

吉村 忍

東京大学大学院工学系研究科・教授

## 原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション

### §1. 研究実施体制

#### (1) 「東京大学・吉村グループ」

① 研究分担グループ長: 吉村 忍 (東京大学大学院工学系研究科, 教授) (研究代表者)

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 研究分担グループ長: 堀 宗朗 (東京大学地震研究所, 教授) (主たる共同研究者)

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/地盤・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 研究分担グループ長: 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) (主たる共同研究者)

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 研究分担グループ長:河合 伸一 (防災科学技術研究所, 主任研究員) (主たる共同研究者)

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 研究分担グループ長:酒井 理哉 ((財)電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域, 主任研究員) (主たる共同研究者)

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 研究分担グループ長:折田 修一 (東京電力(株) 原子力設備管理部 機器耐震技術 G, 主任) (主たる共同研究者)

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及びシミュレーション結果の評価

## §2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

地球温暖化やエネルギーセキュリティの観点から原子力エネルギーへの期待が高まる中、我が国の経年化原子力プラントの巨大地震に対する安全性の確認は焦眉の課題となっている。本研究では、稼働中ないしスクラム直後の過渡状態にある原子力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耐力シミュレータを研究開発し、原子力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としている。

今年度は残りの開発項目を完成させるとともに、耐力シミュレーションシステムを用いたシミュレーションを行い、その評価をもとにモデル・アルゴリズム・システムの改良を行った。

最終年度である次年度は、シミュレーション結果の評価を引き続き行い、改良点が見つかれば改良を行うとともに、最終成果のまとめを行う。

#### (1) 「東京大学大学院工学系研究科・吉村」グループ

昨年度に引き続き、構造解析コード ADVENTURE\_Solid への MPC および材料非線形解析機能の導入を進めた。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。平成 24 年度前半に ADVENTURE\_Solid Ver.2 としてホームページ上に公開する。さらに、マルチコア CPU および次世代スパコン(理化学研究所京コンピュータ)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。(参考:1)、5))

昨年度まで開発を行ってきた連成カプラ ADVENTURE\_Coupler による流体-構造連成解析システム(構造解析ソルバに ADVENTURE\_Solid、アコースティック流体解析ソルバに ADVENTURE\_Thermal を使用)の検証と妥当性の確認を行った。具体的には、原子炉内構造物(シュラウドおよび燃料集合体群)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見られるものの、両者はよく一致し、本流体-構造連成解析システムの有効性が確認された。(参考:3)-4))

地震による原子炉構造機器の破壊挙動を再現するため、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。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っている。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求められた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。(参考:2))

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 を連携させた 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、堀グループにて MMA で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。続いて吉村グループにて 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。吉村グループでの解析は、東京大学情報基盤センター HA8000 にて行った。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。その結果をもとに地震応答解析を断続的に行い、 $\Delta t = 0.01s$ 、2,000 時間ステップ(実時間で 20 秒分)の計算を 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変位および相当応力を可視化し、動画を作成した。

## (2) 「東京大学地震研究所・堀」グループ

本年度の目標は、平成 22 年度まで開発を行ってきたマクロミ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である。具体的な解析として、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。

本年度は、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の実行に成功した。解析手法をチューンアップし高速大規模計算を実行できるようにした<sup>6)</sup>。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<sup>7)8)</sup>。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により検証している。

## (3) 「日本原子力研究開発機構・中島」グループ

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ついては、平成 22 年度までに検証した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)について、図 1 に示した参加研究機関の計算機を接続したグリッド環境<sup>9)10)</sup>において、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 1 に示すグリッド環境において地盤解析<sup>11)</sup>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 GUI 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。

