

1. まえがき	1
2. 概要	2
2.1. センター設置について	2
2.2. 組織	2
2.3. 設備	4
2.4. 研究成果の概要	4
2.4.1. 構造健全性	4
2.4.2. 逆問題	5
2.4.3. 最適化	5
2.4.4. 大規模可視化	5
2.4.5. 大規模並列化	6
2.5. フォーラム・セミナー・ワークショップ・シンポジウムなどの企画と開催	6
2.5.1. 第2回計算力学フォーラム（バンダアチェ）	6
2.5.2. 第3回計算力学フォーラム（シドニー）	6
2.5.3. 第2回計算力学シンポジウム（白山）	6
2.5.4. 第4回計算力学フォーラム（バンギ）	7
2.5.5. 第5回計算力学フォーラム（パダン）	7
2.5.6. 第6回計算力学フォーラム（ウルムチ）	7
2.6. 産学協同活動	7
2.6.1. (株)日立製作所機械研究所との連携	7
2.6.2. 独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携	7
2.6.3. 独立行政法人 原子力研究開発機構との連携	7
2.6.4. 富士通(株)との連携	8
2.7. 教育活動	8
3. 研究成果	9
3.1. 構造健全性	9
3.1.1. 構造健全性に関する研究の概要	9
3.1.2. 大規模構造物中の亀裂の3次元自動進展解析	9
3.1.3. 結晶異方性や粒界を考慮した材料強度に関するマルチスケール解析	25
3.2. 逆問題	30
3.2.1. 逆問題に関する研究の概要	30
3.2.2. コンクリート中の鉄筋腐食検出に関する逆問題	30
3.2.3. 複合材料の同定と最適設計	42
3.2.4. 逆解析を用いたスポット像からの位相分布同定法	47
3.2.5. 薄膜磁気センサを用いた磁場分布のナノ分解能再構成法	50
3.2.6. 熱弾性応力測定法の精度向上のための熱伝導逆解析	55
3.3. 最適化	61
3.3.1. 最適化に関する研究の概要	61
3.3.2. 大規模構造問題における形状最適化問題の研究	61
3.3.3. 境界条件の最適化研究	62
3.3.4. メッシュ生成の研究	66
3.4. 大規模可視化	69
3.4.1. 大規模可視化に関する研究の概要	69
3.4.2. 次世代可視化システムの概念設計および単一の物理に基づく解析に対応する可視化	

システムの構築	69
3.5. 大規模並列化	72
3.5.1. 大規模並列化に関する研究の概要	72
3.5.2. 大規模非圧縮性粘性流体解析システムの開発	72
3.5.3. 汎用CAEシステムによる地球シミュレータ上での大規模構造解析	74
4. 産学協同活動	76
4.1. 概要	76
4.2. (株)日立製作所機械研究所との連携	77
4.3. 独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携	80
4.4. 独立行政法人 原子力研究開発機構との連携	81
4.5. 富士通(株)との連携	81
5. 国際協力	82
5.1. インドネシア (バンダアチェ)	82
5.2. オーストラリア (シドニー)	82
5.3. マレーシア (バンギ)	83
5.4. インドネシア (パダン)	84
5.5. 中国 (ウルムチ)	84
6. 教育活動	85
6.1. 教育活動風景	85
6.2. 卒論・修論の紹介	87
6.3. 学生達の学会活動	91
7. 業績リスト	97
7.1. 論文	97
7.2. 著書	100
7.3. 総説・解説・エッセイ	101
7.4. 招待講演	102
7.5. 講演論文・口頭発表	103
7.6. 受賞	111
8. 結び	112

1. まえがき

ものづくりのイノベーション技術として計算力学は極めて重要である。ものづくりにおいては、製品の製造開始から試用期間を経て廃棄されるまでの諸々の挙動を事前に把握しておく必要がある。特に力学的性質を事前に知ることは最も重要であり、そのためには力学シミュレーションが必須である。その力学シミュレーションの基礎となっている計算力学の助けなくしてものづくりがなされている例は皆無といっても言い過ぎではない。また、計算力学はこのようなものづくりのみならず自然災害、物質の解明など自然界の諸問題を解析・分析する手段としても頻繁に用いられている。わが国における計算力学分野は、1960年代に欧米に10年程度遅れてスタートしたが、その後の研究者や技術者の努力により、国際的に見ても最高の水準に達しており計算力学の技術は上述のようにあらゆる産業界に浸透している。

本センターは、文部科学省学術フロンティア推進事業「東洋大学計算力学研究センター」(5年プロジェクト)として2005年度から5年間の設置が認められた。本年度は活動開始から2年目にあたる。本報告書はこの2年度目のセンター活動を取りまとめたものである。

本センターのコアメンバーは、計算力学を学科のひとつの柱としているコンピューティショナル工学科の教授3名、助教授1名と講師1名で構成されている。また、教育も大きな柱であるため、大学院生、学部生も活動に参加している。さらに、外部の産業界、大学、研究所などからも参加を得ている。産業界側のメンバーである日立製作所機械研究所は、特に機械の信頼性評価技術では世界トップクラスにあり、そこでの高度なシミュレーション技術は、電力、エネルギー、半導体、家電製品など多方面の製造技術において適用されている。また、本センターの国際協力は重要なテーマであることから海外からも研究員が参加している。

以上のように、中核的研究拠点としての大学側と外からの産官学が一体となって、グローバルな計算力学センターを目指している。より具体的には、この分野の新たな方向として注目されている逆問題への応用、マルチフィジックス・マルチスケールな問題(複雑系の問題)の解析手法を確立し、それを実問題へ適用することにより、成果を世に発信することを試みている。

関係各位からのご批判とご指導を賜れば幸いである。

2007年3月
東洋大学計算力学研究センター長 矢川元基

2. 概要

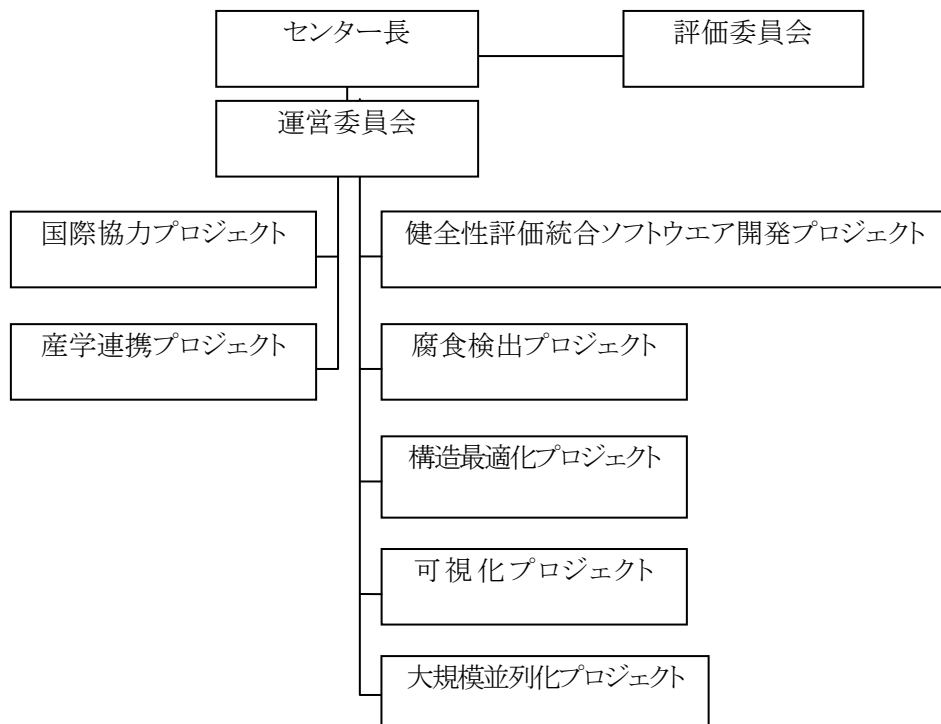
2.1. センター設置について

文部科学省学術フロンティア推進事業「計算力学研究センター」(5 年プロジェクト)の設置の経過は以下のとおりである。

- ・ 平成 16 年 12 月 文部科学省に申請
- ・ 平成 17 年 3 月 内定通知
- ・ 平成 17 年 5 月 理事会決定
- ・ 平成 17 年 6 月 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

2.2. 組織

センターの組織とメンバーは以下のとおりである。



メンバー

●センター長

矢川 元基 (東洋大学工学部コンピュータショナル工学科 教授)

●研究員

青木 繁 (東洋大学工学部コンピュータショナル工学科 教授)

江澤 良孝 (東洋大学工学部コンピュータショナル工学科 教授)

田村 善昭 (東洋大学工学部コンピュータショナル工学科 助教授)

中林 靖 (東洋大学工学部コンピュータショナル工学科 講師)

●研究助手

須賀 一博 (研究助手)

藤澤 智光 (研究助手)

室谷 浩平 (研究助手)

●研究支援者

M.RIDHA (研究支援者)

●客員研究員

畔上 秀幸 (名古屋大学大学院 情報科学研究科 複雑系科学専攻)

天谷 賢治 (東京工業大学大学院 情報理工学研究科 情報環境学専攻)

入部 綱清 (プロメテック・ソフトウェア株式会社)

井上 裕嗣 (東京工業大学大学院 理工学研究科 機械制御システム専攻)

岡田 裕 (鹿児島大学大学院 理工学研究科)

河合 浩志 (慶応義塾大学)

北野 誠 ((株)日立製作所 機械研究所)

斉藤 直人 ((株)日立製作所 機械研究所)

佐々木 康二 ((株)日立製作所 機械研究所)

酒井 譲 (横浜国立大学 教育人間科学部)

塩谷 隆二 (九州大学大学院 工学研究院 知能機械システム部門)

西垣 一朗 ((株)日立製作所 機械研究所)

古川 知成 (University of New South Wales)

松岡 浩 (独立行政法人 日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター)

宮崎 則幸 (京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻)

村松 壽晴 (独立行政法人 日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター)

2.3. 設備

センターの主要な設備である PC クラスタは下記の仕様を有している。

計算力学センター クラスタシステム 一式		
<管理用計算機/解析用計算機>		
VC83800-1UXESP	Intel Xeon 3.8 512K-L2 / 2M-L3	72
	メモリPC/2700 DDR SDRAM 1024MB ECC Reg.	144
	システムHDD 80GB 7200rpm	36
	ケース 1U Rackmount	36
<データ用ストレージ>		
VCRVAL50016-3U	HDD S-ATA 500GB 7200rpm	16
	キャッシュ 1GB	1
	ケース 3U Rackmount	1
<スイッチ関連>		
	HP ProCurve Switch 4160GL	1
	HP ProCurve Switch 2650	1
<キャビネット、周辺機器>		
	25U ラックキャビネット一式	2
	17型TFT液晶ディスプレイ	1
	キーボード、マウス	1
<ソフトウェア>	Fedora Core、クラスタソフトScoreインストール	34

2.4. 研究成果の概要

2.4.1. 構造健全性

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、システムティックで迅速・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、

(1) 大規模構造物に生じる 3 次元複雑形状の亀裂を正確に表現する計算力学モデルの構築の困難さ。すなわち、複雑形状・複雑亀裂に対するプリプロセッシングの困難さ。

(2) 材料の非均一性。すなわち、結晶の異方性や粒界の存在。

の 2 点が挙げられる。そこで、当センターの構造健全性に関する研究として、次の 2 つのサブテーマにフォーカスし研究開発を実施している。

(1) 大規模構造物中の亀裂の 3 次元自動進展解析

(2) 結晶異方性や粒界を考慮した材料強度に関するマルチスケール解析

2.4.2. 逆問題

本年度は、腐食防食、材料試験など様々な分野の逆問題解析に関する研究を進展させた。腐食防食逆問題解析では、コンクリート中の鉄筋腐食検出の効率化を図るために鉄筋が網目状に配置されることに着目して、境界要素法の網目腐食要素を開発した。複合材料の同定と最適設計に関する逆問題解析では、単軸および多軸試験機での材料定数同定と最適実験計画を可能とした。計測の分野では、光位相分布を推定するための、逆問題解析を利用した新しい測定法を提案した。また、逆問題解析を利用した微小領域の磁場計測を高分解能化する方法を提案した。熱弾性応力測定に関しては、逆解析の精度向上を図るための前処理を検討した。

2.4.3. 最適化

構造健全性を高めるための最適化手法を研究している。最適化問題で問題になることのひとつはパラメータが多くなってしまうことである。一般にはパラメータを極力少なくする工夫を行っているが、それにも限界がある。また、パラメータの定め方でその成否が分かれる。そこで、ノンパラメトリック形状最適化の研究では、大規模な数値モデルのままで最適化を行う研究をおこなっている。また、近年重要性を増しているロバスト設計においても、パラメータの定め方が非常に重要であることが分かっている。そこで、ロバスト設計における最適化の問題を研究している。また、シミュレーションという立場からみると、境界条件もひとつの最適化の対象として取り扱うことができる。現象をより精度よくシミュレーションするための境界条件の最適化の研究も行っている。さらにこれらの研究に付随する研究として、最適化の解析モデルを作る際に用いる要素分割の技術の研究を行っている。

2.4.4. 大規模可視化

解析が大規模化・複雑化してくると、膨大な解析結果の評価方法が問題となってくる。その解決策の1つとして挙げられるのが可視化である。計算機による解析結果の可視化は、1960年代から行われてきた比較的歴史ある技術であるが、特に1980年代以降、計算機、特にグラフィックス機能を強化したワークステーション等の出現により急速に進歩した。その後、機器の高性能化、低価格化により広く用いられるようになり、またこれに伴って可視化のためのソフトウェアも多く発売されるようになった。しかし、2000年に入り、計算機環境が複雑化し、解析対象も多岐に亘ってくると、これまでの可視化ソフトウェアでは対応できないことが多くなってきた。そこでここでは、様々な分野の数値解析に対して、その規模や計算機環境によらず統一的に利用できるような次世代の可視化環境の構築を目指す。具体的には以下の項目を考えている。

- (1) クラスタなど分散環境を含む計算機環境に対応する次世代可視化の概念設計
- (2) 構造解析・流体解析など単一の物理に基づく解析に対応する可視化システムの構築
- (3) 複数の物理が連成する現象に対する可視化システムの構築
- (4) 新しい可視化法に関する研究

平成18年度は昨年度の成果を踏まえ、(1) および (2) について研究を行っている。

また、(3) の複数物理の連成現象に対する可視化についてもその準備として流体-構造連成、流体-運動連成に関する基礎的な解析を始めている。

2.4.5. 大規模並列化

2002年に登場し、当時世界最速のコンピュータであった「地球シミュレータ」のピーク性能は約40 TFlopsであるが、現在世界最速のコンピュータである「BlueGene/L」のピーク性能は367 TFlopsとなっており、このことからハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる。一方、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まだまだ十分とは言えず、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、次世代の構造解析・流体解析システムを構築するとともに、これらを組み合わせた連成解析システムの構築を目指している。具体的には以下の項目をテーマとする。

- (1) 汎用 CAE システムによる地球シミュレータ上での大規模構造解析
- (2) 大規模非圧縮性粘性流体解析システムの開発
- (3) 大規模流体構造連成解析システムの開発
- (4) 流体構造連成解析の最適化問題／逆問題への応用

これらのテーマのうち、本年度は (1) および (2) について実施している。

2.5. フォーラム・セミナー・ワークショップ・シンポジウムなどの企画と開催

2.5.1. 第2回計算力学フォーラム（バンダアチェ）

2006年5月12～14日に、第2回計算力学フォーラムをインドネシアのバンダアチェで開催した。本フォーラムは Syiah Kuala University(インドネシア)と National University of Malaysia(マレーシア)が主催する国際会議 Computational Mechanics & Numerical Analysis 2006 との共催で行われた。本会議のチェアマンである Ridha 博士は、CCMRの研究支援者でありフォーラムの世話役も兼任した。

2.5.2. 第3回計算力学フォーラム（シドニー）

2006年9月28～29日に、第3回計算力学フォーラムをオーストラリアのシドニーで開催した。今回は、New South Wales 大学と共同で2日間の日程で開催しました。UNSW 側の幹事は古川助教授、CCMR 側の幹事は中林講師であった。

2.5.3. 第2回計算力学シンポジウム（白山）

表記行事を、下記のとおり企画している。

日時：2007年3月13日、場所：東洋大学 白山キャンパス

参加予定者：計算力学研究センター研究員、研究助手、研究支援者、客員研究員、オブザーバー(学生)など

詳細は未定であるが、上記参加者の平成18年度の成果発表を中心に講演を行う予定である。

2.5.4. 第4回計算力学フォーラム（バンギ）

2007年5月15, 16日に開催予定の Conference on Computational Mechanics & Numerical Analysis 2007 (CMNA2007), Universiti Kebangsaan Malaysia (National University of Malaysia), Bangi, Malaysia と共催して第4回計算力学フォーラムを行う予定である。

2.5.5. 第5回計算力学フォーラム（パダン）

2007年5月18, 19日に開催される The 5th International Conference on Numerical Analysis of Engineering problems 2007 (NAE2007), Padang, West Sumatera, Indonesia と共催して第5回計算力学フォーラムを行う予定である。

URL: <http://www.ic-star.usu.ac.id/nae2007>

2.5.6. 第6回計算力学フォーラム（ウルムチ）

2007年8月27～30日に開催される The 7th International Conference on Fracture and Strength, Far East and Oceanic Fracture Society (FEOfs2007), Urumqi, China と共催して第6回計算力学フォーラムを行う予定である。

URL: <http://kikuanni.me.noda.tus.ac.jp/FEOfs2007/index.html>

2.6. 産学協同活動

2.6.1. (株)日立製作所機械研究所との連携

(株)日立製作所機械研究所とは、(1) 逆問題解析技術、(2) メッシュ生成技術、(3) 構造健全性設計技術の3項目で連携を行っている。機械研究所では半導体を中心とした構造信頼性の解析技術の研究を行っている。また、発電機を中心とした重電関係の構造信頼性の解析技術の研究も行っており、大学で開発した技術の適用の検討、およびフィードバックを行ってもらい、より現場の要望に即した研究開発になるよう定期的に会合をもって情報交換を行っている。

2.6.2. 独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携

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

2.6.3. 独立行政法人 原子力研究開発機構との連携

東洋大学計算力学研究センターでは、産学協同活動のひとつとして独立行政法人原子力研究開発機構との連携を始める準備をしている。計算力学研究センターのメンバーと原子力研究開発機構のメンバーの共同研究という形で、連成逆問題解析の設計・センシングへの応用に関する基礎研究というテーマで行う予定である。

2.6.4. 富士通(株)との連携

大規模可視化に関連し、富士通株式会社と連携してライブラリレス・ネットワーク可視化ツール Vistrace および VistraceHD を開発している。また、Vistrace については同じく共同研究先の航空宇宙研究開発機構と共に、その無償公開を検討しており、平成 18 年度は富士通のサイトでの公開につづいて当センターでも公開を検討している。

2.7. 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様々な研究活動を行っている。当センター所有の PC クラスターや高速度カメラなどを利用した最先端の研究を行える環境を提供したり、New South Wales 大学の大学院生との共同ゼミを開催したりするなど、当センターでは、学生の教育活動にも力を入れている。

3. 研究成果

3.1. 構造健全性

3.1.1. 構造健全性に関する研究の概要

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、システムティックで迅速・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、

- (1) 大規模構造物に生じる 3 次元複雑形状の亀裂を正確に表現する計算力学モデルの構築の困難さ。すなわち、複雑形状・複雑亀裂に対するプリプロセッシングの困難さ
- (2) 材料の非均一性。すなわち、結晶の異方性や粒界の存在

の 2 点が挙げられる。そこで、当センターの構造健全性に関する研究として、次の 2 つのサブテーマにフォーカスし研究開発を実施する。

- (1) 大規模構造物中の亀裂の 3 次元自動進展解析
- (2) 結晶異方性や粒界を考慮した材料強度に関するマルチスケール解析

以下に、それぞれの研究について詳しく述べる。

3.1.2. 大規模構造物中の亀裂の 3 次元自動進展解析

(1) 目標・計画

本研究では、局所メッシュ生成手法であるフリーメッシュ法(FMM)、大規模並列有限要素法解析プログラム(ADVENTURE および NEXST)、破壊力学パラメータ計算手法(VCCM)等の要素技術をベースとして、大規模構造物中の複雑形状き裂の 3 次元進展現象を完全自動でシミュレーションする技術を確立することを目指す。本研究で開発する自動き裂進展解析モジュールは、別途に研究開発を進める逆問題解析モジュールおよびパラメトリック解析モジュールと統合化することにより、主に原子力関連設備、化学プラント、航空宇宙システム等の大規模構造物を対象とした構造健全性評価システムを構築する。

研究開発の計画としては、平成 17 年度から平成 18 年度の 2 ヶ年をフェーズ I とし、FMM と VCCM のカップリングといった要素技術の結合に関する研究開発とプロトタイプの CAE システムとしてのインテグレーションを行う。平成 19 年度から平成 20 年度の 2 ヶ年はフェーズ II とし、混合モードでのき裂進展等、先進的な破壊力学解析手法の実用化に向けた研究開発を行うとともに、フェーズ I で開発したシステムを用いて、当センターの協力研究機関である独立行政法人原子力安全基盤機構で実施する各種き裂試験との比較検討を行い、システムの精度と信頼性を検証する。研究開発スケジュールと解析機能の付加・拡張のロードマップを図 3.1.2.1 および表 3.1.2.1 に示す。

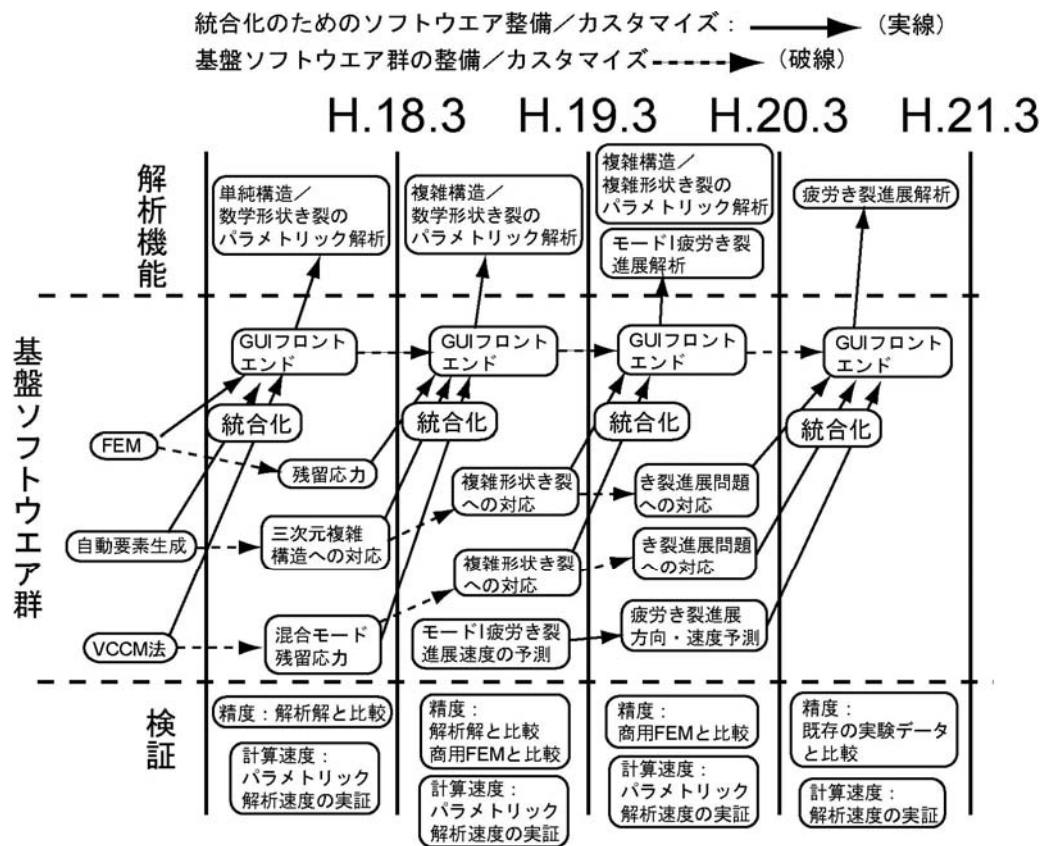


図 3.1.2.1. 3次元自動き裂進展解析システムの研究開発の計画

表 3.1.2.1. 3次元自動き裂進展解析システムの開発ロードマップ

	平成 17 年度	平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度
解析モデル	◎ (複雑形状)	◎ (複雑形状)	◎	◎
き裂形状	○ (数学形状)	◎ (複雑形状)	◎	◎
3次元 VCCM 法	○	○	○	○
残留応力の入力	×	○	○	○
PC クラスターによる並列解析	○ (パラメトリック解析の並列処理)	○	○	○
パラメトリック解析機能	○	○	○	○
自動き裂進展解析機能	×	△ (モードⅠ疲労き裂進展速度の予測モジュールの完成)	○ (モードⅠ疲労き裂進展解析機能の追加)	◎ (疲労き裂進展速度・進展量の実験との比較・検証)
FEM ソルバー	○ (弾性解析)	◎ (弾塑性解析)	◎	◎
Windows GUI	○	○	○	○
VENUS-Pre との接続	○	○	○	○

(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を要求されているが、現在の手動でのき裂進展解析手法では4-6ヶ月程度を要しており、まったく要求に応えられていないのが実情である。それに対し、本研究では、3次元空間中の複雑形状に対して、自在な局所メッシュ生成が行える FMM と、3次元四面体メッシュでの正確な破壊パラメータ計算ができる VCCM の融合によって、完全自動での3次元自動き裂解析を実現する。

これらの研究成果は、大規模構造物の SCC や疲労き裂に関するき裂進展予測で、実務に供されるとともに、原子力安全・保安院等における国の原子力安全施策への基礎検討資料を提供することができるなど、社会的に大きな意味を持つ。さらに、電力会社、プラントメーカー、CAE コンサルティング会社といった産業界に対しても、健全性評価および安全設計のための強力な解析ツールを提供することができる。

従来の計算破壊力学では、六面体要素の利用を前提として理論が組み立てられていたため、3次元複雑形状のき裂のメッシングの問題から自動でのき裂進展解析が事実上不可能であった。今

回開発する完全自動のき裂解析システムは、FMM と VCCM という優れた技術シーズを高レベルで融合することによって、世界でも例をみない四面体要素ベースの高速かつ高精度の自動き裂進展解析システムを実現するものであり、学術研究と産業界の両面において、極めてニーズの高いものである。

(3) 研究内容

本研究で開発する要素技術は、以下の 3 点を特徴とする。

- ① 自動破壊力学解析に有用となる高速かつロバストな局所メッシュ生成ライブラリ(FMM)
- ② 新開発の破壊力学パラメータ計算手法である 3 次元四面体メッシュベース VCCM および VCCM と FMM の融合に関する知見
- ③ PC クラスターまたはグリッドコンピュータのような HPC プラットホーム上での高速かつ高精度の完全自動破壊力学解析

また、当センターで別途開発する逆解析モジュール、パラメトリック解析モジュールと統合化することにより、以下の特徴を持つ構造健全性評価システムを構築する。

- A) **実用的な操作性:** 各種解析を Windows ベースの GUI メニュー操作により実行できるようにするとともに、商用の 3 次元 CAD ソフトウェアとのインターフェースを整備し、実機形状の解析がロバストに実行できるようにする。また、Windows ベースのクライアント PC で、計算サーバーとなる PC クラスターを一括制御し、最新の計算機を設計者や解析者が日常業務で利用できるユーザーフレンドリーな操作環境を提供する。
- B) **大規模並列パラメトリック解析:** 100 万自由度規模の問題に対して、1 日 (24 時間) で、PC1 台あたり 20 ケース以上のパラメトリック解析を自動的に実行することを可能とする。20 台の PC クラスターを用いた場合には 1 日で 400 ケース以上のパラメトリック解析が可能となる。
- C) **完全自動のき裂進展解析:** 100 万自由度規模の問題に対して、1 日 (24 時間) で 20 ステップ以上の自動疲労き裂進展解析を可能とする。20 台の PC クラスターを用いた場合には 1 日で 20 ケースの自動き裂進展解析が可能となる。

(4) H18 年度進捗状況

平成 18 年度の成果としては、平成 17 年度に開発を行った基盤モジュールである混合負荷を受けるき裂に対する自動局所メッシュ生成プログラム (FMM) と混合モード負荷を受ける三次元き裂の応力拡大係数計算のための仮想き裂閉口積分法 (VCCM) プログラムおよび本年度開発を行ったモード I 疲労き裂進展速度予測モジュールの要素技術を統合化し、完全自動の三次元き裂進展システムである FMM-VCCM の構築を行った。以下に、FMM-VCCM を用いた完全自動のき裂進展解析結果の具体的な成果を示す。

(a) 三次元完全自動き裂進展解析システム FMM-VCCM

図 3.1.2.2 に本年度開発を行った完全自動の三次元き裂解析システムの概要を示す。本システムは、疲労/SCC き裂進展の一般的な構造健全性解析アルゴリズムを完全自動にしたものである。具体的には、解析に用いる初期き裂形状、解析条件、材料定数などを一度入力するだけで、FMM ライブラリによるロバストかつ高速な有限要素法モデル作成、FEM による弾性解析、VCCM による破

壊力学パラメータの算出、Paris 則によるき裂進展量の計算を完全自動で実行される。したがって、従来の計算破壊力学解析において必要とされてきた熟練した技術や経験と勘は全く不要である。さらに、解析条件などのデータ入力是一次だけであるため、ユーザーフレンドリーなシステムといえ、き裂のパラメトリック解析などにも適している。

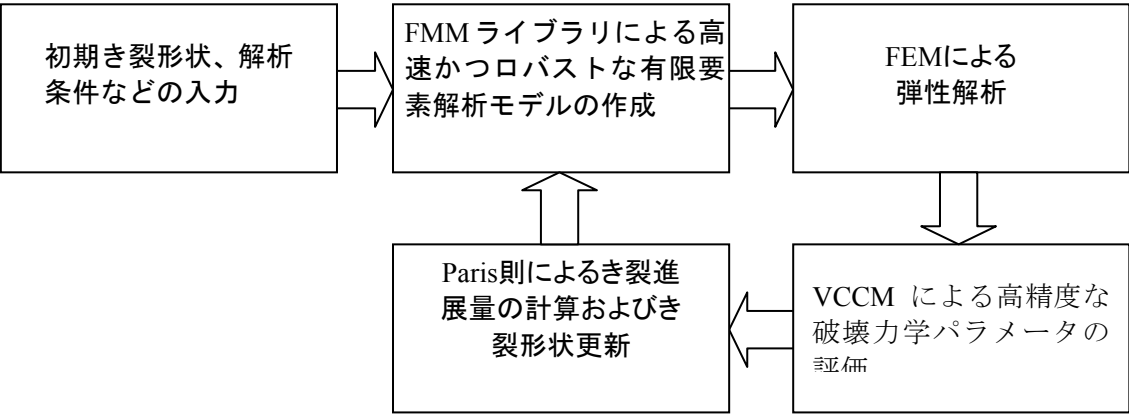


図 3.1.2.2. 完全自動の三次元き裂進展解析システム FMM-VCCM のシステム概要

(b) 応力拡大係数の精度評価と解析時間に関する検討

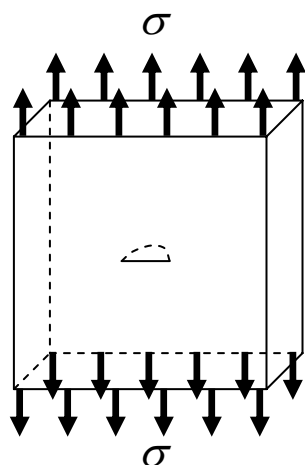
FMM-VCCM の応力拡大係数の精度評価として図 3.1.2.3(1)のような引張応力を受ける半楕円表面き裂問題の解析を行った。図 3.1.2.3(2)に本システムから作成された有限要素解析モデル(節点数:106827、要素数:71488)を示す。

解析より得られた応力拡大係数を図 3.1.2.4 に示す。本システムにより得られた応力拡大係数は Raju-Newman の解と良好に一致した。また、解析に用いた計算機環境などを表 3.1.2.2 に示す。表 3.1.2.2 より本システムで解析モデル作成から応力拡大係数の算出までに要した時間はおよそ 10 分程度であった。したがって、本システムは、ノート PC 上でも問題なく動作可能といえる。

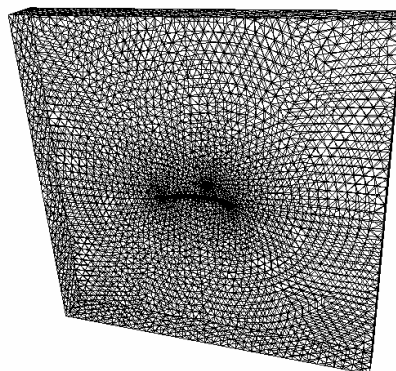
表 3.1.2.2. 解析に用いた計算機環境および解析時間

CPU	PentiumM 1.7GHz
Memory	1Gbyte
解析時間(*1)	10分

(*1)モデル作成から応力拡大係数の算出までに要した時間



(1) 引張応力を受ける表面き裂問題



(2) 本システムより作成された要素分割

図 3.1.2.3. 応力拡大係数の精度評価解析モデル

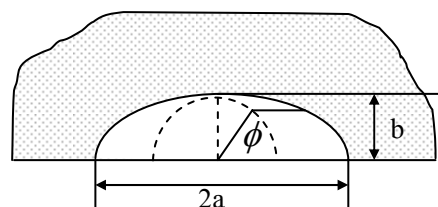
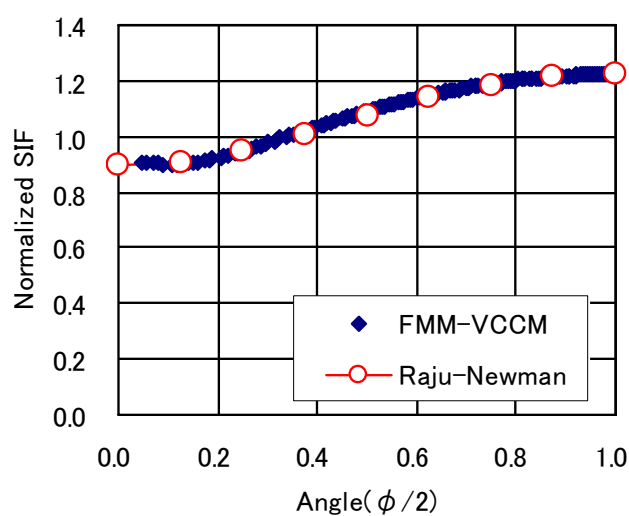


図 3.1.2.4. 応力拡大係数の精度評価解析モデル

(c) 従来の破壊力学パラメータ算出方である変位法との比較・検討

図 3.1.2.5 に示す数値解析モデルにより、四面体有限要素を用いた場合の破壊力学解析において、従来用いられてきた直接法との比較を行った。初期の有限要素モデルを図 3.1.2.6 に、解析より得られたき裂の深さとき裂最深部での応力拡大係数の算出結果を図 3.1.2.7 にそれぞれ示す。

