

地震波形インバージョンによるマントル最下部の

S・P 波速度構造同時推定

—地球深部の熱・化学進化の理解に向けて—

佐藤嶺

東京大学大学院理学系研究科

1. はじめに

本研究の目的は中米下マントル最下部領域の詳細な S・P 速度不均質構造を推定することで熱及び化学不均質構造の解釈を行う事である。

固体岩石のマントルと液体鉄合金の外核が接する核-マントル境界 (CMB) は地球内部の最も主要な熱的・化学組成的境界の 1 つであり、その近傍の詳細な構造推定は地球の熱・化学進化の理解に重要である。CMB 直上約 400 km (D'' 領域) の化学進化の要因については議論が続いており、近年では (A) マントル対流における下部熱境界層である D'' 領域では、地温勾配とマントル組成のソリダスが交わり、部分熔融に伴う化学分化を起こすマグマが定常的に発生する可能性が高い¹。(B) 数億年かけて D'' 領域まで沈み込んだ海洋プレートのうち、放射性熱源を含む海洋地殻成分が海洋プレート本体から剥がれ濃集し、不均質構造を形成する²という二説が主に提唱されている。

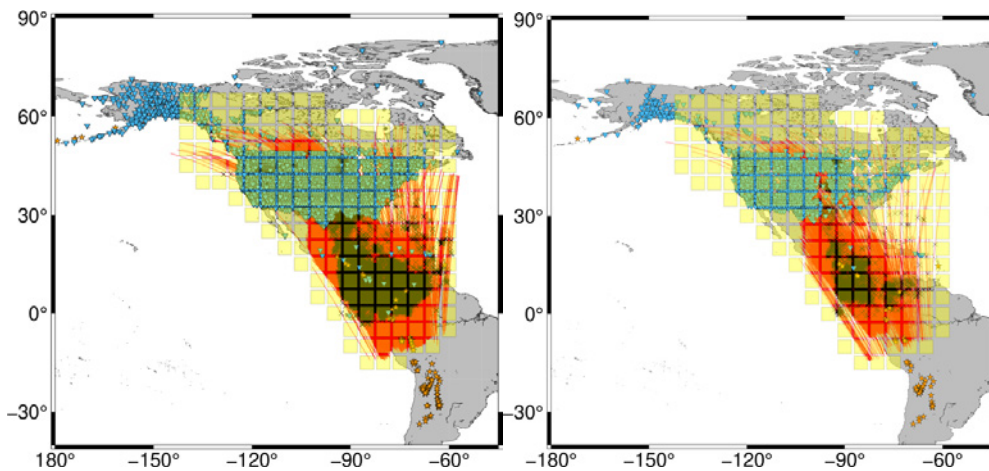
これら化学組成不均質の存在を地震波観測情報から制約するには、地震波 S 波速度 (V_s) 及び P 波速度 (V_p) の不均質構造を同質のデータから同程度の解像度で同時推定することで、地震波速度異常を温度効果と化学組成効果に分離する必要がある³。これまでの $V_s \cdot V_p$ 不均質構造同時推定の研究では、使用するデータセットの種類や質が異なる³、 V_s と V_p の解像度が異なる⁴、解像度が粗い⁵等の課題が存在した。そのため、同質の地震波形データを用いて、 $V_s \cdot V_p$ 不均質構造を同程度かつ D'' 領域内部を解像できるほどの高解像度 (鉛直 100 km 以下、水平 200 km 以下) で同時推定することが要求されていた。

申請者が属する研究グループでは上述の課題を解決しうる手法として、大量かつ地震波形そのものをデータとして用いることで局所的な三次元地震波速度構造を高解像度で推定する波形インバージョン法⁶が開発されている。しかし、これまでの研究では波形インバージョン法は S 波速度不均質構造推定への適用のみに留まっていた^{7, 8}。そこで本研究では、波形インバージョン法を $V_s \cdot V_p$ 構造同時推定ができるように拡張することで、 D'' 領域の $V_s \cdot V_p$ 不均質構造を鉛直 50 km、水平 200 km の高解像度で同時に推定し、その速度不均質構造を最新の鉱物物理学による下部マントル構成鉱物の熱弾性特性データベース⁹と対照することで温度・化学組成不均質構造に解釈することを目指す。

