1.	まえがき	<u> </u>	1
2.	概要		2
	2.1. セン	<i>/</i> ター設置について	2
	2.2. 組約	戰	2
	2.3. 設住	面	4
	2.4. 研究		دک م
	2.4.1.	構 這 健 全 性	5
	2.4.2.	·	5
	2.4.3.	最適化	5
	2.4.4.	大規模可視化	6
	2.4.5.	大規模並列化	6
	2.4.6.	統合化	7
	2.5. フォ	ーーラム・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	8
	2.5.1.	第4回計算力学フォーラム (バンギ)	8
	2.5.2.	第5回計算力学フォーラム (パダン)	8
	2.5.3.	第6回計算力学フォーラム (ウルムチ)	8
	2.5.4.	第3回計算力学シンポジウム (白山)	8
	2.5.5.	計算力学セミナー (白山)	8
	2.6. 産	学協同活動	10
	2.6.1.	(株)日立製作所機械研究所との連携	10
	2.6.2.	独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携	10
	2.6.3.	富士通(株)との連携	10
	2.6.4.	東京理科大との連携	10
	2.6.5.	東京医科歯科大学との連携	10
	2.7. 教育	育活動	11
3.	研究成	果	12
	3.1. 構油	告健全性	12
	3.1.1.	構造健全性に関する研究の概要	12
	3.1.2.	大規模構造物中の亀裂の3次元自動進展解析	13
	3.1.3.	階層的なデータ構造を持つメッシュを用いた高速なアダプティブ解析	23
	3.1.4.	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	29
	3.1.5.	WebベースCAEシステムのインタラクティブ化とマルチフィジクス解析へ向けたフレー	ーム
	ワージ	ク開発	38
	3.1.6.	知識処理融合型複合熱流動数値解析による多目的最適設計システムの開発	41
	3.1.7.	数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用	47
	3.2. 逆	別題	52
	3.2.1.	逆問題に関する研究の概要	52
	3.2.2.	コンクリート中の鉄筋腐食検出に関する逆問題	53
	3.2.3.	流れ場における腐食同定逆問題	60
	3.2.4	静電場領域の領域積分を必要としたい静磁場解析法	65
	325	複合材料における材料同定	
	3.3. 最ì	商化	89
	3.3.1.	 最適化に関する研究の概要	89

3.3.2. 規模構造問題における形状最適化問題の研究	
3.3.3. き裂と接触を含む構造最適化の研究	91
3.4. 大規模可視化	96
3.4.1. 大規模可視化に関する研究の概要	96
3.4.2. 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	
3.5. 大規模並列化	
3.5.1. 大規模並列化に関する研究の概要	
3.5.2. 大規模非圧縮性粘性流体解析システムの開発	102
353 汎田CAFシステムによろ地球シミュレータトでの大相ば構造解析	104
36 統合化	106
361 統合化に関する研究の概要	106
3.63	100
3.0.2. 就可化のための予備使	100
4. 生于 励 円 伯 判	107
4.1. (水)日立殺[[/])(吸吸明元)/20) 座防	107
4.2. 徳立门政仏八 原丁刀女王宏盈[6][6][5][5][5][5][5][5][5][5][5][5][5][5][5]	111
4.3. 宙工地(小)とり生活	
4.5 亩 古 医 科 齿 私 大 学 と の 声 推	112
5. 国際協力	
5. 笛が 1 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (
52 第5回計算力学フォーラム (パダン)	114
5.3. 第6回計算力学フォーラム (ウルムチ)	114
6. 教育活動	
6.1. 教育活動風景	
6.2. 卒論・修論の紹介	
7. 業績リスト	
7.1. 論文	
7.2. 著書	
7.3. 総説・解説・エッセイ	
7.4. 招待講演	
7.5. 講演論文·口頭発表	
7.6. 受賞	
8. 結び	

1. まえがき

本年度はセンターが活動を開始してから3年目にあたる.この報告書はこの第3年 度のセンター活動を取りまとめたものである.

これまでの2年間と同様,本年度もきわめて多忙で充実した年であった.まず,国際協力については、5月にマレーシアとインドネシアにおいてそれぞれ第4回,第5回の計算力学フォーラムを開催した.さらに8月には中国において第6回計算力学フォーラムを開催した.東南アジア,中国など発展途上国ではそれらの国の急速な産業進展に付随する形で計算力学のような"ものづくり"のための基盤科学がますます盛んになりつつある.今後もこれらの地区との協力はますます大事になると思われる.なお、今回のマレーシアにおけるフォーラムがきっかけのひとつとなり、マレーシアで最有力大学であるマレーシア国立大学の計算力学グループと当センターは研究協力提携を結ぶこととなった.今後さらなる協力関係を期待するものである.

国内においては、12月に京都国際会議センターで開催されたアジア太平洋計算力 学会議において本センターからも多くの論文を発表するとともに、特設展示コーナー においてセンターの紹介パネルを出展した.また、メンバーの多くが会議運営母体の 主力となった.さらには、東京ビッグサイトでのイノベーションジャパン、日本数値流体 力学シンポジウムへの出展を行うなど成果の広報につとめた.センター成果公開の公 式行事としては毎年3月に計算力学シンポジウムをこれまで白山または川越キャンパ スで開催してきたが本年度も3月に白山キャンパスにおいて予定している.その他の センター公式行事としてはセンター内での学生の教育もかねて開催する計算力学セミ ナーがあるが、本年度は2007年4月から12月までに内外の講師を招き計8回開催 した.学生諸君にとっては世界の最先端の話題を目の前で聴講でき大きな刺激となっ ていることと思われる.

研究面においても、多くの成果が得られつつあり、査読論文、講演論文も質量とも にますます充実してきている.関連して、内外のいくつかの賞をメンバーが受賞した. これまでは個別のグループにおいての縦割りの研究が中心であったが今年度から統 合化に向けて新たなスタートを切ったことも特筆すべきことである.最終的には多くの 人たちに使っていただけるような統合ソフトの完成を目指している.

今年度の夏から秋にかけては、文部科学省の中間評価のための資料作成に忙殺さ れたが我われ自身のこれまでの過去の活動を反省する意味ではきわめてよいチャン スであったと考えている.

今後とも関係各位からのご批判とご指導を賜れば幸いである.

2008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テーショナル工学科 教	授)
-------------------------------	----

●研究員

青木	繁	(東洋大学工学部コンピュテーショナル工学科	教授)
江澤	良孝	(東洋大学工学部コンピュテーショナル工学科	教授)
田村	善昭	(東洋大学工学部コンピュテーショナル工学科	教授)
中林	靖	(東洋大学工学部コンピュテーショナル工学科	講師)

●研究助手

須賀	一博	(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

民明九		
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)
岡田	裕	(鹿児島大学大学院 理工学研究科)
河合 清	浩志	(慶応義塾大学)
北野	誠	(株式会社 日立製作所 機械研究所)
酒井 清	譲	(横浜国立大学 教育人間科学部)
佐々木	、康二	(株式会社 日立製作所 機械研究所)
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)
中川	雅彦	(独立行政法人 科学技術振興機構)
西垣	一朗	(株式会社 日立製作所 機械研究所)
藤澤	智光	(プロメテック・ソフトウェア株式会社)
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)
宮崎丿	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)
和田	義孝	(諏訪東京理科大学 システム工学部 機械システムデザイン工学科)

2.3. 設備

センターの主要な設備である PC クラスター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			
	メモリPC/2700 DDR SDRAM 1024MB ECC	144	
	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液晶ディスプレー	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,システマティックで迅速・正確な解析手法は, まだ確立されていないというのが実情である.その主な要因として,

- (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.
- (3) 構造健全性を評価するための安定的な逆解析法と最適設計法の未確立.

の3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6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. 階層的なデータ構造を持つメッシュを用いた高速なアダプティブ解析
- 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
- 4. Web ベース CAE システムのインタラクティブ化とマルチフィジクス解析へ向けたフレ ームワーク開発
- 5. 知識処理融合型複合熱流動数値解析による多目的最適設計システムの開発
- 6. 数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用

2.4.2. 逆問題

本年度は、コンクリート中の鉄筋腐食検出に、境界要素法の網目腐食要素と遺伝 的アルゴリズムを利用する方法を開発し、大幅な解析時間の短縮を実現した.配管腐 食同定のための観測方程式を確立するために、流れ場における腐食について基礎的 解析を行い、その結果を実際の配管腐食速度の予測に反映する方法を提案した.ま た、ソース電流の領域積分を必要としない高精度かつ効率的な静磁場の境界要素解 析法を開発し、磁場を利用する非破壊検査を容易にした.さらに、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を開発し、複合 材料の同定を少ない試験片から短時間に行うことを可能にした.

2.4.3. 最適化

構造健全性を高めるための最適化手法を引き続き研究している. 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ている本研究 では、最適化解法を各種連成問題にも適用して、大規模な構造連成問題を解くことの できるプログラムを開発する。また、構造の健全性評価においてはき裂の評価が重要 なテーマになっている。そこで、構造最適化のベースとなるき裂と接触を含む構造の 解析技術の研究を行った。

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) クラスター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 19 年度は特に (2) について実際にシステムを構築した.また,統合化の一環として,各サブプロジェクトが必要とする可視化について調査を行った.

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、このことからもハードウェアとしてコンピュータの性 能が向上するスピードがいかに速いかが分かる。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.

2.4.6. 統合化

本センターの研究プロジェクト「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」には5つのサブプロジェクトがあるが、これらを有機的に結合し、1つの大きなシステムとして利用できるようにするために平成19年度より6つめのサブプロジェクト「統合化」を立ち上げた. 統合化サブプロジェクトの目的は従って、各サブプロジェクトで開発されるソフトウェア群をまとめて1つの大きなシステムとして使えるようにすることであるが、今年度はまず各サブプロジェクトで開発された、あるいは開発中のソフトウェアを解析し、どのようなシステムとしてまとめあげることが適当であるかについての調査・検討を中心に作業を行った.

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4回計算力学フォーラム (バンギ)

5月15,16日に National University of Malaysia(UKM, Universiti Kebangsaan Malaysia), Bangi, Malaysia で第4回計算力学フォーラムを行った.

2.5.2. 第5回計算力学フォーラム(パダン)

5月18,19日に The 5th International Conference on Numerical Analysis of Engineering problems 2007(NAE2007), Padang, West Sumatera, Indonesia の中 で第5回計算力学フォーラムを行った.

2.5.3. 第6回計算力学フォーラム(ウルムチ)

8月 27-30 日に The 7th International Conference on Fracture and Strength, Far East and Oceanic Fracture Society (FEOFS2007), Urumqi, China の中で第6回計算力学フォーラムを行った.

2.5.4. 第3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18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 19 年度の成果発表を中心に講演を行う予 定である.

2.5.5. 計算力学セミナー (白山)

以下のセミナーが CCMR1階会議室で開催され,活発な討論が行われた.

- 2月19日 和田 義孝 准教授 (諏訪東京理科大学システム工学機械システムデザイン工学科)
 「要素および解析モデル生成手法とその周辺技術」
- 4月3日 松原 仁 研究員
 (日本原子力研究開発機構システム計算科学センター研究員)
 「フリーメッシュ法とその精度について」
- ○5月31日 Liu Gui-Rong 教授(National University of Singapore, Singapore) 「計算力学におけるメッシュレス手法の動向について」
- 6月1日 本並 正直 氏 (トヨタ紡績顧問, 元トヨタ紡績社長, 元トヨタ自動車常務取締役)

「トヨタの自動車はどのようにつくられるか」

- ○7月6日 G. Ravichandran 教授(California Institute of Technology, USA) 「強誘電体における電歪による大ひずみについて」
- ○9月14日 F.-G. Buchholz 元教授(University of Paderborn, Germany) 「3 次元疲労亀裂進展のコンピュータシミュレーション」
- ○9月14日 G.M. Atanasiu 教授(Technical University of Iasi, Romania) 「構造物の動的応答および地震に対する安全性評価:従来法から現代的な 計算力学的研究まで」
- ○11月26日 T. Nakamura 教授(State Univ. NY at Stony Brook, USA) 「溶射セラミック皮膜の特異な機械的挙動」
- ○12月11日 Kamal Ariffin 教授(National University of Malaysia, Malaysia) 「アダプティブメッシュを用いた亀裂進展シミュレーション」

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)メッシュ生成技術、(2)構造健全性設計技術 に関して連携を行っている.近年,産業界では解析主導設計による製品開発のスピー ドアップと設計上流段階での品質作り込みが最重要課題として進められている.本年 度は、とくに、メッシュ生成技術を中心に研究を行った.本研究では従来の3次元CA D(ソリッドモデル)を対象としたメッシュ生成では無く、3次元形状撮像から得られるST LデータやCAE解析で使用した解析メッシュデータ等のメッシュモデルとして表現され た形状データを主体としたメッシュベースのCAEシステムの開発を目的としている.

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)と仮想き裂閉口積分法 (以下 VCCM)を融合した構造健全性評価システム FMM-VCCM の信頼性の検証と 実務への応用を目的として独立行政法人原子力安全基盤機構(以下 JNES)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. 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. 平成 19 年度は Vistrace の無償 公開を開始した.また,統合化サブプロジェクトで利用できるよう Vistrace の改良を行った.

2.6.4. 東京理科大との連携

東京理科大学と共同で配管内の腐食同定問題について研究している.本年度は, 逆問題の観測方程式のモデル化ついて検討することを目標とした.中性環境におけ る金属部材の腐食は,溶存酸素によるカソード反応が支配的であるので,溶存酸素の 金属部材表面への拡散速度が,カソード反応の律速反応になっていると考えられる. そこで,金属部材近傍の流体の速度勾配および溶存酸素の濃度分布に着目して,流 れのある配管内の腐食を精度良くシミュレーションできるか考察を行った.

2.6.5. 東京医科歯科大学との連携

平成 18 年度末より, 医療画像を計算力学に応用する研究を東京医科歯科大学血 管外科と連携して行っている. 平成 19 年度は, その第1段階として CT 画像から血管 形状を自動的に判別し, 幾何処理を取り出す手法について研究を行った.

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て、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,システマティックで迅速・正確な解析手法は, まだ確立されていないというのが実情である.その主な要因として,

- (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.
- (3) 構造健全性を評価するための安定的な逆解析法と最適設計法の未確立.

の3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6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. 階層的なデータ構造を持つメッシュを用いた高速なアダプティブ解析
- 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
- 4. Web ベース CAE システムのインタラクティブ化とマルチフィジクス解析へ向けたフレ ームワーク開発
- 5. 知識処理融合型複合熱流動数値解析による多目的最適設計システムの開発
- 6. 数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用

我々は、6 つのサブテーマを次のような位置付けで取り組んでいる. 順解析の問題 に取り組むために、サブテーマ 1、2 がある. サブテーマ1は、本来解きたい問題の順 解析である. サブテーマ 2 は、その順解析を正確に、しかも大規模高速に解く手法の 確立を目指す. 次に、逆問題最適化に関しては、サブテーマ 5、6 が対応している. 3 つ目の、材料の非均一性に関しては、サブテーマ 3 で対応している. そして、これらの テーマを将来まとめて、一般ユーザーへの利用を可能にするために、サブテーマ 4 が ある. 以上のように、我々は、実問題に対応するために、多方面の視点から構造健全 性の確立に取り組んでいる.

3.1.2. 大規模構造物中の亀裂の3次元自動進展解析

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標とする.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ヵ年をフェーズ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ヵ年はフェーズ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

	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)	O	O
き裂形状	。 (数学形状)	◎ (複雑形状)	O	O
3 次元 VCCM 法	0	0	0	0
残留応力の入力	×	0	0	0
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)	0	0	0
パラメトリック 解析機能	0	0	0	0
自動 き裂進展 解析機能	×	△ (モート [*] I 疲労き 裂進展速度の予 測モジュールの完 成)	。 (モート [・] 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)		O	O
Windows GUI	0	0	0	0
VENUS-Pre との 接続	0	0	0	0

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

(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) <u>完全自動のき裂進展解析</u>: 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) 平成 19 年度進捗状況

平成19年度の成果としては、平成18年度までに開発を行った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)および、混合負荷を受ける三次 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)を基盤技術とす る完全自動の三次元き裂進展システム(FMM-VCCM)に対して、本年度開発を行っ たモード I 疲労き裂進展速度予測の要素技術を加え、任意形状のき裂進展解析およ び、それを用いた貫通き裂進展問題への適用を行った.以下に本年度に行った、 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モード I 疲労き裂進展速度予測を考慮し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は一度 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) き裂前縁節点に対する応力拡大係数評価と任意形状き裂進展解析

前年度は、だ円き裂の最深部と表面部の応力拡大係数の評価のみ行っていたため、 だ円形状のき裂進展解析しか扱うことができなかったが、本年度はき裂前縁のすべて の節点に対し応力拡大係数の評価を行い、任意形状のき裂進展解析が可能となった. 図 3.1.2.3(1)、(2)は本システムから作成された有限要素解析モデルである.図 3.1.2.3(3)にき裂形状を示す.

また,図 3.1.2.4 に任意形状のき裂解析の進展図と、そのステップの応力拡大係数



(1)円筒モデルの荷重条件

(2)円筒モデルの内径・外径



(3)任意き裂形状

図 3.1.2.3. 任意形状き裂進展解析モデル



図 3.1.2.4. 任意形状き裂進展解析



(4)応力拡大係数 Step30

(4)き裂進展図

図 3.1.2.4. 任意形状き裂進展解析

(c) 任意形状き裂進展解析の計算時間評価

本システムは、モデル作成からき裂進展解析までをシームレスに行うことが できる.き裂進展解析では主に有限要素解析、応力拡大係数算出、き裂進展計 算、リメッシュの4つの計算工程が繰り返される.特に任意形状のき裂進展解 析の場合、き裂前縁形状が複雑に変化するためリメッシュが困難であるが、本 システムではリメッシュをロバストかつ高速に行うことができる.

図 3.1.2.3(1), (2)の有限要素解析モデル(節点数 77182~80894, 要素数 112360~118721)に用い,き裂進展解析を行った計算機環境と計算時間を表 3.1.2.2 に示す.き 裂進展則は SCC, き裂進展回数は 30 回である.

表 3.1.2.2. 計鼻機填境と解析時間

СРИ	PentiumM1.7GHz
Memory	1Gbyte
計算時間	10 時間 30 分

(d) 貫通き裂解析

任意形状のき裂進展解析の応用として,図 3.1.2.5,6 に貫通き裂進展解析を行った 例を示す.図 3.1.2.5(1),(2)は本システムから作成された有限要素解析モデルである. 図 3.1.2.5(3)に貫通き裂モデルのき裂形状を示す.

図 3.1.2.6 に示すように本システムではき裂の最深部が解析モデルの表面部に到達後, き裂前縁が2つに分かれても安定して解析を行うことができる.



(1)貫通き裂解析の荷重条件

(2)貫通き裂モデルの内径・外径



(3)貫通き裂モデルのき裂形状

図 3.1.2.5. 貫通き裂進展解析モデル





図 3.1.2.6. 貫通き裂進展解析

3.1.3. 階層的なデータ構造を持つメッシュを用いた高速なアダプティブ 解析

(1) 目標·計画

本手法は、リメッシング時間を大幅に短縮する手法である.これは、メッシ ュの要素サイズが大きくなればなるほど、リメッシング回数が増えれば増える ほど、従来の手法と顕著に差が出てくる.

まずは、要素サイズが大きい例に対処する.2次元の問題において、100億ノ ードを持つメッシュを生成して、そのメッシュから階層メッシュを生成し、ア ダプティブ解析に必要となる解像度のメッシュを抽出する.この時、100億頂点 のメッシュはメモリーに載らないので、ハードディスクを用いたバーチャル並 列化を行い実現する.ここで大容量な計算機が必要になる.また、階層メッシ ュは、並列計算と相性がいいので、並列化効率も非常に良いと予想される.こ うすることによって、100億ノードの解像度を持つアダプティブメッシュを非常 に高速に利用することができる.

二つ目は、リメッシングの回数が多い問題に対処する.扱う問題は、3次元の 残留応力下のき裂進展解析を扱う予定である.これは弾塑性問題であるので、 リメッシングが何回も行われるので、本手法が効果を発揮できると予想される.

このように,解析時間を大幅に短縮されれば,初期値を気軽に変えて再計算 を行うことが出来るようになる.また,アダプティブ解析が手軽に行えるよう にもなるので,素人による解析でも解の信頼度が上がる.本研究によって,シ ミュレーションの大衆化を推し進める手助けになると思われる.

(2) 意義・国際社会との比較

大規模なデータを高速に扱うために、データを階層的なデータ構造にして扱 うのは、どの分野でも行われてきた手法である.ただ、よく行われてきた手法 は、二分木、四分木、八分木などのように、領域を比較的綺麗に分割して、デ ータを分割統治してきた.本手法は、そのような綺麗に分割していくのではな く、データが最適と思われる所から整理していく手法である.更には、リアル タイムにデータの出し入れを可能にした手法である.

この手法は、1996 年にコンピュータグラフィックの分野の Hoppe H.が、 「Progressive meshes」という名で開発された手法である. 階層的なデータ構造を 非構造メッシュに適用し、更には、リアルタイムで自由な解像度を抽出するこ とに成功した.本手法の発表後、大規模なリアルタイムレンダリングの研究が 大幅に進み、コンピュータグラフィックで最も有名な手法の一つとなった.

我々の提案する本手法は、これまでリアルタイムレンダリングに用いられて きた手法を、アダプティブ解析に応用したものである.アダプティブ解析の問 題点であった、計算時間の大幅な短縮に、アルゴリズムの面から変える手法で ある. (3) 研究内容

エッジコラプスとバーテックススプリット

階層的なデータ構造を持つメッシュを階層メッシュと呼ぶことにする.この 階層メッシュを生成するためには、2つのメッシュの変換を行う.エッジコラプ スとバーテックススプリットである.

エッジコラプスは、図3.1.3.1にある左側のメッシュから右側のメッシュへの変換である.この変換によって、対象となる辺が1つ潰されて、新たに1つの頂点が生成される.このエッジコラプスによって、三角形要素が2つ減ることになり、メッシュが簡略化されることになる.

もう1つの変換は、バーテックススプリットである. 図3.1.3.1にある右側のメ ッシュから左側のメッシュへの変換である. この変換によって、対象となる頂 点が1つ引き裂かれて、2つの頂点へとなる. このバーテックススプリットによ って、三角形要素が2つ増えることになり、メッシュが詳細化されることになる. また、このバーテックススプリットは、エッジコラプスの逆変換である.



⊠3.1.3.1. Edge collapses and Vertex split.

階層メッシュの生成

エッジコラプスとバーテックススプリットを用いて,次のような手順で,階 層メッシュを生成する.図3.1.3.2を用いながら説明する.図3.1.3.2(a)は初期メッ シュである.

- Step 1. 図3.1.3.2(b)にあるように、全ての辺の長さを計りヒープの中に入れソートする.
- Step 2. ヒープから最も短い辺を取り出し, その辺の両端点を融合して1つの親頂 点へと変換し, その両端点をヒープから取り除く.
- Step 3. 新しく生成された親頂点につながる辺を全て再計算する.
- Step 4. 頂点の数が1個になるまで, Step2とStep3を繰り返す.

各図の右側にある樹形図は、階層メッシュのデータ構造を示すものである.



 \boxtimes 3.1.3.2. Generation of a hierarchical mesh

亀裂進展解析への適用

亀裂進展解析への適用例を示す.まず,階層メッシュを生成する.図3.1.3.3 は階層メッシュが生成されて行く様子である.ここでは,モードIの解析を対 象にしているので,亀裂の進むと予想される箇所だけを細かくしている.図 3.1.3.3(a)の初期メッシュは,7266ノードと14132要素のメッシュである.



 $\boxtimes 3.1.3.3$. Hierarchical meshe generated by edge collapse.

図3.1.3.4のように、引張り解析を行う. ヤング率1.94×10⁴ Pa, ポアソン比0.2 とした.



図3.1.3.4. Boundary condition.

図3.1.3.5は, 亀裂進展解析に用いられたアダプティブメッシュである. 図 3.1.3.6はその際の応力分布図である.本解析では,48ステップ亀裂が進む解析を 行った.その際に行われたリメッシングの回数は,150回である.

密度調節付きメッシュ生成プログラムでは、1回のリメッシングにかかる時間 は約10秒であった.そのため、150回のリメッシングにかかる時間は約25分かか った.

階層メッシュを用いたリメッシングにかかる時間は、1回あたり0.1秒である. ただ、階層メッシュを生成するのにかかる時間が5分かかったので、最終的には、約5分ちょっとの時間がリメッシングに必要とされた.

このように、単純な亀裂進展解析においても大幅な時間の短縮を実現することができた.



(c) adaptive mesh after 30 step









(4) 平成 19 年度進捗状況

本研究では、従来のアダプティブ解析で行われるリメッシングの時間を大幅 に短縮する画期的な手法を提案するものである.

有限要素法を解く際に最も時間がかかる部分は、メッシュ生成の部分と連立 一次方程式を解く所である.連立一次方程式を解く部分は、アダプティブ解析 を行うことによって、前もって決めた誤差以内の解を少ない要素のメッシュを 生成することによって効率よく出すことができる.では、メッシュ生成に関し てはどうかというと、従来では、有限要素法の解から得られた誤差分布を用い て、非効率ではあるが毎回メッシュを生成していた.

このように、アダプティブ解析では何回もリメッシングを行うので、このリ メッシング時間を大幅に短縮することが望まれている. 我々は階層的なデータ 構造を持つメッシュを用いることによって、2次元のアダプティブ解析において、 リメッシングの時間を2次元の非圧縮流体の問題の場合に約1/100程度、モード Iの亀裂進展解析の場合に約1/5まで短縮することに成功した.

3.1.4. 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

(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 Hasen-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

これまで, 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. 本研究では,このような研究を発展させ,下記のよう研究項目を実施する.

