

## 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は非常に重要である。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となる。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感している。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。

これまでGNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測(GNSS-A)は、海域での地殻変動を直上で捉えられる有効な手段として普及してきたが、上下動の計測には移動観測が必要でかつ検出精度も低かったことから、水平変動の検出に重点が置かれてきた。しかし、海底設置トランスポンダを適切なレイアウトで配置して定点観測を実施することで、これまで原理的に上下変動が解けないとされてきた定点観測方式でも上下変動の検出が可能であることがわかってきた(東北大学災害科学国際研究所[課題番号: IRID02])。根室沖の3観測点(G21, G22, G23)では、上下変動を捉えるための中心海底局込みでの中心定点観測を、それぞれ14時間、10時間、9時間実施することがで

きた。さらに定点観測での上下変位検出精度の検証を目指した比較データを得るための移動観測も、それぞれ必要時間実施でき、それらを含めた3回目のキャンペーンデータが得られた。今後、これらの観測記録とシミュレーション結果を比較検討することにより、この領域の固着状況の理解が進むものと期待できる（東北大学災害科学国際研究所 [課題番号：IRID02]）。

日本海溝、房総半島沖、相模トラフの沈み込み型プレート境界における多様なすべり現象の時空間分布を、長期海底観測により明らかにする研究が行われた（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_05]）。根室沖における GNSS-A 観測は、新青丸 KS-21-05 次航海とこの航海で投入した無人機（ウェーブグライダー）で行われた。この観測は、令和元年度に開始して以来3回目の観測で、過去2回の測位結果に整合的な結果が得られていた。さらに、海中音速の時空間不均質の補正などによる詳細解析を行うことで、この海域におけるプレート境界浅部における固着状態が明らかにされるものと期待できる。また、2014年に発生した房総沖スロースリップの海底圧力計データの解析が行なわれた。2台の圧力計データとその場所に対応した海洋モデルデータに対してマルチチャンネル特異スペクトル解析を用いて成分に分け、圧力計データと海洋モデルの相関がよい成分を海洋変動起源として除去した。その結果、単純に圧力計データから海洋モデルを差し引く（標準偏差は約1.6hPa）より、海洋変動の影響を受けないより良いデータ（標準偏差は約1.0hPa）が得られた（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_05]）。

日本海溝から千島海溝の海域における低周波微動の実態を明らかにするため、過去に実施された自己浮上式海底地震計を用いた稠密地震観測のデータをもとにした解析が進められた。微動活動が活発化する前後で、微動活動域の近傍で通常地震活動が活発化する事例が複数確認された（図1）。日本海溝北部で観測された活発化イベントの一つを精査したところ、微動活発化に引き続いて、小繰り返し地震を含む通常地震の活動が微動発生域に隣接した場所で活発化したことが確認された。この微動と通常地震の共通した活発化の背景に、非地震性すべりの存在が示唆される。日本海溝—千島海溝会合部では、S-net で観測されている現在の微動発生域において、2003年十勝沖地震（M8.0）の発生直後とその3年後にも、類似の時空間クラスタ構造を呈する微動活動エピソードが見いだされていた。しかし、現在の活動と比べてエピソードの活動継続時間が長く、その発生間隔が短いという違いが認められた。一方で、2008年茨城県沖の地震（M7.0）の直後には、現在の微動活動が活発ではない領域で、微動が発生していたことが明らかとなった。こうした結果は、プレート境界型大地震後の余効すべりが微動活動に及ぼす影響を示す重要な事例である（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_05]）。

プレート境界地震を理解するためには、沈み込むプレートの形状を把握する必要がある。将来発生が懸念される南海トラフでの沈み込み帯での観測研究が行われた（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI02]）。徳島市から愛媛県西予市まで東北東—西南西に延びる測線について、未解析の波形データからレシーバ関数を追加して、レシーバ関数イ

イメージを更新した。フィリピン海スラブの上面の深さは、東側で 23 km、西側で 34 km であり、測線の中央付近では、海洋地殻がやや厚くなっていることがわかった(図 2)。四国南西部では、土佐清水市から四万十市西土佐奥屋内まで南東―北西に延びる測線上の 7 か所に設置した地震臨時観測点の保守点検とデータ回収を行い、2020 年 5 月から 12 月までのレシーバ関数を用いた暫定的なレシーバ関数イメージを作成した。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(京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI02])。

巨大なプレート境界地震においては重力も重要な観測量であり、地震時地殻変動に対する曲率や自己重力の影響の評価が行われた(東京大学理学系研究科 [課題番号: UTS\_02])。M9 地震を想定した現実的なプレート境界形状を考慮して測地インバージョンを行った。それらの影響を考慮することですべり量の最大値が減少し、やや深い側にすべりのピークが分布することが分かり、すべり分布の正確な議論には、こうした影響による違いを考慮する必要があることが明らかになった。また、密度の水平不均質が地震時地殻変動に与える影響を理論的に見積もった。その結果、密度の変化は長波長の変動の増減に反映されることがわかった(東京大学理学系研究科 [課題番号: UTS\_02])。

### (3) 地震発生過程の解明とモデル化

地震の破壊の階層性についての研究も進められた(東京大学理学系研究科 [課題番号: UTS\_03])。繰り返し地震によってほぼ同じ領域が破壊されることは知られていたが、その破壊開始時点にもある程度の規則性があることがわかった。それぞれの破壊開始点から様々な大きさの地震が発生する。つまり個々の地域で階層的なパッチが相互作用しながら破壊を繰り返すという震源の性質が明らかになった。

自然大地震の発生場は、これまでに掘削到達例がない。一方、南アフリカの金鉱山は、採掘域から掘削調査が可能な範囲に地震が発生し、研究条件が良い。採掘レベルの珪長質岩盤と、採掘レベルよりも下の超苦鉄質変質ダイクとその周囲を研究対象とし、これまでに Cooke 4 鉱山と Moab Khotson 鉱山から試料を掘削回収し研究が行われた(立命館大学 [課題番号: RTM\_01])。同鉱山の、薄板状金鉱脈の母岩である珪岩の層(厚さ数百 m)の上の、太古代 Ventersdorp 巨大火成岩岩区の変質した玄武岩溶岩の層(厚さ数百 m)の試料の摩擦実験が行われ、摩擦特性が速度強化的であることがわかった。

地震の現象の理解に向けて、室内実験、理論研究、数値シミュレーションの連携からなる研究が進められた(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_06])。沈み込み帯のデコルマ断層に限らず、大地震のおこる天然の成熟した断層には、母岩の摩耗で生じた粉体層が介在することが一般的である。ピーク応力後数ミクロンの間は、エイジング効果の解消に対応すると思われる急激な滑り弱화가明瞭に観察される場合ですら、音波透過率の急激な低下が応力ピークまでに完了してしまうという挙動が繰り返し観察された。こ

の現象を理解するため、定量的なモデリングを試みた。主滑り面以外のバルクガウジでの状態変化を記述する定式化において、速度・状態依存摩擦(RSF)の枠組みが使えるよう、バルクガウジでの状態変化や非弾性変形が、便宜的にバルクガウジ内に多数ある副次的剪断面でおきると仮定してモデル化を進めた。このモデルに基づいて数値シミュレーションを行ったところ、音波透過率の急激な低下を含めた挙動を、実験条件全域で定量的に再現できた。この現象についてシミュレーション結果での各状態変数と主・副滑り面での速度を見ると、巨視的な強度は主断層のエイジングが大きいと、(巨視的強度に対して支配的である)主滑り面のエイジング効果の解消過程は応力ピークを過ぎてさらに数ミクロンの滑りを要する。これに対して音波透過に対して支配的な要因である(バルクガウジの状態変化を模した)多数の副滑り面での状態変化は、主滑り面の速度の圧倒的な増加によって応力ピークまでに滑り速度(の対数の)増加が落ち着いてしまうからであると理解できる(図3)(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_06])。

岩石摩擦実験による歴史的な知見は、摩擦力が滑り速度に対数的に単調に依存するというものであり、それは速度状態依存摩擦法則としてまとめられている通りである。しかし、より複雑な物質、特にコア試料などを用いた摩擦実験では、必ずしも単調な対数依存性を示すわけではないことも近年になって知られてきた。このように非単調な速度依存性は、従来の熱的活性化過程と時間依存する回復過程による解釈だけでは理解し難い。同時に、これまで知られている発展法則では、radiation dampingを入れない限りリミットサイクル的挙動を再現できず、解が発散してしまうことが知られている。このことは、速度状態依存摩擦法則自体、未だ本質的な改良の余地があることを示している。地震波を放出しない程度の非定常滑り挙動、例えばSSEなどを説明することができないからである。この問題において、従来知られている発展法則ではリミットサイクルが存在しないことを、数学的な定理を利用して厳密な形で示すことに成功した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_04])。いくつかの代表的な発展法則についてこの作業を行い、radiation dampingなしでは解が発散してしまい周期解が存在しないことを示した。その上で、radiation dampingなしで周期解を実現できる発展法則を複数発見した。これらの発展法則はaging lawの拡張とも見なすことができるが、速度ステップ変化後の緩和過程ではaging lawよりも対称性がよい。さらに、1自由度モデルにおいて実際にradiation dampingなしでリミットサイクルを安定に実現することを示した。

プレート境界域の物質を想定した室内実験もおこなわれた。沈み込み帯プレート境界断層の摩擦挙動に対する層状珪酸塩鉱物の影響を明らかにするべく、石英・滑石混合ガウジを用いて、室温、有効法線応力10 MPaの条件下で摩擦実験が行われた(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_05])。その結果、滑石含有量の増加(0~20 wt%)に伴って、ガウジの摩擦挙動は固着すべり( $a - b < 0$ )からゆっくりとした固着すべり( $a - b \approx 0$ )を経て安定すべり( $a - b > 0$ )へと遷移した。このことは、プレート境界断層帯内の層状珪酸塩鉱物の存在がスロースリップの発生に必要な速度中性条件をもたら

している可能性を示唆している。また、日本海溝に沈み込む太平洋プレートの被覆層チャートの主成分であるオパールについて、日本海溝沈み込み帯浅部の温度 (25~150°C)・封圧 (150 MPa)・間隙水圧 (50 MPa) 条件下で変位速度急変摩擦実験を行い、摩擦特性の温度変化とその要因について検討した。実験の結果、温度上昇に伴って摩擦強度が増大し、100°C以上の温度で変位速度上昇に伴って摩擦強度が低下する速度弱化の挙動となり、150°Cで地震性断層運動に対応する固着すべりが起こることが明らかとなった(図4)。変位速度・状態依存摩擦構成則による摩擦データのフィッティングの結果、定常摩擦係数は温度上昇または変位速度低下に伴って増大し、一方、 $a - b$  値は温度上昇または変位速度低下に伴って減少し、100°C以上の温度で負となり、高温・低変位速度ほど負の大きな値になった。これらの実験結果は、オパールの摩擦特性が温度だけでなく変位速度によっても変化することが示された。100°C以上の温度の実験後、試料にはガウジ粒子の癒着が認められることから、観察された摩擦特性の温度・変位速度による変化は圧力溶解の作用に起因している可能性がある(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_05])。

海山由来の玄武岩試料について、沈み込み帯浅部の温度 (25~150°C)・封圧 (150 MPa)・間隙水圧 (50~125 MPa) 条件下で変位速度急変摩擦実験を行い、沈み込んだ海山がアスペリティとしてふるまう性質を持つ可能性についても検討した。その結果、 $a - b$  値は温度上昇に伴って正から負へと変化すること、温度 50°Cの沈み込み帯浅部の温度条件下では有効圧に関わらず  $a - b$  値が正となることが明らかとなった(図5)。これは、沈み込み帯浅部では海山がプレート境界型地震やスロー地震の震源となる可能性は低いものの、沈み込む深度が深くなり温度が上昇していくと不安定な挙動を示すアスペリティとしてふるまう可能性を示唆している(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_05])。

#### (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

プレート境界地震を考える際に、アウターライズで発生する地震の解明も重要である。アウターライズではプレートの沈み込みに伴う屈曲により海洋プレート浅部に伸張応力場が生じ、海洋性地殻を断ち切る正断層群が発達して、正断層型の地震(アウターライズ地震)が海洋プレート内部で発生する。巨大津波を引き起こす大規模なアウターライズ地震は海溝型巨大地震の後に連動して発生することが知られている。2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)後には大規模アウターライズ地震が未だに起こっておらず、その切迫度が増している状況にあると考えられる。しかしながら、大規模アウターライズ地震断層の実態に関する知見は極めて不足している。日本海溝の海側に発達する大規模アウターライズ地震断層の実態(構造、物性、流体循環など)を解明するため、地球物理学データを地球化学データと組み合わせ、海溝海側の正断層を学際・総合的に調べた(東京大学大気海洋研究所[課題番号:AORI01])。反射法探査データを解析し、宮城沖の海溝海側 45 km 付近で海底面からモホ面を貫きマントルまで発達する大規模

な正断層(断層 A)のイメージングに成功した。この正断層は垂直変位約 180 m、傾斜角約 74° を示し、過去から最近まで繰り返し活動した活断層の可能性が高い。また、この正断層のモホ面付近の反射強度は周囲のモホ面に比べて異常に弱く、断層の繰り返し活動によって透水性の高い破碎帯(幅 6 km)が形成され、流体移動が容易になっていることを示唆する。この断層の破碎帯は、海溝に平行して 160 km 北方の岩手沖の断層にほぼ連続する。このような反射法探査断面図上で確認された正断層付近で得られた流体関与の証拠(ヘリウム同位体比(3He/4He)異常と 4He/20Ne 比)に基づき、日本海溝アウターライズにおいてマントルと海洋を結ぶ大規模な流体循環モデルを構築した。流体循環は主に南北方向の同じ断層破碎帯に沿って起こるが、破碎帯がある程度厚い(例:断層 A 付近の幅 6 km)場合、破碎帯に直交する東西方向での流体循環も示唆された。

詳細な震源分布や震源メカニズムからアウターライズ域における潜在断層の位置、走向、傾斜等に関する情報を把握するため、東北沖地震の主破壊域の南側に位置する日本海溝南部の福島、茨城沖で海底地震計を用いた地震観測記録を解析した(東北大学理学研究科[課題番号:THK\_06])。アウターライズ域では海溝軸に並行または斜交する、長さ 100 km ほどの地震の帯が複数分布することがわかった。これらは海底地形に見られるホルスト・グラーベン構造とよく一致し、ホルスト・グラーベンを形成する正断層がアウターライズにおける地震活動と深く関係していると考えられる(図 6)。また、地震波トモグラフィ解析により、アウターライズ域の地震活動が低地震波速度の海洋マントル内に及んでいることが明らかとなった。こうした観測事実は、正断層が海洋マントルに達していることを示唆する。

