

西太平洋下のマントル最下部における 3 次 S 波速度構造推定

鈴木裕輝

東京工業大学 理学院 地球惑星科学系

1. はじめに

本稿では 2019 年度前期・後期の若手・女性利用者課題「波形インバージョンによる地球マントル最下部における低速度異常の詳細推定」の成果報告を行う。なお、本課題によって得られた成果の詳細は Physics of the Earth and Planet Interior 誌に掲載された論文(Suzuki et al., 2020)を参照されたい。

2. 研究の背景

不均質は対流システムの境界領域で発達する特徴である。地球マントルの最深部数 100 km はマントル対流の境界層の一つであり、熱的にも組成的にも不均質が発達する領域であるため、地球の進化を理解するために重要な領域であると考えられている。これまでの全球的な地球内部構造推定の研究によって、太平洋とアフリカ下の核-マントル境界(CMB)直上の 2 箇所、数千 km スケールの大規模な低速度領域(LLSVP)が存在することが確認されてきたが、CMB の表面積の約 30%を占める LLSVP の起源と組成は明らかになっていない(Garnero et al., 2016)。LLSVP は第一義的には温かい領域であると解釈されるが、構造推定の解像度の問題から、小さな上昇流(プルーム)の集合体で構成されるのか巨大な温かい領域なのか議論が続いていた。前者はプルームクラスターモデルとよばれ、後者はサーモケミカルパイルモデルと呼ばれる。マントルの対流によって、沈み込んだプレートなどの化学的に不均質な物質がよくかき混ぜられてしまい均質になれば小さな上昇流が複数生じ、プルームの集合(クラスター)を作ると考えられている。また、対流によって不均質な物質が核とマントルの境界の上に集められる場合、それを核に大きな温かい化学不均質領域(サーモケミカルパイル)ができると考えられる。そのため、LLSVP がプルームクラスターモデルもしくはサーモケミカルパイルモデルで説明できる場合、マントル対流の様式についてその候補となるモデルをさらに絞り込むことができる(Shubert et al., 2004)。2つのモデルのいずれがもっとも正しいかを明らかにするために、詳細な LLSVP 内部の構造推定を行うことが期待されていた。そこで本研究では、局所的に高解像度が期待できる太平洋 LLSVP の西端領域を対象に構造推定を行った。対象領域の西太平洋は地震イベント及び地震観測点の分布から、LLSVP 内部を方位角の広い分布を持って伝播する地震波データが取得できるため、LLSVP 内部の構造推定に最適な領域である。

3. 構造推定手法について

これまでの研究の多くは、まず観測データから波の到達時刻などを測定し、次にその二次データを分析して内部構造を推定するものであった。一方、本研究で用いる「波形インバージョン法」は、理論地震波形を計算し、観測波形と直接比較し、それらの残差を最小化することによって(但し、解像度に応じて拘束条件を付ける)、内部構造モデルを系統的に改善して推定する手法である。筆者が所属する研究グループは波形インバージョンを効率的に実行するための理論を導き、

その上で関連するソフトウェアを開発してきた(Geller & Hara, 1993; Kawai et al., 2014)。近年この手法を応用して局所的に詳細な地球内部構造推定が実現され始めている(Kawai et al., 2014; Konishi et al., 2014; Suzuki et al., 2016; Borgeaud et al., 2017; Borgeaud et al., 2019)。

