

1. まえがき.....	1
2. 概要.....	2
2.1 センター設置について.....	2
2.2 組織.....	2
2.3 設備.....	3
2.4 研究成果の概要.....	4
2.4.1 構造健全性.....	4
2.4.2 逆問題.....	5
2.4.3 最適化.....	5
2.4.4 大規模可視化.....	5
2.4.5 大規模並列化.....	6
2.5 フォーラム・セミナー・ワークショップ・シンポジウムなどの企画と開催.....	6
2.5.1 センター開所式、記念講演会および第1回計算力学フォーラム.....	6
2.5.2 第1回計算力学シンポジウム.....	7
2.5.3 第2回計算力学フォーラム.....	7
2.5.4 第3回計算力学フォーラム.....	8
2.5.5 その他.....	8
2.6 産学協同活動.....	8
2.6.1 (株)日立製作所機械研究所との連携.....	8
2.6.2 独立行政法人原子力安全基盤機構との連携.....	8
2.6.3 独立行政法人 原子力研究開発機構との連携.....	9
2.7 教育活動.....	9
2.8 広報活動.....	9
3. 研究成果.....	10
3.1 構造健全性.....	10
3.1.1 構造健全性に関する研究の概要.....	10
3.1.2 大規模構造物中の亀裂の3次元自動進展解析.....	10
3.1.3 結晶異方性や粒界を考慮した材料強度に関するマルチスケール解析.....	15
3.2 逆問題.....	18
3.2.1 逆問題に関する研究の概要.....	18
3.2.2 コンクリート中の鉄筋腐食検出に関する逆問題.....	18
3.2.3 腐食モニタリングに関する逆問題.....	20
3.2.4 熱弾性応力測定に関する逆問題.....	21
3.2.5 動的材料特性の同定に関する逆問題.....	24
3.2.6 複合材料の同定と最適設計に関する逆問題.....	25
3.3 最適化.....	28

3. 3.1 最適化に関する研究の概要.....	28
3. 3.2 大規模構造問題における形状最適化問題の研究.....	28
3. 3.3 逆問題手法による, 構造解析における最適化および高精度化技術の開発.....	31
3. 4 大規模可視化.....	33
3. 4.1 大規模可視化に関する研究の概要.....	33
3. 4.2 次世代可視化システムの概念設計.....	33
3. 5 大規模並列化.....	36
3. 5.1 大規模並列化に関する研究の概要.....	36
3. 5.2 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.....	36
3. 5.3 大規模非圧縮性粘性流体解析システムの開発.....	39
3. 6 産学協同研究.....	41
3. 6.1 概要.....	41
3. 6.2 (株)日立製作所機械研究所との連携 (ボイドを含む微細はんだ接続部の疲労き裂進展挙動の解析の研究).....	41
3. 6.3 独立行政法人原子力安全基盤機構との連携.....	44
3. 6.4 ネットワークコンピューティングにおけるデータ操作と効率的通信手段の考察.....	44
3. 6.5 ネットワークコンピューティングにおけるデータセキュリティ管制手段の考察.....	46
3. 7 国際協力.....	50
3. 7.1 インドネシア.....	50
3. 7.2 オーストラリア.....	50
3. 7.3 その他.....	50
4. 業績リスト.....	51
4. 1 論文.....	51
4. 2 著書.....	55
4. 3 総説、解説、エッセイ.....	56
4. 4 招待講演.....	57
4. 5 講演論文、口頭発表.....	59
4. 6 受賞.....	69
5. 結び.....	70

1. まえがき

ものづくりにおいては、製品が製造開始から試用期間を経て廃棄されるまでの諸々の挙動を事前に把握しておく必要がある。特に力学的性質を事前に知ることは最も重要であり、そのためには力学シミュレーションが必須である。そのシミュレーションの基礎となっているのが計算力学とよばれるコンピュータ応用技術である。現在、計算力学の助けなくともものづくりがなされている例は皆無といっても言い過ぎではない。また、計算力学はこのようなものづくりのみならず自然災害、物質の解明など自然界の諸問題を解析・分析する手段としても頻繁に用いられている。わが国における計算力学の分野は、世界屈指のコンピュータ「地球シミュレータ」開発や、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」プロジェクトなどにおけるソフトウェアの整備により、国際的にも最高の水準に達している。

本センターは、文部科学省学術フロンティア推進事業「東洋大学計算力学研究センター」(5年プロジェクト)として2005年度から5年間の設置が認められた。学内での手順などもあり正式にセンターがスタートしたのは2005年6月からであり、本報告書はそのときからの活動を取りまとめたものである。

本センターのコアメンバーは、計算力学を学科のひとつの柱としているコンピューショナル工学科の教授3名、助教授1名と講師1名で構成されておりこれまでも上述の活動などに参加している。また本センターにはこれらのコアメンバーに加えて、産業界、大学、研究所などからも参加を得ている。産業界側のメンバーである日立製作所機械研究所は、特に機械の信頼性評価技術では世界トップクラスにあり、そこでの高度なシミュレーション技術は、電力、エネルギー、半導体、家電製品など多方面の製造技術において適用されている。また、この方面の国際COEを目指すべく海外からも客員研究員が参加している。

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

まだセンターとして立ち上がってから時間的な間がなく活動も緒についたばかりであることをご理解いただき、ご批判とご指導を賜れば幸いです。

2006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

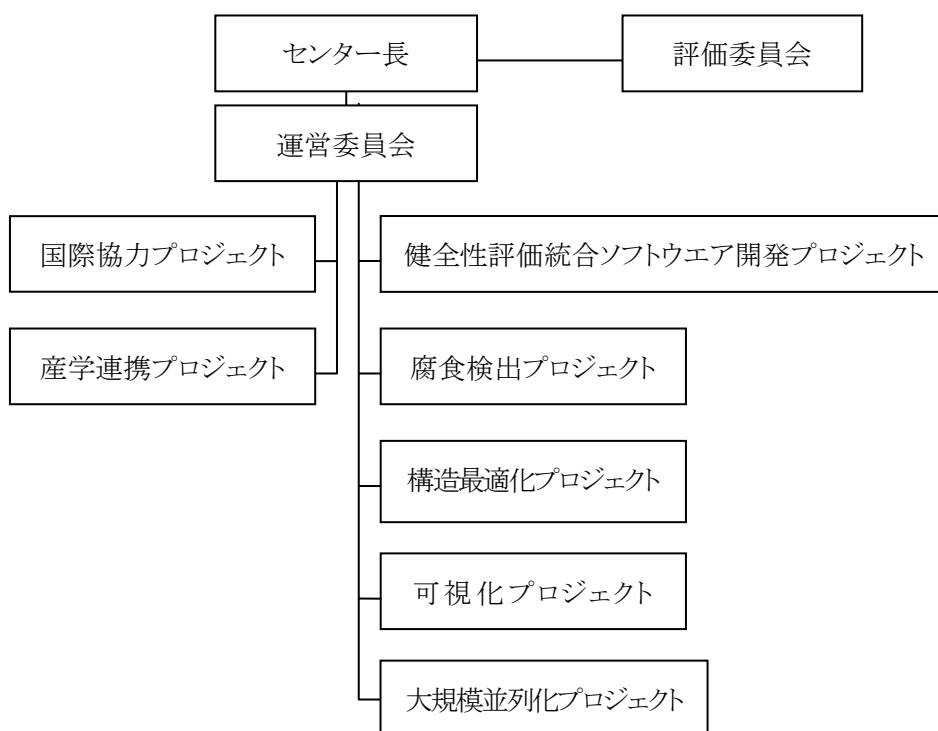
2.1 センター設置について

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
研究員	青木 繁 江澤 良孝 田村 善昭 中林 靖
研究助手	須賀 一博 藤澤 智光 室谷 浩平
研究支援者	M.RIDHA 李 賢良
客員研究員	畔上 秀幸 天谷 賢治 稲葉 正和 井上 裕嗣 北野 誠 斉藤 直人 佐々木 康二 塩谷 隆二 中島 憲宏 古川 知成 宮崎 則幸
その他の研究員	井上 博登 岡田 裕 河合 浩志 柴田 悟
事務	内藤 美佳 成島 久恵 村松 藍香

2.3 設備

センターの主要な設備である PC クラスタは下記の仕様を有している。

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

2. 4 研究成果の概要

2. 4.1 構造健全性

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

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

(2)材料の非均一性。すなわち、結晶の異方性や粒界の存在。

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

(1)大規模構造物中の亀裂の3次元自動進展解析

(2)結晶異方性や粒界を考慮した材料強度に関するマルチスケール解析

2. 4.2 逆問題

結果から原因を推定する逆問題解析は様々な分野でその重要性が認識され、実用化に向けて活発に研究が行われている。本研究では、腐食防食、応力測定および材料試験の分野において、計算力学を利用した逆問題解析手法を開発し、実際問題に役立てることを目指す。具体的には、次に示す逆問題を解析し応用するための方法を探究している。

- (1) コンクリート中の鉄筋腐食検出に関する逆問題
- (2) 腐食モニタリングに関する逆問題
- (3) 熱弾性応力測定に関する逆問題
- (4) 動的材料特性の同定に関する逆問題
- (5) 複合材料の同定と最適設計に関する逆問題

2. 4.3 最適化

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

2. 4.4 大規模可視化

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

- (1) クラスタ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

本年度は(1)のみ研究を行っている。

2. 4.5 大規模並列化

2002年に登場し、当時世界最速のコンピュータであった「地球シミュレータ」のピーク性能は約40 TFlopsであるが、現在世界最速のコンピュータである「BlueGene/L」のピーク性能は367 TFlopsとなっており、このことからハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる。一方、これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては、その開発スピードもソフトウェアの品質もまだまだ十分とは言えず、多くのソフトウェアが20世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である。特に、1970～1980年台に既に確立されているアルゴリズムに対して、並列化の実装のみを加えた物が多く見られる。

このような背景のもと、本プロジェクトでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する、次世代の構造解析・流体解析システムを構築するとともに、これらを組み合わせた連成解析システムの構築を目指している。具体的には以下の項目をテーマとする。

(1)汎用CAEシステムによる地球シミュレータ上での大規模構造解析

(2)大規模非圧縮性粘性流体解析システムの開発

(3)大規模流体構造連成解析システムの開発

(4)流体構造連成解析の最適化問題／逆問題への応用

これらのテーマのうち、本年度は(1)および(2)について実施している。

2. 5 フォーラム・セミナー・ワークショップ・シンポジウムなどの企画と開催

2. 5.1 センター開所式、記念講演会および第1回計算力学フォーラム

表記行事を2005年12月16日(金)におこなった。内外から約80名の参加があった。当日のプログラムは下記のとおりである。

1. 開所式

時間：10:30-11:00

場所：白山第一キャンパス2号館16階スカイホール

式次第:理事長挨拶, 学長挨拶, 他

2. 開所記念講演

時間：11:15-12:00

場所：白山第一キャンパス2号館16階スカイホール

講演者:阿部 博之 先生(総合科学技術会議)

題目:「科学技術政策の動向と大学」

3. 昼食懇談会

時間：12:15-13:15

場所：白山第一キャンパス2号館16階スカイホール

4. 計算力学研究センター建物ツアー

時間：13:15-14:00

場所：白山第2キャンパス計算力学研究センター

5. 第1回計算力学フォーラム -大規模シミュレーションと最適化に関するパネル討論-

時間：14:00-17:00

場所：白山第一キャンパス2号館16階スカイホール

プログラム：

畔上秀幸（名古屋大学）「計算力学による形状設計」

北野 誠（日立製作所）「日立製作所機会研究所における計算力学研究」

塩谷隆二（九州大学）「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」

田村善昭（東洋大学）「大規模解析と可視化」

古川知成（Univ. New South Wales）「A Continuum Approach for Characterizing Nonlinear Inelastic Behavior of Anisotropic Materials」

宮崎則幸（京都大学）「単結晶製造プロセスの材料強度に関連したシミュレーション」

矢川元基（東洋大学）「メッシュレス法についての考察」

2. 5.2 第1回計算力学シンポジウム

表記行事を、下記のとおり企画している。

日時：平成18年3月10日、場所：東洋大学 川越キャンパス

【スケジュール】

13:10-13:15 開会の辞

13:15-14:30 第一部 テーマ：計算力学におけるユーザインターフェース

司会：田村

講演者（順不同，敬称略，以下同様）：中林，藤澤，江澤，室谷

14:30-14:45 休憩

14:45-16:00 第二部 テーマ：最適化と逆問題

司会：矢川

講演者：天谷，須賀，青木，李，Ridha，井上

2. 5.3 第2回計算力学フォーラム

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

場所：インドネシア、バンダーチェ市、Syiah Kuala University

日時:2006年5月12日(金)―14日(日)

テーマ:Building the Strong Research Networking in Asian Region

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

2. 5.4 第3回計算力学フォーラム

第3回国際計算力学フォーラムが2006年9月28日～29日の日程で、オーストラリアのシドニーにあるNew South Wales 大学で開催される予定である。詳細は未定であるが、計算力学センターの客員研究員の一人である古川知成氏(New South Wales 大学、Senior Lecturer)をオーストラリア側の代表として、計算力学研究センターの研究者と、計算力学、最適化などのテーマについて議論する予定である。

2. 5.5 その他

米国 California Institute of Technology 教授の G.Ravichandran 教授を招いて以下の講演会を開き、セミナーを行った。

演題:An Experimental Investigation of Dynamic Failure Mode Transition in Metals and Shock Waves in Layered Solids

場所:東洋大学川越キャンパス1442室

日時:8月11日(木)17時―19時

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

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

2. 6.2 独立行政法人原子力安全基盤機構との連携

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

2. 6.3 独立行政法人 原子力研究開発機構との連携

通信ネットワークの進展は、1980年代から飛躍的な発展をみせ、現在ではインターネットが電気や水道と同様に必須なライフラインとして生活基盤となっている。しかし、その急速な発展と共に、多くの技術者が警笛を鳴らしたとおり、モバイル環境のマナーやインターネットでのセキュリティなどが大きな社会問題となり、犯罪問題や風紀問題にまで、その課題を拡大してしまった。このような環境の中で、グリッド・コンピューティング環境を社会情報基盤として活用していくためには、データ保護や個人認証といったより高度なセキュリティ技術が不可欠となってきている。そこで、グリッド・コンピューティング環境におけるデータ情報保護の高度化を図ろうとする研究を行っている。さらに、高性能計算機の進展は、MPUの高度化の実情から、クラスター・アーキテクチャが主流となっている。具体的には、PCクラスターや地球シミュレータのような並列スーパーコンピュータのクラスタ化によるアーキテクチャである。その意味では、グリッド・コンピューティング環境は、異機種計算機をネットワークにより疎結合したものであり、現在のスーパーコンピュータの同一機種計算機をネットワークで密結合したものとの違いは、ネットワーク性能と異機種計算機結合にある。そこで、グリッド・コンピューティング環境におけるネットワークの高度化を図る研究も行っている。

2. 7 教育活動

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

2. 8 広報活動

朝日新聞から取材を受け以下に示す記事が全国版に掲載された。

朝日新聞2006.1.13(夕刊)

科学

クスなどを用いて、結果を自に見るように示す可視化の研究もある。同大はコンピューティング工学部を設け、集積回路の設計やナノテク素材づくりなどの計算シミュレーション研究に力を入れている。新センターは同学科教授陣が中心になるが、産業界からも話す。(嘉嶋久敏)

大学発

ビルや橋などの安全を支える工学的な計算手法を研究する「計算力学研究センター」を東洋大が設立し、昨年12月に開所式を開いた。

東洋大

建物の安全支える計算法

析手法を「逆問題」とい。構造物へ応用しようとする。構造物の変形やひずみの計測量をもとに、一定の力が加わっても壊れない計算手法を開発し、

3. 研究成果

3.1 構造健全性

3.1.1 構造健全性に関する研究の概要

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

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

(2)材料の非均一性。すなわち、結晶の異方性や粒界の存在。

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

(1)大規模構造物中の亀裂の3次元自動進展解析

(2)結晶異方性や粒界を考慮した材料強度に関するマルチスケール解析

以下に、それぞれの研究について詳しく述べる。

3.1.2 大規模構造物中の亀裂の3次元自動進展解析

(1) 目標・計画

本研究では、局所メッシュ生成手法であるフリーメッシュ法(FMM)、大規模並列有限要素法解析プログラム(ADVENTURE および NEXST)、破壊力学パラメータ計算手法(VCCM)等の要素技術をベースとして、大規模構造物中の複雑形状亀裂の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亀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、混合モードでの亀裂進展等、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亀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1および表1に示す。

