

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. 研究実施の概要

地球温暖化やエネルギーセキュリティー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。

今年度はカブラおよび各ソフトウェアの機能強化を引き続き行うとともに、原子炉のデジタルモデルに対して耐力シミュレーションを実施した。

次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う。

§2. 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)

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)

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)

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)

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(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)

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・小林」グループ

① 研究分担グループ長:小林 敬(東京電力(株) 原子力設備管理部 機器耐震技術 G, 副
長)

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

§3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

(1)「東京大学大学院工学系研究科・吉村」グループ

平成 21 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。特に、繰り返し塑性のための各種機能を ADVENTURE_Solid に実装した。また、マルチコア CPU および次世代スーパーコンピュータへのチューニングを進め、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、BDD(Balancing Domain Decomposition)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(参考:1)-3))。

次世代スーパーコンピュータで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、領域分割ツール ADVENTURE_Metis にメッシュ細分割機能を実装した。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。

実際のモデルデータ作成に関しては、原子力発電所建屋と原子炉圧力容器及び燃料集合体を含む内部構造を結合したモデルを作成し、評価を行っている。なおズーム解析を行うため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をあわせて作成している。

大規模構造解析結果の可視化に関して、そのインタラクティブ可視化の可能性について調査およびプロトタイプ実装を行った。地震動解析の結果を可視化することを想定して、1 ステップの結果を高速に可視化するための要素技術とあわせて、大量(~数千ステップ程度)の計算結果を連続して読み込む場合のチューニングを行った。その結果、2 億自由度原子炉圧力容器モデルにおいて、100 ステップ以上の連続可視化が実用的な速度(8 fps 程度)で可能になることを実証した。

炉構造物と炉水との流体構造連成については、分離反復型および一体型のアプローチをそれぞれ検討している。まず分離反復アプローチについては、連成カプラ ADVENTURE_Coupler に ADVENTURE の各種ソルバを組み合わせた連成解析を行った。PC クラスタ上で構造・流体それぞれ 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効率が得られており、また連成カプラ自身が並列環境においてボトルネックにならないことも確認できた(参考:4))。

一方、アコースティック流体-構造連成問題の一体型方程式を対象に、BDD 前処理付き階層型領域分割法に基づく大規模連成解析手法の開発を行った。特に、流体-構造間の連成効果に着目していくつかの BDD タイプの解法を導出し、大規模並列解析に適した解法を選定した。数値実

験より、提案手法は領域数・自由度数・流体の付加質量効果に依らず、速く安定な収束性を示すことが確認された。また、それらの手法の並列化実装も行い、よい並列性能が得られることを確認するとともに、1千万自由度程度の比較的大規模な連成解析でも有効であることを示した。

(2)「東京大学地震研究所・堀」グループ

地殻-表層地盤-建屋のマルチスケール構造モデリング

地盤・建屋モデリングの基本的な数値解析は地震波動伝播である。この数値解析において、数値分散と呼ばれる空間離散化に起因する近似は計算精度を落とす原因となっていた。地盤・建屋モデリングでは、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。このため、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⁵⁾。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ミクロスケール解析モデルに対し、平成 21 年度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⁶⁾⁻⁷⁾。

耐力シミュレーションシステムへの組み込み

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は、建屋の振動時系列データを介して行われる。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。冗長性・堅牢性の高いデータ変換の手法⁸⁾⁻⁹⁾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。

(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 21 年度までに試作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において、実プラントデータを模擬したモデルによる動作検証を完了した。実プラントデータは、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が可能であることを確認するために、図 1 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連携解析を実施し、機能検証を完了した。

