

東洋大学計算力学研究センター

2016 年度 年報



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のと、単に研究として行うのではなく、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を指していることである。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。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。

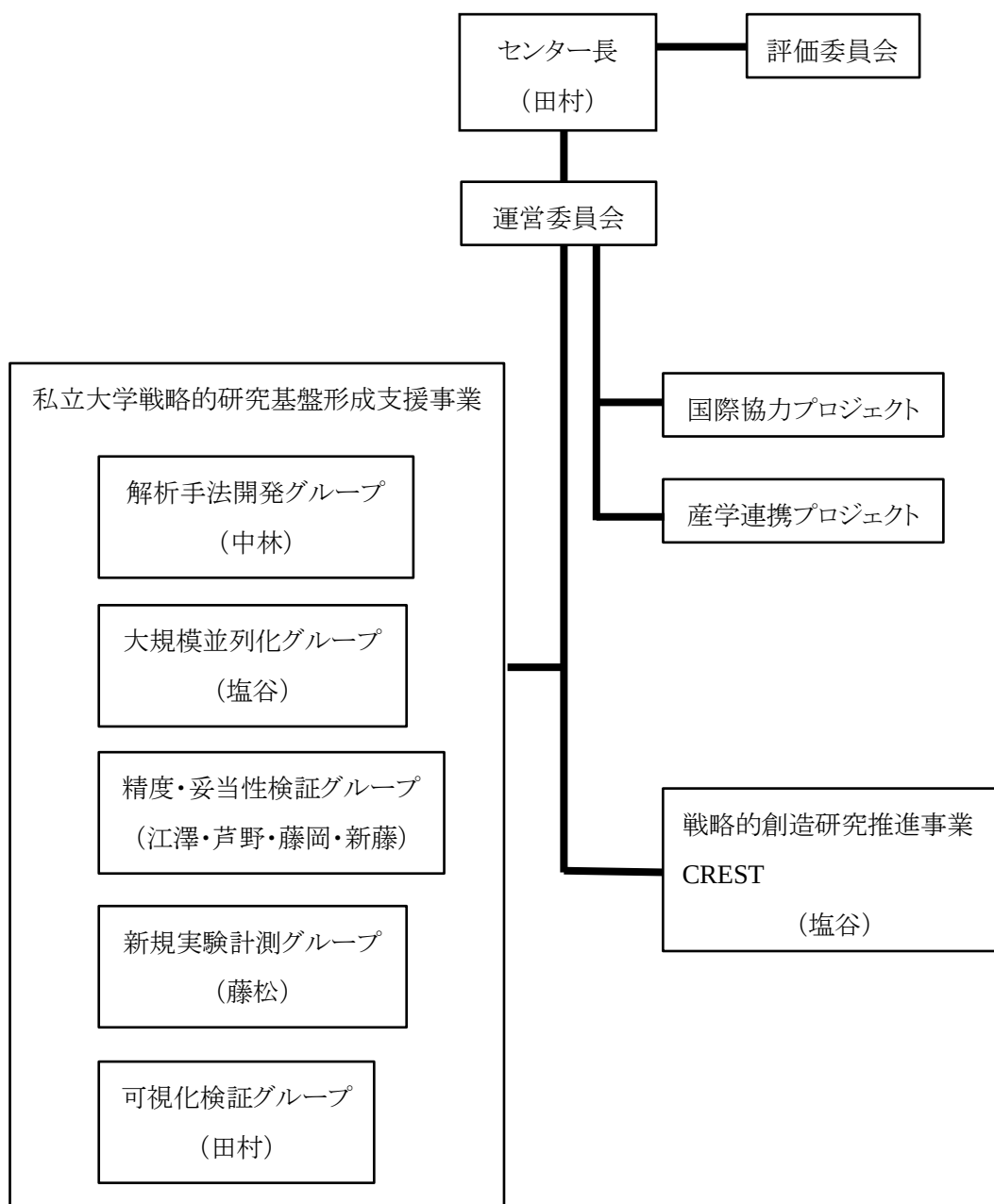


Fig.2.1. センターの組織

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な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。

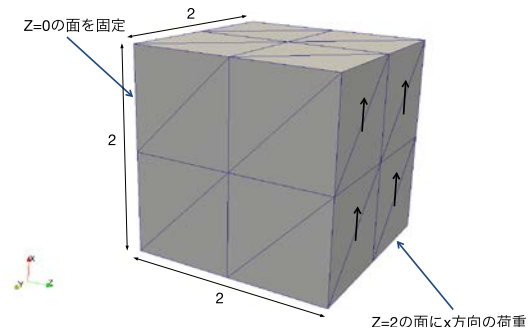


Fig 1. Analysis model

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。

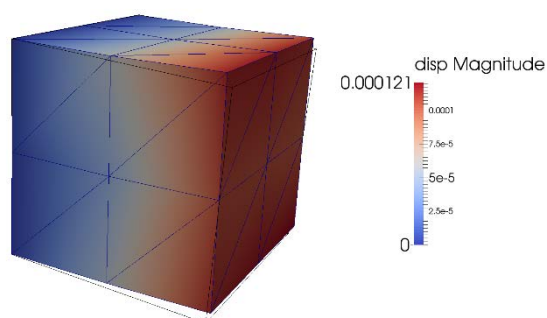


Fig 2. Analysis result (Case of 1PE)

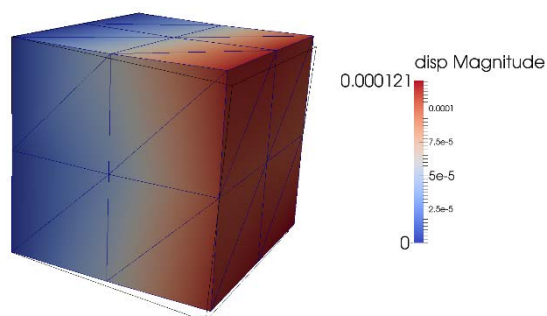


Fig 3. Analysis result (Case of 8PE)

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。

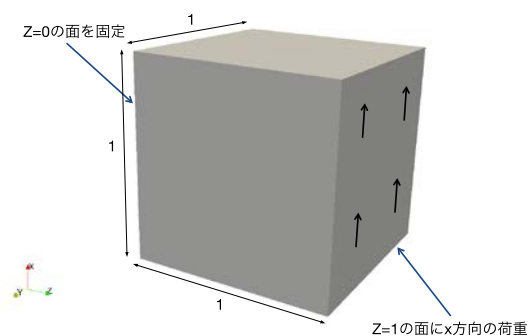


Fig 4. Analysis model

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

#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			要素数	節点数	自由度数
	x	y	z	x	y	z			
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%

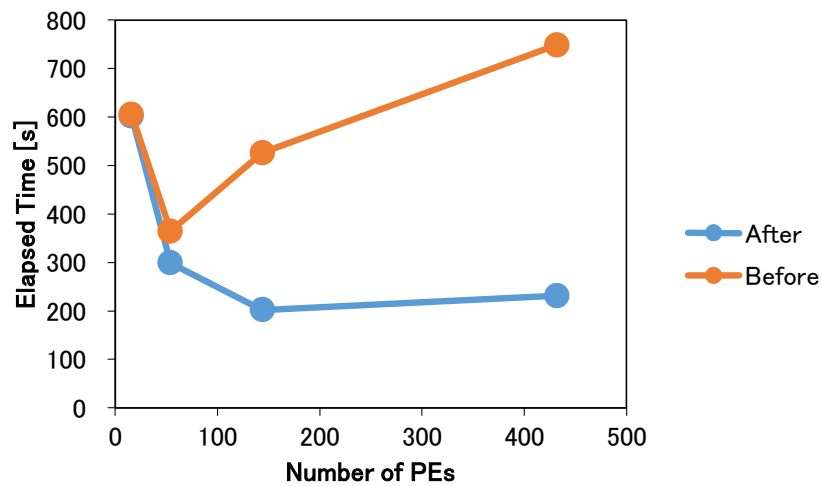


Fig 5. Comparison of computing time between before and after

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と推測される.

Table 8. Detail of computing time by new code

#PE	Elapsed [s]			Speed-Up over 16PE			Parallel Efficiency		
	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%

