1.	まえか	必き	3
2.	概要		4
2	. 1.	センター設置について	4
2	. 2.	組織	5
3.	研究成	戈果	7
3	. 1.	解析手法開発グループ	7
	3.1.1.	. 並列流体-構造連成解析手法の開発	8
	3.1.2	. 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発	14
	3.1.3	. 物体壁面の表面性状を考慮した流れのシミュレーション	17
	3.1.4	. 飛来塩分シミュレーション -流体~粒子弱連成解析	30
	3.1.5	. ブロック構造を有する固体の大規模3次元モデル生成および固液連成角	郓析
	技術の	D構築生	33
3	. 2.	大規模並列化グループ	36
	3. 2. 1.	. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発	37
	3. 2. 2.	. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築	43
3	. 3.	新規実験計測グループ	46
	3.3.1.	流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムの構築	47
	3.3.2.	境界層特性評価のための普遍関数構築	51
	3.3.3.	弾性体による空気抵抗低減効果に関する検討	53
3	. 4.	精度・妥当性検証グループ	56
	3.4.1.	段ボールにおける構造解析手法の開発と精度の検証	57
	3.4.2.	物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発	60
	3.4.3.	確率的大域的最適化	62
	3.4.4.	複雑構造物の軽量化設計技術の開発	65
3	. 5.	可視化検証グループ	67
	3. 5. 1.	 3次元画像による定量的・定性的検証 	68
3	. 6.	横断的研究会	73
	3.6.1	. 連成標準問題検討会	73
	3.6.2	 計算力学と(材料)データベースの会 	73
	3.6.3	 楽器音響と流体構造連成研究会 	73
	3.6.4	. タイヤ研究会	74
4.	共同研	开究	75
4	. 1.	JST CREST プロジェクト	75
5.	国際協	备力	77
5	. 1.	TU-LHU student workshop(龍華科技大学 / 台湾)	77
5	. 2.	LHU-SKKU-TU 若手ワークショップ(白山 / 日本)	78

5	. 3.	SSME 2013 (墾丁 / 台湾)	79
6.	情報発	信	80
6	. 1.	第18回計算力学フォーラム(JSME-CMD / 佐賀)	80
7.	教育活	動	81
7	. 1.	教育活動風景	81
7	. 2.	卒業論文・修士論文の紹介	84
8.	業績リ	スト	86
8	. 1.	総説・解説・エッセイ	86
8	. 2.	論文	86
8	. 3.	講演論文・口頭発表	87
9.	受賞		92
9	. 1.	日本機械学会計算力学部門賞第 91 期業績賞	92
9	. 2.	2013 JACM Fellows Award(日本計算力学連合フェロー賞)	93
10.	結び	۶	94

1. まえがき

本年度はセンターが活動を開始してから9年目にあたる.過去8年間のうち,5年間は 私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」として活動を行ってきて いたが,昨年度,私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定され,いわば第2期の研究 活動を開始したところである.この報告書は,その2年目の活動を中心にとりまとめたも のになる.

今回の、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体構造連 成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」としている.これは、それまでの 流体解析や構造解析といった個別の物理の解析から一歩進めてより複雑な、また現実的な 問題に計算力学の手法を適用しようとすることと、単に研究として行うのでなく、精度や 妥当性を十分に検証し、あるいはその検証方法を確立することで、実用に耐えうるものと することを目指してのことである.本年度は、その2年目であり、昨年度に整えた研究体 制のもと、各メンバー、グループが研究を進めている.それぞれの進展については3章に 詳しく述べられている.また、韓国成均館大学、台湾龍華科技大学とは合同で学生ワーク ショップを開いた.さらに、戦略的研究推進事業 CREST やその他、センターに関連する研 究についてもふれている.

本年度は実際に研究が動き始めたところであると言える.本格的な成果が示せるのは来 年度であろうと思われるが、その中でも期待できるいくつかの成果は本報に含まれている. まだまだ、物足りなく感じられる向きもあろうかと思われるが、今後ともさらなるご批判 とご指導を賜れば幸いである.

2013年3月

東洋大学計算力学研究センター長 田村善昭

2. 概要

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

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

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

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

2.1. センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである.

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

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

・平成22年3月 「学術フロンティア推進事業」終了

・平成23年8月 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST

「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目 「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で 採択される.

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

2.2. 組織

センターの組織とメンバーは以下の通りである.



メンバー

・センター長				
田村善昭	(東洋大学	総合情報学部	総合情報学科	教授)

・研究員

芦野	俊宏	(東洋大学	国際地域学部	国際地域学科	教授)
江澤	良孝	(東洋大学	総合情報学部	総合情報学科	教授)
塩谷	隆二	(東洋大学	総合情報学部	総合情報学科	教授)
中林	靖	(東洋大学	総合情報学部	総合情報学科	准教授)
藤松	信義	(東洋大学	理工学部 機械	式工学科 准教	受)

·研究助手

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

・学生

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

・客員研究員

矢川	元基	(元東洋大学計算力学研究センター長,	東京大学名誉教授,

東洋大学名誉教授)

- 金山 寛 (名古屋大学情報基盤センター 特任教授)
- 富山 潤 (琉球大学工学部 准教授)
- 古川 知成 (Virginia Tech)
- 松原 仁 (琉球大学 工学部 助教)
- 横山 真男 (明星大学 情報学部 情報学科 准教授)

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

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

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

上記の事項を踏まえて、今年度は、以下の5項目について報告を行う.

- (1) 並列流体·構造連成解析手法の開発
- (2) 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発
- (3) 物体壁面の表面性状を考慮した流れのシミュレーション
- (4) 飛来塩分シミュレーション 一流体~粒子弱連成解析-
- (5) ブロック構造を有する固体の大規模3次元モデル生成および固液連成解析技術の構築

3.1.1. 並列流体-構造連成解析手法の開発

(1) 目標·計画

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

今年度は、本提案手法による大規模並列解析を行う際に必要不可欠となる EFMM の並列解析 手法の確立とその実装、およびその並列化効率の検証を行った. 昨年度、提案した EFMM の為の 並列化手法には、応用研究を行った所、幾つかの問題点が明らかとなった為、別の並列化手法を 導入する必要が出てきた為である.

平成26年度は、今年度提案したEFMMの並列解析手法を導入した、EFMMとSUPG/PSPG安定化有限要素法による大規模並列流体-構造連成解析手法の確立と、その解析精度の健全性を実証する為の実験結果との比較を行う.

平成27年度は、実験と数値解析とのリアルタイムでの融合を目指した、チューニングを行いつつ、 様々な現象を数値解析により解明する.

平成28年度には、実験結果と数値解析結果の比較を基に、開発手法について纏める方針である.

(2) 意義・国際社会との比較

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

提案されている多くのアプローチは、流体解析手法として粒子法を用いているものが非常に多い.メッシュ分割を必要としない粒子法を用いることで、流体解析場において多くのアドバンテージが得られることがその一因と考えられる.しかしながら、我々の提案している手法は、流体解析場、構造解析場共に格子法を用いている.格子法を、それぞれの解析場に用いる事で、解析精度の面では、粒子法を用いたアプローチと比較して大きなアドバンテージを有していると考えられる.

本手法の確立により,数値シミュレーションにおいて,非常に重要な解析精度を損なうことなく, 多くの流体-構造連成現象を解く事が可能になると考えられる.このことから,非常に意義のある研 究内容であると言える.

(3) 研究内容

EFMMとSUPG/PSPG 安定化有限要素法とを組み合わせた,本提案手法の大規模並列化の際 に問題となるのはEFMMの解析アルゴリズムである.EFMMによる数値解析を行う場合には,従来 の有限要素法による数値解析とは異なる方法で,剛性マトリックスを生成し,それら得られた剛性マ トリックスを基に,連立一次方程式を解き,解を得る.

具体的には, EFMM を用いた解析では, 解析領域内の全ての節点がそれぞれ中心節点となり, 図 1 に示すような局所要素クラスターと呼ばれる, 幾つかの要素で生成されたクラスターが生成さ れ, それら局所要素クラスター毎に局所剛性マトリックスが計算される.



Fig.1 Fundamental concept of local elements cluster

並列解析を行う際には、一般的に領域分割法(Domain Decomposition Method : DDM)が用いられる. この DDM は、節点ベースの手法と、要素ベースの手法とに大別される (図 2).



Fig.2 An example of domain decomposition method

EFMMは、中心節点毎に局所要素クラスターを生成する節点ベースの解析手法であることから、 節点ベースの DDM の使用が望ましいように考えられるが、局所要素クラスターを生成する節点群 との兼ね合いから、最適化された領域分割を行う事は、非常に困難であると考えられる.

そこで、本研究では、要素ベースのDDMを基に、EFMM解析用の領域分割を行う事で、EFMMの並列化へのアプローチを行った.図3に具体的な領域分割方法のフローチャートを示す.

Analysis domain



- Divide into few domains by the element based domain decomposition method.
- (2) Search nodes which needed to create a correct local elements cluster all of nodes in domain.

*Some nodes are overlapped among with few domains.

(3) Local elements clusters are created without overlapped nodes.

Fig.3 The flowchart of parallelization method for EFMM

本手法を用いる事で、ソルバー内で求められる、通信を必要とする節点数は、図4に示すように、 従来の element-by-element 処理を施した並列解析と理論上は同数となる. ただし、局所要素クラ スターの形状等により、若干の変動は起こり得る事に注意が必要である. また、ソルバー内の行列・ ベクトル積に関しても、局所要素クラスター毎に処理を行う local elements cluster-by-local elements cluster 処理を施す事が可能である. これは、従来の element-by-element 処理をベースと した方法であり、計算機メモリーの節約と、計算時間の大幅な削減が可能となる.



Fig.4 The Comparison of the communication cost

本並列化手法のデメリットとしては、各局所領域間のインターフェイス上の節点を中心節点とす る局所要素クラスターを重複して計算する必要がある事.もう一点、通信テーブルが若干複雑にな る事が挙げられる.これは、通信を必要とする各局所領域内の節点が各局所領域間のインターフ ェイス上で対応していない事、通信を要する節点数が必ずしも一致していない事に起因する問題 である.

本並列化手法による解析のスピードアップを検証する為に,図5に示したエンジンブロックモデルを用いた簡単な静的弾性解析を行った.解析に用いた解析モデルの要素数は,約20万である. 境界条件としてモデル底面を全方向固定し,モデル上面にz方向荷重を与えた.



Fig.5 An analysis model and conditions

なお,領域分割は前述の方法に基づいて行うが,図6に示すように単純に要素数がある程度一 定になるように,単純にx方向に分割を行った為,通信量を考慮した最適化は行っていない.なお, 本手法によるスピードアップは,ストロングスケーリングで計算したものである.



Fig.6 An example of domain decomposition

図7は,単一での解析に要するソルバー部分の解析時間と並列プロセッサ数を2,4,6,8,10台 とした時のスピードアップを示したものである.

同図から、10並列の際のスピードアップが約8.4倍と概ね良好な結果が得られている事が分かる. 本数値解析例でのスピードアップの算出がストロングスケーリングであり、並列プロセッサ数の増加 と共に通信コストの割合が高くなる事、領域分割の最適化を行っていないと云う事を鑑みると、本提 案手法は、十分良好な結果を得られる手法であると言う事が出来る.



Fig.7 Speedup of the parallel EFMM

(4) 平成 25 年度進捗状況

今年度は、我々の提案している EFMM と SUPG/PSPG 安定化有限要素法を組み合わせた流体 -構造連成解析手法を用いた大規模解析を行う際に必要不可欠であり、その適用が非常に困難で あった、EFMM の並列解析手法を提案、実装し、その並列化効率の有効性を実証した.

本提案手法を用いる事で, EFMM と SUPG/PSPG 安定化有限要素法という, 流体-構造連成解 析を行う際に, 非常に相性の良い解析手法を大規模問題へ適用させる事が可能となった.

来年度は、本提案手法を用いた大規模並列流体-構造連成解析手法を実装し、数値解析結果 と実験結果との比較・検証を行い、本提案手法の解析精度面での健全性を示す予定である.

参考文献

- 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、流体と構造体の相互作用による振動現象の数値解析に行い、自己組織化マップ (Self-Organizing Map: SOM)を用いて解析データの分類を行い、条件による振動現象の特徴を検 出することを目的にしている。条件による振動現象の特徴が分かれば、流路内に設置する温度計、 圧力計などのさや管の選定や、楽器などの共振を伴う弦などの設計に役立てることが期待できる。 また、自己組織化マップをモジュラーネットワーク型自己組織化マップ(modular network SOM: mnSOM)に変えるとこで分類と予測を可能にする.mnSOMを用いた予測技術の開発も目指す.

平成25年度では,流体-剛体の移動境界問題を解き,自己組織化マップで分類した.解析モデ ルは2次元円柱で,流れ方向に対して垂直方向にのみ移動するようにバネ・ダンパー系で指示し た.メッシュコントロールは ALE 法と速度 Verlet 法を用いて実行した.解析条件を変え,複数の解 析結果を得た.得られた解析データを SOM でマッピングし,振動現象に起因しているファクタを検 討した.

平成26年度以降は、SOMの学習パラメータを変え、分類性能の向上を図る.また、解析結果の数を増やしてマッピングを行う.同様に、mnSOM でのマッピングを行い、予測精度の向上を図る. また、流体-構造連成問題での場合の分類も目指す.

(2) 意義・国際社会との比較

SOM はデータマイニングに多く用いられる手法であり、入力データをマップ上に配置することができる.また、この配置は似たデータ同士を近くに配置し、そうでないデータを遠くに配置するといった特徴を持つ.また、入力データ間を補間することもできる.

本研究では、SOM を用いた振動現象の分類を行う.振動現象はロックイン現象の再現や 渦励振など様々研究が行われているが、特徴を分類した文献は目にしてない.境界条件に よる円柱の振動運動の特徴でクラスタリングできれば、ある条件下での振動がロックイン するかしないかの予想をたてることができる.

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

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

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

(3)研究内容

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

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

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

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



(a) Model

(b) Mesh

Fig.1 Model of Analysis

]	[nput		Output	
Items	Unit	Ways	Items	Unit
Mass of Cylinder	[kg]	0.5 1.0	Amplitude of Cylinder	[m]
Spring Constant	[kg/s]	0.5 1.0	Frequency of Cylinder	[Hz]
Dumper Coefficient	[kg/s²]	0.0 0.01	Maximum Coefficient of Lift	[-]
Flow Velocity	[m/s]	0.5 1.0	Strouhal Number	[•]
Reynolds Number	[-]	100 500 1000	Average Coefficient of Drag	[-]
Natural Frequency	[Hz]	-		

Table 1 Input-Output Relationship of mnSOM

SOM の分類結果を Fig.2 に示す.入力項目別に確認すると速度と振動,ストローハル数 と円柱振動がそれぞれに起因していることが確認できた.

次に mnSOM の分類,予測を行う. mnSOM のモジュールは MLP を用いる. SOM とは

違い MLP の入出力を決定する必要がある.そこで、本研究では入力に解析条件、出力に解 析結果を与える(Table 1). これにより解析条件から解析結果を予測することができる.勝 者モジュール間は滑らかに補間され、未知の入力に対しても相応の出力が期待できる. MLP の補間能力を考えて、入出力関係をグループ分けして学習を行う.これにより、MLP の補 間と SOM の補間を最大限に発揮し、補間性能の向上が見込める.