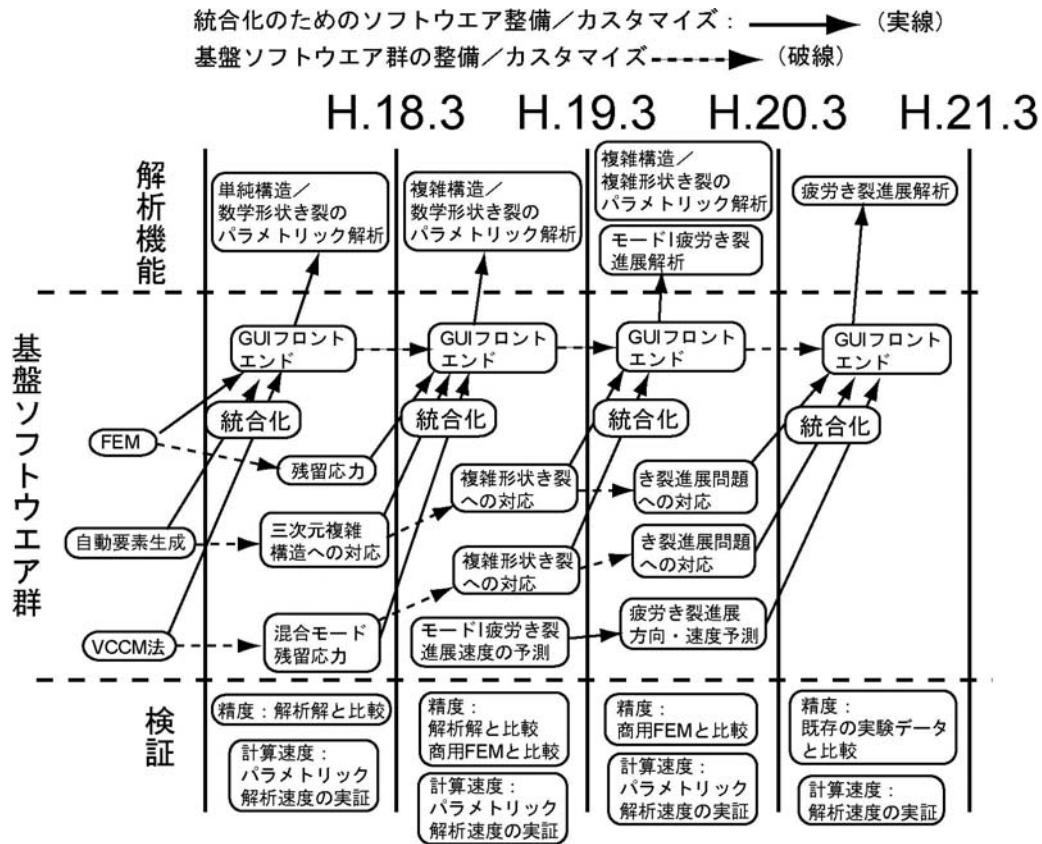


図1 3次元自動亀裂進展解析システムの研究開発の計画

表1 3次元自動亀裂進展解析システムの開発ロードマップ

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

(2) 意義・国際社会との比較

原子力関連施設等での SCC や疲労亀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、現在の手動での亀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次元自動亀裂進展解析を実現する。

これらの研究成果は、大規模構造物の SCC や疲労亀裂に関する亀裂進展予測で、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次元複雑形状の亀裂のメッシングの問題から自動での亀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亀裂解析システムは、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亀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) 特徴

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
- ③PCクラスターまたはグリッドコンピュータのようなHPCプラットフォーム上での高速かつ高精度の完全自動破壊力学解析

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

(A) **実用的な操作性:** 各種解析をWindowsベースのGUIメニュー操作により実行できるようにするとともに、商用の3次元CADソフトウェアとのインターフェースを整備し、実機形状の解析がロバストに実行できるようにする。また、WindowsベースのクライアントPCで、計算サーバーとなるPCクラスターを一括制御し、最新の計算機を設計者や解析者が日常業務で利用できるユーザーフレンドリーな操作環境を提供する。

(B) **大規模並列パラメトリック解析:** 100万自由度規模の問題に対して、1日(24時間)で、PC1台あたり20ケース以上のパラメトリック解析を自動的に実行することを可能とする。20台のPCクラスターを用いた場合には1日で400ケース以上のパラメトリック解析が可能となる。

(C) **完全自動の亀裂進展解析:** 100万自由度規模の問題に対して、1日(24時間)で20ステップ以上の自動疲労亀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ケースの自動亀裂進展解析が可能となる。

(4) H17年度進捗状況

平成17年度の成果としては、数学形状(楕円、半楕円形)を持つ亀裂のパラメトリック解析を行う基盤モジュールの開発を行った。具体的には以下の成果が得られた。

- ①混合モード負荷を受ける三次元亀裂の応力拡大係数計算のための仮想亀裂開口積分法(VCCM)プログラムを開発した。
- ②残留応力下で応力拡大係数を算出できる仮想亀裂開口積分法(VCCM)プログラムを開発した。
- ③混合負荷を受ける亀裂に対する自動局所メッシュ生成プログラム(FMM)を開発した。

- ④GUI メニュー操作による、平板や無限弾性対中のモード I 半楕円／楕円亀裂のパラメトリック解析を行った。
- ⑤解析解の存在する問題での精度検証し、応力拡大係数の誤差1%未満を達成した。
- ⑥100 万自由度規模の問題に対し、1日(24 時間)で 20 ケース以上の解析を自動的に実行することが可能な大規模並列パラメトリック解析機能を開発した。

今年度開発したモジュールを利用したテスト解析の結果を図 2 から図 4 に示す。また、亀裂の進展に応じて、楕円型亀裂の表面パッチと内部節点を自動的に生成している様子を図 5 に示す。

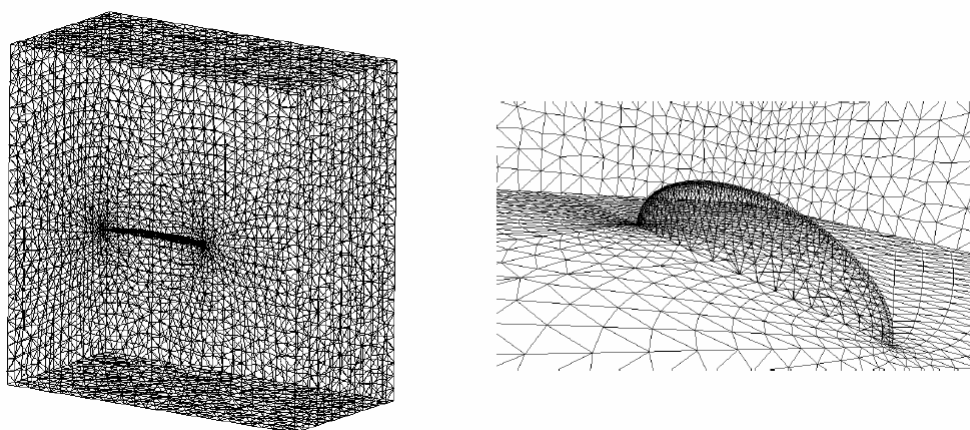


図 2 亀裂進展解析用表面パッチ生成モジュールによる表面メッシュ生成の様子

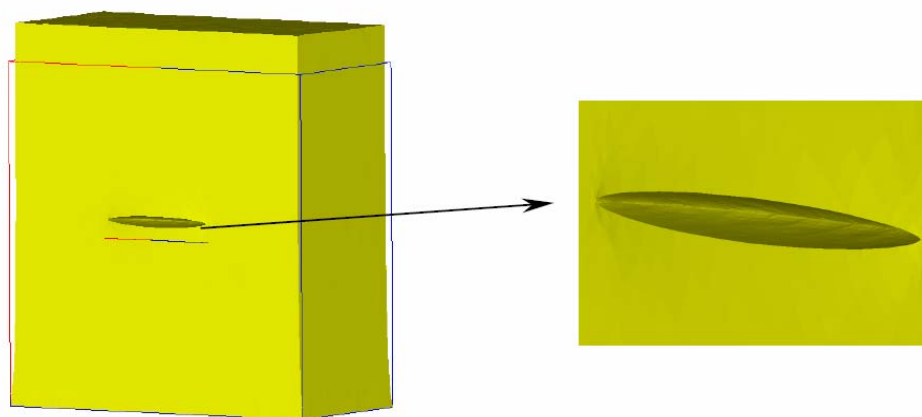


図 3 有限要素法による弾性解析による変形図

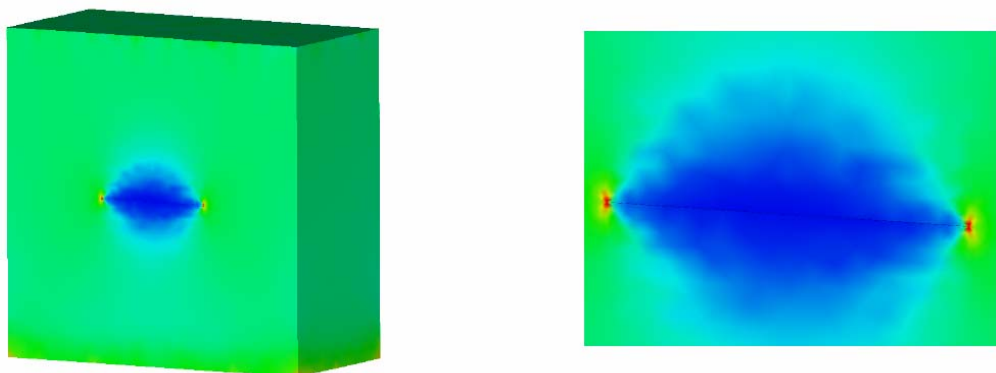


図 4 有限要素法による弾性解析による主応力分布図

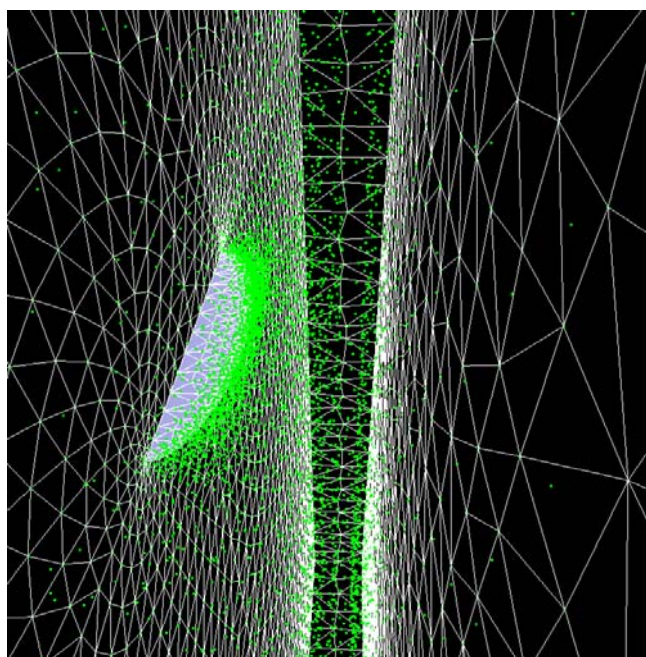


図 5 楕円型亀裂の表面パッチの生成と内部節点の生成の様子

3. 1.3 結晶異方性や粒界を考慮した材料強度に関するマルチスケール解析

(1) 目標・計画

材料強度研究への計算力学手法の適用を有限要素法を用いたマクロレベルの解析と分子動力学法を用いたミクロレベルの解析の両面から行う。マクロレベルの解析では、電子デバイス／光学デバイス用単結晶材料を取り上げ、単結晶引き上げプロセスからデバイス作成のための成膜プロセスまでの転位密度評価、およびマクロな単結晶の割れ評価手法の確立を目指す(以降、マクロレベルの解析と呼称する)。一方、ミクロレベルの解析では、大規模分子動力学解析コードを開発し、それを用いることにより材料強度に粒界がどのような影響を及ぼすかを検討する(以降、ミクロレベ

ルの解析と呼称する)。とりわけ、燃料電池等で注目を浴びている水素利用に関連して重要となってきた水素環境下での材料強度劣化のメカニズムを明らかにする。

(2) 意義・国際社会との比較及び特徴

(A)マクロレベルの解析

単結晶製造プロセスに関連したシミュレーションは流動・伝熱分野では多数行われているが、結晶の品質に直接的な影響を及ぼす固体力学分野の研究は少ない。その中で、本研究では、結晶異方性を厳密に考慮した単結晶育成過程の熱応力解析を三次元有限要素法を用いて行い、結晶育成方向と結晶の品質との関連をはじめて明らかにするという先駆的な研究を実施した。また、クリープひずみ速度が転位密度の関数として与えられるクリープ構成式 Haasen-Alexander-Sumino モデルを用いて、単結晶引き上げ過程における非定常状態での転位密度の定量的解析を世界に先駆けて行った。その後、これを結晶異方性を考慮した三次元解析への拡張、さらにはインゴットアニールプロセス、デバイス作成時の成膜プロセスにおける転位密度の定量的評価解析へ拡張するなど世界最先端の研究を行っている。このような研究成果が評価されて、2006 年 9 月 10 日－13 日にドイツの Bamberg で開催される 5th International Workshop on Modeling in Crystal Growth において結晶育成時の転位密度評価に関連にした招待講演を行うこととなっている。また、単結晶育成時にマクロな割れの生じやすい酸化物単結晶について割れの実験とその実験条件での熱応力解析を行うことによって割れを支配する応力成分とその限界値を明らかにした。

(B)ミクロレベルの解析

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

- ① 領域分割法を用いて並列計算機環境で動作するプログラムを開発し、1億－10億粒子程度の解析を行うことを最終目標とする。
- ② 上記の解析コードを用いて、き裂と粒界があるモデルの解析を行い、粒界が材料の強度に及ぼす影響について検討する。
- ③ 水素が材料強度に及ぼす影響を検討するために亀裂と粒界があるモデルに水素原子を導入して水素ぜい化および疲労強度に水素がどのようなメカニズムで影響を及ぼすかを明らかにする。これまでも、Abraham らの研究グループにより1億－10億粒子程度の大規模分子動力学解析は行われているが、この解析は Lenard-Jones ポテンシャルというモデルポテンシャルを用い、単結晶材料の解析を行っているにすぎず、材料の持つ複雑な内部構造は一切考慮されていない。我々が実施しようとしている研究の特徴は、粒界を持つような実際的な材料を取り上げ、この強度をについて検討しようとする工学的に重要な分野を取り扱っている点に特徴がある。

(3) H17年度進捗状況

マクロレベルの解析およびミクロレベルの解析それぞれにおいて、平成17年度に実施した研究の成果は下記の通りである。

(A)マクロレベルの解析

- ① 正方晶(tetragonal)系単結晶である PMO 単結晶について種々の育成方向に対して単結晶育成過程中的熱応力解析を実施し単結晶育成方向と結晶の品質の関係を検討した。本研究の成果は Journal of Crystal Growth に掲載が決定している。
- ② LT 単結晶のマクロな割れ試験および実験データをもとにした熱応力解析を実施し、結晶のマクロな割れを支配している応力、その限界値、および割れ強度に及ぼす寸法効果について検討した。本研究の成果は Journal of Materials Science に掲載が決定している。
- ③ Si 単結晶へ GaAs をヘテロエピタキシャル成長させるプロセスの転位密度評価解析を行った。本研究の成果は本年 11 月につくば市で開催された日本機械学会第 18 回計算力学講演会において発表された。
- ④ インゴットアニール過程の転位密度評価をより精度良く行うために転位の消滅効果を取り入れた HAS モデルについて検討し、GaAs、InP インゴットのインゴットアニールプロセスおよび Si 単結晶へ GaAs をヘテロエピタキシャル成長させるプロセスの転位密度評価解析を行った。

(B)ミクロレベルの解析

- ① α 鉄を対象として数百万程度の粒子にき裂と2つの粒界を持つモデルについて繰り返し負荷による疲労き裂進展挙動の解析を行い、疲労き裂進展初期過程のメカニズムを明らかにした。
- ② 鋼材中の水素が疲労強度に及ぼす影響に関する実験について文献調査を行い、次年度以降の分子動力学解析の研究対象を検討した。

3. 2 逆問題

3. 2.1 逆問題に関する研究の概要

結果から原因を推定する逆問題解析は様々な分野でその重要性が認識され、実用化に向けて活発に研究が行われている。本研究では、腐食防食、応力測定および材料試験の分野において、計算力学を利用した逆問題解析手法を開発し、実際問題に役立てることを目指す。具体的には、次に示す逆問題を解析し応用するための方法を探究する。

- (1) コンクリート中の鉄筋腐食検出に関する逆問題
- (2) 腐食モニタリングに関する逆問題
- (3) 熱弾性応力測定に関する逆問題
- (4) 動的材料特性の同定に関する逆問題
- (5) 複合材料の同定と最適設計に関する逆問題

以下に、それぞれの研究について詳しく述べる。

3. 2.2 コンクリート中の鉄筋腐食検出に関する逆問題

(1) 目標・計画

本研究では、コンクリート表面における電位などの測定値から境界要素逆解析を利用して、効率的にまた精度よくコンクリート内部の鉄筋の腐食を同定する方法を開発することを目標としている。本年度は、電位の測定値からの鉄筋腐食同定精度を高めるために、実際の構造物から腐食に関する様々な材料特性値を推定するための逆解析手法の基礎を確立する。また、コンクリート深部の鉄筋腐食を検出する場合には、コンクリート表面の電位分布による鉄筋腐食検出の精度が不十分になるので、この問題の解決を図る。腐食によって生じる電流に起因する磁場に着目し、コンクリート床表面の磁場分布の測定と境界要素逆解析を併用して、裏面近くの鉄筋腐食位置を検出する方法を探究するために、数値シミュレーションを行う。

(2) 意義・国際社会との比較

ビルディング、橋脚、防波堤などのコンクリート構造物中の鉄筋にはしばしば錆(腐食)が発生し、腐食生成物による体積膨張のためにその周辺のコンクリートが破壊し、これが構造物の破壊事故の原因になることが知られている。本研究により、鉄筋腐食を非破壊的に検出する効率的な、精度の高い方法が開発できれば、コンクリート構造物の健全性を向上させ、破壊事故を未然に防ぐことが可能となる。

腐食防食の分野では、他の分野ほどには数値解析が利用されることが少なかったが、最近ではその有効性が認められ、徐々に普及し始めている。しかし、逆解析を利用した腐食検出の研究は国の内外を問わず見当たらない。また、磁場を利用する腐食検出の研究は極めて少ない。

(3) 特徴

本研究では、数値逆解析を利用して腐食を検出しようとしている。また、磁場を利用して鉄筋腐食の検出法を探索している。このような研究は、前項で述べたように他には見当たらないか極めて少ないので、本研究の特徴となっている。