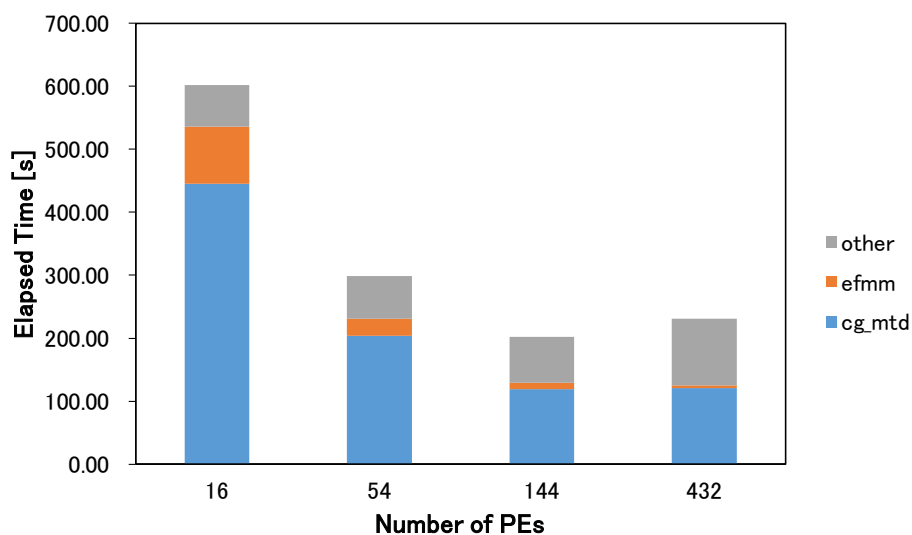


Fig 6. Classification of computing time by new code

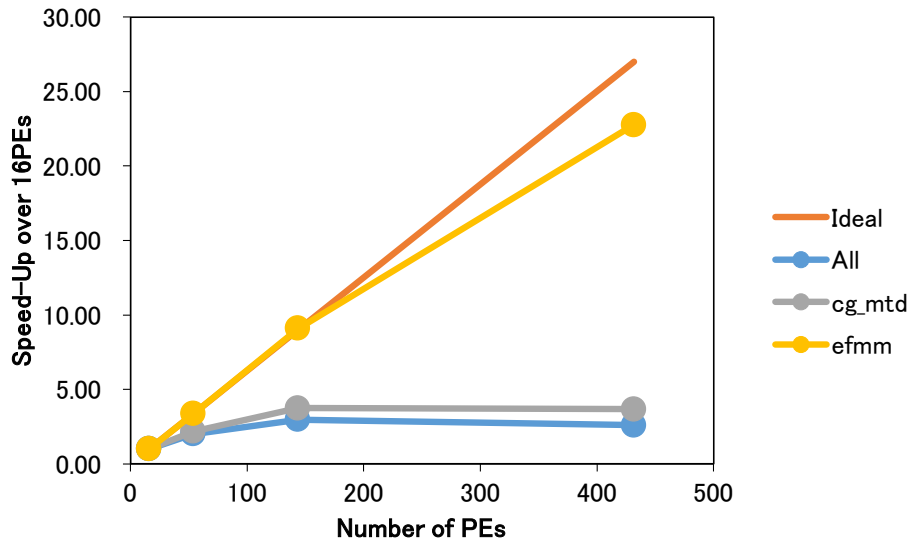


Fig 7. Change of accelerate ratio by new code compared with 16 PE

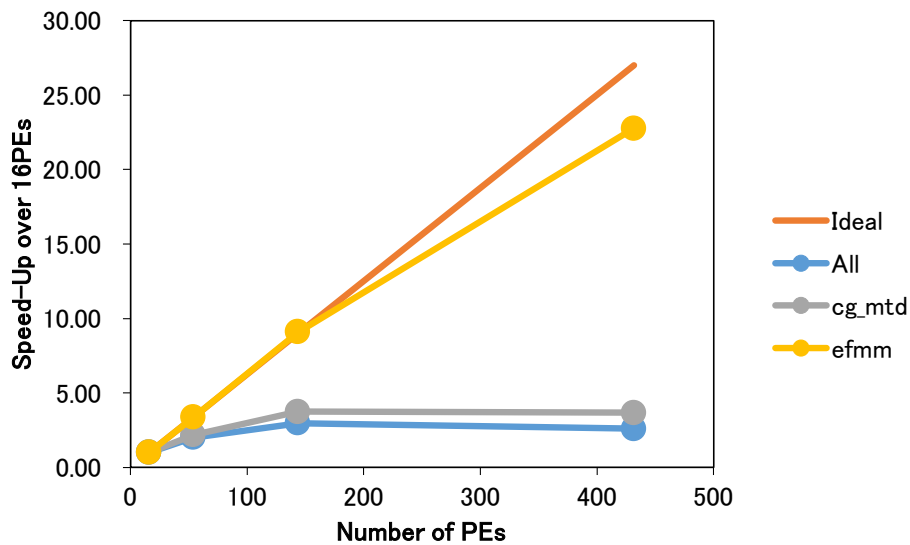


Fig 8. Change of parallel efficiency by new code

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

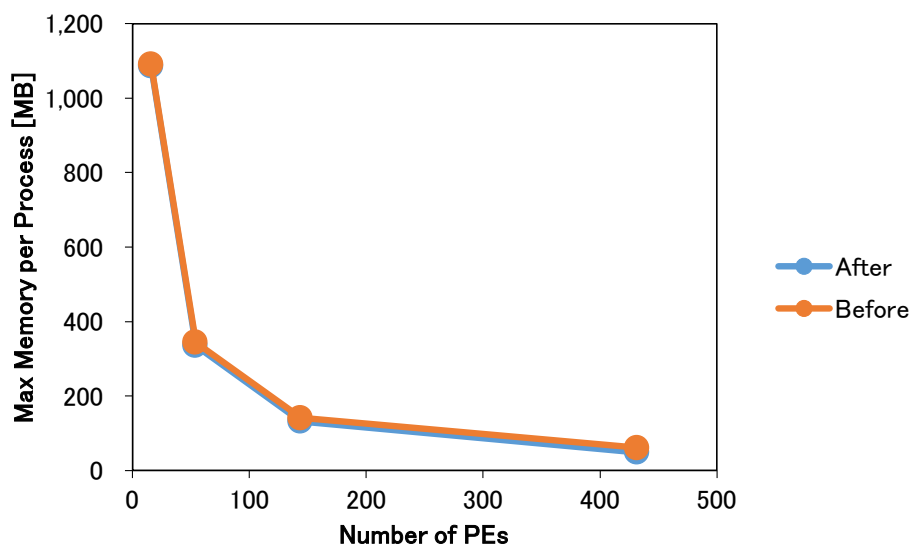


Fig 9. Change maximum memory usage compared with before and after

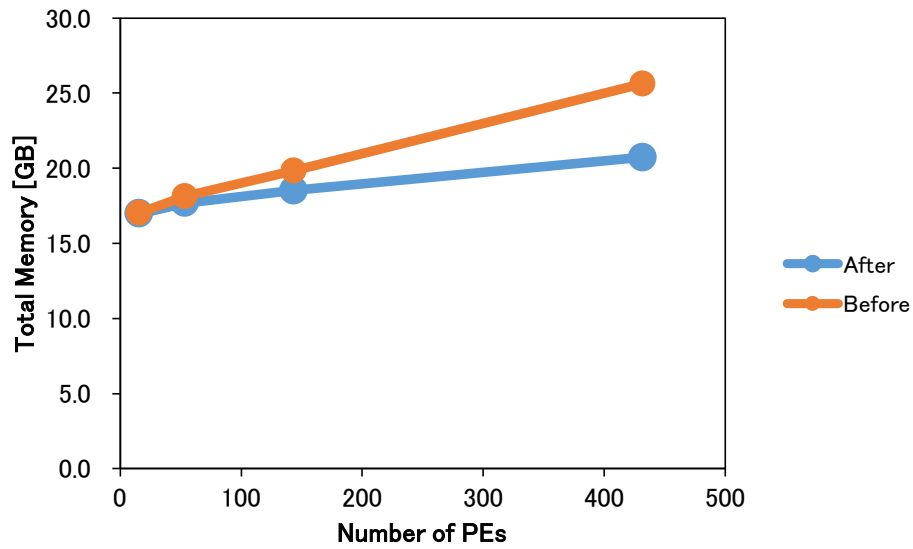


Fig 10. Change total memory usage compared with before and after

(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		

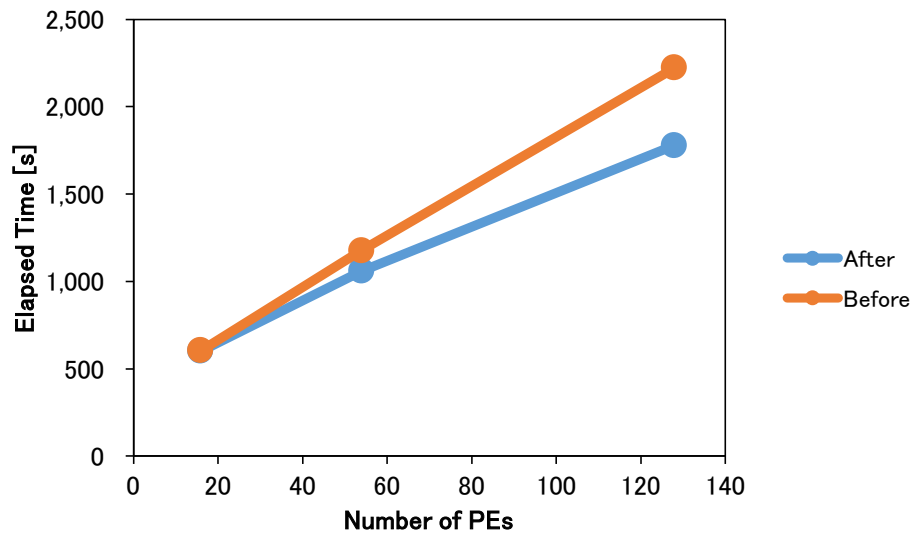


Fig 11. Change computing time compared with before and after

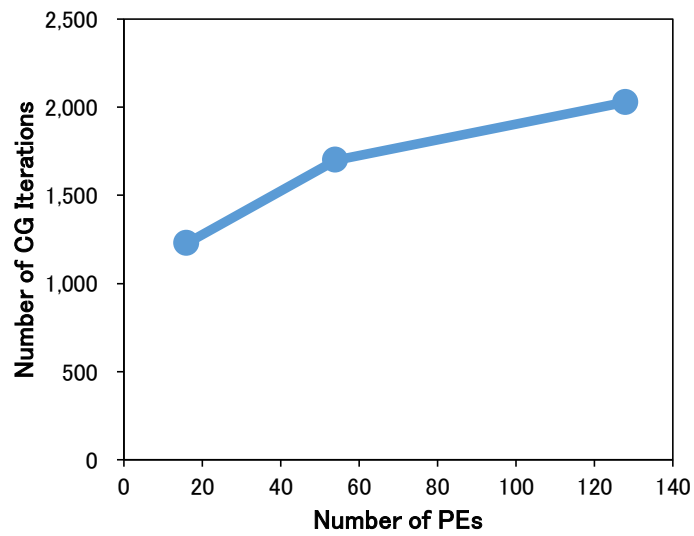


Fig 12. Number of iterations of CG method

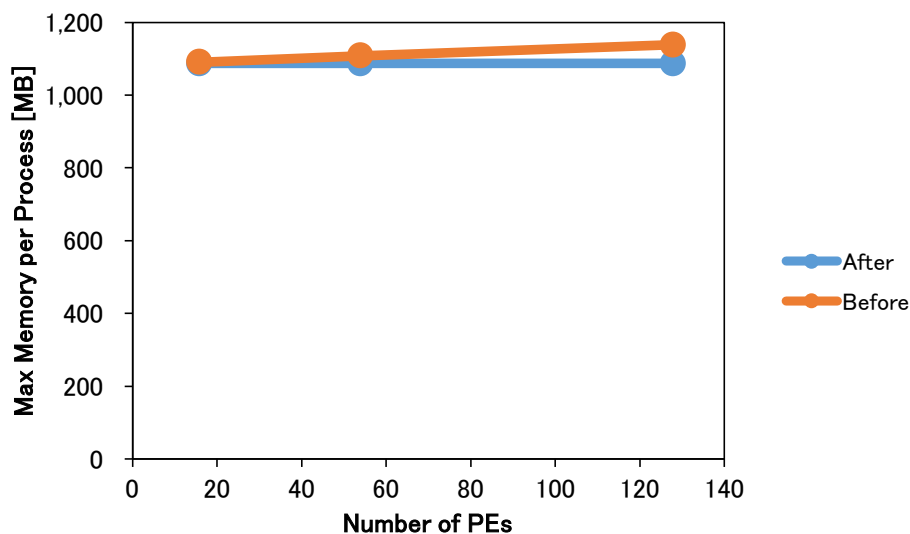


Fig 13. Change maximum memory usage compared with before and after

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			

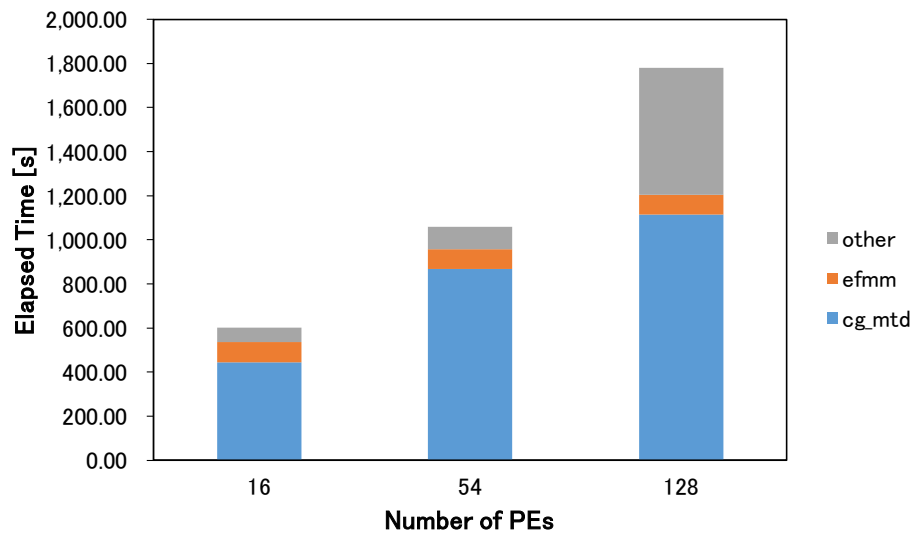


Fig 14. Classification of computing time by new code

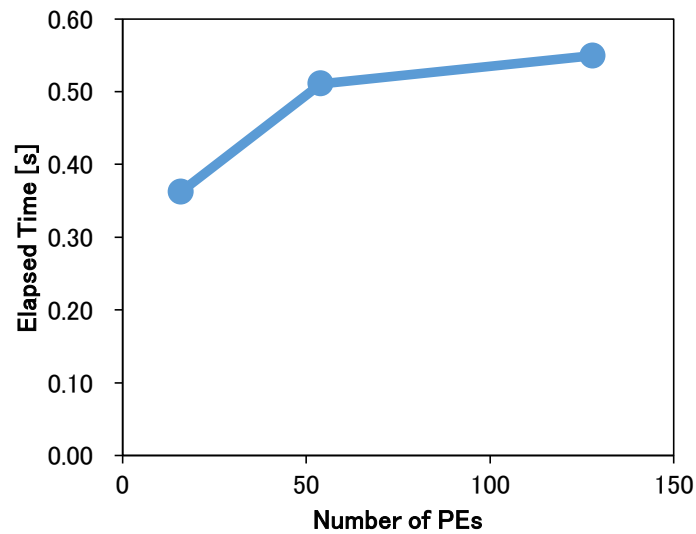


Fig 15. Computing time for each iteration of CG method by new code

(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つである 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、1~4 は局所要素内節点番号を表す。

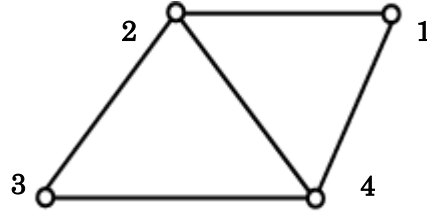


Fig 16. Finite element model

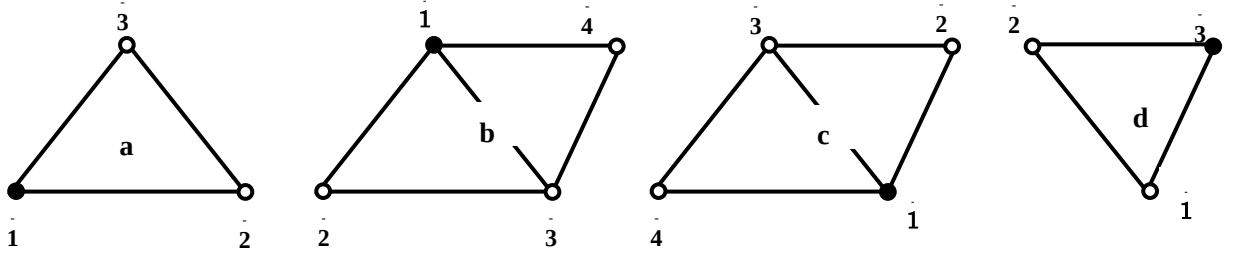


Figure 17. Local elements clusters

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。

$$\begin{bmatrix} a_{11}^a & a_{12}^a & a_{13}^a \\ a_{21}^a & a_{22}^a & a_{23}^a \\ a_{31}^a & a_{32}^a & a_{33}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^b & a_{12}^b & a_{13}^b & a_{14}^b \\ a_{21}^b & a_{22}^b & a_{23}^b & a_{24}^b \\ a_{31}^b & a_{32}^b & a_{33}^b & a_{34}^b \\ a_{41}^b & a_{42}^b & a_{43}^b & a_{44}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^c & a_{12}^c & a_{13}^c & a_{14}^c \\ a_{21}^c & a_{22}^c & a_{23}^c & a_{24}^c \\ a_{31}^c & a_{32}^c & a_{33}^c & a_{34}^c \\ a_{41}^c & a_{42}^c & a_{43}^c & a_{44}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^d & a_{12}^d & a_{13}^d \\ a_{21}^d & a_{22}^d & a_{23}^d \\ a_{31}^d & a_{32}^d & a_{33}^d \end{bmatrix} \quad (1)$$

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.

$$(2) \quad \begin{bmatrix} a_{11}^a + a_{22}^b + a_{44}^c & a_{13}^a + a_{21}^b + a_{43}^c & a_{12}^a + a_{23}^b + a_{41}^c & a_{24}^b + a_{42}^c \\ a_{31}^a + a_{12}^b + a_{34}^c & a_{33}^a + a_{11}^b + a_{33}^c + a_{22}^d & a_{32}^a + a_{13}^b + a_{31}^c + a_{23}^d & a_{14}^b + a_{32}^c + a_{21}^d \\ a_{21}^a + a_{32}^b + a_{14}^c & a_{23}^a + a_{31}^b + a_{13}^c + a_{32}^d & a_{22}^a + a_{33}^b + a_{11}^c + a_{33}^d & a_{34}^b + a_{12}^c + a_{31}^d \\ a_{42}^b + a_{24}^c & a_{41}^b + a_{23}^c + a_{12}^d & a_{43}^b + a_{21}^c + a_{13}^d & a_{44}^b + a_{22}^c + a_{11}^d \end{bmatrix}$$

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 $\mathbf{b}=\mathbf{Ax}$ という演算とする.

$$(3) \quad \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^a + a_{22}^b + a_{44}^c & a_{13}^a + a_{21}^b + a_{43}^c & a_{12}^a + a_{23}^b + a_{41}^c & a_{24}^b + a_{42}^c \\ a_{31}^a + a_{12}^b + a_{34}^c & a_{33}^a + a_{11}^b + a_{33}^c + a_{22}^d & a_{32}^a + a_{13}^b + a_{31}^c + a_{23}^d & a_{14}^b + a_{32}^c + a_{21}^d \\ a_{21}^a + a_{32}^b + a_{14}^c & a_{23}^a + a_{31}^b + a_{13}^c + a_{32}^d & a_{22}^a + a_{33}^b + a_{11}^c + a_{33}^d & a_{34}^b + a_{12}^c + a_{31}^d \\ a_{42}^b + a_{24}^c & a_{41}^b + a_{23}^c + a_{12}^d & a_{43}^b + a_{21}^c + a_{13}^d & a_{44}^b + a_{22}^c + a_{11}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

これにより、ベクトル $\mathbf{b}$ 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.

$$(4) \quad \begin{bmatrix} b_1^a \\ b_2^a \\ b_3^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^a & a_{12}^a & a_{13}^a \\ a_{21}^a & a_{22}^a & a_{23}^a \\ a_{31}^a & a_{32}^a & a_{33}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^a \\ x_2^a \\ x_3^a \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} b_1^b \\ b_2^b \\ b_3^b \\ b_4^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^b & a_{12}^b & a_{13}^b & a_{14}^b \\ a_{21}^b & a_{22}^b & a_{23}^b & a_{24}^b \\ a_{31}^b & a_{32}^b & a_{33}^b & a_{34}^b \\ a_{41}^b & a_{42}^b & a_{43}^b & a_{44}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^b \\ x_2^b \\ x_3^b \\ x_4^b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} b_1^c \\ b_2^c \\ b_3^c \\ b_4^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^c & a_{12}^c & a_{13}^c & a_{14}^c \\ a_{21}^c & a_{22}^c & a_{23}^c & a_{24}^c \\ a_{31}^c & a_{32}^c & a_{33}^c & a_{34}^c \\ a_{41}^c & a_{42}^c & a_{43}^c & a_{44}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^c \\ x_2^c \\ x_3^c \\ x_4^c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} b_1^d \\ b_2^d \\ b_3^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^d & a_{12}^d & a_{13}^d \\ a_{21}^d & a_{22}^d & a_{23}^d \\ a_{31}^d & a_{32}^d & a_{33}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^d \\ x_2^d \\ x_3^d \end{bmatrix}$$

ただし、

$$\begin{bmatrix} x_1^a \\ x_2^a \\ x_3^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_1^b \\ x_2^b \\ x_3^b \\ x_4^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_1^c \\ x_2^c \\ x_3^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_1^d \\ x_2^d \\ x_3^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_4 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

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.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^a + b_2^b + b_4^c \\ b_3^a + b_1^b + b_3^c + b_2^d \\ b_2^a + b_3^b + b_1^c + b_3^d \\ b_4^b + b_2^c + b_1^d \end{bmatrix} \quad (6)$$

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, $n \times n$ 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, $n_{\text{lec}} \times n_{\text{lec}} \times n_{\text{lec}}$ 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.

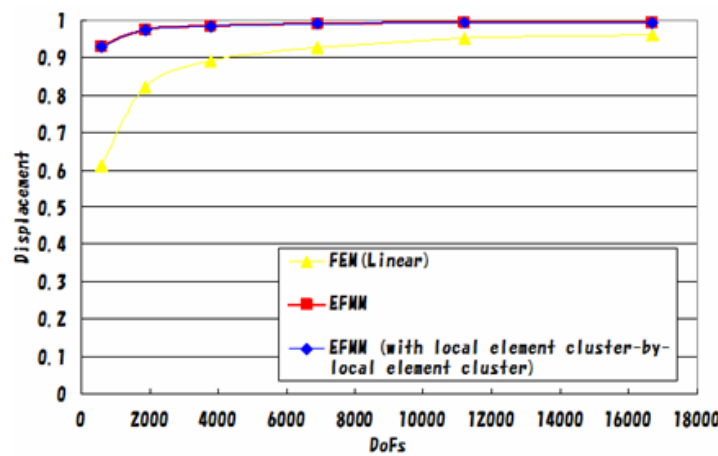


Fig 18. Accuracy comparison with FEM, EFMM and EFMM with present method

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。

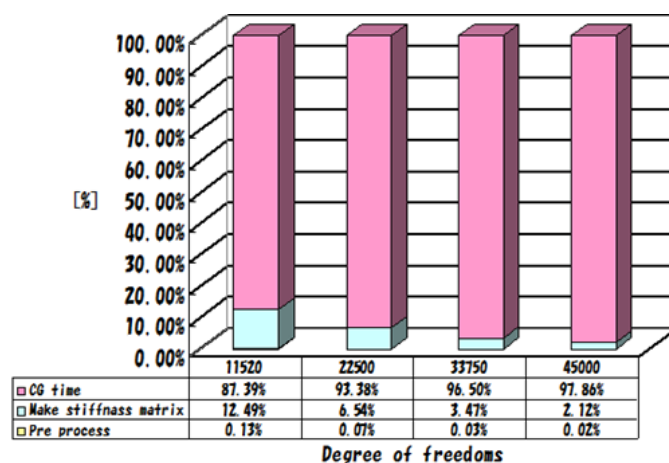


Fig 19. Percentage of computation time of each process in EFMM analysis.