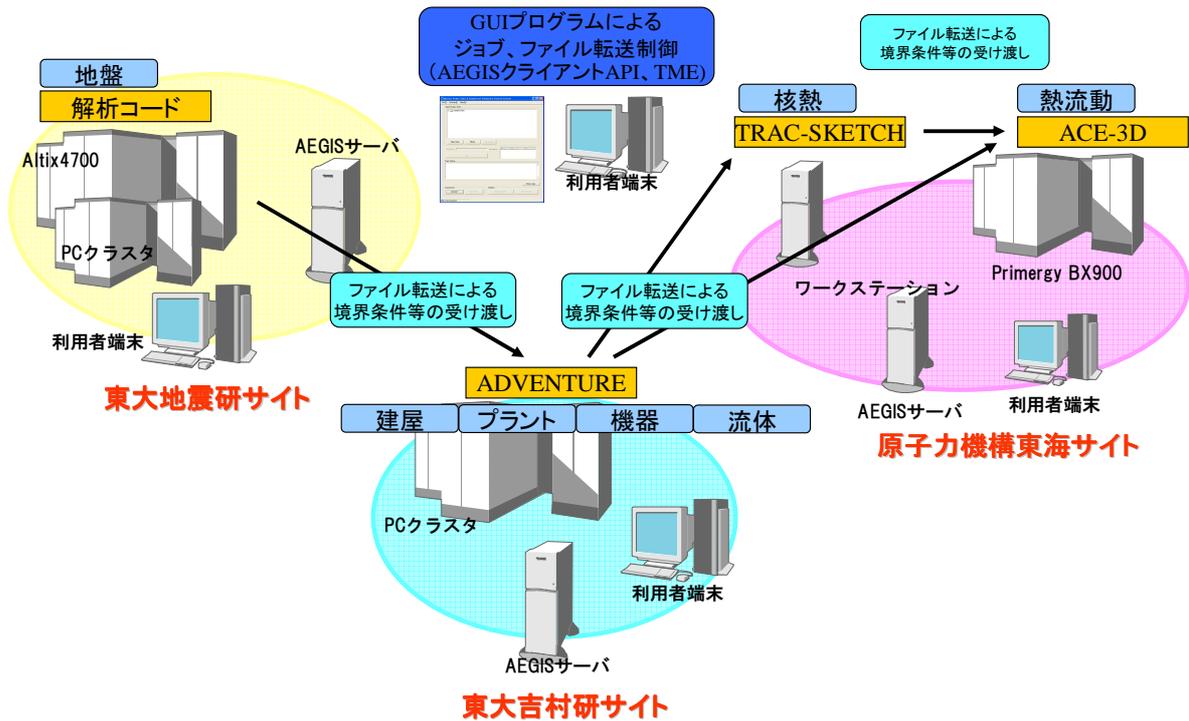


図 1. 地震耐力予測シミュレーションシステムの概念図

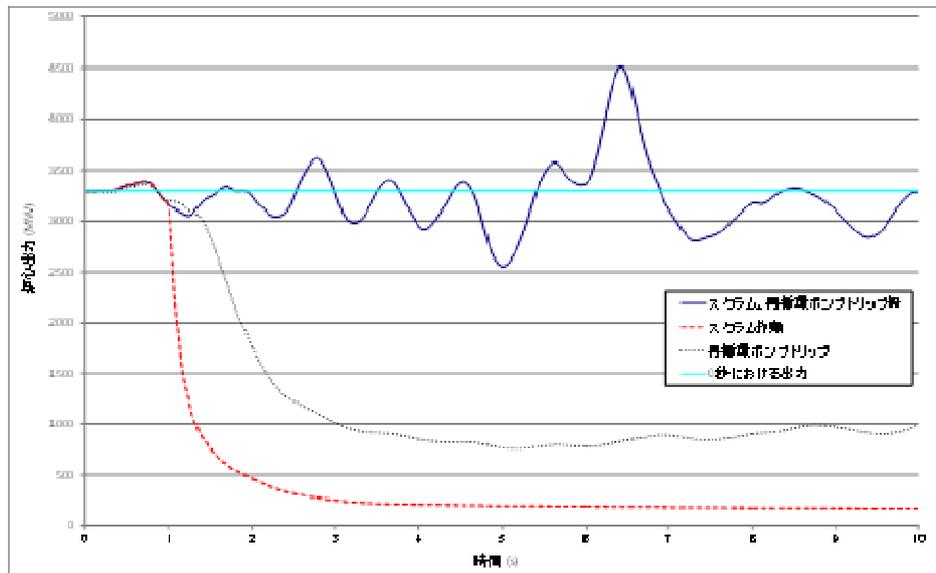


図 2. 3 シナリオにおける地震発生後の出力変動

核熱連成解析に関しては、3次元核熱結合解析コード TRAC-BF1/SKETCH-INS の熱流動相関式への地震加速度項の導入を完了した。本コードを用いた感度解析の結果、相関式における加速度変動は、運動方程式における加速度変動<sup>12)</sup>に比べ、炉内熱流動に与える影響が小さいことがわかった。また、3種類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 2は各シナリオ(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)における, 地震発生後の炉心出力変動の一例を示す。地震波には El Centro 波を用いた。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ていないことがわかる。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る。以上より, 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わかった。