図 3.1.2.7 より、従来用いられてきた変位外装法では応力拡大係数に振動が見られ不安定である

が、四面体二次要素による VCCM を用いた本システムにおいてはこのような振動は見られず安定した応力拡大係数が算出可能である。

図 3.1.2.8 に本解析より得られたき裂進展状況について示す。図 3.1.2.8 より、楕円き裂は進展とともに半円状態になっていく結果が得られた。

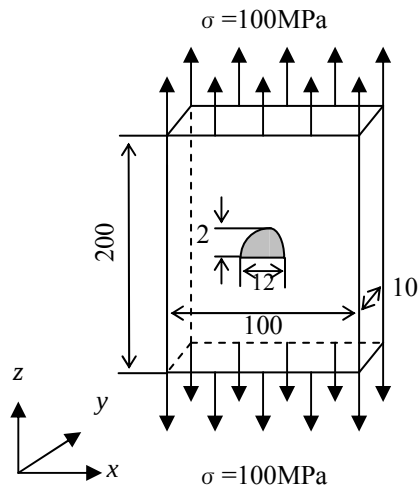


図 3.1.2.5. 数値解析モデル

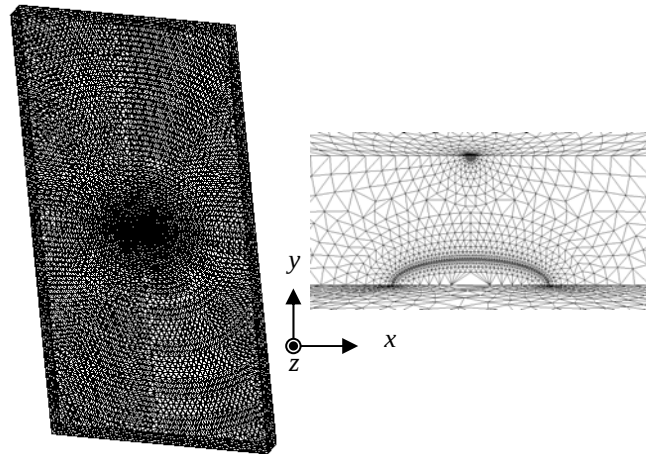


図 3.1.2.6. 初期形状の有限要素モデル

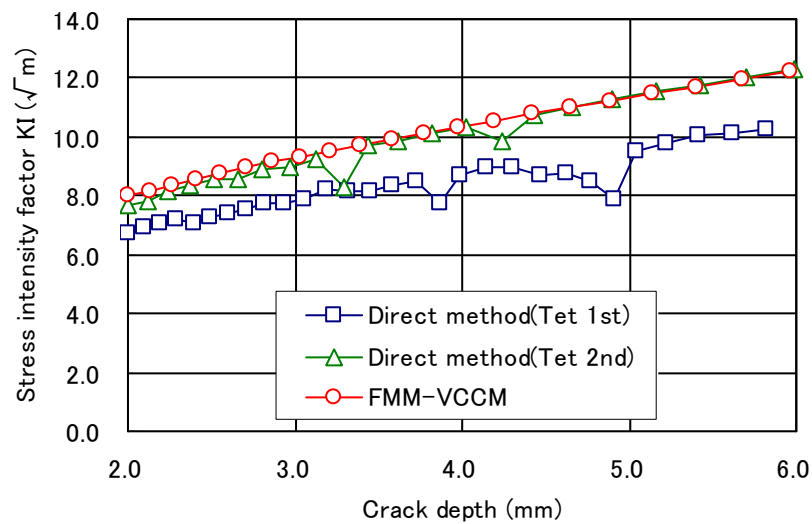


図 3.1.2.7. き裂の深さと最深部での応力拡大係数の関係

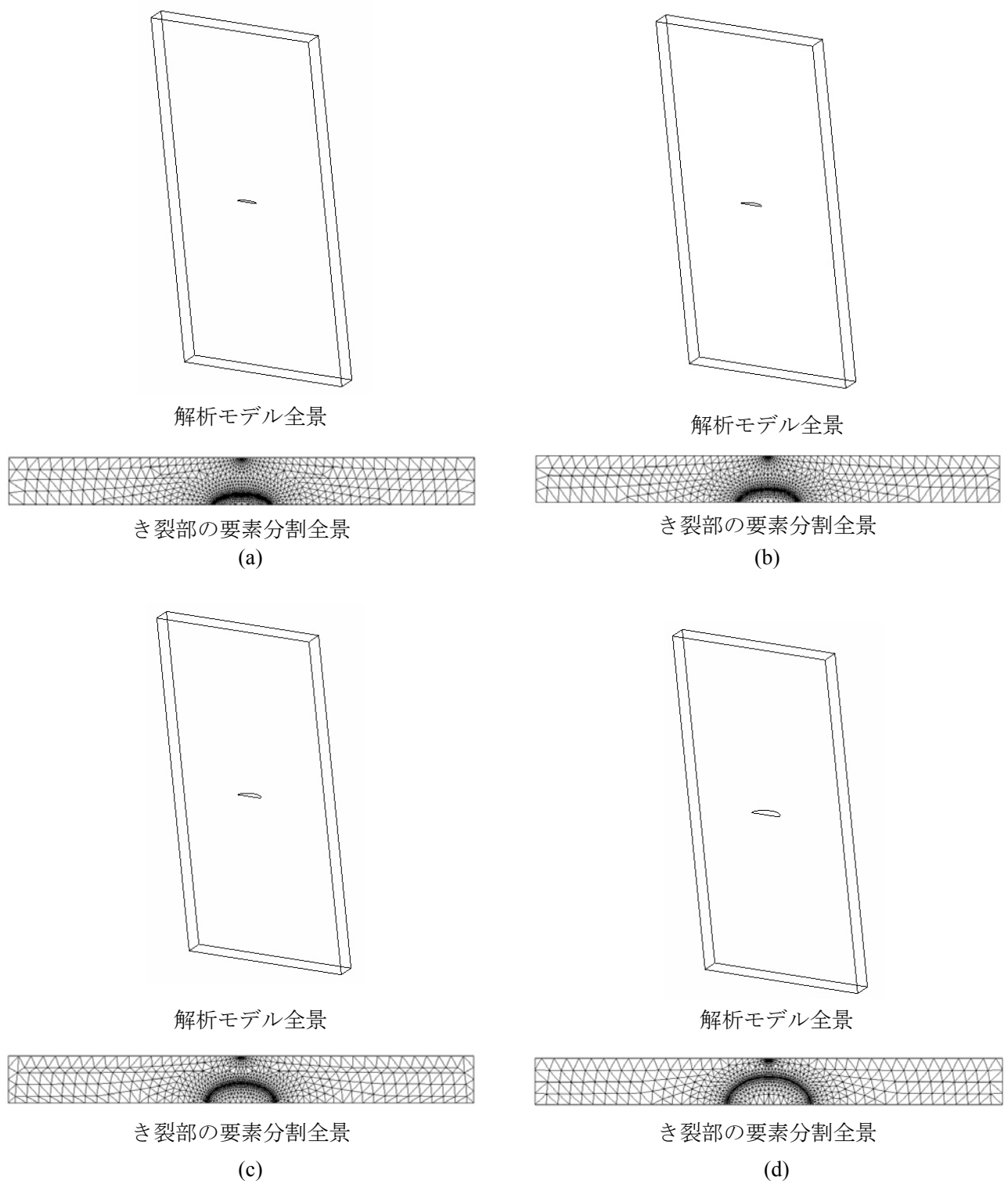


図 3.1.2.8. 自動き裂進展解析結果

(d) 当センターの PC クラスターを用いた自動き裂進展解析

本研究の目的のひとつである当センターの PC クラスター一台による 100 万自由度規模の問題に対して自動き裂進展解析を行った。数値解析モデルは図 3.1.2.9 のように引張応力を受ける表面き裂問題である。図 3.1.2.10 に初期き裂形状の有限要素分割図を示す。

自動き裂進展解析結果はき裂の奥行き方向長さ/板厚 (a/t) が 0.6 まで達するまでに要した時間はおよそ 20 時間であり、き裂進展ステップは 50 ステップ、解析の規模は約 60 万～100 万自由度であった。

き裂進展解析結果の評価として Raju-Newman のき裂進展予測結果と FMM-VCCM により得られたき裂進展予測結果を図 3.1.2.11 に、図 3.1.2.12 に各板厚比におけるき裂前縁の応力拡大係数の分布状況についてそれぞれ示す。両者は良く一致しており、本システムにおける自動き裂進展解析の精度および応力拡大係数は良好である。

図 3.1.2.13 にき裂が進展する様子を示す。図 3.1.2.8 と同様に楕円き裂は進展とともに半円状態になっていく結果が得られた。

以上のことより、本研究の目的の一つである 100 万自由度規模の問題に対して、1 日 (24 時間) で 20 ステップ以上の自動疲労き裂進展解析を達成することができた。また、従来のき裂進展解析に要する時間が 3～4 ヶ月に対し、FMM-VCCM ではわずか 1 日で実行可能であるため、百倍程度の作業効率の向上になる。

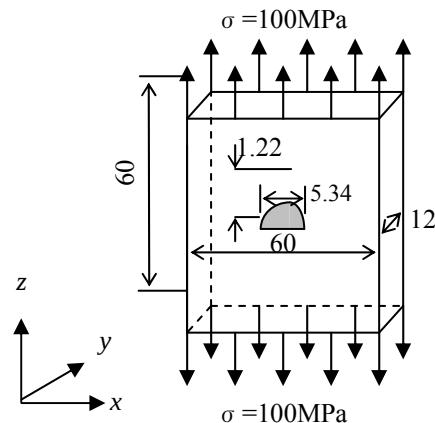
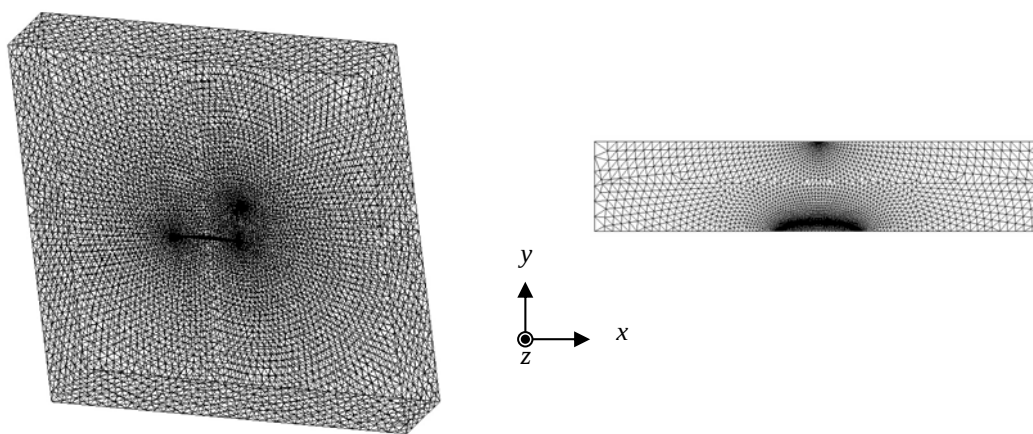


図 3.1.2.9. 数値解析モデル



(a) 有限要素分割図全景

(b) き裂前縁の要素分割図

図 3.1.2.10. 初期き裂形状の有限要素モデル

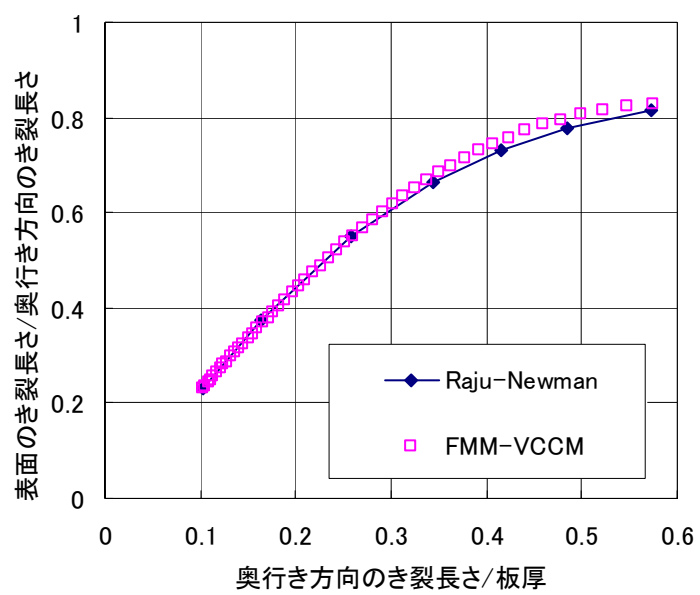
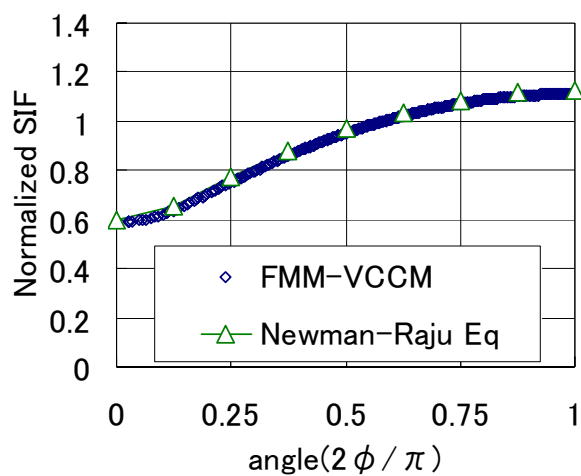
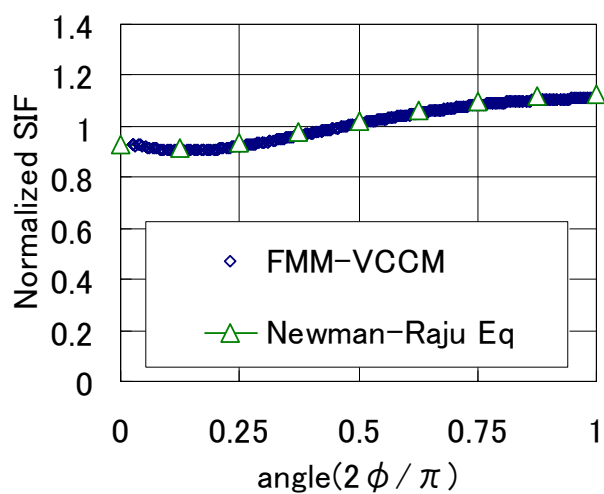


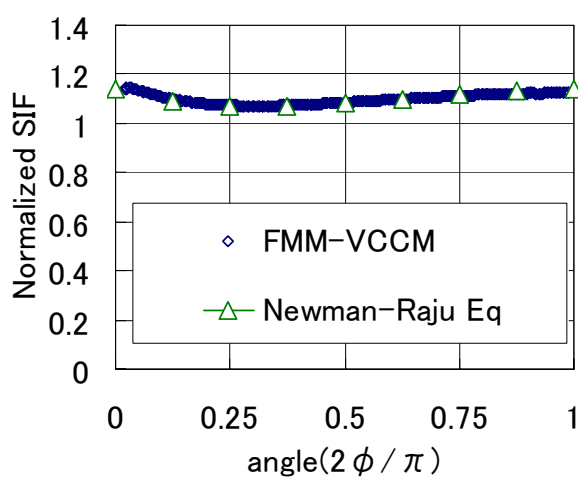
図 3.1.2.11. 本システムにおけるき裂進展予測結果



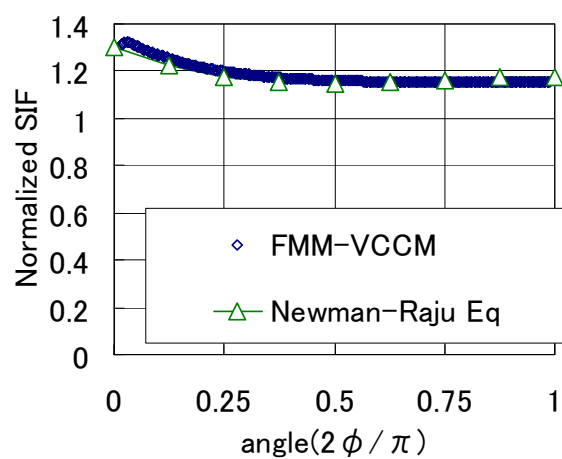
(a) $a/t=0.1$ 付近



(b) $a/t=0.25$



(c) $a/t=0.4$ 付近



(d) $a/t=0.6$ 付近

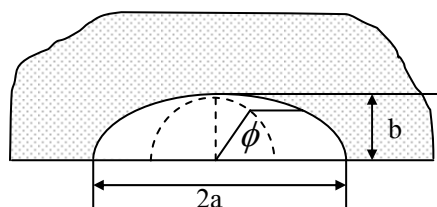
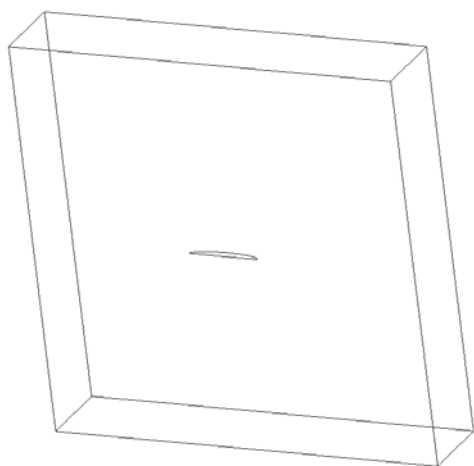
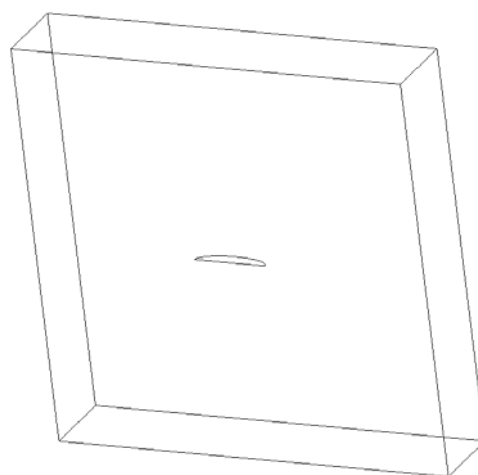


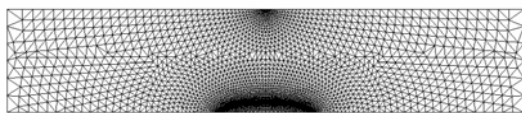
図 3.1.2.12. 各板厚比における応力拡大係数の算出結果



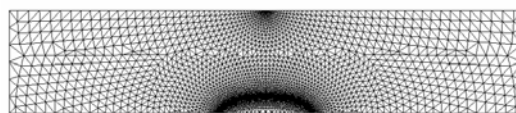
解析モデル全景



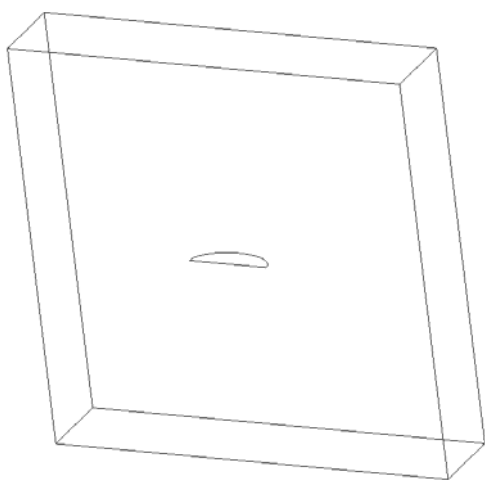
解析モデル全景



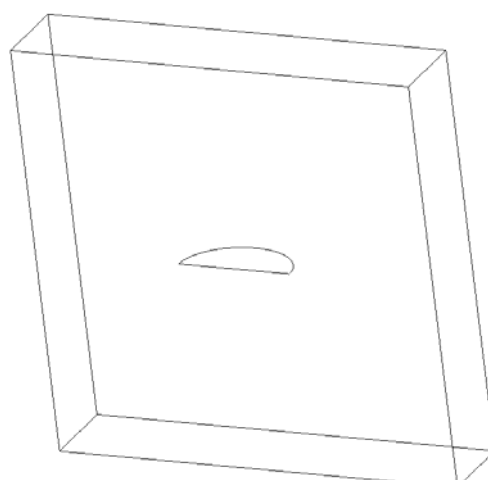
き裂部の要素分割全景
(a)



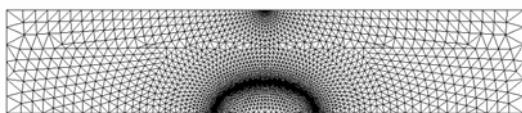
き裂部の要素分割全景
(b)



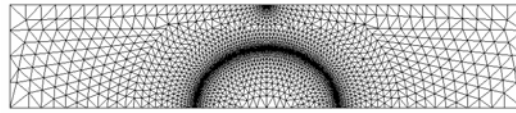
解析モデル全景



解析モデル全景



き裂部の要素分割全景
(c)



き裂部の要素分割全景
(d)

図 3.1.2.13. 本システムにおけるき裂進展解析結果

(e) FMM-VCCM を用いたき裂のパラメトリック解析

き裂のパラメトリック解析を行うことにより、き裂進展に要する時間、き裂前縁における応力拡大係数の分布状況、き裂進展時におけるき裂形状の変化など、構造健全性評価における重要な要因がどのパラメータに大きく寄与するかという感度解析に大きく貢献できる。そこで、FMM-VCCM を用いたき裂のパラメトリック解析として、図 3.1.2.14 に示す表面き裂解析問題について行った。

き裂のパラメトリック解析では以下のパラメータが構造健全性評価に影響を与えと考えられる。

- ・ 初期き裂の奥行き方向長さ a と幅 c の比 (a/c)
- ・ 初期き裂の奥行き方向長さ a と板厚 t の比 (a/t)
- ・ 解析モデル寸法 (幅、高さ、板厚)
- ・ 応力比 R
- ・ ヤング係数、ポアソン比、Paris 則の実験定数
- ・ その他

今年度は、き裂進展に要する時間とき裂形状の変化を検討することを目的とし、以下のパラメータについて検討した。

- ・ 初期き裂の奥行き方向長さ a と幅 c の比 (a/c) : 0.5 ~ 2.5
- ・ 初期き裂の奥行き方向長さ a と板厚 t の比 (a/t) : 5.0, 7.5, 10.0

なお、数値解析ケースとして合計で 62 ケースである。

本年度用いたパラメトリック解析システムの概要を図 3.1.2.15 に示す。本パラメトリック解析システムは、FMM-VCCM を各クラスターに実行できるため、一度に数ケースの自動き裂進展解析が可能である。

解析より得られた奥行き方向の長さ a /板厚 t と繰り返し回数 N の関係、表面のき裂長さ a /奥行き方向のき裂長さ c と奥行き方向の長さ a /板厚 t の関係を図 3.1.2.16 ~ 図 3.1.2.19 にそれぞれ示す。グラフより、板厚が大きくなるにしたがい a/t に達するまでの繰り返し回数が増加していることがわかる。また、き裂の形状はほぼ半円に近づいていくことがわかる。各板厚ごとにき裂進展に要する時間を比較するため、図 3.1.2.19 に示すようにデータを整理した。これより、板厚が 10mm より大きくなった場合においても $a/t=0.6$ に達するまでの繰り返し回数に大きな増加がみられないことが推察される。

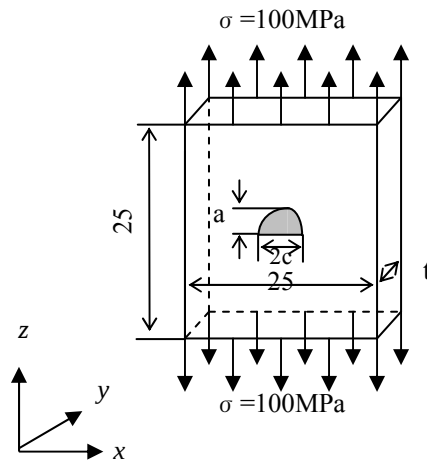


図 3.1.2.14. き裂のパラメトリック解析モデル

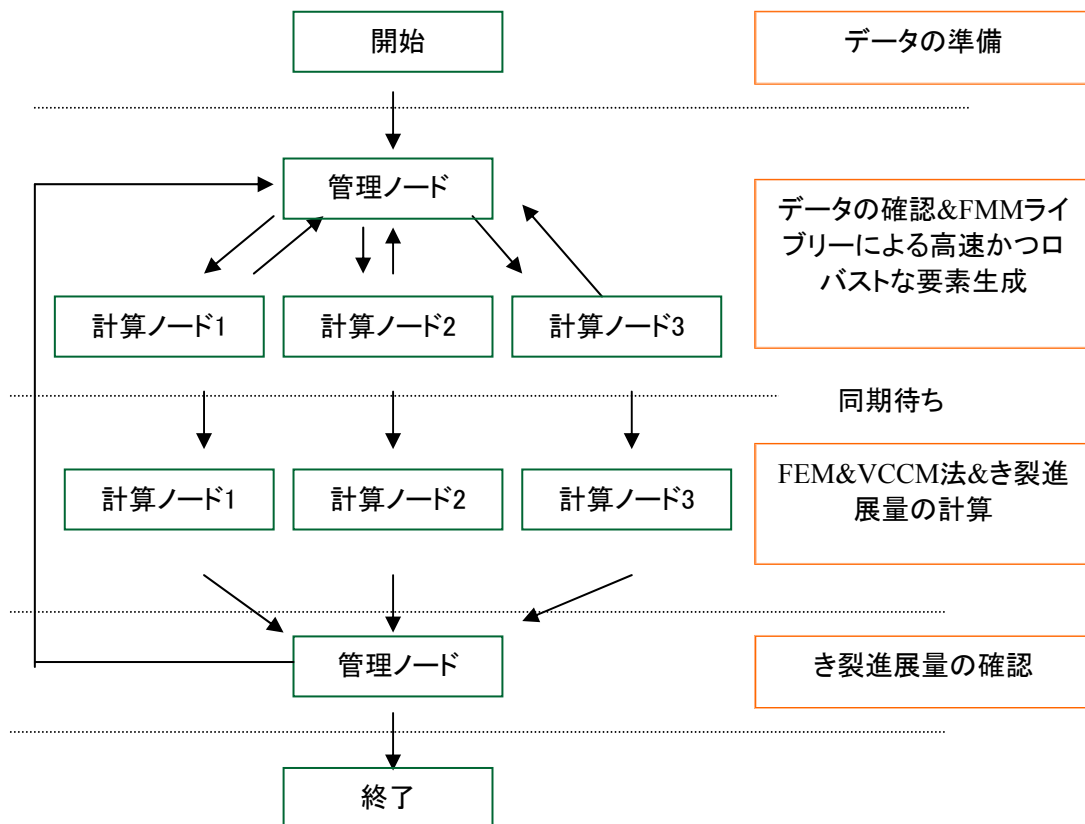
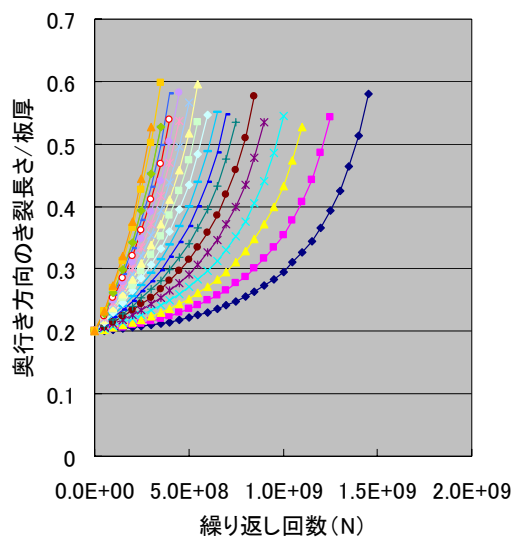
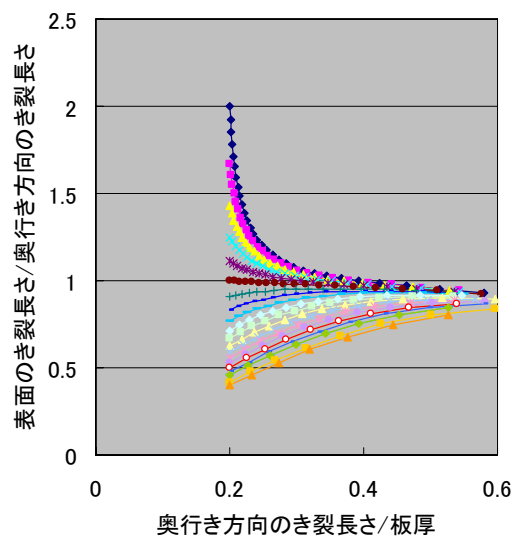


図 3.1.2.15. PC クラスターを利用したき裂のパラメトリック解析の概要

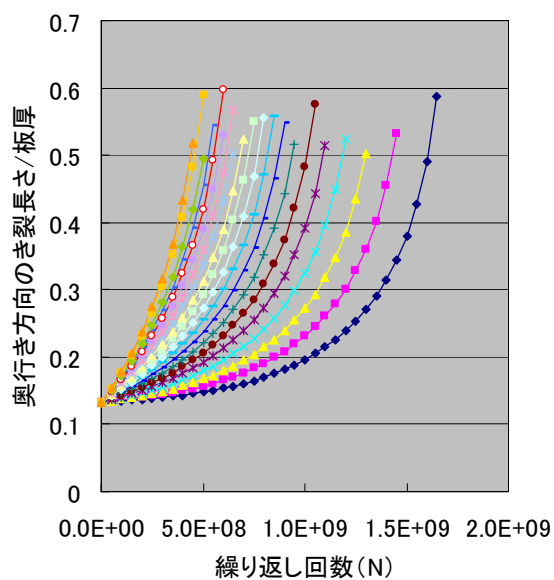


(a) 板厚比(a/t)と繰返し回数 (N) の関係

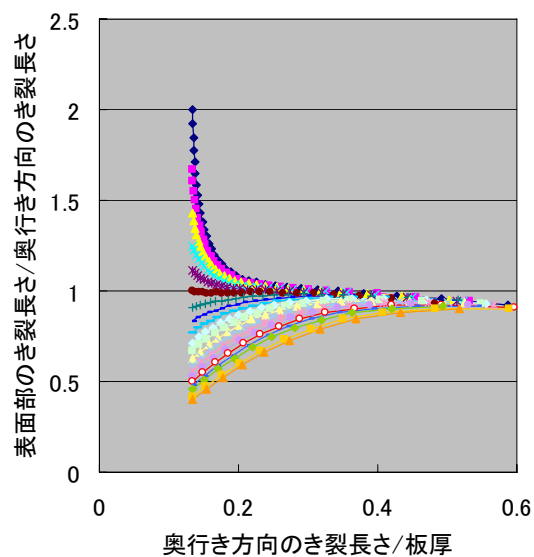


(b) き裂進展に伴う板厚比と各き裂比の関係

図 3.1.2.16. 板厚 $t=5.0$ におけるパラメトリックスタディの結果

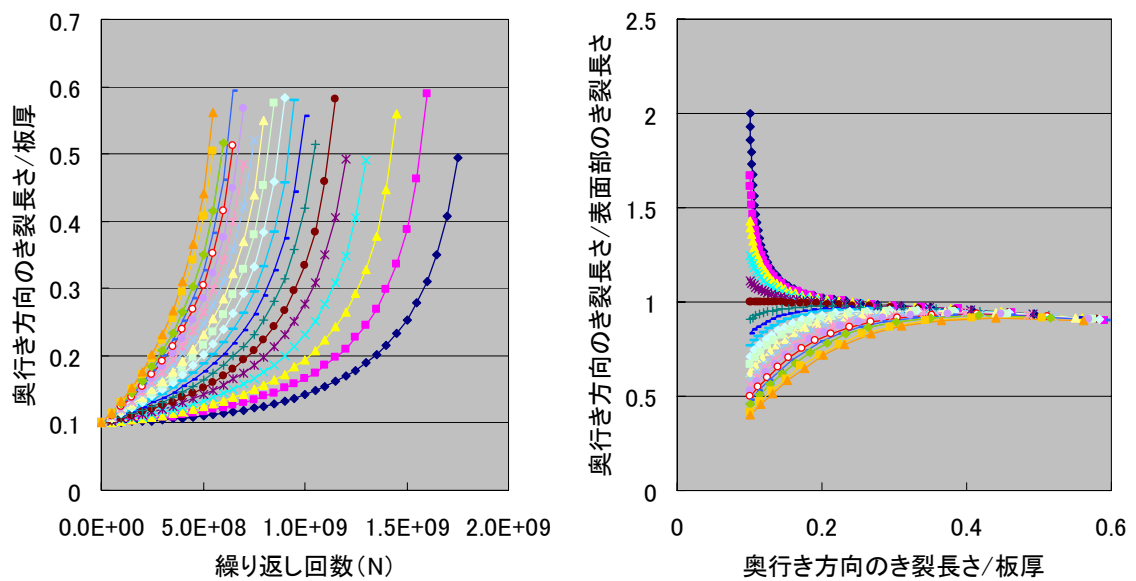


(a) 板厚比(a/t)と繰返し回数 (N) の関係



(b) き裂進展に伴う板厚比と各き裂比の関係

図 3.1.2.17. 板厚 $t=7.5$ におけるパラメトリックスタディの結果



(a) 板厚比(a/t)と繰返し回数 (N) の関係 (b) き裂進展に伴う板厚比と各き裂比の関係

図 3.1.2.18. 板厚 $t=10$ におけるパラメトリックスタディの結果

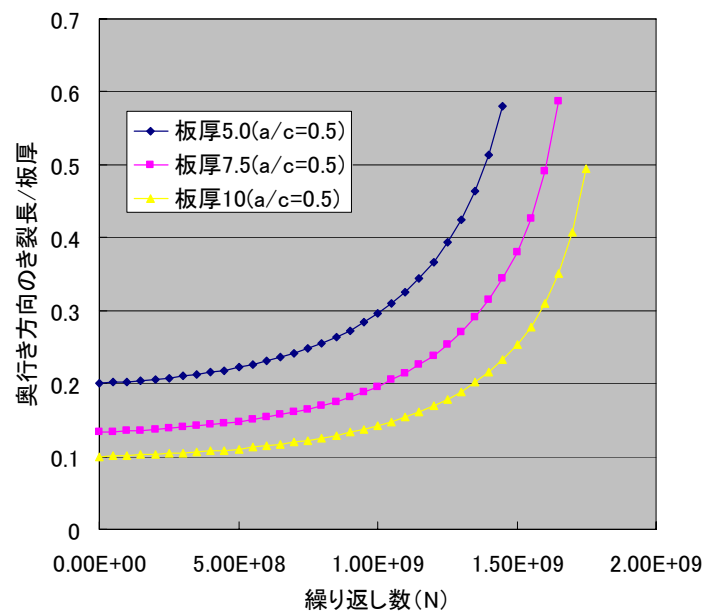


図 3.1.2.19. 各板厚における板厚比と繰返し回数 (N) の関係

3.1.3. 結晶異方性や粒界を考慮した材料強度に関するマルチスケール解析

(1) 目標・計画

材料強度研究への計算力学手法の適用を、有限要素法を用いたマクロレベルの解析と分子動力学法を用いたミクロレベルの解析の両面から行う。マクロレベルの解析では、電子デバイス／光学デバイス用単結晶材料を取り上げ、単結晶引き上げプロセスからデバイス作成のための成膜プロセスまでの転位密度評価、およびマクロな単結晶の割れ評価手法の確立を目指す(以降、マクロレベルの解析と呼称する)。一方、ミクロレベルの解析では、大規模分子動力学解析コードを開発し、それを用いることにより材料強度に粒界がどのような影響を及ぼすかを検討する(以降、ミクロレベルの解析と呼称する)。とりわけ、燃料電池等で注目を浴びている水素利用に関連して重要となってきた水素環境下での材料強度劣化のメカニズムを明らかにする。

(2) 意義・国際社会との比較及び特徴

(A) マクロレベルの解析

単結晶製造プロセスに関連したシミュレーションは流動・伝熱分野では多数行われているが、結晶の品質に直接的な影響を及ぼす固体力学分野の研究は少ない。その中で、本研究では、結晶異方性を厳密に考慮した単結晶育成過程の熱応力解析を三次元有限要素法を用いて行い、結晶育成方向と結晶の品質との関連をはじめて明らかにするという先駆的な研究を実施した。また、クリープひずみ速度が転位密度の関数として与えられるクリープ構成式 Haasen-Alexander-Sumino モデルを用いて、単結晶引き上げ過程における非定常状態での転位密度の定量的解析を世界に先駆けて行った。その後、これを結晶異方性を考慮した三次元解析への拡張、さらにはインゴットアニールプロセス、デバイス作成時の成膜プロセスにおける転位密度の定量的評価解析へ拡張するなど世界最先端の研究を行っている。

(B) ミクロレベルの解析

Johnson ポテンシャルのような経験ポテンシャルを用いた分子動力学解析プログラムを開発し、数百万粒子程度の比較的小規模なモデルを用いてき裂とごく少数の粒界がある体系について、単調負荷と疲労を模擬した繰り返し負荷について解析を行い、き裂端から射出される転位と粒界の相互作用、および繰り返し負荷による疲労の初期過程のメカニズムについて明らかにした。ミクロレベルの解析は H18 年度以降本格的に実施するが、実施する研究項目を下記に示す。

- ① 領域分割法を用いて並列計算機環境で動作するプログラムを開発し、1 億－10 億粒子程度の解析を行うことを最終目標とする。
- ② 上記の解析コードを用いて、き裂と粒界があるモデルの解析を行い、粒界が材料の強度に及ぼす影響について検討する。
- ③ 水素が材料強度に及ぼす影響を検討するためにき裂と粒界があるモデルに水素原子を導入して水素ぜい化および疲労強度に水素がどのようなメカニズムで影響を及ぼすかを明らかにする。

これまでも、Abrahamらの研究グループにより1億－10億粒子程度の大規模分子動力学解析は行われているが、この解析は Lenard-Jones ポテンシャルというモデルポテンシャルを用い、単結晶材料の解析を行っているにすぎず、材料の持つ複雑な内部構造は一切考慮されていない。我々が実施しようとしている研究の特徴は、粒界を持つような実際的な材料を取り上げ、この強度を

について検討しようとする工学的に重要な分野を取り扱っている点に特徴がある。

(3) 研究内容

(A) マクロレベルの解析

クリープひずみ速度が転位密度の関数として与えられるクリープ構成式 Haasen-Alexander-Sumino モデル(以降 HAS モデルと呼称する)を用いて、Si 単結晶へ GaAs をヘテロエピタキシャル成長させるプロセスの転位密度評価解析を行った。図 3.1.3.1に解析体系、図 3.1.3.2 に GaAs 膜内のプロセス終了後の応力分布及び転位密度分布を示す。ここで応力は 12 個あるすべり系の分解せん断応力の和を示す。この解析コードは、Si 単結晶へ GaAs をヘテロエピタキシャル成長させるプロセスの最適化のためのツールとして用いることが可能である。

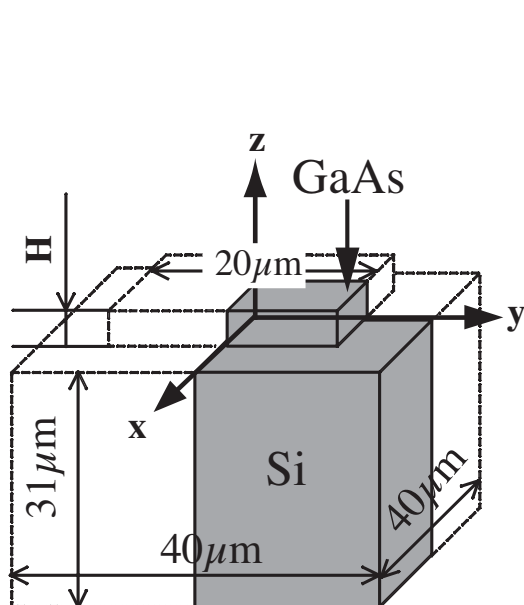


図 3.1.3.1. Si 単結晶へ GaAs をヘテロエピタキシャル成長の解析対象

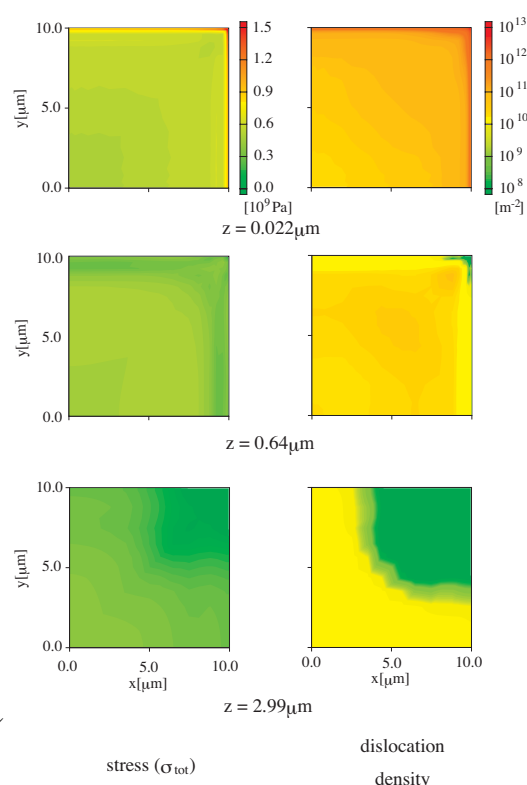


図 3.1.3.2. 解析結果

また、インゴットアニール過程の転位密度評価をより精度良く行うために転位の消滅効果を取り入れた HAS モデルについて検討し、InP インゴットのインゴットアニールプロセスの転位密度解析を行いその有効性を示した。図 3.1.3.3 に解析結果の一例を示す。図中実線(A)は転位の消滅を考慮した HAS モデルによる解析結果、2 点鎖線(Original)は転位の消滅を考慮しない HAS モデルによる解析結果であり、転位消滅効果が有効に作用していることがわかる。