2. データ

本研究では中米下の最下部 400 km のマントル領域における三次元 $V_s \cdot V_p$ 構造を求めることを目的とし、地震波三成分の波形を用いて波形インバージョンを行った。用いた地震イベントは

2001-2019年に発生したもの内、震央距離が70°以上100°以下、震源が150 km以深、マグニチュードが5.6以上7.2以下の102イベントである。これらのイベントを、USArray観測網などのネットワークの観測点2818点で観測された地震波形をデータとして用いた。地震波形はtransverse成分については直達S波が到達する20秒前からScS波が到達した60秒後までを切り取った後に0.005-0.1 Hzのバンドパスフィルタをかけた、vertical, radial成分については直達P波が到達する20秒前からPcP波が到達した60秒後までを切り取った後に0.005-0.2 Hzのバンドパスフィルタをかけた。現段階ではS波のデータは約14,000波形、P波のデータは約4800波形使用している。推定対象三次元モデルは5°×5°×100 km (CMBでは約300×300×100 kmに対応する)の合計1056点のvoxelに分割した。推定パラメータは各voxelでの等方的な弾性定数(μ , λ)の初期モデルからの摂動とし、これら推定した後にVs・Vp構造に焼き直した。第一図にデータセットと推定対象領域をまとめてある。



第一図：使用したデータセットおよび推定対象領域

各図はそれぞれS波データ(左図)およびP波データ(右図)のデータセットを表している。橙色の星が震源、青色の三角が観測点、赤色線が震源-観測点を結ぶ波線のうちD''領域を通過する部分、黒色のバツがScS波またはPcP波のCMB上における反射点、黄色の四角が推定対象領域を分割したのちのvoxelの位置を示す。

3. 手法

第二章で述べた各パラメーターの摂動(δm)の推定には波形インバージョン法⁶を用いた。初期モデルとしてPREM¹⁰を使用し、DSM法¹¹を用いて理論波形を、先行研究のアルゴリズム^{12, 13}を用いて偏微分係数波形(**A**)を計算した。震源付近と観測点付近の不均質構造の影響を取り除くためにオートピック手法¹⁴を適用した後に、観測波形から理論波形を差し引くことで差分波形(δd)を算出した。こうして求められた種々の値を用いて以下のような定式化が行える。

$$A\delta m = \delta d \quad (1)$$

(1)式を逆解析することによって推定パラメーターを求められる。本研究では推定パラメーターとして μ と λ の二つを扱うため、波形インバージョンを二段階に分けることでパラメーターの推定を行った。具体的には、一段階目としてS・P波の両データを用いて μ のみの推定を行った後に、二段階目として推定された μ の摂動も加味した上でP波データのみを用いて λ の推定

を行った。

4. 結果と考察

三章の手法に二章のデータを適用して得られた構造推定結果を第二図に示す。第二図には構造推定結果の他にも理論的な解像度テストの結果を、解像度が低い領域をグレイアウト、解像度が高い領域を白抜きで示してある。

まず、 $V_s \cdot V_p$ の解像度の差異に着目すると、本研究のデータセットでは V_s は広い領域で高い解像度を示しているのに対して、 V_p については P 波が密にサンプルする領域(第一図参照)のみ高い解像度を有している。これは P 波のデータセット数が S 波に比べて少ないことに起因すると考えられるため、現在は V_p の解像度向上を目指して P 波データを追加で収集している。

