大規模高精度流体－構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証

平成 24 年度～平成 28 年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業

研　究　成　果　報　告　書

平成２９年３月

学校法人名　東洋大学
大学名　東洋大学
研究組織名　計算力学研究センター
研究代表者　田村善昭
【東洋大学 総合情報学部 教授】

東洋大学

はしがき

東洋大学計算力学研究センター（本センター）は，文部科学省学術フロンティア推進事業の支援を受け，平成 17 年度に設立されました。本報告書は，これに続いて採択された文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（平成 24 年度～28 年度）による研究成果をまとめたものです。

学術フロンティア推進事業では計算力学の中でも構造解析に重点を置いて研究を進めましたが，今回は，流体―構造連成解析という，より複雑な問題に取り組みました。個別の手法では精度良く解ける問題も，複数の現象が絡むと解析が難しくなったり，あるいは解けたとしてもそれが正しいのか評価が難しくなります。ここでは，手法開発とともに，その精度や妥当性をどのように検証するのかという問題―一般には V&V（Validation & Verification）などと呼ばれる―をテーマとして研究を進めました。その詳細は本報告書にある通りですが，当初の目的は概ね果たせたものと考えています。

また，本センター設立当初より，研究の推進とともに，海外との連携や学生・若手研究者の育成にも力を入れてきました。これらについても本報告書で述べています。

本事業による活動はこれをもって終了しますが，本センターではこれまでの成果を活かしつつ，更に計算力学の発展に寄与すべく活動を続けて行きたいと考えています。関係各位の一層のご指導ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げると共に，最後となりましたが，この 5 年間の活動にご協力・ご支援をいただきましたみなさまに厚く御礼申し上げます。

平成 29 年 3 月 31 日

東洋大学計算力学研究センター長

田村　善昭

総合目次

はしがき（研究代表者：田村善昭）

1. 平成 24 年度～平成 28 年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」
研究成果報告書概要 1

2. 若手研究者の育成状況 41

3. 外部評価委員会報告 55

4. 研究成果の公開 85
4.1. 年報 86
4.1.1. 2012 年度計算力学研究センター年報 87
4.1.2. 2013 年度計算力学研究センター年報 195
4.1.3. 2014 年度計算力学研究センター年報 290
4.1.4. 2015 年度計算力学研究センター年報 387
4.1.5. 2016 年度計算力学研究センター年報 504
4.2. 成果報告会 629
4.3. シミュレーション学会誌特集記事 635
4.4. Validation & Verification for Computational Mechanics 673
4.5. その他 839

1. 平成 24 年度～平成 28 年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」
研究成果報告書概要

（様式 2）

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

平成 24 年度～平成 28 年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」
研究成果報告書概要

1 学校法人名 東洋大学 2 大学名 東洋大学

3 研究組織名 計算力学研究センター

4 プロジェクト所在地 埼玉県川越市鯨井2100

5 研究プロジェクト名 大規模高精度流体－構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証

6 研究観点 研究拠点を形成する研究

7 研究代表者

研究代表者名	所属部局名	職名
田村善昭	東洋大学総合情報学部	教授

8 プロジェクト参加研究者数 14 名

9 該当審査区分 （理工・情報） 生物・医歯 人文・社会

10 研究プロジェクトに参加する主な研究者

研究者名	所属・職名	プロジェクトでの研究課題	プロジェクトでの役割
田村善昭	総合情報学部・教授	立体可視化を利用した新しい精度検証・妥当性検証	研究代表者（立体可視化装置の構築と検証のための可視化手法の開発）
芦野俊宏	国際地域学部・教授	高精度流体―構造連成解析手法の開発	解析対象の物性に関する構成方程式の開発
塩谷隆二	総合情報学部・教授	流体―構造連成解析手法の 2 種の計算機システムへの適用	解析プログラムのスーパーコンピュータへの適用
中林靖	総合情報学部・准教授	高精度流体―構造連成解析手法の開発	連成解析アルゴリズムの開発と実装
藤松信義	理工学部・准教授	流体―構造連成現象の実験と詳細計測	実験,計測装置の構築とデータ取得
藤岡照高	理工学部・教授	計測結果による精度検証・妥当性検証	オープンソース CAE の精度・妥当性検証

（様式 2）

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

新藤康弘	理工学部・助教	計測結果による精度検証・妥当性検証	人体解析モデルの構築と解析精度の向上
江澤良孝	計算力学研究センター・客員研究員	計測結果による精度検証・妥当性検証	最適化手法を援用した解析精度の向上
（共同研究機関等） 矢川元基	原子力安全研究協会・理事長	計測結果による精度検証・妥当性検証	対象に要求される精度と実験結果,解析結果の検討
横山真男	明星大学情報学部・准教授	高精度流体―構造連成解析手法の開発	粒子法による解析と実験との比較
古川知成	ヴァージニア工科大学・教授	計測結果による精度検証・妥当性検証	対象に要求される精度と実験結果,解析結果の検討
松原仁	琉球大学工学部・准教授	高精度流体―構造連成解析手法の開発	固液連成解析手法の提案と実証
富山潤	琉球大学工学部・准教授	高精度流体―構造連成解析手法の開発	流体－粒子拡散連成解析手法の提案と実証
金山寛	日本女子大学理学部・特任教授	流体―構造連成解析手法の 2 種の計算機システムへの適用	解析プログラムのスーパーコンピュータへの適用

＜研究者の変更状況（研究代表者を含む）＞

旧

ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
詳細実験による流体現象・構造現象の分離	理工学部・准教授	吉野隆	映像情報を利用して連成現象を分離し，シミュレーション開発に援用する。

（変更の時期：平成 24 年 4 月 1 日）

新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
		吉野隆	削除

（様式 2）

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

追加

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
明星大学情報学部・准教授	明星大学情報学部・准教授	横山真男	粒子法による解析と実験との比較
琉球大学工学部・助教	琉球大学工学部・助教	松原仁	固液連成解析手法の提案と実証
ヴァージニア工科大学・教授	ヴァージニア工科大学・教授	古川知成	対象に要求される精度と実験結果,解析結果の検討

（変更の時期：平成 24 年 4 月 1 日）

旧

ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
計測結果による精度検証・妥当性検証	工学研究科・教授	矢川元基	対象に要求される精度と実験結果,解析結果の検討

（変更の時期：平成 25 年 4 月 1 日）

新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
工学研究科・教授	原子力安全研究協会・理事長 （東洋大学計算力学研究センター・客員研究員）	矢川元基	対象に要求される精度と実験結果,解析結果の検討

追加

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
琉球大学工学部・准教授	琉球大学工学部・准教授	富山潤	流体－粒子拡散連成解析手法の提案と実証

（変更の時期：平成 25 年 4 月 1 日）

追加

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
日本女子大学理学部・特任教授	日本女子大学理学部・特任教授	金山寛	解析プログラムのスーパーコンピュータへの適用

（変更の時期：平成 26 年 4 月 1 日）

追加

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
理工学部・教授	理工学部・教授	藤岡照高	オープンソース CAE の精度・妥当性検証

（変更の時期：平成 27 年 4 月 1 日）

旧

（様式 2）

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
計測結果による精度検証・妥当性検証	総合情報学部・教授	江澤良孝	最適化手法を援用した解析精度の向上

（変更の時期：平成 27 年 4 月 1 日）

新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
総合情報学部・教授	東洋大学計算力学研究センター・客員研究員	江澤良孝	最適化手法を援用した解析精度の向上

旧

ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
高精度流体―構造連成解析手法の開発	琉球大学工学部・助教	松原仁	固液連成解析手法の提案と実証

（変更の時期：平成 28 年 4 月 1 日）

新

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
琉球大学工学部・助教	琉球大学工学部・准教授	松原仁	固液連成解析手法の提案と実証

追加

変更前の所属・職名	変更（就任）後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
理工学部・助教	理工学部・助教	新藤康弘	人体解析モデルの構築と解析精度の向上

（変更の時期：平成 28 年 4 月 1 日）

11　研究の概要（※　項目全体を10枚以内で作成）

（1）研究プロジェクトの目的・意義及び計画の概要

近年，計算力学分野では「計算の品質」（精度検証と結果の妥当性検証）が重視されている。しかし，「京」コンピュータ等の計算機の大規模化で研究が盛んになっているマルチスケール／マルチフィジックスの問題に対しては，検証が十分とは言えず，実問題への適用，例えば安心・安全の分野での利用が進んでいない。そこで，ここでは，大規模高精度流体―構造連成解析手法の開発と，それを含めた流体―構造連成解析の精度検証・妥当性検証を目的とする。具体的には，1．大規模高精度流体―構造連成解析手法の開発，2．精度検証・妥当性検証のための詳細な流体―構造連成実験，3．詳細実験による精度検証・妥当性検証，を

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

行う。1．では，従来法の多くが，流体・構造それぞれに適した手法を合わせて解析をするときに，それぞれ単体での精度・妥当性は確保されているものの，両者の境界面（データのやりとり）において内挿・補間などによる精度低下が理論的にあり，結果の精度が保証されないのに対して，ここでは理論的に内挿・補間を排除し，原理的に一体化法（流体と構造を一つのシステムとして解く方法。精度は保証されるが，一般に効率が悪く，また大規模化が難しい）と同じ精度が期待できる手法を新たに開発しようとするものである。さらに，ここで用いる流体解析手法，構造解析手法はいずれも大規模化に適したものを選んでいるので，京などのスーパーコンピュータであっても効率よく解析を行うことが期待できる。2．は理論的側面とは別に，実際の解析がどれだけの精度を有しているかを見る方法の一つとしては実験との比較が有効であると考えられるが，流体―構造連成で標準的な問題が存在しないため，ここではそのような「標準問題」を提案し，またその詳細な実験を行うことで，解析の評価に用いることのできるデータを提供しようとするものである。しかし，どれだけ精度のよい実験でも，あるいは解析であっても誤差が必ず含まれる。そこで，3．では，単に結果の値を比較して差が大きい・小さいといった議論をするのでなく，主にベイズ推定等の理論を用いて，精度や妥当性を示す。これにより，実験の誤差も，解析の誤差も考慮しつつ，連成解析にどれだけの精度があるかを示すことができる。以上より，これまでの技術では不可能であった定量的・定性的検証を行うシステムの構築とこれに基づく大規模高精度流体―構造連成解析手法の開発を行い，スーパーコンピュータによる実問題への応用を可能とし，計算科学・計算力学に大きく貢献することを目指す。

上記を進めるため，以下の 5 グループを作り研究を進める。「手法開発」グループは1．の手法開発を主とし，他に標準問題の解析および他の手法との比較検討（例えば粒子法など）も併せて行う。「大規模並列化」グループは「手法開発」グループが開発する手法の大規模化・高効率化を行う。「実験」グループは、標準問題の提案とその詳細実験を行う。「精度・妥当性検証」グループはいわゆる V&V を連成問題に対して行うための方法論を開発し，連成問題に適用する。「可視化検証」グループは，「精度・妥当性検証」グループが解析結果の数値を対象とするのに対し，実験で取得した（動）画像を比較対象として精度・妥当性を検証するための方法（システム）を開発する。それぞれのグループにはグループリーダーをおき，研究を推進するとともに，上記 3 つの目的を達成するため相互に連携して研究を行う。

（2）研究組織

本学「計算力学研究センター（以下，本センター）」の研究体制を継続・発展させて研究プロジェクトを遂行している。研究者総数はのべ 19 名であり、本センター所属教員8名を中心に，ポスドク，研究支援者，RA，学外の客員研究員から構成されている。学部生，大学院生にも積極的に参加を促す。研究者は，先に述べた5つのグループのいずれかに所属する。各グループの研究はグループリーダーがこれをとりまとめ，研究代表者は各グループリーダーと適宜連絡をとり，各グループの進捗を確認すると共に，グループ間の調整を行う。これとは別に，プロジェクト全体の進捗は，原則月1回の運営委員会で確認し，年1回の拡大運営委員会で総括する。国内外の機関との共同研究も本センターが窓口となって積極的に行う。研究成果の発信はホームページで随時行うほか，国際シンポジウム，フォーラム，ワークショップを年数回開催している（＜研究成果の公開状況＞に後述）。また，外部評価委員会による評価を毎年度末に行い，拡大運営委員会での自己評価と併せ，プロジェクトの進捗状況を点検・評価している。

（3）研究施設・設備等

本プロジェクトの目的である，大規模な流体―構造連成解析手法の開発のため，本センター

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

に既設の PC クラスタに加え，本プロジェクトで準備した GPU クラスタシステムを設置した。これに加え，風洞実験装置と VR 装置を設置し，解析手法の精度検証・妥当性検証を行った。実稼働時間は GPU クラスタシステムが 3004 時間，VR 装置が 1094 時間である。また，これらの機器の設置も含め，使用した主な施設の面積と人数は以下の通りである。
614 室 114.6m^2 8名
CCMR 事務室 18.0m^2 2名
CCMR 研究室 18.0m^2 5名
数値デザイン実験室 78.0m^2 3名
LSI/CAD 室 130.0m^2 2名
数値流体力学実験室 104.0m^2 4名
マクロ計算工額実験室 76.4m^2 3名
なお，数値デザイン実験室以下は学部・大学院と共用している。

（4）研究成果の概要 ※下記、13及び14に対応する成果には下線及び＊を付すこと。

本プロジェクトでは，先に述べたように3つの目的を掲げ，これらを5つのグループに分かれて研究している。ここでは，まず3つの目的に対する成果について簡単に述べ，その後に各グループの項で詳しく記すことにする。

プロジェクト全体の成果
大規模高精度流体―構造連成解析手法の開発については，後にも述べるように，もともと精度が良い，SUPG/PSPG 安定化有限要素法による流体解析と，Enriched Free Mesh Method（EFMM）による構造解析をそれぞれに利用し，その境界面では完全に要素，節点が一致するようにして解析する手法を開発できた。もともと流体解析については大規模化ができていたが，EFMM については，未開発であった。本プロジェクトにおいて，これも実現できたため，全体として理論的に高精度かつ大規模で高効率な手法の開発に成功した。「それぞれが高精度」「境界面で内挿・補間がない」「大規模化で効率が落ちない」の要素をすべて満たすものは従来なかったので，本プロジェクトの大きな成果といえる。達成度としてもほぼ 100%である。
精度検証・妥当性検証のための詳細な流体―構造連成実験も，検証に用いることのできる，「標準問題」を提案し，その実験を行って詳細なデータを取得できた。当初は，流体中に方端支持のされた円柱まわりの流れと円柱の変形を標準問題としていたが，これについて，数値として円柱の変位の時系列データならびに円柱の側面及び底面からの高速動画像が取得できている。さらに，当初予定にはなかったが，片持ちシートのフラッタもデータを取ることができた。達成度は 100%と考える。
詳細実験による精度検証・妥当性検証については，ベイズ推定を中心とした方法論を提案し，検証も行った。また，実験・解析同時可視化システムも開発した。ただし，標準問題については，可視化による検証などを行ったものの，ここで提案している手法ではまだ検証できていないので，70%程度の達成度である。
以下，各グループの成果を達成度とともに記す。

1. 解析手法開発グループ
流体構造連成解析を高精度かつ高効率に行うためには，まず，流体解析コードや構造解析コードそれぞれが高精度かつ高効率なものである必要があり，さらに，それらを組み合わせる際の手法，すなわち連成アルゴリズムも高精度である必要がある。本グループで開発した手法は，流体解析に SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用いて，構造解析には Enriched Free Mesh Method (EFMM)を用いるものである。SUPG/PSPG 法ベースの流体解析手法は既

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

に多くの研究者らに用いられてきた手法であり，並列化や大規模計算など多くの成果が発表されている。一方，EFMM ベースの構造解析は限られた分野で用いられてきたものであり，並列化や大規模計算の例はほとんど見られない。本グループでは EFMM ベースの構造解析コードを開発し，それに新たに考案した並列化手法を適用し，京コンピュータ上でも高い性能が出ることを実証した[*発表 218,232]。また，上記の流体解析コードと構造解析コードを結びつける新たな連成解析手法を提案して様々な連成問題に適用を行った[*発表 66,85]。この手法は，流体構造界面での物理量補間が全く必要でないという点が最大の特徴であり，特に時間刻み幅の小さい流体構造連成解析で問題となる物理量伝達の際の誤差を大幅に軽減出来ることが確認された。最終的に開発されたシステムを用いて，新規実験グループとの共通問題にも取り組み，実験と解析でほぼ同様の結果を得ることにも成功した[*発表 116,133] が，その誤差を詳細に評価する段階までは達していない。以上の点から本グループの達成度は 80%である。

2. 大規模並列グループ

ポストペタスケールシステムなど次世代の並列計算機アーキテクチャにおいて，大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション・ソフトウェアが高い演算効率を得るためには，マイクロプロセッサやメモリなどハードウェアが持つ階層構造を考慮したプログラミングモデルを採用することが必要である。特に，入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで，全ての処理がスパコン上で行われることを想定する必要がある。そこで，次世代並列計算機上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として，これまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法(HDDM)の技術を応用した，HDDM による大規模数値計算データ処理システムの研究開発[*論文 34-36,46-49,56,57 図書 2,3]を行った。特に，学術研究・産業界で需要が高い有限要素法(FEM)と粒子法による連続体力学のシミュレーションに対象を絞ることで高性能が得られるアプリケーション特化型システムソフトウェア開発を行った。ターゲットとするアプリケーション・ソフトウェアは，HDDM による大規模計算・超並列計算で実績があり，HPCI 戦略プログラムやポスト「京」重点課題でも利用されているオープンソース CAE ソフトウェア ADVENTURE とした。本研究の成果物であるソフトウェアは，ADVENTURE プロジェクトホームページ内のサブプロジェクトページ(http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/lexadv/)にて一般公開している。当初研究計画では開発，公開予定ソフトウェア 11 項目に対し，公開済みソフトウェア 6 件，公開準備済みソフトウェア 4 件のため，達成度を 10 件/11 項目=90%とした。

3. 新規実験グループ

流体構造連成解析コードを検証するための標準問題を提案し、信頼性ある実験データを提供することを目的として研究した。またグループ目標として、実験を通じて流体構造連成問題に関する新しい実験手法、新しい指標を提案することを目指して取り組んだ。

解析コードの検証に利用するための標準問題であることから、数値計算のモデル化がしやすい問題であり、解析結果が実験結果と比較しやすくあるべきである、ことを踏まえて、次の二つの標準問題 （1）弾性円柱の空力振動、（2）シート材のフラッタ特性 を提案して、実験に取り組んだ。初年度は実験環境の整備と予備実験の実施、2年目は風洞装置による流体構造連成の静的・動的試験を始めた。3年目以降は本グループの特徴を出すために、新規実験として、運動する物体の空気力測定、柔らかい壁面による抵抗低減試験を行った。新規実験に取り組む中で、実験手法・解析手法を提案するだけでなく、工学的なデバイスを提案することを目指した。結果として，流体構造連成に関する2種類の標準問題を提案し、実験結果を得ることができた（100%）。また運動解析による空気力測定法、流体構造連成に関する新しい実験指標を提案（100%）するだけでなく、研究成果の副次的効果として機能性材料開発の可能性を確認することもできた。解析手法開発グループとの連携による数値計算結果と実

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

験結果の比較においては、利用しやすい形で実験結果を提供することが十分に出来ていないため、達成度は 70%である。

4. 精度・妥当性検証グループ

本グループでは，シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・妥当性を向上させるための技術の研究を行った。シミュレーションも実験も誤差を含んでおり，精度の検証および改良は重要なテーマである。具体的には，（1）解析精度を考慮した効率的な解析技術と実験のばらつきの解析精度への影響評価の研究，（2）物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発，（3）オープン CAE（固体の有限要素法）を用いた精度検証などの研究を行った。

（1）については，段ボールを題材として，実験データから高精度で効率的な解析を行うための手法を開発した。さらに実験データのばらつきを考慮して，解析用に算出した数値の精度・妥当性を検証するための手法を開発した*論文 50 発表 178,230（達成度 100%）。これらの成果は構造・流体連成解析にも適用可能であることを確認した。適用範囲拡大については達成度は 70%である。

（2）については，材料の特性に関わるデータについて，計算プログラムなどとのデータ交換に必要とされる標準的なデータ表現，知識表現の研究開発を行った*発表 12,28,31,37,67。産業技術研究所とは材料物性を推計するための数式を記述するため記法を開発し，同所の熱物性データベースに用いられている*論文 3 発表 16,25,80,84。また戦略イノベーション創造プログラム，革新的構造材料，マテリアルズ・インテグレーションにおいて，フェーズ・フィールド，有限要素法などを含む異なった材料特性推算モジュールの連携に必要とされるデータ構造の開発を推進した*発表 187,203,228,243。

（3）についてはオープン CAE を用いて，固体の有限要素解析に対する精度検証の方法と事例を蓄積し，公開する上で，商用ソルバと並んでオープン CAE を取り上げることで，より幅広いユーザが自ら取り組み得る V&V 活動の実例として提示した*発表 182,249。また，発展研究としてオープン CAE ソフトを用いて生体関節を模擬した三次元モデル内の応力分布解析を行い，その精度について，先行研究における生体実験データと比較し有用性を確認した。オープン CAE の医療分野およびバイオメカニクス分野等への発展性を示した*発表 246, 248。

達成度はグループ全体として 80%である。

5. 可視化検証グループ

まず，大型 VR 装置を導入し，これを用いて流体ー構造連成解析結果の可視化検証をどのように行うか検討し，データの種類や目的により大きく2通りの可視化システムを構築した。1 つは，汎用可視化ソフトウェアである AVS をベースとしたもので，この上に，解析結果を表示するモジュールと実験の動画像を表示するモジュールを載せて同時に同じ位置で可視化する，時空間同時表示システムを構築した。もう１つは，本 VR 装置が標準としている VR4MAX という CG ソフトウェアの入力データとして実験及び解析結果を与えるもので，ここでは解析結果は VRML というファイル形式を経由して，また実験の画像は CG のテクスチャとして VR4MAX の前段である 3dsMax に与えられる仕組みになっている。本プロジェクトで提案している標準問題の実験結果および解析結果を用いて，開発したシステムの有効性を検証した*図書 7。また，新たな可視化検証手法を提案する*論文 32 図書 7 発表 79,82,106 とともに，本 VR 装置以外の装置による可能性についても検討した。当初予定と比べると，リアルタイムの可視化ができていないこと，まだシステム公開の道筋がついていないことの２点が達成できていないので，全体として 75%程度の達成度であると考える。

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

＜優れた成果が上がった点＞
プロジェクト全体
3 つの目的に対応づけて述べると，まず流体−構造連成解析の新しい手法を提案できた。これは将来的に公開ないしは他の研究者にも利用できる形にすることを考えているが，流体部分が ADVENTURE という公開ソフトウェアシステムとも互換があることから，これとの連携も期待される。
次に，流体−構造連成解析に対する標準問題を提案したことも，今後の同手法開発に大きく寄与すると考える。従来は，比較的信頼できるとされる他者の2次元の解析結果を比較対象とすることがあったが，これにより3次元のより実用的な問題での検証が可能となる。
最後に，精度・妥当性については，問題によって推定の仕組みや影響する要素を選ぶ必要があるので，システム化（自動化）されているわけではなく，あくまで方法論の提案であるが，ここではいくつかの例によって，連成問題において，実験・解析にそれぞれ誤差があっても，精度を確率分布で示しながら，実験と解析の比較，ないしは真値の推定が可能であることを示したのも大きな成果である。

1. 解析手法開発グループ
従来，並列化が困難だとされていた EFMM に新たに考案した並列化手法を適用することによって，京コンピュータでも高い並列化効率とスケーラビリティーを出すことを実証した。また，流体構造界面での物理量補間が全く必要でないという特徴をもった新たな連成解析アルゴリズムを提案してそれらを様々な流体構造連成問題に適用することに成功した。結果として従来と同程度の計算量で連成解析として精度が高くなる手法を構築することが出来た。

2. 大規模並列グループ
超並列計算機で超大規模有限要素解析を実現するために，メニーコアプロセッサを想定したハイブリッド並列化，局所 Schur 補元行列の陽的構築による演算効率化，複数材料モデル解析を高速化する ScaledBDD 法開発，複素線形対称方程式を効率的に求解する MINRES-like_CS 法開発，などを行った。これにより，「京」8,196 計算ノードを用いて世界的にトップクラスとなる 1 千億自由度規模の有限要素解析に成功した。本成果は，「第 18 回日本計算工学講演会ベストペーパーアワード」を受賞[*発表 73]など国内外で高く評価された。

3. 新規実験グループ
運動する物体に作用する空気力を測定するとき、物体に計測器を付けると良好な測定結果が得られないことから、高速度カメラを用いて物体の運動解析を行い、その結果から空気力を測定する方法を検討した。その結果、加速度運動している物体に働く空気力は、定常流速下にある物体に働く空気力と異なることを示し、その特性を明らかにした。この研究成果は国際会議にて講演[*発表 112]、ならびに論文誌[*論文 39]に論文掲載された（達成度 100%）。その後、高速度カメラの台数を増やした実験を行い、剛体の運動解析への適用を試みており、回転運動に対しても加速度運動時の空気力特性が変わることを確認している。成果の続報は実験力学に投稿中である。
標準問題の実験を通じて、流体構造連成による物体の振動周波数は、物体の形状、材料特性と流速に対して、特徴ある性質を持つことを確認[*発表 113]した。実験結果を系統的に整理すると材料特性と流体力との関係を見出すことができた。次元解析を通じて明らかになったことは、材料に作用する曲げモーメントと流体力によるモーメントの比をパラメータとして実験結果が明確に整理できることである。その成果は実験力学に投稿中であり、他誌への投稿も準備している。

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

4. 精度・妥当性検証グループ
（1）効率的で精度のよい解析技術と実験のばらつきの解析精度への影響評価の研究
少ない実験データで精度良く最適値を求めるためのサンプリング手法*発表27を開発するとともに，均質化法解析のための材料定数において，実験データのばらつきを考慮して，材料定数を算出し，算出したデータの妥当性を評価する技術*論文50，発表178，221，230ができあがった。この技術は均質化法のみならず，構造・流体連成を含む一般の解析において，求めたいデータを算出する際に一般的に適用可能な方法である。
（2）物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発
材料に関わるドメイン・オントロジーの分野では先駆けた研究を行っており，海外の論文への引用のみならず，材料データベースに関わるプロジェクトにおいて用いられている。マテリアルズ・インテグレーションにおいては，当センターで開発したプロトタイプの技術を統合システム開発グループにフィードバックし，汎用データベースの基盤として用いられている。
（3）オープン CAE による V&V
オープンソース CAE を用いて，特別な設備を必要とせず，客観的に再現可能な実験的検証事例（材料非線形，幾何学的非線形，非定常熱伝導，熱疲労）を作成した*発表 182,249。また，生体モデルを用いた構造解析を実施し，精度・妥当性について検証を行った*発表 246,248。

5. 可視化検証グループ
時空間同時可視化という新しい概念を提案し，実証した*図書 7。これにより，実験と解析あるいは異なる解析同士の比較がより分かり易くできるようになったと共に，VR を可視化に利用することの必然性を示すことができた。

＜課題となった点＞
プロジェクト全体
当初目標では，開発した手法も，標準問題の実験・解析データも公開する予定であったが，まだ公開に至っていない。手法については，単にそのままコードを公開するのか，ライブラリ等，ユーザがそれぞれのコードに組み込むような形にするのか，あるいは先にふれた ADVENTURE システムの一部とするのかなど，議論が煮詰まっていない。標準問題については，きれいに整理された形の実験データはあるものの，実験ごとのばらつきや誤差などを含んだ形での生に近いデータをどのように提供するか（これをうまく利用することで精度や誤差の推定が可能となるので）が課題となっている。これらについては，プロジェクト終了後もひきつづき作業を行いたいと考えている。
また，精度・妥当性検証については，簡単の問題では実証できたが，標準問題など規模の大きな問題にはまだ適用できていない。これも時間的な問題が大きく，ひきつづき行っていきたい。

1. 解析手法開発グループ
新規実験グループとの連携による解析結果と実験結果の比較において，定性的には一致した結果が得られているが，解析条件の設定の困難さ等によりその誤差を詳細に評価するレベルでの結果が得られていない。また，大規模並列グループの成果である HDDM ベースのライブラリを流体解析コードや構造解析コードに導入してはおらず，こちらの連携も不十分であった。

2. 大規模並列グループ
連続体力学向け DSL として，要素・セル・粒子に対する物理モデルを対象とし，LaTeX ベース数式記述からプログラムコードへのトランスレータ開発，小規模行列やテンソル演算をマ

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

ルチコア・メニーコアプロセッサや GPU などに最適化したライブラリを開発したが，トランスレータの性能を実用レベルに向上させるには，開発コストが十分でないことが判明し，トランスレータについては，プロトタイプの開発までと計画を変更した。

3. 新規実験グループ

解析手法開発グループとの連携による数値計算結果と実験結果の比較においては、利用しやすい形で実験結果を提供することが十分に出来ていないことが残された課題である。その理由として、数値計算の境界条件が実験との整合性を取りにくいこと、測定結果にばらつきを含みやすい材料特性値が計算結果に強く影響してしまうこと、が挙げられる。検証する上での問題点が明らかなので、材料特性のばらつきが数値解析結果に与える影響について提示していきたい。

4. 精度・妥当性検証グループ

（1）の課題については，ベイズ推定において，事前確率の設定が推定に影響する。そこで，適切な事前確率を簡易に求めるための階層ベイズモデルを開発した。

（2）の課題については，材料に関わるデータ・知識は膨大でかつ複雑であり，現在の研究体制は不充分である。

（3）の課題については，オープン CAE に関しては，接触と材料非線形・幾何学的非線形が同時に生じる問題の検証には至らなかった。

5. 可視化検証グループ

本プロジェクトで用いた大型 VR 装置はまだまだ高価で，一般的に利用するのは難しく，そのためここで開発したシステムそのものを公開する価値は少なく，アイデアを示すに留まっている。そこで，近年急速に普及しつつあるゴーグル型 VR 装置（Head Mounted Display）の使用も視野に入れて研究を進めてきたが，こちらは完成には至っていない。

＜自己評価の実施結果と対応状況＞

約月１回の運営委員会と，年１回の拡大運営委員会で研究の進捗等を報告し，年度末に後に述べる外部評価委員会で自己評価について報告し，翌年度初めに当該年度の研究計画を立ててプロジェクトを進めてきた。個別の達成度は上記の通りであるが，当初の目的の大部分は達成できたと考えている。

＜外部（第三者）評価の実施結果と対応状況＞

毎年年度終わりに４名の外部評価委員（学内２名，学外２名）からなる外部評価委員会を開催し，評価を受けた。本報告書には平成 24 年度から 28 年度まで 5 年分の評価票を参考資料として添付しているが，全体として B～A の評価を受けている。個別には，産学連携の推進，グループ間の連携の推進，学内外のプロモーション，今後の展開（本手法をどのように発展させていくのか）等が指摘されており，その都度，翌年度の計画にこれらを反映させて活動を続けてきた。このうち，学外への発信については，本年３月刊行予定の英文書籍およびシミュレーション学会誌の本センターの特集記事などである程度できるものと考えている。

＜研究期間終了後の展望＞

本プロジェクトは終了するが，センターとしては進行中のプロジェクトがあり，引き続き活動を続けて行く。その中で，本プロジェクトの成果は当然活用されるし，また課題として残った点についても研究を進めて行くことができると考えている。

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

手法開発グループおよび大規模並列化グループでは，次のステップとして商用化支援プログラムへの申請を検討している。
精度・妥当性検証は，標準問題を含め実用問題での本手法の有効性を議論して行く。
可視化検証については，構築したシステムを今後は本センターでの他の問題に適用して有効利用を図ると共に，必要に応じて改良をしていきたい。

本プロジェクトでは，計算力学の中でも流体ー構造連成に焦点をあてて研究を行ってきた。今後の展望として，1．実用問題に展開する。2．他の連成問題に拡張する。の 2 つの方向が考えられる。前者については，2013 年度に関わっていたタイヤの解析などが考えられる。また，後者については，すでに他の連成問題も取り組んでいる*論文 14−17,22,38,40 ので，これらにも本プロジェクトの成果を応用して行きたい。
また，精度・妥当性検証ではベイズ推定を中心的に用いてきたが，連成問題に関連してベイズ推定以外の機械学習*論文 1,7 発表 83,115,148,219 についても研究を行ってきており，今後は機械学習を用いて実験や解析を統合するような枠組みについても研究をしていきたいと考えている。

＜研究成果の副次的効果＞
プロジェクト全体
まず，本プロジェクトを通して，国内外の大学（東京大学，東京理科大学，韓国成均館大学，台湾龍華科学技術大学，バングラデシュシャージャラル工科大学他）との共同研究などが進んだことが挙げられる。特に，韓国成均館大学，台湾龍華科学技術大学，バングラデシュシャージャラル工科大学は，本プロジェクトがきっかけとなり，大学間協定を結ぶことができた。また，本センターでは学生教育や若手研究者の育成にも取り組んでおり，あとに述べるように計 5 回の国際学生ワークショップを開催した。本プロジェクトにはのべ学部生 7 名，研究生 1名，大学院生 12 名（博士前期課程 8 名，博士前期課程 4 名）が参加し，学位取得者 3 名を輩出した。博士研究員は，3 名中 2 名が本学出身者であり，うち 1 名は研究期間中に他大学に博士研究員として転出しており，一定の成果を上げたと考えている。

1. 解析手法開発グループ
開発したシステムのうち，EFMM ベースの構造解析コードはパッケージとしてまとまっており公開可能である。また，本グループが開発した連成解析手法は，他の高精度な四面体一次要素を用いた構造解析手法とともに利用することが可能である。

2. 大規模並列グループ
開発システムは十分に商用化の価値があると判断しており，今後の展開により，商用化が実現されると期待している。

3. 新規実験グループ
新規実験内容として、柔らかい壁面による抵抗低減試験に取り組んだ*発表 51,65。物体表面がゴムやゲルのような粘弾性材料であるとき、金属やアクリルのように硬質の物体に作用する空気抵抗と比べて粘弾性物体の空気抵抗が低減することを確認した。材料特性と抵抗低減効果の関係を調べた結果、適切な材料を選定することで、抵抗低減効果が得られることが分かった。これは新しい抵抗低減デバイスへの応用が期待できる技術である。一方、シリコーンゴム・ゲルのような材料は一度硬化すると材料の性質を変更することができない。そこで、材料に新機能を持たせる方法を検討した結果、ヤング率を2倍以上変化することに成功した。この成果は国際会議で講演予定である。この技術は抵抗低減だけでなく、様々な応用に繋が

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

るものと考えている。

4. 精度・妥当性検証グループ
（1）の課題については，この研究成果は構造解析のみならず流体・構造連成を含む解析一般に適用可能な方法であり。解析結果の妥当性評価が可能となり，それを用いて設計したものの信頼性を定量的に評価できるようになる。製品デザインの信頼性向上につながる。
（2）の課題については，当センターのみならず，一般での活用が見込まれる。
（3）の課題についてはオープン CAE の新興国，中小企業への普及。

5. 可視化検証グループ
ここでの成果は，流体ー構造連成解析に限らず様々な解析の可視化を利用した V&V に利用可能である。また，環境があれば，本プロジェクトのような大型 VR 装置でなく，HMD 等でも利用可能と考える。さらに，本プロジェクトに関連して，新しい可視化手法も提案しているが，これらも他の可視化に利用できると考える。

12 キーワード（当該研究内容をよく表していると思われるものを8項目以内で記載してください。）

（1） 計算力学	（2） 連成解析	（3） V&V
（4） 構造解析	（5） 流体解析	（6） 大規模並列化
（7） 可視化	（8）	

13 研究発表の状況（研究論文等公表状況。印刷中も含む。）
上記、11(4)に記載した研究成果に対応するものには＊を付すこと。

＜雑誌論文＞

1. *M.MASUDA, Y.NAKABAYASHI and G.YAGAWA, "Radius Parallel Self-Organizing Map", Journal of Computational Science and Technology, Vol.6, pp.16-27, 201211.
2. N.TSURUMI, Y.TAMURA and Y.MATSUMOTO, "Improvement of Bubble Model in High Void Fraction for Cavitating Flow Simulations", Journal of Computational Science and Technology, Volume 6, No 3, pp. 113-128, 2012.
3. *T.ASHINO and Y. YAMASHITA, "Development of an Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering ", Data Science Journal, 11 (2012) PASMD17-ASMD21, 2012.
4. K.MUROTANI, G.YAGAWA and J-B, CHOI, "Adaptive finite elements using hierarchical mesh and its application to crack propagation analysis", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.253, pp.1-14, 2013.
5. K.SAKIHARA, H.MATSUBARA, T.EDO and G.YAGAWA, "Multi-dimensional Moving Least Squares Method Applied to 3D Elasticity Problems", Engineering Structures, Vol. 47, pp. 45-53, 2013.
6. 崎原康平，松原仁，江戸孝昭，原久夫，矢川元基，"弾性固体問題における付帯条件付

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

き多次元型移動最小自乗法", 日本機械学会論文集（A 編）, Vol.78, No.786, pp.142-151, 2012 年

7. *増田正人, 中林靖, 矢川元基, "フリーキックサポートシステムの開発", 計算工学会論文集, No.20120009, 2012 年
8. 松原仁, 原久夫, "風化サンゴ骨格の破壊強度とその性状:微細孔と孔内液圧の影響", 土木学会論文集 C（地圏工学）, Vol. 68, No. 4, pp. 610-620, 2012 年 10 月
9. 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, 伊良波繁雄, "捩り外力を受ける環状切欠き丸棒におけるファクトリールーフ状破断面の形成メカニズムに関する数値解析的検討", 日本計算工学論文集, No. 20120016, 2012 年 11 月
10. 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, "岩盤のき裂ネットワークを考慮した不連続体解析手法の提案およびき裂進展解析", 日本計算工学論文集, No.20120017, 2012 年 12 月
11. 鶴見伸夫, 田村善昭, 松本洋一郎, "音波伝播の式を用いた気泡を含む液体中を伝播する集束超音波の数値解析", 日本機械学会論文集 B 編第 78 巻第 796 号, pp. 2096-2112, 2012 年 12 月
12. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "粒状構造を有する脆性材料の離散き裂進展解析手法の開発および性能評価", 土木学会論文集 C（地圏工学）, Vol.69, pp.31-45, 2013 年 1 月
13. K.MUROTANI, G.YAGAWA and J-B, CHOI, "Adaptive finite elements using hierarchical mesh and its application to crack propagation analysis", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.253, pp.1-14, 2013
14. 広瀬孝三郎, 江戸孝昭, 松原仁, "裂性岩盤の狭小領域構造を考慮した広大領域における物質移動シミュレーション", 土木学会論文集 C（地圏工学）, Vol.69, No.3, pp.367-377, 2013 年
15. Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, "Comparison of Numerical and experimental results on Red soil muddy water flow in sand basin with filtration", 7thInternational Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 127-130, 2013.11
16. Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, "Kita-Uebaru Landslide Analysis by using Material Point Method (MPM)", 7thInternational Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 39-42, 2013.11
17. Kosaburo Hirose and Hitoshi Matsubara, "Mudcrack patterns of Okinawa regional soils", 7thInternational Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 35-38,2013.11
18. Yokoyama M., Mochizuki O., Yagawa G, "Surface Condition of Solid in Splash Formation", IACM expressions, No. 34,,pp2-5, 2014.02
19. Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, "Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method ", Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, Vol.1.1,pp1-14, 2014.06
20. 郭永明, 堂脇徹朗, 矢川元基, 上谷俊平, "自然境界弱形式を有する選点法",計算工学講演会論文集, Vol.19, 2014.06
21. 郭永明, 吉田大祐, 矢川元基, 上谷俊平, "Over-Range 選点法における局所座標定数の最適値",計算工学講演会論文集, Vol.19, 2014.06.
22. 富山潤, “コンクリート橋上部工に付着する飛来塩分に関する数値解析的検討”, コンクリ

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

ート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.874-879, 2014.
23. 風間洋, 富山潤, 下地健, 小簇俊介, “沖縄県内陸部におけるFAC利用に関する中性化耐久性検討”, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.850-855, 2014.
24. 福地啓太, 宮野伸介, 富山潤, 大城武, “防食 PC 鋼材の付着性能とプレテンション PC 桁のせん断耐力に関する研究”, プレストレスコンクリート学会, 第 23 回シンポジウム, pp.605-610, 2014.
25. 戸田勝哉, 楊威, 富山潤, 下村匠, “分光分析を用いたコンクリート構造物の塩分分布測定法の開発”, 非破壊検査, 2014.10.
26. A. M. M. Mukaddes, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, “Performance Evaluation of Domain Decomposition Method with Sparse Matrix Storage Schemes in Modern Supercomputer”, International Journal of Computational Methods, Vol.11, Suppl. 1, 1344007, pp.1-14, 2014.
27. Itaru Ishikawa, Hiroshi Kawai, Yosuke Kobayashi, Ryuji Shioya, Genki Yagawa, “Simulation Results and its Performance by Using a Developing Eigenvalue Analysis Module of the ADVENTURE System”, Procedia Engineering, Volume90, 140-146, 2014
28. A.M.M. Mukaddes, Masao Ogino, Ryuji Shioya, “The Study of Thermal-solid Coupling Problems Using Open Source CAE Software”, Procedia Engineering, Volume90, 147-153, 2014.
29. M.Yokoyama, K.Murotani, G.Yagawa, O.Mochizuki, “Some considerations on surface condition of solid in computational fluid-structure interaction”, in NUMERICAL SIMULATIONS OF COUPLED PROBLEMS IN ENGINEERING, pp. 171-186, 2014, Springer International Publishing.
30. Yong-Ming GUO, Kouji SHIOYA, Kei OOBUCHI, Genki YAGAWA, Shunpei KAMITANI , “Accuracy improvement of collocation method by using the over-range collocation points for 2-D and 3-D problems”, Mechanical Engineering Journal, Vol.1, No.2, pp.1-19, 2014.
31. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, ”Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-structure Coupled Analysis”, Procedia Engineering, 90, pp. 288-293, 2014
32. *Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi and Yoichiro Matsumoto, “Visualizations of Bubble Motions and Temperature Rises by Focused Ultrasound,” Procedia Engineering, Volume 90, December 2014, pp. 5-10.
33. Terutaka Fujioka, “Elastic-Route Estimation of Strain Range in Notched Components Under Thermal Loading Without Performing Stress Linearization”, Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 137(2), 021205-1 to 021205-6, April 2015.
34. *Shin-ichiro Sugimoto, Daisuke Tagami, Masao Ogino, Amane Takei, Hiroshi Kanayama, “Improvement of Convergence in Time-Harmonic Eddy Current Analysis with Hierarchical Domain Decomposition Method”, Transaction of the Japan Society for Simulation Technology, Vol.7, No.1, pp.11-17, 2015.
35. *Hiroshi KAWAI, Kohmei SATOH, Yasunori YUSA, Takayuki UOMOTO, Ryuji SHIOYA, Hiroshi OKADA, “AutoMT a library for tensor operations and its

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

performance evaluation for solid continuum mechanics applications", Mechanical Engineering Letters Vol.1, No.15-00349, pp.1-10, 2015.

36. *Kohei MUROTANI, Issei MASAIE, Takuya MATSUNAGA, Seiichi KOSHIZUKA, Ryuji SHIOYA, Masao OGINO, Toshimitsu FUJISAWA, "Performance Improvements of Differential Operators Code for MPS method on GPU", Computational Particle Mechanics, Vol.2, Issue 3, pp.261-272, 2015.
37. Kazuo KONAGAI, Rama Mohan POKHAREL, Hitoshi MATSUBARA and Masataka SHIGA, "Geotechnical aspect of the damage caused by the April 25th, 2015 Gorkha earthquake of Nepal", JSCE Journal of Disaster FactSheets, FS2015-E-0002, July 2015.
38. 富山潤，羽渕貴士，宮里心一，中林靖，"コンクリート橋梁上部工に付着する塩分量分布に関する数値実験"，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.769-774，2015
39. T. Nosaki, N. Fujimatsu, "Trajectory analysis based on aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion", Journal of Visualization, September 2015.
40. 富山潤，"コンクリート構造物を対象としたミクロ・マクロ塩害環境に関する研究"，コンクリート構造物の補修，補強およびアップグレードシンポジウム，Vol.15，pp.405-410，2015 年 10 月
41. Hitoshi Matsubara, Kosaburo Hirose, Taka-aki Edo, Kei-ichi Tamanaha, Hisao Hara and Tomonori Yamada, "Numerical modelling of mudcrack grows", Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ATC1-3-17, November 2015.
42. 広瀬孝三郎，松原仁，原久夫，"マッドペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析"，土木学会論文集 C（地圏工学），72(1)，27-37，2016
43. F Zhang, Y Zhu, T Furukawa, W Song, "Kinematic Analysis of a Partially Decoupled 3-DOF Parallel Wrist", Journal of Robotics, 2015 (790414), pp.1-9, 2015.
44. K Takami, T Furukawa, M Kumon, D Kimoto, G Dissanayake, "Estimation of a nonvisible field-of-view mobile target incorporating optical and acoustic sensors", Journal of Autonomous Robots, 40 (2), pp. 343-359, 2015.
45. B Li, T Furukawa, "Microtexture Road Profiling System Using Photometric Stereo", Journal of Tire Science And Technology, 43 (2), pp.117-143, 2015.
46. *Hiroshi Kanayama, "An Industrial Application of Thermal Convection Analysis", International Journal of Computational Methods, Vol.13, No.2, 2016 (Accepted).
47. *H. Zhu, Q. Yao, H. Kanayama, "Large-scale computations of flow around two cylinders by a domain decomposition method", Mathematical Problems in Engineering, Vol.2016: 8 pages 2016, Article ID 4126123.
48. *河合浩志，荻野正雄，塩谷隆二，山田知典，吉村忍，"領域分割法におけるローカル Schur 補元アプローチの性能評価"，Transaction of JSCES, Vol. 2016, 20160006, 2016 年 2 月(DOI: 10.11421/jsces.2016.20160006)
49. *H. Kanayama, "An industrial application of thermal convection analysis, International Journal of Computational Methods", Vol.13, No.2:15 pages 2016.
50. *Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa, Yoshiaki Tamura, Satoru Takashimizu, and Daisuke Satou, "High Accurate Analysis by Experiment and Simulation Using Bayesian Inference for Corrugated Cardboard", Mechanical Engineering Journal,

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

Vol. 3, No. 4, 16-00072, August, 2016.

51. K. Tazoe, M. Oka and G. Yagawa, “Loading frequencies effects on the oxide induced crack closure in extremely low stress intensity factor range”, International Journal of Fracture Fatigue & Wear, Vol. 4, 153-157, 2016.
52. Yong-Ming GUO, Genki YAGAWA, “A meshless method with conforming and nonconforming sub-domains”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, DOI: 10.1002/nme.5431, 2016.
53. Masao Ogino, Hongjie Zheng, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, Liu Lijun, “Tsunami Run-Up and Inundation Simulations Using LexADV_EMPS Solver Framework on Fujitsu FX100”, SC16 Research Poster (Peer-reviewed International Conference), Salt Lake City, Nov. 13 - 18, 2016.
54. Masao Yokoyama, Genki Yagawa, “Relation between violin timbre and harmony overtone”, Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA), Honolulu, Hawaii, 28 Nov. - 2 Dec. 2016.
55. 小林謙一, 藤岡照高, “微小領域からサンプリングした試料による高経年ボイラーチューブの健全性評価とクリープ余寿命推定”, ボイラ研究, 400 号, pp.10-15, 2016 年 12 月
56. *Wada, Y., Murotani, K., Ogino, M., Kawai, H. and Shioya, R., “High resolution visualization library for exa-scale supercomputer”, Mathe. Prog. Expressive Image Synth. III, Springer, pp.83-94, 2016.
57. *杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, “階層型領域分割法による回転機の解析”, 電気学会論文誌 B, Vol.137, No.3, in press.

＜図書＞

1. Yokoyama M., Murotani, K., Yagawa, G., and Mochizuki, O., “Some Considerations on Surface Condition of Solid in Computational Fluid-Structure Interaction”, In Numerical Simulations of Coupled Problems in Engineering (2014) pp. 171-186, Springer International Publishing.
2. *Hiroshi Kawai, Masao Ogino, Ryuji Shioya, Shinobu Yoshimura, “Fundamentals of High-Performance Computing for Finite Element Analysis”, High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering (Springer Tracts in Mechanical Engineering), Springer, pp.1-21, 2015.
3. *Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Eiichi Nagai, Toshimitsu Fujisawa, Akira Anju, Hiroshi Kanayama, Satoshi Tanaka, Kyoko Hasegawa, “Large-Scale Tsunami Run-Up Analysis Using Particle Method”, High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering (Springer Tracts in Mechanical Engineering), Springer, pp.157-177, 2015.
4. 日本応用数理学会編, 矢川元基分担執筆, “応用数理の散歩道”, 岩波書店, pp.238-253, 2016 年 6 月
5. 矢川元基, 酒井譲, “粒子法”, 岩波書店, 2016 年 11 月
6. H. Kanayama, H. Dan, “Tsunami Propagation from the Open Sea to the Coast”, Tsunami, edited by M. Mokhtari, ISBN 978-953-51-2677-5, InTech: Chapter 4 (61-72) 2016.
7. *Yoshiaki Tamura, Ryuji Shioya and Yasushi Nakabayashi (ed.), “Validation & Verification for Computational Mechanics”, Springer, to appear.

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

＜学会発表＞

1. G.YAGAWA, "An Efficient Domain Decomposition Algorithm for Fe Simulation", The Colloquium on Advances in Computational Science, Engineering and mathematics in honor of Tinsley Oden's 75th birthday, Univ.Texas at Austin, USA, 2012.1.19
2. Y.EZAWA, S.SHIMAMURA, K.SUGA and S.AOKI, "Effects of Material Properties of Cue on Ball Trajectory in Billiard", The 4th International Conference on Advanced Manufacturing, Taiwan, 2012.3.4-8
3. G.YAGAWA, "Memories of Ptofessor Y.J.Kim", ASINCO9 (Kaohsuing, Taiwan), 2012.4.19
4. G.YAGAWA, "Some Remarks on Domain Decomposition Algorithm for FE Simulation", Celebration Meeting of the FEM Class of 42 Fellows (Barcelona, Spain), 2012.5.8
5. G.YAGAWA, "Some Strategies for High-performance FEM", ESI Global Executive Meeting (Amagi, Japan), 2012.5.22
6. K.SAKIHARA, H.MATSUBARA and G.YAGAWA, "An Application of Multi-dimensional Moving Least Squares Method to 3D Crack Analysi", 10th World Congress on Computational Mechanics (Sao Paulo, Brazil), 2012.7.10
7. G.YAGAWA, "Some considerations on high performance computational mechanics", The JSME-CMD International Computational Mechanics Symposium (ICMS) (Kobe, Japan), 2012.10.11
8. G.YAGAWA, "Preliminary study for exascale computing in Japan", Second international workshop on "COllaborative DEvelopment of SImulation software of next GeNeration (CO-DESIGN 2012)" (Peking University, Beijing, China), 2012.10.23-25
9. G.YAGAWA, "Recent advances on simulation technology", ESI Users' Forum Japan 2012 (Tokyo, Japan), 2012.11.21
10. 矢川元基, "福島原子力事故の総合工学的観点", 第 2 回「量子ビームを用いた材料・生体の構造と機能の研究」成果報告会 (いばらき量子ビーム研究センター、東海村、茨城), 2012.3.16
11. 矢川元基, "計算科学技術における我が国の貢献", 日本学術会議第3回計算科学シミュレーションシンポジウム (東京), 2012.4.25
12. *芦野俊宏, "国際材料データベースの事例と課題", 日本地球惑星科学連合 2012 年大会 地球電磁気・地球惑星圏学会 データ問題検討分科会, 2012.5.22
13. 矢川元基, "計算科学技術に関する2，3の課題", 第 24 回 CCSE ワークショップ (柏), 2012.6.19
14. 矢川元基, "計算力学シミュレーションの現状と課題", ADVENTURECluster ユーザー会 (東京), 2012.6.27
15. 藤松信義, "技術をどのように伝えるか", 日本実験力学会 産学連携支援センター主催 パネルディスカッションー実験技術を語るー, 2012.12.15
16. *T.ASHINO and Y.YAMASHITA, "Development of Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering", The 3rd Asian Materials Database Symposium, AMDS 2012, Japan Nara, 2012.4.17

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

17. Hitoshi MATSUBARA, Taka-aki EDO, Ryuji SHIOYA and Genki YAGAWA, "Large-scale simulation for fracture pattern of brittle porous media in Compression", Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), 2012.7
18. Kohei SAKIHARA, Hitoshi MATSUBARA, Ryuji SHIOYA and Genki YAGAWA, "An application of Multi-dimensional moving least squares method to 3D crack analysis", Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), 2012.7.
19. I. ISHIKAWA, Y.KOBAYASHI, R.SHIOYA, R.NAKAOKA, A.MATSUOKA, G.YAGAWA, "Development of Structural Eigenanalysis Module for The Adventure System", The 10th WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS (WCCM 2012), 19719.pdf, SaoPaulo, Brazil, 2012.7.9.
20. M. FUKAYA, R. MORINAKA, N. SAITOU, H. HATOU, Y. TAMURA, Y. MATSUMOTO, "Cavitating Jet Simulation for Predicting Residual Stress Improvement of cylindrical Structure by Water Jet Peening", 8th International Sympusium on Cavitation, Singapore, 2012.8
21. Y. TAMURA, N. TSURUMI, Y. MATSUMOTO, " Further Improvement of Bubble Model for Cavitating Flow Simulations", 8th International Sympusium on Cavitation, Singapore, 2012.8
22. Kaworu YODO, Ryuji SHIOYA, Akio MIYOSHI, Takuru ASAUMI, " Parallel CAE System for Large Scale Problems Based on HTML5 and WebGL", DETC2012-70909, pp.1-7, Proceedings of the 2012 International Desigh Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2012, August 12-15, Chicago, Illinois, USA, 2012.8.14
23. Kaworu YODO, Hiroshi KAWAI, Hiroshi OKADA, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, "Development of The Next-Generation Computational Fracture Mechanics Simulator on The Earth Simulator 2", DETC2012-70909, pp.1-7, Proceedings of the 2012 International Desigh Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2012, August 12-15, Chicago, Illinois, USA, 2012.8.15
24. Hitoshi MATSUBARA, "Numerical simulation of fracture network in rock based on GFEM and MLSM", KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2012, pp.227-231, 2012.9
25. *T.ASHINO, "Development of Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering", 日本学術会議主催学術フォーラム「データと発見-Data Intensive Scientific Discovery」, 2012.9.10
26. N. TSURUMI, Y. TAMURA, Y. MATSUMOTO, "Numerical Simulation of Wave Propagation in Two-Phase Fluid", European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering (ECCOMAS 2012), Vienna, Austria, 2012.9.10-14
27. *Y.EZAWA , S.TAKASHIMIZU, "Novel infill criterion for stochastic metamodel-based optimization", ECCOMAS 2012 - European Congress on Computational Methods in Sciences and Engineering, 2012.9.11

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

28. *T.ASHINO, "Electronic Data Exchange for Materials Science and Engineering", IUMRS-ICEM 2012,Yokohama, Japan, 2012.9.27
29. A.M.M.MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, " A Computational Study of Sparse Matrix Storage Schemes in The Domain Decomposition Method", Proceedings of 25th JSME Computational Division Conference, Kobe, Japan, 2012.10.6
30. A.M.M.MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, "ADVENTURE _Thermal-An Open Source Module for Large Scale Heat Conduction Problems", PUCDIP 2012, Kyusyu, Japan, 2012.10.13
31. *Toshihiro ASHINO, "Data and Expressions for Science and Engineering into e-Journal", 23nd International CODATA Conference, Taipei, Oct., 2012
32. Hitoshi MATSUBARA, Takaaki EDO and Hisao HARA, "Crack Propagation Model for Discrete Fracture Network based on GFEM and MLSM", Proceedings of the 4th international conference on computational methods, 2012.11
33. 大橋秀樹，浅海拓来，塩谷隆二，"スマートフォン端末を用いた CAE 可視化システム", HPCS2012，名古屋大学, 2012.1.26
34. 小林陽介，矢川元基，" 3 次元き裂の自動進展解析",第 61 回理論応用力学講演会，東京大学, 2012.3.7-9
35. 松尾友紀，伊倉宏治，田村善昭，"圧縮性気液二相流の数値解析手法の開発",日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会，日本大学生産工学部（千葉）, 2012.3.9-10
36. 小俣慎弥，田村善昭, "ダリウス形風車まわりの流体解析",日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会，日本大学生産工学部（千葉）, 2012.3.9-10
37. *芦野俊宏，"材料データ交換の標準化：CEN WS SERES の概要", CCMR-HDDMPPS（CREST プロジェクト）合同シンポジウム, 2012.3.29
38. 長岡慎介，"流体-構造連成解析の為の新しい解析手法とその応用例", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム，東洋大学, 2012.3.29
39. 江澤良孝，"最適デザインの効率化について"，CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム，東洋大学, 2012.3.29
40. 中林靖，"リアルタイムシミュレーションの防災への応用"，CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム，東洋大学, 2012.3.29
41. 田村善昭，"キャビテーション/エロージョンの数値予測 "，CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム，東洋大学, 2012.3.29
42. 塩谷隆二，"ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解放ライブラリ開発", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム，東洋大学, 2012.3.29
43. 松原仁，"多孔質体の圧縮破壊パターンに関する数値解析的検討", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム，東洋大学, 2012.3.29
44. 矢川元基，"東電原子力事故調査と計算力学"，CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム，東洋大学, 2012.3.29
45. 河合浩志，荻野正雄，塩谷隆二，吉村忍，"領域分割法における BDD 前処理のための並列直接ソルバーの開発"，第 15 回計算工学講演会，Vol.15，No.1，pp.191-192, 2012.5.27
46. 江戸孝昭，松原仁，原久夫，"先在き裂を考慮したき裂進展シミュレーション"，第 2 回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会概要集，pp.95-96, 2012.9.

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

47. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "脆性材料のき裂進展シミュレーション:先在き裂と破壊プロセスの関連性", 土木学会第 67 回年次学術講演概要集, pp.339-340, 2012.9
48. 広瀬孝三郎, 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, "き裂ネットワークモデルを用いたき裂性岩盤における物質移動シミュレーション", 土木学会第 67 回年次学術講演概要集, pp.353-354, 2012.9
49. 横山真男, 窪田佳寛, 望月修, "突入物体の表面性状を考慮したスプラッシュの数値シミュレーション", 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012.9.10
50. 藤松信義, "Wavelet基底に基づくVITA法による乱流渦運動解析", 日本機械学会2012年度年次大会, (CD-ROM Proceedings), J054042, 2012.9.10
51. 藤松信義, "乱流摩擦抵抗低減効果と粘弾性皮膜運動に関する数値的研究", 日本機械学会 2012 年度年次大会, (CD-ROM Proceedings), J054046, 2012.9.10
52. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "ハイドロゲル壁面近傍における流れの数値シミュレーション", 日本流体力学会年会 2012, 2012.9.17
53. 石川格, 小林陽介, 塩谷隆二, 矢川元基, "ADVENTURE 固有値解析モジュールの開発", 第 25 回計算力学講演会、407、神戸, 2012.10
54. 松原仁, "光外乱が亜熱帯生物の定着に及ぼす影響", 平成 24 年度沖縄しまたて協会技術環境研究所研究発表会論文集, pp.25-34, 2012.10
55. 崎原康平, 松原仁, 江戸孝昭, 矢川元基, "付帯条件付き多次元移動最小自乗法を用いたき裂進展に関する研究", 日本機械学会第 25 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp.544-545, 2012.10
56. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "生体を模擬したハイドロゲル壁面近傍における流れの数値シミュレーション", 可視化情報全国講演会 2012, 2012.10.4.
57. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "水面に突入する物体表面の滑りを考慮したスプラッシュのシミュレーション", 日本機械学会 第 25 回計算力学講演会, 2012.10.7
58. 広瀬孝三郎, 江戸孝昭, 松原仁, "き裂性岩盤の狭小領域構造を考慮した広大領域における浸透流解析", 第 25 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, 2012.11
59. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "き裂性岩盤におけるき裂進展解析", 第 25 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, 2012.11
60. 李思陽, 江澤良孝, "圧力容器の効率的解析技術と最適化技術の開発", 第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.6
61. 高清水聖, 江澤良孝, "確率的メタモデルによる大域的最適化", 第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.7
62. 島村雅彦, 江澤良孝, "フラクタル構造物の構造最適化設計", 第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.7
63. 藤松信義, "乱流統計量を求める際の注意点について", 日本実験力学会 分科会合同ワークショップ, 2012.12.7
64. 田村善昭, 鶴見伸夫, 松本洋一郎, "気泡の合体の効果を考慮したキャビテーション流れのための気泡モデル", 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2012.12.18-20
65. N. FUJIMATSU, "Direct Numerical Simulation on Drag Reduction of Channel Flow with Visco-Elastic Wall", 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2013.1.7
66. *長岡慎介, 中林靖, 矢川元基, “EFMM の並列流体-構造連成解析への適用”, 第 62 回理 論応用力学講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2013.03.06-08

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

67. *芦野俊宏, “材料データベースの国際動向と今後の展望”, 科学技術未来戦略ワークショ ップ データを活用した設計型物質・材料研究(マテリアルズ・インフォマティクス)ワークショップ第 2 回, 東京, 2013.06.01
68. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Genki YAGAWA, “E Application of EFMM to Fluid-Structure Coupled Analysis and Its Parallelization”, SEECCM III, Kos Island, Greece, 2013.06.012-14
69. Hiroshi KAWAI, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, Shinobu YOSHIMURA “Performance Benchmark of Local Solvers on Supercomputers in Domain Decomposition Method”, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13
70. Kaoru YODO, Ryuji SHIOYA, Yoshitaka WADA, Akio MIYOSHI ,“Parallel CAE system based on HTML5, WebGL and offline visualization technology with domain decomposition method”, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13
71. Itaru ISHIKAWA, Yosuke KOBAYASHI, Ryuji SHIOYA, Genki YAGAWA ,“Vibration Analysis by an Eigenvalue Analysis Module of ADVENTURE System”, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13
72. A.M.M. MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, “A Computational Study of Sparse Matrix Storage Schemes in Large Scale Thermal-Solid Coupling Analysis”, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13.
73. *荻野正雄, 塩谷隆二, “階層型領域分割法による 1000 億自由度並列有限要素解析”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
74. 石川格, 小林陽介, 塩谷隆二, 矢川元基, “ADVENTURE 振動固有値解析モジュールの開発”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
75. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, “コース行列の逆行列を用いた BDD 前処理”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
76. 和田義孝, 河合浩志, 塩谷隆二, “超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの開発”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
77. 淀薫, 塩谷隆二, 和田義孝, 三好昭生, “領域分割法に基づくオフライン可視化と WebGL による大規模解析用ネットワーク CAE システムの開発”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
78. 荒井皓一郎, 岡田裕, 河合浩志, 淀薫, 塩谷隆二, “地球シミュレータによる大規模有限要素法破壊力学解析と破壊力学パラメータの計算手法”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
79. 田村善昭, 鶴見伸夫, 松本洋一郎, “集束超音波による気泡運動と温度上昇の可視化”, 可視化情報シンポジウム, 東京, 2013.06.19-21
80. *Y. Yamashita, T. Baba and T. Ashino, “Semantic mathematical representation using OpenMath for equation”, The 10th Asian Thermophysical Properties Conference, Jeju, Kora, 2013.09
81. 長岡慎介, 中林靖, 矢川元基, “EFMM による並列流体-構造連成解析について”, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山大学津島キャンパス, 2013.09.08-11

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

82. *Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, “Numerical Simulation Method of HIFU with Microbubbles”, ASME/FDA 2013 1st Annual Frontiers in Medical Devices: Applications of Computer Modeling and Simulation (FMD2013), Washington DC, U. S. A., 2013.09.11-13
83. *増田正人, 中林靖, 田村善昭, “振動現象の連成解析及び自己組織化マップによるその分類”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
84. *山下雄一郎(産総研), 馬場哲也, 芦野俊宏, “分散型熱物性データベースの開発(10)-OpenMath を用いた数式データの表現-”, 第 34 回日本熱物性シンポジウム, 富山, 2013.11
85. *Shisnuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa , “Evaluation of Efficiency of New Fluid-Structure Coupled Analysis Method using Parallel Enriched Free Mesh Method”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013) , Singapore, 2013.12.11-14
86. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura , “Fluid-Structure Coupled Analysis of Vibration Phenomena and Its Classification and Prediction Using the modular network Self Organizing Map”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics(APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
87. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, “Numerical Simulation of Nonlinear Acoustic Waves in Two-Phase Fluid”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
88. 石川 格, 河合浩志, 塩谷隆二, “振開発中の ADVENTURE 振動固有値解析モジュールによる並列計算”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04.
89. I. Ishikawa, M. Ogino, A. M. M. Mukaddes, Ryuji Shioya, “Trial Study of Multi-Level Domain Decomposition Method for Heat Transfer Analysis”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
90. 河合浩志, 塩谷隆二, “連続体力学向け DSL の開発”, 日本機械学会第 26 回計算力学 講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
91. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法ソルバーの性能ベンチマーク”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
92. 和田義孝, 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, “超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの並列化”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
93. 淀薫, 塩谷隆二, 和田義孝, 河合浩志, 三好昭生, “大規模解析のためのレイキャスティング可視化技術の検討”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
94. A M M Mukaddes, Masao Ogino and Ryuji Shioya, “A new implementation of sparse matrix-vector multiplication in the parallel finite element”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14.
95. S. Sugimoto, M. Ogino and R. Shioya, “Implementation and acceleration of the

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

domain decomposition method with complex data types”， 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14

96. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, “Material Point Method（MPM）におけるエネルギー変動問題と その抑制法”, 土木学会第 68 回年次学術講演概要集, pp.233-234, 2013.09
97. 広瀬孝三郎, 松原仁, “島尻粘土における乾燥き裂パターンに関する実験研究”, 土木学会 第 68 回年次学術講演概要集, pp.463-464, 2013.09
98. 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, “不均質脆性固体における破壊形態の複雑性に関する数値解 析的検討”, 第 26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.24-25, 2013.11
99. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, “Material Point Method(MPM)を用いた斜面崩壊発生時の土質 強度の検討”, 第 26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.18-23, 2013.11
100. 広瀬孝三郎, 松原仁, “Mud crack の形成メカニズムに関する実験的検討”, 第 26 回沖縄 地盤工学研究発表会講演概要集, pp.14-17, 2013.11
101. Hitoshi Matsubara , “Numerical Study on the Forming Mechanism of Honeycomb-weathering of Rock” , Proceedings of 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, December 2013.
102. Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, “High-accuracy Material Point Method based on the Moving Least Squares Method”, Proceedings of 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, December 2013.
103. G. Yagawa, M. Yokoyama, K. Murotani, "High-Performance Computing for Fluid-Structure Interaction with Application to Splash Problem”, International Conference on Computational Fluid–Structure Interaction and Flow Simulation ",Tokyo, JAPAN, 2014.03.20
104. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA and Genki YAGAWA, "An Efficient Approach for the Fluid-Structure Interaction Problems based on the Stabilized Finite Element Method and the Enriched Free Mesh Method", Advances in Computational Fluid–Structure Interaction and Flow Simulation, Tokyo, Japan, 2014.03.19–21
105. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA and Genki YAGAWA, "An Efficient Parallelization Method and Asymmetric Solver for the Fluid-Structure Interaction Problem", KSME-JSME Symposium on Computational Mechanics & CAE 2014, Jeju, Korea, 2014.05.01
106. *Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, "Visualizations of Bubble Motions and Temperature Rises by Focused Ultrasound", International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, 2014.06.20-21
107. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA, Yoshiaki TAMURA and Genki YAGAWA, "An Efficient Parallelization and Asymmetric Solver for the FSI Solver

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

based on the SUPG/PSPG Method and the Enriched Free Mesh Method", The 5th International Conference on Computational Methods (ICCM2014), Cambridge, England, 2014.07.28-30

108. G. Yagawa, Large scale fluid structure interaction considering the surface condition of the solid wall, ESI Forum2014, 2014.11.20(Tokyo)
109. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, "Parallelization of enriched free mesh method for large scale fluid-structure coupled analysis", International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, June 20-21, 2014.
110. Itaru Ishikawa, Yosuke Kobayashi, Ryuji Shioya, Genki Yagawa, "Simulation results and its performance by using a developing eigenvalue analysis module of the adventure system", International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, June 20-21, 2014.
111. M. Yokoyama, K. Murotani, K. Kikuchi, G. Yagawa, O. Mochizuki, "How deal with slippery surface between fluid and structure in particle method?" The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16) , Okinawa Convention Center, June 26, 2014.
112. Takafumi Nosaki, Nobuyoshi Fujimatsu, "Experimental study of aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion", The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16) , Okinawa Convention Center, June 26, 2014.
113. Naohiro Shinozaki, Nobuyoshi Fujimatsu. " Motion analysis and flow visualization of sheet flutter for various materials", The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16) , Okinawa Convention Center, June 26, 2014.
114. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi and Yoichiro Matsumoto, "Some Modifications of Bubble Model for Cavitating Flow Simulations", 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
115. *Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi and Yoshiaki Tamura, "Fluid-Structure Interaction Analysis of Vibration Phenomena and Verification of its classification and Prediction Accuracy using Modular Network Self-Organizing Map",11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
116. *Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura and Genki Yagawa, "The Comparison of the Experimental Result with the Numerical Analysis using the New Coupled Analysis Method based on the Enriched Free Mesh Method and the SUPG/PSPG Stabilized Finite Element Method",11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

117. Masao Yokoyama, Kohei Murotani, Genki Yagawa and Osamu Mochizuki, "Fluid-Structure Interaction Analysis with Slippery Mucus Skin", 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
118. 広瀬孝三郎, 松原仁, 粘性土における Mud crack 生成パターンに関する実験的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演概要集, pp. 85-86, 2014.
119. 宮野伸介, 大城武, 富山潤, 福地啓太, “塗装 PC 鋼より線仕様のプレテンション PC 桁の付着性能に関する研究”, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-013, pp.25-26, 2014.
120. 富山潤, 大城武, 大貫隆弘, “塩害環境化におけるエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた鉄筋コンクリートの防食に関する研究”, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-439, pp.877-878, 2014.
121. 松浦葵, 富山潤, 迫田泰治, “ASR 劣化したプレテンション PC 桁橋の劣化調査とモニタリング調査”, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-484, pp.967-968, 2014.
122. 横山真男, 野村和希, 望月修, “水底の形状変化を用いた水滴落下による騒音の緩和”, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2014.10.
123. 新城達也, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “ロックアンカー・ロックボルトの非破壊試験法の開発”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.60-61, 2014.
124. 土屋憲一, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “トンネル掘削における発破振動計測の試み, 土木学会西部支部沖縄会”, 第 4 回技術研究発表会, pp.62-63, 2014.
125. 福長友弥, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “史的石積み構造物に対する多重パラメータ動態計測システムとその中城城址への適用”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.64-69, 2014.
126. 亀川裕也, 藍檀オメル, 富山潤, 山口順圭, 屋我晃, 神谷和志, 上里尚也, “コンクリートプリズム（CPT）を用いた ASR 加速試験の遅延膨張性 ASR への適用性に関する研究”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.128-129, 2014.
127. 外間賢伍, 松浦葵, 藍檀オメル, 富山潤, “コンクリート橋上部工の付着塩分量に関する調査および塩害環境評価法に関する基礎研究”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.130 -131, 2014.
128. 松浦葵, 藍檀オメル, 富山潤, 迫田泰治, 浅井光輝, “ASR 劣化したプレテンション PC 桁橋の調査および損傷理論を導入したボクセル FEM を用いた膨張予測の基礎検討”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.132-135, 2014.
129. 平田淳貴, 吉次優祐, 松浦葵, 藍檀オメル, 富山潤, “コンクリート梁の振動特性に関する基礎研究, 土木学会西部支部沖縄会”, 第 4 回技術研究発表会, pp.170-171, 2014.
130. 吉次優祐, 松浦葵, 平田淳貴, 松川博宣, 富山潤, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, “塩害劣化したコンクリート橋梁の振動特性評価に関する基礎研究”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.172-173, 2014.
131. 松川博宣, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “モノレール駅の振動特性に関する基礎研究, 土木学会西部支部沖縄会”, 第 4 回技術研究発表会, pp.174-175, 2014
132. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, “自己組織化マップを用いた解析結果の予測”, 日本

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

機械学会第 27 回計算力学講演会，盛岡，2014 年 11 月

133. *長岡慎介，中林靖，田村善昭，矢川元基，“EFMM を用いた流体-構造連成解析と実験結果との比較”，日本機械学会第 27 回計算力学講演会，盛岡，2014 年 11 月

134. 後藤恵理子，瀬田陽平，矢川元基，横山真男，“容器の口から流れる液だれの数値シミュレーション”，日本機械学会第 27 回計算力学講演会，盛岡，2014 年 11 月

135. Toshihiro Ashino, Yuichiro Yamashita and Tetsuya Baba, “The Requirements for Permanent URI’s of Reliable Constant Values and Unit Systems to Linked Measurement Data”, SciDataCon2014, Delhi, India, November 2014

136. 広瀬孝三郎，松原仁，原久夫，マッドペーストを用いたMud crack生成パターンに関する実験的検討，第 27 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集，pp.32-33, 2014.

137. 河合浩志，谷村景貴，塩谷隆二，“アクセラレーター向け最適化コード自動生成 DSL 開発”，日本機械学会第 27 回計算力学講演会，講演番号 1604，岩手大学工学部，2014 年 11 月 22 日～24 日

138. Hirotaka Tanimura, Hiroshi Kawai, and Ryuji Shioya, "A Development of Domain Specific Language(DSL) for Continuum Mechanics", JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software, P40, KOBE, JAPAN, December 2-4, 2014

139. Hiroshi Kawai, Masao Ogino, Ryuji Shioya, Tomonori Yamada, Shinobu Yoshimura, “Performance Tuning of Parallel Structural Analysis Code Based on Iterative Substructruring with BDD Pre-conditioner for Peta-scale Supercomputers”, The 18th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2015), Regent Taipei, Taiwan, March 16-18, 2015.

140. Hiroshi Kanayama, Masao Ogino, Shin-ichiro Sugimoto, “Preconditioners in Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, The 18th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2015), Regent Taipei, Taiwan, March 16-18, 2015.

141. Genki Yagawa, “Views of Japanese Academia on Fukushima Daiichi Nuclear Accident”, World Engineering Conference and Convention 2015, Kyoto, December 1, 2015.

142. 横山真男，斉藤勇也，“ヒットチャートランキング上位に入る楽曲の特徴分析”，情報処理学会研究報告音楽情報科学(MUS)，山梨，2015 年 2 月

143. 渡辺大樹，瀬田陽平，横山真男，“HMDとLeap Motionを用いた指差し天体観測システムの開発”，情報処理学会第 77 回全国大会，京都，Vol.1，pp.651-653，2015 年 3 月

144. 杉本振一郎，田上大助，荻野正雄，武居周，金山寛，“領域分割法を用いた時間調和渦電流解析の収束性改善（第 2 報），静止器/回転機合同研究会・電磁界数値計算技術とその応用，宮古島マリンターミナル，2015 年 3 月 5-6 日

145. 月川久義，井上雅弘，金山寛，田島正喜，“屋上から排出した水素の建物周囲の流れ解析”，日本機械学会九州支部第 68 期総会・講演会，福岡大学工学部，2015 年 3 月 13 日

146. 金山寛，“自動販売機内部の熱対流解析”，日本機械学会材料力学部門 2014 年度第 2 回「マルチフィジックスの実験／計算技術の高度化に関する研究会」，東京大学山上会館 001 会議室，2015 年 3 月 19 日

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

147. Yoshiaki Tamura, Tomoki Matsuo, “Numerical Simulation Method of Compressible Gas-Liquid Two Phase Flow”, PANACM 2015 1st Pan-American Congress on Computational Mechanics, Buenos Aires, Argentina, April 27-29, 2015.
148. *Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, Shioya Ryuji, Fumihiko Hakuno, Hiroki Nishi, Shinichiro Takahashi, “Study of Effects of Blood Amino Acid and Hormone Level for Controlling Triglyceride Accumulation in the Liver of Rats using Self-Organizing Map”, 1st. Pan-American Congress on Computational Mechanics (PANACM 2015) & XI Argentine Congress on Computational Mechanics (MECOM 2015), Argentina, pp.885-891, April 27-29, 2015.
149. M. Yokoyama, Y. Seta, K. Murotani, G. Yagawa, “3D simulation considering surface condition of wall in particle method”, VI th International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED PROBLEMS 2015), Venice, Italy, May 2015.
150. 横山真男, “黄金比による音律で調弦した音楽”, 情報処理学会研究報告音楽情報科学（MUS）, 東京, 2015 年 5 月
151. 富山潤, 浅井光輝, 久保善司, “損傷力学ベースボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張挙動解析の基礎研究”, 土木学会第 18 回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.199-200, 2015 年 5 月
152. 室谷浩平, 越塚誠一, 塩谷隆二, 荻野正雄, 永井英一, 藤澤智光, 安重晃, MPS 法を用いた福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋の津波浸水解析”, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, B-5-4.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 8 日
153. 和田義孝, 河合浩志, 荻野正雄, 室谷浩平, 塩谷隆二, 高精細可視化ライブラリ LexADV-VSCG へのポリゴン断面可視化の実装“, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-6-2.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日
154. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, 領域分割法における局所 Schur 補元アプローチの性能予測モデルと評価“, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-7-1.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日
155. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 室谷浩平, 大規模解析のための多階層領域分割法の基本設計と実装“, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-7-2.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日
156. 杉本振一郎, 田上大助, 荻野正雄, 武居周, 金山寛, 階層型領域分割法における時間調和渦電流解析の収束性改善(第 2 報)“, 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015 年 6 月 8-10 日
157. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Yoshiaki TAMURA, Genki YAGAWA, “Efficient Approach for the Fluid-Structure Interaction Problems and the Comparison between Experiment and Computation”, ICCM2015, Auckland, New Zealand, July 14-17, 2015.
158. Hitoshi Matsubara, “Mathematical and numerical modelling for microbial rock weathering”, Proceedings of 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), San Diego, USA, July 2015.
159. S. Koshiyama, N. Fujimatsu, “Establishment of PSP Technique for Small-Scaled Model using the Supersonic Wind-Tunnel”, International Symposium

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

on Space Technology and Science, Kobe International Conference Center, July 2015.

160. Kosaburo Hirose, Takaaki Edo and Hitoshi Matsubara, “Crack propagation simulation on mud pastes”, Proceedings of 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), San Diego, USA, July 2015.

161. Hiroshi Kanayama, Masao Ogino and Shin-ichiro Sugimoto, “Preconditioners in Domain Decomposition Method for Magnetostatic Problems”, ICCM2015, Pullman Hotel, Auckland, New Zealand, July 14-17, 2015.

162. Yoshiaki Tamura, “Development of Numerical Methods for Compressible Gas-Liquid Two Phase Flows”, The 13h Asian International Conference on Fluid Machinery 2015 (AICFM13), Tokyo, Japan, August 7-10, 2015.

163. 藤松信義, “摩擦係数評価のための乱流境界層の普遍関数構築”, 日本実験力学会 2015 年度年次講演会, 新潟大学工学部, 2015 年 8 月

164. M. Yokoyama, K. Murotani, O. Mochizuki, G. Yagawa, “Numerical and experimental study on splash formation with consideration of the surface condition of solid wall”, IV th Conference on Particle-Based Methods (PARTICLES 2015), Barcelona, Spain, September 2015.

165. 横山真男, “現代音楽のための黄金比を用いた新音律の提案と評価”, 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, 福島, 2015 年 9 月

166. 富山潤, 藍檀オメル, 亀川裕也, 山口順圭, 屋我晃, “遅延膨張性細骨材に対するコンクリートプリズムを用いたASR加速試験の適応性に関する研究”, 土木学会第70回年次学術講演会, V-547, pp.25-26, 2015 年 9 月

167. 風間洋, 富山潤, 下地建, 小簇俊介, “コンクリート表面の含有塩分量 C0 調査方法の提案”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-70, pp.139-140, 2015 年 9 月

168. 佐川康貴, 山田一夫, 合田寛基, 久保善司, 富山潤, 川端雄一郎, “共通試験結果に基づくコンクリートプリズムを用いた ASR 加速試験方法に関する考察”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-548, pp.1095-1096, 2015 年 9 月

169. 広瀬孝三郎, 松原仁, “マッドペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山, pp.783, 2015 年 9 月

170. 﨑山将, 広瀬孝三郎, 松原仁, “粘質土壌における亀裂進展シミュレーション”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山, pp.573-574, 2015 年 9 月

171. 室谷浩平, 越塚誠一, 塩谷隆二, 荻野正雄, 永井英一, 藤澤智光, 安重晃, “MPS 法を用いた福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋内部の津波浸水解析”, 第 28 回計算力学部門講演会, 130.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日

172. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 室谷浩平, “大規模解析のための多階層領域分割法ソルバの開発”, 第 28 回計算力学部門講演会, 154.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日

173. 鄭宏杰, 荻野正雄, 塩谷隆二, “京コンピ ュータにおける ADVENTURE_Solid 2.0 の性能評価”, 第 28 回計算力学部門講演会, 231.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日

174. 増田正人, 塩谷隆二, 中林靖, 伯野史彦, 西宏起, 田村善昭, 高橋伸一郎, “自己組織化マップを用いたラットの血中アミノ酸量と肝臓脂肪の関係分類”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 321.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日

175. 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 鄭宏杰, 淀薫, “静磁場領域分割インターフェイス

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

問題の前処理付き共役勾配法”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日

176. Ryuji Shioya, Masao Ogino, Hiroshi Kawai, “Development of a Numerical Library based on Hierarchical Domain Decomposition and Extreme Large Scale FEM Simulation”, IWACOM-III, p93_OW4-3-2.pdf, Tokyo, Japan, October 12-14, 2015.

177. Hiroshi Kawai, Ryuji Shioya, “Domain specific language for continuum mechanics: translator from LaTeX to C/Fortran”, IWACOM-III, p94_OW4-3-3.pdf, Tokyo, Japan, October 12-14, 2015.

178. *島村雅彦, 江澤良孝, 田村善昭, 高清水聖, 佐藤大亮, “ベイズ推定を用いた実験と数値シミュレーション融合による高精度予測”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日

179. 横山真男, 室谷浩平, 矢川元基, “粒子法によるミルククラウンの大規模数値シミュレーション”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月

180. 瀬田陽平, 横山真男, 牧野光則, 矢川元基, “容器の縁形状を考慮した液だれの数値シミュレーション, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月

181. 松原仁, “玄武岩質ガラスの微生物風化シミュレーション”, 計算工学会講演会, つくば, Vol.20, 2015

182. *藤岡照高, “構造解析ソルバ検証用参照解の整備（低合金鋼引張試験の Code-Aster による再現）”, オープン CAE シンポジウム 2015, 富山国際会議場, 2015 年 11 月

183. 広瀬孝三郎, 松原仁, “ベントナイトペーストに発生する乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 第 28 回沖縄地盤工学研究発表会, 沖縄, pp.29-30, 2015 年 11 月

184. 江戸孝昭, 松原仁, “格子ボルツマン法を用いた発破騒音場における防音壁の効果に関する数値解析的検討”, 第 28 回沖縄地盤工学研究発表会, 沖縄, pp.1-6, 2015 年 11 月

185. 伯野史彦, 増田正人, 舘野昌洋, 西宏起, 高橋伸一郎, 塩谷隆二, 機械学習による血中アミノ酸濃度から肝臓脂肪蓄積量の予測“, 第 38 回日本分子生物学会年会, 第 88 回日本生化学会大会合同大会(BMN2015), 神戸, 2015 年 12 月 1-4 日

186. Yoshiaki Tamura, “Development of Numerical Simulation Method for Compressible Gas-Liquid Two-Phase Flows”, The 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015), Lausanne, Switzerland, December 6-10, 2015.

187. *Toshihiro Ashino, “Data and knowledge structure for materials integration”, Pacifichem 2015, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Honolulu, Hawaii, December 2015.

188. MA Hopkins, RJ Griffin, A Leonessa, BY Lattimer, T Furukawa, “Design of a compliant bipedal walking controller for the DARPA Robotics Challenge”, IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots(Humanoids), pp.831-837, 2015.

189. C Knabe, J Seminatore, J Webb, M Hopkins, T Furukawa, “A Leonessa, Design of a series elastic humanoid for the DARPA Robotics Challenge”, IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.738-743, 2015.

190. K Takami, T Furukawa, M Kumon, LC Mak, “Non-field-of-view indoor sound

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

source localization based on reflection and diffraction", IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.59-64, 2015.

191. B Li, T Furukawa, "Photometric stereo under dichromatic reflectance framework dealing with non-Lambertian surfaces", IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.139-144, 2015.
192. T Furukawa, L Dantanarayana, J Ziglar, R Ranasinghe, G Dissanayake, "Fast global scan matching for high-speed vehicle navigation", IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.37-42, 2015.
193. K Takami, T Furukawa, "High-Resolution Deformation Measurement System for Fast Rotating Tires", ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V008T13A058-V008T13A058, 2015.
194. T Furukawa, K Takami, X Tong, D Watman, A Hamed, R Ranasinghe, G. Dissanayake, "Map-Based Navigation of an Autonomous Car Using Grid-Based Scan-to-Map Matching", ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V003T01A005-V003T01A005, 2015
195. B Li, T Furukawa, "Design and Calibration of a 3D High-Resolution Surface Profiling System Using Photometric Stereo", ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V009T07A086-V009T07A086, 2015.
196. MJ Bender, H McClelland, G Bledt, A Kurdila, T Furukawa, R Mueller, "Trajectory Estimation of Bat Flight Using a Multi-View Camera System", IN AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, SciTech, pp.5-9, 2015.
197. K Takami, T Furukawa, "Study of Tire Noise Characteristics with High-Resolution Synchronous Images", EuroNoise 2015, pp.2113-2118, 2015.
198. Genki Yagawa, "Reflection on Fukushima Daiichi Nuclear Accident", ASINCO 2016, Nagasaki, April 12, 2016.
199. Kanayama, H., Zheng, H., Sugimoto, S., Ogino, M., The BDD-DIAG Preconditioner in Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems (Keynote Lecture), ICCM2016, Berkeley, USA, 1-4 August 2016.
200. 金山寛, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, "Considerations of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis", 静止器/回転機合同研究会「電磁界数値計算技術とその応用」, 富士通株式会社本社事務所, 2016 年 1 月 20-21 日.
201. 横山真男, 室谷浩平, 瀬田陽平, 矢川元基, "粒子法による粒子間インタラクションに着目した大規模数値シミュレーション", 粒子法コードユーザーグループ第 33 回会合, 本郷, 2016 年 2 月
202. 齊藤克佳, 瀬田陽平, 横山真男, "HMDとLeapMotionを用いたネットワーク型バーチャルプラネタリウムの開発", 情報処理学会第 78 回全国大会, 横浜, 2016 年 3 月 10-12 日
203. *T. Kadohira, T. Ashino, H. Ishiki, S. Minamoto, M. Watanabe, J. Inoue, M.

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

Enoki and T. Koseki, “Establishment of descriptors-inventory for data-utilization in Materials Science and Engineering with collective intelligence”, ICME 2016, Second International Workshop on Software Solutions for Integrated Computational Materials Engineering, Barcelona, Spain, April 12-15, 2016.

204. 金山寛, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, “静磁場領域分割解析におけるインターフェイス問題”, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 慶應義塾大学, 2016 年 5 月 18-20 日

205. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法における反復法に基づくローカルソルバーの性能評価”, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日

206. 和田義孝, 荻野正雄, 室谷浩平, 河合浩志, 塩谷隆二, “高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG のビューア対応機能の実装”, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日

207. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, “大規模解析のための多階層領域分割法によるデータ圧縮効果”, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日

208. 鄭宏杰, 塩谷隆二, Mukaddes Abul Mukid Mohammad,「京」を用いた ADVENTURE_Thermal による大規模熱伝導解析, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日.

209. Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., “Performance tuning of subdomain local FE solver in domain decomposition method”, ECCOMAS2016, Crete Island, Greece, 5-10 June 2016.

210. T. Fujioka, “Analytical Expression of Elastic Follow-up Factors in Fully Plastic Situation for Creep-fatigue Damage Assessment of High Temperature Components”, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2016-63031, Vancouver, July 17-21, 2016.

211. Kanayama, H., Ogino, M., Sugimoto, S., Zheng, H., Yodo, K., “Application of the BDD-DIAG Preconditioner to Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.

212. Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Kanayama, H., Ogino, M., “Storing Techniques for Sparse Matrices-A Study on Thermal-Convection Problems”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.

213. Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., “Mixed Precision Implementation of Coarse Inverse Approach in BDD Pre-conditioner”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.

214. Zheng., H., Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Ogino, M., “Performance Evaluation of ADVENTURE_Solid and ADVENTURE_Thermal on the K computer”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.

215. Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, Abul Mukid Mohammad MUKADDES, Masao OGINO, “Performance Evaluation of ADVENTURE_Solid and ADVENTURE_Thermal on the K Computer”, The 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2016), 152041.pdf, July, 2016.

216. Hiroshi KANAYAMA, Masao OGINO, Shin-ichiro SUGIMOTO, Hongjie ZHENG

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

and Kaworu YODO, “Application of the BDD-DIAG Preconditioner to Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, The 12th World Congress on Computational Mechanics and The 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM XII & APCOM VI), online, 2016/07/24-29, Seoul, Korea.

217. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Yoshiaki TAMURA and Genki YAGAWA (Toyo University), “Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-Structure Interaction Analysis”, WCCM/APCOM 2016, 2016.7.26.
218. *Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura, and Genki Yagawa, “Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-Structure Interaction Analysis”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
219. *Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, and Yoshiaki Tamura, “Prediction of Analysis Results with Deep Learning”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
220. Yoshiaki Tamura, “Numerical Simulation Method of Gas-Liquid Two-Phase Flow for a Cavitation Bubble Collapse”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
221. *Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa, Yoshiaki Tamura, Satoru Takashimizu, and Daisuke Satou, “High Accurate Analysis by Experiment and Simulation Using Bayesian Inference”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
222. Youhei SETA, Masao YOKOYAMA, Mitsunori MAKINO, Genki YAGAWA, “Application of Particle Method to Liquid Dripping”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
223. Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Ogino, M., “Finite Element Approach with Unsteady Bioheat Equation for Human Skin Injury”, ICCM2016, Berkeley, USA, 1-4 August 2016.
224. Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, “Large-Scale Fluid-Structure Analysis for Tsunami Inundation into the Interior of a Building using MPS-FEM Coupling Method”, International Conference on Computational Methods (ICCM 2016), 1585, August, 2016.
225. Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., “Subdomain local FE solver implementation using iterative solver in domain decomposition method”, ICTAM2016, Montreal, Canada, 21-26 August, 2016.
226. K. Tazoe, M. Oka and G. Yagawa, “LOADING FREQUENCIES EFFECTS ON THE OXIDE-INDUCED CRACK CLOSURE IN EXTREMELY LOW STRESS INTENSITY FACTOR RANGE”, 5th International Conference on Fracture Fatigue and Wear FFW 2016, Kitakyushu, Japan, 24 August 2016.
227. 金山寛，荻野正雄，杉本振一郎，淀薫，鄭宏杰，静磁場の領域分割解析におけるコース問題の解法について，静止器/回転機合同研究会，石垣市商工会館，2016 年 9 月 8-9 日
228. *Toshihiro Ashino, “Reusable Equation Library for Materials Informatics and

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

Integration based on Materials Ontology", SciDataCon 2016, Denver, US, September 11-13, 2016.

229. 横山真男, 粟原義己, "バイオリンの音色に関する印象語と音響特徴の相関分析の試み", 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会, 横浜, 2016 年 9 月 14-16 日

230. *島村雅彦, 江澤良孝, 田村善昭, 高清水聖, 佐藤大亮, "ベイズ推定を用いた実験とシミュレーションによる高精度解析", 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日

231. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, "深層学習を用いた連成解析結果予測", 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日

232. *長岡慎介, 中林靖, 田村善昭, 矢川元基, "高精度フリーメッシュ法の並列解析手法について", 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日

233. 瀬田陽平, 横山真男, 牧野光則, 矢川元基, "界面張力を考慮した粒子法による容器口から流れる液垂れの数値シミュレーション", 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日

234. 小林陽介, 村上恭子, 稲葉正和, 矢川元基, "フリーメッシュ法を用いた計測データからの高精度 3D モデリングアプリケーション", 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日

235. 金山寛, 淀薫, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, "部分領域を直接法で解く場合のインターフェイス問題の反復法について", 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22-24 日

236. 鄭宏杰, 塩谷隆二, "スーパーコンピュータ京を用いた 3 次元大規模並列 MPS-FEM 流体構造連成解析", 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22-24 日.

237. 和田義孝, 荻野正雄, 室谷浩平, 河合浩志, 塩谷隆二, "高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG のインタラクティブ可視化ビューア対応", 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22-24 日

238. 横山真男, 瀬田陽平, 矢川元基, "容器口の形状に着目した液だれ防止方法の提案", 日本流体力学会年会 2016, 名古屋, 2016 年 9 月 26-29 日

239. H. Hirayama, Y. Satoh, K. Takahasi and M. Yokoyama, "Multimedia Improvisation for brain waves, cello and live electronics", iCLA Music and the Brain Symposium 2016, Yamanashi, Japan, October 2016.

240. 田添広喜, 岡正徳, 矢川元基, "酸化物誘起き裂閉口が無視できる場合の疲労き裂進展下限界特性の板厚依存性", 日本機械学会材料力学カンファランス, 神戸, 2016 年 10 月 8 日

241. 松井陽平, 岡田満利, 高橋俊彦, 藤岡照高, "実機ガスタービン動翼から採取した試験片を用いたクリープ寿命評価手法", 第 44 回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, 酒田, 2016 年 10 月 26-27 日

242. H.Kanayama, "Balancing domain decomposition (BDD) related preconditioners in engineering including magnetostatic problems", CoMFoS16:Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications II, Kyushu University, October 22-24, 2016.

243. *Toshihiro Ashino, "Materials Information Integration Based on Ontology (Keynote)", AMDS 2016 (The 5th Asian Materials Database Symposium), Hanoi, Vietnam, October 30-November 2, 2016.

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

244. 篠﨑雅和, 瀬田陽平, 横山真男, “教育支援を目的としたネットワーク型バーチャルプラネタリウムの開発”, NICOGRAPH 2016, 富山, 2016 年 11 月 4-6 日
245. Hongjie Zheng, Masao Ogino, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, “Large-scale Tsunami Run-up and Inundation Simulation Using an Explicit Moving Particle Simulation Solver Framework”, Women in HPC workshop at SC16, Salt Lake City, Nov. 13, 2016.
246. *市島泰人, 新藤康弘, 藤岡照高, ‘‘有限要素法による大腿頸骨角を考慮した簡易膝関節モデルの接触解析’’, 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2016, 埼玉, 2016 年 11 月 19 日
247. Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, “Large-scale analysis of ADVENTURE system on the K computer”, オープン CAE シンポジウム 2016@東京, 2016 年 11 月 24-26 日.
248. *市島泰人, 新藤康弘, 藤岡照高, “オープンソース CAE ソフト Salome-Meca を用いた膝関節半月板内における応力分布の数値的検討”, オープン CAE シンポジウム 2016, 東京, 2016 年 11 月 24-26 日
249. *三浦純哉, 藤岡照高, “Salome-Meca を用いた熱疲労試験の再現解析”, オープン CAE シンポジウム 2016, 東京, 2016 年 11 月 24-26 日
250. Masao YOKOYAMA, Yoshiki Awahara, Genki YAGAWA, “Relation between violin timbre and harmony overtone”, ASA-ASJ Joint Meeting 2016, Honolulu, USA, November 28-December 2, 2016.
251. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, “深層学習を用いた流体解析結果予測”, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2016 年 12 月 12-14 日

＜研究成果の公開状況＞（上記以外）

シンポジウム・学会等の実施状況、インターネットでの公開状況等
＜既に実施しているもの＞
*センターホームページの公開
「http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/」にて, 研究センターのホームページを公開している。研究者向けのコンテンツとして研究内容, 研究成果, 年次報告書を公開している。また, 一般向けコンテンツとして教育活動, 産学連携活動, 国際活動を公開している。さらに計算力学に馴染みの薄い方にも興味を持っていただけるコンテンツとして「ギャラリー」を公開している。この点が, 本センターのホームページの特色である。「ギャラリー」では, 「衝突と亀裂シミュレーション」や「津波のシミュレーション」の結果, ハイスピードカメラを用いて撮影した「軟式テニスボールの変形の瞬間の様子」などの画像を公開している。
これらの作品は, 本センターの研究成果を基に作成されたものである。「ギャラリー」によって計算力学の可能性や面白さを伝えていくことを主な目的としている。現在, 19点の作品を公開している。

*計算力学フォーラム
・ 第15回計算力学フォーラム, サンパウロ(ブラジル), 平成24年7月8日～13日, 国際会議WCCM2012の中で行った。
・ 第16回計算力学フォーラム, 神戸, 平成24年10月6日～9日, 神戸ポートアイランド南地区において開催された日本機械学会第25回計算力学講演会の中で行った。
・ 第17回計算力学フォーラム, ゴールドコースト(オーストラリア), 平成24年11月25日～28

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

日，国際会議ICCM2012の中で行った。
・ 第18回計算力学フォーラム，佐賀，平成25年11月2日～4日，佐賀大学において開催された日本機械学会第26回計算力学講演会の中で行った。
・ 第19回計算力学フォーラム，仙台，平成26年４月21～23日，仙台国際センターにおいて開催されたCOMPSAFE2014の中で行った。
・ 第20回計算力学フォーラム，ケンブリッジ(イギリス)，平成26年7月28日～30日，国際会議ICCM2014の中で行った。
・ 第21回計算力学フォーラム，岩手，平成26年11月22日～24日，岩手大学において開催された日本機械学会第27回計算力学講演会の中で行った。
・ 第22回計算力学フォーラム，ブエノスアイレス(アルゼンチン)，平成27年4月27日～29日，国際会議PANACM2015の中で行った。
・ 第23回計算力学フォーラム，オークランド(ニュージーランド)，平成27年7月14日～17日，国際会議ICCM2015の中で行った。
・ 第24回計算力学フォーラム，横浜，平成27年10月10日～１２日，横浜国立大学において開催された日本機械学会第28回計算力学講演会の中で行った。
・ 第25回計算力学フォーラム，ソウル(韓国)，平成28年7月26日～29日，国際会議WCCM2016の中で行った。
・ 第26回計算力学フォーラム，バークレー(アメリカ)，平成27年8月1日～4日，国際会議ICCM2016の中で行った。
・ 第27回計算力学フォーラム，名古屋，平成27年9月22日～24日，名古屋大学において開催された日本機械学会第29回計算力学講演会の中で行った。

*CCMR-HDDMPPS合同シンポジウム
・ 第8回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト)合同シンポジウム，白山キャンパス，平成25年3月28日。
・ 第9回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト)合同シンポジウム，白山キャンパス，平成26年3月10日。
・ 第10回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト)合同シンポジウム，白山キャンパス，平成27年3月10日。
・ 第11回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト)合同シンポジウム，白山キャンパス，平成28年3月8日。
・ 第12回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト)合同シンポジウム，白山キャンパス，平成29年1月21日。

*学生ワークショップ
・ 東洋大学ー龍華科技大學合同学生ワークショップ，龍華科技大學(台湾)，平成25年2月25日。
・ 龍華科技大學ー成均館大学ー東洋大学若手ワークショップ，東洋大学白山キャンパス，平成25年9月6日。
・ 第 1 回日韓中台学生ワークショップ Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015，諏訪東京理科大学，平成27年3月25日～26日。
・ カーディフ大学ー東洋大学合同学生ワークショップ，カーディフ，平成28年2月22,23日。
・ 龍華科技大學ー東京理科大学ー近畿大学ー東洋大学合同学生ワークショップ，台湾，平成28年12月1-3日。

*その他

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

・ 第10回機械工学国際会議，ダッカ(バングラディッシュ)，平成26年6 月19日～21日，keynote speakerなどで講演を行った。
・ 5th International Industrial Supercomputing Workshop(IISW2014)，東洋大学白山キャンパス，平成26年10月2日～3日。
・ 東京都北区主催「ものづくり夜間大学校」，東洋大学白山キャンパス，平成26年10月23日，30日。
・ 台湾・龍華科技大學川越キャンパス見学会，東洋大学川越キャンパス，平成27年6月23日，川越キャンパスの案内及び本センターの紹介を行った。
・ 東洋大学産学協同教育センター中核人材育成講座「スマホアプリ開発入門講座」，東洋大学川越キャンパス，平成27年11月7日，14日。

＜これから実施する予定のもの＞
なし。

14 その他の研究成果等

本センターでは，産学連携研究や他の研究機関との共同研究を積極的に推し進め，多くの成果が得られた。その研究成果を，以下にまとめる。

(a) JST CRESTプロジェクトとの連携
ポストペタコンなど次々世代の並列計算機アーキテクチャにおいて，大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション分野が高い演算効率を得るためには，マイクロプロセッサやメモリの階層構造を考慮したプログラミングモデルが必要である。ポストペタコンの利用が想定される大規模シミュレーションでは，全ての処理がポストペタコン上で行われ，モジュール間のデータ受け渡しを最小限にするようなプログラミングモデル，並びにそれに基づく大規模数値計算データ処理システムの基盤技術が不可欠と言える。そこでCRESTプロジェクトでは，ポストペタコン上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として，数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法の技術を応用した，階層型領域分割法による大規模数値計算データ処理システムの研究開発を目指す。当センターは，研究項目「階層分割型数値計算ライブラリの基礎研究並びに設計とその応用」において共同研究を実施した。

(b) バージニア工科大学との連携
2012年8月にバージニア工科大学が中心となり，米国政府National Science Foundation (NSF)を支援母体とし，タイヤ研究センター(CenTiRe <http://www.centire.org/>)が設立され，産官学によるタイヤ・車両業界全体の技術の底上げを目的とした研究・開発・教育・交流など様々な活動を行っている。研究対象は，タイヤ材料，ゴム材料，タイヤモデリング，製造手法，並列コンピューティングとダイナミックシミュレーションなど，多岐にわたっている。日本からはタイヤメーカー4社，自動車メーカー2社の計6社が参加しており，国内活動 の拠点を目的とし，2013年度より東洋大学計算力学研究センターが拠点大学として参加し，CenTiReの国際センターとしての活動を進めた。

(c) 株式会社 日立製作所 機械研究所との連携
（株）日立製作所機械研究所とは，(1)メッシュ生成技術，(2)構造健全性設計技術に関して連携を行っている。近年，産業界では解析主導設計による製品開発のスピードアップと設計上流段階での品質作り込みが最重要課題として進められている。そのためのCAEシステム

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

技術の開発をこれまで行い，実用性の検証を実施した。そこで，本年度は，テーマ(2)に関する，き裂進展解析を用いたCuコアはんだボールの接続信頼性評価メッシュ生成技術を中心に研究を行った。

(d) 独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携
当センターで開発を行っているフリーメッシュ法(以下FMM)と仮想き裂閉口積分法(以下VCCM)を融合した構造健全性評価システムFMM-VCCMの信頼性の検証と実務への応用を目的として，独立行政法人原子力安全基盤機構(以下JNES)への技術支援を行った。また，JNES，株式会社テクノスター， プロメテック・ソフトウェア株式会社と連携し世界最先端レベルの破壊力学ソフトウェアの構築も行った。

(e) 東京理科大学との連携
東京理科大学と共同で配管内の腐食同定問題について研究した。東京理科大学ではおもに実験を，本センターではシミュレーション方法について研究を行った。逆問題の観測方程式のモデル化について検討することを目標とした。中性環境における金属部材の腐食は，溶存酸素によるカソード反応が支配的であるので，溶存酸素の金属部材表面への拡散速度が，カソード反応の律速反応になっていると考えられる。そこで，金属部材近傍の流体の速度勾配および溶存酸素の濃度分布に着目して，流れのある配管内の腐食を精度良くシミュレーションできるか考察を行った。更に，これらの解析をアダプティブに行うために，階層メッシュを用いた手法も開発した。

(f) 本田技術研究所との連携
本田技術研究所から，「ヘッドライト損傷解析手法の確立」と「永久変形量予測技術の開発」を依頼された。従来は，衝突解析ソルバーRADIOSSを用いることによって，これらの解析していた。しかし，より詳細で正確な解析を求めたいという要望からRADIOSSにプリポスト処理を加えることによって，これらの問題を解決する。「ヘッドライト損傷解析手法の確立」に対しては，アダプティブな亀裂進展解析の機能を，「永久変形量予測技術の開発」に対しては，アダプティブな永久解析の機能を加えることになる。これらの機能を加えることによって，超大型の並列計算機や専用のソルバーで長時間かかった解析を，これまでと同じ計算機環境で一晩あれば解析できるようになる。

(g) インテグラル・テクノロジー株式会社との連携
本連携は，「オーサリング機能をもつCAEソフトウェアの販売・カスタマイズ事業」という題目で，経済産業省近畿経済産業局の新連携支援事業の審査を受け通過した事業である。連携の仕組みは，インテグラル・テクノロジー株式会社をコア企業，エンジニアス・ジャパン株式会社を連携企業，東洋大学計算力学センターとアルテアエンジニアリング株式会社を外部支援団体としている。当センターは，有限要素法の計算精度を保持したままメッシュの数を減らす技術を提供する形で協力した。

15 「選定時」及び「中間評価時」に付された留意事項及び対応

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

＜「選定時」に付された留意事項＞
なし

＜「選定時」に付された留意事項への対応＞
なし

＜「中間評価時」に付された留意事項＞
成果発表を活発にすること，グループごとの成果は出ているので，グループ間の連携および外部との連携を考慮することが指摘された。

＜「中間評価時」に付された留意事項への対応＞
成果発表に関しては，13にあるように，57 件の投稿論文，251 件の学会発表，18 件のオーガナイズドセッション／フォーラム／シンポジウムの他，全体をまとめた英文書籍を発刊予定である。また，グループ間の連携にも留意して，当初の3つの目的に沿って研究を進めた他，今後の展望も見据え，中間評価後に，新たにドイツのゲーテ大学フランクフルト校や東京大学農学部などと共同研究を始めている。

2. 若手研究者の育成状況

東洋大学計算力学研究センターでは，従前よりプロジェクト研究の推進と共に，学生や若手研究者の育成にも努めてきている。

・博士研究員

下記は，研究助手および研究支援者として本プロジェクトに参加した者である。

- 小林陽介　博士（工学）（東洋大学）　2012 年度
- 谷村景貴　博士（理学）（首都大学東京）2015, 2016 年度
- 長岡慎介　博士（工学）（東洋大学）　2012～2016 年度
- 増田正人　博士（工学）（東洋大学）　2012～2016 年度

・学生

5 年間のプロジェクトで，アルバイトおよび RA（Research Assistant）として活動した者は以下の通りである。

学部生：7 名

研究生：1 名

博士前期課程：8 名

博士後期課程：4 名

・学位取得者

増田正人，半径並列モジュラーネットワーク型自己組織化マップに関する研究，東洋大学大学院工学研究科博士論文，2012 年 9 月.

崎原康平，付帯条件付き多次元型移動最小自乗法の固体問題への適用性に関する研究，東洋大学大学院工学研究科博士論文，2013 年 3 月.

鶴見伸夫，気液二流体中を伝播する集束超音波の数値解析，東洋大学大学院工学研究科博士論文，2013 年 3 月.

・国際学生ワークショップ

都合 5 回開催した。次頁以降にそのプログラムを示す。

Lunghwa University – Toyo University
Joint Student Workshop on Computational Mechanics

Date February 25, 2013
Venue Lunghwa University of Science and Technology, Taiwan

Program

9:30 - 9:40	Opening Address	Prof. Kuen Ting, Lunghwa University, Taiwan
9:40-12:00	Session 1 (20min x 7)	
12:00-13:30	Lunch Break	
13:30-16:10	Session 2 (20min x 8)	
16:10-16:20	Closing Remarks	Prof. Genki Yagawa, Toyo University, Japan

Session 1

"Numerical Simulations of Focused Ultrasound in Water with Micro Bubbles"
Nobuo Tsurumi, Graduate Student, Toyo University

"Development of the efficient analysis and optimization technology for pressure vessels"
Siyang Li, Graduate Student, Toyo University

"Structural optimum design of fractal structures"
Masahiko Shimamura, Graduate Student, Toyo University

"Numerical Simulation of a Single Bubble Collapse"
Tomoki Matsuo, Graduate Student, Toyo University

"The measurements of nanomechanical properties with temperature dependence by nanoindenation and atomic force microscopy"
C. S. Wu, Graduate Student, Lunghwa University

"The statistical analysis of hand vanscular blood perfusion due to electromagnetic interference using Doppler's flow image instrument"
J. C. Yeh, Graduate Student, Lunghwa University

“The cooupled thermal-mechanical analysis of contact problems in nanoindentation”
C.H. Huang, PH.D. student of National Chung Hsing University

Session 2

“Parallel EFMM for Fluid-Structure Coupled Problem”
Shinsuke Nagaoka, Postdoctoral Researcher, Toyo University

“Fluid Analysis of Moving Boundary using ALE Method”
Masato Masuda, Postdoctoral Researcher, Toyo University

“Development of Structural Eigenvalue Analysis Module for the ADVENTURE System”
Itaru Ishikawa, Postdoctoral Researcher, Toyo University

“Automated 3D Crack Propagation Analysis”
Yosuke Kobayashi, Postdoctoral Researcher, Toyo University

“Large Scale Heat Conduction Analysis using Efficient Domain Decomposition Approach”
Abul Mukid Mohammad Mukaddes, Postdoctoral Researcher, Toyo University

“The bioheat transfer analsis of laser surgery”
Y.L. Su, PH.D. student of National Chung Hsing University

“The structural integrity of tube support plate with thousands of holes in steam generator”
S.R. Lin, PH.D. student of National Taiwan University

“The electromagnetic and fluid analysis in MOCVD plasma simulation”
C.S. Chang, Post Doctor Researcher, National Central University

The 1st LHU-SKKU-TU Joint Student Workshop on Nano and Computational Mechanics

organized by

Nanomechanics Laboratory, Lunghwa University of Science and Technology, Taiwan

Mechanical Engineering, Sungkyun Kwan University, Korea

Center for Computational Mechanics Research, Toyo University, Japan

Date Friday, September 6th, 2013

Venue "Skyhall", The 16th floor of Building 2, Hakusan-Campus, Toyo University

Address 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606, Japan

Program

10:00-10:10	Opening Address	Prof. Genki Yagawa, Toyo University, Japan
10:10-12:10	Session 1	(40min x 3)
12:10-13:30	Lunch Break	
13:30-15:30	Session 2	(15min x 8)
15:45-17:30	Session 3	(15min x 7)
17:30-17:40	Closing Remarks	TBD
18:00-20:00	Reception	

Session 1 (10:10-12:10)

"Eco-system design to create a new market for Neo-Smart-Human"
Prof. Jae Boong Choi, Sungkyunkwan University, Korea

"Nano & Bio Applications of a Mass-weighted Chemical Elastic Network Model"
Prof. Moon Ki Kim, Sungkyunkwan University, Korea

"Introduction of CCMR and Some Research Topics"
Prof. Yoshiaki Tamura, Toyo University, Japan

Session 2 (13:30-15:30)

"Estimation of C*-Integral for Slanted Circumferential Through-wall Cracked Pipies using 3D FE Analyses"
Min Koo Won, Graduate Student, Sungkyunkwan University, Korea

"Development of Skin Moisture Meter with Earphone Communication"
Kyoung Pyo Hong, Graduate Student, Sungkyunkwan University, Korea

"Estimation of Thermal Fatigue Life with FEM Considering the Bond Strength and Experiment Conditions"
Jang Gyun Lim, Graduate Student, Sungkyunkwan University, Korea

"Understanding of G Protein Signal Mechanism Based on Its Conformational Change"
Young Jin Kim, Graduate Student, Sungkyunkwan University, Korea

"Parallelization of Developing Structural Eigenvalue Analysis Module of the ADVENTURE System"
Itaru Ishikawa, Postdoctoral Fellow, Toyo University, Japan

"Evaluation of Effectiveness and Efficiency of Parallel EFMM"
Shinsuke Nagaoka, Postdoctoral Fellow, Toyo University, Japan

"Classification of Vibration Phenomena using Self-Organizing Map"
Masato Masuda, Postdoctoral Fellow, Toyo University, Japan

"Stochastic Global Optimization"
Satoru Takashimizu, Graduate Student, Toyo University, Japan

Session 3 (15:45-17:30)

"Combining Finite Element Method and Nanoindentation Measurement to Indenfy the Elasoplastic Behavior of Metal Thin Film"
Chin Hsing Wu, Graduate Student, National Taiwan University of Science and Technology, Taiwan

"To Optimize the Laser Surgery Process using Mathematical Response Surface Method"
Yun Liang Su, PhD. Candidate, National Chungshing Universtiy, Taiwan

"Studies on the Nanomechanical Properties of Humain Hair by Nanoindentation"
Hsiu Ming Chang, Undergraduate Student, Lunghwa University, Taiwan

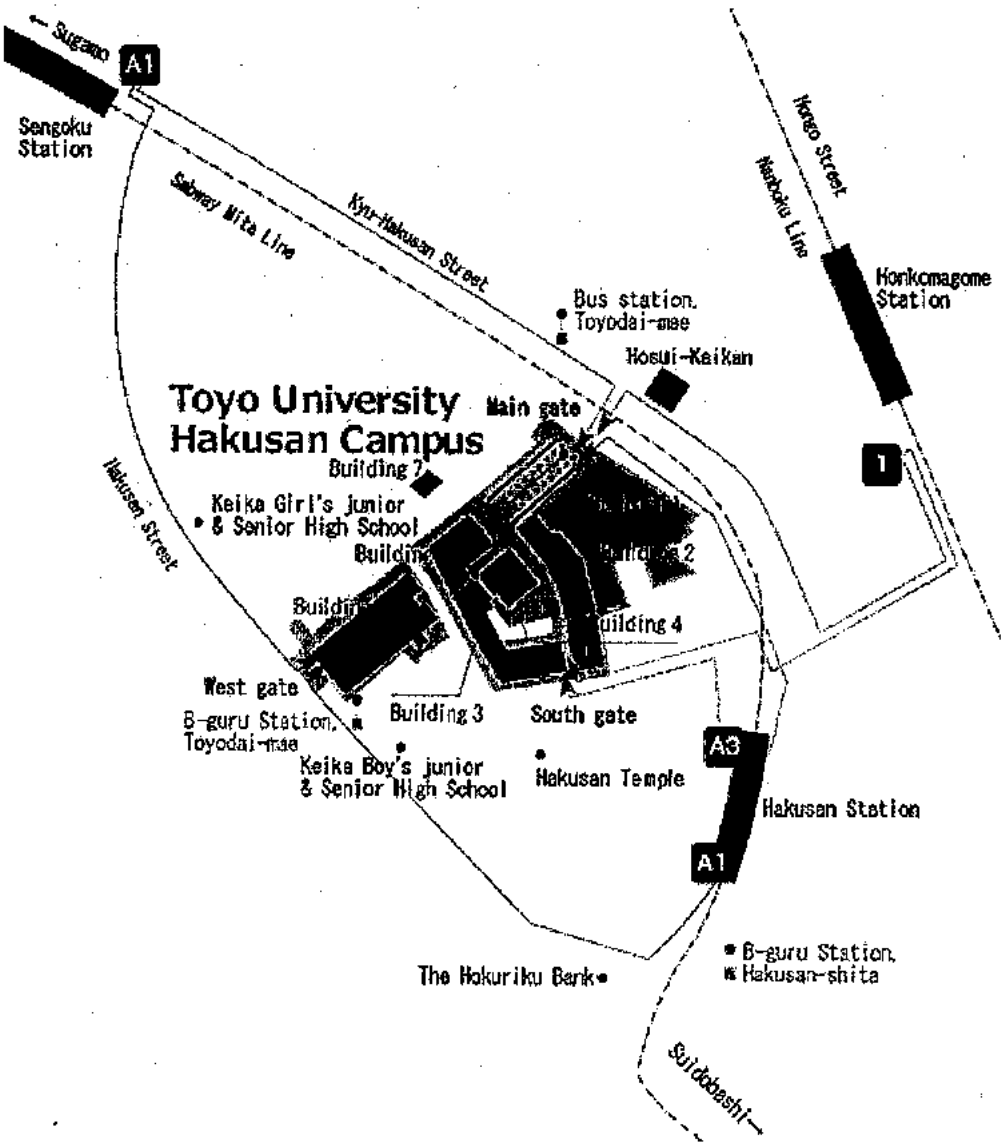
"Studies on the Nanomechanical Properties of Biotissue by Nanoindentation"
Chin Chien Hung, Undergraduate Student, Lunghwa University, Taiwan

"Stractural Optimum Design of Fractal Stractures"
Masahiko Shimamura, Graduate Student, Toyo University, Japan

"Numerical Simulation of a Single Cavitation Bubble Collapse"
Tomoki Matsuo, Graduate Student, Toyo University, Japan

"Towards the Optimization of Vertical Axis Wind Turbine"
Satoshi Nagao, Graduate Student, Toyo University, Japan

Hakusan Campus, Toyo Universiy



Address : 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606

Public Transportation

- Metropolitan Mita Line · 5 minutes from "Hakusan Station", or 8 minutes from "Sengoku Station"
- Tokyo Metro Namboku Line · 5 minutes from "Hon Komagome Station"

October 9th 2014

Mechanical Engineering Seminar 2015

(MES2015)

March 24th – 27th, 2015

Tokyo University of Science, Suwa, Japan

Dear colleagues

After the success of the 2nd Student Seminar on Mechanical Engineering (SSME2013) held at Howard Beach Resort, Kenting, Taiwan in 2013, we are pleased to announce that Mechanical Engineering Seminar 2015 (MES2015) will be held at Tokyo University of Science, Suwa, Japan during March 24th – 27th, 2015. Suwa is a nice place for enjoying beautiful nature and classical Japanese traditions.

The purpose of the seminar is to share those of our research experiences and knowledge in regard to the new development and application of applied mechanics and mechanical engineering technologies. In addition, it is important to enhance friendship among students in Asian areas.

We would like to ask you and your students to present their recent research progresses and results in the seminar. If you have any questions, please feel free to contact us anytime.

We are looking forward to seeing you in Suwa, and enjoying beautiful nature of Suwa area with you.

With best regards,

Akiyuki Takahashi
Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Science and Technology,
Tokyo University of Science
e-mail: takahash@rs.noda.tus.ac.jp

Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015
Program

Seminar Location

Location: Bulding #6, 2nd floor, Lecture Hall, Tokyo University of Science Suwa
http://www.suwa.tus.ac.jp/about/campusguide/

Opening Ceremony

March 25th **Wednesday**

09:00 – 09:20	Openning Ceremony

Oral Presentations:

March 25th **Wednesday**

Session 1 (4) Chairperson: **Mamtimin Geni** (Xinjiang University, China)

Time	Presentation
09:20 – 09:40	**Investigation on Fatigue Crack Propagation Behaviour in Plate with Multiple Discontinuities using XFEM** *Yixiu Shu, Yazhi Li*
09:40 – 10:00	**Development of Elastic Crack Opening Displacement Solutions for Circumferential Through-wall Cracks in Thin Elbows** *Min-Kyu Kim, Han-Bum Surh, Min-Gu Won, Moon Ki Kim, Nam-Su Huh, Jae-Boong Choi*
10:00 – 10:20	**Dislocation Dynamics Study on Influence of Elastic Anisotropy in Polycrystal Plastic Deformation** *Yuya Suzuki, Akiyuki Takahashi*
10:20 – 10:40	**(TBD)** *Yong-Teng Zheng, Kuen Ting*

10:40 – 11:00	Coffee break

Session 2 (3) Chairperson: **Yoshiaki Tamura** (Toyo University, Japan)

Time	Presentation
11:00 – 11:20	**Large Scale Fluid Structure Interaction Simulation with Smoothed Particle Hydrodynamics on Multi-core and -GPU Systems** *Zhe Ji, Fei Xu, Akiyuki Takahashi*
11:20 – 11:40	**Large-scaled Simulation on the Mixing Mechanism of Film Cooling based on Hybrid Thermal Lattice Boltzmann Method** *Shangguan Yanqin*
11:40 – 12:00	**Simulation of Droplet Impacting onto Elastic Solid with the SPH Method** *Yinan Bie, Xiao-Jing Ma, Mamtimin Geni*

12:00 – 13:00	Lunch

Session 3 (5) Chairperson: **Moon Ki Kim** (Sungkyunkwan University, Korea)

Time	Presentation
13:00 – 13:20	**Experimental Observation of the Skeletal Adaptive Repair Mechanism and Bionic Topology Optimization Method by using Cross-Type Reaction-Diffusion** *Kaysar Rahman, Mamtimin Geni*
13:20 – 13:40	**Molecular Dynamics Modeling of Mixed Dislocations in BCC Metals** *Kazuki Takahashi, Akiyuki Takahashi, Akiyoshi Nomoto*
13:40 – 14:00	**Study on Band Structures of Layered Phononic Crystals with Flexoelectricity** *Wenjun Yang*
14:00 – 14:20	**(TBD)** *Li-Hsuan Kung, Kuen Ting*
14:20 – 14:40	**The Influence of Oxidation Parameters on Stress Development at the Phase Transformation Zone in Thermal Barrier Coatings** *CHAI Yi-jun, LIN Chen, LI Yue-ming*

14:40 – 15:00	Coffee break

Session 4 (4) Chairperson: **Kuen Ting** (Lunghwa University of Science and Technology, Taiwan)

Time	Presentation
15:00 – 15:20	**In-situ Observation of Fracture and Failure Behavior in Thermal Barrier Coatings under Three-point Bending** *Peng Jiang, Xueling Fan, Dingjun Li, Tiejun Wang, Yacong Wu*
15:20 – 15:40	**Analytical Study on Small Punch Creep Test for Creep Life Prediction** *Taeksang Lee, Jae Boong Choi, Moon Ki Kim*
15:40 – 16:00	**Compressive Response of Short Nomex Honeycomb** *Wei Feng, Fei Xu, Xiangyang Gao*
16:00 – 16:20	**Study of Pressure Characteristics of Sealing Pair Oil-Film for Bellows Mechanical Seal** *Ning Li, Mutellip Ahmat, Guangpeng Wang*

March 26th Thursday

Session 5 (4) Chairperson: **Shenping Shen** (Xi'an Jiaotong University, China)

Time	Presentation
09:00 – 09:20	**Material Strength Changes due to Spinodal Decomposition in Fe-Cr Ferric Steels** *Takuya Suzuki, Akiyuki Takahashi, Akiyoshi Nomoto*
09:20 – 09:40	**Normal Mode Guided Elastic Network Interpolation (NGENI) for Prediction of Conformational Pathway in Proteins** *Byungho Lee, Jae Boong Choi, Moon Ki Kim*
09:40 – 10:00	**(TBD)** *Yun-Liaug Su, Kuen Ting*
10:00 – 10:20	**Theoretical Prediction of Failure Envelopes for Composite Laminates including Nonlinear and In-situ Effect** *Biao Li, Yazhi Li*

10:20 – 10:40	Coffee break

Session 6 (4) Chairperson: **Fei Xu** (Northwestern Polytechnical University, China)

Time	Presentation
10:40 – 11:00	**Development of Efficient and Accurate Analysis Method for Cardboards** *Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa*
11:00 – 11:20	**Numerical Modeling and Simulation of Wind Blown Sand Morphology under Complex Wind-Flow Field** *Mawsude Muhtar, Mardan Wali, Xamxinur Abdikerem, LeiWang, Afang Jin, Muhtar Sadir and Mamtimin Geni*
11:20 – 11:40	**Development of Improved Integrity Assessment Standard Containing Axial and Circumferential Multiple Through-wall Cracks** *Jin Won Hong, Jae Boong Choi, Moon Ki Kim*
11:40 – 12:00	**(TBD)** *Chin-Hsing Wu, Kuen Ting*

Poster Presentations:

3-minute presentation at Lunch time on March 25th.

Poster presentation during coffee break and lunch time

Order	Presentation
1	**Flexoelectric Effects in Three-dimensional Eshelby's Nano-inclusion Problem** *Shasha Yang, Shengping Shen*
2	**SPH Numerical Simulation of Impact and Take-off of Sand Particles in Flat Bed** *Jin A Fang, Maimtmin Geni*
3	**Research on Mechanical Characteristics of the Oblique Arch Roof in Turpan Traditional Houses** *Abulikemu Touheti, Sawulet Bekey, Mutailipu Ruzeaiti, Aierken Haimudula*
4	**Stress analysis multibody contact problem based on SPH Method** *Muhtar Kerim, Rahmatjan Imin, Azhar Halik, Mamtimin Geni*
5	**Numerical Simulations and Dynamic Contact Behavior Analysis of Ball Bearing Lubrication System by Adopting FEM and SPH Coupling Method** *Yue WU, Mamtimin Geni*

Cardiff University - Toyo University Joint Student Workshop

Data: Monday 22 and Tuesday 23, February 2016
Venue: Queen's Buildings, Cardiff University (room to be determined)

Program

Session 1 (Monday 22, 10:00-12:00)

Opening Address	Prof.Yasushi Nakabayashi	Toyo University
Special Lecture	Prof. Yoshiaki Tamura	Toyo University
Student Speaker 1	Atheel Jameel	Cardiff University
Student Speaker 2	Hongjie Zheng	Toyo University
Student Speaker 3	A. Mohanmad	Cardiff University
Student Speaker 4	Masahiko Shimamura	Toyo University

Session 1 (Monday 22, 14:00-16:00)

Special Lecture	Prof. Feng Xiao	Tokyo Institute of Technology
Student Speaker 5	Satoshi Koshiyama	Toyo University
Student Speaker 6	Syazana Omar	Cardiff University
Student Speaker 7	Shuhei Watanabe	Toyo University
Student Speaker 8	Li Qijie	Cardiff University

Session 3 (Tuesday 23, 10:00-12:00)

Special Lecture	Prof. Kensuke Yokoi	Cardiff University
Student Speaker 9	A. Noguchi and T. Mori	Toyo University
Student Speaker 10	Alex	Cardiff University
Student Speaker 11	T. Matsuzawa and M. Ota	Toyo University
Student Speaker 12	Deng	Tokyo Institute of Technology
Closing Remarks	Prof. Ryuji Shioya	Toyo University

4 Universities Joint Student Workshop

Lunghwa University of Science and Technology
Tokyo University of Science
Kindai University
Toyo University

Data: Thursday 1st, Friday 2nd and Saturday 3rd, December 2016
Venue: Lunghwa University of Science and Technology (room to be determined)

Program

Session 1 (Thursday 1st, 10:00-12:00)		
Opening Address	Prof. Kuen Ting	Lunghwa University
Special Lecture	Prof. Masanori Kikuchi	Tokyo University of Science
Student Speaker 1	Keishi Kumamoto	Kindai University
Student Speaker 2	Yun-Liaug Su	Lunghwa University
Session 2 (Thursday 1st, 14:00-16:00)		
Special Lecture	Prof. Yasushi Nakabayashi	Toyo University
Student Speaker 3	Shuhei Watanabe	Toyo University
Student Speaker 4	Chin-Hsing Wu	Lunghwa University
Student Speaker 5	Kensuke Yagi	Toyo University
Session 3 (Friday 2nd, 10:00-12:00)		
Special Lecture	Prof. Yoshitaka Wada	Kindai University
Student Speaker 6	Yang Kui	Tokyo University of Science
Student Speaker 7	Li-Hsuan Kung	Lunghwa University
Session 4 (Friday 2nd, 14:00-16:00)		
Special Lecture	Prof. Akiyuki Takahashi	Tokyo University of Science
Student Speaker 8	Hiromi Sekiguchi	Toyo University
Student Speaker 9	Chih-Cheng Wei	Lunghwa University
Student Speaker 10	Risa Ito	Toyo University
Session 5 (Saturday 3rd, 10:00-12:00)		
Special Lecture	Prof. Ryuji Shioya	Toyo University
Student Speaker 11	Satoshi Koshiyama	Toyo University
Student Speaker 12	You-Ting Chou	Lunghwa University
Closing Remarks	Prof. Masanori Kikuchi	Tokyo University of Science

3. 外部評価委員会報告

各年度末に，以下の日程で外部評価委員会を開催した。

第１回委員会
日時：平成 25 年 3 月 27 日 15:00-17:00
場所：東洋大学白山第２キャンパス D 棟計算力学研究センター１F 会議室

第２回委員会
日時：平成 26 年 3 月 18 日(火)10:00-12:00
場所：東洋大学川越キャンパス福利厚生棟特別会議室

第３回委員会
日時：平成 27 年 3 月 14 日 14:00-16:00
場所：東洋大学白山キャンパス 5 号館１階 5102 教室

第４回委員会
日時：平成 27 年 3 月 9 日（水）14:00-16:30
場所：東洋大学白山キャンパス５号館１階 5102 教室

第５回委員会
日時：平成 29 年 3 月 6 日（月）14:00-16:30
場所：東洋大学川越キャンパス４号館４階第２会議室

センター長ならびに研究員より各年度の研究成果や活動状況を報告したのち，各委員に評価をいただいた。
次頁以下に，各回の外部評価票を添付する。

平成 24 年度外部評価委員会外部評価票

外部評価委員：
萩原　一郎（明治大学研究・知財戦略機構）
松本洋一郎（東京大学副学長）
神田　雄一（東洋大学副学長）
吉田　泰彦（東洋大学理工学部長）

評価票

評価委員御氏名 吉田泰彦

1．センターの運営・研究体制は適当か
☑ 適当　□ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

2．研究費の使い方は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

3．センターの目標は適当か
☑ 適当　□ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】
今後，東日本大震災による汚染土壌除去に関して，何らかの貢献はできないのでしょうか？

4．研究経過の科学的・技術的インパクトはどうか
□ 高い　■ 比較的高い　□ 普通　□ やや低い　□ 低い
【ご意見があれば】

5．今後、研究成果が期待できるか
□ 期待できる　■ 比較的期待できる　□ 普通　□ あまり期待できない　□ 期待できない
【ご意見があれば】

6．その他、特記すべき事項

7．総合評価
研究成果，特に論文成果においては研究員の中での片寄りが見られる。しかし，概ね，研究およびその成果については評価できる。

評価票

評価委員御氏名 神田 雄一

1．センターの運営・研究体制は適当か
□ 適当　□ 比較的適当　☑ 普通　☑ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】
テーマ数、内容等より多様な形態をとっているので体制をしっかり構築した方が良い。人員等配慮する必要がある。プロジェクトマネジメント手法を導入してはどうか。

2．研究費の使い方は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】
・おおむね適当と判断する。

3．センターの目標は適当か
□ 適当　□ 比較的適当　☑ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】
3点挙げているが一番大きな目標は何なのか、名確にした方が良い。

4．研究経過の科学的・技術的インパクトはどうか
□ 高い　☑ 比較的高い　□ 普通　□ やや低い　□ 低い
【ご意見があれば】
本活動は初年度であるが、従来からの継続を考慮すれば高いインパクトと評価できる。

5．今後、研究成果が期待できるか
☑ 期待できる　□ 比較的期待できる　□ 普通　□ あまり期待できない　□ 期待できない
【ご意見があれば】
将来的には社会的課題（例えば環境問題、ものづくり等）への進展が出来ると望ましい。

6．その他、特記すべき事項
・プロジェクト体制を整える必要性を感じる。
・産学連携についても配慮して欲しい。
・ステークホルダーへのPR、広く研究紹介をして欲しい。
・海外大学との連携強化を期待
→留学生、交換研究員等の増大

7．総合評価
初年度であり、また場所等の外的要因もあり充分な環境（研究）では方かったと理解するが、一応の成果は認められるので次年度以降に期待が大きくなる。
是非、世界の頂点を目指して欲しい。
"学制生"の意味を明確にすると一層理解が得られると感じた。

評価票

評価委員御氏名 萩原一郎

1．センターの運営・研究体制は適当か

☒ 適当　☐ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

構造・流体 それぞれにエクスパートがいて
バランスがとれている。 博士コースの学生もおり
かなりすぐれている

2．研究費の使い方は適当か

☒ 適当　☐ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

人件費，機器バランスがとれている。
旅費が多いのはそれだけ活発な活動をされているからであろう

3．センターの目標は適当か

☐ 適当　☒ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

目標が時機を得たものであるから，目の予算がとれている
今後取り続けるためには さらに先の目標を
明確にされた方が良い

4．研究経過の科学的・技術的インパクトはどうか

☒ 高い　☐ 比較的高い　☐ 普通　☐ やや低い　☐ 低い

【ご意見があれば】

Creatがとれているのは大きい。 ~~[illegible]~~ も，より迫力のある説明を
心がけた方が良い
EFMM（当研究員開発のと
概言葉をつけるとか）

5．今後、研究成果が期待できるか

☒ 期待できる　☐ 比較的期待できる　☐ 普通　☐ あまり期待できない　☐ 期待できない

【ご意見があれば】

Creatなど中心に大きな成果が期待できる
計算と実験の両方をやっているのは心強い
実験より計算の方が精度の良い場合もあることを念頭に入れてもらいたい

6．その他、特記すべき事項

H24年度・評価実験回はまさに構造・連成のものであり 精度・安全性
グループもこれを例にすると
よいと考えられる

計算力学センターは，日本には，本学だけと思われる
日本をけん引するようがんばって頂きたい。学内との協力，学外との協力を
より進めることにより連大できると思われる。

7．総合評価

本学はナノが強く そことのコラボ，また東北大学の
数学の材料への応用などよく行って頂きたい。
材料

上記のように
大変良い評価とできる。自信を持って進んでいって
もらいたい。

評価票

評価委員御氏名 松本洋一郎

1．センターの運営・研究体制は適当か
□ 適当 ☑ 比較的適当 □ 普通 □ やや不適当 □ 不適当
【ご意見があれば】

センター長を中心に適切な体制がとられている。

2．研究費の使い方は適当か
☑ 適当 □ 比較的適当 □ 普通 □ やや不適当 □ 不適当
【ご意見があれば】

3．センターの目標は適当か
□ 適当 ☑ 比較的適当 □ 普通 □ やや不適当 □ 不適当
【ご意見があれば】

流体－構造連成解析の高度化は重要である。

4．研究経過の科学的・技術的インパクトはどうか
□ 高い ☑ 比較的高い □ 普通 □ やや低い □ 低い
【ご意見があれば】

精度検証に当っては，境界条件等不確実な要素が適切に考慮し得る手法の開発が必要と思われる。

5．今後、研究成果が期待できるか
☑ 期待できる □ 比較的期待できる □ 普通 □ あまり期待できない □ 期待できない
【ご意見があれば】

完全な対策が出ている訳ではないがその方向性は妥当であり期待したい。

6．その他、特記すべき事項

7．総合評価

大規模高精度流体－構造連成解析手法の開発を目標とした
センターは時代の要請に合ったもので，他機関との連携を含めて
発展することを期待したい。

平成 25 年度外部評価委員会外部評価票

外部評価委員：
萩原　一郎（明治大学研究・知財戦略機構）
松本洋一郎（東京大学副学長）
神田　雄一（東洋大学副学長）
吉田　泰彦（東洋大学理工学部長）

評価票

評価委員御氏名 松本洋一郎

1．センターの運営・研究体制は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

センター長のリーダーシップによってより強力な研究体制の構築が望まれる

2．研究費の使い方は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

適切な機器の導入が図られており，活動の強化が期待される

3．センターの目標は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

より明確な目標設定があってもよいのではないか

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか
□ 高い　□ 比較的高い　☑ 普通　□ やや低い　□ 低い
【ご意見があれば】

流体・構造連成は重要なテーマであり，テーマを絞って発信したほうがよりインパクトがあるのではないか．

5．今後、研究成果が期待できるか
□ 期待できる　☑ 比較的期待できる　□ 普通　□ あまり期待できない　□ 期待できない
【ご意見があれば】

目標を絞り込んでより分かりやすくする事により研究成果が期待されると思われる．

6．その他、特記すべき事項

7．総合評価

運営の努力は認めたいと思うが，各テーマ統一感が出ておらずポテンシャル的には発信が弱いように思われる．より明確なテーマ設定と絞り込みによりインパクトのある成果に期待したい．

評価票

評価委員御氏名 萩原一郎

1．センターの運営・研究体制は適当か

☑ 適当　☐ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

口答発表，フォーラムなども積極的に行われており
センター長のリーダーシップも評価できる

2．研究費の使い方は適当か

☑ 適当　☐ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

人件費，出張費，設備費などバランスがとれている。

3．センターの目標は適当か

☐ 適当　☑ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

第1の連成解析の目標，何を解しうとしているのか
より明確にするのが良いと感じた。

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い　☑ 比較的高い　☐ 普通　☐ やや低い　☐ 低い

【ご意見があれば】

口答発表は十分なされている。これを正式論文とすることに
より更にインパクトが向上する。

5．今後、研究成果が期待できるか

☑ 期待できる　☐ 比較的期待できる　☐ 普通　☐ あまり期待できない　☐ 期待できない

【ご意見があれば】

構造－音場連成解析も EFMMでとり組むなど
今後の展開に大いに期待できる。

6．その他、特記すべき事項

国際会議の主催や 関連の国際・国内会議で
積極的に OS等を設けている。

7．総合評価

それぞれの目標をより明確にすること。
マルチフィジクス、マルチスケールの課題にも積極的に
チャレンジする，（例えば タイヤ，段ボールの解析をする時
マルチスケール、マルチフィジクスの問題として
を考える等）

このようなことをすることにより
更に センターとしての機能が向上すると思われる

評価票

評価委員御氏名 吉田泰彦

1．センターの運営・研究体制は適当か
□ 適当　□ 比較的適当　■ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

2．研究費の使い方は適当か
□ 適当　□ 比較的適当　■ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

3．センターの目標は適当か
□ 適当　□ 比較的適当　■ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか
□ 高い　□ 比較的高い　■ 普通　□ やや低い　□ 低い
【ご意見があれば】 外部の方に，わかりやすい説明・広報。

5．今後、研究成果が期待できるか
□ 期待できる　■ 比較的期待できる　□ 普通　□ あまり期待できない　□ 期待できない
【ご意見があれば】

6．その他、特記すべき事項

7．総合評価
- 広報・説明：分野外の人にも、目的等がわかるような説明が必要。
- 研究員・若手学生の育成

一般的に，外部にわかりやすい説明・広報にはなっていないので，その点を検討することが必要である。
また，若手の人材の育成のため，管理システムの強化・見直し，若手への教育が不足しているようである。
概ね，研究としては順調に進行しており，各グループ間の連携を(こうに)密になることを希望する。

評価票

評価委員御氏名　神田雄一

1．センターの運営・研究体制は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

概ね体制は適切と判断する。

2．研究費の使い方は適当か
☑ 適当　□ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

適切と判断する。

3．センターの目標は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

プロジェクトの目標は適切と考えるが，センターの目標として具体的な研究成果の目標~~まで~~も明示されると良いと感ずる。

4．研究経過の科学的・技術的インパクトはどうか
□ 高い　☑ 比較的高い　□ 普通　□ やや低い　□ 低い
【ご意見があれば】

基礎的な分野と応用分野の領域において幅広く成果を出していることは評価できる。

5．今後、研究成果が期待できるか
☑ 期待できる　□ 比較的期待できる　□ 普通　□ あまり期待できない　□ 期待できない
【ご意見があれば】

基礎的な部分が多いと思われるが，これをベースとして応用分野への展開を大いに期待したい。

6．その他、特記すべき事項

- 海外との共同研究等も進展しているので継続して欲しい
- 研究のロードマップを作成したことは研究の明示性から良い。

7．総合評価

- 産学連携の推進，センターのPRを積極的に展開されることを希望する。
成果を期待しております。

平成 26 年度外部評価委員会外部評価票

外部評価委員：
萩原　一郎（明治大学研究・知財戦略機構）
松本洋一郎（東京大学副学長）
神田　雄一（東洋大学副学長）
吉田　泰彦（東洋大学理工学部長）都合により欠席

評価票

評価委員御氏名 松本洋一郎

1．センターの運営・研究体制は適当か
□ 適当 ☑ 比較的適当 □ 普通 □ やや不適当 □ 不適当
【ご意見があれば】

所定のより明確なアウトカムの設定が必要である。

2．研究費の使い方は適当か
☑ 適当 □ 比較的適当 □ 普通 □ やや不適当 □ 不適当
【ご意見があれば】

適切な投資が導されていつ結果に期待したい

3．センターの目標は適当か
□ 適当 ☑ 比較的適当 □ 普通 □ やや不適当 □ 不適当
【ご意見があれば】

適切と判断される。よりインパクトの高い課題の選定もあるのではないか

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか
□ 高い ☑ 比較的高い □ 普通 □ やや低い □ 低い
【ご意見があれば】

目標に大規模化を取り上げるのは適切である。アルゴリズムとアーキテクチャの連携も重要かもしれない

5．今後、研究成果が期待できるか
□ 期待できる ☑ 比較的期待できる □ 普通 □ あまり期待できない □ 期待できない
【ご意見があれば】

目標を明確化しつつ成果に期待したい。

6．その他、特記すべき事項

他組織との積極的な連携も必要と考えられる。

7．総合評価

より社会，産業界にインパクトの高いテーマに絞って広報活動を強化するなど強力な発信が期待される。

評価票

評価委員御氏名　萩原一郎

1．センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当　☑ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

非常に興味深い課題を設定している。未だどこでもなされていない。
構造一流体連成の実験とシミュレーションで対応させようとしている。

2．研究費の使い方は適当か

☑ 適当　☐ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

人件費，出張費，設備費などバランスがとれている

3．センターの目標は適当か

☐ 適当　☑ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

グンボル構造体の異方性を、均質化法で特定し、
それをもとに、標準問題を設定し、本分野への貢献を目指している
新しい解析法，実験法にもとりくまれている

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い　☑ 比較的高い　☐ 普通　☐ やや低い　☐ 低い

【ご意見があれば】

広報をもう少し、やる必要がある。例えば、各課題で、社会インパクトを
具体的に示す必要がある。このようなインパクトを与えるためにこのようなことを
するという説明が欲しい。

5．今後、研究成果が期待できるか

☑ 期待できる　☐ 比較的期待できる　☐ 普通　☐ あまり期待できない　☐ 期待できない

【ご意見があれば】

構造法は連成解析をセンター間各のEFMMで
とり組んでいる。これが成功すればインパクトがある。
若い人~~をより~~には ~~[illegible]~~ 彼らの業績に手かせるところと
目標を明確に与える
両方のアプローチで
進めると更に良い。

6．その他、特記すべき事項

国際会議の主催や関連の国内会議で
積極的にOS等を設けている

7．総合評価

適当である。計算科学の世界の動きをとらえ
研究を進めている。

広報をより明確に積極的にやって行く
と更にすぐれたものとなる

目標を明確にする。例えば～をすれば これらの方面を連携が
進むなど。

ホームページなど充実させる

評価票

評価委員御氏名　神田雄一

1．センターの運営・研究体制は適当か
□ 適当　□ 比較的適当　☑ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

✓ 研究プロジェクトのPDCAサイクルをしっかり廻わす必要がある
✓ 自己点検評価を行ってはどうか。 ~~(具体的)~~

2．研究費の使い方は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

妥当と考える。

3．センターの目標は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

目標を各グループで共有すること大事。(具体的成果の明示)

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか
□ 高い　☑ 比較的高い　□ 普通　□ やや低い　□ 低い
【ご意見があれば】

専門的には ~~[illegible]~~ (正しく) 評価出来ないが、広報をもっとやる必要性を感じる

5．今後、研究成果が期待できるか
□ 期待できる　☑ 比較的期待できる　□ 普通　□ あまり期待できない　□ 期待できない
【ご意見があれば】

今後の環境問題、学際的課題へのアプローチに期待したい
(工学・社会科学への適用も含めて)

6．その他、特記すべき事項

✓ 目標である若手育成への対応どうするか？
✓ 教育への展開を考えて欲しい。

7．総合評価

✓ スーパーグローバル大学の関連で留学生も含めて是非かかわって欲しい。
✓ 産学連携の推進をもっと出来ないか？ → 社会的成果・評価に結びつく。
✓ センターの成果の広報をもっと積極的に実施して欲しい！

平成 27 年度外部評価委員会外部評価票

外部評価委員：
萩原　一郎（明治大学研究・知財戦略機構）
松本洋一郎（理化学研究所理事）
神田　雄一（東洋大学副学長）
寺田　信幸（東洋大学理工学部長）

評価票

評価委員御氏名 萩原一郎

1．センターの運営・研究体制は適当か

□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当

【ご意見があれば】

Crestもやっているのだから、もっと多くのPDをやとえるのではないでしょうか。実験グループと解析グループの良いコラボができている。海外との連携による効果がよく分からない。

2．研究費の使い方は適当か

☑ 適当　□ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当

【ご意見があれば】

やはり人件費が一番必要になると思う

次に旅費

3．センターの目標は適当か

□ 適当　□ 比較的適当　☑ 普通　□ やや不適当　□ 不適当

【ご意見があれば】

明確な目標が必ずしもない。

(構造一流体連成は目標であるが

他とどのように差別化して行くかの目標など)

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

□ 高い　□ 比較的高い　☑ 普通　□ やや低い　□ 低い

【ご意見があれば】

新聞報道など見られない

構造一流体連成が中心となると思われるが、

他とどれくらい差別化ができるかの説明が十分でない

産業との共同研究が見られない

5．今後、研究成果が期待できるか

□ 期待できる　☑ 比較的期待できる　□ 普通　□ あまり期待できない　□ 期待できない

【ご意見があれば】

色々な研究をされているが、目玉となるもの二、三。

やり遂げる気持でやることにより、期待できる。

6．その他、特記すべき事項

Crestグループとの連携が良くなされている。

シンポジウムの主催を積極的にやっている。

7．総合評価

比較的高い。

計算力学にディープラーニングをとりこむこと。

画像処理だも、実験と計算を合わせる

など新しい試み。

構造一流体連成も他とは異なる手法(メッシュレス法など)

などを使われており、他を凌駕する可能性あり

評価票

評価委員御氏名 木本洋一郎

1．センターの運営・研究体制は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】
多様な課題に取組んでおり有意な結果を得ているが今後はそれを
どのように集約して行くかが課題である。

2．研究費の使い方は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】
妥当と考えられる。

3．センターの目標は適当か
☑ 適当　□ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】
適切である。

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか
□ 高い　☑ 比較的高い　□ 普通　□ やや低い　□ 低い
【ご意見があれば】
様々な手法、概念を用いて研究を進めており、適切な広報に期待したい。

5．今後、研究成果が期待できるか
☑ 期待できる　□ 比較的期待できる　□ 普通　□ あまり期待できない　□ 期待できない
【ご意見があれば】
どのように集約して行くかが課題となる。今後に期待したい。

6．その他、特記すべき事項
他の機関（産業界）との連携があってもよいのではないか。

7．総合評価
多様な概念を取込んで研究を進めており明確な
研究の方向性を提示して行くことが望まれる。

評価票

評価委員御氏名 神田 雄一

1．センターの運営・研究体制は適当か
□ 適当 ☑ 比較的適当 □ 普通 □ やや不適当 □ 不適当
【ご意見があれば】
少人数体制の中では良く研究運営がなされていると感じる．

2．研究費の使い方は適当か
□ 適当 □ 比較的適当 ☑ 普通 □ やや不適当 □ 不適当
【ご意見があれば】
・収支を明確に示す必要がある．
・大学よりの持出し分を配慮することも重要．

3．センターの目標は適当か
□ 適当 ☑ 比較的適当 □ 普通 □ やや不適当 □ 不適当
【ご意見があれば】
目標，方向性はほぼ確立しているが，目標の一つとして
産学連携の進展を考えて欲しい．

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか
□ 高い ☑ 比較的高い ☑ 普通 □ やや低い □ 低い
【ご意見があれば】
成果は多く出ているので その公表の仕方が不十分なので
公報により インパクトは上ると考える．

5．今後、研究成果が期待できるか
□ 期待できる ☑ 比較的期待できる □ 普通 □ あまり期待できない □ 期待できない
【ご意見があれば】
AIの適用，オープンCAE など 今後につながる研究テーマの
芽ばえを作る必要性も考えて下さい．

6．その他、特記すべき事項
・昨年も述べたが，産学連携の成果を期待したい．
・SAIL周辺で海外の大学との学生間交流を活発にして欲しい．
（留学，支援研究等の）

7．総合評価
これまでの成果を ~~まとめ~~ 統合して，大学内・外で評価される
ことを期待したい．

評価票

評価委員御氏名 寺田信幸

1．センターの運営・研究体制は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

2．研究費の使い方は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

3．センターの目標は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか
□ 高い　□ 比較的高い　□ 普通　☑ やや低い　□ 低い
【ご意見があれば】
社会的なインパクトが少し足りないように感じました。

5．今後、研究成果が期待できるか
□ 期待できる　☑ 比較的期待できる　□ 普通　□ あまり期待できない　□ 期待できない
【ご意見があれば】
本成果をどう社会に役立てるかを明確に表現する必要があるように思います。

6．その他、特記すべき事項
最終報告書作成時には，各研究グループの関係性をしっかりと位置づけておく必要があると思います。

7．総合評価
A

平成 28 年度外部評価委員会外部評価票

外部評価委員：
萩原　一郎（明治大学研究・知財戦略機構）
松本洋一郎（理化学研究所理事）
神田　雄一（東洋大学副学長）
寺田　信幸（東洋大学理工学部長）

評価票

評価委員御氏名 寺田信幸

*特に指定のないものは，H28 年度についてご評価下さい。

1．センターの運営・研究体制は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

2．研究費の使い方は適当か
□ 適当　□ 比較的適当　☑ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

3．センターの目標は適当か
□ 適当　☑ 比較的適当　□ 普通　□ やや不適当　□ 不適当
【ご意見があれば】

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか
□ 高い　□ 比較的高い　☑ 普通　□ やや低い　□ 低い
【ご意見があれば】
研究成果がどの様な分野に生かされ，イノベーションを引起すのか？
社会に貢献できるか？が明確に伝わってこない。

5．５年間のプロジェクトを総括しての評価はどうか
□ 良い　□ 比較的良い　☑ 普通　□ あまり良くない　□ 良くない
【ご意見があれば】
プロジェクト全体としてはおおむね評価できるが，出口としての活用が見えにくい。

6．その他、特記すべき事項
本プロジェクトの成果を今後どう発展させていくのかを明確に示す必要がある。

7．総合評価
「B」

評価票

評価委員御氏名 松本洋一郎

*特に指定のないものは，H28 年度についてご評価下さい。

1．センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当　☑ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

小人数の組織としては妥当な運営がなされている

小組織

2．研究費の使い方は適当か

☐ 適当　☐ 比較的適当　☑ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

特に問題はなつ。

3．センターの目標は適当か

☐ 適当　☑ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

目標の設定は妥当である

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い　☐ 比較的高い　☑ 普通　☐ やや低い　☐ 低い

【ご意見があれば】

期待される成果は上っているものと判断される

5．５年間のプロジェクトを総括しての評価はどうか

☐ 良い　☑ 比較的良い　☐ 普通　☐ あまり良くない　☐ 良くない

【ご意見があれば】

表出の仕方にも依るが，取りまとめを工夫すれば比較的良いとの評価も可能である。

6．その他、特記すべき事項

7．総合評価

妥当な活動を行って来たと評価される。報告には一工夫が必要である。特に同じような計算手法等との比較・検討を充分にしておく必要があると思われる。

評価票

評価委員御氏名　神田 雄一

*特に指定のないものは，H28 年度についてご評価下さい。

1．センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当　☑ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

組織的には整っており適当と評価するが、実施（プロジェクト）そのものをもう少し効率良出来なかったか？（プロジェクトマネジメント手法の適用など）

2．研究費の使い方は適当か

☑ 適当　☐ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

良好と判断

3．センターの目標は適当か

☑ 適当　☐ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

目標は明確であった。

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い　☑ 比較的高い　☐ 普通　☐ やや低い　☐ 低い

【ご意見があれば】

基礎的な知見を多数得たことは評価。

産学連携など社会的インパクトは弱いところが見られた。

5．５年間のプロジェクトを総括しての評価はどうか

☐ 良い　☑ 比較的良い　☐ 普通　☐ あまり良くない　☐ 良くない

【ご意見があれば】

学内外への発信も含めて活発な展開されたと評価する。

英文書籍の刊行は良い。

6．その他、特記すべき事項（大学の立場より）

今後は大学ブランディングへの対応など学内の他部門との協働をさぐって欲しい。オリンピック・パラリンピックへの対応，産学連携を推進して欲しい。

7．総合評価

5年間で基礎的知見を多く得られたことは評価する。本手法の特徴をアピールし，今後は成果を明確にして次のステージ（応用的展開）への方向性を示して欲しい。

産学官連携も含めて

総合評価　A

評価票

評価委員御氏名 萩原一郎

*特に指定のないものは，H28 年度についてご評価下さい。

1．センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当　☑ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

国内外の機関との共同研究も本センターが窓口となって
積極的に行った。国際シンポジウム，フォーラム，ワークロップを
年数回開催している。ただ企業との連携がやや希薄

2．研究費の使い方は適当か

☑ 適当　☐ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

風洞実験装置とVR装置を設置するなど有効に
研究費を利用

3．センターの目標は適当か

☐ 適当　☑ 比較的適当　☐ 普通　☐ やや不適当　☐ 不適当

【ご意見があれば】

1 大規模高精度流体－構造連成解析手法の開発
2 精度検証、妥当性検証のための流体－構造連成実験
3 詳細実験による精度検証、妥当性検証と明確な目標を上げている

4．研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い　☑ 比較的高い　☐ 普通　☐ やや低い　☐ 低い

【ご意見があれば】

従来、並列化が困難とされていたEFUMに新たに考案した並列化手法を
適用することによって，京コンピュータでも高い並列化効率とスケジュリティーを出すことを
実証した

5．５年間のプロジェクトを総括しての評価はどうか

☐ 良い　☑ 比較的良い　☐ 普通　☐ あまり良くない　☐ 良くない

【ご意見があれば】

国内外の大学との共同研究などが進んだ
企業との連携もう少し必要

6．その他、特記すべき事項

標準問題の実験を通じて，流体構造連成による物体の振動周波数は
物体の形状，材料特性と流速に対して，特徴ある性質を
持つことを確認した。

7．総合評価

比較的良い。論文数56であるが更に出そうである
流体－構造連成解析に対する標準問題の提案が行われている点で
活発な研究成果。ただし，本研究の特徴をより分かりにして
説明願いたい。今後どのようにして行くのかをより明確にしてもらいたい

4. 研究成果の公開

4.1.年報

東洋大学計算力学研究センター

2012 年度　年報

CCMR
Center for Computational Mechanics Research
Toyo University

2013 年 3 月

1. まえがき 3
2. 概要 4
2.1. センター設置について 4
2.2. 組織 5
3. 研究成果 7
3.1. 解析手法開発グループ 7
3.1.1. EFMM による高精度大規模並列流体-構造連成解析手法の開発 8
3.1.2. 付帯条件付き多次元型移動最小自乗法の３次元固体問題への適用性に関する研究 17
3.1.3. ブロック構造を有する固体の大規模３次元モデル生成および固液連成解析技術の構築 26
3.1.4. 粒子法手法による並列流体-構造連成解析手法 33
3.1.5. 振動現象の流体-構造連成解析と自己組織化マップを用いた分類 38
3.2. 大規模並列化グループ 43
3.2.1. 大規模構造物中のき裂の３次元自動進展解析 44
3.2.2. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発 50
3.3. 新規実験計測グループ 55
3.3.1. 物性データ交換のためのデータ表現形式の検討 56
3.3.2. ドット重心追跡法による変位・ひずみ場解析(古川先生) 58
3.3.3. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムの整備 64
3.3.4. 境界層特性評価のための普遍関数構築 66
3.3.5. 熱線流速計の温度依存性に関する検討 68
3.4. 精度・妥当性検証グループ 70
3.4.1. 最適化技術 71
3.5. 可視化検証グループ 77
3.5.1. ３次元画像による定量的・定性的検証 78
3.6. 横断的研究会 83
3.6.1. 連成標準問題検討会 83
3.6.2. 計算力学と（材料）データベースの会 83
3.6.3. 楽器の流体（音響）構造連成研究会 83
4. 共同研究 84
4.1. JST CREST プロジェクト 84
5. 国際協力 86
5.1. バージニア工科大学 86
6. 情報発信 87
6.1. 第 15 回計算力学フォーラム（サンパウロ） 87

6.2. 第16回計算力学フォーラム（JSME CMD / 神戸） 88
6.3. 第17回計算力学フォーラム（ICCM / ゴールドコースト） 89
7. 教育活動 91
7.1. 教育活動風景 91
7.2. 卒業論文・修士論文の紹介 94
8. 業績リスト 96
8.1. 総説・解説・エッセイ 96
8.2. 論文 97
8.3. 招待講演 99
8.4. 講演論文・口頭発表 101
9. 結び 107

1. まえがき

本年度はセンターが活動を開始してから８年目にあたる．過去７年間のうち，５年間は私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」として活動を行ってきていたが，本年度，私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定され，いわば第２期の研究活動を開始したところである。この報告書は，その初年度の活動を中心にとりまとめたものである。

今回の，私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」とした。これは，それまでの流体解析や構造解析といった個別の物理の解析から一歩進めてより複雑な，また現実的な問題に計算力学の手法を適用しようとすることと，単に研究として行うのでなく，精度や妥当性を十分に検証し，あるいはその検証方法を確立することで，実用に耐えうるものとすることを目指してのことである。

本年度は，その１年目であるため，研究体制・研究環境の整備に重点をおくことになった。メンバーは，本学の３学部，Ｉ研究科の教員７名を中心に，博士研究員４名，研究支援者１名，客員研究員３名と大学院生からなる。さらに，これまでの関係から引き続き，韓国成均館大学とは年１回の学生ワークショップを中心に連携を図るほか，新たに台湾の龍華科技大学とも提携し，本報告書が出る頃には第１回の学生ワークショップが台湾で開かれているはずである。

また，当センターは昨年度より科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST にも選定されており，その活動についても本報告書では簡単にふれている。

本年度は，新たなテーマで研究を開始したところであり，また個人的にはセンター長を前任の矢川教授より引き継いだばかりということもあって，物足りなく感じられる向きもあろうかと思われるが，今後ともさらなるご批判とご指導を賜れば幸いである。

2013 年 3 月

東洋大学計算力学研究センター長
田村善昭

2. 概要

本センターは、わが国の私立大学学術フロンティア拠点のひとつとして文部科学省から設置が認められ、平成１７年度に活動を開始した。その後，平成２３年度に科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST の選定､続いて平成２４年度に文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け、今日に至っている。本センターに参加する研究員は、東洋大学の複数学部・大学院の教員（工学研究科、国際地域学部、総合情報学部、理工学部)、博士研究員、大学院生などを中核とし、また客員研究員として関連分野の内外の研究者から構成されている。各自の専門分野は、構造解析、流体解析、破壊解析、逆問題・最適化、大規模並列計算、可視化など、計算力学分野で必要とされるほぼ全ての分野に跨っており、この分野における専門家集団である。平成２３年度に採択を受けた CREST では「京」コンピュータ利用のための超大規模解析技術に関して、また平成２４年度からは、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け、連成解析や計算力学の精度検証・妥当性検証にも積極的に取り組んでいる。さらに、東洋大学 125 周年を契機とした国際化に合わせて海外の関連する大学と積極的に交流を進め，若手の人材育成にも寄与したいと考えている。

2.1. センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである。

・平成１７年６月　文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」に研究題目「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」で採択され，計算力学研究センター発足

・平成１７年１２月 センター開所式開催のあと，白山第２キャンパス内計算力学研究センター棟に入居し本格活動開始

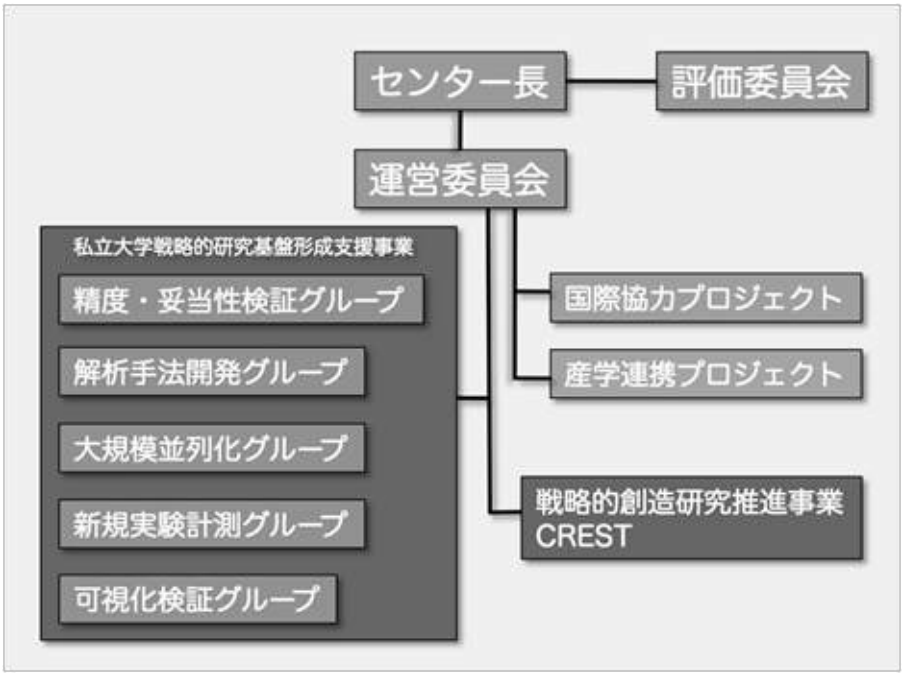
・平成２２年３月　「学術フロンティア推進事業」終了

・平成２３年８月　科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST
「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で採択される。

・平成２４年４月　文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に研究題目「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」で採択される。

2.2. 組織

センターの組織とメンバーは以下の通りである。



メンバー

・センター長

田村　善昭	（東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授）

・研究員

矢川　元基	（東洋大学大学院 工学研究科 機能システム専攻 教授）
芦野　俊宏	（東洋大学 国際地域学部 国際地域学科 教授）
江澤　良孝	（東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授）
塩谷　隆二	（東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授）
中林　靖	（東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 准教授）
藤松　信義	（東洋大学　理工学部　機械工学科　准教授）

・研究助手

長岡　慎介	（東洋大学 計算力学研究センター）
石川　格	（東洋大学 計算力学研究センター）
A.M.M. Mukaddes	（東洋大学 計算力学研究センター）

・研究支援者

小林　陽介	（東洋大学　計算力学研究センター）
増田　正人	（東洋大学 計算力学研究センター）

・客員研究員

古川　知成	（Virginia Tech）
松原　仁	（琉球大学 工学部 環境建設工学科）
横山　真男	（明星大学 情報学部 情報学科）

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

解析手法開発グループでは，計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち，「高精度流体構造連成解析手法の開発」の部分に焦点を当てた活動を行っている．

流体-構造連成解析を高精度かつ安定的に実施するためには，まず，流体解析手法・構造解析手法そのものの精度や信頼性を高めた上で，それらを連成させるアルゴリズムについても十分に検討する必要がある．これまでのところ，計算力学研究センターでは流体解析に SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用い，構造解析に EFMM を用いる手法を中心に連成解析を行ってきたが，このアプローチ以外にも例えば粒子法を用いた手法など様々な戦略が考えられる．本プロジェクトの初年度である平成 24 年度については，広くさまざまな解析手法を試して比較検討することを目的として活動を行った．

上記の事項を踏まえて，今年度は，以下の 5 項目について報告を行う．

(1) EFMM による高精度大規模並列流体-構造連成解析手法の開発
(2) 付帯条件付き多次元型移動最小自乗法の３次元固体問題への適用性に関する研究
(3) ブロック構造を有する固体の大規模３次元モデル生成および固液連成解析技術の構築
(4) 粒子法手法による並列流体-構造連成解析手法
(5) 振動現象の流体–構造連成解析と自己組織化マップを用いた分類

3.1.1. EFMM による高精度大規模並列流体−構造連成解析手法の開発

(1) 目標・計画

本研究では、計算力学の分野において、その需要が高まりつつある連成現象を解く為の新しい大規模並列流体-構造連成解析手法を提案、実装することを目的としている。

我々の身の回りで生じている現象のほとんどは、何らかの力学現象が相互関連しあって起こっている。これらの現象を連成現象と呼び、この連成現象には多種多様な種類の現象が存在する。その中で、本研究においては、流体と固体とが相互関連する流体-構造連成現象をその対象としている。

近年の計算機の性能の向上と共に、数値計算技術は飛躍的に発展を遂げており、連成解析を取り扱った研究も徐々に増えつつある。しかしながら、単一の現象を対象とした研究と比較するとまだまだ十分な研究がなされているとは言い難い。これは、連成現象を取り扱うためには、単一現象を解く為の解析と比較して様々な解決すべき問題を多く含んでおり、これは、単に計算機の性能の向上のみで解決できる問題だけではなく、その解析アルゴリズムにも関係している為である。

本研究で提案する EFMM を用いた構造解析手法と、SUPG/PSPG 安定化 FEM を用いた流体解析手法とを組み合わせた、新しい流体-構造連成解析手法は、各解析領域場に使用するメッシュ分割パターンが共に四面体一次要素であることから、流体-構造境界面における整合性を完全に得ることが出来、その結果、流体-構造連成問題を解く際に非常に重要となってくる界面の連成効果を考慮する際に生じる問題を解消することに成功している。

さらに、前述の通り、各解析場で用いるメッシュ分割パターンは、高次要素を用いる事無く、線形要素である。それにもかかわらず、その解析結果は、従来の線形要素を用いた解析結果と比較して向上するという結果を得られている。これは、大規模問題を解く際に問題になってくる計算機リソースと計算時間の大幅な抑制を可能にすることを意味している。

このように、本研究で提案している EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM とを組み合わせた流体-構造連成解析手法は、未だに数多くの問題を有する流体-構造連成解析を解く為に非常に効果的な手法であると言える。

しかしながら、本提案手法は、近年の大規模解析の際に必要不可欠となる並列処理を施す際に、大きな問題を有する手法であることが明らかとなった。この問題は、EFMM の解析アルゴリズムに起因するものであり、従来の要素ベースの領域分割手法への適用が困難である。さらに、この問題により、並列解析においては非常に重要な問題である各プロセッサ間の通信量が増加してしまい解析効率、並列化効率を大幅に低下させる一因となった。

平成 24 年度は、3 次元並列流体-構造連成解析手法を確立するために、SUGP/PSPG 安定化 FEM による流体解析手法の並列化、EFMM による構造解析手法の並列化と、その並列化の際に生じる問題点を解消するための処理を提案、実装した。そのうえで、これら 2 つの解析手法を組み合わせた並列流体-構造連成解析手法の開発を行った。

次年度以降は、本解析手法による実現象を対象とした解析と、実験との比較による解析精度の検証を行う予定である。

(2) 意義・国際社会との比較

前述の通り、計算力学の分野において、流体-構造連成現象を対象とした研究の事例は、単一の現象を対象とした解析のケースと比較して非常に少なく、まだまだ十分な研究が成されているとは言い難い。

しかしながら、流体-構造連成現象は、工学の分野のみならず、バイオ分野などを中心に非常に重要な現象である事から、流体-構造連成現象を高速に解き、高精度な解析結果を得られる解析手法の開発と確立は非常に重要な意義を持つ。

流体-構造連成現象が原因となった事故として、ワシントン州のピュージェット湾にあるタコマナローズ海峡に架かる吊橋であるタコマナローズ橋の落下事故が有名である。タコマナローズ橋は風力を静荷重として考慮した設計では、風速 60m/sec の強風まで耐えられる設計が施されていた。しかしながら、実際には風速 19m/sec の風が吹いた折に崩落してしまった。これは風速 19m/sec の風が吹いた際に、橋の周りにカルマン渦と呼ばれる渦が生じ、その渦から橋に加えられる周期的な力と橋のねじれ振動が共振を起こし、振幅が増大してケーブルが破断した為に起きた事故である。この事故をきっかけに、風の動的メカニズムを考慮に入れた橋の設計が行われるようになってきた。この有名な事故も、仮に流体と構造の相互現象、連成効果を考慮に入れた安全性の確認を行っていれば十分に防ぐことが出来たものと予想される。

この事例からも、流体-構造連成現象は、一般的に構造物を設計する立場からは、その発生を回避すべき対象であり、このような事故の再発を未然に防ぐ為にも、また工学の分野のみならず、その他の分野においても、連成効果を無視することで発生する多くの事故を防ぐ為にも、流体-構造連成現象を対象とした研究とその研究成果から得られる解析手法の需要は今後ますます増加する事が予想される。

(3) 研究内容

本研究の目的は、大規模並列流体-構造連成解析システムの提案と構築である。３次元流体-構造連成問題については、平成 23 年度までの研究課程において、EFMM を使用した構造解析手法と、SUPG/PSPG 安定化 FEM とを組み合わせる新しい解析手法を実装し、バイオ分野の問題に適用し、良好な解析結果を得ることが出来ている。

具体的な解析手法として、連成効果を考慮した解析を行う際には、図１に示すように流体解析場と構造解析場の界面において、節点数、節点座標値に整合性がとれている事が望ましい。これは、図２のように、界面の節点位置に整合性が得られない場合には、流体場から構造場、構造場から流体場への連成効果を考慮する際に、その連成効果を内挿、補間する必要があり、このプロセスは複雑な流体-構造連成解析のアルゴリズムを更に複雑なも

のにするだけでなく、解析精度の低下の原因にもなる。

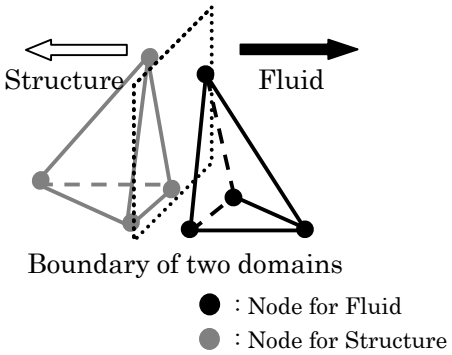


図 1 整合性の得られた流体-構造界面

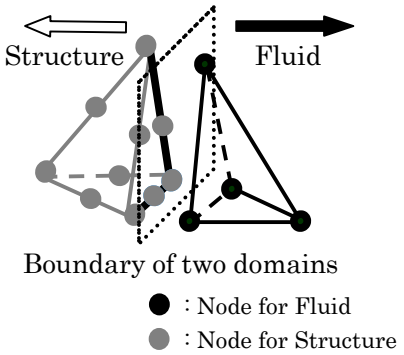


図 2 整合性が得られていない流体-構造界面

EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM は、それぞれ解析に用いる要素は、四面体一次要素である事から、流体解析場と構造解析場においての整合性を得る事が出来る。更には、これらの解析手法は、従来の線形要素のみを使用した解析と比較して、解析精度を向上させる事が可能であるという特徴を持つ。

バイオ分野への適用例として、毛細血管内を移動する赤血球の血流による形状変形と、その形状変形に伴う流体場の流れの変化の様子についてのシミュレーション結果を示す。図３は解析に用いたモデルである。

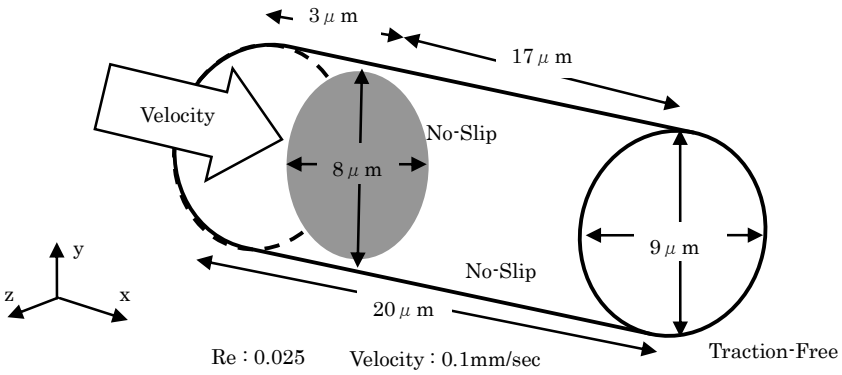


図 3 解析モデル

図 4、5 はそれぞれ解析により時々刻々と変化する流れ場と赤血球の形状変形の様子を示している。

赤血球は、毛細血管の様に、赤血球自体の長径よりも細い血管を通過する際には、血流により下流方向に向かってパラシュート型に形状変形をする様子が観測されているが、本数値解析結果では、その様子が伺える。

特に、構造解析結果では、赤血球の上流側中心に最も大きな圧力を観測しており、その結果から中心が大きく窪み、我々の体内で実際に観測されるパラシュート型への形状変形を良く計算できている。

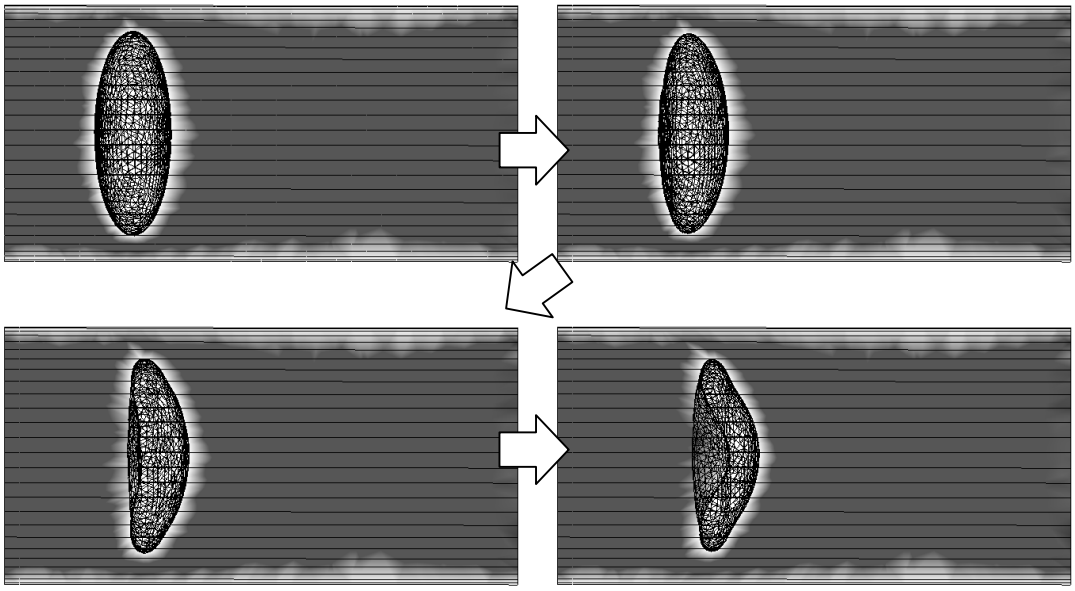


図 4 解析結果（流体解析場）

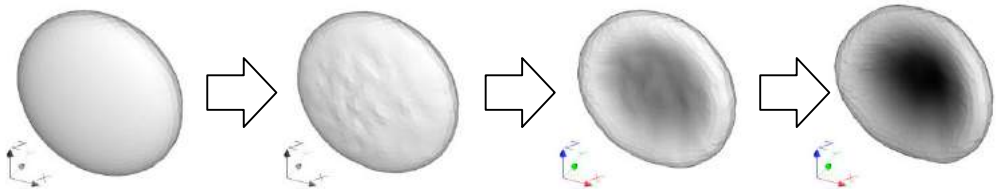


図 5 解析結果（構造解析場）

このように、本研究で提案している EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM による新しい流体-構造連成解析手法は良好な解析結果を得られることが、確認できている。

(4) 平成 24 年度進捗状況

前節で述べたように、EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM とを組み合わせた流体-構造連成解析手法は、実現象と比較して良好な解析結果を得られることが示されている。

しかしながら、この EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM とを組み合わせた連成解析手

法は、並列処理を行わない単一 PC での処理を行う場合には、非常に相性の良い組み合わせであるものの、並列処理を加えようと試みると幾つかの問題が生じる。

最も大きな問題点として挙げられるのが、EFMM の並列解析への適用が困難であるという点である。具体的には、静解析のようにメッシュの再生成を必要としない問題では、大きな問題も無く並列処理を適用することが可能である。その際、局所要素毎の処理を行う EFMM に対して、従来の Element-by-Element 手法に基づく Local element cluster - by - Local element cluster 処理を施すことで、並列 CG 解析を高速に解くことに成功している。

一方、メッシュの再生成を必要とするアダプティブ問題などの場合には、EFMM の解析アルゴリズムの特徴から、並列処理を行う事が困難になってくる。

我々が対象とする問題は、流体-構造連成問題である。多くの流体-構造連成問題では、流体と構造の相互作用によってメッシュ形状が時々刻々と変化する。また、解析領域数も多く、実現象を対象とした時、解析の為のメッシュ数は非常に大規模なものとなる事から、並列処理の実装は必要不可欠である。

並列 EFMM がアダプティブ解析などへの適用が困難な原因として、EFMM は図 6 に示すように解析領域全体の全ての節点が、その節点周りに局所要素クラスターを生成する。この局所要素クラスター毎に剛性マトリックスを生成して、それら節点ごとに生成される剛性マトリックスを全体剛性マトリックスに足し合わせることで、解析領域全体の剛性マトリックスを得ることが可能である。

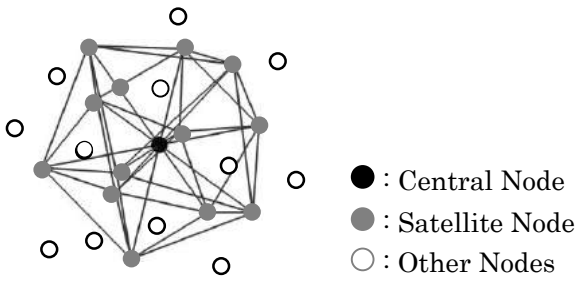


図 6 EFMM の生成する局所要素クラスター

当然、節点毎に剛性マトリックスを生成していくことから、局所剛性マトリックスの生成に関しては、100%の並列化効率を得ることが出来る。図 7 は、ある解析モデルに対して EFMM による剛性マトリックスの生成プロセスに並列処理を加えた際の並列化効率の推移を示したものである。

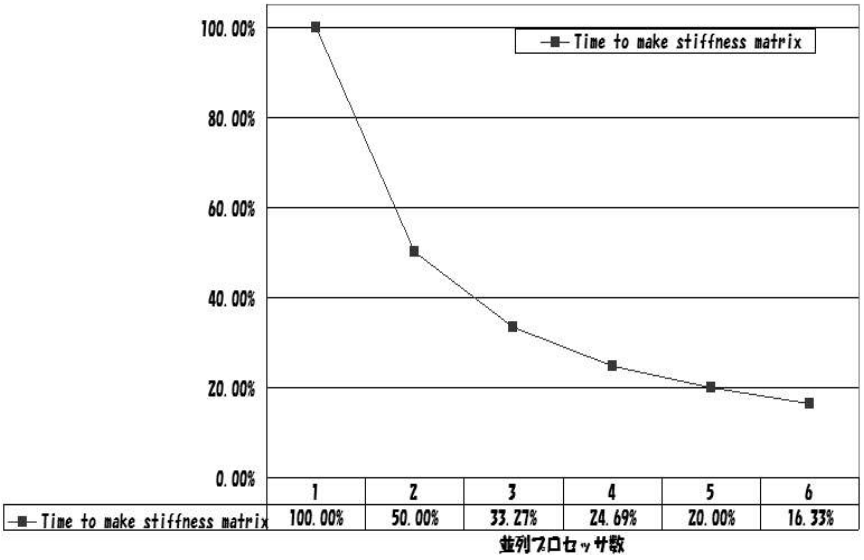


図 7 並列プロセッサ数と全体剛性マトリックス生成に要する時間の関係

このように、節点ベースの解析手法であることから、EFMM を並列静解析へ適用する場合には、非常に高効率な並列化効率を得ることが可能である。

しかしながら、EFMM は節点ベースの解析手法であることから、要素ベースの領域分割を行った際に、自身の担当領域内の節点の座標データのみならず、解析領域内の節点が生成する局所剛性マトリックスに依存する解析領域外の節点の座標データも合わせて必要になる。これは、アダプティブ解析のように解析と共に節点座標値が移動するに伴い、それらの移動した節点の座標値を領域間で通信する必要があることを意味する。これは、解析ステップ毎に求められるので大きな通信コストとなる。

そこで、本研究では、図８のように EFMM に要素ベースでの領域分割を行い、その領域内の節点のみを使って局所要素クラスターを生成して剛性マトリックスを作成する。

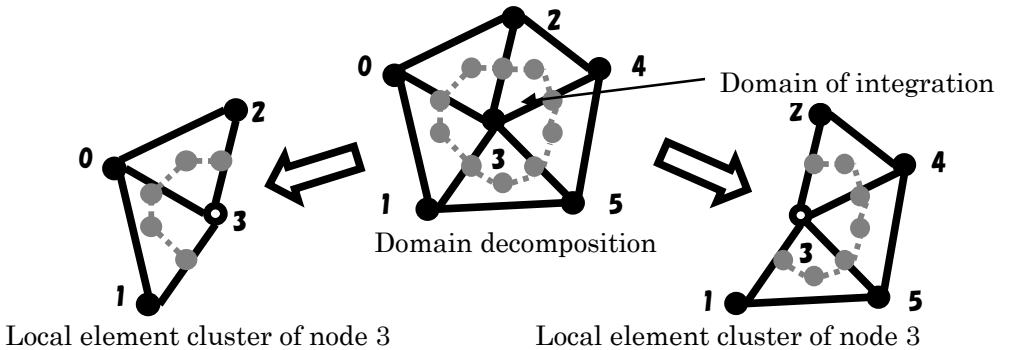


図 8 領域分割例

この方法を取ることで、リメッシングなどを施した際も、各節点座標値等のデータ通信は必要なくなる。一方で、本来節点ベースの解析手法であるにもかかわらず、複数の領域で同一の節点が、中心節点となる局所要素クラスターが生成される。この複数の領域に跨る同一の節点を中心節点とする局所要素クラスターは、積分領域は網羅できるものの、剛性マトリックス生成過程に必要となる縮約が正確に行えないことから、不正確な剛性マトリックスを生成することとなる為、解析精度の低下が懸念される。(図 8)

そこで、要素ベースの領域分割処理を施した EFMM の解析精度と並列プロセッサ数の関係について検証を行った。解析に用いるのは図 9 に示す簡単な片持ち梁モデルである。また、図 10 には領域分割例を示している。なお、本手法を用いて得られる全体剛性マトリックスは、本来の EFMM 解析で得られるような対称行列にはならずに、非対称行列となる事から GPBi-CG 法などの非対称行列にも対応できるソルバーを用意する必要がある。

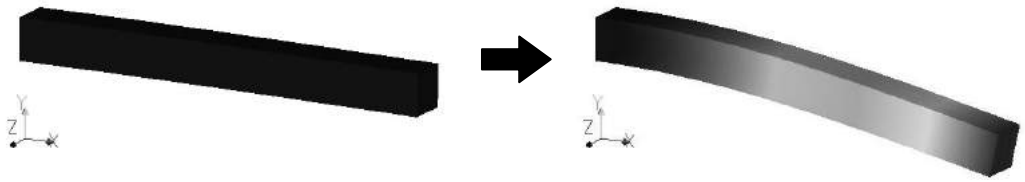


図 9 解析モデル

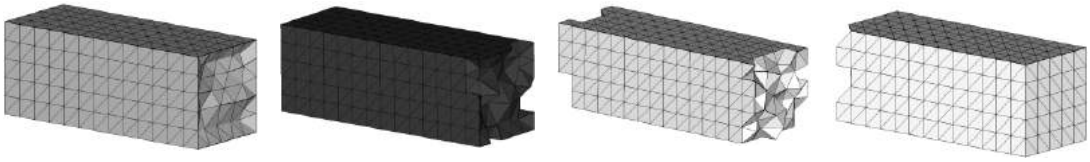


図 10 領域分割例

図 11 は、横軸に並列プロセッサ数、縦軸に正規化変位を表している。

図 11 から明らかなように、並列プロセッサ数が増加すれば増加するほど、解析精度は若干の低下を示す傾向にある。これは、領域分割を行うとその界面付近に不正確な局所要素クラスターが生成される。この不正確な局所要素クラスターは、領域分割数が増えれば増えるほど、各領域間の界面が増えるため、その数が増加する。結果、不正確な要素剛性マトリックスが多く計算され解析精度を低下させている。

しかしながら、解析領域全体の節点数を十分に取れば、その差は微々たる値に抑えることが可能となることが、解析結果の傾向から見て取れる。節点ベースの EFMM を正確に並列化した際の通信コストの増加と比較すると、本手法は大きなメリットがあると考えられる。

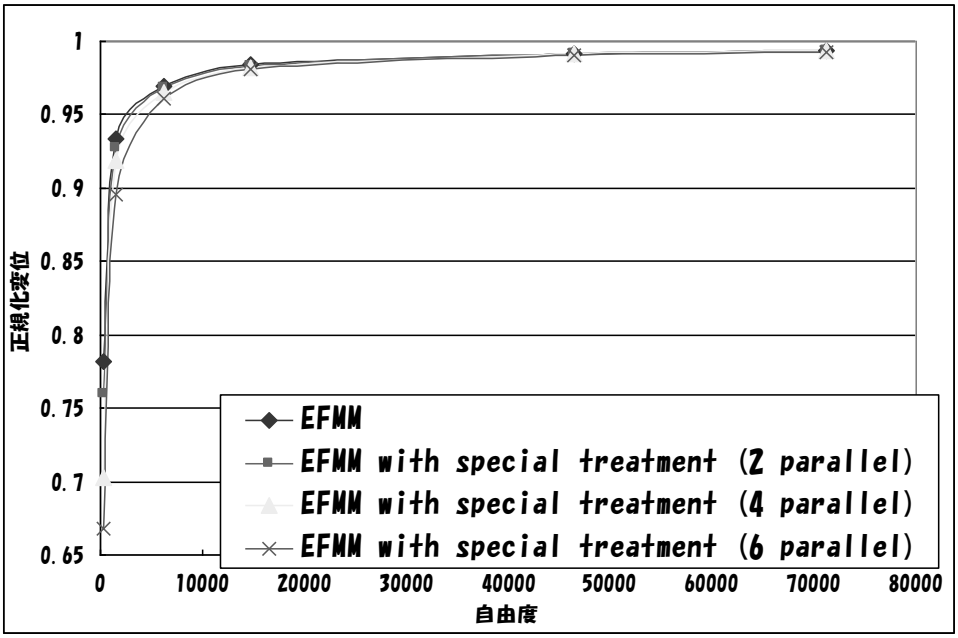


図 11 各並列台数における解析モデルの自由度と正規化変位の関係

今年度は、昨年度までに完成させた EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM による新しい流体-構造連成解析システムの大規模並列化に着手した。

並列解析への適用時に、EFMM のリメッシングを含む問題での並列処理が非常に困難であるという問題点が明らかとなり、問題を解消する為の処理を提案し、有効な結果を得ることが出来た。

本手法を取り入れることで、現在、EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM による新しい並列流体-構造連成解析手法を完成した。

来年度以降は、本手法のより高速な処理を施すためのチューニング、擬似弾性スムージングによるリメッシング手法を導入し、実験との比較による、本提案手法の健全性を明らかにしていく。

参考文献

1) Yagawa, G. and Matsubara, H., Enriched element method and its applications to solid mechanics, Proc. Computational Method In Engineering and Science EPMESC X, pp.15-18, 2006.

