

「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 17 年度採択研究代表者

松浦 充宏

東京大学大学院理学系研究科・教授

観測・計算を融合した階層連結地震・津波災害予測システム

## 1. 研究実施の概要

本研究の目的は、プレート運動による地殻応力の蓄積を経て大地震が発生し、地震波が構造物を揺らし、津波が海岸部を襲うまでの一連の過程を再現・予測する観測・計算融合の階層連結型高精度シミュレーション・システムを開発することにある。この目的を達成するため、第1フェーズ（平成17～19年度）では、相互に関連する要素モデルを結合することで、地震発生予測、強震動／津波予測、及び人工構造物振動予測の3つのサブシステムを開発し、現実に即したシミュレーションを通じて、その実効性を検証した。また、これと並行して、大規模連成シミュレーションのための階層連結プラットフォームの開発を進めた。第2フェーズ（平成20年度～22年度）では、上記の3つのサブシステムを高度化すると共に、それらを階層連結した全体システムを構築し、観測データとモデル計算を融合した地震・津波災害予測シミュレーションを実施する。

## 2. 研究実施内容

（文中にある参照番号は4.(1)に対応する）

平成19年度は、地震発生予測、強震動／津波予測、人工構造物振動予測の3つのサブシステムの実効性を、現実に即したシミュレーションを通じて検証すると共に、大規模連成シミュレーションのための階層連結プラットフォームの開発を進めた。

### 2.1 地震発生予測サブシステムの開発と検証

松浦・福山グループは、2003年十勝沖地震(M8.0)を例にとり、プレート境界での準静的応力蓄積—動的破壊伝播—地震波動伝播の連成シミュレーション(図1)を行い、現実

的なプレート境界面形状，摩擦特性，地殻構造等を設定すれば，将来的に発生が予想されるプレート境界地震による地震動を，物理モデルに基づいて理論的に予測することが可能であることを示した [1, 2]。

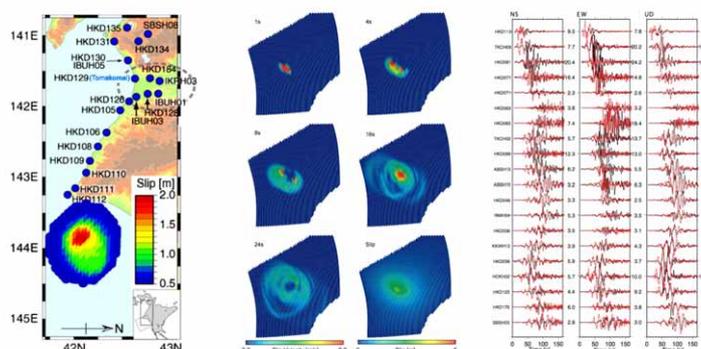


図 1：応力蓄積—動的破壊伝播—地震波動伝播の連成シミュレーション（福山他）。左）2003 年十勝沖地震の震源域と観測点配置。中）断層すべり速度の時間変化と地震波の放射（右下は最終すべり量分布）。右）計算波形（赤）と観測波形（黒）の比較。

また，数値シミュレーションと地震・地殻変動観測の融合に向けて，地震の CMT データから地殻応力を推定するインバージョン解析手法 [3] を開発し，15,000 個の地震の CMT データ (NIED, Seismic Moment Tensor Catalogue) から太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込む日本列島全域の地殻応力パターンを推定した (図 2 左)。更に，直接的及び間接的先験情報を観測データと結合した統合逆化公式に基づく測地データインバージョン解析手法 [4] を開発し，GPS データから北海道・東北地域のプレート境界面の固着状態を明らかにした (図 2 右)。