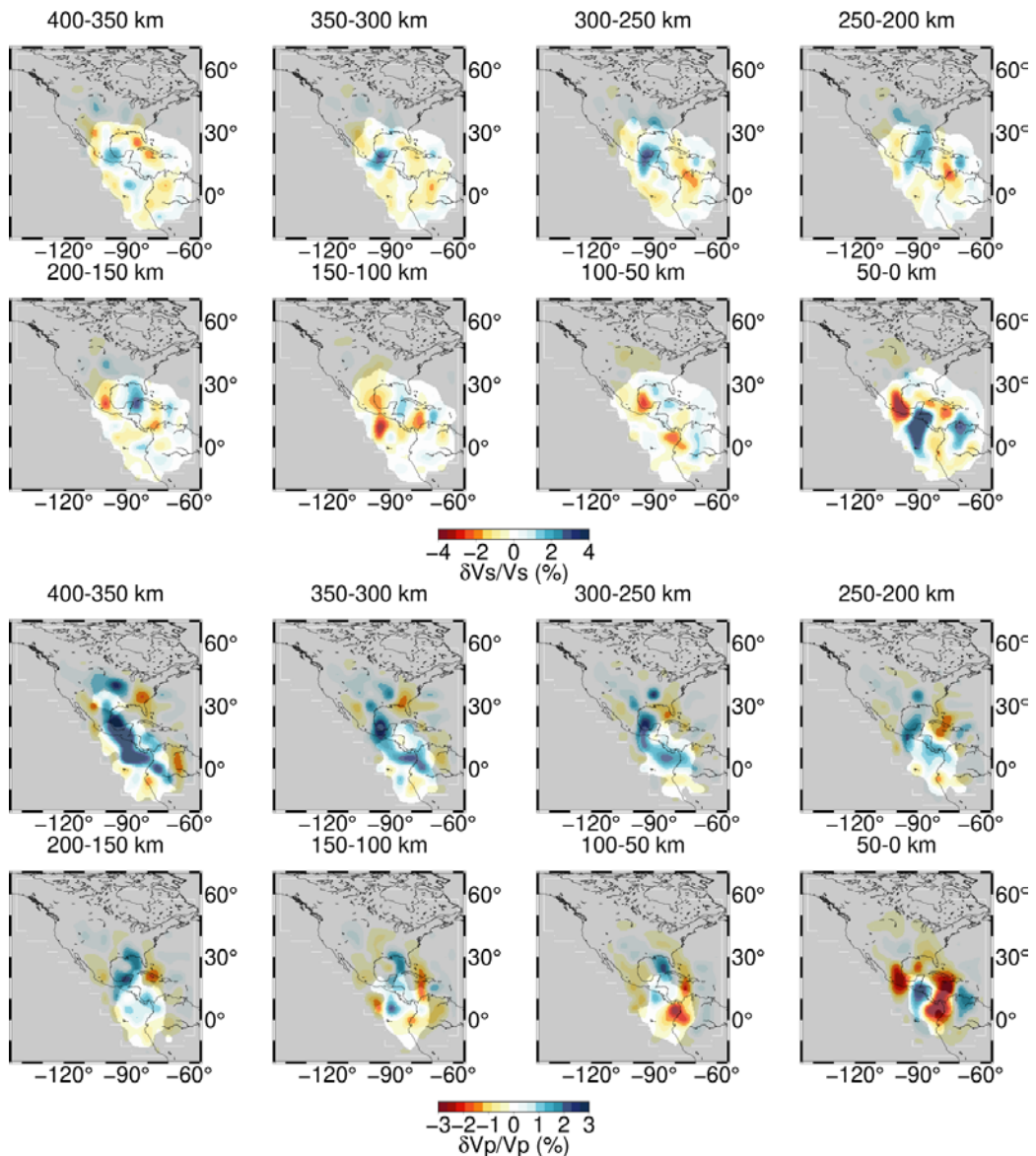
次に構造推定結果に着目をする。まず V_s については CMB 直上 0-50 km の領域では中米下とベネズエラ下に二つの高速度不均質構造が、その間およびメキシコ下に低速度不均質構造が存在している。このうち中米下の高速度不均質構造については北上しながら CMB 直上 400 km まで続いている。また、二つの高速度不均質の間に存在した低速度不均質構造についてもおおよそ同じ位置を保ったまま CMB 直上 400 km まで続いていることが読み取れる。これにより CMB 直上 200-400 km の領域については概して西側で高速度不均質、東側で低速度不均質構造を示している。