浅部低周波微動の観測研究は日本の様々な地域で行われており、20 km スパンの海底地震計アレイデータを用いて、期間中に発生した浅部低周波微動(以下「浅部微動」という。)の暫定的な解析を実施した(鹿児島大学[課題番号:KGSM01])。浅部微動の波形を波形記録から目で確認したところ、浅部微動の主な活動は観測網内及び周辺において、2020 年 8 月上旬~中旬、2021 年 1 月中旬~下旬、2021 年 2 月~3 月、2021 年 3 月~4 月の期間に見られた。マイグレーションを伴う活動も複数回確認され、昨年度の結果同様にマイグレーション方向は南北両方向に存在している(図 7)。マイグレーションの特徴から、活動域が観測網内で 2 つに分かれているようにも見える。このうち、2021 年 3 月から 4 月の活動は、2 つの活動域を縦断するように南から北にマイグレーションした。微動活動域には明瞭な低活動領域が存在していることがわかった。2020-2021 観測(第 2 期観測)網の内部に位置しており、微動が発生していれば検知できていること、および震源決定誤差を考慮すると、低活動領域では実際にはほとんど微動が発生していないことが示唆された。微動の低活動領域のスケールは 20 km 程度であり、過去の構造探査の結果から、周辺では海山の沈み込みが明らかになっており、海山のスケールは一致しているが位置はずれていることが分かっている。その一方で、地磁気異常のデータを見ると、空白域およびその周辺に海山の沈み込みを示唆する分布が見られる。今後、

重力等、他の地球物理学データとの対比が必要であるが、この空白域には海山が沈み込んでいる可能性が高いと考えられる（鹿児島大学 [課題番号：KGSM01]）。

プレート境界地震の研究においては海外における観測研究もおこなわれている。津波生成過程の理解のためには浅部スロー地震の理解が重要である。メキシコ・ゲレロ州沖合で2017年11月から実施している海底地震・測地観測網のデータを解析し、観測されたテクトニック微動の震源メカニズム解と放射エネルギーをそれぞれ推定した。その結果として震源メカニズム解の多くが逆断層型として説明可能なこと、過去に大地震の発生した領域近くの微動の放射エネルギーが海溝近くの微動と比べて大きいことを指摘し、プレート間固着の空間的な変化に対応して微動の放射エネルギーが変化する可能性に言及した（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI01]）。2014年～2017年に実施された海底地震観測のデータを解析し、既存の活動領域（西側活動域）よりも東側の活動域の詳細を明らかにした。東側活動域は、西側活動域から東にマイグレーションし、海溝軸近傍まで活動が確認された。マイグレーション速度について西側活動域は30-60km/dayであるのに対し、東側活動域は2~20km/dayと遅い。このマイグレーション速度の違いは、プレート間固着の強さの違いを反映している可能性がある。東側活動域は四国沖の南海トラフ沿いの固着域により近い性質をもつため、南海トラフを対象としたシミュレーション研究から指摘されている固着の剥がれによる浅部スロー地震活動の変化が見られる可能性が考えられる。

ニュージーランド沖での海外観測も実施されており、成果が得られつつある（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_08]）。2018年10月にヒ克蘭ギ沈み込み帯北部のギズボーン沖に設置し、2019年10月に回収された5台の海底地震計で取得したデータの解析を進めている。この観測期間中の2019年3月から4月にかけて、観測網直下で大規模なスロースリップ（SSE）が発生し、これに伴って活発な微動も観測された。本海域では、2014年9月から10月にかけても大規模なSSEおよびそれに伴う微動が発生したが、日本-NZ-米の国際共同観測（Hikurangi Ocean Bottom Investigation of Tremor and Slow Slip：HOBITSS）によって観測網直下での観測に成功し、それらの活動の詳細が明らかになっていた。2019年3月の大規模SSEに伴う微動活動は、2014年の微動活動と同様、SSEのすべりが終息する時期に活動が活発化したことがわかった。

プレート境界地震の調査研究を含めた海域での観測研究は大学以外の研究機関でも進められている。海溝型地震震源域海底において、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（図8）、および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が継続していることが明らかとなっている（図9）。また、東北沖地震後10年にわたる海底地殻変動観測データから余効変動を詳細に調査した結果、福島県沖の海溝軸付近に大きな地震時すべりが生じていたことを示唆する結果が得られた。このすべりは、津波から推定されていた結果と整合

的であり、津波インバージョンの結果を測地データによって裏付ける結果となった。また、地震時の大すべり域の南北縁において発生した余効すべりは、地震後概ね2-3年程度で急激に減衰したことも示された（図10）。

沖縄トラフ南部では背弧リフトに伴う火山・熱水活動に加えて、群発的な地震活動がしばしば発生する。海洋研究開発機構では、こうした地震活動の発生要因を理解するため、過去20年間の地震活動の分布と統計的な性質（ $b$ 値）を調べ、その空間分布を反射法探査に基づく地下構造と比較した（海洋研究開発機構 [課題番号：JAMS02]）。その結果、M5以上の比較的大きな地震は八重山地溝帯等のリフト中軸部の近くで発生しており、そこでは周囲より低い $b$ 値（ $<0.8$ ）を示すことがわかった。対照的に、石垣海丘や鳩間海丘周辺では大きな $b$ 値（ $>1.2$ ）を示し、そこでは火山フロントが形成されていることが示唆された。

活断層によって発生する内陸地震の現象解明も重要な課題であり、多くの研究が進められた。2016年の山陰地方の地震帯で発生したMj6.7の地震である鳥取県中部地震について研究が進められた（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI03]）。約50km西で発生した2000年鳥取県西部地震（Mj7.3）の断層の南端付近で、本震のすべりによる応力変化に調和的なP軸の分布が見出されていたことから、断層端の謎を解明することを主な目的として、京大・九大・東大地震研による合同余震観測が行われ解析が進められた。余震分布は最深部においてはお椀型を示しているように見えるが、両端部においてはほぼ鉛直な直線的な形状を示している。地震破壊は震源から同心円状、あるいは楕円状に広がっていくと考えられるが、余震分布はそれに対応した形ではなく矩形を呈している。このことは、断層の両端に、何か特別なものが存在していることを示唆しており、実際断層の北端付近には第四紀火山が存在している。また、山陰の地震帯において、大きな地震の断層両端において、応力緩和が起こっている可能性を示唆している。断層両端における応力状態をより直接的に推定するために、応力逆解析を行った（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI03]）。その結果、断層の両端において、地震前に差応力が小さかったことが確認された（図11）。また、断層深部においても、差応力が小さかったことが見出された。今後は解析を進めることにより、これらの結果が発生する地震の断層の大きさとどのように関係するのかを調べる必要がある（図12）。

内陸地震発生メカニズムを解明することは、災害を軽減するために非常に重要な課題である。また、内陸地震のメカニズムを理解するためには、断層への応力集中とひずみの蓄積について理解することが重要である。さらに、内陸地震発生には地殻内流体の存在が大きく関係していることがわかってきている。そのような地殻内流体が、島弧のシステムの中でどのように生成され、移動し、断層近傍に存在するのかについて理解することは重要な研究課題である。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を明らかにする研究がおこなわれた（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_09]）。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。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。火山フロント近傍の低比抵抗域は明らかにマントルから地殻下部に延びており、深部のマントル中から延びて上部地殻に入り込んでいることがよくわかる。今後は、この低比抵抗域の原因と地殻内流体の関係を明らかにし、地殻内流体の供給源との関係について調べることで、内陸地震発生ポテンシャルについて調べていく必要がある。

このように低比抵抗域と火山フロントとの関係が明らかになっていく中で、火山活動との関係も重要な課題である。火山地域での比抵抗構造の研究が進められ、地殻内の低比抵抗体の実体が明らかにされつつある（九州大学 [課題番号：KYU\_01]）。また、マグマ供給系の実体をとらえるために雲仙火山において自然地震を用いた速度構造トモグラフィ解析が行われた。雲仙火山では1990-1995年の噴火活動を引き起こしたマグマは島原半島の西部、橘湾の地下10~15km付近から雲仙山頂に向かい斜めに上昇してきたことが、GNSS+水準測定の観測、および震源の移動により明らかになっている。インバージョン結果は雲仙火山を頂点とした円錐状の形状の低 $V_p$ 領域（深さ3-16 km）を示し、マグマの上昇経路はその上面付近に対応する。S波速度、 $V_p/V_s$ も考慮して、この定 $V_p$ 領域はメルトの存在量が大きく見積もって5%以下の、高度に結晶化したマグマだまりであると推定された。マッシュ状のマグマだまりの内部をマグマが鉛直に上昇するという考えとは異なり、ほぼ固結しつつあるマグマだまりの上面をなぞるようにマグマが上昇していくという、新しいマグマ供給系のイメージが得られた（図13）。また、島原半島全域で2017-2021年にかけて得た70点の広帯域MT観測データの解析から、雲仙1990-1995年噴火のマグマの移動経路は、深さ5 kmより深部に存在する100-3000  $\Omega$ m程度の高比抵抗体、およびその上部に位置する1-10  $\Omega$ m程度の低比抵抗体のいずれとも一致せず、両者の境界付近に位置することが分かった。また、九重火山での稠密広帯域MT観測からは、火口や地熱地帯は深さ3~5 kmの低比抵抗体の上部に位置するという発見があり、構造境界での流体の存在を裏付けた（図14）。

内陸地震に強く関連すると考えられている地殻流体は、群発地震にも大きく寄与していると考えられている。そのため、群発地震の研究も進められた（弘前大学 [課題番号：HRS\_01]）。2011年東北地方太平洋沖地震でトリガーされた東北地方各地の群発地震について、その継続時間と群発地震開始位置からの拡散的時空間発展を系統的な方法で調査し、群発地震の震源位置の拡散係数と群発地震の継続時間との間に負の相関があることを発見した。群発地震の継続時間に関する特徴を明らかにしたもので、群発地震のみならず内陸地震発生と流体の関係について理解する上で大きな貢献になりうるものである（弘前大学 [課題番号：HRS\_01]）。

火山下の詳細な構造の解析やマグマだまりの存在を求める研究も進められた。箱根火山下における地殻構造の推定を進め、地震波速度構造を通して火山下のマグマ溜まりや、

深部低周波地震発生域からマグマ溜まりへの供給経路を示唆する低速度域の存在を明らかにした（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI04]）。火山の深さ 6 km より深部で顕著な低速度域が推定され、これらの低速度域において、深さ 9 km 付近にはマグマ溜まりを示唆する高  $V_p/V_s$  域、またその上部深さ 6 km 付近にはマグマ由来の熱水やガスの存在を示唆する低  $V_p/V_s$  域の存在が認められた。群発地震活動は低速度域より上部深さ 6 km 以浅で発生し、また GNSS 観測により推定された圧力源は低速度域上部の深さ 6 km 付近に位置することが分かった（図 15）。さらに、深さ 20 km 付近に発生する深部低周波地震発生域にかけて、低速度域が分布している描像も推定された。深部低周波地震は、先行研究により浅部の群発地震活動や地殻変動と時間的に連動していることが報告されており、ここでは深部低周波地震がやや先行して活発化し、その後深さ 6 km 付近を圧力源とする膨張性地殻変動やより浅部での群発地震活動が開始することが示されている。これらの結果をもとに考察すると、深部からのマグマ供給に伴い深さ 20 km 付近で深部低周波地震が活発化し、その影響がより浅部の深さ 9 km 付近のマグマ溜まりに伝播し、マグマ溜まりからの脱水脱ガスの促進にともない群発地震や地殻変動などを引き起こしている可能性が示唆される（図 16）。

地震と地殻内流体の関係を探る研究は他の地域でも行われた。2017 年鹿児島湾での M5.3 の地震の前震-本震-余震系列の高精度震源決定を行なった（東北大学 [課題番号：THK\_07]）。前震活動・余震活動の発生場所が徐々に移動したことが分かった。このことから前震-本震-余震系列の発生に深部から浅部への流体移動が関与していた可能性が考えられることがわかった（図 17）。比抵抗モデルによって得られた表層付近の比抵抗値を物質モデリングで解釈する方法についても研究を進めた（東北大学 [課題番号：THK\_07]）。葛根田や湯沢の地熱地域では低比抵抗体が海拔下約 2 km 以深に存在しており、低比抵抗体の内部は微小地震が発生していないので、脆性-延性境界の延性域にあり、石英脈にシールされた超臨界地熱貯留層であると解釈される。上部が石英脈にシールされ石英溶解度曲線を考慮すると、低比抵抗体内は 380~400°C 以上であることや NaCl-H<sub>2</sub>O 系で考えると二相卓越形または单相型の超臨界水を含む地熱貯留層であることが示唆されている。また地震波速度構造と同時に解釈することにより、塩濃度に依存するが湯沢地熱地域での流体の体積分率は 0.1~4.2 % であることが推定されている。同じく比抵抗と地震波速度を同時に解釈して吾妻山のマグマだまりでもマグマ+熱水の体積分率が 6 % 以下であること、マグマ単独では解釈が難しく、比抵抗の低い熱水が卓越していることなどが明らかになりつつある（東北大学 [課題番号：THK\_07]）。

地殻内部における流体の移動についての研究も進められた。マントル起源の蛇紋岩体に炭酸塩脈が発達していることを発見し、反応と破壊、せん断変形を繰り返しながら複数の炭酸塩鉱物が析出していることを見出した（東北大学 [課題番号：THK\_02]）。さらに、この蛇紋岩の炭酸塩化は、固体体積が収縮しながら脱水する反応で、間隙水圧の上昇が起こるために、き裂形成・物質移動・反応が自己促進的に進行することをつきとめ

た (図 18)。

国の研究機関においても内陸地震の研究が進められた。熊本地震の余効変動のモデルを構築し、これを補正した上でマグマだまりの体積変化の抽出を試みた(国土地理院[課題番号: GSI\_01])。熊本地震の余効変動のうち、粘性緩和の寄与分については、表層が弾性層、基盤層が Maxwell 粘弾性体の半無限 2 層構造を仮定して補正した。計算には RELAX を用いた。また、地震断層モデルとしては矢来・他 (2016) を使用し、構造パラメータ (粘弾性層の厚さ、基盤層の粘性) については、地殻変動データからグリッドサーチにより推定した。余効すべりについては、地震断層モデルを含む拡大面を小断層で離散化し、それぞれの小断層でのすべりを地殻変動データから推定した。

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、三重県中央構造線の地質調査、地質調査に対応した岩石変形の解明のための実験が行われた (産業技術総合研究所 [課題番号: AIST05])。これまでに断層走向沿い東西方向 1 km の範囲の調査により、塑性変形条件下での 200 MPa を超える高差応力領域の空間分布を明らかにした。また、これまでの研究で明らかになった高差応力領域について、4 km 西方までの広がりを見出した。

内陸地震の研究においても海外での観測研究が進められた。ニュージーランドのカイコウラ地震の震源域での研究が進められた (東北大学 [課題番号: THK\_01])。地震波速度トモグラフィの結果、カイコウラ地震の震源域、地殻内断層の深部やプレート境界に沿った地震時・地震後すべり域付近に地震波速度低速度・高  $V_p/V_s$  の領域を見出した。この地震波速度低速度・高  $V_p/V_s$  の領域は高い間隙流体圧の領域を示しており、断層活動や地震活動と流体との関連、特に流体による連動破壊や地震後すべり発生への寄与、が示唆される。さらに、多様なテクトニック環境下でのスロー地震発生メカニズムを理解するために、カイコウラ地震震源域を含むマルボロ断層系において、微動活動の検出と震源決定を行い、カイコウラ地震発生に関係した微動活動の変化が見られた (東北大学 [課題番号: THK\_01]) (図 19)。