2) Tezduyar, T.E., Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, *Advanced in Applied Mechanics*, 28 pp.1-44, 1991.

3) Tezduyar, T.E., Mittal, S., Ray, S.E. and Shih, R., Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* 95 pp.221-242, 1992.

4) Franca, L.P., Frey, S.L. and Hughes, T.J.R., Stabilized finite element methods I. Application to the advective - diffusive model, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 95 pp.253-276, 1992.

5) Franca, L.P. and Frey, S. L., Stabilized finite element methods II. The incompressible Navier-Stokes equations, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 99 pp.209-233, 1992.

3.1.2. 付帯条件付き多次元型移動最小自乗法の３次元固体問題への適用性に関する研究

(1) 目標・計画

近年，実構造物における構造健全性評価の効率的な実施が求められており，昨今の巨大化・複雑化した構造物の環境下において，3 次元複合荷重下における応力状態や破壊現象を高精度かつ容易に解析できる計算手法の構築は非常に重要であり，そのニーズは今後さらに増えていくことが予想される．本研究では，3 次元固体問題における高精度かつ効率的な計算力学手法を研究開発することを目的とする．

平成 24 年度では，有限要素法で使用されるメッシュ（要素）を必要とせず，境界拘束を容易に設定できる付帯条件付き多次元型移動最小自乗法（Multi-dimensional Moving Least Squares Method with Constraint Condition：C-MultiMLS 法）[(1)(2)]の 3 次元固体問題へ適用する方法を提案し，本手法の妥当性について評価を行う．具体的には， 既存手法との境界拘束に関する精度を検証する．次に 3 次元弾性固体問題を対象に，理論解および既存手法との精度検証を実施し，その有効性について確認する．また，破壊力学問題への適用方法を示し，その妥当性を検討する．

平成 25 年度では，前年度で構築した本提案手法を弾塑性および大変形問題を考慮できるよう拡張する．また，3 次元解析においては大規模モデルを取り扱うため，並列計算による大規模解析への展開を目指す．

(2) 意義・国際社会との比較

昨今の 3 次元固体解析においては，様々な数値解析手法が提案されている．有限要素法は計算力学を代表する数値解析手法の 1 つであるが，物理量の設定や境界条件の付与など，メッシュ（要素）と呼ばれる部分領域単位で処理されるため，き裂の進展状況など，不連続面が時々刻々と変化するような問題や大変形問題に対しては，高性能なメッシュ再分割機能が不可欠となり，実用上大きなボトルネックとなっている．

一方，メッシュの考え方を払拭し，高性能な解を求めようとする動きは Belytschko らによって提案されたエレメントフリーガラーキン法（Element Free Galerkin Method：EFG 法）[(3)]など，いわゆるメッシュフリー法の研究に見られる．しかしながら，エレメントフリーガラーキン法では，移動最小自乗法（Moving Least Squares Method：MLS 法）をベースとしているため，Direchlet 型境界条件を設定する際，有限要素法のように直接節点変位を拘束することができない．そのため，境界条件の設定に Lagrange 未定乗数法やペナルティ法等の特別な処理が必要となり，境界を拘束することが煩雑あるいは困難などの問題を抱えている．したがって，有限要素法のように直接節点変位を拘束でき，メッシュを必要としない EFG 法の両手法の利点を生かした方法論の確立は 3 次元固体解析を実施する上で，極めて有用であると考えられる．

以上のことから，本研究は学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており，国際社会におい

ても重要な位置づけとなる研究であると考える．

(3) 研究内容

(A) 3 次元 C-MultiMLS 法の定式化

ここでは，本研究で提案する 3 次元 C-MultiMLS 法の定式化について述べる．今，デカルトの直交座標系（x, y, z）上の座標（x_i, y_i, z_i）に位置する評価点 i について考える．評価点 i 周りにおける変位を $u_{C-MultiMLS}(x,y,z)$，$v_{C-MultiMLS}(x,y,z)$ および $w_{C-MultiMLS}(x,y,z)$ とすると，評価点 i 周りで 2 次の Taylor 展開をすることによって，次式が得られる．

$$
\begin{aligned}
&u_{C-MultiMLS}(x,y,z) \approx \\
&u^h_{C-MultiMLS}(x,y,z) = u_i + \frac{\partial u}{\partial x}\tilde{x} + \frac{\partial u}{\partial y}\tilde{y} + \frac{\partial u}{\partial z}\tilde{z} \\
&\qquad + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\tilde{x} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\tilde{y} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\tilde{z} \\
&\qquad + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}\tilde{x}\tilde{y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial z}\tilde{y}\tilde{z} + \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial x}\tilde{z}\tilde{x}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

$$
\begin{aligned}
&v_{C-MultiMLS}(x,y,z) \approx \\
&v^h_{C-MultiMLS}(x,y,z) = v_i + \frac{\partial v}{\partial x}\tilde{x} + \frac{\partial v}{\partial y}\tilde{y} + \frac{\partial v}{\partial z}\tilde{z} \\
&\qquad + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\tilde{x} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\tilde{y} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\tilde{z} \\
&\qquad + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}\tilde{x}\tilde{y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z}\tilde{y}\tilde{z} + \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial x}\tilde{z}\tilde{x}
\end{aligned}
\tag{2}
$$

$$
\begin{aligned}
&w_{C-MultiMLS}(x,y,z) \approx \\
&w^h_{C-MultiMLS}(x,y,z) = w_i + \frac{\partial w}{\partial x}\tilde{x} + \frac{\partial w}{\partial y}\tilde{y} + \frac{\partial w}{\partial z}\tilde{z} \\
&\qquad + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\tilde{x} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\tilde{y} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\tilde{z} \\
&\qquad + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\tilde{x}\tilde{y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z}\tilde{y}\tilde{z} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x}\tilde{z}\tilde{x}
\end{aligned}
\tag{3}
$$

ここで，u_i，v_i および w_i は評価点 i における x 方向変位，y 方向変位および z 方向変位，$\tilde{x} = x - x_i$，$\tilde{y} = y - y_i$，$\tilde{z} = z - z_i$，x_i，y_i および z_i は評価点 i の座標値，x，y および z は任意の座標値である．一方，弾性理論（微小変形理論）によって，ひずみおよび回転は，

$$\varepsilon_x=\frac{\partial u}{\partial x}\quad,\quad \varepsilon_y=\frac{\partial v}{\partial y}\quad,\quad \varepsilon_z=\frac{\partial w}{\partial z}\quad,\quad \begin{matrix}\gamma_{xy}=\dfrac{\partial v}{\partial x}+\dfrac{\partial u}{\partial y} & \theta_x=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial w}{\partial y}-\dfrac{\partial v}{\partial z}\right)\\ \gamma_{yz}=\dfrac{\partial w}{\partial y}+\dfrac{\partial v}{\partial z} & \theta_y=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u}{\partial z}-\dfrac{\partial w}{\partial x}\right)\\ \gamma_{zx}=\dfrac{\partial u}{\partial z}+\dfrac{\partial w}{\partial x} & \theta_z=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial v}{\partial x}-\dfrac{\partial u}{\partial y}\right)\end{matrix} \tag{4}$$

となる．ここで，ε_xはx方向ひずみ，ε_yはy方向ひずみ，ε_zはz方向ひずみ，γ_{xy}，γ_{yz}，γ_{zx}はせん断ひずみ，θ_x，θ_y，θ_zは回転である．したがって，式(1)，式(2)，式(3)に式(4)を適用することにより評価点i周りの変位は次式のようになる．

$$\begin{aligned}u^h_{C-MultiMLS}(x,y,z)=u_i&+\varepsilon_{ix}\tilde{x}+\left(\frac{1}{2}\gamma_{ixy}-\theta_{iz}\right)\tilde{y}+\left(\frac{1}{2}\gamma_{ixy}+\theta_{iy}\right)\tilde{z}\\&+\frac{1}{2}\varepsilon_{ix,x}\tilde{x}^2+\frac{1}{2}\left(\gamma_{ixy,y}-\varepsilon_{iy,x}\right)\tilde{y}^2+\frac{1}{2}\left(\gamma_{izx,z}-\varepsilon_{iz,x}\right)\tilde{z}^2\\&+\varepsilon_{ix,y}\tilde{x}\tilde{y}+\frac{1}{2}\left(\gamma_{ixy,z}+\gamma_{izx,y}-\gamma_{iyz,x}\right)\tilde{y}\tilde{z}+\varepsilon_{ix,z}\tilde{z}\tilde{x}\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}v^h_{C-MultiMLS}(x,y,z)=v_i&+\left(\frac{1}{2}\gamma_{ixy}+\theta_i\right)\tilde{x}+\varepsilon_{iy}\tilde{y}+\left(\frac{1}{2}\gamma_{ixy}-\theta_{ix}\right)\tilde{z}\\&+\frac{1}{2}\left(\gamma_{ixy,x}-\varepsilon_{ix,y}\right)\tilde{x}^2+\frac{1}{2}\varepsilon_{iy,y}\tilde{y}^2+\frac{1}{2}\left(\gamma_{iyz,z}-\varepsilon_{iz,y}\right)\tilde{z}^2\\&+\varepsilon_{iy,x}\tilde{x}\tilde{y}+\varepsilon_{iy,z}\tilde{y}\tilde{z}+\frac{1}{2}\left(\gamma_{iyz,x}+\gamma_{ixy,z}-\gamma_{izx,y}\right)\tilde{z}\tilde{x}\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}w^h_{C-MultiMLS}(x,y,z)=w_i&+\left(\frac{1}{2}\gamma_{izx}-\theta_{iy}\right)\tilde{x}+\left(\frac{1}{2}\gamma_{iyz}+\theta_{ix}\right)\tilde{y}+\varepsilon_{iz}\tilde{z}\\&+\frac{1}{2}\left(\gamma_{izx,x}-\varepsilon_{ix,z}\right)\tilde{x}^2+\frac{1}{2}\left(\gamma_{iyz,z}-\varepsilon_{iy,z}\right)\tilde{y}^2+\frac{1}{2}\varepsilon_{iz,z}\tilde{z}^2\\&+\frac{1}{2}\left(\gamma_{izx,y}+\gamma_{iyz,x}-\gamma_{ixy,z}\right)\tilde{x}\tilde{y}+\varepsilon_{iz,y}\tilde{y}\tilde{z}+\varepsilon_{iz,x}\tilde{z}\tilde{x}\end{aligned} \tag{7}$$

ここで，θ_{ix}，θ_{iy}，θ_{iz}は評価点iにおける回転，ε_{ix}，ε_{iy}，ε_{iz}は評価点iにおける各軸方向のひずみ，γ_{ixy}，γ_{iyz}，γ_{izx}は評価点iにおけるせん断ひずみ，$\varepsilon_{ix,x}$，$\varepsilon_{ix,y}$，$\varepsilon_{ix,z}$，$\varepsilon_{iy,x}$，$\varepsilon_{iy,y}$，$\varepsilon_{iy,z}$，$\varepsilon_{iz,x}$，$\varepsilon_{iz,y}$，$\varepsilon_{iz,z}$，$\gamma_{ixy,x}$，$\gamma_{ixy,y}$，$\gamma_{ixy,z}$，$\gamma_{iyz,x}$，$\gamma_{iyz,y}$，$\gamma_{iyz,z}$，$\gamma_{izx,x}$，$\gamma_{izx,y}$，$\gamma_{izx,z}$はひずみの微分量であり，“,x”はx方向微分，“,y”はy方向微分，“,z”はz方向微分を意味している．本手法の誤差評価関数は，各軸方向の変位関数内にひずみや回転などの共通項が存在するため，残差平方和の足し合わせとして，次式のように表される．

$$J_{C-MultiMLS} = \sum_{j}^{N} W(r_{ji}, h)\left\{\left(u^{h}_{C-MultiMLS}(x,y,z) - u_j\right)^2 + \left(v^{h}_{C-MultiMLS}(x,y,z) - v_j\right)^2 + \left(w^{h}_{C-MultiMLS}(x,y,z) - w_j\right)^2\right\} \quad (8)$$

ここで，$W(r_{ji}, h)$は重み関数，hは重み関数の影響半径，r_{ji}は評価点iと影響半径内にある近傍粒子jとの距離，u_j，v_j，w_jはそれぞれ近傍粒子jにおけるx方向変位，y方向変位およびz方向変位である．本手法では，式(8)の誤差評価関数が最小となるように，ひずみや回転などの未定係数を決定する．

$$\frac{\partial J_{C-MultiMLS}}{\partial \mathrm{G}^{T}} = 0 \quad (9)$$

$$\mathrm{G} = \{\theta_{ix} \;\; \theta_{iy} \;\; \theta_{iz} \;\; \varepsilon_{ix} \;\; \varepsilon_{iy} \;\; \varepsilon_{iz} \;\; \gamma_{ixy} \;\; \gamma_{iyz} \;\; \gamma_{izx} \;\; \varepsilon_{ix,x} \;\; \varepsilon_{ix,y} \;\; \varepsilon_{ix,z} \;\; \varepsilon_{iy,x} \;\; \varepsilon_{iy,y} \;\; \varepsilon_{iy,z}$$
$$\varepsilon_{iz,x} \;\; \varepsilon_{iz,y} \;\; \varepsilon_{iz,z} \;\; \gamma_{ixy,x} \;\; \gamma_{ixy,y} \;\; \gamma_{ixy,z} \;\; \gamma_{iyz,x} \;\; \gamma_{iyz,y} \;\; \gamma_{iyz,z} \;\; \gamma_{izx,x} \;\; \gamma_{izx,y} \;\; \gamma_{izx,z}\}^{T} \quad (10)$$

(B)　領域積分の方法

本手法では，剛性マトリックスを得るために，粒子ごとの領域積分を実行する必要がある．評価点周りにおける積分を行う方法には，節点積分法があるが，これらは節点周りの領域の面積を乗じることで表現している．そこで本研究では，着目する評価点ごとに積分領域を定義し，Gauss の数値積分を用いて領域積分を行った．具体的には，解析領域全体における積分の重複評価をさけるために，図 1 に示すように評価点および近傍粒子 3 つを用いた四面体領域を考え，評価点まわりのすべての四面体を集合させた領域を積分領域とした．

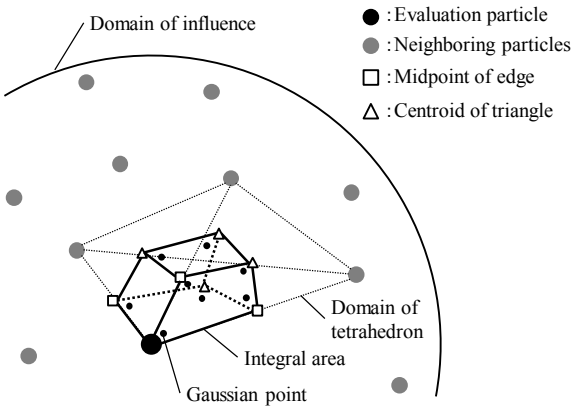


図 1　積分領域の定義（3 次元）

(C)　境界拘束の精度[4]

ここでは，C-MutltiMLS 法（以後，本法と略す）と EFG 法との境界拘束の精度を検証するため，図 2 に示す片持ち梁を対象に，動的陽解法による 2 次元振動解析を実施した．本例題では，ヤング率は 210GPa，ポアソン比は 0.3 を仮定した．また時間刻み幅はクーラン条件を考慮し，1.0e-7 秒に設定し解析を行った．

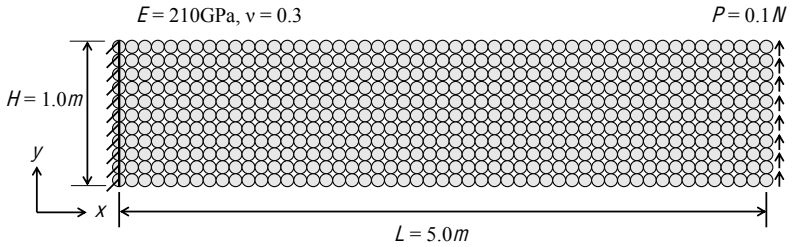
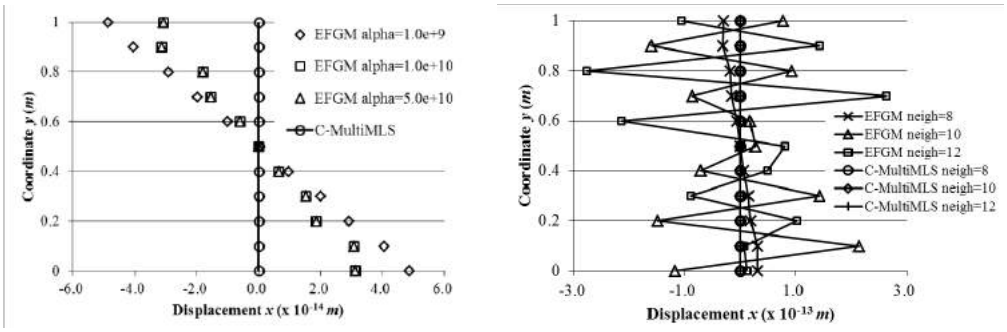


図 2　解析モデル



(a) ペナルティ数の違いによる変位挙動　　(b) 近傍粒子数の違いによる変位挙動

図 3　固定端部における EFG 法と本法の変位挙動

図 3 の(a)に図 2 の固定端（x=0.0）における EFG 法および本法の変位挙動を示す．同図より EFG 法ではペナルティ数が大きくなるに伴い，変位拘束の精度が向上することが確認できるが，ペナルティ数が 1.0e+10 を用いた場合でも変位を拘束することはできなかった．またペナルティ数を 1.0e+11 以上に設定した場合には解が発散する結果となった．一方，本法では変位拘束できているのが確認できる．

EFG 法と本法における固定端部の近傍粒子数は，解析領域外側には粒子が存在しないため，内部の評価粒子と比べて近傍粒子数が少なくなる．そこで，固体端部の近傍粒子数が精度に与える影響を調べるため，ペナルティ数を 1.0e+10 に設定した上で影響領域内に含まれる最低近傍粒子数を 8，10，12 と変更して解析を実施した．その結果を図 3 の(b)に示す．同図より，EFG 法では近傍粒子の個数に依存した形で解の振動が見られた．一方，本法で

は近傍粒子の個数にかかわらず変位の振動なく変位を拘束できることがわかった.

(D)　3 次元弾性固体問題の精度検証[5]

ここでは，図 4 に示すような片持ち梁（ヤング率 E=3.1×10^{7}GPa，ポアソン比 ν=0.3）の自由端に分布荷重（P= -1.0N）が作用する静弾性問題を対象として，変位精度について検証する． なおここでは，表記を簡単にするために， 2 次の項まで Taylor 展開して得られる本法を“GPM-quadratic”， 1 次の項まで Taylor 展開して得られる本法を“GPM-linear”と呼び，定ひずみ四面体要素を用いた有限要素法を“FEM-TET”，線形ひずみ四面体要素を用いた有限要素法を“FEM-TET2”と呼ぶことにする.

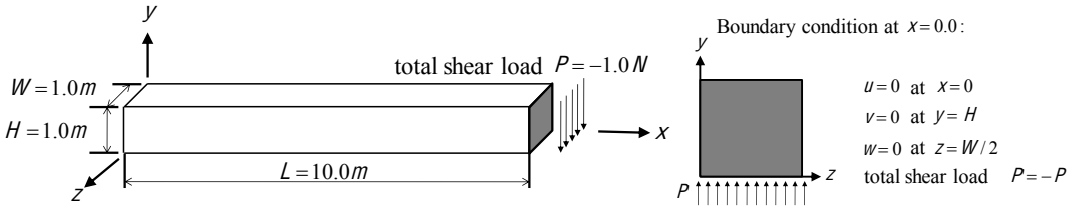


図 4　片持ち梁モデル

図 5 に，総自由度数と荷重作用位置における変位の理論解にて正規化した正規化変位との関係を示す．同図より，総自由度数が少ない場合において，GPM-linear による解の精度は FEM-TET2 による場合より劣るが，FEM-TET の場合よりも優れる結果となった．GPM-quadratic の解は，FEM-TET2 と比較して，総自由度が少ない場合において若干の差があるものの，ほぼ同等な値を示す結果となった. 理論解の収束性については，FEM-TET と異なり，GPM-linear においては上界から収束することがわかった.

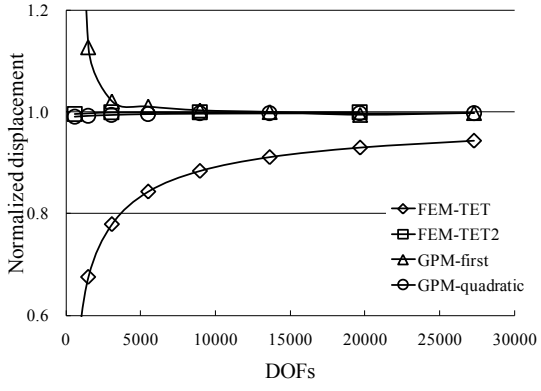


図 5　正規化変位と自由度との関係

(E)　破壊力学問題への適用

本法の破壊力学問題へ適用する利点としては，以下のことが挙げられる．有限要素法な

どの既存手法によるき裂進展解析の場合，き裂面における結合部をリメッシュ技術によって完全に分離した形で表す方法が用いられる場合が多く，そのリメッシュ作業が現状のき裂進展解析を実施する上でのボトルネックとなっている．また，ジョイント要素を用いた解析手法なども提案されているが，2 重節点の配置する必要があることや，多数の不連続面をモデル化することが困難であるといった課題が報告されている．

一方，本法では，積分領域の境界をき裂面として使用しているため，既存手法で行われるリメッシュ作業は必要としない利点を有していると考えられる． また，2 重節点を配置する必要もないため，その作業工数も削減できる．

ここでは，破壊力学問題における本法の妥当性を検討するため， 図 6 に示すような切り欠きを有する梁の中央部に強制変位が作用する場合の 2 次元き裂進展解析を行った． 図 7 に本解析モデルの粒子分布を示す．また物性値として，ヤング率 E=39224MPa，ポアソン比 ν=0.2，引張強度 f_t=3.33MPa とした．また境界条件として，梁の上部中央に強制変位 u_y=1.0e-4mm を与えた．

図 8 にき裂進展状況を示す．同図より切り欠き上部からき裂が発生し，その後，梁上部へ進展する様子を再現できていることを確認した．

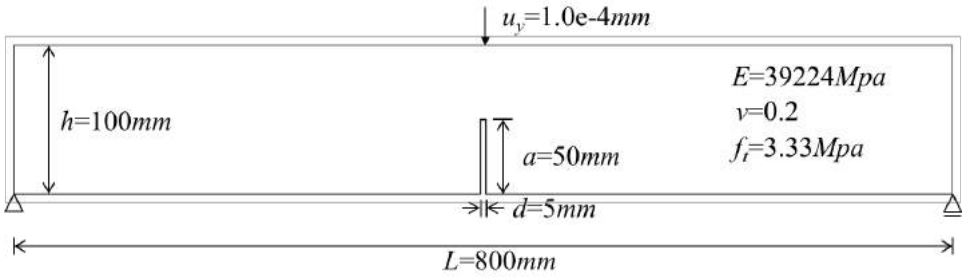


図 6　切り欠きを有する梁（2 次元）

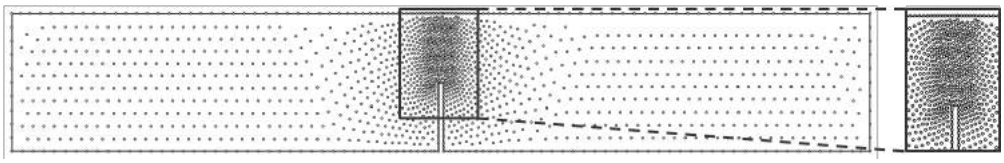


図 7　解析モデルの粒子分布（総粒子数：1442）

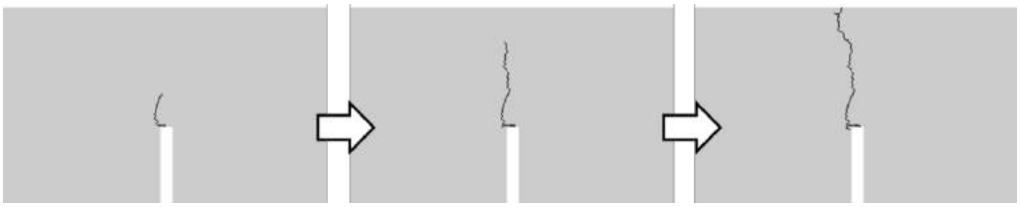


図 8　き裂進展状況（2 次元）

次に，自由端において集中荷重を受ける片持ち梁（図 9 参照）の 3 次元き裂進展解析の例を示す． 図 10 にき裂進展状況を示す．き裂は固定端上部より現れ，その後，下方向に進展していく様子を確認した．しかしながら，3 次元き裂進展解析では離散したき裂が多く発生し，連続したき裂とならなかった．その原因として，初期に配置した粒子数が少なく，その結果，十分なき裂経路（本法におけるき裂面）の確保ができなかったことが考えられるため，今後，大規模計算への対応が必要であると考えられる．

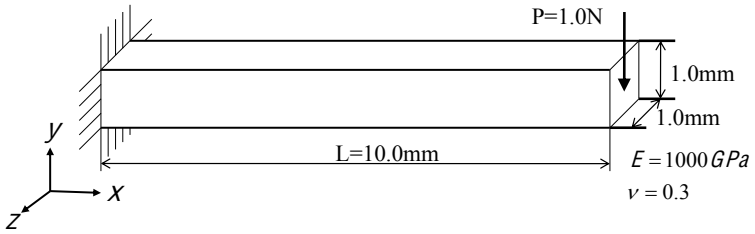
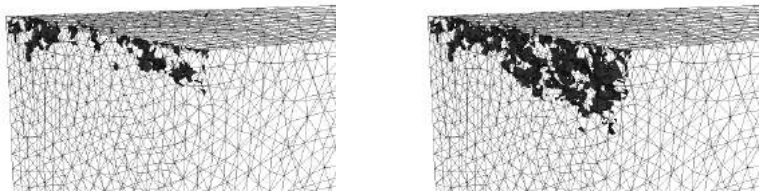


図 9　解析モデルと解析条件（3 次元）



(a) 初期　　(b) 後期

図 10　固定端部のき裂進展状況（3 次元）

(4) 平成 24 年度進捗状況

今年度は，有限要素法で使用されるメッシュを必要とせず，境界拘束を容易に設定できる付帯条件付き多次元型移動最小自乗法の 3 次元固体問題へ適用する方法を提案し，その妥当性について検討した．今後は，本法を弾塑性および大変形問題を考慮できるように拡張するとともに，並列計算による大規模解析技術を構築し，実構造物への応用について検討していく予定である．

参考文献

(1) 松原仁，入部綱清，伊良波繁雄：粒子法の微分精度に関する一考察および物理自由度を有する移動最小自乗法，土木学会論文集 A，Vol. 66，No. 4，pp. 723-736, 2010.

(2) 崎原康平，松原仁，江戸孝昭，原久夫，矢川元基：弾性固体問題における付帯条件付き多次元型移動最小自乗法，日本機械学会論文集（A 編），Vol. 78, No.786, pp. 142-151, 2012.

(3) Belytschko T., Lu, Y. Y., Gu, L.: Element-Free Galerkin Method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 37 pp. 229-256, 1994.

(4) 崎原康平，松原仁，江戸孝昭，矢川元基：付帯条件付き多次元型移動最小自乗法とエレメントフリーガラーキン法における境界条件の精度，日本機械学会論文集（A 編）ノート，掲載予定.

(5) Sakihara, K. Matsubara, H. Edo, T. and Yagawa, G.: Multi-dimensional moving least squares method applied to 3D elasticity problems, Engineering Structures, Elsevier, 2012 (accepted).

3.1.3. ブロック構造を有する固体の大規模３次元モデル生成および固液連成解析技術の構築

(1) 目標･計画

岩盤内部には大小様々なき裂が存在し，岩盤を成す材料は不均質かつ不確実なものである．また，き裂面の一部には地下水が流れており，岩盤内部の水理学的特性と材料学的特性の両方を考慮する必要がある．したがって，岩盤全体としての力学的挙動を解析することは必然的に複雑なものとなり，岩盤の安定性や岩盤崩落の危険性を精度良く評価することは困難である．これは，岩盤の崩落現象が，岩盤内部のき裂分布，材料分布，地下水流れ，き裂進展挙動などの物理現象が互いに連成した結果として生じることから，これらの現象のすべてを考慮した理論的・実験的検討は極めて困難であることに起因している．特に，海底地すべり現象は岩盤崩落が海底で発生することから，前記の物理的要因に加えて，海水の激しい容積移動が伴う．したがって，海底地すべり現象を解明し，人間社会の安心や安全を担保するためには，数値解析技術を援用した安全性評価が不可欠である．

本研究では，Sulsky らによって開発された MPM（Material Point Method）を基盤とした固体－破壊－流体連成解析技術を構築し，数値シミュレーションの観点から海底地すべり現象の力学的メカニズムやそれに伴って生じる津波の発生メカニズムを理解することを目標とする．本研究の計画を図 1 に示す．同図に示すように，本研究では初年度で深層崩壊や表層崩壊を誘発するような様々な形状を有する岩盤（岩山，連峰）や海底地すべり地層のモデル化技術を構築し，2 次元領域，3 次元領域の順で海底地すべりシミュレータの構築を目指す．また，3 次元解析においてはデータ数が膨大になることが予想されることから，並列計算機を用いた大規模解析への応用も視野に入れて議論する．

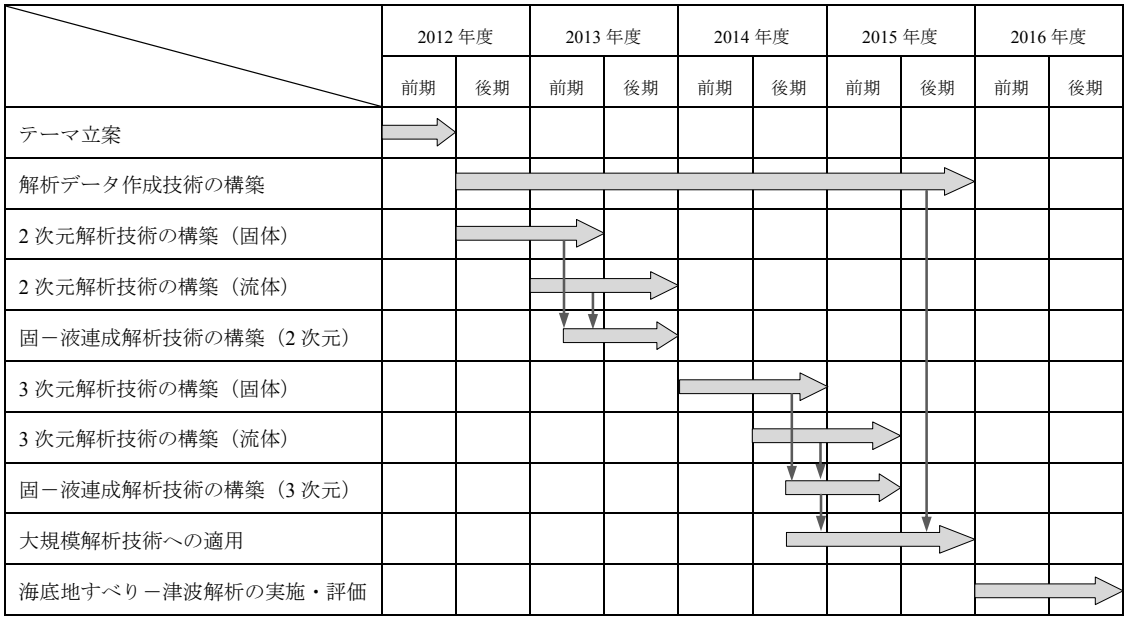


図 1　研究計画

(2) 意義・国際社会との比較

2004 年 12 月，インド洋沖で津波が発生し 22 万人もの死者・行方不明者を生じた．我が国においても 2011 年 3 月，東北地方を襲った津波により大規模な被害が生じ，国際的に津波への防災対策の重要性が高まっている．津波を誘発する原因のひとつに海底地すべりがある．海底地すべりは規模が非常に大きいことが特徴であり，陸上の地すべりによる土塊の移動距離は数百メートル程度であるのに対して，海底地すべり数十キロメートルに及び，すなわち海底地すべりは極めて大規模に発生する自然現象であることがわかる．さらに海底地すべりに関する研究は，地震探査，地形調査，コアリング等を用いて海底地すべりの地形形状の把握，発生年代の特定を行うものが多く，その力学的な挙動やメカニズム解明に着目した研究はあまり行われていないのが現状である．したがって，海底地すべり現象に対して計算力学的視点から解明することを指向した研究の国際社会における意義は極めて大きい．

不連続岩盤の大変形ならびに斜面崩壊を動的に解析できる手法に関して，個別要素法（DEM）や不連続変形解析法（DDA）などが挙げられる．個別要素法は，岩盤ブロックを剛体ブロックとし，剛体ブロック同士の衝突をバネとダッシュポットでモデル化する手法である．一方で不連続変形法は， FEM と同様に，ポテンシャルエネルギーの最小化原理に基づく手法であり，岩盤ブロックを弾性体とし，ブロック間の接触にペナルティ法による貫入制御を行うことで，ブロックの応力，ひずみ等が計算される．しかしながら，個別要素法は岩盤ブロックを剛体としているため岩盤の変形が無いものとしており，さらに解の唯一性が保証されておらず，ブロック同士の接触に関して力学的に曖昧な定義が使われているため，落石のように物体の動きが速い問題においては解の安定性が得られない場合がある．接触に関する検討が現在も進められているのが現状である．不連続変形法は，個別要素法とは異なり，ポテンシャルエネルギーの最小化原理に基づくため解の唯一性は保証されているものの，3 次元においてブロック同士の接触関する定式化が極めて複雑であり，3 次元問題への拡張の足かせとなっている．さらに，大小様々なブロックを有する問題においては，ブロック同士の貫入制御が難しく，ブロック同士の透過やブロックが飛び散るなど実現象では有り得ない挙動が得られる場合ある．すなわち，不連続岩盤の大変形問題を動的に解析できる手法は存在するが，未だ確立されていないのが現状である．特に，海底地すべり現象は流体と固体が連成し合い，多くの亀裂を含む不確実な固体の 3 次元的な破壊現象を伴う極めて複雑な力学的問題であるから，精度の高い大容量・高速 3 次元計算が必要不可欠となり，数値計算手法を扱う計算力学分野においてはチャレンジングな対象である．

以上のことから，本研究は学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており，国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考える．

(3) 研究内容

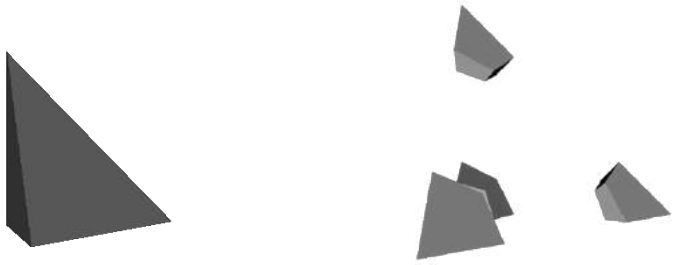
(A) 任意形状の地形形成技術の構築

本研究では，前述したように，Sulskyらによって開発されたMPM（Material Point Method）を基盤とした固体－破壊－流体連成解析技術を構築し，数値シミュレーションの観点から海底地すべり現象の力学的メカニズムやそれに伴って生じる津波の発生メカニズムを理解することを目標としている．そこで，本年度は様々な地形の3次元モデル化技術（3次元ブロックモデルの自動生成技術）を確立することに取り組んだ．以下に概略を述べる．

(B) 地形のモデル化方法

(1) 四面体要素のブロック化

四面体を用いたモデル生成技術は有限要素法の発展とともに進化してきた．近年においては，機械部品のように極めて複雑な形状を有する対象であっても高い精度のメッシュモデルを生成することが可能となっている．そこで，本研究ではブロックを作成する際，四面体要素で分割されたメッシュモデルを利用することにした．任意形状のモデルを四面体要素に分割する際，例えば，オープンソースの 3 次元 Mesh Generator である TetGen を用いて作成することができ，本研究ではこれを用いることにした．四面体を用いてブロックを作成する時，本研究では，ブロックの面は四面体要素の頂点，各辺の中点，各面の重心，要素の重心を用いて形成することを仮定した．したがって，ブロック面は必ず 4 つの点で構成される．図 2 に示すように四面体要素が一つの場合，この要素から作成されるブロックは 4 つであり，各ブロックは 6 つの面を有している．各ブロック面は頂点，辺の中点，面の重心，辺の中点からなる面が 3 面，要素の重心，面の重心，辺の中点，面の重心からなら面の 3 面が存在する．隣接する四面体要素が存在する時，隣り合うブロック同士の重複する面を取り除いてできるブロックを 1 ブロックとした．すなわち四面体要素における頂点が解析領域の境界に位置していない場合，その頂点はブロック面を形成する点としては用いないものとする．したがって，ブロックのサイズは要素サイズに依存するため，任意形状のモデルを四面体要素にて分割する際に，要素サイズを均一に分割した場合には各ブロックのサイズは均一となり，要素サイズをランダムに分割すると大小様々なブロックを有す地形モデルの作成が可能となる．

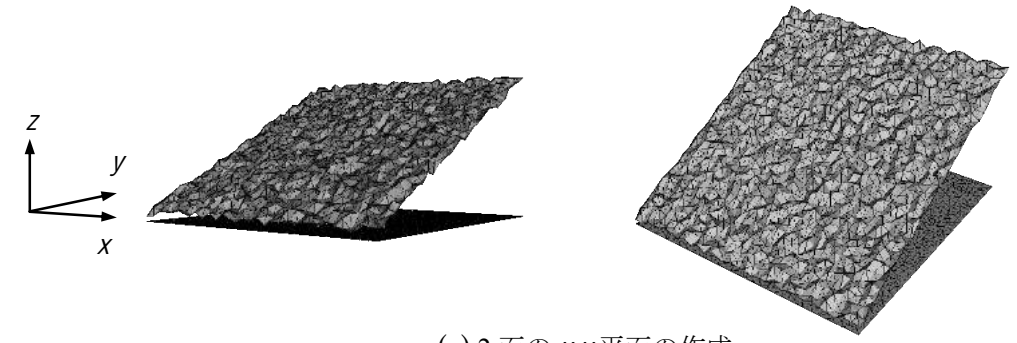


(a) 四面体要素　　(b) ブロック

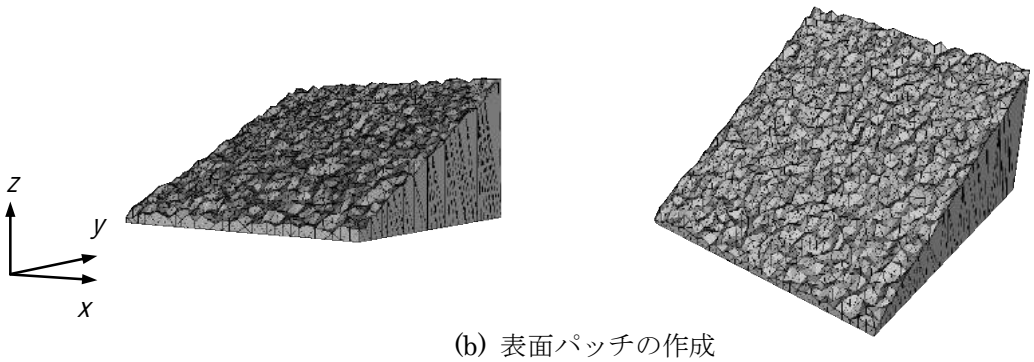
図 2　四面体要素のブロック化

(2) 3次元地形のモデル化

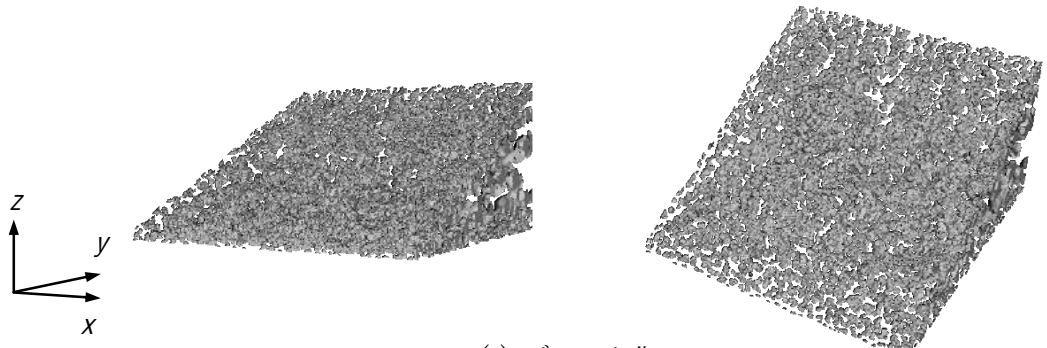
ここでは，3 次元地形のモデル化手法について述べる．モデル化する地形の平面を *x-y* 平面とし，高さ方向を *z* 方向とする．まず *x-y* 平面の領域を決め，その領域を三角形要素にて分割する．そして，三角形要素の各頂点における *z* 座標に任意の値を与えた平面と，与えていない平面（*z* = 0.0）を作成する（図 3(a)参照）．このとき，三角形要素は 3 次元モデルの表面パッチとなるため，各平面の三角形要素と 2 面の境界における節点同士を結んだ表面パッチを用いて，3 次元地形のモデルにおける表面パッチを作成する（図 3(b)参照）．そして，この表面パッチのデータを用いて TetGen にて地形モデルを四面体要素にて分割し，（1）節の方法にてブロック化を行う（図 3(c)参照）．なお本研究では，三角形要素を作成する際，オープンソースの 2 次元 Mesh Generator である Triangle を用いた．



(a) 2 面の *x-y* 平面の作成



(b) 表面パッチの作成

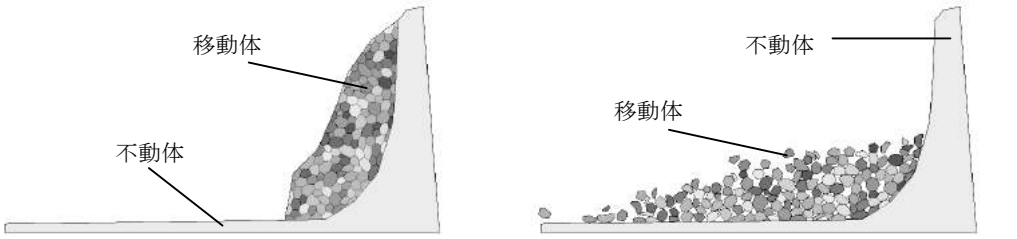


(c) ブロック化

図 3　移動体の生成方法

(3) 不動域の作成

不連続変形法や個別要素法のように斜面崩壊をシミュレーションする場合，図 4 に示すように，上部の移動体と下部の不動域が作成され，一般的に不動域は 1 ブロックで表わされ，移動体に比べ，ブロックのサイズは極めて大きい．ここでは，そのような不動域の作成方法について述べる．まず（2）節の方法を用いて，不動域の地形モデルを作成し，表面パッチを作成する．この表面パッチを用いて 1 ブロックの不動域を作成する．このとき（1）節で述べたように，ブロック面は 4 つの点で構成されるため，表面パッチを形成する三角形要素内に点を設け，頂点，辺の中点，要素内の点で構成される 4 点をブロックの面とした．すなわち図 5 に示すように，1 つの三角形要素からできるブロック面は 3 面である．この面を用いることで，不動域が 1 ブロックにて表現可能となる．図 6 にフローチャート示した．本手法を用いることで，任意形状の不動域ならびに移動体の作成が可能となり，図 7 に示すように，移動体と不動域の結合を行うことで容易に任意形状の 3 次元地形をモデル化することが可能となる．



(a) 解析モデル　　(b) シミュレーション結果（DDA による）

図 4　2 次元ブロックを用いた地すべり解析の例

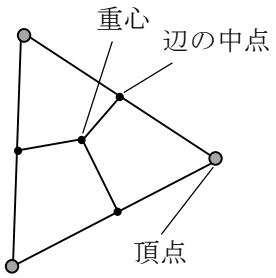


図 5　三角形要素の分割

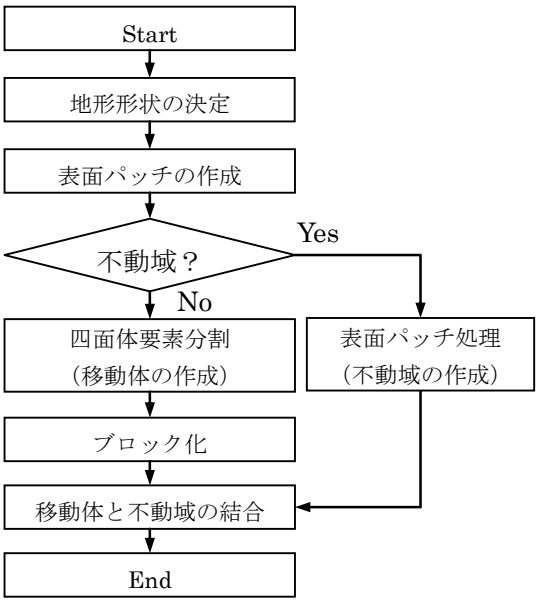
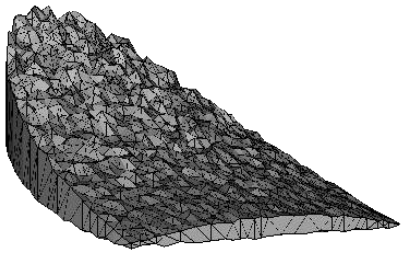
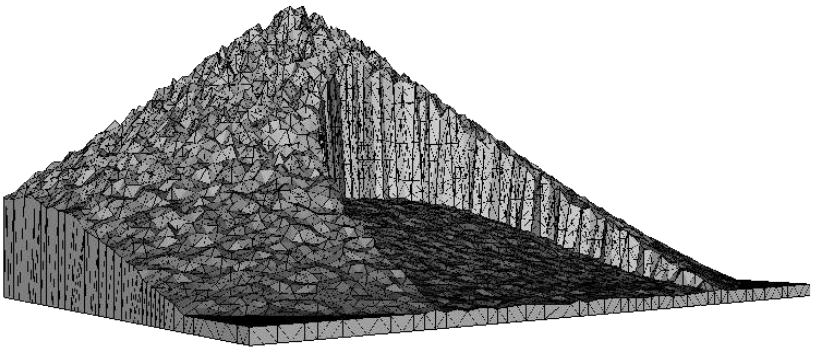


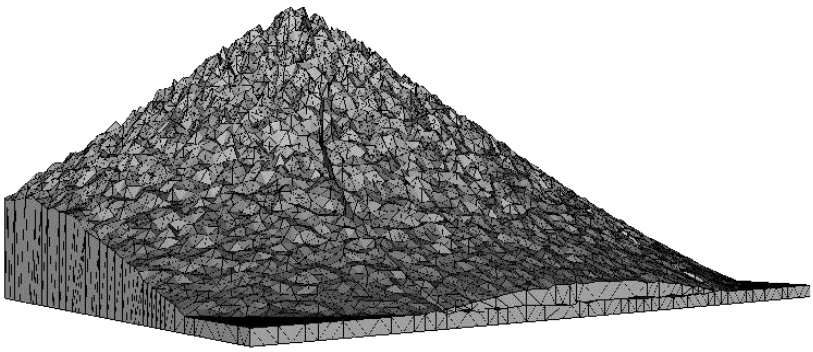
図 6　四面体ブロック化フロー



(a) 移動体（# Block 1267）



(b) 不動域（# Block 1）



(c) 地形モデル（# Block 1268）

図 7　任意形状の地形モデル

(4) 平成 24 年度進捗状況

今年度は，地すべり地形に対する3次元ブロックモデルの自動生成技術について議論した．ブロックの作成に関して，地形モデルをオープンソースであるTriangleとTetGenを用いて四面体要素にて作成し，その四面体要素の頂点，辺の中点，面の重心，要素の重心を用いて，四面体要素からブロックの作成を行った．また，地形モデルの表面パッチを用いることで複数のブロックからなる移動体ではなく，1ブロックからなる不動域の作成も行った．その結果，移動体と不動域からなる任意形状の地形モデルの作成が可能となった．今後はこれらの地形データならびにMPMを用いて斜面崩壊，海底地すべり等の大変形問題に適用し，崩壊メカニズムについて検討していく予定である．

参考文献

(1) 松原仁，江戸孝昭，原久夫：岩盤のき裂ネットワークを考慮した不連続体解析手法の提案およびき裂進展解析，日本計算工学会論文集，No.20120017，2012.

(2) Hitoshi Matsubara, Takaaki Edo and Hisao Hara: Crack Propagation Model for Discrete Fracture Network based on GFEM and MLSM, Proceedings of the 4th International conference on computational methods, 2012.

(3) Hitoshi Matsubara: Numerical simulation of fracture network in rock based on GFEM and MLSM, Proceedings of KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2012, pp. 227-231 2012.

(4) 江戸孝昭，松原仁，原久夫：粒状構造を有する脆性材料の離散き裂進展解析手法の開発および性能評価，土木学会論文集 C（地圏工学），印刷中.

3. 1. 4. 粒子法手法による並列流体-構造連成解析手法

(1)目標・計画

本研究では、流れと構造物を粒子の集合体で表現する粒子法により、流体と構造体の相互作用による運動解析を数値的に行うことを目的にしている。

平成 24 年度は、構造物の表面性状の違いによる境界条件の変化がもたらす流れ場や運動への影響に取り組み、構造物と流れの相互作用点となる境界条件に新たなモデルを導入しその評価を行う。特に、表面性状としては生体などに関連する親水性をもつ表面における滑り効果を考慮した、物体の運動と周辺流れ場の連成計算を可能にすることを目指す。具体的には、水に突入する物体が生成する水しぶきの数値シミュレーションを取り上げ、その物体表面の滑り度合いと境界条件の関連をモデル化する。そして、物体と流体の境界における滑りの条件の差により、物体突入により生成される水しぶきの形状変化などをシミュレーションできるようにする。

平成 25 年度以降では、前年度で取り上げた落下する物体の弾性を考慮に入れ、流体と構造体の変形も考慮に入れた連成問題に着手する。金属のような剛体ではなく生物のように柔らかい物体が落下し着水するときには、着水時の水面からの反作用などにより物体の形状に変形が伴う。また、着水時の物体変形は抗力を変化させ周囲の流れ場にも影響を与えるため、流れ場と物体変形の連成問題が生じる。そういった流体からの圧力変化による物体の変形を考慮に入れた数値計算を可能にし、粒子法を用いる利点である大変形や破砕のような自由境界面のシミュレーションの表現能力の向上を行う。さらに、将来的にはこれらの 3 次元化と大規模粒子数による詳細なシミュレーションを可能になるように並列計算への発展を目指す。

(2)意義・国際社会との比較

流体と個体の相互作用を扱う粒子法（MPS 法）シミュレーションを行うにあたって、個体である物体の表面性状の違いを数値計算に導入する方法を提案する。ここで扱う表面性状とは、高分子素材であるハイドロゲルといった表面に親水性で滑り特性を持つ物体を対象とする。

ハイドロゲルとは、寒天やゼラチンのような食用品から医療や生体材料まで幅広く用いられている水を溶媒とする高分子ゲルであり、魚やカエルといった生物の体表面のヌメリはそういった高分子ゲルの一つである Mucin が主な成分である。これまで、我々は生物とそれらを取り巻く流体環境の解明として、生体材料でもあるハイドロゲルとその周辺流れについての研究を行ってきた。

本研究のように物体と流体の相互作用の先行研究としては、表面性状と壁面の水滴や表面の粗さや材質による流れ場の影響についての研究が行われており、液滴の接触角の調査から車体の撥水性や船体の抵抗低減の問題まで多く取り扱われている。また、落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ（飛沫）に関しては、物体の落下速度や形

状によってスプラッシュの形状が異なるが、さらに物体の材質の違い（例えばハイドロゲルとアクリル樹脂）によっても観察されるスプラッシュの形状に差が生じる。つまり、同じ運動条件でも表面性状の違いによって周囲の流れ場は異なる現象になるため、表面に滑りがあるような物体と流れの相互作用を数値シミュレーションで計算するには、物体と流体の境界条件に滑りの効果を記述するモデルの導入をする必要がある。

これまで数値シミュレーションにおける表面性状の違いの扱いとしては、ディンプルやボルテックスジェネレータのような剥離などを扱ったりする物体表面の構造的な点に着目した研究は多くなされてきたが、それら研究の物体と液体の境界は滑りなし条件で設定されており、上で挙げたような生体のぬめりのような表面の滑り効果を考慮した物体と流れの相互作用を扱ったシミュレーションはない。また、自由表面を伴う流れ場の解析に有効な粒子法の一つである MPS 法（Moving Particle Semi-implicit 法）によるシミュレーションも多くの研究成果があるが、既存の方法のままでは材質による差は表現できていない。一方、生体や医療といった分野の循環器系や細胞などのシミュレーション解析においても、血管壁や膜などの表面の滑りの扱いについては特に言及されていない。よって本研究では、ハイドロゲルといった親水性物質による物体とそうでない物体といったように、物体の壁面応力に違いのある物体と周辺流れ場の相互作用を計算する方法について提案する。

(3)研究内容

ハイドロゲル表面の滑りの効果を MPS 法に取り入れる方法として、ここでは表面の滑りを物体と流体の壁面の摩擦の低減として表し、その低減率を slip ratio して定義し、物体と流体の壁面のせん断力の計算に適用する方法をとった。まず、ハイドロゲルの物性値の一つである膨潤度 S（swelling degree）は、下記の式(5)のようにゲルの質量に対する水の質量の比で表される。

$$S = (m_{\mathrm{water}} + m_{\mathrm{gel}}) / m_{\mathrm{gel}} \qquad (1)$$

ここで m_{water} は溶媒となる水の質量、m_{gel} はゲルの乾燥材料の質量である。本研究における、ハイドロゲル壁面と流体との間に生じる滑り率(slip ratio)については、流路を流れる水の PIV 実験により寒天壁面近傍の垂直方向の水の速度勾配からハイドロゲルの壁面応力を測定し、そこから滑り率(slip ratio) α として数値計算の境界条件に導入した。図 1 はその実験の模式図であるが、寒天およびアクリル(滑り無し条件として)でできた斜面上を流れる水の流速を水中に混入させたパーティクル使ってビデオ撮影により計測し、その壁面近傍における速度勾配から壁面応力を算出した。ここでは、アクリル斜面を滑り無しとして基準の壁面応力 τ とし、次式によって壁面近傍の速度勾配から算出する。なお、ハイドロゲルの動摩擦抵抗係数 μ は水 1.0×10^{-6} とする。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}\Big|_{y=0} \qquad (2)$$

また膨潤度 S のときの壁面応力を τ'とし同様に壁面近傍の速度勾配から算出し、上の滑り無しの場合の応力との比を滑り率 α とした。

$$\alpha = \tau / \tau' \quad (3)$$

S に対して α は、実験結果より次式のように線形の値をとる結果が得られ、

$$\alpha = 1 - \beta S \quad (4)$$

その膨潤度 S と α の関連を図 2 に示す。この実験値より係数 β は 0.0012 であった。例えば膨潤度 150 では α は約 0.95 であり約 5%の壁面摩擦抵抗の低減になることを示している。(なお、no-slip の場合は α=1 で、また完全にスリップする場合の α は 0 である）。

ここで得られた α は、ゲル壁面と水の境界付近における粘性の計算時の重み関数の係数として用いる。MPS 法では、各パーティクル間のせん断力の影響度を次の重み関数 κ として与え、本研究では、図 3 に示すように、寒天ゲル壁面と周囲の水の滑り（壁面せん断力の低減）の影響として、粘性項の計算における重み関数に滑り率 α を掛け合わせた κ_H を寒天ゲルの周囲 r_e にある水粒子との間にのみに用いた。

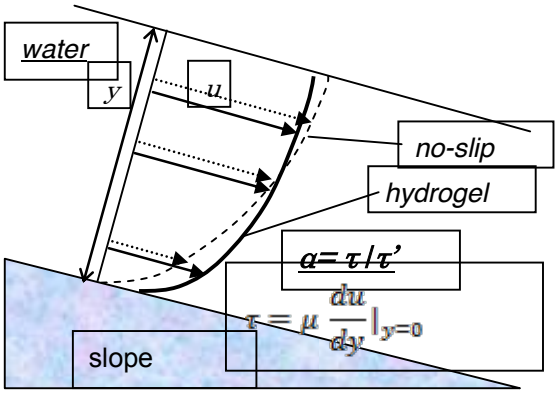


図 1 Definition of slip ratio α and flow on the hydorogel slope. The τ is wall shear stress on the slope with no-slip condition. The τ' is that on the slope with hydrogel (agar).

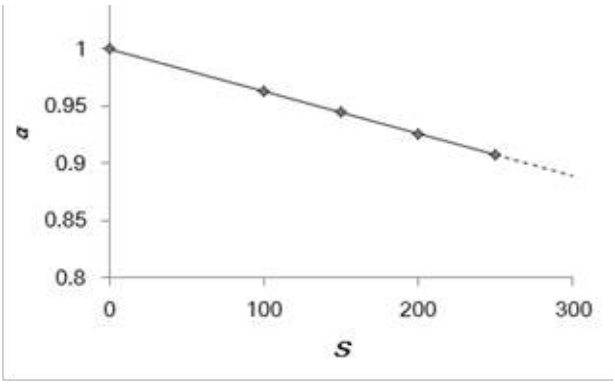


図 2 Relationship of swelling degree S of agar and slip ratio α, which was obtained experimentally.

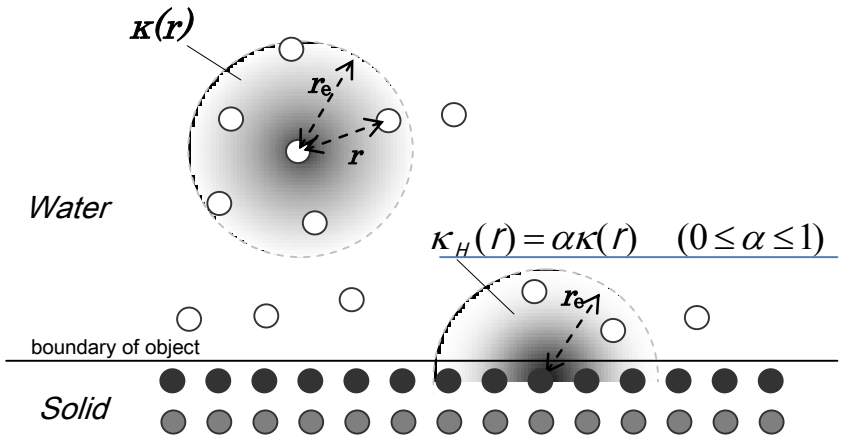


図 3　Difference of weight functions κ_H and κ.　The distance between particles denoted by r. The κ_H is used between the particle on the boundary of the hydrogel object and the virtual water particle near the boundary.　Here, κ is used between the other particles, and α is the coordinate as a ratio of κ_H and κ.

$$\nabla^2 u_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum \left[(u_j - u_i) \kappa_H (| \vec{r}_j - \vec{r}_i |) \right] , \tag{5}$$

$$\kappa_H(r) = \alpha\kappa(r), \tag{6}$$

ここで、d は次元数、λ は分散を表す定式で n^0 は初期粒子密度である。ただし、他の水同士の重み関数には通常の κ を用いる。つまり、ハイドロゲルの表面を構成するパーティクルから半径 r_e にある水粒子との粘性項計算についてのみ α を掛け、重み関数 κ_H で計算することで壁面応力を α 分だけ小さくしハイドロゲル壁面近傍の滑りを表現した。なお、他の項の圧力勾配 ∇P などの扱いは従来の MPS 法と同じで、他の数値計算の解き方も従来の手法をそのまま使用しており、本研究ではハイドロゲル壁面近傍のせん断力の扱いが異なる。

(4)平成 24 年度進捗状況

本研究の手法の検証として、管路内を流れるポアズイユ流れの二次元シミュレーションを行った。図 4 に、高さ h の管路に水を流した時の、床面からの距離 y とその位置における流速 u の分布について、床面の滑り無し条件（no-slip）と滑り有り条件（膨潤度 S = 100, 250）それぞれの結果を示す。床面の滑り無し条件および滑り有り条件共に流れの計算領域上面($y = h$)は slip 条件で x 方向に流速 u_0 を与えるものとしている。速度分布 u は u_0 で、また高さ y は h でそれぞれ割って正規化している。

シミュレーションによる結果をポアズイユ流れの速度分布の理論値と比較すると、同等の速度勾配が得られている。図中右に拡大図を示すが、滑りがある $S = 250$ の結果において、no-slip の結果より床近傍で約 10%流速が増加しており、上述の実験と同様の結果になっていた。また、膨潤度の上昇に伴いハイドロゲル表面の滑りによる効果で壁面流速は増加している。つまり、壁面応力は表面近傍の速度勾配に比例するが、シミュレーション結果がハイドロゲルの膨潤度 S の増加により表面近傍の速度の変化率が減少しており（図 4 では縦に速度を取っているので傾きが急になる）、slip ratio の導入による表面の滑りによる効果で抵抗低減の効果の様子が実験同様に示せたことを表している。以上、壁面に slip ratio を滑り有り壁面近傍に導入することで、実験の結果と同様の計算が可能になり本手法は妥当であることが確認できた。

3.1.5. 振動現象の流体–構造連成解析と自己組織化マップを用いた分類

(1) 目標・計画

本研究では、流体と構造体の相互作用による振動現象の数値解析に行い，自己組織化マップを用いて解析データの分類を行い，条件による振動現象の特徴を検出することを目的にしている．条件による振動現象の特徴が分かれば，流路内に設置する温度計，圧力計などのさや管の選定や，楽器などの共振を伴う弦などの設計に役立てることが期待できる．

自己組織化マップは，高次元のベクトルデータを低次元空間(マップ)に写像するものであり，高次元データのクラスタリングを行える．また，マップを見ることでデータの特徴抽出やマイニングを行うことができる．自己組織化マップのマップ部分をモジュールに置き換えたモジュラーネットワーク型自己組織化マップもあり，モジュールを MLP(Multi Layer Perceptron)に置き換えたものが主で，入出力関係を保持することができる．このモジュラーネットワーク型自己組織化マップを用いると，分類後に未知の入力から想起して意図する出力を提示することが可能であり，設計に用いることができる．

自己組織化マップを用いてクラスタリングすることより，振動現象の分類が可能で，マップに写像することで直感的にデータを扱うこともできると期待できる．

平成 24 年度では，ADVENTURE システムのモジュールの一つである，ADVENTER_Fluid を用いて，流体-剛体の移動境界問題を解いた．移動境界には ALE 法を用いて解析を行う．また，解析対象は簡単のため 2 元無限円柱をモデルとして解析を行った．

平成 25 年度以降は，様々な条件での解析を行い，データを収集する．収集したデータを自己組織化マップでマッピングして振動現象の分類マップを作成し，ロックイン現象になりやすい条件，そうではない条件などを示唆するマップを形成する．また，流体–構造での場合の分類も目指す．

(2) 意義・国際社会との比較

自己組織化マップは分類機としてデータマイニングに多く用いられる手法であり，入力データをマップ上に配置することができる．また，この配置は似たデータ同士を近くに配置し，そうでないデータを遠くに配置するといった特徴を持つ．そのことから，入力データのクラスタリングが可能となり，データマイニングが行える．

本研究では，自己組織化マップを用いた振動現象の分類を行う．振動現象はロックイン現象の再現や渦励振など様々研究が行われているが，特徴を分類した文献は目にしてない．本研究ではロックイン現象を視野に入れて研究を行う．境界条件による円柱の振動運動の特徴でクラスタリングできれば，ある条件下での振動がロックインするかしないかの予想をたてることができる．このことにより，流路内のさや管の選定に役立てたり，ロックイン現象を意図的に起こす楽器の設計に役立てたりすることが期待できる．

また，流体-構造連成現象も視野にいれ，構造側が変形する場合の自己組織化マップによる分類は，構造物の変形具合をマップに写像することで，意図する構造の変形を選択的に選び出し使うことができる．

入力データを様々に変更することで，多様なマップを作成でき，流体-構造連成解析の解析データをまとめることができ，そのデータをベースに未知の条件でも，ある程度の予測をたてることが可能であると考えられる．

以上のことから，本研究は学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており，国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考える．

(3) 研究内容

自己組織化マップ，並びにモジュラーネットワーク型自己組織化マップを作成した．自己組織化マップは2階層のニューラルネットワークであり,図1のように入力層と出力層(マップ)とに分かれる．また，出力層では格子上に配置されたユニット U が存在し，ユニットと入力層を結合荷重 w が結んでいる．自己組織化マップは競合学習により勝者ユニット(図1の場合 U_m)とその近傍(赤いサークル内)のユニットが入力データに似るように修正される．入力データを変更して同様に繰り返していくことで入力データをクラスタリングすることができる．

例として,動物のクラスタリングを行った.動物は16種類の動物を16個特徴(体(大,中,小)，2足歩行，4足歩行，羽，縞，たてがみ，etc.)で表し，マップに配置した．出来上がったマップを図2に示す．

図2より，鳥類が下側に集まり，上に草食動物，肉食動物がクラスタリングできた．以上より，入力データを自己組織化マップで分類することが可能であり，特徴を見つけ出すことが可能である．

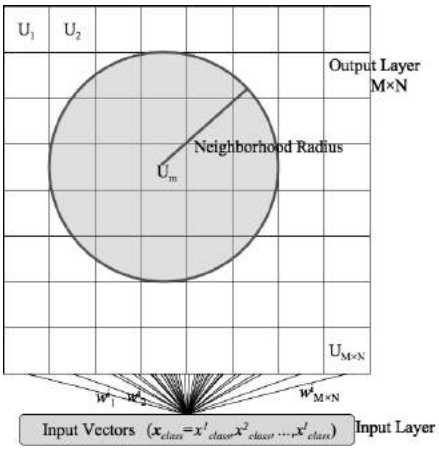


図1　自己組織化マップ概略図

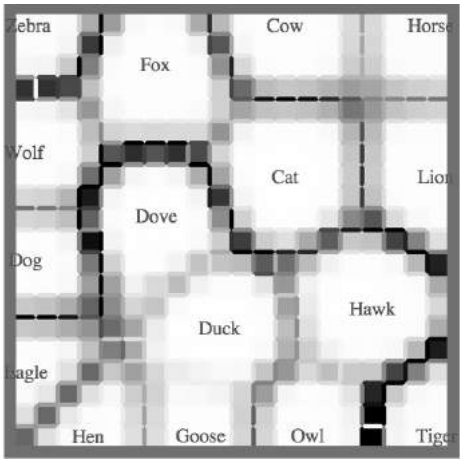


図2　動物のクラスタリング

本研究での入力ベクトルは，流速，円柱の直径，Re 数，バネ定数，円柱質量，最大振幅，平均振幅，波長などを考えている．

次に，流体-構造連成解析では，ADVENTURE システムを用いる．今回は移動境界問題を扱うために，ADVENTUER_Fluid モジュールを書き換えて，解析を行う．
ADVENTURE_Fluid モジュールは有限要素法による大規模並列非圧縮性流体解析モジュールであり，六面体用コードと四面体用コードがある．本研究では四面体用コードを用いる．四面体用コードは P1-P1 要素をベースとして， SUPG/PSPG 法による安定化が施されている．

ADVENTURE_Fluid モジュールに含まれる四面体用コード ADVENTURE_Fluid_Tet は P1-P1 要素を用いた有限要素法に非圧縮粘性流体解析コードで，SUPG/PSPG 法による安定化手法が用いられ，ALE 表記による有限要素法の弱形式は以下のように表される．

$$
\begin{aligned}
&\int w_i \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j u_{i,j} \quad f_i \right) d \quad + \int w_{i,j} \quad _{ij} d \quad + \int q u_{i,j} d \\
&+ \sum_e \int_e \quad _{SUPG} u_j w_{i,j} \cdot \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_k u_{i,k} \quad f_i \right) \quad _{ik,k} \right] d \\
&+ \sum_e \int_e \quad _{PSPFG} \frac{1}{} q_i \cdot \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_k u_{i,k} \quad f_i \right) \quad _{ik,k} \right] d \\
&= \int_h w_i h_i d
\end{aligned}
\tag{1}
$$

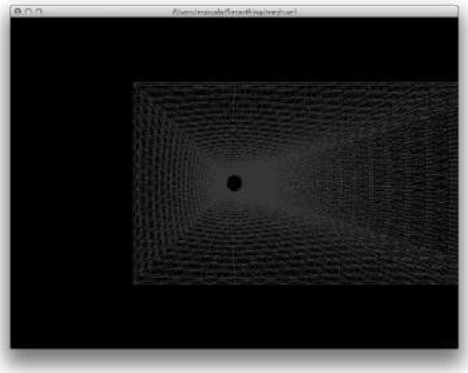
メッシュの移動がうまく扱えられているか，円柱を sin 波で強制振動させて，メッシュの移動がうまく行えているか確かめた．図 3 に強制振動させた円柱周りのメッシュを示す．円柱の移動に伴ってメッシュも移動している．

実際は円柱にかかる流体力から円柱の移動量を求めることとなる．そのとき，Verlet 法を用いて円柱の次ステップの移動量を算出する．Verlet 法による円柱中心座標の移動位置の算出方法と，円柱表面の移動速度の算出方法を以下に示す．

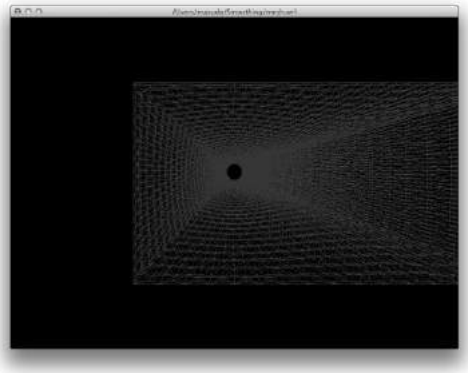
$$
Pos_{new} = Pos_{old} + v dt + \frac{dt^2}{2m} \left(trac \quad kx \right) \tag{2}
$$

$$
v_{new} = v_{old} + \frac{dt}{2} \left(a_{new} + a_{old} \right) \tag{3}
$$

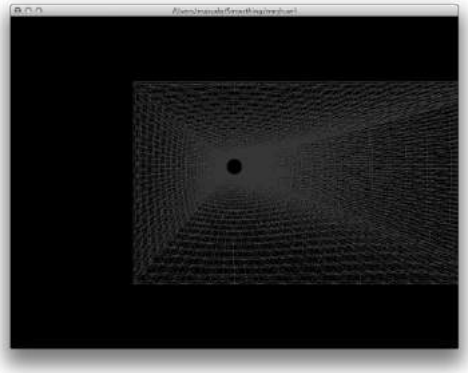
ここで，*Pos* は円柱の中心座標，*v* は円柱の移動速度，*dt* は時間刻み幅，*m* は円柱の質量，*trac* は円柱にかかる流体力，*k* はバネ定数，*x* は円柱の初期位置からの距離を表す．*a* は円柱の加速度である．式(2)より円柱の位置を求め，式(3)により円柱の速度を更新していく．これにより，円柱の運動を表すことができる．



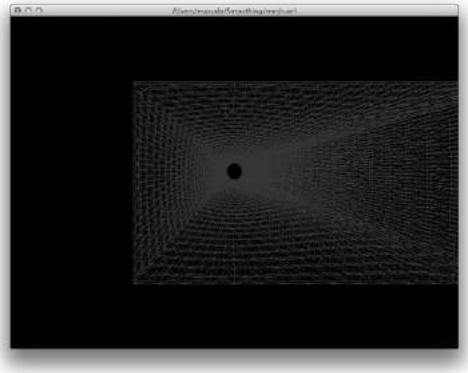
(a) sin 0



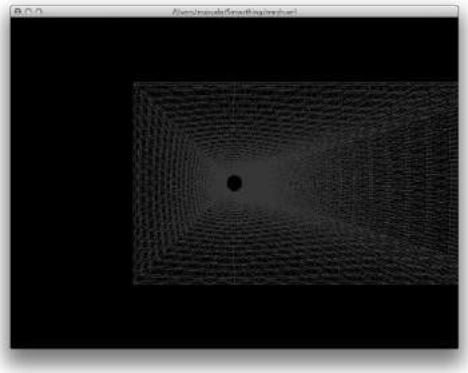
(b) sin 1/4 π



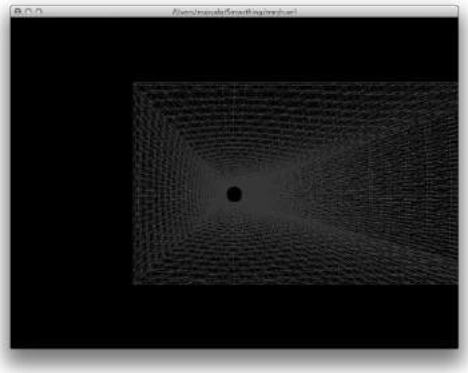
(c) sin 1/2 π



(d) sin 3/4 π



(e) sin π



(f) sin 5/4 π

図 3　メッシュの移動制御

ここで，ADVENTURE_Fulid モジュールを書き換えたので，円柱周りの流れ解析を行う．このとき円柱は支持されていて動かない．円柱の揚係数，抗力係数，ストローハル数を調べる．

また，本研究の連成問題の解析モデルは図 4 に示す．モデルは y 方向にだけバネで支持した円柱を風下に設置し，風上から一様流速を与える．このとき x 方向，z 方向には動かない．

解析条件を適宜変更しながら，解析データを収集して，振動現象に関する自己組織化マップを作成する．

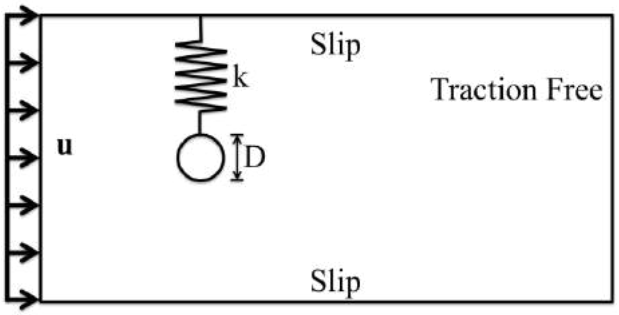


図 4　解析モデル(イメージ)

(4) 平成 24 年度進捗状況

自己組織化マップで動物のクラスタリングを確認した．動物のクラスタリングを行った結果，特徴別にマップ上に配置されていることが確認できた．

流体-構造連成解析に向けて，ADVENTURE_Fluid モジュールを ALE 表記で SUPG/PSPG 法による 安定化有限要素法に書き換えた．また，メッシュの移動制御ができるようにした．Verel 法を ADVENTURE_Fluid モジュールに組み込み，円柱の受ける流体力から移動量，移動速度を求めることができた．

今後は，解析精度の確認と，移動境界問題を解き，解析データを収集して自己組織化マップでマッピングを行う予定である．

3.2. 大規模並列化グループ

2011 年に京コンピュータが 10 ペタ(Peta: 1 京)フロップス(Flops: Floting Points per second)に達し，TOP500 では 2 回連続世界 1 位となり，2012 年には米国の Sepuoia、Titan がそれぞれ 1 位を記録し，次世代スーパーコンピュータは，ペタの次の世代，つまりエクサ(Exa)フロップスを指す時代へと突入している．このことからもハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる．その一方で，これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては，その開発スピードもソフトウェアの品質も十分とは言えず，多くのソフトウェアが 20 世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である．特に，1970～1980 年台に既に確立されているアルゴリズムに対して，並列化の実装のみを加えた物が多く見られる．このような背景のもと，本プロジェクトでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する，次世代の大規模解析システムを構築するとともに，常に最先端のスーパーコンピュータ能力を活用するシミュレーション実現を目指す.

今年度は，以下の項目について報告を行う.

(1) 大規模構造物中のき裂の３次元自動進展解析

(2) ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

(3) 流体-構造連成解析手法に用いる構造解析部分のための大規模メッシュモデリング

3.2.1. 大規模構造物中のき裂の３次元自動進展解析

（1）目標・計画

原子力関連設備，化学プラント，航空宇宙システム等の高度の安全性が求められる構造物の設計や運用においては，SCC・疲労・腐食等に関連する劣化予測，実験が困難なシビアアクシデント時における挙動予測，事故要因の分析や補修工事の妥当性評価のための逆問題解析等の健全性評価手法を確立することが極めて重要である．しかし，構造健全性評価のための数値シミュレーションには，未だに熟練した解析技術者の経験と勘に頼っている要素が多く，システマティックで迅速・正確な解析手法は，まだ確立されていないというのが実情である．その主な要因として，以下が挙げられる．

・大規模構造物に生じる 3 次元複雑形状のき裂を正確に表現する計算力学モデルの構築の困難さ．つまり，複雑形状・複雑き裂に対するプリプロセッシングの困難さ．
・マルチスケール・マルチフィジックス解析を精度良く効率よく解くことの重要さ．

当センターでは，構造健全性に関する研究の一テーマとして，上記の要因を満足する，き裂進展解析システムの研究開発を継続している．

目標は，下記 2 つの技術の確立である．

i) 大規模構造物中に発生したき裂の評価をタイムリーに実施可能な技術
ii) 大規模構造物中の複雑形状き裂の三次元進展現象を完全自動でシミュレーションする技術

（2）意義・国際社会との比較

原子力関連施設等での SCC や疲労き裂の進展予測評価に関しては，実用上，感度解析も含めて 1 ヶ月程度で終了することが要求される．現在の六面体有限要素を用いたき裂進展解析では解析モデル生成にマニュアル操作が多く，一解析ケースあたり 4-6 ヶ月程度を要する．要求をまったく満足できていない．現在までに複雑な三次元形状をもつ構造に発生したき裂の解析を短時間に行うことや，また，その進展予測をするき裂進展解析はほぼ不可能であった．

本研究の成果によって，自動モデル生成技術の確立された四面体有限要素を使用し，き裂の形状や大きさに関するパラメトリック解析やき裂進展解析の完全自動化を実現し，原子力関連施設の SCC や疲労き裂問題の解析をタイムリーに実行可能とすることが可能になる．そのため，原子力関連機器の安全性評価の高度化に対して大きく寄与するものである．

（3）研究内容

本年度までに，基礎的研究，ソフトウェアプラットフォームの構築，溶接残留応力場に

おける二次元き裂進展解析の実例はほぼ終了している．具体的には下記のとおりである．

（A）VCCM を用いた三次元き裂の応力拡大係数算出に関わる研究

モード I 埋没き裂，表面き裂，さらに混合モード解析により，計算精度の検証を行い，良好な精度で解析可能であることがわかった．[1) 2)]

（B）三次元自動き裂進展解析システムの開発

プラットフォームには，（株）テクノスター社製の TSV-Pre[3)] を利用している．最初に，き裂進展解析システムのフローを説明する（図 1）．

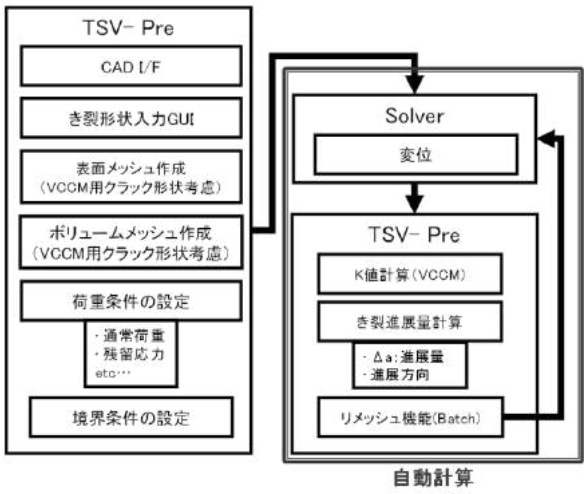


図 1 自動き裂進展解析システム フロー

最初に，図 1 左に示すとおり，手作業で初期き裂メッシュモデルを作成する．具体的には下記の流れになる．

1. CAD モデルをインポートする．
2. き裂形状を CAD モデルに追加する．
3. 自動メッシングにより，四面体二次要素でメッシュモデルを作成する．
4. 荷重，境界条件を設定する．

初期き裂メッシュモデルの例を，図 2 に示す．メッシュサイズは，き裂先端の応力拡大係数評価部が一番細かくなるようにコントロールしている．また，き裂先端周りのメッシュ形状が VCCM の応力拡大係数計算条件に適する形（き裂面側とリガメント側で対象）になる．

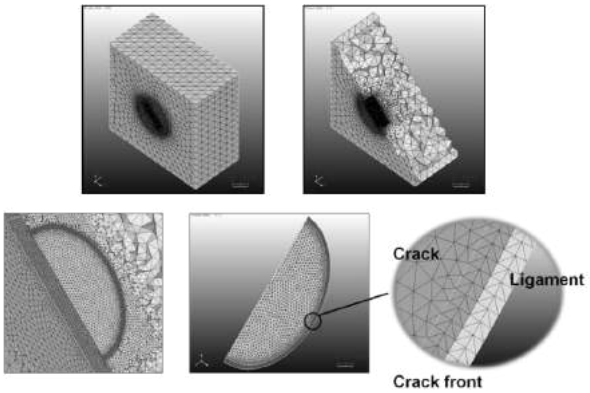


図 2 初期き裂メッシュモデル

初期き裂メッシュモデルを作成した後は，き裂進展パラメータを入力するだけで，完全自動のき裂進展解析が始まる．き裂進展パラメータは，「SCC または疲労の選択」「SCC の場合は，残留応力場の設定」「進展量」「き裂進展則」「スムージング係数」である．き裂進展則は，研究の多様性のために，パリス則等だけでなく，任意式にも対応する．

図 1 右側の自動き裂進展解析のフローについては，図 3 に詳細を示す．まず，変位と節点力を計算する．その後，VCCM により応力拡大係数を計算する．そして，き裂進展則に応力拡大係数を代入して，き裂進展量を求める．き裂進展量が求められたので，⊿t または⊿N 分，モデルのき裂形状が進展する．最後にリメッシングを実施する．以上の手順を，解析終了として設定されたステップ，もしくは，き裂が貫通するまで繰り返す．

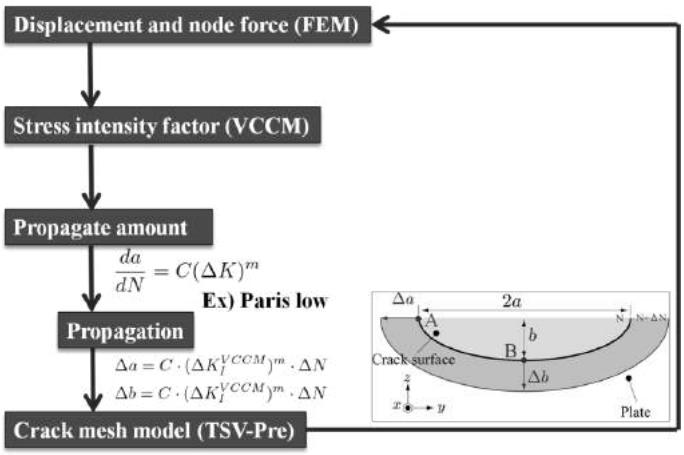


図 3 き裂進展計算フロー

（C）溶接残留応力場における二次元き裂進展解析

き裂進展解析システムのロバスト性の評価として，溶接部を模した平板モデルで二次元き裂進展解析を実施した．残留応力場は，残留応力解析の環境に影響されないよう，応力

値をもった点群データに対応する．この点群データの応力値を四面体要素にマッピングする（図 4 参照）．図 5 に，残留応力場とき裂進展の軌跡を示す．

き裂進展則により，材料 A は材料 B，C に比べ，進展量を小さくしている．材料 C に進入時にき裂は終了する事とした．自動き裂進展解析により，⊿t の進展量がコントロールすることにより，手作業では不可能は細かい進展量で，安定したき裂進展解析を実施することができた．

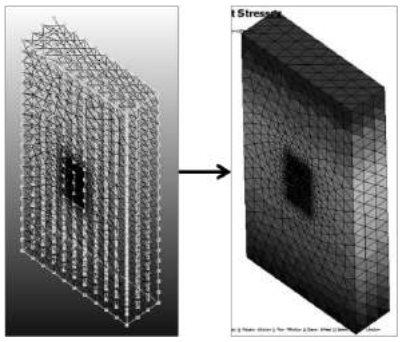


図 4 残留応力のマッピング

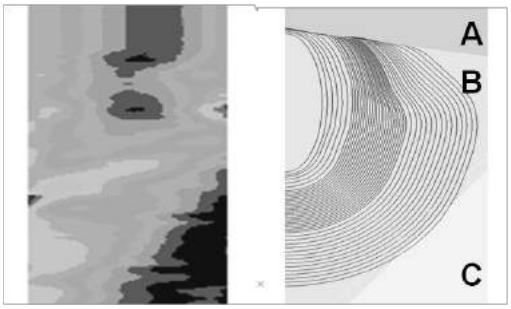


図 5 模擬残留応力場，き裂進展軌跡

（4）平成 24 年度進捗状況

上記の自動き裂進展解析システム開発に対して，進捗状況は以下の通りである．

・3 次元き裂進展解析への適用

【達成度 90%】基礎的問題に対してであるが，ほぼ完了している．ただし，ロバスト性に若干の問題があり，問題によってはシステムがストップする．その場合は，途中のステップからのリスタートを必要とする．

（例）半楕円表面き裂問題の解析

半楕円上面き裂問題をとき，2 ステップ以降の進展解析も実施した．半楕円上面き裂問題に対する典型的な有限要素法解析モデルを図 6 に示す．なお，本例題は，Raju‐Newman の

表面き裂問題[4]のモデルを参考に設定した．初期き裂の応力拡大係数は，円板状埋没き裂のモードⅠ応力拡大係数で正規化して表した結果を図 7 に示す．図 8 は，初期き裂と貫通後のき裂形状である．き裂が 3 次元に進展している様子がわかる．

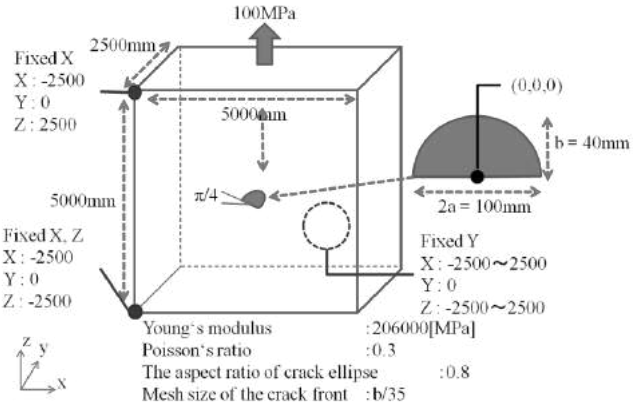


図 6 半楕円表面き裂モデル

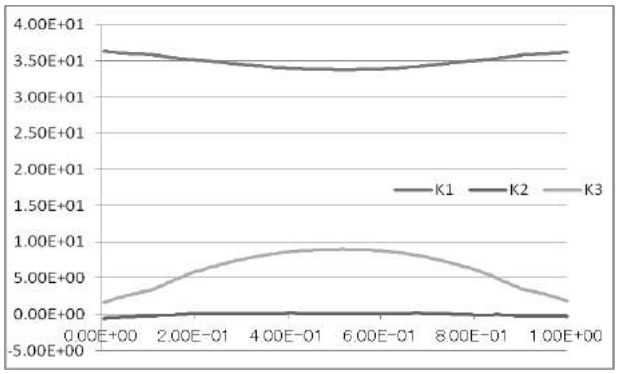


図 7 正規化応力拡大係数

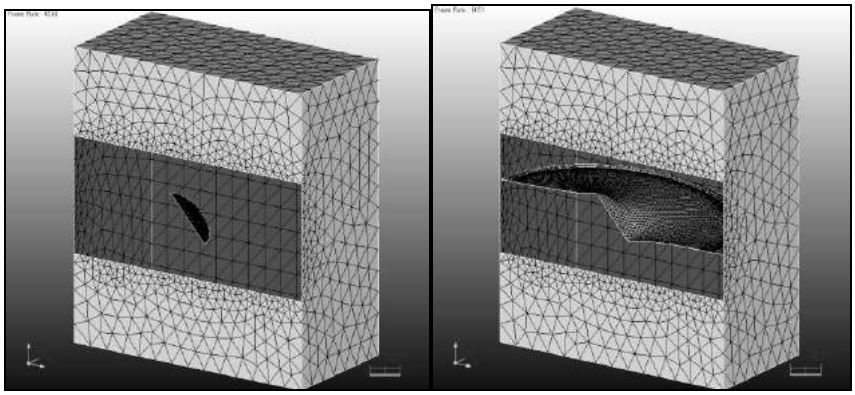


図 8 3 次元き裂進展解析

今後はロバスト性の向上化とともに，き裂の分岐進展や，複数き裂対応などを実施する予定である．

参考文献

1) 岡田，荒木，河合，大規模有限要素法解析のための応力拡大係数計算手法(四面体要素を用いた仮想き裂閉口積分(VCCM))，日本機械学会，第 73 巻，第 728 号，pp.498‐505，2007.
2) 岡田，荒木，河合，大規模有限要素法解析のための応力拡大係数計算手法(混合モード／複雑形状き裂解析のための四面体要素仮想き裂閉口積分法(VCCM))，日本機械学会，第 73 巻，第 733 号，pp.997‐1004，2007.
3) http://www.e-technostar.com/
4) Y.Murakami et al, Stress intensity factor handbook, volume 2 (1987),Pergamon Press.

3.2.2. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

（1）目標・計画

本研究では対象問題をある程度限定することで高性能が得られるアプリケーション特化型システム開発を行っていく．対象問題は連続体力学とし，産業界で需要が高い非構造格子並びに自由表面や移動境界問題に重要なメッシュフリー（粒子法を含む）の取り扱いを可能とする．時間方向の非定常性や問題が持つ非線形性を考慮する必要があるが，陰解法ベースの数値解析手法を対象とする．これらに対し，3 つの課題(A)DDM 入出力ライブラリ開発，(B)DDM ソルバーライブラリ開発，(C)連続体力学向け DSL 開発に取り組む．本研究で開発されたライブラリを用いて連続体力学系シミュレータの実装と評価も行う予定である．

（2）意義・国際社会との比較

ポストペタスケール計算を見据えた新技術の開発について，これまで同様汎用向けのライブラリなども開発されるであろうが，それらの利用では，非構造格子問題では高々数パーセントの性能，あるいはそれ以下しか期待できず，連続体力学系シミュレーションに特化したシステム開発が必要と考えられる．そもそも数パーセントの性能でのソフトウェアはペタコンでの運用が認められないという制約もあり，これはポストペタコンについてはさらに厳しくなることも想定される．

連続体力学系シミュレーションは，従来からの FEM，FVM，BEM など非構造格子アプローチに加え，近年ではメッシュフリーや粒子ベース手法による大規模計算の台頭が目覚しく，これらにも対応させ，非構造格子および節点，粒子ベースモデルを統一的に扱えるようにすることで，連続体力学系シミュレーション向けライブラリとして整備されれば，ポストペタコンの連続体力学系シミュレーションでの利用の拡大に大きく貢献することが期待できる．

（3）研究内容

A）DDM（Domain Decomposition Method，領域分割法）入出力ライブラリ

本研究項目は，マルチレベル領域分割法に基づく多階層計算格子データの生成，操作および I/O ライブラリ開発を行うものである．一般的なアプリケーションシステムは，プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが，これまでは最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装されてきた．ポストペタコンでは，全ての処理をスパコン上に実装し，並列化することが当然求められてくる．しかし，従来の枠組みで並列化したのみでは，それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される．そこで，これまで研究代表者らがソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法の技術を応用した，マルチレベル領域分割法によるデータ処理システムの開発を行う．

B）DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は，マルチレベル領域分割法に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列ライブラリ開発を行うものである．一般的な線形代数ソルバーは，アセンブリされた連立一次方程式を入力とするため，FEM におけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた．それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくいが，ポストペタコンで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される．そこで，提案するマルチレベル DDM による多階層型データ構造を活用した，大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリの開発を行う．

これは，

・多階層領域分割に基づく分散メモリ並列向け線形代数ソルバーの構築

・多階層領域分割に基づくマルチレベルコースグリッド修正法の開発

・構造・熱・流体・磁場などを対象とする物理現象毎に特化したコースグリッド修正法の開発

を含む. つまり, これまで FEM を対象に研究を進めてきた DDM をマルチレベルに拡張し，さらに FVM，BEM，メッシュフリー，節点ベース FEM や粒子法など連続体力学全般に適用する技術開発である．また，マルチレベルな領域分割を利用し，線形代数ソルバーにおける前処理手法について，研究代表者らがこれまで研究を進めてきた高速かつ安定した収束性を持つ反復解法である BDD（ Balancing Domain Decomposition）法や BDDC（Balancing Domain Decomposition by Constraints）法をマルチレベルに拡張し，さらに粒子法などへの応用も進める．開発システムは線形代数ライブラリとして整備していく．

C）連続体力学向け DSL（Domain Specific Language，問題領域専用言語）

本研究項目は，連続体力学向け DSL の開発と，それに対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成の開発を行うものである．ポストペタコンのアーキテクチャでは，計算ノード間の並列性だけでなく計算ノード内での効率も重視される．各計算ノードはメニーコアや GPU，SIMD 拡張命令といった多種多様なアクセラレータを有し，これらを有効利用することが望まれる．従来のプログラミング言語やコンパイラ最適化技術での対処は不十分であり，現状ではそれぞれのアクセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必要とされている．一方，数値シミュレーションコードの場合，特に連続体力学分野においては，そのアプリケーションロジックは物理現象や数値解析スキームであり，これは数学表現，特に行列やテンソルで表記されることが多い．よって，連続体物理モデルを DSL 化して，数学記述（例えば，行列，テンソルの式を tex 形式で記述）から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブラリを call するコードを生成するコードジェネレータあるいはトランスレータアプローチが有効であると考えられ，これを実現するシステムの開発を行う．

（4）平成 24 年度進捗状況

A）DDM 入出力ライブラリ

演算処理装置や記憶装置の階層構造に適した負荷分散機能として，非構造格子向けの多階層領域分割アルゴリズムを開発した．特に本年は，MPI-OpenMP ハイブリッド並列処理に適した多階層領域分割機能の開発を行った．更に，大規模解析支援機能として，四面体ソリッド要素と六面体ソリッド要素の一様メッシュ細分割の機能の開発を行った．本ライブラリを用いることで，東大 T2K の 1,024 計算ノードを用いて 13 億要素数の非構造四面体メッシュを 280 秒で生成することができ，京コンピュータの 3,072 計算ノードを用いて 28 億要素数の非構造四面体メッシュを約 12 分で生成することに成功した．

また，粒子法向けライブラリの重要性が高まっていることから，当初計画を 1 年前倒しして，メッシュフリー向け階層型領域分割アルゴリズムとメッシュフリー向け標準 I/O ライブラリの開発を行った．特に本年は粒子法向けの機能開発を行った．メッシュフリー向け階層型領域分割アルゴリズムでは，粒子が計算ノードに均等に割り当てられ，隣接間通信の少ない領域分割が行われるものである（図 1）．メッシュフリー向け標準 I/O ライブラリでは，大規模有限要素法解析の実績があり，ソースプログラムが公開されている ADVENTURE I/O ライブラリをベースに開発を行い，粒子法への対応を行った．粒子法で用いられる物理量のラベルを定義し，本ライブラリを用いることで解析プログラムから接続するプレポストまでの統一的な開発が可能となった．

本年度の成果を元に，来年度は「DDM 入出力ライブラリ」の 50%以上の機能開発を目指す．

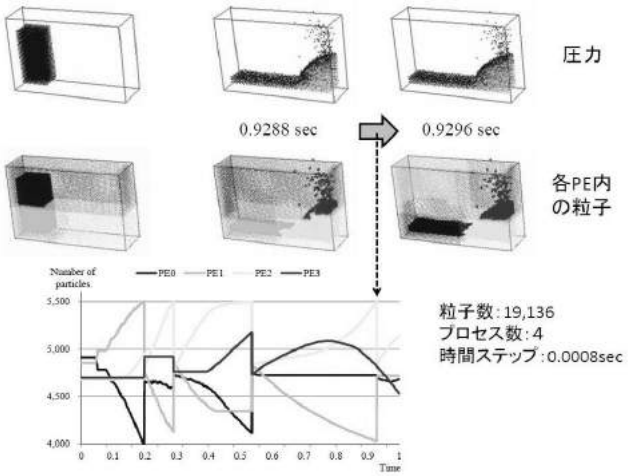


図 1 メッシュフリー向け領域分割ライブラリによる動的負荷分散例

B）DDM ソルバーライブラリ

非構造格子向け DDM 反復法ライブラリとして，多階層領域分割情報を利用した DDM 反復アルゴリズムの開発を行った．特に本年は，MPI-OpenMP ハイブリッド処理に適した 2 階層領域分割に基づく DDM 共役勾配法の開発を行った．線形代数演算のアプリ特化型最適化として，有限要素法における節点自由度数に応じた手動ループ展開や SIMD 向け最適化を行った．本ライブラリ

を用いることで，非構造格子による大規模有限要素解析が京コンピュータにおいて 10%以上のピーク性能比を得ることに成功した．また，目標アプリの 1 つである磁場解析向けに，非正則行列及び複素対称行列向け DDM 反復法アルゴリズムの開発を行った．本ライブラリを用いることで，解析規模に対してロバストな収束性を得ることが可能となった．来年度は，開発ライブラリを用いた外部ユーザによる実装評価を行っていく．

また，多階層前処理技術として，有限要素法向け BDD 並びに BDDC 前処理アルゴリズムの開発を行った．既に実績がある構造解析向け BDD 前処理については超並列計算環境向け実装技術の開発を行い，京コンピュータの 256 計算ノードでウィークスケーリング 89%，ストロングスケーリング 92%の並列効率が得られた．来年度は，京コンピュータの大規模ノードに加えて東大 FX10 と東工大 TSUBAME2 における性能評価を行う．構造解析向け BDDC 前処理アルゴリズムを開発し，試解析を行い，理論に基づく性能が得られた．来年度はポアソン・磁場解析向けアルゴリズム開発を行う．また，3 次元静磁場解析向け BDD アルゴリズムの検討を行った [1]．来年度は試解析を行う．

本年度の成果を元に，来年度は「DDM ソルバーライブラリ」の 50%以上の機能開発を目指す．

C） 連続体力学向け DSL

連続体力学向け DSL として，基本機能であるトランスレータ開発を行った．本年は特に，DSL の仕様・文法について詳細な検討を行った．LaTeX および独自のテキストベース DSL の二種類に対して，特に有限要素解析向け応用を意図し，言語仕様や LaTeX マクロを定めた．次に，アクセラレータ対応コード自動生成として，SIMD・GPU 向けに性能最適化ライブラリ開発を行った．本年は特に，スカラー型プロセッサでの SIMD 命令利用に重点を置き，テンソル・行列演算向けライブラリのプロトタイプ実装を行った．アイソパラメトリック要素の要素剛性行列作成コードのベンチマークにおいて，インテル社 Sandy Bridge において理論ピーク性能比の 40～70%，京コンピュータ（富士通 SPARC64 VIIIfx)において同 20～25%程度を，それぞれ達成した．また，外部ユーザによる開発中ライブラリの性能評価を並行して行うことで，開発効率化並びにユーザビリティ改善を行っている．

本年の成果を元に，来年度は「連続体力学向け DSL」の 30%以上の機能開発を目指す．

D） 連続体力学系シミュレータ

粒子法向けライブラリは実問題解析に適用可能かが重要な評価指針であるため，当初計画を前倒しして，開発中の粒子法向けライブラリを用いたシミュレータ実装並び評価を並行して実施することとした．粒子法向けライブラリでは，関数ポインタを用いて利用者が粒子の物理量計算の関数を定義することができるので，解きたい物理モデルを自由に組み込むことができる仕様となっている．

東大 T2K を用いて，粒子法向けライブラリを用いたシミュレータの並列性能を測定したところ，64 計算ノード 1,800 万粒子から 1,024 計算ノード 2.6 億粒子へのウィークスケーリング性能評価で

94%の並列効率が得られ，6,900 万粒子の 64 計算ノードから 1,024 計算ノードのストロングスケーリング性能評価において 93%の並列効率が得られた．来年度は，東大 FX10 と東工大 TSUBAME2 への実装と性能評価を予定している．

また，プロメテック社に商用コード PartcleWorks を用いた GPU クラスタ上での試解析を外注した．来年度はその試験結果を元に，開発ライブラリの性能評価と検証に用いる予定である．

本年度はモデル作成や条件設定などにおいて仮想的なシミュレーションを行ったが，来年度は実問題解析を対象にシミュレータ実装と性能評価を行う予定である．

3.3. 新規実験計測グループ

流体－構造連成解析手法を検証するために詳細実験を行うと同時に，物性データ交換のための表現形式，変位・ひずみ場や流速分布データの解析手法，流体計測法を新しく開発することが目標である．数値計算を実施するには既存の物性データを入力する作業が必要であるが，データ表現の統一規格がないため，計算環境に依存するのが現状である．そこで，数値計算のシステムと物性データベースを連携して，数値計算に反映できる標準データの構築を検討する．また，数値計算の妥当性を評価するには詳細実験が不可欠であることから，物体の変位量，ひずみ量，流速分布，空気力など様々な計測実験を行い，数値計算結果の信頼性を評価する．また，熱線流速計の安価で簡易な温度較正法の構築，乱流境界層の速度分布全域を表わす普遍関数の検討についても報告する．

3.3.1. 物性データ交換のためのデータ表現形式の検討

（1）目標・計画

数値シミュレーションのために基本的な物性値は必須のものであるが、材料の物性値を収めたデータベースにおけるデータ表現は統一されておらず、必要なデータは多くのデータベースがインターネット上に存在する現在でも事実上手作業で値を入力する必要がある。本研究では、材料データの標準データ交換形式を開発し、数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的とする。

（2）意義・国際社会との比較

材料物性に関するデータベースは各所で開発されているが、統一されたフォーマットは無く、データを交換するための標準を作成する試みは NIST などによって行われてきたが現在のところ定まった標準がない。データ交換のためのフォーマットの開発は、分散したデータベースの統合利用に加え、数値計算システムなどからの利用も容易になる。

芦野らのグループはオントロジー技術を用いた材料データの表現形式開発を進めており、2005,6 の二ヶ年 NEDO からの受託研究を受けて開発した材料データオントロジーは、物質・材料研究機構と産業技術総合研究所の間でのデータ交換を実現するとともに、現在 EU 標準規格委員会のワークショップにおける機械試験データのオントロジー開発においても参照されるている。また、芦野は CODATA における材料データ交換フォーマットの国際タスクグループの議長を務めるなど、この分野の研究では国際的に見て比較的進んでいるが、我が国の材料データベースの整備やデータ交換のための組織的な取り組みは縮小傾向にある。

（3）研究内容

2012 年度より、産業技術総合研究所において、材料の標準計測データを Linked Open Data として活用することが出来るようにするための作業が開始された。Linked Open Data は W3C などを中心に行われている活動であり、Semantic Web の技術に基づいて Web 上のデータをその意味内容が分かるような形でリンクして活用しようというものである。現在の World Wide Web では、自然言語で書かれたテキストがハイパーリンクによって接続されている構造であり、リンクにどのような意味があるかは問題にされない。これに対して Semantic Web では、それぞれのデータがどのような意味を持つかを明かにする形でリンクされる。

たとえば、材料物性であれば、材料の名前とある数値がリンクされるときに、この関係は熱伝導率である、などと内容に基づいてリンクされていれば内容に基づいて必要なデータを取得することが出来る。しかしながら、この場合リンクの意味などを定義する辞書となるものが必要であり、意味を持たないリンクと異なり作成には多大な労力を要する。現在、産総研における LOD への対応において、NEDO 受託研究によって、Semantic Web におけるオントロジー記述言語である OWL を用いて開発した材料データオントロジーが

活用されており、開発者として協力している。

また、材料の物性値は温度や圧力などの状態変数に依存するものであり、あらゆる状態での測定は不可能なことから、経験式や理論から実験値に基づいて導き出された関係式の形式で記述され、必要に応じて計算で求められる場合も多い。現在、材料データベースにはこのような数式を表現する標準的な手法がなく、また、一般的なデータベース管理システムではこのようなデータを管理することができないことから、各所で開発されたデータベースが独自の手法をとって表現している。

これに対して芦野らは、数式の意味を記述するために開発された OpenMath 規格を用いて数式の意味内容を記述して管理する手法を開発し、産総研の熱物性データベースに収録されている数式データの OpenMath 化を行っている。OpenMath は XML 形式での記述が可能なため、LOD のデータや OWL によるオントロジー記述との相互リンクや、数式処理システムなどとのデータ入出力、MathML に対応したブラウザでの数式レンダリングにも対応が容易であり、LOD との親和性も高い。

（4）平成 24 年度進捗状況

本年度は、産総研熱物性データベースに収録された数式データについて、OpenMath による表記を用いたデータベースの試作を行うとともに、LOD への標準試験データのリンクについて、単位系の表記、NEDO オントロジーの活用にあたっての協力を進めた。

3.3.2. ドット重心追跡法による変位・ひずみ場解析(古川先生)

(1) 目標・計画

構造物の健全性は腐食や減肉，繰り返し荷重によるき裂に進展などによる断面積の減少が密接に関連している．構造物の破壊による事故を未然に防ぐためには，構造物の損傷よるみかけのヤング率の変化の検知が重要である．そのためには，広い測定範囲・適用性の高さを有する全視野測定が有効である．全視野測定は，近年のデジタルカメラと計算機の性能の向上と価格の低下により，測定への導入が比較的容易となった．デジタルカメラを使用した測定法には，モアレ法，スペックル法やデジタル画像相関法(Digital Image Correlation)法などがある．これらの手法には，装置の設置や操作が複雑である点や，計算量が多い点が問題点として挙げられる[1,2]．このような問題点を解決した手法の一つに，ドット重心法がある [3-6]．ドット重心法とは，図 1 に示すように，被測定対象物に付着されたドットマークをデジタルカメラで撮影し，そのドットマークの重心位置を算出し，重心の移動量を変位量とし，ひずみを求める手法である．

デジタルカメラを使用した手法において，レンズによるひずみが誤差の原因となる[7]．ドット重心法も例外ではなく，ドット重心法についての過去の研究[8]では，平板の一様引張りにおけるひずみ場の測定において，ひずみ場が一様に測定されない結果となった．この原因はレンズによるひずみであり，ドット重心法においてレンズのひずみを取り除く必要性を示している．ドット重心法の大きな利点は，扱う情報はドットの重心位置のみである点である．そのため，レンズの補正対象はドットの重心位置のみであり，画像を補正する手法に比べ計算量を大幅に削減できる．そこで本研究では，ドット重心法に適したレンズひずみの補正の事前処理の手法を提案し，また，円孔付き平板の測定に対して，提案手法を適用し検討した．

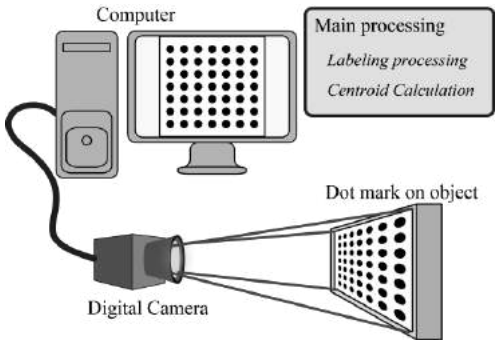


Fig. 1 System of Dot centroid method

(2) 研究内容,

レンズひずみは，正規化座標系おいて，原点からの距離 R とレンズひずみ係数 k_1, k_2, k_3 により式(1)でモデル化される．

$$
\begin{aligned}
x_{dist} &= x(1.0 + k_1R^2 + k_2R^4 + k_3R^6) \\
y_{dist} &= y(1.0 + k_1R^2 + k_2R^4 + k_3R^6) \\
R &= \sqrt{x^2 + y^2}
\end{aligned} \tag{1}
$$

ここで，x, x_{dist} はそれぞれ理想的な重心位置と，撮影によって得られる重心位置である．機械的ひずみ場の測定では，理想的な重心位置で評価する必要がある．

画像座標（x, y）と物体座標（X, Y, Z）は射影変換式（式 2）により関係づけられる．ここで，a, b, c, d, e, f, g, h は射影変換係数である．

$$
x = \frac{aX + bY + c}{gX + hY + 1.0}, y = \frac{dX + eY + f}{gX + hY + 1.0} \tag{2}
$$

また，画像座標は，式(1)のレンズひずみを受け，式(3)のように示される．

$$
\begin{aligned}
x_{dist} &= \frac{aX + bY + c}{gX + hY + 1.0}(1.0 + k_1R^2 + k_2R^4 + k_3R^6) \\
y_{dist} &= \frac{dX + eY + f}{gX + hY + 1.0}(1.0 + k_1R^2 + k_2R^4 + k_3R^6) \\
R &= \sqrt{\left(\frac{aX + bY + c}{gX + hY + 1.0}\right)^2 + \left(\frac{dX + eY + f}{gX + hY + 1.0}\right)^2}
\end{aligned} \tag{3}
$$

式(3)より，すべての係数は撮影によって得られた重心位置と理想的な重心位置を使用し，レーベンバーグ・マーカート法により求める．

式（1）のレンズひずみのモデル式は非線形であるため，解析的な逆変換が困難である．そこで数値的に逆変換を行う．まず，中心(a,0)，半径 r の円を式(1)により写像した閉曲線の重心位置 x_c を以下の式(4)~(7)によって求める．解析的に写像された閉曲線の重心位置が求められれば，逆変換によりレンズひずみの補正が可能になる．撮影によって得られた重心位置から理想的な重心位置が推定できる．

$$
\begin{aligned}
x &= (r\cos(\ ) \quad a)(k_0 + k_1R^2 + k_2R^4 + k_3R^6) \\
y &= (r\sin(\ ))(k_0 + k_1R^2 + k_2R^4 + k_3R^6) \\
&where \ \ R^2 = x^2 + y^2
\end{aligned} \tag{4}
$$

$$
S_x = \int_0^2 \int_0^r |J| x \, dr \, d \tag{5}
$$

$$S = \int_0^2 \int_0^r |J| \, dr \, d \tag{6}$$

$$x_c(a,r) = S_x(a,r) / S(a,r) \tag{7}$$

式(5)の断面一次モーメントと式(6)の面積について解析的に積分を行う[10]．撮影によって得られた重心位置 x_cを初期値とし, Newton-Raphson 法により理想的な重心位置 aを求める．

(3) 平成 24 年度進捗状況

数値例をここに示す．ここでは，実際の重心位置を式（8）と一般的なレンズひずみ係数 k0 = 1.0，k1 = -0.2535，k2 = 0.1178 を使用し，解析的にひずませる．

$$\begin{aligned} x_{distorted} &= x_{actual}(k_0 + k_1 R^2 + k_2 R^4) \\ y_{distorted} &= y_{actual}(k_0 + k_1 R^2 + k_2 R^4) \\ where \quad R &= \sqrt{x_{actual}^2 + y_{actual}^2} \end{aligned} \tag{8}$$

次に，ひずんだ重心位置を提案手法により逆変換を行った．その結果を図 2 に示す．逆変換における数値誤差は 10-15 以下であった．この結果より，レンズひずみ係数が既知である場合，高精度な逆変換が可能となった．

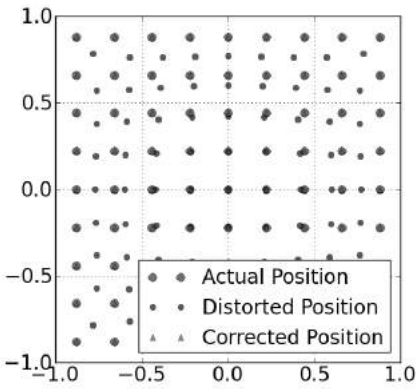


Fig. 2 Result of numerical inverse transformation

ひずみ場の測定のために，厚さ 3mm の円孔付き平板を使用した．試験片の材質は，アルミニウム合金の A2017-T4 である. この材質のヤング率とポアソン比は, それぞれ 69.09GPa と 0.35 である．円孔付き平板にドットマークを付着させた試験片が図 3 である．この試験片を縦方向に 14.75kN の引張り荷重を与える. 撮影に使用したデジタルカメラとレンズは, それぞれ Flea 3(Point Grey Research, Inc.)と HF35HA(Fujinon Corporation)である.
引張試験において，荷重を与える前後のドットマークをそれぞれ撮影し，重心位置からメ

ッシュを作成した．その結果を図 4 に示す.

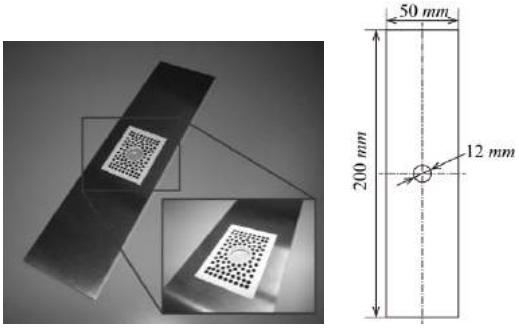


Fig. 3 Specimen and dot mark sheet

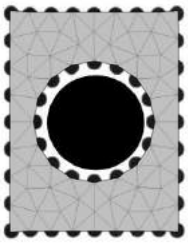
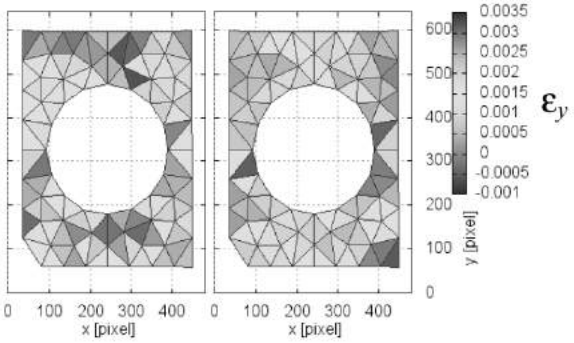


Fig. 4 Mesh by centroids of captured dots

図 4 に示されたメッシュと変位量から, グリーンのひずみの定義によりひずみ場を求めた. レンズのひずみの補正前後のひずみ場を図 5 に示す.



5-a Distorted　　5-b Corrected

Fig. 5 Measurement result of strain field

次に，有限要素法汎用コード ANSYS による数値解を図 6 に示す.この結果は，補正後の結果が補正前の結果に比べ測定精度が向上していることを示している.この結果より，三角形一次要素で精度良く測定が行える事が確認できた.

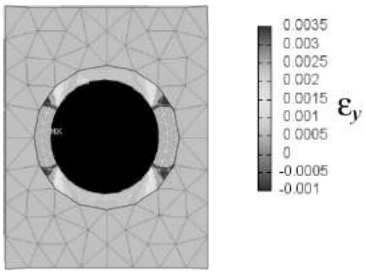


Fig. 6 Calculated result of strain field by ANSYS

次に，レンズひずみの補正前後のひずみ場の差を図 7 に示す．撮影領域の中心から離れるにつれ，ひずみの差は増加している．これは，撮影領域の中心から離れるにつれレンズのひずみの補正量が増える傾向と一致している．また，提案手法によって生じるひずみの差は 0.1%ひずみの測定に大きく影響する値であることが確認できた．

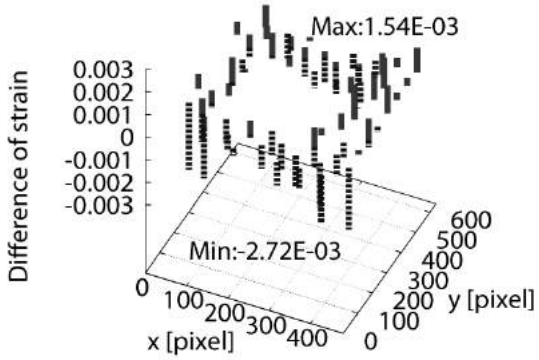


Fig. 7 Difference of strain between distorted result and collected result

本研究によりドット重心法に適したレンズひずみの補正に関する事前処理の手法を提案し，三角形一次要素と少ない自由度でひずみ場が高精度に求めることを実現した．これにより，レンズひずみの補正を含んだ変位とひずみ場を求めるシステムの開発を行った．

参考文献

[1] Vendroux, G., and Knauss, W., G., 1998, “Submicron Deformation Field Measurments: Part2. Improved Digital Image Correlation”, Experimental Mechanics, Vol. 38, No.2

[2] Uneda, M., Okuhata, S., and Ishikawa, K., 2010, “Study on Accuracy Evaluation of Deformation and Strain Distribution Measurement using Digital Image

Correlation Method", JSME

[3] Iliopoulos, A. P., Michopoulos, J. G., and Andriopoulos N. P., 2010, "Performance Analysis of the Mesh-Free Random Grid Method for Full-Field Synthetic Strain Measurement", An International Journal for Experimental Mechanics

[4] Michopoulos, J. G., and Iliopoulos, A. P., 2011, "A Computational Workbench for Remote Full Field 3D Displacement and Strain Measurements". ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, DETC2010/CIE-47739

[5] Iliopoulos, A. P., Michopoulos, J. G., Orifici, A. C., and Thomson, R. S., 2011, "External Validation of the 2D Meshless Random Grid Method". ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, DETC2010/CIE-48232

[6] Michopoulos, J. G., Hermanson, J. G., Iliopoulos, A. P., Lambrakos, S., and Furukawa, T., 2011, "On The Constitutive Response Characterization for Composite Materials via Data-driven Design Optimization". ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, DETC2010/CIE-47740

[7] Bradski, G., and Kaehler, A.,2009, "Learning OpenCV"

[8] Wada, T., Furukawa, T.,2011"Noise reduction method for digital image based full field strain measurement",NAE2011, The 7th International Conference on Numeric Analysis Engineering

[9] Kobayashi, K., and Mori, C., 1997, "Relations between the Coefficients in the Projective Transformation Equation the Orientation Elements of a Photograph" , PE&RS

3.3.3. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムの整備

(1) 目標・計画

流体－構造連成解析手法を検証するための実証試験として，低速風洞試験を行う．図1は風洞試験装置システムの概要図である．風路内部に実験模型を設置して試験を行い，数値解析の検証用データを提供する．また本研究を通じて，新しい計測手法，解析手法の提案を目指す．

(2) 意義・国際社会との比較

流体-構造連成問題について数値計算，実験は多数行われているが，その殆どが単独に行われたものである．そのため文献ではいずれかの結果が引用される場合が多く，両者の信頼性を保証した上で，結果を議論した例が見られないのが現状である．本研究では，数値計算結果の信頼性を検証するためのデータを提供することを主眼として，様々な実験に取り組む．これまで行われていなかった数値計算と実験の両方を実施することで，計算上の問題点，実験上の問題点を明らかにする．

(3) 研究内容

2012年度は風洞試験装置システムの整備期間であり，2013年度は基礎試験フェイズ，2014年度以降は応用的な実験を検討している．Fig 1 は風洞試験装置システムの概要図である．実証試験では実験模型の運動解析，空気力計測，PIV流れ解析を組み合わせた流体実験を行う．

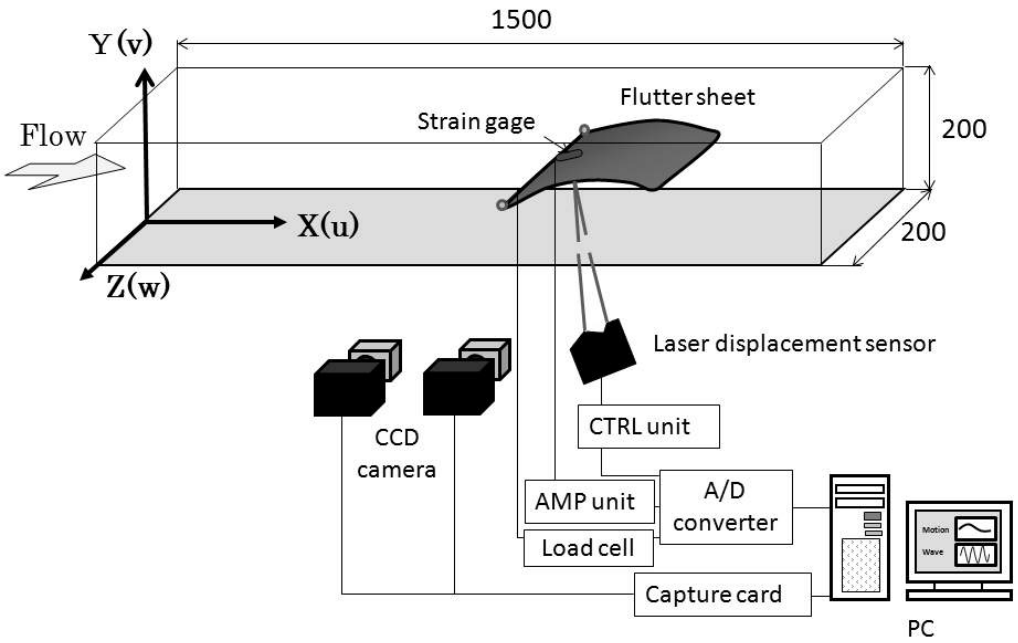


図1　風洞試験装置システム

現在予定している実験内容は以下の通りである．

(1)　高速度カメラとレーザ変位計を用いた物体の振動周波数測定，振動モード解析

(2)　実験模型の空気力測定
(3)　実験模型の応力測定
(4)　煙発生器による流れの可視化，PIV解析による流れ場解析
(5)　流体計測手法および解析手法の検討

(4) 平成 24 年度進捗状況

検証試験に必要な風洞装置，計測機器を導入し，風洞試験装置システムの整備を行った．風路断面内速度分布，乱れ強さを測定して，信頼性のある風洞試験環境を整えた．今年度，導入した装置，機器は以下の通りである．

(1)風洞装置
(2)6分力計測システム
(3)レーザ変位計
(4)3次元運動計測システム
(5)煙発生器
(6)AD変換器
(7)ステレオPIV計測システム

3. 3. 4. 境界層特性評価のための普遍関数構築

(1) 目標・計画

乱流境界層の速度分布を表わす普遍関数を構築する．これまで境界層速度分布を表現した様々な関数が提案されているが，乱流境界層の速度分布全体を記述することはできていない．本研究では，速度境界層の内層から外層，後流域を記述する関数を提案する．本手法は流体摩擦力の推算や境界層特性を算出するために適用できると考えられる．

(2) 意義・国際社会との比較

流体力学において摩擦抵抗低減は主要な研究の一つであることから，摩擦抵抗を高い精度で測定することが求められている．しかし，摩擦抵抗の大きさは一般的に小さいことから，定量計測が困難である．信頼性のある計測法として，浮動片を用いた直接計測法があるが，セッティングのための時間的コストが掛かること，平面以外の計測に不適当であることから，殆ど実施されていない．本研究では，速度分布から推算する間接計測に着目している．摩擦係数を推算するために，速度境界層を記述する様々な関数が定義されているが，乱流境界層が複雑な形をしていることから，単一の関数で記述することは出来ていない．本研究の目的である乱流境界層の速度分布を表す普遍関数を構築できれば，高精度に摩擦抵抗を計測するだけでなく，境界層特性を求めることもできると考えられる．

(3) 研究内容

乱流境界層の速度分布を表わす普遍関数を，物理的考察に基づいて導出する．内層を表わす定せん断層と外層を表わす速度欠損則を組み合わせると乱流境界層の速度分布を表現することができる．そのため，異なる関数を接続することが重要となる．提案する普遍関数と風洞試験結果，実験式と比較して，普遍関数の信頼性を評価する．

(4) 平成 24 年度進捗状況

乱流境界層を記述する速度分布関数は様々な種類がある．今年度は Spalding 則と Cole の後流関数を組み合わせることで，速度分布を積分形で陽的に表した関数を導いた(式(1)).

$$\frac{u}{u_\tau}=\int_0^{y^+}\frac{2\,dy^+}{1+\left\{1+4\kappa^2 y^{+2}\left[1-\exp\left(-y^+/A\right)\right]\right\}^{1/2}}+\frac{2\Pi}{\kappa}\sin^2\left(\frac{\pi}{2}\eta\right) \tag{1}$$

カルマン定数 κ=0.4, 後流強さ Π=0.4757，乱流混合長から算出される定数 A は式(2)のように表され，レイノルズ数 Re の関数として計算される．

$$A\approx 5B=5\left(a\ln \mathrm{Re}_\delta+b\right) \tag{2}$$

各係数は実験データを元に，Newton 法により算出できる．実験値は内層から外層までの

すべてのデータを使用した.

Figure 1 は式(1) を適用して得られた結果を実線で示している. 比較のため, 実験値 (○) も示している. 提案した普遍関数は乱流境界層全体を表現できること, また実験データをよく再現できている.

Table 1 は提案した普遍関数で得られた摩擦係数と White の経験式を比較した結果である. 提案した関数により, 良好に C_f 値を推算できている.

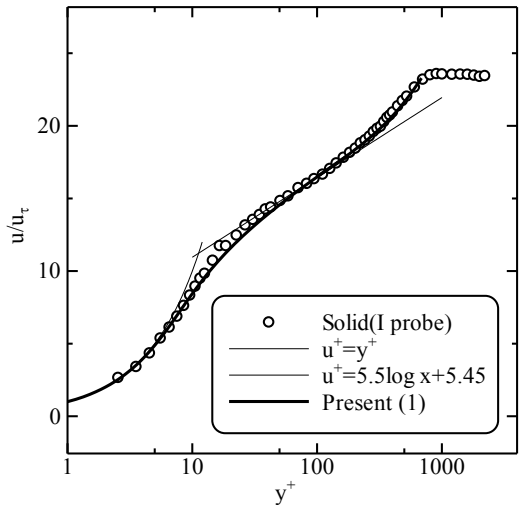


Fig.1　Logarithmic velocity profile (Eq. (1)).

Table. 1　Comparison of skin friction coefficient.

	$C_f \times 10^3$	Error (%)
White's formula	4.175	−
Present (1)	4.179	0.1

3.3.5. 熱線流速計の温度依存性に関する検討

(1) 目標・計画

熱線流速計は風速変動に対する応答性に優れており，さらに安価であることから現在でも流体工学，特に乱流の実験ではよく利用されている計測器のひとつである．しかし，熱線出力は風速に対して非線形であり，また気流温度の影響を受けるため，それぞれについて校正が必要である．通常はアナログリニアライザーを用いて出力を線形化し，気流温度変化に対してはそのつど校正しなおす必要がある．本研究では，熱線流速計のデジタル校正法と温風風洞を用いることなく温度校正する方法を検討することを目的としている．

(2) 意義･国際社会との比較

熱線流速計は現在も新しいタイプのセンサが提案されており，今後も改良の余地が残されている計測ツールである．しかし，熱線流速計を頻繁に使用している研究者であっても，速度と温度に関する校正は商用の計測システムに頼る場合が殆どであり，そのシステムは高価である．そこで本研究では，安価で簡易な速度，温度校正法を提案することを目指す．

(3) 研究内容

熱線流速計には，熱線に一定の電流を流した状態で測定する定電流型と，負帰還回路を用いて熱線の温度が一定になるように電流を調整する定温度型の２種類がある．速度計測には定温度型熱線流速計が使用される．風洞装置の流速を変化させて熱線流速計の速度校正を行い，温度補正については温風風洞を用いて温度校正を行うのが一般的である．

本実験では，(a) 熱線の発熱量と対流熱伝達のバランスから導出される King の式を速度校正に適用すること，(b) 温風風洞を用いることなく温度校正をする方法を開発することを目的としている．

(4) 平成 24 年度進捗状況

定温度型では負帰還電圧 E と流速 U の関係を導出した．気流中におかれた熱線の発熱量（ジュール熱）が対流熱伝達による放熱量と平衡状態にあるとき，単位長さ当たりの熱線流速計周りの熱量の釣り合い方程式は次式となる．

$$\pi r_w^2 c_w \rho_w dT_w / dt + 2\pi r_w h (T_w - T_f) = I^2 R_w \qquad (1)$$

定温度型熱線流速計を使用する場合は熱線の表面温度の時間変化がないため $dT_w/dt=0$ となり，(1)式は以下のようになる．

$$2\pi r_w h (T_w - T_f) - I^2 R_w = 0 \qquad (2)$$

熱線表面の熱伝達率 N_{uf} は理論的に求めることができないので，実験式を用いて推算さ

れる（例えば，Collis-Williams の式）．その結果，出力電圧 E は

$$E^2 = (T_w - T_f)(B' + C' U^n) = B(T_f) + C(T_f) U^n \quad (3)$$

となる．ここで，B, C は気流温度に影響されることに注意する．n は熱線の半径 r_w と風速 U に基づくパラメータである．(3)式における B，C，n を求めることにより，校正曲線を決定することができる．今年度は，温度依存性がないものとして，各パラメータを最小自乗法により求めた．

Fig.1 は風速に対する熱線の出力電圧と(3)式を解いて得られた曲線を示している．Fig.2 は直線性を示すために U^n～E^2 で整理した．校正曲線は実験データを良好に再現していることが分かる．熱線流速計は強制対流により生じる流速と出力電圧の関係を測定するもので，ほぼ自然対流に近い状態になる流速 U=0.5m/s 以下では，同一の校正式を用いて流速の出力電圧の関係を求めることは困難である．そのため，最小二乗法により求めた校正曲線を U=0.5m/s 以下で使用する際には注意が必要である．

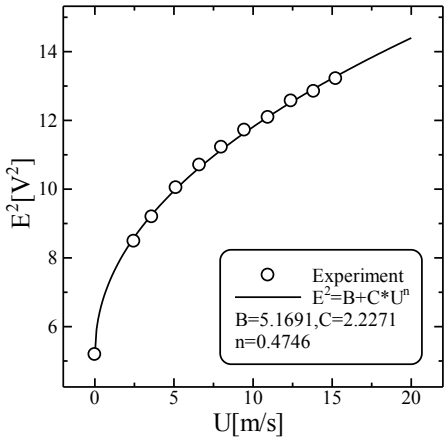


Fig.1　Calibration curve.

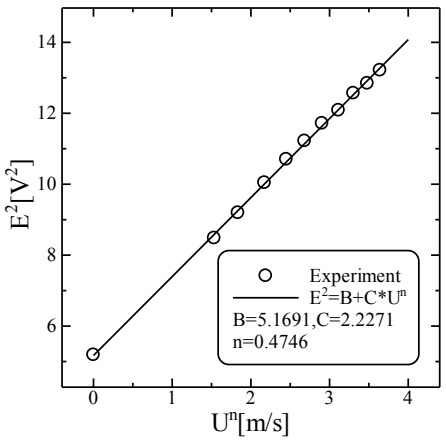


Fig.2　Linearlized calibration curve.

3.4. 精度・妥当性検証グループ

精度のよい最適値を効率的にかつ精度良く予測する技術を開発することを目標として研究を行っている．最適化の効率化においては，サンプリング回数の削減と各サンプリングにおける時間の短縮が重要な意味をもっている．どのようなサンプリングを行うかは，予測値の精度に重要な影響を与える．サンプリング回数の削減手法としては，Efficient Global Optimization が有名である．これはメタモデルを使った最適化手法であり，メタモデルをいかに精度良く効率的に求めるかがポイントになっている．しかしながら，Efficient Global Optimization にはまだ各種の問題点が指摘されている．そこで，特に，メタモデルを使った最適化技術の研究に重点をおいている．また，同時に各サンプリングにおける時間短縮と精度向上を目的とした効率的な解析手法の開発も行っている．本年度は，メタモデルを使った最適化技術でいくつかの方法を開発した．また，具体的な製品として，燃料電池の圧力容器の最適化，およびフラクタル構造の最適化の研究を行った．これらの研究成果として精度のよい最適値を効率的に予測する見通しを得ることができた．今後，さらにアルゴリズムの改良と実証実験を行う予定でいる．

3.4.1. 最適化技術

(1) 目標・計画

精度のよい最適値を効率的にかつ精度良く予測する技術を開発することを目標として研究を行っている．計画では，まず従来の手法の問題点を調査してのち，改良アルゴリズムを考案する．つぎにその改良アルゴリズムによる検証を行って，改良アルゴリズムの改良を行う．同時に具体的な適用範囲の拡大を行う．また，各サンプリングにおける作業短縮を目的として，効率的な解析手法の開発を行う．

(2) 意義・国際社会との比較

最適化においてはサンプリングそのものに時間がかかることが多く，サンプリングの数を少なくすることが重要なテーマとなっている．そのための代表的手法が Efficient Global Optimization(EGO)である．Efficient Global Optimization のなかでもＥＩと呼ばれる手法が有名であるが，ＥＩでは余分なサンプリングを行ったり，最適点を見逃すこともある．そこで，より効率的で精度の良い解がえられる手法を開発している．これらの技術の開発により，最適化技術の実用性が高まることが期待される．

(3) 研究内容

(a) 確率的メタモデルによる大域的最適化

(i) モデル誤り： EGO ガウス過程などによるメタモデルは確率モデルの一種である．一般に，統計的予測や機械学習において予測モデルと真のモデルが一致することはまれであり，多かれ少なかれこの二つにはズレ（モデル誤り）がある．またそれとは別に最適化中の数値計算の誤差に対するロバスト性もこの中に含まれる．このズレを減らすには確率モデルのパラメータを増やしたり，複数のモデルの混合をすれば良いのだが，これをするとパラメータ空間の特異点や計算量が増加する問題がある．そこで我々はあくまでシンプルな確率モデルを使いながらも，ある程度のモデル誤りに対してロバストとなるような２種類の改良方法を検討した．既存の代表的な手法である EI などと比べて我々の基準は頑健では無い．なぜなら EI において暗に仮定しているなだらかな勾配の分布をディラックのデルタ関数の様に先鋭にしたためである．この仮定を弱めるには勾配の条件付けを弱めればよい．これには２つのアプローチが考えられる．

(ii) 混合モデル： EI は勾配について考慮していないため勾配の暗に定義された事前分布は無情報事前分布である．そこで次に提案基準で使われる事後分布と EI とのそれによる混合モデルによって基準の頑強性の向上が期待される．

(iii) Softening： 頻度論的な条件付けに対し，ベイズ的に「Softening」したものを用いる．この事前分布は例えば基準自体の最適化を格子上に全探査する

場合，その格子のサイズ正しい分布を最適化する前の段階で求めておくことが出来る．

(iv)実験： 以上の手法の比較実験を行った．混合モデルにおいてはモデルの事前確率は等しいとした. また Softening に関しては勾配の事前分布は共役の多変量正規分布を用いることとし，平均0，共分散行列は $2^{-n}I(n=-2,-1,\cdots,6,7)$ なる等方的なものを用いる（I は単位行列）．人工的な２次元の目的関数を 4 千個作り，それをそれぞれの手法で最適化する．大域的最適解を見つけるまでの目的関数の評価回数で書く手法のパフォーマンスを計量する．

実験結果は表１の通りとなった．

表中の θ は目的関数を生成する時に用いたパラメータで，小さいほど局所解の多い複雑な関数となる．適当な細かさの格子点について全探査してもよいし，設計空間の次元が大きいならば各種大域的最適化手法を用いることになるが，いずれの場合においても最適解を正確に当てるのは難しい．つまりモデル誤りに相当するものが存在することになる．たとえば全探査する場合には目的関数の解がちょうど格子点上にない場合，格子点中の最小値においては勾配が 0 とならない可能性がある. 混合モデルより softening の結果が悪い理由は現在のところ不明であるが，さらに原因を究明してアルゴリズムの改良を行う予定でいる．

表１　　手法の比較実験の結果

	$\theta=0.1$	0.2	0.3	0.4
EI	**16.36**	7.688	5.375	4.163
Prop.	26.24	6.953	4.263	3.825
Mix	16.69	**6.41**	**4.259**	**3.822**
Softening	$\theta=0.1$	0.2	0.3	0.4
$n=-2$	25.89	7.959	4.983	4.226
$n=-1$	25.66	7.953	4.972	4.206
0	25.49	7.889	**4.950**	4.172
1	25.29	7.822	4.961	4.163
2	24.85	7.742	4.978	**4.149**
3	24.25	7.667	5.043	4.169
4	23.61	**7.632**	5.095	4.287
5	23.08	7.637	5.166	4.292
6	22.80	7.683	5.220	4.352
7	**22.35**	7.675	5.373	4.378

(b) 圧力容器の補強の最適化

A1 序言

近年大気汚染防止や地球温暖化対策の推進を図るため、燃料電池自動車(FCV)の普及が期待されている。燃料電池自動車では、燃料電池を極力高圧にすることが要求されている。しかしながら，安全でかつ高圧に耐える容器を作成することは容易でない．本研究はワイヤ補強によって安全性が高い、高圧の圧力容器を開発することを題材として、効率的で高精度な解析手法と最適化手法を開発することを目的として行っている。

A2 解析ソフト

汎用有限要素法解析ソフト ANSYS と MATLAB を用いて実施した。ANSYS とは、多種の解析（構造、伝熱、磁場、流体、圧電、音響など）が可能なだけでなく、ほとんどすべての解析の間で連成解析が可能である。MATLAB とは数値解析ソフトウェアであり、行列計算、ベクトル演算、グラフ化や 3 次元表示などの豊富なライブラリを持った、インタプリタ形式の高性能なテクニカルコンピューティング言語、環境としての機能を持つ。

A3 解析モデル

ワイヤーを巻いた水素タンクのイメージは図１に示す。

寸法は丸い部分の寸法である

Fig. 1 Analysis model

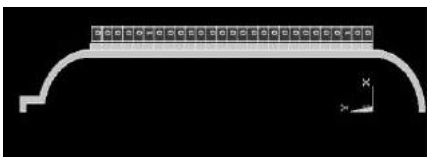


Fig.2 Mesh for GA

A4 手法１遺伝的アルゴリズム

淘汰，交叉，突然変異等の進化を模擬した操作により新しい個体群作る．最適解を発見す

る手法である.

本研究は、ワイヤの替りにボンベの周りに要素を並び、要素のヤング率でワイヤがあるか、ないかを決める。

図２は上述した方法で遺伝子のように１と０でワイヤの位置を示した。MATLAB で書いたプログラムで ANSYS を自動化し、ワイヤの位置を全探査し、ワイヤの本数と位置の最適解を調べた。

図３は遺伝的アルゴリズム手法で解析した結果である。

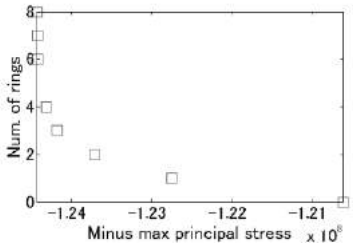


Fig. 3　Result of GA

A5 手法２Efficient Global Optimization (EGO)

遺伝的アルゴリズムは収束が遅く多くの解が必要となり、より複雑な問題に適用困難なことがあり、EGO に着目した。EGO は大域的最適解を 探索する手法であり、少ないサンプリング点で最適解を推定できる。

従来サンプリング点を追加する基準は EI である、先験情報有りの EI で最適解を調べた。

図４はワイヤが４本の場合の結果である。

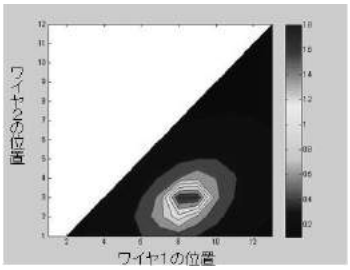


Fig. 4　　Result of EI

A6　まとめ

燃料電池自動車の水素タンクのワイヤー補強の最適化を行った結果，遺伝的アルゴリズムの有効性を確認できた.

(c) フラクタル構造物の構造最適化

A1 諸言

近年複雑な形状をした建築物や構造物が注目されるようになりそれらの安全性や健全性評価を考慮した設計が重要になる。特に構造物の大きい複雑な形状による全体の挙動を最適化する様々な取組が行われている。そのひとつとして構造物の接続部の応力や変形量は重要課題と言える。

最近では計算機性能の向上や解析シミュレーション技術の高度化により、より高精度の解析が実現できるようになってきた。しかしながら複雑な構造を解析するには膨大な時間かつ複雑な形状のモデルを作成することが容易ではない。

本研究ではフラクタル構造の一つであるシェルピンスキー四面体を模擬した人工的に自然の木蔭を作るフラクタル日除けを題材に挙げ、解析精度の低下も含め、複雑構造物の最適化とロバスト性を考慮した最適化設計の開発の為の技術を開発した。

A2 解析シミュレーション

解析汎用有限要素法解析ソフト ANSYS Ver.13.0 を用いて実施した。ANSYS は、多種の解析（構造、伝熱、磁場、流体、圧電、音響など）が可能である。また連立方程式を解くソルバープログラムとモデルを作成するプリプロセッサ、結果処理を行うポストプロセッサがすべて一つの実行ファイルに収められ、ANSYS プログラムだけで有限要素解析に必要な作業がすべて可能になっている。またカスタマイズを行う為の言語 APDL が備わっており ANSYS のコマンドラインとともに、変数や IF 文や DO 文を使用することで有限要素解析を含めたプログラミングを行うことができる。GUI のカスタマズも可能で APDL と併用して使用し専用のマクロサブルーチンや GUI を使用することで特定の解析に対して操作を単純化することができる。本研究では APDL を用いてカスタマイズを行った。

A3 解析モデル

ANSYS を用いてシェルピンスキー四面体のモデルと四面体のモデルを作成し解析した。図 1 に示すのがシェルピンスキーのモデルである。横幅 3200mm、奥行き 1440mm、高さ 770mm、肉厚 2mm とした。図 2 に示すのが四面体モデルである。横幅 3200mm、奥行き 1440mm、高さ 770mm である。両モデルともヤング率 4.1×10^{9}Pa（塩化ビニル）、ポアソン比 0.3 とし両モデルの各点を完全拘束し枠内の y 方向に鉛直下向きの荷重を加えた。

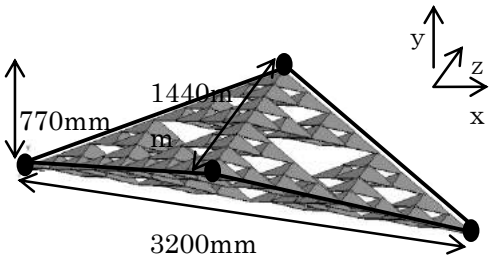


Fig1. Model with Sierpinski Tetrahedrons

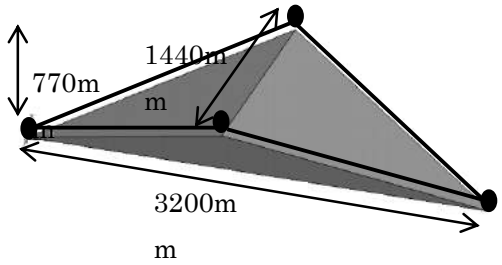


Fig2.Model with Tetrahedron

A4 等価

シェルピンスキー四面体と四面体モデルの変形量が等価になるようにする。要素剛性マトリックスの釣り合い式

$$\{f\} = [K]\{u\} \qquad (1)$$

(1)式から強制変位$\{u\}$と反力$\{f\}$から直接、12 行 12 列の等価な剛性マトリックス$[K]$を求める。残りの変位量Uy, Uz, Uxy, Uyz, Uzx についても同様に剛性マトリックス$[K]$求めフラクタル日除けの大きさに並べた四面体モデルに等価したパラメータを適用しフラクタル日除けのクリティカルな節点を導出する。導出されたクリティカルな節点の最適化を行い再びシェルピンスキー四面体と四面体の等価を繰り返す。

現在，本手法による検証実験を行っている.

(4) 平成 24 年度進捗状況

本年度は, 確率的メタモデルによる大域的最適化においては，いくつかの改良アルゴリズムを開発し，その検証実験を進めた．現在は，さらにアルゴリズムの改良を行っているところである．また，燃料電池車における圧力容器を対象として，最適化手法の適用検証を行った．さらに，フラクタル構造に均質化解析を組み合わせることにより，フラクタル構造全体を解析できる技術の開発を行った.

