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

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

1. まえがき

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

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

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

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

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

2013 年 3 月

東洋大学計算力学研究センター長
田村善昭

2. 概要

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

2.1. センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである。

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

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

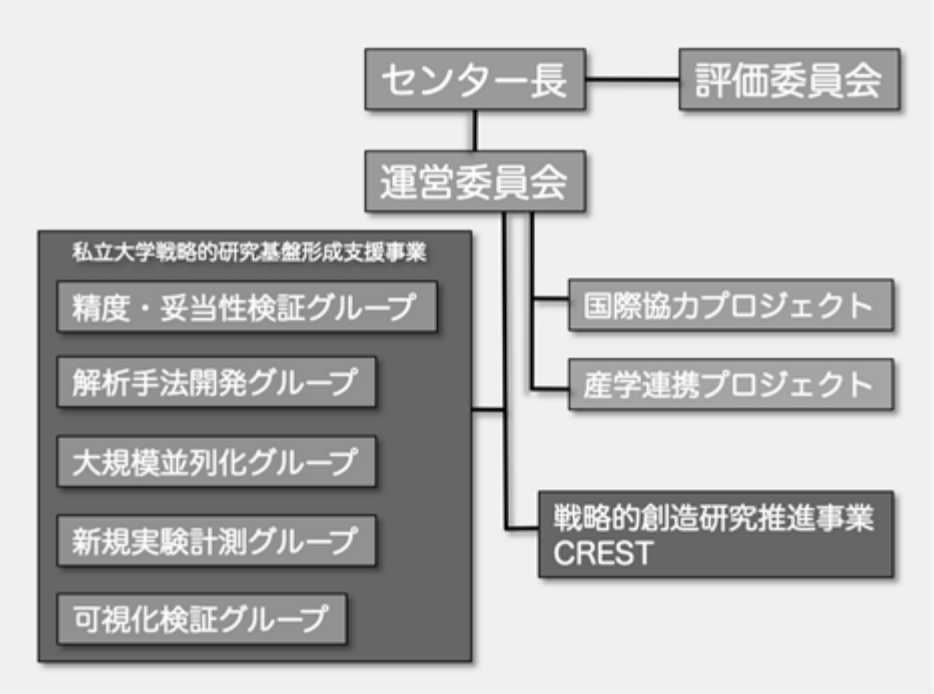
・平成２２年３月　　「学術フロンティア推進事業」終了

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

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

2.2. 組織

センターの組織とメンバーは以下の通りである。



メンバー

・センター長

田村　善昭　（東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授）

・研究員

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

・研究助手

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

・研究支援者

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

・客員研究員

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

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

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

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

上記の事項を踏まえて，今年度は，以下の 5 項目について報告を行う．

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

3.1.1. EFMMによる高精度大規模並列流体−構造連成解析手法の開発

(1) 目標・計画

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

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

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

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

(3) 研究内容

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

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

のにするだけでなく、解析精度の低下の原因にもなる。

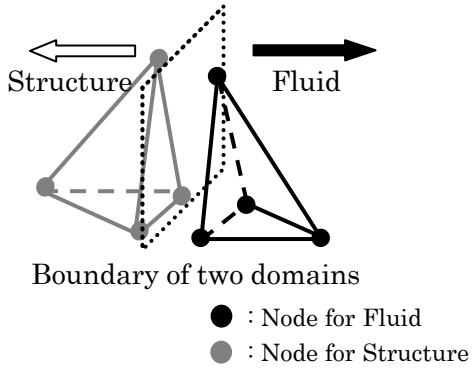


図 1 整合性の得られた流体-構造界面

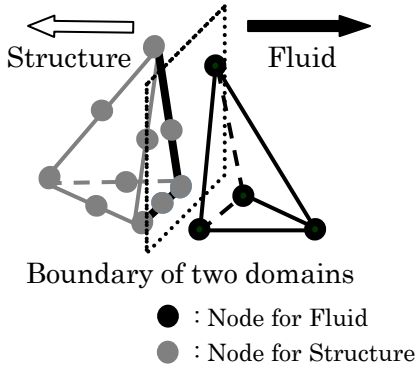


図 2 整合性が得られていない流体-構造界面

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

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

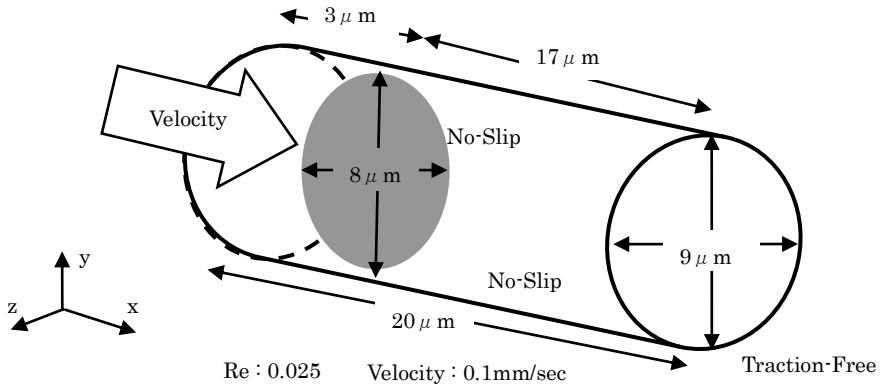


図 3 解析モデル

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

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

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

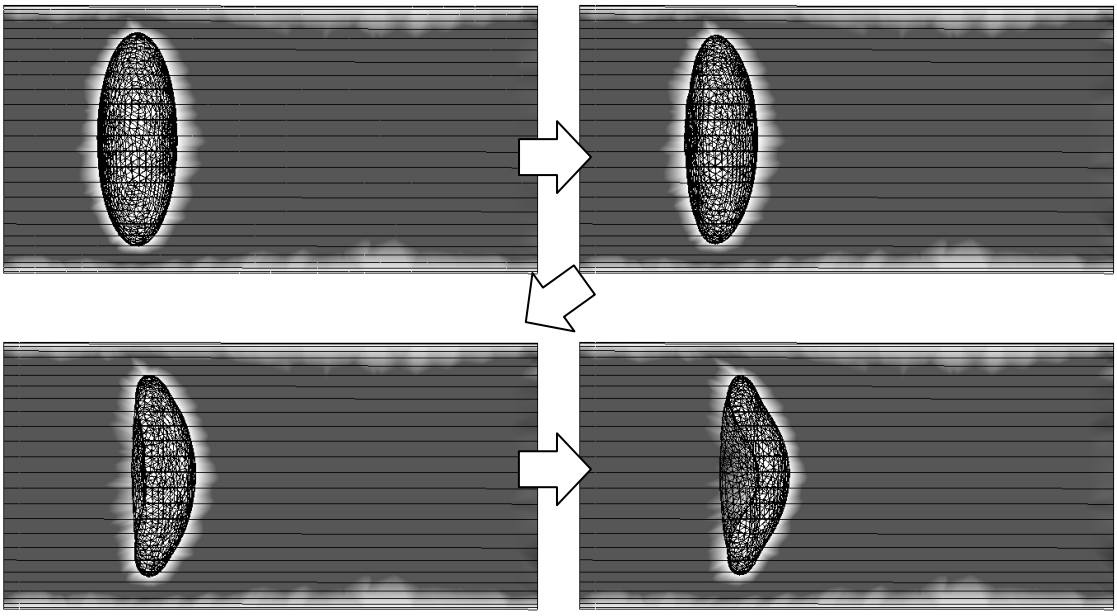


図 4 解析結果（流体解析場）

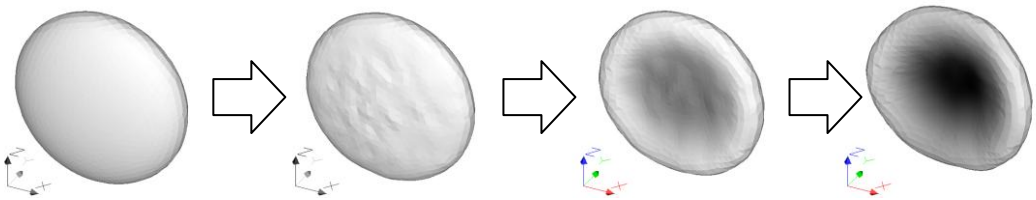


図 5 解析結果（構造解析場）

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

(4) 平成 24 年度進捗状況

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

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

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

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

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

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

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

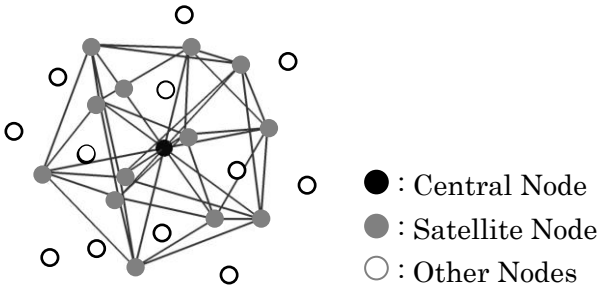


図 6 EFMM の生成する局所要素クラスター

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

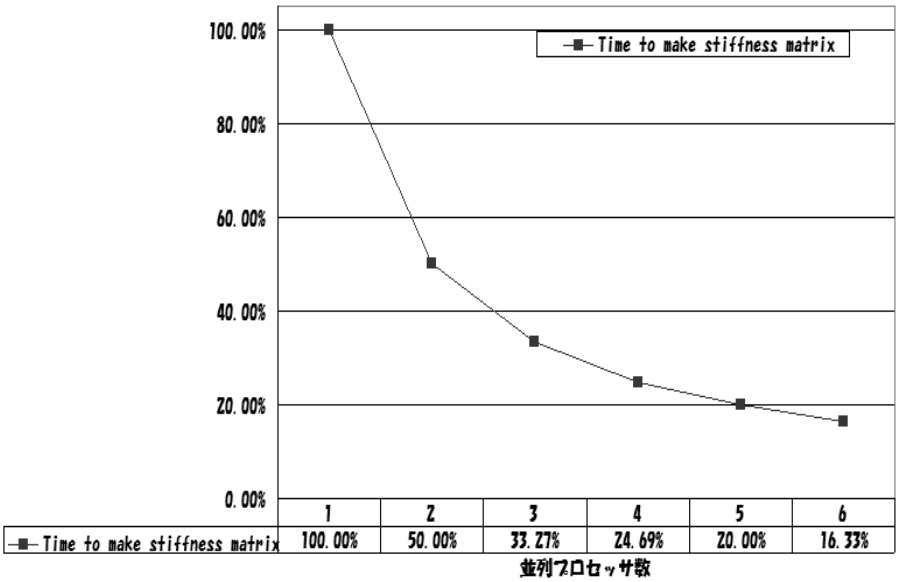


図 7 並列プロセッサ数と全体剛性マトリックス生成に要する時間の関係