世界の様々な沈み込み帯での研究もおこなわれた。近地地震と遠地地震の走時データの同時インバージョンで M9.0 以上の巨大地震が起った 6 つの沈み込み帯地域の詳細な 3 次元 P 波速度構造を調べた結果、以下のことがわかった (東北大学 [課題番号: THK\_05])。 (1) 沈み込んだ海洋スラブ下のマントルに顕著な低速度異常体 (subslab low-velocity anomaly, SLVA) が存在する。これは、熱いマントル上昇流を反映すると思われる。 (2) 巨大地震の震源は SLVA の端部や複数の SLVA の間 (SLVA ギャップ) の真上に位置する。 (3) 巨大地震の地震時すべりは主に SLVA ギャップの真上に分布する。 (4) SLVA と SLVA ギャップの浮力の違いが巨大地震発生の一因となる。 (5) 巨大地震の発生には、スラブ上面付近や上盤プレートの構造と応力場だけでなく、スラブ下の不均質構造も影響を及ぼすと推定できる。これらの成果は、巨大地震発生メカニズムの解明およびその震源位置と破壊範囲の予測への重要な手がかりとなるとと思われる。

超電導重力計や絶対重力計を用いた重力の観測研究もおこなわれている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_10]）。長野県松代における超伝導重力計 iGrav（28号機）による重力連続観測はひきつづき順調であり、高品質のデータが取得されている。松代においては2016年から2018年にかけて従来型の超伝導重力計との並行観測を行ったが、今回そのデータの詳細な解析を行った。その結果、ノイズレベル、ドリフト特性などの点で、2台の重力計のデータの品質はほぼ同等であることが確認された。また、地震研究所が所有する2台の絶対重力計の器差を精密に検定する実験を、山梨県富士山科学研究所（山梨県）において行なった。その結果、1マイクロガルオーダーの精度での検定を行うことができた（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_10]）。

地球化学的アプローチによる研究も進められている（東京大学理学系研究科 [課題番号：UTS\_04]）。本宮地域の地熱帯において電源開発の目的でNEDOが多数掘削した調査孔の一つ（NEDO井）を観測のために借用し、深部起源ガスを検出して変化を観測する試みを行った。NEDO井に加えて、自噴の温泉が湧出する川湯温泉（Kawayu井）でも観測を行った。NEDO井の観測では、大気リークを解決できず観測を断念した。川湯温泉では大気リークの無い観測が実現していたものの、溶存ガスは大気そのもので、深部起源ガスを検知することができなかった。そこで、500m深度から採水している渡瀬温泉に観測場所を変えて、深部起源ガスの検知を試みるようにする（東京大学理学系研究科 [課題番号：UTS\_04]）。

大規模データを活用した観測研究も進められている。大量の微小地震を用いて日本全国の地殻内応力マップを作成した（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST07]）。昨年度開発した、深層学習によるP波初動極性の自動検出システムと震源メカニズム解決定プログラムHASHを用いて、日本全国の内陸部及び沿岸海域（海岸線から50km以内）の下で20kmより浅い場所で発生した微小地震の震源メカニズム解を決定した。解析した66万件のうち21.6万件ほどの微小地震について、震源メカニズム解が良好に求まった。これらの震源メカニズム解を用いて、応力インバージョンを実施した。その結果、大局的な東西圧縮に加えて、地域的な応力場の傾向、局所的な応力方位の異常などを見ることが出来る応力マップが出来上がった。布田川断層・日奈久断層、四国地方の中央構造線、糸魚川静岡構造線の南端部、北上高地の西端など、地質境界を境に水平主圧縮軸方位が異なる様子が見られた。地震発生予測や日本のテクトニクス研究の基礎的な情報として活用されることが期待される成果である。

### 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、歴史地震の震度の検証および、その定量化に向けた研究もおこなわれている（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、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観測点を置いた。観測点を徐々に追加していき、現在は17点で観測をしている。これまでに文京区本郷で震度1以上を記録した地震は51回あり、それらのデータを用いた暫定的な結果では、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(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_15])。

## 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

海底観測においては機器の技術開発も重要な課題である。海底において空間的に高密度なやや広帯域地震観測の実施をめざして、小型広帯域地震計を搭載した長期観測型海底地震計の開発を行い、観測に用いている(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_23])。自由落下自己浮上式海底地震計は、どのような傾きで海底に着底しても地震計の鉛直・水平を保持する必要がある、低消費電力で小型の広帯域地震計センサー向けのレベリング装置を開発して、小型広帯域海底地震計に用いている。2021年は、このレベリング装置の機能強化を行った(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_23])。

#### 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。これらのデータを用いた今後の成果が期待される。また、滑りの多様性という観点においては、国内ばかりでなく海外のフィールドを含めた様々な沈み込み帯での微動やスロースリップを対象とした観測研究が進められており、様々な成果が得られている。今後は、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、地震の滑りについては室内実験等の研究も進んでおり、実際のプレート境界のすべりと関連付けると共に、現象の本質に関係する要因を明らかにしていく必要がある。観測と計算機を用いたシミュレーションの比較研究もなされており、多くの成果が得られつつある。これらのデータを実際のマクロな地震現象にどのようにつなげていくかが次の課題であるように思われる。内陸地震については、それぞれの地域での現象が明らかにされ、多くの地域で、沈み込み帯における水の流れを背景とした内陸地震と地殻内流体との関係が明らかになりつつある。本年度は、電磁気学的手法によって描き出される構造の精緻化がめざましく、地殻内流体の定量評価に向けた取り組みも多くみられる。この部会では、プレート境界地震やプレート内地震、さらに活断層を代表とした内陸地震と、様々な研究対象や分野で多様な成果が得られつつある。

今後は得られる個々の成果をまとめ、地震の現象解明にむけ全体像を明らかに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

- Aizawa, K., M., Ustugi, K., Kitamura, T., Koyama, M., Uyeshima, N., Matsuhima, S., Takakura, H., Inagaki, H., Saito, Y., Fujimitsu, 2022, Magmatic fluid pathways in the upper crust: Insights from dense magnetotelluric observations around the Kuju Volcanoes, Japan, *Geophysical Journal International*, 228, 755-772, <https://doi.org/10.1093/gji/ggab368>
- Aizawa, K., S., Takakura, H., Asaue, K., Koike, R., Yoshimura, K., Yamazaki, S., Komatsu, M., Utsugi, H., Inoue, K., Tsukamoto, M., Uyeshima, T., Koyama, W., Kanda, T., Yoshinaga, N., Matsushima, K., Uchida, Y., Tsukashima, T., Matsushima, H., Ichihara, D., Muramatsu, Y., Teguri, A., Shito, S., Matsumoto, H., Shimizu, 2021, Electrical conductive fluid-rich zones and their influence on the earthquake initiation, growth, and arrest processes: observations from the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Kyushu Island, Japan, *Earth, Planets and Space*, 73-12, [doi.org/10.1186/s40623-020-01340-w](https://doi.org/10.1186/s40623-020-01340-w)
- Akuhara, T., K. Nakahigashi, M. Shinohara, T. Yamada, H. Shiobara, Y. Yamashita, K. Mochizuki, and K. Uehira, 2021, Lithosphere-asthenosphere boundary beneath the Sea of Japan from transdimensional inversion of S-receiver functions, *Earth Planets Space*, 73(1), 171, [doi: 10.1186/s40623-021-01501-5](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01501-5)
- Amezawa, Y., T., Maeda, M., Kosuga, 2021, Migration diffusivity as a controlling factor in the duration of earthquake swarms, *Earth, Planets and Space*, 73, 148, [10.1186/s40623-021-01480-7](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01480-7)
- Arai, R., 2021, Characteristics of seismicity in the southern Okinawa Trough and their relation to back-arc rifting processes, *Earth Planets and Space*, 73, 160, [10.1186/s40623-021-01491-4](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01491-4)
- Asaah, A.N.E., T., Yokoyama, H., Iwamori, F., Tongwa, A., 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*, in press, <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2022.125865>
- Asaah, A.N.E., T., Yokoyama, H., Iwamori, H.L.A. Nche, T., Ohba, 2021, High- $\mu$  signature in lavas of Mt. Oku: Implications for lithospheric and asthenospheric contributions to the magmatism of the Cameroon Volcanic Line (West Africa),

- Lithos, 400–401, DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106416
- Chang, T., S., Ide, 2020, Hypocenter Hotspots Illuminated Using a New Cross-Correlation-Based Hypocenter and Centroid Relocation Method, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 126, e2021JB021991, 10.1029/2021JB021991
- Chiba, K., 2021, Stress State Inferred from b Value and Focal Mechanism Distributions in the Aftershock Area of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake, *Pure Appl. Geophys.*, 178, 1165–1179, doi:10.1007/s00024-021-02691-5
- Cruz-Atienza, V. M., J. Tago, C. Villafuerte, M. Wei, R. Garza-Girón, L. A. Dominguez, V. Kostoglodov, T. Nishimura, S. I. Franco, J. Real, M. A. Santoyo, Y. Ito, and E. Kazachkina, 2021, Short-term interaction between silent and devastating earthquakes in Mexico, *Nat. Commun.*, 12, doi:10.1038/s41467-021-22326-6
- Dandar, O., A. Okamoto, M. Uno, and N. Tsuchiya, 2021, Redistribution of magnetite during multi-stage serpentinization: Evidence from the Taishir Massif, Khantaishir ophiolite, western Mongolia, *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 116, 176–181, doi:10.2465/jmps.201130a
- Dhar, S., J. Muto, Y. Ito, S. Miura, J. D. P. Moore, Y. Ohta, T. Iinuma, 2022, Along-Arc Heterogeneous Rheology Inferred from Postseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggac063
- Fan, J., D. Zhao, 2021, Subslab heterogeneity and giant megathrust earthquakes, *Nat. Geosci.*, 14, 349–353
- Fan, J., D. Zhao, 2021, P wave tomography and azimuthal anisotropy of the Manila - Taiwan - southern Ryukyu region, *Tectonics*, 40, e2020TC006262
- 藤田雅之, 松本良浩, 佐藤まりこ, 石川直史, 渡邊俊一, 横田裕輔, 2021, 定常的な GNSS-A 海底地殻変動観測の確立と地震学への貢献, *地震*, 74, 55–65, 10.4294/zisin.2020-18
- Fujiwara, T., 2021, Seafloor Geodesy From Repeated Multibeam Bathymetric Surveys: Application to Seafloor Displacement Caused by the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Frontiers in Earth Science*, 9, 371, 10.3389/feart.2021.667666
- Fukao, Y., T., Kubota, H., Sugioka, A., Ito, T., Tonegawa, H., Shiobara, M., Yamashita, T., Saito, 2021, Detection of “rapid” aseismic slip at the Izu-Bonin Trench, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2021JB022132, doi:10.1029/2021JB022132
- Fukuda, K., T. Hatano, K. Mochizuki, 2022, Model for tectonic tremors: Enduring events, moment rate spectrum, and moment-duration scaling, *Physical Review E*, 105, 014124, 10.1103/physreve.105.014124
- Hirauchi, K., Y., Nagata, K., Kataoka, R., Oyanagi, A., Okamoto, K., Michibayashi, 2021, Cataclastic and crystal-plastic deformation in shallow mantle-wedge

- serpentinite controlled by cyclic changes in pore fluid pressures, *Earth and Planetary Science Letters*, 572, 117232, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117232>
- Hirauchi, K., I., Segawa, Y., Kouketsu, Y., Harigane, Y., Ohara, J., Snow, A., Sen, M., Fujii, K., Okino, 2021, Alteration processes recorded by back-arc mantle peridotites from oceanic core complexes, Shikoku Basin, Philippine Sea, Island Arc, 90, e12419, <https://doi.org/10.1111/iar.12419>
- Huang et al., 2021, Anelasticity and lateral heterogeneities in Earth's upper mantle: impact on surface displacement, self-attraction and loading and ocean dynamics, *JGR*, 10.1029/2021JB022332
- Huang, Y., H. Guo, T. Nakatani, K. Uesugi, M. Nakamura, and H. Keppler, 2021, Electrical conductivity in texturally equilibrated fluid-bearing forsterite aggregates at 800° C and 1 GPa: Implications for the high electrical conductivity anomalies in mantle wedges, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 126, e2020JB021343, doi:10.1029/2020JB021343
- Ichiki, M., T. Kaida, T. Nakayama, S. Miura, M. Yamamoto, Y. Morita, and M. Uyeshima, 2021, Magma reservoir beneath Azumayama Volcano, NE Japan, as inferred from a three-dimensional electrical resistivity model explored by means of magnetotelluric method, *Earth Planets Space*, doi: 10.1186/s40623-021-01451-y
- Ide, S., 2021, Empirical Low-Frequency Earthquakes Synthesized From Tectonic Tremor Records, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 126, e2021JB022498, 10.1029/2021JB022498
- Iio, Y., S., Matsumoto, Y., Yamashita, et al., 2021, Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori earthquake, *Commun Earth Environ*, 2, <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00231-6>
- 今西和俊・野田朱美, 2021, 内陸応力場の時空間パターン: 発震機構解とプレート間固着を用いた新手法から明らかになった特徴とそのテクトニックな意味, 日本地球惑星科学連合 2021年大会, SCG50-13
- 今西和俊・野田朱美, 2021, オフフォルト地震と地殻変動データを用いた新手法による東北沖プレート間固着の詳細な時空間変動の推定, 日本地震学会 2021年度秋季大会, S08-08
- 今西祐一・西山竜一・本多亮・田村良明, 印刷中, 絶対重力計 FG5 #109 と #241 の器差の検定について—東京および富士山における相互比較—, *測地学会誌*, 67
- Inoue, T., Y., Ito, L. M., Wallace, Y., Yoshikawa, D., Inazu, E. S. M., Garcia, T., Muramoto, S. C., Webb, K., Ohta, S., Suzuki, R., Hino, 2021, Water depth dependence of long - range correlation in nontidal variations in seafloor pressure, *Geophys. Res. Lett.*, 48(8), e2020GL092173, doi:10.1029/2020GL092173



- Ishizu, K., Y. Ogawa, K. Nunohara, N. Tsuchiya, M. Ichiki, H. Hase, W. Kanda, S. Sakanaka, Y. Honkura, Y. Hino, K. Seki, H. T. Kuo, Y. Yamaya, T. Mogi, 2022, Estimation of spatial distribution and fluid fraction of a potential supercritical geothermal reservoir by magnetotelluric data: a case study from Yuzawa geothermal field, NE Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 127, doi: 10.1029/2021JB022911
- Iwamori, H., K. Ueki, T. Hoshide, H. Sakuma, M. Ichiki, T. Watanabe, M. Nakamura, H. Nakamura, T. Nishizawa, A. Nakao, Y. Ogawa, T. Kuwatani, K. Nagata, T. Okada, E. Takahashi, 2021, Simultaneous Analysis of Seismic Velocity and Electrical Conductivity in the Crust and the Uppermost Mantle: A forward Model and Inversion Test Based on Grid Search, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SOLID EARTH*, 126, 10.1029/2021JB022307
- Jamali Hondori, E., C. Guo, H. Mikada, and J.-O. Park, (2021), Full-waveform inversion for imaging faulted structures: A case study from the Japan Trench forearc slope, *Pure Appl. Geophys.*, 178, 1609–1630, doi:10.1007/s00024-021-02727-w
- Jiang, G., G. Zhang, D. Zhao, Q. Lu, D. Shi, H. Li, and X. Li, 2021, Mantle flow and dynamics beneath central-east China: New insights from P-wave anisotropic tomography, *J. Geophys. Res. : Solid Earth*, 126, e2020JB020070
- 海上保安庁, 2021, 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, 106, 428–432
- 海上保安庁, 2021, 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, 106, 104–109
- Kameda, J., A. Okamoto, 2021, Generation of oxidising fluids by comminution of fault rocks, *Geochem. Perspect. Lett.*, 19, 32–35, doi:10.7185/geochemlet.2131
- Kanamatsu, T., K. Ikehara, K.-H. Hsiung, 2022, Stratigraphy of deep-sea marine sediment using paleomagnetic secular variation: Refined dating of turbidite relating to giant earthquake in Japan Trench, *Marine Geology*, 443, 106669, 10.1016/j.margeo.2021.106669
- 加納靖之, 2021, 紀伊半島における土地傾斜ブロマイド記録のデジタルアーカイブ構築, 東京大学地震研究所技術研究報告, 26, 16–19
- 片岡俊一, 2022, 青森県階上町道仏震度観測点の特異性確認のための町内各地の地盤震動特性調査, 東北地域災害科学研究, 58, 印刷中
- Katori, T., N. Shigematsu, J. Kameda, A. Miyakawa, R. Matsumura, 2021, 3D fault-zone architecture across the brittle-plastic transition along the Median Tectonic Line, SW Japan: Fault-rock characterization, *Journal of Structural Geology*, Elsevier Ltd., 153, 104446, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104446>
- 木戸元之・福田達也・太田雄策・富田史章・本荘千枝・飯沼卓史, 2021, ウェーブライダーによる GNSS-A 観測データの準リアルタイム伝送, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会