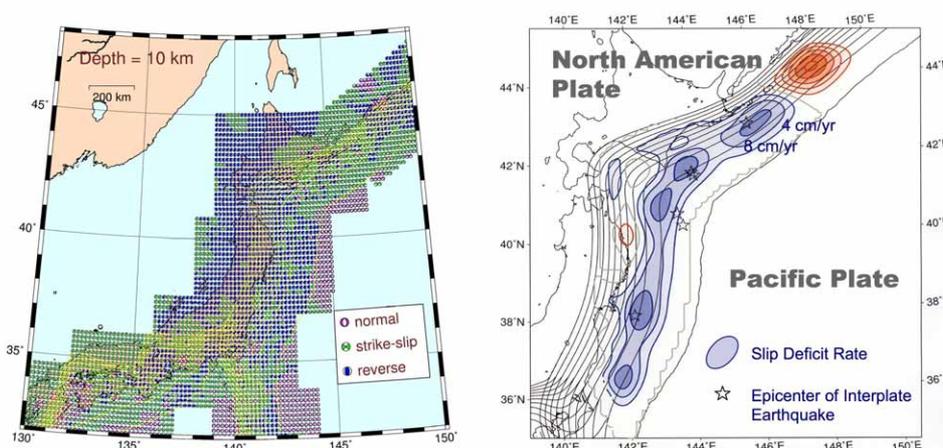


図 2：日本列島域の地殻応力場とプレート間カップリング。左）地震の CMT データのインバージョン解析で推定した日本列島域の地殻応力パターン（寺川・松浦）。右）GPS データのインバージョン解析で推定した北米—太平洋プレート境界のすべり遅れ速度分布（橋本他）。コンター間隔は 4cm/yr。星印は過去 50 年間に発生したプレート間大地震の震央位置。

## 2.2 強震動／津波予測サブシステムの開発と検証

古村グループは、2007年能登半島地震等による強震動と長周期地震動シミュレーションを実施し、強震波形記録との比較を通じて、その再現性を検証した [5, 6, 7]。その検証結果に基づいて関東平野の堆積層モデルの高精度化を進め、関東周辺域の M7 クラスの内陸地震による周期2秒以上の長周期地震動の高精度予測を可能にした [8, 9]。

また、前年度開発した地震－津波連成シミュレーションコードの津波計算法を、従来の二次元長波近似から三次元ナビエ・ストークス方程式の直接解法に拡張し、海底変動に起因する津波発生過程を含めた、より現実的な津波発生伝播シミュレーションが可能となった。この新しい地震－津波連成シミュレーションコードを用いて、2007年千島列島沖の地震津波の評価を行った。また、1896年明治三陸津波地震の地震動および津波を再現し、日本海溝に厚くたまった堆積層の海底地殻変動への効果が大津波と長周期地震動を発生させるというメカニズムを明らかにした (図3)。

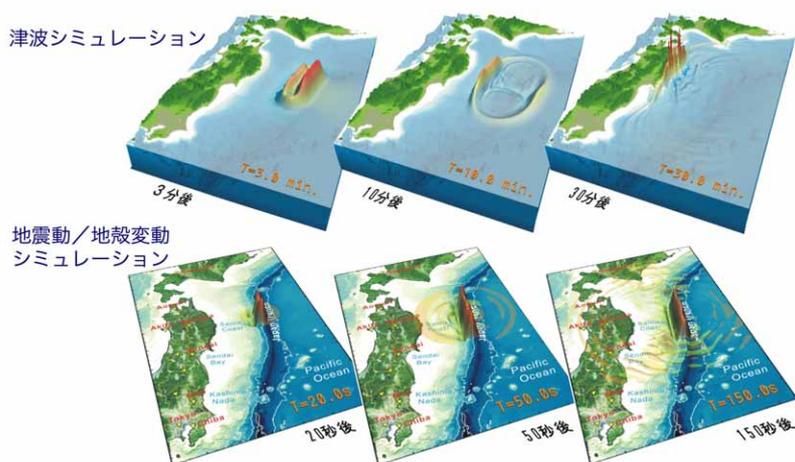


図3：海底堆積層を考慮したモデルによる1896年明治三陸地震の地震－津波連成シミュレーション (古村・齋藤)。下段：地震発生から20秒、50秒、150秒後の地震波伝播と海底地殻変動。上段：地震発生から3分、10分、30分後の津波伝播。