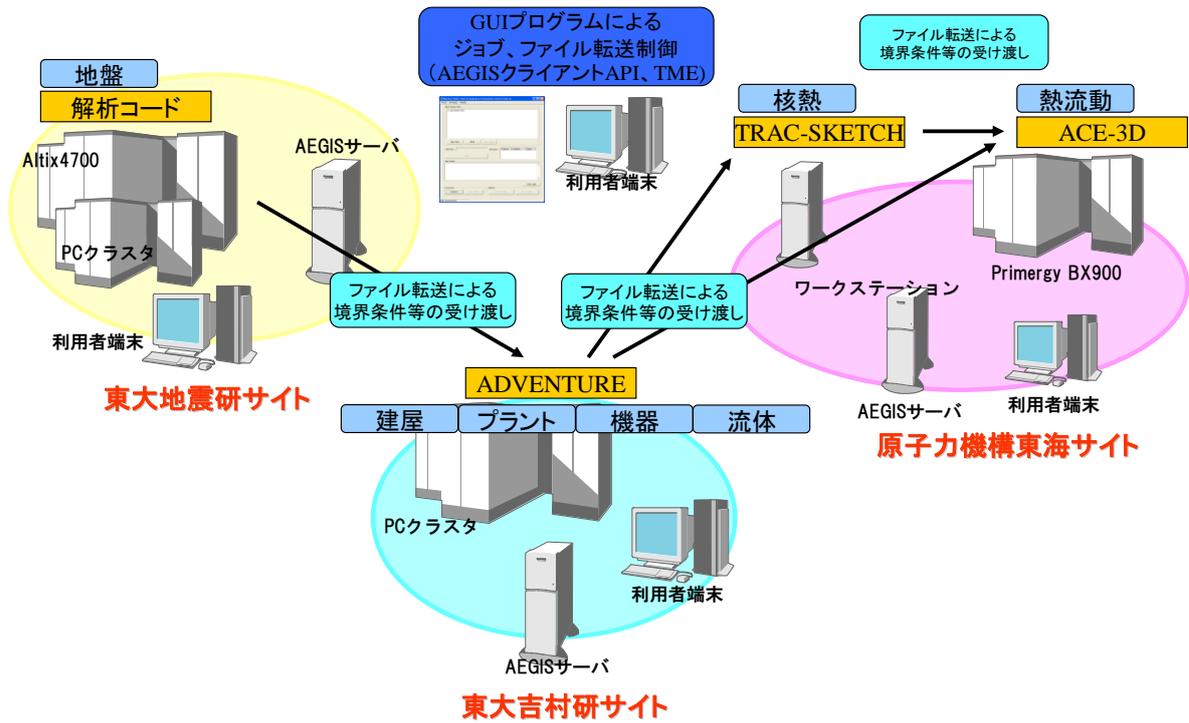


図 1. 地震耐力予測シミュレーションシステムの概念図

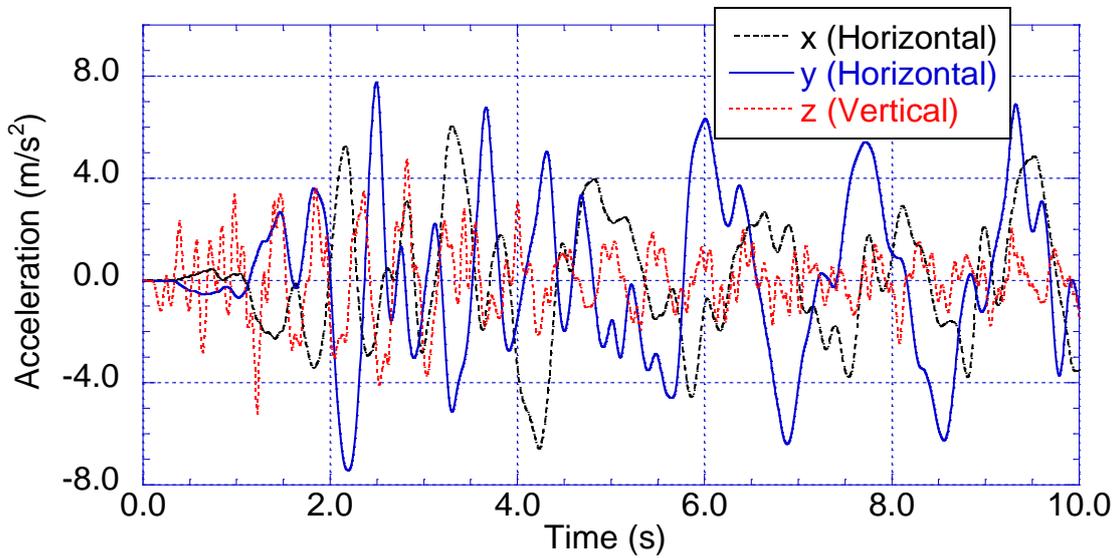


図 2. 付加加速度



図 3. 炉心水平断面内セル出力分布の時間変化

核熱連成振動解析に関しては、平成 21 年度までの成果である、運動方程式に地震加速度モデルを導入した改造 3 次元核熱結合解析コード TRAC-BF1/SKETCH-INS を用い、実機原子炉である Peach Bottom 炉を対象とした解析を実施した。炉のモデル化については、核解析・熱水力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、気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。解析結果の一例として、実地震波を基にした振動加速度 (図 2) を付加した場合の、炉心軸方向中央断面におけるセル出力分布を図 3 に示す。左上が初期状態 (地震波が印加される前の定常状態) であり、その他は解析時間 (10 秒間) で特に変動の大きかった期間 (4.5 秒～9.5 秒) の 0.5 秒ごとの分布である。炉心断面全体の出力が同位相で大きく変動しており、特に 6.5 秒付近では定常時の 1.7 倍程度まで全体の出力が増加している。また、この全体的な出力増減に重畳して、水平方向に逆位相の振動が例えば 4.5 秒～6.0 秒付近に見られ、さらに本図からは判別しにくい、詳細に時系

