

## 1 (1) 地震 (現象解明)

「地震 (現象解明)」計画推進部会長 飯高 隆

(東京大学・大学院情報学環)

副部会長 望月公廣

(東京大学・地震研究所)

副部会長 岡田知己

(東北大学・理学研究科)

地震や火山噴火が多発する我が国において、地震、火山噴火に伴う現象を理解し、これらによる災害を減少させることは重要な課題である。そのため、災害軽減に貢献することを目指して、地震・火山の観測研究を推進することの意義は大きい。地震がいつ、どこで、どのようなメカニズムで、どのような頻度で発生したかについての解明は基本的な情報を与える。地震現象の根本的な理解を深めるためには低頻度大規模現象を含む地震現象の多様性について特性を理解し、それらの現象が発生する仕組みや発生する場について観測研究・理論研究・実験研究の多方面からアプローチすることが大切である。

### 1. 地震・火山現象の解明のための研究

#### (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

低頻度で大規模な地震現象の研究では、長期間における地震活動を把握する必要がある。史料や考古学的データや地質データ等の長期間にわたるデータの解析に加えて近代的な観測データを用いた解析を行い、研究を進めていく必要がある。2011年3月11日に、M9という巨大な地震の発生を経験した我々は、低頻度でも巨大な地震がいかに甚大な被害を及ぼすのかを実体験した。低頻度の巨大地震については、その災害を想定し対策を講ずることが非常に重要である。その現象の発生が低頻度であるがゆえに、我々はその実像をはっきりと理解することが難しいが、様々な観測や実験によって現象を明らかにすることが重要である。

日本海溝および千島海溝根室沖でのプレート境界浅部の固着・すべり状態を定量評価することを目的とした GNSS-A 観測を継続した研究がなされた (東京大学地震研究所[課題番号: ERI\_05])。2022年5月に備船(第三開洋丸)およびウェーブグライダーによって根室沖での観測を実施したほか、6月と10月に日本海溝沿いでの観測がウェーブグライダーにより実施された。その結果、根室沖の海溝陸側斜面に設置されている2観測点で約7 cm/年の変位速度が得られた(図1)。これはプレート境界において、プレートが浅部まで固着していることを強く示唆する結果である。上下動に関しては、3観測点とも沈降傾向が見られるものの、船舶とウェーブグライダーという異なるプラットフォームによる観測間で機器によるオフセットが生じてしまう問題があり、他の観測点のデータとも合わせたオフセット推定の必要性があることがわかった(東北大学災害科学国際研究所[課題番号: IRID02])。日本海溝沿いの水平変位速度の分布については、中部(宮城県沖)で粘弾性緩和による陸向き変位が卓越する状況が継続している一方で、北部(三陸沖)・南部(福島県沖)では、陸向き変位速度の増加あるいは海溝向き変位速度の減少傾向が、それぞれの海域で認められ、東北沖地震後の余効変動の空間パターンが時間変化していることが示唆された(東京大学地震研究

所[課題番号：ERI\_05])。

2011年の東北沖地震(M 9.0)では、地震に伴う断層滑りが「浅部プレート境界断層」(=デコルマ)に沿って海溝軸近傍まで到達し、結果として大きな津波が発生した。一方、これまでの多くの研究では、流体(=水)がデコルマの地震性すべりに深く関与していると推測されてきたが、デコルマの物性に関する知見は極めて限定的であった。特に、断層面の強度を規定する間隙水圧のデータはデコルマに沿って全く得られていない。そこで、東北沖の日本海溝に発達しているデコルマの物性を解明するため、反射法地震探査データを高精度で解析した(東京大学大気海洋研究所[課題番号：AORI01])。海底下のP波速度構造モデル(図2)を用い、デコルマに沿って間隙水圧を定量的に求めた結果、デコルマの間隙水圧が異常に高いことを発見した。

メキシコ・ゲレロ州沖合で、2022年3月末から4月初めにかけて、海底地震計の設置回収作業を実施した。また、海底地震観測網の海底地震・測地観測網のデータを解析して、観測されたテクトニック微動と微小地震の活動域を残差地形及び重力異常と比較した(京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01])。ゲレロ地震空白域の特に西側では、微小地震とテクトニック微動の両方がほとんど発生しない領域(サイレントゾーン)の存在が既に指摘されている。サイレントゾーンは、局所的な重力及び地形の特徴を示す残留重力及び残差地形分布の負の異常域に対応する。この負の異常域は沈み込むプレート境界面が周囲と比べて相対的に窪む領域として解釈できる。一方、正の異常域は、沈み込む前の海底地形とそこで得られる残差重力及び地形異常との比較から、沈み込む海山として解釈した。また、2017年から2019年にかけて機械学習による検出で約4000の微小地震が検出された。特に2017年11月からの1年間には、これまでの目視による検出数の約5倍の2500イベントが検出された。得られた微小地震の震央の多くは海岸線付近に分布し、ゲレロ地震空白域のサイレントゾーン内にはほとんど分布しない。つまり、ゲレロ地震空白域内の顕著な残留重力及び残差地形の負の異常域から解釈されるプレート境界面上の相対的な窪み域では微小地震はほとんど発生していない。さらに、ゲレロ地震空白域を含む沖合で発生する微小地震及びテクトニック微動の震央の多くは、残差重力・地形異常が正から負に遷移する領域に多く分布する。つまり、明瞭な正または負の異常域では、微小地震とテクトニック微動のような小さなファスト地震及びスロー地震のいずれも発生していないことがわかった。

### (3) 地震発生過程の解明とモデル化

地震発生過程の解明とモデル化においては、観測結果や実験結果の解析から理解が進んだ。スロー地震発生域のプレート境界では延性的なマトリックス中に脆性的なブロック体が混在し、特異なレオロジーを示すことが示唆されている。その際に非球状の鉱物粒子が示すレオロジーを微視的観点から解明することは摩擦の物理における重要課題になっている。しかし、非球状な粒子を扱うシミュレーションは技術的困難が多く、これまで地震発生論分野では研究が進んでいなかった。そこで非球状粒子のレオロジーの微視的メカニズム解明に資するための数値計算コード開発を開始した(東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_04])。圧縮・剪断・一定圧力・一定体積などさまざまな境界条件に対応するコードを実装し、その基礎的な挙動を確認した。単純剪断で定常状態を実現したシミュレーションにおいては、レオロジー特性が形状因子にはさほど依存せず Herschel-Bulkley型の構成法則を満たすことを確認した。

深部地殻の強度は地震発生の理解に重要な基礎情報である。深部地殻変形を支配すると期待され

る石英について、過去に固体圧式変形試験機を用いて行われた含水天然石英岩（瑪瑙）の高温高压変形実験における流動応力は、変形条件への依存性が系統的でなく、パイロフィライト圧媒体の内部摩擦の補正が課題となっていた。そこで、このデータの補正を目的として、温度 800 °C、封圧 0.8 GPa における試料アセンブリの内部摩擦を求め、差応力を精密に決定する手法を確立した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_06]）。さらに、実験回収試料を解析し、転位クリープの力学特性とも密接に関係する動的再結晶組織の発達過程が、石英結晶のすべり系に依存することを明らかにした。

通常地震の発生予測については、点過程を用いた ETAS モデルや、更新過程を用いた繰り返し地震の予測手法が存在するが、テクトニック微動などのスロー地震活動については予測手法が確立していない。そこで更新過程に短期相互作用と長期ローディングの効果を取り入れた予測手法を開発し、西南日本の微動に適用した。予測性能は期待通りであったが、同時に地域的なテクトニクスの違いによる予測パラメータの違いを示すことができた（東京大学理学系研究科[課題番号：UTS\_03]）。

マクスウェル粘弾性体中の地震サイクルシミュレーションでは、速度弱化パッチが地震サイクルから永久固着に遷移することが知られている。この遷移の数学的構造を詳細に解析し、従来の弾性体内断層の地震性・非地震性滑り遷移が渦状点の Hopf 分岐であるのとは違って、粘弾性系に特有な鞍点があり、地震性挙動に対応する渦状点に接近して接線分岐をおこす前に地震性リミットサイクルに衝突して消失する、ホモクリニック分岐であることをつきとめた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_06]）。

熱・流体・空隙相互作用がある時の断層挙動を統一的に理解する枠組みを作る試みを開始した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_06]）。そのような相互作用が重要であると考えられている事象の一つに、稍深発地震の原因と目されるスラブマントルの蛇紋岩の脱水脆性化がある。長崎変成帯のアンチゴライト蛇紋岩を用い、深さ 60 km の稍深発地震域に相当する封圧 0.6-1.7 GPa、温度 500-700 °C で変形実験を行った。700 °C でも脱水軟化および降伏が起きる場合と起きない場合があり、蛇紋岩の初期不均質（微小クラックの存在）の影響と考えられる。降伏した場合の試料では、実験中に生じた断層剪断帯に集中して脱水反応の生成鉱物がみられ、断層の形成や剪断変形が脱水反応を促進することが示唆された。これは正のフィードバックを生み、不安定現象を生み出すメカニズムとなりうることがわかった。

南西諸島北部域における海底地震観測では、令和 3 年度までの第 1 期・第 2 期データから震源決定（観測点補正済み）した通常の微小地震に対して、Double-Difference 法による高精度相対震源決定を適用した（鹿児島大学 [課題番号：KGSM01]）。その結果、2019 年 5 月（第 1 期）に発生したマイグレーションを伴う微動エピソードに先行して、M3 イベントを含む微小地震の震源が上盤内で移動していることがわかった（図 3）。一連の微小地震は、約 3~4 km/day の速さで南西から北東方向へ移動し、その活動の終端付近から微動エピソードが開始していることから、両者の時空間的な関係が示唆された。

南アフリカの鉱山において、Cooke4 鉱山の採掘前線前方の応力集中域と Mponeng 鉱山の Mw2.2 の地震発生場から掘削回収したコアを用いて、3次元応力場の拘束を試み、その推定に成功した（立命館大学 [課題番号：RTM\_01]）。また、余震発生帯をホストする地質構造から、角閃石・黒雲母とともに 20 wt% を超えるタルクが見つかったこと、粉末ガウジの摩擦係数が小さく速度強化性を示

したことなどが示された（立命館大学〔課題番号：RTM\_01〕）。

乾燥（5 %RH）、室内（45 %RH）、湿潤（100 %RH）、加水の4条件で、速度ステップの摩擦すべり実験を行い、摩擦構成則のパラメータ及びAE活動の水蒸気量依存性を調べた。摩擦パラメータについては、おおむね、先行研究と同様に水蒸気圧の上昇に伴って $b-a$ が大きくなる傾向が得られた一方、先行研究と異なり乾燥環境でも速度弱化作性が示された（図4、東北大学理学研究科〔課題番号：THK\_02〕）。また、日本列島内陸域のMw3-7の地震のモーメントレート関数を系統的に推定・解析することにより、中小地震の破壊の複雑性の多様性を明らかにした（図5、東北大学理学研究科〔課題番号：THK\_07〕）。

### （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

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おいては、多くの観測研究がなされ、重要な成果が得られた。まず、海溝型地震の発生場について、日向灘で過去最大級とされている1662年日向灘地震について、浅部スロー地震の海底地震観測の成果や人工地震波を用いたプレート境界の位置情報、東北地方太平洋沖地震で得られた浅部スロー地震と巨大地震大すべりの関係など最新の地球物理学研究の知見を基に、新たな断層モデルを構築した（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI01〕）。並行して実施した宮崎県沿岸部における津波堆積物の調査結果と断層モデルを用いた津波による浸水シミュレーションにより、この断層モデルの妥当性を評価し、1662年日向灘地震がM8級巨大地震であった可能性を科学的に初めて示した。本研究の結果は、国や日向灘沿岸の地方自治体における地震・津波に対する防災に役立つ基礎資料となり、すでに日向灘の地震活動の長期評価に反映されている（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI01〕、産業技術総合研究所〔課題番号：AIST04〕と共同で実施）。

四国南西部の土佐清水市から四万十市西土佐奥屋内を通過して八幡浜市までの測線について、未解析だった期間（2021年1月～2022年1月）のレシーバ関数を追加して、レシーバ関数イメージを更新した（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI02〕）。スラブの傾きは、南側では約 $10^\circ$ であるが、深部低周波地震の発生域付近より北側では約 $20^\circ$ と大きくなる。四国東部の海陽―米子測線でのスラブの傾斜 $6^\circ$ よりやや大きいことがわかった（図6）。

ニュージーランド、ヒ克蘭ギ沈み込み帯北部のギズボーン沖の観測について、海底地震計波形記録には、先行研究で確認された120個以上の微動が見られることが視認されたため、なるべく完全な微動活動の時空間分布を把握することを目的として、観測全期間にわたる海底地震計観測記録のみを用いた解析を実施した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI\_08〕）。その結果、2590個の微動が検出され、その多くはSSEが発生した直後からバースト的に発生したepisodicなものであった。SSE発生期間前後以外の微動発生域は沈み込んだ海山の直上からアップディップ側の深さ10～15 km程度に収まっているが、SSE発生期間の前後では発生域が深さ40 km程度に拡大した。さらにこの海域の微動について、そのエネルギーの推定を行った。今回求められた微動のエネルギーはほとんどが $10^2$ – $10^6$  Jに収束しており、特に $10^3$ – $10^5$  Jに多くのイベントが集中している。微動のエネルギー・レートは、多くのイベントが $10^1$ – $10^3$  J/sに収束していた。この結果から、この海域で発生するテクトニック微動のエネルギーは、南海トラフ浅部をはじめ、東北沖や十勝沖のものと比較して1桁以上小さいことがわかった。