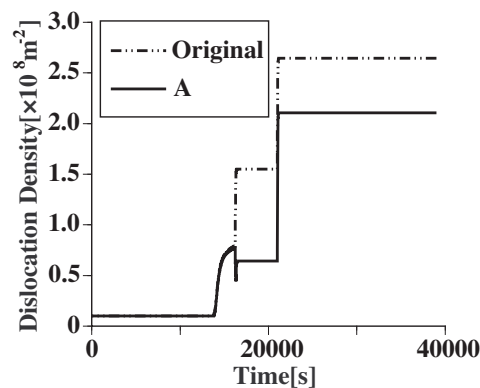


図 3.1.3.3. 最大転位密度の時間変化

上記のような転位密度を含むマクロな構成式を用いた単結晶の各種プロセスの転位密度評価解析に関する研究が評価され、2006 年 9 月 10 日～13 日にドイツの Bamberg で開催された 5th International Workshop on Modeling in Crystal Growth において結晶育成時の転位密度評価に関連にした招待講演を行った。

正方晶(tetragonal)系単結晶である PMO 単結晶について種々の育成方向に対して単結晶育成過程中的熱応力解析を実施し、これまで実験結果として知られている単結晶育成方向と結晶の品質の関係を検討した。

さらに、LT 単結晶のマクロな割れ試験および実験データをもとにした熱応力解析を実施し、結晶のマクロな割れを支配している応力、その限界値、および割れ強度に及ぼす寸法効果について検討した。

(B) ミクロレベルの解析

まず、数百万原子モデルの分子動力学解析により α 鉄のへき界破壊、転位と粒界との相互作用、繰り返し荷重下のき裂進展挙動の解析を実施した。特に、繰り返し荷重下のき裂進展挙動の初期過程については、すべり方向に生じたボイドが連結することによりき裂進展が生じることを明らかにした。図3.1.3.4に各荷重サイクルでのボイドの生成状況とき裂進展状況を示す。

水素が材料強度に及ぼす影響の検討においては、まず鉄—水素系の分子動力学解析に使用可能な原子間ポテンシャルの検討を行い、Wen らの EAM 型ポテンシャルが最も良いことを明らかにした。次に、このポテンシャルを用いて図 3.1.3.5 のような α 鉄の体系について、外周部にき裂の弾性特異応力場に対応する変位場を強制変位として与えることにより、Wen らの EAM 型ポテンシャルを用いた分子動力学解析を行った。図 3.1.3.6 に水素が存在する場合と存在しない場合について、き裂の進展挙動を示す。この図より両者について差異が認められた。すなわち、水素が存在する方がき裂進展の速度が速く、かつ直進するような傾向が認められた。

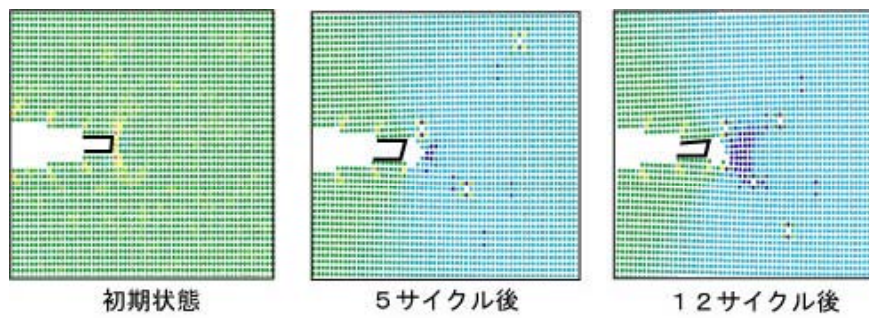


図 3.1.3.4. ボイドの生成状況とき裂進展状況

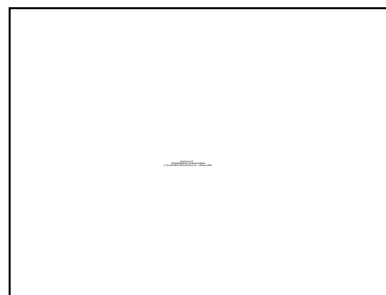


図 3.1.3.5. 解析体系: α 鉄のすべり系 $\{110\}\langle 111\rangle$, $\{112\}\langle 111\rangle$

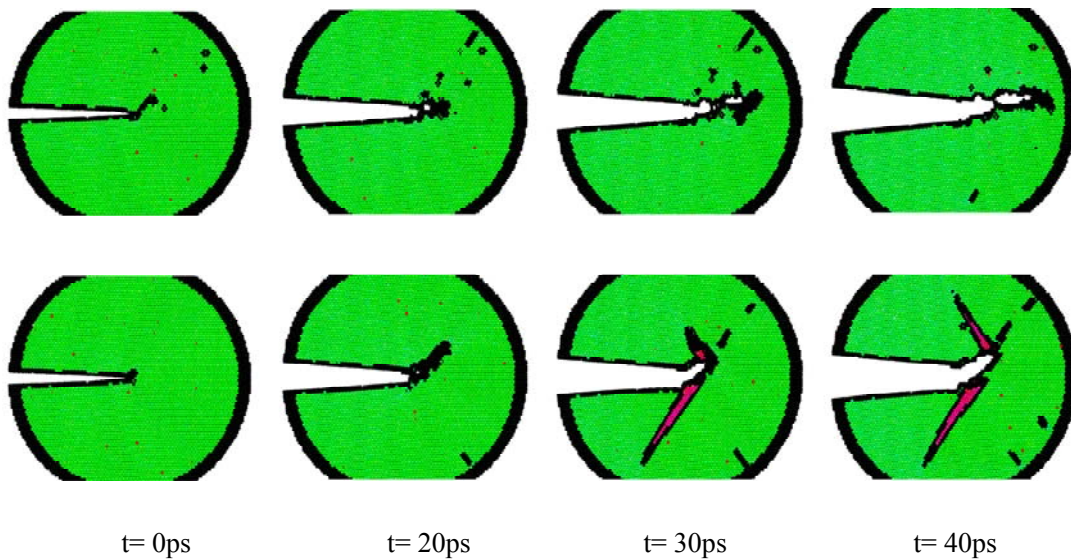


図 3.1.3.6. き裂進展状況(上段:水素あり、下段:水素なし)

(4) H18 年度進捗状況

マクロレベルの解析およびミクロレベルの解析それぞれにおいて、平成 18 年度に実施した研究の成果は下記の通りである。

(A)マクロレベルの解析

- ①Si 単結晶へ GaAs をヘテロエピタキシャル成長させるプロセスの転位密度評価解析を行った。本研究の成果は、下記の論文に掲載された。
松本壮平，宮崎則幸，”半導体薄膜中の転位密度の有限要素解析”，日本計算工学会論文集，論文番号 20060025，2006 年 9 月
- ②インゴットアニール過程の転位密度評価をより精度良く行うために転位の消滅効果を取り入れた HAS モデルについて検討し、InP インゴットのインゴットアニールプロセスの転位密度評価解析を行った。本研究の成果は、下記の論文に掲載された。
松本直樹，宮崎則幸，”化合物半導体単結晶のインゴットアニール過程における転位密度評価解析”，日本計算工学会論文集，論文番号 20060028，2006 年 9 月
- ③H17 年度に実施した PMO 単結晶育成過程の熱応力と結晶の品質に関する論文が下記のように掲載された。
N. Miyazaki, Y. Matsuura, D. Imahase, “Thermal Stress Analysis of Lead Molybdate Single Crystal during Growth Process: Discussion on the Relation between Thermal Stress and Crystal Quality”, Journal of Crystal Growth, Vol.289, No.2, pp.659-662, April 2006.
- ④H17 年度に実施した LT 単結晶のマクロな割れ試験および実験データをもとにした熱応力解析に関する論文が下記のように掲載された。
N. Miyazaki, N. Koizumi, “Analysis of Cracking of Lithium Tantalate (LiTaO₃) Single Crystals Due to Thermal Stress”, Journal of Materials Science, Vol.41, No.19, pp. 6313-6321, October 2006.

(B)ミクロレベルの解析

鉄-水素系の分子動力学解析に使用可能な原子間ポテンシャルの検討、および検討結果選択された原子間ポテンシャルを用いた α 鉄のき裂進展解析を行った。この研究成果の一部を、2007 年 2 月 1 日に福岡市で開催される International Hydrogen Energy Development Forum（水素先端世界フォーラム）で発表する。

3.2. 逆問題

3.2.1. 逆問題に関する研究の概要

計算力学的手法を利用する逆問題解析はその有用性が広く認識されるようになり、様々な分野で活発に研究されている。本年度は、腐食防食、材料試験、計測など様々な分野の逆問題解析に関する研究を進展させた。腐食防食逆問題解析では、コンクリート中の鉄筋腐食検出の効率化を図るために鉄筋が網目状に配置されることに着目して、境界要素法の網目腐食要素を開発した。複合材料の同定と最適設計に関する逆問題解析では、複合材料の材料定数同定手法の全体像の構築と逆擬似行列による弾性材料定数の同定手法の開発を行い、単軸および多軸試験機での材料定数同定と最適実験計画を可能とした。この方法をさらに効率化するための研究を続行中である。測定に関しては、光学システムの分野で重要な光位相分布を推定するための、逆問題解析を利用した新しい測定法を提案した。また、逆問題解析を HDD に用いられている薄膜磁気センサに適用して、微小領域の磁場計測を高分解能化する方法を提案した。さらに、熱弾性応力に関する逆問題解析では、昨年度に引き続き、熱伝導逆解析手法の実用化に向けて、逆解析の精度向上を図るための前処理を検討した。

3.2.2. コンクリート中の鉄筋腐食検出に関する逆問題

(1) 目標・計画

コンクリート表面における電位などの測定値から境界要素逆解析を利用して、効率的に、また精度よくコンクリート内部の鉄筋の腐食を同定することを目標としている。本年度は、昨年度にマルチステップ遺伝的アルゴリズムを利用する検出方法を、さらに効率化するために鉄筋腐食を簡便に解析することができる網目特殊要素の開発を図る。また、コンクリートの複素電気伝導度と鉄筋とコンクリートの間のインピーダンスを同定するための測定条件を最適化する。さらに、SQUID を用いた磁場計測の予備実験に着手する。

(2) 意義・国際社会との比較

ビルディング、橋脚、防波堤などのコンクリート構造物中の鉄筋にはしばしば錆(腐食)が発生し、腐食生成物による体積膨張のためにその周辺のコンクリートが破壊し、これが構造物の破壊事故の原因になることが知られている。コンクリート構造物の健全性を向上させ、破壊事故を未然に防ぐためには、鉄筋の腐食を非破壊的に検出し、保守しておくことが必要である。通常、図 3.2.2.1 のように、コンクリート表面の数多くの点の電位の測定値から鉄筋腐食を検出するポテンシャルマッピング法や交流インピーダンス法が用いられる。しかし、測定に多くの労力と時間を必要とすること、コンクリートかぶりが厚い場合や鉄筋が複雑に組まれている場合には検出の精度が不十分であることなどの問題点が残されていた。

本研究では、コンクリート表面における数少ない点の電位の測定値から境界要素逆解析を利用して、鉄筋腐食部分の個数、位置および形状を、仮定なしで、同定する効率的な方法を開発する。また、腐食に関する様々な材料特性値を推定するための逆解析手法を開発する。さらに、コンクリートかぶりが厚い場合などのように、コンクリート表面の電位分布による鉄筋腐食検出の精度が不十分になる場合に対して、その対応策を模索する。腐食によって生じる電流に起因する磁場に着目し、コンクリート表面の磁場分布の測定と境界要素逆解析を併用して、鉄筋腐食位置を検出する

方法を探求する。この研究が完成すると、鉄筋腐食が精度よく効率的に検出できるようになるために、広く利用されている鉄筋コンクリート構造物の安全性を向上させることができるので、その意義は大きい。

腐食防食の分野では、他の分野ほどには計算力学的手法が利用されることが少なかった。最近では、その有用性が認められ徐々に普及し始めている。しかし、逆問題解析を利用した腐食検出の研究は国の内外を問わず見当たらない。また、磁場を利用する腐食検出の研究は極めて少ない。

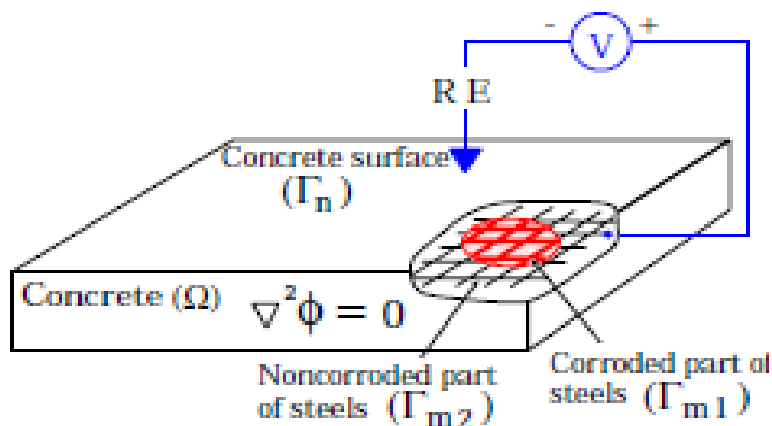


図 3.2.2.1. コンクリート表面の電位測定

(3) 研究内容

(3-1 マルチステップ遺伝的アルゴリズムの利用)

本研究では、前項で述べたように、これまであまり利用されることがなかった数値逆問題解析を用いる方法を探求する。この方法の特徴を以下に示す。亀裂や欠陥の同定では、図 3.2.2.2 (a) のように亀裂や欠陥の個数や形状を予め仮定して、その位置や大きさを求めるという方法がよく用いられる。しかし、鉄筋腐食の場合は腐食部の個数や形状を予め予想することが困難なため、その方法は有効ではない。

そこで、図 3.2.2.2 (b) のように鉄筋コンクリート構造物表面をセルに分割し、そのセルの下部の鉄筋が腐食している場合を 1、腐食していない場合を 0 とし、0 と 1 からなる長いひもを考え、これを遺伝子として遺伝的アルゴリズムを適用する。すなわち、各遺伝子について 1 の部分を鉄筋が腐食しているとして、境界要素法を用いてコンクリート表面の電位を計算し、実験値と比較して適応度をもとめ、適応度の高い遺伝子のみを生き残らせて交差、突然変異などを施して次世代の遺伝子を作る。これを何世代も繰り返して、腐食部の個数や形状を、予め仮定することなく、同定する方法を提案した。

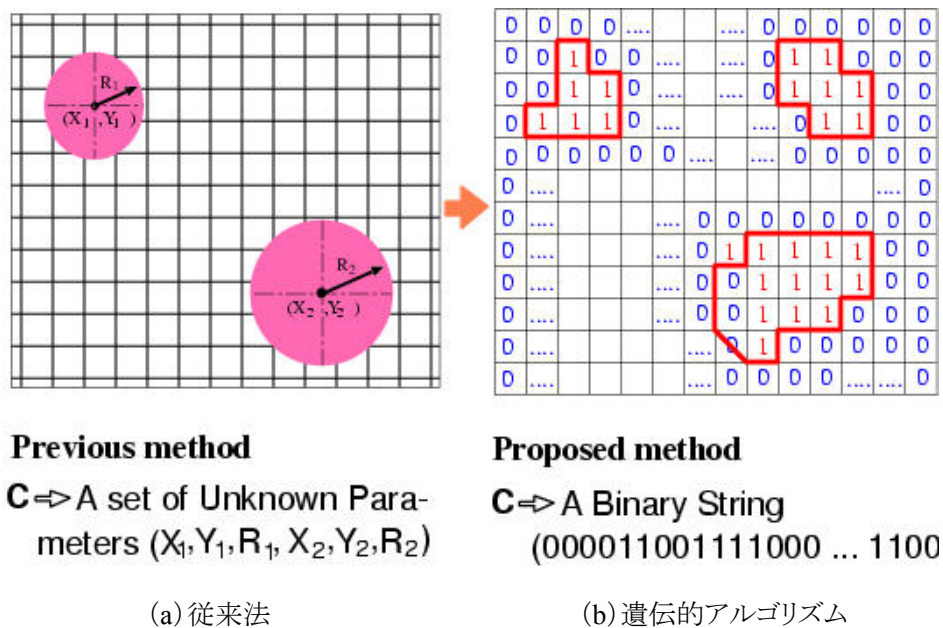


図 3.2.2.2. コンクリート中の鉄筋腐食の検出方法

しかし、この方法を構造物に直接適用すると、計算時間が膨大となるため現実的でない。この困難を克服するために、図 3.2.2.3 のように、最初は粗いセルを用いて大まかに鉄筋腐食部を推定し、次第に解像度を上げるというマルチステップ遺伝的アルゴリズムを用いる。

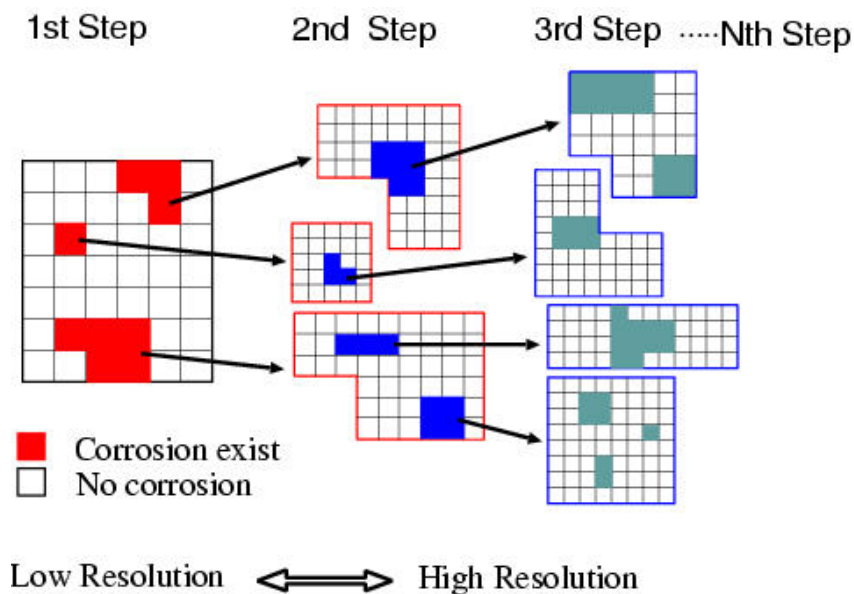


図 3.2.2.3. マルチステップ遺伝的アルゴリズム

各ステップにおける適応度の計算においても、分極曲線を直線で近似することにより、解の重ね合わせを可能にして計算時間を短縮する。図 3.2.2.4 にシミュレーション例を示す。3 ステップで、鉄筋腐食部を正確に推定できていることがわかる。

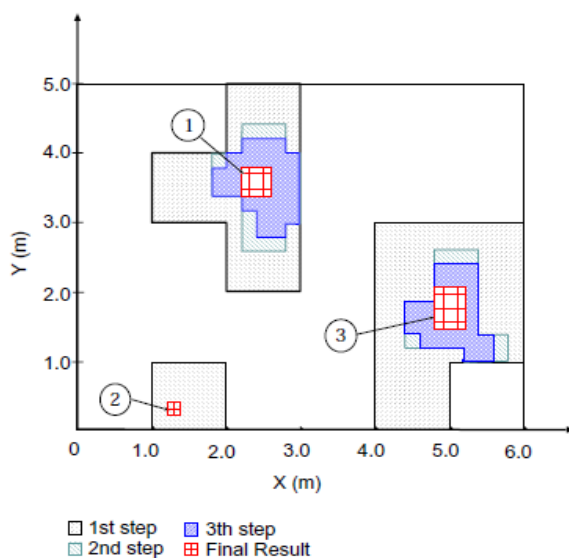


図 3.2.2.4. シミュレーション例

(3-2 網目要素の開発)

マルチステップ遺伝的アルゴリズムによる鉄筋腐食検出の計算時間をさらに短縮することを目指して、鉄筋が網目状であることを考慮に入れた境界要素腐食解析用網目特殊要素(図 3.2.2.5 参照)の開発を行った。網目特殊要素内の鉄筋表面から出入りする電流密度分布を鉄筋の軸方向の直線的变化、円周方向の余弦的变化、軸方向の余弦的变化などの和として 10 個のパラメータで表すことにより、未知数の数を減少させ計算時間の短縮を図っている。

このパラメータ数は、必要な精度に応じて最低 1 個まで減少させることができる。1 個の場合は網目特殊要素内のすべての鉄筋の電流密度は一定値をとる。網目特殊要素に含まれる鉄筋の数も必要とする精度に応じて、任意に選ぶことができる。分極曲線は直線で近似する。

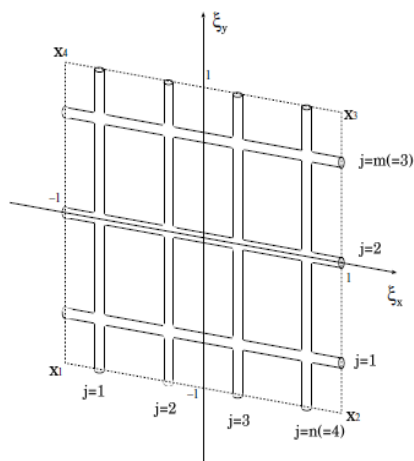


図 3.2.2.5. 網目特殊要素

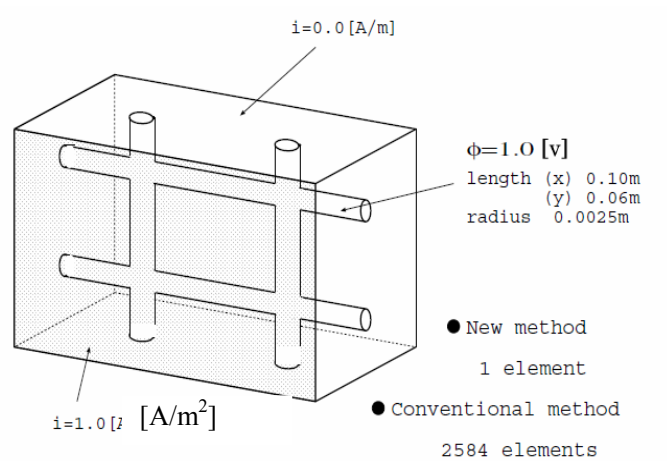


図 3.2.2.6. 井桁状鉄筋を持つコンクリートブロック

図 3.2.2.6 は簡単な井桁状の鉄筋がコンクリートブロックに入っていて、ブロックの前面から電流密度 1.0A/m^2 の一様電流を流し込むことを想定した例題である。ただし、鉄筋の電位は 1V 、ブロック前面以外は絶縁である。図 3.2.2.7 および 3.2.2.8 はこの例題の鉄筋表面の電流密度分布を通常の方法と比較した結果である。両者は良く一致していることがわかる。

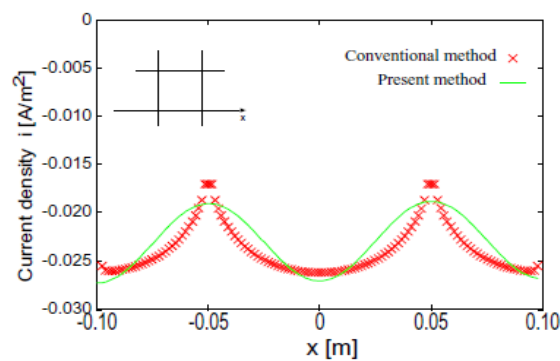


図 3.2.2.7. 井桁状鉄筋の電流密度の軸方向分布

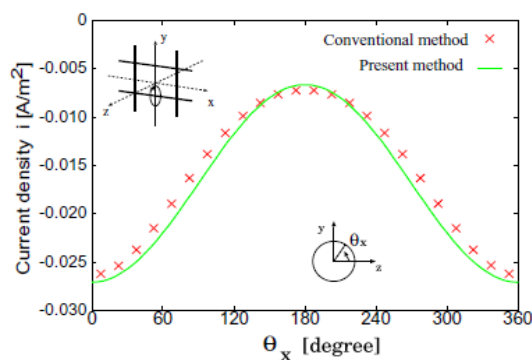


図 3.2.2.8. 井桁状鉄筋の電流密度の周方向分布

図 3.2.2.9 は鉄筋コンクリート柱の中心部に電極を置いて、この電極から電流を流して、鉄筋をカソード防食することを想定した例題である。鉄筋部を網目特殊要素を用いて要素分割した図を図3.2.2.10に示す。縦、横とも2本ずつの鉄筋を持つ網目特殊要素を(対称性より柱の8分の1を)要素分割している。

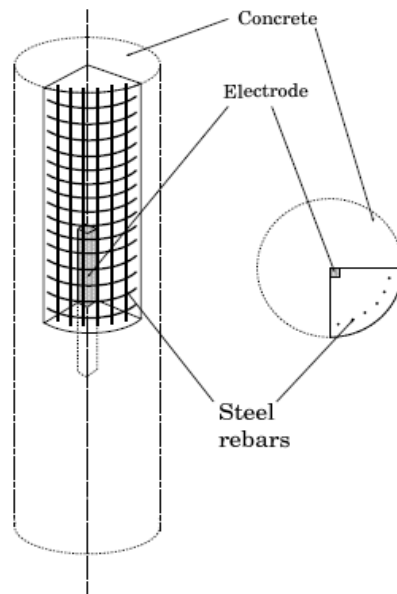


図 3.2.2.9. カソード防食を施した鉄筋コンクリート柱

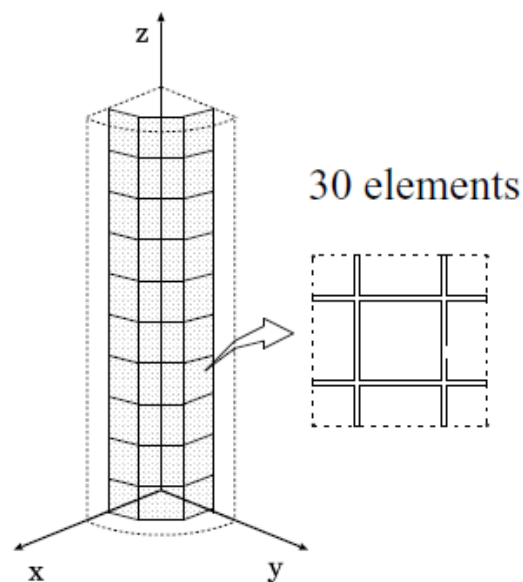


図 3.2.2.10. 網目特殊要素による鉄筋部の要素分割

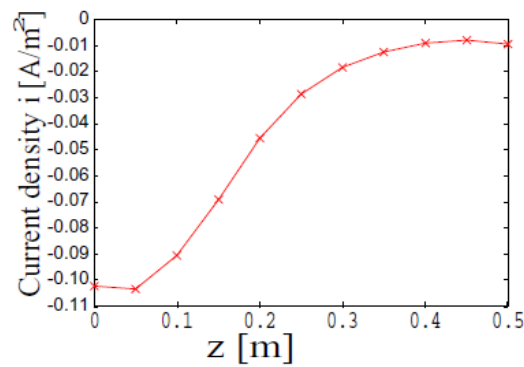


図 3.2.2.11. 鉄筋のコンクリート柱軸方向の電位分布

図 3.2.2.11 は鉄筋の軸方向の電位分布である。本方法はこのような問題の解析に適していることがわかる。この網目特殊要素を前述のマルチステップ遺伝的アルゴリズムに組み入れることにより、さらに効率的な鉄筋腐食同定方法の確立を目指している。

(3-3 腐食に関する特性値の同定)

コンクリート中の鉄筋腐食速度を交流インピーダンス法と計算力学的手法を併用して推定するためには、また鉄筋腐食の詳細なメカニズムを究明するためには、コンクリートの複素電気伝導度および鉄筋とコンクリート間のインピーダンスを把握しておく必要がある。簡単な実験からこれらを同定するための研究を行っている。図 3.2.2.12 は試験片の境界要素分割図である。

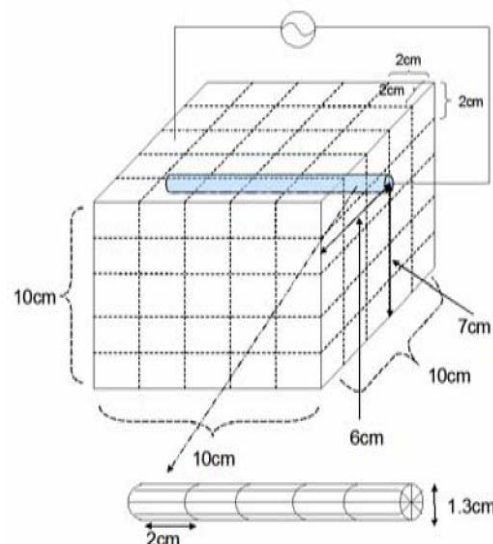


図 3.2.2.12. 試験片の境界要素分割図

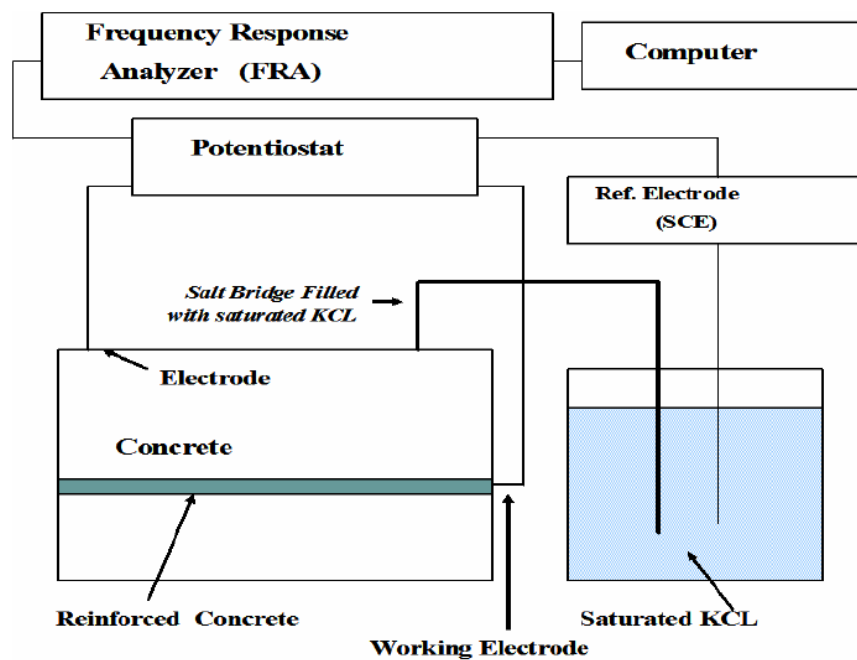


図 3.2.2.13. 実験装置

図 3.2.2.13 に実験装置を示す。材料特性値を精度よく同定するためには、推定誤差マトリックスの最大固有値をできるだけ小さくする必要がある。その観点から試験片表面の測定位置のランク付けを行ったのが図 3.2.2.14 である。現在このことを考慮してデータを収集中である。

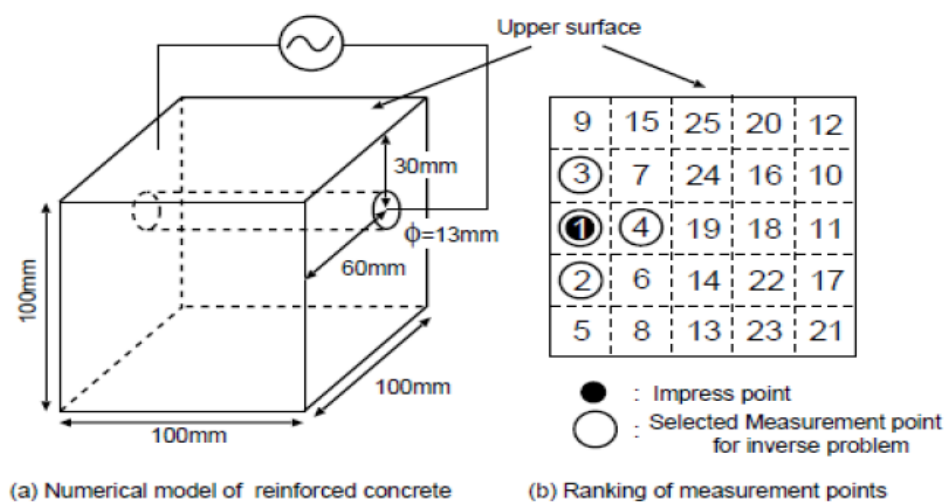


図 3.2.2.14. 逆解析に有効な測定位置のランク付け

(3-4 磁場を利用した鉄筋腐食同定)

栈橋の上から海面に近い裏面近傍の鉄筋腐食を検出する場合のように、コンクリート床の裏面に近い位置の鉄筋が腐食している場合やコンクリートかぶり厚が厚く、腐食部が小さい場合には、コンクリート表面の電位分布による鉄筋腐食検出の精度が不十分になるので、この問題の解決策を探求している。腐食によって生じる電流に起因する磁場に着目し、図 3.2.2.15 のようにコンクリート表面の磁場分布を測定して、境界要素逆解析を行うことにより、表面から遠い鉄筋腐食位置が検出できるかどうかを調べるためにシミュレーションを行った。図3.2.2.16は腐食部が小さい場合の境界要素モデルである。

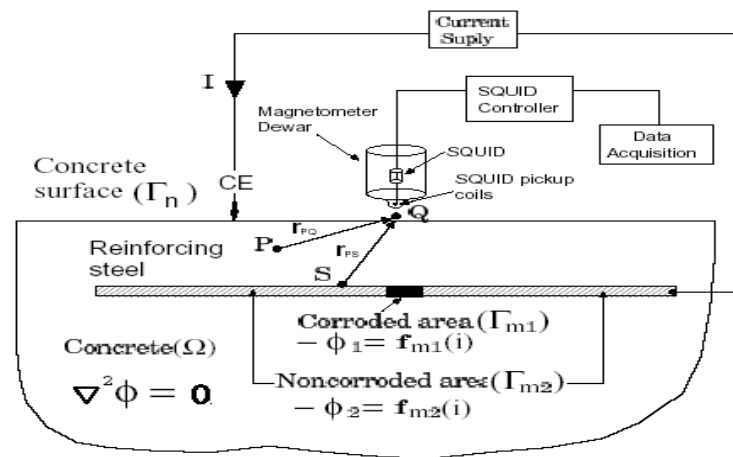


図 3.2.2.15. 磁場計測による鉄筋腐食位置の検出

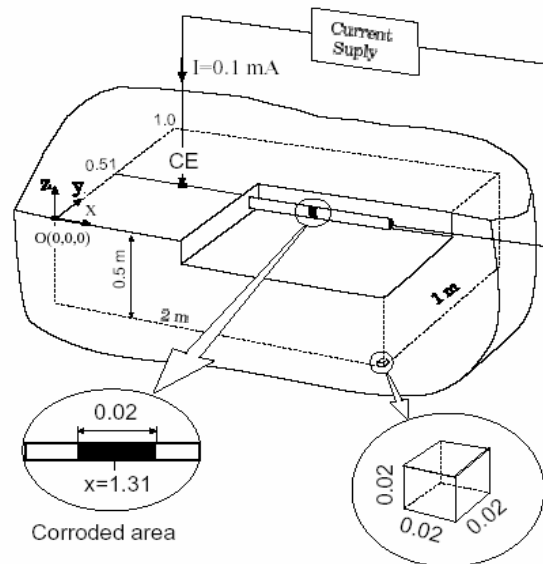


図 3.2.2.16. 境界要素シミュレーションのためのモデル（腐食が小さい場合）

図 3.2.2.17 はコンクリート表面上の磁束密度の計算結果である。図 3.2.2.18 は腐食の有無による磁束密度の差異を模式的に示している。図 3.2.2.19 は参考のために腐食がある場合のコンクリート表面上の電位分布を示している。これらの図から電位からは検出不可能な小さな腐食も磁場を用いれば検出できる可能性があることが予想される。

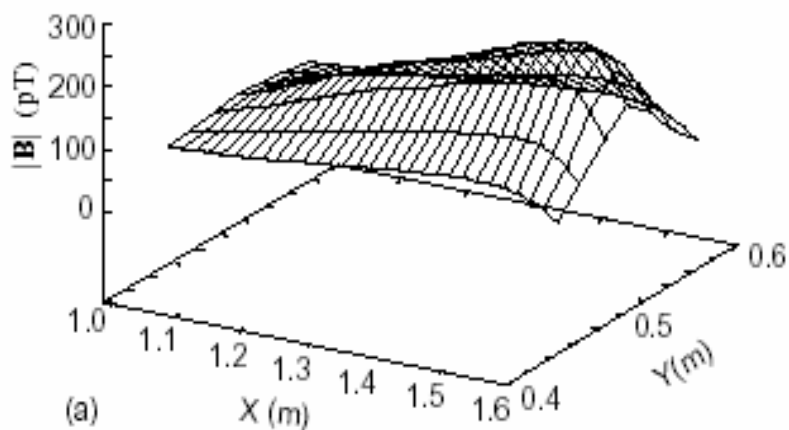


図 3.2.2.17. コンクリート表面上の磁束密度分布

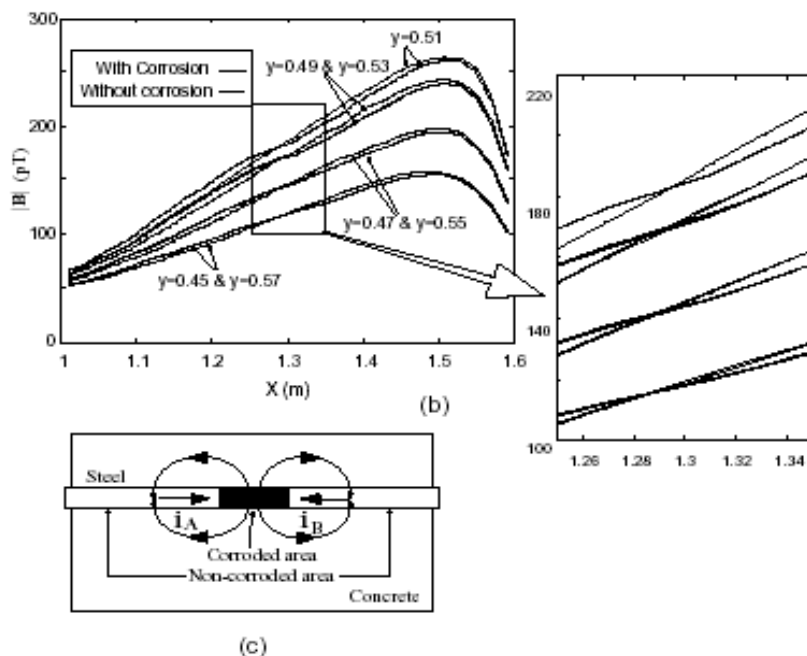


図 3.2.2.18. 腐食の有無によるコンクリート表面上の磁束密度の差異
(a) 表面上の様々な位置における差異 (b) 拡大図 (c) 腐食による電流の模式図

