

[ 参 考 資 料 ]

## II. 計画推進部会および総合研究グループ等別の成果

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（第2次）」（建議）に示された実施内容について、令和2年度の成果を計画推進部会および総合研究グループ等別に学術報告として取りまとめた。

この報告は、地震・噴火予知研究協議会<sup>1)</sup>に設置された8の計画推進部会と分野横断で取り組む総合研究を推進する体制として5の総合研究グループ、及び地震火山観測研究を災害研究に結びつけるための共同研究を実施する東京大学地震研究所と京都大学防災研究所の拠点間連携委員会<sup>2)</sup>の責任で編集したものである。

この報告に基づいて、難解な学術用語をなるべく言い換え、平易な文章で表現して書き直したものが、本編の「令和元年度の成果の概要」である。本編の「令和元年度の成果の概要」の内容について、さらに詳細を知りたい場合、原著論文を参照したい場合には、以下の報告をご参照いただきたい。

### ○東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会

「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（東北大学大学院理学研究科）
「地震（長期予測）」計画推進部会長	西村卓也（京都大学防災研究所）
副部会長	宍倉正展（産業技術総合研究所）
「地震（中短期予測）」計画推進部会長	中谷正生（東京大学地震研究所）
副部会長	内田直希（東北大学大学院理学研究科）
「火山」計画推進部会長	中道治久（京都大学防災研究所）
副部会長	前野 深（東京大学地震研究所）
「災害誘因評価・即時予測」計画推進部会長	太田雄策（東北大学大学院理学研究科）
副部会長	三宅弘恵（東京大学地震研究所）
「防災リテラシー」計画推進部会長	高橋 誠（名古屋大学大学院環境学研究科）
副部会長	木村玲欧（兵庫県立大学環境人間学部）
「史料・考古」計画推進部会長	榎原雅治（東京大学史料編纂所）
副部会長	加納靖之（東京大学地震研究所）
「観測研究基盤」計画推進部会長	鶴岡 弘（東京大学地震研究所）
副部会長	青山 裕（北海道大学大学院理学研究院）
「南海トラフ沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー	伊藤喜宏（京都大学防災研究所）
「首都直下地震」総合研究グループリーダー	酒井慎一（東京大学地震研究所）
「千島海溝沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー	高橋浩晃（北海道大学大学院理学研究院）
「桜島大規模火山噴火」総合研究グループリーダー	井口正人（京都大学防災研究所）
「高リスク小規模火山噴火」総合研究グループリーダー	大湊隆雄（東京大学地震研究所）

### ○東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会

委員長	松島信一（京都大学防災研究所）
副委員長	市村 強（東京大学地震研究所）

- 
- 1) 東京大学地震研究所には、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画で立案された研究を推進することを目的に設立された地震・火山噴火予知研究協議会がある。ここでは、本観測研究計画に参加する全国の大学等が連携し、研究機関と協力しながら研究を推進している。また、科学技術・学術審議会測地分科会地震火山観測研究計画部会では、大学、研究機関、行政機関が連携して計画の推進を図っている。地震・火山噴火予知研究協議会には、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の、効率的かつ調和的な実施を推進するために、8の計画推進部会と5の総合研究グループが設置されている。
  - 2) 「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所は、地震や火山噴火の現象解明・予測の研究成果を災害軽減につなげるための組織的な共同研究を実施するために、拠点間連携共同研究委員会を設置している。

## 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、火山噴火及びこれらによる災害を科学的に解明することにより、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、どこで、いつ、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

#### （1）地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

##### ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

日本海溝に沿った約250kmの範囲で取得された海底堆積層コアから、2011年の東北地方太平洋沖地震の影響を放射性同位体元素の濃縮度から特定した（海洋開発研究機構[課題番号：JAMS02]）。地震時に形成された音響的に透明で均質な層は、通常起こる高周波の地震動、および上盤プレートの物性に起因する低周波かつ長時間の地震動に関連して堆積した可能性を明らかにした。また、琉球海溝における海底堆積物の解釈を目的として、水深6,147 mから採取したコアに対して解析を行った。XRFコアスキャナーによる1 mm間隔の化学組成データから、36枚のタービダイトを識別した。さらに、Zr/Rbピークが主に粒径を反映すること、半遠洋性泥はタービダイトに比べて全有機炭素と全窒素の含有量がやや高いという特徴、また磁気測定結果から、台湾からの堆積物の供給が高い時期があった可能性があることを明らかにした。

