

(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7年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

日本の陸域と海域に展開されている稠密な地震観測網(Hi-net, S-net等)で記録された大量の近地地震と遠地地震のスペクトルデータを用いて、日本列島下の深さ700kmまでの3次元P波・S波減衰(Q)構造を初めて推定した。沈み込んでいる太平洋スラブとフィリピン海スラブがhigh-Q異常体としてイメージングされた。マントルwedgeに顕著なlow-Q異常体が見られ、スラブ脱水と熱いマントル上昇流を反映する。スラブ下のマントルに顕著なQ変化が見られ、スラブの深い沈み込みとマントル深部からの上昇流によって生じたローカルマントル対流を反映する(Wang & Zhao 2025 JGR)。

最新の全マントル地震波トモグラフィー法で地震波速度方位異方性を取り扱えるよう拡張し、日本沈み込み帯下の全マントル3次元等方性・異方性地震波速度構造を初めて詳細に可視化した。これにより、千島海溝下の太平洋スラブに存在するスラブウィンドウを介して、スラブ下低速度構造が巨大噴火発生に関わっている可能性が見いだされた(Toyokuni et al. 2025 JGR)。南米沈み込み帯でも同様に、スラブやスラブ下構造と巨大噴火との関連が明らかとなった(Toyokuni & Zhao 2026 SIG)。

日本海溝北部における稠密海底地震観測データを用いた常時微動表面波トモグラフィーにより推定した3次元S波速度構造からプレート境界付近のS波速度を抽出し、2025年11月の三陸沖の地震活動と比較を行なった。その結果、プレート境界深さが同程度の場所について、微動発生域は低S波速度異常、1994年三陸はるか沖地震の破壊開始点が存在する微動空白域は高S波速度異常に対応するのに対し、2025年11月の地震活動はその中間的なS波速度を持つ領域に位置していることが明らかになった。

・「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

包括的な構造解析により、異方性構造や減衰構造を含む沈み込み帯における不均質構造が明らかになってきた。「地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化」によって、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つながる成果である。

- (8) 令和7年度の成果に関連の深いもので、令和7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

Toyokuni, G. and D. Zhao, 2026, Slabs and plumes beneath South America revealed by whole mantle tomography. *Surveys in Geophysics*, 47,
<https://doi.org/10.1007/s10712-025-09926-3>, 査読有, 謝辞無

Zhang, X., G. Jiang, D. Zhao, and G. Zhang, 2026, Fine slab structure and mechanism of deep earthquakes beneath central Japan. *Communications Earth & Environment* (in press)., 査読有, 謝辞有

Zhao, D., and G. Toyokuni, 2025, Seismogenic structures in subduction zones, *Surveys in Geophysics*, 46, 1137-1172., 査読有, 謝辞有

Zhao, D., G. Toyokuni, and Y. Kim, 2025, Changbai intraplate volcanism and big mantle wedge. *Phys. Earth Planet. Inter.* 367, 107425., 査読有, 謝辞有

Wang, Z., and D. Zhao, 2025, Deep attenuation structure of Japan subduction zone from joint inversion of local and teleseismic data. *J. Geophys. Res.* 130, e2025JB031451., 査読有, 謝辞有

Liang, X., D. Zhao, M. Faccenda, S. Yang, and Y. Xu, 2025, Melt architecture under East Asian volcanoes revealed by anisotropic tomography. *J. Geophys. Res.* 130, e2025JB031819., 査読有, 謝辞有

Wang, T., H. Hu, D. Zhao, X., Niu, and A. Ruan, 2025, Subduction polarity reversal during arc-continent collision in Taiwan: New insight from P-wave tomography. *J. Geophys. Res.* 130, e2025JB031442., 査読有, 謝辞有

Nie, R., X. Liu, and D. Zhao, 2025, Seismic tomography of the Pampean flat-slab subduction zone and its implications for volcanism and seismicity in the Central Andes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 669, 119575., 査読有, 謝辞有

