

(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）スラブ内地震・深発地震の発生場・発生機構の解明

（英文）Generation Mechanism of Intralab and Deep Earthquakes

(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 分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究

(2) 首都直下地震

(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：

自然地震の地震波解析と室内での岩石変形実験を組み合わせることにより、スラブ内地震の発生機構の理解を進展させることを目的とする。

地震波解析からは、深部スラブの形状や二重深発地震面における地震活動の詳細とエネルギー収支、スラブ内地震の発生場となるアウターライズ断層の活動様式と含水化のかかわりを明らかにする。

岩石変形実験からは、最新の放射光実験とAE観測に基づき、脱水不安定や相転移不安定性などに伴う断層形成・震源過程を実験的に検証することにより、スラブ内部の温度・圧力および岩石種を変化させた場合の複雑な断層形成機構を明らかにする。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

概要

・地震波解析: スラブ内地震・アウターライズ地震の地震波放射エネルギー、破壊複雑性、地震活動のb値を推定し、その空間変化の意味を調べるとともに、実験結果との比較を行う。西南日本に沈み込むフィリピン海スラブ内の二重深発地震面の有無や近畿地方下に存在するとされているスラブの断裂、関東地方下に沈み込むフィリピン海プレート内の蛇紋岩化領域と過去のM7クラス地震の震源域との関係などを精査することにより、日本列島で実際に発生しているスラブ内地震の発生場の詳細を明らかにする。東北沖地震以降に度々発生したM7級アウターライズ地震の震源断層の形状や深さ範囲を再検討することにより、アウターライズ断層の成長や含水プロセスの手がかりを得る。

・室内実験: 稍深発・深発地震を再現する温度・圧力条件を発生することが可能な高圧変形試験機（マルチアンビル型もしくは固体圧変形試験機）とAE（アコースティック・エミッション）計測を組み合わせることで、含水鉱物を含む岩石（蛇紋岩、角閃岩、青色片岩など）の脱水反応やオリビンスピネル相転移に伴う断層形成（塑性不安定性）機構と震源過程を明らかにする。高温高圧下での変形実験に使用可能かつ自然地震との地震波特性の比較が可能な広帯域AEセンサーの開発も進める。広帯域AEセンサーにCT観察を組み合わせ、自然地震とも比較可能なb値や断層の発達過程を計測することで、出発試料や変形条件によって変わる複雑な断層形成機構を明らかにする。さらに構造探査から

得られる二重深発地震面での断層再活動の可能性を明らかにするために、高間隙水圧下での既存断層の有無による震源過程の違いを明らかにする。

年次計画

・令和6年度

[地震波解析] 最新の地震波形データを取得するとともに、蓄積されてきた海底地震観測データを整理し、それらデータの一次処理を行う。

[実験] 高温高压環境下にて使用可能な広帯域AEセンサーの開発を行う。二重深発地震面上で起きる稍深発地震の発生メカニズム解明に向けて、青色片岩の高温高压変形実験を固体圧変形試験機にて行い、AE観測と組み合わせることにより震源過程を明らかにする。

・令和7年度

[地震波解析] 近畿地方下に存在するとされている太平洋スラブの深部断裂の有無を調査し、得られた結果とスラブ内地震の分布やメカニズム解の比較により、活発な深発地震活動の原因を議論する。機械学習に基づく地震検出により海溝海側斜面域における地震活動の再評価を行う。日本列島周辺域で発生したスラブ内地震の地震活動のb値の空間変化を推定する。

[実験] 前年度に開発した広帯域AEセンサーを用いて、AEの発震機構を推定する。そのために、8個のセンサーを用いることのできるD111加圧方式を試験機に採用する。高間隙水圧システムを固体圧変形試験機に導入し、青色片岩の変形実験から行い、間隙水圧の断層形成への影響を明らかにする。