- 木戸元之・本荘千枝・木村友季保, 2021, 様々な観測形態による GNSS-音響方式での上下動検出について, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会
- Kimura, M., N. Kame, S. Watada, A. Araya, T. Kunugi, and R. Wang, 2021, Determination of the source parameters of the 2011 Tohoku-Oki earthquake from three-component pre-P gravity signals recorded by dense arrays in Japan, *Earth Planets Space*, 73, 223, doi:10.1186/s40623-021-01553-7
- Kortink, M., A. Yates, M. Savage, W. Wang, T. Okada, S. Matsumoto, Y. Iio, K. Jacobs, 2021, Velocity changes around the Kaikōura earthquake ruptures from ambient noise cross-correlations, *Geophysical Journal International*, doi:10.1093/gji/ggab514
- Kubota, T. et al., 2021, Improving the constraint on the Mw 7.1 2016 off-Fukushima shallow normal-faulting earthquake with the high azimuthal coverage tsunami data from the S-net wide and dense network: Implication for the stress regime in the Tohoku overriding plate, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 10.1029/2021jb022223
- Kubota, T., T., Saito, Y., Fukao, H., Sugioka, A., Ito, T., Tonegawa, H., Shiobara, M., Yamashita, 2021, Earthquake rupture and tsunami generation of the 2015 Mw 5.9 Bonin event revealed by in situ pressure gauge array observations and integrated seismic and tsunami wave simulation, *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL095915, doi:10.1029/2021GL095915
- Kundu, S., A., Opris, Y., Yukutake, T., Hatano, 2021, Extracting Correlations in Earthquake Time Series Using Visibility Graph Analysis, *Frontiers in Physics*, 9, doi:10.3389/fphy.2021.656310
- Kuritani, T., E. Sato, K. Wada, A. Matsumoto, M. Nakagawa, D. Zhao, K. Shimizu, and T. Ushikubo, 2021, Conditions of magma generation at the Me-akan volcano, northern Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 417, 107323
- Mannen, K., Y., Abe, Y., Daita, R., Doke, M., Harada, G., Kikugawa, N., Honma, Y., Miyashita, Y., Yukutake, 2021, Volcanic Unrest at Hakone Volcano after the 2015 phreatic eruption - Reactivation of a Ruptured Hydrothermal System?, *Earth, Planets and Space*, 73, 80, doi:10.1186/s40623-021-01387-3.
- Matsumoto, Y., K., Yoshida, T., Matsuzawa, A., Hasegawa, 2021, Fault-valve behavior estimated from intensive foreshocks and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake sequence, Kyushu, southern Japan, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2020JB020278, doi:10.1029/2020JB020278
- Matsuno, S., M., Uno, A., Okamoto, N., Tsuchiya, 2022, Machine-learning techniques for quantifying the protolith composition and mass transfer history of metabasalt, *Sci. Rep.*, 12, 1385, doi:10.1038/s41598-022-05109-x

- 松野有希・小菅正裕・前田拓人, 2021, 北海道雌阿寒岳における深部・浅部低周波地震活動, 東北地域災害科学研究, 57, 109-114
- Miyano, K., K., Aizawa, T., Matsushima, A., Shito, H., Shimizu, 2021, Seismic velocity structure of Unzen Volcano, Japan, and relationship to the magma ascent route during eruptions in 1990 - 1995, *Scientific Reports*, 11, 22407, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00481-6>
- Mizushima, R., T. Hatano, 2021, Slow periodic oscillation without radiation damping: new evolution laws for rate and state friction, *Geophysical Journal International*, 229, 274, 10.1093/gji/ggab471
- Mochizuki, K., S. Henrys, D. Haijima, E. Warren-Smith, and B. Fry, 2021, Seismicity and velocity structure in the vicinity of repeating slow slip earthquakes, northern Hikurangi subduction zone, New Zealand, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 563, doi:10.1016/j.epsl.2021.116887
- Murakami S., T. Ichimura, K. Fujita, T. Hori, and Y. Ohta, 2021, Sensitivity analysis for seafloor geodetic constraints on coseismic slip and interseismic slip-deficit distributions, *Front. Earth Sci.*, 9, 600946, doi:10.3389/feart.2021.614088
- Nagano, A., Y. Yamashita, K. Ariyoshi, T. Hasegawa, H. Matsumoto, and M. Shinohara, 2021, Seafloor Pressure Change Excited at the Northwest Corner of the Shikoku Basin by the Formation of the Kuroshio Large-Meander in September 2017, *Front. Earth Sci.*, 8, 583481, doi:10.3389/feart.2020.583481
- 長尾優樹・岡田里奈・梅田浩司・鎌滝孝信, 2022, 1804年象潟地震による津波堆積物の堆積構造, 東北地域災害科学研究, 58, 印刷中
- Nakajima, J., A. Hasegawa, 2021, Prevalence of shallow low-frequency earthquakes in the continental crust, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2020JB021391, doi:10.1029/2020JB021391
- Nakamura, H., H., Iwamori, N., Morikawa, N., Kharitonova, G., Chelnokov, I., Bragin, Q., Chang, 2021, Upwelling of deep-seated fluid in the Sikhote-Alin region, Far East of the Eurasian Plate, *Aquatic Geochemistry*, 27, 269-282, <https://doi.org/10.1007/s10498-021-09398-y>
- Nakanishi, N., T., Yokoyama, S., Okabayashi, H., Iwamori, T., Hirata, 2021, Geochemical constraints on the formation of chondrules: Implication from Os and Fe isotopes and HSE abundances in metals from CR chondrites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 319, 254-270, 10.1016/j.gca.2021.11.009
- Nakata, R., T. Hori, S. Miura, and R. Hino, 2021, Presence of interplate channel layer controls of slip during and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake through the frictional characteristics, *Sci. Rep.*, 11, 6480, 1-11, doi:10.1038/s41598-021-

86020-9

- Noda, H., 2021, Shear strength of a shear zone in the brittle-plastic transition based on tensorial strain partitioning, *J. Struct. Geol.*, 146, 104313, doi:10.1016/j.jsg.2021.104313
- Noda, H., 2021, Dynamic earthquake sequence simulation with a SBIEM without periodic boundaries, *Earth Planets Space*, 73, 137, doi:10.1186/s40623-021-01465-6
- Nomuulin, A., N. Tsuchiya, O. Dandar, A. Okamoto, M. Uno, U. Batsaikhan, and J. Wang, 2021, Multi-stage serpentization of ultramafic rocks in the Manlay Ophiolite, southern Mongolia, *Mong. Geosci.*, 26, 1-17, doi:10.5564/mgs.v26i53.1787
- Nurdiana, A., A. Okamoto, K. Yoshida, M. Uno, T. Nagaya, N. Tsuchiya, 2021, Multi-stage infiltration of Na- and K-rich fluids from pegmatites at mid-crustal depths as revealed by feldspar replacement textures, *Lithos*, 388-389, 106096, doi:10.1016/j.lithos.2021.106096
- Obana, K. G., Fujie, Y., Yamamoto, Y., Kaiho, Y., Nakamura, S., Miura, S., Kodaira, 2021, Seismicity around the trench axis and outer-rise region of the southern Japan Trench, south of the main rupture area of the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. J. Int.*, 226, 131-145, doi:10.1093/gji/ggab093
- 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・日本材料学会*, 受理
- 太田雄策・木戸元之・本荘千枝・木村友季保・佐藤真樹子・鈴木秀市・東龍介・大園真子・青田裕樹・高橋浩晃・富田史章・飯沼卓史・篠原雅尚・日野亮太, 2021, GNSS-A 観測に基づく千島海溝根室沖における海底地殻変動の予備的結果, *日本地球惑星科学連合 2021 年大会*
- 岡田 知己・中山 貴史・平原 聡・立岩和也・堀内 茂木・勝俣 啓・大園 真子・小菅 正裕・前田 拓人・山中 佳子・片尾 浩・松島 健・八木原寛・2011 年東北地方太平洋沖地震緊急観測グループ, 2022, 東北地方中南部における臨時地震観測, *東北地域自然災害研究*, 58, 19-24
- Okada, Y., T. Nishimura, T. Tabei, T. Matsushima, and H. Hirose, 2022, Development of a detection method for short-term slow slip events using GNSS data and its application to the Nankai subduction zone, *Earth Planets Space*, doi:10.1186/s40623-022-01576-8
- Okamoto, A., H. Ishii, R. Oyanagi, and N. Tsuchiya, 2021a, Albite-K-feldspar-quartz equilibria in hydrothermal fluids at 400, 420° C and 20-35 MPa: Experimental measurements and thermodynamic calculations, *Geothermics*, 94, 102109, doi:10.1016/j.geothermics.2021.102109
- Okamoto, A., R. Oyanagi, K. Yoshida, M. Uno, H. Shimizu, and M. Satish-

- Kumar, 2021b, Rupture of wet mantle wedge by self-promoting carbonation, *Commun. Earth Environ.*, 2, 151, doi:10.1038/s43247-021-00224-5
- Okazaki, T., Fukahata, Y. & Nishimura, T., 2021, Consistent estimation of strain-rate fields from GNSS velocity data using basis function expansion with ABIC, *Earth Planets Space*, 73:153, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01474-5>.
- 大竹和機, 2022, 沈み込み帯の付加体構造を考慮した静的弾性応力場の計算 -XBIEM を用いて-, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻修士論文
- Oyanagi, R., A. Okamoto, M. Satish-Kumar, M. Minami, Y. Harigane, and K. Michibayashi, 2021, Hadal aragonite records venting of stagnant paleoseawater in the hydrated forearc mantle, *Commun. Earth Environ.*, 2, 243, doi:10.1038/s43247-021-00317-1
- Park, J.-O., N. Takahata, E. Jamali Hondori, A. Yamaguchi, T. Kagoshima, T. Tsuru, G. Fujie, Y. Sun, J. Ashi, M. Yamano, and Y. Sano, (2021), Mantle-derived helium released through the Japan trench bend-faults, *Sci. Rep.*, 11, 12026, doi:10.1038/s41598-021-91523-6
- Park, J.-O., T. Tsuru, G. Fujie, E. Jamali Hondori, T. Kagoshima, N. Takahata, D. Zhao, and Y. Sano, 2021, Seismic reflection images of possible mantle-fluid conduits and basal erosion in the 2011 Tohoku earthquake rupture area, *Front. Earth Sci.*, 9, 687382, doi:10.3389/feart.2021.687382
- Plata-Martinez, R., R. Ide, M. Shinohara, E. S. Garcia, N. Mizuno, L. A. Dominguez, T. Taira, Y. Yamashita, A. Toh, T. Yamada, J. Real, A. Husker, V. M. Cruz-Atienza, and Y. Ito, 2021, Shallow slow earthquakes to decipher future catastrophic earthquakes in the Guerrero seismic gap, *Nat. Commun.*, 12, doi:10.1038/s41467-021-24210-9
- Sawa, S., J. Muto, N. Miyajima, R. Shiraishi, M. Kido, and H. Nagahama, 2021, Strain localization bands in fine-grained aggregates of germanate olivine and pyroxene deformed by a Griggs type apparatus, *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sci.*, 104812, doi:10.1016/j.ijrmms.2021.104812
- Sawa, S., N. Miyajima, J. Muto, and H. Nagahama, 2021, Strain-induced partial serpentinization of germanate olivine with a small amount of water, *American Mineralogist*, 106, 11, doi:10.2138/am-2021-7735
- Sawaki, Y., Y. Ito, K. Ohta, T. Shibutani and T. Iwata, 2021, Seismological Structures on Bimodal Distribution of Deep Tectonic Tremor, *Geophys. Res. Lett.*, 48(8), e2020GL092183, doi:10.1029/2020gl092183
- 篠原雅尚・山田知朗・悪原岳・望月公廣・酒井慎一, 2021, 分散型音響センシング計測と三陸沖海底光ケーブル観測システムによる地震観測, *月刊地球*, 44, 37-43

- Shinohara, M., S. Sakai, T. Okada, H. Sato, Y. Yamashita, R. Hino, K. Mochizuki, and 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 Planets Space*, 74(5), doi:10.1186/s40623-021-01562-6
- Shinohara, M., T. Yamada, H. Shiobara, and Y. Yamashita, 2021, Development of a Compact Broadband Ocean Bottom Seismometer, *Seismol. Res. Lett.*, 92, 3610-3625, <https://doi.org/10.1785/0220210100>
- Shinohara, M., T. Yamada, K. Uehira, S. Sakai, H. Shiobara, and T. Kanazawa, 2021, Development and operation of an Ocean Bottom Cable Seismic and Tsunami observation system (OBCST) in the source region of the Tohoku-oki earthquake, *Earth Space Sci.*, doi:10.1029/2020EA001359, 2021
- Shiobara, H., A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara, and T. Sato, 2021, Tilt observations at the seafloor by mobile ocean bottom seismometers, *Front. Earth Sci.*, 8, 599810, doi:10.3389/feart.2020.5998102021
- 塩原肇・太田豊宣, 2021, 一高機能海底地震計開発試験に向けた一深海用加速度データロガーの開発, 東京大学地震研究所技術研究報告, 27
- Shiraishi, K., T. No, G. Fujie, in press, Seismic reflection imaging of deep crustal structures via reverse time migration using offshore wide-angle seismic data on the eastern margin of the Sea of Japan, *Earth Planets and Space*
- Shiraishi, K., T. Watanabe, 2021, Passive seismic reflection imaging based on acoustic and elastic reverse time migration without source information: theory and numerical simulations, *EXPLORATION GEOPHYSICS*, 1, doi:10.1080/08123985.2021.1917293
- Shiraishi, R., J. Muto, A. Tsunoda, S. Sawa, and A. Suzuki, 2022, Localized Deformation of Lawsonite during Cold Subduction, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2021JB022134
- Suhendro, I., A. Toramaru, T., Miyamoto, Y., Miyabuchi, T., Yamamoto, 2021, Magma chamber stratification of the 1815 Tambora caldera-forming eruption, *Bulletin of Volcanology*, 83, 1-20, <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01484-x>
- Sugiyama D, S. Tsuboi Y, Yukutake, 2021, Application of deep learning-based neural networks using theoretical seismograms as training data for locating earthquakes in the Hakone volcanic region, Japan, *Earth, Planets and Space*, 73:135, doi:10.1186/s40623-021-01461-w
- Tago, J., V. M. Cruz-Atienza, C. Villafuerte, T. Nishimura, V. Kostoglodov, J. Real, Y. Ito, 2021, Adjoint Slip Inversion under a Constrained Optimization Framework:

