

「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うとともに、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を行った。また、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試験的に実施した。

次年度はカプラー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、現実の原子炉を模擬した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ていく。

§ 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、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((独)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((独)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((財)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・小林」グループ

① 研究分担グループ長:小林 敬(東京電力株式会社、副長)

② 研究項目

§ 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

炉構造の経年化材料モデリングとして、繰り返し塑性のための移動硬化及び複合硬化モデルの ADVENTURE_Solid への導入に関して、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実施した。また、ADVENTURE_Solid への鉄筋コンクリート構成式の実装も進めた。(参考:文献7))

次に、ADVENTURE_Solid への多点拘束(MPC)機能導入に関して、動解析および非定常熱伝導解析ソルバーを対応させるとともに、多点拘束条件添付ツールを開発した。さらに、このツールとメッシュジェネレータ及びソルバー等と連携させた大規模解析へのテスト及び適用を開始した。

また、表層地盤・建屋-構造・材料-流体の大規模連成解析を可能とする連成カプラー ADVENTURE_Coupler を開発中である。ADVENTURE_Coupler を用いた連成解析の操作手順は次のとおりである。ADVENTURE_Coupler は、ソルバー用の通信ライブラリとライブラリから受け取った境界面上の値を幾何的に補間し送受信を行うプログラム、およびソルバーと送受信プログラムの対応を定義するプログラムからなる。構造・流体の各ソルバー間で受け渡される境界面上のデータは、送受信プログラムを介して受け渡される。カプラーとソルバー間の通信は、ADVENTURE_Coupler に含まれるソルバー用通信ライブラリをソルバーにリンクすることで、ソルバー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可能となる。また、プリプロセスプログラムとして、境界面上でのデータ補間のための幾何情報データを生成するカップリングデータ作成プログラムがある。ソルバーとカプラー間の通信は標準的なTCP/IPソケットを使用し、カプラー内の通信は MPI を使用する。ソルバー自体については特に制約はないが、現在 ADVENTURE_Coupler の組み込み対象として想定しているソルバーである ADVENTURE_Solid および ADVENTURE_Thermal では、並列解析時に MPI を使用して通信を行っている。この機能を検証するため、カプラーを介したソルバー間での境界値の通信について、疑似ソルバーを使用したテストを行った。さらに、上述した MPI と TCP/IP ソケットが混在した方式に加えて、すべてを同一環境で行う方式についても検討している。

なお、境界節点の結合関係はカップリングデータ作成プログラムによって生成されるが、そのためのプレ処理として、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モデラーに渡すことで、モデラー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。

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、ポアソン方程式ベースの音響流体と構造物との大規模分離反復型双方向連成解析の検討を行った。図

1

図 1に2角柱簡易モデルによる流体-構造連成解析の結果を示す。分離反復型解法に関して、非線形解法の1種である Broyden 法を適用した場合、より単純なブロック Gauss-Seidel 法などでは収束しないような流体の付加質量が十分大きい問題でも良好に収束することが確認された。続いて、この分離反復型アルゴリズムを ADVENTURE システムに組み込み並列計算機環境上へ実装した。構造コード ADVENTURE_Solid と、ポアソン方程式ソルバーとしての ADVENTURE_Thermal とを、前記のカプラーを介して接続した。分離反復アルゴリズムとしてはブロック Gauss Seidel 法および Broyden 法の両方を実装した。本システムを用いた解析例として、角柱群の地震応答解析を行った。図 2はある時刻における9x9角柱群の変形モードとその時刻における圧力分布を示したものである。流体領域・構造領域あわせて100万自由度程度の解析がPCクラスタ上で動作すること、妥当な収束解が得られること、および、Broyden 法の導入によりブロック Gauss Seidel 法に比べて反復回数が半減できることなどを確認した。(参考:文献2), (6), (8))

続いて、次世代スパコンを念頭においた FEM ソルバーのマルチコア/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。