(4) H17年度進捗状況

構造物から腐食に関する様々な材料特性値を推定するための逆解析手法を開発するために、基礎的な実験および境界要素法シミュレーションを行った。鉄筋を含むコンクリート試験片の表面上の1点と鉄筋の間に交流を印加して、試験片表面上の数点における電位を測定し、この測定値から数値逆解析によってコンクリートの複素電気伝導度および鉄筋とコンクリート間のインピーダンスを推定した。この結果を機械学会講演会で発表した。

また、この逆解析に対して、推定誤差の共分散行列を計算し、その主値の平均値を最小化することにより最適な測定点の位置を決定した。すなわち、最適な測定条件を求めた。この研究結果を機械学会で講演発表した。

コンクリート深部の鉄筋腐食を検出するために、磁場計測と数値逆解析を利用する方法を開発するために、境界要素法を用いてシミュレーションを行った。その結果、電位測定では検出不可能な場合でも、下図のようにSQUIDによる磁場計測を利用すれば検出できる可能性があることを明らかにした。この結果を国際誌NACEに論文発表した。

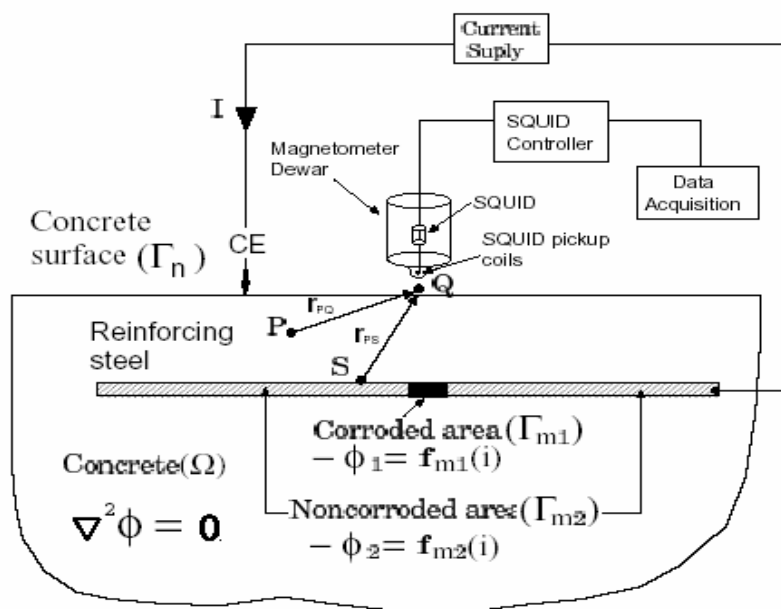


Figure 1. Model of magnetic field measurement for identifying corrosion of steels in concrete.

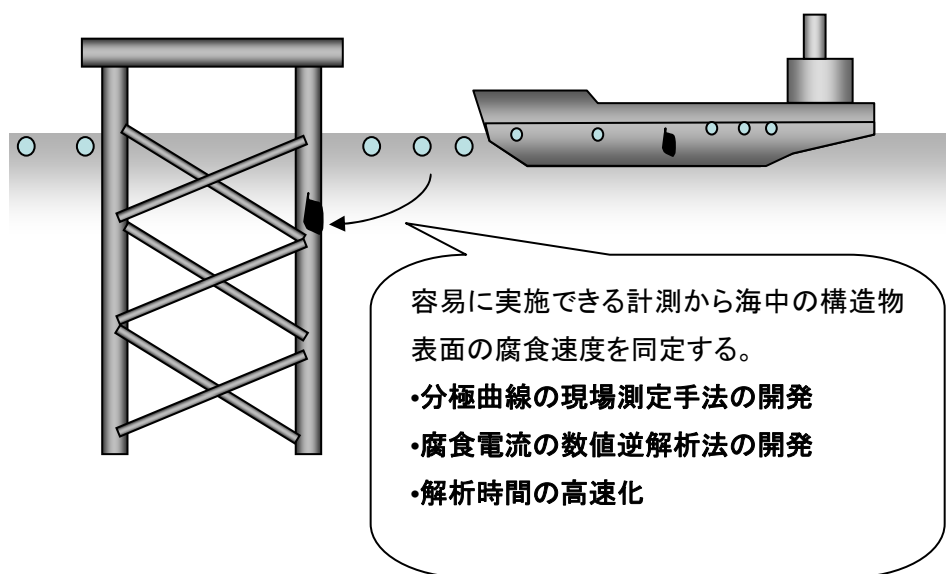
3. 2.3 腐食モニタリングに関する逆問題

(1) 目標・計画

腐食モニタリングとは、現在そのとき(In-situ)の腐食速度を遠隔的に監視し、それに基づいて何らかの腐食対策を施すことである。構造物の腐食管理に対しては腐食モニタリングが、経済性、安全性の上で直接的なメリットがあるにもかかわらず、以下の3つの問題が存在する。

1. 腐食モニタリング技術の日本での開発は低調であり、フィールドで適用可能な腐食モニタリング技術の多くは、国外に依存しているのが実情である。2. 測定に多くの労力と時間と熟練を必要であり、人が近づきにくい環境で測定する場合や構造物が複雑な場合には検出の精度が不十分である。3. 腐食は電気化学・金属工学の分野で古くから多くの研究されてきているがコンピュータシミュレーション技術の適用が逆に遅れている。

本研究では上記の要請に答え問題点を克服するために数値逆解析を適用した海洋構造物の腐食モニタリング技術を開発する(下図参照)。すなわち、**(1)数値逆解析技術の開発(2)フィールドで適用可能な高精度の測定法の開発(3)高速な腐食解析計算法の開発**の3点を行う。



(2) 意義・国際社会との比較

海洋構造物の腐食検出は構造物の安全性向上のために重要であるので、多くの電気化学的な研究がなされてきた。本研究ではこれらの成果を取り入れるだけでなく、この分野で利用されることの少なかった数値逆解析および最適化を導入・改良して、新しい実用的な腐食検出方法を見出す。

国外では腐食シミュレーションがようやく研究されるようになり、今年初めてこの分野の国際会議が開催され申請者は招待講演を行った。逆解析はまだほとんど研究されておらず当研究グループは世界をリードしている。国内でも数値腐食解析の研究はほとんど手付かずの状態である。

本研究の過程で他分野にも応用できるような新しい数値逆解析手法も開発する。なお、本研究

で開発される技術は腐食分野だけでなく電気化学現象を基礎とする応用技術、例えば燃料電池、タンパク質検出、LSI 製造プロセスの管理、生物細胞の膜電位計測など直接アクセスできない対象物の電気化学的な表面状態を離れた位置における測定量から同定する必要がある多くの実用的な分野で直接利用できる。

(3) 特徴

- 海洋構造物における腐食を、従来法に比べて極めて少ない労力・時間・熟練で検出する**実用的・効率的**な方法を見出そうとしている。具体的にはアクセスが簡易な位置における間接的な情報(電位、抵抗、磁場)を集め、これらの情報を総合的に取り扱う**数値逆解析**により構造物表面の腐食状態を同定する。これが本研究の第1の特色・独創点である。
- 従来、腐食防食工学の分野であまり利用されてこなかった**数値逆解析**の手法を、海洋構造物の効率的な腐食検出のために導入・改良しようとしている。具体的には、先験情報を利用した逆解析手法および海洋構造物どうしの相互干渉による腐食の進行速度を定量的に推定する解析システムを開発する。これが本研究の第2の特色・独創点である。この方法は、上述のように腐食検出を効率化できるばかりでなく、微細構造を含む長大構造物の解析や一般構造物中のき裂や欠陥検出など他の幅広い分野にも応用することができる。

(4) H17年度進捗状況

磁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。しかし、この方法には、静電場解析を行ったあと、領域内の電流密度を領域内で体積分して計算する必要があるため、計算量と計算精度の点で様々な問題がある。解領域解析においては積分領域が膨大となるためこの問題は特に顕著になる。本年度は、静電場がラプラス方程式に支配される場合に対して、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。

3. 2.4 熱弾性応力測定に関する逆問題

(1) 目標・計画

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

熱弾性法の適用に際しては、通常、測定対象物に振幅・周波数が一定の正弦波状負荷を与え、この状態を断熱状態とみなして、測定される温度振幅から直接主応力和の振幅を求めている。しかし、実際には、測定対象物内の熱伝導のために温度振幅の分布と主応力和振幅の分布は一致せず、場合によってはその差異が無視できないほど大きくなる。

本研究では、熱弾性法の精度向上を目的として、赤外線サーモグラフィにより計測される温度分

布を元に、断熱状態における温度分布(すなわち、主応力分布)を推定するための熱伝導逆解析手法の確立を目指している。

(2) 意義・国際社会との比較

熱弾性法は、物体に生じる応力の分布を“非接触的に”かつ“画像形式で”測定できるという点において、他の応力測定法にない優れた特徴を有している。特に企業等の現場における実験応力解析では応力分布の定量的評価(応力集中部の正確な把握)の効率化が要求されるが、このような要求に対して熱弾性法は最も適した方法である。よって、熱弾性法の高精度化を図ることは、特に工業的に意義が高い。

熱伝導が熱弾性法の精度に無視できないほどの影響を及ぼすことについては、既によく知られている。しかしながら、従来の研究は、

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

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

本研究で確立しようとする逆解析手法は、現場での応力測定における実用性を前提として、熱弾性法の測定精度の向上を図ろうとするものであり、世界的にも類似の研究は見当たらない。

(3) 特徴

本研究において確立しようとしている熱伝導逆解析手法は、次のような特徴を有する。

- (1)逆問題解析に関する各種の研究においては、逆解析のテクニックは優れているが、逆問題の設定(前提、仮定)が十分に確認されていないケースがしばしば見受けられる。本研究では、「境界要素法による周期定常熱伝導問題の順解析」と「最新の赤外線サーモグラフィによる実測」を行い、両者が十分に高い精度で一致することを確認し、順解析における熱伝導現象のモデル化を踏まえた上で、逆問題の設定を行っている。
- (2)有限要素法や境界要素法などの数値解析手法を用いれば実用上十分な精度で本研究の主題である逆解析が可能であることは、Offermannらの研究および著者らの過去の研究により知られている。熱弾性法の利点は「現場での効率的な応力分布の把握」にあるのに対し、赤外線サーモグラフィにより温度分布画像が得られる度に有限要素法や境界要素法の解析モデル(メッシュ)を作成することは、特殊な場合を除けば現実的でない。この難点を踏まえて、本研究では、「赤外線サーモグラフィにより得られるデジタル画像データに対する演算処理」と「測定装置に組み込むことにより現場で使用できる手法」を前提として、差分法を基本とする逆解析手法を採用している。

(3)多くの逆問題では、非適切性に起因する多くの困難がある。このことは既によく知られているにもかかわらず、非適切性の回避(緩和)を考慮していない研究論文は未だに少なくない。本研究では、「逆問題の本質的な非適切性」、「実測データの温度分解能」および「実験上不可避なノイズの存在」を考慮して、モリフィケーション法による適切化処理を行っている。

(4) H17年度進捗状況

昨年度までの研究では、次の各項目を実施してきた。

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

本年度は、以上の成果を踏まえ、上記(4)で開発した逆解析手法を実測データに対して適用し、その有効性の検証と問題点の抽出を行った。以下に、A2024 合金製の有孔帯板の引張りに関する解析結果の一例を示す。

図1と図2は、境界要素法による順解析の結果である。図1は断熱状態における温度分布(左:振幅, 右:位相, 以下同様)であり、図2は熱伝導状態(負荷周波数 1 Hz)における温度分布である。円孔の周囲の温度分布(すなわち、見かけ上の主応力分布)は、両者の間で大きく異なっている。図3は、図2の順解析と同一の条件における実測データである。図2の順解析結果と図3の実測結果は、十分高い精度で一致している。図4は、図3の実測データに対して本研究の手法による逆解析を施した結果である。図4の逆解析結果は図3の実測データに比べて図1の断熱状態における温度分布に近づいており、本研究の手法が本質的に有効であることが確認できる。

今後の課題としては、以下の点が挙げられる。

- (1) モリフィケーション法におけるモリフィケーション半径(一種の適切化パラメータ)の最適化手法の確立とその自動化
- (2) 逆解析の事前処理(ノイズ低減等)の検討
- (3) 実用上の要求精度を踏まえた解析効率の向上(境界条件の取り扱いの簡略化)
- (4) 各種実測データによる有効性の検証

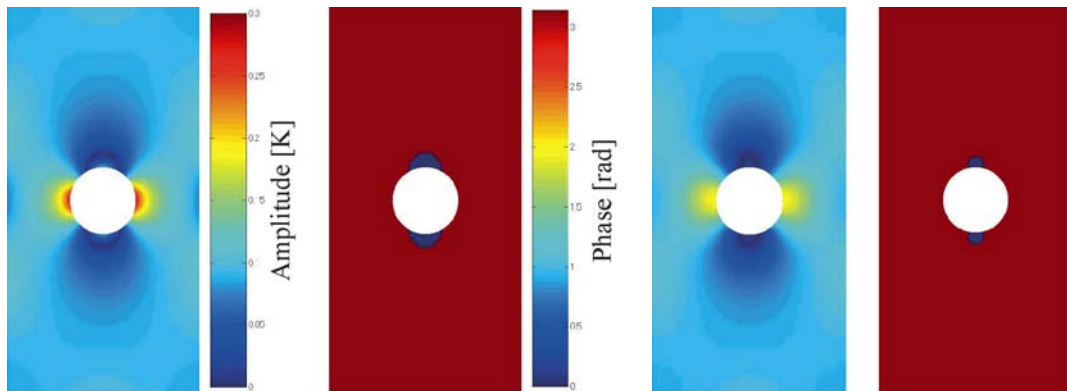


図 1 断熱状態における温度分布(順解析)

図 2 熱伝導状態における温度分布(順解析)

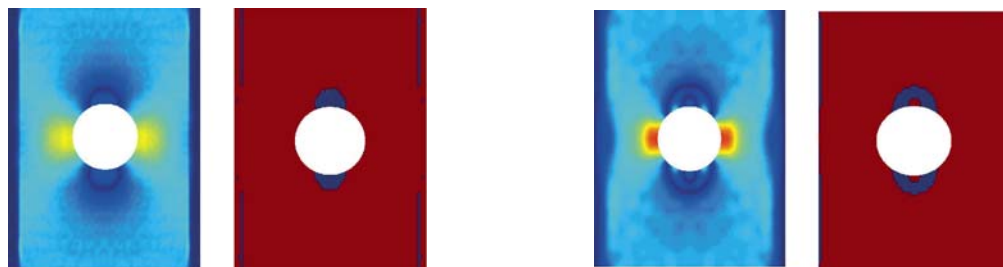


図 3 熱伝導状態における温度分布(実測)

図 4 断熱状態における温度分布(逆解析)

3. 2.5 動的材料特性の同定に関する逆問題

(1) 目標・計画

自動車や電車などの乗り物の衝突に対する安全性確保をはじめとして、地震に対する構造物の健全性評価、高速塑性加工法の改良、ゴルフなどのスポーツ用具の開発、ノートPCなどの精密機器の落下に対する健全性確保など広い分野で動的解析が不可欠であることはいうまでもない。これらの解析には高ひずみ速度下の材料の変形特性を正確に測定しておくことが必要であるが、同一材料でも試験機によって大幅に異なった結果を生じることがある。

この主な原因として、動的な応力測定の誤差が挙げられる。ねじ部を含む応力棒中を伝播する応力波の挙動を正確に把握し、応力棒に貼られたひずみゲージの出力から試験片に作用した応力を逆解析により同定すれば、この誤差を除去できると考えられる。

そこで、本研究では、まず、応力波の伝播挙動を正確に、効率よく(順)解析できる方法を提案し、次に、この方法を利用して逆解析する方法を開発することを目的とする。順解析法の研究を 17、18 年度に、逆解析法の開発を 19 年度に行う予定である。

(2) 意義・国際社会との比較

本研究の成果が高ひずみ速度下の材料の変形特性測定に利用され、測定精度が向上すれば、上述の様々な動的解析への信頼性が向上し、例えば自動車実機による高価な衝突実験の回

数を減少させることができる。このために、国の内外で動的材料特性の測定精度向上のための研究が活発に行われているが、衝撃試験機のように複雑な系の動的応力逆解析はあまり研究されていないのが現状である。

(3) 特徴

本研究では、衝撃試験機の応力測定部に多く用いられるホプキンソン棒のように均一断面を持つ弾性体中を伝播する応力波を空間的および時間的の細かい分解能で解析できる効率的な有限要素法を開発する。この有限要素法を用いることにより、従来ならば極めて大規模な計算機でしか実施できなかった逆解析を小さな計算機で実行できるようにして、様々な場所で使用されている衝撃試験機の精度向上を図る点が本研究の特徴である。

(4) H17年度進捗状況

均一断面を持つ弾性体中を伝播する応力波を空間的および時間的の細かい分解能で解析できる効率的な有限要素法を開発し、国際学術誌 Int. J. Numerical Methods in Engineering に論文発表した。

3. 2.6 複合材料の同定と最適設計に関する逆問題

(1) 目標・計画

これまで、材料同定は主に単軸実験で得られた応力・ひずみデータを基に行われてきた。非均質性・異方性を有する複合材料においても、一般に材料実験は短軸試験機に材料の向きを変えて固定させることにより行っている。しかし複合材料における損傷は、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ため、必ずしも巨視的な材料パラメータの全てを短軸実験で正確に同定できるとは限らない。そこで近年、多軸試験機が開発されるようになり、多軸試験による材料同定の必要性が問われるようになってきた。