 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、あるいは水素による材料強度の 低下といった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

マクロレベルの解析

(a) 概要

平成19年度はフッ化カルシウム(以下CaF2と表記)単結晶を研究対象として とりあげた. CaF? 単結晶は真空紫外光まで高い透過率を有することから、半導 体リソグラフィーにおける高性能ステッパーのレンズ硝材として、石英ガラス とともに用いられる. このような用途には, 直径が 10 インチ級以上の CaF2 単結 晶が必要となる.そのような大口径単結晶の育成技術はチョクラルスキー法. あるいは垂直ブリッジマン法を用いて開発されている. 電子デバイスの微細加 工のためには、ステッパー用のレンズ硝材にも高い性能が要求され、とりわけ 複屈折の低減は重要である.CaF2単結晶は固有複屈折と残留応力に起因する複 屈折を生じる、前者はレンズの組み合わせにより対処可能であるが、後者は分 布を持ち,対処が不可能である.よって,残留応力に起因する複屈折を低減す ることが主題となる.チョクラルスキー法では、育成中の温度分布の存在によ る熱応力、また垂直ブリッジマン法のように単結晶がるつぼと接触しながら成 長する場合には、熱応力に加えて、るつぼからの機械的応力に起因する残留応 力により,比較的大きな複屈折が存在する.一般に結晶が大口径になるほど, 単結晶中に大きな残留応力が存在している。よって、高性能ステッパーのレン ズ硝材として CaF2単結晶を用いる場合、複屈折を低減することを目的として、 育成後に単結晶のアニール処理が実施される.このアニール過程により残留応 力を小さくし、複屈折を低く抑える.しかし、目標値まで複屈折を抑えるには、 現状ではかなり長期間のアニール工程を要する。そこで、できるだけ効率の良 いアニール工程の探索のために、アニール工程における残留応力、およびその 結果として生じる複屈折の評価が重要である.そこで、本研究では CaF2 単結晶 のアニール工程後の複屈折現象のシミュレーション手法の開発を目的とした.

(b) 解析方法

本解析の流れは、単結晶アニール過程の温度解析をまず行い、その結果をも とに熱応力解析によりアニール過程終了後の残留応力を算出し、さらに求めら れた残留応力から光路差を計算するというものである.以下にその概要を記述 する.

温度解析

温度解析には、総合伝熱解析コード CrysVUn により、アニール炉内中のイン ゴット表面の温度分布を得る.次に得られた表面温度データを境界条件として 用い、非定常熱伝導解析によりインゴット内部の温度分布を求める.この解析 には汎用有限要素法解析コード MARC を用いた.

残留応力解析

前述の非定常熱伝導解析から求まるインゴット内部の温度分布から,残留応 力解析を求める. CaF₂ 単結晶については高温での非弾性挙動(クリープ挙動) に関するデータが現状では全くないことから,非弾性挙動熱応力解析から残留 応力を求めることはできない. そこで,本研究では応力フリー温度という概念 を用いて弾性応力解析により残留応力を評価した. 以下に応力フリー温度について説明する.

ここで、応力フリー温度とはインゴットの平均温度がその温度以上では完全 に無応力状態であるとし、インゴットの平均温度がその温度に達した時点を境 として応力が発生するという温度のことである.これを定め、最終的にインゴ ットは一様に室温になるとすると、弾性熱応力解析により応力フリー温度時の 温度分布に応じた残留応力が計算できる.なお、CaF2単結晶は立方晶であり弾 性係数に異方性を有している.残留応力を求める弾性熱応力解析にはこの結晶 異方性を考慮する必要がある.この解析にも汎用有限要素法解析コード MARC を用いた.

光路差の計算

光路差の計算方法としては、ジョーンズ計算という厳密な手法と光路に沿う 平均的な応力値を用いる近似的な手法がある.光弾性効果が小さい材料に対し ては、後者の近似的な手法で十分な精度が出ることが証明されるので、本研究 ではこの近似的な手法により光路差を計算した.

(c) 解析結果

解析対象は図 3.1.4.1 に示すような直径が 200 mm, 厚さが 40 mm の円板状 CaF₂単結晶インゴットである. なお, <100>方向引き上げ, すなわち厚さ方向に とった x₃方向と<100>方向が一致する場合のインゴットを解析した. また, アニ ール条件としてはインゴットを炉内で約 10 日間かけてアニール場合とした. 同 図には非定常熱伝導解析に用いた有限要素メッシュも示す. 20 節点アイソパラ メトリック要素を用い, 要素数は 2568, 節点数は 12289 である. 前述のように

熱伝導解析のためのインゴット表面の温度条件は総合伝熱解析コード CrysVUn を用いて、アニール炉内の輻射伝熱解析を行うことによって求めた. 非定常熱 伝導解析により得られたアニール工程中でインゴット温度が約 973 K の時の単 結晶体中の温度分布の一例を図 3.1.4.2 に示す.





図 3.1.4.1. 解析対象および解析に使用した 有限要素メッシュ

図 3.1.4.2. 温度解析の結果

非定常熱伝導解析に引き続いて,弾性熱応力解析に基づいた残留応力評価を 行った.用いた有限要素モデルは非定常熱伝導解析の場合と同じである.また, この解析では応力フリー温度を仮定しなければならないが,本解析では,これ を973 K とした.この応力フリー温度設定の妥当性は後述するように光路差の 値について解析結果と実験値を比較することにより検証される.弾性熱応力解 析は弾性異方性を考慮して行った.残留応力の解析結果を図 3.1.4.3 に示す.結 果はミーゼスの相当応力で示してある.応力分布には弾性係数の異方性に起因 する4回対称性が見られる.

上記の残留応力解析の結果から,光路差を求めた.図 3.1.4.4 に解析により求まった単位厚さ当たりの光路差分布を,図 3.1.4.5 に同条件での実験結果を示す.まず,光路差の分布



図 3.1.4.3. 残留応力解析の結果(ミーゼスの相当応力)





図 3.1.4.4. 本解析により求められた単位厚さ 当たりの光路差分布

図 3.1.4.5. 実験により得られた単位厚さ 当たりの光路差分布

については、実験結果では<110>方向の光路差の小さい部分が外周部までおよんでいるが、解析結果では<110>方向の外周部に近づくに従って少し光路差が大きくなっているなど、若干の相違が見られる.しかし、両者ともに<110>方向に光路差の小さい部分が存在し、<100>方向の外周部に最も光路差の大きい部分が存在するなど、全体的には解析結果は実験結果の特徴をかなり良くとらえている. また、応力フリー温度を 973 K 設定することにより解析で得られた光路差の平均値、最大値は実験値とおおむね一致している.

ミクロレベルの解析

(a) 概要

金属中へ水素が侵入することによって、破断伸びが減少したり、疲労き裂の 成長速度が加速したりする、いわゆる水素脆化現象が広く知られている.低強 度鋼においても粒内破壊が支配的な水素脆化を生じることが示されており、水 素による強度低下を生じない金属はほとんど存在しない.近年、大気汚染によ る環境悪化や地球温暖化の問題が顕在化しており、その解決のために水素を有 効利用する社会システムを構築しようという動きが活発になっている.しかし ながら、水素利用頻度が増大すれば材料内に侵入した水素に起因する破壊事故 の割合が増加することが危惧される.

水素脆化に関する研究の歴史は長く、これまでにも多くのメカニズムが提案 されている.古くから提案されている代表的なものとしては Hydrogen Enhanced Decohesion (HDED)説がある.これは水素原子により原子間の結合力が低下する ために容易に破壊を生じるというものであるが、金属材料中の水素濃度は一般 的に極めて低く、結合力の低下を生じるような濃度にはならないとする意見が 多い.一方で、水素脆化は水素が塑性変形挙動に影響を及ぼすためであるとす る説が、近年有力視されている.Beachem によって最初に提唱された水素によ る軟化説は Hydrogen Enhanced Localized Plasticity (HELP)と呼ばれ,その後も多 くの報告が行われている.例えば,松井・木村は170 Kから約300 Kの範囲で 水素チャージを行いながら超高純度鉄の引張り試験を行い,温度が200 K以上 の時には急激な軟化を示すことを,イリノイ大学を中心とする研究グループは 様々な材料において塑性変形の局在化や転位のモビリティーが増加することを 透過型電子顕微鏡 (TEM)内での転位の直接観察や解析によって示している. しかしながら,転位のモビリティーが増加すると,き裂進展に対してき裂開口 が容易になるため,水素によって進展が促進される原因は不明である.これを 明らかにするためには,き裂先端での水素をトラップした転位とき裂成長との 関わりを詳細に調べなければならない.水素脆化メカニズムの解明が困難な理 由として,極めて低い水素濃度で影響が現れること,金属中での水素の拡散が 非常に速いこと,水素分布を直接観察するのが非常に難しいことなどが挙げら れる.分子動力学シミュレーションは,金属中の水素の動きを詳細に調べるこ とができるため,き裂成長過程に水素が果たす役割について検討し,水素脆化 メカニズムに関する洞察を与える有効な手段になり得ると考えられる.

本研究ではまず,鉄-水素系を取り扱うことのできる既存の原子間ポテンシ ャルの中から最も精度が良いと考えられるものを選択する.次に、単純な系と してα鉄単結晶を対象とし、モードIき裂の進展挙動に与える水素の影響につい て調べる.これまでにも、分子動力学法を用いて水素がき裂進展に与える影響 を調べた研究は存在するが、本研究では水素の濃度や分布をより現実的な条件 にした解析を行う.また、前述したように、水素脆性による破壊は転位運動と 密接な関係があるとの報告がなされているため、本研究では転位が発生しない 場合と発生する場合についての解析を行い、両者の比較を行う.

(b) 解析方法

鉄ー水素系の原子間ポテンシャル

分子動力学シミュレーションにおいては、原子間ポテンシャルの選択が非常 に重要であり、特性を理解して使用する必要がある.現在、鉄ー水素系を取り 扱うことのできる原子間ポテンシャルは3つ、すなわち、Morse ポテンシャル、 Wen らの開発した EAM ポテンシャル、Ruda らの開発した EAM ポテンシャルが 提案されている.まず、これらの原子間ポテンシャルの中から最も適切なもの を選び出すために、基本的な物性値の評価を行った.ここでは、Wen の EAM ポ テンシャルと Ruda の EAM ポテンシャルをそれぞれ簡略化して EAM-W、EAM-R と呼ぶことにする. EAM-W は EAM-R をもとに、より多くの水素に関する物性 値を再現するように作られている.よって、EAM-W は EAM-R よりも優れてい ると考えられる.次に EAM-W と Morse ポテンシャルを比較した. EAM-W は Morse ポテンシャルと比較して、α鉄の弾性定数、α鉄への水素の溶解熱や拡散 の活性化エネルギー高精度に再現することがわかった.以上の結果から総合的 に判断して、EAM-W を現時点で最も優れた鉄ー水素系の原子間ポテンシャルで あると考え、本研究では EAM-W を採用することにした.
数值積分法

分子動力学シミュレーションの運動方程式を解く方法として,速度 Velret 法が よく用いられる.しかし,水素原子の質量は鉄原子の質量の約 1/55 であり,原 子に加わる加速度は鉄原子に比べ大きく運動速度も速い.したがって,速度 Verlet 法では原子数の少ない水素のための小さい時間ステップを,モデルの大部 分を占める鉄原子に対して用いる必要があり計算コストが高くなる.そこで本 研究では数値積分法として多重時間数値積分法 (rRESPA)を用いた.この方法 では,系の自由度を重い粒子の系と軽い粒子の系に分割することで,異なる時 間ステップを用いることができる. $\Delta t \ge \alpha \ge c$, $\mathcal{E} = n \ge c$, $\Delta t \ge c$, $\Delta t = n \ge c$, $\Delta t \ge c$

(c) 解析結果

無限体中のき裂を想定するために、半径 9.7 nm、奥行き 2.8 nm の円筒型のモ デル中の全原子に応力拡大係数が $K_1=0.9$ [MPa \sqrt{m}]の弾性解に対応する変位を与え ることで初期き裂を導入した(結晶方位については後述).初期き裂の先端位置 を原点にとり、き裂の進展方向に x 軸を、厚さ方向に z 軸を設定する.本モデ ルは原子数が約 71,000 の疑似 3 次元モデルであり、z 軸方向に周期境界条件を 適用する.モデル外周部から 0.7 nm の距離以内にある原子を境界原子とし、後 に変位制御の境界条件を与える.鉄中での水素の安定位置は T (tetrahedral) サ イトであり、静水圧応力依存性を有することが示されている.よって、初期状 態の水素原子は次式に従うように静水圧応力依存性するように T サイトに乱数 を用いて導入した.

き裂進展解析は図 3.1.4.6 に示すように2種類の結晶方位(それぞれを結晶方位(A),結晶方位(B)と呼ぶ)について行った.図中の灰色の面は鉄のすべり面である{112}面を表している.結晶方位(A)では、き裂面が(110)面、き裂進展方向が[1ī0]方向であり, x-y 平面に垂直なすべり面が存在しない.結晶方位(B)では、き裂面が(110)面、き裂進展方向が[001]



図 3.1.4.6. {112}すべり面の配置



図 3.1.4.7. 結晶方位(A)の場合のき裂進展状況 (400K, x⁰=0)



図 3.1.4.8. 結晶方位(B)の場合のき裂進展状況 (400K, (a) x^o=1.0×10⁻⁴, (b) x^o=3.0×10⁻⁴, (c) x^o=0)

方向であり, x-y 平面に垂直な{112}すべり面が存在し, さらに x-y 面に<111>す べり方向が含まれる.

結晶方位(A)の場合は、水素濃度を $x^0 = 0$ (水素なし)、 1.0×10^4 , 3.0×10^4 , 5.0×10^4 の4通りに変化させた. 図 3.1.4.7 に水素濃度が $x^0 = 0$ の場合のき裂進展の様子を 示す. 図中で灰色の部分は bcc 構造の原子を、黒色の部分は bcc 構造以外の原子 を表している.水素を含む場合にも同様の傾向が見られた. このように、結晶 方位(A)の場合には転位は発生することなく、き裂は脆性的に真っ直ぐに進展す る.

図 3.1.4.8 に,結晶方位(B)の場合の典型的なき裂成長挙動を,水素濃度が(a) x^o=1.0×10⁴, (b) x^o=3.0×10⁴, (c) x^o=0のそれぞれについて示す.図に見られるように水素を含む場合は{112}すべり面でき裂が進展する様子が高い頻度で確認された.

以上の結果より,転位が発生しない場合には,水素による破壊挙動の変化は

確認できなかった.一方,転位が発生する場合には水素を含む場合の方が含ま ない場合よりもすべり面で破壊する傾向が強いことがわかった.

平成 19 年度進捗状況

(A) マクロレベルの解析

単結晶引き上げプロセスの転位密度評価についてはほぼ研究が収束したので, 2006 年 9 月にドイツの Bamberg で開催された 5th International Workshop on Modeling in Crystal Growth における招待講演の内容をベースに総説的な論文を 執筆し, Journal of Crystal Growth 誌に掲載された (N. MIYAZAKI, "Dislocation Density Evaluation using Dislocation Kinetics Method", Journal of Crystal Growth, Vol. 303, No. 1, pp.302-309, May 2007). そこで,今年度は応力が複屈折という応力が 結晶の光学特性に及ぼす現象についとりあげ,結晶の残留応力分布から複屈折 現象まで取り扱うことができる解析システムを開発した.

(B) ミクロレベルの解析

本報告の研究内容の所では割愛したが,分子動力学解析だけでなく,第一原 理,分子静力学法も活用しながら,水素によるα鉄の破壊強度に及ぼす影響(水 素脆化現象)についての研究を精力的に行った.その結果,現状の研究成果か らα鉄の水素脆化の機構は下記のようにまとめられる.

すべり面に沿って転位が発生する.

水素が転位芯および転位芯近傍のすべり面上にトラップされる.

水素の存在により転位運動のエネルギー障壁が低下し、転位の可動性が増し、 堆積転位間隔が縮まる.

転位にトラップされた水素よるすべり面の表面エネルギーの低下によりすべり 面上でへき界破壊が生じ,堆積転位間でそれらが連結する.

3.1.5. Web ベース CAE システムのインタラクティブ化とマルチフィジクス解析へ向けたフレームワーク開発

(1) 目標·計画

Web ベース CAE システムは基礎的なインタラクティブ性の向上が可能なこと が確かめられた.目標は GUI 上で境界条件の設定および可視化手法の高度化を 行う.この際,並列計算を念頭においた大規模な対象を扱えることが重要とな る.

FEM 解析と他の手法(流体,熱,最適化等)との協調作業ができることが示 されているが、実際に行われていない.そこで、FEM 解析と高度化されたメッ シュ生成機能をWeb ベースシステム上で統合する実験を行う.

外部から本システムを使えるように API の整備と公開を行う. それら API を 用いてシステム構築を行う.

(2) 意義・国際社会との比較

スーパーコンピュータやクラスタコンピュータなどのハイパフォーマンスコ ンピュータはその管理方法や利用するアプリケーションによって構成の違いな どが生じる.しかし、実際のユーザが利用するにあたりその微妙な差異などは 重要でない.効率よく解析を行えることが最も重要になる.これまでも、問題 解決環境や専用の設計システム等が様々な分野で開発されてきた.しかし、汎 用性と他のアプリケーション及びコンピュータとの有機的な結合は、複雑なプ ロトコル(例えば CORBA や SOAP 等)を利用する他なく実質的な開発が困難 であった.本研究では、ネットワーク(特にインターネット)を利用すること によるユーザインターフェイスの統一が自然に行われることと、ネットワーク にあるサーバが有機的に結合可能である.これにより、システムの大きな差異 は、適切にユーザインターフェイス上に反映され、細かい差異はユーザインタ ーフェイスで見せなくすることが可能になる.

(3) 研究内容

Ajax によるインタラクティブな可視化はこれまでに行ったが、境界条件の設 定などは出来ていなかった.そこで、Ajax に新たなイベント検知のための機能 (PickSurfaces, PickNodes, PickElements)を追加し表示されているメッシュの面、 節点、要素を選べるようにした.このことにより任意の境界条件を与えられる. 図 3.1.5.1 にはりの右端面を選択した様子を示す.

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モジュールの Adventure Solid と同プロジェクトの Adventure CAD と Adventure TetMesh を組み合わせて実際にモデル化からメッシュ生成までを行 った. これにより異なるサーバの異なる機能を組み合わせて利用することが可 能となった. この異なる機能の協調作業は図 3.1.5.2 のような例えば3つのサー バを用いて実行することが可能である.

以上の機能の追加と統合は表 3.1.5.1 に示すクラスを用いて行った. これらの APIは JavaScript により呼び出され,ネットワークを介して利用される. したが って,これらの API が公開されれば,即外部のサーバが利用可能になる. もち ろん認証により制限を設けることも可能である. クラスは主に6つのカテゴリ に分れており,メッシュのデータを表現するもの,境界条件を表現するもの, 解析結果を表現するものが表 3.1.5.1 の最初の3つのクラスである. 残りの3つ のクラスは,解析の実行や停止を管理するもの,実行中の解析を監視するもの, 可視化および解析結果の処理を行うものである.



Specify correct boudary conditions which are both of displacement and load. You can attach the conditions on model surfaces, segment or nodes as shown following figures. If you check buttons and enter values, the conditions are validated. Notice: when you apply a distributed load, unit of load is a load per unit area or length. If you enter a value which is required for a real value, you should enter a real number with a decimal point. For example, "100" instead of "10". 1^{y} ...

図 3.1.5.1. Web ブラウザ上におけるインタラクティブ要素選択



図 3.1.5.2. ネットワークサーバを用いた協調作業

WORKING FUNCTION	CLASS NAME	ARGUMENTS
Representation of mesh	CDRMesh	CBCForce, CBCFix and so on
Representation of boundary condition	CDRBCForce CDRBCFix	node id, element id and so on
Storing analysis result	CDRResult	CCalculate
Control of analysis	CCTAnalysisSpc	CCalculate
Observing status of analysis	CCTCalculate	CMesh
Visualization fo mesh and analysis result	CCTVisualize	CMesh, CResult

表 3.1.5.1. Ajax による CAE システムクラス定義

(4) 平成 19 年度進捗状況

本年度は、主に基本機能の実装を行った.要素や節点の選択の機能は、まだ、 要素を1つずつ選択する程度の機能にとどまっている. 今後、より自由度の高 い選択機能の実装が必要である.次に、自動メッシュと解析プログラムの連携 については、定義実装した API を用いて行った. API は解析プログラムの種類 を増やし、より充実する必要がある.様々な解析またはプリ・ポストプロセス プログラムとの連携を考えるとより多くのプログラムとの連携を行い可能な限 り具体的で汎用性のあるバランスの取れた API を模索する必要がある. 今後、 ユーザインターフェイスの高自由度化そして高精細化を行い大規模解析への対 応をよりすすめる.また、高精細な画像生成が可能な可視化ソフトウェア Shade との連携を図っており、現在、高精細化および API の充実を行っている.

3.1.6. 知識処理融合型複合熱流動数値解析による多目的最適設計シス テムの開発

(1) 目標·計画

過渡熱流動現象を定性推論するためには,原因と結果の間の時間遅れ(時区間)等 に関する認識が不可欠となる.すなわち,質的に量子化された集合上の任意の挙動 に対し,物理的因果連鎖についての時区間概念を定式化する必要がある.

このため,平成 19 年度は,時区間概念の定式化に必要な「時間概念を含む因果 的定性プロセスオントロジー」を構築するため,流体挙動に関する「物理的因果性」と 「認知的因果性」の関係を整理する.

(2) 意義・国際社会との比較

(A) 背景

国家基幹技術の一つに挙げられている「高速増殖炉サイクルの実用化研究開発」におけるナトリウム冷却高速増殖炉では、プラント物量を大幅に削減して経済性を向上させる観点から、高速増殖原型炉「もんじゅ」と同規模の原子炉容器(直径 ~10 m)の中に約5倍の出力を持つ炉心を装荷し、ここでの発熱を約4倍の冷却材流量により除熱する革新的システムを採用する計画であり、このため原子炉出口配管(50B)換算のレイノルズ数は10⁷を超える超高乱流場となる.この高乱流・高流速条件に対し、反応度異常を引き起こす可能性のある冷却材中へのカバーガス巻き込みを防止する観点から、原子炉容器内流動の適正化問題が、当該プラント概念の成立性を左右する重要課題として挙げられている.さらに、液体金属ナトリウムを冷却材として用いる高速増殖炉では、プラントシステム内の温度差が大きく(~ 150 ℃)、またナトリウムの熱伝導度が良好(水の約100倍)であるため、熱荷重に対するプラント設計上の配慮が必要である.

従来はこのような複数の設計課題それぞれについての対応策(単一評価関数の局所的最適解)を見つけ出すため、様々なスケールの実験装置を製作し、水およびナトリウムを作動流体とした実験が試行錯誤的に行われてきた.しかしながら、実験に必要となる年間費用は百億円規模となるにも拘らず、最終的に得られる設計解の多目的な観点からのトレードオフ最適性は保証されないことになる.

(B) これまでの研究成果

上記のようなトレードオフ問題を設計作業において的確に取扱えるようにするため, 多目的最適化設計手法の実用化に向けて「知識処理融合型複合熱流動数値解析に よる多目的最適設計システム (図 3.1.6.1)」の概念構築を進めてきている. 同システム は,開発中のものも含め,以下の4サブシステムから構成される.

(1)	大規模複合数値シミュレーション	:	マルチスケール・マルチフィジックス現象の数値
			シミュレーション(数値処理)
(2)	多目的最適化システム	:	応答曲面近似,多目的最適解探索(数值·知識処理)

(4) 最適解評価システム

(3) 多次元空間情報可視化システム: 俯瞰的な多次元設計空間情報の可視化(知識処理) : 最適設計作業のための知的判断サポート(知識処理)



図 3.1.6.1. 知識処理融合型複合熱流動数値解析による多目的最適設計システム

この内, 大規模複合数値シミュレーションでは, タイムスケールの大きく異なるマル チスケール・マルチフィジックス現象を安定且つ高精度で数値計算を行うため,時間 刻み幅に対するファジィ適応制御システムを開発し、多次元熱流動乱流解析コードに 導入した. 同システムでは, 流速 3 成分, エンタルピ, 乱流諸量の相対変動率 ((;ⁿ⁺¹- ;ⁿ)/ ;ⁿ;n:時間レベル) を観測変数として用い, 数値計算系の状態に応じて 次時間ステップで使用すべき緩和係数 (クーラン条件に掛かる係数)を制御変数 として出力する.

このファジィ適応制御システムを流体-構造熱的連成現象の大規模数値解析に適 用し、タイムスケールの大きく異なるマルチスケール・マルチフィジックス現象への適用 性とその有効性を確認した.

(3) 研究内容

(A) 定性推論における時区間概念定式化

「知識処理融合型複合熱流動数値解析による多目的最適設計システム」には、多 目的最適解の物理的妥当性を解釈・評価するための機能として,ファジィ論理を用い た定性推論器が導入されている. 同推論器は, 与えられた解析体系と境界条件の下 で発生する熱流動挙動を専門家知識 (言語ルール)のみを用いて評価するもので, 専門家の直感に基づいて多目的最適解の定性的妥当性を確認するものである.

知識工学分野における一般的な定性推論は,質的な意味で量子化された集合上 で行うものであり、流体挙動などの連続体を評価の対象とした場合にはその滑らかさを 表現することが難しい.このため同推論器では、質的に変化する各ラベルの中間状態 (例えば、固体壁の若干手前等の状況)をファジィ論理によって指定可能とし、この集 合上で空間連続的な定性推論が行える機能が組み込まれている.

他方, 過渡熱流動現象を定性推論するためには, 原因と結果の間の時間遅れ (時 区間) 等に関する認識が不可欠となる. すなわち, 質的に量子化された集合上の任 意の挙動に対し, 物理的因果連鎖についての時区間概念を定式化する必要がある.

このような物理的因果連鎖過程での時区間概念をモデル化するためには、ある任 意のモデル表現形式が陰的に意図している時間概念を適切に認識する必要がある. 例えば、定性推論対象を時間的空間的に離散化した概念で認識したモデルでは、そ れぞれの間における認知的な時間遅れなどを陰的に内包し、それぞれの間に対応し た時区間を想定しておくことが重要となる.このような対象表現に応じた時間概念は、 各モデルの持つ目的や意図などに従って定性推論対象をどのように解釈したかに大 きく依存し、その構築意図を示唆している.

しかしながら、定性推論対象を時間的空間的に離散化した概念モデルにおける時 区間は、それぞれの間の関連性によってその根拠を明示することができるものの、これ によって生成された時区間は必ずしも物理世界の根拠を示すとは限らない.要するに、 離散化概念モデルにより評価された物理的挙動は、定性推論アルゴリズムなどで順序 づけられた挙動に他ならない.

