

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「マルチスケール・マルチフィジックス現象
の統合シミュレーション」
研究課題「原子力発電プラントの地震耐力予測
シミュレーション」

研究終了報告書

研究期間 平成19年10月～平成25年3月

研究代表者: 吉村 忍
(東京大学大学院工学系研究科、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本チームでは、原子力発電プラントの真の地震耐力の定量的予測を行うことを目的に、稼働中ないしスクラム直後の過渡状態にある原子力発電プラントの機能限界をマルチスケール・マルチフィジックス統合シミュレーションにより定量的に見極める地震耐力予測シミュレータを研究開発した。

吉村グループでは、地震耐力予測シミュレータのうち、建屋-機器解析システムの研究開発を担当した。有限要素法による並列構造解析ソルバ ADVENTURE_Solid の高度化とマルチフィジックス連成カプラ ADVENTURE_Coupler の研究開発により建屋および炉容器の解析、内部流体の付加質量を考慮した連成解析が可能となった。また、同様の連成解析の手法を用い、大規模構造物中に存在するき裂の進展挙動シミュレーションに適した手法の開発も行った。解析を支援するソフトウェアとして細分割機能を持つ階層型領域分割ツール ADVENTURE_Metis Ver.2、多点拘束や連成解析に必要な境界条件データを作成する ADVENTURE_BCtool Ver.2、大規模モデルの可視化をオンラインまたはオフラインで行うとともにウォークスルー可視化を行う ADVENTURE_POSTtool の研究開発も行った。これらを総称して ADVENTURE2 と呼ぶ。これらのソフトウェアは吉村がリーダーを務める ADVENTURE プロジェクトのホームページにてソースコードを無料で 2012 年 8 月より一般に公開している。さらに、平成 21 年度より次世代スーパーコンピュータ用アプリケーション開発強化支援の一環として、ADVENTURE_Solid に次世代スパコン「京」向けのチューニングを施し、4,096 ノードでピーク性能比 31%を達成した。

堀グループでは、マルチスケール構造・連成モデリングを担当した。これは、地震が発生する断層を含む地殻、原子力発電所建屋周辺の地盤、鉄筋コンクリート造の建屋を対象とするもので、Macro-Micro-Analysis (MMA)と名付けたマルチスケール有限要素法を適用し、地殻のキロメートル単位の空間スケールから、建屋のセンチメートル単位の空間スケールを計算するマルチスケール解析を行う。MMA では、特異摂動展開を利用することで、数理的に厳密なマルチスケール解析を行う点に特徴がある。また、波動問題に特有の数値分散に対処するため、MMA は粒子離散化手法に基づく離散化を採用している。さらに、億単位の次元のマトリクス方程式を高速に解くため、独自の前処理を施した共役勾配法の開発も行い、MMA に実装している。

中島グループでは、耐力シミュレーションシステムの構築、および地震時の炉内核熱振動解析および気液二相熱流動解析を可能とするためのコードの開発およびシミュレーションを担当した。耐力シミュレーションシステムの構築では、マルチスケール構造モデリングおよびマルチスケール連成モデリングの連携を実現するために二つの開発を行った。一つは、異なる計算機あるいは大規模並列計算機のノード間で実行されるマルチスケール・シミュレーションコード間のデータ変換機能を実現するグリッド機能の開発である。もう一つは、異なるスケールや物理を有するシミュレーションコード間のデータの受け渡しを実現する連成データ変換機能の開発である。また、核熱連成振動解析では、地震時における炉心発熱シミュレーションを行うためにコードを改造し、炉心での熱発生と流動の相互フィードバック効果による中性子束と流動の振動状態の安定性(核熱水力安定性)およびシステム熱水力挙動を解析的に評価した。熱流動解析では、3次元熱流動解析技術の高度化を図り、炉内構造物等の変形時における大規模な熱流動シミュレーションを可能とした。これらの研究開発を通して、炉特性に対する地震の影響を初めて定量的に示すことができた。

河合グループでは、堀グループおよび折田グループと連携をとりながら、地震動および地盤に関するデータの収集・整理を行い、地震動および地盤に関するデータの提供を進めた。

酒井グループでは、大規模数値シミュレーション技術の高度化のため、複雑な物理現象を適切にモデル化し、解析結果の妥当性を実験により確認する研究を進めた。原子力発電プラント全体解析を実施する上で、従来の解析モデルで十分考慮されていない、建屋(コンクリート)と機器(鋼構造)の接合箇所に着目した力学実験を行い、非線形振動応答挙動を把握するとともに検証データを取得し、ADVENTURE_Solid を用いたシミュレーション解析により解析精度を確認した。

折田グループでは、代表的な BWR-5 型プラントの諸元に基づき、原子炉建屋、原子炉格納容器、原子炉圧力容器、炉内構造物等の解析用デジタルデータを作成し、それらをマルチフィジックス解析用データとして提供した。解析用データの作成にあたっては、燃料集合体を詳細にモデル

化し、原子炉圧力容器地震応答解析の結果を取り込み熱流動解析と連成(マルチフィジックス解析)することを可能とし、また、3次元 FEM 解析モデルでは表現が困難だった冷却材(炉水)の影響を表現できるよう、冷却材 FEM モデルは流体解析との連成を可能なものとした。また、地質・地盤のデジタルデータの作成に資する実プラントデータの公開・提示、他のグループが実施するマルチスケール・マルチフィジックス解析の結果に対して実務的な観点からの評価、耐震シミュレーションへのフィードバックを行った。

(2) 顕著な成果

1. 原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレータの研究開発とソフトウェア構築
概要: MMA, ADVENTURE2, 地震時応答評価機能を実装した TRAC-BF1/SKETCH-INS および ACE-3D という、それぞれ世界初あるいは世界トップの性能を有するコードを開発し、さらにそれらを統合した地震耐力予測シミュレータを構築した。ADVENTURE2 はソースコードを無料で一般に公開した。
2. 原子力発電プラントの詳細なデジタル解析データ作成と地震応答解析
概要: 地震耐力予測シミュレータ向けに、沸騰水型原子炉 BWR-5 型プラントの諸元に基づき、原子炉建屋、原子炉圧力容器および炉内構造物等の 3 次元有限要素解析用データを作成した。また、このデータを使用してシミュレーションを実施し、地震時の原子力発電プラントの詳細な耐力評価が可能であることを世界ではじめて示した。
3. 機器建屋接合部位の力学挙動データの取得と解析
概要: 鉄筋コンクリート製の建屋と鋼製の機器の接合部位に着目して、地震動を付加する繰り返し振動破壊実験を行い、非線形応答挙動の詳細なデータを取得した。この挙動を概ね解析で再現した。シミュレーションの一層の高度化を図るとともに、実験結果を一般にも公開し、ベンチマークとして活用する。

§ 2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

巨大地震力を受ける、稼働中ないしスクラム直後の過渡状態にある原子力発電プラントの機能限界を「耐力」と定義し、それをマルチスケール・マルチフィジックス統合シミュレーションにより定量的に見極めることを可能とする地震耐力予測シミュレータを提案し、実装することを本プロジェクトの目標とした。地震耐力予測シミュレータでは、原子力設備の安全性・健全性を評価するために、地殻-表層地盤-建屋-機器間および構造-材料-流体-熱-炉特性における時空間スケール・物理現象の異なる領域を統一的に扱う。まず機器への地震入力波を正確に評価するため、異なる振動特性を有する地殻-表層地盤-建屋-機器間を伝播する地震波動の挙動を明らかにする。同時に、原子炉内部の構造-材料-流体-熱-炉特性の相互作用シミュレーションシステムを構築し、動的変形を伴う機器内の気液二相流挙動などの微視的な炉内変化、および炉特性の変化をマルチスケール・マルチフィジックス的に解析評価する。具体的には堀グループが保有する地震伝搬解析コードおよび吉村グループが保有する ADVENTURE をベースに、MMA および ADVENTURE2 を研究開発する。また、中島グループが保有する TRAC-BF1/SKETCH-INS および ACE-3D へ地震時応答解析の機能を追加する。これらの解析コードを新たに研究開発するマルチスケール・マルチフィジックスカプラにて接続し、地震耐力予測シミュレータとする。本シミュレータはグリッド上で実行できるようにする。また、河合グループおよび折田グループにより、原子力発電プラントおよびプラント周辺の地盤のデジタルデータを作成し、シミュレータのテストに用いる。酒井グループでは、鉄筋コンクリート製の建屋と鋼製の機器の接合部位に着目してハイブリッド実験を行い、非線形応答挙動の詳細なデータを取得、本プロジェクトで研究開発する非線形解析コードのベンチマークとして活用する。

また、平成 21 年度より次世代スーパーコンピュータ用アプリケーション開発強化支援の一環として、ADVENTURE_Solid に次世代スパコン「京」向けのチューニングを施す。

(2)新たに追加・修正など変更した研究構想

<吉村グループ>

全体としては、ほぼ当初の計画通りに進めることができたと考えている。

中間評価において指摘された、「実機データ入手による手法の高精度化、高効率化」、「実モデルでの検証を十分に行うこと」については、一部であるが、中越沖地震を再現した解析を行い、一定の成果を得ている。しかし、実モデルによるシミュレータ全体の統合解析の検証はまだ十分ではなく、今後の課題である。

「コンピューティングパワーへの依存だけではなく、チームの高いポテンシャルを生かして手法の面からも高効率化に努めて頂くとさらに良い」との指摘については、平成 21 年度より次世代スーパーコンピュータ用アプリケーション開発強化支援の一環として取り組んだ ADVENTURE_Solid の次世代スパコン「京」向けチューニングを通して、ソルバの高効率化に取り組み、非構造格子を使用する有限要素法コードでありながら、京コンピュータの 4,096 ノードでピーク性能比 31%という、非常に高い性能を達成した。

「原子力用途以外への展開を目指すことも期待したい」との指摘については、次世代スーパーコンピュータ「京」のHPCI戦略プログラム「分野3 防災・減災に資する地球変動予測」及び同「分野4 次世代ものづくり」に、本プロジェクトにて開発した ADVENTURE2 を提供し、活用されている。また、ADVENTURE2 自体は汎用並列有限要素法解析システムという性格も備えており、ホームページから無料で公開され、幅広い問題の性能評価や設計に用いられる。

<堀グループ>

研究開始当初、基本的コードが開発されていた MMA に対しては、計算の大規模・高速化や他のコードとの連成を実現することが当初の主要な目的と考えていた。しかし、波動問題の長年の課題であった数値分散を抑えるためには、コードの改良では不十分であった。このため、離散化という数理論まで立ち返って、定式化の改良とそれに伴うコードの抜本の変更を施した。さらに、MMA で計算可能な問題の規模が大きくなったこと(100 万単位から億単位の自由度)に対応して、地殻から建屋までの詳細な解析モデルの構築も新たな課題となった。このため、六面体要素と四面体要素を組み合わせる解析モデルの自動構築手法を開発した。

<中島グループ>

研究を進めていく中で、マルチスケール・シミュレーションコード間を連動させるグリッド機能において、コードのリトライ実行等、実行やデータ保存のための信頼性向上技術の開発が必要となり、そのような機能の設計変更をとまなう開発を行い、テストや実験を通し、コードの実行が無駄にならないよう改良を加えた。異なるスケールや物理を有するシミュレーションコード間のデータの受け渡しを実現する連成データ変換機能では、当初は単純なデータ変換や単位変換を考えていたが、シミュレーション精度向上のため、データの持つ特性を加味して、異なる密度や形式のメッシュ間のデータ分配方法等の工夫を施した。

中間評価では、以下の指摘や助言を受けた。

- ① 地震時の原子力発電プラントにおける熱流動条件の変化と炉出力変化の相互作用に関する研究は、これまで国内外において系統的に行われたことが無いため、本研究により変動外力場における炉内の核熱連成挙動を詳細に取り扱えるシステム解析コードを開発することにより、仮想的な振動条件から現実の地震波にまで対応したプラントの動的挙動を理解し、安全評価を精度よく実施することが可能となり、その重要度は高い。
- ② 地盤、建屋などの構造解析、炉内の熱流/核特性解析など、幾つかの個別のシミュレーションシステムを統合したシステムであり、相互の整合性をとることやデータ授受に齟齬をきたさないようにすることが重要である。
- ③ 一貫したシステムとして実際に現場で評価システムとして使用できるためには、ユーザインターフェースにも配慮が必要である。
- ④ 実用に向けて、実モデルでの検証を十分に行うこと。

- ⑤ 過去にこの種の安全解析プログラムを使った解析に基づいて十分に「安全」という評価を得て建設された原子力発電所で様々な事故が発生したことがある。その理由は、電力会社が原子力発電所の建設を急ぐあまり、この種の安全解析結果を国や住民を説得するための「水戸黄門の印籠」として悪用したことによる。本研究で開発されたプログラムがそのような目的で使用されないよう十分なケアが必要だと思われる。今後、この研究で得られた成果を、原子力安全・保安院や原子力安全委員会での各種検討に活かしていただきたい。

これらに対して、以下のような対応を実施した。

- ① 安全評価をより精度よく実施する技術を確立していくため、データ連携機能の高度化を検討した。その結果、マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションにおいては、データ連携をより機構論的に実現する手法を研究していくため、今回の連携シミュレーションのデータ取得に努めた。
- ② データ授受に齟齬をきたさないようにするために、具体的にはシミュレーションの実行が無駄にならないように、リスタートデータの確保等が可能となるような改善を行った。
- ③ ユーザインターフェースの評価については、利用者の意見をヒアリングして、その改善に努め、グラフィックインターフェースや操作性の改善に努めた。
- ④ できるだけ多くのデータを用いて、マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション実行環境での実験を進め、マルチスケール・シミュレーションコード間を連動させるグリッド環境や連成データ変換機能の検証を行った。
- ⑤ 研究成果を認知してもらうために学会活動を行い、これにより将来的に有効な手段としての評価を得ていけるよう努めた。

〈河合グループ〉

新たに追加・修正した研究構想はなし。

〈酒井グループ〉

担当する耐震評価実験については、研究プロジェクトの全体会合を通じて、識者からの意見をいただき、反映しながら実験計画の策定を行った。このため実験の実施時期が当初予定より半年程度ずれたものの、詳細な事前検討を盛り込んだ形で実施できた。

〈折田グループ〉

新たに追加・修正した研究構想はなし。

§ 3 研究実施体制

(1)「東京大学・吉村グループ」

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
吉村 忍	東京大学大学院工学系研究科	教授	H19.10～H25.3
南 さつき	同上	特任研究員	H19.10～H25.3
遊佐 泰紀	同上	D1	H23.10～H25.3
三目 直登	同上	M1	H24.4～H25.3
金山 寛	九州大学大学院工学研究院	教授	H19.10～H25.3
荻野 正雄	名古屋大学情報基盤センター	准教授	H19.10～H25.3
大石 篤哉	徳島大学工学部	准教授	H19.10～H25.3
宮村 倫司	日本大学工学部	講師	H19.10～H25.3
塩谷 隆二	東洋大学総合情報学部	教授	H19.10～H25.3
中林 靖	同上	准教授	H19.10～H25.3
河合 浩志	諏訪東京理科大学システム工学部	准教授	H19.10～H25.3

武居 周	苫小牧工業高等専門学校電気電子工学科	准教授	H22.12～H25.3
吉村 卓也	首都大学東京	教授	H19.10～H25.3
玉置 元	同上	助教	H19.10～H25.3
山田 知典	日本原子力研究開発機構システム計算科学センター	研究副主幹	H19.10～H20.3
野口 裕久	慶応大学理工学部	教授	H19.10～H20.8
文屋 信太郎	東京大学大学院工学系研究科	講師	H19.10～H21.3
犬塚 一徹	同上	元学生	H19.10～H23.3
室谷 浩平	同上		H19.10～H23.10
杉本 振一郎	同上		H19.10～H24.3

② 研究項目

マルチスケール構造・連成モデリング A

マルチスケール構造モデリング/アセンブリー機器・プラント構造・建屋モデリング, マルチスケール連成モデリング/炉特性・熱流動・構造材料連成モデリング, シミュレーション実施

(2)「東京大学・堀グループ」

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
堀 宗朗	東京大学地震研究所	教授	H19.10～H25.3
小國 健二	同上	准教授	H19.10～H25.3
市村 強	同上	准教授	H19.10～H25.3
本多 弘明	同上	博士課程学生	H20.4～H21.3
ソバニネジャド ゴラムレザ	同上	博士課程学生	H20.4～H22.3
マラナン ギンギス	同上	修士課程学生	H21.4～H22.3
フェール・エロール	同上	博士課程学生	H22.4～H22.3

② 研究項目

マルチスケール構造・連成モデリング B

マルチスケール構造モデリング/地盤・建屋モデリング, マルチスケール連成モデリング/地殻・地盤・建屋・機器連成モデリング

(3)「日本原子力研究開発機構・中島グループ」

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
中島 憲宏	日本原子力研究開発機構システム計算科学センター	次長	H19.10～H25.3
武宮 博	同上	室長	H20.9～H25.3
西田 明美	同上	研究主幹	H19.10～H25.3
鈴木 喜雄	同上	研究主幹	H20.4～H25.3
高瀬 和之	日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究部門	グループリーダー	H19.10～H25.3
吉田 啓之	同上	研究主幹	H19.10～H25.3
三沢 丈治	同上	研究員	H19.10～H25.3
丸山 結	日本原子力研究開発機構安全研究センター	研究主幹	H20.4～H25.3
佐藤 聡	同上	研究員	H20.4～H25.3
浅香 英明	同上	研究主幹	H19.10～H20.3
近藤 昌也	同上	研究副主幹	H19.10～H20.3

新谷 文將	日本原子力研究開発機構システム計算科学センター	技術主幹	H20.4～H22.3
渡辺 正	日本原子力研究開発機構安全研究センター	研究主幹	H20.4～H24.5

② 研究項目

マルチスケール構造・連成モデリング C

マルチスケール構造モデリング/プラント構造モデリング, マルチスケール連成モデリング/全体, 耐力シミュレーションシステム/耐力シミュレーションシステム実装, シミュレーション実施

(4)「防災科学技術研究所・河合グループ」

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
河合 伸一	(独)防災科学技術研究所	主任研究員	H19.10～H25.3
藤田 英輔	同上	主任研究員	H19.10～H25.3
佐藤 一雄	同上	契約専門員	H19.10～H25.3
大井 昌弘	同上	研究員	H19.10～H25.3

② 研究項目

マルチスケール構造・連成モデリング D

マルチスケール構造モデリング/地盤モデリング(地震動および地盤に関するデータの提供)

(5)「電力中央研究所・酒井グループ」

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
酒井 理哉	電力中央研究所・地震工学領域	主任研究員	H19.10～H25.3
山本 広祐	電力中央研究所・地球工学研究所	上席研究員	H22.4～H25.3
宮川 義範	電力中央研究所・構造工学領域	主任研究員	H21.4～H25.3
豊田 幸宏	電力中央研究所・地球工学研究所	上席研究員	H20.4～H22.3
佐藤 雄亮	電力中央研究所・構造工学領域	主任研究員	H21.4～H24.3

② 研究項目

マルチスケール構造・連成モデリング E

マルチスケール構造モデリング/実験計画, 実験-シミュレーション融合によるハイブリッド実験

(6)「東京電力株式会社・折田グループ」

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
折田 修一	東京電力株式会社原子力設備管理部 機器耐震技術グループ	主任	H19.10～H25.3
長澤 和幸	同上	マネージャー	H19.10～H21.6 H24.2～H25.3
清浦 英明	同上	副長	H24.3～H25.3
福島 将司	同上	主任	H21.7～H25.3
奥 武弘	同上	副主任	H22.7～H24.9
小林 敬	同上	副長	H21.7～H24.1

渡辺 愛	同上	主任	H20.3～H23.9
山崎 英一	同上	主任	H19.10～H22.6
島 晃洋	同上	副長	H19.10～H21.6
井上 龍介	同上	主任	H21.4～H21.6

② 研究項目

耐力シミュレーションの実施・実験評価

実プラントデータの提供およびシミュレーション結果の評価

§ 4 研究実施内容及び成果

4.1 マルチスケール構造・連成モデリング A (東京大学・吉村グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本グループでは、地震耐力予測シミュレータのうち、建屋-機器解析システムの研究開発を担当した。有限要素法による並列構造解析ソルバ ADVENTURE_Solid の高度化とマルチフィジックス連成カプラ ADVENTURE_Coupler の研究開発により建屋および炉容器の解析、内部流体の付加質量を考慮した連成解析が可能となった。また、同様の連成解析の手法を用い、大規模構造物中に存在するき裂の進展挙動シミュレーションに適した手法も開発した。解析を支援するソフトウェアとして細分割機能を持つ階層型領域分割ツール ADVENTURE_Metis Ver.2, 多点拘束や連成解析に必要な境界条件データを作成する ADVENTURE_BCtool Ver.2, 大規模モデルの可視化をオンラインまたはオフラインで行うとともにウォークスルー可視化を行う ADVENTURE_POSTtool Ver.1 の研究開発も行った。これらのソフトウェアは ADVENTURE プロジェクトのホームページにてソースコードを 2012 年 8 月より無料で一般に公開している。さらに、平成 21 年度より次世代スーパーコンピュータ用アプリケーション開発強化支援の一環として、ADVENTURE_Solid に次世代スパコン「京」向けのチューニングを施し、京コンピュータ 4,096 ノードでピーク性能比 31%を達成した。これらは、並列有限要素法解析分野において、扱える解析モデル規模及び並列計算性能の観点から世界トップの成果である。

・ADVENTURE_Solid の高度化

地盤、鉄筋コンクリート、金属などの材料非線形性の考慮、および大規模アセンブリ構造物の解析に対応するため、有限要素法による並列構造解析ソルバ ADVENTURE_Solid の高度化を行った。

本研究開発のベースとした ADVENTURE_Solid Ver.1 には簡易な材料非線形解析機能しかなく、建屋の主要な構造材である鉄筋コンクリートの考慮や、地震のように繰り返し大きな力が加えられるような状況下での解析はできなかった。そのため、新たに繰り返し塑性のための移動硬化および複合硬化モデル、鉄筋コンクリート構成式の実装を行った。また、各種硬化モデルにおけるひずみ硬化則のより一般的な入力指定、弾性・塑性遷移および除荷に関する自動増分制御機能など、大規模動弾塑性解析を効率的かつロバストに実行するための各種機能の導入および性能最適化を行った。

大規模アセンブリ構造物の解析に対応するため、ADVENTURE_Solid Ver.1 に多点拘束条件 (Multiple Point Constraints: MPC)機能を実装した。ADVENTURE_Solid の特徴であるバランスング領域分割前処理向けに最適化された MPC を実装するとともに、MPC のための入力データを作成する解析支援ツール ADVENTURE_BCtool Ver.2 の研究開発を行った。これにより、MPC を伴う大規模モデルの並列解析が可能となった。なお、MPC の解析支援ツールの研究開発についての詳細は後述する。

また、プロジェクトの成果として一般への公開を行うため、コードの整理、機能テスト、パフォーマンステスト、ユーザビリティテスト、パッケージングを行った。ADVENTUREプロジェクトのホームページ(<http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/>)にて、ADVENTURE_Solid Ver.2 としてソースコードを 2012 年 8 月より無料で一般に公開した。

・マルチフィジックス解析機能の構築

炉容器内部の炉水の付加質量効果を流体-構造連成によって高精度に考慮するため、マルチフィジックス解析のための連成カプラ ADVENTURE_Coupler の研究開発を行った。

ADVENTURE_Coupler は複数の単一力学現象ソルバを統合して活用するマルチフィジックス解析プログラムである。ソルバ間の物理量の交換を並列に行うためのプログラムであり、カプラ-ソルバ間の通信を行うためのソルバ用通信ライブラリと、ライブラリから受け取った連成面/連成領域の値を幾何的に補間し送受信を行う機能、ソルバのプロセスとカプラのプロセスの対応を定義する機能などを持つ。

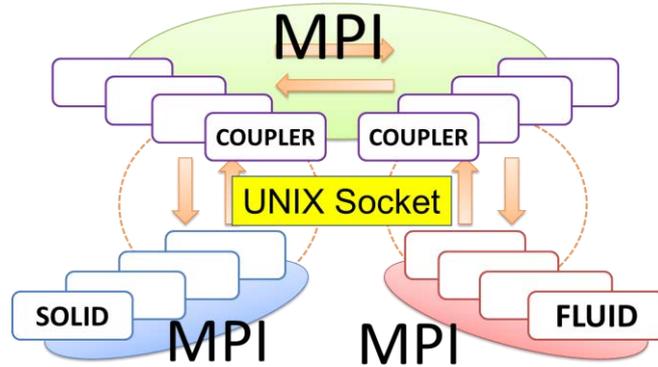


図 1. ADVENTURE_Coupler の通信.