列を追跡することで、周方向に回転するような出力振動も得られた。以上より、地震による加速度の影響により、全炉心安定性及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が生じることが、本3次元核熱連成振動解析により明らかになった。

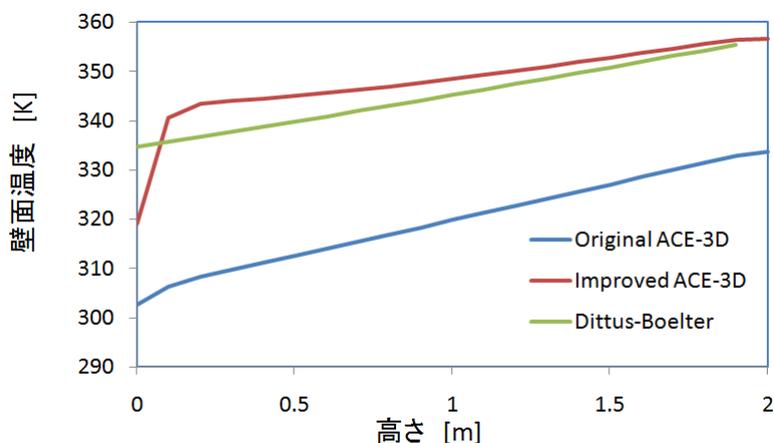


図 4. 円管内壁面温度分布

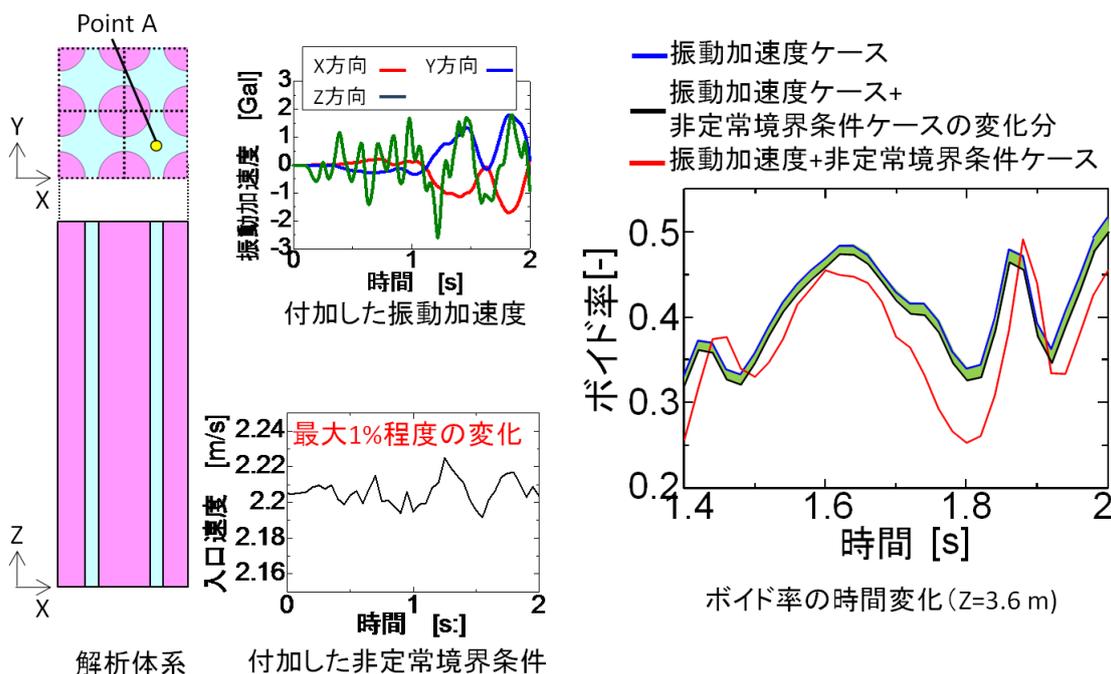


図 5. 地震時の燃料集合体内沸騰流解析結果の一例

炉内熱流動解析に関しては、ACE-3D に、沸騰二相流条件での加熱面近傍における乱流熱流束の評価に境界層の影響を適切に反映するため、等価熱流束モデルを新たに導入した。図 4 に加熱円管内乱流を対象とした熱伝達解析結果の一例を示す。本改良により、既存実験式