## 2.3 人工構造物振動予測サブシステムの開発

市村グループは、地震波動伝播と構造物応答の動的相互作用を考慮した連成シミュレーション手法及び広域都市震災シミュレーション手法の開発を行った。高精度かつ高分解能な震災予測手法として、断層運動から構造物応答までの一連のプロセスを三次元動的数値解析することが考えられるが、膨大な計算量のためその実現は難しいとされている。本研究では、上記の数値解析モデルを、断層から地表面近傍までのモデルと構造物を含む地表面近傍のモデルに階層分割して解析することにより計算量の軽減を図った。階層解析手法によるシミュレーションの精度を検証するため、全体システムを直接三次元解析した場合と比較し、良好な結果を得た [10]。この手法が確立されれば、理学分野の地震動シミュレ

ーションと工学分野の構造物動的解析を適切に結びつけることが出来、より高精度かつ高分解能な震災予測が可能になる。また、広域での都市震災シミュレーションを行う上で、都市のデジタルデータと震災シミュレーションの効率的な連成は必須であるが、両者のデータ構造は必ずしも親和性が高いとは言えない。本研究では、両者のデータ構造を考慮した効率的な連成手法についても検討を行った[11]。

また、長嶋グループは、湾岸地帯に設置されている石油貯蔵タンクに地震波が入力した場合の液面およびタンク構造の動的応答シミュレーションのための、有限要素法 (FEM) に基づく構造解析コード、ポテンシャル流解析コード、及びそれらの連成解析コードを開発整備し、観測地震波 (2003 年十勝沖地震の加速度地震波 HKD129 EW) を入力データとして石油貯蔵タンクの液面の動的応答を評価した。拡張有限要素法 (X-FEM) を用いれば自由表面形状をメッシュと独立に定義でき、石油タンク内部の液位が変化した場合に対しても流体や構造の有限要素メッシュを作成し直す必要がない。そこで、X-FEM を円筒容器のスロッシング解析に適用してみたところ、良好な結果が得られた [12]。

## 2.4 階層連結プラットフォームの構築

奥田グループは、多階層解析支援データリザボア開発の一環として、多種多様・膨大な電子データを効率良く共有するコミュニケーションツールとしてのグループウェアを開発した。特にファイルマネジメント部分については、各ファイルやユーザや電子掲示板を意味的なネットワークで有機的に結びつけ各ユーザにとって重要な情報を効率良く自動抽出するシステムとした。データリザボアの現在の基本的な機能は、ファイル共有機能、電子掲示板機能であり、タグ付けも行えるようになっている。ビジネスシーンで見られる従来のグループウェアとは異なり、計算科学分野の複数研究機関共同体における「各地に散在する研究機関が同時に関わり多種多様で膨大なデータを扱う」状況に対応できる他、タグ付けの機能を解析モジュールに拡張させることで連成解析のサポートも可能である。コミュニケーション、ファイルマネジメント、連成シミュレーションを同時にサポートする仕組みは、これまでの計算科学研究支援ツールには見当たらず、新たなグリッド利用形態として意義がある。また、複数のクラスタ間で並列有限要素法アプリケーションを連携して稼働させるための環境構築や、アプリケーションのタイプに応じた運用効率化に関する検討を実施した [13]。

中島 (松浦グループ) は、接触問題、不均質問題などの悪条件問題のための並列前処理手法の開発を実施した。大規模並列問題を解く場合には、安定で並列性能の高い前処理手法とともに、適切な領域分割が不可欠である。有限要素法における要素特性を利用した、「選択的フィルイン」、「選択的オーバーラップ」を開発し、悪条件問題において安定性と高い並列性能を得ることができた [14]。「選択的オーバーラップ」の代わりに Henon & Saad (2007) の Hierarchical Interface Decomposition (HID) を適用する手法についても検討を実施した [15, 16]。更に、並列多重格子法への適用も実施し、安定性と高い並列性能、スケアラ