3.5. 可視化検証グループ

本プロジェクトでは，流体–構造連成解析の品質保証に特に重点を置いている。その中でも，

・解析結果を正しく理解し，評価すること

・実験結果等と公正な比較を行うこと

は重要な要素であると考えられる。そのためには，可視化は必須である。特に，連成解析は現象が複雑であり，限られた数値データのみでこれを評価することは困難である。実験における可視化技術やその応用は実験による検証の項目に譲り，ここでは，解析結果の可視化および，比較のための実験の可視化結果の表示を中心に研究を行う。解析は，当面簡単のため２次元および３次元でもそれほど３次元性が強くない問題を対象とするが，そうであっても特に流れ場は３次元であり，また今後のより一般的な問題に対応するためにも，３次元の可視化が本質である。そこで，ここでは連成解析において３次元データを如何に可視化するかを中心に研究を進める。１つは以下に述べるような立体視あるいはVR（バーチャルリアリティ）を用いた可視化であるが，これに限らず，３次元データの可視化方法を検討していく。

3.5.1. ３次元画像による定量的・定性的検証

(1) 目標・計画

本研究の目標は，流体構造連成問題について，数値解析の精度検証を支援するための，画像による定量評価，定性評価の手法やシステムを開発し，本プロジェクトで開発される連成解析手法の評価に供することである。特に，バーチャルリアリティ（VR）技術を利用した３次元可視化システムを中心に３次元画像による可視化評価を中心に研究を進める。大きな計画としては，

平成 24 年度：

表示装置となる VR 装置の導入を行い，ハードウェアの準備を行う。

平成 25 年度：

VR 装置の上でソフトウェアを開発し，PC クラスタと結合してこの上での解析結果の表示を行う。

平成 26 年度：

画像による検証に利用するための可視化システムを VR 装置上で開発する。

平成 27 年度：

積極的に可視化による比較・検証を行う。特に，（立体）画像を用い，実験と解析の可視化画像を重ねたり，並べたりして効果的な比較・検証方法について検討する。

平成 28 年度：

研究をまとめ，その公開方法について検討する。

としている。これらにより，従来とは異なる，多彩な可視化により，直感的・効果的な比較・検証が可能となり，開発される連成解析手法をより多面的に評価できると考える。

(2) 意義･国際社会との比較

連成解析は，複数の物理が関連するため，その妥当性の評価は単一の物理に対する解析よりも難しい。ここでは，流体–構造連成を中心に研究を行っているが，流体・構造それぞれ単独で妥当性を示すことができても，それらを組み合わせただけで連成問題が正しく解けるということでは必ずしもない。２つの物理をやり取りするものがあり，それが正しく評価されているかが，重要であるが，実験的に測定できるもの，できないもの等あり，単純ではない。ここでは，可視化，特に３次元画像を利用することで，実験と解析を出来る限り直接的に比較することを考えており，流体–構造連成解析の精度検証・妥当性検証のテンプレートとなることを期待している。

国際的に見ると，連成解析は計算力学における重要な研究テーマの１つであるが，必ずしも検証については進んでおらず，信頼できるとされる過去の解析例と比較したり，パラメータスタディによって，実験で見られる現象と，解析で得られる現象の範囲が等しい（あ

るいは近い）といったことを示すにとどまっている場合がほとんどである。連成解析手法を評価する手法の１つとして３次元画像を用いる方法は，ほとんど例がなく，その成果は重要なものとなると考える。

(3) 研究内容

本研究の中心となる装置は，図１の２面没入型ディスプレイ装置である。大きさは正面のスクリーンが 2.8×2.1m，下のスクリーンが同じく 2.8×2.1m でここに２台のプロジェクターにより，それぞれ 1400×1050 の解像度の画像を表示する。画像は時分割方式で立体映像を投影できるようになっており，液晶シャッター眼鏡によって立体映像を観察する。立体映像は３台のグラフィックスワークステーションで生成する。１台はマスタで，あとの２台が正面と下面の映像を担当する。これとは別に観察者や観察者が持つコントローラの位置を赤外線カメラで取得するシステムがあり，１台のトラッキングワークステーションで制御する。グラフィックスワークステーションのマスタはトラッキングワークステーションから逐次データを取得して観察者（やコントローラ）の位置を計算する。

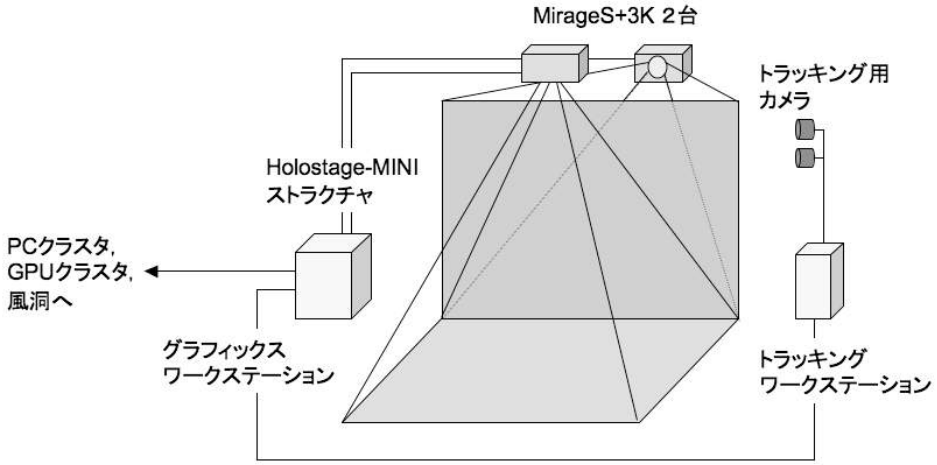


図１　システム構成図

このシステムに，流体−構造連成の３次元画像を表示する。表示する画像は大きく分けると，実験の画像と解析の画像の２種類である。これらを同時に，あるいは交互に表示することで直接的な比較を行う。

実験の画像については，物体の変位等，直接得られるものから，PIV で可視化した流れの速度分布や PSP（感圧塗料）で可視化した物体面上の圧力分布，画像解析により得られる応力分布等が考えられる。これらを得ることは，実験班の研究に委ねられるが，その３次元化や，本装置での表示にはデータの転送等も含めてさまざまな検討と技術的課題の克服が必要である。

解析結果については，単独の物理に基づく解析では多くの知識と経験があるものの，連成問題については，それぞれの物理に関する量を可視化表示するにとどまっており，まずは何を可視化することで連成解析の精度や妥当性評価につながるかの検討が重要となる。そのため，まず，さまざまな物理量の３次元可視化を可能とするシステムを開発する。解析は大規模となることが前提なので，そのデータをどのように転送し，また可視化するかも課題となる。

次に，実験と解析の比較である。たとえば，視点・スケールを合わせて交互に表示する／重ねて表示する，などが考えられるが，それには時間的・空間的な位置合わせ等，技術的な課題が多くある。また，必ずしも同じ量を表示できる訳ではないので，何を見るか，比べるかも問題となる。また，実験については，取得した画像（動画）をそのまま見るのか，あるいはデータを抽出して，解析結果と同じように CG で表示するのかといったアプローチもありうる。これらについても時間をかけて検討し，システムを構築することで新しい可視化法・評価法につなげたい。

最終的には，システム化できるところはまとめたい。実験データも，標準的で精度の高いものが得られれば，標準問題として公開したいが，その際に３次元画像もその１つとできればよいと考えている。

(4) 平成 24 年度進捗状況

平成 24 年度は装置（ハードウェア）の導入を主な目的としていた。装置が大掛かりであるため，その詳細をつめ，実際に取得し，設置するにはそれなりに時間を要すると考えたからである。実際には，平成 24 年 12 月に図２のような装置を東洋大学川越キャンパス１号館３階に導入した。本来，計算力学研究センターは白山第２キャンパスに研究棟があり，当初はここに導入することを検討していたが，平成 25 年度に当センターが川越キャンパスに移動することが確定的となり，無駄な移動を少なくするため，あらかじめ川越キャンパスに設置した。ただし，平成 25 年度にはキャンパス内で設置場所を変更する予定である。

ハードウェアの構成は（３）で述べた通りである。図２に全体像を示す。上のプロジェクターは下面に投影する。正面のスクリーンは背面より投影する。図３と図４に計算機を示す。図３はグラフィックスワークステーションのマスタである。正面及び下面を受け持つワークステーションとトラッキングワークステーションは図４のように１つのラックに収まっている。

図２　VR 装置全体。正面の映像は背面から投影する。

図３　グラフィックスワークステーションのマスタ

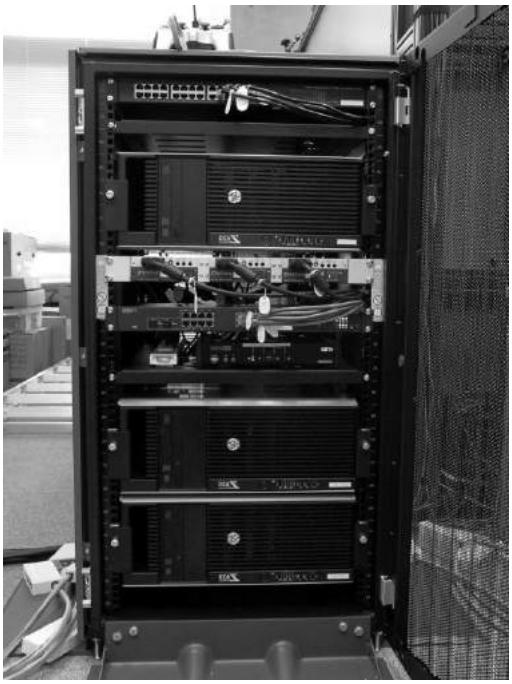


図４　グラフィックスワークステーション２台とトラッキングワークステーション

図１のプロジェクターの下に２つ赤外線カメラがついている（図５）。これにより図６の液晶シャッター眼鏡とコントローラについているマーカを認識し，その位置をトラッキングワークステーションで算出する。

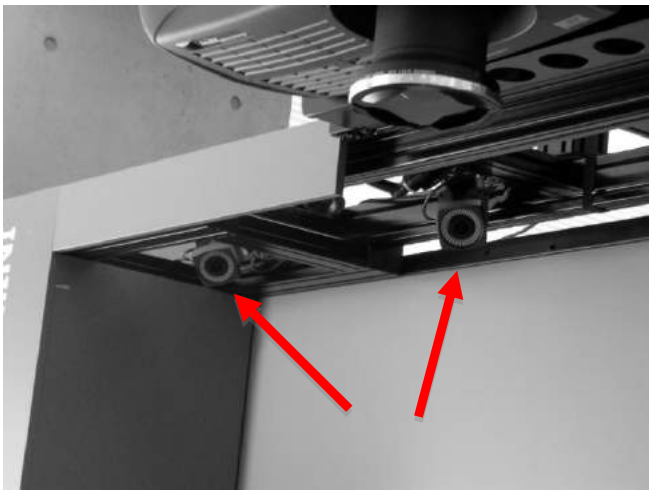


図５　トラッキング用赤外線カメラ（４台のうちの２台）

図６　コントローラと液晶シャッター眼鏡およびマーカ

平成 24 年度はまず，装置を入れ，基本的な動作を確認するところまでを目標とした。ハードウェアとして稼働するのはもちろんであるが，トラッキングワークステーションとその上で動作するソフトウェア（trackd）が正しく，観察者や観察者のコントローラの位置を認識すること，その情報をグラフィックスワークステーションのマスタに送っていることを確認した。さらに，画像表示については，本格的なソフトウェアはこれから作っていくことになるので，まずは仮のデモプログラムによって，３次元立体画像が表示できることを確認し，平成 24 年度の当初目的は果たした。

今年度の残りと次年度は，この装置で動作する可視化システムを構築する予定である。

3.6. 横断的研究会

前述の５つの研究テーマは，本プロジェクトの柱となるものであるが，それぞれを横断的につなぐ研究や，それぞれの成果から派生した研究もまた重要であると考える。そこで，計算力学研究センターでは，そのときどきで研究会を立ち上げ，つの柱とは別のグループで研究を進めようと考えている。平成 24 年度は，まず３つの研究会を立ち上げた。ここではその概要を記す。

3.6.1. 連成標準問題検討会

連成解析の精度を高め，実用的な手法として育てるのには標準問題が必要であろうと考える。流体解析・構造解析などではそれぞれ手法を開発するとまず解くべき問題があり，それによって手法の精度や有効性等が確認できる。残念ながら連成問題にはそのような標準問題が少ない。そこで，ここでは流体―構造連成に関し，当センターで実験を行い，詳細なデータを取って標準問題として提案できるものを検討する。最終的には，実験・解析を行い，比較するとともに，それらを標準問題として公開する。平成 24 年度は，まず，現在標準的に解かれている問題を調査し，その中で，実験・計測が当センターで可能であると思われるものを選択し，実験準備を行った。具体的には流体力による２次元平板の曲げ問題等である。

3.6.2. 計算力学と（材料）データベースの会

連成問題の検証に重要な役割を果たすと考えられるものの１つが材料の特性をいかに解析に反映するかである。現在，材料力学の分野ではかなり詳細な材料データベースが作られているが，それらはなかなか計算力学と結びついていない。ここでは，それらをどのように結合していくことで，連成解析の精度向上が図れるかを目的としている。また，将来的には，いわゆるビッグデータと計算力学をどのように関連づけるかもテーマとなろう。平成 24 年度はまず材料データベースの現状把握を行っている。

3.6.3. 楽器の流体（音響）構造連成研究会

楽器は典型的な流体―構造連成問題であるが，楽器の設計・製造には多分に職人技的な意味合いが強く，科学的な解明が直接楽器の進歩には繋がらないなどの理由から，必ずしも積極的に取り上げられることはなかったと思われる。ここでは，客員研究員の横山准教授が，楽器製作を実際に手がけていることから，これと合わせて楽器の流体―構造連成問題と実験（実測）・解析の両面から解明し，設計に役立てようとするものである。平成 24 年度は，研究会を立ち上げたところで，これから問題設定等を行っていく。

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

H23 年 10 月より JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」において，研究課題名「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」が採択され，研究拠点を当センターに置き，研究を実施している．

4.1.1. 研究内容

ポストペタコンなど次々世代の並列計算機アーキテクチャにおいて，大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション分野が高い演算効率を得るためには，マイクロプロセッサやメモリの階層構造を考慮したプログラミングモデルが必要である．特にそれは，入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで，統一的に提供される必要がある．つまり，一般的な実アプリケーションはプレ／ソルバー／ポスト処理など目的に応じたモジュール群で構成されていることが多いが，ポストペタコンの利用が想定される大規模シミュレーションでは，全ての処理がポストペタコン上で行われ，モジュール間のデータ受け渡しを最小限にするようなプログラミングモデル，並びにそれに基づく大規模数値計算データ処理システムの基盤技術が不可欠と言える．

ここで，ポストペタコンのアーキテクチャとしては，SIMD 拡張命令，GPGPU，FPGA など何らかのアクセラレータを搭載したヘテロジニアスメニーコアで構成される計算ノードをネットワーク接続した，分散メモリ型アーキテクチャになると予想され，計算ノード内はチップ上／ボード上問わずに異種の演算装置が NUMA 型で搭載されることを想定する必要がある．また，演算性能と通信性能の向上比を考慮すると，マイクロプロセッサにとって計算ノード間ネットワークというのは, 現在で例えると WAN 並みに遅く感じるネットワークとなる可能性があり，ポストペタコンはそれらを数十万から数百万ノード規模で接続して構築されると予想される．さらに，ポストペタコン利用が想定されるシミュレーションにおいて生成されるデータのファイルサイズはペタバイトオーダーになるが，ハードディスクなどの外部記憶装置の記憶容量やアクセス性能の大幅な改善にはまだ時間を要すると考えられる．つまり，ポストペタコンを利活用できるアプリケーションは，ヘテロジニアスな分散メモリ並列かつ数百万計算ノード環境において高い並列効率と演算効率を示す必要があるが，その高いハードルを突破できたとしても，大規模な入出力データを効率的に処理できない限り，本当の意味での利活用は不可能である．この問題を解決するためには，並列ファイル入出力システムの効率化やデータ圧縮展開アルゴリズムの高速化な

どだけではない，根本的なデータ量削減に関する解決策が求められる．

そこで本提案では，ポストペタコン上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として，申請者らがこれまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法の技術を応用した，階層型領域分割法による大規模数値計算データ処理システムの研究開発を目指す．この基盤技術にはアプリケーション分野に依存する箇所があることが予想されるため，本提案では連続体力学向けアプリケーションを対象としながら，具体的には以下の基盤技術開発をターゲットとする．

A) マルチレベル領域分割法による連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列化ライブラリ

B) マルチレベル領域分割法による多階層計算格子データの生成，操作および I/O ライブラリ

C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

これらの技術に基づいて開発されるアプリケーションでは，核となるモジュール間のデータ受け渡し量を従来のものより 3 桁削減することが可能となり，ピーク演算性能比 20%以上のシステム開発の実現を目指す．

4.1.2. 研究実施体制

研究実施体制は次の 3 グループにより構成され，お互い連携して研究を遂行している．

(1)「東洋大学」グループ

塩谷隆二（東洋大学，研究代表者），矢川元基，田村善昭，江澤良孝，中林靖，Abul Mukid Mohammad Mukaddes，石川格（東洋大学），河合浩志(諏訪東京理科大学)，松原仁(琉球大学)，古川知成(バージニア工科大学)，淀薫(株式会社インサイト)

(2)「名古屋大学」グループ

荻野正雄（名古屋大学，主たる共同研究者），金山寛（九州大学），和田義孝（近畿大学）

(3)「東京大学」グループ

越塚誠一（東京大学，主たる共同研究者），室谷浩平（東京大学），藤澤智光(プロメテック・ソフトウェア株式会社)

5. 国際協力

5. 1. バージニア工科大学

2012 年 8 月にバージニア工科大学が中心となり, 米国政府 National Science Foundation (NSF)を支援母体とし，タイヤ研究センター(CenTiRe < http://www.centire.org/>)が設立され，産官学によるタイヤ・車両業界全体の技術の底上げを目的とした研究・開発・教育・交流など様々な活動を行っている．研究対象は，タイヤ材料，ゴム材料，タイヤモデリング，製造手法，並列コンピューティングとダイナミックシミュレーションなど，多岐にわたっている．

日本からはタイヤメーカー4 社，自動車メーカー2 社の計 6 社が参加しており，国内活動の拠点を目的とし, 2013 年度より東洋大学計算力学研究センターが拠点大学として参加し，CenTiRe の国際センターとしての活動を進めている．

6. 情報発信

6.1. 第 15 回計算力学フォーラム（サンパウロ）

2012 年 7 月 8 日から 13 日の 6 日間に亘りブラジル, サンパウロで行われた WCCM2012 にて，第 15 回計算力学フォーラムを行った.

第 15 回計算力学フォーラムを, ブラジル, サンパウロで開催された 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM2012)内の, Mini-symposium「Large Scale Coupled Problems and Related Topics」の一環として開催した.

WCCM は 2 年に 1 回開催される世界で最も大きな計算力学の会議であり，日本の計算力学関連の研究者になじみの深い国際会議であり，日本からも多数の参加があった．今回の会議では，9 件の plenary lecture と 28 件の semi-plenary lecture があった．また，ミニシンポジウムが 165 件程度あり，これらのミニシンポジウムが 25 室に分かれパラレルセッションにおいて 5 日間にわたり開催された．参加登録者数については 1,200 名程度と発表された.

本シンポジウムは 2 つのセッションから構成され以下の 9 件の講演が行われた.

- A DDM Implementation Using Local Schur Complement Approach on Peta-scale Supercomputer
- A Finite Element Simulation of Tsunami in Hakata Bay
- An iterative method based on the domain decomposition method for large-scale complex symmetric linear systems
- Development of Structural Eigenanalysis Module for the ADVENTURE System
- Efficient numerical computations on magnetic field problems using an iterative domain decomposition method
- Large-scale full-wave analysis of electromagnetic field by the finite element method using numerical human body models
- Numerical analysis of surface characteristic and structural design for evaluation of polymer electrolyte fuel cell performance
- Parallel Computing of Fluid-Structure Coupled Analysis Using SUPG/PSPG and Enriched Free Mesh Method.
- Parallel Fluid-Structure Interaction Analysis of Wind Turbine Blades Using REVOCAP System

図 1　会場入り口の様子

6.2. 第 16 回計算力学フォーラム（JSME CMD / 神戸）

2012 年 10 月 6 日から 9 日の 4 日間に亘り神戸市ポートアイランド南地区で行われた CMD2012 にて，第 16 回計算力学フォーラムを行った.

第 16 回計算力学フォーラムとして，兵庫県・神戸市ポートアイランド南地区で開催された JSME 25rd Computational Mechanics Division Conference 2012 (CMD2012)内で，計算力学フォーラムとして，オーガナイズドセッション「大規模並列・連成解析と関連話題」を開催した. 本フォーラムは 2 つのセッションから構成され以下の 6 件の講演が行われた.

- 逆行列アプローチによる BDD コースグリッド修正の高速化
- 領域分割法におけるスパース行列アルゴリズムの比較
- MPI-OpenMP ハイブリッド並列領域分割法による 100 億自由度規模有限要素解析
- 細分割ツールを用いた大規模並列磁場解析
- 大規模複合構造物のマルチスケール解析
- ADVENTURE 固有値解析モジュールの開発

これらの講演と議論を通し，大規模計算を中心とした現状と今後の課題に関する議論が行われた.

また，9 日から 11 日に引き続き開催された International Computational Mechanics Symposium 2012 の Plenary Lecture において，矢川元基教授による講演「Some considerations on high performance computational mechanics」が行われた.

図 1　会場の様子

図 2 懇親会の様子

6.3. 第 17 回計算力学フォーラム（ICCM / ゴールドコースト）

2012 年 11 月 25 日から 28 日の 4 日間に亘りオーストラリア，ゴールドコーストで行われた ICCM2012 にて，第 17 回計算力学フォーラムを行った.

第 17 回計算力学フォーラムとして, オーストラリア, ゴールドコーストで開催された 4th International Conference on Computational Methods(ICCM2012)内で，Mini Symposia「High Performance Computing and related topics」を開催した．本シンポジウムは 2 つのセッションから構成され以下の 10 件の講演が行われた.

- A Massively Parallel Structural Analysis Code on Peta-scale Supercomputer Based on Domain Decomposition Method Using Local Schur Complement Approach
- Hybrid OpenMP+MPI parallelization of an implicit decoupling method for direct numerical simulation of turbulent boundary layer
- Large Scale Parallel Analysis of Eigenanalysis Using ADVENTURE System with CAD System
- Calculation of Volume from Crank Angle Using Reconfigurable Hardware
- Performance of Domain Decomposition Method with Sparse Matrix Storages Schemes
- Large Scale Parallel Analysis of Acoustic Fluid Structure Interaction Using ADVENTURE System
- Space.Time Fluid.Structure Interaction Techniques for Long Arterial Segments
- A Scalable and High Performance Implementation of the Domain Decomposition Method
- Domain decomposition analysis of thermal convection problems based on the characteristic curve method

· Optimal design of centrifugal pumps impeller

いずれも大規模並列計算に関する発表であり，これらの講演と議論を通し，大規模計算を中心とした現状と今後の課題に関する議論が行われた.

図 1 会場の様子

7. 教育活動

センター研究員らの指導のもとで、東洋大学工学部卒論学生、工学研究科大学院学生がセンターにおいて研究活動を行っている。

7.1. 教育活動風景

田村研究室

田村研究室では、学部生 7 名の卒業研究および大学院生 1 名の修士研究と 1 名の博士研究を行っている。

週 1 回のセミナーでは、大学院生 1 名、学部生 2,3 名が研究発表を行う。またそれ以外の学生は 1 週間の進捗を報告する。また、学部生は週 1 回の輪読で専門書を読み、大学院生は週 1 回の輪読で学術論文紹介を行っている。図 1 はセミナーの様子である。

図 1. セミナー風景

矢川研究室

矢川研究室では、博士課程の学生 1 名とポスドク、客員研究員を交えて、月に数回セミナーを開き、進捗状況を報告し、議論を行なっている。大学院生は、各自が計算力学を用いた独自のテーマを持ち、研究に取り組み、Java や C 言語で実装している。Free Mesh Method の高精度化手法である Enriched Free MeshMethod のき裂問題に対する有効性の検討や、精度の向上、六面体要素への拡張についての研究や、流体-構造連成解析手法への適用に関する研究、さらに粒子(節点)に回転やひずみ、曲率などの物理自由度を直接定義することができ、低自由度でありながら高精度な解が得られる"付帯条件付き多次元型移動最小自乗法"を用いた三次元弾性固体解析に関する研究が行われている。

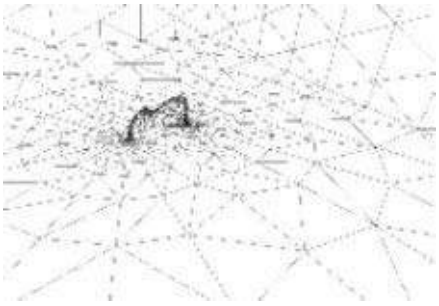


図 2. 3 次元き裂進展解析

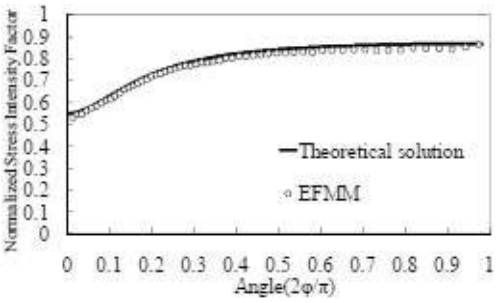


図 3. 解析精度検証結果

江澤研究室

江澤研究室では、学部学生 2 名卒業研究および大学院生 3 名の修士研究および博士研究を行っている。学部学生は毎週 1 回セミナーを開き、勉強会や進捗状況報告をしてもらっている。大学院生は、月に数回各自の研究の進捗状況報告および勉強会を実施している。学部学生はまず汎用構造解析プログラム ANSYS を習得してもらい、つぎに 3 次元 CAD の勉強をしてもらっている。大学院生は独自に開発したプログラム等を使って研究を行っている。図 4 はセミナーでの勉強会風景である。図 5 は ANSYS を使って解析をしている様子である。

図 4. セミナー風景

図 5. 卒業論文の研究風景

塩谷研究室

塩谷研究室では、学部学生 17 名の卒業研究，プロジェクト研究および大学院生 1 名の修士研究を行っている。毎週 1 回開催されるセミナーでは学生が研究進捗状況についての発表などを行っている。図 6 はタブレット端末上での可視化システムの様子であり、図 7 はスマートフォン向けアプリケーション開発の様子である。

図 6. 携帯端末上での可視化の様子

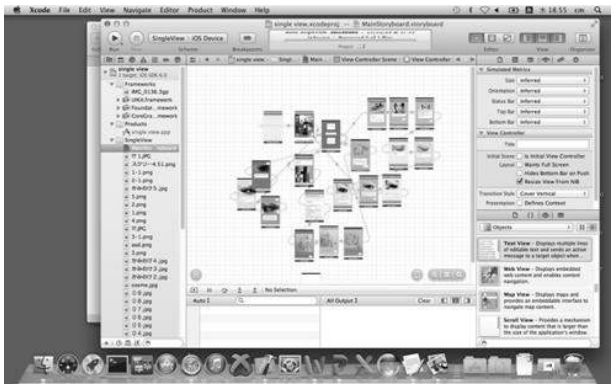


図 7. アプリ設計画面

中林研究室

中林研究室では、学部学生 10 名が卒業研究を行い、大学院生 1 名が博士論文のための研究を行っている。毎週 1 回開催されるセミナーでは各回とも 4 名が研究発表を行い研究の進捗状況の報告や内容について議論する。また、卒業論文提出締切が近くなると全員が週 1 回の進捗状況を行うことになっている。卒論発表会は研究内容の近い田村研究室と合同で行っている。図 8 は研究室の様子であり、図 9 は研究発表会の様子である。

図 8. 研究室の様子

図 9. 研究発表会

7.2. 卒業論文・修士論文の紹介

田村研究室

⑴ 画像に基づく流体解析手法の開発

複雑な実形状まわりの流れを解析するには，物体形状に関する詳細な 3 次元データが必要であり，またそれを元に計算格子（要素）を生成するには専用のツールやプログラムをもってしてもかなりの時間と手間を要することが知られている。そこでここではそのような詳細なデータがない場合でも流体解析ができるようにするための手法として，画像をベースとしてその流れ場を解く方法を研究している。

⑵ 医療分野での流体解析技術の利用

コンピュータによる流体解析，いわゆる CFD（Computational Fluid Dynamics）の進歩は目覚ましいが，まだまだ実用分野は限られている。ここでは，CFD の適用範囲を広げることを目的として，特に医療分野への応用について研究を行っている。具体的には，超音波による治療について解析を行っている。

⑶ 混相流の解析手法の開発

気液２相流など混相流の数値解析にはいまだ様々な問題がある。ここでは，１個の気泡が変形あるいは崩壊する問題や，多数の小気泡が液体中に存在する気泡流など問題ごとに手法を開発し，解析を行っている。

江澤研究室

(1) 震災時における机の最適化

机に震災時に荷重が掛かった場合の強度を評価し、強度を高くすることを検討した。

(2) 位相最適化を用いたローラーチェーンのプレート形状最適化

自転車のローラーチェーンのプレートの形状最適化を行った。

(3) ゲームプログラミングの最適化

オセロゲームの強さを高めるために、各種パラメータの最適化を行った。

(4) 圧力容器の効率的解析技術と最適化技術の開発

燃料電池車の圧力容器を題材として、最適化の効率化技術の開発を行った。まず、遺伝的アルゴリズムの適用を行い、問題点を抽出を行った。次に、Efficient Global Optimization の適用を行い、効率化できる見通しを得た。さらに先験情報を組み込むことにより、さらに効率的な最適化を実現した。

塩谷研究室

(1) マルチメディアデバイスを用いたシミュレーション

近年普及が進んでいるスマートフォンと呼ばれるポータブルマルチメディアデバイス端末について，その直感的かつ簡易な操作性に着目し，クラウド型 CAE システムの入出力端末としての利用を目的とし，マルチメディアデバイス上での可視化システムの構築を行なった．

(2) ネットワーク型 CAE ソフトウェアの開発

本研究では，遠隔地で運用される並列計算機システムを，インターネットを介して利用するネットワーク型 CAE システムについて，九州大学と共同研究を行うことにより，関東と九州間での遠隔利用実験を行った．解析結果の可視化機能の拡張を行い，可視化可能な物理量の選択肢を広げることを実現した．

(3) Windows 版熱伝導解析モジュール開発

計算サーバ上で実行される大規模有限要素並列計算を，簡易に実現する Windows 版システムとして開発された構造解析のシステムに，熱伝導解析機能を追加することを目的として，モジュールの開発を行い，いくつかの問題に対して有効性の検討を行った．

中林研究室

(1) スマートフォン用アプリケーションの企画・デザイン・開発

Android 端末や iOS 端末など，近年，情報機器の主流になりつつあるスマートフォンをプラットフォームとして，従来 PC や大型の計算機で行っていたような数値シミュレーションを実現する手法について広く研究を行っている．

(2) ニューラルネットワークを用いた予測システムの開発

ニューラルネットワークを用いて過去のデータを学習させることにより，何らかの予測を行うシステムの開発を行っている．これまでには，ドーナツショップの販売個数予測や，パチスロ機の設定予測などを試してきたが，本年度は過去の天気変化のデータを用いて，24 時間後の天気をニューラルネットワークで予測するシステムの構築を行った．

(3) 自己組織化マップの応用に関する研究

ニューラルネットワークの一種で，教師なし学習が可能であることや，多次元データの 2 次元マップ上での分類などに特徴がある自己組織化マップを用いて，様々なデータの分類や予測を行っている．本年度は過去の音楽 CD の売り上げや，曲自体のテンポや調などのデータを事故組織化マップにより分類・整理することにより，音楽の流行の変遷や将来予測をするシステムの構築を行った．

8. 業績リスト

本章では、2012 年 1 月から 2013 年 2 月までの当センターに関係する業績を記載する。

8.1. 総説・解説・エッセイ

1. 矢川元基, "日本機械学会計算力学部門設立当時のことなど", 日本機械学会計算力学部門ユースレター, No.49, pp.1-3, 2012

2. 矢川元基, "情報は誰のものか", 日本原子力学会計算科学ニュース, 2012

3. 矢川元基, "巻頭言：事故調査の目的は何か", 原安協だより, No.247, pp.1-2, 2012

4. 矢川元基, 高橋桂子, "巻頭言：福島原子力事故、シミュレーションおよびその発言", 学術の動向, Vol.17, 2012

5. 田村善昭, 鶴見伸夫, "気泡を含む水中における集束超音波の数値解析＝超音波治療への応用を目指して＝", 超音波 TECHNO, VOL. 24, No. 4, pp. 46-51, 2012.7-8

6. 矢川元基, "巻頭言：2013 年を迎えて", 原安協だより, No.251, pp.1-2, 2013

8.2. 論文

1. M.MASUDA, Y.NAKABAYASHI and G.YAGAWA, "Radius Parallel Self-Organizing Map", Journal of Computational Science and Technology, Vol.6, pp.16-27, 2012

2. H.HIRAI, M.CHIBA, M.ABE, T.IKEDA and N.MIYAZAKI, "Stress Intensity Factor Analysis of an Interfacial Corner between Piezoelectric Bimaterials using the H-integral Method", Engineering Fracture Mechanics, Vol.82, No.1, pp.60-72, 2012

3. R.IMAI and M.NAKAGAWA, "A Reduction Algorithm of Contact Problems for Core Seismic Analysis of Fast Breeder Reactors", CMES:Computer Modeling in Engineering and Sciences,Vol.84,No.3,253-282, 2012

4. N.TSURUMI, Y.TAMURA and Y.MATSUMOTO, "Improvement of Bubble Model in High Void Fraction for Cavitating Flow Simulations", Journal of Computational Science and Technology, Volume 6, No 3, pp. 113-128, 2012

5. T.ASHINO and Y. YAMASHITA, "Development of an Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering ", Data Science Journal, 11 (2012) PASMD17-ASMD21, 2012

6. K.MUROTANI, G.YAGAWA and J-B, CHOI, "Adaptive finite elements using hierarchical mesh and its application to crack propagation analysis", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.253, pp.1-14, 2013

7. K.SAKIHARA, H.MATSUBARA, T.EDO and G.YAGAWA, "Multi-dimensional Moving Least Squares Method Applied to 3D Elasticity Problems", Engineering Structures, Vol. 47, pp. 45-53, 2013

8. 崎原康平, 松原 仁, 江戸孝昭, 原 久夫, 矢川元基, "弾性固体問題における付帯条件付き多次元型移動最小自乗法", 日本機械学会論文集（A 編）, Vol.78, No.786, pp.142-151, 2012 年

9. 増田正人, 中林 靖, 矢川元基, "フリーキックサポートシステムの開発", 計算工学会論文集, No.20120009, 2012 年

10. 関 章一, 松本龍介, 井上義規, 武富紳也, 宮崎則幸, "類似的に水素の影響を考慮した鉄 EAM ポテンシャルの作成と水素ぜい化の分子動力学シミュレーション", 材料, 第 61 巻 2 号, pp.175-182, 2012 年 2 月

11. 松原 仁, 原 久夫, "風化サンゴ骨格の破壊強度とその性状：微細孔と孔内液圧の影響", 土木学会論文集 C（地圏工学), Vol. 68, No. 4, pp. 610-620, 2012 年 10 月

12. 松原 仁, 江戸孝昭, 原 久夫, 伊良波 繁雄, "捩り外力を受ける環状切欠き丸棒におけるファクトリールーフ状破断面の形成メカニズムに関する数値解析的検討", 日本計算工学論文集, No. 20120016, 2012 年 11 月

13. 松原 仁, 江戸孝昭, 原 久夫, "岩盤のき裂ネットワークを考慮した不連続体解析手法の提案およびき裂進展解析", 日本計算工学論文集, No.20120017, 2012 年 12 月

14. 鶴見伸夫, 田村善昭, 松本洋一郎, "音波伝播の式を用いた気泡を含む液体中を伝播する集束超音波の数値解析", 日本機械学会論文集 B 編第 78 巻第 796 号, pp. 2096-2112, 2012 年 12 月

15. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "粒状構造を有する脆性材料の離散き裂進展解析手法の開発および性能評価", 土木学会論文集 C（地圏工学), Vol.69, pp.31-45, 2013 年 1 月

8.3. 招待講演

1. G.YAGAWA, "An Efficient Domain Decomposition Algorithm for Fe Simulation", The Colloquium on Advances in Computational Science, Engineering and mathematics in honor of Tinsley Oden's 75th birthday, Univ.Texas at Austin, USA, 2012.1.19

2. Y.EZAWA, S.SHIMAMURA, K.SUGA and S.AOKI, "Effects of Material Properties of Cue on Ball Trajectory in Billiard", The 4th International Conference on Advanced Manufacturing, Taiwan, 2012.3.4-8

3. G.YAGAWA, "Memories of Ptofessor Y.J.Kim", ASINCO9 (Kaohsuing, Taiwan), 2012.4.19

4. G.YAGAWA, "Some Remarks on Domain Decomposition Algorithm for FE Simulation", Celebration Meeting of the FEM Class of 42 Fellows (Barcelona, Spain), 2012.5.8

5. G.YAGAWA, "Some Strategies for High-performance FEM", ESI Global Executive Meeting (Amagi, Japan), 2012.5.22

6. K.SAKIHARA, H.MATSUBARA and G.YAGAWA, "An Application of Multi-dimensional Moving Least Squares Method to 3D Crack Analysi", 10th World Congress on Computational Mechanics (Sao Paulo, Brazil), 2012.7.10

7. G.YAGAWA, "Some considerations on high performance computational mechanics", The JSME-CMD International Computational Mechanics Symposium (ICMS) (Kobe, Japan), 2012.10.11

8. G.YAGAWA, "Preliminary study for exascale computing in Japan", Second international workshop on "COllaborative DEvelopment of SImulation software of next GeNeration (CO-DESIGN 2012)" (Peking University, Beijing, China), 2012.10.23-25

9. G.YAGAWA, "Recent advances on simulation technology", ESI Users' Forum Japan 2012 (Tokyo, Japan), 2012.11.21

10. 藤澤智光, "防災分野におけるシミュレーション CG の効用と課題", 第 1 回 S&V(Simulation & Visualization)研究会, 日本計算工学会, 中央大学, 2012.3.2

11. 矢川元基, "福島原子力事故の総合工学的観点", 第 2 回「量子ビームを用いた材料・生体の構造と機能の研究」成果報告会（いばらき量子ビーム研究センター、東海村、茨城), 2012.3.16

12. 矢川元基, "計算科学技術における我が国の貢献", 日本学術会議第３回計算科学シミュレーションシンポジウム（東京), 2012.4.25

13. 芦野俊宏, "国際材料データベースの事例と課題", 日本地球惑星科学連合 2012 年大会 地球電磁気・地球惑星圏学会 データ問題検討分科会, 2012.5.22

14. 矢川元基, "計算科学技術に関する２， ３の課題", 第 24 回 CCSE ワークショップ（柏), 2012.6.19

15. 矢川元基, "計算力学シミュレーションの現状と課題", ADVENTURECluster ユーザー会 （東京), 2012.6.27

16. 藤澤智光, "MPS 法による津波シミュレーション", フォーラム 6 防災・減災にむけて計算力学はいかに貢献できるか,第 24 回計算力学講演会, 岡山大学, 2012.10.10

17. 藤松信義, "技術をどのように伝えるか", 日本実験力学会 産学連携支援センター主催パネルディスカッションー実験技術を語るー, 2012.12.15

8.4. 講演論文・口頭発表

1. T. IKEDA, M. OKA, S. KAWAHARA, N. MIYAZAKI, K. MATSUMOTO, S. KOHARA, Y. ORII, F. YAMADA and M. KADA, "Combination between the Nonlinear Finite Element Analyses and the Strain Measurement Using the Digital Image Correlation for a New 3D SIC Package", IEEE International 3D System Integration Conference (3DIC), Osaka, Japan, 2012.2.1

2. A.M.M.MUKADDES, "Performance of Domain Decomposition Method with Sparse Matrix Storage Scheme", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

3. T.ASHINO and Y.YAMASHITA, "Development of Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering", The 3rd Asian Materials Database Symposium, AMDS 2012, Japan Nara, 2012.4.17

4. Hitoshi MATSUBARA, Taka-aki EDO, Ryuji SHIOYA and Genki YAGAWA, "Large-scale simulation for fracture pattern of brittle porous media in Compression", Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), 2012.7

5. Kohei SAKIHARA, Hitoshi MATSUBARA, Ryuji SHIOYA and Genki YAGAWA, "An application of Multi-dimensional moving least squares method to 3D crack analysis", Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), 2012.7

6. I.ISHIKAWA, Y.KOBAYASHI, R.SHIOYA, R.NAKAOKA, A.MATSUOKA, G.YAGAWA, "Development of Structural Eigenanalysis Module for The Adventure System", The 10th WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS (WCCM 2012), 19719.pdf, SaoPaulo, Brazil, 2012.7.9

7. M. FUKAYA, R. MORINAKA, N. SAITOU, H. HATOU, Y. TAMURA, Y. MATSUMOTO, "Cavitating Jet Simulation for Predicting Residual Stress Improvement of cylindrical Structure by Water Jet Peening", 8th International Sympusium on Cavitation, Singapore, 2012.8

8. Y. TAMURA, N. TSURUMI, Y. MATSUMOTO, " Further Improvement of Bubble Model for Cavitating Flow Simulations", 8th International Sympusium on Cavitation, Singapore, 2012.8

9. Kaworu YODO, Ryuji SHIOYA, Akio MIYOSHI, Takuru ASAUMI, " Parallel CAE System for Large Scale Problems Based on HTML5 and WebGL", DETC2012-70909, pp.1-7, Proceedings of the 2012 International Desigh Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2012, August 12-15, Chicago, Illinois, USA, 2012.8.14

10. Kaworu YODO, Hiroshi KAWAI, Hiroshi OKADA, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, "Development of The Next-Generation Computational Fracture Mechanics Simulator on The Earth Simulator 2", DETC2012-70909, pp.1-7, Proceedings of the 2012 International Desigh Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2012, August 12-15, Chicago, Illinois, USA, 2012.8.15

11. Hitoshi MATSUBARA, "Numerical simulation of fracture network in rock based on GFEM and MLSM", KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2012, pp.227-231, 2012.9

12. T.ASHINO, "Development of Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering", 日本学術会議主催学術フォーラム「データと発見-Data Intensive Scientific Discovery」, 2012.9.10

13. N. TSURUMI, Y. TAMURA, Y. MATSUMOTO, "Numerical Simulation of Wave Propagation in Two-Phase Fluid", European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering (ECCOMAS 2012), Vienna, Austria, 2012.9.10-14

14. Y.EZAWA, S.TAKASHIMIZU, "Novel infill criterion for stochastic metamodel-based optimization", ECCOMAS 2012 - European Congress on Computational Methods in Sciences and Engineering, 2012.9.11

15. T.ASHINO, "Electronic Data Exchange for Materials Science and Engineering", IUMRS-ICEM 2012,Yokohama, Japan, 2012.9.27

16. A.M.M.MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, " A Computational Study of Sparse Matrix Storage Schemes in The Domain Decomposition Method", Proceedings of 25th JSME Computational Division Conference, Kobe, Japan, 2012.10.6

17. A.M.M.MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, "ADVENTURE _Thermal-An Open Source Module for Large Scale Heat Conduction Problems", PUCDIP 2012, Kyusyu, Japan, 2012.10.13

18. Toshihiro ASHINO, "Data and Expressions for Science and Engineering into e-Journal", 23nd International CODATA Conference, Taipei, Oct., 2012

19. Hitoshi MATSUBARA, Takaaki EDO and Hisao HARA, "Crack Propagation Model for Discrete Fracture Network based on GFEM and MLSM", Proceedings of the 4th international conference on computational methods, 2012.11

20. N. FUJIMATSU, "Direct Numerical Simulation on Drag Reduction of Channel Flow with Visco-Elastic Wall", 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2013.1.7

21. 大橋秀樹, 浅海拓来, 塩谷隆二, "スマートフォン端末を用いた CAE 可視化システム", HPCS2012, 名古屋大学, 2012.1.26

22. 岡大智, 池田徹, 宮崎則幸, "デジタル画像相関法によるひずみ計測を用いた三次元積層チップの微細接合部のひずみ評価",第 18 回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム（Mate 2012), 横浜市, 2012.1.31

23. 小林陽介, 矢川元基, " 3 次元き裂の自動進展解析",第 61 回理論応用力学講演会, 東京大学, 2012.3.7-9

24. 松尾友紀, 伊倉宏治, 田村善昭, "圧縮性気液二相流の数値解析手法の開発",日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会, 日本大学生産工学部（千葉）, 2012.3.9-10

25. 小俣慎弥, 田村善昭, "ダリウス形風車まわりの流体解析",日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会, 日本大学生産工学部（千葉）, 2012.3.9-10

26. 小金丸正明, 多田直弘, 池田　徹, 宮崎則幸, "HyENEXSS を用いた N 型半導体における機械的応力効果のシミュレーション",応用物理学会関西支部セミナー : 先端半導体デバイスのシミュレーション, 吹田市, 2012.3.27

27. 芦野俊宏, "材料データ交換の標準化 : CEN WS SERES の概要", CCMR-HDDMPPS（CREST プロジェクト）合同シンポジウム, 2012.3.29

28. 長岡慎介, "流体-構造連成解析の為の新しい解析手法とその応用例", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

29. 小林陽介, "き裂の 3 次元自動進展解析", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

30. 中川雅俊, "高速炉の炉心群振動解析手法の研究", ", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

31. 宮崎則幸, α鉄中の転位射出に及ぼす水素の影響", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

32. 江澤良孝, "最適デザインの効率化について", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

33. 藤澤智光, "防災シミュレーションと CG", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

34. 中林靖, "リアルタイムシミュレーションの防災への応用", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

35. 田村善昭, "キャビテーション/エロージョンの数値予測 ", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

36. 塩谷隆二, "ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解放ライブラリ開発", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

37. 松原仁, "多孔質体の圧縮破壊パターンに関する数値解析的検討", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

38. 矢川元基, "東電原子力事故調査と計算力学", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

39. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, "領域分割法における BDD 前処理のための並列直接ソルバーの開発", 第 15 回計算工学講演会, Vol.15, No.1, pp.191-192, 2012.5.27

40. 江戸孝昭，松原仁，原久夫, "先在き裂を考慮したき裂進展シミュレーション", 第 2 回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会概要集，pp.95-96, 2012.9

41. 江戸孝昭，松原仁，原久夫, "脆性材料のき裂進展シミュレーション：先在き裂と破壊プロセスの関連性", 土木学会第 67 回年次学術講演概要集，pp.339-340, 2012.9

42. 広瀬孝三郎，松原仁，江戸孝昭，原久夫, "き裂ネットワークモデルを用いたき裂性岩盤における物質移動シミュレーション", 土木学会第 67 回年次学術講演概要集，pp.353-354, 2012.9

43. 横山真男, 窪田佳寛, 望月修, "突入物体の表面性状を考慮したスプラッシュの数値シミュレーション", 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012.9.10

44. 藤松信義, "Wavelet 基底に基づく VITA 法による乱流渦運動解析", 日本機械学会 2012 年度年次大会, (CD-ROM Proceedings), J054042, 2012.9.10

45. 藤松信義, "乱流摩擦抵抗低減効果と粘弾性皮膜運動に関する数値的研究", 日本機械学会 2012 年度年次大会, (CD-ROM Proceedings), J054046, 2012.9.10

46. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "ハイドロゲル壁面近傍における流れの数値シミュレーション", 日本流体力学会年会 2012, 2012.9.17

47. 石川格，小林陽介，塩谷隆二，矢川元基, "ADVENTURE 固有値解析モジュールの開発", 第 25 回計算力学講演会、407、神戸, 2012.10

48. 松原仁, "光外乱が亜熱帯生物の定着に及ぼす影響", 平成 24 年度沖縄しまたて協会技術環境研究所研究発表会論文集，pp.25-34, 2012.10

49. 崎原康平，松原仁，江戸孝昭，矢川元基, "付帯条件付き多次元移動最小自乗法を用いたき裂進展に関する研究", 日本機械学会第 25 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集，pp.544-545, 2012.10

50. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "生体を模擬したハイドロゲル壁面近傍における流れの数値シミュレーション", 可視化情報全国講演会 2012, 2012.10.4

51. 横山真男，菊地謙次，窪田佳寛，望月修，"水面に突入する物体表面の滑りを考慮したスプラッシュのシミュレーション"，日本機械学会 第 25 回計算力学講演会, 2012.10.7

52. 広瀬孝三郎，江戸孝昭，松原仁, "き裂性岩盤の狭小領域構造を考慮した広大領域における浸透流解析"，第 25 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, 2012.11

53. 江戸孝昭，松原仁，原久夫, "き裂性岩盤におけるき裂進展解析"，第 25 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, 2012.11

54. 李思陽，江澤良孝, "圧力容器の効率的解析技術と最適化技術の開発"，第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.6

55. 高清水聖，江澤良孝, "確率的メタモデルによる大域的最適化"，第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.7

56. 島村雅彦，江澤良孝, "フラクタル構造物の構造最適化設計"，第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.7

57. 藤松信義, "乱流統計量を求める際の注意点について"，日本実験力学会 分科会合同ワークショップ, 2012.12.7

58. 田村善昭，鶴見伸夫，松本洋一郎, "気泡の合体の効果を考慮したキャビテーション流れのための気泡モデル"，第 26 回数値流体力学シンポジウム，東京, 2012.12.18-20

9. 結び

本報は、2012 年度の活動を取りまとめたものである。なお、2013 年 3 月に予定されているセンター評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2013 年 1 月 30 日とした。したがって、それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい。

社会が抱える問題、あるいは産業界が抱える問題を発掘しながらソリューションを見出していくことをセンターに関係する全ての研究者が使命として共有しながら今後の活動や研究開発を進めていきたい。

東洋大学計算力学研究センター

2013 年度　年報

CCMR
Center for Computational Mechanics Research
Toyo University

2014 年 3 月

1. まえがき 3
2. 概要 4
2.1. センター設置について 4
2.2. 組織 5
3. 研究成果 7
3.1. 解析手法開発グループ 7
3.1.1. 並列流体-構造連成解析手法の開発 8
3.1.2. 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発 14
3.1.3. 物体壁面の表面性状を考慮した流れのシミュレーション 17
3.1.4. 飛来塩分シミュレーション　-流体～粒子弱連成解析- 30
3.1.5. ブロック構造を有する固体の大規模３次元モデル生成および固液連成解析技術の構築生 33
3.2. 大規模並列化グループ 36
3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発 37
3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築 43
3.3. 新規実験計測グループ 46
3.3.1. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムの構築 47
3.3.2. 境界層特性評価のための普遍関数構築 51
3.3.3. 弾性体による空気抵抗低減効果に関する検討 53
3.4. 精度・妥当性検証グループ 56
3.4.1. 段ボールにおける構造解析手法の開発と精度の検証 57
3.4.2. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発 60
3.4.3. 確率的大域的最適化 62
3.4.4. 複雑構造物の軽量化設計技術の開発 65
3.5. 可視化検証グループ 67
3.5.1. ３次元画像による定量的・定性的検証 68
3.6. 横断的研究会 73
3.6.1. 連成標準問題検討会 73
3.6.2. 計算力学と（材料）データベースの会 73
3.6.3. 楽器音響と流体構造連成研究会 73
3.6.4. タイヤ研究会 74
4. 共同研究 75
4.1. JST CREST プロジェクト 75
5. 国際協力 77
5.1. TU-LHU student workshop（龍華科技大学 / 台湾） 77
5.2. LHU-SKKU-TU 若手ワークショップ（白山 / 日本） 78

5.3. SSME 2013 (墾丁 / 台湾) 79
6. 情報発信 80
6.1. 第 18 回計算力学フォーラム (JSME-CMD / 佐賀) 80
7. 教育活動 81
7.1. 教育活動風景 81
7.2. 卒業論文・修士論文の紹介 84
8. 業績リスト 86
8.1. 総説・解説・エッセイ 86
8.2. 論文 86
8.3. 講演論文・口頭発表 87
9. 受賞 92
9.1. 日本機械学会計算力学部門賞第 91 期業績賞 92
9.2. 2013 JACM Fellows Award(日本計算力学連合フェロー賞) 93
10. 結び 94

1. まえがき

本年度はセンターが活動を開始してから９年目にあたる．過去８年間のうち，５年間は私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」として活動を行ってきていたが，昨年度，私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定され，いわば第２期の研究活動を開始したところである．この報告書は，その２年目の活動を中心にとりまとめたものになる．

今回の，私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」としている．これは，それまでの流体解析や構造解析といった個別の物理の解析から一歩進めてより複雑な，また現実的な問題に計算力学の手法を適用しようとすることと，単に研究として行うのでなく，精度や妥当性を十分に検証し，あるいはその検証方法を確立することで，実用に耐えうるものとすることを目指してのことである．本年度は，その２年目であり，昨年度に整えた研究体制のもと，各メンバー，グループが研究を進めている．それぞれの進展については３章に詳しく述べられている．また，韓国成均館大学，台湾龍華科技大学とは合同で学生ワークショップを開いた．さらに，戦略的研究推進事業 CREST やその他，センターに関連する研究についてもふれている．

本年度は実際に研究が動き始めたところであると言える．本格的な成果が示せるのは来年度であろうと思われるが，その中でも期待できるいくつかの成果は本報に含まれている．まだまだ，物足りなく感じられる向きもあろうかと思われるが，今後ともさらなるご批判とご指導を賜れば幸いである．

2013 年 3 月

東洋大学計算力学研究センター長
田村善昭

2. 概要

本センターは，わが国の私立大学学術フロンティア拠点のひとつとして文部科学省から設置が認められ，平成 17 年度に活動を開始した．その後，平成 23 年度に科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST の選定，続いて平成 24 年度に文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け，今日に至っている．

本センターに参加する研究員は，東洋大学の複数学部・大学院の教員（工学研究科，国際地域学部，総合情報学部，理工学部），博士研究員，大学院生などを中核とし，また客員研究員として関連分野の内外の研究者から構成されている．

各自の専門分野は，構造解析，流体解析，破壊解析，逆問題・最適化，大規模並列計算，可視化など，計算力学分野で必要とされるほぼ全ての分野に跨っており，この分野における専門家集団である．平成 23 年度に採択を受けた CREST では「京」コンピュータ利用のための超大規模解析技術に関して，また平成 24 年度からは，私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け，連成解析や計算力学の精度検証・妥当性検証にも積極的に取り組んでいる．

さらに，東洋大学 125 周年を契機とした国際化に合わせて海外の関連する大学と積極的に交流を進め，若手の人材育成にも寄与したいと考えている．

2.1. センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである．

・平成１７年６月　文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」に研究題目「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」で採択され，計算力学研究センター発足

・平成１７年１２月 センター開所式開催のあと，白山第２キャンパス内計算力学研究センター棟に入居し本格活動開始

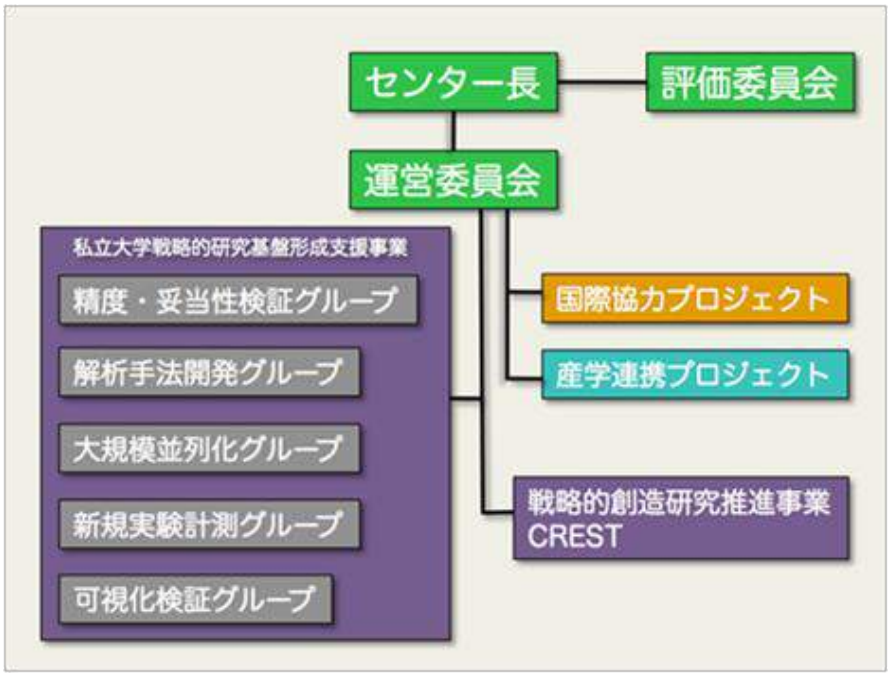
・平成２２年３月　「学術フロンティア推進事業」終了

・平成２３年８月　科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で採択される．

・平成２４年４月　文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に研究題目「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」で採択される．

2.2. 組織

センターの組織とメンバーは以下の通りである.



メンバー

・センター長

田村　善昭	（東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授）

・研究員

芦野　俊宏	（東洋大学 国際地域学部 国際地域学科 教授）
江澤　良孝	（東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授）
塩谷　隆二	（東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授）
中林　靖	（東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 准教授）
藤松　信義	（東洋大学 理工学部 機械工学科　准教授）

・研究助手

A.M.M. Mukaddes	（東洋大学 計算力学研究センター）
石川　格	（東洋大学 計算力学研究センター）
増田　正人	（東洋大学 計算力学研究センター）
長岡　慎介	（東洋大学 計算力学研究センター）

・学生

島村　雅彦	（東洋大学大学院 工学研究科機能システム専攻 博士後期課程）
高清水　聖	（東洋大学大学院 工学研究科機能システム専攻 博士後期課程）
松尾　友紀	（東洋大学大学院 工学研究科機能システム専攻 博士前期課程）
長尾　智	（東洋大学大学院 工学研究科機能システム専攻 博士前期課程）

・客員研究員

矢川　元基	（元東洋大学計算力学研究センター長，東京大学名誉教授，東洋大学名誉教授）
金山　寛	（名古屋大学情報基盤センター 特任教授）
富山　潤	（琉球大学工学部 准教授）
古川　知成	（Virginia Tech）
松原　仁	（琉球大学 工学部 助教）
横山　真男	（明星大学 情報学部 情報学科 准教授）

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

解析手法開発グループでは，計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち，「高精度流体構造連成解析手法の開発」の部分に焦点を当てた活動を行っている．

流体-構造連成解析を高精度かつ安定的に実施するためには，まず，流体解析手法・構造解析手法そのものの精度や信頼性を高めた上で，それらを連成させるアルゴリズムについても十分に検討する必要がある．これまでのところ，計算力学研究センターでは流体解析に SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用い，構造解析に EFMM を用いる手法を中心に連成解析を行ってきたが，このアプローチ以外にも例えば粒子法を用いた手法など様々な戦略が考えられる．

上記の事項を踏まえて，今年度は，以下の 5 項目について報告を行う．

(1) 並列流体-構造連成解析手法の開発
(2) 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発
(3) 物体壁面の表面性状を考慮した流れのシミュレーション
(4) 飛来塩分シミュレーション　-流体～粒子弱連成解析-
(5) ブロック構造を有する固体の大規模３次元モデル生成および固液連成解析技術の構築

3.1.1. 並列流体−構造連成解析手法の開発

(1) 目標・計画

本研究では，流体−構造連成現象を解く為の新しい解析手法を開発することを目的としている．本研究で提案する Enriched Free Mesh Method(EFMM)[1]を用いた構造解析手法と，SUPG/PSPG 安定化有限要素法[2][3][4][5]を用いた流体解析手法を組み合わせた，新しい流体−構造連成解析手法[6]は，各解析領域場に使用するメッシュ分割パターンが共に線形要素であることから，流体−構造境界面における整合性を完全に得ることが出来，その結果，流体−構造連成問題を解く際に，非常に重要となる，各解析場の境界面の連成効果を考慮する際に生じる問題を解消することに成功している．さらに，前述の通り，各解析場に用いられるメッシュ分割パターンは，線形要素のみであるにも関わらず，その解析精度は，従来の線形要素を用いた解析結果と比較して向上すると云う結果を得られている．この特徴から，本提案手法は，大規模問題を解く際に問題になってくる計算機リソースと計算時間の大幅な抑制を可能にすることを意味している．一方で，本手法は，近年の大規模解析の際に必要不可欠となる並列処理を施す際に，大きな問題を有する手法であることが明らかとなった．この問題は，EFMM の解析アルゴリズムに起因するものである．

今年度は，本提案手法による大規模並列解析を行う際に必要不可欠となる EFMM の並列解析手法の確立とその実装，およびその並列化効率の検証を行った．昨年度，提案した EFMM の為の並列化手法には，応用研究を行った所，幾つかの問題点が明らかとなった為，別の並列化手法を導入する必要が出てきた為である．

平成 26 年度は，今年度提案した EFMM の並列解析手法を導入した，EFMM と SUPG/PSPG 安定化有限要素法による大規模並列流体−構造連成解析手法の確立と，その解析精度の健全性を実証する為の実験結果との比較を行う．

平成 27 年度は，実験と数値解析とのリアルタイムでの融合を目指した，チューニングを行いつつ，様々な現象を数値解析により解明する．

平成 28 年度には，実験結果と数値解析結果の比較を基に，開発手法について纏める方針である．

(2) 意義・国際社会との比較

現在，国内外を問わずに，計算力学の分野において，流体−構造連成現象を対象とした研究は非常に注目されており，積極的に行われている．この現象を解く為に，多くの研究者が様々なアプローチを行い，沢山の新しい解析手法が提案され，多くの成果が発表されている．その一方では，決定的な解析手法が確立されていないのが現状である．

提案されている多くのアプローチは，流体解析手法として粒子法を用いているものが非常に多い．メッシュ分割を必要としない粒子法を用いることで，流体解析場において多くのアドバンテージが得られることがその一因と考えられる．しかしながら，我々の提案している手法は，流体解析場，構造解析場共に格子法を用いている．格子法を，それぞれの解析場に用いる事で，解析精度の面では，粒子法を用いたアプローチと比較して大きなアドバンテージを有していると考えられる．

本手法の確立により，数値シミュレーションにおいて，非常に重要な解析精度を損なうことなく，多くの流体−構造連成現象を解く事が可能になると考えられる．このことから，非常に意義のある研究内容であると言える．

(3) 研究内容

EFMM と SUPG/PSPG 安定化有限要素法とを組み合わせた，本提案手法の大規模並列化の際に問題となるのは EFMM の解析アルゴリズムである．EFMM による数値解析を行う場合には，従来の有限要素法による数値解析とは異なる方法で，剛性マトリックスを生成し，それら得られた剛性マトリックスを基に，連立一次方程式を解き，解を得る．

具体的には，EFMM を用いた解析では，解析領域内の全ての節点がそれぞれ中心節点となり，図 1 に示すような局所要素クラスターと呼ばれる，幾つかの要素で生成されたクラスターが生成され，それら局所要素クラスター毎に局所剛性マトリックスが計算される．

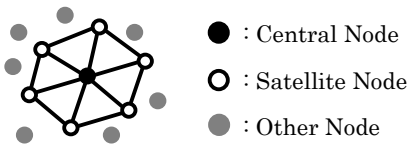


Fig.1 Fundamental concept of local elements cluster

並列解析を行う際には，一般的に領域分割法(Domain Decomposition Method：DDM)が用いられる．この DDM は，節点ベースの手法と，要素ベースの手法とに大別される（図 2).

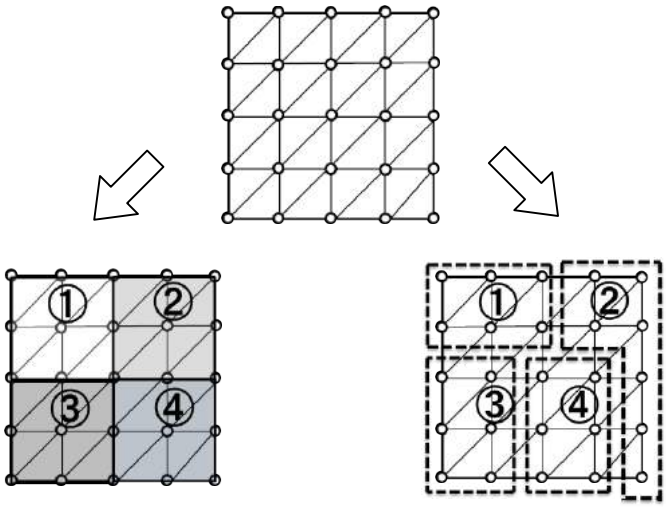


Fig.2 An example of domain decomposition method

EFMMは，中心節点毎に局所要素クラスターを生成する節点ベースの解析手法であることから，節点ベースの DDM の使用が望ましいように考えられるが，局所要素クラスターを生成する節点群との兼ね合いから，最適化された領域分割を行う事は，非常に困難であると考えられる．

そこで，本研究では，要素ベースの DDM を基に，EFMM 解析用の領域分割を行う事で，EFMM の並列化へのアプローチを行った．図 3 に具体的な領域分割方法のフローチャートを示す．

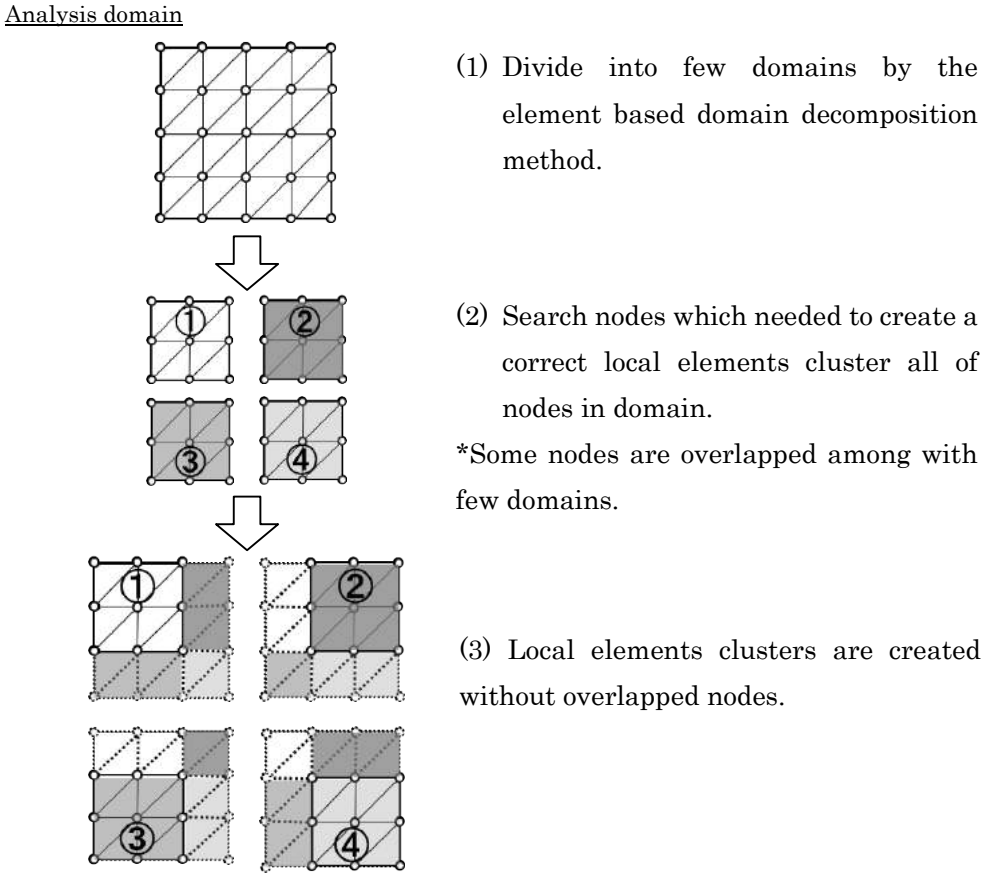


Fig.3 The flowchart of parallelization method for EFMM

本手法を用いる事で，ソルバー内で求められる，通信を必要とする節点数は，図4に示すように，従来の element-by-element 処理を施した並列解析と理論上は同数となる．ただし，局所要素クラスターの形状等により，若干の変動は起こり得る事に注意が必要である．また，ソルバー内の行列・ベクトル積に関しても，局所要素クラスター毎に処理を行う local elements cluster-by-local elements cluster 処理を施す事が可能である．これは，従来の element-by-element 処理をベースとした方法であり，計算機メモリーの節約と，計算時間の大幅な削減が可能となる．

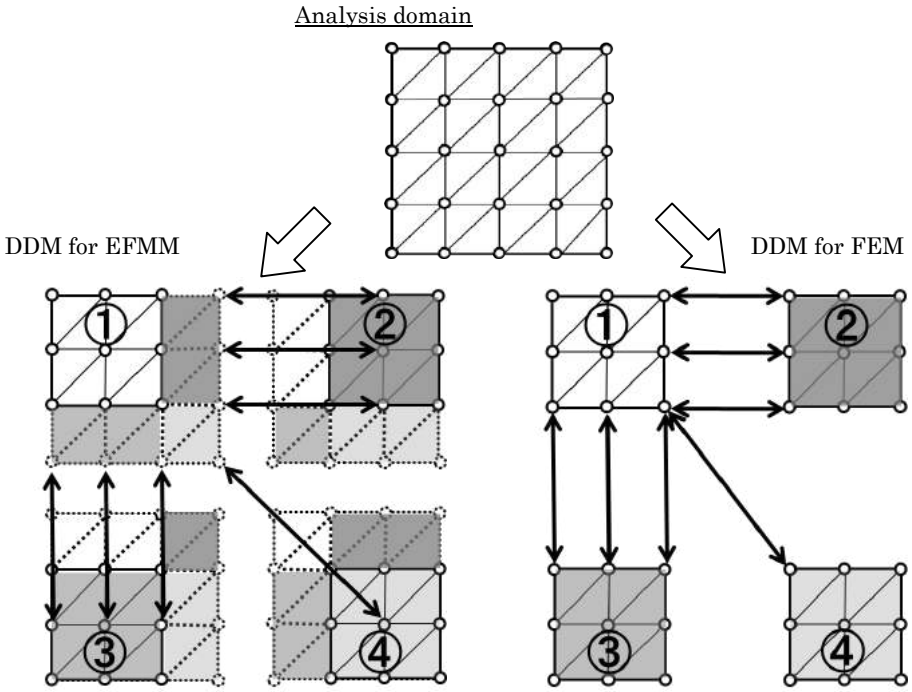


Fig.4 The Comparison of the communication cost

本並列化手法のデメリットとしては，各局所領域間のインターフェイス上の節点を中心節点とする局所要素クラスターを重複して計算する必要がある事．もう一点，通信テーブルが若干複雑になる事が挙げられる．これは，通信を必要とする各局所領域内の節点が各局所領域間のインターフェイス上で対応していない事，通信を要する節点数が必ずしも一致していない事に起因する問題である．

本並列化手法による解析のスピードアップを検証する為に，図 5 に示したエンジンブロックモデルを用いた簡単な静的弾性解析を行った．解析に用いた解析モデルの要素数は，約 20 万である．境界条件としてモデル底面を全方向固定し，モデル上面にz方向荷重を与えた．

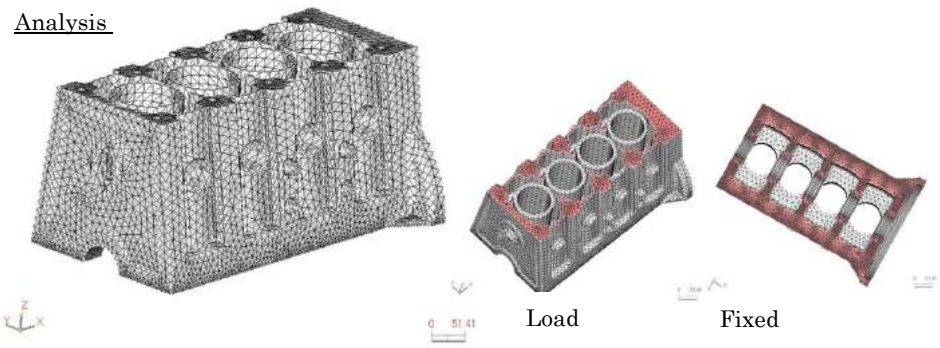


Fig.5 An analysis model and conditions

なお，領域分割は前述の方法に基づいて行うが，図 6 に示すように単純に要素数がある程度一定になるように，単純に x 方向に分割を行った為，通信量を考慮した最適化は行っていない．なお，本手法によるスピードアップは，ストロングスケーリングで計算したものである．

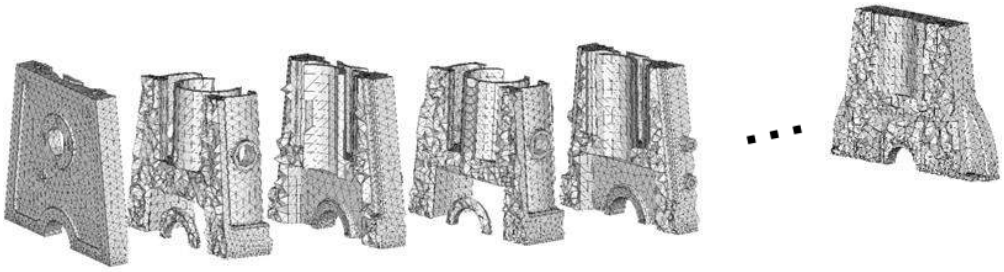


Fig.6 An example of domain decomposition

図7は，単一での解析に要するソルバー部分の解析時間と並列プロセッサ数を 2，4，6，8，10 台とした時のスピードアップを示したものである．

同図から，10 並列の際のスピードアップが約 8.4 倍と概ね良好な結果が得られている事が分かる．本数値解析例でのスピードアップの算出がストロングスケーリングであり，並列プロセッサ数の増加と共に通信コストの割合が高くなる事，領域分割の最適化を行っていないと云う事を鑑みると，本提案手法は，十分良好な結果を得られる手法であると言う事が出来る．

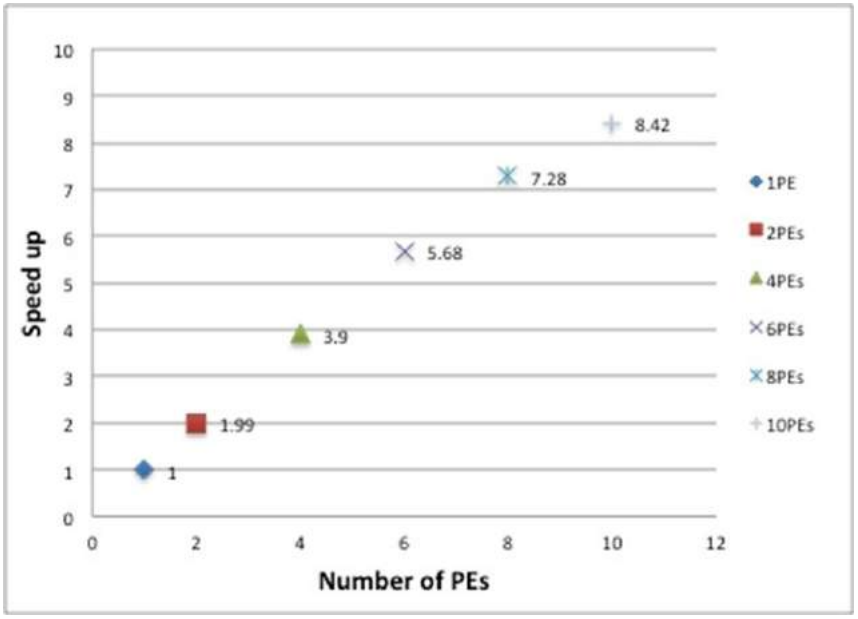


Fig.7 Speedup of the parallel EFMM

(4) 平成 25 年度進捗状況

今年度は，我々の提案しているEFMMとSUPG/PSPG安定化有限要素法を組み合わせた流体−構造連成解析手法を用いた大規模解析を行う際に必要不可欠であり，その適用が非常に困難であった，EFMMの並列解析手法を提案，実装し，その並列化効率の有効性を実証した．

本提案手法を用いる事で，EFMMとSUPG/PSPG安定化有限要素法という，流体−構造連成解析を行う際に，非常に相性の良い解析手法を大規模問題へ適用させる事が可能となった．

来年度は，本提案手法を用いた大規模並列流体−構造連成解析手法を実装し，数値解析結果と実験結果との比較・検証を行い，本提案手法の解析精度面での健全性を示す予定である．

参考文献

[1] Yagawa, G. and Matsubara, H., “Enriched element method and its applications to solid mechanics”, *Proc. Computational Method In Engineering and Science EPMESC X*, pp. 15-18, 2006.

[2] Tezduyar, T.E., “Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations”, *Advanced in Applied Mechanics*., 28, pp. 1-44, 1991.

[3] Tezduyar, T.E., Mittal, S., Ray, S.E. and Shih, R., Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* 95 pp.221-242, 1992.

[4] Franca, L.P., Frey, S.L. and Hughes, T.J.R., Stabilized finite element methods I. Application to the advective - diffusive model, C*omputer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95 pp.253-276, 1992.

[5] Franca, L.P. and Frey, S. L., Stabilized finite element methods II. The incompressible Navier-Stokes equations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 99 pp.209-233, 1992.

[6] S. Nagaoka, Y. Nakagabashi and G. Yagawa, Accurate fluid-structure interaction computations using elements without midside nodes. *Comput Mech.*, Vol. 48, pp. 269-276, 2011.

3.1.2. 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発

(1) 目標・計画

本研究では，流体と構造体の相互作用による振動現象の数値解析に行い，自己組織化マップ(Self-Organizing Map：SOM)を用いて解析データの分類を行い，条件による振動現象の特徴を検出することを目的にしている．条件による振動現象の特徴が分かれば，流路内に設置する温度計，圧力計などのさや管の選定や，楽器などの共振を伴う弦などの設計に役立てることが期待できる．また，自己組織化マップをモジュラーネットワーク型自己組織化マップ(modular network SOM：mnSOM)に変えるとこで分類と予測を可能にする．mnSOM を用いた予測技術の開発も目指す．

平成 25 年度では，流体-剛体の移動境界問題を解き，自己組織化マップで分類した．解析モデルは 2 次元円柱で，流れ方向に対して垂直方向にのみ移動するようにバネ・ダンパー系で指示した．メッシュコントロールは ALE 法と速度 Verlet 法を用いて実行した．解析条件を変え，複数の解析結果を得た．得られた解析データを SOM でマッピングし，振動現象に起因しているファクタを検討した．

平成 26 年度以降は，SOM の学習パラメータを変え，分類性能の向上を図る．また，解析結果の数を増やしてマッピングを行う．同様に，mnSOM でのマッピングを行い，予測精度の向上を図る．また，流体ー構造連成問題での 場合の分類も目指す．

(2) 意義・国際社会との比較

SOM はデータマイニングに多く用いられる手法であり，入力データをマップ上に配置することができる．また，この配置は似たデータ同士を近くに配置し，そうでないデータを遠くに配置するといった特徴を持つ．また，入力データ間を補間することもできる．

本研究では，SOM を用いた振動現象の分類を行う．振動現象はロックイン現象の再現や渦励振など様々研究が行われているが，特徴を分類した文献は目にしてない．境界条件による円柱の振動運動の特徴でクラスタリングできれば，ある条件下での振動がロックインするかしないかの予想をたてることができる．

また，流体-構造連成現象も視野にいれ，構造側が変形する場合の SOM による分類は，構造物の変形具合をマップに写像することで，意図する構造の変形を選択的に選び出し使うことができる．

入力データを様々に変更することで，多様なマップを作成でき，流体-構造連成解析の解析データをまとめることができ，そのデータをベースに未知の条件でも，ある程度の予測をたてることが可能であると考えられる．

以上のことから，本研究は学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており，国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考える．

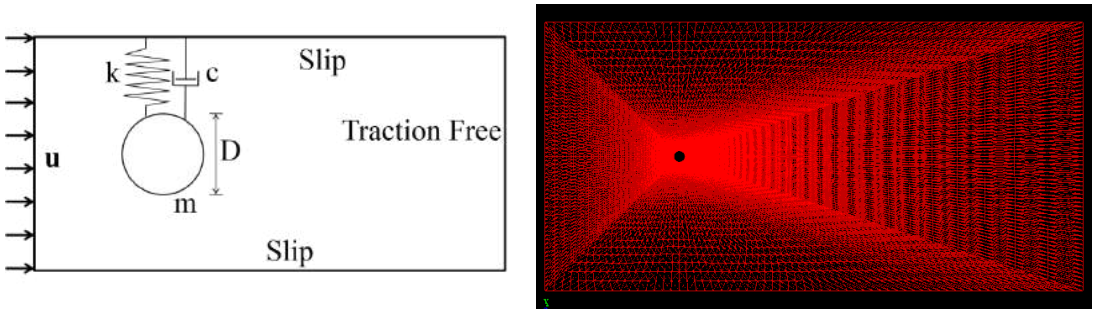
(3) 研究内容

SOM は，高次元のベクトルデータを低次元空間(マップ)に写像するものであり，高次元

データのクラスタリングを行える．また，マップを見ることでデータの特徴抽出やマイニングを行うことができる. mnSOM は SOM のマップユニット部分をモジュールに置き換えたものである．モジュールは MLP(Multi Layer Perceptron)に置き換えたものが主で，入出力関係を保持することができる．この mnSOM を用いると，分類後に未知の入力から想起して意図する出力を提示することが可能であり，設計に用いることができる．

本研究での SOM に与える入力条件として，円柱質量とバネ定数，ダンパー係数，流速，レイノルズ数，バネの固有振動数，円柱振幅，円柱振動数，最大揚力係数，ストローハル数，平均抗力係数の 11 項目を与える．

流体-剛体連成解析は，ADVENTURE_Fluid を用いて数値解析した．移動境界問題を扱うために ALE 法を，円柱の移動を計算するために速度 Verlet 法を用いた．解析モデルを Fig.1 に示す．Table 1 に示した解析条件で計 48 通りの解析を行った．



(a) Model　　(b) Mesh

Fig.1 Model of Analysis

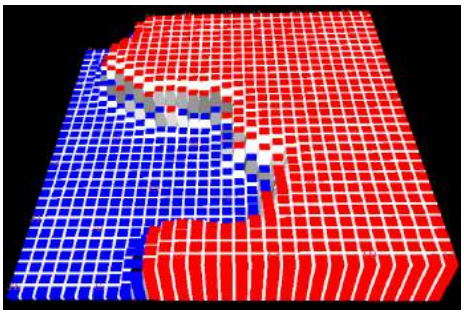
Table 1 Input-Output Relationship of mnSOM

Input			Output	
Items	Unit	Ways	Items	Unit
Mass of Cylinder	[kg]	0.5　1.0	Amplitude of Cylinder	[m]
Spring Constant	[kg/s]	0.5　1.0	Frequency of Cylinder	[Hz]
Dumper Coefficient	[kg/s²]	0.0　0.01	Maximum Coefficient of Lift	[-]
Flow Velocity	[m/s]	0.5　1.0	Strouhal Number	[-]
Reynolds Number	[-]	100 500 1000	Average Coefficient of Drag	[-]
Natural Frequency	[Hz]	-		

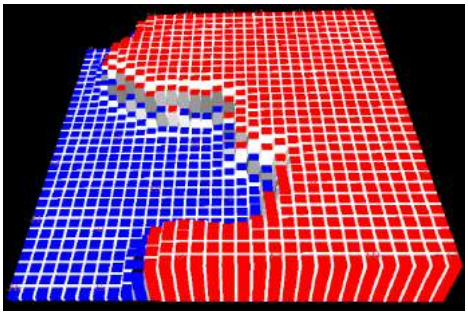
SOM の分類結果を Fig.2 に示す．入力項目別に確認すると速度と振動，ストローハル数と円柱振動がそれぞれに起因していることが確認できた．

次に mnSOM の分類，予測を行う．mnSOM のモジュールは MLP を用いる．SOM とは

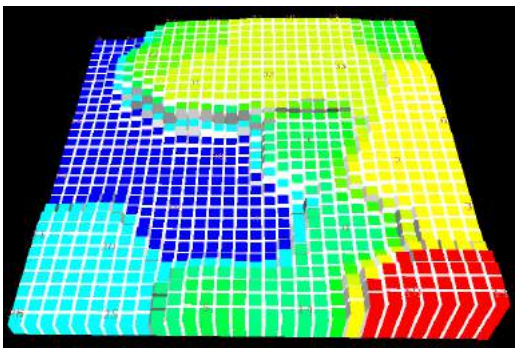
違い MLP の入出力を決定する必要がある．そこで，本研究では入力に解析条件，出力に解析結果を与える(Table 1)．これにより解析条件から解析結果を予測することができる．勝者モジュール間は滑らかに補間され, 未知の入力に対しても相応の出力が期待できる. MLP の補間能力を考えて，入出力関係をグループ分けして学習を行う．これにより，MLP の補間と SOM の補間を最大限に発揮し，補間性能の向上が見込める．



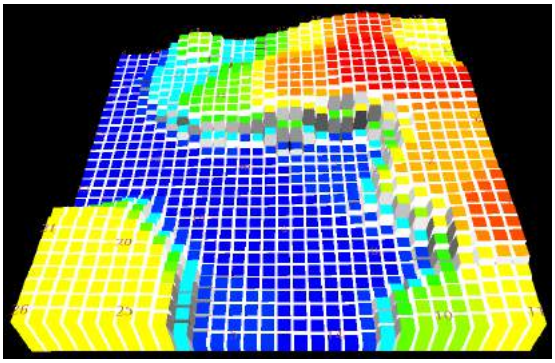
Flow Velocity



Reynolds Numbder



Frequency of Cylinder



Amplitude of Cylinder

Fig.2 Result of SOM

(4) 平成 25 年度進捗状況

流体-剛体連成解析を行い，48 通りの解析結果を得た．解析結果から SOM 及び mnSOM の分類, 学習データを取得した. それを用いて SOM,の分類, mnSOM の予備実験を行った．

SOM の分類では入力データ間の関係を確認することができた．解析条件と解析結果の関係が視覚的にも確認でき，振動現象の分類が可能であることを確認した．

mnSOM では解析結果の分類，可視化を行い，予測性能を評価した．しかし，未知のデータに対しての検証はできていないので，今後の課題である．また，予測性能の向上を図るため，学習パラメータの調整と解析データを増やす必要があると考える．

今後は予測精度の向上を図り，解析対象を流体と構造の連成問題に拡張して，分類，予測を行う予定である．

3. 1. 3. 物体壁面の表面性状を考慮した流れのシミュレーション

(1) 目標・計画

これまで多くの流れのシミュレーションは，物体と流体の間の境界条件は滑り無しで計算されてきた. しかし，物体表面の性状によっては，一概に滑り無し条件では適切な結果が得られない場合もある. 一例として，魚類や両性類の体表にはヌメリや滑りがあるが，その為にこれまでの滑り無し壁面とは異なる流れが観察され，この滑りといった表面性状の効果を計算に導入する必要がある. 本研究では，境界条件に滑りを考慮に入れることで，その様な滑りのある物体を表現する方法を提案し，粒子法（MPS 法）による流れのシミュレーションを行うことを目的とする. 検証については，生体材料の 1 つであり水触媒の高分子ゲルであるハイドロゲルを用いて，ポアズイユ流れ及びスプラッシュの実験と比較し，シミュレーション結果と実験の比較を行う.

(2) 研究内容

1 はじめに

本研究では，流体と物体の相互作用を扱う数値シミュレーションを行うにあたって，物体の表面性状の違いを計算に導入する方法を提案する．流体と物体の相互作用（Fluid Structure Interaction）の先行研究については，表面の粗さや材質による流れ場への影響に関しての研究が行われており，液滴の接触角の調査から車体の撥水性や船体の抵抗低減の問題まで多く取り扱われてきた[1-4]．また，これまでの数値シミュレーションにおける表面性状の違いの扱いに関しては，ディンプルやボルテックスジェネレータ等のように剥離というような物体表面の構造的な点に着目した研究は多くなされてきたが，それらのほとんどは物体と液体の境界は滑りなし条件で設定されてきた.

しかし，例えば，魚類や両生類のような体表にヌメリをもった生物と流れや，消化器官や血管の内壁は一律に滑りなし条件とはいかないと思われるが，そういった生体表面のもつ滑り効果を考慮した物体と流れの相互作用を扱ったシミュレーションは少ない．材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況もあり，例えば，落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ（飛沫）が挙げられる．スプラッシュは物体の形状や衝突速度によって，水飛沫の形状が変化することが分かっている[5]が，また，物体の材質の違い（例えばハイドロゲルとアクリル樹脂）によっても，観察されるスプラッシュの形状に差が生じる（後述の図 7 を参照）．つまり，同じ運動条件でも表面性状の違いによって周囲の流れ場は異なる現象になるため，この例のように表面に滑りがあるような物体と流れの相互作用をシミュレーションで計算するには，物体と流体の境界条件に滑りの効果を記述するモデルを導入する必要がある.

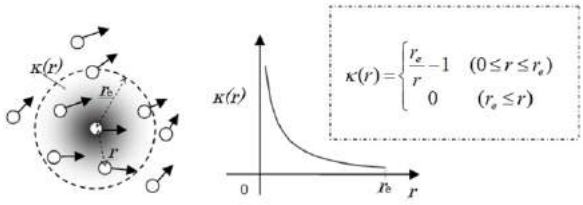


図 1　Schema of MPS method and weight function κ.　The r is distance between particles. The range where the effect of weight function

また，自由表面を伴う流れ場の解析に有効な粒子法の一つである MPS 法（Moving Particle Semi-implicit 法）[6,7]によるシミュレーションも多くの研究成果が報告されているが，既存の方法のままでは材質による差は表現できていない．一方，生体や医療といった分野の循環器系や細胞などのシミュレーション解析においても，血管壁[8-12]や膜[13-16]などの表面の滑りの扱いについては特に言及されていない．また，これまで我々は生物とそれらを取り巻く流体環境の解明として，流体中の細胞の大変形[17]や生体材料のハイドロゲルとその周辺流れについての研究を行ってきた[18]. そこで，本論文で扱う表面性状については，上述のような生体材料であり生物の体表のヌメリの成分であり，親水性高分子ゲルのハイドロゲルといった滑り特性を持つ物体を対象としている．ハイドロゲルとは，寒天やゼラチンのような食用品から医療や生体材料まで幅広く用いられている水を溶媒とする高分子ゲルであり，魚やカエルといった生物の体表面のヌメリはそういった高分子ゲルの一つである Mucin が主な成分である[19].

本研究では，表面性状の考慮が必要なシミュレーションにおける物体壁面の条件の取り扱いについて言及するものであり．2 章にて，その例として生体材料の一つのハイドロゲルにおける滑りを粒子法（MPS 法）による計算へ導入する方法について述べ，3 章で，壁面の滑りを考慮して計算した粒子法シミュレーションを実験との比較によって評価・考察し，4 章にて結言を述べる．

2　流体と物体表面における相互作用の導入

MPS 法は，混相流やスロッシング，波，破壊など流体の自由表面や，また，大変形を扱う構造物のシミュレーションを行うのに有効な手法として，近年盛んに用いられている数値シミュレーション手法である[6]．　MPS 法はメッシュレスな粒子法の一つであるため，有限要素法などの他の格子を切る計算方法に比べ，界面が大変形したり合体・分裂したりする流体のシミュレーションを容易に行えるメリットがある．

図 1 に示すように，離散的な流体粒子および固体粒子に作用する運動方程式をたて，各計算ステップで連立方程式を解き，各粒子の運動を追跡するラグランジュ的な方法である．運動量保存則は Navier-Stokes の式で表され，各粒子に作用する外力や粘性による移動量

を陽的に計算して仮の位置を求めた後に，質量保存則としての連続の式の代わりに，粒子密度一定の条件を満たすためにポアソン方程式を解くといった半陰的解法である．ここでは，生体材料のような表面性状が通常と異なるハイドロゲル表面で見られるような滑りの効果を，MPS 法による流れ場を解く計算に導入する方法を述べる．

2.1 粒子法と流れの基礎方程式

非圧縮粘性流体の流れ場を計算するにあたって，Navier-Stokes の支配方程式は次式の通りである．

$$\frac{Du}{Dt} = F - \frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2 u \tag{1}$$

ここで，u は流れ場の速度ベクトルで，ρ は流体密度，P は圧力，ν は動粘性係数，そして F は重力などの外力である．また，Navier-Stokes の式において，MPS 法における圧力項の gradient と粘性項の Lapracian の離散的な計算方法はそれぞれ以下のように表せられる．

$$\nabla P_i = \frac{d}{n^0}\sum_{j\neq i}\left[\frac{p_j - p_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2}(\vec{r}_j - \vec{r}_i)\kappa(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)\right] \tag{2}$$

$$\nabla^2 u_i = \frac{2d}{\lambda n^0}\sum\left[(u_j - u_i)\kappa(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)\right] \tag{3}$$

ここで，r は粒子の位置ベクトル，d は計算領域の次元，λ は統計的な分散を表す変数，n^0 は粒子の初期配置の密度，p は圧力を示す．本研究では，詳細は次節で述べるが，実験結果からの類推によりこの陽的に計算される Lapracian に滑りの効果を導入する．なお，MPS 法では図 1 右に示すように，各パーティクル間の相互作用の影響度として重み関数 κ は以下の式として与える．

$$\kappa(r) = \begin{cases} \dfrac{r_e}{r} - 1 & (0 \le r \le r_e) \\ 0 & (r_e \le r) \end{cases} \tag{4}$$

ここで，r は二点間の距離であり，パーティクル近傍の影響範囲を示す閾値 r_e は一般的に用いられている $2.1l_0$ とし[6]，l_0 は初期状態のパーティクルの平均間隔で，計算時間と描画の分解能を考慮し $l_0 = 4\text{mm}$ とした．

2.2 ハイドロゲル表面の滑りの効果の導入

物体表面の滑りの効果を MPS 法に取り入れる方法を示す．ここでは，表面の滑りを物体と流体の壁面応力の低減として捉え，実験によりその低減率を滑り率(slip ratio) α として求め，ハイドロゲル壁面とその近傍の流体に作用するせん断力の計算に適用するといった，

実験から得られた現象を元にした手法である．

まず，ハイドロゲルの物性値の一つである膨潤度 S（swelling degree）は，下記の式(5)のようにゲルの質量に対する水の質量の比で表される．

$$S = (m_{water} + m_{gel}) / m_{gel} \qquad (5)$$

ここで m_{water} は溶媒となる水の質量，m_{gel} はゲルの乾燥材料の質量であり，つまり，水分量が大きいほど S の値が大きくなる．本研究の対象には，含水量の調整や成型の容易さからハイドロゲルとして寒天を選んだが，寒天は主にアガロースと呼ばれる高分子による鎖状の分子構造で，網目状の架橋構造を作りその合間に水分子を含み，その値は数百といった多量の水分を含有することができる．

次に，ハイドロゲル壁面と流体との間に生じる滑り率 α については，ハイドロゲルによ

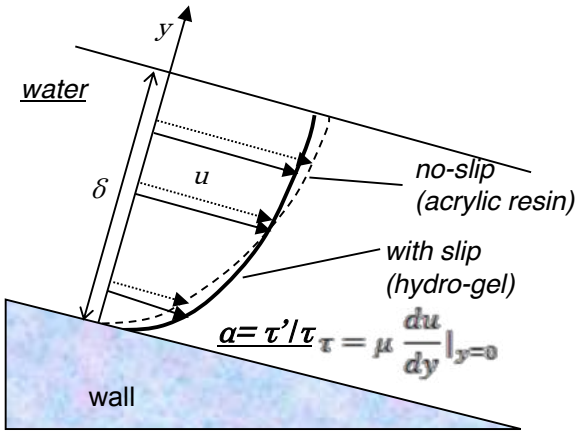


図 2　Schema of experiment of a film flow with slip at the wall.　Slip ratio α was the ratio of wall shear stress obtained by the experiment.　The τ is wall shear stress on the slope with no-slip condition.　The τ' is that on the slope with

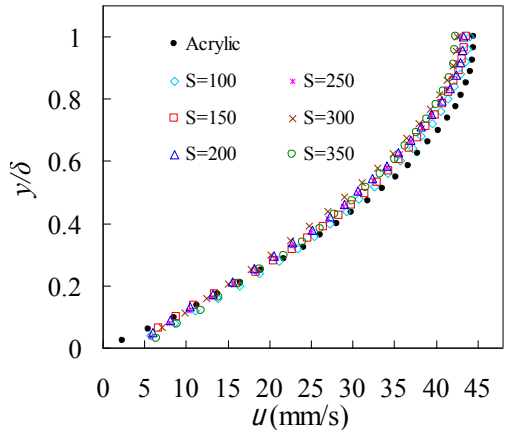


図 3　Experimental result(18) of velocity profile of flow on the agar wall.　The u is the velocity of water.

る滑り有りの壁面応力およびアクリル樹脂による滑り無しの壁面応力の比で求めた．流路を流れる水の PIV 実験による壁面近傍の垂直方向の速度勾配から，壁面応力をそれぞれ求めその比を α として数値計算の境界条件に導入することにした．

実験のより詳しい説明は参考文献[18]にゆずるが，図 2 にその実験の模式図と α の導出に関する概要を示す．実験は，ハイドロゲルによる滑り有り条件およびアクリル樹脂による滑り無し条件による斜面上に，パーティクルを混入させた水を上部から流し，パーティクルの移動の様子を側面からハイスピードカメラによるビデオ撮影により計測した．流路は長さ 400mm，幅 20mm のアクリル樹脂板で作成し，ハイドロゲルの層をその底面上に一様に形成させた．ハイドロゲルには形成の容易さから寒天を取り上げたが，さらに比較のためにカラギーナンゲルでも同じ実験を行った．ハイドロゲル層の上に流した水の流速は 44.5mm/s で，計測した流れの壁面垂直方向 y の高さ δ はハイドロゲル表面から 0.83mm であった．なお，水の注入は撮影箇所から十分はなれた上流から行い，ハイドロゲル表面はこの流れによる変形や流失はなかった．

図 3 に，実験による膨潤度 S の違いによる寒天上およびアクリル樹脂上の流速の分布を示す．床面垂直な方向 y における斜面方向の速度 u の分布は，寒天(S=100～350)では y/δ=0.2 より下の壁面近傍でアクリル樹脂(Acrylic)に比べ速くなっており，概略図 2 の実線のように寒天の表面近傍では滑りがある流れが観測された．なお，滑り無し条件のアクリル樹脂では，図 2 の破線のようにポアズイユ流れが観測され，これは理論値と一致していた．

ここで，実験精度について述べると，壁面上を流れる液膜流れの理論値と比較を行ったところ，計測より得られた滑り無し条件としてのアクリル板上の速度分布は液膜流れの理論値との相関係数が 0.999 であり非常に良好な一致が得られた．また，壁面近傍での標準誤差は最大±0.06%であった．この測定精度をもって，図 3 はハイドロゲル上を流れる液膜流れの速度分布を計測しているので精度は保障されていると言える．

壁面応力 τ は，次式のとおり壁面近傍における速度勾配から算出する．

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}\Big|_{y=0} \tag{6}$$

ここで μ は水の粘度で，u は流速である．壁面における速度勾配 du/dy は，壁面に最も近い方から 2 つのパーティクルを選び，それらのパーティクルの底面に平行な方向の速度変化量 du を垂直方向の距離 dy で除算して求めた．計測したパーティクルの斜面からの距離は 10μm 以下で，概ね精度は保障される値である．本研究では，アクリル斜面を滑り無しとして基準の壁面応力 τ とし，また寒天のときの壁面応力を τ'とし，次式の様にそれぞれの応力の比を滑り率 α とする．

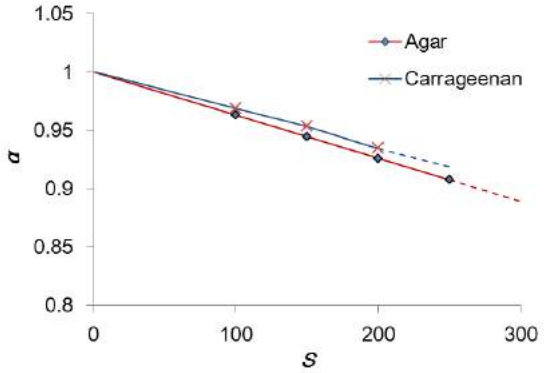


図 4　Relationship of swelling degree S of agar and slip ratio α, which was obtained

$$\alpha = \tau' / \tau \qquad (7)$$

また，膨潤度 S と滑り率 α の関係は，寒天およびカラギーナンゲルによる実験結果から図 4 に示すような値が得られ，それぞれ線形となる結果となったことにより次式のようにモデル化した．

$$\alpha = 1 - \beta S \qquad (8)$$

係数 β は，実験値より寒天(Agar)の場合 0.0012 であった．よって，膨潤度 150 では α は約 0.94 であり約 6%の壁面摩擦抵抗の低減になることを示している．なお，no-slip の場合は $\alpha = 1$ で，また完全にスリップする場合は $\alpha = 0$ とする．

次いで，ここで得られた α は，図 5 に示すようにゲル壁面と水の境界付近における，陽的な粘性の計算時の重み関数の係数として用いる．MPS 法では，各パーティクル間のせん断力の影響度を重み関数 κ として与えるが，本研究では，寒天ゲル壁面と周囲の水の滑り（壁面せん断力の低減）の影響として，粘性項の計算における重み関数に滑り率 α を掛け合わせた κ_H を寒天ゲルの周囲 r_e にある水粒子との間にのみに用いた．ほかの粒子間である壁から離れたところの粒子や水粒子同士には通常の κ を用いる．

$$\nabla^2 u_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum \left[(u_j - u_i) \kappa_H (|\bar{r}_j - \bar{r}_i|) \right] \qquad (9)$$

i: water particle near hydro-gel wall
j: surface particle of hydro-gel wall

$$\kappa_H(r) = \alpha \kappa(r) \qquad (10)$$

つまり，ハイドロゲルの表面を構成するパーティクルから半径 r_e にある水粒子との粘性項計算についてのみ α を掛けた重み関数 κ_H で計算することで，壁面応力を α 分だけ小さくし

ハイドロゲル壁面近傍の滑りを表現した．

3　シミュレーション結果と考察

本章では，既存の粒子法プログラムに対し 2 章で示したハイドロゲル壁面の滑りの効果を導入したシミュレーション結果を示す．まず，2.2 節で述べたハイドロゲル表面上を流れる水の実験と比較することで，本手法の妥当性を検証し，次に，生体分野での応用例として，ハイドロゲル球が水面に落下によって生じるスプラッシュのシミュレーションを行った．

3.1 ハイドロゲル床上の流れの検証

本研究で提案した手法の検証として，式(9)と式(10)を用いてハイドロゲル床面上の流れる水の速度分布についてシミュレーションを行った．図 6 に，高さ h の管路に水を流した時の，床面からの距離 y とその位置における流速 u の分布について，床面の滑り無し条件（no-slip）と滑り有り条件（膨潤度 S = 100, 250）それぞれの結果を示す．計算条件については，r_e は参考文献[6,7,9]などでよく用いられている $2.1l_0$ とし，また，初期粒子間隔 l_0 は 4mm とした．また，計算領域は長さ 80 l_0，高さ 20 l_0 とし，計算領域上面($y = h$)は slip 条件で x 方向に流速 u_0 = 4cm/s を与えるものとしている．なお，速度分布 u は与えた流れの初速 u_0 で，また高さ y は h でそれぞれ割って正規化している．

シミュレーションの結果については，まず，滑り無し条件(no-slip)ではポアズイユ流れになることが知られているが，本計算による流れの速度分布を理論値（破線）と比較すると

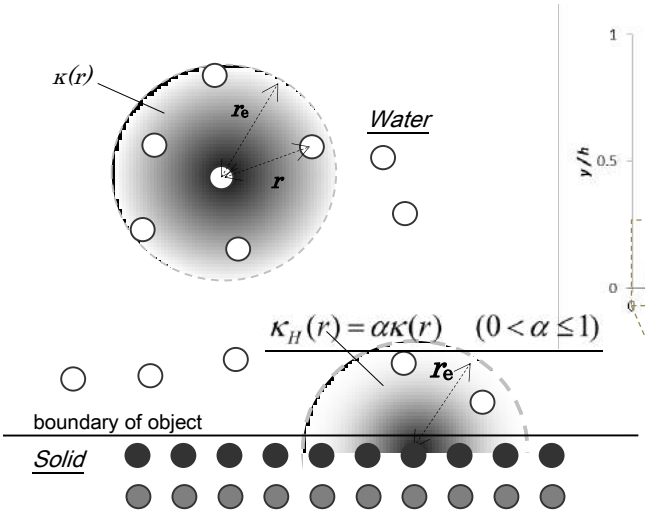


図 5　Difference of weight functions κ_H and κ. The distance between particles denoted by r. The κ_H is used between the particle on the boundary of the hydrogel object and the virtual

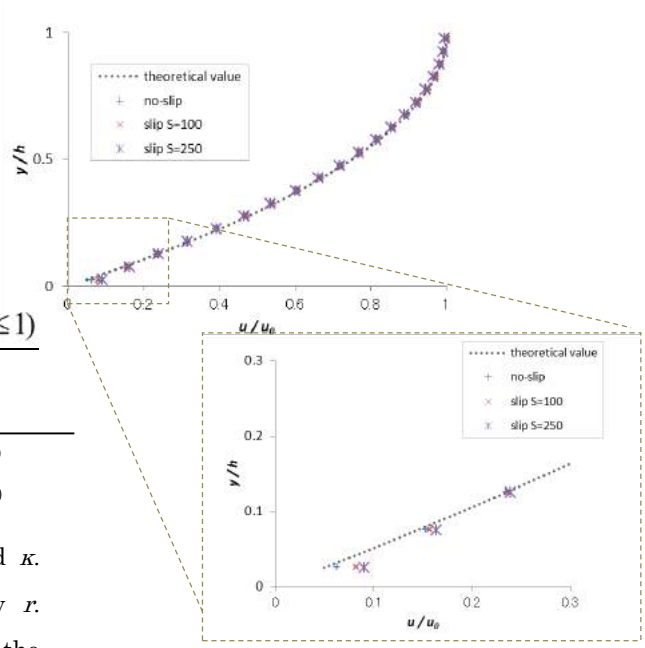
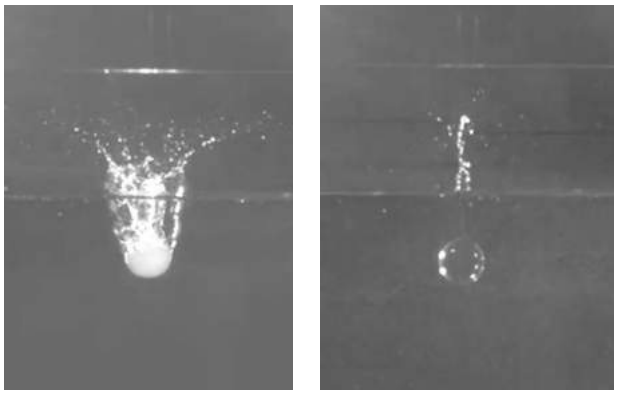


図 6　Difference of flow velocity u on the hydro-gel wall (slip wall) and no-slip wall in a conduit by MPS method. The U_0 is the



(A) Hydrogel (Agar)　　(B) Acrylic resin

図 7　Difference of water splash by a sphere made of hydro-gel and a sphere made of acrylic resin. The picture at left is the splash of an agar sphere (Radius=10mm, S = 100), the picture at right is a splash of acrylic resin (Radius=10mm). The velocity impacting water surface in both photos was the same, but each splash's form was different.

同等の速度勾配が得られており，滑り無し条件では正しく計算ができている．次いで，図 6 の右下に拡大図を示すが，ハイドロゲル床面である S= 100 や S= 250 の条件では，膨潤度の上昇に伴いハイドロゲル表面の滑りによる効果で壁面近傍の流速が増加している．例えば，滑りがある S= 250 の結果において，no-slip の結果より床近傍で流速が約 10%増加しており，前述の実験と同様の結果であった．図 6 は横に速度を取っているため，傾きが急になっていることはハイドロゲルの膨潤度 S の増加により表面近傍の速度の変化率が減少していることを表している．つまり，壁面応力は式(6)に示したように表面近傍の速度の変化率に比例するので，このシミュレーション結果は壁面応力が低減していることを表していることになる．以上により，slip ratio を滑り有り壁面近傍に導入することで実験の結果と同様の計算が得られ本手法は妥当であるといえる．

ここで，粒子法におけるパラメータの影響についての検証について述べておく．閾値 r_e に関して，一般的に用いられている $2.1l_0$ 以外の場合では，図 6 で示した速度勾配において差が生じた．r_e が 2.1 より小さい 1.8 などでは流速が壁面と上面の中間(y/h=0.5)付近で実験値よりも大幅に大きい値になり，また一方，r_e が 2.1 より大きい 2.4 や 2.6 などでは壁面近傍の流速が急激に増加した．よって，結局 r_e は文献の値 2.1 の時に，全体的によくゲル状のポアズイユ流れを表現できていた．また一方，初期粒子間隔 l_0 については，この間隔を 2 倍 4 倍，1/2 倍 1/4 倍と変えてシミュレーションの検証をしたが，図 6 の壁面近傍のスリップによる効果の傾向が変わるといった違いはなかった．なお，粒子の移動に関しては 4 次精度のルンゲクッタ法を用いている．

3.2 ハイドロゲル球が生成するスプラッシュにおける滑りの効果

次に，本手法の応用例としてハイドロゲル球が水面に突入した時のスプラッシュの二次元シミュレーションを行った．

スプラッシュは流体の自由表面や大変形，物体との連成といった計算工学における流体と固体の相互作用問題（Fluid Structure Interaction）の観点で興味深い現象である[20-23]．本研究で扱った滑りとスプラッシュにおいては，バイオミメティクスの観点では，魚類が泳ぐときやカエルが水面に飛び込むときに生じるしぶきや，またはイルカのトムズ効果で知られるような表面分泌物による抵抗低減の現象などに関連している．また，競泳水着や船体壁面における飛沫のメカニズムや造波の抵抗低減といったように，スポーツや造船分野の研究においても自由表面を扱うスプラッシュが取り上げられている．こういった研究は，通常の no-slip でない境界条件でのシミュレーションも検討されるべきではないかと思われる．

表面性状の違いにより周辺の流れが影響を受ける現象の例を図 7 に示す．大きさと水面への突入速度が同じ(A)ハイドロゲル球（寒天：S=100）と，(B)アクリル樹脂球によるスプラッシュの形状のスナップショットである．球は吸引による Launcher 装置で吸いながら静止させ後，電気スイッチにて吸引を止めることで無回転で落下させた．静水面に突入した

際に形成されるスプラッシュ映像は，真横からハイスピードカメラ（Vision Research Inc. Phantom V7.1）を使用し 4000 frames/sec で撮影したものである．物体には，水に飛び込むカエルなどの小生物などを想定し，その大きさに近い半径 R=10mm の球を，高さ $50R$ から落下させた．

図 7(A)のハイドロゲル球では，いわゆるミルククラウンのような冠状のスプラッシュが形成されるが，アクリル樹脂球(B)では柱状になった．この例のように，どちらも表面はなめらかであるが，物体表面の滑りといった性質によって周辺流れ場が影響を受ける例があるので，本研究のようにシミュレーションにおいても表面性状の違いは考慮されるべきである．

図 8 に，ハイドロゲルの滑りの効果をいれたシミュレーションと実験によるハイドロゲル球のスプラッシュとの生成過程を示す．本研究では，MPS 法における滑りの効果による結果への影響をみるため，計算コストも考慮してここでは三次元でのシミュレーションではなく二次元で検証した．実際のスプラッシュとの三次元に起因する相違の比較は今後の課題にしたい. 球は半径 R=10mm でシミュレーションの水槽は半径 $20R$, 深さ $20R$ とし，スプラシュの形状への影響がないことを確認した大きさである．

ハイドロゲルの球が水槽の水面に着水した瞬間を t=0.0 として，t=0.02 で最初のスプラッシュ(Primary Splash)が上がり，いわゆるこれはミルククラウン[20]に見られるものである．その後 t=0.03 では球が沈降するに伴い柱状の空気のキャビティができる．このシミュレーション結果は実験結果で観察されるスプラッシュと良く似た結果が得られた．

図 9 は，ハイドロゲル球によるスプラッシュのシミュレーションで，その飛散する水粒子の軌跡をトレースしたものである．水面に突入した瞬間を $t = 0$ とし，水粒子の運動の軌跡を $t = 0.045$ までプロットしたものである．軌跡として表示している粒子は，突入する寒天ゲル球の直下を x=0 とし近傍の半径 R 内にある水粒子であり，青線は S=50 の時の軌跡を，赤線は S=350 の時の軌跡をそれぞれ示している．

図 9 の軌跡の広がり方の違いにみられるように膨潤度が大きくなるにつれ水粒子の飛散する軌跡が外側に広がり，粒子の移動距離は膨潤度が大きいほど多かった．この原因としては，ハイドロゲル球周辺の水の移動速度が滑りにより増加することが考えられる．

図 10 に，各 S に対する水粒子の平均速度 V_{ave} の変化を示すが，各 S における値は図 9 に示した球の落下地点付近の粒子の平均をとっている．このグラフより，膨潤度 S の大きい方が V_{ave} は速く，ハイドロゲル表面における滑りの影響により表面の周辺にある水粒子の速度が増加したことを示している．

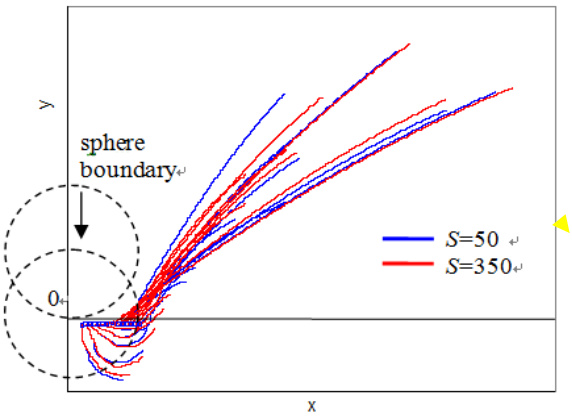


図 9　Path lines of a virtual water particle near the impact point hydrogel sphere plunging, during T = 0 to 0.045sec. The particles started from the surface of water at x = 0 to R. Blue line: S = 50, Red line:S = 350. The particle of S = 350 moved wider than that of S = 50.

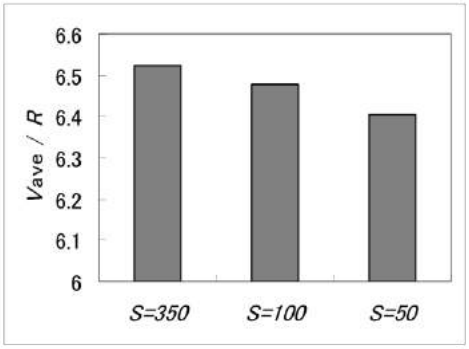


図 10　Average velocity of the particles included in splash as shown in Fig.6.

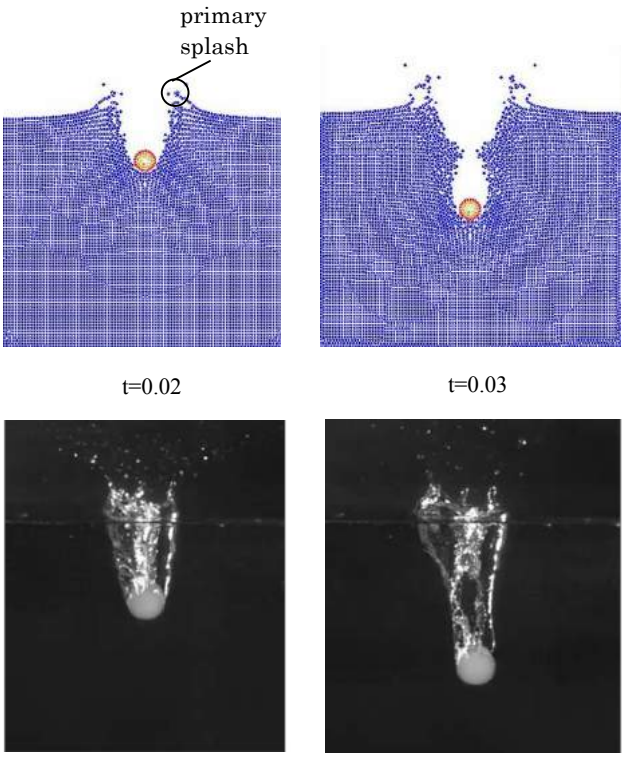


図 8　Crown-type-splash of hydrogel (S = 100) by experiment and simulation. Primary

以上，本研究の提案する手法により，ハイドロゲルの膨潤度の違いに応じた slip-ratio を導入することで，物体表面の滑りの度合いが周辺流れ場に与える影響が解析できるようになった．なお，スプラッシュの観察においては，実験環境での詳細な流れ解析は難しく，筆者らも PIV や着色によって着水物体の近傍の流れをトレースしようとしたが，パーティクルが気泡やキャビティによってさえぎられたり，光の反射や前面に跳ね上がる波などが障害になったりして解析は満足に行えなかった．また，膨潤度の大きいハイドロゲルでは球そのものが柔らかくなることによる変形の影響も受けるため，表面の滑り効果のみの影響を観察するためにも，本研究のようなシミュレーションによる解析が滑りの影響の調査には有効な一手段であると考えられる．

4 おわりに

本研究は, 物体表面に滑りを有するような物体周りの流れ場のシミュレーションを計算する方法を提案した．二次元の非圧縮性流体の粒子法(MPS 法)シミュレーションにおいて，膨潤度に応じた壁面の滑り度合いとして滑り率(slip ratio)を実験より求め，それをナビエ・ストークスの式における粘性項を陽的に計算する際に，重み関数に掛ける係数として導入した.

提案した手法の検証として，管路内を流れるポアズイユ流れの数値シミュレーションを行い，ハイドロゲル壁面近傍における流速が滑り無し条件に比べ増加するといった, 実験との同様の結果が得られることを確認した．そして，本手法による計算方法の応用例として，生物の水面への飛び込みに見られるようなスプラッシュを取り挙げた. 膨潤度に応じたスプラッシュの違いのシミュレーションを行い, 膨潤度の増加により球近傍の水粒子の速度が上昇しスプラッシュの幅が増大することを示した.

本研究の効果として，流体と物体壁面の干渉において通常の no-slip 条件ではない表面性状として滑りを計算に導入したが，これにより，ぬめりのある体表面を持った生物や，さらには血管や消化器の内壁といった生体における流れのシミュレーションへ適用の可能性を示すことが出来た.

引 用 文 献

(1) Manservisi, S., and Scardovelli, R., “A variational approach to the contact angle dynamics of spreading droplets”, *Computers & Fluids ,* Vol.38 (2009), pp.406-424.

(2) Tanaka, Y., Washio, Y., Yoshino, M., and Hirata T., “Numerical simulation of dynamic behavior of droplet on solid surface by the two-phase lattice Boltzmann method”, *Computers & Fluids*, Vol.40 (2011), pp.68-78.

(3) Muradoglu, M., and Tasoglu, S., “A front-tracking method for computational modeling of impact and spreading of viscous droplets on solid walls”, *Computers & Fluids*, Vol.39 (2010), pp.615-625.

(4) Yabe, T., Chinda, K., and Hiraishi, T., “Computation of surface tension and contact angle and its application to water strider”, *Computers & Fluids*, Vol.36 (2007), pp.184-190.

(5) Kubota, Y., and Mochizuki, O., “Splash Formation by a Spherical Object Plunging into Water”, *Journal of Visualization*, Vol.12 (2009), pp.339-345.

(6) 越塚誠一, 粒子法 (2005), pp.10-29, 日本計算工学会.

(7) Harada, T., Suzuki, Y., Koshizuka, S., Arakawa, T., and Shoji, S, “Simulation of Droplet Generation in Micro Flow Using MPS Method”, *JSME International Journal*, Series B, Vol.49 (2006), pp.731-736.

(8) Takizawa, K., Bazilevs, Y., Tezduyar, T.E., “Space-time and ALE-VNS Techniques for patient-specific cardiovascular fluid-structure interaction modeling”, *Arch. Comput. Methods Eng.,* Vol.19 (2012), pp.171-225

(9) 田中正幸, 越塚誠一, “粒子法を用いた赤血球の変形シミュレーション”, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol. 26 No.1 (2007), pp.49-55.

(10) Tsubota, K., Wada, S., Kamada, H., Kitagawa, Y., Lima, R. and Yamaguchi, T., “A particle method for blood flow simulation, - Application to flowing red blood cells and platelets –“, *Journal of the Earth Simulator*, Vol.5 (2006) pp.2-7.

(11) Shirai, A., Fujita, R., and Hayase, T., “Transit characteristics of a neutrophil passing through a circular constriction in a cylindrical capillary vessel”, *JSME International Journal*, Series C, Vol.45, (2002), pp.974-980.

(12) Sun, S., Migliorini, C., and Munn L.L., “Red Blood Cells Initiate Leukocyte Rolling in Post Capillary Expansions: A Lattice Boltzmann Analysis”, *Biophysical Journal*, Vol.85 (2003) pp.208-222.

(13) Barthes-Biesel, D., Diaz, A, and Dhenin, E, "Effect of constitutive laws for two-dimensional membranes on flow-induced column deformation", *J.Fluid Mech.*, Vol.460 (2002), pp.211-222
(14) Ramanjan, S., and Pozrikidis, C., "Deformation of liquid capsules enclosed by elastic membranes in simple shear flow: large deformations and the effect of fluid viscosities", J. Fluid Mech., Vol.361 (1998) pp.117-143.
(15) Zhu, L.D., Chin, R.C.Y., "Simulation of elastic filaments interacting with a viscous pulsatile flow", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.197 (2008), pp.2265–2274.
(16) Taylor, C.A., Hughes, T.J. R, and Zarins, C.K., "Finite element modeling of three-dimensional pulsatile flow in the abdominal aorta: Relevance to atherosclerosis", *Annals of Biomedical Engineering*, Vol.26 (1998) pp.975–987.
(17) Yokoyama, M., and Mochizuki, O., "Deformation of a fluid-filled compliant cylinder in a uniform flow", *Journal of Fluids and Structures*, Vol.25 (2009) pp.1049-1064.
(18) Kikuchi, K., and Mochizuki, O., "A flow on a hydrogel surface mimicked a living cell", *The 21st International Symposium on Transport Phenomena*, (2010), CD-ROM
(19) Ling, S.C., and Ling, T.Y., "Anomalous drag-reducing phenomenon at a water / fish-mucus or polymer interface", *J.Fluid Mech*, Vol.65 (1974), pp.499-512.
(20) Worthington, A.M., "On Impact with a Liquid Surface", *Proceedings of the Royal Society of London* , Vol. 34 (1982), pp.217-230.
(21) Krechetnikov, R., and Homsy, G.M., "Crown-forming instability phenomena in the drop splash problem", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.331 (2009), pp.555-559.
(22) Bussmann M., Chandra S. and Mostaghimia J., "Modeling the splash of a droplet impacting a solid surface", *Physics of fluids*, Vol.12 (2000), pp.3121-3132.
(23) Yoon, S.S., Jepsen, R.A., Nissen, M.R., and O'Hern T.J., "Experimental investigation on splashing and nonlinear fingerlike instability of large water drops", *Journal of Fluids and Structure*, Vol. 23 (2007), pp. 101-115.

3.1.4. 飛来塩分シミュレーション　–流体～粒子弱連成解析–

(1) 目標・計画

本研究はコンクリート構造物の塩害劣化シミュレータの開発を目的としている. コンクリートの塩害は, 海から運ばれる海塩粒子(飛来塩分)に起因する場合と, コンクリートの構成材料である骨材に未洗浄あるいは十分洗浄していない海砂が使用された場合がある. 本研究で対象としている塩害は, 前者である.

飛来塩分に起因したコンクリート構造物の塩害は, 海から運ばれる塩分がコンクリート表面に付着し, それらの一部が構造物内部に浸透し, 内部の鉄筋位置まで達し, それらの濃度が腐食発生源限界塩化物イオン濃度を超えると, 鉄筋が腐食・膨張し, その膨張圧でコンクリートに有害なひび割れを生じさせる劣化現象である.

本研究では, それらの劣化現象を精度よく予測するための数値解析的手法を開発することを目標としている. これまでADVNETURE_Fluid_Tetおよび粒子拡散手法の一種であるランダムウォーク法を用い, 流体-粒子弱連成解析おいて, 飛来塩分の移流・拡散および構造物への付着シミュレーションを実施してきた. 今年度の目標は, 本解析結果と実構造物との付着塩分の調査との比較を行い, 本手法の妥当性を検討することである.

今後のは, 構造物に付着した塩分の浸透解析, 鋼材腐食・膨張解析, コンクリートのひび割れ解析などを実施し, コンクリート構造物の塩害劣化シミュレータの作成を目指す.

(2) 意義・国際社会との比較

世界的にコンクリート材料は社会基盤を構成する多くの構造物に使用されており, コンクリート構造物の合理的でかつ効率的な維持管理を行うためには, 劣化因子(塩害の場合は, 飛来塩分など)の作用強度の空間的分布の把握が必要である. 本手法は飛来塩分の移流・拡散および構造物への付着現象をシミュレートでき, 劣化因子の空間的分布の評価が可能である. このため, 塩害劣化に対する維持管理のための劣化進行予測を行うための有力な手法であるといえる.

(3) 研究内容

本解析手法は, 2 段階に分かれる. 具体的には, ADVENTURE_Fluid_Tet により構造物周辺の流れ場(風速場)を解く第1ステップと, 第1ステップで得られた流れ場を用いて粒子拡散手法の一つであるランダムウォーク法により飛来塩分粒子の移流・拡散を解く第2ステップからなる. ここではADVENTURE_Fluid_Tetの説明は省略し, ランダムウォーク法について概説する.

本研究では飛来塩分の移流拡散モデルとして粒子拡散手法の一種である 3 次元ランダムウォーク法を用いた. このモデルは, 発生源から追跡粒子を放出し, 個々の粒子が平均流と乱流によって運ばれるとして, その後の粒子の分布を, 3 次元空間で計算するものである.

(a) 粒子位置の更新(移流・拡散)

3 次元乱流で i ステップ目の粒子の位置 $x_i(x,y,z)$とし, それぞれの速度を $u_i(u,v,z)$とする. その特徴として, 粒子の速度を求める際に, 乱流統計量により粒子の拡散性状を表現する.

以下にそれぞれの粒子の位置と速度の関係を示す.

発生した塩分粒子の輸送を次式で表す.

$$x_j^{i+1} = x_j^i + u_j^{i+1}\Delta t \tag{1}$$

ここで，Δtは時間ステップである．また，i+1ステップ後の粒子速度を次式に表す．jは座標を表す.

$$u_j^{i+1} = U_j^{i+1} + \alpha u_j^i + \lambda_j^{i+1} \tag{2}$$

ここで，U_j^iは平均的な風速であり，Adventure_Fluid_Tet から得られる流れ場を用いる（弱連成）．λ_j^{i+1}は乱流統計量，αはラグランジュの相関関数である．また，乱流統計量は次式となる.

$$\lambda_j^{i+1} = \left(1-\alpha^2\right)^{1/2}\sigma_j \cdot \eta_j^{i+1} \tag{3}$$

粒子は平均値がゼロの正規分布に従うとしている．σ_jは粒子拡散の標準偏差を表し，粒子の拡散性状を表現するものである．また，σは次式に示す Fick 形の拡散形式を持つものとしてモデル化を行っている.

$$\sigma = \sqrt{2Kt} \tag{4}$$

ここで，Kは乱流拡散係数であり，粒子速度に依存すると仮定し，次式から求めている.

$$K = \frac{\beta}{3}\left(u^2 + v^2 + w^2\right)\cdot t \tag{5}$$

ここで，βは係数，tは時間である.

(b) 付着判定

本研究の位置づけは，コンクリート表面に付着する塩分量を評価することであるため，ランダムウォーク法に用いる粒子が構造物へいかに付着するかは重要なモデル化となる．しかし，その件について十分な検証データがないため，本研究では，構造物に衝突した粒子はすべて付着するとした完全付着モデルを採用した.

(c) 粒子の塩分濃度, 沈降速度

ランダムウォーク法の大きな特徴の一つに個々の粒子ごとに個性を持たせることができることが挙げられる．過去の研究において粒子の塩分濃度および沈降速度などを定義したが，今回の検証においては，対象橋梁の高さが海面より 5m 程度で，さらに，高さがそれほどないため，粒子の塩分濃度は一定であると仮定し，付着塩分量は付着粒子の個数に依存するとした．また，今回の解析対象において，沈降速度の影響は小さいものと考え，沈降速度は考慮していない.

(4) 平成 25 年度進捗状況

以下に平成 25 年度の進捗状況を示す．本年度は本手法と実測値を比較し，本手法の妥当性を検証した．対象としたコンクリート構造物は，沖縄本島北部の西海岸側に建設されたプレテンション PC 橋である．対象橋梁の側面図を図- 1 に示す．付着塩分はガーゼ拭き取り法にて採取した．また，測定位置は，図- 1 の南側端部，中央部および北側端部である.

今回は，飛来塩分の影響のみを受ける中央部の結果について報告する．今回付着塩分採取法に採用したガーゼ拭き取りの様子と測定位置を図-2 に示す．図-3 に付着塩分量の結果を示す．測定位置は，図に示す 6 主桁すべての 5 か所であり，測定位置を海側から順位番号付けしており図の横軸の番号に対応する．

つぎに解析結果について説明する．図-4 に ADVENURE_Fluid_Tet により計算した 0.5 秒後の風速ベクトルであり，その風速場を用いてランダムウォーク法の解析を行った．なお，境界条件しての入力風は，年平均風速を参考に 5m/s とした．図-5 に飛来塩分の移流・拡散・構造物への付着解析の結果を示す．また，図-6 に解析より得られた付着塩分量（単位面積当たりの粒子数）の結果を示す．

実測値および本解析値の付着塩分量はともに，主桁下面が多く，特に２番目の桁下面が最も多く，陸側へ向かうにしたがって付着塩分量が少なくなっていく結果を示している．この結果より，定性的ではあるが本手法の妥当性が得られた．今後は定量的な評価を行う予定である．

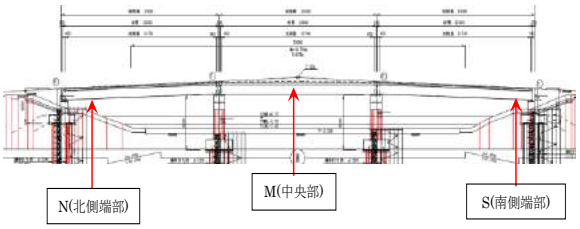


図- 1　対象橋梁（側面図）

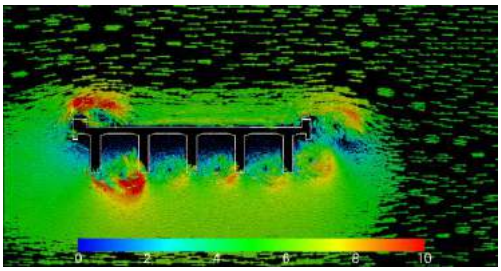


図-4　風速ベクトル図(0.5s)

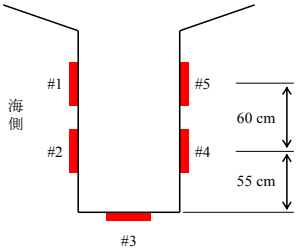


図-2 測定の様子と測定位置

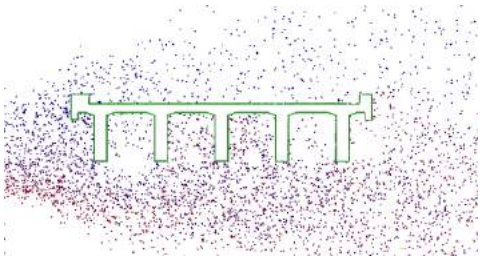


図-5 飛来塩分シミュレーション

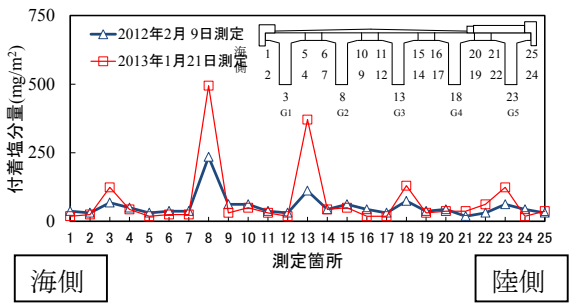


図-3　付着塩分量（実測値）

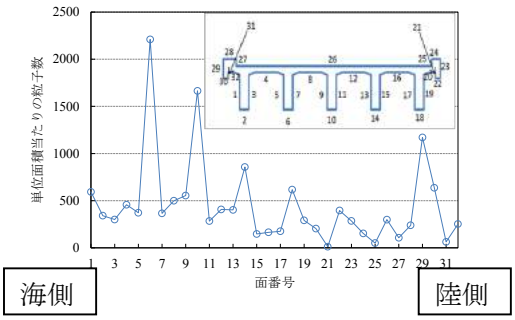


図-6　付着塩分量（解析値）

3.1.5. ブロック構造を有する固体の大規模３次元モデル生成および固液連成解析技術の構築生

(1) 目標・計画

地盤・岩盤の内部には大小様々なき裂が存在し，それを成す材料は不均質かつ不確実なものである．したがって，地盤・岩盤全体としての力学的挙動を解析することは必然的に複雑なものとなり，その安定性や斜面崩壊，岩盤崩落の危険性を精度良く評価することは困難である．これは，上記の崩壊現象が，材料内部のき裂分布，材料分布，地下水流れ，き裂進展挙動などの物理現象が互いに連成した結果として生じることから，これらの現象のすべてを考慮した理論的・実験的検討が極めて困難であることに起因している．我が国は平野部が少ないため山間部まで人間の居住空間が広がっているため，土石流のような土の流動現象が生じると多くの人的被害を伴う場合が多い．したがって，地盤・岩盤の流動現象を解明し，人間社会の安心や安全を担保するためには，数値解析技術を援用した安全性評価が不可欠である．

本研究では，Sulsky らによって開発された MPM（Material Point Method）を基盤とした固体－破壊－流体連成解析技術を構築し，数値シミュレーションの観点から海底地すべり現象の力学的メカニズムやそれに伴って生じる津波の発生メカニズムを理解することを目標とする．本研究では初年度で深層崩壊や表層崩壊を誘発するような様々な形状を有する岩盤（岩山，連峰）や海底地すべり地層のモデル化技術を構築した．今年度は，地盤の流動解析の構築を目標とした．

(2) 意義・国際社会との比較

地すべりや津波等の自然災害の多発に伴い，国際的に防災対策の重要性が高まっている．土石流や斜面崩壊・崩落等の土の流動現象はマルチフィジックスな現象であり，これを力学的に解明することは現代社会が立ち向かうべき課題の一つである．実際の土砂災害時における土塊の移動距離は数百~千メートル程度であり，極めて大規模な自然現象であることは想像に難くない．しかしながら，破壊力学や流体力学等の様々な分野において，三次元数値解析や大規模解析が複数実施されているにもかかわらず，土の流動現象の大規模数値シミュレーション技術に関する研究開発は見当たらず，未だ達成されていない．したがって，土の流動解析を可能とする大規模シミュレーション技術を構築することの国際社会における意義は極めて大きい．

不連続岩盤の大変形ならびに斜面崩壊を動的に解析できる手法として，個別要素法（DEM）や不連続変形解析法（DDA）などが挙げられる．しかしながら，地盤の流動現象は土の材料額的性質や土粒子と地下水との力学的連成挙動が極めて複雑であるため，これらを精度よく解析できるまでには至っていない．さらには，多くの亀裂を含む不確実な岩盤の破壊力学解析に至っては，地下水や内部き裂を考慮することができる高度な 3 次元破壊シミュレータの開発が必須となることから，極めてチャレンジングな研究対象となっている．

以上のことから，本研究は学術的かつ実用的な面で研究的意義を見出すことができ，国際社会においても重要な位置を占める研究のひとつであると考える．

(3) 研究内容

(A) 支配方程式

図-1 に示すように，MPM は粒子が持つ物理量を Euler 格子における節点の内挿関数を用いて Euler 格子に集約させ，Euler 格子にて運動方程式を解き，算出された物理量を再び内挿関数を用いて粒子に集約することで，連続体の変形，移動現象を表現する手法である．このとき，連続体における質量および運動量の保存則は次式で表わされる．

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\nabla\cdot\mathsf{v} = 0 \tag{1}$$

$$\rho\mathsf{a} = \nabla\cdot\boldsymbol{\sigma} + \rho\mathsf{b} \tag{2}$$

ここで，ρ:密度，v:速度，a:加速度，$\boldsymbol{\sigma}$:応力，b:体積力である．

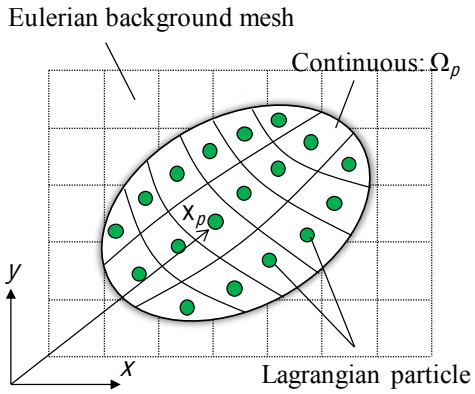


図-1　MPM の概念図

(B) 地すべり解析（Kita-Uebaru Landslide）

次に，MPM の大変形問題への適用を試みる．本研究では，沖縄県中頭郡中城村で発生した地すべり[1)]（以下，Kita-Uebaru landslide と称す）を対象とした．解析モデルは Tokashiki et al. (2011)[2)]の研究を参考した．また弾塑性構成則には，Drucker-Prager の降伏関数を用いた．図-2 に時間と移動層先端の到達距離の関係を示す．本解析では，観測結果を基に内部摩擦角がピーク値（25degs）の場合と残留内部摩擦角値（12degs）の場合において解析を行った．同図より，内部摩擦角が 25degs の時，移動層はほとんど動いていないことが分ける．一方，内部摩擦角が 12degs の時，50 秒間における移動距離は 110.7m となり，Gibo et al. (2006)[3)]の観測値の 110m とほぼ同等な値となった．このことから，斜面崩壊が発生する時の地盤の強度特性はピーク強度から著しく低下していることが示唆される．また，Tokashi et al. (2011)[2)]らの解析結果（50 秒時における到達距離：109.87m）と比較すると，解析開始時から 15 秒において，Tokashiki et al.の結果では，移動層の移

動距離は線型的に増加している. 一方で, 本解析結果においては, 二次関数的に移動距離が増加していることがわかる. すなわち, 本解析結果では, 斜面崩壊は突発的に発生したことがわかる. 図-3 に, 内部摩擦角が 12 degss と 25 degs における Kita-Uebaru landslide のシミュレーション結果を示す. 同図においても, 内部摩擦角が 25 degs の時, 移動層がほとんど移動してないことがわかる.

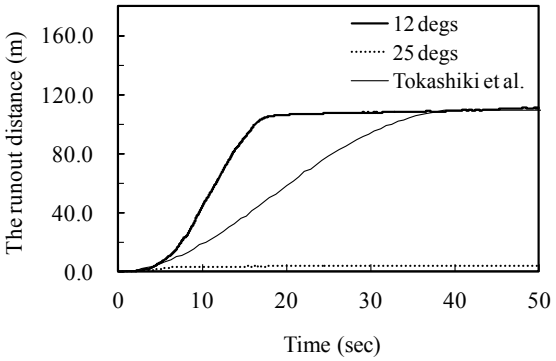


図-2　解析結果

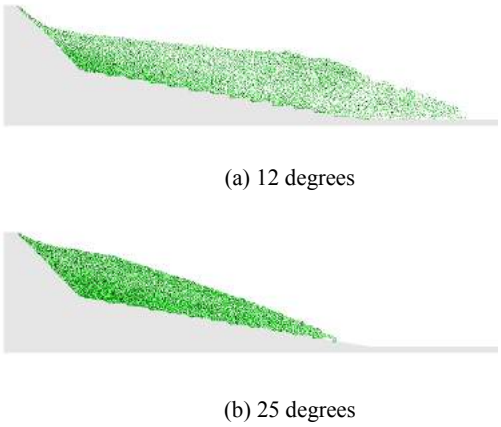


図-3　角内部摩擦角における地盤の変形挙動

(4) 平成 25 年度進捗状況

今年度は, 地盤の大変形解析を評価できる手法の確立を目的とし, MPM を斜面崩壊現象へ適用し, その妥当性の検証を行った. その結果, 観測値と解析結果が同程度な値を示し, その有用性が検証された. 今後は, 本手法の 3 次元化ならびに大規模化への拡張を予定している.

参考文献

1) 陳伝勝, 宜保清一, 佐々木慶三, 中村真也：沖縄, 島尻層群泥岩分布地域の地すべり類型区分の試みー地すべりの危険度評価に関連してー, 日本地すべり学会誌, Vol. 43, No. 6, pp.1-12, 2007.
2) Tokashiki, N. and Aydan, Ö.: Kita-Uebaru natural rock slope failure and its back analysis. *Environmental Earth Sciences,* Vol. 62, pp.25-31, 2011.
3) Gibo S, Zhou Y, Sasaki K, Nakamura S (2006) Kitauebaru landslide caused by continual rainfall in Nakagusuku Village, Okinawa Prefecture, on June 10, 2006. Journal of the Japan Landslide Society 43 (2): 44-47

3.2. 大規模並列化グループ

2011 年に京コンピュータが 10 ペタ(Peta: 1 京)フロップス(Flops: Floting Points per second)に達し，TOP500 では 2 回連続世界 1 位となり，2013 年には中国の Tianhe-2 が 33 ペタにより 1 位を記録し，次世代スーパーコンピュータは，ペタの次の世代，つまりエクサ(Exa)フロップスを指す時代へと突入している．このことからもハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる．その一方で，これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては，その開発スピードもソフトウェアの品質も十分とは言えず，多くのソフトウェアが 20 世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である．特に，1970～1980 年台に既に確立されているアルゴリズムに対して，並列化の実装のみを加えた物が多く見られる．このような背景のもと，本プロジェクトでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する，次世代の大規模解析システムを構築するとともに，常に最先端のスーパーコンピュータ能力を活用するシミュレーション実現を目指す.

今年度は，以下の項目について報告を行う.

(1) ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

(2) 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

（1）目標・計画

本研究では対象問題をある程度限定することで高性能が得られるアプリケーション特化型システム開発を行っていく．対象問題は連続体力学とし，産業界で需要が高い非構造格子並びに自由表面や移動境界問題に重要なメッシュフリー（粒子法を含む）の取り扱いを可能とする．時間方向の非定常性や問題が持つ非線形性を考慮する必要があるが，陰解法ベースの数値解析手法を対象とする．これらに対し，3 つの課題（A）DDM 入出力ライブラリ開発，(B) DDM ソルバーライブラリ開発，(C) 連続体力学向け DSL 開発に取り組む．本研究で開発されたライブラリを用いて連続体力学系シミュレータの実装と評価も行う予定である．

（2）意義・国際社会との比較

ポストペタスケール計算を見据えた新技術の開発について，これまで同様汎用向けのライブラリなども開発されるであろうが，それらの利用では，非構造格子問題では高々数パーセントの性能，あるいはそれ以下しか期待できず，連続体力学系シミュレーションに特化したシステム開発が必要と考えられる．そもそも数パーセントの性能でのソフトウェアはペタコンでの運用が認められないという制約もあり，これはポストペタコンについてはさらに厳しくなることも想定される．

連続体力学系シミュレーションは，従来からの FEM，FVM，BEM など非構造格子アプローチに加え，近年ではメッシュフリーや粒子ベース手法による大規模計算の台頭が目覚しく，これらにも対応させ，非構造格子および節点，粒子ベースモデルを統一的に扱えるようにすることで，連続体力学系シミュレーション向けライブラリとして整備されれば，ポストペタコンの連続体力学系シミュレーションでの利用の拡大に大きく貢献することが期待できる．

（3）研究内容

A）DDM（Domain Decomposition Method，領域分割法）入出力ライブラリ

本研究項目は，マルチレベル領域分割法に基づく多階層計算格子データの生成，操作および I/O ライブラリ開発を行うものである．一般的なアプリケーションシステムは，プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが，これまでは最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装されてきた．ポストペタコンでは，全ての処理をスパコン上に実装し，並列化することが当然求められてくる．しかし，従来の枠組みで並列化したのみでは，それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される．そこで，これまで研究代表者らがソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法の技術を応用した，マルチレベル領域分割法によるデータ処理システムの開発を行う．

B）DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は，マルチレベル領域分割法に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列ライブラリ開発を行うものである．一般的な線形代数ソルバーは，アセンブリされた連立一次方程式を入力とするため，FEM におけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた．それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくいが，ポストペタコンで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される．そこで，提案するマルチレベル DDM による多階層型データ構造を活用した，大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリの開発を行う．

これは，

・多階層領域分割に基づく分散メモリ並列向け線形代数ソルバーの構築

・多階層領域分割に基づくマルチレベルコースグリッド修正法の開発

・構造・熱・流体・磁場などを対象とする物理現象毎に特化したコースグリッド修正法の開発

を含む. つまり, これまで FEM を対象に研究を進めてきた DDM をマルチレベルに拡張し，さらに FVM，BEM，メッシュフリー，節点ベース FEM や粒子法など連続体力学全般に適用する技術開発である．また，マルチレベルな領域分割を利用し，線形代数ソルバーにおける前処理手法について，研究代表者らがこれまで研究を進めてきた高速かつ安定した収束性を持つ反復解法である BDD（ Balancing Domain Decomposition）法や BDDC（Balancing Domain Decomposition by Constraints）法をマルチレベルに拡張し，さらに粒子法などへの応用も進める．開発システムは線形代数ライブラリとして整備していく．

C）連続体力学向け DSL（Domain Specific Language，問題領域専用言語）

本研究項目は，連続体力学向け DSL の開発と，それに対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成の開発を行うものである．ポストペタコンのアーキテクチャでは，計算ノード間の並列性だけでなく計算ノード内での効率も重視される．各計算ノードはメニーコアや GPU，SIMD 拡張命令といった多種多様なアクセラレータを有し，これらを有効利用することが望まれる．従来のプログラミング言語やコンパイラ最適化技術での対処は不十分であり，現状ではそれぞれのアクセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必要とされている．一方，数値シミュレーションコードの場合，特に連続体力学分野においては，そのアプリケーションロジックは物理現象や数値解析スキームであり，これは数学表現，特に行列やテンソルで表記されることが多い．よって，連続体物理モデルを DSL 化して，数学記述（例えば，行列，テンソルの式を tex 形式で記述）から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブラリを call するコードを生成するコードジェネレータあるいはトランスレータアプローチが有効であると考えられ，これを実現するシステムの開発を行う．

（4）平成 25 年度進捗状況

A）DDM（Domain Decomposition Method，領域分割法）入出力ライブラリ

これまで開発してきた多階層領域分割アルゴリズムについて，非構造格子向け並びにメッシュフリー向けの機能強化を行った．特に，京コンピュータや PRIMEHPC FX10 が持つ Tofu を例に，ネットワークトポロジーを意識したデータ配分の自動調整アルゴリズムの検討と開発などを行った．本ライブラリを用いることで，東京大学 FX10 の 600 計算ノードを用いてポリゴンモデルから 20 億粒子生成を 20 秒，京コンピュータの 8,196 計算ノードを用いて 258 億要素の非構造四面体メッシュ生成を約 94 分で成功するなど，ポストペタコンで想定される超大規模シミュレーションのプレ処理に有効なライブラリであることが示された．

また，超大規模シミュレーション結果を高効率に可視化するために，マルチプラットホーム大規模領域分割型並列可視化ライブラリ VSCG（Versatile Scientific Computing Graphics library）の開発を開始した．VSCG は依存ライブラリが数学関数のみであることから，将来を含めた多様な計算機環境で動作することが可能であり，メッシュ・粒子の描画に対応した基礎的な可視化機能の開発を行った．ソフトウェア描画を行うライブラリであり，超大規模データに対する高精細画像生成を容易に可能とした（図 1）．この高精細画像は最低でも $10^4 \times 10^4$ ピクセル画像を生成し結果の評価に用いる．また，プロセスごとの描画と画像出力，並びに深さ情報に基づく画像重畳機能を備えており，それらを利用することで並列可視化を可能とした．VSCG を用いて多階層領域分割されたメッシュまたは粒子の並列可視化システムを構築し，京コンピュータ上で 112 億自由度有限要素モデルのポスト処理に成功した．

さらに，非構造格子向け DDM 圧縮技術の開発を開始した．多階層領域分割による領域間境界上情報への圧縮率調査を行っている．一般的な CG 法の演算量（$O(n^3+n^2)$）を基準に試算を行った．全体剛性行列を解く計算量と領域ごとの小さな剛性行列を解く計算量の比が極めて大きくなることが分かった．100 億自由度有限要素法モデルの計算量の比は，10^{10} 以上の計算量比が生じる．このことから，袖領域の変位量をもとに内部の変位，ひずみ，応力を再度計算することは現実的であることが分かった．現在，計算速度の計測と全体の計算量がどの程度のオーダーになるのかを詳細に調べ，次世代計算機のパフォーマンス推定の基礎データとする予定である．

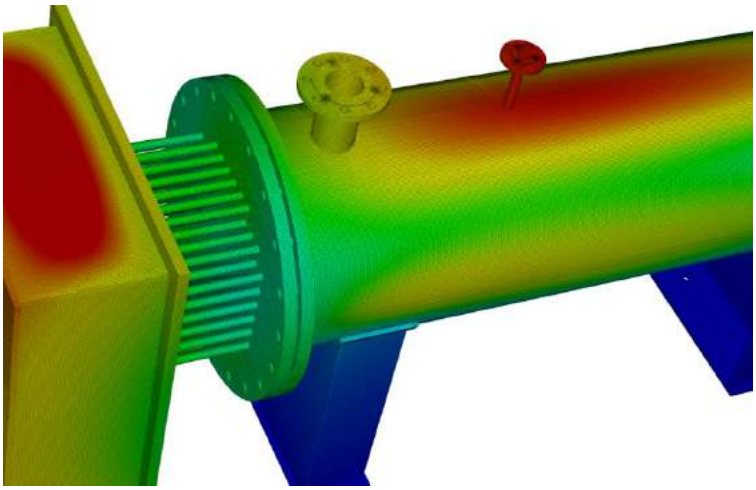


図 1　1,200×9,000 ピクセル画像の部分拡大図（重力による変位分布コンタ）

B）DDM ソルバーライブラリ

非構造格子向け DDM 反復法ライブラリとして，多階層領域分割情報を利用した DDM 反復アルゴリズムの機能強化を行った．特に，ポストペタコンに対する社会ニーズを想定し，現在のペタコンを用いた 1,000 億自由度規模有限要素解析の実現性について検討した．DDM-CG 法の部分領域問題ソルバーとして Eisenstat 技法に基づく CG 法+SSOR 前処理を適用するなど，実装に関する最適化を行うことで，京コンピュータの 8,196 計算ノードを用いて 1,040 億自由度規模有限要素解析（古代建築物パンテオンモデルの自重解析）に 81.8 時間で成功した．本手法はストロングスケーリング性能として約 90%の並列効率を示しており，京コンピュータの全計算資源を利用することで実用時間内に計算できる見込みであり，ポストペタコンにおいては実用化できる可能性が示された．また，非圧縮性粘性流れ問題や電磁界問題解析を想定し，CR 法や MINRES 法など，様々な反復法に基づく DDM 反復法の開発を継続的に行っている．

非構造格子向け多階層前処理技術として，有限要素法向け BDD 前処理アルゴリズムの機能強化を行った．特に，BDD 前処理の超並列計算環境向け実装技術の強化を行い，112 億自由度有限要素解析において 53 反復（収束判定値は相対残差が 3 桁小さくなった時点）で収束解を得ることに成功した．また，異種材料混在モデルにおける収束性を改善するために，DDM 反復法に対する対角スケーリング処理法の新解釈を提案した．特に BDD 前処理において効果的であり，物性値が 100 倍以上でなる複数部材で構成された構造物のシミュレーションにおいて，20 倍以上の収束性改善に成功した．

また，多階層領域分割情報を用いた非構造格子向け数値解析手法のヘテロジニアスコンピューティング向け負荷分散アルゴリズムの開発を行った．特に CPU と GPU のヘテロジニアス環境において，計算ノードに割り当てられた部分領域群を OpenMP の動的スケジューリング機能を用いて CPU コアや GPU に動的負荷分散を行う機能を開発した．6 コア CPU

単体に比べて，6 コア CPU-GPU ハイブリッドにおいて約 2 倍の高速化に成功した．

さらに，非構造格子向け DDM ソルバーライブラリお試しツールの開発を開始した．これは，既存の反復法ライブラリユーザーに対して DDM 反復法の試験環境を提供するものであり，ユーザーニーズのフィードバックを可能とする仕組みでもある．

MPS 陽解法（粒子法）向けの数値解析手法開発では，東京大学 FX10 の 4,800 計算ノード上において 200 億粒子のベンチマーク計算に成功した．並列性能では，25 億粒子の 60 計算ノードから 4,800 計算ノードのストロングスケーリングで 0.9933 を達成した．実証例題として，石巻市街地に津波が侵入して，直径 9 m の 2 つのタンクが地上構造物に衝突しながら漂流する解析に成功した（図 2）．本解析は，東京大学 FX10 の 600 計算ノードや九州大学 CX400 の 32 計算ノードを用いた最大 3.8 億粒子の解析である．

今後は,「非構造格子向け多階層領域分割情報を利用した DDM 反復法アルゴリズム」,「ポアソン・構造解析向け BDD・BDDC による多階層コースグリッド修正法」と「多階層領域分割情報を用いた非構造格子・メッシュフリー数値解析手法の開発」の開発を継続して実施する．

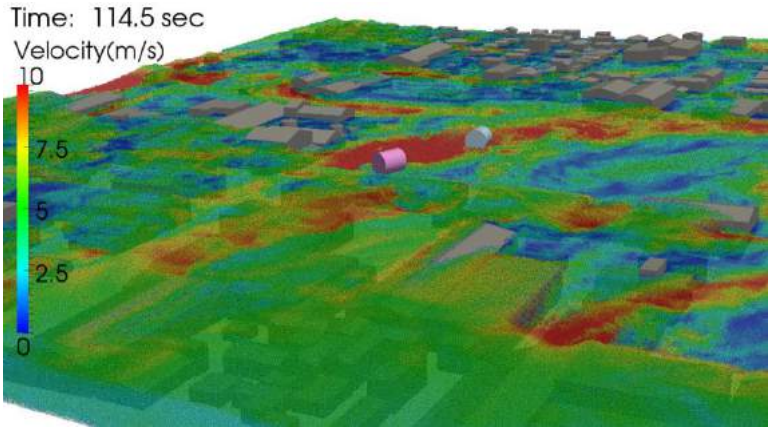


図 2　直径 9m の 2 つのタンクが津波によって流される様子を 3.8 億粒子で可視化した結果

C）連続体力学向け DSL（Domain Specific Language，問題領域専用言語）

マルチコア及び SIMD 命令セット向け最適化ライブラリの開発を進めた．開発中の①構造解析・要素剛性，②非線形材料構成則，③熱伝導解析・要素剛性のそれぞれの行列テンソルライブラリでは，Intel（Sandy Bridge）でピーク性能比①60%，②27%，③50%を達成し, 東京大学 FX10 ではピーク性能比①27%, ②14%, ③35%を達成することに成功した．粒子系シミュレーションのための DSL の β 版を開発した結果，東京大学 FX10 ではピーク性能比 7%を達成した．トランスレータについては，グループ内外のユーザからのフィードバック情報を元に，文法レベルの検討を行っている．

また，豊田中央研究所や東京理科大学に外部ユーザとして，本 DSL を利用してもらうこ

とで，性能評価と並行してユーザビリティの改善を行っている．加えて，本 DSL を，理化学研究所，JAMSTEC，JAXA，JAEA，東京大学生産技術研究所，東京大学地震研究所や国内スパコンセンターなどへの普及活動を積極的に行い，理化学研究所 京コンピュータ，東京大学 FX10，T2K 及び GPU クラスタ，九州大学 FX10，JAMSTEC ES2，筑波大学 T2K，名古屋大学 FX1，京都大学 XE6，九州大学 CX400 などの利用実績を築きつつある．更に，HPC 技術の産業界向け応用に関する国際ワークショップに参加し，韓国 KiSTi における HPC クラウド開発への協力を行うことで，海外スパコンセンターへの普及活動も行っている．

今後は需要の高いマルチコア及び SIMD 命令セット向けの最適化ライブラリの開発を延長して実施する．また，GPU 向けの開発を重点的に行う．GPU 向け開発には，CUDA 及び OpenACC の利用を検討する．また，メニーコア CPU を視野に，インテルの MIC を対象にした拡張も検討する．トランスレータはプロトタイプを作成する予定である．

D） 連続体力学系シミュレータ

本研究項目は，研究項目（A）～（C）で開発されたマルチレベル領域分割法による基盤技術の性能評価を行うために，マルチレベル領域分割法による連続体力学系シミュレータの開発を行うものである．

新たに機能追加された「DDM 入出力ライブラリ」，「DDM ソルバーライブラリ」と「連続体力学向け DSL」を用いて，大規模構造物の耐震解析や実地形津波解析などを実証例題とし，理化学研究所 京コンピュータ，東京大学 FX10，T2K 及び GPU クラスタ，名古屋大学 FX1，筑波大学 T2K，九州大学 CX400 などアーキテクチャの異なる複数のスパコン上においてそれぞれ性能評価を行った．

今後は，評価環境として東京工業大学 TSUBAME2.0，京都大学 CRAY XE6，名古屋大学の新システムなどを追加し，多様な計算機上において性能評価を行うことで，ポストペタスケールにおける連続体力学系シミュレータの課題を明らかにする．また，大規模な実証問題解析を行い，それらの実用化に必要となる計算資源量を推定評価する．

3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

（1） 目標・計画

A）静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

磁場解析の分野ではこれまで約 20 年近く，東京大学の菊地文雄名誉教授が線形静磁場問題で確立した独創的な混合法的定式化を自然な形で 3 次元渦電流問題や 3 次元非線形静磁場問題に独自の工夫を加えて拡張し，ADVENTURE_Magnetic を公開してきた．ごく最近部分領域問題を直接法で解くことにより 1 億実自由度や約 5,000 万複素自由度の大規模解析を可能にした魅力を次世代計算機で更に活かすためにはもう 1 桁程度の計算速度の改善が望ましい状況がある(速ければ速いほど，実際の設計に用いる計算モデルを更に詳細化できる)．本研究では，この高速化に対応する研究を行い，もう 1 桁高速化したソフトウェアを公開していく．ここに述べた手法に基づく磁場解析ソフトウェアは，国産市販ソフトウェアは言うまでもなく国際的に見てもあまり例がない．また現在数百万自由度規模程度で留まっている電磁場解析の規模の拡大にとって現時点ですでにブレークスルーを引き起こした研究になっている． 実際，大規模解析では我々の現時点のレベルを目標にする研究チームもいくつか現れているが，本研究では得意とする大規模化に更に高速性を加味することにより，追随者の上を行く Perfect Only One を目指す．

B）熱対流解析コードの機能強化

非圧縮性粘性流解析・熱対流解析の分野では現時点の ADVENTURE_sFlow をもとに計算サービスを行っているベンチャー企業も現われている．ADVENTURE_sFlow では磁場解析や構造解析と同様な手法で計算しているので，高速化の検討を共通の課題として行え，入力データの共有化がしやすく連成解析が行いやすいという特長がある．低炭素社会向けシミュレーション技術に応用分野を特化し解析機能を限定してでも，この特長を早く引き出したいと考えている．

（2） 意義・国際社会との比較

3 次元電磁場の有限要素解析はこれまでやや試行錯誤的に行われており，信頼のおける数値解法が未だ十分確立されていない状況にある．このようななかで，我々は菊地理論をベースに，工学的応用を展開するという形を採っており，国際的に見ても極めてユニークな注目すべき研究を展開している．これまでに開発されてきた文部科学省支援研究による電磁場解析ソフトウェアの骨格を一貫して提供してきたという自負もある．今後の低炭素社会に向けて電気自動車の利用が推進されているが，電磁環境適合性(EMC)のためにも電磁場解析の有用性は増している．非圧縮性粘性流・熱対流や固体力学の大規模解析も統一的な手法で研究を進めているので，それらとの連成解析が有利に行えるという利点も持っている．

（3） 研究内容

A）静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

3 次元磁場の有限要素法による解析，特に 3 次元渦電流解析（複素自由度 4,355 万の問題が 32 台の PC クラスタを用い 5 時間弱で解けている）並びに 1 億自由度を最近可能にした 3 次元非線形静磁場解析に対しては，領域分割法を用いる際の数値計算上の諸問題を以下の更なる高速化に関する課題に焦点を絞って研究する．

「離散化に伴い生じる超大規模（1 億自由度以上）の疎な対称連立 1 次方程式と連立非線形方程式に対する領域分割法を意識した効率的な数値解法を確立し，特にもう 1 桁の高速化を可能にする前処理方法を確立する．」

B）熱対流解析コードの機能強化

3 次元非圧縮性粘性流解析についてはこれまでの内容を発展させた新アルゴリズムの導入を図る．2006 年 7 月に公開したモジュール ADVENTURE_sFlow はその後水素利用社会向けシミュレーション技術でも応用があったので，熱対流解析の基本機能が非定常解析機能も含めて追加され，前処理機能の強化による高速化が実現されたため，実用レベルの有効性をチェックする段階になっている． 非定常解析機能では Stokes 問題のみならず，Navier-Stokes 問題に対しても特性曲線法の活用により対称な連立 1 次方程式ソルバーを活用できることがポイントになっている．

（4）平成 25 年度進捗状況

A）静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

今年度は BDD 前処理の実装実現のために二つの課題を設定した．一つはノイマンノイマン前処理を実装させること，もう一つはコース行列を作成し，それを既存のパラレルソルバーで解くことである． この二つが実現できれば，BDD の実装はほとんど実現できると言ってよいほどの重要な 2 項目になる．ノイマンノイマン前処理は 2005 年に一度成功した実績があるが当時の記録が紛失しており，新たな開発を行うことになった．現時点ではコードの骨格ができた段階であり，(1)のテーマの B)の研究テーマと連携しながら完成を急いでいる段階である．一方，コース行列作成はテストランを行っている段階であり，まだ少数の部分領域情報の重ねあわせしか実現できていない．これを全部分領域までに拡張できれば，並列ソルバーは既存のものを使う予定なので，第 2 項目もクリアできると考えている．

B）熱対流解析コードの機能強化

このテーマは今年度の課題として公開用ドキュメントの整備以外に以下の 4 課題を設定した．すなわち ADVENTURE_sFlow への機能強化として

・熱方程式部分への DDM フレームワークの適用

・熱流束境界条件入力機能の追加
・熱伝達境界条件入力機能の追加
・BDD 前処理における通信処理改善の検討

を図るものである．最初の DDM フレームワークの適用は(1)のテーマの B)の研究テーマと連携しながら，開発ライブラリのプロトタイプのテストを兼ねたものであるが，プロトタイプの提供を待っている段階である．2 番目，3 番目のテーマは 1 番目のテーマが予定より遅れているので，DDM フレームワークを除いた形での実現をまず目指している．4 番目は派生した問題を解決しながら，検討を続けている段階である．

3.3. 新規実験計測グループ

流体-構造連成解析では，流れと構造物の相互作用を含むことから，流体もしくは構造のみの現象よりも複雑となる場合が殆どであり，現象を数値解析結果のみで評価することは困難である．また，連成問題に関する研究の多くが，解析もしくは実験のみに頼ったものであり，両方を実施して実験結果，数値解析結果の信頼性を議論したものは見られない．

本グループの目的は，流体–構造連成問題の実験を行い，数値解析結果の信頼性を評価するための情報を提供することである．そのためには，予め実験結果の質を保証しておくことが重要であり，さまざまな観点から計測を試みることで，それぞれの計測結果の信頼性を調べておくことが不可欠となる．流れと構造物の運動は３次元的である．一般的に，ある点の変位や流速を同時計測するとき，その値の信頼性を高めるほど，空間分解能は低下する．逆に，空間分解能を上げると各点の測定値の信頼性は低下する．このようなことから，点計測と面計測の測定値を比較することで，観察される現象や結果の質についても検討する．

実験に取り組むと，さまざまな計測上の問題が生じるが，それを解決することで新しい計測法や新規実験テーマを提案していくことも本グループの役割であると考えている．

3.3.1. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムの構築

（1） 目標・計画

流体－構造連成解析手法を検証するための実証試験として，低速風洞試験を行う．図１は風洞試験装置システムの概要図である．風路内部に実験模型を設置して試験を行い，数値解析の検証用データを提供する．また本研究を通じて，新しい計測手法，解析手法の提案を目指す．

（2） 意義・国際社会との比較

流体-構造連成問題について数値計算，実験は多数行われているが，その殆どが単独に行われたものである．そのため文献ではいずれかの結果が引用される場合が多く，両者の信頼性を保証した上で，結果を議論した例が見られないのが現状である．本研究では，数値計算結果の信頼性を検証するためのデータを提供することを主眼として，様々な実験に取り組む．これまで行われていなかった数値計算と実験の両方を実施することで，計算上の問題点，実験上の問題点を明らかにする．

(3) 研究内容

２０１２年度は風洞試験装置システムの整備期間であり，２０１３年度は基礎試験，２０１４年度以降は応用的な実験を検討している．基礎試験ではシートフラッタ実験を行い，応用的実験では航空機模型のフラッタ実験，フラッタの工学的利用や弾性皮膜による流体抵抗低減を目指した研究を行う予定である．図１は風洞試験装置の概要図である．実証試験では実験模型の運動解析，空気力計測，ＰＩＶ流れ解析を組み合わせた流体実験を行う．

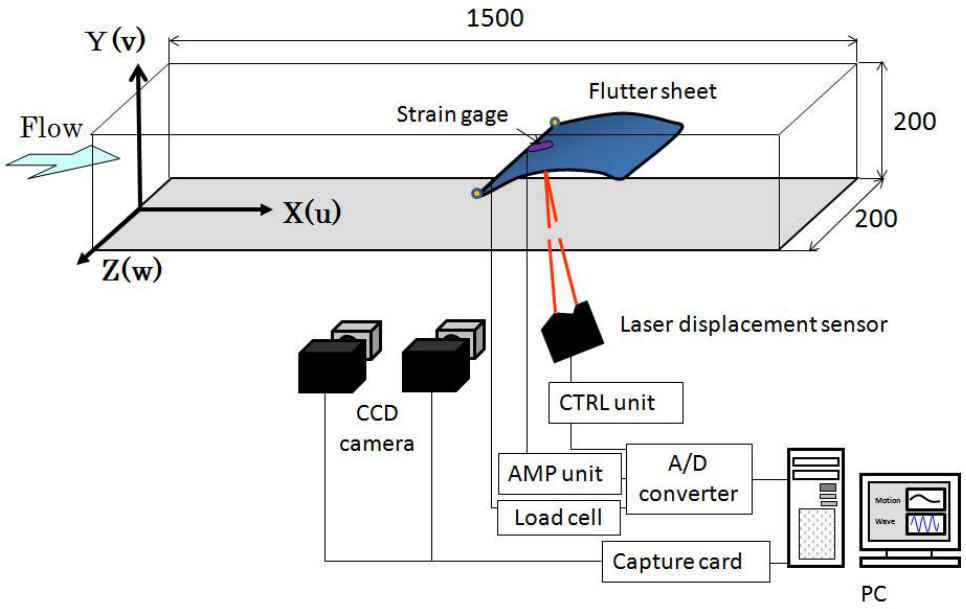


図1 風洞試験装置

本風洞試験装置により実施できる試験内容は以下の通りである．

（1） 高速度カメラによる３次元運動解析
（2） レーザ変位計による変位測定
（3） ６分力天秤による空気力・モーメント測定
（4） ひずみゲージ測定
（5） 煙発生器による流れの可視化
（6） ＰＩＶ解析による流れの可視化

(4) 平成 25 年度進捗状況

昨年度末までに風洞試験装置と計測システムを導入した．風洞装置の移設を８月に終えた後，風洞試験を開始した．風洞装置の検定を行い，回転数と風速の関係がほぼ比例すること，風路断面積 0.3×0.3m² の断面内において，試験領域では一様流を保つことが出来ることを確認した．

風洞装置の検定と併行して，流体構造連成実験の試験装置として，シートフラッタ装置を製作した．図２は風洞装置に設置した試験装置を示している．回転軸にシート材を固定して，風洞装置で気流を発生させて，シートフラッタを発生させる機構になっている．**様々な種類のシート材を調達し，予備実験でシート材を選定した**．シート材はポリプロピレン，シリコーンゴム，PVC などの材料を用いて実験を行った．

図２　フラッタ試験装置

図２のフラッタ試験装置には，シート材を水平に設置するとフラッタが発生する前に，空気力により浮き上がる必要があるため，垂直に設置することで，重力の影響をあまり受けずにフラッタが開始するようになっている．

フラッタ開始後のシート材の変位量は，レーザ変位計を用いて測定した．レーザ変位計は，株式会社キーエンス製の LK－G シリーズを使用した．レーザヘッドは CCD レーザ式の LK－G500，コントローラは LK-G3000，電源ユニットは KZ-U3 を用いた．レーザヘッドは三脚に固定して，シート材から水平距離 500 ㎜離れた位置から測定した．

シートフラッタを発生させて，レーザ変位計を用いて変位を測定した結果を周波数解析して得られたフラッタ特性が図３である．風速を上げていくとシートはフラッタし始めるが，一旦フラッタが発生すると，風速を下げたときフラッタが終了する風速は，開始速度とは異なる．本装置を用いて得られたフラッタ特性は，他者の実験結果と比較して良好に一致しており，シート取付冶具が良好であることを確認している．

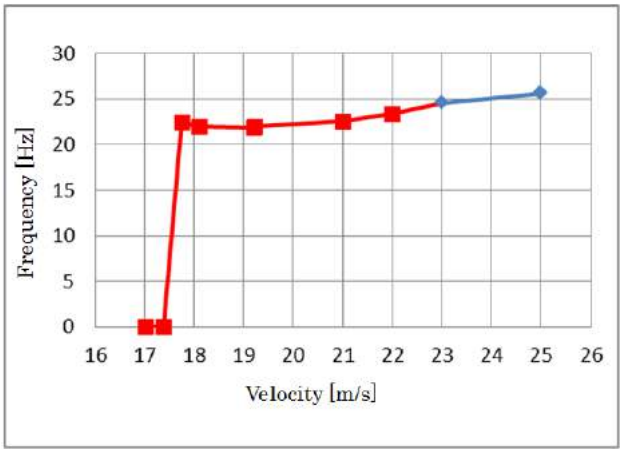


図３　シートフラッタの周波数特性

図４は３次元運動解析システムを示している．シート材料がフラッタする様子を，シート材の左右に２台ずつ設置したハイスピードカメラを用いて測定することができる．カメラは株式会社ディテクト製 HAS シリーズの HAS-L1 を使用した. 画像データはパソコン上のメモリに記憶され，その後，データ解析が行われる．パソコンに 16GB のメモリを実装した場合，VGA 形式で約 37000 枚の画像データが記録可能であり，約 75 秒録画することができる．シート材の表面にマーキングを施し，カメラでステレオ撮影することにより，シート材がフラッタする様子を運動解析することができる．

図４　３次元運動解析システム

図５は，動画像中におけるフラッタの軌跡を示している．シート材の表面に９点のマーキングを施してあり，画像中では白丸で表示されている．レーザ変位計の結果と比較した結果，良好に一致することを確認した．

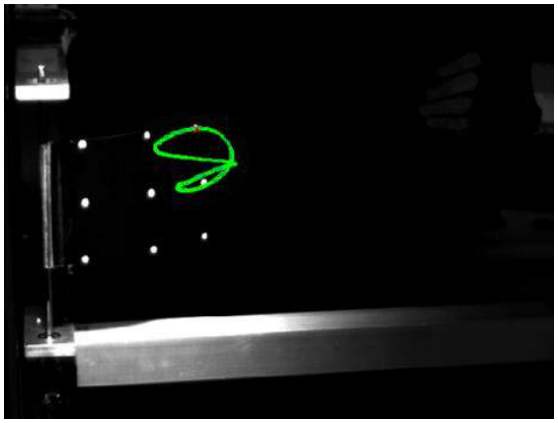


図５　シートフラッタの軌跡

3.3.2. 境界層特性評価のための普遍関数構築

(1) 目標・計画

乱流境界層の速度分布を表わす普遍関数を構築する．これまで境界層速度分布を表現した様々な関数が提案されているが，乱流境界層の速度分布全体を記述することはできていない．本研究では，速度境界層の内層から外層，後流域を記述する関数を提案する．本手法は流体摩擦力の推算や境界層特性を算出するために適用できると考えられる．

(2) 意義・国際社会との比較

流体力学において摩擦抵抗低減は主要な研究の一つであることから，摩擦抵抗を高い精度で測定することが求められている．しかし，その大きさは一般的に小さいことから，定量計測が困難である．信頼性のある計測法として，浮動片を用いた直接計測法があるが，セッティングのための時間的コストが掛かること，平面以外の計測に不適当であることから，殆ど実施されていない．本研究では，速度分布から推算する間接計測に着目している．摩擦係数を推算するために，速度境界層を記述する様々な関数が定義されているが，乱流境界層が複雑な形をしていることから，単一の関数で記述することは出来ていない．本研究の目的である乱流境界層の速度分布を表す普遍関数を構築できれば，高精度に摩擦抵抗を計測するだけでなく，境界層特性を求めることもできると考えられる．

(3) 研究内容

乱流境界層の速度分布を表わす普遍関数を，物理的考察に基づいて導出する．内層を表わす定せん断層と外層を表わす速度欠損則を組み合わせると乱流境界層の速度分布を表現することができる．そのため，異なる関数を接続することが重要となる．提案する普遍関数と風洞試験結果，実験式と比較して，普遍関数の信頼性を評価する．

(4) 平成 25 年度進捗状況

実験は吹き下ろし式風洞装置を用いて行った(Fig. 1)．風路断面は 600×600mm^2，風路長は 3000mm である．流れ計測は単位長さ当たりのレイノルズ数で Re [1/m] で 3×10^5 で実験を行い，速度計測には I 型の熱線流速計を使用した．

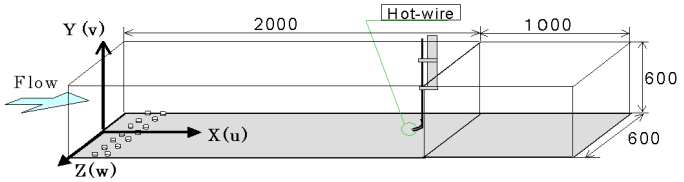


Fig.1　Schematic of test section in the wind tunnel.