多軸試験では、多自由度において試験片を変形させることができる。そこで問題になるのが、どの経路で試験片を変形させると材料が最も正確に同定されるかということである。そこで本研究では、最適経路を含めた多軸試験による材料の同定方法の導出、ならびに開発された同定方法による複合材料の同定を目的とする。

研究計画としては、まず線形挙動のみを考慮し、線形材料パラメータの同定方法の開発を行う。同定されるパラメータの評価基準としてはこれまでに研究者が開発してきた特異値分解法による特異値を、さらに測定誤差を考慮するために統計学的手法であるベイズ推定を応用する。線形挙動への応用に伴い、非線形材料パラメータの導出、ならびに実材料の同定を行う。非線形を記述するためにこれまでに研究者が開発してきたニューラルネットワークを、また非線形最適設計においては多目的勾配最適化手法を用いる。

(2) 意義・国際社会との比較

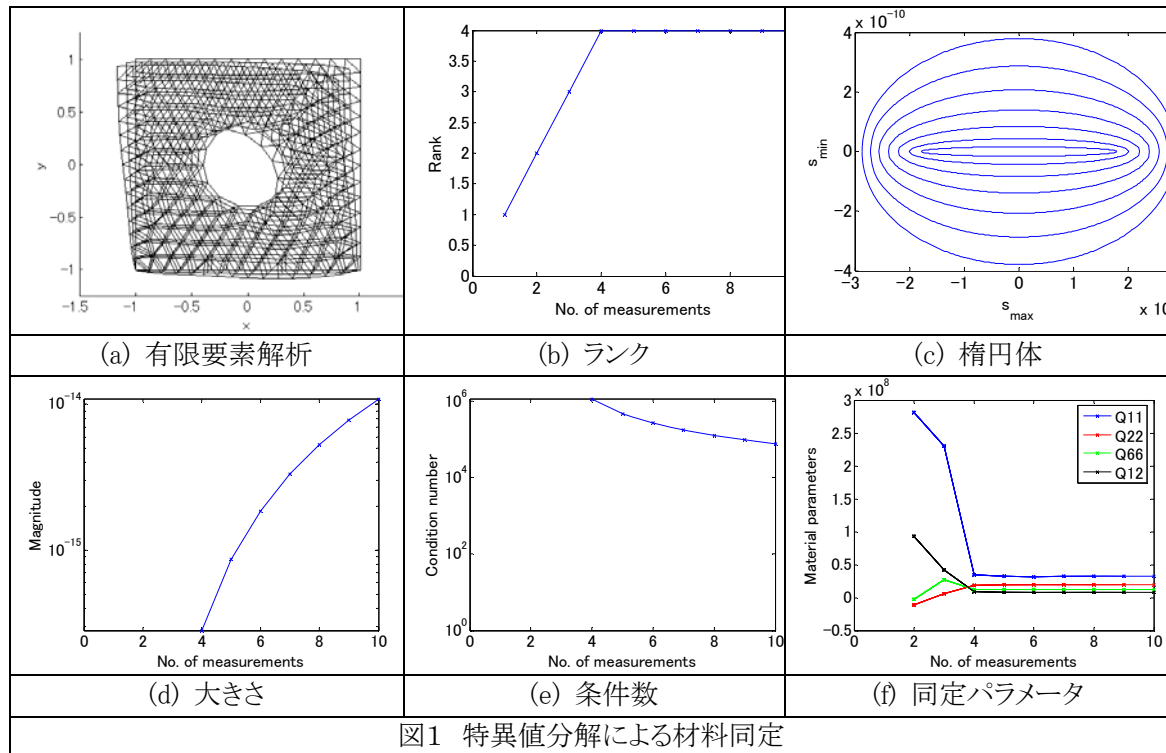
多軸試験における材料同定方法はまだ確立されていないため、本研究の意義は大変高い。研究者は材料同定分野においてこれまでも第一線で活躍しており、またその研究成果を基に海外にて職務についており、国際的にも一定の評価を既に得ている。

(3) 特徴

本研究の第一の特徴は、多軸試験による材料同定にある。また多軸試験による材料同定にあたって、従来用いられてこなかったベイズ推定を統計学的手法として、同定評価に特異値分解を、非線形記述にニューラルネットワークを、最適化に多目的勾配最適手法を用いる。

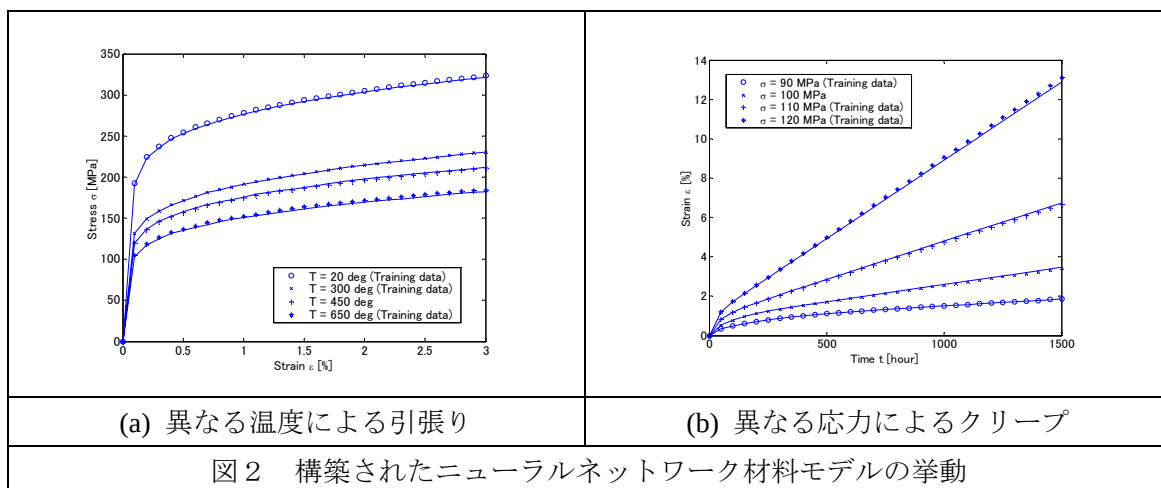
(4) H17年度進捗状況

これまでの研究成果として、円孔のある長方形試験片に特異値分解を応用した結果を図1に示す。本手法では境界条件から得られた仕事と、内部応力・ひずみにより導出された内部エネルギーを比較することにより逆問題を定式化、特異値を算出している。図 1(a)は三角形要素を用いて二次元有限要素解析を行った結果、図 1(b)は逆問題の定式化により得られた行列のランク、図 1(c)は行列の特異値から得られた楕円体、図 1(d)と図 1(e)は特異値から算出された大きさと条件数の推移、そして図1(f)は同定されたパラメータを示す。同定されたパラメータは、有限要素解析に用いられた材料パラメータと一致し、本手法の有効性が伺える。



また図2には、短軸実験による材料データから構築されたニューラルネットワーク材料モデルの材

料挙動を材料データとともに示す。図2(a)は異なる温度による引張り、図2(b)は異なる応力によるクリープ挙動の結果を表している。これらの解析からニューラルネットワーク材料モデルが様々な材料挙動を記述できることが分かる。



3.3 最適化

3.3.1 最適化に関する研究の概要

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

3.3.2 大規模構造問題における形状最適化問題の研究

(1) 目標・計画

構造健全性を評価する上で計算力学的手法は実験に代わる評価手法としてその重要性が高まってきた。構造健全性をさらに高めるためには、危険な現象が発生しにくい構造に設計を変えていくための最適化手法を開発する必要がある。本研究では、計算力学的手法によって解かれてきた大規模構造問題に対して、大規模な数値モデルのまま評価関数が最適化するように数値モデルの形状を更新する手法を開発することを目指している。これまでの研究により、関数空間の勾配法を応用した汎用的な解法を開発し、弾性体、流れ場、熱伝導場、音場を対象とした形状最適化問題が解けることを示してきた。本研究では、その汎用解法を各種連成問題に適用することを目指した。今年度は、異種材料からなる構造の境界面形状最適化問題、流体・構造連成系の形状最適化問題、構造・音場連成系の形状最適化問題にこれまで開発してきた汎用解法を適用することを試みた。

(2) 意義・国際社会との比較

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

ノンパラメトリック形状最適化問題に関する理論研究はフランスの応用数学者らが先駆的な研究を行ってきた。その結果に基づけば、それぞれの形状最適化問題に対して形状変動に対する目的

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

(3) 特徴

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

(4) H17年度進捗状況

(1)異種材料からなる構造の境界面形状最適化問題

硬さの異なる 2 種類の材料の境界面形状を変化させることで指定した部分境界の変位を指定した変位に近づける異種材料境界面の形状同定問題を定式化し、その解法を示した。最小化させる目的汎関数には指定した部分境界上での変位の 2 乗誤差積分を選んだ。形状勾配は随伴変数法によって評価した。滑らかな形状変動を得るために力法を適用した。解析例では、硬質材と軟質材の貼り合わせからなる簡略化した座位保持具の数値モデルを対象にして、使用者が着座した際のまつわり付く変形を抑えた異種材料境界面の解析結果を示した。

(2)流体・構造連成系の形状最適化問題

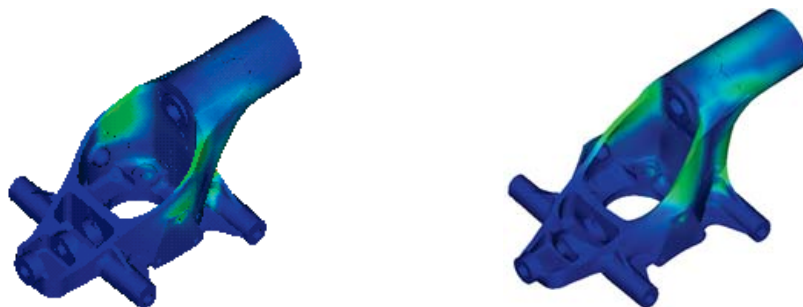
流体・構造連成問題の数値解析は生体や流れ場に置かれた柔軟構造のシミュレーションの必要性から需要が高まっている。近年では、数値解析の結果を利用したパラメトリックな形状最適化問題も解かれるようになってきた。本研究では、流体・構造連成問題の形状最適化をノンパラメトリック形状最適化問題として定式化し、形状勾配を利用した解法を示した。

(3)構造・音場連成系の形状最適化問題

音場・構造連成問題の数値解析は振動騒音対策において重要な役割を演ずるようになってきた。近年では、数値解析の結果を利用したパラメトリックな形状最適化問題も解かれるようになってきた。本研究では、音場・構造連成問題の形状最適化問題をノンパラメトリック形状最適化問題として定式化し、形状勾配を利用した解法を示した。

ナックルジョイントの軽量化(ADVENTURE プロジェクトの成果)

初期形状/収束形状

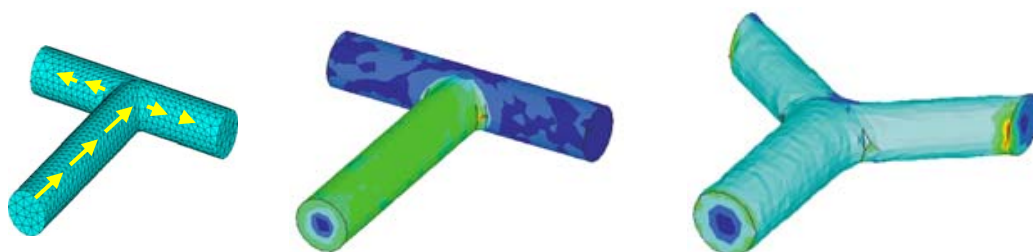


領域分割図



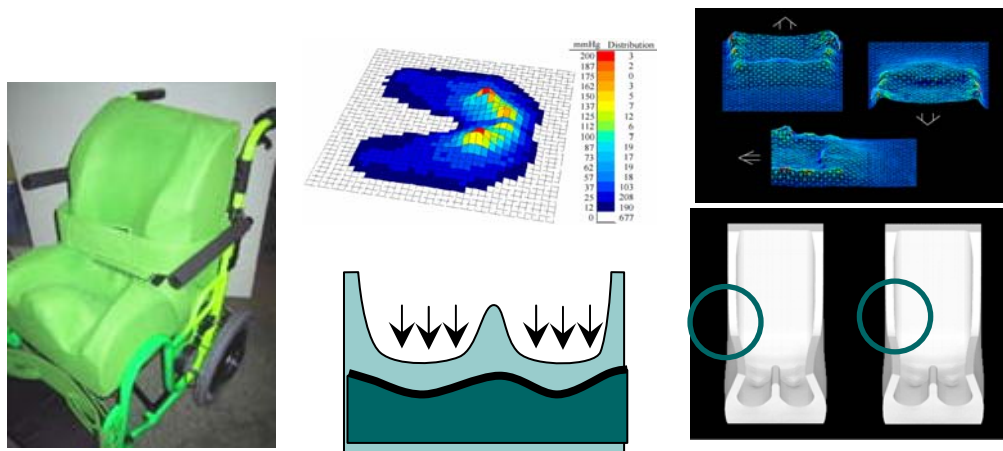
Stokes 流れ場 圧力損失最小化 3 次元対称分岐管

初期形状/収束形状



軟らかい材料と硬い材料の境界形状を設計対象にして、変形をデザインしたい。

初期モデルの変形/最適化モデルの変形



3. 3.3 逆問題手法による、構造解析における最適化および高精度化技術の開発

(1) 目標・計画

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

逆問題手法による境界条件の推定では、まず摩擦力が小さい場合の基本問題における摩擦係数の推定技術の開発を行い、次に摩擦力を大きくして推定アルゴリズムの改良を行っていく。メッシュ生成技術ではドローネ分割の自動改良技術の開発を2次元、3次元の順に行う。ロバスト設計では、従来のロバスト設計技術の問題点の洗い出しと、最適化技術との組み合わせ法の改良を行っていく。

(2) 意義・国際社会との比較

前記の目標でも述べたように(1)解析精度の向上、(2)ロバストな構造の設計、(3)メッシュの自動生成は、構造設計の実用上、重要な意義をもっている。メッシュ生成は、二次元問題に関しては、ほぼ技術開発は終了し、三次元問題に開発の中心は移っている。

本研究はその三次元問題でのメッシュ自動生成をターゲットとしている。

(3) 特徴

メッシュ生成技術の特徴は、ドローネ分割をしながら、自動的に必要な節点を適切な位置に追加していく点にある。従来の手法としてはバブルメッシュ法が有名であるが、この場合は事前にある程度適切な位置に置いておく必要がある。開発している手法はその必要がない点に特徴がある。摩

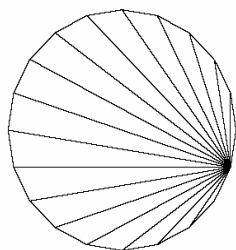
摩擦係数の逆問題推定手法は、摩擦すべりを考慮した点に特徴がある。接触解析は基本的に非線形解析であり、その非線形性をどう考慮するかに研究のポイントがある。

(4) H17年度進捗状況

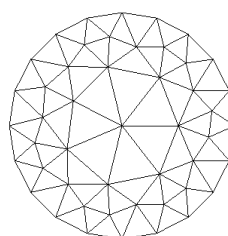
平成17年度は、メッシュ生成技術に関しては、二次元問題でその有効性を確認した CCM 法を三次元に拡張する研究を行っている。CCM 法は構造内部の節点を自動生成するところに特徴がある。また、逆問題に関しては ANSYS を使って接触問題解析における摩擦係数の推定精度の推定に関する。さらに、ロバスト設計技術における相互作用の問題の解決方法の研究も行っている。以下に研究例を紹介する。

(1)メッシュ生成技術の研究

下記は従来法との比較である。開発した手法では、内部節点を適切に生成しており、生成された三角形も正三角形に近くなっている。



(a) 従来手法

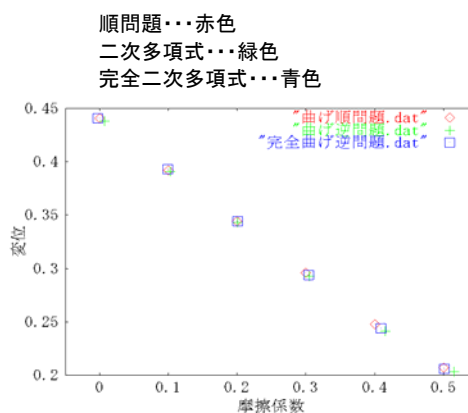
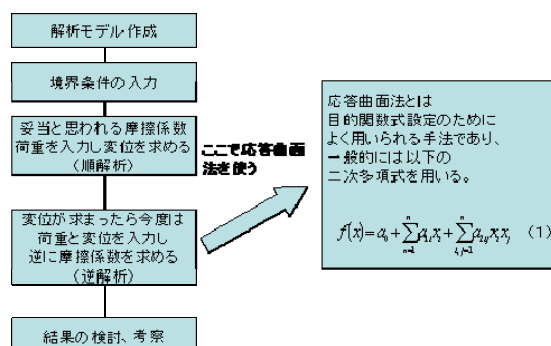


(b) 開発手法

(2) 逆解析手法を用いた解析精度向上の研究

下記のフローチャートは応答曲面法を逆問題に応用した例で、グラフは測定変位から摩擦係数を推定した例であり、結果は順問題の結果とほぼ一致しており、精度よく摩擦係数を推定できていることが分かる。

