

「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

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、地震波が人工構造物を揺らし、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シミュレーション・システムの開発を目的として、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し、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構築した。第2フェーズ(平成 20 年度～22 年度)では、これらのサブシステム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 20 年度は、現実的な状況設定の下でのシミュレーションを通じて各サブシステムの実効性を検証すると共に、観測データとモデル計算の融合に向けた広域 GPS／地震観測データの逆解析手法の開発を行った。また、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、ペタフロップス級並列計算機の利用を視野に入れて、東京大学情報基盤センターの T2K オープンスパコン上での実装を試みた。

### 2.1 地震発生予測サブシステム

#### (a) 地震／地殻変動データの逆解析

松浦グループは、観測データとモデル計算の融合に向け、地震の CMT データから地殻応力を推定する逆解析手法及び GPS データからプレート境界のすべり速度を推定する逆解析手法を開発してきた。平成 20 年度は、CMT データ逆解析手法を防災科学技術研究所の F-net のデータに適用して日本列島全域の 3次元地殻応力パターンを推定した<sup>1)</sup>。また、プレート定常沈み込みによる粘弾性変形の影響<sup>2,3)</sup>を考慮した GPS データ逆解析手法を国土地理院の GONET のデータに適用して北海道～東北地域のプレート境界の詳細なすべり速度分布を求め、5つの顕著なすべり遅れ領域が過去 100 年間に発生したプレート間大地震の震源域と完全に一致することを明ら

かにした<sup>4)</sup>(図1)。

#### (b) 地震発生と波動伝播の連成シミュレーション

福山グループは、地震の動的破壊パラメータと破壊伝播速度の定量的関係<sup>5)</sup>及び松浦グループによる上記のGPSデータ逆解析結果に基づいて2003年十勝沖地震(M8.0)の震源域の摩擦特性パラメータを設定し、プレート沈み込みに伴う準静的応力蓄積-動的破壊伝播-地震波動伝播の連成シミュレーションを実施した。シミュレーション結果と観測波形データの詳細な比較・検討により、プレート境界面形状、摩擦特性、地殻構造等を適切に設定すれば、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。

### 2.2 強震動/津波予測サブシステム

#### (a) 2008年中国四川地震の長周期地震動シミュレーション

古村グループは、並列地震動計算コード<sup>6)</sup>を用いて2008年中国四川大地震の際に北京・上海で観測された長周期地震動のシミュレーションを実施し、卓越周期10~20秒で最大地動振幅5cm、振幅1cm以上の揺れの継続時間1~2分であったことを明らかにした。また、長周期地震動の生成には、地震規模(M7.9)に加え、長周期の表面波を伝えやすい大陸地殻構造が原因していることが分かった。

#### (b) 地震-津波連成シミュレーションコードの高度化

前年度に開発した地震-津波連成シミュレーションコード<sup>7)</sup>を用いて、2004年紀伊半島南東沖の地震と2007年千島列島の地震の大規模津波シミュレーションを実施し、海底ケーブル津波計との比較から、計算手法の有効性を確認した<sup>8)</sup>。また、従来の線形長波近似式による計算との比較から、深海を伝わる分散波を考慮して津波の波高と継続時間を正しく見積もるためには、非線形津波方程式に基づく計算が不可欠であることを示した(図2)。

#### (c) 次世代スパコンに向けた大規模並列計算コードの整備

次世代スパコンによる大規模並列計算を念頭に置き、地震波計算コード(Seism3D3)と津波計算コード(SOLA3D)の高速化チューニングをベクトル計算機(地球シミュレータ;ES)とスカラー計算機(T2Kスパコン-東大)を用いて実施した[古村, スーパーコンピューティングニュース, 東大情報基盤センター, 10, 2009]。Flat MPIによる並列計算のStrong Scalingテストを行ない、地震波コードでは最大10,000CPU程度まで、また津波コードでは2,000CPU程度までの並列計算でスケラビリティを確認した。このときの地震波計算コードの実効性能(CPUの理論性能に対する割合)は、ESで60%、T2Kで8%、また津波計算コードに関してはESで20%、T2Kで4%であった。

### 2.3 人工構造物振動予測サブシステム

#### (a) 都市構造物群の地震時挙動評価

都市構造物群の地震時挙動評価の高分解能・高精度化は、三次元数値解析モデルを用いた断層破壊過程、地殻内波動伝播、地表面近傍での増幅及び構造物の動的挙動の一括シミュレーションを行えば可能だが、膨大な計算資源が必要とされるため、実現は難しい。市村グループは、階層型解析の考え方を導入し、断層から構造物までの解析を断層から地表面までの解析(地震学における波動伝播の計算)と地表面近傍と構造物の解析(地震工学における地盤-構造物