Frequency of Cylinder

Amplitude of Cylinder



(4) 平成 25 年度進捗状況

流体⁻剛体連成解析を行い,48通りの解析結果を得た.解析結果からSOM及びmnSOMの分類,学習データを取得した.それを用いてSOM,の分類,mnSOMの予備実験を行った.

SOM の分類では入力データ間の関係を確認することができた. 解析条件と解析結果の関係が視覚的にも確認でき,振動現象の分類が可能であることを確認した.

mnSOM では解析結果の分類,可視化を行い,予測性能を評価した.しかし,未知のデ ータに対しての検証はできていないので,今後の課題である.また,予測性能の向上を図 るため,学習パラメータの調整と解析データを増やす必要があると考える.

今後は予測精度の向上を図り,解析対象を流体と構造の連成問題に拡張して,分類,予 測を行う予定である.

3.1.3. 物体壁面の表面性状を考慮した流れのシミュレーション

(1) 目標·計画

これまで多くの流れのシミュレーションは、物体と流体の間の境界条件は滑り無しで計算されて きた.しかし、物体表面の性状によっては、一概に滑り無し条件では適切な結果が得られない場合 もある.一例として、魚類や両性類の体表にはヌメリや滑りがあるが、その為にこれまでの滑り無し 壁面とは異なる流れが観察され、この滑りといった表面性状の効果を計算に導入する必要がある. 本研究では、境界条件に滑りを考慮に入れることで、その様な滑りのある物体を表現する方法を提 案し、粒子法(MPS 法)による流れのシミュレーションを行うことを目的とする.検証については、生 体材料の1つであり水触媒の高分子ゲルであるハイドロゲルを用いて、ポアズイユ流れ及びスプラ ッシュの実験と比較し、シミュレーション結果と実験の比較を行う.

(2)研究内容

1 はじめに

本研究では、流体と物体の相互作用を扱う数値シミュレーションを行うにあたって、 物体の表面性状の違いを計算に導入する方法を提案する.流体と物体の相互作用(Fluid Structure Interaction)の先行研究については、表面の粗さや材質による流れ場への影響に 関しての研究が行われており、液滴の接触角の調査から車体の撥水性や船体の抵抗低減の 問題まで多く取り扱われてきた⁽¹⁻⁴⁾.また、これまでの数値シミュレーションにおける表面 性状の違いの扱いに関しては、ディンプルやボルテックスジェネレータ等のように剥離と いうような物体表面の構造的な点に着目した研究は多くなされてきたが、それらのほとん どは物体と液体の境界は滑りなし条件で設定されてきた.

しかし、例えば、魚類や両生類のような体表にヌメリをもった生物と流れや、消化器官 や血管の内壁は一律に滑りなし条件とはいかないと思われるが、そういった生体表面のも つ滑り効果を考慮した物体と流れの相互作用を扱ったシミュレーションは少ない.材質の 表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況もあり、例えば、落下物体が水面に 衝突するときに生成されるスプラッシュ(飛沫)が挙げられる.スプラッシュは物体の形 状や衝突速度によって、水飛沫の形状が変化することが分かっている⁽⁵⁾が、また、物体の材 質の違い(例えばハイドロゲルとアクリル樹脂)によっても、観察されるスプラッシュの 形状に差が生じる(後述の図7を参照).つまり、同じ運動条件でも表面性状の違いによっ て周囲の流れ場は異なる現象になるため、この例のように表面に滑りがあるような物体と 流れの相互作用をシミュレーションで計算するには、物体と流体の境界条件に滑りの効果 を記述するモデルを導入する必要がある.



 \boxtimes 1 Schema of MPS method and weight function κ . The *r* is distance between particles. The range where the effect of weight function

また,自由表面を伴う流れ場の解析に有効な粒子法の一つである MPS 法(Moving Particle Semi-implicit法)^(6,7)によるシミュレーションも多くの研究成果が報告されている が,既存の方法のままでは材質による差は表現できていない.一方,生体や医療といった 分野の循環器系や細胞などのシミュレーション解析においても,血管壁⁽⁸⁻¹²⁾や膜⁽¹³⁻¹⁶⁾などの 表面の滑りの扱いについては特に言及されていない.また,これまで我々は生物とそれら を取り巻く流体環境の解明として,流体中の細胞の大変形⁽¹⁷⁾や生体材料のハイドロゲルと その周辺流れについての研究を行ってきた⁽¹⁸⁾.そこで,本論文で扱う表面性状については, 上述のような生体材料であり生物の体表のヌメリの成分であり,親水性高分子ゲルのハイ ドロゲルといった滑り特性を持つ物体を対象としている.ハイドロゲルとは,寒天やゼラ チンのような食用品から医療や生体材料まで幅広く用いられている水を溶媒とする高分子 ゲルであり,魚やカエルといった生物の体表面のヌメリはそういった高分子ゲルの一つで ある Mucin が主な成分である⁽¹⁹⁾.

本研究では、表面性状の考慮が必要なシミュレーションにおける物体壁面の条件の取り 扱いについて言及するものであり.2章にて、その例として生体材料の一つのハイドロゲル における滑りを粒子法(MPS法)による計算へ導入する方法について述べ、3章で、壁面 の滑りを考慮して計算した粒子法シミュレーションを実験との比較によって評価・考察し、 4章にて結言を述べる.

2 流体と物体表面における相互作用の導入

MPS 法は, 混相流やスロッシング, 波, 破壊など流体の自由表面や, また, 大変形を扱 う構造物のシミュレーションを行うのに有効な手法として, 近年盛んに用いられている数 値シミュレーション手法である⁽⁶⁾. MPS 法はメッシュレスな粒子法の一つであるため, 有限要素法などの他の格子を切る計算方法に比べ, 界面が大変形したり合体・分裂したり する流体のシミュレーションを容易に行えるメリットがある.

図 1 に示すように、離散的な流体粒子および固体粒子に作用する運動方程式をたて、各 計算ステップで連立方程式を解き、各粒子の運動を追跡するラグランジュ的な方法である. 運動量保存則は Navier-Stokes の式で表され、各粒子に作用する外力や粘性による移動量 を陽的に計算して仮の位置を求めた後に,質量保存則としての連続の式の代わりに,粒子 密度一定の条件を満たすためにポアソン方程式を解くといった半陰的解法である.ここで は,生体材料のような表面性状が通常と異なるハイドロゲル表面で見られるような滑りの 効果を,MPS法による流れ場を解く計算に導入する方法を述べる.

2.1 粒子法と流れの基礎方程式

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

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

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 重力などの外力である.また、Navier-Stokesの式において、MPS法における圧力項の gradient と粘性項の Lapracian の離散的な計算方法はそれぞれ以下のように表せられる.

$$\nabla P_{i} = \frac{d}{n^{0}} \sum_{j \neq i} \left[\frac{p_{j} - p_{i}}{|\vec{r}_{j} - \vec{r}_{i}|^{2}} (\vec{r}_{j} - \vec{r}_{i}) \kappa(|\vec{r}_{j} - \vec{r}_{i}|) \right]$$
(2)
$$\nabla^{2} u_{i} = \frac{2d}{\lambda n^{0}} \sum_{j \neq i} \left[(u_{j} - u_{i}) \kappa(|\vec{r}_{j} - \vec{r}_{i}|) \right]$$
(3)

ここで, r は粒子の位置ベクトル, d は計算領域の次元, A は統計的な分散を表す変数, n⁰ は粒子の初期配置の密度, p は圧力を示す.本研究では,詳細は次節で述べるが,実験結果 からの類推によりこの陽的に計算される Lapracian に滑りの効果を導入する.なお, MPS 法では図 1 右に示すように,各パーティクル間の相互作用の影響度として重み関数 к は以 下の式として与える.

$$\kappa(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 \le r \le r_e) \\ r & 0 & (r_e \le r) \end{cases}$$
(4)

ここで、*r*は二点間の距離であり、パーティクル近傍の影響範囲を示す閾値 *r*_bは一般的に用いられている 2.1*b* とし⁽⁶⁾、*b*は初期状態のパーティクルの平均間隔で、計算時間と描画の分解能を考慮し *b*=4mm とした.

2.2 ハイドロゲル表面の滑りの効果の導入

物体表面の滑りの効果を MPS 法に取り入れる方法を示す.ここでは,表面の滑りを物体 と流体の壁面応力の低減として捉え,実験によりその低減率を滑り率(slip ratio) a として求 め,ハイドロゲル壁面とその近傍の流体に作用するせん断力の計算に適用するといった, 実験から得られた現象を元にした手法である.

まず、ハイドロゲルの物性値の一つである膨潤度 S (swelling degree) は、下記の式(5) のようにゲルの質量に対する水の質量の比で表される.

$$S = (m_{\text{water}} + m_{\text{gel}}) / m_{\text{gel}}$$
(5)

ここで *m*water は溶媒となる水の質量, *m*ge₁ はゲルの乾燥材料の質量であり, つまり, 水分 量が大きいほど *S* の値が大きくなる.本研究の対象には, 含水量の調整や成型の容易さか らハイドロゲルとして寒天を選んだが, 寒天は主にアガロースと呼ばれる高分子による鎖 状の分子構造で,網目状の架橋構造を作りその合間に水分子を含み,その値は数百といっ た多量の水分を含有することができる.

次に、ハイドロゲル壁面と流体との間に生じる滑り率 a については、ハイドロゲルによ



 $\boxtimes 2$ Schema of experiment of a film flow with slip at the wall. Slip ratio *a* was the ratio of wall shear stress obtained by the experiment. The τ is wall shear stress on the slope with no-slip condition. The τ' is that on the slope with



 \boxtimes 3 Experimental result⁽¹⁸⁾ of velocity profile of flow on the agar wall. The *u* is the velocity of water.

る滑り有りの壁面応力およびアクリル樹脂による滑り無しの壁面応力の比で求めた.流路 を流れる水の PIV 実験による壁面近傍の垂直方向の速度勾配から,壁面応力をそれぞれ求 めその比を *a* として数値計算の境界条件に導入することにした.

実験のより詳しい説明は参考文献⁽¹⁸⁾にゆずるが,図2にその実験の模式図と*a*の導出に 関する概要を示す.実験は、ハイドロゲルによる滑り有り条件およびアクリル樹脂による 滑り無し条件による斜面上に、パーティクルを混入させた水を上部から流し、パーティク ルの移動の様子を側面からハイスピードカメラによるビデオ撮影により計測した.流路は 長さ 400mm,幅 20mmのアクリル樹脂板で作成し、ハイドロゲルの層をその底面上に一 様に形成させた.ハイドロゲルには形成の容易さから寒天を取り上げたが、さらに比較の ためにカラギーナンゲルでも同じ実験を行った.ハイドロゲル層の上に流した水の流速は 44.5mm/s で、計測した流れの壁面垂直方向*y*の高さ*δ*はハイドロゲル表面から 0.83mm で あった.なお、水の注入は撮影箇所から十分はなれた上流から行い、ハイドロゲル表面は この流れによる変形や流失はなかった.

図3に、実験による膨潤度 Sの違いによる寒天上およびアクリル樹脂上の流速の分布を 示す.床面垂直な方向yにおける斜面方向の速度uの分布は、寒天(S=100~350)ではy/&=0.2 より下の壁面近傍でアクリル樹脂(Acrylic)に比べ速くなっており、概略図2の実線のように 寒天の表面近傍では滑りがある流れが観測された.なお、滑り無し条件のアクリル樹脂で は、図2の破線のようにポアズイユ流れが観測され、これは理論値と一致していた.

ここで、実験精度について述べると、壁面上を流れる液膜流れの理論値と比較を行った ところ、計測より得られた滑り無し条件としてのアクリル板上の速度分布は液膜流れの理 論値との相関係数が 0.999 であり非常に良好な一致が得られた.また、壁面近傍での標準 誤差は最大±0.06%であった.この測定精度をもって、図 3 はハイドロゲル上を流れる液 膜流れの速度分布を計測しているので精度は保障されていると言える.

壁面応力 τは、次式のとおり壁面近傍における速度勾配から算出する.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}|_{y=0} \tag{6}$$

ここで μ は水の粘度で、u は流速である. 壁面における速度勾配 du/dy は、壁面に最も近 い方から 2 つのパーティクルを選び、それらのパーティクルの底面に平行な方向の速度変 化量 du を垂直方向の距離 dy で除算して求めた. 計測したパーティクルの斜面からの距離 は $10\mu m$ 以下で、概ね精度は保障される値である.本研究では、アクリル斜面を滑り無し として基準の壁面応力 τ とし、また寒天のときの壁面応力を τ とし、次式の様にそれぞれの 応力の比を滑り率 α とする.



 $\alpha = \tau' / \tau$

(7)

また, 膨潤度 Sと滑り率 aの関係は, 寒天およびカラギーナンゲルによる実験結果から図 4 に示すような値が得られ, それぞれ線形となる結果となったことにより次式のようにモデル化した.

 $\alpha = 1 - \beta S \tag{8}$

係数 β は、実験値より寒天(Agar)の場合 0.0012 であった.よって、膨潤度 150 では aは約 0.94 であり約 6%の壁面摩擦抵抗の低減になることを示している.なお、no-slip の場合は a = 1 で、また完全にスリップする場合は a = 0 とする.

次いで、ここで得られた a は、図 5 に示すようにゲル壁面と水の境界付近における、陽 的な粘性の計算時の重み関数の係数として用いる. MPS 法では、各パーティクル間のせん 断力の影響度を重み関数 ĸ として与えるが、本研究では、寒天ゲル壁面と周囲の水の滑り

(壁面せん断力の低減)の影響として,粘性項の計算における重み関数に滑り率 a を掛け 合わせた KHを寒天ゲルの周囲 reにある水粒子との間にのみに用いた.ほかの粒子間である 壁から離れたところの粒子や水粒子同士には通常の K を用いる.

$$\nabla^2 u_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum \left[(u_j - u_i) \kappa_H(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right]$$
(9)

i: water particle near hydro-gel wall j: surface particle of hydro-gel wall

$$\kappa_H(r) = \alpha \kappa(r) \tag{10}$$

つまり、ハイドロゲルの表面を構成するパーティクルから半径 Reにある水粒子との粘性項 計算についてのみ aを掛けた重み関数 KHで計算することで,壁面応力を a 分だけ小さくし ハイドロゲル壁面近傍の滑りを表現した.

3 シミュレーション結果と考察

本章では、既存の粒子法プログラムに対し 2 章で示したハイドロゲル壁面の滑りの効果 を導入したシミュレーション結果を示す.まず、2.2節で述べたハイドロゲル表面上を流れ る水の実験と比較することで、本手法の妥当性を検証し、次に、生体分野での応用例とし て、ハイドロゲル球が水面に落下によって生じるスプラッシュのシミュレーションを行っ た.