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

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

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

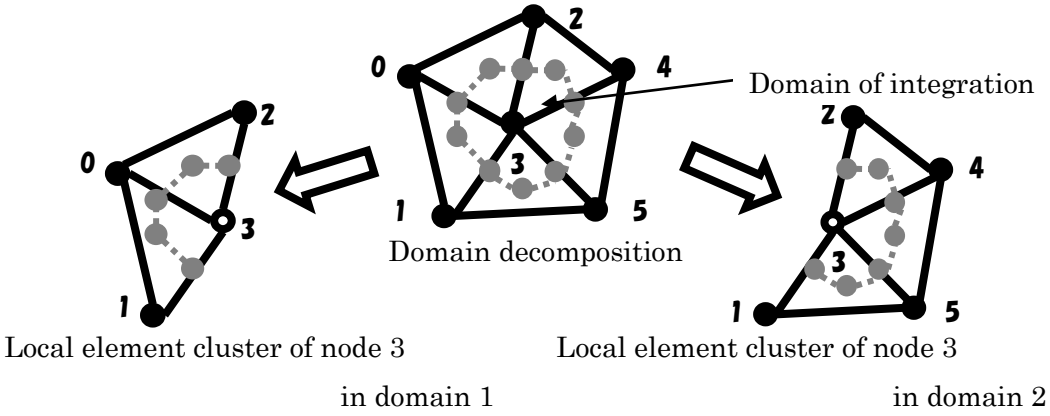


図 8 領域分割例

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

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

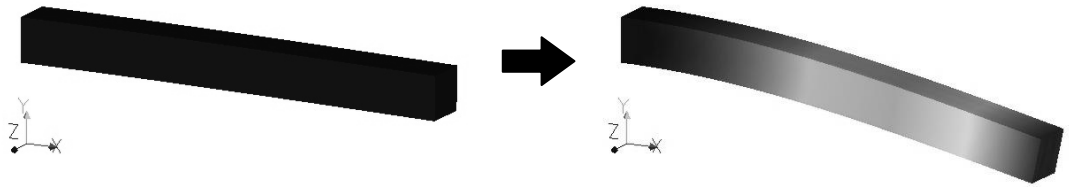


図 9 解析モデル

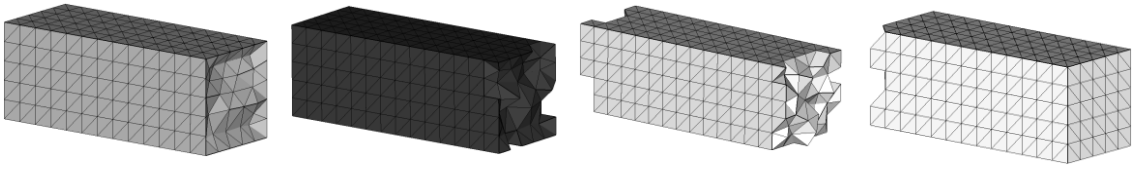


図 10 領域分割例

図 11 は、横軸に並列プロセッサ数、縦軸に正規化変位を表している。

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

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

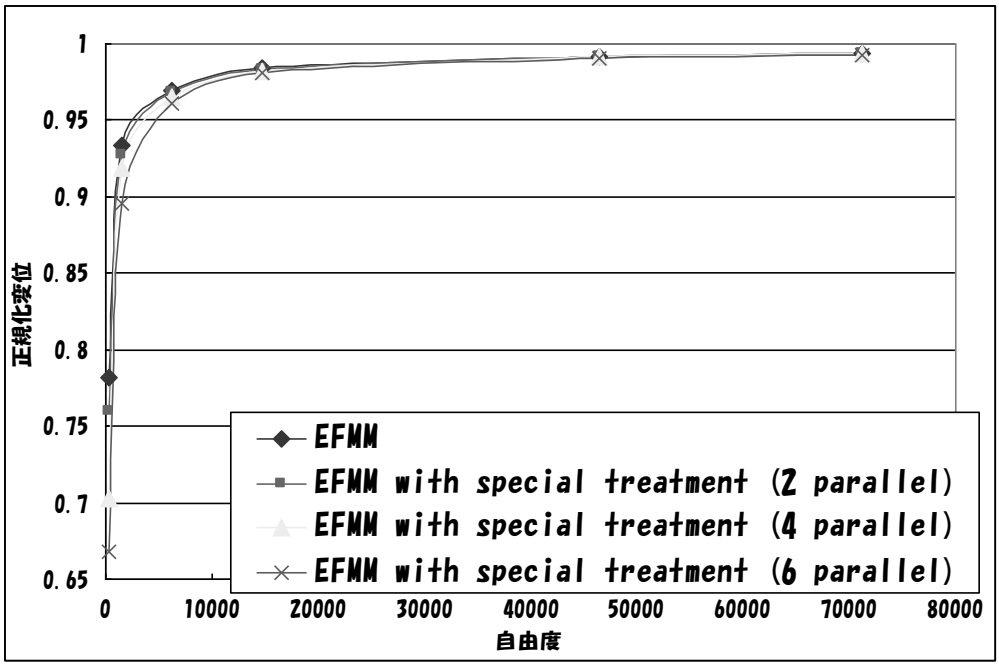


図 11 各並列台数における解析モデルの自由度と正規化変位の関係

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

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

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

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

参考文献

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

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

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

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

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

3. 1. 2. 付帯条件付き多次元型移動最小自乗法の３次元固体問題への適用性に関する研究

（1）目標・計画

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

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

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

（2）意義・国際社会との比較

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

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

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

ても重要な位置づけとなる研究であると考える．

（3）研究内容

(A)　3 次元 C-MultiMLS 法の定式化

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(B)　領域積分の方法

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

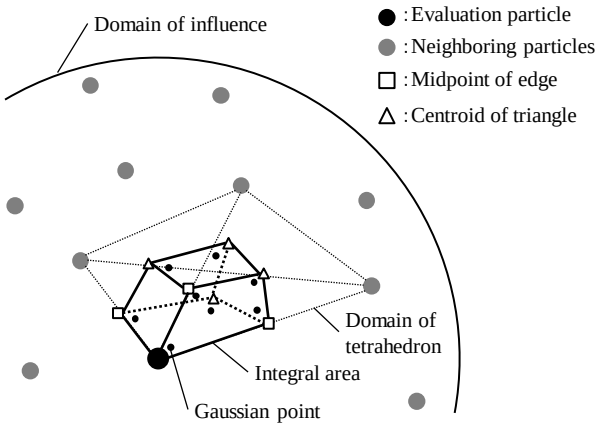


図 1　積分領域の定義（3 次元）

(C)　境界拘束の精度[4]

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

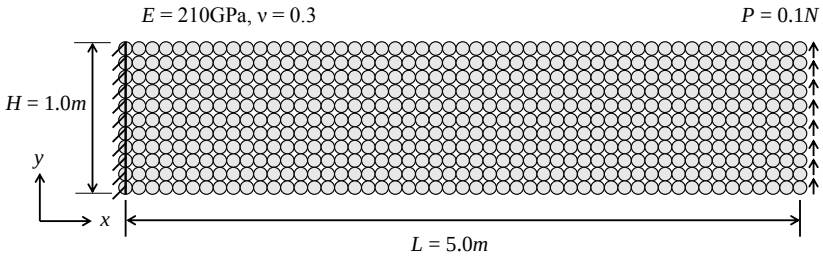
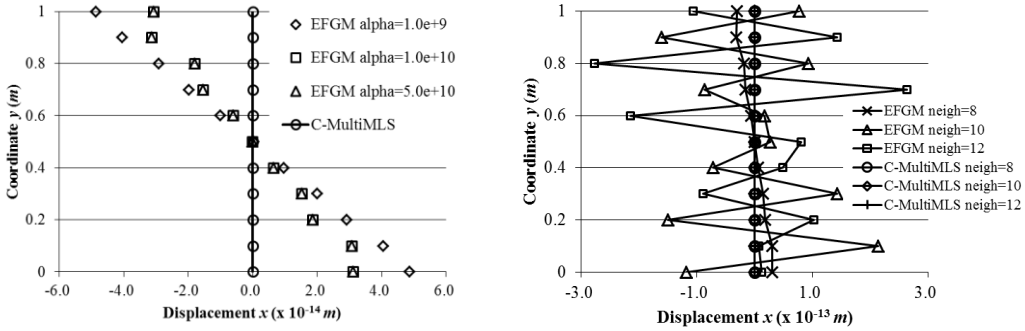


図 2　解析モデル



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

図 3　固定端部における EFG 法と本法の変位挙動

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

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

は近傍粒子の個数にかかわらず変位の振動なく変位を拘束できることがわかった．

(D)　3 次元弾性固体問題の精度検証[5]

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

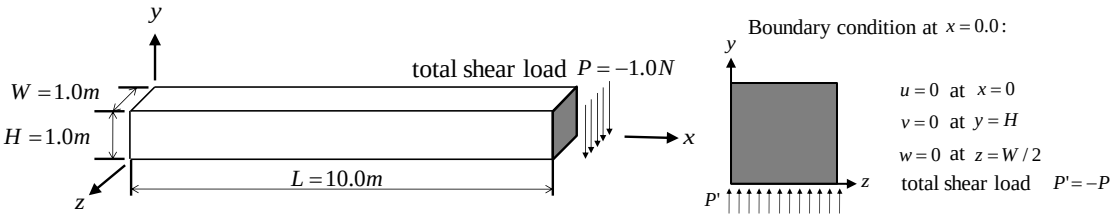


図 4　片持ち梁モデル

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

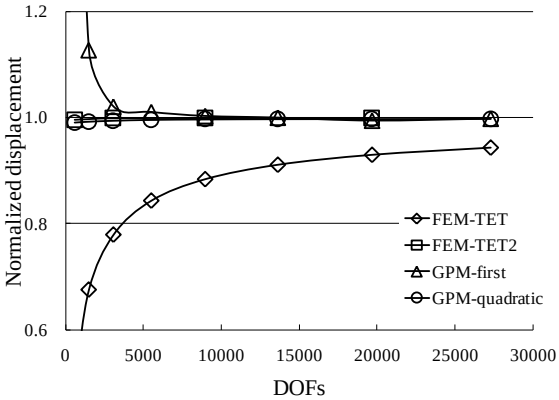


図 5　正規化変位と自由度との関係

(E)　破壊力学問題への適用

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

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

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

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

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

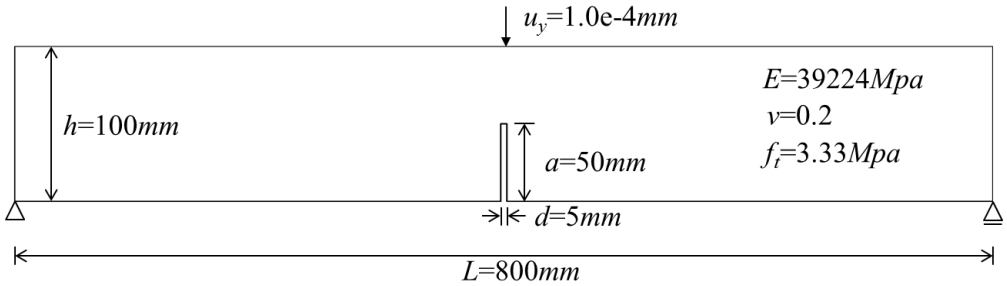


図 6　切り欠きを有する梁（2 次元）

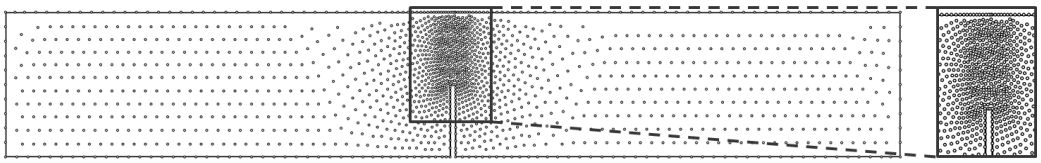


図 7　解析モデルの粒子分布（総粒子数：1442）

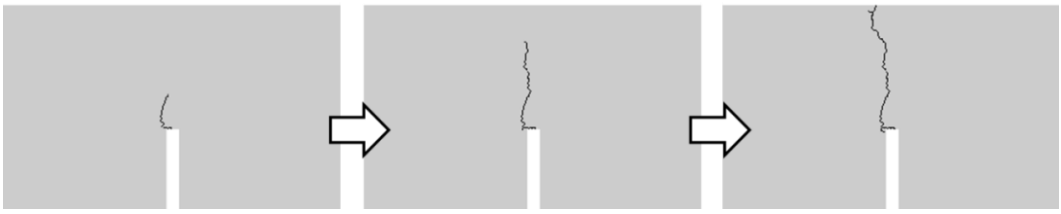


図 8　き裂進展状況（2 次元）

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

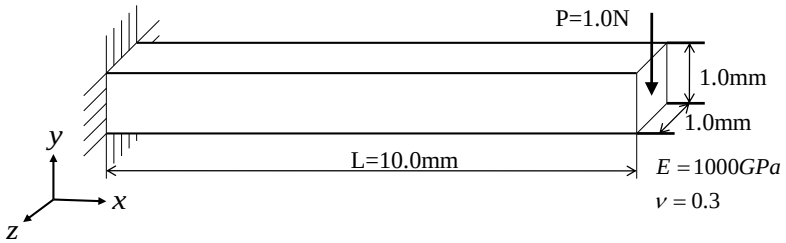
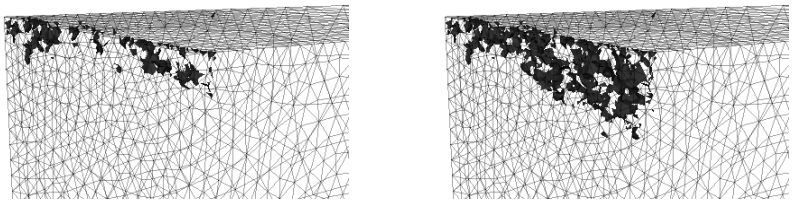