乱流境界層を記述する速度分布関数を Spalding 則と Cole の後流関数を組み合わせることで，陰的に速度分布を表現できる式を提案する．

$$y^+ = u^+ + e^{-\kappa B}\left(e^{\kappa u^+} - 1 - \kappa u^+ - \frac{(\kappa u^+)^2}{2} - \frac{(\kappa u^+)^3}{6}\right) + \frac{2\delta^+}{\pi}\sin^{-1}\left(\sqrt{\frac{\kappa u^+}{2\Pi}}\right) \qquad (1)$$

境界層を表わす関数は，Spalding 則+後流関数の形となっている．層流のときは $B = 0$ であり，層流境界層と乱流境界層を同時に記述できる．各係数 κ, B, π, δ は実験データを元に，Newton 法により算出できる．実験値は内層から外層までのすべての測定データを使用した．

Figure 2 は式(1) を適用して得られた結果を実線で示している. 比較のため, 実験値（○）も示している．提案した普遍関数は乱流境界層全体を表現できており，また実験データをよく再現できている．

Table 1 は提案した普遍関数で得られた摩擦係数と White の経験式を比較した結果である．提案した関数により，良好に C_f 値を推算できている．

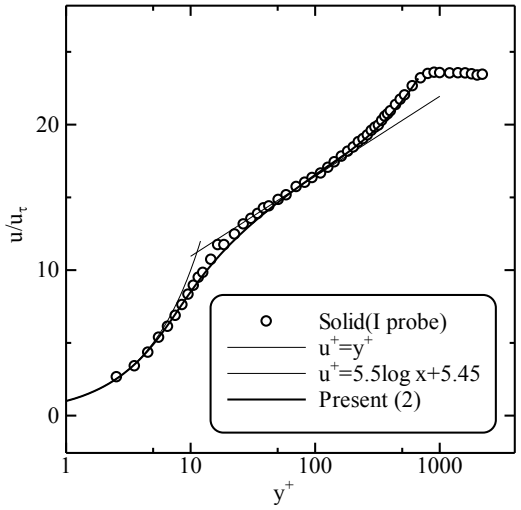


Fig.2　Logarithmic velocity profile (Eq. (1)).

Table. 1　Comparison of skin friction coefficient.

	$C_f \times 10^3$	Error (%)
White's formula	4.175	−
Present (1)	4.178	0.072

3.3.3. 弾性体による空気抵抗低減効果に関する検討

(1) 目標・計画

本研究の目標は，弾性体を用いた空気抵抗低減法を提案することである．２０１３年度は弾性体に作用する空気力計測を行い，空気力特性を調べる．複数の計測法で空気力測定を行い，抵抗低減効果の確認を行う．２０１４年度以降は材料特性と空気力低減効果の関係を調べ，気流条件により効率的に抵抗低減効果が得られる材料特性の提案を目指す．

(2) 意義･国際社会との比較

流体力学において摩擦抵抗低減は主要な研究課題の一つである．リブレット，マイクロバブル，粘弾性をこれまで様々な摩擦抵抗低減法が提案されており，その効果が研究されている．本研究は，弾性体を用いた摩擦抵抗低減法の研究に着目している．水棲生物の中には，表皮の柔らかい生き物が存在し，皮膚の表面近傍に発生する乱流渦構造を弱めることで，摩擦抵抗が低減して高速で遊泳できるとされるものがある．イルカはその代表例とされている．欧州を中心に研究されているが，その殆どが理論的研究であり，実験的研究は数少ない．本研究では，弾性体に作用する空気力測定を行い，金属やアクリル材のように硬い材料に作用する空気力との比較を行う．また，弾性体の材料特性に対する空気力特性を調べ，抵抗低減デバイスとしての可能性を検討する．

(3) 研究内容

本研究では，イルカの柔らかい表皮に着目して弾性皮膜による抵抗低減効果に関する研究を行う．弾性体の材料特性と弾性体に作用する空気力抵抗特性を調べ，航空機などに適用可能な抵抗低減法を提案する．

(4) 平成 25 年度進捗状況

実験は図１のような大気吸込み式風洞を用いて行った. 風路断面積は $0.2\times0.2\mathrm{m}^2$ である．実験模型の上流と下流の速度分布を測定するために, ピトー管を 2 本同時に設置している．風洞装置には 4 基の送風ファンが取り付けられており，風速はインバータで調節を行うことができる．

実験模型は直径 30mm，長さ 200mm のアクリル円柱とシリコーンゴム丸棒（デュロメータ硬さ 50, 60, 70）を使用した．上流部と下流部の圧力分布はデジタルマノメータを用いて測定した．本実験では圧力差が最大となるように回転数 50Hz に固定した．このときのレイノルズ数は 13000 である．上流部は側壁から 20，50，100，150，180mm の位置で圧力計測を行い，その平均値を測定値とした．実験模型後流部は側壁から 20，40，60，80，100mm の位置で圧力計測を行った．

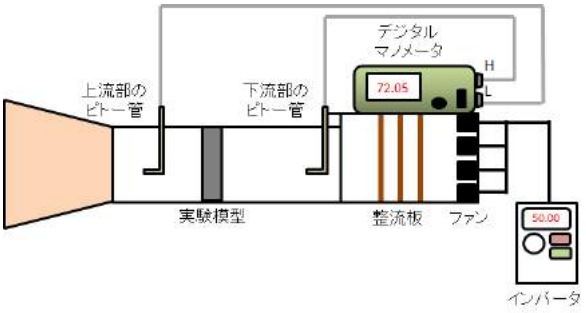


図１　風洞試験装置

空気抵抗の測定はジョーンズの方法を用いた．その原理は，運動量保存則に基づいており，上流と下流の圧力差から空気抵抗を測定できる．風洞実験では，実験模型の上流と下流でピトー管を用いて圧力差の空間分布を測定して，以下の式を数値積分することで抵抗係数を測定する．

$$C_D = 2\int_{-h}^{h} \sqrt{\frac{p_{0T} - p_T}{p_{0\infty} - p_\infty}} \left(1 - \sqrt{\frac{p_{0T} - p_T}{p_{0\infty} - p_\infty}}\right) d\left(\frac{y_T}{L}\right) \tag{1}$$

圧力 P に添え字 0 が付いたものは全圧，ないものは静圧を意味しており，∞は上流，T は下流を意味する．

図２は風路内における単位面積当たりの空気抵抗分布である．円柱の背後 (100mm) は流体の運動量が最も減少するため，空気抵抗が最大となり，測定位置が風洞側壁に近づくにつれて空気抵抗は小さくなる．また，シリコーンゴムの硬度が低下するにつれて，円柱後流部分の流体抵抗が次第に減少している．

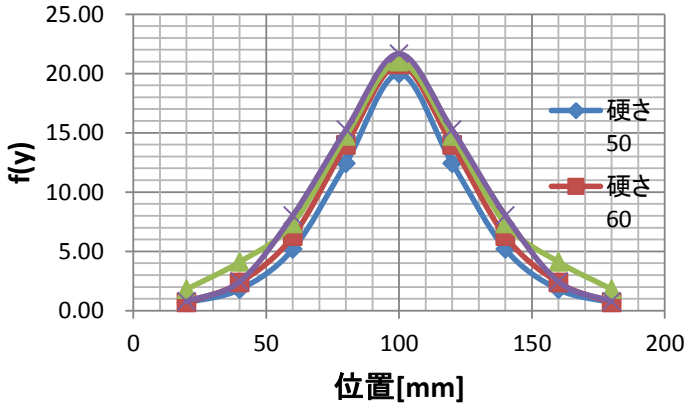


図２　円柱後流の抗力分布

表１は材質ごとの抵抗係数を示している．風洞壁面に摩擦抵抗が作用するため，模型挿入前の圧力分布から壁面摩擦力を測定して，実験値との差を取り補正している．シリコーンゴムの硬度が増すにつれて空気抵抗が減少しており，抵抗低減率(D.R.)は最大 22.6%となった．

表１　材質と抵抗係数の違い

材質	アクリル	硬度 50	硬度 60	硬度 70
C_D	1.278	0.989	1.233	1.303
D.R.(%)	－	22.6	3.5	-2.0

ピトー管計測以外の方法でも，抵抗低減効果が確実に生じていることを確認するために，新たに実験装置として回流式低速風洞装置を製作し，熱線流速計による計測システムを製作した（図３）．試験装置内で，ピトー管と熱線流速計による同時計測が可能な計測システムである．測定位置は，トラバース装置で移動できるようにしている．現在，本試験装置による実験を行っており，抵抗低減効果を確認中である．

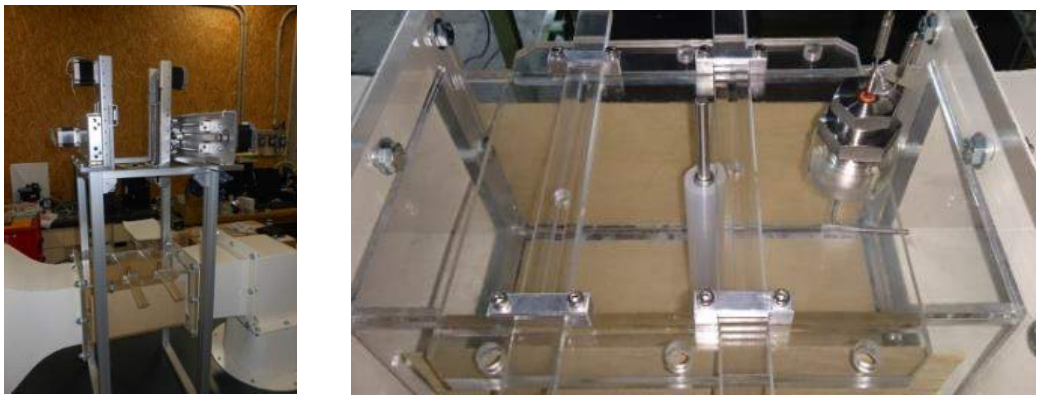


図３　弾性体の空力特性試験装置（左：移動装置，右：円柱模型（中央））

3.4. 精度・妥当性検証グループ

本グループでは，シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・妥当性を向上させるための技術の研究を行っている．シミュレーションも実験も誤差を含んでおり，精度の検証および改良は重要なテーマである．具体的には，（1）効率的で精度のよい解析技術の開発，（2）実験とシミュレーションの融合，（3）材料データベースの開発，（3）精度の改良技術の開発，などを目標に研究を行っている．研究対象としては，段ボールおよびフラクタル構造の効率的かつ高精度な解析のための基礎的研究を行った．また，段ボールを対象にして実験とシミュレーションの融合のための予備的実験も開始した．

3.4.1. 段ボールにおける構造解析手法の開発と精度の検証

（1） 目標・計画

段ボールはその特性が製造環境，使用環境などに大きく左右される為，主だった解析手法が確立されていない．そこでまず初期設計に活用できるレベルの構造解析手法の確立を目指す．その後，解析精度を高め，より活用出来る手法に洗練していく予定である．

（2） 意義・国際社会との比較

（1）でも述べたように段ボールに関しては主だった解析手法が確立，公開がされていない．また１００％リサイクル可能な段ボールを使用する技術手法であることから環境面から考えても地球環境保全に貢献できるものと考える．

（3） 研究内容

等価モデルの構築のため，ANSYS 用に開発されたマルチスケール解析ソフト MultiScale.sim を用いて段ボールの均質化解析等の解析を行っている．また，LS-DYNA を用いて段ボール緩衝材の落下衝撃シミュレーションを行う．平行して段ボールの特性実験の装置を開発し，シミュレーションの精度を実験に近づけることを行う．また，段ボールの実落下試験を行い，実落下試験と落下衝撃シミュレーションの結果を比較し，シミュレーションと実験の精度・妥当性検証を行い，改良するための技術開発を行う．

（4） 平成 25 年度進捗状況

ANSYS 用に開発されたマルチスケール解析ソフト MultiScale.sim を用いて段ボール解析を行った．当初段ボールの検討素材数は 50 以上と多めを検討していたが，全体の工程を考慮し，１素材（BF:K180/scp120/K180）をベースに集中的に検討していくこととした．

下記に現在までのシミュレーション結果等の画像を示す．図１は段ボールの一部を切り出したものをモデル化したものである．これから図２のような等価モデルを生成し，等価解析を行っている．

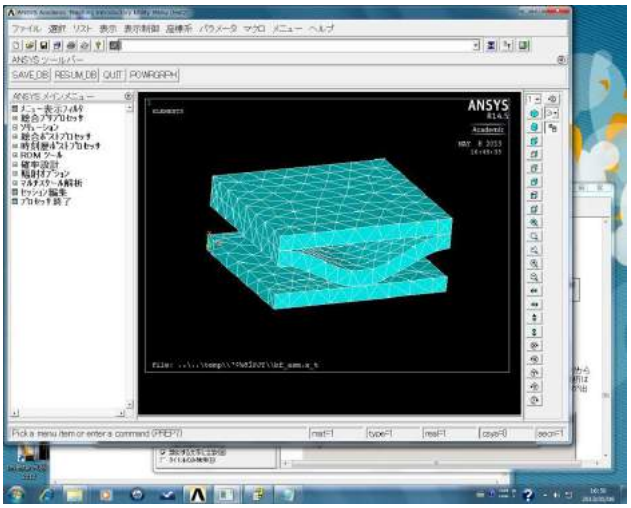


図１ 段ボール詳細モデル（MultiScale.sim）

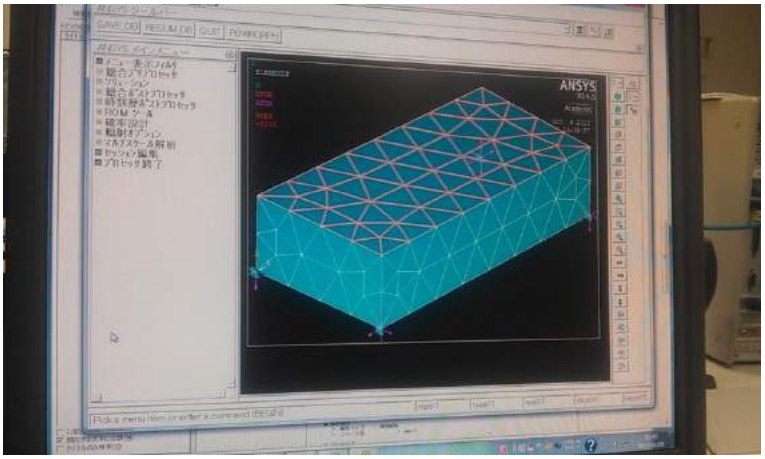


図２　段ボール等価モデル（MultiScale.sim）

また，段ボールで重要な段ボールの衝撃シミュレーションも開始した．図３は LS-DYNA を使って行った解析結果である．

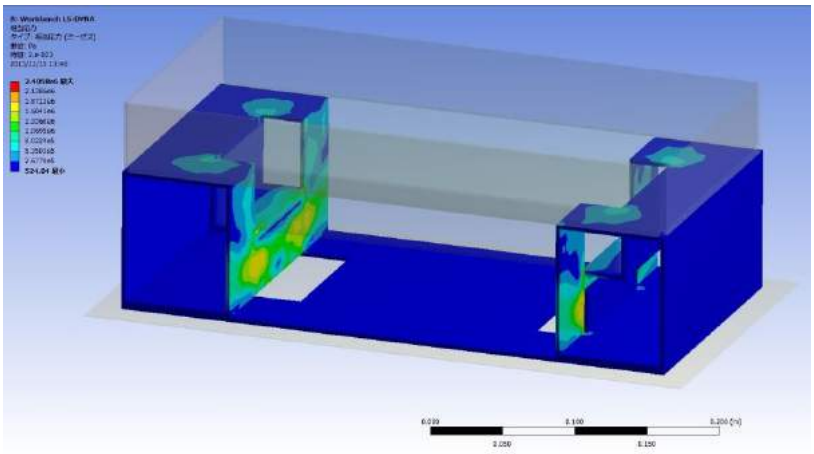


図３　LS-DYNA 解析結果画面

図３では，ライナー，中芯に仮の材料特性値を与え，実際の梱包を想定した解析を行った．実際はほぼ動かないであろう部位が応力による反力で跳ね上がり，本来力が掛ると思われる部位に応力が出ないという結果が生じた．これは材料特性値の問題ではなく，使用した緩衝材の解析モデルに問題があったと考える．そこでモデルの作り込みをさらにする必要が明らかになった．

段ボールの力学的特性はこれまで十分な研究がなされていない．そこで，図４に示すような試験装置を開発した．

図４　段ボール試験装置

これを使って行った予備実験の結果が図５である．

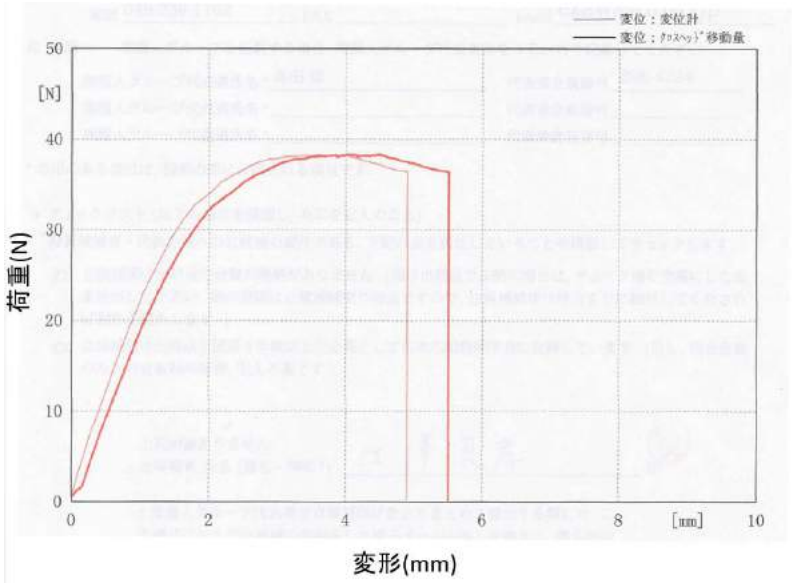


図５　段ボール変形試験の結果

本実験は変形指定（5mm/min）の条件で行ったものである．太線はクロスヘッドの移動量，細線は変位計の値である．本実験から段ボールは非線形の挙動を示すことがわかった．したがって高精度なシミュレーションのためにはこの非線形挙動を正確にモデル化することが要求される．今後は段ボールの含水率も考慮にいれた実験を行い，シミュレーションのモデル化の精度と妥当性の検証を行う予定でいる．さらに，段ボールの材料特性を調査する為，国内外から材料サンプルを取り寄せ，本実験装置にて試験を行う．その結果から各試験片の材料特性値を求める予定である．

3.4.2. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発

（1） 目標・計画

数値シミュレーションのために基本的な物性値は必須のものであるが，材料の物性値を収めたデータベースにおけるデータ表現は統一されておらず，多くの材料データベースがインターネット上に存在する現在でも，必要なデータは事実上手作業で値を入力する必要がある．本研究では，材料データの標準データ交換形式を開発し，数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的とする．

（2） 意義・国際社会との比較

材料物性に関するデータベースは各所で開発されているが，統一されたフォーマットは無く，データを交換するための標準を作成する試みは NIST などによって行われてきたが現在のところ定まった標準がない．データ交換のためのフォーマットが統一されることにより，分散したデータベースの統合利用に加え，数値計算システムなどからの利用も容易になる．

2012 年には，NSF の資金によりアメリカでマテリアルズ・ゲノム・イニシアティブが立ち上がり，実験・数値計算などから得られるデータを活用して材料設計の効率化を図るためのマテリアルズ・インフォマティクス研究開発が本格的になった．これを受けて，我が国でも 2013 年に入り，JST がマテリアルズ・インフォマティクスのワークショップを開催するなどの動きがあった．マテリアルズ・インフォマティクスでは多くの情報資源から得られた材料情報を共有する必要があるため，当センターにおいて実施しているような材料データの共有フォーマットやメタデータの辞書についても課題に挙っており，米国では本格的に開発が始まっている．

また，欧州標準規格委員会では，製造業において材料の試験データを電子的に共有するための規格策定に継続的に取り組んでおり，2012 年から 2014 年にかけてワークショップ，WS/SERES (Standards for Electronic Reporting in the Engineering Sector)を開催している．マテリアルズ・インフォマティクスが新材料の開発を目的とするのに対し，CEN のワークショップは，エンジニアリング材料を対象とするものであり，ISO6892 の Technical Annex としての採択を目指している．

研究データ全般の電子的な交換に関しては，2013 年，NIST，EU の協同により，NSF が資金援助した RDA （Research Data Alliance)が活動を開始した. 現在我が国からは地球科学情報を扱う WDS のグループが参加しているだけである. 材料についてはまだワーキンググループが設置されていないが，元 NIST の John Rumble，EU JRC の Tim Austin らとともに材料に関するワーキンググループ設置について検討している．

芦野らのグループは，2006-2007 年度，NEDO 知的基盤創成・利用促進開発事業の採択を得て，材料に関する基本的な辞書である材料オントロジーの開発を行い，先駆的な開発を行ったが，その後，拡張を本格的に進めることは困難な状況となった．また，2011-2013 年度科研費基盤(C)の採択により，産総研などと材料に関する数学的知識のデータベース化

についての研究開発を進めているが，上述した欧米のプロジェクトと比べて格段に規模が小さい．我が国では産業技術総合研究所，物質・材料研究機構が世界的にも評価の高い材料データベースを提供しているが，標準的なデータフォーマット・データ交換技術の開発を情報学の専門家と共同して行うことはしておらず，欧米に対して遅れを取りつつある．

（3） 研究内容

2012 年度より継続して，産業技術総合研究所と協力して材料の標準計測データを Linked Open Data として活用することが出来るようにするための検討を行っている．2011-2013 年度は科研費科学研究費助成事業 基盤(C)「材料オントロジーの拡張と国際化による材料データ交換手法の確立」の採択を得て，CEN の材料データに関するワークショップ SERES に参画し，材料データ記述の標準化に関与するとともに，材料物性に関する経験式や理論から実験値に基づいて導き出された関係式について，OpenMath を用いたデータベース開発を引き続き行っている．

材料の物性値などは温度・圧力などによって変化するものであるが，実験で得られるのは特定条件下での値であり，これを補完するための経験式・理論式などが多く整備されており，本来，数値シミュレーションなどにはこれらに基づいて計算された物性値が用いられなくてはならない．現状，こうした数学的な知見はデータベース中で係数のリストなどとして保存されており，数式処理ステムや，LOD で用いられるセマンティック・ウェブにおけるデータ表現との連携が困難である．

本研究では，一般化した数式を OpenMath Content Dictionary として整備し，これに実験データセットを適用して得られたパラメータの値を RDF の形式で表現することで他のシステムとの連携を可能とする方法を開発している．材料に関する数学的な知見の記述については，現在のところ上述のマテリアル・インフォマティクスや RDA でのトピックとして挙がっていないが，今後確実に必要とされる先駆的な研究と考えている．

（4） 平成 25 年度進捗状況

本年度は，CEN ワークショップに参加し，3 月のワークショップ最終ミーティングにおける CWA (CEN Workshop Agreement)作成へ向けて議論を行った．また，科研費科学研究費助成事業 基盤(C)「材料オントロジーの拡張と国際化による材料データ交換手法の確立」最終年度の取りまとめへ向けて，引き続き産総研熱物性データベースに収録された数式データベースの開発を行い，得られた問題点についてとりまとめと検証を行い，適宜熱物性学会などで報告している．6 月には，JST 研究開発戦略センターが開催した第二回のマテリアルズ・インフォマティクスワークショップに出席，材料データベース，材料データ交換のための試みと国際的な標準基盤整備の活動について述べた．

3.4.3. 確率的大域的最適化

（1） 目標・計画

我々の目標は実数値最適化の一般理論を整えることである．これまでにその土台となる各種定式化と数値実験環境の整備を行ってきた．今後もこの作業を継続する予定である．

（2） 意義・国際社会との比較

現在，最も包括的といえる枠組みは局所・非線形凸最適化理論までであり，これからはみ出た大域的最適化の理論といえるものは存在しない．この局所最適化を包括する大域的最適化理論を作ることは，最適化に関する統一的視点を得ることを意味する．またこの枠組みを基にした各種実験の結果から有意義な定量的・漸近的議論が可能となる．

（3） 研究内容

目的関数の単峰・多峰を問わず，関数中で最小となる値とその設計変数をそれぞれ最適値 y^{**}，最適解 $\boldsymbol{x}^{**}$ と呼ぶことにし，また $(\boldsymbol{x}^{**},\ y^{**}) = D^{**}$ とする．

（甲）要請：最適化とはユーザー I の損失関数 $\lambda_I = \lambda_I(y^{**})$ の期待値 $\mathbb{E}\lambda_I(y^{**})$ を最小化する行動である．

これによりライバル製品との競合状態や限界効用逓減の法則といった人間と現代社会の業が最適化プロセスに反映される．（甲）の計算には，ある時点までに集まった観測値 D と先験情報 I を基にした D^{**} のベイズ的な事後分布 $p(D^{**}|D,\ I)$ が必要となる．そしてこれを基に次の評価点を決定・観測のループを繰り返す．つまり，

（乙）事実：最適化ループとはベイズ更新である．

このような最適化におけるベイズ更新を EGO フレームワークと呼ぶことにする．また，世界中の過去・現在・そして未来の最適化手法はこのフレームワークに属すると強引に解釈することは可能である．（甲）を達成するには明らかに D^{**} の良い推定が必要であり，

（丙）事実：最適化アルゴリズムとは D^{**} を推定する EGO フレームワークである．

実は次が言える：

（丙’）定理：**良い**最適化アルゴリズムとは局所解 $\{D_j^*\}_j$ のモデルから D^{**} を推定する EGO フレームワークである．

「良い」とは（甲）の意味においてである．またここで局所解 $\boldsymbol{x}_j^*$ とその値 y_j^* について $(\boldsymbol{x}_j^*,\ y_j^*) = D_j^*\ \left(j = 1,\ \ldots,\ n\right)$ とした．n は目的関数中の局所解の数である．（丙’）より $p\left(D^{**}\middle|\{D_j^*\},\ D,\ I\right)$ を求めるには局所解のモデル $p\left(D\middle|\{D_j^*\},\ I\right)$ が必要となる．あらゆる解は，（∇）勾配が０，（$\perp$）不連続の端，（∂）制約の上，（Υ）V 字形の底，のいずれかであり，これで局所解が定義される：

$$p\left(D\middle|\{D_j^*\},\ I\right) = \sum_{e\in\{\nabla,\ \perp,\ \partial,\ \Upsilon\}} p\left(D\middle|\{D_j^*\},\ e,\ I\right)p\left(e\middle|\{D_j^*\},\ I\right)$$

これらによるモデル混合・モデル比較によって（甲）を達成する．

（丙’）の証明：仮想実験 e のたとえ話

（∇）を考慮すべきであることを示す．「（∇）を考慮する」を「費用が c の実験 e を実施した結果，観測値 $\boldsymbol{\nabla}$ を得る」と読み替える．ある行動 $\boldsymbol{x}^{**}$ の結果として y^{**} が起きる状況において，実験家 I の損失 λ_I の期待値を最小化する問題を考える．実験を行わなかった場合（e_0とする）の最適な行動 $\hat{\boldsymbol{x}}_0$ を

$$\hat{\boldsymbol{x}}_0 = \mathrm{argmin}_{\boldsymbol{x}^{**}} \int \lambda_I\left(\boldsymbol{x}^{**},\ e,\ y^{**}\right)p\left(y^{**}\middle|e_0,\ \boldsymbol{x}^{**},\ D\right)dy^{**}$$

とし，実験結果を考慮した最適な行動$\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{\nabla}}$を

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{\nabla}} = \mathrm{argmin}_{\boldsymbol{x}^{**}} \iint \lambda_I\left(\boldsymbol{x}^{**},\ e,\ \boldsymbol{\nabla},\ y^{**}\right)p\left(y^{**}\middle|e,\ \boldsymbol{\nabla},\ \boldsymbol{x}^{**},\ D\right)dy^{**}p(\boldsymbol{\nabla}|e)d\boldsymbol{\nabla}$$

とする．実験 e の価値 $v(e)$ を

$$v(e) = \int\left\{\lambda_I\left(\hat{\boldsymbol{x}}_0,\ e_0,\ y^{**}\right) - \lambda_I\left(\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{\nabla}},\ e,\ \boldsymbol{\nabla},\ y^{**}\right)\right\}p\left(y^{**}\middle|e,\ \boldsymbol{\nabla},\ \hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{\nabla}},\ D\right)dy^{**}$$

とする．このとき実験 e は $\mathbb{E}v(e) \geq c$ となるときに行うべきで，それ以外は費用に見合わずやるべきではない．ところが仮想実験 e は単なる頭の体操でありコスト c はゼロである．よって$\mathbb{E}v(e) \geq 0$ を示せばよい． λ_I の形が

$$\lambda_I\left(\hat{\boldsymbol{x}}_0,\ e_0,\ y^{**}\right) = -A\ln p\left(y^{**}\middle|e_0,\ \hat{\boldsymbol{x}}_0,\ D\right) + B(y^{**}),\ \mathrm{A} > 0$$
$$\lambda_I\left(\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{\nabla}},\ e,\ \boldsymbol{\nabla},\ y^{**}\right) = -A\ln p\left(y^{**}\middle|e,\ \boldsymbol{\nabla},\ \hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{\nabla}},\ D\right) + B(y^{**}),\ A > 0$$

であるとすると，

$$v(e) = A\int \ln\frac{p\left(y^{**}\middle|e,\ \boldsymbol{\nabla},\ \hat{\boldsymbol{x}}_{\nabla},\ D\right)}{p\left(y^{**}\middle|e_0,\ \hat{\boldsymbol{x}}_0,\ D\right)}p\left(y^{**}\middle|e,\ \boldsymbol{\nabla},\ \hat{\boldsymbol{x}}_{\nabla},\ D\right)dy^{**}$$

となるがこれは KL 情報量である．よって常に非負なので $\mathbb{E}v(e) = \int v(e)p(\boldsymbol{\nabla}|e)d\boldsymbol{\nabla} \geq 0$ であり，$p(\boldsymbol{\nabla}|e)$ によらず常に勾配を考慮すべきである．他の（$\perp$）（∂）（Υ）も同様…証明終.

これには状況証拠もある．たとえば遺伝的アルゴリズムや焼きなまし法の定義を読んでも局所解 $\{D_j^*\}$ を考慮するかのような言及は無い. 一方これらのパフォーマンスは事前の各

種パラメータ設定次第で大きく変化することが知られる．そして良いパラメータ設定とは「早熟な収束」を避けるものであるとされるがこれは $D_j^*(\neq D^{**})$ への収束に他ならない．

以上からモデルの超パラメータベクトルを $\boldsymbol{\theta}$ とすれば，

$$\iiint \lambda_I(D^{**})p(D^{**}|\{D_j^*\},\ \boldsymbol{\theta},\ D,\ I)p(\{D_j^*\}|\boldsymbol{\theta},\ D,\ I)p(\boldsymbol{\theta}|D,\ I)d\boldsymbol{\theta}d\{D_j^*\}dy^{**}$$

を最小にする $\{\boldsymbol{x}^{**}\}$ が次回の評価点集合となる．また「ユーザー I が局所最適化を行う」とは $n=1$ と確信している状態 $p(n=1|I)=100\%$ であり，$D_1^*=D^{**}$ となる特別な場合と見なせる．

（4）　平成 25 年度進捗状況

モデル誤りが存在する状況におけるパフォーマンス低下の調査

「単峰だと思って最適化してみたら実は多峰だった」というシチュエーションはしばしば遭遇する．そこでこのような状況を再現しその実態を探った．具体的には，（丙’）より多峰性の目的関数においては関数中の局所解の数 $n(\geq 2)$ を推定しながら $\{D_j^*\}_{j\in\{1,\ldots,\ n\}}$ から D^{**} を 推定しなくてはならないが，その替わりに先述の $p(n=1|I)=100\%$ としたアルゴリズムと，比較用に既存のアルゴリズム Expected Improvement (EI)との２つを用いて，それぞれ目的関数４０００ケースを最適化した．結果は EI の方が勝った．

遺伝的アルゴリズム(GA)のような大域的手法であっても，悪いパラメータ設定（e.g. 交叉率や突然変異率が小さすぎる）では先述のような早熟な収束によって局所解しか見つからない．しかしこれでも理論上は十分な反復回数の後に大域的解にたどり着くが，このような場合はむしろ局所最適化をしたと言う方が現実に即しており，このような場合を「狭義に大域的」な最適化をしたと呼ぶことにすれば，比較実験における単峰を仮定したアルゴリズムは狭義に大域的であったといえる．

3.4.4. 複雑構造物の軽量化設計技術の開発

(1) 目標・計画

近年，複雑な形状をした大規模な建築物や構造物が多くなるに伴いそれらの健全性評価や安全性を考慮した設計は極めて重要である．実構造物の詳細なモデルを作成し大規模なメッシュ分割を用いて数値解析を行うことは非常に困難であり，実用的ではない．そこで

大規模なメッシュ分割を用いることなく高精度かつ解析時間の高速化の手法を開発する．

(2) 意義・国際社会との比較

大規模で複雑な形状を解析する手法としてミクロ・マクロ解析など様々な既存の手法の研究がなされている．それらの既存の手法の多くの問題点は精度の向上や，解析時間の高速化，解の収束などが挙げられる．それらをより高度化するアルゴリズムを開発することは非常に重要である．また環境問題の一つにヒートアイランド現象対策として普及しつつある京都大学・人間環境学科，酒井敏教授らによって考案されたフラクタル日除けを解析対象として題材に挙げている．フラクタル日除けは砂漠など植物の育たない地域や大雪の降る地域など様々な環境で使用することが出来るがゆえ，環境問題にも貢献できると思われる．

(3) 研究内容

本研究では実構造モデルを近似モデルである要素（四面体要素）で近似して解析を行う．解析対象としてシェルピンスキー四面体を組み合わせて作成されたフラクタル日除けを題材に挙げている．近似モデルを作成するために実構造モデルから近似モデルの節点に適応するサンプル点より反力を求め，{f}=[k]{u}より直接，等価な剛性マトリックスを得る．この等価な剛性マトリックスより近似モデルを作成し近似モデルを組み合わせて全体構造のモデルに拡張することにより全体解析が非常に困難であるシェルピンスキー構造体を等価な要素に置き換えて全体構造の解析をすることで大規模な複雑構造物を，要素数，節点数を大幅に減少することができ，解析時間の高速化，計算コストの減少が期待できる．またこのアルゴリズムを繰り返すことにより効率の良い最適化も期待できる．

(4) 平成 25 年度進捗状況

等価モデルでは近似に起因する誤差は避けられないため，実構造モデルと等価モデルの両モデル間における解析誤差を確認し実用性を検証した．その結果，最大約５％程度の誤差が生じていた．そこで等価モデル解析の精度をあげるために，剛性マトリックスの対角項を修正し高精度化を行った結果が図６である．図６は等価モデルの 1 点に単位荷重をかけてほかの自由度は拘束したときの解析結果を詳細モデルの結果と比較したものである．図から分かる様に，改良した結果（CorrectionTerm）は詳細モデルと等価モデルの解析結果は同じになった．なお，Symmetry と書いてある結果は剛性マトリックスが完全な対称

行列になるように([K]+[K]^T)/2 としてみた結果であるが効果はほとんどなかった．高精度化にはほかにもいろいろ手法が考えられるので，検討をさらに進める予定である．

この等価モデルを組み合わせ全体構造モデルに拡張し全体構造における解析を行いこのアルゴリズムを用いて最適化を行った．

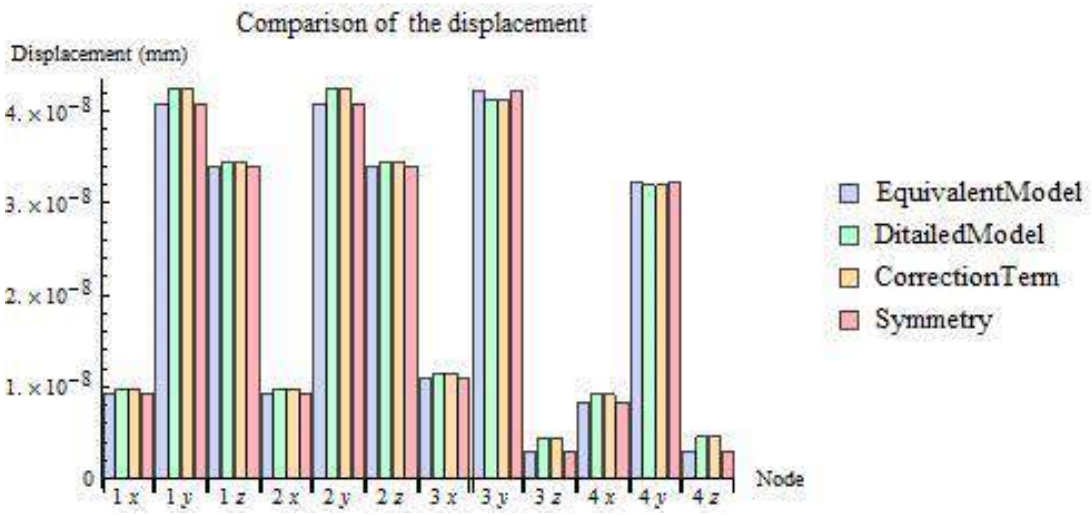


図 6　　等価モデルの精度検証と改良

3.5. 可視化検証グループ

本プロジェクトでは，流体–構造連成解析の品質保証に特に重点を置いている．その中でも，

・解析結果を正しく理解し，評価すること

・実験結果等と公正な比較を行うこと

は重要な要素であると考えられる．そのためには，可視化は必須である．特に，連成解析は現象が複雑であり，限られた数値データのみでこれを評価することは困難である．実験における可視化技術やその応用は実験による検証の項目に譲り，ここでは，解析結果の可視化および，比較のための実験の可視化結果の表示を中心に研究を行う．解析は，当面簡単のため２次元および３次元でもそれほど３次元性が強くない問題を対象とするが，そうであっても特に流れ場は３次元であり，また今後のより一般的な問題に対応するためにも，３次元の可視化が本質である．そこで，ここでは連成解析において３次元データを如何に可視化するかを中心に研究を進める．１つは以下に述べるような立体視あるいはVR（バーチャルリアリティ）を用いた可視化であるが，これに限らず，３次元データの可視化方法を検討していく．

3.5.1. ３次元画像による定量的・定性的検証

(1) 目標・計画

本研究の目標は，流体構造連成問題について，数値解析の精度検証を支援するための，画像による定量評価，定性評価の手法やシステムを開発し，本プロジェクトで開発される連成解析手法の評価に供することである．特に，バーチャルリアリティ（VR）技術を利用した３次元可視化システムを中心に３次元画像による可視化評価を中心に研究を進める．

大きな計画としては，

平成 24 年度：

表示装置となる VR 装置の導入を行い，ハードウェアの準備を行う．

平成 25 年度：

VR 装置の上でソフトウェアを開発し，PC クラスタと結合してこの上での解析結果の表示を行う．

平成 26 年度：

画像による検証に利用するための可視化システムを VR 装置上で開発する．

平成 27 年度：

積極的に可視化による比較・検証を行う．特に，（立体）画像を用い，実験と解析の可視化画像を重ねたり，並べたりして効果的な比較・検証方法について検討する．

平成 28 年度：

研究をまとめ，その公開方法について検討する．

としている．これらにより，従来とは異なる，多彩な可視化により，直感的・効果的な比較・検証が可能となり，開発される連成解析手法をより多面的に評価できると考える．

(2) 意義・国際社会との比較

連成解析は，複数の物理が関連するため，その妥当性の評価は単一の物理に対する解析よりも難しい．ここでは，流体–構造連成を中心に研究を行っているが，流体・構造それぞれ単独で妥当性を示すことができても，それらを組み合わせただけで連成問題が正しく解けるということでは必ずしもない．２つの物理をやり取りするものがあり，それが正しく評価されているかが，重要であるが，実験的に測定できるもの，できないもの等あり，単純ではない．ここでは，可視化，特に３次元画像を利用することで，実験と解析を出来る限り直接的に比較することを考えており，流体–構造連成解析の精度検証・妥当性検証のテンプレートとなることを期待している．

国際的に見ると，連成解析は計算力学における重要な研究テーマの１つであるが，必ずしも検証については進んでおらず，信頼できるとされる過去の解析例と比較したり，パラメータスタディによって，実験で見られる現象と，解析で得られる現象の範囲が等しい（あるいは近い）といったことを示すにとどまっている場合がほとんどである．連成解析手法を評価する手法の１つとして３次元画像を用いる方法は，ほとんど例がなく，その成果は

重要なものとなると考える．

(3) 研究内容

本研究の中心となる装置は，図１の２面没入型ディスプレイ装置である．大きさは正面のスクリーンが 2.8×2.1m，下のスクリーンが同じく 2.8×2.1m でここに２台のプロジェクターにより，それぞれ 1400×1050 の解像度の画像を表示する．画像は時分割方式で立体映像を投影できるようになっており，液晶シャッター眼鏡によって立体映像を観察する．立体映像は３台のグラフィックスワークステーションで生成する．１台はマスタで，あとの２台が正面と下面の映像を担当する．これとは別に観察者や観察者が持つコントローラの位置を赤外線カメラで取得するシステムがあり，１台のトラッキングワークステーションで制御する．グラフィックスワークステーションのマスタはトラッキングワークステーションから逐次データを取得して観察者（やコントローラ）の位置を計算する．

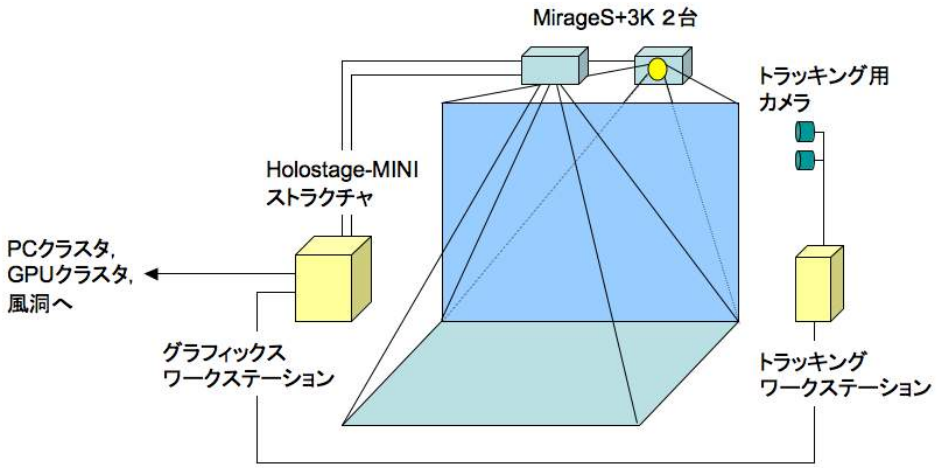


図１　システム構成図

このシステムに，流体–構造連成の３次元画像を表示する．表示する画像は大きく分けると，実験の画像と解析の画像の２種類である．これらを同時に，あるいは交互に表示することで直接的な比較を行う．

実験の画像については，物体の変位等，直接得られるものから，PIV で可視化した流れの速度分布や PSP（感圧塗料）で可視化した物体面上の圧力分布，画像解析により得られる応力分布等が考えられる．これらを得ることは，実験班の研究に委ねられるが，その３次元化や，本装置での表示にはデータの転送等も含めてさまざまな検討と技術的課題の克服が必要である．

解析結果については，単独の物理に基づく解析では多くの知識と経験があるものの，連成問題については，それぞれの物理に関する量を可視化表示するにとどまっており，まず

は何を可視化することで連成解析の精度や妥当性評価につながるかの検討が重要となる．そのため，まず，さまざまな物理量の３次元可視化を可能とするシステムを開発する．解析は大規模となることが前提なので，そのデータをどのように転送し，また可視化するかも課題となる．

次に，実験と解析の比較である．たとえば，視点・スケールを合わせて交互に表示する／重ねて表示する，などが考えられるが，それには時間的・空間的な位置合わせ等，技術的な課題が多くある．また，必ずしも同じ量を表示できる訳ではないので，何を見るか，比べるかも問題となる．また，実験については，取得した画像（動画）をそのまま見るのか，あるいはデータを抽出して，解析結果と同じように CG で表示するのかといったアプローチもありうる．これらについても時間をかけて検討し，システムを構築することで新しい可視化法・評価法につなげたい．

最終的には，システム化できるところはまとめたい．実験データも，標準的で精度の高いものが得られれば，標準問題として公開したいが，その際に３次元画像もその１つとできればよいと考えている．

(4) 平成 25 年度進捗状況

平成 25 年度の主な目的は可視化のためのソフトウェアの開発であった．本報を記している平成 25 年 12 月現在，すべてのソフトウェアの開発が終了してはいないが，以下，計画も含めて可視化システムの現状を述べる．

図２にシステムの全体構成（案）を示す．実験および数値解析の両者を同時にあるいは個別に表示し,比較･検証を行うことができるように考えている.AVS-MPE および 3dsmax, VR4MAX は既に導入されたソフトウェアであり，これらを有機的につなぐこと，データの表示や制御を可視化や CG の専門家でなくともできるようにすることが目的である．

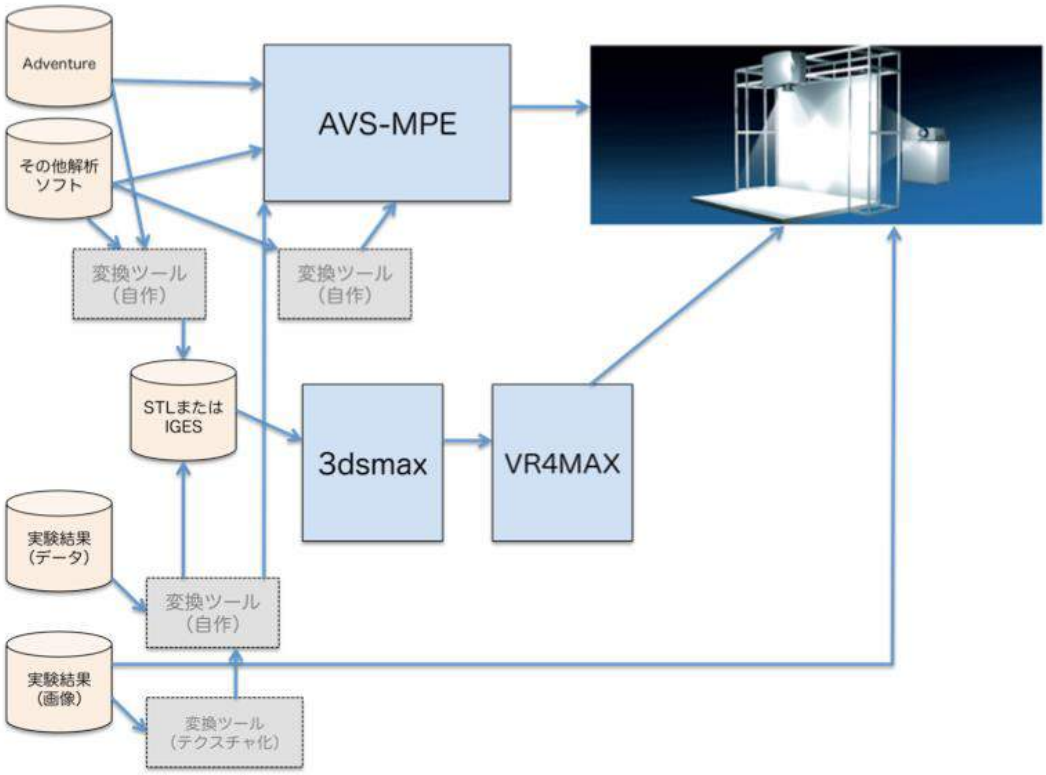


図２　可視化システム全体構成図（案）

図２から分かるように，数値解析結果は AVS-MPE を通して表示するパスがいくつか確立しているので，現在は実験結果を AVS-MPE に送るソフトウェアを準備している．そのイメージを図３に示す．

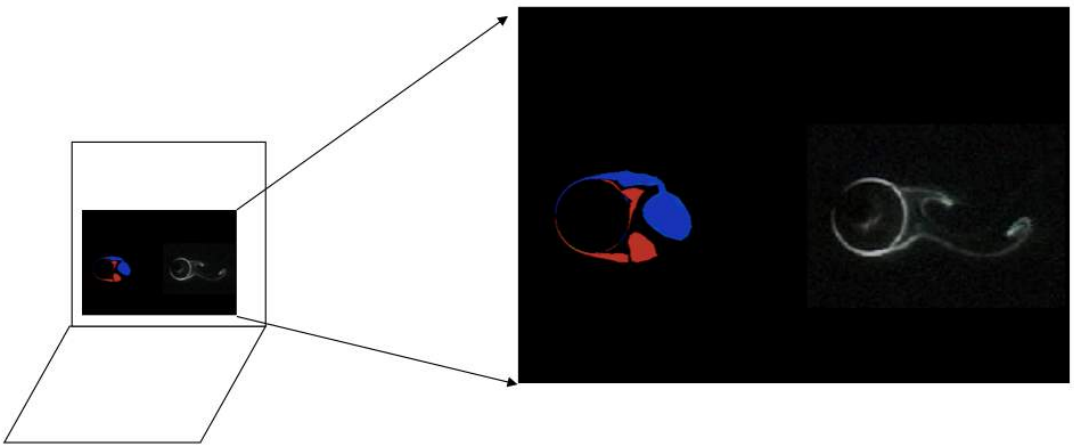


図３　実験と可視化の同時表示のイメージ

解析は２次元であれ，３次元であれ問題なく VR 空間で表示できる．実験については，多くの場合，２次元計測（面計測）が多いので，まず，データの面を指定し，そこに取得した画像（PIV 等）をマッピングする．解析と実験との位置や向き，大きさを合わせること，動画であれば時間を揃えることが必要となるのが，動画についてはそのための前処理を設計中で，年度内には完成する予定である．

予定通りに進まなかったこととしては，装置を都合で平成 25 年 5 月，川越キャンパス６号館に移設した．近くに PC クラスタも移設されたが，まだネットワーク環境は完全には整備されておらず，　PC クラスタと VR 装置とはネットワークで直結されてはいない．これは今年度末から来年度早々には実現させる予定である．

3.6. 横断的研究会

前述の５つの研究テーマは，本プロジェクトの柱となるものであるが，それぞれを横断的につなぐ研究や，それぞれの成果から派生した研究もまた重要であると考える．そこで，計算力学研究センターでは，そのときどきで研究会を立ち上げ，５つの柱とは別のグループで研究を進めようと考えている．研究テーマごとの活動と重複する部分もあるが，ここでは今年度に活動のあった研究会の概要をあらためて記す．

3.6.1. 連成標準問題検討会

連成解析の精度を高め，実用的な手法として育てるのには標準問題が必要であろうと考える．流体解析・構造解析などではそれぞれ手法を開発するとまず解くべき問題があり，それによって手法の精度や有効性等が確認できる．残念ながら連成問題にはそのような標準問題が少ない．そこで，ここでは流体―構造連成に関し，当センターで実験を行い，詳細なデータを取って標準問題として提案できるものを検討する．最終的には，実験・解析を行い，比較するとともに，それらを標準問題として公開する．平成 25 年度は，具体的なターゲットとして一様流れ中に置かれた一端固定の円柱の連成挙動に着目し，数値解析が比較的容易なレイノルズ数 10,000 程度になるように流速や円柱の大きさを決めた後，連成解析として適当な規模の変形量になるように材料定数を決定し，標準問題の最初の一つとして提案した．

3.6.2. 計算力学と（材料）データベースの会

計算力学に現在用いられている物性データの信頼性の確認と，今後必要とされるデータの所在についての検討が必要と考えられる．また，数値計算とデータベースのより緊密な連携のためには，データアクセスのための API について検討する必要がある．現在，欧州標準規格委員会のワークショップにおいて，機械試験の試験データを電子的に記述するための標準についての検討が行われている．三次元 CAD データなども含む製造物データ管理のための規格である ISO10303 (STEP)との連携も視野に入っており，計算力学による設計と個別の材料の試験データを共通のデータフォーマットを用いて連携させるための規格として今後検討の必要がある．

3.6.3. 楽器音響と流体構造連成研究会

音楽や楽器に関する研究は，他の研究領域に比べまだまだ未知なことが多いわりには研究が進んでいない．その理由には，芸術至上主義ともいわれるように音楽になにか科学的なものや現実的な効果を測ることに，ある種のアレルギーが世の中にはまだあることが挙げられ，また研究対象として理解されなかったり予算が組まれなかったりするからである．しかし，本研究会では，音響工学や計算工学の立場から科学的に楽器の音響特性や構造，音色，その先には芸術の科学的解明を目的とする．そもそも音楽は楽器本体から発せられ

る空気振動現象を脳の聴覚野で知覚するプロセスであり，楽器の振動と周辺流体の連成は計算工学としても困難であるが興味深い対象である．現在は，弦楽器の音響特性のスペクトル解析やハイスピードカメラを用いた弦の振動の可視化，操作性やヴィヴラートのような演奏技術などの調査を行っている．

3.6.4. タイヤ研究会

もともとは，米国科学基金（NSF）により 2011 年度に設立された産学協同研究センターである，タイヤ研究センターとの連携を模索する中で，当センターでもそれとは別にタイヤに関する研究をすべきであろうとの結論に達し，平成 25 年 12 月に１回目の研究打ち合わせを行った．目的は，タイヤ（やその周辺）解析に当センターの大規模解析技術，連成解析技術を適用し，タイヤに関連するものづくりに資することであるが，今回のプロジェクトのメインテーマである，妥当性検証はここでも重要であることから，解析のみならず，実験も同時に行うことを考えている．そのため，当センター／プロジェクトのメンバーにこだわらず，本学理工学部から協力いただける研究者を募った．本稿執筆時点では，まだ１回目の打ち合わせが終わったばかりで具体的な研究は始まっていないが，年度内に第２回の会合を持ち，少し具体的な研究テーマ設定を行う予定である．

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

H23 年 10 月より JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」において，研究課題名「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」が採択され，研究拠点を当センターに置き，研究を実施している．

4.1.1. 研究実施体制

ポストペタコンなど次々世代の並列計算機アーキテクチャにおいて，大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション分野が高い演算効率を得るためには，マイクロプロセッサやメモリの階層構造を考慮したプログラミングモデルが必要である．特にそれは，入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで，統一的に提供される必要がある．つまり，一般的な実アプリケーションはプレ／ソルバー／ポスト処理など目的に応じたモジュール群で構成されていることが多いが，ポストペタコンの利用が想定される大規模シミュレーションでは，全ての処理がポストペタコン上で行われ，モジュール間のデータ受け渡しを最小限にするようなプログラミングモデル，並びにそれに基づく大規模数値計算データ処理システムの基盤技術が不可欠と言える．

ここで，ポストペタコンのアーキテクチャとしては，SIMD 拡張命令，GPGPU，FPGA など何らかのアクセラレータを搭載したヘテロジニアスメニーコアで構成される計算ノードをネットワーク接続した，分散メモリ型アーキテクチャになると予想され，計算ノード内はチップ上／ボード上問わずに異種の演算装置が NUMA 型で搭載されることを想定する必要がある．また，演算性能と通信性能の向上比を考慮すると，マイクロプロセッサにとって計算ノード間ネットワークというのは，現在で例えると WAN 並みに遅く感じるネットワークとなる可能性があり，ポストペタコンはそれらを数十万から数百万ノード規模で接続して構築されると予想される．さらに，ポストペタコン利用が想定されるシミュレーションにおいて生成されるデータのファイルサイズはペタバイトオーダーになるが，ハードディスクなどの外部記憶装置の記憶容量やアクセス性能の大幅な改善にはまだ時間を要すると考えられる．つまり，ポストペタコンを利活用できるアプリケーションは，ヘテロジニアスな分散メモリ並列かつ数百万計算ノード環境において高い並列効率と演算効率を示す必要があるが，その高いハードルを突破できたとしても，大規模な入出力データを効率的に処理できない限り，本当の意味での利活用は不可能である．この問題を解決するためには，並列ファイル入出力システムの効率化やデータ圧縮展開アルゴリズムの高速化などだけではない，根本的なデータ量削減に関する解決策が求められる．

そこで本プロジェクトでは，ポストペタコン上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として，申請者らがこれまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法の技術を応用した，階層型領域分割法による大規模数値計算データ処理システムの研究開発を目指す．この基盤技術にはアプリケーション分野に依存する箇所があることが予想されるため，本提案では連続体力学向けアプリケーションを対象としながら，具体的には以下の基盤技術開発をターゲットとする．

A) マルチレベル領域分割法による連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列化ライブラリ

B) マルチレベル領域分割法による多階層計算格子データの生成，操作および I/O ライブラリ

C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

これらの技術に基づいて開発されるアプリケーションでは，核となるモジュール間のデータ受け渡し量を従来のものより 3 桁削減することが可能となり，ピーク演算性能比 20%以上のシステム開発の実現を目指す．

4.1.2. 研究実施内容

（1）「東洋大学」グループ

①研究代表者：塩谷　隆二　（東洋大学総合情報学部，教授）

②研究項目

・ 階層分割型数値計算ライブラリの基礎研究並びに設計とその応用

（2）「名古屋大学」グループ

①主たる共同研究者：荻野　正雄　（名古屋大学情報基盤センター，准教授）

②研究項目

・ 階層型ソルバーライブラリの基礎研究とその応用

（3）「東京大学」グループ

①主たる共同研究者：越塚　誠一　（東京大学大学院工学系研究科，教授）

②研究項目

・ 階層分割型入出力ライブラリ並びに連続体力学向け問題領域専用言語の基礎研究とその応用

5. 国際協力

5.1. TU-LHU student workshop（龍華科技大学 / 台湾）

日時：2013 年 2 月 25 日（金）

場所：龍華科技大学

主催：龍華科技大学

2013 年 2 月 25 日に台湾の龍華科技大学で行われた，2013 Japan-Taiwan (Toyo University and Lunghwa University) Joint Student Workshop on Nano and Computational Mechanics へ東洋大学計算力学研究センターのポスドク，大学院の学生の計８名が参加・講演を行った.

東洋大学側の講演は主に計算力学を用いた応用研究についての発表がなされ，龍華科技大学側は主にナノテクノロジーを応用した研究内容で 5 件の発表がされた.

東洋大学と龍華科技大学とは，研究分野が異なる部分もあったものの，各 20 分の発表に対して 5 分間の質疑応答の為の時間には多くの議論がされ，双方の大学の学生にとって，今後の研究に多くの影響を得ることが出来たと考えられる.

次回は，9 月に日本での開催を予定しており，その際にも数多くの有意義な意見交換ができることが期待できる.

5.2. LHU-SKKU-TU 若手ワークショップ（白山 / 日本）

日時：2013 年 9 月 6 日（金）

場所：東洋大学白山キャンパス 2 号館　スカイホール

主催：東洋大学計算力学研究センター

2013 年 9 月 6 日(金)，計算力学研究センター主催で，本校との提携校である，台湾の龍華大学，韓国の成均館大学を招いて，白山キャンパス 2 号館のスカイホールにて，The 1st LHU-SKKU-TU Joint Student Workshop on Nano and Computational Mechanics と題した 3 大学合同学生ワークショップを開催した．

当日のプログラムは 3 構成で行われ，第 1 部では，韓国，日本の教授らによる特別講演が 3 件行われた． 第 2 部，第 3 部では，台湾，韓国の大学院生により，それぞれ 4 件の講演が行われ，日本からは大学院生，研究助手らにより 7 件の講演が行われた．短い講演時間ではあったが，それぞれの講演に対する質疑応答が数多くなされ非常に有意義なワークショップとなった．

本 3 大学合同学生ワークショップは，今後，年に 1 度，各大学持ち回りで開催されることが決まっており，研究の観点のみならず，国際交流の観点からも今後の発展が期待できる．

ワークショップの様子

5.3. SSME 2013（墾丁 / 台湾）

日時：2013 年 11 月 10 日（金）～12 日（日）

場所：東洋大学白山キャンパス 2 号館　スカイホール

主催：龍華工科大学（台湾）

2013 年 11 月 10 日から 12 日にわたって，台湾の墾丁，Haward Beach Resort にて，台湾龍華工科大学の主催で行われた The 2nd Student Seminar on Mechanical Engineering (SSME2013) に本センターより博士前期課程の学生 2 名が参加・発表した．

SSME2013 には，台湾，日本のみならず，中国，韓国から 4 カ国 7 大学の学生が参加し 26 の講演が行われた．各講演の後に行われた質疑応答の際も，各々の持ち時間を超過する程，多くの議論がなされ，各自の研究の今後の更なる発展に繋がる非常に有意義なワークショップとなった．

会場の様子

6. 情報発信

6.1. 第 18 回計算力学フォーラム（JSME-CMD / 佐賀）

2013 年 11 月 2 日から 4 日の 3 日間に亘り佐賀大学で行われた CMD2013 にて，第 18 回計算力学フォーラムを行った.

第 18 回計算力学フォーラムとして，佐賀県・佐賀大学で開催された JSME 26rd Computational Mechanics Division Conference 2013 (CMD2013)内で，計算力学フォーラムとして，オーガナイズドセッション「大規模並列・連成解析と関連話題」を開催した. 本フォーラムは 3 つのセッションから構成され以下の 12 件の講演が行われた.

- Diagonal-scaled BDD 法を用いた複合材料の並列有限要素解析
- 多数の MPC を含む大規模構造解析への BDD 法の適用
- Isogeometric 解析における階層型接触探索
- 振動現象の連成解析及び自己組織化マップによるその分類
- 大規模複合構造物のマルチスケール解析
- 開発中の ADVENTURE 固有値解析モジュールによる並列解析
- 機構-非線形有限要素法の連成解析を用いたサスペンション挙動シミュレーションの高度化に関する一考察
- 連続体力学向け DSL の開発
- 領域分割法ソルバーの性能ベンチマーク
- 3 次元有限要素解析コードのための並列領域分割法ライブラリに関する研究
- 複素数を用いる並列有限要素法解析ソルバの実装と高速化
- 超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの並列化
- 大規模解析のためのレイキャスティング可視化技術の検討

これらの講演と議論を通し，大規模計算並びに連例解析手法を中心とした現状と今後の課題に関する議論が行われた.

7. 教育活動

センター研究員らの指導のもとで，東洋大学総合情報学部卒論学生，工学研究科大学院学生がセンターにおいて研究活動を行っている．

7.1. 教育活動風景

田村研究室

田村研究室では，学部生６名の卒業研究および大学院生２名の修士研究を行っている．

週 1 回のセミナーでは，大学院生 1 名，学部生 2,3 名が研究発表を行う．またそれ以外の学生は 1 週間の進捗を報告する．また，学部生は週 1 回の輪読で専門書を読み，大学院生は週１回の輪読で学術論文紹介を行っている．図１はセミナーの様子である．

図 1. セミナー風景

江澤研究室

江澤研究室では，学部学生 12 名卒業研究および大学院生 4 名の修士研究および博士研究を行っている．学部学生は毎週 1 回セミナーを開き，勉強会や進捗状況報告をしてもらっている．大学院生は，月に数回各自の研究の進捗状況報告および勉強会を実施している．学部学生はまず汎用構造解析プログラム ANSYS を習得してもらい，つぎに 3 次元 CAD の勉強をしてもらっている．大学院生は独自に開発したプログラム等を使って研究を行っている．図 2 はセミナーでの勉強会風景である．図 3 は ANSYS を使って解析をしている様子である．

図 2. セミナー風景

図 3. 卒業論文の研究風景

塩谷研究室

塩谷研究室では，学部学生 12 名の卒業研究を行っている．毎週 1 回開催されるセミナーでは学生が研究進捗状況についての発表などを行っている．図 4 は携帯端末解析の可視化システムの様子であり，図 5 は研究室の様子である．

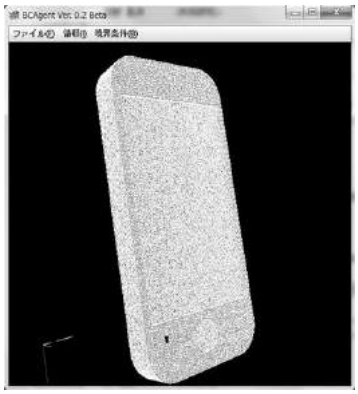


図 4. 携帯端末上での可視化の様子

図 5. 研究室の様子

中林研究室

中林研究室では，学部学生 15 名とポスドク 1 名が研究活動を行っている．毎週 1 回開催されるセミナーでは各回とも 5 名が研究発表を行い研究の進捗状況の報告や内容について議論する．また，卒業論文提出締切が近くなると全員が週 1 回の進捗状況を行うことになっている．卒論発表会は研究内容の近い塩谷研究室や田村研究室と合同で行っている．図 6 は研究室の様子であり，図 7 は研究発表会の様子である．

図 6. 研究室の様子

図 7. 研究発表会

7.2. 卒業論文・修士論文の紹介

田村研究室

⑴ 画像に基づく流体解析手法の開発

複雑な実形状まわりの流れを解析するには，物体形状に関する詳細な 3 次元データが必要であり，またそれを元に計算格子（要素）を生成するには専用のツールやプログラムをもってしてもかなりの時間と手間を要することが知られている．そこでここではそのような詳細なデータがない場合でも流体解析ができるようにするための手法として，画像をベースとしてその流れ場を解く方法を研究している．

⑵ 医療分野での流体解析技術の利用

コンピュータによる流体解析，いわゆる CFD（Computational Fluid Dynamics）の進歩は目覚ましいが，まだまだ実用分野は限られている．ここでは，CFD の適用範囲を広げることを目的として，特に医療分野への応用について研究を行っている．具体的には，超音波による治療について解析を行っている．

⑶ 混相流の解析手法の開発

気液２相流など混相流の数値解析にはいまだ様々な問題がある．ここでは，１個の気泡が変形あるいは崩壊する問題や，多数の小気泡が液体中に存在する気泡流など問題ごとに手法を開発し，解析を行っている．

江澤研究室

(1) 震災時における机の最適化

机に震災時に荷重が掛かった場合の強度を評価し，強度を高くすることを検討した．

(2) 位相最適化を用いたローラーチェーンのプレート形状最適化

自転車のローラーチェーンのプレートの形状最適化を行った．

(3) ゲームプログラミングの最適化

オセロゲームの強さを高めるために，各種パラメータの最適化を行った．

(4) 圧力容器の効率的解析技術と最適化技術の開発

燃料電池車の圧力容器を題材として，最適化の効率化技術の開発を行った．まず，遺伝的アルゴリズムの適用を行い, 問題点を抽出を行った. 次に, Efficient Global Optimization の適用を行い，効率化できる見通しを得た．さらに先験情報を組み込むことにより，さらに効率的な最適化を実現した．

塩谷研究室

(1) マルチメディアデバイスを用いたシミュレーション

近年普及が進んでいるスマートフォンと呼ばれるポータブルマルチメディアデバイス端末について，その直感的かつ簡易な操作性に着目し，クラウド型 CAE システムの入出力端末としての利用を目的とし，マルチメディアデバイス上での可視化システムの構築を行なった.

(2) ネットワーク型 CAE ソフトウェアの開発

本研究では，遠隔地で運用される並列計算機システムを，インターネットを介して利用するネットワーク型 CAE システムについて，九州大学と共同研究を行うことにより，関東と九州間での遠隔利用実験を行った．解析結果の可視化機能の拡張を行い，可視化可能な物理量の選択肢を広げることを実現した.

(3) Windows 版熱伝導解析モジュール開発

計算サーバ上で実行される大規模有限要素並列計算を，簡易に実現する Windows 版システムとして開発された構造解析のシステムに，熱伝導解析機能を追加することを目的として，モジュールの開発を行い，いくつかの問題に対して有効性の検討を行った.

中林研究室

(1) スマートフォン用アプリケーションの企画・デザイン・開発

Android 端末や iOS 端末など，近年，情報機器の主流になりつつあるスマートフォンをプラットフォームとして，従来 PC や大型の計算機で行っていたような数値シミュレーションを実現する手法について広く研究を行っている.

(2) ニューラルネットワークを用いた予測システムの開発

ニューラルネットワークを用いて過去のデータを学習させることにより，何らかの予測を行うシステムの開発を行っている．これまでには，ドーナツショップの販売個数予測や，パチスロ機の設定予測などを試してきたが，本年度は過去の天気変化のデータを用いて，24 時間後の天気をニューラルネットワークで予測するシステムの構築を行った.

(3) 自己組織化マップの応用に関する研究

ニューラルネットワークの一種で，教師なし学習が可能であることや，多次元データの 2 次元マップ上での分類などに特徴がある自己組織化マップを用いて，様々なデータの分類や予測を行っている．本年度は過去の音楽 CD の売り上げや，曲自体のテンポや調などのデータを事故組織化マップにより分類・整理することにより，音楽の流行の変遷や将来予測をするシステムの構築を行った.

8. 業績リスト

本章では，2013 年 1 月から 2013 年 12 月までの当センターに関係する業績を記載する．

8.1. 総説・解説・エッセイ

1. 矢川元基，"巻頭言：2013 年を迎えて"，原安協だより, No.251, pp.1-2, 2013

8.2. 論文

1. K.MUROTANI, G.YAGAWA and J-B, CHOI, "Adaptive finite elements using hierarchical mesh and its application to crack propagation analysis", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.253, pp.1-14, 2013

2. K.SAKIHARA, H.MATSUBARA, T.EDO and G.YAGAWA, "Multi-dimensional Moving Least Squares Method Applied to 3D Elasticity Problems", Engineering Structures, Vol. 47, pp. 45-53, 2013

3. 江戸孝昭，松原仁，原久夫，"粒状構造を有する脆性材料の離散き裂進展解析手法の開発および性能評価"，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.69, pp.31-45, 2013 年 1 月

4. 広瀬孝三郎，江戸孝昭，松原仁，"裂性岩盤の狭小領域構造を考慮した広大領域における物質移動シミュレーション"，土木学会論文集 C（地圏工学）, Vol.69, No.3, pp.367-377, 2013 年

5. Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, "Comparison of Numerical and experimental results on Red soil muddy water flow in sand basin with filtration", 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 127-130, 2013.11

6. T Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, "Kita-Uebaru Landslide Analysis by using Material Point Method (MPM)", 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 39-42, 2013.11

7. Kosaburo Hirose and Hitoshi Matsubara, "Mudcrack patterns of Okinawa regional soils ", 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 35-38, 2013.11

8.3. 講演論文・口頭発表

1. N. FUJIMATSU, "Direct Numerical Simulation on Drag Reduction of Channel Flow with Visco-Elastic Wall", 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2013.1.7

2. 長岡慎介，中林靖，矢川元基，“EFMM の並列流体-構造連成解析への適用”，第 62 回理論応用力学講演会，東京工業大学大岡山キャンパス，2013.03.06-08

3. 芦野俊宏，“材料データベースの国際動向と今後の展望”，科学技術未来戦略ワークショップ　データを活用した設計型物質・材料研究(マテリアルズ・インフォマティクス)ワークショップ第 2 回，東京，2013.06.01

4. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Genki YAGAWA，“E Application of EFMM to Fluid-Structure Coupled Analysis and Its Parallelization”，SEECCM III，Kos Island, Greece，2013.06.012-14

5. Hiroshi KAWAI, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, Shinobu YOSHIMURA “Performance Benchmark of Local Solvers on Supercomputers in Domain Decomposition Method”，The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS)，Jeju, South Korea, 2013.06.09-13

6. Kaoru YODO, Ryuji SHIOYA, Yoshitaka WADA, Akio MIYOSHI , “Parallel CAE system based on HTML5, WebGL and offline visualization technology with domain decomposition method”，The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS)，Jeju, South Korea, 2013.06.09-13

7. Itaru ISHIKAWA, Yosuke KOBAYASHI, Ryuji SHIOYA, Genki YAGAWA , “Vibration Analysis by an Eigenvalue Analysis Module of ADVENTURE System”，The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS)，Jeju, South Korea, 2013.06.09-13

8. A.M.M. MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, “A Computational Study of Sparse Matrix Storage Schemes in Large Scale Thermal-Solid Coupling Analysis”，The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS)，Jeju, South Korea, 2013.06.09-13

9. 荻野正雄，塩谷隆二，“階層型領域分割法による 1000 億自由度並列有限要素解析”，第 18 回計算工学講演会，東京，2013.06.19-21

10. 石川格，小林陽介，塩谷隆二，矢川元基，“ADVENTURE 振動固有値解析モジュールの開発”，第 18 回計算工学講演会，東京，2013.06.19-21

11. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, “コース行列の逆行列を用いた BDD 前処理”，第 18 回計算工学講演会，東京，2013.06.19-21

12. 和田義孝，河合浩志，塩谷隆二，“超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの開発”，第 18 回計算工学講演会，東京，2013.06.19-21

13. 淀薫, 塩谷隆二, 和田義孝, 三好昭生, “領域分割法に基づくオフライン可視化と WebGL による大規模解析用ネットワーク CAE システムの開発”，第 18 回計算工学講演会，東京，2013.06.19-21

14. 荒井皓一郎，岡田裕，河合浩志，淀薫，塩谷隆二，“地球シミュレータによる大規模有限要素法破壊力学解析と破壊力学パラメータの計算手法”, 第 18 回計算工学講演会, 東京，2013.06.19-21

15. 田村善昭，鶴見伸夫，松本洋一郎，“集束超音波による気泡運動と温度上昇の可視化”，可視化情報シンポジウム，東京，2013.06.19-21

16. Y. Yamashita，T. Baba and T. Ashino，“Semantic mathematical representation using OpenMath for equation”，The 10th Asian Thermophysical Properties Conference，Jeju, Kora，2013.09

17. 長岡慎介，中林靖，矢川元基，“EFMM による並列流体-構造連成解析について”，日本機械学会　2013 年度年次大会，岡山大学津島キャンパス，2013.09.08-11

18. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, “Numerical Simulation Method of HIFU with Microbubbles”, ASME/FDA 2013 1st Annual Frontiers in Medical Devices: Applications of Computer Modeling and Simulation (FMD2013), Washington DC, U. S. A., 2013.09.11-13

19. 増田正人，中林靖，田村善昭，“振動現象の連成解析及び自己組織化マップによるその分類”，日本機械学会第 26 回計算力学講演会，佐賀，2013.11.02-04

20. 山下雄一郎(産総研)，馬場哲也，芦野俊宏，“分散型熱物性データベースの開発(10) -OpenMath を用いた数式データの表現-”, 第 34 回日本熱物性シンポジウム, 富山, 2013.11

21. Shisnuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa，“Evaluation of Efficiency of New Fluid-Structure Coupled Analysis Method using Parallel Enriched Free Mesh Method”， 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013)， Singapore, 2013.12.11-14

22. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura，“Fluid-Structure Coupled Analysis of Vibration Phenomena and Its Classification and Prediction Using the modular network Self Organizing Map”， 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013)，Singapore, 2013.12.11-14

23. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto，“Numerical Simulation of Nonlinear Acoustic Waves in Two-Phase Fluid”， 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013)，Singapore, 2013.12.11-14

24. 石川 格，河合浩志，塩谷 隆二，“振開発中の ADVENTURE 振動固有値解析モジュールによる並列計算”，日本機械学会第 26 回計算力学講演会，佐賀，2013.11.02-04

25. I. Ishikawa, M. Ogino, A. M. M. Mukaddes, Ryuji Shioya, “Trial Study of Multi-Level Domain Decomposition Method for Heat Transfer Analysis”， 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013)，Singapore, 2013.12.11-14

26. 河合浩志，塩谷隆二，“連続体力学向け DSL の開発”，日本機械学会第 26 回計算力学講演会，佐賀，2013.11.02-04

27. 河合浩志，荻野正雄，塩谷隆二，山田知典，吉村忍，“領域分割法ソルバーの性能ベンチマーク”，日本機械学会第 26 回計算力学講演会，佐賀，2013.11.02-04

28. 和田義孝，河合浩志，荻野正雄，塩谷隆二，“超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの並列化”，日本機械学会第 26 回計算力学講演会，佐賀，2013.11.02-04

29. 淀薫，塩谷隆二，和田義孝，河合浩志，三好昭生，“大規模解析のためのレイキャスティング可視化技術の検討”，日本機械学会第 26 回計算力学講演会，佐賀，2013.11.02-04

30. 武居周，室谷浩平，河合浩志，“並列有限要素法に基づく full-wave 電磁界解析ソフトウエアの HPCI における性能評価”，日本機械学会第 26 回計算力学講演会，佐賀，2013.11.02-04

31. A M M Mukaddes, Masao Ogino and Ryuji Shioya，“A new implementation of sparse matrix-vector multiplication in the parallel finite element”， 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013)，Singapore, 2013.12.11-14

32. I. Ishikawa, M. Ogino, A. M. M. Mukaddes and R. Shioya，“Trial Study of multi-level domain decomposition method for heat transfer analysis”， 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013)，Singapore, 2013.12.11-14

33. S. Sugimoto, M. Ogino and R. Shioya，“Implementation and acceleration of the domain decomposition method with complex data types”， 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013)，Singapore, 2013.12.11-14

34. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫，“Material Point Method（MPM）におけるエネルギー変動問題とその抑制法”，土木学会第 68 回年次学術講演概要集，pp.233-234, 2013.09

35. 広瀬孝三郎, 松原仁，“島尻粘土における乾燥き裂パターンに関する実験研究”，土木学会第 68 回年次学術講演概要集，pp.463-464, 2013.09

36. 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫，“不均質脆性固体における破壊形態の複雑性に関する数値解析的検討”，第 26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集，pp.24-25, 2013.11

37. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫，“Material Point Method(MPM)を用いた斜面崩壊発生時の土質強度の検討”，第 26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集，pp.18-23, 2013.11

38. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, “Material Point Method(MPM)を用いた斜面崩壊発生時の土質強度の検討”, 第 26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.18-23, 2013.11

39. 広瀬孝三郎, 松原仁, “Mud crack の形成メカニズムに関する実験的検討”, 第 26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.14-17, 2013.11

40. Hitoshi Matsubara, “Numerical Study on the Forming Mechanism of Honeycomb-weathering of Rock”, Proceedings of 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, December 2013.

41. Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, “High-accuracy Material Point Method based on the Moving Least Squares Method”, Proceedings of 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, December 2013.

9. 受賞

9.1. 日本機械学会計算力学部門賞第 91 期業績賞

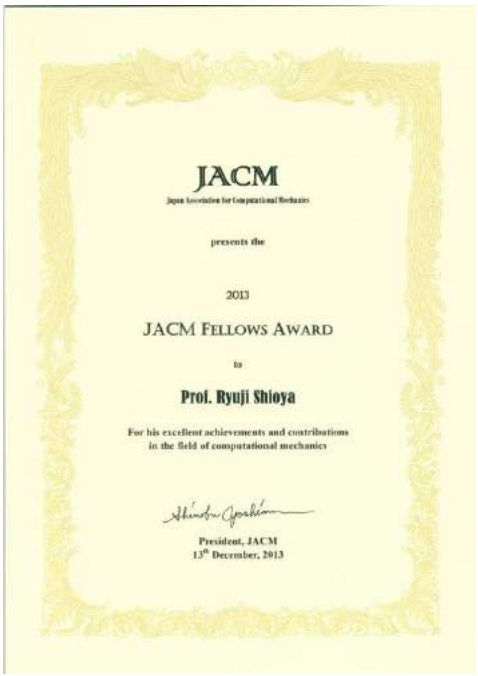
2013 年 11 月 2 日（土）～4 日（月），佐賀大学にて日本機械学会第 26 回計算力学講演会が開催され，研究員の塩谷隆二教授が，日本機械学会計算力学部門賞第 91 期の業績賞を受賞した．

授賞式の様子

受賞理由は，超並列計算機を活用した計算力学研究の基盤となる理論を提唱した業績と，計算力学技術者試験認定事業に対する部門への貢献である．

9.2. 2013 JACM Fellows Award(日本計算力学連合フェロー賞)

2013 年 12 月 3 日(金)，シンガポールにて JACM(日本計算力学連合)総会が開催され，研究員の塩谷隆二教授が 2013 JACM Fellows Award(日本計算力学連合フェロー賞)を受賞した.


JACM

Japan Association for Computational Mechanics

presents the

2013

JACM FELLOWS AWARD

to

Prof. Ryuji Shioya

For his excellent achievements and contributions in the field of computational mechanics

President, JACM
13th December, 2013

賞状

受賞理由は計算力学分野で顕著な業績を上げ，JACM へのサポート，および IACM(International Association for Computational Mechanics)関連国際学会への貢献である.

10. 結び

本報は，2013 年度の活動を取りまとめたものである．なお，2014 年 3 月に予定されているセンター評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2013 年 12 月 31 日とした．したがって，それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい．

社会が抱える問題，あるいは産業界が抱える問題を発掘しながらソリューションを見出していくことをセンターに関係する全ての研究者が使命として共有しながら今後の活動や研究開発を進めていきたい．

東洋大学

東洋大学計算力学研究センター

2014 年度　年報

CCMR
Center for Computational Mechanics Research
Toyo University

2015 年 3 月

東洋大学計算力学研究センター

2014 年度年報 目次

1. まえがき 1
2. センターの概要 2
2.1. センター設置について 2
2.2. 組織 3
2.3. 構成メンバー 4
3. 研究成果 5
3.1. 解析手法開発グループ 5
3.1.1. 並列流体-構造連成解析手法の開発 6
3.1.2. 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発 13
3.1.3. 固体の表面性状を考慮したスプラッシュのシミュレーション 17
3.1.4. 損傷理論を導入したボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張解析の基礎研究 21
3.1.5. Mudcrack の3次元数値シミュレーション 25
3.2. 大規模並列化グループ 28
3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発 29
3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築 34
3.3. 新規実験計測グループ 37
3.3.1. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験 37
3.3.2. 画像処理を用いた野球ボールに働く空気力計測 45
3.3.3. 運動する物体内部における流体挙動に関する実験的研究 50
3.4. 精度・妥当性検証グループ 57
3.4.1. データ同化技術を用いた効率的精度解析技術の開発 58
3.4.2. 工学における最適化プロセスの完全自動化 62
3.4.3. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発 64
3.5. 可視化検証グループ 66
3.5.1. 3 次元画像による定量的・定性的検証 67
3.6. 横断的研究会 72
3.6.1. 連成標準問題検討会 72

3.6.2. 計算力学と(材料)データベースの会 72
3.6.3. 楽器音響と流体構造連成研究会 72
4. 共同研究 74
4.1. JST CREST プロジェクト 74
4.1.1. 研究実施体制 74
4.1.2. 研究実施内容 75
4.2. (株)日立製作所機械研究所との連携 75
4.3. 独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携 75
4.4. 東京理科大学との連携 75
4.5. 本田技術研究所との連携 76
5. 成果の広報および普及活動 77
5.1. 第 3 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウム 77
5.1.1. プログラム 77
5.2. 第 10 回機械工学国際会議 78
5.3. 第 5 回国際スーパーコンピューティングワークショップ 79
5.3.1. 実行委員会 79
5.3.2. プログラム 79
5.4. 東京都北区主催「ものづくり夜間大学校」 82
6. 学術活動 83
6.1. 論文投稿 83
6.2. 総説・解説・エッセイ 84
6.3. 書籍 84
6.4. 学会発表 85
6.3. 招待講演 89
6.4. 受賞 90
7. 研究グループ紹介 91
8. 結び 92

1. まえがき

本年度はセンターが活動を開始してからちょうど 10 年目にあたる. 過去 9 年間のうち, 5 年間は私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」として活動を行ってきていたが, その後, 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定された. この報告書は, その3年目の活動を中心にとりまとめたものであり, いわば第 2 期の中間報告である.

今回の, 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」としている. これは, それまでの流体解析や構造解析といった個別の物理の解析から一歩進めてより複雑な, また現実的な問題に計算力学の手法を適用しようとすることと, 単に研究として行うのでなく, 精度や妥当性を十分に検証し, あるいはその検証方法を確立することで, 実用に耐えうるものとすることを目指してのことである. 本年度は, その 3 年目であり, 各メンバー, グループの研究もようやく結果が出始めたところかと思う. それぞれの進展については3章に詳しく述べられている. また, 従来, 韓国成均館大学, 台湾龍華科技大学と開いてきた学生ワークショップは拡大され, この報告が出る 3 月には中国および国内の他大学も含めた形で開催される運びとなっている. さらに, 戦略的研究推進事業 CREST やその他, センターに関連する研究についてもふれている.

本年度は文部科学省に中間報告を出しており, これまでの成果をまとめ, 残りの期間で何ができるか, 何をすべきかもう一度見直す時期である. その中で, ある程度の成果は本報に含まれているが, まだまだ, 物足りなく感じられる向きもあろうかと思う. 今後ともさらなるご批判とご指導を賜れば幸いである.

2015 年 3 月

東洋大学計算力学研究センター長
田村善昭

2.　センターの概要

本センターは，わが国の私立大学学術フロンティア拠点のひとつとして文部科学省から設置が認められ，平成17年度に活動を開始した．その後，平成23年度に科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST の選定，続いて平成 24 年度に文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け，今日に至っている．

本センターに参加する研究員は，東洋大学の複数学部・大学院の教員（工学研究科，国際地域学部，総合情報学部，理工学部），博士研究員，大学院生などを中核とし，また客員研究員として関連分野の内外の研究者から構成されている．

各自の専門分野は，構造解析，流体解析，破壊解析，逆問題・最適化，大規模並列計算，可視化など，計算力学分野で必要とされるほぼ全ての分野に跨っており，この分野における専門家集団である．平成23年度に採択を受けたCRESTでは「京」コンピュータ利用のための超大規模解析技術に関して，また平成 24 年度からは，私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け，連成解析や計算力学の精度検証・妥当性検証にも積極的に取り組んでいる．

さらに，東洋大学 125 周年を契機とした国際化に合わせて海外の関連する大学と積極的に交流を進め，若手の人材育成にも寄与したいと考えている．

2.1.　センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである．

- 平成 17 年 6 月文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」に研究題目「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」で採択され，計算力学研究センター発足
- 平成 17 年 12 月センター開所式開催のあと，白山第 2 キャンパス内計算力学研究センター棟に入居し本格活動開始
- 平成 22 年 3 月「学術フロンティア推進事業」終了
- 平成 23 年 8 月科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で採択される
- 平成24年4月文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に研究題目「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」で採択される

2.2. 組織

計算力学研究センターの組織は以下の通りである.

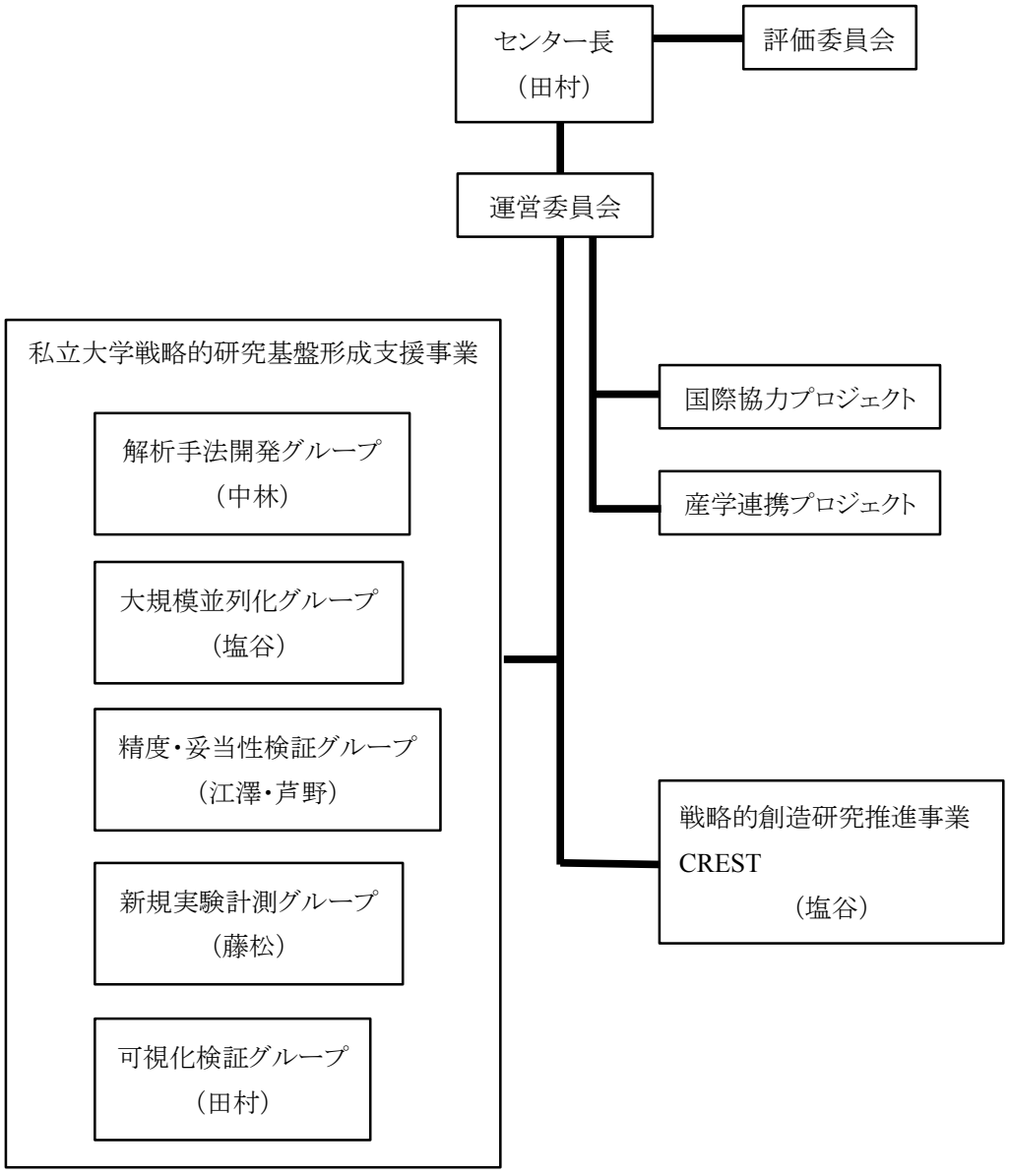


図 2.1. センターの組織

2.3.　構成メンバー

計算力学研究センターは以下のメンバーで構成されている.

センター長

田村　善昭（東洋大学総合情報学部総合情報学科教授）

研究員

芦野　俊宏（東洋大学国際地域学部国際地域学科教授）
江澤　良孝（東洋大学総合情報学部総合情報学科教授）
塩谷　隆二（東洋大学総合情報学部総合情報学科教授）
中林　靖（東洋大学総合情報学部総合情報学科准教授）
藤松　信義（東洋大学理工学部機械工学科准教授）

研究助手

長岡　慎介（東洋大学計算力学研究センター）
増田　正人（東洋大学計算力学研究センター）
谷村　景貴（東洋大学計算力学研究センター）

学生

島村　雅彦（東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程）
高清水　聖（東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程）
長尾　智（東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士前期課程）

客員研究員

矢川　元基（前東洋大学計算力学研究センター長，東京大学名誉教授，東洋大学名誉教授）
金山　寛（日本女子大学特任教授，九州大学名誉教授）
富山　潤（琉球大学工学部准教授）
古川　知成（バージニア工科大学工学部機械工学科教授）
松原　仁（琉球大学工学部助教）
横山　真男（明星大学情報学部情報学科准教授）

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

解析手法開発グループでは，計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち，「高精度流体構造連成解析手法の開発」の部分に焦点を当てた活動を行っている．

流体-構造連成解析を高精度かつ安定的に実施するためには，まず，流体解析手法・構造解析手法そのものの精度や信頼性を高めた上で，それらを連成させるアルゴリズムについても十分に検討する必要がある．これまでのところ，計算力学研究センターでは流体解析に SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用い，構造解析に EFMM を用いる手法を中心に連成解析を行ってきたが，このアプローチ以外にも例えば粒子法を用いた手法など様々な戦略が考えられる．

上記の事項を踏まえて，今年度は，以下の 5 項目について報告を行う．

(1) 並列流体-構造連成解析手法の開発
(2) 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発
(3) 固体の表面性状を考慮したスプラッシュのシミュレーション
(4) 損傷理論を導入したボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張解析の基礎研究
(5) Mudcrack の３次元数値シミュレーション

3.1.1.　並列流体-構造連成解析手法の開発

(1)　目標・計画

本研究では，流体-構造連成現象を解く為の新しい解析手法を開発する事を目的としている．本研究で提案する Enriched Free Mesh Method (EFMM)[1]を用いた構造解析手法と，SUPG/PSPG 安定化有限要素法[2][3][4][5]を用いた流体解析手法を組み合わせた，新しい流体-構造連成解析手法[6]は，各解析領域場に使用するメッシュ分割パターンが共に線形要素であることから，流体-構造境界面における整合性を完全に得ることが出来，その結果，流体-構造連成問題を解く際に，非常に重要となる，各解析場の境界面の連成効果を考慮する際に生じる問題を解消する事に成功している．さらに，前述の通り，各解析場に用いられるメッシュ分割パターンは，線形要素のみであるにも関わらず，その解析精度は，従来の線形要素を用いた解析結果と比較して向上すると云う結果を得られている．この特長から，本提案手法は，大規模問題を解く際に，問題になってくる計算機リソースと，計算時間の大幅な抑制を可能にする事を意味している．一方で，本手法は，近年の大規模解析の際に，必要不可欠となる並列処理を施す際に，大きな問題を有する手法であることが明らかとなった．この問題は，EFMM の解析アルゴリズムに起因するものであった．昨年度，本提案手法による大規模並列解析を行うために，EFMM の並列解析手法の提案と実装を行い，その並列化効率の検証を併せて行い，概ね良好な結果を得ることが出来た．

平成 26 年度は，昨年度確立をした EFMM の並列化手法を，我々が提案している流体-構造連成解析手法へ導入し応用研究へ着手した．その課程に於いて，昨年度提案した EFMM の並列解析手法のアルゴリズムに誤りがあることが明らかとなり，この点を修正した，EFMM の並列解析手法を確立した．

併せて，新規実験・計測グループとの共同研究として，新規実験・計測グループにより提案された流体-構造連成現象に関する実験結果と数値解析との比較を行った．

次年度以降は，本提案手法の定量的評価と，実験により得られた実現象との比較・検証を基に，本提案手法について纏める方針である．

(2)　意義・国際社会との比較

現在，国内外を問わずに，計算力学の分野において，流体-構造連成現象を対象とした研究は，非常に注目されており，積極的に行われている．この現象を解くために，多くの研究者が様々なアプローチを行い，沢山の新しい解析手法が提案され，多くの成果が発表されている．その一方で，現時点までに，決定的な解析手法は確立されていない．

提案されている多くのアプローチは，流体解析手法として，粒子法を用いているものが，非常に多い．メッシュ分割を必要としない粒子法を用いることで，解析場が大きく変動するような問題の解析も容易になることから，流体解析場において多くのアドバンテージが得られることが，その一因であると考えられる．しかし，我々の提案している手法は，流体解析場，構造解析場共に格子法を用いている．格子法をそれぞれの解析場に用いる事で，粒子法を用いた流体解析と比較して，解析領域の大きな変化に対しては，対応し難い面もあるが，解析精度の面では，粒子法を用いたアプ

ローチと比較して大きなアドバンテージを有していると考えられる.

本手法の確立により, 数値シミュレーションにおいて, 非常に重要な解析精度を損なう事無く, 多くの流体-構造連成現象を解く事が可能になると考えられる. このことから, 本研究は, 格子法を用いた流体-構造連成解析手法の確立と云う観点からも, 非常に意義のある研究であると言える.

(3) 研究内容

(a) 並列 EFMM

我々が提案した EFMM の並列化のアプローチは, 下記の通りである.

初めに, 解析領域(図 1[i])を, 従来の要素ベースの領域分割法を用いて, 複数の局所領域に分割する(図 1[ii]).

次に, 分割された領域内にある節点が, それぞれ中心節点となる局所要素クラスターを生成する. この時, 対象となる衛星節点は, 分割された局所領域内の節点だけでなく, 領域分割前の解析領域(図 1[i])の全ての節点が対象となる. この時, 自身の領域内の節点のみを対象として, 局所要素クラスターを生成すると, 幾つかの局所要素クラスターは, 不完全な形状となる為である.

具体的には, 領域分割面上の節点は, 正確な局所要素クラスターを作る事が出来ない. 例えば, 図 1[ii]の局所領域[a]内の節点 8 は, 本来, 図 2 中の左側に記すような局所要素クラスターが生成されるべきであるが, 分割された局所領域内のみで, 局所要素クラスターを生成すると, 図 2 内, 右側に記したような, 衛星節点の一部が欠落した不完全な局所要素クラスターが生成されてしまう. つまり領域分割された領域内の節点が, 局所要素クラスターを生成する際に, 解析領域内全ての節点がその対象となるのは, EFMM を用いた解析を行う際, 特に重要となる解析領域内全ての節点が, 正確な局所要素クラスターを生成するという点を遵守するためである.

なお, この工程を行うと, 複数の局所領域に分割された各領域の一部は, 幾つかの局所領域間で重複する事になるが, ここまで得られた領域(図 1[iii])が, EFMM による並列解析を行う際の, 各局所領域となる. 但し, 計算過程における局所剛性マトリックスの生成に関しては, 最初に要素分割を行った際に, 自身の領域内に含まれていた節点を中心節点に関する部分のみである, と云う点に, 注意が必要である. 具体的には, 図 1[iii]の局所領域 1 内では, 節点番号 1,2,3,6,7,8,11,12,13 を中心節点とした局所要素剛性マトリックスを計算する事になり, 節点 4,9,14,16,17,18,19 を中心節点とした局所要素剛性マトリックスに関しては, 不要となる.

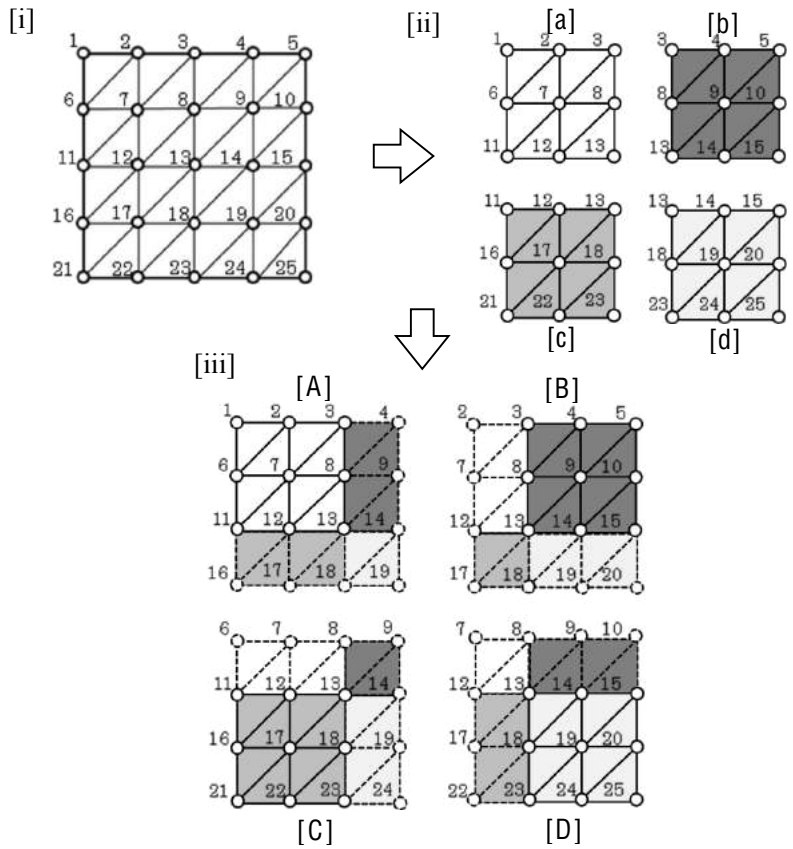


Fig. 1 The flowchart of parallelization method for EFMM

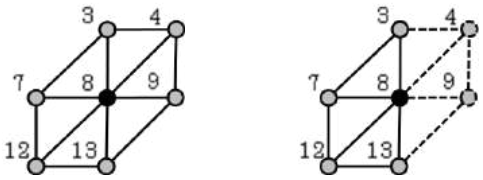


Fig. 2 Example of created local elements cluster (L : correct , R : incorrect)

さて，これら分割された局所領域間の通信方法であるが，前述の通り，並列 EFMM では，要素ベースの領域分割を行っているものの，局所領域間での重複領域もあることから，通信方法は，従来の FEM の並列解析手法とは異なったアプローチが必要となる．

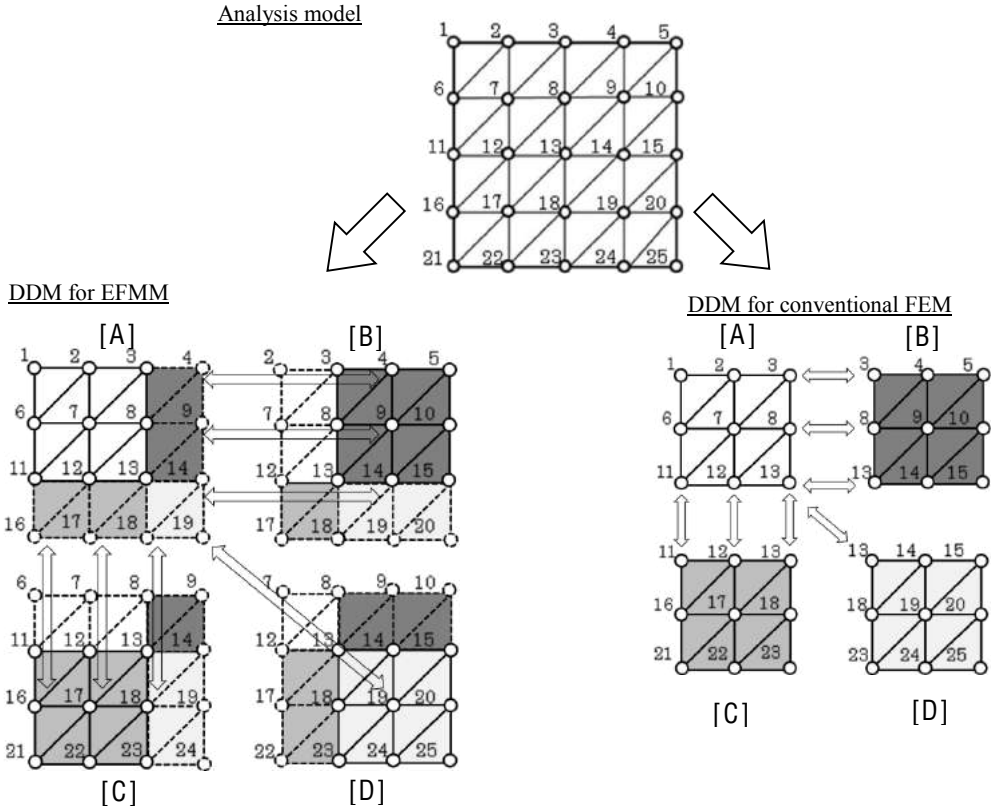


Fig. 3 The comparison of the communication cost

図3は，図1で示した領域分割手法により抽出された，局所領域を例に，本並列解析手法における通信方法を示したものである．本研究では，ソルバーに共役勾配法（Conjugate Gradient Method）を用いるが，その際に，通信に必要となるのは，分割領域[A]では，節点番号 4,9,14,16,17,18,19 となる．つまり，前述の局所領域内にありながら，中心節点として局所剛性マトリックスを計算する必要が無い節点群に関して，他の局所領域から通信によってデータを受信する必要がある．具体的に受信するデータは，上記の受信すべき節点が生成する局所剛性マトリックス内の，最初に領域分割を行った際の境界面上の節点と，正確な局所要素クラスターを生成するために，後から追加された重複節点に付随するデータとなる．

なお，重複節点群が生成する局所剛性マトリックスのデータの，境界面上の節点群に関するデータは，自身の領域内の境界面状の節点に関する局所剛性マトリックスを生成した際にも一部計算されており，この部分を通信により足し合わせると，値が重複して，本来得られるべき全体剛性マトリックスの値と誤差が生じる．このデータの重複を防ぐために，重複節点群が生成する局所剛性マトリックスのデータの内，重複節点群に関する値に関しては，自身の領域内で計算された剛性マトリックスに上書きを行い，境界面上の節点に関する剛性マトリックスに関しては足し合わせる．具体的には，図3中，領域[A]を例に取ると，領域[B]内の節点4,9,14を中心節点とする局所剛性マトリックスの節点 4,9,14 に関するデータを受信，上書きをし，3,8,13 に関するデータは受信，足し合わせを

行う. 同様に, 領域[C]内の節点 16,17,18 を中心節点とする, 局所剛性マトリックスの節点 16,17,18 に関するデータを受信, 上書きをし, 11,12,13 に関するデータを受信, 足し合わせを行う. 最後に, 領域[D]内の節点 19 を中心節点とする局所剛性マトリックスの, 節点 19 に関するデータを受信, 上書きをし, 節点 13 に関するデータを受信, 足し合わせを行う. すると, 局所領域[A]内の, 剛性マトリックスを正確に作成することが出来る.

このように, データ通信を行う節点毎に, 境界面上の節点であるか, 重複節点であるかによって処理が異なる事に注意が必要である.

なお, 昨年度までに提案していた並列 EFMM のアルゴリズムにおいては, 上記の, 節点毎の処理の違いを考慮していなかった為に, 解析に誤りが生じていた.

本手法により, 昨年度提案していた並列化手法と同等の並列化効率を得る事が可能となった.

(b)　数値解析例（実験との比較）

本項では, 本提案手法を用いた数値解析と, 新規実験・計測グループが行った実験との比較について述べる.

実験モデルは, 図 4 に示した通りである. 図中, 円柱が弾性体であり, この弾性体上面を固定し, 図中左側から流速を与える. 本実験では, 与える流速と円柱の物性値の関係により生じる, 円柱の挙動の変化について明らかにする事を目的としている.

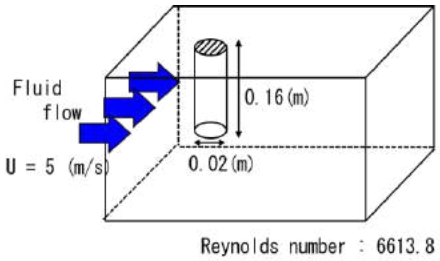


Fig. 4 The experimental model

図 5 は, 円柱のヤング率を 9MPa とした際の挙動を示しており, その際の下端最大変位は, 0.5mm であった.

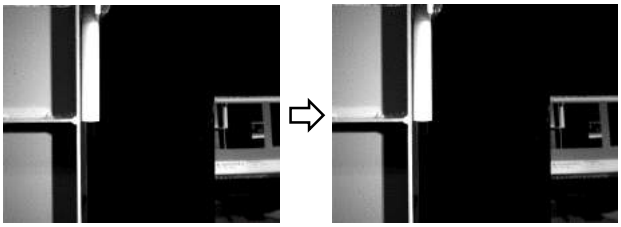


Fig. 5 Experimental result (Elastic modulus : 9MPa)

図 6 は，解析に用いたメッシュモデルである．

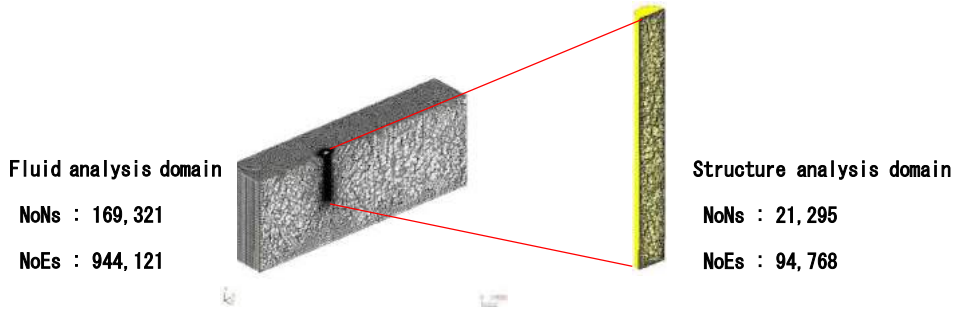


Fig. 6 Analysis model

上記の解析モデルを用いた数値解析結果では，円柱底面の最大変位量が 0.15mm であり，実験結果で得られた 0.5mm と比較して変位量が小さくなっている．

現在，解析メッシュモデルの変更や，解析手法の高精度化を取り入れ，実験結果との誤差量の減少を試みている．

(4)　平成 26 年度進捗状況

今年度は，昨年度までに提案してきた，EFMM の並列化手法における問題点を修正し，並列流体-構造連成解析手法を確立した．

本手法を用いた数値解析と実験結果の間には，大きな誤差がある為，解析メッシュモデルの変更や，解析手法の高精度化を行う必要がある．

来年度以降は，現時点で定量的な評価による健全性の証明には至っていない本手法の高精度化を行い，実験との比較から本手法の健全性の証明を行う．

参考文献

[1] Yagawa, G. and Matsubara, H., “Enriched element method and its applications to solid mechanics”, *Proc. Computational Method In Engineering and Science EPMESC X*, pp. 15-18, 2006.

[2] Tezduyar, T.E., “Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations”, *Advanced in Applied Mechanics*., 28, pp. 1-44, 1991.

[3] Tezduyar, T.E., Mittal, S., Ray, S.E. and Shih, R., Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* 95 pp.221-242, 1992.

[4] Franca, L.P., Frey, S.L. and Hughes, T.J.R., Stabilized finite element methods I. Application to the advective - diffusive model, C*omputer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95 pp.253-276, 1992.

[5] Franca, L.P. and Frey, S. L., Stabilized finite element methods II. The incompressible Navier-Stokes equations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 99 pp.209-233, 1992.

[6] S. Nagaoka, Y. Nakagabashi and G. Yagawa, Accurate fluid-structure interaction computations using elements without midside nodes. *Comput Mech.*, Vol. 48, pp. 269-276, 2011.

3.1.2. 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発

(1) 目標・計画

本研究では，流体−構造連成解析を行い，自己組織化マップ(Self-Organizing Map : SOM)[1]などの人工知能技術を用いて解析データの分類を行い，解析条件から解析結果を予測することができる技術を開発することを目的としている．分類と予測の両方を包括する mnSOM(modular network SOM)を用いて学習を行う．このときモジュールは MLP を用いる．しかし，連成問題は非線形性が非常に強く，mnSOM での予測には限界があると思われる．そこで，Deep Learning の考えを取り入れた予測技術の開発を目指す．これは Google を始め各企業や研究所でも注目されている技術で，画像認識や音声認識において，既存の技術よりも遥かに良い性能が得られることが知られている[2][3]．

本研究の予測技術を確立すると，解析の大まかな結果を得ることで，詳細な解析をするための手がかりが提示できると考える．このことにより，機器や構造物設計における全体の解析時間を短縮できると期待できる．

今年度は，簡単のため，2 次元円柱の振動解析を行い，解析条件と解析結果のデータを 48 パターン用いて mnSOM で学習し，予測と予測精度の検証を行った．mnSOM の学習は予測精度が不十分であった．そのため，Deep Leaning 技術を用いた学習に着目した．まず，Deep Leaning 技術を活用するためにコードを作成し，画像認識を行った．

平成 27 年度は，手書き文字認識の予測を CNN(Convolutional Neural Network)ではなく，AE(Auto-Encoder)や RBM(Restricted Boltzmann Machine)を用いた Deep Leaning で行い，予測精度を検証し，同様のネットワーク構造の Deep Leaning を用いた解析結果予測を行い，その予測精度を検証し，ネットワーク構成や学習パラメータをチューニングする．

平成 28 年度は，SOM と Deep Leaning を組み合わせた分類と予測を可能にする技術を開発し，研究成果をまとめる方針である．

(2) 意義・国際社会との比較

現在，解析対象の複雑化や大規模化から，計算時間がボトルネックにある．並列計算機を使うのは当然で，GPU を用いた解析方法も数多く見られる．しかしながら，計算量は膨大で，1ケース解くのに数日から数週間かかることもある．設計技術者は目的の解析結果を得るのに何度も解析を繰り返す必要がある．そこで，予めある程度の解析結果が分かれば試行回数を削減し，設計における全体の解析時間を短縮できると考えられる．ある事象を解析を行わないで解析結果を予測するという試みは，全く新しいものであり，学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており，国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考える．

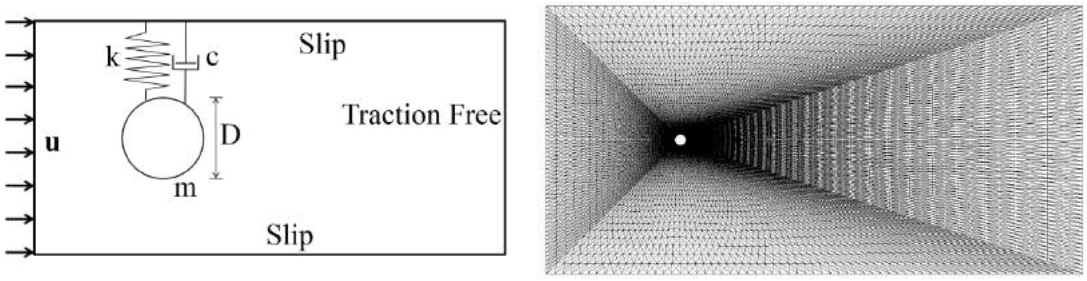
(3) 研究内容

SOM は，高次元のベクトルデータを低次元空間(マップ)に写像するものであり，高次元データの

クラスタリングを行える. また, マップを見ることでデータの特徴抽出やマイニングを行うことができる. mnSOM は SOM のマップユニット部分をモジュールに置き換えたものである. モジュールは MLP(Multi Layer Perceptron)に置き換えたものが主で, 入出力関係を保持することができる. この mnSOM を用いると, 分類後に未知の入力から想起して意図する出力を提示することが可能であり, 設計に用いることができる.

本研究での SOM に与える入力条件として, 円柱質量とバネ定数, ダンパー係数, 流速, レイノルズ数, バネの固有振動数, 円柱振幅, 円柱振動数, 最大揚力係数, ストローハル数, 平均抗力係数の 11 項目を与える.

流体- 剛体連成解析は, ADVENTURE_Fluid を用いて数値解析した. 移動境界問題を扱うために ALE 法を, 円柱の移動を計算するために速度 Verlet 法を用いた. 解析モデルを Fig.1 に示す. Table 1 に示した解析条件で計 48 通りの解析を行った.



(a) Model　　(b) Mesh

Fig.1 Model of Analysis

Table 1 Input-Output Relationship of mnSOM

Input			Output	
Items	Unit	Ways	Items	Unit
Mass of Cylinder	[kg]	0.5　1.0	Amplitude of Cylinder	[m]
Spring Constant	[kg/s]	0.5　1.0	Frequency of Cylinder	[Hz]
Dumper Coefficient	[kg/s^2]	0.0　0.01	Maximum Coefficient of Lift	[-]
Flow Velocity	[m/s]	0.5　1.0	Strouhal Number	[-]
Reynolds Number	[-]	100 500 1000	Average Coefficient of Drag	[-]
Natural Frequency	[Hz]	-		

mnSOM の学習では, 48 通りの学習データを円柱質量とバネ定数とダンパー係数(2×2×2=8)で集約して 8 グループを作成し学習させた. このときマップサイズは 10×10 とし, MLP の入力に 6, 出力に 5, 中間層を 50 とした. 学習後の予測精度を Table 2 に示す. 予測精度は誤差で表し次式で定義する.

$$Prediction\ Error = \frac{\|Learned - Analysis\|}{Analysis} \quad (1)$$

Table 2 Prediction Error of mnSOM

	Minimum error		Maximum error		Average error	
Known Data (Hidden 50)	3.7	%	84.4	%	21.0	%
Unknown Data (Hidden 50)	3.3	%	214.1	%	51.3	%
Unknown Data (Hidden 100)	4.5	%	155.6	%	53.1	%

mnSOM の予測精度は既知のときで平均 21%, 未知の場合では 51.3%と, 十分ではない. 中間層の素子の数を倍に増やしたが, 最大の誤差は現象したものの, 平均誤差は改善しなかった. これは問題の非線形性が強いためだと考えられる. そこで, 非線形性に対応するために階層を深くしたニューラルネットワークの学習法である Deep Learning を用いることを考えた.

Deep Learning の動作確認に為に手書き文字の認識を試験する. 試験データは MNIST[4]を用いる. MNIST の画像は 28×28 画素で, 6 万枚の画像データ集である. Deep Learning は Auto-Encoder を階層的に積み上げたネットワークを用いる. ネットワーク構成は入力に 784, 中間層を 516, 256, 128, 64, 32 ニューロンとし, 出力層を Logistic 関数として 10 個を出力とした. 学習に使う画像を 1000 枚として, Pre-training を 10000 セット, Fine-tuning を 5000 とし, 学習係数は Pre-training, Fine-tuning ともに 0.1 として学習を行った. 検証には 20 枚の未学習データを与えた. 画像の一例を Fig.2 に示す. 学習結果を表 3 に示す. 結果より学習はうまく行えていないことが分かる. まだ内部にバグが混在している可能性が高い.

Fig.2 Figures of Handwritten character

(4) 平成 26 年度進捗状況

mnSOM を用いて円柱振動の予測を行った. 学習結果から非線形性が強いため, mnSOM だけでは予測性能を向上させるのは困難だと思われる. そこで, Deep Learning 技術に着目し, 予測精度を向上させることを考えた. 階層型 Auto-Encoder を構築し, Pre-training, Fine-tuning のコードを作成し, 文字認識試験を行った. しかし, まだコードにバグが残っていると思われるため, バグの除去と学習パラメータ, ネットワーク構造の調節を行っている.

今後は Deep Learning による識字率の向上，振動現象の予測に応用することを考える．

Table 3 Result of Character recognition

		Output Factors									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Input	7	0.03316	0.00472	0.00014	0.02211	0.17155	0.00517	0.00278	0.71413	0.00872	0.03751
	2	0.55421	0.00318	0.01372	0.01831	0.00737	0.00057	0.00014	0.39777	0.00356	0.00117
	1	0.16919	0.00044	0.00015	0.00935	0.00794	0.00013	0.00003	0.80467	0.00169	0.0064
	0	0.26226	0.00079	0.00031	0.02818	0.00358	0.0287	0.00094	0.66061	0.00708	0.00755
	4	0.50348	0.00303	0.00112	0.00306	0.0307	0.00121	0.0287	0.02189	0.01218	0.39463
	1	0.26795	0.0004	0.00013	0.00712	0.01918	0.00016	0.00006	0.68628	0.00276	0.01596
	4	0.07135	0.01364	0.00001	0.02078	0.00149	0.00912	0.00249	0.8643	0.01007	0.00675
	9	0.15664	0.00108	0.00011	0.00115	0.02759	0.00058	0.00297	0.67904	0.12504	0.00581
	5	0.38801	0.01473	0.00252	0.05407	0.06469	0.02302	0.00106	0.08305	0.07776	0.2911
	9	0.0035	0.0065	0.00001	0.00011	0.00011	0.0002	0.00001	0.98951	0.00002	0.00003
	0	0.35197	0.0329	0.00266	0.00917	0.07723	0.00685	0.02366	0.48356	0.00791	0.00409
	6	0.47125	0.11341	0.00046	0.00366	0.01642	0.0131	0.00268	0.36551	0.00111	0.0124
	9	0.1659	0.00747	0.00009	0.00447	0.42315	0.00037	0.04139	0.27618	0.07767	0.0033
	0	0.24693	0.01942	0.00109	0.05123	0.01304	0.0842	0.0117	0.53873	0.00513	0.02853
	1	0.09771	0.00022	0.03546	0.44935	0.00001	0.00002	0.00226	0.37547	0.03933	0.00017
	5	0.07339	0.00972	0.00339	0.01589	0.02465	0.03775	0.00083	0.81614	0.01778	0.00044
	9	0.0407	0.00076	0.00021	0.02306	0.63693	0.00024	0.02454	0.01933	0.16652	0.08769
	7	0.00952	0.0008	0.00053	0.02207	0.71052	0.00116	0.00288	0.23319	0.01519	0.00413
	3	0.02835	0.02553	0.00003	0.00403	0.0003	0.0142	0.00865	0.9082	0.00118	0.00954
	4	0.04753	0.00041	0.00003	0.0001	0.00009	0.00023	0.00054	0.95018	0.00084	0.00005

参考文献

[1] T.Kohonen, ”Self-Organizing Maps”, pringer-Verlag, 1995.

[2] Quoc V. Le, Marc’Aurelio Ranzato, Rajat Monga, Matthieu Devin, Kai Chen, Greg S. Corrado, Jeff Dean and Andrew Y. Ng, “Building High-level Features Using Large Scale Unsupervised Learning”, Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning, 2012.

[3] A.Krizhevsky, I.Sutskever, G.E.,Hinton, “ImageNet Classifi- cation with Deep Convolutional Neural Networks”

[4] Yann LeCun, “The MNIST database of handwritten digits”, http://yann.lecun.com/exdb/mnist/ (2015/1/12 現在)

3.1.3. 固体の表面性状を考慮したスプラッシュのシミュレーション

スプラッシュに関する最も古い研究は，1882 年の Worthington[1]が行ったスケッチによるスプラッシュの形状の実験観察であるが，その中で彼は落下する球体が水面に突入する際に発生するスプラッシュの形状が球体表面の粗さや濡れ性に依存することを示した．物体の材質の違いの例として Fig.1 に示すようにハイドロゲルとアクリル樹脂によって，観察されるスプラッシュの形状に差が生じることが実験により明らかになっている[2].

しかし，これまでの数値シミュレーションにおいては，ほとんどが物体と液体の境界は滑りなし条件で設定されてきた．しかし，材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況が，上述の観察のように落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ（飛沫）にみられることが分かっていることから，物体の表面性状の違いを数値シミュレーションにも導入する必要がある．つまり，同じ運動条件でも表面性状の違いによって周囲の流れ場は異なる現象になるため，この例のように表面に滑りがあるような物体と流れの相互作用をシミュレーションで計算するには，物体と流体の境界条件に表面性状の効果を記述するモデルを導入する必要がある．

スプラッシュのような自由表面を伴う流れ場の解析に有効な計算法として，粒子法の一つである MPS 法（Moving Particle Semi-implicit 法[3], Fig.2）が近年盛んに利用されているが，既存の方法のままでは材質による差は表現できていない．本研究では，表面性状の考慮が必要なシミュレーションにおける物体壁面の取り扱いについて言及し，壁面の滑りや静電気などの特性を考慮して計算した粒子法シミュレーションを開発し，実験との比較によって評価・考察しその有効性を示すものである．

非圧縮粘性流体の流れ場を計算するにあたって，Navier-Stokes の支配方程式は次式の通りである．

$$\frac{Du}{Dt} = F - \frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2 u \qquad (1)$$

ここで，uは流れ場の速度ベクトルで，ρは流体密度，Pは圧力，νは動粘性係数，そして Fは外力項である．

本研究では，物体の表面性状を記述するモデルとして，Fig.1 の実験の違いを再現するために，両生類や爬虫類にみられる表皮のぬめりの成分であるハイドロゲルによる滑りと，アクリル樹脂のもつ静電気力を Navier-Stokes 式に適用する．

一つ目のハイドロゲルの滑りを導入には，粘性項の計算における重み関数 κ に実験より得られた滑り率を乗ずることとした（式 2）．つまり，ハイドロゲルの表面を構成するパーティクルから半径 r_e にある水粒子との粘性項計算についてのみ α を掛けた重み関数 κ_H で計算することで，壁面応力を α 分だけ小さくしハイドロゲル壁面近傍の滑りを表現した．また一方，アクリル樹脂のもつ静電気的な引力にはクーロン力を模擬したモデルを導入した（式 3）．

$$\nabla^2 \vec{u} = \frac{2d}{\lambda n^0}\sum_{i\neq j}\left[(\vec{u}_j - \vec{u}_i)\kappa_H(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)\right],\ \kappa_H(r) = \alpha\kappa(r) \qquad (2)$$

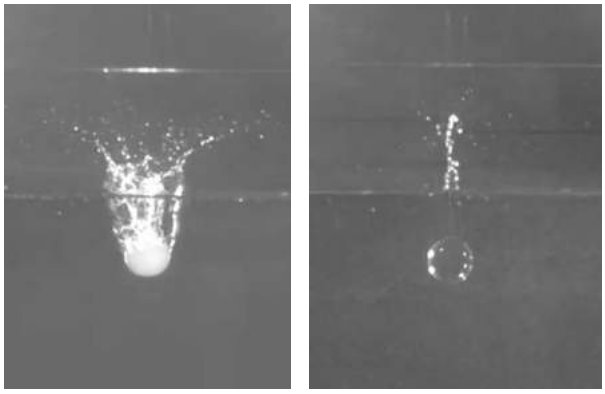
$$F = C_{E,ij}\frac{d\varphi_{ij}(r)}{dr},\quad \varphi_{ij}(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_i q_j}{r_{ij}} \tag{3}$$

ここで α は滑りの程度を表す滑り率で，CE も引力の程度を調整する値でありそれぞれ材質や流体によって変化する値で実験との比較によって決定される．

さらに，本研究では，クラウン状スプラッシュの先端形状 (finger / spike)の詳細なシミュレーションを行うために，億単位の粒子数による高精度な 3D の大規模計算を行っている．その理由としては，クラウンの先端にみられる spike/finger は各水粒子が飛散する際にそれらが集まって液滴が形成されると考えられるからで，そのシミュレーションのためにはより小さい粒子径で計算を行う必要がある．また，そういった水分子同士の結合力の表現には，表面張力を計算モデルに導入する必要もある．

Fig.5 はその表面張力モデル（ポテンシャルモデル[4]）を導入した粒子法（陽解法）による大規模並列計算によるミルククラウンの計算結果である．水粒子は互いに引き合い spike 状の先端がスプラッシュに見られるようになってはいるものの，クラウンの形状が網状になってしまっているのでこの点は今後の検討が必要である．

以上の研究結果については文献[5,6,7]に詳細を記している．文献[5]は表面性状のうち固体の滑りについてであり，文献[6]は電気的な引力について，文献[7]はこれらの実験とシミュレーションについて概要を解説したものである．また計算手法については，主要な計算力学と可視化情報に関する国際学会で発表している（文献[8]および[9]）．



(A) Hydrogel (Agar)　　(B) Acrylic resin

Fig.1　Difference of water splash by a sphere made of hydro-gel and a sphere made of acrylic resin.　The picture at left is the splash of an agar sphere (Radius=10mm, S = 100), the picture at right is a splash of acrylic resin (Radius=10mm). The velocity impacting water surface in both photos was the same, but each splash's form was different.

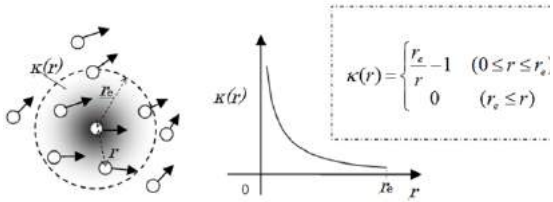
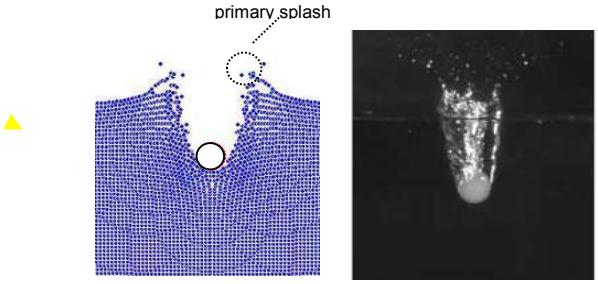
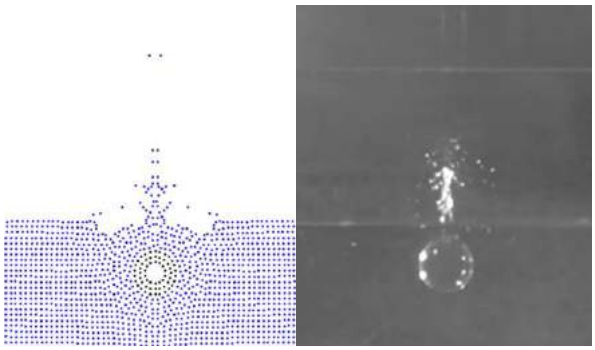


Fig.2　Schema of MPS method and weight function κ.　The r is distance between particles.　The range where the effect of weight function acts is r_e.



t = 0.02 sec

Fig.3 Simulation result with slip effect of crown-type splash by hydro-gel sphere.



t = 0.02 sec

Fig.4 Simulation result with attractive force effect of column-type splash by acrylic resin sphere.

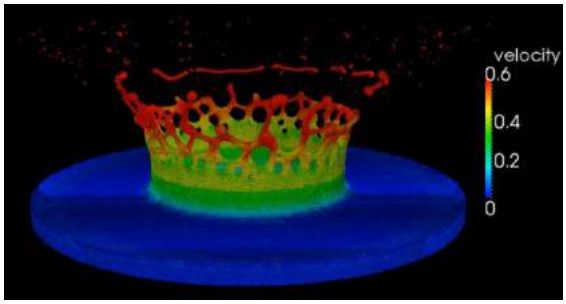


Fig.5 Simulation result of milk crown calculated by FX10. The number of particles is about 200 million.

参考文献

[1] Worthington AM (1882) On Impact with a Liquid Surface. Proceedings of the Royal Society of London 34:217-230.

[2] 横山真男, 菊地 謙次, 窪田 佳寛, 望月修, 物体壁面の表面性状を考慮した流れのシミュレーション, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.32 (2013) pp.319-326

[3] 越塚誠一, 粒子法 (2005), pp.10-29, 日本計算工学会.

[4] 近藤雅裕, 越塚誠一, 滝本正人, MPS 法における粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力, Transactions of JSCES (2007)

[5] Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences Vol.1:1 (2014) pp.1-14

[6] Yokoyama, M., Murotani, K., Yagawa, G., and Mochizuki, O,. Some Considerations on Surface Condition of Solid in Computational Fluid-Structure Interaction. In Numerical Simulations of Coupled Problems in Engineering (2014) pp. 171-186, Springer International Publishing.

[7] Yokoyama M., Mochizuki O., Yagawa G., Surface Condition of Solid in Splash Formation. IACM expressions No.34 (2014) pp.2-5.

[8] Masao Yokoyama, Kohei Murotani, Genki Yagawa and Osamu Mochizuki, Fluid-Structure Interaction Analysis with Slippery Mucus Skin, 11th World Congress on Computational Mechanics, Barcelona, Spain, 2014.

[9] M. Yokoyama, K. Murotani, K. Kikuchi, G. Yagawa, O. Mochizuki, How deal with slippery surface between fluid and structure in particle method?, 16th International Symposium on Flow Visualization, Okinawa, Japan, 2014.

3.1.4. 損傷理論を導入したボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張解析の基礎研究

(1) 目標・計画

社会基盤を支えるコンクリート構造物の劣化原因のひとつにアルカリシリカ反応（以下，ASR）がある．ASR は，コンクリート中のある種の反応性骨材(鉱物)とアルカリ性細孔溶液との化学反応により，ゲルを生じ，そのゲルが吸水することで，膨張圧が生じる現象をいう．ゲルの吸水膨張に伴う膨張圧により，コンクリートに有害なひび割れを生じるケースや，鉄筋破断が生じケースがあり，ASR 劣化は，コンクリートの耐久性，耐荷性の低下につながることから，本研究では，ASR の膨張挙動を精度よく予測するための数値解析手法を構築することを目標とする．

ASR の膨張挙動は，骨材寸法や形状に依存することが考えられるため，それらの膨張挙動を解析するために，本研究では，コンクリート中の骨材が考慮可能な損傷理論を導入したボクセル有限要素法を用いた．

今年度の計画では，1)粗骨材の寸法・形状をモデル化したボクセルデータ（以下，コンクリートモデル）の作成，2)コンクリートモデルを入力データとし，損傷力学モデルの概念を導入したボクセル有限要素法（以下，DM-VFEM: Voxel FEM incorporated with the Damage Mechanics）を用いた数値解析の基礎的な検討を行う．

(2) 意義・国際社会との比較

世界的にコンクリート材料は社会基盤を構成する多くの構造物に使用されており，コンクリート構造物の合理的でかつ効率的な維持管理を行うためには，コンクリート構造物の劣化現象を正しく理解し，精度良く再現する数値解析手法の開発が必要である．本研究の対象は，コンクリートの劣化現象の一つであるアルカリシリカ反応（ASR）の膨張予測である．世界的にも ASR の劣化現象を対象に数値解析的な予測手法の研究が行われているが，未だ決定な手法は構築されていない．したがって，本研究で対象としている ASR の劣化予測手法に対する数値解析的な取り組みは非常に意義のあることである．

(3) 研究内容

(3)-1 コンクリートモデル

ここでは，コンクリート中の粗骨材を考慮したコンクリートモデルの作成方法の概念を示す．

コンクリートモデルの作成は，まずはじめに，粗骨材の形状を画像として取り込み，画像から粗骨材の形状を考慮したポリゴンデータを作成する．つぎに，作成した粗骨材のポリゴンデータからボクセル要素で分割した粗骨材ボクセルモデルを作成し，これをコンクリートモデル内に配置し，2 層系のコンクリートモデルを作成することができる． 図-1 にその概念図を示す．

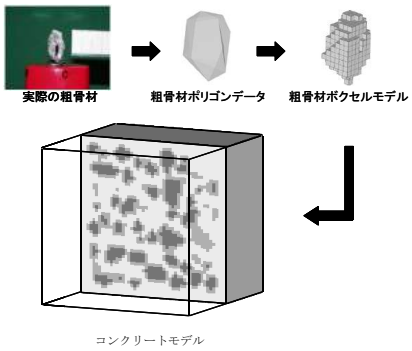


図-1　コンクリートモデルの作成方法概念図

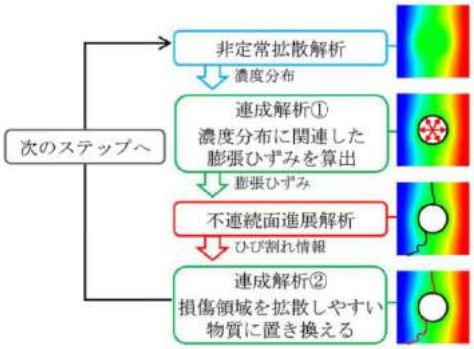


図-2　連成解析フローチャート

(3)-2　連成解析手法

本解析は，ボクセル FEM をベースとし，非定常拡散問題と非線形ひび割れ進展問題の両者を連成して行う．ひび割れは，損傷に応じてボクセル要素の剛性を現象させる損傷モデルを導入することで表現し，同時に得られる損傷パラメータを用いて拡散問題における物性値も段階的に変化さ，拡散問題と固体損傷の連成解析手法である．

図-2 に解析フローチャートを示す．連成解析では，最初に非定常拡散問題を解き拡散物質（アルカリイオン）の空間分布を予測する．そして，イオン濃度の空間分布から粗骨材の膨張力を決定する．この際，膨張力によって不連続面と判定される要素は，高い拡散係数に置換し，再び拡散問題を解く．これを繰り返すことで，浸透・拡散に伴う不連続面進展解析を実施する．

(3)-3　数値解析例

図-3 に解析に用いた 40×40×40mm のモデルを示す．1 ボクセル $1mm^3$ であり，粗骨材量を 10%とした．表-1 に各種係数を示す．アルカリ量に応じた膨張ひずみを粗骨材に与え，ASR の膨張を表現した．境界条件は yz 面以外の面に対して面外方向の変位を拘束し，両 yz 面からアルカリを拡散浸透させている．

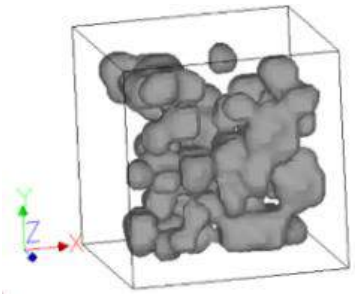
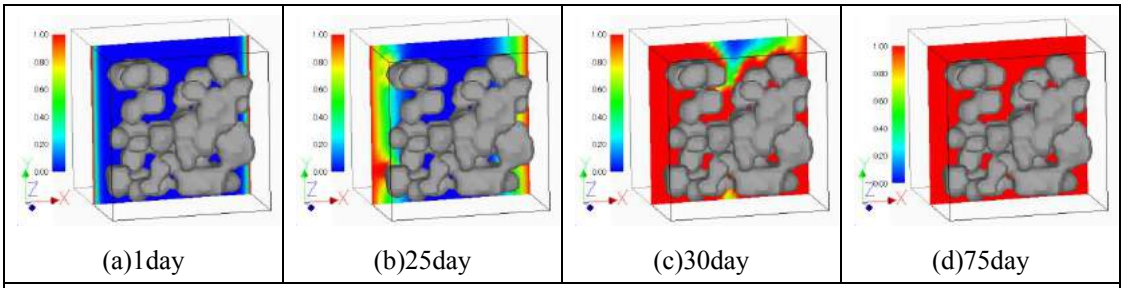


図-3　解析モデル(40×40×40mm)

表－1　各種係数

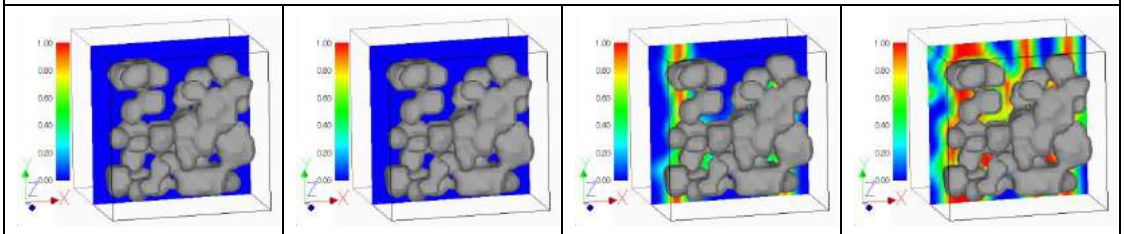
	モルタル	粗骨材
拡散係数	$1.0\times10^{-8}cm^2/s$	$1.0\times10^{-12}cm^2/s$
弾性係数	20GPa	60GPa
引張強度	4.0MPa	破壊しない

次に解析結果を示す. 図-4, 5 はそれぞれ中央断面の 1 日, 25 日, 30 日, 75 日のアルカリ浸透解析およびひび割れ進展解析の結果である. これよりアルカリの浸透とともに内部のひび割れの進展も確認できる.



(a)1day (b)25day (c)30day (d)75day

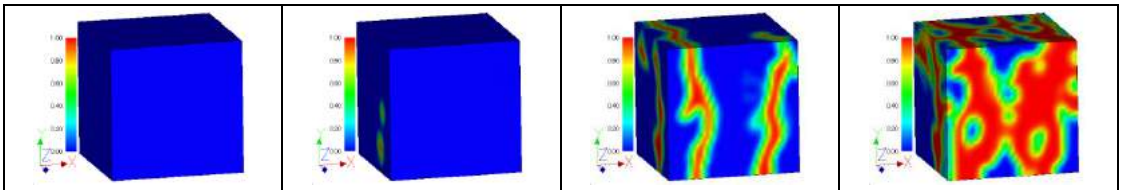
図-4 アルカリ浸透解析



(a)1day (b)25day (c)30day (d)75day

図-5 ひび割れ解析(損傷係数表示)

図-6 には表面ひび割れの状況を示す. 反応した骨材の膨張に伴い, 無拘束の X 方向に膨張が生じ, 30 日で Y 軸に沿ったひび割れが入る. そこからひび割れが進展し, 亀甲状のひび割れが確認できる. しかし, 今回の解析ではアルカリの消費を考えておらず, 無限に膨張し, ASR の収束が考慮されていない. 化学反応モデルの高度化については, 今後の課題である.



(a)1day (b)25day (c)30day (d)75day

図-6 表面ひび割れ(損傷変数表示)

(4) 平成 26 年度進捗状況

(3)に示した通り, ASR 膨張予測のための数値解析手法の適用性が示された. 今後は, 大規模

な解析が予想されるため，並列計算(MPI+OpenMP ハイブリッド)を用いた高速化および解析パラメータを求めるための，実験をあわせて行う予定である．

なお，本研究は九州大学工学部地球環境工学科　浅井光輝准教授との共同研究である．

3.1.5. Mudcrackの3次元数値シミュレーション

(1) 目標・計画

地盤の内部には大小様々な亀裂が存在し，それを成す材料は不均質かつ不確実なものである．特に，粘質土壌が乾燥する過程で生じる亀裂は，乾燥収縮亀裂と呼ばれ（以後，Mudcrack と呼ぶ），田畑や干潟等の地表面だけでなく，地層中でも見ることができる．Mudcrack の進展現象は，極めて複雑な挙動を示すことから，亀裂発生の力学的メカニズムに関する系統的な研究例は多くなく，十分に理解されているとは言い難い状況がある．

そこで本研究では，Mudcrack を数値シミュレーションにて再現することを指向し，3 次元有限要素法に基づく新たな数値解析手法を開発し，Mudcrack の亀裂進展解析を実施した．また，提案するモデルを検証するために，数値解析により得られた亀裂パターンのフラクタル次元を，実験値と比較することにより，本手法の妥当性を検討した．なお，前年度までに，深層崩壊や表層崩壊を誘発するような様々な形状を有する岩盤（岩山，連峰）や海底地すべり地層のモデル化技術，地盤の流動解析技術を構築したが，本研究は，地盤の内部構造に関する研究となっている．

(2) 意義・国際社会との比較

Mudcrack は，粘質土壌の乾燥過程で生じる乾燥収縮亀裂現象として知られており，不可逆性の非線形現象のひとつである．Mudcrack に関する工学的な問題としては，例えば，一般廃棄物や産業廃棄物，有害廃棄物等の最終処分場にて使用される土壌ライナーに Mudcrack が発生することにより汚染物質が拡散する等を挙げることができ，人間生活の安全・安心の観点からしても極めて重要な問題とされている．また，粘性土に乾燥－湿潤のサイクルを複数回繰り返すと，Mudcrack により発生したブロックが細分化されることが知られており，岩盤風化の本質的な力学的メカニズムのひとつとして考えられている．したがって，Mudcrack の発生メカニズムや亀裂パターンの評価手法を構築することは工学的にも重要な課題であると言える．しかしながら，その力学的メカニズム等の詳細は未だ解明されておらず，材料の種類や環境変数を考慮した検討が必要視されている．一方，破壊力学や流体力学等の様々な分野において，3 次元数値解析や大規模解析が研究されているにもかかわらず，Mudcrack の亀裂進展現象の数値解析手法に関する研究は，単純モデルによる研究は存在するが，系統的な詳細モデルについては国際的に見ても見当たらず，未だ達成されていない．したがって，本研究の国際社会における意義は極めて大きい．

(3)　研究内容

本研究では，粘性土壌内部の水分の蒸発に伴って発生するひずみを乾燥収縮ひずみとし，次式にて定義した．

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^{e} + \boldsymbol{\varepsilon}^{s} \qquad (1)$$

ここで，$\boldsymbol{\varepsilon}$：全ひずみテンソル，$\boldsymbol{\varepsilon}^{e}$：弾性ひずみテンソル，$\boldsymbol{\varepsilon}^{s}$：乾燥収縮ひずみテンソルである．なお，本研究では，$\boldsymbol{\varepsilon}^{s}$ を次式にて仮定した．

$$\varepsilon_{ij}^{s} = -\left(\frac{\exp(-\beta t)-1}{\exp(-\beta)-1}\right) \quad ; \quad t = \frac{z}{z_{\max}} \qquad (2)$$

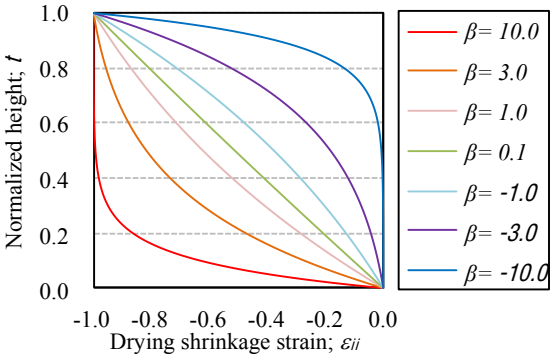


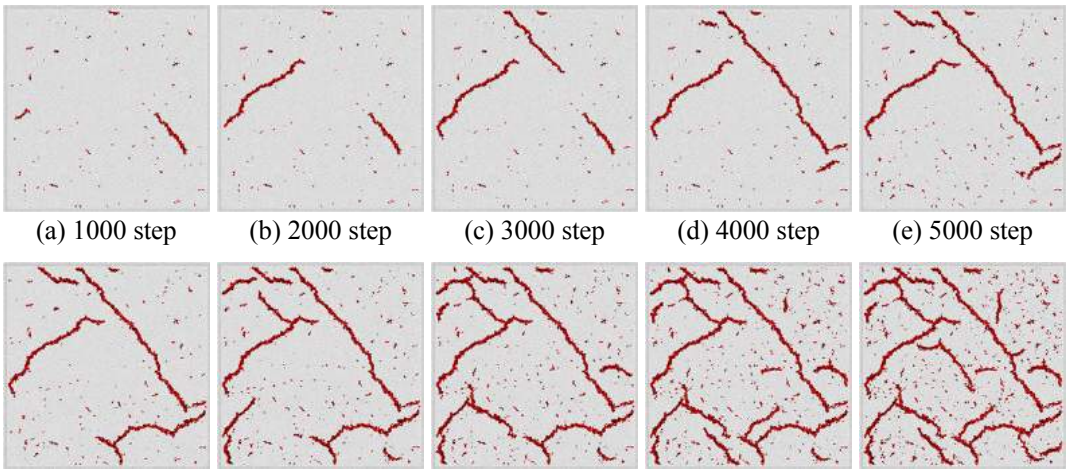
図 1.1.5-1　乾燥収縮ひずみの分布

ここで，z: 試料表面からの距離，$z_{\max}$: 試料の厚さを意味する．本モデルでは，図-1.1.5-1 に示すように，β 値が大きい程に表面乾燥が激しく，β 値が小さい程に表面乾燥が穏やかである状況を模擬している．ポテンシャルエネルギー原理に，式(1)，(2)で表される乾燥収縮ひずみを外力項として考慮すると，次式のようになる．

$$\int_V \mathsf{B}^T \mathsf{D}\,\mathsf{B}\mathsf{u}\,dV = \int_V \mathsf{B}^T \mathsf{D}\boldsymbol{\varepsilon}^{s}\,dV \qquad (3)$$

ここで　V: 物体の体積，B: ひずみ-変位マトリックス，D: 応力-ひずみマトリックス，u: 節点変位ベクトルである．本研究では，これらの式を支配方程式として用い，亀裂進展解析を実施した．なお，亀裂進展解析では，全領域において最大主応力の最大値を静弾性解析にて求め，1 ステップごとに，最大主応力が得られた要素を亀裂要素として解析を進めた．

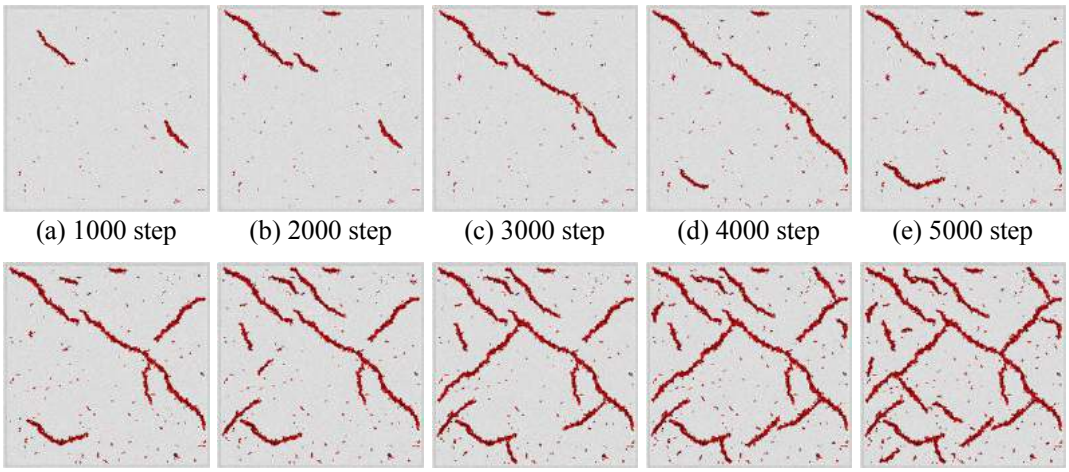
図-1.1.5-2 及び図-1.1.5-3 に，β=3.0 及び β=-3.0 の場合の亀裂進展の様子をそれぞれ示す．β 値によらず，亀裂は約 90° で連結している様子が分かる．これは，実際の地盤でも観察できる現象である．また，β=3.0 における亀裂は β=-3.0 の場合よりも多く分布している．これは，外気温が高い等の影響によって，土壌表面が乾燥し易い状況では，亀裂が多く発生し，多くの Mudblock が生成されることを示唆するものである．このことについては，実験などを組み合わせて本シミュレーション結果を検証していく必要がある．なお，詳細は割愛するが，本シミュレーションによって得られた亀裂パターンのフラクタル次元は約 1.45 次元であり，粘性土（ベントナイト）の実験値: 1.46 次元と近似していることを明記しておく．



(a) 1000 step (b) 2000 step (c) 3000 step (d) 4000 step (e) 5000 step

(f) 6000 step (g) 8000 step (h) 10000 step (i) 12000 step (j) 14000 step

図 1.1.5-2 亀裂進展パターン（β=3.0）



(a) 1000 step (b) 2000 step (c) 3000 step (d) 4000 step (e) 5000 step

(f) 6000 step (g) 8000 step (h) 10000 step (i) 12000 step (j) 14000 step

図 1.1.5-3 亀裂進展パターン（β=-3.0）

(4) 平成 26 年度進捗状況

今年度は，地盤内部の亀裂分布や亀裂の生成メカニズムを評価できる手法の確立を目的とし，Mudcrack 現象が再現できる 3 次元数値シミュレーション技術を構築した．その結果，観測値と解析結果が同程度な値を示し，その有用性が検証された．今後は，実験値との比較など，更なる検証を進めて行く予定である．

3.2.　大規模並列化グループ

2011 年に京コンピュータが 10 ペタ(Peta: 1 京)フロップス(Flops: Floting Points per second)に達し，TOP500 では 2 回連続世界 1 位となり，2013 年には中国の Tianhe-2 が 33 ペタにより 1 位を記録し，次世代スーパーコンピュータは，ペタの次の世代，つまりエクサ(Exa)フロップスを指す時代へと突入している．このことからもハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる．その一方で，これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては，その開発スピードもソフトウェアの品質も十分とは言えず，多くのソフトウェアが 20 世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である．特に，1970～1980 年台に既に確立されているアルゴリズムに対して，並列化の実装のみを加えた物が多く見られる．このような背景のもと，本プロジェクトでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する，次世代の大規模解析システムを構築するとともに，常に最先端のスーパーコンピュータ能力を活用するシミュレーション実現を目指す．

今年度は，以下の項目について報告を行う．

(1)　ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発
(2)　超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

(1) 目標・計画

本研究では対象問題をある程度限定することで高性能が得られるアプリケーション特化型システム開発を行っていく. 対象問題は連続体力学とし, 産業界で需要が高い非構造格子並びに自由表面や移動境界問題に重要なメッシュフリー(粒子法を含む)の取り扱いを可能とする. 時間方向の非定常性や問題が持つ非線形性を考慮する必要があるが, 陰解法ベースの数値解析手法を対象とする. これらに対し, 3 つの課題(A)DDM 入出力ライブラリ開発, (B)DDM ソルバーライブラリ開発, (C)連続体力学向け DSL 開発に取り組む. 本研究で開発されたライブラリを用いて連続体力学系シミュレータの実装と評価も行う予定である.

(2) 意義・国際社会との比較

ポストペタスケール計算を見据えた新技術の開発について, これまで同様汎用向けのライブラリなども開発されるであろうが, それらの利用では, 非構造格子問題では高々数パーセントの性能, あるいはそれ以下しか期待できず, 連続体力学系シミュレーションに特化したシステム開発が必要と考えられる. そもそも数パーセントの性能でのソフトウェアはペタコンでの運用が認められないという制約もあり, これはポストペタコンについてはさらに厳しくなることも想定される.

連続体力学系シミュレーションは, 従来からの FEM, FVM, BEM など非構造格子アプローチに加え, 近年ではメッシュフリーや粒子ベース手法による大規模計算の台頭が目覚しく, これらにも対応させ, 非構造格子および節点, 粒子ベースモデルを統一的に扱えるようにすることで, 連続体力学系シミュレーション向けライブラリとして整備されれば, ポストペタコンの連続体力学系シミュレーションでの利用の拡大に大きく貢献することが期待できる.

(3) 研究内容

(a) DDM(Domain Decomposition Method, 領域分割法)入出力ライブラリ

本研究項目は, マルチレベル領域分割法に基づく多階層計算格子データの生成, 操作および I/O ライブラリ開発を行うものである. 一般的なアプリケーションシステムは, プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが, これまでは最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装されてきた. ポストペタコンでは, 全ての処理をスパコン上に実装し, 並列化することが当然求められてくる. しかし, 従来の枠組みで並列化したのみでは, それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される. そこで, これまで研究代表者らがソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法の技術を応用した, マルチレベル領域分割法によるデータ処理システムの開発を行う.

(b) DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は, マルチレベル領域分割法に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メ

モリ並列ライブラリ開発を行うものである．一般的な線形代数ソルバーは，アセンブリされた連立一次方程式を入力とするため，FEM におけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた．それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくいが，ポストペタコンで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される．そこで，提案するマルチレベル DDM による多階層型データ構造を活用した，大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリの開発を行う．

これは，

・多階層領域分割に基づく分散メモリ並列向け線形代数ソルバーの構築

・多階層領域分割に基づくマルチレベルコースグリッド修正法の開発

・構造・熱・流体・磁場などを対象とする物理現象毎に特化したコースグリッド修正法の開発

を含む．つまり，これまで FEM を対象に研究を進めてきた DDM をマルチレベルに拡張し，さらに FVM，BEM，メッシュフリー，節点ベース FEM や粒子法など連続体力学全般に適用する技術開発である．また，マルチレベルな領域分割を利用し，線形代数ソルバーにおける前処理手法について，研究代表者らがこれまで研究を進めてきた高速かつ安定した収束性を持つ反復解法である BDD（Balancing Domain Decomposition）法や BDDC（Balancing Domain Decomposition by Constraints）法をマルチレベルに拡張し，さらに粒子法などへの応用も進める．開発システムは線形代数ライブラリとして整備していく．

(c)　連続体力学向け DSL（Domain Specific Language，問題領域専用言語）

本研究項目は，連続体力学向け DSL の開発と，それに対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成の開発を行うものである．ポストペタコンのアーキテクチャでは，計算ノード間の並列性だけでなく計算ノード内での効率も重視される．各計算ノードはメニーコアや GPU，SIMD 拡張命令といった多種多様なアクセラレータを有し，これらを有効利用することが望まれる．従来のプログラミング言語やコンパイラ最適化技術での対処は不十分であり，現状ではそれぞれのアクセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必要とされている．一方，数値シミュレーションコードの場合，特に連続体力学分野においては，そのアプリケーションロジックは物理現象や数値解析スキームであり，これは数学表現，特に行列やテンソルで表記されることが多い．よって，連続体物理モデルを DSL 化して，数学記述（例えば，行列，テンソルの式を tex 形式で記述）から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブラリを call するコードを生成するコードジェネレータあるいはトランスレータアプローチが有効であると考えられ，これを実現するシステムの開発を行う．

(4)　平成 26 年度進捗状況

(a)　DDM 入出力ライブラリ

平成 26 年度は，次の研究項目の研究開発が進められた．

1.　多階層メッシュ・メッシュフリー対応 AdvIO

平成 26 年度は，本研究項目の開発を大幅に進めた．非構造格子向け領域分割ツールに，

多階層の領域分割を並列計算機上で行える機能を付け加えた[5]. 多階層に領域分割されたメッシュをソルバーに受け渡すためのデータ仕様を検討し始め完成しつつある. また, 大規模データ向け I/O ライブラリの開発に一定の成果がでたため, 今後, 本 I/O ライブラリは β 版公開を行う予定である.

2. メッシュ向け DDM 圧縮

平成 26 年度は, 非構造格子向け DDM 圧縮技術の実装を開始し, FEM による熱伝導解析を対象に基本機能を開発した. 今後, 大規模解析への適用を開始する予定である.

3. 並列 IO・DDM 圧縮対応 AdvIO

平成 24 年度に開発開始した VSCG の β 版を完成させ, 高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG として公開する準備を行った. さらに, 粒子向け可視化機能を強化し, 半透明可視化機能やポリゴンとの融合可視化機能の開発を進めている. また, LexADV_VSCG を高並列環境で実行するための, 高精細並列オフライン可視化ツール LexADV_WOVis を開発し, 公開する準備を行った. さらに, LexADV_WOVis の β テストとして, HPCI 戦略分野 3 で実施された 2 億自由度規模超高層ビル地震応答シミュレーション結果の京による並列可視化を行い, 図 1 に示す 1 万×1 万ピクセルの高解像度可視化に成功した.

今後は「DDM 入出力ライブラリ」β 版に対する, ユーザーによる性能評価を行う予定である.

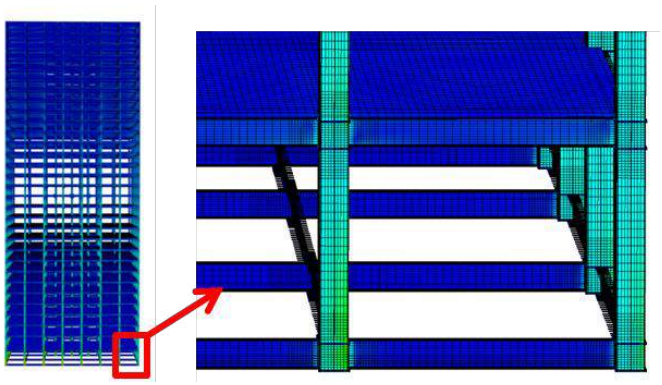


図 1 超高層ビル地震応答シミュレーションの高解像度可視化例

(b) DDM ソルバーライブラリ

平成 26 年度は, 次の研究項目の研究開発が進められた.

1. メッシュ向け DDM ソルバー

非構造格子向け DDM 反復法ライブラリの開発を継続して進め, DDM に基づいた 2 種類の反復法(DDM-CR 法, DDM-MINRES 法)と 1 種類の前処理(N-N 前処理)の実装を完成させた. LexADV_IsDDM として, β 版公開を行う予定である. また, DDM ソルバーライブラリ LexADV_TryDDM の β 版を完成させ, 公開する準備を行った. 本ライブラリは, 既存の反復

法ライブラリユーザーに対して DDM 反復法の試験環境を提供するものであり，ユーザーニーズのフィードバックを可能とする仕組みでもある．本ライブラリを用いることで，これまで困難であった DDM 向け前処理と ILU や SSOR などの一般的な前処理との性能比較も可能となった．

また，電磁場ソルバー等で需要がある複素数への対応を進めた．C 言語における複素数型に関して複数の実装を行い，性能評価を行った．さらに，アルゴリズムの見直しによって DDM-COCG 法の部分領域問題ソルバーに直接法を適用可能とするなど，最適化を行った．これにより，時間調和渦電流問題解析において，東京大学 FX10 の 96 ノードでピーク性能比 0.9%から 7%へ向上させることに成功した．

2. 熱・構造 FEM 向け多階層前処理

平成 24 年度に提案した異種材料混在モデルに適した BDD 前処理法について，複数のモデルで追加実験を行い，モデルによらずに性能改善の効果が得られることが分かった．また，BDD 前処理の多階層化について継続的に開発を行っている．

3. 流れ・電磁界 FEM 向け多階層前処理

平成 26 年度は，電磁界問題向けに BDD 前処理の統一的構築方法を提案し，開発を継続的に行った．

4. メッシュ・メッシュフリー向け多階層 DDM

平成 24 年度から開発を続けていた MPS 陽解法（粒子法）向けライブラリが完成した．流体と多数の剛体との連成解析が新たな機能として追加された．本粒子法ライブラリは，LexADV_EMPS として β 版公開を行う予定である．また，粒子型解法の基礎となる近似作用素に関して，数学的な打切り誤差評価や，より高精度な近似手法の提案を行った．

(c) 連続体力学向け DSL

平成 26 年度は，次の研究項目の研究開発が進められた．

1. DSL トランスレータ

平成 24 年度から引き続き，豊田中央研究所や東京理科大学，理化学研究所，JAMSTEC，JAXA，JAEA，東京大学生産技術研究所，東京大学地震研究所や国内スパコンセンターなどへの普及活動を積極的に行い，理化学研究所 京コンピュータ，東京大学 FX10，T2K 及び GPU クラスタ，九州大学 FX10，JAMSTEC ES2，筑波大学 T2K，名古屋大学 FX1，名古屋大学 CX400，名古屋大学 FX10，京都大学 XE6，九州大学 CX400，九州大学 FX10 などの利用実績を築きつつある．更に，HPC 技術の産業界向け応用に関する国際ワークショップに参加し，韓国 KiSTi における HPC クラウド開発への協力を行うことで，海外スパコンセンターへの普及活動も継続して行っている．この活動の一環として，5th International Industrial Supercomputing Workshop が平成 26 年 10 月 2-3 日に東洋大学で開催された．

2. SIMD・GPU 向け最適化 AutoMT

平成 26 年度は，マルチコア及び SIMD 命令セット向け最適化ライブラリの開発を更に進め

た. 開発中の①構造解析・要素剛性, ②非線形材料構成則, ③熱伝導解析・要素剛性のそれぞれの行列テンソルライブラリでは, Intel (Sandy Bridge)でピーク性能比①60%, ②27%, ③50%を達成し, 東大 FX10 ではピーク性能比①35%, ②14%, ③38%を達成することに成功した. また, GPU・MIC 向けの開発を重点的に行った. パフォーマンスはまだ出せていないが, GPU では CUDA 及び OpenACC, MIC ではネイティブ実装及びオフロード実装での実装に成功した.

3.2.2.　超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

(1)　目標・計画

(A)　静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

磁場解析の分野ではこれまで約20年近く，東京大学の菊地文雄名誉教授が線形静磁場問題で確立した独創的な混合法的定式化を自然な形で3次元渦電流問題や3次元非線形静磁場問題に独自の工夫を加えて拡張し，ADVENTURE_Magneticを公開してきた．ごく最近部分領域問題を直接法で解くことにより1億実自由度や約5,000万複素自由度の大規模解析を可能にした魅力を次世代計算機で更に活かすためにはもう1桁程度の計算速度の改善が望ましい状況がある(速ければ速いほど，実際の設計に用いる計算モデルを更に詳細化できる)．本研究では，この高速化に対応する研究を行い，もう1桁高速化したソフトウェアを公開していく．ここに述べた手法に基づく磁場解析ソフトウェアは，国産市販ソフトウェアは言うまでもなく国際的に見てもあまり例がない．また現在数百万自由度規模程度で留まっている電磁場解析の規模の拡大にとって現時点ですでにブレークスルーを引き起こした研究になっている．　実際，大規模解析では我々の現時点のレベルを目標にする研究チームもいくつか現れているが，本研究では得意とする大規模化に更に高速性を加味することにより，追随者の上を行くPerfect Only Oneを目指す．

(B)　熱対流解析コードの機能強化

非圧縮性粘性流解析・熱対流解析の分野では現時点のADVENTURE_sFlowをもとに計算サービスを行っているベンチャー企業も現われている．ADVENTURE_sFlowでは磁場解析や構造解析と同様な手法で計算しているので，高速化の検討を共通の課題として行え，入力データの共有化がしやすく連成解析が行いやすいという特長がある．低炭素社会向けシミュレーション技術に応用分野を特化し解析機能を限定してでも，この特長を早く引き出したいと考えている．

(2)　意義・国際社会との比較

3 次元電磁場の有限要素解析はこれまでやや試行錯誤的に行われており，信頼のおける数値解法が未だ十分確立されていない状況にある．このようななかで，我々は菊地理論をベースに，工学的応用を展開するという形を採っており，国際的に見ても極めてユニークな注目すべき研究を展開している．これまでに開発されてきた文部科学省支援研究による電磁場解析ソフトウェアの骨格を一貫して提供してきたという自負もある．今後の低炭素社会に向けて電気自動車の利用が推進されているが，電磁環境適合性(EMC)のためにも電磁場解析の有用性は増している．非圧縮性粘性流・熱対流や固体力学の大規模解析も統一的な手法で研究を進めているので，それらとの連成解析が有利に行えるという利点も持っている．

(3) 研究内容

(A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

3次元磁場の有限要素法による解析，特に3次元渦電流解析（複素自由度4,355万の問題が32台のPCクラスタを用い5時間弱で解けている）並びに1億自由度を最近可能にした3次元非線形静磁場解析に対しては，領域分割法を用いる際の数値計算上の諸問題を以下の更なる高速化に関する課題に焦点を絞って研究する．

「離散化に伴い生じる超大規模（1億自由度以上）の疎な対称連立1次方程式と連立非線形方程式に対する領域分割法を意識した効率的な数値解法を確立し，特にもう1桁の高速化を可能にする前処理方法を確立する．」

(B) 熱対流解析コードの機能強化

3次元非圧縮性粘性流解析についてはこれまでの内容を発展させた新アルゴリズムの導入を図る．2006年7月に公開したモジュールADVENTURE_sFlowはその後水素利用社会向けシミュレーション技術でも応用があったので，熱対流解析の基本機能が非定常解析機能も含めて追加され，前処理機能の強化による高速化が実現されたため，実用レベルの有効性をチェックする段階になっている． 非定常解析機能ではStokes問題のみならず，Navier-Stokes問題に対しても特性曲線法の活用により対称な連立1次方程式ソルバーを活用できることがポイントになっている．

(4) 平成 26 年度進捗状況

(A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

今年度は BDD 前処理の実装実現のために 1 コア処理に限定して三つの課題を設定した．一つはシュアコンプリメント行列 S とベクトル p の積 q を計算する部分を独立して利用可能にすること，二つ目はノイマンノイマン前処理を実装させること ADVENTURE_sFlow，三つ目はコース行列を作成し，それを既存のパラレルソルバーで解くことである． この三つが実現できれば，BDD の実装はほとんど実現できると言ってよいほどの重要な 3 項目になる．ノイマンノイマン前処理は 2005 年に一度成功した実績があるが当時の記録が紛失しており，新たな開発を行うことになった．現時点ではコードの骨格はできたが，残念ながら効果が全く出ていない．部分領域数が大きくなると手法自体の特徴として効果が出ないのか，何かミスを犯しているのかを見極める必要がある．3 番目のコース行列作成もテストランは行えるようになったが，今後もう少し検討が必要と思われる．予想外に時間がかかっているのは最初の q=Sp の計算であり，いくつか試みたがまだうまくいっていない．年度末までに LexADV の TryDDM を試して，1 コアの BDD 前処理に見通しをつけたいと考えている．

(B) 熱対流解析コードの機能強化

このテーマは今年度の課題として公開用ドキュメントの整備以外に以下の 4 課題を設定した．す

なわち ADVENTURE_sFlow への機能強化として
・熱方程式部分への DDM フレームワークの適用
・熱流束境界条件入力機能の追加
・熱伝達境界条件入力機能の追加
・BDD 前処理における通信処理改善の検討
を図るものである. 最初の DDM フレームワークの適用は(1)のテーマの A)の研究テーマと連携しながら, 開発ライブラリのプロトタイプ（LexADV の TryDDM）のテストを兼ねたものであり, 一応利用可能になった. 2 番目, 3 番目のテーマは 1 番目のテーマが可能になった時点で, DDM フレームワークでの実現が可能になった. 4 番目は派生した問題を解決しながら検討を続けた結果, これも可能になった. 以上の成果を踏まえて ADVENTURE_sFlow の Ver.1.0 の年度内公開に向けて準備を進めている

3.3. 新規実験計測グループ

3.3.1. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験

(1) 目標・計画

流体－構造連成解析手法を検証するための実証試験として，低速風洞試験を行う．図1は風洞試験装置システムの概要図である．風路内部に実験模型を設置して試験を行い，数値解析の検証用データを提供する．また本研究を通じて，新しい計測手法，解析手法の提案を目指す．

(2) 意義・国際社会との比較

流体−構造連成問題について数値計算，実験は多数行われているが，その殆どが単独に行われたものである．そのため文献ではいずれかの結果が引用される場合が多く，両者の信頼性を保証した上で，結果を議論した例が見られないのが現状である．本研究では，数値計算結果の信頼性を検証するためのデータを提供することを主眼として，様々な実験に取り組む．これまで行われていなかった数値計算と実験の両方を実施することで，計算上の問題点，実験上の問題点を明らかにする．

(3) 研究内容

2012 年度は風洞試験装置システムの整備期間であり，2013 年度は基礎試験，2014 年度以降は応用的な実験を検討している．基礎試験ではシートフラッタ実験を行い，応用的実験では航空機模型のフラッタ実験，フラッタの工学的利用や弾性皮膜による流体抵抗低減を目指した研究を行う予定である．Figure 1 は風洞試験装置の概要図である．実証試験では実験模型の運動解析，空気力計測，PIV流れ解析を組み合わせた流体実験を行う．

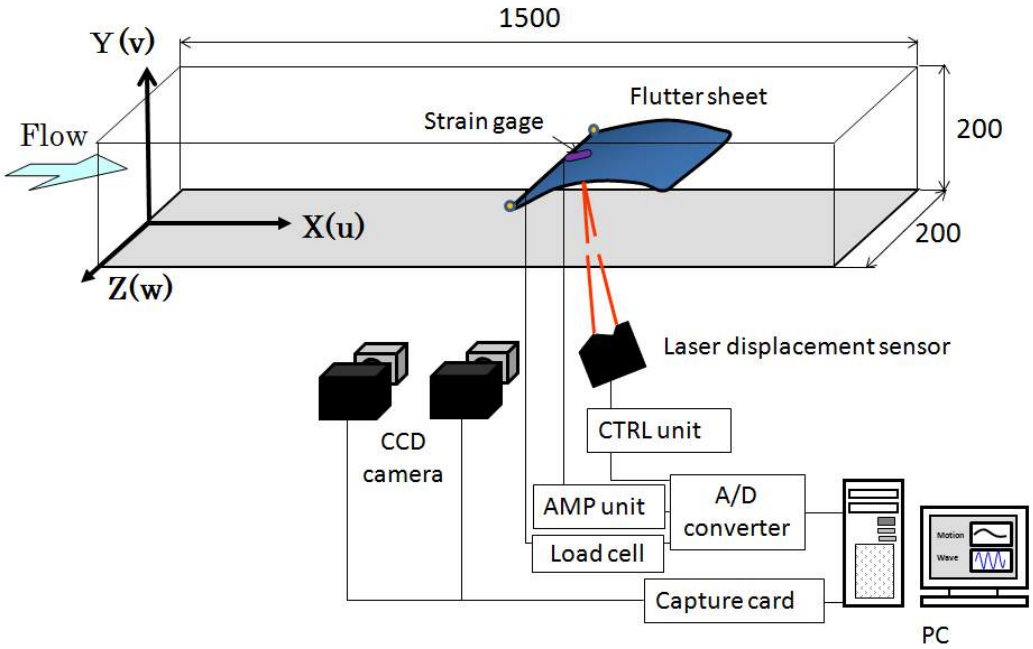


Fig. 1　Low-speed wind-tunnel system.