#### （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発生履歴、規模、場所の解明は重要な課題である。2011年東北地方太平洋沖地震発生域周辺の地震波構造調査の結果から、非常に大きな浅部滑りがあった箇所は反射断面には逆断層とそれによる変形構造が見られ、浅部滑りが小さかった場所にはそのような構造は見られないこと、さらに主破壊域北側海溝軸付近で報告されている津波波源域では海溝軸陸側の海底で斜面崩壊が認められることがわかった（海洋開発研究機構[課題番号：JAMS02]）。沈み込み帯浅部の構造的な特徴は、巨大地震の浅部滑りと関連している可能性があることを示唆していると考えられる。

17世紀に超巨大地震が発生し、近い将来にも巨大地震が発生する可能性がある千島海

溝根室沖で実施された地震波構造調査のデータを用いて、走時トモグラフィ解析を行った（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_05]）。海溝軸周辺に海底地震計を展開することにより、先行研究より陸側プレート最前縁部の構造モデルの分解能が改善され、断層すべりが海溝軸まで達した、日本海溝北部に類似した低  $V_p$  の堆積物ウェッジが存在することが明らかとなった。このウェッジの分布が、17 世紀超巨大地震の津波堆積物分布を再現するためのモデルに設定された海溝沿いの断層の位置と概ね対応することがわかった（図 1）。

この構造調査と同じ根室沖の海域にて、GNSS/A (GPS/A) 観測が実施された。2 回の測距の結果を比較すると、いずれの観測点においても 9cm/a 以上の速度で北西に変位していることを示す結果となった（図 2）（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_05]、東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID02]）。根室沖に設置した 3 箇所の GNSS-A 観測点（G21, G22, G23）のうち、プレート運動より大きな速度となった G21 では誤差が大きいものと見られる一方で、太平洋プレート上に設置した G23 はプレート運動に近い速度が得られ、G22 からは全体としての強い固着が覗われる結果となった。上下変位速度については、中心海底局設置によって大幅な精度の向上が確認できたが、現段階では固着について言及できる精度ではない。観測データがもつ誤差を考慮すると、今後同様の観測を継続することで、プレート境界浅部における固着状態を明らかにすることが期待できる。

一方、日本海溝沿い、および南海トラフ沿いの海溝型地震震源域海底においても、GNSS-A による地殻変動観測を継続している（海上保安庁[課題番号：JCG\_03]）。日本海溝沿いでは、東北地方太平洋沖地震の余効変動が続いていることが明らかとなり（図 3）、南海トラフ沿いでは、プレート境界固着の影響による地殻変動がとらえられている（図 4）。観測データ誤差の共分散項の導入や事前分布を制御するハイパーパラメータを ABIC で選択するなど、統計学的に適切な手法を用いることで、GNSS-A の最大の誤差要因である音速変動を適切に推定することを可能とした。一方、観測の効率化に向け、海上における測量船の観測範囲及び海底局アレイのサイズが測位精度に与える影響についてシミュレーションによる検証を行った結果、これまでの観測アレイのサイズが最適であることが確認された。このように海底地殻変動観測の高度化を進めており、大地震発生ポテンシャルの把握に向けた海域下プレート境界における固着状況のモニタリングが可能になりつつある。

低頻度大規模地震は国内での発生回数も限られるため、このような地震を理解するためには海外での観測も重要である。メキシコ・ゲレロ州沖合で回収された地震計記録を解析し、微小地震活動および低周波微動の分布を求め、海底地形（残差地形）と比較した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]）。結果として、ゲレロ空白域内の浅部プレート境界の一部では、通常地震や低周波微動のいずれも発生しない領域が存在し、これらの領域はプレート境界面上の窪みに起因すると考えられる残差地形の負の領域に対応することが分かった。この窪地に蓄積して沈み込む海洋性堆積物がゲレロ地震空白域の要因となっている可能性が考えられる。