図 9　解析モデルと解析条件（3 次元）



(a) 初期　　(b) 後期

図 10　固定端部のき裂進展状況（3 次元）

(4) 平成 24 年度進捗状況

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

参考文献

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

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

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

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

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

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

（1）目標･計画

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

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

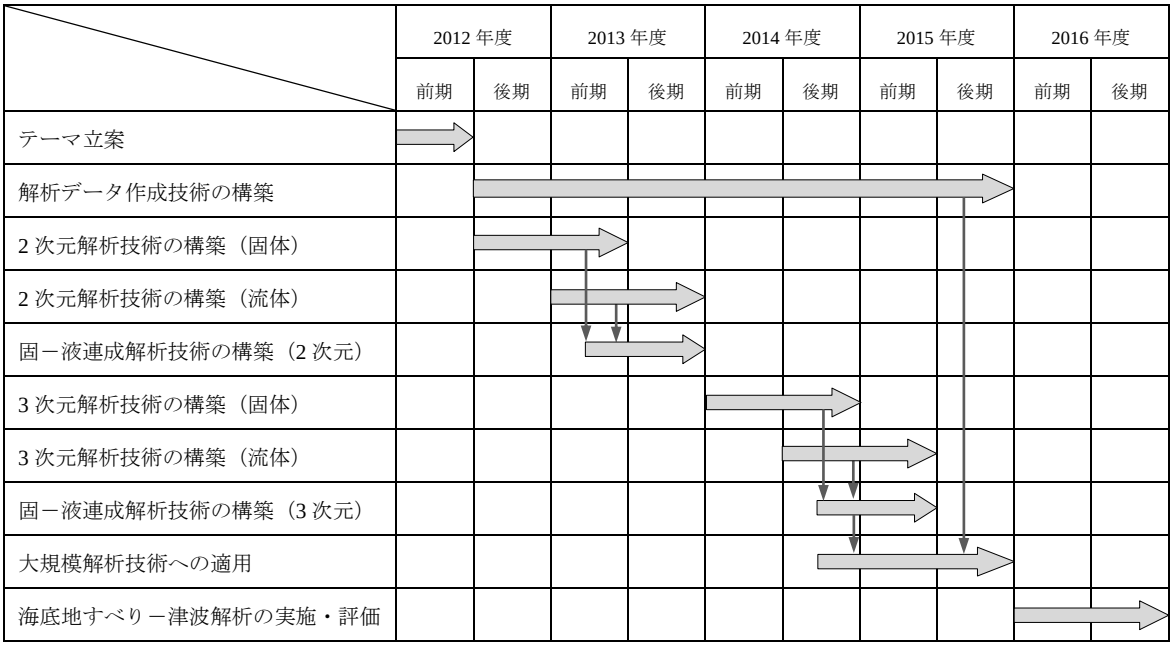


図 1　研究計画

（2）意義･国際社会との比較

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

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

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

(3) 研究内容

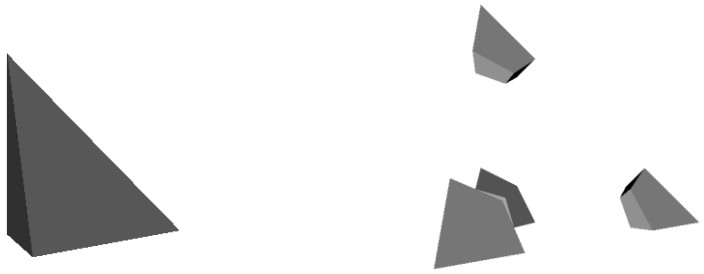
(A) 任意形状の地形形成技術の構築

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

(B) 地形のモデル化方法

(1) 四面体要素のブロック化

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

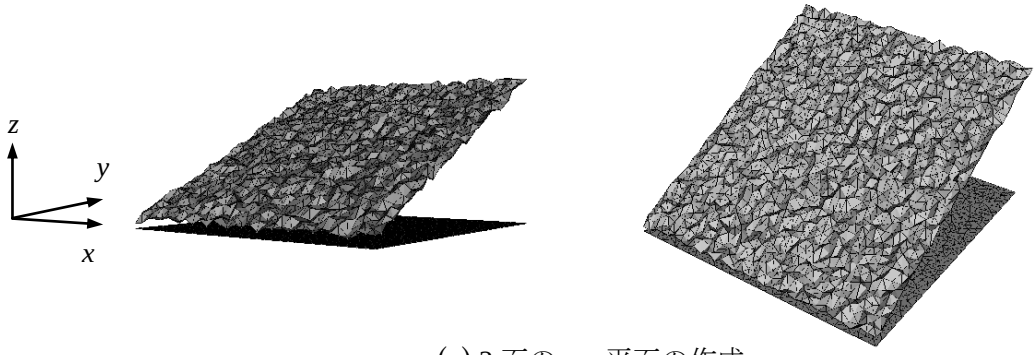


(a) 四面体要素　　(b) ブロック

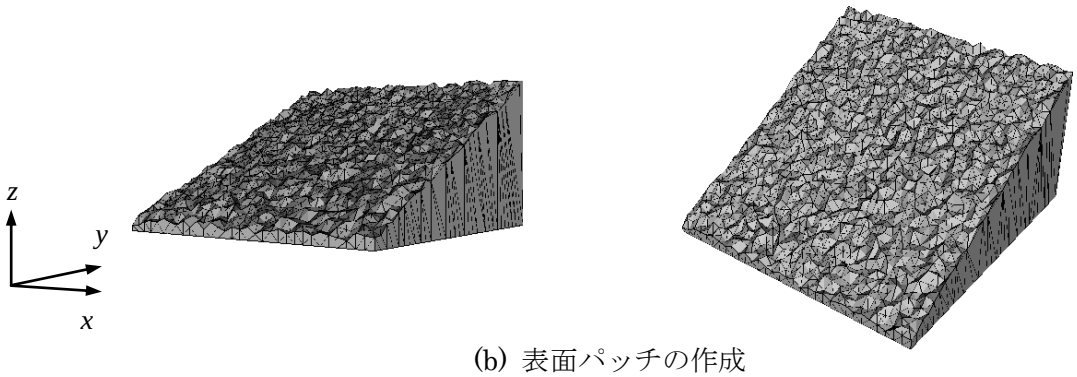
図 2　四面体要素のブロック化

(2) 3次元地形のモデル化

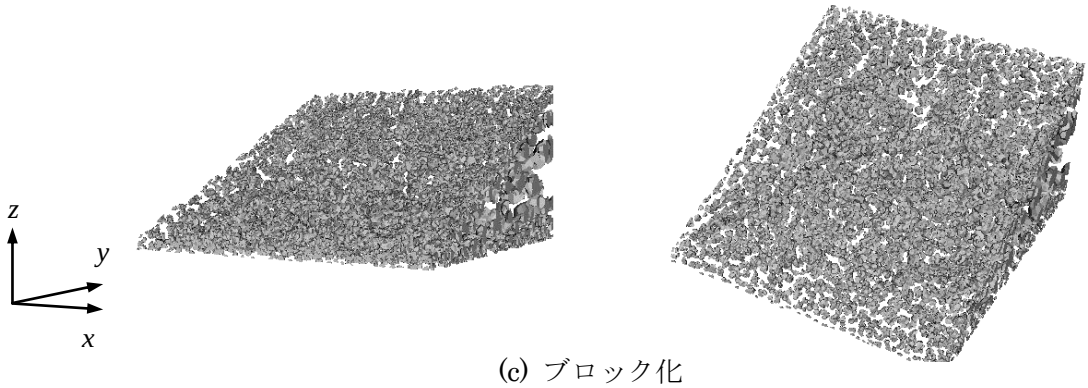
ここでは，3 次元地形のモデル化手法について述べる．モデル化する地形の平面を *x*-*y* 平面とし，高さ方向を *z* 方向とする．まず *x*-*y* 平面の領域を決め，その領域を三角形要素にて分割する．そして，三角形要素の各頂点における *z* 座標に任意の値を与えた平面と，与えていない平面（*z* = 0.0）を作成する（図 3(a)参照）．このとき，三角形要素は 3 次元モデルの表面パッチとなるため，各平面の三角形要素と 2 面の境界における節点同士を結んだ表面パッチを用いて，3 次元地形のモデルにおける表面パッチを作成する（図 3(b)参照）．そして，この表面パッチのデータを用い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



(a) 2 面の *x*-*y* 平面の作成



(b) 表面パッチの作成

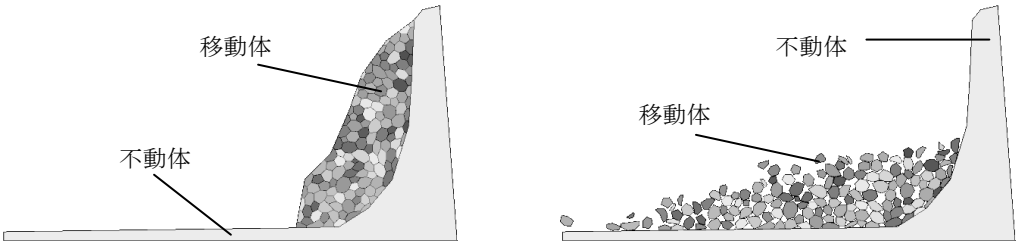


(c) ブロック化

図 3　移動体の生成方法

(3) 不動域の作成

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



(a) 解析モデル　　(b) シミュレーション結果（DDA による）

図 4　2 次元ブロックを用いた地すべり解析の例

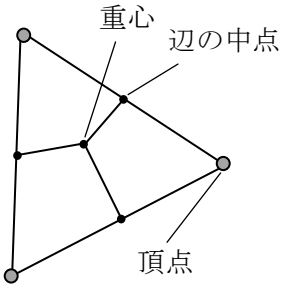


図 5　三角形要素の分割

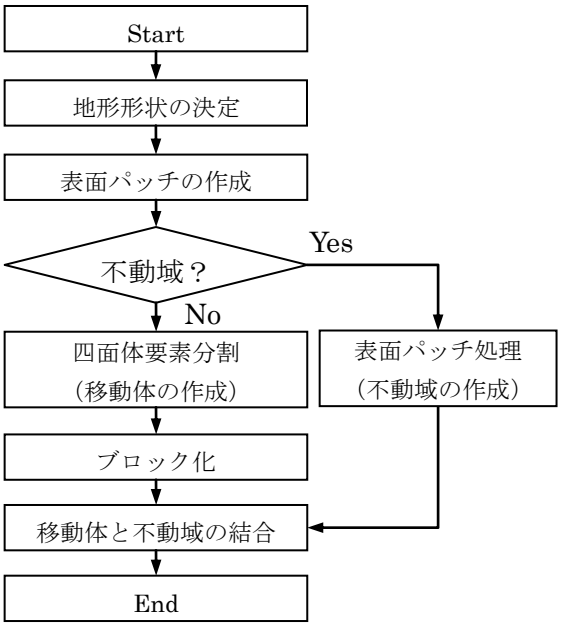
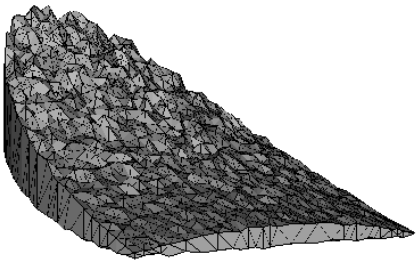
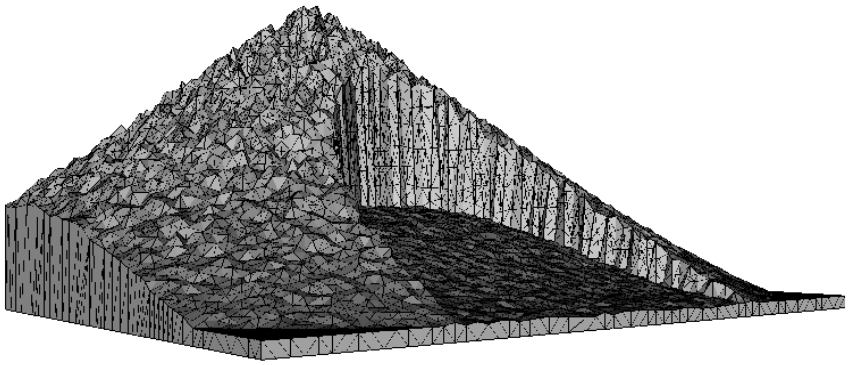


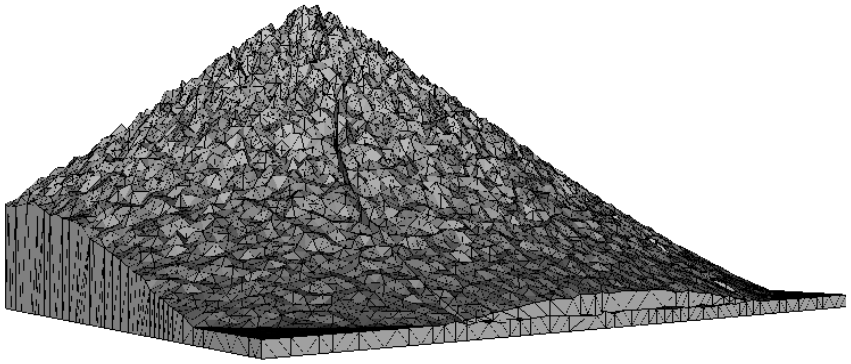
図 6　四面体ブロック化フロー



(a) 移動体（# Block 1267）



(b) 不動域（# Block 1）



(c) 地形モデル（# Block 1268）

図 7　任意形状の地形モデル

（4）平成 24 年度進捗状況

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

参考文献

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

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

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

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

3. 1. 4. 粒子法手法による並列流体−構造連成解析手法

(1)目標・計画

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

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

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

(2)意義・国際社会との比較

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

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

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

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

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

(3)研究内容

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

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

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

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

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

$$\alpha = \tau / \tau' \tag{3}$$

S に対して α は、実験結果より次式のように線形の値をとる結果が得られ、

$$\alpha = 1 - \beta S \tag{4}$$

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

ここで得られた α は、ゲル壁面と水の境界付近における粘性の計算時の重み関数の係数と

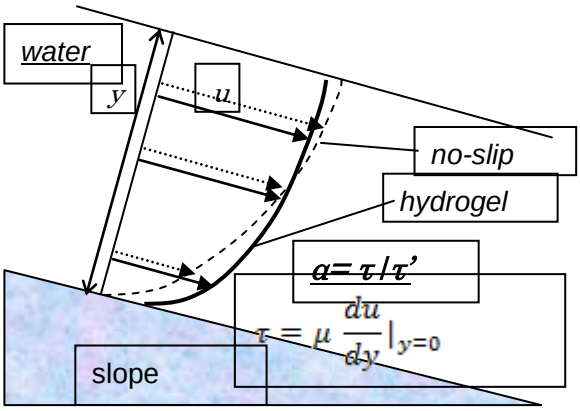


図 1 Definition of slip ratio α and flow on the hydorogel slope. The τ is wall shear stress on the slope with no-slip condition. The τ' is that on the slope with hydrogel (agar).

