

次元可変なパラメータ空間でのコーダ波解析：東北沖アウターライズ地域への適用

高橋 努 (JAMSTEC)

はじめに 数 Hz 以上の高周波数帯域において地震波は散乱や非弾性減衰の影響を強く受け、直達波の波形が崩れるとともにコーダ波が励起される。これらの現象の理解には、適切な波動伝播モデルの構築とともに、媒質のランダム不均質や非弾性的性質の空間分布を定量的に評価する手法の構築が重要である。Multiple Lapse Time Window Analysis (MLTWA, Fehler et al. 1992; Hoshiba 1993)は、直達波からコーダ波までのエネルギーの時空間変化に基づいて散乱および内部減衰の Q 値を推定する手法として提案され、稠密地震観測網の記録を用いて Q 値の空間変化を推定する研究も行われている (e.g., Carcole & Sato, 2010)。しかし、解析対象領域内の Q 値が一定という仮定に基づいた波動伝播モデルを用いることが一般的であり、MLTWA を用いて詳細な構造変化を推定する手法は確立していない。そこで本研究では、次元可変空間でのベイズ推論の枠組みで MLTWA を一般化し、一様構造中の波動伝播モデルを用いて散乱減衰および内部減衰の空間変化をより適切に推定する手法を提案する。

手法 MLTWA では、S 波到達時から連続する 3 つの時間窓のエネルギー E_i ($i = 1 \sim 3$) と、震源時から一定時刻における時間窓でのエネルギー E_{ref} の 4 つの時間窓のエネルギーを解析に用いる。コーダ規格化法に基づき E_i を E_{ref} で規格化することで震源やサイト特性を取り除き、この規格化したエネルギー E_i/E_{ref} の残差二乗和

$$s = \sum_{ray} \sum_{i=1}^3 \left\{ \log(4\pi r^2 E_i^{Obs} / E_{ref}^{Obs}) - \log(4\pi r^2 E_i^{Calc} / E_{ref}^{Calc}) \right\}^2 \quad (1)$$

を最小化することで散乱減衰(Q_s)と内部減衰(Q_i)の最適な組み合わせを推定する。これまでの多くの研究では解析対象領域を観測点からの距離などに基づいて決め、 E_x^{calc} は Q 値が一定の場合を仮定している。しかし領域設定の段階では構造の空間変化に関する情報が得られていないため、対象領域内で Q 値が一定という条件を満たすことは困難である。

本研究では、解析対象領域を Q 値が一定の離散 Voronoi cell で分割し、Voronoi Cell の個数や空間配置、 Q 値を変化させながら、全ての cell に対する式(1)の総和を最小化にする解を探索する。これにより、 Q 値が一定の領域の集合として最適な領域設定と Q 値の組み合わせを推定する。なお観測点と震源を結ぶ波線は複数の Voronoi cell を横切る場合があるため、本研究では波線上で占める割合の最も大きい cell 内のデータとして残差を評価することとした。尤度関数はガウス型 $\exp(-\phi/2)$ を仮定し、

$$\begin{aligned} \phi = & \sum_{cell} \sum_{ray} \sum_{i=1}^3 \frac{\left\{ \log(4\pi r^2 E_i^{Obs} / E_{ref}^{Obs}) - \log(4\pi r^2 E_i^{Calc} / E_{ref}^{Calc}) \right\}^2}{\sigma_i^2} \\ & + w_{Q_i} \text{var}(\log Q_i^{-1}) + w_{Q_s} \text{var}(\log Q_s^{-1}) + w_r \sum_{cell} \sum_{ray} \left(1 - \frac{\max(r_1, \dots, r_k, \dots)}{R} \right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

とした。第2項と第3項はそれぞれ Q_i と Q_s の分散を小さくするためのペナルティ項を表す。第4項は各波線が横切る cell の数を抑制するためのペナルティ項であり、 R は震源から観測点までの距離、 r_k は波線上に存在する k 番目の cell 内の波線長を表す。 w_r を十分大きくすると、解析領域全体を一つの cell とする解が得られる。

この問題は未知数の数が不定となるため、Reversible Jump Markov Chain Monte Carlo (Green, 1995) を用いて次元可変なパラメータ空間での事後確率の元でサンプリングを行い、最適解周辺のサンプル点のアンサンブル平均とばらつきから構造と推定誤差を評価した。

結果 この手法について、Yoshimoto (2000) のモンテカルロシミュレーションを用いて人工データを作成し検証した。その結果、従来の観測点ごとの MLTWA に比べ Q 値をより正確に推定することができ、また空間分布も入力モデルに近い結果を復元することができた。これにより一様構造を仮定した波動伝播モデルに基づいた MLTWA でも、データの持つ情報を適切に抽出することで Q 値の空間変化をより詳細に解明できることが分かった。またこの手法を東北沖アウターライズ地域での海底地震観測記録へ適用した結果、内部減衰はほぼ空間一様な構造を示し、散乱は明瞭な空間変化を示した。観測網の北側にイメージされた散乱の強い領域は、2005年に発生した M7.0 の地震の震源域 (Hino et al. 2009) や 2011年東北沖地震の約40分後に発生した Mw7.6 の震源付近に対応し、破碎構造を反映している可能性が高いと考えられる。また観測網の中央から南東側にも散乱の強い領域が分布し、プチスポットが存在すると考えられている領域 (Hirano et al., 2008) とよく一致する。火成岩が分布する領域で散乱が強いという傾向は西南日本でも見られており (Takahashi et al. 2013)、マグマ貫入などによって形成された不均質性を反映している可能性が高いと考えられる。また、このプチスポット領域では地殻浅部に強い反射面が存在し、地殻浅部に強い不均質性が集中している可能性も指摘されている (Fujie et al., 2016)。今後は Q 値の深さ変化を解明する手法の構築と適用を進め、 Q 値と地下構造の関係を詳細に解明することが重要となる。