

地殻構造探査における反射法地震探査データを用いた初動走時トモグラフィ解析と初期モデルランダム化による解の評価

Traveltime tomography using reflection seismic data and uncertainty analysis by initial model randomization

白石 和也^{1*}, 阿部 進¹, 斉藤 秀雄¹, 岩崎 貴哉², 佐藤 比呂志², 越谷 信³, 加藤 直子², 新井 隆太², 川中 卓¹, 河合 展夫⁴

Kazuya Shiraishi^{1*}, Susumu Abe¹, Hideo Saito¹, Takaya Iwasaki², Hiroshi Sato², Shin Koshiya³, Naoko Kato², Ryuta Arai², Taku Kawanaka¹, Nobuo Kawai⁴

¹(株)地球科学総合研究所, ²東京大学地震研究所, ³岩手大学工学部, ⁴石油資源開発(株)

¹JGI, Inc., ²ERI, The University of Tokyo, ³Faculty of Engineering, Iwate University, ⁴JAPEX

近年、主に深部地殻構造探査において、稠密長大展開による反射法データ、広角反射法データおよび屈折法データの同時取得が実施されており、反射法と広角反射法の解析による速度構造及び構造断面の構築、屈折法によるトモグラフィ解析及びフォワードモデリングを通じた統合解釈が可能となった。反射法地震探査データや屈折法地震探査データの初動走時を用いたトモグラフィ解析では、地表に位置する多数の震源と受振点の組み合わせに対して、一般的には測線長10km~100kmの調査に対して深度1km~10km程度までの地下を対象とするP波速度構造を直接推定することができる。トモグラフィの利用が進む一方、初期モデルに対する依存性や観測ジオメトリの問題などから、解である速度モデルの持つ不確実性に対する評価指標が求められる。本研究では、一般的に用いられる屈折初動走時トモグラフィの解析手順に初期モデルランダム化によるモンテカルロ確度解析を加え、平均モデルと標準偏差分布により解の評価を行う方法について、シミュレーションおよびフィールドデータへの適用事例を重ねて検討を行ったので報告する。

屈折初動走時トモグラフィでは、反射法及び屈折法地震探査データより初動走時の読み取りを行い走時トモグラフィの入力データとする。任意の初期モデルに対する理論走時を計算し、観測走時との差を最小とするように速度モデルの更新を繰り返し、走時誤差が収束したところで速度モデルを出力する。ここでは、理論走時の計算にはLTI法、速度モデル更新にはSIRT法を採用した。さらに、一定の条件のもと数百の初期モデルをランダムに生成してそのすべてに対してトモグラフィ解析を実施し、全出力を合わせた平均的な速度構造モデルと各解析点における標準偏差分布を最終的な結果とする。標準偏差の値が小さい場所はどの初期モデルから解析を始めてもほぼ同じ速度値が求まることを意味し、一方、標準偏差の大きな場所では初期モデルに依存する解の不安定性を示す。これにより、最終モデルにおける理論走時と観測走時の対比に加えて、推定速度モデルに対する空間的な確からしさの指標を提供する。

いくつかのケーススタディにおいてそれぞれ100~500の初期モデルランダム化を実施し、地質構造と対応する信頼度の高い速度分布を得るとともに、構造の変化を反映する標準偏差分布を得た。例えば、楔状低速度帯による速度逆連モデルを用いたシミュレーションテストでは、トモグラフィにより速度逆転を捉えた速度分布を得るとともに逆転層上面および先端部分で標準偏差が局所的に高くなることが確認された。また、北上低地帯を東西に横断する測線長42km(総発震点数712点、総受振点数1152点)の反射法地震探査データに対して適用した例では、トモグラフィ解析により推定された速度構造は反射法地震探査により捉えられた広域の地質構造変化や断層の形状に調和的であり、地表から基盤にいたるまでの速度構造が高い信頼度で明らかとなった。標準偏差分布より3~4kmまでの浅部では分散が小さく信頼度の高い解が得られていることが示

され、断層付近や堆積層と基盤の境界付近で標準偏差値が周辺に比べて大きくコンターの集積が確認された。そういった速度構造が大きく変化する場所では波線経路も急激に変化するため、速度の求まる位置と値が不安定となりやすく標準偏差の値が周辺に比べて大きくなるものと考えられる。このことから、標準偏差の示す値は地質構造の変化を反映しているものと考えられることができる。また、速度モデルと標準偏差の収束に関する検討を検討した結果、安定した解を求めるためには少なくとも100~200程度の初期モデルランダム化が必要であることもわかった。

本手法は解の空間分解能について評価できるものではなく、一つの方法としてチェッカーボードレゾリューションテストの実施が挙げられる。しかし、自然地震によるトモグラフィとは違い、震源と受振点がともに地表に在る場合のトモグラフィ解析では、格子状の速度揺らぎを与えた場合に波線経路が大きく変わり解析領域も変化する可能性があるため注意が必要である。

今後は、走時曲線の対比、平均的速度モデルと標準偏差分布、波線密度分布を併せて解釈することが、トモグラフィ解析結果を評価する一つの方法として定着していくものと考えられる。今後、トモグラフィ解析に基づき速度勾配や傾斜等のアトリビュートを抽出して長周期の速度構造変化の中の短周期な構造変化の抽出を試み、反射法地震探査や他の調査結果と併せた統合的な地殻構造調査に役立てていきたい。

尚、本研究の一部は、東京大学地震研究所と(株)地球科学総合研究所で実施している共同研究として行われたものである。

キーワード: 屈折走時トモグラフィ, 反射法地震探査, 初期モデルランダム化, 確度解析

Keywords: Refraction travelttime tomography, reflection seismic survey, initial model randomization, uncertainty analysis