フローチャート



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

本年度は(1)のみ研究を行ったので、これについて以下に述べる。

3. 4.2 次世代可視化システムの概念設計

(1) 目標・計画

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

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

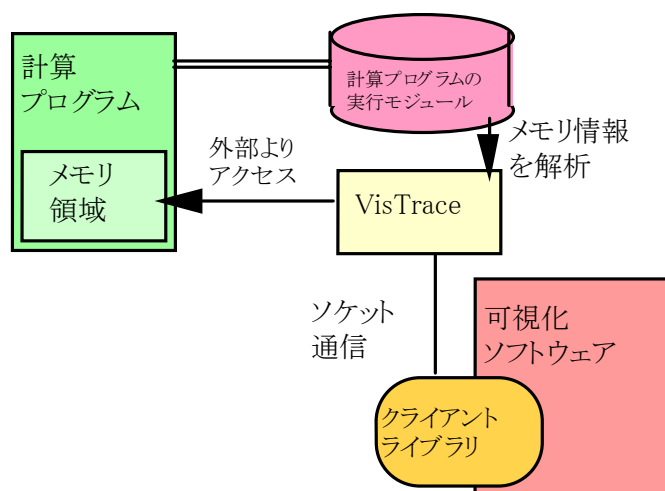
これまで、可視化ソフトウェアは米国や欧州を中心に開発されたものが製品として我が国に入ってくるが多かった。しかし、計算機環境は現在でも日本は最も進んでおり、諸外国でも大規模な解析のための新しい可視化システムの開発はこれからである。逆に我が国では可視化情報学会に次世代可視化に関する研究会が発足するなどこの分野では諸外国に先んじており、本研究もそのように位置づけられると考えられる。

(3) 特徴

本研究では、以下の2つの点を特徴としている。1つ目は、これまでも述べたように、様々な計算機環境に対して同じ使い勝手・機能を提供することであり、言い換えればスケーラブルな可視化システムを目指していることである。2つ目は、データ量と解析時間の関係から今後は計算した後で可視化するのではなく、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。

(4) H17年度進捗状況

17年度は、まず様々な計算機環境においてどのようにデータが存在し、これを統一的に扱うにはどのようにすればよいかについて検討を行った。その結果として、本研究以前より、富士通およびJAXA と共同で開発しているリアルタイム可視化のためのシステム(Vistrace)をベースにするのがよいという結論に達し、これを基にしたデータ取得システムの開発を行った。以下にVistraceのイメージ図を示す。



Vistrace の動作イメージ

これに対し、ここで開発するシステムは図のメモリ領域がハードディスク（ファイル）となるが、可視化ソフトウェアから見た動作はほぼ同じになるように作られている。結果と

して、データがどこにあっても利用者はそれを特に意識することなく可視化を行うことができる。また、ここで転送するデータは可視化に必要な最低限のものでよいので、データ転送に要する時間を最小限に抑えることができ、また無駄に大きなファイルをあちこちらの計算機に残すこともなくなる。

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

2002年に登場し、当時世界最速のコンピュータであった「地球シミュレータ」のピーク性能は約40 TFlopsであるが、現在世界最速のコンピュータである「BlueGene/L」のピーク性能は367 TFlopsとなっており、このことからハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる。

一方、これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては、その開発スピードもソフトウェアの品質もまだまだ十分とは言えず、多くのソフトウェアが20世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である。特に、1970～1980年台に既に確立されているアルゴリズムに対して、並列化の実装のみを加えた物が多く見られる。

このような背景のもと、本プロジェクトでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する、次世代の構造解析・流体解析システムを構築するとともに、これらを組み合わせた連成解析システムの構築を目指す。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、本年度実施した(1)および(2)について以下に述べる。

3.5.2 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) 特徴

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) H17年度進捗状況

本年度は、MPI フラット型並列で実装されている ADVENTURE_Solid の地球シミュレータ上における並列効率について調査を行った。また、1 億自由度規模モデルの陰解法に基づく動的応力解析(5 ステップ)を約 2.4 分で成功し、大規模自由度メッシュを用いた非定常解析の可能性を示した。さらに、1 億 4 千万自由度規模メッシュを用いた古代建築物パンテオンモデルの静応力解析を行い、256 ノード(2,048 プロセッサ)上において約 10 分で成功した。

またバーチャル実証試験の実践として、産業界と協力し CAD モデル(図 1)を作成し、2,300 万自由度モデルによる地震応答解析に成功、1 億 5,200 万自由度モデルを解析中(表 2)である。

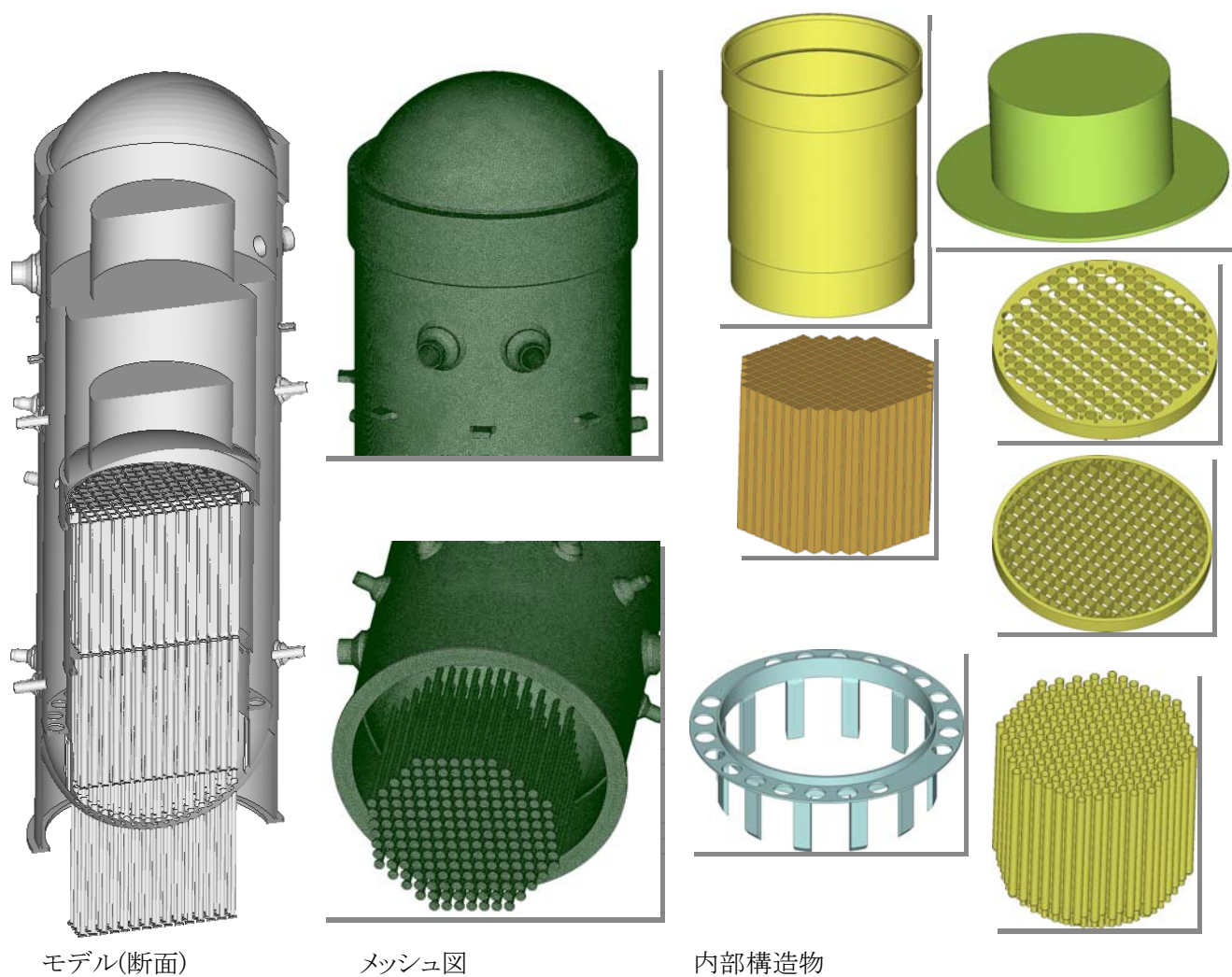


図1 内部構造物付き BWR モデル

表1 1億5千万自由度モデルによる解析

要素数	29,800,348 (4面体2次)
節点数	50,660,053
CPU 数	256 nodes (2,048 APs)
Time (min)	26.1 (CG 法 1,000 反復)
TFLOPS	3.59 (22.5% to peak)
Memory (TB)	3.12

3. 5.3 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

前節で述べた計算力学システム ADVENTURE の 1 モジュールとして既に開発されている、汎用の非圧縮性粘性流体解析システムを、超並列計算機や PC クラスタ上でより効率的に動作するように改良し、またシステムとしての機能拡張を行うとともに、流体解析で問題となるロバスト性を向上させることを目的とする。近い将来の計画として、構造解析システムと統合し、大規模な流体構造連成解析を効率よく行えるシステムの構築を目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

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

(3) 特徴

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。

(4) H17年度進捗状況

本年度は、これまでに開発してきたシステムをベースとしていくつかの機能拡張を行った。まず、これまで三次元四面体要素のみに対応していたシステムを、二次元三角形、四角形、三次元六面体にも対応した。今後、三次元プリズム、ピラミッド要素にも対応する予定である。また、ALE 法による移動境界問題に対応し、流体構造連成解析システム構築へ向けての準備段階が完了した。

本システムを用いて行った大規模解析例として、図2、3にサッカーボールの周りの流れ解析結果を示し、本年度の主要な機能拡張の例として、図4に移動境界問題としての浮力により上昇する球の周りの流れ解析結果を示す。

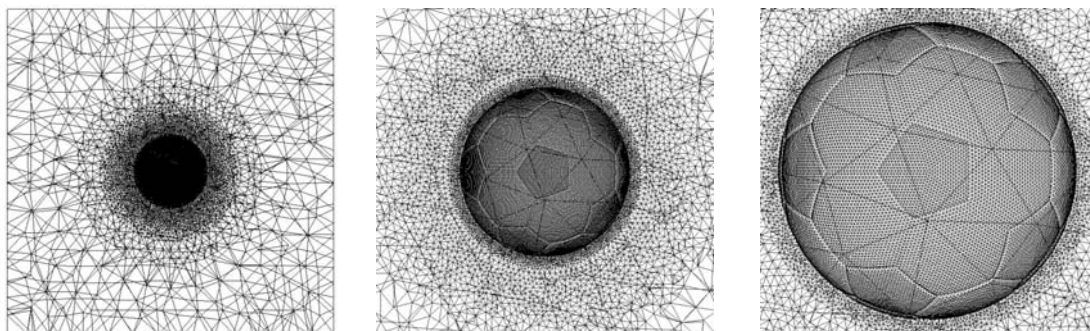


図2 サッカーボール周りの流れ(有限要素法モデル)

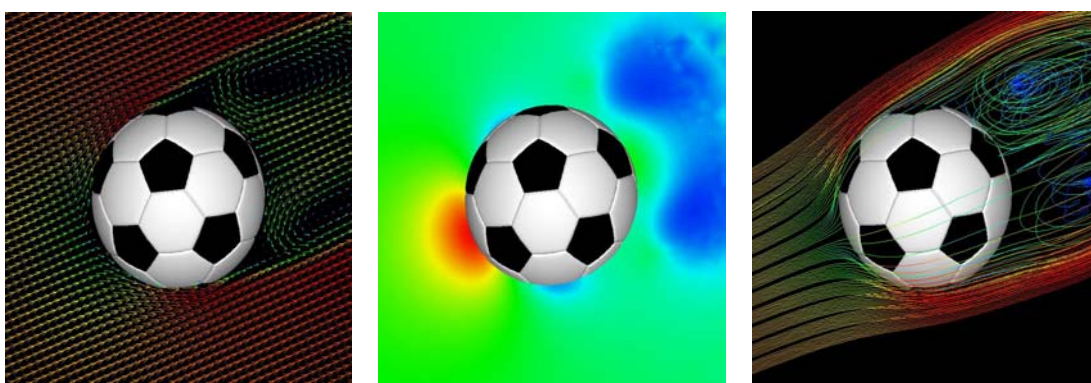


図3 サッカーボール周りの流れ(左:速度ベクトル、中:圧力、右:流線)

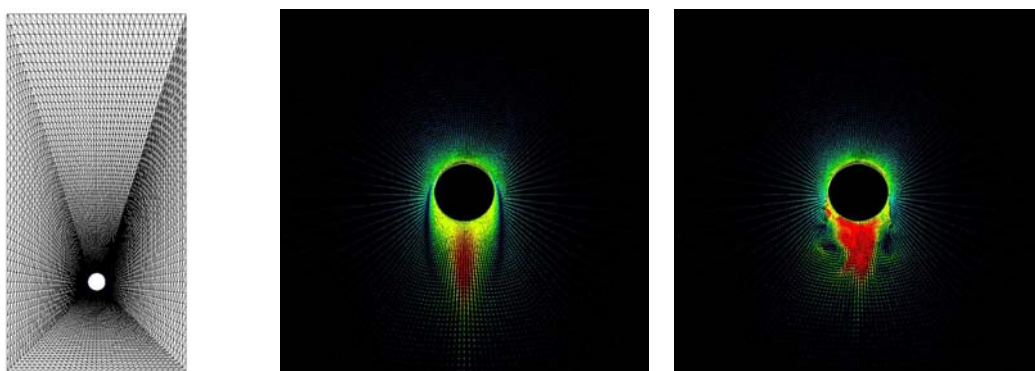


図4 浮力により上昇する球(左:メッシュ、中:Re=400、右:Re=40000)

3. 6 産学協同研究

3. 6.1 概要

(1) ㈱日立製作所機械研究所との連携

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

(2) 独立行政法人原子力安全基盤機構との連携

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

(3) 独立行政法人 原子力研究開発機構との連携

通信ネットワークの進展は、1980年代から飛躍的な発展をみせ、現在ではインターネットが電気や水道と同様に必須なライフラインとして生活基盤となっている。しかし、その急速な発展と共に、多くの技術者が警笛を鳴らしたとおり、モバイル環境のマナーやインターネットでのセキュリティなどが大きな社会問題となり、犯罪問題や風紀問題にまで、その課題を拡大してしまった。このような環境の中で、グリッド・コンピューティング環境を社会情報基盤として活用していくためには、データ保護や個人認証といったより高度なセキュリティ技術が不可欠となってきた。そこで、グリッド・コンピューティング環境におけるデータ情報保護の高度化を図ろうとする研究を行っている。さらに、高性能計算機の進展は、MPUの高度化の実情から、クラスター・アーキテクチャが主流となっている。具体的には、PCクラスターや地球シミュレータのような並列スーパーコンピュータのクラスタ化によるアーキテクチャである。その意味では、グリッド・コンピューティング環境は、異機種計算機をネットワークにより疎結合したものであり、現在のスーパーコンピュータの同一機種計算機をネットワークで密結合したものとの違いは、ネットワーク性能と異機種計算機結合にある。そこで、グリッド・コンピューティング環境におけるネットワークの高度化を図る研究も行っている。

3. 6.2 ㈱日立製作所機械研究所との連携 (ボイドを含む微細はんだ接続部の疲労き裂進展挙動の解析の研究)

(1) 目標・計画

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

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

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

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

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

(2) 意義・国際社会との比較

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

(3) 特徴

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

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

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

(4) H17年度進捗状況

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

解析結果を図2に示す。横軸は、繰返し数 n をボイドが無いバンプの接続寿命 N_{f0} で規格化した値である。どちらのボイド形状でも、ボイド直径が大きくなると初期荷重振幅が小さくなるとともに、荷重振幅の低下速度が速くなるサイクル数が短くなっている。荷重振幅の低下速度が速くなるのは、疲労き裂がボイドの周辺に達したためである。

ボイド径 (mm)

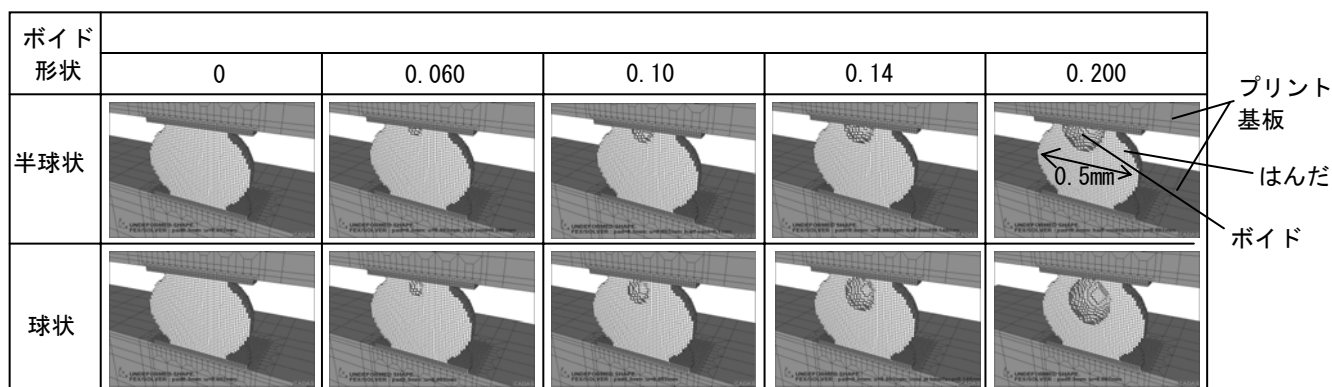


図1 解析モデル(ボイドを含む微細はんだ接合)