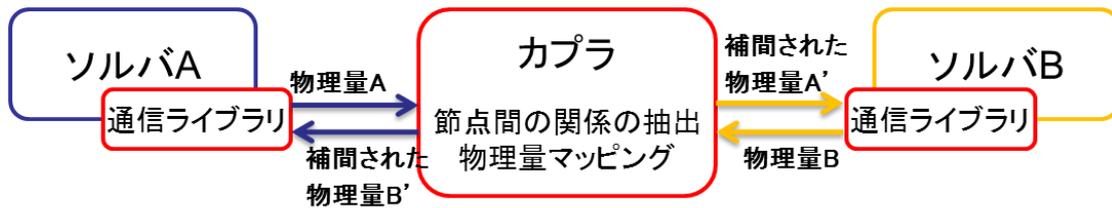


図 2. ADVENTURE_Coupler の物理量マッピング.

カプラ-ソルバ間の通信は標準的な TCP/IP ソケットを使用しており、この通信によって物理量の送受信が行われる。カプラ内の通信には MPI を使用しているが、ソルバ内の通信手法に制限はない。高度に並列化された多種多様なソルバを連成できることが、ADVENTURE_Coupler の特徴の一つである。カプラ-ソルバ間の通信機能はライブラリとして提供されており、ソルバにこのライブラリをリンクすることで連成解析が可能となる(図 1)。また、物理量の幾何的な補間はカプラ内部で行う。カプラは、異なる単一力学現象ソルバの解析モデルに設定されたメッシュトポロジーの関係および領域分割の違いを解析し、連成現象が生ずる節点間の関係を抽出する機能と、その情報を基に連成面/連成領域の値を幾何的に補間する機能を持つ(図 2)。以上により、ソルバ内部でデータの幾何的な補間や通信機構の実装を行うことなしに比較的簡便に複数のソルバを接続したマルチフィジックス解析が可能となる。

原子炉の耐震解析における流体-構造連成による付加質量効果を高精度に考慮するため、分離反復型強連成解析を行うための機能も ADVENTURE_Coupler は持っている。Broyden 法などの非線形解法を実装することで、モノリシックな強連成解析と比較しても遜色ない精度とロバストさを実現した。図 3 は構造解析ソルバ ADVENTURE_Solid とポアソン方程式ベースの音響流体を考慮するソルバ ADVENTURE_Thermal を用いた大規模分離反復型強連成解析の模式図である。このシステムの検証を PC クラスタ上で行い、流体、構造それぞれ 1 千万自由度を超えるような大規模な問題に対しても実用的に動作することが確認された。16 ノード 64 コア PC クラスタにおいて流体、構造各ソルバともに十分な並列効率が得られており、連成カプラ自身が並列環境においてボル

ネックにならないことも確認した。

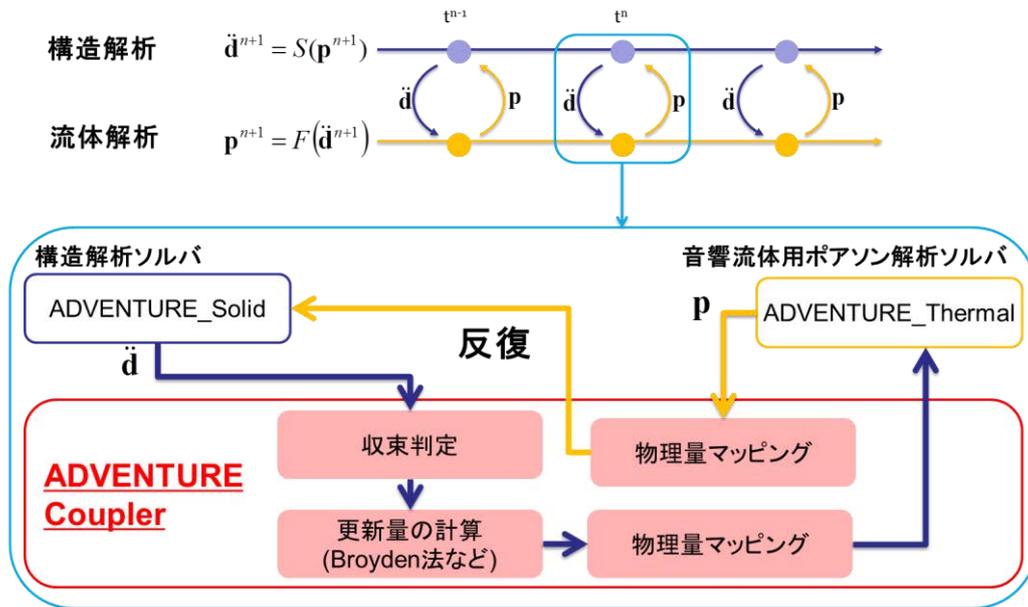


図 3. 音響流体-構造の分離反復型強連成システム。

さらに、原子炉の実機により近いモデル(シュラウドおよび燃料集合体 368 体)に地震波を入力した際の振動解析を行い、既存の解析結果との比較を行った。その結果、モデル化手法の違いによると考えられる若干の差異はあるものの、両者はよい精度で一致し、本アコースティック流体構造連成システムの妥当性を確認した。現在までに 15 秒(3,000 時刻ステップ)まで計算を行い、妥当な時間内で安定して解が得られることも確認し、本アコースティック流体構造連成システムの実機の耐震解析における有用性が示唆された。また、解析結果から、内側に位置する燃料集合体はほぼ一様に振動するのに対し、外側に位置する燃料集合体は流体の付加質量の影響により複雑に振動する様子など、単純な多質点系モデルでは表現されない現象が観察され、詳細モデルによる耐震解析の重要性が改めて認識された(図 4, 図 5)。

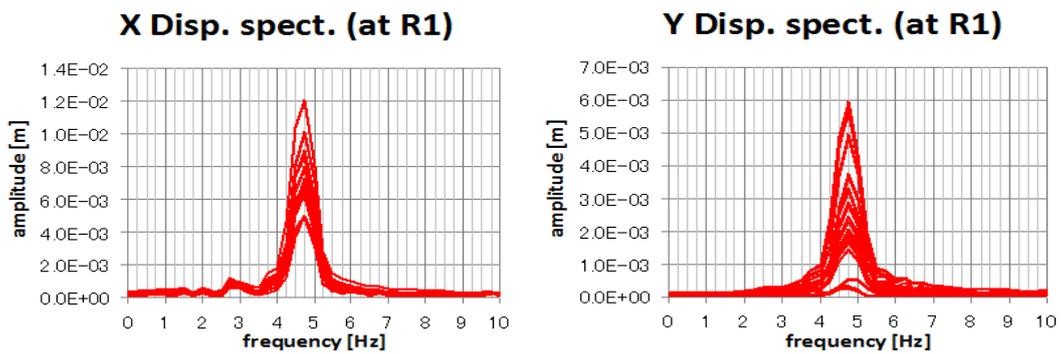


図 4. 外側の燃料集合体の変位スペクトル(左:X 方向, 右:Y 方向)

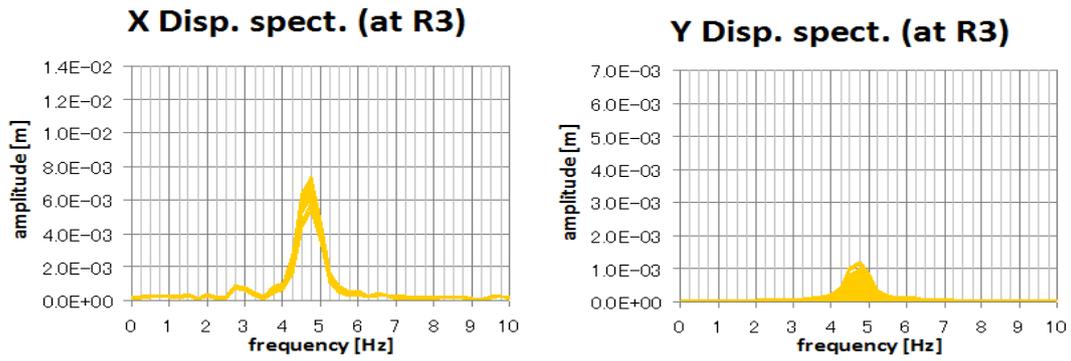


図 5. 内側の燃料集合体の変位スペクトル(左:X方向, 右:Y方向)

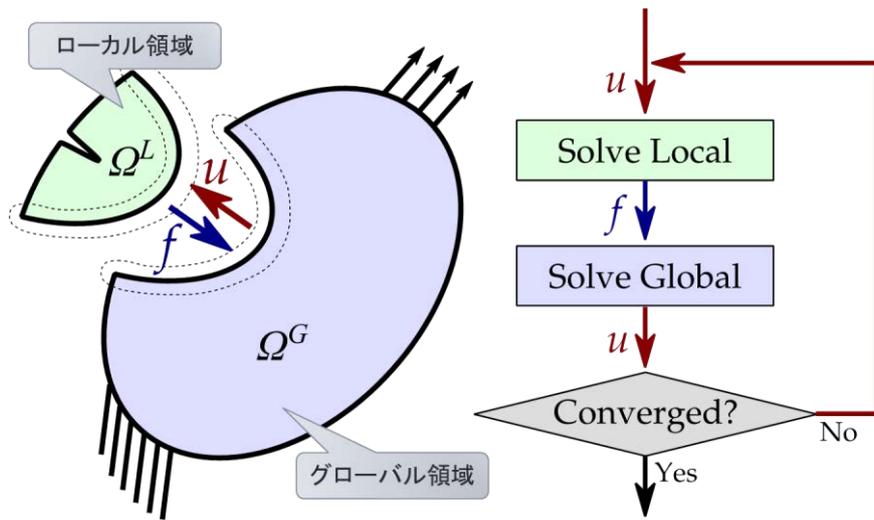


図 6. き裂進展挙動シミュレーションのための構造-構造連成解析.

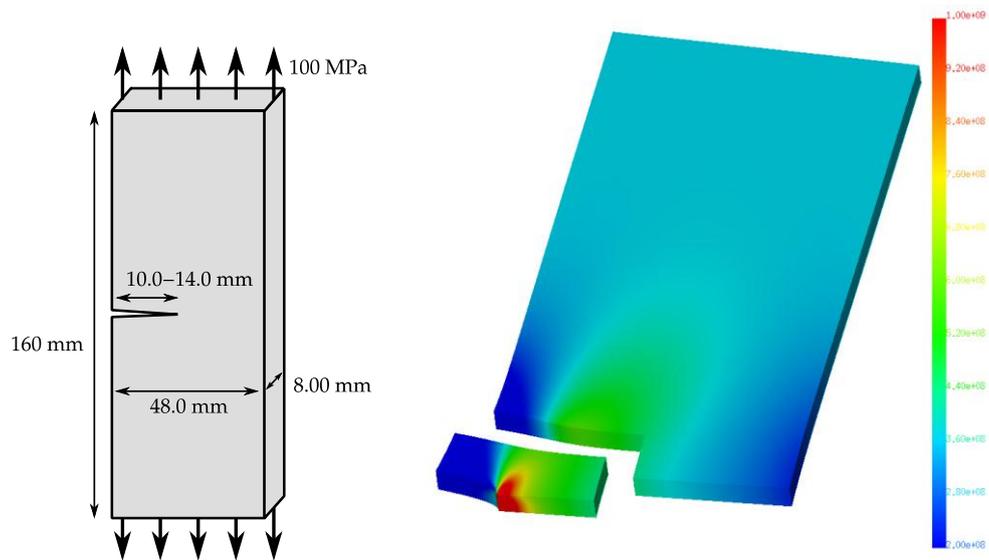


図 7. 平板のき裂進展挙動シミュレーション.

地震による原子炉構造機器の破壊挙動を表現するため、大規模構造物中に存在するき裂の進展挙動シミュレーションに適した手法を開発し、評価を行っている。ここでは、流体-構造連成解析

の分離反復型解法を応用し、き裂先端近傍の小規模な領域とそれ以外の大規模な領域を分離して解析を行う(図 6)。1 台の計算機を用いた 200 万自由度のき裂付き帯板モデルの 3 次元疲労き裂進展解析において、従来の標準的な解析と比較して応力拡大係数において同等の精度が得られ、5 倍程度の高速化を達成した(図 7)。

・解析支援ツール群の研究開発

解析を支援するソフトウェアとして、細分割機能を持つ階層型領域分割ツール ADVENTURE_Metis Ver.2, MPC や連成解析に必要なデータを作成する ADVENTURE_BCtool Ver.2, 大規模モデルの可視化をオンラインまたはオフラインで行うとともにウォークスルー可視化を行う ADVENTURE_POSTtool Ver.1 の研究開発を行った。

ADVENTURE_Metis Ver.2 は、既存の階層型領域分割ツール ADVENTURE_Metis Ver.1 をベースとし、次世代スーパーコンピュータでの 100 億自由度規模の超大規模解析を念頭にそのモデルデータを準備するため、メッシュ細分割機能を実装した(図 8)。その結果、数百万から数千万自由度程度の中規模サイズのメッシュを入力として、複数回細分割を行い数十億から数百億自由度規模の超大規模メッシュの階層型領域分割データを並列計算機上で高速に生成することができるようになった。メッシュ細分割を行う際に生成される要素は、形状関数で形状を補正され、モデルが生成された CAD モデルにほぼ等しい形状を保持される。また、1 台の計算機を用いて、省メモリモードで同様な規模のメッシュを生成することができるようになり、計算機環境に対してよりフレキシブルなモデルデータ作成が可能となった。

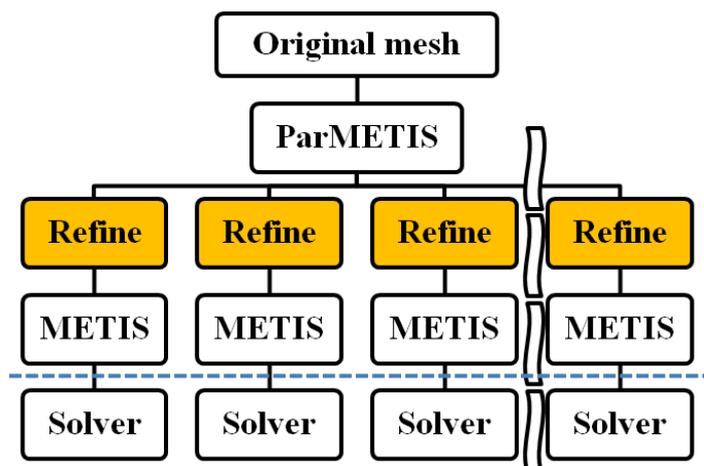


図 8. 細分割機能付き ADVENTURE_Metis Ver.2.

ADVENTURE_BCtool Ver.2 は、既存の ADVENTURE_BCtool Ver.1 をベースとし、新たに多点拘束(MPC)支援機能および連成解析支援機能を実装した。多点拘束支援機能では、実原子力発電プラントアセンブリ構造の解析アルゴリズムの実装を念頭においた、ADVENTURE 向け多点拘束支援ツール群の研究開発を行った。具体的には、拘束を課す 2 面の表面パッチを融合し、かつ接触面の節点配置を一致させるツール(pcmMerge)、表面パッチベースの節点や面グループの多点拘束条件データファイルを 4 面体メッシュベースの多点拘束条件データファイルに変換するツール(mpcLocal2Global)、メッシュに対話的に従来の境界条件と多点拘束条件を貼付するツール(mpcGui)である。連成解析支援機能では、マルチフィジックス連成カプラのプレ処理として、各領域の連成表面節点を適切にグルーピングした「面グループ」を入力データとして定義する。構造側の面グループと流体側の面グループのペアを境界面としてカプラに渡すことで、カプラ内部で境界面上の節点をリストアップし、それらの座標値から補間関係式のパラメータを計算し、境界節点関係定義ファイルとして保存している。面グループ定義は ADVENTURE_BCtool に含まれる msh2pch モジュールで行い、流体メッシュ/構造メッシュのそれぞれで生成した面グループ情報を合成して境界面定義ファイルを生成するプログラム(fgr2cond)を作成した。

また、数億自由度クラスおよびそれを超える規模の解析結果を可視化するためのオフラインおよびウォークスルー可視化機能の研究開発を行い、ADVENTURE_POSTtool Ver.1としてパッケージングを行った。オフライン可視化では、すでに地球シミュレータ上で動作していたものをPCクラスタに移植し、ポリゴンレンダリング部分について各種スカラプロセッサ向け性能最適化を行った。また、性能ボトルネックとなっていた並列画像合成部分について、画像の高速圧縮伸張機能を導入することにより、並列効率を改善した。一方、ウォークスルー可視化については、最新グラフィックスハードウェアへの対応を進めるとともに、任意断面表示機能の追加を行った。これらのシステムを用いて、後述する建屋-炉容器モデルの地震応答解析の結果を可視化した。

・建屋-炉容器モデルの地震応答解析

東京電力・折田グループの協力の下、原子力発電所建屋と原子炉圧力容器および燃料集合体を含む内部構造を結合した約 2 億自由度のモデル(図 9)を作成し、評価を行った。なおこのモデルと適合させた燃料集合体モデルおよび炉水モデルもあわせて作成した。

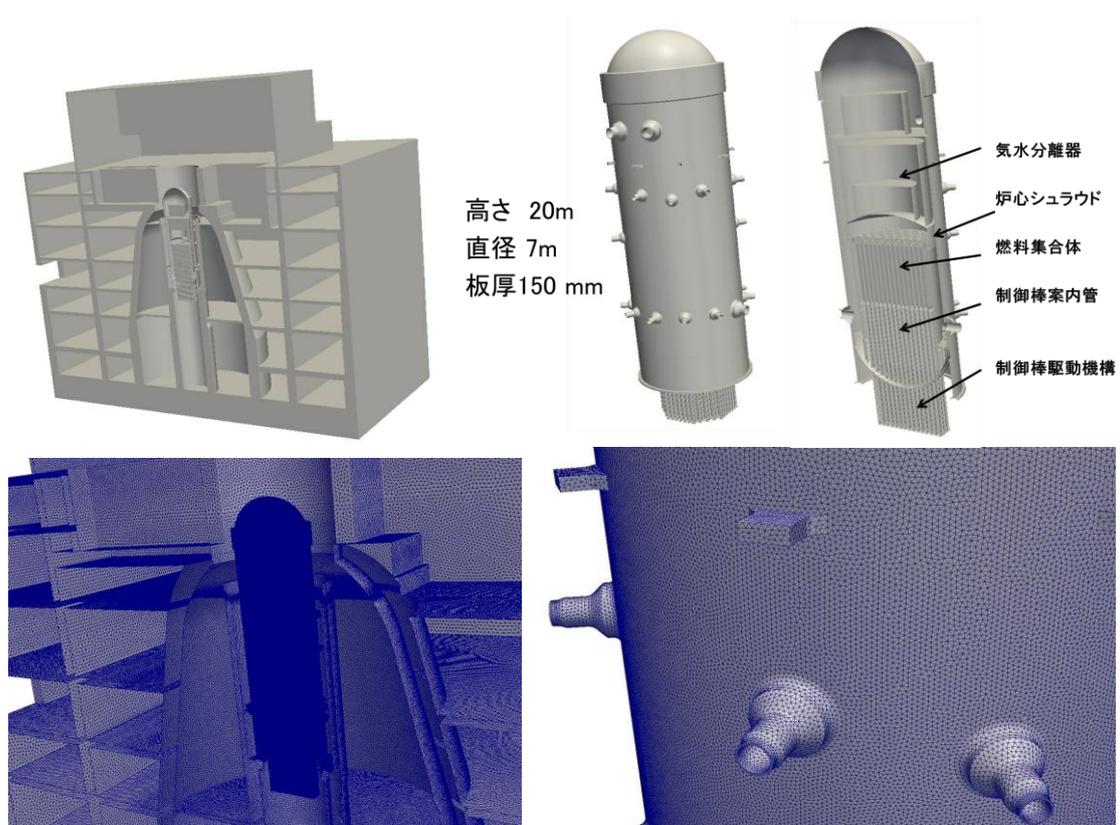
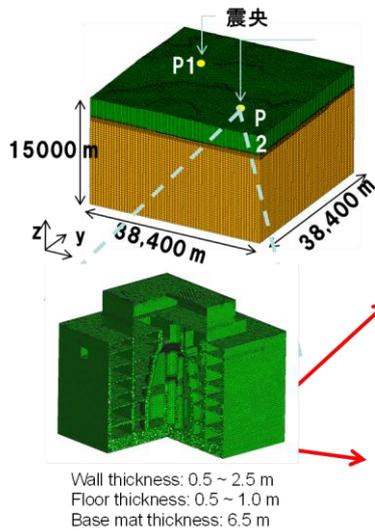
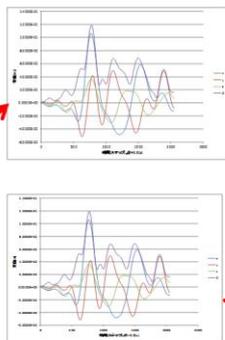


図 9. 2 億自由度建屋-炉容器モデル。

ステップ1: MMAによる断層⇒地盤⇒原子炉建屋の地震波動伝播解析



ステップ2:
MMAの結果から
建屋表面の変位
の時刻歴を**節点
毎に抽出**



ステップ3:

建屋表面の節点毎の変位の時刻歴を境界条件として、ADVENTUREによる建屋 - 炉容器 - 炉内機器の地震応答解析

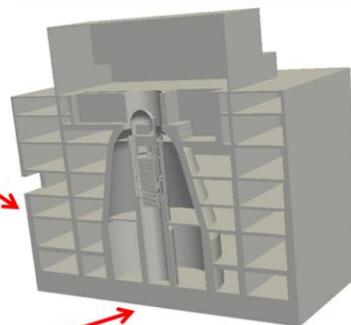


図 10. MMA と ADVENTURE_Solid の連携.

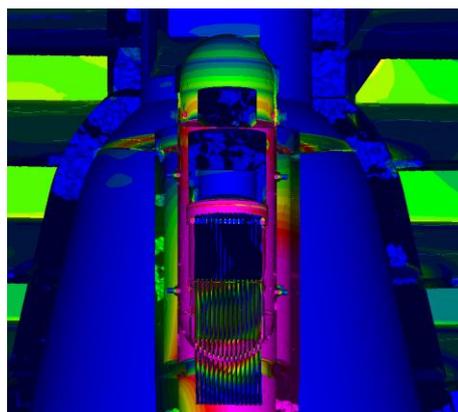
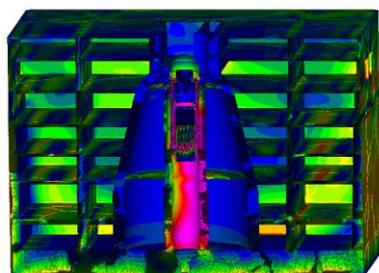


図 11. 2億自由度大規模沸騰水型原子炉建屋及び圧力容器の地震応答解析のスナップショット(相当応力分布).

