

原子力施設のための3次元仮想振動台システムの 研究開発への取り組み

日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター
西田 明美、鈴木 喜雄、山田 知典、木野 千晶、鶴沢 憲、
宮村 浩子、河村 拓馬、武宮 博、中島 憲宏

1. はじめに

2011年3月の東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故から、一年半以上が経過した。原子力施設の地震に対する安全性の評価は、従来にも増して重要な課題であると位置づけられ、現在、原子力施設の耐震裕度評価等に関する研究開発が関係機関において懸命に行われている。

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）システム計算科学センターでは、2003年から原子力耐震計算科学研究を開始している。ここで、原子力耐震計算科学研究とは、計算機の発達に伴い発展してきた、計算科学技術を生かしたモデリングとシミュレーションを中心とするアプローチによる研究を意味している。構造・流体・熱が複雑にかかわりあう原子力分野においては、実験、特に実大実験は困難であり、原子力耐震計算科学研究の進展が大いに期待されている。

システム計算科学センターでは、原子力耐震計算科学研究の一つの取り組みとして、構造・流体・熱というさまざまな現象をあつかえる3次元仮想振動台システムの研究開発に着手した。原子力施設は複雑かつ巨大な構造物であり、1000万点もの部品から成り立っているといわれている。このような複雑・巨大構造物の挙動をシミュレーションしようとするときには、解析技術だけではなく、データ作成や結果データの整理・分析・評価などのプリポスト処理を含めた総合的なシステムとしての視

点が重要となる。そこで、システム計算科学センターでは、構造部品を部品単位で認識し、必要な解析のためのデータを組み上げていく組立構造解析アプローチを提案し、原子力施設のような複雑・巨大構造物の挙動解析のためのフレームワークを試作した。3次元仮想振動台システムと呼んでいるこの技術において、データは部品単位で構成され、組み上げられたデータで解析を行った後、部品単位で結果データの処理や可視化処理を行うことが可能となる。これまでに、原子力機構大洗研究開発センターにある高温工学試験研究炉（High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR）の建屋や機器のデータを用いた数値実験を行い、原子力施設全体での大規模地震応答シミュレーションが可能であることを実証した。現在は、巨大地震等による地震応答シミュレーションに不可欠な非線形シミュレーション技術の開発に着手し、その適用として、耐震裕度評価への取り組みを開始している。

本稿では、3次元仮想振動台システムのフレームワーク、システムの核となる組立構造解析アプローチ、結果評価のための可視化技術、および、3次元仮想振動台システムの適用研究として2011年より着手した地震リスク評価への試みについて述べる。

2. 3次元仮想振動台システムのフレームワーク

図1に、3次元仮想振動台システムのフレ

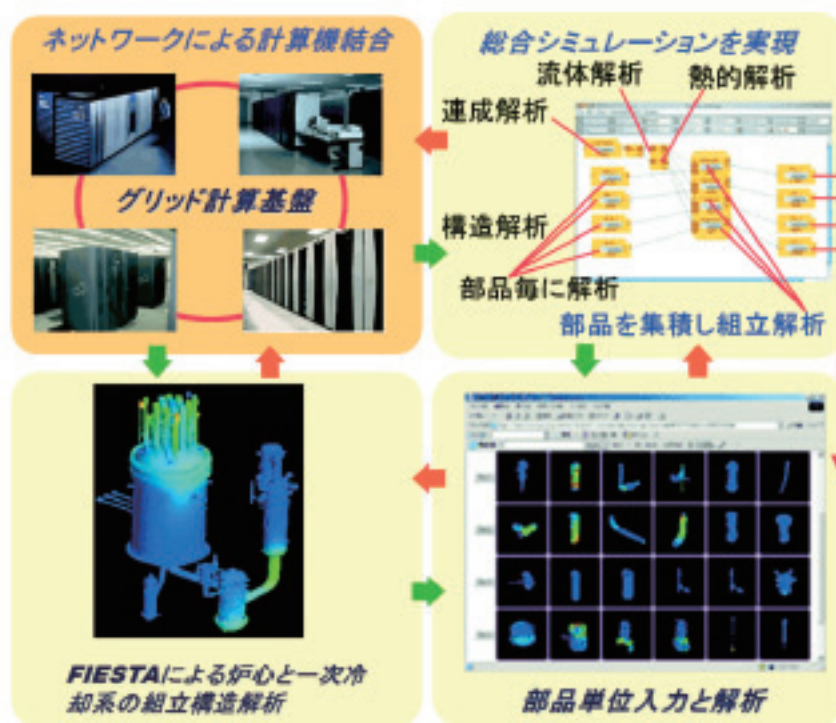


図1 3次元仮想振動台システムのフレームワーク概要
(FIESTA：3次元仮想振動台システムの有限要素コードのひとつ)