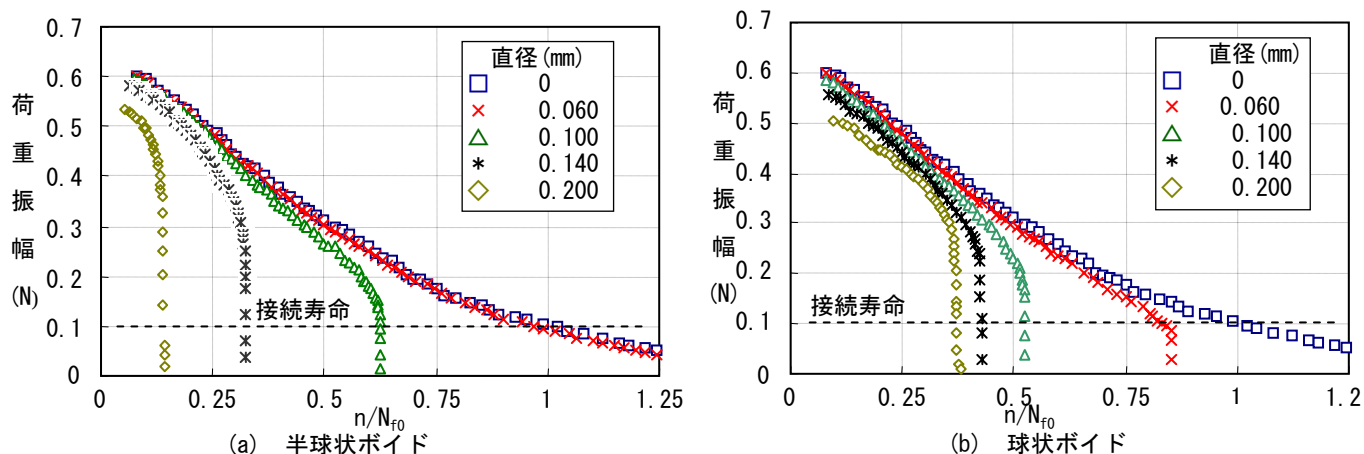


図2 き裂進展解析結果

図3にボイド面積比と規格化した寿命の関係を示す。ボイドが接続部の中心に位置する場合、接合界面の半球状および球状ボイドの双方とも、ボイド面積比が5%を超えると寿命比が顕著に低下し始め、10%程度で寿命比が約半分に低下している。ボイドの面積率が20%を超えると、特に半球状ボイドの場合に顕著に寿命比が低下することがわかった。今後、開発したはんだ疲労き裂進展解析手法を用いて、負荷条件や信頼性要求に応じた適切なボイド管理基準の作成が可能になると考える。

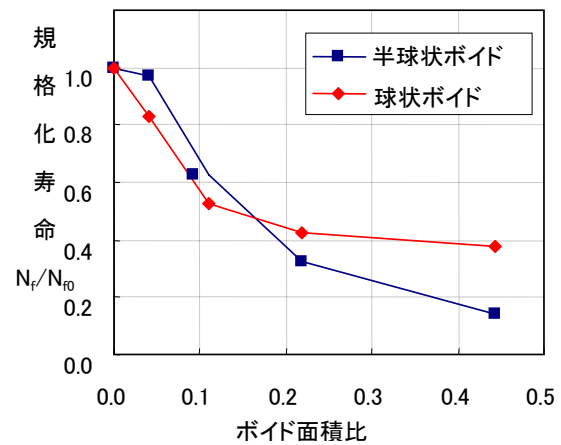


図3 はんだバンプの接続寿命

3. 6.3 独立行政法人原子力安全基盤機構との連携

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

(詳細は構造健全性の項を参照)

3. 6.4 ネットワークコンピューティングにおけるデータ操作と効率的通信手段の考察

(1) 目標・計画

高性能計算機の進展は、MPUの高度化の実情から、クラスター・アーキテクチャが主流となっている。具体的には、PCクラスターや地球シミュレータのような並列スーパーコンピュータのクラスター化によるアーキテクチャである。その意味では、グリッド・コンピューティング環境は、異機種計算機をネットワークにより疎結合したものであり、現在のスーパーコンピュータの同一機種計算機をネットワークで密結合したものと違いは、ネットワーク性能と異機種計算機結合にある。

本研究の目的は、グリッド・コンピューティング環境におけるネットワークの高度化を図ろうとするものである。インターネットの高速化は、既にメガビットからギガビットに移行しているが、利用者からの高速化にかかわる要求は将来的にも際限なくある。しかしながら、有限の太さの管の中に入る水の体積に上限があるように、ネットワークのデータ流量も、そのネットワーク性能に依存し限界が生じる。そこでQoS(Quality of Service)という概念が出現したように、ネットワーク環境をいかに効率的

に使うかという技術が重要となる。本研究では、グリッド・コンピューティング環境で構造解析などのシミュレーションを行った場合に出現する膨大な計算結果のデータを効率的にデータ通信する手段を実現することにある。その手始めとして、計算結果データを効率的に分割し、分散処理により送受信する技術の検討を行なう。その結果として、グリッド・コンピューティング環境における総シミュレーション処理時間を圧縮し、見かけ上の通信時間を全体処理時間の中に隠蔽する技術の確立を目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

ITBL(Information Technology Based Laboratory)は、日本原子力研究開発機構(旧、日本原子力研究所)をはじめとする 6 機関により、e-Japan プロジェクトとして進められたグリッド・コンピューティング環境の国家インフラ整備事業である。現在、約 45 テラフロップスの計算機資源を 12 機関の 26 計算機(18 機種 11 スーパーコンピュータを含む)の多機種ネットワークで実現している世界で類を見ない実用環境である。類似の環境として、米国 TeraGrid や独国 UNICORE、商用環境として AVAKI などがある。TeraGrid はクラスターコンピュータの接続を多機関に渡り接続している。しかしながら、AVAKI と同様、ネットワークは専用線であるため、いわゆるイントラネット接続による環境である。ITBL は、インターネット接続とイントラネット接続の両方を実現しており、ファイアーウォールに跨るセキュリティ環境においてサービスを提供している。独国 UNICORE は、RPC を中心として高いセキュリティ環境を有するが、ITBL で可能な異機種 MPI 連携やパラメータサーベイ機能のサービスを有さない。

今日では数多くのグリッド・コンピューティング実用環境の利用はなされているが、アプリケーション分野における利用は未だ揺籃期である。多くの実用課題や研究課題の指摘がある。このような研究課題抽出は、グリッド・コンピューティングの実践的な研究やその利用経験から出現してくるものである。本テーマは ITBL というグリッド・コンピューティングの実用利用から生まれてきたもので、有意義なものとする。

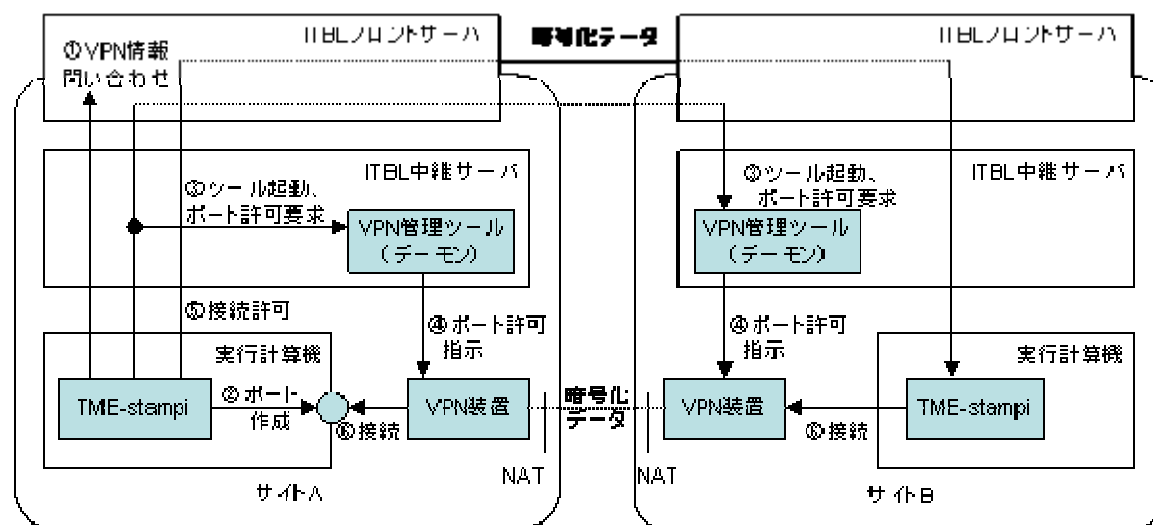
(3) 特徴

ITBL の一つの特徴はそのセキュリティレベルにあると同時に、多くの通信手段を有するところにある。本研究では、ITBL の通信手段のうち、ITBL の共同研究者 6 機関のうちの一つである独立行政法人理化学研究所が開発した廉価な VPN 技術を、独立行政法人日本原子力研究開発機構(当時は日本原子力研究所)が ITBL 上にセキュアに実装した ITBL-VPN 通信手段を用いて、データ操作の効率的通信手段を実現したことに特徴がある。

(4) H17年度進捗状況

ITBL 上において、構造解析データを効率的にグリッド・コンピューティング環境で通信処理する手段を開発した。具体的には、原子力分野で扱う膨大なシミュレーションデータを通信状態に応じて分割し、図 1 に示すような構成で ITBL-VPN 通信手段で分散通信する技術を実現した。これによ

り、従来の通信手段よりも 20%程度の効率化を図れる可能性を見出した。



TME :Task Management Editor, STAMPI : Seamless Thinking Aid for MPI

図1 ITBL-VPN 通信手段

【補足】本研究開発は、東洋大学工学部計算力学センター4年生の実習テーマとして、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が与えて実施したものである。

3. 6.5 ネットワークコンピューティングにおけるデータセキュリティ管制手段の考察

(1) 目標・計画

通信ネットワークの進展は、1980年代から飛躍的な発展をみせ、現在ではインターネットが電気や水道と同様に必須なライフラインとして生活基盤となっている。しかし、その急速な発展と共に、多くの技術者が警笛を鳴らしたとおり、モバイル環境のマナーやインターネットでのセキュリティなどが大きな社会問題となり、犯罪問題や風紀問題にまで、その課題を拡大してしまった。このような環境の中で、グリッド・コンピューティング環境を社会情報基盤として活用していくためには、データ保護や個人認証といったより高度なセキュリティ技術が不可欠となってきている。

本研究の目的は、グリッド・コンピューティング環境におけるデータ情報保護の高度化を図ろうとするものである。現在のグリッド・コンピューティング環境では、PKIによる個人認証や、暗号化によるセキュリティ技術が導入されているが、悪質な利用からセキュリティを維持するには、技術的な研鑽による高度化が常に不可欠である。本研究では、グリッド・コンピューティング環境で構造解析などのシミュレーションを行った場合に出現する入力データや計算結果のデータの開封権限を個人認証により強化しようとするものである。その手始めとして、計算結果データを個人認証情報により暗号化し、特定個人および当該個人が許可した人達のみを開封権限を与える技術の検討を行なう。その結果として、グリッド・コンピューティング環境における個人情報保護技術の確立を目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

ITBL(Information Technology Based Laboratory)は、独立行政法人日本原子力研究開発機構(旧、日本原子力研究所)をはじめとする6機関により、e-Japanプロジェクトとして進められたグリッド・コンピューティング環境の国家インフラ整備事業である。現在、約45テラフロップスの計算機資源を12機関の26計算機(18機種11スーパーコンピュータを含む)の多機種ネットワークで実現している世界で類を見ない実用環境である。類似の環境として、米国 TeraGrid や独国 UNICORE、商用環境として AVAKI などがある。TeraGrid はクラスターコンピュータの接続を多機関に渡り接続している。しかしながら、AVAKI と同様、ネットワークは専用線であるため、いわゆるイントラネット接続による環境である。ITBL は、インターネット接続とイントラネット接続の両方を実現しており、ファイアーウォールに跨るセキュリティ環境においてサービスを提供している。独国 UNICORE は、RPC を中心として高いセキュリティ環境を有するが、ITBL で可能な異機種 MPI 連携やパラメータサーベイ機能のサービスを有さない。

グリッド・コンピューティング実用環境の利用は、数多くの実践的利用がなされているが、アプリケーション分野における利用は未だ揺籃期である。多くの実用課題や研究課題の指摘がある。このような研究課題抽出は、グリッド・コンピューティングの実践的な研究やその利用経験から出現してくるものである。本テーマは ITBL というグリッド・コンピューティングの実用利用から生まれてきたもので、有意義なものと考ええる。

(3) 特徴

ITBL の一つの特徴はそのセキュリティレベルにある。本研究では、ITBL の個人認証手段である PKI(X.509) 認証証を用いたデータの保護と特定のグループ内での共有化という相反するセキュリティレベルの共存手段を実現したことに特徴がある。

(4) H17年度進捗状況

ITBL 上において、構造解析データを PKI 認証証を用いてグリッド・コンピューティング環境でセキュリティ管理する手段を開発した。具体的には、原子力分野で扱う膨大なシミュレーションデータを安全にセキュリティレベルを管理し制御する管制技術を実現した。これにより、グリッド・コンピューティング環境における個人の情報操作を個人認証を行なうことで監視し、セキュリティを維持するための管理・制御を図れる可能性を見出した。

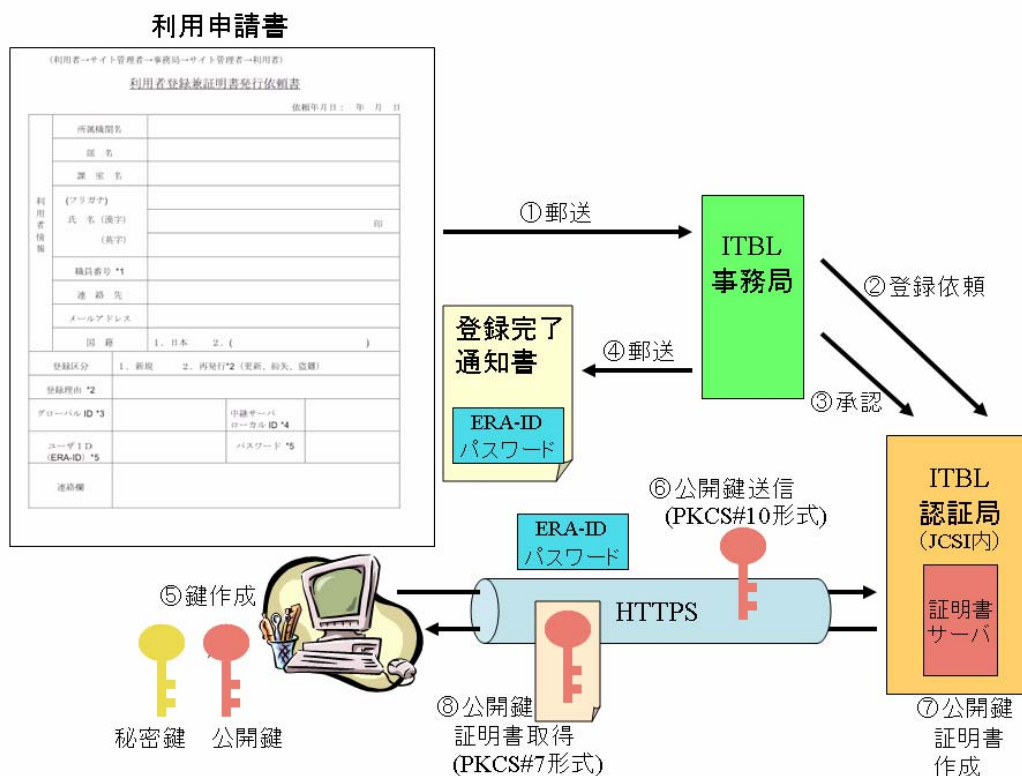


図 1 PKI による個人認証システムの概要

【補足】本研究開発は、東洋大学工学部計算力学センター4年生の実習テーマとして、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のもとで実施したものである。

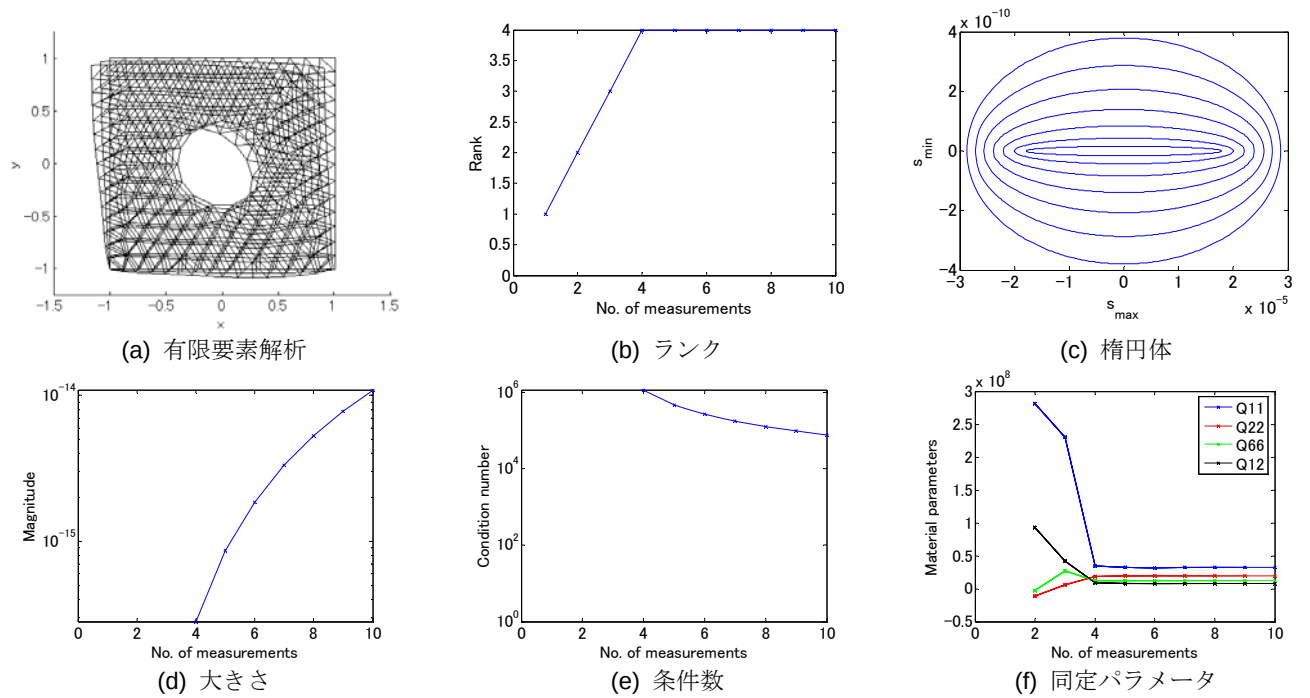


図1 特異値分解による材料同定

また図2には、短軸実験による材料データから構築されたニューラルネットワーク材料モデルの材料挙動を材料データとともに示す。図2(a)は異なる温度による引張り、図2(b)は異なる応力によるクリープ挙動の結果を表している。これらの解析からニューラルネットワーク材料モデルが様々な材料挙動を記述できることが分かる。