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ためのプロセスの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。

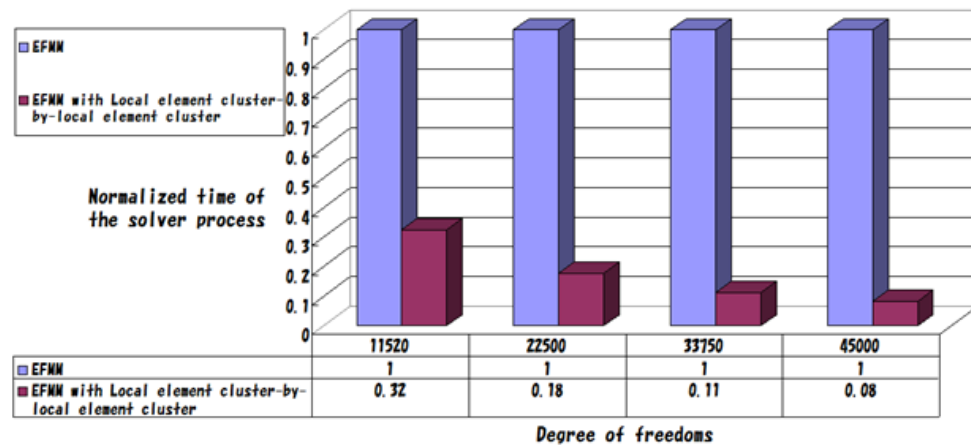


Fig 20. Computation time comparison with EFMM and EFMM with present method

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な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。

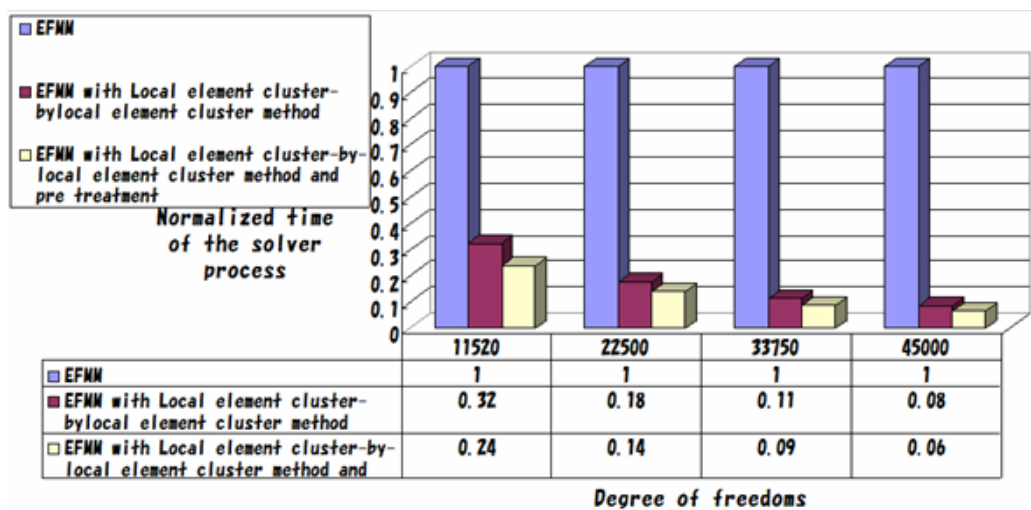


Fig 21. Computation time comparison with EFMM and EFMM with present method

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,

$$\begin{aligned} [M]\{\ddot{U}_n\} + [K(t_n)]\{U_n\} &= \{F_n\} \\ [M]\{\ddot{U}_{n+1}\} + [K(t_n)]\{U_{n+1}\} &= \{F_{n+1}\} \end{aligned} \quad (7)$$

上 2 式の差から, 増分表現をすると,

$$[M]\{\Delta \ddot{U}_n\} + [K(t_n)]\{\Delta U_n\} = \{\Delta F_n\} \quad (8)$$

ここに,

$$\begin{aligned} \{\Delta U\} &= \{U_{n+1}\} - \{U_n\} \\ \{\Delta \ddot{U}\} &= \{\ddot{U}_{n+1}\} - \{\ddot{U}_n\} \\ \{\Delta F\} &= \{F_{n+1}\} - \{F_n\} \end{aligned} \quad (9)$$

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.

$$\{\ddot{U}(t)\} = \frac{1}{2}(\{\ddot{U}_n\} + \{\ddot{U}_{n+1}\}) \quad (10)$$

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.

$$\begin{aligned} \{\dot{U}(t)\} &= \{\dot{U}_n\} + \int_{t_n}^t \{\ddot{U}(t)\} dt = \{\dot{U}_n\} + \frac{1}{2}(\{\ddot{U}_n\} + \{\ddot{U}_{n+1}\})(t - t_n) \\ \{U(t)\} &= \{U_n\} + \int_{t_n}^t \{\dot{U}(t)\} dt = \{U_n\} + \{\dot{U}_n\}(t - t_n) + \frac{1}{4}(\{\ddot{U}_n\} + \{\ddot{U}_{n+1}\})(t - t_n)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

上式より, 時刻 $n+1$ の速度と変位は次式になる.

$$\begin{aligned} \{\dot{U}_{n+1}\} &= \{\dot{U}_n\} + \frac{1}{2}(\{\ddot{U}_n\} + \{\ddot{U}_{n+1}\})\Delta t \\ \{U_{n+1}\} &= \{U_n\} + \{\dot{U}_n\}\Delta t + \frac{1}{4}(\{\ddot{U}_n\} + \{\ddot{U}_{n+1}\})\Delta t^2 \end{aligned} \quad (12)$$

増分変位で表すと,

$$\begin{aligned} \{\Delta \dot{U}\} &= \{\ddot{U}_n\}\Delta t + \frac{1}{2}\{\Delta \ddot{U}\}\Delta t \\ \{\Delta U\} &= \{\dot{U}_n\}\Delta t + \frac{1}{2}\{\ddot{U}_n\}\Delta t^2 + \frac{1}{4}\{\Delta \ddot{U}\}\Delta t^2 \end{aligned} \quad (13)$$

また, 式(8)から

$$\{\Delta \ddot{U}\} = -[M]^{-1}[K(t_n)]\{\Delta U\} + [M]^{-1}\{\Delta F\} \quad (14)$$

(13)式と(14)式を変位増分 $\{\Delta U\}$ について解けば,

$$\{\Delta U\} = [\bar{K}]^{-1}\{\Delta F\} \quad (15)$$

ここに,

$$\begin{aligned} [\bar{K}] &= [K(t_n)] + \frac{4}{\Delta t^2} [M] \\ \{\Delta \bar{F}\} &= \{\Delta F\} + [M] \left(\frac{4}{\Delta t} \{\dot{U}_n\} + 2\{\ddot{U}_n\} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

式(15)から, $\{\Delta U\}$ 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.

$$\begin{aligned} \{\Delta \ddot{U}\} &= \frac{4}{\Delta t^2} \{\Delta U\} - \frac{4}{\Delta t} \{\dot{U}_n\} - 2\{\ddot{U}_n\} \\ \{\Delta \dot{U}\} &= \frac{2}{\Delta t} \{\Delta U\} - 2\{\dot{U}_n\} \end{aligned} \quad (17)$$

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.

$$\frac{M}{NoEs} = m \quad (18)$$

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)のように表し, 式(16)のように, $[K]$ マトリックスと $\{\Delta F\}$ ベクトルを変形する.

$$\begin{bmatrix} m & & & & & & \\ & m & & & & & \\ & & m & & & & \\ & & & m & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & m \\ & & & & & & & m \\ & & & & & & & & m \\ & & & & & & & & & m \end{bmatrix} \quad (19)$$

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.

$$\left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n \quad (20)$$

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.

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n & & & & & & \\ & \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n & & & & & \\ & & \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n & & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n & \\ & & & & & & \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n \\ & & & & & & & \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n \end{bmatrix} \quad (21)$$

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-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掛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-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。

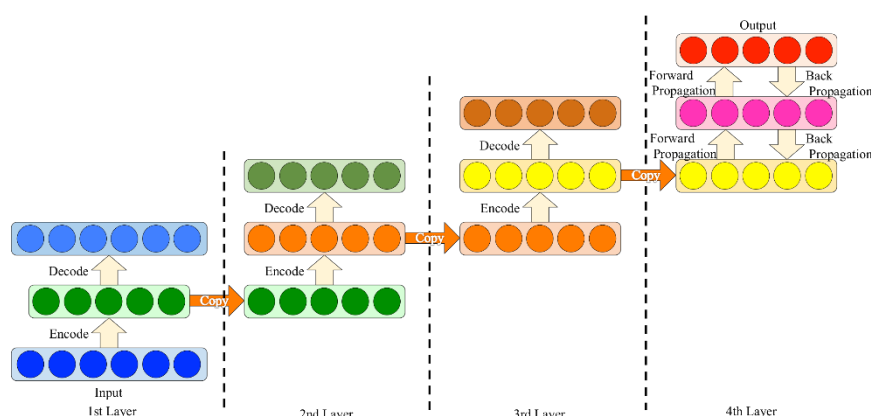


Fig.1 Example of Deep Autoencoder

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

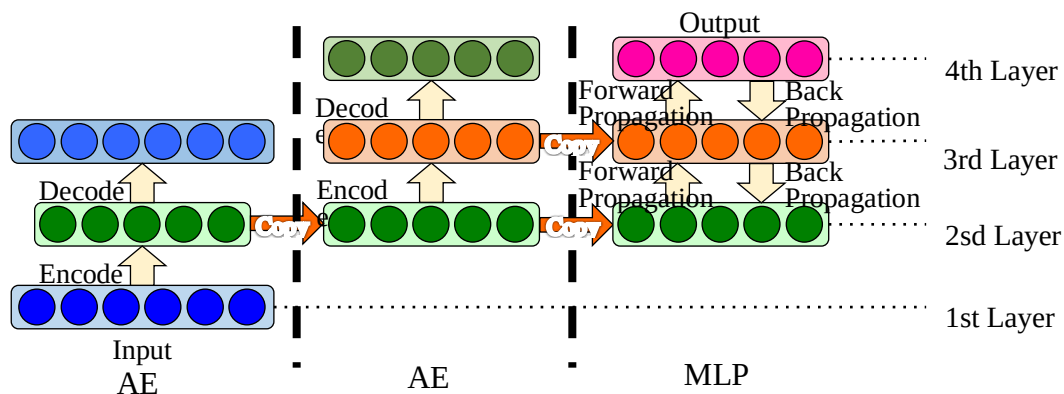


Fig.3 Schematic of Deep AE for MNIST

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-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-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.

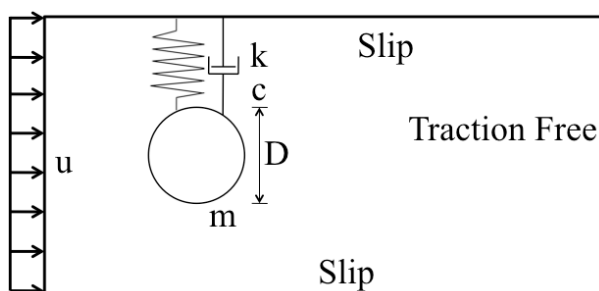


Fig.4 Schematic of Analysis Model

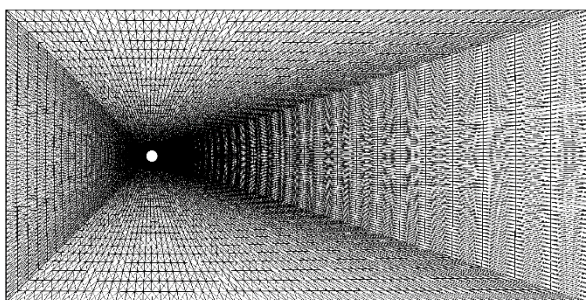


Fig.5 Mesh of Analysis Model

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, 検証用に 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.

$$error = \sum_o \left(\frac{|predict - correct|}{correct} \right) \quad (1)$$

$$average = \frac{\sum_n error}{N} \quad (2)$$

$$maximum = average_n(error) \quad (3)$$

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	A _c [m]	-
Frequency of Cylinder	f _C [Hz]	-
Maximum Coefficient of Lift	C _L [-]	-
Strouhal Number	St [-]	-
Average Coefficient of Drag	C _D [-]	-

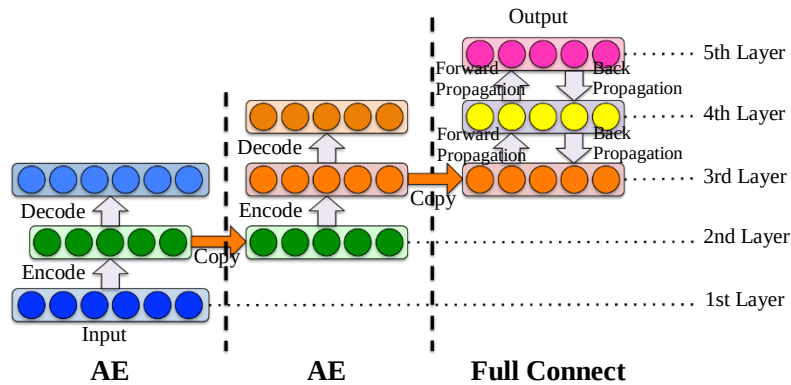


Fig.6 Schematic of Deep AE for FSI Analysis

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りなかつたと考えられる. 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あり, 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 を持ちこた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, 入力のカテゴリ, 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ず, 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.

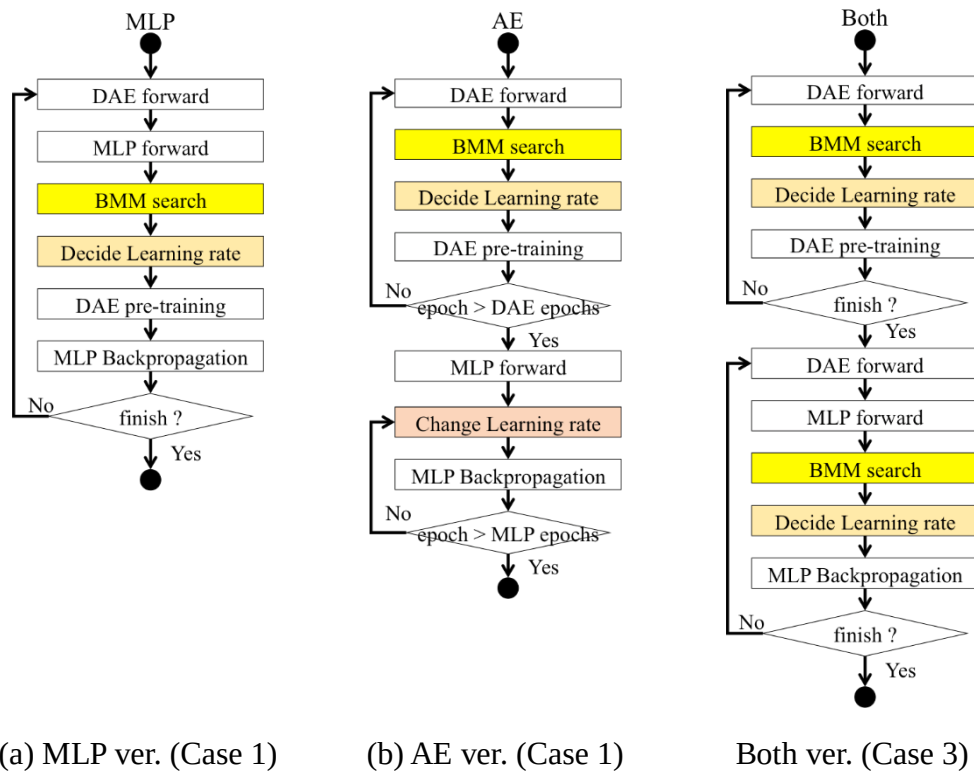


Fig.7 Flowchart of Deep mnSOM Algorithm

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 を持ちこすることで、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-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 Classification 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现象について粒子法(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

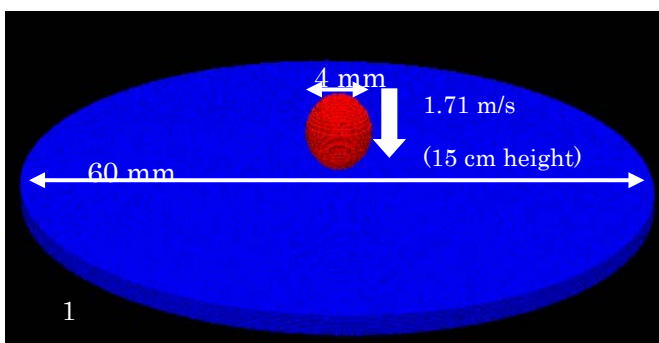
(i) ミルククラウンの大規模数値シミュレーション

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。ミルククラウンは、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。

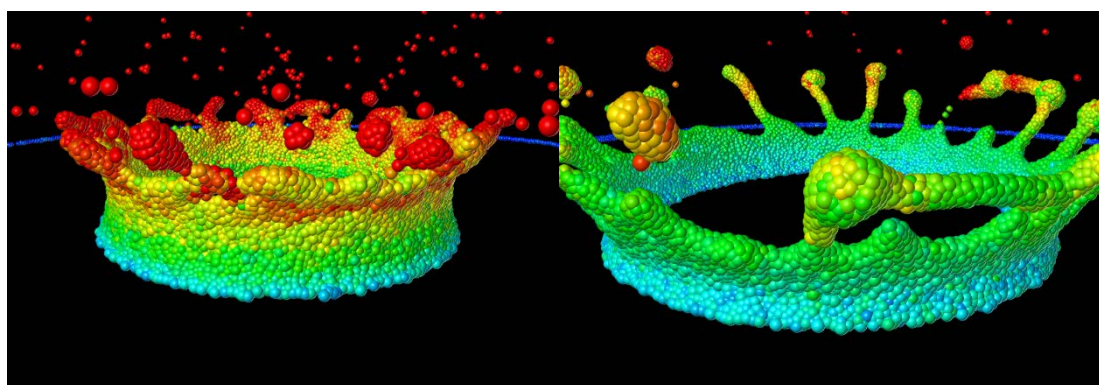
Fig.2 から Fig.5 に示すように, 粒子の直径 0.2 mm, 0.1 mm, 0.05 mm, 0.025 mm の解析結果であり, 色は速度の大きさである. Fig.4 の粒子直径 0.05 mm の解析や Fig.5 の粒子直径 0.025 mm の解析では, ミルククラウンの発生に成功している. Fig.4 の粒子直径 0.1 mm の解析では, クラウンの側面の壁に穴が開くなどして, 非現実

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.