時区間概念を定式化する際には、区間的概念と順序的概念の双方を認識しておく 必要がある.区間的概念は時区間の長さ自体の物理的な根拠を反映するものであっ て、物理的挙動を支配する時間遅れなどを定式化するものである.他方、順序的概念 は、離散化されたそれぞれの時区間での順序関係を物理的根拠を持って定式化する ものである.

ここでは、最終的な多次元空間での複合熱流動挙動に対する検討に先立ち、多次 元空間を1次元配管で接続した閉ループ熱流動システム(図 3.1.6.2)を対象として、時 区間概念モデルを基礎的な面から検討した.



この閉ループ熱流動システムに対する物理的因果連鎖過程を表現する時区間概念として,以下の7種類を利用した.

(1) t₁:多次元空間内時区間(多次元空間内の影響の伝播にかかる時間)

(2) t2:大域的同時時区間(大域的に同時に変化する時間)

(3) t3:多次元空間間時区間(隣り合う多次元空間の間で影響の伝播にかかる時間)

(4) t4:大域的時区間(大域的な変化にかかる時間)

(5) ts:積分時区間(積分によって変化するのにかかる時間)

(6) t₆:部分的平衡時区間(系の一部分が平衡状態に到達するまでの時間)

(7) t₇:完全平衡時区間(系全体が平衡状態に到達するまでの時間)

多次元空間を1次元配管で接続した閉ループ熱流動システムを考える場合,多次 元空間内時区間 t_1 に加え,隣り合う多次元空間の間で影響の伝播にかかる時区間 t_3 を考慮する必要がある.大域的同時時区間 t_2 は,異なる多次元空間の状態量が同時 的に変化する場合にかかる時間を表現する.他方,大域的時区間 t_4 は,大域的熱バ ランスによる温度変化のような大域的な現象にかかる時間を表現する.更に,積分によ る変化を表現する積分時区間 t_5 並びに平衡状態への遷移にかかる時間として部分的 平衡時区間 t_6 および完全平衡時区間 t_7 は,系の一部あるいは全体が平衡状態に到 達するまでの時間を規定する.これらの時区間概念が表す区間の長さは, $t_1 < t_2 < t_3 \cdot \cdot$ の順序関係を持つ.

以上の時区間概念を用いると,図 3.1.6.2 に示した閉ループ熱流動システムにおいて、ポンプ回転数が変動した場合の物理的因果連鎖過程は図 3.1.6.3 のように示すことができる.



図 3.1.6.3. ポンプ回転数が変動した場合の物理的因果連鎖過程の例

このような物理的因果連鎖過程における時区間は様々な時区間概念に支配されており,時区間概念の明示によって時区間自体の概念的な識別と時間スケールの比較が可能となる.これは,時区間のインスタンス固有の時間スケールに立脚したものではないことに注意が必要である.

(B) 因果的時間オントロジー

任意の時区間概念は、以下に示す4種類の軸を用いた4次元上の点として表現することができる.

- (1)時間変量モデル化 Ta1:相互依存的時区間 Ta2:依存的時区間 Ta3:積分時区間 Ta4:平衡時区間
- (2) 時定数定性化Tb1:速い現象の時区間

Tb2:遅い現象の時区間

- (3) 多次元空間構造化
 Tc1:多次元空間内時区間
 Tc2:多次元空間の間の時区間
 Tc3:大域的時区間
 Tc4:系全体時区間
- (4) 期間限定化

Td1:初期反応期時区間

Td2:中間過渡期時区間

Td3:最終反応期時区間

因果連鎖はモデルから生成されることから、その時間的意味はモデルにフィードバックされる.このため、4種類の軸はそれぞれモデル自体の表現技法を示唆している.

時間変量モデル化(a)では、物理現象の時間的な特質はモデルの数学的技法により直接的に標記される.この中で、相互依存的時区間(Ta1)は定性連立式集合の変数の値が決定されるまでの時間であり、依存的時区間(Ta2)は定性連立式集合の間の変化によって、積分を含まない定性連立式集合の値が充足するまでの時間を表現する. 積分時区間(Ta3)は微小な物理量変化の蓄積によって、注目する変数の値が変化するのにかかる時間であり、平衡時区間(Ta4)は任意の変数集合の平衡状態間の時間である.

時定数定性化(b)は、物理現象の時間スケールの違いを表現するため、系を平衡状態に到達するまでにかかる時間 Ta4を本質的に異なる複数の集合に分割する.これを用いた定性推論方式では、推論対象空間の分割によって推論効率が向上するといった利点が生まれる.

多次元空間構造化(c)では,推論対象空間の多次元構造空間に従ってモデルを構造化する.このため,多次元空間内の変数間の影響伝播を表現する多次元空間内時 区間(Tc1),隣接した多次元空間の間で発生する影響伝播を表現する多次元空間の 間の時区間(Tc2),大域的構造の間の影響の授受を表現する大域的時区間(Tc3)およ びシステム全体での平衡状態を表現する系全体時区間(Tc4)を利用する.このような 分類における時区間概念の順序関係は,多次元空間の大きさによる効果を表現する ことになる.

期間限定化(d)は、過渡挙動における初期応答といった物理現象の特定の時区間 だけに着目し、当該部分だけを取扱うためのモデル化に相当する.当該モデルでは、 時区間の長さだけでなく、時区間の分割数にも制約を与えることによって、定性推論 結果に対する曖昧性の抑制と推論計算量の低減に寄与する.

(C) 時間概念に基づく定性推論

時区間概念に基づく定性推論は、複数の時間軸上での物理現象の遷移を繰返し 評価するプロセスであると認識することが可能で、それぞれの時区間概念はその長さ の順序関係において隣接する時区間概念への遷移条件として定義される.このような 時区間概念に基づく定性推論の結果、時区間毎に物理現象に立脚した挙動が同定 され、物理的因果関係に対する時区間の長さを評価することが可能となる.更に、物 理的因果関係が見出せない物理現象としてのイベントに対して、それらの間の時間的 順序を関係づけることが可能となる.例えば、イベントe1およびe2の共通の上流側イベ ントを e_0 とし、イベント e_0 と e_1 の間の物理的因果連鎖過程の時区間概念を t_1 、イベント e_0 と e_2 の間の時区間概念を t_2 とすると、 t_1 と t_2 の大小関係からその時間的順序を評価 する.

人間のフィードバックに対する認識は、そのループの一周にかかる時間遅れに対す る感覚に基づいている。例えば、フィードバックの時間遅れが非常に短く、これが興味 の対象とした時区間概念よりも小さい場合は、系の状態量変化を追跡する必要は無い。 従って、フィードバックの経路に沿った時区間を表す t が、事前に決定された閾値 t_tよ りも小さい場合には、準フィードバックとしての取扱いが可能となる。要するに、フィード バック後の新しい値が従来の特性と異なる場合は、系内に発生する影響を無視するこ とができる。これは、「着目する状態量の値を瞬間的に変化させる要素はフィードバッ ク特性として存在しない」といったヒューリスティック要素に基づいている。

3.1.7. 数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用

(1) 目標・計画

将来的に目指す目標として、「ロボット潜水艇が流体中を航行する際に、潜水 艇内部から直接計測が可能なある限定された場所の流体運動の情報を取得しつ つ、潜水艇の周辺領域全体にわたる流体場を逆解析によって時々刻々と求めな がら、周辺流体が潜水艇構造物の表面各部に及ぼす力の詳細な空間分布とその 時間変化をリアルタイムで推定できる情報処理システムを実現する」ことを想 定し、その基礎研究として、当該逆解析手法に関する研究を行う.

ただし、上記のとおり、ロボット潜水艇に搭載する情報処理システムへの応 用を想定しているので、リアルタイムで行う逆解析のための数値計算は極力低 消費電力で実行されることが望ましい.このような低消費電力化は、通常は、 コンピュータのハードウェア性能の向上に頼るところであるが、ここでは、極 限的に低消費電力化を追求していく観点から、ソフトウェア面からも最大限の 方策を講じることとしたい.

(2)意義・国際社会との比較

ロボット潜水艇は、海洋科学技術などの関連分野で、例えば、海底地殻変動 の観測、海底地震計の設置、海中や海底における構造物や各種資源の状況把握、 流速・水温・塩分濃度等の各種モニタリング、プランクトンの採取など、今後、 様々な用途への利用拡大のニーズが増大していくものと考えられる.これに伴 い、ロボット潜水艇の機能の高度化と潜水航行継続時間の長時間化が求められ るので、いろいろな航行条件下において、潜水艇構造物が周辺流体からどのよ うな力を受けるかを詳細に把握し、構造物の健全性確保上問題のないことを確 認しておくことが大切である.

一般に、いろいろな観測や作業を行うロボット潜水艇は、各種計測装置やロ ボットアーム等の付属構造物をもつため、その潜水艇外形は複雑な形状をして いる.このような形状の航行体は、周囲に複雑な流れを発生させながら、かつ、 その流れから複雑な力を受けつつ進行する.場合によっては、付属構造物に予 想外の力が繰り返しかかっているかもしれない.このような状況の履歴につい て、ロボット潜水艇自身が正しく自己モニタリングできるような手法を確立で きれば、将来のロボット潜水艇の安全な利用に資する点が大きいと考えられる.

(3)研究内容

①格子ガス法による数値シミュレーションの確認

本研究では、基本となる流体シミュレーションの手法として"<u>格子ガス法</u>" (LGM)を採用した.これは、流体が存在する空間中に張られた格子上を、仮想粒 子が並進・衝突を繰り返しながら、その集団としての運動を自己組織化により 形成していくものであり、最終的な流体運動は、これらの仮想粒子の運動を適 当な大きさの時空間で平均化(疎視化)することによって得られる.本手法は、任 意の複雑な形状をした境界条件に適用できるという特徴を有しているので,各 種計測装置やロボットアーム等の付属構造物により複雑な形状をしている可能 性が高いロボット潜水艇への応用では,大きなメリットとなる.

はじめは2次元問題から研究することとし、最も単純な計算モデルである "FHP-Iモデル"から出発する.本モデルに基づく2次元格子ガス法の概念を下 図 3.1.7.1 に示す.また、図 3.1.7.2 に、本手法によってシミュレーションした円 柱後流のカルマン渦の例を示す.本例は、8 Gflops のベクトルプロセッサ8並 列で計算を行い、格子点数は、約3億点である.





図 3.1.7.1.2 次元格子ガス法の概念

図 3.1.7.2. カルマン渦の例

格子ガス法の計算モデルは、時間発展計算において実数を用いないため、ト ランジスタを数多く必要とする演算回路(例:浮動小数点表示された数の乗算 回路)の使用を省略できる.したがって、使用しない演算回路への電源供給を 選択的に遮断できる次世代型汎用プロセッサや、使用しない演算回路をもとも と組み込まない専用プロセッサあるいは回路をその都度再構成できるプロセッ サ(例:FPGA←その都度プログラムで変更可能なゲート回路配列)を利用する 場合においては、超低消費電力化に大きく貢献できる可能性がある.

②ニューラルネットワーク対応による逆解析手法の検討

さて、FHP-I モデルでは、2次元三角格子上で、「2体正面衝突に伴う進行向 きの60度回転」と「3体対称衝突に伴う進行向きの逆転」という2種類の衝突 規則が適用され、その他の場合は、仮想粒子は入射した向きに直進していく. いずれにしても、各格子点では、6つの向きの仮想粒子が、それぞれの向きに 存在する(1)か否(0)かという2つの状態が可能であり、格子点全体では、6ビッ ト(=2の6乗=64通り)の状態が可能になる.各格子点の時刻t+1における状態 は、周辺の6つの格子点から自分の格子点に向かう仮想粒子が時刻tにどのよう なパターンで存在する(1)か否(0)かで決定される.これは,図 3.1.7.3 のように,ひとつの格子点ごとに,6つの2値入力と1つの2値出力をもつニューロンを6個ずつ想定できることを意味する.(注:境界におけるニューロンでは,固体壁における仮想粒子の逆進規則など他のニューロンとは異なった入出力関係を与える重みが設定されている必要がある.)



図 3.1.7.3. 格子ガス法に基づく衝突則



図 3.1.7.4. 多層ニューラルネットワーク学習

従って、このニューロンのつながりを解析しようとしている全体の格子点体 系にまで広げ、かつ、シミュレーションを行う時間全体にわたってニューロン の層を重ねていくと、図 3.1.7.4 のようなフィードフォワード型多層ニューラル ネットワークが得られる.ただし、図 3.1.7.4 では、6つの1ビット入力と1つ の1ビット出力をもつニューロン6個をまとめて、6つの1ビット入力と1つ の6ビット出力をもつニューロン1個で表示している.

このニューラルネットワークを利用すると、任意の時刻に任意の場所に出現 させたい流線を与えたとき、それを教師データとして学習できる可能性がある. そして、学習の結果得られたニューロンの重みから、仮想粒子の衝突規則が得 られることになる.

もっとも興味深いのは、教師データとして、乱流の流線変化の時系列を与え たとき、上記のニューラルネットワークの学習によって、それを再現できる衝 突規則を学習結果として得られるかどうかである.通常の格子ガス法の衝突規 則では、模擬可能なレイノルズ数は、理論的に算出され、その値は、格子点メ ッシュの分割数をよほど大きくしない限り、大きくはならない.上記の学習に よって、この限界を超えられるか?が研究課題である.

なお、衝突規則の最適化方法については、上記のニューラルネットワーク対応のほか、遺伝的アルゴリズムによる方法も考えられ、この手法も検討することとしたい.



(4)平成19年度進捗状況

図 3.1.7.5. 渦に発達していく時間発展過程

格子ガス法 FHP-I モデルにある衝突規則を追加して,静止状態の流体(全ての 仮想粒子が完全にランダムな向きに運動していて全体の重心が静止している状態)に適用すると,図 3.1.7.5 のように,はじめに微小な渦が発生し,だんだんと 大きな渦に発達していく時間発展過程が得られた.この衝突規則は,格子点レ ベルで仮想粒子の数もエネルギーも保存するものであるので,大きな渦の運動 エネルギーは、ランダムな向きをもつ仮想粒子の運動がだんだんその向きをそろえることによって得られたものである.これは、熱運動のエネルギーを重心 運動のエネルギーに変えるものであり、現象的には、"負の粘性"を実現したことになる.これに対し、通常の格子ガス法の衝突規則では、ある大きさの正の粘性しか実現できないことが知られている.両者の衝突規則をうまく制御できれば、ゼロに近い正の粘性を実現することができ、これによって、高レイノルズ数の流体シミュレーションを可能にできるかもしれない.現在、本手法について研究中である.

3.2. 逆問題

3.2.1. 逆問題に関する研究の概要

本年度は、(1)コンクリート中の鉄筋腐食、(2)流れ場における腐食、(3) 磁場計測による非破壊検査および(4)材料試験に関する逆問題解析の研究を 進めた.

(1)では、コンクリート中の鉄筋腐食検出のいっそうの効率化を図った. 昨年度に鉄筋が網目状に配置されるという特徴に着目して開発した境界要素法の網目腐食要素を、一昨年度に開発したマルチステップ遺伝的アルゴリズムに 組込み、要素分割や係数行列の作成の工夫と合わせて、ステップが進む毎に解 像度と解析精度を同時に段階的に高めていくという方法を考案し、計算時間を 1/100 に短縮した.

(2)では、配管の内側の腐食を同定するために、観測方程式について基礎 的な検討を行った.酸素律速の腐食を考え、様々な流れの場における金属表面 近傍の酸素濃度分布や拡散層の厚さを計算し、腐食速度に金属表面に垂直方向 の流速勾配が重要な影響を持つという解析結果を得た.この結果を実際の配管 腐食速度の予測に反映する方法を提案した.

(3)では、各種の非破壊検査に盛んに用いられている静磁場解析を効率的 に行うことのできる境界要素解析法を開発した. すなわち、静電場が Laplace 方 程式に支配される場合に対して、ソース電流の領域積分を必要としない高精度 かつ効率的な静磁場の境界要素解析法を開発した. この方法は開領域解析にお いて特に効率的である.

(4) 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を開発した.すなわち,試験片の形状・構造,実験の荷重条件,試験機の性能および測定誤差を統合的に考慮し材料同定を行う手法を開発した.本手法により,複合材料の同定を少ない試験片から短時間に行うことが可能となった.

3.2.2. コンクリート中の鉄筋腐食検出に関する逆問題

目標・計画

昨年度に引き続き、コンクリート表面における電位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、昨年度に開発した鉄筋腐食を簡便に 解析することができる網目特殊要素を、一昨年度に開発したマルチステップ遺 伝的アルゴリズムに組み込んで、鉄筋腐食の検出をより一層効率化することを 目標とした.

(2) 意義・国際社会との比較

日本では、橋脚、高速道路、ビルディング、防波堤など、高度経済成長期に 建設されたコンクリート構造物がこれから続々と耐用年数の目安とされる 築 50 年を迎える.日本だけでなく、多くの国でコンクリート構造物の老朽化が進 んでいる.

もし、コンクリート中の鉄筋に腐食が生じ進行すると、腐食生成物の体積膨 張のため、周辺のコンクリートにき裂が生じる.き裂がコンクリート表面に達 している場合はもとより、達していなくても、すなわち外観は健全そうでも、 構造物の強度が著しく低下する.これが破壊事故の原因となることが多いので、 鉄筋の腐食検出が緊急の重要課題といわれている.

鉄筋が腐食すると、腐食部の電位が上昇し、電流が流れる.したがって、コ ンクリート表面の電位の高い場所を見付ければ、鉄筋腐食位置を検出できる. そこで、図 3.2.2.1 に示すように、通常、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.

ところが、数多くの点における電位測定には多大な労力と時間を必要とする. そこで、一昨年度には、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した.本年度は、昨年度に開発した網 目要素を利用して、この逆解析方法をさらに効率化する.

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、また、この研究で開発される逆解析手法他の分野の逆問題にも広く応用できるので、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効率的な腐食検出の研究は国の内外を問わず見当た らない.

(3) 研究内容

(3-1 昨年度までの研究概要) 亀裂や欠陥の同定では,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、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として、0と1からなる 長いビット列を考え、これを染色体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、 適応度の高い染色体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 染色体を作る.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 3.2.2.1. コンクリート表面の電位測定



図 3.2.2.2. 分極曲線の線形近似 (実験データは J. P. Broomfield, P. E. Langford and A. J. Ewins: ASTM STP 1065 (1990), p. 157. から引用)

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、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 リズムを採用した.また、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 縮した.

マルチステップ遺伝的アルゴリズムにおける各ステップにおける適応度の計 算において,図 3.2.2.2 に示すように鉄筋の分極特性(電流と電位の非線形な関 係)を直線近似することにより,解の重ね合わせを可能にする.

図 3.2.2.2 では、健全な鉄筋の電流密度が正の部分の分極曲線が直線から大き く異なっている.しかし、実際に腐食が生じている状況では、健全鉄筋の電流 密度が負の部分の分極曲線と腐食している鉄筋の電流密度が正の部分の分極曲 線が腐食反応に関与するので、直線近似による計算誤差は小さい.

解の重ね合わせが可能になると、例えば、染色体(11000....0)に対応するコン クリート表面の電位を計算する場合には、予め染色体(10000...0)と(01000....0) に対応する電位を計算しておき、両者を重ね合わせることにより解が得られる. したがって、前処理として、染色体(10000...0)、(01000....0)、(00100....0)...に 対応する電位を計算して表として保存しておけば、任意の腐食位置、形状、個 数に対応する電位を加算のみで求めることができる.



図 3.2.2.3. 網目要素

さらに、鉄筋が網目状に配置されるという特徴に着目して、効率的な網目腐 食要素(図 3.2.2.3 参照)を開発した.網目腐食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変化、円周方向の余弦的変化、軸方向 の余弦的変化などの和として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個の場合は網目腐食要素内 のすべての鉄筋の電流密度は一定値をとる.網目腐食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.

(3-2 マルチステップ遺伝的アルゴリズムの効率化) 前年度までに開発したマルチステップ遺伝的アルゴリズムで後述の例題(太さ 0.01m の鉄筋が 0.2m 間隔で網目状に入った5X6X0.4mのコンクリート板.かぶり厚さ0.075m. 3個所腐食.図3.2.2.4参照)を, Intel(R) Pentium(R) D 3.00GHz の CPU(1 コアだけ使用)を用いて解いた場合,計算時間は約3.5時間を要した.実用に供するためには更に効率化する必要がある.

そこで,前年度に開発した鉄筋が網目状であることを考慮に入れた境界要素 腐食解析用網目腐食要素(図 3.2.2.3 参照)をマルチステップ遺伝的アルゴリズ ムに組み込んで計算時間短縮を図った.



図 3.2.2.4. シミュレーションに用いた鉄筋コンクリート平板



網目要素としては最もパラメータの数が少ない一定網目要素(パラメータ数が 1)を使用する.上述の前処理において,例えば染色体(10000...0)に対応するセ ルに腐食がある場合を考える.「腐食なし」セルには,セルの大きさの網目要素 を用いる.「腐食あり」セル(染色体(10000...0)に対応)は複数の最小網目要素 で要素分割し,左下隅の最小網目要素に腐食した鉄筋の分極曲線を与える.同 様にして,別のセル(例えば,染色体(01000...0)に対応するセル)が腐食してい る場合も解析できるが,境界要素法の係数行列[H]と[G]²⁾の全成分を作り直す必 要がある.







図 3.2.2.7. 第2ステップの探索結果

この作り直し作業を最小にするために[H]と[G]の作成方法を次のようにする. 複数の最小網目要素をセルの大きさの網目要素に重ね合わせ,重ねられた網目 要素に対応する網目要素の電流密度と電位を 0 と指定する. セルの大きさの網 目要素およびコンクリート表面の要素に若い要素番号を与えれば, [H]と[G]の左 上の大半の要素は腐食位置が変わっても,書き換える必要がなくなる. 作り直 し作業が必要となるのは最小網目要素に対応する行列成分のみとなる.

また,前年度の方法ではマルチステップ遺伝的アルゴリズムにおいて,最初 のほうのステップで同定精度が粗い解を見つける場合にも,詳細な解析メッシ ュを用いた境界要素解析を行っていた.そのため,解を得るために多大の計算 コストを要した.そこで,本年度では,ステップが進む毎に解析メッシュ(コ ンクリート表面には通常の4角形要素,鉄筋には網目要素によるメッシュ)を 細かくしていき,同定精度ばかりでなく解析精度も同時に高める方法を考案し た.



図 3.2.2.8. 第3ステップの探索結果



図 3.2.2.9. 各ステップの探索結果

それぞれのステップにおいて,前ステップで「腐食あり」と推定されたセル のみを取り出し,前ステップで得られた解析結果を合理的に用いて境界条件を 与えて,解析を小規模にした.現在この作業は手作業によっているが,将来の 自動化に備えて出来るだけシステマチックに操作できるようにした.

本手法では、各ステップにおける複数の探索領域に対して、同じ解析を独立 に行うので並列化計算に向いている.本年度には間に合わなかったが、並列化 を行えば更に効率化できると思われる.

本手法の有効性を示すために,図 3.2.2.4 に示すような鉄筋コンクリート平板 を考え,図 3.2.2.5 に示すように3ヶ所に鉄筋腐食があると仮定して,本手法に よるシミュレーションを行った.コンクリート表面は絶縁とし,鉄筋の腐食部 および健全部表面の電位と電流密度は図 3.2.2.2 に示した分極曲線で与えられる 関係を満足するとした.コンクリート内の電位が満たすべきラプラス方程式を 上記の境界条件の下で解いてコンクリート表面の電位を求め,測定誤差を考慮 して有効数字3桁に丸め,測定値とした.

第一ステップでは,図3.2.2.5 左図に示すように鉄筋面を25 個のセルに分割し, コンクリート表面に25 個の測定点を定めて,本手法を適用した.その結果,図 5 右図の推定結果が得られた.順次第2,第3ステップの探索を図3.2.2.6,3.2.2. 7 のように実行し,最終的に図3.2.2.8 に示すように正解と一致する探索結果が 得られた.解析時間は昨年度の約1/100であった.

(4) 平成 19 年度進捗状況

鉄筋腐食の位置,形状,個数を仮定なしで同定するために採用した遺伝的ア ルゴリズムを効率化するために,昨年度までに(1)マルチステップ化(2) 線形化と解の重ね合わせ(3)網目腐食要素の開発を行った.19年度は(4) 網目腐食要素をマルチステップ遺伝的アルゴリズムに組み込んだ.また,鉄筋 以外(コンクリート表面)の要素分割もステップとともに徐々に細かくし,ス テップが進むにつれて同定精度とともに解析精度も同時に徐々に向上させた.

(5) さらに,前ステップで「腐食あり」と推定されたセルのみを取り出し, 前ステップで得られた解析結果を合理的に用いて境界条件を与えて,各ステッ プの解析を小規模にした.(6)網目腐食要素の重ね合わせにより,腐食位置が 変わるたびに境界要素法の係数行列[H]と[G]の全成分を作り直すのではなく,一 部のみを作り直せば解が得られるようにした.

以上のように改良した方法を用いて、例題についてシミュレーションを行った.その結果、計算時間を昨年度までの1/100に短縮できた.今後、(7) 現在各ステップの要素分割を手作業で行っているが、これを自動化すること、

(8) 各ステップにおける複数の領域における探索を並列化すること,および (9) 完成したプログラムを, FPGA(Field Programmable Gate Array)チップを

利用して、ノートPCに組み込むことなどを行えば実用化できると思われる.

3.2.3. 流れ場における腐食同定逆問題

(1) 目標·計画

流れのある配管内の腐食を精度良く予測するための逆解析手法を開発する.本年 度は,逆問題の観測方程式のモデル化ついて検討することを目標とした.

中性環境における金属部材(例えば,水溶液中の炭素鋼)の腐食は,溶存酸素に よるカソード反応が支配的である.したがって,溶存酸素の金属部材表面への拡散速 度が,カソード反応の律速反応になっていると考えられる.そこで,金属部材近傍の流 体の速度勾配,および腐食反応を律速している溶存酸素の濃度分布に着目して,流 れのある配管内の腐食を精度良くシミュレーションできるか考察を行う.

(2) 意義・国際社会との比較

配管は各種プラントや上下水道・ガスなどの社会インフラの構成部材として広く利用 されている.配管の腐食による事故の防止と保守コストの低減を図るために,精度よく 配管の腐食を同定する手法を開発することは重要である.