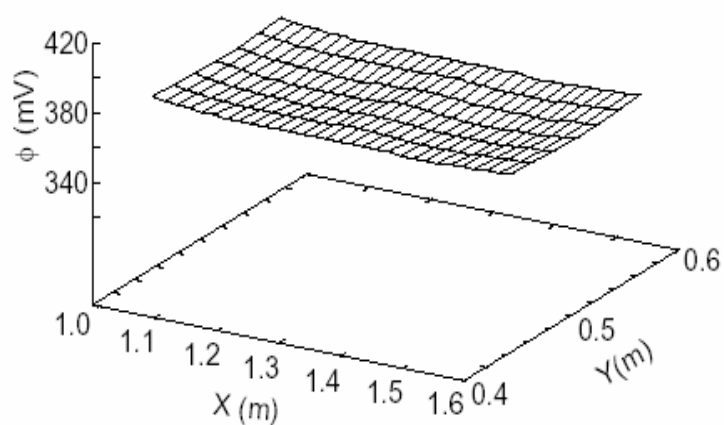


図 3.2.2.19. コンクリート表面上の電位分布

図 3.2.2.20 は 2 層目の鉄筋に腐食がある場合の境界要素モデルである。図 3.2.2.21 は磁束密度または電位の測定値と計算値の差の 2 乗和として定義したコスト関数を比較している。磁場計測による腐食検出の可能性がうかがえる。しかし、磁場測定の誤差や困難さなどに伴う種々の問題など実用までには解決すべき多くの問題が残されている。

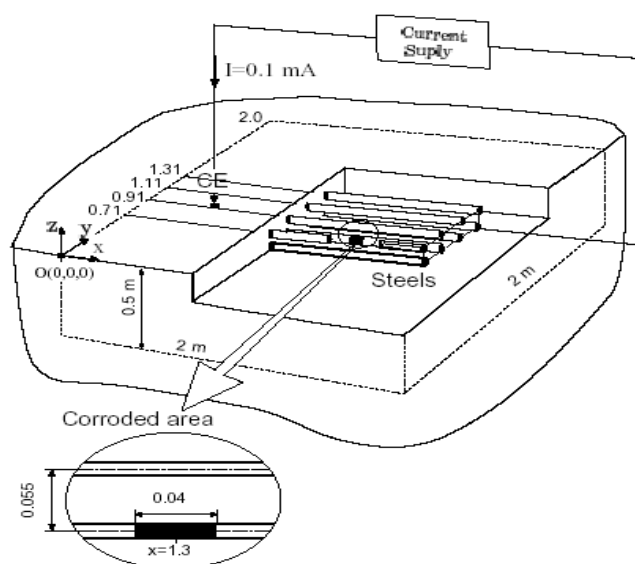


図 3.2.2.20. 境界要素シミュレーションのためのモデル
(第 2 層の鉄筋腐食がある場合)

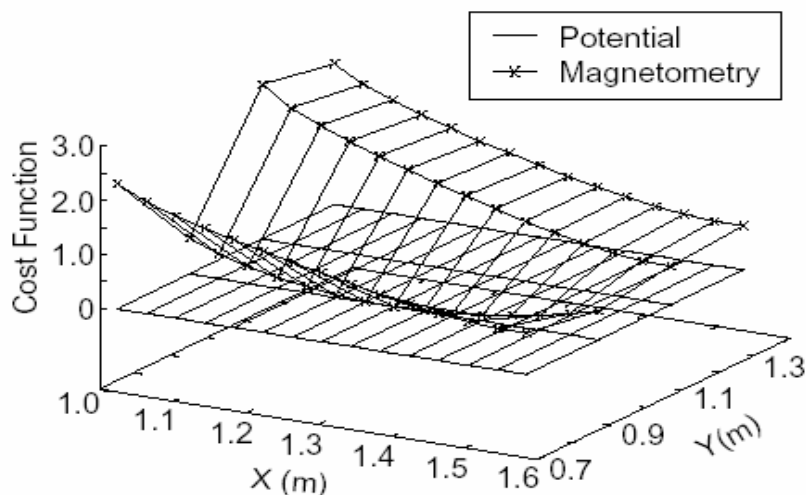


図 3.2.2.21. 磁束密度または電位の測定値と計算値の差の 2 乗和として定義したコスト関数の比較

以上述べてきたように、本年度は、コンクリート中の鉄筋腐食の検出方法として昨年度に開発したマルチステップ遺伝的アルゴリズムを利用する方法を、さらに効率化するために鉄筋腐食を簡便に解析することができる網目特殊要素を開発した。この要素は、必要とする解析精度に応じて、未知パラメータ数を最大 10 個から最低 1 個まで自由に選ぶことができる。2, 3 の例題にこの要素を適用し、その有用性を示した。また、コンクリートの複素電気伝導度と鉄筋とコンクリートの間のインピーダンスを同定するための測定条件を、推定誤差マトリックスの最大固有値を出来るだけ小さくすることにより、最適化した。

(4) H18 年度進捗状況

マルチステップ遺伝的アルゴリズムによる鉄筋腐食検出の計算時間をさらに短縮するために、鉄筋が網目状に配置されることに着目して境界要素腐食解析用網目特殊要素の開発を行った。(3) 項で詳述したように、鉄筋表面から出入りする電流密度分布を鉄筋の軸方向の直線的変化、円周方向の余弦的变化、軸方向の余弦的变化などの和として 10 個のパラメータで表すことにより、未知数の数を減少させ計算時間の短縮を図っている。現在、この網目特殊要素をマルチステップ遺伝的アルゴリズムに組み込むための研究を行っている。

コンクリート中の鉄筋腐食に関する材料特性値(コンクリートの複素電気伝導度および鉄筋とコンクリート間のインピーダンス)を精度よく同定するために、推定誤差マトリックスの最大固有値をできるだけ小さくするという観点から試験片表面における電位の測定位置のランク付けを行った。現在このことを考慮してデータを収集中である。

コンクリート床の裏面に近い位置の鉄筋が腐食している場合やコンクリートかぶり厚が厚く、腐食部が小さい場合には、コンクリート表面の電位分布による鉄筋腐食検出の精度が不十分になるので、この問題の解決策を探求している。シミュレーションにより、腐食によって生じる電流に起因するコンクリート表面の磁場を測定して、境界要素逆解析を行うことにより鉄筋腐食位置が検出できる可能性があることが分かったので、基礎的な実験を行っている。

3.2.3. 複合材料の同定と最適設計

(1) 目標・計画

これまでの材料定数同定は、簡単な形状を持つ試験片への単軸実験で得られた応力・ひずみデータを基に行われてきた。非均質性・異方性を有する複合材料においても、一般に材料実験は荷重方向と材料の繊維方向を一致させた上で単軸試験機にて行われ、別の繊維方向における材料定数同定も、材料の向きを変えて荷重方向とその繊維方向が一致するように固定させて行う。しかし複合材料における変形は微視的な亀裂や繊維の破断など複雑なメカニズムにより生じる。そのため材料定数同定は、試験片の形状や構造ならびに実験の荷重条件を考慮した上で行われなければならない。

複合材料において同定された材料定数の信頼性は試験片の形状や構造、実験の荷重条件ならびに試験機の性能に大きく左右されるにもかかわらず、これまで材料定数、試験片および実験を定量的に評価する手法は開発されていない。そのため、信頼しうる材料定数を同定するのに、どの試験片を何個用い、何点のデータを観測するべきかといった基本的な実験計画はまだ実験者の知識と経験に委ねられている。また複合材料の異方性から近年多軸試験機が開発されつつあるが、多軸試験による材料定数の信頼性はさらに荷重経路に依存するため、材料定数同定実験を様々な面から評価計画し、信頼性の高い同定を行う手法の確立が望まれる。そこで本研究では、複合材料定数同定実験を評価計画し、同定された材料定数の信頼性を定量化する手法の開発を目的とする。

(2) 意義・国際社会との比較

試験片の形状・構造、実験の荷重条件および試験機の性能を統合的に考慮し材料同定を行う手法は確立されていないため、本研究の意義は大変高い。研究者は材料同定分野においてこれまでも第一線で活躍してきており、またその研究成果を基に海外にて職務についており、国際的にも一定の評価を既に得ている。

(3) 研究内容

図 3.2.3.1 に開発する手法の概略図を示す。本手法は Offline path planning, Online path planning, Online elastic identification, Online inelastic identification の4つのループから構成されるが、特筆すべき本手法の斬新さは、実験データ(Empirical knowledge)を取得するたびに材料の弾性・非弾性定数の同定と実験計画を行うことにある。実験データが十分に得られていない段階では、実験は事前知識(Prior knowledge)のみから計画される。実験データが十分に得られた時点では、実験データが得られるたびに弾性定数同定(Online elastic identification)と非弾性定数同定(Offline inelastic identification)を行うが、同時に実験計画も行われ、同定の信頼性が向上される様に単軸では荷重変位、多軸では荷重経路が決定される。

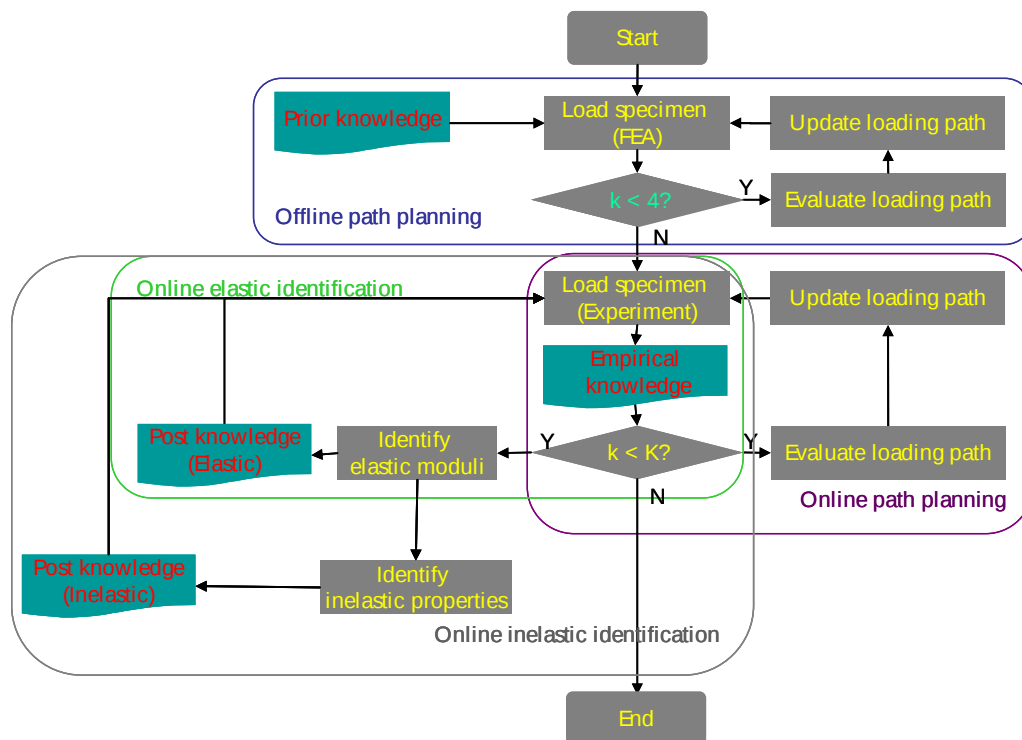
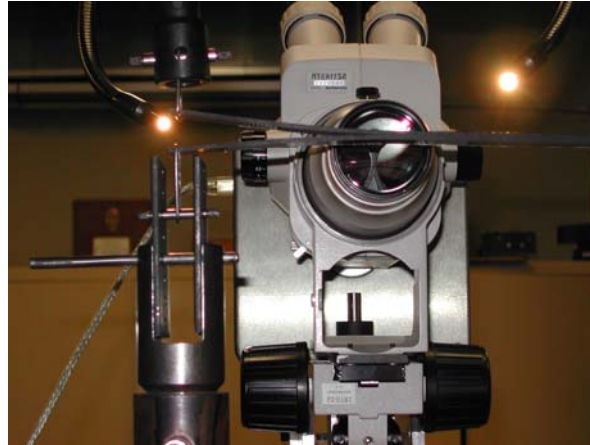


図 3.2.3.1. 本手法の概略図

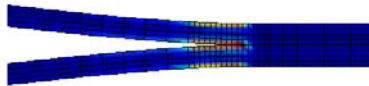
様々な試験片での弾性・非弾性定数の同定および実験計画を行うには、試験片の形状・構造を考慮した上で同定された定数の信頼性を定量的に評価しなければならない。そのため、本手法では線形有限要素法に基づく感度解析から、同定逆問題の特異値を導出し、信頼性の指標として本研究者が定義した Distinguishability と Uniqueness を計算する。Distinguishability と Uniqueness が大きければ大きいほど同定された定数の信頼性が高くなることから、実験計画は両指標を最大にすることにより決定される。弾性定数の同定手法としては、2 手法が開発されつつある。最初の手法は感度解析から得られた線形方程式において逆擬似行列を導出し弾性定数を決定する方法、もう 1 つはベイズ推定に基づくカルマンフィルタを用いて決定する方法である。逆擬似行列による方法は、事前知識や測定誤差分布を用いないことから、材料定数や実験機器に関する予備知識がないときに、カルマンフィルタによる方法は、事前知識・測定誤差分布から統計学的に定数推定を行うことから予備知識があるときに有効と考えられる。非弾性についてはモデルの構築が難しくなることから、モデルの定式化を行わずに実験データから直接モデルを構築する陰構成モデリング手法(本研究者により以前に提案された手法)を用いることとする。

逆擬似行列による弾性材料定数の同定は本年度の研究により既に可能となった。応用例として、破壊解析で用いられる Dual Cantilever Beam (DCB) 実験におけるパラメータ同定結果を図 3.2.3.2 に示す。DCB 実験は図 3.2.3.2(a)に示す通り、試験片の上下片に荷重を加えた際の破壊挙動解析に用いられるが、本手法を用いればこのような試験片を用いても材料定数の同定が可能である。図 3.2.3.2(b-c)は繊維角 0/90 deg で図 3.2.3.2(d-e)は繊維角-30/30 deg で作成された複合材料での変形、および楕円(Distinguishability と Uniqueness から構築され、楕円の面積が大きければ大

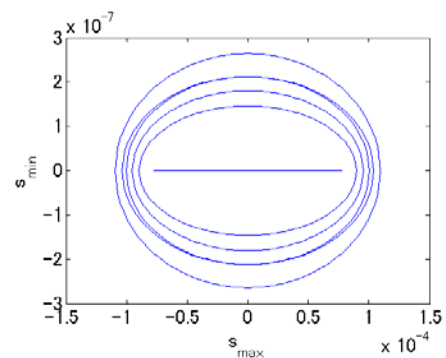
きいほど Distinguishability が多角、楕円が円に近ければ近いほど Uniqueness が高い)を示す。楕円は実験データが得られるたびに描かれ、実験データが得られるたびに面積が大きくなる。楕円の面積と円性から同定された材料定数の信頼性が評価されるため、これらの結果から、試験片の形状が同じでも構造が違う場合、同定された材料の信頼性が異なることが分かる。



(a) DCB 試験



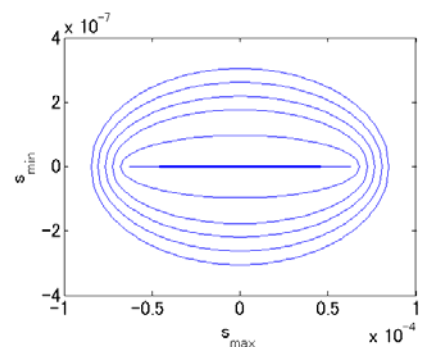
(b) 繊維角 0/90 deg における変形



(c) 繊維角 0/90 deg における楕円



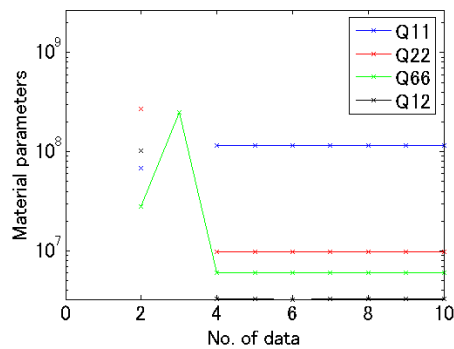
(d) 繊維角 -30/30 deg における変形



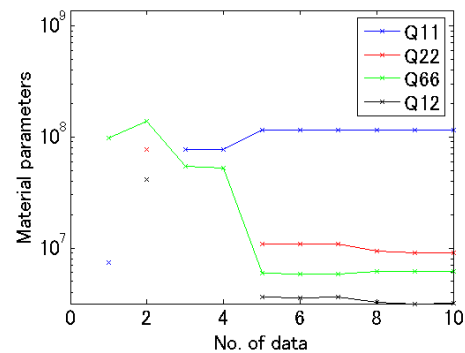
(e) 繊維角 -30/30 deg における楕円

図 3.2.3.2. Dual Cantilever Beam (DCB)実験におけるパラメータ同定結果

これらの材料試験において測定誤差が異なる場合の結果の一例を図 3.2.3.3 に示す。図に示されるよう、測定誤差が小さい場合、4 定数は測定点が 4 点に達した時点でほぼ正確に同定されている。一方で測定誤差が大きい場合はより多くの実験データが必要となるが、測定点が増えるたびに同定された材料定数の信頼性が上がっていることが分かる。



(b) 測定誤差が小さい場合



(c) 測定誤差が大きい場合

図 3.2.3.3. 同定された弾性材料定数

これらの結果から、多軸試験における線形材料定数の同定を試みる。ここで用いられたのは図 3.2.3.4 に示される 3 自由度の試験機で、一定の引張変位に対し、信頼性が最大になるよう試験機上部の姿勢を制御した。その結果を図 3.2.3.5 に示す。図 3.2.3.5(a)から、引張荷重に対しひずみエネルギーの変化が刻み目の部分に集中し、変化を最大にするために荷重角度はプラスとマイナスに大きく変化していることが分かる。また、楕円の面積と円性が増していることから、実験データが得られるたびに同定された材料定数の信頼性が向上していることが分かる。

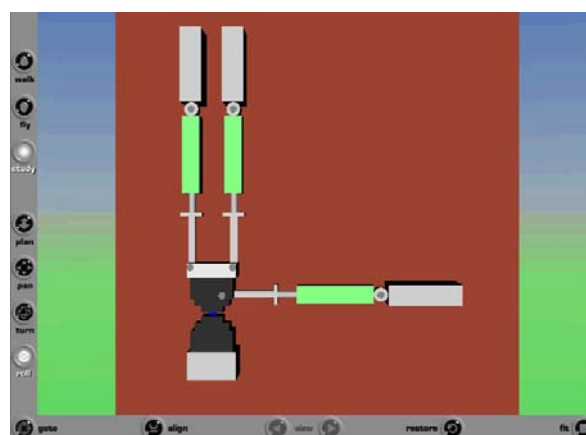
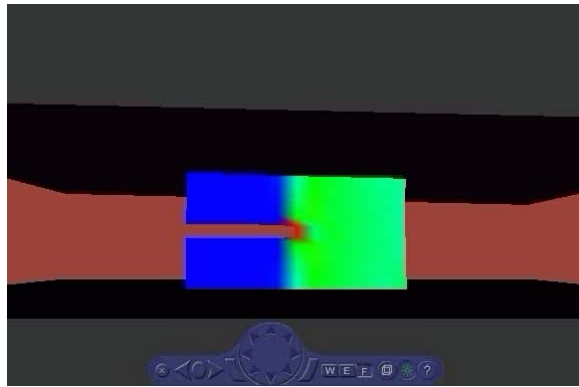
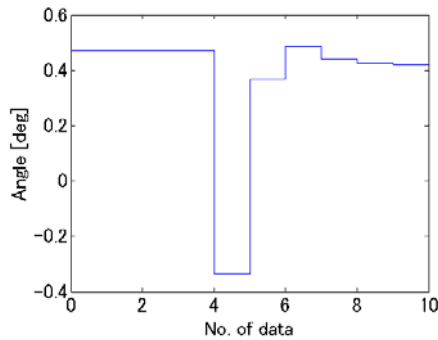


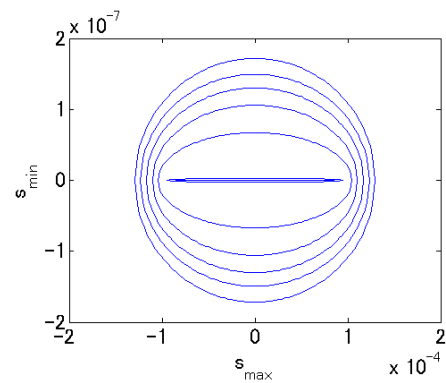
図 3.2.3.4. 3 自由度多軸試験機



(a) ひずみエネルギー増分の分布



(b) 最適角度



(c) 楕円

図 3.2.3.5. 3 自由度多軸試験における最適線形材料定数同定

(4) 平成18年度進捗状況

平成 18 年度の研究では、複合材料の材料定数同定手法の全体像の構築と逆擬似行列による弾性材料定数の同定手法の開発を行い、逆擬似行列による同定手法では、単軸および多軸試験機での材料定数同定と最適実験計画を可能とした。しかし逆擬似行列による同定手法は、材料定数や実験機器に関する予備知識が得られる場合には効率のよい手法であるとは言えず、また実験データが得られるたびごとに逆行列の計算量が増してしまう。そのため、事前知識や測定誤差を確率分布として処理して推定に利用し、また最後の実験データのみから反復計算を行うカルマンフィルタを今後用いて同定し、逆擬似行列による手法と比較する予定である。

3.2.4. 逆解析を用いたスポット像からの位相分布同定法

(1) 目標・計画

本研究では、強度画像からの数値的な光位相分布の推定のために新しい測定系を提案する。まず、同一の被測定光を複数の異なる光学系にそれぞれ通過させ、強度と位相を変調し強度分布を複数測定する。このような測定を行うことで未知数より多くの方程式を用意することができる。これらの光学系および強度分布の情報から観測方程式をたて、位相分布を推定する逆問題を最適化問題として定式化する。この最適化問題を解くことで位相分布を同定する。

(2) 意義・国際社会との比較

光の位相分布には透過物体の屈折率分布、反射物体の表面形状などの情報が含まれる。光位相分布の計測は光学システムの設計評価、表面形状計測、波面補償光学など多くの分野で必要とされる。光位相分布の可視化や定量的測定は工学的に非常に重要である。特に近年 DVD ピックアップに代表されるレーザによる情報書き込み・読み出し装置の評価においては収差解析と呼ばれる位相分布の計測は必要不可欠な技術である。

従来より光の位相分布の測定装置として、干渉計やシャック・ハートマンセンサーなどがある。しかしこれらは非常に高価で、装置を設置するスペースも必要となる。さらに光の分布のスケールが波長レベルになると計測のための調整の労力や誤差が増大する問題がある。光波は CCD などの撮像素子により検出するが、このとき得られるのは光強度分布である。光波は振動数が非常に高く、検出の際に位相分布を直接得ることはできない。

このような特別な測定装置を用いることなく、本研究では、強度画像からの数値的な光位相分布の推定のために測定法を提案する。CCD などにより容易に得ることのできる強度分布画像から数値的に位相分布を推定することができれば非常に有用である。強度は光波を表す複素振幅の絶対値の情報である。よって光波を CCD により1回撮影しただけでは、複素数の実部と虚部を合わせた未知数より絶対値を表す方程式の方が少ないため、複素振幅を得ることはできず、位相分布を得ることもできない。本研究では複数の強度画像から逆解析を用いて位相分布を同定する。

(3) 研究内容

本研究では、強度画像からの数値的な光位相分布の推定のために新しい測定系を提案する。まず、同一の被測定光を複数の異なる光学系にそれぞれ通過させ、強度と位相を変調し強度分布を複数測定する。このような測定を行うことで未知数より多くの方程式を用意することができる。これらの光学系および強度分布の情報から観測方程式をたて、位相分布を推定する逆問題を最適化問題として定式化する。この最適化問題を解くことで位相分布を同定する。本手法では適切な光学系を任意の個数設定することや、先験情報を与えることによって、逆問題の悪条件性を克服し、解を安定化させ唯一解を求めることが可能となる。また本手法で利用する光学系は特性が既知であればどのようなものでも構わない。例えば、レンズ焦点で観測することと、レンズを介さず CCD に直接入射させ観測することは二つの異なる光学系と見なせ、デジタルカメラなどにより容易に実現できる。本手法の有効性は様々な例題に対する数値実験により確認できた。

本研究で設定する位相分布同定逆問題の観測量として得られる強度分布情報は膨大なデータ数になるため、非常に大規模な最適化問題を解くことになる。このような大規模問題に対応す

るためサイズの異なる問題を用意し段階を追って同定する手法を提案した。実際にこの同定手法を適用したところ計算時間の短縮に成功し、有効性を確認できた。

本手法を利用することで、既存の測定器のように高価な光学機器を必要としない、簡便な光位相分布の計測が可能となる。

未知量 複素振幅分布
光伝播モデル

$$\{g\} \text{ (complex vector)} \quad [H]\{g\} = \{f\}$$

**観測量 フォーカスおよび
デフォーカスにおける強度画像**
 $|\bar{g}|, |\bar{f}|$

目的関数(最小2乗法)

$$J(g) = \left\| |Hg|^2 - |\bar{f}|^2 \right\|^2 + \left\| |g|^2 - |\bar{g}|^2 \right\|^2 + \Lambda(g) \rightarrow \min$$

$\Lambda(g)$: regularization term
quartic function
Quasi-Newton method
(BFGS)

図 3.2.4.1. 逆解析手法

(4) 平成 18 年度進捗状況

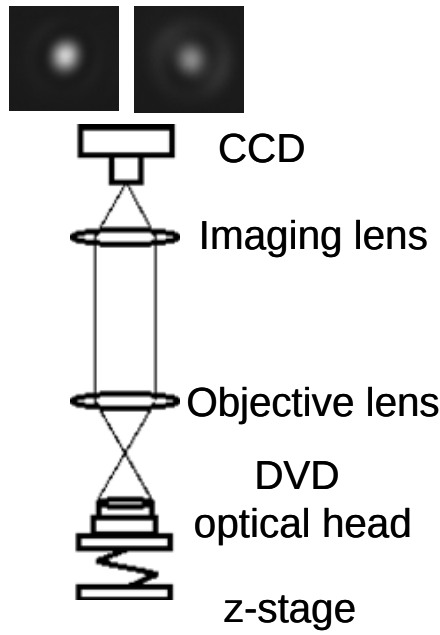
上記の手法は精度および計算時間の両面において、実用上十分なものでは無かった。主な原因は次の二点である。①大規模なマトリックスの積演算を含むため、計算時間が長い。②光伝播の数理モデルをホイヘンスの原理等に近似して求めていたため、対象とする光系のスケールが波長レベルになるとこの仮定が誤差を生む。

本年度の研究において、上記の手法を以下の三点の改良を加えることで高性能化した。①境界要素法を用いて光伝播モデルを表すマトリックスをキルヒホッフの積分方程式からそのまま数値的に求める手法を提案しモデルの誤差を低減する。②光学系による変換マトリックスを高速フーリエ変換し、像空間で周波数成分ごとに独立に積演算を行い、高速フーリエ逆変換により実空間へ戻すことで大規模なマトリックスの積演算を高速化する。③境界要素法による光伝播モデルの積分核のフーリエ変換の解析解を導出することにより、数値誤差を低減し、高速かつ高精度な解析を可能にする。

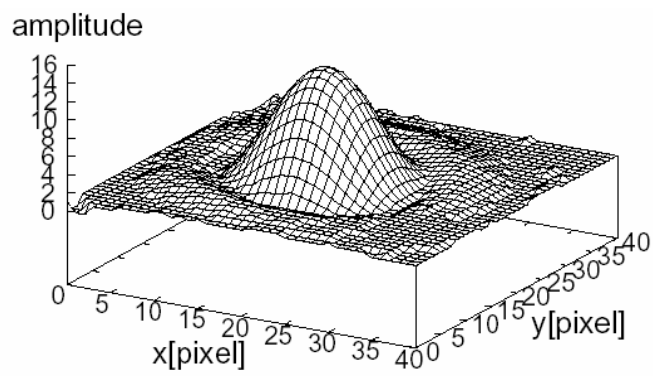
以上の改良を施した本手法を用いて実際の DVD ピックアップの位相分布を約 2 秒程で同定した。さらに、その結果を干渉計による測定結果と比較し、本手法の有効性を確認をした。また、本手法を DVD ピックアップ品質検査装置に応用した。

実験および位相分布の同定

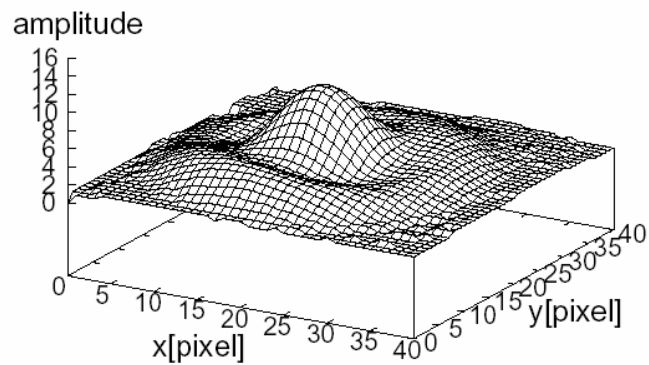
実験条件 測定対象となる光源は波長 650nm の赤色ガウス光源である。焦点における強度画像およびデフォーカス 1μm での強度画像を図 3.2.4.2 に示す装置で撮影した。図 3.2.4.3 および図 3.2.4.4 に撮影した強度画像分布を示す。これらの画像から本手法を用いて位相分布を同定した結果を図 3.2.4.5 に示す。計算時間はパソコンで約 2 秒であった。



☒ 3.2.4.2. Spot profile recording system



☒ 3.2.4.3. Observed amplitude distribution at focal plane.



☒ 3.2.4.4. Observed amplitude distribution at 1 μm defocus.

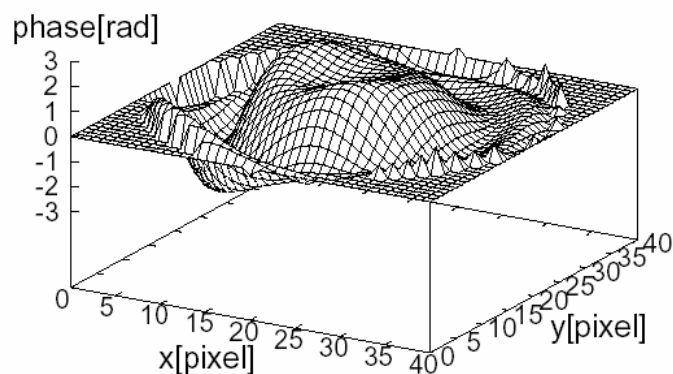


図 3.2.4.5. Identified phase distribution.

3.2.5. 薄膜磁気センサを用いた磁場分布のナノ分解能再構成法

(1)目標・計画

本研究では薄膜磁気センサを磁場分布計測のプロープに応用する手法を提案する。試料を水平面内で回転させ、薄膜センサを試料の極近傍でその厚さ方向に1次元並進スキャンを行い計測データを得る。様々な試料の回転角度、並進位置でのスキャンによる観測量から磁場分布を再構成する。再構成手法には一般的に広く利用されているX線CTアルゴリズムを利用することができる。従来、センサの幅で制限されていた分解能を、本手法では薄膜センサの膜厚と同等にすることができる。

本年度の報告では薄膜磁気センサを利用し、センサの膜厚と同等の分解能で磁場分布を得る手法の詳細を述べ、本手法の数値実験を行った結果を示す。

(2)意義・国際社会との比較

ハードディスク(HDD)や不揮発性磁気メモリ(MRAM)などの各種磁気記録デバイスの研究開発現場において各種デバイスの記録媒体の微小な磁化分布や、微小な磁気ヘッドの周りの磁場分布を評価したいという要求は多い。実用化されている微小領域の磁場計測技術として、磁気力顕微鏡(MFM)があげられる。しかし MFM には微細な先端を有する針状のプロープの製作が容易ではないという問題、またプロープの精密な位置制御が必要となるという問題が存在する。

現在、薄膜技術を用いた磁気センサは HDD のヘッドをはじめ広く利用されている。代表的な薄膜磁気センサとして巨大磁気抵抗(Giant Magnetoresistive)効果を利用した GMR 素子がある。現在の HDD の読み取りヘッドの主流である GMR ヘッドはヘッドの幅が数百ナノメートル程度、膜厚が 10nm 以下となっており、膜厚方向に数十ナノメートルの間隔で並んだディスク上の磁化分布を読み出している。

これらに対し、本研究では逆解析を適用して薄膜磁気センサを用いた高分解能の磁場分布の測定法を提案する。提案する手法では HDD の分野で著しく進歩した計測技術をそのまま利用できるように、安価、簡便に高分解能の計測が期待できる。薄膜磁気センサ技術は HDD 分野に

において著しく進歩しており、測定対象に合わせた磁気感度の設定にこれらの技術を応用できる。通常の磁気力顕微鏡で使用する針状のプローブは水平面で 2 次元の精密制御を必要とするが、本手法ではセンサの幅を試料に対して十分大きく取ること、センサの幅方向の精密な制御を必要としない。一方、角度は無次元数であるためその制御は比較的容易である。従って、薄膜磁気センサを用いた場合、ナノスケールの精密な制御が必要な次元数を 1 次元減らすことができる。これは実際の計測システムを構築の上で大きな利点となる。

(3)研究内容

薄膜磁気センサを用いた観測の原理

薄膜磁気センサとしては様々なものが利用できるが、本報告では GMR ヘッドを例として以下手法を述べる。

観測手法

GMR ヘッドを磁場分布計測のプローブとして利用する手法の詳細を示す。図 3.2.5.1 に示すように試料を水平面で回転させ、ヘッドをその厚さ方向に 1 次元並進スキャンする。ヘッドに流れる電流値を一定に保ち、試料からの磁場による抵抗変化をヘッドの両端での電圧変化として観測する。様々な回転角度、並進位置で得られる複数の観測量から、磁場分布を未知数とする連立方程式を構成する。この連立方程式の構造は X 線 CT (Computed Tomography) で取り扱われているものと同様であるので、方程式の求解には既存の X 線 CT の様々な再構成アルゴリズムが利用できる。

数理モデル

試料、ヘッドに固定された原点を共有する座標系をそれぞれ x, y 座標系、 X, Y 座標系とし、ヘッドの膜厚方向に X 軸、幅方向に Y 軸をとる。試料上の磁場分布の垂直成分を $h(x, y)$ とする。 θ だけ回転した試料上をヘッドが並進スキャンしたとき、位置 X でのヘッドの両端で観測される電圧変化を $g(X, \theta)$ とする。電圧変化 $g(X, \theta)$ はヘッドの膜厚が薄いため、ヘッドの幅方向 (Y 軸方向) での磁場分布 $h(x, y)$ の積分値として次式のように得ることができる。

$$g(X, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) dY \dots\dots\dots (1)$$

$$x = X \cos \theta - Y \sin \theta \quad y = X \sin \theta + Y \cos \theta$$

再構成手法

観測量 $g(X, \theta)$ から試料上の磁場分布の推定値 $\hat{h}(x, y)$ を再構成する手法を示す。再構成には X 線 CT (Computed Tomography) アルゴリズムの一つである FBP (Filtered Backprojection) 法を採用し、次式のように $\hat{h}(x, y)$ が求まる。

$$\hat{h}(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega, \theta) R(\omega) \exp^{i\omega X} d\omega d\theta \quad (2)$$

ただし、 $G(\omega, \theta)$ は $g(X, \theta)$ の 1 次元フーリエ変換、 $R(\omega)$ は Shepp-Logan のフィルタ関数である。

数値実験

順解析

GMR ヘッドを試料上でスキャンし磁場分布から電圧変化を観測する順解析を行う。磁場分布を図 3.2.5.2 に示す。分布の中央に約 $90\text{nm} \times 20\text{nm}$ の大きさの N 極(白)S 極(黒)の磁場分布がそれぞれ存在する。図 3.2.5.2 の磁場分布を 1° 間隔で $0^\circ \sim 180^\circ$ までスキャンし、10%の誤差を加えた模擬計測データを図 3.2.5.3 に示す。図 3.2.5.3 の縦軸はスキャン角度 θ 、横軸はスキャン位置 X を示す。

再構成結果

模擬計測データ図 3.2.5.3 から、式 2 を用いて磁場分布を再構成した結果を図 3.2.5.4 に示す。磁場分布を再構成できていることがわかる。正解の磁場分布、誤差無しの再構成磁場分布、10%誤差を加えた再構成磁場分布の横方向の中心の分布を図 3.2.5.5 に示す。誤差が無い場合には正解とほぼ一致しており、誤差がある場合にも分布の特徴を捉えている。

(4) 平成 18 年度進捗状況

薄膜磁気センサを用いた高分解能の磁場分布の測定法を提案した。数値実験を行い本手法を実証した。提案する手法では HDD の分野で著しく進歩した計測技術をそのまま利用できるため、安価、簡便に高分解能の計測が期待できる。薄膜磁気センサ技術は HDD 分野において著しく進歩しており、測定対象に合わせた磁気感度の設定にこれらの技術を応用できる。通常の磁気力顕微鏡で使用する針状のプロブは水平面内で 2 次元の精密制御を必要とするが、本手法ではセンサの幅を試料に対して十分大きく取ることで、センサの幅方向の精密な制御を必要としない。一方、角度は無次元数であるためその制御は比較的容易である。従って、薄膜磁気センサを用いた場合、ナノスケールの精密な制御が必要な次元数を 1 次元減らすことができる。これは実際の計測システムを構築の上で大きな利点となる。

来年度以降は本年度に提案した手法を実際に実験を行い、手法の有効性を確認する。

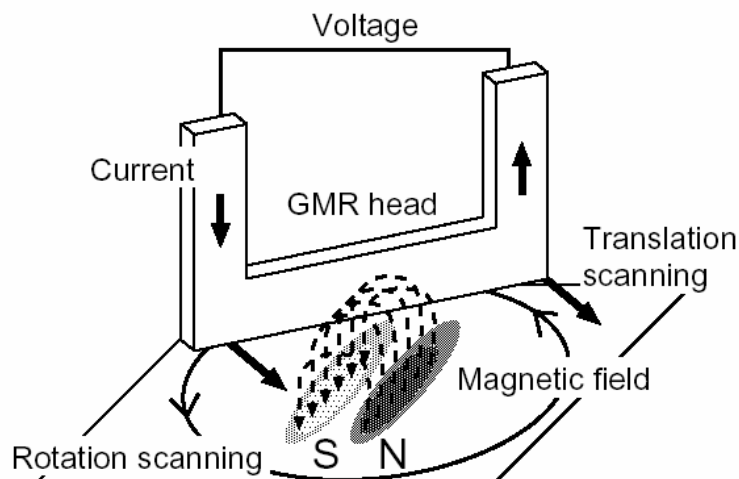
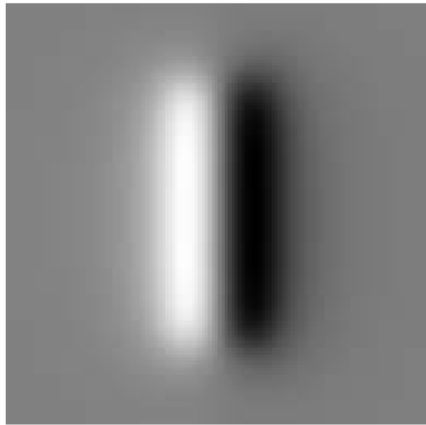
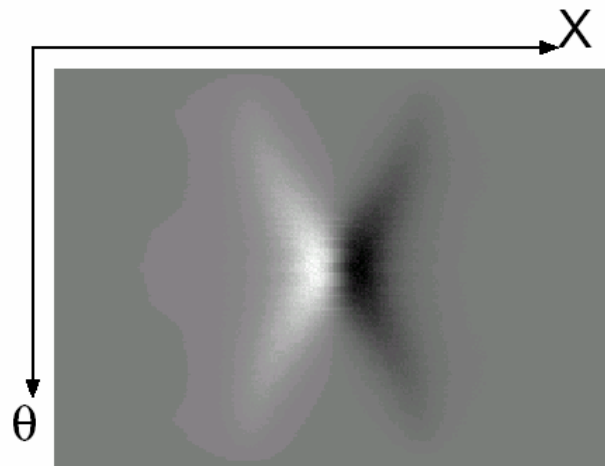


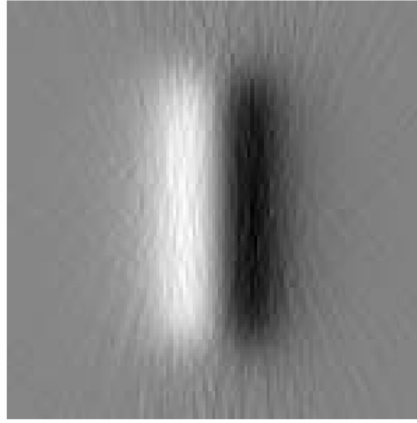
図 3.2.5.1. Observing magnetic field by repeated scanning of the magnetized sample from different angle using GMR head.



