

地震波動伝播シミュレーションのための基盤的コミュニティ・コードの開発 Development of a community software for numerical simulations of seismic wave propagation

○前田拓人・土井一生

○Takuto MAEDA, Issei DOI

Numerical simulation of the seismic wave propagation is a fundamental tool for various aspects of the earthquake seismology, such as the estimation of the inhomogeneous structure, seismic source process, physics of wave propagation in heterogeneous earth media. The significant improvements on the simulation method, unified inhomogeneous velocity structure, and the computer itself eventually enabled us to use the 3D numerical simulation for regular data processing studies with present parallel computers. In this study, we developed an open-source 3D numerical simulation software based on the finite difference method, which designed to be used easily for non-specialists of the numerical simulations for wider utilization of the earthquake seismology.

1. はじめに

地震波伝播の数値シミュレーションは、リソスフェアや浅部地盤構造の推定、巨大地震の震源モデル研究、不均質構造中の地震波伝播の評価などの高度化に直結することが期待される基盤的な技術である。数値シミュレーション手法の改良、標準的な構造モデルの整備、そして計算機自体の進化という三者の発展によって、今日の地震波伝播シミュレーションは日常的な解析研究に応用できるレベルに達しつつある。

本研究では、地震波解析ならびに防災研究における数値シミュレーションの利用の促進に向け、これまでスーパーコンピュータ上で開発してきた並列差分法コードの性能を最大限に維持したまま、数値シミュレーションの専門家でなくても容易に扱え、かつより広範な分野で利用可能となるよう全面的な刷新を行った。

2. 計算コードの開発と公開

本研究で開発した差分法に基づく並列地震波動伝播シミュレーションコードは、媒質の減衰構造を一般化 Zener 粘弾性体モデルによって表現するなど、現実の不均質構造下での広帯域地震動を評価するための有効な技術を採用し、かつスーパーコンピュータにおける並列計算によってその計算機性能を最大限に引き出すことのできるものであった。だが、高性能化の代償としてそのコードが各スパコンの計算機アーキテクチャに特化しており、汎用性が低くなっていた。

そこで、数値シミュレーションの専門家でなくても容易に扱えるよう、このコードを抜本的に改修した。開発したコードは、入力パラメタに応じて動的な計算機メモリの確保や構造モデルの生成、計算と出力を一貫して行う。モデルの変更や計算サイズの修正および並列数の変更などはすべて入力パラメタのみで制御可能であり、利用者がコードを修正する必要なく、実用的な数値シミュレーションが実施できる。また、入力データとなる地下構造モデルの準備や計算結果のフォーマット変換等の必要な作業をすべて計算コードに統合することによって、利用者の負担を大幅に軽減した。

本コードはデカルト座標系で差分法計算を行うが、緯度・経度座標との座標変換のための Gauss-Krüger の等角地図投影変換が計算コードに内包されており、震源や観測点位置などの位置情報は緯度経度のままで与えることができる。地震波速度構造についても、緯度・経度・境界面の深さからなる複数の速度不連続面で表現された成層構造モデルにより表される 3次元不均質構造から自動的に指定領域を抽出し、デカルト座標系の差分格子に合わせた不均質構造モデルを生成させることができる。震源についてもさまざまな問題に適用できるように、モーメントテンソルで表される点震源の他に、主として火山で用いられるような実体力震源や遠地地震・地盤構造研究のための平面波入射を選択可能にした。相反定理を用いて多数の震源要素位置からの応答を高速に計算する Green 関数モードも整備した。これら動作モードの変更

も、入力パラメタの変更だけで制御できる。

地震波速度構造モデルやスナップショット出力などの空間情報を扱う入出力ファイルには NetCDF を、地震波形出力には SAC フォーマットをそれぞれ採用した。どちらも広く使われている解析・可視化ツールを通じて地震学研究コミュニティになじみ深いものであり、ユーザーにとってシミュレーション結果の取り扱いが容易になると期待される。

コードには日・英のマニュアルを整備し、<http://www.github.com/takuto-maeda/OpenSWPC> にて公開した。図に全国 1 次地下構造モデル (Koketsu et al., 2012) に基づくシミュレーションのスナップショットを示す。短波長地震波が関東地方の複雑な浅部構造ならびに海水層によって複雑に散乱され、長時間継続している様子が確認できる。