の動的解析)に適切に分解することで、必要計算資源を軽減するシミュレーション手法を提案した<sup>9,10)</sup>。

#### (b) 貯蔵タンクの流体構造連成解析手法の開発

長嶋グループは、強連成解析手法に基づく連成解析プログラムを新に開発し、観測地震波を入力データとして石油貯蔵タンクの液面の動的応答解析を実施した。また、様々な液位についての解析モデルの作成を効率化するために拡張有限要素法(X-FEM)の導入を試み、自由表面の応答解析を実施し、従来方法による結果と比較し同等な結果が得られることを確認した<sup>11)</sup>。

### 2.4 階層連結プラットフォーム

#### (a) 多階層解析支援データリザボアの開発

奥田グループは、連成計算支援機能の一環として、有限要素解析の高速化を図るための GPU 援用に関し、BLAS (Basic Linear Algebra Subprogram) レベルのアルゴリズムの検討および性能評価を実施した。その結果、疎行列演算について、従来型 CPU を用いた場合と比較し数倍～10倍程度の速度向上が得られることが分かった<sup>12)</sup>。

#### (b) 並列前処理手法の開発と並列プログラミングモデル

中島グループは、接触問題や不均質問題等の悪条件問題のための並列前処理手法として、Hierarchical Interface Decomposition (HID; Henon & Saad, 2007) を改良した Extended HID 法を開発し、安定な収束性と高い並列性能が得られることを示した<sup>13)</sup>。また、並列可視化、並列適応格子、動的負荷分散等の形状処理に関する研究を行い、六面体要素(図 3)については T2K オープンスパコン(東大)等の最新のハードウェアを使用した評価を実施した<sup>14)</sup>。同時に、次世代スーパーコンピュータの利用に向けて、Flat MPI と Hybrid の並列プログラミングモデルの性能評価も実施した。データの再並び替えにより、Hybrid 並列プログラミングモデルを使用した場合でも高い性能が得られることを示した<sup>15)</sup>。

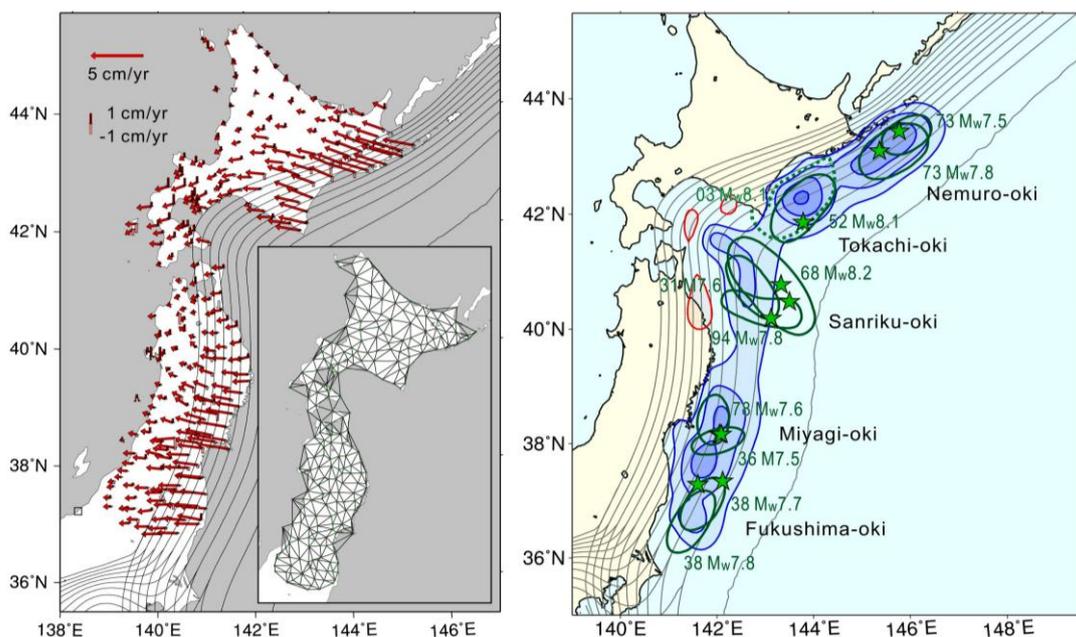


図1: GPS データの逆解析で求めた北米-太平洋プレート境界のすべり遅れ速度分布<sup>4)</sup>。左:

GPS 観測によって得られた地表観測点の水平(ベクトル)及び鉛直(バー)運動速度。挿入図は GPS 観測点が構成する最適三角網を示す。右: 青のコンターはプレート境界のすべり遅れ速度分布(3cm/yr 間隔)を示す。緑の楕円は過去 100 年間に発生したマグニチュード 7.5 以上のプレート間大地震の震源域を示す。