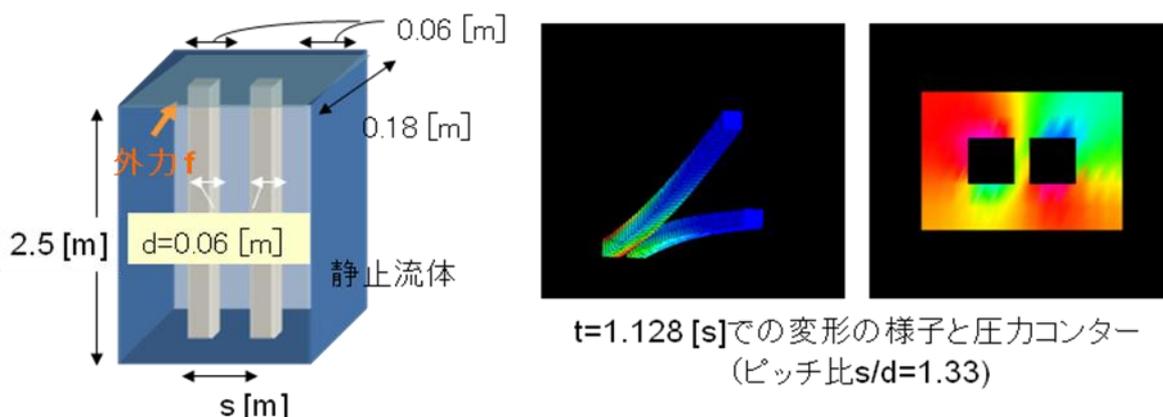


図 1.2 角柱簡易モデルによる流体-構造連成解析の解析結果

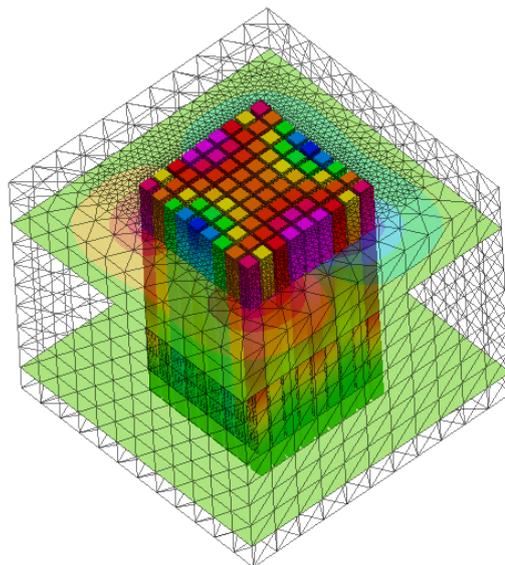
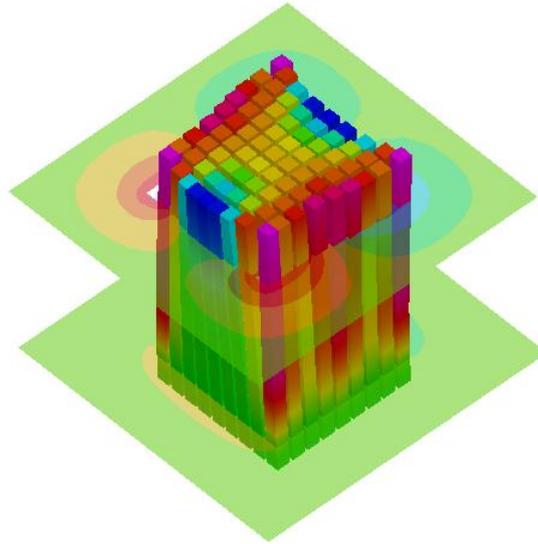


図 2. 9x9 角柱簡易モデルにおける流体-構造連成解析の解析結果

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 への移植を開始した。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、本年度は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ーの性能調査
- 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、さらなるスケールアップ性向上に関して、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 BDD 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ー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、バンド行列ソルバーである LAPACK およびその分散並列版 ScaLAPACK、および、ASTOM と共同で 5 種類のスパースダイレクトソルバー、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ーに関しては、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。(参考:文献1), 3), 4), 5))

(2)「東京大学地震研究所・堀」グループ

マルチスケール構造モデリングの地盤モデリングでは、マルチスケール地震波動伝播解析手法であるマクロミ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。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ミ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。この解析モデルは、非線形有限要素解析である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コード化を行った。き裂発生・進展を表現するPDSをADVENTURE_Solidに実装する予定である。(参考:文献9))