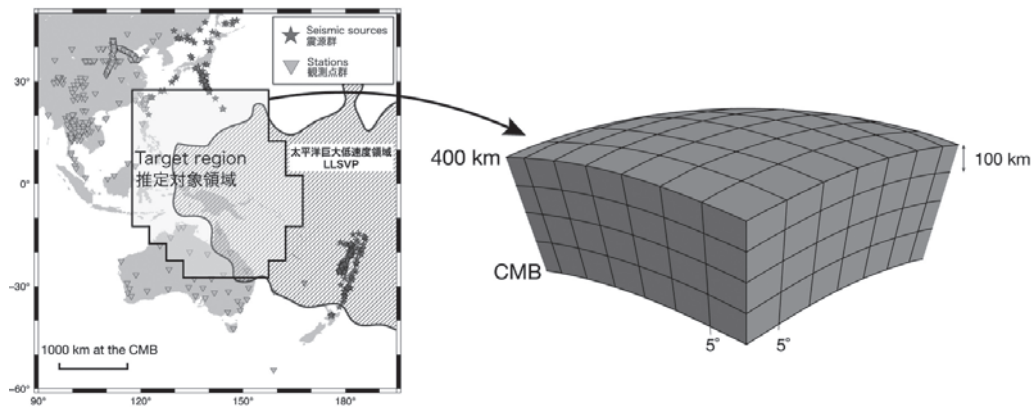


図 1: 震源・観測点分布と構造推定対象領域。

日本付近の地震イベントをオーストラリアで観測した北—南方向のデータに加え、トンガ・フィジー付近の地震イベントを東南アジアで観測した東—西の方位を持つ地震波データを取得してより広い方位角・震央距離を持つデータセットを作成した。推定対象のマンテル最深部 400km は右図に示すように、水平方向には角距離 5°、鉛直方向に 100 km サイズのボックス状にグリッドを区切ってパラメータ化を行なった。

各震源観測点ペアに対する 1 次元理論地震波形の計算には、DSM(Geller & Ohminato, 1994; Kawai et al., 2006)を、推定対象領域の各グリッドの弾性定数に関する偏微分係数波形の計算には Geller & Hara (1993)の手法を用いた。さらに、既存の 3 次元全マンテル速度構造モデルに対する理論地震波形を、スペクトル要素法に基づく計算プログラムである SPECFEM3D_GLOBE (Komatisch et al., 2002)を用いて計算した。理論地震波形、偏微分係数波形ともに周期 \sim 6 秒まで計算し、周期 12.5 秒から 200 秒のバンドパスフィルタを適用して解析に用いた。図 2 には構造推定による理論地震波形の改善の結果の例を示す。

