

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）包括的構造解析に基づく日本海溝沈み込み帯の地震発生場と内部変形過程の理解

（英文） Seismogenesis and deformation process in the Japan Trench subduction zone inferred from comprehensive structural analysis

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測（重点研究）

ア. プレート境界巨大地震の長期予測

5 分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究

(3) 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 本課題の5か年の到達目標：

プレート沈み込みに伴う地震発生過程の解明には発生場の理解が必要不可欠である。しかし、巨大地震震源域を含むプレート境界の浅い領域のほとんどは海域に位置しているため、地震学的構造の理解が人工地震探査による浅部2次元構造や局所的な海底地震観測に依存し、水平及び深さ方向に広い領域の構造不均質についての理解が不十分であった。S-netをはじめとする最近の海域観測網の発展と観測データの蓄積はこの状況を一変させ、海域を含めた沈み込み帯構造不均質に関する理解が一気に進展すると期待される。また、解析手法の高度化により、地震波速度の等方成分だけでなく地震波速度異方性トモグラフィーが発展してきた。地震波速度異方性は、応力場やマントル対流などのプレート沈み込みに伴う地殻・マントルの内部変形過程やダイナミクスに関する情報を与える重要なパラメータである。本研究課題では、巨大地震・スロー地震・スラブ内地震等の様々な地震現象が発生し地震観測研究のフロンティアである日本海溝沈み込み帯周辺を対象とし、海域及び陸域観測網のデータを活用した広域かつ高分解能な3次元構造解析を行う。先行研究により、前弧最先端部の堆積層構造と浅部滑り挙動の関係に加えて、より深部のスラブ下マントル構造とプレート境界すべり滑り様式の関係が指摘されていることから、浅部から深部までの3次元不均質構造の全体像の解明が重要であると考えられる。そのため、堆積層・上盤地殻・マントルウェッジ・プレート境界・スラブ・スラブ下マントルまで含めた3次元地震波速度構造・異方性構造を推定し、日本海溝沈み込み帯の地震発生場及び内部変形過程を包括的に理解することが目的である。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

最先端の実体波トモグラフィー及び表面波トモグラフィーを用いて日本海溝沈み込み帯周辺におけ

る3次元の地震学的構造を推定する。実体波トモグラフィーでは近地及び遠地地震による実体波走時を利用して上盤プレートからスラブ下マントルまでの比較的深部のP波速度・S波速度構造を主対象とした構造解析を行う。表面波トモグラフィーでは常時微動と遠地地震表面波を利用し、堆積層からプレート境界周辺及び海洋性地殻を含むスラブ上部の浅部S波速度構造を主対象とする。得意とする深さ範囲が異なるそれぞれの手法による結果を相互に比較・統合して解釈を行うことで、浅部から深部までの全体像の理解につなげる。具体的な研究内容は下記の通りである。

令和6～9年度においては、自然地震の到達時刻データを用いた実体波トモグラフィー及び常時微動・遠地地震データを用いた表面波トモグラフィーを実施する。これまで開発してきた実体波トモグラフィー手法を、Hi-netとS-netを中心とする海陸基盤観測網のデータに適用し、P波・S波の3次元速度構造・異方性構造を推定する。特に、任意の対称軸を持つ3次元異方性構造を推定できる最先端のトモグラフィー手法を活用する。上盤プレート内及びスラブ内の近地地震を用いることで上盤プレート内からスラブ上部の構造を拘束する。また、波形解析によって海域及び陸域の観測網で記録された遠地地震相対走時の読み取りを行い、近地地震到達時刻と合わせて解析することで、スラブ下マントル深部構造まで含めたマルチスケールのトモグラフィーを得る。速度構造及び異方性構造を合わせて地震活動等と比較解釈することで、地震発生場の構造不均質・応力場・断層構造および及び上盤プレート内・スラブ内部の変形過程を明らかにする。

