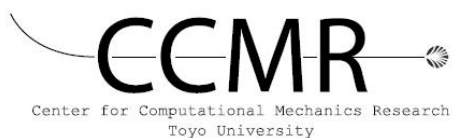


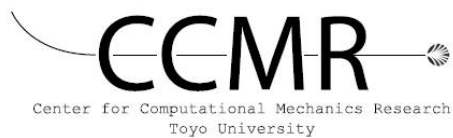
# 東洋大学計算力学研究センター

2015 年度 年報



2016 年 3 月

2015 Annual Report of  
Center for Computational Mechanics Research  
Toyo University



March 2016

# 目次

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 1. まえがき.....                                        | 1  |
| 2. センターの概要 .....                                    | 2  |
| 2.1. センター設置について .....                               | 2  |
| 2.2. 組織 .....                                       | 3  |
| 2.3. 構成メンバー .....                                   | 4  |
| 3. 研究成果 .....                                       | 5  |
| 3.1. 解析手法開発グループ .....                               | 5  |
| 3.1.1. 超大規模並列流体－構造連成解析手法の開発 .....                   | 6  |
| 3.1.2. 流体－構造連成解析の mnSOM を用いた分類及び予測技術の開発 .....       | 26 |
| 3.1.3. 粒子間インタラクションに着目した大規模粒子法シミュレーション .....         | 30 |
| 3.1.4. 損傷理論を導入したボクセル FEM によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析 .....  | 35 |
| 3.1.5. Sinkhole の形成シミュレーション .....                   | 45 |
| 3.2. 大規模並列化グループ .....                               | 50 |
| 3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発 .....       | 51 |
| 3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築 .....                 | 55 |
| 3.3. 新規実験計測グループ .....                               | 58 |
| 3.3.1. 標準問題のための弾性円柱の振動実験 .....                      | 59 |
| 3.3.2. 流体－構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験 .....   | 61 |
| 3.3.3. 飛行物体に作用する空気力特性 .....                         | 64 |
| 3.4. 精度・妥当性検証グループ .....                             | 66 |
| 3.4.1. ベイズ推定を用いた効率的精度解析技術の開発 .....                  | 67 |
| 3.4.2. 最適化の代数的構造の研究 .....                           | 72 |
| 3.4.3. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発 .....            | 74 |
| 3.4.4. オープン CAE (固体の有限要素法) を用いた精度検証 .....           | 76 |
| 3.5. 可視化検証グループ .....                                | 82 |
| 3.5.1. 3次元画像による定量的・定性的検証 .....                      | 83 |
| 3.5.2. オールドバイオリンの音色とバイオリンの演奏法に関する可視化的研究 .....       | 89 |
| 4. 共同研究 .....                                       | 91 |
| 4.1. JST CREST プロジェクト .....                         | 91 |
| 4.1.1. 研究実施体制 .....                                 | 91 |
| 4.1.2. 研究実施内容 .....                                 | 92 |
| 5. 成果の広報および普及活動 .....                               | 94 |
| 5.1. 第4回 CCMR-HDDMPPS (CREST プロジェクト) 合同シンポジウム ..... | 94 |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.1. プログラム.....                                                    | 94  |
| 5.2. 第1回日韓中台学生ワークショップ Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015..... | 96  |
| 5.2.1. プログラム.....                                                    | 96  |
| 5.3. 台湾・龍華科技大學川越キャンパス見学 .....                                        | 100 |
| 5.4. 東洋大学産学協同教育センター中核人材育成講座「スマホアプリ開発入門講座」.....                       | 101 |
| 6. 学術活動 .....                                                        | 102 |
| 6.1. 論文投稿 .....                                                      | 102 |
| 6.2. 著書 .....                                                        | 103 |
| 6.3. 総説・解説・エッセイ .....                                                | 103 |
| 6.4. 学会発表 .....                                                      | 104 |
| 6.5. 招待講演 .....                                                      | 110 |
| 6.6. 受賞 .....                                                        | 110 |
| 7. 研究グループ紹介 .....                                                    | 111 |
| 8. 結び .....                                                          | 112 |

## 1. まえがき

2012年に私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定されてほぼ4年が経過した。本事業はセンターとして二度目の大型事業であり、いわば第2期である。この報告書はその4年目の活動を中心にとりまとめている。

今回の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体\_構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」としている。これは、それまでの流体解析や構造解析といった個別の物理の解析から一歩進めてより複雑な、また現実的な問題に計算力学の手法を適用しようとするのと、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目標としていることである。本年度は、その4年目であり、各メンバー、グループの研究もほぼ収束に向かっているはずである。それぞれの進展については3章に詳しく述べられている。また、これまでアジアの大学を中心に研究交流を行ってきたが、この報告が出る直前には、英国カーディフ大学と合同学生ワークショップが開催されている予定である。さらに、戦略的研究推進事業 CREST やその他、センターに関連する研究についてもふれている。

昨年度、文部科学省に出した中間報告に対する評価からは、センターの特色・強みをどのように出していくかが課題であるとの指摘を受けたと思っている。残りの期間で何ができるか、何をすべきか見直しながら本年度の活動を行ってきた。ある程度の成果は本報に含まれているが、まだまだ、物足りなく感じられる向きもあろうかと思う。今後ともさらなるご批判とご指導を賜れば幸いである。

2016年3月

東洋大学計算力学研究センター長

田村 善昭

## 2. センターの概要

本センターは、わが国の私立大学学術フロンティア拠点のひとつとして文部科学省から設置が認められ、平成 17 年度に活動を開始した。その後、平成 23 年度に科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST の選定、続いて平成 24 年度に文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け、今日に至っている。

本センターに参加する研究員は、東洋大学の複数学部・大学院の教員(工学研究科, 国際地域学部, 総合情報学部, 理工学部), 博士研究員, 大学院生などを中核とし, また客員研究員として関連分野の内外の研究者から構成されている。

各自の専門分野は、構造解析, 流体解析, 破壊解析, 逆問題・最適化, 大規模並列計算, 可視化など, 計算力学分野で必要とされるほぼ全ての分野に跨っており, この分野における専門家集団である。平成 23 年度に採択を受けた CREST では「京」コンピュータ利用のための超大規模解析技術に関して, また平成 24 年度からは, 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け, 連成解析や計算力学の精度検証・妥当性検証にも積極的に取り組んでいる。

さらに, 東洋大学 125 周年を契機とした国際化に合わせて海外の関連する大学と積極的に交流を進め, 若手の人材育成にも寄与したいと考えている。

### 2.1. センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである。

- 平成 17 年 6 月文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」に研究題目「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」で採択され, 計算力学研究センター発足
- 平成 17 年 12 月センター開所式開催のあと, 白山第 2 キャンパス内計算力学研究センター棟に入居し本格活動開始
- 平成 22 年 3 月「学術フロンティア推進事業」終了
- 平成 23 年 8 月科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で採択される
- 平成 24 年 4 月文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に研究題目「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」で採択される

## 2.2. 組織

計算力学研究センターの組織は以下の通りである。

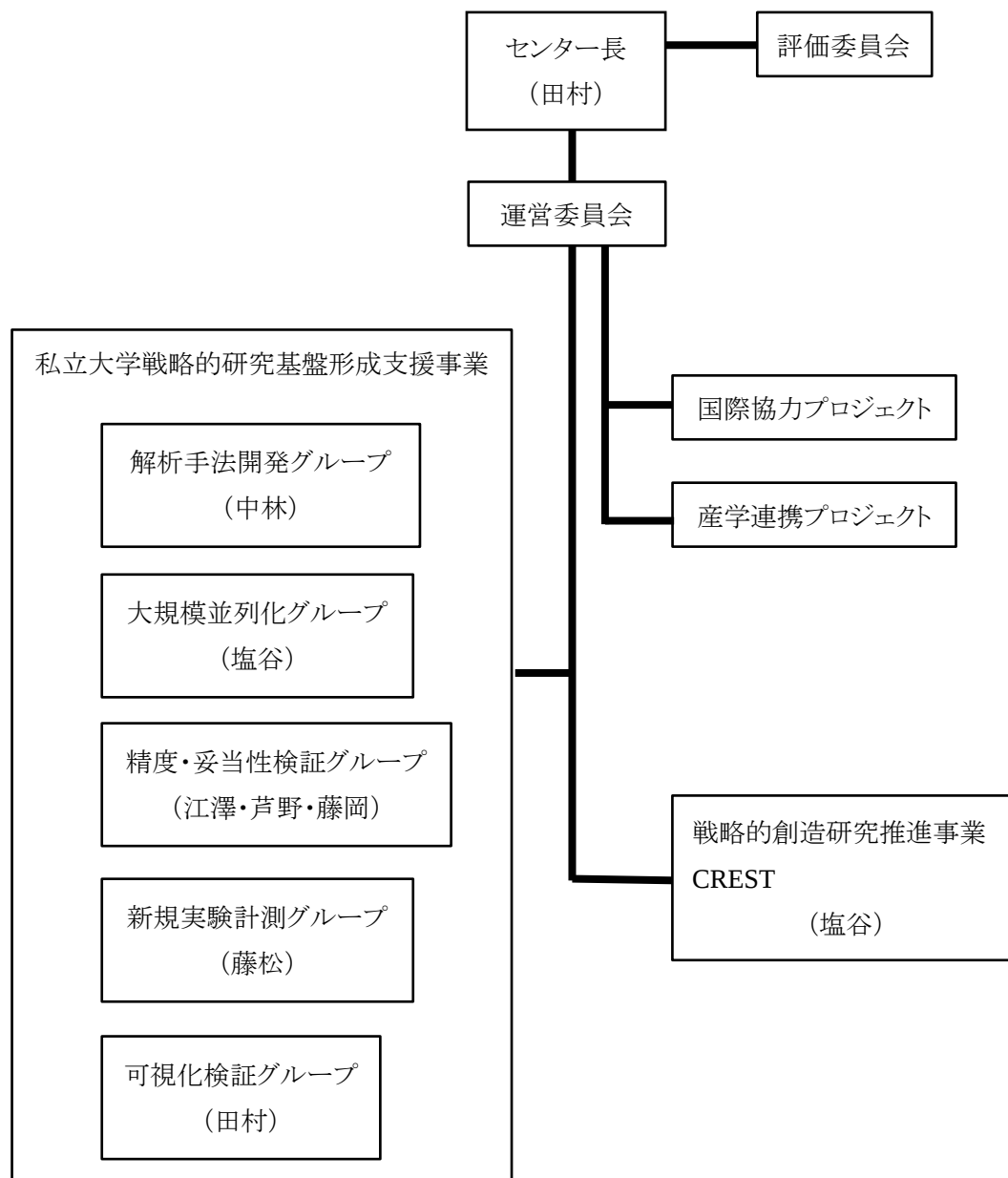


Fig.2.1. センターの組織

## 2.3. 構成メンバー

計算力学研究センターは以下のメンバーで構成されている。

### センター長

田村 善昭(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

### 研究員

芦野 俊宏(東洋大学国際地域学部国際地域学科教授)

塩谷 隆二(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

中林 靖(東洋大学総合情報学部総合情報学科准教授)

藤岡 照高(東洋大学理工学部機械工学科教授)

藤松 信義(東洋大学理工学部機械工学科准教授)

### 研究助手・研究支援者

長岡 慎介(東洋大学計算力学研究センター)

増田 正人(東洋大学計算力学研究センター)

鄭 宏杰(東洋大学計算力学研究センター)

谷村 景貴(東洋大学計算力学研究センター)

### 学生

島村 雅彦(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程)

高清水 聖(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程)

### 客員研究員

矢川 元基(前東洋大学計算力学研究センター長, 東京大学名誉教授, 東洋大学名誉教授)

金山 寛(日本女子大学特任教授, 九州大学名誉教授)

富山 潤(琉球大学工学部准教授)

古川 知成(バージニア工科大学工学部機械工学科教授)

松原 仁(琉球大学工学部助教)

横山 真男(明星大学情報学部情報学科准教授)

江澤 良孝(元東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

## 3. 研究成果

### 3.1. 解析手法開発グループ

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

流体-構造連成解析を高精度かつ安定的に実施するためには、まず、流体解析手法・構造解析手法そのものの精度や信頼性を高めた上で、それらを連成させるアルゴリズムについても十分に検討する必要がある。これまでのところ、計算力学研究センターでは流体解析に SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用い、構造解析に EFMM を用いる手法を中心に連成解析を行ってきたが、このアプローチ以外にも例えば粒子法を用いた手法など様々な戦略が考えられる。

上記の事項を踏まえて、今年度は、以下の 5 項目について報告を行う。

- (1) 超大規模並列流体-構造連成解析手法の開発
- (2) 流体-構造連成解析の mnSOM を用いた分類及び予測技術の開発
- (3) 粒子間インタラクションに着目した大規模粒子法シミュレーション
- (4) 損傷理論を導入したボクセル FEM によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析
- (5) Sinkhole の形成シミュレーション

### 3.1.1. 超大規模並列流体-構造連成解析手法の開発

#### (1) 目標・計画

本研究では、超大規模問題にも適用可能な流体-構造連成現象を解く為の新しい解析手法を開発する事を目的としている。本研究で提案する Enriched Free Mesh Method (EFMM)を用いた構造解析手法と、SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用いた流体解析手法を組み合わせ、新しい流体-構造連成解析手法は、各解析領域場を使用するメッシュ分割パターンが共に線形要素であることから、流体-構造境界面における整合性を完全に得ることが出来、その結果、流体-構造連成問題を解く際に、非常に重要となる、各解析場の境界面の連成効果を考慮する際に生じる問題を解消する事に成功している。さらに、前述の通り、各解析場に用いられるメッシュ分割パターンは、線形要素のみであるにも関わらず、その解析精度は、従来の線形要素を用いた解析結果と比較して向上すると云う結果を得られている。この特長から、本提案手法は、大規模問題を解く際に、問題になってくる計算機リソースと、計算時間の大幅な抑制を可能にする事を意味している。一方で、本手法は、近年の大規模解析の際に、必要不可欠となる並列処理を施す際に、大きな問題を有する手法であることが明らかとなった。この問題は、EFMM の解析アルゴリズムに起因するものであった。

昨年度までに、本提案手法による大規模並列解析を行うために、EFMM の並列解析手法の提案と実装を行い、その並列化効率の検証を併せて行い、概ね良好な結果を得ることが出来たが、本研究で対象とするような超大規模問題へ適用した際に、アルゴリズムに若干の改良とそれに伴う、コードのチューニングが必要となる事が明らかとなった。

また、提案している流体-構造連成解析手法を用いた並列化解析を行う過程で、現行のメッシュコントロール手法では、今後の超大規模解析を行う際の計算時間が莫大なものとなるという問題も明らかになった。

そこで平成 27 年度は、並列計算を行う際に分割する局所領域ベースでのメッシュのスムージング手法を新たに導入し、さらに昨年度までに提案している並列 EFMM を 1 兆自由度規模の問題へ適用し、その解析精度と並列化効率の検証を行った。

また、これらの手法の健全性を証明するために、提案手法を用いた数値解析結果と実験結果との比較を行った。

#### (2) 意義・国際社会との比較

現在、国内外を問わずに、計算力学の分野において、流体-構造連成現象を対象とした研究は、非常に注目されており、積極的に行われている。この現象を解くために、多くの研究者が様々なアプローチを行い、沢山の新しい解析手法が提案され、多くの成果が発表されている。その一方で、現時点までに、決定的な解析手法は確立されていない。

提案されている多くのアプローチは、流体解析手法として、粒子法を用いているものが、非常に多い。メッシュ分割を必要としない粒子法を用いることで、解析場が大きく変動するような問題の解析も容易になることから、流体解析場において多くのアドバンテージが得られることが、その一因で

あると考えられる。しかし、我々の提案している手法は、流体解析場、構造解析場共に格子法を用いている。格子法をそれぞれの解析場に用いる事で、粒子法を用いた流体解析と比較して、解析領域の大きな変化に対しては、対応し難い面もあるが、解析精度の面では、粒子法を用いたアプローチと比較して大きなアドバンテージを有していると考えられる。

本手法の確立により、数値シミュレーションにおいて、非常に重要な解析精度を損なう事無く、多くの流体-構造連成現象を解く事が可能になると考えられる。このことから、本研究は、格子法を用いた流体-構造連成解析手法の確立と云う観点からも、非常に意義のある研究であると言える。

### (3) 研究内容

今年度の研究内容は下記の 3 つに大別される。

1. 領域分割型ラプラシアンスムージングの開発
2. 超大規模並列 EFMM の開発
3. 標準問題との比較

1 のテーマでは、流体-構造連成問題を対象とした数値解析を行う際に、多くの現象で見られる構造物の移動、変形に伴うメッシュの再構築、スムージングを全体領域で行うと、様々な問題が生じるので、この点を考慮した局所領域毎のメッシュスムージング手法を開発した。

2 のテーマは、昨年度までに提案した並列 EFMM のアルゴリズムを 1 億自由度規模の超大規模問題へ適用した際の、並列化効率について検証を行った。

3 のテーマは、我々のグループで提案している数値解析手法の健全性の評価を行う為に、「新規実験・計測グループ」が実施している、流体-構造連成現象の発生メカニズムを明らかにする新しい標準問題を確立する為の実験結果と数値解析結果との比較を行った。

#### (3.1) 領域分割型ラプラシアンスムージングの開発

流体-構造連成解析を行う際には、流体と構造の間に生じる相互間作用により生じるメッシュの再構築、スムージングが必要不可欠である。また、多くの場合、流体-構造連成解析を行う際には、並列解析を用いるが、その際、解析モデルは複数領域に分割される。その分割された領域全体に対して一貫性のあるメッシュの再構築が求められるが、解析領域全体に対して、メッシュの再構築を行うと、解析の規模にもよるが、膨大な計算量が求められ、解析のボトルネックとなる。

そこで、本節では、局所領域毎のメッシュスムージング法について述べる。

はじめに、下記の図 1 に示すように、解析モデルを複数の領域に分割する。

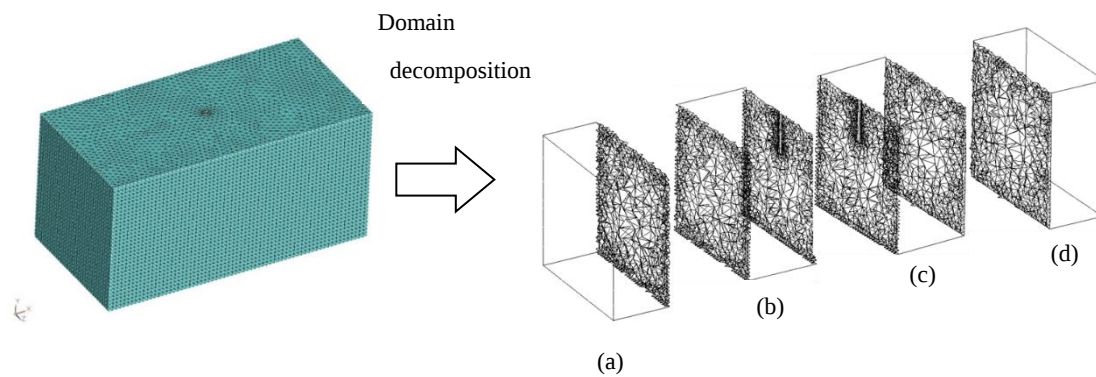


Fig.1. Domain decomposition

この領域分割された局所領域の節点を下記の 4 つのグループに分類する.

1. 流体-構造境界面上の節点
2. 局所領域共有面上の節点
3. 解析モデル表面上の節点
4. 内部の節点

具体的に, 図 1 に示した局所領域(b)(c)の節点群をグループ分けすると下記のようなになる.

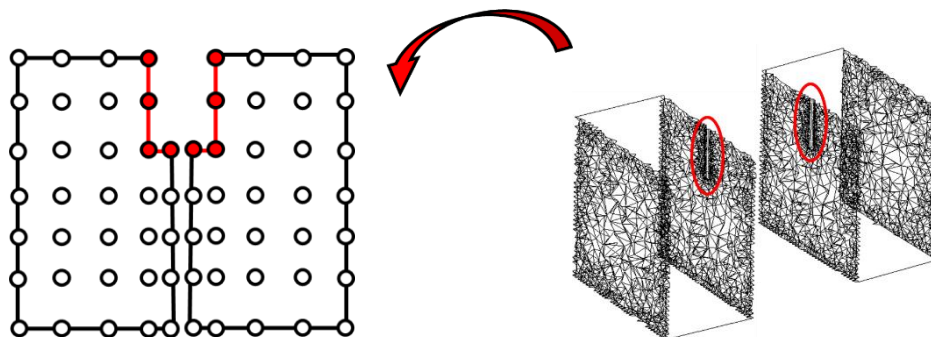


Fig.2. Nodes on fluid-structure common face

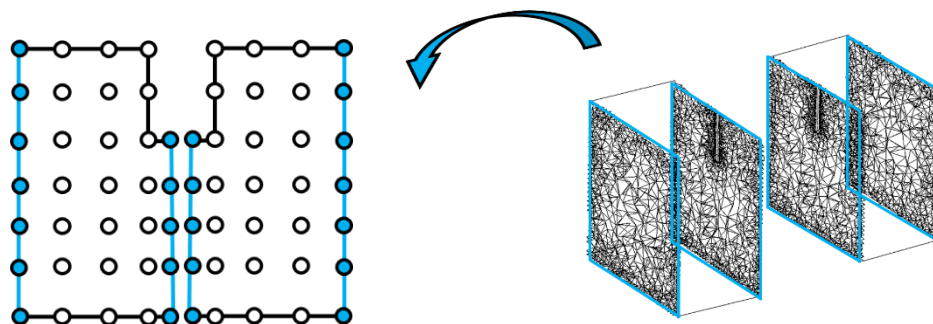


Fig.3. Nodes on common face of local domain

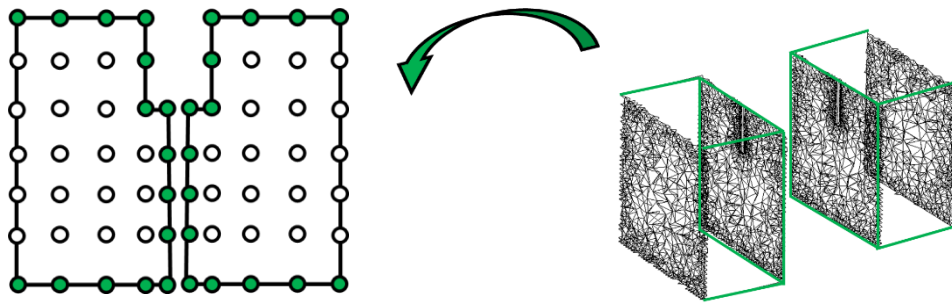


Fig.4. Nodes on surface of original model

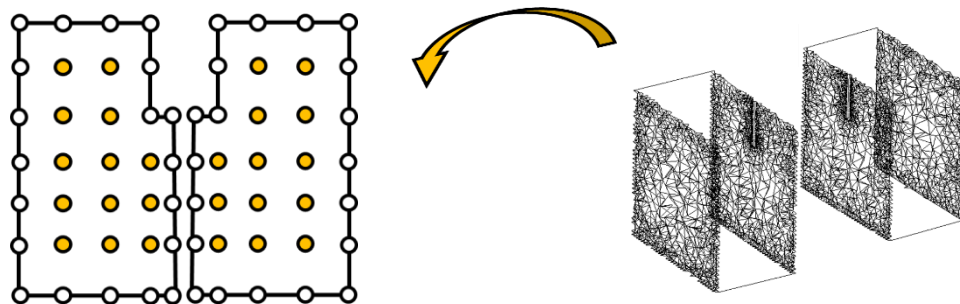


Fig.5. Inner nodes

これら分類された節点のメッシュスムージング時の働きは下記の通りである。

1. 流体-構造境界面上の節点 : 流体解析の結果にしたがって移動
2. 局所領域共有面上の節点: 1 の移動量を基に移動
3. 解析モデル表面上の節点: 固定
4. 内部の節点: メッシュコントロール

ここで、局所領域面上の節点の移動方法について述べる。

流体-構造境界面上の節点のみを移動させると、解析対象によって異なるが、多くの場合メッシュが大きく歪み、解析の精度が著しく低下するだけでなく、場合によってはメッシュが破綻をして、解析を行うことが出来なくなってしまう。

例えば、図 6 に示すように、流体-構造境界面上の節点が、構造解析の結果に伴い移動したとする。

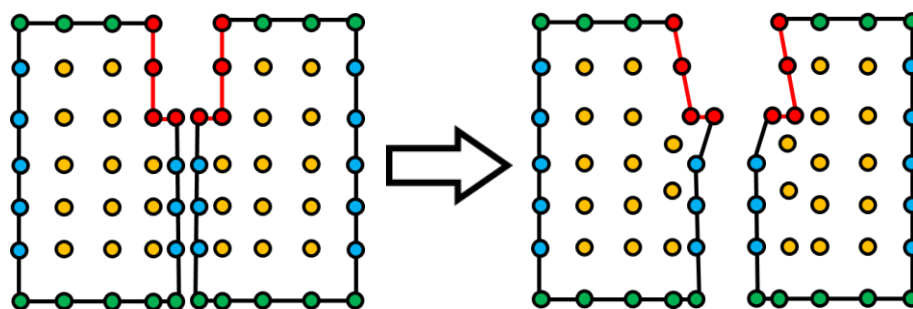


Fig.6. Example of movement of node on fluid-structure common face

上図のように、流体-構造境界面上の節点のみ、解析結果に伴って移動をさせると、対象の変位量によっては、流体-構造境界面上の節点と、それらの節点の最も近傍にある節点を含む要素計上が大きく歪み、前述の問題が生じる。

そこで、局所領域共有面上の節点で且つ流体-構造連成面に近い節点に関しては、流体-構造共有面上の節点同様、移動をさせる。本研究では、流体-構造連成面上のある節点を基準に、その節点からある一定の長さを検索半径として、その検索半径内に含まれる節点を、基準とした節点の移動量を基に移動をさせる事で、メッシュの破綻を防ぐ事とした。

図 7 は、この処理を導入する前後での、モデルの違いを図示したものである。

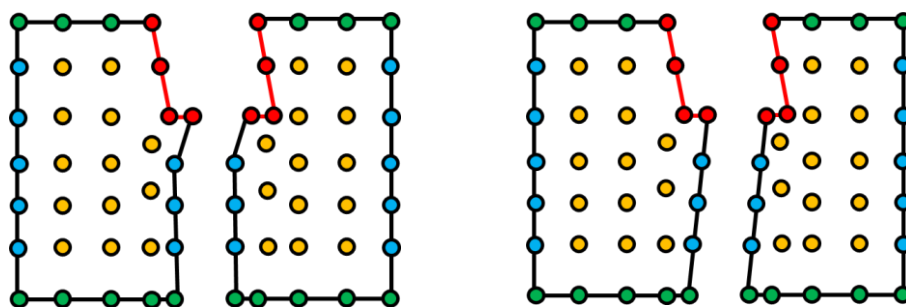


Fig.7. Example of difference of movement of node

実際に 3 次元解析に導入すると下記の図 8 に示したように、円柱の移動に伴う円柱周辺のメッシュの変化に違いが生じる。

図中左側に示した、流体-構造連成面上の節点のみを移動させた場合、近傍の節点が移動しない為、流体-構造連成面上の節点を含む要素が大きく歪んでいる。

一方、検索半径を導入して、ある流体-構造連成面周辺の節点の移動も同時に行った図中右側の例では、円柱近傍節点も移動している為、流体-構造連成面上の節点を含む要素も、大きく歪むことは無く、メッシュを制御することが出来ている。(図中のコンターは節点の移動量を示している。)

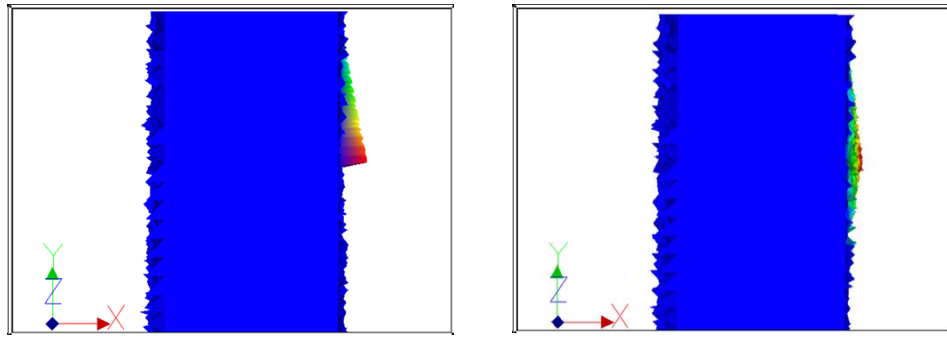


Fig.8. Example of difference of model after mesh control

このような制約の下，局所領域の境界を移動させた後，ラプラシアンスムージングによるメッシュのスムージングを行うことで，メッシュの破綻を防ぐことが可能となった．

### (3.2) 超大規模並列 EFMM の開発(大規模並列化グループとの連携)

本節では, 昨年度までに提案をした, Enriched Free Mesh Method (EFMM)の超大規模並列化について述べる.

本プロジェクトで対象とする流体-構造連成現象を解く為には, 流体解析場のみならず, 構造解析場の大規模並列化は必須である. 流体解析手法として用いる SUPG/PSPG 安定化有限要素法に関しては, 既に様々な解析事例もあり, 解析精度, 並列化効率共に非常に良好な結果が得られることが証明されている.

昨年度までに提案した並列 EFMM の並列化効率も良好な結果であったが, 今年度は 1 億自由度規模の問題に対応できるようにチューニングを行った.

並列 EFMM の為の領域分割は下記の図 9 の手順で行う.