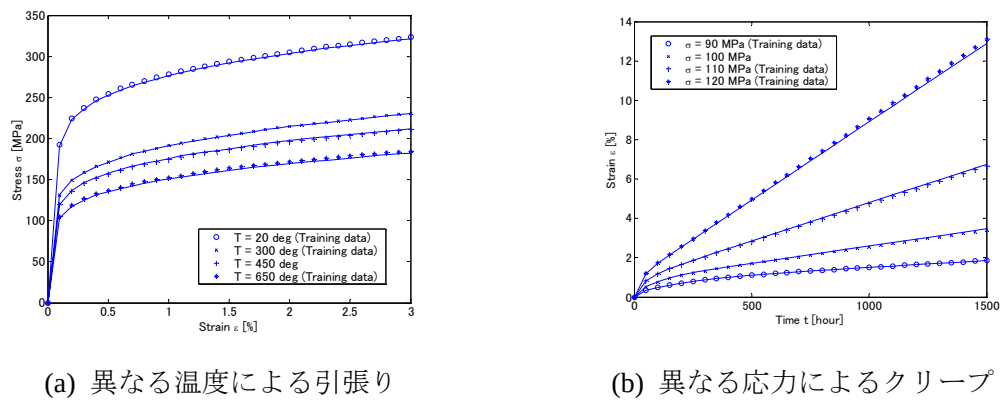


図2 構築されたニューラルネットワーク材料モデルの挙動

3.7 国際協力

3.7.1 インドネシア

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

場所: インドネシア、バンダーチェ市、Syiah Kuala University

日時: 2006年5月12日(金)ー14日(日)

テーマ: Building the Strong Research Networking in Asian Region

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

3.7.2 オーストラリア

第3回国際計算力学フォーラムが2006年9月28日～29日の日程で、オーストラリアのシドニーにある New South Wales 大学で開催される予定である。詳細は未定であるが、計算力学センターの客員研究員の一人である古川知成氏(New South Wales 大学、Senior Lecturer)をオーストラリア側の代表として、計算力学研究センターの研究員と、計算力学、最適化を中心としたテーマについて議論する予定である。

3.7.3 その他

米国 California Institute of Technology 教授の G.Ravichandran 教授を招いて以下の講演会を開き、セミナーを行った。

演題: An Experimental Investigation of Dynamic Failure Mode

Transition in Metals and Shock Waves in Layered Solids

場所: 東洋大学川越キャンパス1442室

日時: 8月11日(木)17時ー19時

4. 業績リスト

4. 1 論文

- Akira SHINOZAKI, Kikuo KISHIMOTO, Hirotugu INOUE
A Study of Deformation Behavior in Polymer, Key Engineering Materials, 297-300 2922-2928
(Nov. 2005)
- Chen Jian Ken Lee, Tomonari Furukawa and Shinobu Yoshimura, “A Human-like Numerical
Technique for Engineering Design,” International Journal for Numerical Methods in
Engineering, Vol. 64, pp. 1915-1943, 2005.
- Feng JIN, Kikuo KISHIMOTO, Hirotugu INOUE, Takashi TATENO
Experimental Investigation on the Interface Properties Evaluation in Piezoelectric Layered
Structures by Love Waves Propagation, Key Engineering Materials, 297-300 807-812 (Nov.,
2005)
- Frederic Bourgault, Tomonari Furukawa and Hugh F. Durrant-Whyte, ”Optimal Search for a
Lost Target in a Bayesian World,” Eds. S. Yuta and H. Asama, Field and Service Robots IV,
Springer Tracts in Advanced Robotics (STAR), Springer-Verlag, 18 pages, in press.
- G.YAGAWA, T.MIYAMURA
Three-node Triangular Shell Element Using Mixed Formulation and Its Implementation by
Free Mesh Method, Computers and Structures, 2066-2076, 2005
- Hideyuki Azegami, Kenzen Takeuchi
“A Smoothing Method for Shape Optimization: Traction Method Using the Robin Condition”
International Journal of Computational Methods, in press
- Hiroshi Okada, Sayaka Endoh and Masanori Kikuchi, On Fracture Analysis using an Element
Overlay Technique, Engineering Fracture Mechanics, vol. 72, pp. 773-789, 2005.
- Hiroshi Okada, Mayumi Higashi, Masanori Kikuchi, Yasuyoshi Fukui and Noriyoshi Kumazawa,
Three dimensional Virtual Crack Closure-Integral Method (VCCM) with skewed and
non-symmetric mesh arrangement at the crack front, Engineering Fracture Mechanics, vol. 72,
pp. 1717-1737, 2005.

- H.OKUDA, G.YAGAWA
Large-Scale Parallel Finite Element Analysis for Solid Earth Problems by GeoFEM, Surveys on Mathematics for Industry, in press

- Insu JEON, Masaki OMIYA, Hirotugu INOUE, Kikuo KISHIMOTO, Tadashi ASAHINA
A New Specimen for Measuring the Interfacial Toughness of Al-0.5%Cu Thin Film on Si Substrate, Key Engineering Materials, 297-300 521-526 (Nov., 2005)

- J.Tsuchida, T.Fujisawa, G.Yagawa
Direct Numerical Simulation of Aerodynamic Sounds by a Compressible CFD Scheme with Node-by-Node Finite Elements, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, in press

- K.AMAYA and S.AOKI, "Optimum design of cathodic protection using the Boundary Element Method", Trans. WIT, Simulation of Electrochemical Processes, Engineering Sciences vol.4825-37, (2005)

- K.SHIBATA, Y.KANTO, S.YOSHIMURA, G.YAGAWA
Recent Japanese Probabilistic Fracture Mechanics Reserches Related to Failure Probability of Aged RPV, Nuclear Engineering and Design, in press

- M.RIDHA, K.AMAYA and S.AOKI, "Boundary Element Simulation for Identification of Steel Corrosion in Concrete Using Magnetic Field Measurement" Corrosion, Vol. 61, No. 8, pp.784-791(2005-8).

- M. Nizar MACHMUD, Masaki OMIYA, Hirotugu INOUE, Kikuo KISHIMOTO
Impact Behaviour Analysis of PC/ABS (50/50) Blends, Key Engineering Materials, 297-300 1297-1302 (Nov., 2005)

- Masaki OMIYA, Hirotugu INOUE, Kikuo KISHIMOTO, Masaaki YANAKA, Noritaka IHASHI
UV-irradiation Effects on Interfacial Strength between Thin Ceramic Film and Polymer Substrate, Key Engineering Materials, 297-300 2284-2289 (Nov., 2005)

- Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, Hiroshi KAWAI and Shinobu YOSHIMURA,
Seismic Response Analysis of Nuclear Pressure Vessel Model with ADVENTRUE System on the Earth Simulator, Journal of the Earth Simulator, 2, pp.41-54, 2005

- MUROTANI, K., and SUGIHARA, K.
The spectral decomposition for three-dimensional shape models and its applications, ASME Transactions, Journal of Computing & Information, Science in Engineering (JCISE), Vol.5-4, pp.277-282 ,2005.

- N. MIYAZAKI, Y. MATSUURA, D. IMAHASE
Thermal stress analysis of lead molybdate single crystal during growth process: Discussion on relation between thermal stress and crystal quality, JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH, in press

- N. MIYAZAKI, N. KOIZUMU
“Cracking of lithium tantalite single crystal due to thermal stress”, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE, in press

- Nobuyoshi Fujimatsu, Yoshiaki Tamura and Kozo Fujii, “Improvement of Noise Filtering and Image Registration Methods for the Pressure Sensitive Paint Experiments,” Journal of Visualization, Vol 8, No. 3, pp. 225-233, 2005.

- Tomoe Oda, Yoshiaki Tamura, Yoichiro Matsumoto and Tetuya Kawamura, “Two-Dimensional Coupled Analysis of Pipe Burst and Multicomponent Fluid of Very High Pressured Natural Gas Pipeline,” Computational Fluid Dynamics Journal, Vol 14, No. 1, pp. 76-83, 2005.

- Tomonari Furukawa, Frederic Bourgault and Hugh F. Durrant-Whyte, “Multiple UAVs Engaging Multiple Targets Time-Optimally,” Engineering Optimisation, in press

- Teppei Wakatsuki, Yoshimi Watanabe, Hiroshi Okada, Development of Fe-Mn-Si-Cr Shape Memory Alloy Fiber Reinforced Plaster-Based Smart Composites, Materials Science Forum Vols. 475-479, pp. 2063-2067, 2005.

- Ryuji SHIOYA and Genki YAGAWA,
Large-scale parallel finite element analysis using the internet: a performance study, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 63, pp.218-230, 2005

- R. Tian, G. YAGAWA
Generalized Nodes and High-Performance Elements(to appear), International Journal for Numerical Methods in Engineering, in press

- R. Tian, G. YAGAWA
Linear Dependence Problems of Partition-of-Unity Based Generalized FEMs(to appear),
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.2006, in press
- Y.ONISHI, M.URAGO, K.AMAYA and S.AOKI, “Efficient dynamic finite element
method for 3D objects with uniform cross-section” International Journal for Numerical
Methods in Engineering, Vol. 63 pp.1898-1910 (2005-4).
- Won-Keun KIM, 池田 徹, 宮崎則幸
“異方性導電樹脂接合型フリップチップの吸湿リフロー試験のはく離予測解析”, エレクトロニ
クス実装学会誌, 8(3) 215-224 (May 2005)
- 岡田 裕, 遠藤明香, 菊池正紀, 重合メッシュ法による二次元破壊力学解析, 日本機械学会
論文集 A 編, 71 巻, 704 号, pp. 677-684, 2005.
- 篠崎明, 井上裕嗣, 岸本喜久雄
分子鎖ネットワークモデルによる高分子材料の機械的特性解析(分子量分布ならびに紫外線
劣化の影響), 日本機械学会論文集(A 編), 71(710) 1333-1339 (Oct., 2005)
- 宮崎則幸
“単結晶製造プロセスと材料強度に関する研究”, 日本機械学会論文集 A 編, 71(704)
587-593 (Apr. 2005)

4.2 著書

- 矢川元基、吉村 忍 計算固体力学, シリーズ＜現代工学入門＞, 岩波書店, 2005
- 矢川元基、関東康祐、奥田洋司 計算力学, シリーズ＜現代工学入門＞, 岩波書店, 2005

4.3 総説、解説、エッセイ

- 岡田 裕, 複雑な形状を持つき裂の三次元解析 ―計算力学の立場から―, 日本実験力学会誌(解説) Vol. 5, No. 2, pp. 93-98, 2005.
- 宮崎則幸
“半導体単結晶育成過程の転位密度評価シミュレーション (1)”, 機械の研究, 57(6) 619-626 (Jun. 2005)
- 宮崎則幸
“半導体単結晶育成過程の転位密度評価シミュレーション (2)”, 機械の研究, 57(7) 743-749 (Jul. 2005)
- 矢川元基 スーパーコンピューターはなぜ必要か, 文部科学時報, 文部科学省, 2005.12.10

4. 4 招待講演

- G.YAGAWA
Recent Advanced in Large-Scale Computational Mechanics Analysis, Forum on the Development and Popularization of CAE Technology, 2005.11.4 (Shanghai, China)
- G.YAGAWA, H.MATSUBARA
Node Based Finite Element Method with High Performance Elements: The Local Element Method, Proceedings of the Eighth International Conference on Computational Plasticity (COMPLAS VIII), pp.64-67, September, 2005
- G. YAGAWA
Damage and Crack Propagation Analyses Using a Node Based FEM , 6th International Conference on Fracture and Strength of Solids, 2005.4.4-6 (Bali,Indonesia)
- G. YAGAWA
Computer simulation and experiment for unsymmetrical crack propagation, 2nd Korean Conference on Pressure Vessel and Piping , 2005.6.16-17 (Korea)
- Tomonari Furukawa, “Multi-objective Coordination of Multiple Unmanned Aerial Vehicles,” 6th Annual International Conference: Cooperative Control and Optimization, Gainesville, Florida, February 1-3, 2006
- Rong TIAN ,G YAGAWA
A Formulation of Generalized Node, A Quadratic Tetrahedron / Triangle with Only Corners, and Meshfree Approximations with Rotational Dofs, Eighth U.S. National Congress on Computational Mechanics(USNCCM VIII), 2005.7.24-28 (Austin,Texas, USA)
- Rong TIAN ,G YAGAWA
Some numerical studies on the linear dependence problem of partition-of-unity based generalized finite element methods, Eighth U.S. National Congress on Computational Mechanics(USNCCM VIII), 2005.7.24-28 (Austin,Texas, USA)
- 矢川元基
リスク情報を活用した安全規制の導入に関する今後の課題, 内閣府原子力安全委員会,

2006.1.24 (東京)

- 矢川元基
計算科学技術の最近の動向と課題, 日本機械学会関東支部第 12 期総会, 2006.3.10 (埼玉)
- 矢川元基
スーパーコンピューティングの将来, 非線形 CAE 勉強会, 2005.6.18 (東京)

4. 5 講演論文、口頭発表

- A.M.M.MUKADDES, M.OGINO, R.SHIOYA, H.KANAYAMA
A Scalable Balancing Domain Decomposition Based Preconditioner for Large Scale Thermal-Solid Coupling Problems,
日本機械学会 第 18 回計算力学講演会 講演論文集, No.05-2, pp.523-524, November, 2005
- Akira SHINOZAKI, Kikuo KISHIMOTO, Hirotugu INOUE
Simulation of Deformation Behavior of Polymeric Materials by Chain Network Model
The 6th International Conference on Fracture and Strength of Solids
(Bali,Indonesia,2005/04)
- Chen Jian Ken Lee, Hirohisa Noguchi and Tomonari Furukawa, “Multi-objective Gradient-based Optimization for Finite Element Design Applications,” International Conference on Computational Engineering and Sciences, India, December 2005.
- Chen Jian Ken Lee, Tomonari Furukawa and Hirohisa Noguchi, “Constrained Multi-objective Performance Optimization of Structures using a Gradient-based Algorithm,” Proceedings of MIT Conference on Fluid and Solid Mechanics, Boston, August 2005, pp. 245-248, 2005.
- Chen Jian Ken Lee, Tomonari Furukawa and Hirohisa Noguchi, “Multi-objective and Constrained Gradient-based Approach to Parametric Design,” Proceedings of Computational Engineering Conference, Tokyo, May, 2005, Vol. 10, pp. 1-5, 2005.
- Chern Feng Chung and Tomonari Furukawa, “Time-optimal Control of Pursuers Using Forward Reachable Sets,” The Second International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems, Singapore, December, 2005.
- Chihiro Ono and Yoshiaki Tamura, “A Simple Analysis Method for the Aerodynamic Characteristics of a Running Motor Cycle,” 1st International Conference on Design Engineering and Science, Vienna, Austria, October 2005, pp. 347-351, 2005.
- Cindy Leung, Shoudong Huang, Gamini Dissanayake and Tomonari Furukawa, “Real Time Trajectory Planning in Bearing Only Target Localization,” 2005 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, August, 2005.