また、1964 年 3 月 27 日に Mw9.2 の巨大地震が発生したアラスカにおいては、アラスカ南部地域の地殻および上部マントルの地震波速度とポアソン比の 3 次元微細構造を明らかにし、2018 年 11 月 30 日に起こった Anchorage 地震 (Mw7.1) と 1964 年アラスカ巨大地震の震源域の構造と発生メカニズムについて調べた（東北大学[課題番号：THK\_05]）。

その結果、2018年 Anchorage 地震 (Mw 7.1) は沈み込んでいる太平洋スラブの中で起こった正断層型の地震であったことがわかった。震源の上下に顕著な低速度・高ポアソン比の異常体が存在し、スラブの脱水による流体を反映するものと考えられる。一方、1964年 アラスカ巨大地震 (Mw9.2) の震源は megathrust zone における構造の急変部に位置し、震源真上の北米プレートに顕著な高ポアソン比の異常体が存在することがわかった。太平洋スラブの脱水と震源域の構造不均質がこれらの大地震の発生に影響を及ぼしたと考えられる。

海陸地殻変動観測に加え衛星による重力観測のデータの利用も視野に入れた広域粘弾性変形モデルを構築し、低頻度の巨大地震発生サイクルにおける地殻変動のふるまいを理解するための理論的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\_02])。M9 規模の矩形断層が引き起こす地震時の弾性変形について、半無限モデル (Okada) と球体モデル (PREM) に対するフォワードモデリングを行った結果、震央付近から最大変位が生じる地点までの変動量はほぼ一致するものの、その外側 (海溝側、陸側) では半無限モデルの振幅が非常に大きくなることが分かった。また、球モデルにおいて弾性定数の水平不均質を考慮して地震時の弾性変形を計算する手法を開発した。2次元モデルにおける予備的な計算を行ったところ、震源での弾性定数の水平不均質の効果が大きいことが分かった。

### (3) 地震発生過程の解明とモデル化

#### ア. 地震発生機構の解明

日本海溝に沈み込む海洋プレートの基盤岩から被覆層堆積物までの試料について、日本海溝沈み込み帯浅部の温度・封圧・間隙水圧条件下で三軸摩擦実験を行い、摩擦特性の温度変化について再検討した (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_05])。実験の結果、定常摩擦係数  $\mu_{ss}$  は粘土鉱物含有量の増加に伴い系統的に低下し、また温度上昇に伴い増加する傾向が認められた。一方、 $a - b$  値は温度上昇に伴い減少し、チャート試料は 50~100 °C、玄武岩試料は約 100 °C、半遠洋性粘土試料は 100~150 °C、遠洋性粘土試料は 150~200 °C でそれぞれ正から負へと変化し、負になる温度は粘土鉱物含有量が多いほど高くなった (図 5)。この実験結果は、同一温度 (深度) でも断層帯構成物質 (粘土鉱物含有量) の相違によって非地震性~地震性の多様な断層運動が起こることを意味しており、日本海溝沈み込み帯で観察される南北方向の地震活動の不均質が断層帯構成物質 (粘土鉱物含有量) の不均質を反映していることを示唆している。

中下部地殻での岩石破壊にともなう水理学パラメータを制約するために、天然の岩石-流体反応帯から流体活動時間・流体圧・浸透率を制約する新たな手法を確立した (東北大学 [課題番号: THK\_02])。未破壊の地殻の浸透率は  $10^{-22} - 10^{-20} \text{ m}^2$  と非常に低く、き裂を含む破砕された地殻の浸透率は  $10^{-16} - 10^{-10} \text{ m}^2$  と数桁上昇することを示した。従来の地殻浸透率見積り ( $10^{-18} \text{ m}^2$ ; e. g., Ingebritsen and Manning, 2010) は百万年スケールの時間平均であったが、本研究によってその平均浸透率が、未破壊地殻 ( $10^{-22} - 10^{-20} \text{ m}^2$ ) の破壊による時間~年スケールでの浸透率上昇によって説明できるとともに、中下部地殻における地殻流体圧・浸透率変動の物質科学的な証拠をつかむことにも成功している。これらのことから、地震発生と流体のエピソディックな振る舞いの時空間分解が期待できる。一方、立ち上がり類似した地震波の検出法を改良し、震源 (破壊開始点) の精密

