

東洋大学計算力学研究センター

2014 年度 年報



2015年3月

東洋大学計算力学研究センター

2014 年度年報 目次

1.	まえ	こがき	<	1
2.	セン	ノター	-の概要	2
	2.1.	セン	/ター設置について	2
	2.2.	組織	鍛	3
	2.3.	構反	戈メンバー	4
3.	研究	究成;	果	5
	3.1.	解机	斤手法開発グループ	5
	3.1	.1.	並列流体-構造連成解析手法の開発	6
	3.1	.2.	流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発1	3
	3.1	.3.	固体の表面性状を考慮したスプラッシュのシミュレーション1	7
	3.1	.4.	損傷理論を導入したボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張解析の基礎の	开
	究	•••••		1
	3.1	.5.	Mudcrack の3次元数値シミュレーション	5
	3.2.	大規	見模並列化グループ2	8
	3.2	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2	9
	3.2	2.2.	超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築	4
	3.3.	新規	見実験計測グループ	7
	3.3	8.1.	流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験3	7
	3.3	8.2.	画像処理を用いた野球ボールに働く空気力計測4	.5
	3.3	3.3.	運動する物体内部における流体挙動に関する実験的研究5	0
	3.4.	精厚	ぎ・ 妥当性検証グループ5	7
	3.4	l.1.	データ同化技術を用いた効率的精度解析技術の開発5	8
	3.4	l.2.	工学における最適化プロセスの完全自動化	2
	3.4	1.3.	物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発	4
	3.5.	可礼	見化検証グループ6	6
	3.5	5.1.	3次元画像による定量的・定性的検証	7
	3.6.	横脚	新的研究会7	2
	3.6	5.1.	連成標準問題検討会7	2

	3.6	5.2.	計算力学と(材料)データベースの会	72
	3.6	5.3.	楽器音響と流体構造連成研究会	72
4.	共同	司研	究	74
	4.1.	JST	「CREST プロジェクト	74
	4.1	.1.	研究実施体制	74
	4.1	.2.	研究実施内容	75
	4.2.	(株)日立製作所機械研究所との連携	75
	4.3.	独	立行政法人 原子力安全基盤機構との連携	75
	4.4.	東	京理科大学との連携	75
	4.5.	本	田技術研究所との連携	76
5.	成學	果の	広報および普及活動	77
	5.1.	第	3回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウム	77
	5.1	.1.	プログラム	77
	5.2.	第	10 回機械工学国際会議	
	5.3.	第	5 回国際スーパーコンピューティングワークショップ	79
	5.3	8.1.	実行委員会	79
	5.3	8.2.	プログラム	79
	5.4.	東	京都北区主催「ものづくり夜間大学校」	82
6.	学徒	析活	動	83
	6.1.	論	文投稿	83
	6.2.	総詞	説・解説・エッセイ	84
	6.3.	書	辭	84
	6.4.	学:	会発表	85
	6.3.	招征	待講演	89
	6.4.	受	賞	90
7.	研究	発グ,	ループ紹介	91
8.	結て	ブ		92

1. まえがき

本年度はセンターが活動を開始してからちょうど 10 年目にあたる. 過去 9 年間のうち, 5 年間は 私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」として活動を行ってきていたが, その後,私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定された.この報告書は,その3年目の活 動を中心にとりまとめたものであり,いわば第2期の中間報告である.

今回の、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体構造連成解 析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」としている.これは、それまでの流体解析や構 造解析といった個別の物理の解析から一歩進めてより複雑な、また現実的な問題に計算力学の手 法を適用しようとすることと、単に研究として行うのでなく、精度や妥当性を十分に検証し、あるいは その検証方法を確立することで、実用に耐えうるものとすることを目指してのことである.本年度は、 その3年目であり、各メンバー、グループの研究もようやく結果が出始めたところかと思う.それぞれ の進展については3章に詳しく述べられている.また、従来、韓国成均館大学、台湾龍華科技大 学と開いてきた学生ワークショップは拡大され、この報告が出る3月には中国および国内の他大学 も含めた形で開催される運びとなっている.さらに、戦略的研究推進事業 CREST やその他、センタ ーに関連する研究についてもふれている.

本年度は文部科学省に中間報告を出しており、これまでの成果をまとめ、残りの期間で何ができるか、何をすべきかもう一度見直す時期である。その中で、ある程度の成果は本報に含まれているが、まだまだ、物足りなく感じられる向きもあろうかと思う。今後ともさらなるご批判とご指導を賜れば幸いである。

2015年3月

東洋大学計算力学研究センター長 田村善昭

2. センターの概要

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

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

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

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

2.1. センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである.

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

2.2. 組織

計算力学研究センターの組織は以下の通りである.



図 2.1. センターの組織

2.3. 構成メンバー

計算力学研究センターは以下のメンバーで構成されている.

<u>センター長</u>

田村 善昭(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

<u>研究員</u>

芦野 俊宏(東洋大学国際地域学部国際地域学科教授)
江澤 良孝(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)
塩谷 隆二(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)
中林 靖(東洋大学総合情報学部総合情報学科准教授)
藤松 信義(東洋大学理工学部機械工学科准教授)

研究助手

長岡 慎介(東洋大学計算力学研究センター) 増田 正人(東洋大学計算力学研究センター) 谷村 景貴(東洋大学計算力学研究センター)

<u>学生</u>

島村 雅彦(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程) 高清水 聖(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程) 長尾 智(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士前期課程)

<u>客員研究員</u>

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

- 金山 寛(日本女子大学特任教授,九州大学名誉教授)
- 富山 潤(琉球大学工学部准教授)
- 古川 知成(バージニア工科大学工学部機械工学科教授)
- 松原 仁(琉球大学工学部助教)
- 横山 真男(明星大学情報学部情報学科准教授)

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

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

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

上記の事項を踏まえて、今年度は、以下の5項目について報告を行う.

- (1) 並列流体-構造連成解析手法の開発
- (2) 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発
- (3) 固体の表面性状を考慮したスプラッシュのシミュレーション
- (4) 損傷理論を導入したボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張解析の基礎研究
- (5) Mudcrack の3次元数値シミュレーション

3.1.1. 並列流体-構造連成解析手法の開発

(1) 目標·計画

本研究では、流体-構造連成現象を解く為の新しい解析手法を開発する事を目的としている.本研究では、流体-構造連成現象を解く為の新しい解析手法を開発する事を目的としている.本研究で提案するEnriched Free Mesh Method (EFMM)^[1]を用いた構造解析手法と、SUPG/PSPG 安定化有限要素法^{[2][3][4][5]}を用いた流体解析手法を組み合わせた、新しい流体-構造連成解析手法^[6]は、各解析領域場に使用するメッシュ分割パターンが共に線形要素であることから、流体-構造境界面における整合性を完全に得ることが出来、その結果、流体-構造連成問題を解く際に、非常に重要となる、各解析場の境界面の連成効果を考慮する際に生じる問題を解消する事に成功している.さらに、前述の通り、各解析場に用いられるメッシュ分割パターンは、線形要素のみであるにも関わらず、その解析精度は、従来の線形要素を用いた解析結果と比較して向上すると云う結果を得られている.この特長から、本提案手法は、大規模問題を解く際に、問題になってくる計算機リソースと、計算時間の大幅な抑制を可能にする事を意味している.一方で、本手法は、近年の大規模解析の際に、必要不可欠となる並列処理を施す際に、大きな問題を有する手法であることが明らかとなった.この問題は、EFMM の解析アルゴリズムに起因するものであった.昨年度、本提案手法による大規模並列解析を行うために、EFMMの並列解析手法の提案と実装を行い、その並列化効率の検証を併せて行い、概ね良好な結果を得ることが出来た.

平成26年度は、昨年度確立をしたEFMMの並列化手法を、我々が提案している流体-構造連成 解析手法へ導入し応用研究へ着手した.その課程に於いて、昨年度提案したEFMMの並列解析 手法のアルゴリズムに誤りがあることが明らかとなり、この点を修正した、EFMMの並列解析手法を 確立した.

併せて,新規実験・計測グループとの共同研究として,新規実験・計測グループにより提案された流体-構造連成現象に関する実験結果と数値解析との比較を行った.

次年度以降は、本提案手法の定量的評価と、実験により得られた実現象との比較・検証を基に、 本提案手法について纏める方針である.

(2) 意義・国際社会との比較

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

提案されている多くのアプローチは、流体解析手法として、粒子法を用いているものが、非常に 多い.メッシュ分割を必要としない粒子法を用いることで、解析場が大きく変動するような問題の解 析も容易になることから、流体解析場において多くのアドバンテージが得られることが、その一因で あると考えられる.しかし、我々の提案している手法は、流体解析場、構造解析場共に格子法を用 いている.格子法をそれぞれの解析場に用いる事で、粒子法を用いた流体解析と比較して、解析 領域の大きな変化に対しては、対応し難い面もあるが、解析精度の面では、粒子法を用いたアプ ローチと比較して大きなアドバンテージを有していると考えられる.

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

(3) 研究内容

(a) 並列 EFMM

我々が提案した EFMM の並列化のアプローチは、下記の通りである.

初めに,解析領域(図 1[i])を,従来の要素ベースの領域分割法を用いて,複数の局所領域に 分割する(図 1[ii]).

次に,分割された領域内にある節点が,それぞれ中心節点となる局所要素クラスターを生成する. この時,対象となる衛星節点は,分割された局所領域内の節点だけでなく,領域分割前の解析領 域(図 1[i])の全ての節点が対象となる.この時,自身の領域内の節点のみを対象として,局所要 素クラスターを生成すると,幾つかの局所要素クラスターは,不完全な形状となる為である.

具体的には、領域分割面上の節点は、正確な局所要素クラスターを作る事が出来ない.例えば、 図 1[ii]の局所領域[a]内の節点 8 は、本来、図 2 中の左側に記すような局所要素クラスターが生成 されるべきであるが、分割された局所領域内のみで、局所要素クラスターを生成すると、図 2 内、右 側に記したような、衛星節点の一部が欠落した不完全な局所要素クラスターが生成されてしまう. つまり領域分割された領域内の節点が、局所要素クラスターを生成する際に、解析領域内全ての 節点がその対象となるのは、EFMM を用いた解析を行う際、特に重要となる解析領域内全ての節 点が、正確な局所要素クラスターを生成するという点を遵守するためである.

なお、この工程を行うと、複数の局所領域に分割された各領域の一部は、幾つかの局所領域間 で重複する事になるが、ここまで得られた領域(図 1[iii])が、EFMM による並列解析を行う際の、各 局所領域となる.但し、計算過程における局所剛性マトリックスの生成に関しては、最初に要素分 割を行った際に、自身の領域内に含まれていた節点を中心節点に関する部分のみである、と云う 点に、注意が必要である.具体的には、図 1[iii]の局所領域 1 内では、節点番号 1,2,3,6,7,8,11,12,13 を中心節点とした局所要素剛性マトリックスを計算する事になり、節点 4,9,14,16,17,18,19を中心節点とした局所要素剛性マトリックスに関しては、不要となる.

7



Fig. 1 The flowchart of parallelization method for EFMM



Fig. 2 Example of created local elements cluster (L : correct , R : incorrect)

さて、これら分割された局所領域間の通信方法であるが、前述の通り、並列 EFMM では、要素ベースの領域分割を行っているものの、局所領域間での重複領域もあることから、通信方法は、従来の FEM の並列解析手法とは異なったアプローチが必要となる.



Fig. 3 The comparison of the communication cost

図3は、図1で示した領域分割手法により抽出された、局所領域を例に、本並列解析手法におけ る通信方法を示したものである.本研究では、ソルバーに共役勾配法(Conjugate Gradient Method) を用いるが、その際に、通信に必要となるのは、分割領域[A]では、節点番号 4,9,14,16,17,18,19 と なる. つまり、前述の局所領域内にありながら、中心節点として局所剛性マトリックスを計算する必 要が無い節点群に関して、他の局所領域から通信によってデータを受信する必要がある.具体的 に受信するデータは、上記の受信すべき節点が生成する局所剛性マトリックス内の、最初に領域 分割を行った際の境界面上の節点と、正確な局所要素クラスターを生成するために、後から追加さ れた重複節点に付随するデータとなる.

なお、重複節点群が生成する局所剛性マトリックスのデータの、境界面上の節点群に関するデー タは、自身の領域内の境界面状の節点に関する局所剛性マトリックスを生成した際にも一部計算さ れており、この部分を通信により足し合わせると、値が重複して、本来得られるべき全体剛性マトリ ックスの値と誤差が生じる.このデータの重複を防ぐために、重複節点群が生成する局所剛性マト リックスのデータの内、重複節点群に関する値に関しては、自身の領域内で計算された剛性マトリ ックスに上書きを行い、境界面上の節点に関する剛性マトリックスに関しては足し合わせる.具体的 には、図3中、領域[A]を例に取ると、領域[B]内の節点4,9,14を中心節点とする局所剛性マトリック スの節点4,9,14 に関するデータを受信、上書きをし、3,8,13 に関するデータは受信、足し合わせを 行う. 同様に, 領域[C]内の節点 16,17,18 を中心節点とする, 局所剛性マトリックスの節点 16,17,18 に関するデータを受信, 上書きをし, 11,12,13 に関するデータを受信, 足し合わせを行う. 最後に, 領域[D]内の節点 19を中心節点とする局所剛性マトリックスの, 節点 19 に関するデータを受信, 上書きをし, 節点 13 に関するデータを受信, 足し合わせを行う. すると, 局所領域[A]内の, 剛性マトリックスを正確に作成することが出来る.

このように、データ通信を行う節点毎に、境界面上の節点であるか、重複節点であるかによって処理が異なる事に注意が必要である.

なお,昨年度までに提案していた並列 EFMM のアルゴリズムにおいては,上記の,節点毎の処 理の違いを考慮していなかった為に,解析に誤りが生じていた.

本手法により,昨年度提案していた並列化手法と同等の並列化効率を得る事が可能となった.

(b) 数値解析例(実験との比較)

本項では、本提案手法を用いた数値解析と、新規実験・計測グループが行った実験との比較に ついて述べる.

実験モデルは、図4に示した通りである. 図中, 円柱が弾性体であり, この弾性体上面を固定し, 図中左側から流速を与える. 本実験では, 与える流速と円柱の物性値の関係により生じる, 円柱の 挙動の変化について明らかにする事を目的としている.



Fig. 4 The experimental model

図 5 は,円柱のヤング率を 9MPa とした際の挙動を示しており,その際の下端最大変位は, 0.5mm であった.



Fig. 5 Experimental result (Elastic modulus : 9MPa)

図6は,解析に用いたメッシュモデルである.



Fig. 6 Analysis model

上記の解析モデルを用いた数値解析結果では、円柱底面の最大変位量が0.15mmであり、実験結果で得られた 0.5mm と比較して変位量が小さくなっている.

現在,解析メッシュモデルの変更や,解析手法の高精度化を取り入れ,実験結果との誤差量の 減少を試みている.

(4) 平成 26 年度進捗状況

今年度は、昨年度までに提案してきた、EFMM の並列化手法における問題点を修正し、並列流体-構造連成解析手法を確立した.

本手法を用いた数値解析と実験結果の間には、大きな誤差がある為、解析メッシュモデルの変更や、解析手法の高精度化を行う必要がある.

来年度以降は,現時点で定量的な評価による健全性の証明には至っていない本手法の高精度 化を行い,実験との比較から本手法の健全性の証明を行う.

