

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630192

研究課題名(和文) 巨大地震被害想定のための断層シナリオ高度化に関する基礎研究

研究課題名(英文) Development of crust deformation analysis method for enhancing earthquake fault scenario

研究代表者

市村 強 (Ichimura, Tsuyoshi)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：20333833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：多くの地殻変動解析が行われているものの、地殻構造を半無限媒体や水平成層構造に近似するものが多い。一方で、三次元の有限要素法を用いた地殻変動解析が最近行われつつある。これは、地殻構造の不均質さや地表面・各層境の幾何形状が解析結果に強く影響を及ぼすためである。高詳細な地殻構造を用いれば、このような影響を考慮した、より現実的な地殻変動解析が可能と期待される。計算・観測された地殻変動データを組み合わせることによって、地震メカニズムの理解がすすみ、地震災害軽減へつなぐと期待される。本研究課題では、高分解能地殻構造データ蓄積や計算機環境の進歩を踏まえて、高詳細な地殻構造を用いた地殻変動解析手法の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Although analysis of crustal deformation has been intensively performed, most studies use analytical solutions with the assumption that the crustal structure is a half-space or a layered half-space, but some recent studies have used the 3D finite element method. This is because the heterogeneity of the crustal structure and ground-surface/layer-boundary geometry have a significant impact on simulation results. Crustal deformation analyses using high-fidelity crustal structure can be expected to consider such effects more realistically. The combination of computation results and crustal deformation observation data is expected to elucidate the earthquake mechanisms, which leads the reduction of earthquake disasters. With the accumulation of high-resolution observation data and the advancement of computer environment, the crustal deformation analysis method with such high-fidelity crustal structure data have been developed in this research project.

研究分野：地震工学，計算科学，応用力学

キーワード：震源断層シナリオ 地殻変動 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

巨大地震の被害想定を行う上で、「断層がどのように破壊するのか、また、破壊規模はどの程度となるか(断層シナリオ)」の適切な想定は重要と考えられる。この想定の実現には、プレート間の固着域の状態を適切に推定する必要があり、推定の確度向上を目指して多くの研究がなされてきた。

昨今の観測データの充実及び計算機能力の向上を踏まえた、高詳細な地殻変動解析手法を開発することで、プレート間の固着域の状態推定確度を改善できる可能性があることが示唆されていた。本手法により断層シナリオの想定がより確度の高いものになれば、巨大地震の被害想定の高高度化につながると期待される。

2. 研究の目的

巨大地震の適切な断層シナリオを想定するためには、プレート間の固着域の状態推定が重要である。観測された地殻変動データと地殻変動解析による逆解析を用いてプレート間の固着域の状態推定が現在でも行われている。しかし、その地殻変動解析には、水平成層構造や簡略化した地殻構造が用いられている。

一方で、GPSと海底観測による地殻変動の観測データの蓄積が進み、また、高分解能な日本列島モデルも提案されている。さらには、京コンピュータに代表される計算能力の向上もある。これらを用いれば、超高分解能な日本列島の数値解析モデルを構築し、潤沢な地殻変動の観測データを用いて、地殻変動解析による逆解析を行い、従来よりも確度の高いプレート間の固着域の状態推定を実現できるのではと期待されるが、現実はそうなっていなかった。なぜなら、解析対象領域が大きく(日本列島程度: 2000×1500×1000km オーダー)、高分解能が必要とされるため(少なくとも 1km 程度)、数値解析モデルの構築自体が通常的手法ではほぼ不可能に近いためである。また、構築した数値解析モデルを用いた地殻変動解析の計算コストも膨大となる。結果的に、潤沢な観測データ及び良質な日本列島モデルはあるものの、プレート間の固着域の状態推定の確度向上には、活用のさらなる余地がある状況であった。

本研究課題では、「超高分解能な日本列島の数値解析モデル構築手法」と「超高速地殻変動解析手法」を開発し、潤沢な観測データ及び良質な日本列島モデルをさらに有効活用するための手法を開発する。日本列島のプレート間の固着域の状態推定確度向上につながると期待される。