Kinematic viscosity	$1.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Surface tension contact angle	30°
Surface tension coefficient	0.04 N/m
Density	1030 kg/m^3

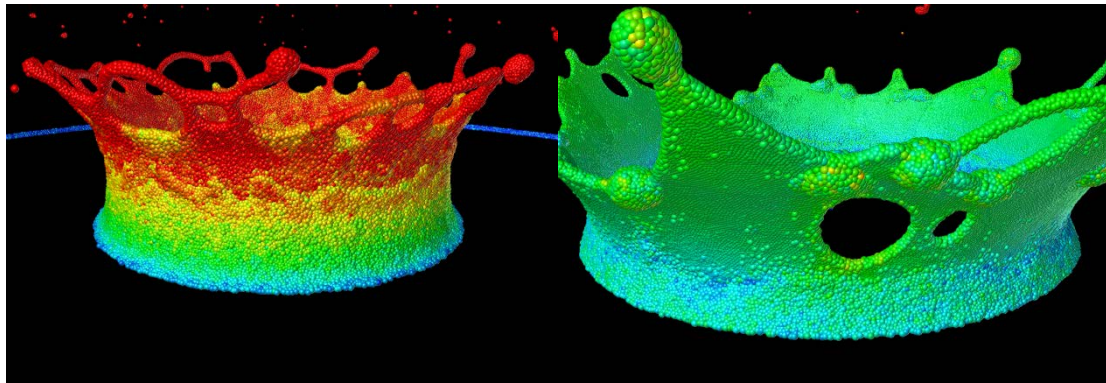
Fig.1 ミルクを想定したミルククラウンの計算条件



(a) 10 ms

(b) 24 ms

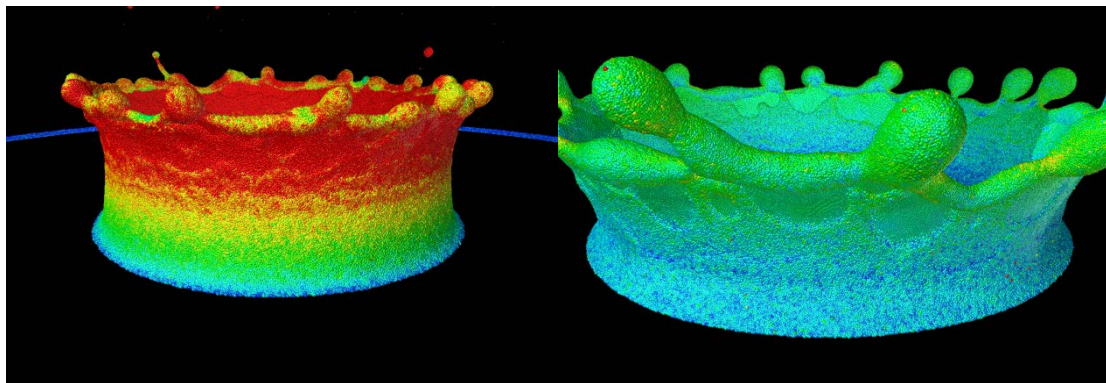
Fig.2 粒子直径 0.2 mm の解析結果



(a) 10 ms

(b) 24 ms

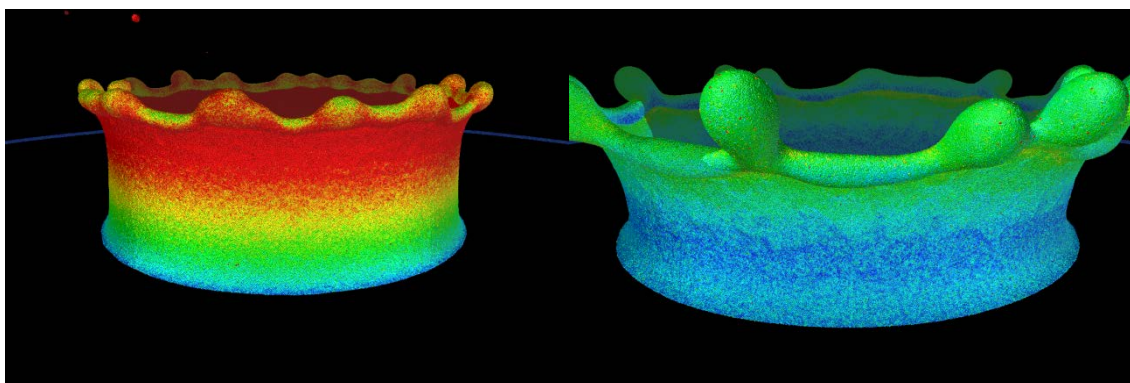
Fig. 3 粒子直径 0.1 mm の解析結果



(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.

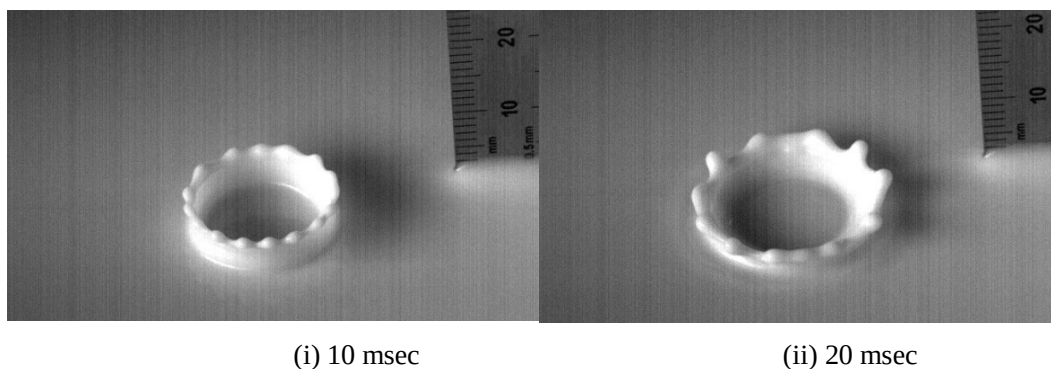


Fig.6. ハイスピードカメラを用いたミルククラウンの実験映像.

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.

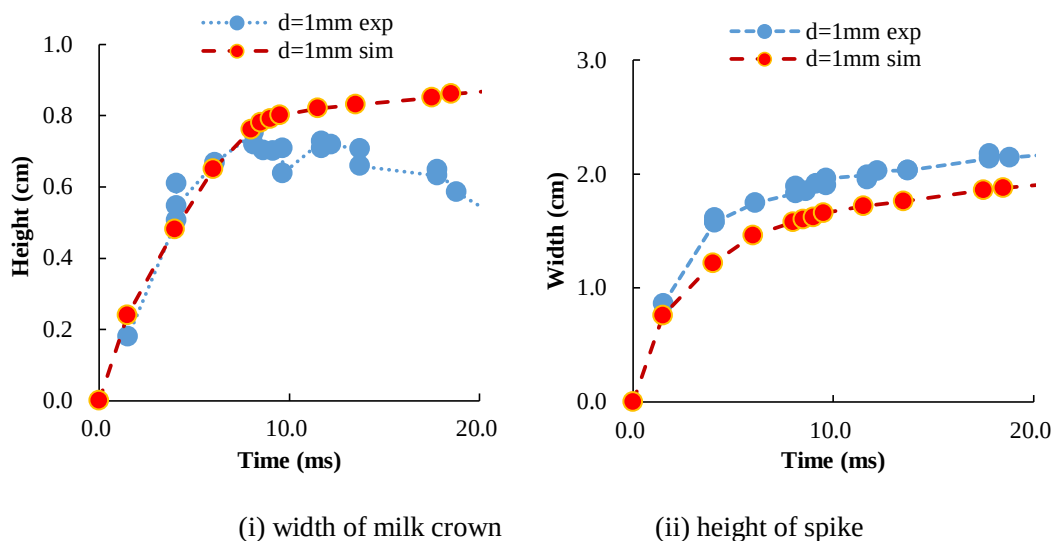


Fig.7 実験結果^[2]と計算結果の比較 (depth $d = 1\text{mm}$).

(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。

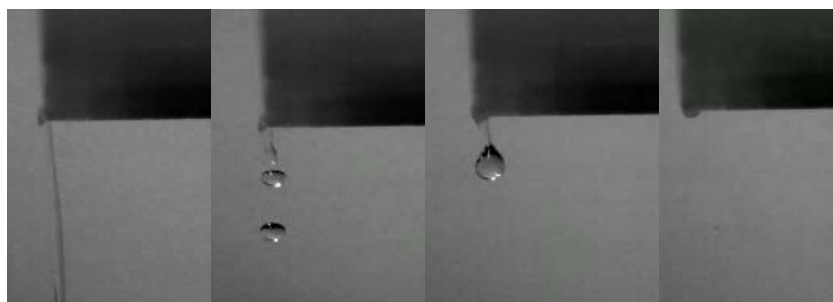


Fig.8 液だれの実験映像(四角縁, 水)

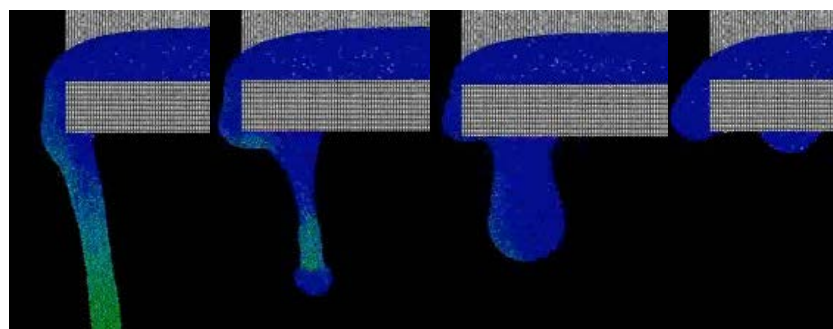


Fig.9 液だれの計算シミュレーション結果

(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: Floating 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ポロジ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。

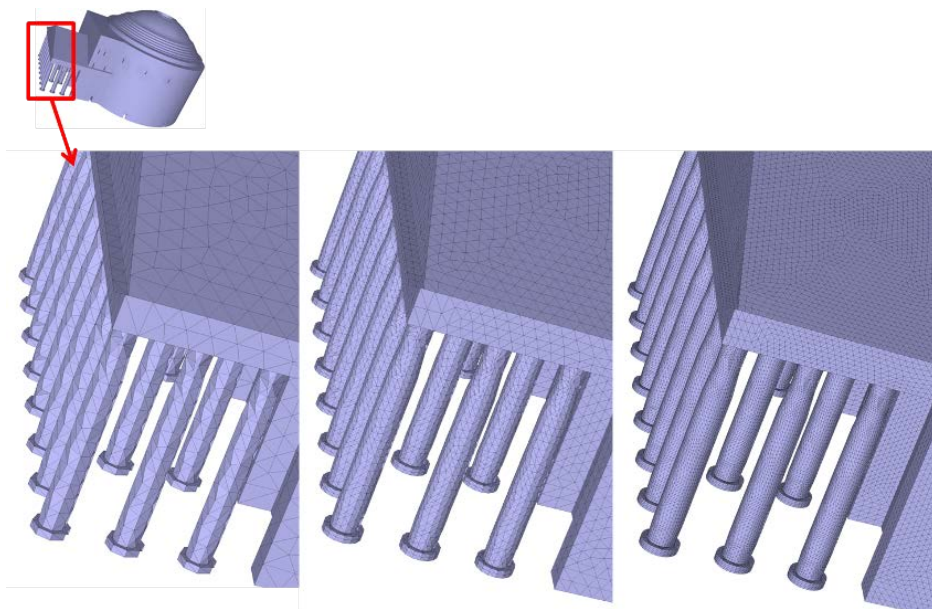


Fig.1 Parallel large scale mesh generation by subdivision with shape conformity to CAD data

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.

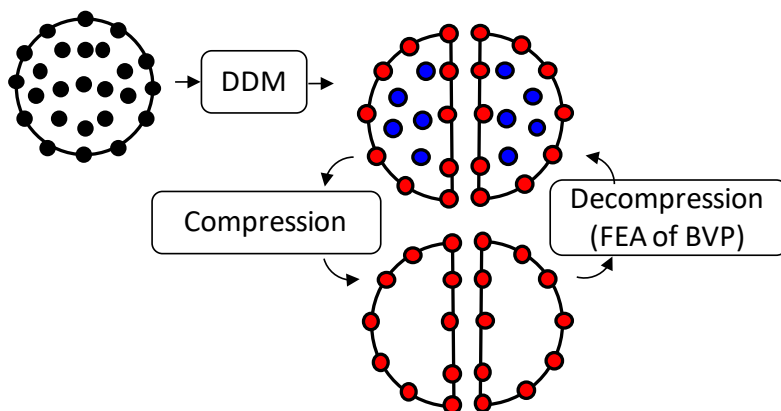


Fig.2 DDM compression by removing of internal degree of freedom

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 年前倒してメッシュフリー向け標準 I/O ライブラリを開発を行った. 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 反復ライブラリを開発を行った. 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, メモリーコピ化などに伴う 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.

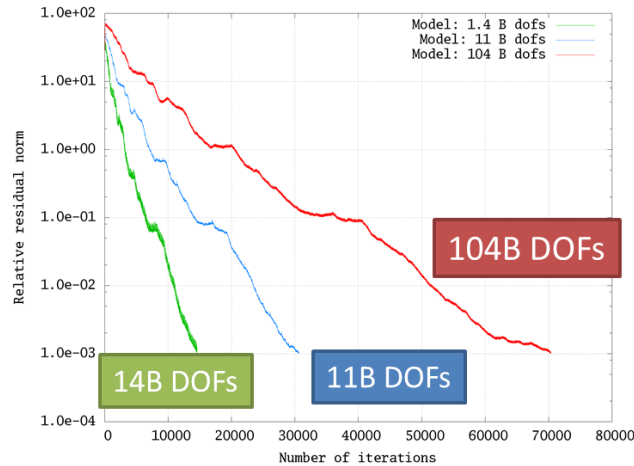


Fig.3 Convergence history of iterative method in 100 billion DOF finite element analysis

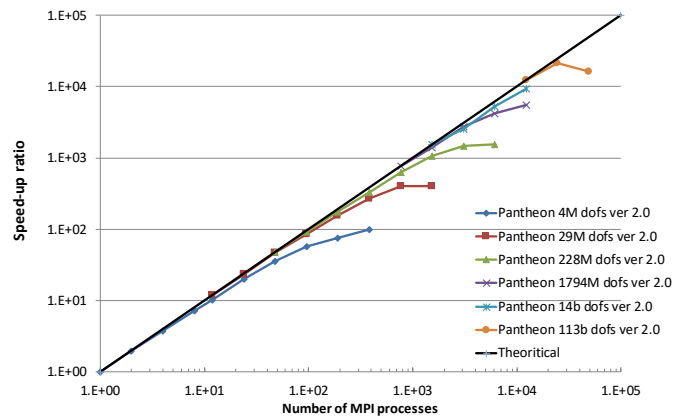


Fig.4 Parallel performance of strong scaling with K-computer

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).

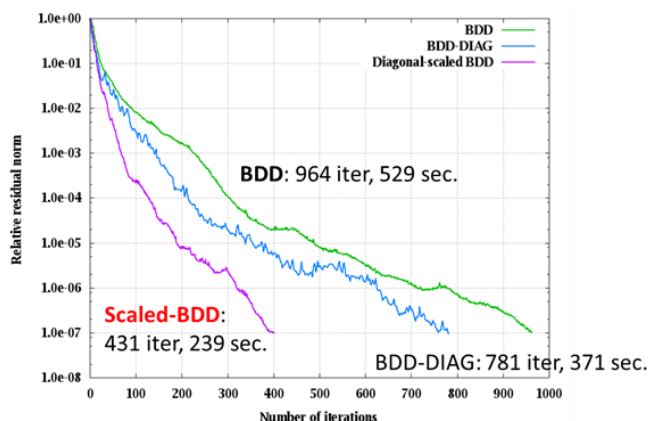


Fig.5 Convergence improvement with Scaled-BDD on multiple material model

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).

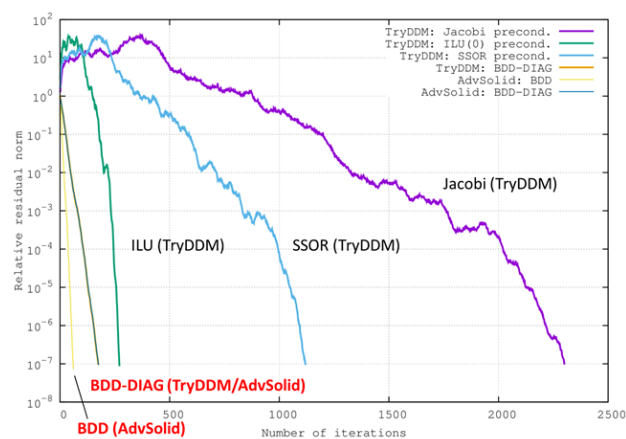


Fig.6 Convergence evaluation of BDD preconditioner

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**、メモリ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。

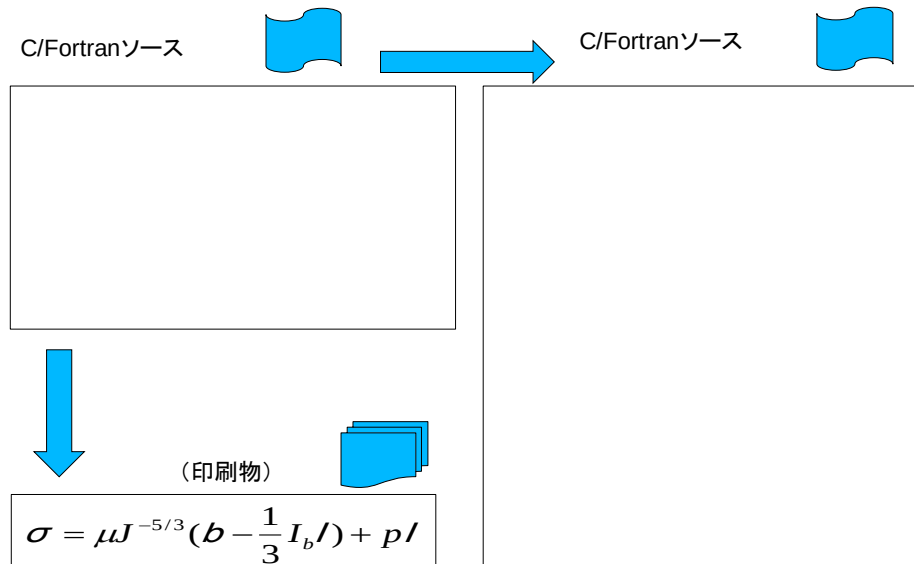


Fig.7 Flow of DSL for continuum mechanics

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。

<3-Dベクトル>	
Cプリプロセッサマクロ による変数宣言	#define declare_vector(a)¥ double a##_0, a##_1, a##_2;
オリジナルコード	declare_vector(u);
Cプリプロセッサ出力	double u_0, u_1, u_2;
<対称テンソル>	
Cプリプロセッサマクロ による変数宣言	#define declare_tensor(a)¥ double a##_xx, a##_yy, a##_zz;¥ double a##_xy, a##_yz, a##_zx;
オリジナルコード	declare_tensor(B);
Cプリプロセッサ出力	double B_xx, B_yy, B_zz; double B_xy, B_yz, B_zx;