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(参考:文献10))を行う。2)マクロ解析の地殻の地震波動を入力として、ミクロ解析を使って地殻-地盤の連成を計算する(参考:文献11), 12))。さらに、3)ミ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。マルチスケール構造モデリングの地盤モデリングで構築された、地殻構造の3次元FEMモデルを図3に示す。この図の中央に点震源(深さ6.2 km, 地震モーメント1.017 Nm, 立ち上がり2.0 sec, 走行30 deg, 傾斜角40 deg, すべり角0 deg)を置いてマクロ解析を行う。地盤構造の3次元FEMモデルを図4に、地盤-建屋の連成解析用に構築された建屋のFEMモデルを図5に示す。

なお、マクロ解析の計算結果がミクロ解析の入力データ、さらにミ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が現時点では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。

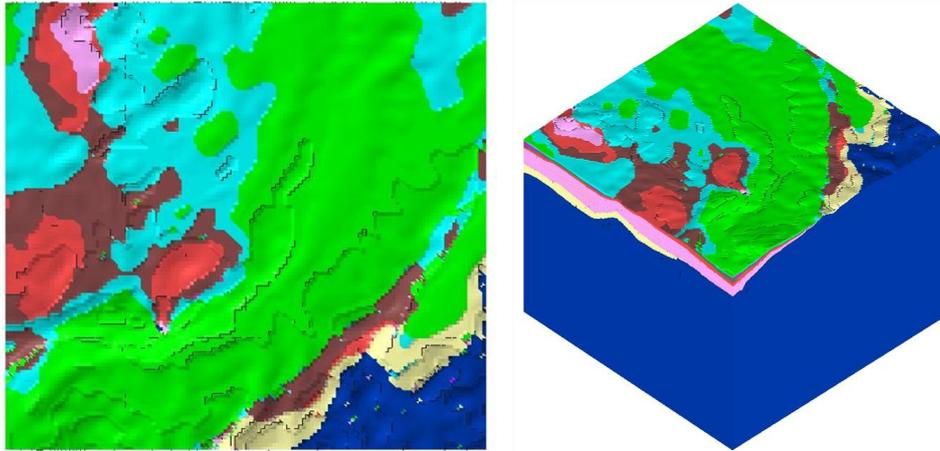


図 3 地殻構造の 3 次元 FEM モデル：左) 地質分類を考慮した平面図、右) 3 次元構造

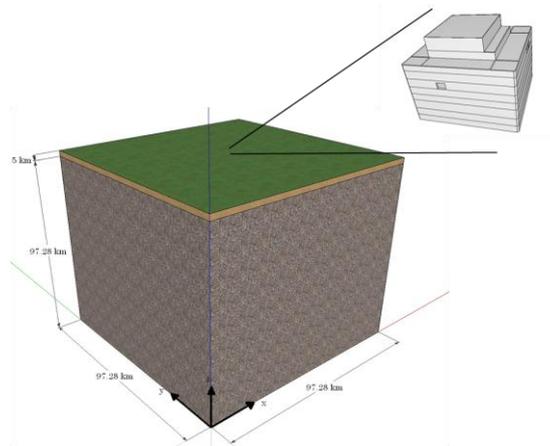


図 4 ミクロ解析用の 3 次元 FEM モデル

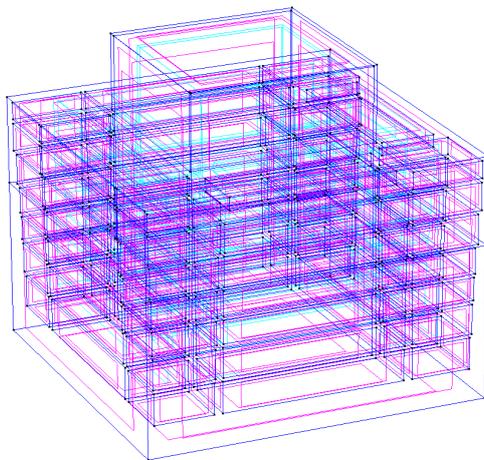


図 5 ADVENTURE_Solid 用の建屋 FEM モデル

(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、本研究で連携する計算機をグリッド接続するためのグリッド基盤を導入し、全ての計算機接続を完了した。また、昨年度開発した計算を制御するためのユーザインターフェースプログラムを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、パイプライン処理の導入を実施し、動作確認作業を完了した。また、昨年度試作し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について、マルチスケール・シミュレーションのために必要となるデータの自動変換化等の改良を行い、図 6に示した計算機へインストールし、カップリングインターフェースの動作確認を完了した。