3. 研究の方法

「超高分解能な日本列島有限要素モデル」構築手法及び「超高速地殻変動解析手法」を開発し、超高分解能有限要素日本列島モデル、超高速地殻変動解析を用いて、東北地方太平

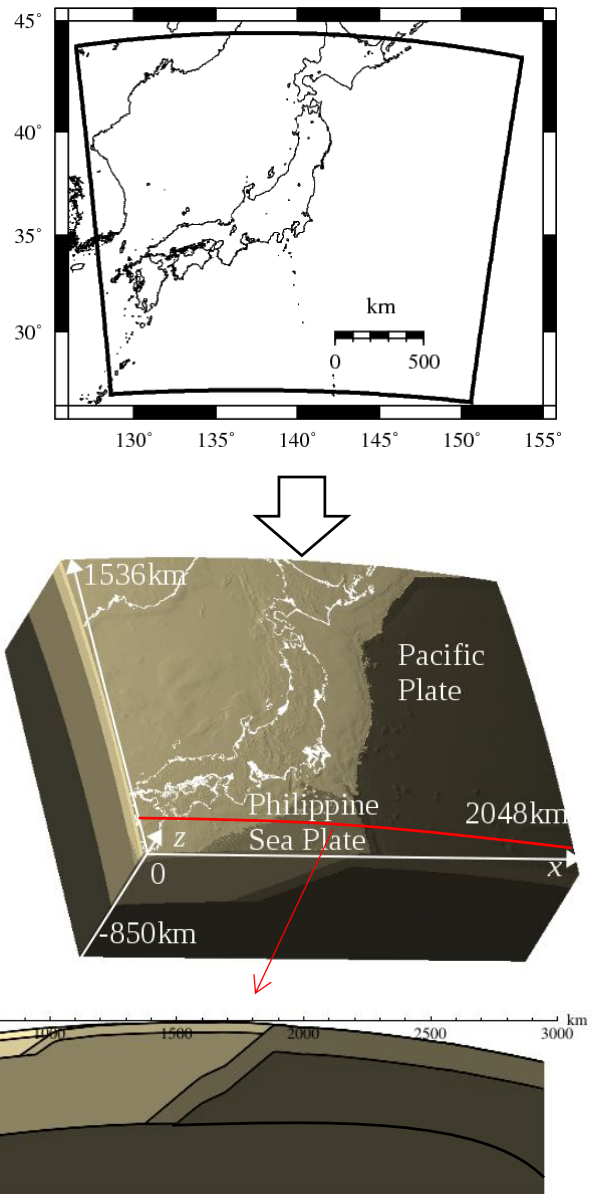


図 1: 開発手法により構築された三次元日本列島有限要素モデル。上段図内の実線部分がモデル化された領域。中段図は三次元有限要素モデル。下段図は中段図赤線部における断面図。2000×1500×1000kmの領域で 1 km 分解能という高い分解能で有限要素モデルが構築されている。自由度は約 100 億自由度である。

洋沖地震の断層破壊過程の解析などを通して、開発手法の有効性を確認した。

「超高分解能な日本列島有限要素モデル」構築手法の開発では、背景格子を用いた全自動有限要素モデル構築手法と地殻変動解析の開発を行った。対象モデルは複雑な幾何形状を持つといえども、成層構造である。この特徴を生かして、三次元背景格子を対象モデルに被せ、複雑な幾何形状部分では非構造要素を、均質部分では立方体要素を生成する。最後にこれらを四面体二次要素へ変換し、応力の評価が可能な有限要素モデルを自動的に生成する手法を構築した。なお、OpenMP 型の

並列化により高速なモデル生成が可能となっている。図1に日本列島を例として構築した三次元有限要素モデルを示す(自由度は100億自由度程度)。既往研究と比較して、1000倍程度自由度が多く、非常に高い分解能で詳細な幾何形状が再現されていることが分かる(詳細は引用文献参照)。

「超高速地殻変動解析手法」の開発では、地殻変動解析用に新たに方程式の高速求解法を開発した。この手法は、精度混合演算、マルチグリッド、可変前処理などの計算手法を効率的に組み合わせた手法であり、従来法に比べ26.7倍もの高速で求解することができている(引用文献参照)。また、OpenMP/MPIのハイブリッド並列に対応しており、多数ノードを用いた並列計算も可能である。実際、京コンピュータの2048計算ノードを用いて、上記の100億自由度の日本列島三次元有限要素モデルを用いた地殻変動解析を125秒で実現した。また、4096計算ノード、8192計算ノードでの計算では63.5秒、35.5秒で解析できており、Strong Scaleで0.96、0.88と並列性の観点からも高い性能を示していることがわかる。

4. 研究成果

昨今の観測データの充実及び計算機能力の向上をさらに活用可能な、「超高分解能日本列島有限要素モデル」構築手法及び「超高速地殻変動解析手法」を開発した。従来用いられている簡便化されたモデルと高詳細なモデルを用いて、推定東北地方太平洋沖地震震源断層すべりによる地殻変動を評価したところ、3割程度の差は少なくとも生じることが分かった(詳細は引用文献参照)。また、高詳細なモデルを使うことで地殻モデルパラメータが及ぼす影響をより現実的に検討できるようにもなった(詳細は引用文献参照)。また、同様の検討を上記以外にも行い、本研究課題で開発した手法の有効性を示した。

<引用文献>

T. Ichimura, R. Agata, T. Hori, K. Hirahara, C. Hashimoto, M. Hori, Y. Fukahata, An Elastic/Viscoelastic Finite Element Analysis Method for Crustal Deformation using a 3D Island-scale High-fidelity Model, *Geophysical Journal International*, (advance access), 2016, doi: 10.1093/gji/ggw123 (査読あり)。