決定法を開発した（東京大学理学系研究科[課題番号：UTS\_03]）。この手法により、破壊開始点およびセントロイドの相対位置それぞれを独立に、高精度で決定できるようになった。小地震では破壊開始点とセントロイドの位置は同一とみなすと、地震発生域に小地震からなる座標系を設定して、その上に大地震の破壊開始点とセントロイドをマップすることが可能になる。この手法を常陸那珂沖ほか数地域の繰り返し地震を含む地震活動に適用した。常陸那珂沖では異なるサイズの地震の破壊開始点が集中する場所が数か所発見され、これらの場所が特に地震の開始しやすい場所になっていることが分かった。

## イ. 地震断層滑りのモデル化

アスペリティでの応力集中による塑性変形は、摩擦面の原子格子構造を大きく乱す要因として挙げられ、微小なアモルファス系の剪断に伴う構造緩和が摩擦の原子論的過程であると考えてよいという背景と動機から、アモルファス系のレオロジーとその微視的素過程に関する研究が行なわれた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_04]）。従来知られていた速度弱化メカニズムは接触面積の拡大だったが、剪断変形におけるアモルファス系特有の遅い構造緩和過程によって接触面積が一定の場合でも速度弱化が発生する可能性が示された。また簡単な分子動力学シミュレーションによって、構造緩和の時系列特性を幅広い密度領域で確認し、臨界密度においては応力の緩和挙動がベキ的になることが確かめられた。

空間ドメインでの境界積分法については、摩擦法則に基づいて断層の滑りの時空間発展を計算するシミュレーションにおいて広く用いられている。この方法において、従来の手法に比べて圧倒的に広い条件で数値的に容易な時間発展計算手法を見つけた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_06]）。このことにより計算メッシュが柔軟に設定できるので断層の不均質をとりこんだ動的シミュレーションが容易になり、また、破壊モードが混在していても安定に計算できるので、非平面な断層を扱うにも有利になると考えられる。さらに、タイムステップを大きくとることができて計算速度も改善することができるようになった。

昨年度、水と塩の二成分流体の二面角を調べ、わずか1～数 wt. %の塩が加わるだけで、二面角が純水の場合よりも大きく低下し、カンラン石の表面を良く濡らすようになることを明らかにした（東北大学[課題番号：THK\_02]）。これは、沈み込み流体が蛇紋岩として固定される前弧域と、流体がマントルを融解させる領域の間に、マントル岩の粒間に流体が共存する領域があり、沈み込んだ流体がマントルを浸透して前弧域に直接抜けている可能性を示している。しかし、もう一つの重要な副成分である二酸化炭素は、塩とは反対に二面角を増加させるため、塩と二酸化炭素の効果の競合関係を理解する必要がある。このような問題意識の下、多成分流体の実験を行った結果、二酸化炭素と比べて塩の方が二面角に効果的に作用するため、多成分流体がカンラン石表面を良く濡らすことを突き止めた（東北大学[課題番号：THK\_02]）。さらに、沈み込み帯相当の低温高压条件下では、カンラン石の炭酸塩化反応により、流体中の二酸化炭素濃度が大幅に低下するとともに、生成した直方輝石と菱苦土石の影響により、さらに二面角が低下することが明らかになった（図6）。また、多成分流体は二面角が小さく、岩石の溶けた融液に近い分布形態を示す一方で、流体と融液では、弾性的性質に差があることから、地震波トモグラフィデータに基づいて、楔形マントル内の流体と融液を区別してマッピングできる

可能性がある。

南アフリカ金鉱山での観測研究もすすみ、M5.5の地震断層が確認された Lamprophyre dyke の Intact 部分では、XRD 分析によってタルクや黒雲母などが確認されていた（立命館大学[課題番号：RTM\_01]）。その Intact 部分の高知コアセンターでの  $V_p$ 、密度、磁化率の非破壊分析結果と比較したところ、タルクを多く検出した Lamprophyre dyke の密度と磁化率が有意に高く、 $V_p$  が有意に低いことが明らかになった（立命館大学[課題番号：RTM\_01]）。