・令和8年度

[地震波解析] 関東地方下に沈み込むフィリピン海プレート内の地震波速度構造を推定し、蛇紋岩化領域と過去のM7クラス地震の震源域との関係を精査する。宮城県沖の海溝海側斜面域で実施された2011・2012・2013・2017年海域観測データから地震検出、精密震源決定と小繰り返し地震の探索を行い、M7級地震に関係した非地震性すべりの検出を試みる。日本列島周辺で発生した中～大規模地震スラブ内・アウターライズ地震の震源時間関数の網羅的な推定を行う。

[実験] 稍深発地震発生場の温度圧力環境下（400～800℃、2～3万気圧）におけるダナイトの変形実験を行う。その際に、前年度までに開発した広帯域AEセンサー+D111加圧方式を用いて卓越周波数の測定を行うほか、発震機構を求めることも試みる。b値決定も併せて行い、断層形成機構の詳細の解明を目指す。上部マントルに沈み込んだアウターライズ断層の再活動を模擬した断層ガウジを用いた高温高压下での摩擦実験を行う。広帯域AEセンサーの開発も進め、自然地震との地震波特性の比較を行う。

・令和9年度

[地震波解析] 西南日本に沈み込むフィリピン海スラブ内の地震活動を詳細に調べ、二重深発地震面の有無および先行研究で提唱されているスラブの断裂の再評価を行う。2015年（1933年昭和三陸地震）と2017年（福島県沖）の海底地震観測データとS-netのデータを解析し、日本海溝中～北部広域のアウターライズ断層地震活動の分布把握を行う。前年度に得られた震源時間関数データを用いて、日本列島周辺で発生した中～大規模地震スラブ内・アウターライズ地震の放射エネルギー・破壊複雑性を網羅的に調べる。

[実験] 前年度と同様の圧縮変形実験を含水ダナイト試料に対して行う。水性流体がAEの卓越周波数や発震機構、及びb値に与える影響を明らかにする。マントル遷移層条件でのアウターライズ断層の再活動を模擬した摩擦実験をマルチアンビル型変形試験機にて行う。

・令和10年度

[地震波解析] 前年度までに得られたスラブ内地震発生場・不均質構造と地震活動、地震波放射エネルギー、破壊過程の複雑性の関係を系統的に比較・検討し、実験結果と総合することにより、スラブ内地震の発生原因を考察する。

[実験] 前々年度と同様の実験を、深発地震発生場の温度圧力環境下（600～1000℃、13～20万気圧）において試みる。カンラン石の圧力誘起相転移にトリガーされる断層形成機構の詳細を明らかにすることを目指す。引き続きマントル遷移層での断層再活動を模擬した変形実験を行い、アウターライズ断層がどの深さまで再活動するのかを明らかにする。

(7) 令和6年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

沈み込むスラブの地下300km付近で発生する深発地震の発生メカニズムの解明を目的として、含

水鉱物の一つである Phase A+カンラン石多結晶体の変形実験を行った。変形中の AE (Acoustic emission) 計測の結果、Phase Aの量がかんらん石に対して非常に少ない (5 %) 場合には AEの数が多く、逆に Phase Aのみ (100 %) の場合には少なくなることが明らかになった。このことは、規模の大きな地震を発生するためには、高い強度をもつカンラン石のような鉱物の存在が必要であることを示唆する。

大型放射光施設 SPring-8の新ビームライン BL15XUの開発の基となっているテストビームライン BL05XUにおけるカンラン石多結晶体試料の応力緩和試験により、高圧下におけるカンラン石の遷移クリープがバーガスモデルにより記述できることを見出した。このことは、大地震後の余効変動を同モデルで予測できる可能性を示唆している。

東北日本に代表される冷たい沈み込み帯の二重深発地震面の上面で発生する稍深発地震の発生メカニズム解明に向けて、青色片岩の変形実験を行った。含水鉱物の脱水脆性化を支持する先行研究とは異なり、青色片岩の半脆性的挙動が稍深発地震の発生メカニズムの一つである可能性を示唆する結果が得られた。