また、海陸基盤観測網で観測された常時微動連続記録に地震波干渉法を適用し、周期数秒から数十秒程度までの表面波を抽出する。マルチモード表面波及び有限周波数効果を取り入れた最先端の表面波トモグラフィー手法を適用することで、堆積層からスラブ上部までのS波速度構造をこれまでの手法よりも水平・深さ方向ともに高分解能で推定する。常時微動に加えて遠地地震による表面波を合わせて利用することで、長周期側の周期帯域を広げてより深部における推定分解能向上を図る。日本海溝沈み込み帯では通常地震とスロー地震が近接して発生するなど、短波長のプレート滑り様式不均質が示唆されている。そのため、基盤観測網に加えて過去の海底稠密地震観測データを再活用することにより、より小スケールの構造不均質及び地震発生場の理解を目指す。また、表面波から方位異方性・鉛直異方性構造を推定するためのトモグラフィー手法の高度化を行う。

令和9～10年度においては、上記解析の結果を統合して解釈することで、日本海溝沈み込み帯の浅部の堆積層から深部のスラブ下マントルまで含めた構造不均質と内部変形過程の全体像及び地震活動との関係性を解明する。また、同解析を日本と世界の他の沈み込み帯にも適用し、普遍性や日本海溝沈み込み帯における特徴を抽出する。さらに、上記解析の相互のフィードバックによって構造推定の高度化を図るとともに、実体波到達時刻および及び表面波分散曲線の同時利用を検討し、可能であればジョイント・インバージョンによってよりシームレスな構造モデルの構築を目指す。

(7) 令和6年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2006-2007年に日本海溝北部で実施された稠密海底地震観測網のデータに常時微動表面波トモグラフィー手法を適用し、深さ30 km程度までの詳細な3次元S波速度構造モデルを推定した。その結果、微動と空間的に相関するS波速度不均質構造が検出された。プレート走向方向に断続的に分布する微動発生域では、プレート境界付近に顕著な低速度が存在する。この低速度領域は海溝から100 km程度まで存在することから、沈み込む海洋プレート上の堆積層から脱水した流体による間隙圧分布を反映すると考えられる。また、沈み込む海洋プレート上部の堆積層厚の不均質による流体供給量の空間変化が、微動発生深度における間隙流体圧と滑り挙動の走向方向の変化を生むと考えられる。

最新の海域・陸域地震観測網で得られた地震波形から大量の到着時刻データを読み取ることで、東日本前弧域を含む日本列島全域下の深さ700kmまでの地殻とマントルの詳細な3次元P波速度構造モデルを得た。その結果、沈み込んでいる太平洋スラブ下に顕著な低速度異常体が検出され、マントル深部からの熱い上昇流を反映し、プレート境界型の巨大地震とスラブ内地震の発生に影響を及ぼすと思われる。

世界の様々な沈み込み帯の構造と、日本の沈み込み帯との比較研究を行った。リージョナルな領域でも高分解能で解ける最新のグローバルトモグラフィー手法を適用し、ニュージーランド・ヒ克蘭ギ沈み込み帯下の構造を調べた。結果として、スラブに開いた穴を通して、下部マントルからの熱いマントル上昇流が島弧マグマと混合することで、タウポ火山等の巨大噴火が発生する可能性が明らかとなった。これは千島沈み込み帯とも共通した特徴と考えられる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

複数のデータ・手法を用いた包括的な構造解析により、沈み込み帯における地震発生及び火山活動を支配する場の不均質構造が明らかになってきた。特に、プレート境界付近のS波速度異常やスラブ下マントル内の速度異常の分布が、プレート境界で発生する微動や巨大地震の分布と空間的に対応することが示された。また、沈み込むスラブの穴と火山巨大噴火の関連性を示唆する結果が得られた。これらの結果は、「地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化」を通して、災害を引き起こす「プレート境界地震と海洋プレート内部の地震」や沈み込み帯の火山噴火の根源的な理解に貢献する成果である。今後は、異なる領域における比較により普遍性や地域性を明らかにするとともに、異方性構造も推定することでスラブ内地震発生への構造不均質の影響をより詳細に調べる。