T. Ichimura, R. Agata, T. Hori, K. Hirahara, C. Hashimoto, M. Hori, Y. Fukahata, An Elastic/Viscoelastic Finite Element Analysis Method for Crustal Deformation using a 3D Island-scale High-fidelity Model, *Geophysical Journal International*,

(advance access), 2016, doi: 10.1093/gji/ggw123 (査読あり)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

T. Ichimura, R. Agata, T. Hori, K. Hirahara, C. Hashimoto, M. Hori, Y. Fukahata, An Elastic/Viscoelastic Finite Element Analysis Method for Crustal Deformation using a 3D Island-scale High-fidelity Model, *Geophysical Journal International*, (advance access), 2016, doi: 10.1093/gji/ggw123 (査読あり)。

R. Agata, T. Ichimura, K. Hirahara, M. Hyodo, T. Hori, C. Hashimoto, M. Hori, Numerical Verification Criteria for Coseismic and Postseismic Crustal Deformation Analysis with Large-scale High-fidelity Model, *Procedia Computer Science*, 51, 1534-1544, 2015, doi:10.1016/j.procs.2015.05.344(査読あり)。

R. Agata, T. Ichimura, K. Hirahara, M. Hyodo, T. Hori, M. Hori, Several Hundred Finite Element Analyses of an Inversion of Earthquake Fault Slip Distribution using a High-fidelity Model of the Crustal Structure, *Procedia Computer Science*, 29, 877-887, 2014, doi:10.1016/j.procs.2014.05.079(査読あり)。

縣亮一郎, 市村強, 兵藤守, 堀高峰, 平原和朗, 堀宗朗, 震源断層の想定高度化に関する基礎研究-高詳細な三次元地殻構造モデルを用いた地殻変形解析手法の開発-, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, 69, I_767-I_776, 2013, doi:jscejsee.69.I_767 (査読あり)。

T. Ichimura, R. Agata, T. Hori, K. Hirahara, M. Hori, Fast numerical simulation of crustal deformation using a three-dimensional high-fidelity model, *Geophysical Journal International*, 195, 1730-1744, 2013, doi: 10.1093/gji/ggt320 (査読あり)。

[学会発表](計8件)

R. Agata, T. Ichimura, T. Hori, K. Hirahara, C. Hashimoto, M. Hori, Simultaneous Inverse Analysis Method

of Fault Slip and Asthenosphere Viscosity Using Large Scale Finite Element Simulation of Postseismic Deformation, AGU Fall Meeting, 2015, Dec 14-18, San Francisco, the U.S.

縣亮一郎, 市村強, 堀高峰, 平原和朗, 橋本千尋, 堀宗朗, 余効変動の高詳細有限要素シミュレーションを用いたアセノスフェア粘性率・断層すべり同時推定手法の開発, 日本地震学会秋季大会, 2015, 10月26日-28日, 神戸国際会議場(兵庫県・神戸市).

縣亮一郎, 市村強, 平原和朗, 兵藤守, 中野優, 堀高峰, 堀宗朗, 高詳細な地殻変動シミュレーションに基づいた津波波高推定のための基礎的研究, 計算工学講演会, 2015, 6月8日-10日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市).

縣亮一郎, 市村強, 堀高峰, 平原和朗, 橋本千尋, 堀宗朗, 高詳細な地殻変動解析手法を用いたアセノスフェア粘性率推定手法の検討, 応用力学シンポジウム, 2015, 5月16日-17日, 金沢大学(石川県・金沢市).

R. Agata, T. Ichimura, K. Hirahara, M. Hyodo, T. Hori, M. Hori, Large-scale finite element simulation of coseismic and postseismic crustal deformation using a high-fidelity model, Asia Oceania Geosciences Society, 2014, Jul 28- Aug 1, ロイトン札幌(北海道・札幌市).

R. Agata, T. Ichimura, K. Hirahara, M. Hyodo, T. Hori, M. Hori, -Basic Study on Physics-Based Fault Scenario-Estimation of Coseismic Slip Distribution Using Enhanced Inversion Analysis Method with Three-Dimensional High-Fidelity Model of Crustal Structure, The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, 2014, April 13-16, 仙台国際センター(宮城県・仙台市).

R. Agata, T. Ichimura, K. Hirahara, T. Hori, M. Hyodo, M. Hori, Geodetic Inversion Analysis Method of Coseismic Slip Distribution Using a Three-dimensional Finite Element High-fidelity Model, AGU Fall Meeting Abstracts 1, 2202, 2013, Dec 9-13, San

Francisco, the U.S.

縣亮一郎, 市村強, 平原和朗, 兵藤守, 堀高峰, 堀宗朗, 高詳細三次元地殻モデルを用いた地震時断層すべり分布推定手法の開発とその有効性の基礎的検討, 日本地震学会秋季大会, 2013, 10月7日-9日, 神奈川県民ホール(神奈川県・横浜市).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sensing_and_simulation/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市村 強 (Ichimura, Tsuyoshi)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 20333833

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし