

ボクセル有限要素法を用いた2次元速度構造インバージョン Two-dimensional Velocity Structure Inversion Using the Voxel FEM

郭 雨佳^{1*}, 纈 纈 一起¹

GUO, Yujia^{1*}, KOKETSU Kazuki¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

強震動の特性を説明し、その発生メカニズムを解明するには、震源断層での破壊過程のみならず、地震波が伝播する地下構造による影響も適切に考慮することが重要である。特に、地下構造の不均質性や非弾性減衰は、観測される波形を複雑に変化させると考えられている。そのため、不均質性や非弾性減衰が十分に反映された忠実な地下構造モデルを構築する必要がある。本研究では、非弾性減衰を考慮に入れた地殻の2次元断面の速度構造モデルを、P-SV波動場の波形インバージョンによって求める手法を提案する。

インバージョンの際のforward計算には、Koketsu et al. (2004)によるボクセル有限要素法を採用した。ボクセル要素を用いることで要素の生成が効率的になり、差分法とほぼ同等な計算効率で計算を行うことができる。長方形のボクセル要素に対してGalerkin法を適用し、各要素の形状関数は1次要素のものを用いた。時間方向の離散化は、加速度項は中心差分、速度項は後退差分で行った。また、2次元問題のため、線震源による波形が計算されることになる。このため、引間(2007)に従い、3次元震源断層の2次元P-SV波動場への近似的な変換を施し、点震源相当の波形を得た。

広帯域での減衰特性を実現するため、剛性比例減衰と質量比例減衰を組み合わせ、両者の線形結合で表されるRayleigh減衰(池上2009)を導入した。これにより、P波・SV波それぞれに対して本来要求されるQ値一定のスペクトルを広帯域にわたって近似的に実現することが可能となる。

非線形の拘束条件付き最小二乗問題のゆえに、反復法を用いてKKT条件を満たす局所的な最適解を探していくことになるが、その際の偏微分波形は運動方程式を直接偏微分することによって定式化し、forward計算と同時に計算できるようにした。また、最適化空間の次元と、ステップ幅や探索方向の決定はAskan(2006)とAskan et al. (2007)の手法をベースとした。最適化空間の次元に関しては、問題の計算規模が大きいため、全空間を (σ, μ) の2次元空間へ射影した縮小空間で解いた。ステップ幅は直線探索法を使い、現在いる点から探索方向へ移動していく幅を1次の最小化問題として解くことによって求めた。探索方向はNewton-CG法を使い、Newton方向をGauss-Newton近似や共役勾配法で解くことによって決定した。また、局所的な最小値にはまり込むことなく大域的な最小解を導くため、粗いグリッドからインバージョンを始め、得られた解をより細かいグリッドでの初期推定解として使ってインバージョンを繰り返していくマルチグリッド法を用いた。

発表では、本研究の定式化の詳細と数値実験による計算の結果を示す。

キーワード: 速度構造, 減衰, 有限要素法, インバージョン

Keywords: Velocity structure, Attenuation, Finite-element method (FEM), Inversion