東京大学地震研究所・堀グループが開発した地震動伝搬解析ソルバ MMA と ADVENTURE_Solid を連携させ、この 2 億自由度の建屋-炉容器モデルの地震応答解析を行った。まず、堀グループが MMA を用いて直下型地震の地震動伝搬解析を行い、地盤と接する建屋表面の変位履歴を計算した(図 10)。続いて吉村グループが MMA により得られた変位履歴を入力として ADVENTURE_Solid で建屋-炉容器モデルの地震応答解析を行い、変位履歴および相当応力を求めた。吉村グループの解析は、東京大学情報基盤センターHA8000 上で行った。まず前処理の選択と解析時間の見積りを行うための試解析を行った。その結果をもとに、64 ノード(1,024 コア)を用いて地震応答解析を断続的に行い、 $\Delta t = 0.01$ 秒、2,000 時間ステップ(実時間で 20 秒分)の計算を約 5 ヶ月かけて行った。最後に、ADVENTURE_POSTtool にて建屋-炉容器モデル全体の变位および相当応力を可視化(図 11)し、動画を作成した。

・次世代スパコン「京」向けチューニング

次世代スーパーコンピュータ用アプリケーション開発強化支援の一環として、ADVENTURE_Solid に次世代スパコン「京」向けのチューニングを施した。

まず、次世代スパコンを念頭においた FEM ソルバのマルチコア/メニーコアスカラー型超並列計

算機向け性能最適化を行った。ADVENTURE システムで採用されている反復型領域分割法の領域 FEM 計算部分について、これまでのメモリアクセス・インテンシブな DS (Direct solver-based matrix Storage)型設計に加え、より省メモリでメニーコアアーキテクチャ上でのスケーラビリティが高い DSF (Direct solver-based matrix Storage-Free)および ISF (Iterative solver-based matrix Storage-Free)型を提案した。後者の反復法ベース ISF としては、SSOR 前処理と Eisenstat 技法を組み合わせた非ゼロ成分記憶型 CG、および Element-by-Element の行列無記憶型並列 CG の二種類を試作した。

これらについて基本性能の検証を行った結果、24 コア搭載ワークステーション 1 台を用いた OpenMP ベース SMP 環境において、3,500 万自由度 ABWR モデルの構造解析を約 20 分で解くことに成功した。また、1 億自由度の薄板モデルを約 1 時間で解き、このとき必要となるメモリを約 9GB に抑えることができた。このとき、約 23 倍のスケールアップおよびピーク浮動小数点性能比 6 割程度を達成した。これを MPI 並列化した実装を大規模 PC クラスタ向けに開発し、1 億自由度モデルを 5 分で解くことに成功した。また、5 億自由度モデルの解析にも成功している。このとき、ピーク性能の 2~5 割を達成した。さらに、高並列環境向けに東京大学 T2K および富士通 FX1 への移植を行った。FX1 での予備調査では、ホットスポットにおいてピーク性能の 2~3 割を達成した。

また、次世代スパコン向け ADVENTURE システム高速化の一環として、以下の作業を行った。

- ・ 構造解析コード ADVENTURE_Solid の超並列環境でのスケールアップテスト
- ・ ADVENTURE_Solid のホットスポット部分の性能計測とチューニング
- ・ 領域分割法における BDD 前処理向けの直接法ソルバの性能調査
- ・ 領域分割法アルゴリズム性能向上のための右辺項問題向け反復法アルゴリズムの調査

ADVENTURE_Solid の超並列環境上での並列スケールアップテストを富士通と共同で行った。東大情報基盤センターの T2K スパコンのうち 1,024 コアを用いて 1 億自由度モデルでのストロングスケールアップおよびウィークスケールアップテストを行い、ほぼスケールすることを確認した。また、さらなるスケーラビリティ向上に関して、グローバル通信に関するボトルネックや通信性能の改善点が発見された。

同じく ADVENTURE_Solid に関して、スカラー演算性能のボトルネックであるホットスポット部分を数箇所抽出し、その性能計測とチューニングを富士通と共同で行った。次世代スパコンと同様な計算機アーキテクチャを有する富士通 FX1 上での計測において、前記マルチコア向け領域分割法実装のうち、DSF についてピークの 4 割、ISF についてピークの 2 割から 3 割程度の性能を確認した。

一方、領域分割法のためのバランシング領域分割前処理における性能ボトルネックであるコースグリッド修正に関して、そこで用いられる直接法ソルバの性能向上を狙ったベンチマーク調査を実施した。実際には、バンド行列ソルバである LAPACK およびその分散並列版 ScaLAPACK、および、5 種類のスパース直接法ソルバ、Spooles, PARDISO, SuperLU, MUMPS, WSMP の性能調査を実施した。その結果、LAPACK および ScaLAPACK は移植性に優れほとんどの HPC プラットフォームにおいて利用可能であり、性能としても領域分割数が数万程度の比較的少数であれば妥当レベルであること、一方、より高速であるが利用環境に制限があるスパースソルバに関しては、領域数 10 万規模において、IBM の WSMP およびフリーソフトの MUMPS の二つが他に比べ高速かつロバストであることを確認した。

また、反復法としての領域分割法アルゴリズムの高速化を検討した。領域分割法ではその領域 FEM 計算や Schur 補元評価において右辺項問題となるが、このような同一係数行列であるが右辺項が異なる複数の連立 1 次方程式を次々に解いていく際に効率的な解法として知られている AugCG 法を領域分割法に適用し、性能評価を行った。数値実験より、使用メモリは増加するものの記憶ベクトル数に応じて高速化が図れることが確認された。

以上により、マルチコア CPU 向けのチューニングとしては、領域 FEM 計算部分に関して直接法および反復法アプローチを用いてそれぞれピーク性能比 50%以上を達成した。一方、バランシング領域分割前処理におけるコースグリッド修正部分の高速化を行った。その結果、東大 T2K におい

て4,096 コアを用いて2億自由度モデルを1分、20億自由度モデルを8分程度で求解できるようになった。

さらに、次世代スパコン「京」でのチューニングを進め、領域 FEM 計算部分に関し、直接法アプローチとしてローカル Schur 補元(DS-LSC)型、反復法アプローチとして閾値付き不完全分解(IS-ICT-EBE)型の開発を進め、京コンピュータにおいてピーク比40%、25%をそれぞれ実現した。また、4,096 ノードまでのスケーリングテストをパスし、2億自由度モデルを30秒、9億モデルを2分程度で求解できるようになった。最終的にDS-LSCのアプローチにてバランシング領域分割前処理部分も含めた計算全体で、4,096 ノードを使用してピーク性能比31%を達成した。

次世代スーパーコンピュータ「京」における単体性能向上および利用ノード数を数千から数万へ引き上げることを目標に、DS-LSCアプローチの強化とともに、並列化のボトルネックであったコースグリッド修正の高速化を狙った逆行列アプローチを導入した。これは、コース行列の逆行列をあらかじめ求めておき、コースグリッド修正自体は並列行列ベクトル積で置き換えるものである。なお、逆行列の高精度な評価のために4倍精度演算が必要とされた。この逆行列アプローチの導入により、コースグリッド修正過程が従来の並列スカイラインソルバーのものに比べ10～30倍程度高速化された。その結果、線形動解析を想定したベンチマークにおいて従来アプローチに対し10倍以上の高速化、および2万ノード利用時においてピークの15%程度を実現した。

(2)研究成果の今後期待される展開

地震耐力予測シミュレータは、本プロジェクトにて完成した。本シミュレータにて直下型地震の際の原子力発電プラントの耐力評価が可能となった。今後は電力会社などの原子力関連企業と連携することで、既存の原子力発電プラントの耐力予測、バックチェックやストレステストの高度化などに役立てていくことが期待される。

一方、本シミュレータではまだプレート境界型の広域大地震や津波などの影響は考慮できない。そのため、今後起こると想定される東海・東南海・南海地震等の巨大地震や、それらの連動地震における耐力予測を本シミュレータで行うことはできない。しかし、本シミュレータを構築するために研究開発したマルチスケール・マルチフィジックス連成カブラの技術を活用して広域の地震波動伝搬解析コードや津波の解析コードを本シミュレータに接続することにより、そのような状況下での耐力予測も可能となると思われる。

さらに、2011年3月11日の東日本大震災によって引き起こされた福島第一原子力発電所の事故では、地震の後に津波によって大きな被害を受けたこと、放射線レベルが高いためにプラント内部の調査ができないことから、地震動によってプラントがどの程度の影響を受けていたかわかっていない。しかし、本シミュレータを用いることにより、地震によってプラントが損傷を受けたかどうか、受けたとした場合の損傷の程度を予測することができるものと期待される。

4.2 マルチスケール構造・連成モデリング B (東京大学 堀グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本グループは、はじめ3年間かけて、既存構成式・モデルの調査および現在有している技術やその実装形態であるソフトウェアの融合開発を行い、マルチスケール構造モデリングを完成させる。研究全体として構想されている、オープンソースの大規模並列有限要素法解析システム ADVENTURE を基盤として用いることに従い、地盤や鉄筋コンクリート製の建屋の非線形挙動を表すために必要不可欠な技術を高性能・大規模計算機環境へ組み込む。それと同時に、独自に開発する断層-構造系システム(地震を発生する断層を含む地殻構造、地震波が伝播し増幅する地盤構造、地盤-構造連成を考慮した建屋周辺構造、図12参照)での地震波動伝播・構造地震応答のマルチスケール解析を実行するマクロ-ミクロ解析(Macro-Micro Analysis, MMA)の開発も目指す。

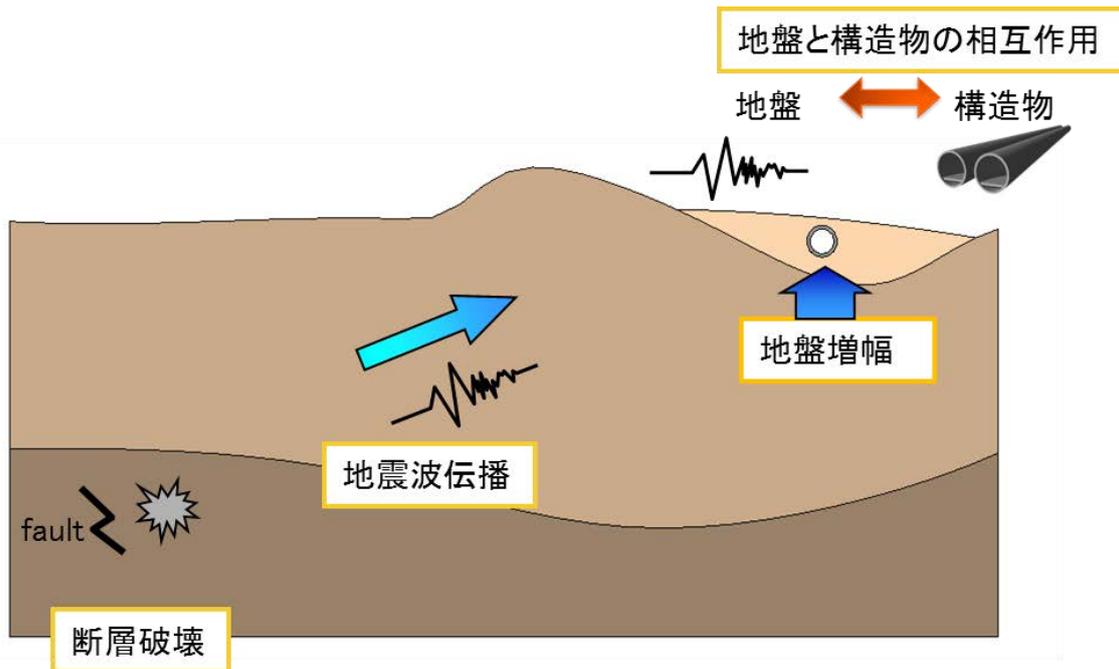


図 12. 断層－構造系システム:断層破壊, 地震波伝播, 地盤増幅, 地盤と構造物の相互作用を考慮した構造物地震応答の一連の過程のシミュレーションのためのモデル.

平成 19 年度の研究実施内容は文献調査である. 構造モデリングの対象の一つである鉄筋コンクリート造建屋に使われるコンクリート材料は, 鋼材等の金属材料に比べ, 応力-ひずみ関係(構成則)が複雑である. コンクリートと鉄筋コンクリートの構成則の関係式と, その構成則を使った数値解析手法を文献調査し, 調査結果を整理し, 本グループが実装する構成則の具体的な対象を選定した.

平成 20 年度の研究実施内容は, 前年度に引き続き, 文献調査を行うとともに, 構造モデリングのプロトタイプを開発することである. 実際に, 地殻から表層地盤・建屋までマルチスケールに扱える構造モデリングのプロトタイプを開発した. 地殻から表層地盤までの地下構造に対する構造モデリングを開発する際に特に重要となるのは, 100~1,000[m]の地震学的スケールと 0.1~1[m]の地震工学的スケールをつなぐ地震動計算の数値解析手法である. 計算の高速化とともに, 計算自由度の大規模化を達成した. 建屋の構造モデリングの開発に関しては, 損傷・破壊挙動の追跡をできるように, 地震応答計算の数値解析手法を高度化した.

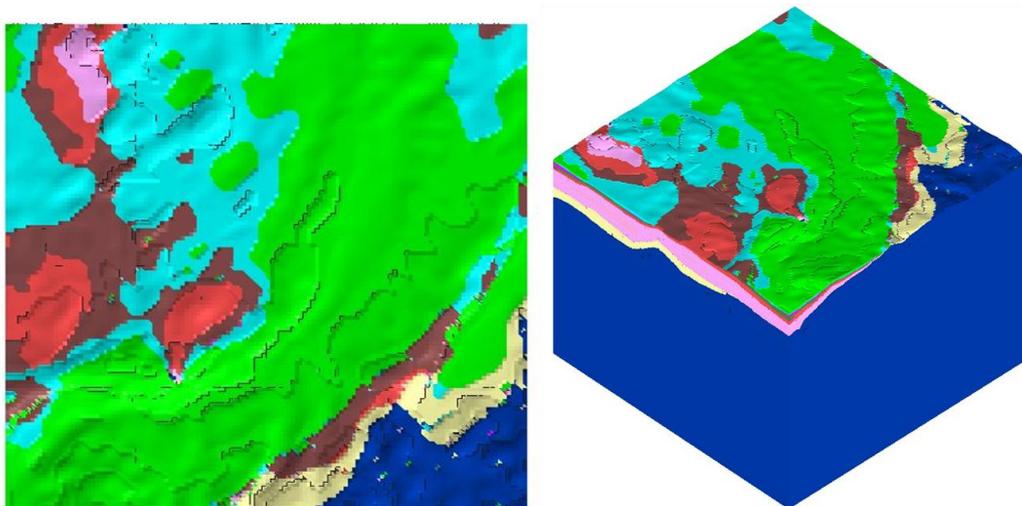


図 13. 地殻構造の 3 次元 FEM モデル:左)地質分類を考慮した平面図. 右)3 次元構造.

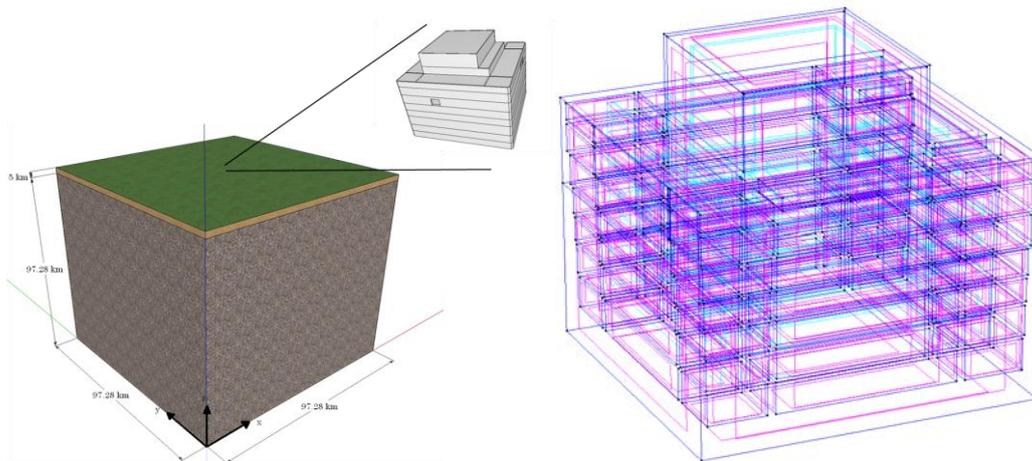


図 14. 建屋と近接する地盤を含めた 3 次元 FEM モデル:左)モデルの全体像, 右)建屋のモデル.

平成 21 年度の研究実施内容は、マルチスケール構造モデリングとマルチスケール連成モデリングの具体的なモデリングを開発することである。マルチスケール構造モデリングでは、地盤モデリングを対象とし、マルチスケール地震波動伝播解析手法であるマクロ-マイクロ解析の具体的な対象となる二つの解析モデル、地殻構造の 3 次元 FEM モデルと地盤構造の 3 次元モデルを構築した(図 13 参照)。この解析モデルは、地震学的・地震工学的に計測・推定された地質構造データと地盤構造データを基に構築されている。地殻構造の FEM モデルは粗いスケールのマクロ解析、地質構造の FEM モデルは細かいスケールのマイクロ解析に提供される。マルチスケール構造モデリングの建屋モデリングでは、地盤-構造相互作用数値解析の具体的な対象となる、建屋と近接する地盤を含めた 3 次元 FEM モデルを構築した(図 14 参照)。この解析モデルは、非線形有限要素解析ソルバである ADVENTURE_Solid を使って計算される。建屋は鉄筋コンクリート造であるため、コンクリートの非線形塑性挙動や微小き裂発生・進展に起因する損傷挙動を表現する構成則の高度化を行った。マルチスケール連成モデリングでは、地殻-地盤-建屋-機器連成のうち、地殻-地盤-建屋の連成解析が実行可能であることを示した。この連成解析は次の手順による。1)想定された地震シナリオにしたがってマクロ解析を行う。2)マクロ解析の地殻の地震波動を入力として、マイクロ解析を使って地殻-地盤の連成を計算する。さらに、3)マイクロ解析の計算結果を入力として、ADVENTURE_Solid を使って地盤-建屋の連成解析を行う。なお、マクロ解析の計算結果がマイクロ解析の入力データ、さらにマイクロ解析の計算結果が ADVENTURE_Solid の入力データとなるが、このデータの受け渡しはまだ完全に自動化されておらず、オペレータの判断と人力が必要である。

平成 22 年度の研究実施内容は、地殻-表層地盤-建屋のマルチスケール構造モデリングと耐力シミュレーションシステムへの組み込みである。地殻-表層地盤-建屋のマルチスケール構造モデリングでは、基本的な数値解析が地震波動伝播であり、計算精度を落とす数値分散に対応を図った(る)。数値分散は変位関数の空間離散化に起因する近似が原因である。特に、地盤-建屋モデリングの内、断層と構造物から構成される断層-構造系システムを対象としたマクロスケール解析モデルでは、領域を小さい長さスケールで計算するため、数値分散の悪影響は特に大きいことが懸念される。断層-構造系システムの数値解析のマルチスケール構造モデリングに、粒子離散化手法という新しい空間離散化手法を適用することで、従来の手法に比べ数値分散を相当低減させることに成功した。この結果、断層-表層地盤-建屋のマルチスケール構造モデリングの高精度化が実現した。断層-構造系システムの中の建屋と周辺地盤を対象としたマイクロスケール解析モデルに対し、前年度までに作成された解析モデルの空間離散化を改良した。この結果、より詳細な構造モデリングが可能となった。耐力シミュレーションシステムへの組み込みの要諦は、地殻-表層地盤-建屋のマルチスケール構造モデリングと建屋-機器-炉構造のマルチスケール連成モデリングの連成が、建屋の振動時系列データを介して行われることである。すなわち、地殻-表層地盤-建屋のマルチスケール構造モデリングで出力された建屋の変位・速度・加速度時系列データを変換し、建屋-機器-炉構造のマルチスケール連成モデリングの建屋部分の入力データとするのである。冗

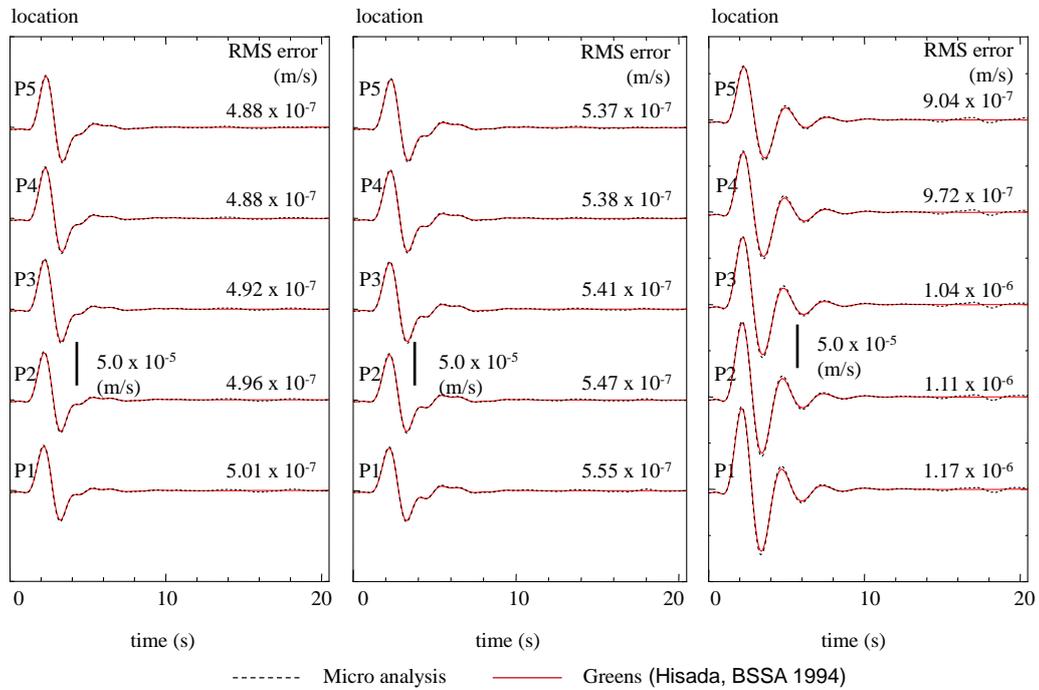


図 15. 数値分散への対応の例:解析解と比較して, 良好な精度の数値解を得ることに成功.

長性・堅牢性の高いデータ変換の手法を考案し, これを実装することで, 二つのマルチスケール連成モデリングの連成を可能とした. これによって, 地殻-表層地盤-建屋のマルチスケール構造モデリングが耐力予測シミュレーションシステムに組み込まれたことになる.

平成 23 年度は, 平成 22 年度まで開発を行ってきたマクロ-マイクロ解析手法をベースとして, 地殻-表層地盤-建屋までをマルチスケールに扱えるマルチスケール構造モデリングと地殻-地盤-建屋-機器連成モデリングを確立することを目的とした. 具体的な課題は, 2007 年中越沖地震を例として, 地殻・表層地盤・建屋のマルチスケール構造モデルを実行することである(図 16 参照). この結果は, 建屋・機器構造のマルチスケール連成モデルの入力となる. 平成 23 年度の成果は, 2007 年中越沖地震を例とした, 地殻・表層地盤・建屋のマルチスケール構造モデルに成功したことである. 解析手法をチューンアップし高速大規模計算が実行できるようにした. 地殻, 表層地盤, 建屋の解析モデルを構造データから自動構築するモジュールを開発し, 実際に大規模モデルを構築した. 各解析モデルの妥当性は, 長周期の観測・計測データとの比較で検証している(図 17 参照).

本研究の成果は, 断層から地殻, 表層地盤, 土木・建築構造物に至る大規模かつ精密な地震波動伝播解析という観点から, 世界初の成果である.

