S18-02

内部減衰と速度揺らぎの 3 次元不均質構造推定の試み

小木曽 仁 (気象研究所)

2018 年 9 月 10 日

はじめに

地震波減衰構造は地球内部構造の理解や地震・火山活動との関連の考察に加えて強震動予測においても重要な情報となる。昨年度の本研究集会では、等方散乱の仮定の元で内部減衰と散乱係数の 3 次元不均質構造推定について発表したが、強震動予測への活用も視野に入れるのであれば主要動付近の波形を適切に表現できる減衰構造が必要となり、主要動付近の波形を説明するためには非等方散乱を考慮しなければならない。本発表では、非等方散乱を考慮した内部減衰と散乱減衰の 3 次元不均質構造の推定手法を提案し、西南日本地域に適用した結果について紹介する。

構造推定手法

本研究では地震波エンベロープを用いて減衰構造を推定する。エンベロープの計算には輻射伝達理論に基づいたモンテカルロ法を採用し、速度構造の不均質性 (ここでは 1D 速度構造を用いる）も考慮できるようにした。また、媒質に指数関数型のパワースペクトルで特徴付けられるランダムな速度揺らぎがあると仮定し、ボルン近似に基づいた散乱係数を利用することによって非等方散乱の効果をエンベロープ計算に取り入れることとした。なお、本研究ではランダム媒質の相関距離 a は 1km で固定し、S 波及び SS 散乱のみを考慮する。

最初に、震源－観測点の各ペアごとにエンベロープを最もよく説明する内部減衰と速度揺らぎの組み合わせ $(Q_{ij}^{-1}, \varepsilon_{ij})$ を推定する。観測点 $\mathbf{x}_j$ における地震 i の観測エンベロープ $W_{ij}^{\mathrm{obs}}(t)$ が次式で表現されると仮定する:

$$W_{ij}^{\mathrm{obs}}(t) = W_{ij}^{s} E_i(\varepsilon_{ij}; \mathbf{x}_j, t) \exp(-b_{ij} t) \tag{1}$$

ここで $E_i(\varepsilon_{ij}; \mathbf{x}_j, t)$ は観測点 $\mathbf{x}_j$ におけるエンベロープのグリーン関数を示し、$b_{ij} = 2\pi f Q_{ij}^{-1}$ (f は周波数) である。W_{ij}^{s} は震源振幅やサイト特性等、定数で表現できる項を表す。ある ε_{ij} を仮定して $E_{ij}(\varepsilon_{ij}; \mathbf{x}_j, t)$ を計算し、式 (1) の対数をとって b_{ij} と W_{ij}^{s} を推定する。その上で ε_{ij} についてグリッドサーチを行い、最小残差となる $(Q_{ij}^{-1}, \varepsilon_{ij})$ の組み合わせを各震源－観測点ペアごとに探索した。

最初のステップで推定した $(Q_{ij}^{-1}, \varepsilon_{ij})$ の組み合わせは震源ー観測点ペア間の平均的な減衰特性を示しているものと考えることができる。よって、次のステップとして、得られた $(Q_{ij}^{-1}, \varepsilon_{ij})$ を 3 次元空間にマッピングすることを考える。その際、ある初期構造 $(Q_{\mathrm{ini}}^{-1}, \varepsilon_{\mathrm{ini}})$ を仮定し、その初期構造をステップ 1 で合成したエンベロープと Takeuchi (2016) の式 (11) によるセンシティビティカーネルを用いて修正していくこととする。減衰構造パラメータの摂動 $(\delta Q^{-1}, \delta\varepsilon)$ は次式で表せ、モンテカルロ法で計算することができる:

$$\frac{W_{ij}^{\mathrm{cal}}(t)}{W_{ij}^{s}} - E_i(Q_{\mathrm{ini}}^{-1}, \varepsilon_{\mathrm{ini}}; \mathbf{x}_j, t) = \left\{ -\int_l \frac{2\delta\varepsilon}{\varepsilon_{\mathrm{ini}}} g_0 dl + \sum_k \frac{2\delta\varepsilon(\mathbf{x}_k)}{\varepsilon_{\mathrm{ini}}(\mathbf{x}_k)} - \int_l k_0 \delta Q^{-1} dl \right\} \exp\left(-k_0 \int_l Q_{\mathrm{ini}}^{-1} dl \right) \tag{2}$$