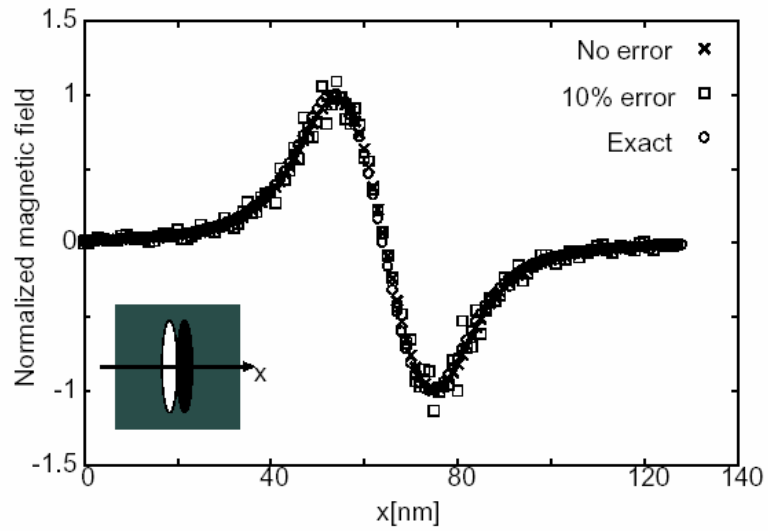
☒ 3.2.5.2. Sample magnetic field distribution.



☒ 3.2.5.3. Measurement data with 10% error: vertical axis is θ and horizontal axis is X .



☒ 3.2.5.4. Reconstructed magnetic field distribution with 10% error.



☒ 3.2.5.5. Comparison of exact data and reconstructed datas on middle horizontal line.

3.2.6. 熱弾性応力測定法の精度向上のための熱伝導逆解析

(1) 目標・計画

熱弾性応力測定法(以下、熱弾性法という)は、線形弾性体の熱弾性効果(断熱状態において、主応力和の変化に比例して温度が変化する現象)を利用し、赤外線サーモグラフィで温度変化分布を計測することにより、主応力和分布を可視化する応力測定法である。

熱弾性法の適用に際しては、通常、測定対象物に振幅と周波数が共に一定の正弦波状負荷を与え、この状態を断熱状態とみなして、測定される温度振幅から直接主応力和の振幅を求めている。しかし、実際には、測定対象物内の熱伝導のために温度振幅の分布と主応力和振幅の分布は一致せず、場合によってはその差異が無視できないほど大きくなる。

本研究は、熱弾性法の精度向上を目的として、赤外線サーモグラフィにより計測される温度分布を元に、断熱状態における温度分布(すなわち、主応力和分布)を推定するための熱伝導逆解析手法の確立を目標としている。昨年度までの研究では、次の各項目を順次実施してきた。

- (a) 熱弾性応力測定における熱伝導順解析手法の開発
- (b) 数値シミュレーションおよび実測データによる熱伝導順解析の精度の検証
- (c) 順解析の反復による熱伝導逆問題解析手法の開発と数値シミュレーションによる有効性の検証
- (d) 差分法を基本とした熱伝導逆解析手法の開発と数値シミュレーションによる有効性の検証
- (e) 差分法を基本とした熱伝導逆解析手法の実測データへの適用

本年度は、これらに引き続き、熱伝導逆解析手法の実用化に向けて、逆解析の精度向上を図るための前処理を検討した。

(2) 意義・国際社会との比較

熱弾性法は、物体に生じる応力の分布を“非接触的に”かつ“画像形式で”測定できるという点において、他の応力測定法にない優れた特徴を有している。特に企業等の現場における実験応力解析では応力分布の定量的評価(応力集中部の正確な把握)の効率化が要求されるが、このような要求に対して熱弾性法は最も適した方法である。近年、自動車産業を始めとする種々の産業の現場において、各種部品の応力測定への適用が試みられつつあり、今後さらなる普及が期待されている。

熱弾性法による応力測定に及ぼす熱伝導の影響は、原理的にはよく知られている。しかしながら、従来の研究は、

- (a) 他の応力測定法との比較による熱弾性法の適用のノウハウに留まっているもの
- (b) 理論的ではあるが定性的な考察による熱弾性法の適用指針に留まっているもの
- (c) 理論的かつ定量的ではあるが、熱伝導による精度低下現象の説明に留まっているもの

のいずれかであり、熱伝導の影響を補正することにより測定精度の向上を図ろうとする研究は世界的にもほとんどなされていない。唯一、Offermann ら(1997)は、有限要素法による熱伝導順解析を反復することにより、測定された温度分布を逐次修正する逆解析手法を示している。しかし、Offermann らの手法は、実用性の面で、現場での応力測定における要求に対して応え得るものではない。

本研究で確立しようとする逆解析手法は、現場での応力測定における実用性を考慮して、熱弾

性法の測定精度の向上を図ろうとするものであり、世界的にも類似の研究は見当たらない。本研究において確立しようとしている熱伝導逆解析手法は、次のような特徴を有する。

- (a) 逆問題解析に関する各種の研究においては、逆解析のテクニックは優れているが、逆問題の設定(前提、仮定)が十分に確認されていないケースがしばしば見受けられる。本研究では、「境界要素法による周期定常熱伝導問題の順解析」と「最新の赤外線サーモグラフィによる実測」を行い、両者が十分に高い精度で一致することを確認し、順解析における熱伝導現象のモデル化を踏まえた上で、逆問題の設定を行っている。
- (b) 有限要素法や境界要素法などの数値解析手法を用いれば実用上十分な精度で本研究の主題である逆解析が可能であることは、Offermann らの研究および著者らの過去の研究により知られている。熱弾性法の利点は「現場での効率的な応力分布の把握」にあるのに対し、赤外線サーモグラフィにより温度分布画像が得られる度に有限要素法や境界要素法の解析モデル(メッシュ)を作成することは、特殊な場合を除けば現実的でない。この難点を踏まえて、本研究では、「赤外線サーモグラフィにより得られるデジタル画像データに対する演算処理」と「測定装置に組み込むことにより現場で使用できる手法」を前提として、差分法を基本とする逆解析手法を採用している。
- (c) 多くの逆問題では、非適切性に起因する多くの困難がある。このことは既によく知られているにもかかわらず、非適切性の回避(緩和)を考慮していない研究論文は未だに少なくない。本研究では、「逆問題の本質的な非適切性」、「実測データの温度分解能」および「実験上不可避なノイズの存在」を考慮して、モリフィケーション法による適切化処理を行っている。

(3) 研究内容

(3-1) 熱伝導逆解析手法

測定対象物内部の熱伝導を考慮すれば、熱弾性法の基礎式は次式で表される。

$$k\nabla^2 T(\mathbf{x}, t) - \rho C_p \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \alpha T(\mathbf{x}, t) \frac{\partial s(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \quad \text{..... (1)}$$

ここで、 T は絶対温度、 s は主応力和、 $\mathbf{x}$ は空間座標、 t は時刻を表し、 α は線膨張係数、 C_p は定圧比熱、 k は熱伝導率、 ρ は質量密度を表す。通常の測定環境において熱弾性効果により生じる温度変化は絶対温度に比べて微小であるから、式(1)の右辺の $T(\mathbf{x}, t)$ を定数(温度の平均値) T_0 で置き換える。代表寸法を L 、代表温度を T_0 、代表応力を σ_0 として、

$$\bar{\mathbf{x}} = \frac{\mathbf{x}}{L} \quad \text{..... (2)}$$

$$\bar{T} = \frac{\rho C_p}{\alpha \sigma_0 T_0} T \quad \text{..... (3)}$$

$$\bar{s} = \frac{s}{\sigma_0} \quad \text{..... (4)}$$

により無次元化し、式(1)の両辺を Fourier 変換すれば、

$$\frac{Fo}{2\pi i} \nabla^2 \hat{\bar{T}}(\bar{\mathbf{x}}, \omega) - \hat{\bar{T}}(\bar{\mathbf{x}}, \omega) = \hat{\bar{s}}(\bar{\mathbf{x}}, \omega) \quad \text{..... (5)}$$

を得る。ここで、 $\hat{\bar{T}}$ と $\hat{\bar{s}}$ はそれぞれ $\bar{T}$ と $\bar{s}$ の Fourier 変換、 ω は角周波数、 i は虚数単位を表し、 Fo は

$$Fo = \frac{2\pi k}{\omega L^2 \rho C_p} \dots\dots\dots (6)$$

により定義される Fourier 数である。線形弾性体に振幅と周波数が一定の正弦波状負荷を与える場合、式(5)における角周波数 ω は負荷の角周波数に等しく一定であり、主応力和の位相は位置に依らず負荷の位相と同一である。

式(5)に基づいて熱伝導逆解析を行うために、モリフィケーション法を導入する。本研究では 2 次元平面問題 ($\mathbf{x} = (x, y)$) を考える。2 次元のモリフィケーション関数は次式で定義される。

$$\rho(x, y) = \frac{1}{\delta^2 \pi} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\delta^2}\right) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 δ はモリフィケーション半径と呼ばれ、熱伝導逆解析における適切化パラメータとなる。

最近の熱弾性応力測定装置に使用されている赤外線サーモグラフィでは、振幅と周波数が一定の負荷の下でロックイン計測を行うことにより、温度の振幅と位相の分布がデジタル画像データとして得られる。そこで、この画像データに対して次の処理を行う。

(a) $\rho(x, y)$ と $\hat{T}(x, y)$ との畳み込みにより $\hat{T}(x, y)$ の平滑化近似値を求める。

(b) $\nabla^2 \rho(x, y)$ と $\hat{T}(x, y)$ との畳み込みにより $\nabla^2 \hat{T}(x, y)$ の平滑化近似値を求める。

温度の画像データの各画素を格子点と考えれば、これらの処理によって各格子点における温度の振幅と位相のデータから $\hat{T}(x, y)$ および $\nabla^2 \hat{T}(x, y)$ の平滑化近似値が得られ、これらから式(5)に基づいて直接計算することにより各格子点において $\hat{\mathbf{s}}(x, y)$ すなわち主応力和の振幅と位相が直ちに得られる。なお、実際には $\hat{T}(x, y)$ は離散データであるから、畳み込みは $\pm 3\delta$ の範囲について数値積分により計算する。

(3-2) 円孔を有する帯板の引張りの問題に対する適用

本研究では、典型的な平面応力問題の一つである円孔を有する帯板の引張りに関する実験を行い、その実験データに対して前述の熱伝導逆解析を適用した。

アルミニウム合金 A2024 製の帯板(幅 50 mm, 厚さ 3 mm, 円孔直径 16 mm)に正弦波状負荷(平均値 2.5 kN, 振幅 2 kN, 周波数 1 Hz)を与え、熱弾性応力測定装置(Cedip, Jade, Altair LI)により温度の振幅と位相を計測した。材料定数は $\alpha = 23.2 \times 10^{-6}$ [1/K], $C_p = 880$ [J/kg K], $k = 120$ [W/m K], $\rho = 2770$ [kg/m³]であり、温度は $T_0 = 296$ [K]であった。図 3.2.6.1 に計測結果を示す。この計測結果は、別途行った境界要素法による熱伝導順解析の結果と十分に高い精度で一致した。

そこで、図 3.2.6.1 の計測結果に対して前述の熱伝導逆解析を適用した。代表長さ L は円孔の直径(1 画素当たりの無次元長さは約 0.02)、代表応力 σ_0 は負荷振幅を帯板上下端部の断面積で除した値(13.3 MPa)とした。以下では、図 3.2.6.1 の温度計測結果と比較するために、逆解析結果の主応力和と振幅に $\alpha T_0 / \rho C_p$ を乗じ、温度振幅に換算して表示する。

まず、最も簡便な逆解析の適用法として、試験片と背景を含む画像全体に対して逆解析を適用した結果を図 3.2.6.2 に示す。モリフィケーション半径は試行錯誤的に $\delta/L = 0.10$ すなわち約 5 画素とした。この場合は、計測結果よりもさらに精度が低下しており、逆解析の効果は全く認められない。

そこで、試験片の左右両端および円孔部の境界を指定し、境界において断熱条件を設定した上で、逆解析を適用した結果を図 3.2.6.3 に示す。板の左右両端では比較的良好な結果が得られているが、円孔近傍では満足できる程度の結果とは言えない。これは、試験片の変形に伴って生

じるいわゆるエッジ効果によって、温度の計測精度が低下したことが主因と考えられる。

さらに、エッジ効果が顕著であると判断される円孔近傍の領域について、計測データを直接利用する代わりにその周辺領域のデータから外挿したデータを用いて、逆解析を適用した結果を図 3.2.6.4 に示す。図 3.2.6.3 に比べて円孔近傍での精度向上が認められる。

最後に、負荷の位相を基準とするときの主応力和の位相が零であるという先見情報を利用し、各格子点における主応力和の推定結果の虚部の絶対値が最小となるようにモリフィケーション半径 δ の値を調整した。この操作は、逆解析における適切化パラメータの最適化に相当する。 δ/L の値を 0.03～0.14(約 1～7 画素)の範囲で 0.01 刻みに調整した場合の結果を図 3.2.6.5 に示す。図 3.2.6.4 に比べて円孔近傍の位相の精度が向上している。なお、幾つかの格子点において δ の調整範囲内に最適値が存在しない場合もあるため、実用上は δ の調整範囲を適切に設定するような工夫が求められる。

(4) 平成 18 年度進捗状況

前述した研究内容に示したように、本年度は熱弾性法における熱伝導の影響を補正するための実用的な手法の確立を目的として、モリフィケーション法に基づく熱伝導逆解析手法の精度向上を図るために、逆解析の前処理について検討した。その結果、実用上十分な精度で熱伝導の影響が補正できることが明らかとなった。

本年度までに開発してきた逆解析手法は、平面応力問題すなわち 2 次元問題に対する手法である。しかし、実際に企業等の現場で求められるのは複雑な形状を有する 3 次元形状の部品等の応力測定であり、これまでに開発した手法を直ちに適用することはできない。今後は、3 次元問題への取り組みが課題である。

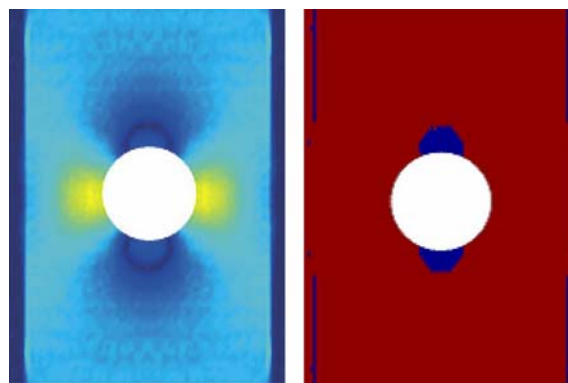


図 3.2.6.1. 実験において計測された温度分布(左:振幅, 右:位相)

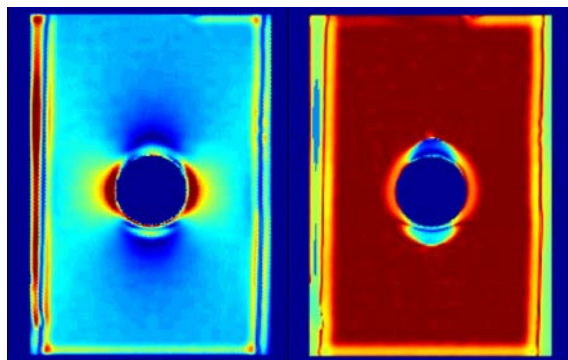


図 3.2.6.2. 背景を含む画像全体に対して逆解析を適用した場合の結果(左:振幅, 右:位相)

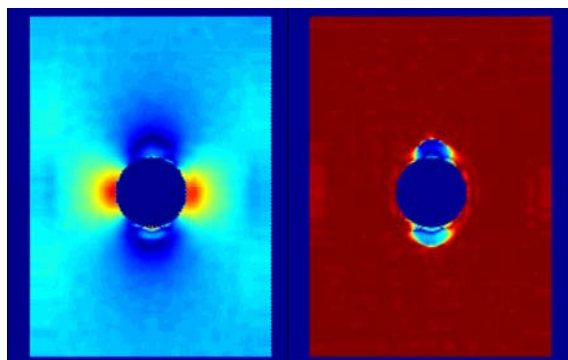


図 3.2.6.3. 試験片の境界を指定し, 境界上で断熱条件を仮定して逆解析を適用した場合の結果
(左:振幅, 右:位相)

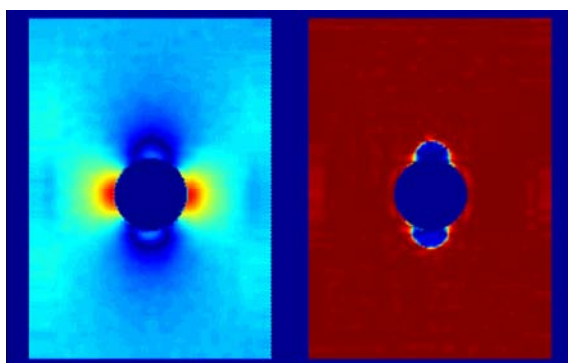


図 3.2.6.4. 図 3.2.6.3 の場合の操作に加えて, 円孔近傍の領域のデータの代わりにその周辺領域から外挿して得たデータを用いて逆解析を適用した場合の結果(左:振幅, 右:位相)

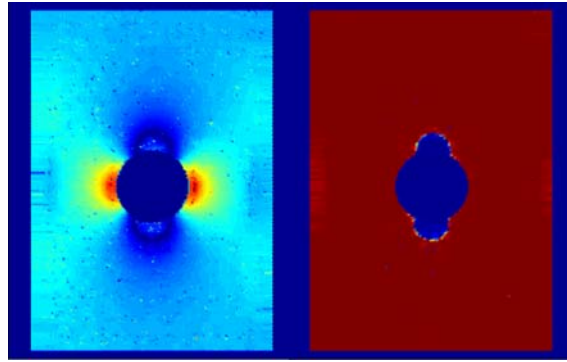


図 3.2.6.5. 図 3.2.6.4 の場合の操作に加えて、モリフィケーション半径を各画素毎に最適化して逆解析を適用した場合の結果(左:振幅, 右:位相)

3.3. 最適化

3.3.1. 最適化に関する研究の概要

本研究では逆問題技術、ロバスト設計技術、メッシュ生成技術の高度化を目的として研究を行っている。メッシュ生成技術ではドローネ分割の自動改良技術の開発を 2 次元、3 次元の順に行う。ロバスト設計では、従来のロバスト設計技術の問題点の洗い出しと、最適化技術との組み合わせ法の改良を行っている。

3.3.2. 大規模構造問題における形状最適化問題の研究

(1) 目標・計画

構造健全性を評価する上で計算力学的手法は実験に代わる評価手法としてその重要性が高まってきた。構造健全性をさらに高めるためには、危険な現象が発生しにくい構造に設計を変えていくための最適化手法を開発する必要がある。本研究では、計算力学的手法によって解かれてきた大規模構造問題に対して、大規模な数値モデルのまま評価関数が最適化するように数値モデルの形状を更新する手法を開発することを目指している。これまでの研究により、関数空間の勾配法を応用した汎用的な解法を開発し、弾性体、流れ場、熱伝導場、音場を対象とした形状最適化問題が解けることを示してきた。本研究では、その汎用解法を各種連成問題に適用することを目指とした。今年度は、流体・構造連成系の形状最適化問題に対してレイノルズ数を高めた場合の解析が可能のように流れ場の安定化手法を取り入れたプログラムの開発を試みた。さらに、2 つの弾性体が大変形しながら接触する場合の形状最適化問題を新たに提起し、問題の定式化と解法を明らかにすることを試みた。

(2) 意義・国際社会との比較

これまで最適構造設計と呼ばれてきた研究分野では、長さや断面積などの有限個のパラメータを設計変数に選んだパラメトリック形状最適化問題が扱われてきた。それに対して本研究では、形状変動を写像で定義したノンパラメトリック形状最適化問題を扱った。ノンパラメトリック形状最適化問題による定式化は、計算力学の手続きで作成された離散化モデルに応じた設計自由度を確保できる点が優れている。

ノンパラメトリック形状最適化問題に関する理論研究はフランスの応用数学者らが先駆的な研究を行ってきた。その結果に基づけば、それぞれの形状最適化問題に対して形状変動に対する目的汎関数の第 1 変分から形状勾配が評価可能であることは示せる。しかしながら、形状勾配は滑らかさが不足するために、形状勾配を直接用いた勾配法では形状の滑らかさが維持できないという問題があった。その問題を克服するために、応用数学者らはペナルティ法による方法を提案してきた。それに対して、本研究では、形状勾配を第 2 種あるいは第 3 種境界条件に用いた楕円型偏微分方程式の境界値問題の解を用いることで滑らかさを保持する方法を開発してきた。この方法は、ペナルティ法と比較して手続きが簡単であることから、プログラム開発が容易であり、大規模な問題にも適している。形状最適化問題の理論研究に関しては、フランスの応用数学者らがリードしてきたが、解法の研究では本研究がリードしていると考えている。

(3) 特徴

本研究で注目するノンパラメトリック形状最適化問題の定式化と解法の特徴は汎用性にある。対象とする現象の偏微分方程式の境界値問題が定式化されれば、その問題の形状勾配を評価するための随伴問題が決定する。随伴問題も計算力学の手法を適用することによって数値的に解くことができる。本研究で目標とする各種連成問題の形状最適化問題も、同様に解くことが可能である。

(4) H18 年度進捗状況

(1) 流体・構造連成系の形状最適化問題

流体を扱う大規模構造の健全性を高めるためには、流体と構造系を連成させた問題を数値的に精度よく解いた上で形状最適化を検討する必要がある。本研究では、流体・構造連成問題の形状最適化をノンパラメトリック形状最適化問題として定式化し、形状勾配を利用した解法を開発することを目標としてきた。昨年度は、流れ場の安定化手法を使用しなかったために低レイノルズ数の問題しか解析できなかった。今年度は、安定化手法を取り入れることにより、高レイノルズ数の非定常流れ場と構造の連成問題を対象とした形状最適化問題を解析できるように改良した。

(2) 接触する弾性体の形状最適化問題

構造設計において接触応力を適切に制御することが健全性を高めるために重要となる場合がある。これまで、異なる材料を接合した弾性体に対して、外力を固定した下で、界面の形状を最適化することで指定した境界の変形を制御できることが示されてきた。本研究では、外力が弾性接触によって与えられた場合を想定して、応力が均一化する界面の形状最適化問題をノンパラメトリック形状最適化問題として定式化し、形状勾配を利用した解法を開発することを目標とした。弾性変形には幾何学的非線形性を考慮した定式化を用い、接触はラグランジュ乗数法に基づく定式化を採用した。今年度は、接触解析が精度よく行えるプログラムの開発を行った。

3.3.3. 境界条件の最適化研究

(1) 目標・計画

構造の最適化技術の開発は、製品開発の究極の目標であったが、現在はこれまでの研究段階から実用段階に移りつつある。このような段階において重要となっているのが、解析精度のさらなる向上とデータ作成の簡便化である。特に非線形解析においては適切な境界条件を設定することが困難であることが多く、解析精度の低下の原因となっている。そこで、本研究では逆問題技術を用いて境界条件設定の精度を向上させることを目的として研究を行っている。

逆問題手法による境界条件の推定では、まず摩擦力が小さい場合の基本問題における摩擦係数の推定技術の開発を行い、次に摩擦力を大きくして推定アルゴリズムの改良を行っていく。最終的には実機レベルの応用を目指している。

(2) 意義・国際社会との比較

前記の目標でも述べたように解析精度の向上は構造設計の実用上、重要な意義をもっている。

(3) 研究内容

順問題(direct problem)とは原因から結果を考えていく方法で、逆問題(inverse problem)とは結果から原因を求める方法のことを言う。順問題がうまく解ける場合でも、逆問題が解けないことがある。すなわち、原因から結果を推定することが容易であっても、その逆に結果から原因を推定することは難しいということである。したがって、逆問題を解くときは順問題とは別のアプローチが必要となることが多く、その手法を一般的には「逆解析」と呼ぶ。

一般的に順問題より逆問題の方が難しいと言われているのはなぜか。これは先にも述べたが順問題というのは様々なデータを元に結果を求める方法なのだが、逆問題で使う結果はたいていの問題で小さな誤差を含んでいる。この誤差が逆問題を難しくしている理由とも言えるだろう。また逆問題には解ける問題と解けない問題(問題の適切性と非適切性)があるので簡単に説明しておく。

逆問題を行おうとするといきなり困難に出会ってしまうことがしばしばある。順問題はなんなく解けたのに、逆問題になるとまったく解けなくなってしまう場合である。『順問題は解けたのに逆問題は解けない』順問題は適切であるが逆問題としては非適切であるといえる。では『順問題が適切である』というのはどういうことかという、順問題の時は【解があり(解の存在性)、解は一組であり(解の一意性)、問題が少し変わってもそれに応じて答えを見つけられる(解の安定性)】ということだ。これを【解の適切性】という。逆問題が解けなかったのは順問題の適切性とは逆のことが逆問題にいてしまったからである。それは逆問題として『答えがない(解の存在性)、または答えがたくさんある(解の一意性)、そして入力を少し変えると、出力は大きく変わってしまう(解の連続性)』ということである。これの3個を総称して【解の非適切性】という。

これを簡単な数学の因数分解をする問題で表現してみると以下ようになる。以下の式(1)を例にとって考えると逆問題の非適切性(解の存在性、解の一意性、解の連続性)は次のように説明できる。

$$[A][x] = [y] \quad (1)$$

- 1, $[A] = [1, 2]^T$ (2×1 -行列)の場合、 $[y] = [3, 4]^T$ に対して式(1)を満たす $[x]$ は存在しない。
- 2, $[A] = [1, 2]^T$ (1×2 -行列)の場合、 $[y] = [1]$ に対して任意の a の $[x] = [1 + 2a - a]^T$ は式(1)を満たすため、 $[x]$ が多数存在することになる。
- 3, $[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e \end{bmatrix}$ (2×2 -行列)の場合、 $[A]$ の逆行列は $[A]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/e \end{bmatrix}$ だから、どのような $[y]$ に対しても式(1)を満たす $[x]$ を求めることができる。しかし、 $e \leq 1$ であれば、ほんの少し異なる $[y_1]$ と $[y_2]$ 対しても、式(1)を満たす $[x_1]$ と $[x_2]$ が大きく変わるようになる。

本研究では、接触解析における摩擦係数を、変位やひずみから推定する技術を研究している。推定に用いているのは応答曲面である。したがって精度よい応答曲面をいかに生成するかがポイントとなる。

(4) 平成18年度進捗状況

図 3.3.3.1 のフローチャートは応答曲面法を逆問題に応用した例で、図 3.3.3.2 は測定変位から摩擦係数を推定した結果を示したものである。この手法による推定精度は応答曲面の出来にかかっている。

フローチャート

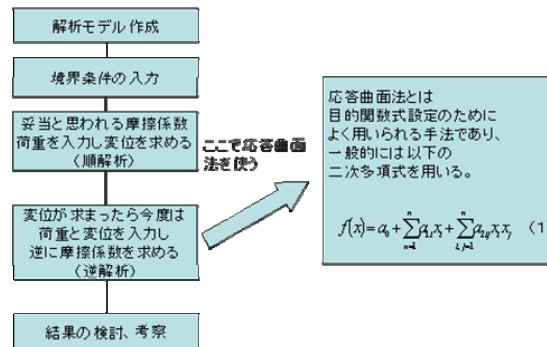


図 3.3.3.1. フローチャート

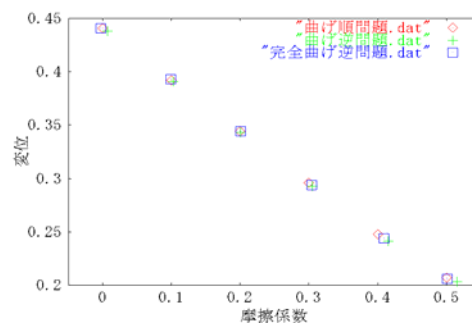
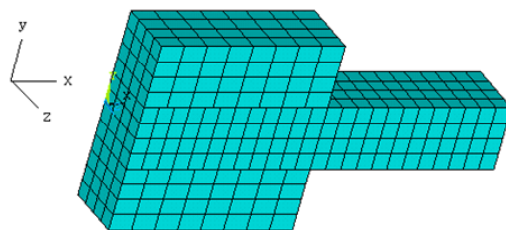


図 3.3.3.2. 測定変位から摩擦係数を推定した結果

平成 17 年度の研究では、2 次元問題で、すべりが比較的少ない場合を対象としていた。上の結果から分かるように、この場合は精度よく推定できることを確認した。平成 18 年度では、3 次元問題に拡張し、さらにすべりがかなり生じている場合も対象とした。

図 3.3.3.3 は解析モデルである。



Number of nodes 3811 Number of elements 848
Young's modulus 21(GPa) Poisson's ratio 0.3

図 3.3.3.3. Analysis model

接触条件を図 3.3.3.4 に示す。

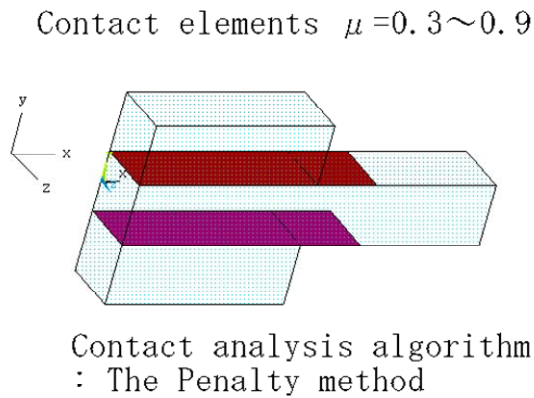


図 3.3.3.4. Contact condition

すべりが生じる場合は、応答曲面に折れ目ができる。したがって、応答曲面作成のために用いるデータの選択が重要となる。そこで次に示すようなアルゴリズムを考案した。

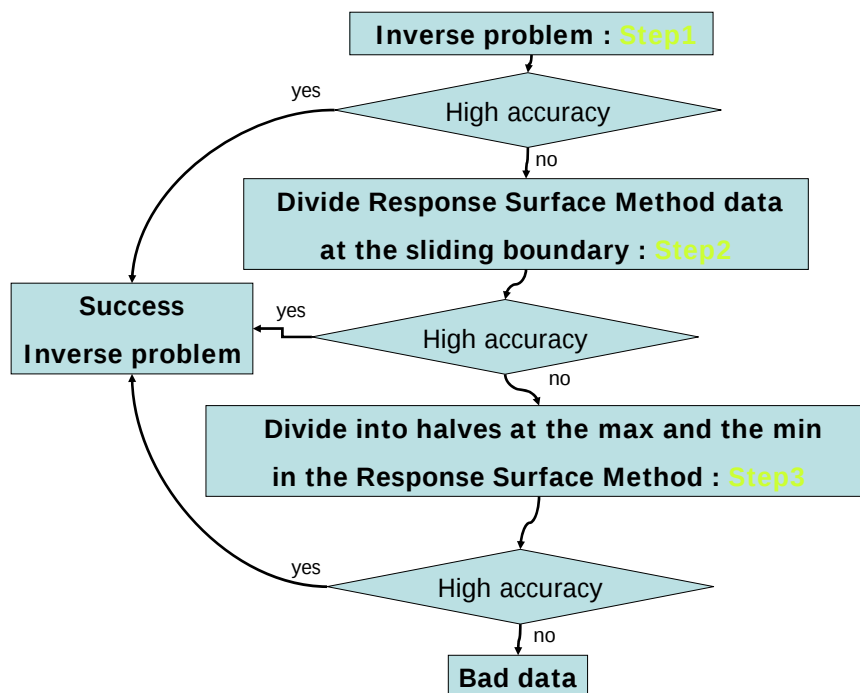


図 3.3.3.5. Algorithm for making response surface

これは、推定精度をデータを徐々に分割していく方法である。推定精度は推定した値を使って順解析を行い、推定に用いた変位(またはひずみ)とどの程度一致するかで評価する。

図 3.3.3.6は、横軸に順解析に用いた摩擦係数、縦軸に推定誤差をとったもので、ステップ1は初期のデータを分割しなかった場合の結果で、ステップ2は第1回目の分割結果、ステップ3が第2回目の分割結果である。この図からデータを分割するにつれて推定精度が上がっていることが分かる。

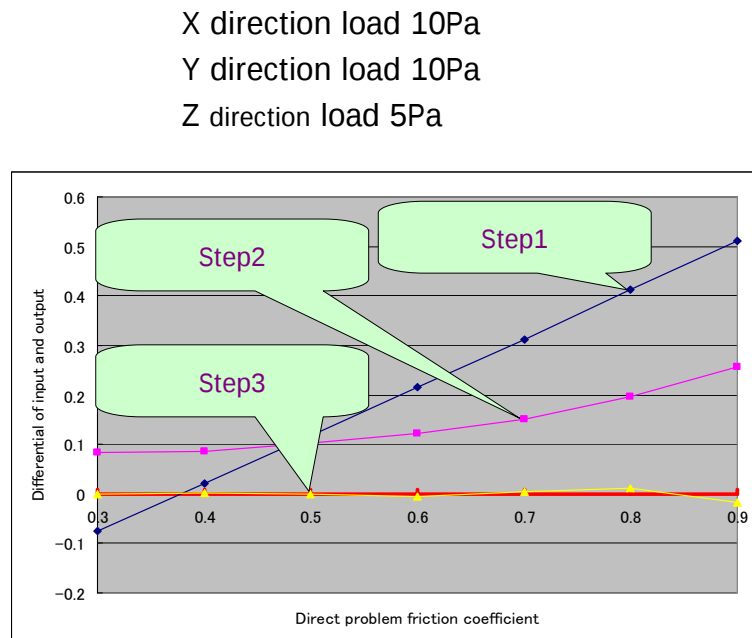


図 3.3.3.6. Comparison of results

3.3.4. メッシュ生成の研究

(1) 目標・計画

メッシュ生成は解析を精度よく行うためのキー技術である。三角形要素分割ではデローニー法が有名であるが、この手法は内部の節点を事前に配置しておく必要がある。この研究では、デローニー法をベースにして内部の節点を生成しながら分割する手法を開発することを目標としている。そのために、まず二次元問題でデローニーをベースにした手法を開発し、その手法を Crossed Circles Method と名付けた。この手法をさらに三次元問題に拡張した。今後はこの手法の有効性を実際の解析で検証していく計画である。

(2) 意義・国際社会との比較

メッシュ生成は、二次元問題に関しては、ほぼ技術開発は終了し、三次元問題に開発の中心は移っている。本研究はその三次元問題でのメッシュ自動生成をターゲットとしている。

(3) 研究内容

本研究で用いたデローニー法プログラムで採用したアルゴリズムを以下に示す。

- (1) 要素全体を含む仮想三角形を作成する
- (2) 節点 P が含まれる三角形 A を見つける
- (3) 三角形 A を、節点 P を頂点とする3つの三角形 B, C, D に分割する

- (4) 三角形 A について、三角形 A の各辺 L で隣接する三角形 E の外接円が節点 P を含むか調べる
- (5) 含む場合は、辺 L で隣接するふたつの三角形 B, E で作る四角形の対角線をスワップして新しい三角形 B', E' にする
- (6) スワップ後の三角形について(4)、(5)を繰り返す
- (7) 全ての点が追加されるまで(2)に戻る
- (8) 最初に設定した仮想三角形に関する三角形を削除する。