参考文献

- Yagawa, G. and Matsubara, H., "Enriched element method and its applications to solid mechanics", *Proc. Computational Method In Engineering and Science EPMESC X*, pp. 15-18, 2006.
- [2] Tezduyar, T.E., "Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations", *Advanced in Applied Mechanics.*, **28**, pp. 1-44, 1991.
- [3] Tezduyar, T.E., Mittal, S., Ray, S.E. and Shih, R., Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **95** pp.221-242, 1992.
- [4] Franca, L.P., Frey, S.L. and Hughes, T.J.R., Stabilized finite element methods I. Application to the advective - diffusive model, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95 pp.253-276, 1992.
- [5] Franca, L.P. and Frey, S. L., Stabilized finite element methods II. The incompressible Navier-Stokes equations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 99 pp.209-233, 1992.
- [6] S. Nagaoka, Y. Nakagabashi and G. Yagawa, Accurate fluid-structure interaction computations using elements without midside nodes. *Comput Mech.*, Vol. 48, pp. 269-276, 2011.

3.1.2. 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発

(1) 目標·計画

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

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

今年度は、簡単のため、2次元円柱の振動解析を行い、解析条件と解析結果のデータを48パタ ーン用いて mnSOM で学習し、予測と予測精度の検証を行った. mnSOM の学習は予測精度が不 十分であった. そのため、Deep Leaning 技術を用いた学習に着目した. まず、Deep Leaning 技術 を活用するためにコードを作成し、画像認識を行った.

平成 27 年度は、手書き文字認識の予測を CNN(Convolutional Neural Network)ではなく、 AE(Auto-Encoder)や RBM(Restricted Boltzmann Machine)を用いた Deep Leaning で行い、予測精 度を検証し、同様のネットワーク構造の Deep Leaning を用いた解析結果予測を行い、その予測精 度を検証し、ネットワーク構成や学習パラメータをチューニングする.

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

(3) 研究内容

SOM は, 高次元のベクトルデータを低次元空間(マップ)に写像するものであり, 高次元データの

クラスタリングを行える.また,マップを見ることでデータの特徴抽出やマイニングを行うことができる. mnSOM は SOM のマップユニット部分をモジュールに置き換えたものである.モジュールは MLP(Multi Layer Perceptron)に置き換えたものが主で,入出力関係を保持することができる.この mnSOM を用いると,分類後に未知の入力から想起して意図する出力を提示することが可能であり, 設計に用いることができる.

本研究での SOM に与える入力条件として, 円柱質量とバネ定数, ダンパー係数, 流速, レイノル ズ数, バネの固有振動数, 円柱振幅, 円柱振動数, 最大揚力係数, ストローハル数, 平均抗力係 数の 11 項目を与える.

流体-剛体連成解析は、ADVENTURE_Fluid を用いて数値解析した.移動境界問題を扱うためにALE法を、円柱の移動を計算するために速度 Verlet 法を用いた.解析モデルをFig.1 に示す. Table 1 に示した解析条件で計 48 通りの解析を行った.



(a) Model

(b) Mesh

Fig.1 Model of Analysis

	Input		Output			
Items	Unit	Ways	Items	Unit		
Mass of Cylinder	[kg]	0.5 1.0	Amplitude of Cylinder	[m]		
Spring Constant	[kg/s]	0.5 1.0	Frequency of Cylinder	[Hz]		
Dumper Coefficient	[kg/s ²]	0.0 0.01	Maximum Coefficient of Lift	[-]		
Flow Velocity	[m/s]	0.5 1.0	Strouhal Number	[-]		
Reynolds Number	[-]	100 500 1000	Average Coefficient of Drag	[-]		
Natural Frequency	[Hz]	-				

Table 1 Input-Output Relationship of mnSOM

mnSOMの学習では、48通りの学習データを円柱質量とバネ定数とダンパー係数(2×2×2=8)で集約して8グループを作成し学習させた.このときマップサイズは10×10とし、MLPの入力に6、出力に5、中間層を50とした.学習後の予測精度をTable 2に示す.予測精度は誤差で表し次式で定義する.

$$Prediction Error = \frac{\|Learned - Analysis\|}{Analysis} \tag{1}$$

	Minimum error		Maximum e	rror	Average error	
Known Data (Hidden 50)	3.7	%	84.4	%	21.0	%
Unknown Data (Hidden 50)	3.3	%	214.1	%	51.3	%
Unknown Data (Hidden 100)	4.5	%	155.6	%	53.1	%

Table 2 Prediction Error of mnSOM

mnSOM の予測精度は既知のときで平均 21%, 未知の場合では 51.3%と, 十分ではない. 中間 層の素子の数を倍に増やしたが, 最大の誤差は現象したものの, 平均誤差は改善しなかった. こ れは問題の非線形性が強いためだと考えられる. そこで, 非線形性に対応するために階層を深く したニューラルネットワークの学習法である Deep Learning を用いることを考えた.

Deep Learning の動作確認に為に手書き文字の認識を試験する. 試験データは MNIST^[4]を用いる. MNIST の画像は 28×28 画素で,6万枚の画像データ集である. Deep Learning は Auto-Encoder を階層的に積み上げたネットワークを用いる. ネットワーク構成は入力に 784,中間 層を516,256,128,64,32 ニューロンとし,出力層を Logistic 関数として 10 個を出力とした. 学習に 使う画像を 1000 枚として, Pre-training を 10000 セット, Fine-tuning を 5000 とし,学習係数は Pre-training, Fine-tuning ともに 0.1 として学習を行った. 検証には 20 枚の未学習データを与えた. 画像の一例をFig.2 に示す. 学習結果を表3 に示す. 結果より学習はうまく行えていないことが分かる. まだ内部にバグが混在している可能性が高い.



Fig.2 Figures of Handwritten character

(4) 平成 26 年度進捗状況

mnSOM を用いて円柱振動の予測を行った. 学習結果から非線形性が強いため, mnSOM だけ では予測性能を向上させるのは困難だと思われる. そこで, Deep Learning 技術に着目し, 予測精 度を向上させることを考えた. 階層型 Auto-Encoder を構築し, Pre-training, Fine-tuning のコードを 作成し,文字認識試験を行った. しかし,まだコードにバグが残っていると思われるため, バグの除 去と学習パラメータ, ネットワーク構造の調節を行っている. 今後は Deep Learning による識字率の向上, 振動現象の予測に応用することを考える.

		Output Factors									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	7	0.03316	0.00472	0.00014	0.02211	0.17155	0.00517	0.00278	0.71413	0.00872	0.03751
	2	0.55421	0.00318	0.01372	0.01831	0.00737	0.00057	0.00014	0.39777	0.00356	0.00117
	1	0.16919	0.00044	0.00015	0.00935	0.00794	0.00013	0.00003	0.80467	0.00169	0.0064
	0	0.26226	0.00079	0.00031	0.02818	0.00358	0.0287	0.00094	0.66061	0.00708	0.00755
	4	0.50348	0.00303	0.00112	0.00306	0.0307	0.00121	0.0287	0.02189	0.01218	0.39463
	1	0.26795	0.0004	0.00013	0.00712	0.01918	0.00016	0.00006	0.68628	0.00276	0.01596
	4	0.07135	0.01364	0.00001	0.02078	0.00149	0.00912	0.00249	0.8643	0.01007	0.00675
	9	0.15664	0.00108	0.00011	0.00115	0.02759	0.00058	0.00297	0.67904	0.12504	0.00581
	5	0.38801	0.01473	0.00252	0.05407	0.06469	0.02302	0.00106	0.08305	0.07776	0.2911
Treased	9	0.0035	0.0065	0.00001	0.00011	0.00011	0.0002	0.00001	0.98951	0.00002	0.00003
Input	0	0.35197	0.0329	0.00266	0.00917	0.07723	0.00685	0.02366	0.48356	0.00791	0.00409
	6	0.47125	0.11341	0.00046	0.00366	0.01642	0.0131	0.00268	0.36551	0.00111	0.0124
	9	0.1659	0.00747	0.00009	0.00447	0.42315	0.00037	0.04139	0.27618	0.07767	0.0033
	0	0.24693	0.01942	0.00109	0.05123	0.01304	0.0842	0.0117	0.53873	0.00513	0.02853
	1	0.09771	0.00022	0.03546	0.44935	0.00001	0.00002	0.00226	0.37547	0.03933	0.00017
	5	0.07339	0.00972	0.00339	0.01589	0.02465	0.03775	0.00083	0.81614	0.01778	0.00044
	9	0.0407	0.00076	0.00021	0.02306	0.63693	0.00024	0.02454	0.01933	0.16652	0.08769
	7	0.00952	0.0008	0.00053	0.02207	0.71052	0.00116	0.00288	0.23319	0.01519	0.00413
	3	0.02835	0.02553	0.00003	0.00403	0.0003	0.0142	0.00865	0.9082	0.00118	0.00954
	4	0.04753	0.00041	0.00003	0.0001	0.00009	0.00023	0.00054	0.95018	0.00084	0.00005

参考文献

[1] T.Kohonen, "Self-Organizing Maps", pringer-Verlag, 1995.

[2] Quoc V. Le, Marc'Aurelio Ranzato, Rajat Monga, Matthieu Devin, Kai Chen, Greg S. Corrado, Jeff Dean and Andrew Y. Ng, "Building High-level Features Using Large Scale Unsupervised Learning", Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning, 2012.

[3] A.Krizhevsky, I.Sutskever, G.E.,Hinton, "ImageNet Classifi- cation with Deep Convolutional Neural Networks"

[4] Yann LeCun, "The MNIST database of handwritten digits", http://yann.lecun.com/exdb/mnist/ (2015/1/12 現在)

3.1.3. 固体の表面性状を考慮したスプラッシュのシミュレーション

スプラッシュに関する最も古い研究は、1882年のWorthington[1]が行ったスケッチによるスプラッシュの形状の実験観察であるが、その中で彼は落下する球体が水面に突入する際に発生するスプラッシュの形状が球体表面の粗さや濡れ性に依存することを示した.物体の材質の違いの例として Fig.1 に示すようにハイドロゲルとアクリル樹脂によって、観察されるスプラッシュの形状に差が生じることが実験により明らかになっている[2].

しかし、これまでの数値シミュレーションにおいては、ほとんどが物体と液体の境界は滑りなし条件で設定されてきた。しかし、材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況が、 上述の観察のように落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ(飛沫)にみられるこ とが分かっていることから、物体の表面性状の違いを数値シミュレーションにも導入する必要がある。 つまり、同じ運動条件でも表面性状の違いによって周囲の流れ場は異なる現象になるため、この例 のように表面に滑りがあるような物体と流れの相互作用をシミュレーションで計算するには、物体と 流体の境界条件に表面性状の効果を記述するモデルを導入する必要がある。

スプラッシュのような自由表面を伴う流れ場の解析に有効な計算法として, 粒子法の一つである MPS 法(Moving Particle Semi-implicit 法[3], Fig.2)が近年盛んに利用されているが, 既存の方法 のままでは材質による差は表現できていない.本研究では, 表面性状の考慮が必要なシミュレー ションにおける物体壁面の取り扱いについて言及し, 壁面の滑りや静電気などの特性を考慮して 計算した粒子法シミュレーションを開発し, 実験との比較によって評価・考察しその有効性を示すも のである.

非圧縮粘性流体の流れ場を計算するにあたって、Navier-Stokesの支配方程式は次式の通りである.

$$\frac{Du}{Dt} = F - \frac{1}{\rho} \nabla P + v \nabla^2 u \tag{1}$$

ここで、uは流れ場の速度ベクトルで、 ρ は流体密度、Pは圧力、vは動粘性係数、そしてFは外力 項である.

本研究では、物体の表面性状を記述するモデルとして、Fig.1の実験の違いを再現するために、 両生類や爬虫類にみられる表皮のぬめりの成分であるハイドロゲルによる滑りと、アクリル樹脂のも つ静電気力を Navier-Stokes 式に適用する.

ーつ目のハイドロゲルの滑りを導入には、粘性項の計算における重み関数 κ に実験より得られた 滑り率を乗ずることとした(式 2). つまり、ハイドロゲルの表面を構成するパーティクルから半径 r_e に ある水粒子との粘性項計算についてのみ α を掛けた重み関数 κ_H で計算することで、壁面応力を α 分だけ小さくしハイドロゲル壁面近傍の滑りを表現した.また一方、アクリル樹脂のもつ静電気的な 引力にはクーロン力を模擬したモデルを導入した(式 3).

$$\nabla^2 \vec{u} = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{i \neq j} \left[(\vec{u}_j - \vec{u}_i) \kappa_H(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right], \kappa_H(r) = \alpha \kappa(r)$$
(2)

$$F = C_{E,ij} \frac{d\varphi_{ij}(r)}{dr}, \quad \varphi_{ij}(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_i q_j}{r_{ii}}$$
(3)

ここでαは滑りの程度を表す滑り率で、CE も引力の程度を調整する値でありそれぞれ材質や流体 によって変化する値で実験との比較によって決定される.

さらに、本研究では、クラウン状スプラッシュの先端形状 (finger / spike)の詳細なシミュレーションを 行うために、億単位の粒子数による高精度な 3D の大規模計算を行っている. その理由としては、 クラウンの先端にみられる spike/finger は各水粒子が飛散する際にそれらが集まって液滴が形成さ れると考えられるからで、そのシミュレーションのためにはより小さい粒子径で計算を行う必要があ る. また、そういった水分子同士の結合力の表現には、表面張力を計算モデルに導入する必要も ある.

Fig.5はその表面張力モデル(ポテンシャルモデル[4])を導入した粒子法(陽解法)による大規模 並列計算によるミルククラウンの計算結果である.水粒子は互いに引き合い spike 状の先端がスプ ラッシュに見られるようになってはいるものの,クラウンの形状が網状になってしまっているのでこの 点は今後の検討が必要である.

以上の研究結果については文献[5,6,7]に詳細を記している. 文献[5]は表面性状のうち固体の 滑りについてであり,文献[6]は電気的な引力について,文献[7]はこれらの実験とシミュレーション について概要を解説したものである.また計算手法については,主要な計算力学と可視化情報に 関する国際学会で発表している(文献[8]および[9]).



(A) Hydrogel (Agar)

(B) Acrylic resin

Fig.1 Difference of water splash by a sphere made of hydro-gel and a sphere made of acrylic resin. The picture at left is the splash of an agar sphere (Radius=10mm, S = 100), the picture at right is a splash of acrylic resin (Radius=10mm). The velocity impacting water surface in both photos was the same, but each splash's form was different.



Fig.2 Schema of MPS method and weight function κ . The *r* is distance between particles. The range where the effect of weight function acts is r_{e} .



Fig.3 Simulation result with slip effect of crown-type splash by hydro-gel sphere.





Fig.4 Simulation result with attractive force effect of column-type splash by acrylic resin sphere.



Fig.5 Simulation result of milk crown calculated by FX10. The number of particles is about 200 million.

参考文献

[1] Worthington AM (1882) On Impact with a Liquid Surface. Proceedings of the Royal Society of London 34:217-230.

[2] 横山真男, 菊地 謙次, 窪田 佳寛, 望月修, 物体壁面の表面性状を考慮した流れのシミュレ ーション, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.32 (2013) pp.319-326

[3] 越塚誠一, 粒子法 (2005), pp.10-29, 日本計算工学会.