- Revisiting the 2006 Guerrero Slow Slip Event, *Geophys. J. Int.*, 226(2), 1187-1205, doi:10.1093/gji/ggab165
- Takahashi, T., Y. Kaiho, Y., Ishihara, K., Obana, S., Miura, S., Kodaira, Y., Kaneda, 2021, Trans-dimensional imaging of the random inhomogeneity structure in the southern Ryukyu arc, Japan, *Geophys J Int*, ggab518, 10.1093/gji/ggab518
- Tanaka, E., K. Yasukawa, K. Nakamura, J. Ohta, T. Miyazaki, B. Stefanov 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, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23, <https://doi.org/10.1029/2021GC009729>
- Tonegawa, T., T. Kimura, K. Shiraishi, S. Yabe, Y. Fukao, E. Araki, M. Kinoshita, Y. Sanada, S. Miura, Y. Nakamura, S. Kodaira, 2021, Weak faults at megathrust plate boundary respond to tidal stress, *Earth, Planets and Space*, 73, 89, 10.1186/s40623-021-01414-3
- Toyokuni, G., D. Zhao, 2021, P-wave tomography for 3-D radial and azimuthal anisotropy beneath Greenland and surrounding regions, *Earth Space Science*, 8, e2021EA001800
- Toyokuni, G., D. Zhao, K. Chen, 2021, Structural control on the 2018 and 2019 Hualien earthquakes in Taiwan, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 312, 106673
- Tsuchiyama A., J. Nakajima, 2021, Diversity of deep earthquakes with waveform similarity, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 314, 106695, doi:10.1016/j.pepi.2021.106695
- Uno, M., K. Koyanagawa, H. Kasahara, A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 2022, Volatile-consuming reactions fracture rocks and self-accelerate fluid flow in the lithosphere, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 119, e2110776118, doi:10.1073/pnas.2110776118
- Usui, Y., M. Uyeshima, T. Ogawa, R. Yoshimura, N. Oshiman, S. Yamaguchi, H. Toh, H. Murakami, K. Aizawa, T. Tanbo, Y. Ogawa, T. Nishitani, S. Sakanaka, M. Mishina, H. Satoh, T. Goto, T. Ksaya, T. Mogi, Y. Yamaya, I. Shiozaki, Y. Honkura, 2021, Electrical resistivity structure around the Atotsugawa fault, central Japan, revealed by a new 2-D inversion method combining Wideband - MT and Network - MT datasets, *J. Geophys. Res. : Solid Earth*, 126, doi:10.1029/2020JB020904
- Victor Levy dit Vehel , T. Hatano , L. Vanel , K. J. Måløy , O. Ramos, 2021, Dilation as a precursor in a continuous granular fault, *EPJ Web of Conferences*, 249, 15006, 10.1051/epjconf/202124915006
- Villar-Muñoz, L., M. Kinoshita, J. P. Bento, I. Vargas-Cordero, E. Contreras-Reyes, U. Tinivella, M. Giustiniani, N. Abe, R. Anma, Y. Orihashi, H. Iwamori, T. Nishikawa, E. Andres Veloso & S. Haraguchi, 2021, A cold seep triggered by a hot ridge subduction, *Scientific Reports*, 11, 10.1038/s41598-021-00414-3

- Wang, Q.-Y., M. Campillo, F. Brenguier, A. Lecointre, T. Takeda, and K. Yoshida, 2021, Seismic evidence of fluid migration in northeastern Japan after the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 563, 116894 - 116894, doi:10.1016/j.epsl.2021.116894
- Wang, Z. W., D. Zhao, and X. Chen, 2022, Seismic anisotropy and intraslab hydrated faults beneath the NE Japan forearc, *Geophysical Research Letters*, 49, e2021, doi:10.1029/2021GL097266
- 渡邊俊一, 2021, 海洋情報部における 2011 年から 2020 年にかけての GNSS-A 海底地殻変動観測の発展と成果, *海洋情報部研究報告*, 59, 95-114
- Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Nakamura and Y. Yokota, 2021, Co- and postseismic slip behaviors extracted from decadal seafloor geodesy after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Earth, Planets and Space*, 73, 162, 10.1186/s40623-021-01487-0
- Yamashita, Y., M. Shinohara, T. Yamada, 2021, Shallow tectonic tremor activities in Hyuga-nada, Nankai subduction zone, based on long-term broadband ocean bottom seismic observations, *Earth, Planets and Space*, 73(1), 196, doi:10.1186/s40623-021-01533-x
- Yamashita, S., Y. Yagi, R. Okuwaki, K. Shimizu, R. Agata, Y. Fukahata, 2021, Consecutive ruptures on a complex conjugate fault system during the 2018 Gulf of Alaska earthquake, *Scientific Reports*, 11:5979, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85522-w>
- 山本有人・相澤広記・村松弾・安仁屋智・田辺暖終・若林翌馬・藤田詩織・志藤あずさ・小山崇夫, 2021, 別府地熱地帯の比抵抗構造から推定する流体の移動経路, *Conductivity Anomaly 研究会論文集*, 36-37, [http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/CA/2021/Yamamoto\\_et\\_al\\_CA2021.pdf](http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/CA/2021/Yamamoto_et_al_CA2021.pdf)
- Yamaya, Y., Y. Suzuki, Y. Murata, K. Okamoto, N. Watanabe, H. Asanuma, H. Hase, Y. Ogawa, T. Mogi, K. Ishizu, T. Uchida, submitted, 3-D resistivity imaging of the supercritical geothermal system in Sengan geothermal region, NE Japan, *Earth and Space Science Open Archive*, doi:10.1002/essoar.10509292.1
- Yarce, J., A. Sheehan, S. Roecker, and K. Mochizuki, 2021, Seismic Velocity Heterogeneity of the Hikurangi Subduction Margin, New Zealand: Elevated Pore Pressures in a Region with Repeating Slow Slip Events, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, doi:10.1029/2020JB021605
- Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe and Y. Nakamura, 2021, Crustal deformation detection capability of the GNSS-A seafloor geodetic observation array (SGO-A), provided by Japan Coast Guard, *Progress in Earth and Planetary Science*, 8, 63, 10.1186/s40645-021-00453-4



- 吉田圭佑, 2021, 地殻深部から上昇する流体が地震の発生に及ぼす影響の研究 -2011年東北地方太平洋沖地震に誘発された地震活動による拘束-, 地震 2, doi:10.4294/zisin.2020-20
- Yoshida, K., H. Noda, M. Nakatani, and B. Shibazaki, submitted, Backward earthquake ruptures far ahead of fluid invasion: Insights from dynamic earthquake-sequence simulations, *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2021.229038
- 行竹洋平・萬年一剛, 2021, 水蒸気噴火の発生場と噴火過程の観測—最近の進展と今後の展望—, 地学雑誌, 130, 731-753, doi:10.5026/jgeography.130.731
- Yukutake, Y., Y. Abe, R. Honda, S. Sakai, 2021, Magma reservoir and magmatic feeding system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structure, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2020JB021236, doi:10.1029/2020JB021236
- Zhao, D., Y. Hua, 2021, Anisotropic tomography of the Cascadia subduction zone, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 318, 106767

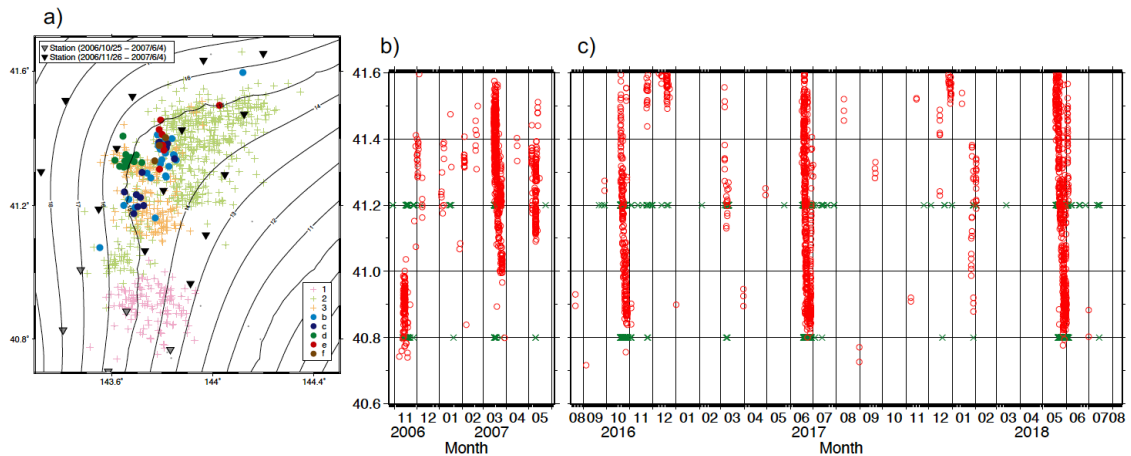


図 1. 日本海溝-千島海溝会合部におけるテクトニック微動活動。(a)2006~2007年の観測で検知された微動の震央分布。3期の顕著な活動エピソード(1~3)と高頻度小規模活動(b~f)が認められた。(b)2006~2007年の微動活動の時空間分布。緑×はBaba et al. (2020)によるVLFE。(c)2016~2018年の微動活動(Nishikawa et al., 2019)の時空間分布(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_05])。

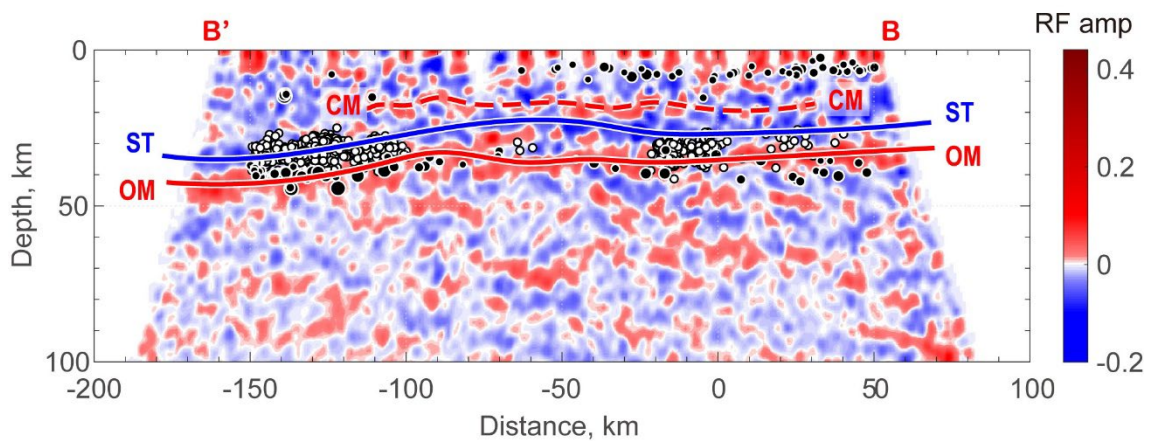


図 2. 徳島-西予測線でのレシーバ関数イメージ  
Bが徳島市側、B'が愛媛県西予市側。STはスラブ上面、OMは海洋モホ、CMは大陸モホを示す。黒丸は通常地震、白丸は深部低周波地震を示す(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI02])。

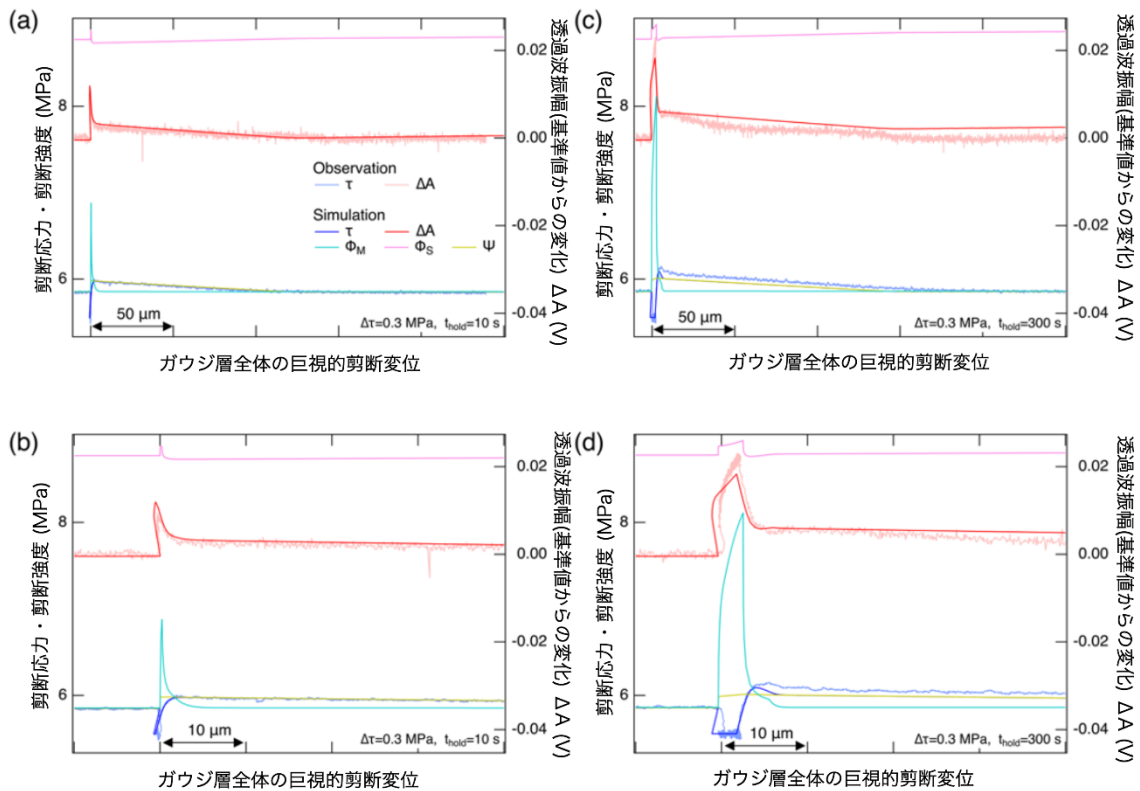


図3. 初期層厚 1mm の実験における Slide-hold-slide 試験の結果と再現シミュレーション結果の比較例 (永田ら、私信)。実験で観察された剪断応力  $\tau$ 、透過振幅変化  $\Delta A$  と、シミュレーションによる  $\tau$ 、 $\Delta A$  に加え、シミュレーションによるエイジングによる主断層及び副断層の強度  $\Phi_M$ 、 $\Phi_S$ 、圧密効果による強度  $\psi$  を示す。横軸はガウジ層全体の巨視的相対変位。Hold 後再載荷開始時の変位を揃えている。(a)エイジング効果によると思われる剪断応力ピークが現れない例。(b) (a)中の hold 前後の拡大。(c)エイジング効果によると思われる剪断応力ピークが現れる例。(d) (c)中の hold 前後の拡大 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_06])。