3.1 ハイドロゲル床上の流れの検証

本研究で提案した手法の検証として、式(9)と式(10)を用いてハイドロゲル床面上の流れ る水の速度分布についてシミュレーションを行った. 図 6 に、高さ h の管路に水を流した 時の、床面からの距離 y とその位置における流速 u の分布について、床面の滑り無し条件 (no-slip) と滑り有り条件(膨潤度 S = 100, 250) それぞれの結果を示す.計算条件につ いては、 r_e は参考文献^(6,7,9)などでよく用いられている 2.1hとし、また、初期粒子間隔 hは 4mm とした.また、計算領域は長さ 80 h、高さ 20 hとし、計算領域上面(y = h)は slip 条 件で x方向に流速 $u_0 = 4$ cm/s を与えるものとしている.なお、速度分布 uは与えた流れの 初速 u_0 で、また高さ yは h でそれぞれ割って正規化している. シミュレーションの結果については、まず、滑り無し条件(no-slip)ではポアズイユ流れに なることが知られているが、本計算による流れの速度分布を理論値(破線)と比較すると



 \boxtimes 5 Difference of weight functions $\kappa_{\rm H}$ and κ . The distance between particles denoted by r. The $\kappa_{\rm H}$ is used between the particle on the boundary of the hydrogel object and the virtual



 \boxtimes 6 Difference of flow velocity u on the hydro-gel wall (slip wall) and no-slip wall in a conduit by MPS method. The U_0 is the



(A) Hydrogel (Agar)

(B) Acrylic resin

 \boxtimes 7 Difference of water splash by a sphere made of hydro-gel and a sphere made of acrylic resin. The picture at left is the splash of an agar sphere (Radius=10mm, S = 100), the picture at right is a splash of acrylic resin (Radius=10mm). The velocity impacting water surface in both photos was the same, but each splash's form was different.

同等の速度勾配が得られており,滑り無し条件では正しく計算ができている.次いで,図6の右下に拡大図を示すが,ハイドロゲル床面である *S*=100 や *S*=250の条件では,膨潤度の上昇に伴いハイドロゲル表面の滑りによる効果で壁面近傍の流速が増加している.例えば,滑りがある *S*=250の結果において,no-slipの結果より床近傍で流速が約10%増加しており,前述の実験と同様の結果であった.図6は横に速度を取っているため,傾きが急になっていることはハイドロゲルの膨潤度*S*の増加により表面近傍の速度の変化率が減少していることを表している.つまり,壁面応力は式(6)に示したように表面近傍の速度の変化率に比例するので,このシミュレーション結果は壁面応力が低減していることを表していることになる.以上により,slip ratioを滑り有り壁面近傍に導入することで実験の結果と同様の計算が得られ本手法は妥当であるといえる.

ここで、粒子法におけるパラメータの影響についての検証について述べておく. 閾値 re に関して、一般的に用いられている 2.1 ん以外の場合では、図 6 で示した速度勾配において 差が生じた. reが 2.1 より小さい 1.8 などでは流速が壁面と上面の中間(y/h=0.5)付近で実験 値よりも大幅に大きい値になり、また一方、reが 2.1 より大きい 2.4 や 2.6 などでは壁面近 傍の流速が急激に増加した.よって、結局 re は文献の値 2.1 の時に、全体的によくゲル状 のポアズイユ流れを表現できていた.また一方、初期粒子間隔 b については、この間隔を 2 倍 4 倍、1/2 倍 1/4 倍と変えてシミュレーションの検証をしたが、図 6 の壁面近傍のスリッ プによる効果の傾向が変わるといった違いはなかった.なお、粒子の移動に関しては 4 次 精度のルンゲクッタ法を用いている.

3.2 ハイドロゲル球が生成するスプラッシュにおける滑りの効果

次に、本手法の応用例としてハイドロゲル球が水面に突入した時のスプラッシュの二次 元シミュレーションを行った.

スプラッシュは流体の自由表面や大変形,物体との連成といった計算工学における流体 と固体の相互作用問題(Fluid Structure Interaction)の観点で興味深い現象である⁽²⁰⁻²³⁾. 本研究で扱った滑りとスプラッシュにおいては,バイオミメティクスの観点では,魚類が 泳ぐときやカエルが水面に飛び込むときに生じるしぶきや,またはイルカのトムズ効果で 知られるような表面分泌物による抵抗低減の現象などに関連している.また,競泳水着や 船体壁面における飛沫のメカニズムや造波の抵抗低減といったように,スポーツや造船分 野の研究においても自由表面を扱うスプラッシュが取り上げられている.こういった研究 は,通常の no-slip でない境界条件でのシミュレーションも検討されるべきではないかと思 われる.

表面性状の違いにより周辺の流れが影響を受ける現象の例を図 7 に示す.大きさと水面 への突入速度が同じ(A)ハイドロゲル球(寒天: S=100)と,(B)アクリル樹脂球によるスプ ラッシュの形状のスナップショットである.球は吸引による Launcher 装置で吸いながら静止させ後,電気スイッチにて吸引を止めることで無回転で落下させた.静水面に突入した

際に形成されるスプラッシュ映像は、真横からハイスピードカメラ(Vision Research Inc. Phantom V7.1)を使用し 4000 frames/sec で撮影したものである.物体には、水に飛び込むカエルなどの小生物などを想定し、その大きさに近い半径 R=10mm の球を、高さ 50Rから落下させた.

図 7(A)のハイドロゲル球では、いわゆるミルククラウンのような冠状のスプラッシュが 形成されるが、アクリル樹脂球(B)では柱状になった.この例のように、どちらも表面はな めらかであるが、物体表面の滑りといった性質によって周辺流れ場が影響を受ける例があ るので、本研究のようにシミュレーションにおいても表面性状の違いは考慮されるべきで ある.

図 8 に、ハイドロゲルの滑りの効果をいれたシミュレーションと実験によるハイドロゲル球のスプラッシュとの生成過程を示す.本研究では、MPS 法における滑りの効果による結果への影響をみるため、計算コストも考慮してここでは三次元でのシミュレーションではなく二次元で検証した.実際のスプラッシュとの三次元に起因する相違の比較は今後の課題にしたい.球は半径 *R*=10mm でシミュレーションの水槽は半径 20*R*,深さ 20*R* とし、スプラシュの形状への影響がないことを確認した大きさである.

ハイドロゲルの球が水槽の水面に着水した瞬間を *t*=0.0 として, *t*=0.02 で最初のスプラ ッシュ(Primary Splash)が上がり,いわゆるこれはミルククラウン⁽²⁰⁾に見られるものであ る. その後 *t*=0.03 では球が沈降するに伴い柱状の空気のキャビティができる. このシミュ レーション結果は実験結果で観察されるスプラッシュと良く似た結果が得られた.

図 9 は、ハイドロゲル球によるスプラッシュのシミュレーションで、その飛散する水粒 子の軌跡をトレースしたものである.水面に突入した瞬間を *t*=0 とし、水粒子の運動の軌 跡を *t*=0.045 までプロットしたものである.軌跡として表示している粒子は、突入する寒 天ゲル球の直下を *x*=0 とし近傍の半径 *R*内にある水粒子であり、青線は *S*=50 の時の軌跡 を、赤線は *S*=350 の時の軌跡をそれぞれ示している.

図 9 の軌跡の広がり方の違いにみられるように膨潤度が大きくなるにつれ水粒子の飛散 する軌跡が外側に広がり、粒子の移動距離は膨潤度が大きいほど多かった.この原因とし ては、ハイドロゲル球周辺の水の移動速度が滑りにより増加することが考えられる.

図 10 に、各 S に対する水粒子の平均速度 Vave の変化を示すが、各 S における値は図 9 に示した球の落下地点付近の粒子の平均をとっている. このグラフより、膨潤度 S の大き い方が Vave は速く、ハイドロゲル表面における滑りの影響により表面の周辺にある水粒子 の速度が増加したことを示している.



 \boxtimes 9 Path lines of a virtual water particle near the impact point hydrogel sphere plunging, during T = 0 to 0.045sec. The particles started from the surface of water at x = 0 to R. Blue line: S = 50, Red line: S = 350. The particle of S = 350 moved wider than that of S = 50.





以上、本研究の提案する手法により、ハイドロゲルの膨潤度の違いに応じた slip-ratio を 導入することで、物体表面の滑りの度合いが周辺流れ場に与える影響が解析できるように なった. なお、スプラッシュの観察においては、実験環境での詳細な流れ解析は難しく、 筆者らも PIV や着色によって着水物体の近傍の流れをトレースしようとしたが、パーティ クルが気泡やキャビティによってさえぎられたり、光の反射や前面に跳ね上がる波などが 障害になったりして解析は満足に行えなかった.また、膨潤度の大きいハイドロゲルでは 球そのものが柔らかくなることによる変形の影響も受けるため、表面の滑り効果のみの影 響を観察するためにも、本研究のようなシミュレーションによる解析が滑りの影響の調査 には有効な一手段であると考えられる.



t=0.02





 \boxtimes 8 Crown-type-splash of hydrogel (S = 100) by experiment and simulation. Primary

4 おわりに

本研究は、物体表面に滑りを有するような物体周りの流れ場のシミュレーションを計算する方 法を提案した.二次元の非圧縮性流体の粒子法(MPS 法)シミュレーションにおいて、膨潤度に 応じた壁面の滑り度合いとして滑り率(slip ratio)を実験より求め、それをナビエ・ストークスの 式における粘性項を陽的に計算する際に、重み関数に掛ける係数として導入した.

提案した手法の検証として、管路内を流れるポアズイユ流れの数値シミュレーションを行い、 ハイドロゲル壁面近傍における流速が滑り無し条件に比べ増加するといった,実験との同様の結 果が得られることを確認した.そして、本手法による計算方法の応用例として、生物の水面への 飛び込みに見られるようなスプラッシュを取り挙げた.膨潤度に応じたスプラッシュの違いのシ ミュレーションを行い,膨潤度の増加により球近傍の水粒子の速度が上昇しスプラッシュの幅が 増大することを示した.

本研究の効果として,流体と物体壁面の干渉において通常の no-slip 条件ではない表面性 状として滑りを計算に導入したが,これにより,ぬめりのある体表面を持った生物や,さ らには血管や消化器の内壁といった生体における流れのシミュレーションへ適用の可能性 を示すことが出来た.

引用文献

- (1) Manservisi, S., and Scardovelli, R., "A variational approach to the contact angle dynamics of spreading droplets", *Computers & Fluids*, Vol.38 (2009), pp.406-424.
- (2) Tanaka, Y., Washio, Y., Yoshino, M., and Hirata T., "Numerical simulation of dynamic behavior of droplet on solid surface by the two-phase lattice Boltzmann method", *Computers & Fluids*, Vol.40 (2011), pp.68-78.
- (3) Muradoglu, M., and Tasoglu, S., "A front-tracking method for computational modeling of impact and spreading of viscous droplets on solid walls", *Computers & Fluids*, Vol.39 (2010), pp.615-625.
- (4) Yabe, T., Chinda, K., and Hiraishi, T., "Computation of surface tension and contact angle and its application to water strider", *Computers & Fluids*, Vol.36 (2007), pp.184-190.
- (5) Kubota, Y., and Mochizuki, O., "Splash Formation by a Spherical Object Plunging into Water", *Journal of Visualization*, Vol.12 (2009), pp.339-345.
- (6) 越塚誠一, 粒子法 (2005), pp.10-29, 日本計算工学会.
- (7) Harada, T., Suzuki, Y., Koshizuka, S., Arakawa, T., and Shoji, S, "Simulation of Droplet Generation in Micro Flow Using MPS Method", *JSME International Journal*, Series B, Vol.49 (2006), pp.731-736.
- (8) Takizawa, K., Bazilevs, Y., Tezduyar, T.E., "Space-time and ALE-VNS Techniques for patient-specific cardiovascular fluid-structure interaction modeling", Arch. Comput. Methods Eng., Vol.19 (2012), pp.171-225
- (9) 田中正幸, 越塚誠一, "粒子法を用いた赤血球の変形シミュレーション", 日本流体力学会誌 「ながれ」, Vol. 26 No.1 (2007), pp.49-55.
- (10) Tsubota, K., Wada, S., Kamada, H., Kitagawa, Y., Lima, R. and Yamaguchi, T., "A particle method for blood flow simulation, Application to flowing red blood cells and platelets –", *Journal of the Earth Simulator*, Vol.5 (2006) pp.2-7.
- (11) Shirai, A., Fujita, R., and Hayase, T., "Transit characteristics of a neutrophil passing through a circular constriction in a cylindrical capillary vessel", *JSME International Journal*, Series C, Vol.45, (2002), pp.974-980.
- (12) Sun, S., Migliorini, C., and Munn L.L., "Red Blood Cells Initiate Leukocyte Rolling in Post Capillary Expansions: A Lattice Boltzmann Analysis", *Biophysical Journal*, Vol.85 (2003) pp.208-222.

- (13) Barthes-Biesel, D., Diaz, A, and Dhenin, E, "Effect of constitutive laws for two-dimensional membranes on flow-induced column deformation", *J.Fluid Mech.*, Vol.460 (2002), pp.211-222
- (14) Ramanjan, S., and Pozrikidis, C., "Deformation of liquid capsules enclosed by elastic membranes in simple shear flow: large deformations and the effect of fluid viscosities", J. Fluid Mech., Vol.361 (1998) pp.117-143.
- (15) Zhu, L.D., Chin, R.C.Y., "Simulation of elastic filaments interacting with a viscous pulsatile flow", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.197 (2008), pp.2265–2274.
- (16) Taylor, C.A., Hughes, T.J. R, and Zarins, C.K., "Finite element modeling of three-dimensional pulsatile flow in the abdominal aorta: Relevance to atherosclerosis", *Annals of Biomedical Engineering*, Vol.26 (1998) pp.975–987.
- (17) Yokoyama, M., and Mochizuki, O., "Deformation of a fluid-filled compliant cylinder in a uniform flow", *Journal of Fluids and Structures*, Vol.25 (2009) pp.1049-1064.
- (18) Kikuchi, K., and Mochizuki, O., "A flow on a hydrogel surface mimicked a living cell", *The 21st International Symposium on Transport Phenomena*, (2010), CD-ROM
- (19) Ling, S.C., and Ling, T.Y., "Anomalous drag-reducing phenomenon at a water / fish-mucus or polymer interface", *J.Fluid Mech*, Vol.65 (1974), pp.499-512.
- (20) Worthington, A.M., "On Impact with a Liquid Surface", *Proceedings of the Royal Society* of London, Vol. 34 (1982), pp.217-230.
- (21) Krechetnikov, R., and Homsy, G.M., "Crown-forming instability phenomena in the drop splash problem", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.331 (2009), pp.555-559.
- (22) Bussmann M., Chandra S. and Mostaghimia J., "Modeling the splash of a droplet impacting a solid surface", *Physics of fluids*, Vol.12 (2000), pp.3121-3132.
- (23) Yoon, S.S., Jepsen, R.A., Nissen, M.R., and O'Hern T.J., "Experimental investigation on splashing and nonlinear fingerlike instability of large water drops", *Journal of Fluids* and Structure, Vol. 23 (2007), pp. 101-115.

3.1.4. 飛来塩分シミュレーション -流体~粒子弱連成解析-

(1) 目標·計画

本研究はコンクリート構造物の塩害劣化シミュレータの開発を目的としている.コンクリートの塩害 は、海から運ばれる海塩粒子(飛来塩分)に起因する場合と、コンクリートの構成材料である骨材に 未洗浄あるいは十分洗浄していない海砂が使用された場合がある.本研究で対象としている塩害 は、前者である.