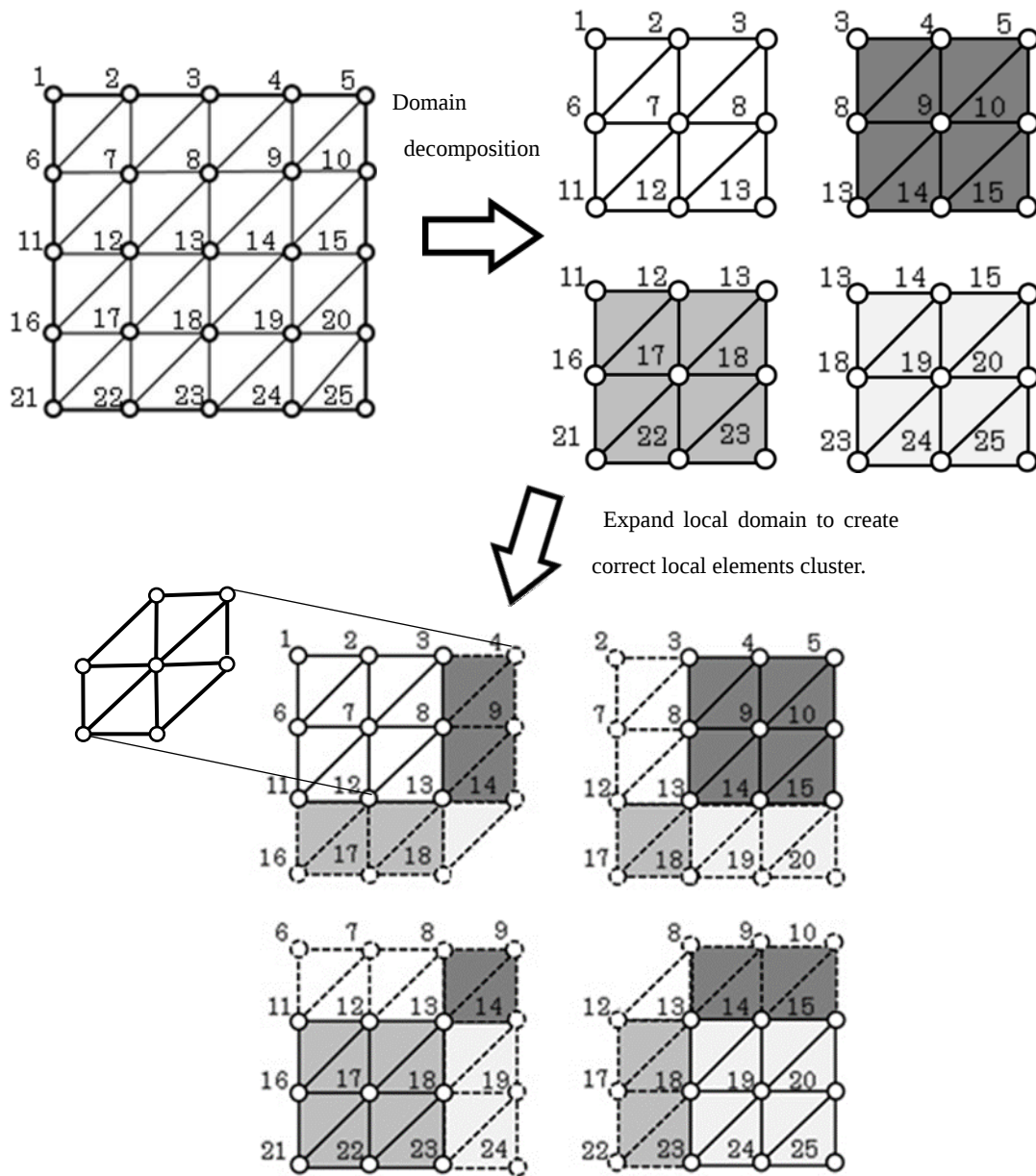


Fig.9. Domain decomposition method for parallel EFMM

領域分割を行った局所領域毎の計算手順は下記の通りである。

1. 各領域で行列ベクトル積計算(全ての節点がいずれか1つの計算領域のみで評価されること)
2. 領域境界の1層内側の節点について、正しい値を計算すべき領域に対して、自身の領域で計算された寄与分を送信して足し込む。
3. 領域境界上の節点について、共有する領域間で値を送受信し、それぞれ互いの値を足し込む。
4. 領域境界の1層外側の節点について、正しい値を計算すべき領域から値を受け取り上書き。

## 精度検証

はじめに、並列 EFMM の通信テーブルは、従来の FEM と比較すると若干複雑になる為、アルゴリズム及びコードの健全性を示すために下記の 3 つの解析モデルを使用して、単一解析の場合と解析結果が一致するか確認を行った。

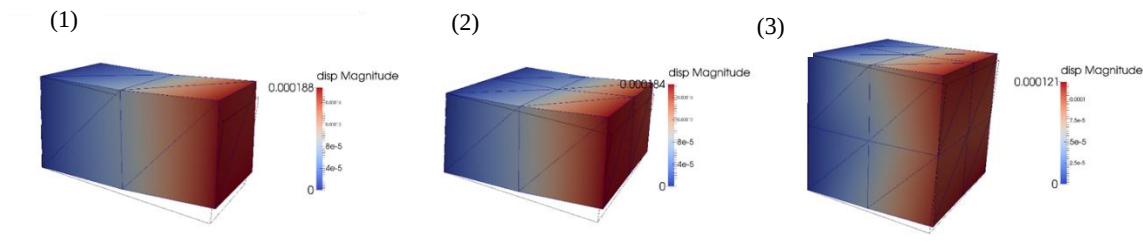


Fig.10. Analysis models

各解析モデルの詳細は下記の通りである。

- (1). 2 領域が隣接する 12 節点モデル
- (2). 4 領域が隣接する 18 節点モデル
- (3). 最大で 8 領域が隣接する 27 節点モデル

得られた解析結果は、それぞれ単一解析の結果と完全に一致したことから、解析アルゴリズムとコードの健全性は証明された。

次に、本解析手法と理論解とを比較して、解析精度が十分良好であるかの確認を行った。

解析には、図 11 に示す単純な片持ち梁の問題を用いて、単一解析、10 並列、20 並列の 3 ケースと理論解とを比較した。各解析結果はそれぞれ完全に一致し、理論解との誤差は 0.49%であった。解析結果例を図 12 に示す。

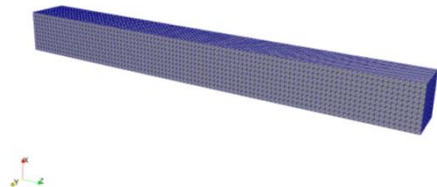


Fig.11. Analysis model

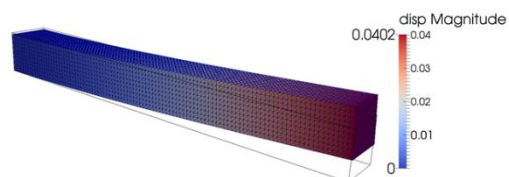


Fig.12. Analysis result

## 並列性能測定

次に、並列 EFMM の並列化効率について述べる。解析に用いるモデルは、図 13 に示すような 1 辺の長さが 1 の立方体の  $z=0$  面を完全固定し、 $z=1$  のせん断方向に荷重を加える。

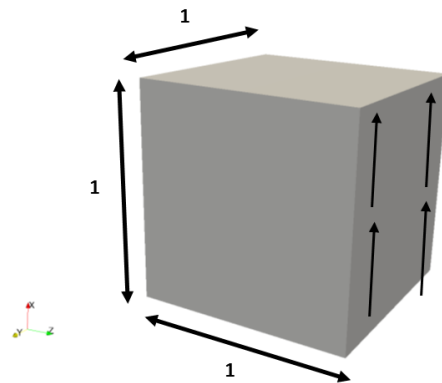


Fig.13. Analysis model

並列性能の測定方法は、各辺の分割数、プロセスへの分割数を変え、ストロングスケーリングとウィークスケーリングによる測定を行う。

#### ストロングスケーリングによる検証結果

ストロングスケーリングは、解析に用いるモデルの自由度数を一定として、領域分割数を増加させていく測定方法である。測定に用いるモデルの詳細を表 1 に示す。

Table.1. Detail of analysis model

|            |           |
|------------|-----------|
| 立方体の各辺の分割数 | 108       |
| 要素数        | 7,558,272 |
| 節点数        | 1,295,029 |
| 自由度数       | 3,885,087 |

並列化効率の測定の為に、上記の表 1 に示したモデルを 16, 54, 144, 432 並列の 4 パターンで解析を行い、16 並列と比較をして並列化効率の検証を行った。

各解析ケースのモデルの詳細を表 2 に示す。

Table.2. Detail of each analysis model

| #PE | 各プロセスへの<br>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  | 54                | 54 | 27 | 472,392 | 84,700 | 254,100 |
| 54  | 3                   | 3 | 6  | 36                | 36 | 18 | 139,968 | 26,011 | 78,033  |
| 144 | 4                   | 6 | 6  | 27                | 18 | 18 | 52,488  | 10,108 | 30,324  |
| 432 | 6                   | 6 | 12 | 18                | 18 | 9  | 17,496  | 3,610  | 10,830  |

測定は下記の 3 項目に対して行った.

- ・ 加速率の推移
- ・ 並列化効率の推移
- ・ 計算時間(解析全体, 行列ベクトル積)

表 3 は測定結果の詳細を示している.

Table.3. Detail of each analysis result

| #PE | Elapsed [s] |         | #CG Iter | Speed-Up over 16PE |         |       | Parallel Efficiency |         |
|-----|-------------|---------|----------|--------------------|---------|-------|---------------------|---------|
|     | All         | mat_vec |          | All                | mat_vec | Ideal | All                 | mat_vec |
| 16  | 1,944       | 1,273   | 1,375    | 1.00               | 1.00    | 1.00  | 100.0%              | 100.0%  |
| 54  | 639         | 416     | 1,375    | 3.04               | 3.06    | 3.38  | 90.1%               | 90.6%   |
| 144 | 237         | 151     | 1,375    | 8.21               | 8.41    | 9.00  | 91.2%               | 93.4%   |
| 432 | 90          | 55      | 1,375    | 21.54              | 23.02   | 27.00 | 79.8%               | 85.3%   |

以下の図 14~16 に上記の測定結果を示す.

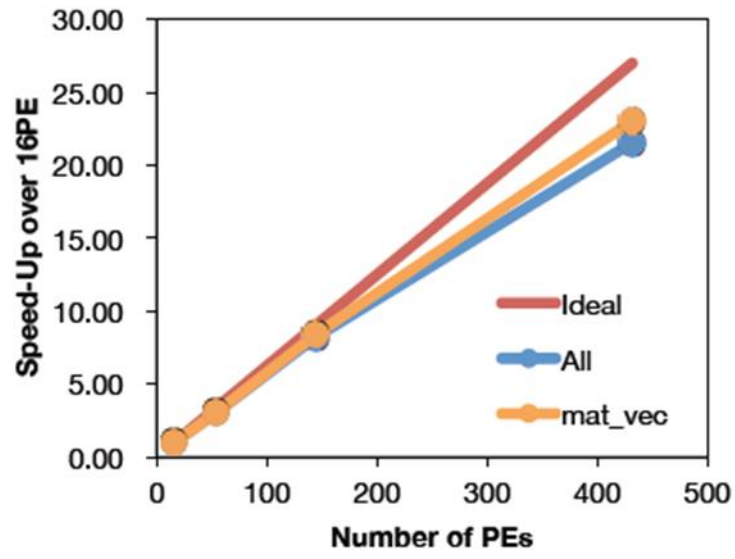


Fig.14. Speed-up

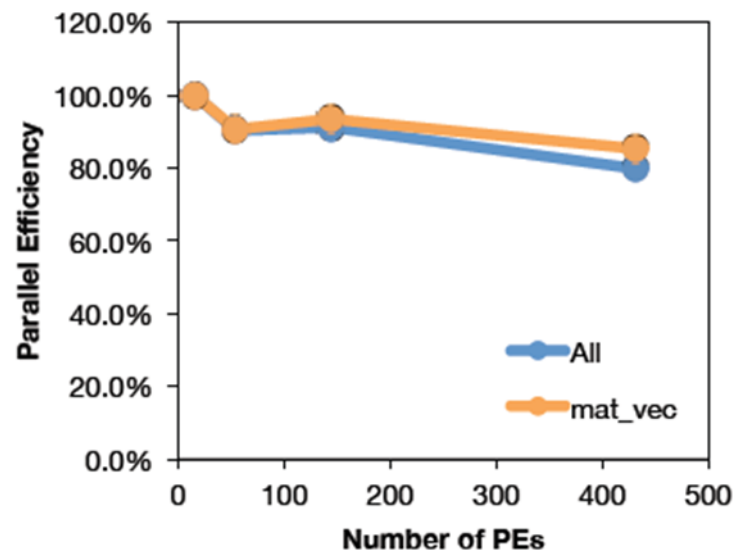


Fig.15. Parallel efficiency

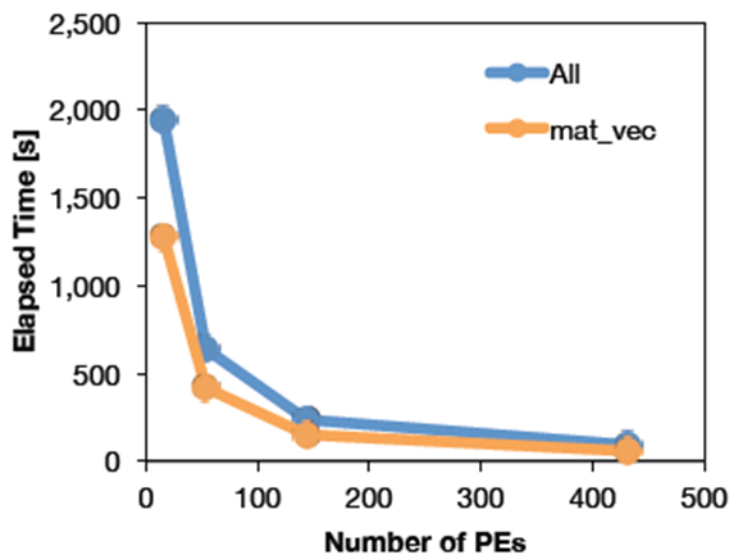


Fig.16. Computing time

これらのストロングスケーリングによる並列性能測定結果から、本手法は十分良好並列性能が得られていることが確認された。

#### ウィークスケーリングによる検証結果

次に、ウィークスケーリングによる本並列解析手法の並列化効率の検証結果を示す。ウィークスケーリングは、各プロセッサが担当するモデルの自由度数を一定として、並列化効率を検証する方法である。その為、解析に用いるモデルの全体の自由度数は、並列数に伴って増加していく。

各プロセッサが担当するモデルの詳細を表 4 に示す。

Table.4. Detail of each analysis model

|                |   |         |
|----------------|---|---------|
| 立方体の各辺の<br>分割数 | x | 54      |
|                | y | 54      |
|                | z | 27      |
| 要素数            |   | 472,392 |
| 節点数            |   | 84,700  |
| 自由度数           |   | 254,100 |

並列化効率の測定の為に、1 領域あたりを上記の表 4 に示した自由度として、16, 54, 144, 432 並列の 4 パターンで解析を行い、並列化効率の検証を行った。

各解析ケースのモデルの詳細を表 5 に示す.

Table.5. Detail of each analysis model

| #PE | 全体モデル         |             |            |             | 各プロセスへの<br>全体モデルの分割 |   |    |
|-----|---------------|-------------|------------|-------------|---------------------|---|----|
|     | 立方体の<br>一辺の分割 | 要素数         | 節点数        | 自由度数        | x                   | y | z  |
| 16  | 108           | 7,558,272   | 1,295,029  | 3,885,087   | 2                   | 2 | 4  |
| 54  | 162           | 25,509,168  | 4,330,747  | 12,992,241  | 3                   | 3 | 6  |
| 128 | 216           | 60,466,176  | 10,218,313 | 30,654,939  | 4                   | 4 | 8  |
| 432 | 324           | 204,073,344 | 34,328,125 | 102,984,375 | 6                   | 6 | 12 |

測定は下記の 3 項目に対して行った.

- ・ 計算時間(解析全体, 行列ベクトル積)
- ・ CG 法の収束までの反復回数
- ・ 行列ベクトル積 1 回あたりの計算時間の推移

表 6 は測定結果の詳細を示している.

Table.6. Detail of each analysis result

| #PE | Elapsed [s] |         |           | #CG Iter | Memory Max [MiB] |
|-----|-------------|---------|-----------|----------|------------------|
|     | All         | mat_vec | 1 mat_vec |          |                  |
| 16  | 1,944       | 1,273   | 0.926     | 1,375    | 1,538            |
| 54  | 2,304       | 1,614   | 0.935     | 1,726    | 1,561            |
| 128 | 2,813       | 2,115   | 0.929     | 2,276    | 1,602            |
| 432 | 3,286       | 2,568   | 0.935     | 2,747    | 1,769            |

以下の図 17~19 に上記の測定結果を示す.

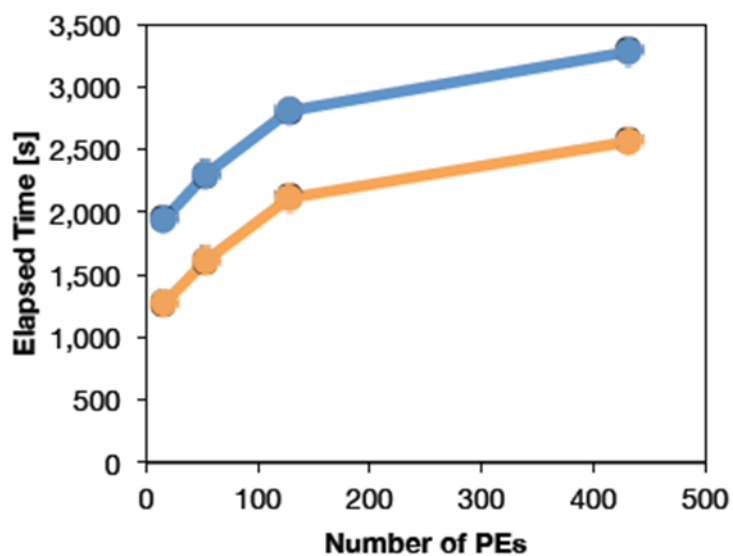


Fig.17. Speed-up

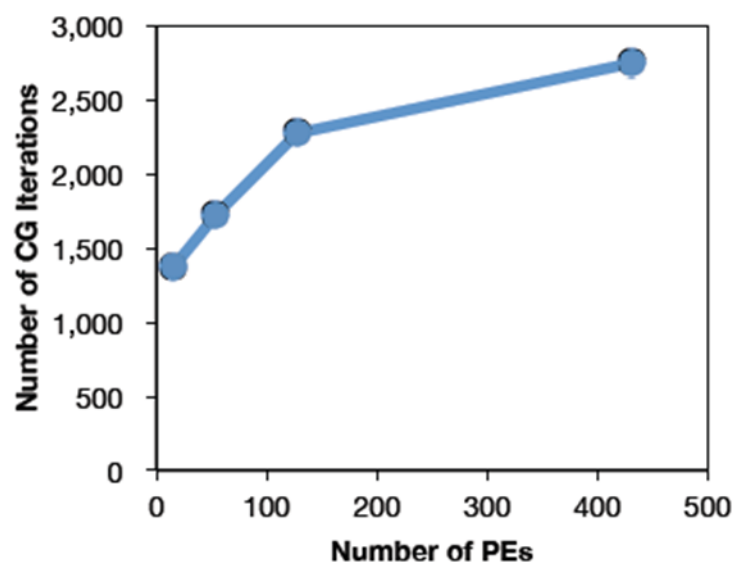


Fig.18. Changes in the number of iterations

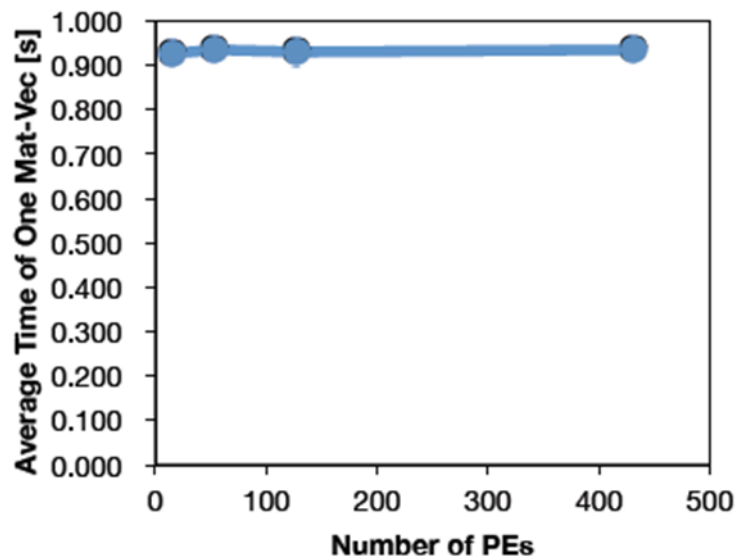


Fig.19. Changes in an once computing time of matrix vector product.

並列プロセッサ数の増加に伴って、全体の解析モデルの自由度数が増加する為、CG法の収束までの反復回数が増加するので、計算時間も同時に増加していくが、行列ベクトル積1回あたりの計算時間はほぼ一定に保たれており、ウィークスケーリングの性能としては十分な性能が得られている。

これらの結果から、提案したEFMMの為の超大規模並列アルゴリズムは、1億自由度程度の問題を対象とした超大規模解析にも十分適用可能であることが示された。

### (3.3) 標準問題との比較(新規実験・計測グループとの連携)

ここでは、本提案手法の健全性を証明する為に行った、標準問題と数値解析との比較結果について示す。

図20は実験に用いた風洞装置の写真である。



Fig. 20. Experimental device

写真中央に示された風洞の中に、弾性体で精製された円柱が設置されている. この円柱は上面が固定されており, この弾性体に対して風を与える. この時, 円柱の物性値と風速を変化させ, その際に生じる円柱の振る舞いの関係について明らかにする.

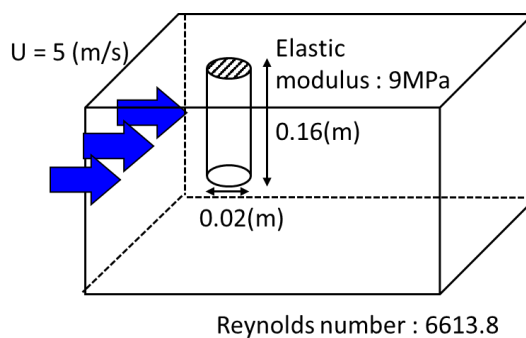


Fig. 21. Experimental model

次に, 図 22 は解析に用いるメッシュモデルである. 図 22 に示したメッシュモデルの詳細を表 7 に示す.

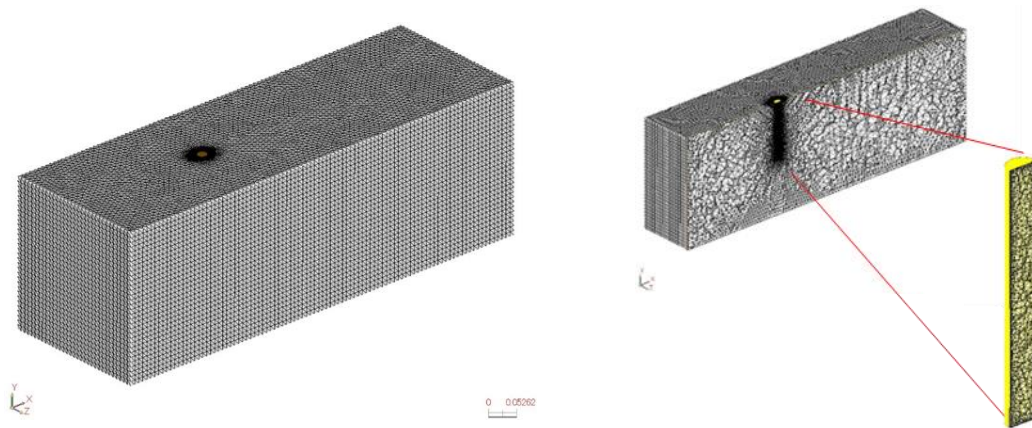


Fig. 22. Analysis mesh model

Table.7. Detail of analysis mesh model data

|                    | Fluid   | Structure |
|--------------------|---------|-----------|
| Number of Nodes    | 944,121 | 94,768    |
| Number of Elements | 169,321 | 21,295    |

実験により得られた結果を図 23,24 に示す.

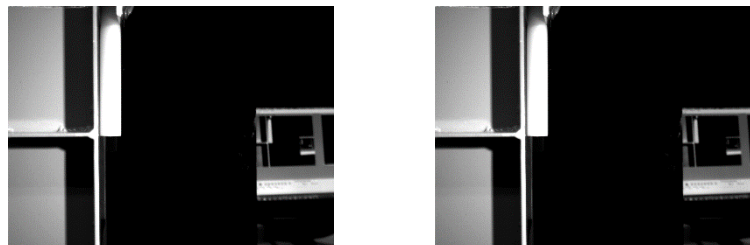


Fig.23. Experimental result (side)



Fig.24. Experimental result (Upper side)

図 22, 23 に示したように, 上述の実験条件下で行った実験では, 弾性体は振動する事無く, 単純に変形するだけの結果となった. 円柱下端の最大変形量も  $0.0005\text{m}$  となり, 円柱の底面直径  $0.02\text{m}$  に対して非常に小さい変形量となった.

次に数値解析結果を図 25 に示す. 図は構造解析場(円柱)の変位を示している.

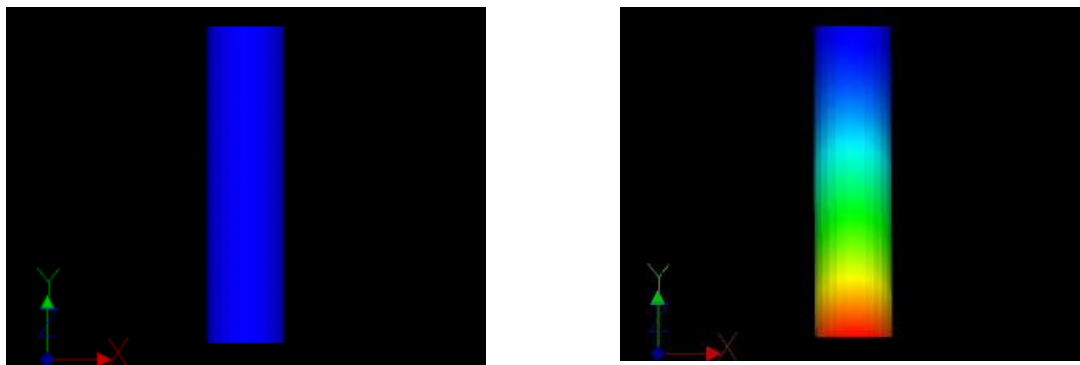


Fig.25. Experimental result (Upper side)

数値解析によって得られた円柱底面の最大変位量は  $0.00063\text{m}$  となり, 実験結果よりも大きく変形する結果となった. 実験と結果の誤差は  $20.6\%$  となり, この結果からは, 本手法の健全性を証明するには至らなかった.

数値解析の健全性の証明に関しては, 数値解析手法のみならず, 実験条件の見直しを含め最終年度の課題とする.

#### (4) 平成 27 年度進捗状況

今年度は, 前節で述べた通り, 下記の 3 つのテーマについて主に研究を行った.

1. 領域分割型ラプラシアンスムージングの開発
2. 超大規模並列 EFMM の開発
3. 標準問題との比較

局所領域分割型ラプラシアンスムージングによるメッシュスムージングは, 超大規模並列流体-構造連成解析の際に, 必要不可欠であるが同時にボトルネックになるメッシュの再生成を局所領域単位で行うことで, 計算時間の増加を大幅に抑制する事が期待できる.

超大規模並列流体-構造連成解析への拡張は,  $1$  億自由度規模の問題でも解析精度面は勿論, 並列化効率の面でも非常に良好な結果を得ることが可能となった.

標準問題との比較では, 数値解析結果により得られる変位量が実験結果よりも大きくなり, 誤差も  $20.6\%$  と若干大きなものであった. これは, 問題の設定が構造体に単純な曲げが発生するものであり, 実験条件を厳密に一致させなければ, 変位量を一致させることは非常に困難であると考えられる.

これらの点を鑑みて, 最終年度は構造体の変形(振る舞い)が時々刻々と変化する問題を対象と

して、本年度までに開発した、超大規模並列 EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM とを組み合わせ、超大規模並列流体-構造連成解析手法による数値解析と実験との比較を行い、本数値解析手法の健全性を証明する。

### 3.1.2. 流体－構造連成解析の mnSOM を用いた分類及び予測技術の開発

#### (1) 目標・計画

本研究では、流体－構造連成解析を行い、自己組織化マップ(Self-Organizing Map : SOM)<sup>[1]</sup>などの人工知能技術を用いて解析データの分類を行い、解析条件から解析結果を予測することができる技術を開発することを目的としている。分類と予測の両方を包括する mnSOM(modular network SOM)を用いて学習を行う。このときモジュールは MLP(Multi Layer Perceptron)を用いる。しかし、連成問題は非線形性が非常に強く、mnSOM での予測には限界があると思われる。そこで、Deep Learning の考えを取り入れた予測技術の開発を目指す。これは Google を始め各企業や研究所でも注目されている技術で、画像認識や音声認識において、既存の技術よりも遥かに良い性能が得られることが知られている<sup>[2][3]</sup>。

本研究の予測技術を確立すると、解析の大まかな結果を得ることで、詳細な解析をするための手がかりが提示できると考える。このことにより、機器や構造物設計における全体の解析時間を短縮できると期待できる。

今年度は、Deep Learning 技術を活用するために Autoencoder(AE)を作成し、簡単な2つの数の積算を学習させた。また、同様の手法で画像認識を行った。Deep Learning の技術を mnSOM で活用するためのアルゴリズムについても考えた。

平成 28 年度は、SOM と Deep Learning を組み合わせた分類と予測を可能にする技術を開発し、研究成果をまとめる方針である。

#### (2) 意義・国際社会との比較

現在、解析対象の複雑化や大規模化から、計算時間がボトルネックにある。並列計算機を使うのは当然で、GPU を用いた解析方法も数多く見られる。しかしながら、計算量は膨大で、1ケース解くのに数日から数週間かかることもある。設計技術者は目的の解析結果を得るのに何度も解析を繰り返す必要がある。そこで、予めある程度の解析結果が分かれば試行回数を削減し、設計における全体の解析時間を短縮できると考えられる。ある事象を数値解析を行わないで解析結果を予測するという試みは、全く新しいものであり、学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており、国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考えられる。

#### (3) 研究内容

Deep Learning は入力次元の大きいデータ(ex.ビッグデータなど)を学習したり、非線形性の強い問題を学習したりするものに非常に効果的であり、流体－構造連成解析などの複雑な問題にも応用可能と期待できる。

本研究で使用する Deep Learning 技術は Deep Autoencoder である。これは AE を複数重ねたネットワーク構造を持ち、出力層では通常の Back Propagation を用いて学習する。

Deep AE は各層の AE は独立で処理を行い、手前の層(入力層に近い層)の中間層を次の層の入力層として用いることで、ネットワーク全体が結合する(Fig.1)。各層の出力層は入力層と同じ次元を持ち、入力ベクトルを再現するように学習を行う。このときに中間層を入力層より小さいサイズ

にすることにより、入力データを圧縮し、入力データを再構成するための最低限必要な特徴量を抽出することができる。この特徴抽出により、大規模データを効率良く学習することが可能となる。

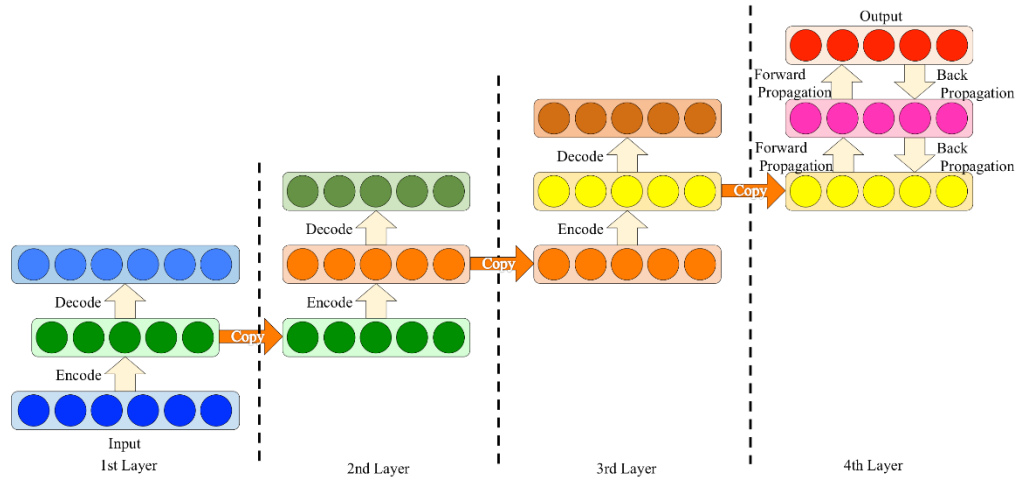


Fig.1. Example of Deep Autoencoder

Deep Learning では上記の AE 部の学習を pre-training と呼び、教師なし学習による入力データの圧縮、特徴抽出を目的とした。教師あり学習部分を fine-tuning と呼び、主に Back Propagation(BP)法を用いて教師データの入力ベクトルと出力ベクトルを補間する。この fine-tuning は最終層でのみ行う場合や、ネットワーク全体で行う場合など、多種多様に処理される。最終層でのみ fine-tuning を行う場合は事前の層で必要な特徴が抜き出せると仮定して、入力ベクトルを圧縮し、最終層の BP 法を効率良く行うための方法である。一方、ネットワーク全体を fine-tuning する方法は、AE は MLP の結合荷重の適切な初期値を得るために用い、MLP の学習を効率化させる。どちらの方法も学習は効率化され、単純な MLP 学習より学習精度の大きな向上が見込める。

本研究で作成した、Deep AE を用いて簡単な積算を学習させた。このとき最終層でのみ fine-tuning を行った場合とネットワーク全体で行った場合の2通りを試行した。入力には 1~9, 1~9 の正数を与え、出力にはその2つの正数の積を与えた。ネットワークは2入力1出力となる。ネットワーク全体の fine-tuning を行った場合、最終出力層の1に集約される部分の decode がうまく行えず、学習は失敗する結果となった。これは1つの変数から2つ以上の独立変数を導けないので、入出力関係を考えた上で AE を実行する必要があるとわかった。最終層をのみ fine-tuning する方法は学習に成功したが、設定した問題が簡単だったために、単純な MLP と同等の精度しか得られなかった。

次に手書き文字の認識を試験する。試験データは MNIST<sup>[4]</sup>を用いる。MNIST の画像は 28×28 画素で、6万枚の画像データ集である。1画像に 0~9 のいずれかの数字が描かれている。ネットワーク構成は入力に 784、中間層を 516, 256, 128, 300 ニューロンとし、出力層を 10 出力とした。入力層から 784-512-256-128 までは AE で圧縮し 128-300-10 を BP 法で教師あり学習を行う。学習に使う画像を 100 枚として、pre-training を 10000 セット、fine-tuning を 10000 とし、学習係数は

pre-training, fine-tuning とともに 0.1 として学習を行った. 検証には 20 枚の未学習データを与えた. 画像の一例を Fig.2 に示す. 1層目の入力ベクトルの再現は良く一致し, 入力ベクトルの圧縮に成功している. 学習後の正解率は約 60%とある程度の学習ができた. まだ, 1, 7, 9 などの似たような文字の正解率は低いが, 学習セットを6万枚とし, 学習係数などのハイパーパラメータの調整により向上が見込める.



