

「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」
平成 19 年度採択研究代表者

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。

今年度は耐力シミュレーションを行うための準備として、既存最先端技術の現状を把握し、本研究開発で取り組むべき技術の抽出を行った。この調査を基に、地殻－表層地盤－原子力建屋－機器および機器内の挙動を支配する構造・材料－流体－熱－炉特性等の連成解析においてそれぞれの解析で用いるソフトウェアの機能強化を行った。さらに各ソフトウェアをつなげるためのマルチスケールカプラー、マルチフィジックスカプラーの開発に着手し、基本設計とプロトタイプ of the 構築を行った。

次年度はカプラーの研究開発を続けつつ、カプラーを用いて各ソフトウェアを接続し、並列分散計算機環境上で地殻－表層地盤－原子力建屋－機器類のマルチスケール連成解析及び炉構造内部の経年化構造・材料－流体－熱－炉特性等のマルチフィジックス連成解析を実施する。

2. 研究実施内容 (文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

●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)

地盤、鉄筋コンクリート、炉構造の非線形材料挙動のモデリングおよび経年化構造材料モデリングに関する調査を、昨年度に引き続き行った。特に、炉構造の経年化材料モデリングとして、繰返し塑性のための移動硬化及び複合硬化モデルを ADVENTURE システムに試験的に導入した。また、等方硬化モデルにおけるひずみ硬化則指定について一般化を行った。

実原子力プラントアセンブリー構造の解析アルゴリズムの実装を念頭においた ADVENTURE 用多点拘束設定ツールの開発を、昨年度に引き続き行なった。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)がほぼ完成した。次年度は実際に使用しながらツールの完成度を高めるとともに、動解析への対応等も含めた改良を行う。

表層地盤・建屋－構造・材料－流体のマルチスケール連成解析^{1, 5}を可能とする連成カップラーとして ADVENTURE_Coupler の開発に着手した。基本設計が終わり、プロトタイプを作成した。

また、次世代グリッド環境および次世代スパコンでの連成シミュレーションの実行を視野に、マルチコア/メニーコアスカラー型超並列計算機における大規模 FEM 計算のための性能最適化を検討した。具体的には、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、従来のメモリアクセスインテンシブな DS(Direct Storage)型^{2, 9}設計の代わりに、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 Storage-Free)および ISF(Iterative Storage-Free)型を新たに提案し、基本性能の検証を行った。

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整備を進めた。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⁶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ー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、2億自由度 BWR モデルおよび ABWR モデルの耐震解析結果を可視化した。

●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）

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た。

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、 $10^2 \sim 10^3$ [m]の地震学的スケールと $10^{-1} \sim 1$ [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¹¹。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、地震応答計算の数値解析手法を高度化した^{3, 10, 12}。