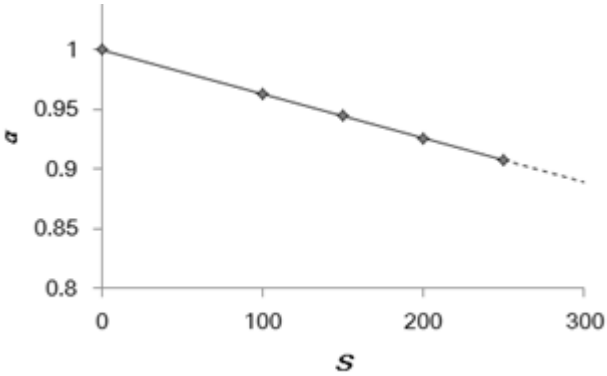


図 2 Relationship of swelling degree S of agar and slip ratio α, which was obtained experimentally.

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

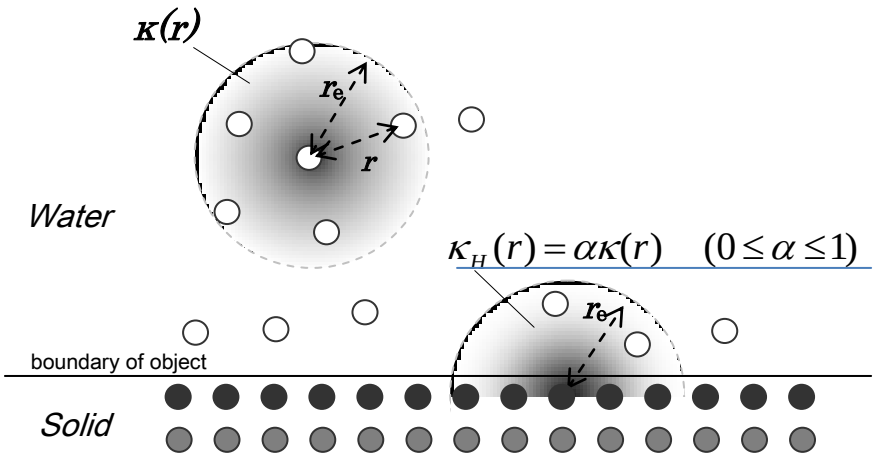


図 3　Difference of weight functions κ_H and κ. The distance between particles denoted by r. The κ_H is used between the particle on the boundary of the hydrogel object and the virtual water particle near the boundary.　Here, κ is used between the other particles, and α is the coordinate as a ratio of κ_H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

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

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

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

(4)平成 24 年度進捗状況

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

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

3.1.5. 振動現象の流体–構造連成解析と自己組織化マップを用いた分類

(1) 目標・計画

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

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

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

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

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

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

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

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

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

(3) 研究内容

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

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

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

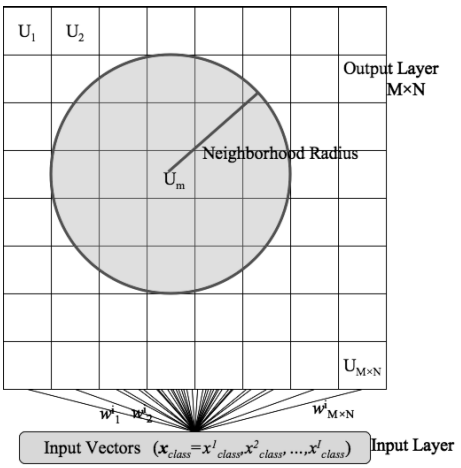


図 1　自己組織化マップ概略図

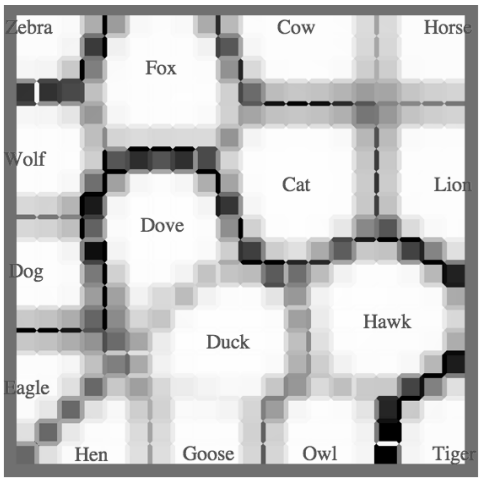


図 2　動物のクラスタリング

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

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

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

$$
\begin{aligned}
&\int_{\Omega} w_i \cdot \rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j u_{i,j} - f_i\right) d\Omega + \int_{\Omega} w_{i,j} \sigma_{ij} d\Omega + \int_{\Omega} q u_{i,j} d\Omega \\
&+ \sum_e \int_{\Omega^e} \tau_{SUPG} u_j w_{i,j} \cdot \left[\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_k u_{i,k} - f_i\right) - \sigma_{ik,k}\right] d\Omega \\
&+ \sum_e \int_{\Omega^e} \tau_{PSPFG} \frac{1}{\rho} q_i \cdot \left[\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_k u_{i,k} - f_i\right) - \sigma_{ik,k}\right] d\Omega \\
&= \int_{\Gamma_h} w_i h_i d\Gamma
\end{aligned}
\tag{1}
$$

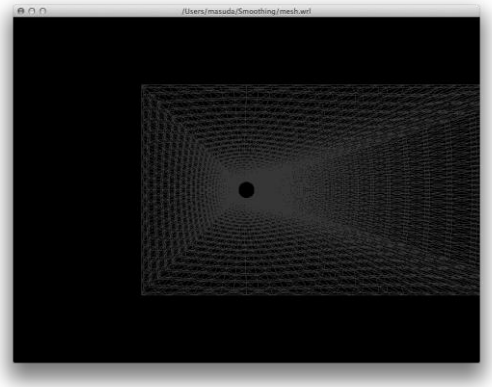
メッシュの移動がうまく扱えられているか，円柱を sin 波で強制振動させて，メッシュの移動がうまく行えているか確かめた．図 3 に強制振動させた円柱周りのメッシュを示す．円柱の移動に伴ってメッシュも移動している．

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

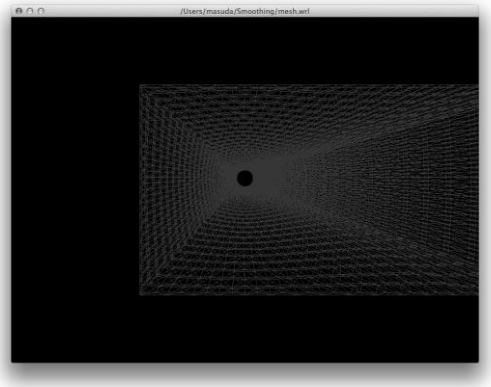
$$
Pos_{new} = Pos_{old} + v dt + \frac{dt^2}{2m}\left(trac - kx\right) \tag{2}
$$

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

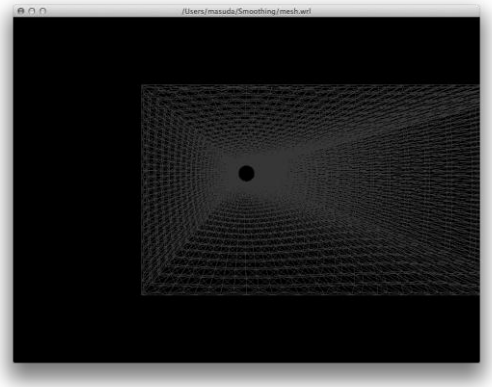
ここで，*Pos* は円柱の中心座標，*v* は円柱の移動速度，*dt* は時間刻み幅，*m* は円柱の質量，*trac* は円柱にかかる流体力，*k* はバネ定数，*x* は円柱の初期位置からの距離を表す．*a* は円柱の加速度である．式(2)より円柱の位置を求め，式(3)により円柱の速度を更新していく．これにより，円柱の運動を表すことができる．



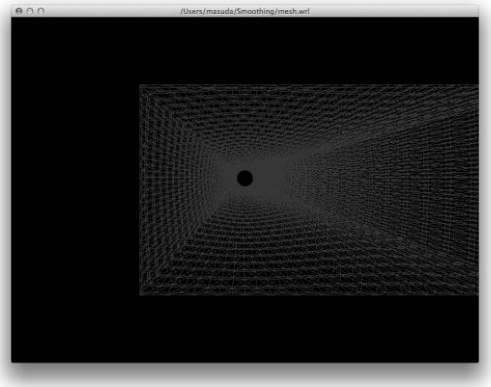
(a) sin 0



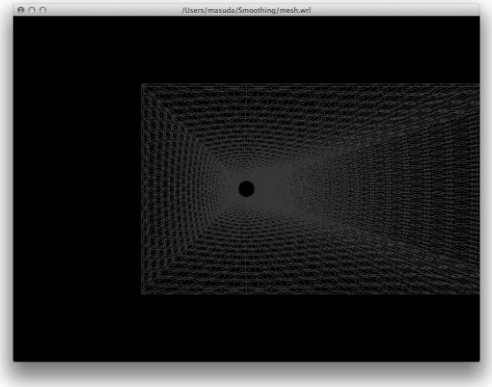
(b) sin 1/4 π



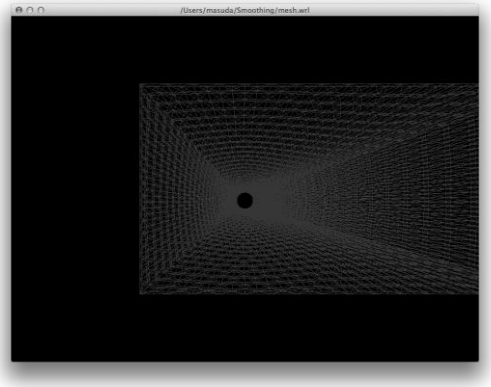
(c) sin 1/2 π



(d) sin 3/4 π



(e) sin π



(f) sin 5/4 π

図 3　メッシュの移動制御

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

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

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

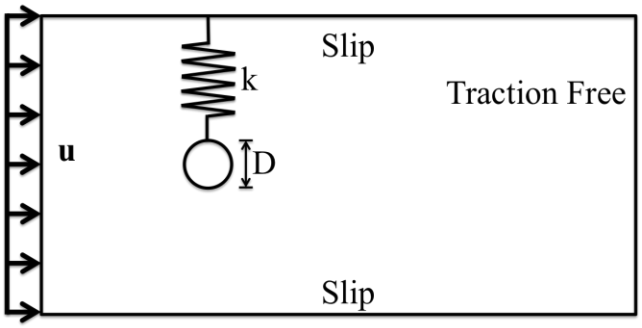


図 4　解析モデル(イメージ)

（4）平成 24 年度進捗状況

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

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

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

3.2. 大規模並列化グループ

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

今年度は，以下の項目について報告を行う.