ームワークを示す。3次元仮想振動台システムのフレームワークには、システム計算科学センターが長年培ってきた大規模数値計算技術やITBLプロジェクト^{注1)}等の計算科学技術が生かされている。ネットワークによる計算機結合環境において、複数のプログラムやデータの関係図を描画できるTME (Task Mapping Editor) 機能等を利用し、部品ごとのデータの集積や解析を実行する。本フレームワークのプロトタイプを用いて、これまでに、原子力機構内の4つのスーパーコンピュータをネットワーク結合した計算機環境で合計約2億自由度規模の大規模振動解析を実現し、提案するフレームワークの有効性を実証している。

3. 3次元仮想振動台システムにおける組立構造解析アプローチ

図2に組立構造解析アプローチの概要を示す。3次元仮想振動台システムでは、CADデータやメッシュデータは部品単位で構成さ

れ、解析の目的に応じて必要な部品を組み合わせることが可能である。前述の数値実験では、組立構造解析アプローチにより部品データを各計算機に配置し、ネットワーク経由で連携させる解析を行っている。

組立構造解析アプローチでは、多くの部品を組み上げていくため、部品間の結合処理が不可欠となる。部品間の結合面におけるメッシュは一般的に不整合となり、それらの接続には現実の結合面の物理状態に応じた接続方法を選ぶ必要がある。これまでに、ペナルティ法、多点拘束法等が実装されており、今後、r-法、マルチスプリングなどを追加していく予定である。複数の接続方法を実装することで、システムの利用者は物理状態に応じた接続方法を選ぶことが可能となる。