海底下で発生する地震は、陸域と比較して未だ実態の把握が大幅に遅れている。そこで、地震活

動の現状把握と実態解明のために、広域かつ精緻な観測データをリアルタイムで取得する海底地殻変動・地震活動観測技術システムを開発し、展開している(海洋研究開発機構[課題番号: JAMS02])。特に、巨大地震・津波の発生源として緊急性や重要性が高い海域を中心に三次元地殻構造や地殻活動、断層物性、地震活動履歴等に係る調査を実施した。潮岬沖—四国沖の稠密測線で得られた反射断面から、土佐渚トラフ近傍下にトラフ軸に沿った構造異常があることを見出した。構造異常の成因は上盤プレート内の低速度帯である可能性が高い。この構造異常帯は 1946 年南海地震の滑り域やプレート間の固着が強い地域と、ゆっくり地震が観測される地域の境界に位置しており、プレート境界滑り様式の深さ方向での違いとの関連が示唆される。地震調査分野のビッグデータから得られた南海トラフ全域の 3D 構造と地震発生様式との関連を調べ、それらの対応状況を明らかにした(海洋研究開発機構[課題番号: JAMS02])。

スラブ内地震やマントルウェッジに関する研究も進められた。S-net 及び Hi-net で記録された大量の近地地震走時データを用いて東日本前弧域の 3 次元 P 波・S 波トモグラフィ解析を行った結果、マントルウェッジと沈み込んでいる太平洋スラブに顕著な構造不均質が存在することがわかった(東北大学理学研究科[課題番号: THK\_05])。特に、太平洋スラブは表面から 20 km の厚さ範囲で蛇紋岩化マントルを示す高 P 波速度 ( $V_p$ )、高ポアソン比でイメージされたものの、2003、2021、2022 年に福島沖～宮城沖で発生した M7 級のスラブ内地震の余震分布に沿うように低  $V_p$  域が局在することが明らかとなった(図 7、東北大学理学研究科[課題番号: THK\_06])。

海溝型地震震源域海底において、GNSS-音響測距結合方式(GNSS-A)による地殻変動観測を継続して実施した(海上保安庁[課題番号: JCG\_03])。日本海溝沿いにおける観測から、東北地方太平洋沖地震の余効変動が続いていること、南海トラフ沿いにおける観測から、プレート境界固着の影響による地殻変動を観測していることを示した。

Hi-net 観測網の地震計特性を補正して低周波成分を抽出すると、空間的に連続したさまざまな後続波が見られる。その中で P 波直後の後続波に注目し、波動伝播シミュレーションも用いて検討した結果、波形の震源深さ依存性を用いて震源の深さを推定できる可能性があることがわかった(弘前大学[課題番号: HRS\_01])。また、東北地方太平洋沖地震の前後で内陸の地震活動が大きく変化したことが知られている。これを、近年機械学習によって整備された微小地震まで含む震源メカニズム解カタログをレシーバ断層として用いたクーロン破壊基準( $\Delta CFF$ )の観点から調査した。有限断層モデルに基づいて計算された  $\Delta CFF$  の空間ブロック平均から、東北地方北部と南部～関東地方にかけては、東北地震後の内陸地震の  $\Delta CFF$  が系統的に正に偏る、すなわち東北地震によって誘発された可能性が示唆された。また東北地震前の定常的な活動に対する  $\Delta CFF$  は必ずしも正にはならず、地震によって内陸地震の発生が大きく変更を受けたことを強く示唆している(弘前大学[課題番号: HRS\_01])。

内陸地震発生や火山活動を支配する場の研究においても多くの観測研究がなされた。有馬高槻断層帯の北方の下部地殻内に、地震波反射体が存在することが知られている。これまで、満点計画による稠密な地震観測網の波形データを活用して、反射体のイメージングが行われ、深部低周波地震の震源域を下端とするような北落ちの反射体が推定されていた。しかしながら、これらにおいては、単純な速度構造や一定傾斜の反射体を仮定していること、浅部のイメージングにおいて直達 S 波の影響を除き切れていないことなどの問題があった。今回、新たに開発した深層学習を用いた走時読み取りプログラムを用いて、満点計画の地震データの中で、未処理で震源決定も行われていなかった

たデータを解析に利用することを可能にした(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI03])。さらに、開発した走時読み取りプログラムをFine TuningしてS波の反射波を読み取るモデルを作成することにより、約14万個という大量の反射波の走時を読み取り、イメージングを行うことが出来た。また、深部低周波地震の震源決定に用いられているJMA2001の速度構造を解析に用いること、および、マイグレーション処理により反射体の傾斜を補正することで、反射体の上面の位置を精度よく推定することに成功した。加えて、高周波帯域までのレシーバ関数解析を行うことにより、これまで不明だった反射体の鉛直方向の構造を推定し、反射体が厚さ5 km以下の地震波低速度の薄い層であることを明らかにした。これらにより、反射体は深部低周波地震の震源域で最も深く、そこから浅部へ広がっていることが明確となった。さらに、反射体の南北の端の水平位置を押さえることにより、主たる反射体が、深部低周波地震の震源域から有馬高槻断層帯へ向かって、南上がりの扇形に広がるように分布していることが分かった(図8, 京都大学防災研究所[課題番号:DPRI03])。

長野県西部地域の10 kHz サンプリングと満点観測および周辺の定常観測点のデータを用いて、地震メカニズムの逆解析により、2017年6月のMj5.6(気象庁の震央地名は長野県南部の地震)の断層付近において、応力場の空間変化が推定された(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI03])。この中の領域において遠方の応力場に比べて、約20度の時計回りの $\sigma_1$ の回転が検知された。これは、長野県西部地震による応力変化と背景応力場、および地震発生域より深部の逆断層における非地震性すべりによる応力変化で説明できることが分かった。この付近の震源分布の下限は、深さ約7 kmを最浅部とするアーチ状を示しているので、深部の逆断層は、深さ7.5 kmを断層の上端として、東落ち傾斜 $45^\circ$ 、すべり方向 $65^\circ$ を仮定した。非地震性すべりを起こす断層の平均すべり量は6 m、背景応力場の主応力の方向はN125° Eとし、差応力を13 MPaとした。この非地震性すべりにより、M5.6の断層に応力集中を起こすことが可能であることがわかった(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI03])。

深部流体および火山体内部を含む浅部での流体循環の実態を明らかにするため、阿蘇カルデラを含む九州中部、および始良カルデラを含む九州南部のそれぞれの領域に分布する地下水について、地殻流体の分布・循環についての研究が行われた(図9, 京都大学防災研究所[課題番号:DPRI04])。溶存元素組成データを統計解析し、組成的特徴とその空間分布の成因あるいは生成機構を推定した。統計解析の方法は、白色化されたデータに基づくクラスタ解析を用いた。その結果、既存研究では見出せなかったカルデラ内および外における浅部の流体循環、火山性成分の循環、および沈み込んだプレート由来と考えられる深部流体を見分け、その分布と地質学的構造との間の関連性を、初めてクリアに捉えることに成功した。特に、九州中部地域においては、有馬型の深部流体が、別府島原地溝帯南縁や大きな断層帯に沿い、かつ前弧から背弧に存在し、九州中部が広範囲に深部流体のフラックスを受けていることが分かった(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI04])。

地震発生ポテンシャルを評価するうえで重要なものの一つは下部地殻から地震発生層への応力载荷が挙げられる。下部地殻内の粘性不均質に起因する局所的な非弾性変形は地震や歪み集中帯の成因に対して重要な役割を果たしている可能性があるが、その影響を評価するためには、下部地殻の変形を検出する必要がある。九州のGNSS観測点の定常的な変位速度を用いた、下部地殻の非弾性歪速度およびプレート間の固着分布の推定が行われた(九州大学[課題番号:KYU\_01])。推定の結果、プレート間の固着分布はこれまでの先行研究に類似した分布が得られた一方で、下部地殻の非弾性歪み速度の分布は周辺のテクトニクスを反映したと思われる特徴的な分布を示した(図10)。

推定された地殻下部の非弾性変形とプレート間カップリングを用いて計算された応力変化は、九州の内陸地震が地殻下部の非弾性変形の影響を強く受けていることを示している。また、上部地殻の偏差応力場との比較から、別府島原地溝帯の南側に多くの弱断層からなる shear zone が存在することが示唆された。

福岡県警固断層周辺で 2021～2022 年に広帯域 MT 観測を行い、得られた 65 点のデータを用いて 3 次元比抵抗構造を推定した（九州大学[課題番号：KYU\_01]）。その結果、警固断層の北西端付近（2005 年福岡県西方沖地震の地震断層の南東端）および警固断層の南東端付近に低比抵抗体がイメージングされた。警固断層は両低比抵抗体に挟まれた比較的高比抵抗な領域に位置している。警固断層の走行と 2005 年福岡県西方沖地震断層の走行は、およそ  $10^\circ$  のずれがあるが、低比抵抗体が破壊に対するバリアとして働き、断層走行が変化していることが示唆された。また、福岡県西方沖地震断層の余震分布の下限は低比抵抗体の上面と一致する。道東および警固断層で見られた内陸地震発生域が 2 つの低比抵抗体に挟まれた場所であるという結果は、2016 年熊本地震の結果と類似していることがわかった。

いわきの地震活動域から新潟に延びる測線において電磁気学的構造について、3 本の測線において解析を行った（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_09]）。中央の測線の構造では測線上において上部地殻からマントルにかけて 3 つの領域で低比抵抗域が検出できたことが報告されている。ひとつは火山フロント中心部の低比抵抗域であり、マントルから地殻中部まで見られた。2 つ目は火山フロントの前面部に位置し地殻中部に存在する低比抵抗域である。3 つ目は、測線の西端での上部地殻に存在する低比抵抗域である。この特徴的な構造は、他の 2 つの測線でも見られた。中央の測線の結果同様に、火山フロントの背弧側に顕著な低比抵抗域がマントルから地殻にかけて見られた。

また、庄内平野で取得したデータについても、さらにデータを増やして解析を進めた。南北に近い 5 つのラインに沿う比抵抗構造の鉛直断面図において、震源分布と比抵抗構造を比較すると、地震発生層の下限が浅部の高比抵抗とその下の低比抵抗の境界と対応していることがわかった。日本海に近くでは上部地殻の高比抵抗域が厚くなり、地震発生層も厚くなるのに対して、脊梁山脈の近くでは上部地殻の高比抵抗域が薄くなり、地震発生層も薄くなるのが分かった。また、定量的評価として地震発生層の下限の下の地殻の比抵抗値はおおよそ  $3\sim 100 \Omega\text{m}$  であることが分かった（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_09]）。

箱根火山周辺域における群発地震の発生メカニズムの解明をさらに進めるため、2000 年から 2020 年までの期間における相似地震の検出を行った（東北大学理学研究科[課題番号：THK\_02]）。群発地震の震源分布は、西北西—東南東方向のほぼ鉛直な面状に集中して発生していることが分かった。得られた相似地震から非地震性滑りの履歴を推定し、近傍の神奈川県温泉地学研究所湖尻観測点（KZR）の傾斜計記録との比較を行った。非地震性滑りの加速と同時期に西南西方向へ傾き下がる有意な傾斜変動が観測されており、群発地震に伴う非地震性すべりの発生が示唆された。

2020 年末ごろから能登半島北東部で発生している群発地震の震源分布を高精度に決定し、それらの地震が面構造を用いて深部から浅部へ移動していたことを明らかにした（図 11、東北大学理学研究科[課題番号：THK\_02]）。また群発地震開始部付近にみられた環状震源分布と S 波反射面を根拠に、マグマ活動に関係した構造が群発地震を発生させた流体供給に寄与した可能性を示した。さらにこの群発地震震源域周辺で行った合同臨時観測データを用いて、地震波速度構造の推定を行い、高間隙圧流体を示唆する高  $V_p/V_s$  領域を震源域付近に確認した。また、常時微動表面波トモグラフ

ィー手法を高度化し、S-net データに適用して3次元S波速度構造を推定した。流体を多く含むと考えられる堆積層および海洋性地殻に対応する低速度領域のイメージングに成功した(図12, 東北大学理学研究科[課題番号: THK\_02])。

東日本各地での絶対重力測定に関しては、松代以外に、弟子屈(北海道)、蔵王(宮城県)、富士山(山梨県)において実施した(東京大学地震研究所[課題番号: ERI\_10])。弟子屈および蔵王では、それぞれ産業技術総合研究所および東北大学と協力し、超伝導重力計の経年的なドリフトを検定する作業を進めている。富士山では、山麓と中腹とで2台の絶対重力計を同時に動かし、重力値の差を精密に決定した。これによって、サーベイなどに使用する相対重力計の感度検定に有用な測線を構築することができた。