Dong, Z., X. Liu, D. Zhao, and S. Zhao, 2025, Oceanic subduction and craton underthrusting beneath the Bolivian orocline in Central Andes: Insight from anisotropic tomography, *Geophys. J. Int.* 241, 1762-1779., 査読有, 謝辞有

Wang, J., D. Zhu, Z. Zhang, J. He, L. Chen, D. Zhao, and Z. Yao, 2025, Seismic evidence for large-scale intraslab heterogeneity beneath Northeast Japan. *J. Geophys. Res.* 130, e2024JB030046., 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.* 130, e2024JB029593., 査読有, 謝辞有

Zhao, D., X. Liu, and D. Zhao, 2025, Shear-wave velocity and azimuthal anisotropy in the upper mantle of the Tonga subduction zone. *Geoscience* 39, 1-17., 査読有, 謝辞無

Takagi, R., K. Yoshida, and T. Okada, 2025, Rupture of solidified ancient magma that impeded preceding swarm migrations led to the 2024 Noto earthquake, *Science Advances*, 11, 42,
Takagi, R., K. Yoshida, and T. Okada, 2025, Rupture of solidified ancient magma that impeded preceding swarm migrations led to the 2024 Noto earthquake, *Science Advances*, 11, 42, doi: 10.1126/sciadv.adv5938., 査読有, 謝辞有

Suzuki, R., N. Uchida, W. Zhu, G. Beroza, T. Nakayama, K. Yoshida, G. Toyokuni, R. Takagi, R. Azuma, A. Hasegawa, 2025, The forearc seismic belt: A fluid pathway constraining down-dip megathrust earthquake rupture, *Science*, 389,190-194, doi: 10.1126/science.adt6389, 査読有, 謝辞有

Tagami, A., T. Okada, M.K. Savage, C. Chamberlain, T. Matsuzawa, R. Fujimura, K. Tateiwa, K. Yoshida, R. Takagi, S. Kimura, S. Hirahara, T. Yamada, and Y. Ohta, 2025, Evaluation of the favorability of faults to slip: the case of the 2024 Noto Peninsula earthquake, *Earth Planets Space* 77, 107, doi: 10.1186/s40623-025-02235-4, 査読有, 謝辞無

Paris, N., Y. Itoh, F. Brenguier, Q. Wang, Y. Sheng, T. Okada, N. Uchida, Q. Higeret, R. Takagi, S. Sakai, S. Hirahara, and S. Kimura, 2025, Coseismic crustal seismic velocity changes associated with the 2024 MW 7.5 Noto earthquake, Japan, *Earth Planets Space* 77, 51, doi: 10.1186/s40623-025-02177-x, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Zhao, D., X. Liang, Y. Hua, and Y. Xu, 2025, Origin of intraplate volcanism and big mantle wedge beneath western Alaska and the Bering Sea, 日本地球惑星科学連合2025年大会.

趙大鵬, Z. Wang, 2025, 近地と遠地地震スペクトルデータから推定した日本列島深部の3次元減衰構造, 日本地震学会2025年度秋季大会.

Toyokuni, G., and D. Zhao, 2025, The stealth hotspot volcanoes, 日本地球惑星科学連合2025年大会.

Toyokuni, G., D. Zhao, M. Kanao, S. Tsuboi, and H. Takenaka, 2025, 15 years of the GLISN seismic network in Greenland (1): Observations. 日本地球惑星科学連合2025年大会.

Toyokuni, G., D. Zhao, M. Kanao, S. Tsuboi, and H. Takenaka, 2025, 15 years of the GLISN seismic network in Greenland (2): Achievements, 日本地球惑星科学連合2025年大会.

豊国源知, 趙大鵬, 2025, 2025年カムチャツカ半島巨大地震: スラブ下のマントル上昇流の影響, 日本地震学会2025年度秋季大会.