4. 3次元仮想振動台システムにおける可視化技術

3次元仮想振動台システムで扱う複雑・巨

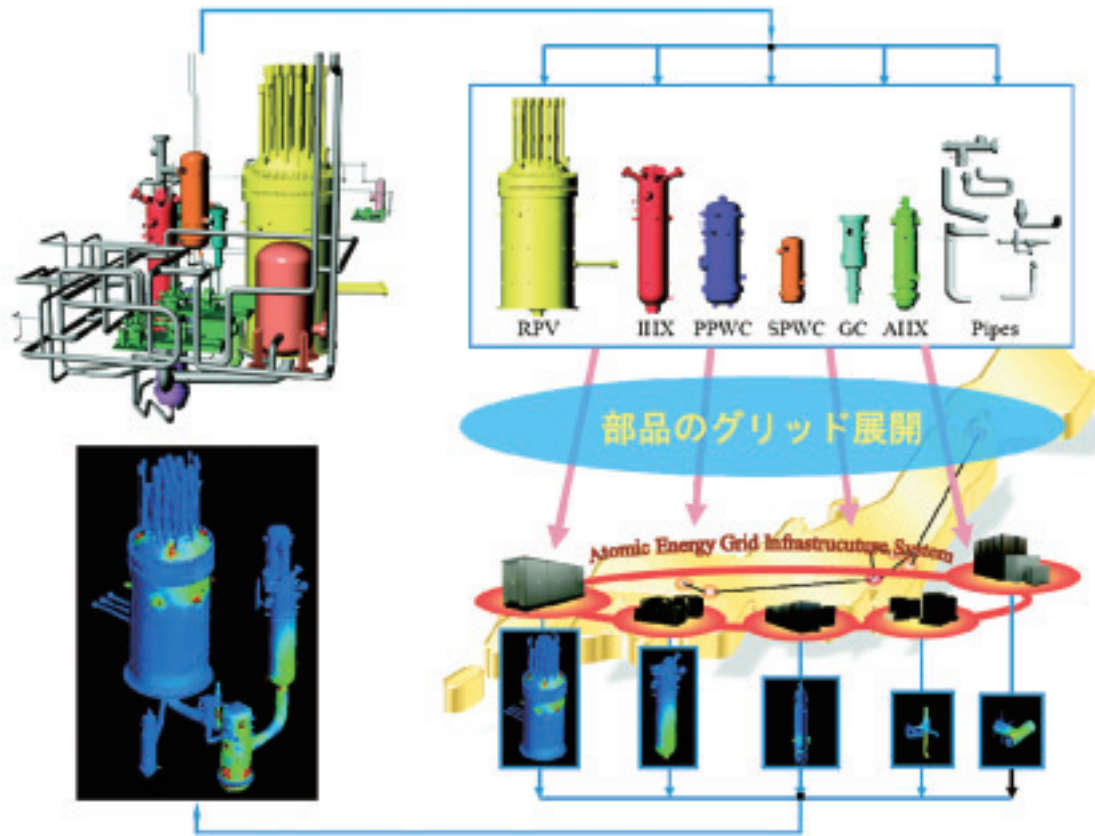


図2 組立構造解析アプローチの概要

大構造物の解析結果は、膨大なデータ量となるため、その分析・評価を行う際には地震時に影響を受けやすい箇所（重要箇所）の見逃しがないよう留意する必要がある。また、重要箇所を捉えた後は、複雑形状における詳細分析が必須である。そこで、システム計算科学センターでは、時間と空間の変化を同時に捉えることで見逃しを防止し、かつ、詳細分析可能とする可視化技術の開発に取り組んでいる。図3に時空間データマップと呼んでいる可視化の例を示す。時間と空間を二次元的に描画することで、重要箇所の見逃しを防ぐ技術である。また、図4に粒子ベースボリュームレンダリングと呼んでいる可視化の例を示す。本手法は、内部空間まで透視することで、時空間データマップで発見した重要箇所をより詳細に分析できるように工夫された可視化技術である。これらの可視化技術を用いることで、解析結果から地震時に影響を受け

やすい部品を見逃すことなく発見し、分析することが可能となる。

5. 3次元仮想振動台システムの地震リスク評価への適用

原子力施設の地震リスク評価には、地震起因事象に関する確率論的リスク評価（Probabilistic Risk Assessment : PRA）、いわゆる地震PRAがある。地震PRAは、設計想定を超える地震動の発生可能性を考慮して、安全を一層確実にするアクシデントマネジメント強化策の検討に有力な手段であるが、一方で、その活用は円滑に進んでいない。その原因として、現状では、地震動の発生頻度を評価するいわゆる地震ハザード評価等に不確かさが大きいとされ、その不確かさの解釈や扱い方に十分な検討や合意形成がなされていないこと、サイトへの入力地震動と個々の機器損傷メカニズムとの関係が明瞭ではな

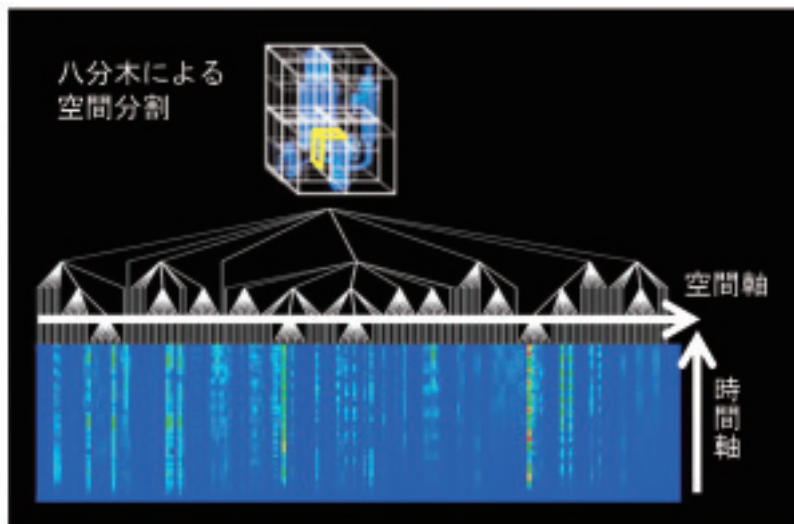


図3 時間と空間の値の分布を提示する時空間データマップによる可視化例



図4 粒子ベースボリュームレンダリングによる可視化例

いことなどがあげられる。

そこで、システム計算科学センターでは、従来とは異なる新しい地震リスク評価として、3次元仮想振動台システムによるモンテカルロシミュレーション (MCS) を用いた地震リスク評価手法の提案を目的とし、2011年、研究開発に着手した。従来の地震ハザード評価・脆弱性評価・事故シーケンス評価^{注2)} という評価の流れは変えずに、個々のばらつきの分布を正規分布等で仮定することなく、すべてをシミュレーションにより求める。本稿では、現在取り組んでいるこのシミュレーションベースの地震リスク評価について、簡単に述べる。