[4] 近藤雅裕, 越塚誠一, 滝本正人, MPS 法における粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力, Transactions of JSCES (2007)

[5] Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences Vol.1:1 (2014) pp.1-14

[6] Yokoyama, M., Murotani, K., Yagawa, G., and Mochizuki, O. Some Considerations on Surface Condition of Solid in Computational Fluid-Structure Interaction. In Numerical Simulations of Coupled Problems in Engineering (2014) pp. 171-186, Springer International Publishing.

[7] Yokoyama M., Mochizuki O., Yagawa G., Surface Condition of Solid in Splash Formation. IACM expressions No.34 (2014) pp.2-5.

[8] Masao Yokoyama, Kohei Murotani, Genki Yagawa and Osamu Mochizuki, Fluid-Structure Interaction Analysis with Slippery Mucus Skin, 11th World Congress on Computational Mechanics, Barcelona, Spain, 2014.

[9] M. Yokoyama, K. Murotani, K. Kikuchi, G. Yagawa, O. Mochizuki, How deal with slippery surface between fluid and structure in particle method?, 16th International Symposium on Flow Visualization, Okinawa, Japan, 2014.

3.1.4. 損傷理論を導入したボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張解析の基礎研究

(1) 目標·計画

社会基盤を支えるコンクリート構造物の劣化原因のひとつにアルカリシリカ反応(以下, ASR)がある. ASR は、コンクリート中のある種の反応性骨材(鉱物)とアルカリ性細孔溶液との化学反応により、ゲルを生じ、そのゲルが吸水することで、膨張圧が生じる現象をいう. ゲルの吸水膨張に伴う膨張圧により、コンクリートに有害なひび割れを生じるケースや、鉄筋破断が生じケースがあり、ASR 劣化は、コンクリートの耐久性、耐荷性の低下につながることから、本研究では、ASR の膨張挙動 を精度よく予測するための数値解析手法を構築することを目標とする.

ASR の膨張挙動は、骨材寸法や形状に依存することが考えられるため、それらの膨張挙動を解 析するために、本研究では、コンクリート中の骨材が考慮可能な損傷理論を導入したボクセル有限 要素法を用いた.

今年度の計画では、1)粗骨材の寸法・形状をモデル化したボクセルデータ(以下、コンクリートモデル)の作成、2)コンクリートモデルを入力データとし、損傷力学モデルの概念を導入したボクセル 有限要素法(以下, DM-VFEM: Voxel FEM incorporated with the Damage Mechanics)を用いた数 値解析の基礎的な検討を行う.

(2) 意義・国際社会との比較

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

(3) 研究内容

(3)-1 コンクリートモデル

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

コンクリートモデルの作成は、まずはじめに、粗骨材の形状を画像として取り込み、画像から粗骨材の形状を考慮したポリゴンデータを作成する。つぎに、作成した粗骨材のポリゴンデータからボクセル要素で分割した粗骨材ボクセルモデルを作成し、これをコンクリートモデル内に配置し、2層系のコンクリートモデルを作成することができる。図-1にその概念図を示す。



(3)-2 連成解析手法

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

図-2 に解析フローチャートを示す.連成解析では,最初に非定常拡散問題を解き拡散物質(アルカリイオン)の空間分布を予測する.そして,イオン濃度の空間分布から粗骨材の膨張力を決定する.この際,膨張力によって不連続面と判定される要素は,高い拡散係数に置換し,再び拡散問題を解く.これを繰り返すことで,浸透・拡散に伴う不連続面進展解析を実施する.

(3)-3 数值解析例

図-3 に解析に用いた 40×40×40mm のモデルを示す.1 ボクセル 1mm³であり, 粗骨材量を10% とした. 表-1 に各種係数を示す.アルカリ量に応じた膨張ひずみを粗骨材に与え, ASR の膨張を 表現した.境界条件は yz 面以外の面に対して面外方向の変位を拘束し, 両 yz 面からアルカリを 拡散浸透させている.

	表-1 各種係数					
		モルタル	粗骨材			
22 P	拡散係数	$1.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$	$1.0 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$			
~ 982 C	弾性係数	20GPa	60GPa			
Z OFA	引張強度	4.0MPa	破壊しない			
図-3 解析モデル(40×40×40mm)						

次に解析結果を示す. 図-4,5はそれぞれ中央断面の1日,25日,30日,75日のアルカリ浸透 解析およびひび割れ進展解析の結果である.これよりアルカリの浸透とともに内部のひび割れの進展も確認できる.



図-6には表面ひび割れの状況を示す.反応した骨材の膨張に伴い,無拘束のX方向に膨張が 生じ,30日でY軸に沿ったひび割れが入る.そこからひび割れが進展し,亀甲状のひび割れが確 認できる.しかし,今回の解析ではアルカリの消費を考えておらず,無限に膨張し,ASR の収束が 考慮されていない.化学反応モデルの高度化については,今後の課題である.



(4) 平成 26 年度進捗状況

(3)に示した通り、ASR 膨張予測のための数値解析手法の適用性が示された. 今後は、大規模

な解析が予想されるため,並列計算(MPI+OpenMP ハイブリッド)を用いた高速化および解析パラメ ータを求めるための,実験をあわせて行う予定である.

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

3.1.5. Mudcrack の3次元数値シミュレーション

(1) 目標·計画

地盤の内部には大小様々な亀裂が存在し、それを成す材料は不均質かつ不確実なものである. 特に、粘質土壌が乾燥する過程で生じる亀裂は、乾燥収縮亀裂と呼ばれ(以後, Mudcrack と呼ぶ)、田畑や干潟等の地表面だけでなく、地層中でも見ることができる. Mudcrack の進展現象は、 極めて複雑な挙動を示すことから、亀裂発生の力学的メカニズムに関する系統的な研究例は多く なく、十分に理解されているとは言い難い状況がある.

そこで本研究では、Mudcrack を数値シミュレーションにて再現することを指向し、3 次元有限要素法に 基づく新たな数値解析手法を開発し、Mudcrack の亀裂進展解析を実施した.また、提案するモデルを検 証するために、数値解析により得られた亀裂パターンのフラクタル次元を、実験値と比較することにより、 本手法の妥当性を検討した.なお、前年度までに、深層崩壊や表層崩壊を誘発するような様々な形 状を有する岩盤(岩山、連峰)や海底地すべり地層のモデル化技術、地盤の流動解析技術を構築 したが、本研究は、地盤の内部構造に関する研究となっている.

(2) 意義・国際社会との比較

Mudcrack は、粘質土壌の乾燥過程で生じる乾燥収縮亀裂現象として知られており、不可逆性の非線 形現象のひとつである. Mudcrack に関する工学的な問題としては、例えば、一般廃棄物や産業廃棄物、 有害廃棄物等の最終処分場にて使用される土壌ライナーに Mudcrack が発生することにより汚染物質が 拡散する等を挙げることができ、人間生活の安全・安心の観点からしても極めて重要な問題とされている. また、粘性土に乾燥ー湿潤のサイクルを複数回繰り返すと、Mudcrack により発生したブロックが細分化さ れることが知られており、岩盤風化の本質的な力学的メカニズムのひとつとして考えられている. したがっ て、Mudcrack の発生メカニズムや亀裂パターンの評価手法を構築することは工学的にも重要な課題であ ると言える. しかしながら、その力学的メカニズム等の詳細は未だ解明されておらず、材料の種類や環境 変数を考慮した検討が必要視されている. 一方、破壊力学や流体力学等の様々な分野において、3 次元 数値解析や大規模解析が研究されているにもかかわらず、Mudcrack の亀裂進展現象の数値解析手法 に関する研究は、単純モデルによる研究は存在するが、系統的な詳細モデルについては国際的に見て も見当たらず、未だ達成されていない. したがって、本研究の国際社会における意義は極めて大きい.

(3) 研究内容

本研究では、粘性土壌内部の水分の蒸発に 伴って発生するひずみを乾燥収縮ひずみとし、 次式にて定義した.

$$\mathbf{\varepsilon} = \mathbf{\varepsilon}^e + \mathbf{\varepsilon}^s \tag{1}$$

ここで, **&** :全ひずみテンソル, **ɛ**^e :弾性ひずみ テンソル, **ɛ**^s :乾燥収縮ひずみテンソルである. なお, 本研究では, **ɛ**^s を次式にて仮定した.

$$\mathcal{E}_{ii}^{s} = -\left(\frac{\exp(-\beta t) - 1}{\exp(-\beta) - 1}\right) \quad ; \quad t = \frac{z}{z_{\max}} \qquad (2)$$



ここで, z:試料表面からの距離, z_{max}:試料の厚さを意味する. 本モデルでは, 図-1.1.5-1 に示すように, β 値が大きい程に表面乾燥が激しく, β値が小さい程に表面乾燥が穏やかである状況を模擬している. ポテ ンシャルエネルギー原理に, 式(1), (2)で表される乾燥収縮ひずみを外力項として考慮すると, 次式のよう になる.

$$\int_{V} \mathbf{B}^{T} \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{u} dV = \int_{V} \mathbf{B}^{T} \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}^{s} dV$$
(3)

ここで V:物体の体積, B:ひずみ-変位マトリックス, D:応力-ひずみマトリックス, u:節点変位ベクトルで ある. 本研究では, これらの式を支配方程式として用い, 亀裂進展解析を実施した. なお, 亀裂進展解析 では, 全領域において最大主応力の最大値を静弾性解析にて求め, 1 ステップごとに, 最大主応力が得 られた要素を亀裂要素として解析を進めた.

図-1.1.5-2 及び図-1.1.5-3 に, β =3.0 及び β =-3.0 の場合の亀裂進展の様子をそれぞれ示す. β 値によ らず, 亀裂は約 90°で連結している様子が分かる. これは, 実際の地盤でも観察できる現象である. また, β =3.0 における亀裂は β =-3.0 の場合よりも多く分布している. これは, 外気温が高い等の影響によって, 土壌表面が乾燥し易い状況では, 亀裂が多く発生し, 多くの Mudblock が生成されることを示唆するもの である. このことについては, 実験などを組み合わせて本シミュレーション結果を検証していく必要がある. なお, 詳細は割愛するが, 本シミュレーションによって得られた亀裂パターンのフラクタル次元は約 1.45 次元であり, 粘性土(ベントナイト)の実験値:1.46 次元と近似していることを明記しておく.



(4) 平成 26 年度進捗状況

今年度は、地盤内部の亀裂分布や亀裂の生成メカニズムを評価できる手法の確立を目的とし、 Mudcrack現象が再現できる3次元数値シミュレーション技術を構築した.その結果、観測値と解析 結果が同程度な値を示し、その有用性が検証された.今後は、実験値との比較など、更なる検証 を進めて行く予定である.

27

3.2. 大規模並列化グループ

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

今年度は,以下の項目について報告を行う.

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

3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発 (1) 目標・計画

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

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

(3) 研究内容

(a) DDM (Domain Decomposition Method, 領域分割法) 入出カライブラリ

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

(b) DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は、マルチレベル領域分割法に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メ

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

これは,

・多階層領域分割に基づく分散メモリ並列向け線形代数ソルバーの構築

・多階層領域分割に基づくマルチレベルコースグリッド修正法の開発

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

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

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

(4) 平成 26 年度進捗状況

(a) DDM 入出カライブラリ

平成26年度は、次の研究項目の研究開発が進められた.

1. 多階層メッシュ・メッシュフリー対応 AdvIO

平成 26 年度は、本研究項目の開発を大幅に進めた. 非構造格子向け領域分割ツールに、

多階層の領域分割を並列計算機上で行える機能を付け加えた[5]. 多階層に領域分割された メッシュをソルバーに受け渡すためのデータ仕様を検討し始め完成しつつある. また, 大規模 データ向け I/O ライブラリの開発に一定の成果がでたため, 今後, 本 I/O ライブラリはβ版公開 を行う予定である.

2. メッシュ向け DDM 圧縮

平成 26 年度は,非構造格子向け DDM 圧縮技術の実装を開始し, FEM による熱伝導解 析を対象に基本機能を開発した. 今後, 大規模解析への適用を開始する予定である.

3. 並列 IO·DDM 圧縮対応 AdvIO

平成 24 年度に開発開始した VSCG の β 版を完成させ,高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG として公開する準備を行った.さらに,粒子向け可視化機能を強化し,半透 明可視化機能やポリゴンとの融合可視化機能の開発を進めている.また,LexADV_VSCG を 高並列環境で実行するための,高精細並列オフライン可視化ツール LexADV_WOVis を開 発し,公開する準備を行った.さらに,LexADV_WOVis の β テストとして, HPCI 戦略分野 3 で実施された 2 億自由度規模超高層ビル地震応答シミュレーション結果の京による並列可視 化を行い,図1に示す1万×1万ピクセルの高解像度可視化に成功した.

今後は「DDM 入出力ライブラリ」β版に対する,ユーザーによる性能評価を行う予定である.



図1 超高層ビル地震応答シミュレーションの高解像度可視化例

(b) DDM ソルバーライブラリ

平成26年度は、次の研究項目の研究開発が進められた.

1. メッシュ向け DDM ソルバー

非構造格子向け DDM 反復法ライブラリの開発を継続して進め、DDM に基づいた 2 種類の反復法(DDM-CR 法、DDM-MINRES 法)と1 種類の前処理(N-N 前処理)の実装を完成させた. LexADV_IsDDM として、 β 版公開を行う予定である. また、DDM ソルバーライブラリ LexADV_TryDDM の β 版を完成させ、公開する準備を行った. 本ライブラリは、既存の反復

法ライブラリユーザーに対して DDM 反復法の試験環境を提供するものであり, ユーザーニー ズのフィードバックを可能とする仕組みでもある. 本ライブラリを用いることで, これまで困難で あった DDM 向け前処理と ILU や SSOR などの一般的な前処理との性能比較も可能となっ た.

また,電磁場ソルバー等で需要がある複素数への対応を進めた. C 言語における複素数型 に関して複数の実装を行い,性能評価を行った. さらに,アルゴリズムの見直しによって DDM-COCG 法の部分領域問題ソルバーに直接法を適用可能とするなど,最適化を行った. これにより,時間調和渦電流問題解析において,東京大学 FX10の96ノードでピーク性能比 0.9%から7%へ向上させることに成功した.

2. 熱・構造 FEM 向け多階層前処理

平成24年度に提案した異種材料混在モデルに適したBDD前処理法について,複数のモデルで追加実験を行い,モデルによらずに性能改善の効果が得られることが分かった.また,BDD前処理の多階層化について継続的に開発を行っている.

- 3. 流れ・電磁界 FEM 向け多階層前処理 平成 26 年度は,電磁界問題向けに BDD 前処理の統一的構築方法を提案し,開発を継続 的に行った.
- 4. メッシュ・メッシュフリー向け多階層 DDM
 - 平成 24 年度から開発を続けていた MPS 陽解法(粒子法)向けライブラリが完成した. 流体 と多数の剛体との連成解析が新たな機能として追加された.本粒子法ライブラリは, LexADV_EMPS として β 版公開を行う予定である.また,粒子型解法の基礎となる近似作用 素に関して,数学的な打切り誤差評価や,より高精度な近似手法の提案を行った.

(c) 連続体力学向け DSL

平成26年度は、次の研究項目の研究開発が進められた.

1. DSLトランスレータ

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

2. SIMD·GPU 向け最適化 AutoMT

平成 26 年度は、マルチコア及び SIMD 命令セット向け最適化ライブラリの開発を更に進め
た. 開発中の①構造解析・要素剛性, ②非線形材料構成則, ③熱伝導解析・要素剛性のそ れぞれの行列テンソルライブラリでは, Intel (Sandy Bridge)でピーク性能比①60%, ②27%, ③50%を達成し, 東大 FX10 ではピーク性能比①35%, ②14%, ③38%を達成することに成功 した. また, GPU・MIC 向けの開発を重点的に行った. パフォーマンスはまだ出せていないが, GPU では CUDA 及び OpenACC, MIC ではネイティブ実装及びオフロード実装での実装に 成功した.