ビリティを得ることができた [17]。これらの手法を様々なケースについて適用し、大規模悪条件問題における並列前処理、領域分割手法に関する成果を原著論文 [18, 19] にまとめ。「次世代スーパーコンピュータ」向けの並列プログラミングモデルとして、Flat MPI と Hybrid の性能評価を最新のハードウェアを使用して実施した [20, 21]。また、HID を適用した並列前処理手法についても Hybrid 並列プログラミングモデルを実装し、最新のハードウェアを使用して性能を評価した [15, 16, 21]。現状では、メモリバンド幅による制約が大きく、マルチコアプロセッサにおいても Flat MPI が有利であるが、コア数が  $10^5$  を超える場合も想定して、Hybrid 並列プログラミングモデルに関する研究を継続していく必要がある。

### 3. 研究実施体制

#### (1) 「松浦」グループ

① 研究分担グループ長: 松浦 充宏 (東京大学理学系研究科、教授)

#### ② 研究項目

・複雑なテクトニック環境の下にある日本列島域を対象として、プレート運動に依る地殻応力の蓄積から破壊核の形成を経て大地震に至るまでの一連の過程を、観測データと理論モデルを融合した大規模シミュレーションにより再現・予測する。

#### (2) 「古村」グループ

① 研究分担グループ長: 石川裕 (東京大学地震研究所、教授)

#### ② 研究項目

・地震波動伝播と津波発生伝播のシミュレーションを行う。断層面上での動的破壊により放射された地震動を入力として、不均質媒質中を地震波が伝播し、地表に強震動を生成する過程を FDM によりシミュレーションする。これを入力地震動として、人工構造物振動シミュレーションとの連成解析を実施する。また、地震断層運動による海底地殻変動を、海底地形と地殻の物性パラメータを組み込んだ大変形 FEM を用いて計算し、津波の発生と伝播のシミュレーションを行う。

#### (3) 「奥田」グループ

① 研究分担グループ長: 奥田 洋司 (東京大学人工物工学研究センター、教授)

#### ② 研究項目

・観測データとモデル計算を融合した大規模連成計算を地球シミュレータ上で効率良く実施し、プログラム間のデータ交換、大規模データ可視化処理を行うための階層連結プラットフォームを構築する。

(4) 「市村」グループ

① 研究分担グループ長:市村 強(東京工業大学大学院理工学研究科、准教授)

② 研究項目

・強震動に人工構造物が応答して地震動災害が起きる最終局面を、地震波動伝播と構造物応答の動的相互作用を考慮した連成シミュレーションにより再現・予測する。

(5) 「長嶋」グループ

① 研究分担グループ長:長嶋 利夫(上智大学、教授)

② 研究項目

・配管構造や石油貯蔵タンクなど湾岸地帯に設置されているプラント機器構造物に地震波が入力した場合の動的応答を高精度かつ高速にシミュレーションする計算コード開発を行う。

(6) 「福山」グループ

① 研究分担グループ長:福山 英一(防災科学技術研究所、総括主任研究員)

② 研究項目

・境界積分方程式法による動的破壊シミュレーションコードと差分法による地震波動伝播コードを開発し、それらを松浦グループの数値境界積分方程式法による応力蓄積シミュレーションコードと連結することで、地震発生の物理過程を考慮した定量的な地震動シミュレーションを行う。

#### 4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

- [1] Fukuyama, E., Fault structure, stress, friction and rupture dynamics of earthquakes, *Advances in Earth Sciences: From Earthquakes to Global Warming*, Imperial College Press, London, 109-132, 2007.
- [2] 福山英一, 地震の動的破壊とアスペリティ, *月刊地球*, 29 巻 6 号, 392-396 頁, 2007.
- [3] Terakawa, T. and M. Matsu'ura, CMT data inversion using a Bayesian information criterion to estimate seismogenic stress fields, *Geophys. J. Int.*, 172, 674-685, 2008.
- [4] Matsu'ura, M., A. Noda, and Y. Fukahata, Geodetic data inversion based on Bayesian formulation with direct and indirect prior information, *Geophys. J. Int.*, 171, 1342-1351, 2007.
- [5] Furumura, T. and T. Hayakawa, Anomalous propagation of long-period ground motions recorded in Tokyo during the 23 October 2004 Niitgata-ken Chuetsu (Mw6.6) earthquake, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, 3, 863-880, 2007.