(8) 令和6年度の成果に関連の深いもので、令和6年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

- Tsunashima, R., D. Zhao, and G. Toyokuni, 2025, Three-dimensional ray tracing in P-wave azimuthal anisotropic media, *Geophys. J. Int.*, 240, 160-173, doi:10.1093/gji/ggae374.,査読有, 謝辞無
- Suzuki, M., D. Zhao, G. Toyokuni, and R. Takagi, 2025, Teleseismic evidence for structural heterogeneity in East Japan forearc from seafloor S-net data, *Tectonophysics*, 895, 230579, doi:10.1016/j.tecto.2024.230579.,査読有,謝辞有
- Zhao, D., X. Liang, G. Toyokuni, Y. Hua, and Y. Xu, 2024, Cause of enigmatic upper-mantle earthquakes in central Wyoming, *Seismol. Res. Lett.*, 95, 2497-2505, doi: 10.1785/0220230333.,査読有,謝辞有
- Yuan, T., Z. Wang, D. Zhao, R. Gao, and X. Chen, 2024, Seismic evidence for break-off of the Molucca Sea slab, *Tectonophysics*, 874, 230218, doi:10.1016/j.tecto.2024.230218.,査読有,謝辞無
- Yuan, T., Z. Wang, D. Zhao, R. Gao, and X. Chen, 2024, Multiple slabs and complex mantle flows in the Molucca Sea subduction zone, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 25, e2024GC011500, doi:10.1029/ 2024GC011500.,査読有,謝辞無
- Toyokuni, G. and D. Zhao, 2024, Slab-plume interactions beneath Australia and New Zealand: New insight from whole-mantle tomography. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 25, e2024GC011739, doi:10.1029/2024GC011739.,査読有,謝辞無
- Liang, X., D. Zhao, Y. Hua, and Y. Xu, 2024, Big mantle wedge and intraplate volcanism in Alaska: Insight from anisotropic tomography, *J. Geophys. Res.*, 129, e2023JB027617, doi:10.1029/2023JB027617.,査読有,謝辞無
- Ren, X., X. Liu, and D. Zhao, 2024, Subduction transforms azimuthal anisotropy in the Juan de Fuca plate, *Tectonophysics*, 877, 230272, doi:10.1016/j.tecto.2024.230272.,査読有,謝辞無
- Liu, D., Z. Wang, D. Zhao, H. Hu, and R. Gao, 2024, Accretionary wedge, arc magmatism and fluid migration in northern Sumatra: Insight from seismic attenuation tomography, *J. Geophys. Res.*, 129, e2024JB029777, doi:10.1029/2024JB029777.,査読有,謝辞無
- Xie, F., Z. Wang, D. Zhao, R. Gao, and X. Chen, 2024, Tilting axis anisotropic tomography and subduction dynamics of the Java-Banda arc, *Geophys. Res. Lett.*, 51, e2023GL107720, doi:10.1029/2023GL107720.,査読有,謝辞無
- Wang, X., S. Xia, H. Yang, H. Chen, and D. Zhao, 2024, Structure and dynamics of southern Mariana margin: Constraints from seismicity, tomography and focal mechanisms, *Tectonophysics*, 878, 230300, doi:10.1016/j.tecto.2024.230300.,査読有,謝辞無

- Tonegawa, T., K. Shiomi, and R. Takagi, 2024, Anisotropic structure at shallow depths across the Japan Trench, *Earth, Planets Space*, 76(1), doi:10.1186/s40623-024-02059-8.,査読有,謝辞無
- Yoshida, K., R. Takagi, Y. Fukushima, R. Ando, Y. Ohta, and Y. Hiramatsu, 2024, Role of a hidden fault in the early process of the 2024 Mw7.5 Noto Peninsula earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 51, e2024GL110993, doi:10.1029/2024GL110993.,査読有,謝辞無
- Toyokuni, G., D. Zhao, and D. Takada, 2025, Whole-mantle isotropic and anisotropic tomography beneath Japan and adjacent regions, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, in press.,査読有,謝辞無
- Brossard, V. P., K. Nishida, B. Enescu, and R. Takagi, 2025, Ocean Microseisms Recorded by the Cuban Seismic Network: Time Variation, Spectral Features, and Source Directionality Characteristics, *Seismol. Res. Lett.*, doi:10.1785/0220240351.,査読有,謝辞無
- Zhao, D., X. Liu, D. Zhao, Q. Qiao, and L. Zhao, 2024, Subduction-driven mantle flow beneath active back-arc basins inferred from seismic anisotropy tomography, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 643, 118890, doi:10.1016/j.epsl.2024.118890.,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