3.3 次元地下構造モデルに基づく観測地震波形再現性の検討

開発したコードを用いて、日本列島各地で発生した Mw 6-6.5 の地震の F-net メカニズム解を用いて、広帯域地震波観測記録の再現を試みた。シミュレーションには防災科学技術研究所 F-net の 1 次元速度構造 (Kubo et al., 2002) ならびに全国 1 次地下構造モデルを用い、観測記録と計算記録の走時ずれを許容した相互相関係数を通じた波形一致度の評価を行った。

周期 50-100 秒帯域においては、数値シミュレーション結果と観測記録の相関は全般に高いが、周期 50 秒を下回ると相関が急激に落ち、またその落ち方に地域性が見られることが明らかになった。ここで、1 次元構造を仮定した計算波形と 3 次元不均質構造を仮定した計算波形とが比較的長周期帯でも顕著に異なる場合があり、かつそれが海溝や盆地構造など特定の不均質構造に起因すると思われる地域性を持つことは特筆に値する。F-net メカニズムの震源位置およびメカニズムは 1 次元速度構造を仮定して推定されており、それを元に 3 次元構造モデルで計算した波形が観測記録によりよく一致するとは限らないことには注意が必要であるが、本結果は今後適切な 3 次元不均質構造を導入することで、長周期波形を用いたモーメントテンソル解析が大幅に高精度化する可能性を強く示唆するものである。

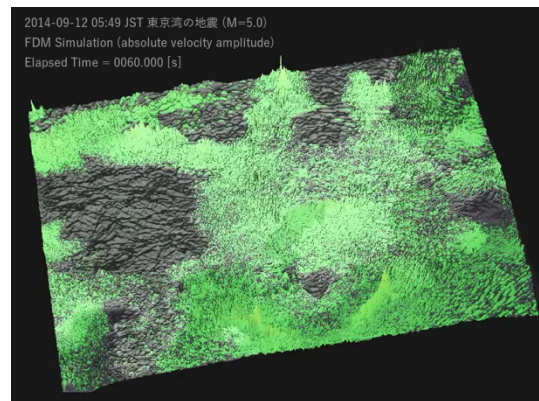
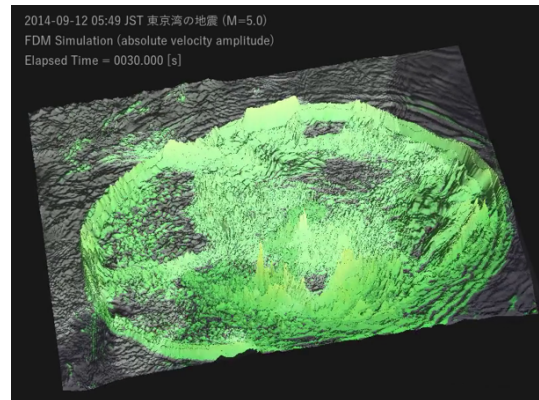
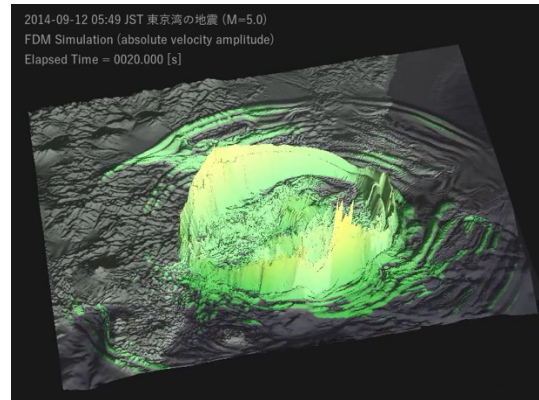
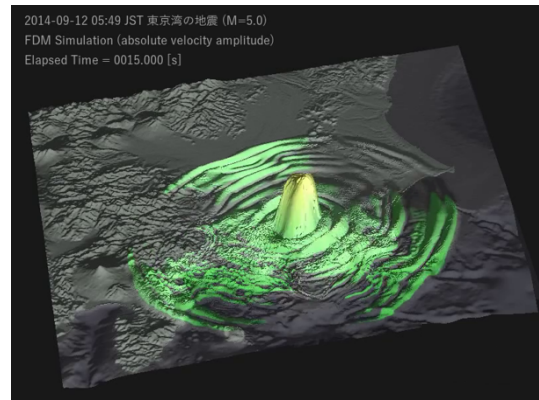


図. 全国 1 次地下構造モデルに基づく 2015 年 9 月 12 日東京湾の地震 (M=5.0) のシミュレーション. 時刻 10, 20, 30, 60 秒における速度の絶対振幅を高さで示す.