内陸地震の発生過程を理解すべく海外での観測研究もおこなわれた。2016年ニュージーランド・カイクウラ地震の震源域の応力場を推定し、Slip Tendency (ST) 解析によりカイクウラ地震を構成する小断層群の応力場に対するすべりやすさを確認した(東北大学理学研究科[課題番号: THK\_01])。震源に対応する断層では高いST値が確認され、応力場に対してすべりやすい断層であることが確認された一方、すべりの終端に対応する断層では、低いST値が確認され、応力場に対してすべりにくい断層であることが確認された。また、各小断層のすべり方向は応力場により概ね説明できることがわかった。

内陸断層の深部における地震発生と塑性流動の関わりを明らかにするための地質調査、地質調査に対応した岩石変形の解明のための実験を行った(産業技術総合研究所[課題番号: AIST05])。塑性変形した岩石から応力と歪を石英の動的再結晶微細構造から読み取る手法を確立した。また、Na端成分斜長石の焼結方法を確立した。

熊本地震による粘性変形を補正した上で余効すべりとマグマだまりの体積変化の同時推定を試みた(国土地理院[課題番号: GSI\_01])。予察的な結果ではあるが、地震後に顕著に見られた阿蘇カルデラ内の沈降が、阿蘇カルデラ内の2枚の断層面における正断層的なすべりで説明できること、また、阿蘇山のマグマだまりの体積変化には地震をはさんだ顕著な変化はあまり見られず、2015-2016, 2019, 2021の火山活動活発化に対応した体積膨張が見られることがわかった(国土地理院[課題番号: GSI\_01])。

地震発生場の解明とモデル化においては、シミュレーションを用いた解析も行われている。東北沖地震10年間の余効変動に関する論文と簡単な2次元モデルから、マントルウェッジの非線形・深さ依存レオロジー、火山前線の下での低粘度ゾーンなど、個々のレオロジー不均質性の寄与を明らかにした。これらを明らかにするには地震後の垂直変動及びその時系列が重要な観測であることから、レオロジー的不均質を含んだ力学モデルと稠密観測が、沈み込み帯の地震サイクルにおける様々な変形を包括的に理解する上で重要な役割を果たす可能性を示した(図13, 東北大学理学研究科[課題番号: THK\_07])。

地下の弾性定数・密度の不均質構造、自己重力を考慮した球モデルにより地震時の重力変化を計算する基本的な手法が完成した(東京大学理学系研究科[課題番号: UTS\_02])。また、既存のモデルとの比較により球モデルの優位性を評価した。具体的には、東北地方太平洋沖地震で観測された震源付近の海底測地データと遠地の陸上GNSSデータが球モデルでは整合的に説明できることを、半無限モデルとの比較により示した。また、弾性定数や密度の水平不均質が地震時の重力変化に与える影響を定量的に評価し、衛星重力観測の精度を高めることでそれらが検出可能なことを示した。

温泉溶存ガスの連続を精度良く実行する観測評価システムを製作するとともに、温泉溶存ガスの濃度変化の観測結果によって深部低周波地震を検出できるかどうかを明らかにするために、深部低周波地震の震源域があつて第四紀火山が確認されていない、紀伊半島南部の温泉で現在観測が行われている（東京大学理学系研究科[課題番号：UTS\_04]）。本宮観測点では2021年6月24日から約半年の間観測を行った。この間の通常の地震は4回、深部低周波地震は25回あつたが、これらに応答するような溶存ガス組成の特徴的な変化は観測できなかった。川湯観測点では2022年1月11日から約半年の間観測を行った。この間の通常の地震は4回、深部低周波地震は28回あつたが、これらに応答するような溶存ガス組成の特徴的な変化は観測できなかった。大紀観測点では2022年12月15日から観測を継続している。観測期間がまだ短いので、組成の変動はまだ評価できないが、この間の通常の地震は0回、深部低周波地震は6回あつたが、これらに応答するような溶存ガス組成の変化はまだなく、今後見極めていく必要がある。

ビッグデータの解析やデータベースの公開の研究も進んだ。日本全国の地殻内応力マップに関する論文を公表し、その結果を産業技術総合研究所の地殻応力場データベースで公開した（産業技術総合研究所[課題番号：AIST07]）。不均一応力場の成因に関して、今年度は福島県浜通り周辺の正断層場について検討を行った。S-net データを活用し、海陸データを統合して震源再決定を行った。その結果、多くの震源は気象庁カタログよりも浅い位置に再決定されたが、依然として太平洋プレートから陸に向かって伸びる分布が確認できた。これらの地震のメカニズム解は様々なタイプを示すが、応力テンソルインバージョンにより推定した応力場は正断層場に近い場であり、分岐断層が正断層すべりを起こし得ることが示された（産業技術総合研究所[課題番号：AIST07]）。

### 3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

#### （1）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

##### ア. 強震動の事前評価手法

現代の地震観測で得られる知見を史料の分析結果と結びつけ、歴史地震の震度を検証および定量化したいと考え、2020年9月から東京都文京区根津周辺における稠密観測が継続されている（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_15]）。安政江戸地震の揺れの検証を目的のひとつとし、観測点は同地震の被害史料の分析から被害場所が特定できた地点とその近隣地点にした。2023年2月時点では11点で観測をしている。暫定的な結果では、観測点ごとの卓越周波数や振幅の違いが確認できている。

東北地方にある2つの強震観測点の地下構造を推定した（弘前大学[課題番号：HRS\_01]）。微動アレー観測を行い、地盤調査結果を踏まえて比較的表層のS波速度を逆解析した。さらに、地震記録を収集して深い地盤構造の影響を拡散波動場理論によって確認した。K-NET 青森では、微動アレーの結果から深さ約100mまでS波速度を推定した。2つめの強震観測点は、気象庁で階上町道仏観測点と呼ばれている観測点である。ここでは、深さ約16mまでボーリング調査を行い、速度構造を求めた。この地点では、地盤応答の非線形性についても検討した（弘前大学[課題番号：HRS\_01]）。

### 5. 研究を推進するための体制の整備

#### （3）研究基盤の開発整備

##### イ. 観測・解析技術の開発

地震の現象解明を目指した観測機器の技術開発の研究も行なわれている。海底面設置型の広帯域地震・傾斜観測システムの開発と高度化が進められた（東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_23]）。房総半島沖で繰返し実施している次世代型広帯域海底地震・傾斜計（BBOBST-NX）による長期海底傾斜観測の、機器近傍の水温を含む2年以上のデータが2020年に得られた。これにより傾斜データの水温依存性が約 $-30 \text{ micro rad}/^\circ\text{C}$ の温度係数で明確に存在しており、 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 度以上の温度変動があると有意な傾斜変動を判別するのに問題となることが分かった。この水温変動の影響を対症的に除去する手法開発を進めると共に、その要因となり得る広帯域地震センサー内部で高精度な温度変化記録を陸上の実験室内で試験計測した。

### これまでの課題と今後の展望

低頻度大規模地震の現象解明においては、千島海溝沿いや三陸沖に設置された観測機器による海域観測が進められており、データが蓄積されている。海溝近くの観測点でもプレートの沈み込みの方向に大きく動いていることから、プレートが浅部までカップリングしていることを示した。海域でのGNSS-Aによる海底地殻変動観測は、ウェーブライダー等の新しい技術開発によって、高密度高頻度での観測が可能となりつつあり、より精度の良いデータがとられることが期待される。また、S-netを用いた解析も進み、海域でより精密な構造が得られつつある。このことは今後のシミュレーション等のより正確な解析に貢献するものと思われる。南海トラフにおける海底地殻変動の観測においては安定した精度でデータが得られつつあり、モニタリングが可能となりつつある。プレートの沈み込みに伴う浅部微動の解析は、国内外の観測で進められており、それぞれの沈み込み帯で得られた結果を比較検討し、それぞれの地域の特徴の類似・相違点を明らかにしたうえで、現象を普遍的に捉えた研究がなされるものと期待される。また、微小地震と浅部微動の震央分布の時空間的關係についての検討が進み、お互いに影響を及ぼしあっている可能性について示唆される結果が得られつつある。GNSS-A観測点の設置が進んでいない日向灘から南西諸島北部域にかけては、小繰返し地震を用いた累積すべり量の時間変化を用いることにより、変化の検出を試みている。スラブ内地震の現象の理解においてはS-net等を用いた詳細なトモグラフィ結果が示され、スラブ内地震がアウターライズ断層や流体と関係している可能性が示され、理解が進んでいる。

深層学習の技術を取り込んだ地震波の到達時刻を読み取る技術が進み、多くのデータの解析が可能となり、ビッグデータを用いた解析へと進みつつある。群発地震の原因として、地殻内流体を含む反射面との関係の理解が進み、群発地震の発生においては地殻内流体の影響が大きいという考えが支持された。

地震の滑りについては室内実験等の研究も進んでおり、プレート境界地震や内陸地震の断層の挙動についての理解が進んでいる。また、シミュレーションの研究も進んでおり、多くの成果が得られつつある。これらの得られた結果を実際の地震現象にどのようにつなげていくかが重要であるように思われる。このように、プレート境界地震やプレート内地震や内陸地震において、様々な研究対象や分野で多様な成果が得られつつある。今後は地震現象の総括的理解を目指していく必要がある。また、得られた個々の成果や全体像を他部会へとつなぎ、発生の予測や災害軽減にどのようにつなげていくかを考えて進めていくことが重要である。

## 成果リスト

- Amanda, F.F., N. Tsuchiya, V.N. Alviani, M. Uno, R. Yamada, S. Shimizu, R. Oyanagi, 2022, High-temperature silicified zones as potential caprocks of supercritical geothermal reservoirs, *Geothermics*, 105, 102475, doi:10.1016/j.geothermics.2022.102475
- Asaah A.N.E., T. Yokoyama, H. Iwamori, F.T. Aka, J. Tamen, T. Kuritani, T. Usui, T. Hasegawa, E.M. Fozing, 2022, Geochemical composition of dykes along the Cameroon Line (CL): Petrogenesis and similarities with the Central Atlantic Magmatic Province, *Geochemistry*, 82, doi:10.1016/j.chemer.2022.125865
- Bassett, D., A. Arnulf, S. Henrys, D. Barker, H. van Avendonk, N. Bangs, S. Kodaira, H. Seebeck, L. Wallace, A. Gase, T. Luckie, K. Jacobs, B. Tozer, R. Arai, D. Okaya, K. Mochizuki, G. Fujie, Y. Yamamoto, 2022, Crustal Structure of the Hikurangi Margin From SHIRE Seismic Data and the Relationship Between Forearc Structure and Shallow Megathrust Slip Behavior, *Geophys. Res. Lett.*, 49, doi:10.1029/2021GL096960
- Bassett, D., A. Arnulf, S. Kodaira, A. Nakanishi, A. Harding, G. Moore, 2022, Crustal Structure of the Nankai Subduction Zone Revealed by Two Decades of Onshore-Offshore and Ocean-Bottom Seismic Data: Implications for the Dimensions and Slip Behavior of the Seismogenic Zone, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 127, doi:10.1029/2022JB024992
- Bayarbold, M., A. Okamoto, O. Dandar, M. Uno, N. Tsuchiya, 2022, Continental arc-derived eclogite in the Zavkhan Terrane, western Mongolia: Implications for the suture zone in the northern part of the Central Asian Orogenic Belt, *J. Asian Earth Sci.*, 229, 105150, doi:10.1016/j.jseaes.2022.10515
- Dhar, S., J. Muto, Y. Ohta, T. Iinuma, 2023, Heterogeneous rheology of Japan subduction zone revealed by postseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 10, 9, doi:10.1186/s40645-023-00539-1
- Farazi, A.H., Y. Ito, E.S.M. Garcia, A.M. Lontsi, F.J. Sánchez-Sesma, A. Jaramillo, S. Ohyanagi R. Hino, M. Shinohara, 2023, Shear-wave velocity structure at the Fukushima forearc region based on H/V analysis of ambient noise recordings by ocean bottom seismometers, *Geophys. J. Int.*, doi:10.1093/gji/ggad028
- Fujita, W., M. Nakamura, K. Uesugi, 2022, Chemical compaction and fluid segregation in piston cylinder experiments, *Chem. Geol.*, 614, 121182, doi:10.1016/j.chemgeo.2022.121182
- 深畑幸俊, 岡崎智久, 西村卓也, 2022, GNSS データに基づく日本列島の歪み速度場と島弧間および島弧内変動, *地学雑誌*, 131, 479-496, doi:10.5026/jgeography.131.479
- Fukuda, J., J. Muto, S. Koizumi, S. Sawa, H. Nagahama, 2022, Enhancement of ductile deformation in polycrystalline anorthite due to the addition of water, *J. Struct. Geol.*, 156, 104547, doi:10.1016/j.jsg.2022.104547
- Fukushima, S., M. Shinohara, K. Nishida, A. Takeo, T. Yamada, K. Yomogida, 2022, Detailed S-wave velocity structure of sediment and crust off Sanriku, Japan by a new analysis method for distributed acoustic sensing data using a seafloor cable and seismic interferometry, *Earth*