Fig.2. Figures of Handwritten character

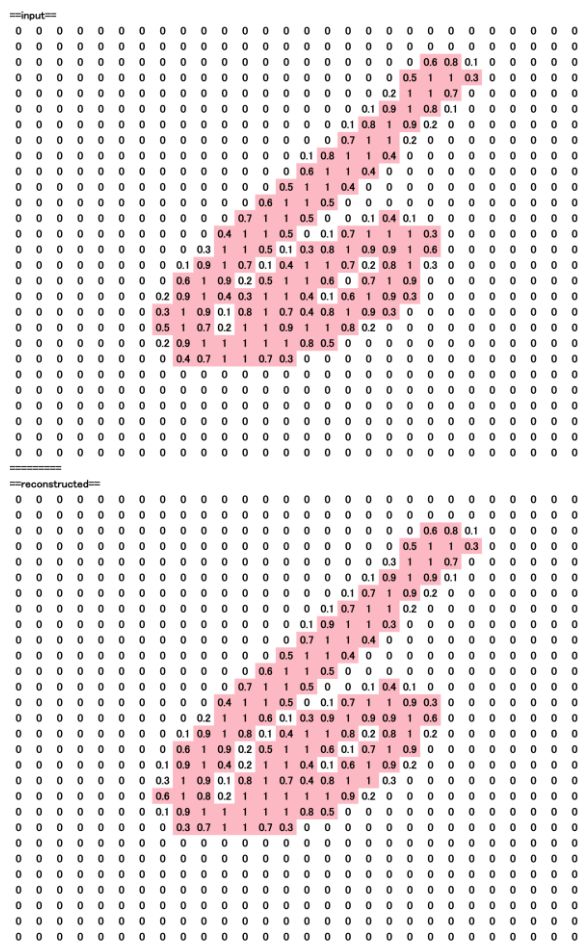


Fig.3. Example of Reconstructed Input Vector  
(Upper figure is input vector and lower figure is reconstructed input vector.  
High value place is painted the red.)

次に mnSOM のモジュール部を Deep Learning へ変更することを考える。Pre-training と fine-tuning はそれぞれ別々に行う。つまり pre-training の最後の層の中間層を fine-tuning の入力層として使う。mnSOM は競合学習により各モジュールの相対的な位置関係を獲得しながら、入出力関係を補間していく。競合学習をどのタイミングで行うのかを考える必要がある。AE から Back Propagation までを行ってから出力(最終出力)で競合学習を行う方法と、AE 部でも競合学習させる方法が考えられる。通常の mnSOM では最終出力により競合学習を実行するが、AE を挟むことにより、fine-tuning 部分の入力がほぼ同じになることが予想され、そこからクラスタリングを行うことが効率的な学習であるのか、考慮する必要がある。AE 部における競合学習は入力を分類することに役立つと考えられる。ある程度の入力を分類して、下流の fine-tuning へ繋がれば、学習精度も向上すると期待できる。上記の2通りの mnSOM を作成し、効率的な学習ができる方を選択することを考える。

#### (4) 平成 27 年度進捗状況

Deep Learning による学習を行い、単純な積算の学習に成功した。文字認識も妥当な解答を得られた。mnSOM へ Deep Learning を適応するための競合学習方法を考え、コードの作成を開始した。

平成 28 年度では、mnSOM with Deep Learning の競合学習方法を確立させ、コードの完成を目指す。また、流体-構造連成解析結果を予測する問題を扱い、mnSOM や 3 層の MLP と比較して、より高精度で予測することができるかを検証し、本研究をまとめる。

#### 参考文献

- [1] T.Kohonen, "Self-Organizing Maps", pringer-Verlag, 1995.
- [2] Quoc V. Le, Marc'Aurelio Ranzato, Rajat Monga, Matthieu Devin, Kai Chen, Greg S. Corrado, Jeff Dean and Andrew Y. Ng, "Building High-level Features Using Large Scale Unsupervised Learning", Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning, 2012.
- [3] A.Krizhevsky, I.Sutskever, G.E.,Hinton, "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks"
- [4] Yann LeCun, "The MNIST database of handwritten digits", <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/> (2016/1/13 現在)

### 3.1.3. 粒子間インタラクションに着目した大規模粒子法シミュレーション

#### 1.はじめに

これまでの数値流体シミュレーションにおいては、ほとんどが物体と液体の境界は滑りなし条件で解かれてきた。しかし、材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況が、Fig.1のように、落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ(飛沫)にみられることが分かっている。つまり、粒子間のインタラクション(この場合は壁と液体粒子間)に物性を表すモデルを導入して計算しないと実現象とかい離することを示唆している。

本研究では、そういった物体の表面性状の違いを数値シミュレーションに導入するために、物体と流体の境界条件に表面性状の効果を記述するモデルを提案してきた[1]-[4]。現在は、自由表面を扱う流体现象のシミュレーションの応用例として、ミルククラウンとコップの縁から流れ落ちる液だれの現象について、粒子法(MPS)による大規模並列計算を行い、実験映像と比較して計算の妥当性について検証を行っている。

#### 2. ミルククラウンの数値シミュレーション

ミルククラウンと呼ばれる水滴が落下し液相に衝突したときに発生するスプラッシュ現象を再現した。ミルククラウンは、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.2)。物性値は水とした。である。本節では、計算点である粒子直径を 0.2 mm, 0.1mm, 0.05mm, 0.025mm と変化させて、どの程度の粒子の直径が適切であるかを確認した。

Fig.3 から Fig.6 に示すように、粒子の直径 0.2 mm, 0.1 mm, 0.05 mm, 0.025 mm の解析結果であり、色は速度の大きさである。Fig.5 の粒子直径 0.05 mm の解析や Fig.6 の粒子直径 0.025 mm の解析では、ミルククラウンの発生に成功している。Fig.4 の粒子直径 0.1 mm の解析では、クラウンの側面の壁に穴が開くなどして、非物理的な現象が発生している。これは、粒子の直径が大きすぎて、クラウンの側面の壁の厚さ方向に十分な数の粒子を配置することができなくなったためである。Fig.3 の粒子直径 0.2 mm の解析では、粒子を繋ぎとめておくに必要な表面張力を発生させることができなくなってしまっている。以上の結果から、最低でも粒子直径 0.1 mm, 可能なら粒子直径 0.05 mm の解析を行うことが求められることが分かった。

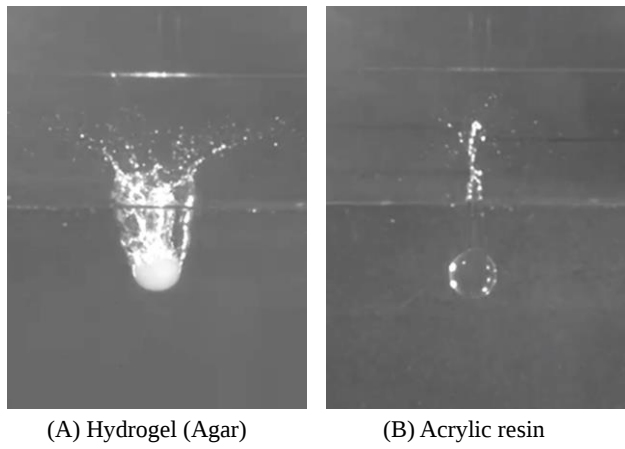


Fig.1. 材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況: 落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ(飛沫)の実験

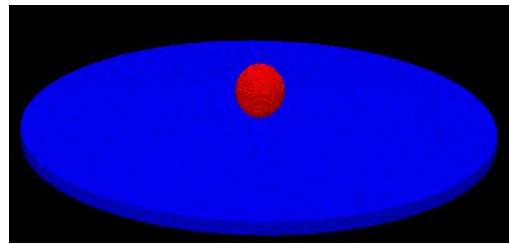
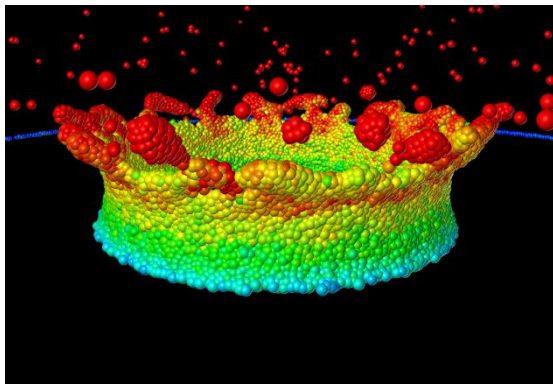
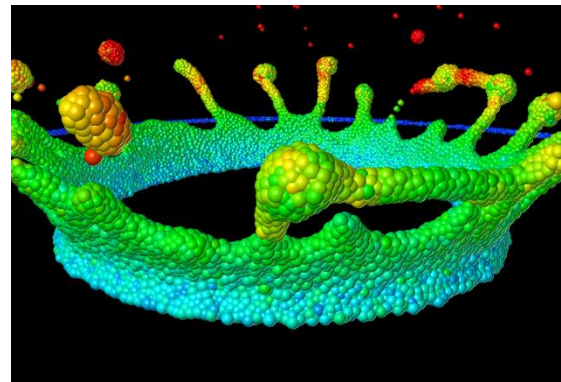


Fig.2. 液滴を液体層に衝突させる解析のモデル

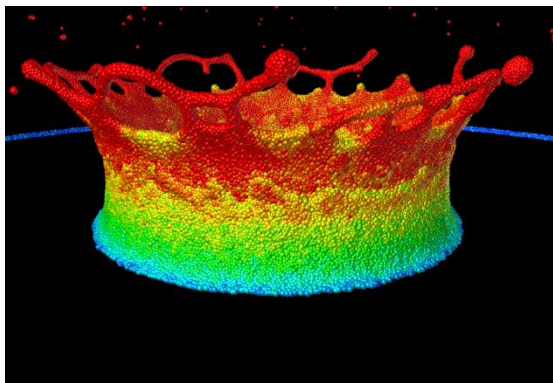


(a) 10 ms

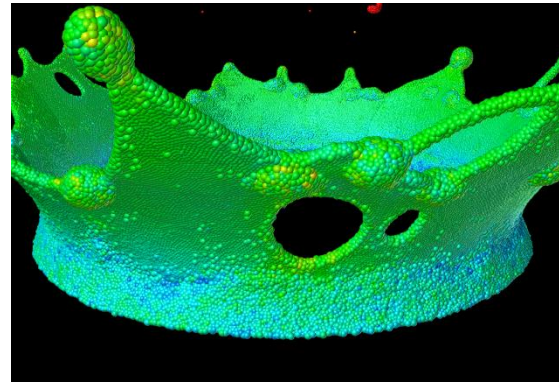


(b) 24 ms

Fig.3. 粒子直径 0.2 mm の解析



(a) 10 ms



(b) 24 ms

Fig.4. 粒子直径 0.1 mm の解析

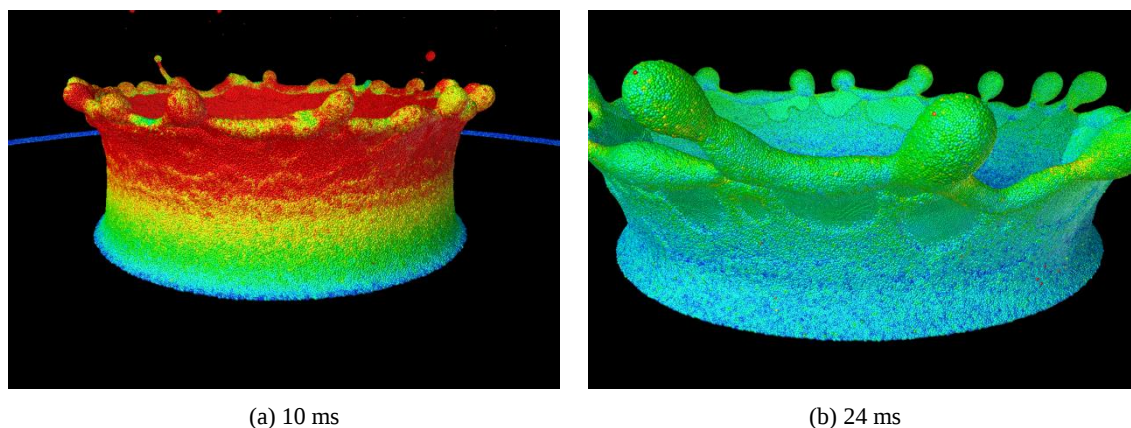


Fig.5. 粒子直径 0.05 mm の解析

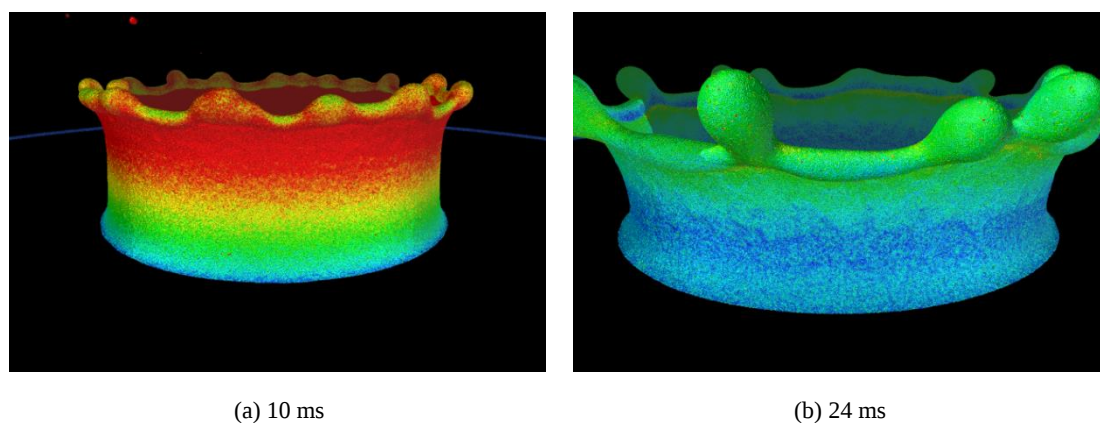


Fig.6. 粒子直径 0.025 mm の解析

### 3. 容器口から流れ落ちる液だれの数値シミュレーション

水や調味料などの液体容器の設計時において液だれの発生を抑制するための考慮は重要な課題である. 本研究では容器口の縁付近の形状やその表面性状の差異による流体挙動への影響を調査している. 3次元プリンタにより縁の形状と表面性状の異なる容器を複数作成し, それらの容器から液体が流れ出る際の縁付近の流れを撮影した. また作成した容器から液体が流れ出る際と同様な条件下における数値シミュレーションを行い実験映像との比較を行っている.

既存の MPS の手法では界面の濡れ性や接触角を用いた方法が提案されているが, 決定的な精度よい計算結果は出てきていない. 本研究でも, それらのモデルを導入しても物体に付着するような流動現象をシミュレーションすることはできなかったため, 新たにクーロン力に似せた距離に反比例する引力モデルを導入した. よって, 本章で紹介するような液だれ現象を発生させるためには, 流体粒子と容器壁面を構成する粒子との間にクーロン力のような引力を生じる計算モデルの導入することで液だれ挙動を表現可能であると考えた, クーロンによる模擬した疑似的な静電気モデルの力は下記である

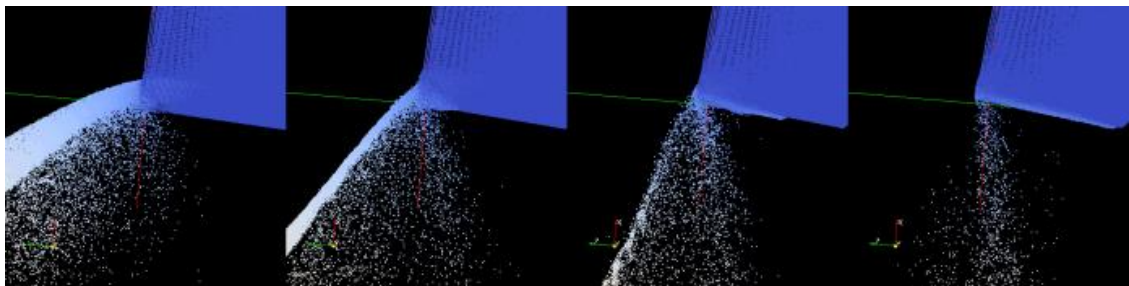
$$F_c = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1)$$

ここで  $k$ ,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $r$  はそれぞれ比例定数, 流体粒子の電荷, 壁面粒子の電荷, 粒子間の距離を表す. 求めた  $F_c$  をナビエーストークス式の外力項へ加え陽的に計算することで流体粒子と壁面粒子の引力を表現する.

数値シミュレーション結果を Fig.7 に示す. Fig.7 (A), (B) はそれぞれクーロン力モデル導入前, 導入後の角縁容器の数値シミュレーション結果である. クーロン力モデル導入前の数値シミュレーション結果では角縁の実験時に見られた流れの容器壁面方向への湾曲は見られず, 容器外壁の壁面粒子への付着は発生しなかった. クーロン力モデル導入後の数値シミュレーション結果では容器外へ向かう流体粒子の主な流れから壁面へ湾曲する流れが僅かに分かれる様子を確認し, また流体粒子が容器外壁を伝い落ちる様子を確認した.



(A) 角縁 クーロン力モデル導入前



(B) 角縁 クーロン力モデル導入後

Fig.7. 角縁容器の数値シミュレーション結果

#### 4. おわりに

本研究は, 粒子法における界面張力や表面張力といった粒子間のインタラクションに着目し, 自由表面を伴う流れをより現実に近づける手法について提案するものである. まだ実現現象を再現するには固体・流体それぞれの物性についてパラメータ調性をする必要があり, さらに今後の実験結果との比較検証をしていく予定である.

謝辞

本研究は, 文部科学省私学助成金東洋大学研究拠点 CCMR, JST-CREST「ポストペタスケール

シミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」, JSPS 科研費 26390127 の助成を受けた。

また, 革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ(課題番号: hp140199, hp150189)と学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(課題番号: 14-NA07)名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクトの支援を得た。

## 参考文献

- [1] Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences Vol.1:1 (2014) pp.1-14
- [2] Yokoyama, M., Murotani, K., Yagawa, G., and Mochizuki, O., Some Considerations on Surface Condition of Solid in Computational Fluid-Structure Interaction. In Numerical Simulations of Coupled Problems in Engineering (2014) pp. 171-186, Springer International Publishing.
- [3] Yokoyama M., Mochizuki O., Yagawa G., Surface Condition of Solid in Splash Formation. IACM expressions No.34 (2014) pp.2-5.
- [4] Masao Yokoyama, Kohei Murotani, Genki Yagawa and Osamu Mochizuki, Fluid-Structure Interaction Analysis with Slippery Mucus Skin, 11th World Congress on Computational Mechanics, Barcelona, Spain, 2014.

### 3.1.4. 損傷理論を導入したボクセル FEM によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析

#### (1) 目標・計画

社会基盤を支えるコンクリート構造物の劣化原因のひとつにアルカリシリカ反応(以下, ASR)がある。ASR は, コンクリート中のある種の反応性骨材(鉱物)とアルカリ性細孔溶液との化学反応により, ゲルを生じ, そのゲルが吸水膨張することで, 膨張圧が生じる現象をいう。ゲルの吸水膨張に伴う膨張圧により, コンクリートに有害なひび割れを生じるケースや, 最悪な場合は, 鉄筋破断が生じるケースがあり, ASR 劣化は, コンクリートの耐久性, 耐荷性の低下を引き起こす原因のひとつである。

ASR の膨張挙動において, 最も興味深い現象として, ペシマム現象がある。ペシマム現象とは, を反応性骨材と非反応性骨材のある一定の混合割合によって最も大きな膨張を示す現象をいう。ペシマム現象は, 反応性鉱物の種類やアルカリ環境条件などにも影響を受けるため, 膨張挙動を予測するのが極めて困難な問題である。

ASR のペシマム現象に対する膨張挙動は, 骨材寸法や形状に加え, 反応性骨材と非反応性骨材の混合割合に依存するため, 本研究では, コンクリート中の反応性骨材および非反応性骨材の混合割合を考慮可能な損傷理論を導入したボクセル有限要素法の開発を行うことを目的とする。

今年度は, 1)反応性粗骨材と非反応性粗骨材の混合率を考慮可能なボクセルデータ(以下, コンクリートモデル)の作成, 2)反応性粗骨材と非反応性粗骨材の混合率を考慮したコンクリートモデルを入力データとし, 損傷力学モデルの概念を導入したボクセル有限要素法(以下, DM-VFEM: Voxel FEM incorporated with the Damage Mechanics)を用いて, ペシマム現象の再現可能な解析手法の基礎検討を行った。

#### (2) 意義・国際社会との比較

世界的にコンクリート材料は社会基盤施設を構成する多くの構造物に使用されており, コンクリート構造物の合理的かつ効率的な維持管理を行うためには, コンクリート構造物の劣化現象を正しく理解し, 精度良く再現する数値解析手法の開発が必要である。本研究の対象は, コンクリートの劣化現象の一つであるアルカリシリカ反応(ASR)の膨張予測である。世界的にも ASR の劣化現象を対象に数値解析的な予測手法の研究が行われているが, 未だ決定な手法は構築されていない。したがって, 本研究で対象としている ASR の劣化予測手法に対する数値解析的な取り組みは非常に意義のあることである。

#### (3) 研究内容

##### (a) コンクリートモデル

ここでは, コンクリート中の粗骨材を考慮したコンクリートモデルの作成方法の概念を示す。

コンクリートモデルの作成は, はじめに, 粗骨材の形状を画像として取り込み, 画像から粗骨材

の形状を考慮したポリゴンデータを作成する。つぎに、作成した粗骨材のポリゴンデータからボクセル要素で分割した粗骨材ボクセルモデルを作成し、これをコンクリートモデル内に配置し、2層系のコンクリートモデルを作成することができる。粗骨材を配置する際に、反応性粗骨材と非反応性粗骨材の混合率を指定し、その割合に従い、粗骨材を配置する。図-1 にその概念図を、図-2 に反応性骨材、非反応性骨材の分布の例を、それぞれ示す。

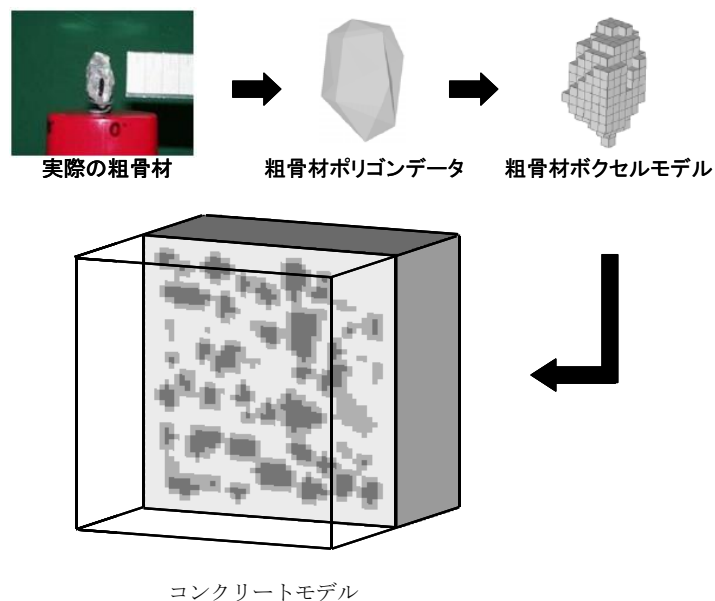


図-1 コンクリートモデル作成の概念図

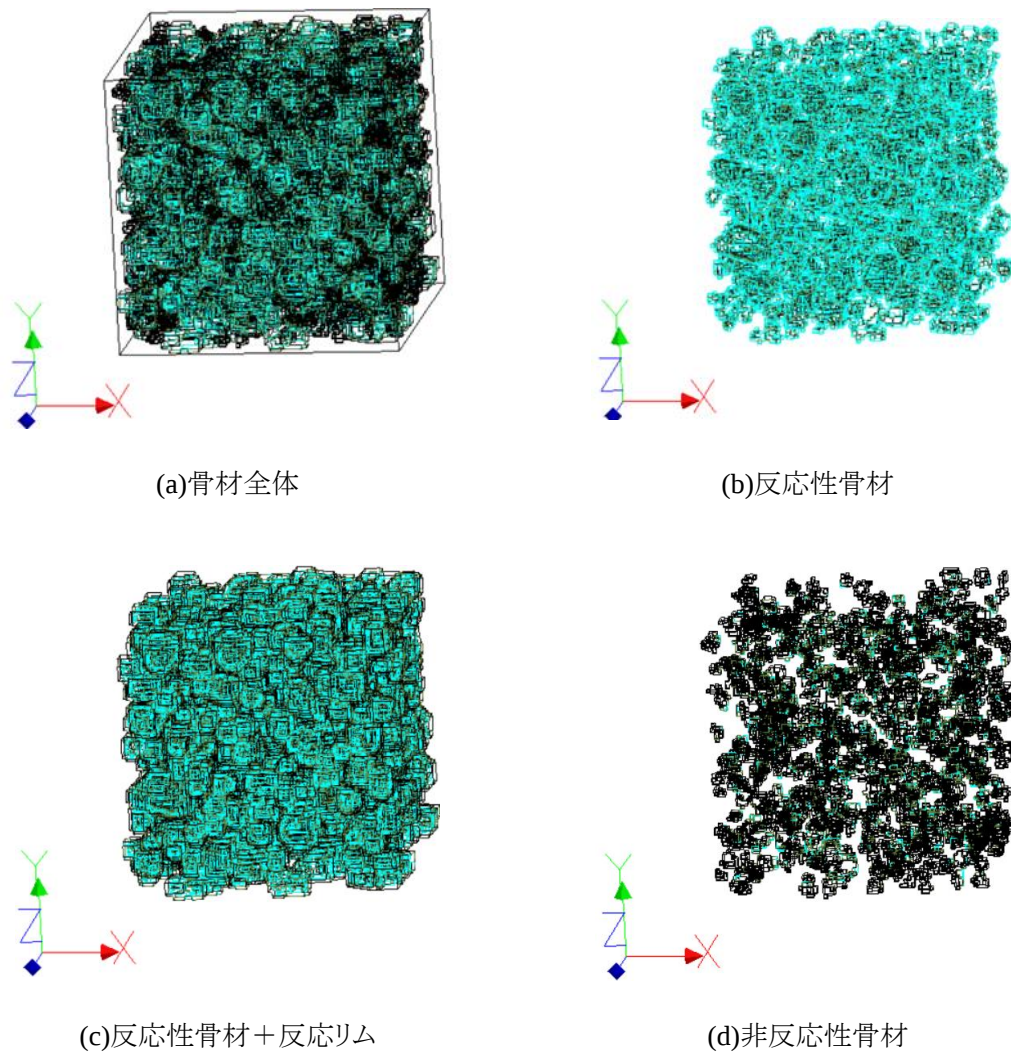


図-2 反応性骨材と非反応性骨材の分布の例

### (b) 連成解析手法

本解析は、ボクセルFEMをベースとし、非定常拡散問題と非線形ひび割れ進展問題の両者を連成して行う。ひび割れは、損傷に応じてボクセル要素の剛性を現象させる損傷モデルを導入することで表現し、得られる損傷パラメータを用いて拡散問題における物性値（拡散係数）も段階的に変化させるイオン拡散-固体損傷の連成解析手法である。

図-3 に連成解析フローチャートを示す。連成解析では、最初に非定常拡散問題を解き拡散物質（アルカリイオン）の空間分布を予測する。そして、イオン濃度の空間分布から粗骨材の膨張力を決定する。この際、膨張力によって不連続面と判定される要素は、高い拡散係数に置換し、再び拡散問題を解く。これを繰り返すことで、イオン拡散に伴う不連続面進展解析を実施する。

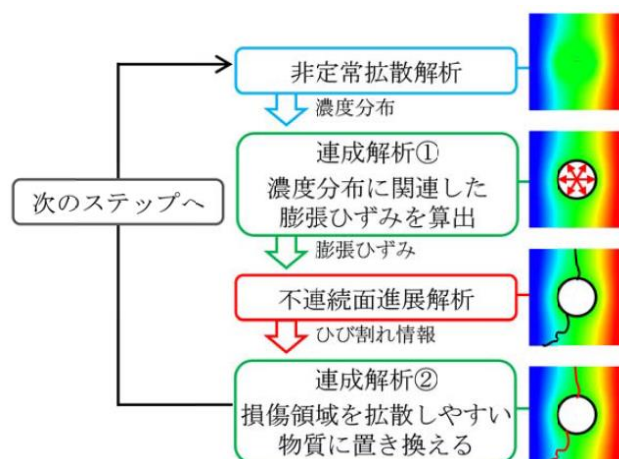


図-3 連成解析フローチャート

## 損傷力学モデルの概要

損傷モデルでは連続体損傷力学を導入し，損傷変数  $D$  を用い，要素剛性を段階的に減少させるモデルである．

損傷変数は  $0 \leq D \leq 1$  であり， $D=0$  のときには健全な状態を示し， $D=1$  は最終的な破壊状態を表す．損傷に伴う微小空間の発達には材料の剛性低下を引き起こすため，本研究では弾性係数の低下によって損傷状態を表す．

$$D = (E_0 - E) / E_0 \quad (1)$$

ここで， $E_0$  は非損傷状態の弾性係数， $E$  は損傷後の弾性係数である．具体的な損傷変数は Mazars らによる損傷進展式を用いている． $\mathbf{C}^e$  を等方弾性テンソルとすると，損傷を考慮した材料構成則は以下のように規定される．

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D) \mathbf{C}^e \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

## ひび割れた要素の拡散係数モデル

ひび割れた要素の拡散係数  $k$  は，損傷パラメータに応じ大きくし，ある一定量  $\alpha$  になると収束するとした式(3)のモデルを提案する(図-4(a) 参照)．

$$k = k_0 + \alpha \{1 - \exp(-\beta \times D)\} \quad (3)$$

ここで， $k_0$  は健全時の拡散係数， $\alpha$  は拡散係数の収束値を表現する係数， $\beta$  は拡散係数の最

大値への収束速度を表現する係数,  $D$  は損傷係数である.

### 膨張モデル

ASR 膨張は, 反応生成物である ASR ゲルの吸水膨張によるものであるが, 本研究では, ASR ゲル量がイオン濃度に比例すると仮定し, また, ASR ゲル生成後, 吸水膨張までの潜伏期を考慮した式(4)に示す等方ひずみ  $\varepsilon$  を膨張モデルとして提案する(図-4(b) 参照).

$$\left. \begin{array}{l} C_{alkali} < C_{TL} \quad \varepsilon = 0 \\ C_{alkali} \geq C_{TL} \quad \varepsilon = \alpha \{1 - \exp(-\beta(C_{alkali} - C_{TL}))\} \end{array} \right\} \quad (4)$$

ここで,  $\alpha$  は膨張量の最大を表現する係数,  $\beta$  は膨張速度を表現する係数,  $C_{alkali}$  はアルカリイオン濃度,  $C_{TL}$  は閾値である. なお, 反応を起こし, 膨張した要素を構成する節点のアルカリイオン濃度  $C_{alkali}$  は, 反応で消費されたとして, 次の式を用いて減少させている.

$$C_{alkali} = C_{alkali} - \gamma C_{CT} \quad (5)$$

ここで,  $\gamma$  は, アルカリ消費率を表す係数であり, 本解析は,  $\gamma = 0.001$  とした.