同様に V_p の構造推定結果の特徴を挙げて行く。CMB 直上 0-50 km の領域では V_s と同様に中米下に高速度不均質が、その東側に低速度不均質が存在している。高速度不均質については東側に広がりながら CMB 直上 400 km まで続いているのに対して、低速度不均質は CMB 直上 150 km まで続いた後にそれ以浅では消失している。よって CMB 直上 200-400 km の領域では概して巨大な高速度不均質構造が広がっていることが確認される。

以降では推定モデルを地質学的に解釈してゆく。まず、CMB 直上 400 km から CMB 直上 0 km まで続く V_s と V_p が両方とも高速度異常を示す西側領域については沈み込み Farallon スラブと考えられる。 $V_s \cdot V_p$ の両者が高速度であることから、摂動の原因はおおよそ低温異常のみで説明できる¹⁵ うえ、この高速度異常の位置は過去の走時トモグラフィ¹⁶ で解像された下部マントル領域の沈み込みスラブの位置および 150 Ma の Farallon プレート境界の位置¹⁷ と調和的である。従って、この領域は沈み込み Farallon スラブが由来の低温異常領域であると解釈される。次に、CMB 直上 200-400 km の領域における V_s は低速度、 V_p は高速度異常を示す東側領域の解釈を行う。 $V_s \cdot V_p$ 不均質が負相関となるには温度異常のみでの説明は不可能であり、化学組成異常の効果も考える必要がある。温度異常のみを考慮した場合、高温異常では $V_s \cdot V_p$ は共に高速度に、低温異常では $V_s \cdot V_p$ は共に低速度不均質を発生させる為、いずれの場合も $V_s \cdot V_p$ 不均質は正相関を示してしまう¹⁵。また、化学組成不均質を考える場合も鉄やアルミニウムなどの不純物の効果のみでは $V_s \cdot V_p$ 不均質の負相関は実現し得ない¹⁸。これを達成する可能性がある候補として鉱物物理学の研究から中央海嶺玄武岩(MORB)成分が提案されている。最下部マントル条件下ではブリッジマナイト-ポストペロプスカイト相転移の影響も加味すると MORB 成分はパイロライト成分と比較して V_s が低速度、 V_p が高速度となることが報告されている¹⁹。よって、CMB 直上 200-400 km の東側領域の解釈として MORB 物質が濃集している可能性があげられる。

5. まとめ

本研究では波形インバージョン法を拡張することで中米下 D'' 領域の $V_s \cdot V_p$ 構造推定を行っ



第二図：構造推定結果

波形インバージョンによる構造推定結果。(上図) S波速度構造(下図) P波速度構造。各図上部の数字はCMBから何 km 上部の層であることを示している。各々の速度は初期モデルである PREM⁰ からの摂動を示している。各図の白抜き領域およびグレイアウト領域はそれぞれ理論的な解像度テストの結果解像度が高い又は低い領域を示している。

た。推定結果より沈み込んだ Farallon スラブが D'' 領域全域まで到達していることを明らかにした。また、D'' 領域浅部 (CMB 直上 200-400 km) の東側領域には化学的不均質構造が存在している事を示唆し、その候補として MORB 物質が濃集している可能性を提示した。今後の展望としては、依然として存在する Vs・Vp の解像度の差異を解消する為に、更なる P 波データの集計お