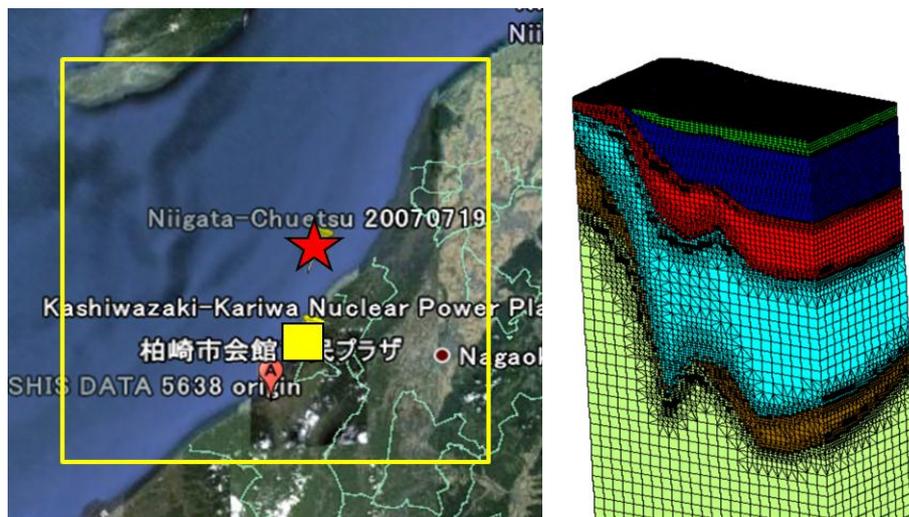


図 16. 2007 年中越沖地震を対象としたマルチスケール構造モデリング:左)対象領域, 右)構築された 3 次元モデルの例.

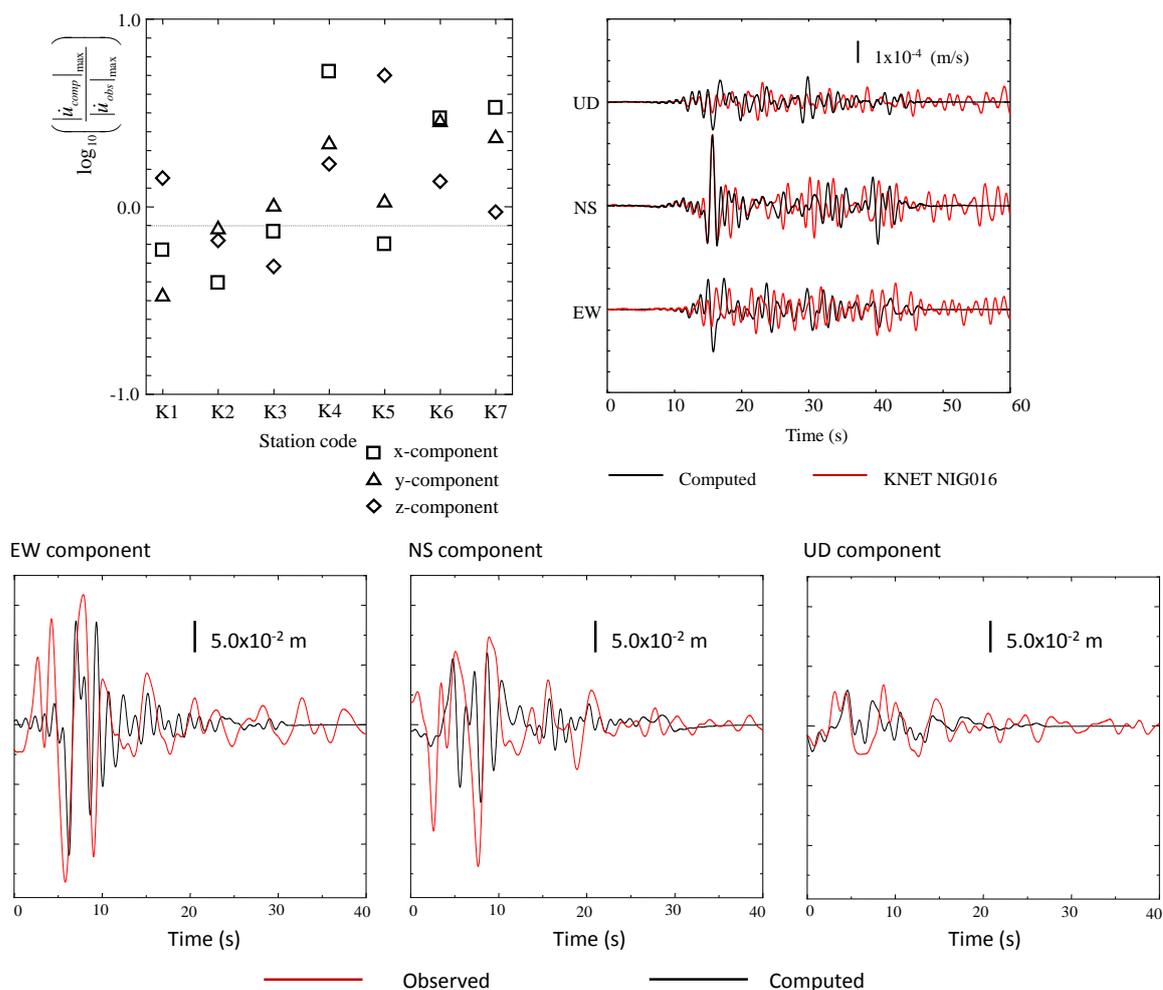


図 17. 2007 年中越沖地震を対象としたマルチスケール構造モデリングの結果: 左上) 地震動の計算波形の誤差, 右上) 地震動の観測波形と計算波形の比較, 左下) 建屋応答の観測波形と計算波形の比較.

(2) 研究成果の今後期待される展開

本研究で開発した MMA および ADVENTURE_Solid に実装されたコンクリート構成則・破壊解析は、当初の計画通り、断層-構造系システムの数値解析に対して、厳密なマルチスケール解析を実行できる手法として利用が検討されている。限定的ではあるが、大規模地下構造物の耐震性の検討に既に利用が開始されている。今後も、計算機のハードウェア・ソフトウェアの進歩に見合う、大規模数値解析を利用した大規模構造物の耐震性の検討は加速化すると期待されている。本研究の成果は、少なくとも土木工学の分野においては、この加速化を具体的に実現する一翼となることは確実である。

本研究の展開の具体的な形として、京計算機の利用を前提とした、HPCI 戦略プログラム「分野 3 防災減災に資する地球変動予測」という研究プロジェクトが挙げられる。このプロジェクトの一つの課題は、構造物の地震応答シミュレーションの高度化である。平成 24 年度より本格利用が計画されている京計算機において、2011 年東日本大震災以降、分野 3 のプロジェクトが果たす役割は大きい。特に、発生が懸念されている南海トラフの巨大地震に備えるために、構造物の地震応答シミュレーションの高度化は重要度を増している。本研究の成果を活かした、解析手法の更なる高度化が必要である。

4.3 マルチスケール構造・連成モデリング C (日本原子力研究開発機構・中島グループ)

(1)研究実施内容及び成果

地震耐力予測シミュレーションシステムのグリッド化実装に関しては、地震耐力予測シミュレーションシステムの実行に必要な各参加研究機関の計算機(東大地震研究所のスーパーコンピュータ, 東大吉村研究室の PC クラスタ, 原子力機構のスーパーコンピュータおよびワークステーション)間を原子力機構のグリッド基盤である AEGIS に接続した。図 18 に、地震耐力予測シミュレーションシステムでマルチスケールシミュレーションを行うために実現した計算機環境の模式図を示す。また、耐力シミュレーションの一連の計算を制御するためのユーザインターフェースを開発し、長時間解析に対応できるようにフォールトトレラント機能の強化を図るため、パイプライン処理を導入した。

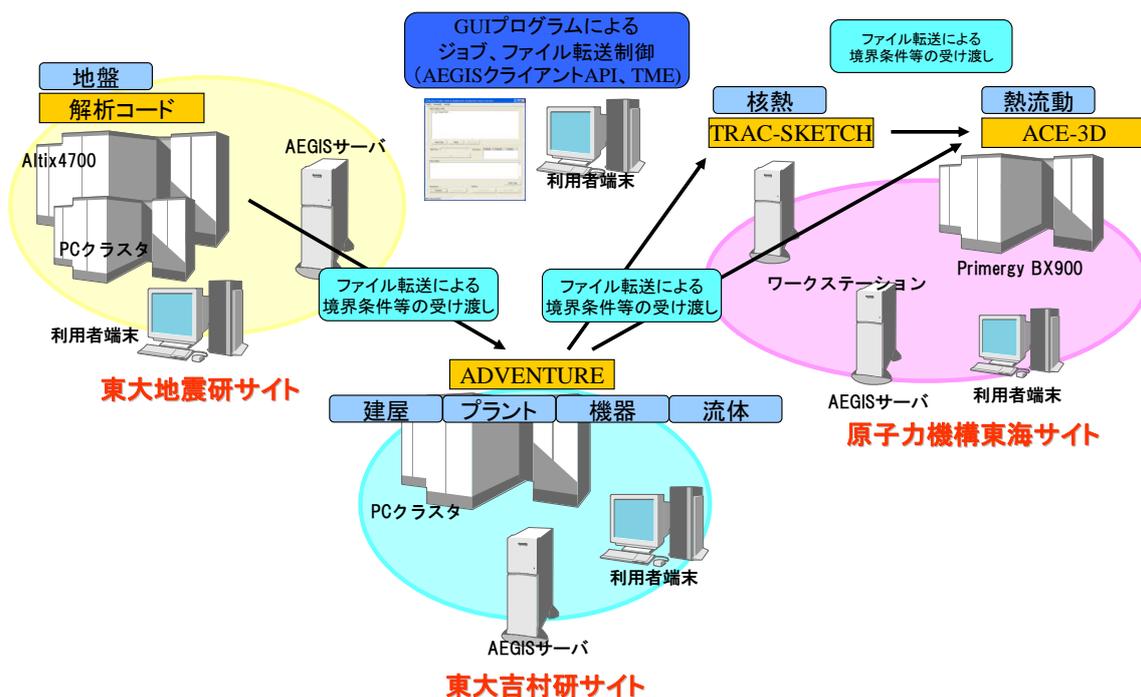


図 18. 地震耐力予測シミュレーションシステムの概念図。

また、マルチスケール構造モデリングによるシミュレーションとマルチスケール連成モデリングによるシミュレーションの連携に関しては、①地盤解析-建屋・機器解析、②建屋・機器解析-核熱連成振動解析、③建屋・機器解析-炉内熱流動解析、④核熱連成振動解析-炉内熱流動解析間のカップリングインターフェース(耐力予測シミュレーションを構成する複数の解析ソフトウェア間で交換すべき物理量のデータ授受を実現するためのインターフェースソフトウェア)の開発を行った。グリッド環境上での実行制御を可能とするために、マルチスケールシミュレーションに必要なデータの自動変換化を実施した。

構築したグリッド環境において、開発したカップリングインターフェースを用いた実プラントデータを模擬したモデルによる機能評価を実施した。実プラントデータを模擬したモデルとは、現実の原子炉を簡易にデジタルモデル化したものである。グリッド環境上での耐震シミュレーションの実施のために、図 18 に示すグリッド環境において地盤解析から炉内解析までの各解析アプリケーションと各解析間のカップリングインターフェースをあわせた一連の連携解析がユーザインターフェースを介して連続的に実施できることを確認し、機能評価を完了した。

当グループで担当するマルチスケールシミュレーション(核熱連成振動解析および炉内熱流動解析)の連成シナリオとして、流体-炉特性-熱特性と言った異なる物理現象を連携計算させるために、以下の三つの事象を選定した。

- ① 地震時に原子炉構成機器が正常に作動した場合を想定し、原子炉スクラムが作動しかつ再循環ポンプが作動を継続する事象。
- ② 地震時に核熱安定性が劣化した状態に移行した状況を想定し、原子炉スクラムが失敗しかつ再循環ポンプがトリップする事象。
- ③ 地震時に原子炉出力が高い状態に維持される状況を想定し、原子炉スクラムが失敗しかつ再循環ポンプが作動を継続する事象。



図 19. 炉心水平断面内セル出力分布の時間変化.

核熱連成振動解析では、3次元核熱結合解析コード TRAC-BF1/SKETCH-INS に地震加速度モデルを導入し、実機原子炉である Peach Bottom 炉を対象とした解析を実施した。加速度の導入は、流体の運動方程式および熱流動相関式の重力項に付加する事で実現した。原子炉のモデル化においては、核解析・熱水解析共に全燃料集合体(764 体)を模擬し、さらに再循環ループ、汽水分離器を精密に模擬することで、地震波が炉心内出力分布等に与える 3 次元的な影響を詳細にとらえられるようにした。印加する加速度には、実際の地震波(El Centro 波)に対する原子炉压力容器の応答を用いた。本解析により、図 19 に示すような、炉心断面全体の大きな出力変動、またこれに重畳した、水平方向に逆位相の振動、さらに周方向に回転するような出力振動が得られた。これにより、地震による加速度が、全炉心安定性および領域安定性の両者に影響を与える

可能性のある出力振動を引き起こす事を明らかにした。また、3種類(①スクラム失敗、②スクラム作動、③再循環ポンプトリップ)の地震発生後の事象シナリオを想定した解析を実施し、各シナリオにおける地震加速度の事象への影響を調査した(図 20)。スクラム失敗の場合は炉心出力が大きく変動を繰り返すのに対し、スクラム作動の場合には急激に出力が減少し、地震加速度の影響をほとんど受けないこと。また、再循環ポンプトリップの場合、地震加速度の影響による出力変動を若干伴いながらも、ゆっくりと出力が減少していくことがわかった。これにより、スクラム失敗という非常に厳しい条件の場合のみ、地震加速度による出力変動を考慮する必要があることが示された。

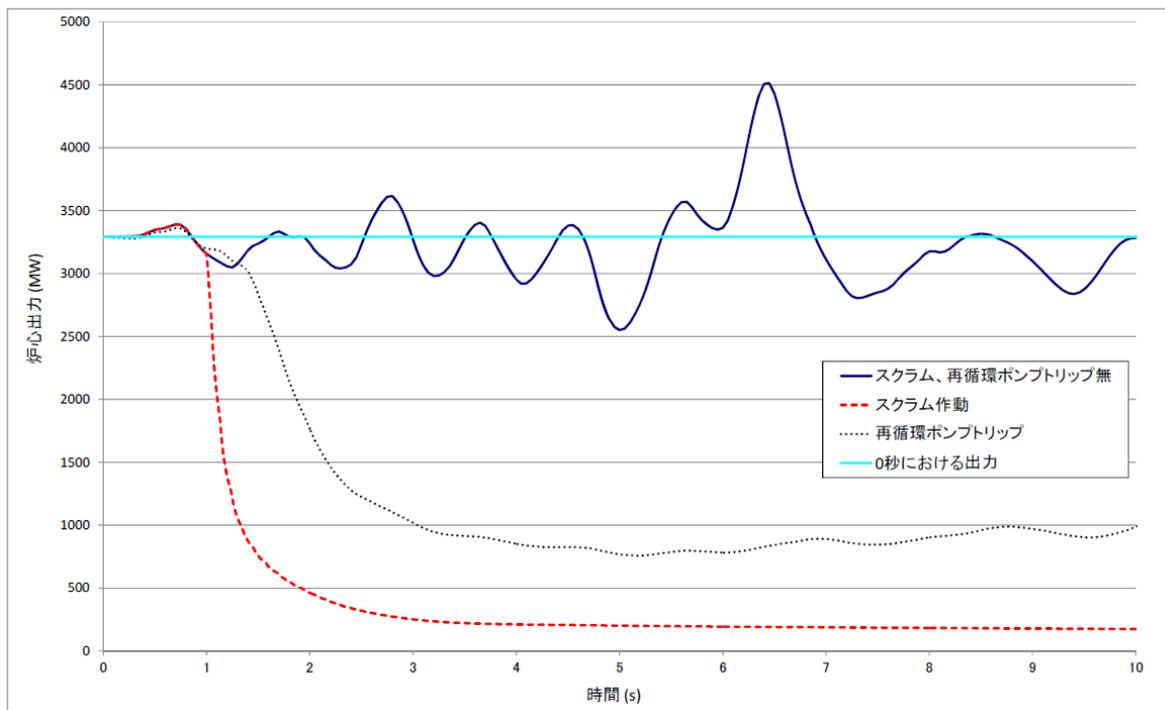


図 20. 3 種類のシナリオにおける地震発生後の出力変動。

炉内熱流動解析に関しては、日本原子力研究開発機構が開発している 3 次元 2 流体モデル解析コード ACE-3D を拡張することにより、地震動に起因する、燃料集合体内沸騰 2 相流の 3 次元的な挙動の評価手法開発を目的とした。

本研究の課題は、①構造物の振動により流体に加わる加速度を運動方程式の外力項に加えることにより、その影響を評価できる振動加速度付加機能、および循環流量や炉内圧力等の時間的変化を境界条件として反映する非定常境界条件付加機能の導入、②時間刻み幅が最大 100Hz である原子炉機器構造解析との整合性評価、および沸騰流評価に必要な物理時間の把握、③データ連係解析機能を用いた解析の実施である。

導入した振動加速度付加機能および非定常境界条件付加機能の検証計算を実施し、物理的に妥当な結果が得られることを確認し、導入した解析機能の妥当性を確認した。検証計算結果の一例として、燃料棒群で形成される 2×2 サブチャンネル内沸騰流に、周期 0.2 秒の模擬地震加速度を付加した解析で得られた断面内ボイド率分布の時間変化を

図 21 に示す。振動加速度と同じ約 0.2 秒の周期で、ボイド率分布が変化していることが分かる。

機器構造解析より抽出される振動加速度データとの整合性を評価するとともに、解析に必要な計算時間の把握を目的として、振動周波数の影響を簡易解析により評価した。その結果、100Hz 以上の振動に対しては沸騰二相流の変動がほとんど見られず、最大周波数が 100Hz である機器構造解析結果と整合することを確認した。また、周期 0.6 秒以上の振動加速度に対し沸騰二相流が準定常に変化することから、1 秒以上の計算が必要であることを明らかにした。

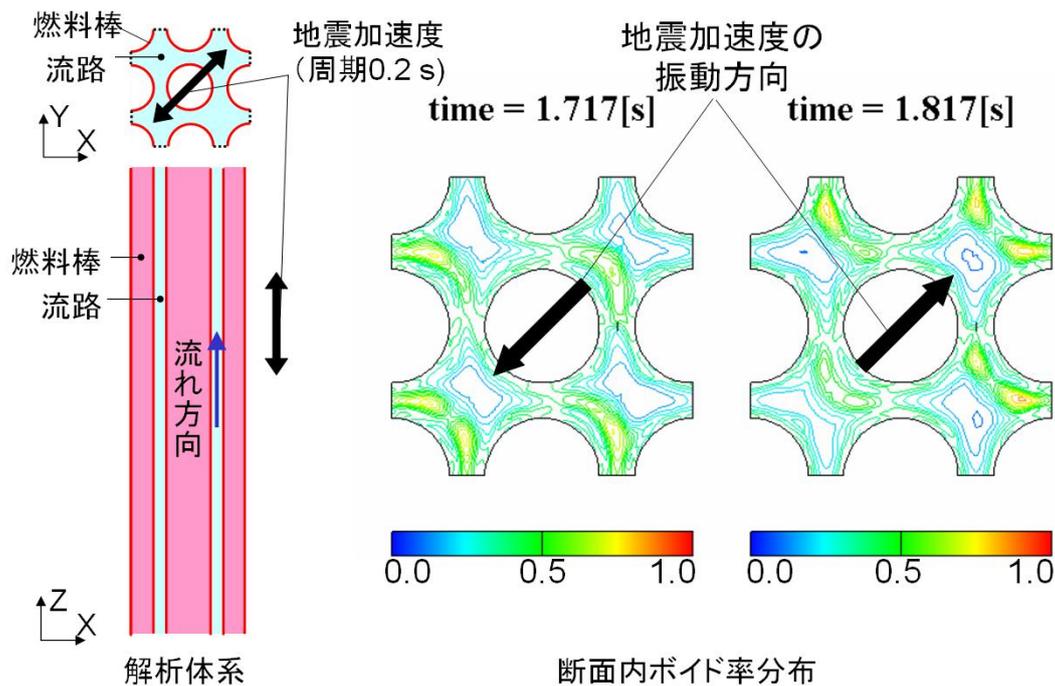


図 21. 振動加速度付加機能の検証計算結果の一例.

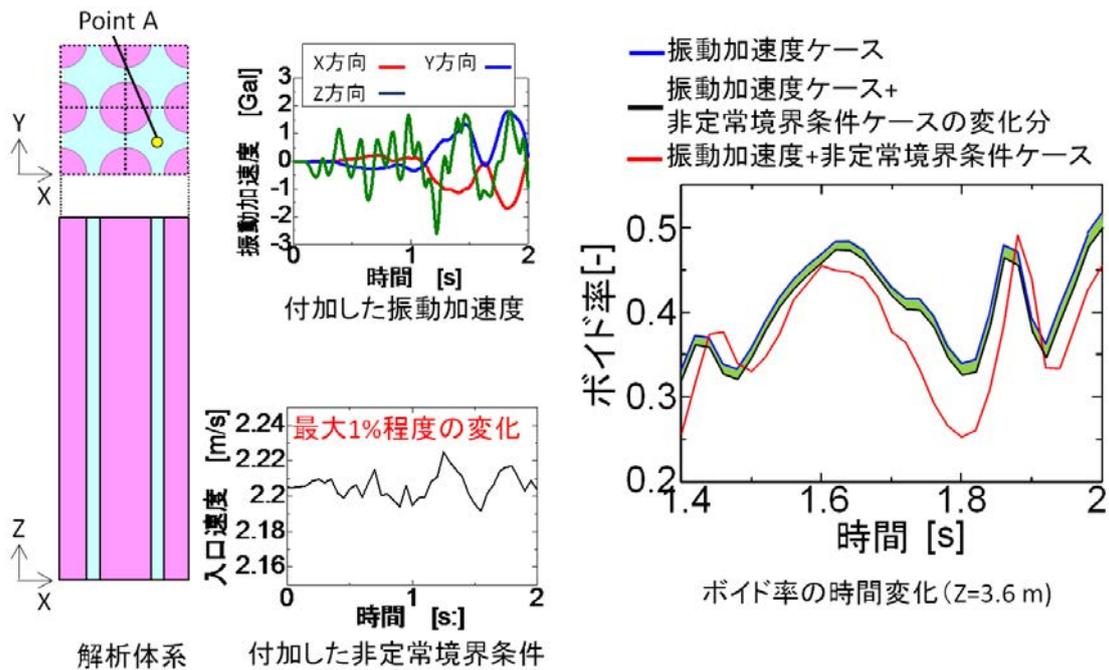


図 22. 地震時の燃料集合体内沸騰流解析結果の一例.