Takagi, R. and K. Nishida, 2025, Mapping megathrust asperities along the Japan Trench using a high-resolution S-wave velocity structure model estimated by the S-net ocean-bottom seismic network, 日本地球惑星科学連合2025年大会.

(9) 令和7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8年度実施計画の概要:

最先端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周辺の詳細3次元速度と異方性構造を推定する。スラブ内とスラブ上下の異常構造がスラブ内地震とプレート境界型地震の発生への影響について調べる。

世界の様々な沈み込み帯を対象に、スラブ内・スラブ下構造も明瞭にイメージできるトモグラフィー手法を用いて解析を行い、巨大噴火・巨大地震と地下構造との関連を調べる。様々な地域の比較により、それぞれの沈み込み帯が持つ固有性と、共通性を明らかにする。

常時微動表面波トモグラフィーの推定分解能を詳細に評価し、イメージングされているS波速度異常域の広がりや信頼性と速度異常の要因について検討する。

(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

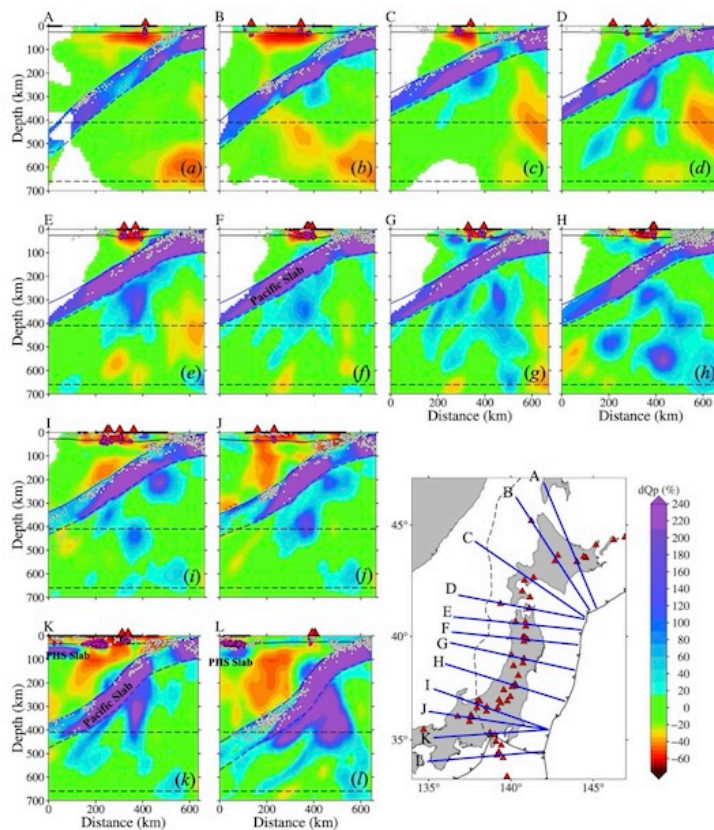
(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

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

日本列島深部の3次元減衰構造 (*Wang & Zhao 2025 JGR*)