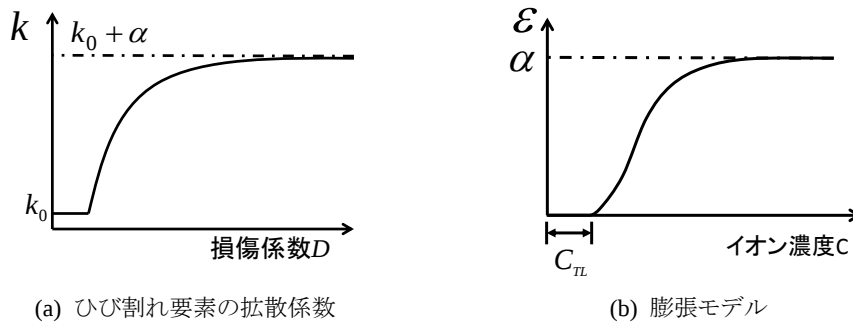
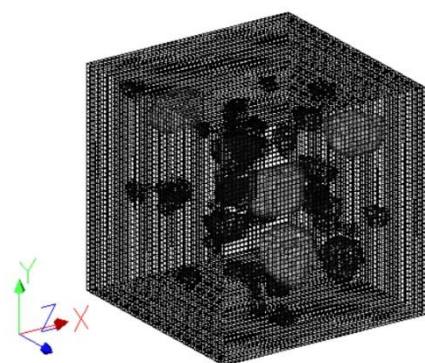


図-4 拡散モデルおよび膨張モデル

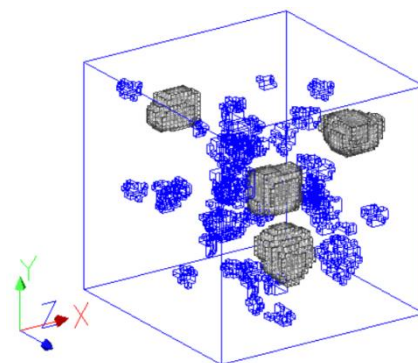
### 数値解析例

解析には  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  のコンクリートモデルを用いた. 1 ボクセル  $3 \text{ mm}^3$  とし, 粗骨材量を 5% とし, 反応性粗骨材は粗骨材量の 10 %, 50% の 2 水準とした. 図-5 および図-6 に 2 水準のコンクリートモデルを示す. 図中の反応性骨材周辺には膨張層 (反応リムモデル) も同時に示している. 表-1 に各種係数を示す. なお, 時間刻みは 0.5 日とした.

アルカリ量に応じた膨張ひずみを粗骨材に与え, ASR の膨張を表現した. 境界条件は  $yz$  面以外の面に対して面外方向の変位を拘束し, アルカリは粗骨材以外 (モルタル) に初期値として  $1 \text{ kg/mm}^3$  を与えた.

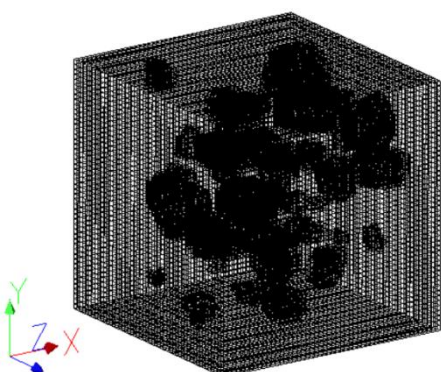


(a) モデル全体

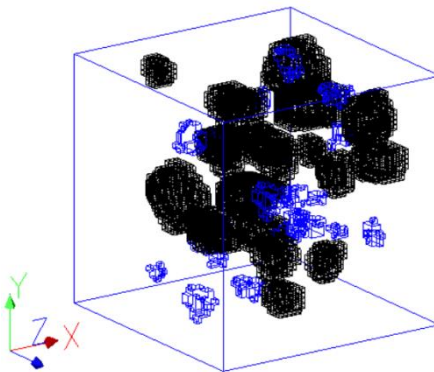


(b)反応性骨材(黒)および非反応性骨材(青)

図-5 コンクリートモデル(反応性粗骨材 5%)



(a) モデル全体



(b)反応性骨材(黒)および非反応性骨材(青)

図-6 コンクリートモデル(反応性粗骨材 50%)

表-1 解析に用いた材料特性

|                            | モルタル | 反応性粗骨材               | 非反応性粗骨材              |
|----------------------------|------|----------------------|----------------------|
| 拡散係数(mm <sup>2</sup> /day) | 1.0  | $1.0 \times 10^{-3}$ | $1.0 \times 10^{-6}$ |
| 弾性係数(GPa)                  | 20.0 | 60.0                 | 60.0                 |
| 引張強度(MPa)                  | 4.0  | 破壊しない                | 破壊しない                |

図-7, 図-8 にそれぞれ内部ひび割れおよび表面ひび割れの解析結果(損傷係数表示)を示す. この結果より, 両ケースとも, ひび割れは反応性粗骨材の周辺のもルタルから生じ, コンクリート表面に進展しているのがわかる. また, 反応性骨材と非反応性骨材の混合率によるひび割れ発生の違いを表現できていることがわかる. しかし, 膨張量の評価は行っていないため, 今後は, 内在アルカリ量や反応に伴うアルカリ消費量を考慮に入れたモデルを開発し, ペシマム現象による膨張量の詳細な検討を行う予定である.

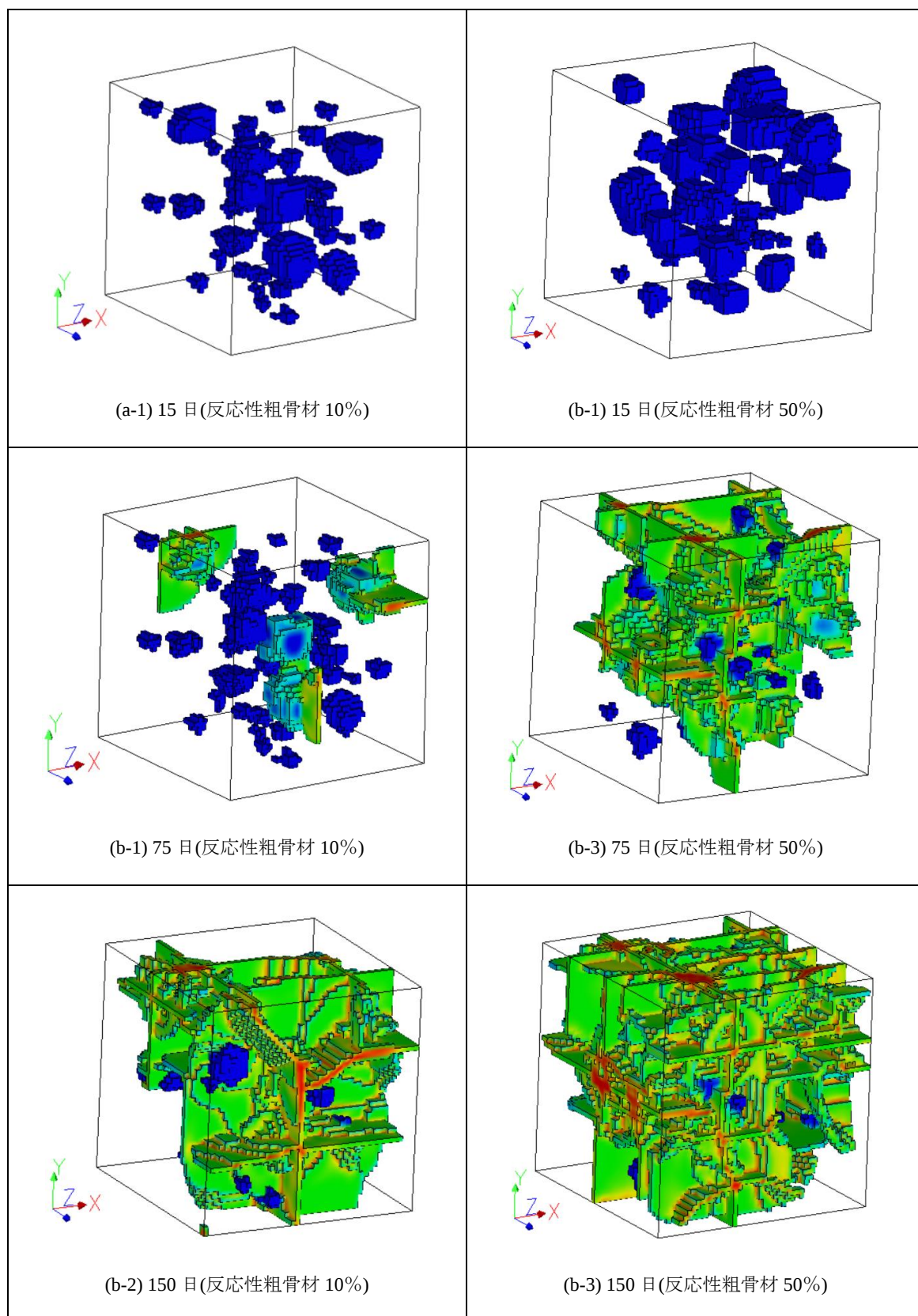


図-7 内部ひび割れ進展(損傷係数表示)

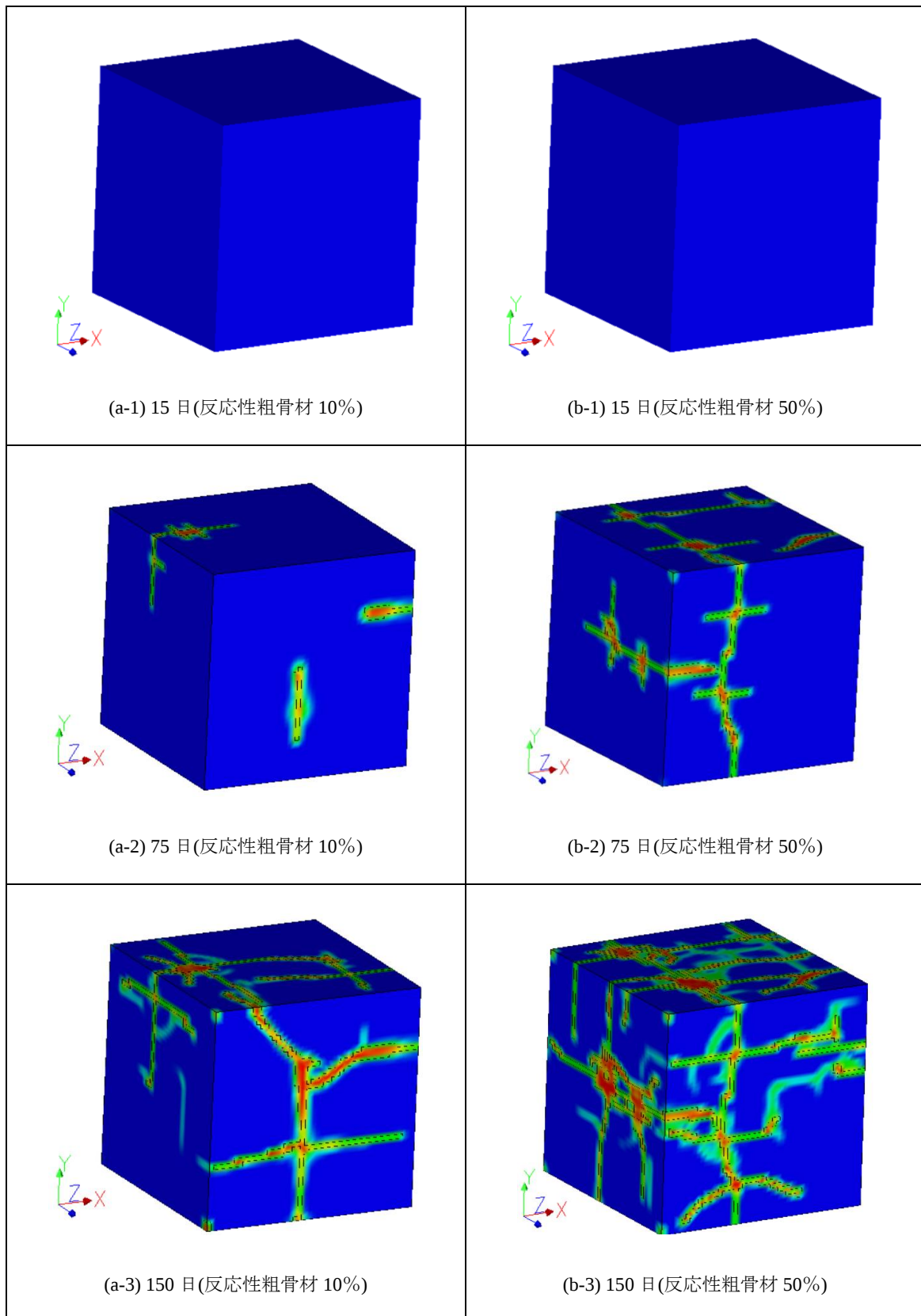


図-8 内部ひび割れ進展(損傷係数表示)

#### (4) 平成 27 年度進捗状況

(3)に示した通り, 反応性骨材と非反応性粗骨材の混合率を変えた ASR 膨張解析が実施可能であることを示した. 今後は, 解析パラメータを求めるための実験をあわせて行い, ペシマム現象を再現可能な解析手法の構築を目指す. また, 大規模な解析が予想されるため, 並列計算 (MPI+OpenMP ハイブリッド)を用いた高速化を行う.

なお, 本研究は九州大学工学部地球環境工学科 浅井光輝准教授との共同研究である.

### 3.1.5. Sinkhole の形成シミュレーション

#### (1) 目標・計画

Sinkhole は、カルスト地形にて多く形成される地盤陥没現象を意味し、雨水や地下水などによって石灰岩の固い層が溶解することで発生する。この溶解現象は、地盤内部だけでなく、地表面にも影響を及ぼすことがあり、例えば、数十メートルを超える大きな地盤陥没が、前兆もなく突然に発生した事例も数多く存在している。したがって、Sinkhole の発生メカニズムの解明および予測等は工学上極めて重要な課題となっている。しかしながら、石灰岩の溶解に伴う Sinkhole の発生機構を実験的に模擬した上で地盤の陥没過程を観察することは、時間的制約や現象自体の複雑さから極めて困難であり、災害後の調査などに頼らざるを得ない現状がある。このような現状を考慮すると、Sinkhole の形成メカニズムや発生後の被害を想定する際には、数値シミュレーション技術が強力なツールになると考えられる。

そこで本研究では、石灰岩の溶解過程を反応拡散系にて数理モデル化し、Sinkhole の形成過程を計算機上で再現した。なお、本研究は、最終的には地盤陥没現象のメカニズム解明に挑むものとなっている。なお、前年度までに、地盤の幾何モデリング技術、地盤の流動解析技術、地盤内表面における破壊パターン解析技術として、力学をベースとした解析手法を展開してきたが、本年度は更に踏み込み、地盤の化学的風化現象の数値モデル化に挑んだものとなっている。

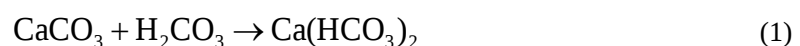
#### (2) 意義・国際社会との比較

Sinkhole 現象に関しては、アメリカ合衆国やアラブ首長国連邦、大韓民国等の都市部においても多くの被害が確認されており、特に、フロリダ半島においては、半島全体を覆う石灰岩が全体的に溶出した影響で、多数の Sinkhole が発生しており、物理的な被害のみならず人的な被害も発生していることから、緊急な対策が必要とされている。しかしながら、本現象は力学的な理論のみでは解決することが困難な問題であり、また、時間的な制約も重なって、明確な解決の緒は未だ見つかっていない。数値解析的な検討については、若干の先行研究があるものの、ダルシー則等の単純化されたモデルがあるのみである。したがって、本研究の国際社会における意義は極めて大きい。

#### (3) 研究内容

##### 1) 石灰岩の溶解過程の定式化

石灰岩の溶解は次式にて表すことができる。



したがって、石灰岩の溶解に対する化学反応速度式は、次式にて表すことができる。

$$\frac{d[A]}{dt} = -k_1(A - a)(B - a) \quad (2)$$

$$\frac{d[B]}{dt} = -k_1(A - a)(B - a) \quad (3)$$

$$\frac{d[C]}{dt} = k_1(A - a)(B - a) \quad (4)$$

ここで, A:  $\text{CaCO}_3$ , B:  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , C:  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $k_1$ : 反応速度定数,  $t$ : 時間,  $a$ : 溶解反応した物質  
量である. また, この反応は可逆性を有しており, これも考慮しなければならない. このとき, 化学反  
応速度式は 1 次の反応速度式になり, 次式にて表すことができる.

$$\frac{d[A]}{dt} = k_2(C - b) \quad (5)$$

$$\frac{d[B]}{dt} = k_2(C - b) \quad (6)$$

$$\frac{d[C]}{dt} = -k_2(C - b) \quad (7)$$

ここで,  $k_2$ : 反応速度定数,  $b$ : 生成反応した物質, C:  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  の濃度である. 一方, 各物質  
は岩盤内部で拡散していることが考えられるから, 式(2)~(7)に拡散項を導入することを仮定する.  
具体的には, 各物質濃度の時間に伴う変化量を反応拡散系にて定義し, 次式にて仮定した.

$$\frac{d[A]}{dt} = D_1 \nabla^2 A - k_1([A]_0 - a)([B]_0 - a) + k_2([C]_0 - b) \quad (8)$$

$$\frac{d[B]}{dt} = D_2 \nabla^2 B - k_1([A]_0 - a)([B]_0 - a) + k_2([C]_0 - b) \quad (9)$$

$$\frac{d[C]}{dt} = D_3 \nabla^2 C + k_1([A]_0 - a)([B]_0 - a) - k_2([C]_0 - b) \quad (10)$$

ここで,  $D_1$ :  $\text{CaCO}_3$  の拡散係数,  $D_2$ :  $\text{H}_2\text{CO}_3$  の反応係数,  $D_3$ :  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  の拡散係数である.

## 2) 数値解析例: Sinkhole の形成シミュレーション

### ① 解析モデル

解析領域は, 損傷部位を含んだ矩形領域で  $2 \times 2$  の 2 次元モデルを仮定した. このモデルにおける  
総格子点数は 40401 であり, 境界条件としてモデルの上下左右端に Neumann 条件を設定した. ま  
た, 化学反応量にばらつきを持たせるために, 毎ステップごとに化学反応する量が, 正反応および逆  
反応共にランダムに変化するように設定した. さらに, 異なる環境下・条件下での反応を観察するた  
めに, 石灰石の形状や炭酸水の流入場所を変化させ, より実際の状況に近い条件を設定した. な  
お, 石灰岩の表面では,  $\pm 0.1$  の範囲の濃度をランダムに設定した. 以下に, 本研究で用いた 2 つ  
の解析モデルの詳細を記す.

### ■ 解析モデル 1

本モデルは、Sinkhole の形成過程を観察するためのモデルであり、図-3.1.5-1 に示すように、モデル上部の穴から一定量の炭酸水が供給される。これは、正方形の石灰岩の上部に穴をあけ、そこから炭酸水が供給されて石灰岩が溶けていく様子を再現したものである。

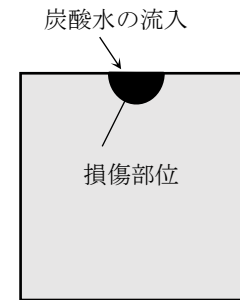


図-3.1.5-1 解析モデル 1

### ■ 解析モデル 2

本モデルは、Sinkhole が岩石の内部損傷部位から発達していく様子を観察するためのモデルであり、図-3.1.5-2 に示すように、石灰岩の濃度として層状に3つの値を設定した(上段:  $0.5 \pm 0.1$ , 中段:  $0.9 \pm 0.1$ , 下段:  $0.1 \pm 0.1$ )。

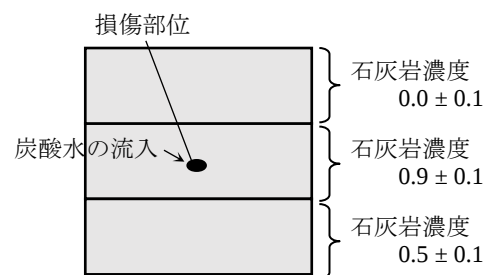


図-3.1.5-2 解析モデル 2

## ② 解析モデル 1 の結果と考察

解析モデル 1 の解析結果として、石灰石の濃度、炭酸水の濃度および炭酸水素ナトリウムの濃度を、それぞれ、図-3.1.5-3、図-3.1.5-4 および図-3.1.5-5 に示す。図中のカラーグラデーションは各物質の濃度の大きさを示しており、青から緑、赤に変わるにつれて低濃度から高濃度に変化したことを意味する。図-3.1.5-3 より、本解析結果は、炭酸水が石灰岩を溶かし Sinkhole が形成されていく様子を示している。さらに、一部の炭酸水素カルシウムがそれぞれ石灰岩と炭酸水に変化している様子も確認される。また、炭酸水は、図-3.1.5-4 より、解析の初期段階では上部の穴から供給され、そこから step 数が増加していくに伴って、拡散していくことが分かる。また、図-3.1.5-5 より、炭酸水と石灰岩が接触している様子が見受けられることから、炭酸カルシウムが徐々に増加し続け、その後拡散していることが分かる。さらに、モデルの下部には炭酸カルシウムが発生していないことから、炭酸水と石灰岩が接触していなければ、炭酸水素カルシウムは生成されないことが分かる。

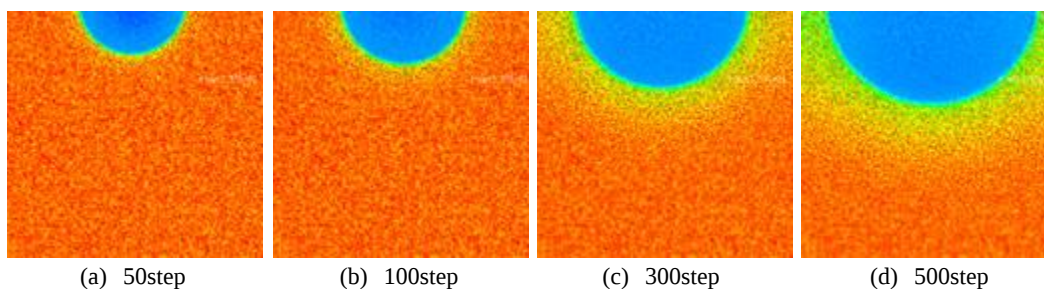


図-3.1.5-3 石灰石の濃度パターン(a)～(e):経時変化 (解析モデル 1)

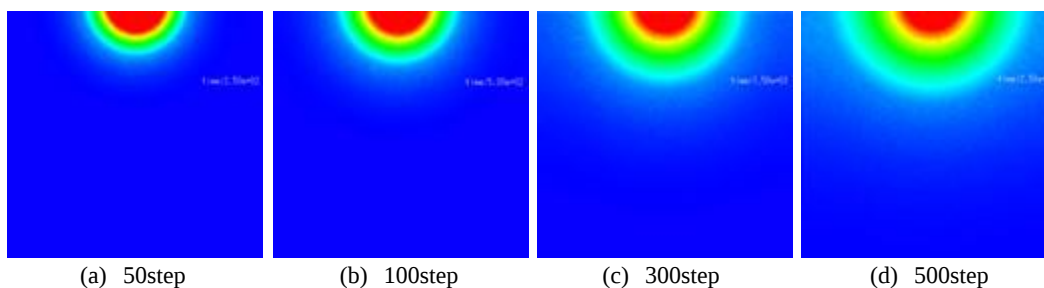


図-1.1.5-4 炭酸水の濃度パターン(a)～(e):経時変化 (解析モデル 1)

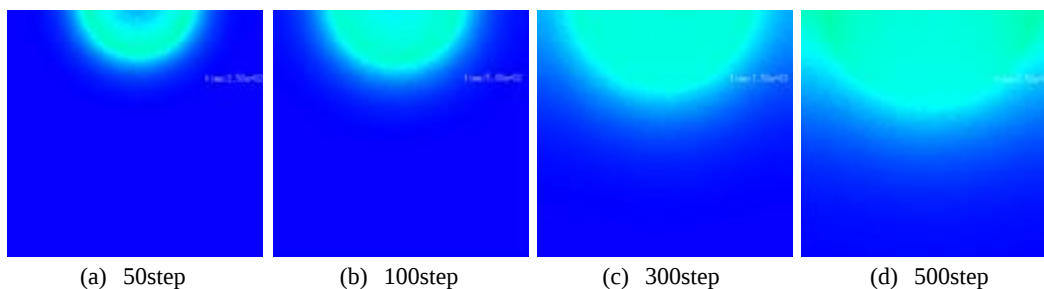


図-3.1.5-5 炭酸水素ナトリウムの濃度パターン(a)～(e):経時変化 (解析モデル 1)

### ③ 解析モデル 2 の結果と考察

解析モデル 2 の解析結果として、石灰石の濃度、炭酸水の濃度および炭酸水素ナトリウムの濃度を、それぞれ、図-3.1.5-6、図-3.1.5-7 および図-3.1.5-8 に示す。図-3.1.5-6 より、石灰岩では、水が流入している箇所から徐々に穴が大きくなっていき、最終的には上下の層を貫き、縦穴をあけている。これらの層を地層として想定すると、中間の層が炭酸水によって破壊されることにより、上段にある層の比較的柔らかい層が、Sinkhole の内部になだれ込む、と考えられることができる。このような現象は、実地盤においても確認されていることであり、本手法が定性的には妥当であることが分かる。また、図-3.1.5-7 より、炭酸水が石灰岩の濃度の低いところに残っていることが分かる。さらに、図-3.1.5-8 より、炭酸水素カルシウムが一定には拡散せず、層の境目で異なった拡がりを示していることから、炭酸水素カルシウムは石灰岩濃度の高い箇所に集中すると考察できる。

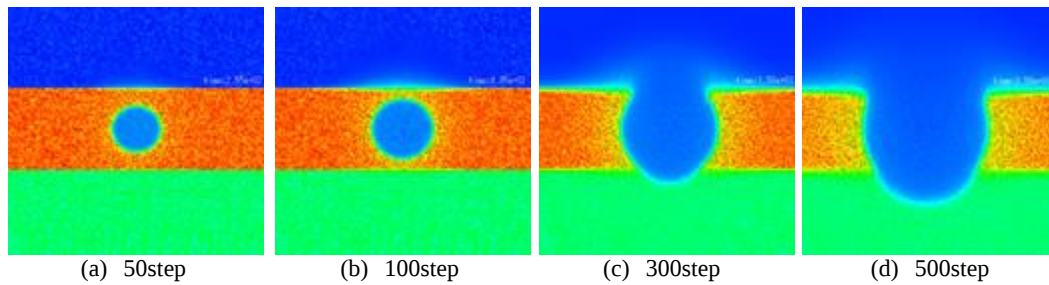


図-3.1.5-6 石灰岩の濃度パターン(a)～(e):経時変化 (解析モデル 2)

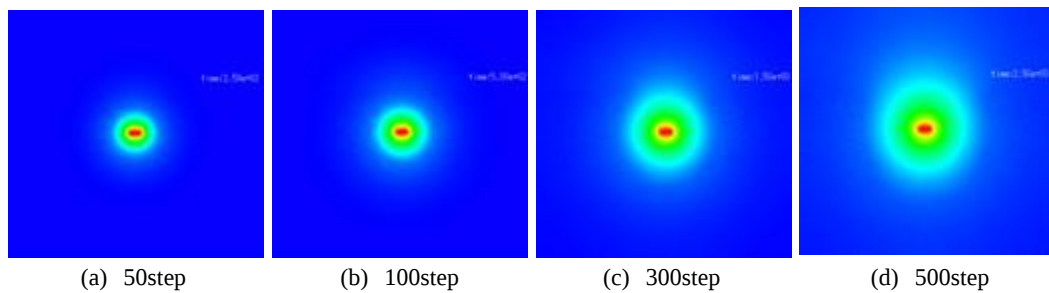


図-3.1.5-7 炭酸水の濃度パターン(a)～(e):経時変化 (解析モデル 2)

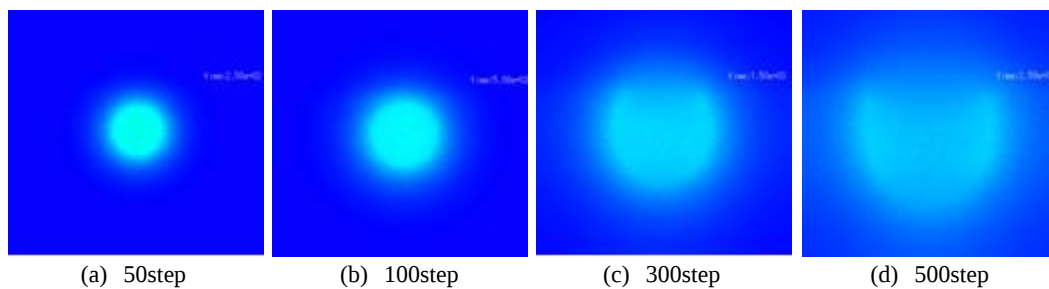


図-3.1.5-8 炭酸水素カルシウムの濃度パターン(a)～(e):経時変化 (解析モデル 2)

本研究で定式化した数理モデルは極めて単純である一方、多くのパラメータを含む。したがって、今後の展開としては、多くのパラメータサーベイを実施し、実地盤の状態を加味した数値シミュレーションを実施していくことが望ましい。また、実際の災害状況や石灰岩の溶解実験結果などと比較し、本手法の妥当性を検討するとともに、本モデルの精度向上を図る必要がある。

#### (4) 平成 27 年度進捗状況

今年度は、地盤内部における化学反応に伴う岩石溶解現象に対して、反応拡散系理論をベースにした数理モデルを構築し、2次元領域における数値解析技術を構築した。その結果、Sinkholeの発生過程のシミュレーションに成功し、定性的には良好な結果を得ることができた。今後は、実験値との比較など、更なる検証を行う必要がある。

### 3.2. 大規模並列化グループ

2011 年に京コンピュータが 10 ペタ(Peta: 1 京)フロップス(Flops: Floting Points per second)に達し, TOP500 では 2 回連続世界 1 位となり, 2013 年には中国の Tianhe-2 が 33 ペタにより 1 位を記録し, 次世代スーパーコンピュータは, ペタの次の世代, つまりエクサ(Exa)フロップスを指す時代へと突入している. このことからハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる. その一方で, これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては, その開発スピードもソフトウェアの品質も十分とは言えず, 多くのソフトウェアが 20 世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である. 特に, 1970~1980 年台に既に確立されているアルゴリズムに対して, 並列化の実装のみを加えた物が多く見られる. このような背景のもと, 本プロジェクトでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する, 次世代の大規模解析システムを構築するとともに, 常に最先端のスーパーコンピュータ能力を活用するシミュレーション実現を目指す.

今年度は, 以下の項目について報告を行う.

