

「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

プレート沈み込み帯に位置する我が国の地震・津波災害の軽減に資するために、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「地球シミュレータ」上で再現・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・システムを世界に先駆けて開発する。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及び基本プログラムを結合して3つのサブシステムを構築し、地震発生予測シミュレーション、強震動／津波予測シミュレーション、人工構造物振動予測シミュレーションを実施する。第2フェーズ（平成20～21年度）では、これら3つのサブシステムを更に階層連結して全体システムを構築し、実シナリオに即した地震・津波災害予測の統合シミュレーションを試みる。

## 2. 研究実施内容

### 研究目的

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「地球シミュレータ」上で再現・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・システムを世界に先駆けて開発する。

### 研究方法

本研究で開発する地震・津波災害予測システムは、プレート運動、地殻応力蓄積、地震破壊伝播、地震波動伝播、津波発生伝播、及び人工構造物振動の6つの要素モデルと地殻変動データ解析、地震活動データ解析、及び強震動データ解析の3つの基本プログラム、そしてそれらを連結するシミュレーション・プラットフォームから構成される（図1）。全体システムを構成する要素モデル及び基本プログラムは、既にそのプロトタイプが開発されている。従って、本研究の第1フェーズ（平成17年度～19年度）では、相互に関連する要素モデル及び基本プログラムを結合して3つのサブシステムを構築し、地震発生予測シミュレーション、強震動／津波予測シミュレーション、及び人工構造物振動予測シミュレ

ーションを実施する。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を開発する。第2フェーズ（平成20年度～22年度）では、これらの3つのサブシステムを更に階層連結した全体システムを構築し、実シナリオに近い形での地震・津波災害予測シミュレーションを実施する。

上記研究計画は、6つの研究グループ（松浦、古村、奥田、市村、長嶋、福山の各グループ）が連携・協力しながら、分担して遂行する。各グループの分担研究項目は次の通りである。

- (1) プレート運動に依る地殻応力の蓄積と地震発生予測シミュレーション（松浦グループ）
- (2) 地震波動伝播と津波発生伝播のシミュレーション（古村グループ）
- (3) 階層連結プラットフォームの構築（奥田グループ）
- (4) 地震波動伝播と都市構造物群の連成シミュレーション（市村グループ）
- (5) 地震波動伝播と流体構造連成シミュレーション（長嶋グループ）
- (6) 地震発生と地震波動伝播の連成シミュレーション（福山グループ）