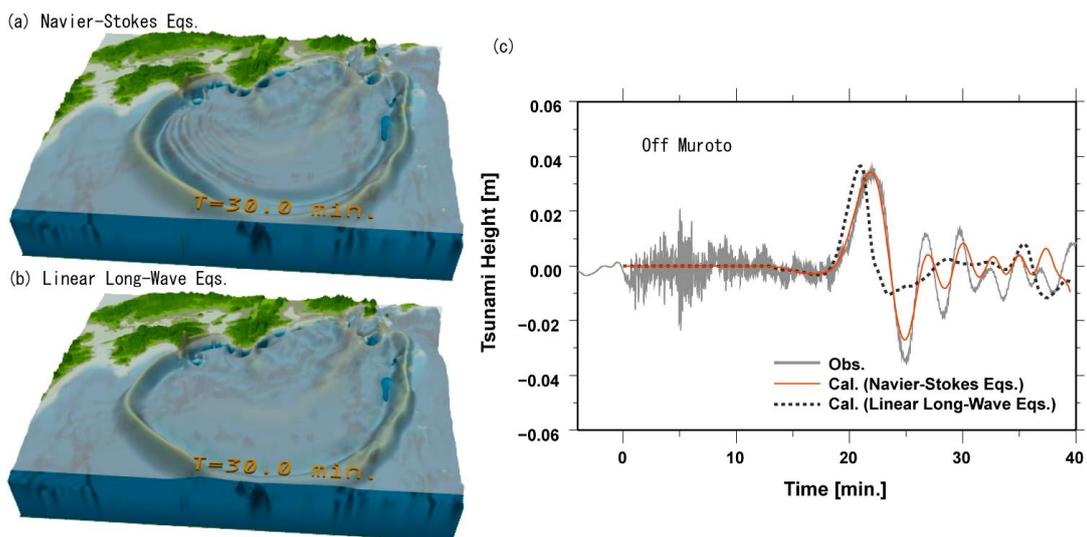


図2: 2004 年紀伊半島南東沖の地震による津波発生伝播シミュレーション<sup>8)</sup>。左: 地震発生 30 分後のスナップショット。(a) Navier-Stokes 式による計算、(b) 線形長波近似式による計算。右: 室戸沖で観測された津波波形(灰色)と計算波形(赤: Navier-Stokes 式、黒: 線形長波近似式)の比較。

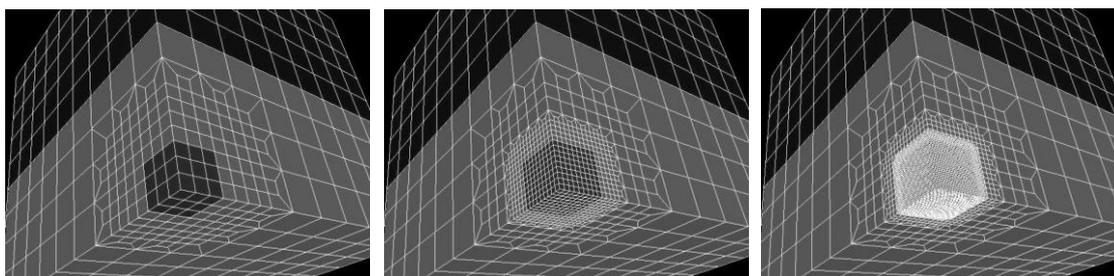


図 3: 六面体メッシュの多段階局所細分化<sup>14)</sup>。

### 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、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: 古村 孝志(東京大学大学院、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、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、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。

## (7) 中島グループ

①研究分担グループ長:中島 研吾(東京大学、教授)