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～数百キロ四方程式度)、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四方程式度)、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四方程式度)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。

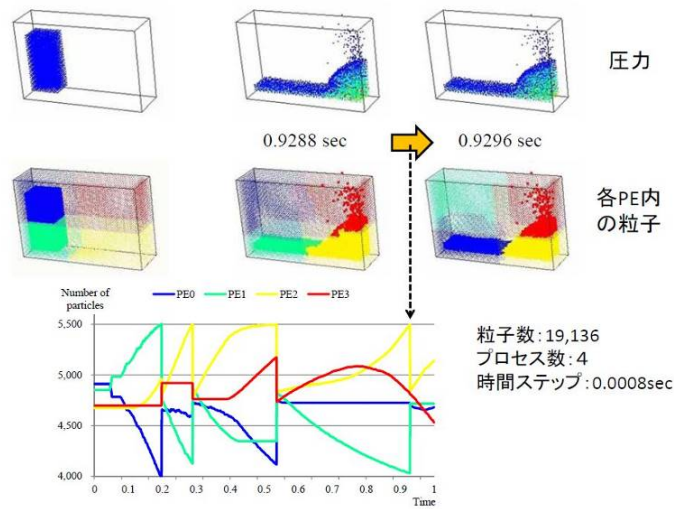


Fig.9 Dynamic load balancing for distributed memory parallel processing of particles

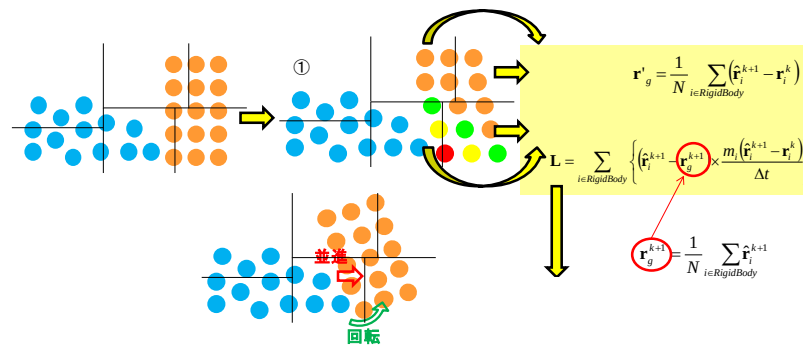


Fig.10 Calculation procedure of rigid body in LexADV_EMPS

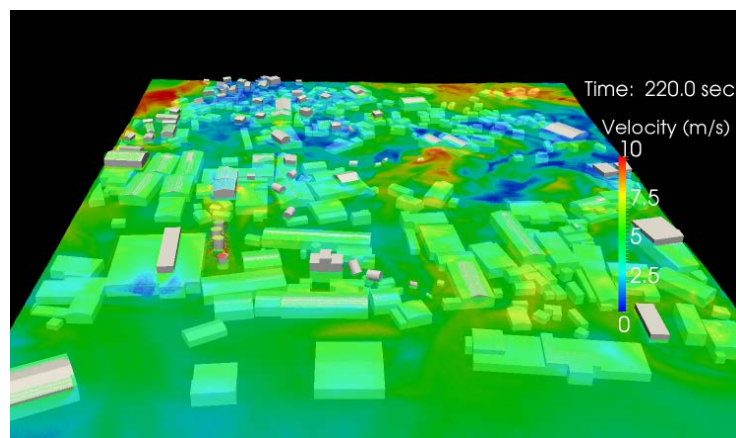


Fig.11 A result of simulation including many rigid bodies by LexADV_EMPS

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)。

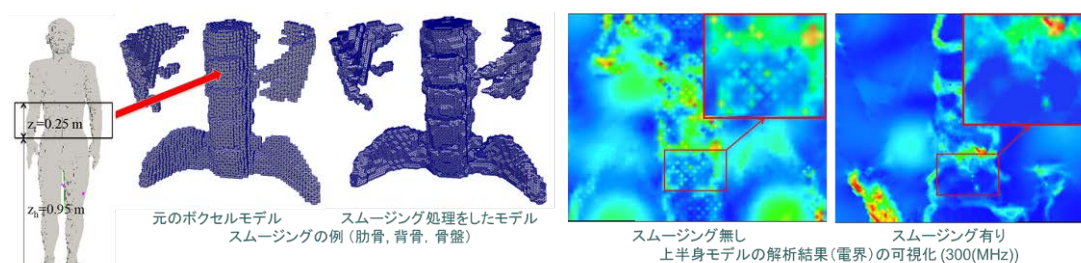


Fig.12 Thermal therapy simulation with AdvMetis2 and AdvMagneticHF

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)。

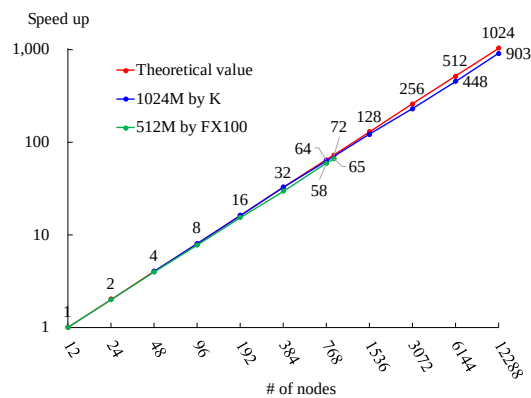


Fig.13 Parallel performance of strong scaling with uncompressed flow analysis

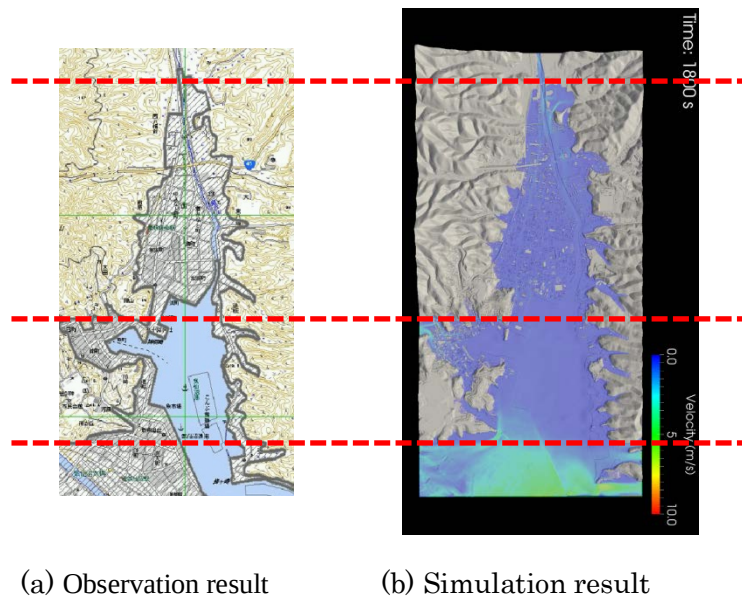


Fig.14 Validation of tsunami run-up analysis with LexADV_EMPS

(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實的描画は、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、実験モデル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 $A=0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ の風洞装置にシリコ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。

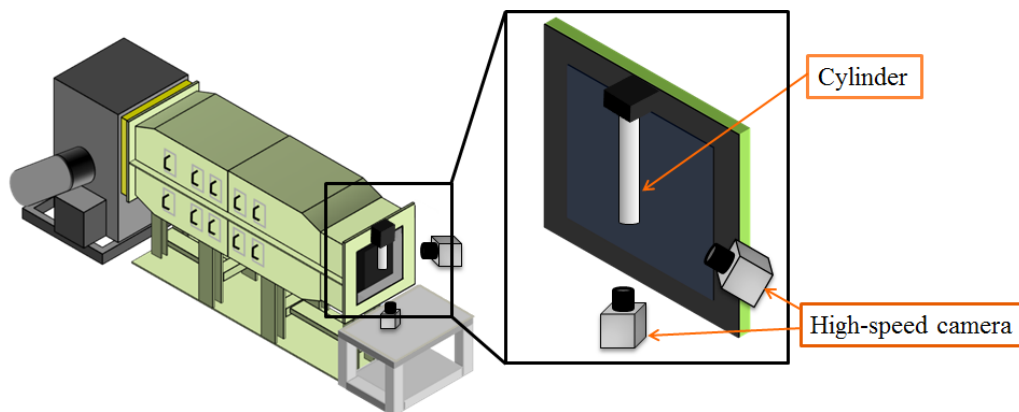


Fig.1 Schematic picture of experimental setup.

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。

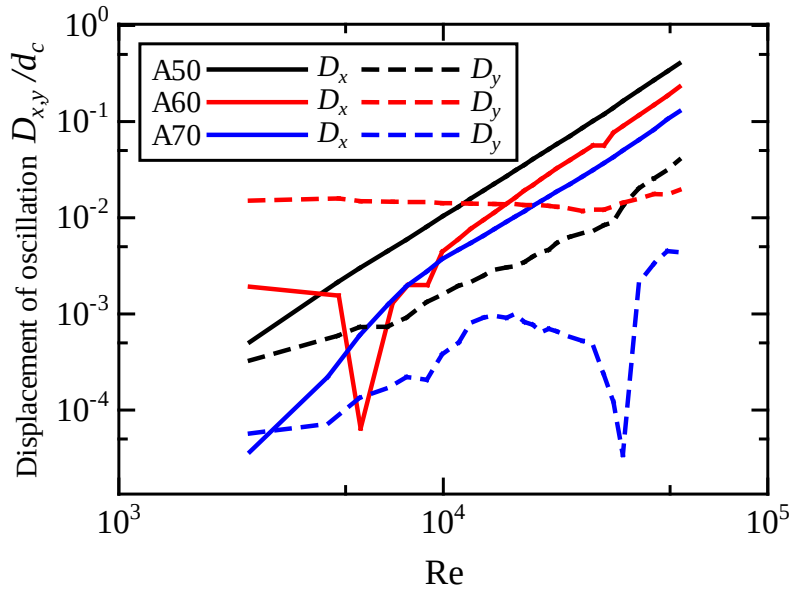


Fig. 3 Time-averaged displacement of oscillating cylinder.

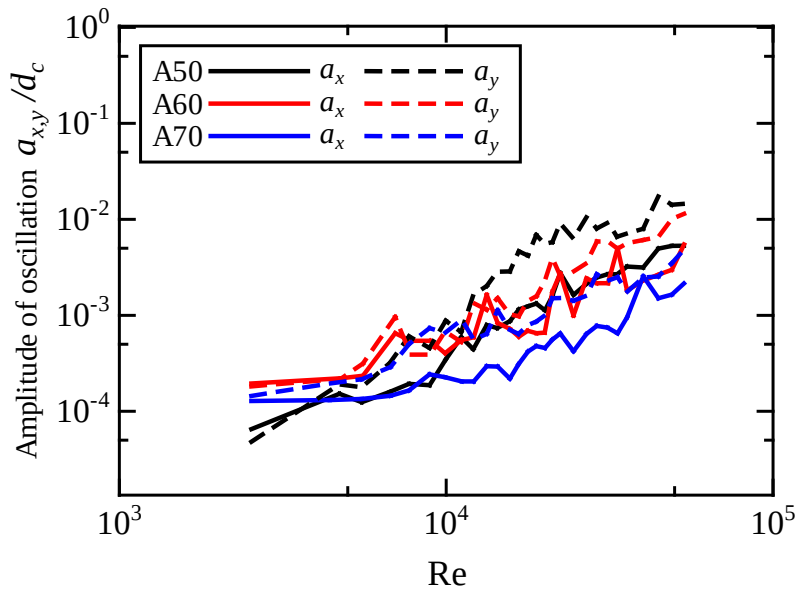


Fig. 4 R.M.S. amplitude of oscillating cylinder.

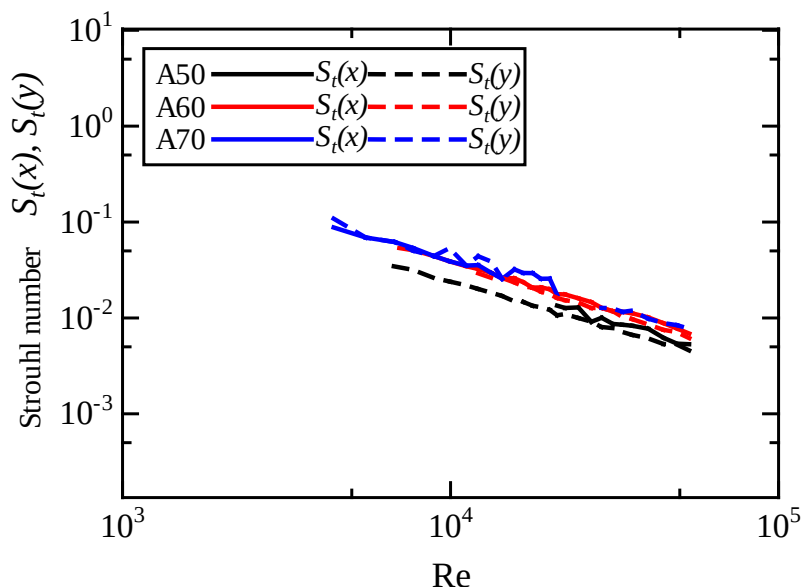


Fig. 5 Frequency characteristics of oscillating cylinder.

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 $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ であり、気流速度は最大 40 m/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 5 kHz 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。

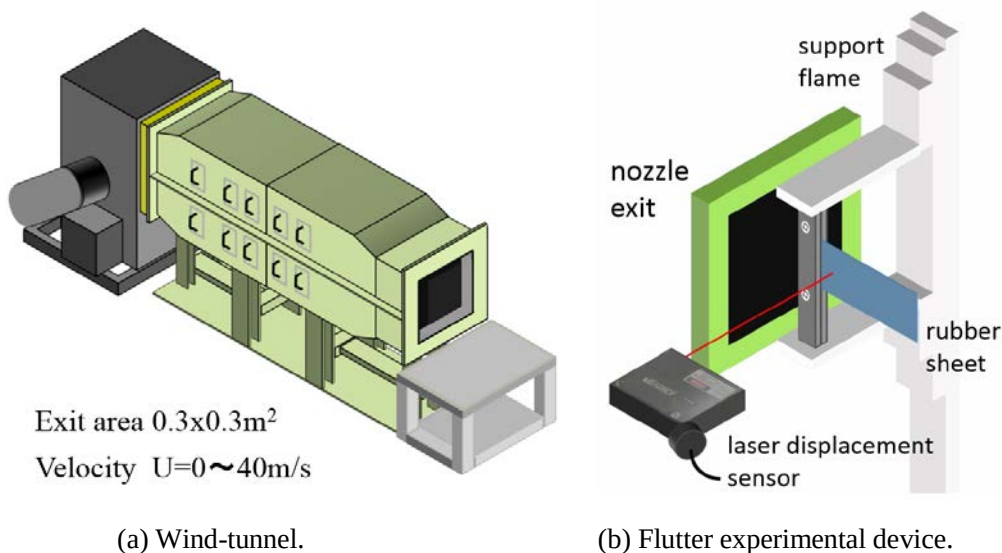


Fig.1 Experimental setup of wind-tunnel.

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、長さとは幅は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。

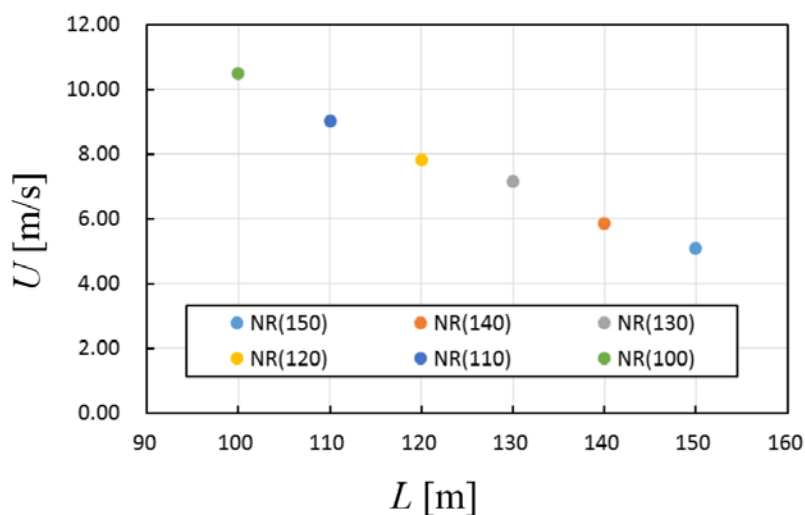


Fig. 3 Comparison of flutter velocity to sheet length (BN).

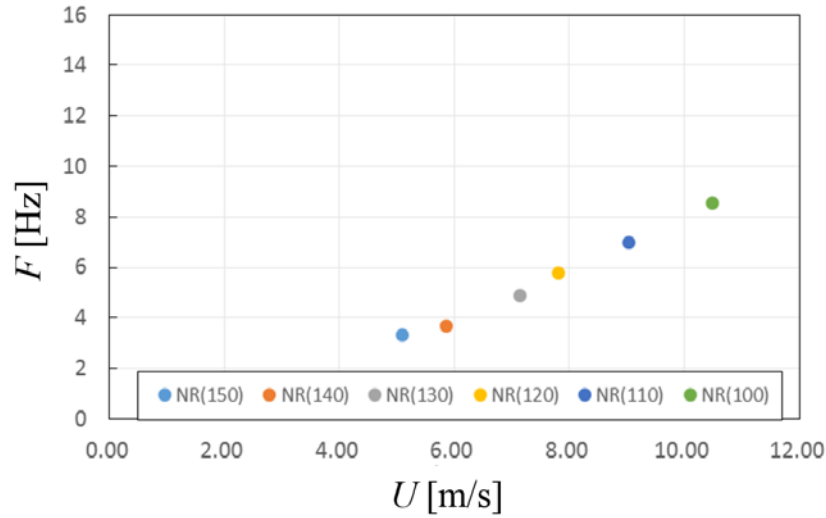


Fig. 4 Characteristics of flutter frequency to sheet length (BN).