熱流動解析に関しては, 昨年度に引き続き, 機器構造解析, 核熱連成解析とのデータ連携により, 燃料集合体内沸騰流を対象に, 振動加速度や非定常境界条件を付加した解析<sup>13)</sup>を実施し, 次の成果を得た。①振動加速度や非定常境界条件に応じたボイド率分布の三次元的な時間変化の計算を可能とした(図 3参照)。②炉内構造物の振動と, 地震動に起因する炉心入口流量, 熱出力等を考慮した燃料集合体内沸騰二相流解析が行えることを確認した。これらにより, 地震動下における熱流動解析が必要とする機能要件として, 振動加速度や非定常境界条件を付加する方法論が機能することを確認するとともに, 計算結果から挙動を機構論的に説明できることを確認できた。

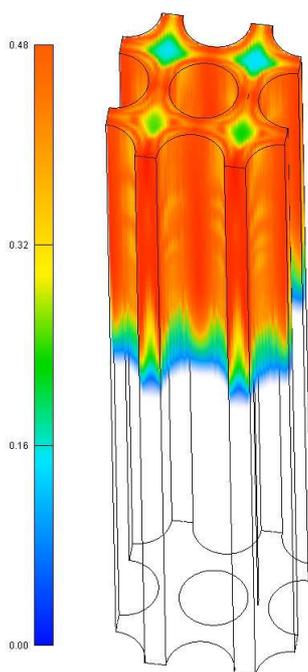


図 3. 解析より得られたボイド率の 3 次元分布

#### (4) 「防災科学技術研究所・河合」グループ

防災科学技術研究所においては地震動に関する研究が盛んに行われており, 地震動および地盤に関するデータを多く有することからその提供を図るとともに, 地盤-建屋連成に関する検証

および評価を支援する。

本年度は昨年度に引き続き、東大堀グループ及び東電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。

#### (5) 「電力中央研究所・酒井」グループ

平成22年度に実施した建屋・機器接合部のハイブリッド実験を対象に、ADVENTURE\_Solidを使用したシミュレーション解析を行った。

図4に示すような解析モデルを作成し、2種類の定着長(100mm, 210mm)のケースで、実験との比較を行った。解析結果と実験結果を比較した荷重変位関係を図5に示す。コンクリートの降伏条件をパラメータとした解析で、実験結果を概ね再現できることが示された。非線形性の強い建屋・機器接合部の地震時挙動に対し、解析精度が確認された。