スラブ表面での屈折を考慮したレシーバー関数イメージングを用いて、東北日本沈み込み帯における太平洋スラブ内部の速度不連続構造を調査した。海洋地殻のエクロジャイト相転移に伴う速度コントラストの消失を検出し、この相転移位置が二重深発地震面上面地震の発生位置と空間的に一致していることが判明した。これは Kita et al., (2006)が提案した海洋地殻の脱水脆化モデルと整合的である。さらに、オリビン準安定領域の上面と下面において、それぞれ明瞭な負振幅と正振幅を検出した。これらは深発地震の発生位置とも空間的に相関しており、相転移断層モデルを支持している。加えて、このオリビン準安定領域の速度コントラストは深さ 450 km付近で消失し、深発地震の分布限界とも一致することから、マントル遷移層でオリビン準安定領域が存在しないことが示唆された。更に、稍深発地震発生帯付近の海洋モホ面において負のコントラストを検出した。この不連続面の成因は未解明だが、この領域での未知の脱水反応あるいは相転移反応の存在を反映している可能性がある。

地震波トモグラフィ解析により、2013年に米国西部ワイオミング州中央部で発生した謎の上部マントル地震（深さ75 km）が、近傍の高温なイエローストーンプルームの影響で促進された、沈み込んだファラロンスラブ残骸の脱水に起因する上昇流体によって引き起こされたことを示した (Zhao et al., 2024)。

2003年5月26日に宮城沖で発生した M7.1スラブ内地震震源域周辺の地震の時空間変化を調査した。その結果、2011年東北地方太平洋沖地震後にこの直上のプレート境界で繰り返し地震が出現したことが明らかになった。このことは、東北沖地震の余効変動に伴う载荷速度増加に伴いスラブ内地震直上のプレート境界で発生する破壊の不安定性が増加したことを示唆する。地震波形に基づき周辺域の地震の断層サイズを推定すると、それが典型的な応力降下量 3~10 MPaから期待されるより半分程度以下に小さいことが分かった。高い深度と法線応力により、発生する地震の応力降下量が大きくなっている可能性が示唆される。推定された断層サイズに基づき繰り返し地震を探索すると、プレート境界に大量の繰り返し地震が検出されたのと同じ基準でも、スラブ内では繰り返し地震は見つからなかった。プレート境界とスラブ内の各々の地震の震源間距離のパターンも大きく異なっており (図 1)、断層の分布、地震パッチの孤立度、断層上の地震性滑り-非地震性滑りの割合、断層の成熟度などがプレート境界とスラブ内で大きく異なっている可能性が示唆される。

2021年2月13日 M7.3地震および 2022年3月16日 M7.4地震の余震分布から複数の明瞭な面構造 (2021年の地震については4枚、2022年の地震については2枚の主要な面)を検出した。各々の地震により破壊された断層面に対応すると考えられる。断層沿いの地震活動を東北沖地震発生時まで遡って調べてみると、2022年の地震で破壊した2つの断層面のうちの一方において、東北沖地震発生の直後から顕著な地震活動の活発化があったことがわかった。こうした地震活動は深部側の面構造に集中している。これらのM7級スラブ内地震はスラブ内の既存の弱面の破壊により発生したと考えられるが、その1つにおいて本震の破壊に先行する地震活動があったと考えられる。

短周期の直達P波とS波の波形合わせにより、スラブ内のM2~4の地震のモーメント・テンソル解を大量に推定できるようになった。2003年M7.1スラブ内地震震源域周辺で得られたモーメント・テンソル解は、プレート境界における逆断層すべり、その直下から20 kmまでの範囲における down-dip compression型の応力場、それ以深における down-dip extension型の応力場とよく整合した (図 2)。

- ・「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

地震波解析により、スラブ内地震や上部マントル地震の発生メカニズムとして脱水脆化を裏付ける構造の空間的变化を明らかにした。また、東北日本におけるマグニチュード7級のスラブ内地震の発生場および発生過程の複雑性も明らかになって来た。これらの研究成果は、「海洋プレート内部の地震を支配する要因の解明とモデル化」に大きく貢献している。今後は、深部構造と高精度震源分布の関係をさらに詳しく調査し、スラブ内地震の発生メカニズムの解明を進めるとともに、研究対象地域の拡大を図る。