- [6] Furumura, T., Hayakawa, M., Nakamura, K. Koketsu, and T. Baba, Development of long-period ground motions from the Nankai Trough, Japan, earthquakes: Observations and computer simulation of the 1944 Tonankai (Mw8.1) and the 2004 SE Off-Kii Peninsula (Mw7) Earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 2007 (accepted).
- [7] Furumura, T. and B.L.N.Kennett, A scattering waveguide in the heterogeneous subducting plate, *Advances in Geophysics, Scattering of Short-Period Seismic Waves in Earth Heterogeneity*, Eds. H Sato and M. Fehler, Elsevier, 2007 (accepted).
- [8] 古村孝志・竹内宏之, 首都圏直下の地震と強震動—安政江戸地震と明治東京地震, *地学雑誌*, 116, 3, 431-450, 2007.
- [9] 古村孝志・武村俊介・早川俊彦, 2007年新潟県中越沖地震 (M6.8) による首都圏の長周期地震動, *地学雑誌*, 116, 3, 576-587, 2007.
- [10] Ichimura, T., M. Hori, and H. Kuwamoto, Earthquake Motion Simulation with Multi-Scale Finite Element Analysis on Hybrid Grid, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, 4, 1133-1143, 2007.
- [11] Hori, M. and T. Ichimura, Current State of Integrated Earthquake Simulation for Earthquake Hazard and Disaster, *Journal of Seismology*, DOI: 10.1007/s10950-007-9083-x, 2007 (in press).
- [12] Nagashima, T., Sloshing Analysis of a Liquid Storage Container using the Level Set X-FEM, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 2008 (in press).
- [13] 村岡雅江・奥田洋司, Cluster-of-Clusters 環境における有限要素解析の実用性評価, *日本機械学会論文集 (A 編)*, Vol.73, No.733, 981-988, 2007.
- [14] Nakajima, K., Parallel Preconditioning Methods with Selective Fill-Ins and Selective Overlapping for Ill-Conditioned Problems in Finite-Element Methods, *Lecture Notes in Computer Science 4489*, 1085-1092, 2007.
- [15] 中島研吾, 階層領域分割によるマルチステージ並列前処理手法へのハイブリッド並列プログラミングモデルの適用, *情報処理学会研究報告 (HPC-110)*, 25-30, 2007.
- [16] Nakajima, K., Parallel Multistage Preconditioners based on a Hierarchical Graph Decomposition for SMP Cluster Architectures with a Hybrid Parallel Programming Model, *Lecture Notes in Computer Science 4782*, 384-395, 2007.
- [17] 中島研吾, 階層型領域分割による並列多重格子法, 「ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム HPCS2008」論文集 p.115-122, 2008.
- [18] Nakajima, K., Strategies for automatic selection of parameters in parallel preconditioning methods for ill-conditioned problems in finite-element applications, *Proceedings of The Second International Workshop on Automatic Performance Tuning (iWAPT2007)*, 53-62, 2007.
- [19] Nakajima, K., Strategies for Preconditioning Methods of Parallel Iterative Solvers in Finite-Element Applications on Geophysics, *Springer e-book series on computational geosciences*, 2008 (in press).

- [20] Nakajima, K., The Impact of Parallel Programming Models on the Linear Algebra Performance for Finite Element Simulations, Lecture Notes in Computer Science 4395, 334-348, 2007.
- [21] 中島研吾, GeoFEM ベンチマークによる Hitachi SR11000/J2 の性能評価, 情報処理学会研究報告 (HPC-114), 205-210, 2008.