●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）

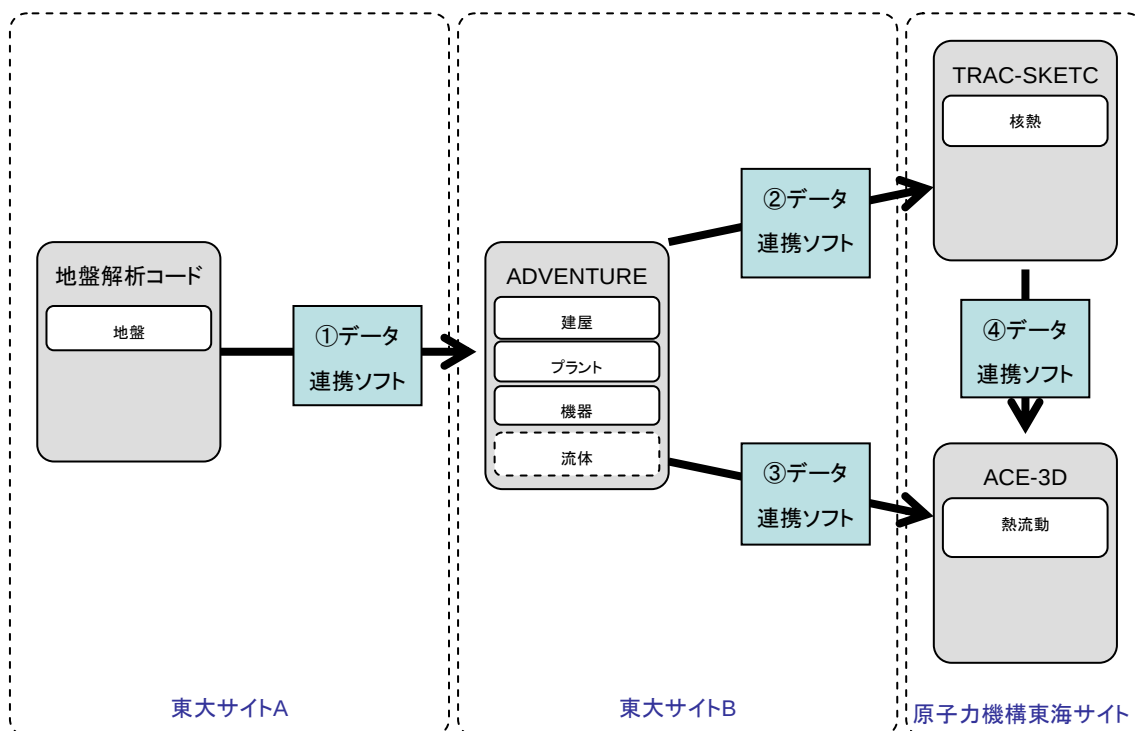


図 1. シミュレーションシステムの解析全体の構成

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、昨年度実施した原子力機構と防災科研の計算機を試験的に接続して行ったデータ授受試験の経験を基に、全サイト間でのデータ授受（シミュレーションシステムの全体像を図 1に示す）の実現へ向けたグリッド環境整備を連携機関との調整を図りつつ実施すると共に計算を制御するためのユーザーインターフェースプログラムのプロトタイプの開発を実施した。また、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の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試作を実施した。さらに、グリッド化実装⁴に係わり、解析間連携方法の相違による解析結果への影響を把握するための基礎的検討を実施した。この他、耐力予測シミュレーションとして実施する解析の事象シナリオについて、主に当グループで担当する解析（核熱連成振動解析及び炉内熱流動解析）に関わり検討を行い、次の3つのシナリオを選定した。

- 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たシナリオとして、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する状況を想定したシナリオとして、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たシナリオとして、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。

核熱連成振動解析および炉内熱流動解析の機能強化に関する実施内容は、以下の通りである。

3次元核熱結合解析コード TRAC-BF1/SKETCH-INS に関しては、まず、本コードを実行するための計算機環境の整備を行った。当該計算機において同コードが実行可能であること、および従来使用していた計算機による結果と同等の解析精度が得られることを確認した。さらに、実機解析のための入力データを準備し、上記計算機上で使用可能であることを確認した。また、同コードに地震加速度モデルを導入するために、プログラムの調査・改造を実施した。プログラム内の運動方程式に関する部分、相関式に関する部分等において、加速度項が影響する部位を特定し、導入方法を検討した。続いて、運動方程式に関する部分に加速度項を導入する改造を施した。この改造コードを使用し、単管内单相流に変動加速度を付加した計算を実施し、計算結果と解析解を比較した。図 2に示すとおり、両者は良好に一致し、今回の改造の妥当性が示された。

炉内熱流動解析コード ACE-3D に関しては、燃料棒変形などによる複雑流路状況を模擬するために、ACE-3D に任意形状を表現できる座標系を導入した。燃料棒変形や流路中の障害物を模擬した体系で解析を実施し、導入した座標系により妥当な解析が行えることを確認した。

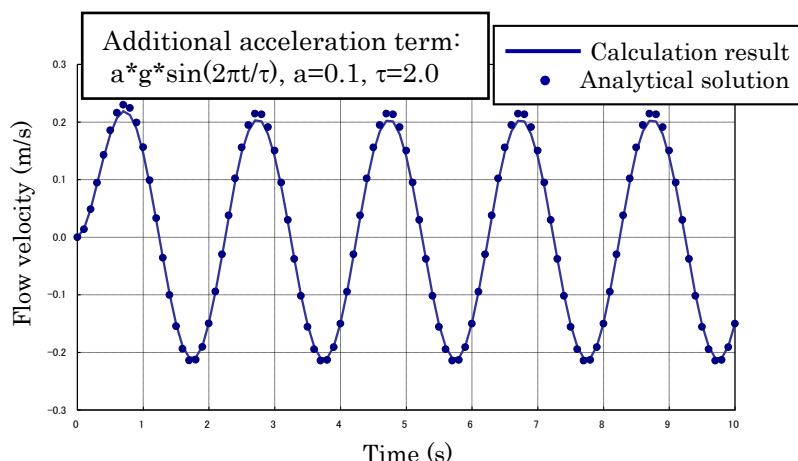


図 2. 変動加速度場における流速変動

● 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）

既存原子力プラント周辺の地震動および地盤に関するデータを提供するための準備として想定箇所として適切な箇所の選定およびデータ収集作業を行った。また、地盤モデル作成手法に関する研究を実施した。