- (1) ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発
- (2) 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

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

#### (1) 目標・計画

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

#### (2) 意義・国際社会との比較

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

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

#### (3) 研究内容

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

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

##### B) DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は、マルチレベル領域分割法に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列ライブラリ開発を行うものである。一般的な線形代数ソルバーは、アセンブリされた連立一

次方程式を入力とするため、FEM におけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた。それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくい、ポストペタコンで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される。そこで、提案するマルチレベル DDM による多階層型データ構造を活用した、大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリの開発を行う。これは、

- ・多階層領域分割に基づく分散メモリ並列向け線形代数ソルバーの構築
- ・多階層領域分割に基づくマルチレベルコースグリッド修正法の開発
- ・構造・熱・流体・磁場など物理現象毎に特化したコースグリッド修正法の開発

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

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

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

### (4) 平成 27 年度進捗状況

#### A) DDM 入出力ライブラリ

平成 27 年度は、次の研究項目の研究開発が進められた。

##### 1. メッシュ向け多階層領域分割

2 層領域分割アルゴリズムについて、非構造格子向け並びにメッシュフリー向けの機能強化を行った。MPI-OpenMP ハイブリッド並列化とリスト機能を追加することで、現時点で最終目的である 2,260 億要素 (0.9 兆自由度) の非構造四面体メッシュ生成に名大 FX10 の 96 ノー

ドを 56 時間用いることで達成できた。ポストペタコンで想定される超大規模シミュレーションのプレ処理に有効なライブラリであることが示された。

## 2. メッシュ向け DDM 圧縮

非構造格子向け DDM 圧縮技術の実装を開始し、FEM による熱伝導解析を対象に基本機能を開発した。平成 26 年度には、大規模解析への適用を開始するとともに、新たに多階層精度圧縮数値記録技術に基づいた FEM データ圧縮ライブラリを開発し、大規模解析において約 8 割の圧縮率を得ることに成功した。

## 3. メッシュフリー向け DDM 圧縮

多階層精度圧縮数値記録技術に基づいた粒子データ圧縮ライブラリを開発し、大規模解析において約 5 割の圧縮率を得ることに成功した。

## B) DDM ソルバーライブラリ

平成 27 年度は、次の研究項目の研究開発が進められた。

### 1. メッシュ向け DDM ソルバー

LexADV\_TryDDM の開発を継続して行い、電磁界解析ソフトウェアからの利用に向けて Nédélec 要素対応などを行った。また、複素対称を係数に持つシステム向けに、DDM に基づく反復解法である MINRE-like\_CS 法を開発した。さらに、DDM の計算アルゴリズム見直しによる高速化を進めており、平成 26 年度は時間調和渦電流問題において反復解法の収束性を大幅に改善することに成功した。これにより、従来の計算アルゴリズムでは 5,000 万自由度程度までしか求解できなかったが、東京大学 FX10 の 720 ノードで 35 億自由度モデルを 9 時間弱で求解することに成功し、ポストペタコンにおいて解くべき問題に対しても有効な計算手法であることが示された。

### 2. メッシュフリー向け DDM ソルバー

メッシュフリー向け DDM 解釈を数学的にを行い、加えて、メッシュフリー向け DDM アルゴリズムをインターフェースの選び方で 2 種類開発した。現在、検証用の実装を行っている。

### 3. 流れ・電磁界 FEM 向け多階層前処理

電磁界問題向けに BDD 前処理の統一的構築方法の開発と実装を行った[15]。また、LexADV\_TryDDM による BDD 前処理研究開発フレームワークを開発中である。

### 4. ポストペタコン向けシミュレータ評価

評価環境として京コンピュータ、東京大学 FX10、東京工業大学 TSUBAME2.5(GPU)、名古屋大学 CX400(MIC)を主な開発計算機としてそれぞれのソルバーの性能向上をおこなった。有限要素法による構造解析機能と粒子法による流体解析機能を持った「連続体力学系シミュレータ」の開発を行い、ファイルベースの片方向連成機能のみの開発を完了した。図 1 では、LexADV\_EMPS を用いて津波遡上解析を行った後、流体解析で出力されたファイルから、地上構造物に与える流体圧力を求め、構造解析の入力ファイルを作成する。この構造解析用の入力ファイルを用いて、ADVENTURE\_Solid が応力解析を行う。このようにして

LexADV\_EMPS の片方向連成機能の開発により, 大規模分散メモリ環境で, 粒子法による流体解析と有限要素法による構造解析の連成解析が可能となった.

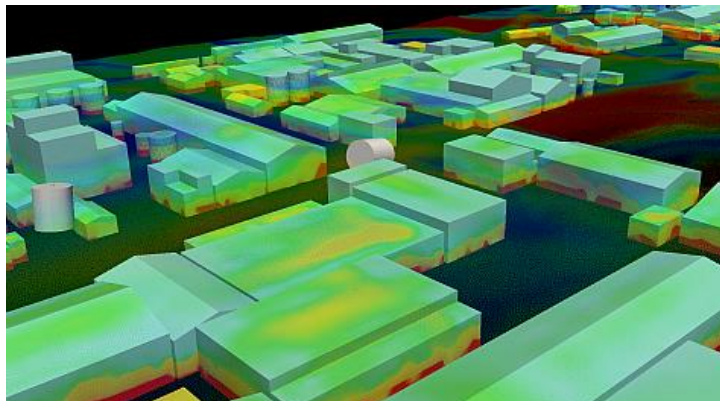


Fig.1. A Coupled Analysis with LexADV\_EMPS and ADVENTURE\_Solid

### C) 連続体力学向け DSL

平成 27 年度は, 次の研究項目の研究開発が進められた.

#### 1. DSL トランスレータ

平成 24 年度から引き続き, 豊田中央研究所や東京理科大学, 理化学研究所, JAMSTEC, JAXA, JAEA, 東京大学生産技術研究所, 東京大学地震研究所や国内スパコンセンターなどへの普及活動を積極的に行い, 理化学研究所 京コンピュータ, 東京大学 FX10, T2K 及び GPU クラスタ, 九州大学 FX10, JAMSTEC ES2, 筑波大学 T2K, 名古屋大学 FX1, 名古屋大学 CX400, 名古屋大学 FX10, 京都大学 XE6, 九州大学 CX400, 九州大学 FX10 などの利用実績を築きつつある. 更に, HPC 技術の産業界向け応用に関する国際ワークショップに参加し, 韓国 KiSTi における HPC クラウド開発への協力を行うことで, 海外スパコンセンターへの普及活動も継続して行っている. この活動の一環として, 5th International Industrial Supercomputing Workshop が平成 26 年 10 月 2-3 日に東洋大学で開催された.

#### 2. DSL 性能評価

需要の高いマルチコア及び SIMD 命令セット向けの最適化ライブラリの開発を延長して実施した. また GPU・MIC 向けの開発を更に重点的に行った. GPU 向け開発には, CUDA 及び OpenACC の利用を引き続き検討した. MIC 向け開発には, ネイティブ実装及びオフロード実装の利用を検討した.

#### 3. SIMD・GPU 向け最適化 AutoMT

マルチコア及び SIMD 命令セット向け最適化ライブラリの開発を更に進めた. 開発中の①構造解析・要素剛性, ②非線形材料構成則, ③熱伝導解析・要素剛性のそれぞれの行列テンソルライブラリでは, Intel (Sandy Bridge) でピーク性能比①70%, ②31%, ③50%を達成し, 東大 FX10 ではピーク性能比①44%, ②40%, ③38%を達成することに成功した.

### 3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

#### (1) 目標・計画

##### A) 静磁場解析におけるインターフェース問題のBDD前処理の実装

磁場解析の分野ではこれまで約20年近く、東京大学の菊地文雄名誉教授が線形静磁場問題で確立した独創的な混合法的定式化を自然な形で3次元渦電流問題や3次元非線形静磁場問題に独自の工夫を加えて拡張し、ADVENTURE\_Magneticを公開してきた。ごく最近部分領域問題を直接法で解くことにより1億実自由度や約5,000万複素自由度の大規模解析を可能にした魅力を次世代計算機で更に活かすためにはもう1桁程度の計算速度の改善が望ましい状況がある(速ければ速いほど、実際の設計に用いる計算モデルを更に詳細化できる)。本研究では、この高速化に対応する研究を行い、もう1桁高速化したソフトウェアを公開していく。ここに述べた手法に基づく磁場解析ソフトウェアは、国産市販ソフトウェアは言うまでもなく国際的に見てもあまり例がない。また現在数百万自由度規模程度で留まっている電磁場解析の規模の拡大にとって現時点ですでにブレークスルーを引き起こした研究になっている。実際、大規模解析では我々の現時点のレベルを目標にする研究チームもいくつか現れているが、本研究では得意とする大規模化に更に高速性を加味することにより、追従者の上を行くPerfect Only Oneを目指す。

##### B) 熱対流解析コードの機能強化

非圧縮性粘性流解析・熱対流解析の分野では現時点のADVENTURE\_sFlowをもとに計算サービスを行っているベンチャー企業も現われている。ADVENTURE\_sFlowでは磁場解析や構造解析と同様な手法で計算しているので、高速化の検討を共通の課題として行え、入力データの共有化がしやすく連成解析が行いやすいという特長がある。低炭素社会向けシミュレーション技術に応用分野を特化し解析機能を限定してでも、この特長を早く引き出したいと考えている。

#### (2) 意義・国際社会との比較

3次元電磁場の有限要素解析はこれまでやや試行錯誤的に行われており、信頼のおける数値解法が未だ十分確立されていない状況にある。このようななかで、我々は菊地理論をベースに、工学的応用を展開するという形を採っており、国際的に見ても極めてユニークな注目すべき研究を展開している。これまでに開発されてきた文部科学省支援研究による電磁場解析ソフトウェアの骨格を一貫して提供してきたという自負もある。今後の低炭素社会に向けて電気自動車の利用が推進されているが、電磁環境適合性(EMC)のためにも電磁場解析の有用性は増している。非圧縮性粘性流・熱対流や固体力学の大規模解析も統一的な手法で研究を進めているので、それらとの連成解析が有利に行えるという利点も持っている。

#### (3) 研究内容

##### A) 静磁場解析におけるインターフェース問題のBDD前処理の実装

3次元磁場の有限要素法による解析, 特に3次元渦電流解析(複素自由度4,355万の問題が32台のPCクラスタを用い5時間弱で解けている)並びに1億自由度を最近可能にした3次元非線形静磁場解析に対しては, 領域分割法を用いる際の数値計算上の諸問題を以下の更なる高速化に関する課題に焦点を絞って研究する。

「離散化に伴い生じる超大規模(1億自由度以上)の疎な対称連立1次方程式と連立非線形方程式に対する領域分割法を意識した効率的な数値解法を確立し, 特にもう1桁の高速化を可能にする前処理方法を確立する。」

#### B) 熱対流解析コードの機能強化

3次元非圧縮性粘性流解析についてはこれまでの内容を発展させた新アルゴリズムの導入を図る。2006年7月に公開したモジュールADVENTURE\_sFlowはその後水素利用社会向けシミュレーション技術でも応用があったので, 熱対流解析の基本機能が非定常解析機能も含めて追加され, 前処理機能の強化による高速化が実現されたため, 実用レベルの有効性をチェックする段階になっている。非定常解析機能ではStokes問題のみならず, Navier-Stokes問題に対しても特性曲線法の活用により対称な連立1次方程式ソルバーを活用できることがポイントになっている。

### (4) 平成 27 年度進捗状況

#### A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

昨年度はBDD前処理の実装実現のために1コア処理に限定して三つの課題を設定した。一つはシュアコンプリメント行列  $S$  とベクトル  $p$  の積  $q$  を計算する部分を独立して利用可能にすること, 二つ目はノイマンノイマン前処理を実装させること, 三つ目はコース行列を作成し, それを既存の平行ソルバーで解くことである。この三つが実現できれば, BDDの実装はほとんど実現できると言ってもよいほどの重要な3項目になる。ノイマンノイマン前処理は2005年に一度成功した実績があるが当時の記録が紛失しており, 新たな開発を行うことになった。現時点ではコードの骨格はできたが, 残念ながら効果が全く出していない。部分領域数が大きくなると手法自体の特徴として効果が出ないのか, 何かミスをしているのかを見極める必要がある。3番目のコース行列作成部分は既存技術の適用で今のところ問題がない。予想外に時間がかかったのは最初の  $q=Sp$  の計算であり, いくつか試みた結果, LexADVのTryDDMを適用することにより, ようやく1コアのBDD前処理に見通しをつけることができた。ただし本来のBDD前処理は内蔵しているノイマンノイマン前処理ともども依然として効果がでておらず, 唯一BDD前処理を簡易化したBDD-DIAG前処理のみが収束する。前述のとおりLexADVのTryDDMを適用しているので, 現在の自由度規模が100万以内に抑えられている。この程度の規模ではBDD-DIAG前処理の効果は芳しくなく, ADVENTURE\_Magneticのデフォルト前処理になっている簡易対角スケール前処理(diag)の反復回数を減らすことができない状態である。現在, いくつかのベンチマーク問題でBDD-DIAG前処理の効果をいろいろな視点からテストしているが, いずれの場合もほぼ同様な事情になっている。マルチコアでの処理を可能とし, シュアコンプリメント行列  $S$  を陽に作成しないアプローチを可能にする等の今後の工夫が必要であると考えている。

## B) 熱対流解析コードの機能強化

このテーマは昨年度の課題として公開用ドキュメントの整備以外に以下の 4 課題を設定した. すなわち ADVENTURE\_sFlow への機能強化として

- 熱方程式部分への DDM フレームワークの適用
- 熱流束境界条件入力機能の追加
- 熱伝達境界条件入力機能の追加
- BDD 前処理における通信処理改善の検討

を図るものである. 最初の DDM フレームワークの適用は(1)のテーマの B)の研究テーマと連携しながら, 開発ライブラリのプロトタイプ (LexADV の TryDDM) のテストを兼ねたものであり, 一応利用可能になった. 2 番目, 3 番目のテーマは 1 番目のテーマが可能になった時点で, DDM フレームワークでの実現が可能になった. 4 番目は派生した問題を解決しながら検討を続けた結果, これも可能になった. 以上の成果を踏まえて ADVENTURE\_sFlow の Ver.1.0 を公開した. 今年度は自動販売機内の熱対流計算での実践を通して, Ver.1.0 の信頼性をチェックすると同時に, 燃料電池自動車の市場投入に同期させて水素漏洩時の拡散現象を熱対流のアナロジーで解く試みを本格化させる準備を行った.

今後の課題は静磁場解析同様, 熱解析の部分が LexADV の TryDDM を使っているための 100 万自由度の壁を突破することと ADVENTURE\_Thermal を参考にしながらの BDD 前処理を導入することである. これらの課題をクリアしていくことにより, 自動販売機の熱対流解析, 燃料電池自動車からの水素漏洩時の拡散解析を核にして ADVENTURE\_sFlow の産業界での応用を促進していく.

## 部分領域ごとの剛性行列の零空間の発見

( Finding of  $\text{Null } K^{(i)}$  )

| Structural Analysis   | Thermal Analysis  | Stokes Flow Analysis    | Magnetostatic Analysis         |
|-----------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------|
| The rigid body motion | A constant vector | Translation like moving | $\text{grad } Q_h _{\Omega^0}$ |



鍵になる包含関係 (  $\text{Null } S^{(i)} \subset \text{Range } Z^{(i)}$  )



局所問題の可解性 (Solvability of local problems)



BDD前処理の有効性 (Effectiveness of BDD)

Fig.2 A General Framework for a Unified Construction of the BDD Preconditioners.

### 3.3. 新規実験計測グループ

新規実験計測グループでは、計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体－構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち、「標準問題実験の検討」に焦点を当てた活動を行っている。

流体－構造連成実験を高い信頼性で実験するには、実験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円柱周りの流れ実験だけでなく、シートフラッタ試験、飛行物体の空気力特性を中心に連成実験を行ってきた。

上記の事項について、今年度は以下の3項目について報告する。

- (1) 標準問題のための弾性円柱の振動実験
- (2) 平板翼モデルのフラッタ特性の系統的整理
- (3) 飛行物体に作用する空気力特性

### 3.3.1. 標準問題のための弾性円柱の振動実験

#### (1) 目標・計画

流体－構造連成解析手法を検証するための標準問題として、低速風洞を用いた円柱の振動試験を行っている。図1は風洞試験の概要図である。風路下流に実験模型を設置して試験を行い、数値解析の検証用データを提供する。また本研究を通じて、新しい計測手法、解析手法の提案を目指す。

#### (2) 意義・国際社会との比較

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

#### (3) 研究内容

Fig. 1 は風洞試験の概要図である。出口面積  $A=0.3\times0.3\text{ m}^2$  の風洞装置にシリコンゴム円柱を固定した。円柱の直径は  $\phi=20\text{ mm}$ 、長さ  $L=160\text{ mm}$  である。シリコンゴム円柱のヤング率で  $E=9.0, 12\text{ MPa}$  である。気流速度を上昇させていくと円柱は気流に対して垂直に振動し始める。Fig. 2 は気流速度に対する円柱の変形量を示している。

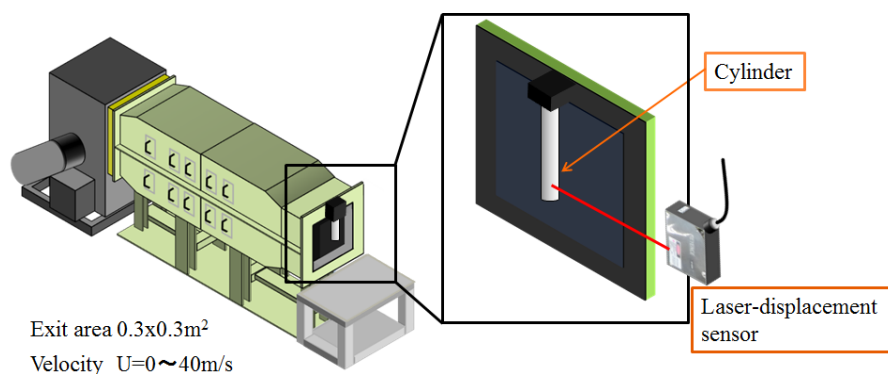


Fig.1. Schematic picture of experimental setup.

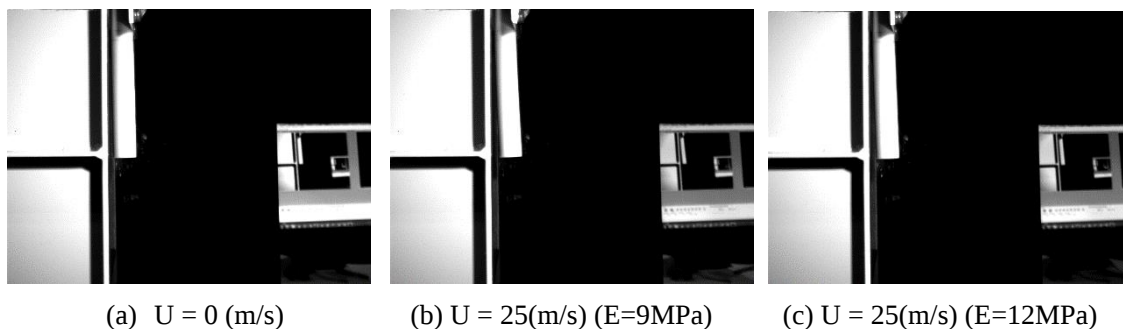


Fig.2. Deformation of cylinder at several flow velocity.

レーザ変位計を用いて、円柱の変位を測定し、FFT 解析により周波数特性を調べた。Fig. 2 はレイノルズ数とストローハル数の関係を示している。円柱は気流に対して垂直に振動しているが、レイノルズ数が上昇するにつれて  $St$  数は緩やかに減少している。これは風速の上昇に伴い、ことが分かる。円柱は  $St=0.01$  で振動していることが分かる。

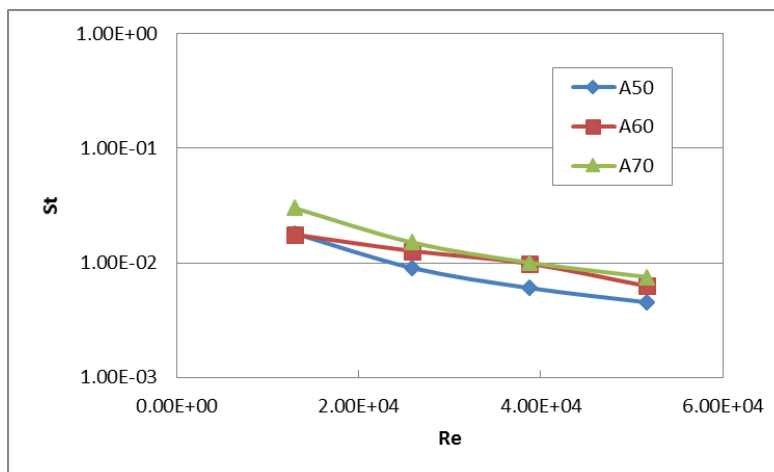


Fig.2. Frequency characteristics of oscillating cylinder.

#### (4) 平成 27 年度進捗状況

標準問題に関する実験を行い、様々なシリコンゴムの物性値について変形量を測定することができた。数値計算との比較、3次元可視化とのデータ共有を行うためにデータを整理している。

#### 参考文献

- (1) R. D. Blevins: "Flow-induced vibration", Krieger publishing company (1990) .
- (2) R. King and M. J. Prosser and D. J. Johns, On Vortex Excitation of Model Piles in Water, Journal of Sound and Vibration, Vol.29 (2), pp.169-188 (1973) .
- (3) N, Kondo, Three-dimensional computation for flow-induced vibrations in in-line and cross-flow directions of a circular cylinder, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 70, pp.158-185, (2012).

### 3.3.2. 流体－構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験

#### (1) 目標・計画

フラッタ特性に関する理論的・実験的研究は、これまで多く行われてきた。しかし、系統的にデータを整理した成果は数少ない。本研究は様々なシート材のフラッタ特性を調べて、材料と流体力学の物理量を関連付けることで、フラッタ開始速度の予測を試みる。

#### (2) 意義・国際社会との比較

翼のフラッタに関する数値計算は流体-構造連成問題の主要課題の一つである。計算機性能の向上により、予測精度の信頼性は向上している一方で、数値計算結果の妥当性を確認するために参照となる実験データは数少ない。本研究ではフラッタに関する基礎的な実験を行うと共に、

#### (3) 研究内容

Fig.1 は実験装置の全体図である。風洞装置本体の吹き出し部分にフラッタ装置を設置し、試験片である平板翼模型も同様にフラッタ装置に取り付けた。水平に設置した試験片の変位を上方から測定するために、試験片とレーザ変位計の配置は Fig. 2 の様になっている。試験片はたわみに関して、片端固定、他端自由の状態である。固定端は二枚の板で上下方向から挟み、ボルトによって固定することで構成されている。自由端は自重でたわむ形になっている。翼弦長は 40mm で固定し、翼スパンを変化させ実験を行うこととした。これら翼厚と翼サイズの2つを考慮し、翼厚は 0.3mm から 0.5mm までの間で変化させ、翼スパンを 200mm から 300mm の間で変化させた。

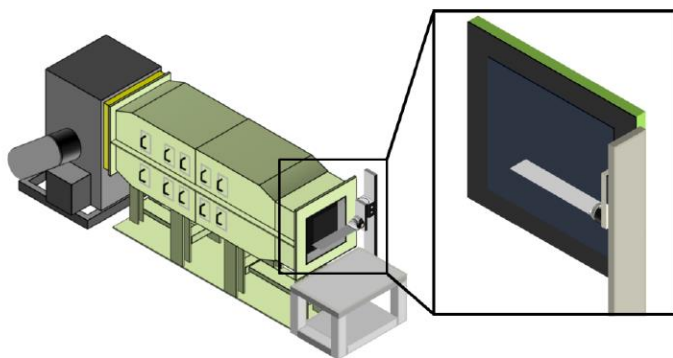


Fig. 1 Experimental setup of wind tunnel.

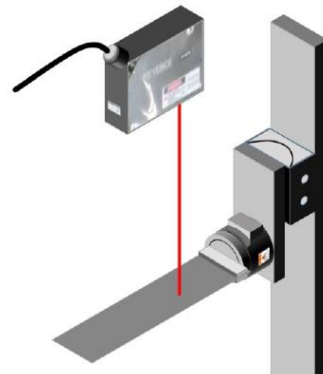


Fig. 2 Laser displacement sensor.

Fig.3 は平板翼模型をスパン、翼厚についてフラッタ開始速度を示した図である。平板翼のスパン長が短いほどフラッタ開始風速が増すことがわかる。また、平板翼の長さが長くなるにつれて、フラッタが発生しやすくなり、どの翼厚でもフラッタ限界風速は単調減少する。翼厚を 0.3mm から 0.5mm に変化させると一様にフラッタ限界風速が増加している。Fig.4 は材質に着目して翼厚

0.3mm, 翼弦長 40mm の平板翼について材質(ヤング率)を変えた実験を行い, スパン長とフラッタ開始速度を整理した結果である. 黄銅は 105 [GPa], アルミニウムは 70.6 [GPa], ステンレスは 205 [GPa]である. ヤング率が増すとフラッタ開始速度は高くなっている. これらの傾向は, 従来のフラッタ試験でも確認ができています.

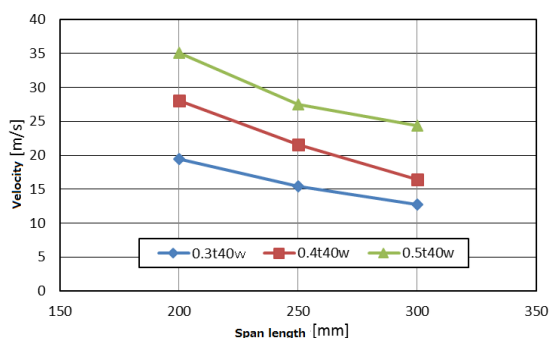


Fig.3. Comparison of flutter velocity to span length.

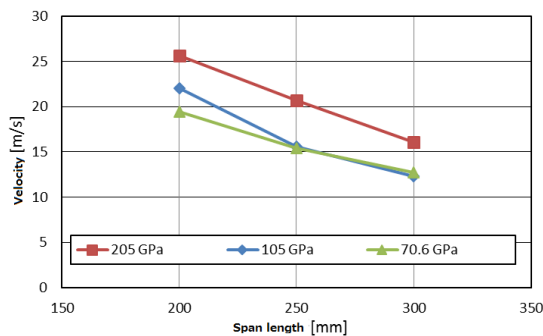


Fig.4. Characteristics of flutter velocity to Young modulus.

Fig.5 はアルミ材のフラッタ開始速度について系統的に整理した結果である. 縦軸はフラッタ周波数を固有振動数で, 横軸は材料特性を流体特性で無次元化した結果である. アルミ板は概ね固有振動数でフラッタ振動しており, フラッタ開始速度は20~30の範囲内で始まることが判る. この結果は, ここで用いたパラメータで実験結果を整理すると, 横軸の値から材料毎によりフラッタ開始速度が予測できることを意味している. 現在, その他の材料についても実験に取り組んでおり, 同様の整理を試みている.

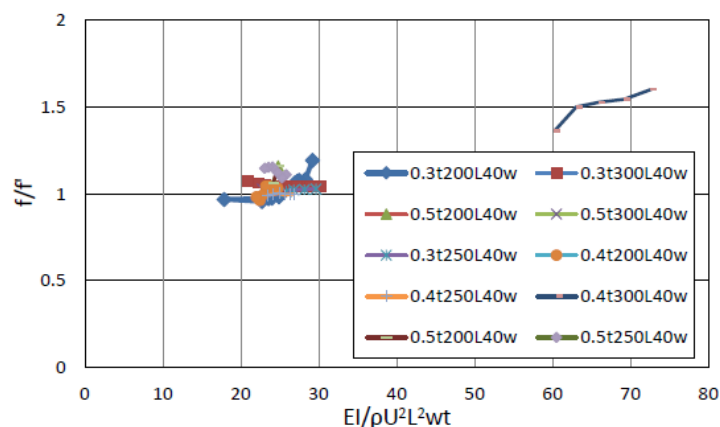


Fig.5. Characteristics of flutter frequency to FSI parameter.

#### (4) 平成 27 年度進捗状況

平板翼に関する実験を行い, フラッタ開始速度とフラッタ周波数を無次元化して整理した. その結果, 同じ材料であれば形状の違いによらず, フラッタ開始速度を予測できる可能性を示した. 材料特性の違いについても同様の整理を試みている.

## 参考文献

- (1) Eloy, C., Souilliez, C., Schouveiler, L., "Flutter of a rectangular plate", J. Fluids Struct., 23, 904-919 (2007).
- (2) 山口信行, 伊藤恵介, 緒方正幸, 柔軟ウェブ基礎形態のフラッタ限界とその挙動に関する研究(第 1 報, フラッタ限界の予測と風洞試験結果), 日本機械学会論文集(B 編), 67 巻, 663 号(2001-11), pp. 2738-2745
- (3) 黒川雄太, フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定: その 2 重量比およびアスペクト比が風荷重に与える影響(膜構造:風洞,構造 I), 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, (2007).
- (4) 伊藤憲一, 剛体と弾性体を用いた翼のフラッタ特性に関する研究(GS 流体力学(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).
- (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)
- (6) 小松敬治, 日本機械学会宇宙工学部門宇宙工学ガイド機械構造動力学, (2004)

### 3.3.3. 飛行物体に作用する空気力特性

#### (1) 目標・計画

運動する物体に作用する空気力特性を把握することは流体－構造連成解析問題の課題の一つである。風洞試験では一定風速で実験が行われることが殆どであるため、定風速下での空気力特性は系統的に整理されているが、加速度運動する物体に作用する空気力特性は調べられていない。そこで、本研究では、加速度運動する物体に作用する空気力を測定し、定速度下における空気力特性と比較することで、加速度運動する際の効果を系統的に整理することを目的としている。2014年度は実験システムの構築を行い、ボールなどの単純形状で実験を行う。2015年度以降はロケット模型に対して作用する空気力特性を調べ、その特徴を明らかにする。

#### (2) 意義・国際社会との比較

物体に作用する空気力特性を調べる風洞実験、数値計算は多数行われているが、一定速度での解析<sup>(1)</sup>であり、加速度運動時の空気力特性を調べた研究は数少ない<sup>(2,3)</sup>。本研究の目的は、加速度運動する物体に作用する空気力を実験的に測定し、その特性を明らかにすることである。研究成果は、航空機や宇宙機を設計する上で、従来とは異なる新機体形状を提案するために活かされるものと考えられる。

#### (3) 研究内容

物体に作用する空気力や物体周り流れの特性を把握することは、流体力学において主要な研究対象の一つである。ロケット等の空力特性を調べるための実験的研究は、模型を用いた風洞試験が数多く行われている。しかし、風洞試験は一定風速、同一の姿勢で行われるため、そこから把握できるのは定常状態の空力特性である。そのため、ロケットのように非定常運動する物体の空力特性を把握するには、風洞試験に代わる実験を行う必要がある。本研究の目的は、ロケット模型の射出試験を行い、画像解析により非定常運動時の空力特性を調べることである。

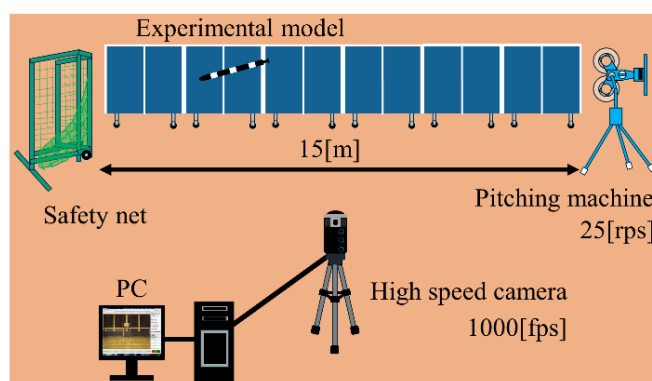


Fig.1. Experimental setup.

Fig.1 は実験の概要を示している。ロケット模型は CAD データを基に 3D プリンタで製作した。画像処理のために、模型の一部を白黒に塗装した。本実験では、日本 JUGS 社のオールラウンドピッチングマシンを使用して、模型を射出した。射出後の動画撮影にはノビテック社の高速度カメラ

Phantom Miro M310 を使用した。動画を画像に分割し、10 フレーム毎に抽出した。画像には歪み補正及び二値化処理を施す。3 点のピクセル座標を抽出し、模型の重心座標や角度の時間変化を調べた。得られたデータを最小二乗法により 4 次関数で近似し、時間微分することで重心位置での速度と加速度、重心回りの角速度と角加速度を求めることができる。画像解析によって求めた物理量を用いて、式(1)から抵抗係数  $C_D$  を求めた。

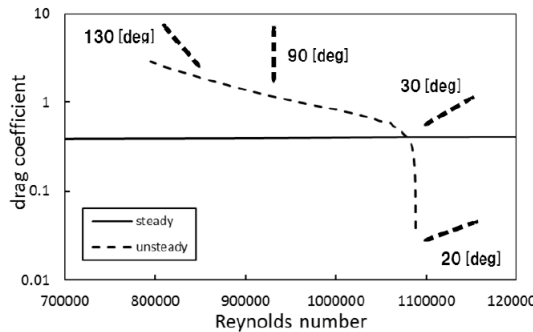


Fig. 2 Drag coefficient to Reynolds number.

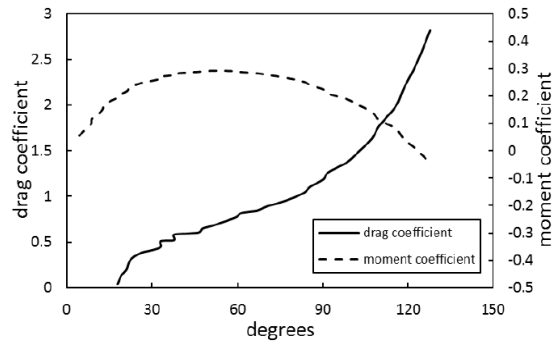


Fig. 3 Drag coefficient and momentum coefficient to pitch angle.