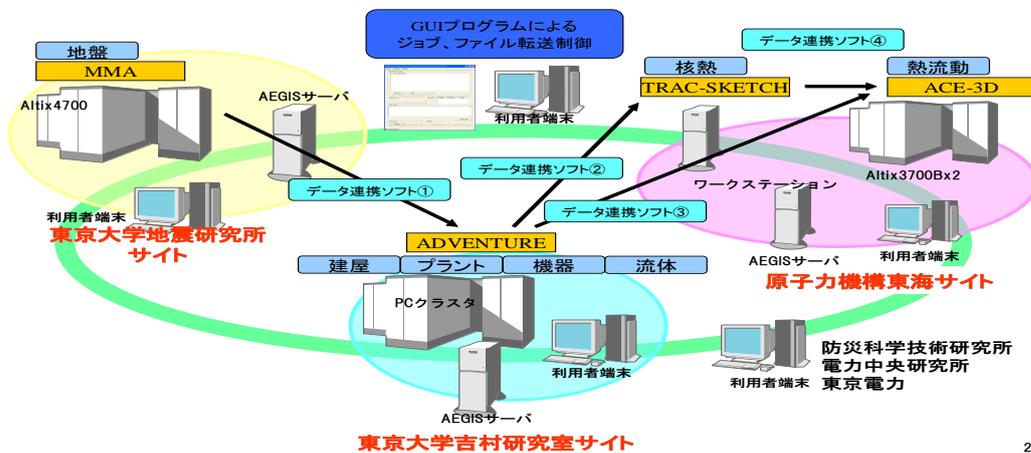


図 6 地震耐力予測シミュレーションシステムの概念図

核熱連成振動解析に関しては、昨年度の成果である、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、当改造コードの実機解析への適用性検討のため、Peach Bottom 炉を対象とした予備解析を実施した。この解析結果の一例として、図 7に、鉛直方向および水平方向に正弦波の変動加速度を付加した場合の、炉心出力の変動を示す。炉心出力が付加した加速度と等しい周期で振動しており、妥当な結果と考えられる。また、実際の地震波 (El Centro 波) から得られた原子炉压力容器への振動加速度を付加した解析を実施することにより、実地震動に対する適用可能性を確認するとともに、振動加速度の振幅、周期が原子炉の出力応答に与える影響を調査するための感度解析を実施した (図 8)。一方、相関式における重力項の影響調査を行い、この結果を基に全ての相関式における加速度項の影響を調査できる機能を追加する改造を TRAC-BF1/SKETCH コードに加え、改造の妥当性を評価できる環境を整えた。