(Dittus-Boelter 相関式)と壁面温度が一致した。また、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 0.6s 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、1s 以上の計算が必要であることを明らかにした。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及び炉内核熱流動連成解析より得られた最大で 1%程度変化する非定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 5 に示すように、振動加速度と非定常境界条件を同時に与えると、非定常境界条件の最大の変化(1%程度)を上回る沸騰二相流の変動(10%以上)が生じることを確認した。従って、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、機器構造解析及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、地震発生時における炉心燃料集合体内沸騰流の総合評価が行えることを確認した。

(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小林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

マルチスケール構造モデリングでの重要な構成要素の一つである、建屋・機器の接合部位に着目した、実験とシミュレーション融合によるハイブリッド実験を行った。

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 1.2m×1.2m×0.5m 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载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 6)。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、単調载荷、漸増繰返し载荷、地震波载荷の 3 ケースの試験を実施した。単調载荷では試験体加力部における荷重-変位関係(骨格曲線)を、漸増繰返し载荷では骨格曲線内での履歴性状を取得した(図 7)。また、地震波载荷では当所が保有するハイブリッ

ト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について、基本的な耐荷力特性と動的応答特性が取得でき、他グループが開発を進めている耐力シミュレータの検証データが取得できた。



図 6. 建屋・機器接合部位の載荷実験

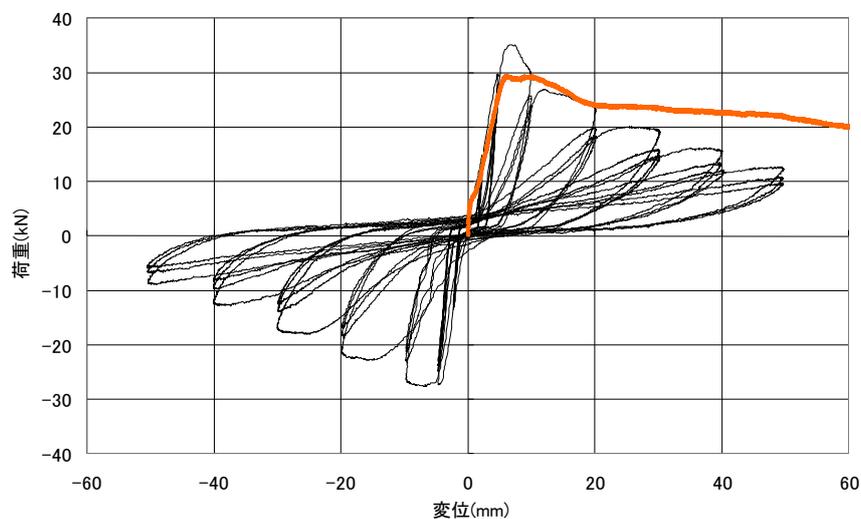


図 7. 実験で得られた荷重変位関係

構造解析コード ADVENTURE_Solid を用いて 100 万自由度レベルの構造解析を行った (図 8)。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)。今年度の検討では、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、弾性レベルの試解析を行った。試験のシミュレーション解析により、試験で直接計測していない部位の状態把握に活用できる見通しを得た。