よび適切な重み付け方法の模索などを通して、最高解像度での $V_s \cdot V_p$ 構造推定を目指して行きたい。

謝 辞

本研究は東京大学情報基盤センターが提供する「若手・女性利用」制度からの援助を受けました。地震波形データは IRIS データセンターよりダウンロードしました。

参 考 文 献

- [1] Garnero, E. J., & McNamara, A. K. (2008). Structure and dynamics of Earth's lower mantle. *Science*, 320(5876), 626-628
- [2] Tackley, P. J. (2011). Living dead slabs in 3-D: The dynamics of compositionally stratified slabs entering a "slab graveyard" above the core-mantle boundary. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 188(3-4), 150-162.
- [3] Masters, G., Laske, G., Bolton, H., & Dziewonski, A. (2000). The relative behavior of shear velocity, bulk sound speed, and compressional velocity in the mantle: implications for chemical and thermal structure. *Geophysical Monograph Series*, 117, 63-87
- [4] Houser, C., Masters, G., Shearer, P., & Laske, G. (2008). Shear and compressional velocity models of the mantle from cluster analysis of long-period waveforms. *Geophysical Journal International*, 174(1), 195-212.
- [5] Koelemeijer, P., Ritsema, J., Deuss, A., & van Heijst H.-J. (2016). SP12RTS: a degree-12 model of shear- and compressional-wave velocity for Earth's mantle. *Geophysical Journal International*, 204(2), 1024-1039.
- [6] Kawai, K., Konishi, K., Geller, R. J., & Fuji, N. (2014). Methods for inversion of body-wave waveforms for localized three-dimensional seismic structure and an application to D'' structure beneath central America. *Geophysical Journal International*, 197(1), 495-524.
- [7] Suzuki, Y., Kawai, K., Geller, R. J., Borgeaud, A. F. E., & Konishi, K. (2016). Waveform inversion for 3-D S-velocity structure of D'' beneath the Northern Pacific: possible evidence for a remnant slab and a passive plume. *Earth, Planets and Space*, 68, 198.
- [8] Borgeaud, A. F. E., Kawai, K., Konishi, K., & Geller, R. J. (2017). Imaging paleoslabs in the D'' layer beneath Central America and the Caribbean using seismic waveform inversion. *Science Advances*, 3(11).
- [9] Kawai, K., & Tsuchiya, T. (2015). Small shear modulus of cubic CaSiO_3 perovskite. *Geophysical Research Letters*, 42, 2718-2726.
- [10] Dziewonski, A. M., & Anderson, D. L. (1981). Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(4), 297-356.
- [11] Kawai, K., Takeuchi, N., & Geller, R. J. (2006). Complete synthetic seismograms up to 2 Hz for transversely isotropic spherically symmetric media. *Geophysical Journal*

International, 164(2), 411-424.

[12] Geller, R. J., & Hara, T. (1993). Two efficient algorithms for iterative linearized inversion of seismic waveform data. *Geophysical Journal International*, 115(3), 699-710.

[13] Borgeaud, A. F. E., Kawai, K., & Geller, R. J. (2019). Three-dimensional S velocity structure of the mantle transition zone beneath Central America and the Gulf of Mexico inferred using waveform inversion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 9664-9681.

[14] Fuji, N., Kawai, K., & Geller, R. J. (2010). A methodology for inversion of broadband seismic waveforms for elastic and anelastic structure and its application to the mantle transition zone beneath the northwestern Pacific. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 180(3-4), 118-137.

[15] Wentzcovitch, R. M., Tsuchiya, T., & Tsuchiya, J. (2006). MgSiO₃ postperovskite at D'' conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(3), 543-546.

[16] Grand, S. P., van der Hilst, R., & Widiyantoro, S. (1997). Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth. *GSA Today*, 7(4), 1-7

[17] Müller, R. D., Seton, M., Zahirovic, S., Williams, S. E., Matthews, K. J., Wright, N. M., Shephard, G. E., Maloney, K. T., Barnett-Moore, N., Hosseinpour, M., Bower, D. J., & Cannon, J. (2016). Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangaea breakup. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44, 107-138.

[18] Tsuchiya, T., & Tsuchiya, J. (2006). Effect of impurity on the elasticity of perovskite and postperovskite: Velocity contrast across the postperovskite transition in (Mg,Fe,Al)(Si,Al)O₃. *Geophysical Research Letters*, 33(12), L12S04.

[19] Tsuchiya, T. (2011). Elasticity of subducted basaltic crust at the lower mantle pressures: Insights on the nature of deep mantle heterogeneity. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 188, 142-149.