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。

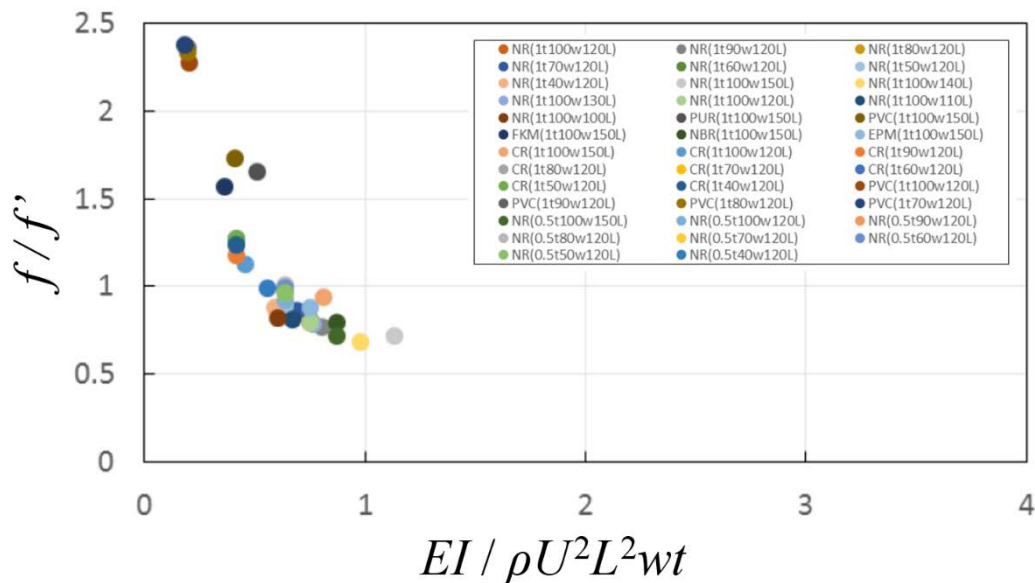


Fig. 5 Characteristics of flutter frequency to FSI parameter.

(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 流体力学(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, 流体力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がグループに加わり、(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、引張試験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.

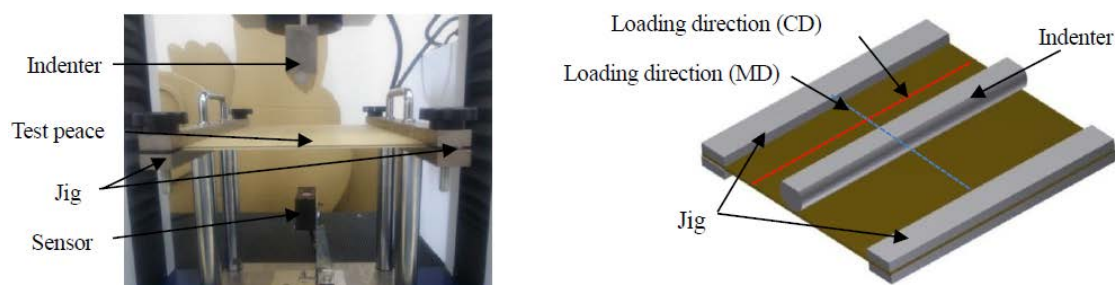


Fig.1 Bending test of corrugated cardboard

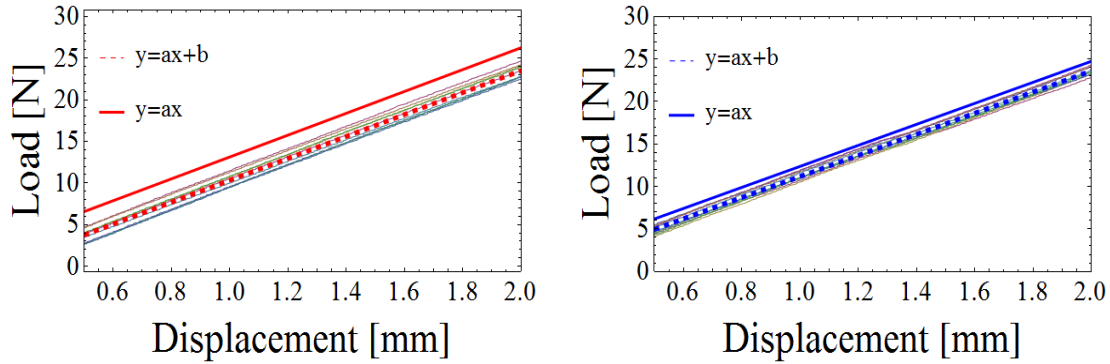


Fig.2 Load – distribution characteristic

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マイクロモデル図 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。

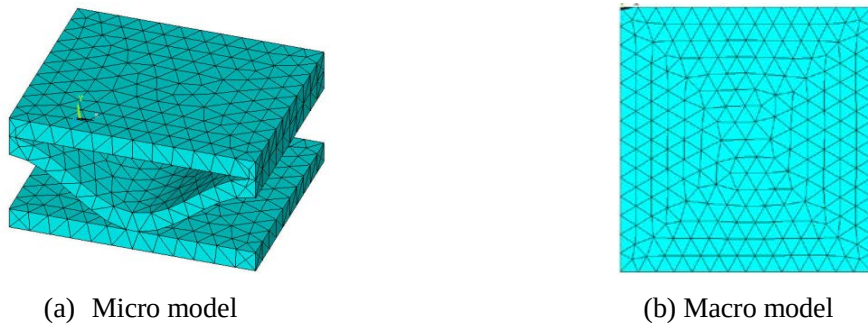


Fig3. Homogenization model

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。

$$\text{im}(F_{20})\left(\{(e_1, e_2) | e_1, e_2 \in \{1e^3, 2e^3, 3e^3, \dots 1e^4\}\}\right) \quad (1)$$

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.

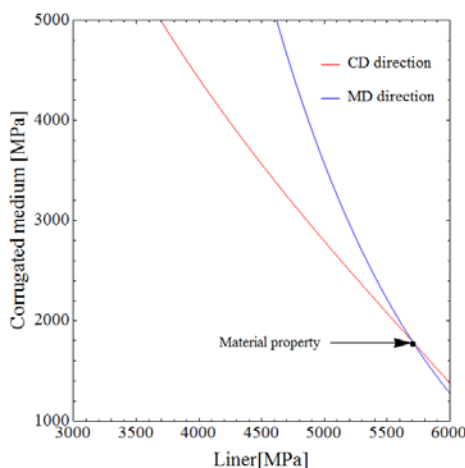


Fig.4 Inference of material property by intersection of coordinate

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.

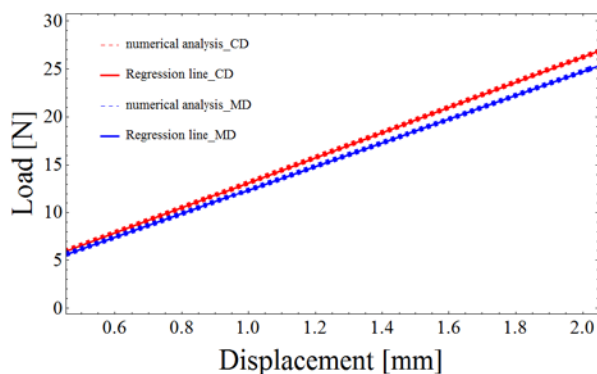


Fig.5 Comparison of between reduction regression line and numerical analysis

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.

$$p(\theta|D) \propto f(D|\theta)p(\theta) \quad (2)$$

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。従って尤度は次式ようになる。

$$L(u|F, C) \quad (3)$$

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。

$$y|u, \lambda \sim N[u, \lambda^{-1}] \quad (4)$$

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。

$$\lambda^{-1} \sim Ga[\alpha, \beta] \quad (5)$$

ここで α 、 β はガンマ分布を支配するパラメータであり $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ という制約条件が課せられる。従って尤度は次式となる。

$$L(y|F, C, E, \alpha, \beta) \quad (6)$$

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.

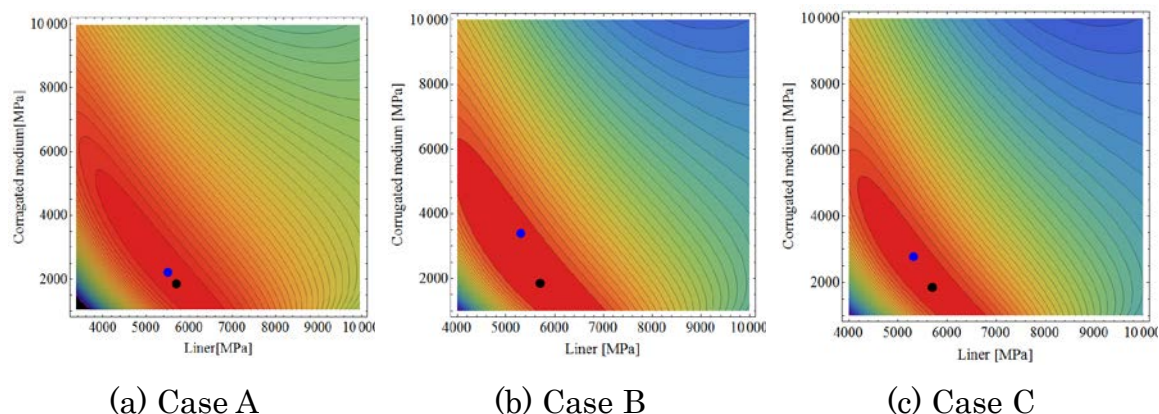


Fig.6 Posterior distribution

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マイ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.

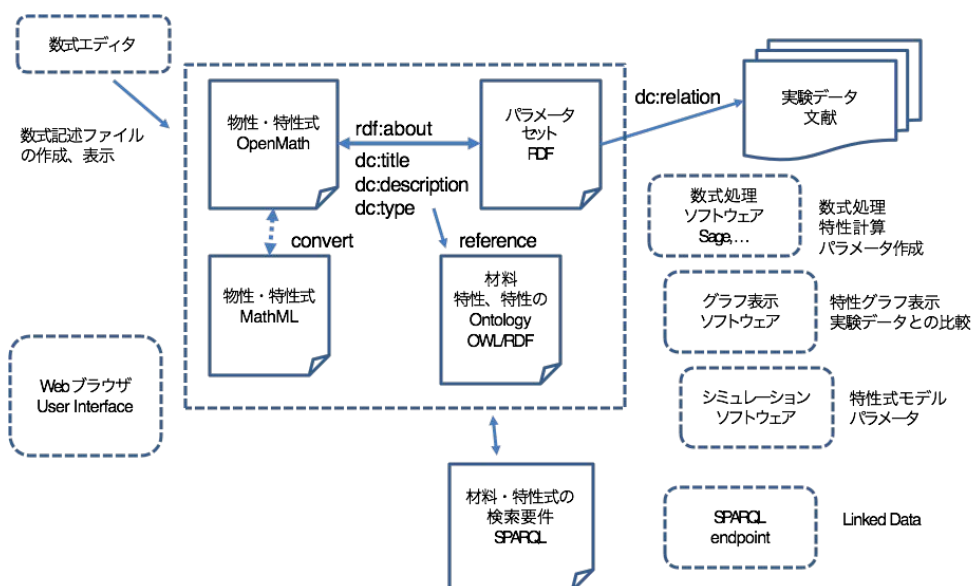


Figure 1. Application of the Semantic Web Framework for Materials Integration

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, 引張試験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ェ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、ソフトウェ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、ものづ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、試験体に繰り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 分の急冷の繰り返しを 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.MarcTM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。

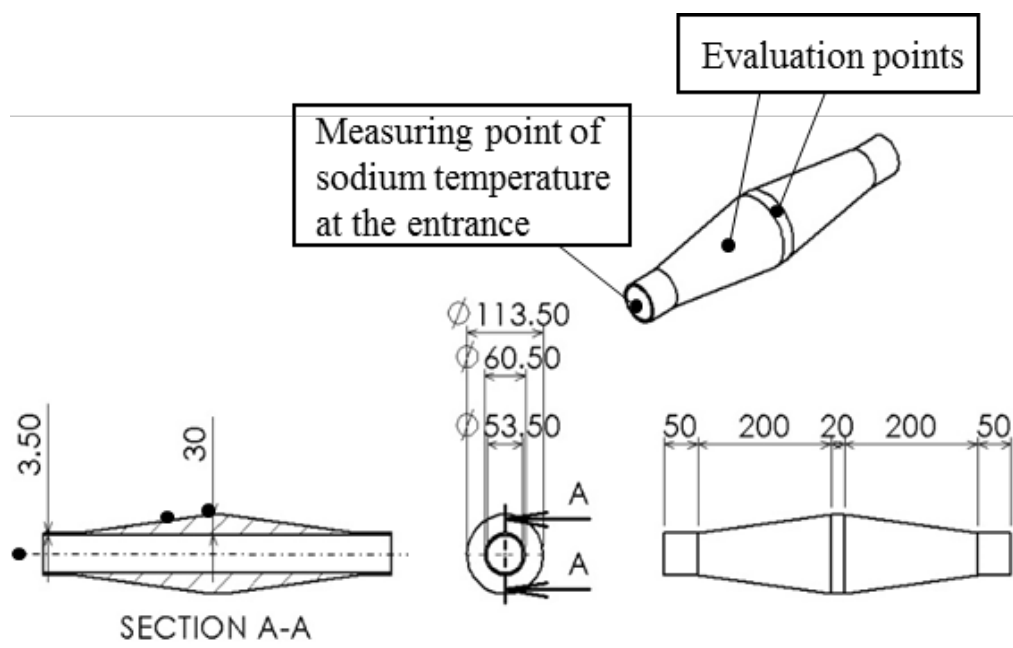


Fig. 1 Configuration of the specimen and temperature measuring points

Table 1 Material properties used the heat transfer analysis and the elastic analysis

$T (^{\circ}\text{C})$	λ (Kcal/m h $^{\circ}\text{C}$)	C_p (Kcal/kg $^{\circ}\text{C}$)	ρ (kg/m ³)	E (kg/mm ²)	ν	α (10 ⁻⁶ mm/mm $^{\circ}\text{C}$)
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

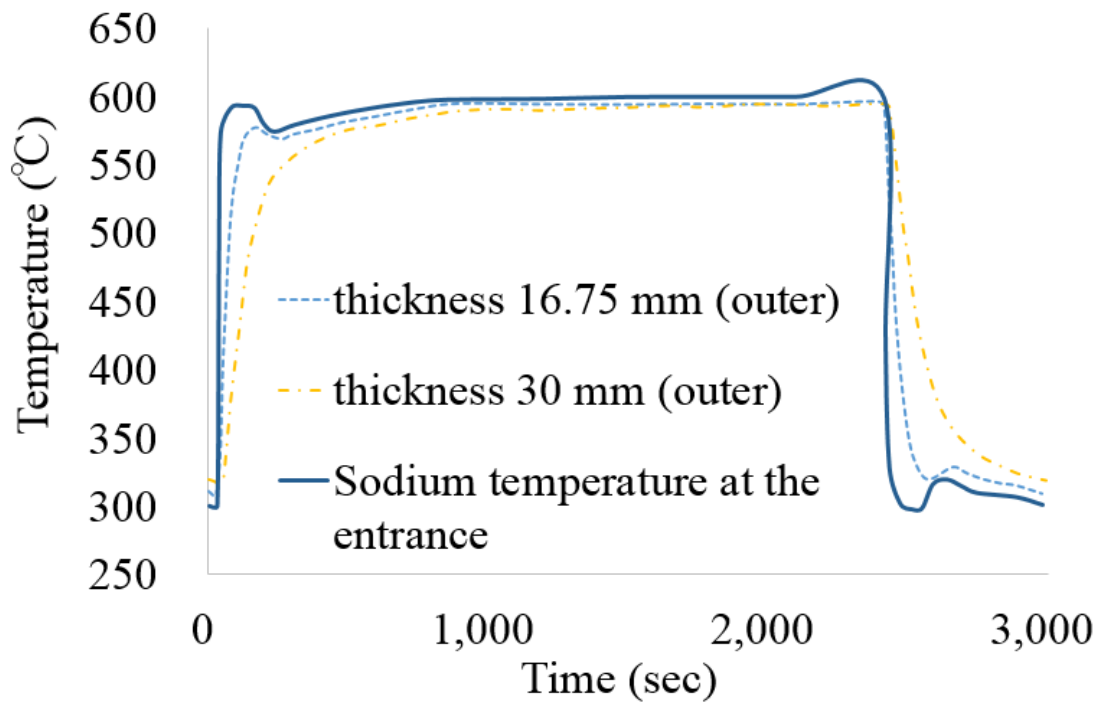


Fig. 2 Temperature histories at the evaluation points [2]