- 趙大鵬, X. Liang, 豊国源知, Y. Hua, Y. Xu, 2024, スラブ残骸からの流体と2013年北米上部マントル地震, 2024年地球惑星科学連合大会, SCG46-20.
- 豊国源知・趙大鵬, 2024, ステルス・ホットスポット火山～破局噴火を引き起こす, 島弧火山列に紛れたホットスポット火山～, 日本地震学会2024年度秋季大会, S04-02.
- 高木涼太・東龍介・日野亮太・西田究・篠原雅尚, 2024, 稠密海底地震観測データに基づく日本海溝北部の3次元S波速度構造推定, 2024年地球惑星科学連合大会, SSS09-02.
- 高木涼太・吉田圭佑・岡田知己, 2024, 詳細な3次元S波速度構造に基づく群発地震と2024年Mw7.5能登半島地震の関係, 2024年地球惑星科学連合大会, U15-P13.
- 高木 涼太, 東 龍介, 日野 亮太, 西田 究, 篠原 雅尚, 日本海溝北部における浅部微動分布とS波速度構造の空間相関, 日本地震学会2024年度秋季大会, S09-15.

(9) 令和6年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(10) 令和7年度実施計画の概要:

日本海溝北部において実施した常時微動表面波トモグラフィー手法を、千島海溝及び日本海溝南部における過去の稠密海底地震観測データに適用し、日本海溝・千島海溝沿いに不均質に分布する微動分布の支配要因を明らかにする。

最新の地震波トモグラフィー法を使い、大量の近地地震と遠地地震の走時データを解析し、日本列島および他の沈み込み帯のスラブとスラブ下の詳細3次元速度と異方性構造を推定する。スラブ内とスラブ下の異常構造がスラブ内地震発生への影響について調べる予定である。

世界の様々な沈み込み帯の構造と、日本の沈み込み帯との比較研究を継続して行う。東南アジア、南米、地中海等の沈み込み帯との比較を行い、巨大噴火の発生を普遍的に説明するモデルを構築する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

高木涼太（東北大学大学院理学研究科）, 豊国源知（東北大学大学院理学研究科）, 趙大鵬（東北大学大学院理学研究科）

他機関との共同研究の有無: 無

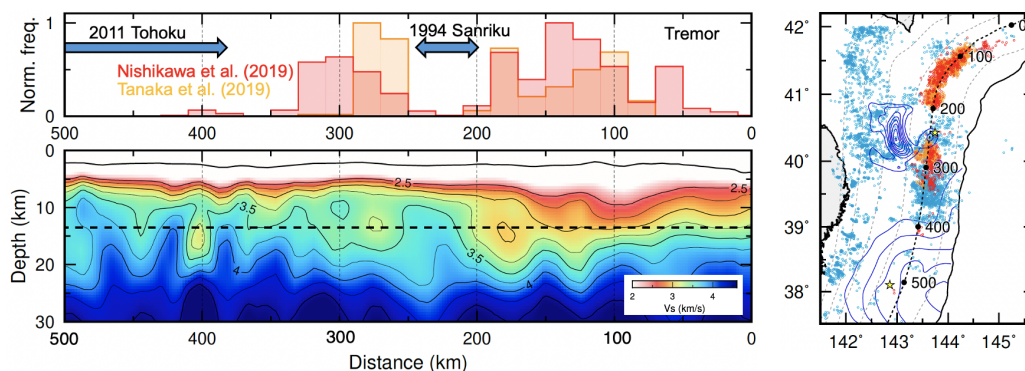
(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター
 電話：022-225-1950
 e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
 URL：https://www.aob.gp.tohoku.ac.jp

