

震源断層モデル高度化のための基礎研究 —高詳細な三次元地殻構造モデルを用いた震源断層すべりの推定—

東京大学 学生会員 ○縣 亮一郎
 東京大学 正会員 市村 強
 海洋研究開発機構 非会員 兵藤 守
 海洋研究開発機構 非会員 堀 高峰
 京都大学 非会員 平原 和朗
 東京大学 正会員 堀 宗朗

1. はじめに

プレート境界型地震の震源断層モデルは、震源断層すべり分布の推定手法を高度化することによって改善できる可能性がある。震源断層すべり分布は、観測された地殻変動データと地殻変動解析を組み合わせた逆解析によって推定される。観測技術の発達により、地上・海底での地殻変動データと、地殻の詳細な形状・物性データの蓄積が進んでいる。一方地殻変動解析は、半無限弾性体などの単純な地殻モデルを用いて行われているのが現状である。本研究ではハイパフォーマンスコンピューティングの技術を用い、地殻の形状・物性の詳細なデータに基づいた三次元有限要素 (FE) モデルの生成手法と、生成したモデルを用いた地殻変動解析手法を開発し、震源断層すべり分布推定に適用する。

2. 手法

解析には、地殻構造のような複雑な形状を扱うのに適した有限要素法を用いる。本研究では数日程度の時間スケールを対象とするため、地殻変動は静弾性問題とみなせる。境界条件を考慮して整理すると、問題は以下の連立一次方程式に帰着する。

$$\mathbf{Ku} = \mathbf{f},$$

ここで、 $\mathbf{K}$, $\mathbf{u}$, $\mathbf{f}$ はそれぞれ全体剛性マトリクス、変位ベクトル、外力ベクトルである。食い違い断層は、節点分割法¹⁾により入力する。

次に FE モデル生成手法について述べる。この手法では、バックグラウンド構造格子を入力データである成層構造の地殻データ (数値標高データと物性値) にあてがうことで、三次元 FE モデルの自動生成が行われる。これにより地殻の複雑な形状や物性の不均質性を考慮した地殻構造モデルを堅牢かつ高速に生成できる。地表面・境界面付近には四面体要素を、それ以外の部分には立方体要素を生成する。これらは地殻形状の再現と要素数の削減を両立した FE モデルの生成を可能とする。FE モデルの側面と底面には無限要素²⁾を適用し、半無限性を導入する。

本研究では対象とする問題の自由度が大きくなることを考慮し、有限要素解析の並列化が行われる。多数の計算ノードを用いて多数ケース計算を行う (次章での地表面変位応答関数の計算など) ことを前提とし、計算ノード間の通信オーバーヘッドが少なくなるように、共有メモリ型並列 (OpenMP) のみを用いる。 $\mathbf{K}$ マトリクス全体を計算メモリに記憶することなく計算できるよう、ソルバーには Element-by-Element (EBE) 法³⁾と共役勾配法を組み合わせ用いた。共役勾配法の前処理に可変的な前処理と単精度演算を導入することで、後に示すように、導入前と比べて計算時間が大幅に短縮された。

3. 震源断層すべり推定への適用

本手法の震源断層すべり分布推定への適用例として、東日本地殻構造の FE モデルを生成し、東北地方太平洋沖地震における震源断層すべりの推定を試みる。FE モデルの概観・詳細図を図 1 に示す。 $0 \leq x \leq$

キーワード 高詳細な地殻構造モデル, 震源断層すべり分布推定, 有限要素法, 地殻変動解析

連絡先 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1 地震研究所 1 号館 615 号室 TEL 03-5841-1774