本風洞試験装置により実施できる試験内容は以下の通りである.

[1]　高速度カメラによる3次元運動解析
[2]　レーザ変位計による変位測定
[3]　6分力天秤による空気力・モーメント測定
[4]　ひずみゲージ測定
[5]　煙発生器による流れの可視化
[6]　PIV解析による流れの可視化

(4)　平成 26 年度進捗状況

昨年度はフラッタ試験装置を製作し，シートフラッタの周波数特性と3次元運動解析システムの動作試験を行った．今年度はシート材の材質，サイズに対する周波数特性の詳細を調べた．また数値計算と比較するための実験も行った（この内容については解析手法開発グループの報告でまとめている）.

(4)-1　フラッタ限界風速（シート材の長さ *L* の影響）

風速の上昇時と下降時で，フラッタ現象は発生する速度と終了する速度が異なる．本節では，シート材の長さと風速の関係について，ウレタンゴムとネオプレンゴムの結果を考察する．Tables 1, 2 はシート材の長さに対するフラッタ開始風速と終了風速を示している．これらの結果から，シート材の長さが短いほどフラッタ開始と終了の風速が増すことがわかる．Figs.2, 3 は Tables 1, 2 の結果を

グラフ化したものである．シート材の長さが長くなるにつれて，フラッタが発生しやすくなる．またシート材の長さを100mmから150mmに変化させるとフラッタ限界風速が大きく変化し，それ以降はシート材が長くなるにつれて速度の変化率は鈍化していくことがわかる．Fig. 2 からウレタンゴムのフラッタ限界風速は単調減少しているが，ネオプレンゴムのフラッタ限界風速はある一定速度に漸近しており，一様にフラッタが発生しやすくなるとは限らないことが分かる．

Table 1 Critical flutter speed (urethane-rubber).

Sheet length [mm]	Start speed [m/s]	End speed [m/s]
100	21.40	19.95
150	15.60	11.22
200	10.48	7.75
300	7.04	4.04

Table 2 Critical flutter speed (neoprene rubber).

Sheet length [mm]	Start speed [m/s]	End speed [m/s]
100	15.77	8.32
150	8.83	5.39
200	7.14	3.67
300	6.27	4.79

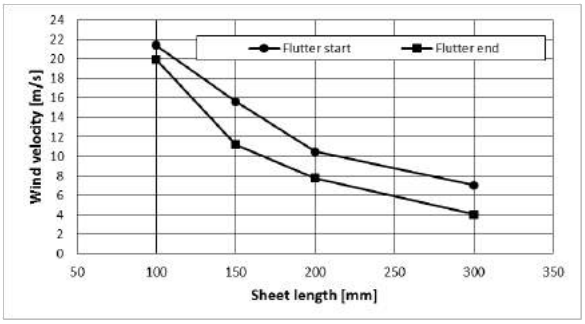


Fig.2 Critical flutter speed of urethane rubber.

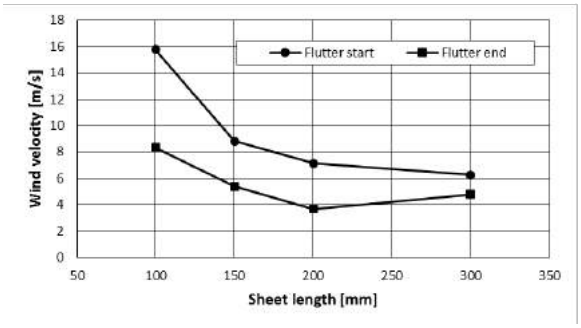


Fig.3 Critical flutter speed of neoprene rubber.

(4)-2　フラッタ限界風速（シート材の厚さ *t* の影響）

Table 3, Fig.4, 5 はネオプレンゴムに関するシート材の厚さ t とフラッタ限界風速の関係を示している．シート材の厚さは 0.3mm から 1.0mm まで変化させた．

Table 2 を見ると，シート材の厚さが増すとフラッタ限界風速が増加する傾向にあることが分かる．また，シート材の長さが増すと 100, 150, 200mm ではフラッタ限界風速は減少する傾向にある．すなわち，シート材の長さが長いはフラッタが発生しやすいことが伺える．Fig. 4, 5 はシート材の厚さに対するフラッタ限界風速の変化を，シート材の長さについて整理している．長さ100mmの場合は厚さが増すとフラッタ限界風速の増加が顕著であるが，それ以外の長さでは厚さが増すと一定の風速に近づいているように見える．Fig. 5 は 100mm 以外の t = 0.8mm の結果が読み取りにくいが，

Fig. 4 と同様に一定の風速に近づいているように考えられる．シート材の L = 300mm, t = 0.3mm の結果は擾乱の影響を受けやすくなるため，フラッタが発生しやすくなる．そのため，L = 150, 200mm, t = 0.3mm の結果と比べるとフラッタ限界風速が低下している．

Table 3 を見て分かるように，シート材の厚さが薄く，長さが長いほどフラッタが開始しやすくなり，また，フラッタ開始風速と終了風速の差も小さくなる．つまり，フラッタが発生しやすいと言える．すなわち，以上の結果からフラッタ現象を抑えるには，シート材の厚さを増して，長さを短くすると良いと考えられる．

Table 3 Comparison of flutter velocities with different thickness for increasing and decreasing flow speeds.

	100mm		150mm		200mm		300mm	
thickness	Start	End	Start	End	Start	End	Start	End
0.3mm	5.53	3.67	2.97	2.59	2.22	1.28	4.25	3.34
0.5mm	10.62	5.49	7.55	4.65	6.23	2.80	5.70	4.28
0.8mm	12.47	6.94	7.89	3.98	7.51	3.74	6.17	4.11
1.0mm	15.77	8.32	8.83	5.39	7.14	3.67	6.27	4.79

Table 4 Comparison of flutter velocities with different thickness for increasing and decreasing flow speeds.

	100mm		150mm		200mm		300mm	
thickness	Start	End	Start	End	Start	End	Start	End
0.3mm	5.53	3.67	2.97	2.59	2.22	1.28	4.25	3.34
0.5mm	10.62	5.49	7.55	4.65	6.23	2.80	5.70	4.28
0.8mm	12.47	6.94	7.89	3.98	7.51	3.74	6.17	4.11
1.0mm	15.77	8.32	8.83	5.39	7.14	3.67	6.27	4.79

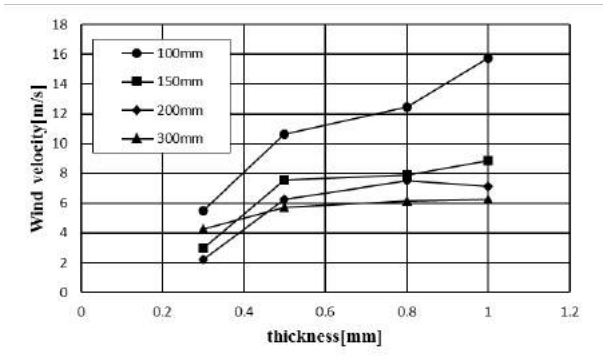


Fig.4 Flutter velocity with different thickness for increasing flow speed.

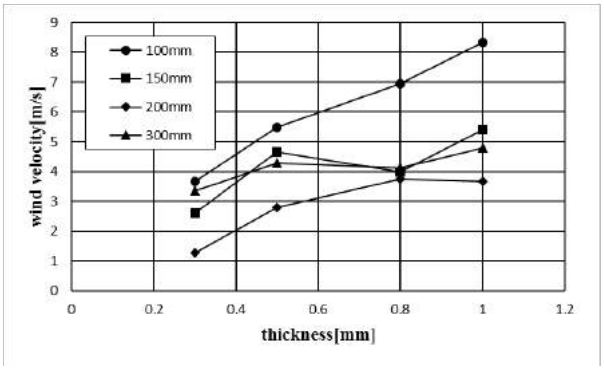


Fig.5 Flutter velocity with different thickness for decreasing flow speed.

(4)-3 フラッタ周波数特性（材質による比較）

Fig. 6 は L = 150mm, t = mm のウレタンゴムの周波数特性を示している. 回転軸から 25mm, 40mm, 55mm, 70mm, 85mm 下流の5点について, レーザ変位計を用いてシート材の変位を測定し, FFT 解析を行った. 場所によらず, どの位置でも同じ周波数でピークが得られていることから, 計測しやすい 25mm の位置で測定を行った.

シート材の材質と大きさを変化させて, 風速と振動数の関係を比較した結果を Fig. 10 に示す. 一般に塩化ビニルは黒天然ゴムに比べ硬度, ヤング率が高い. そのため, 塩化ビニルはフラッタしにくく, フラッタ開始速度と終了速度の幅が大きい. 一方, 天然ゴムやネオプレンはフラッタ開始速度が塩化ビニルの L=300mm の結果よりも低くなっている. これはヤング率が低いため, フラッタが発生しやすいからと考えられる. 材質が等しい場合, シート材の長さが長くなるとフラッタ限界風速と振動数が減少していくと共に, フラッタ開始速度と終了速度の幅が狭まることが分かる. また, ヤング率の高い塩化ビニルやウレタンゴムの方が, ヤング率の低い天然ゴム, ネオプレンゴムよりも振動数が増しており, ゴムの硬さがフラッタの振動数に関係していることが分かる.

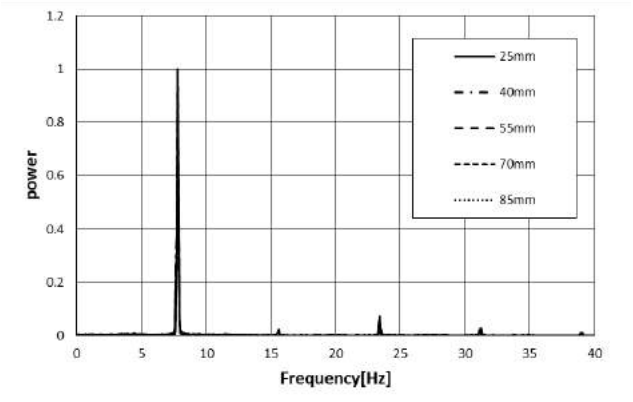


Fig.6 Power spectrum with different length.

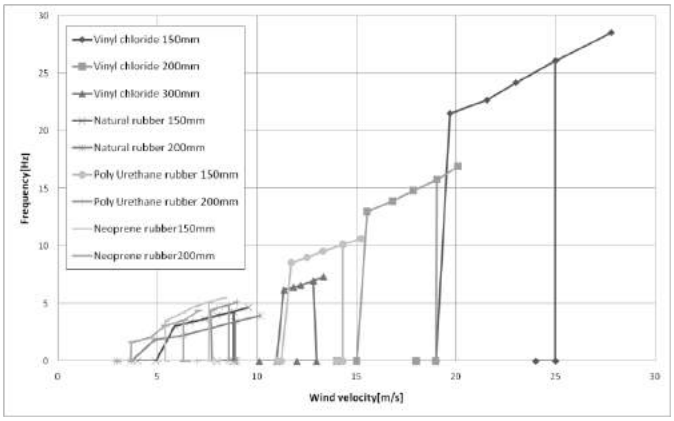


Fig. 7 Characteristics of flutter frequency with different sheet materials.

(4)-4　シート材のフラッタ運動

Fig. 8 はフラッタ運動しているシート材の瞬間画像を示している. シート材の材質は塩化ビニル (L=150mm) を PVC, フッ素ゴム (L=150, 200mm) を FPM で示した. フッ素ゴムに関しては風速によるシート材の運動の違いも示した. Fig. 8 からシート材の材質により, 風速, シート長により振動パターンが異なることがわかる. シート材のフラッタ周波数も同様に風速, シートサイズ, 材質によって異なっている.

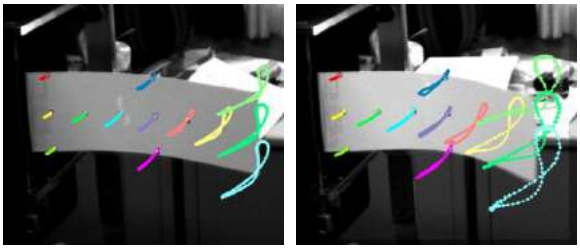
実験に使用したシート材のうち代表的なものについて, 3 次元運動解析を行った(Fig.9). シート材の表面には 13 個のマーキングを施しており, ステレオ撮影によりフラッタ運動の軌跡を追跡した. シート材の材質は塩化ビニル, シート材の大きさは L = 300mm, t = 0.5mm であり, 振動モードを調べるために異なる風速(U = 10.8, 13.3[m/s])で追跡を行った.

風速が増すと振動モードと振幅が変化する. 回転軸から最も下流の 3 点の軌跡を比較すると, 顕著な違いを確認できる. 3 次元運動解析の結果から, 軸から離れるにつれ規則的な軌道を描いている. さらに風速を上げるとシート材の変位が増すため, 軌跡は大きくなる. また固定点から離れるに従い 8 の字を描いて周期的に振動していることがわかる.

(a)PVC 150[mm],U＝18.2[m/s]. (b) FPM200[mm],U＝15[m/s].

(c) FPM 150[mm],U＝15[m/s]. (d) FPM 150[mm],U＝5[m/s].

Fig.8　Comparison of flutter mode.



(a) U = 10.8 [m/s].　　(b) U = 13.3 [m/s].

Fig. 9 Trajectory of the marker point of the sheet material.

(4)-5　無次元周波数特性

Fig.10 は塩化ビニル(PVC)と天然ゴム(NR)のフラッタ周波数を，レイノルズ数 Re とストローハル数 St によって無次元化して整理したグラフを示している．流れ方向のシート長さ L を代表長さとして 150，200，300mm と変化させ，その時における振動数と流速の関係を示している．

Fig.10 を見ると塩化ビニルの値はレイノルズ数に対してストローハル数は一定である．また天然ゴムの結果も 300mm を除いて一定である．これはフラッタ周波数と風速の増加が比例することを意味する．L=300mm の結果に関してはシート長さが長すぎたため，フラッタが不規則であったため，一定値になっていない．しかし，どちらの結果もレイノルズ数に対してストローハル数が一定となる範囲が存在することが分かる．

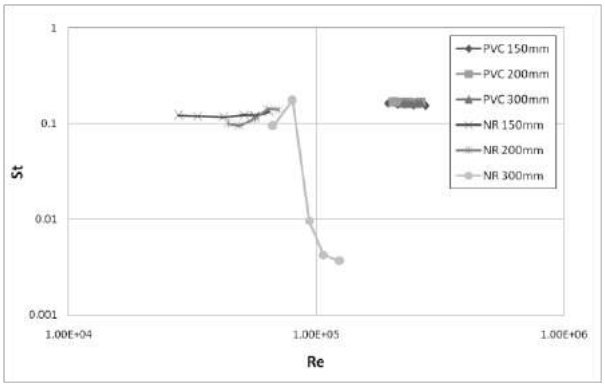


Fig. 10 Non-dimensional characteristics of flutter frequency.

(4)-6　まとめ

シート材の特性によりフラッタ発生の条件は以下のように整理できる. シート長さを長くする, もしくはシート材を薄くすると, フラッタが発生しやすくなることが確認できた. また, シート材の剛性を下げていくとフラッタが発生しやすくなる傾向があることが分かった. 風速を増すことにより, フラッタ周波数は上昇し, 振幅も大きくなる. フラッタ発生時は無次元周波数 St が Re によらず一定になることから, 風速の上昇に伴いフラッタ周波数も比例して増すことがわかった.

参考文献

1) 黒川雄太, フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定: その 2 重量比およびアスペクト比が風荷重に与える影響(膜構造:風洞,構造 I), 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, (2007).
2) 伊藤憲一, 剛体と弾性体を用いた翼のフラッタ特性に関する研究(GS 流体工学(流体計測,翼など)), 日本機械学会, 東海支部総会講演会講演論文集,(2009).
3) 小河利行, フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定, 日本建築学会構造工学論文集, B, (2007)
4) 吉村友里, フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定, 日本建築学会学術講演梗概集, B, (2006).

3.3.2. 画像処理を用いた野球ボールに働く空気力計測

(1) 目標・計画

運動する物体に作用する空気力特性を把握することは流体－構造連成解析問題の課題の一つである. 風洞試験では一定風速で実験が行われることが殆どであるため, 定風速下での空気力特性は系統的に整理されているが, 加速度運動する物体に作用する空気力特性は調べられていない. そこで, 本研究では, 加速度運動する物体に作用する空気力を測定し, 定速度下における空気力特性と比較することで, 加速度運動する際の効果を系統的に整理することを目的としている. 2014年度は実験システムの構築を行い, ボールなどの単純形状で実験を行う. 2015年度以降はロケット模型に対して作用する空気力特性を調べ, その特徴を明らかにする.

(2) 意義・国際社会との比較

物体に作用する空気力特性を調べる風洞実験, 数値計算は多数行われているが, 殆どの研究が一定速度での解析であり, 本研究で目的としている加速度運動時の空気力特性を調べた研究例は数少ない. 本研究では, 加速度運動する物体に作用する空気力を実験的に測定し, その特性を明らかにすることが目的である. 本研究の成果は, 移動するビークルを設計する上で, 渋滞とは異なる新機体形状を提案するために活かされるものと考えられる.

(3) 研究内容

球技で使用されるボールに働く空気力特性やボール周りの流れの特性を調べることは, 流体力学において興味深い研究対象の一つであり, これまでに球技で使用されているボールについて多くの研究例がある. 特に, 野球ボールにおいては実験的研究, 数値的研究が盛んに行われている. しかし, 実験的研究の多くは風洞装置を使用して行われたものであり[(1)-(5)], 一定風速の下で試験されている. 野球ボールは投手の手を離れると空気抵抗や重力, ボールの回転により発生する空気力によって軌道が変化する. ボールの抵抗係数は, 球速により変化するが, 実際に投手が投げる軌道の球速変化の効果を空気力パラメータに考慮した研究例は, 著者らが調べた限り数少ない[(6,7)]. このような背景から, 実際の投球時における野球ボールについて加速度依存性を考慮した空気力特性を明らかにする必要がある.

2014年度は基礎試験としてピッチングマシンによるボールの射出実験を行い, 加速度運動する物体の空気力特性を調べる. 2015年度以降は宇宙機模型の射出実験を行い, 機体に作用する空気力を加速度と速度をパラメータとして調べ, 機体設計に応用するための指針を得る.

(4) 平成 26 年度進捗状況

2014年度はピッチングマシンにより野球ボールとラクロスボールを射出して, その運動の画像解析から空気力特性を調べる. 2015年度以降はロケット模型の射出実験を行い, 加速度運動する機体の空気力特性を把握することで, 新機体形状の提案に活かしたいと考えている.

(4)-1 実験装置の概要

本実験では, 投手の投球軌道を再現するために, 日本 JUGS 社のオールラウンドピッチングマシンを使用した. 実験の概要図を Fig.1 に示す. ピッチングマシンからボールを打ち出し, その軌道を 2 台のハイスピードカメラで撮影した. 打ち出されたボールの並進運動の撮影にはノビテック社の

Phantom Miro M／LC310, 回転運動の撮影にはノビテック社の Phantom V4.2 を使用した. フレームレートはそれぞれ 1000[fps]に設定し撮影を行った. ハイスピードカメラはそれぞれパソコンに接続されており, 撮影した動画はパソコンに保存される.

実験条件はピッチングマシンの 2 つのホイールを地面と垂直になるようにし, 上のホイールのダイヤル設定を 40～60, 下のホイールのダイヤル設定を 100 に固定し, ボールにバックスピンがかかるよう設定した. ボールを打ち出す際は日本において最も一般的なストレートであるフォーシームの回転になるよう縫い目の角度を調整した.

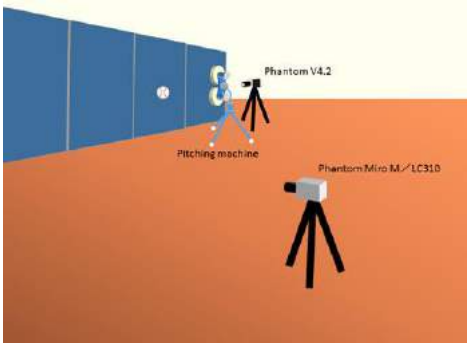


Fig. 1　Schematic picture of experimental setup.　　Fig. 2　Painted baseballs.

使用したボールは, ミズノ社の硬式野球ボール(大学試合用), ナガセ・ケンコー社の軟式野球ボール(A 号球)である. また, 野球ボールの縫い目の影響を調べるために, ラクロスボールを真球と仮定し使用した. Fig.2 のようにそれぞれのボールには, ボールの回転運動を読み取りやすくするため, ラッカースプレーとサインペンで塗装した.

(4)-2　解析手法及び実験結果

野球ボールに作用する空気力を解析するために, ボールの並進運動をとらえた動画をフレームごとに画像に分割した. 分割した画像から 10 フレームごとに画像を抽出し, 抽出した画像から, 画像内にあるボールの中心座標を目視により求めた. この中心座標をもとに, 野球ボールの並進運動の時間変化を調べた. Fig.3 はホイールのダイヤル設定が上 40, 下 100 の硬式野球ボールの並進運動のグラフを示している. 時間はフレームレートより求めた.

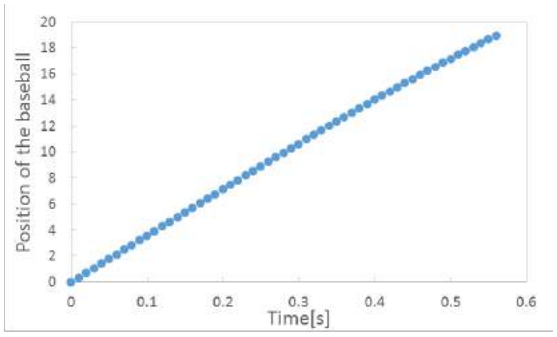


Fig. 3　Time history of the translational motion.

座標点から得られた並進運動の軌道を最小二乗法により4次関数で近似した．近似した4次関数を時間微分することにより速度と加速度を容易に求めることができる．Fig.4 は速度の時間変化，Fig.5 は加速度の時間変化を表している．速度は時間が経過するにつれて減速し加速度は負の方向に増加していることがわかる．このことから抵抗係数は一般的に定速で計算されるが，速度と加速度をパラメータとして扱う必要があることが予測できる．

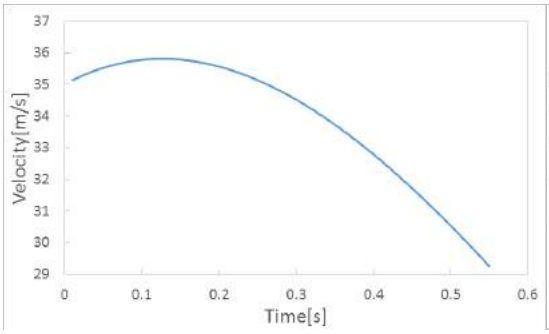


Fig. 4　Time history of the velocity.

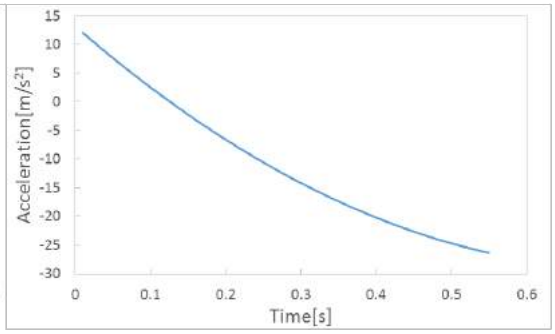


Fig. 5　Time history of the acceleration.

得られた速度と加速度の近似関数から，0.01[s]間隔で速度と加速度の値を取り出し，(1)式の運動方程式から野球ボールに作用する抵抗係数を求めた．

$$m\frac{du}{dt} = -C_D\frac{1}{2}\rho u^2 A \qquad (1).$$

抵抗係数の値を求める上では，ボールが加速している時間帯での計算は行わず，減速し始めた時間から計算を行った．

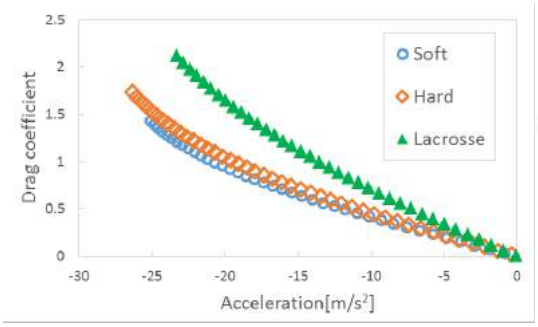


Fig. 6　Time history of the acceleration.

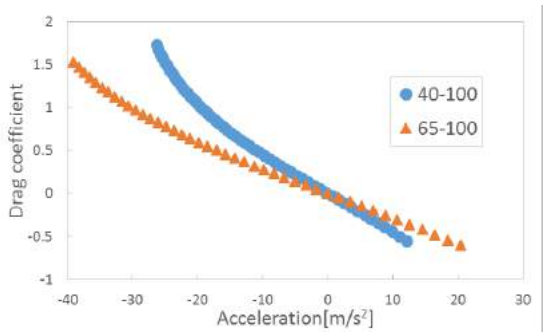


Fig. 7　Enlarged view of the drag coefficient.

Fig.6 は実験で使用した 3 種類のボールの抵抗係数と加速度の関係を表している．軟式野球ボールと硬式野球ボールの結果は，よく類似していることが分かる．ラクロスボールは両者と比べ傾きが大きくなっていることがわかる．これはラクロスボールに縫い目が無いことが影響していると考えられる．

次に，抵抗係数の速度と加速度の関係を明らかにするために，同じボールに対して球速を変えて同様に比較を行った．硬式野球ボールでの比較結果を Fig.7 に示す．球速が速い場合，加速度に対する抵抗係数の変化が緩やかであることが確認できる．この特性は軟式野球ボールとラクロス

ボールで比較した場合でも同様の結果であった．すなわち，抵抗係数は速度だけでなく加速度にも依存していることが分かる．

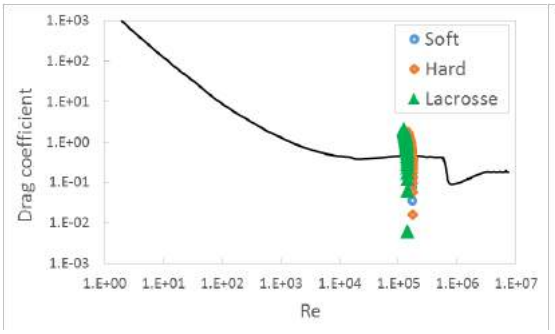


Fig. 8　Drag coefficient.

Fig. 9　Enlarged view of the drag coefficient

Fig.8 は抵抗係数とレイノルズ数 Re の関係を示している．実線は流体力学のテキストなどに掲載されている球体に作用する抵抗係数の値である．レイノルズ数は(2)式から求めた．本研究では流体の密度，粘性係数を気温 20[℃]として与えた．

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho U d}{\mu} \qquad (2).$$

Fig. 8 から加速度運動中のボールに作用する抵抗係数は一定値ではなく，幅広い値を持つことが分かる．また，ボールが減速する，すなわちレイノルズ数が低下するにつれて，静止状態の球に作用する抵抗係数よりも抵抗係数が増していくことが確認できる．Fig. 9 は Fig. 8 の実験結果を拡大して示している．軟式野球ボール(Soft)と硬式野球ボール(Hard)の値はよく類似している．ラクロスボール(Lacrosse)に関してはボールの大きさと打ち出し速度が両者と比べて遅くなったこと，また縫い目が無いことから野球ボールとは異なる値を示している．

(4)-3　まとめ

運動中の野球ボールの空気力特性を調べるためにピッチングマシンを用いた打ち出し実験を行った．打ち出されたボールに作用する空気抵抗は，減速時に変化していることを確認した．この結果から運動中の野球ボールに作用する抵抗係数は速度だけでなく，加速度にも依存することを確認した．今後，ボールの軌道解析を行う場合，抵抗係数を速度と加速度の関数として扱うことで正確な軌道が再現されると予測される．

参考文献

1) 横山佳之，高見圭太，田中潤一郎，宮嵜　武，姫野龍太郎，硬式野球ボールの空力特性に対する縫目の影響，「境界層遷移の解明と制御」研究会講演論文集(第 41 回・第 42 回)，pp.71-74.
2) 坂本誠馬，長谷川淳哉，田多輝洋，鳴尾丈司，溝田武人，"統一球と日米硬式野球ボールの空力特性"，スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011，(2011).

3) 長谷川淳哉, 坂本誠馬, 田多輝洋, 鳴尾丈司, 溝田武人, "風洞実験による硬式野球ボールの空力特性(回転軸の方向の違い)", スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011, (2011).
4) 木下康浩, 青木克己, 長瀬二郎, ”軟式野球ボールのデザインと空気力特性”, CD-ROM 論文集 329, (2001).
5) 谷口哲也, 宮嵜 武, 清水鉄也, ”硬式野球ボールに働く空気力の測定”, ながれ, 25, (2006), pp.257-264.
6) 今野友博, 市川誠司, 窪田佳寛, 望月 修, "水中を落下する球の抵抗係数", 日本機械学会論文集(B編), 79 巻 798 号, (2013), pp.151-1.
7) 野球ボールの軌道解析に基づく空気力モデルに関する実験的研究, 野崎 崇史, 藤松 信義, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2013, 242, (2013).

3.3.3.　運動する物体内部における流体挙動に関する実験的研究

(1)　目標・計画

運動する物体に作用する流体の運動特性を把握することは流体－構造連成解析問題の課題の一つである. 3.3.2 節では加速度運動する物体に作用する空気力特性を調べる研究について述べたが, 運動する構造物内での流体挙動や飛行する航空宇宙機の燃料タンク内部での液面挙動について理解することは重要である. 本研究では, 落下試験塔を製作して試験容器を落とし, 一定の加速度下で試験容器内部の液面の運動を調べることで, 加速度運動する際の液面挙動と流体の粘性, 表面張力との関係を系統的に整理することを目的としている. 2014年度は実験システムの構築を行い, 工業用油を用いて落下実験を行う. 2015年度以降は応用的実験として揺動するカプセル内部の液面挙動を調べるようなロケットの燃料タンクを模擬した実験を検討している.

(2)　意義・国際社会との比較

運動する物体内部における流体挙動に関する研究は, スロッシングや微小重力環境における液面挙動に代表されるような事例がある. スロッシングに関する研究は, 宇宙機の燃料タンク内部における液体燃料の挙動解析や地震時における高層構造物の揺動を流体で抑制する流体式精神装置の開発がある. 研究内容は実問題が殆どであり, 基本形状を用いて液体挙動を解析した事例は数少ない. 本研究は円筒形状, 矩形形状の容器に対して, 粘度や表面張力の異なる流体に対する落下時, 揺動時の液面挙動を系統的に整理することが目的である.

(3)　研究内容

運動する物体内部における流体挙動を調べるために, 液体を封入したカプセルの落下試験, 液体のスロッシング運動解析を行う. 2014年度は落下試験塔を用いて, 液体の粘度と表面張力により液面の挙動特性を調べた. 2015年度以降は液体のスロッシング運動を調べるために, 揺動装置の製作を行い, 実験を行う. 本実験を通じて, 揺動速度・加速度と液体の物性値に対する液面の運動特性を明らかにすることが目的である.

(4)　平成 26 年度進捗状況

2014年度は落下試験塔を製作して, 実験を行った. 落下試験塔の全体図を Fig.1 に示す. 落下試験塔の高さは 4150mm, 内径 200mm である. 落下試験塔は下から試験カプセルを入れる構造になっている. 試験カプセルはワイヤーで繋がっており, 電磁石で固定された状態で滑車を介して, 上に上げる仕組みになっている. また, 最上部まで試験カプセルを上げた際に, 錘で試験カプセルの位置を固定できるようになっている.

塔内部を真空ポンプで粗挽きして, ゲージ圧で-0.1MPa まで圧力を下げる. 真空中を試験カプセルが落下すると, 微小重力状態となる. このとき, 内部にある液面の挙動をデジタルカメラで撮影し観察する. Fig.2 は試験カプセルの内部を示している. 試験カプセル内部の透明容器には液体が封入されており, その挙動をデジタルカメラで撮影できる. 液面の変位を計測するためメジャーを設置してある. デジタルカメラは SONY サイバーショット DSC-TX30 を使用した. このカメラの最短撮影距離は 1cm (拡張マクロ) であり, 動画撮影サイズは 1920×1080 のフル HD, フレームレートは 60fps である. また防水であるため液体を使う本研究に適している. 落下試験塔内は, ULVAC 社

製の油回転真空ポンプ VD401 を用いて減圧した. この真空ポンプは設計排気速度が 40m^3/h であり, 落下試験塔を真空引きするのに約 10 分かかる.

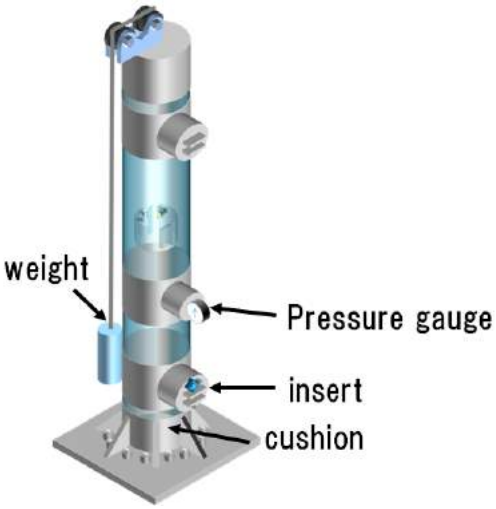


Fig. 1 Free fall tower.

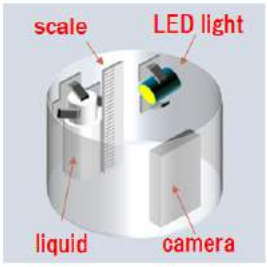


Fig. 2 Falling capsule.

実験で使用した液体は全てニュートン流体を使用しており, 主に工業用油を使用した. 今回は液体 A,B,C の三種類の液体のパラメータを調べ, 運動解析を行った. Table 1 は油の粘性係数と表面張力を示している. 粘性係数は Brookfield 社の回転粘度計 DV-I Prime を用いて計測した. 表面張力は, 液体に作用する重力と表面張力の関係を用いて[(2)], 透明容器内のメニスカス部分を画像解析することで計測した. 液面の運動解析には DITECT 社の運動解析ソフトである DIPP-Motion PRO を使用した.

Table 1　Physical properties of liquid.

Liquid	Viscosity ($\times 10^3$ Pa･s)	Surface tension ($\times 10^2$ N/m)
A	46.2	6.7
B	64.9	6.4
C	2.12	5.7

以下に, 実験結果および考察を示す.

(4)-1　試験カプセルの落下時間

試験カプセルが真空中を落下する際, 空気抵抗を受けないため自由落下状態となる. 落下時間は, x を落下距離, g を重力加速度, t を落下時間として, (1)式から計算できる.

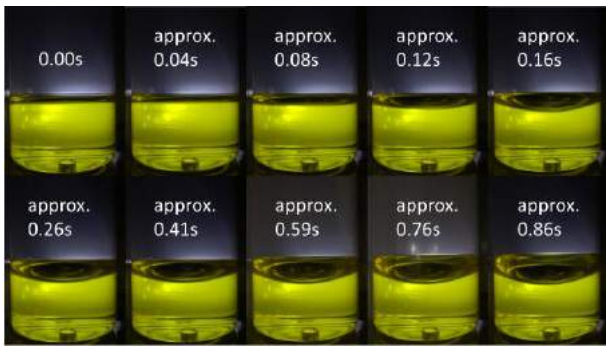
$$x = \frac{1}{2} g t^2 \qquad (1)$$

本実験の落下試験塔の落下距離は 4000mm であるので, 重力加速度を 9.81m/s^2 とすると落下時間は 0.90 sec となる. 実際の試験カプセルの落下時間を計算するために, 動画を画像に分割し,

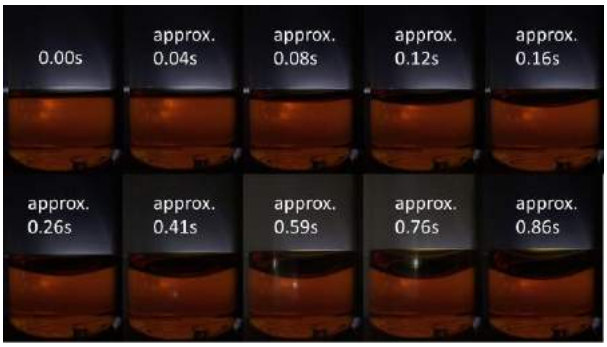
液面が動き始めた瞬間から試験カプセルが落下し終わった瞬間までの画像枚数を調べた．試験カプセルが落下し終わるまでの枚数は 54 枚であり，デジタルカメラのフレームレートは 60 fps であることから落下時間は 0.9s となった．実験による落下時間と解析結果はよく一致することから，落下中の試験カプセルは自由落下状態にあり，本実験装置は無重力環境を模擬できるといえる．

(4)-2　液面の時間変化

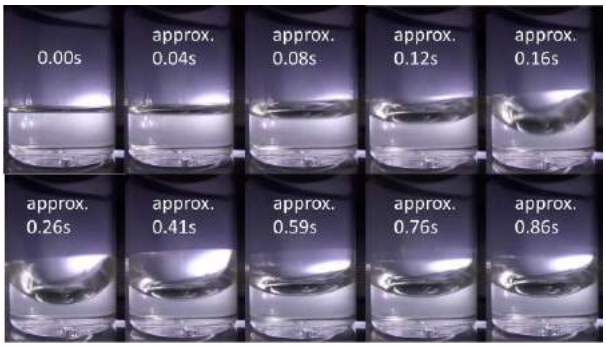
Figs. 3-(a), (b), (c) は液体 A, B, C の液面の時間変化を示している．液体ボトルが落下中の様子をできるだけ等分割して示した．



(a) Liquid A.



(b) Liquid B.



(c) Liquid C.

Fig. 3 Time histories of surface behavior of liquid.

液体 A は 0.12 秒以降，液面の中央付近が下がり始め，ボトル壁面に接したメニスカス部分が上昇し始める．その後，中央のくぼみが大きくなり，ボトル壁面に接した流体は上昇していく．試験カプセルが落下している間，液体 A の液面運動は上記の傾向を示した．

液体 B の液面は，液体 A の液面と同様の運動をしており，運動開始時の特徴も類似している．0.59 秒以降は，液面中央のくぼみに高さの変化があまり見られないように見える．

液体 C の液面は，液体 A, B に比べると落下開始直後から顕著である．落下開始後，0.04 秒のときには液面の動きを目視で確認することができており，0.26 秒で液面の中央が最も低くなり，透明容器壁面に接する液面の高さも最大となる．液体 C は液体 A, B に比べると粘度が低いことから，液面の動きが顕著であり，その動きが落下時の擾乱影響を受けやすいため非対称な液面の分布になっている．その後，0.59 秒まで液面の中央の高さは復元し，再び液面の高さが低くなっていくように見える．

液体 A, B の表面張力はほぼ同じ値であるが，粘度は液体 C に比べて高い値である．そのため，表面張力がほぼ等しく，粘度が 46.2～64.9×103Pa･s の範囲であれば，同様の傾向を示すと考えられる．液体 C の表面張力は液体 A, B の表面張力に比べて，約 11～15%小さい．一方で，液体 C の透明容器壁面のメニスカス部分の液面高さは液体 A, B のそれらの高さより高くなっている．透明容器と液体が接する部分では表面張力の影響を顕著に受けるので，液体 C の高さは低くなるはずである．しかし，液体 C の粘度は液体 A, B に比べて低いので，液面の動きが減衰しにくくなっており，液体 C の表面張力がやや低くても，最も液面が高くなったと考えられる．

(4)-3 液面座標の時間変化

無重力状態での液体の挙動に対する，粘度や表面張力の影響を調べるために，実験画像から液面の座標を読み取り，その位置や速度の時間変化を調べる．Fig. 4 は液面を読み取る座標を示している．画像中に座標軸 x, y を取り，液面を 9 つに均等に分割した点上の動きを画像処理した．

Figs.5-(a), (b), (c) は液体 A，B，C の液面座標の時間変化を示している．落下時の 54 枚の画像の中から 9 枚を選択し，液面の座標をプロットしている． 画像の単位はピクセルのため，液体ボトルの隣に設置してあるメジャーから 1mm 当たりのピクセル数を計算し，単位を変換した．液面が上昇する位置は透明容器に接する 1, 9 番目の点だけであり，それ以外の位置では下降する結果となった．Figs.5-(a), (b), (c)において，液面がボトルに接している部分は上昇しており，中心付近では下降していることが分かる．また，液体ボトルの中心に近づくにつれて下降する距離が大きくなる結果を得た．また，ボトル壁面に接する液面の最大上昇値は液体 A が 3.1mm，液体 B が 2.3mm，液体 C が 10mm となり中心の最大下降値は液体 A が-6.8mm，液体 B が-6.8mm，液体 C が-12mm となった．

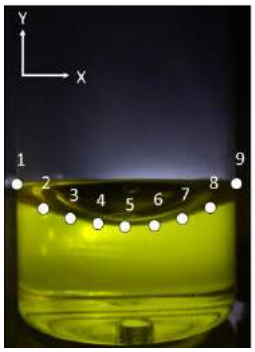
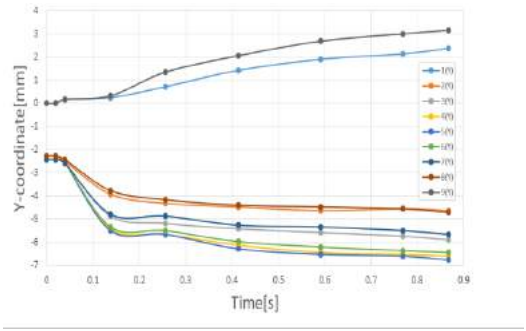
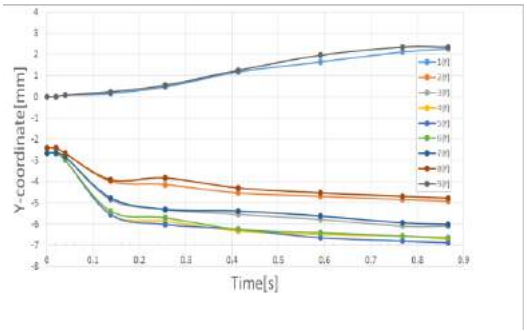


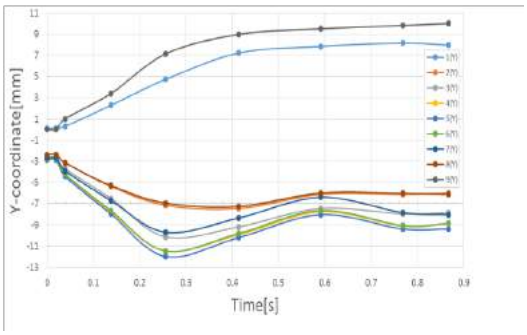
Fig. 4 Location of liquid surface used in the image processing.



(a) Liquid A.



(b) Liquid B.



(c) Liquid C.

Fig.5 Time histories of coordinates over liquid surface.

液体 C は液面の上昇，下降する高さが最も大きくなっている．また，液体 A, B に比べて，液体 C は 3(Y)～7(Y) の位置で，液面の上下運動が顕著であることも確認できる．4.2 節でも述べたように，液面の高さの違いは液体の粘度が最も影響していると考えられる．これは，液体 A の液面の上昇値が粘度の高い液体 B よりも大きいことからも説明できる．また，液体が透明容器に接するメニスカス部分 (1(Y), 9(Y)の位置) の高さは，液体 B は共に等しいが液体 A, C は最大上昇値が異なっている．

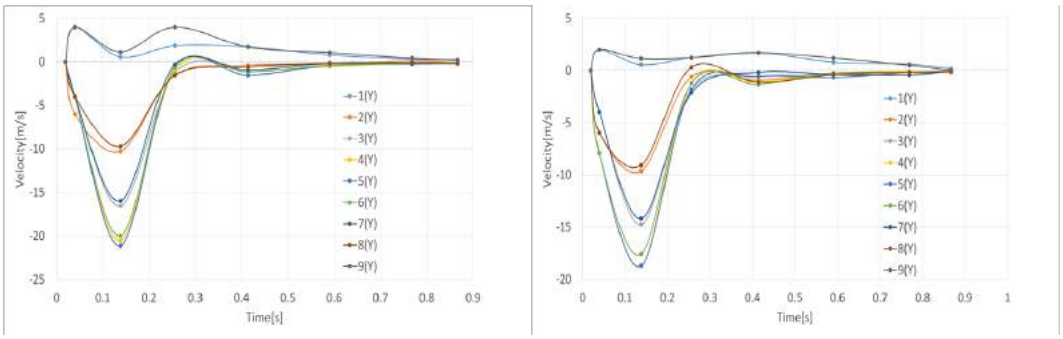
(4)-4　液面速度の時間変化

画像処理で得られた液面座標から，2次精度中心差分法を用いて液面の速度を求めた．Figs.

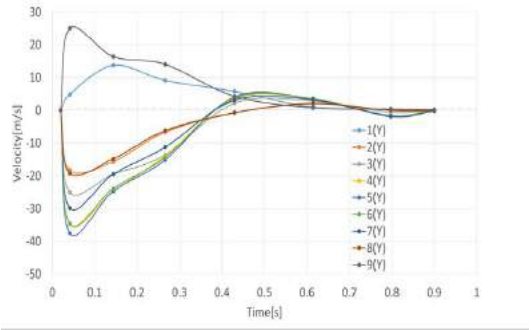
6-(a), (b), (c) に液面速度の時間履歴を示す.

Figs. 6-(a), (b) を見ると, 透明容器に接するメニスカスの部分 (Fig.6-(a), (b) の 1(Y), 9(Y) の位置) は約 0.04 秒で液面の上昇速度が最大となり, それ以外の位置では約 1.6 秒で液面の下降速度が最大となる. その後, 緩やかに下降していく速度履歴の傾向が一致している. これは 4.2, 4.3 節で述べたように, 液面の動きがよく類似していたことに対応する.

液体 C は液体 A, B と比べ粘度が極端に低いため, 液面の挙動が異なっている. 外部からの擾乱の影響が強いため, メニスカス部分 (Fig.6-(c) の 1(Y), 9(Y)の位置) での液面速度は非対称となっている. それ以外の部分では約 0.04 秒で液面の下降速度は最大となり, その後, 緩やかに下降している. Fig. 6-(c) の 2(Y), 8(Y) の位置では, 約 0.41 秒で液面が上昇に転じている.



(a) Liquid A. (b) Liquid B.



(c) Liquid C.

Fig.6 Time histories of velocity of liquid surface.

液体 A, B, C の表面張力は最大で 15%の違いである一方,粘度は 20～30 倍の違いがあるため, 本研究の液面速度の傾向の違いは粘度に依存する結果であると考えられる. 液体 C の液面が非対称となる擾乱の原因として, 電磁石により試験カプセルを切り離す際に影響を与えていると予想される.

(4)-5　まとめ

本研究で製作した試験装置により，液体の自由落下状態を模擬できることを確認し，無重力環境下における液面の運動を確認することができた．比較的高粘度の液体の場合，液面の運動が類似することを示し，粘度が低い液体は，落下中に液面の上下運動が顕著となることを確認した．

今後，液体の種類を増やし系統的にデータを整理して，物性値と液面運動の関係を明らかにしたいと考えている．

参考文献

1) 望月栄徳，藤松信義，落下試験塔を用いた微小重力環境下における液面挙動の運動解析，日本実験力学会 2014 年次講演会，(2014).
2) 今井良二，落下等を利用した流体制御実験，日本マイクログラビティ応用学会誌，Vol. 18，No.3，pp.145-149，(2001).
3) 中山秦喜著，改訂版　流体の力学，養賢堂，(1998).

3.4.　精度・妥当性検証グループ

本グループでは，シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・妥当性を向上させるための技術の研究を行っている．シミュレーションも実験も誤差を含んでおり，精度の検証および改良は重要なテーマである．具体的には，(1)効率的で精度のよい解析技術の開発，(2)実験とシミュレーションの融合，(3)材料データベースの開発，(3)精度の改良技術の開発，などを目標に研究を行っている．昨年度は特に一番目のテーマを重点的に研究を行ったが，本年度は昨年の成果に基づき，二番目のテーマである，実験とシミュレーションの融合技術の研究を行った．研究対象としては，段ボールの解析と実験を例題として取り上げている．その結果，本研究における提案手法と実験値の比較を行い未知の材料物性値の推定の有効性を検証した．今後，実験のばらつきを考慮した実験，シミュレーションの妥当性検証を引き続き行っていく．テーマ(1)については，効率的で精度の良い最適化を目的として，最適化プロセスの完全自動化を目指した研究を行っており，本年度はその理論的構築を開始するとともに，最適化アルゴリズムを生成・比較実験する環境の一部を整備した．また，材料データベースに関しては，材料データの標準データ交換形式を開発し，数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的として研究を行っており，今後，各研究グループにおける要素技術に必要とされる入出力・データ構造について調査・検討を進める．

3.4.1.　データ同化技術を用いた効率的精度解析技術の開発

(1)　目標・計画

本研究ではデータ同化により実際に計測できない物性値を数値シミュレーションに実験データを取り込むことにより推定することを目的としている．本研究で扱う段ボールは，巾目，流れ目において材料特性に異方性を有しており数値シミュレーションの対象として考える場合にはその材料特性を十分考慮して解析に取り入れていく必要があるため，材料特性を把握することは重要な課題である．従来段ボールの設計は過去の経験や，試行錯誤に依存する傾向にあり有限要素法を用いた力学的特性の解析は浸透しておらず本研究で開発した手法を用いることで効率的な設計に役立てることができると期待できる．

本年度は万能試験機により段ボールの巾，流目におけるそれぞれの変位データ測定を行い，測定データの変位と等価な値を取得するように FEM により材料特性の同定を行い，同定の妥当性を検討するため推定した材料物性値において任意の荷重を与え測定データと比較を行った．また FEM による段ボール製品において解析を行う場合，対象とする段ボールの段が周期的に並んでおり，これらの段をすべてモデリングするには手間がかかる．またそれぞれの段に対してメッシュを切らなければならず計算コストが非常に大きくなり効率的ではない．そこで本研究では均質化法を用いて解析を行うことで計算コストを大幅に削減した．

(2)　意義・国際社会との比較

段ボールは外装容器のみならず製品を衝撃から保護する緩衝材，固定材としての使用法が多くなり，またリサイクルといった環境面からも注目され，段ボールの用途が広がりつつある．近年，製品開発において正確な強度設計が必要とされ FEM を用いて強度解析等の数値シミュレーションを行い，開発の効率化を図るという手法は定着している．しかしながら段ボールにおいて現状ではまだ一般的な解析手法が確立しているとは言い難く，その非効率さがコストの上昇を招いていると考えられる．本手法は未知であった材料物性値を把握することで迅速かつ，高精度に解析を行うことが可能になると考えられる．このことから，非常に意義のある研究内容であると言える．

(3)　研究内容

本研究では数値シミュレーションに実験データを馴染ませるにあたり，万能試験機による圧縮試験を行い計測された実験データの任意の変位を目的関数とし FEM よる数値シミュレーションにおいて材料物性値を変数として探索を行う．本研究では数値シミュレーションにおいて直接モデルを作成し，解析を行うことは計算コストが大きくなる問題が避けられない，そこで本研究では段ボールが周期性の特性を持った構造体であることに着目し，このような特徴を持った構造体に対して計算精度を損なうことなく計算コストを削減できるという観点からマルチスケール解析を用いて解析を行った，

(a)　圧縮試験機による変位量の計測と推定

圧縮試験により変位量の測定を行うため，250×250 の段ボール片を作成し巾，流れ目において複数回試験を施行し計測を行った．試験結果を Fig1，Fig2 に示す．またこれらの圧縮試験においてバイアス，バラツキが0の真値の測定は不可能であることからこれらの誤差を考慮する為に本研究では非線形範囲は扱わずまず線形範囲のみを扱うものとし最小二乗法によりそれぞれの目において変位の推定を行った結果を Fig3，Fig4 に示す．

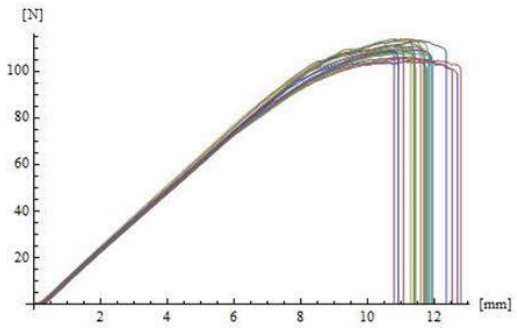


Fig1．測定値（巾目）

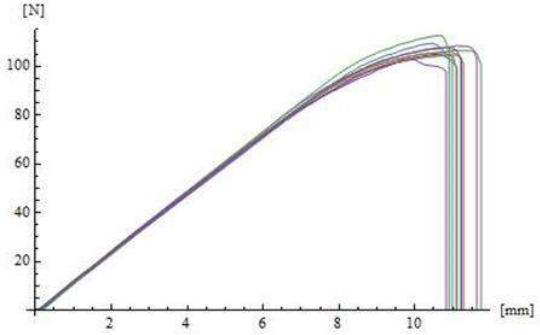


Fig2．測定値（流れ目）

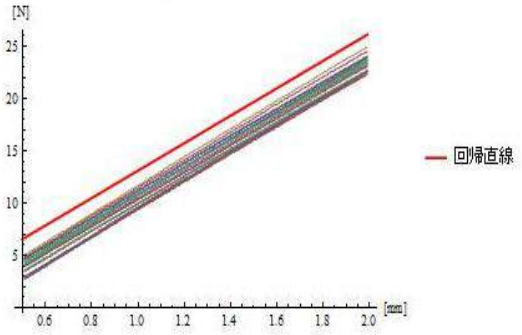


Fig3．回帰直線（巾目）

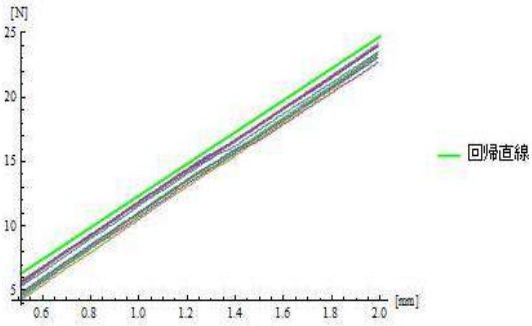


Fig4．回帰直線（流れ目）

(b)　マルチスケール解析

解析対象領域が，ある微視構造を単位として規則的に繰り返されることによって構成され，解析対象を均質な等価モデルで代用して全体を解析するというものである．具体的には均質化領域に対して，周期性の見出せるユニットセル（ミクロモデル）を取り出し材料物性値を算出する第1ステップと，均質化領域を fig 簡略化モデル（マクロモデル）作成し算出した等価物性値をマクロモデルに適応して解析を行う第2ステップからなる．ミクロモデルとマクロモデルを fig6，fig7 に示す．

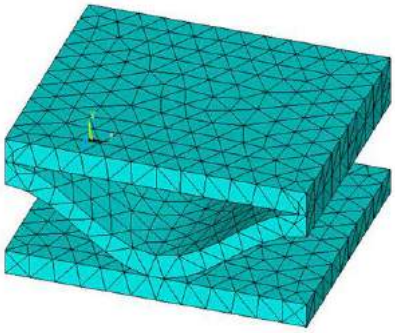


Fig6. ミクロモデル

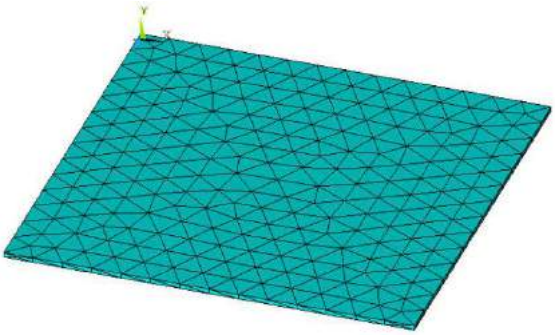


Fig7. マクロモデル

(c)　材料物性値の探索

一般に段ボールはライナと中芯を貼り合わせた構造体であり，それぞれの強度に異方性を有している．本研究ではライナ，中芯に対しそれぞれに材料定数を与え，最小二乗法により推定した回帰直線において，任意の荷重における変位にあうように巾目，流れ目において材料定数を探索し巾目と流れ目の材料定数を変数とする変位の応答局面をそれぞれ求め，巾目と流れ目の交点により材料特性の推定を行った結果を fig8 に示す．縦軸と横軸はそれぞれ中芯とライナ材料定数を示し，赤の曲線は巾目，青の曲線は流れ目の変位を示す．

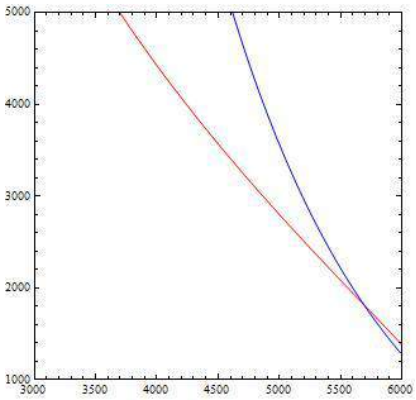


Fig8. 材料定数の推定

(d)　材料定数の検証

推定した材料特性の有効性を調べるため，境界条件として 10N，15N，20N，25N の荷重において解析を行い，回帰直線との比較の結果を Fig9，Fig10 に示す．

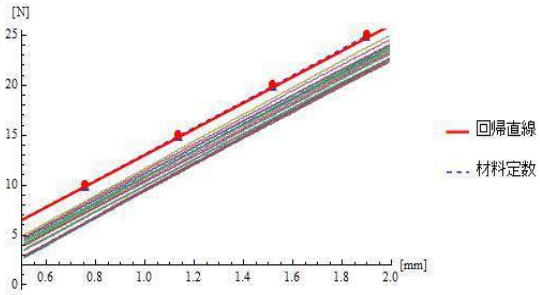


Fig9. 実験値との比較（巾目）

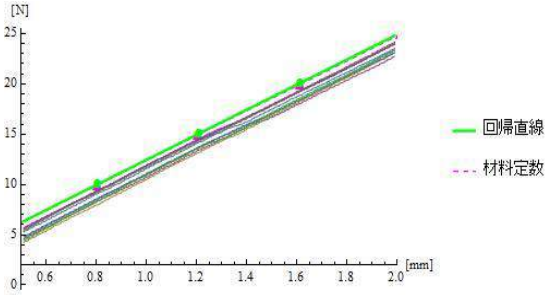


Fig10. 実験値との比較（流れ目）

(4)　平成 26 年度進捗状況

本年度は本研究における提案手法と実験値の比較を行い未知の材料物性値の推定に有効性のあることを検証した．その結果巾目，流れ目における回帰直線の値と本手法により推定した材料物性値を与え数値シミュレーションを行った解析結果において同程度の値を示すことができた．今後ベイズ推定による線形回帰モデルの応用に取り組む予定である．

3.4.2.　工学における最適化プロセスの完全自動化

(1)　目標・計画

現在，最適化アルゴリズム同士を比較する方法は存在しない．ある対象をエンジニアが最適化したいならば，まずしなくてはならない事は既存のアルゴリズム（共役勾配法・遺伝的アルゴリズム・焼き鈍し法・等々）から，その問題に最も適したものを選ぶことであるが，こんなことは不可能であるため，しょうがないのでエンジニアはその日の気分でどれかを選択しているのが実情である．このような非生産的な状況から抜け出すためには，アルゴリズム間を比較するための方法を見つけなくてはならない．

もしアルゴリズム間を比較する方法が完成すれば，それは同時に最適化における他の工程間も比較できることを意味する．つまり，最適化の工程＜目的関数 f の設計＞→＜アルゴリズムalgの選択＞→＜アルゴリズムのパラメータ$\boldsymbol{\theta}$の設定＞，の3つについて，2つ目が比較できるようになれば，残りの2工程も比較できるようになるのである．たとえば3つ目の工程の自動化は次のようになる．あるfとalgと$\boldsymbol{\theta}$について，「$\boldsymbol{\theta}$に設定した，f を最適化するためのalg」を「fしか最適化できない，パラメータは$\boldsymbol{\theta}$で固定の，ある最適化アルゴリズム$\mathrm{alg}_{\mathrm{f},\boldsymbol{\theta}}$」と解釈する．そして「パラメータ$\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \ldots, \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{N}}$のなかでどれが良いか？」という問題を，「$\mathrm{alg}_{\mathrm{f},\boldsymbol{\theta}_1}$, $\mathrm{alg}_{\mathrm{f},\boldsymbol{\theta}_2}$, …, $\mathrm{alg}_{\mathrm{f},\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{N}}}$のなかでどれが良いか？」という問題に置き換え，比較する．

このように各工程間が比較できるようになれば，それを基に最適化の全工程が自動化できることは明らかである．そうなれば，例えばある新商品の試作品を最適化したいなら，そのエンジニアが使用しているシミュレーションソフトウェアのどこかにあるであろう「最適化する」というボタンをクリックし，じっと待つだけである．

このような最適化の完全自動化を実現するために，まずはその土台部分を完成させることを計画している．

(2)　意義・国際社会との比較

最適化が全自動化されれば社会の様々な場面において最適化が手軽に使われるようになりエコに貢献する．

(3)　研究内容

ある集合 X, Y, Z について，これらからなる可測空間をそれぞれ (X, Σ_X), (Y, Σ_Z), (Z, Σ_Z) と書くとする．ここでΣ_Xは，X上の σ 加法族である．また今後 (X, Σ_X) は X と略せるとする．正則条件付き確率（マルコフ基底）k を，引数を2つとる次のような関数と定義する：

$$X \ni x \mapsto k(.|x) \in [0,1]$$

$$\Sigma_Y \ni B \mapsto k(B|.) \in \mathbb{R}$$

$$(X \times \Sigma_Y) \ni (B|x) \mapsto a \in [0,1]$$

また，2 つのマルコフ基底 $X \overset{r}{\to} Y$, $Y \overset{k}{\to} Z$ の合成関数 $(k \circ r): X \overset{r}{\to} Y \overset{k}{\to} Z$ を，

$$(k \circ r): (\Sigma_Z \times X) \ni (C|x) \mapsto \left(\int_{y \in Y} k(C|y) dr(.|x) \right) \in [0,1]$$

で定義する. また

$$k_f(A|x) \coloneqq k(f^{-1}(A)|x) = k(A|f(x))$$

とする. 可測空間を対象, 可測関数を射とする対称モノイド圏 **Meas** から, 可測空間を対象, マルコフ基底を射とする対称モノイド圏 **P** への共変関手 δ を

$$\delta: \mathbf{Meas} \to \mathbf{P}$$
$$: (X, \Sigma_X) \mapsto (X, \Sigma_X)$$
$$: f \mapsto \delta_f$$

とする. このとき, 工学最適化における様々な概念, すなわち単目的最適化・多目的最適化・ロバスト最適化・ノイジー最適化・実数値最適化・組み合わせ最適化は, まとめて次の式で表現することができる:

$$\mathrm{X} \otimes \otimes_{j=1}^{J} \mathrm{Y}^{\mathrm{X}} \xleftarrow{M \otimes \otimes_{j=1}^{J} 1} \mathrm{X} \otimes \otimes_{j=1}^{J} \mathrm{Y}^{\mathrm{X}} \xrightarrow{1 \otimes \otimes_{j=1}^{J} N} X \otimes \otimes_{j=1}^{J} Y^X$$

$$\xrightarrow{1 \otimes \otimes_{j=1}^{J} \delta_{\Gamma_\cdot}} \otimes_{j=1}^{J} (X \otimes (X \otimes Y)^X) \xrightarrow{\otimes_{j=1}^{J} \delta_{ev}} \otimes_{j=1}^{J} (X \otimes Y)$$

ここでJは目的関数の数, また $\Gamma_\cdot$ は, 任意の $f: X \ni \boldsymbol{x} \mapsto f(\boldsymbol{x}) \in Y$ について,

$$\Gamma_f: X \ni \boldsymbol{x} \mapsto \big(\boldsymbol{x}, f(\boldsymbol{x})\big) \in X \otimes Y$$

と定義される **Meas** の射である.

(4) 平成 26 年度進捗状況

前述の工学最適化の表現から, 最適化アルゴリズムを生成・比較実験する環境の一部を整備した.

3.4.3.　物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発

(1)　目標・計画

数値シミュレーションのために基本的な物性値は必須のものであるが，材料の物性値を収めたデータベースにおけるデータ表現は統一されておらず，多くの材料データベースがインターネット上に存在する現在でも，必要なデータは事実上手作業で値を入力する必要がある．本研究では，材料データの標準データ交換形式を開発し，数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的とする．

(2)　意義・国際社会との比較

材料物性に関するデータベースは各所で開発されているが，統一されたフォーマットは無く，データを交換するための標準を作成する試みは NIST などによって行われてきたが現在のところ定まった標準がない．データ交換のためのフォーマットが統一されることにより，分散したデータベースの統合利用に加え，数値計算システムなどからの利用も容易になる．

米国マテリアルズ・ゲノム・イニシアティブの影響を受け，2014 年には我が国においてもマテリアルズ・インフォマティクスに関連する研究プロジェクトが注目され，物質・材料研究機構にプラットフォームが設置されるなどしている．内閣府戦略イノベーション創造プログラムでは，テーマの一つである革新的構造材料にマテリアルズインテグレーションが取り上げられた．

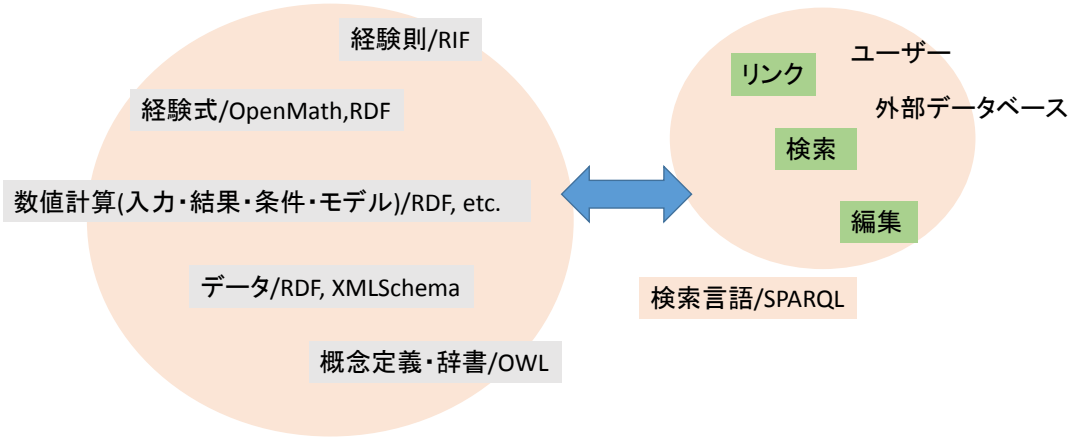
マテリアルズインテグレーションには東大・小関教授を代表者とするテーマが採択され，平成 26 年度より 5 年間で構造物溶接部の性能評価を例題としてシステム開発を行うこととなり，芦野はここに分担者として参画し，セマンティック・ウェブ技術を用いた材料に関する数式・データ・シミュレーションを連携させるためのデータ構造開発を行うこととなった．

海外でのマテリアルズ・インフォマティクス研究では機能性の材料や鋳造などが主たる対象であり．構造材料，特に鉄鋼材料の溶接部はミクロ組織も複雑であり計算による物性の推定が困難であることから対象となっていない．我が国では産業界での必要性などからあえて困難な対象を選んで研究対象とすることとなった．

(3)　研究内容

セマンティック・ウェブの一連の規格である RDF (Resource Description Framework)， OWL (Web Ontology Language) ， RIF (Rule Interchange Format), および数式の意味内容を記述する OpenMath など XML を用いた記法を用いて，既にある程度知見の整備されている機械試験に関連した経験式，推論規則，データを記述してリンクし，検索言語 SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language)を用いて検索する．

溶接の計算機支援は従来から溶接学会などにおいて多くの研究があるが，本研究では単一の知識ベース，あるいは計算ソフトではなく，それぞれの要素をリンクして相互参照できるようにし，ユーザや研究者のノウハウや知識を集合知として連携してゆくことのできる構造を目指す．



(4)　平成 26 年度進捗状況

SIP 初年度として，既にある程度計算式などが整備されている機械試験などを例として経験式，推論規則，データをセマンティック・ウェブの規格をベースにしてリンクしたプロトタイプを開発し，データ構造を検証する．また，各研究グループにおける要素技術に必要とされる入出力・データ構造について調査・検討を進める．

3.5. 可視化検証グループ

本プロジェクトでは，流体–構造連成解析の品質保証に特に重点を置いている．その中でも，

- 解析結果を正しく理解し，評価すること
- 実験結果等と公正な比較を行うこと

は重要な要素であると考えられる．そのためには，可視化は必須である．特に，連成解析は現象が複雑であり，限られた数値データのみでこれを評価することは困難である．実験における可視化技術やその応用は実験による検証の項目に譲り，ここでは，解析結果の可視化および，比較のための実験の可視化結果の表示を中心に研究を行う．解析は，当面簡単のため2次元および3次元でもそれほど3次元性が強くない問題を対象とするが，そうであっても特に流れ場は3次元であり，また今後のより一般的な問題に対応するためにも，3次元の可視化が本質である．そこで，ここでは連成解析において3次元データを如何に可視化するかを中心に研究を進める．1つは以下に述べるような立体視あるいは VR（バーチャルリアリティ）を用いた可視化であるが，これに限らず，3次元データの可視化方法を検討していく．

3.5.1. 3 次元画像による定量的･定性的検証

(1) 目標･計画

本研究の目標は，流体構造連成問題について，数値解析の精度検証を支援するための，画像による定量評価，定性評価の手法やシステムを開発し，本プロジェクトで開発される連成解析手法の評価に供することである．特に，バーチャルリアリティ（VR）技術を利用した３次元可視化システムを中心に３次元画像による可視化評価を中心に研究を進める．

大きな計画としては，

平成 24 年度：

表示装置となる VR 装置の導入を行い，ハードウェアの準備を行う．

平成 25 年度：

VR 装置の上でソフトウェアを開発し，PC クラスタと結合してこの上での解析結果の表示を行う．

平成 26 年度：

画像による検証に利用するための可視化システムを VR 装置上で開発する．

平成 27 年度：

積極的に可視化による比較・検証を行う．特に，（立体）画像を用い，実験と解析の可視化画像を重ねたり，並べたりして効果的な比較・検証方法について検討する．

平成 28 年度：

研究をまとめ，その公開方法について検討する．

としている．これらにより，従来とは異なる，多彩な可視化により，直感的･効果的な比較･検証が可能となり，開発される連成解析手法をより多面的に評価できると考える．

(2) 意義･国際社会との比較

連成解析は，複数の物理が関連するため，その妥当性の評価は単一の物理に対する解析よりも難しい．ここでは，流体–構造連成を中心に研究を行っているが，流体・構造それぞれ単独で妥当性を示すことができても，それらを組み合わせただけで連成問題が正しく解けるということでは必ずしもない．２つの物理をやり取りするものがあり，それが正しく評価されているかが，重要であるが，実験的に測定できるもの，できないもの等あり，単純ではない．ここでは，可視化，特に３次元画像を利用することで，実験と解析を出来る限り直接的に比較することを考えており，流体–構造連成解析の精度検証・妥当性検証のテンプレートとなることを期待している．

国際的に見ると，連成解析は計算力学における重要な研究テーマの１つであるが，必ずしも検証については進んでおらず，信頼できるとされる過去の解析例と比較したり，パラメータスタディによって，実験で見られる現象と，解析で得られる現象の範囲が等しい（あるいは近い）といったことを示すにとどまっている場合がほとんどである．連成解析手法

を評価する手法の１つとして３次元画像を用いる方法は，ほとんど例がなく，その成果は重要なものとなると考える．

(3)　研究内容

本研究の中心となる装置は，図１の２面没入型ディスプレイ装置である．大きさは正面のスクリーンが 2.8×2.1m，下のスクリーンが同じく 2.8×2.1m でここに２台のプロジェクターにより，それぞれ 1400×1050 の解像度の画像を表示する．画像は時分割方式で立体映像を投影できるようになっており，液晶シャッター眼鏡によって立体映像を観察する．立体映像は３台のグラフィックスワークステーションで生成する．１台はマスタで，あとの２台が正面と下面の映像を担当する．これとは別に観察者や観察者が持つコントローラの位置を赤外線カメラで取得するシステムがあり，１台のトラッキングワークステーションで制御する．グラフィックスワークステーションのマスタはトラッキングワークステーションから逐次データを取得して観察者（やコントローラ）の位置を計算する．

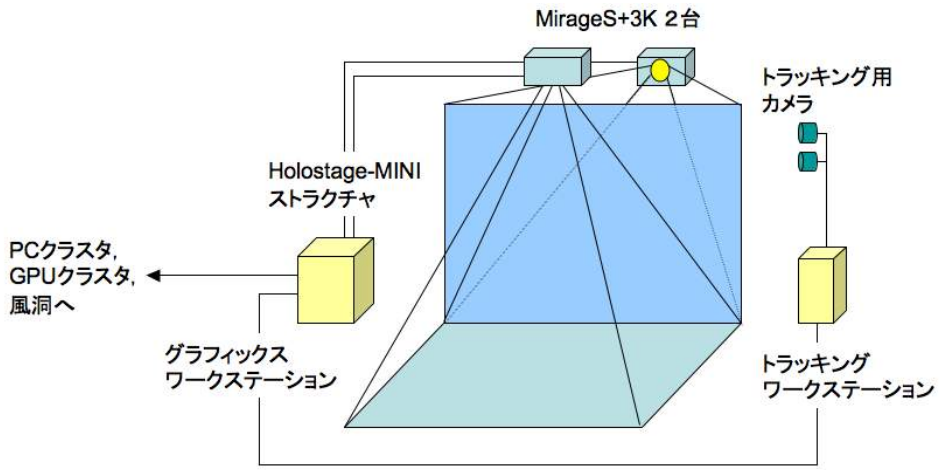


図１　システム構成図

このシステムに，流体–構造連成の３次元画像を表示する．表示する画像は大きく分けると，実験の画像と解析の画像の２種類である．これらを同時に，あるいは交互に表示することで直接的な比較を行う．

実験の画像については，物体の変位等，直接得られるものから，PIV で可視化した流れの速度分布や PSP（感圧塗料）で可視化した物体面上の圧力分布，画像解析により得られる応力分布等が考えられる．これらを得ることは，実験班の研究に委ねられるが，その３次元化や，本装置での表示にはデータの転送等も含めてさまざまな検討と技術的課題の克服が必要である．

解析結果については，単独の物理に基づく解析では多くの知識と経験があるものの，連

成問題については，それぞれの物理に関する量を可視化表示するにとどまっており，まずは何を可視化することで連成解析の精度や妥当性評価につながるかの検討が重要となる．そのため，まず，さまざまな物理量の３次元可視化を可能とするシステムを開発する．解析は大規模となることが前提なので，そのデータをどのように転送し，また可視化するかも課題となる．

次に，実験と解析の比較である．たとえば，視点・スケールを合わせて交互に表示する／重ねて表示する，などが考えられるが，それには時間的・空間的な位置合わせ等，技術的な課題が多くある．また，必ずしも同じ量を表示できる訳ではないので，何を見るか，比べるかも問題となる．また，実験については，取得した画像（動画）をそのまま見るのか，あるいはデータを抽出して，解析結果と同じように CG で表示するのかといったアプローチもありうる．これらについても時間をかけて検討し，システムを構築することで新しい可視化法・評価法につなげたい．

最終的には，システム化できるところはまとめたい．実験データも，標準的で精度の高いものが得られれば，標準問題として公開したいが，その際に3次元画像もその1つとできればよいと考えている．

(4) 平成 26 年度進捗状況

まず，2013 年度計算力学研究センター年報の本稿執筆時点ではできていなかったが，図２に示す全体構成図において，AVS-MPE を用いて解析結果と実験結果を同時表示するシステムを構築した．データはそれぞれ時系列で用意されているとし，１時刻目から同時に進めて表示するようになっている．

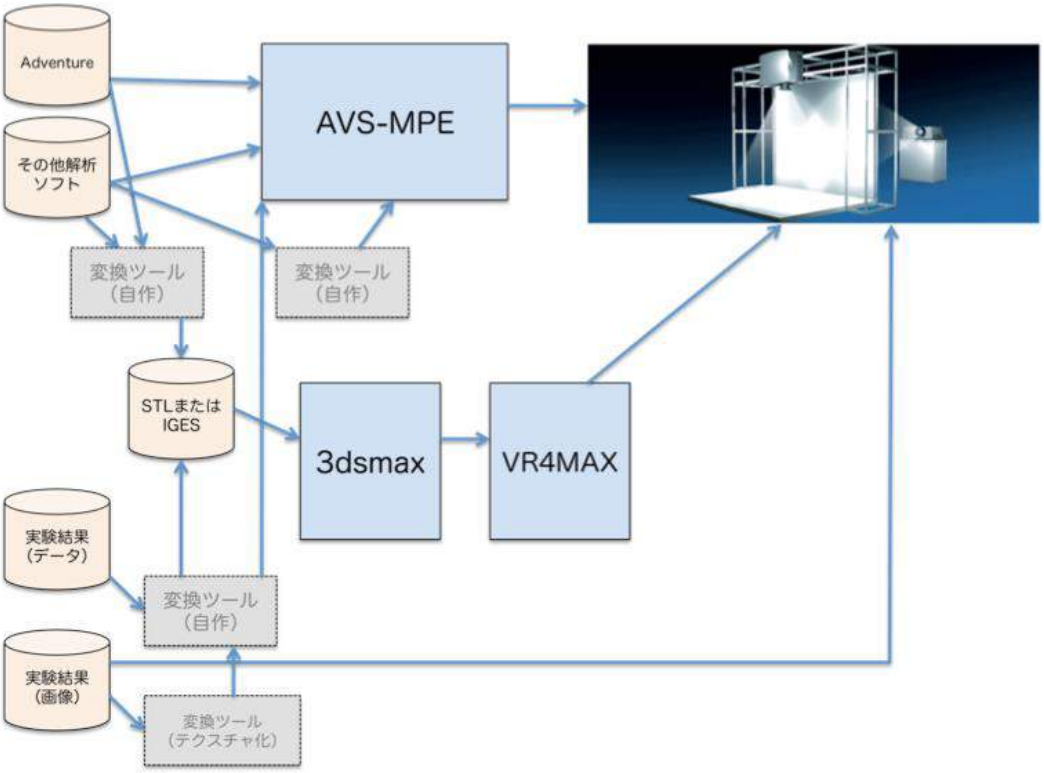


図 2　可視化システム全体構成図（案）

図３は AVS の可視化の仕組みを示すネットワークエディタである．ここにはいくつかのモジュールが示されており，それぞれのモジュールが可視化においてなんらかのまとまった役割を果たしている．実際にはここにあるモジュールのいくつかはさらに複数のモジュールからできている．ここでは，解析結果は物体形状と流れの流線および断面の圧力，実験は２次元の動画１種類を表示するようになっているが，表示内容はネットワークの構成を変えたりモジュールを追加／変更したりすることで，変えることができる．

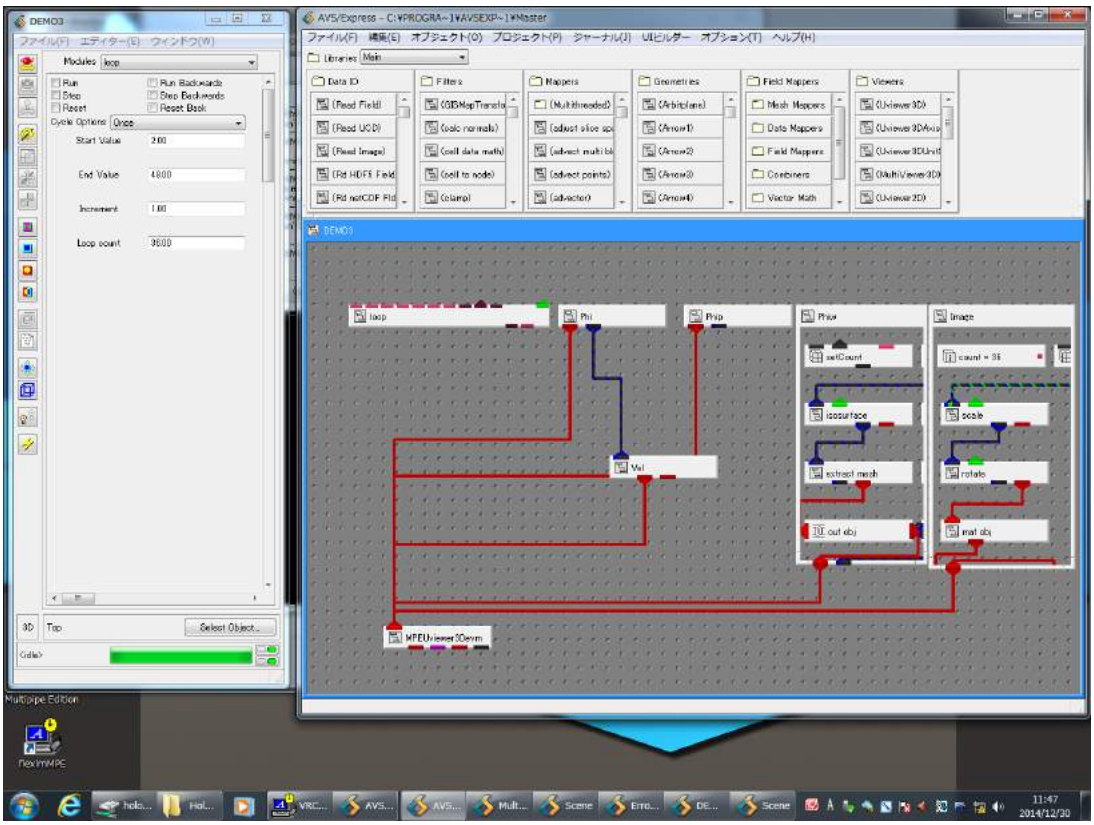


図 3　実験と可視化の同時表示のための AVS ネットワークエディタ

当面は，標準問題に対する，解析結果および実験結果の同時表示を試みている．

予定通りに進まなかったこととしては，図 2 の 3dsmax→VR4MAX のパスについては，解析結果（や実験結果）を CAD データにするところができていないので実現していないが，3dsmax で作成した CG データ自体は表示できるようになっているので，これは年度内にも実現したい．また，PC クラスタと VR 装置とのネットワーク接続はできているが，活用できていないので，これも早々に整備したい．

3.6.　横断的研究会

前述の 5 つの研究テーマは，本プロジェクトの柱となるものであるが，それぞれを横断的につなぐ研究や，それぞれの成果から派生した研究もまた重要であると考える．そこで，計算力学研究センターでは，そのときどきで研究会を立ち上げ，5 つの柱とは別のグループで研究を進めようと考えている．研究テーマごとの活動と重複する部分もあるが，ここでは今年度に活動のあった研究会の概要をあらためて記す．

3.6.1.　連成標準問題検討会

連成解析の精度を高め，実用的な手法として育てるのには標準問題が必要であろうと考える．流体解析・構造解析などではそれぞれ手法を開発するとまず解くべき問題があり，それによって手法の精度や有効性等が確認できる．残念ながら連成問題にはそのような標準問題が少ない．そこで，ここでは流体―構造連成に関し，当センターで実験を行い，詳細なデータを取って標準問題として提案できるものを検討する．最終的には，実験・解析を行い，比較するとともに，それらを標準問題として公開する．平成 25 年度は，具体的なターゲットとして一様流れ中に置かれた一端固定の円柱の連成挙動に着目し，数値解析が比較的容易なレイノルズ数 10,000 程度になるように流速や円柱の大きさを決めた後，連成解析として適当な規模の変形量になるように材料定数を決定し，標準問題の最初の一つとして提案したが，今年度はこの問題を解析手法開発グループにおいて解析・比較検討を行っている．

3.6.2.　計算力学と（材料）データベースの会

計算力学に現在用いられている物性データの信頼性の確認と，今後必要とされるデータの所在についての検討が必要と考えられる．また，数値計算とデータベースのより緊密な連携のためには，データアクセスのための API について検討する必要がある．現在，欧州標準規格委員会のワークショップにおいて，機械試験の試験データを電子的に記述するための標準についての検討が行われている．三次元 CAD データなども含む製造物データ管理のための規格である ISO10303 (STEP)との連携も視野に入っており，計算力学による設計と個別の材料の試験データを共通のデータフォーマットを用いて連携させるための規格として今後検討の必要がある．

3.6.3.　楽器音響と流体構造連成研究会

音楽や楽器に関する研究は，他の研究領域に比べまだまだ未知なことが多いわりには研究が進んでいない．その理由には，芸術至上主義ともいわれるように音楽になにか科学的なものや現実的な効果を測ることに，ある種のアレルギーが世の中にはまだあることが挙げられ，また研究対象として理解されなかったり予算が組まれなかったりするからである．しかし，本研究会では，音響

工学や計算工学の立場から科学的に楽器の音響特性や構造，音色，その先には芸術の科学的解明を目的とする．そもそも音楽は楽器本体から発せられる空気振動現象を脳の聴覚野で知覚するプロセスであり，楽器の振動と周辺流体の連成は計算工学としても困難であるが興味深い対象である．現在は，弦楽器の音響特性のスペクトル解析やハイスピードカメラを用いた弦の振動の可視化，操作性やヴィヴラートのような演奏技術などの調査を行っている．

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

平成 23 年 10 月より JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」において，研究課題名「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」が採択され，研究拠点を当センターに置き，研究を実施している．

4.1.1. 研究実施体制

ポストペタコンなど次々世代の並列計算機アーキテクチャにおいて，大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション分野が高い演算効率を得るためには，マイクロプロセッサやメモリの階層構造を考慮したプログラミングモデルが必要である．特にそれは，入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで，統一的に提供される必要がある．つまり，一般的な実アプリケーションはプレ／ソルバー／ポスト処理など目的に応じたモジュール群で構成されていることが多いが，ポストペタコンの利用が想定される大規模シミュレーションでは，全ての処理がポストペタコン上で行われ，モジュール間のデータ受け渡しを最小限にするようなプログラミングモデル，並びにそれに基づく大規模数値計算データ処理システムの基盤技術が不可欠と言える．

ここで，ポストペタコンのアーキテクチャとしては，SIMD 拡張命令，GPGPU，FPGA など何らかのアクセラレータを搭載したヘテロジニアスメニーコアで構成される計算ノードをネットワーク接続した，分散メモリ型アーキテクチャになると予想され，計算ノード内はチップ上／ボード上問わずに異種の演算装置が NUMA 型で搭載されることを想定する必要がある．また，演算性能と通信性能の向上比を考慮すると，マイクロプロセッサにとって計算ノード間ネットワークというのは，現在で例えると WAN 並みに遅く感じるネットワークとなる可能性があり，ポストペタコンはそれらを数十万から数百万ノード規模で接続して構築されると予想される．さらに，ポストペタコン利用が想定されるシミュレーションにおいて生成されるデータのファイルサイズはペタバイトオーダーになるが，ハードディスクなどの外部記憶装置の記憶容量やアクセス性能の大幅な改善にはまだ時間を要すると考えられる．つまり，ポストペタコンを利活用できるアプリケーションは，ヘテロジニアスな分散メモリ並列かつ数百万計算ノード環境において高い並列効率と演算効率を示す必要があるが，その高いハードルを突破できたとしても，大規模な入出力データを効率的に処理できない限り，本当の意味での利活用は不可能である．この問題を解決するためには，並列ファイル入出力システムの効率化やデータ圧縮展開アルゴリズムの高速化などだけではない，根本的なデータ量削減に関する解決策が求められる．

そこで本プロジェクトでは，ポストペタコン上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として，申請者らがこれまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法の技術を応用した，階層型領域分割法による大規模数値計算データ処理システムの研究開発を目指す．この基盤技術にはアプリケーション分野に依存する箇所があることが予想されるため，本提案では連続体力学向けアプリケーションを対象としながら，具体的には以下の基盤技術開発をターゲットとする．

A) マルチレベル領域分割法による連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列化ライブラリ

B) マルチレベル領域分割法による多階層計算格子データの生成，操作および I/O ライブラリ
C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

これらの技術に基づいて開発されるアプリケーションでは，核となるモジュール間のデータ受け渡し量を従来のものより3桁削減することが可能となり，ピーク演算性能比20%以上のシステム開発の実現を目指す．

4.1.2. 研究実施内容

(1)「東洋大学」グループ
① 研究代表者：塩谷隆二（東洋大学総合情報学部，教授）
② 研究項目
階層分割型数値計算ライブラリの基礎研究並びに設計とその応用

(2)「名古屋大学」グループ
① 主たる共同研究者：荻野正雄（名古屋大学情報基盤センター，准教授）
② 研究項目
階層型ソルバーライブラリの基礎研究とその応用

(3)「東京大学」グループ
① 主たる共同研究者：越塚誠一（東京大学大学院工学系研究科，教授）
② 研究項目
階層分割型入出力ライブラリ並びに連続体力学向け問題領域専用言語の基礎研究とその応用

4.2. (株)日立製作所機械研究所との連携

（株）日立製作所機械研究所とは，(1)メッシュ生成技術，(2)構造健全性設計技術に関して連携を行っている．近年，産業界では解析主導設計による製品開発のスピードアップと設計上流段階での品質作り込みが最重要課題として進められている．そのための CAE システム技術の開発をこれまで行い，実用性の検証を実施した．そこで，本年度は，テーマ(2)に関する，き裂進展解析を用いた Cu コアはんだボールの接続信頼性評価メッシュ生成技術を中心に研究を行った．

4.3. 独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携

当センターで開発を行っているフリーメッシュ法(以下 FMM)と仮想き裂閉口積分法(以下 VCCM)を融合した構造健全性評価システム FMM-VCCM の信頼性の検証と実務への応用を目的として，独立行政法人原子力安全基盤機構(以下 JNES)への技術支援を行う．また，JNES，株式会社テクノスター，プロメテック・ソフトウェア株式会社と連携し世界最先端レベルの破壊力学ソフトウェアの構築も行っている．

4.4. 東京理科大学との連携

東京理科大学と共同で配管内の腐食同定問題について研究している．東京理科大学ではおもに

実験を，本センターではシミュレーション方法について研究を行っている．本年度は，逆問題の観測方程式のモデル化について検討することを目標とした．中性環境における金属部材の腐食は，溶存酸素によるカソード反応が支配的であるので，溶存酸素の金属部材表面への拡散速度が，カソード反応の律速反応になっていると考えられる．そこで，金属部材近傍の流体の速度勾配および溶存酸素の濃度分布に着目

して，流れのある配管内の腐食を精度良くシミュレーションできるか考察を行った．更に，今年度から，これらの解析をアダプティブに行うために，階層メッシュを用いた手法も開発された．

4.5.　本田技術研究所との連携

本田技術研究所から，「ヘッドライト損傷解析手法の確立」と「永久変形量予測技術の開発」を依頼されている．従来は，衝突解析ソルバーRADIOSS を用いることによって，これらの解析していた．しかし，より詳細で正確な解析を求めたいという要望から RADIOSS にプリポスト処理を加えることによって，これらの問題を解決する．「ヘッドライト損傷解析手法の確立」に対しては，アダプティブな亀裂進展解析の機能を，「永久変形量予測技術の開発」に対しては，アダプティブな永久解析の機能を加えることになる．これらの機能を加えることによって，超大型の並列計算機や専用のソルバーで長時間かかった解析を，これまでと同じ計算機環境で一晩あれば解析できるようになる．

5. 成果の広報および普及活動

5.1. 第 3 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウム

2014 年 3 月 10 日(月), 東洋大学白山キャンパス 2 号館 16 階スカイホールにて, 第 3 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウムを開催した.

当日は, 計算力学研究センターと HDDMPPS グループから, 各 5 名が講演を行い, 1 年間の研究の進捗を報告すると共に, 来年度以降の研究方針についての議論が活発に行われた

また, 特別講演として, ヴァージニア工科大学の古川知成教授をお招きして,「タイヤ研究に見る計算・計測工学」と題した講演も行われ, アメリカにおける最先端の計算・計測工学について知ることの出来る, 貴重な講演となった.

5.1.1. プログラム

13:00-13:10	開会の挨拶	矢川元基 東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授
13:10-14:50	セッション 1 (CCMR) 文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業: 「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」 プロジェクトリーダ:田村善昭(東洋大学計算力学研究センター長)	
	「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」	田村善昭(東洋大)
	「並列流体-構造連成解析手法の開発」	長岡慎介(東洋大)
	「流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発」	増田正人(東洋大)
	「合理的な維持管理を目指したコンクリート構造物の塩害環境評価に関する数値解析的検証」	富山潤(琉球大)
	「ブロック構造を有する岩盤の 3 次元モデル生成および地すべり解析」	松原仁(琉球大)
14:50-15:00	休憩	
15:00-16:40	セッション 2 (HDDMPPS)	

	科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業（CREST）:	
	「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」	
	プロジェクトリーダ：塩谷隆二(東洋大学)	
	「ポストペタスケールシミュレーションのためのライブラリ開発」	塩谷隆二（東洋大）
	「大規模粒子系シミュレーションのメニーコア向け開発と多数の浮遊物が伴う市街地津波解析」	室谷浩平（東京大）
	「超大規模データ可視化ライブラリの開発」	和田義孝（近畿大）
	「超大規模解析に向けた数値計算ライブラリの開発」	屋雄介（名大）
	「高精度電磁界シミュレーション」	武居周（宮崎大）
16:40-16:50	休憩	
16:50-17:20	特別講演 「タイヤ研究に見る計算・計測工学」	古川知成 （Virginia Tech.）
17:20-17:30	閉会の辞	田村善昭 東洋大学計算力学研究センター長

5.2.　第 10 回機械工学国際会議

第 10 回機械工学国際会議 2014 年 6 月 19 日（木）から 21 日（土）にわたり，ダッカ（バングラデッシュ）のバングラデッシュ工科大学（Bangladesh University of Engineering and Technology: BUET）にて行われた，第 10 回機械工学国際会議 （10th International Conference on Mechanical Engineering: ICME2013）に，東洋大学計算力学研究センターより 3 名が参加・講演を行った．ICME は 2 年に 1 度，バングラデッシュで開催される，機械工学の分野を幅広く取り扱った国際会議である．当日は，センター長の田村が Keynote speaker として講演を行った他，研究員の塩谷，研究助手の長岡が講演を行った．この地域で行われる会議に参加する機会は，非常に少ない為，同地域の機械工学や 計算力学の現状を知ることができる，極めて有益な機会となった．

図　第 10 回機械工学国際会議の様子

5.3. 第 5 回国際スーパーコンピューティングワークショップ

5th International Industrial Supercomputing Workshop (IISW2014)

2-3 October 2014, Hakusan Campus, Toyo University, Tokyo, Japan

http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/iisw2014.html

2014 年 10 月 2 日・3 日，東洋大学白山キャンパス 125 周年記念ホールにて第 5 回国際スーパーコンピューティングワークショップ（5th International Industrial Supercomputing Workshop, IISW2014）が行われた．第 5 回国際スーパーコンピューティングワークショップは NCSA（アメリカ），KISTI（韓国），HLRS（ドイツ），そして SURFsara（オランダ）に続くものである．このワークショップの主な目的は，スーパーコンピューティングに関連する技術的問題を共有することである．世界中から集まった優れた研究者たちにより活発な議論が行われた．参加者たちにとって，各々の研究活動をさらに推進するための幅広くかつ深い知識を得ることができた貴重な機会となった．

5.3.1. 実行委員会

Ryuji Shioya (Toyo University) - Chairman

Hiroshi Kawai (Tokyo University of Science Suwa)-Secretary General

Yoshiaki Tamura (Toyo University), Masao Ogino (Nagoya University), Kohei Murotani (University of Tokyo), Yasushi Nakabayashi (Toyo University), and Akio Miyoshi (Insight Inc.)

Supported by

CREST, Japan Science and Technology Agency (JST)

Center for Computational Mechanics Research (CCMR), Toyo University

Assisted by

Japan Association for Computational Mechanics (JACM)

Japan Society for Computational Engineering and Science (JSCES)

Joint Usage/Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures (JHPCN)

5.3.2. プログラム

Day 1, 2nd October, 2014

10:00	Welcome and introduction: Ryuji Shioya, Toyo University, Japan
10:15-11:15	Session 1 Chair: Ryuji Shioya, Toyo University, Japan

Lecture 1	Merle Giles, National Center for Supercomputing Applications (NCSA), University of Illinois, United States
Lecture 2	Bastian Koller, High Performance Computing Center Stuttgart (HLRS), University of Stuttgart, Germany
11:15-11:45	Coffee Break
11:45-12:45	Session 2 Chair: Yasushi Nakabayashi, Toyo University, Japan
Lecture 3	Sang Min Lee, Supercomputing Center, Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI), South Korea
Lecture 4	Satoshi Itoh, Advanced Institute for Computational Science (AICS), RIKEN, Japan
12:45-14:15	Lunch
14:15-15:45	Session 3 Chair: Yoshitaka Ezawa, Toyo University, Japan
Lecture 5	Yoshinari Fukui, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Japan
Lecture 6	Atsushi Sasaki, Global Scientific Information and Computing Center (GSIC), Tokyo Institute of Technology, Japan
Lecture 7	Makoto Tsubokura, Division of Mechanical and Space Engineering, Hokkaido University, Japan
15:45-16:15	Coffee Break
16:15-18:15	Session 4 Chair: Hiroshi Kawai, Tokyo University of Science, Japan
Lecture 8	Hiroshi Akiba, Allied Engineering Corporation, Japan
Lecture 9	Hiromu Chiba, Numerical Algorithms Group, Japan
18:15	Closing: Hiroshi Kawai, Tokyo University of Science, Japan
18:30-20:30	Reception Party

Day 2, October 3rd, 2014

10:00	Opening: Yoshiaki Tamura, Toyo University, Japan
10:15-11:15	Session 5 Chair: Yoshiaki Tamura, Toyo University, Japan
Lecture 10	Walter Lioen, SURFsara, Netherlands
Lecture 11	Mariano Vazquez, Barcelona Supercomputing Center (BSC), Spain
11:15-11:45	Coffee Break
11:45-12:45	Session 6 Chair: Hiroshi Kanayama, Japan Women's University, Japan

Lecture 12	Leif Nordlund, KTH Royal University of Stockholm, Sweden
Lecture 13	Pankaj Shah, Ohio Supercomputer Center and OARnet, United States
12:45-14:15	Lunch
14:15-15:45	Session 7 Chair: Masao Yokoyama, Meisei University, Japan
Lecture 14	Takahiro Katagiri, Information Technology Center (ITC), University of Tokyo, Japan
Lecture 15	Ryouji Takagi, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Japan
Lecture 16	Masahiko Mizuno, Toyota Central R&D Labs., INC, Japan
15:45-16:15	Coffee Break
16:15-18:00	Session 8 Chair: Yoshitaka Wada, Kinki University, Japan
Lecture 17	Hiroshi Okuda, Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo, Japan
Lecture 18	Kenji Ono, Center for Research on Innovative Simulation Software (CISS), Institute of Industrial Science (IIS), University of Tokyo, Japan
18:00	Closing: Genki Yagawa, CCMR, Toyo University, Japan
18:30-20:30	Banquet

図 IISW2014 の様子

5.4.　東京都北区主催「ものづくり夜間大学校」

10 月 23 日・30 日に東洋大学白山キャンパスにて東京都北区主催の「ものづくり夜間大学校」が開催された. 本センターより塩谷隆二教授と中林靖准教授, 研究助手三名が指導にあたった. “東洋大学による「スマートフォンアプリ開発講座」”という題名で, 23 日は iPhone アプリ開発, 30 日は Android アプリ開発についての講義と実習が行われた. 本講座の対象は中小企業の方々で, 両日とも約 20 名が受講した.

23 日の iPhone アプリ編では, Xcode という iPhone アプリ開発用ソフトを用いて, 具体的にどのように開発するのかをレクチャーしたあと, 受講者各自が実際に手を動かしてアプリ制作に取り組むという流れだった. Apple により最近開発された Swift という新しい言語を用いたこともあり, 年配の受講者はやや苦戦しているようだったが, 多くの受講者は簡単なアプリを制作できた.

30 日の Android アプリ編では, AppInventor2 というソフトを用いて, 講義および実習を行った. 通常, Android アプリは JAVA という言語を用いて開発されるが, AppInventor2 を用いれば, JAVA の知識が全くなくても, 直感的な操作でアプリを制作することができる. プログラムコードを書く必要がなく操作がわかりやすかったので, ほとんどの受講者が簡単なアプリを制作することができた.

両日とも, 受講者の皆様は熱心に講義に聞き入っていて, 中小企業のスマホアプリ開発に対する強い興味と関心を感じた.

図　ものづくり夜間学校の様子

6. 学術活動

2014 年 1 月から 2015 年 1 月までの業績を掲載する.

6.1. 論文投稿

1. Yokoyama M., Mochizuki O., Yagawa G, "Surface Condition of Solid in Splash Formation", IACM expressions, No. 34,,pp2-5, 2014.02

2. Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, "Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method ", Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, Vol.1.1,pp1-14, 2014.06

3. 郭永明, 堂脇徹朗, 矢川元基, 上谷俊平, "自然境界弱形式を有する選点法",計算工学講演会論文集, Vol.19, 2014.06

4. 郭永明, 吉田大祐, 矢川元基, 上谷俊平, "Over-Range 選点法における局所座標定数の最適値",計算工学講演会論文集, Vol.19, 2014.06.

5. 富山潤, “コンクリート橋上部工に付着する飛来塩分に関する数値解析的検討”, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.874-879, 2014.

6. 風間洋, 富山潤, 下地健, 小簇俊介, “沖縄県内陸部における FAC 利用に関する中性化耐久性検討”, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.850-855, 2014.

7. 福地啓太, 宮野伸介, 富山潤, 大城武, “防食 PC 鋼材の付着性能とプレテンション PC 桁のせん断耐力に関する研究”, プレストレスコンクリート学会, 第 23 回シンポジウム, pp.605-610, 2014.

8. 戸田勝哉, 楊威, 富山潤, 下村匠, “分光分析を用いたコンクリート構造物の塩分分布測定法の開発”, 非破壊検査, 2014.10

9. A. M. M. Mukaddes, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, “Performance Evaluation of Domain Decomposition Method with Sparse Matrix Storage Schemes in Modern Supercomputer”, International Journal of Computational Methods, Vol.11, Suppl. 1, 1344007, pp.1-14, 2014.

10. Itaru Ishikawa, Hiroshi Kawai, Yosuke Kobayashi, Ryuji Shioya, Genki Yagawa, “Simulation Results and its Performance by Using a Developing Eigenvalue Analysis Module of the ADVENTURE System”, Procedia Engineering, Volume90, 140-146, 2014.

11. A.M.M. Mukaddes, Masao Ogino, Ryuji Shioya, “The Study of Thermal-solid Coupling Problems Using Open Source CAE Software”, Procedia Engineering, Volume90, 147-153, 2014.

12. M.Yokoyama, K.Murotani, G.Yagawa, O.Mochizuki, “Some considerations on surface condition of solid in computational fluid-structure interaction”, in NUMERICAL SIMULATIONS OF COUPLED PROBLEMS IN ENGINEERING, pp. 171-186, 2014, Springer International Publishing.

13. Yong-Ming GUO, Kouji SHIOYA, Kei OOBUCHI, Genki YAGAWA, Shunpei KAMITANI , “Accuracy improvement of collocation method by using the over-range collocation points for 2-D and 3-D problems”, Mechanical Engineering Journal, Vol.1, No.2, pp.1-19, 2014.

14. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, ”Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-structure Coupled Analysis”, Procedia Engineering, 90, pp. 288-293, 2014

6.2. 総説・解説・エッセイ

1. 横山真男, ヴァイオリンの音色研究, 可視化情報学会誌,vol.35, 136,(2014) pp.17-22.

6.3. 書籍

1. Yokoyama M., Murotani, K., Yagawa, G., and Mochizuki, O., “Some Considerations on Surface Condition of Solid in Computational Fluid-Structure Interaction”, In Numerical Simulations of Coupled Problems in Engineering (2014) pp. 171-186, Springer International Publishing.

6.4. 学会発表

1. N. FUJIMATSU, "Direct Numerical Simulation on Drag Reduction of Channel Flowwith Visco-Elastic Wall", 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2013.1.7.

2. 長岡慎介, 中林靖, 矢川元基, “EFMM の並列流体-構造連成解析への適用”, 第 62 回理論応用力学講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2013.03.06-08.

3. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, "Parallelization of enriched free mesh method for large scale fluid-structure coupled analysis”, International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, June 20-21, 2014.

4. Itaru Ishikawa, Yosuke Kobayashi, Ryuji Shioya, Genki Yagawa, "Simulation results and its performance by using a developing eigenvalue analysis module of the adventure system”, International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, June 20-21, 2014.

5. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, "Visualizations of Bubble Motions and Temperature Rises by Focused Ultrasound”, International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013)",Dahka, Bangladesh, 2014.06.20-21.

6. M. Yokoyama, K. Murotani, K. Kikuchi, G. Yagawa, O. Mochizuki, "How deal with slippery surface between fluid and structure in particle method?" The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16) , Okinawa Convention Center, June 26, 2014.

7. Takafumi Nosaki, Nobuyoshi Fujimatsu, "Experimental study of aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion”, The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16) , Okinawa Convention Center, June 26, 2014.

8. Naohiro Shinozaki, Nobuyoshi Fujimatsu. " Motion analysis and flow visualization of sheet flutter for various materials”, The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16) , Okinawa Convention Center, June 26, 2014.

9. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi and Yoichiro Matsumoto, "Some Modifications of Bubble Model for Cavitating Flow Simulations",11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.

10. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi and Yoshiaki Tamura, "Fluid-Structure Interaction Analysis of Vibration Phenomena and Verification of its classification and Prediction Accuracy using Modular Network Self-Organizing Map",11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.

11. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura and Genki Yagawa, "The Comparison of the Experimental Result with the Numerical Analysis using the New Coupled Analysis Method based on the Enriched Free Mesh Method and the SUPG/PSPG Stabilized Finite Element Method",11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.

12. Masao Yokoyama, Kohei Murotani, Genki Yagawa and Osamu Mochizuki, "Fluid-Structure Interaction Analysis with Slippery Mucus Skin",11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.

13. 広瀬孝三郎, 松原仁, 粘性土における Mud crack 生成パターンに関する実験的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演概要集, pp. 85-86, 2014.

14. 宮野伸介, 大城武, 富山潤, 福地啓太, “塗装 PC 鋼より線仕様のプレテンション PC 桁の付着性能に関する研究”, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-013, pp.25-26, 2014.

15. 富山潤, 大城武, 大貫隆弘, “塩害環境化におけるエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた鉄筋コン

クリートの防食に関する研究”, 土木学会第69回年次学術講演会, V-439, pp.877-878, 2014.

16. 松浦葵, 富山潤, 迫田泰治, “ASR 劣化したプレテンション PC 桁橋の劣化調査とモニタリング調査”, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-484, pp.967-968, 2014.

17. 横山真男, 野村和希, 望月修, “水底の形状変化を用いた水滴落下による騒音の緩和”, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2014.10.

18. 新城達也, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “ロックアンカー・ロックボルトの非破壊試験法の開発”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.60-61, 2014.

19. 土屋憲一, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “トンネル掘削における発破振動計測の試み, 土木学会西部支部沖縄会”, 第 4 回技術研究発表会, pp.62-63, 2014.

20. 福長友弥, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “史的石積み構造物に対する多重パラメータ動態計測システムとその中城城址への適用”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.64-69, 2014.

21. 亀川裕也, 藍檀オメル, 富山潤, 山口順圭, 屋我晃, 神谷和志, 上里尚也, “コンクリートプリズム(CPT)を用いた ASR 加速試験の遅延膨張性 ASR への適用性に関する研究”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.128-129, 2014.

22. 外間賢伍, 松浦葵, 藍檀オメル, 富山潤, “コンクリート橋上部工の付着塩分量に関する調査および塩害環境評価法に関する基礎研究”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.130 -131, 2014.

23. 松浦葵, 藍檀オメル, 富山潤, 迫田泰治, 浅井光輝, “ASR 劣化したプレテンション PC 桁橋の調査および損傷理論を導入したボクセル FEM を用いた膨張予測の基礎検討”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.132-135, 2014.

24. 平田淳貴, 吉次優祐, 松浦葵, 藍檀オメル, 富山潤, “コンクリート梁の振動特性に関する基礎研究, 土木学会西部支部沖縄会”, 第 4 回技術研究発表会, pp.170-171, 2014.

25. 吉次優祐, 松浦葵, 平田淳貴, 松川博宣, 富山潤, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, “塩害劣化したコンクリート橋梁の振動特性評価に関する基礎研究”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.172-173, 2014.

26. 松川博宣, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “モノレール駅の振動特性に関する基礎研究, 土木学会西部支部沖縄会”, 第 4 回技術研究発表会, pp.174-175, 2014

27. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, “自己組織化マップを用いた解析結果の予測”, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月

28. 長岡慎介, 中林靖, 田村善昭, 矢川元基, “EFMM を用いた流体-構造連成解析と実験結果との比較”, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月

29. 後藤恵理子, 瀬田陽平, 矢川元基, 横山真男, “容器の口から流れる液だれの数値シミュレーション”, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月

30. Toshihiro Ashino, Yuichiro Yamashita and Tetsuya Baba, “The Requirements for Permanent URI’s of Reliable Constant Values and Unit Systems to Linked Measurement Data”, SciDataCon2014, Delhi, India, November 2014

31. 広瀬孝三郎, 松原仁, 原久夫, マッドペーストを用いた Mud crack 生成パターンに関する実験的検討, 第 27 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.32-33, 2014.

32. 河合浩志, 谷村景貴, 塩谷隆二, “アクセラレーター向け最適化コード自動生成 DSL 開発”, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 講演番号 1604, 岩手大学工学部, 2014 年 11 月 22 日～24 日

33. Hirotaka Tanimura, Hiroshi Kawai, and Ryuji Shioya, "A Development of Domain Specific Language(DSL) for Continuum Mechanics", JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software, P40, KOBE, JAPAN, December 2-4, 2014

6.3. 招待講演

1. G. Yagawa, M. Yokoyama, K. Murotani, "High-Performance Computing for Fluid-Structure Interaction with Application to Splash Problem", International Conference on Computational Fluid–Structure Interaction and Flow Simulation ",Tokyo, JAPAN, 2014.03.20

2. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA and Genki YAGAWA, "An Efficient Approach for the Fluid-Structure Interaction Problems based on the Stabilized Finite Element Method and the Enriched Free Mesh Method", Advances in Computational Fluid–Structure Interaction and Flow Simulation, Tokyo, Japan, 2014.03.19–21

3. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA and Genki YAGAWA, "An Efficient Parallelization Method and Asymmetric Solver for the Fluid-Structure Interaction Problem", KSME-JSME Symposium on Computational Mechanics & CAE 2014, Jeju, Korea, 2014.05.01

4. 矢川元基, 流体構造連成問題について(その 2), 東京理科大学特別講義, 2014.5.27(野田)

5. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, "Visualizations of Bubble Motions and Temperature Rises by Focused Ultrasound", International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, 2014.06.20-21

6. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA, Yoshiaki TAMURA and Genki YAGAWA, "An Efficient Parallelization and Asymmetric Solver for the FSI Solver based on the SUPG/PSPG Method and the Enriched Free Mesh Method", The 5th International Conference on Computational Methods (ICCM2014), Cambridge, England, 2014.07.28-30

7. 矢川元基, 計算力学の最新動向, ヤンマー(株), 特別講演, 2014.9.29(米原)

8. 矢川元基, 計算科学, 計算力学シミュレーションの現状と課題, 新日鉄住金(株), 特別講演, 2014.10.8(富津)

9. G. Yagawa, Large scale fluid structure interaction considering the surface condition of the solid wall, ESI Forum2014, 2014.11.20(Tokyo)

6.4. 受賞

1. 松原仁, 平成 25 年度日本計算工学会論文奨励賞（論文タイトル：捩り外力を受ける環状切欠き丸棒におけるファクトリールーフ状破断面の形成メカニズムに関する数値解析的検討）, 平成 26 年 5 月

7.　研究グループ紹介

中林研究室

塩谷研究室

藤松研究室

江澤研究室

田村研究室

8. 結び

本報は, 2014 年度の活動を取りまとめたものである. なお, 2015 年 3 月に予定されているセンター評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2015 年 1 月 31 日とした. したがって, それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい.

社会が抱える問題, あるいは産業界が抱える問題を発掘しながらソリューションを見出していくことをセンターに関係する全ての研究者が使命として共有しながら今後の活動や研究開発を進めていきたい.

東洋大学 計算力学研究センター 2014 年度年報

この資料の転載, 引用などはご遠慮ください.

本資料に関するお問い合わせは下記へお願いいたします.

編集・発行　東洋大学計算力学研究センター

〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100

URL: http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/

TEL・FAX: 049-239-1475

2015 年 3 月発行

禁無断転載

東洋大学計算力学研究センター

2015 年度　年報

CCMR
Center for Computational Mechanics Research
Toyo University

2016 年 3 月

2015 Annual Report of

Center for Computational Mechanics Research

Toyo University

March 2016

目次

1. まえがき....1
2. センターの概要....2
   2.1. センター設置について....2
   2.2. 組織....3
   2.3. 構成メンバー....4
3. 研究成果....5
   3.1. 解析手法開発グループ....5
      3.1.1. 超大規模並列流体－構造連成解析手法の開発....6
      3.1.2. 流体－構造連成解析の mnSOM を用いた分類及び予測技術の開発....26
      3.1.3. 粒子間インタラクションに着目した大規模粒子法シミュレーション....30
      3.1.4. 損傷理論を導入したボクセル FEM によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析....35
      3.1.5. Sinkhole の形成シミュレーション....45
   3.2. 大規模並列化グループ....50
      3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発....51
      3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築....55
   3.3. 新規実験計測グループ....58
      3.3.1. 標準問題のための弾性円柱の振動実験....59
      3.3.2. 流体－構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験61
      3.3.3. 飛行物体に作用する空気力特性....64
   3.4. 精度・妥当性検証グループ....66
      3.4.1. ベイズ推定を用いた効率的精度解析技術の開発....67
      3.4.2. 最適化の代数的構造の研究....72
      3.4.3. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発....74
      3.4.4. オープン CAE（固体の有限要素法）を用いた精度検証....76
   3.5. 可視化検証グループ....82
      3.5.1. 3 次元画像による定量的・定性的検証....83
      3.5.2. オールドバイオリンの音色とバイオリンの演奏法に関する可視化的研究....89
4. 共同研究....91
   4.1. JST CREST プロジェクト....91
      4.1.1. 研究実施体制....91
      4.1.2. 研究実施内容....92
5. 成果の広報および普及活動....94
   5.1. 第 4 回 CCMR-HDDMPPS（CREST プロジェクト）合同シンポジウム....94

5.1.1. プログラム....94
5.2. 第 1 回日韓中台学生ワークショップ Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015....96
5.2.1. プログラム....96
5.3. 台湾・龍華科技大學川越キャンパス見学....100
5.4. 東洋大学産学協同教育センター中核人材育成講座「スマホアプリ開発入門講座」....101
6. 学術活動....102
6.1. 論文投稿....102
6.2. 著書....103
6.3. 総説・解説・エッセイ....103
6.4. 学会発表....104
6.5. 招待講演....110
6.6. 受賞....110
7. 研究グループ紹介....111
8. 結び....112

1. まえがき

2012年に私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定されてほぼ4年が経過した. 本事業はセンターとして二度目の大型事業であり, いわば第2期である. この報告書はその4年目の活動を中心にとりまとめている.

今回の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体_構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」としている. これは, それまでの流体解析や構造解析といった個別の物理の解析から一歩進めてより複雑な, また現実的な問題に計算力学の手法を適用しようとすることと, 単に研究として行うのでなく, 精度や妥当性を十分に検証し, あるいはその検証方法を確立することで, 実用に耐えうるものとすることを目指してのことである. 本年度は, その4年目であり, 各メンバー, グループの研究もほぼ収束に向かっているはずである. それぞれの進展については3章に詳しく述べられている. また, これまでアジアの大学を中心に研究交流を行ってきたが, この報告が出る直前には, 英国カーディフ大学と合同学生ワークショップが開催されている予定である. さらに, 戦略的研究推進事業 CREST やその他, センターに関連する研究についてもふれている.

昨年度, 文部科学省に出した中間報告に対する評価からは, センターの特色・強みをどのように出していくかが課題であるとの指摘を受けたと思っている. 残りの期間で何ができるか, 何をすべきか見直しながら本年度の活動を行ってきた. ある程度の成果は本報に含まれているが, まだまだ, 物足りなく感じられる向きもあろうかと思う. 今後ともさらなるご批判とご指導を賜れば幸いである.

2016 年 3 月

東洋大学計算力学研究センター長
田村　善昭

2.　センターの概要

本センターは，わが国の私立大学学術フロンティア拠点のひとつとして文部科学省から設置が認められ，平成17年度に活動を開始した．その後，平成23年度に科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST の選定，続いて平成 24 年度に文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け，今日に至っている．

本センターに参加する研究員は，東洋大学の複数学部・大学院の教員（工学研究科，国際地域学部，総合情報学部，理工学部），博士研究員，大学院生などを中核とし，また客員研究員として関連分野の内外の研究者から構成されている．

各自の専門分野は，構造解析，流体解析，破壊解析，逆問題・最適化，大規模並列計算，可視化など，計算力学分野で必要とされるほぼ全ての分野に跨っており，この分野における専門家集団である．平成23年度に採択を受けたCRESTでは「京」コンピュータ利用のための超大規模解析技術に関して，また平成 24 年度からは，私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け，連成解析や計算力学の精度検証・妥当性検証にも積極的に取り組んでいる．

さらに，東洋大学 125 周年を契機とした国際化に合わせて海外の関連する大学と積極的に交流を進め，若手の人材育成にも寄与したいと考えている．

2.1.　センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである．

- 平成 17 年 6 月文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」に研究題目「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」で採択され，計算力学研究センター発足
- 平成 17 年 12 月センター開所式開催のあと，白山第 2 キャンパス内計算力学研究センター棟に入居し本格活動開始
- 平成 22 年 3 月「学術フロンティア推進事業」終了
- 平成 23 年 8 月科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で採択される
- 平成24年4月文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に研究題目「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」で採択される

2.2. 組織

計算力学研究センターの組織は以下の通りである.

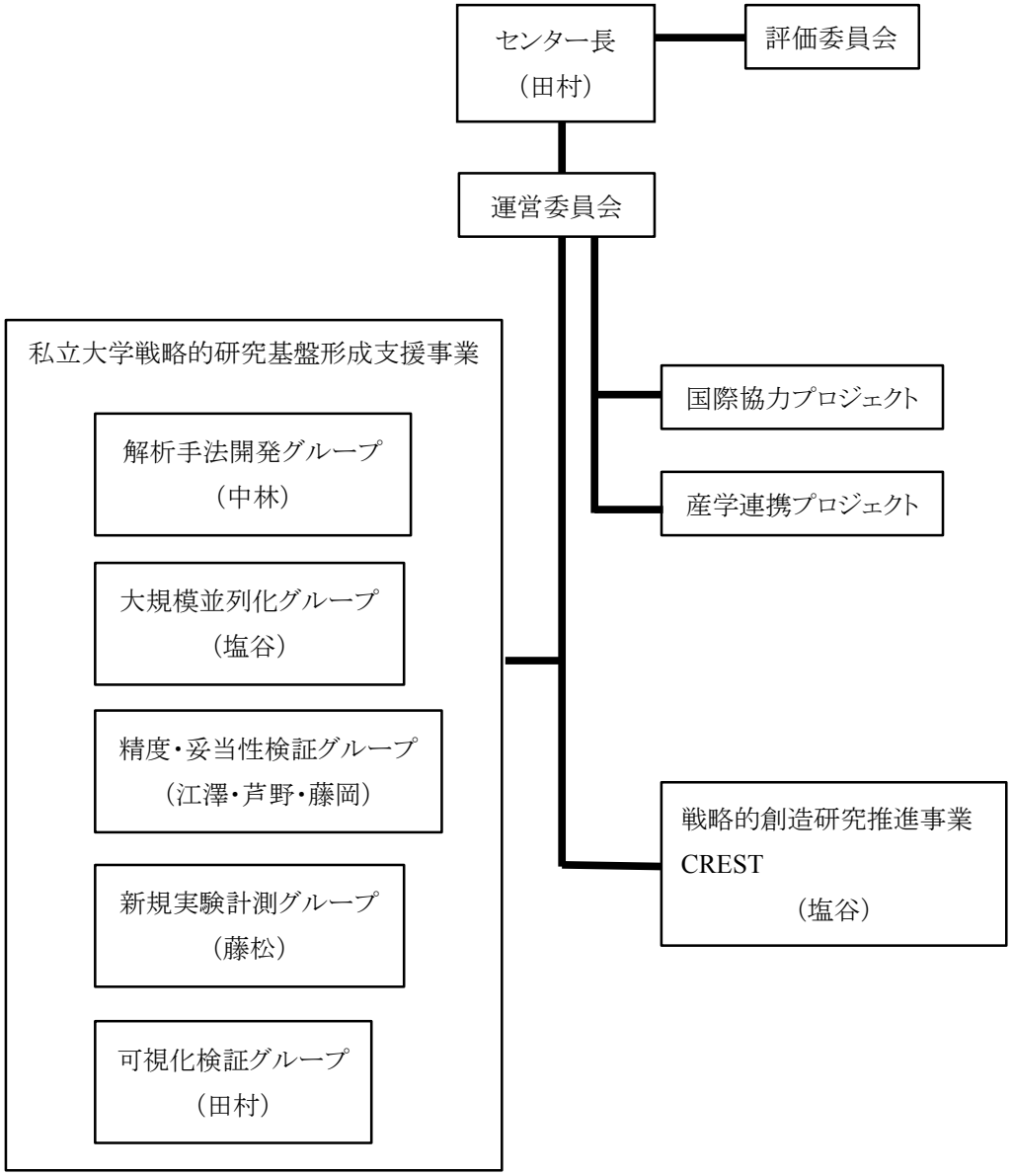


Fig.2.1. センターの組織

2.3.　構成メンバー

計算力学研究センターは以下のメンバーで構成されている.

センター長

田村　善昭（東洋大学総合情報学部総合情報学科教授）

研究員

芦野　俊宏（東洋大学国際地域学部国際地域学科教授）
塩谷　隆二（東洋大学総合情報学部総合情報学科教授）
中林　靖（東洋大学総合情報学部総合情報学科准教授）
藤岡　照高（東洋大学理工学部機械工学科教授）
藤松　信義（東洋大学理工学部機械工学科准教授）

研究助手・研究支援者

長岡　慎介（東洋大学計算力学研究センター）
増田　正人（東洋大学計算力学研究センター）
鄭　宏杰（東洋大学計算力学研究センター）
谷村　景貴（東洋大学計算力学研究センター）

学生

島村　雅彦（東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程）
高清水　聖（東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程）

客員研究員

矢川　元基（前東洋大学計算力学研究センター長，東京大学名誉教授，東洋大学名誉教授）
金山　寛（日本女子大学特任教授，九州大学名誉教授）
富山　潤（琉球大学工学部准教授）
古川　知成（バージニア工科大学工学部機械工学科教授）
松原　仁（琉球大学工学部助教）
横山　真男（明星大学情報学部情報学科准教授）
江澤　良孝（元東洋大学総合情報学部総合情報学科教授）

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

解析手法開発グループでは，計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち，「高精度流体構造連成解析手法の開発」の部分に焦点を当てた活動を行っている.

流体-構造連成解析を高精度かつ安定的に実施するためには，まず，流体解析手法・構造解析手法そのものの精度や信頼性を高めた上で，それらを連成させるアルゴリズムについても十分に検討する必要がある. これまでのところ，計算力学研究センターでは流体解析にSUPG/PSPG安定化有限要素法を用い，構造解析に EFMM を用いる手法を中心に連成解析を行ってきたが，このアプローチ以外にも例えば粒子法を用いた手法など様々な戦略が考えられる.

上記の事項を踏まえて，今年度は，以下の 5 項目について報告を行う.

(1) 超大規模並列流体-構造連成解析手法の開発
(2) 流体-構造連成解析の mnSOM を用いた分類及び予測技術の開発
(3) 粒子間インタラクションに着目した大規模粒子法シミュレーション
(4) 損傷理論を導入したボクセル FEM によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析
(5) Sinkhole の形成シミュレーション

3.1.1.　超大規模並列流体－構造連成解析手法の開発

(1) 目標・計画

本研究では，超大規模問題にも適用可能な流体−構造連成現象を解く為の新しい解析手法を開発する事を目的としている．本研究で提案する Enriched Free Mesh Method (EFMM)を用いた構造解析手法と，SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用いた流体解析手法を組み合わせた，新しい流体−構造連成解析手法は，各解析領域場に使用するメッシュ分割パターンが共に線形要素であることから，流体−構造境界面における整合性を完全に得ることが出来，その結果，流体−構造連成問題を解く際に，非常に重要となる，各解析場の境界面の連成効果を考慮する際に生じる問題を解消する事に成功している．さらに，前述の通り，各解析場に用いられるメッシュ分割パターンは，線形要素のみであるにも関わらず，その解析精度は，従来の線形要素を用いた解析結果と比較して向上すると云う結果を得られている．この特長から，本提案手法は，大規模問題を解く際に，問題になってくる計算機リソースと，計算時間の大幅な抑制を可能にする事を意味している．一方で，本手法は，近年の大規模解析の際に，必要不可欠となる並列処理を施す際に，大きな問題を有する手法であることが明らかとなった．この問題は，EFMM の解析アルゴリズムに起因するものであった．

昨年度までに，本提案手法による大規模並列解析を行うために，EFMM の並列解析手法の提案と実装を行い，その並列化効率の検証を併せて行い，概ね良好な結果を得ることが出来たが，本研究で対象とするような超大規模問題へ適用した際に，アルゴリズムに若干の改良とそれに伴う，コードのチューニングが必要となる事が明らかとなった．

また，提案している流体−構造連成解析手法を用いた並列化解析を行う過程で，現行のメッシュコントロール手法では，今後の超大規模解析を行う際の計算時間が莫大なものとなるという問題も明らかになった．

そこで平成 27 年度は，並列計算を行う際に分割する局所領域ベースでのメッシュのスムージング手法を新たに導入し，さらに昨年度までに提案している並列 EFMM を 1 兆自由度規模の問題へ適用し，その解析精度と並列化効率の検証を行った．

また，これらの手法の健全性を証明するために，提案手法を用いた数値解析結果と実験結果との比較を行った．

(2) 意義・国際社会との比較

現在，国内外を問わずに，計算力学の分野において，流体−構造連成現象を対象とした研究は，非常に注目されており，積極的に行われている．この現象を解くために，多くの研究者が様々なアプローチを行い，沢山の新しい解析手法が提案され，多くの成果が発表されている．その一方で，現時点までに，決定的な解析手法は確立されていない．

提案されている多くのアプローチは，流体解析手法として，粒子法を用いているものが，非常に多い．メッシュ分割を必要としない粒子法を用いることで，解析場が大きく変動するような問題の解析も容易になることから，流体解析場において多くのアドバンテージが得られることが，その一因で

あると考えられる. しかし, 我々の提案している手法は, 流体解析場, 構造解析場共に格子法を用いている. 格子法をそれぞれの解析場に用いる事で, 粒子法を用いた流体解析と比較して, 解析領域の大きな変化に対しては, 対応し難い面もあるが, 解析精度の面では, 粒子法を用いたアプローチと比較して大きなアドバンテージを有していると考えられる.

本手法の確立により, 数値シミュレーションにおいて, 非常に重要な解析精度を損なう事無く, 多くの流体−構造連成現象を解く事が可能になると考えられる. このことから, 本研究は, 格子法を用いた流体−構造連成解析手法の確立と云う観点からも, 非常に意義のある研究であると言える.

(3) 研究内容

今年度の研究内容は下記の 3 つに大別される.

1. 領域分割型ラプラシアンスムージングの開発
2. 超大規模並列 EFMM の開発
3. 標準問題との比較

1 のテーマでは, 流体-構造連成問題を対象とした数値解析を行う際に, 多くの現象で見られる構造物の移動, 変形に伴うメッシュの再構築, スムージングを全体領域で行うと, 様々な問題が生じるので, この点を考慮した局所領域毎のメッシュスムージング手法を開発した.

2 のテーマは, 昨年度までに提案した並列 EFMM のアルゴリズムを 1 億自由度規模の超大規模問題へ適用した際の, 並列化効率について検証を行った.

3 のテーマは, 我々のグループで提案している数値解析手法の健全性の評価を行う為に,「新規実験・計測グループ」が実施している, 流体-構造連成現象の発生メカニズムを明らかにする新しい標準問題を確立する為の実験結果と数値解析結果との比較を行った.

(3.1) 領域分割型ラプラシアンスムージングの開発

流体−構造連成解析を行う際には, 流体と構造の間に生じる相互間作用により生じるメッシュの再構築, スムージングが必要不可欠である. また, 多くの場合, 流体−構造連成解析を行う際には, 並列解析を用いるが, その際, 解析モデルは複数領域に分割される. その分割された領域全体に対して一貫性のあるメッシュの再構築が求められるが, 解析領域全体に対して, メッシュの再構築を行うと, 解析の規模にもよるが, 膨大な計算量が求められ, 解析のボトルネックとなる.

そこで, 本節では, 局所領域毎のメッシュスムージング法について述べる.

はじめに, 下記の図 1 に示すように, 解析モデルを複数の領域に分割する.

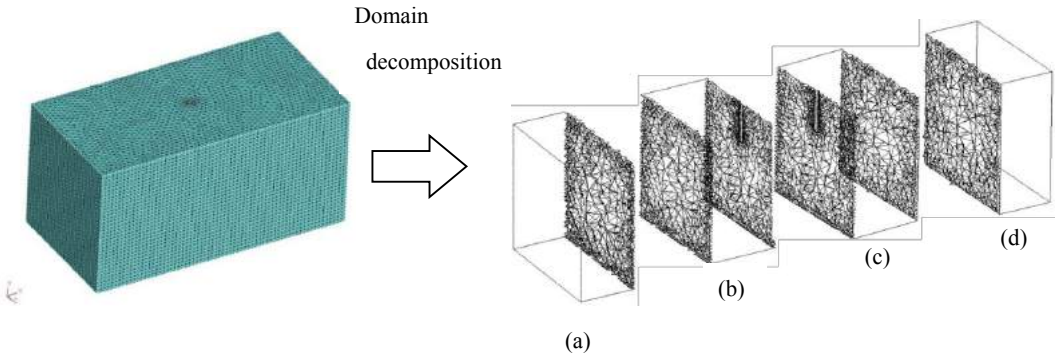


Fig.1.　Domain decomposition

この領域分割された局所領域の節点を下記の 4 つのグループに分類する.

1.　流体−構造境界面上の節点
2.　局所領域共有面上の節点
3.　解析モデル表面上の節点
4.　内部の節点

具体的に, 図 1 に示した局所領域(b)(c)の節点群をグループ分けすると下記のようになる.

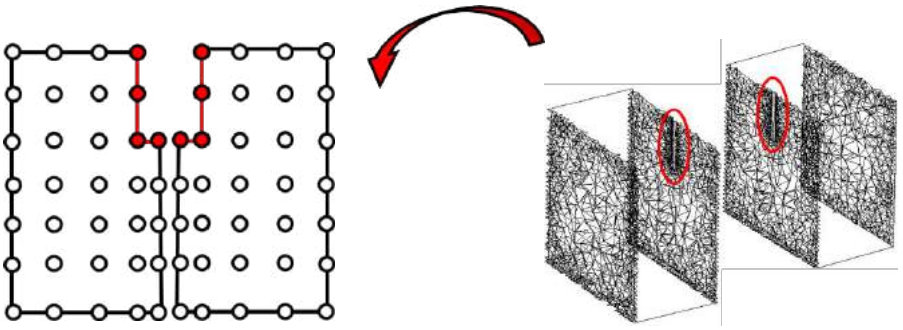


Fig.2.　Nodes on fluid-structure common face

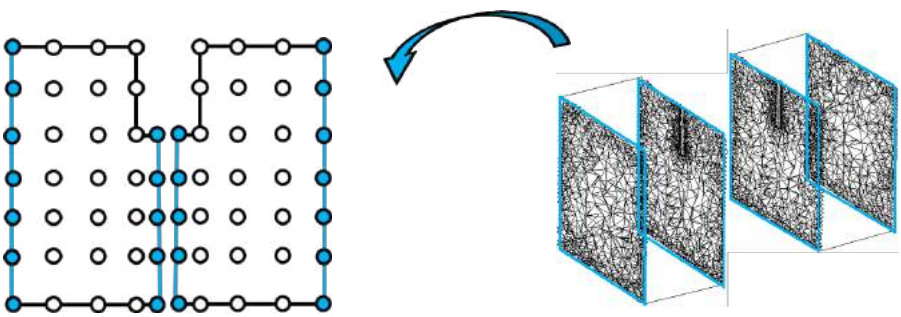


Fig.3.　Nodes on common face of local domain

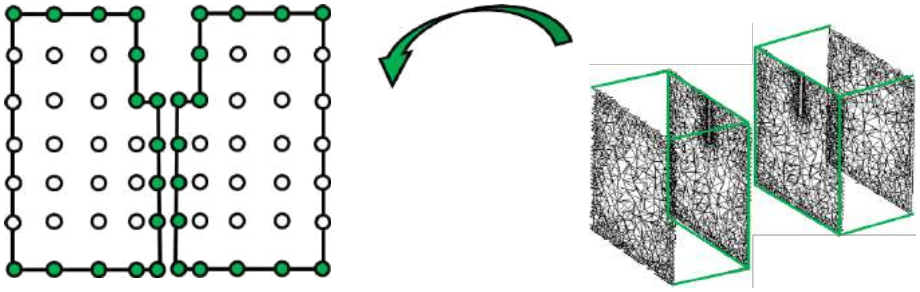


Fig.4.　Nodes on surface of original model

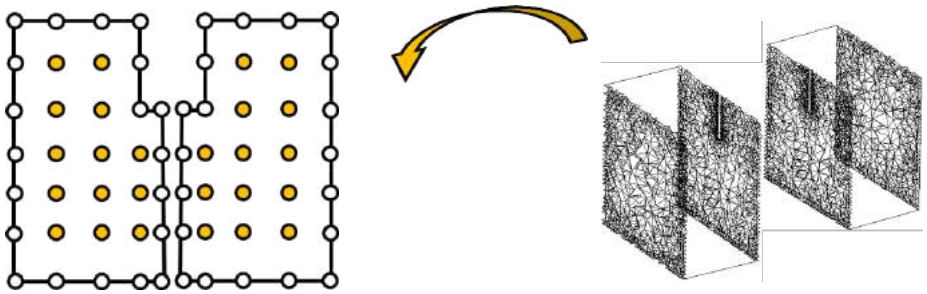


Fig.5.　Inner nodes

これら分類された節点のメッシュスムージング時の働きは下記の通りである.

1.　流体−構造境界面上の節点　:流体解析の結果にしたがって移動
2.　局所領域共有面上の節点:1 の移動量を基に移動
3.　解析モデル表面上の節点:固定
4.　内部の節点:メッシュコントロール

ここで, 局所領域面上の節点の移動方法について述べる.

流体−構造境界面上の節点のみを移動させると, 解析対象によって異なるが, 多くの場合メッシュが大きく歪み, 解析の精度が著しく低下するだけでなく, 場合によってはメッシュが破綻をして, 解析を行うことが出来なくなってしまう.

例えば, 図 6 に示すように, 流体−構造境界面上の節点が, 構造解析の結果に伴い移動したとする.

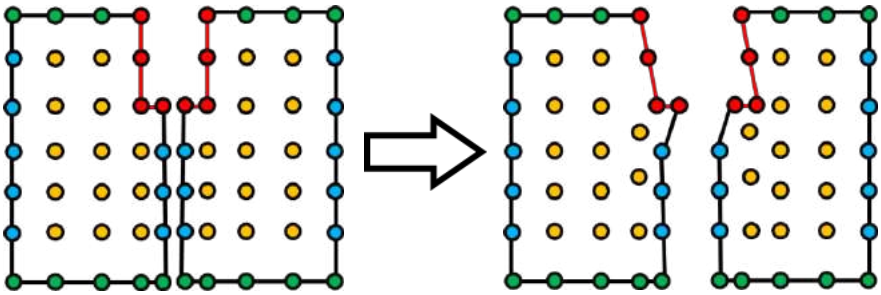


Fig.6.　Example of movement of node on fluid-structure common face

上図のように，流体−構造境界面上の節点のみ，解析結果に伴って移動をさせると，対象の変位量によっては，流体−構造境界面上の節点と，それらの節点の最も近傍にある節点を含む要素計上が大きく歪み，前述の問題が生じる．

そこで，局所領域共有面上の節点で且つ流体−構造連成面に近い節点に関しては，流体−構造共有面上の節点同様，移動をさせる．本研究では，流体−構造連成面上のある節点を基準に，その節点からある一定の長さを検索半径として，その検索半径内に含まれる節点を，基準とした節点の移動量を基に移動をさせる事で，メッシュの破綻を防ぐ事とした．

図 7 は，この処理を導入する前後での，モデルの違いを図示したものである．

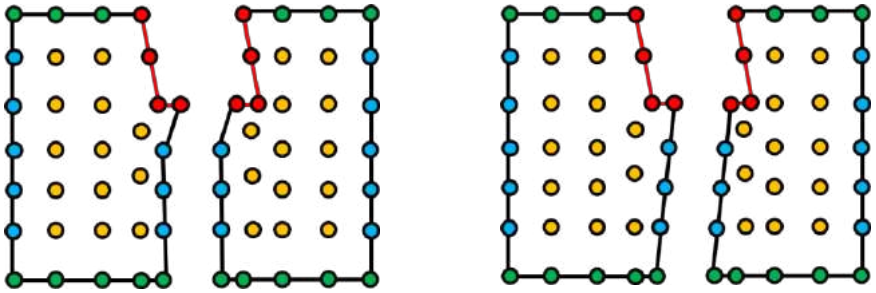


Fig.7.　Example of difference of movement of node

実際に 3 次元解析に導入すると下記の図 8 に示したように，円柱の移動に伴う円柱周辺のメッシュの変化に違いが生じる．

図中左側に示した，流体−構造連成面上の節点のみを移動させた場合，近傍の節点が移動しない為，流体−構造連成面上の節点を含む要素が大きく歪んでいる．

一方，検索半径を導入して，ある流体−構造連成面周辺の節点の移動も同時に行った図中右側の例では，円柱近傍節点も移動している為，流体−構造連成面上の節点を含む要素も，大きく歪むことは無く，メッシュを制御することが出来ている．（図中のコンターは節点の移動量を示している．）

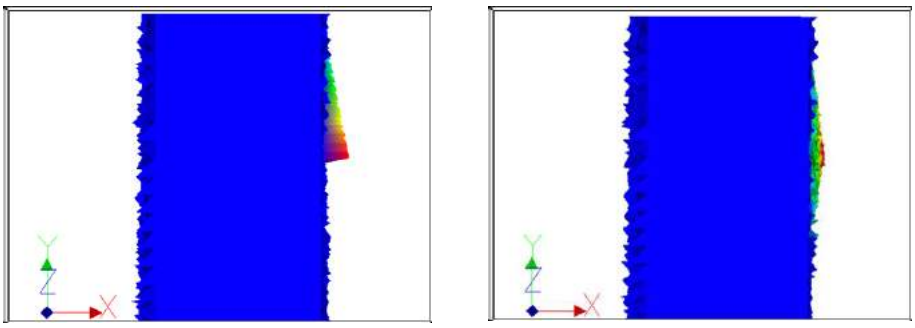


Fig.8. Example of difference of model after mesh control

このような制約の下，局所領域の境界を移動させた後，ラプラシアンスムージングによるメッシュのスムージングを行うことで，メッシュの破綻を防ぐことが可能となった．

(3.2)　超大規模並列 EFMM の開発（大規模並列化グループとの連携）

本節では，昨年度までに提案をした，Enriched Free Mesh Method (EFMM)の超大規模並列化について述べる．

本プロジェクトで対象とする流体−構造連成現象を解く為には，流体解析場のみならず，構造解析場の大規模並列化は必須である．流体解析手法として用いる SUPG/PSPG 安定化有限要素法に関しては，既に様々な解析事例もあり，解析精度，並列化効率共に非常に良好な結果が得られることが証明されている．

昨年度までに提案した並列 EFMM の並列化効率も良好な結果であったが，今年度は 1 億自由度規模の問題に対応できるようにチューニングを行った．

並列 EFMM の為の領域分割は下記の図 9 の手順で行う．

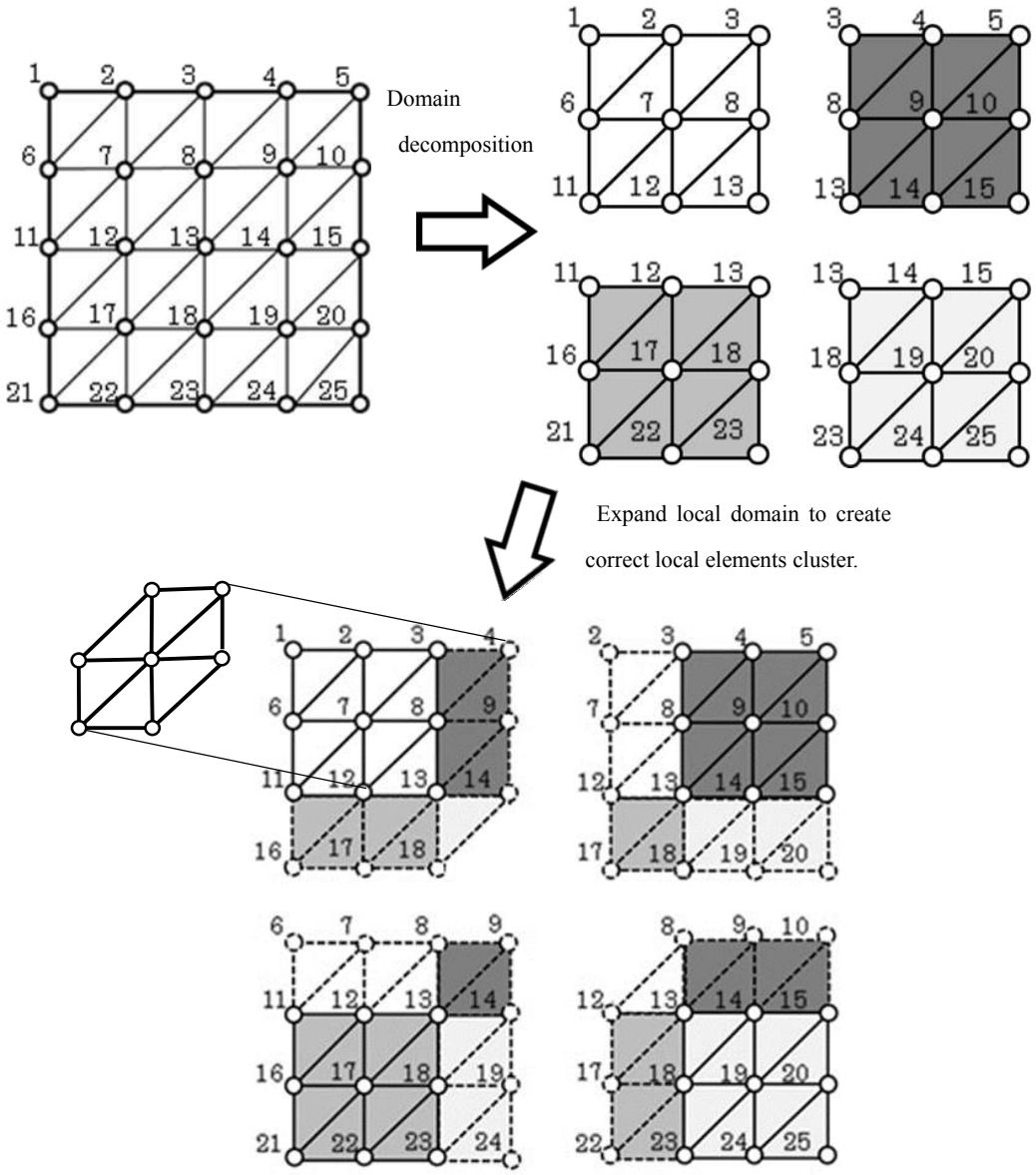


Fig.9. Domain decomposition method for parallel EFMM

領域分割を行った局所領域毎の計算手順は下記の通りである.

1. 各領域で行列ベクトル積計算(全ての節点がいずれか1つの計算領域のみで評価されること)
2. 領域境界の 1 層内側の節点について, 正しい値を計算すべき領域に対して, 自身の領域で計算された寄与分を送信して足し込む.
3. 領域境界上の節点について, 共有する領域間で値を送受信し, それぞれ互いの値を足し込む
4. 領域境界の 1 層外側の節点について, 正しい値を計算すべき領域から値を受け取り上書き.

精度検証

はじめに，並列 EFMM の通信テーブルは，従来の FEM と比較すると若干複雑になる為，アルゴリズム及びコードの健全性を示すために下記の 3 つの解析モデルを使用して，単一解析の場合と解析結果が一致するか確認を行った．

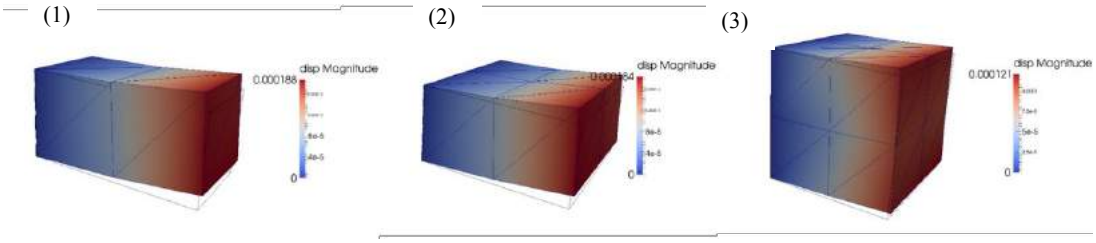


Fig.10.　Analysis models

各解析モデルの詳細は下記の通りである．

(1)．2 領域が隣接する 12 節点モデル

(2)．4 領域が隣接する 18 節点モデル

(3)．最大で 8 領域が隣接する 27 節点モデル

得られた解析結果は，それぞれ単一解析の結果と完全に一致したことから，解析アルゴリズムとコードの健全性は証明された．

次に，本解析手法と理論解とを比較して，解析精度が十分良好であるかの確認を行った．

解析には，図 11 に示す単純な片持ち梁の問題を用いて，単一解析，10 並列，20 並列の 3 ケースと理論解とを比較した．各解析結果はそれぞれ完全に一致し，理論解との誤差は 0.49%であった．解析結果例を図 12 に示す．

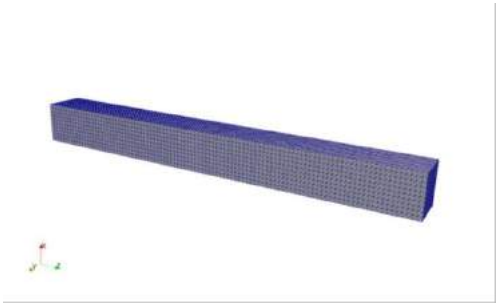


Fig.11.　Analysis model

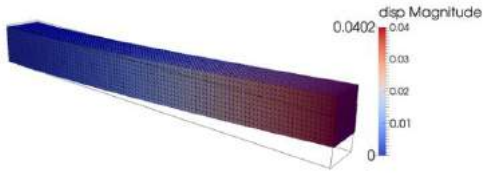


Fig.12.　Analysis result

並列性能測定

次に，並列 EFMM の並列化効率について述べる．解析に用いるモデルは，図 13 に示すような 1 辺の長さが 1 の立方体の z=0 面を完全固定し，z=1 のせん断方向に荷重を加える．

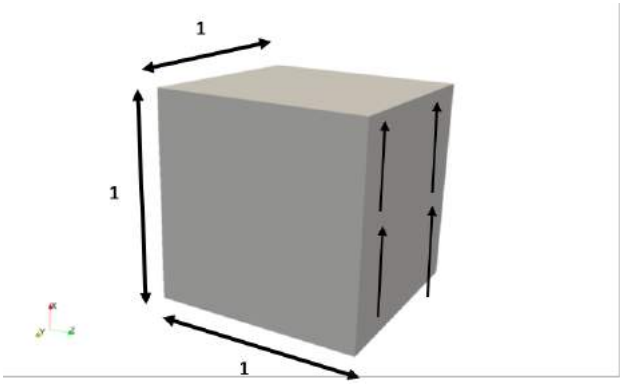


Fig.13. Analysis model

並列性能の測定方法は，各辺の分割数，プロセスへの分割数を変え，ストロングスケーリングとウィークスケーリングによる測定を行う．

ストロングスケーリングによる検証結果

ストロングスケーリングは，解析に用いるモデルの自由度数を一定として，領域分割数を増加させていく測定方法である．測定に用いるモデルの詳細を表 1 に示す．

Table.1. Detail of analysis model

立方体の各辺の分割数	108
要素数	7,558,272
節点数	1,295,029
自由度数	3,885,087

並列化効率の測定の為に，上記の表 1 に示したモデルを 16，54，144，432 並列の 4 パターンで解析を行い，16 並列と比較をして並列化効率の検証を行った．

各解析ケースのモデルの詳細を表 2 に示す．

Table.2.　Detail of each analysis model

#PE	各プロセスへの全体モデルの分割			各プロセスが担当する直方体ブロック					
				各辺の分割数					
	x	y	z	x	y	z	要素数	節点数	自由度数
16	2	2	4	54	54	27	472,392	84,700	254,100
54	3	3	6	36	36	18	139,968	26,011	78,033
144	4	6	6	27	18	18	52,488	10,108	30,324
432	6	6	12	18	18	9	17,496	3,610	10,830

測定は下記の 3 項目に対して行った.

- 加速率の推移
- 並列化効率の推移
- 計算時間(解析全体, 行列ベクトル積)

表 3 は測定結果の詳細を示している.

Table.3.　Detail of each analysis result

#PE	Elapsed [s]		#CG Iter	Speed-Up over 16PE			Parallel Efficiency	
	All	mat_vec		All	mat_vec	Ideal	All	mat_vec
16	1,944	1,273	1,375	1.00	1.00	1.00	100.0%	100.0%
54	639	416	1,375	3.04	3.06	3.38	90.1%	90.6%
144	237	151	1,375	8.21	8.41	9.00	91.2%	93.4%
432	90	55	1,375	21.54	23.02	27.00	79.8%	85.3%

以下の図 14~16 に上記の測定結果を示す.

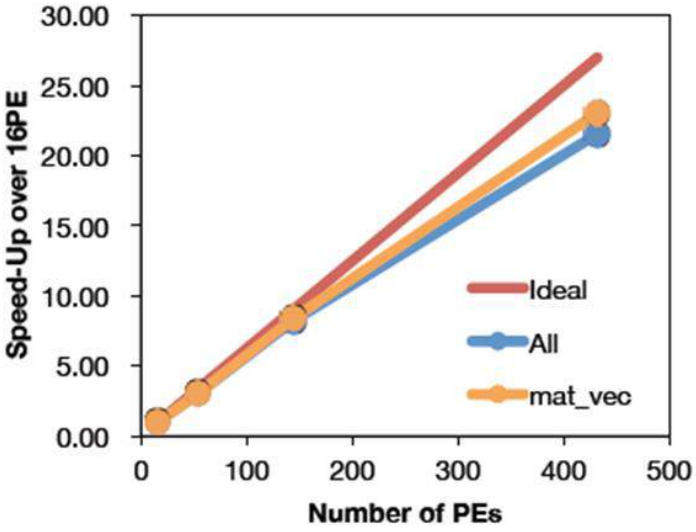


Fig.14. Speed-up

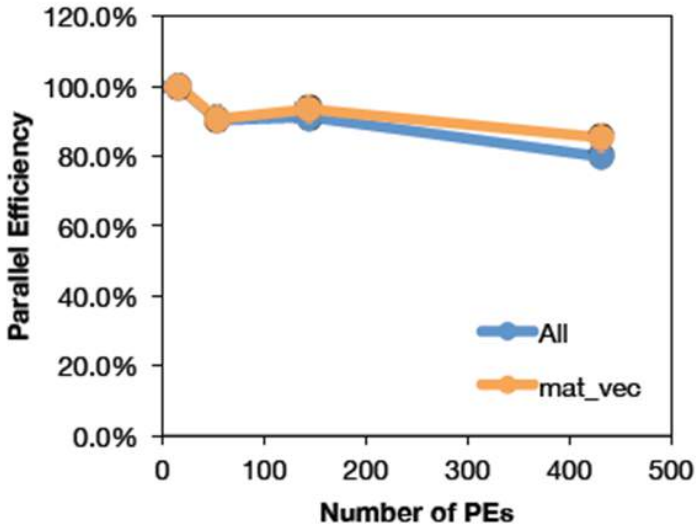


Fig.15. Parallel efficiency

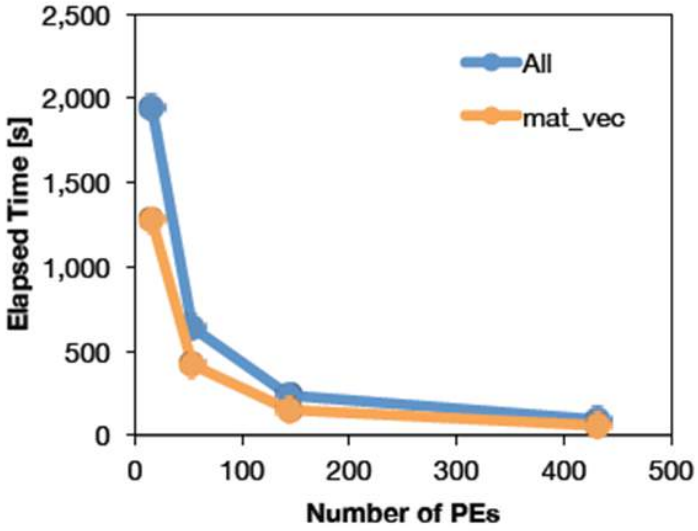


Fig.16.　Computing time

これらのストロングスケーリングによる並列性能測定結果から，本手法は十分良好並列性能が得られていることが確認された．

ウィークスケーリングによる検証結果

次に，ウィークスケーリングによる本並列解析手法の並列化効率の検証結果を示す．ウィークスケーリングは，各プロセッサが担当するモデルの自由度数を一定として，並列化効率を検証する方法である．その為，解析に用いるモデルの全体の自由度数は，並列数に伴って増加していく．

各プロセッサが担当するモデルの詳細を表 4 に示す．

Table.4.　Detail of each analysis model

立方体の各辺の分割数	x	54
	y	54
	z	27
要素数		472,392
節点数		84,700
自由度数		254,100

並列化効率の測定の為に，1 領域あたりを上記の表 4 に示した自由度として，16，54，144，432 並列の 4 パターンで解析を行い，並列化効率の検証を行った．

各解析ケースのモデルの詳細を表 5 に示す.

Table.5. Detail of each analysis model

#PE	全体モデル				各プロセスへの全体モデルの分割		
	立方体の一辺の分割	要素数	節点数	自由度数	x	y	z
16	108	7,558,272	1,295,029	3,885,087	2	2	4
54	162	25,509,168	4,330,747	12,992,241	3	3	6
128	216	60,466,176	10,218,313	30,654,939	4	4	8
432	324	204,073,344	34,328,125	102,984,375	6	6	12

測定は下記の 3 項目に対して行った.

- 計算時間(解析全体, 行列ベクトル積)
- CG 法の収束までの反復回数
- 行列ベクトル積 1 回あたりの計算時間の推移

表 6 は測定結果の詳細を示している.

Table.6. Detail of each analysis result

#PE	Elapsed [s]			#CG Iter	Memory Max [MiB]
	All	mat_vec	1 mat_vec		
16	1,944	1,273	0.926	1,375	1,538
54	2,304	1,614	0.935	1,726	1,561
128	2,813	2,115	0.929	2,276	1,602
432	3,286	2,568	0.935	2,747	1,769

以下の図 17~19 に上記の測定結果を示す.

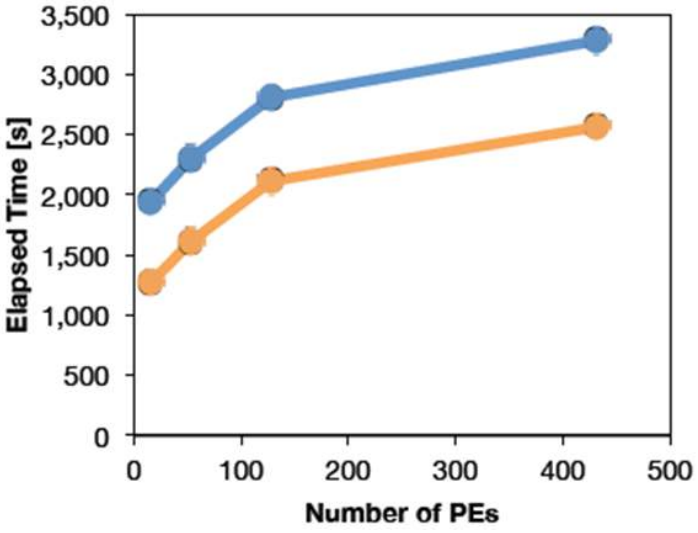


Fig.17.　Speed-up

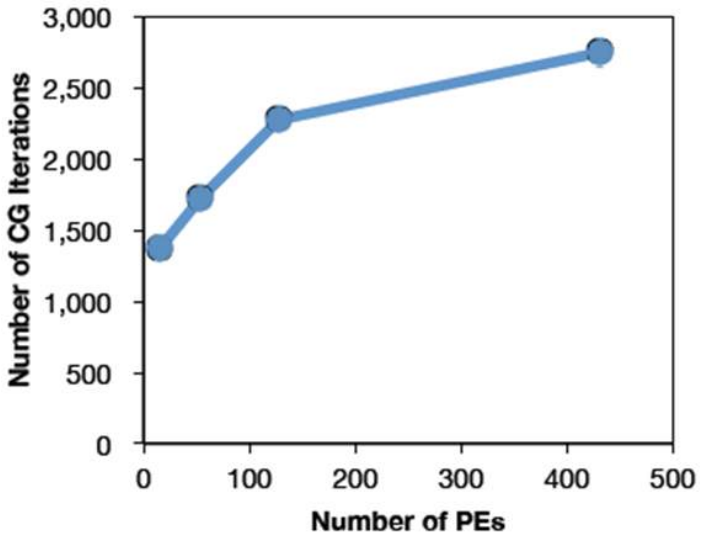


Fig.18.　Changes in the number of iterations

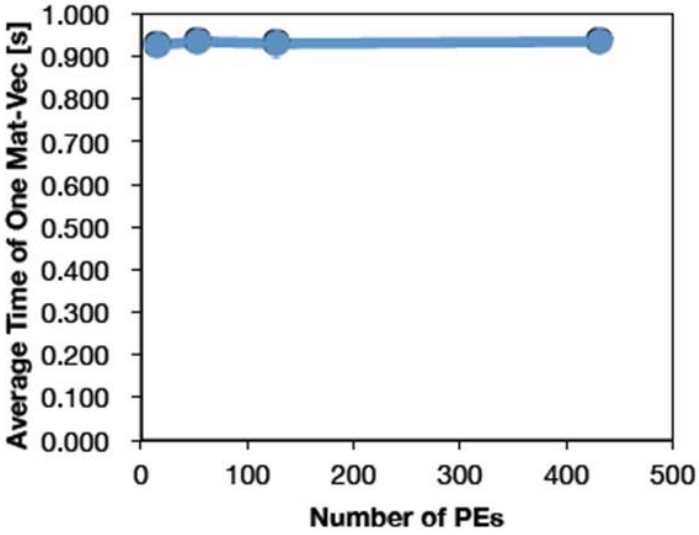


Fig.19. Changes in an once computing time of matrix vector product.

並列プロセッサ数の増加に伴って，全体の解析モデルの自由度数が増加する為，CG 法の収束までの反復回数が増加するので，計算時間も同時に増加していくが，行列ベクトル積 1 回あたりの計算時間はほぼ一定に保たれており，ウィークスケーリングの性能としては十分な性能が得られている.

これらの結果から，提案した EFMM の為の超大規模並列アルゴリズムは，1 億自由度程度の問題を対象とした超大規模解析にも十分適用可能であることが示された.

(3.3) 標準問題との比較（新規実験・計測グループとの連携）

ここでは，本提案手法の健全性を証明する為に行った，標準問題と数値解析との比較結果について示す.

図 20 は実験に用いた風洞装置の写真である.

Fig. 20.　Experimental device

写真中央に示された風洞の中に，弾性体で精製された円柱が設置されている．この円柱は上面が固定されており，この弾性体に対して風を与える．この時，円柱の物性値と風速を変化させ，その際に生じる円柱の振る舞いの関係について明らかにする．

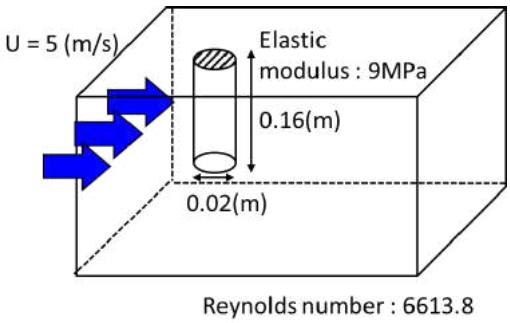


Fig. 21.　Experimental model

次に，図 22 は解析に用いるメッシュモデルである．図 22 に示したメッシュモデルの詳細を表 7 に示す．

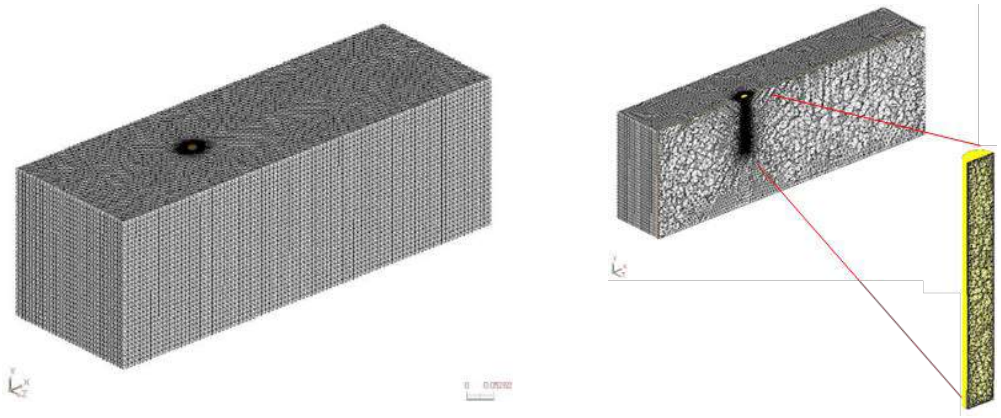


Fig. 22.　Analysis mesh model

Table.7.　Detail of analysis mesh model data

	Fluid	Structure
Number of Nodes	944,121	94,768
Number of Elements	169,321	21,295

実験により得られた結果を図 23,24 に示す.