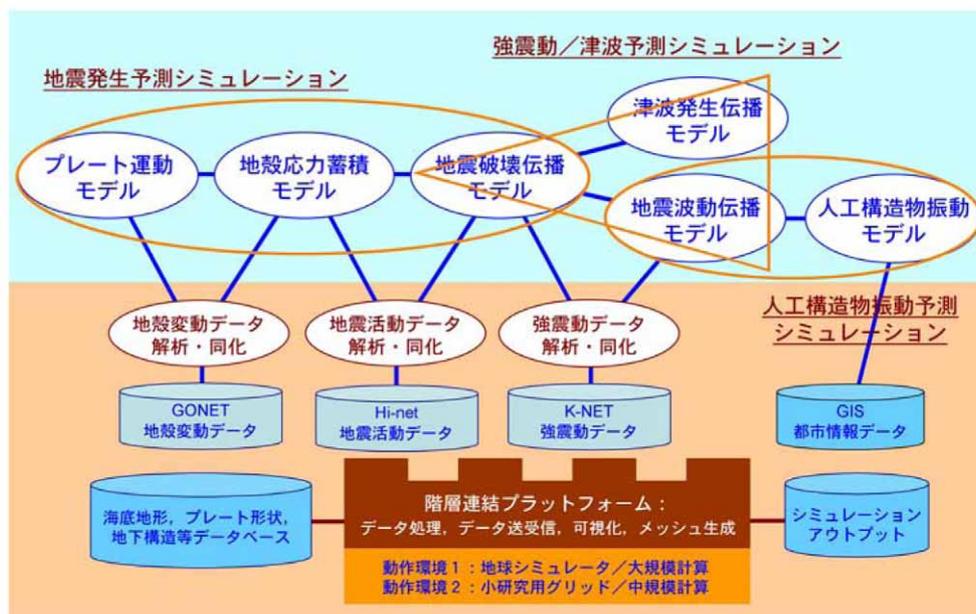


図1. 観測・計算融合の階層連結地震・津波災害予測システムの構成

### 平成18年度の研究成果

全体システム開発構想（図1）に従い、相互に関連する要素モデル及び基本プログラムを結合して3つのサブシステムを構築し、地震発生予測シミュレーション、強震動/津波予測シミュレーション、及び人工構造物振動予測シミュレーションを実施するとともに、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。

### 地震発生予測シミュレーション（松浦・福山グループ）

プレート運動による地殻応力蓄積、地震破壊伝播、地震波動伝播の各要素モデルを結合した日本列島域の地殻活動シミュレーションモデル・プロトタイプを高度化し、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に成功した（図1）。また、シミュレーションと地殻活動観測の融合に向け、地震の CMT 解をデータとして地殻内応力状態を推定するインバージョン解析プログラムを開発し、北海道—東北地域の3次元地震発生応力場の推定を行う一方、直接的及び間接的先験情報を併用したベイズモデルに基づく新しい測地データインバージョン解析手法を定式化し、国土地理院と共同して、それに基づく地殻変動解析プログラムを開発した。

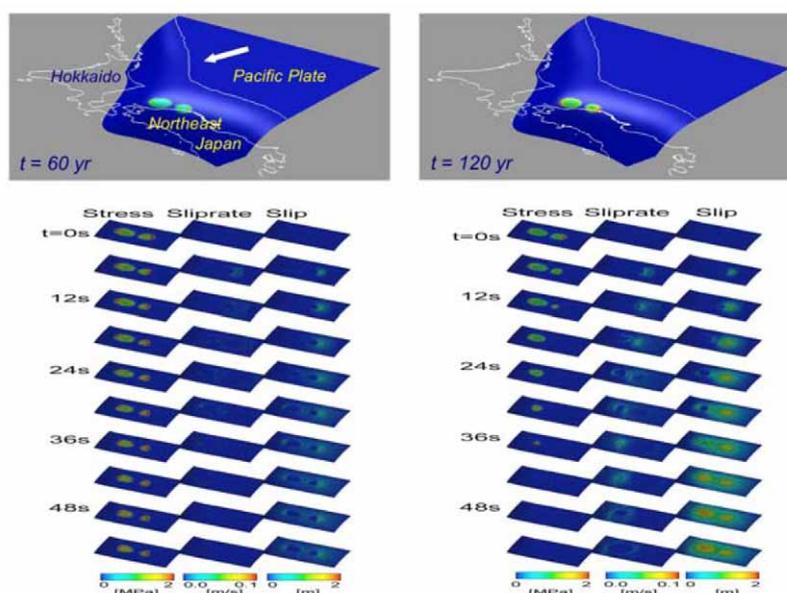


図2.: 1968年十勝沖地震の震源域での準静的応力蓄積—動的破壊伝播—地震波動伝播の連成シミュレーション（Hashimoto, Fukuyama & Matsuura, 2006）。1968年の大地震発生から60年後、120年後の応力蓄積状態（上段）での動的破壊伝播シミュレーション（下段）。

### 強震動／津波予測シミュレーション（古村グループ）

地震—津波連成シミュレーションコードを開発し、地球シミュレータを用いて1944年東南海地震（Mw8.1）の地震発生—津波生成・伝播の大規模シミュレーションを実施した（図3）。地震メカニズムと、津波伝播経路環境により大きく変動する津波を高精度で予測するために、3次元ナビエ・ストークス方程式を直接計算する新しい地震—津波連成計算のプロトタイプコードを開発した。2006年11月と2007年1月に連続して発生した千島列島の地震（Mw8.2）の地震—津波連成計算を行い、遠地地震による津波予測への有効性を確認した。