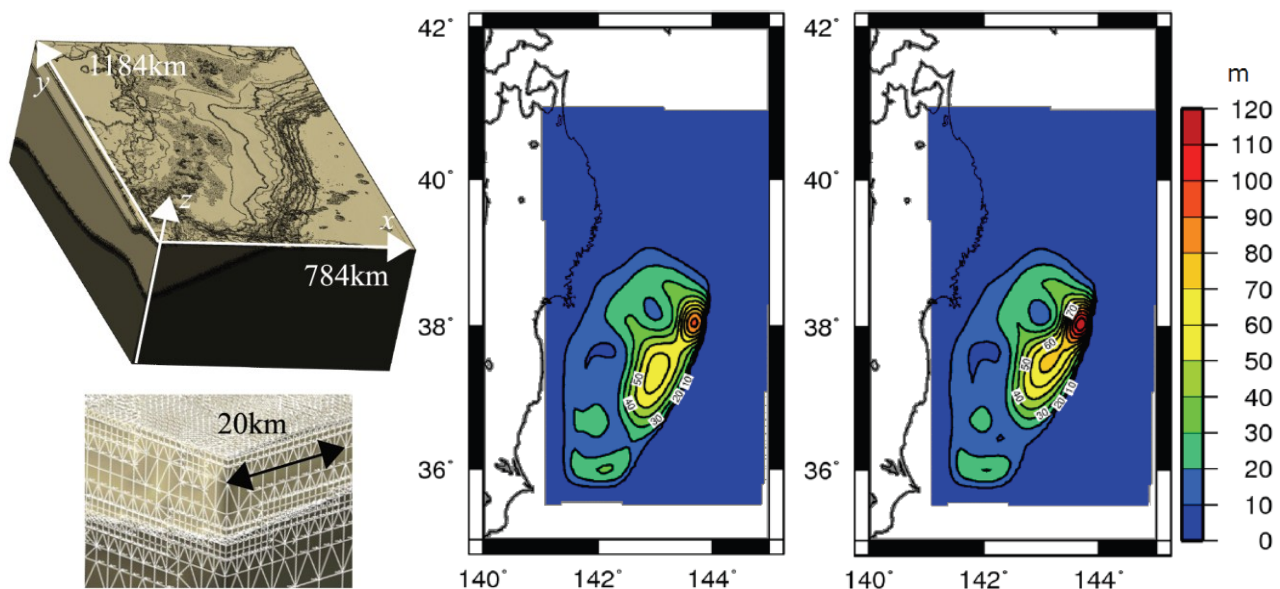


図1：モデル概観・拡大図 図2：震源すべり推定結果（絶対値）。左：本モデル，右：従来モデル。

784km（東西）， $0 \leq y \leq 1184\text{km}$ （南北）， $0 \leq z \leq 400\text{km}$ （鉛直）をモデル化の対象範囲とした．地殻構造は異なる物性値を持つ4層からなる．モデルの分解能は1kmとした．生成したモデルの自由度は157,232,985となった．比較対象として，地殻形状も物性の不均質性も考慮しない単純化されたモデル（従来モデル）を生成する．次に逆解析手法について簡潔に述べる．仮定される断層面上の単位断層すべりに対する地表面変位応答関数を，本手法を用いて計算する．応答関数一つ当たりの計算時間は，可変的な前処理と単精度演算の導入により，導入前の約9時間から1時間強まで短縮された．地震時の地殻変動の観測データを最もよく再現するように地表面変位応答関数の重ね合わせ係数を求めることで，断層すべりを推定する．地震時の地殻変動データは地上・海底のもの両方を用いる⁴⁾⁵⁾⁶⁾．図2にすべり量推定結果の比較を示す．すべりピークの値に有意な差が出ていることが分かる．地殻変動解析に高詳細なモデルを用いることにより，断層すべり分布推定の結果に有意な差が出ることが示唆される．

4. おわりに

本研究では，バックグラウンド構造格子を用いて，地殻の形状・物性を詳細に再現した三次元FEモデルを自動生成する手法を開発した．また省メモリなソルバー，OpenMPによる並列化，高度な前処理を組み合わせた高速な解析手法も開発した．また適用例を通じて震源断層すべり分布推定における本手法の有効性を示した．今後は本手法を，震源断層すべり分布のより精緻な推定に適用することを予定している．

謝辞

海底での地殻変動データの一部は東北大学の伊藤喜宏助教にいただきました．ここに感謝の意を表します．

参考文献

- 1) H. J. Melosh and A. Rafesky: A simple and efficient method for introducing faults into finite element computations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71, pp.1391-1400, 1981.
- 2) O. C. Zienkiewicz, C. Emson and P. Bettess: A novel boundary infinite element, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 19, pp.393-404, 1983.
- 3) T. J. R. Hughes, I. Levit and J. Winget: An element-by-element solution algorithm for problems of structural and solid mechanics, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 36, pp.241-254, 1983.
- 4) 国土地理院: 電子基準点データ提供サービス, <http://terras.gsi.go.jp/ja/index.html>.
- 5) T. Inuma, R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Miura: Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 117, B07409, doi:10.1029/2012JB009186, 2012.
- 6) Y. Ito, T. Tsuji, Y. Osada, M. Kido, D. Inazu, Y. Hayashi, H. Tsushima, R. Hino and H. Fujimoto: Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G05, doi:10.1029/2011GL048355, 2011.