流れの影響を無視できる場合の管内の腐食速度を予測する手法として,境界要素 法を用いた手法の有効性が示されている.また,流れの影響が無視できない場合に は,平均流速によって整理された分極曲線を利用して腐食速度の予測が行われてき た.

しかしながら,実際に腐食が起こる管壁の腐食速度を予測するためには,管壁近傍の流速分布が重要な要因となることが考えられる.たとえば,管壁の流速分布が変われば,管壁に供給される反応物質の量が変わる.しがたって,平均流速のみに注目して分極曲線を決める従来法では,腐食速度を正確に予測することが困難な場合があると考えられる.

この研究が完成すると,流れのある配管内の腐食シミュレーションが精度良く行える ようになる.また,流れのある配管内の腐食を精度良く同定することができるようになる ので研究の意義は大きい.

(3) 研究内容

3.1. 速度勾配の影響

管壁近傍の流体の速度勾配が腐食に与える影響を考察した.まず,図 3.2.3.1 に示 すような配管内に,左右両側から水を流すことを考える. 左から流すときは 0.06[m/s]で 流入させ,右から流すときは 0.02[m/s]で流入させた.このような流し方をすると,管内 の流体の左右どちらから流しても平均流速は同じになる.したがって,従来の腐食シミ ュレーション法では,左右どちらから流しても同じように腐食するという結果になる.



🗵 3.2.3.1. Analysis model

次に,管壁の流体の速度勾配を求めた. 管径が変化する x=48~62[mm]の速度勾 配を図 3.2.3.2 に示す. 流す方向によって速度勾配が異なることが分かる.



⊠ 3.2.3.2. Velocity gradient distribution

求めた速度勾配に応じて,分極曲線を与え腐食解析を行った.分極曲線は,実験 で得られたものを速度勾配で整理して利用した.その結果得られた電流密度分布(腐 食速度に比例する)を図 3.2.3.3 に示す.電流密度が高い場所ほど,腐食速度が速い ことを表している.



☑ 3.2.3.3. Current density calculated with polarization curves that are decided by flow velocity gradient near tube wall

最大電流密度の大きさと位置が異なっていることが分かる. 管壁での速度勾配を考慮 することで, 平均流速だけでは予想できない腐食状況を予想できる可能性があること を示唆する結果であると考えている.

3.2. 濃度分布を考慮した腐食モデル

溶存酸素が腐食反応を律速している流水中の鉄について考える. 速度勾配および 溶存酸素に着目し,構造物各部の腐食速度を予測する方法について考察する.

鉄の腐食反応は、以下の式で表されるの酸化・還元反応に分解して考えることができる.

$$Fe \to Fe^{2+} + 2e^{-} \tag{1}$$

$$1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 4OH$$
 (2)

式(1)は鉄が金属原子の結晶格子から離脱して鉄イオンとなって水中に移行すること を表している.すなわち,電極の表面物質を酸化する反応である.一方,(2)式は水中 に溶けている酸素が(1)式で遊離された電子を受け取って水酸化物イオンとなる反応 を表している.(1)式は鉄表面で速やかに起こりうるので,結果として水中の鉄の腐食 速度は溶存酸素の拡散速度によって制限されることになる.

溶存酸素の濃度分布は Nernst-Planck により得ることができる. 2 次元定常状態を考えると次式が成立する. ただし, D_{o} , は, 酸素の拡散定数, C_{o} , は濃度を表す.

$$0 = D_{O_2} \left(\frac{\partial^2 C_{O_2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_{O_2}}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{O_2} v_x \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C_{O_2} v_y \right)$$
(3)

また,管壁表面でのカソード反応が十分に速く,次の初期条件が成り立つもの とした.

 $C_{O_2}(x, y, 0) = C_{O_2, 0}, \qquad C_{O_2}(0, x, t) = 0$ (4)

観測されるカソード電流*i*。がすべて溶存酸素の還元反応によるものであると 仮定すると次式が成立する.

 $\frac{\left|i_{c}\right|}{nF} = D_{O_{2}}\left(\frac{\partial C_{O_{2}}}{\partial y}\right)$ (5)

ただし, *m* は電化数, *F* はファラデー定数, *n* は流体速度の配管に垂直な方向の 勾配($\partial/\partial n$)を表す. したがって, 壁面近傍における酸素の濃度勾配 $\left(\frac{\partial C_{O_2}}{\partial n}\right)_{y=0}$ が分かれば, 腐食速度を予測することができる.

以上のモデル化の下,配管内の濃度分布を求め,(5)式を用いて腐食箇所を予測 する数値シミュレーションを行った.

図 3.2.3.4 に示すような配管を考える. 配管底面の部分には, 鉄とプラスチックの部位 が 図 のように 配 置 され ている. 配 管 に 左 側 から 0.1m/s の 速 さで, 酸素 (3.1×10⁻⁴[*mol*/*l*])を十分含んだ水を流す. 管内の流速分布は Navier-Stokes 方程式 を解くことで求めた.



 \boxtimes 3.2.3.4. 2D tube model with Fe and plastic area

壁面近傍(y=1.0 及び y=2.0)の位置における酸素の濃度勾配を解析した結果を図 3.2.3.5 に示す.



☑ 3.2.3.5. Gradient of Oxygen concentration near tube wall

図 3.2.3.5 から, 鉄を配置した領域の先端部においてより激しい腐食が起こる可能性があることが分かる.また, 先端部の濃度勾配は測定位置に依存して大きく値が変化するが, それ以外の場所では, 測定位置の影響を受けないことが分かる.

(4) 平成 19 年度進捗状況

属部材近傍の流体の速度勾配,および腐食反応を律速している溶存酸素の濃度 分布に着目して,流れのある配管内の腐食を精度良くシミュレーションできるか考察を 行った.

管壁での速度勾配を考慮することで、平均流速だけでは予想できない腐食状況を 予想できる可能性があることを示唆する結果が得られた.

観測されるカソード電流*i*。がすべて溶存酸素の還元反応によるものであると仮定し、 管壁近傍の酸素濃度分布から、腐食を予測する手法について考察を行った.

今後は、実験による検証をする必要があると考えている.

3.2.4. 静電場領域の領域積分を必要としない静磁場解析法

目標・計画

本研究では静電場が Laplace 方程式に支配される場合に対して,ソース電流の 領域積分を必要としない高精度かつ効率的な静磁場の境界要素解析法を開発し た.まず,領域内の電流密度を電位に関する境界積分で表現できることを利用 する[2][4].次に,静磁場の境界積分方程式の領域積分項を解析的に計算し,境 界積分で表す.これらの操作により,磁束密度と境界の電位の関係を直接定式 化することができ,数値計算における計算精度と計算量の問題を解決すること ができる[7].

本研究ではまず,Laplace 電場に誘起される静磁場問題を示し,従来の静磁場 解析法として,ベクトルポテンシャルを導入した境界要素法と Biot-Savart の法 則について述べる[6].次に本手法の詳細として,ソース電流の領域積分を電位 に関する境界積分に変換する手順を述べ,それらを用いたベクトルポテンシャ ルと Biot-Savart の法則の定式化の手順について述べる.最後に従来法と本手法 の比較のため,具体例として一様な電流が流れている立方体周辺の磁束密度と 円筒型めっき浴周辺の磁束密度を従来法と本手法を用いて計算する.これによ って,従来法と本手法による計算精度と計算量の比較を行い,本手法の有効性 を確認する.

(2) 意義・国際社会との比較

現在,構造物中の鉄筋などの腐食状態を調べる手段やき裂の有無を調べる非 破壊検査を行う手段に静磁場解析が盛んに用いられている.また,生物学の分 野では脳内の微小な電気信号により生じる磁場を解析し,その活動を研究する ことにも利用され,静磁場解析は工学に限らず非常に重要である[1]~[3].

静電場における電流が誘起する静磁場を解析する場合,有限要素法や境界要 素法など種々の数値解析法が利用できる.ベクトルポテンシャルを導入した境 界要素法は,領域内部で要素分割を必要とせず,解析精度も高いため有用であ る.この方法では,まず有限要素法や境界要素法などによる静電場解析を行い, 領域内の電流密度分布を求め,次に電流密度をソースとし,Biot-Savartの法則 によって静磁場解析を行う.しかし,静磁場解析において,電流密度を領域内 の多数の点で求め,さらに数値領域積分して計算を行うため,計算精度および 計算量の点で様々な問題がある.開領域解析においては積分領域が膨大になる ため,この問題は特に顕著になる[4]~[6]. (3) 研究内容

1 Laplace電場に誘起される静磁場問題

静磁場および静電場の概略図を図1に示す.境界 Γ_M で囲まれた透磁率 μ で ある静磁場領域 Ω_M と、領域 Ω_M 内において境界 Γ_E で囲まれた電気伝導度 κ である静電場領域 Ω_E を考える.透磁率 μ は領域 Ω_M 内で、電気伝導度 κ は領域 Ω_E 内で場所によらず一定であるとする.磁束密度を求めるべき点pの位置ベクトルを \mathbf{p} ,ソース点qの位置ベクトルを \mathbf{q} とし、境界 Γ_M におけ る外向き単位法線ベクトルを \mathbf{n}_M 、境界 Γ_E における外向き単位法線ベクトル を \mathbf{n}_E とする.また、全領域を Ω_∞ (境界 Γ_∞)とする.



Figure 1: Analytic area

1.1 静電場解析

静電場領域 Ω_E において、ソース点qにおける電位 $u(\mathbf{q})$ と電流密度 $\mathbf{j}(\mathbf{q})$ の間には、次式が成り立つ。

$$\mathbf{j}(\mathbf{q}) = -\kappa \nabla_q \ u(\mathbf{q}) \tag{1}$$

$$\nabla_a^2 u(\mathbf{q}) = 0 \tag{2}$$

ここで、 ∇_p は p 座標に関する微分であることを表すものとする.

式 (2) の両辺に Laplace 方程式の基本解 $\phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{s})$ を乗じて領域 Ω_E で領域積 分すると

$$\int_{\Omega_E} \phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{s}) \nabla_s^2 \, u(\mathbf{s}) d\Omega(\mathbf{s}) = 0 \tag{3}$$

となる. 上式 (3) の左辺を Green の定理を用いて変形することで

$$u(\mathbf{q}) = \int_{\Gamma_E} \left(\phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{s}) \frac{\partial u(\mathbf{s})}{\partial n_E} - u(\mathbf{s}) \frac{\partial \phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{s})}{\partial n_E} \right) d\Gamma(\mathbf{s})$$
(4)

が得られる. ここで $\partial/\partial n_E$ は境界 Γ_E の外向き法線方向の微分を表す. した がって,式(1)(4) より電流密度 $\mathbf{j}(\mathbf{q})$ は

$$\mathbf{j}(\mathbf{q}) = \kappa \int_{\Gamma_E} \left(\mathbf{i}^*(\mathbf{q}, \mathbf{s}) \frac{\partial u(\mathbf{s})}{\partial n_E} - \mathbf{j}^*(\mathbf{q}, \mathbf{s}) u(\mathbf{s}) \right) d\Gamma(\mathbf{s})$$
(5)

となる. ただし, ここで

$$\mathbf{i}^{*}(\mathbf{q}, \mathbf{s}) = -\nabla_{q} \phi^{*}(\mathbf{q}, \mathbf{s})$$

$$\mathbf{j}^{*}(\mathbf{q}, \mathbf{s}) = -\nabla_{q} \left(\frac{\partial \phi^{*}(\mathbf{q}, \mathbf{s})}{\partial n_{E}} \right)$$

$$= -\nabla_{q} (\nabla_{s} \phi^{*}(\mathbf{q}, \mathbf{s}) \cdot \mathbf{n}_{E})$$

$$= \nabla_{q} (\nabla_{q} \phi^{*}(\mathbf{q}, \mathbf{s}) \cdot \mathbf{n}_{E})$$
(7)

とおいた.

2 従来の静磁場解析法

2.1 静磁場の支配方程式

静磁場領域 Ω_M において、点 \mathbf{p} における磁束密度 $\mathbf{B}(\mathbf{p})$ と電流密度 $\mathbf{j}(\mathbf{p})$ は次のMaxwell方程式

$$\nabla_p \times \frac{\mathbf{B}(\mathbf{p})}{\mu} = \mathbf{j}(\mathbf{p}) \tag{8}$$

$$\nabla_p \cdot \mathbf{B}(\mathbf{p}) = 0 \tag{9}$$

を満たす. 磁束密度 B(p) に関して, 式 (9) が成り立つことから, ベクトルポ テンシャル A(p) を導入して

$$\mathbf{B}(\mathbf{p}) = \nabla_p \times \mathbf{A}(\mathbf{p}) \tag{10}$$

と表すことができる.したがって,透磁率 μ が領域 Ω_M 内で一定である場合,式(8)(10)より

$$\nabla_p \times (\nabla_p \times \mathbf{A}(\mathbf{p})) = \mu \mathbf{j}(\mathbf{p}) \tag{11}$$

となる.さらに、クーロンゲージ $\nabla_p \cdot \mathbf{A}(\mathbf{p}) = 0$ を仮定すると、式 (11) より静磁場の支配方程式として

$$\nabla_p^2 \mathbf{A}(\mathbf{p}) = -\mu \mathbf{j}(\mathbf{p}) \tag{12}$$

が得られる.

2.2 ベクトルポテンシャル A(p) の積分方程式

式 (12) から $A(\mathbf{p})$ を求めるために, Laplace 方程式の基本解 $\phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ を導入 する.

$$\phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \frac{1}{4\pi |\mathbf{p} - \mathbf{q}|} \tag{13}$$

$$\nabla_p^2 \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \nabla_q^2 \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = -\delta(\mathbf{p} - \mathbf{q})$$
(14)

この基本解 $\phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ を式 (12) の両辺に乗じて領域 Ω_M で領域積分すると,領域 Ω_E 外の電流密度が 0 であることから

$$\int_{\Omega_M} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \nabla_q^2 \mathbf{A}(\mathbf{q}) d\Omega(\mathbf{q})$$
$$= -\mu \int_{\Omega_E} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \mathbf{j}(\mathbf{q}) d\Omega(\mathbf{q})$$
(15)

となる. 上式 (15) の左辺を Green の定理を用いて変形すると、ベクトルポテ ンシャル A(p) の積分方程式として

$$\mathbf{A}(\mathbf{p}) = \int_{\Gamma_M} \left(\phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \frac{\partial \mathbf{A}(\mathbf{q})}{\partial n_M} - \mathbf{A}(\mathbf{q}) \frac{\partial \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q})}{\partial n_M} \right) d\Gamma(\mathbf{q}) + \mu \int_{\Omega_E} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \mathbf{j}(\mathbf{q}) d\Omega(\mathbf{q})$$
(16)

が得られる.ここで $\partial/\partial n_M$ は境界 Γ_M の外向き法線方向の微分を表す.

式 (16) において,静磁場境界 Γ_M を無限遠(境界 Γ_∞) にとると境界項で ある右辺第1項を無視できる.このとき,式 (10)(13)(16) より Biot-Savart の 法則である次式が得られる.

$$\mathbf{B}(\mathbf{p}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{\Omega_E} \frac{\mathbf{j}(\mathbf{q}) \times (\mathbf{p} - \mathbf{q})}{|\mathbf{p} - \mathbf{q}|^3} d\Omega(\mathbf{q})$$
(17)

2.3 従来法の問題点

従来の静磁場解析法では境界要素法を用いる場合には式 (16) の右辺第 2 項, Biot-Savart の法則を用いる場合には式 (17) の右辺で表される領域積分を行 わなければならず,非効率的である.また,領域 Ω_E 内のすべての電流密度 を求めるために式 (5) で表される積分を行わなければならないため,電位に 関する境界条件から直接磁束密度を計算することができない.そのため,数 値積分を行う上で計算精度の低下および計算量の増加の要因となっている.

3 領域積分を必要としない静磁場解析法

本研究の手法では、式 (5) のように領域 Ω_E 内の電流密度を電位に関する境 界積分で表現できることを利用し、領域積分に関する部分をあらかじめ解析 的に計算することを利用する.これにより、A(p) および B(p) を境界積分の みで表すことができる.

3.1 本手法による A(p) および B(p) の導出

式 (5) を式 (16) にそのまま代入するだけでは領域積分が領域 Ω_E に依存して しまい,解析対象ごとに領域積分を行う必要がある.しかし, $\mathbf{j}(\mathbf{q}) = 0$ ($\mathbf{q} \in \overline{\Omega}_E$) であることから,式 (16) の右辺第 2 項において,次式のように領域積分 を領域 Ω_E から全領域 Ω_∞ で行うように変形することができる.

$$\mu \int_{\Omega_E} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \mathbf{j}(\mathbf{q}) d\Omega(\mathbf{q}) = \mu \int_{\Omega_\infty} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \mathbf{j}(\mathbf{q}) d\Omega(\mathbf{q})$$
(18)

上式 (18) に式 (5) を代入することで,ベクトルポテンシャル **A**(**p**) を求める 際の領域積分を全領域 Ω_∞ の境界積分に変換することができる.すなわち

$$\begin{split} \mu \int_{\Omega_E} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \mathbf{j}(\mathbf{q}) d\Omega(\mathbf{q}) \\ &= \mu \int_{\Omega_\infty} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \kappa \int_{\Gamma_E} \left(\mathbf{i}^*(\mathbf{q}, \mathbf{s}) \frac{\partial u(\mathbf{s})}{\partial n_E} \right. \\ &- \mathbf{j}^*(\mathbf{q}, \mathbf{s}) u(\mathbf{s}) \quad \left. \right) d\Gamma(\mathbf{s}) d\Omega(\mathbf{q}) \\ &= \kappa \mu \int_{\Omega_\infty} \int_{\Gamma_E} \left(-\phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \mathbf{i}^*(\mathbf{q}, \mathbf{s}) \frac{\partial u(\mathbf{s})}{\partial n_E} \right. \\ &- \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \mathbf{j}^*(\mathbf{q}, \mathbf{s}) u(\mathbf{s}) \quad \left. \right) d\Gamma(\mathbf{s}) d\Omega(\mathbf{q}) \end{split}$$

積分の順序を入れ換えると

$$\mu \int_{\Omega_E} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \mathbf{j}(\mathbf{q}) d\Omega(\mathbf{q})$$

= $\kappa \mu \int_{\Gamma_E} \int_{\Omega_\infty} \left(\frac{\partial u(\mathbf{s})}{\partial n_E} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \mathbf{i}^*(\mathbf{q}, \mathbf{s}) - u(\mathbf{s}) \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \mathbf{j}^*(\mathbf{q}, \mathbf{s}) \right) d\Omega(\mathbf{q}) d\Gamma(\mathbf{s})$
= $\kappa \mu \int_{\Gamma_E} \left(\frac{\partial u(\mathbf{s})}{\partial n_E} \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) - u(\mathbf{s}) \mathbf{g}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) \right) d\Gamma(\mathbf{s})$ (19)

となる. ただし, ここで積分核 f(p,s),g(p,s) はそれぞれあらかじめ解析的 に求めておくことができ,以下のようになる.

$$\mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) = \int_{\Omega_{\infty}} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \mathbf{i}^*(\mathbf{q}, \mathbf{s}) d\Omega(\mathbf{q})$$

= $-\int_{\Omega_{\infty}} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) (\nabla_q \ \phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{s})) d\Omega(\mathbf{q})$
= $\frac{\mathbf{p} - \mathbf{s}}{8\pi |\mathbf{p} - \mathbf{s}|}$ (20)

$$\mathbf{g}(\mathbf{p},\mathbf{s}) = \int_{\Omega_{\infty}} \phi^*(\mathbf{p},\mathbf{q}) \mathbf{j}^*(\mathbf{q},\mathbf{s}) d\Omega(\mathbf{q})$$

$$= \int_{\Omega_{\infty}} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \{ \nabla_q (\nabla_q \ \phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{s}) \cdot \mathbf{n}_E) \} d\Omega(\mathbf{q})$$
$$= \frac{\mathbf{n}_E}{8\pi |\mathbf{p} - \mathbf{s}|} - \frac{3(\mathbf{p} - \mathbf{s}) \cdot \mathbf{n}_E}{8\pi |\mathbf{p} - \mathbf{s}|^3} (\mathbf{p} - \mathbf{s})$$
(21)

したがって、ベクトルポテンシャル A(p) の積分方程式は式 (16) および式 (19) より

$$\mathbf{A}(\mathbf{p}) = \int_{\Gamma_M} \left(\phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \frac{\partial \mathbf{A}(\mathbf{q})}{\partial n_M} - \mathbf{A}(\mathbf{q}) \frac{\partial \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q})}{\partial n_M} \right) d\Gamma(\mathbf{q}) + \kappa \mu \int_{\Gamma_E} \left(\frac{\partial u(\mathbf{s})}{\partial n_E} \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) - u(\mathbf{s}) \mathbf{g}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) \right) d\Gamma(\mathbf{s})$$
(22)
となり、ベクトルポテンシャル A(p) に関する積分方程式のすべての項を境 界積分のみで表すことができる。

また, Biot-Savart の法則は式 (22) において右辺第 1 項を無視し,式 (10) に代入すると

$$= \nabla_{p} \times \left\{ \kappa \mu \int_{\Gamma_{E}} \left(\frac{\partial u(\mathbf{s})}{\partial n_{E}} \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) - u(\mathbf{s}) \mathbf{g}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) \right) d\Gamma(\mathbf{s}) \right\}$$
$$= \kappa \mu \int_{\Gamma_{E}} \left(\frac{\partial u(\mathbf{s})}{\partial n_{E}} \nabla_{p} \times \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) - u(\mathbf{s}) \nabla_{p} \times \mathbf{g}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) \right) d\Gamma(\mathbf{s})$$
(23)

となる. ここで

 $\mathbf{B}(\mathbf{p})$

$$\nabla_p \times \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) = \mathbf{0} \tag{24}$$

$$\nabla_p \times \mathbf{g}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) = \frac{\mathbf{n}_E \times (\mathbf{p} - \mathbf{s})}{4\pi |\mathbf{p} - \mathbf{s}|^3}$$
(25)

であることから

$$\mathbf{B}(\mathbf{p}) = -\frac{\kappa\mu}{4\pi} \int_{\Gamma_E} \frac{\mathbf{n}_E \times (\mathbf{p} - \mathbf{s})}{|\mathbf{p} - \mathbf{s}|^3} u(\mathbf{s}) d\Gamma(\mathbf{s})$$
(26)

となり、ベクトルポテンシャル A(p) の積分方程式と同様に Biot-Savart の法 則も境界積分で表すことができる.

3.2 本手法の利点

本手法では式 (22) および式 (26) のように電場に関する領域積分を必要とせ ず,境界積分のみで磁場の計算ができる.さらに,電位に関する境界条件か ら直接磁場を計算できるため,計算量の点で改善されている.また,電場に 関する領域積分を必要としないことから,電場を要素分割して計算する場合 には領域を分割する必要が無く,境界を分割するだけでよい.これにより, 従来法に比べて計算精度も高くなることが期待される.

4 従来法と本手法における計算精度と計算量の比較

本手法の有効性を確認するため、簡単な例として立方体の電場領域周辺の磁 束密度分布を従来法と本手法を用いて計算する.得られた結果をBiot-Savart の法則による解析解と比較し、従来法と本手法における計算精度と計算量の 比較を行う.

4.1 解析対象

解析対象となるモデルを図2に示す.図2に示すように、一辺の長さが2Lの 立方体内部をz軸方向に電流密度jが一様に流れているとする.また、立方 体周辺の透磁率は μ とし、場所によらず一定とする.このときの点p(X,0,0)における磁束密度 $\mathbf{B} = \{B_x, B_y, B_z\}$ は Biot-Savart の法則より次のように求 まる.

$$B_x = B_z = 0 \tag{27}$$

$$B_{y} = \frac{\mu j}{4\pi} \int_{-L}^{L} \int_{-L}^{L} \int_{-L}^{L} \frac{X - x}{\{(X - x)^{2} + y^{2} + z^{2}\}^{\frac{3}{2}}} dx dy dz$$
(28)



Figure 2: The cubic model

4.1.1 従来法による定式化と計算方法

従来法では式 (28) を用いる.本手法と計算精度の比較を行うため,図3のように立方体を一辺の分割数が N になるように立方体要素で分割し,計 N³ 個の要素について各要素ごとに数値積分を行う.

4.1.2 本手法による定式化と計算方法

立方体の電気伝導度を κ とし、場所によらず一定とする. z = Lの面を基準 とし、その電位 u(x, y, L) = 0とすると、z = -Lの面の電位は

$$u(x, y, -L) = \frac{2jL}{\kappa},\tag{29}$$



Figure 3: The cubic model (element division)

 $x = \pm L$ の面および $y = \pm L$ の面の電位は

$$u(\pm L, y, z) = u(x, \pm L, z) = \frac{j(L-z)}{\kappa}$$
(30)

となる. これらを式 (26) に代入すると、点 p(X,0,0) における磁束密度 B = $\{B_x, B_y, B_z\}$ は

$$B_x = B_z = 0 \tag{31}$$

$$B_{y} = \frac{\mu j}{4\pi} \left\{ \int_{-L}^{L} \int_{-L}^{L} \frac{L(X-x)}{\{(X-x)^{2} + y^{2} + L^{2}\}^{\frac{3}{2}}} dx dy + \int_{-L}^{L} \int_{-L}^{L} \frac{z^{2}}{\{(X-L)^{2} + y^{2} + z^{2}\}^{\frac{3}{2}}} dy dz - \int_{-L}^{L} \int_{-L}^{L} \frac{z^{2}}{\{(X+L)^{2} + y^{2} + z^{2}\}^{\frac{3}{2}}} dy dz \right\}$$
(32)

となる.

従来法と計算精度の比較を行うため、5.1.1と同じく、図3のように立方体の表面を一辺の分割数がNになるように正方形要素で分割する.そして、この計6N²個の要素について各要素ごとに数値積分を行う.

4.2 数値計算

前節5.1において得られた式(28)および式(32)に具体的な数値を代入し,実際に計算した結果を比較することで従来法と本手法の計算精度と計算量の違いについて比較する.

4.2.1 数値計算条件

図 2 において、立方体の一辺の長さ 2L = 2 m、立方体内の電流密度 j = 100A/m² とし、立方体周辺の透磁率 $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m とする.また、要素分 割する際の一辺の分割数 N は 5, 6, 10, 15, 20, 25, 30 の 7 段階とする.このと きの要素分割数は従来法では 125~27000、本手法では 150~5400 となる.