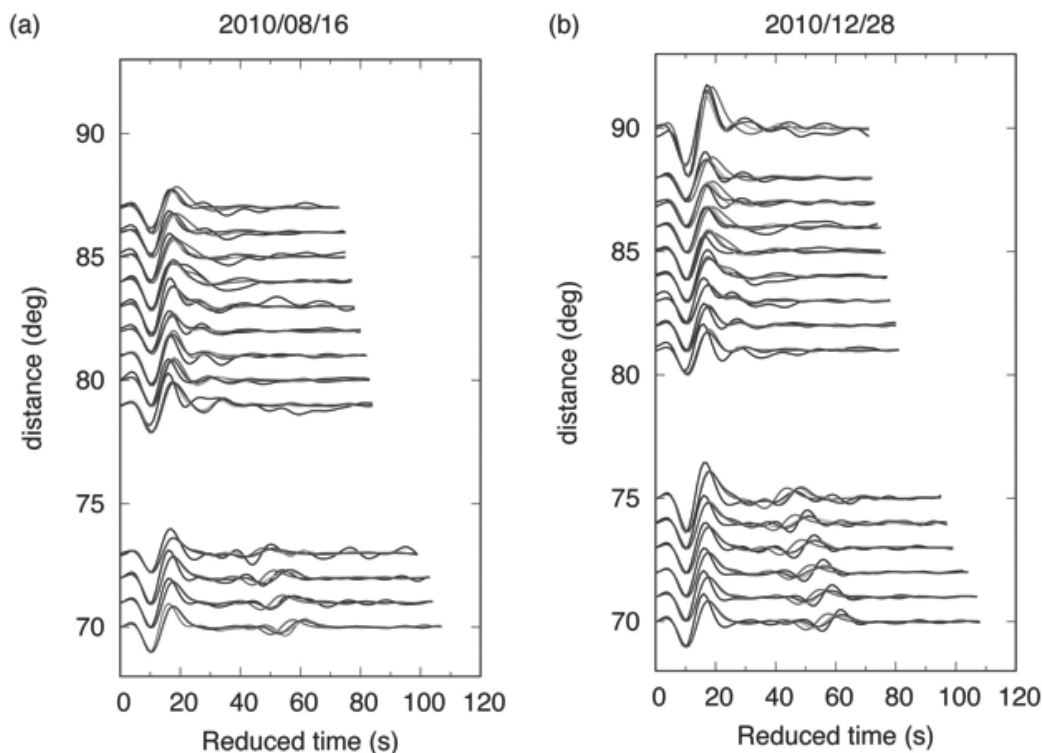


図 2: 観測地震波形と理論地震波形の例。

ここでは解析に用いた地震イベントのうち典型的なイベント 2 つを例として示す。各イベントの観測及び理論地震波形を震央距離(角距離)1°毎にスタックして表示している。各パネルには、実際の観測データ(黒線)、標準的 1 次元速度構造モデル PREM に対する理論地震波形(緑線)、Born 近似を用いて計算した最終モデルに対する理論地震波形(ピンク線)、SPEC-FEM3D_GLOBE を用いて計算した最終モデルに対する理論地震波形(青線)を示している。最終モデルに対する理論地震波形は、初期モデルに対する理論地震波形よりも観測波形を説明するよう改善されていることがわかる。各波形は周期 12.5 秒から 200 秒のバンドパスフィルタをかけて、直達 S 波の走時で揃えて表示している。カラー版は Suzuki et al. (2020) の Fig. S7 を参照。

4. 結果と解釈

推定した地震波(S波)速度構造(図 3)から、以下の 3 つの特徴的な構造が明らかになった。(i) CMB 直上に直径約 300 km の小規模な低速度異常(平均的なマントル最深部の地震波速度と比べて最大約 3.5% の低速度)が複数存在することがわかった。(ii) また、その低速度異常は、300-400 km 上まで鉛直方向につながった構造を有する。以上の(i, ii)の二つの推定された低速度異常の構造は、これまで 1 つの巨大な低速度異常領域と考えられてきた太平洋 LLSVP は、少なくともその西端においては、複数の小規模(約 300 km)な低速度異常の集合体で構成されることを示唆している。(iii) さらに、フィリピン海の下には、CMB 上 400 km から CMB まで垂直に伸びる顕著な高速度異常(平均的なマントル最下部の地震波速度と比べて最大で約 3.5% の高速度)があり、その位置は約 2 億年前のイザナギプレート境界と概ね一致していることがわかった。一般的に、高速度異常領域は温度が(平均より)低い領域であり、低速度異常領域は温度が(平均より)高い領域と考えられるため、高速度領域は低温の過去に沈み込んだプレートと解釈できる。イザナギプ

プレートのマントル中での沈降速度を 1.4cm/年とした場合の、プレート運動復元モデルにおける沈み込み位置の水平方向の変動と、本研究で推定した高速度異常の位置が調和的であることから、推定された高速度異常が約 2 億年前に西太平洋で沈み込んだイザナギプレートの残骸であることが示唆される。