②研究項目

「次世代スーパーコンピュータ」等のペタフロップス級超大規模並列計算機に於いて本システムの稼動を円滑に実現するためのミドルウェアの研究開発を実施する。

#### 4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

1. 寺川寿子・松浦充宏, 地震学における応力インバージョンの新展開, 地震, 61, 2009 (in press).
2. Hashimoto, C. and M. Matsu'ura, 3-D simulation of steady plate subduction with tectonic erosion: Current crustal uplift and free-air gravity anomaly, Pure Appl. Geophys., 165, 567-583, 2008.
3. Hashima, A., Y. Takada, Y. Fukahata, and M. Matsu'ura, General expressions for internal deformation due to a moment tensor in an elastic/viscoelastic multilayered half-space, Geophys. J. Int., 175, 992-1012, 2008.
4. Hashimoto, C., A. Noda, T. Sagiya, and M. Matsu'ura, Interplate seismogenic zones along the Kuril-Japan trench inferred from GPS data inversion, Nature Geoscience, 2, 141-144, doi:10.1038/ngeo421, 2009.
5. 福山英一, 地震の動的破壊パラメータ, 地震, 61, 2009 (in press).
6. 古村孝志, 差分法による3次元不均質場での地震波伝播の大規模計算, 地震, 61, 2009 (in press).
7. Furumura, T., T. Saito, An integrated simulation of ground motion and tsunami for the 1944 Tonankai earthquake using high-performance super computers, J. Disaster Research, Vol4, No2., 2009, in press.
8. Saito, T. and T. Furumura, Three-dimensional simulation of tsunami generation and propagation: Application to intraplate events, J. Geophys. Res., 114, B02307, doi:10.1029/2007JB005523, 2009.
9. 市村強・山木洋平・堀宗朗, 階層型解析による断層-構造物系を考慮した構造物の地震時挙動予測手法, 応用力学論文集 JSCE, Vol.11, pp.641-646, 2008.
10. Ichimura, T. and M. Hori, Structural Seismic Response Analysis Based on Multiscale Approach of Computing Fault-Structure System, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, doi: 10.1002/eqe.861, 2009 (in press).
11. Nagashima, T., Sloshing Analysis of a Liquid Storage Container using the Level Set X-FEM, Communications in Numerical Methods in Engineering, 2009 (in press).
12. Muraoka, M. and H. Okuda, Feasibility Study of Parallel Finite Element Analysis on Cluster-of-Clusters, Journal of Computational Science and Technology, JSTAGE, 2009 (in press).
13. Nakajima, K., Strategies for Preconditioning Methods of Parallel Iterative Solvers in

- Finite-Element Applications on Geophysics, *Advances in Geocomputing*, Lecture Notes in Earth Science 119, 65-118, 2009 (in press).
14. 中島研吾, 六面体メッシュの適合型並列局所細分化と負荷分散, 情報処理学会研究報告 (HPC-116), 163-168, 2008.
  15. 中島研吾, マルチコアクラスタにおける有限要素法アプリケーションのための階層型領域間境界分割に基づく並列前処理手法, 情報処理学会研究報告 (HPC-119-18), 103-108, 2009.
  16. Hashima, A., Y. Fukahata, and M. Matsu'ura, 3-D simulation of tectonic evolution of the Mariana arc-back-arc system with a coupled model of plate subduction and back-arc spreading, *Tectonophysics*, 458, 127-136, 2008.
  17. Fukuyama, E., Introduction: Fault-zone properties and earthquake rupture dynamics, in *Fault-zone Properties and Earthquake Rupture Dynamics*, International Geophysics Series Volume 94, Elsevier Co. Ltd., 1-13, 2009.
  18. Fukuyama, E., Dynamic rupture propagation of the 1995 Kobe, Japan, earthquake, in *Fault-zone Properties and Earthquake Rupture Dynamics*, International Geophysics Series Volume 94, Elsevier Co. Ltd., 269-283, 2009.
  19. 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, 195-217, 2009.
  20. Saito, T. and T. Furumura, Scattering of linear long-wave tsunamis due to randomly fluctuating sea-bottom topography: Coda excitation and scattering attenuation, *Geophys. J. Int.*, 2008 (accepted).
  21. Ichimura, T., M. Hori, and J. Bielak, A Hybrid Multiresolution Meshing Technique for Finite Element Three-Dimensional Earthquake Ground Motion Modeling in Basins Including Topography, *Geophys. J. Int.*, 2009 (in press).
  22. Kushida, N. and H. Okuda, Optimization of the Parallel Finite Element Method for the Earth Simulator, *Journal of Computational Science and Technology*, Vol.2, No.1, pp.81-91, 2008.
  23. Shinohara, K., H. Okuda, S. Ito, N. Nakajima, and M. Ida, Shape Optimization Using Adjoint Variable Method for Reducing Drag in Stokes Flow, *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 2008, Vol.58, pp.119-159, 2008.
  24. Suzuki, M. and H. Okuda, Fragment Replica-Exchange Method for Efficient Protein Conformation Sampling, *Molecular Simulation*, Vol.34, No.3, pp.267-275, 2008.
  25. Suzuki, M. and H. Okuda, Acceleration of Biomolecular Dynamics Simulations on the Earth Simulator, *International Journal of Computational Methods*, Vol.5, No.2, pp.319-327, 2008.
  26. Li Chen and H. Okuda, High-Performance Parallel Visualization Library for Curious Simulation Environments, *International Journal of Computational Methods*, Vol.5, No.2, pp.273-287, 2008.

27. Nakajima, K., Sparse Approximate Inverse Preconditioner for Contact Problems on the Earth Simulator using OpenMP, International Journal of Computational Methods 5-2, 255-272, 2008.
28. Nakajima, K., Parallel Multistage Preconditioners by Hierarchical Interface Decomposition on “T2K Open Super Computer (Todai Combined Cluster)” with Hybrid Parallel Programming Models, Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Cluster Computing (Cluster 2008), 298-303, 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)