以上の条件において,点p(2,0,0)における磁束密度 B のy方向成分 B_y を 従来法と本手法を用いて計算した.なお,数値積分には Gauss の積分公式を 用い,積分点は従来法では 2^3 個,本手法では 2^2 個とした.

4.2.2 数値計算結果

要素分割する際の一辺の分割数 N = 6(要素分割数 216)の場合において, 解析解,従来法(式(28))および本手法(式(32))を用いて計算し,得られ た点 pにおける磁束密度 B_y を表1に示す.また,分割数を変化させたとき の解析解とそれぞれの手法によって得られた値との差の推移を図4に示す.

表1より,解析解からの差は本手法の方が従来法に比べて約3倍小さいこ とが分かる.また,図4より分割数を大きくするにつれて,従来法と本手法 ともに解析解に近づく傾向が見られる.しかし,本手法の方が従来法に比べ て,少ない要素分割数で速く解析解に近づくことが分かる.したがって,計 算精度について,本手法の方が従来法よりも優れていることが示された.

一方,従来法では N³ 個の要素に,本手法では 6N² 個の要素に分割して計算を行った.計算時間はこれら要素の数に比例し,従来法では N³,本手法では N² のオーダーとなる.したがって,計算量についても本手法の方が従来法よりも優れていることが分かる.

Method	$B_{y} [\mu T]$	Error $[\mu T]$
Exact	18.859955244	-
Conventional	18.859791737	-1.64×10^{-4}
Present	18.860013684	$+5.84 \times 10^{-5}$

Table 1: The calculated results at N = 6(Number of elements = 216)



Figure 4: The errors of the calculated results

(4) 平成 19 年度進捗状況

今年度は実際の工学問題における適用例を解析した.

5 実際の工学問題における適用例

本手法の実際の工学問題における有効性を確認するため、具体例として円筒 型めっき浴周辺の磁束密度分布を従来法と本手法を用いて計算し、従来法と 本手法における計算精度と計算量の比較を行う.

5.1 解析対象

解析対象となる円筒型めっき浴のモデルを図5,6に示す.図5に示すように, 軸対称な円筒座標系をとり,各軸をr軸およびz軸とする.アノード電極は 銅板であり,めっき浴内は硫酸銅(CuSO₄)で満たされている.シリコンウェ ハについては,実際の工程ではシリコンウェハ表面の二酸化ケイ素(SiO₂) 絶縁膜上に薄い窒化タンタル(TaN)などのバリア層および銅(Cu)のシー ド層をスパッタリングなどで作成し,この上に電気めっきを施す(図6).シ リコンウェハのシード層外周部には吸電ターミナルが設置されており,シー ド層がカソードとなる.

めっき浴を半径 R, 高さ h の円筒容器とし, アノード電極となる銅板の位置を z = h, シリコンウェハのシード層の位置を z = 0 とする. 硫酸銅の電気伝導度を κ とし, アノードの電極抵抗は非常に小さいため無視する.

また、銅の磁化率は -0.086×10^{-6} 、硫酸銅の磁化率は 6.3×10^{-6} であり、 非常に小さいため無視でき、めっき浴内部および外部の透磁率 μ は一様と考 えることができる.磁束密度を測るための磁気センサの位置を $p(\xi, \zeta)$ とする.



Figure 5: The model of the electroplating device



Figure 6: The cross-sectional view of the electroplating device

5.1.1 めっき浴内の電位分布

めっき浴内の電位分布を $\phi^b(r,z)$ とすると、 ϕ^b は次の軸対称性を考慮した円 筒座標系における Laplace 方程式を満足する.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\phi^b = 0$$
(33)

一方, ϕ^b の境界条件は円筒容器の側面が絶縁されていることから

$$\left. \frac{\partial \phi^b}{\partial r} \right|_{r=R} = 0 \tag{34}$$

となる. 式 (33)(34) を満たす解は

$$\phi^{b}(r,z) = k_{0} + k_{z}z$$

$$+ \sum_{i=1}^{\infty} \left(k_{i}^{a} \frac{\sinh(\beta_{i}z)}{\sinh(\beta_{i}h)} + k_{i}^{c} \frac{\sinh(\beta_{i}(z-h))}{\sinh(\beta_{i}h)} \right) J_{0}(\beta_{i}r)$$
(35)

と表すことができる. ここで, $J_n(\beta_i r)$ は n 次 Bessel 関数, β_i は $J_1(\beta_i R) = 0$ を満たす定数であり, k_0 は吸電ターミナルの電位, k_z は印加総電流量によっ て決まる定数, k_i^a, k_i^c はアノードおよびカソードの状態によって決まる定数 である.

5.1.2 シード層内の電位分布

シード層の抵抗が0の場合、シード層は吸電ターミナルと等電位となり、電流は一様に流入する.しかし、実際にはシード層の抵抗は大きく、電流は一

様に流れ込まず,吸電ターミナルが設置されている外周部に流入しやすくなる. このとき,シード層の電気伝導度を κ_w ,厚さを $t (\ll h)$ とすると,容器の底面 z = 0のシード層内の電位分布 $\phi^w(r)$ は次の Poisson 方程式を満足する.

$$\kappa_w t \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \phi^w = -\kappa \frac{\partial \phi^b}{\partial z} \bigg|_{z=0}$$
(36)

一方, ϕ^w の境界条件はウェハの外周部の電位を0とすると

$$\phi^w(R) = 0, \quad \left. \frac{\partial \phi^w}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$
 (37)

となる. 式(36)および(37)は式(35)より

$$\phi^{w}(r) = \frac{\kappa}{\kappa_{w}t} \left\{ k_{z} \frac{R^{2} - r^{2}}{4} + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{k_{i}^{a}}{\sinh(\beta_{i}h)} + \frac{k_{i}^{c}}{\tanh(\beta_{i}h)} \right) \frac{J_{0}(\beta_{i}r) - J_{0}(\beta_{i}R)}{\beta_{i}} \right\}$$
(38)

となる.

5.2 めっき浴周辺の磁束密度分布

めっき浴周辺の磁束密度分布を従来法(式(17))および本手法(式(26))を用いて定式化する.ただし、シード層はめっき浴に対して非常に薄く(t ≪ h)、平面領域と考えることができるため、シード層内の電場の影響による磁束密度は従来法のみによって求める.

5.2.1 従来法による定式化と計算方法

めっき浴内の電流密度 $\mathbf{j}^{b}(r,z)$ およびシード層内の電流密度 $\mathbf{j}^{w}(r)$ はそれぞれ

$$\mathbf{j}^{b}(r,z) = -\kappa \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \phi^{b}}{\partial r} \\ \frac{\partial \phi^{b}}{\partial z} \end{array} \right\}, \quad \mathbf{j}^{w}(r) = -\kappa_{w} \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \phi^{w}}{\partial r} \\ 0 \end{array} \right\}$$
(39)

となるから,式(35)および(38)を用いて求めることができる.

式 (39) を式 (17) に代入すると, $p(\xi,\zeta)$ における磁束密度 $\mathbf{B}(\xi,\zeta)$ は次のようになる. \mathbf{B} の r 軸方向成分 B_r および z 軸方向成分 B_z は

$$B_r(\xi,\zeta) = B_z(\xi,\zeta) = 0, \tag{40}$$

Bのr軸法線方向成分 B_θ は

$$B_{\theta}(\xi,\zeta) = \frac{\kappa\mu}{4\pi} \int_{0}^{R} \left[\int_{0}^{h} \left\{ \frac{\partial \phi^{b}(r,z)}{\partial r} (\zeta-z) C(r,z) - \frac{\partial \phi^{b}(r,z)}{\partial z} (\xi I(r,z) - rC(r,z)) \right\} dz + \frac{\kappa_{w} t}{\kappa} \frac{\partial \phi^{w}(r)}{\partial r} \zeta C(r,0) \right] r dr$$
(41)

となる.ただし、ここで

$$I(r,z) = \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{\{(\xi - r\cos\theta)^2 + (r\sin\theta)^2 + (\zeta - z)^2\}^{\frac{3}{2}}}$$
(42)

$$C(r,z) = \int_0^{2\pi} \frac{\cos\theta d\theta}{\{(\xi - r\cos\theta)^2 + (r\sin\theta)^2 + (\zeta - z)^2\}^{\frac{3}{2}}}$$
(43)

とする.

I(*r*,*z*) および*C*(*r*,*z*) は第1種完全楕円積分および第2種完全楕円積分を 用いて表すことができるが、これらをさらに積分するには数値積分に頼らざ るを得ない.

5.2.2 本手法による定式化と計算方法

めっき浴境界での電位は式(35)より得られ,さらに式(26)を用いてめっき浴 内の電位の影響による磁束密度を求めることができる.シード層内の電場の 影響による磁束密度はシード層が平面領域であることから従来法で求める.

これにより、 $p(\xi,\zeta)$ における磁束密度 $\mathbf{B}(\xi,\zeta)$ は次のようになる. \mathbf{B} のr軸 方向成分 B_r および z 軸方向成分 B_z は

$$B_r(\xi,\zeta) = B_z(\xi,\zeta) = 0, \tag{44}$$

Bのr 軸法線方向成分 B_θ は

$$B_{\theta}(\xi,\zeta) = \frac{\kappa\mu}{4\pi} \left[\int_{0}^{R} \left\{ \phi^{b}(r,0)(\xi I(r,0) - rC(r,0)) - \phi^{b}(r,h)(\xi I(r,h) - rC(r,h)) + \frac{\kappa_{w}t}{\kappa} \frac{\partial \phi^{w}(r)}{\partial r} \zeta C(r,0) \right\} r dr + \int_{0}^{h} \phi^{b}(R,z)(\zeta-z)C(R,z)R dz \right]$$

$$(45)$$

となる. 従来法による式(41)と本手法による式(45)を比較すると, 従来法では二重積分を行う必要があるが,本手法では二重積分を行わずに済む. このことから,数値積分を行う場合において,計算精度および計算量が改善されている.

5.3 数値計算

前節 6.2 において得られた式 (41) および式 (45) に具体的な数値を代入し,実際に計算した結果を比較することで従来法と本手法の計算精度および計算量の違いについて比較する.

5.3.1 数値計算条件

図5において、めっき浴の半径 R = 150 mm、高さh = 10 mm、印加総電 流量 $j_{ave}\pi R^2$ (平均電流密度 $j_{ave} = 100$ A/m²) とし、硫酸銅の電気伝導度 $\kappa = 25$ /Ωm とする.また、めっき浴内部および外部の透磁率 $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m とし、磁気センサは高さ $\zeta = -1$ mm において $\xi = 10$ mm から 200 mm まで 10 mm ごとに計 20 個配置するものとする.シード層の抵抗については、 シード層の抵抗を無視した場合と考慮した場合の 2 つの場合に対して数値実 験を行った.

なお,数値計算において,Bessel 級数の項数はi = 100までで打ち切り,数 値積分の計算には Mathematica を用いた.また,計算機には CPU 2.21 GHz, メモリ 2.00 GB である市販のパーソナルコンピュータを用いた.

5.3.2 数値計算結果

従来法(式(41))および本手法(式(45))を用い,計算して得られためっき 浴周辺の磁束密度分布を図7,8に示す.図7はシード層の抵抗を無視した場 合の従来法による計算結果と本手法による計算結果であり,図8はシード層 の抵抗を考慮した場合の計算結果である.

計算精度に関しては、図7,8に示すようにシード層の抵抗を無視した場合 とシード層の抵抗を考慮した場合の両方とも従来法と本手法による値がほと んど一致していることが分かる.実際の計算結果のそれぞれの値は小数点以 下7桁まで一致しており、本手法による計算結果と従来法による計算結果に ほとんど違いが無いことを確認した.一方,計算量に関しては、シード層の 抵抗を無視した場合では図7の結果を算出するのに従来法で約16秒、本手 法で約2秒かかっている.また、シード層の抵抗を考慮した場合では図8の 結果を算出するのに従来法で約2000秒、本手法で約2000秒かかっており、 本手法によって従来法の約8~10倍の速さで計算できることが分かった.

したがって、実際の工学問題においても、本手法が従来法に比べて優れて いることが示された.



Figure 7: The magnetic flux density distribution (Resistance of seed layer unconsidered)

6 結論

本研究では静電場が Laplace 方程式に支配される場合に対して、ソース電流 の領域積分を評価する境界積分である式 (46)を導出し、新しい静磁場解析 法を開発した.これにより、静磁場におけるベクトルポテンシャルの積分方 程式および Biot-Savart の法則における領域積分をそれぞれ式 (49) および式



Figure 8: The magnetic flux density distribution (Resistance of seed layer considered)

(50)のように境界積分項のみで構成することができた.これらの操作では領域内の電流密度を電位に関する境界積分で表現できることを利用し,静磁場の積分方程式の領域積分項を解析的に計算した.そのため,従来法におけるソース電流の領域積分に起因する数値計算による計算精度と計算量の問題を解決することができた.

さらに、従来法と本手法の比較のため、一様な電流が流れている立方体周 辺の磁束密度を従来法と本手法を用いて計算した.従来法による計算結果と 本手法による計算結果の比較により、計算精度と計算量の両面において、本 手法が従来法よりも優れていることが示された.実際の工学問題における適 用例として、円筒型めっき浴周辺の磁束密度についても従来法と本手法を用 いて計算した.これによって、従来法と本手法による計算精度と計算量の比 較を行い、本手法の有効性を確認した.

$$\mu \int_{\Omega_E} \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \mathbf{j}(\mathbf{q}) d\Omega(\mathbf{q})$$
$$= \kappa \mu \int_{\Gamma_E} \left(\frac{\partial u(\mathbf{s})}{\partial n_E} \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) - u(\mathbf{s}) \mathbf{g}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) \right) d\Gamma(\mathbf{s})$$
(46)

$$\mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) = \frac{\mathbf{p} - \mathbf{s}}{8\pi |\mathbf{p} - \mathbf{s}|} \tag{47}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) = \frac{\mathbf{n}_E}{8\pi |\mathbf{p} - \mathbf{s}|} - \frac{3(\mathbf{p} - \mathbf{s}) \cdot \mathbf{n}_E}{8\pi |\mathbf{p} - \mathbf{s}|^3} (\mathbf{p} - \mathbf{s})$$
(48)

$$\mathbf{A}(\mathbf{p}) = \int_{\Gamma_M} \left(\phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \frac{\partial \mathbf{A}(\mathbf{q})}{\partial n_M} - \mathbf{A}(\mathbf{q}) \frac{\partial \phi^*(\mathbf{p}, \mathbf{q})}{\partial n_M} \right) d\Gamma(\mathbf{q}) + \kappa \mu \int_{\Gamma_E} \left(\frac{\partial u(\mathbf{s})}{\partial n_E} \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) - u(\mathbf{s}) \mathbf{g}(\mathbf{p}, \mathbf{s}) \right) d\Gamma(\mathbf{s})$$
(49)

$$\mathbf{B}(\mathbf{p}) = -\frac{\kappa\mu}{4\pi} \int_{\Gamma_E} \frac{\mathbf{n}_E \times (\mathbf{p} - \mathbf{s})}{|\mathbf{p} - \mathbf{s}|^3} u(\mathbf{s}) d\Gamma(\mathbf{s})$$
(50)

References

- Kojima, F. et al., Computational Method for Crack Reconstruction of Steam Generator Materials using FEM-BEM Scheme in Inverse Applied Electromagnetics, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.63, No.612, (1997), pp.2650-2656.
- [2] Aoki,S. et al., Boundary Element Analysis on Corrosion Problems, (1998), pp.24-55, Shokabo.
- [3] Ridha,M. et al., Boundary Element Simulation for Identification of Steel Corrosion in Concrete Using Magnetic Field Measurement, *Corrosion*, Vol.61,No.8, (2005), pp.784–791.
- [4] Tanaka, M. et al., Boundary Element Method, (1991), pp.23–48, Baifukan.
- [5] Sakai,Y. and Yamasita,A., Magnetostatic Analysis by Coupling Finite-Element Method and Boundary Element Method, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.59, No.557, (1993), pp.211-218.
- [6] Honma, T. et al., Numerical Electromagnetic Dynamics (in Japanese), (2002), pp.1–24, Morikita Syuppan.
- [7] Tanaka,Y. and Amaya,K., Development of Method for the Magnetostatic Analysis without Region Integration, *Proceedings of the 17th Computational Mechanics Conference*, No.04-40, (2004-11), pp.447-448.

3.2.5. 複合材料における材料同定

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.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.そこで本研究では、これまでに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した.本手法 の開発により、複合材料の同定を少ない試験片から短時間に行うことが可能と なった.

材料同定における効率の向上が見込めるようになった一方で、本手法では試 験片を連続体として考慮することから、材料同定のための測定が試験片境界表 面や内部に及ぶ.そのため、測定誤差を無視することができない.研究目標お よび計画は、これまでのものからさらに発展させて、測定誤差をモデル化させ、 どのように除去するかについて、カルマンフィルタのような線形・正規分布方 程式の問題からさらに非線形・非正規分布方程式に及ぶまで確率的材料同定の 定式化を行い、複合材料の同定手法の一般化を図ることとする.

(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,試験機の性能および測定誤差を統合 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に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

3-1 確定的手法による材料同定

複合材料を構成する異方性材料の板の一枚が

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \text{ or } {}^{\{M\}} \boldsymbol{\sigma} = {}^{\{M\}} \boldsymbol{Q} {}^{\{M\}} \boldsymbol{\varepsilon}, \qquad (1)$$

で表される場合を考える.ここで σ , **Q**, ϵ は応力,線形係数及びひずみを, $\{M\}$ は材料座標系を表す.さらに非ゼロの材料定数を $\{M\}$ **q** = $[Q_{11}, Q_{22}, Q_{66}, Q_{12}]^T$ とすると、大域的座標系における応力---ひずみ関係は

で表される.

試験片に加えられた仕事が₩,変換された内部ひずみエネルギーがUの場合, ポテンシャルエネルギーの増分は

 $\delta \Delta \Phi = \delta \Delta U - \delta \Delta W ,$ (4) で与えられる.ここで弾性変形においては \mathbf{P}_i , \mathbf{u}_i を外力,変位,また $\mathbf{q}_M = {}^{M}\mathbf{q}$ とした場合

$$\delta\Delta U = \frac{1}{2} \int_{V} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{T} \mathbf{Q} \left(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{q}_{M} \right) \Delta \boldsymbol{\varepsilon} dV = \left\{ \frac{1}{2} t \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} \int_{A} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{i} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{j} dA \mathbf{h}_{ij} \left(\boldsymbol{\theta} \right) \right\} \mathbf{q}_{M}, \quad (5a)$$

$$\delta \Delta W = \frac{1}{2} \sum_{i} \Delta \mathbf{u}_{i}^{T} \Delta \mathbf{P}_{i} , \qquad (5b)$$

となる.ここでt, Aは試験片の厚みと断面積である.従って, K回に測定にお いて、エネルギー保存則により外部仕事が全て内部ひずみエネルギーとして蓄 えられた場合,次の線形方程式が構築される.

$$\mathbf{g}\left(\Delta \boldsymbol{\breve{\varepsilon}}^{k};\boldsymbol{\theta}\right)^{T}\mathbf{q}_{M} = \delta \Delta \boldsymbol{\breve{W}}^{k}, \forall k \in \{1,...,K\}$$

$$\tag{6}$$

ここでāは変数aの測定値を表す.

従来の確定的手法ではK個の線型方程式を並べて線形問題を構成し $\mathbf{G}(\mathbf{A} \cong 1:K)$

$$\mathbf{G}\left(\Delta \boldsymbol{\breve{\varepsilon}}^{1:K};\boldsymbol{\theta}\right)\mathbf{q}_{M} = \mathbf{w}^{1:K}$$

$$\tag{7}$$

代数幾何学的に方程式を解く.

$$\mathbf{q}_{M} = \mathbf{G} \left(\Delta \breve{\varepsilon}^{1:K}; \boldsymbol{\theta} \right)^{+} \mathbf{w}^{1:K}$$
(8)

ここで $\mathbf{G}(\Delta \breve{\varepsilon}^{:K}; \theta)^{+}$ は $\mathbf{G}(\Delta \breve{\varepsilon}^{:K}; \theta)$ の擬似逆行列である.

3-2 確率的手法による材料同定

確率的材料同定として、これまでに開発されたカルマンフィルタによる手法 を説明する.カルマンフィルタによる同定では、正規分布の不確かさを持つ線 形状態遷移モデルと線形測定モデルが構築されなければならない。材料定数が 不変の値であることから,線形状態遷移モデルは

$$\mathbf{q}_M^{k+1} = \mathbf{I}\mathbf{q}_M^k + \tilde{\mathbf{q}}_M^k \tag{8}$$

で表される.ここで $\tilde{\mathbf{q}}_{M}^{k}$ は製造過程などで生ずる正規分布のノイズ $N(\mathbf{0}, \mathbf{S}_{a}^{k})$ を表 す.一方で線形測定モデルは式(6)から

$$\delta \Delta \widetilde{W}^{k} = \mathbf{g} \left(\Delta \varepsilon^{k}; \boldsymbol{\theta} \right)^{T} \mathbf{q}_{M} + \delta \Delta \widetilde{W}^{k}$$
⁽⁹⁾

と表される.ここで $\delta \Delta \tilde{W}^{k}$ も正規分布 $N(0, S_{W}^{k})$ を示す.真のひずみ増分 $\Delta \varepsilon^{k}$ は測定値からは導出できないため、これを測定値 $\Delta \varepsilon^{k}$ で近似すれば、線形測定モデルは

$$\delta \Delta \tilde{W}^{k} = \mathbf{g} \left(\Delta \tilde{\varepsilon}^{k}; \boldsymbol{\theta} \right)^{T} \mathbf{q}_{M} + \delta \Delta \tilde{W}^{k}$$
(10)

となる.

カルマンフィルタは状態遷移モデルと測定モデルに基づいて予測と修正を交互 に繰り返す.システム行列がI,測定行列が $\mathbf{g}(\Delta \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^k; \boldsymbol{\theta})^T$ であることから,予測に よる平均と共分散は

$$\mathbf{q}_M^{k|k-1} = \mathbf{I}\mathbf{q}_M^{k-1|k-1} = \mathbf{q}_M^{k-1|k-1}$$
(11a)

$$\mathbf{S}^{k|k-1} = \mathbf{I}\mathbf{S}^{k-1|k-1}\mathbf{I}^T + \mathbf{S}_{\mathbf{q}}^{k-1} = \mathbf{S}^{k-1|k-1} + \mathbf{S}_{\mathbf{q}}^{k-1}$$
(11b)

修正による平均と共分散は,

$$\mathbf{q}_{M}^{k|k} = \mathbf{K}^{k} \left(\delta \Delta \widetilde{W}^{k} - \mathbf{g} \left(\Delta \widetilde{\varepsilon}^{k}; \boldsymbol{\theta} \right)^{T} \mathbf{q}_{M}^{k|k-1} \right)$$
(13a)

$$\mathbf{S}^{k|k} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}^{k} \mathbf{g} \left(\Delta \breve{\varepsilon}^{k}; \boldsymbol{\theta}\right)^{T}\right) \mathbf{S}^{k|k-1}$$
(13b)

となる. ここでカルマンゲインK^k は $\mathbf{K}^{k} = \frac{\mathbf{S}^{k|k-1}\mathbf{g}(\Delta \breve{\varepsilon}^{k}; \theta)}{\mathbf{g}(\Delta \breve{\varepsilon}^{k}; \theta)^{T} \mathbf{S}^{k|k-1}\mathbf{g}(\Delta \breve{\varepsilon}^{k}; \theta) + S_{W}^{k}}$ (12)

となる. カルマンフィルタによる確率的同定をブロック線図に表すと, 図 3.2.5.1 のようになる.



図 3.2.5.1. カルマンフィルタによる確率的材料同定

3-3 確定的手法と確率的手法による数値比較

人工的にノイズを加えた測定値から確定的手法と確率的手法を用いて同定し た結果を図 3.2.5.2 と図 3.2.5.3 に示す.まず図 3.2.5.2 の確定的手法において,ノ イズがない場合(緑)には即座に厳密解が同定され,ノイズがわずかにある(赤) においても比較的良好な結果が現れている.しかしノイズが多い場合には,誤 差がほとんど減ることなしに安定して残っていることが伺える.これは,確定 的手法が過去に蓄積されたノイズを除去しないため,一旦測定値を支配したノ イズがそのまま同定結果を支配することに起因する.



一方でカルマンフィルタを用いた確率的手法によるパラメータ同定においては、 同定値が細かく揺れながら誤差を減らして行っているのが伺える.この傾向は ノイズが多い場合でも同じである.カルマンフィルタでは当初事前知識が大き な役割を果たすが、測定が進むにつれ測定値が推定の修正を行っていく.その ため事前知識で存在した大きな不確かさは徐々に除去され、測定値を重視した 細かい同定が施される.そのためノイズが多い場合には、確率的手法によるパ ラメータ同定のほうが有力であると言える.



(4) 平成 19 年度進捗状況

平成19年度の研究では、確定的手法に加え、カルマンフィルタに基づく確率 的手法による複合材料の材料同定を可能にした.両者を比較した結果、測定ノ イズが多い問題においては確率的手法を用いた方が有用であることが分かった. これまでですでに、確率的手法における基本的な理論の枠組みは完成したが、 現在応用できる問題は、均質材料の線形材料定数同定に限られ、境界表面測定 の際の正規分布ノイズしか除去することができない.今後はまず、ひずみ測定 におけるノイズの除去が行えるように、そしてさらには正規分布以外のノイズ を除去できるように定式化を改良する.そのためには、非線形・非正規分布の 推定が可能なベイズ推定へと推定手法をより一般化させていく必要がある.ま た一般化に成功した際には、非線形挙動のモデリングおよび非均質材料のモデ リングに挑戦していくつもりである.

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、大規模構造問題における最適化の研究、き裂と接触を含む構造の最 適化の研究を行っている.

大規模構造問題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 を扱ってきたが、その手法を構造以外の各種連成問題に拡張した. 接触とき裂を含む 構造の最適化では、研究の第一歩として接触とき裂を含む構想の解析技術の研究を 行った.