飛来塩分に起因したコンクリート構造物の塩害は、海から運ばれる塩分がコンクリート表面に付着 し、それらの一部が構造物内部に浸透し、内部の鉄筋位置まで達し、それらの濃度が腐食発生源 限界塩化物イオン濃度を超えると、鉄筋が腐食・膨張し、その膨張圧でコンクリートに有害なひび 割れを生じさせる劣化現象である.

本研究では、それらの劣化現象を精度よく予測するための数値解析的手法を開発することを目 標としている.これまでADVNETURE_Fluid_Tetおよび粒子拡散手法の一種であるランダムウォー ク法を用い、流体-粒子弱連成解析おいて、飛来塩分の移流・拡散および構造物への付着シミュレ ーションを実施してきた.今年度の目標は、本解析結果と実構造物との付着塩分の調査との比較 を行い、本手法の妥当性を検討することである.

今後のは,構造物に付着した塩分の浸透解析,鋼材腐食・膨張解析,コンクリートのひび割れ解 析などを実施し,コンクリート構造物の塩害劣化シミュレータの作成を目指す.

(2) 意義・国際社会との比較

世界的にコンクリート材料は社会基盤を構成する多くの構造物に使用されており、コンクリート構造物の合理的でかつ効率的な維持管理を行うためには、劣化因子(塩害の場合は、飛来塩分など)の作用強度の空間的分布の把握が必要である.本手法は飛来塩分の移流・拡散および構造物への付着現象をシミュレートでき、劣化因子の空間的分布の評価が可能である.このため、塩害劣化に対する維持管理のための劣化進行予測を行うための有力な手法であるといえる.

(3)研究内容

本解析手法は、2 段階に分かれる. 具体的には、ADVENTURE_Fluid_Tet により構造物周辺の 流れ場(風速場)を解く第1ステップと、第1ステップで得られた流れ場を用いて粒子拡散手法の一 つであるランダムウォーク法により飛来塩分粒子の移流・拡散を解く第2ステップからなる. ここでは ADVENTURE_Fluid_Tet の説明は省略し、ランダムウォーク法について概説する.

本研究では飛来塩分の移流拡散モデルとして粒子拡散手法の一種である 3 次元ランダム ウォーク法を用いた.このモデルは,発生源から追跡粒子を放出し,個々の粒子が平均流 と乱流によって運ばれるとして,その後の粒子の分布を,3次元空間で計算するものである. (a) 粒子位置の更新(移流・拡散)

3 次元乱流で i ステップ目の粒子の位置 $x_i(x,y,z)$ とし、それぞれの速度を $u_i(u,v,z)$ とする. その特徴として、粒子の速度を求める際に、乱流統計量により粒子の拡散性状を表現する. 以下にそれぞれの粒子の位置と速度の関係を示す.

発生した塩分粒子の輸送を次式で表す.

$$x_j^{i+1} = x_j^i + u_j^{i+1} \Delta t \tag{1}$$

ここで、 Δt は時間ステップである.また、i+1ステップ後の粒子速度を次式に表す.jは座標を表す.

$$u_{j}^{i+1} = U_{j}^{i+1} + c u_{j}^{i} + \lambda_{j}^{i+1} \tag{2}$$

ここで、 U_j^i は平均的な風速であり、Adventure_Fluid_Tet から得られる流れ場を用いる(弱 連成). λ_j^{i+1} は乱流統計量、 α はラグランジュの相関関数である.また、乱流統計量は次式 となる.

 $\lambda_j^{i+1} = \left(1 - \alpha^2\right)^{1/2} \sigma_j \cdot \eta_j^{i+1} \tag{3}$

粒子は平均値がゼロの正規分布に従うとしている. σ_j は粒子拡散の標準偏差を表し、粒子の拡散性状を表現するものである.また、 σ は次式に示す Fick 形の拡散形式を持つものとしてモデル化を行っている.

$$\sigma = \sqrt{2Kt} \tag{4}$$

ここで、Kは乱流拡散係数であり、粒子速度に依存すると仮定し、次式から求めている.

$$K = \frac{\beta}{3} \left(u^2 + v^2 + w^2 \right) \cdot t$$
 (5)

ここで、*B*は係数、*t*は時間である.

(b) 付着判定

本研究の位置づけは、コンクリート表面に付着する塩分量を評価することであるため、 ランダムウォーク法に用いる粒子が構造物へいかに付着するかは重要なモデル化となる. しかし、その件について十分な検証データがないため、本研究では、構造物に衝突した粒 子はすべて付着するとした完全付着モデルを採用した.

(c) 粒子の塩分濃度, 沈降速度

ランダムウォーク法の大きな特徴の一つに個々の粒子ごとに個性を持たせることができ ることが挙げられる. 過去の研究において粒子の塩分濃度および沈降速度などを定義した が,今回の検証においては,対象橋梁の高さが海面より5m程度で,さらに,高さがそれほ どないため,粒子の塩分濃度は一定であると仮定し,付着塩分量は付着粒子の個数に依存 するとした.また,今回の解析対象において,沈降速度の影響は小さいものと考え,沈降 速度は考慮していない.

(4) 平成 25 年度進捗状況

以下に平成25年度の進捗状況を示す.本年度は本手法と実測値を比較し,本手法の妥当 性を検証した.対象としたコンクリート構造物は,沖縄本島北部の西海岸側に建設された プレテンション PC 橋である.対象橋梁の側面図を図-1に示す.付着塩分はガーゼ拭き取 り法にて採取した.また,測定位置は,図-1の南側端部,中央部および北側端部である. 今回は,飛来塩分の影響のみを受ける中央部の結果について報告する.今回付着塩分採取 法に採用したガーゼ拭き取りの様子と測定位置を図-2 に示す.図-3 に付着塩分量の結果を 示す.測定位置は,図に示す6 主桁すべての5 か所であり,測定位置を海側から順位番号 付けしており図の横軸の番号に対応する.

つぎに解析結果について説明する.図-4 に ADVENURE_Fluid_Tet により計算した 0.5 秒 後の風速ベクトルであり、その風速場を用いてランダムウォーク法の解析を行った.なお、 境界条件しての入力風は、年平均風速を参考に 5m/s とした.図-5 に飛来塩分の移流・拡散・ 構造物への付着解析の結果を示す.また、図-6 に解析より得られた付着塩分量(単位面積 当たりの粒子数)の結果を示す.

実測値および本解析値の付着塩分量はともに,主桁下面が多く,特に2番目の桁下面が 最も多く,陸側へ向かうにしたがって付着塩分量が少なくなっていく結果を示している. この結果より,定性的ではあるが本手法の妥当性が得られた.今後は定量的な評価を行う 予定である.



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

(1) 目標·計画

地盤・岩盤の内部には大小様々なき裂が存在し、それを成す材料は不均質かつ不確実なものである.したがって、地盤・岩盤全体としての力学的挙動を解析することは必然的に複雑なものとなり、その安定性や斜面崩壊、岩盤崩落の危険性を精度良く評価することは困難である.これは、上記の崩壊現象が、材料内部のき裂分布、材料分布、地下水流れ、き裂進展挙動などの物理現象が互いに連成した結果として生じることから、これらの現象のすべてを考慮した理論的・実験的検討が極めて困難であることに起因している.我が国は平野部が少ないため山間部まで人間の居住空間が広がっているため、土石流のような土の流動現象が生じると多くの人的被害を伴う場合が多い.したがって、地盤・岩盤の流動現象を解明し、人間社会の安心や安全を担保するためには、数値解析技術を援用した安全性評価が不可欠である.

本研究では, Sulsky らによって開発された MPM (Material Point Method)を基盤とした固体一破 壊ー流体連成解析技術を構築し,数値シミュレーションの観点から海底地すべり現象の力学的メ カニズムやそれに伴って生じる津波の発生メカニズムを理解することを目標とする.本研究では初 年度で深層崩壊や表層崩壊を誘発するような様々な形状を有する岩盤(岩山,連峰)や海底地す べり地層のモデル化技術を構築した.今年度は,地盤の流動解析の構築を目標とした.

(2) 意義・国際社会との比較

地すべりや津波等の自然災害の多発に伴い,国際的に防災対策の重要性が高まっている.土 石流や斜面崩壊・崩落等の土の流動現象はマルチフィジックスな現象であり,これを力学的に解 明することは現代社会が立ち向かうべき課題の一つである.実際の土砂災害時における土塊の移 動距離は数百~千メートル程度であり,極めて大規模な自然現象であることは想像に難くない.し かしながら,破壊力学や流体力学等の様々な分野において,三次元数値解析や大規模解析が複 数実施されているにもかかわらず,土の流動現象の大規模数値シミュレーション技術に関する研 究開発は見当たらず,未だ達成されていない.したがって,土の流動解析を可能とする大規模シミ ュレーション技術を構築することの国際社会における意義は極めて大きい.

不連続岩盤の大変形ならびに斜面崩壊を動的に解析できる手法として,個別要素法(DEM)や 不連続変形解析法(DDA)などが挙げられる.しかしながら,地盤の流動現象は土の材料額的性 質や土粒子と地下水との力学的連成挙動が極めて複雑であるため,これらを精度よく解析できるま でには至っていない.さらには,多くの亀裂を含む不確実な岩盤の破壊力学解析に至っては,地 下水や内部き裂を考慮することができる高度な3次元破壊シミュレータの開発が必須となることから, 極めてチャレンジングな研究対象となっている.

以上のことから、本研究は学術的かつ実用的な面で研究的意義を見出すことができ、国際社会においても重要な位置を占める研究のひとつであると考える.

(3) 研究内容

(A) 支配方程式

図-1 に示すように, MPM は粒子が持つ物理量を Euler 格子における節点の内挿関数を用いて Euler 格子に集約させ, Euler 格子にて運動方程式を解き, 算出された物理量を再び内挿関数を用 いて粒子に集約することで, 連続体の変形, 移動現象を表現する手法である. このとき, 連続体に おける質量および運動量の保存則は次式で表わされる.

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{1}$$
$$\rho \mathbf{a} = \nabla \cdot \mathbf{\sigma} + \rho \mathbf{b} \tag{2}$$

ここで, *ρ*:密度, **v**:速度, **a**:加速度, **σ**:応力, **b**:体積力である.



Eulerian background mesh

図-1 MPM の概念図

(B)地すべり解析(Kita-Uebaru Landslide)

次に, MPM の大変形問題への適用を試みる.本研究では,沖縄県中頭郡中城村で発生した地 すべり¹⁾(以下, Kita-Uebaru landslide と称す)を対象とした.解析モデルは Tokashiki et al. (2011)²⁾ の研究を参考した.また弾塑性構成則には, Drucker-Prager の降伏関数を用いた.図-2 に時間と 移動層先端の到達距離の関係を示す.本解析では,観測結果を基に内部摩擦角がピーク値 (25degs)の場合と残留内部摩擦角値(12degs)の場合において解析を行った.同図より,内部摩擦 角が 25degs の時,移動層はほとんど動いていなことが分ける.一方,内部摩擦角が 12degs の時, 50秒間における移動距離は 110.7m となり, Gibo et al. (2006)³⁾の観測値の 110m とほぼ同等な値と なった.このことから,斜面崩壊が発生する時の地盤の強度特性はピーク強度から著しく低下して いることが示唆される.また, Tokashi et al. (2011)²⁾らの解析結果(50 秒時における到達距離: 109.87m)と比較すると,解析開始時から15 秒において, Tokashiki et al.の結果では,移動層の移 動距離は線型的に増加している. 一方で,本解析結果においては,二次関数的に移動距離が増加していることがわかる. すなわち,本解析結果では,斜面崩壊は突発的に発生したことがわかる. 図-3 に,内部摩擦角が 12 degss と 25 degs における Kita-Uebaru landslide のシミュレーション結果を示す. 同図においても,内部摩擦角が 25 degs の時,移動層がほとんど移動してないことがわかる.



(4) 平成 25 年度進捗状況

今年度は、地盤の大変形解析を評価できる手法の確立を目的とし、MPM を斜面崩壊現象へ適用し、その妥当性の検証を行った.その結果、観測値と解析結果が同程度な値を示し、その有用性が検証された.今後は、本手法の3次元化ならびに大規模化への拡張を予定している.

参考文献

- 陳伝勝, 宜保清一, 佐々木慶三, 中村真也:沖縄, 島尻層群泥岩分布地域の地すべり類 型区分の試み-地すべりの危険度評価に関連して-, 日本地すべり学会誌, Vol. 43, No. 6, pp.1-12, 2007.
- 2) Tokashiki, N. and Aydan, Ö.: Kita-Uebaru natural rock slope failure and its back analysis. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 62, pp.25-31, 2011.
- Gibo S, Zhou Y, Sasaki K, Nakamura S (2006) Kitauebaru landslide caused by continual rainfall in Nakagusuku Village, Okinawa Prefecture, on June 10, 2006. Journal of the Japan Landslide Society 43 (2): 44-47

3.2. 大規模並列化グループ

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

今年度は,以下の項目について報告を行う.

(1) ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

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

(1) 目標・計画

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

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

(3)研究内容

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

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

B) DDM ソルバーライブラリ

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

これは,

・多階層領域分割に基づく分散メモリ並列向け線形代数ソルバーの構築

・多階層領域分割に基づくマルチレベルコースグリッド修正法の開発

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

を含む. つまり,これまで FEM を対象に研究を進めてきた DDM をマルチレベルに拡張し, さらに FVM, BEM, メッシュフリー, 節点ベース FEM や粒子法など連続体力学全般に適 用する技術開発である. また, マルチレベルな領域分割を利用し, 線形代数ソルバーにお ける前処理手法について, 研究代表者らがこれまで研究を進めてきた高速かつ安定した収 束性を持つ反復解法である BDD (Balancing Domain Decomposition) 法や BDDC

(Balancing Domain Decomposition by Constraints)法をマルチレベルに拡張し,さらに 粒子法などへの応用も進める.開発システムは線形代数ライブラリとして整備していく.

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

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

(4) 平成 25 年度進捗状況

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

これまで開発してきた多階層領域分割アルゴリズムについて,非構造格子向け並びにメ ッシュフリー向けの機能強化を行った.特に,京コンピュータや PRIMEHPC FX10 が持つ Tofu を例に,ネットワークトポロジーを意識したデータ配分の自動調整アルゴリズムの検 討と開発などを行った.本ライブラリを用いることで,東京大学 FX10 の 600 計算ノード を用いてポリゴンモデルから 20 億粒子生成を 20 秒,京コンピュータの 8,196 計算ノード を用いて 258 億要素の非構造四面体メッシュ生成を約 94 分で成功するなど,ポストペタコ ンで想定される超大規模シミュレーションのプレ処理に有効なライブラリであることが示 された.