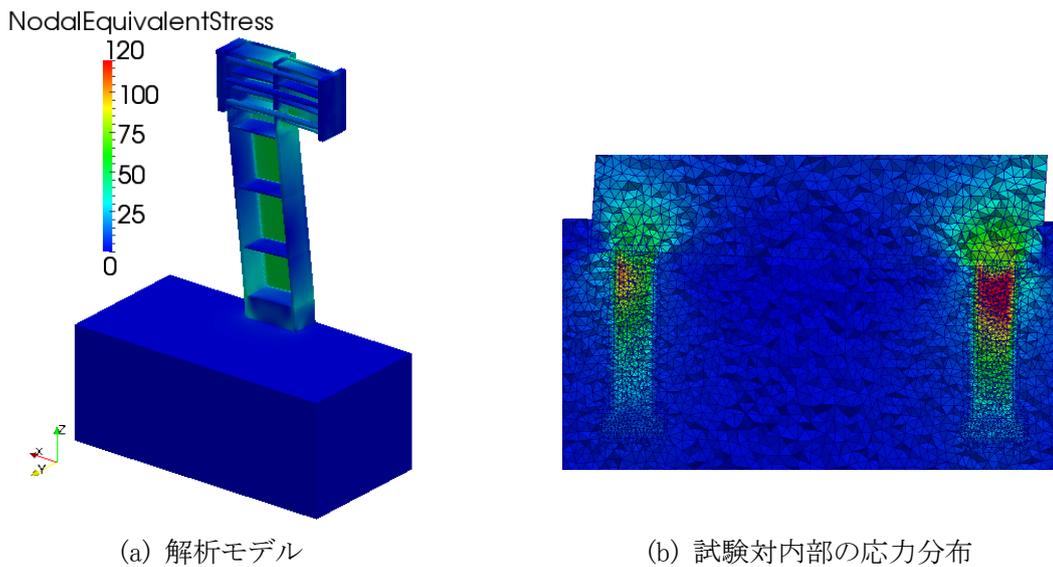


図 8. 実験のシミュレーション解析

(6) 「東京電力・小林」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。

本年度は以下の作業を実施した。

a) 原子炉圧力容器(炉内構造物)のデジタルデータ作成

既往研究においては簡略モデルを用いて評価していた燃料集合体について、平成 21 年度に引き続き、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)するための詳細モデルの構築と評価を実施した。(図 9)

b) マルチフィジックス解析用データの作成

既存の原子炉圧力容器地震応答解析結果に基づき、核熱連成振動解析において原子炉圧力容器内部の地震応答による加速度応答分布を取り込むための検討用データを作成した。

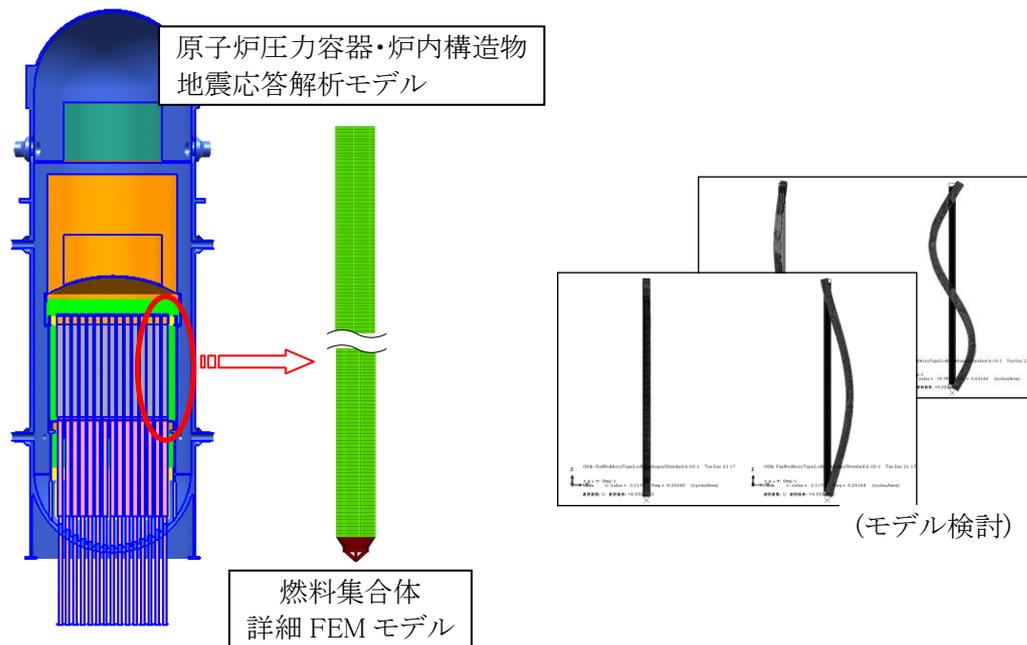


図 9. 燃料集合体 詳細 FEM モデルの作成

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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)
- 4) 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).
- 5) T. Ichimura, M. Hori and M. L. 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)

- 6) Gh. Sobhaninejad, M. Hori and T. Kabayesawab, Enhancing Integrated Earthquake Simulation with High Performance Computing, Journal of AES, Ref. ID. SP2009/0013, 2010.
- 7) H. Dobashi, T. Yamada, Y. Terashima, K. Tsujimoto, T. Konda, M. Hori and H. Shinozaki, A Study on Stress Transfer Characteristics with Shear Connectors at the Joint of Hybrid Structures, JSCE Journal of Structure and Earthquake Engineering, 2010 (in print).
- 8) M. Hori, K. Tanaka, S. Gholamreza, T. Ichimura and K. Oguni, Data Conversion from GIS to Urban Area Model for Natural Disaster Simualtion, JSCE Journal of Structure and Earthquake Engineering, Vol. 68, pp. 1-12, 2010 (in print).
- 9) M, Hori, K. Yugeta, T. Ichimura and L. Wijrathne, On Development of Multi-agent Simulation for Recovery Process of Lifeline Damaged by Earthquake, Journal of Earthquake and Tsunami, 2010 (in print).