これらを踏まえ、改良した ACE-3D を総合的に評価するため、機器構造解析より得られた振動加速度および炉内核熱流動連成解析より得られた最大で 1%程度変化する非正常境界条件を用いて、地震時の炉心燃料集合体内沸騰流解析を 2 秒間実施した. その結果、

図 22 に示すように、振動加速度と非正常境界条件を同時に与えると、非正常境界条件の最大の変化(1%程度)を上回る沸騰 2 相流の変動(10%以上)が生じることを確認した. よって、本研究開発

で改良したACE-3Dにより、小さい変動の非定常境界条件も解析に反映されることに加え、振動加速度と非定常境界条件の相互作用が評価できることが分かった。これらの結果から、機器構造解析および炉内核熱流動連成解析で得られた結果を入力データとして、地盤解析、機器構造解析、核熱連成解析とのデータ連携により、地震発生時における炉心燃料集合体内沸騰流挙動の評価が行えることを確認した。

以上の中島グループの成果は、耐震予測シミュレーションシステムのグリッド実装の実現、地震時の核熱連成解析の実現、地震時の熱流動解析の実現のいずれにおいても世界初の成果である。

(2)研究成果の今後期待される展開

マルチスケールシミュレーションコード間を連動させる機能については、「京」のような超大規模並列計算のノードに、各コードを割り当てて総合シミュレーションを行う場合、ノード間連携向け機能に展開していく可能性がある。異なるスケールや物理を有するシミュレーションコード間のデータの受け渡しを実現する連成データ変換機能では、現状機能の高度化案として、物理的現象を変換しうるモデルをベースにしたシミュレーションにより、データ変換する機能の研究開発に展開する方法がある。

核熱連成解析に関しては、今後特に熱流動相関式についての精度向上が期待される。現状では通常の定常重力下で開発されたモデルを用いているため、大きな振動加速度の印加により、モデルが破綻する場合もある。このため、振動場における熱流動の素過程に関する実験を実施し相関式を新たに開発することで、解析精度の向上が期待でき、熱流動解析の境界条件をより精密に決定することが可能となると考えられる。

振動加速度を考慮した2相流物理モデルの改良を行うことにより、地震発生時における炉心燃料集合体内沸騰流挙動の高精度な評価が行える。

4.4 マルチスケール構造・連成モデリング D (防災科学技術研究所・河合グループ)

(1)研究実施内容及び成果

堀グループ及び折田グループと連携をとりながら、地震動及び地盤に関するデータの収集・整理を行い、地震動及び地盤に関するデータの提供を進めた。加えて、地盤モデル作成手法に関する研究を実施した。具体的には、神戸市およびその周辺地域を対象に、ボーリングデータ等の地盤データや既往文献を参照して、地表面の地形・地質や浅部の地盤状況を反映した浅部地盤モデルを作成するとともに、深部構造モデルとの統合化について検討した。地盤の物性値については、地盤特性に関する研究成果を踏まえた合理的な手法について検討を行うとともに、観測記録等に基づいた地盤増幅評価から地盤モデル作成手法の検討を行った。

(2)研究成果の今後期待される展開

構造物に損傷を与える強震動波形を計算するためには、工学的基盤より浅い地盤と深い地盤から構成される地盤モデルが必要とされる。本研究では、神戸市周辺を対象として、既往研究と建物被害分布に基づき、地盤モデル作成手法の検討を実施したものであり、今後の浅部・深部地盤の統合モデルの高度化に資するものと期待される。

4.5 マルチスケール構造・連成モデリング E (電力中央研究所・酒井グループ)

(1)研究実施内容及び成果

酒井グループは、大規模数値シミュレーション技術の高度化のため、複雑な物理現象を適切にモデル化し、解析結果の妥当性を実験により確認する研究を進めた。原子力発電プラント全体解析を実施する上で、従来の解析モデルで十分考慮されていない、建屋と機器の接合箇所に着目した力学実験を行い、非線形応答挙動を把握するとともに検証データを取得し、ADVENTURE_Solid Ver.1を用いたシミュレーション解析により解析精度を確認した。

① 機器建屋接合部ハイブリッド実験

原子力発電プラントの全体解析の中で、相互作用が生じる建屋－機器の部位でのモデル化に着目した震動実験を実施した。この震動実験では、着目する接合部位のみを力学的な実験でモデル化し、建屋と機器を数値モデルでモデル化して両者を連携させて振動応答挙動を評価するハイブリッド実験を適用した。ハイブリッド実験では、模型製作が一部分で済むため低コストで実施でき、入力する地震加速度は数値モデルで扱うため、大きな加速度レベルを入力可能であり、着目部位の地震応答で加振機の変位制御可能な範囲で実験を実施できる。電中研においては、配管系や支持構造部などに着目した耐震評価にハイブリッド実験を実施している。



図 23. 建屋・機器接合部位の載荷実験。

機器のコンクリート定着部に設ける埋込金物について、一般的な 4 本スタッド形状を対象に耐荷力試験を行った。試験体は $1.2\text{m} \times 1.2\text{m} \times 0.5\text{m}$ の鉄筋コンクリート製建屋床盤部分にスタッドボルト 4 本を埋め込んで定着させてあり、スタッドボルトを固定しているプレート上面に載荷治具を設置して高さ 1m の位置から水平力を作用させる構造となっている(図 23)。この試験体を 2 種類のスタッド定着長(100mm, 210mm)毎に各 3 体の計 6 体を製作した。事前の検討において、スタッド定着長 100mm の試験体はコンクリートの損傷が先行するコーン状破壊先行型、スタッド定着長 210mm の試験体はスタッドボルトの損傷が先行するアンカー降伏先行型として設計した。

2 種類の試験体について、単調載荷、漸増繰り返し載荷、地震波載荷の 3 ケースの試験を実施した。単調載荷では試験体加力部における荷重－変位関係(骨格曲線)を、漸増繰り返し載荷では骨格曲線内での履歴性状を取得した。また、地震波載荷では当所が保有するハイブリッド動的力学試験装置を用い、周期 0.1～0.2 秒の間でフラットな応答スペクトルを持つランダム地震波を入力して応答性状を確認した。コーン状破壊先行型ならびにアンカー降伏先行型の各試験体の、基本的な耐荷力特性と動的応答特性について、ADVENTURE_Solid の検証データが取得できた。

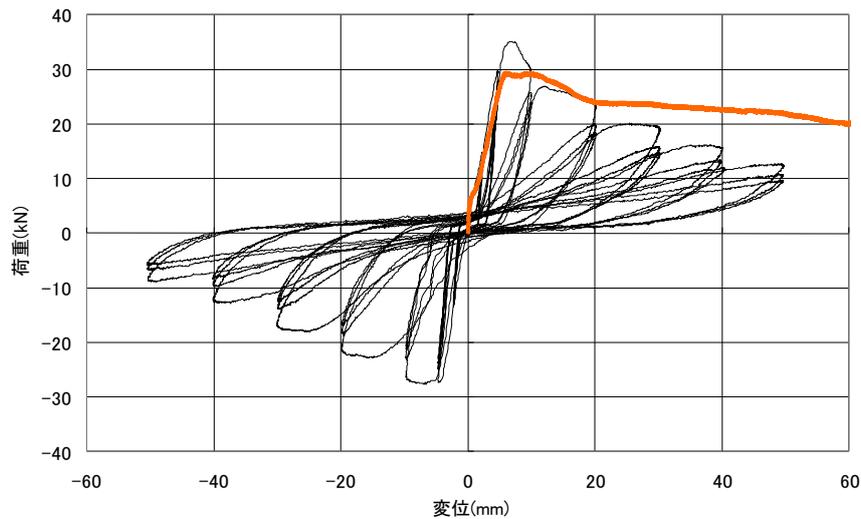


図 24. 実験で得られた荷重変位関係.

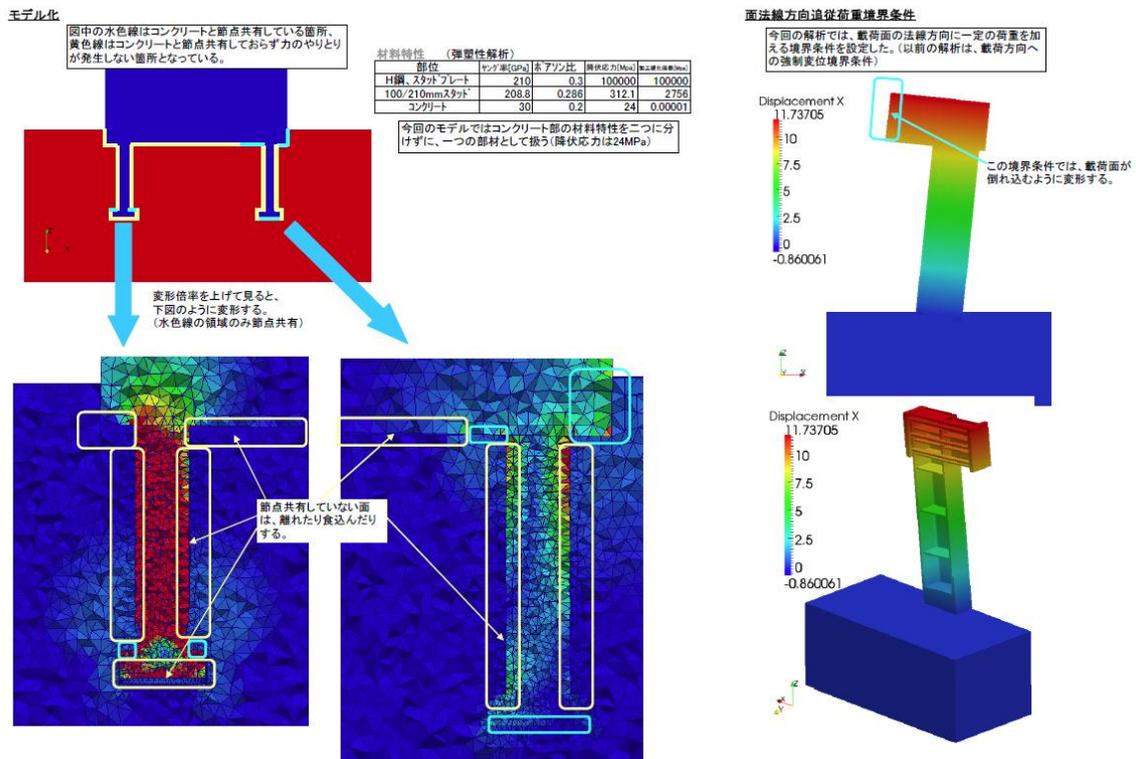
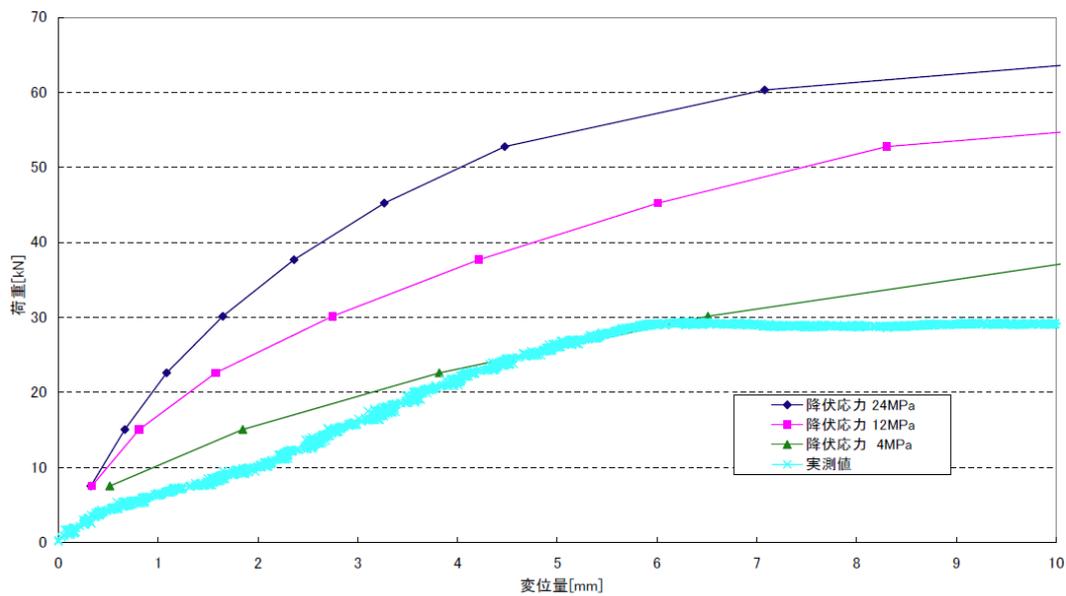


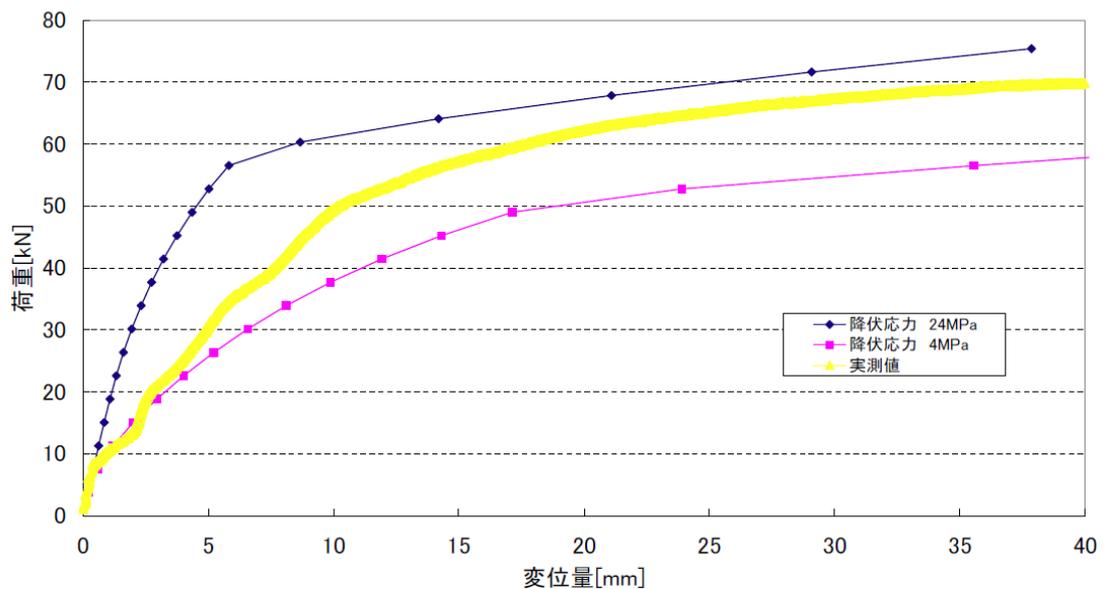
図 25. 解析モデルの概要.

② ADVENTURE_Solid による実験シミュレーション解析

吉村グループと連携し、実験結果のシミュレーション解析として ADVENTURE_Solid Ver.1 を用いて百万自由度レベルの構造解析を行った。解析モデルは対称条件を用いて 1/2 モデルとし、全て四面体1次要素で構成した(節点数:約 24 万, 要素数:約 130 万)。鋼材ならびにコンクリートの材料物性には標準的な値を用い、単調負荷プロセスの弾塑性解析を行った。試験体荷重負荷部における荷重-変位関係(骨格曲線)や、弾性限界付近において生じるスタッドやコンクリート内部の応力分布を把握した。実験結果との比較により、鋼材の塑性化とコンクリートの破壊が進行する非線形性の強い挙動に対して、ADVENTURE_Solid Ver.1 の解析精度が確認できた。



(a) 定着長 100mm



(b) 定着長 210mm

図 26. 解析結果の荷重変位関係.

(2)研究成果の今後期待される展開

接合部載荷実験のシミュレーション解析では、現状のプログラムを使用して機能の概略評価の目的で、ADVENTURE_Solid Ver.1を適用したが、本研究プロジェクトでは、コンクリートの非線形構成則の実装を含む ADVENTURE_Solid Ver.2 の開発を進めている。今後は ADVENTURE_Solid Ver.2 の新機能を使用して、より詳細なモデル化を行い、今回実証データとして得られた建屋機器の接合部位についての解析精度の検証を行う。

さらに、今回取得した機器建屋接合部の実験データは、コンクリートの破壊と鋼材の降伏が重畳した複雑な非線形挙動が詳細に把握できており、このデータも公開し、今後非線形解析プログラムのベンチマークデータとして活用していく。

4.6 耐力シミュレーションの実施・実験評価(東京電力株式会社・折田グループ)

(1)研究実施内容及び成果

代表的な沸騰水型原子炉 BWR-5 型プラントの諸元に基づき、原子炉建屋、原子炉格納容器、原子炉压力容器、炉内構造物等の解析用デジタルデータを作成し、マルチフィジックス解析用データとして提供を行った。燃料集合体については原子炉压力容器地震応答解析の結果を取り込み熱流動解析と連成することが可能な詳細 FEM モデルとして作成し、また、冷却材 FEM モデルについては 3 次元 FEM 解析モデルでは表現が困難だった冷却材(炉水)の影響を表現できるよう、流体解析との連成を可能なものとしてモデル化した。また、地質・地盤のデジタルデータの作成に資する実プラントデータの公開・提示、他のグループが実施するマルチスケール・マルチフィジックス解析の結果に対して実務的な観点からの評価、耐震シミュレーションへのフィードバックを行った。

(2)研究成果の今後期待される展開

地震応答解析と熱流動解析との連成や冷却材の影響を表現できる 3 次元 FEM 解析モデル等、本研究で得られたマルチスケール・マルチフィジックス解析用モデルの作成に関する知見は、様々な分野のマルチスケール・マルチフィジックス解析へ応用に繋がるものと期待される。

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 27 件、国際(欧文)誌 21 件)

(国内誌)

- 1) H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya and S. Yoshimura, Vectorization of Polygon Rendering for Off-line Visualization of Large Scale Structural Analysis with ADVENTURE System on the Earth Simulator, *Journal of the Earth Simulator*, 9, pp. 51-63, 2008.
- 2) 石原大輔, 窪田篤司, 堀江知義, 二保知也, 吉村忍, 構造—非圧縮性粘性流体—静電界連成の強連成解法の開発(第1報 構造を剛体近似した場合), *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 74, No. 744, pp. 1068-1075, 2008.
- 3) 武居周, 吉村忍, 金山寛, 階層型領域分割法による高周波電磁場の大規模解析, *電気学会論文誌 A*, Vol. 128, No. 9, Sec. A, pp. 591-597, 2008.
- 4) 土橋浩, 市村強, 大保直人, 堀宗朗, 山田岳峰, 複雑な構造を持つ大型トンネルの地震応答に対する大規模三次元数値解析の必要性の検討, *土木学会論文集*, 64, 3, pp. 639-652, 2008.
- 5) 中島康平, 鈴木喜雄, 手島直哉, 杉本振一郎, 吉村忍, 中島憲宏, グリッドを意識しないグリッド利用法, 平成 20 年度全 NEC C&C システムユーザー事例論文, 2008.
- 6) 山田知典, 荻野正雄, 吉村忍, バランシング領域分割法の最適領域分割数の予測とその数値検証, *日本計算工学会論文集*, Paper No. 20090014, 2009.
- 7) 犬塚一徹, 山田知典, 吉村忍, 小型人工飛翔体の羽ばたき運動の多目的設計, *日本機械学会論文集 B 編*, 75-754, pp. 1215-1223, 2009.
- 8) 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, 大規模構造解析の並列化可視化における画像合成のための差分符号化画像圧縮, *日本計算工学会論文集*, Paper No. 20090009, 2009.
- 9) 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 趙堅, 部分領域問題に A-p 法を用いた 3 次元非線形静磁場問題の大規模並列解析, *電気学会論文誌 B*, 129-8, pp. 1018-1024, 2009.
- 10) 村山敏夫, 吉村忍, 重畳マルチグリッド前処理による電磁界解析の高速化, *電子情報通信学会論文誌 B*, J92-B-9, pp. 1449-1456, 2009.
- 11) S. Minami and S. Yoshimura, Practical Performances of Non-linear Algorithms for Partitioned Iterative Methods of Fluid-Structure Interaction Problems, *JSME Journal of Computational Science and Technology*, 3-1, pp. 396-407, 2009. (DOI: 10.1299/jcst.3.396)
- 12) H. Machida, M. Arakawa, N. Yamashita and S. Yoshimura, Development of

- Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code for Pipes with Stress Corrosion Cracks, JSME Journal of Power and Energy Systems, 3-1, pp. 103-113, 2009. (DOI: 10.1299/jpes.3.103)
- 13) 土橋浩, 山田武正, 寺島喜宏, 辻本和弘, 今田徹, 堀宗朗, 篠崎裕生, 鋼・コンクリート混合構造接合部における応力伝達に関する研究, 土木学会論文集 A, 65, 2, pp. 454-473, 2009.
 - 14) 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 趙堅, 階層型領域分割法を用いた 1 億自由度の非線形静磁場解析, シミュレーション, 2-1, pp. 1-8, 2010.
 - 15) 武居周, 杉本振一郎, 荻野正雄, 吉村忍, 金山寛, 階層型領域分割法において部分領域に直接法を適用した高周波電磁場の大規模解析, 電気学会論文誌 A, 130-3, pp. 239-246, 2010.
 - 16) 堀宗朗, 田中謙吾, S. Gholamreza, 市村強, 小国健二, 自然災害シミュレーションのための GIS から都市モデルへの汎用的データ変換, 土木学会論文集 A, 66, 1, pp. 1-12, 2010.
 - 17) T. Tatekawa, N. Teshima, Y. Suzuki and H. Takemiya, Implementation of Fault-Tolerant Mechanism to Control Integrated Nuclear Energy Simulations, Progress in Nuclear Science and Technology Vol. 2, pp. 591-597, 2011.
 - 18) T. Misawa, H. Yoshida and K. Takase, Development of an Analytical Method on Water-Vapor Boiling Two-Phase Flow Characteristics in BWR Fuel Assemblies Under Earthquake Condition, Nuclear Reactor, Intech, pp. 157-174, 2011.
 - 19) 堀宗朗, 弓削田恭兵, 市村強, L. Wijarthne, ライフライン地震被害に対する復旧家庭のマルチエージェントシミュレーションの開発, 土木学会論文集 A1, 67, 1, pp. 165-176, 2011.
 - 20) G. Kim, K. Nakajima, N. Teshima, T. Tatekawa, Y. Suzuki and H. Takemiya, 3D Virtual Simulator for the Entire Nuclear Power Plant on the Simple Orchestration Application Framework, Progress in Nuclear Science and Technology Vol. 2, pp. 634-638, 2011.
 - 21) P. E. B. Quinay, T. Ichimura, M. Hori, M.J.L. Wijerathne and A. Nishida, Seismic Structural Response Analysis Considering Fault-Structure System: Application to Nuclear Power Plant Structures, Progress in Nuclear Science and Technology, 2011.
 - 22) A. Satou, T. Watanabe, Y. Maruyama and H. Nakamura, Neutron-coupled Thermal Hydraulic Calculation of BWR under Seismic Acceleration, Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 2, pp. 120-124, 2011.
 - 23) H. Chen, L. Wijrathne, M. Hori and T. Ichimura, Stability of Dynamic Growth of two Anti-Symmetric Cracks using PDS-FEM, Journal Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2, 68, 1, pp. 10-17, 2012.
 - 24) 片岡俊二, 南さつき, 河合浩志, 吉村忍, 分離反復型解法を用いた大規模並列音響流体構造連成解析, 日本計算工学会論文集, No. 20120007, 2012.
 - 25) 吉村忍, 小林敬, 秋葉博, 鈴木智, 荻野正雄, 3次元有限要素法による沸騰水型原子炉のフルスケール地震応答解析, 日本原子力学会和文論文誌, 11-3, pp. 203-221, 2012.
 - 26) Y. Yusa, S. Minami, H. Kawai and S. Yoshimura, CG-based Subdomain Local Solver with ICT Factorization Preconditioner for Domain Decomposition Method, JSME Journal of Computational Science and Technology, 6-3, pp. 157-168, 2012.
 - 27) 遊佐泰紀, 片岡俊二, 河合浩志, 吉村忍, 分離反復連成解法による大規模破壊力学解析, 日本機械学会論文集A編, 78-791, pp. 966-975, 2012.