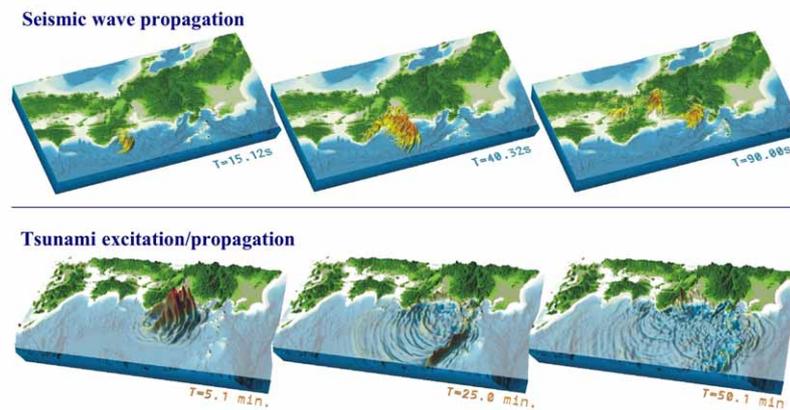


図 3. 1944 年東南海地震 (Mw8.1) の地震発生一津波生成・伝播シミュレーション (Furumura & Saito, 2006)。上段：地震波動伝播。地震発生後 15 秒, 40 秒, 90 秒のスナップショット。下段：津波生成・伝播。地震発生後 5 分, 25 分, 50 分のスナップショット。

#### 人工構造物振動予測シミュレーション (市村・長嶋・奥田グループ)

市村グループは、GIS/CAD データから数値解析用のデータ構造を定義しながら都市モデルを構築するためのフレームワークの開発を実施した。また連成シミュレーション用に並列有限要素法に基づく三次元簡易地盤解析コードを開発した。長嶋グループは、平成 17 年度に開発した有限要素法 (FEM) による薄肉構造物の動的応答解析プログラムおよび自由表面を含む非粘性・非回転ポテンシャル流れ解析プログラムを連成させた弱連成プログラムを開発した。奥田グループで開発した M×N 通信による連成カップラーを使用し、地盤振動 (16 コアまたは 32 コア使用) および石油タンクスロッシング (16 コア使用, 各タンクあたり 1 コア使用) の並列一方向弱連成シミュレーションを実施して連成カップラーの動作確認を実施するとともに、高い効率で連成シミュレーションを実施することができた。

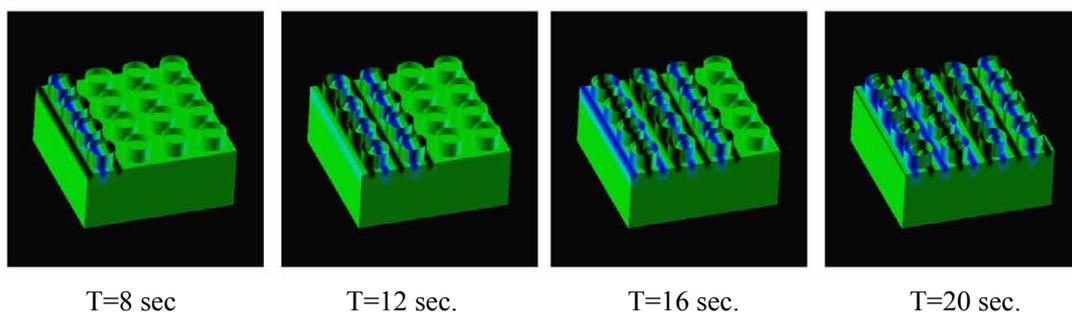


図 4. M×N 通信による連成カップラーを使用した、地盤振動と石油タンクスロッシングの有限要素法による並列一方向弱連成シミュレーション (Ichimura, Nagashima, Okuda & Nakajima, 2006)。

## 階層連結プラットフォーム（奥田グループ）

奥田グループは、多階層ボクセルを用いた並列可視化ライブラリ、M×N 通信による連成カップラーのプロトタイプの開発を実施した。また、市村グループ、長嶋グループと共同して、地盤振動および石油タンクスロッシングの並列一方向弱連成シミュレーションを実施し、連成カップラーの動作確認を行った。さらに、線形ソルバーライブラリの開発のために、悪条件問題に関する並列前処理手法に関する検討を実施した。