従来のPRAでは、地震ハザード評価と脆弱性評価を分離し、さらに、脆弱性評価において建屋と機器を分離して解析・評価を行っている。現在取り組んでいる地震リスク評価は、これらを分離せずに、個々の地震動に対する一連のシミュレーションとして評価する。つまり、地震動は想定サイトにおける周辺断層からの発生地震を想定し、震源特性のばらつきを考えてMCSで地震動を作成する。得られた地震動を用いて、原子力施設建屋の3次元詳細モデルによる地震応答解析を実施し、機器の入力となる床応答時刻歴を求め、得られた床応答時刻歴を

用いて機器にかかる荷重や応力を求め、耐力と比較して損傷しているかどうかの評価を行う。これらをそのサイトで起こりうる多数の地震動に対してそれぞれ行い、データ処理を行うことで、地震動ごとの炉心損傷事故発生確率を評価することが可能となる。

本手法を用いることで、地震ハザード、フラジリティ、事故シーケンスの一連の評価を一貫して実施できるので、機器の損傷に大きくかわるパラメータの特定や、対象とする機器が損傷しやすい地震動の震源特性の同定、また、機器間の損傷の相関なども直接評価できるメリットがある。なによりも、得られた結果がどのような条件に基づくものであるかが一目瞭然である。得られた結果の分析を行うことで、どのような地震が発生した場合にはどの機器が損傷している可能性があるか等、対象建物の耐震裕度や実耐力の評価へとつなげられる可能性がある。

現在、まずは3次元仮想振動台システムの入力となる地震波の生成に着手している。原子力機構の大洗研究開発センターがある大洗地区を対象とし、大洗地区周辺で起こりうる地震動をモンテカルロシミュレーションで発生させ、発生頻度に応じた地震波を抽出し、データとして蓄えつつある。また、2012年より文科省原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ「リスクマネジメント基盤技術としての地震リスク評価の信頼度向上に関する研究」を開始し、PRAで重要となる認識論的不確実さにかかわるパラメータの分析等にも着手したところである。

6. おわりに

3次元仮想振動台システムの要素技術である組立構造解析アプローチ、結果評価のための可視化技術、および、その適用研究としての原子力施設の地震リスク評価に関する研究について紹介した。本稿では、構造を中心とする研究開発を中心に紹介したが、流体や熱

に関する研究開発も進めつつある。流体では、燃料プールのスロッシングによる逸水評価等を、また、流体と構造の連成解析のための解析連携ツール開発等を進めている。熱では、熱応力解析のためのツール整備を進め、次世代高速増殖炉（Fast Breeder Reactor : FBR）の蒸気発生器管板設計の課題解決に貢献した。

3次元仮想振動台システムを原子力施設の地震に対する安全性を確認するための耐震裕度評価に生かすためには、システムとしての要素技術開発はもちろん、適切なモデルデータの作成、適切な境界条件の設定、そして、適切な地震波の入力が必要となる。現実の挙動をモデル化しシミュレーションする、原子力耐震計算科学のモデリング&シミュレーション研究の発展のためには、計算科学だけではなく実験科学等とも連携し、融合横断的に現象解明に取り組むことが重要である。

注1)

e-Japan重点計画に位置づけられた国家プロジェクトInformation Technology Based Laboratory (ITBL) 計画(2001年度～2005年度)のこと。その目的どおり、インターネット上に散在する計算資源、知識、ノウハウなどをネットワーク上に共用化するための研究開発を実施し、複雑で高度なシミュレーション、遠隔地との共同研究を容易に行える仮想研究環境を構築。

注2)

従来の地震PRAは、(1)サイトを襲う地震動の強さに応じた発生頻度を推定する地震ハザード評価、(2)地震動強さに応じた機器等の損傷確率を評価するフラジリティ評価、(3)炉心損傷に至るシナリオ(事故シーケンス)を同定・分類し、その発生頻度(年あたりの発生確率)を評価する事故シーケンス評価の3段階で実施される。