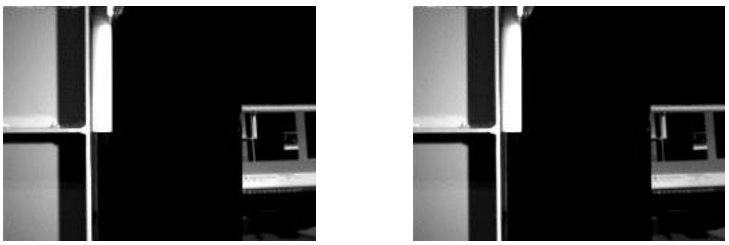


Fig.23.　Experimental result (side)

Fig.24.　Experimental result (Upper side)

図 22, 23 に示したように，上述の実験条件下で行った実験では，弾性体は振動する事無く，単純に変形するだけの結果となった．円柱下端の最大変形量も 0.0005m となり，円柱の底面直径 0.02m に対して非常に小さい変形量となった．

次に数値解析結果を図 25 に示す．図は構造解析場（円柱）の変位を示している．

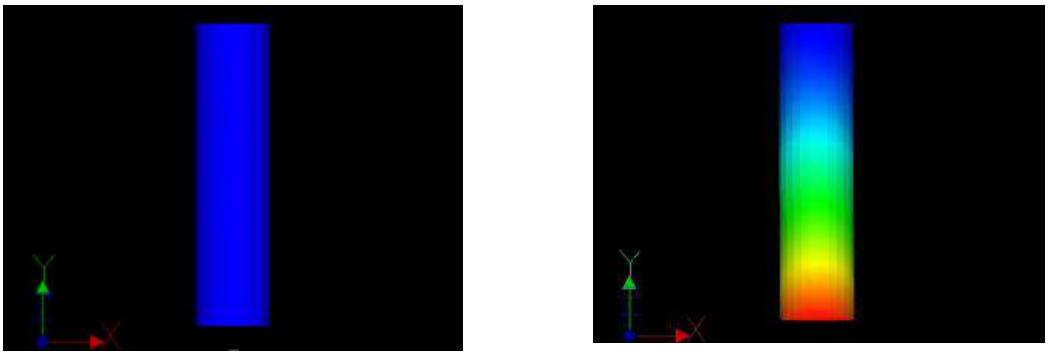


Fig.25.　Experimental result (Upper side)

数値解析によって得られた円柱底面の最大変位量は 0.00063m となり，実験結果よりも大きく変形する結果となった．実験と結果の誤差は 20.6%となり，この結果からは，本手法の健全性を証明するには至らなかった．

数値解析の健全性の証明に関しては，数値解析手法のみならず，実験条件の見直しを含め最終年度の課題とする．

(4) 平成 27 年度進捗状況

今年度は，前節で述べた通り，下記の 3 つのテーマについて主に研究を行った．

1.　領域分割型ラプラシアンスムージングの開発
2.　超大規模並列 EFMM の開発
3.　標準問題との比較

局所領域分割型ラプラシアンスムージングによるメッシュスムージングは，超大規模並列流体-構造連成解析の際に，必要不可欠であるが同時にボトルネックになるメッシュの再生成を局所領域単位で行うことで，計算時間の増加を大幅に抑制する事が期待できる．

超大規模並列流体-構造連成解析への拡張は，1 億自由度規模の問題でも解析精度面は勿論，並列化効率の面でも非常に良好な結果を得ることが可能となった．

標準問題との比較では，数値解析結果により得られる変位量が実験結果よりも大きくなり，誤差も 20.6%と若干大きなものであった．これは，問題の設定が構造体に単純な曲げが発生するものであり，実験条件を厳密に一致させなければ，変位量を一致させることは非常に困難であると考えられる．

これらの点を鑑みて，最終年度は構造体の変形（振る舞い）が時々刻々と変化する問題を対象と

して, 本年度までに開発した, 超大規模並列 EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM とを組み合わせた, 超大規模並列流体-構造連成解析手法による数値解析と実験との比較を行い, 本数値解析手法の健全性を証明する.

3.1.2.　流体ー構造連成解析の mnSOM を用いた分類及び予測技術の開発

(1)　目標・計画

本研究では，流体−構造連成解析を行い，自己組織化マップ(Self-Organizing Map : SOM)[1]などの人工知能技術を用いて解析データの分類を行い，解析条件から解析結果を予測することができる技術を開発することを目的としている．分類と予測の両方を包括する mnSOM(modular network SOM)を用いて学習を行う．このときモジュールは MLP(Multi Layer Perceptron)を用いる．しかし，連成問題は非線形性が非常に強く，mnSOM での予測には限界があると思われる．そこで，Deep Learning の考えを取り入れた予測技術の開発を目指す．これは Google を始め各企業や研究所でも注目されている技術で，画像認識や音声認識において，既存の技術よりも遥かに良い性能が得られることが知られている[2][3]．

本研究の予測技術を確立すると，解析の大まかな結果を得ることで，詳細な解析をするための手がかりが提示できると考える．このことにより，機器や構造物設計における全体の解析時間を短縮できると期待できる．

今年度は，Deep Leaning 技術を活用するために Autoencoder(AE)を作成し，簡単な2つの数の積算を学習させた．また，同様の手法で画像認識を行った．Deep Learning の技術を mnSOM で活用するためのアルゴリズムについても考えた．

平成 28 年度は，SOM と Deep Leaning を組み合わせた分類と予測を可能にする技術を開発し，研究成果をまとめる方針である．

(2)　意義・国際社会との比較

現在，解析対象の複雑化や大規模化から，計算時間がボトルネックにある．並列計算機を使うのは当然で，GPU を用いた解析方法も数多く見られる．しかしながら，計算量は膨大で，1ケース解くのに数日から数週間かかることもある．設計技術者は目的の解析結果を得るのに何度も解析を繰り返す必要がある．そこで，予めある程度の解析結果が分かれば試行回数を削減し，設計における全体の解析時間を短縮できると考えられる．ある事象を数値解析を行わないで解析結果を予測するという試みは，全く新しいものであり，学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており，国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考える．

(3)　研究内容

Deep Learning は入力次元の大きいデータ（ex.ビッグデータなど）を学習したり，非線形性の強い問題を学習したりするものに非常に効果的であり，流体ー構造連成解析などの複雑な問題にも応用可能と期待できる．

本研究で使用する Deep Learning 技術は Deep Autoencoder である．これは AE を複数重ねたネットワーク構造を持ち，出力層では通常の Back Propagation を用いて学習する．

Deep AE は各層の AE は独立で処理を行い，手前の層(入力層に近い層)の中間層を次の層の入力層として用いることで，ネットワーク全体が結合する(Fig.1)．各層の出力層は入力層と同じ次元を持ち，入力ベクトルを再現するように学習を行う．このときに中間層を入力層より小さいサイズ

にすることにより，入力データを圧縮し，入力データを再構成するための最低限必要な特徴量を抽出することができる．この特徴抽出により，大規模データを効率良く学習することが可能となる．

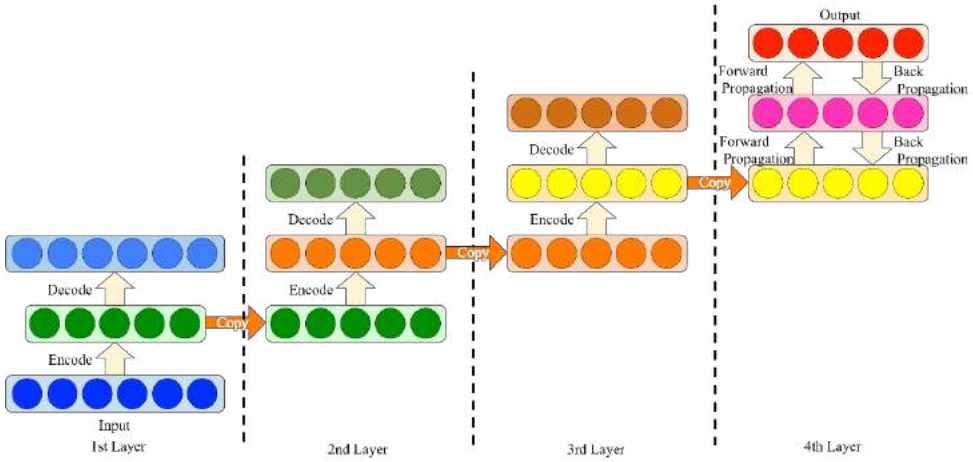


Fig.1. Example of Deep Autoencoder

Deep Learning では上記の AE 部の学習を pre-training と呼び，教師なし学習による入力データの圧縮，特徴抽出を目的とした．教師あり学習部分を fine-tuning と呼び，主に Back Propagation(BP)法を用いて教師データの入力ベクトルと出力ベクトルを補間する．この fine-tuning は最終層でのみ行う場合や，ネットワーク全体で行う場合など，多種多様に処理される．最終層でのみ fine-tuning を行う場合は事前の層で必要な特徴が抜き出せると仮定して，入力ベクトルを圧縮し，最終層の BP 法を効率良く行うための方法である．一方，ネットワーク全体を fine-tuning する方法は，AE は MLP の結合荷重の適切な初期値を得るために用い，MLP の学習を効率化させる．どちらの方法も学習は効率化され，単純な MLP 学習より学習精度の大きな向上が見込める．

本研究で作成した，Deep AE を用いて簡単な積算を学習させた．このとき最終層でのみ fine-tuning を行った場合とネットワーク全体で行った場合の2通りを試行した．入力には 1~9，1~9 の正数を与え，出力にはその2つの正数の積を与えた．ネットワークは2入力1出力となる．ネットワーク全体の fine-tuning を行った場合，最終出力層の 1 に集約される部分の decode がうまく行えず，学習は失敗する結果となった．これは1つの変数から2つ以上の独立変数を導けないので，入出力関係を考えた上で AE を実行する必要があるとわかった．最終層をのみ fine-tuning する方法は学習に成功したが，設定した問題が簡単だったために，単純な MLP と同等の精度しか得られなかった．

次に手書き文字の認識を試験する．試験データは MNIST[4]を用いる．MNIST の画像は 28×28 画素で，6万枚の画像データ集である．1画像に 0~9 のいずれかの数字が描かれている．ネットワーク構成は入力に 784，中間層を 516, 256, 128, 300 ニューロンとし，出力層を 10 出力とした．入力層から 784-512-256-128 までを AE で圧縮し 128-300-10 を BP 法で教師あり学習を行う．学習に使う画像を 100 枚として，pre-training を 10000 セット，fine-tuning を 10000 とし，学習係数は

pre-training, fine-tuning ともに 0.1 として学習を行った. 検証には 20 枚の未学習データを与えた. 画像の一例を Fig.2 に示す. 1層目の入力ベクトルの再現は良く一致し, 入力ベクトルの圧縮に成功している. 学習後の正解率は約 60%とある程度の学習ができた. まだ, 1, 7, 9 などの似たような文字の正解率は低いが, 学習セットを6万枚とし, 学習係数などのハイパーパラメータの調整により向上が見込める.

Fig.2.　Figures of Handwritten character

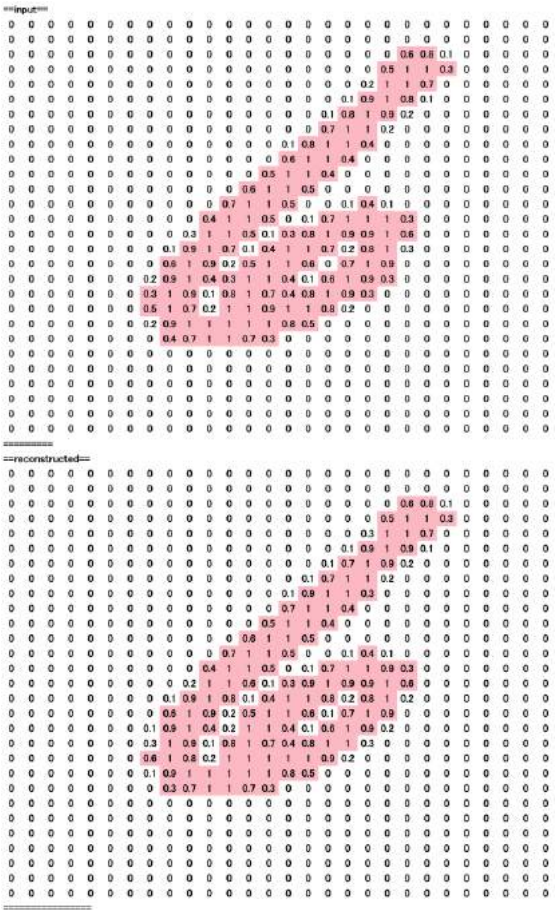


Fig.3.　Example of Reconstructed Input Vector
(Upper figure is input vector and lower figure is reconstructed input vector.
High value place is painted the red.)

次に mnSOM のモジュール部を Deep Learning へ変更することを考える. Pre-training と fine-tuning はそれぞれ別々に行う. つまり pre-training の最後の層の中間層を fine-tuning の入力層として使う. mnSOM は競合学習により各モジュールの相対的な位置関係を獲得しながら, 入出力関係を補間していく. 競合学習をどのタイミングで行うのかを考える必要がある. AE から Back Propagation までを行ってからの出力(最終出力)で競合学習を行う方法と, AE 部でも競合学習させる方法が考えられる. 通常の mnSOM では最終出力により競合学習を実行するが, AE を挟むことにより, fine-tuning 部分の入力がほぼ同じになることが予想され, そこからクラスタリングを行うことが効率的な学習であるのか, 考慮する必要がある. AE 部における競合学習は入力を分類することに役立つと考えられる. ある程度の入力を分類して, 下流の fine-tuning へ繋げられれば, 学習精度も向上すると期待できる. 上記の2通りの mnSOM を作成し, 効率的な学習ができる方を選択することを考える.

(4) 平成 27 年度進捗状況

Deep Learning による学習を行い, 単純な積算の学習に成功した. 文字認識も妥当な解答を得られた. mnSOM へ Deep Learning を適応するための競合学習方法を考え, コードの作成を開始した.

平成 28 年度では, mnSOM with Deep Learning の競合学習方法を確立させ, コードの完成を目指す. また, 流体ー構造連成解析結果を予測する問題を扱い, mnSOM や3層の MLP と比較して, より高精度で予測することができるかを検証し, 本研究をまとめる.

参考文献

[1] T.Kohonen, ”Self-Organizing Maps”, pringer-Verlag, 1995.

[2] Quoc V. Le, Marc’Aurelio Ranzato, Rajat Monga, Matthieu Devin, Kai Chen, Greg S. Corrado, Jeff Dean and Andrew Y. Ng, “Building High-level Features Using Large Scale Unsupervised Learning”, Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning, 2012.

[3] A.Krizhevsky, I.Sutskever, G.E.,Hinton, “ImageNet Classifi- cation with Deep Convolutional Neural Networks”

[4] Yann LeCun, “The MNIST database of handwritten digits”, http://yann.lecun.com/exdb/mnist/ (2016/1/13 現在)

3.1.3.　粒子間インタラクションに着目した大規模粒子法シミュレーション

1.はじめに

これまでの数値流体シミュレーションにおいては，ほとんどが物体と液体の境界は滑りなし条件で解かれてきた．しかし，材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況が，Fig.1 のように，落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ（飛沫）にみられることが分かっている．つまり，粒子間のインタラクション（この場合は壁と液体粒子間）に物性を表すモデルを導入して計算しないと実現象とかい離することを示唆している．

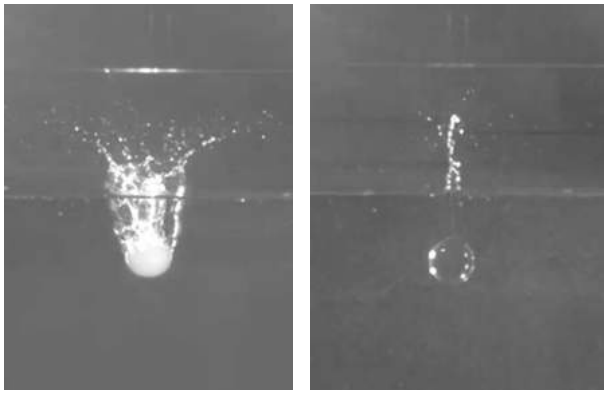
本研究では，そういった物体の表面性状の違いを数値シミュレーションに導入するために，物体と流体の境界条件に表面性状の効果を記述するモデルを提案してきた[1]-[4]．現在は，自由表面を扱う流体現象のシミュレーションの応用例として，ミルククラウンとコップの縁から流れ落ちる液だれの現象について，粒子法（MPS）による大規模並列計算を行い，実験映像と比較して計算の妥当性について検証を行っている．

2. ミルククラウンの数値シミュレーション

ミルククラウンと呼ばれる水滴が落下し液相に衝突したときに発生するスプラッシュ現象を再現した．ミルクウランは，表面張力が支配的な物理現象である．本研究では，流体解析に，MPS 陽解法を用い，表面張力モデルに近藤らの粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力モデルを用いた．

計算点である粒子の直径を変化させ，直径 4 mm 液滴を，高さ 15 cm から落下させ，深さ 1mm の液体層に衝突させる解析を行った（Fig.2）．物性値は水とした．である．本節では，計算点である粒子直径を 0.2 mm, 0.1mm, 0.05mm, 0.025mm と変化させて，どの程度の粒子の直径が適切であるかを確認した．

Fig.3 から Fig.6 に示すように，粒子の直径 0.2 mm, 0.1 mm, 0.05 mm, 0.025 mm の解析結果であり，色は速度の大きさである．Fig.5 の粒子直径 0.05 mm の解析や Fig.6 の粒子直径 0.025 mm の解析では，ミルククラウンの発生に成功している．Fig.4 の粒子直径 0.1 mm の解析では，クラウンの側面の壁に穴が開くなどして，非物理的な現象が発生している．これは，粒子の直径が大きすぎて，クラウンの側面の壁の厚さ方向に十分な数の粒子を配置することができなくなったためである．Fig.3 の粒子直径 0.2 mm の解析では，粒子を繋ぎとめておくに必要な表面張力を発生させることができなくなってしまっている．以上の結果から，最低でも粒子直径 0.1 mm，可能なら粒子直径 0.05 mm の解析を行うことが求められることが分かった．



(A) Hydrogel (Agar)　　(B) Acrylic resin

Fig.1.　材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況：落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ（飛沫）の実験

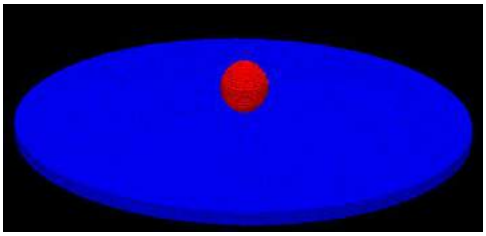
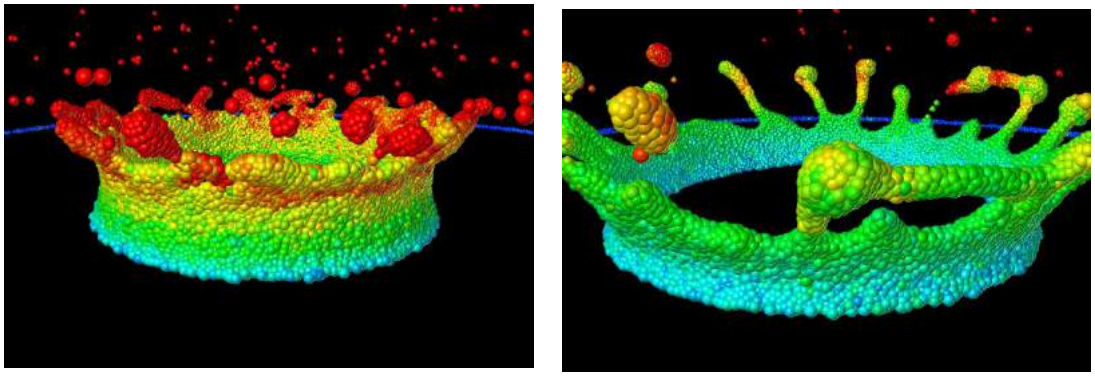
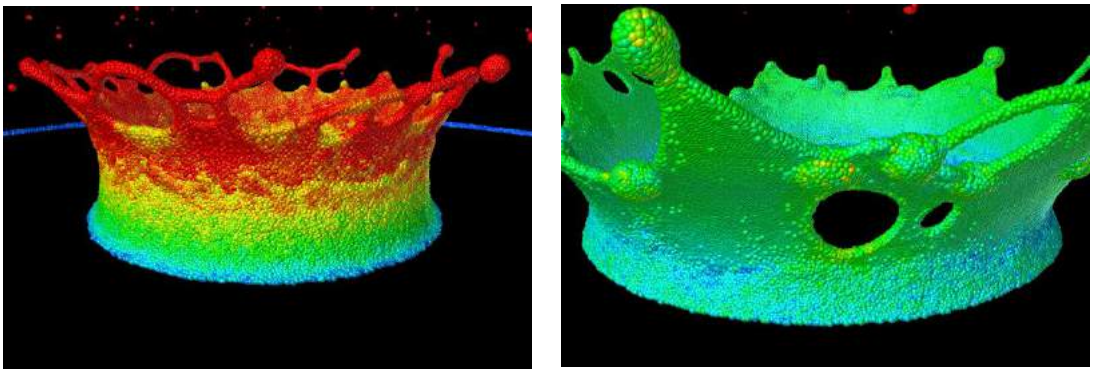


Fig.2.　液滴を液体層に衝突させる解析のモデル



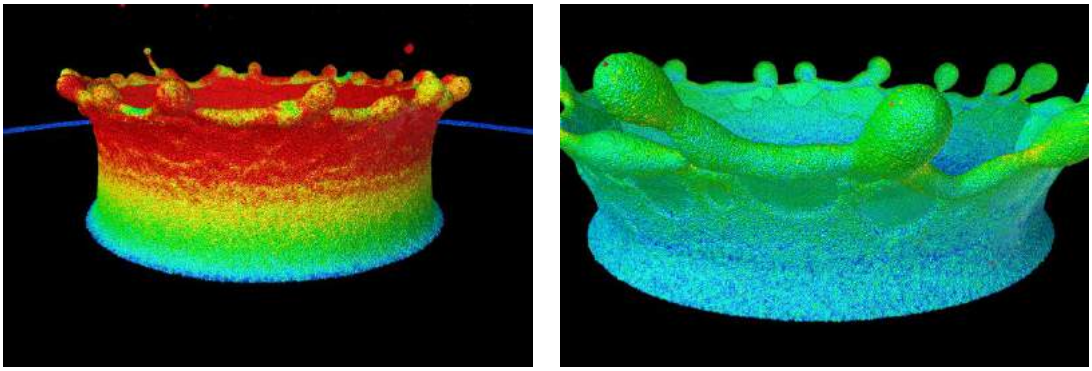
(a) 10 ms　　(b) 24 ms

Fig.3.　粒子直径 0.2 mm の解析



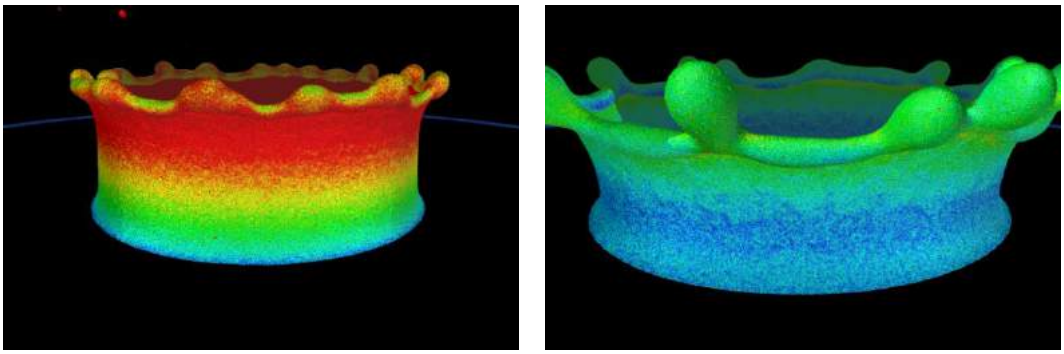
(a) 10 ms　　(b) 24 ms

Fig.4.　粒子直径 0.1 mm の解析



(a) 10 ms　　(b) 24 ms

Fig.5.　粒子直径 0.05 mm の解析



(a) 10 ms　　(b) 24 ms

Fig.6.　粒子直径 0.025 mm の解析

3. 容器口から流れ落ちる液だれの数値シミュレーション

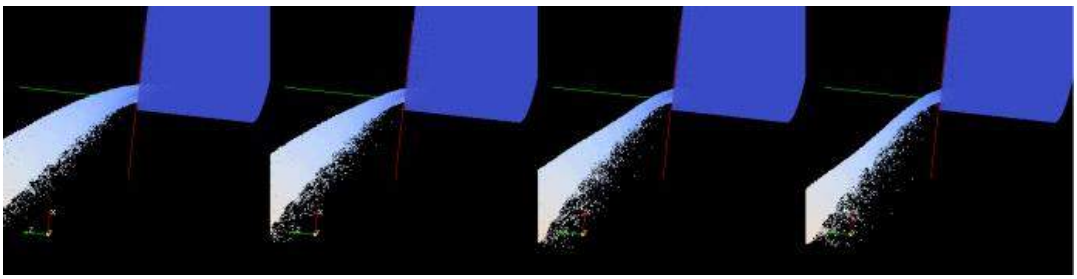
水や調味料などの液体容器の設計時において液だれの発生を抑制するための考慮は重要な課題である. 本研究では容器口の縁付近の形状やその表面性状の差異による流体挙動への影響を調査している. 3 次元プリンタにより縁の形状と表面性状の異なる容器を複数作成し, それらの容器から液体が流れ出る際の縁付近の流れを撮影した. また作成した容器から液体が流れ出る際と同様な条件下における数値シミュレーションを行い実験映像との比較を行っている.

既存の MPS の手法では界面の濡れ性や接触角を用いた方法が提案されているが, 決定的な精度よい計算結果は出てきていない. 本研究でも, それらのモデルを導入しても物体に付着するような流動現象をシミュレーションすることはできなかったため, 新たにクーロン力に似せた距離に反比例する引力モデルを導入した. よって, 本章で紹介するような液だれ現象を発生させるためには, 流体粒子と容器壁面を構成する粒子との間にクーロン力のような引力を生じる計算モデルの導入することで液だれ挙動を表現可能であると考えた, クーロンによる模擬した疑似的な静電気モデルの力は下記である

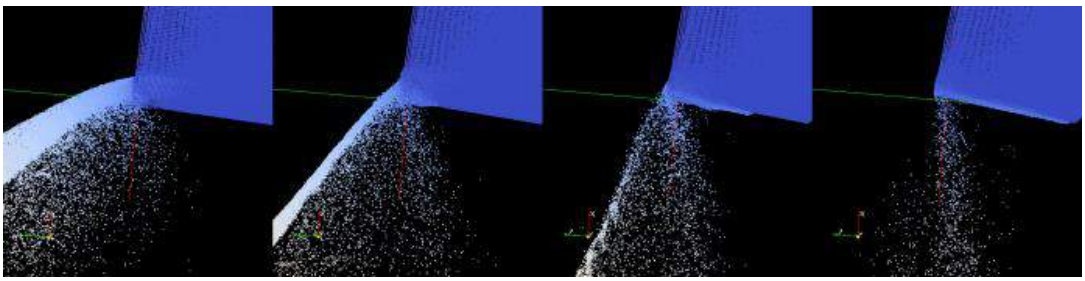
$$F_c = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (1)$$

ここで k，q_1，q_2，r はそれぞれ比例定数，流体粒子の電荷，壁面粒子の電荷，粒子間の距離を表す. 求めたF_cをナビエ―ストークス式の外力項へ加え陽的に計算することで流体粒子と壁面粒子の引力を表現する.

数値シミュレーション結果を Fig.7 に示す. Fig.7 (A), (B)はそれぞれクーロン力モデル導入前，導入後の角縁容器の数値シミュレーション結果である. クーロン力モデル導入前の数値シミュレーション結果では角縁の実験時に見られた流れの容器壁面方向への湾曲は見られず，容器外壁の壁面粒子への付着は発生しなかった. クーロン力モデル導入後の数値シミュレーション結果では容器外へ向かう流体粒子の主な流れから壁面へ湾曲する流れが僅かに分かれる様子を確認し，また流体粒子が容器外壁を伝い落ちる様子を確認した.



(A)　角縁　クーロン力モデル導入前



(B)　角縁　クーロン力モデル導入後

Fig.7.　角縁容器の数値シミュレーション結果

4. おわりに

本研究は，粒子法における界面張力や表面張力といった粒子間のインタラクションに着目し，自由表面を伴う流れをより現実に近づける手法について提案するものである. まだ実現象を再現するには固体・流体それぞれの物性についてパラメータ調性をする必要があり，さらに今後の実験結果との比較検証をしていく予定である.

謝辞

本研究は，文部科学省私学助成金東洋大学研究拠点 CCMR，JST-CREST「ポストペタスケール

シミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」, JSPS 科研費 26390127 の助成を受けた.

また, 革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ（課題番号: hp140199, hp150189）と学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（課題番号: 14-NA07）名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクトの支援を得た.

参考文献

[1] Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences Vol.1:1 (2014) pp.1-14

[2] Yokoyama, M., Murotani, K., Yagawa, G., and Mochizuki, O,. Some Considerations on Surface Condition of Solid in Computational Fluid-Structure Interaction. In Numerical Simulations of Coupled Problems in Engineering (2014) pp. 171-186, Springer International Publishing.

[3] Yokoyama M., Mochizuki O., Yagawa G., Surface Condition of Solid in Splash Formation. IACM expressions No.34 (2014) pp.2-5.

[4] Masao Yokoyama, Kohei Murotani, Genki Yagawa and Osamu Mochizuki, Fluid-Structure Interaction Analysis with Slippery Mucus Skin, 11th World Congress on Computational Mechanics, Barcelona, Spain, 2014.

3.1.4. 損傷理論を導入したボクセル FEM によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析

(1) 目標・計画

社会基盤を支えるコンクリート構造物の劣化原因のひとつにアルカリシリカ反応（以下，ASR）がある．ASR は，コンクリート中のある種の反応性骨材(鉱物)とアルカリ性細孔溶液との化学反応により，ゲルを生じ，そのゲルが吸水膨張することで，膨張圧が生じる現象をいう．ゲルの吸水膨張に伴う膨張圧により，コンクリートに有害なひび割れを生じるケースや，最悪な場合は，鉄筋破断が生じるケースがあり，ASR 劣化は，コンクリートの耐久性，耐荷性の低下を引き起こす原因のひとつである．

ASR の膨張挙動において，最も興味深い現象として，ペシマム現象がある．ペシマム現象とは，を反応性骨材と非反応性骨材のある一定の混合割合によって最も大きな膨張を示す現象をいう．ペシマム現象は，反応性鉱物の種類やアルカリ環境条件などにも影響を受けるため，膨張挙動を予測するのが極めて困難な問題である．

ASR のペシマム現象に対する膨張挙動は，骨材寸法や形状に加え，反応性骨材と非反応性骨材の混合割合に依存するため，本研究では，コンクリート中の反応性骨材および非反応性骨材の混合割合を考慮可能な損傷理論を導入したボクセル有限要素法の開発を行うことを目的とする．

今年度は，1)反応性粗骨材と非反応性粗骨材の混合率を考慮可能なボクセルデータ（以下，コンクリートモデル）の作成，2)反応性粗骨材と非反応性粗骨材の混合率を考慮したコンクリートモデルを入力データとし，損傷力学モデルの概念を導入したボクセル有限要素法（以下，DM-VFEM: Voxel FEM incorporated with the Damage Mechanics）を用いて，ペシマム現象の再現可能な解析手法の基礎検討を行った．

(2) 意義・国際社会との比較

世界的にコンクリート材料は社会基盤施設を構成する多くの構造物に使用されており，コンクリート構造物の合理的かつ効率的な維持管理を行うためには，コンクリート構造物の劣化現象を正しく理解し，精度良く再現する数値解析手法の開発が必要である．本研究の対象は，コンクリートの劣化現象の一つであるアルカリシリカ反応（ASR）の膨張予測である．世界的にも ASR の劣化現象を対象に数値解析的な予測手法の研究が行われているが，未だ決定な手法は構築されていない．したがって，本研究で対象としている ASR の劣化予測手法に対する数値解析的な取り組みは非常に意義のあることである．

(3) 研究内容

(a) コンクリートモデル

ここでは，コンクリート中の粗骨材を考慮したコンクリートモデルの作成方法の概念を示す．

コンクリートモデルの作成は，はじめに，粗骨材の形状を画像として取り込み，画像から粗骨材

の形状を考慮したポリゴンデータを作成する．つぎに，作成した粗骨材のポリゴンデータからボクセル要素で分割した粗骨材ボクセルモデルを作成し，これをコンクリートモデル内に配置し，2層系のコンクリートモデルを作成することができる．粗骨材を配置する際に，反応性粗骨材と非反応性粗骨材の混合率を指定し，その割合に従い，粗骨材を配置する．　図-1 にその概念図を，図-2 に反応性骨材，非反応性骨材の分布の例を，それぞれ示す．

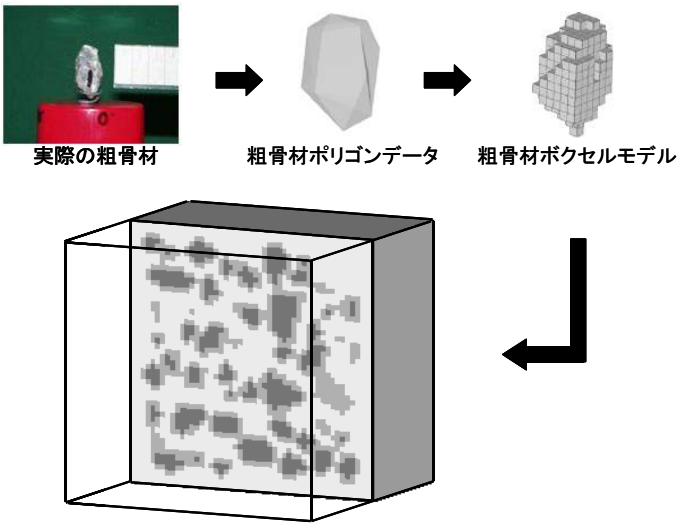
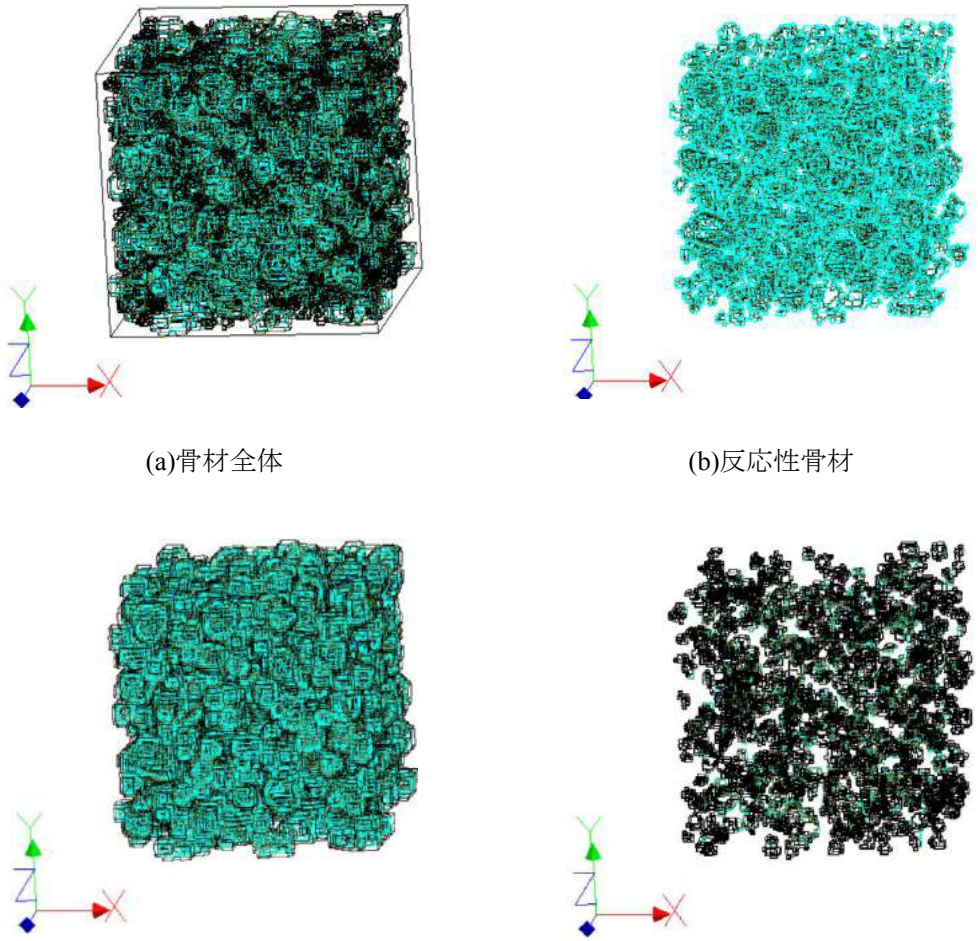


図-1　コンクリートモデル作成の概念図



(a)骨材全体　(b)反応性骨材

(c)反応性骨材＋反応リム　(d)非反応性骨材

図-2　反応性骨材と非反応性骨材の分布の例

(b) 連成解析手法

本解析は，ボクセルFEMをベースとし，非定常拡散問題と非線形ひび割れ進展問題の両者を連成して行う．ひび割れは，損傷に応じてボクセル要素の剛性を現象させる損傷モデルを導入することで表現し，得られる損傷パラメータを用いて拡散問題における物性値（拡散係数）も段階的に変化させるイオン拡散-固体損傷の連成解析手法である．

図-3 に連成解析フローチャートを示す．連成解析では，最初に非定常拡散問題を解き拡散物質（アルカリイオン）の空間分布を予測する．そして，イオン濃度の空間分布から粗骨材の膨張力を決定する．この際，膨張力によって不連続面と判定される要素は，高い拡散係数に置換し，再び拡散問題を解く．これを繰り返すことで，イオン拡散に伴う不連続面進展解析を実施する．

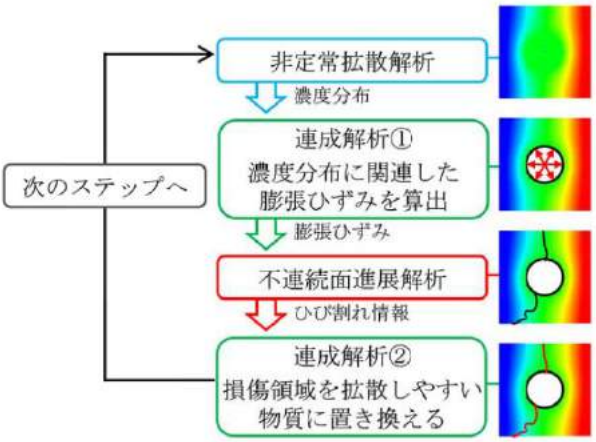


図-3　連成解析フローチャート

損傷力学モデルの概要

損傷モデルでは連続体損傷力学を導入し，損傷変数 D を用い，要素剛性を段階的に減少させるモデルである．

損傷変数は $0 \leqq D \leqq 1$ であり，D=0 のときには健全な状態を示し，D=1 は最終的な破壊状態を表す．損傷に伴う微小空間の発達は材料の剛性低下を引き起こすため，本研究では弾性係数の低下によって損傷状態を表す．

$$D = (E_0 - E)/E_0 \tag{1}$$

ここで，E_0 は非損傷状態の弾性係数，E は損傷後の弾性係数である．具体的な損傷変数は Mazars らによる損傷進展式を用いている．　$\mathbf{C}^e$を等方弾性テンソルとすると，損傷を考慮した材料構成則は以下のように規定される．

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D)\mathbf{C}^e\boldsymbol{\varepsilon} \tag{2}$$

ひび割れた要素の拡散係数モデル

ひび割れた要素の拡散係数 k は，損傷パラメータに応じ大きくし，ある一定量 α になると収束するとした式(3)のモデルを提案する（図-4（a）参照）．

$$k = k_0 + \alpha\{1 - \exp(-\beta \times D)\} \tag{3}$$

ここで，k_0 は健全時の拡散係数，α は拡散係数の収束値を表現する係数，β は拡散係数の最

大値への収束速度を表現する係数，D は損傷係数である．

膨張モデル

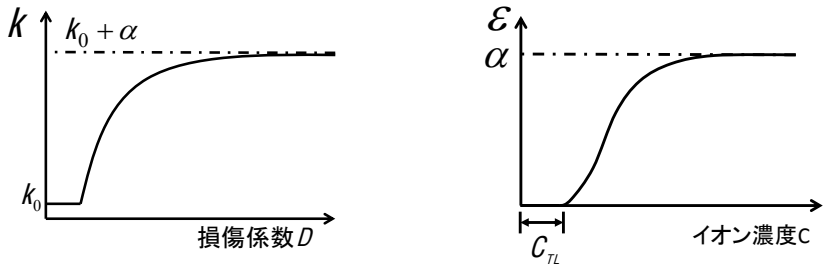
ASR 膨張は，反応生成物である ASR ゲルの吸水膨張によるものであるが，本研究では，ASR ゲル量がイオン濃度に比例すると仮定し，また，ASR ゲル生成後，吸水膨張までの潜伏期を考慮した式(4)に示す等方ひずみ ε を膨張モデルとして提案する（図-4（b）参照）．

$$\left.\begin{array}{l} C_{alkali} < C_{TL} \;\; \varepsilon = 0 \\ C_{alkali} >= C_{TL} \;\; \varepsilon = \alpha\{1 - \exp(-\beta(C_{alkali} - C_{TL}))\} \end{array}\right\} \tag{4}$$

ここで， は膨張量の最大を表現する係数， は膨張速度を表現する係数，C_{alkali} はアルカリイオン濃度，C_{TL} は閾値である．なお，反応を起こし，膨張した要素を構成する節点のアルカリイオン濃度 C_{alkali} は，反応で消費されたとして，次の式を用いて減少させている．

$$C_{alkali} = C_{alkali} - \gamma C_{CT} \tag{5}$$

ここで，γ は，アルカリ消費率を表す係数であり，本解析は，γ =0.001 とした．



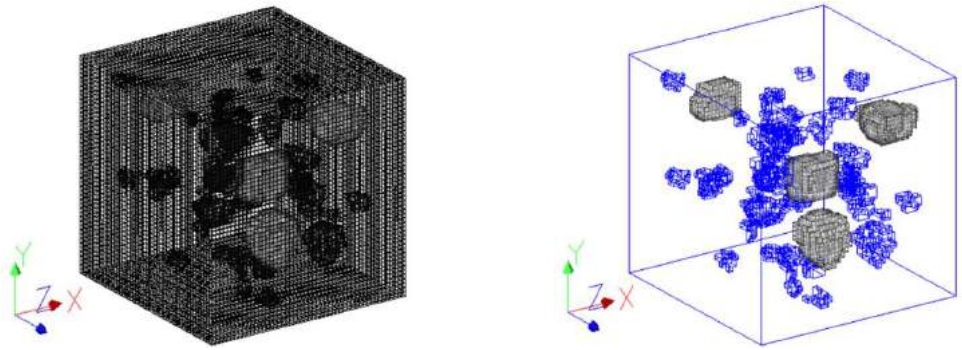
(a) ひび割れ要素の拡散係数　　(b) 膨張モデル

図-4 拡散モデルおよび膨張モデル

数値解析例

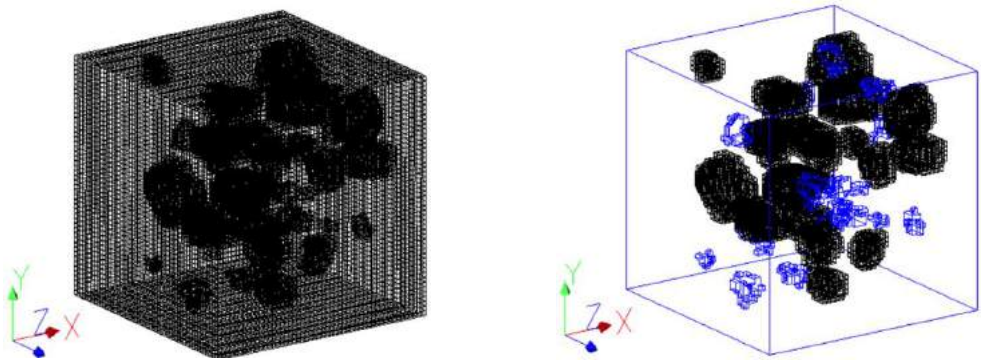
解析には 150×150×150mm のコンクリートモデルを用いた．1 ボクセル 3mm^3 とし，粗骨材量を 5%とし，反応性粗骨材は粗骨材量の 10 %，50%の 2 水準とした．図-5 および図-6 に 2 水準のコンクリートモデルを示す．図中の反応性骨材周辺には膨張層（反応リムモデル）も同時に示している．表-1 に各種係数を示す．なお，時間刻みは 0.5 日とした．

アルカリ量に応じた膨張ひずみを粗骨材に与え，ASR の膨張を表現した．境界条件は yz 面以外の面に対して面外方向の変位を拘束し，アルカリは粗骨材以外（モルタル）に初期値として 1kg/mm^3 を与えた．



(a) モデル全体　　(b)反応性骨材(黒)および非反応性骨材（青）

図-5　コンクリートモデル(反応性粗骨材 5%)



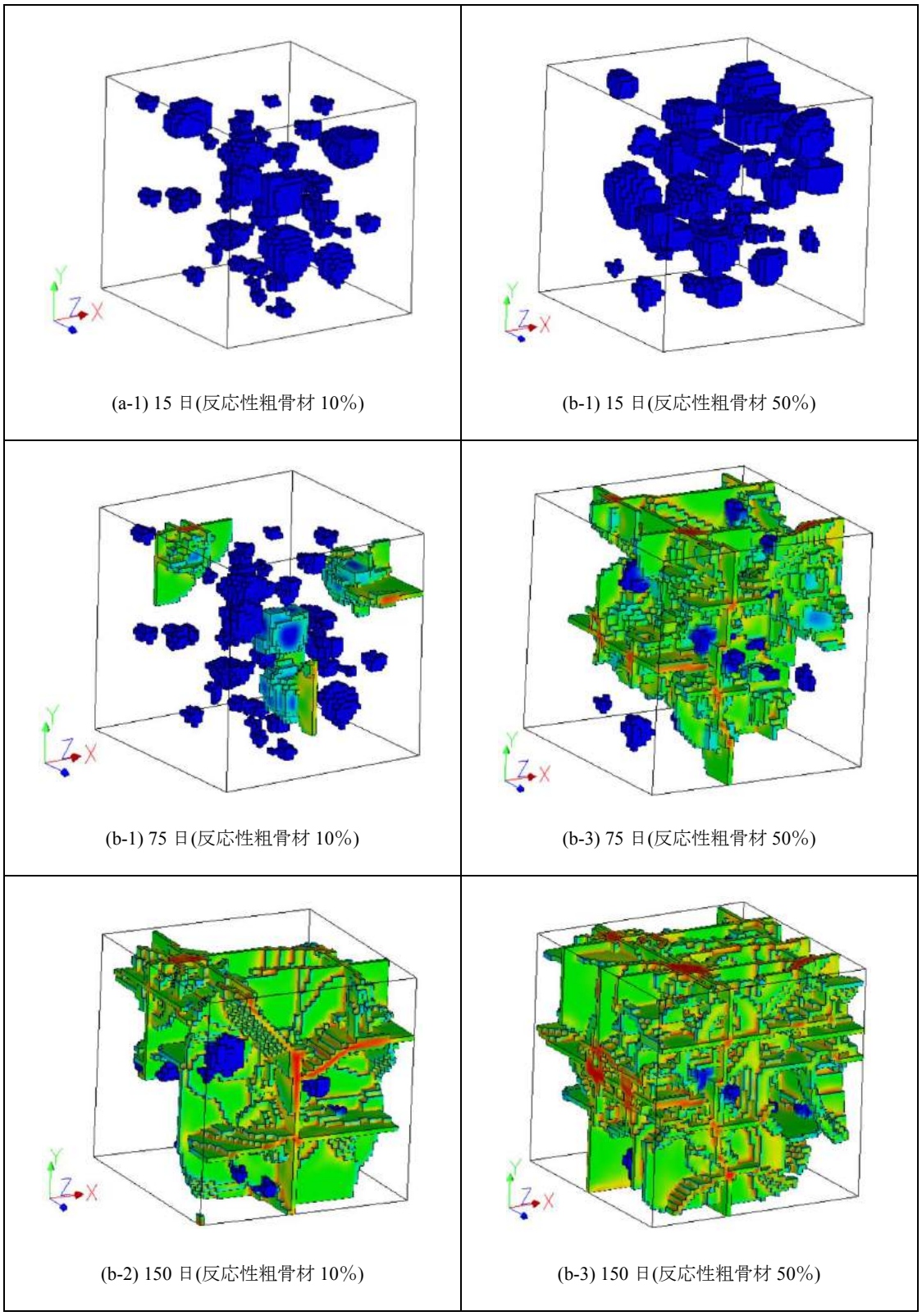
(a) モデル全体　　(b)反応性骨材(黒)および非反応性骨材（青）

図-6　コンクリートモデル(反応性粗骨材 50%)

表-1　解析に用いた材料特性

	モルタル	反応性粗骨材	非反応性粗骨材
拡散係数(mm^2/day)	1.0	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-6}
弾性係数(GPa)	20.0	60.0	60.0
引張強度(MPa)	4.0	破壊しない	破壊しない

図-7, 図-8 にそれぞれ内部ひび割れおよび表面ひび割れの解析結果（損傷係数表示）を示す. この結果より, 両ケースとも, ひび割れは反応性粗骨材の周辺のモルタルから生じ, コンクリート表面に進展しているのがわかる. また, 反応性骨材と非反応性骨材の混合率によるひび割れ発生の違いを表現できていることがわかる. しかし, 膨張量の評価は行っていないため, 今後は, 内在アルカリ量や反応に伴うアルカリ消費量を考慮に入れたモデルを開発し, ペシマム現象による膨張量の詳細な検討を行う予定である.

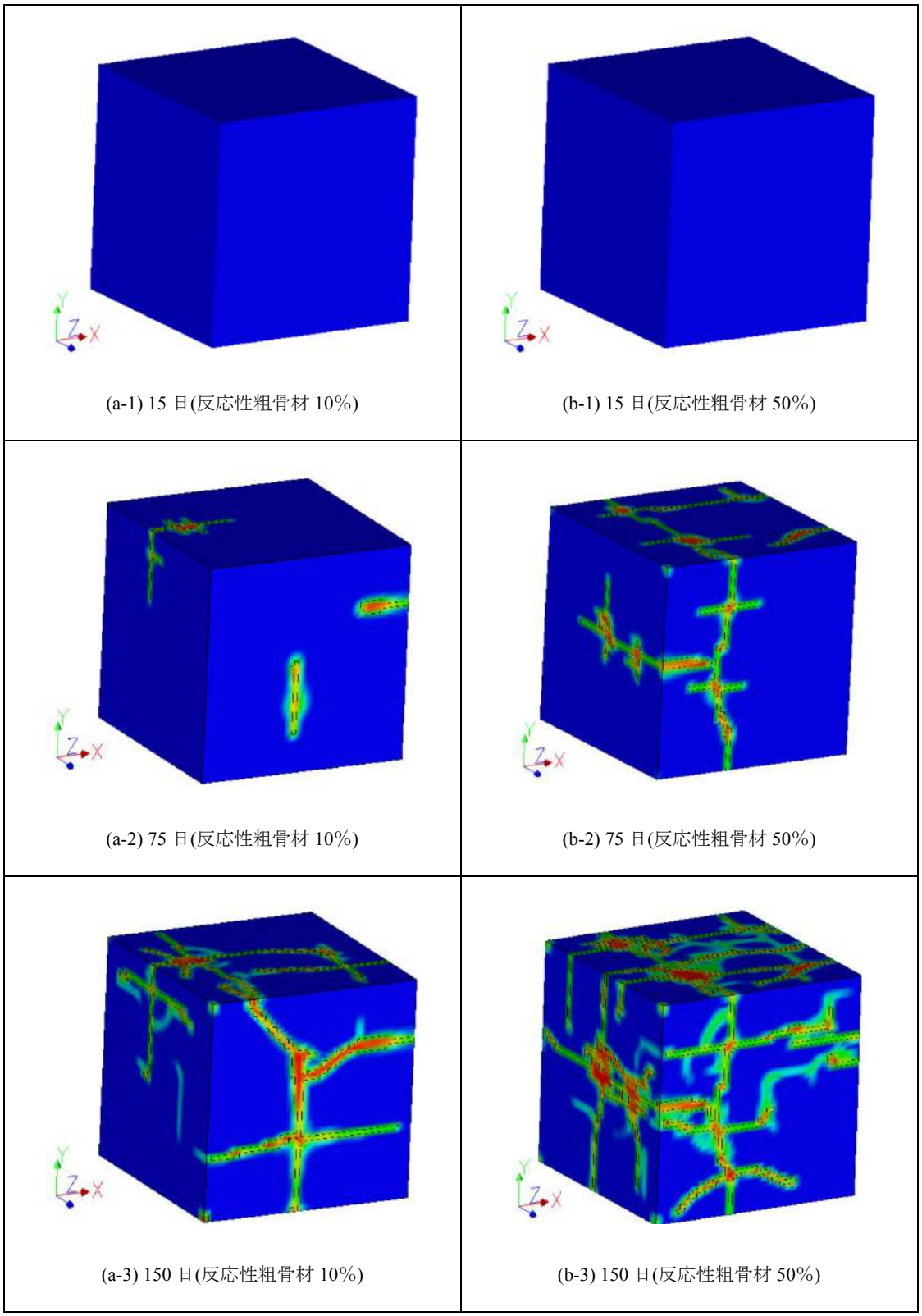


(a-1) 15 日(反応性粗骨材 10%)　(b-1) 15 日(反応性粗骨材 50%)

(b-1) 75 日(反応性粗骨材 10%)　(b-3) 75 日(反応性粗骨材 50%)

(b-2) 150 日(反応性粗骨材 10%)　(b-3) 150 日(反応性粗骨材 50%)

図-7　内部ひび割れ進展(損傷係数表示)



(a-1) 15 日(反応性粗骨材 10%)

(b-1) 15 日(反応性粗骨材 50%)

(a-2) 75 日(反応性粗骨材 10%)

(b-2) 75 日(反応性粗骨材 50%)

(a-3) 150 日(反応性粗骨材 10%)

(b-3) 150 日(反応性粗骨材 50%)

図-8 内部ひび割れ進展(損傷係数表示)

(4) 平成 27 年度進捗状況

(3)に示した通り，反応性骨材と非反応性粗骨材の混合率を変えた ASR 膨張解析が実施可能であることを示した．今後は，解析パラメータを求めるための実験をあわせて行い，ペシマム現象を再現可能な解析手法の構築を目指す．また，大規模な解析が予想されるため，並列計算(MPI+OpenMP ハイブリッド)を用いた高速化を行う．

なお，本研究は九州大学工学部地球環境工学科　浅井光輝准教授との共同研究である．

3.1.5. Sinkhole の形成シミュレーション

(1) 目標・計画

Sinkhole は，カルスト地形にて多く形成される地盤陥没現象を意味し，雨水や地下水などによって石灰岩の固い層が溶解することで発生する．この溶解現象は，地盤内部だけでなく，地表面にも影響を及ぼすことがあり，例えば，数十メートルを超える大きな地盤陥没が，前兆もなく突然に発生した事例も数多く存在している．したがって，Sinkhole の発生メカニズムの解明および予測等は工学上極めて重要な課題となっている．しかしながら，石灰岩の溶解に伴う Sinkhole の発生機構を実験的に模擬した上で地盤の陥没過程を観察することは，時間的制約や現象自体の複雑さから極めて困難であり，災害後の調査などに頼らざるを得ない現状がある．このような現状を考慮すると，Sinkhole の形成メカニズムや発生後の被害を想定する際には，数値シミュレーション技術が強力なツールになると考えられる．

そこで本研究では，石灰岩の溶解過程を反応拡散系にて数理モデル化し，Sinkhole の形成過程を計算機上で再現した．なお，本研究は，最終的には地盤陥没現象のメカニズム解明に挑むものとなっている．なお，前年度までに，地盤の幾何モデリング技術，地盤の流動解析技術，地盤内表面における破壊パターン解析技術として，力学をベースとした解析手法を展開してきたが，本年度は更に踏み込み，地盤の化学的風化現象の数値モデル化に挑んだものとなっている．

(2) 意義・国際社会との比較

Sinkhole 現象に関しては，アメリカ合衆国やアラブ首長国連邦，大韓民国等の都市部においても多くの被害が確認されており，特に，フロリダ半島においては，半島全体を覆う石灰岩が全体的に溶出した影響で，多数の Sinkhole が発生しており，物理的な被害のみならず人的な被害も発生していることから，緊急な対策が必要とされている．しかしながら，本現象は力学的な理論のみでは解決することが困難な問題であり，また，時間的な制約も重なって，明確な解決の緒は未だ見つかっていない．数値解析的な検討については，若干の先行研究があるものの，ダルシー則等の単純化されたモデルがあるのみである．したがって，本研究の国際社会における意義は極めて大きい．

(3) 研究内容

1) 石灰岩の溶解過程の定式化

石灰岩の溶解は次式にて表すことができる．

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca(HCO_3)_2 \tag{1}$$

したがって，石灰岩の溶解に対する化学反応速度式は，次式にて表すことができる．

$$\frac{d[A]}{dt} = -k_1(A-a)(B-a) \tag{2}$$

$$\frac{d[B]}{dt} = -k_1(A-a)(B-a) \tag{3}$$

$$\frac{d[C]}{dt} = k_1(A-a)(B-a) \tag{4}$$

ここで，A: $CaCO_3$，B: H_2CO_3，C: $Ca(HCO_3)_2$，k_1: 反応速度定数，t :時間，a: 溶解反応した物質量である．また，この反応は可逆性を有しており，これも考慮しなければならない．このとき，化学反応速度式は 1 次の反応速度式になり，次式にて表すことができる．

$$\frac{d[A]}{dt} = k_2(C-b) \tag{5}$$

$$\frac{d[B]}{dt} = k_2(C-b) \tag{6}$$

$$\frac{d[C]}{dt} = -k_2(C-b) \tag{7}$$

ここで，k_2: 反応速度定数，b: 生成反応した物質量，C: $Ca(HCO_3)_2$ の濃度である．一方，各物質は岩盤内部で拡散していることが考えられるから，式(2)～(7)に拡散項を導入することを仮定する．具体的には，各物質濃度の時間に伴う変化量を反応拡散系にて定義し，次式にて仮定した．

$$\frac{d[A]}{dt} = D_1\nabla^2 A - k_1([A]_0-a)([B]_0-a) + k_2([C]_0-b) \tag{8}$$

$$\frac{d[B]}{dt} = D_2\nabla^2 B - k_1([A]_0-a)([B]_0-a) + k_2([C]_0-b) \tag{9}$$

$$\frac{d[C]}{dt} = D_3\nabla^2 C + k_1([A]_0-a)([B]_0-a) - k_2([C]_0-b) \tag{10}$$

ここで，D_1: $CaCO_3$ の拡散係数，D_2: H_2CO_3 の反応係数，D_3: $Ca(HCO_3)_2$ の拡散係数である．

2) 数値解析例：Sinkhole の形成シミュレーション

① 解析モデル

解析領域は，損傷部位を含んだ矩形領域で 2×2 の 2 次元モデルを仮定した．このモデルにおける総格子点数は 40401 であり，境界条件としてモデルの上下左右端に Neumann 条件を設定した．また，化学反応量にばらつき持たせるために，毎ステップごとに化学反応する量が，正反応および逆反応共にランダムに変化するよう設定した．さらに，異なる環境下・条件下での反応を観察するために，石灰石の形状や炭酸水の流入場所を変化させ，より実際の状況に近い条件を設定した．なお，石灰岩の表面では，± 0.1 の範囲の濃度をランダムに設定した．以下に，本研究で用いた2つの解析モデルの詳細を記す．

■ 解析モデル 1

本モデルは，Sinkhole の形成過程を観察するためのモデルであり，図-3.1.5-1 に示すように，モデル上部の穴から一定量の炭酸水が供給される．これは，正方形の石灰岩の上部に穴をあけ，そこから炭酸水が供給されて石灰岩が溶けていく様子を再現したものである．

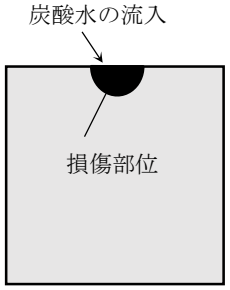


図-3.1.5-1 解析モデル 1

■ 解析モデル 2

本モデルは，Sinkhole が岩石の内部損傷部位から発達していく様子を観察するためのモデルであり，図-3.1.5-2 に示すように，石灰岩の濃度として層状に 3 つの値を設定した（上段：0.5±0.1，中段：0.9±0.1，下段：0.1±0.1）．

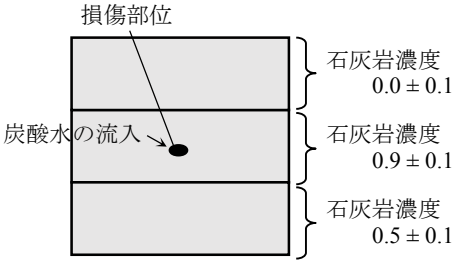
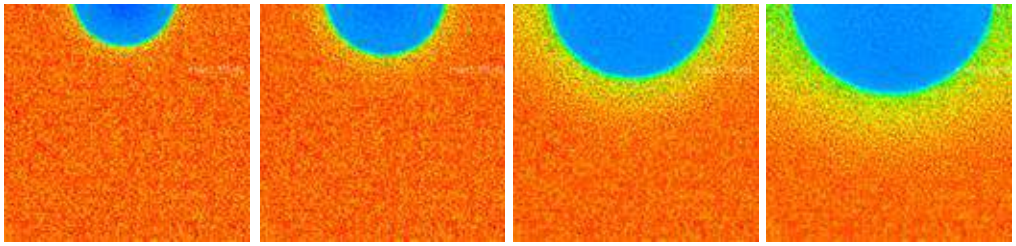


図-3.1.5-2 解析モデル 2

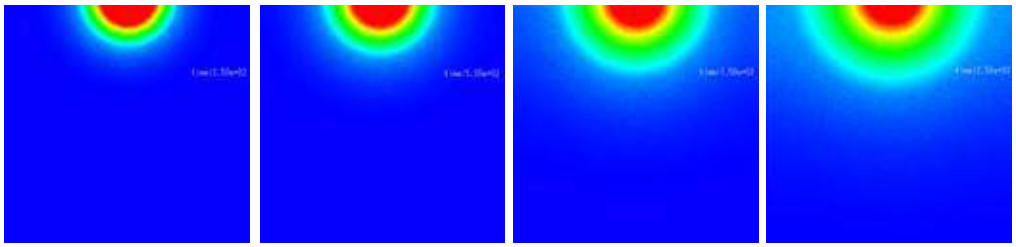
② 解析モデル 1 の結果と考察

解析モデル 1 の解析結果として，石灰石の濃度，炭酸水の濃度および炭酸水素ナトリウムの濃度を，それぞれ，図-3.1.5-3，図-3.1.5-4 および図-3.1.5-5 に示す．図中のカラーグラデーションは各物質量の濃度の大きさを示しており，青から緑，赤に変わるにつれて低濃度から高濃度に変化したことを意味する．図-3.1.5-3 より，本解析結果は，炭酸水が石灰岩を溶かし Sinkhole が形成されていく様子を示している．さらに，一部の炭酸水素カルシウムがそれぞれ石灰岩と炭酸水に変化している様子も確認される．また，炭酸水は，図-3.1.5-4 より，解析の初期段階では上部の穴から供給され，そこから step 数が増加していくに伴って，拡散していくことが分かる．また，図-3.1.5-5 より，炭酸水と石灰岩が接触している様子が見受けられることから，炭酸カルシウムが徐々に増加し続け，その後拡散していることが分かる．さらに，モデルの下部には炭酸カルシウムが発生していないことから，炭酸水と石灰岩が接触していなければ，炭酸水素カルシウムは生成されないことが分かる．



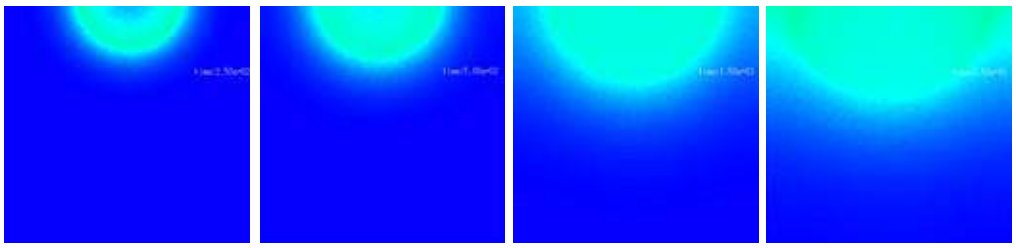
(a) 50step　(b) 100step　(c) 300step　(d) 500step

図-3.1.5-3　石灰石の濃度パターン(a)～(e):経時変化 （解析モデル 1）



(a) 50step　(b) 100step　(c) 300step　(d) 500step

図-1.1.5-4　炭酸水の濃度パターン(a)～(e):経時変化 （解析モデル 1）

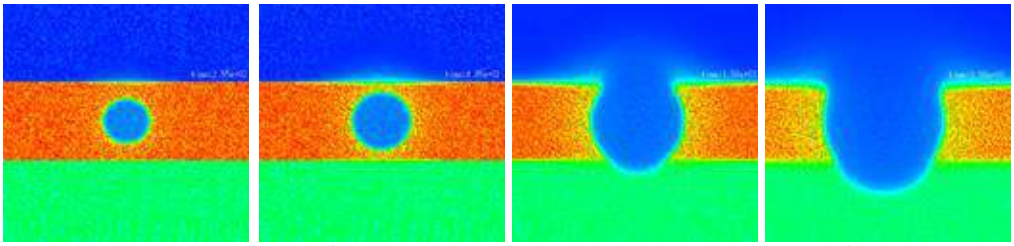


(a) 50step　(b) 100step　(c) 300step　(d) 500step

図-3.1.5-5　炭酸水素ナトリウムの濃度パターン(a)～(e):経時変化 （解析モデル 1）

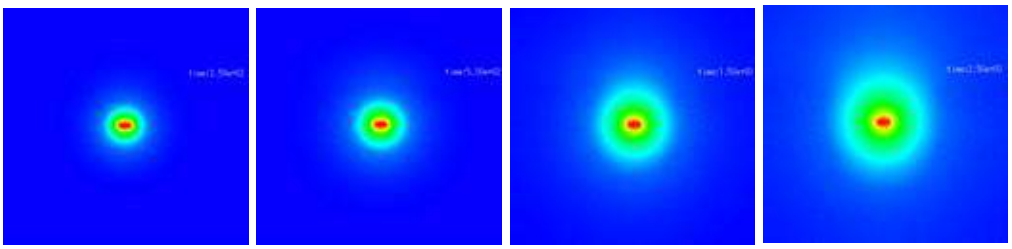
③ 解析モデル 2 の結果と考察

解析モデル 2 の解析結果として，石灰石の濃度，炭酸水の濃度および炭酸水素ナトリウムの濃度を，それぞれ，図-3.1.5-6，図-3.1.5-7 および図-3.1.5-8 に示す．図-3.1.5-6 より，石灰岩では，水が流入している箇所から徐々に穴が大きくなっていき，最終的には上下の層を貫き，縦穴をあけている．これらの層を地層として想定すると，中間の層が炭酸水によって破壊されることにより，上段にある層の比較的柔らかい層が，Sinkhole の内部になだれ込む，と考えられることができる．このような現象は，実地盤においても確認されていることであり，本手法が定性的には妥当であることが分かる．また，図-3.1.5-7 より，炭酸水が石灰岩の濃度の低いところに残っていることが分かる．さらに，図-3.1.5-8 より，炭酸水素カルシウムが一定には拡散せず，層の境目で異なった拡がりを示していることから，炭酸水素カルシウムは石灰岩濃度の高い箇所に集中すると考察できる．



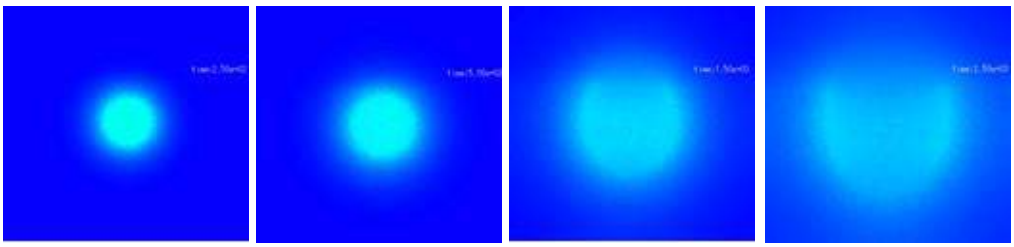
(a) 50step (b) 100step (c) 300step (d) 500step

図-3.1.5-6 石灰岩の濃度パターン(a)～(e):経時変化 （解析モデル 2）



(a) 50step (b) 100step (c) 300step (d) 500step

図-3.1.5-7 炭酸水の濃度パターン(a)～(e):経時変化 （解析モデル 2）



(a) 50step (b) 100step (c) 300step (d) 500step

図-3.1.5-8 炭酸水素カルシウムの濃度パターン(a)～(e):経時変化 （解析モデル 2）

本研究で定式化した数理モデルは極めて単純である一方，多くのパラメータを含む．したがって，今後の展開としては，多くのパラメータサーベイを実施し，実地盤の状態を加味した数値シミュレーションを実施していくことが望ましい．また，実際の災害状況や石灰岩の溶解実験結果などと比較し，本手法の妥当性を検討するとともに，本モデルの精度向上を図る必要がある．

(4) 平成 27 年度進捗状況

今年度は，地盤内部における化学反応に伴う岩石溶解現象に対して，反応拡散系理論をベースにした数理モデルを構築し，2次元領域における数値解析技術を構築した．その結果，Sinkhole の発生過程のシミュレーションに成功し，定性的には良好な結果を得ることができた．今後は，実験値との比較など，更なる検証を行う必要がある．

3.2.　大規模並列化グループ

2011 年に京コンピュータが 10 ペタ(Peta: 1 京)フロップス(Flops: Floting Points per second)に達し，TOP500 では 2 回連続世界 1 位となり，2013 年には中国の Tianhe-2 が 33 ペタにより 1 位を記録し，次世代スーパーコンピュータは，ペタの次の世代，つまりエクサ(Exa)フロップスを指す時代へと突入している. このことからもハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる. その一方で，これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては，その開発スピードもソフトウェアの品質も十分とは言えず，多くのソフトウェアが 20 世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である. 特に，1970～1980 年台に既に確立されているアルゴリズムに対して，並列化の実装のみを加えた物が多く見られる. このような背景のもと，本プロジェクトでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する，次世代の大規模解析システムを構築するとともに，常に最先端のスーパーコンピュータ能力を活用するシミュレーション実現を目指す.

今年度は，以下の項目について報告を行う.

(1) ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

(2) 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

(1) 目標・計画

本研究では対象問題をある程度限定することで高性能が得られるアプリケーション特化型システム開発を行っていく. 対象問題は連続体力学とし, 産業界で需要が高い非構造格子並びに自由表面や移動境界問題に重要なメッシュフリー(粒子法を含む)の取り扱いを可能とする. 時間方向の非定常性や問題が持つ非線形性を考慮する必要があるが, 陰解法ベースの数値解析手法を対象とする. これらに対し, 3 つの課題(A)DDM 入出力ライブラリ開発, (B)DDM ソルバーライブラリ開発, (C)連続体力学向け DSL 開発に取り組む. 本研究で開発されたライブラリを用いて連続体力学系シミュレータの実装と評価も行う予定である.

(2) 意義・国際社会との比較

ポストペタスケール計算を見据えた新技術の開発について, これまで同様汎用向けのライブラリなども開発されるであろうが, それらの利用では, 非構造格子問題では高々数パーセントの性能, あるいはそれ以下しか期待できず, 連続体力学系シミュレーションに特化したシステム開発が必要と考えられる. そもそも数パーセントの性能でのソフトウェアはペタコンでの運用が認められないという制約もあり, これはポストペタコンについてはさらに厳しくなることも想定される.

連続体力学系シミュレーションは, 従来からの FEM, FVM, BEM など非構造格子アプローチに加え, 近年ではメッシュフリーや粒子ベース手法による大規模計算の台頭が目覚しく, これらにも対応させ, 非構造格子および節点, 粒子ベースモデルを統一的に扱えるようにすることで, 連続体力学系シミュレーション向けライブラリとして整備されれば, ポストペタコンの連続体力学系シミュレーションでの利用の拡大に大きく貢献することが期待できる.

(3) 研究内容

A)DDM(Domain Decomposition Method, 領域分割法)入出力ライブラリ

本研究項目は, マルチレベル領域分割法に基づく多階層計算格子データの生成, 操作および I/O ライブラリ開発を行うものである. 一般的なアプリケーションシステムは, プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが, これまでは最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装されてきた. ポストペタコンでは, 全ての処理をスパコン上に実装し, 並列化することが当然求められてくる. しかし, 従来の枠組みで並列化したのみでは, それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される. そこで, これまで研究代表者らがソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法の技術を応用した, マルチレベル領域分割法によるデータ処理システムの開発を行う.

B)DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は, マルチレベル領域分割法に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列ライブラリ開発を行うものである. 一般的な線形代数ソルバーは, アセンブリされた連立一

次方程式を入力とするため，FEM におけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた．それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくいが，ポストペタコンで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される．そこで，提案するマルチレベル DDM による多階層型データ構造を活用した，大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリの開発を行う．これは，

・多階層領域分割に基づく分散メモリ並列向け線形代数ソルバーの構築
・多階層領域分割に基づくマルチレベルコースグリッド修正法の開発
・構造・熱・流体・磁場など物理現象毎に特化したコースグリッド修正法の開発

を含む．つまり，これまで FEM を対象に研究を進めてきた DDM をマルチレベルに拡張し，さらに FVM，BEM，メッシュフリー，節点ベース FEM や粒子法など連続体力学全般に適用する技術開発である．また，マルチレベルな領域分割を利用し，線形代数ソルバーにおける前処理手法について，研究代表者らがこれまで研究を進めてきた高速かつ安定した収束性を持つ反復解法である BDD（Balancing Domain Decomposition）法や BDDC（Balancing Domain Decomposition by Constraints）法をマルチレベルに拡張し，さらに粒子法などへの応用も進める．開発システムは線形代数ライブラリとして整備していく．

C）連続体力学向け DSL（Domain Specific Language，問題領域専用言語）

本研究項目は，連続体力学向け DSL の開発と，それに対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成の開発を行うものである．ポストペタコンのアーキテクチャでは，計算ノード間の並列性だけでなく計算ノード内での効率も重視される．各計算ノードはメニーコアや GPU，SIMD 拡張命令といった多種多様なアクセラレータを有し，これらを有効利用することが望まれる．従来のプログラミング言語やコンパイラ最適化技術での対処は不十分であり，現状ではそれぞれのアクセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必要とされている．一方，数値シミュレーションコードの場合，特に連続体力学分野においては，そのアプリケーションロジックは物理現象や数値解析スキームであり，これは数学表現，特に行列やテンソルで表記されることが多い．よって，連続体物理モデルを DSL 化して，数学記述（例えば，行列，テンソルの式を tex 形式で記述）から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブラリを call するコードを生成するコードジェネレータあるいはトランスレータアプローチが有効であると考えられ，これを実現するシステムの開発を行う．

(4) 平成 27 年度進捗状況

A） DDM 入出力ライブラリ

平成 27 年度は，次の研究項目の研究開発が進められた．

1. メッシュ向け多階層領域分割

2 層領域分割アルゴリズムについて，非構造格子向け並びにメッシュフリー向けの機能強化を行った．MPI-OpenMP ハイブリッド並列化とリスタート機能を追加することで，現時点で最終目的である 2,260 億要素（0.9 兆自由度）の非構造四面体メッシュ生成に名大 FX10 の 96 ノー

ドを 56 時間用いることで達成できた. ポストペタコンで想定される超大規模シミュレーションのプレ処理に有効なライブラリであることが示された.

2. メッシュ向け DDM 圧縮

非構造格子向け DDM 圧縮技術の実装を開始し, FEM による熱伝導解析を対象に基本機能を開発した. 平成 26 年度には, 大規模解析への適用を開始するとともに, 新たに多階層精度圧縮数値記録技術に基づいた FEM データ圧縮ライブラリを開発し, 大規模解析において約 8 割の圧縮率を得ることに成功した.

3. メッシュフリー向け DDM 圧縮

多階層精度圧縮数値記録技術に基づいた粒子データ圧縮ライブラリを開発し, 大規模解析において約 5 割の圧縮率を得ることに成功した.

B) DDM ソルバーライブラリ

平成 27 年度は, 次の研究項目の研究開発が進められた.

1. メッシュ向け DDM ソルバー

LexADV_TryDDM の開発を継続して行い, 電磁界解析ソフトウェアからの利用に向けて Nédélec 要素対応などを行った. また, 複素対称を係数に持つシステム向けに, DDM に基づく反復解法である MINRE-like_CS 法を開発した. さらに, DDM の計算アルゴリズム見直しによる高速化を進めており, 平成 26 年度は時間調和渦電流問題において反復解法の収束性を大幅に改善することに成功した. これにより, 従来の計算アルゴリズムでは 5,000 万自由度程度までしか求解できなかったが, 東京大学 FX10 の 720 ノードで 35 億自由度モデルを 9 時間弱で求解することに成功し, ポストペタコンにおいて解くべき問題に対しても有効な計算手法であることが示された.

2. メッシュフリー向け DDM ソルバー

メッシュフリー向け DDM 解釈を数学的に行い, 加えて, メッシュフリー向け DDM アルゴリズムをインターフェースの選び方で 2 種類開発した. 現在, 検証用の実装を行っている.

3. 流れ・電磁界 FEM 向け多階層前処理

電磁界問題向けに BDD 前処理の統一的構築方法の開発と実装を行った[15]. また, LexADV_TryDDM による BDD 前処理研究開発フレームワークを開発中である.

4. ポストペタコン向けシミュレータ評価

評価環境として京コンピュータ, 東京大学 FX10, 東京工業大学 TSUBAME2.5(GPU), 名古屋大学 CX400(MIC)を主な開発計算機としてそれぞれのソルバーの性能向上をおこなった. 有限要素法による構造解析機能と粒子法による流体解析機能を持った「連続体力学系シミュレータ」の開発を行い, ファイルベースの片方向連成機能のみの開発を完了した. 図 1 では, LexADV_EMPS を用いて津波遡上解析を行った後, 流体解析で出力されたファイルから, 地上構造物に与える流体圧力を求め, 構造解析の入力ファイルを作成する. この構造解析用の入力ファイルを用いて, ADVENTURE_Solid が応力解析を行う. このようにして

LexADV_EMPS の片方向連成機能の開発により，大規模分散メモリ環境で，粒子法による流体解析と有限要素法による構造解析の連成解析が可能となった．

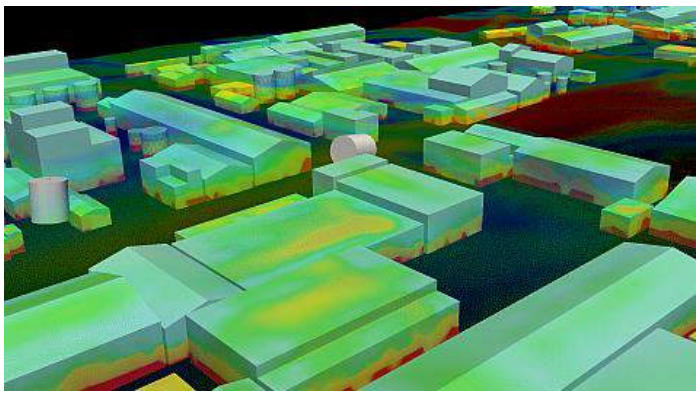


Fig.1.　A Coupled Analysis with LexADV_EMPS and ADVENTURE_Solid

C） 連続体力学向け DSL

平成 27 年度は，次の研究項目の研究開発が進められた．

1. DSL トランスレータ

平成 24 年度から引き続き，豊田中央研究所や東京理科大学，理化学研究所，JAMSTEC，JAXA，JAEA，東京大学生産技術研究所，東京大学地震研究所や国内スパコンセンターなどへの普及活動を積極的に行い，理化学研究所 京コンピュータ，東京大学 FX10，T2K 及び GPU クラスタ，九州大学 FX10，JAMSTEC ES2，筑波大学 T2K，名古屋大学 FX1，名古屋大学 CX400，名古屋大学 FX10，京都大学 XE6，九州大学 CX400，九州大学 FX10 などの利用実績を築きつつある．更に，HPC 技術の産業界向け応用に関する国際ワークショップに参加し，韓国 KiSTi における HPC クラウド開発への協力を行うことで，海外スパコンセンターへの普及活動も継続して行っている．この活動の一環として，5th International Industrial Supercomputing Workshop が平成 26 年 10 月 2-3 日に東洋大学で開催された．

2. DSL 性能評価

需要の高いマルチコア及び SIMD 命令セット向けの最適化ライブラリの開発を延長して実施した．また GPU・MIC 向けの開発を更に重点的に行った．GPU 向け開発には，CUDA 及び OpenACC の利用を引き続き検討した．MIC 向け開発には，ネイティブ実装及びオフロード実装の利用を検討した．

3. SIMD・GPU 向け最適化 AutoMT

マルチコア及び SIMD 命令セット向け最適化ライブラリの開発を更に進めた．開発中の①構造解析・要素剛性，②非線形材料構成則，③熱伝導解析・要素剛性のそれぞれの行列テンソルライブラリでは，Intel (Sandy Bridge)でピーク性能比①70%，②31%，③50%を達成し，東大 FX10 ではピーク性能比①44%，②40%，③38%を達成することに成功した．

3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

(1) 目標・計画

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題のBDD前処理の実装

磁場解析の分野ではこれまで約20年近く，東京大学の菊地文雄名誉教授が線形静磁場問題で確立した独創的な混合法的定式化を自然な形で3次元渦電流問題や3次元非線形静磁場問題に独自の工夫を加えて拡張し，ADVENTURE_Magneticを公開してきた．ごく最近部分領域問題を直接法で解くことにより1億実自由度や約5,000万複素自由度の大規模解析を可能にした魅力を次世代計算機で更に活かすためにはもう1桁程度の計算速度の改善が望ましい状況がある(速ければ速いほど，実際の設計に用いる計算モデルを更に詳細化できる)．本研究では，この高速化に対応する研究を行い，もう1桁高速化したソフトウェアを公開していく．ここに述べた手法に基づく磁場解析ソフトウェアは，国産市販ソフトウェアは言うまでもなく国際的に見てもあまり例がない．また現在数百万自由度規模程度で留まっている電磁場解析の規模の拡大にとって現時点ですでにブレークスルーを引き起こした研究になっている． 実際，大規模解析では我々の現時点のレベルを目標にする研究チームもいくつか現れているが，本研究では得意とする大規模化に更に高速性を加味することにより，追随者の上を行くPerfect Only Oneを目指す．

B) 熱対流解析コードの機能強化

非圧縮性粘性流解析・熱対流解析の分野では現時点のADVENTURE_sFlowをもとに計算サービスを行っているベンチャー企業も現われている．ADVENTURE_sFlowでは磁場解析や構造解析と同様な手法で計算しているので，高速化の検討を共通の課題として行え，入力データの共有化がしやすく連成解析が行いやすいという特長がある．低炭素社会向けシミュレーション技術に応用分野を特化し解析機能を限定してでも，この特長を早く引き出したいと考えている．

(2) 意義・国際社会との比較

3 次元電磁場の有限要素解析はこれまでやや試行錯誤的に行われており，信頼のおける数値解法が未だ十分確立されていない状況にある．このようななかで，我々は菊地理論をベースに，工学的応用を展開するという形を採っており，国際的に見ても極めてユニークな注目すべき研究を展開している．これまでに開発されてきた文部科学省支援研究による電磁場解析ソフトウェアの骨格を一貫して提供してきたという自負もある．今後の低炭素社会に向けて電気自動車の利用が推進されているが，電磁環境適合性(EMC)のためにも電磁場解析の有用性は増している．非圧縮性粘性流・熱対流や固体力学の大規模解析も統一的な手法で研究を進めているので，それらとの連成解析が有利に行えるという利点も持っている．

(3) 研究内容

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題のBDD前処理の実装

3次元磁場の有限要素法による解析，特に3次元渦電流解析（複素自由度4,355万の問題が32台のPCクラスタを用い5時間弱で解けている）並びに1億自由度を最近可能にした3次元非線形静磁場解析に対しては，領域分割法を用いる際の数値計算上の諸問題を以下の更なる高速化に関する課題に焦点を絞って研究する．

「離散化に伴い生じる超大規模（1億自由度以上）の疎な対称連立1次方程式と連立非線形方程式に対する領域分割法を意識した効率的な数値解法を確立し，特にもう1桁の高速化を可能にする前処理方法を確立する．」

B) 熱対流解析コードの機能強化

3次元非圧縮性粘性流解析についてはこれまでの内容を発展させた新アルゴリズムの導入を図る．2006年7月に公開したモジュールADVENTURE_sFlowはその後水素利用社会向けシミュレーション技術でも応用があったので，熱対流解析の基本機能が非定常解析機能も含めて追加され，前処理機能の強化による高速化が実現されたため，実用レベルの有効性をチェックする段階になっている． 非定常解析機能ではStokes問題のみならず，Navier-Stokes問題に対しても特性曲線法の活用により対称な連立1次方程式ソルバーを活用できることがポイントになっている．

(4) 平成 27 年度進捗状況

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

昨年度は BDD 前処理の実装実現のために 1 コア処理に限定して三つの課題を設定した．一つはシュアコンプリメント行列 S とベクトル p の積 q を計算する部分を独立して利用可能にすること，二つ目はノイマンノイマン前処理を実装させること，三つ目はコース行列を作成し，それを既存のパラレルソルバーで解くことである． この三つが実現できれば，BDD の実装はほとんど実現できると言ってよいほどの重要な 3 項目になる．ノイマンノイマン前処理は 2005 年に一度成功した実績があるが当時の記録が紛失しており，新たな開発を行うことになった．現時点ではコードの骨格はできたが，残念ながら効果が全く出ていない．部分領域数が大きくなると手法自体の特徴として効果が出ないのか，何かミスを犯しているのかを見極める必要がある．3 番目のコース行列作成部分は既存技術の適用で今のところ問題がない．予想外に時間がかかったのは最初の q=Sp の計算であり，いくつか試みた結果，LexADV の TryDDM を適用することにより，ようやく 1 コアの BDD 前処理に見通しをつけることができた．ただし本来の BDD 前処理は内蔵しているノイマンノイマン前処理ともども依然として効果がでておらず，唯一 BDD 前処理を簡易化した BDD-DIAG 前処理のみが収束する．前述のとおり LexADV の TryDDM を適用しているので，現在の自由度規模が 100 万以内に抑えられている．この程度の規模では BDD-DIAG 前処理の効果は芳しくなく，ADVENTURE_Magnetic のデフォールト前処理になっている簡易対角スケーリング前処理(diag)の反復回数を減らすことができない状態である．現在，いくつかのベンチマーク問題で BDD-DIAG 前処理の効果をいろいろな視点からテストしているが，いずれの場合もほぼ同様な事情になっている．マルチコアでの処理を可能とし，シュアコンプリメント行列 S を陽に作成しないアプローチを可能にする等の今後の工夫が必要であると考えている．

B) 熱対流解析コードの機能強化

このテーマは昨年度の課題として公開用ドキュメントの整備以外に以下の 4 課題を設定した. すなわち ADVENTURE_sFlow への機能強化として

・熱方程式部分への DDM フレームワークの適用

・熱流束境界条件入力機能の追加

・熱伝達境界条件入力機能の追加

・BDD 前処理における通信処理改善の検討

を図るものである. 最初の DDM フレームワークの適用は(1)のテーマの B)の研究テーマと連携しながら, 開発ライブラリのプロトタイプ(LexADV の TryDDM)のテストを兼ねたものであり, 一応利用可能になった. 2 番目, 3 番目のテーマは 1 番目のテーマが可能になった時点で, DDM フレームワークでの実現が可能になった. 4 番目は派生した問題を解決しながら検討を続けた結果, これも可能になった. 以上の成果を踏まえて ADVENTURE_sFlow の Ver.1.0 を公開した. 今年度は自動販売機内の熱対流計算での実践を通して, Ver.1.0 の信頼性をチェックすると同時に, 燃料電池自動車の市場投入に同期させて水素漏洩時の拡散現象を熱対流のアナロジーで解く試みを本格化させる準備を行った.

今後の課題は静磁場解析同様, 熱解析の部分が LexADV の TryDDM を使っているための 100 万自由度の壁を突破することと ADVENTURE_Thermal を参考にしながらの BDD 前処理を導入することである. これらの課題をクリアしていくことにより, 自動販売機の熱対流解析, 燃料電池自動車からの水素漏洩時の拡散解析を核にして ADVENTURE_sFlow の産業界での応用を促進していく.

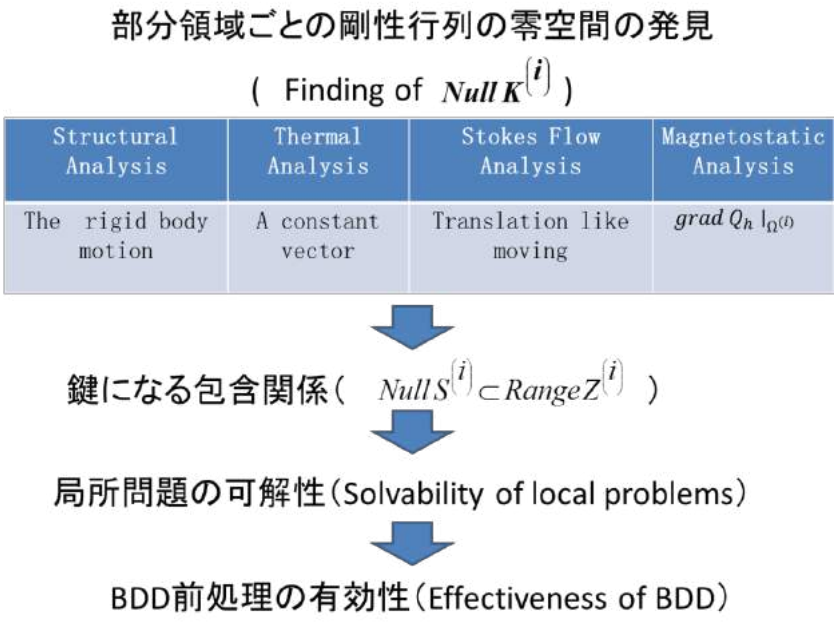


Fig.2　A General Framework for a Unified Construction of the BDD Preconditioners.

3.3.　新規実験計測グループ

新規実験計測グループでは，計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体－構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち，「標準問題実験の検討」に焦点を当てた活動を行っている．

流体－構造連成実験を高い信頼性で実験するには，実験模型の精度や実験装置の信頼性を高めた上で，それらを連成している物理量について考察する必要がある．そこで，標準問題実験に関する円柱周りの流れ実験だけでなく，シートフラッタ試験，飛行物体の空気力特性を中心に連成実験を行ってきた．

上記の事項について，今年度は以下の3項目について報告する．

(1) 標準問題のための弾性円柱の振動実験
(2) 平板翼模型のフラッタ特性の系統的整理
(3) 飛行物体に作用する空気力特性

3.3.1.　標準問題のための弾性円柱の振動実験

(1) 目標・計画

流体－構造連成解析手法を検証するための標準問題として，低速風洞を用いた円柱の振動試験を行っている．図1は風洞試験の概要図である．風路下流に実験模型を設置して試験を行い，数値解析の検証用データを提供する．また本研究を通じて，新しい計測手法，解析手法の提案を目指す．

(2) 意義・国際社会との比較

流体−構造連成問題について数値計算，実験は多数行われているが，その殆どが単独に行われたものである．そのため文献ではいずれかの結果が引用される場合が多く，両者の信頼性を保証した上で，結果を議論した例が見られないのが現状である．本研究では，数値計算結果の信頼性を検証するためのデータを提供することを主眼として，様々な実験に取り組む．数値計算と実験を実施することで，計算上の問題点，実験上の問題点を明らかにできると考えられる．

(3) 研究内容

Fig. 1 は風洞試験の概要図である．出口面積 A=0.3×0.3 m^2 の風洞装置にシリコーンゴム円柱を固定した．円柱の直径は φ=20 mm，長さ L=160 mm である．シリコーンゴム円柱のヤング率で E=9.0, 12 MPa である．気流速度を上昇させていくと円柱は気流に対して垂直に振動し始める．Fig. 2 は気流速度に対する円柱の変形量を示している．

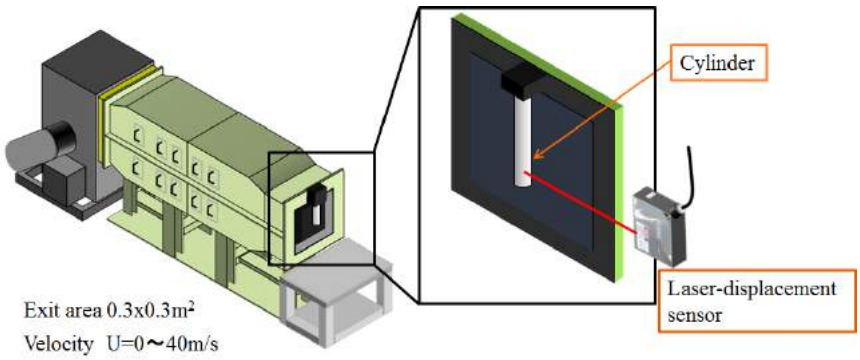


Fig.1.　Schematic picture of experimental setup.

(a)　U = 0 (m/s)　　(b) U = 25(m/s) (E=9MPa)　　(c) U = 25(m/s) (E=12MPa)

Fig.2.　Deformation of cylinder at several flow velocity.

レーザ変位計を用いて，円柱の変位を測定し，FFT 解析により周波数特性を調べた．Fig. 2 はレイノルズ数とストローハル数の関係を示している．円柱は気流に対して垂直に振動しているが，レイノルズ数が上昇するにつれてと*St*数は緩やかに減少している．これは風速の上昇に伴い，ことが分かる．円柱は *St*=0.01 で振動していることが分かる．

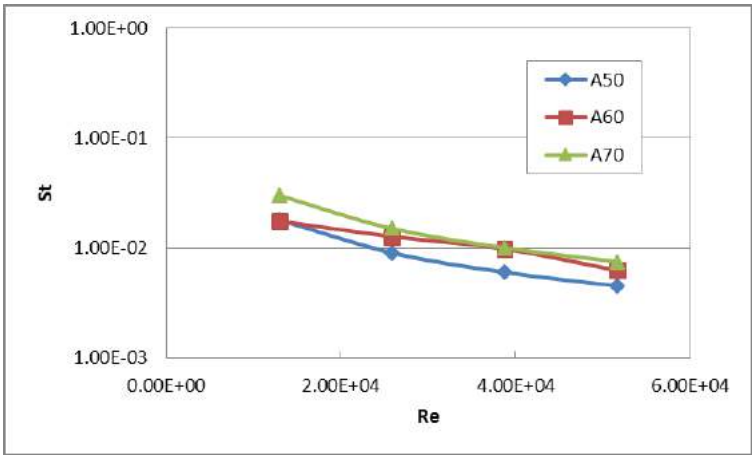


Fig.2.　Frequency characteristics of oscillating cylinder.

(4) 平成 27 年度進捗状況

標準問題に関する実験を行い，様々なシリコーンゴムの物性値について変形量を測定することができた．数値計算との比較，3 次元可視化とのデータ共有を行うためにデータを整理している．

参考文献

(1) R. D. Blevins: "Flow-induced vibration", Krieger publishing company （1990）.
(2) R. King and M. J. Prosser and D. J. Johns, On Vortex Excitation of Model Piles in Water, Journal of Sound and Vibration, Vol.29 (2), pp.169-188（1973）.
(3) N, Kondo, Three-dimensional computation for flow-induced vibrations in in-line and cross-flow directions of a circular cylinder, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 70, pp.158-185, (2012).

3.3.2.　流体－構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験

(1) 目標・計画

フラッタ特性に関する理論的・実験的研究は，これまで多く行われてきた．しかし，系統的にデータを整理した成果は数少ない．本研究は様々なシート材のフラッタ特性を調べて，材料と流体力学の物理量を関連付けることで，フラッタ開始速度の予測を試みる．

(2) 意義・国際社会との比較

翼のフラッタに関する数値計算は流体−構造連成問題の主要課題の一つである．計算機性能の向上により，予測精度の信頼性は向上している一方で，数値計算結果の妥当性を確認するために参照となる実験データは数少ない．本研究ではフラッタに関する基礎的な実験を行うと共に，

(3) 研究内容

Fig.1 は実験装置の全体図である．風洞装置本体の吹き出し部分にフラッタ装置を設置し，試験片である平板翼模型も同様にフラッタ装置に取り付けた．水平に設置した試験片の変位を上方から測定するために，試験片とレーザ変位計の配置は Fig. 2 の様になっている．試験片はたわみに関して，片端固定，他端自由の状態である．固定端は二枚の板で上下方向から挟み，ボルトによって固定することで構成されている．自由端は自重でたわむ形になっている．翼弦長は 40mm で固定し，翼スパンを変化させ実験を行うこととした．これら翼厚と翼サイズの2つを考慮し，翼厚は 0.3mm から 0.5mm までの間で変化させ，翼スパンを 200mm から 300mm の間で変化させた．

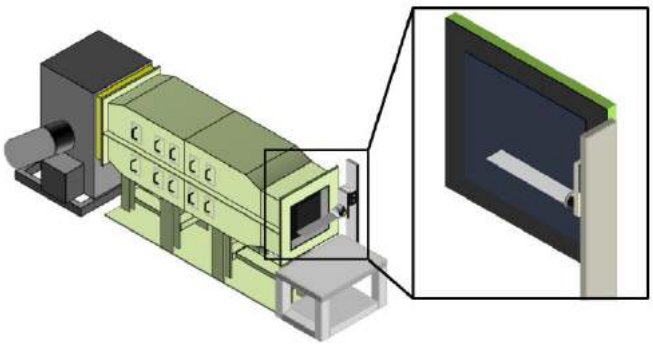


Fig. 1　Experimental setup of wind tunnel.

Fig. 2 Laser displacement sensor.

Fig.3 は平板翼模型をスパン，翼厚についてフラッタ開始速度を示した図である．平板翼のスパン長が短いほどフラッタ開始風速が増すことがわかる．また，平板翼の長さが長くなるにつれて，フラッタが発生しやすくなり，どの翼厚でもフラッタ限界風速は単調減少する．翼厚を 0.3mm から 0.5mm に変化させると一様にフラッタ限界風速が増加している．Fig.4 は材質に着目して翼厚

0.3mm, 翼弦長 40mm の平板翼について材質（ヤング率）を変えた実験を行い，スパン長とフラッタ開始速度を整理した結果である．黄銅は 105 [GPa], アルミニウムは 70.6 [GPa], ステンレスは 205 [GPa]である．ヤング率が増すとフラッタ開始速度は高くなっている．これらの傾向は，従来のフラッタ試験でも確認ができている．

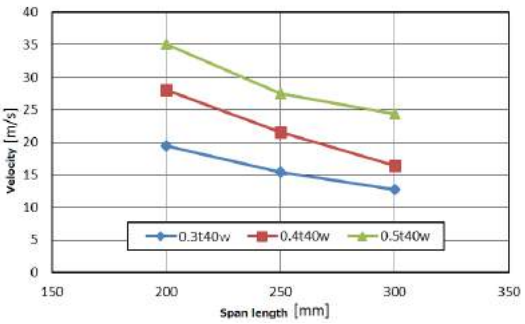


Fig.3.　Comparison of flutter velocity to span length.

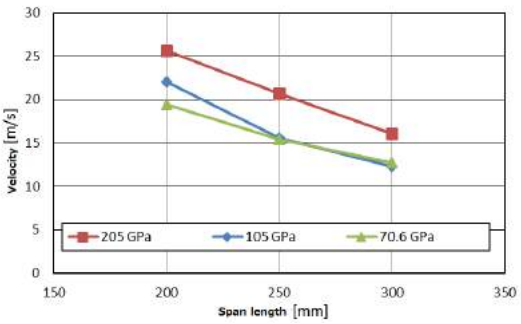


Fig.4.　Characteristics of flutter velocity to Young modulus.

Fig.5 はアルミ材のフラッタ開始速度について系統的に整理した結果である．縦軸はフラッタ周波数を固有振動数で，横軸は材料特性を流体特性で無次元化した結果である．アルミ板は概ね固有振動数でフラッタ振動しており，フラッタ開始速度は20～30の範囲内で始まることが判る．この結果は，ここで用いたパラメータで実験結果を整理すると，横軸の値から材料毎によりフラッタ開始速度が予測できることを意味している．現在，その他の材料についても実験に取り組んでおり，同様の整理を試みている．

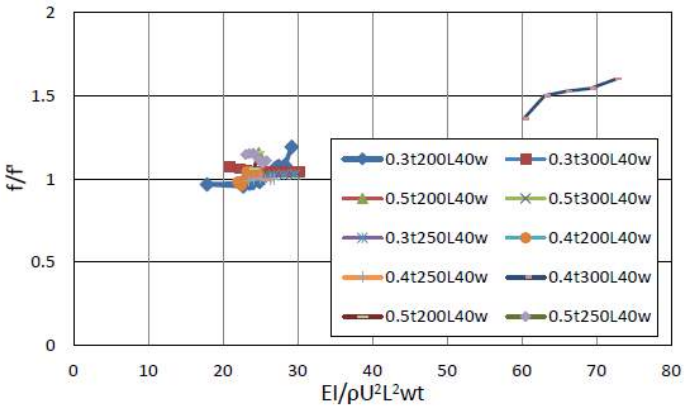


Fig.5.　Characteristics of flutter frequency to FSI parameter.

(4) 平成 27 年度進捗状況

平板翼に関する実験を行い，フラッタ開始速度とフラッタ周波数を無次元化して整理した．その結果，同じ材料であれば形状の違いによらず，フラッタ開始速度を予測できる可能性を示した．材料特性の違いについても同様の整理を試みている．

参考文献

(1) Eloy, C., Souilliez, C., Schouveiler, L., "Flutter of a rectangular plate", J. Fluids Struct., 23, 904-919 (2007).
(2) 山口信行, 伊藤恵介, 緒方正幸, 柔軟ウェブ基礎形態のフラッタ限界とその挙動に関する研究(第 1 報, フラッタ限界の予測と風洞試験結果), 日本機械学会論文集(B 編), 67 巻, 663 号(2001-11), pp. 2738-2745
(3) 黒川雄太, フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定: その 2 重量比およびアスペクト比が風荷重に与える影響(膜構造:風洞,構造 I), 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, (2007).
(4) 伊藤憲一, 剛体と弾性体を用いた翼のフラッタ特性に関する研究(GS 流体工学(流体計測,翼など)), 日本機械学会, 東海支部総会講演会講演論文集,(2009).
(5) 五十嵐保, 杉山均, 流体工学と伝熱工学のための次元解析活用法, 共立出版, (2013)
(6) 小松敬治, 日本機械学会宇宙工学部門宇宙工学ガイド機械構造動力学, (2004)

3.3.3.　飛行物体に作用する空気力特性

(1) 目標・計画

運動する物体に作用する空気力特性を把握することは流体－構造連成解析問題の課題の一つである. 風洞試験では一定風速で実験が行われることが殆どであるため, 定風速下での空気力特性は系統的に整理されているが, 加速度運動する物体に作用する空気力特性は調べられていない. そこで, 本研究では, 加速度運動する物体に作用する空気力を測定し, 定速度下における空気力特性と比較することで, 加速度運動する際の効果を系統的に整理することを目的としている. 2014年度は実験システムの構築を行い, ボールなどの単純形状で実験を行う. 2015年度以降はロケット模型に対して作用する空気力特性を調べ, その特徴を明らかにする.

(2) 意義・国際社会との比較

物体に作用する空気力特性を調べる風洞実験, 数値計算は多数行われているが, 一定速度での解析[(1)]であり, 加速度運動時の空気力特性を調べた研究は数少ない[(2,3)]. 本研究の目的は, 加速度運動する物体に作用する空気力を実験的に測定し, その特性を明らかにすることである. 研究成果は, 航空機や宇宙機を設計する上で, 従来とは異なる新機体形状を提案するために活かされるものと考えられる.

(3) 研究内容

物体に作用する空気力や物体周り流れの特性を把握することは, 流体力学において主要な研究対象の一つである. ロケット等の空力特性を調べるための実験的研究は, 模型を用いた風洞試験が数多く行われている. しかし, 風洞試験は一定風速, 同一の姿勢で行われるため, そこから把握できるのは定常状態の空力特性である. そのため, ロケットのように非定常運動する物体の空力特性を把握するには, 風洞試験に代わる実験を行う必要がある. 本研究の目的は, ロケット模型の射出試験を行い, 画像解析により非定常運動時の空力特性を調べることである.

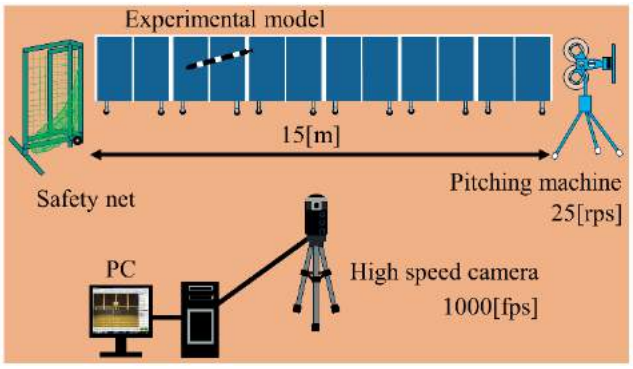


Fig.1.　Experimental setup.

Fig.1 は実験の概要を示している. ロケット模型は CAD データを基に 3D プリンタで製作した. 画像処理のために, 模型の一部を白黒に塗装した. 本実験では, 日本 JUGS 社のオールラウンドピッチングマシンを使用して, 模型を射出した. 射出後の動画撮影にはノビテック社の高速度カメラ

Phantom Miro M310 を使用した. 動画を画像に分割し, 10 フレーム毎に抽出した. 画像には歪み補正及び二値化処理を施す. 3 点のピクセル座標を抽出し, 模型の重心座標や角度の時間変化を調べた. 得られたデータを最小二乗法により 4 次関数で近似し, 時間微分することで重心位置での速度と加速度, 重心回りの角速度と角加速度を求めることができる. 画像解析によって求めた物理量を用いて, 式(1)から抵抗係数 C_D を求めた.

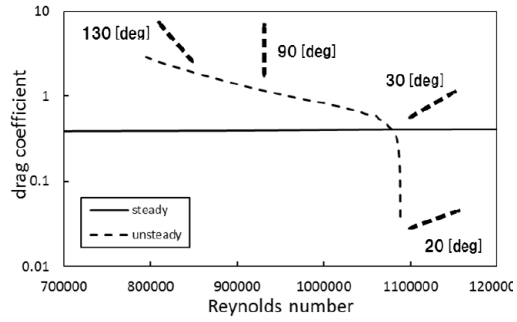


Fig. 2 Drag coefficient to Reynolds number.

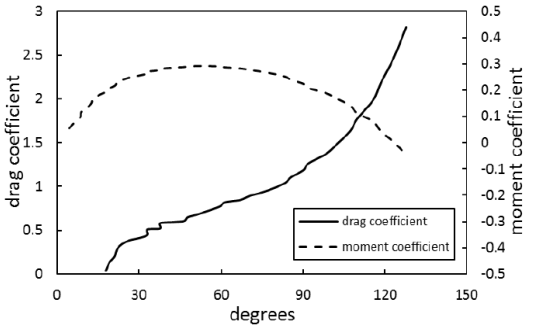


Fig. 3 Drag coefficient and momentum coefficient to pitch angle.

Fig.2 は抵抗係数とレイノルズ数の関係を示している. 定常状態の抵抗係数は一定値を取るのに対して, 非定常状態では様々な値を示すことが分かる. 射出後の模型は投影面積を変化させるため, 空気抵抗の作用が大きくなる. よって速度の減少と加速度の負の方向への増大から, 抵抗係数は増加の傾向を示す. 次に, モーメント係数 C_M を求め, Fig.3 の様に抵抗係数とともにピッチ角度で整理した. 模型射出後, 20～30[deg]付近では模型のノーズ周りで空気力の影響を強く受けるため, 暫くの間加速し, 90[deg]を過ぎるとノズル周りで空気力の影響が強くなるため角速度が小さくなると考えられる. このとき空気力を受ける面積が増すため, 抵抗係数が増す.

(4) 平成 27 年度進捗状況

非定常状態時の空力係数は速度, 加速度, 角速度, 角加速度などに依存することを確認した. これは, 非定常状態時の空力特性を調べる際, 従来の風洞試験の様に系統的な整理が出来ないことを示している. 現在, 新しいデータ整理の試みに取り組んでいる.

参考文献

1) 谷口哲也, 宮嵜武, 清水鉄也, ”硬式野球ボールに働く空気力の測定”, ながれ, 25, (2006), pp.257-264.
2) 今野友博, 市川誠司, 窪田佳寛, 望月 修, "水中を落下する球の抵抗係数", 日本機械学会論文集(B編), 79 巻 798 号, (2013), pp.151-1.
3) T. Nosaki and N. Fujimatsu, Trajectory analysis based on aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion,, J. of Visualization, pp.1-8, (2015).

3.4.　精度・妥当性検証グループ

本グループでは，シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・妥当性を向上させるための技術の研究を行っている．シミュレーションも実験も誤差を含んでおり，精度の検証および改良は重要なテーマである．具体的には，(1)効率的で精度のよい解析技術の研究，(2)最適化の数学的構造の研究，(3)物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発，(4)オープン CAE(固体の有限要素法)を用いた精度検証，などの研究を行っている．一番目のテーマは昨年に引き続き段ボールの解析の研究を行った．本年度は，実験のばらつきを考慮した精度・妥当性の検証に結びつけるため，ベイズ推定を用いた材料定数の設定手法を研究した．その結果，ベイズ推定の有効性を確認できた．また，最適化の理論的研究として，最適化理論の数学的構造の研究を行い，最適化の一般化と自動化に関する研究の端緒とした．材料データベースに関しては，昨年に引き続きデータベースの構築の研究を行っているが，昨年度設計したデータ構造を用いたプロトタイプ構築に着手した．複数の SPARQL エンドポイントを評価し，スケーラビリティには劣るもののオントロジーAPI などを持ち，セマンティック・ウェブに係るソフトウェア環境である Apache Jena の一環として開発されている Fuseki を今後の拡張性などの観点から採用することとした．オープン CAE を用いた精度検証については，オープン CAE の一例としてフランス電力(EdF)が開発した Salome-Meca[1] を取り上げ，引張試験機などユビキタスな試験装置を用いた試験や文献記載の構造モデル試験を例題として，精度検証例の蓄積を進めている．本年度は，最も単純で，材料非線形性と幾何学的非線形性とを同時に考慮する必要がある，延性材料の引張試験 [2] を取り上げた．今後は，接触と摩擦を伴う非線形問題となるスモールパンチ試験 [2] や，非定常熱伝導による熱疲労試験など [3] 順次，難易度が高いベンチマークに取り組む．

3.4.1. ベイズ推定を用いた効率的精度解析技術の開発

(1) 目標・計画

物流のみならず近年，生活の身近なものとして段ボールは様々な用途で使用される．非常に多くの段ボール製品が社会の中に存在するが故，正確な強度設計が要求されるが段ボールの設計は過去の経験や試行錯誤に依存しており数値解析による設計は浸透していないのが現状である．その原因のひとつに段ボールが異方性特性を有する構造体であり，繊維方向において弾性的性質に依存性があるため材料特性等のパラメータを十分に考慮して取り扱わなければならないことが言える．本研究では異方性材料を解析する際，重要となる材料特性を万能試験による実験値と数値解析より効率良く推定する手法を確立する．また推定した材料特性は実験値と数値解析の不確定性因子を含むため一概に妥当性を保証できるとは言い難い．そのような不確定性の取り扱いについては Model Verification & Validation(V&V)[1]に示されその中でベイズ推定[2]が有効であり不確定性の低減が可能であるとされる．そこでベイズ推定を用いて推定した材料特性の妥当性を定量的に評価することを目的とする．

(2) 意義・国際社会との比較

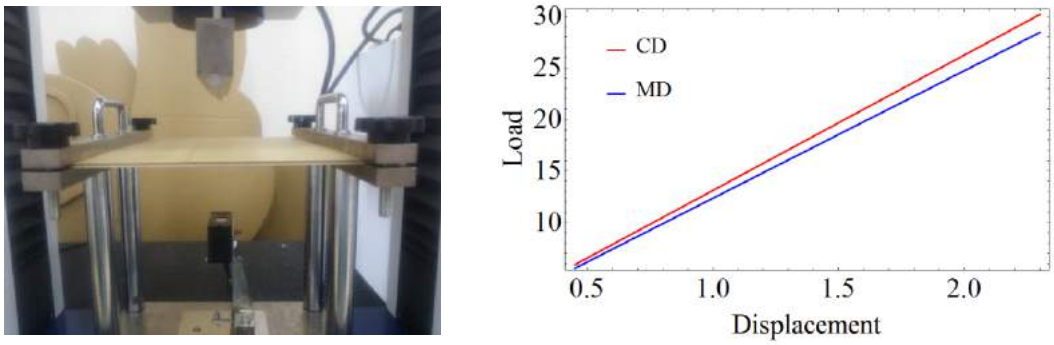
段ボールの用途は近年重要性を増し，リサイクル性の高さからも今後より注目されると期待できる．しかし段ボール構造の数値解析は動的シミュレーションによる設計[3]，均質化法を用いた研究[4]等の研究がなされているが一般的な手法は構築されておらず段ボール製品の効率的な生産を行うには精度の良い数値解析手法の開発が必要である．また，解析結果の妥当性・有効性を検証することは工学的視点から考えてみても重要な問題であり，その中でもベイズ統計学に基づいた信頼性評価は機器損傷率，原子力耐震工学等の原子力分野において数多く適応されその有効性が示され世界各国で行われている．本研究で提案した解析手法を有効に用いるためにモデル化，材料特性，境界条件等の潜在的な不確定性を把握し解析結果の妥当性を検証することは非常に意義のあることと言える．

(3)研究内容

本研究では段ボールの材料特性を推定するため，曲げ強度試験による実験値と数値シミュレーション解析及び両者の結果を繋ぐための実験値と数値シミュレーションの融合から構成される．以下に提案手法による材料特性推定の流れを示す．

曲げ強度試験

段ボールは異方性を有する構造体であり垂直方向(CD)，抄造方向(MD)でそれぞれ弾性的性質が異なる．そこで本研究では実験毎に新たな試験片を使用するものとし図 1.(a)示す試験方法により CD，MD に対してそれぞれ 10 回曲げ強度試験を行った．また，本研究では実験値の線形範囲の一部を議論の対象とし解析を行う．解析範囲の実験値に対し最小二乗法により CD，MD の回帰直線を求めた．図 1.(b)に求めた CD，MD の回帰直線を示す．

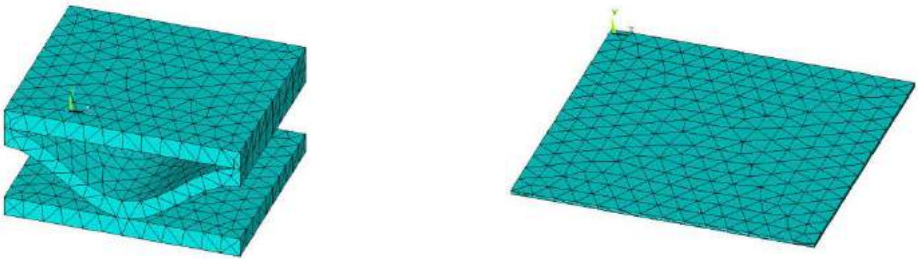


(a)　Bending test of corrugated cardboard　　(b)　Regression line of CD and MD

Fig.1.　Testing by universal testing machine

均質化解析

段ボールの基礎を構成する段は波状に形成された中芯を 2 枚のライナと呼ばれる原紙で貼り合わせて作成される．段ボールを元にした製品を対象に数値解析を行う場合，段ボールを構成する段が非常に密であるためモデル化や境界条件の設定に手間がかかり，各段に対してメッシュを切らなければならず通常の有限要素解析では離散化が困難であり計算コストと時間を必要とするため実用的ではない．そのような中で段のように周期性な微視構造を有する不均質体を効率よく解く解法として均質化法[5]がある．均質化法は単位周期である微視的基本構造単位（ユニットセル）と解析領域全体を対象とする全体構造の異なる 2 つの空間スケールから，支配方程式を連立して解くことにより微視―巨視連成挙動解析を可能にするものである．図 2. (a)段をユニットセルとするミクロモデル，図 2.(b)曲げ強度試験で用いた試験片を全体構造とするマクロモデルをそれぞれ示し，CD，MD それぞれ均質化法による数値解析を行った．



(a)　Macro model　　(b)　Micro model

Fig.2.　Finite element model

材料特性探索の定式化

回帰直線 CD, MD より一意にお決定した荷重から求めた, 変位にフィットするような材料特性の組み合わせをそれぞれ均質化法を用いて探索を行う. F_{20}を回帰直線 CD, MD の一意に決定した荷重 20N としe_1, e_2をそれぞれライナと中芯とすると式 1 に示すように定式化できる.

$$\mathrm{im}(F_{20})(\{(e_1,e_2)|e_1,e_2 \in \{1e^3,2e^3,3e^3,\cdots 1e^4\}\}) \quad (1)$$

応答局面モデル

前節による解析結果からCD, MDそれぞれ応答曲面を作成し, 図3に示す応答曲面の解空間より交点の座標を材料特性の推定値とする.

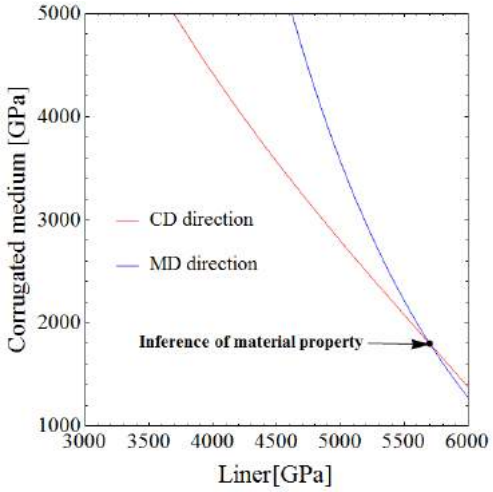


Fig.3. Intersection of coordinate by response surface of CD and MD

材料特性の検証

本研究で求めた材料特性が有効であるか検証を行う. 図 4 は均質化法を用いて線形範囲上の荷重を境界条件とし解析を行い, 回帰直線と比較した結果をそれぞれ示す. 比較結果より回帰直線の変位データを合理的に数値シミュレーションに取り込むことにより材料特性を求めた. したがって, CD, MD それぞれ回帰直線の値と概ね一致しており材料特性の有効性が確認できた.

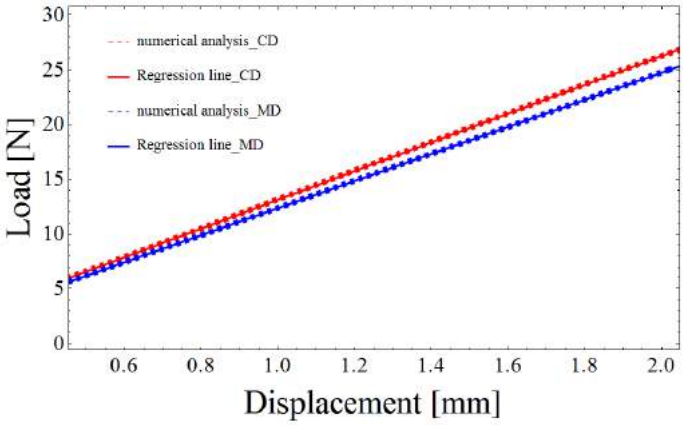


Fig.4.　Comparison of numerical analysis and regression line

ベイズ推定による不確定性低減

ベイズ推定により提案手法により推定した材料特性の不確定性低減を図る. ベイズ推定は解析者の予備知識や現在得られている情報を事前分布とすることで事後分布を決定するものであり, ベイズの定理は式(2)に示すことができる. ここでモデルパラメータθを CD, MD の応答曲面, データ D を各々の実験値に対して回帰直線を求め, それらの回帰直線において 20N における変位, CD データ 10 個, MD データ 10 個, 計 20 データを用いた.

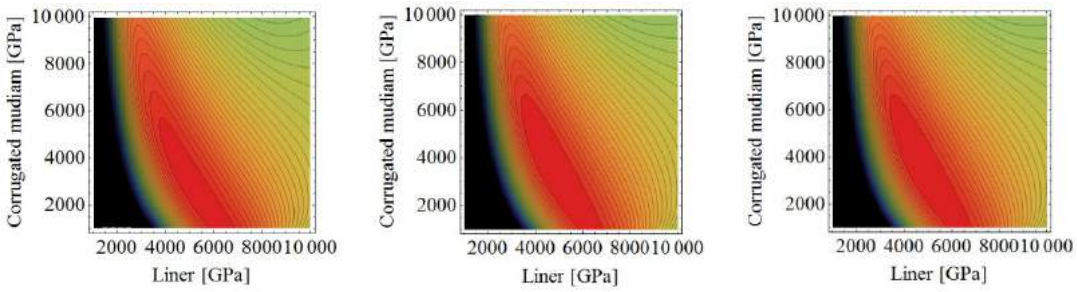
$$p(\theta|d) \propto f(d|\theta)p(\theta) \tag{2}$$

事前分布の設定

事前分布は解析者の主観的な情報を反省させることができる. 本研究では以下に示す事前分布による不確定性低減の比較を行う. Case A では予備知識がない場合すべてのパラメータを一様と見なす一様分布, Case B では過去の経験から明確ではないがモデルパラメータの値の範囲をある程度把握している. よってできる限りモデルパラメータの不確定性に対して, 反映させるようにそれらの情報において工学的検討を行ったガウス分布, Case C では推定したモデルパラメータの値を用いた非常に詳細な情報を反映させた等方性ガウス分布を設定した.

事後分布の比較

図 5 は Case A, B, C の事後分布示し, また事後分布を定量的に評価するために表 1 に平均と分散の値を示す. 図 5 及び表 1 より Case A, B より本研究で用いたデータ数では材料特性の妥当性を保障できるほど不確定性が低減されたとは言い難く, また Case B では平均値の推定に対し設定した事前分布の影響を受けたと考えられることが原因で設定した事前分布に偏る結果となり, 事前分布の設定に大きく影響を受けたことが示された. Case C ではより正確な事前分布を反省させたことで少ないデータ数においても不確定性を図られたといえる.



Case A　　Case B　　Case C

Fig.5. Prior Distribution

Table1. Comparison of average and covariance

		Case A	Case B	Case C
Average	Liner	5494.9	4760.53	5629.13
	Corrugated medium	2211.7	3491.87	2001.32
Covariance	Liner	6892.2	1046.41	2392.13
	Corrugated medium	1607.0	3342.29	5470.91

(4) 平成 27 年進捗状況

今年度は曲げ強度試験の実験値と均質化法による数値シミュレーションより応答曲面を用いて段ボールの材料特性を推定しベイズ推定による精度妥当性を検証した. 本研究で示したベイズ推定では不確定性を十分に考慮できておらず, より高度な議論を行うために正確に不確定性を把握し反映させることが今後の課題である.

参考文献

[1] Alvin, K. F., el al. “Uncertainty quantification in computational structural dynamics: a new paradigm for model validation.” Society for Experimental Mechanics Inc, 16th International Model Analysis Conference. Vol 2. 1998.

[2]渡辺澄夫: ベイズ推定の理論と方法, コロナ社, 2012

[3]中川幸臣, 丹羽一邦, “包装設計の FEM 解析における段ボールのモデル化の検討”, 日本包装紙学会誌, Vol.14, pp.317-327, 2005.

[4]立体紙製品の構造物に関する研究, 独立行政法人 産業技術研究所.

[5]寺田賢二郎, 弓削康平, 菊池昇, “均質化法を用いた複合材料の弾塑性解析 第一報 定式化”, 日本機械学会集 A 編, 61(590), pp.2199-2205.

3.4.2.　最適化の代数的構造の研究

(1) 目標・計画

工学における最適化，すなわち不確実性の下での多峰性目的関数の最小化・最大化の，代数的構造を明らかにする事が目的である．

(2) 意義・国際社会との比較

我々の研究の完成は，「人の幸福とはなにか？」という難問に代数的側面から回答を与えることを意味する．工学における最適化（以下，工学最適化）はベイズ決定の枠組みをつかって良く表現することができるが，このベイズ決定はジェレミ・ベンサムから始まる功利主義の改良バージョン（不確実性に対応）と言える．功利主義においては，人々の幸福が大きくなるよう最適化された政策が良い政策である．

(3) 研究内容

最適化プログラムは階乗を求めるプログラムで喩えることができる．引数の階乗を返すプログラムfac は，

$$\mathrm{fac}(0) \coloneqq 1$$
$$\mathrm{fac}(x) \coloneqq x * \mathrm{fac}(x-1)$$

と定義でき，たとえば $\mathrm{fac}(3) = 6$ である．この 6 を fac の不動点と呼ぶ．この不動点を最適値にたとえれば，大域的最適化とは複数の不動点を推定しつつ，更にそれらの中から最も良い不動点を推定するプロセスに他ならない．

プログラミングにおける例外や副作用などの概念は普遍代数（cf. [Adámek et al. 10]）や余代数(cf. [Rutten 00])を用いて表すことが出来る．たとえば[Moggi 91]のような普遍代数の文脈では，例外と副作用はそれぞれ $TA = A + E$ および $TA = (S \times A)^S$ となる．また， interactive output と nondeterminism のモナドを組み合わせた$TA = \mu X.\mathcal{P}(A + (Act \times X)$ によって並列計算を表すこともできる[Benton et al. 02].

工学最適化とはこの並列計算のモナドに近い．なぜなら最適化プログラムは目的関数（物理実験や FEM）というシステムとインタラクティブにやり取りし（interactive output），また多峰性目的関数の最適化中はどの不動点が大域解なのか明らかではない（nondeterminism）ためである．

(4) 平成 27 年度進捗状況

確率的遷移システム[Larsen & Skou 91] [de Vink & Rutten 99]を工学最適化における目的関数と仮定し，そのシステム（余代数）をベイズ決定[Culbertson & Sturtz 14]の枠組みで最適化するシステムの代数的性質を調査した.

参考文献

[Adámek et al. 10] Adámek, Jiří, Jiří Rosický, and Enrico Maria Vitale. "Algebraic theories: a categorical introduction to general algebra." Cambridge University Press, 2010.

[Benton et al. 02] Benton, Nick, John Hughes, and Eugenio Moggi. "Monads and effects." *Applied Semantics*. Springer Berlin Heidelberg, 2002. 42-122.

[Culbertson & Sturtz 14] Culbertson, Jared, and Kirk Sturtz. "A categorical foundation for Bayesian probability." *Applied Categorical Structures* 22.4 (2014): 647-662.

[de Vink & Rutten 99] de Vink, Erik P., and Jan JMM Rutten. "Bisimulation for probabilistic transition systems: a coalgebraic approach." *Theoretical Computer Science* 221.1 (1999): 271-293.

[Larsen & Skou 91] Larsen, Kim G., and Arne Skou. "Bisimulation through probabilistic testing." *Information and computation* 94 (1991): 1-28.

[Moggi 91] Moggi, Eugenio. “Notions of computation and monads.” *Information and computation* 93.1 (1991): 55-92.

[Rutten 00] Rutten, Jan JMM. "Universal coalgebra: a theory of systems." *Theoretical computer science* 249.1 (2000): 3-80.

3.4.3.　物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発

(1) 目標・計画

数値シミュレーションのために基本的な物性値は必須のものであるが，材料の物性値を収めたデータベースにおけるデータ表現は統一されておらず，多くの材料データベースがインターネット上に存在する現在でも，必要なデータは事実上手作業で値を入力する必要がある．本研究では，材料データの標準データ交換形式を開発し，数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的とする．

(2) 意義・国際社会との比較

材料物性に関するデータベースは各所で開発されているが，統一されたフォーマットは無く，NIST，NIMS などによってデータ交換のための標準を作成する試みが行われてきたが現在のところ定まった標準がない．データ交換のためのフォーマットが統一されることにより，分散したデータベースの統合利用に加え，シミュレーションソフトウェアなどからデータベースを直接参照できるようになる．

米国において始まったマテリアルズ・ゲノム・イニシアティブの影響を受け，2014 年から我が国においてもマテリアルズ・インフォマティクスに関連する研究プロジェクトが注目され，いくつかの国内プロジェクト，基盤整備が始まった．芦野はこのうちの一つである戦略イノベーションプログラム・革新的構造材料のマテリアルズインテグレーション(MI)に分担者として 2014 年度より参画している．MI の最初の目標は構造材料溶接部の特性評価のための統合システム開発であり，この中でセマンティック・ウェブ技術を用いた経験式などの数式・データ・シミュレーションを連携させるためのデータ構造開発を行っている．

海外でのマテリアルズ・インフォマティクス研究では機能性材料，Ni 基耐熱超合金，鋳造シミュレーションなどが主たる対象であり，構造材料，特に鉄鋼材料の溶接部はミクロ組織も複雑であり計算による物性の推定が困難であることもあって対象となっていない．我が国では産業界での必要性などからあえて困難な対象を選んで研究対象とすることとなった．また EU では，Horizon 2020 プログラムの一環として原子炉材料の金属疲労について研究する INCEFA PLUS(INcreasing Safety in NPPs by Covering gaps in Environmental Fatigue Assessment)に関連して，疲労の試験データフォーマット標準化を検討するワークショップ CEN/WS INCEFA を 2016 年 1 月に立ち上げるとの案内を受け，参加を予定している．

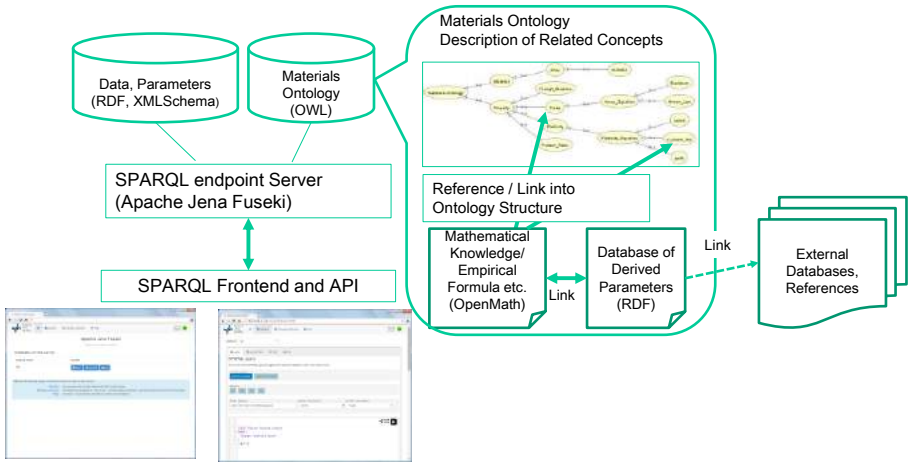
(3) 研究内容

zセマンティック・ウェブの一連の規格である RDF (Resource Description Framework), OWL (Web Ontology Language) , RIF (Rule Interchange Format),および数式の意味内容を記述する OpenMathなどXMLを用いた記法を用い，既にある程度知見の整備されている機械試験に関連した経験式，推論規則，データを記述してリンクし，検索言語 SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language)を用いて検索する．

溶接の計算機支援は従来から溶接学会などにおいて多くの研究があるが，本研究では単一の知識ベース，あるいは計算ソフトではなく，それぞれの要素をリンクして相互参照できるようにし，ユーザや研究者のノウハウや知識を集合知として連携してゆくことのできる構造を目指す．

(4) 平成 27 年度進捗状況

戦略イノベーションプログラムの一環として昨年度設計したデータ構造を用いたプロトタイプ構築に着手した．複数の SPARQL エンドポイントを評価し，スケーラビリティには劣るもののオントロジー API などを持ち，セマンティック・ウェブに係るソフトウェア環境である Apache Jena の一環として開発されている Fuseki を今後の拡張性などの観点から採用することとした．



Prototype data structure for SIP data system.

サンプルデータとしては，クリープ・材料強度などに関する代表的な構成方程式と材料毎に作られたパラメータセットを RDF および OpenMath 形式で保存し，SPARQL により検索することが出来ることを確認した．また，溶接の際の冷却時における相変態を示す CCT 線図，TTT 線図を組成から予測するためのプログラムについてこれらのデータ標記形式を用いた記述についての検討を行った．

3.4.4.　オープン CAE（固体の有限要素法）を用いた精度検証

(1) 目標・計画

製造業の設計現場をはじめとして広く用いられている固体の有限要素解析に対する「解析の品質確保」の重要性は広く認識されている通りである．企業でよく使用されている商用ソルバでは，ソルバ開発元によるソフトウエア品質管理とユーザ支援によってある程度の品質確保が図られており，ソースコードの秘匿化により，ユーザ自身がアルゴリズムを確認することはあまりない．近年，利用が広がりつつあるオープン CAE の場合は，ソースコードが公開されているためユーザ自身が確認，改変ができる一方で，ソフトウエア品質とユーザ技量の両方の検証がユーザに委ねられるため，V&V における新たな課題が提起されている．ただし，ソースコードが公開され，無償であることからアクセス性が高く，オープン CAE が商用ソルバよりも社会的受容性に優れている側面もある．

本研究では，固体の有限要素解析に対する精度検証の方法と事例を蓄積し，公開する上で，商用ソルバと並んでオープン CAE を取り上げることで，より幅広いユーザが自ら取り組み得る V&V 活動の実例として提示する．

(2) 意義・国際社会との比較

誰もがアクセスできるオープン CAE を取り上げることで，市民的目線での検証が可能になり，精度検証の客観性，計算力学に対する社会的受容性が高まる．安価な検証手段を提示することで新興国や小規模企業での普及にも貢献し得る．また，形状モデルデータや可視化ツールを製品開発・製造のための共通プラットフォームとしての利用が可能であることから，ものつくりのグローバル化に寄与する．ユーザ自身に対して高い技術力を要求することから，意欲のあるユーザの自己研さん（結果的に解析の品質確保につながる）のための利用でも有利になる．

(3) 研究内容

オープン CAE の一例としてフランス電力（EdF）が開発した Salome-Meca [1] を取り上げ，引張試験機などユビキタスな試験装置を用いた試験や文献記載の構造モデル試験を例題として，精度検証例の蓄積を進める．本年度は，最も単純で，材料非線形性と幾何学的非線形性とを同時に考慮する必要がある，延性材料の引張試験 [2] を取り上げた．今後は，接触と摩擦を伴う非線形問題となるスモールパンチ試験 [2] や，非定常熱伝導による熱疲労試験など [3] 順次，難易度が高いベンチマークに取り組む．

(4) 平成 27 年度進捗状況

(a) 解析対象

試験データとして文献 [2] 記載の低合金鋼 2.25Cr-1Mo 鋼の室温引張試験データを取り上げた. 解析対象は図 1 に示す平行部直径 10 mm, ひずみ計測部長さ 50 mm の標準引張試験片である. 品質管理の目的で行われる通常の引張試験では, 0.2%耐力を決定できる程度までは低速度で引張り, その後は伸び計を外して, 引張速度を高めて破断させるが, この試験では最大荷重到達以降まで同一速度 0.2 mm/min で引張り, 伸び計測を行っているため, 破断前後の挙動を含めて検証が可能になっている.

(b) 解析方法

解析にはオープン CAE システム, Salome-Meca 2013.2 に内包されたソルバ Code_Aster Ver. 11 [1] を使用した. 他のソルバとの比較を容易にするため, 解析モデルや方法をできるだけ単純化している. 解析モデルは図 1 の平行部を取り出し, 図 2 の 1/4 軸対称モデルとした. ただし, くびれを生じやすいよう半径の 1/1000 だけ片側を小さくする初期不整を導入している.

要素分割は, 図 2 のように正方形均等分割とし, 要素分割のノウハウに起因する差異を排除した. 下端(試験片の中央部)は軸方向変位固定(Code_Aster のキーワードでは DDL_IMPO), 上端(変位計測部末端)は軸方向変位従属(同, LIAISON_UNIF)とし, 1 点を変位制御で引っ張った. 時間増分の影響を排除するため, 最大変位 10 mm までを均等 100 ステップ分割とした. 商用ソルバでデフォルト値としてよく用いられる 0.1 では, 数値誤差によるくびれ位置の不整合が生じたため, 収束判定は厳しめにし, 相対残差力 100 万分の 1 以下に設定した.

材料特性の設定の設定にあたっては以下に 2 通りを想定した. 市販の商用ソルバのいくつかで, マニュアル上は, Cauchy の応力で応力を定義する旨の記載があり, その記述から判断すると真応力が用いられているように読み取られる恐れがあるが, 剛性行列の生成に用いる変位-ひずみ行列(B Matrix)を解析ステップごとに更新する大変形解析では確かに真応力と真ひずみとが計算されるが, 更新しない微小変形解析では, 特別なデータ変換を行わない限り, 応力-ひずみ行列(D Matrix)で使用する関係に無関係に公称応力と公称ひずみが計算されることになる. ソースコードが確認できない商用ソルバでは, マニュアルの記述から推定せざるを得ないことから特に注意を要する.

ここでは, 引張試験データから最大荷重点より以前のデータをそのまま用いる公称応力-公称ひずみ曲線(nominal stress-strain curve)を作成し, 解析にあたっては, 最大荷重点よりも高ひずみ側は応力を一定(すなわち加工硬化係数がゼロ)とした. 作成した曲線を試験データと比較して図 3 に示す.

大変形解析用の真応力-真ひずみ曲線（true stress-strain curve）には，上記の最大荷重点よりも低ひずみ側の塑性ひずみデータを べき乗則（Ramberg-Osgood 則）で近似し，高ひずみ側は同則をそのまま外挿して用いることとした．両社の比較は図 3 に示す．

解析ケースとしては，微小変形解析（Code_Aster のキーワードでは PETIT）と大変形解析（同，SIMO_MIEHE）を行い，両方で 2 つの応力-ひずみ曲線を用いることで 4 ケースを取り上げた．

(c) 解析結果

解析の結果得られた変形状態を図 4 に，相当塑性ひずみのカラーコンターとともに示す．典型的なくびれ形状が再現できていることが確認できる．解析の結果得られた変位と変位制御エッジの荷重反力とから，試験データと比較可能なみかけの公称応力-公称ひずみ曲線を算出して，試験データと比較して図 5 に示す．

図 5 から，(b)にて指摘した通り，微小変形解析（PETIT）を行う場合は，たとえ D マトリックスで Cauchy 応力を前提としていても，公称応力-公称ひずみ曲線（Nominal SS Curve）を用いることで試験と整合する結果が得られることが確認された．また，この方法でも最大荷重を精度よく推定できる．大変形解析（SIMO_MIEHE）を行う場合は，真応力-真ひずみ曲線（True SS Curve）を用いることで，くびれ発生後を含めて試験と整合する結果が得られた．

マニュアルの記載を根拠に，微小変形解析であっても真応力-真ひずみ曲線を用いると，試験よりも高めの応力を算出するだけでなく，最大荷重が推定できないことになる．

(d) 解析結果のまとめ

もっとも単純な非線形問題として延性材料の引張試験を取り上げたが，応力-ひずみ曲線の決定方法や収束判定等において解析の品質を維持するためのノウハウが周知されていない部分があり，微小変形解析を行う場合は公称応力-公称ひずみ曲線を用い，大変形解析を行う場合は真応力-真ひずみ曲線を用いるべきことが，本オープン CAE ソルバ，Code_Aster でも同様であることを確認した．今後はスモールパンチ試験や非定常熱伝導-熱応力解析に対しても同様な検証を進める．

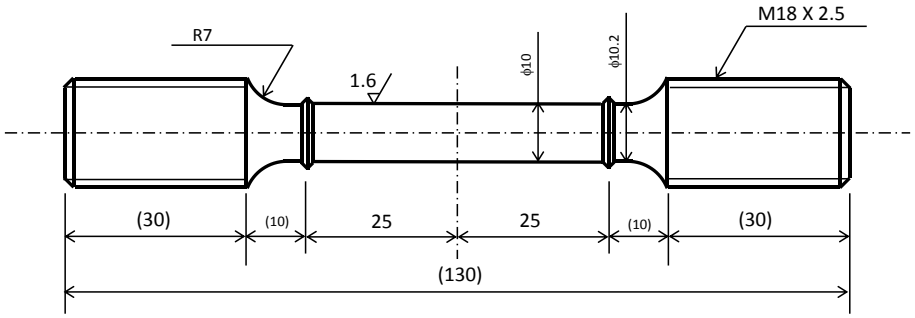


Fig.1. Dimensions of the tensile test specimen analyzed

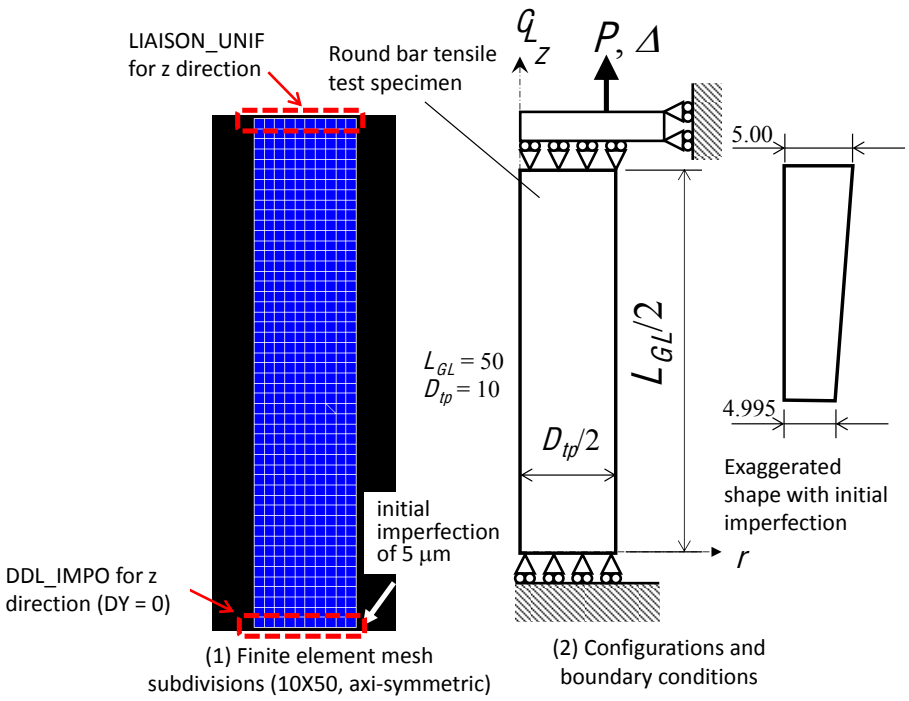


Fig.2. Analytical model of the tensile test specimen with initial imperfection

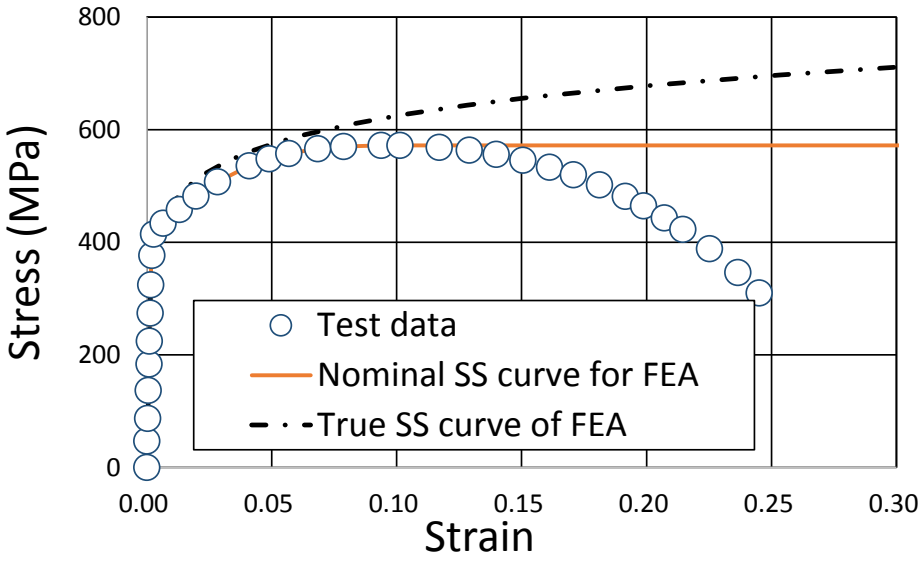


Fig.3.　Non-linear stress-strain curves used in the analysis compared with the test data

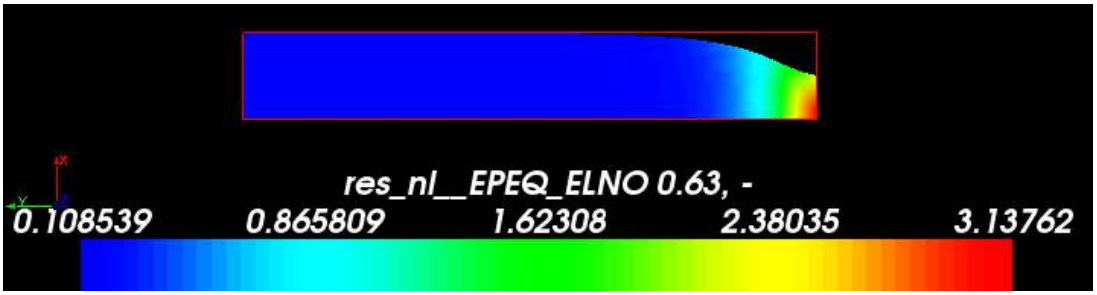


Fig.4.　Deformed shape and equivalent plastic strain distribution at the increment producing 25% of nominal strain

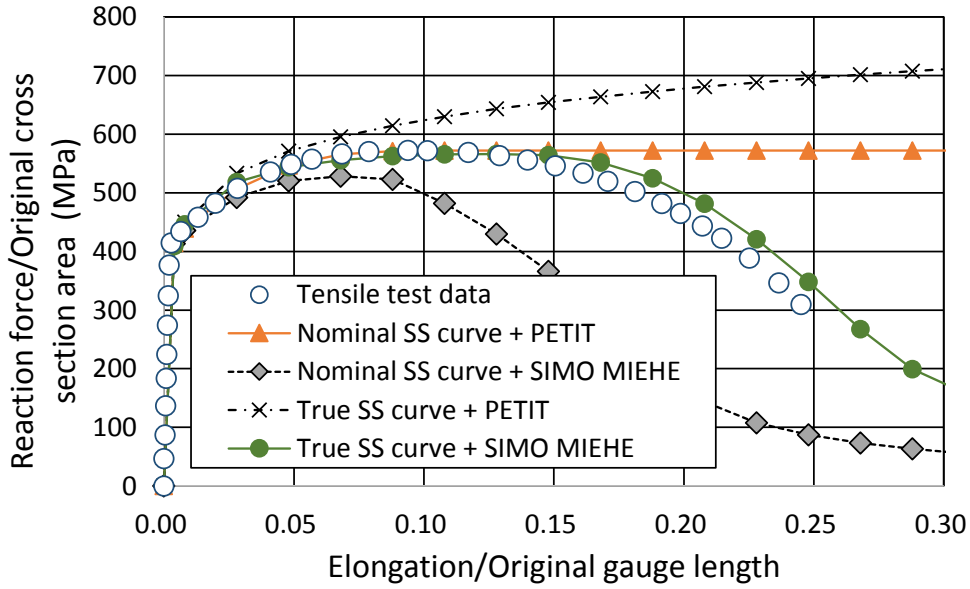


Fig.5. Nominal stress-strain curves obtained in the analyses compared with the test data

参考文献

[1] EdF, Code-Aster.org, http://www.code-aster.org/（2016 年 1 月 25 日閲覧）

[2] 藤岡, 他 3 名, 2.25Cr-1Mo 鋼（STBA24）の室温スモールパンチ試験の再現解析とスモールパンチクリープ試験データの解釈（荷重-応力換算）への応用, 第 61 学術講演会講演論文集, 77-78, 2012-05-25.

[3] CSNI Integrity and Ageing Workd Group, FAT3D- An OECD/NEA Benchmark on Thermal Fatigue in Fuild Mixing Areas, NEA/CSNI/R(2005)2, 2005. (http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/037/44037852.pdf)（2016 年 1 月 25 日閲覧）

3.5. 可視化検証グループ

本プロジェクトでは，流体–構造連成解析の品質保証に特に重点を置いてでも，
・解析結果を正しく理解し，評価すること
・実験結果等と公正な比較を行うこと
は重要な要素であると考えられる. そのためには，可視化は必須である. 特に，連成解析は現象が複雑であり，限られた数値データのみでこれを評価することは困難である. 実験における可視化技術やその応用は実験による検証の項目に譲り，ここでは，解析結果の可視化および，比較のための実験の可視化結果の表示を中心に研究を行う. 解析は，当面簡単のため2次元および3次元でもそれほど3次元性が強くない問題を対象とするが，そうであっても特に流れ場は3次元であり，また今後のより一般的な問題に対応するためにも，3次元の可視化が本質である. そこで，ここでは連成解析において3次元データを如何に可視化するかを中心に研究を進める. 1つは以下に述べるような立体視あるいは VR（バーチャルリアリティ）を用いた可視化であるが，これに限らず，3次元データの可視化方法を検討していく.

3.5.1. 3 次元画像による定量的・定性的検証

(1) 目標・計画

本研究の目標は，流体構造連成問題について，数値解析の精度検証を支援するための，画像による定量評価，定性評価の手法やシステムを開発し，本プロジェクトで開発される連成解析手法の評価に供することである．特に，バーチャルリアリティ（VR）技術を利用した 3 次元可視化システムを中心に 3 次元画像による可視化評価を中心に研究を進める．

大きな計画としては，

平成 24 年度：

表示装置となる VR 装置の導入を行い，ハードウェアの準備を行う．

平成 25 年度：

VR 装置の上でソフトウェアを開発し，PC クラスタと結合してこの上での解析結果の表示を行う．

平成 26 年度：

画像による検証に利用するための可視化システムを VR 装置上で開発する．

平成 27 年度：

積極的に可視化による比較・検証を行う．特に，（立体）画像を用い，実験と解析の可視化画像を重ねたり，並べたりして効果的な比較・検証方法について検討する．

平成 28 年度：

研究をまとめ，その公開方法について検討する．

としている．これらにより，従来とは異なる，多彩な可視化により，直感的・効果的な比較・検証が可能となり，開発される連成解析手法をより多面的に評価できると考える．

(2) 意義・国際社会との比較

連成解析は，複数の物理が関連するため，その妥当性の評価は単一の物理に対する解析よりも難しい．ここでは，流体―構造連成を中心に研究を行っているが，流体・構造それぞれ単独で妥当性を示すことができても，それらを組み合わせただけで連成問題が正しく解けるということでは必ずしもない．2 つの物理をやり取りするものがあり，それが正しく評価されているかが，重要であるが，実験的に測定できるもの，できないもの等あり，単純ではない．ここでは，可視化，特に 3 次元画像を利用することで，実験と解析を出来る限り直接的に比較することを考えており，流体―構造連成解析の精度検証・妥当性検証のテンプレートとなることを期待している．

国際的に見ると，連成解析は計算力学における重要な研究テーマの 1 つであるが，必ずしも検証については進んでおらず，信頼できるとされる過去の解析例と比較したり，パラメータスタディによって，実験で見られる現象と，解析で得られる現象の範囲が等しい（あるいは近い）といったことを示すにとどまっている場合がほとんどである．連成解析手法を評価する手法の1つとして 3 次元画像を用いる方法は，ほとんど例がなく，その成果は重要なものとなると考える．

(3) 研究内容

本研究の中心となる装置は，図 1 の 2 面没入型ディスプレイ装置である．大きさは正面のスクリーンが 2.8×2.1m，下のスクリーンが同じく 2.8×2.1m でここに2台のプロジェクターにより，それぞれ 1400×1050 の解像度の画像を表示する．画像は時分割方式で立体映像を投影できるようになっており，液晶シャッター眼鏡によって立体映像を観察する．立体映像は 3 台のグラフィックスワークステーションで生成する．1 台はマスタで，あとの2台が正面と下面の映像を担当する．これとは別に観察者や観察者が持つコントローラの位置を赤外線カメラで取得するシステムがあり，1 台のトラッキングワークステーションで制御する．グラフィックスワークステーションのマスタはトラッキングワークステーションから逐次データを取得して観察者（やコントローラ）の位置を計算する．

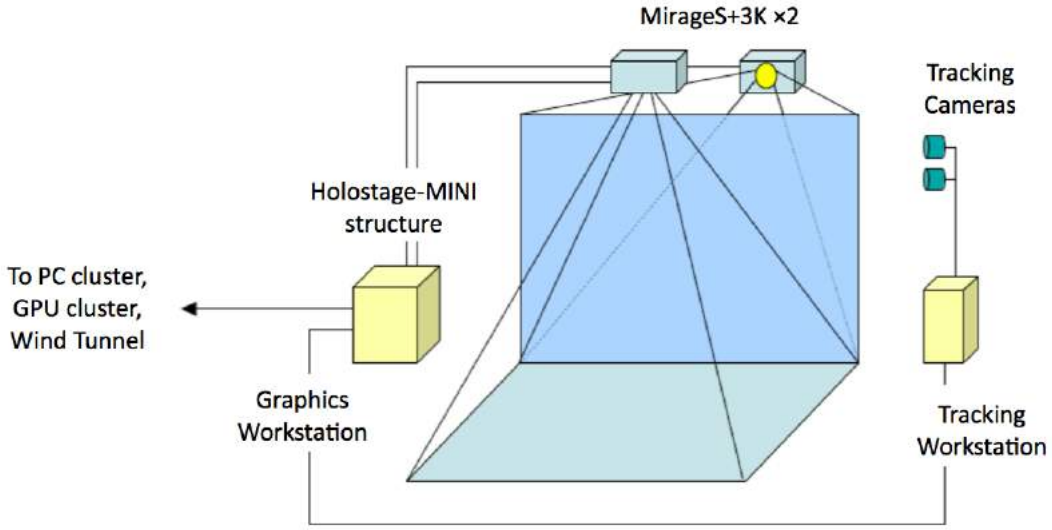


Fig.1.　Hardware configuration

このシステムに，流体—構造連成の 3 次元画像を表示する．表示する画像は大きく分けると，実験の画像と解析の画像の 2 種類である．これらを同時に，あるいは交互に表示することで直接的な比較を行う．

実験の画像については，物体の変位等，直接得られるものから，PIV で可視化した流れの速度分布や PSP（感圧塗料）で可視化した物体面上の圧力分布，画像解析により得られる応力分布等が考えられる．これらを得ることは，実験班の研究に委ねられるが，その3次元化や，本装置での表示にはデータの転送等も含めてさまざまな検討と技術的課題の克服が必要である．

解析結果については，単独の物理に基づく解析では多くの知識と経験があるものの，連成問題については，それぞれの物理に関する量を可視化表示するにとどまっており，まずは何を可視化することで連成解析の精度や妥当性評価につながるかの検討が重要となる．そのため，まず，さまざまな物理量の 3 次元可視化を可能とするシステムを開発する．解析は大規模となることが前提なので，そのデータをどのように転送し，また可視化するかも課題となる．

次に，実験と解析の比較である．たとえば，視点・スケールを合わせて交互に表示する／重ねて表示する，などが考えられるが，それには時間的・空間的な位置合わせ等，技術的な課題が多くある．また，必ずしも同じ量を表示できる訳ではないので，何を見るか，比べるかも問題となる．また，実験については，取得した画像（動画）をそのまま見るのか，あるいはデータを抽出して，解析結果と同じように CG で表示するのかといったアプローチもありうる．これらについても時間をかけて検討し，システムを構築することで新しい可視化法・評価法につなげたい．

最終的には，システム化できるところはまとめたい．実験データも，標準的で精度の高いものが得られれば，標準問題として公開したいが，その際に3次元画像もその1つとできればよいと考えている．

(4) 平成 27 年度進捗状況

平成 27 年度の目標は，上記に述べた通り，実際に本システムで可視化による比較・検証を行うことである．先に完成した図 2 のシステムにおいて，Adventure Fluid や Adventure Solid などの Adv I/O 形式で出力されたデータについては，Adventure で示されたデータファイルを直接 AVS-MPE が読み込み，Holostage-MINI に表示する．一方，実験の画像については，図2の Exp. (Image)のデータ（基本的には動画ファイル）を Data conversion のところで連番の静止画ファイルに分割し，AVS-MPE に渡す．昨年度はあくまで仮のデータでこの動作を確認しただけであったが，今年度は実際に連成手法解析グループと新規実験計測グループが行った，連成解析の標準問題のデータを用いて可視化を行っている．

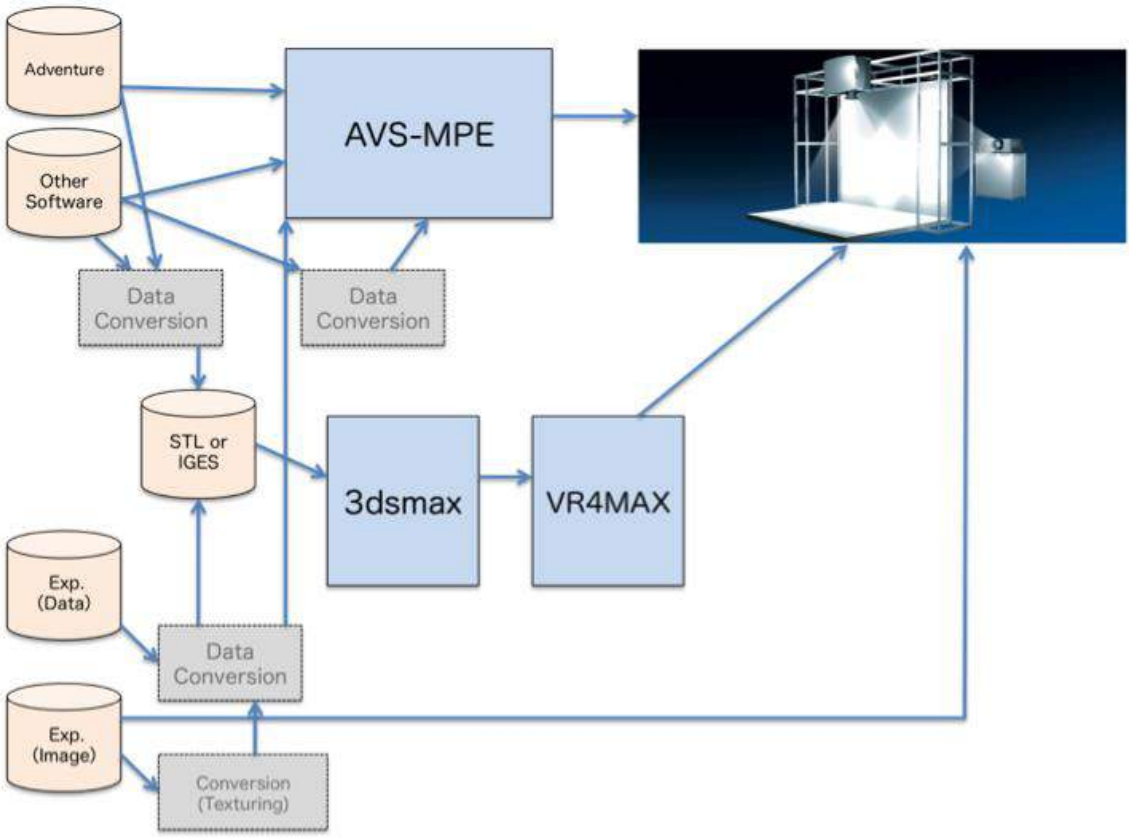


Fig.2.　Visualization system

細かい操作手順を記すことは本報の目的ではないので，ここでは行っていることの概要のみ示す．詳細は，「可視化システム操作手順書（仮）」として次年度に完成させる予定である．

図 3 は可視化の仕組みを示すネットワークエディタである．ここにはいくつかのモジュールが示されており，それぞれのモジュールが可視化においてなんらかのまとまった役割を果たしている．実際にはここにあるモジュールのいくつかはさらに複数のモジュールからできている．これらのモジュールを変えたり，あるいはモジュールのパラメータを変えることで表示内容を変更できる．まず，計算結果の読み込みは，流体と構造の 2 つがあることから，複数のデータを同期を取って読み込めるようモジュールを追加・変更している（図 4）．

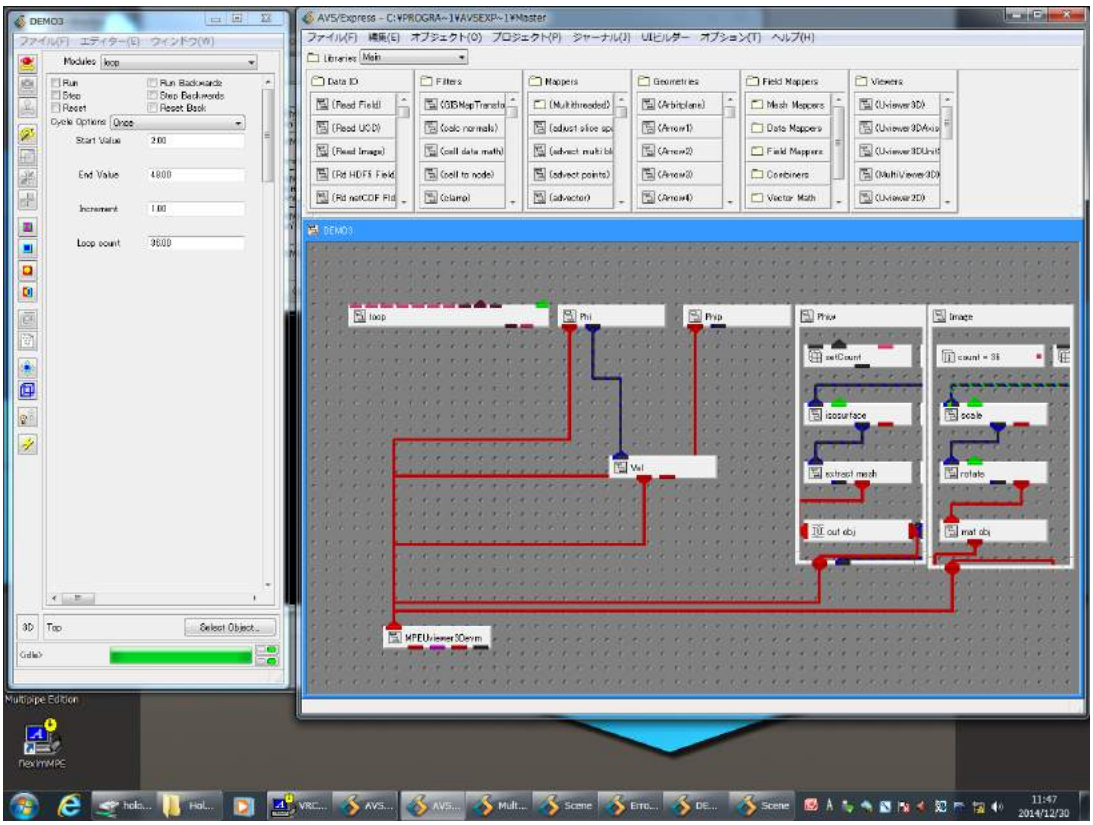


Fig. 3 AVS network editor for simultaneous visualization of experimental and computational results

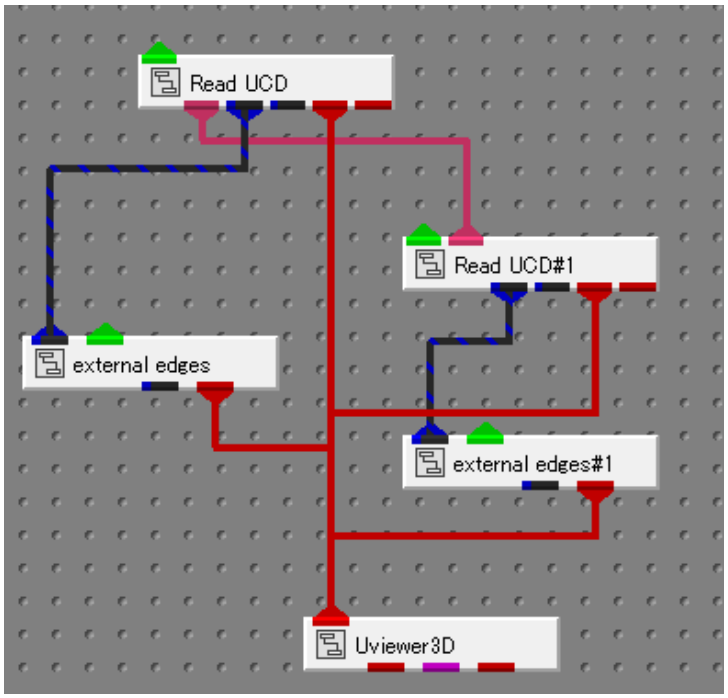


Fig.4.　The way of two “Read UCD” modules synchronizing

実験画像については，いまのところ 2 次元（立体映像ではない）なので，昨年度に作ったものをそのまま用いることができる．

今年度は，これらのデータを，

(a) 並べて表示する．

(b) 重ねて表示する．

の 2 つについて比較・検証を行った．まず，並べるにしても，重ねるにしても，それぞれのデータの大きさに違いがあるため，正確な縮尺と位置合わせが必要になる．そこで，計算結果，実験結果のそれぞれのスケーリングと位置合わせを行い，またそれらをまとめてスケーリングができるよう，モジュール構成を変更した．ここの詳細は略す．

今回用いたデータは上端を指示した弾性円柱の流体力による変形の解析であるが，Holostage-MINI による立体視では，並べて見ることはもちろんそれなりに比較ができるが，重ねても立体視を行っているため，両者を分離して見ることができる（図 5 では分かりにくいが，解析結果は 3D になっており，一方，実験の動画は円柱の中心を通る面に投影されるように表示されている）ので，より効果的であることが分かった．

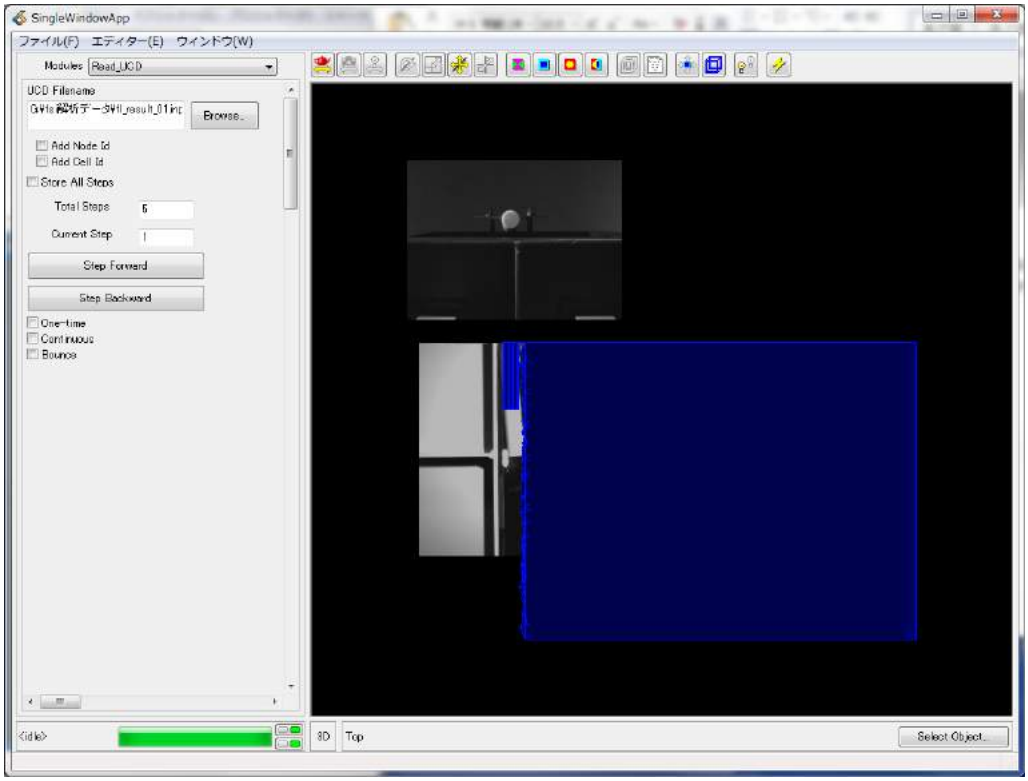


Fig.5.　Simultaneous and overset display of experimental and computational results

次年度は，より多くのデータで本システムの有効性を検証することと，システムの公開方法について検討する予定である．

3.5.2. オールドバイオリンの音色とバイオリンの演奏法に関する可視化的研究

(1) 目標・計画

本研究では，古来よりしばし注目されてきた二つのバイオリンに関する研究を行っている．

一つはオールドバイオリンと新作バイオリンの音色の違いについてであり，FFT による音響解析とアンケート評価による分析を行っている．オールドバイオリンの音色の特徴量を見いだし，現代の技術を用いてアンティークバイオリンに近い音色を出すための楽器製作への一助となるような音響モデルの構築を目指す．

もう一つは，バイオリンの演奏法に関してプロフェッショナルのプレイヤーの運動モデルの解析である．例えば，ピッチを振動させるビブラート奏法やアゴーギーグといわれる機械的でないヒューリスティックなテンポのゆらぎなどである．これらを録音された音響データからの解析とモーションキャプチャを用いた解析がある．

(2) 意義・国際社会との比較

これまでいくつかのバイオリンの音響に関する研究はあるが，オールドバイオリンの音色もプロフェッショナルの演奏もどちらも満足な解析結果が得られているわけではない．

(3) 研究内容

1. FFT と印象評価の多変量解析によるオールドバイオリンの音色解析

楽器店との協力によりオールドバイオリン(表 1)をプロの演奏家に演奏してもらい，バイオリン毎に曲中の同じ音符の部分を抜き出し FFT で周波数スペクトルの音圧ピークを得る．倍音に鋭いピークが得られるのでその倍音の配合の違いから音色の違いの比較を行っている．

2. バイオリン演奏におけるビブラートの運動解析

Table 1 Violins for analysis

Old violin (5)
Stradivari, Catenari, Gragnani, Balestrini, Santo Serafin
Semi-old violin (7)
Pressenda, Faniola, Scaranpella Michetti, Guerra, Fablis, Genovese
Modern violin (2)
Bisiachi Garimberti
Contemporary violin (7)
Pygumarius (Advance A, B, Exelent A, B),Pygumarius (Stradivari copy, Guarneri copy, Del Gesu copy ※㈱文教楽器製)

ビブラート(vibrato)とは，弦を押さえる左指を弦に平行な方向に周期的に動かすことで，ピッチを振動させる表現方法であるが，この奏法は聴衆を魅了する技術的なコツが必要でそれがうまくできない奏者は多い．本研究では一流のプロフェッショナル演奏家の演奏音の音響的解析，およびビ

ブラート運動をモーションキャプチャにより「上手な」ビブラートのかけ方とはどうすれば良いのかを解明する.