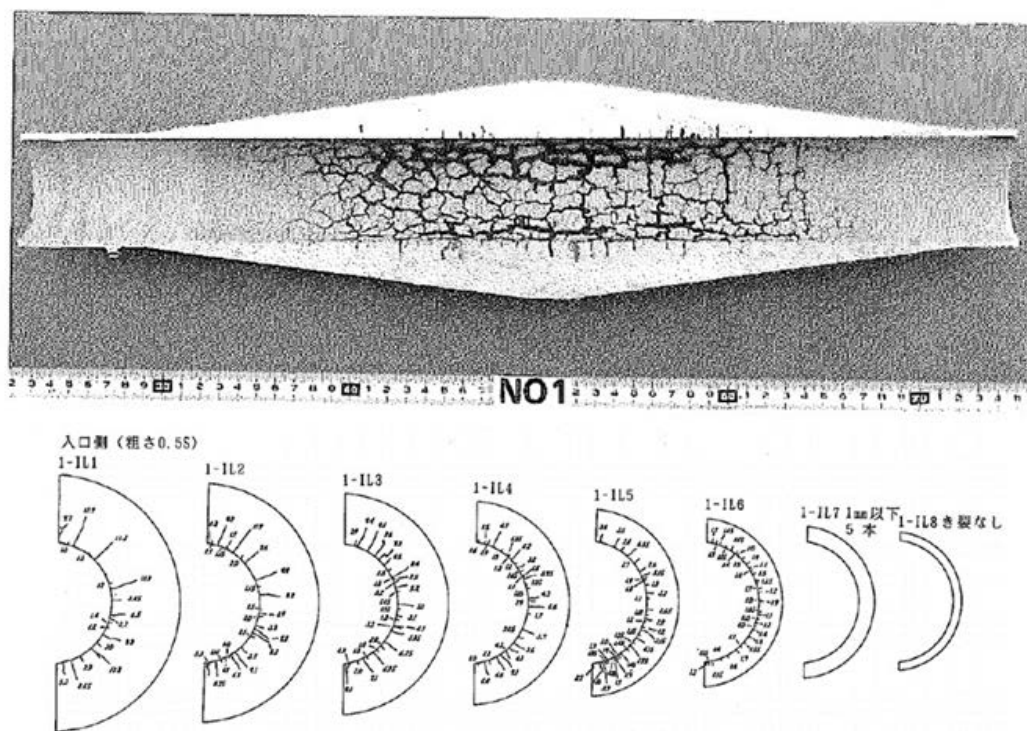


Fig. 3 Results of crack observation [2]

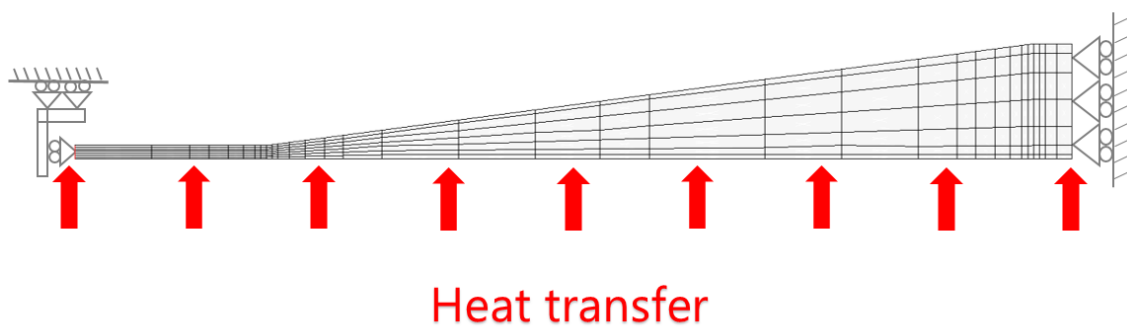


Fig. 4 The model used the simulation analysis and boundary conditions

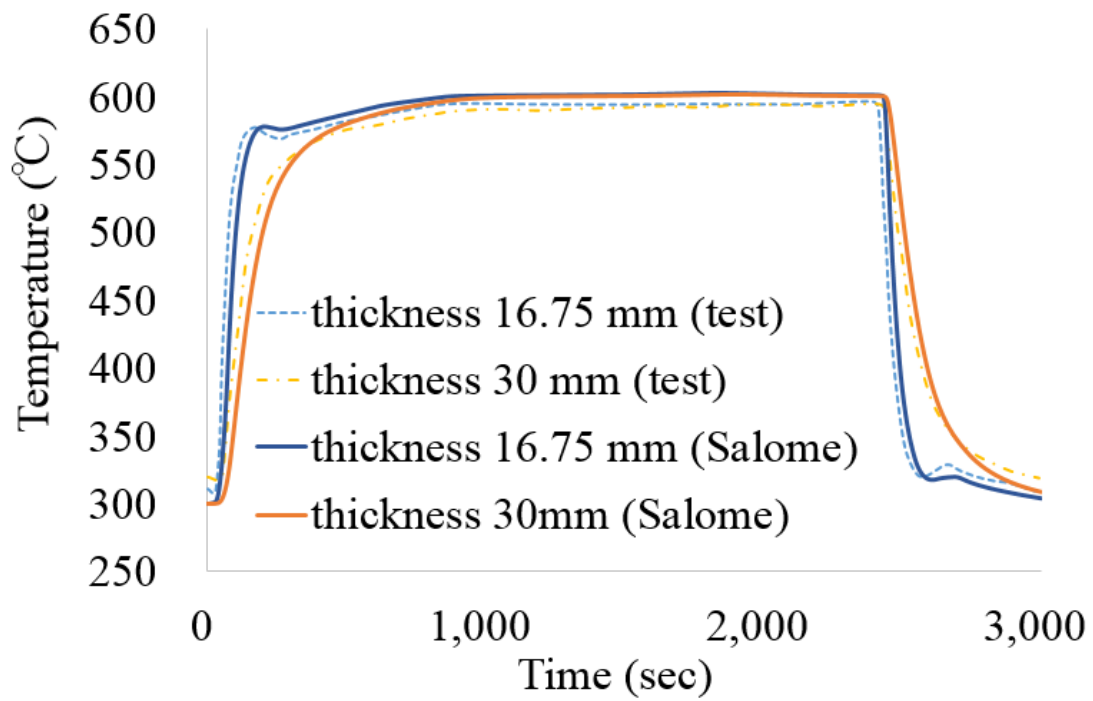


Fig. 5 Temperature histories at the evaluation points

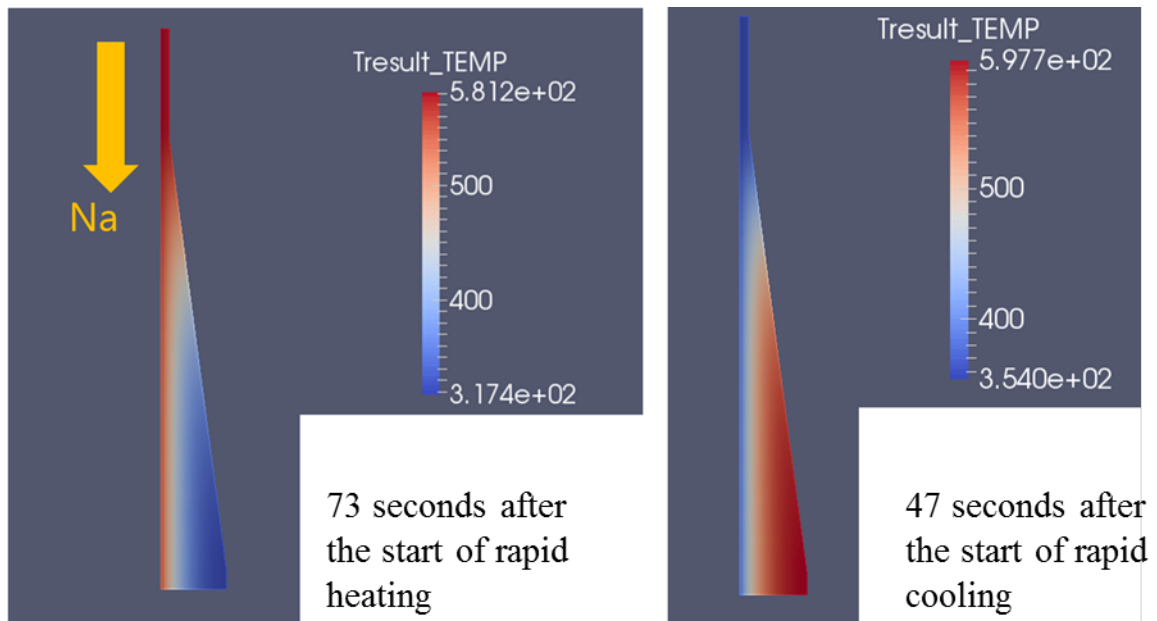


Fig. 6 Temperature distribution at time steps calculated maximum moment equivalent stress

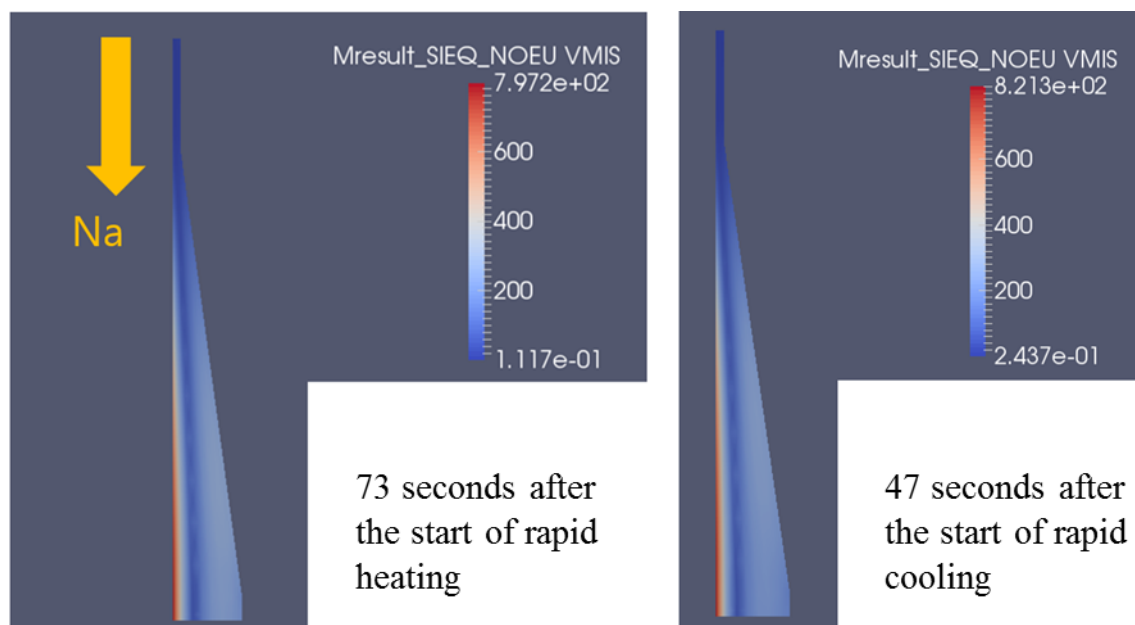


Fig. 7 Mises equivalent stress distribution at time steps calculated maximum moment equivalent stress

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

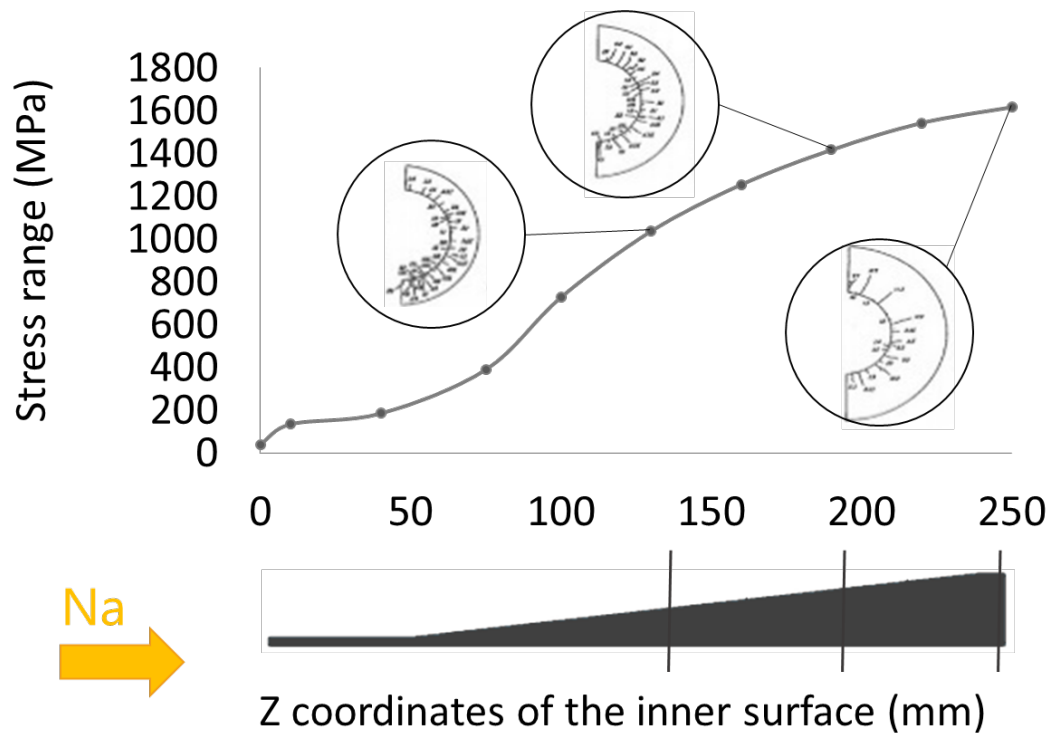


Fig. 8 Distribution of stress ranges compared with crack observations

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。

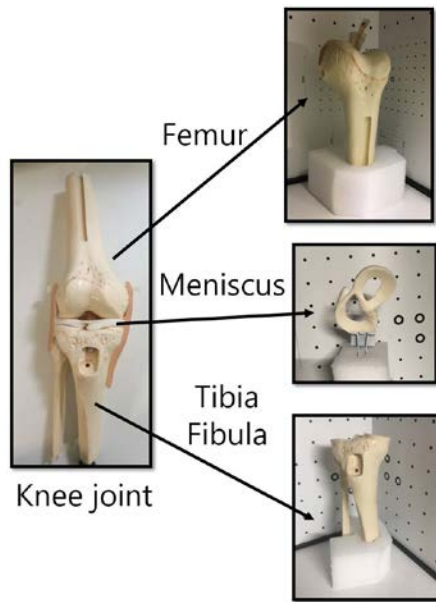


Fig.1 Functional model of the knee-joint

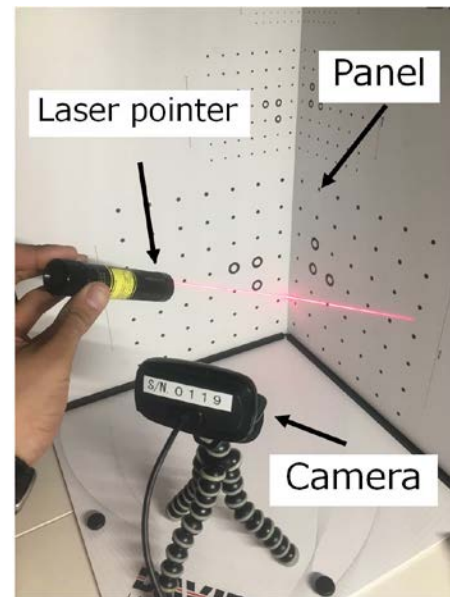


Fig.2 3D laser scanner

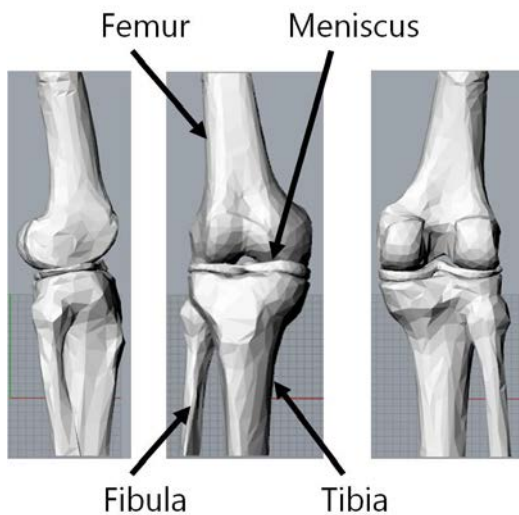


Fig.3 Scanned solid model in 3D-CAD

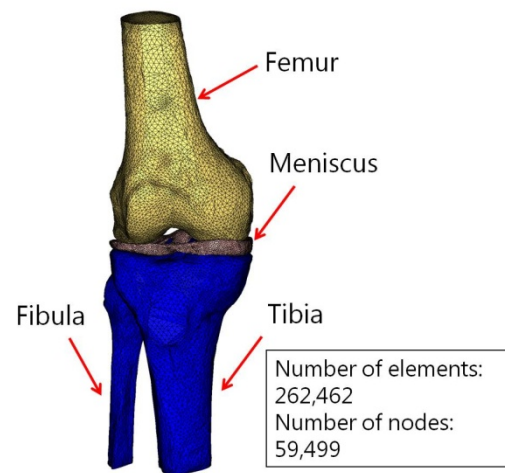


Fig.4 Finite element model of the knee

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™ 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。

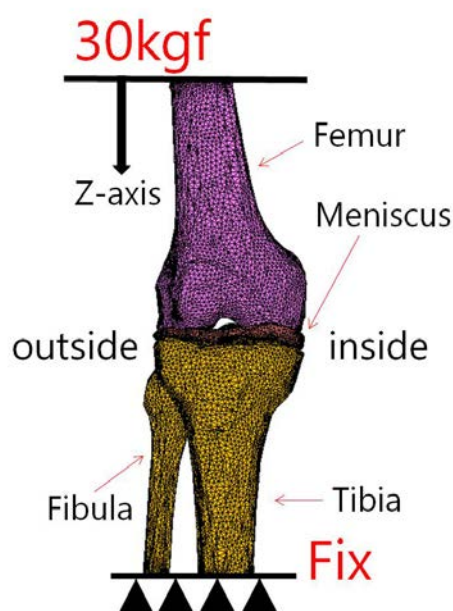


Fig. 5. Boundary conditions

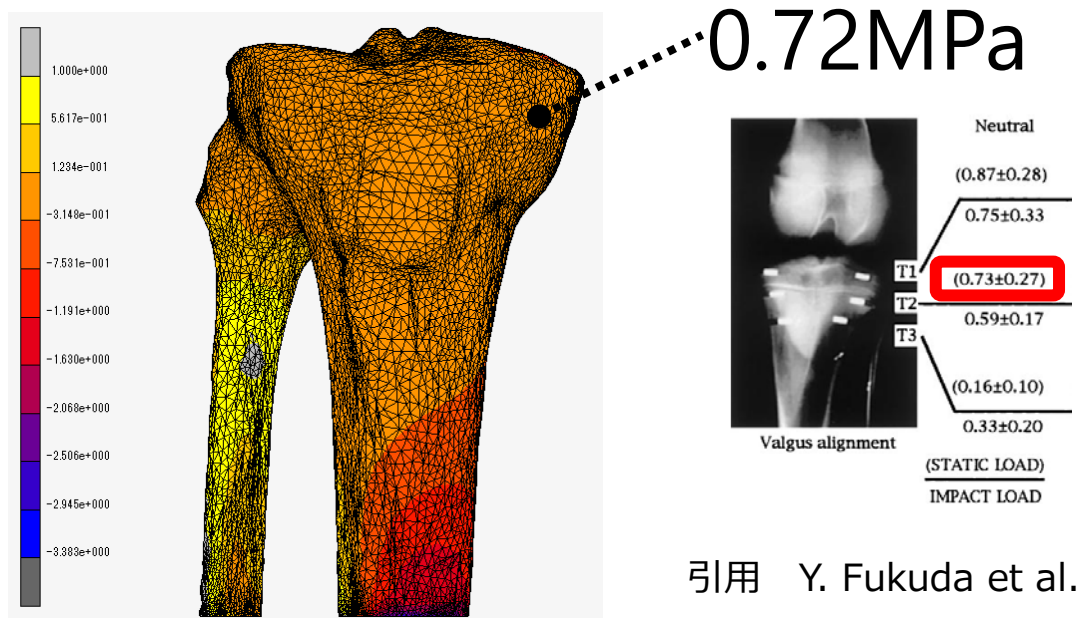
Table I. Material properties

	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 $0.73 \pm 0.27 \text{MPa}$ 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.