また,超大規模シミュレーション結果を高効率に可視化するために、マルチプラットホ ーム大規模領域分割型並列可視化ライブラリ VSCG (Versatile Scientific Computing Graphics library)の開発を開始した.VSCG は依存ライブラリが数学関数のみであること から、将来を含めた多様な計算機環境で動作することが可能であり、メッシュ・粒子の描 画に対応した基礎的な可視化機能の開発を行った.ソフトウェア描画を行うライブラリで あり、超大規模データに対する高精細画像生成を容易に可能とした(図 1).この高精細画 像は最低でも 104×104 ピクセル画像を生成し結果の評価に用いる.また、プロセスごとの 描画と画像出力、並びに深さ情報に基づく画像重畳機能を備えており、それらを利用する ことで並列可視化を可能とした.VSCG を用いて多階層領域分割されたメッシュまたは粒 子の並列可視化システムを構築し、京コンピュータ上で 112 億自由度有限要素モデルのポ スト処理に成功した.

さらに、非構造格子向け DDM 圧縮技術の開発を開始した.多階層領域分割による領域 間境界上情報への圧縮率調査を行っている.一般的な CG 法の演算量(O(n³+n²))を基準 に試算を行った.全体剛性行列を解く計算量と領域ごとの小さな剛性行列を解く計算量の 比が極めて大きくなることが分かった.100 億自由度有限要素法モデルの計算量の比は、 10¹⁰ 以上の計算量比が生じる.このことから、袖領域の変位量をもとに内部の変位、ひず み、応力を再度計算することは現実的であることが分かった.現在、計算速度の計測と全 体の計算量がどの程度のオーダーになるのかを詳細に調べ、次世代計算機のパフォーマン ス推定の基礎データとする予定である.



図1 1,200×9,000 ピクセル画像の部分拡大図(重力による変位分布コンタ)

B) DDM ソルバーライブラリ

非構造格子向け DDM 反復法ライブラリとして,多階層領域分割情報を利用した DDM 反 復アルゴリズムの機能強化を行った.特に,ポストペタコンに対する社会ニーズを想定し, 現在のペタコンを用いた 1,000 億自由度規模有限要素解析の実現性について検討した. DDM-CG 法の部分領域問題ソルバーとして Eisenstat 技法に基づく CG 法+SSOR 前処理 を適用するなど,実装に関する最適化を行うことで,京コンピュータの 8,196 計算ノード を用いて 1,040 億自由度規模有限要素解析(古代建築物パンテオンモデルの自重解析)に 81.8 時間で成功した.本手法はストロングスケーリング性能として約 90%の並列効率を示 しており,京コンピュータの全計算資源を利用することで実用時間内に計算できる見込み であり,ポストペタコンにおいては実用化できる可能性が示された.また,非圧縮性粘性 流れ問題や電磁界問題解析を想定し,CR 法や MINRES 法など,様々な反復法に基づく DDM 反復法の開発を継続的に行っている.

非構造格子向け多階層前処理技術として,有限要素法向け BDD 前処理アルゴリズムの機 能強化を行った.特に,BDD 前処理の超並列計算環境向け実装技術の強化を行い,112 億 自由度有限要素解析において 53 反復(収束判定値は相対残差が 3 桁小さくなった時点)で 収束解を得ることに成功した.また,異種材料混在モデルにおける収束性を改善するため に,DDM 反復法に対する対角スケーリング処理法の新解釈を提案した.特に BDD 前処理 において効果的であり,物性値が 100 倍以上でなる複数部材で構成された構造物のシミュ レーションにおいて,20 倍以上の収束性改善に成功した.

また、多階層領域分割情報を用いた非構造格子向け数値解析手法のヘテロジニアスコン ピューティング向け負荷分散アルゴリズムの開発を行った.特に CPU と GPU のヘテロジ ニアス環境において、計算ノードに割り当てられた部分領域群を OpenMP の動的スケジュ ーリング機能を用いて CPU コアや GPU に動的負荷分散を行う機能を開発した.6コア CPU 単体に比べて、6 コア CPU-GPU ハイブリッドにおいて約2倍の高速化に成功した.

さらに,非構造格子向け DDM ソルバーライブラリお試しツールの開発を開始した.こ れは,既存の反復法ライブラリユーザーに対して DDM 反復法の試験環境を提供するもの であり,ユーザーニーズのフィードバックを可能とする仕組みでもある.

MPS 陽解法(粒子法)向けの数値解析手法開発では、東京大学 FX10の4,800 計算ノー ド上において200億粒子のベンチマーク計算に成功した.並列性能では、25億粒子の60 計算ノードから4,800計算ノードのストロングスケーリングで0.9933を達成した.実証例 題として、石巻市街地に津波が侵入して、直径9mの2つのタンクが地上構造物に衝突し ながら漂流する解析に成功した(図2).本解析は、東京大学 FX10の600計算ノードや九 州大学 CX400の32計算ノードを用いた最大3.8億粒子の解析である.

今後は、「非構造格子向け多階層領域分割情報を利用した DDM 反復法アルゴリズム」、「ポ アソン・構造解析向け BDD・BDDC による多階層コースグリッド修正法」と「多階層領域 分割情報を用いた非構造格子・メッシュフリー数値解析手法の開発」の開発を継続して実 施する.



図2 直径9mの2つのタンクが津波によって流される様子を3.8億粒子で可視化した結果

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

マルチコア及び SIMD 命令セット向け最適化ライブラリの開発を進めた.開発中の①構 造解析・要素剛性,②非線形材料構成則,③熱伝導解析・要素剛性のそれぞれの行列テン ソルライブラリでは,Intel (Sandy Bridge) でピーク性能比①60%,②27%,③50%を達 成し,東京大学 FX10 ではピーク性能比①27%,②14%,③35%を達成することに成功した. 粒子系シミュレーションのための DSL のβ版を開発した結果,東京大学 FX10 ではピーク 性能比 7%を達成した.トランスレータについては,グループ内外のユーザからのフィード バック情報を元に,文法レベルの検討を行っている.

また、豊田中央研究所や東京理科大学に外部ユーザとして、本 DSL を利用してもらうこ

とで、性能評価と並行してユーザビリティの改善を行っている.加えて、本DSLを、理化 学研究所、JAMSTEC、JAXA、JAEA、東京大学生産技術研究所、東京大学地震研究所や 国内スパコンセンターなどへの普及活動を積極的に行い、理化学研究所 京コンピュータ、 東京大学 FX10、T2K 及び GPU クラスタ、九州大学 FX10、JAMSTEC ES2、筑波大学 T2K、名古屋大学 FX1、京都大学 XE6、九州大学 CX400 などの利用実績を築きつつある. 更に、HPC 技術の産業界向け応用に関する国際ワークショップに参加し、韓国 KiSTi にお ける HPC クラウド開発への協力を行うことで、海外スパコンセンターへの普及活動も行っ ている.

今後は需要の高いマルチコア及び SIMD 命令セット向けの最適化ライブラリの開発を延 長して実施する.また,GPU 向けの開発を重点的に行う.GPU 向け開発には,CUDA 及 び OpenACC の利用を検討する.また,メニーコア CPU を視野に,インテルの MIC を対 象にした拡張も検討する.トランスレータはプロトタイプを作成する予定である.

D) 連続体力学系シミュレータ

本研究項目は,研究項目(A)~(C)で開発されたマルチレベル領域分割法による基盤 技術の性能評価を行うために,マルチレベル領域分割法による連続体力学系シミュレータ の開発を行うものである.

新たに機能追加された「DDM 入出力ライブラリ」、「DDM ソルバーライブラリ」と「連 続体力学向け DSL」を用いて、大規模構造物の耐震解析や実地形津波解析などを実証例題 とし、理化学研究所 京コンピュータ、東京大学 FX10、T2K 及び GPU クラスタ、名古屋 大学 FX1、筑波大学 T2K、九州大学 CX400 などアーキテクチャの異なる複数のスパコン 上においてそれぞれ性能評価を行った.

今後は,評価環境として東京工業大学 TSUBAME2.0,京都大学 CRAY XE6,名古屋大 学の新システムなどを追加し,多様な計算機上において性能評価を行うことで,ポストペ タスケールにおける連続体力学系シミュレータの課題を明らかにする.また,大規模な実 証問題解析を行い,それらの実用化に必要となる計算資源量を推定評価する.

42

3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

(1) 目標・計画

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

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

B)熱対流解析コードの機能強化

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

(3) 研究内容

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

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

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

B) 熱対流解析コードの機能強化

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

(4) 平成 25 年度進捗状況

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

今年度は BDD 前処理の実装実現のために二つの課題を設定した. 一つはノイマンノイマン前処理を実装させること, もう一つはコース行列を作成し, それを既存のパラレルソルバーで解くことである. この二つが実現できれば, BDD の実装はほとんど実現できると言ってよいほどの重要な2項目になる. ノイマンノイマン前処理は2005年に一度成功した実績があるが当時の記録が紛失しており, 新たな開発を行うことになった. 現時点ではコードの骨格ができた段階であり,(1)のテーマのB)の研究テーマと連携しながら完成を急いでいる段階である. 一方, コース行列作成はテストランを行っている段階であり, まだ少数の部分領域情報の重ねあわせしか実現できていない. これを全部分領域までに拡張できれば, 並列ソルバーは既存のものを使う予定なので, 第2項目もクリアできると考えている.

B)熱対流解析コードの機能強化

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

・熱方程式部分への DDM フレームワークの適用

- ・熱流束境界条件入力機能の追加
- ・熱伝達境界条件入力機能の追加
- ・BDD 前処理における通信処理改善の検討

を図るものである.最初の DDM フレームワークの適用は(1)のテーマの B)の研究テーマ と連携しながら,開発ライブラリのプロトタイプのテストを兼ねたものであるが,プロト タイプの提供を待っている段階である.2番目,3番目のテーマは1番目のテーマが予定よ り遅れているので,DDM フレームワークを除いた形での実現をまず目指している.4番目 は派生した問題を解決しながら,検討を続けている段階である.

3.3. 新規実験計測グループ

流体・構造連成解析では、流れと構造物の相互作用を含むことから、流体もしくは構造の みの現象よりも複雑となる場合が殆どであり、現象を数値解析結果のみで評価することは 困難である.また、連成問題に関する研究の多くが、解析もしくは実験のみに頼ったもの であり、両方を実施して実験結果、数値解析結果の信頼性を議論したものは見られない.

本グループの目的は、流体-構造連成問題の実験を行い、数値解析結果の信頼性を評価す るための情報を提供することである.そのためには、予め実験結果の質を保証しておくこ とが重要であり、さまざまな観点から計測を試みることで、それぞれの計測結果の信頼性 を調べておくことが不可欠となる.流れと構造物の運動は3次元的である.一般的に、あ る点の変位や流速を同時計測するとき、その値の信頼性を高めるほど、空間分解能は低下 する.逆に、空間分解能を上げると各点の測定値の信頼性は低下する.このようなことか ら、点計測と面計測の測定値を比較することで、観察される現象や結果の質についても検 討する.

実験に取り組むと、さまざまな計測上の問題が生じるが、それを解決することで新しい 計測法や新規実験テーマを提案していくことも本グループの役割であると考えている.

3.3.1. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムの構築

(1) 目標・計画

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

(3)研究内容

2012年度は風洞試験装置システムの整備期間であり,2013年度は基礎試験,2 014年度以降は応用的な実験を検討している.基礎試験ではシートフラッタ実験を行い,応用的実験では航空機模型のフラッタ実験,フラッタの工学的利用や弾性皮膜による流体 抵抗低減を目指した研究を行う予定である.図1は風洞試験装置の概要図である.実証試 験では実験模型の運動解析,空気力計測,PIV流れ解析を組み合わせた流体実験を行う.



図1 風洞試験装置

本風洞試験装置により実施できる試験内容は以下の通りである.

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

(4) 平成 25 年度進捗状況

昨年度末までに風洞試験装置と計測システムを導入した.風洞装置の移設を8月に終えた後,風洞試験を開始した.風洞装置の検定を行い,回転数と風速の関係がほぼ比例すること,風路断面積 0.3×0.3m²の断面内において,試験領域では一様流を保つことが出来ることを確認した.

風洞装置の検定と併行して,流体構造連成実験の試験装置として,シートフラッタ装置 を製作した.図2は風洞装置に設置した試験装置を示している.回転軸にシート材を固定 して,風洞装置で気流を発生させて,シートフラッタを発生させる機構になっている.様々 な種類のシート材を調達し,予備実験でシート材を選定した.シート材はポリプロピレン,シリ コーンゴム, PVC などの材料を用いて実験を行った.



図2 フラッタ試験装置

図2のフラッタ試験装置には、シート材を水平に設置するとフラッタが発生する前に、 空気力により浮き上がる必要があるため、垂直に設置することで、重力の影響をあまり受 けずにフラッタが開始するようになっている.

フラッタ開始後のシート材の変位量は、レーザ変位計を用いて測定した.レーザ変位計 は、株式会社キーエンス製の LK-G シリーズを使用した.レーザヘッドは CCD レーザ式 の LK-G500,コントローラは LK-G3000,電源ユニットは KZ-U3 を用いた.レーザヘッド は三脚に固定して、シート材から水平距離 500 mm離れた位置から測定した. シートフラッタを発生させて、レーザ変位計を用いて変位を測定した結果を周波数解析 して得られたフラッタ特性が図3である.風速を上げていくとシートはフラッタし始める が、一旦フラッタが発生すると、風速を下げたときフラッタが終了する風速は、開始速度 とは異なる.本装置を用いて得られたフラッタ特性は、他者の実験結果と比較して良好に 一致しており、シート取付冶具が良好であることを確認している.



図3 シートフラッタの周波数特性

図4は3次元運動解析システムを示している.シート材料がフラッタする様子を、シート材の左右に2台ずつ設置したハイスピードカメラを用いて測定することができる.カメラは株式会社ディテクト製 HAS シリーズの HAS-L1 を使用した.画像データはパソコン上のメモリに記憶され、その後、データ解析が行われる.パソコンに 16GB のメモリを実装した場合、VGA 形式で約 37000 枚の画像データが記録可能であり、約 75 秒録画することができる.シート材の表面にマーキングを施し、カメラでステレオ撮影することにより、シート材がフラッタする様子を運動解析することができる.



図4 3次元運動解析システム

図5は、動画像中におけるフラッタの軌跡を示している.シート材の表面に9点のマー キングを施してあり、画像中では白丸で表示されている.レーザ変位計の結果と比較した 結果、良好に一致することを確認した.



図5 シートフラッタの軌跡

3.3.2. 境界層特性評価のための普遍関数構築

(1) 目標·計画

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

(3) 研究内容

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

(4) 平成 25 年度進捗状況

実験は吹き下ろし式風洞装置を用いて行った(Fig. 1). 風路断面は $600 \times 600 \text{ mm}^2$,風路長 は 3000 mm である. 流れ計測は単位長さ当たりのレイノルズ数で Re [1/m] で 3×10^5 で実験 を行い,速度計測には I 型の熱線流速計を使用した.



Fig.1 Schematic of test section in the wind tunnel.

乱流境界層を記述する速度分布関数を Spalding 則と Cole の後流関数を組み合わせることで、陰的に速度分布を表現できる式を提案する.

$$y^{+} = u^{+} + e^{-\kappa B} \left(e^{\kappa u^{+}} - 1 - \kappa u^{+} - \frac{(\kappa u^{+})^{2}}{2} - \frac{(\kappa u^{+})^{3}}{6} \right) + \frac{2\delta^{+}}{\pi} \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{\kappa u^{+}}{2\Pi}} \right)$$
(1)

境界層を表わす関数は、Spalding 則+後流関数の形となっている。層流のときは B = 0 であり、層流境界層と乱流境界層を同時に記述できる。各係数 κ , B, π , δ は実験データを元に、Newton 法により算出できる。実験値は内層から外層までのすべての測定データを使用した。

Figure 2 は式(1) を適用して得られた結果を実線で示している. 比較のため, 実験値(○) も示している. 提案した普遍関数は乱流境界層全体を表現できており, また実験データをよく再現できている.

