

**震災軽減のためのヘテロ解析による地殻イメージング手法の開発とその適用**

Development of crust imaging enhanced by  
hetero-computing for reducing earthquake disaster

課題番号：18H05239

市村 強 (ICHIMURA, TSUYOSHI)

東京大学・地震研究所・教授



研究の概要（4行以内）

本課題では、震災軽減を目指し、最先端の計算科学・計算機科学を創成・活用しつつ、超大規模・超高速有限要素モデル構築・解析手法とこれを用いた効率的な最適化手法を開発し、最先端の計測・最新の固体地球科学の知見を踏まえた高分解能・高精度地殻イメージング手法の開発を行い、これを実問題に対して適用する。

研究分野：地震工学，防災工学およびその関連分野

キーワード：地震工学，地震防災，応用力学，計算科学

1. 研究開始当初の背景

地震・地殻変動観測の高度化（海溝型巨大地震震源域直上の海域での、リアルタイム連続高精度観測等）に伴い、震災軽減のための、より高分解能・高精度な地殻イメージング（地殻構造推定や震源状態推定など）の可能性が高まりつつある。その実現のためには、より高分解能・高精度な解析手法が必要とされる。大規模有限要素法はこのような地殻応答解析に適しているものの、大規模有限要素モデル構築及びこれを用いた解析のコストは膨大であり、最適に地殻構造推定・地殻応答解析を行うことは容易ではない。そのため、地震・地殻変動観測の高度化を活用した、より高分解能・高精度な地殻イメージングの実現は難しいとされていた。

2. 研究の目的

本課題では、計算科学と観測・解析の融合により、震災軽減のための、より高分解能・高精度な地殻イメージング手法の創出を目指す。具体的には、大規模有限要素法モデルの高速自動構築手法・これを用いた高速な地殻応答解析手法・これらを用いた地殻構造最適化を、ヘテロコンピューティング的アプローチにより実現することを目指す。また、開発した手法と実観測データを用いて、実問題を対象とした地殻イメージングを試みる。

3. 研究の方法

研究代表者である市村のグループが解析手法を開発し、分担者である堀のグループが開発された解析手法と実観測データを用い

て地殻イメージングを試みる。具体的には、市村グループにおいてヘテロコンピューティング及び大規模有限要素法に基づく高詳細3次元不均質地殻構造モデルでの地震動・地殻変動の超高速計算技術を駆使した最適化手法の開発・この手法に適した解析基盤の導入・この解析基盤へのアルゴリズム実装を行う。堀グループでは、海陸で観測される地殻変動データと震源状態の時空間変化のモデルを整合させる手法を開発するとともに、市村グループにより開発された手法を順次導入することで、地殻イメージングシステムのプロトタイプを構築し、実観測データを用いて地殻イメージングを試みる。

4. これまでの成果

本課題では、最先端の計算科学・計算機科学を創成・活用しつつ、「①超大規模・超高速有限要素モデル構築・解析手法の開発」及び「②地殻構造等改良のための最適化手法開発」を行い、最先端の計測・最新の固体地球科学の知見を踏まえつつ、「③地殻イメージングのひな型となるモデルの妥当性検証」と「④地殻イメージングのひな型となるモデルの予測性能の検討」を行っている。これら①～④の代表的な成果について述べる。  
①超大規模・超高速有限要素モデル構築・解析手法の開発

「ものづくり」における解析のデファクトスタンダードツールの一つでもある低次元構造要素を用いた有限要素解析において、ヘテロコンピューティングに基づく高効率なアルゴリズムを構築した。解析手法の

capability を示すため、米国オークリッジ国立研究所のスーパーコンピュータ Summit 全系を用いて、1.67 兆自由度の超大規模有限要素モデルを構築して解析を行い、有限要素ソルバー全体で 416PFLOPS カーネル部分で 1.10ExaFLOPS という非常に高い性能を誇る世界最大・最速規模の超並列解析を実現した。