(1) 大規模構造物中のき裂の 3 次元自動進展解析

(2) ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

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

3.2.1. 大規模構造物中のき裂の３次元自動進展解析

（１）目標・計画

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

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

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

目標は，下記 2 つの技術の確立である．

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

（２）意義・国際社会との比較

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

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

（３）研究内容

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

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

（A）VCCM を用いた三次元き裂の応力拡大係数算出に関わる研究

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

（B）三次元自動き裂進展解析システムの開発

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

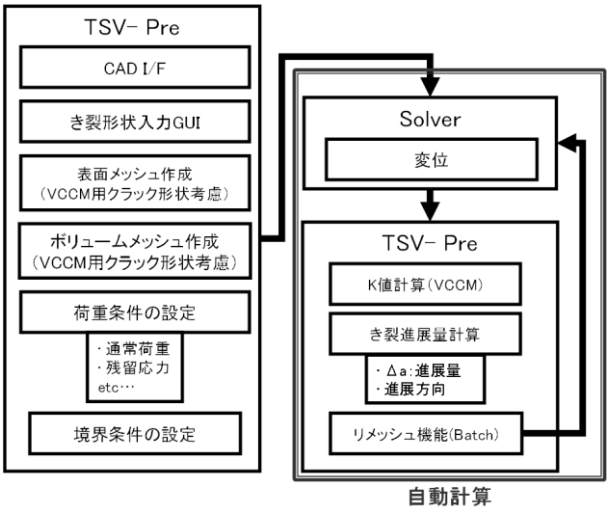


図 1 自動き裂進展解析システム フロー

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

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

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

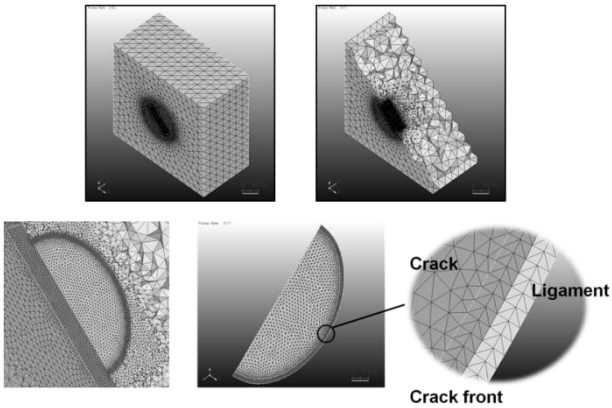


図 2 初期き裂メッシュモデル

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

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

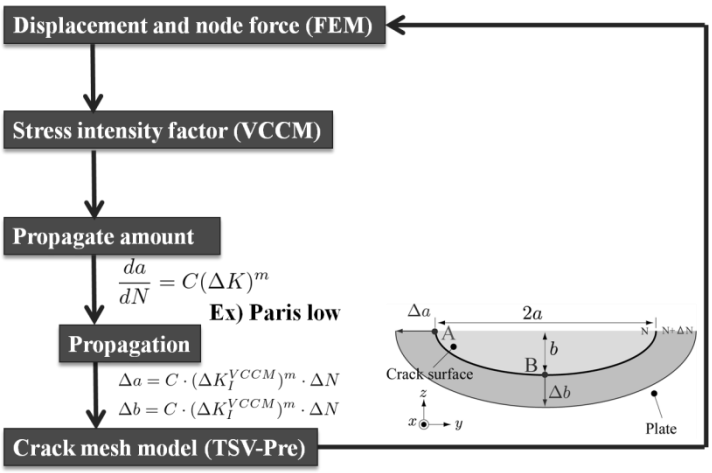


図 3 き裂進展計算フロー

（C）溶接残留応力場における二次元き裂進展解析

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

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

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

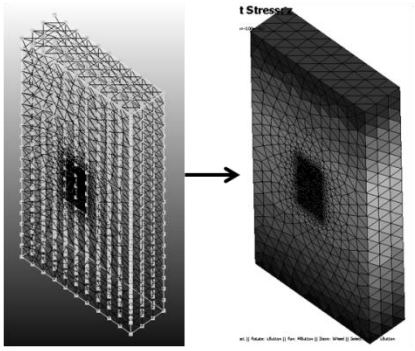


図 4 残留応力のマッピング

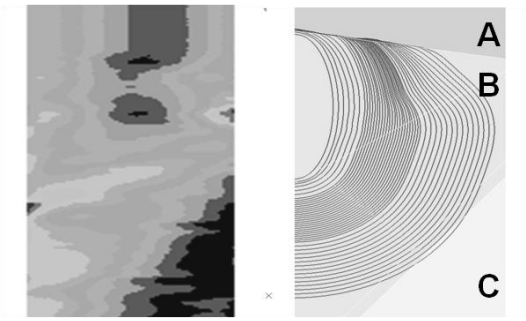


図 5 模擬残留応力場，き裂進展軌跡

（4）平成 24 年度進捗状況

上記の自動き裂進展解析システム開発に対して，進捗状況は以下の通りである．

・3 次元き裂進展解析への適用

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

（例）半楕円表面き裂問題の解析

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

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

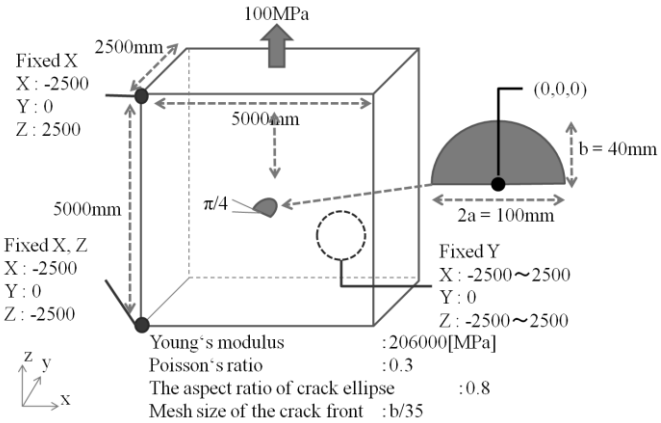


図 6 半楕円表面き裂モデル

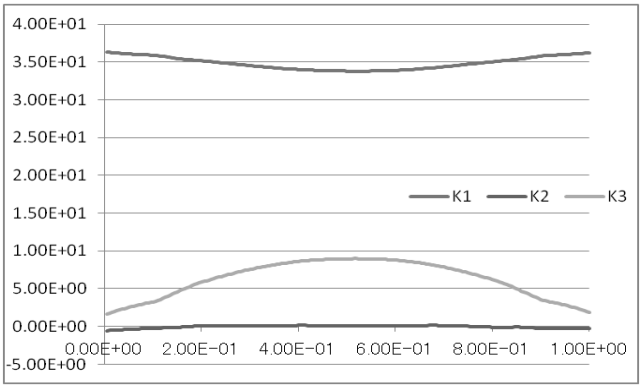


図 7 正規化応力拡大係数

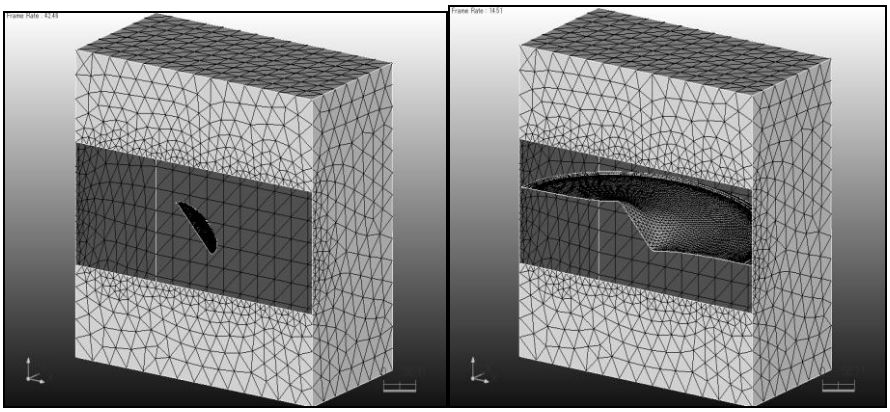


図 8 3 次元き裂進展解析

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

参考文献

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

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

（1）目標・計画

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

（2）意義・国際社会との比較

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

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

（3）研究内容

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

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

B）DDM ソルバーライブラリ

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

これは，

・多階層領域分割に基づく分散メモリ並列向け線形代数ソルバーの構築

・多階層領域分割に基づくマルチレベルコースグリッド修正法の開発

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

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

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

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

（4）平成 24 年度進捗状況

A）DDM 入出力ライブラリ

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

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

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

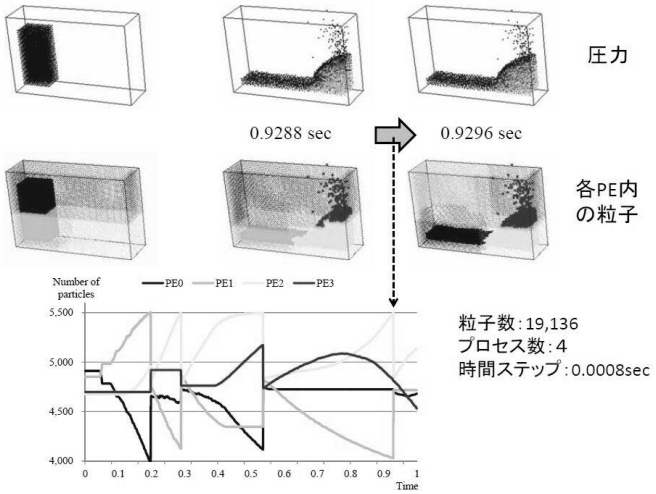


図 1 メッシュフリー向け領域分割ライブラリによる動的負荷分散例

B）DDM ソルバーライブラリ

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

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

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

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

C） 連続体力学向け DSL

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

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

D） 連続体力学系シミュレータ

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

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

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

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

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

3.3. 新規実験計測グループ

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

3.3.1. 物性データ交換のためのデータ表現形式の検討

（1）目標・計画

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

（2）意義・国際社会との比較

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

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

（3）研究内容

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

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

活用されており、開発者として協力している。

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

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

（4）平成 24 年度進捗状況

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

3.3.2. ドット重心追跡法による変位・ひずみ場解析（古川先生）

(1) 目標･計画

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

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

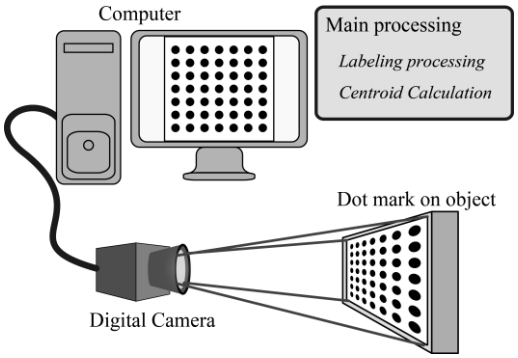


Fig. 1 System of Dot centroid method

(2) 研究内容，

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

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

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

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

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

また，画像座標は，式(1)のレンズひずみを受け，式(3)のように示される．

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

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

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

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

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

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

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

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

(3) 平成 24 年度進捗状況

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

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

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

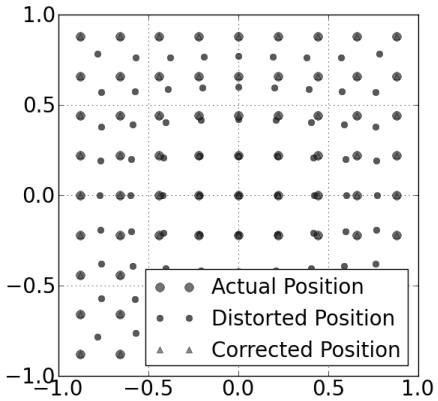


Fig. 2 Result of numerical inverse transformation

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

ッシュを作成した．その結果を図 4 に示す.