実験研究からは、沈み込み帯深部での岩石の力学・破壊挙動の解明や二重深発地震面上面の稍深発地震発生メカニズムの理解に資する成果が得られてきている。稍深発地震が発生する沈み込み帯深部においても、岩石の半脆性的挙動が支配的である可能性を実証することができた。大地震後の余効変動は、長期間にわたり社会インフラに影響を及ぼす可能性があり、そのモデル化は大地震後の都市計画において「余効変動による被害」を予測する上で重要な役割を果たす。これら研究成果は愛媛新聞（2024年7月6日付）でも報道された。

引き続き地震発生場の解明を進めることにより、陸域直下でおこりしばしば甚大な被害を引き起こしうる深発地震・スラブ内地震の発生機構理解と災害軽減に貢献する。

(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

Fuchizaki, K., H. Naruta, F. Sato, T. Ohuchi and A. Suzuki, 2025, Crystalline state in a pressure region of proceeding amorphization of SnI₄, High Press. Res., doi: 10.1080/08957959.2025.2449692, 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

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

Ohuchi, T., Y. Higo, N. Tsujino, Y. Seto, S. Kakizawa, Y. Tange, Miyagawa, Y. Kono, H. Yumoto, T. Koyama, H. Yamazaki, Y. Senba, H. Ohashi, I. Inoue, Y. Hayashi, M. Yabashi and T. Irifune, 2024, Transient creep in olivine at shallow mantle pressures: Implications for time-dependent rheology in post-seismic deformation, Geophys. Res. Lett., 51, e2024GL108356, doi: 10.1029/2024GL108356, 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

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

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

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

- 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
- 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
- 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
- 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, 謝辞無
- Ohuchi, T., 2024, Olivine's trembling transformations. *Nat. Geosci.* 17: 958. doi 10.1038/s41561-024-01547-6, 査読無, 謝辞無
- Toyokuni, G., D. Zhao, D. Takada, 2025, Whole-mantle isotropic and anisotropic tomography beneath Japan and adjacent regions. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* (in press), 査読有, 謝辞有
- Miyazaki, K, and J. Nakajima, 2025, Flat 410 and 660 discontinuities beneath northeastern Japan: Implication for a sub-slab wet plume hypothesis PEPI, doi: 10.1016/j.pepi.2025.107316, 査読有, 謝辞有
- Zhao, D., X. Liu, D. Zhao, Q. Qiao, 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, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

- Ohuchi, T., M. Hoshino, K. Uesugi, S. Okumura, Y. Higo and N. Tsujino, 2024, Three-dimensional location analysis on acoustic emissions and faults in metastable olivine under pressure-temperature conditions of deep subducted slabs, 2024年地球惑星科学連合大会, SCG40-14.
- Ohuchi, T., 2024, 地震発生場の温度圧力条件下における岩石破壊実験：高エネルギー・高フラックスX線を用いた高時間分解能でのその場観察, SPRUC高圧物質科学研究会地球惑星科学研究会合同研究会.
- Ohuchi, T., 2024, 地震発生場の高温高圧環境下における岩石破壊プロセス-高エネルギー・高フラックスX線を用いたその場観察実験-, 第10回大型実験施設とスーパーコンピュータとの連携利用シンポジウム-圧下量子ビーム計測と計算科学の融合で拓がる高圧科学の新展開-.
- Ohuchi, T., M. Hoshino, K. Uesugi, S. Okumura, Y. Higo, N. Tsujino and S. Kakizawa, 2024, 稍深発地震の温度圧力条件下におけるカンラン石の一軸圧縮試験：特にアコースティック・エミッション震源及び断層の空間分布について, 鉱物科学会2024年年会, S3-11.
- Ohuchi, T., Y. Higo, N. Tsujino, S. Kakizawa, Y. Seto and Y. Kono, 2024, 稍深発地震発生場の温度圧力条件下におけるアンチゴライトの摩擦滑り：高時間分解能X線その場観察実験によるアプローチ, 第65回高圧討論会, 1B11.
- Sawa, S., T. Ohuchi, K. Matsuda, Y. Kita and J. Muto, 2024, Mechanism for deep earthquakes: dehydration-driven faulting of phase A and olivine, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024, Oita.
- Yoshida, K., 2024, Intersource-Distance Dependence of Seismic Waveform Similarity and Validity of Repeating Earthquake Detection, 日本地球惑星科学連合2024年大会, May 28, 2024.