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



Fig.2 Logarithmic velocity profile (Eq. (1)).

	$C_{f} imes 10^{3}$	Error (%)
White's formula	4.175	

4.178

0.072

Present (1)

Table. 1 Comparison of skin friction coefficient.

3.3.3. 弾性体による空気抵抗低減効果に関する検討

(1) 目標・計画

本研究の目標は,弾性体を用いた空気抵抗低減法を提案することである.2013年度 は弾性体に作用する空気力計測を行い,空気力特性を調べる.複数の計測法で空気力測定 を行い,抵抗低減効果の確認を行う.2014年度以降は材料特性と空気力低減効果の関 係を調べ,気流条件により効率的に抵抗低減効果が得られる材料特性の提案を目指す.

(2) 意義・国際社会との比較

流体力学において摩擦抵抗低減は主要な研究課題の一つである.リブレット、マイクロ バブル、粘弾性をこれまで様々な摩擦抵抗低減法が提案されており、その効果が研究され ている.本研究は、弾性体を用いた摩擦抵抗低減法の研究に着目している.水棲生物の中 には、表皮の柔らかい生き物が存在し、皮膚の表面近傍に発生する乱流渦構造を弱めるこ とで、摩擦抵抗が低減して高速で遊泳できるとされるものがある.イルカはその代表例と されている.欧州を中心に研究されているが、その殆どが理論的研究であり、実験的研究 は数少ない.本研究では、弾性体に作用する空気力測定を行い、金属やアクリル材のよう に硬い材料に作用する空気力との比較を行う.また、弾性体の材料特性に対する空気力特 性を調べ、抵抗低減デバイスとしての可能性を検討する.

(3) 研究内容

本研究では、イルカの柔らかい表皮に着目して弾性皮膜による抵抗低減効果に関する研 究を行う.弾性体の材料特性と弾性体に作用する空気力抵抗特性を調べ、航空機などに適 用可能な抵抗低減法を提案する.

(4) 平成 25 年度進捗状況

実験は図1のような大気吸込み式風洞を用いて行った.風路断面積は0.2×0.2m²である. 実験模型の上流と下流の速度分布を測定するために,ピトー管を2本同時に設置している. 風洞装置には4基の送風ファンが取り付けられており,風速はインバータで調節を行うこ とができる.

実験模型は直径 30mm,長さ 200mm のアクリル円柱とシリコーンゴム丸棒(デュロメー タ硬さ 50,60,70)を使用した.上流部と下流部の圧力分布はデジタルマノメータを用いて 測定した.本実験では圧力差が最大となるように回転数 50Hz に固定した.このときのレイ ノルズ数は 13000 である.上流部は側壁から 20,50,100,150,180mm の位置で圧力計測 を行い,その平均値を測定値とした.実験模型後流部は側壁から 20,40,60,80,100mm の位置で圧力計測を行った.



図1 風洞試験装置

空気抵抗の測定はジョーンズの方法を用いた.その原理は,運動量保存則に基づいており,上流と下流の圧力差から空気抵抗を測定できる.風洞実験では,実験模型の上流と下流でピトー管を用いて圧力差の空間分布を測定して,以下の式を数値積分することで抵抗係数を測定する.

$$C_{D} = 2 \int_{-h}^{h} \sqrt{\frac{p_{0T} - p_{T}}{p_{0\infty} - p_{\infty}}} \left(1 - \sqrt{\frac{p_{0T} - p_{T}}{p_{0\infty} - p_{\infty}}} \right) d\left(\frac{y_{T}}{L}\right)$$
(1)

圧力 P に添え字 0 が付いたものは全圧,ないものは静圧を意味しており, ∞ は上流,Tは下流を意味する.

図2は風路内における単位面積当たりの空気抵抗分布である.円柱の背後 (100mm) は流体の運動量が最も減少するため,空気抵抗が最大となり,測定位置が風洞側壁に近づくにつれて空気抵抗は小さくなる.また,シリコーンゴムの硬度が低下するにつれて,円柱後流部分の流体抵抗が次第に減少している.



図2 円柱後流の抗力分布

表1は材質ごとの抵抗係数を示している.風洞壁面に摩擦抵抗が作用するため、模型挿 入前の圧力分布から壁面摩擦力を測定して、実験値との差を取り補正している.シリコー ンゴムの硬度が増すにつれて空気抵抗が減少しており、抵抗低減率(D.R.)は最大 22.6%とな った.

材質	アクリル	硬度 50	硬度 60	硬度 70
C _D	1.278	0.989	1.233	1.303
D.R.(%)	_	22.6	3.5	-2.0

表1 材質と抵抗係数の違い

ピトー管計測以外の方法でも,抵抗低減効果が確実に生じていることを確認するために, 新たに実験装置として回流式低速風洞装置を製作し,熱線流速計による計測システムを製 作した(図3).試験装置内で,ピトー管と熱線流速計による同時計測が可能な計測システ ムである.測定位置は,トラバース装置で移動できるようにしている.現在,本試験装置 による実験を行っており,抵抗低減効果を確認中である.



図3 弾性体の空力特性試験装置(左:移動装置,右:円柱模型(中央))

3.4. 精度・妥当性検証グループ

本グループでは、シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・ 妥当性を向上させるための技術の研究を行っている.シミュレーションも実験も誤差を含 んでおり、精度の検証および改良は重要なテーマである.具体的には、(1)効率的で精度 のよい解析技術の開発、(2)実験とシミュレーションの融合、(3)材料データベースの 開発、(3)精度の改良技術の開発、などを目標に研究を行っている.研究対象としては、 段ボールおよびフラクタル構造の効率的かつ高精度な解析のための基礎的研究を行った. また、段ボールを対象にして実験とシミュレーションの融合のための予備的実験も開始し た.

3.4.1. 段ボールにおける構造解析手法の開発と精度の検証

(1) 目標・計画

段ボールはその特性が製造環境,使用環境などに大きく左右される為,主だった解析手法が確立されていない.そこでまず初期設計に活用できるレベルの構造解析手法の確立を 目指す.その後,解析精度を高め,より活用出来る手法に洗練していく予定である.

(2) 意義・国際社会との比較

(1)でも述べたように段ボールに関しては主だった解析手法が確立,公開がされていない.また100%リサイクル可能な段ボールを使用する技術手法であることから環境面から考えても地球環境保全に貢献できるものと考える.

(3) 研究内容

等価モデルの構築のため、ANSYS 用に開発されたマルチスケール解析ソフト MultiScale.sim を用いて段ボールの均質化解析等の解析を行っている.また、LS-DYNA を用いて段ボール緩衝材の落下衝撃シミュレーションを行う.平行して段ボールの特性実 験の装置を開発し、シミュレーションの精度を実験に近づけることを行う.また、段ボー ルの実落下試験を行い、実落下試験と落下衝撃シミュレーションの結果を比較し、シミュ レーションと実験の精度・妥当性検証を行い、改良するための技術開発を行う.

(4) 平成 25 年度進捗状況

ANSYS 用に開発されたマルチスケール解析ソフト MultiScale.sim を用いて段ボール解 析を行った.当初段ボールの検討素材数は 50 以上と多めを検討していたが,全体の工程を 考慮し,1素材(BF:K180/scp120/K180)をベースに集中的に検討していくこととした.

下記に現在までのシミュレーション結果等の画像を示す.図1は段ボールの一部を切り 出したものをモデル化したものである.これから図2のような等価モデルを生成し,等価 解析を行っている.



図1 段ボール詳細モデル (MultiScale.sim)



図2 段ボール等価モデル (MultiScale.sim)

また,段ボールで重要な段ボールの衝撃シミュレーションも開始した.図3はLS-DYNA を使って行った解析結果である.



図3 LS-DYNA 解析結果画面

図3では、ライナー、中芯に仮の材料特性値を与え、実際の梱包を想定した解析を行った。実際はほぼ動かないであろう部位が応力による反力で跳ね上がり、本来力が掛ると思われる部位に応力が出ないという結果が生じた。これは材料特性値の問題ではなく、使用した緩衝材の解析モデルに問題があったと考える。そこでモデルの作り込みをさらにする必要が明らかになった。

段ボールの力学的特性はこれまで十分な研究がなされていない. そこで,図4に示す ような試験装置を開発した.



図4 段ボール試験装置



これを使って行った予備実験の結果が図5である.

図5 段ボール変形試験の結果

本実験は変形指定(5mm/min)の条件で行ったものである.太線はクロスヘッドの移動 量,細線は変位計の値である.本実験から段ボールは非線形の挙動を示すことがわかった. したがって高精度なシミュレーションのためにはこの非線形挙動を正確にモデル化するこ とが要求される.今後は段ボールの含水率も考慮にいれた実験を行い,シミュレーション のモデル化の精度と妥当性の検証を行う予定でいる.さらに,段ボールの材料特性を調査 する為,国内外から材料サンプルを取り寄せ,本実験装置にて試験を行う.その結果から 各試験片の材料特性値を求める予定である.

3.4.2. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発

(1) 目標・計画

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

2012年には、NSFの資金によりアメリカでマテリアルズ・ゲノム・イニシアティブが立ち上がり、実験・数値計算などから得られるデータを活用して材料設計の効率化を図るためのマテリアルズ・インフォマティクス研究開発が本格的になった.これを受けて、我が国でも2013年に入り、JSTがマテリアルズ・インフォマティクスのワークショップを開催するなどの動きがあった.マテリアルズ・インフォマティクスでは多くの情報資源から得られた材料情報を共有する必要があるため、当センターにおいて実施しているような材料データの共有フォーマットやメタデータの辞書についても課題に挙っており、米国では本格的に開発が始まっている.

また,欧州標準規格委員会では,製造業において材料の試験データを電子的に共有する ための規格策定に継続的に取り組んでおり,2012年から2014年にかけてワークショップ, WS/SERES (Standards for Electronic Reporting in the Engineering Sector)を開催してい る.マテリアルズ・インフォマティクスが新材料の開発を目的とするのに対し,CENのワ ークショップは,エンジニアリング材料を対象とするものであり,ISO6892 の Technical Annex としての採択を目指している.

研究データ全般の電子的な交換に関しては、2013年、NIST、EUの協同により、NSF が資金援助した RDA (Research Data Alliance)が活動を開始した.現在我が国からは地球 科学情報を扱う WDS のグループが参加しているだけである.材料についてはまだワーキン ググループが設置されていないが、元 NIST の John Rumble, EU JRC の Tim Austin ら とともに材料に関するワーキンググループ設置について検討している.

芦野らのグループは、2006-2007 年度,NEDO 知的基盤創成・利用促進開発事業の採択 を得て、材料に関する基本的な辞書である材料オントロジーの開発を行い、先駆的な開発 を行ったが、その後、拡張を本格的に進めることは困難な状況となった.また、2011-2013 年度科研費基盤(C)の採択により、産総研などと材料に関する数学的知識のデータベース化 についての研究開発を進めているが、上述した欧米のプロジェクトと比べて格段に規模が 小さい. 我が国では産業技術総合研究所、物質・材料研究機構が世界的にも評価の高い材 料データベースを提供しているが、標準的なデータフォーマット・データ交換技術の開発 を情報学の専門家と共同して行うことはしておらず、欧米に対して遅れを取りつつある.

(3) 研究内容

2012 年度より継続して,産業技術総合研究所と協力して材料の標準計測データを Linked Open Data として活用することが出来るようにするための検討を行っている. 2011-2013 年度は科研費科学研究費助成事業 基盤(C)「材料オントロジーの拡張と国際化に よる材料データ交換手法の確立」の採択を得て,CENの材料データに関するワークショッ プ SERES に参画し,材料データ記述の標準化に関与するとともに,材料物性に関する経験 式や理論から実験値に基づいて導き出された関係式について,OpenMath を用いたデータ ベース開発を引き続き行っている.

材料の物性値などは温度・圧力などによって変化するものであるが,実験で得られるの は特定条件下での値であり,これを補完するための経験式・理論式などが多く整備されて おり,本来,数値シミュレーションなどにはこれらに基づいて計算された物性値が用いら れなくてはならない.現状,こうした数学的な知見はデータベース中で係数のリストなど として保存されており,数式処理ステムや,LODで用いられるセマンティック・ウェブに おけるデータ表現との連携が困難である.

本研究では、一般化した数式を OpenMath Content Dictionary として整備し、これに実 験データセットを適用して得られたパラメータの値を RDF の形式で表現することで他のシ ステムとの連携を可能とする方法を開発している.材料に関する数学的な知見の記述につ いては、現在のところ上述のマテリアル・インフォマティクスや RDA でのトピックとして 挙がっていないが、今後確実に必要とされる先駆的な研究と考えている.

(4) 平成 25 年度進捗状況

本年度は、CEN ワークショップに参加し、3 月のワークショップ最終ミーティングにお ける CWA (CEN Workshop Agreement)作成へ向けて議論を行った.また、科研費科学研究 費助成事業 基盤(C)「材料オントロジーの拡張と国際化による材料データ交換手法の確立」 最終年度の取りまとめへ向けて、引き続き産総研熱物性データベースに収録された数式デ ータベースの開発を行い、得られた問題点についてとりまとめと検証を行い、適宜熱物性 学会などで報告している.6月には、JST 研究開発戦略センターが開催した第二回のマテリ アルズ・インフォマティクスワークショップに出席、材料データベース、材料データ交換 のための試みと国際的な標準基盤整備の活動について述べた.

3.4.3. 確率的大域的最適化

(1) 目標・計画

我々の目標は実数値最適化の一般理論を整えることである.これまでにその土台となる 各種定式化と数値実験環境の整備を行ってきた.今後もこの作業を継続する予定である.

(2) 意義・国際社会との比較

現在,最も包括的といえる枠組みは局所・非線形凸最適化理論までであり,これからは み出た大域的最適化の理論といえるものは存在しない.この局所最適化を包括する大域的 最適化理論を作ることは,最適化に関する統一的視点を得ることを意味する.またこの枠 組みを基にした各種実験の結果から有意義な定量的・漸近的議論が可能となる.

(3) 研究内容

目的関数の単峰・多峰を問わず,関数中で最小となる値とその設計変数をそれぞれ最適 値 y**,最適解 x** と呼ぶことにし,また(x**, y**) = D** とする.

(甲) 要請:最適化とはユーザー I の損失関数 $\lambda_I = \lambda_I(y^{**})$ の期待値 $\mathbb{E}\lambda_I(y^{**})$ を最小化する行動である.

これによりライバル製品との競合状態や限界効用逓減の法則といった人間と現代社会の 業が最適化プロセスに反映される.(甲)の計算には、ある時点までに集まった観測値 D と 先験情報 I を基にした D^{**} のベイズ的な事後分布 $p(D^{**}|D, I)$ が必要となる.そしてこ れを基に次の評価点を決定・観測のループを繰り返す.つまり、

(乙)事実:最適化ループとはベイズ更新である.