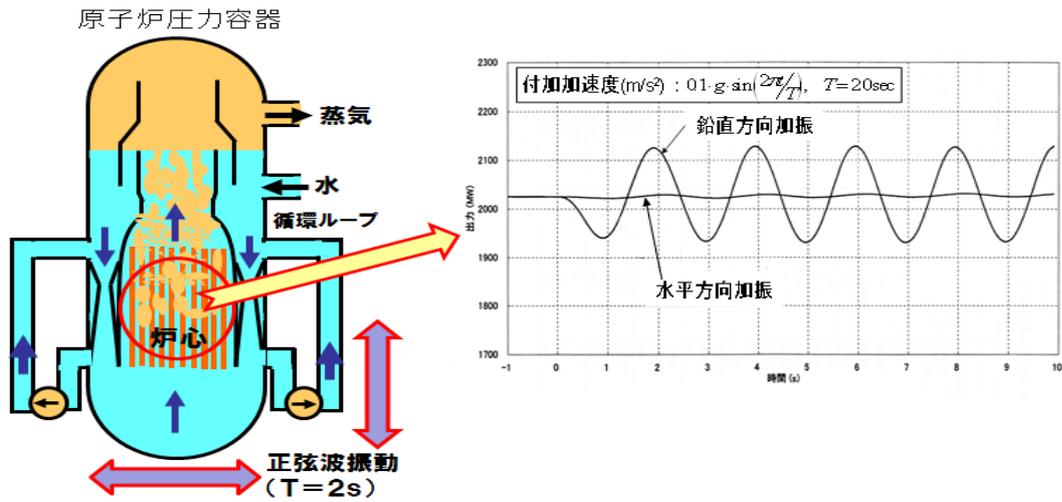


図 7 変動加速度場における炉心出力変動

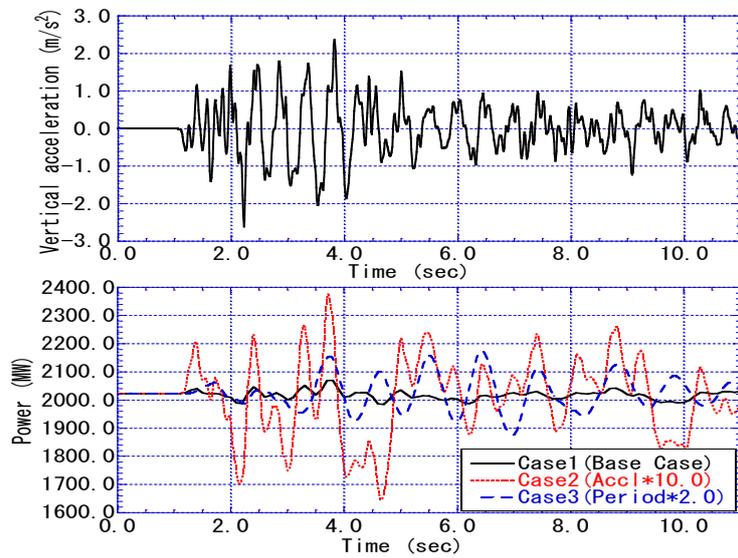


図 8 地震加速度付加時の燃料集合体内沸騰流解析結果の一例

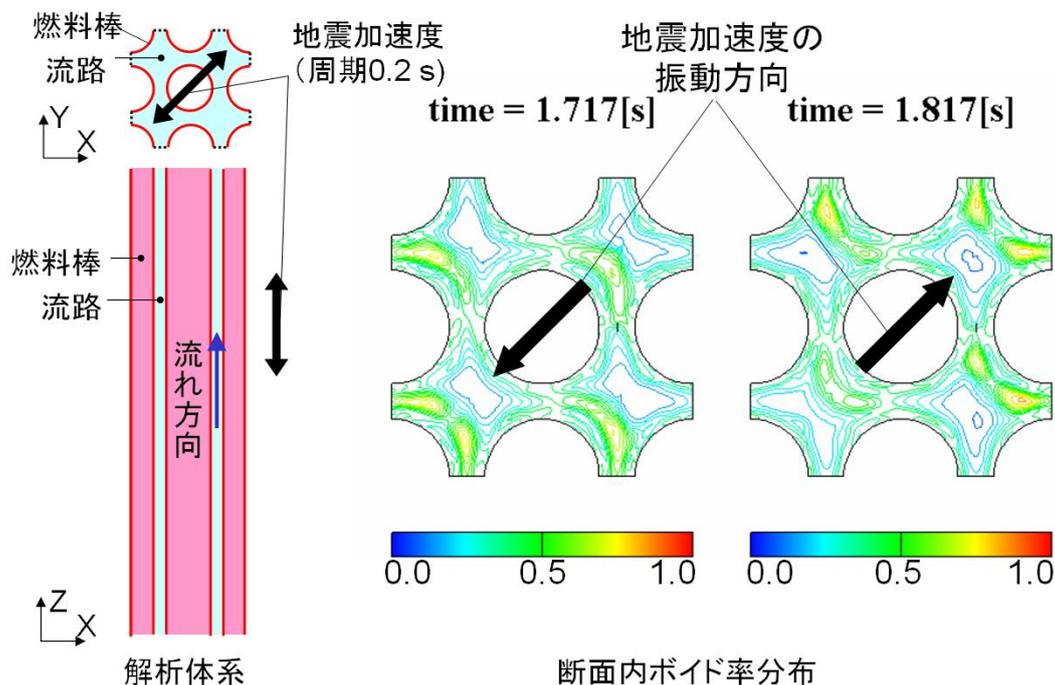


図 9 地震加速度付加時の燃料集合体内沸騰流解析結果の一例

炉内熱流動解析に関しては、行列計算の最適化により、ACE-3D による高空間解像度解析を可能とすることで、燃料集合体内におけるマルチスケールな熱流動現象を再現可能とした。また、機器解析および核熱連成振動解析から提供されるデータを熱流動解析に高精度で反映するため、有限差分法で用いられる高次補間手法を導入した。さらに、検証計算において物理的に妥当な結果が得られることを確認し、これらの改良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 9 に示す。地震加速度と同じ約 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。これらの結果より、当初計画した、地震発生時における燃料集合体内沸騰流解析が可能であることを確認した。

(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。

本年度も昨年度に引き続き、東大堀グループ及び東電小林グループと連携を取りながら、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

①研究のねらい

大規模数値解析におけるマルチスケール構造モデリングを検証するための耐震実験を行う。原子力プラントの建屋と機器の接合部位については、材料物性が異なる鉄筋コンクリートと鋼材の境界箇所であるが、数値解析上は境界節点の多点拘束(MPC)などにより剛結合でモデル化されている。このようなモデル化に対し、過大な地震力の作用に対し許容できる変形状況がどの程度であるかを把握する必要がある。このための機器の定着部位について力学実験を行い、限界的な耐力を評価する。