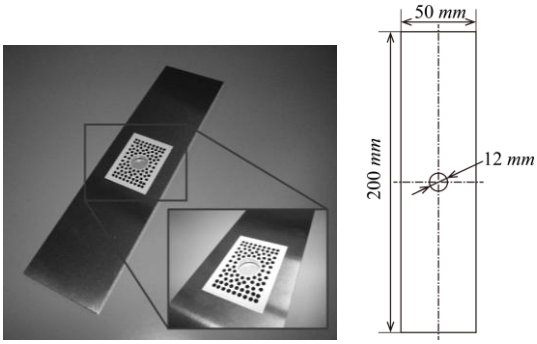


Fig. 3 Specimen and dot mark sheet

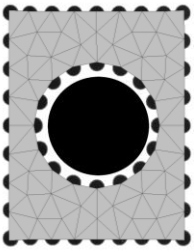
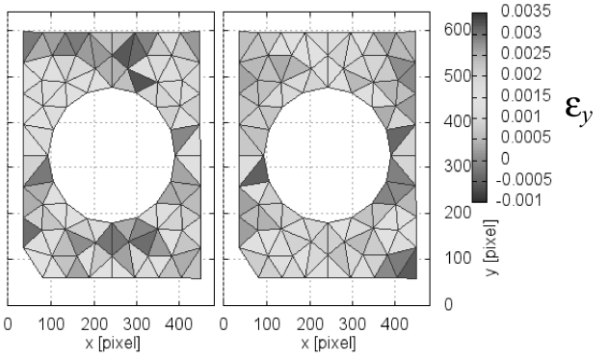


Fig. 4 Mesh by centroids of captured dots

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



5-a Distorted　　5-b Corrected

Fig. 5 Measurement result of strain field

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

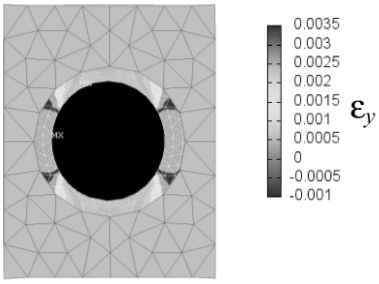


Fig. 6 Calculated result of strain field by ANSYS

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

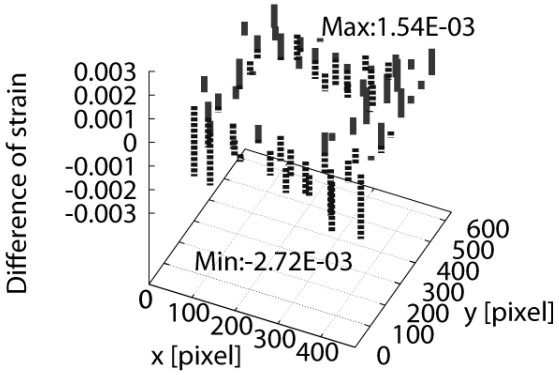


Fig. 7 Difference of strain between distorted result and collected result

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

参考文献

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

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

Correlation Method", JSME

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

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

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

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

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

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

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

3.3.3. 流体−構造連成解析の検証用風洞実験システムの整備

(1) 目標・計画

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

(3) 研究内容

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

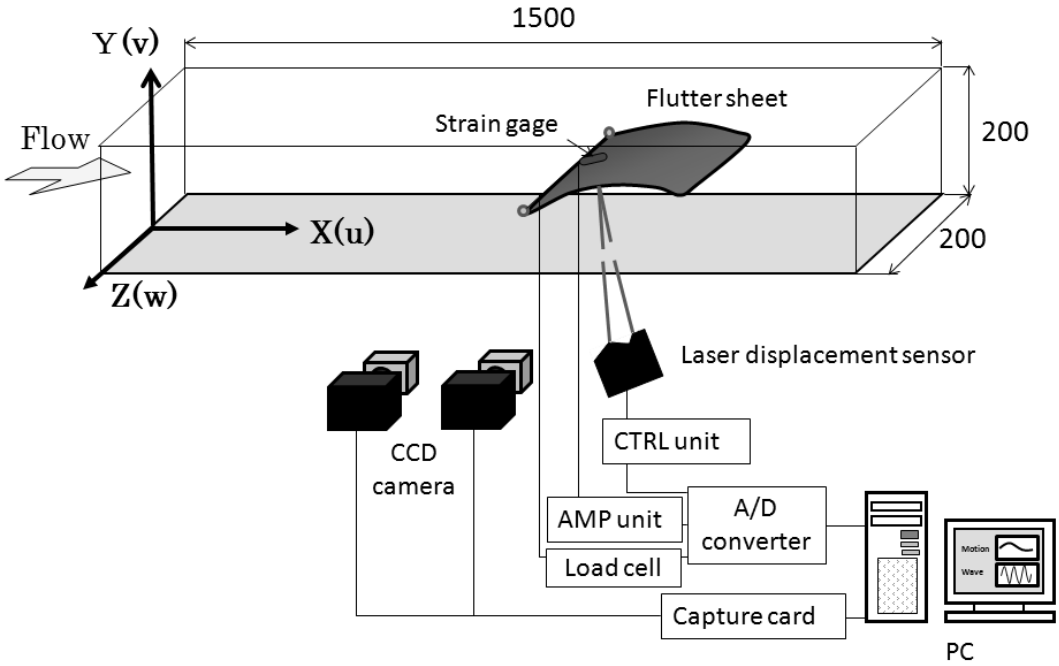


図1 風洞試験装置システム

現在予定している実験内容は以下の通りである．

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

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

(4) 平成 24 年度進捗状況

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

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

3. 3. 4. 境界層特性評価のための普遍関数構築

(1) 目標・計画

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

(3) 研究内容

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

(4) 平成 24 年度進捗状況

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

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

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

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

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

すべてのデータを使用した．

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

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

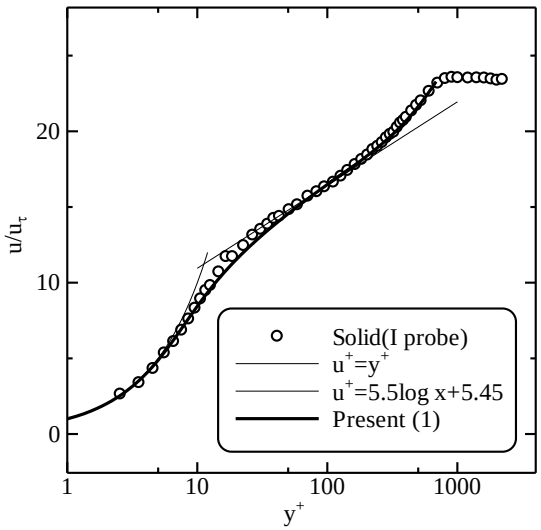


Fig.1　Logarithmic velocity profile (Eq. (1)).

Table. 1　Comparison of skin friction coefficient.

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

3.3.5. 熱線流速計の温度依存性に関する検討

(1) 目標・計画

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

(2) 意義･国際社会との比較

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

(3) 研究内容

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

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

(4) 平成 24 年度進捗状況

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

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

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

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

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

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

$$
\begin{aligned}
E^2 &= (T_w - T_f)\,(B' + C'U^n) \\
&= B(T_f) + C(T_f)\,U^n
\end{aligned}
\tag{3}
$$

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

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

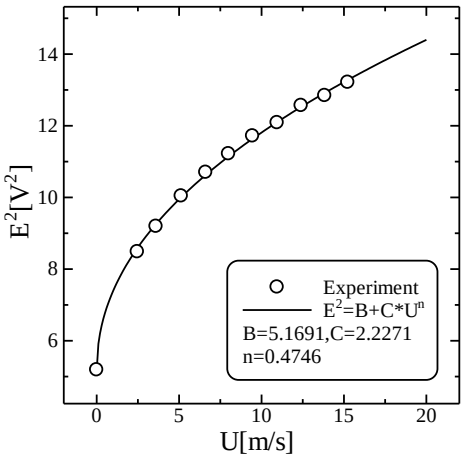


Fig.1　Calibration curve.

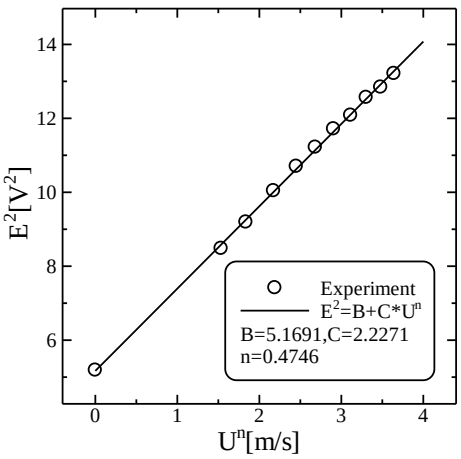


Fig.2　Linearlized calibration curve.

3.4. 精度・妥当性検証グループ

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

3.4.1. 最適化技術

(1) 目標･計画

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

(2) 意義･国際社会との比較

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

(3) 研究内容

(a) 確率的メタモデルによる大域的最適化

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

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

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

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

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

実験結果は表 1 の通りとなった．

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

表 1　　手法の比較実験の結果

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

(b) 圧力容器の補強の最適化

A1 序言

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

A2 解析ソフト

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

A3 解析モデル

ワイヤーを巻いた水素タンクのイメージは図 1 に示す。

寸法は丸い部分の寸法である

Fig. 1 Analysis model

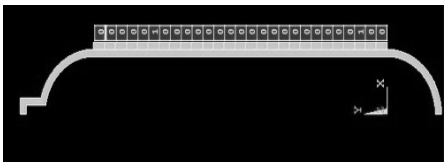


Fig.2 Mesh for GA

A4 手法 1 遺伝的アルゴリズム

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

る手法である.

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

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

図３は遺伝的アルゴリズム手法で解析した結果である。

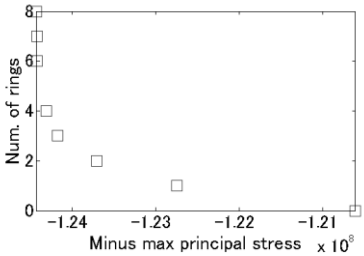


Fig. 3　Result of GA

A5 手法２Efficient Global Optimization (EGO)

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

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

図４はワイヤが４本の場合の結果である。

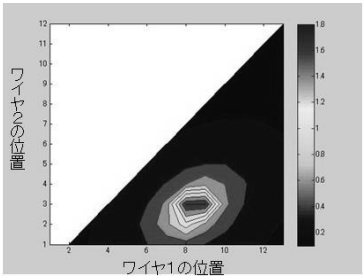


Fig. 4　　Result of EI

A6　まとめ

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

(c) フラクタル構造物の構造最適化

A1 諸言

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

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

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

A2 解析シミュレーション

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

A3 解析モデル

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

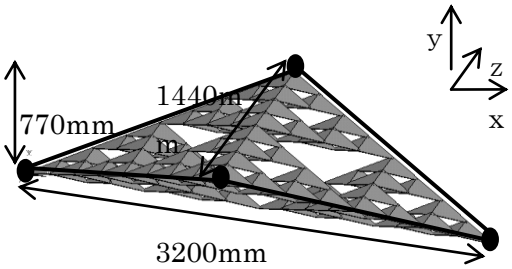


Fig1. Model with Sierpinski Tetrahedrons

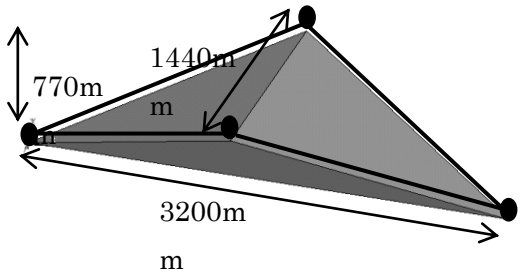


Fig2.Model with Tetrahedron

A4 等価

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

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

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

現在，本手法による検証実験を行っている.

(4) 平成 24 年度進捗状況

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

3.5. 可視化検証グループ

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

・解析結果を正しく理解し，評価すること

・実験結果等と公正な比較を行うこと

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

3.5.1. ３次元画像による定量的・定性的検証

(1) 目標・計画

本研究の目標は，流体構造連成問題について，数値解析の精度検証を支援するための，画像による定量評価，定性評価の手法やシステムを開発し，本プロジェクトで開発される連成解析手法の評価に供することである。特に，バーチャルリアリティ（VR）技術を利用した３次元可視化システムを中心に３次元画像による可視化評価を中心に研究を進める。
大きな計画としては，
平成 24 年度：
表示装置となる VR 装置の導入を行い，ハードウェアの準備を行う。
平成 25 年度：
VR 装置の上でソフトウェアを開発し，PC クラスタと結合してこの上での解析結果の表示を行う。
平成 26 年度：
画像による検証に利用するための可視化システムを VR 装置上で開発する。
平成 27 年度：
積極的に可視化による比較・検証を行う。特に，（立体）画像を用い，実験と解析の可視化画像を重ねたり，並べたりして効果的な比較・検証方法について検討する。
平成 28 年度：
研究をまとめ，その公開方法について検討する。
としている。これらにより，従来とは異なる，多彩な可視化により，直感的・効果的な比較・検証が可能となり，開発される連成解析手法をより多面的に評価できると考える。