Fig.2 は抵抗係数とレイノルズ数の関係を示している。定常状態の抵抗係数は一定値を取るのに対して、非定常状態では様々な値を示すことが分かる。射出後の模型は投影面積を変化させるため、空気抵抗の作用が大きくなる。よって速度の減少と加速度の負の方向への増大から、抵抗係数は増加の傾向を示す。次に、モーメント係数  $C_M$  を求め、Fig.3 の様に抵抗係数とともにピッチ角度で整理した。模型射出後、20～30[deg]付近では模型のノーズ周りで空気力の影響を強く受けるため、暫くの間加速し、90[deg]を過ぎるとノズル周りで空気力の影響が強くなるため角速度が小さくなると考えられる。このとき空気力を受ける面積が増すため、抵抗係数が増す。

#### (4) 平成 27 年度進捗状況

非定常状態時の空力係数は速度、加速度、角速度、角加速度などに依存することを確認した。これは、非定常状態時の空力特性を調べる際、従来の風洞試験の様に系統的な整理が出来ないことを示している。現在、新しいデータ整理の試みに取り組んでいる。

#### 参考文献

- 1) 谷口哲也, 宮寄武, 清水鉄也, "硬式野球ボールに働く空気力の測定", ながれ, 25, (2006), pp.257-264.
- 2) 今野友博, 市川誠司, 窪田佳寛, 望月 修, "水中を落下する球の抵抗係数", 日本機械学会論文集(B編), 79 巻 798 号, (2013), pp.151-1.
- 3) T. Nosaki and N. Fujimatsu, Trajectory analysis based on aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion,, J. of Visualization, pp.1-8, (2015).

### 3.4. 精度・妥当性検証グループ

本グループでは、シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・妥当性を向上させるための技術の研究を行っている。シミュレーションも実験も誤差を含んでおり、精度の検証および改良は重要なテーマである。具体的には、(1)効率的で精度のよい解析技術の研究、(2)最適化の数学的構造の研究、(3)物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発、(4)オープン CAE (固体の有限要素法)を用いた精度検証、などの研究を行っている。一番目のテーマは昨年に引き続き段ボールの解析の研究を行った。本年度は、実験のばらつきを考慮した精度・妥当性の検証に結びつけるため、ベイズ推定を用いた材料定数の設定手法を研究した。その結果、ベイズ推定の有効性を確認できた。また、最適化の理論的研究として、最適化理論の数学的構造の研究を行い、最適化の一般化と自動化に関する研究の端緒とした。材料データベースに関しては、昨年に引き続きデータベースの構築の研究を行っているが、昨年度設計したデータ構造を用いたプロトタイプ構築に着手した。複数の SPARQL エンドポイントを評価し、スケーラビリティには劣るもののオントロジー API などを持ち、セマンティック・ウェブに係るソフトウェア環境である Apache Jena の一環として開発されている Fuseki を今後の拡張性などの観点から採用することとした。オープン CAE を用いた精度検証については、オープン CAE の一例としてフランス電力 (EdF) が開発した Salome-Meca<sup>[1]</sup> を取り上げ、引張試験機などユビキタスな試験装置を用いた試験や文献記載の構造モデル試験を例題として、精度検証例の蓄積を進めている。本年度は、最も単純で、材料非線形性と幾何学的非線形性とを同時に考慮する必要がある、延性材料の引張試験<sup>[2]</sup> を取り上げた。今後は、接触と摩擦を伴う非線形問題となるスモールパンチ試験<sup>[2]</sup> や、非定常熱伝導による熱疲労試験など<sup>[3]</sup> 順次、難易度が高いベンチマークに取り組む。

### 3.4.1. ベイズ推定を用いた効率的精度解析技術の開発

#### (1) 目標・計画

物流のみならず近年、生活の身近なものとして段ボールは様々な用途で利用される。非常に多くの段ボール製品が社会の中に存在するが故、正確な強度設計が要求されるが段ボールの設計は過去の経験や試行錯誤に依存しており数値解析による設計は浸透していないのが現状である。その原因のひとつに段ボールが異方性特性を有する構造体であり、繊維方向において弾性的性質に依存性があるため材料特性等のパラメータを十分に考慮して取り扱わなければならないことが言える。本研究では異方性材料を解析する際、重要となる材料特性を万能試験による実験値と数値解析より効率良く推定する手法を確立する。また推定した材料特性は実験値と数値解析の不確定性因子を含むため一概に妥当性を保証できるとは言いがたい。そのような不確定性の取り扱いについては Model Verification & Validation(V&V)<sup>[1]</sup>に示されその中でベイズ推定<sup>[2]</sup>が有効であり不確定性の低減が可能であるとされる。そこでベイズ推定を用いて推定した材料特性の妥当性を定量的に評価することを目的とする。

#### (2) 意義・国際社会との比較

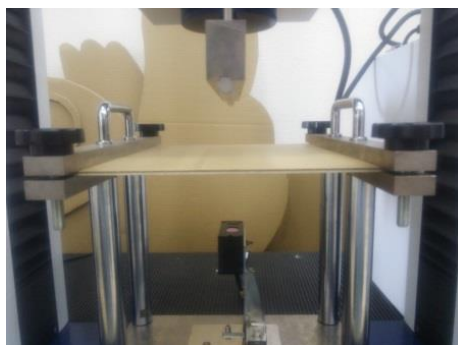
段ボールの用途は近年重要性を増し、リサイクル性の高さからも今後より注目されると期待できる。しかし段ボール構造の数値解析は動的シミュレーションによる設計<sup>[3]</sup>、均質化法を用いた研究<sup>[4]</sup>等の研究がなされているが一般的な手法は構築されておらず段ボール製品の効率的な生産を行うには精度の良い数値解析手法の開発が必要である。また、解析結果の妥当性・有効性を検証することは工学的視点から考えてみても重要な問題であり、その中でもベイズ統計学に基づいた信頼性評価は機器損傷率、原子力耐震工学等の原子力分野において数多く適応されその有効性が示され世界各国で行われている。本研究で提案した解析手法を有効に用いるためにモデル化、材料特性、境界条件等の潜在的な不確定性を把握し解析結果の妥当性を検証することは非常に意義のあることと言える。

#### (3) 研究内容

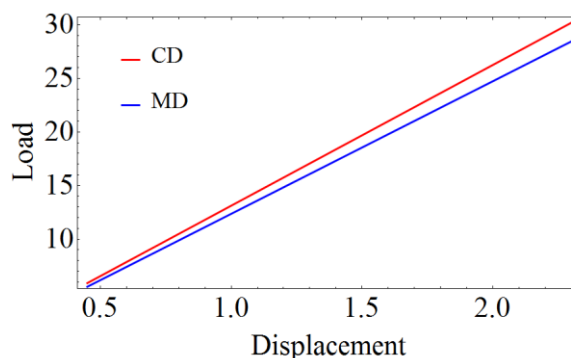
本研究では段ボールの材料特性を推定するため、曲げ強度試験による実験値と数値シミュレーション解析及び両者の結果を繋ぐための実験値と数値シミュレーションの融合から構成される。以下に提案手法による材料特性推定の流れを示す。

#### 曲げ強度試験

段ボールは異方性を有する構造体であり垂直方向(CD)、抄造方向(MD)でそれぞれ弾性的性質が異なる。そこで本研究では実験毎に新たな試験片を使用するものとし図 1.(a)示す試験方法により CD, MD に対してそれぞれ 10 回曲げ強度試験を行った。また、本研究では実験値の線形範囲の一部を議論の対象とし解析を行う。解析範囲の実験値に対し最小二乗法により CD, MD の回帰直線を求めた。図 1.(b)に求めた CD, MD の回帰直線を示す。



(a) Bending test of corrugated cardboard

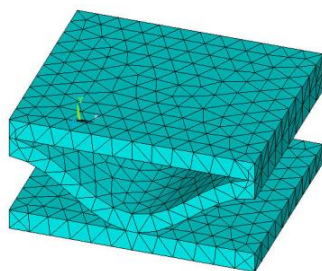


(b) Regression line of CD and MD

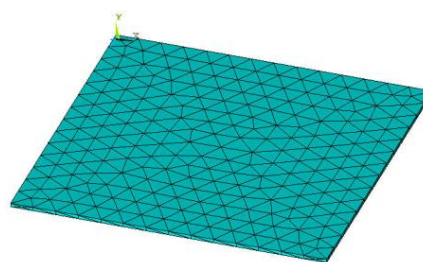
Fig.1. Testing by universal testing machine

### 均質化解析

段ボールの基礎を構成する段は波状に形成された中芯を 2 枚のライナと呼ばれる原紙で貼り合わせて作成される。段ボールを元にした製品を対象に数値解析を行う場合、段ボールを構成する段が非常に密であるためモデル化や境界条件の設定に手間がかかり、各段に対してメッシュを切らなければならない通常の有限要素解析では離散化が困難であり計算コストと時間を必要とするため実用的ではない。そのような中で段のように周期性な微視構造を有する不均質体を効率よく解く解法として均質化法<sup>[5]</sup>がある。均質化法は単位周期である微視的基本構造単位(ユニットセル)と解析領域全体を対象とする全体構造の異なる 2 つの空間スケールから、支配方程式を連立して解くことにより微視一巨視連成挙動解析を可能にするものである。図 2. (a)段をユニットセルとするマイクロモデル、図 2.(b)曲げ強度試験で用いた試験片を全体構造とするマクロモデルをそれぞれ示し、CD, MD それぞれ均質化法による数値解析を行った。



(a) Macro model



(b) Micro model

Fig.2. Finite element model

### 材料特性探索の定式化

回帰直線 CD, MD より一意にお決定した荷重から求めた, 変位にフィットするような材料特性の組み合わせをそれぞれ均質化法を用いて探索を行う.  $F_{20}$ を回帰直線 CD, MD の一意に決定した荷重 20N とし  $e_1, e_2$ をそれぞれライナと中芯とすると式 1 に示すように定式化できる.

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

### 応答局面モデル

前節による解析結果から CD, MD それぞれ応答曲面を作成し, 図 3 に示す応答曲面の解空間より交点の座標を材料特性の推定値とする.

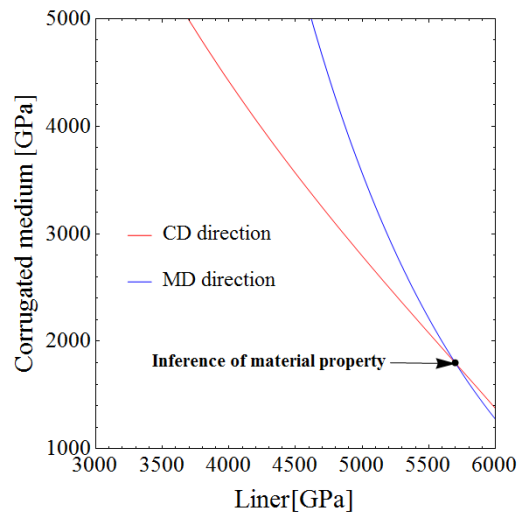


Fig.3. Intersection of coordinate by response surface of CD and MD

### 材料特性の検証

本研究で求めた材料特性が有効であるか検証を行う. 図 4 は均質化法を用いて線形範囲上の荷重を境界条件とし解析を行い, 回帰直線と比較した結果をそれぞれ示す. 比較結果より回帰直線の変位データを合理的に数値シミュレーションに取り込むことにより材料特性を求めた. したがって, CD, MD それぞれ回帰直線の値と概ね一致しており材料特性の有効性が確認できた.

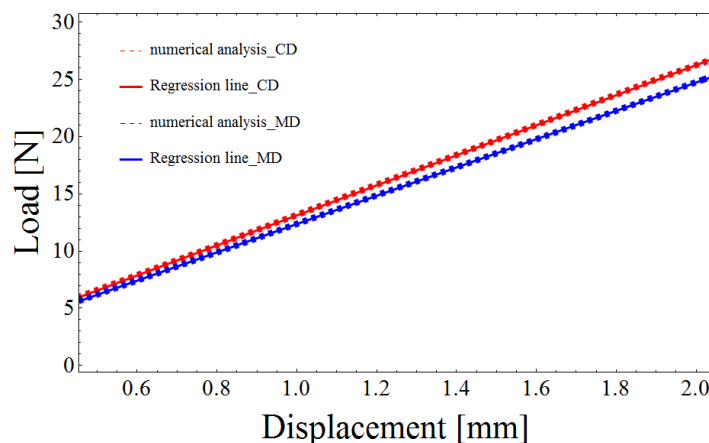


Fig.4. Comparison of numerical analysis and regression line

### ベイズ推定による不確定性低減

ベイズ推定により提案手法により推定した材料特性の不確定性低減を図る。ベイズ推定は解析者の予備知識や現在得られている情報を事前分布とすることで事後分布を決定するものであり、ベイズの定理は式(2)に示すことができる。ここでモデルパラメータ $\theta$ を CD, MD の応答曲面、データ D を各々の実験値に対して回帰直線を求め、それらの回帰直線において 20N における変位、CD データ 10 個, MD データ 10 個, 計 20 データを用いた。

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

### 事前分布の設定

事前分布は解析者の主観的な情報を反省させることができる。本研究では以下に示す事前分布による不確定性低減の比較を行う。Case A では予備知識がない場合すべてのパラメータを一様と見なす一様分布, Case B では過去の経験から明確ではないがモデルパラメータの値の範囲をある程度把握している。よってできる限りモデルパラメータの不確定性に対して、反映させるようにそれらの情報において工学的検討を行ったガウス分布, Case C では推定したモデルパラメータの値を用いた非常に詳細な情報を反映させた等方性ガウス分布を設定した。

### 事後分布の比較

図 5 は Case A, B, C の事後分布を示し、また事後分布を定量的に評価するために表 1 に平均と分散の値を示す。図 5 及び表 1 より Case A, B より本研究で用いたデータ数では材料特性の妥当性を保障できるほど不確定性が低減されたとは言いがたく、また Case B では平均値の推定に対し設定した事前分布の影響を受けたと考えられることが原因で設定した事前分布に偏る結果となり、事前分布の設定に大きく影響を受けたことが示された。Case C ではより正確な事前分布を反省させたことで少ないデータ数においても不確定性を図られたといえる。

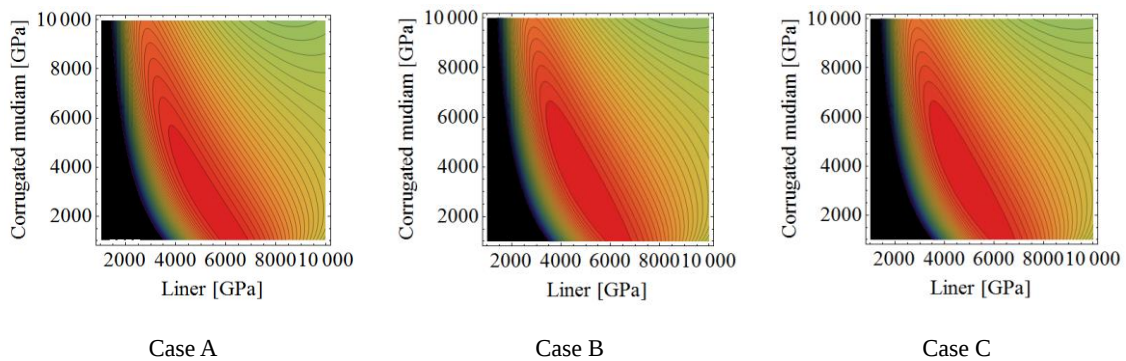


Fig.5. Prior Distribution

Table1. Comparison of average and covariance

|            |                   | Case A | Case B  | Case C  |
|------------|-------------------|--------|---------|---------|
| Average    | Liner             | 5494.9 | 4760.53 | 5629.13 |
|            | Corrugated medium | 2211.7 | 3491.87 | 2001.32 |
| Covariance | Liner             | 6892.2 | 1046.41 | 2392.13 |
|            | Corrugated medium | 1607.0 | 3342.29 | 5470.91 |

#### (4) 平成 27 年進捗状況

今年度は曲げ強度試験の実験値と均質化法による数値シミュレーションより応答曲面を用いて段ボールの材料特性を推定しベイズ推定による精度妥当性を検証した。本研究で示したベイズ推定では不確定性を十分に考慮できておらず、より高度な議論を行うために正確に不確定性を把握し反映させることが今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] Alvin, K. F., et al. “Uncertainty quantification in computational structural dynamics: a new paradigm for model validation.” Society for Experimental Mechanics Inc, 16th International Model Analysis Conference. Vol 2. 1998.
- [2] 渡辺澄夫: ベイズ推定の理論と方法, コロナ社, 2012
- [3] 中川幸臣, 丹羽一邦, “包装設計の FEM 解析における段ボールのモデル化の検討”, 日本包装紙学会誌, Vol.14, pp.317-327, 2005.
- [4] 立体紙製品の構造物に関する研究, 独立行政法人 産業技術研究所.
- [5] 寺田賢二郎, 弓削康平, 菊池昇, “均質化法を用いた複合材料の弾塑性解析 第一報 定式化”, 日本機械学会集 A 編, 61(590), pp.2199-2205.

### 3.4.2. 最適化の代数的構造の研究

#### (1) 目標・計画

工学における最適化, すなわち不確実性の下での多峰性目的関数の最小化・最大化の, 代数的構造を明らかにする事が目的である.

#### (2) 意義・国際社会との比較

我々の研究の完成は, 「人の幸福とはなにか?」という難問に代数的側面から回答を与えることを意味する. 工学における最適化(以下, 工学最適化)はベイズ決定の枠組みをつかって良く表現することができるが, このベイズ決定はジェレミ・ベンサムから始まる功利主義の改良バージョン(不確実性に対応)と言える. 功利主義においては, 人々の幸福が大きくなるよう最適化された政策が良い政策である.

#### (3) 研究内容

最適化プログラムは階乗を求めるプログラムで喩えることができる. 引数の階乗を返すプログラム  $\text{fac}$  は,

$$\begin{aligned}\text{fac}(0) &:= 1 \\ \text{fac}(x) &:= x * \text{fac}(x - 1)\end{aligned}$$

と定義でき, たとえば  $\text{fac}(3) = 6$  である. この 6 を  $\text{fac}$  の不動点と呼ぶ. この不動点を最適値にたとえれば, 大域的最適化とは複数の不動点を推定しつつ, 更にそれらの中から最も良い不動点を推定するプロセスに他ならない.

プログラミングにおける例外や副作用などの概念は普遍代数(cf. [Adámek et al. 10])や余代数(cf. [Rutten 00])を用いて表すことが出来る. たとえば[Moggi 91]のような普遍代数の文脈では, 例外と副作用はそれぞれ  $TA = A + E$  および  $TA = (S \times A)^S$  となる. また, **interactive output** と **nondeterminism** のモナドを組み合わせた  $TA = \mu X. \mathcal{P}(A + (Act \times X))$  によって並列計算を表すこともできる[Benton et al. 02].

工学最適化とはこの並列計算のモナドに近い. なぜなら最適化プログラムは目的関数(物理実験や FEM)というシステムとインタラクティブにやり取りし(**interactive output**), また多峰性目的関数の最適化中はどの不動点が大域解なのか明らかではない(**nondeterminism**)ためである.

**(4) 平成 27 年度進捗状況**

確率的遷移システム[Larsen & Skou 91] [de Vink & Rutten 99]を工学最適化における目的関数と仮定し, そのシステム(余代数)をバイズ決定[Culbertson & Sturtz 14]の枠組みで最適化するシステムの代数的性質を調査した.

**参考文献**

- [Adámek et al. 10] Adámek, Jiří, Jiří Rosický, and Enrico Maria Vitale. "Algebraic theories: a categorical introduction to general algebra." Cambridge University Press, 2010.
- [Benton et al. 02] Benton, Nick, John Hughes, and Eugenio Moggi. "Monads and effects." *Applied Semantics*. Springer Berlin Heidelberg, 2002. 42-122.
- [Culbertson & Sturtz 14] Culbertson, Jared, and Kirk Sturtz. "A categorical foundation for Bayesian probability." *Applied Categorical Structures* 22.4 (2014): 647-662.
- [de Vink & Rutten 99] de Vink, Erik P., and Jan JMM Rutten. "Bisimulation for probabilistic transition systems: a coalgebraic approach." *Theoretical Computer Science* 221.1 (1999): 271-293.
- [Larsen & Skou 91] Larsen, Kim G., and Arne Skou. "Bisimulation through probabilistic testing." *Information and computation* 94 (1991): 1-28.
- [Moggi 91] Moggi, Eugenio. "Notions of computation and monads." *Information and computation* 93.1 (1991): 55-92.
- [Rutten 00] Rutten, Jan JMM. "Universal coalgebra: a theory of systems." *Theoretical computer science* 249.1 (2000): 3-80.

### 3.4.3. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発

#### (1) 目標・計画

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

#### (2) 意義・国際社会との比較

材料物性に関するデータベースは各所で開発されているが、統一されたフォーマットは無く、NIST, NIMS などによってデータ交換のための標準を作成する試みが行われてきたが現在のところ定まった標準がない。データ交換のためのフォーマットが統一されることにより、分散したデータベースの統合利用に加え、シミュレーションソフトウェアなどからデータベースを直接参照できるようになる。

米国において始まったマテリアルズ・ゲノム・イニシアティブの影響を受け、2014 年から我が国においてもマテリアルズ・インフォマティクスに関連する研究プロジェクトが注目され、いくつかの国内プロジェクト、基盤整備が始まった。芦野はこのうちの一つである戦略イノベーションプログラム・革新的構造材料のマテリアルズインテグレーション(MI)に分担者として 2014 年度より参画している。MI の最初の目標は構造材料溶接部の特性評価のための統合システム開発であり、この中でセマンティック・ウェブ技術を用いた経験式などの数式・データ・シミュレーションを連携させるためのデータ構造開発を行っている。

海外でのマテリアルズ・インフォマティクス研究では機能性材料、Ni 基耐熱超合金、鋳造シミュレーションなどが主たる対象であり、構造材料、特に鉄鋼材料の溶接部はマイクロ組織も複雑であり計算による物性の推定が困難であることもあって対象となっていない。我が国では産業界での必要性などからあえて困難な対象を選んで研究対象とすることとなった。また EU では、Horizon 2020 プログラムの一環として原子炉材料の金属疲労について研究する INCEFA PLUS(INcreasing Safety in NPPs by Covering gaps in Environmental Fatigue Assessment)に関連して、疲労の試験データフォーマット標準化を検討するワークショップ CEN/WS INCEFA を 2016 年 1 月に立ち上げるとの案内を受け、参加を予定している。

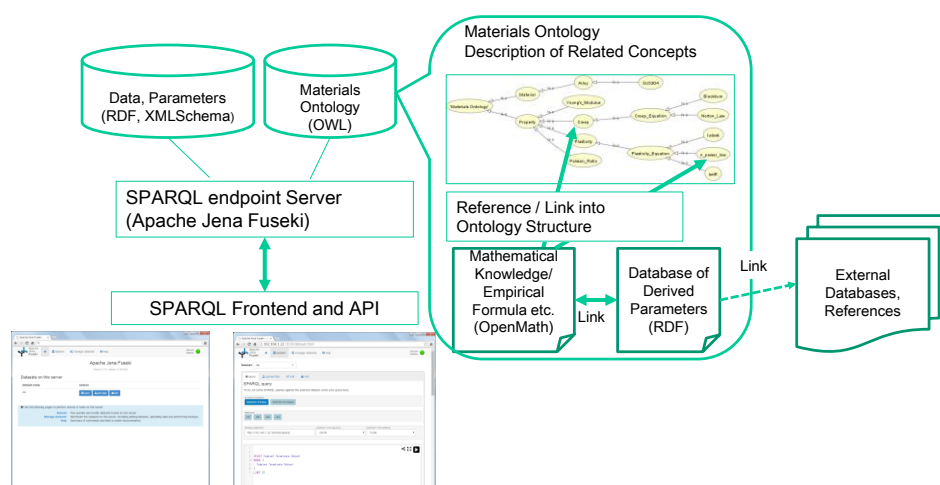
#### (3) 研究内容

zセマンティック・ウェブの一連の規格である RDF (Resource Description Framework), OWL (Web Ontology Language) , RIF (Rule Interchange Format), および数式の意味内容を記述する OpenMath など XML を用いた記法を用い、既にある程度知見の整備されている機械試験に関連した経験式、推論規則、データを記述してリンクし、検索言語 SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language)を用いて検索する。

溶接の計算機支援は従来から溶接学会などにおいて多くの研究があるが、本研究では単一の知識ベース、あるいは計算ソフトではなく、それぞれの要素をリンクして相互参照できるようにし、ユーザや研究者のノウハウや知識を集合知として連携してゆくことのできる構造を目指す。

#### (4) 平成 27 年度進捗状況

戦略イノベーションプログラムの一環として昨年度設計したデータ構造を用いたプロトタイプ構築に着手した。複数の SPARQL エンドポイントを評価し、スケーラビリティには劣るもののオントロジー API などを持ち、セマンティック・ウェブに係るソフトウェア環境である Apache Jena の一環として開



発されている Fuseki を今後の拡張性などの観点から採用することとした。

Prototype data structure for SIP data system.

サンプルデータとしては、クリープ・材料強度などに関する代表的な構成方程式と材料毎に作られたパラメータセットを RDF および OpenMath 形式で保存し、SPARQL により検索することが出来ることを確認した。また、溶接の際の冷却時における相変態を示す CCT 線図, TTT 線図を組成から予測するためのプログラムについてこれらのデータ標記形式を用いた記述についての検討を行った。

### 3.4.4. オープン CAE(固体の有限要素法)を用いた精度検証

#### (1) 目標・計画

製造業の設計現場をはじめとして広く用いられている固体の有限要素解析に対する「解析の品質確保」の重要性は広く認識されている通りである。企業でよく使用されている商用ソルバでは、ソルバ開発元によるソフトウ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、変更ができる一方で、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<sup>[1]</sup> を取り上げ、引張試験機などユビキタスな試験装置を用いた試験や文献記載の構造モデル試験を例題として、精度検証例の蓄積を進める。本年度は、最も単純で、材料非線形性と幾何学的非線形性とを同時に考慮する必要がある、延性材料の引張試験<sup>[2]</sup> を取り上げた。今後は、接触と摩擦を伴う非線形問題となるスモールパンチ試験<sup>[2]</sup> や、非定常熱伝導による熱疲労試験など<sup>[3]</sup> 順次、難易度が高いベンチマークに取り組む。

#### (4) 平成 27 年度進捗状況

##### (a) 解析対象

試験データとして文献<sup>[2]</sup>記載の低合金鋼 2.25Cr-1Mo 鋼の室温引張試験データを取り上げた。解析対象は図 1 に示す平行部直径 10 mm, ひずみ計測部長さ 50 mm の標準引張試験片である。品質管理の目的で行われる通常の引張試験では, 0.2%耐力を決定できる程度までは低速度で引張り, その後は伸び計を外して, 引張速度を高めて破断させるが, この試験では最大荷重到達以降まで同一速度 0.2 mm/min で引張り, 伸び計測を行っているため, 破断前後の挙動を含めて検証が可能になっている。

##### (b) 解析方法

解析にはオープン CAE システム, Salome-Meca 2013.2 に内包されたソルバ Code\_Aster Ver. 11<sup>[1]</sup>を使用した。他のソルバとの比較を容易にするため, 解析モデルや方法をできるだけ単純化している。解析モデルは図 1 の平行部を取り出し, 図 2 の 1/4 軸対称モデルとした。ただし, くびれを生じやすいよう半径の 1/1000 だけ片側を小さくする初期不整を導入している。

要素分割は, 図 2 のように正方形均等分割とし, 要素分割のノウハウに起因する差異を排除した。下端(試験片の中央部)は軸方向変位固定(Code\_Aster のキーワードでは DDL\_IMPO), 上端(変位計測部末端)は軸方向変位従属(同, LIAISON\_UNIF)とし, 1 点を変位制御で引っ張った。時間増分の影響を排除するため, 最大変位 10 mm までを均等 100 ステップ分割とした。商用ソルバでデフォルト値としてよく用いられる 0.1 では, 数値誤差によるくびれ位置の不整合が生じたため, 収束判定は厳しめにし, 相対残差力 100 万分の 1 以下に設定した。

材料特性の設定の設定にあたっては以下に 2 通りを想定した。市販の商用ソルバのいくつかで, マニュアル上は, Cauchy の応力で応力を定義する旨の記載があり, その記述から判断すると真応力が用いられているように読み取られる恐れがあるが, 剛性行列の生成に用いる変位-ひずみ行列(B Matrix)を解析ステップごとに更新する大変形解析では確かに真応力と真ひずみとが計算されるが, 更新しない微小変形解析では, 特別なデータ変換を行わない限り, 応力-ひずみ行列(D Matrix)で使用する関係に無関係に公称応力と公称ひずみが計算されることになる。ソースコードが確認できない商用ソルバでは, マニュアルの記述から推定せざるを得ないことから特に注意を要する。

ここでは, 引張試験データから最大荷重点より以前のデータをそのまま用いる公称応力-公称ひずみ曲線(nominal stress-strain curve)を作成し, 解析にあたっては, 最大荷重点よりも高ひずみ側は応力を一定(すなわち加工硬化係数がゼロ)とした。作成した曲線を試験データと比較して図 3 に示す。

大変形解析用の真応力-真ひずみ曲線(true stress-strain curve)には, 上記の最大荷重点よりも低ひずみ側の塑性ひずみデータを ベキ乗則(Ramberg-Osgood 則)で近似し, 高ひずみ側は同則をそのまま外挿して用いることとした. 両社の比較は図 3 に示す.

解析ケースとしては, 微小変形解析(Code\_Aster のキーワードでは PETIT)と大変形解析(同, SIMO\_MIEHE)を行い, 両方で 2 つの応力-ひずみ曲線を用いることで 4 ケースを取り上げた.

### (c) 解析結果

解析の結果得られた変形状態を図 4 に, 相当塑性ひずみのカラーコンターとともに示す. 典型的なくびれ形状が再現できていることが確認できる. 解析の結果得られた変位と変位制御エッジの荷重反力とから, 試験データと比較可能なみかけの公称応力-公称ひずみ曲線を算出して, 試験データと比較して図 5 に示す.

図 5 から, (b)にて指摘した通り, 微小変形解析(PETIT)を行う場合は, たとえ D マトリックスで Cauchy 応力を前提としていても, 公称応力-公称ひずみ曲線(Nominal SS Curve)を用いることで試験と整合する結果が得られることが確認された. また, この方法でも最大荷重を精度よく推定できる. 大変形解析(SIMO\_MIEHE)を行う場合は, 真応力-真ひずみ曲線(True SS Curve)を用いることで, くびれ発生後を含めて試験と整合する結果が得られた.

マニュアルの記載を根拠に, 微小変形解析であっても真応力-真ひずみ曲線を用いると, 試験よりも高めの応力を算出するだけでなく, 最大荷重が推定できないことになる.

### (d) 解析結果のまとめ

もっとも単純な非線形問題として延性材料の引張試験を取り上げたが, 応力-ひずみ曲線の決定方法や収束判定等において解析の品質を維持するためのノウハウが周知されていない部分があり, 微小変形解析を行う場合は公称応力-公称ひずみ曲線を用い, 大変形解析を行う場合は真応力-真ひずみ曲線を用いるべきことが, 本オープンCAEソルバ, Code\_Aster でも同様であることを確認した. 今後はスモールパンチ試験や非定常熱伝導-熱応力解析に対しても同様な検証を進める.