(4) 平成 27 年度進捗状況

1. バイオリンの音色に関して

図 1 は, FFT アナライザ（OR30 シリーズ）によるスペクトル解析をして, さらに x 軸は, 周波数を基音の周波数 f_0 で割って正規化したもの, y 軸は, 倍音の音圧を基音の音圧で割って正規化し無次元化したものである. オリジナルの Stradivari とコピー製品(㈱文京楽器提供)の比較を Fig.1 に示す. このコピー製品による D 音は, 倍音構造が比較的傾向が似ているので音色も近いと思われるが, 現在評価実験として音色に関するアンケートを取り相関を調査することを試みている. また, 本来, 名器のパフォーマンスはプロの演奏者によって十分鳴らされた演奏音においてその真価が発揮できるのではと考え, 本研究では, これまでのタップ音やハンマー打による応答特性ではなく, プロによる演奏音での FFT 解析をしている. Fig.2 はその一例で開放弦の単純な発音と演奏音の違いを示しているが, これについても現在アンケート評価を行っている.

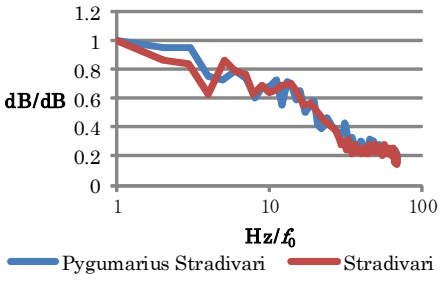


Fig. 1 Original Stradivari vs Copied Stradivari (D4)

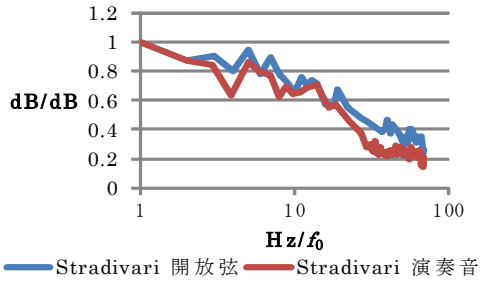


Fig.2　Tone analyze by open string vs by play(D4)

2. ビブラートの解析について

現段階では, モーションキャプチャシステムを用いていくつかの動きを撮影したまでである（Fig.3）. 今後はプロの演奏による音響解析と運動解析の両方の面から解析をしていく予定である.

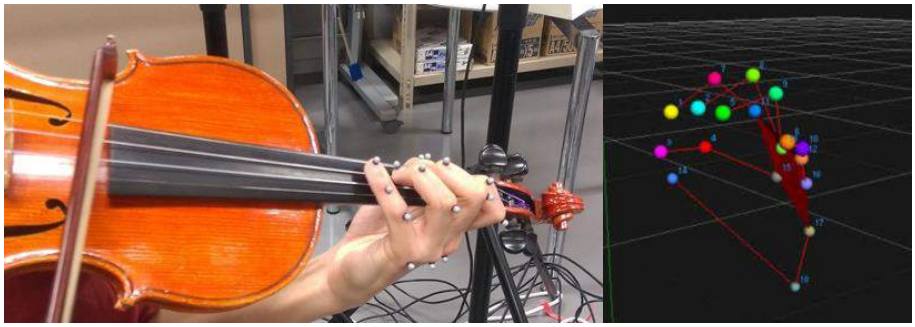


Fig.3.　Motion capture and analyze of vibrato (violin:left, cello:right)

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

平成 23 年 10 月より JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」において，研究課題名「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」が採択され，研究拠点を当センターに置き，研究を実施している．

4.1.1. 研究実施体制

ポストペタコンなど次々世代の並列計算機アーキテクチャにおいて，大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション分野が高い演算効率を得るためには，マイクロプロセッサやメモリの階層構造を考慮したプログラミングモデルが必要である．特にそれは，入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで，統一的に提供される必要がある．つまり，一般的な実アプリケーションはプレ／ソルバー／ポスト処理など目的に応じたモジュール群で構成されていることが多いが，ポストペタコンの利用が想定される大規模シミュレーションでは，全ての処理がポストペタコン上で行われ，モジュール間のデータ受け渡しを最小限にするようなプログラミングモデル，並びにそれに基づく大規模数値計算データ処理システムの基盤技術が不可欠と言える．

ここで，ポストペタコンのアーキテクチャとしては，SIMD 拡張命令，GPGPU，FPGA など何らかのアクセラレータを搭載したヘテロジニアスメニーコアで構成される計算ノードをネットワーク接続した，分散メモリ型アーキテクチャになると予想され，計算ノード内はチップ上／ボード上問わずに異種の演算装置が NUMA 型で搭載されることを想定する必要がある．また，演算性能と通信性能の向上比を考慮すると，マイクロプロセッサにとって計算ノード間ネットワークというのは，現在で例えると WAN 並みに遅く感じるネットワークとなる可能性があり，ポストペタコンはそれらを数十万から数百万ノード規模で接続して構築されると予想される．さらに，ポストペタコン利用が想定されるシミュレーションにおいて生成されるデータのファイルサイズはペタバイトオーダーになるが，ハードディスクなどの外部記憶装置の記憶容量やアクセス性能の大幅な改善にはまだ時間を要すると考えられる．つまり，ポストペタコンを利活用できるアプリケーションは，ヘテロジニアスな分散メモリ並列かつ数百万計算ノード環境において高い並列効率と演算効率を示す必要があるが，その高いハードル

を突破できたとしても，大規模な入出力データを効率的に処理できない限り，本当の意味での利活用は不可能である．この問題を解決するためには，並列ファイル入出力システムの効率化やデータ圧縮展開アルゴリズムの高速化などだけではない，根本的なデータ量削減に関する解決策が求められる．

そこで本プロジェクトでは，ポストペタコン上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として，申請者らがこれまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法の技術を応用した，階層型領域分割法による大規模数値計算データ処理システムの研究開発を目指す．この基盤技術にはアプリケーション分野に依存する箇所があることが予想されるため，本提案では連続体力学向けアプリケーションを対象としながら，具体的には以下の基盤技術開発をターゲットとする．

A) マルチレベル領域分割法による連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列化ライブラリ

B) マルチレベル領域分割法による多階層計算格子データの生成，操作および I/O ライブラリ

C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

これらの技術に基づいて開発されるアプリケーションでは，核となるモジュール間のデータ受け渡し量を従来のものより 3 桁削減することが可能となり，ピーク演算性能比 20%以上のシステム開発の実現を目指す．

4.1.2. 研究実施内容

(1)「東洋大学」グループ

① 研究代表者：塩谷隆二（東洋大学総合情報学部，教授）

② 研究項目

階層分割型数値計算ライブラリの基礎研究並びに設計とその応用

(2)「名古屋大学」グループ

① 主たる共同研究者：荻野正雄（名古屋大学情報基盤センター，准教授）

② 研究項目

階層型ソルバーライブラリの基礎研究とその応用

(3)「東京大学」グループ

① 主たる共同研究者:越塚誠一(東京大学大学院工学系研究科, 教授)

② 研究項目

階層分割型入出力ライブラリ並びに連続体力学向け問題領域専用言語の基礎研究とその応用

5.　成果の広報および普及活動

5.1.　第 4 回 CCMR-HDDMPPS（CREST プロジェクト）合同シンポジウム

2015 年 3 月 10 日（火），東洋大学白山キャンパス 2 号館 16 階スカイホールにて，第 4 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウムを開催した．

当日は，計算力学研究センターと HDDMPPS グループから，各 5 名が講演を行い，1 年間の研究の進捗を報告すると共に，来年度以降の研究方針についての議論が活発に行われた

また，特別講演として，2015 年度で退官される江澤良孝東洋大学総合情報学部教授による最終講義が行われ，江澤教授のこれまでの研究について知ることの出来る，貴重な講演となった．

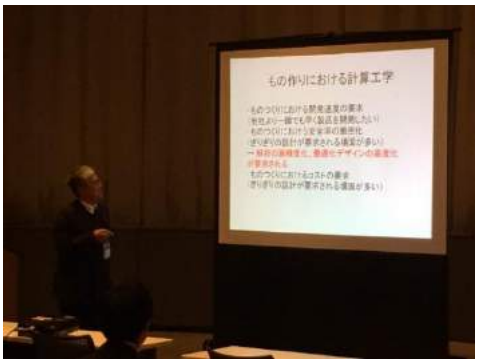
5.1.1.　プログラム

<table>
<tr><td>13:00-13:10</td><td colspan="2">開会の辞</td><td>矢川元基
東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授</td></tr>
<tr><td rowspan="7">13:10-14:50</td><td colspan="3">セッション 1 (CCMR)
文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業:
「大規模高精度流体―構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」
プロジェクトリーダ : 田村善昭（東洋大学計算力学研究センター長）</td></tr>
<tr><td colspan="2">「大規模高精度流体―構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」</td><td>田村善昭（東洋大）</td></tr>
<tr><td colspan="2">「流れと物体と音．実験および数値シミュレーションの研究報告」</td><td>長岡慎介（東洋大）</td></tr>
<tr><td colspan="2">「並列流体－構造連成解析システムの開発及び実験との比較検証」</td><td>長岡慎介（東洋大）</td></tr>
<tr><td colspan="2">「人工知能技術を用いた解析結果予測」</td><td>増田正人（東洋大）</td></tr>
<tr><td colspan="2">「RAPL を用いた粒子法シミュレーションの消費電力制御」</td><td>谷村景貴（東洋大）</td></tr>
<tr><td colspan="3">14:50-15:00　休憩</td></tr>
<tr><td>15:00-16:40</td><td colspan="3">セッション 2 (HDDMPPS)
科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業（CREST）:
「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」</td></tr>
</table>

	プロジェクトリーダ：塩谷隆二(東洋大学)	
	「ポストペタスケールシミュレーションのためのライブラリ開発」	塩谷隆二（東洋大）
	「粒子法と有限要素法を用いた大規模流体構造連成解析システムの開発」	三目直登（東京大）
	「超大規模解析のための多階層型領域分割法ソルバーの開発」	淀薫（インサイト）
	「電磁場シミュレーションの大規模化・高効率化へ向けた理論的検討」	田上大助（九州大）
	「超大規模電磁場解析ライブラリ開発」	杉本振一郎（諏訪東京理科大）
16:40-16:50	閉会の辞	田村善昭 東洋大学計算力学研究センター長
16:50-17:00	休憩	
17:00-18:00	江澤良孝教授最終講義「研究を振り返って－構造解析と最適化」	

矢川先生開会の辞

シンポジウムの様子



江澤先生最終講義

懇親会にて

5.2.　第 1 回日韓中台学生ワークショップ Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015

2015 年 3 月 25～26 日に諏訪東京理科大学にて，日本・韓国・中国・台湾の学生による機械工学に関する第 1 回日韓中台学生ワークショップ Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015 が開催された．講演はすべて英語で行われ，活発な議論が交わされた．本センターからは大学院生の島村雅彦さんが口頭発表を行った．また，諏訪周辺の観光やそば打ち体験も催され，各国の学生達が親睦を深めた．

5.2.1.　プログラム

March 25th　Wednesday	
09:00-09:20	Openning Ceremony

Oral Presentations:	
March 25th　Wednesday	
Session 1 (4)　Chairoerson: Mamtimin Geni (Xinjiang University, China)	
Time	Presentation
09:20-09:40	Investigation on Fatigue Crack Propagation Behaviour in Plate with Multiple Discontinuitier using XFEM
	Yixiu Shu, Yazhi Li
09:40-10:00	Development of Elastic Crack Opening Displacement Solutions for Circumferential Through-wall Cracks in Thin Elbows
	Min-Kyu Kim, Han-Bum Surh, Min-Gu Won, Moon Ki Kim, Nam-Su Huh, Jae-Boong Choi
10:00-10:20	Dislocation Dynamics Study on Influence of Elastic Anisotropy in Polycrystal Plastic Deformation
	Yuya Suzuki, Akiyuki Takahashi
10:20-10:40	(TBD)
	Yong-Teng Zheng, Kuen Ting
10:40-11:00	Coffee Break
Session 2 (3)　Chairperson: Yoshiaki Tamura (Toyo University, Japan)	
11:00-11:20	Large Scale Fluid Structure Interaction Simulation with Smoothed Particle Hydrodynamics on Multi-core and –GPU Systems
	Zhe Ji, Fei Xu, Akiyuki Takahashi
11:20-11:40	Large-scaled Simulation on the Mixing Mechanism of Film Cooling based on Hybrid Thermal Lattice Boltzmann Method

	Shangguan Yanqin
11:40-12:00	Simulation of Droplet Impacting onto Elastic Solid with the SPH Method
	Yinan Bie, Xiao-Jing Ma, Mamtimin Geni
12:00-13:00	Lunch
Session 3 (5)	Chairperson: Moon Ki Kim (Sungkyunkwan University, Korea)
13:00-13:20	Experimental Observation of the Skeletal Adaptive Repair Mechanism and Bionic Topology Optimization Method by using Cross-Type Reaction-Diffusion
	Kaysar Rahman, Mamtimin Geni
13:20-13:40	Molecular Dynamics Modeling of Mixed Dislocations in BCC Metals
	Kazuki Takahashi, Akiyuki Takahashi, Akiyoshi Nomoto
13:40-14:00	Study on Band Structures of Layered Phononic Crystals with Flexoelectricity
	Wenjun Yang
14:00-14:20	(TBD)
	Li-Hsuan Kung, Kuen Ting
14:20-14:40	The Influence of Oxidation Parameters on Stress Development at the Phase Transformation Zone in Thermal Barrier Coatings
	CHAI Yi-jun, LIN Chen, LI Yue-ming
14:40-15:00	Coffee Break
Session 4 (4)	Chairperson: Kuen Ting (Lunghwa University of Science and Technology, Taiwan)
15:00-15:20	In-situ Observation of Fracture and Failure Behavior in Thermal Barrier Coatings under Three-point Bending
	Peng Jiang, Xueling Fan, Dingjun Li, Tiejun Wang, Yacong Wu
15:20-15:40	Analytical Study on Small Punch Creep Test for Creep Life Prediction
	Taeksang Lee, Jae Boon Choi, Monn Ki Kim
15:40-16:00	Compressive Response of Short Nomex Honeycomb
	Wei Feng, Fei Xu, Xiangyang Gao
16:00-16:20	Study of Pressure Characteristics of Sealing Pair Oil-Film for Bellows Mechanical Seal
	Ning Li, Mutellip Ahmat, Guangpeng Wang
March 26th Thursday	
Session 5 (4)	Chairperson: Shenping Shen (Xi'an Jiaotong University, China)
09:00-09:20	Material Strength Changes due to Spinodal Decomposition in Fe-Cr Ferric Steels
	Takuya Suzuki, Akiyuki Takahashi, Akiyoshi Nomoto
09:20-09:40	Normal Mode Guided Elastic Network Interpolation (NGENI) for Prediction of Conformational Pathway in Proteins
	Byungho Lee, Jae Boong Choi, Moon Ki Kim

09:40-10:00	(TBD)
	Yan-Liaug Su, Kuen Ting
10:00-10:20	Theoretical Prediction of Failure Envelopes for Composite Laminates including Nonlinear and In-situ Effect
	Biao Li, Yazhi Li
10:20-10:40	Coffee Break
Session 6 (4)	Chairperson: Fei Xu (Northwestern Polytechnical University, China)
10:40-11:00	Development of Efficient and Accurate Analysis Method for Cardboards
	Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa
11:00-11:20	Numerical Modeling and Simulation of Wind Blown Sand Morphology under Complex Wind-Flow Field
	Mawsude Muhtar, Mardan Wali, Xamxinur Abdikerem, LeiWang, Afang Jin, Muhtar Sadir and Mamtimin Geni
11:20-11:40	Development of Improver Integrity Assessment Standard Containing Axial and circumferential Multiple Through-wall Cracks
	Jin Won Hong, Jae Boong Choi, Moon Ki Kim
11:40-12:00	(TBD)
	Chin-Hsing Wu, Kuen Ting

Poster Presentations:

3-minute presentation at Lunch time on March 25th.

Poster presentation during coffee break and lunch time

Order	Presentation
1	Flexoelectric Effects in Three-dimensional Eshelby's Nano-inclusion Problem
	Shasha Yang, Shengping Shen
2	SPH Numerical Simulation of Impact and Take-off of Sand Particles in Flat bed
	Jin A Fang, Maimtmin Geni
3	Research on Mechanical Characteristics of the Oblique Arch Roof in Turpan Traditional Houses
	Abulikemu Touheti, Sawulet Bekey, Mutailipu Ruzeaiti, Aierken Haimudula
4	Stress analysis multibody contact problem based on SPH Method
	Muhtar Kerim, Rahmatjan Imin, Azhar Halik, Mamtimin Geni
5	Numerical Simulations and Dynamic Contact Behavior Analysis of Ball Bearing Lubrication System by Adopting FEM and SPH Coupling Method
	Yue WU, Mamtimin Geni

島村さんの発表の様子 1

島村さんの発表の様子 2

表彰式

そば打ち体験

5.3.　台湾・龍華科技大學川越キャンパス見学

2015（平成 27）年 6 月 23 日午前に，提携校である台湾・龍華科技大學の教員・学生 20 名が川越キャンパスを見学に訪れた．学外の賞などを受賞した学生に送られる「gold award」を受賞した学生が提携校を訪問するというもので，同大と関連の深い，計算力学研究センターが中心となって見学会を企画した．

まず，東洋大学から吉田善一研究推進部長と，川越キャンパスを代表して杉本富利総合情報学部長が歓迎の挨拶を行い，龍華科技大學の阮管理學院院長が歓迎に対する謝辞を述べた．続いて，田村善昭計算力学研究センター長の司会で参加者全員の紹介や東洋大学の概要説明などを行った．その後，生体医工学研究センターとバイオ・ナノエレクトロニクス研究センターの見学を行い，両大学の親睦を深めた．

Dr.Ruan 挨拶

1 号館前にて

見学の様子

5.4. 東洋大学産学協同教育センター中核人材育成講座「スマホアプリ開発入門講座」

2015 年 11 月 7 日（土），14 日（土）
1307 実験室（1 号館 3 階）
10:00-16:00

2015 年 11 月，川越キャンパスにて，産学協同教育センターが「スマホアプリ開発入門講座」を開講した．本センターから塩谷研究員，長岡研究助手，増田研究助手が指導にあたった．

当講座では，自社で活用可能なアプリ開発を検討している方や，日頃 PC で利用しているソフトウェアの機能の一部を社外などで利用するためにスマートフォン用アプリとして開発を検討している方等を対象とし，スマートフォンの 2 大 OS となっている Android と iOS 両方のアプリ開発について，基礎知識の習得（それぞれの特徴を理解，比較すること）から，オリジナルアプリの作成実習までを行った．

11 月 7 日（土）には，宮川大輔氏（株式会社 mokha・取締役)が，「Android Studio による Android アプリ開発」をテーマとして， Android アプリ開発環境のセットアップにはじまり，Android の仕組みや UI の基礎知識についての講義を行なうとともに，各参加者がオリジナルアプリの設計，開発を目標に，実習を行った．また，Google Play へのアプリ公開手順の紹介も行われた．

11 月 14 日（土）には，本センターの塩谷隆二教授（東洋大学総合情報学部）が，「Xcode による iOS アプリ開発」をテーマとして， Xcode Storyboard による画面遷移簡単アプリ開発や Swift の基礎知識について講義を行なうとともに，各参加者がオリジナルアプリの設計・開発を目標に実習を行った．また，ハイブリッドアプリ開発ツールなどの紹介も行われた．

「スマホアプリ開発入門講座」の様子

6. 学術活動

2015 年 1 月から 2016 年 1 月までの業績を掲載する.

6.1. 論文投稿

1. Terutaka Fujioka, “Elastic-Route Estimation of Strain Range in Notched Components Under Thermal Loading Without Performing Stress Linearization”, Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 137(2), 021205-1 to 021205-6, April 2015.

2. Shin-ichiro Sugimoto, Daisuke Tagami, Masao Ogino, Amane Takei, Hiroshi Kanayama, “Improvement of Convergence in Time-Harmonic Eddy Current Analysis with Hierarchical Domain Decomposition Method”, Transaction of the Japan Society for Simulation Technology, Vol.7, No.1, pp.11-17, 2015.

3. Hiroshi KAWAI, Kohmei SATOH, Yasunori YUSA, Takayuki UOMOTO, Ryuji SHIOYA, Hiroshi OKADA, “AutoMT a library for tensor operations and its performance evaluation for solid continuum mechanics applications”, Mechanical Engineering Letters Vol.1, No.15-00349, pp.1-10, 2015.

4. Kohei MUROTANI, Issei MASAIE, Takuya MATSUNAGA, Seiichi KOSHIZUKA, Ryuji SHIOYA, Masao OGINO, Toshimitsu FUJISAWA, “Performance Improvements of Differential Operators Code for MPS method on GPU”, Computational Particle Mechanics, Vol.2, Issue 3, pp.261-272, 2015.

5. Kazuo KONAGAI, Rama Mohan POKHAREL, Hitoshi MATSUBARA and Masataka SHIGA, “Geotechnical aspect of the damage caused by the April 25th, 2015 Gorkha earthquake of Nepal”, JSCE Journal of Disaster FactSheets, FS2015-E-0002, July 2015.

6. 富山潤，羽渕貴士，宮里心一，中林靖，“コンクリート橋梁上部工に付着する塩分量分布に関する数値実験”，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.769-774，2015.

7. T. Nosaki, N. Fujimatsu, “Trajectory analysis based on aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion”, Journal of Visualization, September 2015.

8. 富山潤，“コンクリート構造物を対象としたミクロ・マクロ塩害環境に関する研究”，コンクリート構造物の補修，補強およびアップグレードシンポジウム，Vol.15，pp.405-410，2015 年 10 月.

9. Hitoshi Matsubara, Kosaburo Hirose, Taka-aki Edo, Kei-ichi Tamanaha, Hisao Hara and Tomonori Yamada, “Numerical modelling of mudcrack grows”, Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ATC1-3-17, November 2015.

10. 広瀬孝三郎，松原仁，原久夫，“マッドペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”，土木学会論文集 C（地圏工学），2016 (Accepted).

11. F Zhang, Y Zhu, T Furukawa, W Song, “Kinematic Analysis of a Partially Decoupled 3-DOF Parallel Wrist”, Journal of Robotics, 2015 (790414), pp.1-9, 2015.

12. K Takami, T Furukawa, M Kumon, D Kimoto, G Dissanayake, “Estimation of a nonvisible field-of-view mobile target incorporating optical and acoustic sensors”, Journal of Autonomous Robots, 40 (2), pp. 343-359, 2015.

13. B Li, T Furukawa, “Microtexture Road Profiling System Using Photometric Stereo”, Journal of Tire Science And Technology, 43 (2), pp.117-143, 2015.

14. Hiroshi Kanayama, “An Industrial Application of Thermal Convection Analysis”, International Journal of Computational Methods, Vol.13, No.2, 2016 (Accepted).

6.2. 著書

1. Hiroshi Kawai, Masao Ogino, Ryuji Shioya, Shinobu Yoshimura, “Fundamentals of High-Performance Computing for Finite Element Analysis”, High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering (Springer Tracts in Mechanical Engineering), Springer, pp.1-21, 2015.

2. Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Eiichi Nagai, Toshimitsu Fujisawa, Akira Anju, Hiroshi Kanayama, Satoshi Tanaka, Kyoko Hasegawa, “Large-Scale Tsunami Run-Up Analysis Using Particle Method”, High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering (Springer Tracts in Mechanical Engineering), Springer, pp.157-177, 2015.

6.3. 総説・解説・エッセイ

1. 横山真男，“ヴァイオリンの音色研究”，可視化情報学会誌, Vol.35, 136, pp.17-22, 2015.

2. 矢川元基, “福島原子力事故特集 PART2 を企画して”“福島原子力事故特集 PART2”, 学術の動向, Vol.20, No.2, pp.33-35, 2015.

3. 矢川元基, “巻頭言:新年のご挨拶”, 原安協だより, No.269, pp.1-2, 2016.

6.4. 学会発表

1. 横山真男, 斉藤勇也, “ヒットチャートランキング上位に入る楽曲の特徴分析”, 情報処理学会研究報告音楽情報科学(MUS), 山梨, 2015 年 2 月.

2. 渡辺大樹, 瀬田陽平, 横山真男, “HMD と Leap Motion を用いた指差し天体観測システムの開発”, 情報処理学会第 77 回全国大会, 京都, Vol.1, pp.651-653, 2015 年 3 月.

3. 杉本振一郎, 田上大助, 荻野正雄, 武居周, 金山寛, “領域分割法を用いた時間調和渦電流解析の収束性改善(第 2 報), 静止器/回転機合同研究会・電磁界数値計算技術とその応用, 宮古島マリンターミナル, 2015 年 3 月 5-6 日.

4. 月川久義, 井上雅弘, 金山寛, 田島正喜, “屋上から排出した水素の建物周囲の流れ解析”, 日本機械学会九州支部第 68 期総会・講演会, 福岡大学工学部, 2015 年 3 月 13 日.

5. 金山寛, “自動販売機内部の熱対流解析”, 日本機械学会材料力学部門 2014 年度第 2 回「マルチフィジックスの実験／計算技術の高度化に関する研究会」, 東京大学山上会館 001 会議室, 2015 年 3 月 19 日.

6. Yoshiaki Tamura, Tomoki Matsuo, “Numerical Simulation Method of Compressible Gas-Liquid Two Phase Flow”, PANACM 2015 1st Pan-American Congress on Computational Mechanics, Buenos Aires, Argentina, April 27-29, 2015.

7. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, Shioya Ryuji, Fumihiko Hakuno, Hiroki Nishi, Shinichiro Takahashi, “Study of Effects of Blood Amino Acid and Hormone Level for Controlling Triglyceride Accumulation in the Liver of Rats using Self-Organizing Map”, 1st. Pan-American Congress on Computational Mechanics (PANACM 2015) & XI Argentine Congress on Computational Mechanics (MECOM 2015), Argentina, pp.885-891, April 27-29, 2015.

8. M. Yokoyama, Y. Seta, K. Murotani, G. Yagawa, “3D simulation considering surface condition of wall in particle method”, VI th International Conference on Computational Methods for

Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED PROBLEMS 2015), Venice, Italy, May 2015.

9. 横山真男, “黄金比による音律で調弦した音楽”, 情報処理学会研究報告音楽情報科学（MUS）, 東京, 2015 年 5 月.

10. 富山潤, 浅井光輝, 久保善司, “損傷力学ベースボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張挙動解析の基礎研究”, 土木学会第 18 回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.199-200, 2015 年 5 月.

11. 室谷浩平, 越塚誠一, 塩谷隆二, 荻野正雄, 永井英一, 藤澤智光, 安重晃, “MPS 法を用いた福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋の津波浸水解析”, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, B-5-4.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 8 日.

12. 和田義孝, 河合浩志, 荻野正雄, 室谷浩平, 塩谷隆二, “高精細可視化ライブラリ LexADV-VSCG へのポリゴン断面可視化の実装“, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-6-2.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日.

13. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法における局所 Schur 補元アプローチの性能予測モデルと評価“, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-7-1.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日.

14. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 室谷浩平, “大規模解析のための多階層領域分割法の基本設計と実装“, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-7-2.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日.

15. 杉本振一郎, 田上大助, 荻野正雄, 武居周, 金山寛, “階層型領域分割法における時間調和渦電流解析の収束性改善(第 2 報)“, 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015 年 6 月 8-10 日.

16. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Yoshiaki TAMURA, Genki YAGAWA, “Efficient Approach for the Fluid-Structure Interaction Problems and the Comparison between Experiment and Computation”, ICCM2015, Auckland, New Zealand, July 14-17, 2015.

17. Hitoshi Matsubara, “Mathematical and numerical modelling for microbial rock weathering”, Proceedings of 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), San Diego, USA, July 2015.

18. S. Koshiyama, N. Fujimatsu, “Establishment of PSP Technique for Small-Scaled Model using the Supersonic Wind-Tunnel”, International Symposium on Space Technology and Science, Kobe International Conference Center, July 2015.

19. Kosaburo Hirose, Takaaki Edo and Hitoshi Matsubara, “Crack propagation simulation on mud pastes”, Proceedings of 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), San Diego, USA, July 2015.

20. Hiroshi Kanayama, Masao Ogino and Shin-ichiro Sugimoto, “Preconditioners in Domain Decomposition Method for Magnetostatic Problems”, ICCM2015, Pullman Hotel, Auckland, New Zealand, July 14-17, 2015.

21. Yoshiaki Tamura, “Development of Numerical Methods for Compressible Gas-Liquid Two Phase Flows”, The 13h Asian International Conference on Fluid Machinery 2015 (AICFM13), Tokyo, Japan, August 7-10, 2015.

22. 藤松信義, “摩擦係数評価のための乱流境界層の普遍関数構築”, 日本実験力学会 2015 年度年次講演会, 新潟大学工学部, 2015 年 8 月.

23. M. Yokoyama, K. Murotani, O. Mochizuki, G. Yagawa, “Numerical and experimental study on splash formation with consideration of the surface condition of solid wall”, IV th Conference on Particle-Based Methods (PARTICLES 2015), Barcelona, Spain, September 2015.

24. 横山真男, “現代音楽のための黄金比を用いた新音律の提案と評価”, 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, 福島, 2015 年 9 月.

25. 富山潤, 藍檀オメル, 亀川裕也, 山口順圭, 屋我晃, “遅延膨張性細骨材に対するコンクリートプリズムを用いた ASR 加速試験の適応性に関する研究”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-547, pp.25-26, 2015 年 9 月.

26. 風間洋, 富山潤, 下地建, 小簗俊介, “コンクリート表面の含有塩分量 C0 調査方法の提案”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-70, pp.139-140, 2015 年 9 月.

27. 佐川康貴, 山田一夫, 合田寛基, 久保善司, 富山潤, 川端雄一郎, “共通試験結果に基づくコンクリートプリズムを用いた ASR 加速試験方法に関する考察”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-548, pp.1095-1096, 2015 年 9 月.

28. 広瀬孝三郎, 松原仁, “マッドペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山, pp.783, 2015 年 9 月.

29. 﨑山将, 広瀬孝三郎, 松原仁, “粘質土壌における亀裂進展シミュレーション”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山, pp.573-574, 2015 年 9 月.

30. 室谷浩平, 越塚誠一, 塩谷隆二, 荻野正雄, 永井英一, 藤澤智光, 安重晃, “MPS 法を用いた福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋内部の津波浸水解析”, 第 28 回計算力学部門講演会, 130.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.

31. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 室谷浩平, “大規模解析のための多階層領域分割法ソルバの開発”, 第 28 回計算力学部門講演会, 154.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.

32. 鄭宏杰, 荻野正雄, 塩谷隆二, “京コンピュータにおける ADVENTURE_Solid 2.0 の性能評価”, 第 28 回計算力学部門講演会, 231.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.

33. 増田正人, 塩谷隆二, 中林靖, 伯野史彦, 西宏起, 田村善昭, 高橋伸一郎, “自己組織化マップを用いたラットの血中アミノ酸量と肝臓脂肪の関係分類”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 321.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.

34. 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 鄭宏杰, 淀薫, “静磁場領域分割インターフェイス問題の前処理付き共役勾配法”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.

35. Ryuji Shioya, Masao Ogino, Hiroshi Kawai, “Development of a Numerical Library based on Hierarchical Domain Decomposition and Extreme Large Scale FEM Simulation”, IWACOM-III, p93_OW4-3-2.pdf, Tokyo, Japan, October 12-14, 2015.

36. Hiroshi Kawai, Ryuji Shioya, “Domain specific language for continuum mechanics: translator from LaTeX to C/Fortran”, IWACOM-III, p94_OW4-3-3.pdf, Tokyo, Japan, October 12-14, 2015.

37. 島村雅彦, 江澤良孝, 田村善昭, 高清水聖, 佐藤大亮, “ベイズ推定を用いた実験と数値シミュレーション融合による高精度予測”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.

38. 横山真男, 室谷浩平, 矢川元基, “粒子法によるミルククラウンの大規模数値シミュレーション”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月.

39. 瀬田陽平, 横山真男, 牧野光則, 矢川元基, “容器の縁形状を考慮した液だれの数値シミュレーション, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月.

40. 松原仁, “玄武岩質ガラスの微生物風化シミュレーション”, 計算工学会講演会, つくば, Vol.20, 2015.

41. 藤岡照高, “構造解析ソルバ検証用参照解の整備(低合金鋼引張試験の Code-Aster による再現)”, オープン CAE シンポジウム 2015, 富山国際会議場, 2015 年 11 月.

42. 広瀬孝三郎, 松原仁, “ベントナイトペーストに発生する乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 第 28 回沖縄地盤工学研究発表会, 沖縄, pp.29-30, 2015 年 11 月.

43. 江戸孝昭, 松原仁, “格子ボルツマン法を用いた発破騒音場における防音壁の効果に関する数値解析的検討”, 第 28 回沖縄地盤工学研究発表会, 沖縄, pp.1-6, 2015 年 11 月.

44. 伯野史彦, 増田正人, 舘野昌洋, 西宏起, 高橋伸一郎, 塩谷隆二, “機械学習による血中アミノ酸濃度から肝臓脂肪蓄積量の予測“, 第 38 回日本分子生物学会年会, 第 88 回日本生化学会大会合同大会(BMN2015), 神戸, 2015 年 12 月 1-4 日.

45. Yoshiaki Tamura, “Development of Numerical Simulation Method for Compressible Gas-Liquid Two-Phase Flows”, The 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015), Lausanne, Switzerland, December 6-10, 2015.

46. Toshihiro Ashino, “Data and knowledge structure for materials integration”, Pacifichem 2015, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Honolulu, Hawaii, December 2015.

47. MA Hopkins, RJ Griffin, A Leonessa, BY Lattimer, T Furukawa, “Design of a compliant bipedal walking controller for the DARPA Robotics Challenge”, IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots(Humanoids), pp.831-837, 2015.

48. C Knabe, J Seminatore, J Webb, M Hopkins, T Furukawa, “A Leonessa, Design of a series elastic humanoid for the DARPA Robotics Challenge”, IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.738-743, 2015.

49. K Takami, T Furukawa, M Kumon, LC Mak, “Non-field-of-view indoor sound source localization based on reflection and diffraction”, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.59-64, 2015.

50. B Li, T Furukawa, “Photometric stereo under dichromatic reflectance framework dealing with non-Lambertian surfaces”, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.139-144, 2015.

51. T Furukawa, L Dantanarayana, J Ziglar, R Ranasinghe, G Dissanayake, “Fast global scan matching for high-speed vehicle navigation”, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.37-42, 2015.

52. K Takami, T Furukawa, “High-Resolution Deformation Measurement System for Fast Rotating Tires”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V008T13A058-V008T13A058, 2015.

53. T Furukawa, K Takami, X Tong, D Watman, A Hamed, R Ranasinghe, G. Dissanayake, “Map-Based Navigation of an Autonomous Car Using Grid-Based Scan-to-Map Matching”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V003T01A005-V003T01A005, 2015.

54. B Li, T Furukawa, “Design and Calibration of a 3D High-Resolution Surface Profiling System Using Photometric Stereo”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V009T07A086-V009T07A086, 2015.

55. MJ Bender, H McClelland, G Bledt, A Kurdila, T Furukawa, R Mueller, “Trajectory Estimation of Bat Flight Using a Multi-View Camera System”, IN AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, SciTech, pp.5-9, 2015.

56. K Takami, T Furukawa, “Study of Tire Noise Characteristics with High-Resolution Synchronous Images”, EuroNoise 2015, pp.2113-2118, 2015.

57. 金山寛，鄭こうけつ，杉本振一郎，荻野正雄，“Considerations of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis”， 静止器/回転機合同研究会「電磁界数値計算技術とその応用」，富士通株式会社本社事務所 24 階大会議室，2016 年 1 月 20-21 日．

6.5. 招待講演

1. Hiroshi Kawai, Masao Ogino, Ryuji Shioya, Tomonori Yamada, Shinobu Yoshimura, “Performance Tuning of Parallel Structural Analysis Code Based on Iterative Substructruring with BDD Pre-conditioner for Peta-scale Supercomputers”, The 18th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2015), Regent Taipei, Taiwan, March 16-18, 2015.

2. Hiroshi Kanayama, Masao Ogino, Shin-ichiro Sugimoto, “Preconditioners in Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, The 18th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2015), Regent Taipei, Taiwan, March 16-18, 2015.

3. Genki Yagawa, “Views of Japanese Academia on Fukushima Daiichi Nuclear Accident”, World Engineering Conference and Convention 2015, Kyoto, December 1, 2015.

6.6. 受賞

1. 渡辺大樹, 瀬田陽平, 横山真男, 情報処理学会第 77 回全国大会, 学生奨励賞（論文タイトル：HMD と Leap Motion を用いた指差し天体観測システムの開発）, 京都, 2015 年 3 月.

2. 矢川元基, 日本計算工学会名誉会員, 2015 年 5 月 22 日.

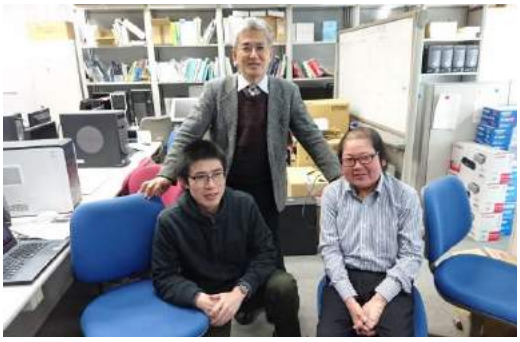
3. 金山寛, 2015 年日本計算力学連合賞, 2015 年 7 月 28 日.

7.　研究グループ紹介

解析手法開発グループ

大規模並列化グループ

新規実験計測グループ



精度・妥当性検証グループ

可視化検証グループ

8.　結び

本報は，2015 年度の活動を取りまとめたものである．なお，2016 年 3 月に予定されているセンター外部評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2016 年 1 月とした．したがって，それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい．

今日，計算力学は製造業のみならず，社会の安心・安全をはじめさまざまな分野に大きく広がりをみせている．私立大学戦略的研究基盤形成支援事業としてはあと1年を残すのみであるが，より広い視点で計算力学の発展に資するようセンター研究員一同，努力していきたい．

東洋大学 計算力学研究センター 2015 年度年報

この資料の転載, 引用などはご遠慮ください.

本資料に関するお問い合わせは下記へお願いいたします.

編集・発行　東洋大学計算力学研究センター

〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100

URL: http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/

TEL・FAX: 049-239-1475

2016 年 3 月発行

禁無断転載

東洋大学計算力学研究センター

2016 年度　年報

CCMR
Center for Computational Mechanics Research
Toyo University

2017 年 3 月

2016 Annual Report of

Center for Computational Mechanics Research

Toyo University

March 2017

目次

1. まえがき 1
2. センターの概要 2
2.1. センター設置について 2
2.2. 組織 3
2.3. 構成メンバー 4
3. 研究成果 5
3.1. 解析手法開発グループ 5
3.1.1. 超大規模並列流体-構造連成解析手法の開発 6
3.1.2. 深層学習を用いた連成解析結果予測 33
3.1.3. 粒子法による粒子間インタラクションに着目した大規模数値シミュレーション 43
3.2. 大規模並列化グループ 49
3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発 49
3.3. 新規実験計測グループ 63
3.3.1. 標準問題のための弾性円柱の振動実験 64
3.3.2. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験 . 67
3.4. 精度・妥当性検証グループ 71
3.4.1. ベイズ推定を用いた効率的精度解析技術の開発 71
3.4.2. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発 77
3.4.3. オープン CAE（固体の有限要素法）を用いた熱疲労試験の再現解析による精度検証 . 79
3.4.4. 人体膝関節モデルを用いた接触応力分布解析 88
3.4.5. 工学における最適化手法の進化計算を用いた最適化 93
3.5. 可視化検証グループ 96
3.5.1. 3 次元画像による定量的・定性的検証 96
4. 共同研究 104
4.1. JST CREST プロジェクト 104
4.1.1. 研究実施体制 104
4.1.2. 研究実施内容 105
5. 成果の広報および普及活動 107
5.1. 英国カーディフ大学にて合同ワークショップ開催 107
5.2. 第 5 回 CCMR-HDDMPPS（CREST プロジェクト）合同シンポジウム 108

5.2.1. プログラム..... 108
5.3. 台湾龍華科技大學にて合同ワークショップ開催.....110
5.3.1. プログラム.....110
5.4. 第 30 回数値流体力学シンポジウム.....111
5.5. 第 6 回 CCMR-HDDMPPS（CREST プロジェクト）合同シンポジウム.....112
5.5.1. プログラム.....112
6. 学術活動.....114
6.1. 論文投稿.....114
6.2. 著書.....114
6.3. 学会発表.....115
6.4. 招待講演.....118
7. 研究グループ紹介.....119
8. 終わりに..... 120

1. まえがき

2012 年に私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定されたプロジェクトも最終年度となった. 本事業はセンターとして二度目の大型事業であり, いわば第 2 期である. この報告書はその最終年度の活動を中心にとりまとめている.

今回の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体―構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」としている. これは, それまでの流体解析や構造解析といった個別の物理の解析から一歩進めてより複雑な, また現実的な問題に計算力学の手法を適用しようとすることと, 単に研究として行うのでなく, 精度や妥当性を十分に検証し, あるいはその検証方法を確立することで, 実用に耐えうるものとすることを目指してのことである. 本年度は最終年度であり, 本報には今年度の成果とともに, 5 年間のまとめも述べられている. また, 戦略的研究推進事業 CREST やその他, センターに関連する研究についてもふれており, これらは本プロジェクト終了後もセンターとして活動を続けて行く予定である.

本プロジェクトの遂行にあたっては, 学内外の研究者・技術者の方々, また, 本学担当事務部にも多大なご支援・ご協力を賜った. 各々名前を挙げることはしないが, ここにあらためて謝意を表する. プロジェクトは終了するが, センターとしては今後も活動を続け, 計算力学の発展のために微力ながら力を尽くしたいと考えている. さらなるご批判とご指導を賜れば幸いである.

2017 年 3 月

東洋大学計算力学研究センター長
田村 善昭

2.　センターの概要

本センターは，わが国の私立大学学術フロンティア拠点のひとつとして文部科学省から設置が認められ，平成17年度に活動を開始した．その後，平成23年度に科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST の選定，続いて平成 24 年度に文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け，今日に至っている．

本センターに参加する研究員は，東洋大学の複数学部・大学院の教員（工学研究科，国際地域学部，総合情報学部，理工学部），博士研究員，大学院生などを中核とし，また客員研究員として関連分野の内外の研究者から構成されている．

各自の専門分野は，構造解析，流体解析，破壊解析，逆問題・最適化，大規模並列計算，可視化など，計算力学分野で必要とされるほぼ全ての分野に跨っており，この分野における専門家集団である．平成 23 年度に採択を受けた CREST では「京」コンピュータ利用のための超大規模解析技術に関して，また平成 24 年度からは，私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け，連成解析や計算力学の精度検証・妥当性検証にも積極的に取り組んでいる．

さらに，東洋大学 125 周年を契機とした国際化に合わせて海外の関連する大学と積極的に交流を進め，若手の人材育成にも寄与したいと考えている．

2.1.　センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである．

- 平成 17 年 6 月文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」に研究題目「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」で採択され，計算力学研究センター発足
- 平成 17 年 12 月センター開所式開催のあと，白山第 2 キャンパス内計算力学研究センター棟に入居し本格活動開始
- 平成 22 年 3 月「学術フロンティア推進事業」終了
- 平成 23 年 8 月科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で採択される
- 平成24年4月文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に研究題目「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」で採択される

2.2. 組織

計算力学研究センターの組織は以下の通りである.

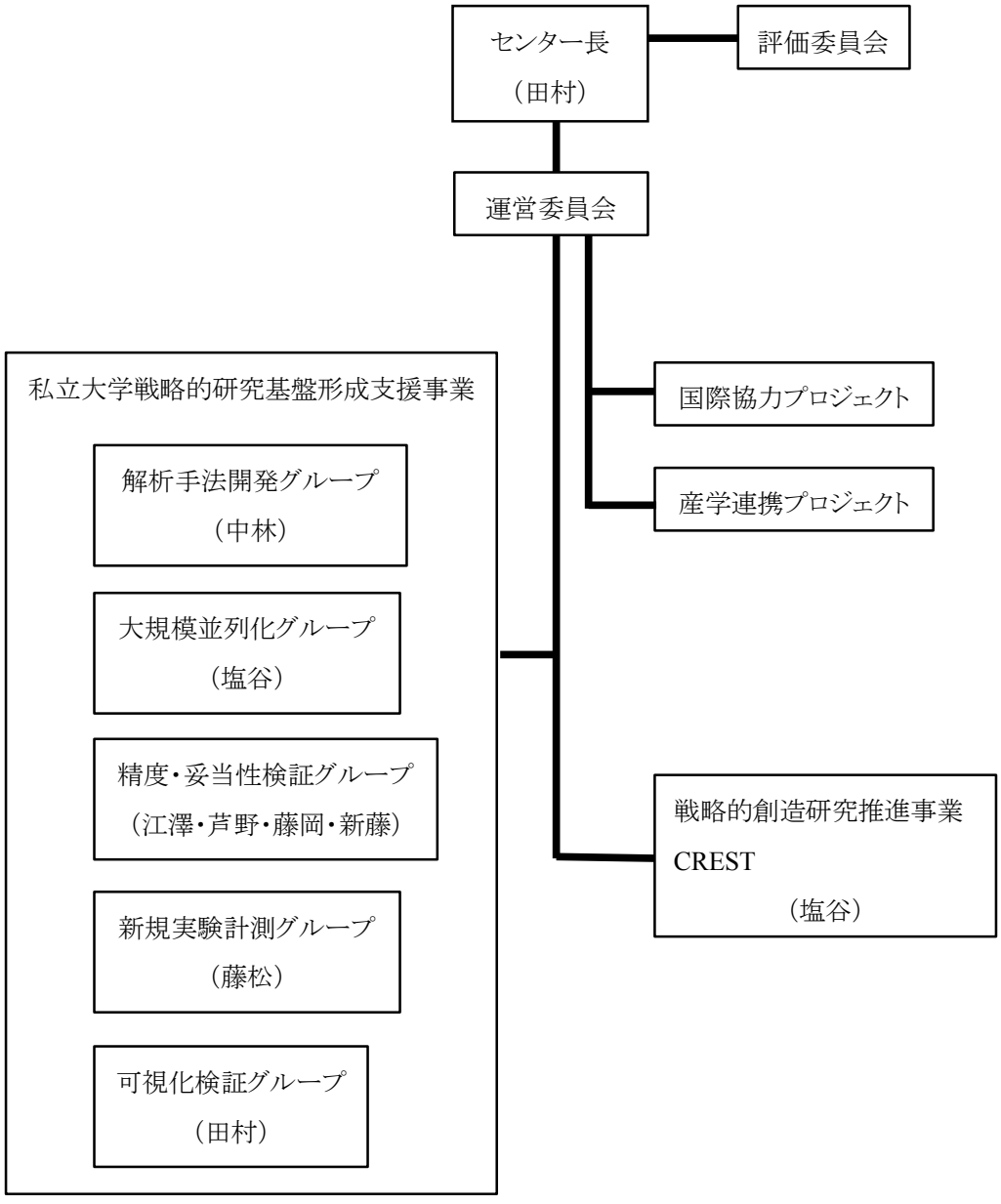


Fig.2.1. センターの組織

2.3. 構成メンバー

計算力学研究センターは以下のメンバーで構成されている.

センター長

田村 善昭(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

研究員

芦野 俊宏(東洋大学国際地域学部国際地域学科教授)
塩谷 隆二(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)
新藤 康弘(東洋大学理工学部機械工学科助教)
中林 靖(東洋大学総合情報学部総合情報学科准教授)
藤岡 照高(東洋大学理工学部機械工学科教授)
藤松 信義(東洋大学理工学部機械工学科准教授)

研究助手・研究支援者

長岡 慎介(東洋大学計算力学研究センター, 2016 年 12 月より東京理科大学)
増田 正人(東洋大学計算力学研究センター)
鄭 宏杰(東洋大学計算力学研究センター)
谷村 景貴(東洋大学計算力学研究センター)

学生

島村 雅彦(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程)
高清水 聖(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程)

客員研究員

矢川 元基(前東洋大学計算力学研究センター長, 東京大学名誉教授, 東洋大学名誉教授)
金山 寛(日本女子大学特任教授, 九州大学名誉教授)
富山 潤(琉球大学工学部准教授)
古川 知成(バージニア工科大学工学部機械工学科教授)
松原 仁(琉球大学工学部助教)
横山 真男(明星大学情報学部情報学科准教授)
江澤 良孝(工学院大学非常勤講師, 元東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

解析手法開発グループでは，計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち，「高精度流体構造連成解析手法の開発」の部分に焦点を当てた活動を行っている.

流体-構造連成解析を高精度かつ安定的に実施するためには，まず，流体解析手法・構造解析手法そのものの精度や信頼性を高めた上で，それらを連成させるアルゴリズムについても十分に検討する必要がある. これまでのところ，計算力学研究センターでは流体解析にSUPG/PSPG安定化有限要素法を用い，構造解析に EFMM を用いる手法を中心に連成解析を行ってきたが，このアプローチ以外にも例えば粒子法を用いた手法など様々な戦略が考えられる.

上記の事項を踏まえて，今年度は，以下の 3 項目について報告を行う.

(1) 超大規模並列流体-構造連成解析手法の開発

(2) 深層学習を用いた連成解析結果予測

(3) 粒子間インタラクションに着目した大規模粒子法シミュレーション

3.1.1.　超大規模並列流体-構造連成解析手法の開発

(1) 目標・計画

本研究では，超大規模問題にも適用可能な流体‐構造連成現象を解く為の新しい解析手法を開発する事を目的としている．

本研究で提案する Enriched Free Mesh Method (EFMM)を用いた構造解析手法と，SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用いた流体解析手法を組み合わせた，新しい流体-構造連成解析手法に用いるメッシュ分割パターンは共に線形要素（2 次元解析では三角形要素，3 次元解析では四面体要素）であることから，流体-構造境界面における整合性を得る事が出来，その結果，流体-構造連成問題を解く際に，非常に重要となる，各解析場が及ぼし合う相互間作用を考慮する際に生じる様々な問題を解消する事に成功している．

さらに，前述のとおり，各解析場に用いられるメッシュ分割パターンは，線形要素のみであるにも関わらず，得られる解析精度は，従来の同一要素を用いた解析結果と比較して向上するという結果を得ている．このことから，本提案手法は，解析向上させつつも，大規模問題を解く際に問題になってくる計算機リソースと計算時間の大幅な抑制を可能にする事を意味している．

一方で，本手法は，近年の大規模解析の際に必要不可欠となる並列処理を施す際に，解消すべき大きな問題を有している事が明らかになった．具体的には，EFMM の大規模並列化が困難であるという点であり，原因は，EFMM の解析アルゴリズムに起因する．

昨年度までに，EFMM の為の超大規模並列化アルゴリズムを提案・実装し，京コンピュータによる並列化効率の検証により，1 億自由度規模の問題に対しても良好な並列化効率を得られる事を示した．

今年度は，流体-構造連成解析を行う際に必要となる，本手法の動的解析への拡張を行った．また，昨年度までに提案してきた並列手法のアルゴリズムの変更に伴う改良を行った所，明らかとなっていた問題点の解消と，同手法の更なる高速化に成功した．

(2) 意義・国際社会との比較

近年，国内外を問わずに，計算力学の分野において，流体-構造連成現象を対象とした研究は，
非常に注目されており，積極的に研究が行われている．この現象を解くために，多くの研究者が様々なアプローチを行い，沢山の新しい解析手法が提案され，多くの成果が発表されている．その一方で，現時点までに，決定的な解析手法は確立されていない．

提案されている多くのアプローチは，流体解析手法として，粒子法を用いているものが非常に多い．メッシュ分割を必要としない粒子法を用いることで，例えば，ダムブレイク問題などの解析場が大きく変動するような問題の解析も容易になることから，流体解析場において多くのアドバンテージ

が得られることが，その一因であると考えられる．

しかし，我々の提案している手法は，流体解析場，構造解析場共に格子法を用いている．格子法をそれぞれの解析場に用いる事で，粒子法を用いた流体解析と比較して，解析領域の大きな変化に対しては，対応し難い面もあるが，解析精度の面では，粒子法を用いたアプローチと比較して大きなアドバンテージを有していると考えられる．

本手法の確立により，数値シミュレーションにおいて，非常に重要な点である，解析精度を損なう事無く，多くの流体-構造連成現象を解く事が可能になると考えられる．このことから，本研究は，格子法を用いた流体-構造連成解析手法の確立と云う観点からも，非常に意義のある研究であると言える．

(3) 研究内容

今年度の研究内容は，下記の 2 つに大別される．

1. 超大規模並列 EFMM の高速化
2. 超大規模並列 EFMM の動的解析への拡張

1 のテーマは，昨年度までに提案・実装した並列 EFMM のアルゴリズムは，十分な並列化効率を得る事が出来たが，一方では改善すべき問題を残していた．この問題を解決する為に，並列化アルゴリズムを改良し，問題の解消のみならず，解析に要する時間の更なる高速化に成功した．ここでは，具体的な解析アルゴリズムと並列化効率の検証結果を示す．

2 のテーマは，流体-構造連成解析を実装する際に必要となる，並列 EFMM の動的解析への具体的な適用方法について述べる．

(3・1) 超大規模並列 EFMM の高速化

並列性能の改良にあたって，今年度は下記の 2 つの作業を実施した．

1. 行列ベクトル積における計算及び通信方法の変更
2. 入力データ形式の変更
3. アルゴリズムの健全性の評価
4. 並列化性能測定

(3・1・1)行列ベクトル積における計算順序および通信方法の変更

変更前のコードにおける計算及び通信の手順は以下の通りである．

1. 【計算】ベクトルの内積計算と同様に，全ての節点がいずれか1つの計算領域でのみ評価されるように，各領域で行列ベクトル積計算を行う．

2. 【通信 1】領域境界の 1 層外側の節点について，正しい値を計算すべき領域に対して，自分の領域で計算された寄与分を送信する．領域境界の 1 層内側の節点について，送られてきた値を足し込むことで，領域境界よりも内側の節点における正しい値が完成する．
3. 【通信 2】領域境界上の節点について，共有する領域間で値を送受信し，それぞれ互いの値を足し込む．これで，領域境界上の節点における正しい値が完成する．
4. 【通信 3】最後に，領域境界の 1 層外側の節点について，正しい値を計算すべき領域から値を受け取り，上書きすることで，領域境界の 1 層外側の節点における正しい値が完成する．なお，ここでの通信は，プロセス 2 における通信の丁度逆の通信となる．

上記の手順において，計算の無駄はないが，3 回の通信および同期が必要となっており，通信が遅い環境においては，パフォーマンス低下の要因になると考えられる．

そこで，今年度は，下記データを予め準備をし，計算および通信手順を変更した．

- 全ての節点について，主担当の領域を決めておく．
  - 主担当となる節点をその領域の内部節点とする．
- 主担当の節点と接続する他領域の節点を外部節点とし，リストに保存する．
- 他領域の外部節点となっている内部節点をリストに保存する．

これによって，事実上，節点ベースの領域分割を行ったのと同等の状態となる．

上記のデータを用いた変更後の計算及び，通信の手順は以下の通りである．

1. 【通信 1】他領域と外部節点となっている内部節点の被演算ベクトル値を当該領域に送信すると共に，自領域の外部節点の被演算ベクトル値をそれらの節点を内部節点として保持する領域から受信し，上書きする．
2. 【計算】全ての内部節点において行列ベクトル積演算を行う．
3. 【通信 2】自領域の外部節点の演算結果ベクトル値をそれらの節点を内部節点として保持する領域に送信すると共に，他領域の外部節点となっている内部節点の演算結果ベクトル値を当該領域から受信し，足し込む．

上記のように計算及び通信手順を変更する事により，計算の無駄が無いだけでなく，通信回数が 2 回に，通信量が約半分になっており，改良前と比較してパフォーマンスの向上が期待できる．

(3・1・2)入力データ形式の変更

昨年度までの解析コードにおいては，要素ベースの領域分割を行い，領域内の全ての節点において局所要素クラスターを生成出来るよう，1 層分外側の要素も保持していた．これによって，各領域間には，要素 2 層分のオーバーラップが生じていた．

今年度，修正したコードにおいても，要素ベースの領域分割を行う事は変わらないが，領域境界上の節点について，主担当の領域を決め，中心節点としての評価は主担当となる領域においてのみ行う事とした．これにより，必要なオーバーラップが 1 層のみとなった．

この変更に伴い，送受信する節点のリストが単純化され，通信テーブルのデータ量も削減された．

(3・1・3)アルゴリズムの健全性の評価

改良後の解析アルゴリズムの健全性を示す為に，8 領域が隣接するモデルを用いて，単一計算時と並列計算時で計算結果が一致する事を確認した．

解析に用いるモデルを図 1 に概略を表 1 に示す．

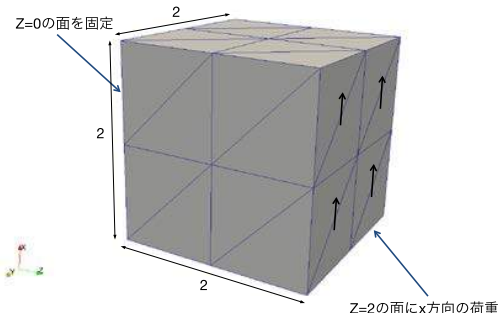


Fig 1. Analysis model

Table 1. Detail of analysis model

立方体の各辺の分割数	x	2
	y	2
	z	2
要素数		48
節点数		27
自由度数		81

図 2 は 1PE による計算結果で，図 3 は 8PE による計算結果を示している．

これらの計算結果は完全に一致しており，並列計算が正しく計算出来ている事が分かる．

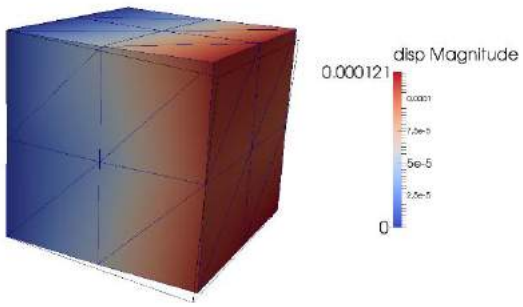


Fig 2. Analysis result (Case of 1PE)

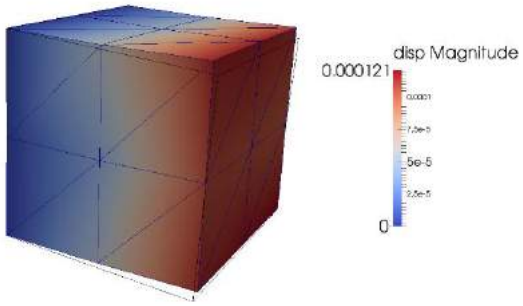


Fig 3. Analysis result (Case of 8PE)

なお，改良した並列アルゴリズムを用いた解析結果と理論解との比較検証も行っており，昨年度示した結果と同様の結果が得られる事を確認している．

これらの結果から，改良した本提案アルゴリズムの健全性を示す事が出来たと言える．

(3・1・4)並列化性能測定

図 4 に示すような，一辺の長さが 1 の立方体 z=0 面を完全固定とし，z=1 面にせん断方向に荷重を加えるモデル（以下，立方体せん断モデルと呼ぶ）について，各辺の分割数やプロセスへの分割を変えることにより，ストロング・スケーリングおよびウィーク・スケーリングによる並列性能測定を行った．解析条件については，表 2 に示した通りである．

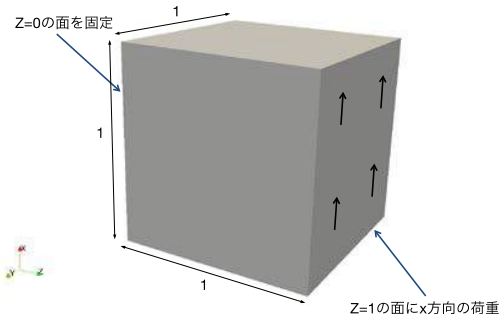


Fig 4. Analysis model

Table 2. Detail of analysis model

ヤング率	100,000
ポアソン比	0.2
単位面積あたりの荷重の大きさ	1
CG 法の収束判定	1.0e-6

なお, 並列性能の測定は, 東洋大学計算力学研究センター所有のクラスタ(CCMR クラスタ)を用いた. CCMR クラスタの各ノードのハードウェア概要は表 3 に示す通りである.

Table 3. Detail of CCMR cluster

CPU	Intel Core-i7 Extreme 980X
コア数	6 (HyperThreading: off)
動作周波数	3.33GHz
キャッシュ	12MB
メモリ	DDR3 PC-10600
容量	12GB (2GB x 6)

(3・1・4・1)ストロング・スケーリングによる性能測定

ストロング・スケーリングによる並列性能測定に用いたモデルの全体規模を表 4 に, また, 各並列数における各プロセスが担当する直方体ブロックの規模を表 5 に示す.

Table 4. Detail of whole analysis model for evaluation of strong scaling

立方体の各辺の分割数	96
要素数	5,308,416
節点数	912,673
自由度数	2,738,019

Table 5. Detail of each analysis model for evaluation of strong scaling

	各プロセスへの全体モデルの分割			各プロセスが担当する直方体ブロック					
				各辺の分割数					
#PE	x	y	z	x	y	z	要素数	節点数	自由度数
16	2	2	4	48	48	24	331,776	60,025	180,075
54	3	3	6	32	32	16	98,304	18,513	55,539
144	4	6	6	24	16	16	36,864	7,225	21,675
432	6	6	12	16	16	8	12,288	2,601	7,803

なお，昨年度に報告をした改良前のコードでは，144 並列以上の計算で，ストロング・スケーリングの性能が大幅に低下した．

そこで，144 並列用のデータを用いて，通信の種類による計算性能の違いを調査したところ，ブロッキング通信が最速となった．

ブロッキング通信を用いる場合は，通信の待ち時間が生じる為，ノンブロッキング通信と比較して高並列において並列性能の低下が起こりやすいと考えられるが，CCMR クラスタにおいては逆にノンブロッキング通信の性能低下が極めて大きい事が判明した．

この結果を受け，本検証では，通信にブロッキング通信のみを用いる設定で行うものとする．

改良前後の各コードを用いたストロング・スケーリングによる並列性能測定の結果をそれぞれ表 6, 7 に示す．

Table 6. Parallel efficiency before improvement

#PE	Elapsed [s]	#CG Iter	Speed-Up over 16PE		Parallel Efficiency
			Actual	Ideal	
16	605	1,228	1.00	1.00	100.0%
54	364	1,228	1.66	3.38	49.2%
144	526	1,228	1.15	9.00	12.8%
432	748	1,228	0.81	27.00	3.0%

Table 7. Parallel efficiency after improvement

#PE	Elapsed [s]	#CG Iter	Speed-Up over 16PE		Parallel Efficiency
			Actual	Ideal	
16	602	1,228	1.00	1.00	100.0%
54	299	1,228	2.01	3.38	59.7%
144	202	1,228	2.98	9.00	33.1%
432	231	1,228	2.61	27.00	9.7%

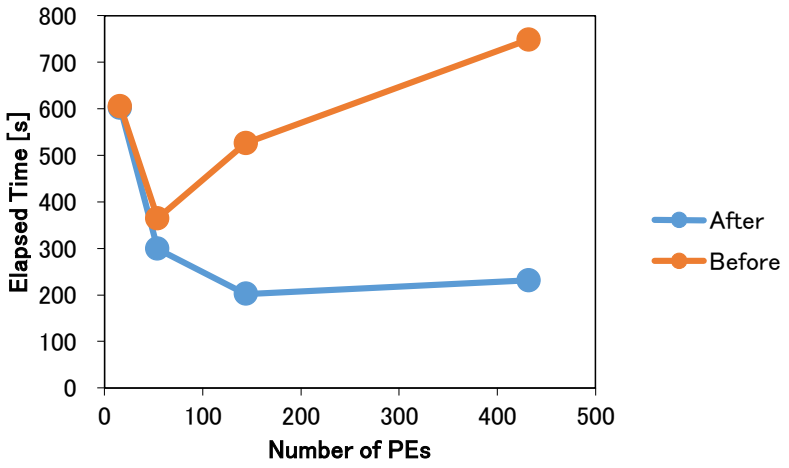


Fig 5. Comparison of computing time between before and after

また，並列数の増大に伴う計算時間の推移を図 5 に示す．改良前のコードでは，54 並列までは比較的良好な加速が得られているが，144 並列，432 並列では並列化効率が大幅に悪化し，十分な性能が得られていなかった．これに対して．改良後のコードでは，144 並列，432 並列での結果

が改良前と比較して大幅に改善されている. ただし, 並列化効率としては, 144 並列で 33.1%, 432 並列で 9.7%と, 決して十分とは言えない結果となっている.

改良後のコードについて, 計算時間の内訳を調査するために, 剛性行列を作成する efmm の計算時間と, CG 法による線型方程式の求解を行う関数 cg_mtd の計算時間を測定した結果を表 8 に示す. また, 並列数の増大に伴う計算時間の内訳の変化, 16 並列を基準とした加速度の推移, 並列化効率の推移をそれぞれ, 図 6, 図 7 及び図 8 に示す.

efmm（剛性行列作成）については良好な並列性能が得られていることが確認出来たが, cg_mtd（CG 法）については, やや物足りない性能となっている. これは, ブロッキング通信を用いることで, 生じる通信の待ち時間による影響が大きい為と推測される.

Table 8. Detail of computing time by new code

	Elapsed [s]			Speed-Up over 16PE			Parallel Efficiency		
#PE	All	efmm	cg_mtd	All	efmm	cg_mtd	All	efmm	cg_mtd
16	602	91	445	1.00	1.00	1.00	100%	100%	100%
54	299	27	204	2.01	3.37	2.18	60%	100%	65%
144	202	10	119	2.98	9.10	3.74	33%	101%	42%
432	231	4	121	2.61	22.75	3.68	10%	84%	14%

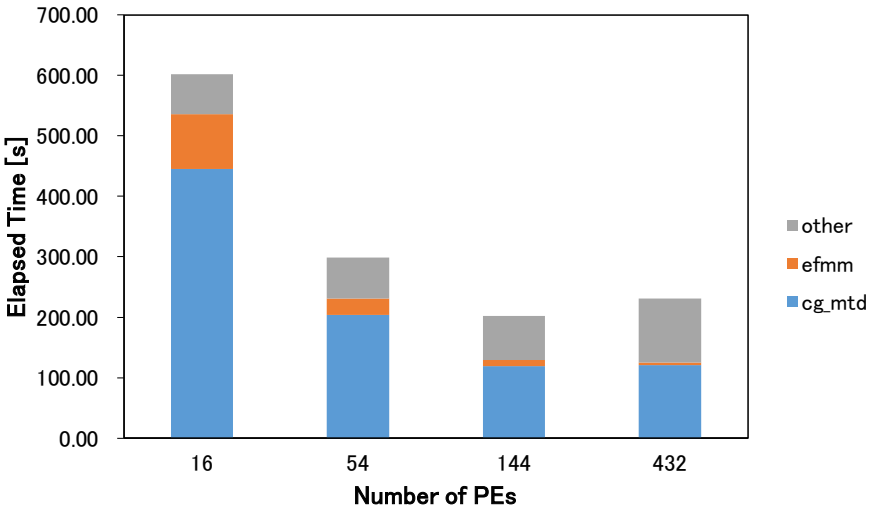


Fig 6. Classification of computing time by new code

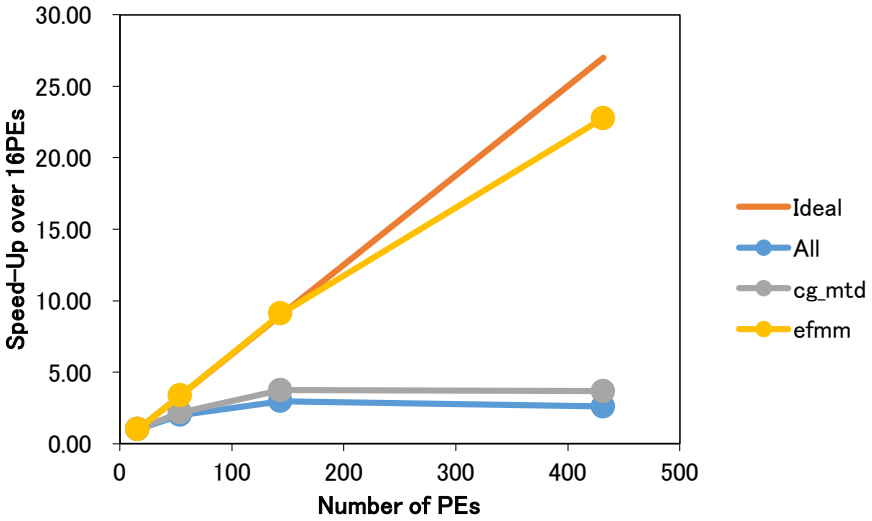


Fig 7. Change of accelerate ratio by new code compared with 16 PE

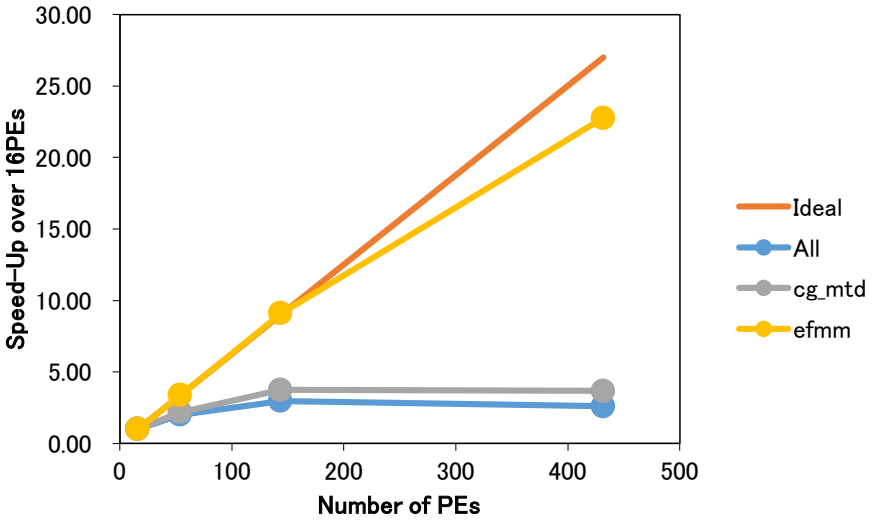


Fig 8. Change of parallel efficiency by new code

改良前後の各コードによるストロング・スケーリングにおける各プロセスのメモリ使用量の最大値，および，全ノードの総メモリ使用量をそれぞれ表 9 及び表 10 に示す．

また，これらのノード数の増加に伴う推移をそれぞれ図 9 及び図 10 に示す．改良前のコードでは，一定の規模の計算にも関わらず，並列数を 16 から 432 まで増やす事で総メモリ使用量が約 5 割増大していたが，改良後のコードでは，約 2 割の増大に抑えられている．

Table 9. Memory usage before tuning

#PE	Memory Max / Node [MiB]	Total Memory [GiB]
16	1,090	17.0
54	344	18.1
144	141	19.8
432	61	25.6

Table 10. Memory usage after tuning

#PE	Memory Max / Node [MiB]	Total Memory [GiB]
16	1,087	17.0
54	335	17.7
144	132	18.5
432	49	20.7

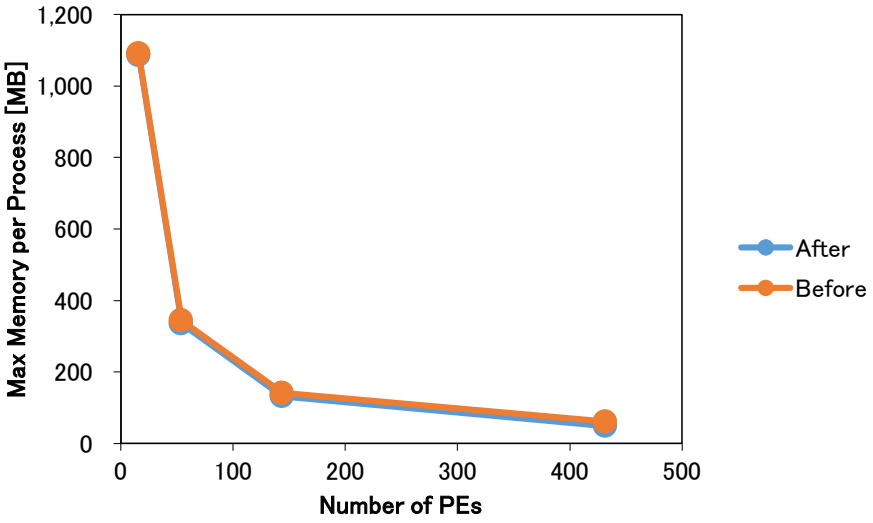


Fig 9. Change maximum memory usage compared with before and after

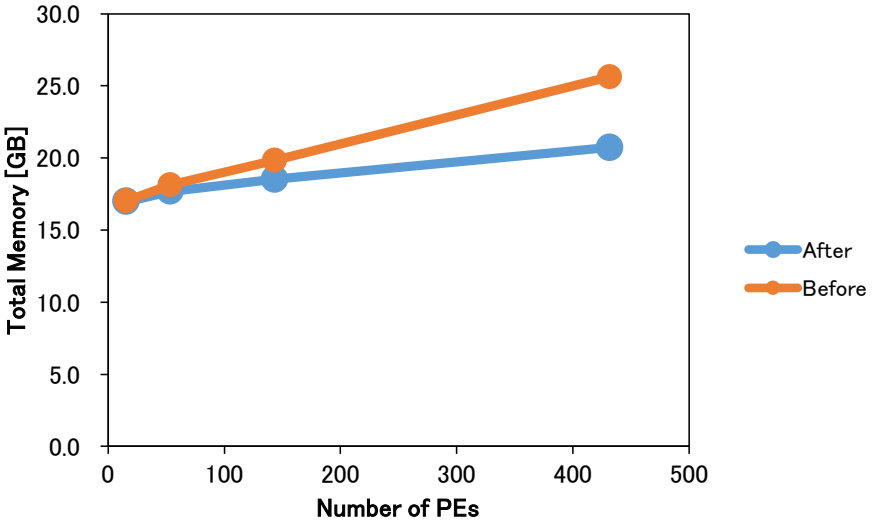


Fig 10. Change total memory usage compared with before and after

(3・1・4・2)ウィーク・スケーリングによる性能測定

ウィーク・スケーリングによる並列性能測定に用いたモデルの各プロセスが担当する直方体ブロックの規模を表 11 に，また，各並列数における全体モデルの規模と各プロセスへの分割の詳細を表 12 に示す．

Table. 11 Detail of analysis model for each domain

立方体の各辺の分割数	x	48
	y	48
	z	24
要素数		331,776
節点数		60,025
自由度数		180,075

Table. 12 Detail of whole analysis model

#PE	全体モデル				各プロセスへの全体モデルの分割		
	一辺の分割	要素数	節点数	自由度数	x	y	z
16	96	5,308,416	912,673	2,738,019	2	2	4
54	144	17,915,904	3,048,625	9,145,875	3	3	6
128	192	42,467,328	7,189,057	21,567,171	4	4	8
432	288	143,327,232	24,137,569	72,412,707	6	6	12

改良前後の各コードを用いたウィーク・スケーリングによる測定結果をそれぞれ表 13 および表 14 に示す. また, 並列数の増大に伴う計算時間の推移, CG 法の収束までの反復回数の推移, ノードあたり最大メモリ使用量の推移をそれぞれ図 11, 図 12 及び図 13 に示す.

改良によって計算時間が短縮した事, また, オーバーラップ数の削減によって, メモリ使用量に関するウィーク・スケーリング性能が改善した事が確認された.

Table 13. Results by previous code

#PE	Elapsed [s]	#CG Iter	Memory Max [MiB]
16	605	1,228	1,090
54	1,177	1,699	1,108
128	2,223	2,028	1,138
432	I/O があまりにも遅いため, 計算中止		

Table 14. Results by improved code

#PE	Elapsed [s]	#CG Iter	Memory Max [MiB]
16	602	1,228	1,087
54	1,060	1,699	1,087
128	1,779	2,028	1,087
432	I/O があまりにも遅いため, 計算中止		

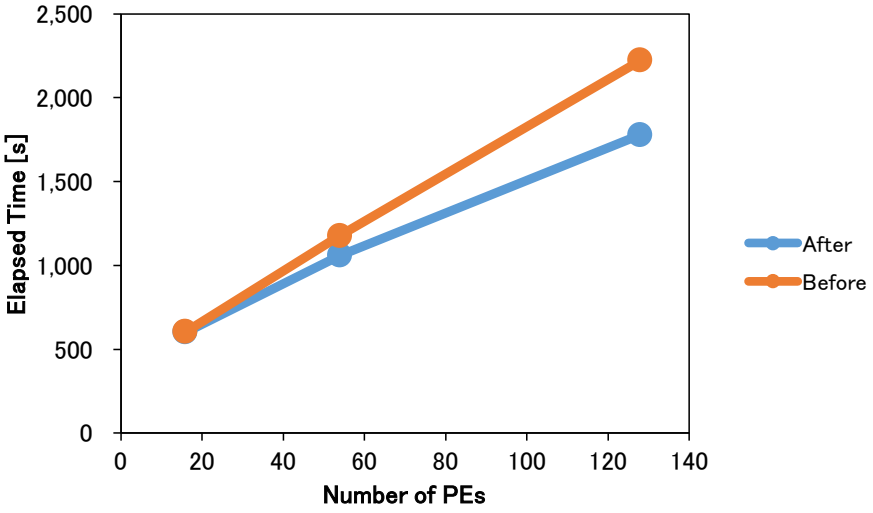


Fig 11. Change computing time compared with before and after

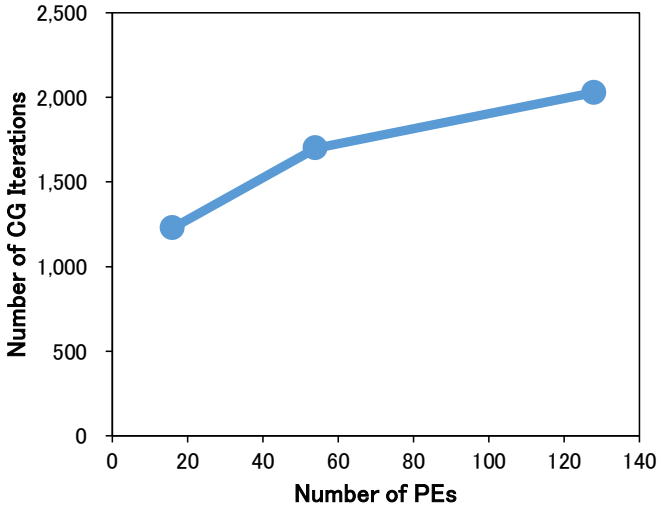


Fig 12. Number of iterations of CG method

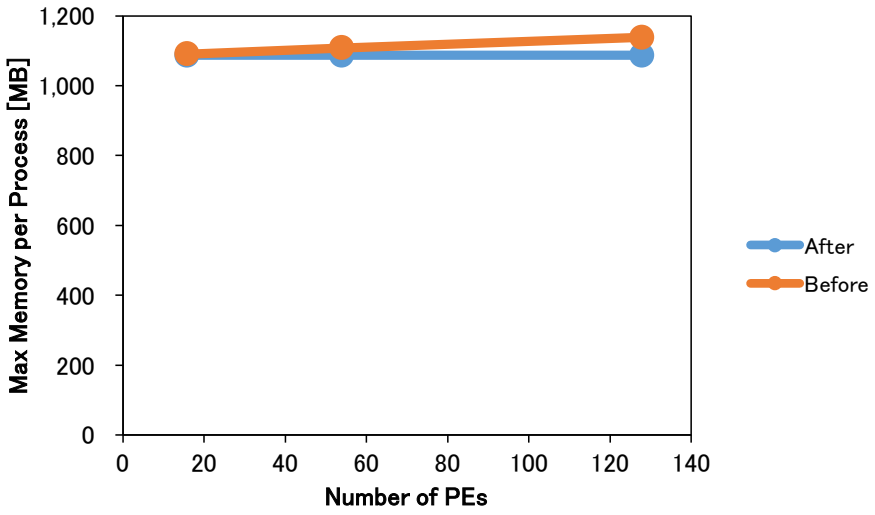


Fig 13. Change maximum memory usage compared with before and after

改良後のコードについて，計算時間の内訳を調査する為，剛性行列を作成する関数 efmm の計算時間と，CG 法による線型方程式の求解を行う関数 cg_mtd の計算時間を測定した結果を表 15 に示す．また，並列数の増大に伴う計算時間の内訳の変化，CG 法 1 反復あたりの計算時間の推移をそれぞれ図 14 及び図 15 に示す．

efmm（剛性行列作成）については良好な並列性能が得られている事が確認出来たが，cg_mtd（CG 法）についてはやや物足りない性能となっている．これは，ブロッキング通信を用いる事で，生じる通信の待ち時間による影響が大きい為と推測される．

Table 15. Detail of computing time by new code

#PE	Elapsed [s]			
	All	efmm	cg_mtd	cg_mtd/iter
16	602	91	445	0.362
54	1,060	89	868	0.511
128	1,779	89	1,114	0.549
432	I/O があまりにも遅いため，計算中止			

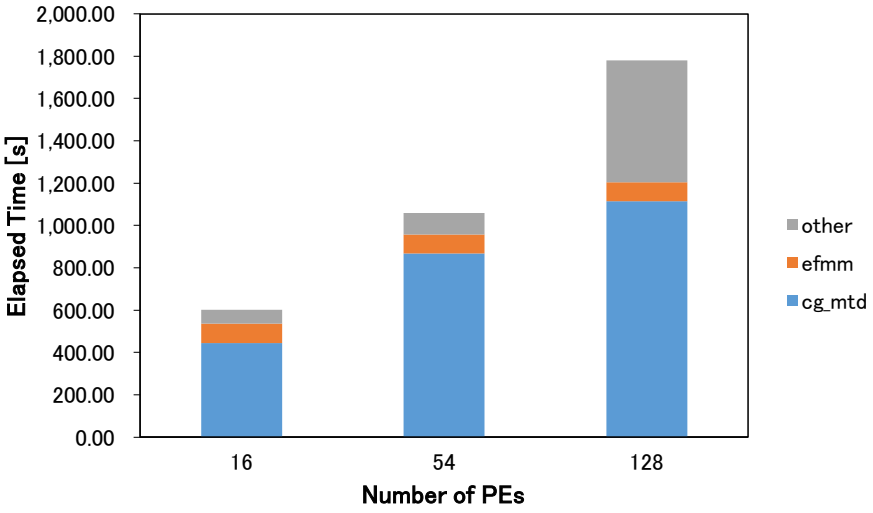


Fig 14. Classification of computing time by new code

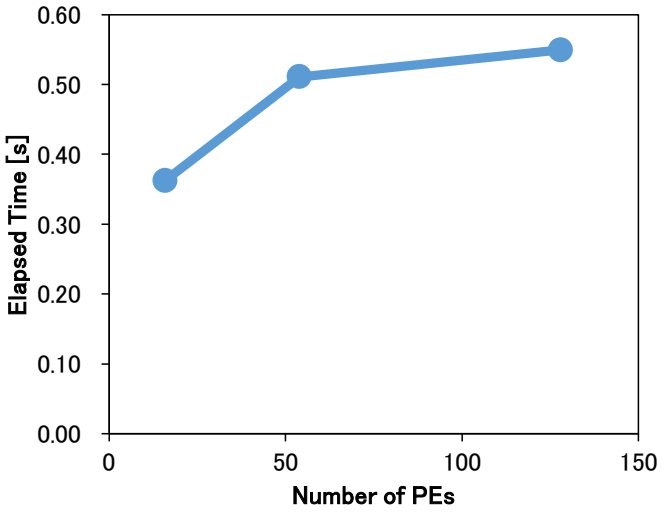


Fig 15. Computing time for each iteration of CG method by new code

(3・1・5)まとめ

並列 EFMM の為のアルゴリズムを改良し，且つ，通信方法をブロッキング通信とする事で，昨年度までのアルゴリズムでは，並列化性能が芳しくなかった CCMR クラスタにおいて，並列化性能が改善される事が分かった．

また，今回の改良により，ストロング・スケーリング，ウィーク・スケーリング共に，並列性能の改善が確認された．

この結果，CCMR クラスタにおいても，ある程度の規模の並列解析の実行をする事が可能とな

った.

なお, 今回の検証は, CCMR クラスタにおける検証のみを行ったが, 昨年度までに提案していたアルゴリズムで既に良好な並列化効率を得ていた京コンピュータで, ノンブロッキング通信による改善アルゴリズムを用いた今年度提案した並列化手法は, 非常に良好な並列化効率を得られる並列解析手法となる事が期待できる.

(3・2) 超大規模並列 EFMM の動的解析への拡張

流体-構造連成現象を数値解析により明らかにする為には, 構造解析に関しても動的解析へ拡張する必要がある.

提案しているEFMMを用いた動的解析への実装は, 本グループが既に行っているが, 本手法の並列解析への適用を行われていないのが現状である. また, EFMM のアルゴリズムおよび, 提案している並列 EFMM の解析アルゴリズムの特徴から, 並列 EFMM を動的解析に適用する為には, これらのアルゴリズムの特徴を考慮した手法を用いなければならない.

具体的には, 並列 EFMM を行う際に用いている高速化手法の一つである, Local elements cluster – by – Local elements cluster (Lec-by-Lec)処理を施し, 更に並列化アルゴリズムにより複数領域に節点がオーバーラップした場合にも対応できるように考慮した並列動的 EFMM のアルゴリズムを提案・実装をした.

本節では, 初めにLec-by-Lec 処理について述べ, その後, 並列動的 EFMM のアルゴリズムについて述べ, その後, 具体的な動的解析への拡張方法を述べる.

(3・2・1) Local elements cluster – by – Local elements cluster 処理について

EFMM 解析を行う場合も, 従来の FEM と同様, 連立一次方程式を解く必要がある. この連立一次方程式の解法は大きく分けて直接法と反復法に分けられるが, 代表的な解法である反復法の一種である CG 法（Conjugate Gradient Method）を用いる場合, 必要となる計算は, ベクトルのノルム計算と行列とベクトルの掛け合わせ（行列・ベクトル積）である. そのうち, 行列・ベクトル積の演算では, 本来, 左辺行列つまり全体剛性マトリックス を記憶しておく必要がある. しかし, 問題の大規模化による自由度の増加に伴い, 必要とされる記憶容量は増大する. その為, 近年の要素ベースの解析手法では, 記憶容量を削減するための方法として, Element-by-Element 処理を導入し, その記憶容量を削減する方法が取られるのが一般的である.

EFMM を用いた解析手法は, 従来の要素ベースの解析手法とは異なり, 節点ベースの解析手法であることから, 従来の Element-by-Element 処理を施すことは不可能である. しかしながら, 生成される全体剛性マトリックスは, 従来の FEM と同じサイズになる為, 全体剛性マトリックスを記憶しておくことは, 記憶容量の点からも, 計算時間の点からも避けるべきである.

そこで我々は, EFMM の為の記憶容量の増加を抑制, 計算時間の短縮を目的とした Local elements cluster-by-Local elements cluster(Lec-By-Lec)処理を提案した. ここで, Local elements cluster とは, 中心節点毎に生成される局所要素群の事を指す.

まず, Lec-By-Lec 処理の理解を容易にするため, 全体行列による計算を基に, 図 16 のモデルにおいて比較を行う. なお, 図 2 中の算用数字 1～4 は節点番号, a～d はそれぞれ中心節点 1～4 の局所要素群, $\bar{1}$～$\bar{4}$は局所要素内節点番号を表す.

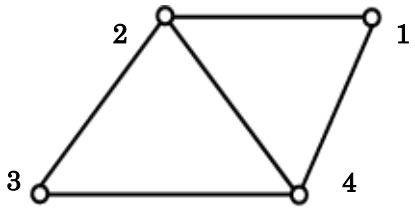


Fig 16. Finite element model

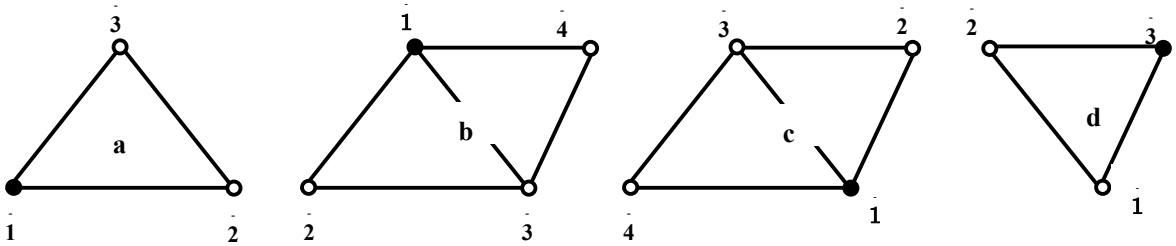


Figure 17. Local elements clusters

まず, 全体行列による計算について述べる. なお, 実際は 2 次元の場合は 2 自由度, 3 次元の場合は 3 自由度であるが, 簡単のため自由度は1と仮定した. 図 16 の有限要素モデルにおいて, 図 17 のように分割した各局所要素群での係数マトリックスは以下のようになる. なお, 図 17 中の黒丸は中心節点となる節点を表している.

$$\begin{bmatrix} a^{a}_{\bar{1}\bar{1}} & a^{a}_{\bar{1}\bar{2}} & a^{a}_{\bar{1}\bar{3}} \\ a^{a}_{\bar{2}\bar{1}} & a^{a}_{\bar{2}\bar{2}} & a^{a}_{\bar{2}\bar{3}} \\ a^{a}_{\bar{3}\bar{1}} & a^{a}_{\bar{3}\bar{2}} & a^{a}_{\bar{3}\bar{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^{b}_{\bar{1}\bar{1}} & a^{b}_{\bar{1}\bar{2}} & a^{b}_{\bar{1}\bar{3}} & a^{b}_{\bar{1}\bar{4}} \\ a^{b}_{\bar{2}\bar{1}} & a^{b}_{\bar{2}\bar{2}} & a^{b}_{\bar{2}\bar{3}} & a^{b}_{\bar{2}\bar{4}} \\ a^{b}_{\bar{3}\bar{1}} & a^{b}_{\bar{3}\bar{2}} & a^{b}_{\bar{3}\bar{3}} & a^{b}_{\bar{3}\bar{4}} \\ a^{b}_{\bar{4}\bar{1}} & a^{b}_{\bar{4}\bar{2}} & a^{b}_{\bar{4}\bar{3}} & a^{b}_{\bar{4}\bar{4}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^{c}_{\bar{1}\bar{1}} & a^{c}_{\bar{1}\bar{2}} & a^{c}_{\bar{1}\bar{3}} & a^{c}_{\bar{1}\bar{4}} \\ a^{c}_{\bar{2}\bar{1}} & a^{c}_{\bar{2}\bar{2}} & a^{c}_{\bar{2}\bar{3}} & a^{c}_{\bar{2}\bar{4}} \\ a^{c}_{\bar{3}\bar{1}} & a^{c}_{\bar{3}\bar{2}} & a^{c}_{\bar{3}\bar{3}} & a^{c}_{\bar{3}\bar{4}} \\ a^{c}_{\bar{4}\bar{1}} & a^{c}_{\bar{4}\bar{2}} & a^{c}_{\bar{4}\bar{3}} & a^{c}_{\bar{4}\bar{4}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^{d}_{\bar{1}\bar{1}} & a^{d}_{\bar{1}\bar{2}} & a^{d}_{\bar{1}\bar{3}} \\ a^{d}_{\bar{2}\bar{1}} & a^{d}_{\bar{2}\bar{2}} & a^{d}_{\bar{2}\bar{3}} \\ a^{d}_{\bar{3}\bar{1}} & a^{d}_{\bar{3}\bar{2}} & a^{d}_{\bar{3}\bar{3}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

これを，全体系に重ね合わせると以下のような全体行列となる．

$$\begin{bmatrix} a^a_{11}+a^b_{22}+a^c_{44} & a^a_{13}+a^b_{21}+a^c_{43} & a^a_{12}+a^b_{23}+a^c_{41} & a^b_{24}+a^c_{42} \\ a^a_{31}+a^b_{12}+a^c_{34} & a^a_{33}+a^b_{11}+a^c_{33}+a^d_{22} & a^a_{32}+a^b_{13}+a^c_{31}+a^d_{23} & a^b_{14}+a^c_{32}+a^d_{21} \\ a^a_{21}+a^b_{32}+a^c_{14} & a^a_{23}+a^b_{31}+a^c_{13}+a^d_{32} & a^a_{22}+a^b_{33}+a^c_{11}+a^d_{33} & a^b_{34}+a^c_{12}+a^d_{31} \\ a^b_{42}+a^c_{24} & a^b_{41}+a^c_{23}+a^d_{12} & a^b_{43}+a^c_{21}+a^d_{13} & a^b_{44}+a^c_{22}+a^d_{11} \end{bmatrix}$$

(2)

ここで， という行列・ベクトル積を考えると，以下のような演算となる．ただし，ここでは b=Ax という演算とする．

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^a_{11}+a^b_{22}+a^c_{44} & a^a_{13}+a^b_{21}+a^c_{43} & a^a_{12}+a^b_{23}+a^c_{41} & a^b_{24}+a^c_{42} \\ a^a_{31}+a^b_{12}+a^c_{34} & a^a_{33}+a^b_{11}+a^c_{33}+a^d_{22} & a^a_{32}+a^b_{13}+a^c_{31}+a^d_{23} & a^b_{14}+a^c_{32}+a^d_{21} \\ a^a_{21}+a^b_{32}+a^c_{14} & a^a_{23}+a^b_{31}+a^c_{13}+a^d_{32} & a^a_{22}+a^b_{33}+a^c_{11}+a^d_{33} & a^b_{34}+a^c_{12}+a^d_{31} \\ a^b_{42}+a^c_{24} & a^b_{41}+a^c_{23}+a^d_{12} & a^b_{43}+a^c_{21}+a^d_{13} & a^b_{44}+a^c_{22}+a^d_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

これにより，ベクトル が求まる．以上が全体行列による行列・ベクトル積の計算である．

この計算に Lec-By-Lec 処理を施す．まず，式(4)のように局所要素群毎の行列を作成し，それを記憶する．この際に，一般的な Element-by-Element 処理の場合と異なるのは，局所要素群を生成する要素数は中心節点毎に異なってくる点である．この部分はプログラミングを行う際には十分注意が必要となる．

次いで，行列・ベクトル積では，以下の演算を行う．まず，局所要素群毎の行列と局所要素群毎のベクトルを掛け合わせる．

$$\begin{bmatrix} b^a_1 \\ b^a_2 \\ b^a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^a_{11} & a^a_{12} & a^a_{13} \\ a^a_{21} & a^a_{22} & a^a_{23} \\ a^a_{31} & a^a_{32} & a^a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^a_1 \\ x^a_2 \\ x^a_3 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} b^b_1 \\ b^b_2 \\ b^b_3 \\ b^b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^b_{11} & a^b_{12} & a^b_{13} & a^b_{14} \\ a^b_{21} & a^b_{22} & a^b_{23} & a^b_{24} \\ a^b_{31} & a^b_{32} & a^b_{33} & a^b_{34} \\ a^b_{41} & a^b_{42} & a^b_{43} & a^b_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^b_1 \\ x^b_2 \\ x^b_3 \\ x^b_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} b^c_1 \\ b^c_2 \\ b^c_3 \\ b^c_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^c_{11} & a^c_{12} & a^c_{13} & a^c_{14} \\ a^c_{21} & a^c_{22} & a^c_{23} & a^c_{24} \\ a^c_{31} & a^c_{32} & a^c_{33} & a^c_{34} \\ a^c_{41} & a^c_{42} & a^c_{43} & a^c_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^c_1 \\ x^c_2 \\ x^c_3 \\ x^c_4 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} b^d_1 \\ b^d_2 \\ b^d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^d_{11} & a^d_{12} & a^d_{13} \\ a^d_{21} & a^d_{22} & a^d_{23} \\ a^d_{31} & a^d_{32} & a^d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^d_1 \\ x^d_2 \\ x^d_3 \end{bmatrix}$$

ただし，

$$\begin{bmatrix} x_1^a \\ x_2^a \\ x_3^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_1^b \\ x_2^b \\ x_3^b \\ x_4^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_1^b \\ x_2^b \\ x_3^b \\ x_4^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_1^d \\ x_2^d \\ x_3^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_4 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \tag{5}$$

である. 続いて, 以上の要素ごとに得られたベクトルを全体系に重ね合わせることにより, 行列・ベクトル積は完了する.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^a + b_2^b + b_4^c \\ b_3^a + b_1^b + b_3^c + b_2^d \\ b_2^a + b_3^b + b_1^c + b_3^d \\ b_4^b + b_2^c + b_1^d \end{bmatrix} \tag{6}$$

以上の式(6)が式(1)とは等価になる. Lec-by-Lec 処理においては, 行列を全体系で重ね合わせるのではなく, 局所要素群毎のベクトルを計算し, それを全体系に重ね合わせる. つまり, 自由度を n とすると, 全体行列での計算では, n×n の行列が必要であったのに対して, 本提案手法においては, $n_{lecn} \times n_{lecn} \times n_{lecn}$ の配列で良いことになる.

これは, 大規模になればなるほど有利となる. これは使用メモリーの点でも全体剛性マトリックスを記憶する必要が無く, 局所要素群毎の剛性マトリックスを記憶すれば良いので非常に効率的である.

図 18 に Lec-by-Lec 処理の健全性を示すために行った, 簡単な片持ち梁を用いた数値解析結果である.

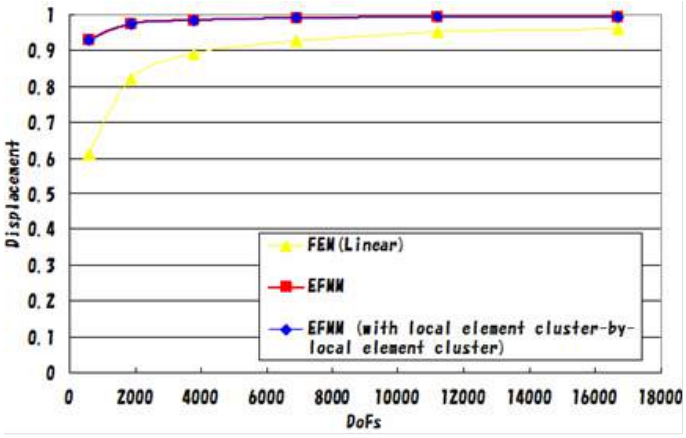


Fig 18. Accuracy comparison with FEM, EFMM and EFMM with present method

解析結果は Lec-by-Lec 処理の有無に関わらず全く同じ結果を得られていることが分かる. この結果は, Lec-by-Lec 処理の解析精度面での健全性を証明出来た事を意味している.

次に, 本数値計算における EFMM 解析を 3 つのプロセスに分けた際の解析全体の計算時間を図 19 に示す. 図中横軸に解析モデルの自由度数を, 縦軸に計算時間全体における各プロセスの計算時間の割合を示している. つまり, 図は解析モデルの自由度の増加と解析プロセスの割合の推移の関係を示している.

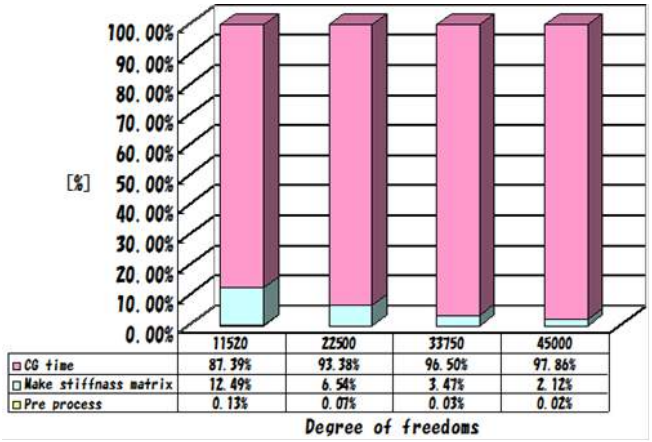


Fig 19.　Percentage of computation time of each process in EFMM analysis.

具体的な解析プロセスは, 節点データ等の解析条件を入力するプリプロセス, 全体剛性マトリクスを生成するプロセス, そして連立一次方程式を解く為のプロセスの3つに分類をした.

図 19 から明らかなように, 解析の際に最もネックとなっているのは, 連立方程式を解くためのソルバー部分である事が分かる. わずか 1 万自由度程度の解析を行う場合にも, 解析全体で連立一次方程式の開放の為に必要となる時間は, 解析全体の 87%を占めている. なお, 連立一次方程式の解法の為に必要となる時間は, 解析に用いるモデルの自由度数が上がれば上がるほど, 解析全体の大部分を占めていく傾向にある事が分かる.

この問題に対して, Lec-by-Lec 処理を施すことで, このプロセスに要する時間をどの程度抑制することが可能となるのかについての検証結果を示す.

検証は先程示した数値解析と同様の解析を Lec-by-Lec 処理を施して行い, その際に必要となった解析時間を Lec-by-Lec 処理を施す前に必要であった時間で正規化した.

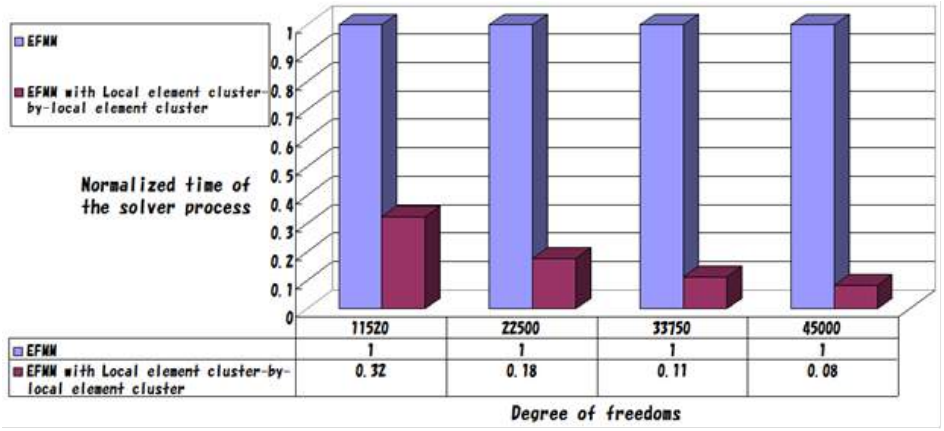


Fig 20. Computation time comparison with EFMM and EFMM with present method

図 20 から明らかなように, Lec-by-Lec 処理を施す事により, 連立一次方程式の解法に必要となる解析時間は大幅に減少させることが可能であることが分かる.

さらに, この解析時間の削減量は, 解析対象の自由度が高くなれば高くなるほど, 多くなる傾向になることが分かる. つまり, 解析対象が大規模化すればするほど, 本提案手法の効率は高くなり, より有効的な手法となる事を意味している.

更に, 本提案手法には, 従来の element-by-element 処理と同様, 収束が速い方程式に変換してから反復解法を行う前処理を施す事が可能である. 図 21 は, この前処理方法として, 左辺行列の対角成分を前処理行列として対角スケーリング法を用いて, 同様の解析を行った際の速度向上率を示したものである.

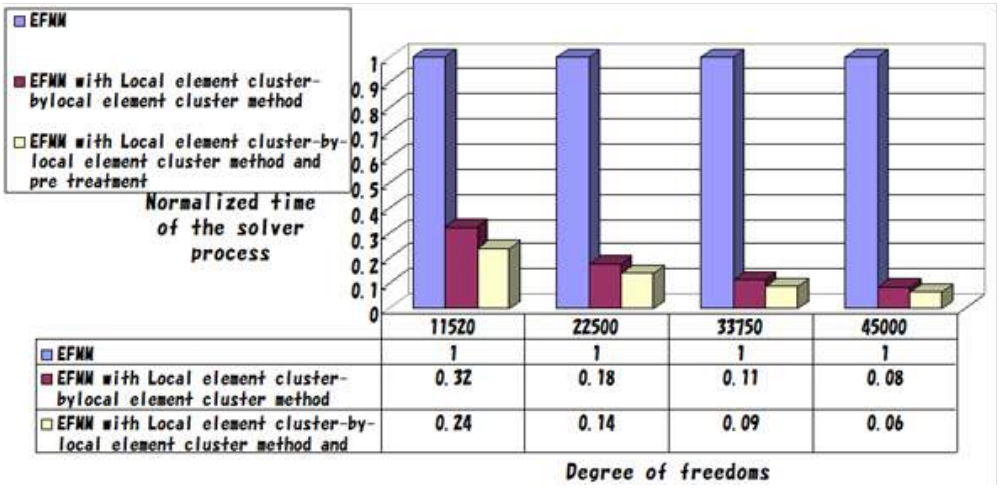


Fig 21. Computation time comparison with EFMM and EFMM with present method

図 21 が示すように，Lec-by-Lec 処理に前処理を施す事により，連立一次方程式の解法に要する時間は更に短縮される．

これらの結果から，本論文で提案した Lec-by-Lec 処理により，EFMM 解析プロセス中において最もネックとなる連立一次方程式の解法部分に要する時間を大幅に削減することが可能となることが示された．特に，本提案手法に対角スケーリング法等の前処理法を導入することでその速度向上率は，更に高くなることも分かる．

この結果から，従来の EFMM 解析では，わずか 11,520 自由度問題程度で，解析全体の 85%以上の解析時間を占めていた CG 法による連立一次方程式の解法時間を，本提案手法と前処理とを組み合わせることで，4 分の 1 程度に抑えることが可能となることが明らかとなった．この CG 法の為の時間は，解析対象が大規模化すればするほど，よりその効果が顕著になる事は自明である．

つまり，Lec-by-Lec 処理は近年の大規模化が進む数値解析分野において EFMM 解析をより短時間で行う為，非常に効果的且つ必要不可欠な手法である．

また，使用メモリーについても，当然全体剛性マトリクスを記憶する必要がなく，細かい局所要素群の局所剛性マトリックスを記憶するのみであるので，こちらの観点からも非常に優れた手法といえる．

(3・2・2) 超大規模並列 EFMM コードの動的解析への拡張

本項では，前項で述べた，Lec-by-Lec 処理を施した局所剛性マトリックスを考慮した並列 EFMM を動的問題へ拡張する際に用いる方法について述べる．

対象とする問題は，剛性マトリックス[K]が時間によって変化する非線形問題であるので，微小区間 Δt で剛性マトリックスがほぼ等しいと仮定すると，

$$\begin{aligned}[M]\{\ddot{U}_n\}+[K(t_n)]\{U_n\}&=\{F_n\}\\ [M]\{\ddot{U}_{n+1}\}+[K(t_n)]\{U_{n+1}\}&=\{F_{n+1}\}\end{aligned} \tag{7}$$

上 2 式の差から，増分表現をすると，

$$[M]\{\Delta\ddot{U}_n\}+[K(t_n)]\{\Delta U_n\}=\{\Delta F_n\} \tag{8}$$

ここに，

$$\begin{aligned}\{\Delta U\}&=\{U_{n+1}\}-\{U_n\}\\ \{\Delta\ddot{U}\}&=\{\ddot{U}_{n+1}\}-\{\ddot{U}_n\}\\ \{\Delta F\}&=\{F_{n+1}\}-\{F_n\}\end{aligned} \tag{9}$$

微小区間 Δt で，加速度が一定であると仮定すると，加速度は次式で示される．

$$\{\ddot{U}(t)\}=\frac{1}{2}\left(\{\ddot{U}_n\}+\{\ddot{U}_{n+1}\}\right) \tag{10}$$

上式を積分することにより，速度，変位が次式のように得られる．

$$\begin{aligned}\{\dot{U}(t)\}&=\{\dot{U}_n\}+\int_{t_n}^{t}\{\ddot{U}(t)\}dt=\{\dot{U}_n\}+\frac{1}{2}\left(\{\ddot{U}_n\}+\{\ddot{U}_{n+1}\}\right)(t-t_n)\\ \{U(t)\}&=\{U_n\}+\int_{t_n}^{t}\{\dot{U}(t)\}dt=\{U_n\}+\{\dot{U}_n\}(t-t_n)+\frac{1}{4}\left(\{\ddot{U}_n\}+\{\ddot{U}_{n+1}\}\right)(t-t_n)^2\end{aligned} \tag{11}$$

上式より，時刻 n+1 の速度と変位は次式になる．

$$\begin{aligned}\{\dot{U}_{n+1}\}&=\{\dot{U}_n\}+\frac{1}{2}\left(\{\ddot{U}_n\}+\{\ddot{U}_{n+1}\}\right)\Delta t\\ \{U_{n+1}\}&=\{U_n\}+\{\dot{U}_n\}\Delta t+\frac{1}{4}\left(\{\ddot{U}_n\}+\{\ddot{U}_{n+1}\}\right)\Delta t^2\end{aligned} \tag{12}$$

増分変位で表すと，

$$\begin{aligned}\{\Delta\dot{U}\}&=\{\ddot{U}_n\}\Delta t+\frac{1}{2}\{\Delta\ddot{U}\}\Delta t\\ \{\Delta U\}&=\{\dot{U}_n\}\Delta t+\frac{1}{2}\{\ddot{U}_n\}\Delta t^2+\frac{1}{4}\{\Delta\ddot{U}\}\Delta t^2\end{aligned} \tag{13}$$

また，式(8)から

$$\{\Delta\ddot{U}\}=-[M]^{-1}[K(t_n)]\{\Delta U\}+[M]^{-1}\{\Delta F\} \tag{14}$$

(13)式と(14)式を変位増分{ΔU}について解けば，

$$\{\Delta U\}=\left[\overline{K}\right]^{-1}\{\Delta\overline{F}\} \tag{15}$$

ここに,

$$\begin{aligned}\left[\overline{K}\right] &= \left[K(t_n)\right] + \frac{4}{\Delta t^2}\left[M\right] \\ \left\{\Delta\overline{F}\right\} &= \left\{\Delta F\right\} + \left[M\right]\left(\frac{4}{\Delta t}\left\{\dot{U}_n\right\} + 2\left\{\ddot{U}_n\right\}\right)\end{aligned} \tag{16}$$

式(15)から，{ΔU}が求まれば，式(13)から次式により速度増分，加速度増分が求められる.

$$\begin{aligned}\left\{\Delta\ddot{U}\right\} &= \frac{4}{\Delta t^2}\left\{\Delta U\right\} - \frac{4}{\Delta t}\left\{\dot{U}_n\right\} - 2\left\{\ddot{U}_n\right\} \\ \left\{\Delta\dot{U}\right\} &= \frac{2}{\Delta t}\left\{\Delta U\right\} - 2\left\{\dot{U}_n\right\}\end{aligned} \tag{17}$$

以上の計算を繰り返す事によって，時々刻々の応答を求める.

さて，式中の質量マトリックスの取り扱いについて，並列動的 EFMM を用いた解析を行う際には，以下のアルゴリズムを適用する.

全体の質量を M とする場合，下記のように表す.

$$\frac{M}{NoEs} = m \tag{18}$$

本研究では，質量マトリックス[M]を全体集中質量マトリックスとするので，下記の式(19)ように表し，式(16)のように，[K]マトリックスと{ΔF}ベクトルを変形する.

$$\begin{bmatrix} m & & & & & & & & & \\ & m & & & & & & & & \\ & & m & & & & & & & \\ & & & m & & & & & & \\ & & & & \ddots & & & & & \\ & & & & & \ddots & & & & \\ & & & & & & m & & & \\ & & & & & & & m & & \\ & & & & & & & & m & \\ & & & & & & & & & m \end{bmatrix} \tag{19}$$

この時, Lec-By-Lec 処理を施し, 且つ, 我々が提案している並列 EFMM のアルゴリズムを用いると, 上式のように単純に質量を当分布する事が出来ないので, 各局所要素クラスターの集中質量マトリックスを算出する場合には, 各節点がクラスター内で寄与するカウントし, 下記の式で各節点の質量を算出する.

$$\left(\frac{1}{3}\times\frac{m}{l}\right)\times n \tag{20}$$

ここで,

l : 全体のモデル中で寄与する回数(2 次元:3 回, 3 次元:4 回)

m: 各要素の質量

n: カウント数

で, ある.

すると, Lec-by-Lec 処理型の集中質量マトリックスは下記のようになる.

$$\begin{bmatrix}
\left(\frac{1}{3}\times\frac{m}{l}\right)\times n & & & & & & & & \\
& \left(\frac{1}{3}\times\frac{m}{l}\right)\times n & & & & & & & \\
& & \left(\frac{1}{3}\times\frac{m}{l}\right)\times n & & & & & & \\
& & & \ddots & & & & & \\
& & & & \ddots & & & & \\
& & & & & \ddots & & & \\
& & & & & & \ddots & & \\
& & & & & & & \left(\frac{1}{3}\times\frac{m}{l}\right)\times n & \\
& & & & & & & & \left(\frac{1}{3}\times\frac{m}{l}\right)\times n \\
& & & & & & & & & \left(\frac{1}{3}\times\frac{m}{l}\right)\times n
\end{bmatrix} \tag{21}$$

上記のように, Lec-By-Lec 処理型集中質量マトリックスを用いることで, 我々が提案した並列 EFMM アルゴリズムを動的解析に用いる事が可能となる.

なお, 解析精度の健全性の評価として, 単一解析時と同様の結果が得られる事を確認している.

(3・2・3) まとめ

前述のように, Lec-by-Lec 型の処理を施し, 且つ, 我々が提案している並列化手法による中心節点や衛星節点のオーバーラップを考慮したうえで, 質量マトリックスを変形させる事で, 並列 EFMM を動的解析へ拡張する事が可能となった.

(4) 平成 28 年度進捗状況

今年度は前章で述べた通り，下記の 2 つのテーマについて主に研究を行った．

1. 超大規模並列 EFMM の高速化
2. 超大規模並列 EFMM の動的解析への拡張

超大規模並列 EFMM の高速化に関しては，前年度までに明らかになっていた問題をある程度改善する事が出来，更なる高速化が可能となった．

本稿で示したような，簡単な試験しか行っていないが，1 億自由度規模の超大規模構造解析においても，十分に適用可能であり，従来の手法より様々な，利点を有することから，今後本手法により様々な問題の解明が行われる事が期待できる．

また，超大規模並列 EFMM の動的解析への拡張においては，我々が提案している並列 EFMM のアルゴリズムと，EFMM の高速化手法の一種である Lec-By-Lec 型の処理を施した際にも適用する事が可能となるアルゴリズムを提案・実装した．

本手法の導入により，超大規模並列動的 EFMM による 1 億自由度規模の超大規模動的構造解析も容易に行う事が可能となったと言える．

(5) まとめ

本稿は，2017 年 1 月に設定された原稿の締め切りの関係から，研究の目的として挙げていた本提案手法と，「新規実験・計測グループ」が行った実験結果との比較検証までを示す事が出来なかった．

しかしながら，本年度までに我々が得た研究成果である，EFMM の超大規模並列化及び，動的解析用のアルゴリズムの確立により，SUPG/PSPG 安定化 FEM との組み合わせによる，解析精度の健全性が保証されている格子法のみの手法である本手法は，実験により得られた流体-構造連成現象の発生メカニズムを数値解析により明らかにする事は十分可能となる事が期待できる．

また，応用研究として，本解析手法を用いる事で，今後は未知の流体-構造連成現象を解明していく為のアプローチも十分可能であると考えられる．

より，高速な流体-構造連成解析手法を確立する為には，並列 EFMM の複数節点がオーバーラップする問題を考慮した領域分割手法が確立されれば，既存の並列解析手法における最大のボトルネックは解消される．

この問題を解消する事で，より幅広く，且つ，社会のニーズに答えられるような現象を対象とした研究に役立つ事が期待できる事から，我々はこの問題の解消が，今後の研究の重要な課題の一つであると考えられる．

3.1.2. 深層学習を用いた連成解析結果予測

(1) 目標・計画

本研究では，流体ー構造連成解析を行い，自己組織化マップ(Self-Organizing Map : SOM)[1]などの機械学習技術を用いて解析データの分類を行い，解析条件から解析結果を予測することができる技術を開発することを目的としている．分類と予測の両方を包括するmnSOM(modular network SOM)を用いて学習を行う．このときモジュールはMLP(Multi Layer Perceptron)を用いる．しかし，連成問題は非線形性が非常に強く，mnSOM での予測には限界があった．そこで，深層学習(Deep Learning)の考えを取り入れた予測技術の開発を目指す．これはGoogleを始め各企業や研究所でも注目されている技術で，画像認識や音声認識において，既存の技術よりも遥かに良い性能が得られることが知られている[2][3]．

本研究の予測技術を確立すると，解析の大まかな結果を得ることで，詳細な解析をするための手がかりが提示できると考える．このことにより，機器や構造物設計における全体の解析時間を短縮できると期待できる．

今年度は，mnSOMのモジュールにDeep Learningの技術を組み込んだDeep mnSOMを開発した．また，既存のMLPやmnSOMとDeep Learningによる予測結果を比較検討し本研究の総括とする．

(2) 意義・国際社会との比較

現在，解析対象の複雑化や大規模化から，計算時間がボトルネックにある．並列計算機を使うのは当然で，GPUを用いた解析方法も数多く見られる．しかしながら，計算量は膨大で，1ケース解くのに数日から数週間かかることもある．設計技術者は目的の解析結果を得るのに何度も解析を繰り返す必要がある．そこで，予めある程度の解析結果が分かれば試行回数を削減し，設計における全体の解析時間を短縮できると考えられる．ある事象を数値解析を行わないで解析結果を予測するという試みは，全く新しいものであり，学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており，国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考える．

(3) 研究内容

Deep Learningは入力次元の大きいデータ（ビッグデータなど）をマイニングしたり分類，学習したりする．また，強い非線形性を持つ問題の学習にも非常に効果的であり，流体ー構造連成解析など

の複雑な問題にも応用可能と期待できる.

本研究で使用する Deep Learning 技術は Deep Autoencoder (Deep AE)である. これは Autoencoder (AE)を複数重ねたネットワーク構造を持ち, 出力層では通常の Back Propagation (BP)法を用いて学習する.

Deep AE は各層の AE は独立で処理を行い, 上位の層(入力層側の層)の中間層を下位の層(次の層)の入力層として用いることで, ネットワーク全体が結合する(Fig.1). AE の各層は入力層と同じ次元の出力層を持ち, 入力ベクトルを再現する出力ベクトルを学習によって獲得する. このときに中間層を入力層より小さいサイズにすることにより, 入力データを圧縮し, 入力データを再構成するための最低限必要な特徴量を抽出することができる. この特徴抽出により, 大規模データを効率良く学習することが可能となる.

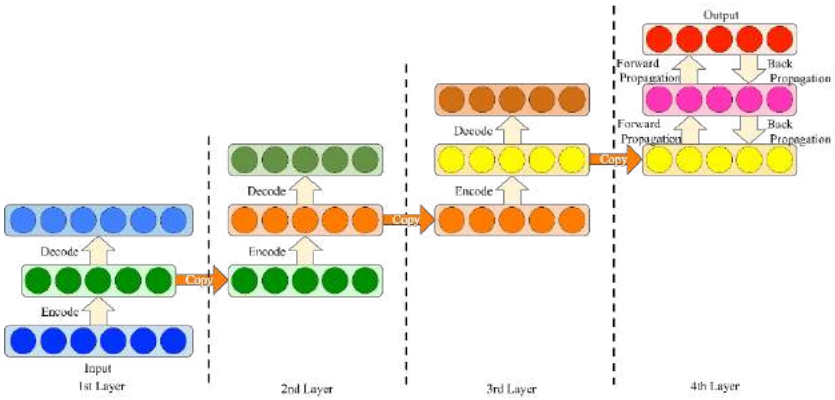


Fig.1 Example of Deep Autoencoder

この Deep Learning 手法では, 上記の AE 部の学習を pre-training と呼び, 教師なし学習による入力データの圧縮, 特徴抽出を目的とした. 教師あり学習部分を fine-tuning と呼び, 主に BP 法を用いて教師データの入力ベクトルと出力ベクトルを補間する. この fine-tuning は最終層でのみ行う場合や, ネットワーク全体で行う場合など, 多種多様に処理される. 最終層でのみ fine-tuning を行う場合は, 事前の層で必要な特徴が抜き出せると仮定して, 入力ベクトルを圧縮し, 最終層の BP 法を効率良く行うための方法である. 一方, ネットワーク全体を fine-tuning する方法は, AE は MLP の結合荷重の適切な初期値を得るために用い, MLP の学習を効率化させる. どちらの方法も学習は効率化され, 単純な MLP 学習より学習精度の大きな向上が見込める.

構築した Deep AE を用いてベンチマーク問題である MNIST[4]の手書き数字認識を行った. MNIST のデータは 28×28pixels の画像で, 6 万枚の学習データと 1 万枚の検証データが用意されたデータセットである. 1画像に 0~9 の数字が描かれていて, この数字の画像に対応している 0~9 のいずれかの数字がラベルとしてリンクされている. データセットの画像の一例を Fig.2 に示す.

使用したネットワーク構成は{784-500-300-10}の 4 層構造で，それぞれ，入力層のニューロン 784，中間層を 500, 300 ニューロン，出力層を 10 ニューロンとした(Fig.3)．入力層から 784-500-300 までの 3 層を AE で圧縮し，500-300-10 の 3 層で BP 法を用いて教師あり学習を行った．ここでは，学習の可否を判断したいので，学習データ，検証データ共に 1,000 枚で学習を行った． 学習後に検証データを用いて正答率を求めた結果を Table 1 に示す．また，同じ学習データの3層型 MLP の結果も同様に示す．Table 1 より，Deep AE が明らかに予測精度を向上させていることがわかる．また，用いるニューロン数は MLP より少なくても高い予測精度を実現することわかった．これは AE による入力次元の圧縮による特徴量の抽出と，BP のための初期重みの最適化が行われた結果だと考えられる．

Fig.2 Figures of Handwritten character

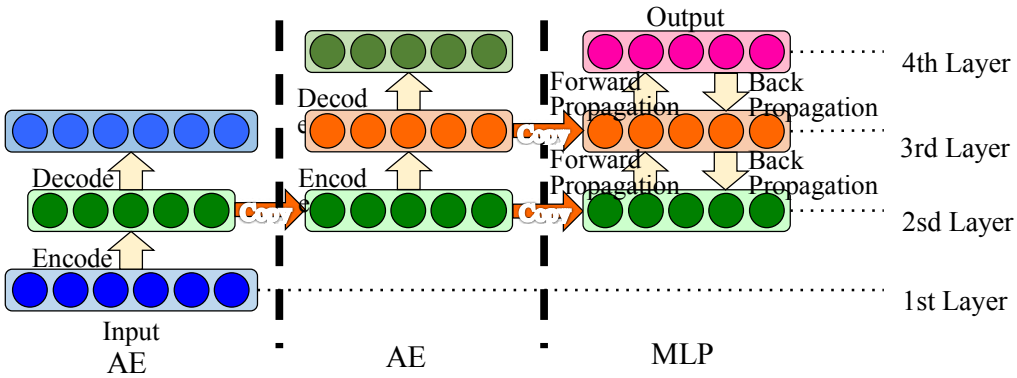


Fig.3 Schematic of Deep AE for MNIST

Table 1 Recognition Result of MNIST

	MLP	Deep AE
Recognition Rate	73.0%	85.1%
Number of Neurons (hidden)	1500	800

次に，本研究の予測対象である流体ー構造連成解析について述べる．今回は簡単のため流体解析の移動境界問題を解くこととした．移動境界問題であっても，流体ー剛体連成といえ，解の複

雑性，非線形性は十分にある．解析対象は 2 次元円柱の振動を対象とする(Fig.4)．円柱は流れと垂直方向にバネダンパモデルで弾性支持され，流体解析より得られた流体力を用いて速度 Verlet 法により変位量を求める．また，メッシュスムージングによりメッシュ制御を行った．解析には ADVENTURE_Fluid[5]を ALE 法用に書き換えて用いる．メッシュは四面体要素を用いる．ADVENTURE_Fluid の四面体用コードは P1-P1 要素をベースとして SUPG/PSPG 法による安定化が施されている．解析モデルのメッシュを Fig.5 に示す．メッシュは円周方向に 256 点，法線方向に 64 点とした．解析は定常状態になるまで計算した．

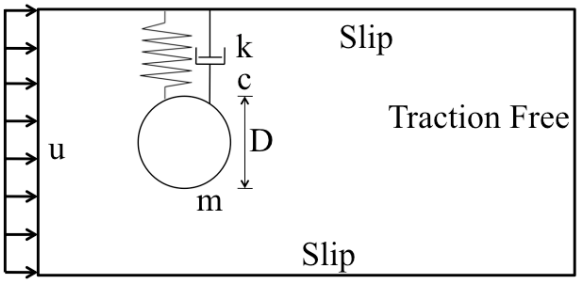


Fig.4 Schematic of Analysis Model

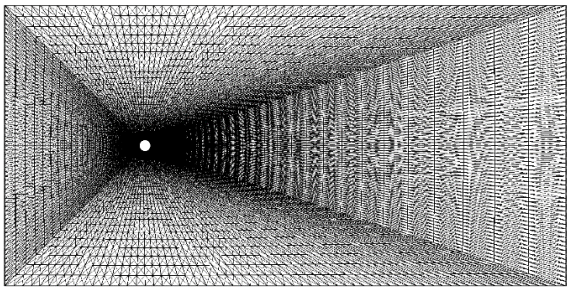


Fig.5 Mesh of Analysis Model

教師データとして，解析の初期条件から流体力や円柱の変位量を導くようなデータセットを作成した．機械学習の入力項目と出力項目を Table 2 に示す．データセットは学習用に 48 データ，検証ように 22 データを用意した．データセットのそれぞれの値は最大値と最小値を用いて 0~1 で正規化した．学習には上記に示した Deep AE を用いて学習させた．用いた Deep AE の概略図を Fig.6 に示す．ここでは，入力側から 6-50-50-50-5 の 5 層のネットワークになっている．AE は入力側の 2 層で用いて，出力側 3 層で BP 法による教師あり学習を行う．また，3層型 MLP と mnSOM との予測精度を比較した．MLP は中間層を 900 ニューロンと設定した．mnSOM はモジュール数を 10×10 の 100 とし，モジュールは中間層ニューロン数を 50 とした 3 層型 MLP とした．学習係数は 0.01 とし，繰り返し学習回数は 10,000 回とし，全手法で同条件に設定した．学習後のネットワークに検証

データを入力し得られた予測誤差を Table 3 に示す. 予測誤差は機械学習が出力した予測値と解析値(真値)との差の割合で, 次式で定義する.

$$error = \sum_{O}\left(\frac{|predict - correct|}{correct}\right) \tag{1}$$

$$average = \frac{\sum_{n} error}{N} \tag{2}$$

$$\underset{n}{maximum} = \underset{n}{average}(error) \tag{3}$$

ここで, O は出力ベクトルの次元, *predict* は機械学習の予測値, *correct* は解析値である. *average* は誤差の総和をデータセット数 N で割った値で, 検証データにおける予測誤差の平均値を示している. Maximum は検証データ内で最大の予測誤差を示す.

Table 2 Inputs and Outputs for Machine Learning

Inputs	Symbols [Unit]	Ways
Mass of Cylinder	m [kg]	0.5 1.0
Spring Constant	k [kg/s]	0.5 1.0
Dumper	c [kg/s^2]	0.0 0.01
Reynolds Number	Re [-]	100 500 1000
Natural Frequency of Cylinder	f_N [Hz]	-
Outputs	**Symbols [Unit]**	**Ways**
Amplitude of Cylinder	Ac [m]	-
Frequency of Cylinder	f_C [Hz]	-
Maximum Coefficient of Lift	C_L [-]	-
Strouhal Number	St [-]	-
Average Coefficient of Drag	C_D [-]	-

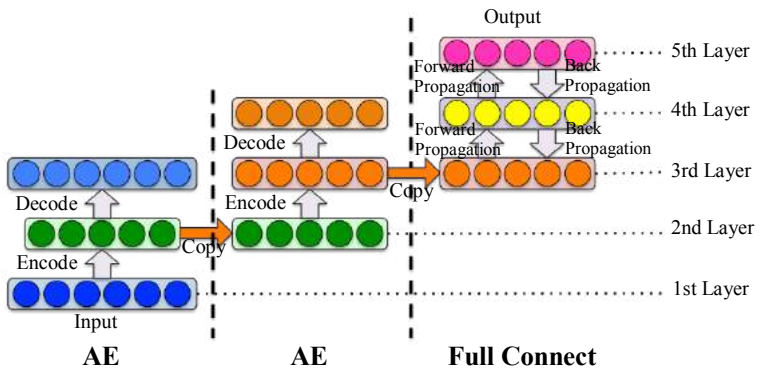


Fig.6 Schematic of Deep AE for FSI Analysis

Table 3 Error Rates of learning result

	MLP	mnSOM	Deep AE
Average error	73.5 %	51.3 %	53.1 %
Maximum error	230.3 %	214.1 %	227.3 %
Number of Neurons (hidden)	900 neurons	50 × modules (5000 neurons)	50 × Layers (150 neurons)

Table 3 より，平均誤差は MLP より mnSOM と Deep AE は明らかに改善された．最大誤差は 3 つの手法で大きな差異は見られなかった．最大誤差を記録する検証データはどの手法でも同じデータで見られ，問題特有の可能性も考慮する必要があると考えられる．一方で，中間層に使用するニューロン数と予測誤差を比較すると，MLP は 900 個のニューロンを用いても予測精度は他の手法と比べ低かった．問題の非線形性が強いことにより，MLP では予測精度が上がらなかったと考えられる．mnSOM は平均の予測精度が一番高くなった．これは入力ベクトルをマップ上に分類し，入力に適したモジュールを選択的に用いることで，良い予測精度が得られたと考えられる．しかし，モジュール数を十分に用意する必要がり，その分中間層ニューロン数は増大する．Deep AE は3手法の中で最も少ないニューロン数で mnSOM と同等の予測精度を得られた．階層を深くすることで MLP は解けないような非線形性の強い問題に対応でき，pre-training による入力ベクトルからの特徴量抽出により mnSOM のような予測精度を実現できることが確認できた．今回用いた Deep AE の階層はさほど深くなく，ハイパーパラメータのチューニングも行っていない比較的単純な構成のネットワークである．より深い階層を構築しハイパーパラメータのチューニングを行うことで予測精度を向上させることが可能であると考えられる．また，今回の入力項目は初期条件であったが，メッシュ情報やその物理量を入力に与えるなどの学習の方法も考えられる．このような比較的連続性のある情報を扱う場合 CNN (Convolutional Neural Network)を用いて学習したり，時系列を考慮できる RNN(Recurrent Neural Network)を用いて学習したりすることができ，パラメータを用いる学習よりも情報量が増し，予測精度が上がる場合もあると考えられる．

次に，mnSOM のモジュールを Deep AE に変更した Deep mnSOM を提案する．mnSOM による入力ベクトルの分類を行い Deep AE モジュールを選択的に用いることで予測精度が向上すると考えられる．今回は前述のベンチマーク問題 MNIST を用いて，学習精度を検証する．前述と同様，学習データ，検証データにそれぞれ 1,000 データを用いる．手書き数字認識のカテゴリ数は 10 なので，5×5 の mnSOM 用のマップを用いた．mnSOM を持ちるためモジュールのニューロン数を少し削減し，代わりに階層を1層深くした 784-256-64-16-10 のネットワークとした．入力層側から 4 層を AE で pre-training し，MLP の初期重みを決定し，ネットワーク全体を BP 法で学習させる．このとき，

SOM 同様に近傍学習法に基づき学習係数を決定する. 近傍学習の方法は 3 通り考えられ, それぞれを以下に示す.

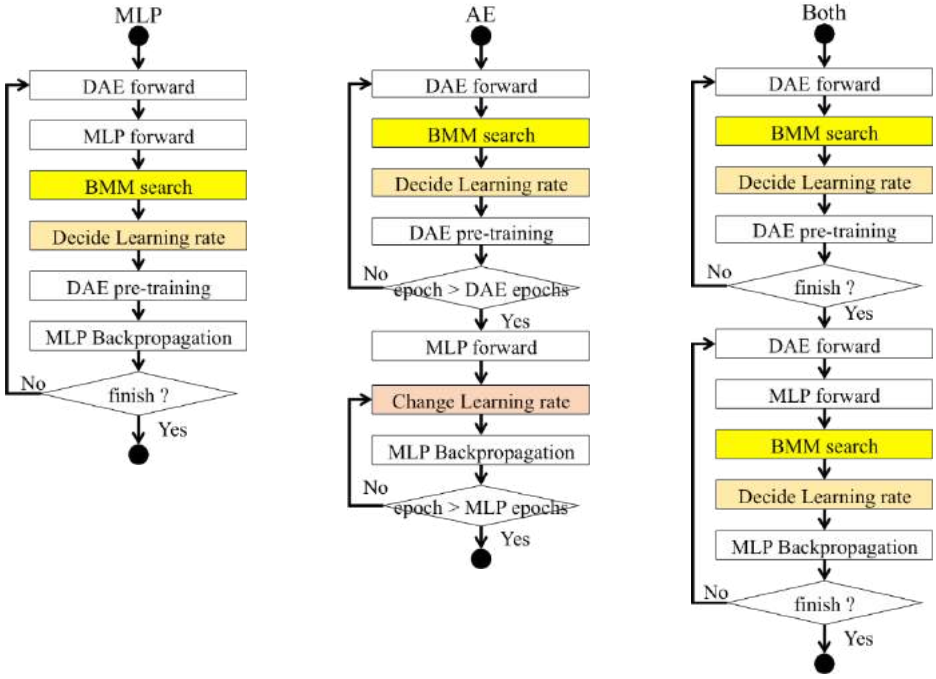
Case 1. 学習の1ステップごとに MLP の出力を求め, MLP の出力値を基に各モジュール間で近傍関数を設定する方法. (MLP)

Case 2. Pre-training においての入力ベクトル再現度を基に各モジュール間で近傍関数を設定する方法. (AE)

Case 3. Case 2 のように Pre-training においての入力ベクトル再現度を基に AE を近傍学習させ, Case 1 のように MLP の出力を基に MLP を近傍学習させる方法. (Both)

Case 1 は構造が一番単純で, 実装しやすく, mnSOM の考え方に忠実であるが, 入力の分類, 特徴抽出における近傍学習の効果が得られるかはわからない. Case 2 は pre-training で近傍学習係数を設定する方法であるため, 入力ベクトルの分類, 特徴抽出において効果が発揮されると期待できるが, pre-training の反復回数と fine-tuning の反復回数が異なると, MLP 学習時に近傍関数が使いまわせなく, なんらかの補間処理が必要となる. Case 3 は Case 1, Case 2 をそれぞれ独立に扱い, それぞれの場合で近傍関数を設定する方法である. それぞれのフローチャートを Fig.7 に示す. フローチャート中の BMM search を行う箇所がそれぞれで異なっていることがわかる.

今回は構成が一番単純な Case 1 を実装した. 学習は入力層側から 4 層を AE による pre-training を行い, MLP の初期重みを決定し, ネットワーク全体を BP 法で学習する. このとき SOM 同様に近傍学習法に基づき, 学習係数を決定する. 近傍学習は MLP の出力と正解のラベルとの平均二乗誤差を求め, 最小のモジュールを勝者モジュール(Best Matching Module: BMM)として, 勝者モジュールとその近傍のモジュールでネットワークの重みの修正を行う. 近傍学習の影響範囲を表す近傍半径は 3(勝者モジュールから半径 3 の距離)を初期値として, 学習ステップが進むにつれて単調減少させていき, 最終的には 1(勝者モジュールのみ)となるように設定した. mnSOM の学習の繰り返し回数は 1,000 回とし, モジュールの学習回数は 50 とした. つまり, フローチャートでいう BMM search が 1,000 回行われ, 各 mnSOM 学習ステップで決定された学習係数で 50 回 pre-training と fine-tuning を繰り返す.



(a) MLP ver. (Case 1)　　(b) AE ver. (Case 1)　　Both ver. (Case 3)

Fig.7 Flowchart of Deep mnSOM Algorithm

学習は途中であるが，学習成果が表れ始めてきている．Table 4 にその経過を示す．Table 4 は Deep mnSOM のモジュール出力の誤差を表示し，赤字は誤差が最小となるモジュール(勝者モジュール)の誤差値である．検証用データの“7”と“9”が似ている画像となるので近くに勝者モジュールが配置されていることがわかる．また，微妙な違いを認識していて，“7”が入力されたときには“9”で勝者に選ばれるモジュールの誤差は大きくなり，逆もまた同様である．“2”に関しては左下に勝者モジュールが配置され，“7”，“9”とは異なるものとして認識し，なおかつ遠い位置に配置することでマップ空間上でも“7”，“9”とは全くの別物として認識していることがわかる．また，SOM の特徴である，競合学習により勝者モジュールの周りのモジュールの誤差値も小さくなっている傾向が見られることから，判別しにくい画像が入力されても，ある程度の推論が可能であると期待できる．このことから，Deep mnSOM は手書き数字をマップ上に分類することができ，その数字がなんであるのかを認識することができると考えられる．

Table 4 Prediction errors of Deep mnSOM (epochs=60)

Handwritten Digit “2”

7.377	7.276	1.148×10	1.612×10	1.323×10
6.262	3.112	9.614	1.257×10	1.612×10
4.921	5.148	5.901	8.828	9.899
2.530	8.023	2.726	5.311	7.605
0.815	2.267	8.702	6.407	5.739

Handwritten Digit “7”

7.541	4.077	7.059	1.190×10^{-7}	1.232×10
8.042	1.370	1.320×10	1.245×10	1.612×10
1.477×10	7.652	5.634	1.022×10	1.035×10
7.546	1.475×10	4.700	6.135	8.887
1.191×10	1.245×10	1.498×10	1.105×10	7.863

Handwritten Digit “9”

3.174	2.77	4.681	1.611×10	5.683
4.204	9.605	4.397	1.040×10	1.612×10
1.172×10	4.602	5.425	1.416×10	9.989
5.797	1.221×10	4.564	7.446	8.092
1.478×10	1.311×10	1.007×10	5.227	7.875

Deep mnSOM の学習はニューロン数の増大により，非常に計算時間がかかるため，本誌での学習後の予測誤差をまとめることは間に合わなかったが，学習傾向にあることは明らかである．

(4) 平成 28 年度進捗状況

Deep Learning 技術を用いた機械学習コードを作成し，ベンチマーク問題が解けることを確認した．同技術を用いて連成解析結果の予測を行い，従来手法である 3 層型 MLP と mnSOM との比較を行った．また，Deep mnSOM を提案し，その開発を行い，ベンチマーク問題を試行した．学習の途中ではあるが，学習傾向にあることが確認できた．

連成解析結果の予測精度は現段階では実用性には欠けるが，Deep mnSOM を持ちることで，より高精度な予測ができると期待できる．

(5) まとめ

本研究は，流体ー構造連成問題の解析結果を予測することで，複雑な解析を用いないである程度の妥当的な結果を導くことで，解析者を扶翼し，詳細な解析を行うための手助けを行うことができるシステムの開発を目的としている．その手段として，機械学習を用いて解析結果予測を行ってき

た. しかし, 従来手法である 3 層型 MLP や mnSOM では十分な予測精度が得られなかった. そこで, 深層学習(Deep Learning)技術に着目し, AE を用いた多階層型ネットワークを用いて解析結果予測を行った.

C 言語による Deep AE コードを作成し, ベンチマーク問題である MNIST の手書き数字認識を試行し, 十分な学習精度が得られることを確認した. また, 3 層型 MLP と予測精度の比較も行い, 明らかに Deep AE の方が高い予測精度を有することが確認できた.

次に連成解析を行った. 解析対象は 2 次元剛体円柱の振動問題とした. ADVENTURE_Fluid を移動境界問題に適応するように書き換えて解析を行った. メッシュはスムージングにより制御した. 解析を 70 回行い, 学習用データと検証用データを作成した.

作成した教師データを用いて 3 層型 MLP, mnSOM, Deep AE でそれぞれ学習させ, 予測誤差を求めた. 結果として mnSOM と Deep AE は同程度の予測誤差であったが, MLP よりは明らかに予測精度は向上していた. 用いたニューロン数は Deep AE が最小となり, mnSOM が最大であった. このことより, 階層を深くすることでネットワークの自由度が増し, 非線形問題への対応力が向上したと考えられる.

mnSOM のモジュールを Deep AE に置き換えた Deep mnSOM を作成した. これは mnSOM の入力ベクトルの分類を行い, 各モジュールに教師データを分配することで Deep AE の学習精度を向上させるというものである. このコードは Python 言語で作成し, Keras[6]を用いて機械学習を実装している. 今回はベンチマーク問題を解いている. 学習には非常に多くの時間がかかるが, 途中結果から学習傾向にあることがわかった.

この Deep mnSOM を用いて解析結果予測を行うことで, より高い精度の予測が可能となると期待でき, 解析者をサポートするシステムになると考えられる.

参考文献

[1] T.Kohonen, ”Self-Organizing Maps”, pringer-Verlag, 1995.

[2] Quoc V. Le, Marc’Aurelio Ranzato, Rajat Monga, Matthieu Devin, Kai Chen, Greg S. Corrado, Jeff Dean and Andrew Y. Ng, “Building High-level Features Using Large Scale Unsupervised Learning”, Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning, 2012.

[3] A.Krizhevsky, I.Sutskever, G.E.,Hinton, “ImageNet Classifi- cation with Deep Convolutional Neural Networks”

[4] Yann LeCun, “The MNIST database of handwritten digits”, http://yann.lecun.com/exdb/mnist/ (2017/01/19 アクセス)

[5] ADVENTURE Project: http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/ (2017/01/19 アクセス)

[6] Keras: https://keras.io/ (2017/01/19 アクセス)

3.1.3. 粒子法による粒子間インタラクションに着目した大規模数値シミュレーション

(1) 目標・計画

自由表面を扱う流体現象について粒子法（MPS 法）による大規模数値シミュレーションを行っている. 特に, 物体と流体の相互作用（FSI）に着目し物体および流体を形成する粒子間のモデル構築と検証を行っている.

2016 年度は応用例として, ミルククラウンとコップの縁から流れ落ちる液だれの現象について, 粒子法（MPS）による大規模並列計算を行い, 実験映像と比較して計算の妥当性について検証を行った.

(2) 意義・国際社会との比較

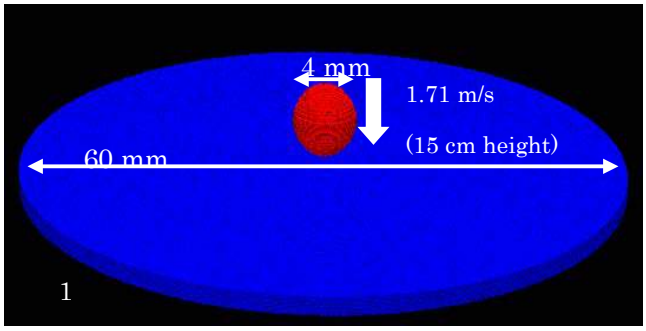
既存の数値流体シミュレーションにおいては, ほとんどが物体と液体の境界は滑りなし条件で解かれてきた. しかし, 材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する. 例えば, 落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ（飛沫）においては, 同じ質量・体積で落下位置が同じ球であってもアクリル球とゲル球ではスプラッシュの形状や大きさが異なる[1]. つまり, 粒子間のインタラクション（この場合は壁と液体粒子間）に物性を表すモデルを導入して計算しないと実現象とかい離することを示唆している. 本研究では, そのような物体の表面性状の違いを数値シミュレーションに導入するために, 物体と流体の境界条件に表面性状の効果を記述するモデルを提案する.

(3) 研究内容

(i) ミルククラウンの大規模数値シミュレーション

ミルククラウンと呼ばれる水滴が落下し液相に衝突したときに発生するスプラッシュ現象を再現した. ミルクウランは, 表面張力が支配的な物理現象である. 本研究では, 流体解析に, MPS 陽解法を用い, 表面張力モデルに近藤らの粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力モデルを用いた.

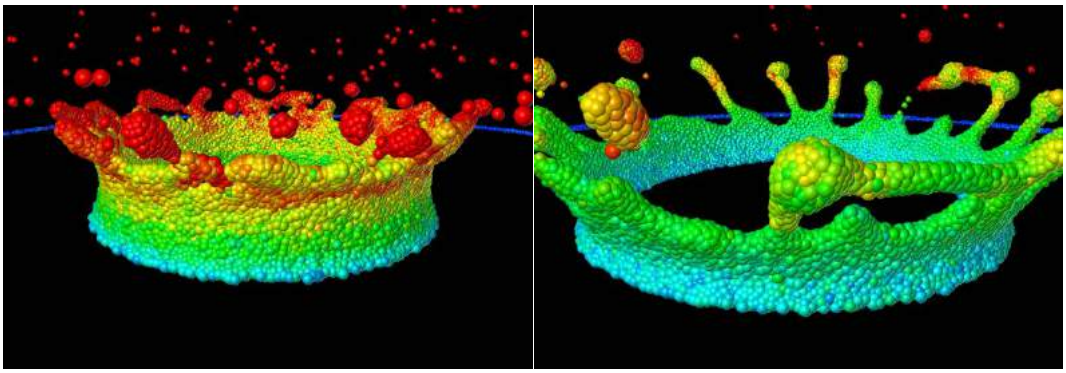
計算点である粒子の直径を変化させ, 直径 4 mm 液滴を, 高さ 15 cm から落下させ, 深さ 1mm の液体層に衝突させる解析を行った（Fig.1）. 物性値は水とした. である. 本節では, 計算点である粒子直径を 0.2 mm, 0.1mm, 0.05mm, 0.025mm と変化させて, どの程度の粒子の直径が適切であるかを確認した.



Kinematic viscosity	1.7×10^{-6} m^2/s
Surface tension contact angle	30°
Surface tension coefficient	0.04 N/m
Density	1030 kg/m^3

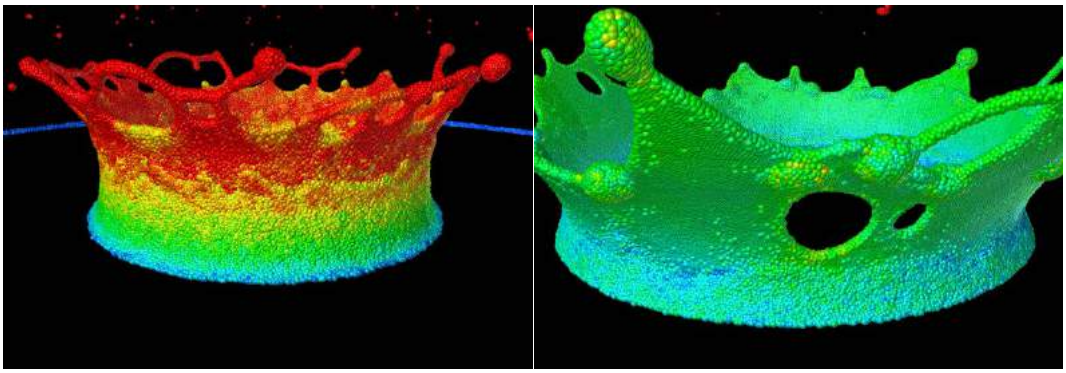
Fig.1 ミルクを想定したミルククラウンの計算条件

Fig.2 から Fig.5 に示すように，粒子の直径 0.2 mm，0.1 mm，0.05 mm，0.025 mm の解析結果であり，色は速度の大きさである．Fig.4 の粒子直径 0.05 mm の解析や Fig.5 の粒子直径 0.025 mm の解析では，ミルククラウンの発生に成功している．Fig.4 の粒子直径 0.1 mm の解析では，クラウンの側面の壁に穴が開くなどして，非現実的な現象が発生している．これは，粒子の直径が大きすぎて，クラウンの側面の壁の厚さ方向に十分な数の粒子を配置することができなくなったためである．Fig.3 の粒子直径 0.2 mm の解析では，粒子を繋ぎとめておくに必要な表面張力を発生させることができなくなってしまっている．以上の結果から，最低でも粒子直径 0.05 mm，可能なら粒子直径 0.025 mm の解析を行うことが求められることが分かった．



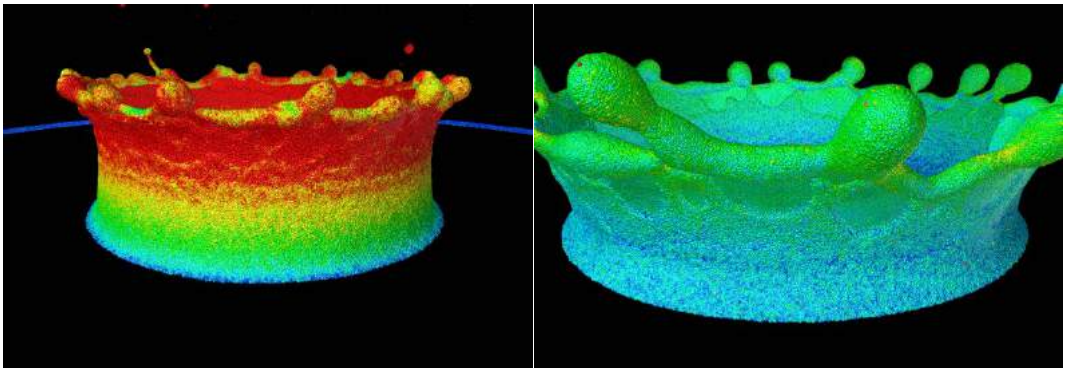
(a) 10 ms　　(b) 24 ms

Fig.2 粒子直径 0.2 mm の解析結果



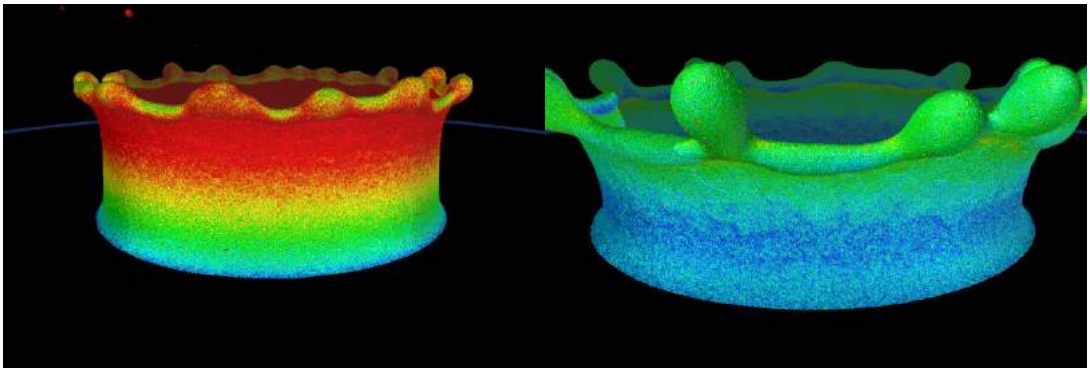
(a) 10 ms　　(b) 24 ms

Fig. 3 粒子直径 0.1 mm の解析結果



(a) 10 ms　　(b) 24 ms

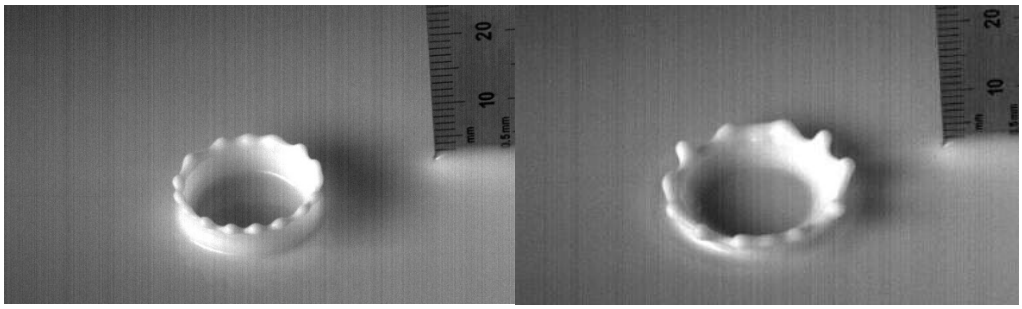
Fig.4 粒子直径 0.05 mm の解析結果



(a) 10 ms　　(b) 24 ms

Fig.5 粒子直径 0.025 mm の解析結果

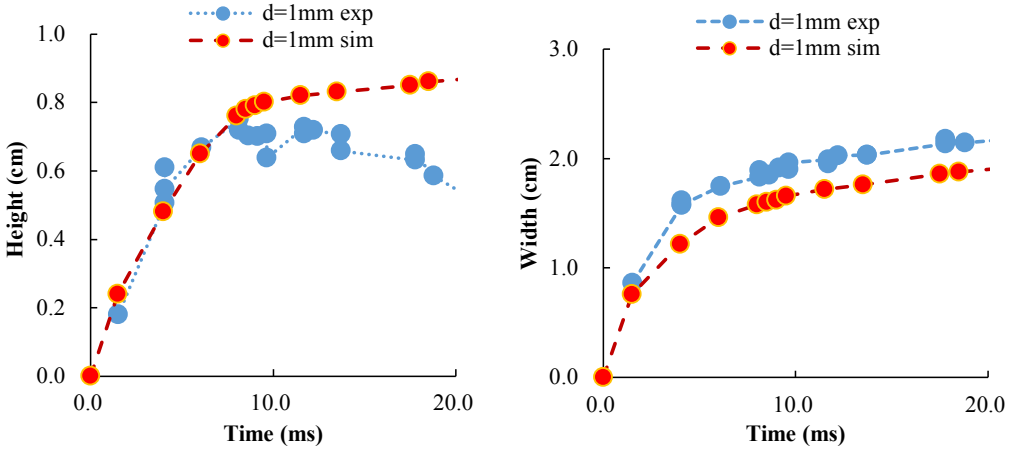
実験映像との比較については，Fig.6 にハイスピードカメラを用いた実験によるミルククラウン形成のスナップショットを示すが，Fig.5 のスパイクや全体形状としては似た結果が得られている．スパイクの数については，実験では 4 回撮影したミルククラウンにおいて平均で 13.5 本であったが，Fig.4 では 14 本，また Fig.5 では 12 本であり，ほぼ同じ本数となった．



(i) 10 msec　　(ii) 20 msec

Fig 6.　ハイスピードカメラを用いたミルククラウンの実験映像．

Fig.6(i)はクラウンの根元における幅（直径）について，Fig.6(ii)はミルククラウンのスパイクの高さについて，我々の解析結果と郡司ら[2]の実験結果との比較を示す．



(i) width of milk crown　　(ii) height of spike

Fig.7　実験結果[2]と計算結果の比較　(depth d = 1mm).

(ii)　容器口から流れ落ちる液だれの大規模数値シミュレーション

水や調味料などの液体容器の設計時において液だれの発生を抑制するための考慮は重要な課題である．本研究では容器口の縁付近の形状やその表面性状の差異による流体挙動への影響

を調査している. 液だれの現状の研究結果として, Fig.8 に実験結果と Fig.9 に数値シミュレーション結果の一例を示す.

実験に関しては, 3 次元プリンタにより縁の形状と表面性状の異なる容器を作成し, それらの容器から液体が流れ出る際の縁付近の流れを撮影した. 容器は, 開口部径 60mm, 深さ 50mm, 厚み 4mm で, 縁の断面形状は矩形であり, 素材は PLA 樹脂(ポリ乳酸)である. 表面はなめらかに削ってある. 容器を水平に固定し, 内部にスポイトにより水を注入し容器から流出した液体の挙動をハイスピードカメラによって撮影を行った.

また作成した容器から液体が流れ出る際と同様な条件下における数値シミュレーションを行い実験映像との比較を行った. 本研究では界面張力モデルとして近藤ら[3]の粒子間ポテンシャル力モデルを用いる. 粒子間ポテンシャル力は界面張力の要因となる分子間力を表現するもので MPS 法における各粒子へ近傍粒子との相互作用力を追加するものである. 実験容器において液垂れ挙動が確認された. また数値シミュレーションにおいて, 流線の湾曲と液滴の付着の液体挙動が確認できた.

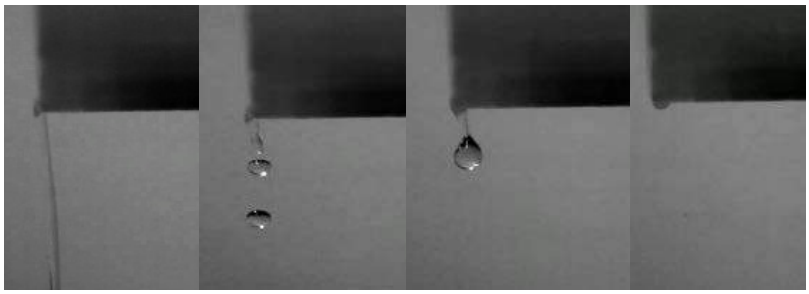


Fig.8 液だれの実験映像(四角縁, 水)

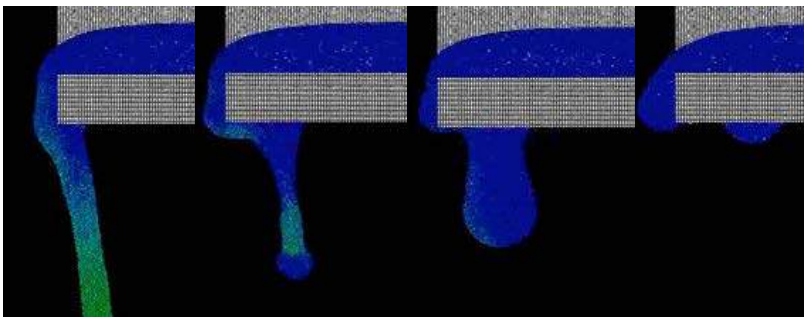


Fig.9 液だれの計算シミュレーション結果

(4) 平成 28 年度進捗状況

平成 28 年度はミルククラウンと液だれの計算結果の検証として実験との比較を行った. 現在, 論文を執筆中である.

(5) まとめ

本研究は，粒子法における界面張力や表面張力といった粒子間のインタラクションに着目し，自由表面を伴う流れをより現実に近づける手法について提案するものである．まだ実現象を再現するには固体・流体それぞれの物性についてパラメータ調性をする必要があり，さらに今後の実験結果との比較検証をしていく予定である．

参考文献

[1] Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences Vol.1:1 (2014) pp.1-14

[2] Gunji H., Ishii H., Saitoh A. and Sakai T., http://www2.nagare.or.jp/mm/2003/gunji/ index_ja.htm, The Japan Society of Fluid Mechanics.

[3] 近藤雅裕，越塚誠一，滝本正人，MPS 法における粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力モデル(2007).

3.2. 大規模並列化グループ

2011 年に京コンピュータが 10 ペタ(Peta: 1 京)フロップス(Flops: Floting Points per second)に達し, TOP500 では 2 回連続世界 1 位となり, 2016 年秋には中国の Sunway TaihuLight が 93 ペタにより 1 位を記録し, 次世代スーパーコンピュータは, ペタの次の世代, つまりエクサ(Exa)フロップスを目指す時代へと突入している. このことからもハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる. その一方で, これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては, その開発スピードもソフトウェアの品質も十分とは言えず, 多くのソフトウェアが 20 世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である. 特に, 1970～1980 年台に既に確立されているアルゴリズムに対して, 並列化の実装のみを加えた物が多く見られる. このような背景のもと, 本グループでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する, 次世代の大規模解析システムを構築するとともに, 常に最先端のスーパーコンピュータ能力を活用するシミュレーションの実現を行ってきた.

3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

(1) 目標・計画

本研究では対象問題をある程度限定することで高性能が得られるアプリケーション特化型システム開発を行った. 対象問題は連続体力学とし, 産業界で需要が高い非構造格子並びに自由表面や移動境界問題に重要なメッシュフリー(粒子法を含む)の取り扱いを可能とする. 時間方向の非定常性や問題が持つ非線形性を考慮する必要があるが, 陰解法ベースの数値解析手法を対象とする. これらに対し, 3 つの課題(A)DDM 入出力ライブラリ開発, (B)DDM ソルバーライブラリ開発, (C)連続体力学向けDSL開発に取り組み, 本研究で開発されたライブラリを用いて(D)連続体力学系シミュレータの実装と評価についても行った.

(2) 意義・国際社会との比較

ポストペタスケール計算を見据えた新技術の開発について, これまで同様汎用向けのライブラリなども開発されるであろうが, それらの利用では, 非構造格子問題では高々数パーセントの性能, あるいはそれ以下しか期待できず, 連続体力学系シミュレーションに特化したシステム開発が必要と考えられる. そもそも数パーセントの性能でのソフトウェアはペタコンでの運用が認められないという制約もあり, これはポストペタコンについてはさらに厳しくなることも想定される.

連続体力学系シミュレーションは, 従来からの FEM, FVM, BEM など非構造格子アプローチに加え, 近年ではメッシュフリーや粒子ベース手法による大規模計算の台頭が目覚しく, これらにも対応させ, 非構造格子および節点, 粒子ベースモデルを統一的に扱えるようにすることで, 連続体力学系シミュレーション向けライブラリとして整備されれば, ポストペタコンの連続体力学系シミュレーションでの利用の拡大に大きく貢献することが期待できる.