(2) 意義･国際社会との比較

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

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

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

(3) 研究内容

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

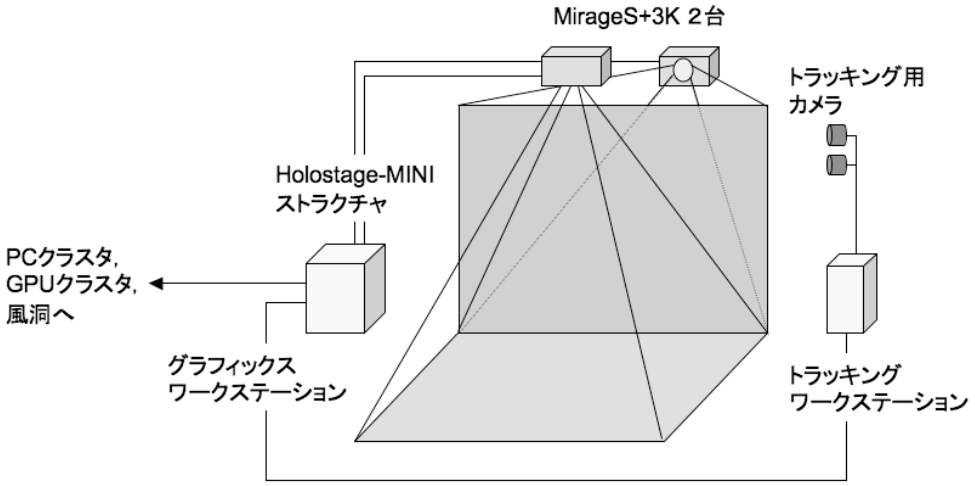


図１　システム構成図

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

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

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

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

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

(4) 平成 24 年度進捗状況

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

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

図２　VR 装置全体。正面の映像は背面から投影する。

図３　グラフィックスワークステーションのマスタ

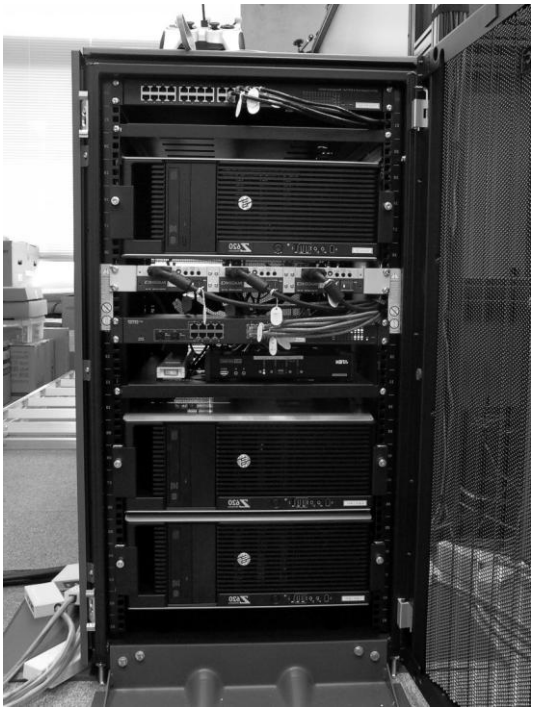


図４　グラフィックスワークステーション２台とトラッキングワークステーション

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

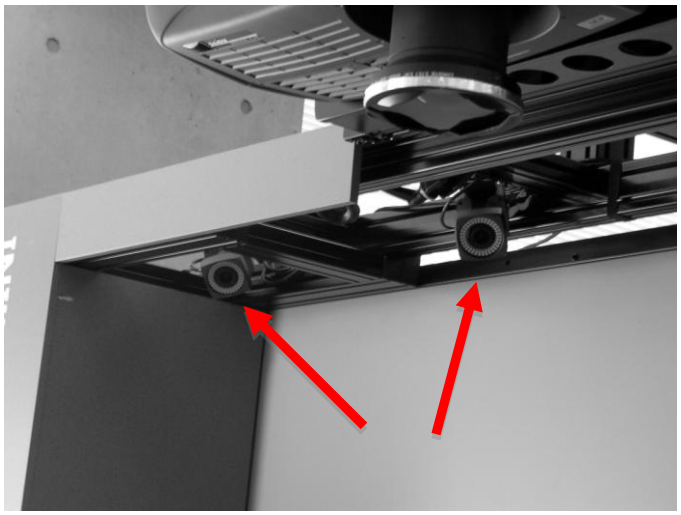


図５　トラッキング用赤外線カメラ（４台のうちの２台）

図６　コントローラと液晶シャッター眼鏡およびマーカ

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

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

3.6. 横断的研究会

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

3.6.1. 連成標準問題検討会

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

3.6.2. 計算力学と（材料）データベースの会

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

3.6.3. 楽器の流体（音響）構造連成研究会

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

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

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

4.1.1. 研究内容

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

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

どだけではない，根本的なデータ量削減に関する解決策が求められる．

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

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

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

C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

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

4.1.2. 研究実施体制

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

(1)「東洋大学」グループ

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

(2)「名古屋大学」グループ

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

(3)「東京大学」グループ

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

5. 国際協力

5. 1. バージニア工科大学

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

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

6. 情報発信

6.1. 第 15 回計算力学フォーラム（サンパウロ）

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

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

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

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

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

図１　会場入り口の様子

6.2. 第 16 回計算力学フォーラム（JSME CMD / 神戸）

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

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

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

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

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

図 1　会場の様子

図 2 懇親会の様子

6.3. 第 17 回計算力学フォーラム（ICCM / ゴールドコースト）

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

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

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

・　Optimal design of centrifugal pumps impeller

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

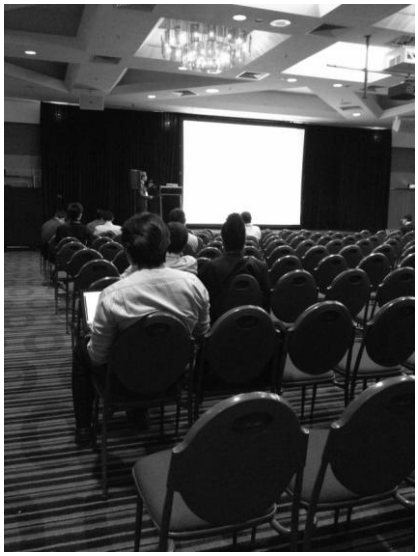


図１　会場の様子

7. 教育活動

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

7.1. 教育活動風景

田村研究室

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

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

図 1. セミナー風景

矢川研究室

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

図 2. 3 次元き裂進展解析

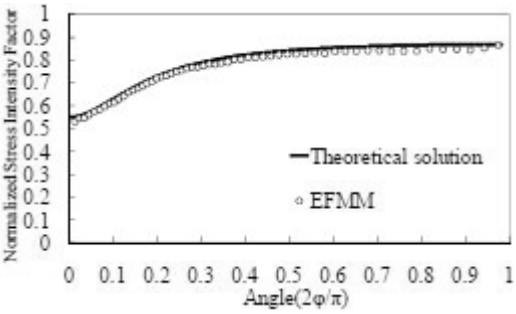


図 3. 解析精度検証結果

江澤研究室

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

図 4. セミナー風景

図 5. 卒業論文の研究風景

塩谷研究室

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

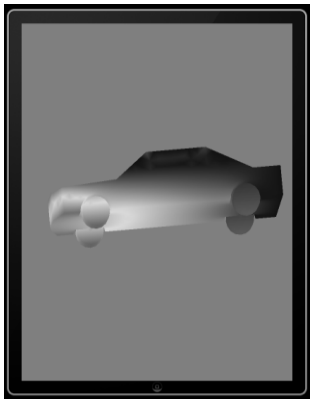


図 6. 携帯端末上での可視化の様子

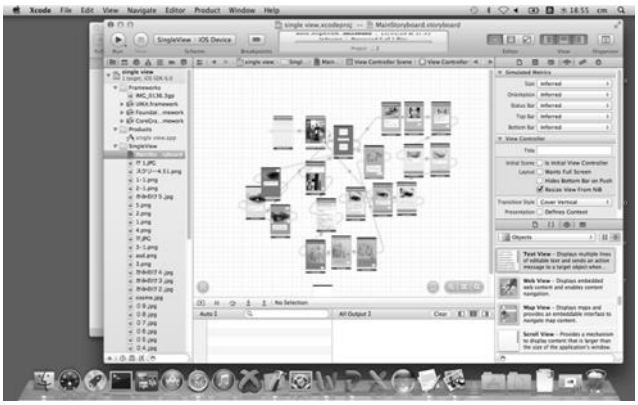


図 7. アプリ設計画面

中林研究室

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

図 8. 研究室の様子

図 9. 研究発表会

7.2. 卒業論文・修士論文の紹介

田村研究室

⑴　画像に基づく流体解析手法の開発

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

⑵　医療分野での流体解析技術の利用

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

⑶　混相流の解析手法の開発

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

江澤研究室

(1) 震災時における机の最適化

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

(2) 位相最適化を用いたローラーチェーンのプレート形状最適化

自転車のローラーチェーンのプレートの形状最適化を行った。

(3) ゲームプログラミングの最適化

オセロゲームの強さを高めるために、各種パラメータの最適化を行った。

(4) 圧力容器の効率的解析技術と最適化技術の開発

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

塩谷研究室

(1) マルチメディアデバイスを用いたシミュレーション

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

(2) ネットワーク型 CAE ソフトウェアの開発

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

(3) Windows 版熱伝導解析モジュール開発

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

中林研究室

(1) スマートフォン用アプリケーションの企画・デザイン・開発

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

(2) ニューラルネットワークを用いた予測システムの開発

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

(3) 自己組織化マップの応用に関する研究

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

8. 業績リスト

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

8.1. 総説・解説・エッセイ

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

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

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

4. 矢川元基, 高橋桂子, "巻頭言：福島原子力事故、シミュレーションおよびその発言", 学術の動向, Vol.17, 2012

5. 田村善昭, 鶴見伸夫, "気泡を含む水中における集束超音波の数値解析＝超音波治療への応用を目指して＝", 超音波 TECHNO, VOL. 24, No. 4, pp. 46-51, 2012.7-8

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

8.2. 論文

1. M.MASUDA, Y.NAKABAYASHI and G.YAGAWA, "Radius Parallel Self-Organizing Map", Journal of Computational Science and Technology, Vol.6, pp.16-27, 2012

2. H.HIRAI, M.CHIBA, M.ABE, T.IKEDA and N.MIYAZAKI, "Stress Intensity Factor Analysis of an Interfacial Corner between Piezoelectric Bimaterials using the H-integral Method", Engineering Fracture Mechanics, Vol.82, No.1, pp.60-72, 2012

3. R.IMAI and M.NAKAGAWA, "A Reduction Algorithm of Contact Problems for Core Seismic Analysis of Fast Breeder Reactors", CMES:Computer Modeling in Engineering and Sciences,Vol.84,No.3,253-282, 2012

4. N.TSURUMI, Y.TAMURA and Y.MATSUMOTO, "Improvement of Bubble Model in High Void Fraction for Cavitating Flow Simulations", Journal of Computational Science and Technology, Volume 6, No 3, pp. 113-128, 2012

5. T.ASHINO and Y. YAMASHITA, "Development of an Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering ", Data Science Journal, 11 (2012) PASMD17-ASMD21, 2012

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

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

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

9. 増田正人，中林 靖，矢川元基, "フリーキックサポートシステムの開発"，計算工学会論文集, No.20120009, 2012 年

10. 関 章一, 松本龍介, 井上義規, 武富紳也, 宮崎則幸, "類似的に水素の影響を考慮した鉄 EAM ポテンシャルの作成と水素ぜい化の分子動力学シミュレーション", 材料, 第 61 巻 2 号, pp.175-182, 2012 年 2 月

11. 松原 仁, 原 久夫, "風化サンゴ骨格の破壊強度とその性状：微細孔と孔内液圧の影響", 土木学会論文集 C（地圏工学）, Vol. 68, No. 4, pp. 610-620, 2012 年 10 月

12. 松原 仁, 江戸孝昭, 原 久夫, 伊良波 繁雄, "捩り外力を受ける環状切欠き丸棒におけるファクトリールーフ状破断面の形成メカニズムに関する数値解析的検討", 日本計算工学論文集, No. 20120016, 2012 年 11 月

13. 松原 仁, 江戸孝昭, 原 久夫, "岩盤のき裂ネットワークを考慮した不連続体解析手法の提案およびき裂進展解析", 日本計算工学論文集, No.20120017, 2012 年 12 月

14. 鶴見伸夫, 田村善昭, 松本洋一郎, "音波伝播の式を用いた気泡を含む液体中を伝播する集束超音波の数値解析", 日本機械学会論文集 B 編第 78 巻第 796 号, pp. 2096-2112, 2012 年 12 月

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

8. 3. 招待講演

1. G.YAGAWA, "An Efficient Domain Decomposition Algorithm for Fe Simulation", The Colloquium on Advances in Computational Science, Engineering and mathematics in honor of Tinsley Oden's 75th birthday, Univ.Texas at Austin, USA, 2012.1.19

2. Y.EZAWA, S.SHIMAMURA, K.SUGA and S.AOKI, "Effects of Material Properties of Cue on Ball Trajectory in Billiard", The 4th International Conference on Advanced Manufacturing, Taiwan, 2012.3.4-8

3. G.YAGAWA, "Memories of Ptofessor Y.J.Kim", ASINCO9 (Kaohsuing, Taiwan), 2012.4.19

4. G.YAGAWA, "Some Remarks on Domain Decomposition Algorithm for FE Simulation", Celebration Meeting of the FEM Class of 42 Fellows (Barcelona, Spain), 2012.5.8