まず比較のために、図 3.3.4.1 のような直径 20mm の円周上に等間隔で 20 個の節点を事前配置した場合を考える。

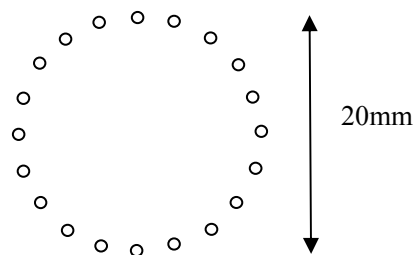


図 3.3.4.1. Nodes on a circumference

図 3.3.4.1 の節点配置で上記アルゴリズムを適用すると図 3.3.4.2 のようになる。

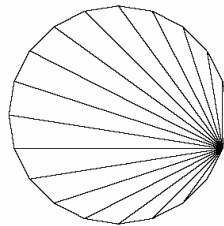


図 3.3.4.2. Mesh created by Delaunay method

図 3.3.4.2 の要素分割の問題点は、(1)扁平な要素ができてしまうことと、(2)事前の節点配置に対称性があるにもかかわらず要素分割結果に対称性がないことである。この要素分割を使って解析を行っても良い結果を得られないことは明らかである。念のため、円の中心に節点をひとつ追加すると図 3.3.4.3 のようになり、要素分割の対称性は実現するが、三角形が扁平のままである。

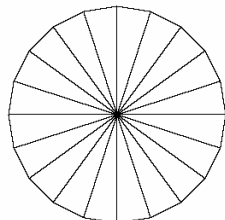


図 3.3.4.3. Mesh created by Delaunay method with a center point

筆者が考えた節点追加アルゴリズムは、上記手順(5)の後に以下の手順を追加する。

- (5-1) スワップ後の三角形 B', E' について、それぞれの外接円 F, G を作成し、そのふたつ

の外接円の中心 O_1, O_2 の座標を計算する。

(5-2) 外接円 F, G の中心 O_1, O_2 の中間点 O_M の座標を計算する

(5-3) 中間点 O_M が外接円 F, G の両方に含まれるかしらべる

(5-4) 含まれる場合は、中間点 O_M の近傍に既存の点があるかどうか調べる

(5-5) ない場合は、この中間点を追加する

この方法は、日本の家紋である「輪違い」(Crossed circle)と似ているので、以下、便宜上 Crossed Circles Method と呼ぶことにする。

上記アルゴリズムでポイントとなるのは、手順(5-3)における近傍の判定基準である。そこでつぎのような基準ふたつの基準を考えた。すなわち、ひとつは

(基準 1) $d^2 < (R_1^2 + R_2^2) \times Ratio$ (1)

のときは隣接節点ありと判断する。ここに、 d は中間点 O_M と既存追加点の距離、 R_1 と R_2 はスワップ後の各三角形の外接円の半径である。 $Ratio$ は定数である。もうひとつの基準は絶対距離による基準で

(基準 2) $d^2 < Distance$ (2)

のときは隣接節点ありと判断する。ここに、 $Distance$ は定数である

(4) 平成18年度進捗状況

上記で説明した Crossed Circles Method(CCM)を三次元に拡張し、さらにこの手法を複数の三次元モデルに適用し、検証を行った。下図はその適用事例である。

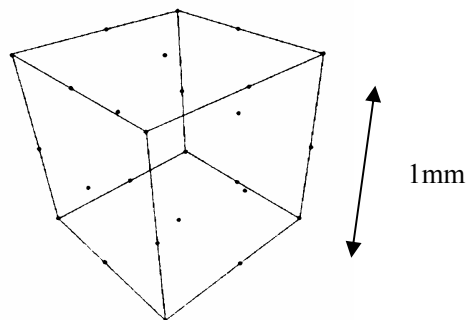


図 3.3.4.4. Points on hexahedron

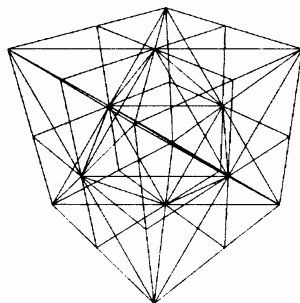


図 3.3.4.5. Mesh created by CCM

内部の適切な位置に節点が自動追加されることが確認できた。さらにより節点数の多い場合にも適用し、実際に構造解析を行い、精度よい解析が可能であることを検証した。

3.4. 大規模可視化

3.4.1. 大規模可視化に関する研究の概要

解析が大規模化・複雑化してくると、膨大な解析結果の評価方法が問題となってくる。その解決策の1つとして挙げられるのが可視化である。計算機による解析結果の可視化は、1960年代から行われてきた比較的歴史ある技術であるが、特に1980年代以降、計算機、特にグラフィックス機能を強化したワークステーション等の出現により急速に進歩した。その後、機器の高性能化、低価格化により広く用いられるようになり、またこれに伴って可視化のためのソフトウェアも多く発売されるようになった。しかし、2000年に入り、計算機環境が複雑化し、解析対象も多岐に亘ってくると、これまでの可視化ソフトウェアでは対応できないことが多くなってきた。

そこでここでは、様々な分野の数値解析に対して、その規模や計算機環境によらず統一的に利用できるような次世代の可視化環境の構築を目指す。具体的には以下の項目を考える。

- (1) クラスタなど分散環境を含む計算機環境に対応する次世代可視化の概念設計
- (2) 構造解析・流体解析など単一の物理に基づく解析に対応する可視化システムの構築
- (3) 複数の物理が連成する現象に対する可視化システムの構築
- (4) 新しい可視化法に関する研究

平成18年度は昨年度の成果を踏まえ、(1)および(2)について研究を行ったので、これについて以下に述べる。

3.4.2. 次世代可視化システムの概念設計および単一の物理に基づく解析に対応する可視化システムの構築

(1) 目標・計画

本研究では、これからの計算機環境に対応する可視化システムがどのようなものであるかを考え、それを実現するための要素技術を開発し、全体の概念を設計すること、およびそれに基づいて実際に可視化システムの開発を行うことを目的としている。

現在、計算力学に関連する研究を行う計算機は、個人で所有するPCから地球シミュレータクラスの超大型並列計算機まで様々である。どの規模の計算機を用いるかはその問題に依存するが、可視化に関して考えると、その規模によらず可視化は同じようにできることが望ましい。また、可視化をするためのデータは必ずしも可視化表示を行う計算機にあるわけではなく、あるときは遠隔地にあり、あるときは複数台の計算機に分散している。これらを統一的に扱うためには、単に可視化を行うソフトウェアを開発すればよいのではなく、データがどのように存在し、それをどのように動かしていくかを考える必要がある。従って、ここでは、データの流れを中心として、実際に可視化する計算機に必要なデータを必要なタイミングで送るための仕組みを考え、その基礎となるソフトウェアを設計・開発する。

(2) 意義・国際社会との比較

先にも述べたように、従来の可視化ソフト／システムではこれからの解析には対応できない。特に本研究センターのように他に先駆けて大規模・複雑な解析を行っているところでは可視化はさらに重要な問題である。

これまで、可視化ソフトウェアは米国や欧州を中心に開発されたものが製品として我が国に入ってくるが多かった。しかし、計算機環境は現在でも日本は最も進んでおり、諸外国でも大規模な

解析のための新しい可視化システムの開発はこれからである。逆に我が国では可視化情報学会に次世代可視化に関する研究会が発足するなどこの分野では諸外国に先んじており、本研究もそのように位置づけられると考えられる。

(3) 研究内容

本研究では、以下の 2 つの点を特徴としている。1 つ目は、これまでも述べたように、様々な計算機環境に対して同じ使い勝手・機能を提供することであり、言い換えればスケーラブルな可視化システムを目指していることである。2 つ目は、データ量と解析時間の関係から今後は計算した後で可視化するのでなく、計算しながらその場で可視化していくことも増えるであろうと考え、データがファイルとして存在しても、計算中でメモリー上にあっても同じように可視化できるようにすることである。これらは他の可視化ソフトウェア／システムにはない特徴であると共に、今後最も重要になると思われる点である。これらを踏まえ、本研究では、まず、これからの可視化システムでどのようなべきかについて、特にデータの動きを中心にして概念設計や共通で用いることのできるツールの開発を行う。次に、個別の物理に対するシステムに関しては、それぞれの解析に適したものとなるように開発を行っていく。

(4) H18 年度進捗状況

17 年度において、下記に示す Vistrace および VistraceHD を用いてデータの扱いを容易にするのがよいという結論に達したので、18 年度はこれを踏まえて全体の設計を行った。

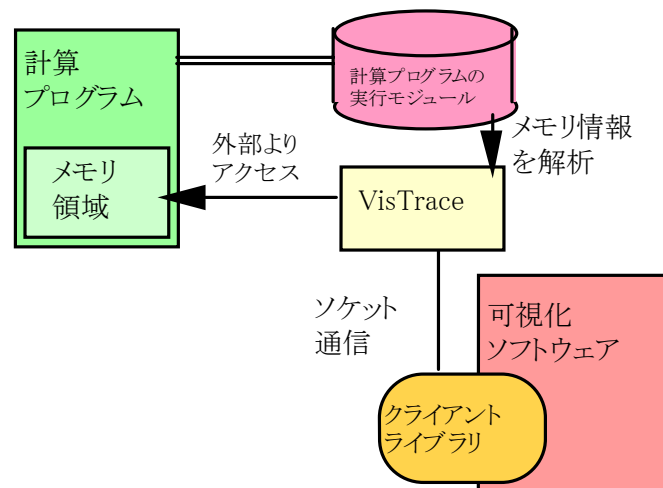


図 3.4.2.1. Vistrace の動作イメージ

従来の可視化ソフトウェアは、まず計算結果（や途中結果）をまるごと、あるいは間引いて読み込み、次にこれらに対して可視化処理を行い、表示するというプロセスをとっている。これに対し、新しいソフトウェアでは、計算結果を指定した時点ではデータは読み込まず、実際に可視化処理を行う段階でそれに必要なデータだけを Vistrace 等によってもって来るという動作になる。可視化処理の内

容にもよるが、多くの可視化処理は同時に計算結果の全部は利用しないことが多いので、このように必要なときに必要なデータだけを転送することにすれば、より膨大な計算結果に対しても現実的な時間で処理が可能となる。より細かい制御をするとすれば、画面に映る領域によってデータをどのくらい間引くか、あるいはどの領域に限るかを自動的に判断するなどの処理も考えられるだろう。図 3.4.2.2 にこの概念を示す。

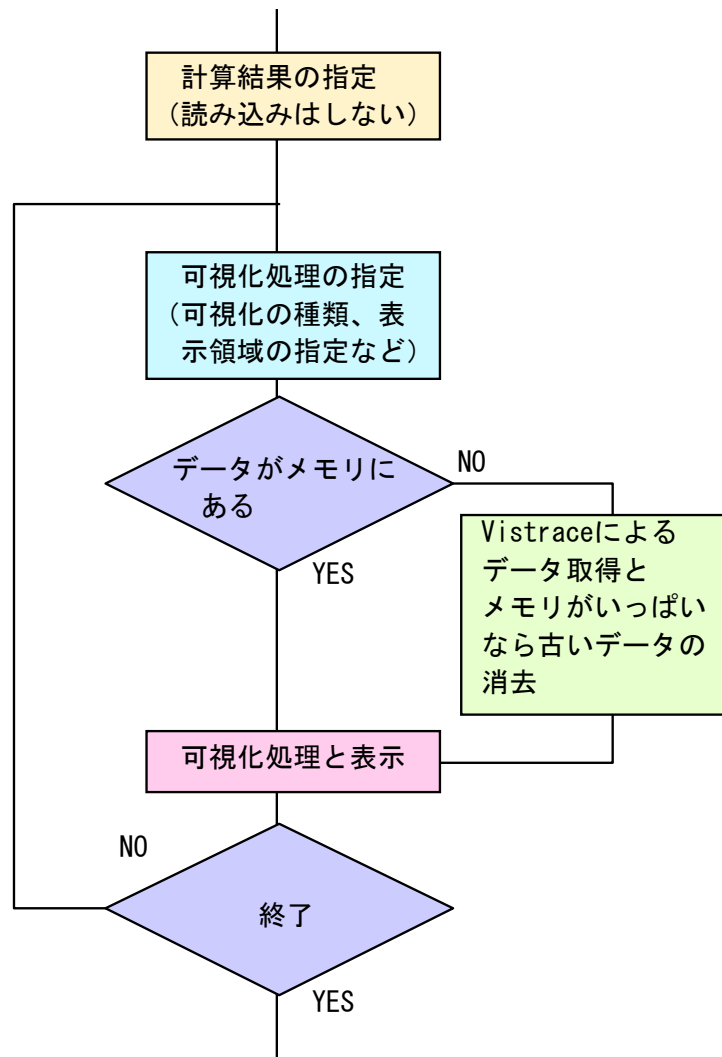


図 3.4.2.2. 新しい可視化処理の概念

次に、単一の物理(構造力学、流体力学など)に基づく大規模解析結果を可視化するシステムの構築を始めた。まずは流体解析に対応する可視化システムの構築を目指す。ベースとして、本プロジェクト研究員が以前から開発して利用している流体解析のための可視化ソフトウェア「ポスト君」を用いた。「ポスト君」はメモリ効率がよく、軽く作られているので、このように大規模な結果をPCなどより小規模な計算機で可視化するのに向いていると考えられる。

具体的には、「ポスト君」のデータの取り扱いを図 3.4.2.2 のようにすることを考え、18年度はまず計算格子(要素・メッシュ)に対してプログラム開発を行った。その成果の一部は来年度の国際学会等で発表する予定である。

3.5. 大規模並列化

3.5.1. 大規模並列化に関する研究の概要

日本国内では 2010 年を目途に 10 ペタフロップス規模の世界最速計算機を構築しようという計画が着々と進んでいる。つい最近まで国内はもとより世界最速であった地球シミュレータは、2002 年に登場しそのピーク性能は約 40 テラフロップスであり、10 年も経たずに数百倍の速度を目指すことになる。このことからハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる。

その一方で、これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては、その開発スピードもソフトウェアの品質もまだまだ十分とは言えず、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、並列化の実装のみに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、次世代の構造解析・流体解析システムを構築するとともに、これらを組み合わせさせた連成解析システムの構築を目指す。具体的には以下の項目をテーマとする。

- (1) 大規模非圧縮性粘性流体解析システムの開発
- (2) 大規模構造解析システムの開発
- (3) 大規模流体構造連成解析システムの開発
- (4) 流体構造連成解析の最適化問題／逆問題への応用

3.5.2. 大規模非圧縮性粘性流体解析システムの開発

(1) 目標・計画

日本学術振興会未来開拓プロジェクトの1プロジェクトであった「ADVENTUREプロジェクト」で開発された計算力学システム「ADVENTUREシステム」の1モジュールとして、これまでに開発が続けられてきた汎用の非圧縮性粘性流体解析システム「ADVENTURE_Fluidシステム」をベースとして、超並列計算機やPCクラスタ上でより効率的に動作する大規模非圧縮性粘性流体解析システムを構築する。また、システムとしての機能拡張を行うとともに、流体解析で問題となるロバスト性を向上させることを目的とする。近い将来の計画として、構造解析システムと統合し、大規模な流体構造連成解析を効率よく行えるシステムの構築を目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

本システムは、有限要素法による定式化を行っており、また、ADVENTURE システムで提供されている簡易 CAD モジュールやメッシュ生成モジュール、境界条件貼付モジュールとの連携が確立されているため、極めて自由度の高い任意形状の解析領域に対して用いることが可能である。また、有限要素法による非圧縮粘性流体解析分野で最も安定性に優れていると考えられている SUPG/PSPG 法をベースとした安定化手法を導入することにより、これまでに解析不可能であった高レイノルズ数の問題等に対して、極めて精度が高く効率の良い解析を実施することが可能となっている。

(3) 研究内容

本システムは、安定化手法を適用した有限要素法による定式化を行っているため、最終的に解くべきマトリックスが非対称なものとなる。この非対称マトリックスは反復法ソルバーの収束性が極めて悪いことが特徴であり、この問題に対処するために Bi-CGSTAB 法、GPBi-CG 法、GMRES(m) 法などの種々の非対称マトリックス用ソルバーが提供されている。これらのソルバーと適当な前処理を組み合わせることにより、安定した解析が可能となる。また、前節で述べた通り、ADVENTURE システムの特徴であるモジュール型システムアーキテクチャを採用することで、標準化された I/O を介して他のモジュールと強調して稼動することも可能となっている。これは、近い将来に計画されている、流体構造連成解析システムの構築を行う際に極めて有効な特徴であると考えられる。

このような特徴をもとに、本システムを用いて行った大規模解析例として、図 3.5.2.1 と 3.5.2.2 に川越キャンパスの建物周りの流れ、フリスビーの周りの流れ解析結果を示す。

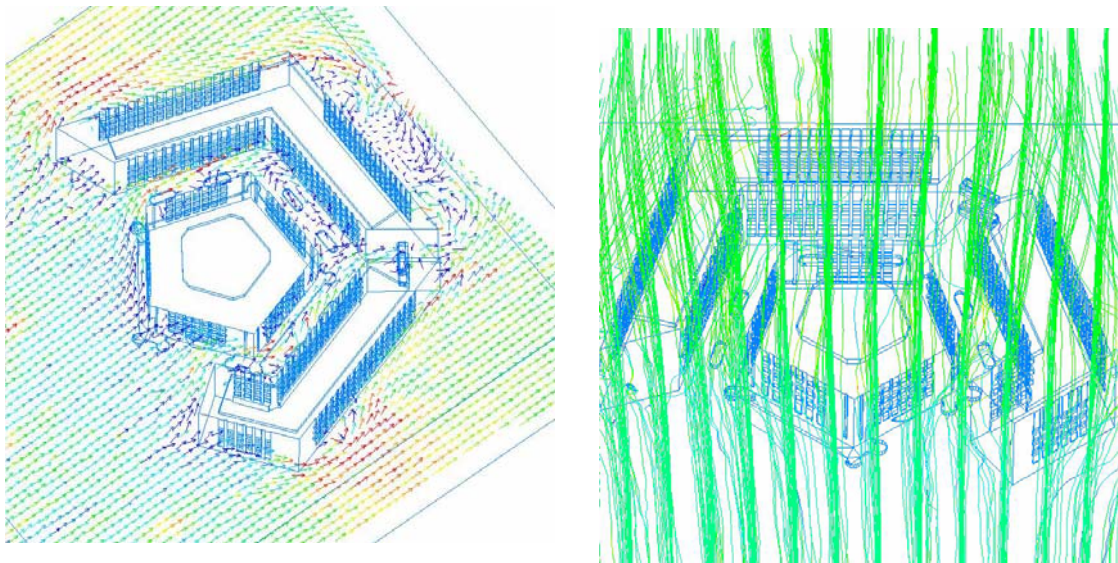


図 3.5.2.1. 川越キャンパスの建物周りの流れ

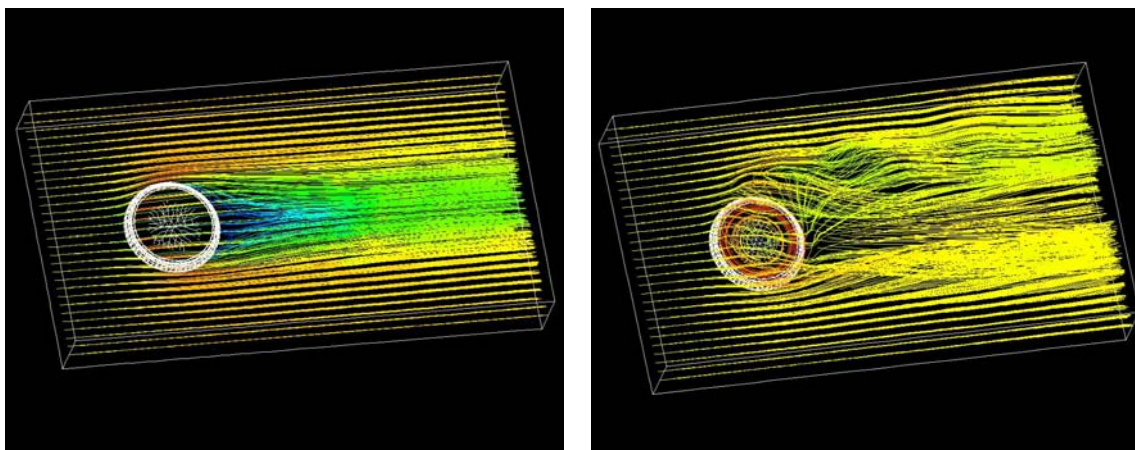


図 3.5.2.2. フリスビーの周りの流れ

(4) H18 年度進捗状況

本年度は、これまでに開発してきたシステムをベースとしていくつかの機能拡張を行った。まず、これまで三次元四面体、六面体、二次元三角形、四角形要素のみに対応していたシステムを、三次元プリズム、ピラミッド要素にも対応した。今後はこれらの混合要素にも対応する予定である。また、ALE 法による移動境界問題／連成問題に対応するシステムを構築した。現在、流体構造連成解析システム構築へ向けて、ソケットを用いた汎用カプラーの作成を開始している。

3.5.3. 汎用 CAE システムによる地球シミュレータ上での大規模構造解析

(1) 目標・計画

既に多くの超並列計算機やPCクラスタ上において実績を示している、1億自由度級の大規模メッシュを用いた人工物や自然物の丸ごと詳細解析を可能とする汎用計算力学システム ADVENTURE を地球シミュレータに導入することで、数億自由度規模の有限要素メッシュを用いた非定常非線形解析を実用時間で可能とする技術を確認し、実験および解析不可能であった問題規模での現象解明、産業界への貢献を目的としている。

(2) 意義・国際社会との比較

本システムにより、1つのアプリケーションとして、地震荷重負荷時の原子力圧力容器実機の応答から複合的な損傷の発生・進行・拡大、そして極限強度に至るまでの全プロセスのシミュレーションを実現することとなる。これらを実現できるシミュレータは世界的に例がなく、このような極限強度に至る解析例も存在せず、極めて独創性が高く、本シミュレータを用いることにより、たとえば原子力システムの極限強度を大型耐震試験によらずに正確に予測できることが期待される。

(3) 研究内容

本システムでは、超大規模解析における優れた実行性能、拡張性・保守性・開放性に重点を置き、モジュール型システムアーキテクチャを採用することで、各モジュールが独立したプログラムとして単独でも、また標準化された I/O を介して他のモジュールと協調しても稼動することを実現している。主要並列ソルバの 1 つである構造解析モジュール ADVENTURE_Solid では、階層型領域分割法に基づく並列負荷分散を行い、さらに高速安定な線形ソルバとして BDD 法を採用している。これまで、地球シミュレータ 256 ノード(2,048 プロセッサ)上において、1 億自由度規模の非構造メッシュを用いた簡易原子炉圧力容器モデルの静応力解析に成功し、実行性能 31.75% (5.08TFLOPS)を示してきた。

(4) H18 年度進捗状況

本年度は、ADVENTURE_Solid を用いて、内部構造物付き沸騰水型圧力容器(BWR)を複数材料物性モデルとして、2 億自由度規模の耐震解析を実現した。有限要素メッシュは、4 面体 2 次要素で要素数 39,746,750、節点数 67,910,224、境界条件自由度数 116,235、自由度数 203,614,437 となる。35 種類の異なる材料物性から構成され、メッシュ間における最大/最小要素サイズは比は約 80、材料間における最大/最小ヤング率比は約 60 となっている。

解析には地球シミュレータ 2,048 プロセッサを用い、ソルバには高速かつ高効率な性能を示している、IBDD-DIAG(Incomplete Balancing Domain Decomposition with Diagonal Scaling)法を採用、

時間積分は Newmark の β 法による陰解法を用いた。

0.01 秒を 1 タイムステップとし、1 タイムステップ当り 1,190 秒、60 タイムステップを 19.9 時間で解析を行った。このときベクトル化率 98.2%、計算性能値 3.56TFlops(これはピーク性能の 21.7%)、使用メモリは 3.93TBytes を示した。また、解析結果の検証として、地震初期の計算結果と実験データを比較し、物性値や境界条件の同定、モデル化の見直しなどを行い、地震応答解析を継続して行っている。

他のモデルとして、炭素繊維強化高圧水素タンク(CFPV)モデルの耐圧解析を行っている。このモデルでは、材料異方性を考慮する必要があるため、それに対応可能となる解析機能の追加を行っている。

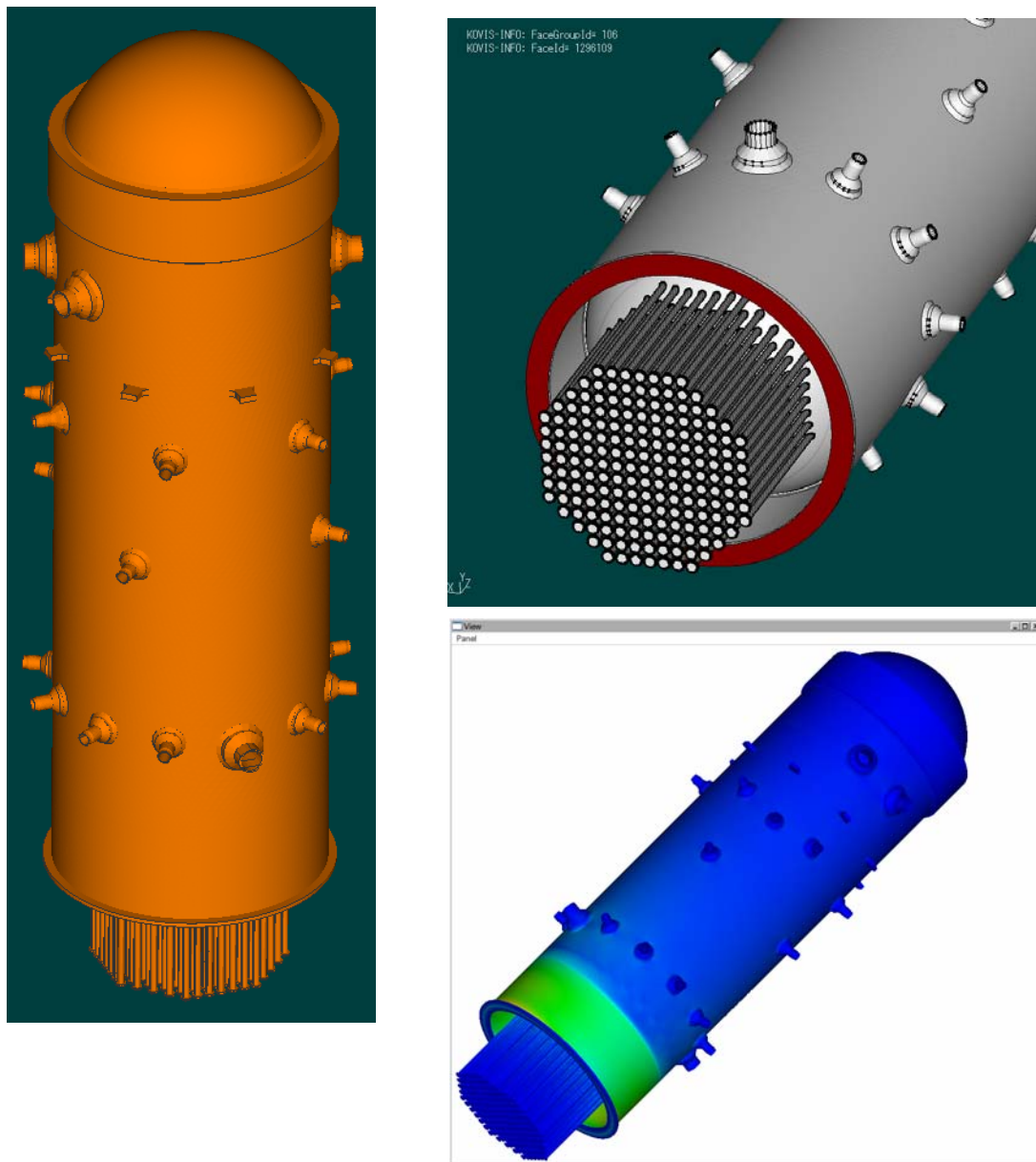


図 3.5.3.1. 内部構造物付き BWR モデル(左:全体図、右上:スカート部、右下:相当応力)。

4. 産学協同活動

4.1. 概要

(1) (株)日立製作所機械研究所との連携

き裂の解析技術の研究を行っている。微小な物体の問題としては、半導体のはんだ接続部のき裂進展挙動解析の研究を行った。半導体の実装の高密度化によって、信頼性の問題が以前にもまして重要となっており、き裂経路と進展寿命を正確に予測することがきわめて大切である。今後は、実際の微細はんだ接続設計に用い、製品の信頼性向上に寄与する計画である。また、日立製作所が有する豊富な実製品のデータを研究に生かすことを考えている。

(2) 独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携

当センターで開発する構造健全性評価システムの信頼性の検証と実務への応用を目的として、独立行政法人原子力安全基盤機構(以下 JNES)との密接な共同研究開発体制を構築する。具体的には、当センターでは、FMMとVCCMを利用した破壊力学パラメータの計算法、亀裂進展速度の予測モデルの構築、高精度FMMの開発、混合モードでの亀裂進展方向の決定等に関して、先進的かつ学術的な技術課題の研究開発を進める。一方 JNES では、各種亀裂試験を実施し、シミュレーション結果と実験の比較検討を通して、当センターで開発するシステムの精度を検証する。さらに、実際の健全性評価業務への適用結果を当センターにフィードバックすることにより、開発したシステムの有効性を実証し、また、システムのユーザービリティを向上させることを目指す。

(3) 独立行政法人 原子力研究開発機構との連携

当センターでは、産学協同活動の一つとして独立行政法人原子力研究開発機構との連携を始める準備をしている。当センターのメンバーと原子力研究開発機構のメンバーの共同研究という形で、連成逆問題解析の設計・センシングへの応用に関する基礎研究というテーマで行う予定である。

(4) 富士通(株)との連携

大規模可視化に関連し、富士通株式会社と連携してライブラリレス・ネットワーク可視化ツール Vistrace および VistraceHD を開発している。また、Vistrace については同じく共同研究先の航空宇宙研究開発機構と共に、その無償公開を検討しており、平成 18 年度は富士通のサイトでの公開につづいて当センターでも公開を検討している。

4.2. (株)日立製作所機械研究所との連携

(1) 目標・計画

半導体のはんだ接続部は、実装の高密度化によって微細化が進んでおり、従来と同等以上の信頼性が必要とされる。従来あまり問題にはならなかったはんだ接続部のボイドは、微細化に伴い寿命に大きな影響を与える可能性があることから、これらを考慮した高精度の寿命評価技術の開発が求められている。

これまで、BGA (Ball Grid Array)などの微細なはんだ接続部の接続寿命は、主に疲労き裂発生寿命を基に評価されてきた。しかし近年、これらの微細な接続部の接続寿命も疲労き裂進展の影響が大きいことが報告され、微細接続部の疲労き裂進展に関する研究が進められている。

本研究は、BGA のように微細かつボイドを有するはんだ接続部の疲労き裂進展メカニズムは明らかにし、疲労き裂経路と進展寿命を解析で予測する技術の開発を目標としている。

本年度では、はんだ各位置に累積されるダメージに基づいて疲労き裂の発生や進展を評価することで、BGA はんだ接続部の疲労き裂経路を解析的に再現できる疲労き裂進展解析手法について提案した。提案した疲労き裂進展解析手法を用いてはんだバンプの接続寿命を評価し、ボイドの影響を検討した。

今後は本手法を実際の微細はんだ接続設計に用い、製品の信頼性向上に寄与する計画である。

(2) 意義・国際社会との比較

微細はんだ接合部の強度評価は、日本が世界をリードしている分野の一つである。本研究で課題としているき裂進展に関しては、J積分などを用いた破壊力学による手法が一般的であるが、本手法は従来手法に対して数値解析のロードが少なく、実製品の設計に適用できることに意義がある。

(3) 特徴

本手法の概略を以下に示す。まず、き裂の進展を評価する領域を一定寸法の要素に分割し、外力に対して非線形有限要素法解析を行い、各要素の相当塑性ひずみ範囲を求める。この値と Coffin-Manson 則で表したはんだの疲労強度を比較し、さらに線形被害則を用いて累積ダメージにより寿命に達した要素を削除し、き裂とする。この解析を繰り返し、き裂の経路と進展寿命を求める。

本手法は以下のように通常の応力解析と同様な容易さで疲労き裂進展が求められることが最大の特徴である。

- ・ 初期き裂を仮定する必要がなく、複数の疲労き裂の進展経路を自動的に解析できる。
- ・ 疲労き裂進展に伴って、有限要素解析モデルを変更する必要が無い。
- ・ 1回の応力解析で1要素が削除されるサイクル数の計算を行うので、計算の繰返し数が少ない。
- ・ 疲労き裂進展特性を別途求める必要がなく、既存の Coffin-Manson 則の係数を用いることができる。

(4) H18 年度進捗状況

当センターで研究している接触解析逆問題解析技術に関して、現場の立場から定期的に意見をいただいた。さらに、開発した技術の応用について検討してもらっている。

さらに、(株)日立製作所機械研究所独自の技術開発として、はんだの疲労解析の研究も行っている。

本年度はBGAはんだバンプのき裂進展におけるボイド寸法の影響について検討した。図 4.2.1 に解析モデルを示す。対象性を考慮し、1/2 をモデル化した。バンプ径は 0.5mm である。はんだの物性値はねじり試験で求めた Sn-3.5Ag-0.75Cu の弾塑性挙動および疲労強度を用いた。荷重条件としては、上下のプリント基板に 0.002mm の繰り返し相対変位を与えた。荷重振幅が 0.1N に低下する繰返し数を接続寿命 N_f と定義した。

解析結果を図 4.2.2 に示す。横軸は、繰返し数 n をボイドが無いバンプの接続寿命 N_0 で規格化した値である。どちらのボイド形状でも、ボイド直径が大きくなると初期荷重振幅が小さくなるとともに、荷重振幅の低下速度が速くなるサイクル数が短くなっている。荷重振幅の低下速度が速くなるのは、疲労き裂がボイドの周辺に達したためである。

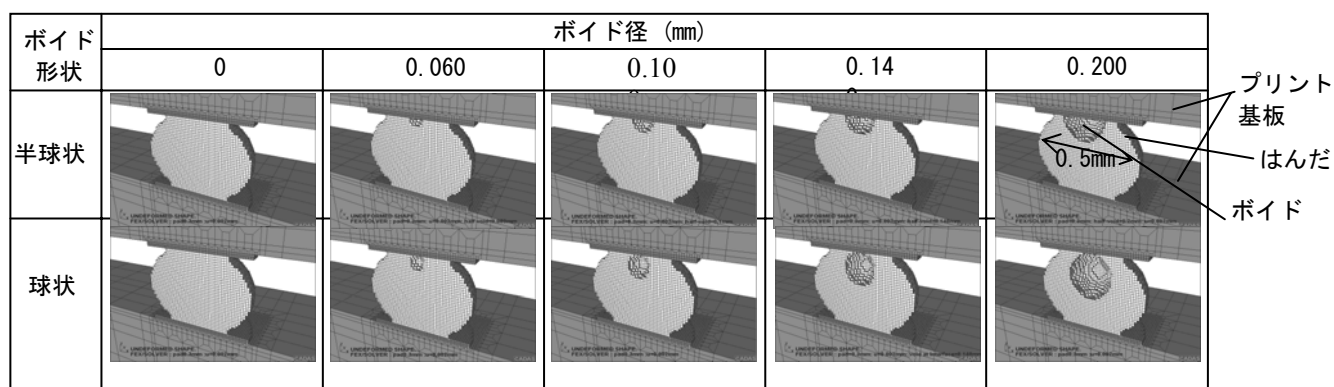


図 4.2.1. 解析モデル(ボイドを含む微細はんだ接合)

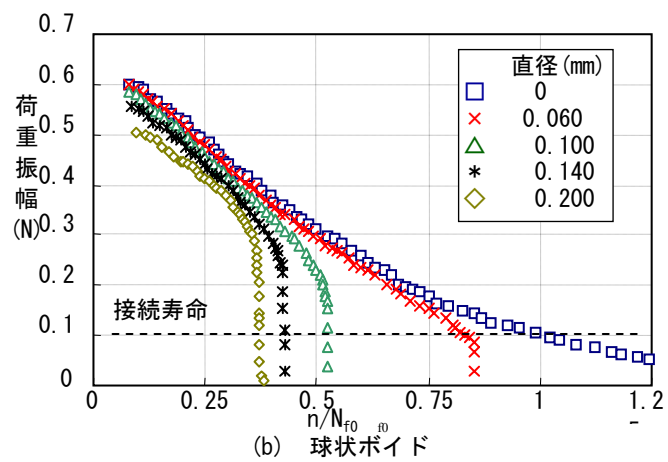
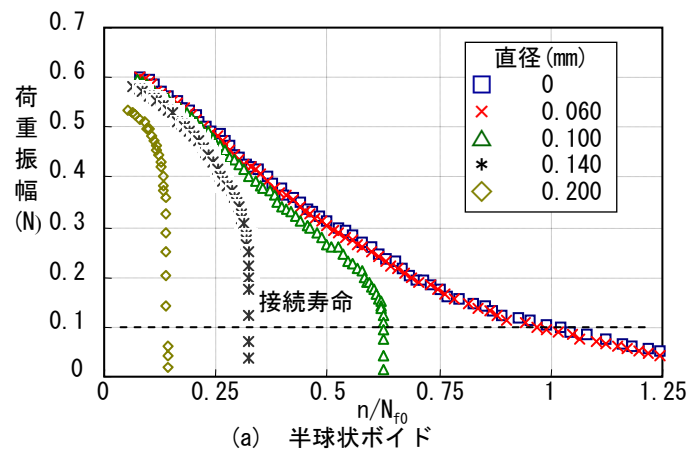


図 4.2.2. き裂進展解析結果

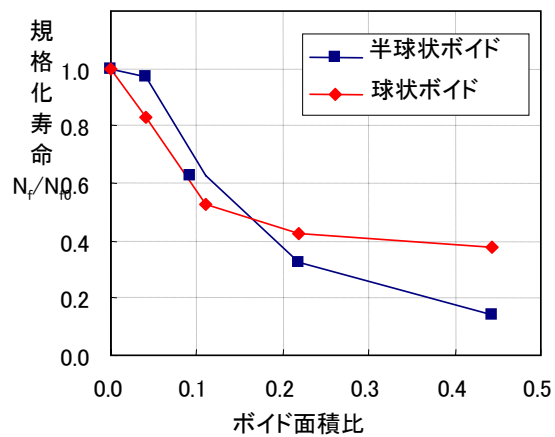


図 4.2.3. はんだバンプの接続寿命

図 4.2.3 にボイド面積比と規格化した寿命の関係を示す。ボイドが接続部の中心に位置する場合、接合界面の半球状および球状ボイドの双方とも、ボイド面積比が 5%を超えると寿命比が顕著に低下し始め、10%程度で寿命比が約半分に低下している。ボイドの面積率が 20%を超えると、特に半球状ボイドの場合に顕著に寿命比が低下することがわかった。今後、開発したはんだ疲労き裂進展解析手法を用いて、負荷条件や信頼性要求に応じた適切なボイド管理基準の作成が可能になると考える。