Zhao, D., X. Liang, G. Toyokuni, 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.

(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：

沈み込む海洋プレートの二重深発地震面上面では含水鉱物の脱水により豊富に流体が存在していると考えられる。青色片岩に水を加えた実験を行い、断層形成に水が影響するのかを検証する。

引き続き、大型放射光施設 SPring-8の新ビームライン BL15XUと関連ビームラインを用いて高温高压下におけるカンラン石の変形・破壊実験を実施する。当ビームラインの高エネルギー・高フラックス X線により、サブ秒の時間分解能でのメカニカルデータ取得が可能であるため、高温高压下における断層形成やすべりのプロセスの詳細を観察し、それをモデル化することを目指す。

最新の地震波トモグラフィー法により、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与える影響について調べる。

3次元速度構造を考慮した震源再決定プロセスを用いて、日本列島下の深発地震の震源をより詳細に決定し、レシーバー関数イメージングの結果と比較する。深発地震がオリビン準安定領域の形成に伴う相転移に関連して発生している場合、オリビン準安定領域の表面あるいは裏面に深発地震が集中すると期待されるため、より詳細な空間比較によりこのモデルを検証する。

高精度再決定震源と新たに推定可能になった大量の微小地震のモーメント・テンソル解、大地震の破壊過程を用いて、2003年と2011年宮城沖、2021年と2022年福島沖のM7級スラブ内地震や関東地方のスラブ内地震の発生場の特徴を明らかにする。加えて応力変化や流体移動を通じたスラブ直上のプレート境界地震との相互作用も詳細に調べる。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

日野 亮太（東北大学）, 趙 大鵬（東北大学）, 内田 直希（東北大学）, 矢部 康男（東北大学）, 武藤 潤（東北大学）, 澤 燦道（東北大学）, 東 龍介（東北大学）, 吉田 圭佑（東北大学）