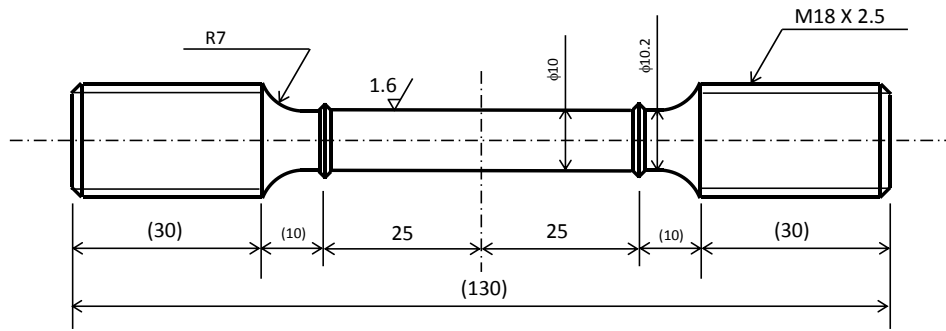


Fig.1. Dimensions of the tensile test specimen analyzed

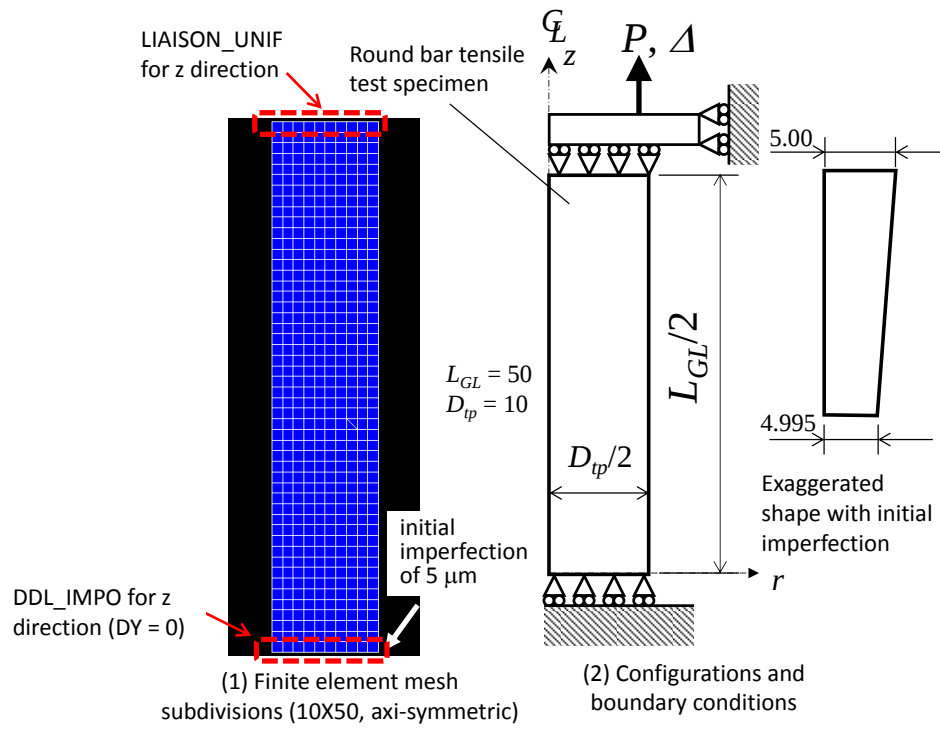


Fig.2. Analytical model of the tensile test specimen with initial imperfection

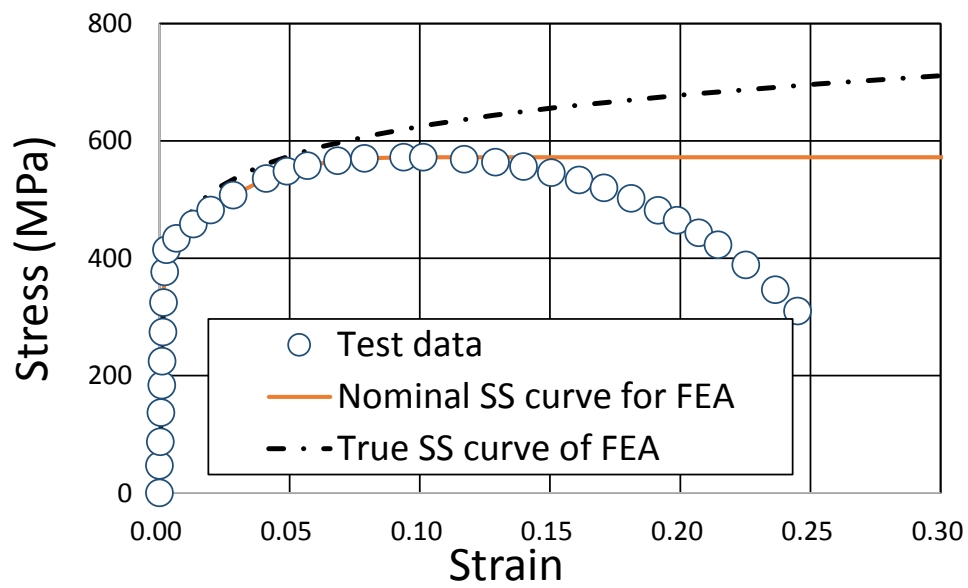


Fig.3. Non-linear stress-strain curves used in the analysis compared with the test data

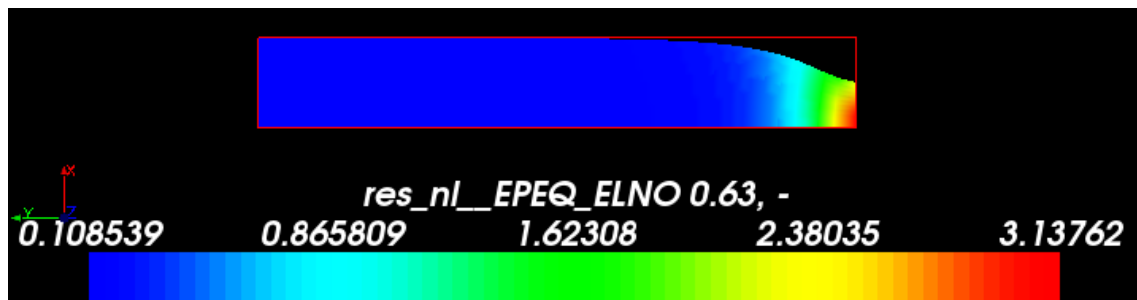


Fig.4. Deformed shape and equivalent plastic strain distribution at the increment producing 25% of nominal strain

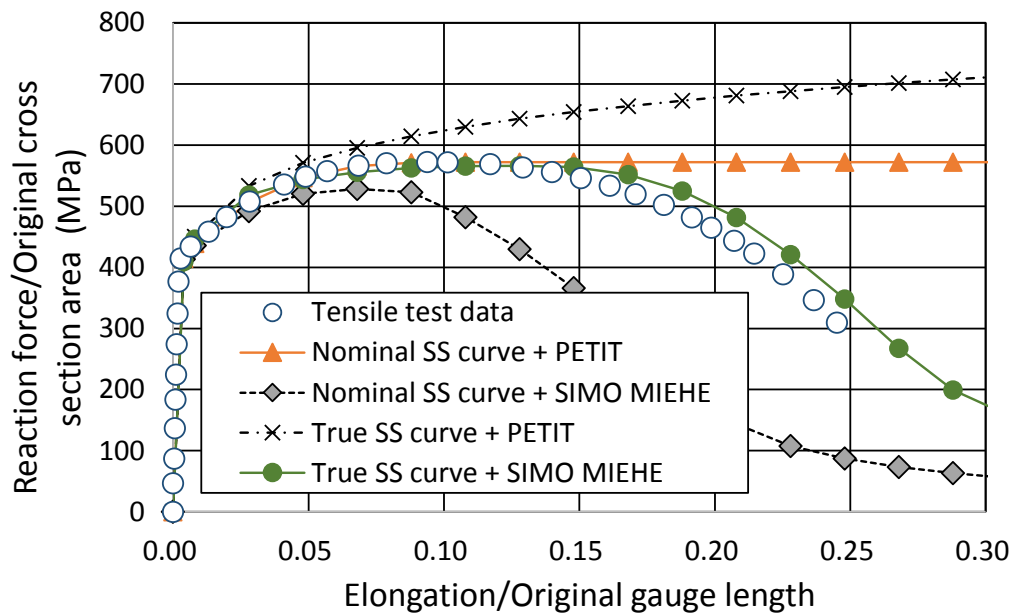


Fig.5. Nominal stress-strain curves obtained in the analyses compared with the test data

#### 参考文献

- [1] EdF, Code-Aster.org, <http://www.code-aster.org/> (2016 年 1 月 25 日閲覧)
- [2] 藤岡, 他 3 名, 2.25Cr-1Mo 鋼 (STBA24) の室温スモールパンチ試験の再現解析とスモールパンチクリープ試験データの解釈 (荷重-応力換算) への応用, 第 61 学術講演会講演論文集, 77-78, 2012-05-25.
- [3] CSNI Integrity and Ageing Workd Group, FAT3D- An OECD/NEA Benchmark on Thermal Fatigue in Fuild Mixing Areas, NEA/CSNI/R(2005)2, 2005. ([http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/44/037/44037852.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/037/44037852.pdf)) (2016 年 1 月 25 日閲覧)

### 3.5. 可視化検証グループ

本プロジェクトでは、流体-構造連成解析の品質保証に特に重点を置いてでも、

- ・解析結果を正しく理解し、評価すること
- ・実験結果等と公正な比較を行うこと

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

### 3.5.1. 3次元画像による定量的・定性的検証

#### (1) 目標・計画

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

大きな計画としては、

平成24年度：

表示装置となるVR装置の導入を行い、ハードウェアの準備を行う。

平成25年度：

VR装置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  $1400 \times 1050$  の解像度の画像を表示する。画像は時分割方式で立体映像を投影できるようになっており、液晶シャッター眼鏡によって立体映像を観察する。立体映像は 3 台のグラフィックスワークステーションで生成する。1 台はマスタで、あとの2台が正面と下面の映像を担当する。これとは別に観察者や観察者が持つコントローラの位置を赤外線カメラで取得するシステムがあり、1 台のトラッキングワークステーションで制御する。グラフィックスワークステーションのマスタはトラッキングワークステーションから逐次データを取得して観察者(やコントローラ)の位置を計算する。

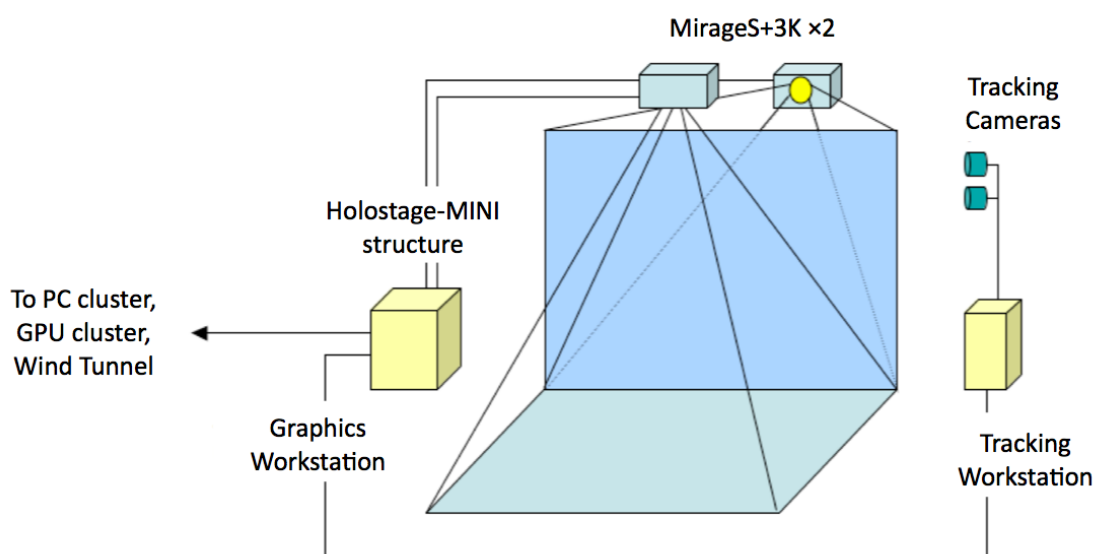


Fig.1. Hardware configuration

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

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

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

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

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

#### (4) 平成 27 年度進捗状況

平成 27 年度の目標は、上記に述べた通り、実際に本システムで可視化による比較・検証を行うことである。先に完成した図 2 のシステムにおいて、Adventure Fluid や Adventure Solid などの Adv I/O 形式で出力されたデータについては、Adventure で示されたデータファイルを直接 AVS-MPE が読み込み、Holostage-MINI に表示する。一方、実験の画像については、図2の Exp. (Image)のデータ(基本的には動画ファイル)を Data conversion のところで連番の静止画ファイルに分割し、AVS-MPE に渡す。昨年度はあくまで仮のデータでこの動作を確認しただけであったが、今年度は実際に連成手法解析グループと新規実験計測グループが行った、連成解析の標準問題のデータを用いて可視化を行っている。

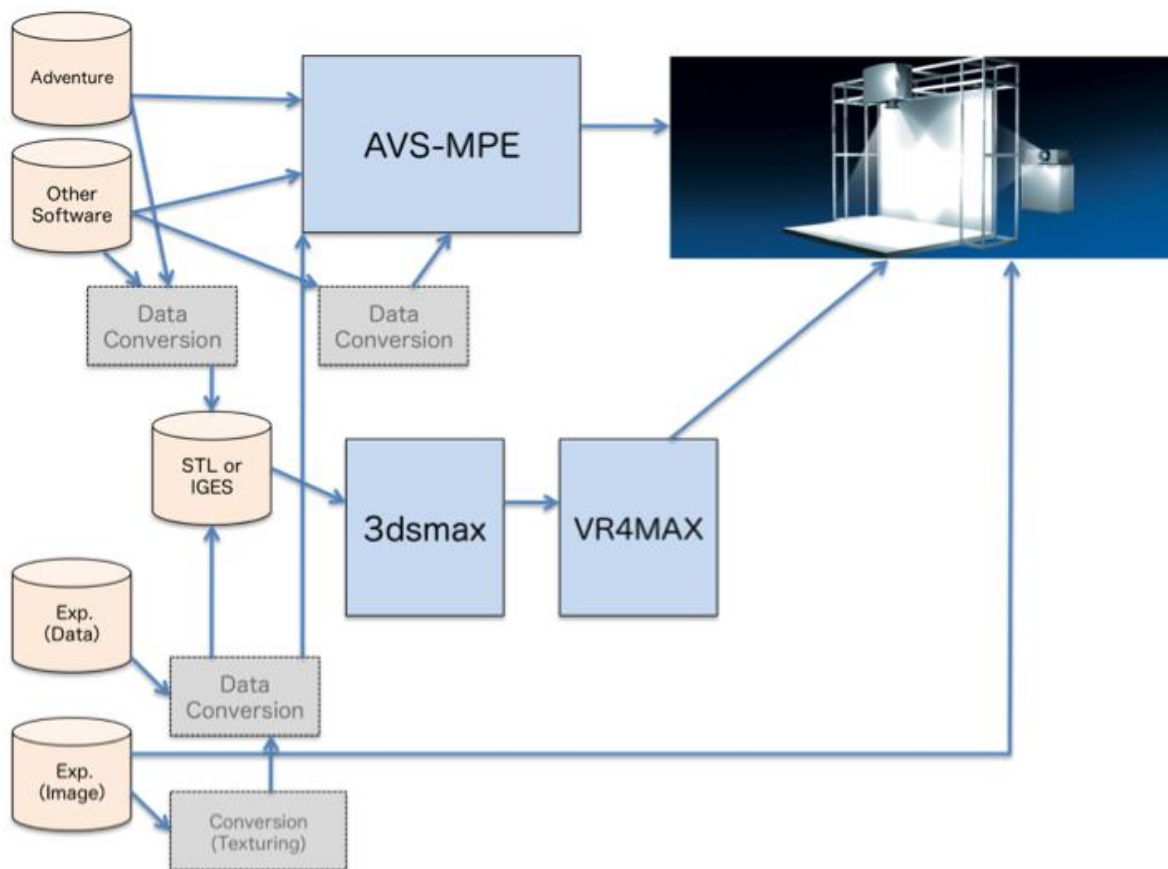


Fig.2. Visualization system

細かい操作手順を記すことは本報の目的ではないので、ここでは行っていることの概要のみ示す。詳細は、「可視化システム操作手順書(仮)」として次年度に完成させる予定である。

図 3 は可視化の仕組みを示すネットワークエディタである。ここにはいくつかのモジュールが示されており、それぞれのモジュールが可視化においてなんらかのまとまった役割を果たしている。実際にはここにあるモジュールのいくつかはさらに複数のモジュールからできている。これらのモジュールを変えたり、あるいはモジュールのパラメータを変えることで表示内容を変更できる。まず、計算結果の読み込みは、流体と構造の 2 つがあることから、複数のデータを同期を取って読み込めるようモジュールを追加・変更している(図 4)。

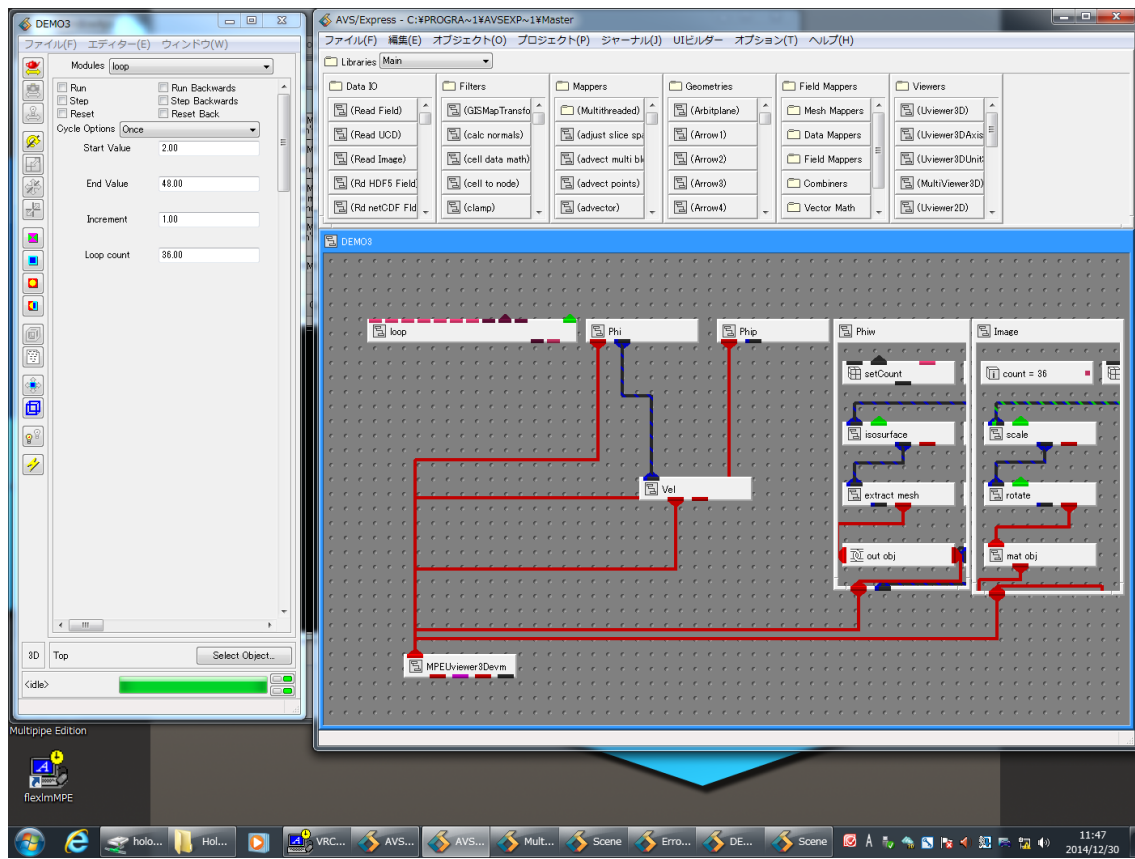


Fig. 3 AVS network editor for simultaneous visualization of experimental and computational results

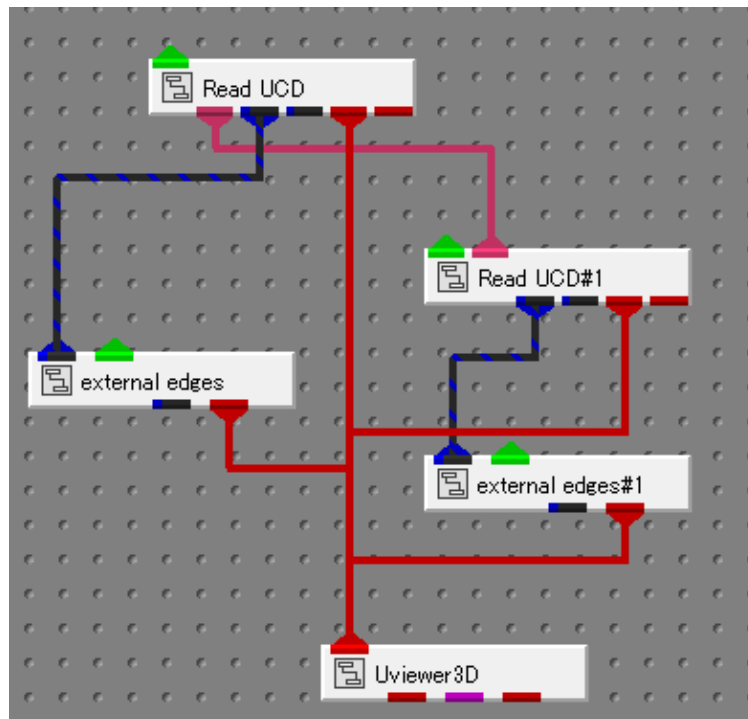


Fig.4. The way of two “Read UCD” modules synchronizing

実験画像については、いまのところ 2 次元(立体映像ではない)なので、昨年度に作ったものをそのまま用いることができる。

今年度は、これらのデータを、

- (a) 並べて表示する。
- (b) 重ねて表示する。

の 2 つについて比較・検証を行った。まず、並べるにしても、重ねるにしても、それぞれのデータの大きさに違いがあるため、正確な縮尺と位置合わせが必要になる。そこで、計算結果、実験結果のそれぞれのスケーリングと位置合わせを行い、またそれらをまとめてスケーリングができるよう、モジュール構成を変更した。この詳細は略す。

今回用いたデータは上端を指示した弾性円柱の流体力による変形の解析であるが、Holostage-MINI による立体視では、並べて見ることはもちろんそれなりに比較ができるが、重ねても立体視を行っているため、両者を分離して見ることができる(図 5 では分かりにくいですが、解析結果は 3D になっており、一方、実験の動画は円柱の中心を通る面に投影されるように表示されている)ので、より効果的であることが分かった。

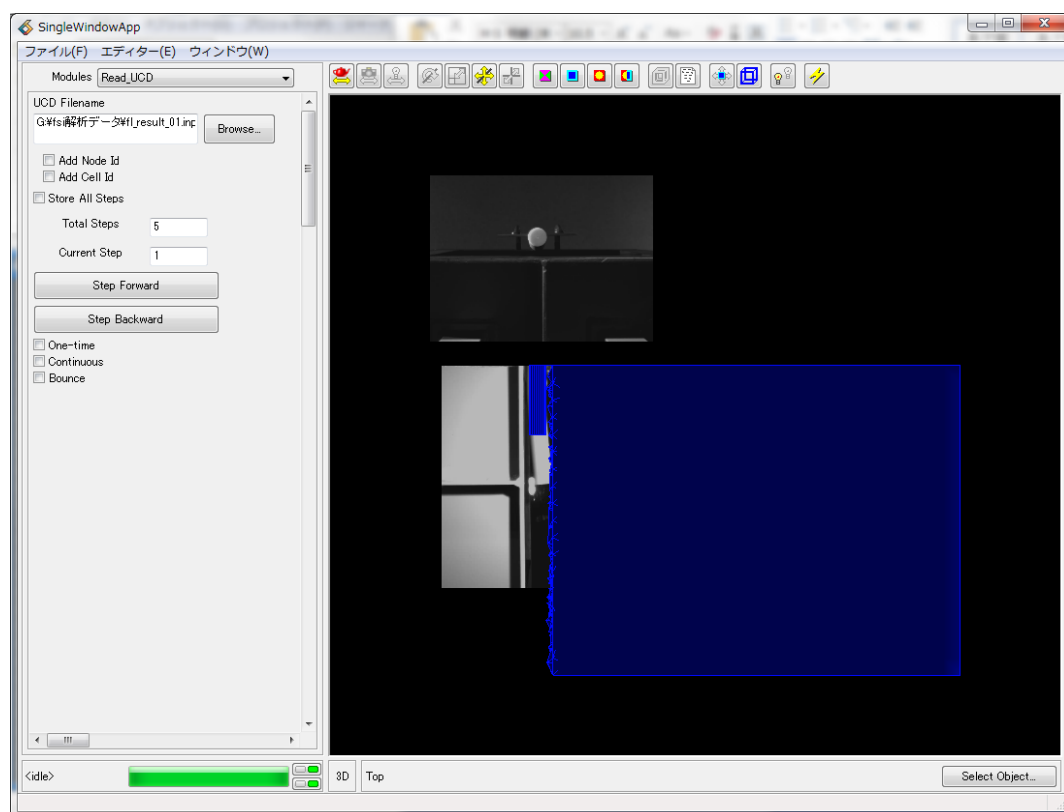


Fig.5. Simultaneous and overset display of experimental and computational results

次年度は、より多くのデータで本システムの有効性を検証することと、システムの公開方法について検討する予定である。

### 3.5.2. オールドバイオリンの音色とバイオリンの演奏法に関する可視化的研究

#### (1) 目標・計画

本研究では、古来よりしばし注目されてきた二つのバイオリンに関する研究を行っている。

一つはオールドバイオリンと新作バイオリンの音色の違いについてであり、FFT による音響解析とアンケート評価による分析を行っている。オールドバイオリンの音色の特徴量を見だし、現代の技術を用いてアンティークバイオリンに近い音色を出すための楽器製作への一助となるような音響モデルの構築を目指す。

もう一つは、バイオリンの演奏法に関してプロフェッショナルのプレイヤーの運動モデルの解析である。例えば、ピッチを振動させるビブラート奏法やアゴーギングといわれる機械的でないヒューリスティックなテンポのゆらぎなどである。これらを録音された音響データからの解析とモーションキャプチャを用いた解析がある。

#### (2) 意義・国際社会との比較

これまでいくつかのバイオリンの音響に関する研究はあるが、オールドバイオリンの音色もプロフェッショナルの演奏もどちらも満足な解析結果が得られているわけではない。

#### (3) 研究内容

##### 1. FFTと印象評価の多変量解析によるオールドバイオリンの音色解析

楽器店との協力によりオールドバイオリン(表 1)をプロの演奏家に演奏してもらい、バイオリン毎に曲中の同じ音符の部分抜き出し FFT で周波数スペクトルの音圧ピークを得る。倍音に鋭いピークが得られるのでその倍音の配合の違いから音色の違いの比較を行っている。

##### 2. バイオリン演奏におけるビブラートの運動解析

Table 1 Violins for analysis

|                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Old violin (5)                                                                                                   |
| Stradivari, Catenari, Gagnani, Balestrini, Santo Serafin                                                         |
| Semi-old violin (7)                                                                                              |
| Pressenda, Faniola, Scaranpella Michetti, Guerra, Fablis, Genovese                                               |
| Modern violin (2)                                                                                                |
| Bisiachi Garimberti                                                                                              |
| Contemporary violin (7)                                                                                          |
| Pygumarius (Advance A, B, Exelent A, B),Pygumarius (Stradivari copy, Guarneri copy, Del Gesu copy ※<br>(株)文教楽器製) |

ビブラート(vibrato)とは、弦を押さえる左指を弦に平行な方向に周期的に動かすことで、ピッチを振動させる表現方法であるが、この奏法は聴衆を魅了する技術的なコツが必要でそれがうまくできない奏者は多い。本研究では一流のプロフェッショナル演奏家の演奏音の音響的解析、およびビ

ブラート運動をモーションキャプチャにより「上手な」ビブラートのかけ方とはどうすれば良いのかを解明する。

#### (4) 平成 27 年度進捗状況

##### 1. バイオリンの音色に関して

図 1 は, FFT アナライザ(OR30 シリーズ)によるスペクトル解析をして, さらに  $x$  軸は, 周波数を基音の周波数  $f_0$  で割って正規化したもの,  $y$  軸は, 倍音の音圧を基音の音圧で割って正規化し無次元化したものである. オリジナルの Stradivari とコピー製品(榊文京楽器提供)の比較を Fig.1 に示す. このコピー製品による D 音は, 倍音構造が比較的傾向が似ているので音色も近いと思われるが, 現在評価実験として音色に関するアンケートを取り相関を調査することを試みている. また, 本来, 名器のパフォーマンスはプロの演奏者によって十分鳴らされた演奏音においてその真価が発揮できるのではと考え, 本研究では, これまでのタップ音やハンマー打による応答特性ではなく, プロによる演奏音での FFT 解析をしている. Fig.2 はその一例で開放弦の単純な発音と演奏音の違いを示しているが, これについても現在アンケート評価を行っている.

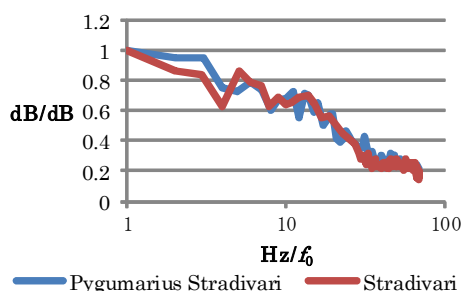


Fig. 1 Original Stradivari vs Copied Stradivari (D4)

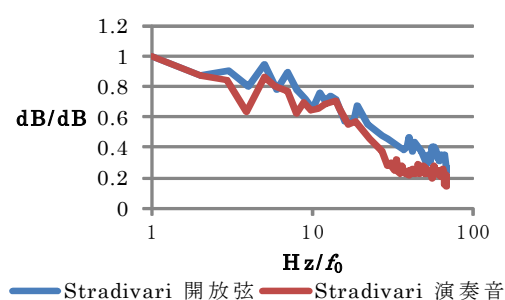


Fig. 2 Tone analyze by open string vs by play(D4)

##### 2. ビブラートの解析について

現段階では, モーションキャプチャシステムを用いていくつかの動きを撮影したまでである (Fig.3). 今後はプロの演奏による音響解析と運動解析の両方の面から解析をしていく予定である.