(国際(欧文)誌)

- 1) T. Yamada and S. Yoshimura, Line Search Partitioned Approach for

- Fluid-structure Interaction Analysis of Flapping Wing, *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 24-1, pp. 51-60, 2008. (DOI: 10.3970/cmcs.2008.024.051)
- 2) A. Oishi and S. Yoshimura, Genetic Approaches to Iteration-free Local Contact Search, *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, Vol. 28, No. 2, pp. 127-146, 2008. (DOI: 10.3970/cmcs.2008.028.127)
 - 3) A. Oishi and S. Yoshimura, Finite Element Analyses of Dynamic Problems Using Graphics Hardware, *Computer Modeling in Engineering and Science*, Vol. 25, No. 2, pp. 115-132, 2008. (DOI: 10.3970/cmcs.2008.025.115)
 - 4) A. Takei, S. Yoshimura and H. Kanayama, Large Scale Parallel Finite Element Analyses of High Frequency Electromagnetic Field in Commuter Trains, *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-11, 2009. (DOI: 10.3970/cmcs.2008.031.013)
 - 5) M. Hori and T. Ichimura, Current State of Integrated Earthquake Simulation for Earthquake Hazard and Disaster, *Journal of Seismology*, 2008. (DOI: 10.1007/s10950-007-9083-x)
 - 6) T. Ichimura and M. Hori, Structural Seismic Response Analysis Based on Multiscale Approach of Computing Fault-structure System, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 2008. (DOI: 10.1002/eqe.861)
 - 7) M.J.L. Wijerathne, K. Oguni and M. Hori, Stress Field Tomography Based on 3D Photoelasticity, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56, 3, pp. 1065-1085, 2008. (DOI: 10.1016/j.jmps.2007.06.004)
 - 8) M. Hori, K. Oguni and T. Ichimura, Integrated Simulation for Earthquake Hazard and Disaster Prediction, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 3, pp. 121-141, 2009. (DOI: 10.1142/S1793431109000573)
 - 9) T. Ichimura, M. Hori and J. Bielak, A Hybrid Multiresolution Meshing Technique for Finite Element Three-Dimensional Earthquake Ground Motion Modeling in Basins Including Topography, *Geophys. J. Int.*, 177, pp. 1221-1232, 2009. (DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04154.x)
 - 10) T. Ichimura and M. Hori, Structural Seismic Response Analysis Based on Multiscale Approach of Computing Fault-Structure System, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38, 439-455, 2009. (DOI: 10.1002/eqe.86)
 - 11) A. Takei, S. Sugimoto, M. Ogino, S. Yoshimura and H. Kanayama, Full Wave Analyses of Electromagnetic Fields with an Iterative Domain Decomposition Method, *IEEE Transactions on Magnetics*, 46-8, pp. 2860-2863, 2010. (DOI: 10.1109/TMAG.2010.2044775)
 - 12) S. Minami and S. Yoshimura, Performance Evaluation of Nonlinear Algorithms with Line-Search for Partitioned Coupling Techniques for Fluid-Structure Interactions, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 64, No. 10-12, pp. 1129-1147, 2010. (DOI: 10.1002/flid.2274)
 - 13) T. Ichimura, M. Hori and M.J.L. Wijerathne, Linear Finite Elements with Orthogonal Discontinuous Basis Functions for Explicit Earthquake Ground Motion Modeling, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2010. (DOI: 10.1002/nme.3062)
 - 14) Gh. Sobhaninejad, M. Hori and T. Kabayesawab, Enhancing Integrated Earthquake Simulation with High Performance Computing, *Journal of AES*, Ref. ID. SP2009/0013, 2010. (10.1016/j.advengsoft.2010.10.009)
 - 15) H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya and S. Yoshimura, Large Scale Elasto-Plastic Analysis Using Domain Decomposition Method Optimized for Multi-core CPU Architecture, *Key Engineering Materials Vols. 462-463*, pp. 605-610, 2011. (DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.462-463.605)
 - 16) H. Okada, H. Kawai, T. Tokuda and Y. Fukui, Fully Automated Mixed Mode Crack Propagation Analyses Using VCCM (Virtual Crack Closure-Integral

- Method) for Tetrahedral Finite Element, Key Engineering Materials Vols. 462-463, pp. 900-905, 2011. (DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.462-463.900)
- 17) S. Minami, H. Kawai and S. Yoshimura, Parallel BDD-based Monolithic Approach for Acoustic Fluid-structure Interaction, Computational Mechanics, 50, pp. 707-718, 2012. (DOI: 10.1007/s00466-012-0776-9)
 - 18) S. Minami, H. Kawai and S. Yoshimura, A Monolithic Approach Based on Balancing Domain Decomposition Method for Acoustic Fluid-Structure Interaction, Transactions of ASME, Journal of Applied Mechanics, 790, 1, 010906, 2012. (DOI: 10.1115/1.4005092)
 - 19) P. E. Quinay, T. Ichimura and M. Hori, Waveform Inversion for Modeling Three-Dimensional Crust Structure with Topographic Effects, Bulletin of the Seismological Society of America, 102, 3, pp. 1018-1029, 2012. (DOI: 10.1785/0120110175)
 - 20) T. Ichimura, M. Hori, P. E. Quinay, M. J. L. Wijerathne, T. Suzuki and S. Noguchi, Comprehensive numerical analysis of fault-structure systems - Computation of the large-scale seismic structural response to a given earthquake scenario -, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 41, 4, pp. 795-81, 2012.
 - 21) K. Murotani, S. Sugimoto, H. Kawai and S. Yoshimura, Hierarchical Domain Decomposition with Parallel Mesh Refinement for Billions-of-DOF Scale Finite Element Analyses, International Journal of Computational Methods, accepted.

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

- 1) 吉村忍, 原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション, 化学工学, 73-11, pp. 578-580, 2009.
- 2) 吉村忍, [解説]原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション, 配管技術, Vol. 52, No. 10, pp. 1-6, 2010年9月.
- 3) 山田知典, 塩谷隆二, 吉村忍, 原子力発電施設の大規模耐震シミュレーションの進展(小特集「原子炉のシミュレーション」), シミュレーション, Vol. 30, No. 2, 2011.
- 4) 吉村忍, 原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション(特集 マルチスケール・マルチフィジクス現象の統合シミュレーション), 計算工学, Vol. 16, No. 3, 2011.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 4件、国際会議 17件)
(国内会議)

- 1) 吉村忍, 人工物設計の新しい形 -大規模計算力学解析とインタラクティブ設計の統合-, 日本建築学会 コロキウム 構造形態の解析と創生 2008 論文集, pp. 2-6, 東京, 2008.11.20-21.
- 2) 堀宗朗, 数学と地震・地震工学の境界, 日本応用数理学会 2011 年度年会, 京都, 2011.9.14-16.
- 3) 堀宗朗, 地震防災シミュレーションの最先端, 高知工科大学開学記念日行事 特別講演会 地震・津波防災の最先端 -来たるべき南海地震に備えて-, 高知, 2011.11.7.
- 4) 堀宗朗, 地震学と地震工学のシミュレーション, 日本応用数理学会応用数理シンポジウム -大規模災害と応用数理-, 東京, 2011.12.10.

(国際会議)

- 1) S. Yoshimura, N. Yonemura, T. Yamada, Coupling Analysis Platform in Parallel Environments, Third Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics in conjunction with Eleventh International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and

- Science (APCOM'07-EPMESC XI), p. 236, 2007, Kyoto, (2007.12.3-6)
- 2) A. Nishida, Impact Analysis of Three-Dimensional Frame Structures- An Application for Piping Structures of a Nuclear Power Plant -, International Symposium on Structures under Earthquake, Impact, and Blast Loading 2008 (IB08), OSAKA Univ., Japan, October 10-11, 2008.
 - 3) M. Hori, Computer Simulation for Earthquake Engineering, NEES/E-Defense Phase 2 Planning Meeting, National Science Foundation, Arlington, Virginia, January 12-13, 2009.
 - 4) M. Hori, Peta-Scale Computation for Earthquake Engineering, China-USA-Japan Cooperative Research Workshop on Earthquake Engineering and Mega-Earthquake Disaster Mitigation, Guangzhou, China, February 23-25, 2009.
 - 5) G. Kim, Y. Suzuki, A. Nishida, and H. Takemiya, Development of APIs for Desktop Supercomputing, 9th Teraflop Workshop, Sendai, Japan, November 12-13, 2008.
 - 6) S. Minami and S. Yoshimura, Performance Study on Nonlinear Algorithms of Partitioned Iterative Methods for Steady/Unsteady FSI Problems, Proc. of 15th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF09), p. 92, Tokyo, April 1-3, 2009.
 - 7) G. Sobhaninejad and M. Hori, Generic Design of a Distributable Class for Integrated Earthquake Simulation, The First International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing for Engineering (PARENG2009), Pécs, Hungary, 6-8 April 2009.
 - 8) M. Hori, K. Oguni, M.J.L. Wijerathne and T. Okinaka, Particle-discretization Scheme Finite Element Method for Solving Fracture Problems, Computational Methods in Engineering, 3rd Asia-Pacific Int. Conf. on Comp. Meth. in Engrg (ICOME 2009), Nanjing, China, Oct. 18-20, 2009.
 - 9) M. Hori, G. Sobhaninejad, T. Ichimura and M.J.L. Wijerathne, Enhancement of Integrated Earthquake Simulation with High Performance Computing, International Symposium on Advancement of Urban Safety (SAUS 2010), Kobe, Japan, March 27-29, 2010.
 - 10) S. Yoshimura, S. Kataoka, S. Minami and H. Kawai, Parallel Response Analysis of Rod Bundle in Fluid Using Partitioned Coupling Technique, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM2010), CD-ROM, Sydney, Australia, 2010.07.19-23.
 - 11) H. Kanayama, S. Sugimoto, J. Zhao, Y. Bao and K. Komalasari, Large-Scale Parallel Analysis of 3D Non-Linear Magnetostatic Problems Using Hierarchical Domain Decomposition Method, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM2010), CD-ROM, Sydney, Australia, 2010.07.19-23.
 - 12) M. Hori, Application of Micromechanics to Earthquake Engineering, Symposium in Memory of Professor Toshio Mura - Recent Advances in Nano-Micromechanics of Materials -, Evanston, USA, 2010.05.24-25.
 - 13) (Semi-Plenary) S. Yoshimura, H. Kawai, S. Sugimoto and K. Murotani, Towards Peta-scale Simulation of Nuclear Power Plant Subjected to Large Earthquake, 3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN2011), CD-ROM, Corfu, Greece, 2011.5.25-28.
 - 14) (Plenary) S. Yoshimura, H. Kawai, S. Sugimoto and K. Murotani, High Performance Computation and Walkthrough Visualization for Assessing Seismic Safety of Nuclear Power Plants, 21st International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT21), New Delhi, India, 2011.11.6-11.

- 15) M. Hori, 2011 TOHOKU-CHIHO-TAIHEIYOU-OKI EARTHQUAKE, Grand Challenges in Earthquake Engineering Research, A Community Workshop, Irvine, USA, 2011.3.14-15.
- 16) M. Hori, Simulation of seismic structure response in Tokyo Metropolitan Area: A real-time hazard and disaster map, SCEC-ERI Joint Workshop, Stanford University, USA, 2011.11.9-11.
- 17) M. Hori, Application of large scale numerical computation to earthquake simulation, Seventh Gulf Seismic Forum 2012, Jeddah, Saudi Arabia, 2012.1.22-25.

② 口頭発表 (国内会議 130 件、国際会議 77 件)
(国内会議)

- 1) 杉本振一郎, 田畑平, 吉村忍, 金山寛, 階層型領域分割法を用いた磁場一構造連成解析(第 2 報), 電気学会研究会資料(マグネティックス・静止器・回転機合同研究会), pp. 49-52, 京都, 2008.1.24-25.
- 2) 南さつき, 山田知典, 吉村忍, 定常/非定常流体構造連成解析における分離反復型連成アルゴリズムの比較, 計算工学講演会論文集第 13 巻第 1 号, pp. 9-12, 仙台, 2008.5.19-21.
- 3) 河合浩志, 岡田裕, 三次元破壊力学解析のための四面体メッシュ自動生成(任意複雑全体形状モデルへの拡張), 計算工学講演会論文集第 13 巻第 1 号, pp. 253-256, 仙台, 2008.5.19-21.
- 4) 犬塚一徹, 山田知典, 吉村忍, 羽ばたき型小型人工飛翔体の多目的最適化, 計算工学講演会論文集第 13 巻第 2 号, pp. 523-526, 仙台, 2008.5.19-21.
- 5) 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, 領域分割法における領域 FEM 計算のマルチコア PC 向け性能最適化, 計算工学講演会論文集第 13 巻第 2 号, pp. 639-642, 仙台, 2008.5.19-21.
- 6) 荻野正雄, 塩谷隆二, 河合浩志, 吉村忍, IBDD-DIAG 法を用いた 2 億自由度規模原子炉圧力容器フルモデルの地震応答解析, 計算工学講演会論文集第 13 巻第 2 号, pp. 649-652, 仙台, 2008.5.19-21.
- 7) 荻野正雄, 塩谷隆二, 河合浩志, 宗清尚平, 2 億自由度の原子炉容器地震応答シミュレーションの並列サーバーサイド可視化, 計算工学講演会論文集第 13 巻第 2 号, pp. 653-654, 仙台, 2008.5.19-21.
- 8) 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, 大規模構造解析の画像合成に基づく並列可視化のための画像圧縮技術, 計算工学講演会論文集第 13 巻第 2 号, pp. 939-942, 仙台, 2008.5.19-21.
- 9) 犬塚一徹, 山田知典, 吉村忍, 小型人工飛翔体のための羽ばたき飛行の多目的最適化, 第 57 回理論応用力学講演会論文集, pp. 199-200, 東京, 2008.6.10-12.
- 10) 武居 周, 杉本振一郎, 吉村忍, 金山寛, 階層型領域分割法による高周波電磁場一熱伝導連成解析, 第 57 回理論応用力学講演会論文集, pp. 209-210, 東京, 2008.6.10-12.
- 11) 杉本振一郎, 吉村忍, 田畑平, 金山寛, 階層型領域分割法を用いた大規模磁場一構造連成解析のための検討, 第 27 回日本シミュレーション学会大会発表論文集, pp. 507-510, 滋賀, 2008.6.19-20.
- 12) 犬塚一徹, 山田知典, 吉村忍, 羽ばたき型小型人工飛翔体の多目的翼運動設計, 日本機械学会第 21 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 355-356, 沖縄, 2008.11.1-3.
- 13) 犬塚一徹, 山田知典, 吉村忍, CFD と ADVENTURE_DecisionMaker を用いた小型人工飛翔体の羽ばたき運動の多目的設計, 日本機械学会第 8 回最適化シンポジウム 2008 講演論文集, pp. 17-20, 東京, 2008.11.27-28.

- 14) 西田明美, 原子力機構における 3 次元仮想振動台の研究開発, GASST 研究会, 2008.6.19.
- 15) 中島康平, 中島憲宏, 新谷文將, 鈴木喜雄, 西田明美, 松原仁, シミュレーション結果評価過程支援システムにおけるデータ調査システム, 第 27 回日本シミュレーション学会大会, 滋賀, 2008.6.20.
- 16) 金奎希, 鈴木喜雄, 木野千晶, 櫛田慶幸, 山田知典, 新谷文將, 西田明美, 青柳哲雄, 中島憲宏, 近藤誠, 並列分散計算技術の研究開発と 3 次元仮想振動台への適用, 原子力学会秋の大会, 高知, 2008.9.4-6.
- 17) 中島憲宏, 山田知典, 中島康平, 西田明美, 鈴木喜雄, 新谷文將, 櫛田慶幸, 原子力施設規模の振動シミュレーションの実現に向けて, 原子力学会秋の大会, 高知, 2008.9.4-6.
- 18) 河合浩志, 松尾亜児, 杉本振一郎, 武居周, 吉村忍, 階層型領域分割データ構造を用いた大規模電磁場解析向け可視化, 計算工学講演会論文集, Vol. 14, pp. 161-162, 東京, 2009.5.12-14.
- 19) 荻野正雄, 河合浩志, 塩谷隆二, 吉村忍, BDD 法のマルチコア向け実装と収束性評価, 計算工学講演会論文集, Vol. 14, pp. 221-224, 東京, 2009.5.12-14.
- 20) 大石篤哉, 上田崇文, 中尾真也, 中田恵介, 吉村忍, 非 x86 プロセッサによる有限要素解析の高速化, 計算工学講演会論文集, Vol. 14, pp. 319-320, 東京, 2009.5.12-14.
- 21) 河合浩志, 岡田裕, 破壊力学解析のための四面体メッシュ生成の曲面形状への対応, 計算工学講演会論文集, Vol. 14, pp. 379-380, 東京, 2009.5.12-14.
- 22) 河合浩志, 田中真人, 有限要素開発のための行列とテンソルライブラリ, 計算工学講演会論文集, Vol. 14, pp. 685-688, 東京, 2009.5.12-14.
- 23) 杉本振一郎, 向田悠志, 吉村忍, 階層型領域分割法を用いた並列磁場一構造連成解析のための検討, 計算工学講演会論文集, Vol. 14, pp. 787-788, 東京, 2009.5.12-14.
- 24) 趙堅, 杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, 階層型領域分割法を用いた非線形静磁場解析の改良, 計算工学講演会論文集, Vol. 14, pp. 789-790, 東京, 2009.5.12-14.
- 25) 趙堅, 杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, 部分領域問題に直接法を用いた超大規模非線形静磁場解析, 第 21 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 277-278, 長野, 2009.5.20-22.
- 26) 武居周, 吉村忍, 金山寛, 階層型領域分割法に基づく高周波電磁場解析ソルバの性能評価, 第 21 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 287-290, 長野, 2009.5.20-22.
- 27) 杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, 吉村忍, 階層型領域分割法を用いた時間調和渦電流解析における部分領域解法の検討, 第 21 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 293-294, 長野, 2009.5.20-22.
- 28) 武居周, 杉本振一郎, 荻野正雄, 吉村忍, 金山寛, 階層型領域分割法に基づく空洞共振器の大規模高周波電磁場解析, 第 58 回理論応用力学講演会論文集, pp. 47-48, 東京, 2009.6.9-11.
- 29) 趙堅, 杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, 階層型領域分割法による 3 次元静磁場の超大規模解析, 第 28 回日本シミュレーション学会大会論文集, pp. 337-340, 東京, 2009.6.11-13.
- 30) 杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, 吉村忍, 階層型領域分割法による時間調和渦電流解析における部分領域解法の検討, 第 28 回日本シミュレーション学会大会論文集, pp. 341-344, 東京, 2009.6.11-13.
- 31) 武居周, 吉村忍, 金山寛, 階層型領域分割法において部分領域に直接法を適用した高周波電磁場解析, 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会), pp. 37-40, 北海道, 2009.9.16-17.
- 32) 杉本振一郎, 趙堅, 荻野正雄, 金山寛, 吉村忍, 階層型領域分割法による 1 億自由度

- 規模の非線形静磁場解析, 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会), pp. 41-46, 北海道, 2009.9.16-17.
- 33) 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, EBE 反復法を用いたメニーコア環境向け DDM, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 74-75, 金沢, 2009.10.10-12.
 - 34) 大石篤, 吉村忍, Cell プロセッサによる並列有限要素解析, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 76-77, 金沢, 2009.10.10-12.
 - 35) 武居周, 吉村忍, 金山寛, 大規模有限要素法による通勤電車内の電磁環境解析, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 208-209, 金沢, 2009.10.10-12.
 - 36) 河合浩志, 岡田裕, 三次元複雑形状き裂解析のための四面体自動メッシュ生成について, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 342-343, 金沢, 2009.10.10-12.
 - 37) 南さつき, 河合浩志, 吉村忍, 非粘性流体-弾性体連成解析における分離反復型解放の収束性について, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 382-383, 金沢, 2009.10.10-12.
 - 38) 河合浩志, 岡田裕, 破壊力学解析のためのき裂付きメッシュ自動生成について, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 607-608, 金沢, 2009.10.10-12.
 - 39) 白根裕大, 河合浩志, 吉村忍, GPU 上での領域分割法の高速度化, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 747-748, 金沢, 2009.10.10-12.
 - 40) 中亮二, 大石篤哉, 吉村忍, CUDA による要素マトリクス計算, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 753-754, 金沢, 2009.10.10-12.
 - 41) 武居周, 吉村忍, 金山寛, 階層型領域分割法に基づく大規模高周波電磁場解析の電磁環境問題への適用, 電気学会研究会資料(マグネティックス・静止器・回転機合同研究会), pp. 73-74, 愛知, 2010.1.28-29.
 - 42) 山田知典, 新谷文将, 原子力施設規模の振動シミュレーションの実現に向けた解析プラットフォームの構築, 日本原子力学会 2009 年秋の大会, 仙台, 2009.9.16-18.
 - 43) 佐藤聡, 渡辺正, 丸山結, 中村秀夫, 地震時の BWR 炉内核熱連成解析, 日本原子力学会 2010 年春の大会, 水戸, 2010.3.26-28.
 - 44) 吉村忍, 河合浩志, 荻野正雄, 宮村倫司, 塩谷隆二, 淀薫, 三好昭生, ADVENTURE2 の開発とプリポスト技術, 計算工学講演論文集, Vol. 15, pp. 85-88, 福岡, 2010.5.26-28.
 - 45) 大石篤哉, 中亮二, 橋本惇矢, 吉村忍, CUDA による並列有限要素解析, 計算工学講演会論文集, Vol. 15, pp. 119-120, 福岡, 2010.5.26-28.
 - 46) 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, 領域分割法における BDD 前処理のための並列直接ソルバーの開発, 計算工学講演会論文集, Vol. 15, pp. 191-192, 福岡, 2010.5.26-28.
 - 47) 杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, 吉村忍, 階層型領域分割法による 1 億自由度規模の並列磁場解析, 計算工学講演会論文集, Vol. 15, pp. 193-196, 福岡, 2010.5.26-28.
 - 48) 南さつき, 片岡俊二, 河合浩志, 吉村忍, 反復型領域分割法によるアコースティック流体-構造連成解析, 計算工学講演会論文集, Vol. 15, pp. 227-230, 福岡, 2010.5.26-28.
 - 49) 犬塚一徹, 吉村忍, 三次元シミュレーションによる羽ばたき翼運動のパラメトリックスタディ, 計算工学講演会論文集, Vol. 15, pp. 551-552, 福岡, 2010.5.26-28.
 - 50) V. Magron, S. Sugimoto and S. Yoshimura, Time Dependent Magnetic Structural Coupled Analysis of MRI Model with PC Cluster, 計算工学講演会論文集, Vol. 15, pp. 757-760, 福岡, 2010.5.26-28.
 - 51) 河合浩志, 吉村忍, 岡田裕, き裂解析のための四面体メッシュ生成ツールキットにおける

- 拡張性について, 計算工学講演会論文集, Vol. 15, pp. 927-928, 福岡, 2010.5.26-28.
- 52) 吉村忍, 河合浩志, 杉本振一郎, 米村望, 清河和久, 徳永健一, 並列連成解析システム REVOCAP を用いた流体構造連成解析, 第 59 回理論応用力学講演会論文集, pp. 365-366, 東京, 2010.6.8-10.
- 53) 杉本振一郎, V. Magron, 吉村忍, MRI の磁場-構造並列連成動解析へ向けた基礎的検討, 第 59 回理論応用力学講演会論文集, pp. 371-372, 東京, 2010.6.8-10.
- 54) 杉本振一郎, V. Magron, 吉村忍, MRI の磁場-構造並列連成動解析の基礎的検討, 第 29 回日本シミュレーション学会大会論文集, pp. 231-234, 山形, 2010.6.19-20.
- 55) 犬塚一徹, 吉村忍, 羽ばたき翼運動の三次元 ALE 解析, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 39-40, 北見, 2010.9.23-25.
- 56) 杉本振一郎, V. Magron, 吉村忍, MRI の磁場-構造並列連成動解析, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 326-327, 北見, 2010.9.23-25.
- 57) 片岡俊二, 南さつき, 河合浩志, 吉村忍, 分離反復型解法によるアコースティック流体・構造連成解析システム, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 331-332, 北見, 2010.9.23-25.
- 58) 南さつき, 片岡俊二, 河合浩志, 吉村忍, バランシング領域分割法による三次元アコースティック流体-構造連成解析手法の開発, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 333-334, 北見, 2010.9.23-25.
- 59) 大石篤哉, 中亮二, 吉村忍, アクセラレータクラスタによる並列有限要素解析, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 340-341, 北見, 2010.9.23-25.
- 60) 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, ADVENTURE Solid の BDD 前処理への並列直接ソルバーの導入, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 344-345, 北見, 2010.9.23-25.
- 61) 宮村倫司, 荻野正雄, 河合浩志, 淀薫, 三好昭生, 吉村忍, 非線形動解析に対応した ADVENTURE_Solid の開発, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 605-606, 北見, 2010.9.23-25.
- 62) 室谷浩平, 河合浩志, 杉本振一郎, 吉村忍, メッシュ細分割を用いた階層型領域分割法のための大規模並列メッシュ生成法, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 607-608, 北見, 2010.9.23-25.
- 63) 淀薫, 三好昭生, 吉村忍, 河合浩志, ADVENTURE2 における大規模並列解析結果の可視化技術, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 609-610, 北見, 2010.9.23-25.
- 64) 河合浩志, 吉村忍, 岡田裕, 破壊力学解析のための三次元複雑形状表面パッチ生成, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 203-204, 北見, 2010.9.23-25.
- 65) 岡田裕, 河合浩志, 徳田貴志, 福井泰好, 自動き裂進展解析システムの開発, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 217-218, 北見, 2010.9.23-25.
- 66) 武居周, 吉村忍, 金山寛, 生活環境中の大規模電磁環境解析, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. 472-473, 北見, 2010.9.23-25.
- 67) H. Kanayama, M. Ogino, S. Sugimoto and B. Yanqing, A Domain Decomposition Analysis of a Nonlinear Magnetostatic Problem with 100 Million Degrees of Freedom, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp. F-34-35, 北見, 2010.9.23-25.
- 68) 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 江波翔, 大規模静磁場問題の領域分割解析用前処理の検討, 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会), pp. 1-6, 鹿児島, 2010.9.28-29.
- 69) 杉本振一郎, 淀薫, 荻野正雄, 金山寛, 階層型領域分割法による 10 億自由度規模の並列磁場解析, 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会), pp. 7-10, 鹿児島,

