

高周波数帯を含むレシーバ関数による南海地域におけるスロー地震域の構造の予備的推定  
 A preliminary estimation of seismic structures around slow earthquakes area in the Nankai using receiver functions in multi-frequency bands

○高山朗文・佐脇泰典・Yihuan RUAN・伊藤喜宏・前田拓人・澁谷拓郎

○Akifumi TAKAYAMA, Yasunori SAWAKI, Yihuan RUAN, Yoshihiro ITO, Takuto MAEDA, Takuo SHIBUTANI

Seismic heterogeneity around a subducted slab (especially subducted seamounts) often reflects the source environment of the slow earthquakes (slow EQ). However, there is an ongoing debate about whether or how the seismic heterogeneity associated with subducted seamounts affects the occurrence of deep slow EQ. We compare synthetic receiver function (RF) using PyRaysum and OpenSWPC to image the seismic heterogeneity caused by seamounts of the Nankai subduction zone. A thin low-velocity layer with a thickness of 1 km is inserted above the top of the slab to simply assume the presence of seismic heterogeneity due to seamount. 1 km-thick low-velocity zone was NOT properly imaged using the conventional RF method, but high-frequency RF probably resolves the thin seismic heterogeneity using higher-frequency parts. We will calculate RF on the real waveform using higher frequency bands and time-domain RF to evaluate thin seismic heterogeneity like deep subducted seamounts.

### 1. はじめに

通常の地震と比べ、断層面でのすべり速度が遅い地震をスロー地震と呼ぶ。スロー地震域における地震学的構造の推定は、スロー地震の発生メカニズムの理解に必須である。

浅部スロー地震発生場では、沈みこむ海山に伴い生じる上盤側の不均質構造の影響が指摘されている (e.g. Sun et al., 2020) 。一方、深部スロー地震発生場では、P 波速度 ( $V_p$ ) と S 波速度 ( $V_s$ ) の比 ( $V_p/V_s$ ) が高いとされる (Shelly et al., 2006) 。しかし、 $V_p/V_s$  の空間的なばらつきが存在 (Nakajima and Hasegawa, 2016) など、深部スロー地震域の十分な解像度での不均質構造の研究は途上である。したがって、深部スロー地震発生域における詳細な構造推定は、スロー地震発生場とそのメカニズムの理解において重要である。

本発表ではこれらの解明に向け、深く沈み込んだ海山などに伴い生じる微細な不均質構造が地震学的手法を用いて検出できるか、波動伝播モデリングに基づいて検証する。

### 2. 手法

本研究では、構造推定手法としてレシーバ関数 (RF) 法 (e.g. Langston, 1979) を使用した。RF 法は、遠地地震波形から速度不連続面で変換した波

を抽出することで、速度境界を検出する手法である。本研究では、遠地地震波の水平動成分を上下動成分で周波数領域において除算し、ガウシアンローパスフィルタを作用させた上で、時間領域に戻したものを RF とした。

波動伝播モデリングには、PyRaysum (Bloch and Audet, 2023) と OpenSWPC (Maeda et al., 2017) を使用した。PyRaysum は、波線追跡と高周波近似を適用し、成層構造における平面波波動伝播を計算する (Raysum: Frederiksen and Bostock, 2000) 。OpenSWPC は、弾性体・粘弾性体の運動方程式を差分法で離散化し、グリッドで与えた構造における 3 次元波動伝播を計算する。

### 3. 設定

設定した地下構造は、大陸地殻と傾斜したスラブの 2 層を基本とし、沈み込む海山などで生じる不均質構造として厚さ 1 km の地震波低速層をスラブ直上に挿入した。この層には、南海沈み込み帯における深部スロー地震発生場における地下構造の特徴を反映させた。具体的には、低  $V_p$  (e.g. Bassett et al., 2022) , 高  $V_p/V_s$  (e.g. Shelly et al., 2006) を考慮した。

波動伝播モデリングで入射する波は、遠地地震波を想定し、浅い入射角を持つ P 波平面波とし

た. 具体的には, PyRaysum で入射する平面波のスローネスを  $0.06 \text{ s/km}$  とし, OpenSWPC で入射する平面波の入射角はスローネス  $0.06 \text{ s/km}$  に対応する  $15^\circ$  に設定した.

#### 4. 結果

本研究では, 海山の沈み込みなどに伴う微細な速度不均質層の有無によって RF に違いが現れるか, 2 種類の波動伝播モデリングで検証した.