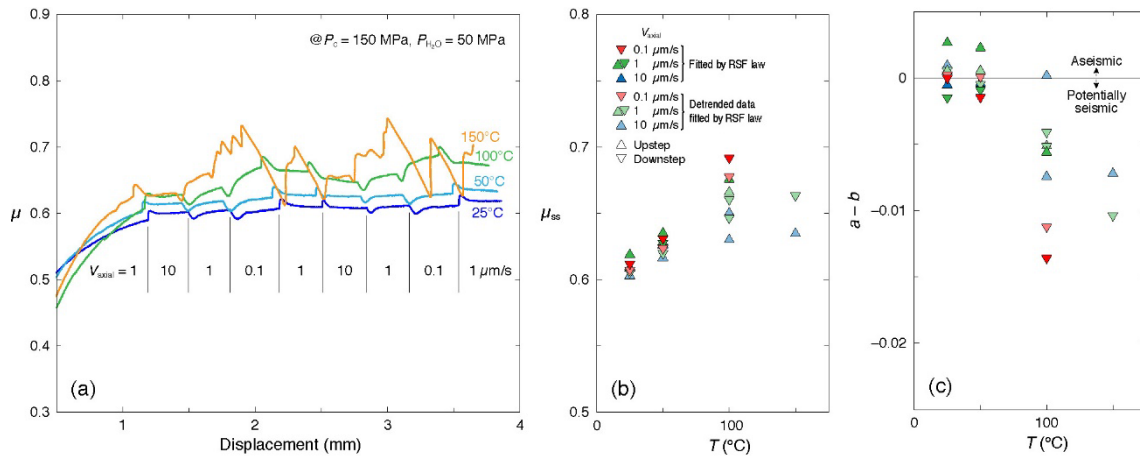


図 4. (a) オパールガウジの変位速度急変摩擦実験結果。(b) 定常摩擦係数の温度変化。(c)  $a - b$  値の温度変化。 $\mu$ : 摩擦係数,  $\mu_{ss}$ : 定常摩擦係数,  $T$ : 温度,  $V_{axial}$ : 軸方向変位速度,  $P_c$ : 封圧,  $P_{H_2O}$ : 間隙水圧, RSF law: 変位速度・状態依存摩擦構成則 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_05])。

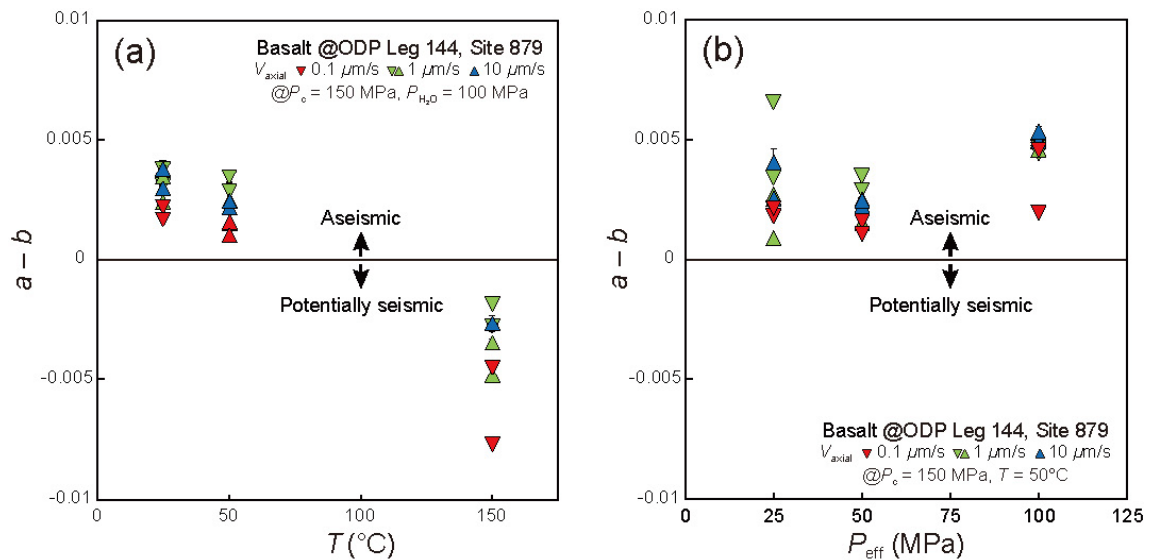


図 5. 武岩の変位速度急変摩擦実験から得られた  $a - b$  値の温度依存性 (a) および有効圧依存性 (b)。 $V_{axial}$ : 軸方向変位速度,  $T$ : 温度,  $P_c$ : 封圧,  $P_{H_2O}$ : 間隙水圧,  $P_{eff}$ : 有効圧 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_05])。

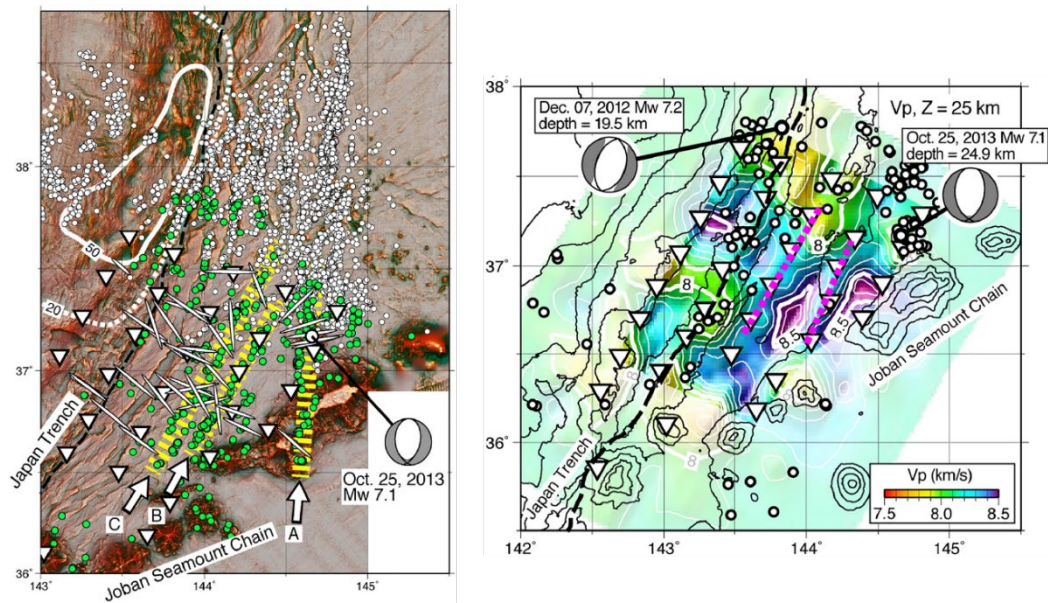


図 6. (左) 宮城県沖アウターライズ域の地震震央分布。緑丸と白丸はそれぞれ Obana et al. (2021) と Obana et al. (2019) による深さ 14 km 以浅の地震の震央。白矢印と黄色の帯は、主要な地震列。 (右) 深さ 25 km での海洋マントル内 P 波速度分布 (Obana et al., 2021)。マゼンタは地震活動の低調かつ低 P 波速度の領域。白丸は深さ 20~30 km の地震の震央 (東北大学理学研究科 [課題番号: THK\_06])。

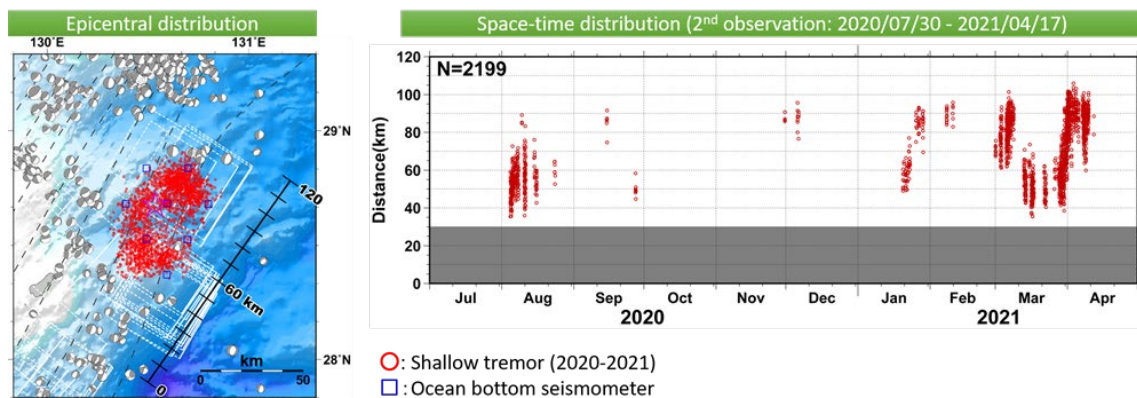


図 7. 浅部微動の震央分布と時空間分布。震源決定された浅部微動を赤○で示す。震央分布図の□は第 2 期観測の LOBS 観測点である。また F-net の MT 解を重ねて示した (鹿児島大学 [課題番号: KGSM01])。

Site name	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Velocity (cm/yr) (deg)	Period	Data	Update
(1) KAMN	38.89	143.36	4.3 282.3	08/19/2017 - 08/21/2021	10	*
(2) KAMS	38.64	143.26	5.9 291.1	08/19/2017 - 08/22/2021	12	*
(3) MYGI	38.08	142.92	5.7 278.0	08/19/2017 - 08/22/2021	15	*
(4) MYGW	38.15	142.43	0.6 217.1	08/18/2017 - 08/21/2021	16	*
(5) FUKU	37.17	142.08	1.8 147.7	08/18/2017 - 08/20/2021	16	*
(6) CHOS	35.50	141.67	1.2 268.1	08/23/2017 - 08/23/2021	13	*
(7) BOSN	34.75	140.50	1.3 323.4	08/02/2017 - 08/19/2021	14	*
(8) SAGA	34.96	139.26	4.0 5.1	08/02/2017 - 06/19/2021	16	*
GEONET				08/23/2017 - 08/23/2021		

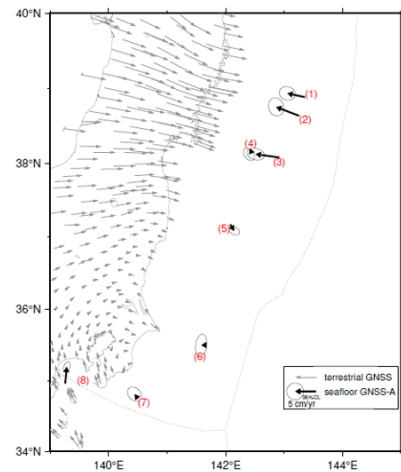


図 8. 日本海溝沿いの直近約 4 年間の水平移動速度。北米プレート固定 (海上保安庁 [課題番号: JCG\_03])。

Site name	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Velocity (cm/yr) (deg)	Period	Data	Update
(9) TOK1	34.08	138.13	1.9 290.5	11/19/2017 - 10/11/2021	19	*
(10) TOK2	33.88	137.60	3.5 299.6	11/19/2017 - 11/17/2021	19	*
(11) TOK3	34.18	137.39	4.7 297.8	11/18/2017 - 07/05/2021	16	*
(12) ZENW	33.09	137.55	- -	02/20/2020 - 07/06/2021	6	*
(13) KUM1	33.67	137.00	4.0 291.8	11/18/2017 - 11/16/2021	21	*
(14) KUM2	33.43	136.67	3.1 316.9	11/17/2017 - 10/12/2021	22	*
(15) KUM3	33.33	136.36	3.7 295.0	11/17/2017 - 09/13/2021	22	*
(16) KUM4	33.08	136.64	- -	02/21/2020 - 09/13/2021	8	*
(17) SLOW	33.16	135.57	3.4 309.3	11/17/2017 - 09/14/2021	21	*
(18) SIO2	32.98	135.99	- -	03/18/2020 - 09/14/2021	8	*
(19) MRT1	33.35	134.94	4.9 300.4	07/31/2017 - 07/03/2021	21	*
(20) MRT2	32.87	134.81	3.3 289.0	11/16/2017 - 11/16/2021	26	*
(21) MRT3	32.80	135.35	- -	08/10/2019 - 09/15/2021	10	*
(22) TOS1	32.82	133.67	5.0 307.6	11/15/2017 - 11/15/2021	19	*
(23) TOS2	32.43	134.03	5.9 299.3	11/13/2017 - 11/15/2021	19	*
(24) ASZ1	32.37	133.22	5.8 307.5	11/14/2017 - 09/16/2021	19	*
(25) ASZ2	31.93	133.58	4.5 303.1	06/19/2017 - 06/27/2021	18	*
(26) HYG1	32.38	132.42	3.0 290.2	11/15/2017 - 11/14/2021	19	*
(27) HYG2	31.97	132.49	2.4 299.1	11/14/2017 - 11/14/2021	21	*
GEONET				11/17/2017 - 11/17/2021		