3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

(1) 目標·計画

(A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

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

(B) 熱対流解析コードの機能強化

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

(3) 研究内容

(A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

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

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

(B) 熱対流解析コードの機能強化

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

(4) 平成 26 年度進捗状況

(A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

今年度はBDD前処理の実装実現のために1コア処理に限定して三つの課題を設定した.一つ はシュアコンプリメント行列Sとベクトルpの積qを計算する部分を独立して利用可能にすること, 二つ目はノイマンノイマン前処理を実装させること ADVENTURE_sFlow, 三つ目はコース行列を 作成し,それを既存のパラレルソルバーで解くことである.この三つが実現できれば,BDDの実装 はほとんど実現できると言ってよいほどの重要な3項目になる.ノイマンイマン前処理は2005年 に一度成功した実績があるが当時の記録が紛失しており,新たな開発を行うことになった.現時点 ではコードの骨格はできたが,残念ながら効果が全く出ていない.部分領域数が大きくなると手法 自体の特徴として効果が出ないのか,何かミスを犯しているのかを見極める必要がある.3番目の コース行列作成もテストランは行えるようになったが,今後もう少し検討が必要と思われる.予想外 に時間がかかっているのは最初のq=Spの計算であり,いくつか試みたがまだうまくいっていない. 年度末までにLexADVのTryDDMを試して,1コアのBDD前処理に見通しをつけたいと考えて いる.

(B) 熱対流解析コードの機能強化

このテーマは今年度の課題として公開用ドキュメントの整備以外に以下の4課題を設定した.す

東洋大学計算力学研究センター 2014 年度 年報

なわち ADVENTURE_sFlow への機能強化として

・熱方程式部分への DDM フレームワークの適用

・熱流束境界条件入力機能の追加

・熱伝達境界条件入力機能の追加

・BDD 前処理における通信処理改善の検討

を図るものである. 最初の DDM フレームワークの適用は(1)のテーマの A)の研究テーマと連携しな がら,開発ライブラリのプロトタイプ(LexADV の TryDDM)のテストを兼ねたものであり,一応利用 可能になった. 2 番目, 3 番目のテーマは 1 番目のテーマが可能になった時点で, DDM フレーム ワークでの実現が可能になった. 4 番目は派生した問題を解決しながら検討を続けた結果,これも 可能になった. 以上の成果を踏まえて ADVENTURE_sFlow の Ver.1.0 の年度内公開に向けて準 備を進めている

3.3. 新規実験計測グループ

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

(1) 目標·計画

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

(3) 研究内容

2012 年度は風洞試験装置システムの整備期間であり、2013 年度は基礎試験、2014 年度以降 は応用的な実験を検討している.基礎試験ではシートフラッタ実験を行い、応用的実験では航空 機模型のフラッタ実験、フラッタの工学的利用や弾性皮膜による流体抵抗低減を目指した研究を 行う予定である. Figure 1 は風洞試験装置の概要図である.実証試験では実験模型の運動解析、 空気力計測、PIV流れ解析を組み合わせた流体実験を行う.



Fig. 1 Low-speed wind-tunnel system.

本風洞試験装置により実施できる試験内容は以下の通りである.

- [1] 高速度カメラによる3次元運動解析
- [2] レーザ変位計による変位測定
- [3] 6分力天秤による空気力・モーメント測定
- [4] ひずみゲージ測定
- [5] 煙発生器による流れの可視化
- [6] PIV解析による流れの可視化

(4) 平成 26 年度進捗状況

昨年度はフラッタ試験装置を製作し、シートフラッタの周波数特性と3次元運動解析システムの 動作試験を行った.今年度はシート材の材質、サイズに対する周波数特性の詳細を調べた.また 数値計算と比較するための実験も行った(この内容については解析手法開発グループの報告でま とめている).

(4)-1 フラッタ限界風速(シート材の長さLの影響)

風速の上昇時と下降時で、フラッタ現象は発生する速度と終了する速度が異なる.本節では、シート材の長さと風速の関係について、ウレタンゴムとネオプレンゴムの結果を考察する. Tables 1,2 はシート材の長さに対するフラッタ開始風速と終了風速を示している. これらの結果から、シート材の長さが短いほどフラッタ開始と終了の風速が増すことがわかる. Figs.2,3 は Tables 1,2 の結果を

グラフ化したものである.シート材の長さが長くなるにつれて、フラッタが発生しやすくなる.またシート材の長さを100mmから150mmに変化させるとフラッタ限界風速が大きく変化し、それ以降はシート材が長くなるにつれて速度の変化率は鈍化していくことがわかる. Fig. 2 からウレタンゴムのフラッタ限界風速は単調減少しているが、ネオプレンゴムのフラッタ限界風速はある一定速度に漸近しており、一様にフラッタが発生しやすくなるとは限らないことが分かる.

Table 1 Critical flutter speed (urethane-rubber). Table 2 Critical flutter speed (neoprene rubber).

Sheet length [mm]	Start speed [m/s]	End speed [m/s]	Sheet length [mm]	Start speed [m/s]	End speed [m/s]
100	21.40	19.95	100	15.77	8.32
150	15.60	11.22	150	8.83	5.39
200	10.48	7.75	200	7.14	3.67
300	7.04	4.04	300	6.27	4.79



Fig.2 Critical flutter speed of urethane rubber.



Fig.3 Critical flutter speed of neoprene rubber.

(4)-2 フラッタ限界風速(シート材の厚さtの影響)

Table 3, Fig.4, 5 はネオプレンゴムに関するシート材の厚さtとフラッタ限界風速の関係を示している. シート材の厚さは 0.3mm から 1.0mm まで変化させた.

Table 2を見ると、シート材の厚さが増すとフラッタ限界風速が増加する傾向にあることが分かる. また、シート材の長さが増すと100、150、200mm ではフラッタ限界風速は減少する傾向にある.す なわち、シート材の長さが長いはフラッタが発生しやすいことが伺える. Fig. 4、5 はシート材の厚さ に対するフラッタ限界風速の変化を、シート材の長さについて整理している. 長さ100mmの場合は 厚さが増すとフラッタ限界風速の増加が顕著であるが、それ以外の長さでは厚さが増すと一定の 風速に近づいているように見える. Fig. 5 は 100mm 以外の *t* = 0.8mm の結果が読み取りにくいが、 Fig. 4 と同様に一定の風速に近づいているように考えられる. シート材の L = 300mm, t = 0.3mm の 結果は擾乱の影響を受けやすくなるため, フラッタが発生しやすくなる. そのため, L = 150, 200mm, t = 0.3mm の結果と比べるとフラッタ限界風速が低下している.

Table 3 を見て分かるように、シート材の厚さが薄く、長さが長いほどフラッタが開始しやすくなり、 また、フラッタ開始風速と終了風速の差も小さくなる. つまり、フラッタが発生しやすいと言える. す なわち、以上の結果からフラッタ現象を抑えるには、シート材の厚さを増して、長さを短くすると良い と考えられる.

Table 3 Comparison of flutter velocities with different thickness for increasing and decreasing flow

speeds.

	100mm		150mm		200mm		300mm	
thickness	Start	End	Start	End	Start	End	Start	End
0.3mm	5.53	3.67	2.97	2.59	2.22	1.28	4.25	3.34
0.5mm	10.62	5.49	7.55	4.65	6.23	2.80	5.70	4.28
0.8mm	12.47	6.94	7.89	3.98	7.51	3.74	6.17	4.11
1.0mm	15.77	8.32	8.83	5.39	7.14	3.67	6.27	4.79

Table 4 Comparison of flutter velocities with different thickness for increasing and decreasing flow

speeds.

	100mm		150mm		200mm		300mm	
thickness	Start	End	Start	End	Start	End	Start	End
0.3mm	5.53	3.67	2.97	2.59	2.22	1.28	4.25	3.34
0.5mm	10.62	5.49	7.55	4.65	6.23	2.80	5.70	4.28
0.8mm	12.47	6.94	7.89	3.98	7.51	3.74	6.17	4.11
1.0mm	15.77	8.32	8.83	5.39	7.14	3.67	6.27	4.79



Fig.4 Flutter velocity with different thickness for increasing flow speed.



Fig.5 Flutter velocity with different thickness for decreasing flow speed.

(4)-3 フラッタ周波数特性(材質による比較)

Fig. 6 は L = 150mm, t = mm のウレタンゴムの周波数特性を示している. 回転軸から 25mm, 40mm, 55mm, 70mm, 85mm 下流の5点について, レーザ変位計を用いてシート材の変位を測定し, FFT 解析を行った. 場所によらず, どの位置でも同じ周波数でピークが得られていることから, 計測しやすい 25mm の位置で測定を行った.

シート材の材質と大きさを変化させて、風速と振動数の関係を比較した結果を Fig. 10 に示す. 一般に塩化ビニルは黒天然ゴムに比べ硬度、ヤング率が高い. そのため、塩化ビニルはフラッタし にくく、フラッタ開始速度と終了速度の幅が大きい. 一方、天然ゴムやネオプレンはフラッタ開始速 度が塩化ビニルの L=300mm の結果よりも低くなっている. これはヤング率が低いため、フラッタが 発生しやすいからと考えられる. 材質が等しい場合、シート材の長さが長くなるとフラッタ限界風速 と振動数が減少していくと共に、フラッタ開始速度と終了速度の幅が狭まることが分かる. また、ヤ ング率の高い塩化ビニルやウレタンゴムの方が、ヤング率の低い天然ゴム、ネオプレンゴムよりも振 動数が増しており、ゴムの硬さがフラッタの振動数に関係していることが分かる.



Fig.6 Power spectrum with different length.



Fig. 7 Characteristics of flutter frequency with different sheet materials.

(4)-4 シート材のフラッタ運動

Fig. 8 はフラッタ運動しているシート材の瞬間画像を示している. シート材の材質は塩化ビニル (L=150mm) を PVC, フッ素ゴム (L=150, 200mm) を FPM で示した. フッ素ゴムに関しては風速 によるシート材の運動の違いも示した. Fig. 8 からシート材の材質により, 風速, シート長により振動 パターンが異なることがわかる. シート材のフラッタ周波数も同様に風速, シートサイズ, 材質によっ て異なっている.

実験に使用したシート材のうち代表的なものについて、3 次元運動解析を行った(Fig.9). シート 材の表面には 13 個のマーキングを施しており、ステレオ撮影によりフラッタ運動の軌跡を追跡した. シート材の材質は塩化ビニル、シート材の大きさは *L* = 300mm、*t* = 0.5mm であり、振動モードを調 べるために異なる風速(*U* = 10.8、13.3[m/s])で追跡を行った.

風速が増すと振動モードと振幅が変化する.回転軸から最も下流の3点の軌跡を比較すると, 顕著な違いを確認できる.3次元運動解析の結果から,軸から離れるにつれ規則的な軌道を描い ている.さらに風速を上げるとシート材の変位が増すため,軌跡は大きくなる.また固定点から離れ るに従い8の字を描いて周期的に振動していることがわかる.

42



(a)PVC 150[mm],U=18.2[m/s]. (b) FPM200[mm],U=15[m/s].



(c) FPM 150[mm], U=15[m/s]. (d) FPM 150[mm], U=5[m/s]. Fig.8 Comparison of flutter mode.



(a) U = 10.8 [m/s]. (b) U = 13.3 [m/s]. Fig. 9 Trajectory of the marker point of the sheet material.

(4)-5 無次元周波数特性

Fig.10 は塩化ビニル(PVC)と天然ゴム(NR)のフラッタ周波数を,レイノルズ数 Re とストローハル数 St によって無次元化して整理したグラフを示している.流れ方向のシート長さ L を代表長さとして 150, 200, 300mm と変化させ,その時における振動数と流速の関係を示している.

Fig.10 を見ると塩化ビニルの値はレイノルズ数に対してストローハル数は一定である.また天然ゴムの結果も300mmを除いて一定である.これはフラッタ周波数と風速の増加が比例することを意味する. *L*=300mm の結果に関してはシート長さが長すぎたため,フラッタが不規則であったため,一定値になっていない.しかし,どちらの結果もレイノルズ数に対してストローハル数が一定となる範囲が存在することが分かる.



Fig. 10 Non-dimensional characteristics of flutter frequency.

(4)-6 まとめ

シート材の特性によりフラッタ発生の条件は以下のように整理できる.シート長さを長くする,もし くはシート材を薄くすると,フラッタが発生しやすくなることが確認できた.また,シート材の剛性を下 げていくとフラッタが発生しやすくなる傾向があることが分かった.風速を増すことにより,フラッタ周 波数は上昇し,振幅も大きくなる.フラッタ発生時は無次元周波数 St が Re によらず一定になること から,風速の上昇に伴いフラッタ周波数も比例して増すことがわかった.

参考文献

- 1) 黒川雄太,フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定:その2 重量比およびアスペクト比が風荷重に与える影響(膜構造:風洞,構造 I),日本建築学会学術講演梗概集,B-1,(2007).
- 2) 伊藤憲一, 剛体と弾性体を用いた翼のフラッタ特性に関する研究(GS 流体工学(流体計 測,翼など)), 日本機械学会, 東海支部総会講演会講演論文集,(2009).
- 3) 小河利行,フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定,日本建築学会構造工学論文集, B, (2007)
- 4) 吉村友里, フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定, 日本建築学会学術講演梗概集, B, (2006).

3.3.2. 画像処理を用いた野球ボールに働く空気力計測

(1) 目標·計画

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

(2) 意義・国際社会との比較

物体に作用する空気力特性を調べる風洞実験,数値計算は多数行われているが,殆どの研究 が一定速度での解析であり,本研究で目的としている加速度運動時の空気力特性を調べた研究 例は数少ない.本研究では,加速度運動する物体に作用する空気力を実験的に測定し,その特 性を明らかにすることが目的である.本研究の成果は,移動するビークルを設計する上で,渋滞と は異なる新機体形状を提案するために活かされるものと考えられる.

(3) 研究内容

球技で使用されるボールに働く空気力特性やボール周りの流れの特性を調べることは、流体力 学において興味深い研究対象の一つであり、これまでに球技で使用されているボールについて多 くの研究例がある.特に、野球ボールにおいては実験的研究、数値的研究が盛んに行われている. しかし、実験的研究の多くは風洞装置を使用して行われたものであり⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾、一定風速の下で試験さ れている.野球ボールは投手の手を離れると空気抵抗や重力、ボールの回転により発生する空気 力によって軌道が変化する.ボールの抵抗係数は、球速により変化するが、実際に投手が投げる 軌道の球速変化の効果を空気力パラメータに考慮した研究例は、著者らが調べた限り数少ない ^(6.7).このような背景から、実際の投球時における野球ボールについて加速度依存性を考慮した空 気力特性を明らかにする必要がある.

2014年度は基礎試験としてピッチングマシンによるボールの射出実験を行い,加速度運動する 物体の空気力特性を調べる.2015年度以降は宇宙機模型の射出実験を行い,機体に作用する 空気力を加速度と速度をパラメータとして調べ,機体設計に応用するための指針を得る.