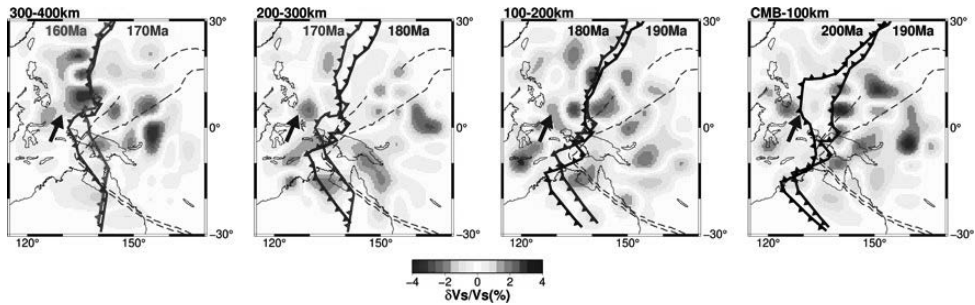


図 3: 西太平洋下の最下部マントル 400 km の S 波速度構造モデル(平均的モデルに対する水平不均質構造)。

4 枚のパネルは、CMB から 400km 上までの 4 つの層(100 km 毎)の S 波速度構造モデルを示す。マントル中の平均スラブ沈下速度を 1.4cm/年と仮定すると、CMB では 2 億年 (200 Ma)、CMB から 100km 上では 1.9 億年 (190 Ma) となり、それぞれのパネルに示すように、復元されたイザナギスラブの沈み込み位置付近(Young et al., 2019)に高速度異常が発見されていることが分かる。フィリピン海の下に垂直に連続する高速度異常(青矢印)の位置は、各深さのイザナギプレートの沈み込みの位置と調和的である。灰色の破線は、走時の解析(相対走時差)に基づいて提案された LLSVP の境界を示している(He & Wen, 2009)。CMB 直上には直径約 300 km の低速度異常が複数存在し、一部は少なくとも 400 km 上までつながっている。カラー版は Suzuki et al. (2020) の Fig. 3 を参照。

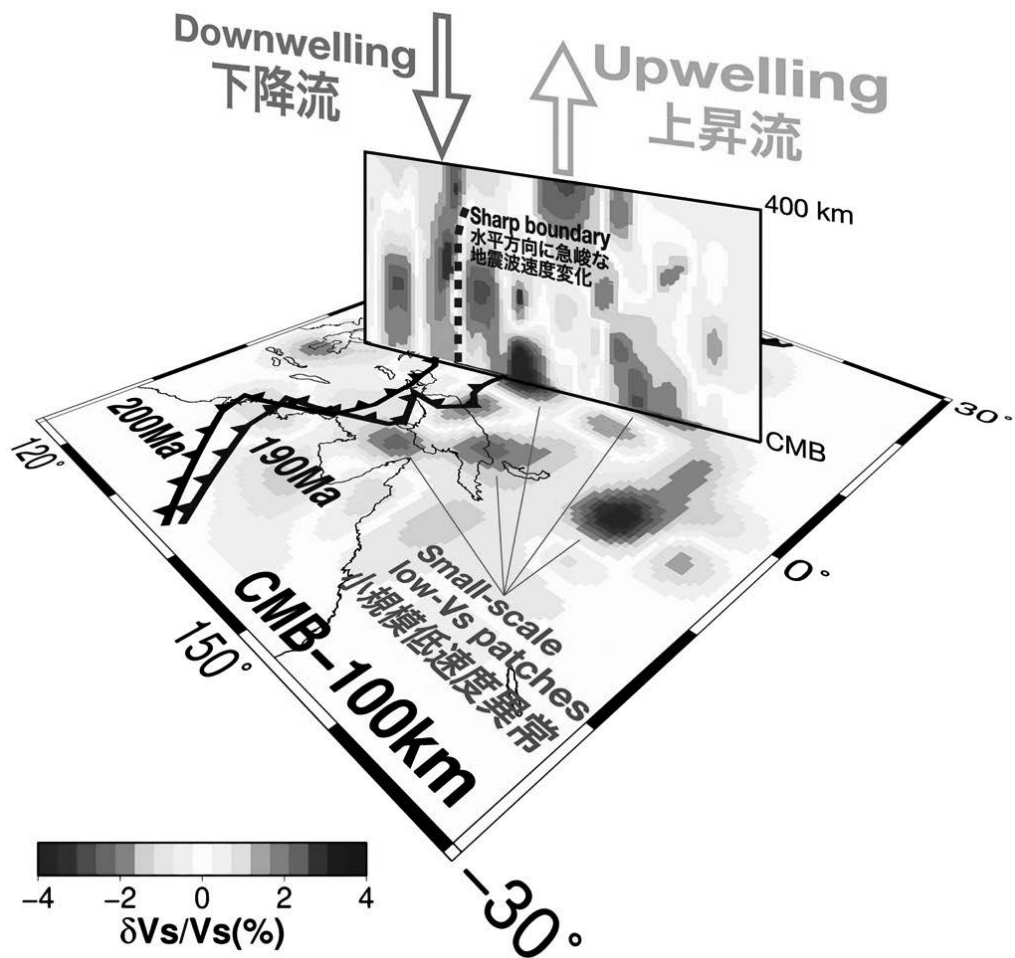


図4: 本研究で得られたS波速度構造モデルに基づく模式的な解釈図。

直径約 300 km の小規模な低速度異常が複数存在し、フィリピン海の下にある高速度異常は復元された 2 億年前 (200 Ma) のイザナギプレートの沈み込み位置 (図中の黒及び藍色線; Young et al., 2019) と概ね一致する。カラー版は Suzuki et al. (2020) の Fig. 12 を参照。