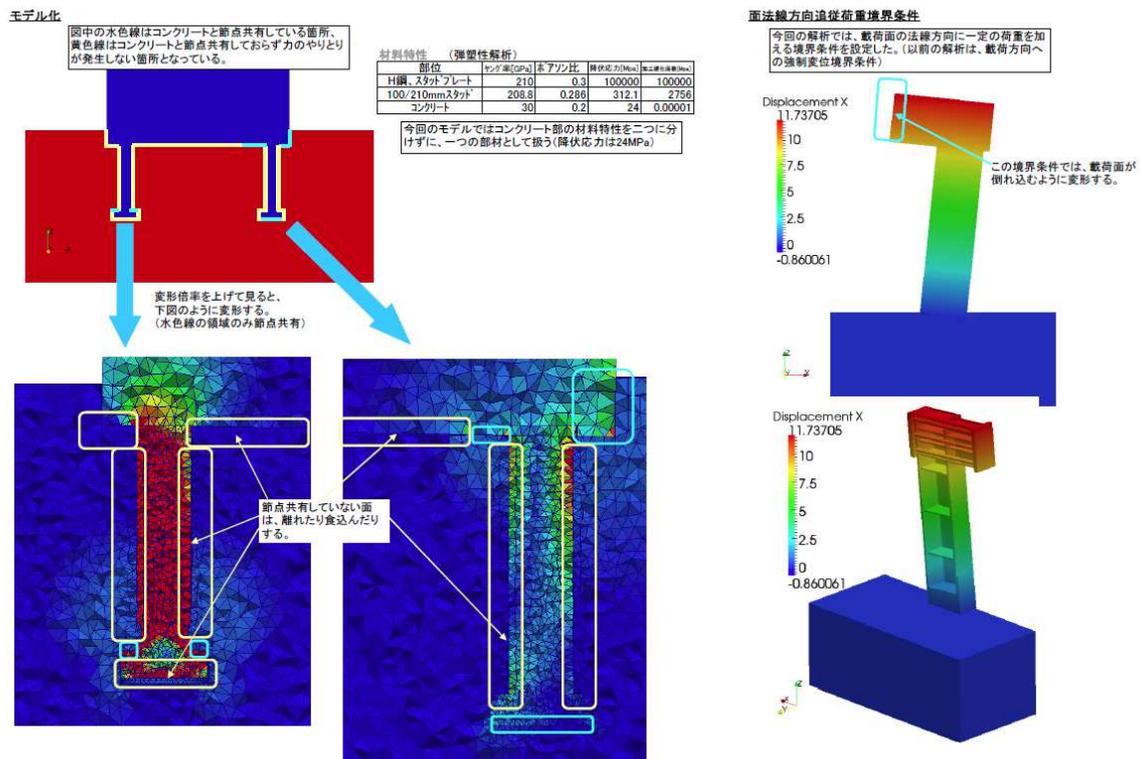
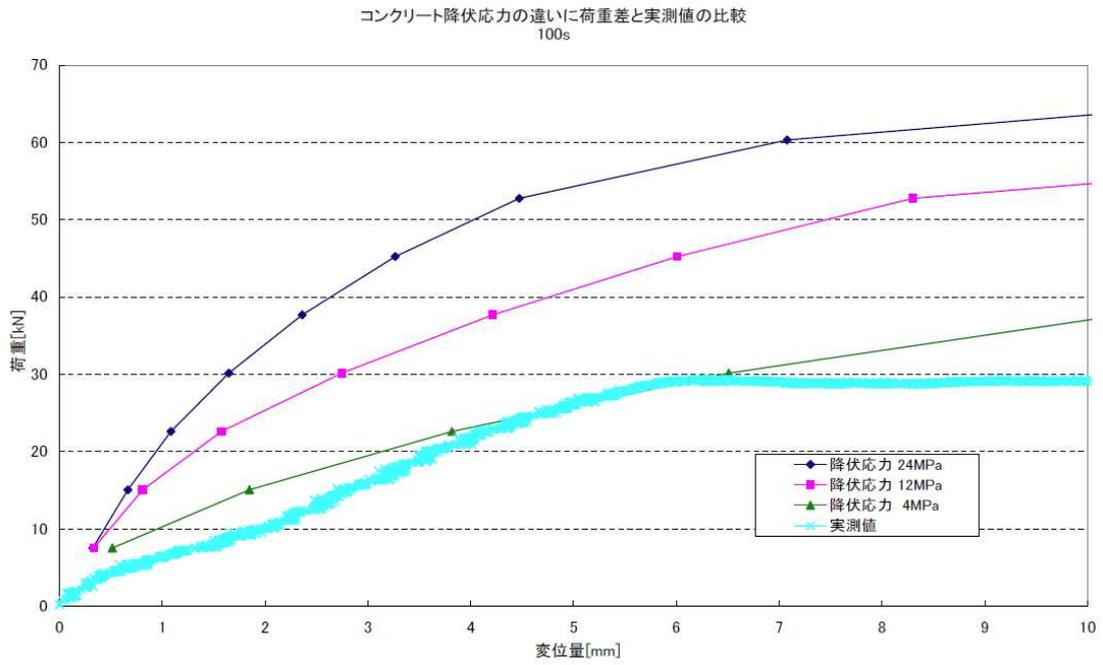
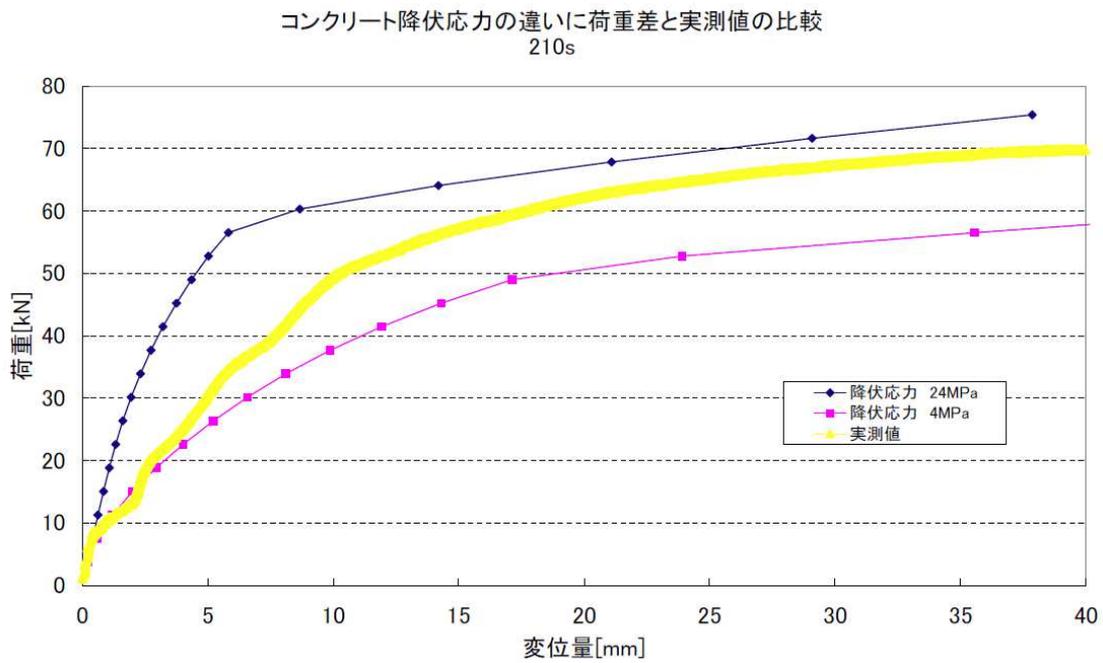