- Planet. Space, 74, 92, doi:10.1186/s40623-022-01652-z
- Heath, B.A., D. Eberhart-Phillips, F. Lanza, C. Thurber, M.K. Savage, T. Okada, S. Matsumoto, Y. Iio, S. Bannister, 2022, Fracturing and pore-fluid distribution in the Marlborough region, New Zealand from body-wave tomography: Implications for regional understanding of the Kaikōura area, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 593, 117666, doi:10.1016/j.epsl.2022.117666
- Hino, R., T. Kubota, N. Y. Chikasada, Y. Ohta, H. Otsuka, 2022, Assessment of S-net seafloor pressure data quality in view of seafloor geodesy, *Progress in Earth and Planetary Science, Prog. Earth Planet. Sci.*, 9, 1, doi:10.1186/s40645-022-00526-y
- Honda, R., Y. Abe, Y. Yukutake, S. Sakai, 2022, Fracture structures in and around Hakone volcano revealed by dense seismic observations, *J. Disaster Res.*, 17, 663-669, doi:10.20965/jdr.2022.p0663
- Hua, Y., D. Zhao, Y. Xu, 2022, Azimuthal anisotropy tomography of the southeast Asia subduction system, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 127, e2021JB022854, doi:10.1029/2021JB022854
- Ide S., S. Nomura, 2022, Forecasting tectonic tremor activity using a renewal process model, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 9, 57, doi:10.1186/s40645-022-00523-1
- Iio, Y., S. Matsumoto, Y. Yamashita, S. Sakai, K. Tomisaka, M. Sawada, T. Iidaka, T. Iwasaki, M. Kamizono, H. Katao, A. Kato, E. Kurashimo, Y. Teguri, H. Tsuda, T. Ueno, 2023, Spatial change in differential stress magnitudes around the source fault before intraplate earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 233, 1279-1295, doi:10.1093/gji/ggac52
- Ikehara, K., T. Kanamatsu, K. Usami, 2022, Possible Tsunami-Induced Sediment Transport From Coral Reef to Deep Sea Through Submarine Canyons on the Southern Ryukyu Forearc, Japan, *Front. Earth Sci.*, doi:10.3389/feart.2022.753583
- Imanishi, Y., 2022, Inertial effects due to eruption-induced atmospheric disturbances identified by superconducting gravimeter observations at Matsushiro, Japan, *Earth Planet. Space*, 74, 54, doi:10.1186/s40623-022-01615-4
- Imanishi, Y., K. Nawa, Y. Tamura, H. Ikeda, 2022, Effects of vertical nonlinearity on the superconducting gravimeter CT #036 at Ishigakijima, Japan, *Earth Planet. Space*, 74, 73, doi:10.1186/s40623-022-01609-2
- 今西祐一, 西山竜一, 本多亮, 2022, 富士山における2台のFG5による絶対重力測定(2022年9月)ー相対重力計検定ラインの構築およびFG5の器差検定ー, *東京大学地震研究所彙報*, 97, 1-11, doi:10.15083/0002005972
- 今西祐一, 高森昭光, 2021, 超伝導重力計における磁気浮上の有限要素法によるシミュレーション, *東京大学地震研究所彙報*, 96, 3-4, doi:10.15083/0002003430
- Inoue, T., T. Hashimoto, R. Tanaka, Y. Yamaya, 2022, A broadband magnetotelluric survey for Mt. Meakandake volcano with special attention to the unrest during 2016-2017, *Earth Planet. Space*, 74, 114, doi:10.1186/s40623-022-01673-8.
- Ioki, K., Y. Yamashita, Y. Kase, 2022, Effects of the tsunami generated by the 1662 Hyuganada earthquake off Miyazaki Prefecture, Japan, *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-022-03198-3

- 岩森光, 2022, 地殻流体の分布を推定する地球物理—地球化学の統合的手法, 地球化学, 56, 87-98, doi: 10.14934/chikyukagaku.56.87
- Iwamori, H., H. Nakamura, N. Morikawa, M. Takahashi, A. Inamura, S. Haraguchi, T. Nishizawa, S. Sakata, 2023, Groundwaters and deep-seated fluid circulation around Aso Volcano, Southwest Japan, revealed by multivariate statistical analysis of the geochemical data, *J. Volcanol.*, 433, doi:10.1016/j.jvolgeores.2022.107739
- Iwamori, H., M. Yoshida, H. Nakamura, 2022, Large-scale structures in the Earth's interior: Topdown hemispherical dynamics constrained by geochemical and geophysical approaches, *Front. Earth Sci.*, 10, doi:10.3389/feart.2022.1033378
- Iwasaki, Y., K. Mochizuki, M. Ishise, E.K. Todd, S.Y. Schwartz, H. Zal, M.K. Savage, S. Henrys, A.F. Sheehan, Y. Ito, L.M. Wallace, S.C. Webb, T. Yamada, M. Shinohara, 2022, Continuous Tremor Activity With Stable Polarization Direction Following the 2014 Large Slow Slip Event in the Hikurangi Subduction Margin Offshore New Zealand, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 127(2), doi:10.1029/2021JB022161
- Jamali Hondori, E., J.-O. Park, 2022, Connection between high pore-fluid pressure and frictional instability at tsunamigenic plate boundary fault of 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Sci. Rep.*, 12, 12556, doi:10.1038/s41598-022-16578-5
- 海上保安庁, 2022, 日本海溝沿いの海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 107, 79
- 海上保安庁, 2022, 南海トラフ沿いの海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 107, 389
- 海上保安庁, 2022, 南海トラフ沿いの海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 108, 433
- Kanaya, T., W. Zhu, M. Nakatani, A. Takeuchi, 2022, Effect of pore fluid pressure on the brittle-ductile transition, USGS Earthquake Hazards Program, Final Technical Reports, G21AP10012
- Kimura, G., Y. Nakamura, K. Shiraishi, G. Fujie, S. Kodaira, T. Tsuji, R. Fukuchi, A. Yamaguchi, 2022, Nankai Forearc Structural and Seismogenic Segmentation Caused by a Magmatic Intrusion off the Kii Peninsula, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 23(8), e2022GC010331, doi:10.1029/2022GC010331
- 木村雄大, 岡田里奈, 梅田浩司, 2023, 下北半島, 関根浜のイベント堆積物について, 東北地域災害科学研究, 59, 印刷中
- Koge, H., J. Ashi, J.-O. Park, A. Miyakawa, S. Yabe, 2022, Simple topographic parameter reveals the along-trench distribution of frictional properties on shallow plate boundary fault, *Earth Planet. Space*, 74, 56, doi:10.1186/s40623-022-01621-6
- 小菅正裕, 2023, 東北地方太平洋沖で発生した地震のP波直後の波形を用いた震源深さ推定の試み, 東北地域災害科学研究, 59, 印刷中
- Kubota, T., T. Saito, R. Hino, 2022, A new mechanical perspective on a shallow megathrust near-trench slip from the high-resolution fault model of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 9, 68, doi:10.1186/s40645-022-00524-0
- Lei, X., T., Ohuchi, M., Kitamura, X., Li, Q., Li, Q., 2022, An effective method for laboratory acoustic emission detection and location using template matching, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 14, 1642-1651, doi:10.1016/j.jrmge.2022.03.010

- Liang, X., D. Zhao, Y. Xu, Y. Hua, 2022, Anisotropic tomography and dynamics of the big mantle wedge, *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2021GL097550, doi:10.1029/2021GL097550
- Masuda, Y., T. Yokoyama, S. Okabayashi, A. Ishikawa, H. Iwamori, 2022, Chemical and Isotopic Evaluation of a Microsampling Method using Laser Ablation and Membrane Filter, *Geostand. Geoanal. Res.*, 46, 205-222, doi:10.1111/ggr.12426
- 増永仁, 前田拓人, 高野智也, 2023, 3次元不均質速度構造モデルを用いた青森県周辺の地震に対するCMT解推定, *東北地域災害科学研究*, 59, 印刷中
- Matsubara, M., T. Ishiyama, T. No, K. Uehira, M. Mochizuki, T. Kanazawa, N. Takahashi, S. Kamiya, 2022, Seismic velocity structure along the Sea of Japan with large events derived from seismic tomography for whole Japanese Islands including reflection survey data and NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, *Earth Planet. Space*, 74, 171, doi:10.1186/s40623-022-01724-0
- Matsuno, M., A. Tagami, T. Okada, S. Matsumoto, Y. Kawamura, Y. Iio, T. Sato, T. Nakayama, S. Hirahara, S. Bannister, J. Ristau, M.K. Savage, C.H. Thurber, R.H. Sibson, 2022, Spatial and temporal stress field changes in the focal area of the 2016 Kaikōura earthquake, New Zealand: A multi-fault process interpretation, *Tectonophysics*, 835, 229390, doi:10.1016/j.tecto.2022.229390
- Mindaleva, D., M. Uno, N. Tsuchiya, 2023, Short-lived and voluminous fluid-flow in a single fracture related to seismic events in the middle crust, *Geophys. Res. Lett.*, 20(5), e2022GL099892, doi:10.1029/2022GL099892
- 三浦亮, 野徹雄, 小平秀一, 前川拓也, 寺田育正, 柴田英紀, 岡部圭二, 2022, 大陸棚～大陸斜面上部に設置した自己浮上型海底地震計のアンカー回収作業, *地震*, 75, 13-28, doi:10.4294/zisin.2021-9.
- Miyamoto, T., T. Hirono, Y. Yokoyama, S. Kaneki, Y. Yamamoto, T. Ishikawa, A. Tsuchiyama, I. Katayama, Y. Yabe, M. Ziegler, R.J. Durrheim, H. Ogasawara, 2022, Characteristics of Fault Rocks Within the Aftershock Cloud of the 2014 Orkney Earthquake (M5.5) Beneath the Moab Khotsong Gold Mine, South Africa, *Geophys. Res. Lett.*, 49(14), 2022GL098745, doi:10.1029/2022GL098745
- Mukuhira, Y., M. Uno, K. Yoshida, 2022, Slab-derived fluid storage in the crust elucidated by earthquake swarm, *Commun. Earth Environ.*, 3, 286, doi:10.1038/s43247-022-00610-7
- Mngadi, S.B., M.D. Manzi, N.Z. Nkosi, R.J. Durrheim, Y. Yabe, A. Tsutsumi, H. Ogasawara, 2022, Micro- and macro-structural investigations of faulting in deep South African gold mines, *Proc. 10th Int. Symposium RaSIM10*
- 中村仁美, 岩森光, 2022, 有馬型温泉水とスラブ脱水, *地球化学*, 56, 76-86, doi:10.14934/chikyukagaku.56.76
- Nakamura, Y., K. Shiraishi, G. Fujie, S. Kodaira, G. Kimura, Y. Kaiho, T. No, S. Miura, 2022, Structural Anomaly at the Boundary Between Strong and Weak Plate Coupling in the Central-Western Nankai Trough, *Geophys. Res. Lett.*, 49(10), 2022GL098180, doi:10.1029/2022GL098180.
- 中村優斗, 石川直史, 秋山裕平, 渡邊俊一, 黒田泰成, 望月将志, 横田裕輔, 2023, 海底地殻変動観測で用いる海底基準局のディレイタイムの計測について, *海洋情報部研究報告*, 61, 19-27
- Nakanishi, N., T. Yokoyama, S. Okabayashi, H. Iwamori, T. Hirata, 2022, Geochemical constraints