3.3.2. 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

計算力学的手法は、実験では困難な現象のシミュレーションや詳細なデータが取得できることから、機能に基づく構造の性能を評価する上で重要な役割を演ずるようになってきた.さらに性能を高めるためには、現状モデルで発生している現象が望みの現象に近づくように構造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位相を含めた形状を最適化する手法を開発することを目標とする.

(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.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,楕円型偏微分 方程式の境界値問題用に開発されたプログラムが利用できることから,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.

一方,ノンパラメトリック位相最適化問題に関する研究はデンマークなどの応用数学 者や工学者らによって密度を変化させることで最適な位相を近似的に求めるいくつか の方法が提案されてきた.しかしながら,これらの方法においても、チェッカーボード 現象などの数値不安定が発生することが問題とされてきた.これまでは、フィルタを用 いた平滑化処理が使われてきた.本研究では、形状最適化問題の解法と同様の原理 に基づく解法を開発する. その解法によれば, 数値不安定が原理的に防止できること が予想される.

(3) 研究内容

上記目標に対して、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 形状最適化問題の解法(力法、あるいは形状最適化問題のための H¹ 勾配法)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、その解法を各種連成問題にも適用して、大規模な構造連成問 題を解くことのできるプログラムを開発する.

一方,連続体の位相を設計対象にした最適化問題に対しては,均質化法ある いは密度法により密度と材料特性が関連付けられた下で最適な密度分布を求め る問題として定式化されてきた.その際,密度を有限要素ごとに離散化する方 法ではチェッカーボード現象やメッシュ依存性などの数値的な不安定が現れる ことが知られてきた.本研究では,形状最適化問題において我々が開発した H¹ 勾配法を位相最適化問題にも適用することによって,正則な位相最適化問題の 解法を開発する.

(4) 平成 19 年度進捗状況

平成19年度は、形状最適化問題に対しては、振動する構造から放射される音 場を対象にした形状最適化問題の解法を開発した.本研究では、振動する構造 として、ギターなどの楽器を取り上げ、構造の固有周波数と体積を制約した下 で、放射音圧を最大化する問題に取り組んだ.図3.3.2.1にギターの弦の付け根 を 75~150[Hz]の単位力で加振した場合の音場外側境界における音圧パワー積分 を最大化する問題に対する有限要素モデルと形状変動後の結果を示す.音場外 側境界では Sommerfeld の無反射条件を仮定した.固有周波数の制約は今後の 課題として残された.



(a) 楽器と音場の有限要素モデル (b) 最適化に向う形状変動 図 3.3.2.1. 構造音場連成系に対する放射音圧最大化問題の解析例

一方,連続体の位相最適化問題においては,形状最適化問題の解法で用いた H^1 空間の勾配法の考え方を取り入れることによって,位相最適化問題のための H^1 勾 配法の理論を示し,プログラムを開発した.図 3.3.2.2 に片持ちはり状 3 次元連続体に 対する密度分布の解析結果を示す. L^2 勾配法では,密度を有限要素節点値で離散 化した下で密度勾配を計算し,直接勾配法を適用した.それに対して, H^1 勾配法では, 密度勾配を外力項にした楕円型偏微分方程式の境界値問題を解いて,その解を密 度変動として用いている.その結果, H^1 勾配法の解析結果においては, L^2 勾配法の 解析結果に見られるような中間密度の領域での密度の波打ち現象が抑制されている. しかしながら,密度を上限下限内に収める処理が不十分であるために, H^1 勾配法の 場合にも密度の高い領域での波打ち現象が現れている.密度制約の対処法に関して は,今後の課題として残された.現在,主双対内点法を用いた方法を検討している.



図 3.3.2.2. 位相最適化問題の解析例

3.3.3. き裂と接触を含む構造最適化の研究

(1) 目標·計画

き裂と接触を含む構造は、構造のなかでも信頼性のキーとなることが多い. そこでき裂と接触を含む構造の構造最適化技術の開発を目標としている.その ためには、まず解析技術の確立が急務となる.そこで、本年度は、研究の第一 歩として、接触を含むき裂の解析技術を研究した.今後は、この技術をベース にして最適化への展開を図る予定である.

(2) 意義・国際社会との比較

き裂と接触を含む構造は、構造のなかでも信頼性のキーとなることが多い.したがってこの部分の構造最適化は重要なテーマである.き裂に関しては、非常に多くの研究が国際的になされているが、三次元を含むき裂進展の高精度な解析技術はまだ不十分といえる.本研究は、き裂進展解析にむいた手法であるフリーメッシュ法をベースにして、接触を含むき裂の解析技術を研究するものであり、実用上大きな意味をもつと考える.

(3) 研究内容

き裂を有する構造物には様々な荷重が同時に作用する.そのため,引張荷重 のような単純な荷重だけではなく,複雑な負荷を受けるき裂の進展挙動につい て解析することが重要であるが,その際にき裂が閉口し,き裂面同士に接触が 生じることがある.メッシュレス法の一種であるフリーメッシュ法は、ロバス トなリメッシング機能を持ち,き裂問題に特に有効な手法である.これまでに 二次元のき裂進展システムが開発されているが,き裂表面の接触については考 慮されていない.そこで本研究では、フリーメッシュ法を用いてき裂面の接触 を考慮した解析を行う技術を提案し,簡単な数値解析を実施した.

(4) 平成 19 年度進捗状況

フリーメッシュ法は有限要素法を基本とした解析手法で,各節点ごとにその 周囲の節点群を用いて一時的に局所的な要素を生成する.局所要素の要素剛性 マトリクスのうち,中心節点に関する成分のみを計算し,全ての局所要素の成 分を足し合わせることで中心節点に対応する全体剛性マトリクスの成分を得る.



⊠ 3.3.3.1. Concept of Free Mesh Method

リーメッシュ法き裂進展解析では、破壊経路が要素分割に依存しない移動要素法に基づいた解析を行う.具体的には、外部境界節点とき裂進展量を入力として与え、き裂の進展に合わせて境界節点と内部節点を更新しながら解析を進める.内部節点の発生についてはき裂先端の応力場の特異性を考慮し、図 3.3.3.2 に示すようにき裂先端部は同心円状、それ以外の部分は格子状に発生させる.



⊠ 3.3.3.2. Moving nodes around a propagating crack tip

局所要素の生成には、多階層バケットと包装法を組み合わせた手法を用いた. この手法は、き裂のような鋭いくさび形の形状や、節点密度差の大きい場合で もロバストに局所要素が生成できる.フリーメッシュ法を用いたき裂進展解析 の例として、三点曲げ試験を扱う.試験片形状および計算条件を図 3.3.3.3 に示 す.荷重は静的荷重とし、混合モードの破壊を生じさせるため、試験片中央か ら 2.5mm 離れた位置に荷重を与えた場合の解析も行った.き裂進展方向は最大 周方向応力説により決定する.解析結果から得られた破壊経路を図 3.3.3.4 に示 す.



 \boxtimes 3.3.3.3. Three points bending test



⊠ 3.3.3.4. Crack path and generated local mesh (b)

図 3.3.3.4 から,き裂が荷重点の方向に進展するという挙動が再現できている ことがわかる.

き裂面の接触を考慮するためのフリーメッシュ法接触解析について以下に示 す.接触している物体1と2の接触面上の接触力のなす仮想仕事を考慮し、仮 想仕事の原理による静的接触問題の基本方程式を以下に示す.



 \boxtimes 3.3.3.5. Local elements in contact analysis

連続する接触境界についてはマスター・スレーブアルゴリズムを採用した. す なわち,物体1の節点(hitting node)と,これから物体2のセグメント(target segment)上に垂直に下ろした垂線の足の点(target point)との間の接触に置き換え て考える.

接触面に接触条件を考慮するため,接触特殊要素を挿入する.ここで用いる 接触特殊要素は接触面に一辺を持つ三角形要素である.中心節点が接触面上の 節点であった場合,フリーメッシュ法における局所要素群は図 3.3.3.5 のように 接触特殊要素を含むものとする.

き裂面の接触を考慮する場合には、従来のき裂進展解析における各ステップ での計算時、き裂面間の領域に前節で述べた方法により接触を定義する.適用 事例として、図 3.3.3.6 に示すき裂を有する試験片の解析を行った.き裂面を接 触させるため二軸荷重を与え、摩擦は考慮しないものとした.応力拡大係数は 応力外挿法により算出した.図 3.3.3.7 に初期き裂長さに対する応力拡大係数の 変化を示す.





Generated local mesh (a=2mm)

図 3.3.3.6. Crack under combined loading



図 3.3.3.7. Stress intensity factor vs. crack length

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) クラスター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 19 年度は特に (2) について実際にシステムを構築したので,これについて以下に述べる.

3.4.2. 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

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 が国に入ってくることが多かった.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、これまでにも述べたように、 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であ るべきかについて、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) 平成 19 年度進捗状況

まず,H18年度には図 3.4.2.1.に示すような可視化処理の概念設計を行っていた.



図 3.4.2.1. 新しい可視化処理の概念

これは、従来の可視化ソフトウェアが、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 セスをとっているのに対し、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 という動作をするものである(Vistrace はこれまでに開発したツールである.前年度の年 報を参照されたい).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ていど間引くか、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.

これに基づいて、可視化システムの構築を行った.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 3.4.2.1.のようにすることを 考え、プログラム開発を行った. その成果の一部は H19 年度に国内および国際 学会で発表したが、その概要は以下の通りである.

まず,図 3.4.2.2 のような 379×401×131 の格子の図を表示するのに従来はそのすべてをメモリーに載せるため約 250MB のメモリーを必要としたが、本システムではわずかにその 1/100 で表示を可能にしている(図 3.4.2.3.).



図 3.4.2.2. 計算格子の表示

grid[0]: filename: format:U-form; Single_Grid; 3D; Single precision Zone Js Je Jt Ks Ke Kt Ls Le Lt file 1: 379 ×401 ×131 1 379 1 1 401 1 1 131 1 fort.60 Work Area Used : 238910988 Bytes

Total Work Area Used: 238910988 Bytes

(a) 従来のシステム

grid[0]: filename: format:U-form; Single_Grid; 3D; Single precision Js Je Jt Ks Ke Kt Ls Le 1 379 1 1 401 1 1 131 file Lt Zone 1: 379 ×401 ×131 1 fort.60 on all memory *** Jt Ks Ke Κt No: Js Je Ls Le Lt Zone | size 1 379 1823748 Bytes, 1 401 [1]| 2 1: 1 1 1 1 1 2: 379 379 1 131 630372 Bytes, 1 1 401 1 1 [1]| 1 2454120 Bytes Total Work Area Used:

(b) 本システム

図 3.4.2.3. 本システムと従来のシステムでのメモリー使用量の比較

また,図 3.4.2.4.に示すのは 1024×1024×1024 の格子による計算結果で,ファイルを16分割しても計算格子が約0.8MB,計算結果が約1.3MBの大きさであるが,512MBのメモリーで可視化が可能である.また表示後もマウスでの移動・拡大・回転が容易にできている.



図 3.4.2.4. 大規模解析の表示例

来年度は、これをより使い勝手のよいものにすると共に、他のサブプロジェクトで開発されているソフトウェアとの連携を視野に、複数の物理に対する可視 化を検討していく予定である.

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. このことからもハードウェアとしてコンピュ ータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる.

その一方で、これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては、その開発スピードもソフトウェアの品質も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
- (5) 大規模解析結果の効率的な可視化手法について

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ら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 に電車車両内部のエアコンによる流れ、新型サッカーボール(チームガイスト)周りの流れ解析結果を示す.

(4) 平成 19 年度年度進捗状況

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、プレ処理システムとしてこれまで対応していなかった Gridgen を用いて作

成した形状データからの解析を行うためのツール類を整備した.これにより従来不可 能であった ADVENTURE_CAD で対応できない複雑形状の解析が可能となった。ま た,ポスト処理システムとして,大規模可視化グループが開発したポスト君の非構造格 子版(ゥポスト君)での可視化が可能となった。



図 3.5.2.1. 電車車両内部のエアコンによる流れ



図 3.5.2.2. フリスビーの周りの流れ

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 立し,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) 平成 19 年度進捗状況

本年度は、地球シミュレータ上での ADVENTURE_Solid を用いた,2 億自由度 BWR モデルの耐震解析については、模擬地震波による地震応答解析を行い、2,048 プロセッサを用いて、継続時間 10 秒(時間ステップ数 1,000 回)を約 26 時間、1 タイム ステップ当り 67.5 秒での解析に成功した.これは、前年度から 10 倍以上の高速化を 実現している.また、その解析結果の精度については、多質点系モデルとの比較や設 計者を交えて検証中である.

CFRP 高圧水素タンクモデルの耐圧解析については,斜交積層板複合材料を考慮 した解析システムを開発し,簡略化したCFRP高圧水素タンクモデルの解析を行った. 繊維層を5層としてた簡易モデルでは,73万自由度の問題の弾性解析を8プロセッ サ用いて行い,解析時間 103 秒,使用メモリ 8.4GB,性能 11.2Gflops,ベクトル化率 96.3%の性能を確認することができ,繊維層を 50 層まで考慮した 1,000 万自由度級の 新しいモデルについても線型解析を実施し,モデルのチェックを行った.解析結果より, タンクの CFRP 層の局所座標系は,フープ巻き部分の強化軸は周方向,ヘリカル巻き 部分は接線方向(円筒部では周と直角方向)に正しく設定されていることが確認され, 今後のモデルの詳細化と,弾塑性解析の準備を整えることができた.(図 3.5.3.1)

解析結果の可視化について,並列サーバサイド可視化システムを導入することにより, 100枚の画像を出力するのに,1,800万自由度モデルを8プロセッサを用いて3.6分, 2億自由度のモデルは32プロセッサを用いて7.5分で実現することができ,可視化に ついても解析部分と同様に,地球シミュレータの遠隔利用において,大規模問題を実 用的に扱えるシステムが構築された.





図 3.5.3.1. CFRP 圧力容器モデル (上:六面体要素モデル、左下:ミーゼス応力,右下:y方向変位).

3.6. 統合化

3.6.1. 統合化に関する研究の概要

本センターの研究プロジェクト「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」の目的の1つは、本センターで開発した手法を組み合わせて様々な構造物・機器の構造健全性向上に資することである.このためには、単に個々の要素技術を開発するだけではなく、それらを組み合わせて使えるような仕組みが必要であると考えられる.そこで、研究プロジェクト3年目の平成 19 年度から、「統合化サブプロジェクト」を立ち上げ、上記目的のための研究・開発を行う.

3.6.2. 統合化のための予備検

平成 19 年度は、統合化に向けてどのような形態が可能か、またそのために来年度 以降どのような研究・開発が必要となるかを検討するための準備として、各サブプロジ ェクトで開発された、あるいは開発中の個々の手法について調査を行った.

調査は2回に分けて行い,まず,1回目は開発しているソフトウェアごとに,使用する 計算機の規模や,解析手法(差分法/有限要素法など),出力される物理データの種 類などを中心に調査を行った.その目的は,それぞれのソフトウェアの出力を統一的 に表示するビュワー(可視化ソフトウェア)を想定してその実現可能性を調べることであ る.アンケートの詳細は省略するが,結果として,有限要素法をベースとする手法が大 半であることが分かったので,そのようなビュワーを開発できる可能性が確認できた.

次に、ソフトウェア間の関連やデータの関係を調べるアンケートを行った.ここでは、 個々の解析手法やソフトウェアの入出力に焦点を当て、その関連性を調べた.この調 査は現在進行中であるが、どのソフトウェアが関連しているか、またそれらを連携して 用いるのに開発すべきものがあるかなどを明らかにしていく予定である.
4. 産学協同活動

4.1. (株)日立製作所機械研究所との連携

(1) 目標·計画

近年,製造業では解析主導設計による製品開発のスピードアップと設計上流段階での品質作り込みが最重要課題として進められている.3次元CADを中心としたCAD ーCAE一貫システムの開発もその一環である.さらに最近は,製品の3次元CADデ ータが作成される前の構想設計段階からCAE解析を適用したいというニーズも高まっ ており,過去にCAE解析のために作成した類似形状の解析メッシュデータやX線CT 装置で撮像した形状データをCAE解析で活用するためのメッシュ生成技術の開発が 求められている.

本研究では従来の3次元CAD(ソリッドモデル)を対象としたメッシュ生成では無く, 3次元形状撮像から得られるSTLデータやCAE解析で使用した解析メッシュデータ 等のメッシュモデルとして表現された形状データを主体としたメッシュベースのCAEシ ステムの開発を目的としている.図1は従来のCAD連携CAEシステムとメッシュベー スCAEシステムの概要を示している.

メッシュベースCAEシステムを実現するためには、利用者の要求に応じて自由にメ ッシュモデルの形状を変更する技術(メッシュモーフィング技術)と、CAE解析で利用 可能なレベルにメッシュの品質や粗密を制御する技術(メッシュ粗密品質制御技術)の 開発が不可欠である.本研究ではX線CT撮像データをCAE解析に利用することを当 面の目標として、後者のメッシュ粗密品質制御技術の研究を行った.

今後はメッシュモーフィング技術と本研究のメッシュ粗密品質制御技術を組み合わ せることにより、メッシュモデルとして表現された様々な形状データを入力としたメッシュ 生成システム(図2)を開発することで、設計上流段階でのCAE解析を実現していく計 画である.



図1 解析主導設計のためのCAEシステム



(2) 意義・国際社会との比較

形状表面を表現する三角形メッシュデータ(STLデータ)のメッシュ粗密制御技術は コンピュータグラフィックス分野において様々な手法が提案され確立されている.しか しながら, CAE解析に必要なメッシュ品質を考慮した粗密制御が課題となっている.ま た, ソリッドメッシュ(四面体メッシュ, 六面体メッシュ)への拡張も課題である.

本研究では形状表面の三角形メッシュと形状内部を含めた四面体メッシュのメッシュ 1 粗密品質制御技術を開発した.特に,四面体メッシュへの展開は過去に報告事例 がなく,先進的研究であると言える.

(3) 研究内容

形状表面の三角形メッシュ及び形状内部の四面体メッシュの要素数を低減し要素品 質を改善するメッシュ粗密品質制御技術について述べる. CG表示用のメッシュデータ や3次元形状計測で得られたメッシュデータを解析に利用するためには下記の課題が ある.

①解析精度に悪影響を及ぼす品質の悪い要素の改善

②解析時間の増大を抑えるための要素数の低減

③表面メッシュデータから形状内部のメッシュ生成

そこで本研究では高密度なメッシュデータからCAE解析で利用可能な要素品質や要素数を満足する解析メッシュに変換する多重解像度表現(MRR:Multi-Resolution

Representation)メッシャーを開発した.

高密度メッシュデータの低解像度化処理では,三角形(四面体)の稜線を1点に縮 退させるエッジコラプス(Edge Collapse)を用いている. 縮退する稜線を共有している 三角形(四面体)をエッジコラプスで除去することで要素数を低減する. またエッジコラ プスの前処理として下記の条件を事前にチェックすることで,エッジコラプスによる低解 像度化処理の過程で同時に要素品質を改善することができる.

- ① 縮退した点を共有する三角形(四面体)の品質
- ② 縮退した点の形状トレランス
- ③ 縮退した点を共有する三角形(四面体)の数
- ④ 縮退した点を共有する三角形(四面体)の要素サイズ

図3に本システムを用いた要素数低減と要素品質改善の例を示す.四面体要素の 品質はストレッチ(四面体の最大辺長と内接球の径の比を正規化した値)で評価され る.ストレッチが0ならば4頂点が全て同一平面上にある品質の悪い四面体になり,スト レッチが1ならば正四面体になる.一般的な構造解析プログラムでは0.1以上のストレ ッチが要求される.この例では要素数が9万でストレッチ0.2以下の要素が45個存在 する四面体メッシュに対してエッジコラプスにより要素数を2万5千まで低減した.ストレ ッチ0.2以下の要素は低減したが依然として12個が残った.これはメッシュが粗くなる とエッジコラプスによる品質改善の効果が低減するためである.そこで,この12個の品 質の悪い要素の近傍をデローニ分割で細分化し、細分化した領域に対して再度エッ ジコラプスで要素数を低減することで局所的に要素品質を改善した.その結果、要素 数を変えずにストレッチ0.2以下の要素を完全に無くすことができた.



図3 四面体メッシュの要素品質改善

(4) 平成 19 年度進捗状況

本年度はX線CT装置の現物撮像データからCAE解析用メッシュを作成するシステムに本研究成果を適用することで、MRRメッシャーの効果を検証した.図4は撮像データからメッシュ

生成までのフローを示したものである.また,図5はSTLデータから解析メッシュを生成する従 来手法とMRRメッシャーによるメッシュ生成例を比較したものである.少ない要素数で形状の エッジ部分が精度良く再現できており,形状再現性とメッシュ品質の点で本システムは優位で あることが確認できた.



図4 X線CTデータからの解析メッシュ生成フロー



図5 MRRメッシャーを用いたメッシュ生成例

4.2. 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.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,システムのユーザー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 4.2.1 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に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 4.2.1. 複雑形状のき裂を挿入した要素分割モデル

4.3. 富士通(株)との連携

大規模可視化サブプロジェクトでは、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する予定で準備を進めていたが, H19年度からwebによる公開を始めた. 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、Vistrace は様々なデータ形式に対応するものであるが、本センターのプロジェクトで多く用いられている有限要素解析には不向きなところがあった. 具体的には、C 言語等で動的にメモリーを確保している場合に、その領域を参照するのが難しかった. そこで、H19年度は、この問題に対応すべく Vistrace を改良し、動的なメモリー確保に対応するよう開発を行った. H20年度は実際にこれを利用したプログラム開発を行いたいと考えている.

4.4. 東京理科大との連携

東京理科大学の早瀬研究室と流れのある配管内の腐食を同定する問題につい て共同研究をおこなっている.配管は各種プラントや上下水道・ガスなどの社 会インフラの構成部材として広く利用されており,配管の腐食による事故の防 止と保守コストの低減を図るために,精度よく配管の腐食を同定する手法を開 発することを目標としている.本年度は,逆問題の観測方程式のモデル化つい て検討することを目標とした.中性環境における金属部材の腐食は,溶存酸素 によるカソード反応が支配的であるので,溶存酸素の金属部材表面への拡散速 度が,カソード反応の律速反応になっていると考えられる.そこで,金属部材 近傍の流体の速度勾配,および腐食反応を律速している溶存酸素の濃度分布に 着目して,流れのある配管内の腐食を精度良くシミュレーションできるか考察 を行っている.詳細は 3.2.3 節を参照して頂きたい.

4.5. 東京医科歯科大学との連携

大規模可視化サブプロジェクトの一環として, 平成 18 年度末より, 医療画像を計算 力学に応用する研究を東京医科歯科大学血管外科と連携して行っている. 平成 19 年 度は, その第1段階として CT 画像から血管形状を自動的に判別し, 幾何処理を取り 出す手法について研究を行った.

医療現場では、CT 等の画像情報を利用することが盛んになっているが、画像自体は2次元であるため、そこから3次元情報を抽出するには様々な処理が必要となる.ここでは、大規模可視化サブプロジェクトで行っている可視化技術が、医療画像の処理にも応用できるのではないかと考えて共同研究を始めた.その成果として、CT の断層画像を重ねて3次元データとして扱うことで、血管の3次元幾何情報を取り出すことができた. 今後は、これを診断や治療計画に利用するための研究・開発を予定している. 図 4.6.1.は抽出した血管の例である.



図 4.6.1. 抽出された血管

5. 国際協力

5.1. 第4回計算力学フォーラム (バンギ)

第4回計算力学フォーラムを19年5月15,16日にNational University of Malaysia (UKM, Universiti Kebangsaan Malaysia, <u>http://www.ukm.my/</u>)で開催した. CCMR メンバー7名,日本の他機関からの研究者4名,インドネシアからの研究者1 名,National University of Malaysia の研究者9名がそれぞれ計算力学に関する講 演を行い,活発な討論がなされた.なお,National University of MalaysiaのKamal Ariffin 教授は20年度からCCMRに研究支援者として参加する予定である.

5.2. 第5回計算力学フォーラム(パダン)

第 5 回計算力学フォーラムを 19 年 5 月 18, 19 日に開催された The 5th International Conference on Numerical Analysis of Engineering problems 2007(NAE2007), Padang, West Sumatera, Indonesia,

URL:http://www.ic-star.usu.ac.id/nae2007 の中で行った.5.3で述べた第4回計 算力学フォーラムに参加したCCMRメンバー7 名および日本の他機関からの研 究者4名全員が研究成果を発表し、インドネシアの北スマトラ大学のBustami教 授はじめ多くの研究者と活発な討論を行い、情報交換を行った.

5.3. 第6回計算力学フォーラム(ウルムチ)

第6回計算力学フォーラムを19年8月27-30日に開催された The 7th International Conference on Fracture and Strength, Far East and Oceanic Fracture Society (FEOFS2007), Urumuqi, China,

<u>URL:http://kikuanni.me.noda.tus.ac.jp//FEOFS2007/index.html</u>の中で,CCMR,新 疆大学,東京理科大学の3機関合同(International Conference on Computational Science and Engineering)で行った.参加者はCCMRから大学院生2名を含め7名, 新疆大学から4名,東京理科大学から9名であった.テーマは砂漠化に関する 流体力学,分子動力学,大規模解析法,破壊力学,逆解析など多岐にわたった. 活発な討論が行われ,今後の研究に有用な情報が得られた.

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11名と大学院生3名とで週1回程度セミナーを開き、進捗 状況を報告し、議論を行なっている.大学院生は、各自が計算力学を用いた独自のテ ーマを持ち、研究に取り組み、Java や C 言語で実装している.学部生は、現在、解析 方法を学ぶため、「Nastran」「ANSYS」「AMPS」など有限要素法解析ソフトを用いて、 様々な現象について研究を行なっている.また、有限要素法解析結果と実現象につ いての比較を行なう為に、高速度カメラ等を用いた実験も行なっている.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してもらっている. 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2名の修士研究を行っている.

週1回のセミナーでは、大学院生1名、学部生2,3名が研究発表を行う.またそれ以外 の学生は1週間の進捗を報告する.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 はセミナーの様子である.