図 4. 解析モデルの概要



(a) 定着長 100mm



(b) 定着長 210mm

図 5. 解析結果の荷重変位関係

#### (6) 「東京電力・折田」グループ

原子力発電プラントを多数運用していることから設計データ・運用データ・将来課題などを含めた総合的なデータの提供が可能であり、また、実務的な観点からのシミュレーション結果の評価を行う。本研究では、将来の実プラント解析への適用のための第一ステップとして、原子力発電プラントのデジタルデータ作成、および運用データなど評価指標データの電子化について検討する。また、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を支援し、得られたシミュレーション結果に対して実務的な観点からの評価を実施し、耐震シミュレーションへのフィードバックを行う。

本年度は、他のグループと連携をとりながら、開発中であった耐力シミュレーションシステムによる試解析の結果の分析、評価などへの助言を行った。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

##### ●論文詳細情報

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 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 (accepted).
- 4) 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 (accepted).
- 5) 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 (accepted).
- 6) H. Chen, M. L. L. Wijrathne, M. Hori and T. Ichimura, Stability of Dynamic Growth of two Anti-Symmetric Cracks using PDS-FEM, Journal of Civil Engineering, A2, Vol. 29 pp. 1-8, 2012. (ISSN:0289-8063)
- 7) P. E. Quinay, T. Ichimura and M. Hori, Waveform Inversion for Modeling Three-Dimensional Crust Structure with Topographic Effects, Bull. Seism. Soc.

Am., 2012 (in press).

- 8) T. Ichimura, M. Hori, P. E. Quinay, M. L. 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, 2012 (in press).
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) P. E. B. Quinay, T. Ichimura, M. Hori, M. L. 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.
- 12) 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.
- 13) 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.