4.3. 独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携

当センターで開発する構造健全性評価システムの信頼性の検証と実務への応用を目的として、独立行政法人原子力安全基盤機構(以下 JNES)との密接な共同研究開発体制を構築する。当センターは、基盤要素技術である FMM と VCCM による四面体有限要素を利用したき裂進展解析より得られる新しい知見、混合モードき裂進展予測モデルの開発、高精度 FMM などの先進的かつ学術的な研究開発を行う。一方、JNES では各種のき裂試験を実施し、き裂進展システムとの比較検討を通して、開発するシステムの信頼性や妥当性を検討する。さらに、実際の健全性評価業務への適用結果を当センターにフィードバックすることにより、開発したシステムの有効性を実証し、また、システムの利用者ビリティを向上させることを目指す。(詳細は構造健全性の項を参照)

また、当センターで開発した構造解析システム(FMM-VCCM)より得られる知見をベースにして、JNES、株式会社テクノスター、プロメテック・ソフトウェア株式会社と共同でプリ・ソルバー・ポストを完備した世界最先端レベルの破壊力学解析ソフトを構築する。図 4.3.1 に複雑形状き裂を挿入した有限要素法モデル作成状況を示す。このような複雑形状のき裂を、ユーザーが任意箇所を設定できるソフトウェアは世界でも例は少ないため、実業務における構造健全性解析や構造設計において非常に強力なツールを提供することが出来る。

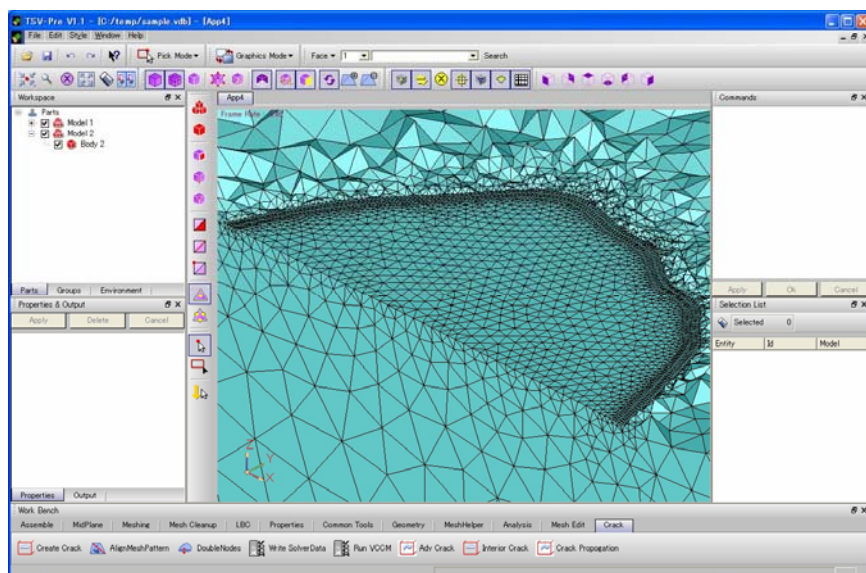


図 4.3.1. 複雑形状のき裂を挿入した要素分割モデル

4.4. 独立行政法人 原子力研究開発機構との連携

当センターでは、産学協同活動のひとつとして独立行政法人原子力研究開発機構との連携を始める準備をしている。当センターのメンバーと原子力研究開発機構のメンバーの共同研究という形で、連成逆問題解析の設計・センシングへの応用に関する基礎研究というテーマで行う予定である。

具体的な内容としては、流体－構造および流体－熱伝導連成逆問題解析による流れ場予測に関する研究を行う予定である。本来、流入・流出条件を与えてプラント等の配管の変位を予測することは流体－構造連成解析などにより可能であると考えられるが、逆に配管の変位を測定することにより、配管内の流動を予測・評価する連成逆問題解析システムを開発し、また、流体－熱伝導連成現象に関しても同様に、配管の温度分布を測定することにより、逆に流れ場を予測するシステムを開発することを目的としている。

原子力研究開発機構との連携が正式に決定次第、19 年度から本格的に活動を行う予定となっている。

4.5. 富士通(株)との連携

大規模可視化プロジェクトでは、大規模解析が主に並列計算機で行われることを想定し、分散した計算機からデータを集めて可視化することを念頭に置いている。その中で、分散した計算機からデータを簡単かつ効率的に集める手段として、富士通株式会社および航空宇宙研究開発機構と共同で開発を行ったライブラリレス・リアルタイム可視化ツール **Vistrace** を用いることを考えている。**Vistrace** は研究目的に限り無償公開を予定しており、すでに富士通(株)のサイトでは公開を行っているが、当センターにおいても今年度中の公開をめざして準備を行っている。**Vistrace** はネットワークで繋がった任意の計算機の動作中のプログラムのメモリーからデータを読み出すツールであり、リアルタイム可視化以外にもデバッグなど幅広い用途が期待できる。

また、当センターでは **Vistrace** とは異なり、動作中のプログラムでなく、ネットワーク上の計算機のハードディスク(ファイル)からその任意の一部を取り出すライブラリ **VistraceHD** を富士通(株)と開発している。こちらは既に計算されたデータを取り出すので、いわゆるファイル転送プログラムと似たものであるが、ファイル全部でなく一部を取り出せること、インターフェースが **Vistrace** と同じであることが特徴である。このため、**Vistrace** を用いてリアルタイム可視化等を行うプログラムを開発すれば、大きな変更なしに、これを計算中のプログラムでなく、計算結果に対しても利用できるという利点がある。また、**VistraceHD** は **Vistrace** 同様、必要なデータしか転送しないので、大規模解析においてもその通信量を抑えることができる。平成 18 年度は **Vistrace** および **VistraceHD** を大規模可視化プロジェクトで開発中の可視化ソフトウェアに組み込むことを予定している。

5. 国際協力

5.1. インドネシア（バンドアチェ）

インドネシアの Syiah Kuala University およびマレーシアの National University of Malaysia が主催する会議 Computational Mechanics & Numerical Analysis 2006 (MNA2006)の中で、第2回計算力学フォーラムを開催した。本会議のチェアーマンである CCMR 研究支援者のリダ博士が本フォーラムの世話役を務めた。

場所: インドネシア、バンドアチェ市、Syiah Kuala University

日時: 2006 年 5 月 12 日 (金)～14 日 (日)

学会名: Computational Mechanics & Numerical Analysis 2006

テーマ: Building the Strong Research Networking in Asian Region

URL: <http://cmna2006.unsyiah.net>



会議終了後、会場入り口にて撮影

5.2. オーストラリア（シドニー）

第3回計算力学フォーラムをオーストラリアのシドニーで開催した。今回は、New South Wales 大学と共同で2日間の日程で開催した。UNSW 側の幹事は古川助教授、CCMR 側の幹事は中林講師であった。初日のフォーラムは、UNSW 側から5名、CCMR 側から7名の先生方の講演が行われた。テーマは、“Solids and Structures”, “Visualization”, “Inverse analysis and Optimization”, “CFD”の4テーマで行われ、活発な討論が繰り広げられた。翌日には、研究助手と学生を合わせて9名が、それぞれの研究を発表し合う、ミニシンポジウムが行われた。

場所: The University of New South Wales, Sydney, Australia

日時: 2006 年 9 月 28 日～29 日

テーマ: Solids and Structures, Visualization, Inverse analysis and Optimization, CFD

Thursday 28, 9:00-12:00 "Panel Discussion"

Guest Panelers:

Prof. Don Kelly (University of New South Wales)
Prof. Nasser Khalili (University of New South Wales)
Prof. Qing Li (University of Sydney)
Prof. Tomonari Furukawa (University of New South Wales)
Prof. Tracie Barbar (University of New South Wales)

Panelers from CCMR:

Prof. Shigeru Aoki
Prof. Yoshiaki Tamura
Prof. Yuzuru Sakai
Prof. Kenji Amaya
Prof. Yasushi Nakabayashi
Mr. Tsunakiyo Iribe

Friday 29, 9:00-12:00 "Mini Symposium"

Speakers:

Dr. Kohei Murotani
Dr. Kazuhiro Suga
Mr. Yoshikazu Endo
Mr. Yusuke Nakajima
Mr. Ryu Yoshida
Mr. Masato Masuda

Forum Secretariat:

Prof. Yasushi Nakabayashi (CCMR)



フォーラムの様子

5.3. マレーシア (バンギ)

第4回計算力学フォーラムを2007年5月15, 16日に開催予定の Conference on Computational Mechanics & Numerical Analysis 2007 (CMNA2007), Universiti Kebangsaan Malaysia (National

University of Malaysia), Bangi, Malaysia) 中で行う予定である。この会議はマレーシアの National University of Malaysia とインドネシアの Syiah Kuala University が主催し、毎年開催される会議であり、2006 年度は第 2 回計算力学フォーラムをこの会議と共催の形で行った。この会議のチェアマンを務める National University of Malaysia の Kamal Ariffin 教授は今後当センターに研究支援者として参加し、協力する予定である。なお、CMNA2007 の開催月日が未だ確定していないので、もし予定月日から大幅に異なった場合には、National University of Malaysia において 2007 年 5 月 15,16 日に同大学の研究者とともにフォーラムを行うことを計画している。

場所: マレーシア、バンギ、National University of Malaysia

日時: 2007 年 5 月 15, 16 日

学会名: Conference on Computational Mechanics & Numerical Analysis 2007

URL: <http://www.ukm.my/>

5.4. インドネシア (パダン)

第 5 回計算力学フォーラムを 2007 年 5 月 18, 19 日に開催予定の The 5th International Conference on Numerical Analysis of Engineering problems 2007 (NAE2007), Padang, West Sumatera, Indonesia と共催の形で行う予定である。

場所: インドネシア、パダン

日時: 2007 年 5 月 18, 19 日

学会名: The 5th International Conference on Numerical Analysis of Engineering problems
2007

URL: <http://www.ic-star.usu.ac.id/nae2007>

5.5. 中国 (ウルムチ)

第 6 回計算力学フォーラムを 2007 年 8 月 27~30 日に開催予定の The 7th International Conference on Fracture and Strength, Far East and Oceanic Fracture Society (FEOFS2007), Urumqi, China と共催の形で行う予定である。

場所: 中国、ウルムチ

日時: 2007 年 8 月 27~30 日

学会名: The 7th International Conference on Fracture and Strength, Far East and Oceanic
Fracture Society

URL: <http://kikuanni.me.noda.tus.ac.jp/FEOFS2007index.html>

6. 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。

6.1. 教育活動風景

矢川研究室

矢川研究室では、学部生 10 名と大学院生 3 名とで毎週 1 回セミナーを開き、その週の進捗状況を報告しあっている。大学院生は、各自が力学を中心とし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。学部生は、現在、解析方法を学ぶため、「Nastran」「PAM-CRASH」「AMPS」などを用いて、様々な有限要素法解析を行っている。図 6.1.1 は、実際に学部生が、Nastran を用いて梁の曲げ解析を行った様子を表したもので、図 6.1.2 は、「AMPS」を用いた様子である。

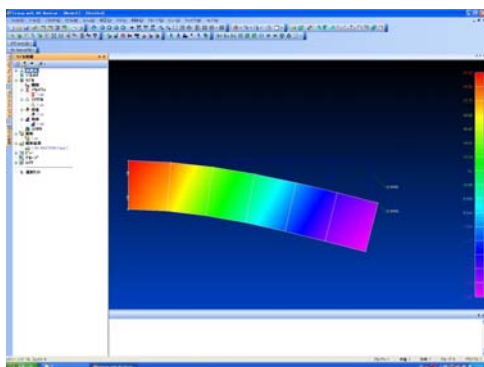


図 6.1.1. Nastran を用いた解析の様子

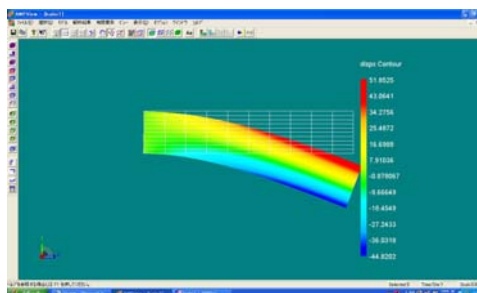


図 6.1.2. AMPS を用いた解析の様子

青木研究室

青木研究室では、学部生 11 名の卒業研究および大学院生 3 名の修士研究を行っている。週に 1 回 2-3 時間のセミナーを開催し、先週に研究したこと、次週の計画、半年後の目標などを各自パワーポイントを用いてプレゼンテーションしてもらい、皆でディスカッションする。図 6.1.3 はその様子である。研究内容には解析ばかりではなく、実験も含まれる。図 6.1.4 は、ビリヤードのキューの合理的な設計法を確立するために、高速度カメラを用いてキューと球の衝突現象を詳しく調べている様子である。また、12 名の学部 3 年生を秋学期から研究室に仮配属させ、卒業研究のための予備的な勉強・演習を行ってもらう予定である。

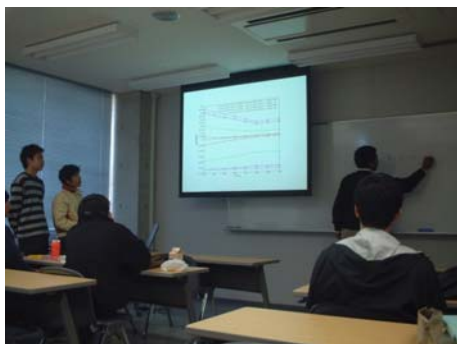


図 6.1.3. セミナーの風景



図 6.1.4. ビリヤードの実験

江澤研究室

江澤研究室では、学部学生 13 名の卒業研究および大学院生 3 名の修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。大学院生は毎週または隔週に 1 回各自の研究の進捗状況を説明してもらい、皆でディスカッションしている。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、つぎに三次元 CAD や最適化手法等の勉強をもらっている。大学院生は、構造解析を中心とする独自のテーマをもって研究を行っている。図 6.1.5 はセミナーでの勉強会風景である。図 6.1.6 は、ANSYS を使って解析を行っている様子である。



図 6.1.5. セミナー風景



図 6.1.6. 卒業論文の研究風景

田村研究室

田村研究室では、学部生 11 名の卒業研究および大学院生 6 名の修士研究を行っている。週 1 回のセミナーでは、大学院生 1, 2 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。これにはオブザーバーとして仮配属されている 3 年生も参加している。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 6.1.7 は研究室での研究の様子である。



図 6.1.7. 研究室の様子

中林研究室

中林研究室では、学部学生 13 名の卒業研究および大学院生 5 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部学生 3 名と大学院生 1 名が研究発表を行う。また、卒業論文や修士論文の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。図 6.1.8 は研究室の様子であり、図 6.1.9 は研究発表会の様子である。



図 6.1.8. 研究室の様子



図 6.1.9. 研究発表会

6.2. 卒論・修論の紹介

矢川研究室

(1) 3次元き裂進展解析手法の開発

コンピュータによるシミュレーション解析が行われている昨今、き裂進展解析の研究はあまり行われていないのが現状である。3次元き裂進展解析手法の開発を行うに当たり、解析モデルとして、スペースシャトルのオービターの主翼モデル(風洞実験モデル)にき裂を与え、どのように進展するのか研究している。

(2) BFCを用いた列車の先頭車両の流体解析

本研究では、鈍い物体と車両形状を模擬した物体周囲の流れ解析を行い、形状の違いが周囲流れ場に及ぼす影響を調査することを研究している。

(3) 流体、構造の連成解析

熱流体解析ソフトGiD-FINAS/CFDを使用し、円柱の流体構造連成振動解析モデルの流体・構造連成解析に取り組んでいる。

(4) ネットワークコンピューティングにおけるデータ操作と効率的通信手段の考察

グリッド・コンピューティングにおける通信の効率化を図るために、ITBL(IT-Based Laboratory)上でVPN(Virtual Private Network)を利用した通信を行う。その際、送受信するデータはNastranでの構造解析の数値データを使用している。

(5) 銀河の星の見え具合係数(立体角)算出システム

国際宇宙ステーションでの建造において注意しなければならないものの中に、太陽熱輻射がある。しかし、膨大な量である太陽熱の輻射を計算するには多くの時間と高スペックの計算環境が要求されてしまう。そこで本研究では、OpenGLの陰面処理を利用した、銀河の星相互の間の見え具合係数(立体角)算出システムの作成を行った。

(6) 風力タービンの適地選定

現在、地球温暖化を防ぐため二酸化炭素の大幅な削減が緊急課題になっている。これに伴い、クリーンで環境に優しい風力エネルギーの有効利用に注目が集まっている。本研究では「非定常・非線形風況シミュレータ」を利用して、三宅島における風力タービンの適地選定を行った。

(7) BGAモデルによる電子実装基盤の熱変形解析

近年、電子基盤上ではBall Grid Array(BGA)と呼ばれる接続方法が用いられる。しかし、その接続部で使用される鉛はんだの鉛が環境へ悪影響を及ぼす。そんな中、はんだを含まない新しい素材である鉛フリーはんだが注目されている。本研究では、汎用有限要素法プログラム「AMPS」を用いて、鉛フリーはんだの基本的力学特性を調べ、鉛はんだとの比較検証を行った。

(8) USBフラッシュメモリを用いたセキュリティ技術開発

PCの一般個人利用者のための、手軽かつ簡単なデータの保護システムの研究である。本研究では、自宅の鍵の様に、USBフラッシュメモリをPCの鍵にできるソフトを開発した。

青木研究室

(1) ビリヤードにおけるキューの合理的設計法の確立

キューと球の動的接触問題を有限要素法で解析し、高速度カメラによる実験結果と比較しながら、キューの合理的設計法の確立を目指している。解析の過程でキュー各部の材料特性の同定が必要となるため、サブテーマとして研究している。この研究はキューのメーカーからの依頼がきっかけとなって始められた。

(2) 衝撃試験機の精度向上のための波動伝播解析

材料の衝撃変形特性を計測する際に入り込みやすい様々な誤差を減少させるために、応力棒中を伝播する応力波の挙動を詳しく調べている。偏心衝撃加荷重を受ける場合や応力波がねじ部を通過する場合の挙動を有限要素法を用いて解析するとともに、実験を行って両者を比較する予定である。順解析の後には逆解析ができればと考えている。

(3) 境界要素逆解析を利用したコンクリート中の鉄筋腐食検出

コンクリート構造物表面の数少ない点における電位の測定値から内部の鉄筋腐食を検出するための研究を行っている。腐食箇所の数や形を予め仮定しなくても検出できるようにするために、遺伝的アルゴリズムを用いている。解析の効率化、腐食に関する材料特性の同定、深部の小さい腐食の検出など、実用化に向けて様々な研究を行っている。

(4) 流速差が存在する場合の配管腐食速度予測

海水ポンプや各種プラントの配管腐食による事故を防ぐために、標記の研究を開始した。東京理科大学などと協力して基礎的な実験と流体の有限要素解析および腐食の境界要素解析などを行って、配管各部の腐食速度を予測できるようにすることが目標である。

江澤研究室

(1) 遺伝的アルゴリズムの研究

構造の最適化に遺伝的アルゴリズムを適用する研究を行った。従来の単純GAと呼ばれる方法では、最適解を得るのに、時間がかかる。そこで、最適化に工夫を加えることにより、従来より高速に収束する手法を開発した。

(2) 要素分割手法の研究

三角形要素分割で代表的な手法はデローニー法であるが、この手法では事前に適切に節点を配置しておく必要がある。その対策としては、乱数で節点を発生し、その節点位置を修正するという手法があるが、煩雑である。そこで、3次元問題において領域内部の節点を自動生成する手法を開発した。

(3) 接触解析における摩擦係数の推定法

接触解析においては、摩擦係数は重要なパラメータであるが、摩擦係数そのものは不明なことが多い。そこで、計測可能な変位やひずみから逆に摩擦係数を推定する手法を開発した。現在は、摩擦の大きい場合や3次元問題への拡張に取り組んでいる。

(4) ロバスト設計手法の研究

製品においては、荷重その他の制御できないパラメータが多く、これらの変動に強い設計(ロバスト設計)が求められている。本研究では、ロバスト設計で多目的最適化を行うにはどうしたらいいかを研究している。

田村研究室

(1) 画像に基づく流体解析手法の開発

複雑な実形状まわりの流れを解析するには、物体形状に関する詳細な3次元データが必要であり、またそれを元に計算格子(要素)を生成するには専用のツールやプログラムをもってしてもかなりの時間と手間を要することが知られている。そこでここではそのような詳細なデータがない場合でも流体解析ができるようにするための手法として、画像をベースとしてその流れ場を解く方法を研究している。例としてオートバイを取り上げた。これはオートバイ本体だけでなくそれを運転する人も流れにさらされるため両者のデータが必要となる。しかも人は乗車中に姿勢を変えるのであらかじめデータをとっておくのが難しい。

技術的には画像からの計算格子の生成や、計算精度を確保するための手法の開発、並列計算機への対応などをテーマとして研究を行っている。

(2) 流体と運動の連成解析

流体中を運動する物体には流体力が作用し、それが物体の運動に影響を与える。流体と運動の時間スケールが異なればそれぞれを独立に解析することができるが、時間スケールが近い、あるいはあらかじめ流体力(や係数)を求めておくことが適当でない場合は両者を連成させて解くことになる。ここではアクロバット飛行する機体、突風を受けるオートバイなどを対象として、それぞれに適した流体解析手法を用いながら連成解析を行っている。

(3) バーチャルリアリティ技術の可視化への応用

バーチャルリアリティは、あたかもそこに何かがあるように、あるいはどこかに自分がいるように感じさせる技術であるが、3次元の解析結果を分かりやすく表示するのにも有効であろうと考えて研究を行っている。具体的には、大型バーチャルリアリティ装置を可視化に利用するためのライブラリの開発、より小型で利用しやすいバーチャルリアリティ装置の開発などを行っている。

中林研究室

大規模並列数値流体解析をはじめとして、並列分散処理、最適化設計、人工知能、ユビキタス・コンピューティング等に関連した研究を行っている。

具体的な研究テーマは以下の通りである。

1. 大規模並列計算力学システムを用いた流体－剛体連成解析
2. エアーシャッターを用いた物質拡散制御システムの開発
3. 遺伝的アルゴリズムを用いたサッカーシミュレーションにおけるチーム戦術の最適化
4. 並列分散遺伝的アルゴリズムを用いたマルチエージェントシステムの最適化
5. PSPを用いた並列処理
6. PSPを用いた数値流体解析
7. エアコンの配置を考慮した厨房の流体解析
8. 卓球における魔球開発
9. 高速度カメラと接触解析によるサッカーボールの物性値の推定
10. 遺伝的アルゴリズムを用いたサッカーシミュレーションにおける フォーメーションの最適化
11. サッカーシミュレーションにおけるエージェントの動的な最適化
12. IGA による噴水の形状の最適化

13. 四足歩行リーグにおける AIBO の守備能力の最適化
14. 携帯電話におけるバーチャルフィッティングの開発
15. 携帯電話のネットワーク機能を用いた応力カメラの開発

6.3. 学生達の学会活動

当センターの学生達が、学会で発表してきた研究成果を国際会議と国内の会議に分けて一覧にした。

《国際会議》

講演発表日	学会名	場所	講演題目	学生氏名	所属研究室	学年
2005/10/29	1st International Conference on Design Engineering and Science	Vienna, Austria	Analysis of Ultrasound Propagation for the Development of the Noninvasive Oncotherapy Device	Y.Nakajima	Tamura Laboratory	M1
2005/10/31	1st International Conference on Design Engineering and Science	Vienna, Austria	A Simple Analysis Method for the Aerodynamic Characteristics of a Running Motor Cycle	C.Ono	Tamura Laboratory	M1
2005/8/23	EPMESEC X (The 10th International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science)	Sanya, China	3D Crack Propagation Analysis Using Free Mesh Method	H.Osaki	Yagawa Laboratory	M2

2005/8/23	EPMESC X	Sanya, China	Parallel Computing for Enriched Free Mesh Method(EFMM)	Y.Kobayashi	Yagawa Laboratry	M2
2005/8/23	EPMESC X	Sanya, China	3D Animation for Free Mesh Method	S.Nagaoka	Yagawa Laboratry	M2
2006/8/22	EPMESC X	Sanya, China	Identification of Electrical Conductivity and Impedance of Reinforced Concrete by Boundary Element Inverse Analysis	M.Yoshida	Aoki Laboratory	M2
2006/8/22	EPMESC X	Sanya, China	Numerical Analysis of Impact between Cue and Ball in Billiard (Effect of Tip Structure)	S.Shimamura	Aoki Laboratory	M2
2006/8/23	EPMESC X	Sanya, China	Three- dimensional mesh generation using the crossed circles method	H.Suzuki	Ezawa Laboratry	M1
2006/8/22	EPMESC X	Sanya, China	Development of the diffusion control system using air shutter	T.Asami	Nakabayashi Laboratry	M1
2006/8/23	EPMESC X	Sanya, China	Motion analysis of the elevating ball by the effect of buoyant force	Y.Matsuo	Nakabayashi Laboratry	M1

2006/9/6	ECCOMAS CFD 2006 (European Conference on Computational Fluid Dynamics)	Egmond Aan Zee, The Netherlands	Image-Based Method for the Aerodynamic Characteristics of a Motor Cycle	C.Ono	Tamura Laboratory	M2
2006/9/6	ECCOMAS CFD 2006	Egmond Aan Zee, The Netherlands	Numerical Simulation of Transskull Focused Ultrasound	Y.Nakajima	Tamura Laboratory	M2
2006/9/29	3rd Computational Mechanics Forum (CCMR)	Sydney, Australia	Study on high accurate contact analysis using reverse problem technique	Y.Endo	Ezawa Laboratory	M2
2006/9/29	3rd Computational Mechanics Forum (CCMR)	Sydney, Australia	Numerical Simulation of Transskull Focused Ultrasound	Y.Nakajima	Tamura Laboratory	M2
2006/9/29	3rd Computational Mechanics Forum (CCMR)	Sydney, Australia	Towards the Fluid-Structure Inverse Analysis	R.Yoshida	Tamura Laboratory	M2
2006/10/9	Tokyo University of Science-Xinjiang University 2006 International University Exchange Seminar	Tokyo	Manufacturing Technology supported by Computational Science	S.Shimamura	Aoki Laboratory	M2

《国内会議》

講演発表日	学会名	場所	講演題目	学生氏名	所属研究室	学年
2005/9/2	日本機械学会 関東支部ブロック 合同講演会	足利	ビリヤードにおける キューと球の衝突解析	島村 真介	青木 研究 室	M1
2005/9/2	日本機械学会 関東支部ブロック 合同講演会	足利	境界要素逆解析による 鉄筋コンクリートの 電気伝導度および インピーダンスの同定	吉田 真覚	青木 研究 室	M1
2005/9/16	第 37 回 流体力学講演会	千葉	医療応用を考えた 集束超音波の挙動に 関する研究	中島 祐典	田村 研究 室	M1
2005/12/13	第 19 回 数値流体 力学シンポジウム	東京	二輪車周りの流れ解析 を簡単に行う手法	小野 ちひろ	田村 研究 室	M1
2005/12/15	第 19 回 数値流体 力学シンポジウム	東京	医療応用のための 集束超音波の 数値シミュレーション	中島 祐典	田村 研究 室	M1
2006/3/4	日本応用数理学会 研究部会・連合発表会	東京	CCMを用いた三次元 メッシュ分割技術の開発	鈴木 隼人	江澤 研究 室	M1
2006/3/10	日本機械学会 関東支部 第 12 期総会講演会 関東 学生会・第 45 回学生員 卒業研究発表講演会	東京	CCMを用いた三次元 メッシュ分割技術の開発	鈴木 隼人	江澤 研究 室	M1
2006/3/11	日本機械学会 関東支部 第 12 期 総会講演会 大規模数値解析部門	埼玉	フリーメッシュ法を用いた 3 次元亀裂進展解析	尾崎 弘明	矢川 研究 室	M2
2006/3/11	日本機械学会 関東支部 第 12 期総会講演会 大規模数値解析部門	埼玉	可視化処理の 並列計算	小林 陽介	矢川 研究 室	M2

2006/3/11	日本機械学会 関東支部 第12期総会講演会 大規模数値解析部門	埼玉	フリーメッシュ法のための リアルタイムアニメーション	長岡 慎介	矢川 研究 室	M2
2006/3/11	日本機械学会 関東支部 第12期 総会講演会	埼玉	鉄筋コンクリートの電気 伝導度およびインピー ダンスの同定実験	吉田 真覚	青木 研究 室	M1
2006/3/11	日本機械学会 関東支部 第12期 総会講演会	埼玉	ビリヤードにおける キューと球の衝突解析 (キュー先角部構造の影響)	島村 真介	青木 研究 室	M1
2006/3/11	日本機械学会 関東支部 第12期 総会講演会	埼玉	直角直交格子における 物体境界と計算精度	吉田 竜	田村 研究 室	M1
2006/6/14	第11回 日本計算工学講演会	大阪	頭蓋骨を透過する集束 超音波の数値解析	中島 祐典	田村 研究 室	M2
2006/6/14	第11回 日本計算工学講演会	大阪	画像をもとにした物体 周りの空力特性の解析	小野 ちひろ	田村 研究 室	M2
2006/6/22	第25回 日本 シミュレーション学会大会 ビジュアルシミュレーショ ン(1)(視覚・可視化)部門	東京	フリーメッシュ法のための リアルタイム 3Dアニメーション	長岡 慎介	矢川 研究 室	M2
2006/6/23	第25回 日本 シミュレーション学会大会 有限要素法(2)部門	東京	フリーメッシュ法を用いた 3次元任意形状亀裂進展 解析	尾崎 弘明	矢川 研究 室	M2
2006/6/23	第25回 日本 シミュレーション学会大会 有限要素法(2)部門	東京	高精度フリーメッシュ法 の可視化処理	小林 陽介	矢川 研究 室	M2
2006/9/20	日本機械学会 2006年度年次大会 計算力学部門	熊本	フリーメッシュ法を用いた 3次元任意亀裂進展解析	尾崎 弘明	矢川 研究 室	M2
2006/9/20	日本機械学会 2006年度年次大会 計算力学部門	熊本	フリーメッシュ法を用いた 弾性解析の為のリアル タイム3D アニメーション	長岡 慎介	矢川 研究 室	M2

2006/10/28	第 84 期 日本機械学会 流体工学部門講演会	埼玉	流体-構造連成逆解析 に向けて	吉田 竜	田村 研究 室	M2
2006/10/29	第 84 期 日本機械学会 流体工学部門講演会	埼玉	頭蓋骨を透過する集束 超音波の三次元解析	中島 祐典	田村 研究 室	M2
2006/11/3	日本機械学会 第 19 回 計算力学講演会 計算破壊力学の 最新展開部門	名古屋	3次元亀裂進展 シミュレーションの自動化	尾崎 弘明	矢川 研究 室	M2
2006/11/5	日本機械学会 第 19 回 計算力学講演会 フリーメッシュ法部門	名古屋	高精度フリーメッシュ法の 領域分割による 大規模並列解析	小林 陽介	矢川 研究 室	M2
2006/11/5	日本機械学会 第 19 回 計算力学講演会 フリーメッシュ法部門	名古屋	リメッシング機能を用いた 高精度フリーメッシュ法	長岡 慎介	矢川 研究 室	M2

(注) 一部、昨年度の年報に掲載されたものを含む。

7. 業績リスト

本年度の当センターに関する業績リストを記載する。

7.1. 論文

- A., M., M., MUKADDES, M., OGINO, H., KANAYAMA and R., SHIOYA, “A Scalable Balancing Domain Decomposition Based Preconditioner for Large Scale Heat Transfer Problems”, SME International Journal, SeriesB, Vol. 49, No. 2, pp. 533-540, May 2006.
- A., SHINOZAKI, H., INOUE, K., KISHIMOTO, “Analysis of Mechanical Behavior of Polymers Using Molecular Chain Network Model (Effects of Molecular Weight Distribution and Ultra-Violet Degradation)”, JSME International Journal, Series A, Vol. 49, No. 4, Oct. 2006.
- A., SHINOZAKI, K., KISHIMOTO, H., INOUE, “Simulation of Deformation Behavior of Polymeric Materials by Chain Network Model”, Key Engineering Materials, Vols. 306-308, pp. 983-988, Mar. 2006.
- H., Okada, “Numerical Investigation for micro structural effects on the crack grow the behavior of particulate composite materials”, Final report AOARD-04-4047, 60 pages, July 2006.
- H., Okada, “Numerical Investigation on the failure mechanisms of particulate composite material under a various loading conditions using a damage constitutive law”, Final report AOARD-04-4039, 76 pages, July 2006.
- H., Okada, M., Higashi and T., Kamibeppu, “An Extension of Three Dimensional Virtual Crack Closure-Integral Method (VCCM)”, International Workshop on the Advancement of Computational Mechanics, pp.1-13, 2005.
- H., Okada, Preface: International Workshop on “Development and Advancement of Computational Mechanics”, April 22-23, 2005, CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences, Vol. 10, No. 3, pp. 185-186, 2005. 12. 1.
- H., Okada, T., Kamibeppu, “A Virtual Crack Closure-Integral Method (VCCM) for Three-Dimensional Crack Problems Using Linear Tetrahedral Finite Elements”, CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences, Vol. 10, No. 3, pp. 229-238, 2005. 12. 1.
- J., Imasato and Y., Sakai, “Free Surface Flow Analysis by Smoothed Particle Hydrodynamics”, Pressure Vessel and Piping Codes and Standards 2006, July 2006.
- M. N., MACHMUD, M., OMIYA, H., INOUE, K., KISHIMOTO, “A Phenomenological Constitutive Model Constructed for PC/ABS Blends”, Key Engineering Materials, Vols. 306-308, pp. 989-994, Mar. 2006.
- M., Ridha, K., Amaya and S., Aoki, “Boundary Element Simulation for Identification of Steel Corrosion in Concrete Using Magnetic Field Measurement”, Corrosion, Vol. 61, No. 8, pp. 784-791, Augst 2005.
- M., Ridha, K., Amaya and S., Aoki, “A Multistep Genetic Algorithm for Detecting Corrosion of Reinforcing Steels in Concrete”, Corrosion, Vol.57, No.9, pp. 794-781, 2001.
- R., TIAN, G., YAGAWA, “Advanced 4-Node Terahedrons”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006, to appear.
- R., TIAN, G., YAGAWA, “All man's Triangle, Rotational DOF and Partition of Unity”, International Journal for

Numerical Methods in Engineering, 2006.

- T., Furukawa and J., G., Michopoulos, “Design of Multiaxial Tests for Characterizing Anisotropic Materials”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 25 pages, in print.
- T., Furukawa and J., G., Michopoulos, “Dynamic Characterization of Composites using 3-DOF Loading Machine”, Journal of Composite Materials, Submitted November 2006.
- T., Furukawa and J., G., Michopoulos, “Online Planning of Multiaxial Loading Paths for Elastic Material Identification”, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, Submitted August 2006.
- Y., SAKAI and N., Yamagata, “Elastic-Plastic Analysis and Fracture Analysis using SPH”, Pressure Vessel and Piping Codes and Standards 2006, July 2006.
- Y., SAKAI and Y., Kawashima, “Large deformation Analysis by Smoothed Particle Hydrodynamics”, Pressure Vessel and Piping Codes and Standards 2006, July 2006.
- 岡田裕, “計算固体力学”, 日本機械学会誌(特集「機械工学年鑑」), pp. 605, 2005. 8. 1.
- 岡田裕, “受託研究報告書繰返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究その2”, 平成17年度(経過報告書), 社団法人日本溶接協会, 原子力研究委員会, MF-II 小委員会(執筆分担), 2006. 3. 1.
- 岡田裕, “複雑な形状を持つき裂の三次元解析—計算力学の立場から—2005”, 日本実験力学会誌(解説), vol. 5, No. 2, pp. 93-98, 2005. 6. 1.
- 海津聡, 畔上秀幸, “形状最適化問題と力法の数学的解釈”, 日本応用数理学会論文誌, 2006. 9. 25.
- 吉田正浩, 藤野清次, 岡田裕, “重合メッシュ法による複合材料解析で現れる線形方程式に対するマスキング前処理つきCG法の有効性”, 計算工学会論文集, 論文番号 20060010, 2006. 2. 1.
- 宮村倫司, 文屋信太郎, 中林靖, 吉村忍, “猪苗代湖の河川流および吹送流シミュレーション”, シミュレーション, Vol. 25, No. 2, pp. 48-57, 2006.
- 黒川悠, 水谷義弘, 井上裕嗣, “時間-周波数解析を用いたTOFD法による欠陥高さ測定の高度化非破壊検査”, Vol. 55, No. 12, pp. 635-642, Dec. 2006.
- 黒川悠, 水谷義弘, 井上裕嗣, 黛正己, “パルス圧縮技術を併用した四探触子 TOFD 法による欠陥位置および高さ測定”, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol. 72, No. 724, pp. 2030-2037, Dec. 2006.
- 青木繁, 天谷賢治, 今森智史, “網目状構造物の効率的境界要素腐食解析”, 日本機械学会論文集, A 編, 72 巻 718 号, pp. 830-835, 2006. 6.
- 天谷賢治, 菊池竜, 須賀一博, “0-1 整数制約条件を用いた光 CT 逆問題”, 日本機械学会論文集, A 編, 72 巻, 722 号, pp. 1437-1442, 2006. 10.
- 田中智行, 岡田裕, “ウェーブレットガラーキン法による応力集中問題の解析(第一報, 定式化と境界の取り扱い)”, 日本機械学会論文集, A 編, 72 巻, 718 号, pp. 856-863, 2006. 6. 1.
- 田中智行, 岡田裕, “ウェーブレットガラーキン法による応力集中問題の解析(第二報, 高次 B スプラインを基底関数に使用した解析)”, 日本機械学会論文集, A 編, 72 巻, 718 号, pp. 982-989, 2006. 7.
- 入部綱清, 藤澤智光, 柴田和也, 越塚誠一, “MPS 法を用いた並列流体解析に関する基礎的研究”, 計算工学会論文集, 2006. 4. 27.
- 山川真一, 天谷賢治, M., Parameswaran (Ash), “薄膜磁気センサを用いた磁場分布のナノ分解能再構成法”, 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.6, pp. 597-602, 2006.
- 山川真一, 天谷賢治, M., Parameswaran (Ash), “薄膜磁気センサを用いた磁場プローブまわりの磁場分布のナノ分解能再構成”, 計測自動制御学会論文集, Vol.43, No.1, pp.17-22, 2007.
- 山川 真一, 天谷 賢治, M. Parameswaran (Ash), “薄膜スリットプローブを用いた近接場蛍光イメージの再構

成法”，計算数理工学論文集 第6巻 第2号 pp125-130, 2006. 12.