ここで、$W_{ij}^{\mathrm{cal}}(t)$ はステップ 1 で合成したエンベロープ、$E_i(Q_{\mathrm{ini}}^{-1}, \varepsilon_{\mathrm{ini}}; \mathbf{x}_j, t)$ は初期構造におけるエンベロープのグリーン関数、g_0 は全散乱係数、k_0 は波数である。また、積分記号はモンテカルロ法の各粒子の波線に沿った積分を示し、総和記号は各粒子の $\mathbf{x}_k$ で発生した k 回の散乱イベントすべてについて和を取ることを示す。式 (2) の右辺は簡単に離散化することができるので、多数のデータを用いて $(\delta Q^{-1}, \delta\varepsilon)$ に関する連立方程式を立て、最小二乗法を用いて解くこととする。ここでは、Bayesian-type Algebraic reconstruction technique (ARTB; Herman et al., 1979; Hirahara, 1988) を用いて解を求めた。

結果

地下構造は水平方向 0.4 度、深さ方向 20km(第 1 層のみ 10km) のブロックで離散化した。図 1 に減衰パラメータの 3 次元空間へのマッピング結果を示す。Step1 の結果のばらつきが大きいため、インバージョンの際に強く初期構造に拘束する必要があり、復元された減衰構造の絶対値には検討の余地が残るものの、高減衰・低減衰の分布パターンは議論が可能と考える。全体的な特徴としては、先行研究と同様、九州地方は他の地域より内部減衰と速度揺らぎがともに強い傾向が見て取れ、活発なテクトニクスを反映しているものと考えられる。また、特に中国地方について、内部減衰と速度揺らぎに明瞭な深さ依存性がみられる。深い領域ほど減衰が小さいという特徴は Step1 における結果とも整合的である。

謝辞

本研究の実施にあたり、防災科研 Hi-net で記録された地震波形を利用しました。また、JSPS 科研費 JP17H02064 及び JP18K13622 の助成を受けたものです。記して感謝します。

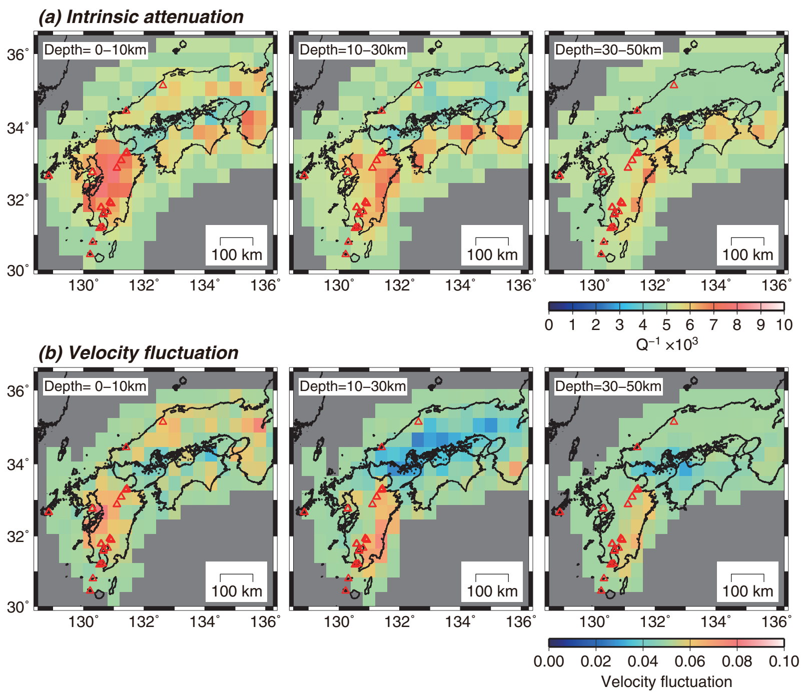

図 1　推定された (a) 内部減衰と (b) 速度揺らぎの 3 次元分布。左から 0-10km, 10-30km, 30-50km の深さを示す。