- on the formation of chondrules: Implication from Os and Fe isotopes and HSE abundances in metals from CR chondrites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 319, 254-270, doi:10.1016/j.gca.2021.11.009
- Nisson, D.M., T.L. Kieft, H. Drake, O. Warr, B. Sherwood Lollar, H. Ogasawara, S.M. Perl, B.M. Friefeld, J. Castillo, M.J. Whitehouse, E. Kooijman, T.C. Onstott, 2023, Hydrogeochemical and isotopic signatures elucidate deep subsurface hypersaline brine formation through radiolysis driven water-rock interaction, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 340, 65-84, doi:10.1016/j.gca.2022.11.015
- Nkosi, N.Z., M.S.D. Manzi, M. Westgate, D. Roberts, R.J. Durrheim, H. Ogasawara, M. Ziegler, M. Rickenbacher, B. Liebenberg, T.C. Onsott, DSeis team, 2022, Physical Property studies to elucidate the source of seismic reflectivity within the ICDP DSeis seismogenic zone: Klerksdorp goldfield, South Africa, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 155, doi:10.1016/j.ijrmms.2022.105082
- Noda, H., 2022, Dynamic earthquake sequence simulation with an SBIEM accounting for interseismic poroelastic rebound, *Earth, Planet. Space*, 74, 89, doi:10.1186/s40623-022-01649-8
- 野末陽平, 深畑幸俊, 2022, 基底関数展開による変位場推定におけるボックスカー関数と3次B-スプライン関数の比較, *地震*, 75, 1-12, doi:10.4294/zisin.2021-8
- Nthaba, B., T. Ikeda, H. Nimiya, T. Tsuji, Y. Iio, 2022, Ambient noise tomography for a high-resolution 3D S-wave velocity model of the Kinki Region, Southwestern Japan, using dense seismic array data, *Earth, Planet. Space*, 74, 96, doi:10.1186/s40623-022-01654-x
- Nurdiana, A., A. Okamoto, M. Uno, M., N. Tsuchiya, 2022, Development of open transport of aqueous fluid from pegmatite revealed by trace elements in garnet, *Geofluids*, 8786250, doi:10.1155/2022/8786250
- 小笠原宏, 美間良大, 石田亮壮, S. Mngadi, 東充也, 矢部康男, 船戸明雄, 伊藤高敏, 中谷正生, R. Durrheim, 2022, 大深度高応力鉱山でのルーチン的な採掘ハザード定量化に資する岩盤コア絶対差応力 DCDA 測定法の試評価, *材料*, 71, 259-264, doi:10.2472/jsms.71.259
- Ogata, Y., 2022, Prediction and validation of short-to-long-term earthquake probabilities in inland Japan using the hierarchical space-time ETAS and space-time Poisson process models, *Earth Planet. Space*, 74, 110, doi:10.1186/s40623-022-01669-4
- Ohuchi, T., 2022, Grain-size-sensitive creep of olivine induced by oxidation of olivine in the Earth's deep upper mantle: Implications for weakening of the subduction interface, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 326, 106865, doi:10.1016/j.pepi.2022.106865
- Ohuchi, T., Y. Higo, Y. Tange, T. Sakai, K. Matsuda, T. Irifune, 2022, In situ X-ray and acoustic observations of deep seismic faulting upon phase transitions in olivine, *Nat. Commun.*, 13, 5213, doi:10.1038/s41467-022-32923-8
- Okada, R., K., Umeda, T., Kamataki, Y., Sawai, D., Matsumoto, Y., Shimada, K. Ioki, 2022, Geological record of 18th and 19th century tsunamis along the Japan Sea coast of Tsugaru Peninsula, northwestern Japan, *Marine Geology*, 453, doi:106905, 10.1016/j.margeo.2022.106905
- Okazaki T., Y. Fukahata, N. Ueda, 2022, Time variable stress inversion of centroid moment tensor

- data using gaussian processes, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 127, doi:10.1029/2022JB024314
- Qin, Y., Y. Nakamura, S. Kodaira, G. Fujie, 2022, Seismic imaging of subsurface structural variations along the Japan trench south of the 2011 Tohoku earthquake rupture zone, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 594, 117707, doi:10.1016/j.epsl.2022.117707
- Roy, S., T. Hatano, 2022, Model for creep failure with healing, *Phys. Rev. Res.*, 4, 023110, doi:10.1103/physrevresearch.4.023110
- Roy, S., T. Hatano, P. Ray, 2022, Modeling crack propagation in heterogeneous materials: Griffith's law, intrinsic crack resistance, and avalanches, *Phys. Rev. E*, 105, 055003, doi:10.1103/PhysRevE.105.055003
- Sakai, S., E. Kurashimo, T. Iidaka, N. Uchida, K. Yoshida, T. Okada, 2022, Seismic Data from Temporary Seismic Observation in the Northeast Noto Peninsula, Central Japan, Zenodo, doi:10.5281/ZENODO.6767362
- Sato, D.K., Y., Fukahata, Y. Nozue, 2022, Appropriate reduction of the posterior distribution in fully Bayesian inversions, *Geophys. J. Int.*, 231, 950-981, doi:10.1093/gji/ggac231.
- Sato, T., T. No, S. Kodaira, 2022, Characteristics of crustal structures in the Yamato Basin, Sea of Japan, deduced from seismic explorations, *Island Arc*, 32, doi:10.1111/iar.12474
- Sawaki, Y., Y. Yamashita, S. Ohyanagi, E. S. M. Garcia, A. Ito, H. Sugioka, T. Takahashi, M. Shinohara, Y. Ito, 2022, Seafloor Depth Controls Seismograph Orientation Uncertainty, *Geophys. J. Int.*, 232, 1376-1392, doi:10.1093/gji/ggac397
- Shigematsu, N., Y. Zhou, H. Hyuga, Y. Yoshizawa, M. Kido, 2022, Fabrication of dense albite aggregates by hot pressing, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 9, 34, doi:10.1186/s40645-022-00492-5
- Shimizu, I., K. Michibayashi, 2022, Steady-state microstructures of quartz revisited: Evaluation of stress states in deformation experiments using a solid-medium apparatus, *Minerals*, 12, 329, doi:10.3390/min12030329
- Shinohara, M., S. Sakai, T. Okada, H. Sato, Y. Yamashita, R. Hino, K. Mochizuki, T. Akuhara, 2022, Precise aftershock distribution of the 2019 Yamagata-oki earthquake using newly developed simple anchored-buoy ocean bottom seismometers and land seismic stations, *Earth, Planet. Space*, 74(5), doi:10.1186/s40623-021-01562-6
- Shinohara, M., T. Yamada, T. Akuhara, K. Mochizuki, S. Sakai, 2022, Performance of seismic observation by distributed acoustic sensing technology using a seafloor cable off Sanriku, Japan, *Front. Mar. Sci.*, 9:844506, doi:10.3389/fmars.2022.844506
- 白石和也, 藤江剛, 小平秀一, 田中聡, 川真田桂, 内山敬介, 2022, 沿岸域の浅海底火山を対象とする地震探査のフィージビリティスタディ: 波形インバージョンとリバータイムマイグレーションの適用性, *物理探査*, 75, 105-118, doi:10.3124/segj.75.105
- Shiraishi, K., T. Watanabe, 2022, Seismic reflection imaging of deep crustal structures using local earthquakes in the Kanto region, Japan, *Earth Planet. Space*, 75, 14, doi:10.1186/s40623-023-01772-0
- Spica, Z. J., J.C. Castellanos, L. Viens, K. Nishida, T. Akuhara, M. Shinohara, T. Yamada, 2022,

- Subsurface Imaging With Ocean-Bottom Distributed Acoustic Sensing and Water Phases Reverberations, *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2021GL095287, doi:10.1029/2021GL095287
- Sumino, Y., T. Saito, T. Hatano, T. Yamaguchi, S. Ide, 2022, Spatiotemporal chaos of a onedimensional thin elastic layer with the rate-and-state friction law, *Phys. Rev. Res.*, 4, 043115, doi:10.1103/physrevresearch.4.043115
- Suzuki, T., 2022, Deriving the slip front propagation velocity with the slip-dependent and slipvelocity-dependent friction laws via the use of the linear marginal stability hypothesis, *Phys. Rev. E*, 106, 015002, doi:10.1103/PhysRevE.106.015002.
- Takagi, R., K. Nishida, 2022, Multimode dispersion measurement of surface waves extracted by multicomponent ambient noise cross-correlation functions, *Geophys. J. Int.*, 231, 1196-1220, doi:10.1093/gji/ggac225
- Takahashi, H., R. Hino, N. Uchida, T. Matsuzawa, Y. Ohta, S. Suzuki, M. Shinohara, 2022, Tectonic tremors immediately after the 2011 Tohoku-Oki earthquake detected by near-trench seafloor seismic observations, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 9, 1, 1-14, doi:10.1186/s40645-022-00525-z
- Tanaka, E., K. Yasukawa, K. Nakamura, J. Ohta, T. Miyazaki, B.S. Vaglarov, S. Machida, K. Fujinaga, H. Iwamori, Y. Kato, 2022, Secular Variations in Provenance of Sedimentary Components in the Western North Pacific Ocean Constrained by Sr Isotopic Features of Deep - Sea Sediments, *Geochem. Geophys. Geosystem.*, 23(1), e2021GC009729, doi:10.1029/2021GC009729
- Terakawa, T., M. Matsu'ura, 2023, Tectonic stress fields inferred from long-term CMT data ranging over different periods, *Geophys. J. Int.*, 223, 162-181, doi:10.1093/gji/ggac449
- Tomita, F., M. Kido, 2022, An approximate travel time calculation and a robust GNSS-acoustic positioning method using an MCMC technique, *Earth Planet. Space*, 74, 176, doi:10.1186/s40623-022-01740-0
- Tonegawa, T., R. Takagi, K. Sawazaki, K. Shiomi, 2023, Short-term and long-term variations in seismic velocity at shallow depths of the overriding plate west of the Japan Trench, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 128, e2022 JB025262, doi:10.1029/2022JB025262
- Tonegawa T., Y. Fukao, 2022, Wave propagation of meteotsunamis and generation of free tsunamis in the sloping area of the Japan Trench for the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption, *Earth, Planet. Space*, 74, doi:10.1186/s40623-022-01727-x
- Toyokuni, G., D. Zhao, K. Kurata, 2022, Whole-mantle tomography of Southeast Asia: new insight into plumes and slabs, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 127, e2022JB024298, doi:10.1029/2022JB024298
- Uchide, T., T. Shiina, K. Imanishi, 2022, Stress map of Japan: Detailed nationwide crustal stress field inferred from focal mechanism solutions of numerous microearthquakes, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 127, e2022JB024036, doi:10.1029/2022JB024036
- 白田優太, 飯高隆, 蔵下英司, 五十嵐俊博, 小原一成, 加藤愛太郎, 酒井慎一, 中川茂樹, 武田哲也, 2022, 北茨城-いわき地域における稠密アレイで記録された地殻内 S 波反射波イメージング, *地震* 2, 75, 125, doi:10.4294/zisin.2021-13
- Viens, L., L.F. Bonilla, Z.J. Spica, K. Nishida, T. Yamada, M. Shinohara, 2022, Nonlinear

- Earthquake Response of Marine Sediments With Distributed Acoustic Sensing, *Geophys. Res. Lett.*, 49, 21, e2022GL100122, doi:10.1029/2022GL100122
- Wang, W., M. Savage, A. Yatesac, H.J. Zala, S. Webb, C. Boulton, E. Warren-Smith, M. Madley, T. Stern, B. Fry, K. Mochizuki, L. Wallace, 2022, Temporal velocity variations in the northern Hikurangi margin and the relation to slow slip, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 574, doi:10.1016/j.epsl.2022.117443
- Wang, Z., D. Zhao, X. Chen, 2023, Fine structure of the subducting slab and the 2022 M7.4 Fukushima-oki intraslab earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, 94, 17-25, doi:10.1785/0220220234
- Wang, Z., D. Zhao, X. Chen, R. Gao, 2022, Subducting slabs, Hainan plume and intraplate volcanism in SE Asia: Insight from P-wave mantle tomography, *Tectonophys.*, 831, 229329, doi:10.1016/j.tecto.2022.229329
- 渡部大地, 前田拓人, 高野智也, 2023, 2011年東北地方太平洋沖地震による地震の誘発現象の力学的検討, *東北地域災害科学研究*, 59, 印刷中
- Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Nakamura, Y. Yokota, 2022, Full-Bayes GNSS-A solutions for precise seafloor positioning with single uniform sound speed gradient layer assumption, *Research Square*, doi:10.21203/rs.3.rs-1881756/v1
- Wei, W., D. Zhao, W. Yu, Y. Shi, 2022, Complex patterns of mantle flow in eastern SE Asian subduction zones inferred from P-wave anisotropic tomography, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 127, e2021JB023366, doi:10.1029/2021JB023366
- Woods, K., S.C. Webb, L.M. Wallace, Y. Ito, C. Collins, N. Palmer, R. Hino, M.K. Savage, D.M. Saffer, E.E. Davis, D.H.N. Barker, 2022, Using seafloor geodesy to detect vertical deformation at the Hikurangi subduction zone: Insights from self-calibrating pressure sensors and ocean general circulation models, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 127, e2022JB02398, doi:10.1029/2022JB02398
- Yabe, Y., S. Abe, G. Hofmann, D. Roberts, H. Yilmaz, H. Ogasawara, T. Ito, A. Funato, M. Nakatani, M. Naoi, R. Durrheim, 2022, Stress state in the source region of Mw2.2 earthquake in a deep gold mine in South Africa determined from borehole cores, *Pure Appl. Geophys.*, 179, 1679-1700, doi:10.1007/s00024-022-02999-w
- 山下裕亮, 2022, 2022年1月22日に日向灘で発生したMJ6.6の地震について, *宮崎の自然と環境*, 7, 39-43
- Yamashita, S., Y. Yagi, R. Okuwaki, K. Shimizu, R. Agata, Y. Fukahata, 2022, Potency density tensor inversion of complex body waveforms with time-adaptive smoothing constraint, *Geophys. J. Int.*, 231, 91-107, doi:10.1093/gji/ggac181
- Yamaya, L., K. Mochizuki, T. Akuhara, S. Takemura, M. Shinohara, T. Yamada, 2022, CMT inversion for small-to-moderate earthquakes applying to dense short-period OBS array at off Ibaraki region, *Earth Planet. Space*, 74, 164, doi:10.1186/s40623-022-01721-3
- Yamaya, Y., Y. Suzuki, Y. Murata, K. Okamoto, N. Watanabe, H. Asanuma, H. Hase, Y. Ogawa, T. Mogi, K. Ishizu, T. Uchida, 2022, 3-D resistivity imaging of the supercritical geothermal system in the Sengan geothermal region, NE Japan, *Geothermics*, 103, 102412,