- 天谷賢治, 堀田修平, 上島正史, “強度画像からの光位相分布の同定逆問題”, 日本機械学会論文集C編 Vol.72, No.717, pp. 1478-1485, 2006.
- 上島正史, 天谷賢治, “強度画像を用いた位相分布同定法の高精度化および効率化”, 日本機械学会論文集C編 Vol.72, No.717, pp. 1486-1491, 2006.

7.2. 著書

- 田村 善昭, 藤井 孝藏, 松本 洋一郎 編

計算力学ハンドブック(差分法・有限体積法・熱流体編), 丸善, 2006 年 3 月.

7.3. 総説・解説・エッセイ

- 井上裕嗣, 機械工学年鑑 5.4.2 構造ヘルスマニタリング, 日本機械学会誌, Vol. 109, No. 1053, p. 625, Aug. 2006.
- 酒井謙, “粒子法解析の現状”, 日本保全学会誌, Vol. 5, No. 2, pp. 87-93, 2006.
- 松岡浩, “超高速コンピューティングによる数値シミュレーション技術の社会貢献”, 研究活動報告第 12 号 (2005 年度) 情報社会構造分野, 東北大学電気通信研究所, 2005.
- 中林靖, “SC2004 参加報告”, 日本計算工学会「計算工学」, Vol. 10, No. 2, 2005.
- 畔上秀幸, “脊柱特発性側彎症の成因解明と臨床評価への応用”, 計算数理工学レビュー, 日本計算数理工学会誌, 千葉大学, 2006. 3. 17.
- 矢川元基, “学会はどうあるべきか”, 日本シミュレーション学会『シミュレーション』, Vol. 3, pp. 167, 2006. 9. 19.
- 矢川元基, “計算科学技術の現状と将来ー計算力学賞などの受賞に関連してー”, 東洋大学工業技術研究所報告, Vol. 27, pp. 13-15, 2005.
- 矢川元基, “計算力学の将来展望”, 日本学術振興会先端材料強度第 129 委員会・第 50 回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集 (第 50 巻), pp. 55, 2006. 4. 3.
- 矢川元基, “高効率を志した大規模連続体解析法”, 東洋大学工業技術研究所報告, Vol. 27, pp. 56-61, 2005.
- 矢川元基, “数学の羅列は流体になり、リアリティを生み出す”, TOYO UNIVERSITY NEWS (東洋大学報), Vol. 202, pp. 17, 2006. 4. 1.

7.4. 招待講演

- G, YAGAWA, “Enriched element method and its applications to solid mechanics”, (PlenaryLecture), 10th International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science, Sanaya, Hainan, China, 2006. 8. 21-23.
- G, YAGAWA, “Numerical Simulation of Fluid-Structure Thermal Interaction Phenomenain Turbulence Flows”, (KeynoteLecture), 7th World Congresson Computational Mechanics, Los Angeles, CA, USA, 2006. 7. 17.
- G, YAGAWA, “On The Enriched Free Mesh Method: A User Friendly Finite Elements For Solid And Structural Mechanics”, (KeynoteLecture), 10th EASTASIA-PACIFIC CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING AND CONSTRUCTION, Bhangkok, Thai, 2006. 8. 4.
- G, YAGAWA, “Some Topics on Supercomputing for Computational Mechanicsin Japan”, (KeynoteLecture), Conferenceon Computational Mechanics & Numerical Analysis (CMNA) 2006, Banda Ache, Indonesia, 2006. 5. 12.
- H., Azegami, “Shape Optimization Problems: Structure and Solution”, 日本機械学会設計工学・システム部門特別講演会最適設計－Topology and Shape Optimizations, 早稲田大学大久保キャンパス, 2006. 10. 30.
- S., AOKI, “Application of BEM to Optimization of Cathodic Protection for long Pipelines”, Tokyo University of Science Xinjiang University 2006 International University Exchange Seminar, TUS Seminar House, Noda-shi, Japan, 2006, 10, 9-21.
- S., AOKI, “Inverse Problems for Determining Impact Material Properties”, Regional Conferenceon Computational Mechanics and Numerical Analysis (CMNA) 2006, Syiah Kuala University, Banda Aceh, Indonesia, 2006, 5, 12-14.
- 松岡浩, “超高速コンピュータが切り開く原子力研究開発と未来社会”, 電子情報通信学会第二種研究会マイクロ波シミュレータ時限研究専門委員会第 11 回マイクロ波シミュレータワークショップ, 東京, 2005. 12. 12.
- 中林靖, “流体解析モジュール ADVENTURE_Fluid の概要”, 第 3 回ADVENTURE定期セミナー, 2006. 3. 17.
- 田村善昭, “次世代計算機環境における可視化”, 第 5 回スーパーコンピュータワークショップ, (筑波), 2006. 8. 30.
- 矢川元基, “「ものづくり」のための計算科学とその課題”, 「計算科学、その展望と課題」計算科学フロンティアフォーラム, 東京, 2005. 9. 30.
- 矢川元基, “ものづくりのためのスーパーコンピューティング”, 第 7 回横幹技術フォーラム, 東京, 2005. 9. 21.
- 矢川元基, “計算科学技術とその原子力への応用”, 原子力システム懇話会, 東京, 2006. 9. 19.
- 矢川元基, “計算科学技術の最新動向と原子力”, 原子力総合シンポジウム, 東京, 2006. 5. 29-30.
- 矢川元基, “計算力学の将来展望”, 日本学術振興会先端材料強度第 129 委員会・第 50 回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集(第 50 巻), 東京, 2006. 4. 3.
- 矢川元基, “大規模計算のための計算手法の開発と次世代 HPC に関する技術動向”, 豊田中央研究所, 東京, 2006. 9. 1.
- 矢川元基, “地球全体をシミュレーションする－世界レベルの大規模高速計算機の開発と利用－”, 機能システム特別講義, 東洋大学大学院工学研究科, 東京, 2005. 11. 12.
- 矢川元基“モノづくりににおけるシミュレーション技術の活用と課題”, (特別講演), 日本品質管理学会第111回シンポジウム, 2006.9.4.

7.5. 講演論文・口頭発表

- Akira SHINOZAKI, Kikuo KISHIMOTO, Hirotsugu INOUE, “Tensile Simulation of Polymeric Material Considering the Meso-Scale Structure”, 16th European Conference on Fracture, Alexandroupolis, Greece, 2006. 07.
- H., Man and T., Furukawa, “Neural Network Modelling for Piezoelectric and Elastic Nonlinearities of Piezoelectric Ceramics”, 7th World Congress on Computational Mechanics (WCCM VII), Los Angeles, 2006, 7, 16-22.
- H., Okada, C., T., Liu, S., Tanaka, “Analysis of Damage Evolution of Particulate Composite Material using the s-version FEM”, Proceedings of International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences 2005 (ICCES’05), CD-ROM, 2005. 12. 1.
- H., Okada, G., Yagawa, H., Kawai, K., Shijyo, D., Fujita, Y., Kanda, T., Fujisawa, T., Iribe, “The State-of-the-Art Methodology to Compute the 3-D Stress Intensity Factors for Arbitrary Shaped Cracks in Complex Shaped Structures”, EPMESC X, Computational Methods in Engineering & Science, pp. 200, Aug 2006.
- H., Okada, S., Tanaka, Y., Fukui, N., Kumazawa, “Analysis of Progressive Damage and Fracture of Particulate Composite Materials using S-FEM Technique”, Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures; proceedings of the 16th European Conference of Fracture, pp. 1141-1142. July 2006.
- H., Okada, Y., Kamimaru, “BEM Analysis on Crack Tip Deformation Field of Rubber-Modified Epoxy Resin, Adhesive Layer”, Proceedings of International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences 2005 (ICCES’05), CD-ROM, 2005. 12. 1.
- H., Suzuki and Y., Ezawa, “Three-dimensional mesh generation using the crossed circles method”, The 10th International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science (EPMESC X), Sanya, China, 2006. 8. 21.
- Hirotsugu INOUE, Kikuo KISHIMOTO, “Development and Application of Contact-Type Line-Focus Ultrasonic Probe”, 12th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing, Auckland, New Zealand, 2006. 11.
- J., G., Michopoulos and T., Furukawa, “A Continuum Approach for Identifying Elastic Moduli of Composites”, 16th European Conference on Fracture Mechanics, Alexandroupolis, Greece, CD-ROM, pp. 1-8, 2006. 7. 3-7.
- J., G., Michopoulos and T., Furukawa, “Effect of Loading Path and Specimen Shape on Inverse Identification of Elastic Properties of Composites”, International Design Engineering Technical Conference (DETC) and Computers and Information in Engineering Conference (CIE), Philadelphia, PA, 2006. 9. 10-13.
- J., G., Michopoulos and T., Furukawa, “Toward Optimal Design of Multi-axial Experiments for Characterizing Anisotropic Materials”, 7th World Congress on Computational Mechanics (WCCM VII), Los Angeles, 2006. 7. 16-22.
- J., Imasato and Y., Sakai, “Free Surface Flow Analysis using SPH”, WCCM, Los Angeles, 2006.
- K., Murotani, G., YAGAWA, Y., Kanda, T., FUJISAWA, “VCCM rule-based meshing algorithm for an arbitrary shape of crack”, Conference on Computational Mechanics & Numerical Analysis (CMNA 2006), pp. 32, Banda Aceh Indonesia, 2006.
- K., Murotani, Y., Kanda, H., Okada, T., FUJISAWA, G., YAGAWA, “VCCM rule-based meshing algorithm for an automatic 3D analysis of crack propagation of mixed mode”, COMPUTATIONAL METHOD IN

ENGINEERING AND SCIENCE EPMESC X, CD-ROM, Sanya China, 2006. 8. 21-23.

- K., Suga, K., Amaya, R., Kikuchi, “Regularization of Ill-posed Optical Computed Tomography Using Optical Absorption with Binary Constraints”, 3rd Computational Mechanics Forum, Sydney, Australia, 2006.
- K., Suga, M., Ridha and S., Aoki, “Measurement Optimization for Boundary Element Inverse Analysis of Reinforced Concrete Corrosion Detection”, Computational Mechanics and Numerical Analysis (CMNA2006) inconjunction with Computational and Experimental Mechanics (CEM), pp.223-226, Syiah Kuala University, BandaAceh, Indonesia, 2006. 5. 12-14.
- K., Suga, M., Ridha, S., Aoki, “Optimization of Observation Conditionon Inverse Analysis for Identifying Corrosion of Steel in Concrete”, COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING AND SCIENCE EPMESC X, Sanya, Hainan, China, 2006. 8. 21-23.
- Kentaro KOZUKI, Masaki OMIYA, Kikuo KISHIMOTO, Hirotsugu INOUE, “Study of Delamination of Thin Film Coating on Cyclic Nano-Indentation Test”, Asian Pacific Conference for Fracture and Strength. Sanya, China, 2006. 11.
- M. Fauzan ADZIMAN, Swarnima DESHPANDE, Masaki OMIYA, Hirotsugu INOUE, Kikuo KISHIMOTO, “Compressive Deformation in Aluminum Foam Investigated Using 2D Object Oriented Finite Element Modeling Approach”, Asian Pacific Conference for Fracture and Strength, Sanya, China, 2006. 11.
- M. Nizar MACHMUD, Masaki OMIYA, Hirotsugu INOUE, Kikuo KISHIMOTO, “Deformation and Failure Behaviors of PC/ABS (50/50) Blends under Impact”, The 8th Asia-Pasific Symposium on Engineering Plasticity and its Applications, Nagoya, Japan, 2006. 09.
- M. Nizar MACHMUD, Masaki OMIYA, Hirotsugu INOUE, Kikuo KISHIMOTO, “Impact-Induced Failure Characteristics of PC/ABS (50/50) Blends with Poor/Good Weld-Lines Strength”, Regional Conference on Computational Mechanics & Numerical Analysis, Banda Aceh, Indonesia, 2006. 05.
- M. Nizar MACHMUD, Masaki OMIYA, Hirotsugu INOUE, Kikuo KISHIMOTO, “Rubber Particle Size Effect on Impact Characteristics of PC/ABS (50/50) Blends”, 16th European Conference on Fracture, Alexandroupolis, Greece, 2006. 07.
- M., Fukaya, Y., Tamura, and Y., Matsumoto, “Prediction of Cavitation Intensity and Erosionin Centrifugal Pump Based on Detailed Bubble Behavior Simulated Using Bubble Flow Model”, The 11th of International Symposiumon Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Honolulu, Hawaii, February-March 2006.
- M., Masuda and Y., Nakabayashi, “Aplication of the Computational Fluid Dynamics to the Free-kick Support System”, 3rd Computational Mechanics Forum, Sydney, Australia, 2006.
- M., Ridha, “Detection of Reinforced Concrete Corrosion by using BEM and Magnetic Field Measurement”, 5th International Materials Technology Conference & Exhibition (IMTCE2006), Mutiara Crown Plaza Hotel, Kuala Lumpur, Malaysia, 2006. 7. 18.
- M., Ridha, S., Aoki, Y., Shibuya and M., Yoshida, “Inverse Analysis for Obtaining the Complex Admittance of Reinforced Concrete Using Experimental Data”, Computational Mechanics and Numerical Analysis (CMNA2006), inconjunction with Computational and Experimental Mechanics (CEM), pp. 321-324, Syiah Kuala University, Banda Aceh, Indonesia, 2006. 5. 12-14.
- M., Ridha, Safuadi, A., K., Arrifin, and A., R., Duad, “Applying Inverse Method to Estimate Conductivity of Electrolyte”, Computational Mechanics and Numerical Analysis (CMNA2006) inconjunction with Computational and Experimental Mechanics (CEM), pp.207-211, Syiah Kuala University, Banda Aceh,

Indonesia, 2006. 5. 12-14.

- M., Shimoda, J., Tsuji and H., Azegami, “Minimum Weight Shape Design for Natural Vibration Problem of Plate and Shell Structures”, Computer Aided Optimum Design in Engineering IX, edited by Hernandez, S. and Brebbia, C. A., 2005. 5. 23.
- M., Yoshida, K., Suga, M., Ridha, K., Amaya, S., Aoki, “Identification of Electrical Conductivity and Impedance of Reinforced Concrete by Boundary Element Inverse Analysis”, COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING AND SCIENCE EPMESC X, Sanya, Hainan, China, 2006. 8. 21-23.
- S., Shimamura and S., AOKI, “Impact between Cue and Ball in Billiard (Effect of Tip Structure)”, Tokyo University of Science and Xinjiang University 2006 International University Exchange Seminar, TUS Seminar House, Noda-shi, Japan, 2006. 10. 9-21.
- S., Shimamura and S., AOKI, “Numerical Analysis of Impact between Cue and Ball in Billiard (Effect of Tip Structure)”, COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING AND SCIENCE EPMESC X, Sanya, Hainan, China, 2006. 8. 21-23.
- S., Yamakawa, K., Amaya, M., Parameswaran (Ash), “A nano-resolution method for magnetic-field reconstruction using a thin-film magnetic sensor”, IEEE Sensors 2006, Daegu, Korea, 2006. 10. 22-25.
- T., Furukawa and J., G. Michopoulos, “Material Characterization of Composites Using Multi-Axial Testing”, Regional Conference on Computational Mechanics and Numerical Analysis, Banda Aceh, Indonesia, CD-ROM, pp. 1-10, 2006. 5. 12-14.
- T., Furukawa, “Automatic Material Characterization for Inelastic Finite Element Analysis”, 7th World Congress on Computational Mechanics (WCCM VII), Los Angeles, (Abstract only), (Invited as Plenary Speaker), 2006. 7. 16-22.
- T., Furukawa, J., G. Michopoulos and M., Hoffman, “Regularized Identification of Material Constraints Using Multi-Objective Gradient-Based Optimization Method,” 16th European Conference on Fracture Mechanics, Alexandroupolis, Greece, CD-ROM, pp. 1-8, 2006. 7. 3-7.
- T., Miyamura, S., Bunya, Y., Nakabayashi and S., Yoshimura, “Environmental fluid simulation of Lake Inawashiro in Japan based on shallow water equations”, 7th World Congress on Computational Mechanics, Los Angeles, California, 2006.
- T., Miyamura, Y., Nakabayashi, H., Kawai and S., Yoshimura, “Mesh generation of a lake for environmental fluid simulation”, The Eighth U.S. National Congress on Computational Mechanics, Austin, Texas, 2005.
- T., Muramatsu, “Virtual Design Laboratory for Fast Reactor System Using a Combined Processing of Knowledge and Numerical Technologies”, The 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, September 2006.
- T., Muramatsu, and G., Yagawa, “Numerical Simulation of Fluid-Structure Thermal Interaction Phenomena in Turbulent Flows”, 7th World Congress on Computational Mechanics 18th, July 2006.
- Takahiro OMORI, Hirotugu INOUE, Noriyasu KAWAMURA, Minoru MUKAI, Kikuo KISHIMOTO, Takashi KAWAKAMI, “Evaluation of Drop Impact Load for Thin Cone-shaped Structures”, Asian Pacific Conference for Fracture and Strength, Sanya, China, 2006. 11.
- Y., Hasegawa, and Y., Kagiya, and H., Azegami, “Shape Optimization on Acoustic-Structure Interaction Problems”, Proceedings of the Fourth China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, 2006. 11. 6.
- Y., Hasegawa, Y., Kagiya, and H., Azegami, “Shape Optimization on Acoustic-Structure Interaction

Problems”, Proceedings of the Fourth China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, 2006. 11. 6.

- Y., Nakabayashi, “ADVENTURE Fluid - One of the modules in the ADVENTURE System”, 3rd Computational Mechanics Forum, Sydney, Australia, 2006.
- Y., Nakabayashi, T. Matsuo, “Motion analysis of the elevating ball by the effect of buoyant force”, Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science (EPMESC X), Sanya, China, 2006.
- Y., Nakabayashi, T., Asami, “Development of the diffusion control system using air shutter”, Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science (EPMESC X), Sanya, China, 2006.
- Y., Nakajima, Y., Tamura, Y., Kaneko and Y., Matsumoto, “Analysis of Ultrasound Propagation for the Development of the Noninvasive Oncotherapy Device”, Selected Articles of the 1st International Conference on Design Engineering and Science, pp. 79-83, June 2006.
- Y., Sakai, “Super Elasticity Analysis using Smoothed Particle Hydrodynamics”, WCCM VII, Los Angeles, 2006.
- Yoshikazu Endo and Yoshitaka Ezawa, “Study on high accurate contact analysis using the inverse problem technique”, The 3rd computational mechanics forum, the University of New South Wales, Sydney, Australia, 2006. 9. 29.
- Yu KUROKAWA, Yoshihiro MIZUTANI, Hirotsugu INOUE, Masami MAYUZUMI, “Crack Height Sizing for Austenitic Stainless Steel Weld Joint by Time-of-Flight Diffraction Method with Time-Frequency Analysis”, Asian Pacific Conference for Fracture and Strength. Sanya, China, 2006. 11.
- タン・コボ, 酒井譲, “粒子法による構造大変形・熱伝導連成解析手法の検討”, 日本機械学会第 19 回計算力学講演会・講演論文集, pp. 355-356, 2006.
- 井上裕嗣, 伊藤大介, 岸本喜久雄, “熱弾性応力測定に関する熱伝導の影響の補正”, 日本機械学会 M&M2006 材料力学カンファレンス, 浜松, 2006. 8.
- 井上裕嗣, 伊藤大介, 岸本喜久雄, “熱弾性応力測定に関する熱伝導逆解析”, 日本機械学会関東支部第 12 期総会講演会, 川越, 2006. 3.
- 井上裕嗣, 岸本喜久雄, “熱弾性応力測定に関する熱伝導逆解析の簡便化”, 日本機械学会 2006 年度年次大会, 熊本, 2006. 9.
- 井上裕嗣, 岸本喜久雄, “熱弾性応力測定に関する熱伝導逆解析の実用化の検討”, 日本機械学会第 19 回計算力学講演会, 名古屋, 2006. 11.
- 岡田裕, “三次元仮想き裂閉口積分法 (VCCM) によるき裂パラメーターの計算法に関する考察”, 第 19 回計算力学講演会講演論文集, 日本機械学会 No. 06-9, pp. 183-184, 2006. 11.
- 岡田裕, 荒木宏介, “四面体有限要素による三次元破壊力学解析 (仮想き裂閉口積分法について)”, 第 55 回理論応用力学講演会講演論文集 (NCTAM 2006), pp. 377-378, 2006. 1.
- 岡田裕, 荒木宏介, “四面体有限要素を用いた三次元混合モードき裂問題への仮想き裂閉口積分法 (VCCM) の適用”, 計算工学講演会論文集, Vol. 11, No. 1, pp. 159-162, 2006. 6.
- 岡田裕, 荒木宏介, 河合浩志, “大規模破壊力学解析の新展開 (四面体有限要素の利用)”, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 Vol. 6, 日本機械学会 No. 06-1, pp. 79-80. 2006. 9.
- 岡田裕, 荒木宏介, 河合浩志, 藤澤智光, 神田康行, 入部綱清, 矢川元基, “テトラ 2 次要素用三次元仮想き裂閉口積分法 (VCCM) による混合モードき裂解析”, M&M 2006 材料力学カンファレンス講演論文集, 日本機械学会 No. 06-4, pp. 401-402, 2006. 8.

- 河合浩志, 岡田裕, “三次元複雑き裂形状を扱うためのプレポストプロセッサの開発”, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 Vol. 6, 日本機械学会 No. 06-1, pp. 81-82, 2006. 9.
- 河合浩志, 藤澤智光, 神田康行, 入部綱清, 岡田裕, 荒木宏介, 矢川元基, “グリッドコンピューティングによる三次元き裂の自動パラメトリック解析”, M&M 2006 材料力学カンファレンス講演論文集, 日本機械学会 No. 06-4, pp. 405-406, 2006. 8.
- 河島庸一, 酒井譲, “粒子法によるゴムの超弾性解析”, 計算工学講演会論文集, 第 11 巻, 第 2 号, pp. 53-56, 2006.
- 吉田勉, 青木繁, “色調分布を特徴付けるパラメータによる玄米の分類”, 2006 年度年次大会機械学会講演論文集, Vol. 7, pp. 325-326, 熊本, 2006. 9. 20.
- 吉田竜, 石川綾佑, 田村善昭, “直角直交格子における物体境界と計算精度”, 日本機械学会関東支部第 12 期総会講演会講演論文集, pp. 225-226, 川越, 2006. 3.
- 橋川黎二郎, 富山潤, 伊良波繁雄, 山田義智, 中林靖, 吉村忍, “飛来塩分の移流・拡散シミュレーション”, 日本応用数理学会環瀬戸内応用数理研究部会, 第 10 回シンポジウム講演予稿集, pp. 17-22, 2006.
- 江澤良孝, “プリプロセッサの現状と課題”, 日本機械学会地方講演会, 川越, 2006. 3. 10.
- 荒井利弘, 安藤啓, 酒井譲, “SPH 粒子法による津波解析”, 日本機械学会第 19 回計算力学講演会・講演論文集, pp. 467-468, 2006.
- 荒木宏介, 岡田裕, 河合浩志, “四面体二次要素による仮想き裂閉口積分法 (VCCM 法) を用いた三次元き裂解析”, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集, Vol. 6, 日本機械学会 No. 06-1, pp. 83-84, 2006. 9.
- 荒木宏介, 岡田裕, 河合浩志, “四面体二次要素を用いた仮想き裂閉口積分法 (VCCM) を用いた混合モードき裂解析”, 第 19 回計算力学講演会講演論文集, 日本機械学会 No. 06-9, pp. 186-187, 2006. 11.
- 黒川悠, 水谷義弘, 井上裕嗣, 黛正己, “TOFD 法に適したウェーブレット変換の検討”, 日本非破壊検査協会平成 18 年度春季大会, 東京, 2006. 05.
- 黒川悠, 水谷義弘, 井上裕嗣, 黛正己, “信号処理を用いた 4 探触子 TOFD 法による欠陥位置および高さ測定”, 日本実験力学学会 2006 年度年次講演会, 春日井, 2006. 03.
- 今里淳, 酒井譲, “SPH 粒子法による分散並列システムにおける効率について”, 日本機械学会第 19 回計算力学講演会・講演論文集, pp. 557-558, 2006.
- 今里淳, 酒井譲, “複雑地形における大規模流体シミュレーション”, 計算工学講演会論文集, 第 11 巻, 第 2 号, pp. 209-210, 2006.
- 笹岡竜, 面高俊樹, 青山大樹, 畔上秀幸, “特発性側彎症の力学的成因仮説に基づく臨床形態の分類”, 日本機械学会東海支部第 55 期総会講演会講演論文集, 2006. 3. 10.
- 笹岡竜, 面高俊樹, 畔上秀幸, 村地俊二, 鬼頭純三, 石田義人, 川上紀明, 牧野光倫, “特発性側彎症の力学的成因仮説に基づく臨床形態の分類”, 第 39 回日本側彎症学会演題抄録集, 2005. 11. 1.
- 山下裕也, 岡田裕, 酒井譲, 福井泰好, “SPH 法による Al-SiCFGM の半溶融加工解析”, 第 19 回計算力学講演会講演論文集, 日本機械学会 No. 06-9, pp. 353-354, 2006. 11.
- 山下裕也, 岡田裕, 酒井譲, 福井泰好, “SPH 法を用いた傾斜機能材料の半溶融加工の数値解析に関する研究”, 日本機械学会九州支部講演論文集, No. 068-1, pp. 165-166, 2006.3.
- 山下裕也, 岡田裕, 酒井譲, 福井泰好, “半溶融加工時における傾斜機能材料の SPH 法による流動解析”, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 Vol. 1, 日本機械学会 No. 06-1, pp. 33-34, 2006. 9.
- 山本真明, 吉村忍, 中林靖, “タバコの煙の人体周り拡散シミュレーション”, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講演論文集, pp. 703-704, 2005.

- 山本真明, 吉村忍, 中林靖, “微粒汚染物質の人体周りの拡散シミュレーション”, 計算工学講演会論文集 Vol. 11, No. 1, pp. 233-236, 2006.
- 山本真明, 吉村忍, 中林靖, “粒子状物質の大気中拡散マルチレベルシミュレーション”, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集, 2005.
- 室谷浩平, “3 次元亀裂進展解析のためのメッシュ生成法”, 日本応用数理学会 2006 年度年会メッシュ生成研究部会オーガナイズドセッション, 筑波大学春日キャンパス, 2006. 9. 16-18.
- 室谷浩平, “メッシュスペクトル分解を用いた頂点位置の決定法”, 応用数理学会平成 18 年研究部会連合発表会, 早稲田大学大久保キャンパス, 2006. 3. 4.
- 室谷浩平, “拡張 SSA を用いた画像のノイズ除去法”, 日本応用数理学会 2006 年度年会ウェーブレット研究部会オーガナイズドセッション, 筑波大学春日キャンパス, 2006. 9. 16-18.
- 篠崎明, 岸本喜久雄, 井上裕嗣, 大宮正毅, “分子鎖ネットワークモデルを用いた粘着材の付着強度解析”, 日本機械学会 M&M2006 材料力学カンファレンス, 浜松, 2006. 08.
- 酒井譲, “SPH法による溶融金属の流動解析”, 計算工学講演会論文集, 第 11 巻, 第 2 号, pp. 57-58, 2006.
- 酒井譲, 山下彰彦, “粒子法による地震構造解析”, 計算工学講演会論文集, 第 11 巻, 第 2 号, pp. 195-196, 2006.
- 酒井譲, 山下彰彦, “粒子法による超弾性解析手法の検討”, 日本機械学会第 19 回計算力学講演会・講演論文集, pp. 565-566, 2006.
- 小林陽介, 矢川元基, “高精度フリーメッシュ法の可視化処理”, 第 25 回日本シミュレーション学会大会発表論文集, pp. 165-168, 2006. 6. 22.
- 松岡浩, 菊池範子, “超高速専用プロセッサによるシミュレーションを目指したセルオートマトン計算モデル”, 日本応用数理学会 2005 年度年会論文予稿集, pp. 276-277, 東京, 2005. 9. 23-25.
- 松岡浩, 菊池範子, “流体専用超高速DRPシステムの開発と不揮発性ロジック等への期待”, 東北大学電気通信研究所「次世代 VLSI コンピューティングとシステムインテグレーション」共同プロジェクト研究会, 2005. 12. 7.
- 上月謙太郎, 大宮正毅, 岸本喜久雄, 井上裕嗣, “繰返しナノインデンテーションによるコーティング薄膜のはく離”, 日本機械学会 2006 年度年次大会, 熊本, 2006. 09.
- 深谷征史, 田村善昭, 松本洋一郎, “気泡モデルキャビテーション流れ解析による遠心ポンプ内のキャビテーション強さ予測”, 第 55 回理論応用力学講演会講演論文集, 京都, 2006. 1.
- 神田康行, 伊良波繁雄, 岡田裕, 富山潤, “高精度四面体要素を用いたき裂解析に関する研究”, 第 19 回計算力学講演会講演論文集, 日本機械学会 No. 06-9, pp. 185-186, 2006. 11.
- 神田康行, 藤澤智光, 入部綱清, 河合浩志, 岡田裕, 荒木宏介, 伊良波繁雄, 矢川元基, “三次元自動き裂進展システムの構築”, M&M 2006 材料力学カンファレンス講演論文集, 日本機械学会 No. 06-4, pp. 403-404, 2006. 8.
- 須賀一博, 天谷賢治, 菊池竜, “光の吸収率に関する 2 値制約条件を利用した光 CT 逆問題の適切化”, 日本機械学会 2006 年次大会, 熊本大学, 2006. 9. 18-22.
- 青山大樹, 畔上 秀幸, “脊柱特発性側彎症の成因解明のための成長シミュレーション”, 第 55 回理論応用力学講演会講演論文集, 2006. 1. 24.
- 青山大樹, 畔上秀幸, “脊柱特発性側彎症の成因に関する幾何学的非線型性を考慮した数値シミュレーション”, FCS/テクノシンボ名大/MPS シンポジウム 2005 計算科学シンポジウム論文集, 2005. 10. 11.
- 青山大樹, 畔上秀幸, “脊柱特発性側彎症の成因に関する非線形座屈解析”, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講演論文集, 2005. 11. 19.

- 前博行, 望月大資, 大宮正毅, 井上裕嗣, 岸本喜久雄, “押出しアルミニウム部材の圧潰解析への直交異方性損傷モデルの適用”, 日本機械学会 M&M2006 材料力学カンファレンス, 浜松, 2006. 08.
- 村松壽晴, “ナトリウム冷却高速増殖炉の熱流動挙動に関するマルチフィジックス大規模数値シミュレーション”, 日本機械学会関東支部第 12 期総会講演会, 2006. 3. 11.
- 村松壽晴, “ファジィ推論を用いた数値計算系の適応制御と知識工学”, 日本原子力研究開発機構システム計算科学センター第 14 回ワークショップ, 2006. 6. 30.
- 村松壽晴, “原子力分野での超高速計算機利用に関する展望”, 東北大学電気通信研究所「新概念回路技術展開型超高速コンピューティングの創造開拓」共同プロジェクト研究会, 2006. 10. 24.
- 村松壽晴, “高速炉自由液面プレナムにおけるカバーガス巻込み挙動と渦度分布に関する数値解析”, 日本機械学会 2006 年度年次大会, 2006. 9. 20.
- 村松壽晴, “高速炉多目的最適化設計における熱流動数値シミュレーションと知識工学”, 日本原子力研究開発機構システム計算科学センター第 13 回ワークショップ, 2006. 2. 24.
- 中林靖, 吉村忍, “サッカーボールの空力特性”, 第 19 回数値流体力学シンポジウム, 2005.
- 中林靖, 松尾吉朗, “浮力により上昇する球の運動解析”, 第 19 回数値流体力学シンポジウム, 2005.
- 中林靖, 浅見達矢, “エアージャッターを用いた物質拡散制御システムの開発”, 第 19 回数値流体力学シンポジウム, 2005.
- 中林靖, 浅野雅裕, “遺伝的アルゴリズムによる AIBO の歩行スタイルの自己学習”, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講演論文集, pp. 709-710, 2005.
- 中林靖, 増田正人, 吉村忍, “サッカーボールの空力特性の評価とそのフリーキックサポートシステムへの応用”, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講演論文集, pp. 531-532, 2005.
- 長岡慎介, 稲葉正和, 矢川元基, “フリーメッシュ法のためのリアルタイム 3D アニメーション”, 第 25 回日本シミュレーション学会大会発表論文集, pp. 69-72, 2006. 6. 22.
- 長谷川義明, 鍵山恭彦, 畔上秀幸, “音場・構造連成問題における形状最適化”, 日本応用数理学会 2006 年度年会講演予稿集, 2006. 9. 16.
- 長谷川義明, 鍵山恭彦, 畔上秀幸, “音場・構造連成問題における形状最適化”, 日本機械学会東海支部第 55 期総会講演会講演論文集, 2006. 3. 10.
- 田村善昭, “気泡モデルによるキャビテーション流れの数値解析”, キャビテーションに関するシンポジウム第 13 回, 札幌, 2006. 6.
- 田村善昭, 小野ちひろ, 古澤寛行, 吉田真弓, “人を含む物体まわりの流れの数値解析”, 日本機械学会関東支部第 12 期総会講演会講演論文集, pp. 183-184, 川越, 2006. 3.
- 田村善昭, 松本洋一郎, “キャビテーション流れ解析の高精度化と安定化”, キャビテーションに関するシンポジウム第 13 回, 札幌, 2006. 6.
- 田中智行, 岡田裕, “B スプラインウェーブレットガラーキン法による三次元応力集中問題解析”, 第 55 回理論応用力学講演会講演論文集 (NCTAM2006), pp. 197-198, 2006. 1.
- 田中智行, 岡田裕, “B スプラインウェーブレットガラーキン法を用いたアダプティブ解析”, 計算工学講演会論文集, Vol. 11, No. 1, pp. 21-24, 2006. 6.
- 島村真介, 青木繁, “ビリヤードにおけるキューと球の衝突解析 (キュー先角部構造の影響)”, 日本機械学会関東支部講演会, 2006. 3.
- 入部綱清, 藤澤智光, 柴田和也, 越塚誠一, “数値地図を用いた MPS 法による津波解析”, 計算工学講演会講演論文, pp. 67-68, 2006. 6.
- 畔上秀幸, 小山悟, “規定した変形を生む異種材料境界面の形状設計”, 日本機械学会第 18 回計算力学

講演会講演論文集, 2005. 11. 19.

- 畔上秀幸, 竹内謙善, “勾配法に基づく形状最適化スキームにおける収束性の改善”, 日本応用数理学会 2005 年度年会講演予稿集, 2005. 9. 23.
- 尾崎弘明, 松原仁, 矢川元基, “フリーメッシュ法を用いた 3 次元任意形状亀裂進展解析”, 第 25 回日本シミュレーション学会大会発表論文集, pp. 157-164, 2006. 6. 22.
- 浜崎純也, 畔上秀幸, “流体・構造連成問題における形状最適化”, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集, 2006. 9. 18.
- 浜崎純也, 畔上秀幸, “流体・構造連成問題における形状最適化”, 日本機械学会東海支部第 55 期総会講演会講演論文集, 2006. 3. 10.
- 富山潤, 神田康行, 伊良波繁雄, 山田義智, 中林靖, 吉村忍, “飛来塩分の大気拡散シミュレーション”, 計算工学講演会論文集 Vol. 11, No. 1, pp. 229-232, 2006.
- 片峯英次, 永友勇也, 畔上秀幸, “粘性流れ場の 3 次元形状最適化”, 日本応用数理学会 2006 年度年会講演予稿集, 2006. 9. 16.
- 片峯英次, 織田恭平, 畔上秀幸, “温度分布を規定する強制熱対流場の形状同定”, 日本機械学会東海支部第 55 期総会講演会講演論文集, 2006. 3. 10.
- 片峯英次, 平井雅大, 畔上秀幸, “熱変形分布を規定する熱弾性場の形状同定問題の解法”, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集, 2005. 9. 19.
- 北村修一, 酒井譲, 矢川元基, “粒子法による地震解析”, 日本機械学会第 19 回計算力学講演会・講演論文集, pp. 469-470, 2006.
- 李海東, 酒井譲, “粒子法による爆発シミュレーション”, 日本機械学会第 19 回計算力学講演会・講演論文集, pp.347-348, 2006.
- 鈴木隼人, 江澤良孝, “CCM を用いた三次元メッシュ分割技術の開発”, 日本応用数理学会研究部会連合発表会, 東京, 2006. 3. 4.
- 鈴木隼人, 江澤良孝, “CCM 法を用いた三次元メッシュ分割技術の開発”, 関東学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会, 川越, 2006. 3. 10.
- 宮村倫司, 中林靖, 白樫卓也, 河合浩志, 吉村忍, “猪苗代湖の三次元流体シミュレーションに関する検討”, 計算工学講演会論文集 Vol. 10, No. 1, pp. 297-298, 2005.
- 宮村倫司, 文屋信太郎, 中林靖, 吉村忍, “浅水長波方程式による猪苗代湖の環境流体シミュレーション”, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講演論文集, pp. 697-698, 2005.
- 山川真一, 天谷賢治, M. Parameswaran (Ash), “薄膜磁気センサを用いた磁場分布のナノ分解能再構成法”, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集, Vol.6, pp.109-110, 熊本大学, 2006. 9. 18-22.
- 山川真一, 天谷賢治, M. Parameswaran (Ash), “薄膜スリットプローブを用いた近接場蛍光イメージの再構成法”, 計算数理工学シンポジウム 2006, 東京工業大学, 2006. 12. 8.
- 上島正史, 天谷賢治, “強度画像を用いた位相分布同定法の高精度化および効率化”, [No.060-1]日本機械学会関東支部第 12 期総会講演会講演論文集(2006), pp.223-224.
- 上島正史, 天谷賢治, “強度画像を用いた高性能収差解析手法の開発”, [No.06-9]日本機械学会第 19 回計算力学講演会論文集(2006), pp.417-418.

7.6. 受賞

- 中林靖, 小川雄士, 伊藤倫之, ロボカップ・ジャパンオープン 2006, シミュレーションリーグ, サッカー2D, 準優勝, 2006.
- 中林靖, 小川雄士, 伊藤倫之, ロボカップ・ジャパンオープン 2006, 人口知能学会賞, 2006.
- 室谷浩平, 日本応用数理学会年会, 若手優秀講演賞, 筑波, 2006.
- 矢川元基, 日本溶接協会原子力研究委員会設立 50 周年記念功績賞, 2007. 2.

8. 結び

本研究は、2005 年 6 月にセンターが発足してから 2007 年 1 月までの活動を取りまとめたものである。また、2007 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 1 月 20 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すべ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。