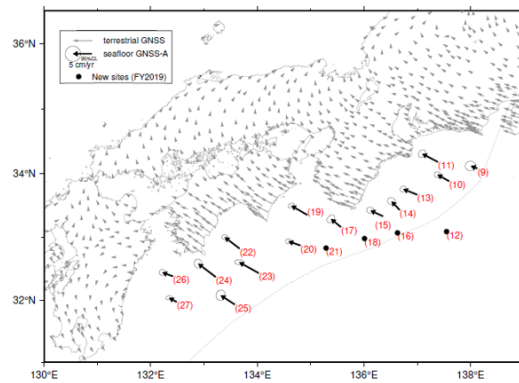


図 9. 南海トラフ沿いの直近約 4 年間の水平移動速度。アムールプレート固定 (海上保安庁 [課題番号: JCG\_03])。

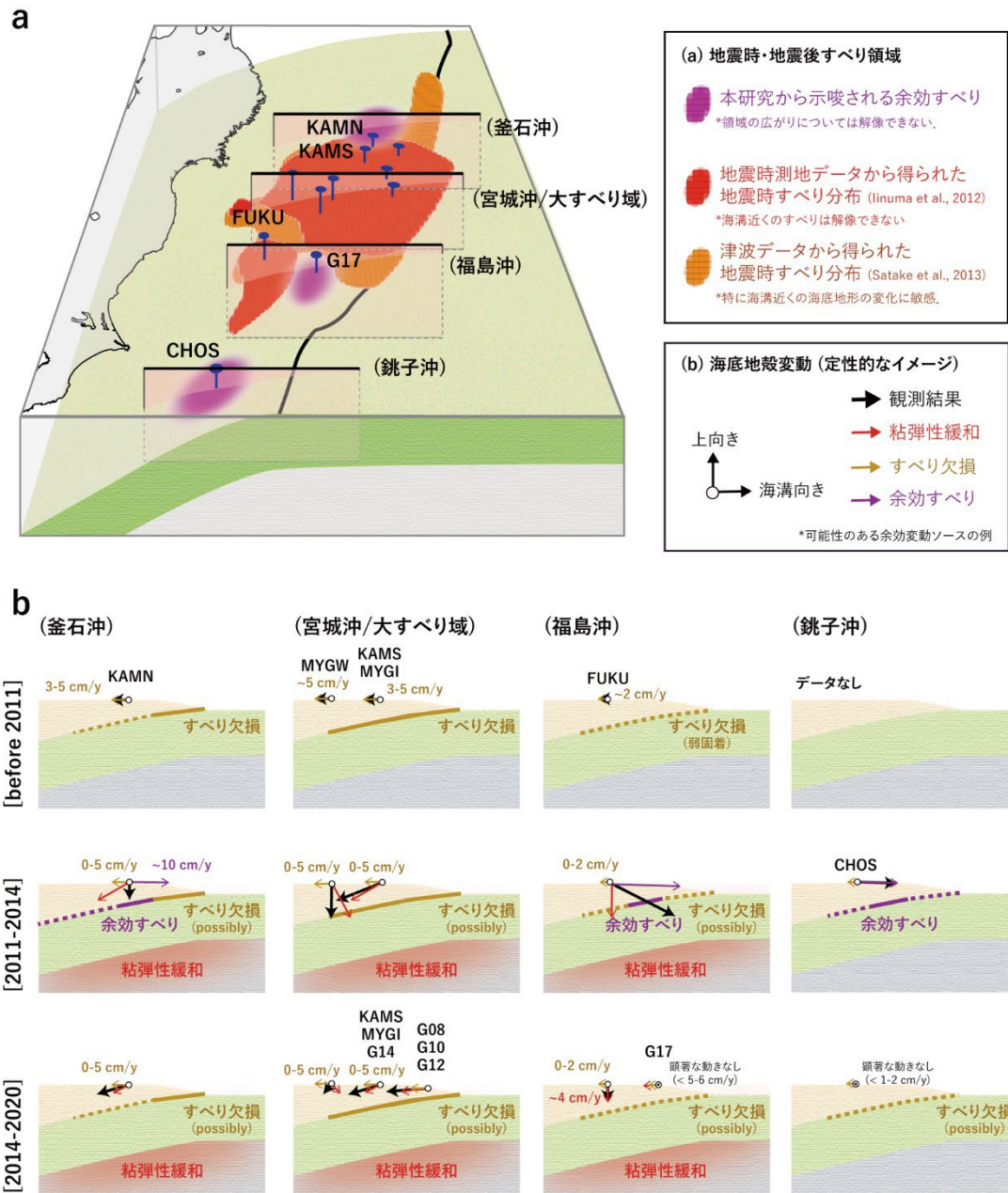


図 10. 海底下にある地殻変動ソースの模式図。(a) プレート境界でのすべり領域のイメージ、(b) 各地殻変動ソースが各 GNSS-A 観測点に与える影響として考えられるもの。凡例は図中を参照のこと (海上保安庁 [課題番号: JCG\_03])。

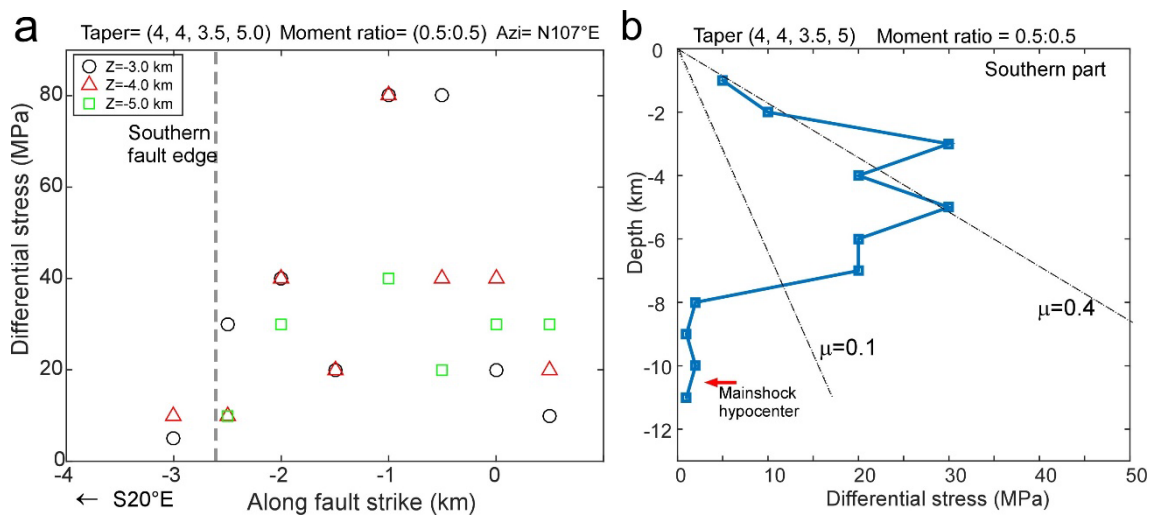


図 11. 地震前の差応力の大きさのプロファイル

a) 南端付近における断層に沿う方向の差応力の空間変化。b) 南端付近における深さ方向の差応力の空間変化。一元化震源による本震の深さが示されている。 $\mu=0.1, 0.4$ の点線は、それぞれの摩擦係数に対応する最もすべりやすい断層に加わる差応力の計算値 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI03])。



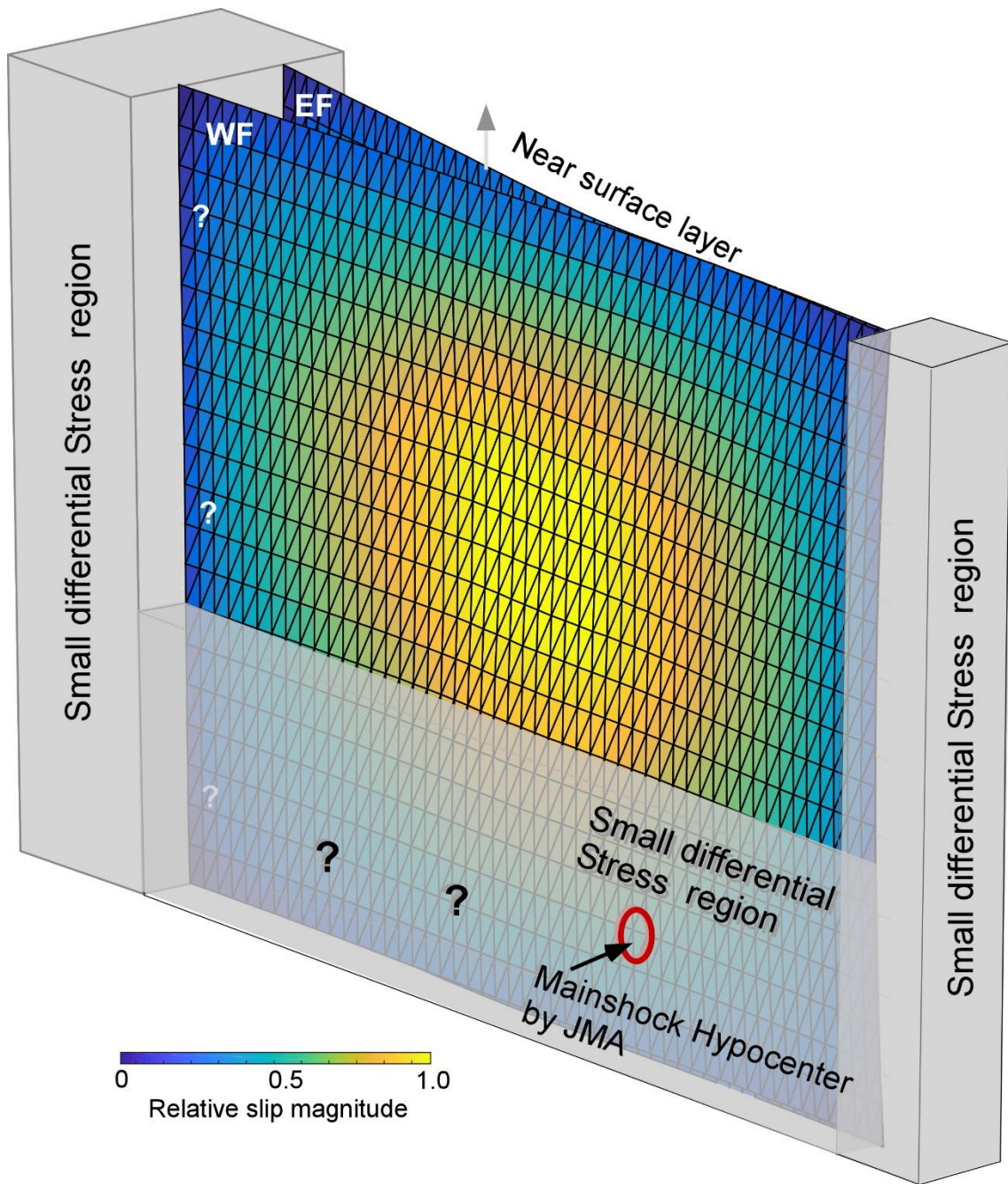


図 12. 鳥取県中部の地震の断層付近の低差応力の領域の模式図（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI03]）。

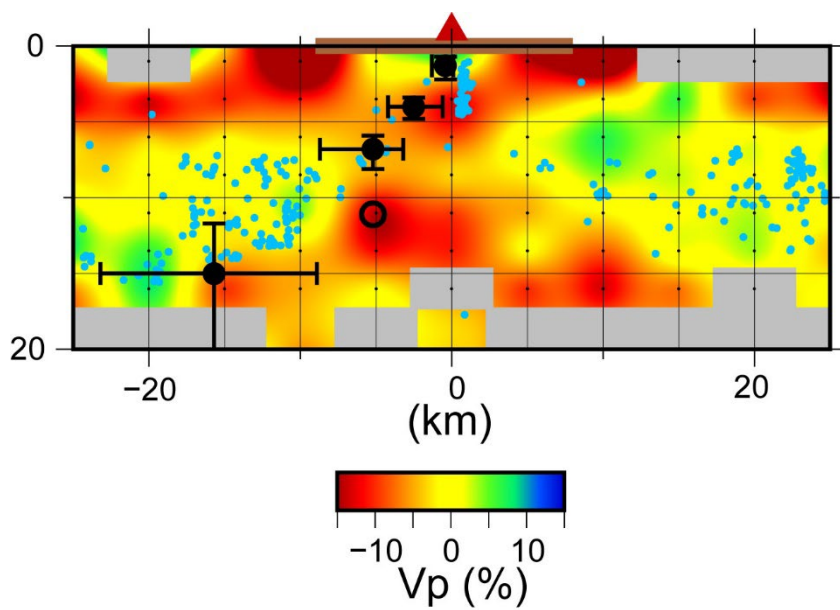


図 13. 雲仙火山の地震波速度構造 ( $V_p$ ) 東西断面 (Miyano et al., 2021 より抜粋)。黒丸は水準測量と GNSS 観測による 1990–1995 年噴火時の圧力源 (Kohno et al., 2004)。白丸は GNSS 観測による圧力源 (Nishi et al., 1999) (九州大学[課題番号:KYU\_01])。

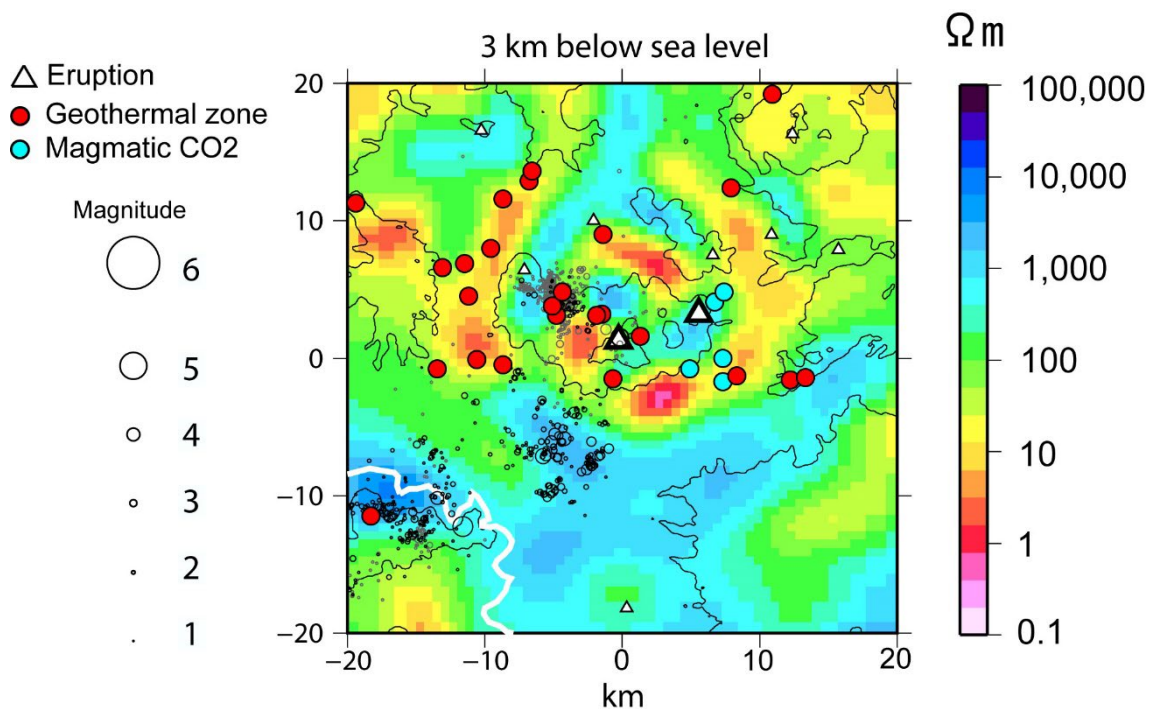


図 14. 九重火山の海拔下 3 km の比抵抗断面 (Aizawa et al. 2022 より抜粋)。火口、地熱地帯、炭酸水は低比抵抗領域の中心ではなく端部に分布している (九州大学 [課題番号: KYU\_01])。