- El-mane Wong, Frederic Bourgault and Tomonari Furukawa, “Optimal Multi-Vehicle Search for Multiple Lost Targets in a Bayesian World,” 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, April, 2005.
- Frederic Bourgault, El-mane Wong and Tomonari Furukawa, “Autonomous Coordination of Aerial Vehicles for Marine Search and Rescue,” Pacific 2006 International Maritime Conference, Sydney, January 31–February 2, 2006, in print.
- G.YAGAWA, H.MATSUBARA
Node Based Finite Element Method with High Performance Elements: The Local Element Method, Proceedings of the Eighth International Conference on Computational Plasticity (COMPLAS VIII), 64–67, September, 2005
- H. Okada and Y. Kamimaru, BEM Analysis on Crack Tip Deformation Field of Rubber-Modified Epoxy Resin, Adhesive Layer, Proceedings of International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences 2005 (ICCES’05) (Edt. by S.M. Sivakumar, M. Meher Prasad, B. Dattaguru, S. Narayanan, A.M. Rajendran, S.N. Atluri), CD-ROM, 2005.
- H. Okada, C.T. Liu and S. Tanaka, Analysis of Damage Evolution of Particulate Composite Material using the s-version FEM, Proceedings of International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences 2005 (ICCES’05) (Edt. by S.M. Sivakumar, M. Meher Prasad, B. Dattaguru, S. Narayanan, A.M. Rajendran, S.N. Atluri), CD-ROM, 2005.
- H. Okada, M. Higashi, M. Kikuchi, Y. Fukui and N. Kumazawa, On three-dimensional virtual crack closure-integral method (VCCM) for arbitrary shaped hexahedron finite elements, 11th International Conference on Fracture, CD-ROM, 2005.
- H. Okada, S. Tanaka and Y. Watanabe, The Application of Element Overlay Technique to the Problems of Composite Materials, 8th U.S. National Congress on Computational Mechanics, July 24–28, 2005, Austin, Texas, Honorary Congress Chair J. T. Oden, Congress Co-Chairs, L. Demkowicz and C. Dawson, CD-ROM, July 2005 年.
- Hiroshi Okada, Mayumi Higashi and Tsuyoshi Kamibepu, An Extension of Three Dimensional Virtual Crack Closure-Integral Method (VCCM), International Workshop on the Advancement of Computational Mechanics (edt. By T. Nishioka, et al.), pp. 1–13, 2005.
- M. KOGANEMARU, T. IKEDA, N. MIYAZAKI
“Experimental and numerical evaluation of residual stress in IC chips”, PROCEEDINGS OF InterPACK2005, Paper IPACK2005-73110 (Jul. 2005)

- M. NAKAGAKI, S. TAKASHIMA, R. MATSUMOTO, N. MIYAZAKI
“Grain size dependent plasticity modeling for super plastic metal”, PROCEEDINGS of ICCES’05, INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL & EXPERIMENTAL ENGINEERING AND SCIENCES, 388-393 (Dec. 2005)
- M. NAKAGAKI, S. TAKASHIMA, R. MATSUMOTO, N. MIYAZAKI
“Study on an aspect of Hall-Petch effect in metallograin structure”, PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL WORKSHOP ON DEVELOPMENT AND ADVANCEMENT OF COMPUTATIONAL MECHANICS, 50-62 (Apr. 2005)
- M. Nizar MACHMUD, Masaki OMIYA, Hirotsugu INOUE, Kikuo KISHIMOTO
A Phenomenological Constitutive Model Constructed for PC/ABS Blends, The 6th International Conference on Fracture and Strength of Solids, (Bali, Indonesia, 2005/04)
- M. Nizar MACHMUD, Masaki OMIYA, Hirotsugu INOUE, Kikuo KISHIMOTO
Phenomenological Modeling of Strain Rate and Temperature Effects on Stress-Strain Behavior of Engineering Polymers, The 4th International Conference on Numerical Analysis in Engineering (Yogyakarta, Indonesia, 2005/04)
- M. Nizar MACHMUD, 望月大資, 大宮正毅, 井上裕嗣, 岸本喜久雄
High Rate Deformation and Failure Characteristics of Amorphous Polymers and Their Blends
日本機械学会 M&M2005 材料力学カンファレンス(福岡, 2005/11)
- M. RIDHA, S. AOKI, Y. SHIBUYA, M. YOSHIDA and K. AMAYA, “Boundary Element Inverse Analysis for Determining the Complex Admittance of Concrete with Embedded Steel” The 4th International Conference on Numerical Analysis in Engineering 2005, Yogyakarta, Indonesia, pp.2/1-7(2005-4)
- M. RIDHA, K. KANAI, K. SUGA, K. AMAYA, S. AOKI
Inverse Analysis for Detection of Steel Corrosion in Concrete by Combining Use of BEM and Magnetic Field Measurement, 日本機械学会関東支部講演会 (2006-3) in press
- Nathan Kirchener and Tomonari Furukawa, “Infrared Localisation for Indoor UAVs,” International Conference on Sensing Technologies, Palmerston North, New Zealand, November 21-23, 2005.

- N. MIYAZAKI, N. KOIZUMU
“Thermal stress analysis of tetragonal single crystal during growth process”, 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE, Paper No. 4234 (Mar. 2005)
- N. MIYAZAKI
“The state of art for mechanical strength study of single crystal for electronic/optical devices” International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (Chennai, India, 2005/12/3)
- N. SHISHIDO, T. IKEDA, N. MIYAZAKI
“Strain measurement in the microstructure of advanced electronic packages using digital image correlation”, PROCEEDINGS EMAP 2005, 2005 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONIC MATERIALS AND PACKAGING, 83–87 (Dec. 2005)
- Phillip J. Sammons, Tomonari Furukawa and Andrew Bulgin, “Autonomous Pesticide Spraying Robot for Use in a Greenhouse,” 2005 Australian Conference on Robotics and Automation, Dec. 5–7, Sydney, 2005.
- S.AOKI, K.AMAYA, M.URAGO and A.NAKAYAMA, “Application of Fast Multipole Boundary Element Method to Corrosion Problems” The 4th International Conference on Numerical Analysis in Engineering 2005, Yogyakarta, Indonesia, pp.1/1–7(2005–4)
- T.Miyamura, Y.Nakabayashi, H.Kawai and S.Yoshimura,
Mesh generation of a lake for environmental fluid simulation, The Eighth U.S. National Congress on Computational Mechanics, Austin, Texas, 2005
- Tomoe Oda, Yoshiaki Tamura, and Tetuya Kawamura, “The Numerical Simulation of Decompression Process with Multicomponent Gas in Very High Pressured Natural Gas Pipeline,” 1st International Conference on Design Engineering and Science, Vienna, Austria, October 2005, pp. 335–340, 2005.
- Yusuke Nakajima, Yoshiaki Tamura, Yukio Kaneko and Yoichiro Matsumoto, “Analysis of Ultrasound Propagation for the Development of the Noninvasive Oncotherapy Device,” 1st International Conference on Design Engineering and Science, Vienna, Austria, October 2005, pp. 433–438, 2005.

- T. IKEDA, W. -K. KIM, N. MIYAZAKI
“Reliability of a flip-chip using adhesive interconnection under solder reflow process”,
PROCEEDINGS of ICCES’05, INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL &
EXPERIMENTAL ENGINEERING AND SCIENCES, 2384-2389 (Dec. 2005)
- T. IKEDA, W. -K. KIM, N. MIYAZAKI
“Predicting technique of delamination at adhesively bonding joints in an flip chip package during
solder reflow process”, PROCEEDINGS OF InterPACK2005, Paper IPACK2005-73153 (Jul.
2005)
- 青山 大樹 and 畔上 秀幸
“脊柱特発性側彎症の成因に関する幾何学的非線型性を考慮した数値シミュレーション”
計算科学シンポジウム(FCS, テクノシンポ名大, MPS シンポジウム 2005)(名古屋
2005/10/11)
- 畔上秀幸
“モノづくりに役立つ形状最適化の理論と応用”, 豊田中央研究所(愛知県愛知郡長久手
町 2005/12/12)
- 畔上秀幸
“形状最適化法の思いつきから理解へ”, くいんとセミナー2005(東京 2005/11/22)
- 畔上秀幸, 竹内謙善
“勾配法に基づく形状最適化スキームにおける収束性の改善”, 日本応用数理学会 2005 年
度年会(仙台 2005/9/23)
- 荒木 宏介, 岡田 裕(鹿児島大), 八反田 大介, 四面体二次要素による仮想き裂閉口積分
法(VCCM 法)を用いた三次元き裂解析, 第 18回計算力学講演会, 日本機械学会, No. 05
-2, pp. 371-372, 2005 年 11 月.
- 安河内辰哉, 萩原世也, 津乗充良, 池田 徹, 宮崎則幸
“誤差と関連した節点移動によるアダプティブ EFG 解析”, 日本機械学会第 18 回計算力学講
演会(つくば 2005/11/19)
- 池田 徹, 宮崎則幸
“接着継ぎ手の破壊靱性値に与える接着剤厚さの影響とそのメカニズムについて”, 日本接
着学会第 43 回年次大会(大阪 2005/6/24)

- 井上裕嗣, 伊藤大介, 岸本喜久雄
熱弾性応力測定に関する熱伝導逆解析の検証, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会(つくば, 2005/11)
- 井上裕嗣, 伊藤大介, 岸本喜久雄
熱弾性応力測定に及ぼす熱伝導の影響の補正, 日本機械学会 M&M2005 材料力学カンファレンス(福岡, 2005/11)
- 井上裕嗣, 伊藤大介, 岸本喜久雄
熱弾性応力測定に及ぼす熱伝導の影響の補正, 日本機械学会 M&M2005 材料力学カンファレンス(福岡, 2005/11)
- 入部綱清, 藤澤智光, 柴田和也, 須藤健太郎, 越塚誠一
映像制作に向けた粒子法の大規模並列シミュレーション, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講演論文集, pp.581-582, 2005
- 江澤良孝
“プリポストプロセッサの現状と課題”, 日本機械学会年次大会(東京, 2005/9/21)
- 江澤良孝
“メッシュ生成部会の目的と進め方”, 日本応用数理学会年会(仙台, 2005/9/24)
- 岡田 裕, 神丸 泰典, 球状介在物の解析解を援用した境界要素法によるゴム変性エポキシ樹脂接着層の解析, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集 Vol.1 (No.05-1), pp. 403-404, 2005 年 9 月.
- 岡田 裕, 神丸 泰典, 球状介在物の解析解を利用した境界要素法によるゴム変性エポキシ樹脂接着層の解析, 第 18 回計算力学講演会, 日本機械学会, No. 05-2, pp. 369-370, 2005 年 11 月.
- 岡田 裕, 神丸 泰典, 福井泰好, 熊澤典良, 境界要素法によるゴム変性エポキシ樹脂接着層のメゾ解析, 計算工学講演会論文集 10(1), pp. 477-480, 2005 年 5 月.
- 岡田 裕, 八反田 大介, 荒木 宏介, 四面体有限要素による三次元き裂解析, 日本機械学会 M&M2005 材料力学カンファレンス講演論文集 (No. 05-9), pp. 325-326, 2005 年 11 月.
- 萩原世也, 海老名亮彦, 津乗充良, 池田 徹, 宮崎則幸
“EFGM による混合モード亀裂進展解析”, 第 10 回日本計算工学会講演会(東京 2005/6/1)

- 萩原世也, 宮崎則幸
“局所的な内部加熱を受ける原子炉冷却管のクリープ損傷の三次元 FEM 解析”, 日本機械学会 M & M 2005 材料力学カンファレンス(福岡 2005/11/4)
- 尾崎弘明, 松原仁, 矢川元基
フリーメッシュ法を用いた 3 次元亀裂進展解析, 日本機械学会関東支部講演会, 東京, 2006.3.10-11
- 小野ちひろ, 田村善昭
二輪車周りの流れ解析を簡単に行う手法, 第 19 回数値流体力学シンポジウム(東京, 2005/12).
- 片峯英次, 平井雅大, 畔上秀幸
“熱変形分布を規定する熱弾性場の形状同定問題の解法”, 日本機械学会 2005 年度年次大会(東京 2005/9/19)
- 金山寛, 塩谷 隆二, 中本 猛,
超音波ドプラ像を利用した血流解析, 第 10 回 日本計算工学講演会 講演論文集, vol.10, No.1, pp.101-102, May, 2005
- 小金丸正明, 池田 徹, 宮崎則幸, 小出康智, 友景 肇
“樹脂封止されたデバイスの残留応力に起因した特性変動評価”, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会(つくば 2005/11/19)
- 小林陽介, 河合浩志, 矢川元基
可視化処理の並列計算, 日本機械学会関東支部講演会, 東京, 2006.3.10-11
- 笹岡竜, 畔上秀幸, 村地俊二, 鬼頭純三, 石田義人, 川上紀明, 牧野光倫
“特発性側彎症の力学的成因仮説に基づく臨床形態の分類”, 第 39 回日本側彎症学会(東京 2005/11/1)
- 塩谷隆二, 本田篤史, V.Salomone, B.Schrefler,
並列強連成解析システムの地盤沈下解析, 日本機械学会 第18回計算力学講演会 講演論文集, No.05-2, pp.521-522, November, 2005
- 宍戸信之, 池田 徹, 宮崎則幸
“デジタル相関法を用いた微細実装構造部のひずみ分布評価”, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会(つくば 2005/11/19)

- 島村 真介、青木 繁
ビリヤードにおけるキューと球の衝突解析
日本機械学会関東支部ブロック合同講演会 No.050-2 pp.131-132 (2005-9)
- 島村 真介、青木 繁
ビリヤードにおけるキューと球の衝突解析(キュー先角部構造の影響), 日本機械学会関東支部講演会 (2006-3) in press
- 須賀一博、青木繁
鉄筋コンクリートの腐食同定逆問題における計測条件の最適化, 日本機械学会関東支部講演会 (2006-3) in press
- 鈴木隼人, 江澤良孝
“CCM 法を用いた三次元メッシュ分割技術の開発”, 関東学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会(川越, 2006/3/10)
- 鈴木隼人, 江澤良孝
“ドローネ分割の三次元自動節点追加方法”(仮題), 日本応用数理学会研究部会連合発表会(東京, 2006/3/4)
- 高島修二, 宮崎則幸, 池田 徹, 中垣通彦
“塑性ひずみ勾配を考慮した粒子分散構成則による粒子径依存性の解析検討”, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会(つくば 2005/11/19)
- 田中智行, 岡田 裕, B スプラインウェーブレット Galerkin 法を用いた応力集中問題解析に関する考察, 第 18 回計算力学講演会, 日本機械学会, No. 05-2, pp. 173-174, 2005 年 11 月.
- 田中智行, 岡田 裕, 福井泰好, 熊澤典良, Wavelet Galerkin 法による応力集中問題解析に関する考察, 計算工学講演会論文集 10(1), pp. 369-372, 2005 年 5 月.
- 田村善昭, 小笠温滋, 中島拓之, 藤井孝藏
ライブラレス・リアルタイム可視化システムとその利用, 第 33 回可視化情報シンポジウム講演論文集, 可視化情報 25-Suppl. No. 1, pp. 251-254(東京, 2005/7).
- 長岡慎介, 稲葉正和, 矢川元基
フリーメッシュ法のための 3D アニメーション, 日本機械学会関東支部講演会, 東京,

2006.3.10-11

- 中島祐典, 田村善昭, 金子幸生, 松本洋一郎
医療応用を考えた集束超音波の挙動に関する研究, 第 37 回流体力学講演会講演集, pp. 263-266 (千葉, 2005/9).
- 中島祐典, 田村善昭, 松本洋一郎
医療応用のための集束超音波の数値シミュレーション, 第 19 回数値流体力学シンポジウム (東京, 2005/12).
- 中林靖, 吉村忍,
サッカーボールの空力特性,, 第 19 回数値流体力学シンポジウム, 2005
- 中林靖, 松尾吉朗,
浮力により上昇する球の運動解析, 第 19 回数値流体力学シンポジウム, 2005
- 中林靖, 浅見達矢,
エアシャッターを用いた物質拡散制御システムの開発, 第 19 回数値流体力学シンポジウム, 2005
- 中林靖, 浅野雅裕,
遺伝的アルゴリズムによる AIBO の歩行スタイルの自己学習, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講演論文集, 2005
- 中林靖, 増田正人, 吉村忍,
サッカーボールの空力特性の評価とそのフリーキックサポートシステムへの応用, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講演論文集, 2005
- 永井政貴, 池田 徹, 宮崎則幸
“三次元異方性異種材界面き裂の応力拡大係数解析手法”, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会 (つくば 2005/11/19)
- 原田千都, 荻野洋岳, 宮崎則幸
“半導体薄膜中の転位密度の有限要素解析”, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会 (つくば 2005/11/19)
- 藤澤智光, 入部綱清, 尾上耕一, 柴田和也, 須藤健太郎, 原田隆宏, 越塚誠一
商用映像制作への粒子法シミュレーションの適用, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講

演論文集, pp.787-788, 2005

- 増田良太, 大宮正毅, 井上裕嗣, 岸本喜久雄
界面強度に及ぼすはく離速度の影響, 日本機械学会 M&M2005 材料力学カンファレンス(福岡, 2005/11)
- 宮崎則幸
“単結晶製造プロセスと材料強度に関する研究”, 学術振興会 161 委員会 結晶の科学 第 46 回研究会(京都 2005/9/21)
- 宮崎則幸
単結晶製造プロセスの材料強度に関連したシミュレーション, 第1回計算力学フォーラム(東京 2005/12/16)
- 宮村倫司, 中林靖, 白樫卓也, 河合浩志, 吉村忍,
猪苗代湖の三次元流体シミュレーションに関する検討, 計算工学講演会論文集 Vol.10, No.1, pp. 297-298, 2005
- 宮村倫司, 文屋信太郎, 中林靖, 吉村忍,
浅水長波方程式による猪苗代湖の環境流体シミュレーション, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講演論文集, 2005
- 山本真明, 吉村忍, 中林靖,
タバコの煙の人体周り拡散シミュレーション, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講演論文集, 2005
- 山本真明, 吉村忍, 中林靖,
粒子状物質の大気中拡散マルチレベルシミュレーション, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集, 2005
- 吉田 真覚, M RIDHA, 渋谷 陽佑, 天谷 賢治, 青木 繁
境界要素逆解析による鉄筋コンクリートの電気伝導度およびインピーダンスの同定, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会 No.050-2 pp.129-130 (2005-9)
- 吉田 真覚, M RIDHA, 須賀 一博, 天谷 賢治, 青木 繁
鉄筋コンクリートの電気伝導度およびインピーダンスの同定実験, 日本機械学会関東支部講演会 (2006-3) in press

4. 6 受賞

- 矢川 元基
日本溶接協会業績賞, 2005.6

5. 結び

本研究は、2005 年 6 月にセンターが発足してから 2006 年 1 月までの活動を取りまとめたものである。時間的制約もあり十分に内容や体裁がこなれていない点については今後の宿題としたい。また、2006 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 15 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可能性がある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。