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：高木涼太
 所属：東北大学大学院理学研究科

微動とS波速度構造の空間相関



常時微動表面波トモグラフィーによって推定されたS波速度構造のプレート境界13.5 km等深線に沿った断面図（高木・他, 2024, 地震学会）

図1. 日本海溝北部における微動とS波速構造の空間相関

スラブ下マントル内の不均質構造

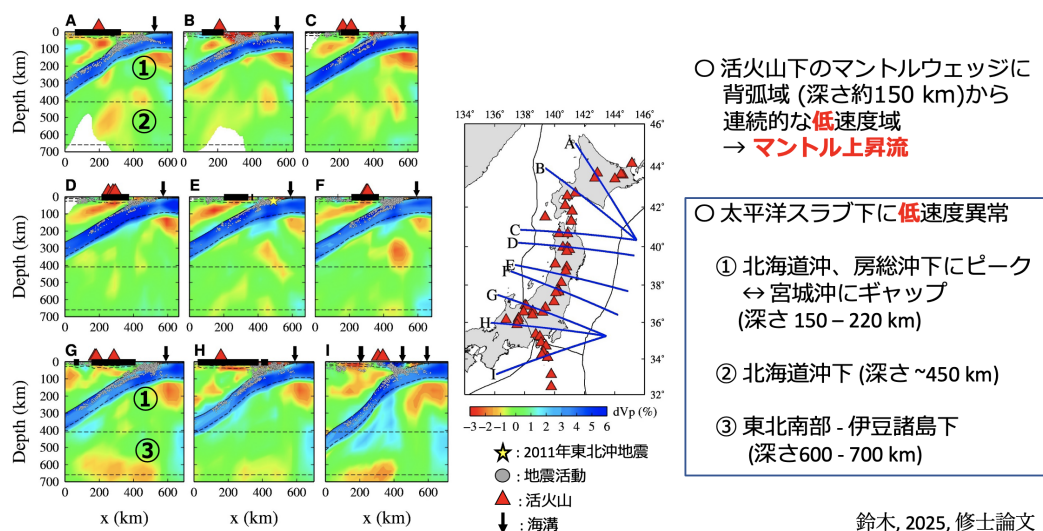


図2. 日本海溝におけるスラブ下マントル内の不均質構造

ヒクラング沈み込み帯下のP波トモグラフィー

(Toyokuni & Zhao, 2024)

10万年以降に巨大噴火を起こした
火山との比較

- Taupo火山とOkataina火山は既知のスラブ・ウィンドウの直上で、スラブ上の低速度 (ULVA) とスラブ下の低速度 (SLVA) が両方よく発達した領域に存在

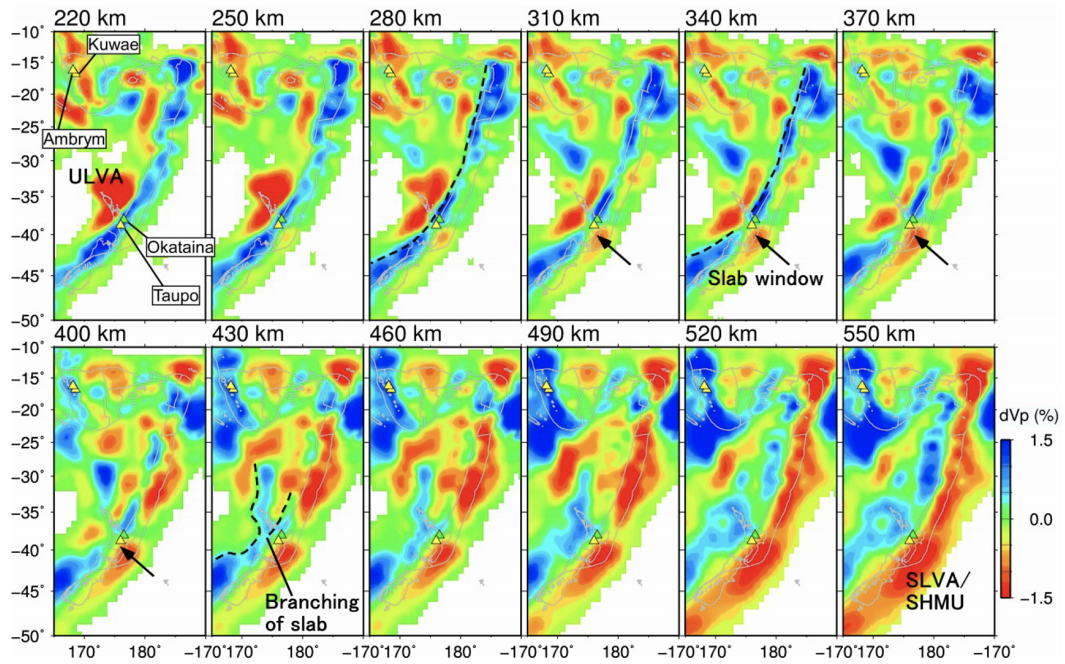


図3. ヒクラング沈み込み帯下のP波トモグラフィー