このような最適化におけるベイズ更新を EGO フレームワークと呼ぶことにする.また, 世界中の過去・現在・そして未来の最適化手法はこのフレームワークに属すると強引に解 釈することは可能である.(甲)を達成するには明らかに *D*** の良い推定が必要であり,

(丙) 事実:最適化アルゴリズムとは D** を推定する EGO フレームワークである.

実は次が言える:

(丙') 定理:良い最適化アルゴリズムとは局所解 $\{D_j^*\}_j$ のモデルから D^{**} を推定する EGO フレームワークである. 「良い」とは(甲)の意味においてである.またここで局所解 x_j^* とその値 y_j^* について (x_j^* , y_j^*) = D_j^* (j = 1, ..., n) とした. n は目的関数中の局所解の数である.(丙')より $p(D^{**}|\{D_j^*\}, D, I)$ を求めるには局所解のモデル $p(D|\{D_j^*\}, I)$ が必要となる.あらゆる解 は、(∇) 勾配がO,(\perp) 不連続の端、(∂) 制約の上、(Y) V 字形の底、のいずれかであり、 これで局所解が定義される:

$$p(D|\{D_{j}^{*}\}, I) = \sum_{e \in \{\nabla, \bot, \partial, Y\}} p(D|\{D_{j}^{*}\}, e, I)p(e|\{D_{j}^{*}\}, I)$$

これらによるモデル混合・モデル比較によって(甲)を達成する.

(丙')の証明:仮想実験 e のたとえ話

(∇)を考慮すべきであることを示す.「(∇)を考慮する」を「費用が *c* の実験 *e* を実施した結果,観測値 ∇ を得る」と読み替える.ある行動 x^{**} の結果として y^{**} が起きる状況において,実験家 *I* の損失 λ_I の期待値を最小化する問題を考える.実験を行わなかった場合 (e_0 とする)の最適な行動 \hat{x}_0 を

$$\widehat{x}_{0} = \operatorname{argmin}_{x^{**}} \int \lambda_{I}(x^{**}, e, y^{**}) p(y^{**}|e_{0}, x^{**}, D) dy^{**}$$

とし,実験結果を考慮した最適な行動 xvを

$$\hat{x}_{\nabla} = \operatorname{argmin}_{\boldsymbol{x}^{**}} \iint \lambda_{I}(\boldsymbol{x}^{**}, e, \nabla, y^{**}) p(y^{**}|e, \nabla, x^{**}, D) dy^{**} p(\nabla|e) d\nabla$$

とする. 実験 e の価値 v(e) を

$$v(e) = \int \{\lambda_I(\widehat{\boldsymbol{x}}_0, e_0, y^{**}) - \lambda_I(\widehat{\boldsymbol{x}}_{\nabla}, e, \nabla, y^{**})\} p(y^{**}|e, \nabla, \widehat{\boldsymbol{x}}_{\nabla}, D) dy^{**}$$

とする. このとき実験 e は $Ev(e) \ge c$ となるときに行うべきで,それ以外は費用に見合わずやるべきではない. ところが仮想実験 e は単なる頭の体操でありコスト c はゼロである. よって $Ev(e) \ge 0$ を示せばよい. λ_I の形が

$$\lambda_I(\hat{\mathbf{x}}_0, e_0, y^{**}) = -A \ln p(y^{**}|e_0, \hat{\mathbf{x}}_0, D) + B(y^{**}), A > 0$$

 $\lambda_I(\hat{\boldsymbol{x}}_{\nabla}, e, \nabla, y^{**}) = -A \ln p(y^{**}|e, \nabla, \hat{\boldsymbol{x}}_{\nabla}, D) + B(y^{**}), A > 0$ Tbose t > t,

$$v(e) = A \int \ln \frac{p(y^{**}|e, \nabla, \hat{x}_{\nabla}, D)}{p(y^{**}|e_0, \hat{x}_0, D)} p(y^{**}|e, \nabla, \hat{x}_{\nabla}, D) dy^{**}$$

となるがこれは KL 情報量である.よって常に非負なので $\mathbb{E}v(e) = \int v(e)p(\nabla|e)d\nabla \ge 0$ であり、 $p(\nabla|e)$ によらず常に勾配を考慮すべきである.他の(1)(∂)(Y)も同様...証明終.

これには状況証拠もある.たとえば遺伝的アルゴリズムや焼きなまし法の定義を読んで も局所解 {*D*_i} を考慮するかのような言及は無い.一方これらのパフォーマンスは事前の各 種パラメータ設定次第で大きく変化することが知られる.そして良いパラメータ設定とは 「早熟な収束」を避けるものであるとされるがこれは *D*^{*}(≠ *D***) への収束に他ならない.

以上からモデルの超パラメータベクトルを θ とすれば,

$$\iiint \lambda_I(D^{**})p(D^{**}|\{D_j^*\}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{D}, \boldsymbol{I})p(\{D_j^*\}|\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{D}, \boldsymbol{I})p(\boldsymbol{\theta}|\boldsymbol{D}, \boldsymbol{I})d\boldsymbol{\theta}d\{D_j^*\}dy^{**}$$

を最小にする { x^{**} } が次回の評価点集合となる.また「ユーザー I が局所最適化を行う」 とは n = 1 と確信している状態 p(n = 1|I) = 100% であり, $D_1^* = D^{**}$ となる特別な場合 と見なせる.

(4) 平成 25 年度進捗状況

モデル誤りが存在する状況におけるパフォーマンス低下の調査

「単峰だと思って最適化してみたら実は多峰だった」というシチュエーションはしばし ば遭遇する.そこでこのような状況を再現しその実態を探った.具体的には,(丙')より多 峰性の目的関数においては関数中の局所解の数 $n(\geq 2)$ を推定しながら $\{D_j^*\}_{j\in\{1,...,n\}}$ か ら D^{**} を 推定しなくてはならないが,その替わりに先述の p(n = 1|I) = 100% としたア ルゴリズムと,比較用に既存のアルゴリズム Expected Improvement (EI)との2つを用い て,それぞれ目的関数4000ケースを最適化した.結果は EI の方が勝った.

遺伝的アルゴリズム(GA)のような大域的手法であっても、悪いパラメータ設定(e.g. 交 叉率や突然変異率が小さすぎる)では先述のような早熟な収束によって局所解しか見つか らない.しかしこれでも理論上は十分な反復回数の後に大域的解にたどり着くが、このよ うな場合はむしろ局所最適化をしたと言う方が現実に即しており、このような場合を「狭 義に大域的」な最適化をしたと呼ぶことにすれば、比較実験における単峰を仮定したアル ゴリズムは狭義に大域的であったといえる.

3.4.4. 複雑構造物の軽量化設計技術の開発

目標・計画

近年,複雑な形状をした大規模な建築物や構造物が多くなるに伴いそれらの健全性評価 や安全性を考慮した設計は極めて重要である.実構造物の詳細なモデルを作成し大規模な メッシュ分割を用いて数値解析を行うことは非常に困難であり,実用的ではない.そこで 大規模なメッシュ分割を用いることなく高精度かつ解析時間の高速化の手法を開発する.

(2) 意義・国際社会との比較

大規模で複雑な形状を解析する手法としてミクロ・マクロ解析など様々な既存の手法の 研究がなされている.それらの既存の手法の多くの問題点は精度の向上や,解析時間の高 速化,解の収束などが挙げられる.それらをより高度化するアルゴリズムを開発すること は非常に重要である.また環境問題の一つにヒートアイランド現象対策として普及しつつ ある京都大学・人間環境学科,酒井敏教授らによって考案されたフラクタル日除けを解析 対象として題材に挙げている.フラクタル日除けは砂漠など植物の育たない地域や大雪の 降る地域など様々な環境で使用することが出来るがゆえ,環境問題にも貢献できると思わ れる.

(3) 研究内容

本研究では実構造モデルを近似モデルである要素(四面体要素)で近似して解析を行う. 解析対象としてシェルピンスキー四面体を組み合わせて作成されたフラクタル日除けを題 材に挙げている.近似モデルを作成するために実構造モデルから近似モデルの節点に適応 するサンプル点より反力を求め、{f}=[k]{u}より直接,等価な剛性マトリックスを得る.こ の等価な剛性マトリックスより近似モデルを作成し近似モデルを組み合わせて全体構造の モデルに拡張することにより全体解析が非常に困難であるシェルピンスキー構造体を等価 な要素に置き換えて全体構造の解析をすることで大規模な複雑構造物を,要素数,節点数 を大幅に減少することができ,解析時間の高速化,計算コストの減少が期待できる.また このアルゴリズムを繰り返すことにより効率の良い最適化も期待できる.

(4) 平成 25 年度進捗状況

等価モデルでは近似に起因する誤差は避けられないため、実構造モデルと等価モデルの 両モデル間における解析誤差を確認し実用性を検証した.その結果、最大約5%程度の誤 差が生じていた.そこで等価モデル解析の精度をあげるために、剛性マトリックスの対角 項を修正し高精度化を行った結果が図6である.図6は等価モデルの1点に単位荷重をか けてほかの自由度は拘束したときの解析結果を詳細モデルの結果と比較したものである. 図から分かる様に、改良した結果(CorrectionTerm)は詳細モデルと等価モデルの解析結 果は同じになった.なお、Symmetry と書いてある結果は剛性マトリックスが完全な対称 行列になるように([K]+[K]^T)/2 としてみた結果であるが効果はほとんどなかった.高精度 化にはほかにもいろいろ手法が考えられるので、検討をさらに進める予定である.

この等価モデルを組み合わせ全体構造モデルに拡張し全体構造における解析を行いこの アルゴリズムを用いて最適化を行った.



3.5. 可視化検証グループ

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

・解析結果を正しく理解し,評価すること

・実験結果等と公正な比較を行うこと

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

3.5.1.3次元画像による定量的・定性的検証

(1) 目標・計画

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

大きな計画としては,

平成 24 年度:

表示装置となる VR 装置の導入を行い,ハードウェアの準備を行う.

平成 25 年度:

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

平成 26 年度:

画像による検証に利用するための可視化システムを VR 装置上で開発する.

平成 27 年度:

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

平成 28 年度:

研究をまとめ、その公開方法について検討する.

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

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

(3)研究内容

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



図1 システム構成図

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

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

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

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

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

(4) 平成 25 年度進捗状況

平成25年度の主な目的は可視化のためのソフトウェアの開発であった.本報を記している平成25年12月現在、すべてのソフトウェアの開発が終了してはいないが、以下、計画も含めて可視化システムの現状を述べる.

図2にシステムの全体構成(案)を示す.実験および数値解析の両者を同時にあるいは 個別に表示し,比較・検証を行うことができるように考えている.AVS・MPEおよび3dsmax, VR4MAXは既に導入されたソフトウェアであり,これらを有機的につなぐこと,データの 表示や制御を可視化やCGの専門家でなくともできるようにすることが目的である.



図2 可視化システム全体構成図(案)

図2から分かるように、数値解析結果は AVS-MPE を通して表示するパスがいくつか確 立しているので、現在は実験結果を AVS-MPE に送るソフトウェアを準備している. その イメージを図3に示す.



図3 実験と可視化の同時表示のイメージ

解析は2次元であれ、3次元であれ問題なくVR空間で表示できる.実験については、多 くの場合、2次元計測(面計測)が多いので、まず、データの面を指定し、そこに取得し た画像(PIV等)をマッピングする.解析と実験との位置や向き、大きさを合わせること、 動画であれば時間を揃えることが必要となるのが、動画についてはそのための前処理を設 計中で、年度内には完成する予定である.

予定通りに進まなかったこととしては,装置を都合で平成25年5月,川越キャンパス6号館に移設した.近くにPCクラスタも移設されたが,まだネットワーク環境は完全には整備されておらず,PCクラスタとVR装置とはネットワークで直結されてはいない.これは今年度末から来年度早々には実現させる予定である.
3.6. 横断的研究会

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

3.6.1. 連成標準問題検討会

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

3.6.2. 計算力学と(材料) データベースの会

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

3.6.3. 楽器音響と流体構造連成研究会

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

3.6.4. タイヤ研究会

もともとは、米国科学基金(NSF)により 2011 年度に設立された産学協同研究センター である、タイヤ研究センターとの連携を模索する中で、当センターでもそれとは別にタイ ヤに関する研究をすべきであろうとの結論に達し、平成 25 年 12 月に1回目の研究打ち合 わせを行った.目的は、タイヤ(やその周辺)解析に当センターの大規模解析技術、連成 解析技術を適用し、タイヤに関連するものづくりに資することであるが、今回のプロジェ クトのメインテーマである、妥当性検証はここでも重要であることから、解析のみならず、 実験も同時に行うことを考えている.そのため、当センター/プロジェクトのメンバーに こだわらず、本学理工学部から協力いただける研究者を募った.本稿執筆時点では、まだ 1回目の打ち合わせが終わったばかりで具体的な研究は始まっていないが、年度内に第2 回の会合を持ち、少し具体的な研究テーマ設定を行う予定である.

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

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

4.1.1. 研究実施体制

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

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

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

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

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

4.1.2. 研究実施内容

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

5. 国際協力

5.1. TU-LHU student workshop (龍華科技大学 / 台湾)

日時:2013年2月25日(金)

場所:龍華科技大学

主催:龍華科技大学

2013 年 2 月 25 日に台湾の龍華科技大学で行われた, 2013 Japan-Taiwan (Toyo University and Lunghwa University) Joint Student Workshop on Nano and Computational Mechanics へ東洋大学計算力学研究センターのポスドク,大学院の学生の計8名が参加・講演を行った.

東洋大学側の講演は主に計算力学を用いた応用研究についての発表がなされ, 龍華科技 大学側は主にナノテクノロジーを応用した研究内容で5件の発表がされた.

東洋大学と龍華科技大学とは、研究分野が異なる部分もあったものの、各 20 分の発表に 対して 5 分間の質疑応答の為の時間には多くの議論がされ、双方の大学の学生にとって、 今後の研究に多くの影響を得ることが出来たと考えられる.

次回は、9月に日本での開催を予定しており、その際にも数多くの有意義な意見交換がで きることが期待できる.

5.2. LHU-SKKU-TU 若手ワークショップ (白山 / 日本)

日時:2013年9月6日(金) 場所:東洋大学白山キャンパス2号館 スカイホール 主催:東洋大学計算力学研究センター

2013 年 9 月 6 日(金), 計算力学研究センター主催で,本校との提携校である,台湾の龍 華大学,韓国の成均館大学を招いて,白山キャンパス 2 号館のスカイホールにて, The 1st LHU-SKKU-TU Joint Student Workshop on Nano and Computational Mechanics と題 した 3 大学合同学生ワークショップを開催した.

当日のプログラムは3構成で行われ,第1部では,韓国,日本の教授らによる特別講演 が3件行われた. 第2部,第3部では,台湾,韓国の大学院生により,それぞれ4件の講 演が行われ,日本からは大学院生,研究助手らにより7件の講演が行われた.短い講演時 間ではあったが,それぞれの講演に対する質疑応答が数多くなされ非常に有意義なワーク ショップとなった.

本3大学合同学生ワークショップは、今後、年に1度、各大学持ち回りで開催されることが決まっており、研究の観点のみならず、国際交流の観点からも今後の発展が期待できる.