また、多数の機器から構成され複雑形状の実プラントの地震時挙動については、固有値の異なる機器の連成振動挙動により、振動モードとして着目していない高次モードが卓越し、特定の部位のみに異常振動が生じる恐れがある。これら連成時の振動モードの見落としについて、プラント全体を解析対象とする大規模数値解析を行うことで解明できる可能性がある。このため、機器の異常振動に関する多自由度連成振動系の振動実験を行い、基本的なデータを取得。これらの試験結果は、ADVENTURE_Solid の機能検証に資するとともに、現行の原子力プラントの耐震安全性を実証するためのデータとして活用する。

②研究方法

建屋と機器の間の接合部位については、基礎ボルト・アンカーなど機器の支持構造部位について試験体を製作し、地震荷重を考慮した载荷により基本的な耐荷力特性、破損限界、損傷モードを把握する。実験に当たっては、建屋・機器を数値モデルとして設定し、アンカー部位を力学実験モデルとして連携動作させるハイブリッド実験を適用し、動的荷重を作用させて地震時挙動を再現する。

連成振動実験に関しては、多数の機器の振動系を対象として、固有値の異なる複数の板ばねを用いた連成振動モデルを製作し、振動台加振試験により現象を把握する。連成振動に関する基本的なデータを取得。

③結論

(1) 定着部要素実験

建屋との境界部分である、アンカーボルト、基礎ボルトについては、静的引き抜き実験が数多く行われ、それらの実験結果が各種設計基準に反映されている。ただし、これら定着部に関して、実際の地震力として作用する動的な繰り返し荷重条件での実験は限られており、動的荷重に対する損傷モード、限界耐力に関するデータは乏しい。

大型機器の支持構造部の耐震評価事例では、原子炉本体基礎の1/10スケールの大規模載荷実験などが行われている。これらの重要機器に関しては部位ごとに詳細な検討がなされており、耐震上も非常に剛な設計になっているため、今回検討する要素試験のモデル化上で着目部位からは除外する。

以上より、耐震重要度の低い機器の支持部、配管の支持構造などについて着目することとした。支持条件が多様であるため、一般的なアンカーボルト、基礎ボルトについて分類を行い、既往の検討事例・各種設計基準類を参照し、単純化した形状の要素模型につい

て、試験体の詳細設計を行った。

(2) 連成振動モデルの要素試験

図 10に示すような板ばね支持の架台上に、固有値が異なる枝状の部材が複数配置された試験体を製作し、振動台加振により架台および枝部材の連成振動の要素実験を行った。打撃試験による振動数測定、スイープ加振、地震波加振により試験体の連成振動特性を把握した(図 11～図 13)。