引用 Y. Fukuda et al.

/Clinical Biomechanics

15,pp516-pp521,(2000)

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

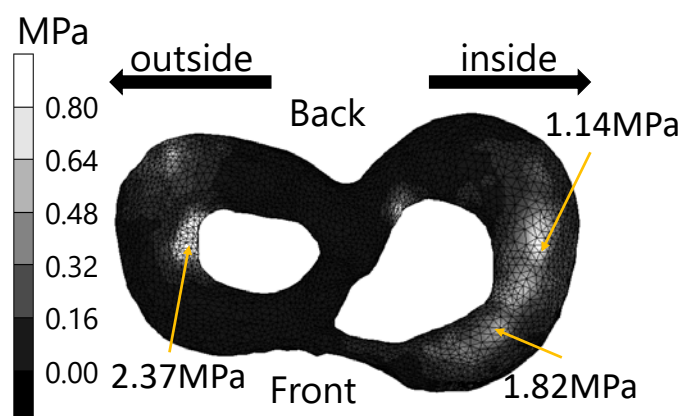


Fig. 8 Distribution of equivalent of Mises stress around the meniscus

(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 and monads." Information and computation 93.1 (1991): 55-92.
- [Wadler 92a] Wadler, Philip. "Comprehending monads." Mathematical structures in computer science 2.04 (1992): 461-493.
- [Wadler 92b] Wadler, Philip. "The essence of functional programming." Proceedings of the 19th ACM SIGPLAN-SIGACT symposium on Principles of programming languages. ACM, 1992.
- [Wadler 95] Wadler, Philip. "Monads for functional programming." 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-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、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 $2.8 \times 2.1\text{m}$ 、下のスクリーンが同じく $2.8 \times 2.1\text{m}$ 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。

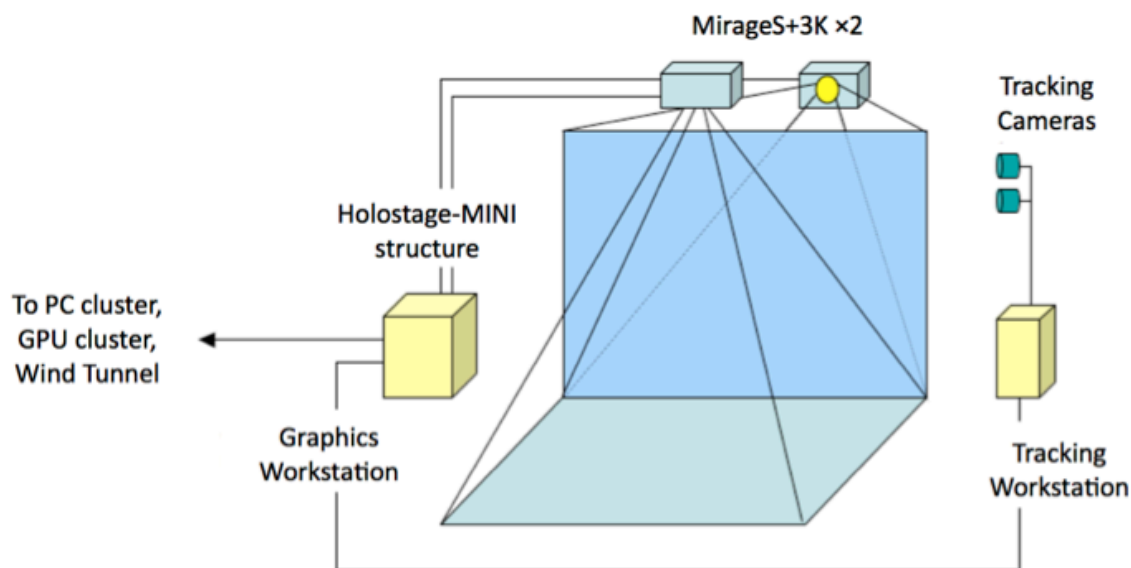


Fig. 1 Hardware configuration

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、何をみるか、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。

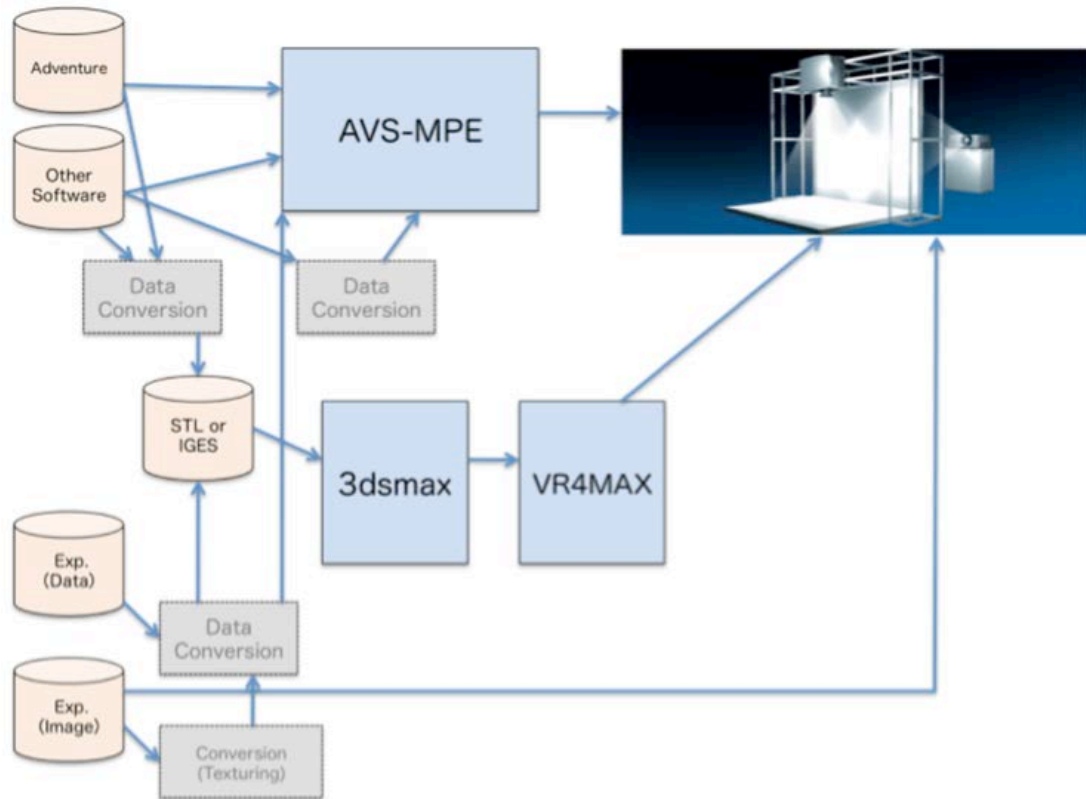


Fig. 2 Visualization system

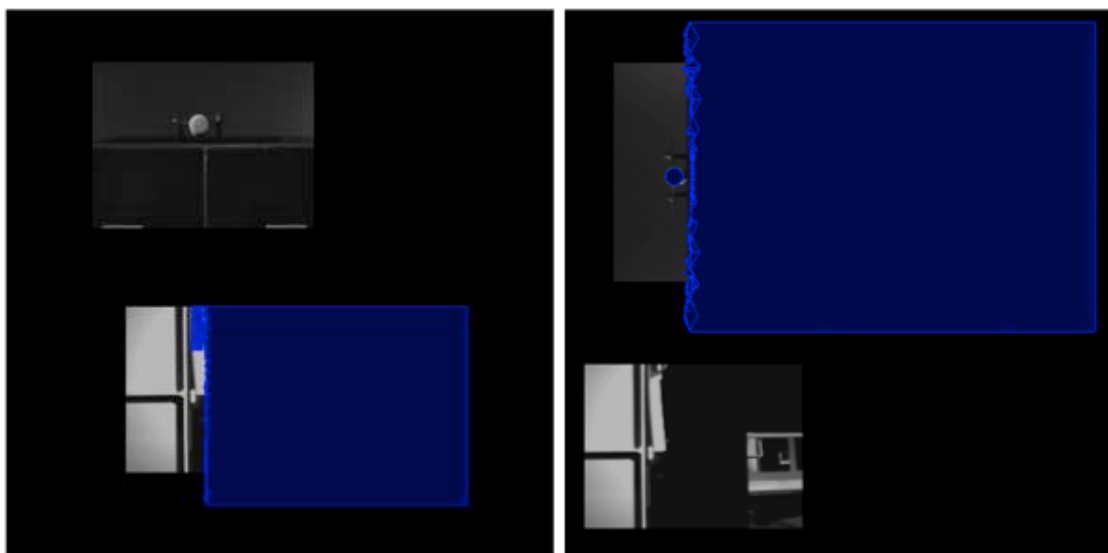


Fig. 3 Visualized image of the standard problem

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ですが、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。

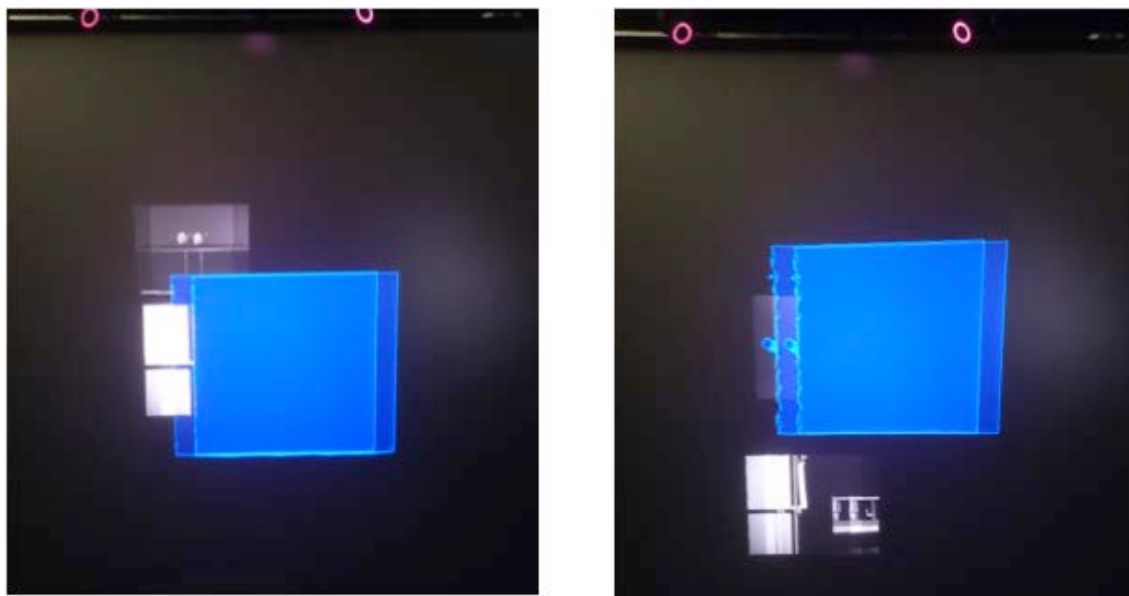


Fig. 4 Visualized image in VR system

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ですが、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られる。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るだろうと思われる。

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、最近では、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。

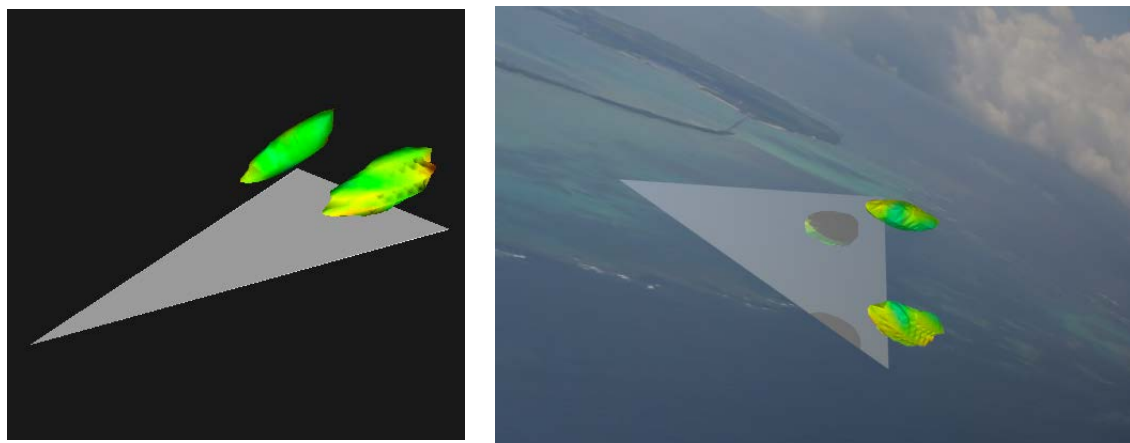


Fig. 6 Vortex breakdown on a delta wing (left) visualized by Post-kun (right) visualized by CG software

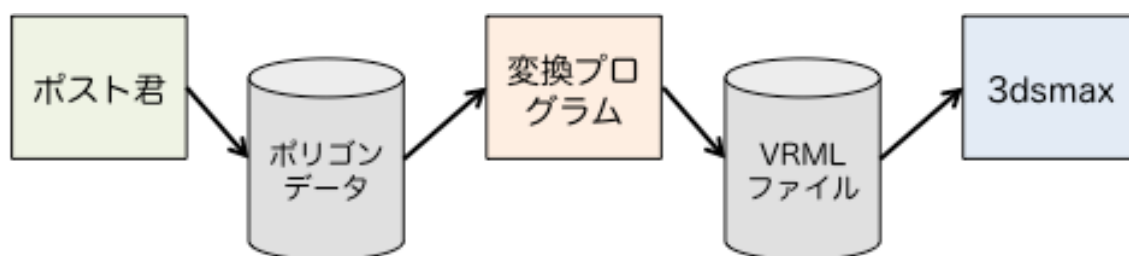


Fig. 7 Data conversion for photorealistic visualization

(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實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く、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 of 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 to 所属する学生 6 名と、計算力学研究センター to 所属する博士課程 of 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ー: 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ー: 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)

5. 成果の広報および普及活動

	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



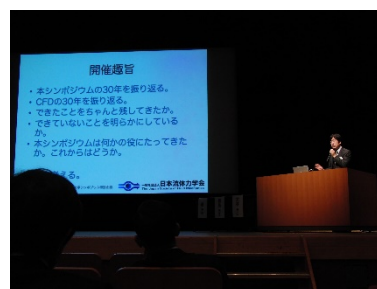
集合写真

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「数値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ーより 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

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ー: 田村善昭(東洋大学計算力学研究センター長)	
	プロジェクトの総括と 今後の展望	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)
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ー: 塩谷隆二(東洋大学)	
	Parallel adaptive multigrid - an approach efficient large scale computing	Prof. Gabriel Wittum (Goethe University Frankfurt)

5. 成果の広報および普及活動

	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/jscs.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, 清水水聖, 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. Takahashi 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レンス, 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. 篠崎雅和, 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



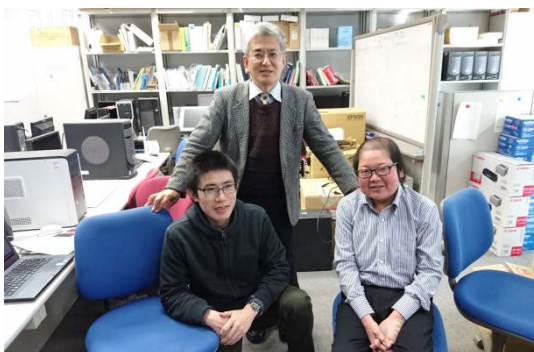
解析手法開発グループ



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. 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と、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、少しでもこれに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, 引用などをご遠慮ください.

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