ワークショップの様子

5.3. SSME 2013 (墾丁 / 台湾)

日時:2013年11月10日(金)~12日(日) 場所:東洋大学白山キャンパス2号館 スカイホール 主催:龍華工科大学(台湾)

2013 年 11 月 10 日から 12 日にわたって,台湾の墾丁,Haward Beach Resort にて,台湾龍華工科大学の主催で行われた The 2nd Student Seminar on Mechanical Engineering (SSME2013) に本センターより博士前期課程の学生 2 名が参加・発表した.

SSME2013には、台湾、日本のみならず、中国、韓国から4カ国7大学の学生が参加し 26 の講演が行われた. 各講演の後に行われた質疑応答の際も、各々の持ち時間を超過する 程、多くの議論がなされ、各自の研究の今後の更なる発展に繋がる非常に有意義なワーク ショップとなった.



会場の様子

6. 情報発信

6.1. 第18回計算力学フォーラム (JSME-CMD / 佐賀)

2013 年 11 月 2 日から 4 日の 3 日間に亘り佐賀大学で行われた CMD2013 にて,第 18 回計算力学フォーラムを行った.

第 18 回計算力学フォーラムとして, 佐賀県・佐賀大学で開催された JSME 26rd Computational Mechanics Division Conference 2013 (CMD2013)内で, 計算力学フォーラムとして, オーガナイズドセッション「大規模並列・連成解析と関連話題」を開催した. 本フォーラムは3つのセッションから構成され以下の12 件の講演が行われた.

- ・ Diagonal-scaled BDD 法を用いた複合材料の並列有限要素解析
- · 多数の MPC を含む大規模構造解析への BDD 法の適用
- · Isogeometric 解析における階層型接触探索
- ・ 振動現象の連成解析及び自己組織化マップによるその分類
- ・ 大規模複合構造物のマルチスケール解析
- ・ 開発中の ADVENTURE 固有値解析モジュールによる並列解析
- 機構・非線形有限要素法の連成解析を用いたサスペンション挙動シミュレーションの高度化に関する一考察
- ・ 連続体力学向け DSL の開発
- ・ 領域分割法ソルバーの性能ベンチマーク
- · 3次元有限要素解析コードのための並列領域分割法ライブラリに関する研究
- 複素数を用いる並列有限要素法解析ソルバの実装と高速化
- ・ 超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの並列化
- ・ 大規模解析のためのレイキャスティング可視化技術の検討

これらの講演と議論を通し、大規模計算並びに連例解析手法を中心とした現状と今後の 課題に関する議論が行われた.

7. 教育活動

センター研究員らの指導のもとで,東洋大学総合情報学部卒論学生,工学研究科大学院 学生がセンターにおいて研究活動を行っている.

7.1. 教育活動風景

田村研究室

田村研究室では、学部生6名の卒業研究および大学院生2名の修士研究を行っている.

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



図 1. セミナー風景

江澤研究室

江澤研究室では、学部学生12名卒業研究および大学院生4名の修士研究および博士研究 を行っている.学部学生は毎週1回セミナーを開き、勉強会や進捗状況報告をしてもらっ ている.大学院生は、月に数回各自の研究の進捗状況報告および勉強会を実施している. 学部学生はまず汎用構造解析プログラムANSYSを習得してもらい、つぎに3次元 CADの 勉強をしてもらっている.大学院生は独自に開発したプログラム等を使って研究を行って いる.図2はセミナーでの勉強会風景である.図3はANSYSを使って解析をしている様 子である.



図 2. セミナー風景

図 3. 卒業論文の研究風景

塩谷研究室

塩谷研究室では、学部学生12名の卒業研究を行っている.毎週1回開催されるセミナーでは学生が研究進捗状況についての発表などを行っている.図4は携帯端末解析の可視化システムの様子であり、図5は研究室の様子である.



図 4. 携帯端末上での可視化の様子



図 5. 研究室の様子

中林研究室

中林研究室では、学部学生15名とポスドク1名が研究活動を行っている.毎週1回開催 されるセミナーでは各回とも5名が研究発表を行い研究の進捗状況の報告や内容について 議論する.また、卒業論文提出締切が近くなると全員が週1回の進捗状況を行うことにな っている.卒論発表会は研究内容の近い塩谷研究室や田村研究室と合同で行っている.図6 は研究室の様子であり、図7は研究発表会の様子である.



図 6. 研究室の様子

図 7. 研究発表会

7.2. 卒業論文・修士論文の紹介

田村研究室

(1) 画像に基づく流体解析手法の開発

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

(2) 医療分野での流体解析技術の利用

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

(3) 混相流の解析手法の開発

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

江澤研究室

(1) 震災時における机の最適化

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

- (2) 位相最適化を用いたローラーチェーンのプレート形状最適化 自転車のローラーチェーンのプレートの形状最適化を行った.
- (3) ゲームプログラミングの最適化

オセロゲームの強さを高めるために、各種パラメータの最適化を行った.

(4) 圧力容器の効率的解析技術と最適化技術の開発

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

塩谷研究室

(1) マルチメディアデバイスを用いたシミュレーション

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

(2) ネットワーク型 CAE ソフトウェアの開発

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

(3) Windows 版熱伝導解析モジュール開発

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

中林研究室

(1) スマートフォン用アプリケーションの企画・デザイン・開発

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

(2) ニューラルネットワークを用いた予測システムの開発

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

(3) 自己組織化マップの応用に関する研究

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

8. 業績リスト

本章では、2013年1月から2013年12月までの当センターに関係する業績を記載する.

8.1. 総説・解説・エッセイ

1. 矢川元基, "巻頭言: 2013 年を迎えて", 原安協だより, No.251, pp.1-2, 2013

8.2. 論文

1. K.MUROTANI, G.YAGAWA and J-B, CHOI, "Adaptive finite elements using hierarchical mesh and its application to crack propagation analysis", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.253, pp.1-14, 2013

 K.SAKIHARA, H.MATSUBARA, T.EDO and G.YAGAWA, "Multi-dimensional Moving Least Squares Method Applied to 3D Elasticity Problems", Engineering Structures, Vol. 47, pp. 45-53, 2013

3. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "粒状構造を有する脆性材料の離散き裂進展解析手法の開発 および性能評価", 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69, pp.31-45, 2013 年 1 月

4. 広瀬孝三郎, 江戸孝昭, 松原仁, "裂性岩盤の狭小領域構造を考慮した広大領域における 物質移動シミュレーション", 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69, No.3, pp.367-377, 2013 年

5. Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, "Comparison of Numerical and experimental results on Red soil muddy water flow in sand basin with filtration", 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 127-130, 2013.11

6. T Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, "Kita-Uebaru Landslide Analysis by using Material Point Method (MPM)", 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 39-42, 2013.11

 Kosaburo Hirose and Hitoshi Matsubara, "Mudcrack patterns of Okinawa regional soils ", 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 35-38, 2013.11

8.3. 講演論文·口頭発表

1. N. FUJIMATSU, "Direct Numerical Simulation on Drag Reduction of Channel Flow with Visco-Elastic Wall", 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2013.1.7

2. 長岡慎介,中林靖,矢川元基, "EFMM の並列流体-構造連成解析への適用",第62回理 論応用力学講演会,東京工業大学大岡山キャンパス,2013.03.06-08

3. 芦野俊宏,"材料データベースの国際動向と今後の展望",科学技術未来戦略ワークショ ップ データを活用した設計型物質・材料研究(マテリアルズ・インフォマティクス)ワーク ショップ第2回,東京,2013.06.01

4. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Genki YAGAWA, "E Application of EFMM to Fluid-Structure Coupled Analysis and Its Parallelization", SEECCM III, Kos Island, Greece, 2013.06.012-14

5. Hiroshi KAWAI, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, Shinobu YOSHIMURA "Performance Benchmark of Local Solvers on Supercomputers in Domain Decomposition Method", The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13

6. Kaoru YODO, Ryuji SHIOYA, Yoshitaka WADA, Akio MIYOSHI, "Parallel CAE system based on HTML5, WebGL and offline visualization technology with domain decomposition method", The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13

7. Itaru ISHIKAWA, Yosuke KOBAYASHI, Ryuji SHIOYA, Genki YAGAWA, "Vibration Analysis by an Eigenvalue Analysis Module of ADVENTURE System", The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13

8. A.M.M. MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, "A Computational Study of Sparse Matrix Storage Schemes in Large Scale Thermal-Solid Coupling Analysis", The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13 9. 荻野正雄,塩谷隆二,"階層型領域分割法による 1000 億自由度並列有限要素解析",第 18回計算工学講演会,東京,2013.06.19-21

10. 石川格,小林陽介,塩谷隆二,矢川元基, "ADVENTURE 振動固有値解析モジュールの開発",第18回計算工学講演会,東京,2013.06.19-21

11. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, "コース行列の逆行列を用いた BDD 前処理", 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21

12. 和田義孝,河合浩志,塩谷隆二, "超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの開発",第18回計算工学講演会,東京,2013.06.19-21

13. 淀薫, 塩谷隆二, 和田義孝, 三好昭生, "領域分割法に基づくオフライン可視化と WebGL による大規模解析用ネットワーク CAE システムの開発", 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21

14. 荒井皓一郎, 岡田裕, 河合浩志, 淀薫, 塩谷隆二, "地球シミュレータによる大規模有 限要素法破壊力学解析と破壊力学パラメータの計算手法", 第18回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21

15. 田村善昭, 鶴見伸夫, 松本洋一郎, "集束超音波による気泡運動と温度上昇の可視化", 可視化情報シンポジウム, 東京, 2013.06.19-21

16. Y. Yamashita, T. Baba and T. Ashino, "Semantic mathematical representation using OpenMath for equation", The 10th Asian Thermophysical Properties Conference, Jeju, Kora, 2013.09

17. 長岡慎介,中林靖,矢川元基, "EFMM による並列流体-構造連成解析について",日本 機械学会 2013 年度年次大会,岡山大学津島キャンパス,2013.09.08-11

18. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, "Numerical Simulation Method of HIFU with Microbubbles", ASME/FDA 2013 1st Annual Frontiers in Medical Devices: Applications of Computer Modeling and Simulation (FMD2013), Washington DC, U. S. A., 2013.09.11-13 19. 増田正人,中林靖,田村善昭,"振動現象の連成解析及び自己組織化マップによるその 分類",日本機械学会第26回計算力学講演会,佐賀,2013.11.02-04

20. 山下雄一郎(産総研),馬場哲也,芦野俊宏,"分散型熱物性データベースの開発(10) -OpenMathを用いた数式データの表現-",第34回日本熱物性シンポジウム,富山,2013.11

21. Shisnuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, "Evaluation of Efficiency of New Fluid-Structure Coupled Analysis Method using Parallel Enriched Free Mesh Method", 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14

22. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura, "Fluid-Structure Coupled Analysis of Vibration Phenomena and Its Classification and Prediction Using the modular network Self Organizing Map", 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14

23. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, "Numerical Simulation of Nonlinear Acoustic Waves in Two-Phase Fluid", 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14

24. 石川 格,河合浩志,塩谷 隆二, "振開発中の ADVENTURE 振動固有値解析モジュー ルによる並列計算",日本機械学会第 26 回計算力学講演会,佐賀, 2013.11.02-04

25. I. Ishikawa, M. Ogino, A. M. M. Mukaddes, Ryuji Shioya, "Trial Study of Multi-Level Domain Decomposition Method for Heat Transfer Analysis", 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14

26. 河合浩志,塩谷隆二,"連続体力学向け DSL の開発",日本機械学会第 26 回計算力学 講演会,佐賀, 2013.11.02-04

27. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, "領域分割法ソルバーの性能ベン チマーク", 日本機械学会第26回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04 28. 和田義孝,河合浩志,荻野正雄,塩谷隆二,"超大規模解析のための高精細可視化ライ ブラリの並列化",日本機械学会第26回計算力学講演会,佐賀,2013.11.02-04

29. 淀薫,塩谷隆二,和田義孝,河合浩志,三好昭生,"大規模解析のためのレイキャスティング可視化技術の検討",日本機械学会第26回計算力学講演会,佐賀,2013.11.02-04

30. 武居周,室谷浩平,河合浩志,"並列有限要素法に基づく full-wave 電磁界解析ソフト ウエアの HPCI における性能評価",日本機械学会第 26 回計算力学講演会,佐賀, 2013.11.02-04

31. A M M Mukaddes, Masao Ogino and Ryuji Shioya, "A new implementation of sparse matrix-vector multiplication in the parallel finite element", 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14

32. I. Ishikawa, M. Ogino, A. M. M. Mukaddes and R. Shioya, "Trial Study of multi-level domain decomposition method for heat transfer analysis", 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14

33. S. Sugimoto, M. Ogino and R. Shioya, "Implementation and acceleration of the domain decomposition method with complex data types", 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14

34. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "Material Point Method (MPM) におけるエネルギー変動問題と その抑制法", 土木学会第68回年次学術講演概要集, pp.233-234, 2013.09

35. 広瀬孝三郎, 松原仁, "島尻粘土における乾燥き裂パターンに関する実験研究", 土木学会 第68回年次学術講演概要集, pp.463-464, 2013.09

36. 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, "不均質脆性固体における破壊形態の複雑性に関する数値解 析的検討", 第26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.24-25, 2013.11

37. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "Material Point Method(MPM)を用いた斜面崩壊発生時の土質 強度の検討", 第26回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.18-23, 2013.11 38. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "Material Point Method(MPM)を用いた斜面崩壊発生時の土質 強度の検討", 第26回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.18-23, 2013.11

39. 広瀬孝三郎, 松原仁, "Mud crack の形成メカニズムに関する実験的検討", 第 26 回沖縄 地盤工学研究発表会講演概要集, pp.14-17, 2013.11

40. Hitoshi Matsubara, "Numerical Study on the Forming Mechanism of Honeycomb-weathering of Rock", Proceedings of 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, December 2013.

41. Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, "High-accuracy Material Point Method based on the Moving Least Squares Method", Proceedings of 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, December 2013.

9. 受賞

9.1. 日本機械学会計算力学部門賞第 91 期業績賞

2013 年 11 月 2 日 (土) ~4 日 (月), 佐賀大学にて日本機械学会第 26 回計算力学講演 会が開催され,研究員の塩谷隆二教授が,日本機械学会計算力学部門賞第 91 期の業績賞を 受賞した.



授賞式の様子

受賞理由は,超並列計算機を活用した計算力学研究の基盤となる理論を提唱した業績と, 計算力学技術者試験認定事業に対する部門への貢献である.

9.2. 2013 JACM Fellows Award(日本計算力学連合フェロー賞)

2013 年 12 月 3 日(金), シンガポールにて JACM(日本計算力学連合)総会が開催され,研究員の塩谷隆二教授が 2013 JACM Fellows Award(日本計算力学連合フェロー賞)を受賞した.



賞状

受賞理由は計算力学分野で顕著な業績を上げ,JACM へのサポート,および IACM(International Association for Computational Mechanics)関連国際学会への貢献で ある.

10. 結び

本報は、2013 年度の活動を取りまとめたものである. なお、2014 年 3 月に予定されて いるセンター評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2013 年 12 月 31 日とした. したがって、それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい.

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