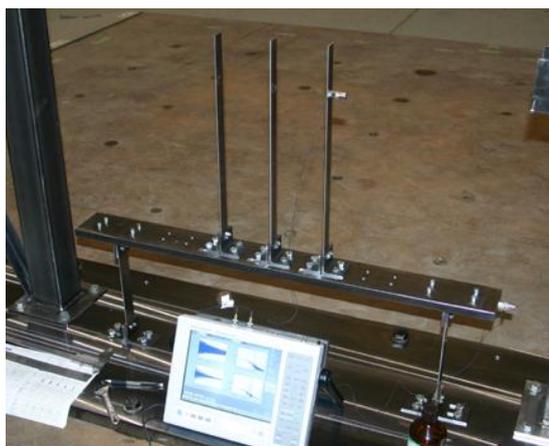


図 10 連成振動モデル

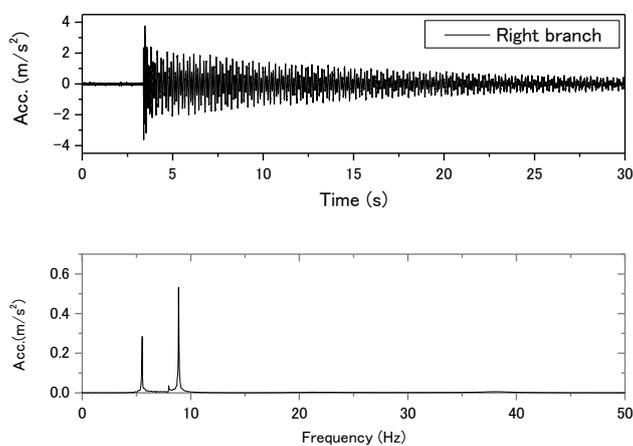


図 11 打撃試験

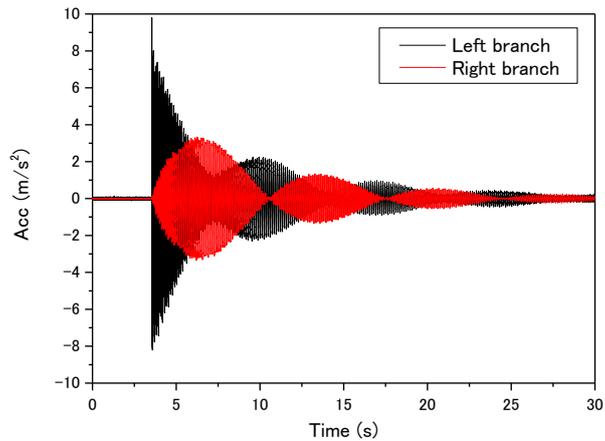


図 12 共振特性

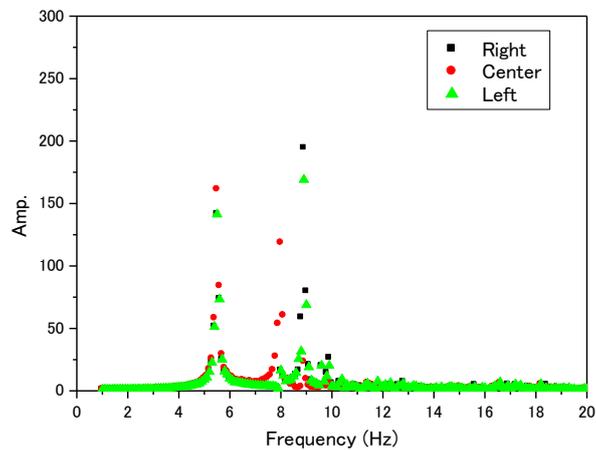


図 13 連成振動

(6) 「東京電力・小林」グループ

原子力発電プラントを多数運営・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。具体的には、実プラントの解析を実現する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、及び現状の運用データなど評価指標データの電子化を図る。さらに、他の研究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する。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、次の作業を進めた。

原子力発電プラントのデジタルデータ作成

a) 原子炉圧力容器(炉内構造物)のデジタルデータ作成(図 14, 表 1)

