

南海トラフ周辺のランダム速度不均質構造

Random Velocity Inhomogeneity in Nankai Subduction zone

高橋努^[1]・尾鼻浩一郎^[1]・山本揚二郎^[1]・海宝由佳^[1]・仲西理子^[1]・小平秀一^[1]・金田義行^[2,1]

1: 独立行政法人海洋研究開発機構, 2: 名古屋大学

1. Introduction

南海トラフはユーラシアプレートの下にフィリピン海プレートが沈み込む収束境界であり、南海・東南海・東海地震といった巨大地震の震源域が分布する。この地域における地下構造の特徴及び地震活動との関連を解明するため、(独)海洋研究開発機構では文部科学省の受託研究「東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究」の一環として、南海トラフ周辺において制御震源及び自然地震を用いた構造探査研究を2008年から2012年まで実施した。この観測記録を用いた研究から、沈み込むフィリピン海プレートの詳細な形状やプレート境界周辺の内部構造が解明され[e.g., Nakanishi et al., 2013; Yamamoto et al., 2013; 2014], 沈み込んだ九州パラオ海嶺は周囲とは異なるランダム不均質を持つことなどが明らかになってきた[e.g., Takahashi et al., 2013]. 本研究では、南海トラフ全域のランダム速度不均質構造をより詳細に推定するため、構造を規定する未知数の数を可変とした解析法を Reversible Jump Markov Chain Monte Carlo [Green, 1995] (以下, rjMCMC) に基づいて構築し、未知数の滑らかな空間分布を仮定せずに構造推定を行った。

2. Peak delay time in von Karman type random media

地下の媒質がランダムな速度ゆらぎを持ち、そのゆらぎが von Karman 型のパワースペクトル密度関数 $P(m) = 8\pi^{3/2}\varepsilon^2 a^3 \Gamma(\kappa+3/2) / [\Gamma(\kappa)(1+a^2 m^2)^{\kappa+3/2}]$ で特徴付けられると仮定する。ここで a は特徴的スケール, ε はゆらぎの RMS 値, κ は高波数域におけるスペクトルの勾配を決めるパラメータを表す。地震波の波長が a に比べて短く、波の伝播距離が a に比べて十分長い場合、前方散乱が卓越し、直達波付近の波群は放物型波動方程式のマルコフ近似[e.g., Sato 1989]により表現できる。von Karman 型のランダム媒質中において、初動到達から最大振幅到達までの時間差として定義されるピーク遅延時間 (t_p) は、伝播距離 r と中心周波数 f の関数として以下のように表現することができる。

$$t_p = N_p(\kappa, \varepsilon, a) \cdot f^{2M_p(\kappa)-4} \cdot r^{M_p(\kappa)}, \quad (1)$$

$$M_p(\kappa) = 1 + 2/p(\kappa), \quad (2)$$

$$N_p(\kappa, \varepsilon, a) = b_p(\kappa) \left(\frac{C(\kappa)^{2/p(\kappa)}}{2} V_0^{1-4/p(\kappa)} \left(\varepsilon^{\frac{2}{p(\kappa)-1}} a^{-1} \right)^{2-\frac{2}{p(\kappa)}} (2\pi)^{-2+\frac{4}{p(\kappa)}} \right). \quad (3)$$

Takahashi et al. (2008)に従い、波線経路に沿って $P(m)$ が区分的に変化する場合を考えると、 κ と $\varepsilon^{2/(p(\kappa)-1)} a^{-1}$ を未知数として、ピーク遅延時間の観測値と各観測点での t_p の周波数依存性から二つの未知数の空間分布を求めることができる (e.g., Takahashi et al. 2009)。

3. Transdimensional Imaging with rjMCMC

マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) は、対象とする確率分布に対して「確率の大きな方へ移動し、確率が大きくなったらその近傍をうろろする」手法である。rjMCMC は次元可変の場合における MCMC 法で、これまで比抵抗構造の推定[Marlinverno, 2002]や表面波トモグラフィ[Bodin & Sambridge, 2009]などで適用され、構造を規定する未知数の数を不定とした解析が行われている。