Fig.3. Motion capture and analyze of vibrato (violin:left, cello:right)

## 4. 共同研究

### 4.1. JST CREST プロジェクト

平成 23 年 10 月より JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」において、研究課題名「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」が採択され、研究拠点を当センターに置き、研究を実施している。

#### 4.1.1. 研究実施体制

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

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

を突破できたとしても、大規模な入出力データを効率的に処理できない限り、本当の意味での利活用は不可能である。この問題を解決するためには、並列ファイル入出力システムの効率化やデータ圧縮展開アルゴリズムの高速化などだけではない、根本的なデータ量削減に関する解決策が求められる。

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

- A) マルチレベル領域分割法による連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列化ライブラリ
- B) マルチレベル領域分割法による多階層計算格子データの生成、操作および I/O ライブラリ
- C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

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

#### 4.1.2. 研究実施内容

##### (1) 「東洋大学」グループ

- ① 研究代表者: 塩谷隆二 (東洋大学総合情報学部, 教授)
- ② 研究項目

階層分割型数値計算ライブラリの基礎研究並びに設計とその応用

##### (2) 「名古屋大学」グループ

- ① 主たる共同研究者: 荻野正雄 (名古屋大学情報基盤センター, 准教授)
- ② 研究項目

階層型ソルバーライブラリの基礎研究とその応用

(3) 「東京大学」グループ

① 主たる共同研究者:越塚誠一(東京大学大学院工学系研究科, 教授)

② 研究項目

階層分割型入出力ライブラリ並びに連続体力学向け問題領域専用言語の基礎研究とその応用

## 5. 成果の広報および普及活動

### 5.1. 第 4 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト) 合同シンポジウム

2015 年 3 月 10 日(火), 東洋大学白山キャンパス 2 号館 16 階スカイホールにて, 第 4 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウムを開催した。

当日は, 計算力学研究センターと HDDMPPS グループから, 各 5 名が講演を行い, 1 年間の研究の進捗を報告すると共に, 来年度以降の研究方針についての議論が活発に行われた。

また, 特別講演として, 2015 年度で退官される江澤良孝東洋大学総合情報学部教授による最終講義が行われ, 江澤教授のこれまでの研究について知ることの出来る, 貴重な講演となった。

#### 5.1.1. プログラム

|             |                                                                                                                           |                           |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 13:00-13:10 | 開会の辞                                                                                                                      | 矢川元基<br>東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授 |
| 13:10-14:50 | セッション 1 (CCMR)<br>文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業:<br>「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」<br>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」                                                                                    | 田村善昭(東洋大)                 |
|             | 「流れと物体と音. 実験および数値シミュレーションの研究報告」                                                                                           | 長岡慎介(東洋大)                 |
|             | 「並列流体—構造連成解析システムの開発及び実験との比較検証」                                                                                            | 長岡慎介(東洋大)                 |
|             | 「人工知能技術を用いた解析結果予測」                                                                                                        | 増田正人(東洋大)                 |
|             | 「RAPL を用いた粒子法シミュレーションの消費電力制御」                                                                                             | 谷村景貴(東洋大)                 |
| 14:50-15:00 | 休憩                                                                                                                        |                           |
| 15:00-16:40 | セッション 2 (HDDMPPS)<br>科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST):<br>「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」                              |                           |

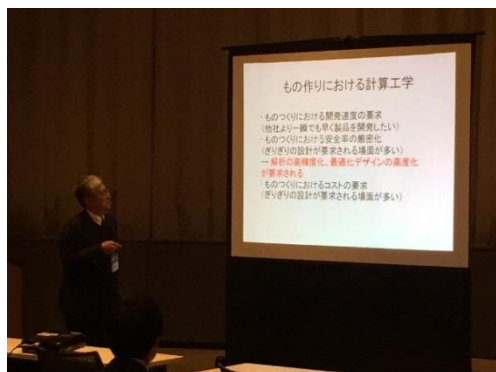
|             |                                   |                         |
|-------------|-----------------------------------|-------------------------|
|             | プロジェクトリーダー:塩谷隆二(東洋大学)             |                         |
|             | 「ポストペタスケールシミュレーションのためのライブラリ開発」    | 塩谷隆二(東洋大)               |
|             | 「粒子法と有限要素法を用いた大規模流体構造連成解析システムの開発」 | 三目直登(東京大)               |
|             | 「超大規模解析のための多階層型領域分割法ソルバーの開発」      | 淀薫(インサイト)               |
|             | 「電磁場シミュレーションの大規模化・高効率化へ向けた理論的検討」  | 田上大助(九州大)               |
|             | 「超大規模電磁場解析ライブラリ開発」                | 杉本振一郎(諏訪東京理科大)          |
| 16:40-16:50 | 閉会の辞                              | 田村善昭<br>東洋大学計算力学研究センター長 |
| 16:50-17:00 | 休憩                                |                         |
| 17:00-18:00 | 江澤良孝教授最終講義「研究を振り返ってー構造解析と最適化」     |                         |



矢川先生開会の辞



シンポジウムの様子



江澤先生最終講義



懇親会にて

## 5.2. 第 1 回日韓中台学生ワークショップ Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015

2015 年 3 月 25～26 日に諏訪東京理科大学にて、日本・韓国・中国・台湾の学生による機械工学に関する第 1 回日韓中台学生ワークショップ Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015 が開催された。講演はすべて英語で行われ、活発な議論が交わされた。本センターからは大学院生の島村雅彦さんが口頭発表を行った。また、諏訪周辺の観光やそば打ち体験も催され、各国の学生達が親睦を深めた。

### 5.2.1. プログラム

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| March 25th  | Wednesday         |
| 09:00-09:20 | Openning Ceremony |

| Oral Presentations:                                                   |                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| March 25th                                                            | Wednesday                                                                                                              |
| Session 1 (4) Chairperson: Mamtimin Geni (Xinjiang University, China) |                                                                                                                        |
| Time                                                                  | Presentation                                                                                                           |
| 09:20-09:40                                                           | Investigation on Fatigue Crack Propagation Behaviour in Plate with Multiple Discontinuitier using XFEM                 |
|                                                                       | <i>Yixiu Shu, Yazhi Li</i>                                                                                             |
| 09:40-10:00                                                           | Development of Elastic Crack Opening Displacement Solutions for Circumferential Through-wall Cracks in Thin Elbows     |
|                                                                       | <i>Min-Kyu Kim, Han-Bum Surh, Min-Gu Won, Moon Ki Kim, Nam-Su Huh, Jae-Boong Choi</i>                                  |
| 10:00-10:20                                                           | Dislocation Dynamics Study on Influence of Elastic Anisotropy in Polycrystal Plastic Deformation                       |
|                                                                       | <i>Yuya Suzuki, Akiyuki Takahashi</i>                                                                                  |
| 10:20-10:40                                                           | (TBD)                                                                                                                  |
|                                                                       | <i>Yong-Teng Zheng, Kuen Ting</i>                                                                                      |
| 10:40-11:00                                                           | Coffee Break                                                                                                           |
| Session 2 (3) Chairperson: Yoshiaki Tamura (Toyo University, Japan)   |                                                                                                                        |
| 11:00-11:20                                                           | Large Scale Fluid Structure Interaction Simulation with Smoothed Particle Hydrodynamics on Multi-core and -GPU Systems |
|                                                                       | <i>Zhe Ji, Fei Xu, Akiyuki Takahashi</i>                                                                               |
| 11:20-11:40                                                           | Large-scaled Simulation on the Mixing Mechanism of Film Cooling based on Hybrid Thermal Lattice Boltzmann Method       |

|                     |                                                                                                                                                                                          |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                     | <i>Shangguan Yanqin</i>                                                                                                                                                                  |
| 11:40-12:00         | Simulation of Droplet Impacting onto Elastic Solid with the SPH Method<br><i>Yinan Bie, Xiao-Jing Ma, Mamtimin Geni</i>                                                                  |
| 12:00-13:00         | Lunch                                                                                                                                                                                    |
| Session 3 (5)       | Chairperson: Moon Ki Kim ( Sungkyunkwan University, Korea)                                                                                                                               |
| 13:00-13:20         | Experimental Observation of the Skeletal Adaptive Repair Mechanism and Bionic Topology Optimization Method by using Cross-Type Reaction-Diffusion<br><i>Kaysar Rahman, Mamtimin Geni</i> |
| 13:20-13:40         | Molecular Dynamics Modeling of Mixed Dislocations in BCC Metals<br><i>Kazuki Takahashi, Akiyuki Takahashi, Akiyoshi Nomoto</i>                                                           |
| 13:40-14:00         | Study on Band Structures of Layered Phononic Crystals with Flexoelectricity<br><i>Wenjun Yang</i>                                                                                        |
| 14:00-14:20         | (TBD)<br><i>Li-Hsuan Kung, Kuen Ting</i>                                                                                                                                                 |
| 14:20-14:40         | The Influence of Oxidation Parameters on Stress Development at the Phase Transformation Zone in Thermal Barrier Coatings<br><i>CHAI Yi-jun, LIN Chen, LI Yue-ming</i>                    |
| 14:40-15:00         | Coffee Break                                                                                                                                                                             |
| Session 4 (4)       | Chairperson: Kuen Ting (Lunghwa University of Science and Technology, Taiwan)                                                                                                            |
| 15:00-15:20         | In-situ Observation of Fracture and Failure Behavior in Thermal Barrier Coatings under Three-point Bending<br><i>Peng Jiang, Xueling Fan, Dingjun Li, Tiejun Wang, Yacong Wu</i>         |
| 15:20-15:40         | Analytical Study on Small Punch Creep Test for Creep Life Prediction<br><i>Taeksang Lee, Jae Boon Choi, Monn Ki Kim</i>                                                                  |
| 15:40-16:00         | Compressive Response of Short Nomex Honeycomb<br><i>Wei Feng, Fei Xu, Xiangyang Gao</i>                                                                                                  |
| 16:00-16:20         | Study of Pressure Characteristics of Sealing Pair Oil-Film for Bellows Mechanical Seal<br><i>Ning Li, Mutellip Ahmat, Guangpeng Wang</i>                                                 |
| March 26th Thursday |                                                                                                                                                                                          |
| Session 5 (4)       | Chairperson: Shenping Shen (Xi'an Jiaotong University, China)                                                                                                                            |
| 09:00-09:20         | Material Strength Changes due to Spinodal Decomposition in Fe-Cr Ferric Steels<br><i>Takuya Suzuki, Akiyuki Takahashi, Akiyoshi Nomoto</i>                                               |
| 09:20-09:40         | Normal Mode Guided Elastic Network Interpolation (NGENI) for Prediction of Conformational Pathway in Proteins<br><i>Byungho Lee, Jae Boong Choi, Moon Ki Kim</i>                         |

| 09:40-10:00                                                                      | (TBD)                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                  | <i>Yan-Liaug Su, Kuen Ting</i>                                                                                                         |
| 10:00-10:20                                                                      | Theoretical Prediction of Failure Envelopes for Composite Laminates including Nonlinear and In-situ Effect                             |
|                                                                                  | <i>Biao Li, Yazhi Li</i>                                                                                                               |
| 10:20-10:40                                                                      | Coffee Break                                                                                                                           |
| Session 6 (4) Chairperson: Fei Xu (Northwestern Polytechnical University, China) |                                                                                                                                        |
| 10:40-11:00                                                                      | Development of Efficient and Accurate Analysis Method for Cardboards                                                                   |
|                                                                                  | <i>Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa</i>                                                                                             |
| 11:00-11:20                                                                      | Numerical Modeling and Simulation of Wind Blown Sand Morphology under Complex Wind-Flow Field                                          |
|                                                                                  | <i>Mawsude Muhtar, Mardan Wali, Xamxinur Abdikerem, LeiWang, Afang Jin, Muhtar Sadir and Mamtimin Geni</i>                             |
| 11:20-11:40                                                                      | Development of Improver Integrity Assessment Standard Containing Axial and circumferential Multiple Through-wall Cracks                |
|                                                                                  | <i>Jin Won Hong, Jae Boong Choi, Moon Ki Kim</i>                                                                                       |
| 11:40-12:00                                                                      | (TBD)                                                                                                                                  |
|                                                                                  | <i>Chin-Hsing Wu, Kuen Ting</i>                                                                                                        |
| <b>Poster Presentations:</b>                                                     |                                                                                                                                        |
| 3-minute presentation at Lunch time on March 25th.                               |                                                                                                                                        |
| Poster presentation during coffee break and lunch time                           |                                                                                                                                        |
| Order                                                                            | Presentation                                                                                                                           |
| 1                                                                                | Flexoelectric Effects in Three-dimensional Eshelby's Nano-inclusion Problem                                                            |
|                                                                                  | <i>Shasha Yang, Shengping Shen</i>                                                                                                     |
| 2                                                                                | SPH Numerical Simulation of Impact and Take-off of Sand Particles in Flat bed                                                          |
|                                                                                  | <i>Jin A Fang, Maimtimin Geni</i>                                                                                                      |
| 3                                                                                | Research on Mechanical Characteristics of the Oblique Arch Roof in Turpan Traditional Houses                                           |
|                                                                                  | <i>Abulikemu Touheti, Sawulet Bekey, Mutailipu Ruzeaiti, Aierken Haimudula</i>                                                         |
| 4                                                                                | Stress analysis multibody contact problem based on SPH Method                                                                          |
|                                                                                  | <i>Muhtar Kerim, Rahmatjan Imin, Azhar Halik, Mamtimin Geni</i>                                                                        |
| 5                                                                                | Numerical Simulations and Dynamic Contact Behavior Analysis of Ball Bearing Lubrication System by Adopting FEM and SPH Coupling Method |
|                                                                                  | <i>Yue WU, Mamtimin Geni</i>                                                                                                           |

5. 成果の広報および普及活動



島村さんの発表の様子 1



島村さんの発表の様子 2



表彰式



そば打ち体験

### 5.3. 台湾・龍華科技大學川越キャンパス見学

2015(平成 27)年 6 月 23 日午前、提携校である台湾・龍華科技大學の教員・学生 20 名が川越キャンパスを見学に訪れた。学外の賞などを受賞した学生に送られる「gold award」を受賞した学生が提携校を訪問するというもので、同大と関連の深い、計算力学研究センターが中心となって見学会を企画した。

まず、東洋大学から吉田善一研究推進部長と、川越キャンパスを代表して杉本富利総合情報学部長が歓迎の挨拶を行い、龍華科技大學の阮管理學院院長が歓迎に対する謝辞を述べた。続いて、田村善昭計算力学研究センター長の司会で参加者全員の紹介や東洋大学の概要説明などを行った。その後、生体医工学研究センターとバイオ・ナノエレクトロニクス研究センターの見学を行い、両大学の親睦を深めた。



Dr.Ruan 挨拶



1 号館前にて



見学の様子

## 5.4. 東洋大学産学協同教育センター中核人材育成講座「スマホアプリ開発入門講座」

2015 年 11 月 7 日(土), 14 日(土)

1307 実験室(1 号館 3 階)

10:00-16:00

2015 年 11 月, 川越キャンパスにて, 産学協同教育センターが「スマホアプリ開発入門講座」を開講した. 本センターから塩谷研究員, 長岡研究助手, 増田研究助手が指導にあたった.

当講座では, 自社で活用可能なアプリ開発を検討している方や, 日頃 PC で利用しているソフトウェアの機能の一部を社外などで利用するためにスマートフォン用アプリとして開発を検討している方等を対象とし, スマートフォンの 2 大 OS となっている Android と iOS 両方のアプリ開発について, 基礎知識の習得(それぞれの特徴を理解, 比較すること)から, オリジナルアプリの作成実習までを行った.

11 月 7 日(土)には, 宮川大輔氏(株式会社 mokha・取締役)が, 「Android Studio による Android アプリ開発」をテーマとして, Android アプリ開発環境のセットアップにはじまり, Android の仕組みや UI の基礎知識についての講義を行なうとともに, 各参加者がオリジナルアプリの設計, 開発を目標に, 実習を行った. また, Google Play へのアプリ公開手順の紹介も行われた.

11 月 14 日(土)には, 本センターの塩谷隆二教授(東洋大学総合情報学部)が, 「Xcode による iOS アプリ開発」をテーマとして, Xcode Storyboard による画面遷移簡単アプリ開発や Swift の基礎知識について講義を行なうとともに, 各参加者がオリジナルアプリの設計・開発を目標に実習を行った. また, ハイブリッドアプリ開発ツールなどの紹介も行われた.



「スマホアプリ開発入門講座」の様子

## 6. 学術活動

2015 年 1 月から 2016 年 1 月までの業績を掲載する。

### 6.1. 論文投稿

1. Terutaka Fujioka, “Elastic-Route Estimation of Strain Range in Notched Components Under Thermal Loading Without Performing Stress Linearization”, Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 137(2), 021205-1 to 021205-6, April 2015.
2. Shin-ichiro Sugimoto, Daisuke Tagami, Masao Ogino, Amane Takei, Hiroshi Kanayama, “Improvement of Convergence in Time-Harmonic Eddy Current Analysis with Hierarchical Domain Decomposition Method”, Transaction of the Japan Society for Simulation Technology, Vol.7, No.1, pp.11-17, 2015.
3. Hiroshi KAWAI, Kohmei SATOH, Yasunori YUSA, Takayuki UOMOTO, Ryuji SHIOYA, Hiroshi OKADA, “AutoMT a library for tensor operations and its performance evaluation for solid continuum mechanics applications”, Mechanical Engineering Letters Vol.1, No.15-00349, pp.1-10, 2015.
4. Kohei MUROTANI, Issei MASAIE, Takuya MATSUNAGA, Seiichi KOSHIZUKA, Ryuji SHIOYA, Masao OGINO, Toshimitsu FUJISAWA, “Performance Improvements of Differential Operators Code for MPS method on GPU”, Computational Particle Mechanics, Vol.2, Issue 3, pp.261-272, 2015.
5. Kazuo KONAGAI, Rama Mohan POKHAREL, Hitoshi MATSUBARA and Masataka SHIGA, “Geotechnical aspect of the damage caused by the April 25th, 2015 Gorkha earthquake of Nepal”, JSCE Journal of Disaster FactSheets, FS2015-E-0002, July 2015.
6. 富山潤, 羽渕貴士, 宮里心一, 中林靖, “コンクリート橋梁上部工に付着する塩分量分布に関する数値実験”, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.769-774, 2015.
7. T. Nosaki, N. Fujimatsu, “Trajectory analysis based on aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion”, Journal of Visualization, September 2015.
8. 富山潤, “コンクリート構造物を対象としたミクロ・マクロ塩害環境に関する研究”, コンクリート構造物の補修, 補強およびアップグレードシンポジウム, Vol.15, pp.405-410, 2015 年 10 月.

9. Hitoshi Matsubara, Kosaburo Hirose, Taka-aki Edo, Kei-ichi Tamanaha, Hisao Hara and Tomonori Yamada, “Numerical modelling of mudcrack grows”, Proceedings of the 15<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ATC1-3-17, November 2015.
10. 広瀬孝三郎, 松原仁, 原久夫, “マッドペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 土木学会論文集 C (地圏工学), 2016 (Accepted).
11. F Zhang, Y Zhu, T Furukawa, W Song, “Kinematic Analysis of a Partially Decoupled 3-DOF Parallel Wrist”, Journal of Robotics, 2015 (790414), pp.1-9, 2015.
12. K Takami, T Furukawa, M Kumon, D Kimoto, G Dissanayake, “Estimation of a nonvisible field-of-view mobile target incorporating optical and acoustic sensors”, Journal of Autonomous Robots, 40 (2), pp. 343-359, 2015.
13. B Li, T Furukawa, “Microtexture Road Profiling System Using Photometric Stereo”, Journal of Tire Science And Technology, 43 (2), pp.117-143, 2015.
14. Hiroshi Kanayama, “An Industrial Application of Thermal Convection Analysis”, International Journal of Computational Methods, Vol.13, No.2, 2016 (Accepted).

## 6.2. 著書

1. Hiroshi Kawai, Masao Ogino, Ryuji Shioya, Shinobu Yoshimura, “Fundamentals of High-Performance Computing for Finite Element Analysis”, High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering (Springer Tracts in Mechanical Engineering), Springer, pp.1-21, 2015.
2. Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Eiichi Nagai, Toshimitsu Fujisawa, Akira Anju, Hiroshi Kanayama, Satoshi Tanaka, Kyoko Hasegawa, “Large-Scale Tsunami Run-Up Analysis Using Particle Method”, High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering (Springer Tracts in Mechanical Engineering), Springer, pp.157-177, 2015.

## 6.3. 総説・解説・エッセイ

1. 横山真男, “ヴァイオリンの音色研究”, 可視化情報学会誌, Vol.35, 136, pp.17-22, 2015.

2. 矢川元基, “福島原子力事故特集 PART2 を企画して” “福島原子力事故特集 PART2”, 学術の動向, Vol.20, No.2, pp.33-35, 2015.

3. 矢川元基, “巻頭言: 新年のご挨拶”, 原安協だより, No.269, pp.1-2, 2016.

## 6.4. 学会発表

1. 横山真男, 斉藤勇也, “ヒットチャートランキング上位に入る楽曲の特徴分析”, 情報処理学会研究報告音楽情報科学(MUS), 山梨, 2015 年 2 月.
2. 渡辺大樹, 瀬田陽平, 横山真男, “HMD と Leap Motion を用いた指差し天体観測システムの開発”, 情報処理学会第 77 回全国大会, 京都, Vol.1, pp.651-653, 2015 年 3 月.
3. 杉本振一郎, 田上大助, 荻野正雄, 武居周, 金山寛, “領域分割法を用いた時間調和渦電流解析の収束性改善(第 2 報)”, 静止器/回転機合同研究会・電磁界数値計算技術とその応用, 宮古島マリンターミナル, 2015 年 3 月 5-6 日.
4. 月川久義, 井上雅弘, 金山寛, 田島正喜, “屋上から排出した水素の建物周囲の流れ解析”, 日本機械学会九州支部第 68 期総会・講演会, 福岡大学工学部, 2015 年 3 月 13 日.
5. 金山寛, “自動販売機内部の熱対流解析”, 日本機械学会材料力学部門 2014 年度第 2 回「マルチフィジックスの実験／計算技術の高度化に関する研究会」, 東京大学山上会館 001 会議室, 2015 年 3 月 19 日.
6. Yoshiaki Tamura, Tomoki Matsuo, “Numerical Simulation Method of Compressible Gas-Liquid Two Phase Flow”, PANACM 2015 1st Pan-American Congress on Computational Mechanics, Buenos Aires, Argentina, April 27-29, 2015.
7. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, Shioya Ryuji, Fumihiko Hakuno, Hiroki Nishi, Shinichiro Takahashi, “Study of Effects of Blood Amino Acid and Hormone Level for Controlling Triglyceride Accumulation in the Liver of Rats using Self-Organizing Map”, 1st. Pan-American Congress on Computational Mechanics (PANACM 2015) & XI Argentine Congress on Computational Mechanics (MECOM 2015), Argentina, pp.885-891, April 27-29, 2015.
8. M. Yokoyama, Y. Seta, K. Murotani, G. Yagawa, “3D simulation considering surface condition of wall in particle method”, VI th International Conference on Computational Methods for

Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED PROBLEMS 2015), Venice, Italy, May 2015.

9. 横山真男, “黄金比による音律で調弦した音楽”, 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS), 東京, 2015 年 5 月.
10. 富山潤, 浅井光輝, 久保善司, “損傷力学ベースボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張挙動解析の基礎研究”, 土木学会第 18 回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.199-200, 2015 年 5 月.
11. 室谷浩平, 越塚誠一, 塩谷隆二, 荻野正雄, 永井英一, 藤澤智光, 安重晃, “MPS 法を用いた福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋の津波浸水解析”, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, B-5-4.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 8 日.
12. 和田義孝, 河合浩志, 荻野正雄, 室谷浩平, 塩谷隆二, “高精細可視化ライブラリ LexADV-VSCG へのポリゴン断面可視化の実装“, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-6-2.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日.
13. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法における局所 Schur 補元アプローチの性能予測モデルと評価“, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-7-1.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日.
14. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 室谷浩平, “大規模解析のための多階層領域分割法の基本設計と実装“, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-7-2.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日.
15. 杉本振一郎, 田上大助, 荻野正雄, 武居周, 金山寛, “階層型領域分割法における時間調和渦電流解析の収束性改善(第 2 報)“, 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015 年 6 月 8-10 日.
16. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Yoshiaki TAMURA, Genki YAGAWA, “Efficient Approach for the Fluid-Structure Interaction Problems and the Comparison between Experiment and Computation”, ICCM2015, Auckland, New Zealand, July 14-17, 2015.
17. Hitoshi Matsubara, “Mathematical and numerical modelling for microbial rock weathering”, Proceedings of 13<sup>th</sup> US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), San Diego, USA, July 2015.

18. S. Koshiyama, N. Fujimatsu, “Establishment of PSP Technique for Small-Scaled Model using the Supersonic Wind-Tunnel”, International Symposium on Space Technology and Science, Kobe International Conference Center, July 2015.
19. Kosaburo Hirose, Takaaki Edo and Hitoshi Matsubara, “Crack propagation simulation on mud pastes”, Proceedings of 13<sup>th</sup> US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), San Diego, USA, July 2015.
20. Hiroshi Kanayama, Masao Ogino and Shin-ichiro Sugimoto, “Preconditioners in Domain Decomposition Method for Magnetostatic Problems”, ICCM2015, Pullman Hotel, Auckland, New Zealand, July 14-17, 2015.
21. Yoshiaki Tamura, “Development of Numerical Methods for Compressible Gas-Liquid Two Phase Flows”, The 13h Asian International Conference on Fluid Machinery 2015 (AICFM13), Tokyo, Japan, August 7-10, 2015.
22. 藤松信義, “摩擦係数評価のための乱流境界層の普遍関数構築”, 日本実験力学会 2015 年度年次講演会, 新潟大学工学部, 2015 年 8 月.
23. M. Yokoyama, K. Murotani, O. Mochizuki, G. Yagawa, “Numerical and experimental study on splash formation with consideration of the surface condition of solid wall”, IV<sup>th</sup> Conference on Particle-Based Methods (PARTICLES 2015), Barcelona, Spain, September 2015.
24. 横山真男, “現代音楽のための黄金比を用いた新音律の提案と評価”, 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, 福島, 2015 年 9 月.
25. 富山潤, 藍檀オメル, 亀川裕也, 山口順圭, 屋我晃, “遅延膨張性細骨材に対するコンクリートプリズムを用いた ASR 加速試験の適応性に関する研究”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-547, pp.25-26, 2015 年 9 月.
26. 風間洋, 富山潤, 下地建, 小籾俊介, “コンクリート表面の含有塩分量 C0 調査方法の提案”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-70, pp.139-140, 2015 年 9 月.
27. 佐川康貴, 山田一夫, 合田寛基, 久保善司, 富山潤, 川端雄一郎, “共通試験結果に基づくコンクリートプリズムを用いた ASR 加速試験方法に関する考察”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-548, pp.1095-1096, 2015 年 9 月.

28. 広瀬孝三郎, 松原仁, “マッドペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山, pp.783, 2015 年 9 月.
29. 崎山将, 広瀬孝三郎, 松原仁, “粘質土壌における亀裂進展シミュレーション”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山, pp.573-574, 2015 年 9 月.
30. 室谷浩平, 越塚誠一, 塩谷隆二, 荻野正雄, 永井英一, 藤澤智光, 安重晃, “MPS 法を用いた福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋内部の津波浸水解析”, 第 28 回計算力学部門講演会, 130.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.
31. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 室谷浩平, “大規模解析のための多階層領域分割法ソルバの開発”, 第 28 回計算力学部門講演会, 154.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.
32. 鄭宏杰, 荻野正雄, 塩谷隆二, “京コンピュータにおける ADVENTURE\_Solid 2.0 の性能評価”, 第 28 回計算力学部門講演会, 231.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.
33. 増田正人, 塩谷隆二, 中林靖, 伯野史彦, 西宏起, 田村善昭, 高橋伸一郎, “自己組織化マップを用いたラットの血中アミノ酸量と肝臓脂肪の関係分類”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 321.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.
34. 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 鄭宏杰, 淀薫, “静磁場領域分割インターフェイス問題の前処理付き共役勾配法”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.
35. Ryuji Shioya, Masao Ogino, Hiroshi Kawai, “Development of a Numerical Library based on Hierarchical Domain Decomposition and Extreme Large Scale FEM Simulation”, IWACOM-III, p93\_OW4-3-2.pdf, Tokyo, Japan, October 12-14, 2015.
36. Hiroshi Kawai, Ryuji Shioya, “Domain specific language for continuum mechanics: translator from LaTeX to C/Fortran”, IWACOM-III, p94\_OW4-3-3.pdf, Tokyo, Japan, October 12-14, 2015.
37. 島村雅彦, 江澤良孝, 田村善昭, 清水聖, 佐藤大亮, “ベイズ推定を用いた実験と数値シミュレーション融合による高精度予測”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.

38. 横山真男, 室谷浩平, 矢川元基, “粒子法によるミルククラウンの大規模数値シミュレーション”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月.
39. 瀬田陽平, 横山真男, 牧野光則, 矢川元基, “容器の縁形状を考慮した液だれの数値シミュレーション”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月.
40. 松原仁, “玄武岩質ガラスの微生物風化シミュレーション”, 計算工学会講演会, つくば, Vol.20, 2015.
41. 藤岡照高, “構造解析ソルバ検証用参照解の整備(低合金鋼引張試験の Code-Aster による再現)”, オープン CAE シンポジウム 2015, 富山国際会議場, 2015 年 11 月.
42. 広瀬孝三郎, 松原仁, “ベントナイトペーストに発生する乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 第 28 回沖縄地盤工学研究発表会, 沖縄, pp.29-30, 2015 年 11 月.
43. 江戸孝昭, 松原仁, “格子ボルツマン法を用いた発破騒音場における防音壁の効果に関する数値解析的検討”, 第 28 回沖縄地盤工学研究発表会, 沖縄, pp.1-6, 2015 年 11 月.
44. 伯野史彦, 増田正人, 舘野昌洋, 西宏起, 高橋伸一郎, 塩谷隆二, “機械学習による血中アミノ酸濃度から肝臓脂肪蓄積量の予測”, 第 38 回日本分子生物学会年会, 第 88 回日本生化学会大会合同大会(BMN2015), 神戸, 2015 年 12 月 1-4 日.
45. Yoshiaki Tamura, “Development of Numerical Simulation Method for Compressible Gas-Liquid Two-Phase Flows”, The 9<sup>th</sup> International Symposium on Cavitation (CAV2015), Lausanne, Switzerland, December 6-10, 2015.
46. Toshihiro Ashino, “Data and knowledge structure for materials integration”, Pacifichem 2015, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Honolulu, Hawaii, December 2015.
47. MA Hopkins, RJ Griffin, A Leonessa, BY Lattimer, T Furukawa, “Design of a compliant bipedal walking controller for the DARPA Robotics Challenge”, IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots(Humanoids), pp.831-837, 2015.
48. C Knabe, J Seminatore, J Webb, M Hopkins, T Furukawa, “A Leonessa, Design of a series elastic humanoid for the DARPA Robotics Challenge”, IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.738-743, 2015.

49. K Takami, T Furukawa, M Kumon, LC Mak, “Non-field-of-view indoor sound source localization based on reflection and diffraction”, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.59-64, 2015.
50. B Li, T Furukawa, “Photometric stereo under dichromatic reflectance framework dealing with non-Lambertian surfaces”, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.139-144, 2015.
51. T Furukawa, L Dantanarayana, J Ziglar, R Ranasinghe, G Dissanayake, “Fast global scan matching for high-speed vehicle navigation”, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.37-42, 2015.
52. K Takami, T Furukawa, “High-Resolution Deformation Measurement System for Fast Rotating Tires”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V008T13A058-V008T13A058, 2015.
53. T Furukawa, K Takami, X Tong, D Watman, A Hamed, R Ranasinghe, G. Dissanayake, “Map-Based Navigation of an Autonomous Car Using Grid-Based Scan-to-Map Matching”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V003T01A005-V003T01A005, 2015.
54. B Li, T Furukawa, “Design and Calibration of a 3D High-Resolution Surface Profiling System Using Photometric Stereo”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V009T07A086-V009T07A086, 2015.
55. MJ Bender, H McClelland, G Bledt, A Kurdila, T Furukawa, R Mueller, “Trajectory Estimation of Bat Flight Using a Multi-View Camera System”, IN AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, SciTech, pp.5-9, 2015.
56. K Takami, T Furukawa, “Study of Tire Noise Characteristics with High-Resolution Synchronous Images”, EuroNoise 2015, pp.2113-2118, 2015.
57. 金山寛, 鄭こうけつ, 杉本振一郎, 荻野正雄, “Considerations of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis”, 静止器/回転機合同研究会「電磁界数値計算技術とその応用」, 富士通株式会社本社事務所 24 階大会議室, 2016 年 1 月 20-21 日.

## 6.5. 招待講演

1. Hiroshi Kawai, Masao Ogino, Ryuji Shioya, Tomonori Yamada, Shinobu Yoshimura, “Performance Tuning of Parallel Structural Analysis Code Based on Iterative Substructuring with BDD Pre-conditioner for Peta-scale Supercomputers”, The 18th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2015), Regent Taipei, Taiwan, March 16-18, 2015.
2. Hiroshi Kanayama, Masao Ogino, Shin-ichiro Sugimoto, “Preconditioners in Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, The 18th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2015), Regent Taipei, Taiwan, March 16-18, 2015.
3. Genki Yagawa, “Views of Japanese Academia on Fukushima Daiichi Nuclear Accident”, World Engineering Conference and Convention 2015, Kyoto, December 1, 2015.

## 6.6. 受賞

1. 渡辺大樹, 瀬田陽平, 横山真男, 情報処理学会第 77 回全国大会, 学生奨励賞(論文タイトル:HMD と Leap Motion を用いた指差し天体観測システムの開発), 京都, 2015 年 3 月.
2. 矢川元基, 日本計算工学会名誉会員, 2015 年 5 月 22 日.
3. 金山寛, 2015 年日本計算力学連合賞, 2015 年 7 月 28 日.

## 7. 研究グループ紹介



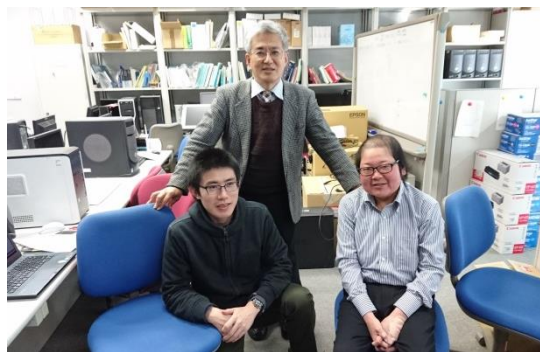
解析手法開発グループ



大規模並列化グループ



新規実験計測グループ



精度・妥当性検証グループ

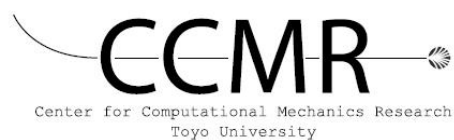


可視化検証グループ

## 8. 結び

本報は、2015 年度の活動を取りまとめたものである。なお、2016 年 3 月に予定されているセンター外部評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2016 年 1 月とした。したがって、それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい。

今日、計算力学は製造業のみならず、社会の安心・安全をはじめさまざまな分野に大きく広がりをみせている。私立大学戦略的研究基盤形成支援事業としてはあと1年を残すのみであるが、より広い視点で計算力学の発展に資するようセンター研究員一同、努力していきたい。



## 東洋大学 計算力学研究センター 2015 年度年報

---

この資料の転載, 引用などをご遠慮ください.

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