図 6.1.7. セミナーの様子

中林研究室

中林研究室では,学部学生11名の卒業研究および大学院生1名の修士研究を行っている.毎週1回開催されるセミナーでは4名の学生が研究進捗状況についての発表を行う.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) Progressive Meshの保存・読込と亀裂進展のアダプティブ解析への適用

本研究では、グラフィックスの分野で開発されたプログレッシブメッシュを用いて、 アダプティブ解析を行った. プログレッシブメッシュは、比較的大きなデータ量を必 要とする. そのため、本研究ではこのデータをハードディスク上で管理することによ って、アダプティブ解析への適用に成功した. 解析例として、 亀裂の解析に適用し た.

(2) POV-Rayを用いた可視化

POV-Rayというオープンソースプログラムを使用して、コンピュータでシミュレーションの計算結果として出力される数字の羅列を、コンピュータグラフィックスを用いて3次元の映像として視覚化した.また、レイトレーシングソフトを使うことでガラス等もよりリアリティな画像にした.

(3) SMS-AMGと反復法の計算および比較とアルゴリズム

流体解析,構造解析や電磁解析などの数値解析には計算効率の優れる反復法 が多く使われている.そこで反復法で主に知られているガウス=ザイデル法,ヤコビ 法,SOR法のアルゴリズムの計算,さらに反復型マトリクスソルバの高速化・高安定 化技術Super Matrix Solver - AMGを使った計算の研究を行った.

(4) サッカーのフォーメーション解析

サッカーの良いフォーメーションと良いパスの指標を算出することを研究目的とする. 算出方法は, Eikonal方程式(|▽T(p)|F=1)の高速な最短経路算出アルゴリズム であるFast Marching法を一般化した優勢領域図を用いて行った. 優勢領域図は, Fast Marching法に運動モデルを導入して, 選手の優勢領域を算出するために考 案された領域分割図である.

(5) 異なる材料同士の接触解析

2種類の材料を使い、荷重をかけた状態での変形及び相当圧力について比較・ 検討した.始めに、板の材料を「ポリスチレン」球の材料を「ニッケル」とし、時間毎 の変化を画像とグラフにして保存し、次に、板の材料を「ニッケル」球の材料を「ポリ スチレン」として、同じようにして材料を変えた時の変化から考察を行った.

(6) 摩擦と回転を含む動的接触解析

物体にかかる変形と応力を調べるためにFEMAP WITH NX NASTRANという 有限要素法ソフトを使って,構造解析を行った.具体的には,物体と物体を衝突さ せるという動的解析をし,その構造の変形や応力を算出した.また,物体に摩擦や 回転を加えた.

(7) 音が物体に与えるメカニズム

声でワイングラスを割るという現象の裏にあるメカニズムの解明.特に物体の固有 振動と共振による破壊現象を実際に起こった事件を参考にして研究した.その上 で実際にワイングラスに音をあて,結果をもとに考察を行った.

(8) 音波によるワイングラスの衝撃現象

音によりワイングラスに衝撃を与え、ワイングラスを割ることを研究目的とした.スピ

ーカーの前にワイングラスを置き,20秒ほどの音をそのスピーカーから大音量で流した.音を当てている時のワイングラスの動画撮影を行い,音波が物体に与える衝撃を,撮影を通して考察した.

(9) 水を含むワイングラスの振動現象

水を含んだワイングラスを用いた振動の研究を行った.肉眼での振動は分かりにくいので,高速度カメラを使用した.水の入っているワイングラスと水の入っていないワイングラスの固有振動数には違いがあると研究で分かった.

(10) 形状が異なるワイングラスの固有振動数の比較

本研究では、CADソフトで作成したワイングラスの固有振動数を求める. その上で、ワイングラスのガラスの厚さ・取っての長さ・底面の大きさ・実際にあるワイングラスの4種類の形状を変えたモデルをそれぞれ作成し、固有振動数にどのような違いが見られるか比較・検討した.

(11) 材料が異なるワイングラスの固有振動数の比較

本研究は、CADソフトを使用してワイングラスを作成した.そして、そのワイングラ スの固有振動数が、ワイングラスを生成する材料の違いによってどのように変化し ていくか比較・検討した.そこから、ヤング率や密度の違いが固有振動数にどのよ うな変化をもたらすのかを考察した.

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. H19年 度は自動車の横風安定性向上のための空力デバイスに関する研究を行った。

(2) 医療分野での流体解析技術の利用

コンピュータによる流体解析,いわゆるCFD (Computational Fluid Dynamics)の進 歩は目覚ましいが,まだまだ実用分野は限られている.ここでは,CFDの適用範囲 を広げることを目的として,特に医療分野への応用について研究を行っている.具 体的には,超音波による治療,血管内の流れ,体内でのキャビテーションなどにつ いて解析を行っている.

(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、立体動画像を大型バ ーチャルリアリティ装置に表示するためのライブラリの開発やこれによる動画像の 効果の検証などを行っている. 中林研究室

(1) 数値流体解析の最適化問題への応用

非圧縮性粘性流体の解析システムを用いて、各種設計問題・最適化問題に取り 組んでいる.具体的には、ある制約条件の中で解析モデルを自動生成し、遺伝的 アルゴリズムによる反復計算をすることにより流体力学的効果を考慮した最適化問 題を解くことができる.

(2) マルチエージェントシステム・人工知能に関する研究

特に, RoboCupサッカーシミュレーションリーグを題材として, マルチエージェント システムの開発を行っている. 18年度から参加してきた, サッカーシミュレーションリ ーグ2Dに加えて, 本年度からはサッカーシミュレーションリーグ3Dのエージェント 開発も開始した.

(3) ユビキタスコンピューティングに関する研究

従来のPCを中心としたコンピューティング環境だけではなく,身の回りの様々な 情報機器を数値シミュレーションに応用する研究を行っている.具体的には,汎用 携帯ゲーム機を用いたクラスタの構築,携帯電話を用いたクラスタの構築,デジタ ルカメラを用いたイメージベースCAEシステムの開発などである.

(3) 計算力学のスポーツへの応用に関する研究

スポーツの中でも特にサッカーを題材として,サッカーボール周りの流れ解析により 変化球のメカニズムを解明したり,逆問題としてフリーキックをサポートするシステムの 開発を行っている.

7. 業績リスト

本年度の当センターに関係する業績リストを記載する.

7.1. 論文

- 1. Chern Ferng Chung and Tomonari Furukawa, "A Reachability Based Strategy for the Time-Optimal and Coordinated Control of Autonomous Pursuers", Engineering Optimisation, Vol. 40, No. 1, pp. 67-93, 2008.
- 2. Chern Ferng Chung and Tomonari Furukawa, "Coordinated Pursuer Control Using Particle Filters for Autonomous Search-and-Capture", Robotics and Autonomous Systems, 25 pages, Submitted Jan. 2007.
- 3. Tomonari Furukawa and John G. Michopoulos, "Online Planning of Multiaxial Loading Paths for Elastic Material Identification", Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 197, pp. 885-901, 2008.
- 4. Tomonari Furukawa and John G. Michopoulos, "Computational Design of Multiaxial Tests for Characterizing Anisotropic Materials", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 25 pages, in print.
- 5. Tomonari Furukawa and John G. Michopoulos, "An Information-Theoretic Approach for Computational Material Modeling", Advanced Materials Research (AMR) Journal, 6 pages, in print.
- 6. Tomonari Furukawa, Frederic Bourgault and Hugh F. Durrant-Whte, "Element-based Method – A Recursive Bayesian Estimation Technique for Search and Rescue", IEEE Transactions on Robotics, 14 pages, Submitted Feb. 2007.
- 7. Tomonari Furukawa and Hugh F. Durrant-Whyte, "Coordinated Bayesian Search and Tracking", Engineering Optimization, 12 pages, Submitted Sep. 2007.
- 8. Tomonari Furukawa and John G. Michopoulos, "Elastic Characterization of Laminated Composites Based on Multiaxial Tests", Journal of Composite Structures, 27 pages, Submitted Oct. 2007.
- 9. S. HAGIHARA and N. MIYAZAKI, "Finite Element Analysis for Creep Failure of Coolant Pipe in Light Water Reactor Due to Local Heating under Severe Accident Condition", Nuclear Engineering and Design, in print.
- Y. ISOBE, M. SAGISAKA, S. YOSHIMURA and G. YAGAWA, "Economic Evaluation of Maintenance Strategies for Steam Generator Tubes Using Probabilistic Fracture Mechanics and A Financial Method", Solid State Phenomena, Vol.120, pp. 119-126, 2007.
- 11. David Kellermann, Tomonari Furukawa and Don Kelly, "Strongly Orthotropic Continuum Mechanics and Finite Element Treatment", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 25 pages, Submitted Nov. 2007.
- Nathan Kirchner and Tomonari Furukawa, "Scalable Infrared Sensor Network for Multiple Three-Dimensional Indoor Targets Localisation", International Journal of Intelligent Sensing Technologies and Applications, Vol. 3, Issue 1/2, pp. 20-32, 2007.
- 13. Benjamin Lavis, Tomonari Furukawa and Hugh F. Durrant-Whyte, "Dynamic Space Reconfiguration for Bayesian Search and Tracking with Moving Targets", Autonomous Robots, 10 pages, in print.

- 14. Lin-Chi Mak and Tomonari Furukawa, "A ToA-based Positioning Technique with NLOS Mitigation Using Low-frequency Sound", Advanced Robotics, 18 pages, in print.
- 15. Lin Chi Mak, Mark Whitty and Tomonari Furukawa, "A localisation system for an indoor rotary-wing MAV using blade mounted LEDs", International Journal Sensor Review, 11 pages, in print.
- Hou Man, Tomonari Furukawa, Mark Hoffman, S. Imalo and Z.H. Lou, "An Indirect Implicit Model for Frequency Dependent Hystereses of Piezoelectric Ceramics", Journal of Australasian Ceramic Society, Vol. 43, No. 2, pp. 169-174, 2007.
- 17. Hou Michael Man, Tomonari Furukawa, Mark Hoffman and S. Imlao, "An Indirect Implicit Technique for Piezoelectric Material Characterisation", Computational Materials Science, 9 pages, in print.
- 18. John G. Michopoulos, John Harmanson and Tomonari Furukawa, "On the Robotic Identification of the Constitutive Response of Composite Materials", Journal of Composite Structures, 45 pages, in print.
- 19. N. MIYAZAKI, "Dislocation Density Evaluation using Dislocation Kinetics Method", Journal of Crystal Growth, Vol. 303, No. 1, pp. 302-309, May. 2007.
- 20. T. MURAMATSU and G. YAGAWA, "An Adaptive Control System Using the Fuzzy Theory for Transient Multi-physics Numerical Simulations", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.54, pp. 805-830, 2007.
- 21. M. NAGAI, T. IKEDA and N. MIYAZAKI, "Stress Intensity Factor Analysis of a Three-dimensional Interface Crack between Dissimilar Anisotropic Materials", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 74, No.16, pp. 2481-2497, Nov. 2007.
- 22. H. OGINO, N. MIYAZAKI, T. MABUCHI and T. NAWATA, "Birefringence Simulation of Annealed Ingot of Calcium Fluoride Single Crystal", Journal of Crystal Growth, Vol. 310, No. 1, pp. 221-228, Jan. 2008.
- 23. Hiroshi OKADA, Sayaka ENDOH and Masanori KIKUCHI, "Application of s-Version Finite Element Method to Two Dimensional Fracture Mechanics Problems", JSME Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.1 No.5, pp. 699-710, Jun. 2007.
- 24. H. Okada, H. Kawai, T. Miyazaki, K. Araki and G. Yagawa, "Development of Software System to Perform Three-Dimensional Crack Propagation Analyses", Proceedings of APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI(Third Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics in conjunction with Eleventh International Conference on the Enhancement and Promotion of Computational ethods in Engineering and Science) in CD-ROM, Dec. 2007.
- 25. Jan Wei Pan and Tomonari Furukawa, "Material Characterisation of Anisotropic Materials using Kalman Filtering", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 20 pages, Submitted Apr. 2007.
- 26. K. SHIBATA, Y. KANTO, S. YOSHIMURA and G. YAGAWA, "Recent Japanese Probabilistic Fracture Mechanics Researches Related to Failure Probability of Aged RPV", Solid State Phenomena, Vol.120, pp. 49-67, 2007.
- 27. S. SHIMAMURA, K. SUGA, Y. EZAWA and S. AOKI, "Effects of material properties of cue on impact behaviours in follow and draw shots in billiards", J. International Sports Engineering Association Vol.10, No.4, to appear, 2008.
- 28. S. TAKASHIMA, M. NAKAGAKI and N. MIYAZAKI, "An Elastic-Plastic Constitutive Equation Taking Account of Particle Size and Its Application to a

Homogenized Finite Element Analysis of a Composite Material", CMES: Computer Modelling in Engineering & Sciences, Vol. 20, No. 3, pp. 193-202, Jul. 2007.

- 29. S. TAKETOMI, R. MATSUMOTO and N. MIYAZAKI, "Atomistic Simulation of the Effects of Hydrogen on the Mobility of Edge Dislocation in Alpha Iron", Journal of Material Science, in print.
- 30. S. Tanaka and H. Okada, "An Adaptive Wavelet Finite Element Method with High-Order B-Spline Basis Functions", Key Engineering Materials, vols. 345-346, pp. 877-880, Apr. 2007.
- 31. S. Tanaka and H. Okada, "An Adaptive Wavelet Finite Element Method with High-Order B-Spline Basis Functions", International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (Editted by S.W. Nam, Y.W. Chang, S.B. Lee, N.J. Kim, CD-ROM), May. 2007.
- 32. Y. WADA, "Web based CAE system and knowledge sharing framework using Web 2.0 technologies", Fracture and Strength of Solids, Advanced Materials Research, to appear.
- Daniel Watman and Tomonari Furukawa, "A Visualization System for Analysis of Micro Aerial Vehicle Scaled Flapping Wings", Journal of Intelligent and Robotic Systems, 15 pages, in print.
- 34. Stephen Webb and Tomonari Furukawa, "Belief Driven Manipulator Visual Servoing in Less Controlled Environments", Advanced Robotics, 19 pages, in print.
- 35. G. YAGAWA and R. TIAN, "Non-matching mesh gluing by meshless interpolation—An alternative to Lagrange multipliers", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.71, pp. 473-503, 2007.
- 36. G. YAGAWA and H. MATSUBARA, "Node Based Finite Element Method with High Performance Elements: The Local Element Method (to appear)", Computational Plasticity, Springer, 2007.
- 37. 岡田裕, 荒木宏介, 河合浩志, "大規模破壊力学解析のための応力拡大係数 計算手法(四面体要素を用いた仮想き裂閉口積分法(VCCM))", 日本機械 学会論文集 A 編, 73 巻第 728 号, pp. 498-505, 2007 年 4 月.
- 38. 岡田裕, 荒木宏介, 河合浩志, "大規模破壊力学解析のための応力拡大係数 計算手法(混合モード/複雑形状き裂解析のための四面体要素用仮想き裂閉 口積分法(VCCM))", 日本機械学会論文集 A 編, 73 巻第 733 号, pp. 997-1004, 2007 年 9 月.
- 39. 神田康行, 岡田裕, 伊良波繁雄, 富山潤, 矢川元基, "回転自由度を有する一般化有限要素の破壊力学パラメータ算出法", 土木学会論文集, pp. 1-10, 2007 年.
- 40. 岸本喜直, 天谷賢治, "磁気センサを用いた LSI めっき電流の測定法", 日本機械学會論文集A編, 73(730), pp. 709-715, (ISSN 03875008), (日本機械学会 /社団法人日本機械学会), 2007 年 6 月 25 日.
- 41. 岸本喜直,田中裕也,天谷賢治,"静電場領域の領域積分を必要としない静磁場解析法",日本機械学會論文集 A 編,73(729), pp. 567-574, (ISSN 03875008),(日本機械学会/社団法人日本機械学会),2007年5月25日.
- 42. 久保田義大, 松本龍介, 宮崎則幸, "ハイブリッドポテンシャル法を用いた 鉄単結晶体中のき裂進展挙動の分子動力学解析", 日本機械学会論文集 A 編, 第 73 巻第 729 号, pp. 643-650, 2007 年 5 月.
- 43. 久保田義大, 松本龍介, 宮崎則幸, "ハイブリッドポテンシャル法を用いた

鉄ナノ結晶体中のき裂進展挙動の分子動力学解析",日本機械学会論文集 A 編,第 73 巻第 733 号, pp. 989-996, 2007 年 9 月.

- 44. 小金丸正明, 池田徹, 宮崎則幸, 友景肇, "実験とデバイスシミュレーション による nMOSFET の応力に起因した DC 特性変動評価", 電子情報通信学会 論文誌 C, 第 J90-C 巻第4号, pp. 351-362, 2007 年4月.
- 45. 小竹広和, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸, "鈍化き裂まわりの非定常な水素 拡散-弾塑性連成解析", 日本機械学会論文集 A 編, 印刷中.
- 46. 島村真介, 須賀一博, 江澤良孝, 青木繁, "ビリヤードにおけるキューの衝突 特性評価", 日本機械学会論文集 C 編, 73 巻 728 号, pp. 1480-1486, 2007 年 5 月.
- 47. 島村真介,須賀一博,江澤良孝,青木繁,"ビリヤードにおけるキューの衝突 特性評価(球にスピンを与える場合)",日本材料学会,投稿中.
- 48. 野村吉昭, 永井政貴, 池田徹, 宮崎則幸, "陽極接合部の異種材界面はく離強 度評価", 日本機械学会論文集 A 編, 第 73 巻第 735 号, pp. 1266-1272, 2007 年 11 月.
- 49. 皆川浩一, 早房敬祐, 須賀一博, M Ridha, 天谷賢治, 青木繁, "遺伝的アルゴ リズムと境界要素法を用いた多段階鉄筋腐食逆解析", 材料と環境, 投稿中.
- 50. 山川真一, 天谷賢治, PARAMESWARAN ASH M., "薄膜磁気センサを用いた 磁気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 43(1), pp. 17-22, (ISSN 04534654), (計測自動制御学会), 2007年1月31日.
- 51. 山岸寛, 天谷賢治, "多重極展開を用いた境界要素法による注目領域の高速 解法", 日本機械学会論文集A編, 73(735), pp. 1225-1229, (ISSN 03875008), (日 本機械学会), 2007 年 11 月.

7.2. 著書

- 1. 前田宣喜, 矢川元基, "非破壊検査の理論", 丸善, 2007年.
- 2. 宮崎則幸,他企画·編集, "機械工学便覧 基礎編α6 計算力学",日本機 械学会,2007年6月.
- 3. 矢川元基, 監修, "ペタコンピューティング", 培風館, 2007年.
- 4. 矢川元基, 宮崎則幸, 編集, "計算力学ハンドブック", 朝倉書店, 2007 年 6 月.

7.3. 総説・解説・エッセイ

- 青木繁,"逆解析を利用した鉄筋腐食の検出",日本機械学会誌,111巻1070 号, p.59, 2008年1月.
- 池田徹,宮崎則幸, "電子実装における接着接合部の強度信頼性評価",日本接着学会誌, Vol.43, No.5, pp.212-219, 2007 年 5 月.
- 3. 岡田裕, "有限要素法と破壊力学(1) 有限要素法解析と破壊力学パラメ ータの計算方法-",機械の研究,第59巻,第4号,pp.423-430,2007年4月.
- 4. 岡田裕, "有限要素法と破壊力学(2) 有限要素法解析と破壊力学パラメ ータの計算方法-",機械の研究,第59巻,第5号,pp.573-580,2007年5月.

7.4. 招待講演

- 1. Tomonari Furukawa, "Information-Theoretic Modeling for Composite Materials(Plenary Talk)", 7th International Conference on Fracture and Strength of Solids, Urumqi, China, Sep. 2007.
- N. MIYAZAKI, "Application of Computational Mechanics to Hydrogen Embrittlement(Plenary Lecture)", ICCES'08: International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, Hawaii, USA, Mar. 2008.
- 3. Y. WADA, "DEVELOPMENT OF WEB-BASED CAE SYSTEM USING AJAX(Keynote Speech)", Abstracts The 5th International Conference on Numerical Analysis in Engineering, NAE2007, CD-ROM 5 pages, Padang, West Sumatera, Indonesia, May. 18-19, 2007.
- 4. G. YAGAWA, "Ultra Large Adaptive Tetrahedron Mesh Using Level of Detail", 14th International Conference on Finite Elements in Flow Problems, Santa Fe,NM, USA, Mar. 26, 2007.
- 5. G. YAGAWA, "Recent Trend of Computational Mechanics and Supercomputing", Lunghwa University of Science and Technology, Taiwan, Apr. 17-19, 2007.
- 6. G. YAGAWA, "Superposition and Enrichment Methods", 4th Computational Mechanics Forum, Kuala Lumpur, Malaysia, May. 15, 2007.
- G. YAGAWA, "Toward More Accurate and Easier-to Use Methods for Computational Mechanics", 5th InternationalConference on Numerical Analysis in Engineering (NAE) 2007 in conjunction with 5th Computational Mechanics Forum, Padang, Indonesia, May. 18, 2007.
- 8. G. YAGAWA, "Enriched Free Mesh Method: Patch by Patch Stress/Strain and Displacement Improvement", 5th InternationalConference on Numerical Analysis in Engineering (NAE) 2007 in conjunction with 5th Computational Mechanics Forum, Padang, Indonesia, May. 19, 2007.
- 9. 岡田裕, "テトラ要素による三次元き裂の解析-完全自動き裂進展解析プロ グラムの構築を目指して-",電力中央研究所セミナー,2007年5月.
- 10. 岡田裕, "テトラ要素による三次元き裂進展解析-完全自動き裂進展解析プ ログラムの構築を目指して-",第 21 回「原子力耐震計算科学」特別専門 委員会,2007年5月.

7.5. 講演論文・口頭発表

- 1. H. ADACHI, K. SUGA, M. HAYASE and S. AOKI, "Numerical Simulation of Corrosion under Different Solution Velocity", FEOFS, Urumqi, China, Aug. 28, 2007.
- 2. K. Amaya, M. Ridha and S. Aoki, "Corrosion detection by multi-step genetic algorithm Trans. WIT. Simulation of Electrochemical Processes", Engineering Sciences, Vol.54, 2007.
- 3. S. AOKI and K. AMAYA, "How to Protect Underground Pipeline", Forum on Computational Mechanics 2007, Universiti Kebangsaan Malaysia, May. 15, 2007.
- 4. S. AOKI and K. AMAYA, "Boundary Element Corrosion Analysis of Underground Pipeline", NAE2007, Pandang, Indonesia, May. 18, 2007.
- 5. S. AOKI and K. AMAYA, "Effective BEM for Corrosion Analysis of Net Structure", FEOFS, Urumqi, China, Aug. 28, 2007.
- 6. M. CHIBA and N. MIYAZAKI, "Piezoelectric effect for cracking of a lithium niobate single crystal", Proceedings of APCOM'07-EPMESC XI, MS8-3-3, Kyoto, Japan, Dec. 2007.
- 7. Tomonari Furukawa, "Coordinated Search and Tracking Using Element-based Method (Abstract only)", 7th International Conference on Cooperative Control and Optimization (CCO '07), Gainesville, FL, Jan. 31-Feb. 2, 2007.
- 8. Tomonari Furukawa, Hugh F. Durrant-Whyte and Benjamin Lavis, "The Element-based Method Theory and its Application to Bayesian Search and Tracking", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2807-2812, San Diego, Oct. 29-Nov. 2, 2007.
- 9. T. IKEDA, T. MIZUTANI and N. MIYAZAKI, "Thermo-Mechanical and Hygro-Mechanical Stress Analyses of an Organic Multilayer Sheet", Proceedings of InterPACK'07, IPACK2007-33212, Vancouver, Canada, Jul. 2007.
- 10. T. IKEDA, M. HAMADA, N. MIYAZAKI, H. TANAKA and T. NUMATA, "Delamination in a Stacked BGA Package under the Solder Reflow Process", Proceedings of APCOM'07-EPMESC XI, MS19-2-4, Kyoto, Japan, Dec. 2007.
- 11. Y. INOUE, R. MATSUMOTO, S. TAKETOMI and N. MIYAZAKI, "First Principle Estimation of the Basic Physical Properties of Fe and Fe-H Systems and Evaluation of Interatomic Potentials", Proceedings of APCOM'07-EPMESC XI, MS10-2-2, Kyoto, Japan, Dec. 2007.
- 12. David Kellermann, Tomonari Furukawa and Jan Wei Pan, "A Continuum Mechanics Solution for In-plane Shear Locking in Plate and Shell Elements (Abstract only)", Ninth U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM IX), p. 2, San Francisco, Jul. 22-26, 2007.
- 13. David Kellermann, Tomonari Furukawa and Hou Man, "Finite Element Implementation and Sub-laminar Decomposition for Strongly Orthotropic Continuum Mechanics", Proceedings of the APCOM07-EPMESC XI Conference, CD-ROM (Paper MS44-3-2), 9 pages, Kyoto, Dec. 3-6, 2007.
- 14. David Kellermann, Tomonari Furukawa and Don Kelly, "A Theory of Strongly Orthotropic Continuum Mechanics", 5th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM 2007), pp. 588-593, Brisbane, Queensland, Australia, Dec. 10-12, 2007.
- 15. David Kellermann, Tomonari Furukawa and Don Kelly, "Solution Procedure and Skewed Polar Decomposition of Strongly Orthotropic Transplacement Gradients

(Abstract only)", 8th World Congress on Computational Mechanics (WCCM VIII), 2 pages, Venice, Italy, Jun. 30-Jul. 5, 2008.