(4) 平成 26 年度進捗状況

2014年度はピッチングマシンにより野球ボールとラクロスボールを射出して、その運動の画像解 析から空気力特性を調べる。2015年度以降はロケット模型の射出実験を行い、加速度運動する 機体の空気力特性を把握することで、新機体形状の提案に活かしたいと考えている。

(4)-1 実験装置の概要

本実験では,投手の投球軌道を再現するために,日本JUGS社のオールラウンドピッチングマシンを使用した.実験の概要図をFig.1に示す.ピッチングマシンからボールを打ち出し,その軌道を2 台のハイスピードカメラで撮影した.打ち出されたボールの並進運動の撮影にはノビテック社の

Phantom Miro M/LC310, 回転運動の撮影にはノビテック社の Phantom V4.2 を使用した. フレームレートはそれぞれ 1000[fps]に設定し撮影を行った. ハイスピードカメラはそれぞれパソコンに接続されており, 撮影した動画はパソコンに保存される.

実験条件はピッチングマシンの2つのホイールを地面と垂直になるようにし、上のホイールのダイ ヤル設定を40~60、下のホイールのダイヤル設定を100に固定し、ボールにバックスピンがかかる よう設定した.ボールを打ち出す際は日本において最も一般的なストレートであるフォーシームの 回転になるよう縫い目の角度を調整した.



Fig. 1 Schematic picture of experimental setup.

Fig. 2 Painted baseballs.

使用したボールは、ミズノ社の硬式野球ボール(大学試合用)、ナガセ・ケンコー社の軟式野球ボ ール(A 号球)である.また、野球ボールの縫い目の影響を調べるために、ラクロスボールを真球と 仮定し使用した.Fig.2 のようにそれぞれのボールには、ボールの回転運動を読み取りやすくする ため、ラッカースプレーとサインペンで塗装した.

(4)-2 解析手法及び実験結果

野球ボールに作用する空気力を解析するために、ボールの並進運動をとらえた動画をフレーム ごとに画像に分割した.分割した画像から 10 フレームごとに画像を抽出し、抽出した画像から、画 像内にあるボールの中心座標を目視により求めた.この中心座標をもとに、野球ボールの並進運 動の時間変化を調べた. Fig.3 はホイールのダイヤル設定が上 40、下 100 の硬式野球ボールの並 進運動のグラフを示している.時間はフレームレートより求めた.



Fig. 3 Time history of the translational motion.

座標点から得られた並進運動の軌道を最小二乗法により4次関数で近似した.近似した4次関数を時間微分することにより速度と加速度を容易に求めることができる. Fig.4 は速度の時間変化, Fig.5 は加速度の時間変化を表している.速度は時間が経過するにつれて減速し加速度は負の方向に増加していることがわかる.このことから抵抗係数は一般的に定速で計算されるが,速度と加速度をパラメータとして扱う必要があることが予測できる.





$$m\frac{du}{dt} = -C_D \frac{1}{2}\rho u^2 A \tag{1}$$

抵抗係数の値を求める上では、ボールが加速している時間帯での計算は行わず、減速し始め た時間から計算を行った.



Fig. 6 Time history of the acceleration. Fig. 7 Enlarged view of the drag coefficient. Fig.6 は実験で使用した 3 種類のボールの抵抗係数と加速度の関係を表している. 軟式野球ボ ールと硬式野球ボールの結果は、よく類似していることが分かる. ラクロスボールは両者と比べ傾き が大きくなっていることがわかる. これはラクロスボールに縫い目が無いことが影響していると考えら れる.

次に,抵抗係数の速度と加速度の関係を明らかにするために,同じボールに対して球速を変え て同様に比較を行った.硬式野球ボールでの比較結果をFig.7に示す.球速が速い場合,加速度 に対する抵抗係数の変化が緩やかであることが確認できる.この特性は軟式野球ボールとラクロス ボールで比較した場合でも同様の結果であった. すなわち, 抵抗係数は速度だけでなく加速度に も依存していることが分かる.



Fig. 8 Drag coefficient.
 Fig. 9 Enlarged view of the drag coefficient
 Fig.8 は抵抗係数とレイノルズ数 Re の関係を示している. 実線は流体力学のテキストなどに掲載
 されている球体に作用する抵抗係数の値である. レイノルズ数は(2)式から求めた. 本研究では流体の密度, 粘性係数を気温 20[℃]として与えた.

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho U d}{\mu} \tag{2}.$$

Fig. 8から加速度運動中のボールに作用する抵抗係数は一定値ではなく,幅広い値を持つこと が分かる.また,ボールが減速する,すなわちレイノルズ数が低下するにつれて,静止状態の球に 作用する抵抗係数よりも抵抗係数が増していくことが確認できる.Fig. 9はFig. 8の実験結果を拡 大して示している.軟式野球ボール(Soft)と硬式野球ボール(Hard)の値はよく類似している.ラクロ スボール(Lacrosse)に関してはボールの大きさと打ち出し速度が両者と比べて遅くなったこと,また 縫い目が無いことから野球ボールとは異なる値を示している.

(4)-3 まとめ

運動中の野球ボールの空気力特性を調べるためにピッチングマシンを用いた打ち出し実験を行った.打ち出されたボールに作用する空気抵抗は、減速時に変化していることを確認した.この結果から運動中の野球ボールに作用する抵抗係数は速度だけでなく、加速度にも依存することを確認した. 今後、ボールの軌道解析を行う場合、抵抗係数を速度と加速度の関数として扱うことで正確な軌道が再現されると予測される.

参考文献

- 横山佳之,高見圭太,田中潤一郎,宮嵜 武,姫野龍太郎,硬式野球ボールの空力特性に 対する縫目の影響,「境界層遷移の解明と制御」研究会講演論文集(第 41 回・第 42 回), pp.71-74.
- 2) 坂本誠馬,長谷川淳哉,田多輝洋,鳴尾丈司,溝田武人, "統一球と日米硬式野球ボールの 空力特性",スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011, (2011).

- 3) 長谷川淳哉,坂本誠馬,田多輝洋,鳴尾丈司,溝田武人,"風洞実験による硬式野球ボール の空力特性(回転軸の方向の違い)",スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011, (2011).
- 4) 木下康浩, 青木克己, 長瀬二郎, "軟式野球ボールのデザインと空気力特性", CD-ROM 論 文集 329, (2001).
- 5) 谷口哲也, 宮嵜 武, 清水鉄也, "硬式野球ボールに働く空気力の測定", ながれ, 25, (2006), pp.257-264.
- 6) 今野友博,市川誠司,窪田佳寛,望月 修,"水中を落下する球の抵抗係数",日本機械学会 論文集(B編),79巻798号,(2013), pp.151-1.
- 7) 野球ボールの軌道解析に基づく空気力モデルに関する実験的研究, 野崎 崇史, 藤松 信義, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2013, 242, (2013).

3.3.3. 運動する物体内部における流体挙動に関する実験的研究

(1) 目標·計画

運動する物体に作用する流体の運動特性を把握することは流体-構造連成解析問題の課題の 一つである. 3.3.2 節では加速度運動する物体に作用する空気力特性を調べる研究について述べ たが,運動する構造物内での流体挙動や飛行する航空宇宙機の燃料タンク内部での液面挙動に ついて理解することは重要である.本研究では,落下試験塔を製作して試験容器を落とし,一定の 加速度下で試験容器内部の液面の運動を調べることで,加速度運動する際の液面挙動と流体の 粘性,表面張力との関係を系統的に整理することを目的としている. 2014年度は実験システムの 構築を行い,工業用油を用いて落下実験を行う. 2015年度以降は応用的実験として揺動するカ プセル内部の液面挙動を調べるようなロケットの燃料タンクを模擬した実験を検討している.

(2) 意義・国際社会との比較

運動する物体内部における流体挙動に関する研究は、スロッシングや微小重力環境における液 面挙動に代表されるような事例がある.スロッシングに関する研究は、宇宙機の燃料タンク内部に おける液体燃料の挙動解析や地震時における高層構造物の揺動を流体で抑制する流体式精神 装置の開発がある.研究内容は実問題が殆どであり、基本形状を用いて液体挙動を解析した事例 は数少ない.本研究は円筒形状、矩形形状の容器に対して、粘度や表面張力の異なる流体に対 する落下時、揺動時の液面挙動を系統的に整理することが目的である.

(3) 研究内容

運動する物体内部における流体挙動を調べるために,液体を封入したカプセルの落下試験,液体のスロッシング運動解析を行う.2014年度は落下試験塔を用いて,液体の粘度と表面張力により液面の挙動特性を調べた.2015年度以降は液体のスロッシング運動を調べるために,揺動装置の製作を行い,実験を行う.本実験を通じて,揺動速度・加速度と液体の物性値に対する液面の運動特性を明らかにすることが目的である.

(4) 平成 26 年度進捗状況

2014年度は落下試験塔を製作して,実験を行った.落下試験塔の全体図を Fig.1 に示す.落 下試験塔の高さは 4150mm,内径 200mm である.落下試験塔は下から試験カプセルを入れる構 造になっている.試験カプセルはワイヤーで繋がっており,電磁石で固定された状態で滑車を介し て,上に上げる仕組みになっている.また,最上部まで試験カプセルを上げた際に,錘で試験カプ セルの位置を固定できるようになっている.

塔内部を真空ポンプで粗挽きして、ゲージ圧で-0.1MPa まで圧力を下げる. 真空中を試験カプ セルが落下すると、微小重力状態となる. このとき、内部にある液面の挙動をデジタルカメラで撮影 し観察する. Fig.2 は試験カプセルの内部を示している. 試験カプセル内部の透明容器には液体 が封入されており、その挙動をデジタルカメラで撮影できる. 液面の変位を計測するためメジャーを 設置してある. デジタルカメラは SONY サイバーショット DSC-TX30 を使用した. このカメラの最短 撮影距離は 1cm (拡張マクロ) であり、動画撮影サイズは 1920×1080 のフル HD, フレームレート は 60fps である. また防水であるため液体を使う本研究に適している. 落下試験塔内は、ULVAC 社 製の油回転真空ポンプ VD401を用いて減圧した.この真空ポンプは設計排気速度が40m³/hであり,落下試験塔を真空引きするのに約10分かかる.



実験で使用した液体は全てニュートン流体を使用しており,主に工業用油を使用した.今回は 液体 A,B,C の三種類の液体のパラメータを調べ,運動解析を行った. Table 1 は油の粘性係数と表 面張力を示している. 粘性係数は Brookfield 社の回転粘度計 DV-I Primeを用いて計測した. 表面 張力は,液体に作用する重力と表面張力の関係を用いて⁽²⁾,透明容器内のメニスカス部分を画像 解析することで計測した. 液面の運動解析には DITECT 社の運動解析ソフトである DIPP-Motion PRO を使用した.

T :	Viscosity	Surface tension		
Liquid	$(\times 10^3 \mathrm{Pa} \cdot \mathrm{s})$	$(\times 10^2 \text{ N/m})$		
А	46.2	6.7		
В	64.9	6.4		
С	2.12	5.7		

Table 1 Physical properties of liquid.

以下に,実験結果および考察を示す.

(4)-1 試験カプセルの落下時間

試験カプセルが真空中を落下する際,空気抵抗を受けないため自由落下状態となる. 落下時間は, xを落下距離, gを重力加速度, tを落下時間として, (1)式から計算できる.

$$x = \frac{1}{2}gt^2 \tag{1}$$

本実験の落下試験塔の落下距離は 4000mm であるので,重力加速度を 9.81m/s²とすると落下 時間は 0.90 sec となる.実際の試験カプセルの落下時間を計算するために,動画を画像に分割し, 液面が動き始めた瞬間から試験カプセルが落下し終わった瞬間までの画像枚数を調べた. 試験 カプセルが落下し終わるまでの枚数は 54 枚であり, デジタルカメラのフレームレートは 60 fps であ ることから落下時間は 0.9s となった. 実験による落下時間と解析結果はよく一致することから, 落下 中の試験カプセルは自由落下状態にあり, 本実験装置は無重力環境を模擬できるといえる.

(4)-2 液面の時間変化

Figs. 3-(a), (b), (c) は液体 A, B, C の液面の時間変化を示している. 液体ボトルが落下中の様子 をできるだけ等分割して示した.



(a) Liquid A.

	approx.	approx.	approx.	approx
0.00s	0.04s	0.08s	0.12s	0.16s
-				
approx	annrox	approx	approx	approx
0.26s	0.41s	0.59s	0.76s	0.86s
	1	States -	Contraction of the second	

(b) Liquid B.



(c) Liquid C.

Fig. 3 Time histories of surface behavior of liquid.

液体 A は 0.12 秒以降, 液面の中央付近が下がり始め, ボトル壁面に接したメニスカス部分が上 昇し始める. その後, 中央のくぼみが大きくなり, ボトル壁面に接した流体は上昇していく. 試験カ プセルが落下している間, 液体 A の液面運動は上記の傾向を示した.

液体 B の液面は,液体 A の液面と同様の運動をしており,運動開始時の特徴も類似している. 0.59 秒以降は,液面中央のくぼみに高さの変化があまり見られないように見える.

液体Cの液面は、液体A,Bに比べると落下開始直後から顕著である.落下開始後、0.04秒のときには液面の動きを目視で確認することができており、0.26秒で液面の中央が最も低くなり、透明容器壁面に接する液面の高さも最大となる.液体Cは液体A,Bに比べると粘度が低いことから、液面の動きが顕著であり、その動きが落下時の擾乱影響を受けやすいため非対称な液面の分布になっている.その後、0.59秒まで液面の中央の高さは復元し、再び液面の高さが低くなっていくように見える.

液体A,Bの表面張力はほぼ同じ値であるが,粘度は液体Cに比べて高い値である.そのため, 表面張力がほぼ等しく,粘度が46.2~64.9×103Pa・sの範囲であれば,同様の傾向を示すと考え られる.液体Cの表面張力は液体A,Bの表面張力に比べて,約11~15%小さい.一方で,液体C の透明容器壁面のメニスカス部分の液面高さは液体A,Bのそれらの高さより高くなっている.透明 容器と液体が接する部分では表面張力の影響を顕著に受けるので,液体Cの高さは低くなるはず である.しかし,液体Cの粘度は液体A,Bに比べて低いので,液面の動きが減衰しにくくなってお り,液体Cの表面張力がやや低くても,最も液面が高くなったと考えられる.

(4)-3 液面座標の時間変化

無重力状態での液体の挙動に対する,粘度や表面張力の影響を調べるために,実験画像から 液面の座標を読み取り,その位置や速度の時間変化を調べる.Fig.4は液面を読み取る座標を示 している.画像中に座標軸 x, y を取り,液面を9つに均等に分割した点上の動きを画像処理した.

Figs.5-(a), (b), (c) は液体 A, B, Cの液面座標の時間変化を示している. 落下時の54枚の画像の中から9枚を選択し,液面の座標をプロットしている. 画像の単位はピクセルのため,液体ボトルの隣に設置してあるメジャーから1mm 当たりのピクセル数を計算し,単位を変換した. 液面が上昇する位置は透明容器に接する1,9番目の点だけであり,それ以外の位置では下降する結果となった. Figs.5-(a), (b), (c)において,液面がボトルに接している部分は上昇しており,中心付近では下降していることが分かる. また,液体ボトルの中心に近づくにつれて下降する距離が大きくなる結果を得た. また,ボトル壁面に接する液面の最大上昇値は液体 A が 3.1mm,液体 B が 2.3mm,液体 C が 10mm となり中心の最大下降値は液体 A が-6.8mm,液体 B が-6.8mm,液体 C が-12mm となった.