他機関との共同研究の有無：有

中島 淳一（東京科学大学）, 大内 智博（愛媛大学）

(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

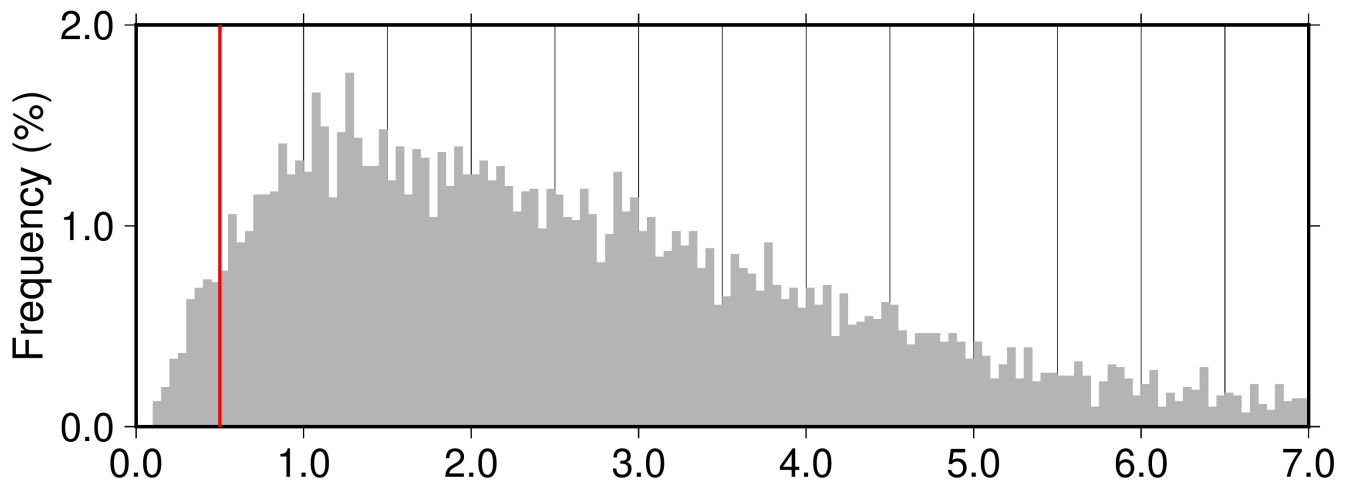
URL：https://www.aob.gp.tohoku.ac.jp

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

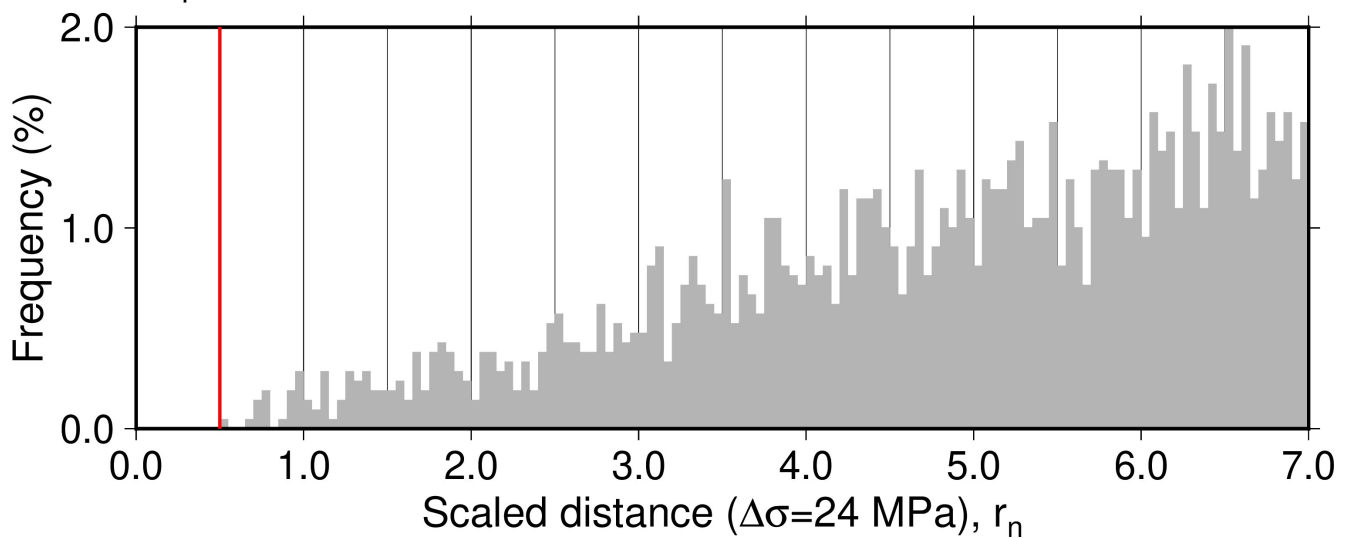
氏名：吉田圭佑

所属：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

(a) Interplate ($n_{\text{pair}}=8902$, $r_n < 7$, $dM < 0.3$)



(b) Slab ($n_{\text{pair}}=9427$, $r_n < 7$, $dM < 0.3$)