- M. KOGANEMARU, T. IKEDA, N. MIYAZAKI and H. TOMOKAGE, "Stress-Induced Effects in Electronic Characteristics of N-Type MOSFETs in Resin-Molded Packages", Proceedings of InterPACK'07, IPACK2007-33533, Vancouver, Canada, Jul. 2007.
- M. KOGANEMARU, T. IKEDA, N. MIYAZAKI and H. TOMOKAGE, "Drift-Diffusion Device Simulation of Stress-Induced Effect on Electronic Characteristics of nMOSFETs", Proceedings of APCOM'07-EPMESC XI, MS8-1-3, Kyoto, Japan, Dec. 2007.
- H. KOTAKE, R. MATSUMOTO, S. TAKETOMI and N. MIYAZAKI, "Unsteady Hydrogen Diffusion-elastoplastic Coupling Analyses Near the Crack Tip during Cyclic Loading", Proceedings of APCOM'07-EPMESC XI, MS10-1-4, Kyoto, Japan, Dec. 2007.
- Benjamin Lavis and Tomonari Furukawa, "Dynamic Search Spaces for Coordinated Autonomous Marine Search and Tracking", 20th International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE 2007), pp. 1032-1041, Kyoto, Jun. 26-29, 2007.
- 20. Benjamin Lavis, Tomonari Furukawa and Yasuyoshi Yokokohji, "Particle Filters for Estimation and Control in Search and Rescue Using Heterogeneous UAVs", 4th International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems, pp. 217-222, Palmerston North, New Zealand, Nov. 28-30, 2007.
- 21. Benjamin Lavis, Yasuyoshi Yokokohji and Tomonari Furukawa, "Estimation and Control for Cooperative Autonomous Searching in Crowded Urban Emergencies", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 7 pages, Pasadena, California, May. 19-23, 2008.
- 22. Shen Hin Lim and Tomonari Furukawa, "Optical Sensor Modelling Using Mechanistic Deconvolution", 2nd International Conference on Sensing Technology (ICST '07), CD-ROM, 6 pages, Palmerston North, New Zealand, Nov. 26-28, 2007.
- 23. Shen Hin Lim and Tomonari Furukawa, "A Probabilistic Image Sensor Model for Recursive Bayesian Search and Tracking", International Conference on Intelligent Technologies (InTech'07), Sydney, Australia, Dec. 12-14, 2007.
- Lin Chi Mak and Tomonari Furukawa, "A 6 DoF Visual Tracking System for a Miniature Helicopter", 2nd International Conference on Sensing Technology (ICST '07), CD-ROM, 6 pages, Palmerston North, New Zealand, Nov. 26-28, 2007.
- 25. Hou Man, Tomonari Furukawa, Mark Hoffman and Soodkhet Imlao, "An Indirect Implicit Model for Frequency Dependent Hystereses of Piezoelectric Ceramics", International Conference and Exhibition by Materials and AustCeram, 6 pages, Sydney, Jul. 4-6, 2007.
- 26. Hou Man, Tomonari Furukawa, Jan Wei Pan and Israel Herszberg, "Constitutive Characterization of Composite Materials using the Data Driven Approach (Abstract only)", Fourteenth International Conference on Composite Structures, Melbourne, Nov. 19-21, 2007.
- 27. Hou Man, Tomonari Furukawa and David Kellermann, "Neural Network Constitutive Models using Indirect Supervised Learning", Proceedings of the APCOM07-EPMESC XI Conference, CD-ROM (Paper GS1-3), 10 pages, Kyoto, Dec. 3-6, 2007.
- 28. R. MATSUMOTO, Y. KUBOTA and N. MIYAZAKI, "The Influence of Grain Size

and Deformation Rate on the Crack Growth Behavior in Nanocrystalline Fe", 9th US National Congress on Computational Mechanics, San Francisco, USA, Jul. 2007.

- 29. S. MATSUMOTO, R. MATSUMOTO, S. TAKETOMI and N. MIYAZAKI, "Molecular Dynamics Simulations of Effects of Hydrogen on Mode I Crack Growth Behavior in □-Iron Single Crystals", Proceedings of APCOM' 07-EPMESC XI, MS10-2-3, Kyoto, Japan, Dec. 2007.
- R. MATSUMOTO, S. TAKETOMI, S. MATSUMOTO, Y. INOUE and N. MIYAZAKI, "Atomistic Study of Hydrogen Effects on the Fracture Behavior of bcc-Fe", Proceedings of APCOM'07-EPMESC XI, MS31-4-3, Kyoto, Japan, Dec. 2007.
- 31. N. MATSUMOTO, R. MATSUMOTO and N. Miyazaki, "Molecular Dynamics Study of Shear Banding in Metallic Glass Containing Nano-crystalline Particles", Proceedings of APCOM'07-EPMESC XI, MS31-5-3, Kyoto, Japan, Dec. 2007.
- John G. Michopoulos and Tomonari Furukawa, "Multi-level Coupling of Dynamic Data-Driven Experimentation with Material Identification", International Conference on Computational Science 2007 (CD-ROM), 10 pages, Beijing, China, May. 27-30, 2007.
- 33. John G. Michopoulos, Tomonari Furukawa, John M. Hermanson and Samuel G. Lambrakos, "Simultaneous Hierarchical and Multi-level Optimization for Material Characterization and Design of Experiments", ASME 2007 International Design Engineering Technical Conference (DETC) and Computers and Information in Engineering Conference (CIE), 10 pages, Las Vegas, Sep. 4-7, 2007.
- 34. K. MINAGAWA, M. RIDHA, K. HAYABUSA, K. AMAYA and S. AOKI, "Non-Destructive Inspection of Rebar Corrosion in Concrete Structures by using BEM and GA", FEOFS, Urumqi, China, Aug. 28, 2007.
- 35. T. MIZUTANI, T. IKEDA, K. MIYAKE and N. MIYAZAKI, "Warpage Analysis of an LCD Panel under Thermo-mechanical and Hygro-mechanical Stress", Proceedings of 9th International Conference on Electronic Materials and Packaging (EMAP2007), EMAP2007-P003, Daejon, Korea, Nov. 2007.
- 36. Murotani, K., and Yagawa, G., "Noise Filtering of Images Using Generalized Singular Spectrum Analysis", The 16-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2008, University of West Bohemia, Plzen, Czech Republic, Feb. 4-7, 2008.
- 37. Kohei Murotani and Genki YAGAWA, "Ultra large adaptive tetrahedron mesh using two mesh clustering", COMPUTATIONAL MECHANICS FORUM 2007, University Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia, 2007.
- 38. Kohei Murotani and Genki YAGAWA, "Adaptive mesh using hierarchical clustering", 5th International Conference on Numerical Analysis in Engineering 2007 (NAE2007), Padang, Indonesia, 2007.
- 39. Kohei Murotani and Genki YAGAWA, "Hierarchical adaptive mesh for FEM simulations of ultra high-speed impact problem", The 7th International Conference on Fracture and Strength of Solids, Urumqi, CHINA, 2007.
- 40. Murotani, K., and Yagawa, G., "Hierarchical adaptive mesh for crack propagation", APCOM2007-EPMESC XI, Kyoto, Japan, Dec. 3-6, 2007.
- 41. Murotani, K., and Yagawa, G., "Hierarchical adaptive meshing for large scale moving boundary", ECCOMAS Multidisciplinary Jubilee Symposium 2008, Vienna, Austria, Feb. 18-20, 2008.

- 42. M. NAGAI, T. IKEDA and N. MIYAZAKI, "Stress Intensity Factors Analysis of a Three-dimensional Interface Crack between Dissimilar Anisotropic Materials under Thermal Stress", Proceedings of APCOM'07-EPMESC XI, MS19-1-4, Kyoto, Japan, Dec. 2007.
- 43. Yusuke Nakajima, Junko Uebayashi, Yoshiaki Tamura and Yoichiro Matsumoto, "Large-scale simulation for HIFU Treatment to Brain", 26th International Symposium on Shock Wave (ISSW26), Göttingen, Germany, Jul. 15-20, 2007.
- 44. Y. NOMURA, T. IKEDA and N. MIYAZAKI, "Stress Singularity Analysis at an Interfacial Corner between Anisotropic Bimaterials under Thermal Stress", Proceedings of APCOM'07-EPMESC XI, MS19-1-2, Kyoto, Japan, Dec. 2007.
- 45. H. Okada, H. Kawai, K. Araki and G. Yagawa, "Software system to perform crack propagation analyses for arbitrary-shaped three-dimensional flaws", 9th US National Congress on Computational Mechancis, Jul. 2007.
- 46. Hiroshi Okada, Hiroshi Kawai, Kousuke Araki and Tsubasa Miyazaki, "Three-Dimensional Crack Propagation Analysis based on VCCM (Virtual Crack Closure-Integral Method) for Tetrahedral Finite Element", FEOFS2007(The 7th International Conference on Fracture and Strength of Solid)/International Conference on Computational Science and Engineering, Urumqi, China, Sep. 2007.
- 47. H. Okada, H. Kawai, T. Miyazaki, K. Araki and G. Yagawa, "Development of Software System to Perform Three-Dimensional Crack Propagation Analyses", APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI(Third Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics in conjunction with Eleventh International Conference on the Enhancement and Promotion of Computational ethods in Engineering and Science), Dec. 2007.
- 48. Jan Wei Pan, Tomonari Furukawa, Hou Man and Israel Herszberg, "Unscented Kalman Filtering for Elastic Identification of Composite Materials using the Energy-based Method (Abstract only)", 13th International Conference on Composite Structures (ICCS/14), p. 2, Victoria, Australia, Nov. 19-21, 2007.
- 49. Jan Wei Pan, Tomonari Furukawa and Hou Man, "Kalman Filter Technique for the Energy-based Elastic Identification of Composite Materials", 3rd Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM'07) in conjunction with 11th International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science (EPMESC XI), pp. 1-10, Kyoto, Japan, Dec. 3-6, 2007.
- 50. Jan Wei Pan and Tomonari Furukawa, "Comparison between Kalman Filter and Singular Value Decomposition for Energy-based Anisotropic Elasticity Characterization", The 5th International Conference on Numerical Analysis in Engineering, pp. 1-10, Padang, Indonesia, May. 18-19, 2007.
- 51. Jan Wei Pan, Tomonari Furukawa and David Kellermann, "Application of Kalman Filtering to the Energy-based Material Constitutive Modelling (Abstract only)", Ninth U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM IX), p. 2, San Francisco, Jul. 22-26, 2007.
- M. Ridha, K. Minagawa, K. Hayabusa, K. Amaya and S. Aoki, "Combining Use of BEM and GA for Non-Destructive Inspection of Steel Corrosion in Concrete Structures", Computational & Experimental Mechanics, Putrajaya, Malaysia, Nov. 27-28, 2007.
- 53. S. SHIMAMURA, K. SUGA, Y. EZAWA and S. AOKI, "Effects of Material Properties of Cue on Impact Behaviours in Follow and Draw Shots in Billiards",

3rd Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics, Kyoto, Japan, Dec. 5, 2007.

- 54. N. SHISHIDO, T. IKEDA and N. MIYAZAKI, "Accuracy Improvement of Full-field Displacement Measurement Using Digital Image Correlation for Images Obtained with a Laser Scanning Confocal Microscope", Proceedings of 9th International Conference on Electronic Materials and Packaging (EMAP2007), EMAP2007-P028, Daejon, Korea, Nov. 2007.
- 55. Kazuhiro SUGA, Masato YOSHIDA, M RIDHA and Shigeru AOKI, "An Inverse Problem Approach for Corrosion Monitoring in Concrete Structure", Forum on Computational Mechanics 2007, Universiti Kebangsaan Malaysia, May. 15, 2007.
- 56. K. SUGA, M. YOSHIDA, M. RIDHA and S. AOKI, "An Inverse Problem Approach for Corrosion Monitoring in Concrete Structure", NAE2007, Pandang, Indonesia, May. 18, 2007.
- 57. K. SUGA, M. YOSHIDA, M. RIDHA and S. AOKI, "Nondestructive Corrosion Monitoring in Reinforced Concrete by Boundary Element Inverse Analysis", FEOFS, Urumqi, China, Aug. 28, 2007.
- 58. S. TAKETOMI, R. MATSUMOTO and N. MIYAZAKI, "Effects of Hydrogen Atom on Dislocation Mobility in Alpha Iron", 9th US National Congress on Computational Mechanics, San Francisco, USA, Jul. 2007.
- 59. S. TAKETOMI, R. MATSUMOTO and N. MIYAZAKI, "Molecular Dynamics Study of Hydrogen Diffusion around an Edge Dislocation in bcc-Fe", Proceedings of APCOM'07-EPMESC XI, MS10-2-1, Kyoto, Japan, Dec. 2007.
- 60. Yoshiaki Tamura and Hiroyuki Furusawa, "A New Concept of Visualization for Large-Scale Simulations", Third Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics in conjunction with Eleventh International Conference on the Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science (APCOM'07-EPMESC XI), CD-ROM (pdf/MS40-3-1.pdf), Kyoto, Japan, Dec. 3-6, 2007.
- 61. S. Tanaka and H. Okada, "An Adaptive B-Spline Wavelet Galeerkin Method for the Analysis of Elastostatics", International Conference on Computational Methods (ICCM2007), Abstract, p. 307, Apr. 2007.
- 62. S. Tanaka, H. Okada, "An Adaptive Wavelet Finite Element Method with High-Order B-Spline Basis Functions", International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (Editted by S.W. Nam, Y.W. Chang, S.B. Lee, N.J. Kim, CD-ROM), May. 2007.
- 63. S. Tanaka and H. Okada, "An Adaptive B-spline Wavelet Galerkin Method for the Elastostatic Problems", 9th US National Congress on Computational Mechancis, Jul. 2007.
- 64. Y. WADA, "Web based CAE system and knowledge sharing framework using Web 2.0 technologies", International Conference on Computational Science and Engineering (ICCSE), p. 8, Urumqi, China, Aug. 28, 2007.
- 65. Daniel Watman and Tomonari Furukawa, "A System for Controlled Visualisation of Flapping Wings (Abstract only)", Flying Insects and Robots Symposiumpp, pp. 125-126, Monte Verità, Ascona, Switzerland, Aug. 12-17, 2007.
- 66. Daniel Watman and Tomonari Furukawa, "A System for Motion Control and Analysis of High-Speed Passively Twisting Flapping Wings", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 6 pages, Pasadena, California, May. 19-23, 2008.

- 67. 安達元,須賀一博,早瀬正則,青木繁, "流れ場における腐食のシミュレーション",日本材料学会東海支部,2008年3月14日.
- 68. 天谷賢治, 上島正史, "スポット像を用いたマイクロレンズの収差解析", マ テリアルステージ 7(3)(通号 75), pp. 110-113, (ISSN 13463926) (技術情報協 会 編/技術情報協会), 2007 年 6 月.
- 69. 天谷賢治, "境界要素法によるガルバニック腐食解析(第 257 回[日本材料学会腐食防食部門委員会]例会 超音波の基礎と腐食防食分野への応用)",腐食防食部門委員会資料 46(257) (pt.4), pp.9-17, (日本材料学会腐食防食部門委員会 編/日本材料学会), 2007 年 7 月 24 日.
- 70. 天谷賢治, "境界要素法による腐食解析(船用機関・機器の腐食の現状と対策)", マリンエンジニアリング月例講演会 42(1), pp. 37-42, (日本マリンエンジニアリング学会), 2007 年 10 月 4 日.
- 71. 池田徹, 濱田学, 宮崎則幸, 田中宏之, 沼田孝, "はんだリフロー時における 電子パッケージ内部でのはく離発生予測評価", 第 17 回マイクロエレクト ロニクスシンポジウム, 神戸, 2007 年 9 月.
- 72. 井上義規, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸, "第一原理計算による Fe と Fe-H 系の基本物性と原子間ポテンシャルの評価", 日本機械学会第 20 回計算力 学講演会, 京田辺, 2007 年 11 月.
- 73. 入部綱清, 藤澤智光, 越塚誠一, "MPS 法を用いた津波の大規模シミュレー ション", 計算工学会講演会論文集, Vol.12, 2007 年 5 月.
- 74. 上島正史, 天谷賢治, "スポット像からの収差解析手法の実験による検証", 日本機械学会講演論文集, No. 07-36, pp. 453-454, (第 20 回計算力学講演会), 2007年.
- 75. 上田真広,池田徹,宮崎則幸,"サブミクロンゴム粒子強化エポキシ樹脂の き裂先端ひずみ場の測定",日本機械学会 M&M2007 材料力学カンファレン ス,東京,2007 年 10 月.
- 76. 大屋 賢典, 岡田 裕, "重合メッシュ法における内挿関数の一次独立性についての考察", M&M 材料力学カンファレンス(CD-ROM), 2007 年 10 月.
- 77. 岡田裕, 荒木宏介, 河合浩志, "テトラ二次要素を用いた三次元混合モード 荷重下のき裂進展解析について", 計算工学講演会論文集, Vol. 12, No. 1, pp. 421-424, 2007 年 5 月.
- 78. 岡田裕,河合浩志,荒木宏介,"四面体有限要素法による三次元き裂進展解 析について",日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集 Vol.1,日本機械 学会 No.07-1, pp. 701-702, 2007 年 9 月.
- 79. 岡田裕, 河合浩志, 荒木 宏介, 宮嵜翼, "テトラ二次要素を用いた三次元混 合モードき裂進展解析", M&M 材料力学カンファレンス(CD-ROM), 2007 年10月.
- 80. 河合浩志, 岡田裕, "三次元き裂進展解析のためのメッシュ生成技術について",計算工学講演会論文集, Vol. 12, No. 1, pp. 401-404, 2007 年 5 月.
- 81. 河合浩志, 野口裕久, 岡田裕, "統合数値計算プラットフォームにおける破 壊力学向けメッシュ生成ツールキット", 計算工学講演会論文集, Vol. 12, No. 1, pp. 405-408, 2007 年 5 月.
- 82. 神田康行, 室谷浩平, 岡田裕, 藤澤智光, 崎原康平, 入部綱清, 河合浩志, 伊

良波繁雄,富山潤,矢川元基, "四面体要素を用いた自動き裂進展解析システム",日本原子力学会2007年春の年会,pp.458,2007年.

- 83. 神田康行, 岡田裕, 伊良波繁雄, 富山潤, 矢川元基, "回転自由度を有する一般化四面体要素を用いた仮想き裂閉口積分法", 計算工学講演会論文集, Vol. 12, No. 1, pp. 417-420, 2007 年.
- 84. 神田康行, 岡田裕, 伊良波繁雄, 富山潤, 矢川元基, "回転自由度を有する四 面体要素によるき裂解析", 日本応用数理学会環瀬戸内応用数理研究部会第 11 回シンポジウム講演予稿集, pp.97-102, 2007 年.
- 85. 神田康行, 岡田裕, 伊良波繁雄, 富山潤, 室谷浩平, 矢川元基, "回転自由度 を有する四面体要素を用いた三次元破壊力学解析", 日本機械学会第 20 回 計算力学講演会講演論文集, pp.403-404, 2007 年.
- 86. 神田康行, 岡田裕, 伊良波繁雄, 富山潤, 矢川元基, "回転自由度を有する四 面体要素用の仮想き裂閉口積分法による破壊力学解析", 日本機械学会九州 支部沖縄講演会, pp.91-92, 2007 年.
- 87. 神田康行, 室谷浩平, 岡田裕, 河合浩志, 藤澤智光, 崎原康平, 入部綱清, 伊 良波繁雄, 富山潤, 矢川元基, "四面体有限要素と VCCM を用いた完全自動 き裂解析システム", 日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス 2007, 2007 年.
- 88. 神田康行,岡田裕,伊良波重雄,富山潤,矢川元基,"回転自由度を有する一般化要素を用いた仮想き裂閉口積分法",計算工学講演会論文集,Vol. 12, No. 1, pp. 417-420, 2007 年 5 月.
- 89. 岸本喜直, 天谷賢治, "磁気センサを用いた LSI めっき電流分布の無侵襲推 定手法", 日本機械学会講演論文集, No. 07-36, pp. 447-448, (第 20 回計算力学 講演会), 2007 年.
- 90. 小金丸正明, 池田徹, 宮崎則幸, 友景肇, "nMOSFET における応力効果を考慮した3次元デバイスシミュレーション", 日本機械学会第20回計算力学 講演会, 京田辺, 2007年11月.
- 91. 小竹広和, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸, "き裂に繰り返し負荷が作用する ときの非定常水素拡散解析", 日本機械学会第20回計算力学講演会, 京田辺, 2007年11月.
- 92. 宍戸信之,池田徹,宮崎則幸, "レーザ走査型顕微鏡画像を用いた画像相関 法によるひずみ計測の高精度化",日本機械学会第20回計算力学講演会,京 田辺,2007年11月.
- 93. 宍戸信之,池田徹,宮崎則幸, "レーザ走査型共焦点顕微鏡を用いたデジタ ル画像相関法によるひずみ分布計測", Mate 2008:第14回エレクトロニクス におけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム,横浜,2008年2月.
- 94. 島村真介, 須賀一博, 江澤良孝, 青木繁, "ビリヤードにおけるキューの衝突 特性評価", 日本実験力学会 2007 年度年次部講演会, 講演論文集, pp.352-353, 東京, 2007 年 8 月 8 日.
- 95. 須賀一博,吉田真覚,青木繁,"逆解析手法を用いた鉄筋コンクリート構造物の腐食検出",日本機械学会創立110周年記念2007年度年次大会講演会, 講演論文集 Vol.6, pp.145-147,関西大学,大阪,2007年9月9-12日.
- 96. 武富紳也, 松本龍介, 薮口博文, 宮崎則幸, "原子モデルによる α 鉄中の転位

の可動性に及ぼす水素の影響",日本材料学会第12回分子動力学シンポジ ウム,名古屋,2007年5月.

- 97. 武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸, "分子動力学法を用いた α 鉄中の刃状転位 近傍の水素拡散挙動解析", 日本機械学会 M&M2007 材料力学カンファレン ス, 東京, 2007 年 10 月.
- 98. 田村善昭, 中島祐典, 上林純子, 松本洋一郎, "超音波による脳内腫瘍治療の ための大規模シミュレーション", 日本機械学会関東支部ブロック合同講演 会 2007 さいたま/第3回埼玉ブロック大会, 埼玉, 2007 年 9 月.
- 99. 千葉真嗣, 宮崎則幸, "LN 単結晶の割れに圧電効果が及ぼす影響", 日本機 械学会第 20 回計算力学講演会, 京田辺, 2007 年 11 月.
- 100.永井政貴,池田徹,宮崎則幸,"四面体有限要素を用いた三次元界面き裂の 応力拡大係数解析手法の開発",第12回日本計算工学会講演会,東京,2007 年5月.
- 101.西井康隆, 天谷賢治, "内蔵フォトセンサ信号からの光ピックアップ収差評価", 日本機械学会講演論文集, No. 07-36, pp. 443-444, (第 20 回計算力学講演会), 2007 年.
- 102.野村吉昭,池田徹,宮崎則幸, "熱応力下の異方性異種材界面接合端部の特 異応力場解析",日本機械学会第 20 回計算力学講演会,京田辺, 2007 年 11 月.
- 103.萩原世也, 安河内辰弥, 佐々木慎司, 池田徹, 宮崎則幸, "EFG 解析の節点再 配置による精度向上に関する検討-境界での節点再配置を考慮した解析-", 第12回日本計算工学会講演会, 東京, 2007年5月.
- 104.花岡秀一,田村善昭, "医療画像データに対する画像処理とその応用",第 21回数値流体力学シンポジウム, CD-ROM (paper/C10-4.pdf),東京, 2007年12 月 19-21 日.
- 105.祐川貴也, 天谷賢治, "赤外線ふく射 2 色 CT 法を用いた噴出ガス温度分布 の高速測定", 日本機械学会講演論文集, No. 07-36, pp. 449-450, (第 20 回計算 力学講演会), 2007 年.
- 106.深谷征史,田村善昭,松本洋一郎, "気泡モデルを用いたキャビテーション 流れ解析による斜流ポンプ内オープン羽根車のキャビテーション壊食予測", 日本機械学会 2007 年度年次大会,大阪,2007 年 9 月.
- 107.古澤寛行,田村善昭, "次世代可視化のためのデータ処理に関する研究",第 21 回数値流体力学シンポジウム, CD-ROM (paper/D4-1.pdf),東京, 2007 年 12 月 19-21 日.
- 108.松本龍介, 久保田義大, 宮崎則幸, "ハイブリットポテンシャル法の開発と それを用いた鉄ナノ多結晶体中のき裂進展挙動解析", 日本材料学会第 12 回分子動力学シンポジウム, 名古屋, 2007 年 5 月.
- 109.松本龍介, 松本直樹, 宮崎則幸, "金属ガラス中のせん断帯の伝ば抵抗に及 ぼすナノ結晶粒子の影響に関する分子動力学解析", 日本金属学会平成 19 年度秋期大会, 岐阜, 2007 年 9 月.
- 110.松本龍介,武富紳也,松本壮平,宮崎則幸,"原子モデルを用いた水素による 滑り面での破壊機構に関する考察",日本機械学会 M&M2007 材料力学カン ファレンス,東京,2007 年 10 月.

- 111.松本壮平,松本龍介,武富紳也,宮崎則幸,"水素と転位の相互作用が bcc 鉄 単結晶中のモード I き裂進展に与える影響の検討",日本機械学会第20回計 算力学講演会,京田辺,2007年11月.
- 112.松本直樹,松本龍介,宮崎則幸,"J積分を用いたナノ結晶分散金属ガラス中のせん断帯伝ば抵抗の評価",日本機械学会第20回計算力学講演会,京田辺,2007年11月.
- 113.村松壽晴, "ファジィ推論", 機械工学便覧基礎編 α6 計算力学, 日本機械 学会, pp. 168-171, 2007 年.
- 114.室谷浩平, "Ward 法を用いたアダプティブ解析",応用数理学会 2007 年度 第一回メッシュ生成研究会,中央大学,2007 年.
- 115.室谷浩平,"拡張 SSA を用いた高精度補間・補外法",日本応用数理学会 2007 年度年会,北海道大学,2007年.
- 116.室谷浩平, "階層メッシュを用いたアダプティブ解析", (財)電力中央研究所, 2007年10月26日.
- 117.山岸寛, 天谷賢治, "多重極展開を用いた境界要素法による注目領域の高速 解法", 日本機械学会講演論文集, No. 07-36, pp. 303-304, (第 20 回計算力学講 演会), 2007 年.

7.6. 受賞

- 1. N. MIYAZAKI, "APACM(=Asian Pacific Association for Computational Mechanics) Award for Computational Mechanics", Dec. 2007.
- 2. N. MIYAZAKI, "JACM(=Japan Association for Computational Mechanics) Award for Computational Mechanics", Dec. 2007.
- 3. G. YAGAWA, "Zienkiewicz Medal"Dec. 2007.
- 4. 宫崎則幸,"日本機械学会創立 110 周年記念会員功労者表彰",2007年 10月.
- 5. 室谷浩平, "船井情報科学振興財団 2006 年度船井情報科学 奨励賞受賞" 2007 年 4 月.
- 6. 矢川元基,"内閣総理大臣表彰"2007年7月.

8. 結び

本報は、2007年度の活動をとりまとめたものである. なお、2008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.