既往研究等で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、熱流動解

析と連成するための詳細 FEM モデルを作成した。

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)の影響を表現するために、同じく流体解析と連成するための冷却材 FEM モデルデータを作成した。

b) 地質・地盤のデジタルデータ作成支援

実プラントデータのうち研究用に利用可能な下記のデータを公開・提示した。

- 「柏崎刈羽原子力発電所における平成 19 年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動に係る報告書」(東京電力(株), 平成 20 年 9 月 22 日補正)
- 「地震に係る確率論的安全評価手法の整備＝深部地盤速度構造同定に基づく評価に関する検討＝に関する報告書」((独)原子力安全基盤機構, 平成 17 年 12 月)

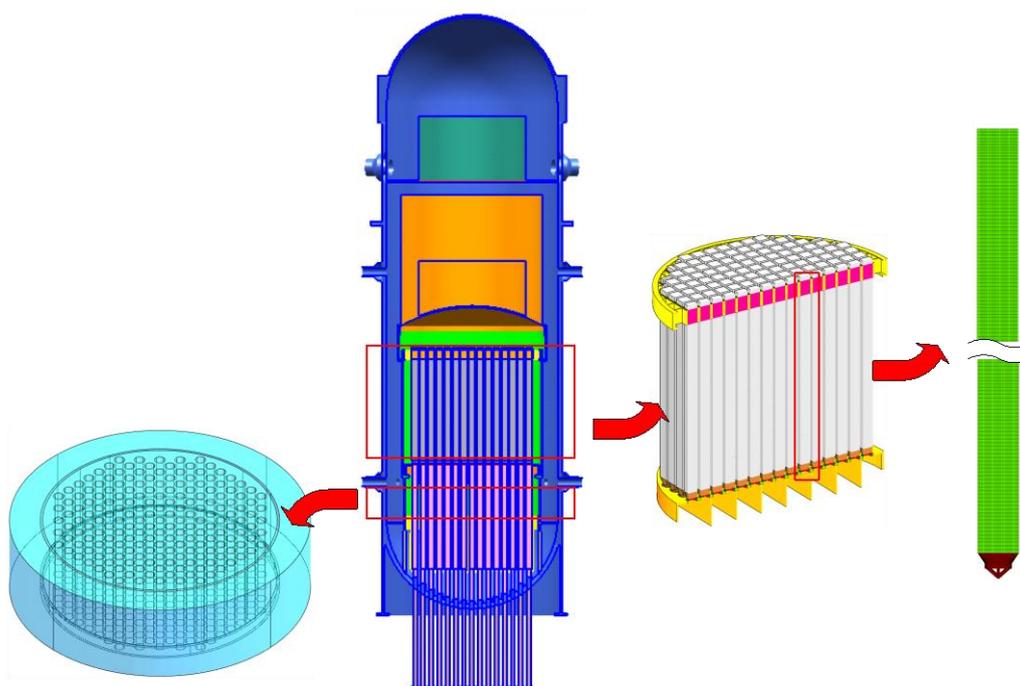


図 14 炉内構造物の詳細モデル

表 1 モデル規模

モデル種別	節点数	要素数	自由度数
燃料集合体(1体)	1,358,245	1,040,341	4,102,449
冷却材 ^{*1}	100,939～ 12,426,430	379,068～ 72,862,983	302,817～ 298,401,510

*1:規模の異なる複数のモデルを作成

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Satsuki MINAMI and Shinobu 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)
- 7) Hideo MACHIDA, Manabu ARAKAWA, Norimichi YAMASHITA and Shinobu 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)
- 8) Satsuki MINAMI and Shinobu YOSHIMURA, Performance Study on Nonlinear Algorithms with Line-Search Techniques for Partitioned Iterative Method of Fluid-Structure Interaction Problems, International Journal for Numerical Methods in Fluids, in press. (DOI: 10.1002/flid.2274)
- 9) Muneo HORI, Kenji OGUNI and Tsuyoshi ICHIMURA, Integrated Simulation for Earthquake Hazard and Disaster Prediction, Journal of Earthquake and Tsunami, 3, pp.121-141, 2009. (DOI: 10.1142/S1793431109000573)
- 10) Tsuyoshi ICHIMURA, Muneo HORI and Jacobo 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)
- 11) Tsuyoshi ICHIMURA and Muneo 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)

- 12) Tsuyoshi ICHIMURA and Muneo HORI, Seismic Structural Response and Strong Ground Motion Simulation based on Multi-scale Analysis, 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2009.