本研究では解析対象領域を個数可変の離散 Voronoi cell で分割し、cell の数や形状を変えながら次元可変なモデル空間内で最適解周辺のサンプリングを行い、そのアンサンブル平均から構造を推定した。サンプリングを行う際の各未知数の範囲は、理論モデルの制約やこれまでの研究結果を考慮し、 κ は 0.1~0.9、 $\epsilon^{2/(p(\kappa)-1)}a^{-1}$ は $10^{-6} \sim 10^{-2} [\text{m}^{-1}]$ とした。

尤度関数は、 t_p の残差二乗和と、観測点毎に得られる t_p の周波数依存性を表す係数 B_{freq} の残差二乗和から構成した。ここで B_{freq} は $\log(t_p[f \text{ Hz}]/t_p[f_{\text{ref}} \text{ Hz}]) = A_{\text{freq}} + B_{\text{freq}} \log f$ による回帰係数である。また収束を安定させるため、 $\epsilon^{2/(p(\kappa)-1)}a^{-1}$ の分散を小さくする拘束条件を導入した。以上より、尤度関数 $p(d_{\text{obs}} | \mathbf{x}, n)$ は以下のように定義した。

$$p(d_{\text{obs}} | \mathbf{x}, n) = \exp \left(- \left(\frac{1}{2\sigma_{t_p}^2} \sum (t_p^{\text{obs}} - t_p(\mathbf{x}))^2 + w_{B_{\text{freq}}} \sum \frac{(B_{\text{freq}}^{\text{obs}} - B_{\text{freq}})^2}{2\sigma_B^2} + w_\epsilon \sum \left(\log(\epsilon^{2/(p(\kappa)-1)}a^{-1}) - \overline{\log(\epsilon^{2/(p(\kappa)-1)}a^{-1})} \right)^2 \right) \right) \quad (4)$$

ここで σ_{t_p} は t_p の標準偏差、 σ_B は回帰係数 B_{freq} の標準偏差、 w_B, w_ϵ は重み係数を表す。

解析には、(独) 海洋研究開発機構がこれまでに南海トラフ周辺で海底地震計を用いて行った自然地震観測の記録と DONET の自然地震記録、そして (独) 防災科学技術研究所の Hi-net・F-net 観測点で得られた地震波形記録を用いた。沈み込むフィリピン海プレート周辺の深さ 35-300km で発生した M5 以下の地震 1605 個について、1714 観測点で得られた記録を用いた。これらの記録から 4-8Hz, 8-16Hz, 16-32Hz の S 波のピーク遅延時間を測定し、解析を行った。離散 Voronoi cell の最小サイズは水平方向 $0.20^\circ \times 0.20^\circ$ 、深さ方向 10km とした。

5. Results & Discussion

解析の結果、九州や中国地方の火山地域周辺の浅部（深さ 0-30km）は、パワースペクトルの勾配が緩やかで速度不均質の短波長成分に富む媒質が分布することが解った。火山地域では深さの増加とともにスペクトルの勾配が緩やかな領域が小さくなる傾向が見られる。また地表付近では、これらの不均質性の強い領域は火成岩の分布と良い相関を示しており、マグマ貫入など火成活動によって形成された媒質の不均質を反映していると考えられる。

四国や四国沖の南海トラフの浅部（深さ 0-30km）は、一様にスペクトルの勾配が急峻で不均質の短波長成分は弱い、 $\epsilon^{2/(p(\kappa)-1)}a^{-1}$ は中国地方に比べて大きな値を示す。この $\epsilon^{2/(p(\kappa)-1)}a^{-1}$ の大きな領域は付加体の分布と良い相関を示しており、付加体形成により特徴的スケール a が周囲に比べ小さくなったことが大きな $\epsilon^{2/(p(\kappa)-1)}a^{-1}$ の成因の一つと考えられる。

深さ 30km 以深では沈み込んだフィリピン海プレートの上面付近に $\epsilon^{2/(p(\kappa)-1)}a^{-1}$ の大きな領域が分布する。また沈み込んだ九州パラオ海嶺付近や紀伊水道付近の沈み込んだ海山付近、足摺岬付近で $\epsilon^{2/(p(\kappa)-1)}a^{-1}$ の大きな領域が存在することがわかった。紀伊水道の $\epsilon^{2/(p(\kappa)-1)}a^{-1}$ の大きな領域は、沈み込んだ海山下の海洋マントル内に存在する低速度異常域 (Kodaira et al., 2002) と概ね対応している。このことは足摺岬付近にも沈み込んだ海山や九州パラオ海嶺と類似した媒質が存在する可能性を示唆する。