- 2010.9.28-29.
- 70) 杉本振一郎, 室谷浩平, 河合浩志, 吉村忍, 細分割機能付き階層型領域分割ツールを用いた大規模磁場解析, 2011 年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム論文集(HPCS2011), p. 59, 茨城, 2011.1.18-19.
 - 71) 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, 領域分割法のマルチコア PC クラスタ向け性能最適化, 2011 年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム論文集(HPCS2011), p. 60, 茨城, 2011.1.18-19.
 - 72) 杉本振一郎, 室谷浩平, 河合浩志, 吉村忍, 細分割ツールを利用した大規模並列磁場解析, 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会)SA-11-10, RM-11-10, pp. 47-50, 京都, 2011.1.20-21.
 - 73) 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 江波翔, 大規模静磁場問題の領域分割解析用前処理の検討(第二報), 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会)SA-11-11, RM-11-11, pp. 51-56, 京都, 2011.1.20-21.
 - 74) 武居周, 吉村忍, 金山寛, 階層型領域分割法による1億複素自由度超の full-wave 解析, 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会)SA-11-14, RM-11-14, pp. 1-4, 京都, 2011.1.20-21.
 - 75) 犬塚一徹, 吉村忍, 3次元 ALE 解析による羽ばたき型小型人工飛翔体の多目的デザイン, 第60回理論応用力学講演会論文集(USB), 東京, 2011.3.8-10.
 - 76) H. Kanayama, M. Ogino, S. Sugimoto, K. Enami and E. Komasaari, A Preconditioner Construction for Domain Decomposition Method of Large Scale 3D Magnetostatic Problems, 第60回理論応用力学講演会論文集(USB), 東京, 2011.3.8-10.
 - 77) 杉本振一郎, 片岡俊二, V. Magron, 吉村忍, ADVENTURE_Coupler を用いた MRI の磁場一構造並列連成解析, 第60回理論応用力学講演会論文集(USB), 東京, 2011.3.8-10.
 - 78) 南さつき, 河合浩志, 吉村忍, バランシング領域分割法を用いた大規模並列アコースティック流体一構造連成解析, 第60回理論応用力学講演会論文集(USB), 東京, 2011.3.8-10.
 - 79) 小原隆志, 堀宗朗, 市村強, 大保直人, 山田岳峰, 伊丹洋人, 遠藤剛, 大規模三次元 FEM を用いた建設振動予測システム, 第45回地盤工学研究発表会, 松山, 2010.8.18-20.
 - 80) S. Noguchi, P.Q. Errol, T. Ichimura and M. Hori, Simultaneous Multi-scale Inversion Method for Estimating Source Location and Crust Structure, 第65回土木学会年次学術講演会, 北海道, 2010.9.1-3.
 - 81) 土橋浩, 寺島善宏, 堀宗朗, 市村強, 大保直人, 沖見芳秀, 山田岳峰, 小原隆志, 大型トンネルを対象とした3次元 FEM 地震応答解析の有限要素分割に関する基礎検討, 第65回土木学会年次学術講演会, 北海道, 2010.9.1-3.
 - 82) 山田岳峰, 大保直人, 伊丹洋人, 森口敏美, 堀宗朗, 市村強, 土橋浩, センターランプ式トンネル出入口部に設置する剛性低下部の耐震効果, 第65回土木学会年次学術講演会, 北海道, 2010.9.1-3.
 - 83) P.Q. Errol, T. Ichimura, M. Hori and M. J. L. Wijerathne, Three-dimensional Layer Interface Modeling Using Spatial-temporal Multi-resolution Inversion and Hybrid-grid FEM, 第13回地震工学シンポジウム, つくば, 2010.11.17-20.
 - 84) 鈴木喜雄, 立川崇之, 金奎希, 木野千晶, 宮村浩子, 手島直哉, 林幸子, 青柳哲雄, 武宮博, 中島憲宏, 原子力グリッド基盤 AEGIS の研究開発, 第15回計算工学講演会, 福岡, 2010.5.26-28.
 - 85) 三澤丈治, 吉田啓之, 高瀬和之, 地震加速度に対する沸騰二相流挙動の影響評価, 第15回動力・エネルギー技術シンポジウム, 東京, 2010.6.21-22.
 - 86) 三澤丈治, 吉田啓之, 高瀬和之, 地震加速度に対する沸騰二相流挙動の影響に関する数値予測, 混相流学会年次講演会 2010, 浜松, 2010.7.17-19.

- 87) 三澤丈治, 吉田啓之, 高瀬和之, 地震加速度の振動周期に対する気液二相流挙動の影響評価, 日本原子力学会 2010 年秋の大会, 札幌, 2010.9.15-17.
- 88) 高瀬和之, 三沢丈治, 吉田啓之, 地震時における燃料集合体内沸騰二相流挙動の数値的可視化, 可視化情報学会全国講演会 2010, 霧島, 2010.10.7-8.
- 89) 大石篤哉, 中亮二, 吉村忍, GPGPU による有限要素解析, 第 16 回計算工学講演会論文集(CD-ROM), Vol. 16, 千葉, 2011.5.25-27.
- 90) 南さつき, 河合浩志, 吉村忍, 不完全バランシング領域分割法を用いたアコースティック流体-構造連成解析, 第 16 回計算工学講演会論文集(CD-ROM), Vol. 16, 千葉, 2011.5.25-27.
- 91) 河合浩志, 吉村忍, 岡田裕, 破壊力学向け形状モデリングと四面体メッシュ生成, 第 16 回計算工学講演会論文集(CD-ROM), Vol. 16, 千葉, 2011.5.25-27.
- 92) 岡田裕, 鈴木貴, 飯野 享, 河合浩志, 自動き裂進展解析システムの開発(解析事例の紹介), 第 16 回計算工学講演会論文集(CD-ROM), Vol. 16, 千葉, 2011.5.25-27.
- 93) 杉本振一郎, 室谷浩平, 河合浩志, 吉村忍, 細分割機能付き階層型領域分割ツールを用いた並列磁場解析, 第 16 回計算工学講演会論文集(CD-ROM), Vol. 16, 千葉, 2011.5.25-27.
- 94) 遊佐泰紀, 河合浩志, 吉村忍, DDM における反復法ベース領域ソルバーのマルチコア向け高速化, 第 16 回計算工学講演会論文集(CD-ROM), Vol. 16, 千葉, 2011.5.25-27.
- 95) 河合浩志, 荻野政雄, 塩谷隆二, 吉村忍, 領域分割法のハイブリッド並列化のための OpenMP ベース部分領域ソルバー, 第 16 回計算工学講演会論文集(CD-ROM), Vol. 16, 千葉, 2011.5.25-27.
- 96) 荻野正雄, 武居周, 野津裕史, 杉本振一郎, COCR 法を用いた高周波電磁界の大規模有限要素解析, 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会), pp. 5-9, 新潟, 2011.8.25-26.
- 97) 武居周, 室谷浩平, 吉村忍, 金山寛, 数値人体モデルを用いたマイクロ波帯域の大規模有限要素電磁界解析, 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会), pp. 11-16, 新潟, 2011.8.25-26.
- 98) 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, Q. Yao, BDD 前処理の統一的構築方法, 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会), pp. 45-49, 新潟, 2011.8.25-26.
- 99) 杉本振一郎, 室谷浩平, 河合浩志, 吉村忍, 細分割ツールを利用した大規模並列磁場解析(第 2 報), 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会), pp. 51-54, 新潟, 2011.8.25-26.
- 100) 室谷浩平, 杉本振一郎, 河合浩志, 吉村忍, 次世代スパコンのためのメッシュ細分割機能付き階層型領域分割ツールの開発, 日本応用数理学会 2011 年度年会論文集(CD-ROM), 京都, 2011.9.14-16.
- 101) 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, Q. Yao, BDD 前処理の統一的構築方法についての一考察, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 岡山, 2011.10.8-10.
- 102) 武居周, 室谷浩平, 吉村忍, 金山寛, 反復型領域分割法による大規模 full-wave 電磁界解析, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 岡山, 2011.10.8-10.
- 103) 吉村忍, 原子力発電プラントの地震応答シミュレーション, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 岡山, 2011.10.8-10.
- 104) 遊佐泰紀, 南さつき, 河合浩志, 吉村忍, 領域分割法における部分領域ソルバーの ICT 分解に基づくマルチコア向け実装, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 岡山, 2011.10.8-10.
- 105) 河合浩志, 荻野政雄, 塩谷隆二, 吉村忍, DDM 部分領域ソルバーの OpenMP 並列化, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 岡山, 2011.10.8-10.
- 106) 大石篤哉, 山田大智, 仁木紀博, 吉村忍, GPGPU による要素マトリックス計算, 日本機

- 械学会第 24 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 岡山, 2011.10.8-10.
- 107) 杉本振一郎, 片岡俊二, 吉村忍, ADVENTURE_Coupler を用いた磁場-構造並列連成解析, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 岡山, 2011.10.8-10.
- 108) 宮村倫司, 荻野政雄, 高谷周平, 淀 薫, 河合浩志, 吉村忍, ADVENTURE_Solid2.0 の開発と性能評価, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 岡山, 2011.10.8-10.
- 109) 河合浩志, 吉村忍, 岡田裕, き裂解析のための対話型幾何モデル入力, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 岡山, 2011.10.8-10.
- 110) 西田明美, 鈴木喜雄, 木野千晶, 鶴沢憲, 原子力施設のための 3 次元仮想振動台の研究開発 (1)全体概要, 2011 年原子力学会秋の大会, 北九州, 2011.9.20.
- 111) 鈴木喜雄, 鶴沢憲, 西田明美, 中島憲宏, 原子力施設のための 3 次元仮想振動台の研究開発 (2)組立構造-組立流体連成フレームワーク, 2011 年原子力学会秋の大会, 北九州, 2011.9.20.
- 112) 木野千晶, 渡辺正, 西田明美, 武宮博, 原子力施設のための 3 次元仮想振動台の研究開発 (3)Immersed Boundary 法を用いた流体構造連成解析手法の開発と検証, 2011 年原子力学会秋の大会, 北九州, 2011.9.20.
- 113) 荻野正雄, 杉本振一郎, E. Komalasari, 金山寛, 最小残差法に基づく磁場問題の領域分割解析, 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会)SA-12-23, RM-12-23, pp. 1-6, 京都, 2012.1.26-27.
- 114) 杉本振一郎, 室谷浩平, 河合浩志, 吉村忍, 細分割ツールを利用した大規模並列磁場解析(第 3 報), 電気学会研究会資料(静止器・回転機合同研究会)SA-12-24, RM-12-24, pp. 7-10, 京都, 2012.1.26-27.
- 115) 片岡俊二, 南さつき, 河合浩志, 吉村忍, Parallel Analysis of Strongly Coupled Incompressible Flow and Structure Interaction Using Partitioned Iterative Methods, 第 61 回理論応用力学講演会論文集(USB), 東京, 2012.3.7-9.
- 116) 遊佐泰紀, 片岡俊二, 河合浩志, 吉村忍, 分離型連成解法による三次元き裂進展解析, 第 61 回理論応用力学講演会論文集(USB), 東京, 2012.3.7-9.
- 117) 荻野政雄, 武居周, 野津裕史, 杉本振一郎, 吉村忍, COCR 法に基づく領域分割法を用いた高周波電磁界有限要素解析, 第 61 回理論応用力学講演会論文集(USB), 東京, 2012.3.7-9.
- 118) 杉本振一郎, 室谷浩平, 河合浩志, 吉村忍, 細分割ツールを利用した大規模磁場解析, 第 61 回理論応用力学講演会論文集(USB), 東京, 2012.3.7-9.
- 119) 武居周, 室谷浩平, 吉村忍, 金山寛, 数値人体モデルを用いた大規模 full-wave 有限要素電磁界解析, 第 61 回理論応用力学講演会論文集(USB), 東京, 2012.3.7-9.
- 120) 大石篤哉, 仁木紀博, 吉村忍, GPGPU による Isogeometric 解析, 第 17 回計算工学講演会論文集(CD-ROM), Vol. 17, 京都, 2012.5.29-31.
- 121) 遊佐泰紀, 片岡俊二, 河合浩志, 吉村忍, 分離反復連成解法による三次元破壊力学解析, 第 17 回計算工学講演会論文集(CD-ROM), Vol. 17, 京都, 2012.5.29-31.
- 122) 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, 領域分割法に基づくローカルソルバーの京コンピュータでの性能評価, 第 17 回計算工学講演会論文集(CD-ROM), Vol. 17, 京都, 2012.5.29-31.
- 123) 荻野正雄, 武居周, 野津裕史, 杉本振一郎, 吉村忍, 大規模複素対称問題に適した反復型領域分割法の検討, 第 17 回計算工学講演会論文集(CD-ROM), Vol. 17, 京都, 2012.5.29-31.
- 124) 遊佐泰紀, 片岡俊二, 河合浩志, 吉村忍, 分離反復連成解法を用いた応力拡大係数に基づく三次元疲労き裂進展シミュレーション, 日本機械学会材料力学カンファレンス(M&M2012), CD-ROM, 松山, 2012.9.22-24.
- 125) 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, 逆行列アプローチによる BDD コースグリッド修正の高速化, 日本機械学会第 25 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 神戸,

2012.10.6-9.

- 126) 杉本振一郎, 室谷浩平, 河合浩志, 吉村忍, 細分割ツールを用いた大規模並列磁場解析, 日本機械学会第 25 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 神戸, 2012.10.6-9.
- 127) 大石篤哉, 仁木紀博, 吉村忍, Isogeometric 解析における基底関数の影響, 日本機械学会第 25 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 神戸, 2012.10.6-9.
- 128) 武居周, 室谷浩平, 吉村忍, 金山寛, 数値人体モデルによる大規模 full-wave 電磁界解析手法の性能評価, 日本機械学会第 25 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 神戸, 2012.10.6-9.
- 129) 遊佐泰紀, 片岡俊二, 河合浩志, 吉村忍, 分離反復連成解法を用いた複雑形状モデルの固体・固体連成解析, 第 62 回理論応用力学講演会論文集(NCTAM 2013) (USB), 東京, 2013.3.6-8.
- 130) 武居周, 杉本振一郎, 荻野正雄, 吉村忍, 金山寛, 反復型領域分割法による電磁環境の大規模 full-wave 解析, 第 62 回理論応用力学講演会論文集(NCTAM 2013) (USB), 東京, 2013.3.6-8.

(国際会議)

- 1) M. Ogino, R. Shioya, H. Kawai, S. Yoshimura, A 204 Millions DOFs Full Scale BWR Pressure Vessel Model Analysis Using the IBDD-DIAG Method, Third Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics in conjunction with Eleventh International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science (APCOM'07-EPMESC XI), p. 176, Kyoto, December 3-6, 2007.
- 2) S. Minami, T. Yamada, S. Yoshimura, Comparison of Non-linear Coupling Algorithms on Partitioned Iterative Method for Fluid-Structure Interaction Problems, Third Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics in conjunction with Eleventh International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science (APCOM'07-EPMESC XI), p. 472, Kyoto, December 3-6, 2007.
- 3) T. Yamada and S. Yoshimura, Line Search Partitioned Approach for Fluid-Structure Interaction Analysis of Flapping Wing, Proc. of International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (ICCES'08), p. 795, Honolulu, Hawaii, March 16-20, 2008.
- 4) S. Yoshimura, I. Inuzuka and T. Yamada, Interactive Multidimensional Optimization of Motion of Flapping Wing with Fluid-Structure Interaction Analysis, Proc. of International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (ICCES'08), pp. 1479-1480, Honolulu, Hawaii, March 16-20, 2008.
- 5) S. Sugimoto, S. Yoshimura and H. Kanayama, Magnetic-Structural Coupled Analysis by Hierarchical Domain Decomposition Method, 8th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM8), 5th. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), (CD-ROM), Venice, Italy, June 30 – July 5, 2008.
- 6) H. Dobashi, T. Hatsuku, T. Ichimura, M. Hori, T. Yamada, N. Ohbo, M. Moriguchi and H. Itami, FULL 3D SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF UNDERGROUND RAMP TUNNEL STRUCTURE USING LARGE-SCALE NUMERICAL COMPUTATION, the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- 7) A. Nishida, Impact Analysis of Three-Dimensional Frame Structures- An Application for Piping Structures of a Nuclear Power Plant -, International Symposium on Structures under Earthquake, Impact, and Blast Loading 2008 (IB08), OSAKA Univ., Japan, October 10-11, 2008.

- 8) S. Serhadlioglu, S. Bunya, S. Yoshimura and K. Funayama, A High-Resolution Finite Element Model of Flooding in the Low-Lying Urban Tokyo Area, Proc. of 15th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF09), p. 51, Tokyo, April 1-3, 2009.
- 9) S. Minami, S. Yoshimura, Performance Study on Nonlinear Algorithms of Partitioned Iterative Methods for Steady/Unsteady FSI Problems, Proc. of 15th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF09), p. 92, Tokyo, April 1-3, 2009.
- 10) I. Inuzuka and S. Yoshimura, Multi-Objective Design of Wing Motion for Flapping Flight of Micro Air Vehicle, Proc. of 15th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF09), p. 174, Tokyo, April 1-3, 2009.
- 11) I. Inuzuka and S. Yoshimura, Numerical Simulation and Multi-objective Design of Wing Motion for Flapping Micro Vehicle, 2nd South-East European Conference on Computational Mechanics (SEECCM 2009), CD-ROM, Rhodes, Greece, June 22-24, 2009.
- 12) S. Minami and S. Yoshimura, Comparison of Nonlinear Algorithms on Partitioned Iterative Methods for FSI Problems with Large Deformation, 2nd South-East European Conference on Computational Mechanics (SEECCM 2009), CD-ROM, Rhodes, Greece, June 22-24, 2009.
- 13) S. Sugimoto and S. Yoshimura, Magnetic-Structural Coupled Analysis with Hierarchical Domain Decomposition Method, 10th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM X 2009), CD-ROM, 2009, Columbus, Ohio, USA, July 16-19, 2009.
- 14) S. Serhadlioglu, S. Bunya and S. Yoshimura, A 2-D Finite Element Unstructured Grid Model for Investigating Storm Surge Inundation in Tokyo Metropolitan City, 10th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM X 2009), CD-ROM, Columbus, Ohio, USA, July 16-19, 2009.
- 15) H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya and S. Yoshimura, Performance Tuning of Hierarchical Domain-decomposition Method on Multi-core Architecture, 10th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM X 2009), CD-ROM, Columbus, Ohio, USA, July 16-19, 2009.
- 16) I. Inuzuka and S. Yoshimura, Multi-objective Design of Motion of Flapping Wing for Micro Air Vehicle, 10th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM X 2009), CD-ROM, Columbus, Ohio, USA, July 16-19, 2009.
- 17) A. Takei, S. Sugimoto, H. Kawai and S. Yoshimura, Visualization for Large-scale High Frequency Electromagnetic Field Analysis Using Hierarchical Domain-decomposition Data Structure, Asian Simulation Conference 2009 (JSST 2009), CD-ROM, Shiga, October 7-9, 2009.
- 18) V. Magron, Y. Mukaida, S. Sugimoto and S. Yoshimura, Magnetic-Structural Coupled Analysis of MRI Model with Hierarchical Domain Decomposition Method, Asian Simulation Conference 2009 (JSST 2009), CD-ROM, Shiga, October 7-9, 2009.
- 19) S. Serhadlioglu, S. Bunya and S. Yoshimura, Flooding Properties of Low-Lying Tokyo Area with Respect to Levee Breaching Phenomenon, Asian Simulation Conference 2009 (JSST 2009), CD-ROM, Shiga, October 7-9, 2009.
- 20) T. Ichimura and M. Hori, Seismic Structural Response and Strong Ground Motion Simulation based on Multi-scale Analysis, 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, March 3-4, 2009.
- 21) G. Kim, Y. Suzuki, N. Teshima, A. Nishida, T. Yamada, F. Araya, H. Takemiya, N. Nakajima, and Makoto KONDO, Script Generator API of AEGIS for Full-Scale 3D Vibration Simulator for an Entire Nuclear Power Plant, The First International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing

- for Engineering, Pecs, Hungary, April 6-8, 2009.
- 22) T. Watanabe, Numerical simulation of droplet motion and two-phase flow field in an oscillating container, Proc. MULTIPHYSICS 2009, Lille, France, December 9-11, 2009.
 - 23) S. Minami, S. Kataoaka, H. Kawai and S. Yoshimura, Acoustic Fluid-Structure Interaction Analysis Using Iterative Domain Decomposition Method, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM2010), CD-ROM, Sydney, Australia, July 19-23, 2010.
 - 24) S. Sugimoto, V. Magron and S. Yoshimura, Parallel Vibration Analysis of Magnetic-Structural Coupled Phenomena of MRI Model, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM2010), CD-ROM, Sydney, Australia, July 19-23, 2010.
 - 25) H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya and S. Yoshimura, Hierarchical Domain-Decomposition Method on Various Types of Processor Architecture, Including Multi-Core Scalar, Vector and GPU, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM2010), CD-ROM, Sydney, Australia, July 19-23, 2010.
 - 26) H. Okada, H. Kawai, S. Kaneko, T. Tokuda and Y. Fukui, On Fracture Mechanics Analyses Using Tetrahedral Finite Elements, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM2010), CD-ROM, Sydney, Australia, July 19-23, 2010.
 - 27) H. Okada, H. Kawai, S. Ipposhi and S. Kaneko, A Fully Automated Crack Propagation Analyses Using VCCM (Virtual Crack Closure-Integral Method) for Tetrahedral Finite Element, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM2010), CD-ROM, Sydney, Australia, July 19-23, 2010.
 - 28) M. Ogino, H. Kawai, R. Shioya and S. Yoshimura, Parallel Implementation of a Balancing Domain Decomposition Method for Multi-core Processors, 2010 International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2010), CD-ROM, pp. 56-61, Fukuoka, Japan, November 4-6, 2010.
 - 29) S. Sugimoto, M. Ogino, H. Kawai and S. Yoshimura, Introduction of a Direct Method at Subdomains in Non-linear Magnetostatic Analysis with HDDM, 2010 International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2010), CD-ROM, pp. 304-309, Fukuoka, Japan, November 4-6, 2010.
 - 30) H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya and S. Yoshimura, A Parallel Skyline Solver for Coarse Grid Correction of BDD Pre-conditioning in Domain Decomposition Method, 2010 International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2010), CD-ROM, pp. 310-314, Fukuoka, Japan, November 4-6, 2010.
 - 31) S. Yoshimura, H. Kawai, S. Sugimoto, M. Hori, N. Nakajima and K. Kobayashi, High Performance Multi-scale and Multi-physics Computation of Nuclear Power Plant Subjected to Strong Earthquake: An Overview”, Proc. SNA+MC2010, Tokyo, Japan, October 17-21, 2010.
 - 32) T. Oku, H. Akiba, S. Suzuki and S. Yoshimura, Seismic Response Analysis Using Three Dimensional FEM Analysis for BWR Nuclear Reactor Facilities, Proceedings of SNA+MC2010, Tokyo, Japan, October 17-21, 2010.
 - 33) H. Akiba, K. Kobayashi, S. Suzuki and S. Yoshimura, Large Scale Parallel