5. まとめと今後の展望

本研究では西太平洋の D'' 領域を詳細に構造推定し、太平洋 LLSVP の西端領域が直径約 300 km の小規模な低速度異常の集合体であることがわかった (図 4)。

今後は、本研究によって示唆された「LLSVP の西側境界領域は小規模の低速度異常の集合体である」という仮説をさらに検証するために、例えば物質流動の情報に関連すると考えられる異方性構造推定を、波形インバージョンによって推定することが期待される。また、本研究で推定したようなマントル最深部の低速度異常の存在は、waveform annealing 効果 (弾性波が低速度領域を通過する際に波面がなまされる効果) や、マルチパス効果 (弾性波の伝播経路上に強い低速度異常が存在する場合に、周波数に応じて伝播経路が曲げられる効果) を引き起こすと考えられており、これらの効果が地震波形に与える影響を定量的に検証することも必要であり、今後の課題としたい。

参 考 文 献

- Borgeaud, A.F.E., Konishi, K., Kawai, K., Geller, R.J., 2017. Imaging paleoslabs in the D'' layer beneath Central America and the Caribbean using seismic waveform inversion. *Sci. Adv.* 3 (11), e1602700. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602700>.
- Borgeaud, A.F.E., Kawai, K., Geller, R.J., 2019. 3-D S-velocity structure of the mantle transition zone beneath Central America and the Gulf of Mexico using waveform inversion. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 124. <https://doi.org/10.1029/2018JB016924>.
- Garnero, E.J., McNamara, A.K., Shim, S.-H., 2016. Continent-sized anomalous zones with low seismic velocity at the base of Earth's mantle. *Nat. Geosci.* 9 (7), 481-489. <https://doi.org/10.1038/ngeo2733>.
- Geller, R.J., Hara, T., 1993. Two efficient algorithms for iterative linearized inversion of seismic waveform data. *Geophys. J. Int.* 115 (3), 699-710. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb01488.x>.
- Geller, R.J., Ohminato, T., 1994. Computation of synthetic seismograms and their partial derivatives for heterogeneous media with arbitrary natural boundary conditions using the direct solution method. *Geophys. J. Int.* 116, 421-446. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb01807.x>.
- Kawai, K., Takeuchi, N., Geller, R.J., 2006. Complete synthetic seismograms up to 2 Hz for transversely isotropic spherically symmetric media. *Geophys. J. Int.* 164, 411-424. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02829.x>.
- 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. *Geophys. J. Int.* 197 (1), 495-524. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt520>.
- Komatitsch, D., Tromp, J., 2002. Spectral-element simulation of global seismic wave propagation-II. Three-dimensional models, oceans, rotation and self-gravitation. *Geophys. J. Int.* 150, 303-318. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01716.x>.
- Konishi, K., Kawai, K., Geller, R.J., Fuji, N., 2014. Waveform inversion for localized three-dimensional seismic velocity structure in the lowermost mantle beneath the western Pacific. *Geophys. J. Int.* 199, 1245-1267. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu288>.
- Schubert, G., Masters, G., Olsen, P., Tackley, P., 2004. Superplumes or plume clusters? *Phys. Earth Planet. Inter.* 146, 147-162. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2003.09.025>.
- 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. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0576-0>.
- Suzuki, Y., Kawai, K., Geller, R.J., Tanaka, S., Siripunvaraporn, W., Boonchaisuk, S., Noisagool, S., Ishihara, Y., Kim, T., 2020. High-resolution 3-D S-velocity structure in the D'' region at the western margin of the Pacific LLSVP: Evidence for small-scale plumes and paleoslabs, *Phys. Earth Planet. Inter.* 307, 106544. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106544>.
- Young, A., Flament, N., Maloney, K., Williams, S., Matthews, K., Zahirovic, S., Müller, R.D., 2019. Global kinematics of tectonic plates and subduction zones since the late Paleozoic Era. *Geosci. Front.* 10, 989-1013. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.05.011>.