プレート境界地震とスラブ内地震の地震間距離

(a) プレート境界地震、(b) スラブ内地震。震源間距離は、マグニチュードから想定される断層サイズの平均値により規格化されている。

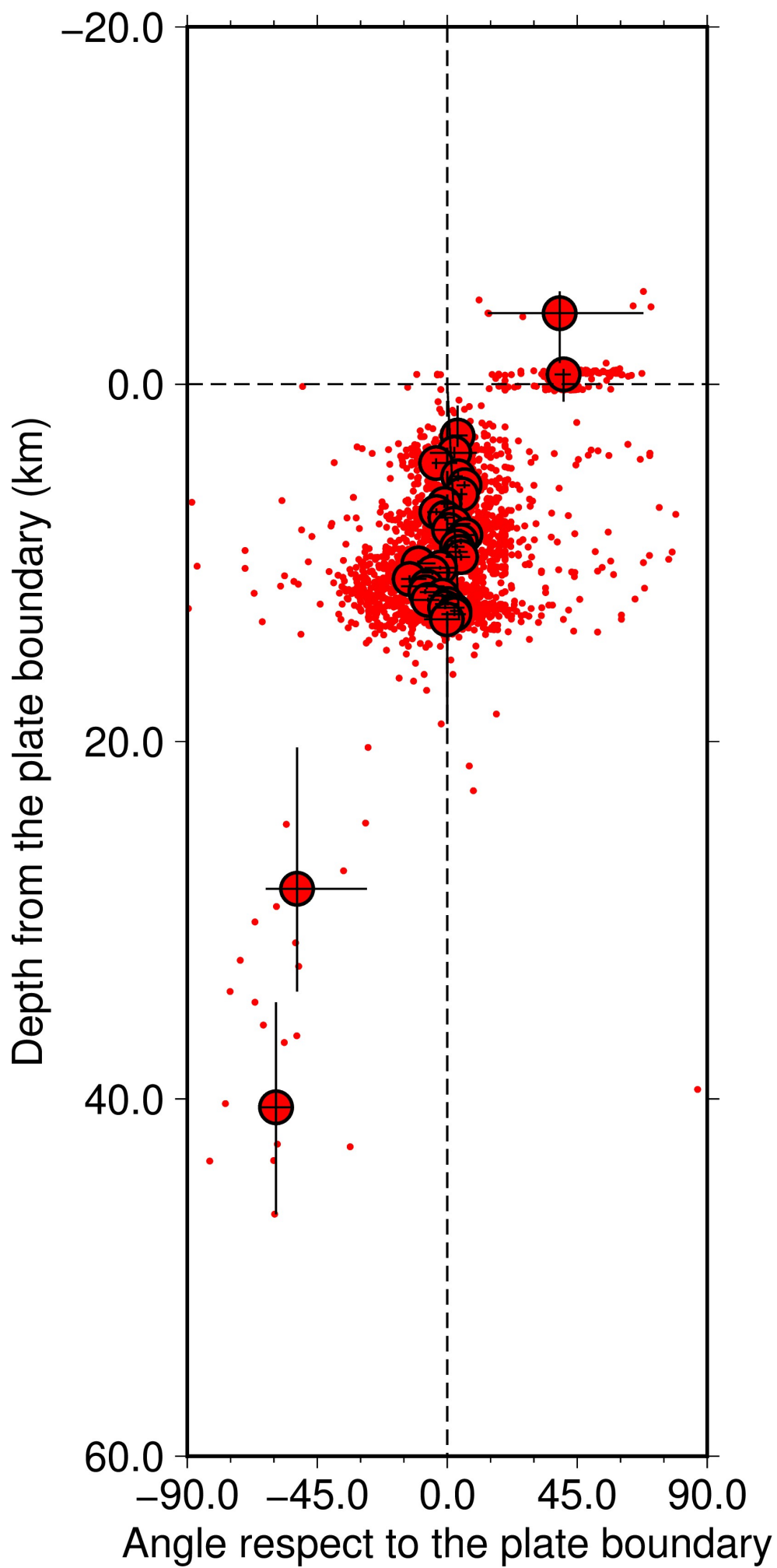


図2

推定したメカニズム解により得られた最大主応力軸の空間変化。プレート境界深度との関係で示す。小さい丸で各々の地震の発生位置での推定結果を、大きい丸で中央値を示す。縦の線は深さ範囲、横の線は 95%信頼範囲を示す。