(3) 研究内容

A) DDM(Domain Decomposition Method, 領域分割法)入出力ライブラリ

本研究項目は，マルチレベル領域分割法に基づく多階層計算格子データの生成，操作および I/O ライブラリ開発を行うものである．一般的なアプリケーションシステムは，プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが，これまでは最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装されてきた．ポストペタコンでは，全ての処理をスパコン上に実装し，並列化することが当然求められてくる．しかし，従来の枠組みで並列化したのみでは，それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される．そこで，これまで当チーム研究者らがソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法の技術を応用した，マルチレベル領域分割法によるデータ処理システムの開発を行った．

B) DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は，DDM に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列ライブラリ開発を行うものである．一般的な線形代数ソルバーは，アセンブリされた連立一次方程式を入力とするため，FEM におけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた．それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくいが，ポストペタスケールシステムで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される．そこで，DDM による多階層型データ構造を活用した，大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリの開発を行った．

C) 連続体力学向け DSL(Domain Specific Language, 問題領域専用言語)

本研究項目は，連続体力学向け DSL の開発と，それに対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成の開発を行うものである．ポストペタスケールシステムのアーキテクチャでは，計算ノード間の並列性だけでなく計算ノード内での効率も重視される．各計算ノードはメニーコアや GPU，SIMD 拡張命令といった多種多様なアクセラレータを有し，これらを有効利用することが望まれる．従来のプログラミング言語やコンパイラ最適化技術での対処は不十分であり，現状ではそれぞれのアクセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必要とされている．一方，数値シミュレーションコードの場合，特に連続体力学分野においては，そのアプリケーションロジックは物理現象や数値解析スキームであり，これは数学表現，特に行列やテンソルで表記されることが多い．よって，連続体物理モデルを DSL 化して，数学記述（例えば，行列，テンソルの式を tex 形式で記述）から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブラリを call するコードを生成するコードジェネレータあるいはトランスレータアプローチが有効であると考えられ，これを実現するシステムの開発を行った．

D) 連続体力学系シミュレータ

本研究項目は，研究項目 A から C で開発された基盤技術の性能評価を行うために，連続体力学系シミュレータの開発を行うものである．

(4) 平成 28 年度進捗状況

A) DDM 入出力ライブラリ

A-1) 多階層領域分割

演算処理装置や記憶装置の階層構造に適した負荷分散機能として，非構造格子向けの多階層領域分割アルゴリズムを開発した．特に，MPI-OpenMP ハイブリッド並列化，CAD データへの形状適合を伴った 4 面体・6 面体ソリッド要素の一様メッシュ細分割機能(Fig.1)，リスタート機能，「京」や PRIMEHPC FX10 等が持つ Tofu 向けにネットワークトポロジーを意識したデータ配分の自動調整アルゴリズムの開発を行った．これにより，「京」の 8,196 計算ノードを用いて 258 億要素の非構造 4 面体メッシュ生成を約 94 分で成功するなど，ポストペタスケールシステムで想定される超大規模シミュレーションのプレ処理に有効であることが示された．また，世界トップクラスとなる 2,260 億要素（構造解析では 0.9 兆自由度）の非構造 4 面体メッシュ生成に名大 FX100 の 128 ノードを 16 時間用いることで成功した．これらの成果は，多階層領域分割ソフトウェア ADVENTURE_Metis2 として整備した．

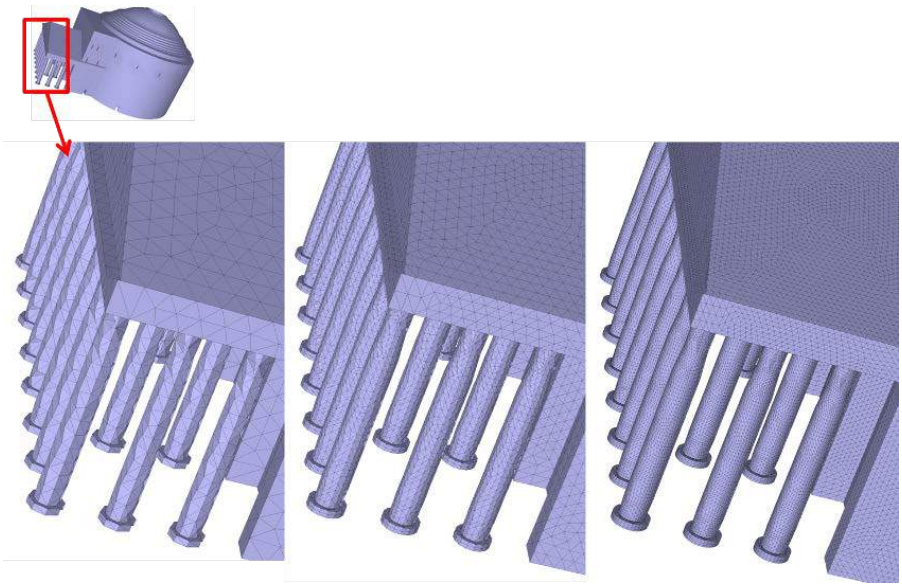


Fig.1 Parallel large scale mesh generation by subdivision with shape conformity to CAD data

A-2) DDM 圧縮技術

非構造格子向け DDM 圧縮技術の開発を行った．DDM 圧縮は，DDM における部分領域の境界上情報のみをファイル出力する対象とするものである(Fig.2)．復元は部分領域ごとの境界値問題を有限要素解析することによって行う．一般的な CG 法の演算量（$O(n^3+n^2)$）を基準に試算を行った結果，全体剛性行列を解く計算量と領域ごとの小さな剛性行列を解く計算量の比が極めて大

きくなり，例えば 100 億自由度有限要素解析モデルの計算量の比は 10^{10} 以上の計算量比が生じることから，袖領域の変位量をもとに内部の変位，ひずみ，応力を再度計算することは現実的であることが分かった．FEM による熱伝導解析を対象に基本機能を開発した．

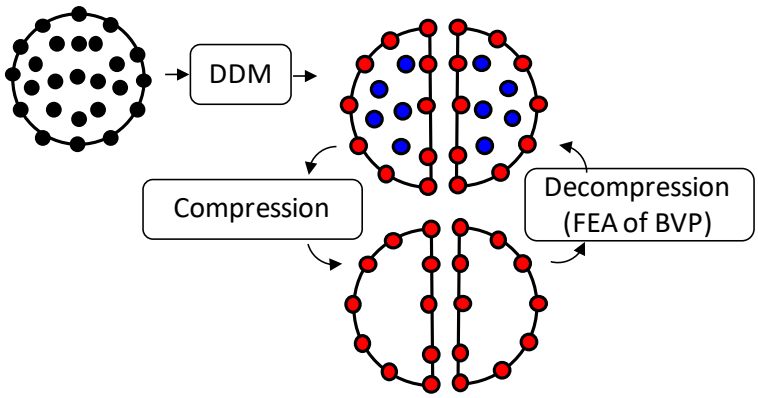


Fig.2 DDM compression by removing of internal degree of freedom

A-3) 標準 I/O ライブラリ

本研究ではオープンソースソフトウェア ADVENTURE をターゲットアプリケーションとしているが，同ソフトウェアでは独自の標準 I/O ライブラリ AdvIO が提供されている．そこで，「京」や FX100 などへの移植や超大規模データ生成などを通じて，ライブラリの問題点を調査し，解決した．また，当初計画を 1 年前倒ししてメッシュフリー向け標準 I/O ライブラリの開発を行った． AdvIO ライブラリをベースに開発を行い，粒子法への対応を行った．粒子法で用いられる物理量のラベルを定義し，本ライブラリを用いることで解析プログラムから接続するプレ・ポストまでの統一的な開発が可能となった．これらの成果は，AdvIO2 ライブラリとして整備した．

B) DDM ソルバーライブラリ

B-1) DDM 反復法

有限要素法向けに，多階層領域分割情報を利用した DDM 反復ライブラリの開発を行った．DDM の静的縮約によって得られる Schur 補元方程式を反復法で解くアルゴリズムとなっており，反復法としては実対称向けに共役勾配(CG)法，共役残差(CR)法，準最小残差(QMR)法，最小残差(MINRES)法，複素対称向けに共役直交共役勾配(COCG)法，共役直交共役残差(COCR)法，対称版 QMR(QMR_SYM)法を実装した．さらに，複素対称向けには MINRES-like_CS 法を新たに開発した．また，MPI-OpenMP ハイブリッド処理に適した 2 階層領域分割に基づく実装，線形代数演算のアプリケーション特化型最適化として節点自由度数に応じた手動ループ展開や SIMD 向け最適化を行った．さらに，メニーコア化などに伴う B/F 値低下に対応するため，DDM 反復法の部分領域問題ソルバーとして Eisenstat 技法に基づく CG 法+SSOR 前処理を実装した．これにより，「京」の 8,196 計算ノードを用いて 1,040 億自由度規模有限要素解析（古代建築物パ

ンテオンモデルの自重解析）に 81.8 時間で成功した(Fig.3). 本手法は,「京」で強スケーリング性能として 85%以上の高い並列効率を示しており(Fig.4), ポストペタスケールシステムでは 1 千億自由度超の超大規模有限要素解析を実用化できる可能性が示された.

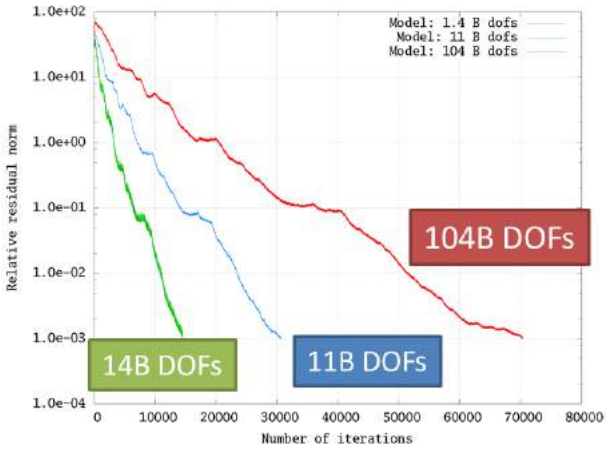


Fig.3 Convergence history of iterative method in 100 billion DOF finite element analysis

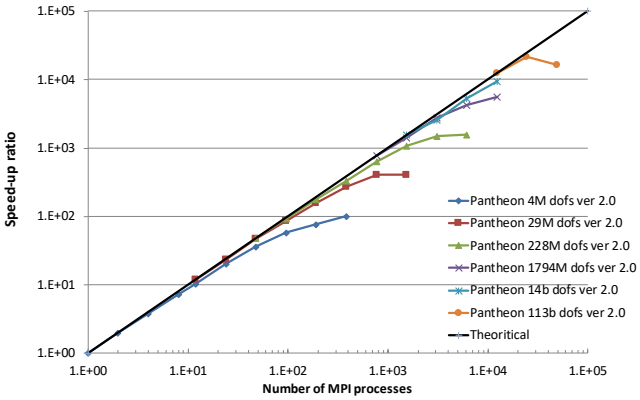


Fig.4 Parallel performance of strong scaling with K-computer

B-2) 多階層前処理技術

多階層前処理技術として, 有限要素法向け BDD 法の開発を行った. 既に実績がある構造解析向け BDD 法については超並列計算環境向け実装技術の開発を行い,「京」の 256 計算ノードで弱スケーリング 89 %, 強スケーリング 92 %の並列効率が得られた. また, 世界トップレベルの 112 億自由度有限要素解析への BDD 法適用実験を行い, 53 反復（収束判定値は相対残差が 3 桁小さくなった時点）で収束解を得ることに成功した.

また, 異種材料混在モデルにおける BDD 法の収束性を改善するために, DDM 反復法に対する簡易対角スケーリング処理法の新解釈を提案した. それに基づき, Scaled-BDD 法を新たに開発し, ヤング率の比が 100 倍以上となる複数部材で構成された構造物のシミュレーションにおいて,

オリジナルの BDD 法に比べて反復回数・計算時間を 1/2 以下にすることに成功した(Fig.5).

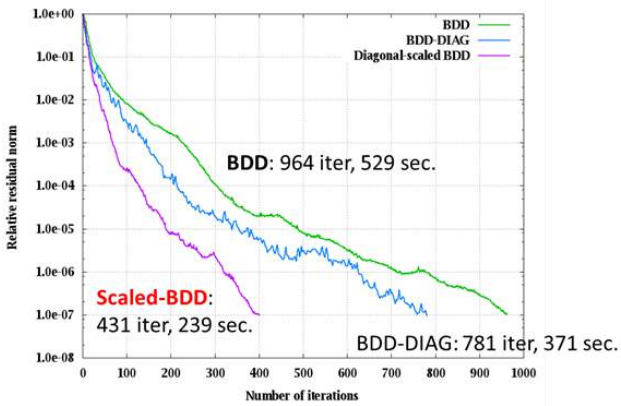


Fig.5　Convergence improvement with Scaled-BDD on multiple material model

また, 電磁場解析向けに, BDD 前処理の統一的構築方法の開発と実装を行った. さらに, 電磁場解析等 BDD 法が未確立分野に向けて, BDD 開発フレームワーク機能を追加開発した. これにより, 静磁場問題に対する BDD 前処理アルゴリズム適用実験に成功した. さらにこの成果を応用して, 構造解析において世界的にも事例が少なかった ILU(0), SSOR, BDD の収束性比較が可能となり, BDD によってどれだけ反復回数を削減できるかを定量的に示すことに成功した(Fig.6).

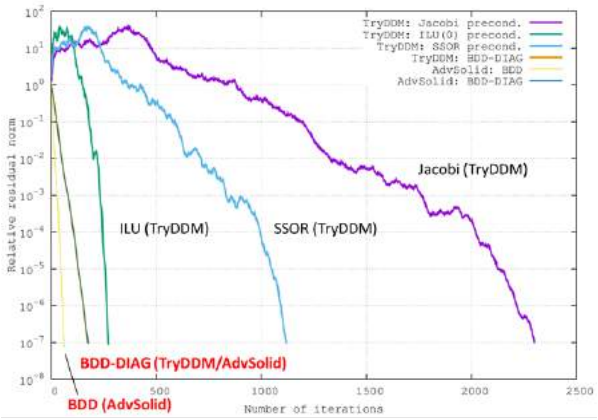


Fig.6 Convergence evaluation of BDD preconditioner

C) 連続体力学向け DSL

C-1) DSL 基本機能

連続体力学向け DSL である LexADV_AutoMT, およびその C 言語および Fortran へのトランスレータ開発を行った. DSL の文法構造としては, 基本的に科学技術分野, 特に数学分野で広く使われている TeX/LaTeX を参考とした. 本研究が主な対象とする連続体力学分野, 特に非線形

固体・構造力学分野においては，その物理現象や材料構成則を記述するために，テンソルあるいは行列・ベクトル演算に基づく数式が多用されている．特にテンソル演算として，連続体力学分野への応用を念頭に，3 次元空間におけるスカラー，ベクトル，2 階テンソルおよび 4 階テンソルに関する加減算および積演算などの各種演算子群に対応させる必要がある．ここではまず，こういった数式を記述可能な LaTeX のサブセットを設定し，またコード生成に必要な変数の型情報など補助的なデータをアノーテーションとして追加する構造を採用した．なお言語仕様や文法などの詳細については，開発初期段階から研究グループ外の β テスターを獲得し，グループ内外のユーザーからのフィードバック情報を元にさまざまな検討を行った．

DSL としての AutoMT をユーザーが利用する際には，前述の LaTeX サブセットのコードがコメントとして C または Fortran のソースコード内に挿入される形式をとる．そして，トランスレータによってそのコメント部分が，対応する C あるいは Fortran のコードに置き換えられる．このとき自動生成されるコード内において，同名のテンソルおよび小規模行列・ベクトル演算向けライブラリ AutoMT が備える各種ライブラリ関数がコールされる．さらに，ライブラリ実装内部について，各種 HPC プラットフォームごとに，特に CPU ベンダーごとの特殊命令や GPU，メニーコア等アクセラレータ向けに最適化することが可能である．DSL 利用の流れを Fig.7 に示す．

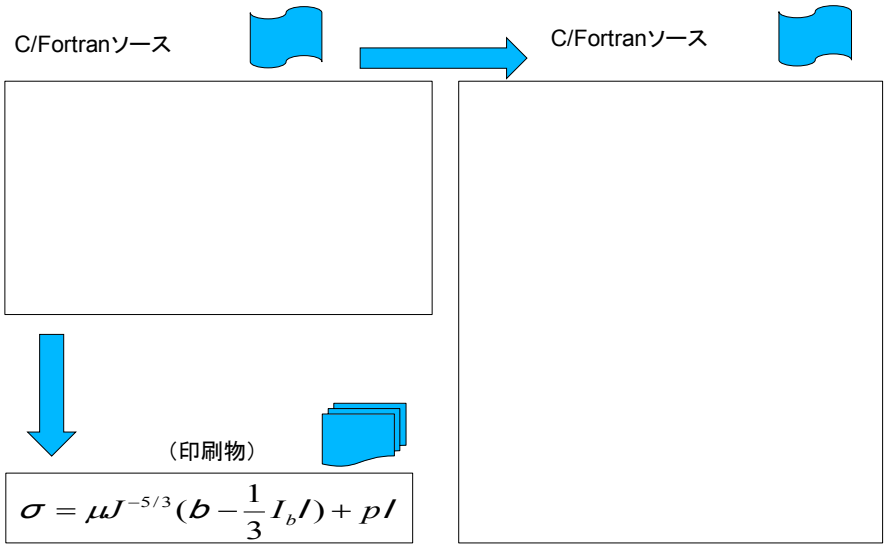


Fig.7 Flow of DSL for continuum mechanics

C-2) アクセラレータ対応コード自動生成

前述のように連続体力学分野向け DSL，LexADV_AutoMT では，その低レベル層に行列・テンソル演算向けライブラリ（同名の AutoMT）を配置している．この LaTeX をベースとする DSL は前記のトランスレータにより C や Fortran コードに変換されるが，このときトランスレータにより自動生成されたコード部分は主にこの AutoMT ライブラリ関数・サブルーチンをコールする．よって，こ

この部分を各種 HPC プラットフォームや特にアクセラレータ向けに最適化することで，結果としてユーザープログラムが高速に動作することになる．

ここでは，アクセラレータ対応コード自動生成として，近年のスカラーCPU の多くが装備する SIMD 命令セットおよび GPU 向けに性能最適化された AutoMT ライブラリの高速バージョンを開発した．Intel および富士通 CPU のマルチコア及び SIMD 命令セット向け実装，CUDA による GPU 向け実装，メニーコア Xeon Phi 向け実装などを行った．

これらの実装に関して特に，主要な各種 HPC プラットフォームにおけるベンチマークテストを通して，SIMD 機構を用いたコードはこれに対応しないコードに比べ実効性能で数倍程度の違いを有することがわかったため，SIMD 命令および GPU 向け最適化として SIMD 機構に対応する AutoMT ライブラリ実装を用意した．これは，あるテンソル式または小規模な行列・ベクトル式に対し，コンパイラによるベクトル化や GPU のスレッドを介し，同時に複数のデータを作用させるものである．通常これは連続体力学ベースの数値解析コードにおいて，複数の要素やセル，粒子データなどについて同じ一連の数式群を評価していくことに対応する．例えば，有限要素解析においてそのモデルデータは大量の有限要素から構成されるが，これら要素単位の演算は element-by-element（EBE） 演算と呼ばれる．シミュレーションプログラムの EBE 演算を行うコード部分のループ構成に関して，必ず要素ごとループをある多重ループの最内側に配置するようにしておく．その最内側ループボディにおいて，テンソルや小規模行列演算ごとに AutoMT ライブラリコールがなされる．このとき，これらのライブラリコールが実際にはプリプロセッサマクロで実装されている，あるいはコンパイラによって確実にインライン展開されることが保障されることにより，最終的にこの要素ループに関してコンパイラを通したベクトル化がなされることになる．

さらに，こういった最適コードが共通に有する特徴やパターンをまとめ，これをハイパフォーマンス・デザインパターンとして提案した．ハイパフォーマンス・デザインパターンでは，まずテンソルや小規模行列，ベクトルなどの数値計算分野向け抽象データ型について，それぞれの変数を1つの配列や構造体ではなく，複数のスカラー変数の束として表現する．また，抽象データ型が備える各種演算・操作について，これらを関数やサブルーチンの代わりにプリプロセッサマクロで実装する．このとき，C プリプロセッサマクロのシンボル連結演算子##を利用している．ハイパフォーマンス・デザインパターンについてこれを Fig.8 に示す．

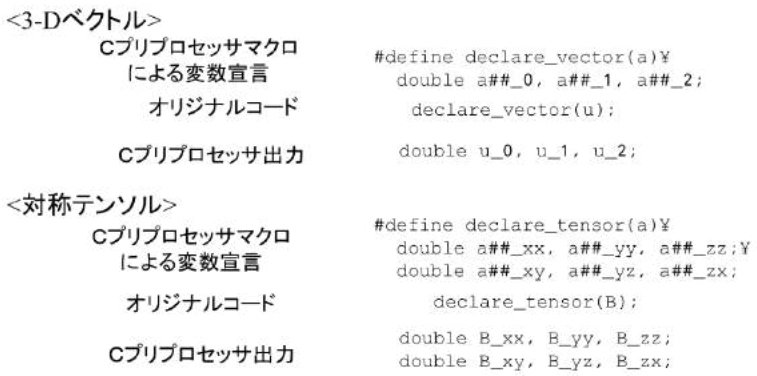


Fig.8 Implementation of vector and tensor by high performance design pattern

これらの成果をまとめ，行列およびテンソル演算ライブラリ LexADV_AutoMT として整備した．開発ライブラリを用いた有限要素解析で現れる特徴的な計算パターンに対する性能評価結果を Table 1 に示す．

Table 1 Benchmark results for finite element analysis

	Intel x86 (Sandy Bridge) + Intel Compiler		Fujitsu SPARC64 IXfx + Fujitsu Compiler	
	Original	Tuning	Original	Tuning
Stiffness Matrix of Structural analysis	21 %	70 %	8 %	44 %
Constitutive law of nonlinear material	16 %	31 %	6 %	40 %
Stiffness Matrix of heat conductive analysis	24 %	50 %	12 %	38 %

D) 連続体力学系シミュレータ

D-1) シミュレータ実装

DDM 反復法ライブラリの応用例として，構造 FEM ソフトウェア AdvSolid への組み込みを行った．「京」，名大 FX10・FX100，名大 CX400，名大 UV 2000，Xeon Phi マシン，GPU マシンなど様々なアーキテクチャにおいて性能評価を行った．特に，メニーコア環境においてスレッド並列効率が低下する傾向が観察され， DDM アルゴリズム見直しについて DDM 反復法ライブラリ開発側にフィードバックした．また，電磁場解析を重要アプリケーションの 1 つと位置づけ，計画を一部前倒しして，電磁場シミュレータの実装を行った．また，実証問題例である数値人体モデルによる医療向け電磁場解析において，メッシュ形状が解析精度に与える影響について調査し，その結果を DDM 入出力ライブラリ側へフィードバックした．さらに，移動体を含む対象の並列計算を効率的

に行うため，階層型領域分割法をベースに新たなアルゴリズムを開発した．移動体を含む対象の解析ではタイムステップごとに移動体の位置が変化し，移動体とそれ以外の固定部との間でメッシュの接続関係が変化する．そのため固定部と移動体の接合部が 1 タイムステップ分ずれても要素面が一致するようにメッシュを生成することでこれに対応するといったことが広く行われている．本研究でもこの手法を踏襲するとともに，領域分割後の小領域表面に接合部の自由度が位置するよう固定部と移動体のメッシュを個別に領域分割することとした．個別に領域分割することで小領域表面に位置した接合部の自由度を part 間で共有されるインターフェース自由度として扱うことで，移動体の移動に伴うメッシュの接続関係の変化は，固定部側の part と移動体側の part の通信関係の変化へと置き換えられる．これにより，時間発展とともに変化する接合部の通信テーブルを事前に用意し，それぞれの時間ステップで使用する通信テーブルを替えることで効率的な手法を構築できた．この手法の利点は，時間ステップごとに異なる通信テーブルを使用する以外には従来の階層型領域分割法とアルゴリズムとして差異がないことである．そのため実装が非常に簡便であるとともに，これまで階層型領域分割法で積み上げられてきた効率化・高速化の成果がそのまま適用できる．さらに階層型領域分割法が適用できればこの手法も適用可能であり，高い汎用性を有する手法となっている．

粒子法向けライブラリは実問題解析に適用可能かが重要な評価指針であるため，当初計画を前倒しして，開発中の粒子法向けライブラリを用いたシミュレータ実装並び評価を並行して実施することとした．粒子法向けライブラリでは，関数ポインタを用いて利用者が粒子の物理量計算の関数を定義することができるので，解きたい物理モデルを自由に組み込むことができる仕様となっている．粒子の動的負荷分散機能(Fig.9)や大規模流体剛体連成解析機能(Fig.10)の実装を行った．これにより，多数の浮遊物(剛体)が津波で流される様子を計算することが可能となった(Fig.11)．また，直ぐに社会に役立つアプリケーションの構築を目指すために，3 段階の津波計算を行える機能を開発した．第 1 の解析では震源で発生する波源から沿岸部までの津波伝播計算(数十～数百キロ四方程度)，第 2 の解析では沿岸部に押し寄せた津波が地上へ遡上する解析(数 km～10km 四方程度)，第 3 の解析では，市街地に浮遊物が衝突しながら浮遊する市街地浸水解析(500m 四方程度)である．この 3 段階の津波解析機能により，従来からある波源から沿岸部までの津波伝播計算を利用して津波の市街地解析を行うことが可能となった．

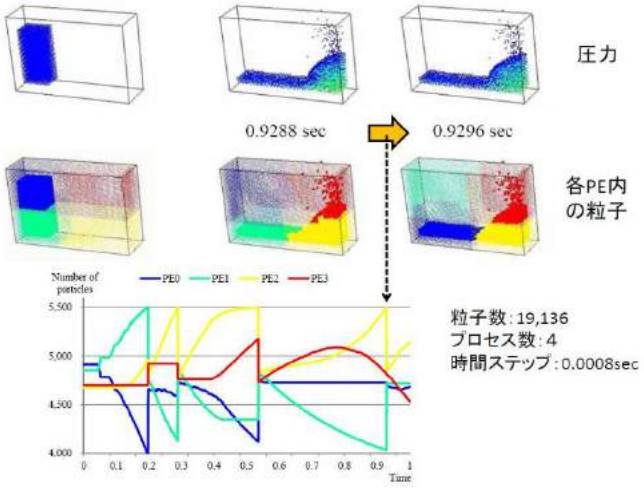


Fig.9　Dynamic load balancing for distributed memory parallel processing of particles

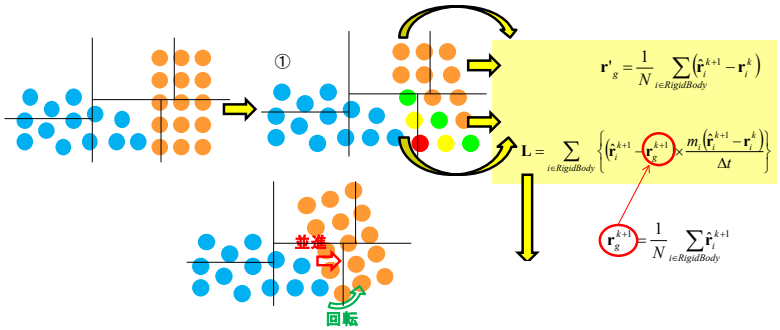


Fig.10　Calculation procedure of rigid body in LexADV_EMPS

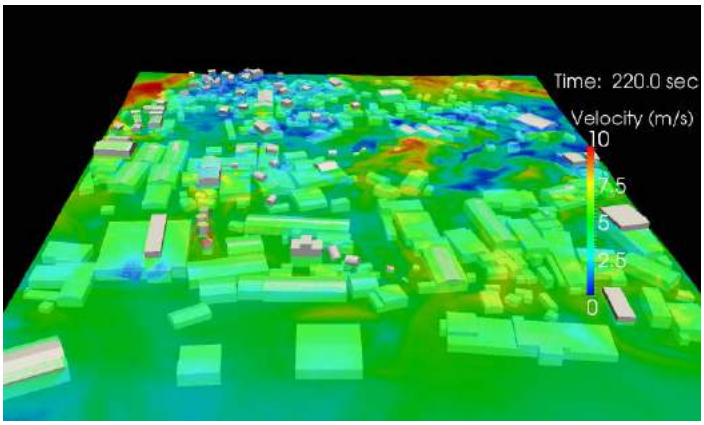


Fig.11　A result of simulatoin including many rigid bodies by LexADV_EMPS

また，有限要素法による構造解析機能と粒子法による流体解析機能を持った「連続体力学系シミュレータ」の開発を行った．ファイルベースの片方向連成機能のみの開発が完了している．

LexADV_EMPS を用いて津波遡上解析を行った後，流れ解析で出力されたファイルから地上構造物に与える流体圧力を求め，構造解析の入力ファイルを作成する．この構造解析用の入力ファイルを用いて，AdvSolid が応力解析を行う．このようにして LexADV_EMPS の片方向連成機能の開発により，大規模分散メモリ環境で，粒子法による流体解析と有限要素法による構造解析の連成解析が可能となった．

D-2) シミュレータ評価

有限要素法によるシミュレータとして，構造 FEM ソフトウェア AdvSolid に DDM 反復法ライブラリを組み込み，400 万自由度から 1,134 億自由度規模までのサイズの問題に対し，「京」の 12 ノードから 24,578 ノードを用いて，強スケーリングと弱スケーリングによる並列効率評価を行った．両指標において高い並列効率が示されたが，2 万ノード規模では効率の低下がみられ，ポストペタスケールシステムに向けての課題を見つけることができた．

また，電磁場 FEM ソフトウェア AdvMagnetic にライブラリを組み込んだ．時間調和渦電流問題において反復解法の収束性を大幅に改善し，東京大学 FX10 の 720 ノードで 35 億自由度の渦電流解析精度検証問題を 9 時間弱で求解することに成功した．また，移動体を含む対象の階層型領域分割法による並列計算手法を回転機の電磁界解析に適用し，FX10 上でストロングスケーリング評価を行った．6 ノードから最大 384 ノードまで使用し，96 ノードまで並列化効率 90%以上という良好な結果を得た．96 ノードを超えるとノードあたりの割り当て演算量が著しく低下するため並列化効率が低下するが，それでも 384 ノードで 60%程度であった．また，従来の有限要素法による逐次計算で 1 ヶ月以上かかっていた計算が，48 ノードで 8.39 時間，384 ノードで 1.60 時間と，大幅な高速化を達成した．さらに，高周波電磁波問題において境界平滑化による計算精度の向上に取り組み，2 億自由度の人体モデルにおいて電界の精度を大幅に向上させることに成功した (Fig.12)．

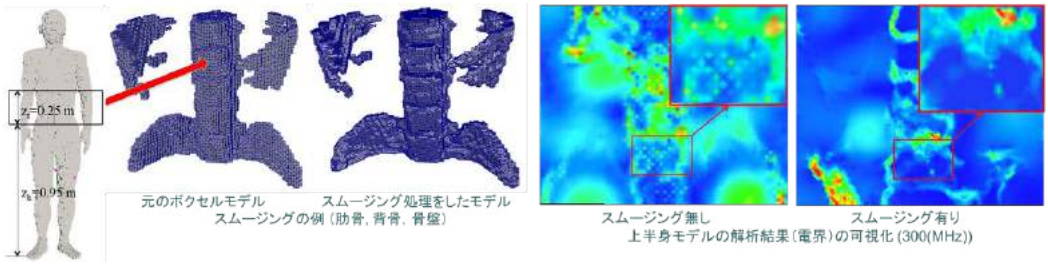


Fig.12　Thermal therapy simulation with AdvMetis2 and AdvMagneticHF

さらに，開発ライブラリを用いた粒子法シミュレーションソフトウェアの評価を行った．評価環境として「京」，東京大学 FX10，東京工業大学 TSUBAME2.5（GPU），名古屋大学 FX100，名古屋大学 CX400（MIC）を主な開発計算機としてそれぞれのソルバーの性能向上をおこなった．東大 T2K では，64 計算ノード 1,800 万粒子から 1,024 計算ノード 2.6 億粒子へのウィークスケーリング

性能評価で 94%の並列効率が得られ，6,900 万粒子の 64 計算ノードから 1,024 計算ノードの強スケーリング性能評価において 93%の並列効率が得られた．10 億粒子モデルを用いて，「京」の 48 ノードから 12,288 ノードのスピードアップ値 225.8（理想値 256）を達成することができた．FX100 では，12 ノードから 864 ノードのスピードアップ値 65（理想値 72）を達成することができた(Fig.13)．LexADV_EMPS を用いて，3 段階の津波解析をシステム化した．その結果，福島第一原子力発電所1号機タービン建屋内浸水解析と気仙沼での第 18 共徳丸の遡上解析を行うことができた．昨年度までは 1ヶ月程度掛かっていた解析を，「京」を用いることで 3 日程度に短縮することができた．観測データ等を用いて津波遡上シミュレーション結果の妥当性確認を行い，十分な精度で現象を再現できていることが示された(Fig.14)．

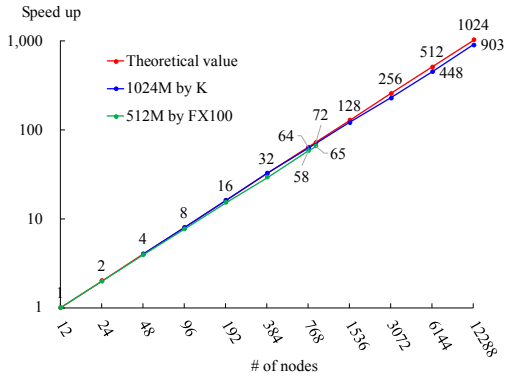
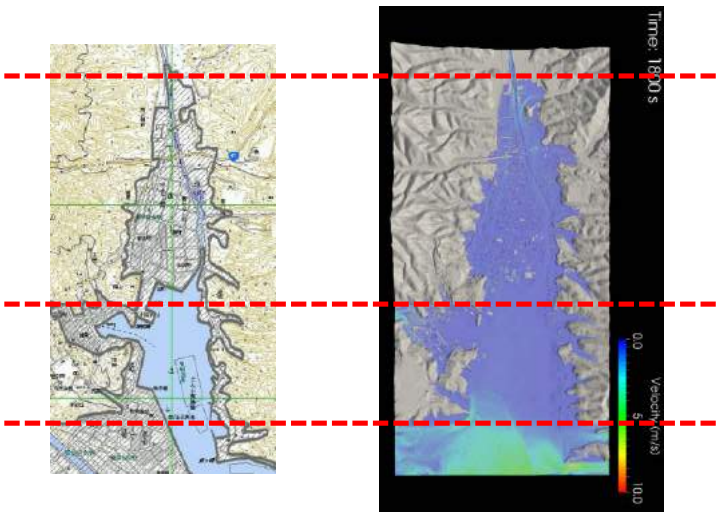


Fig.13 Parallel performance of strong scaling with uncompressed flow analysis



(a) Observation result (b) Simulation result

Fig.14 Validation of tsunami run-up analysis with LexADV_EMPS

(5) まとめ

当初の研究計画で掲げた目標はほぼ予定通り達成できた. ポストペタスケールシステムにおける超大規模な連続体力学系シミュレーションを実用化するために, 1 兆自由度メッシュを並列生成可能な AdvMetis2, FEM や粒子法シミュレーションに対して 10 万×10 万ピクセルの超高精細な First Detail Image を描画可能な LexADV_VSCG, 1 千億自由度 FEM 解析に成功した LexADV_IsDDM, 数億粒子の分散メモリ並列計算を可能にする LexADV_EMPS, LaTeX 記述のテンソル表記構成式から高性能なコードを生成する連続体力学向け DSL を含んだ LexADV_AutoMT など, 多くのソフトウェアを開発・公開することに成功した. これらのソフトウェアは, HPCI 戦略プログラムでの利用からポスト京重点課題での採用と, ペタスケールからポストペタスケールへの橋渡しを行っているシステムソフトウェアとしてその意義は大きいと言える. 本研究期間では有限要素法と粒子法に特化して開発したが, 得られた成果は連続体力学向けの他の数値解析方法にも応用できるものであり, 計算科学全般での活用が期待できるものである. また, 開発ソフトウェアを用いて実施した津波遡上・浸水シミュレーション結果の妥当性確認や写実的描画は, 水害の予測や被害の低減のために有用であることを示しており, 安全・安心社会基盤構築に貢献するものと言える. 今後は, 本研究成果を元に採択されプロジェクトが進行している, ポスト京重点課題やドイツ研究振興協会（DFG）が実施している Software for Exascale Computing (SPPEXA) Phase 2 などを通じてポストペタスケールシステムへの展開を進めていくとともに, ポストペタ後も見据えた研究へと発展させていく予定である.

3.3. 新規実験計測グループ

新規実験計測グループでは，計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体－構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち，「標準問題実験の検討」に焦点を当てた活動を行っている．

流体－構造連成実験を高い信頼性で実験するには，実験模型の精度や実験装置の信頼性を高めた上で，それらを連成している物理量について考察する必要がある．そこで，標準問題実験に関する弾性円柱の振動実験，シートフラッタ試験に取り組んできた．

上記の事項について，今年度は以下の 2 項目について報告する．

(1) 標準問題のための弾性円柱の振動実験

(2) ゴムシート材のフラッタ特性に関する系統的整理

3.3.1.　標準問題のための弾性円柱の振動実験

(1) 目標・計画

流体－構造連成解析手法を検証するための標準問題として，低速風洞を用いた円柱の振動試験を行った．風路下流に実験模型を設置して試験を行い，数値解析の検証用データを提供することを目的としている．

(2) 意義・国際社会との比較

流体−構造連成問題について数値計算，実験は多数行われているが，その殆どが単独に行われたものである．文献にはいずれかの結果が引用される場合が多く，両者の信頼性を保証した上で，結果を議論した例が見られないのが現状である．本研究では，数値計算結果の信頼性を検証するためのデータを提供することを主眼として実験に取り組んだ．そのため，計算結果の検証に使用しやすい問題を選定し，データを提供することを目的としている．

(3) 研究内容

Fig. 1 は風洞試験の概要図である．出口面積 A=0.3×0.3 m^2 の風洞装置にシリコーンゴム円柱を固定した．円柱の側面と下方から高速度カメラで変位量を計測した．円柱は片持ち梁の様に固定されており，上端は固定端，下端は自由である．Table 1 は円柱のサイズと材質を示している．ヤング率の右側に記載した数値はデュロメータ硬さである．

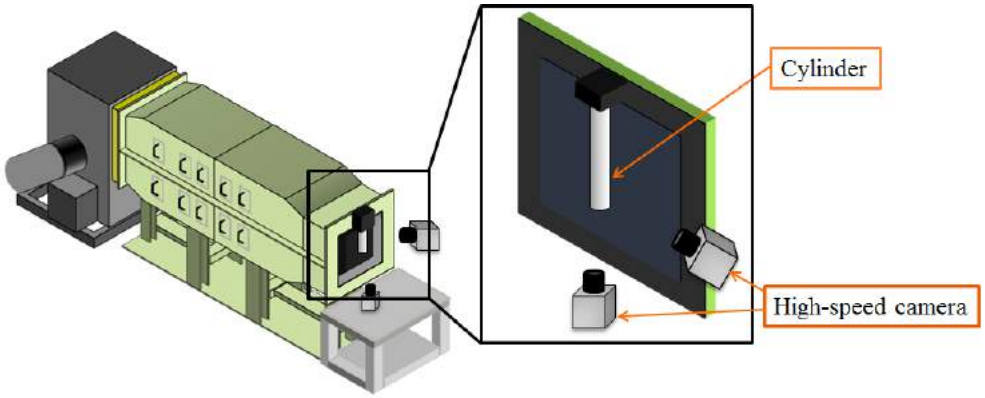


Fig.1 Schematic picture of experimental setup.

Table 1 Specifications of cylindrical cantilever.

Diameter d [mm]	20
Length L_c [mm]	160
Young modulus E [MPa]	2.9 (A50)
	4.9 (A60)
	6.8 (A70)

実験で動画を取得した後，連続画像に分割して 2 値化処理を行い，円柱領域の中心座標を取得した．中心座標の時間履歴から変位と周波数特性を調べた．添え字は x, y 方向を意味する．

Fig. 2 は Re 数に対する変位量 D を示している．Re 数と共に D_x は増加する傾向にある．A50 は最も柔らかい材質であり，Re 数と共に D_y が増している．ただし，D_x の 1/10 程度である．A60，A70 はほぼ一定である．Fig. 3 は変位の時間履歴から算出した RMS 値を円柱の直径で無次元化した値を示している．Re 数と共に a_x，a_y も増加している．硬度が増すと，勾配は緩やかになる傾向が確認できる．流れに垂直方向に振動するため，a_y の傾きが大きくなる．

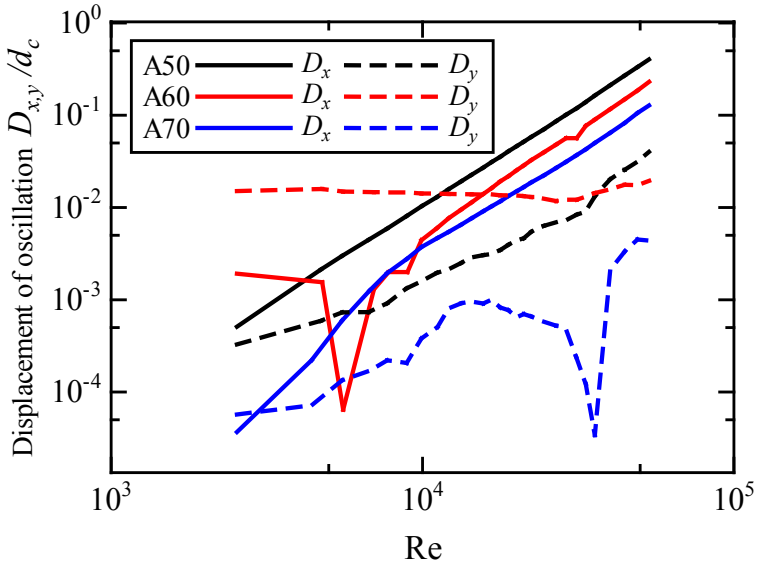


Fig. 3 Time-averaged displacement of oscillating cylinder.

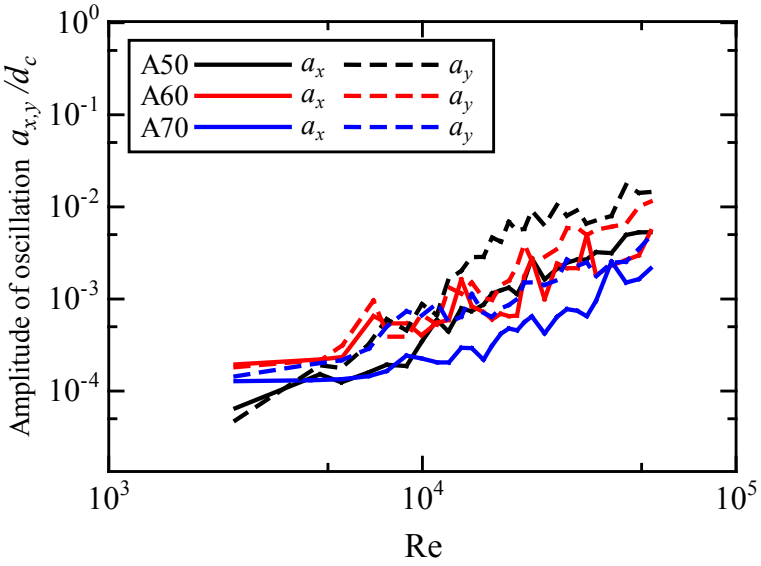


Fig. 4 R.M.S. amplitude of oscillating cylinder.

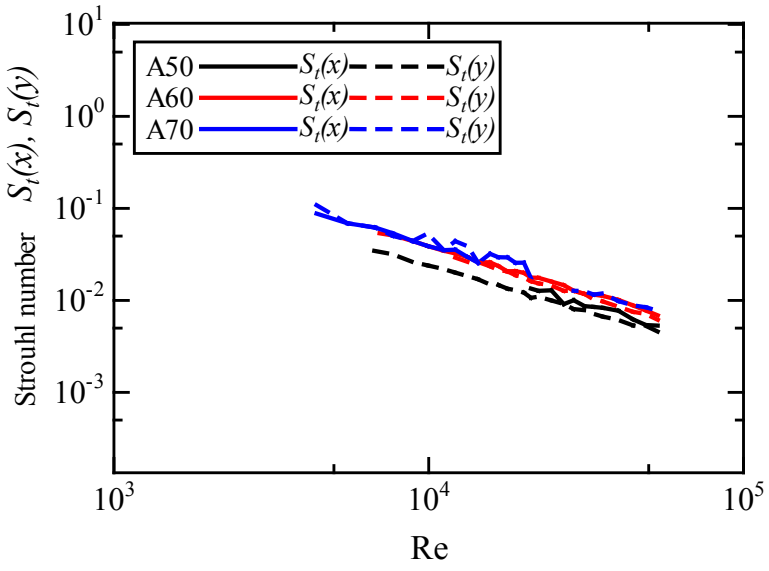


Fig. 5 Frequency characteristics of oscillating cylinder.

Table 2 Slope characteristics of oscillating cylinder.

	D_x	D_y	a_x	a_y	S_t (x)	S_t (y)
A50	2.164	-	1.626	1.988	-1.017	-0.985
A60	2.260	-	1.090	1.504	-1.005	-1.046
A70	2.442	-	1.052	1.125	-0.912	-1.042

Fig. 5 はシリコーンゴム円柱の周波数特性を示している. St 数は Re 数と共に減少しており, その傾きは材質に依らず一定である. また方向にも依らないことが分かる. Table 2 は Fig. 3-5 の実験結果から, Re 数に対する変位, 変位の RMS 値, St 数の勾配を示している.

(4) 平成 28 年度進捗状況

標準問題として弾性円柱の振動実験を行い, 材料特性毎に実験結果を整理した. その結果, に対して 3 種類のヤング率について実験した結果, いずれも同様の傾向を示した. シリコーンゴムの物性値について変形量を測定することができた.

(5) まとめ

流体構造連成解析のための標準問題を検討し, 数値解析結果の妥当性を検証するために必要な実験データを示した.

参考文献

(1) R. D. Blevins: "Flow-induced vibration", Krieger publishing company （1990）.
(2) R. King and M. J. Prosser and D. J. Johns, On Vortex Excitation of Model Piles in Water, Journal of Sound and Vibration, Vol.29（2）, pp.169-188（1973）.
(3) N, Kondo, Three-dimensional computation for flow-induced vibrations in in-line and cross-flow directions of a circular cylinder, Inter. J. for Num. Meth. in Fluids, 70, pp.158-185, (2012).

3.3.2. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験

(1) 目標・計画

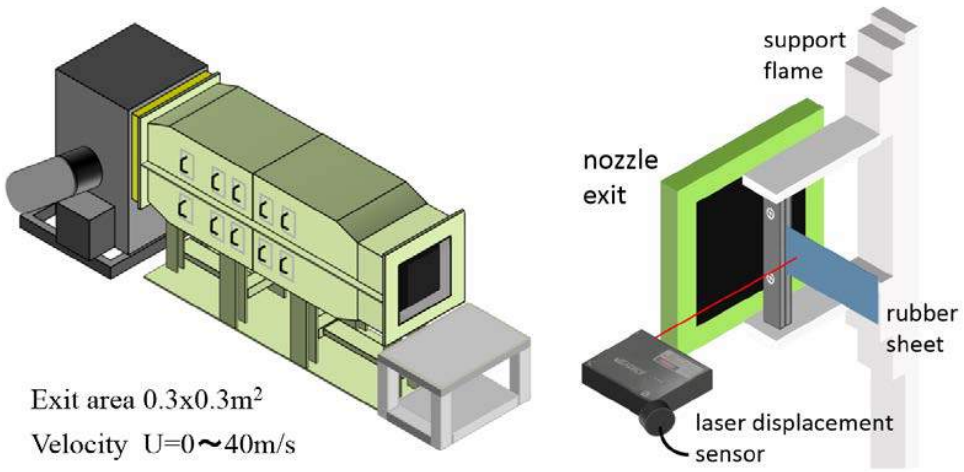
フラッタ特性に関する理論的・実験的研究は，これまで多く行われてきた[1,2]．しかし，系統的にデータを整理した成果は数少ない[3,4]．本研究は様々なシート材のフラッタ特性を調べて，材料と流体力学の物理量を関連付けることで，フラッタ特性を整理できる無次元パラメータの提案を試みる．

(2) 意義・国際社会との比較

翼のフラッタに関する数値計算は流体−構造連成問題の主要課題の一つである．計算機性能の向上により，予測精度の信頼性は向上している一方で，数値計算結果の妥当性を確認するために参照できる実験データは数少ない．本研究ではフラッタ現象に関する基礎的な実験を通じて，無次元数を提案する．

(3) 研究内容

Fig. 1 は風洞装置の全体図である．風洞装置は出口断面積が 0.3×0.3m2 であり，気流速度は最大 40m/s である．風洞装置の出口部分には Fig. 1 (b)に示したようなフラッタ装置を設置している．試験片であるゴムシート材は金属フレームで支持されており，片端固定，他端自由の状態である．固定端は二枚の金属板で挟まれており，実験中に外れない様にボルトを用いて固定されている．鉛直に設置したシート材の横方向変位を測定するために，レーザ変位計(LK-G500, KEYENCE Corp.)を用いた．風速を変化させて実験を行い，フラッタ開始時の風速を調べた．フラッタ時のシート材の変位をサンプリング周波数 5kHz で約 13 秒間測定し，65000 点のデータを収録して周波数解析を行った．



(a) Wind-tunnel. (b) Flutter experimental device.

Fig.1 Experimental setup of wind-tunnel.

Table 2 はゴムシート材の種類とヤング率を示している. 名称の横には, 凡例に表記する略称を示している. Table 3 はゴムシート材のサイズを示している. 幅広くフラッタ特性を調べるために, 長さと幅は 5 種類の条件とした. 厚さは入手できるものを選び 2 種類とした. それぞれのサイズについて実験を行った.

Table 2　Young's modulus of rubber sheet.

Name	Young's modulus
Urethane rubber (UT)	46.20
Flexible polyvinyl chloride (EV)	31.60
Black natural rubber (BN)	9.90
Fluorine-containing rubber (FS)	8.30
Nitrile rubber (NBR)	7.60
Ethylene-propylene rubber (EPT)	7.10
Chloroprene rubber (CR)	5.60

Table 3　Dimensions of rubber sheet.

L [mm]	100, 110, 120, 130, 150
w [mm]	40, 50, 60, 70, 80, 90
t [mm]	0.5, 1.0

Fig. 3 は黒天然ゴムのシート長さに対するフラッタ開始速度の変化を示している. シート長が増すほどフラッタ開始風速が低下しており, フラッタ現象が発生しやすくなる. Fig. 4 は黒天然ゴムのフラッタ開始風速とフラッタ周波数の関係を示している. フラッタ開始速度が低いほどフラッタ周波数は低くなっている. この傾向は他の材料についても同様であった.

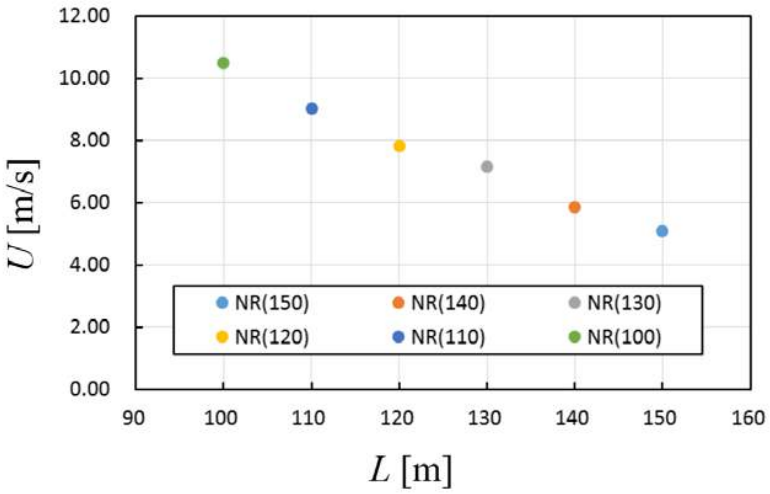


Fig. 3　Comparison of flutter velocity to sheet length (BN).

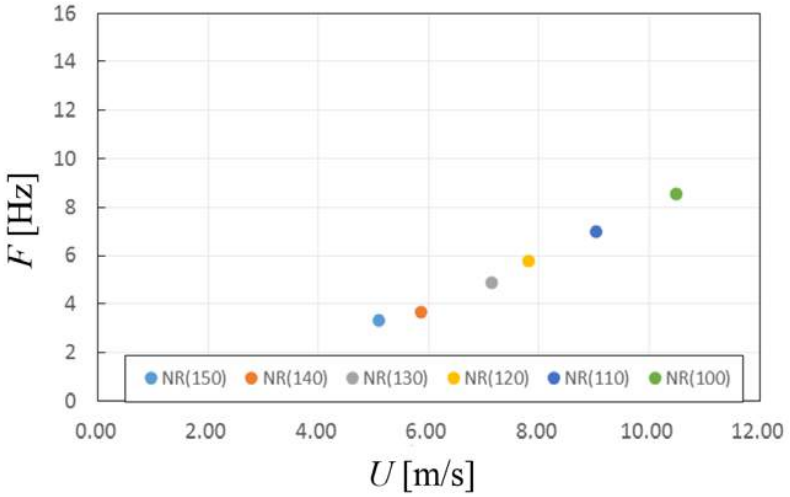


Fig. 4 Characteristics of flutter frequency to sheet length (BN).

本研究では様々なゴムシート材について実験した結果，一定の傾向が見られた．そこで次元解析を行い[5]，材料の曲げモーメントと流体力によるモーメントの比を表す無次元数を導出した．板材の単純形状であるが，単純な式で表されるものであり，材料力学のたわみの式から着想を得たものである．

Fig. 5 はゴムシート材のフラッタ開始速度とフラッタ周波数を系統的に整理した結果である．縦軸はフラッタ周波数を固有振動数で，横軸は提案した無次元数で整理した結果である．ゴムシート材のフラッタ周波数は材質によらず1本の線で結ばれることが判る．横軸の無次元数に対して概ね1未満でフラッタ現象が開始することが分かる．また提案した無次元数で整理すれば，材料によらずフラッタ開始速度が予測できることを意味している．

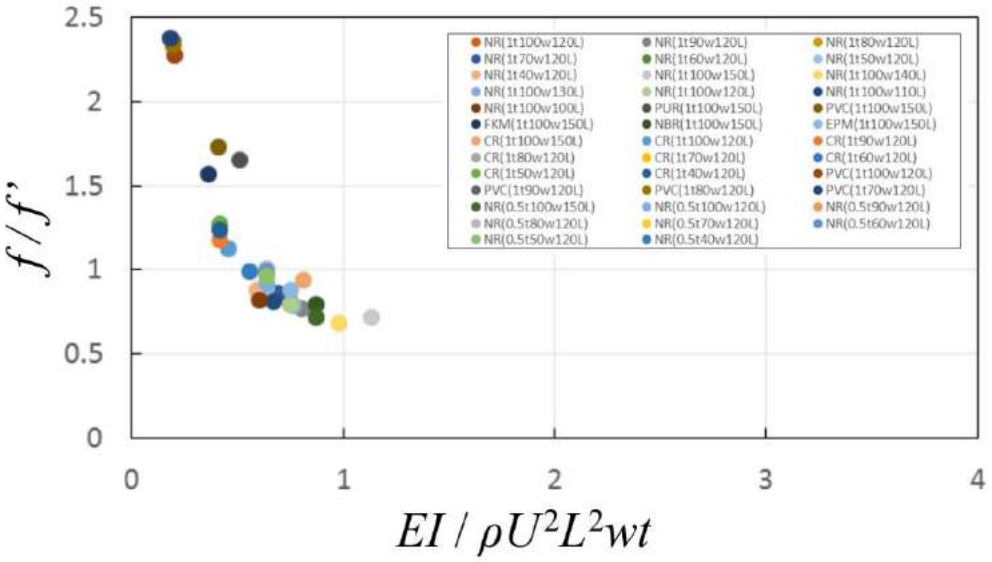


Fig. 5 Characteristics of flutter frequency to FSI parameter.

(4) 平成 28 年度進捗状況

ゴムシート材を用いてフラッタ実験を行った. ゴムシート材の大きさ, 材質, フラッタ開始速度を用いて表される無次元数を提案した. 無次元数は材料の曲げモーメントと流体力によるモーメントの比を意味する. 提案した無次元数は, シート材の大きさ, 材質によらず実験結果を系統的に整理できることを示した.

(5) まとめ

流体構造連成解析の検証に使用できる実験データを取得するために, フラッタ試験を行ってきた. 金属材, ゴムシート材についてフラッタ開始速度を調べた結果, 系統的な傾向を確認することができた. その結果に基づき, 無次元数を導出した結果, 材料の材質, 大きさによらず, フラッタ周波数を整理できるパラメータであることを示した. 矩形の板は検証計算に使用しやすい形の一つであり, 実験結果との比較に利用できるものと考える.

参 考 文 献

(1) Eloy, C., Souilliez, C., Schouveiler, L., "Flutter of a rectangular plate", J. Fluids Struct., 23, 904-919 (2007).
(2) 伊藤憲一, 剛体と弾性体を用いた翼のフラッタ特性に関する研究(GS 流体工学(流体計測,翼など)), 日本機械学会, 東海支部総会講演会講演論文集,(2009).
(3) 黒川雄太, フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定: その 2 重量比およびアスペクト比が風荷重に与える影響(膜構造:風洞,構造 I), 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, (2007).
(4) 山口信行, 伊藤恵介, 緒方正幸, 柔軟ウェブ基礎形態のフラッタ限界とその挙動に関する研究 (第 1 報, フラッタ限界の予測と風洞試験結果), 日本機械学会論文集 (B 編), 67 巻, 663 号 (2001-11), pp. 2738-2745.
(5) 五十嵐保, 杉山均, 流体工学と伝熱工学のための次元解析活用法, 共立出版, (2013).

3.4. 精度・妥当性検証グループ

本グループでは，シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・妥当性を向上させるための技術の研究を行っている．シミュレーションも実験も誤差を含んでおり，精度の検証および改良は重要なテーマである．具体的には，(1)効率的で精度のよい解析技術と実験のばらつきの解析精度への影響の研究，(2)物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発，(3)オープン CAE(固体の有限要素法)を用いた精度検証などの研究を行っている．本年度から新藤先生かグループに加わり，(4)人体膝関節モデルを用いた接触応力分布解析を行った．また，(5)工学における最適化そのものの理論的研究も継続して行った．一番目のテーマは昨年に引き続き段ボールの解析の研究を行った．本年度は，実験のばらつきを考慮した精度・妥当性の検証に結びつけるため，ベイズ推定を用いて実験データのばらつきを考慮して，推定した材料の値の妥当性を検討した．これにより，解析結果の精度・妥当性の検証もできるようになった．材料データベースに関しては，昨年に引き続きデータベースの構築の研究を行っているが，SIP の開始から 3 年度目の中間評価にあたり，統合システムのプロトタイプ開発グループとの連携を中心に行った．プロジェクトで使用している共通鋼材について，分析データ，引張試データなどをサンプルとして XML Schema を用いたスキーマ定義を開発し，OpenMath を用いて記述した構成方程式，拡張したオントロジーを用いてデータの統合に関わる検証のためのサンプルを開発した．オープン CAE を用いた精度検証については，ランス電力(EdF)が開発した Salome-Meca を引き続き用いているが，2016 年度は，詳細な試験データが報告書として公開されている非定常熱伝導繰り返しによる熱疲労試験を取り上げ，非定常熱伝導解析と弾性熱応力解析を行い，試験データのほか，商用 CAE ソルバ MSC.Marc とも比較した．本年度から追加された人体膝関節モデルは，人体膝関節に着目し，その半月板に発生する接触応力分布および周辺の骨に生ずる応力分布について有限要素法を用いた構造解析(接触)を行った．工学における最適化手法のそのものの理論的研究では，進化計算を用いた協調ゲームとプログラム意味論を基にした言語との結合の可能性の理論的検討を行った．

3.4.1. ベイズ推定を用いた効率的精度解析技術の開発

(1) 目標・計画

段ボールは加工食品向けや，青果物の向けの食料品を主体に，電気，精密機械，ガラス・陶磁品，インターネット販売，引越しなど，多種多様な業界で用いられ物流には欠かせない梱包以外に緩衝材としての役割も果たす材料である．しかし段ボールは中芯形状が複雑であり，抄造機によって抄造された板紙は抄造方向に紙を構成する繊維が配列するため抄造方向と垂直方向で弾性率が異なる異方性材料であるため通常の数値シミュレーション解析は困難とされる．そこで，本研究では段ボールの中芯形状の周期性に着目し均質化法を用いて実験と数値シミュレーション解析から効率的に弾性率を算出する手法を提案する．また，提案手法により算出された弾性率は実験，数値シミュレーション解析など算出するまでの過程で不確定性含

み定量的に評価することは重要である. このアプローチとしてベイズ推定が有効であるとされる. したがって, ベイズ推定に用いられる異なる確率モデルを比較し, 不確定性を最低限考慮した確率モデルの構築を目指す.

(2) 意義・国際社会との比較

段ボールは梱包や緩衝材といった他, 近年, インターネット通販の発展により段ボールの市場は大きく物流を支える大きな要因となっている. しかし段ボールの設計は試行錯誤や過去の経験に依存している. 設計段階での数値シミュレーション解析を実施し設計の検討を行うことは支流となっているが現状では段ボールの決定的な解析手法は確立されておらず, 設計の非効率さを招いているといえる. 本研究で提案する手法は段ボール解析を効率的に行なう一つのアプローチとなる取り組みと考えられる. また, 妥当性のある解析結果の評価方法の概念として Model Validation and Verification (Model V&V)は国際的に重要な位置づけをされている. したがって, 提案手法によって算出されたパラメータを用いた解析結果の妥当性を検討することは国際的にも意義のあることである.

(3) 研究内容

曲げ試験

一層段ボールの平面曲げ特性を把握するため図 1(a)に示す試験機を作成し曲げ試験を行った. 測定は試験片の両端を治具で完全固定し圧子により圧縮速度 10mm/min で荷重を与え, 負荷をセンサーにより段が完全に潰れるまで行った. また, 本研究では図 2(b)に示す中芯の 2 方向に対して試験毎に新しい試験片を用いて同手順による測定を CD, MD それぞれ 10 回行う. また, 本研究では図 2 に示すように測定された測定値に対し回帰直線を求め解析領域を $(0.5 \leq x \leq 2.0)$に限定して議論を行う.

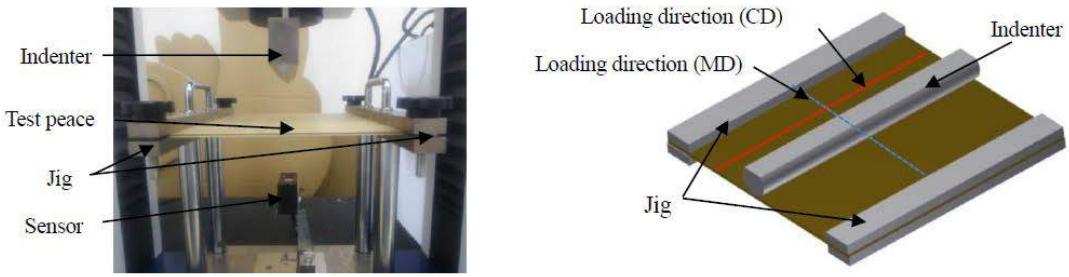


Fig.1 Bending test of corrugated cardboard

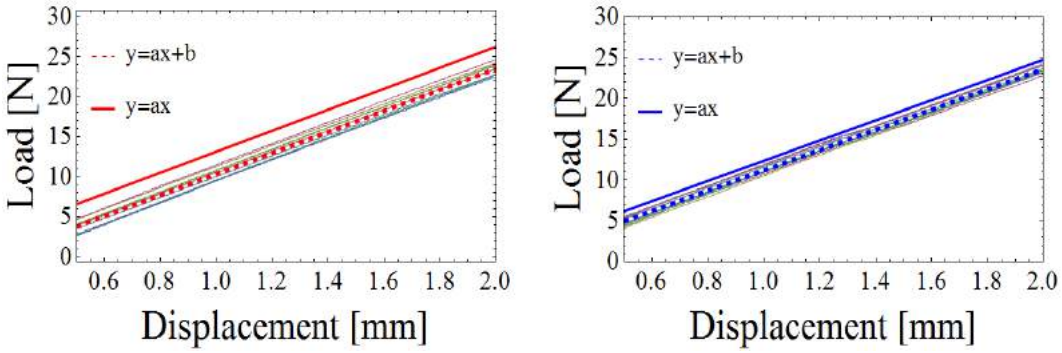


Fig.2 Load – distribution characteristic

均質化法

段ボールを対象に数値シミュレーション解析を行う場合，段ボールを構成する段が非常に密であるためモデル化や境界条件の設定に手間がかかる．また各段に対してメッシュを切る必要があるため通常の有限要素解析では離散化が困難であることや，非常に多くの節点数，要素数を有するため計算コストや時間が実用的ではない．そのため段ボールの詳細モデルを作成し解析を行なうのは非効率的である．そこで本研究では段ボールの段の周期性を活かし均質化法を用いて段ボールの数値シミュレーション解析を行なった．均質化法は周期的な微視構造を有する不均質体を効率よく解く解法として知られ単位周期である微視的基本構造単位(ユニットセル)と解析領域全体を対象とする全体構造の異なる 2 つの空間スケールから，支配方程式を連立して解くことにより微視―巨視連成挙動解析を可能にするものである．本研究では図 3(a)に示す段ボールの一つの段をモデル化したミクロモデル図 3(b)に実験に用いた試験片度同寸法をモデル化したマクロモデルを示す．

(a) Micro model　　(b) Macro model

Fig3. Homogenization model

回帰直線 CD，MD より一意にお決定した荷重から求めた，変位にフィットするような材料特性の組み合わせをそれぞれ均質化法を用いて探索を行う． F_{20}を回帰直線 CD，MD の一意に決定した荷重 20N としe_1，e_2をそれぞれライナと中芯とすると式 1 に示すように定式化できる．

$$\mathrm{im}(F_{20})\left(\left\{(e_1,e_2)\middle|e_1,e_2\in\{1e^3,2e^3,3e^3,\cdots 1e^4\}\right\}\right) \quad (1)$$

材料特性の算出

前節による解析結果からCD, MDそれぞれ応答曲面を作成し, 図4に示す応答曲面の解空間より交点の座標を材料特性の推定値とする.

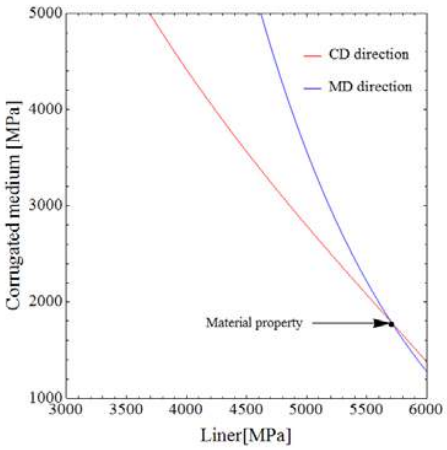


Fig.4 Inference of material property by intersection of coordinate

材料特性の検証

本研究で求めた材料特性が有効であるか検証を行う. 図 5 は均質化法を用いて線形範囲上の荷重を境界条件とし解析を行い, 回帰直線と比較した結果をそれぞれ示す. 比較結果より回帰直線の変位データを合理的に数値シミュレーションに取り込むことにより材料特性を求めた. したがって, CD, MD それぞれ回帰直線の値と概ね一致しており材料特性の有効性が確認できた.

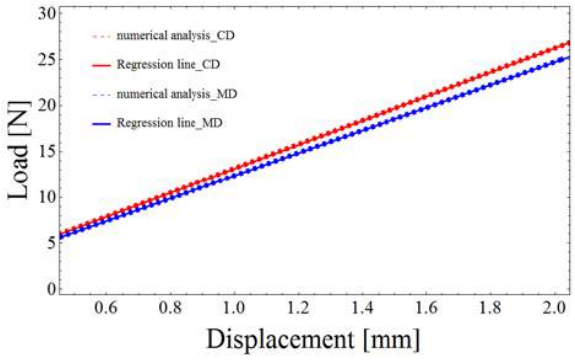


Fig.5 Comparison of between reduction regression line and numerical analysis

材料特性の検証

本来解析者はある事象に対して結果が得られたときの原因について推定する立場である. しかし現実問題として実際に知ることができるのはある原因がもとで得られた結果である事象の場合が多くを占める. ベイズの定理はこのような直接計算するのが困難である結果に対する原因を逆確率という形式で結果から原因を計算する公式を与えるもので式 2 に示すことができる.

$$p(\theta|D) \propto f(D|\theta)p(\theta) \tag{2}$$

ここで原因をデータD, 結果をパラメータθと置き換えると$p(\theta|D)$は事後確率でありデータ D のもとでパラメータθが得られる確率である. 事後確率はパラメータに対する尤もらしさを示す尤度関数$f(D|\theta)$と文献, 過去の知見やデータといった解析者の有する主観的な情報を反映させた事前確率$p(\theta)$を乗ずることで導き出している.

確率モデル

本研究では下記に示す確率モデルについて議論を行うため Case A では明瞭な因子を考慮しない従来型ベイズモデル, Case B, C では解析者が最低限把握している不確定性を考慮したパラメータの異なる最単純型階層ベイズモデルを作成した.

Case A: 従来型ベイズモデル

荷重条件 F, 段ボールの各方向 CD, MD における拘束条件 C のもとで得られた解析結果より作成した応答曲面の変位uから弾性率 E(ライナ: E_{Liner}, 中芯: E_{CM})の弾性率を推定する. 従って尤度は次式のようになる.

$$L(u|F,C) \tag{3}$$

Case B, C: 最単純化階層ベイズモデル

実験値の観測誤差の因子を加えた応答曲面の変位uから弾性率を推定する. 実験値yは試験により測定された変位, λは圧子の初期位置, 試験片の拘束など測定により生じる誤差, $N[u,\lambda^{-1}]$は正規分布を表す. 従って実験値yが正規分布に従うとすると分布は式 4 となる.

$$y|u,\lambda \sim N[u,\lambda^{-1}] \tag{4}$$

ここで実験精度λ^{-1}は実験の正確さであり実験誤差の尺度を制御する, 実験精度λ^{-1}は式 5 に示すガンマ分布に従うとする.

$$\lambda^{-1} \sim Ga[\alpha,\beta] \tag{5}$$

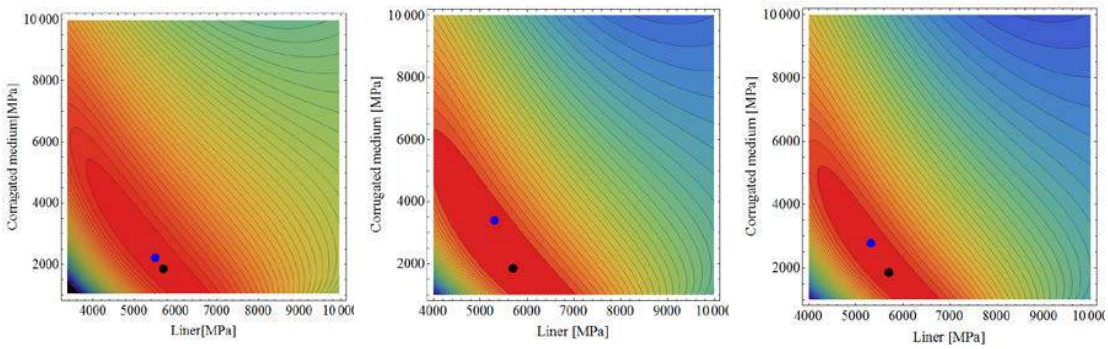
ここでα, βはガンマ分布を支配するパラメータでありα > 0, β > 0という制約条件が課せられる. 従って尤度は次式となる.

$$L(y|\mathrm{F},\mathrm{C},\mathrm{E},\alpha,\beta) \tag{6}$$

推定結果

図に観測データ 20 データ(D_i^{CD}, D_i^{MD}), 一様分布を用いてそれぞれの確率モデルに対してベイズ

推定を行なった結果の事後分布，表 4 に平均と分散の定量値を示す．



(a) Case A　　(b) Case B　　(c) Case C

Fig.6 Posterior distribution

Table.1 Values of average and variance

Parameter	Case A		Case B		Case C	
	Ave	Var	Ave	Var	Ave	Var
Liner	5494	6892.2	5305	6825.8	5319	3673.7
Corrugated medium	2211	16070	3389	27392	2774	13396

結果と考察

通常の有限要素解析では段ボール構造が複雑であるためモデル化や境界条件の設定に手間がかかり非効率であるが，段ボールの周期性構造に着目し均質化法を適用することで詳細なモデルによる解析を必要とすることなくミクロモデルとマクロモデルから段を考慮した全体構造解析が可能となり，効率的に解析を行えることが示された従来型ベイズモデルでは不確定因子の影響を明瞭に考慮しておらず，最単純化階層ベイズモデルと比較するとよい推定結果であるが，不確定性を妥当に表現しているとは言い難く，一方で最単純化ベイズモデルでは明瞭な不確定因子を考慮することでより真の現象を表現することができ，不確定因子のパラメータを設けることで推定の自由度が増ということがいえる．

(4) 平成 28 年度進捗状況

不確定性因子をすべて考慮した確率モデルは非常に複雑となるため，最低限必要となる実験の不確定性を考慮し確率モデルを階層型へと拡張した．実験精度のばらつきをガンマ分布で定義しガンマ分布を支配するパラメータ値に異なる値を設定した推定結果の比較を行った．

(5) まとめ

段ボールを対象に実験と数値シミュレーション解析からデータ同化により効率的に弾性率を算出

する手法を提案した. 数値シミュレーション解析においては段ボールの中芯の周期性に着目し均質化法を用いることで段ボールの詳細モデルを作成することが避けられ計算コスト, 計算時間を大幅に削減することができた. また, ベイズ推定による不確定性を評価するため, 最低限必要となる因子を考慮した実用的な確率モデルを構築した.

3.4.2. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発

(1) 目標・計画

数値シミュレーションのために基本的な物性値は必須のものであるが, 材料の物性値を収めたデータベースにおけるデータ表現は統一されておらず, 多くの材料データベースがインターネット上に存在する現在でも, 必要なデータは事実上手作業で値を入力する必要がある. 本研究では, 材料データの標準データ交換形式を開発し, 数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的とする.

(2) 意義・国際社会との比較

材料物性に関するデータベースは各所で開発されているが, 統一されたフォーマットは無く, データを交換するための標準を作成する試みは NIST などによって行われてきたが現在のところ定まった標準がない. データ交換のためのフォーマットが統一されることにより, 分散したデータベースの統合利用に加え, 数値計算システムなどからの利用も容易になる.

米国では従来からあった材料開発に計算機シミュレーション, データを活用しようという研究を統合する形でマテリアルズ・ゲノム・イニシアティブ(MGI)が国策として推進されるようになった. 2014 年には我が国においてもマテリアルズ・インフォマティクスに関連する研究プロジェクトが注目され, 物質・材料研究機構にプラットフォームが設置されるなどしている. 内閣府戦略イノベーション創造プログラム(SIP)では, テーマの一つである革新的構造材料分野が取り上げられた.

革新的構造材料分野には東大・小関教授を代表者として, 関連するメカニズムに関わる複数のシミュレーション, データなどを統合して構造材料の性能評価を行うマテリアルズ・インテグレーション(MI)が採択され, 平成 26 年度より 5 年間で構造物溶接部の性能評価を例題としてシステム開発を行うこととなった. 芦野はここに分担者として参画し, セマンティック・ウェブ技術を用いた材料に関する数式・データ・シミュレーションを連携させるためのデータ構造開発を行っている.

中国では, やはり MGI の影響を受けた China MGI の活動が始まり, 北京科学技術大学, 上海大学に設置された MGI Institute などにおいて材料研究者, 情報科学研究者などが連携して活発な活動を進めている.

(3) 研究内容

セマンティック・ウェブの一連の規格である RDF (Resource Description Framework), OWL (Web Ontology Language) , RIF (Rule Interchange Format),および数式の意味内容を記述する OpenMath など XML を用いた記法を用いて, 既にある程度知見の整備されている機械試験, クリープなどを例題として関連した経験式, 推論規則, データを記述してリンクし, 検索言語 SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language)を用いて検索する.

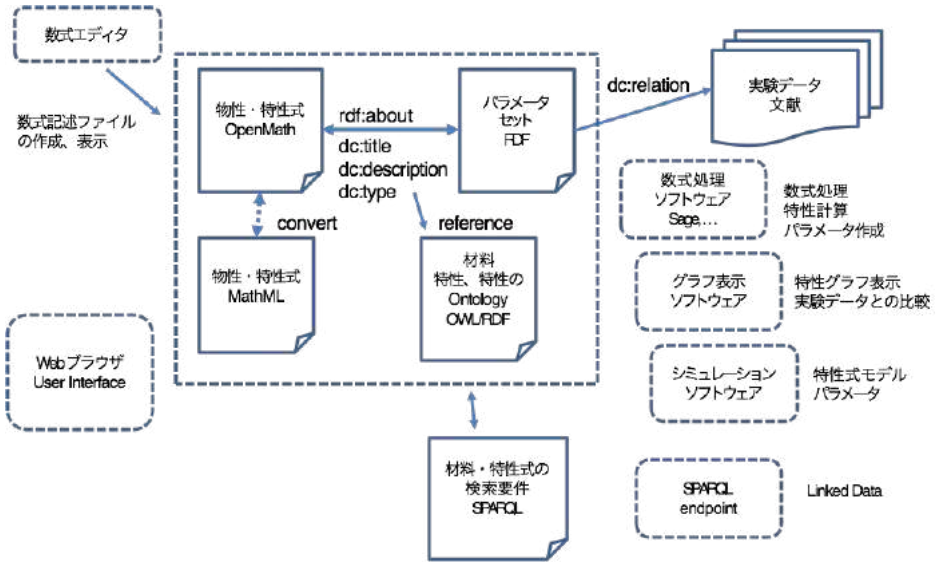


Figure 1. Application of the Semantic Web Framework for Materials Integration

共通のフレームワークを用いてデータ・計算結果・数式・オントロジーを記述することで, 材料に関わるデータと知識の連携のための共通基盤を構築し, MI プロジェクトにおいて開発されている統合システムのデータ基盤を構築する.

(4) 平成 28 年度進捗状況

SIP の開始から 3 年度目の中間評価にあたり, 統合システムのプロトタイプ開発グループとの連携を中心に行った. プロジェクトで使用している共通鋼材について, 分析データ, 引張試データなどをサンプルとして XML Schema を用いたスキーマ定義を開発し, OpenMath を用いて記述した構成方程式, 拡張したオントロジーを用いてデータの統合に関わる検証のためのサンプルを開発した. これらの結果は統合システムにおいて各段階のモデル計算結果, データなどを保存するデータベースの設計に反映されている.

9 月にはデンバーで開催された International Data Week において NIST をはじめとする米 MGI

のグループとの議論に加わった. また, 10 月にはベトナム・ハノイで開催された AMDS2016 (The 5th Asian Materials Database Symposium) においてオントロジーを用いたデータ統合, SIP プロジェクトの統合システム開発などについてキーノート講演を行った. 本シンポジウムでは参加していた中国 China MGI に関わる北京科学技術大学のグループとの間で材料オントロジーなどに関する議論を行った.

(5) まとめ

本研究では, インターネット上でのデータとメタデータ表記の標準であるセマンティック・ウェブの記述を用いることで, 材料のマクロ特性の評価に必要な実験データ, シミュレーションの出力, 経験式など異種のデータに統一的な記法とオントロジーによる共通の語彙を与え, MI の統合システムの基盤開発を行った.

3.4.3. オープン CAE（固体の有限要素法）を用いた熱疲労試験の再現解析による精度検証

(1) 目標・計画

製造業の設計現場をはじめとして広く用いられている固体の有限要素解析に対する「解析の品質確保」の重要性は広く認識されている通りである. 企業でよく使用されている商用ソルバでは, ソルバ開発元によるソフトウエア品質管理とユーザ支援によってある程度の品質確保が図られており, ソースコードの秘匿化により, ユーザ自身がアルゴリズムを確認することはあまりない. 近年, 利用が広がりつつあるオープン CAE の場合は, ソースコードが公開されているためユーザ自身が確認, 改変ができる一方で, ソフトウエア品質とユーザ技量の両方の検証がユーザに委ねられるため, V&V における新たな課題が提起されている. ただし, ソースコードが公開され, 無償であることからアクセス性が高く, オープン CAE が商用ソルバよりも社会的受容性に優れている側面もある.

本研究では, 固体の有限要素解析に対する精度検証の方法と事例を蓄積し, 公開する上で, 商用ソルバと並んでオープン CAE を取り上げることで, より幅広いユーザが自ら取り組み得る V&V 活動の実例として提示する.

(2) 意義・国際社会との比較

誰もがアクセスできるオープン CAE を取り上げることで, 市民的目線での検証が可能になり, 精度検証の客観性, 計算力学に対する社会的受容性が高まる. 安価な検証手段を提示することで新興国や小規模企業での普及にも貢献し得る. また, 形状モデルデータや可視化ツールを製品開発・製造のための共通プラットフォームとしての利用が可能であることから, ものつくりのグローバル化に寄与する. ユーザ自身に対して高い技術力を要求することから, 意欲のあるユーザの自己研さん（結果的に解析の品質確保につながる）のための利用でも有利になる.

(3) 研究内容

オープン CAE の一例としてフランス電力（EdF）が開発した Salome-Meca [1] を取り上げ，精度・妥当性検証を行う．2015 年度は，広く使用されている標準引張試験機を用いた引張試験を再現し，材料非線形，幾何学的非線形問題に対する精度・妥当性検証を行った [2]．

2016 年度は，詳細な試験データが報告書として公開されている非定常熱伝導繰り返しによる熱疲労試験 [2] を取り上げ，非定常熱伝導解析と弾性熱応力解析を行い，試験データのほか，商用 CAE ソルバ MSC.Marc [3] とも比較した．

(4) 平成 28 年度進捗状況

(a) 解析対象

解析対象は図 1 に示す内径 53.5mm，最小肉厚 3.5mm，最大肉厚 30mm の軸対称，左右対称構造厚肉円筒試験体である．材料として，高い熱応力が生じやすい SUS304 が使用されている．また，試験方法として，試験体内部に温度の異なる 2 種類の液体金属ナトリウムが交互に流し込まれた．表 1 に SUS304 液体ナトリウムの物性値を示す．ナトリウムの温度差によって，試験体に繰返し熱過渡応力が発生させられた．流量 100 リットル毎分の液体ナトリウム高速流により，温度 600℃で 40 分の急熱と温度 300℃で 10 分の急冷の繰返しが 2000 回行われた．また，試験結果として試験体外表面の 2 点（肉厚 16.75mm 部と肉厚 30mm 部）と入り口ナトリウム温度が計測され，試験後の試験体のき裂の発生状況が観測された．試験結果を図 2，図 3 に示す．

(b) 解析方法

解析にはオープン CAE システム，Salome-Meca 2015.1 に内包されたソルバ Code_Aster Ver. 11.7 [1] を使用した．解析モデルと要素分割，境界条件を図 4 に示す．他のソルバとの比較を容易にするため，解析モデルや方法をできるだけ単純化している． 要素は四辺形 2 次要素を使用した．左端（ナトリウム入り口側）は軸方向変位従属とし，右端は軸方向変位を 0 に設定した．熱伝導解析では，解析モデルの初期温度を 300℃とし，内面に，表 2 と図 2 の値を用いてナトリウムによる 50 分間の熱過渡を与えた．また，試験体の外面はすべて断熱とした．材料特性の設定として，各物性値はすべて報告書[3]より引用した．

解析実行用のコマンドファイルとして，非定常熱伝導解析では温度依存のデータの読み込み（Code-Aster のキーワードでは DEFI_FONCTION）と非線形・非定常解析の境界条件（同，AFFE_CHAR_THER_F）を設定し，解析を実行した．熱応力解析では，非定常熱伝導解析結果の

継承コマンド（同, POURSUITE）を使用した.

(c) 解析結果

外面評価点における, 非定常熱伝導解析結果と試験での温度計測結果の比較を図 5 に示す. 厚肉部は温度追従が遅く, 薄肉部は温度追従が速いことが分かる. 解析結果と温度計測結果において, 急熱と急冷ともに温度変化率がよく一致した結果が得られた.

Salome-Meca での解析結果より, ミーゼスの相当応力の瞬間値が最大となる 2 時刻点における解析モデル内の温度分布を図 6 に, ミーゼスの相当応力の分布を図 7 に示す. これらの図より, 内面と外面の温度差が大きいほど内面に大きな応力が発生している.

熱疲労の評価には, 瞬間のミーゼス相当応力ではなく, 熱荷重サイクル中の 2 時刻点の差に対するミーゼス相当応力範囲が用いられる [4] . MSC.Marc™ と Salome-Meca において, 内面でのミーゼスの最大ピーク応力範囲を計算した結果を表 2 に示す. 大きな熱応力の発生する厚肉部では, 2 つの解析ソフトにおいて計算結果が一致した. 薄肉部での誤差の原因として, 非定常熱伝導解析の結果に若干の違いがあり, その結果, 応力に有意差を生じたものと考えている. Salome-Meca でのミーゼスの最大ピーク応力範囲計算結果と試験でのき裂の発生状況の比較を図 8 に示す. 図 8 からわかるように, 厚肉になるほど, 深いき裂が観測された.

(d) 解析結果のまとめ

日本原子力研究開発機構で実施された繰返し熱過渡試験の再現解析による精度検証を行った. ミーゼスの最大応力範囲を計算すると, 厚肉部において, 2 つの解析ソフトで近い値が得られた. 試験でのき裂の発生状況は, 解析結果とよく一致した. 以上より, 本解析結果は V&V データとして有効であることを確認した.

今後は, 最新の火力発電機器に用いられている改良 9Cr-1Mo 鋼に対する日本原子力研究機構による同様な試験 [5] など, 検証事例を蓄積し, 数値解析に対する信頼性・社会的受容性を高めて行く所存である.

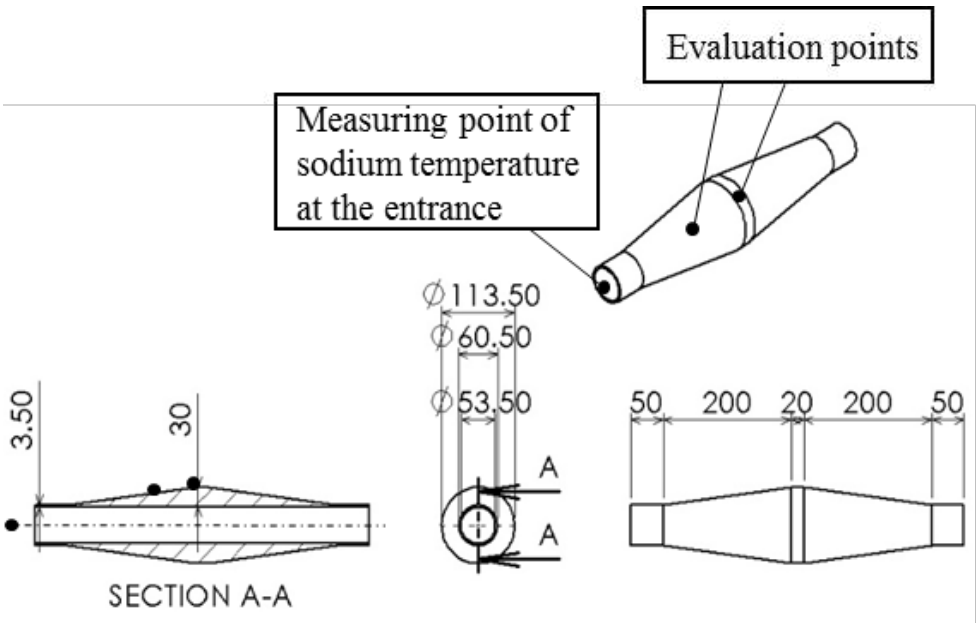


Fig. 1 Configuration of the specimen and temperature measuring points

Table 1 Material properties used the heat transfer analysis and the elastic analysis

T (^{o}C)	λ (Kcal/m h ^{o}C)	C_p (Kcal/kg ^{o}C)	ρ (kg/m^{3})	E (kg/mm^{2})	v	α (10^{-6} mm/mm ^{o}C)
300	15.732	0.129	7900	18000	0.287	18.79
350	16.308	0.131	7880	17600	0.291	19.19
400	16.920	0.132	7860	17200	0.295	19.57
450	17.496	0.133	7830	16700	0.298	19.93
500	18.072	0.134	7810	16200	0.302	20.28
550	18.648	0.136	7790	15700	0.306	20.60
600	19.224	0.138	7760	15200	0.310	20.87

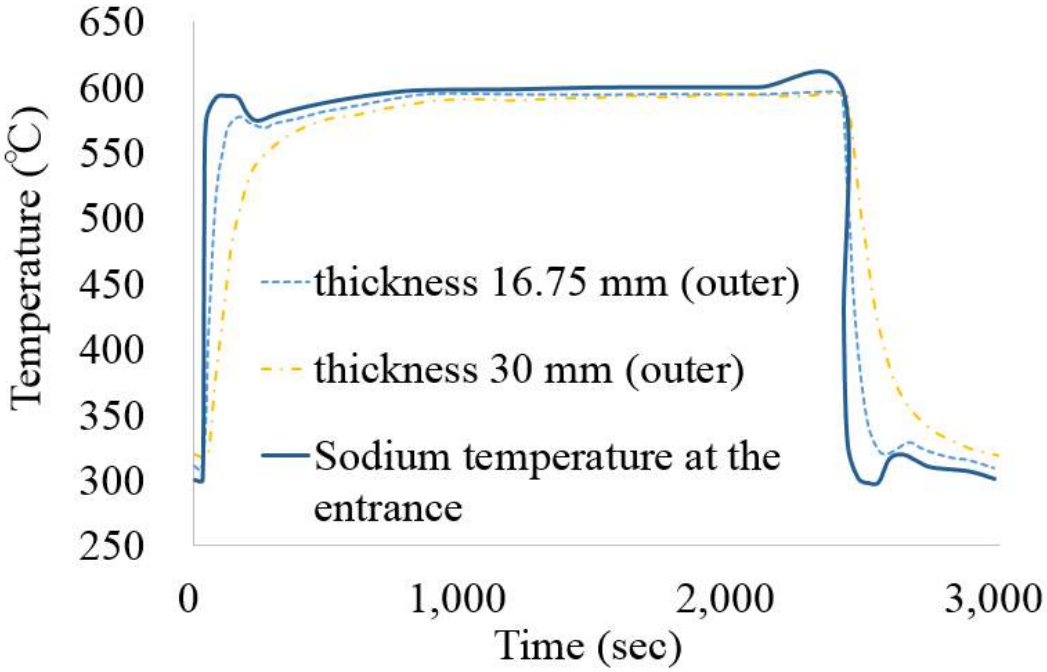


Fig. 2 Temperature histories at the evaluation points [2]

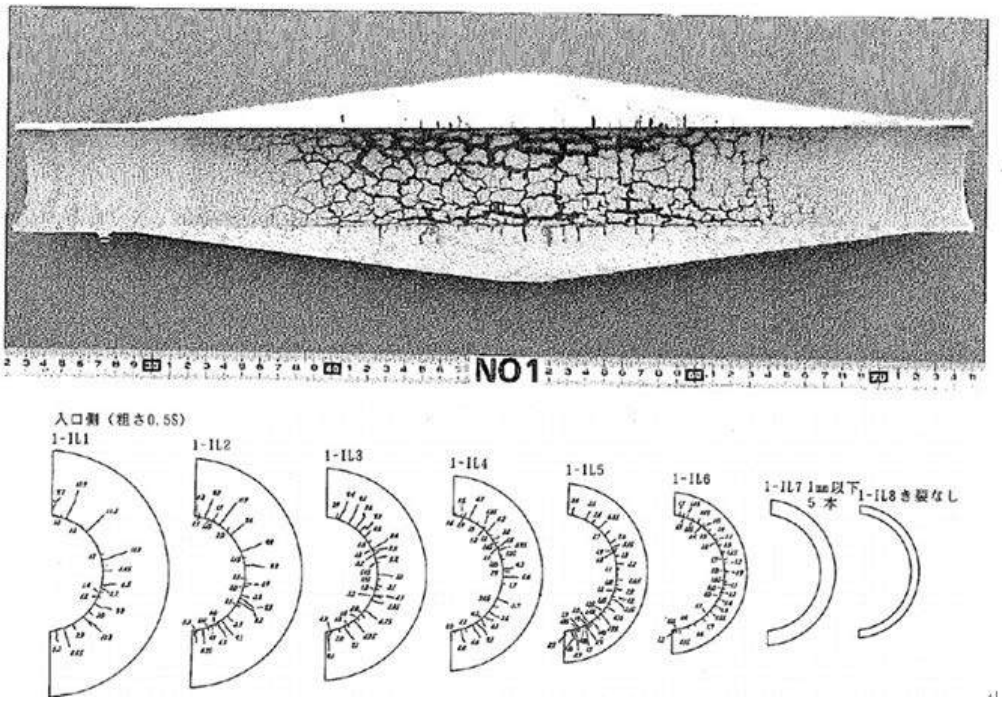


Fig. 3 Results of crack observation [2]

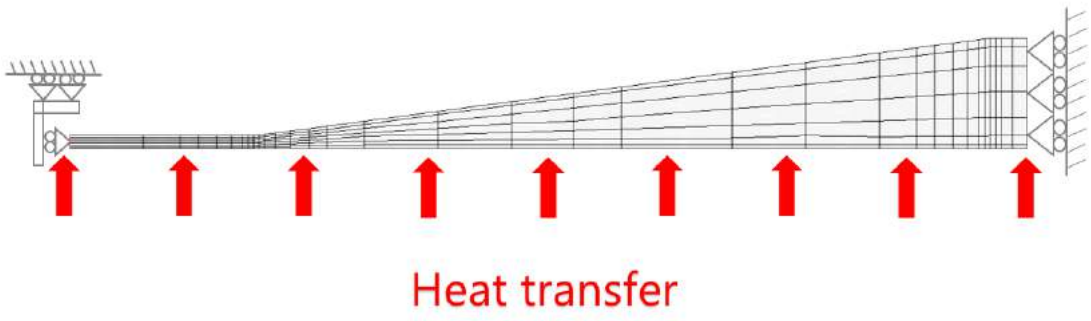


Fig. 4 The model used the simulation analysis and boundary conditions

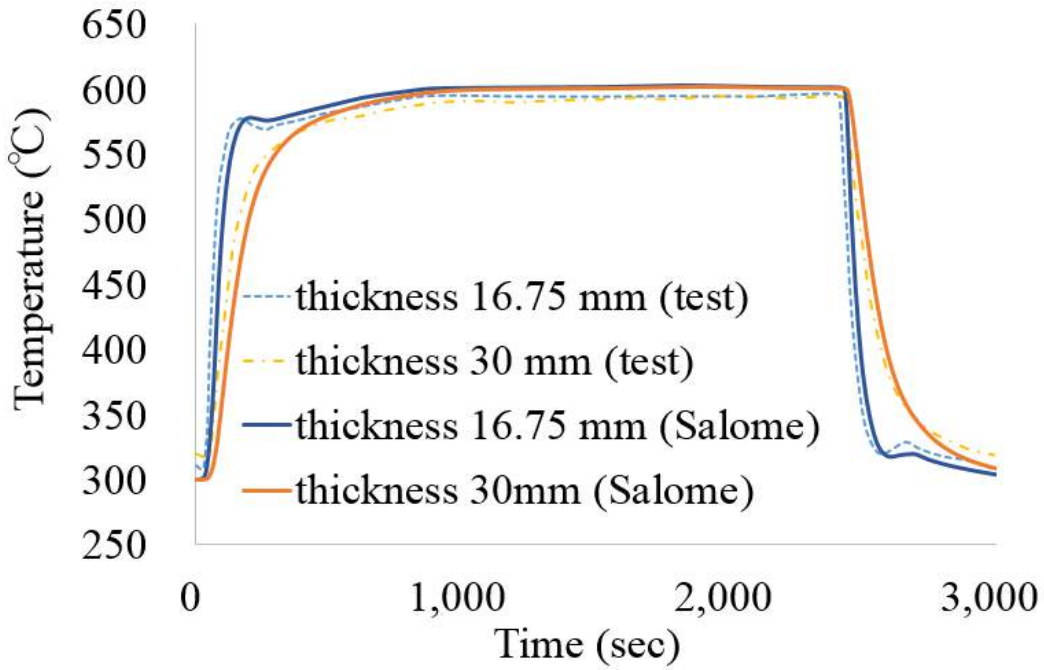


Fig. 5 Temperature histories at the evaluation points

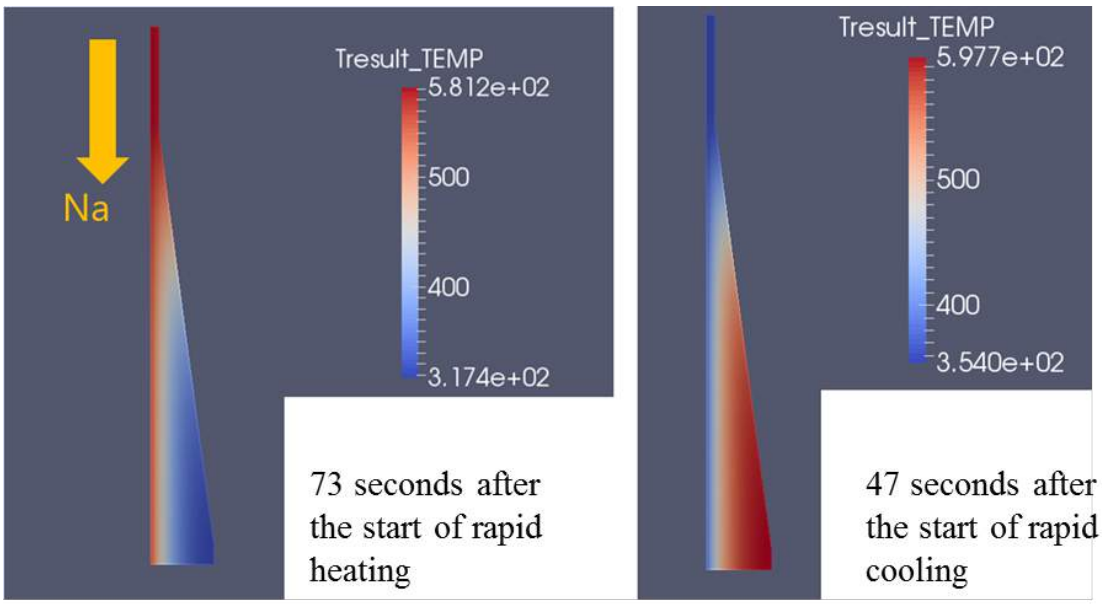


Fig. 6 Temperature distribution at time steps calculated maximum moment equivalent stress

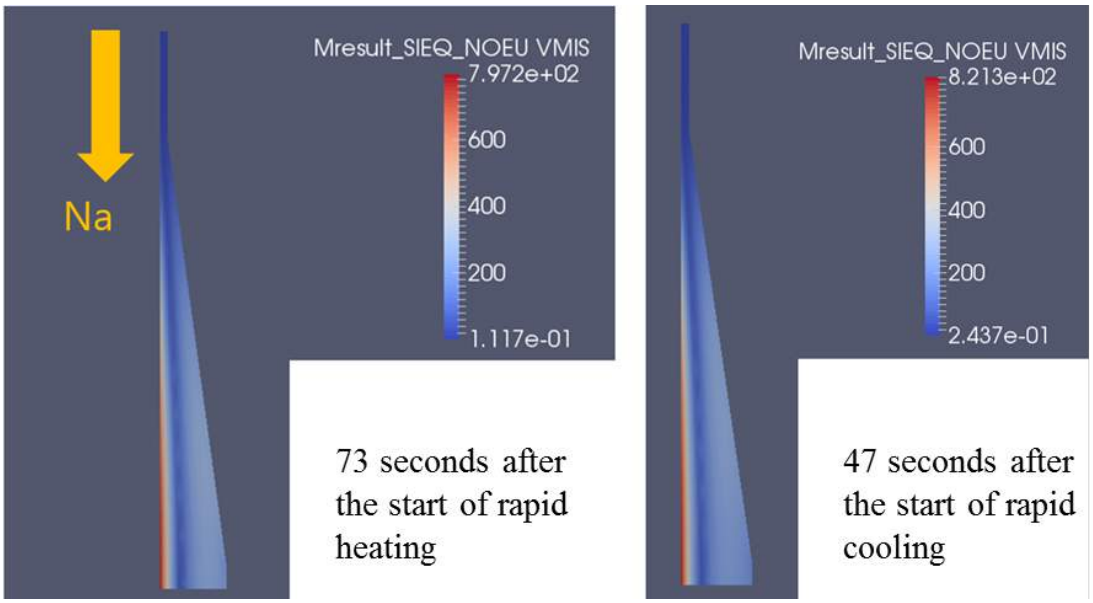


Fig. 7 Mises equivalent stress distribution at time steps calculated maximum moment equivalent stress

Table 2 Results of stress range calculation

Z coodinates of inner surface (mm)	Salome-Meca (MPa)	MSC.Marc™ (MPa)
0	40.48	140.6
10	134.7	211.1
110	1194	1213
250	1617	1630
260	1618	1640

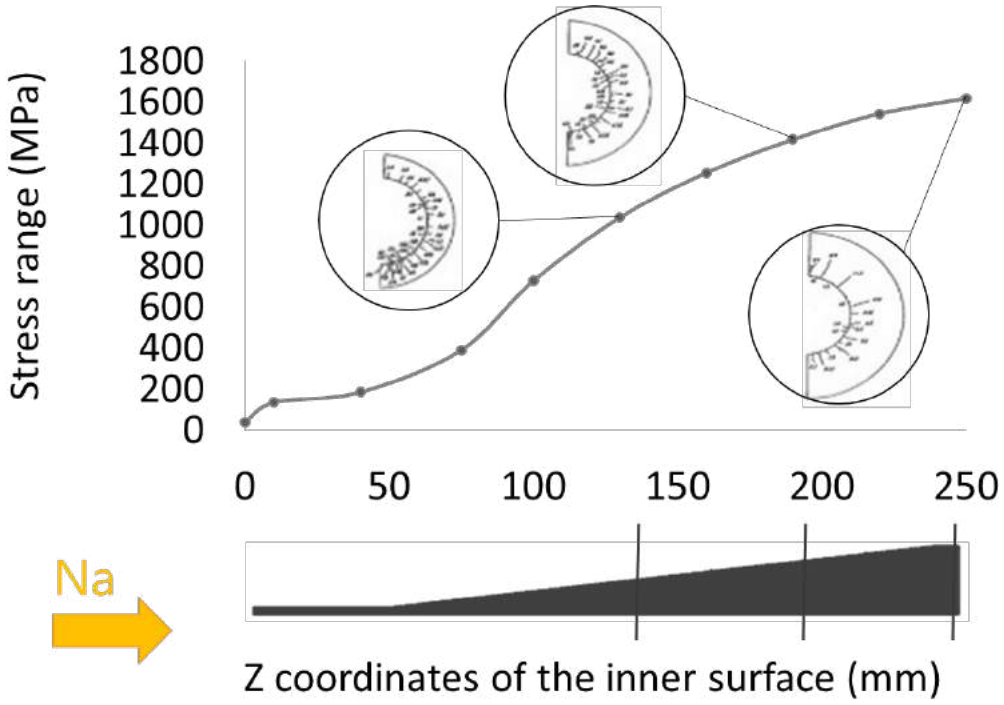


Fig. 8 Distribution of stress ranges compared with crack observations

参考文献

[1] EdF, Code-Aster.org, http://www.code-aster.org/, (2016 年 12 月 23 日閲覧).

[2] 藤岡照高, 構造解析ソルバ検証用参照解の整備(低合金鋼引張試験の Code-Aster による再現), オープン CAE シンポジウム 2015@富山, 富山, 2015(11).

[3] MSC Software, http://www.mscsoftware.com/, (2016 年 12 月 23 日閲覧).

[4] ASME, 2004, Boiler and Pressure Vessels Code, Section III - Rules for Construction of Nuclear Facility Components, Subsection NH - Class 1 Components Elevated Temperature Services.

[5] M. Ando *et al*., Thermal transient test and strength evaluation of a thick cylinder model made of Mod.9Cr-1Mo steel, Nuclear Engineering and Design 255, 2013, pp. 296-309.

3.4.4.　人体膝関節モデルを用いた接触応力分布解析

(1) 目標・計画

変形性関節症は潜在的なものを含めると，日本全国に2400 万人の罹患者がいると推定されている．変形性関節症の進行に伴い，関節面に変性が生じるため，関節可動域の減少および日常的な歩行運動に伴う痛みが増幅するため，日常生活への影響も大きい．健康的で質の高い日常生活を送るためには，変形性関節症の病変発生・進行のメカニズム解明が必要不可欠である[1,2]．

しかしながら，現時点において，変形性関節症の発生・進行のメカニズムは数値的には解明されていない．特に，人体モデルのような複雑形状モデルを対象とした構造解析において，その解析精度および妥当性を検証することは，整形外科分野のみならずスポーツ科学分野やバイオメカニクス関連研究において重要な研究課題であるといえる[3, 4]．

本研究では，3D スキャナを用いて再現した人体膝関節モデルを構造力学的観点から接触解析を行い，先行研究で実施された生体力学試験片の圧縮試験結果[5]との比較検討を行うことで，本研究で実施する解析手法の解析精度・妥当性を検証し，その有用性を確認する．

(2) 意義・国際社会との比較

解剖学的生体モデルを用いた応力分布解析の精度妥当性検証を実施することで，本解析手法の有用性を示し，生体関節部分で発生する様々な整形外科学的病変の進行予測やそのメカニズムの解明に大いに役立つことが期待される．さらに将来的に，膝関節周りの運動解析結果との連成解析を実施することで，歩行や走行などの運動中の膝関節内部の精度の高い構造解析が可能となり，国内外のスポーツ・バイオメカニクス分野へ及ぼす影響は大きいと考えられる．[3, 4]

(3) 研究内容

本研究では，人体膝関節に着目し，その半月板に発生する接触応力分布および周辺の骨に生ずる応力分布について有限要素法を用いた構造解析（接触）を行った．基礎検討として，体重60kg の人間が立位時を想定して，片足に30kg の荷重を加えたときの半月板周辺の応力分布について着目した．

(i)　解析モデルの作成

まず Fig. 1 に示すような，人体脚部標本から型取りされた，ナチュラルキャスト製の膝関節モデルを各組織ごとに分解し，DAVID Vision Systems 社製レーザースキャナ DL-SET01 を用いてモデルの 3 次元モデル化を実施した．スキャニングの様子を Fig. 2 に示す．

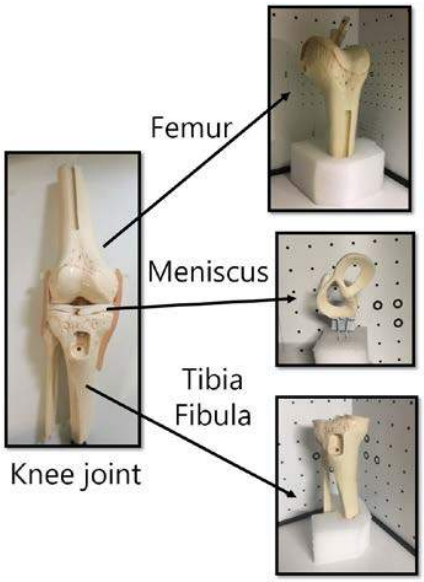


Fig.1 Functional model of the knee-joint

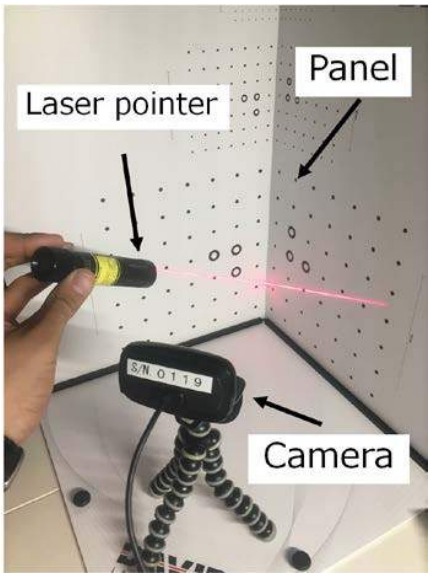


Fig.2 3D laser scanner

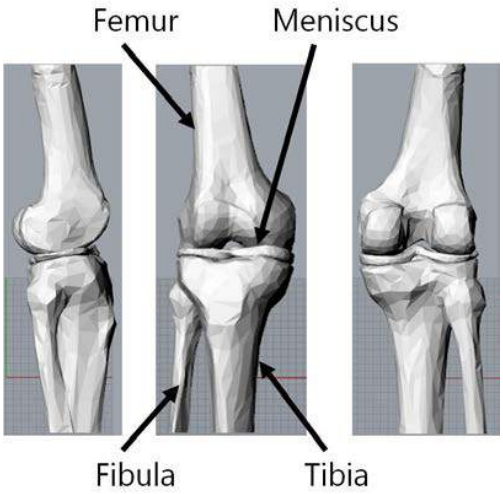


Fig.3 Scanned solid model in 3D-CAD

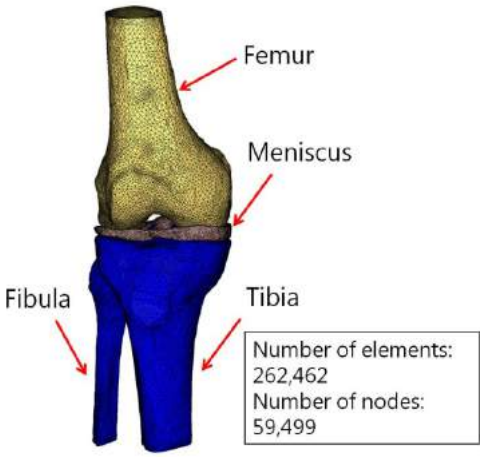


Fig.4 Finite element model of the knee

スキャンしたモデルデータを 3D-CAD ソフトにインポートし，ノイズを除去するためにスムージングしたうえでソリッドモデルを作成する．作成したソリッドモデルを Fig. 3 に示す．その後，プリプロセッサ Hyper Mesh を用いて要素分割を行い，有限要素モデルを作成した．有限要素解析モデルを Fig. 4 に示す．本解析モデルはテトラメッシュで構成されており，総要素数 262,462，総節点数 59,499 となった．本解析モデルを用いて接触解析を実施した．

(ii)　解析条件

解析には，有限要素法構造解析ソフト MSC.Marc^{TM} を使用した．本解析では，体重 60kg の対象者の立位時状態を再現した．Fig.5 に設定した境界条件を示す．脛骨と腓骨の下端断面を完全固定し，片足に体重の半分の重さがかかると想定し，大腿骨上面に 30kgf の荷重を負荷した．各組織の物性値は，Table I に示すとおりである [5]．また，大腿骨と半月板との間に接触条件を定義することで膝関節内を再現した．

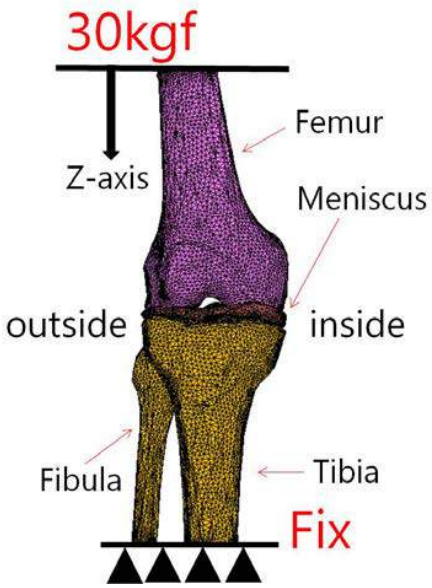


Fig. 5.　Boundary conditions

Table I. Material properties

	Young's modulus [MPa]	Poason's ratio
Femur	17700	0.3
Tibia	17700	0.3
Fibula	17700	0.3
Meniscus	10	0.49

(iii) 解析結果

Fig. 6 に脛骨の骨頭周辺の軸方向応力分布解析結果を示す. この解析結果では断面積の広い骨頭周辺に比べて細くなっている部分に応力が集中していることが確認できる. また, 先行研究との比較検討として, 2000 年に福田らが人体の膝関節片を用いて実施した, 本解析条件と同条件の圧縮試験結果 [5]と比較すると, 実験では脛骨の骨頭周辺に挿入した圧力センサにおいて軸方向応力値として 0.73±0.27MPa が計測されたのに対し, 本解析における同じ位置での応力値は 0.72MPa であり, この点の応力値において約 98.6%一致していることが確認できた.

また, Fig. 7 に全体のミーゼス応力分布解析結果および, Fig. 8 に半月板の大腿骨都の接触面のミーゼス応力分布結果を示す. Fig. 8 において内側半月板の中節から前角にかけて応力集中が確認できた. 本研究では正常アライメントの膝関節に関して立位時の解析を行ったが, 通常状態においてもこのように応力分布に不均一さがあり, 変形性関節症発生予測位置との因果関係が伺える結果となった.

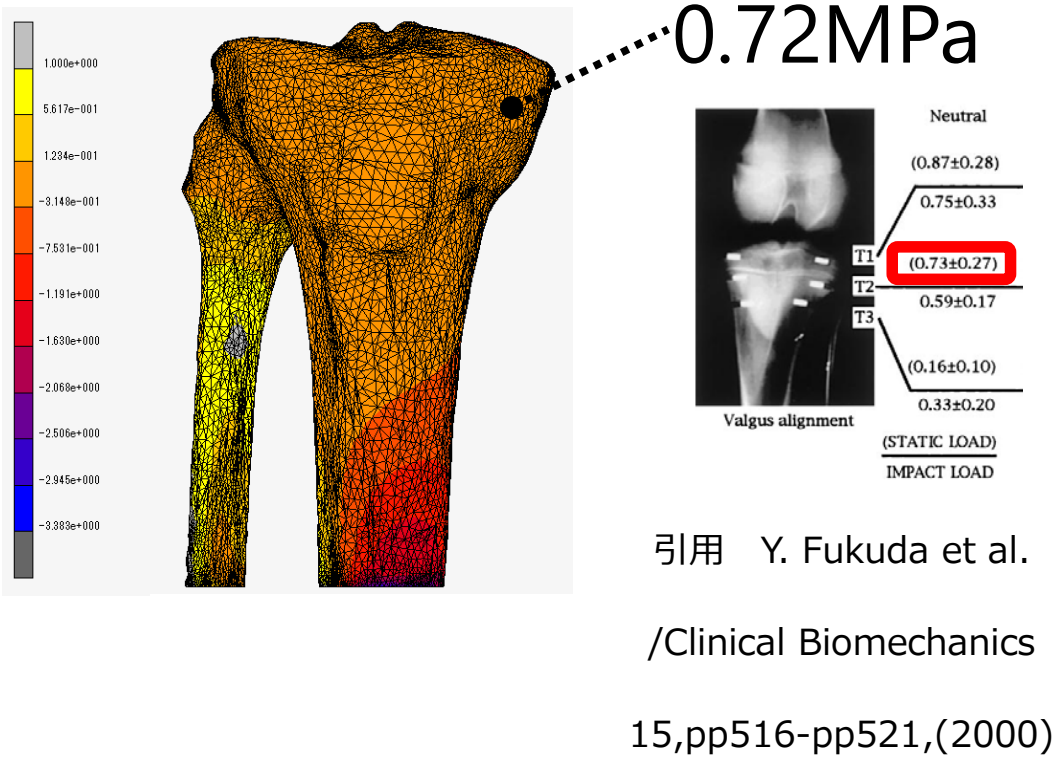


Fig. 6　Estimated result of Z-axis stress distribution and experimental result with knee bone by Y. Fukuda *et. al* in 2000

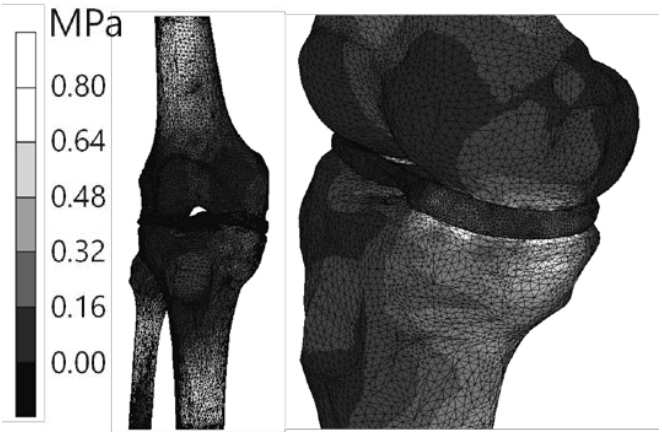


Fig. 7　Distribution of equivalent of Mises stress

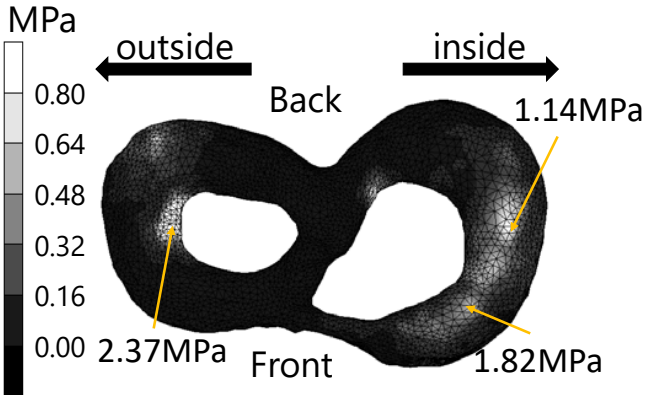


Fig. 8　Distribution of equivalent of Mises stress around the meniscus

(4) 平成 28 年度進捗状況

本年度よりプロジェクトに参画し，上記に示すようなバイオメカニクス分野における V&V を実施した．その結果，有限要素法解析結果と生体試験片を用いた力学試験結果との整合性を確認することができ，当該関連分野における有限要素法を用いた構造解析の有用性を示した．

(5) まとめ

変形性関節症をはじめとする様々な病変の進行メカニズム解明および発生位置の予測，効果的計画治療のためには人体内部の応力分布解析が必要不可欠である．本研究では，3D スキャナを用いて読み込んだ人体膝関節モデルから有限要素モデルを作成し，関節内部の構造解析を行った．その結果，先行研究において実施された生体力学試験結果と精度よく一致し，本解析手法の当該分野における有用性を示した．今後，運動解析結果との連成解析を実施し，運動中の膝関節内部の応力分布について解析を実施する予定である．

[参考文献]

(1) 立花陽明:変形性膝関節症の診断と治療, 理学療法科学, Vol.20, No.3, pp. 235-240, (2005).

(2) Kouhei MURASE, et. al. : Impact Load Transmission of Human Knee Joint Using in Vitro Drop-Tower Test and Three-Dimensional Finite Element Simulation , Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol.2, No4, pp. 218-227, (2007).

(3) 新藤康弘, 市島泰人, 藤岡照高:大腿脛骨角が関節内応力に及ぼす影響についての数値的検討, 日本設計工学会 2016 年度秋季大会講演論文集, pp. 185-186, (2016).

(4) 市島泰人, 新藤康弘, 藤岡照高:オープンソース CAE ソフト Salome-Meca を用いた膝関節半月板内における応力分布の数値的検討, オープン CAE シンポジウム 2016@東京講演会講演概要集, pp. 26, (2016)

(5) Y. Fukuda *et. al*. : Impact load transmission of the knee joint -influence of leg alignment and the role of meniscus and articular cartilage, Clinical Biomechanics, Vol.15, No.7, pp. 516-521, (2000).

3.4.5. 工学における最適化手法の進化計算を用いた最適化

(1) 目標・計画

T型フォード級のイノベーションを, 工学における最適化において実現することが目標である. 核分裂を予測・制御することで原子力発電が発明されたのと同様に, 本研究においては工学を予測・制御することで工学における最適化を最適化する.

(2) 意義・国際社会との比較

工学を工学によって良くすることで, その結果社会が良くなる. 数学や物理学, 哲学のような机上の空論とは対照的に, 工学は物事をより良くする学問だからである.

(3) 研究内容

不良設定問題を解決せずに自動車は作れない. そのため最小二乗法・ファジー論理・カルマンフィルタ・MP一般化逆写像・最尤法・最大事後確率推定などが工学では多用される.

一方, エンジニア同士の合意形成が関係するもう一つの「不良設定問題」がある. 工学においてよくある場面:『自動車を設計しているエンジニアA氏がある日, 不良設定問題に直面する. これを解決するため多くの仮定を積み重ねて1つの「解」を無事得ることができた. しかし同僚のエンジニアB氏がその仮定の一部に疑問を呈する』というものである. A氏の「解」とは異なる別の「解」があるのではないか？ということであり, 事実上この不良設定問題は解決していないといえる. 決定理論[決定理論]ではこのような「解」を決定と呼ぶ. このような人間間の合意を含む「不良設定問題」を進化ゲーム理論は扱うことが出来る.

かつてのVHS対ベータマックス戦争など，技術標準の選択問題は進化ゲームを用いて予測することができる[ゲーム，Chap.11.4]．ゲーム理論の枠組みにおいては技術標準の選択は秘密の握手[Robson90]が存在する協調ゲームの1つである．

協調ゲームはフォーカルポイント[Schelling60]で制御することができ[決定理論，Chap6.4][行動ゲーム，Chap.6.2]，工学におけるフォーカルポイントの一つに意味がある．過去の有名な例に，[Moggi91]のプログラム意味論を基にしたプログラミング言語[Wadler 92a,92b,95]の成功がある．単純なプログラムではなく，例外や入出力まで考慮した実用性の高いプログラムの意味を発見することでそれがプログラマーのフォーカルポイントとなり，その意味に基づいたプログラミング言語の Haskell という規格が普及した．

手法の性能・意味・秘密の握手を最適化することで最適化手法を最適化することが出来る．

参考文献

[Schelling60]Schelling, Thomas C. "The strategy of conflict." Cambridge, Mass (1960).

[Robson90]Robson, Arthur J. "Efficiency in evolutionary games: Darwin, Nash and the secret handshake." Journal of theoretical Biology 144.3 (1990): 379-396.

[ゲーム]岡田章．ゲーム理論．有斐閣, 2011.

[行動ゲーム]川越敏司．行動ゲーム理論入門. NTT 出版,2010.

[決定理論]松原望. "意思決定の基礎，シリーズ意思決定の科学 1."(2001).

[Moggi91]Moggi, Eugenio. “Notions of computation andmonads.” Informationand computation93.1 (1991): 55-92.

[Wadler 92a] Wadler, Philip. "Comprehendingmonads." Mathematical structures in computerscience 2.04(1992): 461-493.

[Wadler 92b] Wadler, Philip. "The essence of functionalprogramming." Proceedings of the 19th ACMSIGPLAN-SIGACT symposium on Principles of programming languages.ACM, 1992.

[Wadler 95] Wadler, Philip. "Monads for functionalprogramming." Advanced Functional Programming.Springer Berlin Heidelberg, 1995. 24-52.

(4) 平成 28 年度進捗状況

「意味」という非工学的な概念を進化ゲームを使うことで目的関数に取り込み，それを最適化するための枠組みを開発した．

(5) まとめ

予測と制御は工学の両輪であり，工学は社会と自然科学との架け橋である．進化ゲームと意味論を用いる事でこの2つを予測・制御し，工学における最適化が最適化される．

3.5. 可視化検証グループ

本プロジェクトでは，流体ー構造連成解析の品質保証に特に重点を置いている．その中でも，
・解析結果を正しく理解し，評価すること
・実験結果等と公正な比較を行うこと
は重要な要素であると考えられる．そのためには，可視化は必須である．特に，連成解析は現象が複雑であり，限られた数値データのみでこれを評価することは困難である．実験における可視化技術やその応用は実験による検証の項目に譲り，ここでは，解析結果の可視化および，比較のための実験の可視化結果の表示を中心に研究を行う．解析は，当面簡単のため2次元および3次元でもそれほど3次元性が強くない問題を対象とするが，そうであっても特に流れ場は3次元であり，また今後のより一般的な問題に対応するためにも，3次元の可視化が本質である．そこで，ここでは連成解析において3次元データを如何に可視化するかを中心に研究を進める．1つは以下に述べるような立体視あるいは VR（バーチャルリアリティ）を用いた可視化であるが，これに限らず，3次元データの可視化方法を検討していく．

3.5.1. 3 次元画像による定量的・定性的検証

(1) 目標・計画

本研究の目標は，流体構造連成問題について，数値解析の精度検証を支援するための，画像による定量評価，定性評価の手法やシステムを開発し，本プロジェクトで開発される連成解析手法の評価に供することである．特に，バーチャルリアリティ（VR）技術を利用した3次元可視化システムを中心に3次元画像による可視化評価を中心に研究を進める．

大きな計画としては，

平成 24 年度：

表示装置となる VR 装置の導入を行い，ハードウェアの準備を行う．

平成 25 年度：

VR 装置の上でソフトウェアを開発し，PC クラスタと結合してこの上での解析結果の表示を行う．

平成 26 年度：

画像による検証に利用するための可視化システムを VR 装置上で開発する．

平成 27 年度：

積極的に可視化による比較・検証を行う．特に，（立体）画像を用い，実験と解析の可視化画像を重ねたり，並べたりして効果的な比較・検証方法について検討する．

平成 28 年度：

研究をまとめ，その公開方法について検討する．

としている．これらにより，従来とは異なる，多彩な可視化により，直感的・効果的な比較・検証が可能となり，開発される連成解析手法をより多面的に評価できると考える．

(2) 意義・国際社会との比較

連成解析は，複数の物理が関連するため，その妥当性の評価は単一の物理に対する解析よりも難しい．ここでは，流体―構造連成を中心に研究を行っているが，流体・構造それぞれ単独で妥当性を示すことができても，それらを組み合わせただけで連成問題が正しく解けるということでは必ずしもない．2つの物理をやり取りするものがあり，それが正しく評価されているかが，重要であるが，実験的に測定できるもの，できないもの等あり，単純ではない．ここでは，可視化，特に3次元画像を利用することで，実験と解析を出来る限り直接的に比較することを考えており，流体―構造連成解析の精度検証・妥当性検証のテンプレートとなることを期待している．

国際的に見ると，連成解析は計算力学における重要な研究テーマの1つであるが，必ずしも検証については進んでおらず，信頼できるとされる過去の解析例と比較したり，パラメータスタディによって，実験で見られる現象と，解析で得られる現象の範囲が等しい（あるいは近い）といったことを示すにとどまっている場合がほとんどである．連成解析手法を評価する手法の1つとして3次元画像を用いる方法は，ほとんど例がなく，その成果は重要なものとなると考える．

(3) 研究内容

本研究の中心となる装置は，図1の2面没入型ディスプレイ装置である．大きさは正面のスクリーンが 2.8×2.1m，下のスクリーンが同じく 2.8×2.1m でここに2台のプロジェクターにより，それぞれ 1400×1050 の解像度の画像を表示する．画像は時分割方式で立体映像を投影できるようになっており，液晶シャッター眼鏡によって立体映像を観察する．立体映像は3台のグラフィックスワークステーションで生成する．1台はマスタで，あとの2台が正面と下面の映像を担当する．これとは別に観察者や観察者が持つコントローラの位置を赤外線カメラで取得するシステムがあり，1台のトラッキングワークステーションで制御する．グラフィックスワークステーションのマスタはトラッキングワークステーションから逐次データを取得して観察者（やコントローラ）の位置を計算する．

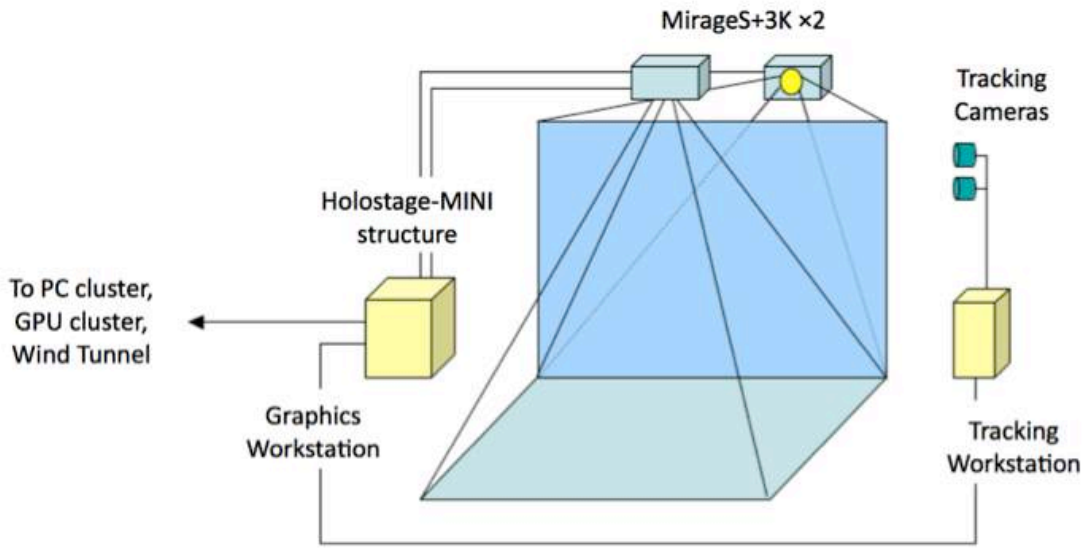


Fig. 1 Hardware configuration

このシステムに，流体―構造連成の3次元画像を表示する．表示する画像は大きく分けると，実験の画像と解析の画像の2種類である．これらを同時に，あるいは交互に表示することで直接的な比較を行う．

実験の画像については，物体の変位等，直接得られるものから，PIV で可視化した流れの速度分布や PSP（感圧塗料）で可視化した物体面上の圧力分布，画像解析により得られる応力分布等が考えられる．これらを得ることは，実験班の研究に委ねられるが，その3次元化や，本装置での表示にはデータの転送等も含めてさまざまな検討と技術的課題の克服が必要である．

解析結果については，単独の物理に基づく解析では多くの知識と経験があるものの，連成問題については，それぞれの物理に関する量を可視化表示するにとどまっており，まずは何を可視化することで連成解析の精度や妥当性評価につながるかの検討が重要となる．そのため，まず，さまざまな物理量の3次元可視化を可能とするシステムを開発する．解析は大規模となることが前提なので，そのデータをどのように転送し，また可視化するかも課題となる．

次に，実験と解析の比較である．たとえば，視点・スケールを合わせて交互に表示する／重ねて表示する，などが考えられるが，それには時間的・空間的な位置合わせ等，技術的な課題が多くある．また，必ずしも同じ量を表示できる訳ではないので，何を見るか，比べるかも問題となる．また，実験については，取得した画像（動画）をそのまま見るのか，あるいはデータを抽出して，解析結果と同じように CG で表示するのかといったアプローチもありうる．これらについても時間をかけて検討し，システムを構築することで新しい可視化法・評価法につなげたい．

このほか，VR でなくても新しい可視化の方法があれば検討をする．

最終的には，システム化できるところはまとめたい．実験データも，標準的で精度の高いものが得られれば，標準問題として公開したいが，その際に3次元画像もその1つとできればよいと考えている．

(4) 平成 28 年度進捗状況

まず，平成 27 年度に完成したシステムについて改めて記す．もともとの構想は図 2 の通りであった．

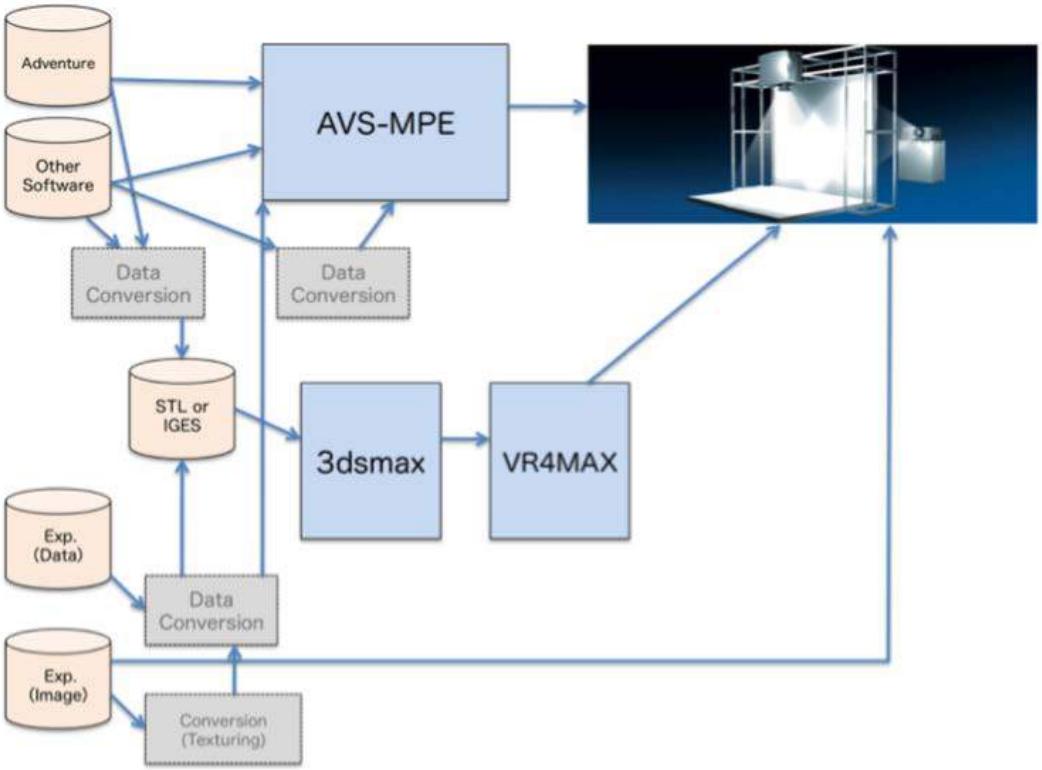


Fig. 2 Visualization system

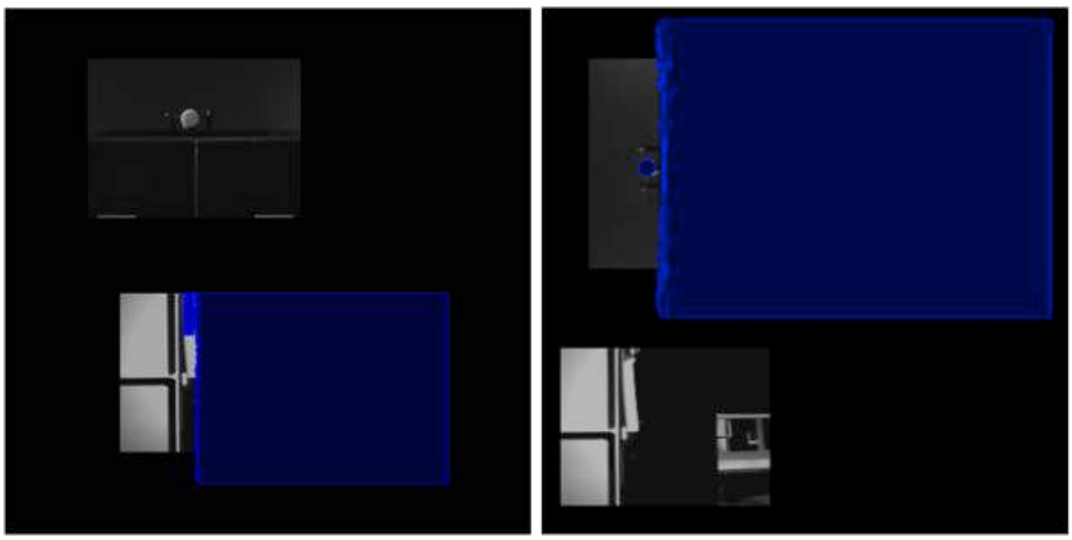


Fig. 3 Visualized image of the standard problem

ここでは，解析のソフトウェアとして ADVENTURE もしくは ADVENTURE の形式で出力されたデータを AVS-MPE に入力する方法で表示する．一方，実験画像は，データ変換を行った後，これも AVS-MPE に入力している．前報以降に行った可視化の例を図 3 に示す．写真では分かりにくいが，青いところが解析結果で，白黒の写真は実験の 2 次元画像である．左の図では，横からの実験画像（動画）と解析結果を重ねて表示しており，右の図では上からの実験画像（動画）と解析結果の位置を合わせている．

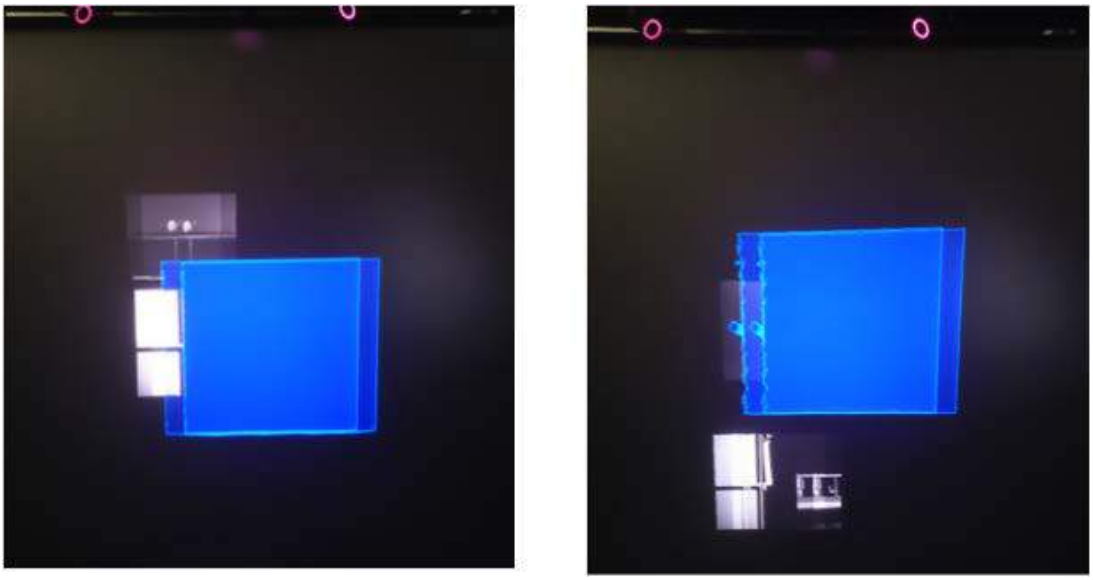


Fig. 4 Visualized image in VR system

これを VR 装置である HolostageMINI 内で見たイメージが図 4 になる．映像が二重に見えるのは，右目と左目用の映像を表示しているためである．これを立体眼鏡を通して見ることで立体視ができる．実験映像は 2 次元であるため，ある面に貼られているように見えている．図 4 の上に見えている赤い丸が観察者の位置を計測する赤外線カメラで，これにより視点位置を測定し，それに応じた右目・左目の映像が投影されている．図 3 や図 4 の写真では実験と解析の像が重なって見にくいが，VR 装置内では，立体視により両者の区別は容易であり，分かり易い比較となっている．

平成 28 年度の目標の 1 つとして，このシステムの公開がある．このシステムは，AVS(-MPE)を使用しているため，AVS(-MPE)と VR 装置との組み合わせがハードウェア構成の前提となるが，そのような環境であれば，AVS のネットワークモジュールやサンプルのデータを提供することは可能であると考える．ただし，利用者が限られるであろうこと，データ量が大きいことなどを考えると，どこかのサイトで公開をするよりは個別の依頼に対応することになろうかと思われる．

次に，この原稿を書く時点では完了していないが，現在進行中の研究について簡単に触れておく．昨年度あたりから VR がブームとなっており，HMD (Head Mounted Display) 型の VR 装置が民生用としても普及しつつある．そこで，そのうちの 1 つである Oculus Rift を購入し，これを表示装置とすることを検討している．Oculus に対応する AVS のライブラリを更に購入することも 1 つの方法で

はあるが，最近は，VR に限らず CG を Unity で作ることが多くなっており，Oculus も Unity に対応しているので，まずは Unity で簡単なプログラムを書き，Oculus で表示することを試みている．

Fig 5. Oculus Rift

最後に，新しい可視化手法として検討していることを記す．従来，可視化においては，CG として不必要なリアリティは避けるようにしてきた．例えば，影付けは CG において重要な処理であるが，計算時間が掛かる上，影によって画像が暗くなるため，可視化している部分が見にくくなるなどの弊害がある．光を当てることはその陰影から形状が分かるので重要であるが，金属光沢やそれによる反射などはこれも可視化している部分の色（色相）を見誤らせる可能性があるためむしろない方がよいと考えられてきた．一方で，2 次元の映像からは 3 次元的な位置関係や時には相対的な大きさが分かりにくいために，物体を会話的に動かしたり，あるいは先に述べているような立体視や VR などによって 3 次元物体の把握を容易にしてきた．近年，CG と計算機の進歩により，影付けや金属光沢，鏡面反射などが比較的容易にできるようになってくると，そのような CG 的な写実性を加味することで，逆に 3 次元形状の把握に有利なこともあるのではないかと考えるようになってきた．そこで，ここでは，CG ソフトウェアの 1 つである 3dsmax の機能を活かし，可視化に CG 的な写実性を導入することを試みている．図 6 にその 1 例を示す．左は著者らが開発した「ポスト君」で可視化した，デルタ翼上の渦崩壊の様子で，崩壊した渦の領域が等値面で示されている．一方，右はこのポスト君から可視化に用いたオブジェクトのデータ（CG のポリゴンデータ）を抜き出し，3dsmax に入

れて表示したものである. ポスト君からのポリゴンデータは一旦 VRML に変換している(図 7). 翼面を鏡面にしたことで, 写り込みにより, 崩壊渦の位置関係が分かり易くなっている.

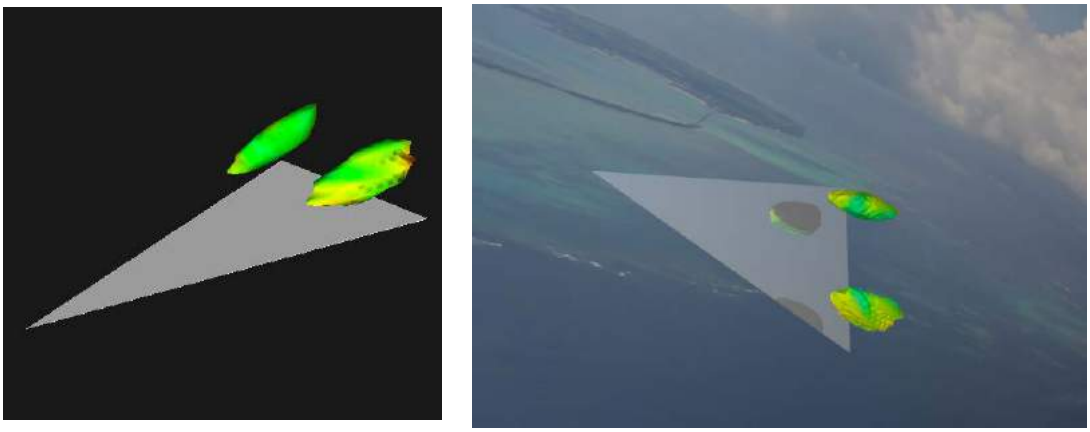


Fig. 6 Vortex breakdown on a delta wing (left) visualized by Post-kun (right) visualized by CG software

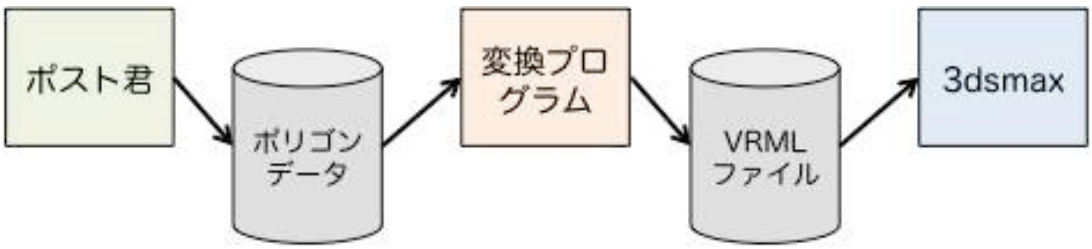


Fig. 7 Data conversion for photorealistic visualization

(5) まとめ

ここでは, 流体–構造連成解析を中心に, 実験と解析の画像を VR 空間で表示することにより, 比較・検証を行うシステムの開発を目指してきた. 5 年間の成果として,

- 実験映像と解析結果を VR 空間に表示するシステムを構築した.
- 実験と解析の時刻を同期させる機能を持たせた.
- 実験と解析の映像の位置を合わせて重ねて表示する効果を確認した.

などが挙げられる. また, 現時点では完了していないが,

- 没入型ディスプレイ方式の VR 装置以外での本システムの稼働(HMD)

・ CG ソフトウェアの機能を利用した写実的表現を含んだ可視化の効果

等にも着手した. 本プロジェクトは今年度で終了となるが, これらのシステム(ハードウェア／ソフトウェア)は残るので, 今後も研究を進めて行く予定である.

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

平成 23 年 10 月より JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」において，研究課題名「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」が採択され，研究拠点を当センターに置き，研究を実施している．

4.1.1. 研究実施体制

ポストペタコンなど次々世代の並列計算機アーキテクチャにおいて，大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション分野が高い演算効率を得るためには，マイクロプロセッサやメモリの階層構造を考慮したプログラミングモデルが必要である．特にそれは，入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで，統一的に提供される必要がある．つまり，一般的な実アプリケーションはプレ／ソルバー／ポスト処理など目的に応じたモジュール群で構成されていることが多いが，ポストペタコンの利用が想定される大規模シミュレーションでは，全ての処理がポストペタコン上で行われ，モジュール間のデータ受け渡しを最小限にするようなプログラミングモデル，並びにそれに基づく大規模数値計算データ処理システムの基盤技術が不可欠と言える．

ここで，ポストペタコンのアーキテクチャとしては，SIMD 拡張命令，GPGPU，FPGA など何らかのアクセラレータを搭載したヘテロジニアスメニーコアで構成される計算ノードをネットワーク接続した，分散メモリ型アーキテクチャになると予想され，計算ノード内はチップ上／ボード上問わずに異種の演算装置が NUMA 型で搭載されることを想定する必要がある．また，演算性能と通信性能の向上比を考慮すると，マイクロプロセッサにとって計算ノード間ネットワークというのは，現在で例えると WAN 並みに遅く感じるネットワークとなる可能性があり，ポストペタコンはそれらを数十万から数百万ノード規模で接続して構築されると予想される．さらに，ポストペタコン利用が想定されるシミュレーションにおいて生成されるデータのファイルサイズはペタバイトオーダーになるが，ハードディスクなどの外部記憶装置の記憶容量やアクセス性能の大幅な改善にはまだ時間を要すると考えられる．つまり，ポストペタコンを利活用できるアプリケーションは，ヘテロジニアスな分散メモリ並列かつ数百万計算ノード環境において高い並列効率と演算効率を示す必要があるが，その高いハードル

を突破できたとしても，大規模な入出力データを効率的に処理できない限り，本当の意味での利活用は不可能である．この問題を解決するためには，並列ファイル入出力システムの効率化やデータ圧縮展開アルゴリズムの高速化などだけではない，根本的なデータ量削減に関する解決策が求められる．

そこで本プロジェクトでは，ポストペタコン上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として，申請者らがこれまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法の技術を応用した，階層型領域分割法による大規模数値計算データ処理システムの研究開発を目指す．この基盤技術にはアプリケーション分野に依存する箇所があることが予想されるため，本提案では連続体力学向けアプリケーションを対象としながら，具体的には以下の基盤技術開発をターゲットとする．

A) マルチレベル領域分割法による連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列化ライブラリ

B) マルチレベル領域分割法による多階層計算格子データの生成，操作および I/O ライブラリ

C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

これらの技術に基づいて開発されるアプリケーションでは，核となるモジュール間のデータ受け渡し量を従来のものより 3 桁削減することが可能となり，ピーク演算性能比 20%以上のシステム開発の実現を目指す．

4.1.2. 研究実施内容

(1)「東洋大学」グループ

① 研究代表者：塩谷隆二（東洋大学総合情報学部，教授）

② 研究項目

階層分割型数値計算ライブラリの基礎研究並びに設計とその応用

(2)「名古屋大学」グループ

① 主たる共同研究者：荻野正雄（名古屋大学情報基盤センター，准教授）

② 研究項目

階層型ソルバーライブラリの基礎研究とその応用

(3)「東京大学」グループ

① 主たる共同研究者：越塚誠一（東京大学大学院工学系研究科，教授）

② 研究項目

階層分割型入出力ライブラリ並びに連続体力学向け問題領域専用言語の基礎研究とその応用

5.　成果の広報および普及活動

5.1.　英国カーディフ大学にて合同ワークショップ開催

2016 年 2 月 22 日, 23 日に英国カーディフ大学にて, Cardiff University-Toyo University Joint Student Workshop と題した, 合同ワークショップを開催し, 当センターの研究員及び東洋大学総合情報学部の学生を含む 15 名が参加をした.

研究発表は, 東洋大学総合情報学部に所属する学生 6 名と, 計算力学研究センターに所属する博士課程の学生とポスドクそれぞれ 1 名ずつが行った. また, 田村善昭計算力学研究センター長より, 当センターのメインテーマである流体-構造連成解析に関する発表も行われた.

参加者の多くは, 初めての海外での英語でのプレゼンテーションであったが, 発表および質疑応答も活発に行われ, 本合同ワークショップは非常に貴重な経験をする機会となった.

ワークショップ終了後の懇親会でも, 研究内容を含む様々な議論を行い, 両大学の親睦を深めた.

合同ワークショップの様子

5.2.　第 5 回 CCMR-HDDMPPS（CREST プロジェクト）合同シンポジウム

2016 年 3 月 8 日（水），東洋大学白山キャンパス 2 号館 16 階スカイホールにて，第 5 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウムを開催した．

当日は，計算力学研究センターと HDDMPPS グループから，各 5 名が講演を行い，1 年間の研究の進捗を報告すると共に，来年度以降の研究方針についての議論が活発に行われた．

5.2.1.　プログラム

13:00-13:10	開会の辞	田村善昭 東洋大学・計算力学研究センター長
13:10-14:50	セッション 1 (CCMR) 文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業: 「大規模高精度流体―構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」 プロジェクトリーダ：田村善昭（東洋大学計算力学研究センター長）	
	大規模高精度流体―構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証～連成解析標準問題の成果を中心に～	田村善昭（東洋大）
	損傷理論を導入したボクセル FEM によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析	富山潤（琉球大）
	オープン CAE（固体の有限要素法）を用いた精度検証	藤岡照高（東洋大）
	フラッタ予測のための流体-構造連成パラメータに関する検討	藤松信義（東洋大）
	反応拡散系理論に基づく石灰岩溶解シミュレーション	松原仁（琉球大）
14:50-15:00	休憩	
15:00-16:40	セッション 2 (HDDMPPS) 科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業（CREST）: 「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」 プロジェクトリーダ：塩谷隆二(東洋大学)	
	Development of a Numerical Library based on HDDM for Post Petascale Simulation	塩谷隆二（東洋大）

	Three-dimensional Analysis Using Coupling-matrix-free S-version FEM	遊佐泰紀（東京理科大）
	A study of Bio-heat Transfer Problem using Finite Element Approach	A. M. M. Mukaddes（シャージャラル科学技術大）
	Run faster and larger – ADVENTURE for K computer	鄭宏杰（東洋大）
	A. Continuum Approach for Detection of Corrosion	古川知成（バージニア工科大）
16:40-16:50	閉会の辞	田村善昭 東洋大学・計算力学研究センター長
16:50-17:00	拡大運営委員会	
17:00-19:00	懇親会	

シンポジウムの様子

5.3.　台湾龍華科技大學にて合同ワークショップ開催

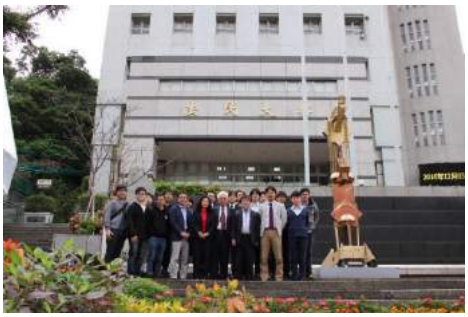
2016 年 12 月 1 日(木)~12 月 3 日にわたり，台湾の龍華科技大學を訪問し，龍華科技大學，東京理科大学，近畿大学，東洋大学による 4 大学合同学生ワークショップを開催した．ワークショップの後で，龍華科技大學の学内を見学し，懇親会で親睦を深めた．ワークショップのプログラムは次の通りである．

5.3.1.　プログラム

Name	Organization	Title
Keishi Kumamoto	Kindai University	Development of crack propagation criteria for moderate-toughness pipes
Shuhei Watanabe	Toyo University	Investigation on the Uav for automatic flight system - Toward the sound source localization system
Chin-Chien Hung	Lunghwa University	Study on the optimum parameters of hydrophobic films prepared by Atmospheric Pressure Plasma Jet by Response Surface Methodology
Kensuke Yagi	Toyo University	Development of an application to make a group with image recognition
Yang Kui	Tokyo University of Science	Atomistic Modeling of Thermally Activated Process of Mixed Dislocations
You-Hao Jin	Lunghwa University	The Deposition of Siox Films on Polycarbonate for Super Hydrophobicity and High Transmittance by Atmospheric Pressure Plasma Jet
Hiromi Sekiguchi	Toyo University	Development of an application to record information in real time for sports
Yi-Cyuan Shih	Lunghwa University	Low Temperature Atmospheric Plasma Technology -Escalator Sterilization Device
Risa Ito	Toyo University	Development of an application to record a score of arcade game with image recognition
Satoshi Koshiyama	Toyo University	Construction of Aerodynamic Measurement System of Aerospace Vehicle Models by Functional Molecular Sensor

Hong-Ming Li	Lunghwa University	Effect of Atmospheric Plasma Surface Treatment of Carbon Fiber on Carbon Fiber-Reinforced Plastics (Cfrp) to Improve the Wettability and Tensile Strength

ワークショップの様子



集合写真

5.4. 第 30 回数値流体力学シンポジウム

2016 年 12 月 12 日(月)～12 月 14 日(水)にかけて，東洋大学計算力学研究センターが共催する第 30 回数値流体力学シンポジウムをタワーホール船堀(東京都)にて開催した．400 名の以上の方がシンポジウムに参加し，大盛況のうちに終了した．

シンポジウムの様子

田村先生の講演

特別企画「数理流体力学シンポジウムの 30 年～できたこと，できなかったこと～」の様子

5.5. 第 6 回 CCMR-HDDMPPS（CREST プロジェクト）合同シンポジウム

2017 年 1 月 21 日（土），東洋大学白山キャンパス 6 号館 6203 教室にて，第 6 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウムを開催した．

セッション 1 では田村善昭計算力学研究センター長と 5 名の研究員によるプロジェクトの総括となる発表が行われた．そのあと，上記 6 名と出席者の方々による今後の展望についてのディスカッションが行われた．

セッション 2 では HDDMPPS グループから，塩谷プロジェクトリーダより 1 年間の研究の進捗を報告すると共に，ドイツからの参加者を含む 4 名が講演を行い，来年度以降の研究方針についての議論が活発に行われた．

5.5.1. プログラム

<table>
<tr><td>13:00-13:10</td><td colspan="2">開会の辞</td><td>田村善昭
東洋大学・計算力学研究センター長</td></tr>
<tr><td rowspan="2">13:10-14:50</td><td colspan="3">セッション 1 (CCMR)
文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業:
「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」
プロジェクトリーダ: 田村善昭（東洋大学計算力学研究センター長）</td></tr>
<tr><td>プロジェクトの総括と
今後の展望</td><td colspan="2">江澤良孝（精度・妥当性検証グループ・リーダー）
塩谷隆二（大規模並列化グループ・リーダー）
田村善昭（可視化検証グループ・リーダー）
中林靖（解析手法開発グループ・リーダー）
藤松信義（新規実験計測グループ・リーダー）</td></tr>
<tr><td>14:50-15:00</td><td colspan="3">休憩</td></tr>
<tr><td rowspan="2">15:00-16:40</td><td colspan="3">セッション 2 (HDDMPPS)
科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業（CREST）:
「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」
プロジェクトリーダ: 塩谷隆二(東洋大学)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Parallel adaptive multigrid - an approach efficient large scale computing</td><td>Prof. Gabriel Wittum
(Goethe University Frankfurt)</td></tr>
</table>

	Geometric multigrid on massively parallel systems with UG4 - approach and applications	Dr. sebastian Reiter (Goethe University Frankfurt)
	Analysis of Skin Burn Injuries Using Finite Element Method with Bio-heat equation	Prof. A. M. M. Mukaddes (Shahjalal University of Science and Technology)
	Development of A Distributed Parallel Explicit Moving Particle Simulation Method and Its Applications	Dr. Lijun LIU (Nagoya University)
16:40-16:50	閉会の辞	矢川元基 東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授
16:50-17:00	拡大運営委員会	
17:00-19:00	懇親会（第 1 会議室・2 号館 3 階）	

セッション 1 での田村先生

セッション 2 での塩谷先生と Wittum 先生

シンポジウムの様子

矢川先生の閉会の辞

6. 学術活動

2016 年 1 月から 2017 年 1 月までの業績を掲載する.

6.1. 論文投稿

1. H. Zhu, Q. Yao, H. Kanayama, “Large-scale computations of flow around two cylinders by a domain decomposition method”, Mathematical Problems in Engineering, Vol.2016: 8 pages 2016, Article ID 4126123.
2. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法におけるローカル Schur 補元アプローチの性能評価”, Transaction of JSCES, Vol. 2016, 20160006, 2016 年 2 月(DOI: 10.11421/jsces.2016.20160006).
3. H. Kanayama, “An industrial application of thermal convection analysis, International Journal of Computational Methods”, Vol.13, No.2:15 pages 2016.
4. Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa, Yoshiaki Tamura, Satoru Takashimizu, and Daisuke Satou, “High Accurate Analysis by Experiment and Simulation Using Bayesian Inference for Corrugated Cardboard”, Mechanical Engineering Journal, Vol. 3, No. 4, 16-00072, August, 2016.
5. K. Tazoe, M. Oka and G. Yagawa, “Loading frequencies effects on the oxide induced crack closure in extremely low stress intensity factor range”, International Journal of Fracture Fatigue & Wear, Vol. 4, 153-157, 2016.
6. Yong-Ming GUO, Genki YAGAWA, “A meshless method with conforming and nonconforming sub-domains”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, DOI: 10.1002/nme.5431, 2016.
7. Masao Ogino, Hongjie Zheng, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, Liu Lijun, “Tsunami Run-Up and Inundation Simulations Using LexADV_EMPS Solver Framework on Fujitsu FX100”, SC16 Research Poster (Peer-reviewed International Conference), Salt Lake City, Nov. 13 - 18, 2016.
8. Masao Yokoyama, Genki Yagawa, “Relation between violin timbre and harmony overtone”, Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA), Honolulu, Hawaii, 28 Nov. - 2 Dec. 2016.
9. 小林謙一, 藤岡照高, “微小領域からサンプリングした試料による高経年ボイラーチューブの健全性評価とクリープ余寿命推定”, ボイラ研究, 400 号, pp.10-15, 2016 年 12 月.
10. Wada, Y., Murotani, K., Ogino, M., Kawai, H. and Shioya, R., “High resolution visualization library for exa-scale supercomputer”, Mathe. Prog. Expressive Image Synth. III, Springer, pp.83-94, 2016.
11. 杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, “階層型領域分割法による回転機の解析”, 電気学会論文誌B, Vol.137, No.3, in press.

6.2. 著書

1. 日本応用数理学会編, 矢川元基分担執筆, “応用数理の散歩道”, 岩波書店, pp.238-253, 2016 年 6 月.
2. 矢川元基, 酒井譲, “粒子法”, 岩波書店, 2016 年 11 月.
3. H.Kanayama, H. Dan, “Tsunami Propagation from the Open Sea to the Coast”, Tsunami, edited by M. Mokhtari, ISBN 978-953-51-2677-5, InTech: Chapter 4 (61-72) 2016.

6.3. 学会発表

1. 金山寛, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, “Considerations of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis”, 静止器/回転機合同研究会「電磁界数値計算技術とその応用」, 富士通株式会社本社事務所, 2016 年 1 月 20-21 日.
2. 横山真男, 室谷浩平, 瀬田陽平, 矢川元基, “粒子法による粒子間インタラクションに着目した大規模数値シミュレーション”, 粒子法コードユーザーグループ第 33 回会合, 本郷, 2016 年 2 月.
3. 齊藤克佳, 瀬田陽平, 横山真男, “HMD と LeapMotion を用いたネットワーク型バーチャルプラネタリウムの開発”, 情報処理学会第 78 回全国大会, 横浜, 2016 年 3 月 10-12 日.
4. T. Kadohira, T. Ashino, H. Ishiki, S. Minamoto, M. Watanabe, J. Inoue, M. Enoki and T. Koseki, “Establishment of descriptors-inventory for data-utilization in Materials Science and Engineering with collective intelligence”, ICME 2016, Second International Workshop on Software Solutions for Integrated Computational Materials Engineering, Barcelona, Spain, April 12-15, 2016.
5. 金山寛, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, “静磁場領域分割解析におけるインターフェイス問題”, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 慶應義塾大学, 2016 年 5 月 18-20 日.
6. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法における反復法に基づくローカルソルバーの性能評価”, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日.
7. 和田義孝, 荻野正雄, 室谷浩平, 河合浩志, 塩谷隆二, “高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG のビューア対応機能の実装”, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日
8. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, “大規模解析のための多階層領域分割法によるデータ圧縮効果”, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日
9. 鄭宏杰, 塩谷隆二, Mukaddes Abul Mukid Mohammad,「京」を用いた ADVENTURE_Thermal による大規模熱伝導解析, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日.
10. Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., “Performance tuning of subdomain local FE solver in domain decomposition method”, ECCOMAS2016, Crete Island, Greece, 5-10 June 2016.
11. T. Fujioka, “Analytical Expression of Elastic Follow-up Factors in Fully Plastic Situation for Creep-fatigue Damage Assessment of High Temperature Components”, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2016-63031, Vancouver, July 17-21, 2016.
12. Kanayama, H., Ogino, M., Sugimoto, S., Zheng, H., Yodo, K., “Application of the BDD-DIAG Preconditioner to Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.
13. Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Kanayama, H., Ogino, M., “Storing Techniques for Sparse Matrices-A Study on Thermal-Convection Problems”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.
14. Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., “Mixed Precision Implementation of Coarse Inverse Approach in BDD Pre-conditioner”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.
15. Zheng., H., Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Ogino, M., “Performance Evaluation of ADVENTURE_Solid and ADVENTURE_Thermal on the K computer”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.

16. Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, Abul Mukid Mohammad MUKADDES, Masao OGINO, “Performance Evaluation of ADVENTURE_Solid and ADVENTURE_Thermal on the K Computer”, The 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2016), 152041.pdf, July, 2016.
17. Hiroshi KANAYAMA, Masao OGINO, Shin-ichiro SUGIMOTO, Hongjie ZHENG and Kaworu YODO, “Application of the BDD-DIAG Preconditioner to Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, The 12th World Congress on Computational Mechanics and The 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM XII & APCOM VI), online, 2016/07/24-29, Seoul, Korea.
18. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Yoshiaki TAMURA and Genki YAGAWA (Toyo University), “Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-Structure Interaction Analysis”, WCCM/APCOM 2016, 2016.7.26.
19. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura, and Genki Yagawa, “Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-Structure Interaction Analysis”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
20. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, and Yoshiaki Tamura, “Prediction of Analysis Results with Deep Learning”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
21. Yoshiaki Tamura, “Numerical Simulation Method of Gas-Liquid Two-Phase Flow for a Cavitation Bubble Collapse”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
22. Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa, Yoshiaki Tamura, Satoru Takashimizu, and Daisuke Satou, “High Accurate Analysis by Experiment and Simulation Using Bayesian Inference”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
23. Youhei SETA, Masao YOKOYAMA, Mitsunori MAKINO, Genki YAGAWA, “Application of Particle Method to Liquid Dripping”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
24. Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Ogino, M., “Finite Element Approach with Unsteady Bioheat Equation for Human Skin Injury”, ICCM2016, Berkeley, USA, 1-4 August 2016.
25. Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, “Large-Scale Fluid-Structure Analysis for Tsunami Inundation into the Interior of a Building using MPS-FEM Coupling Method”, International Conference on Computational Methods (ICCM 2016), 1585, August, 2016.
26. Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., “Subdomain local FE solver implementation using iterative solver in domain decomposition method”, ICTAM2016, Montreal, Canada, 21-26 August, 2016.
27. K. Tazoe, M. Oka and G. Yagawa, “LOADING FREQUENCIES EFFECTS ON THE OXIDE-INDUCED CRACK CLOSURE IN EXTREMELY LOW STRESS INTENSITY FACTOR RANGE”, 5th International Conference on Fracture Fatigue and Wear FFW 2016, Kitakyushu, Japan, 24 August 2016.
28. 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 淀薫, 鄭宏杰, 静磁場の領域分割解析におけるコース問題の解法について, 静止器/回転機合同研究会, 石垣市商工会館, 2016 年 9 月 8-9 日.
29. Toshihiro Ashino, “Reusable Equation Library for Materials Informatics and Integration based on Materials Ontology”, SciDataCon 2016, Denver, US, September 11-13, 2016.
30. 横山真男, 栗原義己, “バイオリンの音色に関する印象語と音響特徴の相関分析の試み”, 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会, 横浜, 2016 年 9 月 14-16 日.
31. 島村雅彦, 江澤良孝, 田村善昭, 高清水聖, 佐藤大亮, “ベイズ推定を用いた実験とシミュレーションによる高精度解析”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日.
32. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, “深層学習を用いた連成解析結果予測”, 日本機械学会第29回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日.

33. 長岡慎介, 中林靖, 田村善昭, 矢川元基, “高精度フリーメッシュ法の並列解析手法について”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日.
34. 瀬田陽平, 横山真男, 牧野光則, 矢川元基, “界面張力を考慮した粒子法による容器口から流れる液垂れの数値シミュレーション”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日.
35. 小林陽介, 村上恭子, 稲葉正和, 矢川元基, “フリーメッシュ法を用いた計測データからの高精度 3D モデリングアプリケーション”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日.
36. 金山寛, 淀薫, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, “部分領域を直接法で解く場合のインターフェイス問題の反復法について”, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22-24 日
37. 鄭宏杰, 塩谷隆二, “スーパーコンピュータ京を用いた 3 次元大規模並列 MPS-FEM 流体構造連成解析”, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22-24 日.
38. 和田義孝, 荻野正雄, 室谷浩平, 河合浩志, 塩谷隆二, “高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG のインタラクティブ可視化ビューア対応”, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22-24 日.
39. 横山真男, 瀬田陽平, 矢川元基, “容器口の形状に着目した液だれ防止方法の提案”, 日本流体力学会年会 2016, 名古屋, 2016 年 9 月 26-29 日.
40. H. Hirayama, Y. Satoh, K. Takahasi and M. Yokoyama, “Multimedia Improvisation for brain waves, cello and live electronics”, iCLA Music and the Brain Symposium 2016, Yamanashi, Japan, October 2016.
41. 田添広喜, 岡正徳, 矢川元基, “酸化物誘起き裂閉口が無視できる場合の疲労き裂進展下限界特性の板厚依存性”, 日本機械学会材料力学カンファランス, 神戸, 2016 年 10 月 8 日.
42. 松井陽平, 岡田満利, 高橋俊彦, 藤岡照高, “実機ガスタービン動翼から採取した試験片を用いたクリープ寿命評価手法”, 第 44 回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, 酒田, 2016 年 10 月 26-27 日.
43. H.Kanayama, “Balancing domain decomposition (BDD) related preconditioners in engineering including magnetostatic problems”, CoMFoS16:Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications II, Kyushu University, October 22-24, 2016.
44. Toshihiro Ashino, “Materials Information Integration Based on Ontology (Keynote)”, AMDS 2016 (The 5th Asian Materials Database Symposium), Hanoi, Vietnam, October 30-November 2, 2016.
45. 篠﨑雅和, 瀬田陽平, 横山真男, “教育支援を目的としたネットワーク型バーチャルプラネタリウムの開発”, NICOGRAPH 2016, 富山, 2016 年 11 月 4-6 日.
46. Hongjie Zheng, Masao Ogino, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, “Large-scale Tsunami Run-up and Inundation Simulation Using an Explicit Moving Particle Simulation Solver Framework”, Women in HPC workshop at SC16, Salt Lake City, Nov. 13, 2016.
47. Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, “Large-scale analysis of ADVENTURE system on the K computer”, オープン CAE シンポジウム 2016@東京, 2016 年 11 月 24-26 日.
48. 市島泰人, 新藤康弘, 藤岡照高, “オープンソース CAE ソフト Salome-Meca を用いた膝関節半月板内における応力分布の数値的検討”, オープン CAE シンポジウム 2016, 東京, 2016 年 11 月 24-26 日.
49. 三浦純哉, 藤岡照高, “Salome-Meca を用いた熱疲労試験の再現解析”, オープン CAE シンポジウム 2016, 東京, 2016 年 11 月 24-26 日.
50. Masao YOKOYAMA, Yoshiki Awahara, Genki YAGAWA, “Relation between violin timbre and harmony overtone”, ASA-ASJ Joint Meeting 2016, Honolulu, USA, November 28-December 2, 2016.
51. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, “深層学習を用いた流体解析結果予測”, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2016 年 12 月 12-14 日.

6.4. 招待講演

1. Genki Yagawa, “Reflection on Fukushima Daiichi Nuclear Accident”, ASINCO 2016, Nagasaki, April 12, 2016.
2. 矢川元基, “粒子法とその応用”, 東京理科大学特別講義, 野田, 2016 年 6 月 7 日.
3. Kanayama, H., Zheng, H., Sugimoto, S., Ogino, M., The BDD-DIAG Preconditioner in Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems (Keynote Lecture), ICCM2016, Berkeley, USA, 1-4 August 2016.
4. 矢川元基, “粒子法入門”, 徳島大学工学部特別講演, 徳島, 2016 年 8 月 17 日.

7.　研究グループ紹介

解析手法開発グループ

新規実験計測グループ

可視化検証グループ

大規模並列化グループ

精度・妥当性検証グループ

8.　終わりに

本報は，2016 年度の活動を取りまとめたものである．なお，2017 年 3 月に予定されているセンター外部評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2017 年 1 月とした．したがって，それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい．また，プロジェクトの最終年度ではあるが，これまでの報告と重複しないよう，前年度までの成果を繰り返し述べることはしていないので，ご了承願いたい．

詳細な記載は間に合わないが，2017 年 1 月 21 日（土）に第 6 回 CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウムを開催した．この中で，本プロジェクトの 5 年間の総括を行ったので，ここに簡単にまとめておきたい．まず，5 つのグループのリーダーからこの 5 年間の成果や達成度について発表いただき，その後，残った課題や問題点等について批判的に議論した．個別にはそれぞれ成果を挙げ，目標を達成できているものも多いが，精度検証・妥当性検証はもう少しできることがあるのではないか，またプロジェクト全体として何ができたのか分かりづらいなどの意見があった．連成問題に対する精度・妥当性検証については新しいデータに対して解析を進めているところであり，また，プロジェクト全体としては，プロジェクトの成果を中心とした英文の書籍を刊行予定である．プロジェクト終了まで一月余りあるので，少しでもこれら残された問題を解決すべく努力をする所存である．

今日，計算力学は製造業のみならず，社会の安心・安全をはじめさまざまな分野に大きく広がりをみせている．私立大学戦略的研究基盤形成支援事業は終了するが，より広い視点で計算力学の発展に資するようセンター研究員一同，今後とも努力していきたい．

東洋大学 計算力学研究センター 2016 年度年報

この資料の転載, 引用などはご遠慮ください.

本資料に関するお問い合わせは下記へお願いいたします.

編集・発行　東洋大学計算力学研究センター

〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100

URL: http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/

TEL・FAX: 049-239-1475

2017 年 3 月発行

禁無断転載