53



Fig. 4 Location of liquid surface used in the image processing.





Fig.5 Time histories of coordinates over liquid surface.

液体 C は液面の上昇, 下降する高さが最も大きくなっている. また, 液体 A, B に比べて, 液体 C は 3(Y)~7(Y) の位置で, 液面の上下運動が顕著であることも確認できる. 4.2 節でも述べたように, 液面の高さの違いは液体の粘度が最も影響していると考えられる. これは, 液体 A の液面の上昇 値が粘度の高い液体 B よりも大きいことからも説明できる. また, 液体が透明容器に接するメニスカス部分 (1(Y),9(Y)の位置) の高さは, 液体 B は共に等しいが液体 A, C は最大上昇値が異なって いる.

(4)-4 液面速度の時間変化

画像処理で得られた液面座標から、2次精度中心差分法を用いて液面の速度を求めた. Figs.

6-(a), (b), (c) に液面速度の時間履歴を示す.

Figs. 6-(a), (b) を見ると, 透明容器に接するメニスカスの部分 (Fig.6-(a), (b) の1(Y), 9(Y) の位置) は約 0.04 秒で液面の上昇速度が最大となり, それ以外の位置では約 1.6 秒で液面の下降速度が最大となる. その後, 緩やかに下降していく速度履歴の傾向が一致している. これは 4.2, 4.3 節で述べたように, 液面の動きがよく類似していたことに対応する.

液体 C は液体 A, B と比べ粘度が極端に低いため, 液面の挙動が異なっている. 外部からの擾乱の影響が強いため, メニスカス部分 (Fig.6-(c) の 1(Y), 9(Y)の位置) での液面速度は非対称となっている. それ以外の部分では約 0.04 秒で液面の下降速度は最大となり, その後, 緩やかに下降している. Fig. 6-(c) の 2(Y), 8(Y) の位置では, 約 0.41 秒で液面が上昇に転じている.







液体 A, B, C の表面張力は最大で 15%の違いである一方,粘度は 20~30 倍の違いがあるため, 本研究の液面速度の傾向の違いは粘度に依存する結果であると考えられる. 液体 C の液面が非 対称となる擾乱の原因として, 電磁石により試験カプセルを切り離す際に影響を与えていると予想 される.

(4)-5 まとめ

本研究で製作した試験装置により,液体の自由落下状態を模擬できることを確認し,無重力環 境下における液面の運動を確認することができた.比較的高粘度の液体の場合,液面の運動が類 似することを示し,粘度が低い液体は,落下中に液面の上下運動が顕著となることを確認した.

今後,液体の種類を増やし系統的にデータを整理して、物性値と液面運動の関係を明らかにしたいと考えている.

参考文献

- 1) 望月栄徳,藤松信義,落下試験塔を用いた微小重力環境下における液面挙動の運動解析, 日本実験力学会 2014 年次講演会, (2014).
- 今井良二,落下等を利用した流体制御実験,日本マイクログラビティ応用学会誌, Vol. 18, No.3, pp.145-149, (2001).
- 3) 中山秦喜著, 改訂版 流体の力学, 養賢堂, (1998).

3.4. 精度・妥当性検証グループ

本グループでは、シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・妥当性を 向上させるための技術の研究を行っている.シミュレーションも実験も誤差を含んでおり、精度の検 証および改良は重要なテーマである.具体的には、(1)効率的で精度のよい解析技術の開発、(2) 実験とシミュレーションの融合、(3)材料データベースの開発、(3)精度の改良技術の開発、などを 目標に研究を行っている.昨年度は特に一番目のテーマを重点的に研究を行ったが、本年度は 昨年の成果に基づき、二番目のテーマである、実験とシミュレーションの融合技術の研究を行った. 研究対象としては、段ボールの解析と実験を例題として取り上げている.その結果、本研究におけ る提案手法と実験値の比較を行い未知の材料物性値の推定の有効性を検証した.今後、実験の ばらつきを考慮した実験、シミュレーションの妥当性検証を引き続き行っていく.テーマ(1)につい ては、効率的で精度の良い最適化を目的として、最適化プロセスの完全自動化を目指した研究を 行っており、本年度はその理論的構築を開始するとともに、最適化アルゴリズムを生成・比較実験 する環境の一部を整備した.また、材料データベースに関しては、材料データの標準データ交換形 式を開発し、数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的として研究を行 っており、今後、各研究グループにおける要素技術に必要とされる入出力・データ構造について調 査・検討を進める.

3.4.1. データ同化技術を用いた効率的精度解析技術の開発

(1) 目標·計画

本研究ではデータ同化により実際に計測できない物性値を数値シミュレーションに実験データを 取り込むことにより推定することを目的としている.本研究で扱う段ボールは,巾目,流れ目におい て材料特性に異方性を有しており数値シミュレーションの対象として考える場合にはその材料特性 を十分考慮して解析に取り入れていく必要があるため,材料特性を把握することは重要な課題で ある.従来段ボールの設計は過去の経験や,試行錯誤に依存する傾向にあり有限要素法を用い た力学的特性の解析は浸透しておらず本研究で開発した手法を用いることで効率的な設計に役 立てることができると期待できる.

本年度は万能試験機により段ボールの巾,流目におけるそれぞれの変位データ測定を行い,測 定データの変位と等価な値を取得するように FEM により材料特性の同定を行い,同定の妥当性を 検討するため推定した材料物性値において任意の荷重を与え測定データと比較を行った.また FEM による段ボール製品において解析を行う場合,対象とする段ボールの段が周期的に並んで おり,これらの段をすべてモデリングするには手間がかかる.またそれぞれの段に対してメッシュを 切らなければならず計算コストが非常に大きくなり効率的ではない.そこで本研究では均質化法を 用いて解析を行うことで計算コストを大幅に削減した.

(2) 意義・国際社会との比較

段ボールは外装容器のみならず製品を衝撃から保護する緩衝材,固定材としての使用法が多く なり,またリサイクルといった環境面からも注目され,段ボールの用途が広がりつつある.近年,製 品開発において正確な強度設計が必要とされFEMを用いて強度解析等の数値シミュレーションを 行い,開発の効率化を図るという手法は定着している.しかしながら段ボールにおいて現状ではま だ一般的な解析手法が確立しているとは言い難く,その非効率さがコストの上昇を招いていると考 えられる.本手法は未知であった材料物性値を把握することで迅速かつ,高精度に解析を行うこと が可能になると考えられる.このことから,非常に意義のある研究内容であると言える.

(3) 研究内容

本研究では数値シミュレーションに実験データを馴染ませるにあたり、万能試験機による圧縮試 験を行い計測された実験データの任意の変位を目的関数とし FEM よる数値シミュレーションにお いて材料物性値を変数として探索を行う.本研究では数値シミュレーションにおいて直接モデルを 作成し、解析を行うことは計算コストが大きくなる問題が避けられない、そこで本研究では段ボール が周期性の特性を持った構造体であることに着目し、このような特徴を持った構造体に対して計算 精度を損なうことなく計算コストを削減できるという観点からマルチスケール解析を用いて解析を行 った、

(a) 圧縮試験機による変位量の計測と推定

圧縮試験により変位量の測定を行うため、250×250の段ボール片を作成し巾,流れ目において 複数回試験を施行し計測を行った.試験結果を Fig1, Fig2 に示す.またこれらの圧縮試験におい てバイアス,バラツキが0の真値の測定は不可能であることからこれらの誤差を考慮する為に本研 究では非線形範囲は扱わずまず線形範囲のみを扱うものとし最小二乗法によりそれぞれの目にお いて変位の推定を行った結果を Fig3, Fig4 に示す.



(b) マルチスケール解析

解析対象領域が,ある微視構造を単位として規則的に繰り返されることによって構成され,解析 対象を均質な等価モデルで代用して全体を解析するというものである.具体的には均質化領域に 対して,周期性の見出せるユニットセル(ミクロモデル)を取り出し材料物性値を算出する第1ステッ プと,均質化領域をfig 簡略化モデル(マクロモデル)作成し算出した等価物性値をマクロモデルに 適応して解析を行う第2ステップからなる.ミクロモデルとマクロモデルをfig6, fig7 に示す.



Fig6. ミクロモデル



(c) 材料物性値の探索

一般に段ボールはライナと中芯を貼り合わせた構造体であり、それぞれの強度に異方性を有している。本研究ではライナ、中芯に対しそれぞれに材料定数を与え、最小二乗法により推定した回帰直線において、任意の荷重における変位にあうように巾目、流れ目において材料定数を探索し巾目と流れ目の材料定数を変数とする変位の応答局面をそれぞれ求め、巾目と流れ目の交点により材料特性の推定を行った結果を fig8 に示す.縦軸と横軸はそれぞれ中芯とライナ材料定数を示し、赤の曲線は巾目、青の曲線は流れ目の変位を示す.



Fig8. 材料定数の推定

(d) 材料定数の検証

推定した材料特性の有効性を調べるため,境界条件として 10N, 15N, 20N, 25N の荷重において 解析を行い,回帰直線との比較の結果を Fig9, Fig10 に示す.



(4) 平成 26 年度進捗状況

本年度は本研究における提案手法と実験値の比較を行い未知の材料物性値の推定に有効性 のあることを検証した.その結果巾目,流れ目における回帰直線の値と本手法により推定した材料 物性値を与え数値シミュレーションを行った解析結果において同程度の値を示すことができた.今 後ベイズ推定による線形回帰モデルの応用に取り組む予定である.

3.4.2. 工学における最適化プロセスの完全自動化

(1) 目標·計画

現在,最適化アルゴリズム同士を比較する方法は存在しない.ある対象をエンジニアが最適化 したいならば,まずしなくてはならない事は既存のアルゴリズム(共役勾配法・遺伝的アルゴリズム・ 焼き鈍し法・等々)から,その問題に最も適したものを選ぶことであるが,こんなことは不可能である ため,しょうがないのでエンジニアはその日の気分でどれかを選択しているのが実情である.このよ うな非生産的な状況から抜け出すためには,アルゴリズム間を比較するための方法を見つけなくて はならない.

もしアルゴリズム間を比較する方法が完成すれば、それは同時に最適化における他の工程間も 比較できることを意味する. つまり、最適化の工程<目的関数fの設計>→<アルゴリズムalgの選 択>→<アルゴリズムのパラメータ θ の設定>、の3つについて、2つ目が比較できるようになれば、 残りの2工程も比較できるようになるのである. たとえば3つ目の工程の自動化は次のようになる. あ るfとalgと θ について、「 θ に設定した、fを最適化するためのalg」を「fしか最適化できない、パラメー タは θ で固定の、ある最適化アルゴリズムalg_{f, θ}」と解釈する. そして「パラメータ θ_1 、 θ_2 、...、 θ_N のな かでどれが良いか?」という問題を、「 alg_{f,θ_1} 、 alg_{f,θ_2} 、...、 alg_{f,θ_N} のなかでどれが良いか?」という問 題に置き換え、比較する.

このように各工程間が比較できるようになれば、それを基に最適化の全工程が自動化できること は明らかである。そうなれば、例えばある新商品の試作品を最適化したいなら、そのエンジニアが 使用しているシミュレーションソフトウェアのどこかにあるであろう「最適化する」というボタンをクリック し、じっと待つだけである。

このような最適化の完全自動化を実現するために、まずはその土台部分を完成させることを計画している.

(2) 意義・国際社会との比較

最適化が全自動化されれば社会の様々な場面において最適化が手軽に使われるようになりエ コに貢献する.

(3) 研究内容

ある集合 *X*, *Y*, *Z* について, これらからなる可測空間をそれぞれ (*X*, Σ_X), (*Y*, Σ_Z), (*Z*, Σ_Z) と書く とする. ここで Σ_X は, *X*上の σ 加法族である. また今後 (*X*, Σ_X) は *X* と略せるとする. 正則条件付き 確率 (マルコフ基底) *k* を, 引数を2つとる次のような関数と定義する:

$$X \ni x \mapsto k(.|x) \in [0,1]$$

 $\Sigma_Y \ni B \mapsto k(B|.) \in \mathbb{R}$
 $(X \times \Sigma_Y) \ni (B|x) \mapsto a \in [0,1]$
また, 2 つのマルコフ基底 $X \xrightarrow{r} Y, Y \xrightarrow{k} Z$ の合成関数 $(k \circ r): X \xrightarrow{r} Y \xrightarrow{k} Z \hat{c}$,

$$(k \circ r) : (\Sigma_Z \times X) \ni (C|x) \mapsto \left(\int_{y \in Y} k(C|y) dr(.|x) \right) \in [0,1]$$

で定義する.また

$$k_f(A|x) \coloneqq k(f^{-1}(A)|x) = k(A|f(x))$$

とする. 可測空間を対象, 可測関数を射とする対称モノイド圏 Meas から, 可測空間を対象, マルコフ基底を射とする対称モノイド圏 P への共変関手 δ を

$$\delta: \mathbf{Meas} \to \mathbf{P}$$

: $(X, \Sigma_X) \mapsto (X, \Sigma_X)$
: $f \mapsto \delta_f$

とする. このとき, 工学最適化における様々な概念, すなわち単目的最適化・多目的最適化・ロバスト最適化・ノイジー最適化・実数値最適化・組み合わせ最適化は, まとめて次の式で表現することができる:

$$X \otimes \bigotimes_{j=1}^{J} Y^{X} \xleftarrow{M \otimes \bigotimes_{j=1}^{J} 1} X \otimes \bigotimes_{j=1}^{J} Y^{X} \xrightarrow{1 \otimes \bigotimes_{j=1}^{J} N} X \otimes \bigotimes_{j=1}^{J} Y^{X}$$
$$\xrightarrow{1 \otimes \bigotimes_{j=1}^{J} \delta_{\Gamma_{\cdot}}} \bigotimes_{j=1}^{J} (X \otimes (X \otimes Y)^{X}) \xrightarrow{\bigotimes_{j=1}^{J} \delta_{ev}} \bigotimes_{j=1}^{J} (X \otimes Y)$$

ここでJは目的関数の数, また Γ は, 任意の $f: X \ni x \mapsto f(x) \in Y$ について,

$$\Gamma_f: X \ni \mathbf{x} \mapsto (\mathbf{x}, f(\mathbf{x})) \in X \otimes Y$$

と定義される Meas の射である.

(4) 平成 26 年度進捗状況

前述の工学最適化の表現から,最適化アルゴリズムを生成・比較実験する環境の一部を整備した.

3.4.3. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発

(1) 目標·計画

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

米国マテリアルズ・ゲノム・イニシアティブの影響を受け,2014 年には我が国においてもマテリアルズ・インフォマティクスに関連する研究プロジェクトが注目され,物質・材料研究機構にプラットフォームが設置されるなどしている.内閣府戦略イノベーション創造プログラムでは,テーマの一つである革新的構造材料にマテリアルズインテグレーションが取り上げられた.

マテリアルズインテグレーションには東大・小関教授を代表者とするテーマが採択され, 平成 26 年 度より 5 年間で構造物溶接部の性能評価を例題としてシステム開発を行うこととなり, 芦野はここに 分担者として参画し, セマンティック・ウェブ技術を用いた材料に関する数式・データ・シミュレーシ ョンを連携させるためのデータ構造開発を行うこととなった.

海外でのマテリアルズ・インフォマティクス研究では機能性の材料や鋳造などが主たる対象であり. 構造材料,特に鉄鋼材料の溶接部はミクロ組織も複雑であり計算による物性の推定が困難である ことから対象となっていない.我が国では産業界での必要性などからあえて困難な対象を選んで 研究対象とすることとなった.