Fig. 1. に低周波成分のみ ( $\leq 0.5 \text{ Hz}$ ) を使用した RF の結果を, Fig. 2. に高周波成分 ( $\leq 1.5 \text{ Hz}$ ) を使用した結果を示す. 低周波成分のみを使用した従来の RF では, どちらの波動伝播モデリング方法でも不均質構造による変換波のシグナルが 2 つに分かれる現象 (スプリット) が現れなかった. 高周波成分を使用した RF では, PyRaysum では不均質構造による変換波のスプリットが現れたが, OpenSWPC では変換波のスプリットは全ての到来方向からは現れなかった.

#### 5. 議論

海山の沈み込みなどに伴う微細な不均質構造は, 低周波成分のみを使用した RF では検出できなかった. この原因として, RF の鉛直方向の分解能が S 波波長に依存することが挙げられる. Levin et al. (2016) は, Ps 変換波の RF の鉛直方向の分解能が S 波波長の  $1/4$  に比例することを示

した. したがって,  $0.5 \text{ Hz}$  より低周波の成分では, Ps 変換波の鉛直方向分解能は約  $3.8 \text{ km}$  となる. また Ps 変換波で厚さ  $1 \text{ km}$  の不均質構造を検出するには, 約  $1.9 \text{ Hz}$  の成分が必要となる. よって, 微細な不均質構造を RF 法で検出するには,  $2.0 \text{ Hz}$  程度の成分を使用する必要がある.

高周波側まで RF 計算に使用した場合について, PyRaysum を使用した場合は不均質構造が RF に反映された. 一方, OpenSWPC では全ての到来方向からは反映されなかった. この原因として, OpenSWPC で設定した計算領域の幅が不十分であった可能性がある. OpenSWPC では水平入射でない平面波の入射は, 計算領域境界からの反射が含まれる (Maeda et al., 2017). 今後より大規模な計算領域を使用することで, 境界からの人工反射波の影響を軽減する必要がある.

#### 6. 展望

近年提案された RF 法を用いた, 深部スロー地震域に沈み込む海山などに伴う微細な不均質構造の検出可能性について検討を進める. 具体的には, 時間領域逆畳み込み積分を使用した RF 法 (e.g. Ligorria and Ammon, 1999; Ruan et al., 2023), 高周波帯域を含むマルチバンド RF 法 (e.g. Sawaki et al., 2021) を適用する. これらの手法を実データにも適用することで, RF 解析で微細な速度不均質構造の安定した検出ができると期待される.

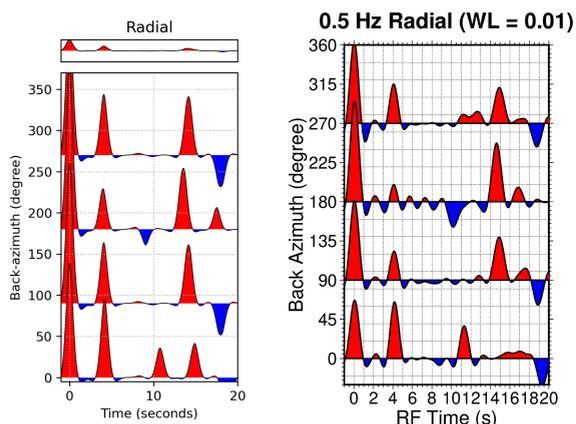


Fig. 1. 低周波成分のみ ( $\leq 0.5 \text{ Hz}$ ) を使用した RF. 左が PyRaysum による RF, 右が OpenSWPC による RF を表す. OpenSWPC による RF では,  $c = 0.01$  の water level と  $\alpha = 2.5$  のガウシアンフィルタを使用した. 縦軸は到来方向 ( $^\circ$ ), 横軸は Pp 波到達からの時間 (s) を表す.

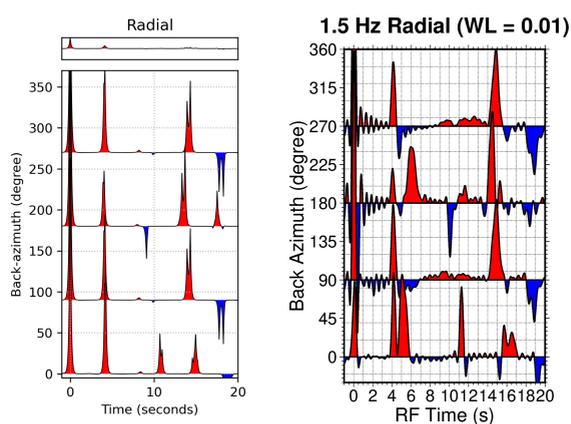


Fig. 2. 高周波成分 ( $\leq 1.5 \text{ Hz}$ ) を使用した RF. 図の見方は Fig. 1. と同様. OpenSWPC による RF では, 差分法の安定条件・波長条件を満たすように, 計算領域・グリッド間隔を Fig. 1. から変更した点に注意. また,  $\alpha = 7$  のガウシアンフィルタを使用した.