doi:10.1016/j.geothermics.2022.102412

- 柳田浩嗣, 仲谷幸浩, 八木原寛, 平野舟一郎, 小林励司, 山下裕亮, 松島健, 清水洋, 内田和也, 馬越孝道, 八木光晴, 森井康宏, 中東和夫, 篠原雅尚, 2022, 2015年11月に沖縄トラフ北部で発生した地震 (M7.1) の余震活動と背弧リフティング, *地震*, 75, 29-41, doi:10.4294/zisin.2021-12
- Yasukawa, K., J. Ohta, M. Hamada, Q. Chang, H. Nakamura, K. Ashida, Y. Takaya, K. Nakamura, H. Iwamori, Y. Kato, 2022, Essential processes involving REE-enrichment in biogenic apatite in deepsea sediment decoded via multivariate statistical analyses, *Chem. Geol.*, 614, 121184, doi:10.1016/j.chemgeo.2022.121184
- Yeo, T., N. Shigematsu, T. Katori, 2023, Dynamically recrystallized grains identified via the application of Gaussian mixture model to EBSD data, *J. Struct. Geol.*, 167, 104800, doi:10.1016/j.jsg.2023.104800
- Yoshida, K., H. Kanamori, 2023, Time-domain source parameter estimation of Mw 3-7 earthquakes in Japan, *Geophys. J. Int.*, 234(1), 243-262, doi:10.1093/gji/ggad068
- Yuasa Y., S., Matsumoto, 2023, Anelastic deformation in the lower crust and its implications for tectonic dynamics in Kyushu, Southwest Japan, *Tectonophysics*, 846, 229674, doi:10.1016/j.tecto.2022.229674
- Yukutake, Y., K. Yoshida, R. Honda, 2022, Interaction between aseismic slip and fluid invasion in earthquake swarms revealed by dense geodetic and seismic observations, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 127, e2021JB022933, doi:10.1029/2021JB022933
- Yukutake, Y., R. Honda, M. Ukawa, K. Kurita, 2022, Harmonic tremor from the deep part of Hakone volcano, *Earth Planet. Space*, 74, 144, doi:10.1186/s40623-022-01700-8.
- Zhao, D., Y. Katayama, G. Toyokuni, 2022, The Moho, slab and tomography of the East Japan forearc derived from seafloor S-net data., *Tectonophysics.*, 837, 229452, doi:10.1016/j.tecto.2022.229452

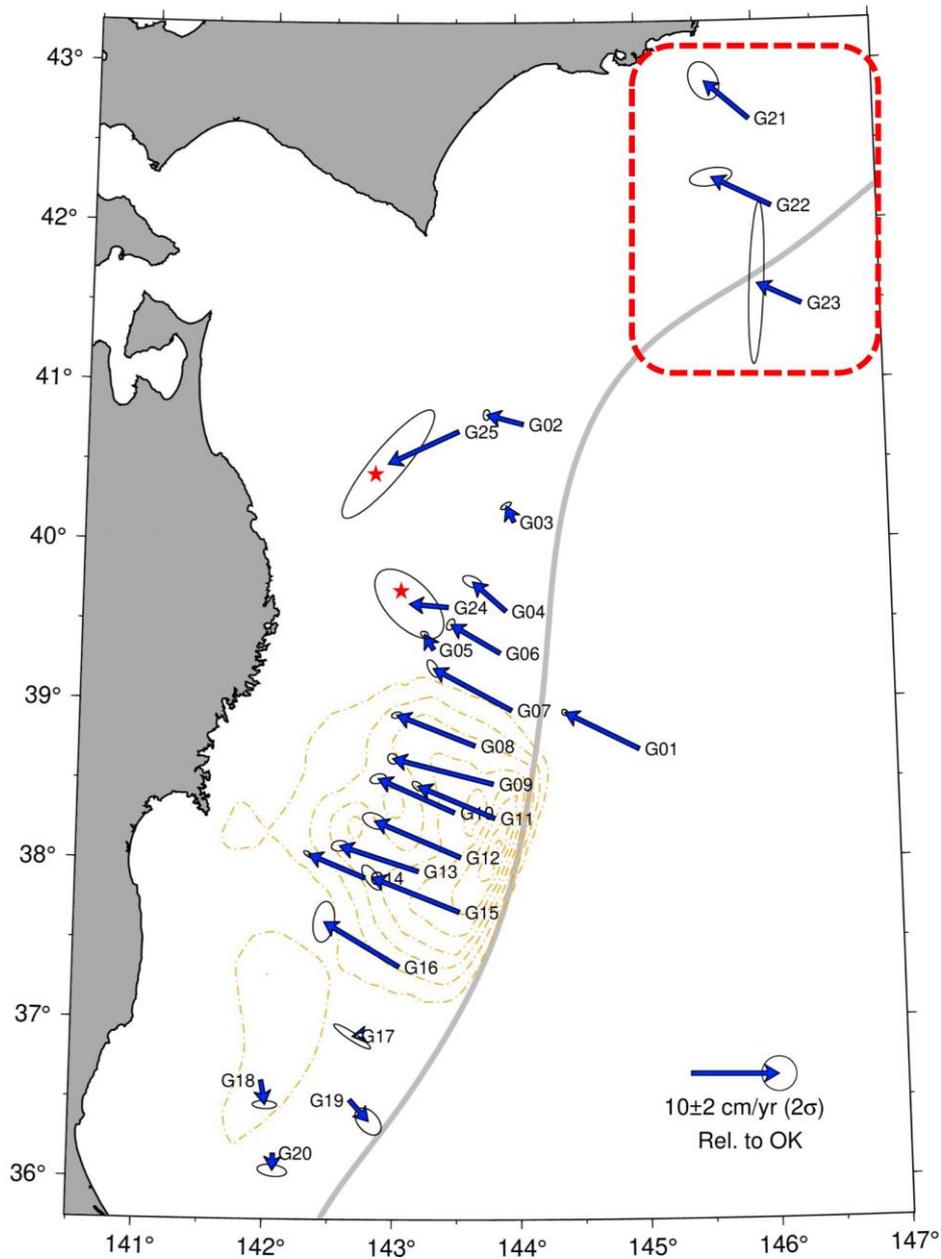


図1. GNSS-A観測で得られた日本海溝から千島海溝南部における水平変位速度（対オホーツクプレート）。2012年からの平均変位速度を示す。ただし、根室沖の観測（赤破線枠内）は2019年、三陸沖の新設観測点（赤星印）は2020年に観測を開始した（東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_05]）。

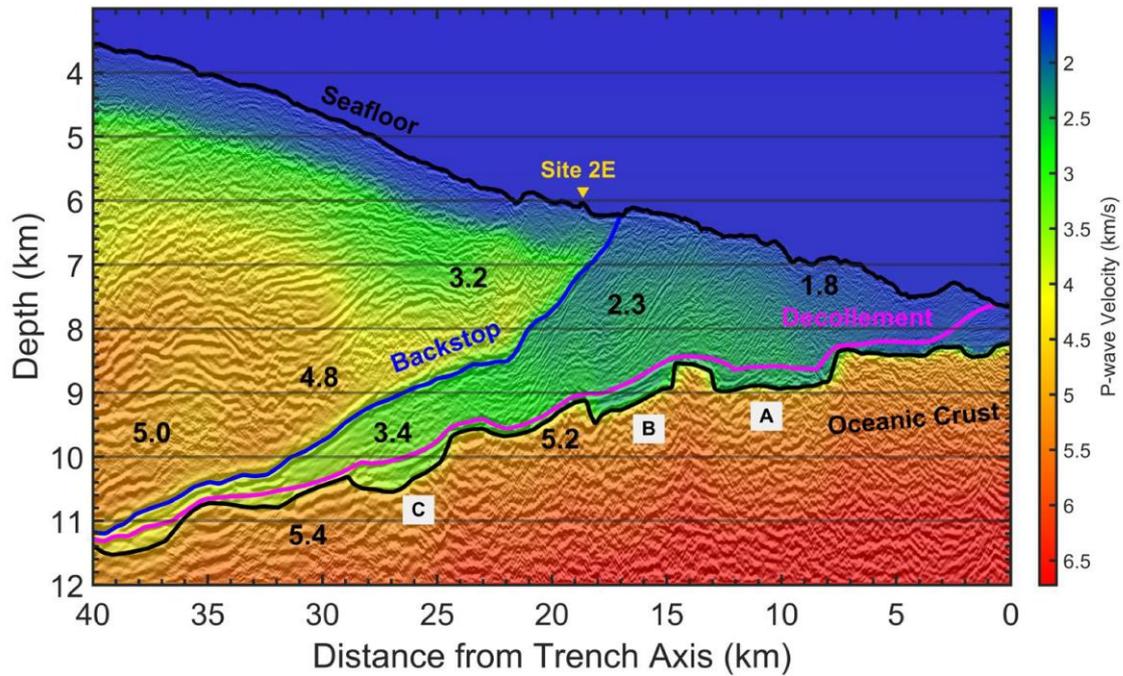


図2. 東北沖の日本海溝を横切る反射法探査測線D13の地殻構造とP波速度構造モデル。図中の数字はP波速度，A，B，Cはグララーベン構造（東京大学大気海洋研究所[課題番号：AORI01]）。

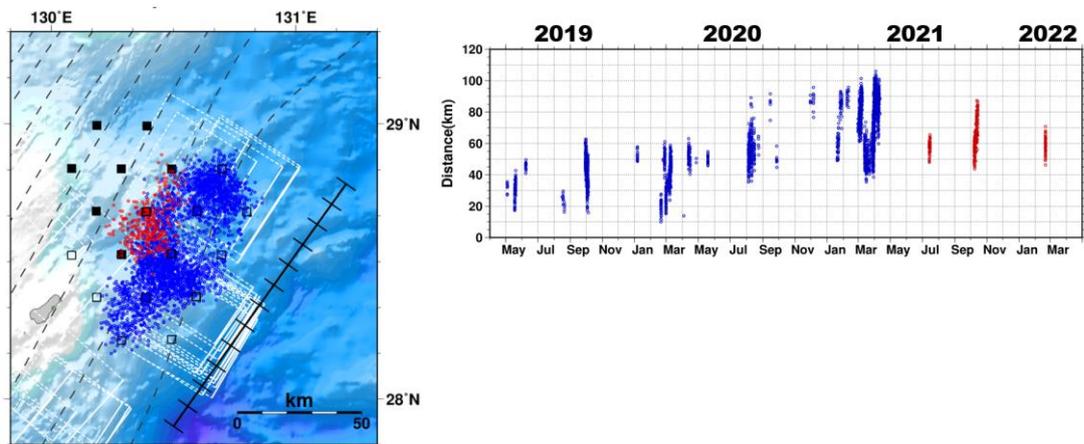


図3. 浅部微動の震央分布と時空間分布。震源決定された浅部微動のうち，第3期観測で推定されたものを赤○，第1～2期観測で推定されたもの（令和3年度までに報告済）を青○で示す。白と黒の□はそれぞれ，第1～2期，第3期の海域地震観測点を示す（鹿児島大学[課題番号：KGSM01]）。