(3) 研究内容

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

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



(4) 平成 26 年度進捗状況

SIP 初年度として,既にある程度計算式などが整備されている機械試験などを例として経験式, 推論規則,データをセマンティック・ウェブの規格をベースにしてリンクしたプロトタイプを開発し,デ ータ構造を検証する.また,各研究グループにおける要素技術に必要とされる入出力・データ構造 について調査・検討を進める.

3.5. 可視化検証グループ

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

● 解析結果を正しく理解し、評価すること

● 実験結果等と公正な比較を行うこと

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

3.5.1. 3次元画像による定量的・定性的検証

(1) 目標·計画

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

大きな計画としては,

平成 24 年度:

表示装置となる VR 装置の導入を行い、ハードウェアの準備を行う.

平成 25 年度:

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

平成 26 年度:

画像による検証に利用するための可視化システムを VR 装置上で開発する.

平成 27 年度 :

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

平成 28 年度:

研究をまとめ、その公開方法について検討する.

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

国際的に見ると、連成解析は計算力学における重要な研究テーマの1つであるが、必ず しも検証については進んでおらず、信頼できるとされる過去の解析例と比較したり、パラ メータスタディによって、実験で見られる現象と、解析で得られる現象の範囲が等しい(あ るいは近い)といったことを示すにとどまっている場合がほとんどである.連成解析手法 を評価する手法の1つとして3次元画像を用いる方法は、ほとんど例がなく、その成果は 重要なものとなると考える.

(3) 研究内容

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



図1 システム構成図

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

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

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

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

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

(4) 平成 26 年度進捗状況

まず,2013 年度計算力学研究センター年報の本稿執筆時点ではできていなかったが,図 2に示す全体構成図において,AVS-MPEを用いて解析結果と実験結果を同時表示するシス テムを構築した.データはそれぞれ時系列で用意されているとし,1時刻目から同時に進 めて表示するようになっている.



図2 可視化システム全体構成図(案)

図3は AVS の可視化の仕組みを示すネットワークエディタである. ここにはいくつかの モジュールが示されており,それぞれのモジュールが可視化においてなんらかのまとまっ た役割を果たしている.実際にはここにあるモジュールのいくつかはさらに複数のモジュ ールからできている.ここでは,解析結果は物体形状と流れの流線および断面の圧力,実 験は2次元の動画1種類を表示するようになっているが,表示内容はネットワークの構成 を変えたりモジュールを追加/変更したりすることで,変えることができる.



図3 実験と可視化の同時表示のための AVS ネットワークエディタ

当面は、標準問題に対する、解析結果および実験結果の同時表示を試みている.

予定通りに進まなかったこととしては、図2の3dsmax→VR4MAXのパスについては、解 析結果(や実験結果)を CAD データにするところができていないので実現していないが、 3dsmax で作成した CG データ自体は表示できるようになっているので、これは年度内にも 実現したい.また、PC クラスタと VR 装置とのネットワーク接続はできているが、活用で きていないので、これも早々に整備したい.

3.6. 横断的研究会

前述の 5 つの研究テーマは、本プロジェクトの柱となるものであるが、それぞれを横断的につな ぐ研究や、それぞれの成果から派生した研究もまた重要であると考える。そこで、計算力学研究セ ンターでは、そのときどきで研究会を立ち上げ、5 つの柱とは別のグループで研究を進めようと考え ている.研究テーマごとの活動と重複する部分もあるが、ここでは今年度に活動のあった研究会の 概要をあらためて記す.

3.6.1. 連成標準問題検討会

連成解析の精度を高め、実用的な手法として育てるのには標準問題が必要であろうと考える. 流体解析・構造解析などではそれぞれ手法を開発するとまず解くべき問題があり、それによって手 法の精度や有効性等が確認できる.残念ながら連成問題にはそのような標準問題が少ない.そこ で、ここでは流体—構造連成に関し、当センターで実験を行い、詳細なデータを取って標準問題と して提案できるものを検討する.最終的には、実験・解析を行い、比較するとともに、それらを標準 問題として公開する.平成 25 年度は、具体的なターゲットとして一様流れ中に置かれた一端固定 の円柱の連成挙動に着目し、数値解析が比較的容易なレイノルズ数 10,000 程度になるように流速 や円柱の大きさを決めた後、連成解析として適当な規模の変形量になるように材料定数を決定し、 標準問題の最初の一つとして提案したが、今年度はこの問題を解析手法開発グループにおいて 解析・比較検討を行っている.

3.6.2. 計算力学と(材料)データベースの会

計算力学に現在用いられている物性データの信頼性の確認と、今後必要とされるデータの所在 についての検討が必要と考えられる.また、数値計算とデータベースのより緊密な連携のためには、 データアクセスのための API について検討する必要がある.現在、欧州標準規格委員会のワーク ショップにおいて、機械試験の試験データを電子的に記述するための標準についての検討が行わ れている.三次元 CAD データなども含む製造物データ管理のための規格である ISO10303 (STEP)との連携も視野に入っており、計算力学による設計と個別の材料の試験データを共通のデ ータフォーマットを用いて連携させるための規格として今後検討の必要がある.

3.6.3. 楽器音響と流体構造連成研究会

音楽や楽器に関する研究は、他の研究領域に比べまだまだ未知なことが多いわりには研究が 進んでいない. その理由には、芸術至上主義ともいわれるように音楽になにか科学的なものや現 実的な効果を測ることに、ある種のアレルギーが世の中にはまだあることが挙げられ、また研究対 象として理解されなかったり予算が組まれなかったりするからである. しかし、本研究会では、音響 工学や計算工学の立場から科学的に楽器の音響特性や構造, 音色, その先には芸術の科学的 解明を目的とする. そもそも音楽は楽器本体から発せられる空気振動現象を脳の聴覚野で知覚す るプロセスであり, 楽器の振動と周辺流体の連成は計算工学としても困難であるが興味深い対象 である. 現在は, 弦楽器の音響特性のスペクトル解析やハイスピードカメラを用いた弦の振動の可 視化, 操作性やヴィヴラートのような演奏技術などの調査を行っている.

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

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

4.1.1. 研究実施体制

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

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

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

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

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

C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

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

4.1.2. 研究実施内容

- (1)「東洋大学」グループ
- ① 研究代表者:塩谷隆二(東洋大学総合情報学部,教授)
- ② 研究項目 階層分割型数値計算ライブラリの基礎研究並びに設計とその応用
- (2)「名古屋大学」グループ
- ① 主たる共同研究者:荻野正雄(名古屋大学情報基盤センター,准教授)
- ⑦ 研究項目
 階層型ソルバーライブラリの基礎研究とその応用
- (3)「東京大学」グループ
- ① 主たる共同研究者:越塚誠一(東京大学大学院工学系研究科,教授)
- ②研究項目 階層分割型入出力ライブラリ並びに連続体力学向け問題領域専用言語の基礎研究とその応用

4.2. (株)日立製作所機械研究所との連携

(株)日立製作所機械研究所とは、(1)メッシュ生成技術、(2)構造健全性設計技術に関して連携を 行っている.近年、産業界では解析主導設計による製品開発のスピードアップと設計上流段階での 品質作り込みが最重要課題として進められている.そのためのCAEシステム技術の開発をこれまで行 い、実用性の検証を実施した.そこで、本年度は、テーマ(2)に関する、き裂進展解析を用いたCuコア はんだボールの接続信頼性評価メッシュ生成技術を中心に研究を行った.

4.3. 独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携

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

4.4. 東京理科大学との連携

東京理科大学と共同で配管内の腐食同定問題について研究している.東京理科大学ではおもに

実験を、本センターではシミュレーション方法について研究を行っている.本年度は、逆問題の観測 方程式のモデル化について検討することを目標とした.中性環境における金属部材の腐食は、溶存 酸素によるカソード反応が支配的であるので、溶存酸素の金属部材表面への拡散速度が、カソード 反応の律速反応になっていると考えられる.そこで、金属部材近傍の流体の速度勾配および溶存酸 素の濃度分布に着目

して,流れのある配管内の腐食を精度良くシミュレーションできるか考察を行った.更に,今年度から,これらの解析をアダプティブに行うために,階層メッシュを用いた手法も開発された.

4.5. 本田技術研究所との連携

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

5. 成果の広報および普及活動

5.1. 第 3 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウム

2014 年 3 月 10 日(月), 東洋大学白山キャンパス 2 号館 16 階スカイホールにて, 第 3 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウムを開催した.

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

また,特別講演として,ヴァージニア工科大学の古川知成教授をお招きして,「タイヤ研究に見る 計算・計測工学」と題した講演も行われ,アメリカにおける最先端の計算・計測工学について知るこ との出来る,貴重な講演となった.

矢川元基

5.1.1. プログラム

開会の挨拶 13:00-13:10 東京大学名誉教授·東洋大学名誉教授 セッション1(CCMR) 文部科学省·私立大学戦略的研究基盤形成支援事業: 「大規模高精度流体--構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当 性検証 プロジェクトリーダ:田村善昭(東洋大学計算力学研究センター長) 「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細 田村善昭(東洋大) 実験による精度・妥当性検証 13:10-14:50 「並列流体-構造連成解析手法の開発」 長岡慎介(東洋大) 「流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技 増田正人(東洋大) 術の開発」 「合理的な維持管理を目指したコンクリート構造物の塩 富山潤(琉球大) 害環境評価に関する数値解析的検証」 「ブロック構造を有する岩盤の3次元モデル生成および 松原仁(琉球大) 地すべり解析」 休憩 14:50-15:00

15:00-16:40 セッション 2 (HDDMPPS)

	科学技術振興機構·戦略的創造研究推進事業(CREST):			
	「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」			
	プロジェクトリーダ:塩谷隆二(東洋大学)			
	「ポストペタスケールシミュレーションのための	タスケールシミュレーションのためのライブラリ		
	開発」		塭谷陲_(果祎入)	
	「大規模粒子系シミュレーションのメニーコア向け開発と		室谷浩平(東京大)	
	多数の浮遊物が伴う市街地津波解析」			
	「超大規模データ可視化ライブラリの開発」		和田義孝(近畿大)	
	「超大規模解析に向けた数値計算ライブラリの開発」		屋雄介(名大)	
	「高精度電磁界シミュレーション」		武居周(宮崎大)	
16:40-16:50	休憩			
16:50-17:20	特別講演		古川知成	
	「タイヤ研究に見る計算・計測工学」		(Virginia Tech.)	
17:20-17:30	閉会の辞	田村善昭		
		東洋大学計	算力学研究センター長	

5.2. 第10回機械工学国際会議

第10回機械工学国際会議 2014年6月19日(木)から21日(土)にわたり、ダッカ(バングラデ ッシュ)のバングラデッシュ工科大学(Bangladesh University of Engineering and Technology: BUET) にて行われた,第10回機械工学国際会議(10th International Conference on Mechanical Engineering: ICME2013)に、東洋大学計算力学研究センターより3名が参加・講演を行った. ICMEは2年に1度、バングラデッシュで開催される、機械工学の分野を幅広く取り扱った国際会 議である.当日は、センター長の田村が Keynote speaker として講演を行った他、研究員の塩谷、 研究助手の長岡が講演を行った.この地域で行われる会議に参加する機会は、非常に少ない為、 同地域の機械工学や計算力学の現状を知ることができる、極めて有益な機会となった.





図 第10回機械工学国際会議の様子

5.3. 第5回国際スーパーコンピューティングワークショップ

5th International Industrial Supercomputing Workshop (IISW2014)

2-3 October 2014, Hakusan Campus, Toyo University, Tokyo, Japan http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/iisw2014.html

2014 年 10 月 2 日・3 日,東洋大学白山キャンパス 125 周年記念ホールにて第 5 回国際スーパ ーコンピューティングワークショップ (5th International Industrial Supercomputing Workshop, IISW2014)が行われた.第 5 回国際スーパーコンピューティングワークショップは NCSA (アメリカ), KISTI (韓国), HLRS (ドイツ), そして SURFsara (オランダ)に続くものである. このワークショップの 主な目的は, スーパーコンピューティングに関連する技術的問題を共有することである. 世界中か ら集まった優れた研究者たちにより活発な議論が行われた. 参加者たちにとって,各々の研究活 動をさらに推進するための幅広くかつ深い知識を得ることができた貴重な機会となった.

5.3.1. 実行委員会

Ryuji Shioya (Toyo University) - Chairman

Hiroshi Kawai (Tokyo University of Science Suwa)-Secretary General Yoshiaki Tamura (Toyo University), Masao Ogino (Nagoya University), Kohei Murotani (University of Tokyo), Yasushi Nakabayashi (Toyo University), and Akio Miyoshi (Insight Inc.)

Supported by

CREST, Japan Science and Technology Agency (JST)

Center for Computational Mechanics Research (CCMR), Toyo University

Assisted by

Japan Association for Computational Mechanics (JACM) Japan Society for Computational Engineering and Science (JSCES) Joint Usage/Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures (JHPCN)

5.3.2. プログラム

Day 1, 2nd October, 2014

10:00	Welcome and introduction: Ryuji Shioya, Toyo University, Japan		
10:15-11:15	Session 1	Chair: Ryuji Shioya, Toyo University, Japan	

Lecture 1	Merle Giles, National Center for Supercomputing Applications (NCSA),				
	University of Illinois, United States				
Lecture 2	Bastian Koller, High Performance Computing Center Stuttgart (HLRS),				
	University of Stuttgart, Germany				
11:15-11:45	Coffee Break				
11:45-12:45	Session 2 Chair: Yasushi Nakabayashi, Toyo University, Japan				
Lecture 3	Sang Min Lee, Supercomputing Center, Korea Institute of Science and				
	Technology Information (KISTI), South Korea				
Lecture 4	Satoshi Itoh, Advanced Institute for Computational Science (AICS), RIKEN,				
	Japan				
12:45-14:15	Lunch				
14:15-15:45	Session 3 Chair: Yoshitaka Ezawa, Toyo University, Japan				
T (5	Yoshinari Fukui, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology				
Lecture 5	(JAMSTEC), Japan				
I to C	Atsushi Sasaki, Global Scientific Information and Computing Center (GSIC),				
Lecture 6	Tokyo Institute of Technology, Japan				
Lecture 7	Makoto Tsubokura, Division of Mechanical and Space Engineering, Hokkaido				
	University, Japan				
15:45-16:15	Coffee Break				
16:15-18:15	Session 4 Chair: Hiroshi Kawai, Tokyo University of Science, Japan				
Lecture 8	Hiroshi Akiba, Allied Engineering Corporation, Japan				
Lecture 9	Hiromu Chiba, Numerical Algorithms Group, Japan				
18:15	Closing: Hiroshi Kawai, Tokyo University of Science, Japan				
18:30-20:30	Reception Party				

Day 2, October 3rd, 2014

10:00	Opening: Yoshiaki Tamura, Toyo University, Japan		
10:15-11:15	Session 5	Chair: Yoshiaki Tamura, Toyo University, Japan	
Lecture 10	Walter Lioen, SURFsara, Netherlands		
Lecture 11	Mariano Vazquez, Barcelona Supercomputing Center (BSC), Spain		
11:15-11:45	Coffee Brea	k	
11:45-12:45	Session 6	Chair: Hiroshi Kanayama, Japan Women's University, Japan	

Lecture 12	Leif Nordlund, KTH Royal University of Stockholm, Sweden			
Lecture 13	Pankaj Shah, Ohio Supercomputer Center and OARnet, United States			
12:45-14:15	Lunch			
14:15-15:45	Session 7 Chair: Masao Yokoyama, Meisei University, Japan			
Lecture 14	Takahiro Katagiri, Information Technology Center (ITC), University of Tokyo,			
	Japan			
Lecture 15	Ryouji Takagi, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Japan			
Lecture 16	Masahiko Mizuno, Toyota Central R&D Labs., INC, Japan			
15:45-16:15	Coffee Break			
16:15-18:00	Session 8 Chair: Yoshitaka Wada, Kinki University, Japan			
Lecture 17	Hiroshi Okuda, Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo, Japan			
Lecture 18	Kenji Ono, Center for Research on Innovative Simulation Software (CISS),			
	Institute of Industrial Science (IIS), University of Tokyo, Japan			
18:00	Closing: Genki Yagawa, CCMR, Toyo University, Japan			
18:30-20:30	Banquet			



図 IISW2014の様子

5.4. 東京都北区主催「ものづくり夜間大学校」

10月23日・30日に東洋大学白山キャンパスにて東京都北区主催の「ものづくり夜間大学校」が 開催された.本センターより塩谷隆二教授と中林靖准教授,研究助手三名が指導にあたった."東 洋大学による「スマートフォンアプリ開発講座」"という題名で,23日は iPhone アプリ開発,30日は Android アプリ開発についての講義と実習が行われた.本講座の対象は中小企業の方々で,両日 とも約20名が受講した.