● 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）

大規模シミュレーション技術の高度化に資するデータ取得のために実施する、建屋・機器連成系のハイブリッド実験について、異材接合部の既往検討事例、各種基準類(AIJ 各種合成構造設計指針、JEAG 4601 など)について文献調査を行った。想定された荷重条件、破損モ

ードを整理し、課題を抽出した。次年度の実験計画の準備を進めた。

●耐力シミュレーション実施・実験評価（東京電力株式会社・長澤グループ）

平成 19 年度より着手していた地震データ、プラントデータの取得および検証と、設備の CAD/CAE データの整備・拡充を引き続き実施し、これらのデータを用いた地震応答解析の試行により、知見の拡充と課題の抽出を行った。

また、耐力シミュレータの開発向けに、代表的な BWR-5 型プラントの諸元に基づき、原子炉建屋および原子炉格納容器(原子炉圧力容器基礎およびしゃへい壁を含む)の解析用データ(図 3)を作成し、あわせて実用化に向けた課題の抽出を行った。

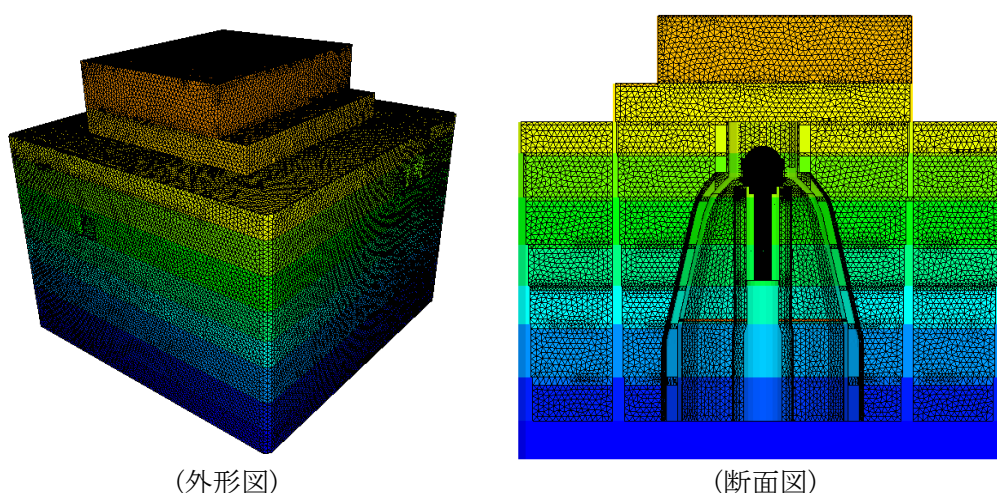


図 3. 耐力シミュレータ開発向け原子炉建屋・原子炉格納容器解析モデル

3. 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、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、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、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、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・長澤」グループ

①研究分担グループ長:長澤 和幸(東京電力株式会社、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

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

1. 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.
2. 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.
3. 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.
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, 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. Tomonori YAMADA and Shinobu YOSHIMURA, Line Search Partitioned Approach for Fluid-structure Interaction Analysis of Flapping Wing, Computer Modeling in Engineering & Sciences, 24-1, pp.51-60, 2008.
 6. Hiroshi KAWAI, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA and Shinobu 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.
 7. Atsuya OISHI, Shinobu YOSHIMURA, Genetic Approaches to Iteration-free Local Contact Search, Computer Modeling in Engineering and Sciences, Vol.28, No.2, pp.127-146, 2008.
 8. Atsuya OISHI and Shinobu YOSHIMURA, Finite Element Analyses of Dynamic Problems Using Graphics Hardware, Computer Modeling in Engineering and Science, Vol.25, No.2, pp.115-132, 2008.
 9. Amane TAKEI, Shinobu YOSHIMURA, Hiroshi 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.
 10. Muneo HORI and Tsuyoshi ICHIMURA, Current State of Integrated Earthquake Simulation for Earthquake Hazard and Disaster, Journal of Seismology, DOI: 10.10, 2008.
 11. Tsuyoshi ICHIMURA and Muneo HORI, Structural Seismic Response Analysis Based on Multiscale Approach of Computing Fault-structure System, Earthquake Engng Struct. Dyn. DOI: 10.1002/eqe.861, 2008.
 12. M.L.L. WIJERATHNE, Kenji OGUNI and Muneo HORI, Stress Field Tomography Based on 3D Photoelasticity, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 56, 3, pp. 1065-1085, 2008.
 13. Akemi 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.

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)