- Structural Analysis System and Its Application to Seismic Analysis of BWR, Proceedings of SNA+MC2010, Tokyo, Japan, October 17-21, 2010.
- 34) M. Hori, High-Performance Computing for Structure Mechanics and Earthquake, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM2010), CD-ROM, Sydney, Australia, July 19-23, 2010.
 - 35) K. Oguni and M. Hori, PDS-FEM and Application to Seismic Structure Analysis of RC Pier, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM2010), CD-ROM, Sydney, Australia, July 19-23, 2010.
 - 36) K. Fujita and M. Hori, Development of Cracked Shell Element by Means of PDS, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Shanghai, China, November 8-12, 2010.
 - 37) P. E. B. Quinay, T. Ichimura and M. Hori, Physical Modeling Approach for Seismic Response Estimation of Nuclear Power Plant Structures, International Conference of Civil Engineering, University of Philippine, ICE Centennial Conference, Metro Manila, Philippine, November 11-12, 2010.
 - 38) P. E. B. Quinay, T. Ichimura, M. Hori and M.J.L. Wijerathne, Seismic Response Estimation of Structures Considering Fault-structure System, 3rd Asia Conference on Earthquake Engineering, Bangkok, Thailand, December 1-3, 2010.
 - 39) T. Ichimura, T. Nagashima, M. Matu'ura, T. Furumura, H. Okuda, E. Fukuyama, K. Nakajima and C. Hashimoto, Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster (3) Combined Simulation System for Ground Motion/Structure Oscillation, 7th ACES International Workshop, Otaru, Hokkaido, October 3-8, 2010.
 - 40) Q.P. Errol, T. Ichimura, M. Hori and T. Nagashima, Spatial-Temporal Multiscale Approach for Three-dimensional Crust Layer Estimation, 7th ACES International Workshop, Otaru, Hokkaido, October 3-8, 2010.
 - 41) M. Hori, T. Ichimura, K. Oguni, Q.P. Errol and P. Tilak, Comprehensive Numerical Analysis of Seismic Response of Nuclear Power Plant Building, Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA + MC2010), Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan October 17-20, 2010.
 - 42) P.Q. Errol, T. Ichimura and M. Hori, Seismic Structural Response Analysis Considering Fault-Structure System -- Application to Nuclear Power Plant Structures --, Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA + MC2010), Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan, October 17-20, 2010.
 - 43) P.Q. Errol, T. Ichimura and M. Hori, Development of a Forward-Inversion Crust Modeling Scheme for Accurate Strong Ground Motion Prediction, 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering & 5th International Conference on Earthquake Engineering, Japan, March 3-5, 2010.
 - 44) P.Q. Errol, T. Ichimura and M. Hori, A Physical Modeling Approach for Seismic Response Estimation of Nuclear Power Plant Structures, UP ICE Centennial Conference on Harmonizing Infrastructure with the Environment, Philippines, November 11-12, 2010.
 - 45) P.Q. Errol, T. Ichimura, M. Hori and M. Lalith, Seismic Response Estimation of Structures Considering Fault-structure System, 3rd Asia Conference on Earthquake Engineering, Thailand, December 1-3, 2010.
 - 46) G. Kim, K. Nakajima, N. Teshima, T. Tatekawa, Y. Suzuki, and H. Takemiya, 3D Virtual Simulator for the Entire Nuclear Power Plant on the Simple Orchestration Application Framework, SNA+MC2010, CD-ROM, Tokyo, Japan,

- October 18-21, 2010.
- 47) C. Kino, T. Tatekawa, N. Teshima, G. Kim, Y. Suzuki, F. Araya, A. Nishida and H. Takemiya, Application Integration Control System for Multi-Scale and Multi-Physics Simulation, SNA+MC2010, CD-ROM, Tokyo, Japan, October 18-21, 2010.
 - 48) T. Misawa, H. Yoshida, K. Takase, Numerical Simulation of Boiling Two-phase Flow in a Simulated Subchannel of Fuel Assemblies Excited by Earthquake Oscillation, SNA+MC2010, CD-ROM, Tokyo, Japan, October 18-21, 2010.
 - 49) A. Satou, T. Watanabe, Y. Maruyama and H. Nakamura, Neutron-Coupled Thermal Hydraulic Calculation of BWR Under Seismic Acceleration, SNA+MC2010, CD-ROM, Tokyo, Japan, October 18-21, 2010.
 - 50) G. Kim, K. Nakajima, N. Teshima, T. Tatekawa, Y. Suzuki, and H. Takemiya, Long-time Simulation of Full-scale 3D Vibration Simulator for an Entire Nuclear Power Plant by Coupling HPC Machines on Grid, Mini-Symposium in SC10, New Orleans, USA, November 13-19, 2010.
 - 51) S. Yoshimura, H. Kawai, S. Sugimoto, K. Murotani, T. Miyamura and M. Ogino, ADVENTURE Ver.2: Dynamic and Nonlinear Finite Element Analysis System for Solving Ultra Large Scale Problems in Parallel Environments, 3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN2011), CD-ROM, Corfu, Greece, May 25-28, 2011.
 - 52) S. Minami, H. Kawai and S. Yoshimura, A Large-scale Parallel Analysis of Acoustic Fluid-Structure Interaction Based on Balancing Domain Decomposition Method, Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering IV (COUPLED PROBLEMS 2011), CD-ROM, island of Kos, Greece, June 20-22, 2011.
 - 53) S. Yoshimura, S. Kataoka, S. Minami and H. Kawai, Seismic Response Analysis of Rod Bundle in Fluid Using ADVENTURE System with Partitioned Coupling Technique, Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering IV (COUPLED PROBLEMS 2011), CD-ROM, island of Kos, Greece, June 20-22, 2011.
 - 54) H. Kanayama, M. Ogino, S. Sugimoto, K. Enami and E. Komalasari, A Preconditioner Construction for Large Scale 3D Magnetostatic Problems, The 18th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG2011), CD-ROM, Sydney, Australia, July 12-15, 2011.
 - 55) A. Takei, S. Sugimoto, M. Ogino, S. Yoshimura and H. Kanayama, EMC Analysis in a Living Environment by Parallel Finite Element Method, The 18th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG2011), CD-ROM, Sydney, Australia, July 12-15, 2011.
 - 56) S. Sugimoto, K. Murotani, H. Kawai and S. Yoshimura, Large-scale Parallel Magnetic Analysis using Hierarchical Domain Decomposition Tool with Refine Function, The 18th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG2011), CD-ROM, Sydney, Australia, July 12-15, 2011.
 - 57) T. Murayama, A. Muto and S. Yoshimura, A Stable Iterative Approach for 3D Electromagnetic Full Wave Analysis Based on Wave Equation, The 18th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG2011), CD-ROM, Sydney, Australia, July 12-15, 2011.
 - 58) S. Sugimoto, K. Murotani, H. Kawai and S. Yoshimura, Generation of Large-scale Mesh by Hierarchical Domain Decomposition Tool with Refine Function, 11th US National Congress on Computational Mechanics (11th USNCCM), USB, Minneapolis, USA, July 25-28, 2011.
 - 59) Y. Yusa, S. Kataoka, H. Kawai and S. Yoshimura, Structure-Structure

- Interaction Modeling for Large Scale Elasto-Plastic Analysis, 11th US National Congress on Computational Mechanics (11th USNCCM), USB, Minneapolis, USA, July 25-28, 2011.
- 60) T. Miyamura, M. Ogino, S. Takaya, H. Kawai and S. Yoshimura, Development of ADVENTURE_Solid 2: Nonlinear Parallel Dynamic Structural Analysis Software Using the Balancing Domain Decomposition Method, 11th US National Congress on Computational Mechanics (11th USNCCM), USB, Minneapolis, USA, July 25-28, 2011.
 - 61) H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya and S. Yoshimura, A Parallel Structural Solver Based on Balancing Domain Decomposition Method for Multi-core Scalar HPC Platforms, 11th US National Congress on Computational Mechanics (11th USNCCM), USB, Minneapolis, USA, July 25-28, 2011.
 - 62) H. Okada, H. Kawai, S. Kaneko, S. Ohata and T. Tokuda, Development of Fracture Mechanics Analysis System based on the Automatic Mesh Generation Program for Complex Shaped Structures, 11th US National Congress on Computational Mechanics (11th USNCCM), USB, Minneapolis, USA, July 25-28, 2011.
 - 63) H. Kanayama, M. Ogino, S. Sugimoto and Q. Yao, A Balancing Domain Decomposition Preconditioner for Finite Element Analysis of Large Scale 3D Magnetostatic Problems, 11th US National Congress on Computational Mechanics (11th USNCCM), USB, Minneapolis, USA, July 25-28, 2011.
 - 64) K. Murotani, S. Sugimoto, H. Kawai and S. Yoshimura, The Hierarchical Domain Decomposition Pre-processing Module with the Parallel Mesh Refinement Function without Communication, The 20th International Meshing Roundtable, CD-ROM, Paris, France, October 23-26, 2011.
 - 65) P. E. B. Quinay, T. Ichimura, and M. Hori, Seismic Response Estimation of a Nuclear Power Plant Structure Considering Nearby Fault Based on a Multiscale Approach, COMPDYN 2011, Corfu, Greece, May 26-28, 2011.
 - 66) T. Pokharel, P. E. B. Quinay, T. Ichimura and M. Hori, Preliminary Discussion of Surface Topography Effect on Long Period Ground Motion Distribution in Kanto Region, The 13th International Summer Symposium, JSCE, Kyoto, Japan, August 26, 2011.
 - 67) M. Hori, T. Ichimura, Q. P. Errol, Multi-scale Analysis for Seismic Wave Propagation and Nuclear Power Plant Building Response Using Model of Faultpstructure System, Transactions, SMiRT 21, New Delhi, India, November 6-11, 2011.
 - 68) P. E. Quinay, T. Ichimura, M. Hori, M.J.L. Wijerathne and A. Nishida, Seismic Structural Response Analysis Considering Fault-Structure System - Application to Nuclear Power Plant Structures -, Progress in Nuclear Science and Technology, 2012.
 - 69) T. Tatekawa, Y. Suzuki, H. Takemiya, N. Hayashi, I. Kamata., SOAF: A Grid-based Framework for Intergarting Large-scale Long-run Applications, ITER IM Technology Workshop, , Cadarache, France, June 8-10, 2011.
 - 70) Y. Yusa, S. Kataoaka, H. Kawai, S. Yoshimura, Three-dimensional Fracture Mechanics Simulation Using Partitioned Iterative Coupling Algorithm, 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM2012), CD-ROM, Brazil, July 8-13, 2012.
 - 71) H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya, S. Yoshimura, A DDM Implementation Using Local Schur Complement Approach on Peta-scale Supercomputer, 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM2012), CD-ROM, Brazil, July 8-13, 2012.
 - 72) M. Ogino, S. Sugimoto, H. Kanayama, Iterative Domain Decomposition Solvers for 3D Magnetostatic Field Problems, KSME-JSME Joint Symposium on

- Computational Mechanics & CAE 2012 (Mechanical Engineering Congress 2012), CD-ROM, Kanazawa, Japan, September 12, 2012.
- 73) H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya, S. Yoshimura, Performance Tuning of Parallel Structural Analysis Code Based on Hierarchical Domain Decomposition Method for K Supercomputer, KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2012 (Mechanical Engineering Congress 2012), CD-ROM, Kanazawa, Japan, September 12, 2012.
- 74) S. Kataoaka, S. Yoshimura, S. Minami, H. Kawai, Large Scale Parallel Analysis of Acoustic-Fluid Structure Interaction Using ADVENTURE System, KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2012 (Mechanical Engineering Congress 2012), CD-ROM, Kanazawa, Japan, September 12, 2012.
- 75) S. Kataoaka, S. Yoshimura, S. Minami, H. Kawai, Parallel Fluid Structure Interaction Analysis Using ADVENTURE_Coupler, JSME-CMD International Computational Mechanics Symposium 2012 (ICMS2012), CD-ROM, Kobe, Japan, October, 9-11, 2012.
- 76) Y. Yusa, S. Kataoaka, H. Kawai, S. Yoshimura, Crack Propagation Analysis of Three-dimensional Complex-shaped Model Using Partitioned Iterative Coupling Algorithm, JSME-CMD International Computational Mechanics Symposium 2012 (ICMS2012), CD-ROM, Kobe, Japan, October, 9-11, 2012.
- 77) S. Yoshimura, Towards Exascale Simulation of Nuclear Power Plants Subjected to Strong Earthquake, Internal Workshop on CO-DESIGN, Beijing, China, October, 23-25, 2012.

③ ポスター発表 (国内会議 0 件、国際会議 3 件)

(国内会議)

なし

(国際会議)

- 1) S. Sugimoto, J. Zhao, M. Ogino, H. Kanayama and S. Yoshimura, Introduction of a Direct Solver at Subdomains in Non-linear Magnetostatic Analysis with HDDM, Proceedings of the 17th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2009), pp. 23-24, CD-ROM, Florianopolis, BRAZIL, November 22-26, 2009.
- 2) A. Takei, S. Sugimoto, M. Ogino, S. Yoshimura and H. Kanayama, Full Wave Analyses of Electromagnetic Fields with an Iterative Domain Decomposition Method, Proceedings of the 17th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2009), pp. 360-361, CD-ROM, Florianopolis, BRAZIL, November 22-26, 2009.
- 3) T. Murayama and S. Yoshimura, Efficient Block Gauss-Seidel Preconditioner for 3D Full-Wave Finite Element Analysis, Proceedings of the 17th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2009), pp. 815-816, CD-ROM, Florianopolis, BRAZIL, November 22-26, 2009.

(4)知財出願

①国内出願 (0 件)

②海外出願 (0 件)

③その他の知的財産権

なし

(5)受賞・報道等

①受賞

- 1) 吉村忍, JACM Fellows Award, 「計算力学分野における顕著な業績と貢献」, 日本計算力学連合, 2007年12月5日
- 2) 吉村忍, The K. Washizu Medal, 「大規模構造物の計算破壊力学解析に関する顕著な業績」, 2008年計算実験理工学国際会議(ICCES'08), 2008年3月20日
- 3) 秋葉博, 吉村忍, 野口裕久, 大山知信, 川上崇, 2007年度日本機械学会賞(技術), 並列処理による汎用大規模構造解析システムの開発と実用化, 日本機械学会, 2008年4月8日
- 4) 中島康平, 鈴木喜雄, 手島直哉, 杉本振一郎, 吉村忍, 中島憲宏, 「平成20年度全NEC C&Cシステムユーザー会、ユーザー事例論文入選」, 「グリッドを意識しないグリッド利用法, 平成20年度全NEC C&Cシステムユーザー事例論文, 2008.」
- 5) (原著論文の5)に記載の論文, 2008.
- 6) 秋葉博, 吉村忍, 大山知信, 川上崇, 平成21年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞(開発部門), 大規模並列構造解析システムの開発, 2009年4月14日
- 7) 武居周, 吉村忍, 金山寛, 日本シミュレーション学会論文賞(2010年度), 「電車内環境中の高周波電磁場の大規模並列有限要素解析, 日本シミュレーション学会論文誌, Vol. 1, No. 1, pp. 1-10, 2009.」
- 8) 山田知典, 荻野正雄, 吉村忍, 平成21年度日本計算工学会賞 論文賞, 「バランシング領域分割法の最適領域分割数の予測とその数値検証, 日本計算工学会論文集, 20090014, 2009.」
- 9) 吉村忍, 平成22年度日本原子力学会 計算科学技術部会 部会業績賞, 「大規模並列計算力学システムの開発と原子力構造安全性向上への適用」
- 10) 吉村忍, 2011 JACM Computational Mechanics Award (日本計算力学賞), 「計算力学の広い分野での顕著な研究業績」, 2011年7月27日

②マスコミ(新聞・TV等)報道

- 1) 読売新聞, 2008年9月5日, 「高知工科大で原子力学会開幕」にて以下の報道あり. 「・・・特別講演「耐震設計とスーパーコンピューティング技術」では, JAEA(日本原子力研究開発機構)システム計算科学センターの中島憲宏次長が登壇. 原子力発電施設の振動耐性評価について, 一つのモノとして考えると大規模な計算機が必要となるが, 部品ごとでは分散計算が可能で, 計算効率の向上が期待できるとし, 施設を一体的ではなく部品ごとに分けて考えることを提唱した. 」

③その他 なし

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

- ・ 開発したプログラム「ADVENTURE2」が次世代スーパーコンピュータ「京」のHPCI戦略プログラム「分野3 防災・減災に資する地球変動予測」にて構造物の地震応答解析に使用されている.
- ・ ADVENTURE2 が次世代スーパーコンピュータ「京」の HPCI 戦略プログラム「分野4 次世代ものづくり」にて大規模プラントの信頼性を抜本的に向上させる次世代安全性・健全性評価システムの研究開発に使用されている.
- ・ ADVENTURE プロジェクトのホームページ(<http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/>)にて, ADVENTURE2 のソースコードを2012年8月より無料で一般に公開している.

1) ADVENTURE_Solid Ver.2

- ・ 材料非線形解析機能(金属材料, コンクリート・地盤)
- ・ 大規模アセンブリ構造対応(MPC, 要素混在)

- ・ マルチコア / 京コンピュータ向け性能チューニング
- 2) ADVENTURE_Metis Ver.2
 - ・ 数百億自由度規模メッシュの階層型領域分割データ生成
- 3) ADVENTURE_Coupler Ver.1
 - ・ 分離反復型解法による双方向連成ツール(流体-構造連成, 磁場-構造連成)
- 4) ADVENTURE_BCtool Ver.2
 - ・ 解析モデル作成支援(MPC, 連成解析等)
- 5) ADVENTURE_POSTtool Ver.1
 - ・ 大規模並列可視化(オンライン, オフライン, ウォークスルー)

②社会還元的な展開活動
なし

§ 6 研究期間中の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2008.12.03	CCSE ワークショップ	JAEA システム計算 科学センター	101	「原子力耐震計算科学による挑 戦」をテーマに基調講演とCREST 研究の研究成果について報告し, 出席者と議論. 今後の耐震計算科 学研究の方向性について情報を 得た.
2009.09.28	サイトビジット	東京大学	20	サイトビジット
2010.01.25	CCSE ワークショップ	JAEA システム計算 科学センター	101	「原子力耐震計算科学による可能 性」をテーマに基調講演とCREST 研究の研究成果について報告し, 出席者と議論. 第19回CCSEワー クショップで報告された柏崎刈羽 原発の機器健全性評価データに 関する東京電力殿の知見に加え, 日本原子力技術協会内の委員会 SANE が進める健全性分析結果の 知見を関係者で情報共有.
2010.06.02	ミーティング	東京大学	18	全体会合
2010.07.22	オーガナイズド セッション	オーストラリア シドニー	発表 10 件	WCCM / APCOM2010, OS: application of high performance computation to earthquake engineering
2010.11.04 -07	ワークショップ	Tsinghua University, China	20	Workshop on application of computer geometry techniques to earthquake engineering
2011.01.04 -06	ワークショップ	Dalian University of Technology, China	10	Workshop on application of massive computation to earthquake engineering simulation
2011.02.04	CCSE ワークショップ	JAEA システム計算 科学センター	77	「原子力耐震計算科学の現状と将 来」をテーマに基調講演, および, CREST 研究の成果報告を実施 し, 出席者と議論. 原子力分野に

				おける耐震計算科学研究の果たす役割や国際動向, および, 耐震設計・耐震安全評価における技術課題と耐震計算科学研究への期待について, 活発な意見交換を実施.
2012.03.05 - 2012.03.06	Lectures on Computational Fluid-Structure Interaction	東京大学	94	本プロジェクトにて取り組んでいる課題の一つである流体-構造連成解析(Fluid-Structure Interaction: FSI)に焦点を当てたワークショップである. 本ワークショップは海外や日本国内から招聘した著名な先生方により, すべて英語にて行われた. また2日間にかけて2部構成で行われた. 初日は最先端のFSI研究や直面している課題についての講義“FSI Exchange”が行われた. 2日目はFSI計算の初心者向けに, 初日に説明されたFSI計算技術の基礎を詳細に解説するショートコーススタイルの講義“FSI Fundamentals”が行われた.
2012.06.19	CCSE ワークショップ	JAEA システム計算 科学センター	73	「先端的計算機の発展とモデリング&シミュレーション技術への期待と展望」をテーマとする基調講演とCREST研究の研究成果報告を行い, 出席者と議論. 福島第一原発の事故により原子力施設の事故時解析やM&Sの重要性が増している中, 「京」が本格稼働を開始し, M&Sのより一層の高度化が期待される状況において, 原子力分野のM&Sに従事する研究者間で活発な議論を実施.

§ 7 結び

当初の研究計画で掲げた目標はほぼ予定通り達成できた. 稼働中ないしスクラム直後の過渡状態にある原子力発電プラントの機能限界をマルチスケール・マルチフィジックス統合シミュレーションにより定量的に見極める地震耐力予測シミュレータが完成した. 本シミュレータを構成する個々のシミュレーションコード(MMA, ADVENTURE2, TRAC-BF1/SKETCH-INS, ACE3D コード)のそれぞれの精度及び妥当性検証(V&V)がほぼ終了した. その結果, 想定地震シナリオに対する実原子力発電プラントの地震耐力評価(断層⇒地盤⇒建屋⇔原子炉容器⇔炉内構造機器⇔炉水⇒燃料集合体モデルの大規模統合解析と, それに基づく構造健全性評価と核熱的健全性評価)が可能となってきた. 今後の課題としては, 全体統合解析の精度及び妥当性検証(V&V)を実施する必要がある. また, 実環境における実発電プラントのデータを収集し, 解析モデルを構築し, それらを用いて実機のシミュレーションを行うことが求められる. なお, 実機の解析には, 上述の作業に加えて膨大な計算機リソースが必要となるが, 平成21年度より次世代スーパーコンピュータ用アプリケーション開発強化支援の一環として, ADVENTURE_Solid に次世代スパコン「京」向けのチューニングに取り組むこともでき, 京コンピュータ 4,096 ノードでピーク性能比 31%という, 非構造格子を

使用する有限要素法コードとしては、非常に高い性能を達成し、実機シミュレーションに向けた準備が整ってきた。

本プロジェクトで開発した地震耐力予測シミュレータを使用すれば、個々の現象評価に簡易解析を用いている現行の耐震バックチェックやストレステストの高度化を図っていくことも可能であろう。ただし、そのためには、技術開発と並行して規制当局や電力会社等に採用を働きかけていく取り組みが必要である。また、たとえば、東京電力、政府、国会それぞれの事故調査委員会の報告書の中で意見の分かれている、「福島第一原子力発電所の一号機において地震力によって機器の損傷があったのかどうか」について、より確度が高く直感的にも理解しやすい客観的な情報を提供できるであろうと考えている。ただし、このレベルのシミュレーションを行うには対象とする実機のデータ(特に形状データ等)が必要であり、それに対する詳細な解析モデルの構築と、シミュレーションが必要となる。したがって、そのためには東京電力をはじめとする関連企業の協力と、モデル構築や解析作業等に相応の費用がかかるため、関係機関への働きかけが必要となる。現在、そうした取り組みをはじめている。

また、本プロジェクトでは、MMAとADVENTURE2を連携することにより、直下型地震に対する発電所の耐力評価が可能となったが、今後さらに数百キロ四方オーダーの広域の地震波動伝搬解析コードと連携することで、プレート境界型の広域巨大地震に対しても、耐力予測が可能となると考えている。さらに、本プロジェクトでは、ADVENTURE_Couplerを活用して原子炉容器や炉内構造物等の構造機器と冷却材との詳細な流体構造連成解析を実現したが、同じCouplerを活用し、津波の伝搬・遡上解析コードとADVENTURE2を接続することで、津波に対する耐力予測も可能となると考えている。ただし、これらの津波コードを新規に開発することは多くの時間と費用を必要とするばかりで効率的ではないため、すでにそのような信頼できる解析コードを持つ研究者らとの連携が必須である。

最後に、今回開発したシステムは、原子力発電プラントを主ターゲットとしたが、当然他の大型の重要構造機器やプラント、インフラ構造物の地震耐力の評価にも適用可能である、そのような観点からも、対外的にも積極的にPRしていく予定である。



連成解析などに使用している東京大学吉村研究室のPCクラスター



(a) 平成 20 年度



(b) 平成 21 年度



(c) 平成 22 年度



(d) 平成 24 年度

本プロジェクトの成果発表のために開催したワークショップの様子