23 日の iPhone アプリ編では、Xcode という iPhone アプリ開発用ソフトを用いて、具体的にどのように開発するのかをレクチャーしたあと、受講者各自が実際に手を動かしてアプリ制作に取り組む という流れだった. Apple により最近開発された Swift という新しい言語を用いたこともあり、年配の 受講者はやや苦戦しているようだったが、多くの受講者は簡単なアプリを制作できた.

30 日の Android アプリ編では、AppInventor2 というソフトを用いて、講義および実習を行った. 通常、Android アプリは JAVA という言語を用いて開発されるが、AppInventor2 を用いれば、JAVA の知識が全くなくても、直感的な操作でアプリを制作することができる。プログラムコードを書く必要 がなく操作がわかりやすかったので、ほとんどの受講者が簡単なアプリを制作することができた.

両日とも,受講者の皆様は熱心に講義に聞き入っていて,中小企業のスマホアプリ開発に対す る強い興味と関心を感じた.



図 ものづくり夜間学校の様子

6. 学術活動

2014年1月から2015年1月までの業績を掲載する.

6.1. 論文投稿

- Yokoyama M., Mochizuki O., Yagawa G, "Surface Condition of Solid in Splash Formation", IACM expressions, No. 34,,pp2-5, 2014.02
- Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, "Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method ", Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, Vol.1.1,pp1-14, 2014.06
- 3. 郭永明, 堂脇徹朗, 矢川元基, 上谷俊平, "自然境界弱形式を有する選点法",計算工学講演 会論文集, Vol.19, 2014.06
- 4. 郭永明,吉田大祐,矢川元基,上谷俊平, "Over-Range 選点法における局所座標定数の最 適値",計算工学講演会論文集, Vol.19, 2014.06.
- 5. 富山潤, "コンクリート橋上部工に付着する飛来塩分に関する数値解析的検討", コンクリート 工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.874-879, 2014.
- 風間洋,富山潤,下地健,小籏俊介,"沖縄県内陸部における FAC 利用に関する中性化耐 久性検討",コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.850-855, 2014.
- 福地啓太,宮野伸介,富山潤,大城武,"防食 PC 鋼材の付着性能とプレテンション PC 桁の せん断耐力に関する研究",プレストレスコンクリート学会,第23回シンポジウム,pp.605-610, 2014.
- 8. 戸田勝哉, 楊威, 富山潤, 下村匠, "分光分析を用いたコンクリート構造物の塩分分布測定法の開発", 非破壊検査, 2014.10

- A. M. M. Mukaddes, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, "Performance Evaluation of Domain Decomposition Method with Sparse Matrix Storage Schemes in Modern Supercomputer", International Journal of Computational Methods, Vol.11, Suppl. 1, 1344007, pp.1-14, 2014.
- Itaru Ishikawa, Hiroshi Kawai, Yosuke Kobayashi, Ryuji Shioya, Genki Yagawa, "Simulation Results and its Performance by Using a Developing Eigenvalue Analysis Module of the ADVENTURE System", Procedia Engineering, Volume90, 140-146, 2014.
- A.M.M. Mukaddes, Masao Ogino, Ryuji Shioya, "The Study of Thermal-solid Coupling Problems Using Open Source CAE Software", Procedia Engineering, Volume90, 147-153, 2014.
- M.Yokoyama, K.Murotani, G.Yagawa, O.Mochizuki, "Some considerations on surface condition of solid in computational fluid-structure interaction", in NUMERICAL SIMULATIONS OF COUPLED PROBLEMS IN ENGINEERING, pp. 171-186, 2014, Springer International Publishing.
- Yong-Ming GUO, Kouji SHIOYA, Kei OOBUCHI, Genki YAGAWA, Shunpei KAMITANI,
 "Accuracy improvement of collocation method by using the over-range collocation points for 2-D and 3-D problems", Mechanical Engineering Journal, Vol.1, No.2, pp.1-19, 2014.
- Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, "Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-structure Coupled Analysis", Procedia Engineering, 90, pp. 288-293, 2014

6.2. 総説・解説・エッセイ

1. 横山真男, ヴァイオリンの音色研究, 可視化情報学会誌, vol.35, 136, (2014) pp. 17-22.

6.3. 書籍

 Yokoyama M., Murotani, K., Yagawa, G., and Mochizuki, O., "Some Considerations on Surface Condition of Solid in Computational Fluid-Structure Interaction", In Numerical Simulations of Coupled Problems in Engineering (2014) pp. 171-186, Springer International Publishing.

6.4. 学会発表

- 1. N. FUJIMATSU, "Direct Numerical Simulation on Drag Reduction of Channel Flowwith Visco-Elastic Wall", 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2013.1.7.
- 長岡慎介,中林靖,矢川元基,"EFMM の並列流体-構造連成解析への適用",第 62 回理 論応用力学講演会,東京工業大学大岡山キャンパス, 2013.03.06-08.
- Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, "Parallelization of enriched free mesh method for large scale fluid-structure coupled analysis", International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, June 20-21, 2014.
- 4. Itaru Ishikawa, Yosuke Kobayashi, Ryuji Shioya, Genki Yagawa, "Simulation results and its performance by using a developing eigenvalue analysis module of the adventure system", International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, June 20-21, 2014.
- Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, "Visualizations of Bubble Motions and Temperature Rises by Focused Ultrasound", International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013)", Dahka, Bangladesh, 2014.06.20-21.
- M. Yokoyama, K. Murotani, K. Kikuchi, G. Yagawa, O. Mochizuki, "How deal with slippery surface between fluid and structure in particle method?" The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16), Okinawa Convention Center, June 26, 2014.
- Takafumi Nosaki, Nobuyoshi Fujimatsu, "Experimental study of aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion", The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16), Okinawa Convention Center, June 26, 2014.
- Naohiro Shinozaki, Nobuyoshi Fujimatsu. " Motion analysis and flow visualization of sheet flutter for various materials", The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16), Okinawa Convention Center, June 26, 2014.

- Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi and Yoichiro Matsumoto, "Some Modifications of Bubble Model for Cavitating Flow Simulations",11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
- 10. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi and Yoshiaki Tamura, "Fluid-Structure Interaction Analysis of Vibration Phenomena and Verification of its classification and Prediction Accuracy using Modular Network Self-Organizing Map",11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
- 11. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura and Genki Yagawa, "The Comparison of the Experimental Result with the Numerical Analysis using the New Coupled Analysis Method based on the Enriched Free Mesh Method and the SUPG/PSPG Stabilized Finite Element Method",11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
- 12. Masao Yokoyama, Kohei Murotani, Genki Yagawa and Osamu Mochizuki, "Fluid-Structure Interaction Analysis with Slippery Mucus Skin",11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
- 13. 広瀬孝三郎, 松原仁, 粘性土における Mud crack 生成パターンに関する実験的検討, 土木 学会第 69 回年次学術講演概要集, pp. 85-86, 2014.
- 宮野伸介,大城武,富山潤,福地啓太,"塗装PC鋼より線仕様のプレテンションPC桁の付着 性能に関する研究",土木学会第69回年次学術講演会,V-013, pp.25-26, 2014.
- 15. 富山潤, 大城武, 大貫隆弘, "塩害環境化におけるエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた鉄筋コン

クリートの防食に関する研究", 土木学会第69回年次学術講演会, V-439, pp.877-878, 2014.

- 松浦葵,富山潤,迫田泰治, "ASR 劣化したプレテンション PC 桁橋の劣化調査とモニタリング 調査", 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-484, pp.967-968, 2014.
- 17. 横山真男, 野村和希, 望月修, "水底の形状変化を用いた水滴落下による騒音の緩和", 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2014.10.
- 18. 新城達也, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, "ロックアンカー・ロックボルトの非破壊試験法の開発", 土木学会西部支部沖縄会, 第4回技術研究発表会, pp.60-61, 2014.
- 19. 土屋憲一, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, "トンネル掘削における発破振動計測の試み, 土木学会西部支部沖縄会", 第4回技術研究発表会, pp.62-63, 2014.
- 20. 福長友弥, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, "史的石積み構造物に対する多重パラメータ 動態計測システムとその中城城址への適用", 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究 発表会, pp.64-69, 2014.
- 21. 亀川裕也, 藍檀オメル, 富山潤, 山口順圭, 屋我晃, 神谷和志, 上里尚也, "コンクリートプリズム(CPT)を用いた ASR 加速試験の遅延膨張性 ASR への適用性に関する研究", 土木学会西部支部沖縄会, 第4回技術研究発表会, pp.128-129, 2014.
- 22. 外間賢伍, 松浦葵, 藍檀オメル, 富山潤, "コンクリート橋上部工の付着塩分量に関する調査 および塩害環境評価法に関する基礎研究", 土木学会西部支部沖縄会, 第4回技術研究発 表会, pp.130-131, 2014.
- 23. 松浦葵, 藍檀オメル, 富山潤, 迫田泰治, 浅井光輝, "ASR 劣化したプレテンション PC 桁橋の調査および損傷理論を導入したボクセル FEM を用いた膨張予測の基礎検討", 土木学会西部支部沖縄会, 第4回技術研究発表会, pp.132-135, 2014.
- 24. 平田淳貴, 吉次優祐, 松浦葵, 藍檀オメル, 富山潤, "コンクリート梁の振動特性に関する基礎研究, 土木学会西部支部沖縄会", 第4回技術研究発表会, pp.170-171, 2014.

- 25. 吉次優祐,松浦葵,平田淳貴,松川博宣,富山潤,藍檀オメル,渡嘉敷直彦,"塩害劣化した コンクリート橋梁の振動特性評価に関する基礎研究",土木学会西部支部沖縄会,第4回技 術研究発表会, pp.172-173, 2014.
- 26. 松川博宣, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, "モノレール駅の振動特性に関する基礎研究, 土木学会西部支部沖縄会", 第4回技術研究発表会, pp.174-175, 2014
- 27. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, "自己組織化マップを用いた解析結果の予測", 日本機械学 会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月
- 28. 長岡慎介, 中林靖, 田村善昭, 矢川元基, "EFMM を用いた流体-構造連成解析と実験結果 との比較", 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月
- 29. 後藤恵理子, 瀬田陽平, 矢川元基, 横山真男, "容器の口から流れる液だれの数値シミュレ ーション", 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月
- Toshihiro Ashino, Yuichiro Yamashita and Tetsuya Baba, "The Requirements for Permanent URI's of Reliable Constant Values and Unit Systems to Linked Measurement Data", SciDataCon2014, Delhi, India, November 2014
- 31. 広瀬孝三郎, 松原仁, 原久夫, マッドペーストを用いた Mud crack 生成パターンに関する実験的検討, 第 27 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.32-33, 2014.
- 32. 河合浩志,谷村景貴,塩谷隆二,"アクセラレーター向け最適化コード自動生成DSL開発", 日本機械学会第27回計算力学講演会,講演番号1604,岩手大学工学部,2014年11月22 日~24日
- 33. Hirotaka Tanimura, Hiroshi Kawai, and Ryuji Shioya, "A Development of Domain Specific Language(DSL) for Continuum Mechanics", JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software, P40, KOBE, JAPAN, December 2-4, 2014

6.3. 招待講演

- G. Yagawa, M. Yokoyama, K. Murotani, "High-Performance Computing for Fluid-Structure Interaction with Application to Splash Problem", International Conference on Computational Fluid–Structure Interaction and Flow Simulation ", Tokyo, JAPAN, 2014.03.20
- Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA and Genki YAGAWA, "An Efficient Approach for the Fluid-Structure Interaction Problems based on the Stabilized Finite Element Method and the Enriched Free Mesh Method", Advances in Computational Fluid–Structure Interaction and Flow Simulation, Tokyo, Japan, 2014.03.19–21
- Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA and Genki YAGAWA, "An Efficient Parallelization Method and Asymmetric Solver for the Fluid-Structure Interaction Problem", KSME-JSME Symposium on Computational Mechanics & CAE 2014, Jeju, Korea, 2014.05.01
- 4. 矢川元基, 流体構造連成問題について(その2), 東京理科大学特別講義, 2014.5.27(野田)
- Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, "Visualizations of Bubble Motions and Temperature Rises by Focused Ultrasound", International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, 2014.06.20-21
- 6. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA, Yoshiaki TAMURA and Genki YAGAWA, "An Efficient Parallelization and Asymmetric Solver for the FSI Solver based on the SUPG/PSPG Method and the Enriched Free Mesh Method", The 5th International Conference on Computational Methods (ICCM2014), Cambridge, England, 2014.07.28-30
- 7. 矢川元基,計算力学の最新動向,ヤンマー(株),特別講演,2014.9.29(米原)
- 矢川元基,計算科学,計算力学シミュレーションの現状と課題,新日鉄住金(株),特別講演, 2014.10.8(富津)
- G. Yagawa, Large scale fluid structure interaction considering the surface condition of the solid wall, ESI Forum2014, 2014.11.20(Tokyo)

6.4. 受賞

 松原仁,平成25年度日本計算工学会論文奨励賞(論文タイトル:捩り外力を受ける環状切欠 き丸棒におけるファクトリールーフ状破断面の形成メカニズムに関する数値解析的検討),平 成26年5月 東洋大学計算力学研究センター 2014 年度 年報

7. 研究グループ紹介



中林研究室



塩谷研究室



藤松研究室



江澤研究室



田村研究室

8. 結び

本報は、2014 年度の活動を取りまとめたものである. なお、2015 年 3 月に予定されているセン ター評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2015 年 1 月 31 日とした. したがって、そ れ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい.

社会が抱える問題,あるいは産業界が抱える問題を発掘しながらソリューションを見出していくこ とをセンターに関係する全ての研究者が使命として共有しながら今後の活動や研究開発を進めて いきたい.



東洋大学 計算力学研究センター 2014 年度年報

この資料の転載, 引用などはご遠慮ください. 本資料に関するお問い合わせは下記へお願いいたします. 編集・発行 東洋大学計算力学研究センター 〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100 URL: http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/

TEL • FAX: 049-239-1475

2015年3月発行