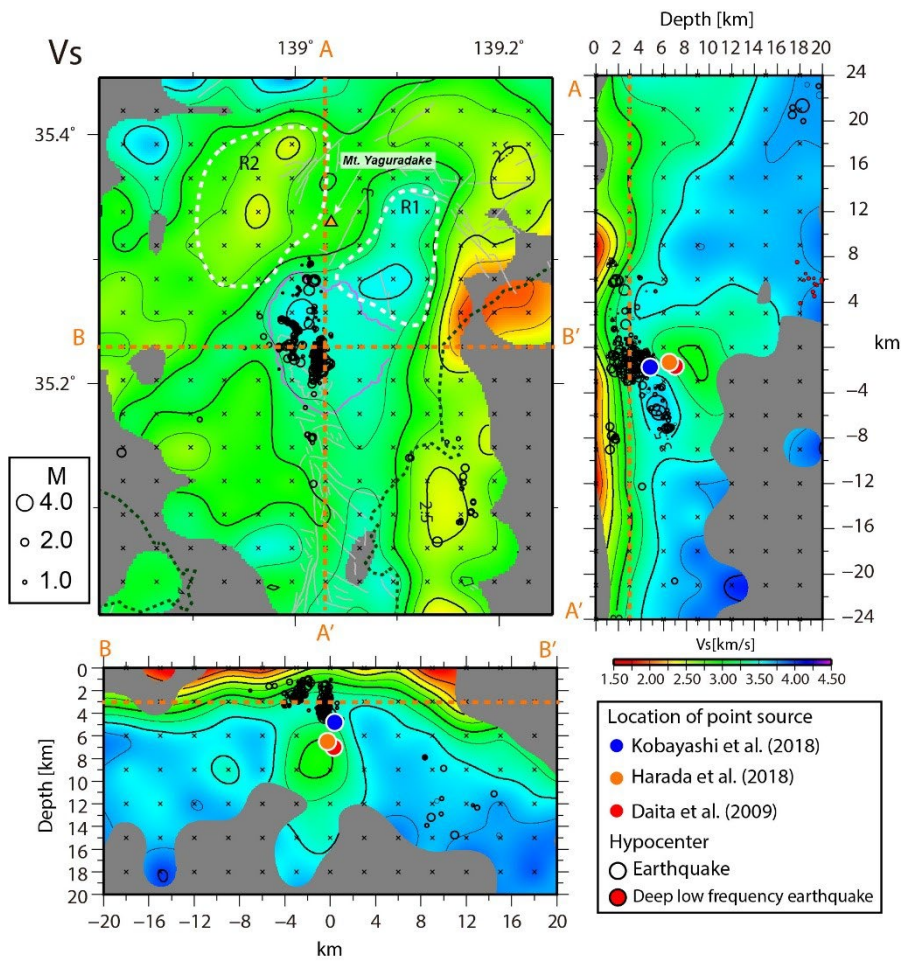


図 15. 箱根火山及び周辺域の S 波速度構造。中央図は深さ 3km における速度構造を、右及び下図は中央火口丘を南北及び東西に通る断面上に投影した速度構造を示す。黒丸は構造成地震の震源位置を、青丸・オレンジ丸・赤丸は GNSS データにより推定された圧力源の位置を示す（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI04]）。

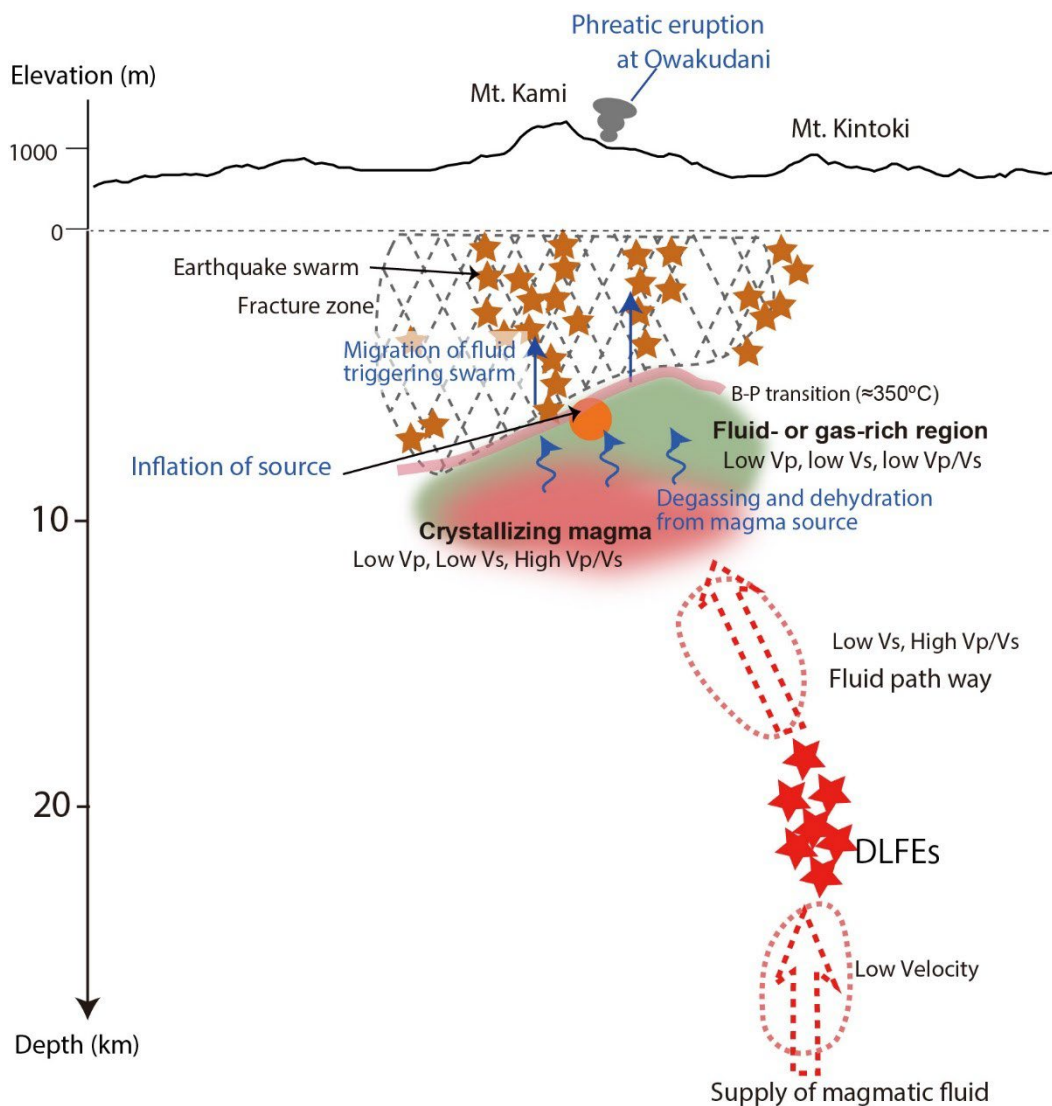
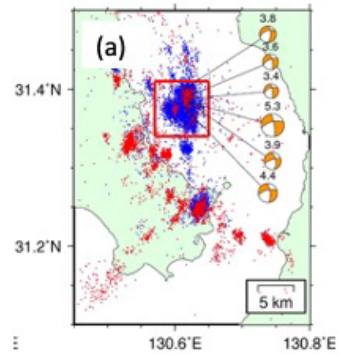


図 16. 地殻構造、構造的な地震や深部低周波地震の活動、地殻変動の分布から推察された、箱根火山下でのマグマ供給過程を示す模式図（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI04]）。



[Matsumoto et al., 2021]

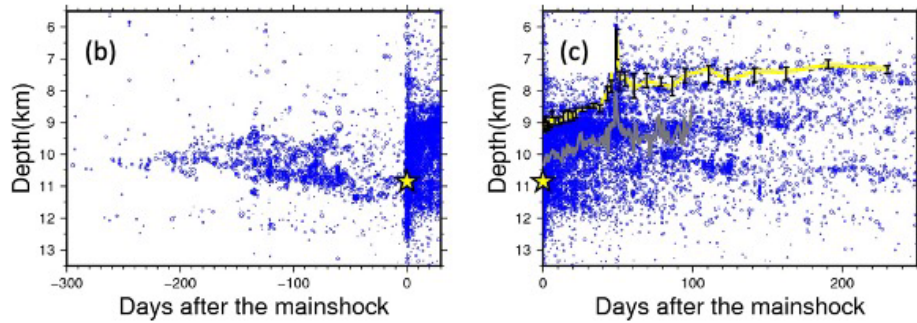


図 17. 2017 年鹿児島湾の地震の震源分布。(a) 2017 年鹿児島湾の地震の震源分布 (2003. 1. 1-2018. 8. 8)。赤・青はそれぞれ前震・余震を示す。赤の四角は震源域を示す。発震機構解 (数字はマグニチュード) を合わせて示す。(b) 震源の時間一深さ分布。星は本震を示す。(c) 余震の時間一深さ分布。黄色の線は 400 地震毎に浅いほうから 10% の地震の深さを示す。黒のエラーバーは 95%信頼区間を示す。灰色の線は 100 日間 1 日毎のすべての余震の平均の深さを示す (東北大学 [課題番号: THK\_07])。

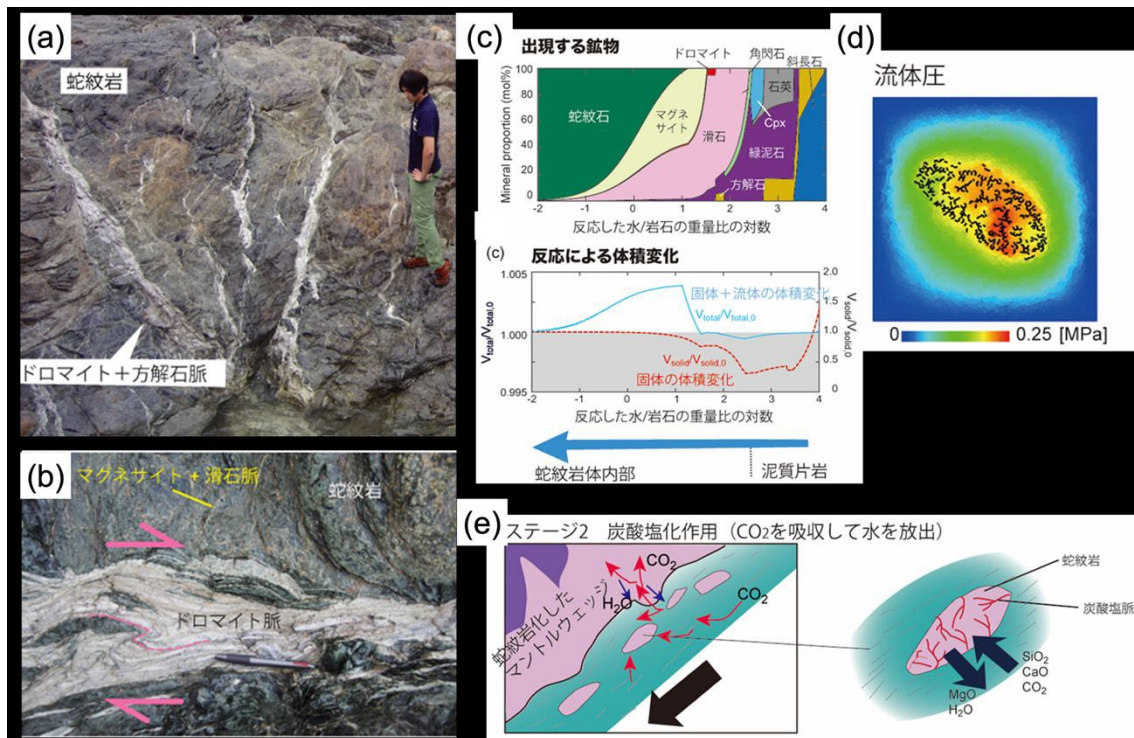


図 18. マントルウェッジ蛇紋岩の炭酸塩化 (三波川変成帯; Okamoto et al., 2021b)。(a, b) 蛇紋岩体中の炭酸塩脈の産状。(a) 蛇紋岩を切って発達する炭酸塩脈のネットワーク (ドロマイト:  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , 方解石:  $\text{CaCO}_3$ )。(b) 炭酸塩脈の構造は脈形成後にせん断変形を受けている。(c) 岩石-流体平衡計算の結果。炭酸塩(マグネサイト  $\text{MgCO}_3$ )の生成に伴い、流体が発生し、固体+流体の体積が増加していることがわかる。(d) 離散要素法を用いた模式的な炭酸塩化反応によるき裂形成と流体圧の変化。(e) マントルウェッジでの炭酸塩化作用の模式図。蛇紋岩化したマントルウェッジは  $\text{CO}_2$  流体が流入すると脱水しながら、局所的に炭酸塩化反応が進行する。この反応はき裂を作りながら自己促進的に進行する。マントルウェッジの一部は変成岩の中に取り込まれ、本岩体のように変成帯の一部として上昇する (東北大学 [課題番号: THK\_02])。

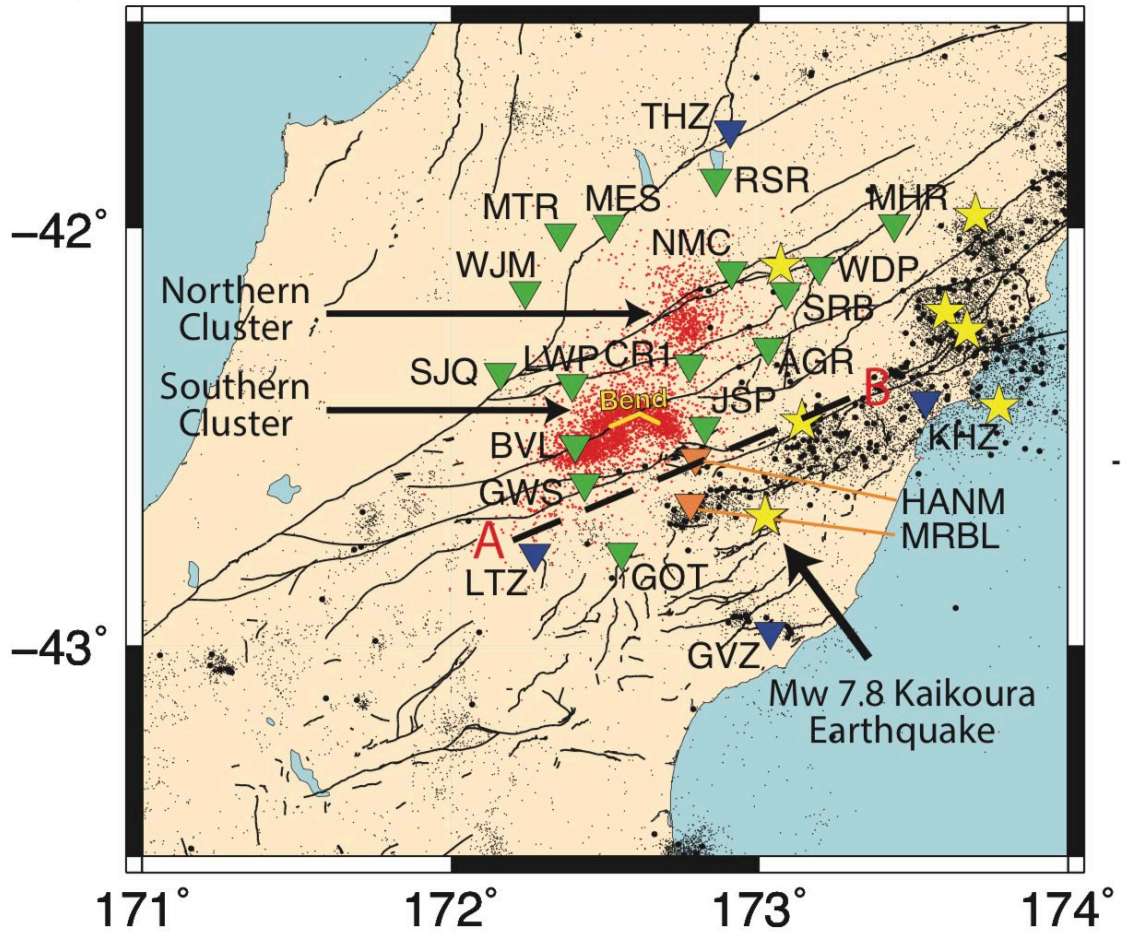


図 19. ニュージーランド南島北中部における微動分布 (2013 年～2019 年)。赤点が微動を示す。黄色星・黒点・灰色点はそれぞれ Mw6 以上、4 以上、4 以下の通常の地震を示す。赤・青・緑の逆三角はそれぞれ、GNSS の定常観測点、地震の定常観測点、地震の臨時観測点を示す (東北大学 [課題番号: THK\_01])。