5. G.YAGAWA, "Some Strategies for High-performance FEM", ESI Global Executive Meeting (Amagi, Japan), 2012.5.22

6. K.SAKIHARA, H.MATSUBARA and G.YAGAWA, "An Application of Multi-dimensional Moving Least Squares Method to 3D Crack Analysi", 10th World Congress on Computational Mechanics (Sao Paulo, Brazil), 2012.7.10

7. G.YAGAWA, "Some considerations on high performance computational mechanics", The JSME-CMD International Computational Mechanics Symposium (ICMS) (Kobe, Japan), 2012.10.11

8. G.YAGAWA, "Preliminary study for exascale computing in Japan", Second international workshop on "COllaborative DEvelopment of SImulation software of next GeNeration (CO-DESIGN 2012)" (Peking University, Beijing, China), 2012.10.23-25

9. G.YAGAWA, "Recent advances on simulation technology", ESI Users' Forum Japan 2012 (Tokyo, Japan), 2012.11.21

10. 藤澤智光, "防災分野におけるシミュレーション CG の効用と課題", 第 1 回 S&V(Simulation & Visualization)研究会, 日本計算工学会, 中央大学, 2012.3.2

11. 矢川元基, "福島原子力事故の総合工学的観点", 第 2 回「量子ビームを用いた材料・生体の構造と機能の研究」成果報告会（いばらき量子ビーム研究センター、東海村、茨城), 2012.3.16

12. 矢川元基, "計算科学技術における我が国の貢献", 日本学術会議第３回計算科学シミュレーションシンポジウム（東京), 2012.4.25

13. 芦野俊宏, "国際材料データベースの事例と課題", 日本地球惑星科学連合 2012 年大会 地球電磁気・地球惑星圏学会 データ問題検討分科会, 2012.5.22

14. 矢川元基, "計算科学技術に関する２， ３の課題", 第 24 回 CCSE ワークショップ（柏), 2012.6.19

15. 矢川元基, "計算力学シミュレーションの現状と課題", ADVENTURECluster ユーザー会 （東京), 2012.6.27

16. 藤澤智光, "MPS 法による津波シミュレーション", フォーラム 6 防災・減災にむけて計算力学はいかに貢献できるか,第 24 回計算力学講演会, 岡山大学, 2012.10.10

17. 藤松信義, "技術をどのように伝えるか", 日本実験力学会 産学連携支援センター主催パネルディスカッションー実験技術を語るー, 2012.12.15

8. 4. 講演論文・口頭発表

1. T. IKEDA, M. OKA, S. KAWAHARA, N. MIYAZAKI, K. MATSUMOTO, S. KOHARA, Y. ORII, F. YAMADA and M. KADA, "Combination between the Nonlinear Finite Element Analyses and the Strain Measurement Using the Digital Image Correlation for a New 3D SIC Package", IEEE International 3D System Integration Conference (3DIC), Osaka, Japan, 2012.2.1

2. A.M.M.MUKADDES, "Performance of Domain Decomposition Method with Sparse Matrix Storage Scheme", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

3. T.ASHINO and Y.YAMASHITA, "Development of Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering", The 3rd Asian Materials Database Symposium, AMDS 2012, Japan Nara, 2012.4.17

4. Hitoshi MATSUBARA, Taka-aki EDO, Ryuji SHIOYA and Genki YAGAWA, "Large-scale simulation for fracture pattern of brittle porous media in Compression", Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), 2012.7

5. Kohei SAKIHARA, Hitoshi MATSUBARA, Ryuji SHIOYA and Genki YAGAWA, "An application of Multi-dimensional moving least squares method to 3D crack analysis", Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), 2012.7

6. I.ISHIKAWA, Y.KOBAYASHI, R.SHIOYA, R.NAKAOKA, A.MATSUOKA, G.YAGAWA, "Development of Structural Eigenanalysis Module for The Adventure System", The 10th WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS (WCCM 2012), 19719.pdf, SaoPaulo, Brazil, 2012.7.9

7. M. FUKAYA, R. MORINAKA, N. SAITOU, H. HATOU, Y. TAMURA, Y. MATSUMOTO, "Cavitating Jet Simulation for Predicting Residual Stress Improvement of cylindrical Structure by Water Jet Peening", 8th International Sympusium on Cavitation, Singapore, 2012.8

8. Y. TAMURA, N. TSURUMI, Y. MATSUMOTO, " Further Improvement of Bubble Model for Cavitating Flow Simulations", 8th International Sympusium on Cavitation, Singapore, 2012.8

9. Kaworu YODO, Ryuji SHIOYA, Akio MIYOSHI, Takuru ASAUMI, " Parallel CAE System for Large Scale Problems Based on HTML5 and WebGL", DETC2012-70909, pp.1-7, Proceedings of the 2012 International Desigh Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2012, August 12-15, Chicago, Illinois, USA, 2012.8.14

10. Kaworu YODO, Hiroshi KAWAI, Hiroshi OKADA, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, "Development of The Next-Generation Computational Fracture Mechanics Simulator on The Earth Simulator 2", DETC2012-70909, pp.1-7, Proceedings of the 2012 International Desigh Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2012, August 12-15, Chicago, Illinois, USA, 2012.8.15

11. Hitoshi MATSUBARA, "Numerical simulation of fracture network in rock based on GFEM and MLSM", KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2012, pp.227-231, 2012.9

12. T.ASHINO, "Development of Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering", 日本学術会議主催学術フォーラム「データと発見-Data Intensive Scientific Discovery」, 2012.9.10

13. N. TSURUMI, Y. TAMURA, Y. MATSUMOTO, "Numerical Simulation of Wave Propagation in Two-Phase Fluid", European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering (ECCOMAS 2012), Vienna, Austria, 2012.9.10-14

14. Y.EZAWA, S.TAKASHIMIZU, "Novel infill criterion for stochastic metamodel-based optimization", ECCOMAS 2012 - European Congress on Computational Methods in Sciences and Engineering, 2012.9.11

15. T.ASHINO, "Electronic Data Exchange for Materials Science and Engineering", IUMRS-ICEM 2012,Yokohama, Japan, 2012.9.27

16. A.M.M.MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, " A Computational Study of Sparse Matrix Storage Schemes in The Domain Decomposition Method", Proceedings of 25th JSME Computational Division Conference, Kobe, Japan, 2012.10.6

17. A.M.M.MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, "ADVENTURE _Thermal-An Open Source Module for Large Scale Heat Conduction Problems", PUCDIP 2012, Kyusyu, Japan, 2012.10.13

18. Toshihiro ASHINO, "Data and Expressions for Science and Engineering into e-Journal", 23nd International CODATA Conference, Taipei, Oct., 2012

19. Hitoshi MATSUBARA, Takaaki EDO and Hisao HARA, "Crack Propagation Model for Discrete Fracture Network based on GFEM and MLSM", Proceedings of the 4th international conference on computational methods, 2012.11

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

21. 大橋秀樹, 浅海拓来, 塩谷隆二, "スマートフォン端末を用いた CAE 可視化システム", HPCS2012, 名古屋大学, 2012.1.26

22. 岡大智, 池田徹, 宮崎則幸, "デジタル画像相関法によるひずみ計測を用いた三次元積層チップの微細接合部のひずみ評価",第 18 回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム（Mate 2012), 横浜市, 2012.1.31

23. 小林陽介, 矢川元基, " 3 次元き裂の自動進展解析",第 61 回理論応用力学講演会, 東京大学, 2012.3.7-9

24. 松尾友紀, 伊倉宏治, 田村善昭, "圧縮性気液二相流の数値解析手法の開発",日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会, 日本大学生産工学部（千葉）, 2012.3.9-10

25. 小俣慎弥, 田村善昭, "ダリウス形風車まわりの流体解析",日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会, 日本大学生産工学部（千葉）, 2012.3.9-10

26. 小金丸正明, 多田直弘, 池田　徹, 宮崎則幸, "HyENEXSS を用いた N 型半導体における機械的応力効果のシミュレーション",応用物理学会関西支部セミナー : 先端半導体デバイスのシミュレーション, 吹田市, 2012.3.27

27. 芦野俊宏, "材料データ交換の標準化 : CEN WS SERES の概要", CCMR-HDDMPPS（CREST プロジェクト）合同シンポジウム, 2012.3.29

28. 長岡慎介, "流体-構造連成解析の為の新しい解析手法とその応用例", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

29. 小林陽介, "き裂の 3 次元自動進展解析", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

30. 中川雅俊, "高速炉の炉心群振動解析手法の研究", ", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

31. 宮崎則幸, α鉄中の転位射出に及ぼす水素の影響", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

32. 江澤良孝, "最適デザインの効率化について", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

33. 藤澤智光, "防災シミュレーションと CG", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

34. 中林靖, "リアルタイムシミュレーションの防災への応用", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

35. 田村善昭, "キャビテーション/エロージョンの数値予測 ", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

36. 塩谷隆二, "ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解放ライブラリ開発", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

37. 松原仁, "多孔質体の圧縮破壊パターンに関する数値解析的検討", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

38. 矢川元基, "東電原子力事故調査と計算力学", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29

39. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, "領域分割法における BDD 前処理のための並列直接ソルバーの開発", 第 15 回計算工学講演会, Vol.15, No.1, pp.191-192, 2012.5.27

40. 江戸孝昭，松原仁，原久夫, "先在き裂を考慮したき裂進展シミュレーション", 第 2 回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会概要集，pp.95-96, 2012.9

41. 江戸孝昭，松原仁，原久夫, "脆性材料のき裂進展シミュレーション : 先在き裂と破壊プロセスの関連性", 土木学会第 67 回年次学術講演概要集，pp.339-340, 2012.9

42. 広瀬孝三郎，松原仁，江戸孝昭，原久夫, "き裂ネットワークモデルを用いたき裂性岩盤における物質移動シミュレーション", 土木学会第 67 回年次学術講演概要集，pp.353-354, 2012.9

43. 横山真男, 窪田佳寛, 望月修, "突入物体の表面性状を考慮したスプラッシュの数値シミュレーション", 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012.9.10

44. 藤松信義, "Wavelet 基底に基づく VITA 法による乱流渦運動解析", 日本機械学会 2012 年度年次大会, (CD-ROM Proceedings), J054042, 2012.9.10

45. 藤松信義, "乱流摩擦抵抗低減効果と粘弾性皮膜運動に関する数値的研究", 日本機械学会 2012 年度年次大会, (CD-ROM Proceedings), J054046, 2012.9.10

46. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "ハイドロゲル壁面近傍における流れの数値シミュレーション", 日本流体力学会年会 2012, 2012.9.17

47. 石川格，小林陽介，塩谷隆二，矢川元基, "ADVENTURE 固有値解析モジュールの開発", 第 25 回計算力学講演会、407、神戸, 2012.10

48. 松原仁, "光外乱が亜熱帯生物の定着に及ぼす影響", 平成 24 年度沖縄しまたて協会技術環境研究所研究発表会論文集，pp.25-34, 2012.10

49. 崎原康平，松原仁，江戸孝昭，矢川元基, "付帯条件付き多次元移動最小自乗法を用いたき裂進展に関する研究", 日本機械学会第 25 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集，pp.544-545, 2012.10

50. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "生体を模擬したハイドロゲル壁面近傍における流れの数値シミュレーション", 可視化情報全国講演会 2012, 2012.10.4

51. 横山真男，菊地謙次，窪田佳寛，望月修，"水面に突入する物体表面の滑りを考慮したスプラッシュのシミュレーション"，日本機械学会 第 25 回計算力学講演会, 2012.10.7

52. 広瀬孝三郎，江戸孝昭，松原仁, "き裂性岩盤の狭小領域構造を考慮した広大領域における浸透流解析"，第 25 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, 2012.11

53. 江戸孝昭，松原仁，原久夫, "き裂性岩盤におけるき裂進展解析"，第 25 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, 2012.11

54. 李思陽，江澤良孝, "圧力容器の効率的解析技術と最適化技術の開発"，第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.6

55. 高清水聖，江澤良孝, "確率的メタモデルによる大域的最適化"，第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.7

56. 島村雅彦，江澤良孝, "フラクタル構造物の構造最適化設計"，第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.7

57. 藤松信義, "乱流統計量を求める際の注意点について"，日本実験力学会 分科会合同ワークショップ, 2012.12.7

58. 田村善昭，鶴見伸夫，松本洋一郎, "気泡の合体の効果を考慮したキャビテーション流れのための気泡モデル"，第 26 回数値流体力学シンポジウム，東京, 2012.12.18-20

9. 結び

本報は、2012 年度の活動を取りまとめたものである。なお、2013 年 3 月に予定されているセンター評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2013 年 1 月 30 日とした。したがって、それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい。

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