1. 大量の近地と遠地震のスペクトルデータを用いて日本列島下の深さ700kmまでの3次元P波・S波減衰(Q)構造を初めて推定した。

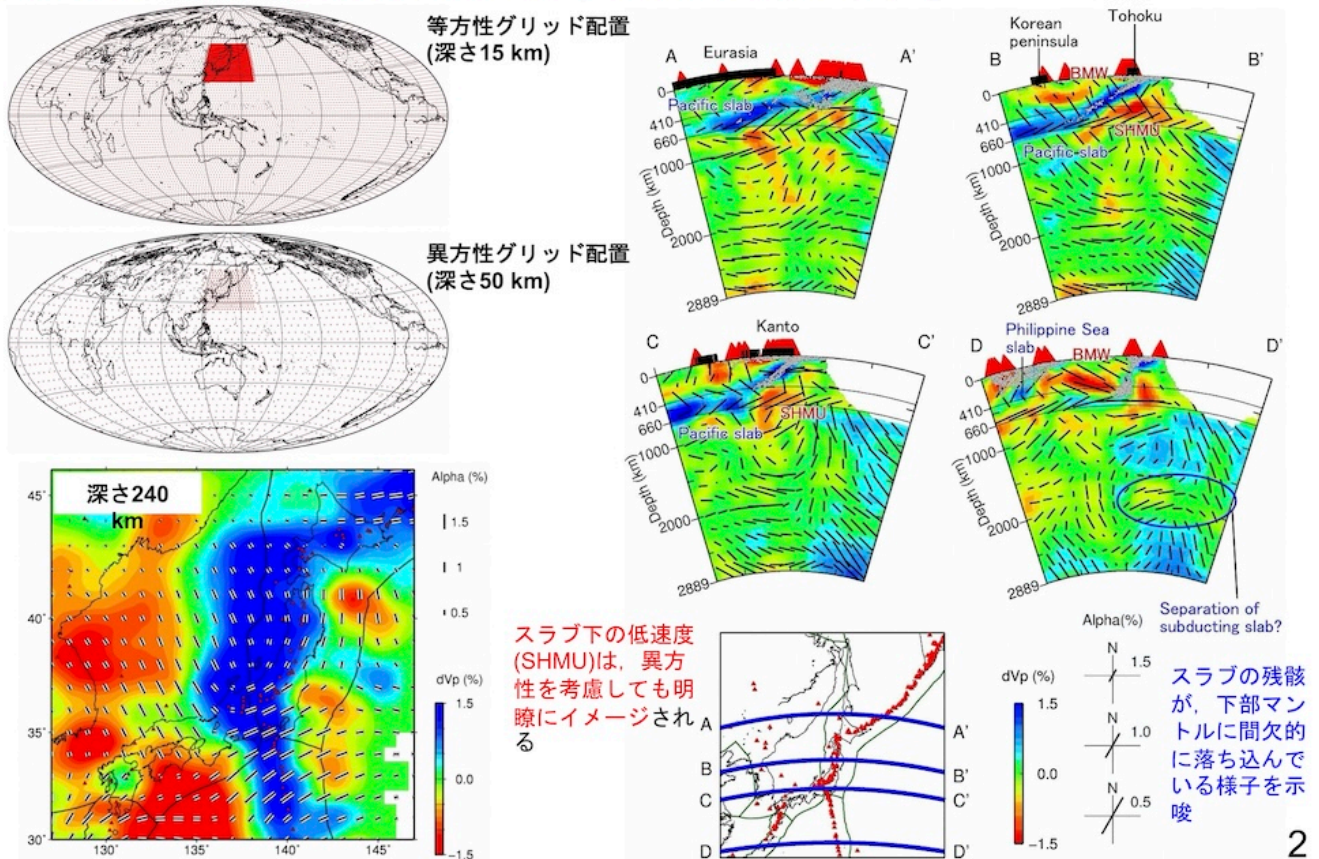
2. 太平洋スラブがhigh-Q異常体としてイメージングされた。マントルwedgeに顕著なlow-Q異常体が見られ、スラブ脱水と熱い上昇流を反映する。

3. 太平洋スラブ下のマントルに顕著なQ変化が見られ、スラブの深い沈み込みとマントル深部からの上昇流によって生じたローカルマントル対流を反映する。

日本列島深部の3次元減衰構造 (Wang & Zhao, 2025, JGR)

日本沈み込み帯下の全マントル異方性構造

✓ マルチスケール・グローバルトモグラフィー法に方位異方性を導入し、**日本沈み込み帯**
下の詳細な全マントル異方性構造を初めて推定 (Toyokuni, Zhao & Takada, 2025, JGR)



日本沈み込み帯下の全マントル異方性構造 (Toyokuni, Zhao & Takada, 2025, JGR)