#### ②地殻構造等改良のための最適化手法開発

大域解推定のための人工知能を活用した最適化手法を開発し、従来法では推定が難しい問題を効率的に高速に推定可能であることを示した。本課題では、観測データと波動場解析を用いた最適化により地殻構造の改良を行う。人工知能により推定パラメータと誤差の関係を学習し、効率的にパラメータ空間を縮約する手法を開発した。波動場解析を用いた内部構造推定問題に対して、この手法を適用したところ、推定パラメータ数が多く、従来法では収束解を得ることが難しい問題においても、効率的に高速にパラメータを推定することが可能なことが示された。

#### ③地殻イメージングのひな型となるモデルの妥当性検証

地殻イメージングのひな型で肝となる、詳細な地殻構造モデルと断層すべりの時空間変化の数理モデルの組み合わせの妥当性を、地震後の粘弾性応答を含む複雑な地殻変動データで実証した。観測データとしては、地殻・マンツルの粘弾性応答で、世界的にみても最も豊富な情報を持っている 2011 年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動を用いた。地震時のすべりによってもたらされる粘弾性応答と地震後のゆっくりした断層すべりの組み合わせのシミュレーションと比較し、海陸・南北で空間的に異なるパターンを示す地殻変動を、恣意的な粘性率の空間不均質を仮定せずに説明できることを示した。また、各点の時間変化も整合することが確認できた。

#### ④地殻イメージングのひな型となるモデルの予測性能の検討

南海トラフ全域を対象とした固着域とゆっくり断層すべりの逐次データ同化の数値実験を行うことでモデルの予測性能の検討を行い、同化手法の有効性を確認できた。この成果と③の成果とによって、地殻イメージングのひな型構築の目処がついた。また、同化手法に適用した場合の、従来の摩擦則の改善点も見出すことができた。

### 5. 今後の計画

当初想定の研究計画通りに研究は進捗しており、今後も計画に従い研究をすすめていく。市村グループは、2019 年度までに解析アルゴリズム構築の目途がついたことから、2020 年度は小規模問題を用いて、次いで 2021・2022 年度はより大規模な実問題に対して開発手法の有効性確認を行う。基礎となる高効率な手法は開発できたが、更なる解析効

率向上が必要とされるため、解析手法の開発を続けつつ、これらの有効性確認を進めることとなる。堀グループは、2019 年度までに地殻イメージングのひな型の構築の目途がついたことから、市村グループで開発された手法を順次取り込みながら、2020 年度はより現実的な問題での地殻変動解析を、2021・2022 年度はその地殻変動解析を用いたシナリオ計算・データ同化を試行することで、地殻イメージングのプロトタイプを構築する。なお、関連する研究プロジェクトと有機的に連携しつつ、意思決定機関とも連携して、現業でのデータ解析への橋渡しを目指した研究開発をすすめる。

### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1) Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Akira Naruse, Jack C. Wells, Thomas C. Schulthess, Tjerk P. Straatsma, Christopher J. Zimmer, Maxime Martinasso, Kengo Nakajima, Muneo Hori, Lalith Madgededara, A Fast Scalable Implicit Solver for Nonlinear Time-Evolution Earthquake City Problem on Low-Ordered Unstructured Finite Elements with Artificial Intelligence and Transprecision Computing, SC '18 Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis, 49:1-49:11, 2018.

2) Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Akira Naruse, Jack C. Wells, Christopher J. Zimmer, Tjerk P. Straatsma, Takane Hori, Simone Puel, Thorsten W. Becker, Muneo Hori, Naonori Ueda, 416-PFLOPS Fast Scalable Implicit Solver on Low-Ordered Unstructured Finite Elements Accelerated by 1.10-ExaFLOPS Kernel with Reformulated AI-Like Algorithm: For Equation-Based Earthquake Modeling, Research Poster for SC19: The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis, 2019.

3) Ryoichiro Agata, Sylvain D. Barbot, Kohei Fujita, Mamoru Hyodo, Takeshi Inuma, Ryoko Nakata, Tsuyoshi Ichimura and Takane Hori, Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake, Nature Comm.,10:1385, 2019.

4) Ryoichiro Agata, Takane Hori, Keisuke Ariyoshi, Tsuyoshi Ichimura, Detectability analysis of interplate fault slips in the Nankai subduction thrust using seafloor observation instruments, Mar. Geophys. Res., 40, 453-466, 2019.

### 7. ホームページ等

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ceseri/>

<http://www.jamstec.go.jp/feat/j/>