## 研究進捗状況

全体システム開発構想に従い、相互に関連する要素モデル及び基本プログラムを結合して3つのサブシステムを構築し、地震発生予測シミュレーション、強震動／津波予測シミュレーション、及び人工構造物振動予測シミュレーションを行うなど、研究は順調に進捗している。

## 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 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 助教授)

#### 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 助教授)

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 助教授)

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 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)

- Fukahata, Y. and M. Matsu'ura, Quasi-static internal deformation due to a dislocation source in a multilayered elastic/viscoelastic half-space and an equivalence theorem, *Geophys. J. Int.* 166, 418-434, 2006.
- Hashimoto, C. and M. Matsu'ura, 3-D simulation of tectonic loading at convergent plate boundary zones: Internal stress fields in northeast Japan, *Pure Appl. Geophys.* 163, 1803-1817, 2006.
- Takada, Y. and M. Matsu'ura, Geometric evolution of a plate interface-branch fault system: Its effects on tectonic development in Himalaya, *J. Asian Earth Sciences* 29, 490-503, 2007.
- Takada, Y., Y. Fukahata, A. Hashima, T. Terakawa, K. Fukui, T. Yanagisawa, Y. Ikeda, G. Kimura, and M. Matsu'ura, Development of 3-D basement structure in Taiwan deduced from past plate motion: Consistency with the present seismicity, *Tectonics*, 2007 (in press).
- 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 (in press).

- 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 (in press).
- Furumura, T, T. Hayakawa, M. Nakamura, K. Koketsu, and T. Baba, Development of long-period ground motions from earthquakes within the Nankai Trough, Japan: Observations and computer simulation of the 1944 Tonankai (Mw8.1) and 2004 SE Off-Kii Peninsula (Mw7.4) earthquakes, Pure and Applied Geophysics, 2007 (in press).
- 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, 2007 (in press).
- Hori, M., T. Ichimura, H. Nakamura, A. Wakai, T. Ebisawa, and N. Yamaguchi, Integrated Earthquake Simulator for Seismic Response Analysis of Structure Set in City, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.23, No.2, 297-306, DOI: 10.2208/jscseeee.23.297s, 2006.
- Hori, M., T. Ichimura, and K. Oguni, Development of Integrated Earthquake Simulation for Estimation of Strong Ground Motion, Structural Responses and Human Actions in Urban Areas, Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), Vol.7, No.4, 381-392, 2006.
- Ichimura, T. and M. Hori, Macro-Micro Analysis Method for Wave Propagation in Stochastic Media, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.35, 419-432, DOI: 10.1002/eqe.533, 2006.
- Ichimura, T. and M. Hori, Strong Ground Motion Prediction using Macro-Micro Analysis Method, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.35, 395-417, DOI: 10.1002/eqe.532, 2006.
- Matsu'ura, M., C. Hashimoto, A. Noda, K. Nakajima, E. Fukuyama, T. Sagiya, and T. Sato, Development of a predictive simulation system for crustal activities in and around Japan - III, Annual Report of the Earth Simulator Center, April 2005-March 2006, 113-116, 2006.
- Ozawa, S. et al., Spatiotemporal evolution of aseismic interplate slip between 1996 and 1998 and between 2002 and 2004, in Bungo channel, southwest Japan, J. Geophys. Res., 2007 (in press).
- 中島研吾・陳莉, ボクセル型背景格子を使用した大規模並列可視化手法, 情報処理学会研究報告 (HPC-107), 91-96, 2006.
- 中島研吾・長嶋利夫・江連真一・市村強・奥田 洋司, M×N 通信による大規模連成シミュレーション, 情報処理学会研究報告 (HPC-109), 215-220, 2007.
- 古村孝志・早川俊彦・瀬瀬一起・馬場俊孝・中村操, 1944 年東南海地震の強震動シミュレーションと関東平野の長周期地震動, 月刊地球, 55, 130-137, 2006.
- 市村強・篠竹英介・佐茂隆洋・堀宗朗, 既存 GIS/CAD データによる都市モデルの構築とその震災想定への適用に関する基礎検討, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, No.285, 2006 (CDROM).