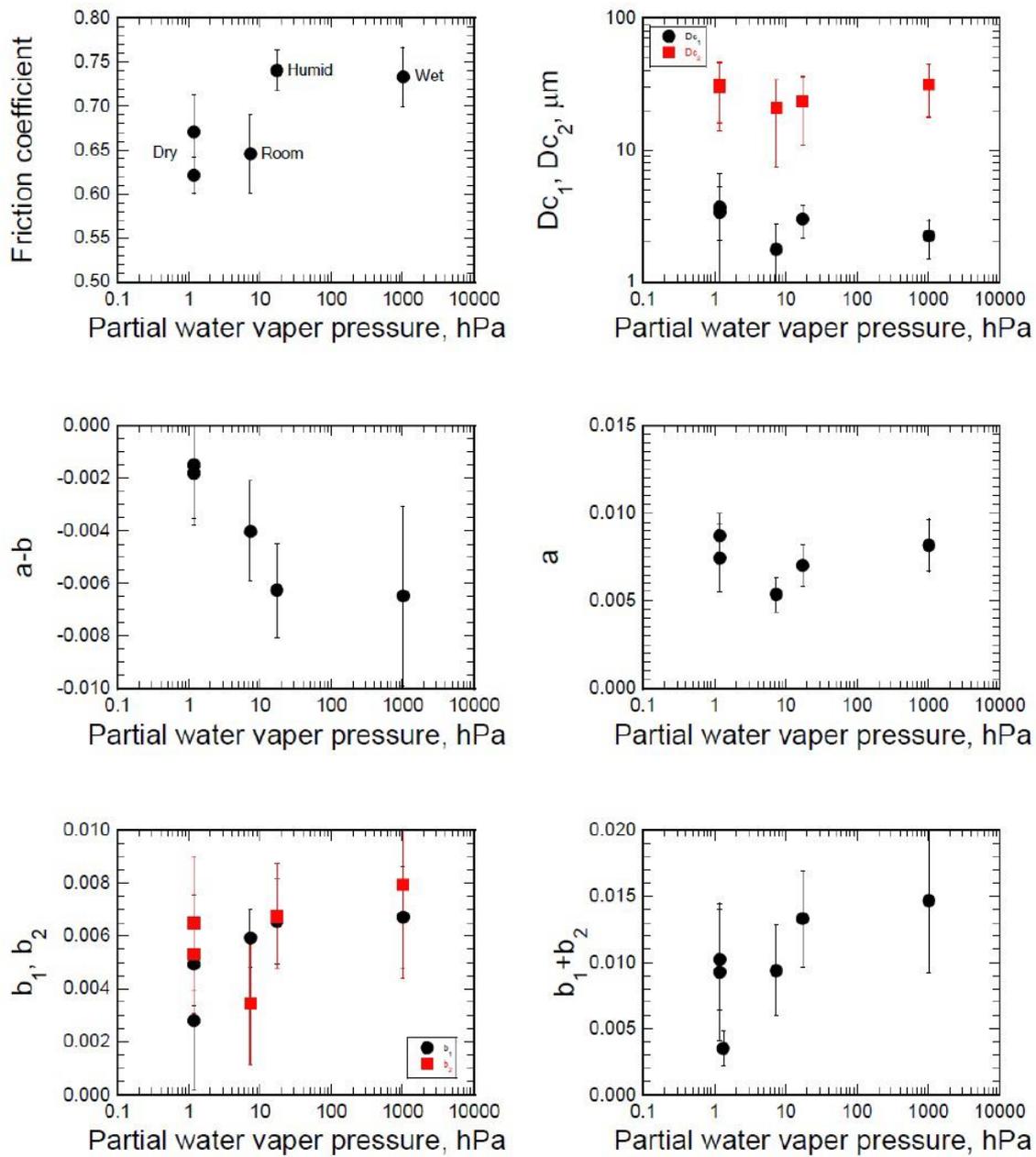
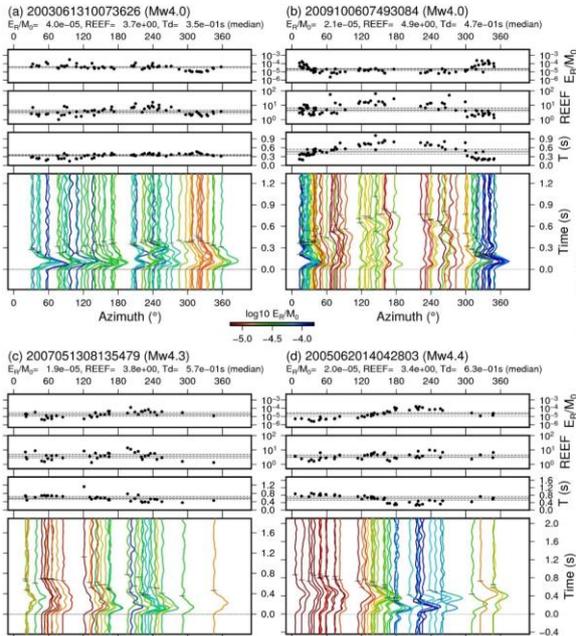
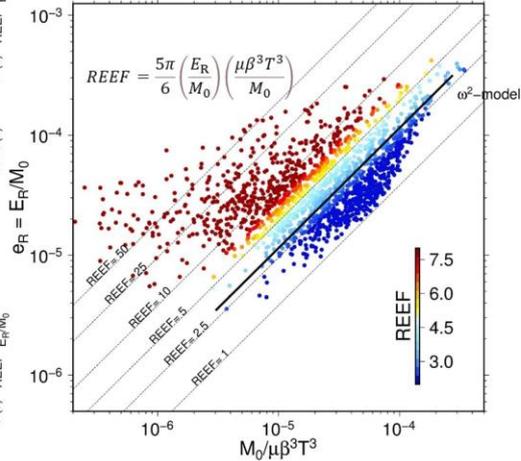


図4. 実験で得られた、二つの状態変数を持つ速度状態依存摩擦構成則の摩擦パラメータの水蒸気分圧依存性（東北大学理学研究科[課題番号：THK\_02]）。

# 1700個以上のMw3~7地震のモーメントレート関数を系統的に解析し、中小地震の破壊過程の複雑性の多様性を明らかにした。



Radiated energy enhancement factor (REEF; Ye et al., 2018)を用いて破壊の複雑性を定量化。



Mw3~7の地震で moment-scaled energy, moment-scaled duration, REEFの明瞭な規模依存は見つからなかった。 1

図5. 日本列島内陸域のMw3-7の地震のモーメントレート関数の系統的な推定（東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_07]）。

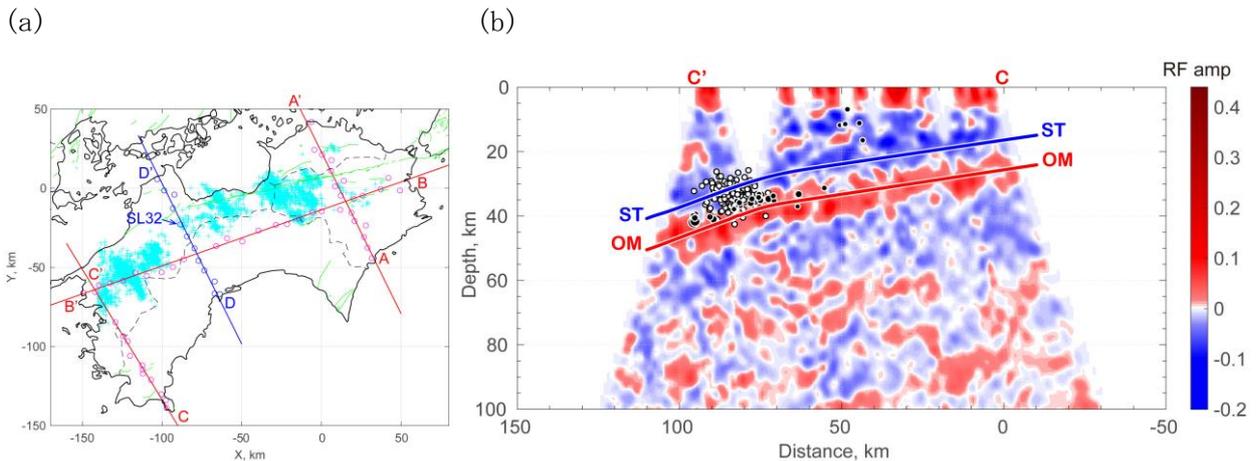


図6. (a) 測線図。(b) 測線CC'におけるレイリー関数イメージ。レイリー関数の正の振幅を赤で、負の振幅を青で示す。STとOMを付した線は、それぞれフィリピン海スラブの上面とスラブ内の海洋モホ面と解釈される。白丸は深部低周波時地震、黒丸は通常地震を示す（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI02]）。

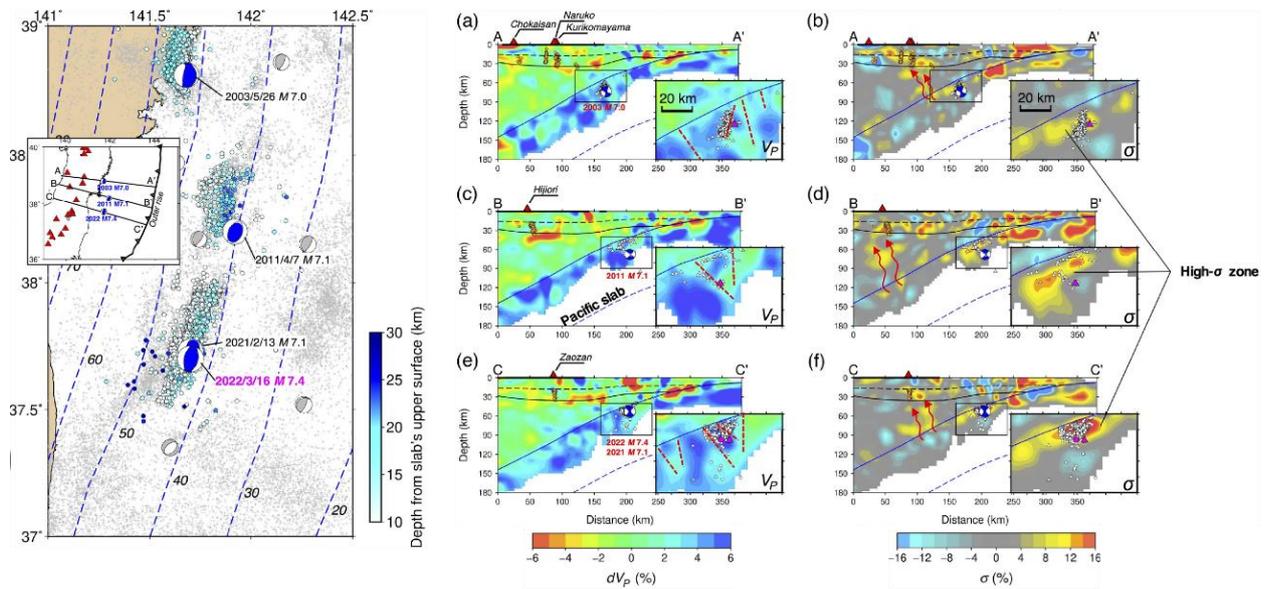


図7. 福島沖～宮城沖前弧域の3次元地震波速度分布 (a, c, e)とポアソン比分布 (b, d, f)。左図広域マップに黒線で断面位置を示す。スラブ表面に局在する低  $V_p$  異常でM7級スラブ内地震断層(赤破線)が活動した(東北大学理学研究科[課題番号: THK\_06])。

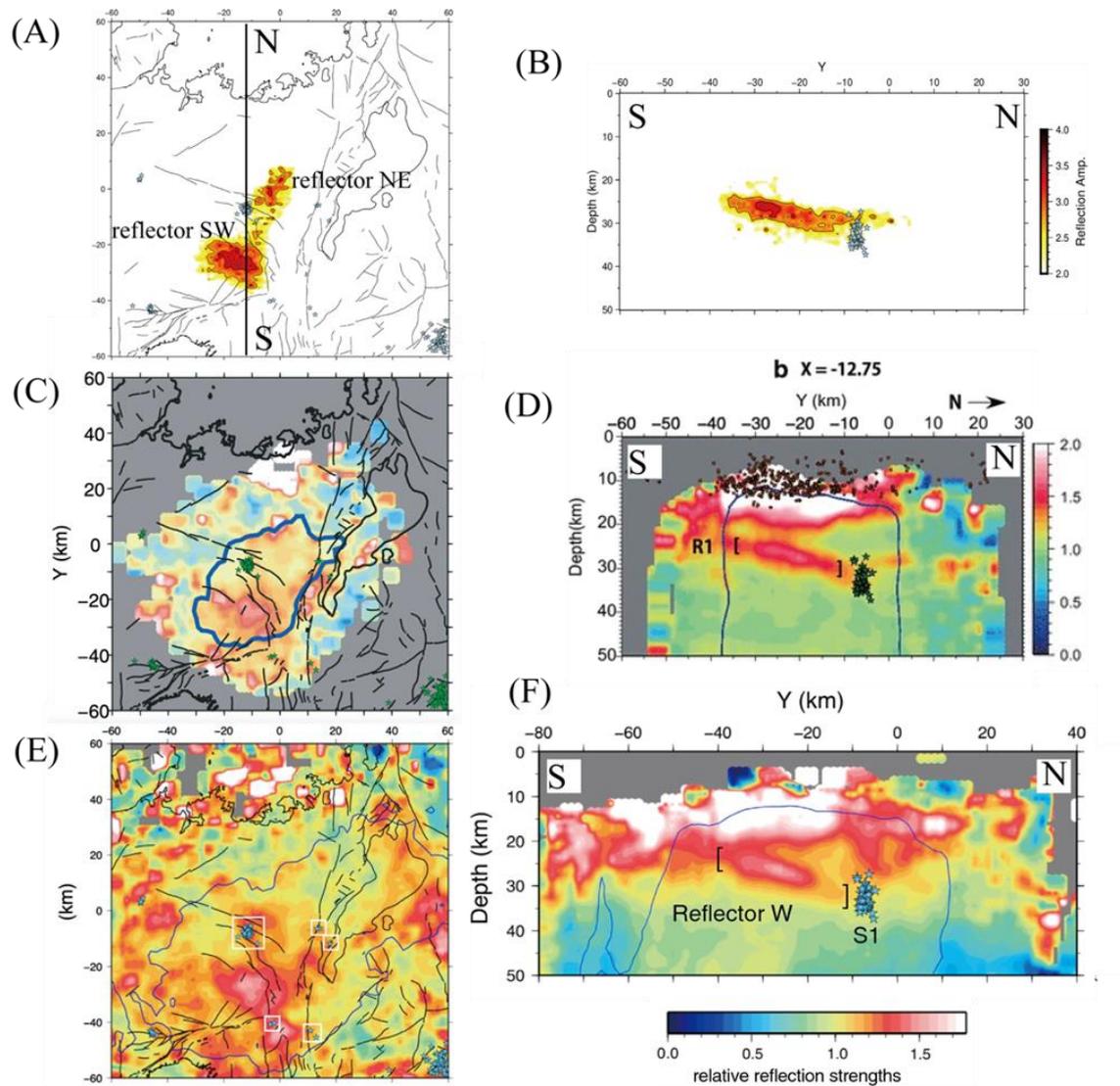


図8. 有馬高槻断層帯の北方の下部地殻内のS波の reflector。(A)は深層学習を活用して推定されたS波 reflector の上面, (B)は(A) の測線に沿う南北断面における反射強度の断面図(加藤, 2022)。一番外側のコンターが reflector とする反射振幅の閾値 (median- $\sigma$ ) に対応している。(C)と(D)は Aoki et al. (2016), (E)と(F)は Katoh et al. (2018)の結果。(B), (D), (F)は(A)上の測線の南北断面図。各図の星印は気象庁一元化震源における深部低周波地震。(D)の赤い丸印は測線から幅5 km 以内で Aoki et al. (2018)が解析に使用した地震, 青い線はグリッドに含まれるデータ数が50000 個の等値線。(E)および(F)の青い線はグリッドに含まれるデータ数が10000 個の等値線。黒線は活断層 (京都大学防災研究所[課題番号: DPRI03], 中田・今泉, 2002)。

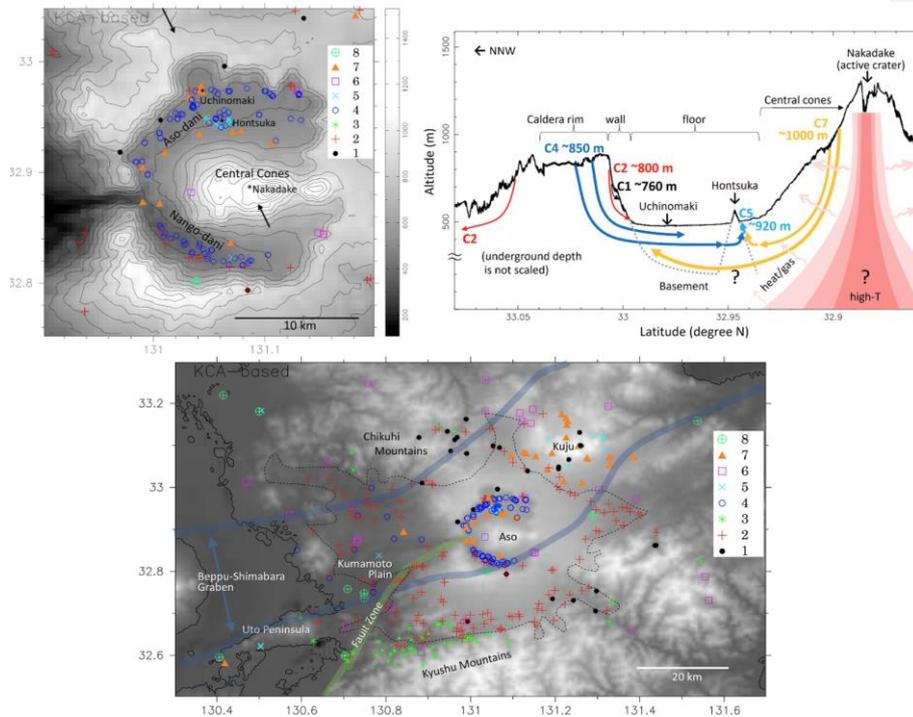


図9. 地下水・湧水の溶存成分組成に基づく8つのクラスタの地理的分布。阿蘇カルデラ内の同心円構造（左上図）と流体循環（右上図：クラスタ1～4は、外輪山への降水が20年程度かけてカルデラ内（および外）に浸透・湧出したもの。クラスタ7は、中央火口丘への降水が浸透・湧出したもの）。広域での8つのクラスタの地理的分布。別府—島原地溝帯や布田川・日奈久断層帯などの大きな構造線沿いに有馬型塩水が出現することなど、地下水の組成・起源と、空間分布に強い関係性があることが分かった（下図）（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI04]）。

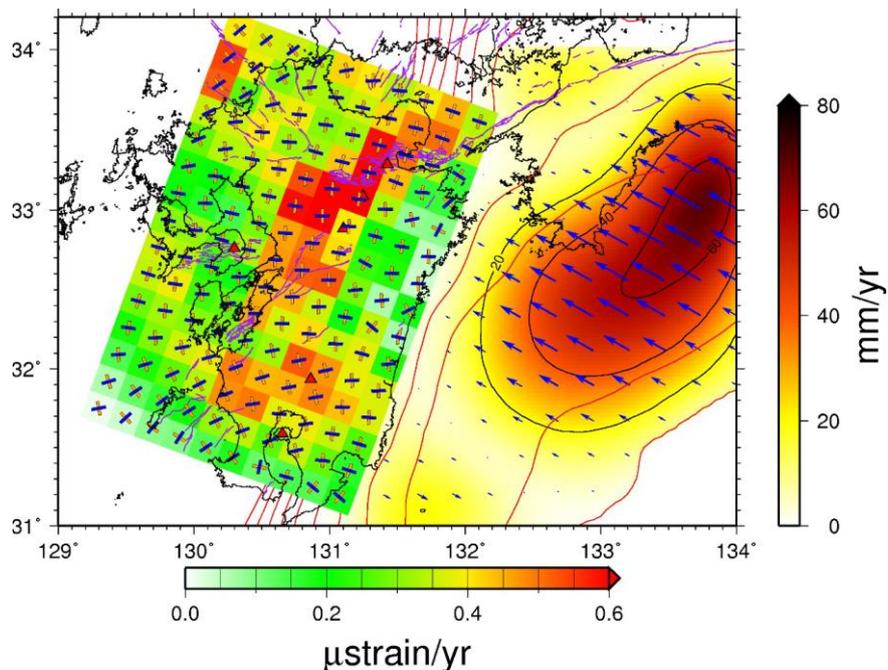


図10. GNSS データから推定した下部地殻の非弾性変形とプレート境界のすべり分布（九州大学[課題番号：KYU\_01]）。

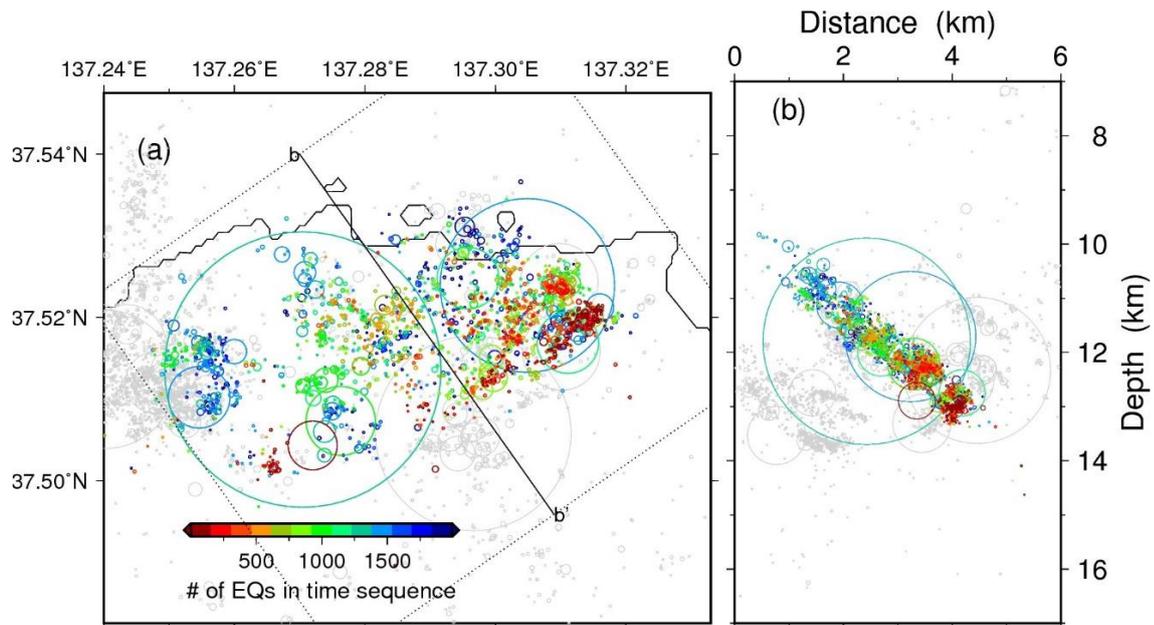


図 11. 能登半島北東部の群発地震活動中に発生した 2022 年 M5.4 地震の断層面における地震の震源分布。色は発生順を表す（東北大学理学研究科[課題番号：THK\_02]）。

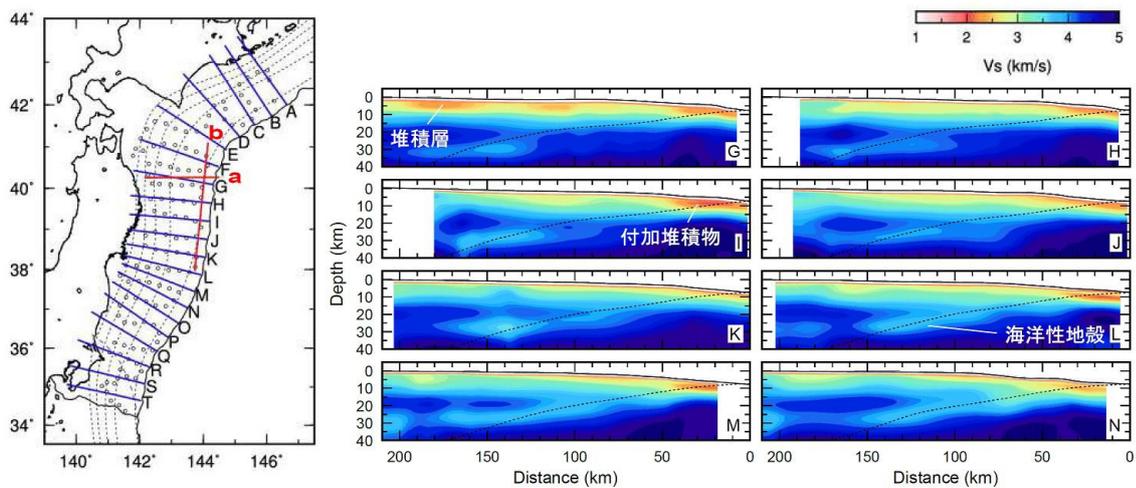


図 12. S-net データを用いた常時微動表面波トモグラフィーにより推定した 3 次元 S 波速度構造。破線はプレート境界上面モデルを表す（東北大学理学研究科[課題番号：THK\_02]）。

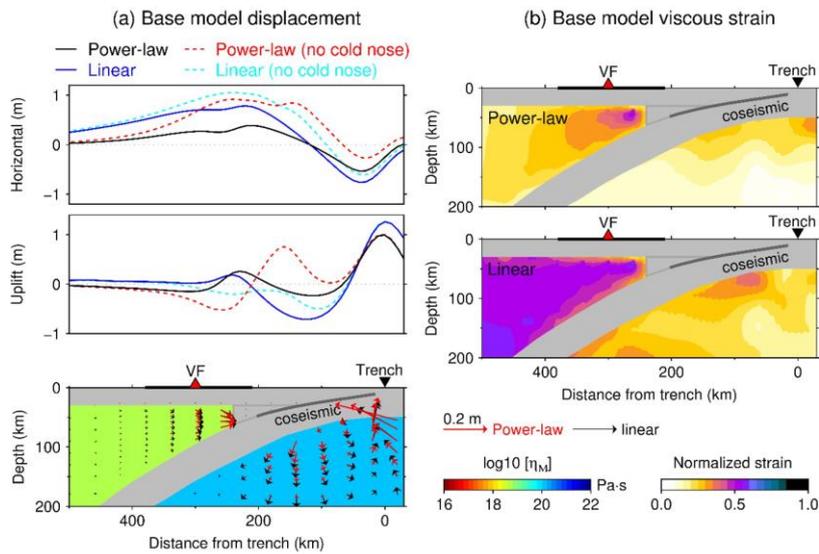


図 13. 非線形レオロジーを使用した余効変動モデル (Dhar et al., 2023)。a) 線形，べき乗レオロジーによる地表変動 (実線はコールドノーズあり，点線はコールドノーズなし)。べき乗レオロジーの方が，震源に近い部分でのみ変形小さい (ただし，両者の定常粘性率はほぼ同じ値を採用している)。b) レオロジーによる粘性歪み分布の違い：べき乗 (上)，線形 (下)。べき乗レオロジーの方が，震源に近い部分で粘性の低下により粘性歪が発生するが，線形モデルではモデル領域全体で変形している。これが a) での全体の変形量の幅を決めている (東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_07])。