## （５）地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

### ア．プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

海溝の海側には、一般的にアウターライズ（海溝外縁隆起帯）と呼ばれる地形的高まりが認められる。これはプレートの沈み込みに伴う屈曲によって形成され、海洋プレート浅部は伸張応力場となる。そのため海洋性地殻を断ち切る正断層群が発達するとともにホルスト・グラベン（地塁・地溝）構造が形成され、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発生後に連動して発生することが知られている。宮城沖と三陸沖のアウターライズで反射法地震探査を実施し、ホルスト・グラベン構造を形成する多数の海底活断層（アウターライズ正断層）の高解像度構造をイメージングした（東京大学大気海洋研究所[課題番号：AORI01]）。その結果、三陸沖と宮城沖のアウターライズで正断層の発達様式が著しく異なることが明らかになった。fault offset の場合、三陸沖の方が宮城沖より大きい。三陸沖では主に海溝近傍でプレートの折り曲げによって形成した新しい断層が発達しているのに対し、宮城沖では新しい断層と古い断層が混在して存在する。また、宮城沖では堆積層の基本層序（遠洋性堆積物、チャート層、玄武岩）が維持されながら正断層が発達するが、三陸沖では海溝海側約 75 km 付近から海溝側へチャート層が不明瞭となり、層厚が著しく減少する。このように三陸沖と宮城沖のアウターライズで正断層の発達様式が異なる要因はプチスポット火山活動の有無が考えられる。

S-net で観測された常時微動記録に地震波干渉法を適用し、観測網全域にわたる表面波トモグラフィを行った（東北大学[課題番号：THK\_02]）。特に、マルチモードの表面波分散曲線の推定手法を開発し、レイリー波基本モード・1次高次モードおよびラブ波基本モードの位相速度マップの推定に成功した（図7）。三陸沖北部の前弧最先端部において周期14秒のラブ波位相速度が低速度となっており、Tsuru et al. (2002)によって構造探査から得られている沈み込む堆積層厚の空間分布と調和的である。また、2011年東北沖地震の大すべり域（Iinuma et al., 20012）と根室沖の微小地震空白域（Takahashi and Kasahara, 2007）では高速度であり、プレート境界におけるすべり様式とS波速度構造の対応関係が示唆される。

房総半島沖では自己浮上式海底圧力計2台を今年度新たに設置し、計6台での観測を続けている。また、2018年に発生した房総沖スロースリップについて、海底圧力計データの解析を行った（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_05]）。4台の圧力計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、海洋変動と思われる成分を除去し、残りの成分にパラメトリックモデルを当てはめてスロースリップによる



変動の抽出を試みた。その結果、全4地点で1-2 cmの隆起が見られた。

四国南東部の徳島県海陽町から2000年鳥取県西部地震の震源域の北端付近に位置する米子市まで南南東-北北西に延びる測線において、南東部で2014年~2017年に行われたリニアアレイ観測で得られたレシーバ関数と北西部で2002年~2004年の合同観測で得られたレシーバ関数(Ueno et al., 2006)を用いて、レシーバ関数イメージを作成した(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI02])。その結果、フィリピン海スラブ内の海洋モホ面とフィリピン海スラブの上面が明瞭にイメージされ、四国東部下に沈み込むフィリピン海プレートはとても緩やかな傾斜(約6度)で、少なくとも中国地方の中ほどまで存在していることがわかった。また、大陸モホ面は測線北端の深さ30 kmから南端の深さ15 kmまで南南東上がりにフィリピン海スラブの上方に位置していると考えられるが、測線の両端部以外では明瞭にイメージされなかった。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おいてもレシーバ関数を追加して、レシーバ関数イメージが更新された(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI02])。

日向灘から奄美大島にかけての小領域ごとに小繰り返し地震が発生する度に、その地震発生前2年間の準静的すべり速度を求め、時間変化について調べた(鹿児島大学[課題番号:KGSM01])。その結果、日向灘中部から奄美大島にかけての広域で準静的すべり速度が概ね全般的に増加していること、この中でもM6.3が発生した日向灘中部、M6.0が発生した種子島東方、奄美大島付近と大隅半島南東沖は周囲に比べて準静的すべり速度の増加が相対的に大きいことがわかった。これとは逆に、奄美大島北東沖では準静的すべり速度が明瞭に低下していることがわかった(図8)。

南西諸島海溝において、令和元年度に設置した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(以降、浅部微動)の震源決定を実施した(鹿児島大学[課題番号:KGSM01])。最も活発な活動は令和元年(2019年)9月から10月にかけて発生した。また、マイグレーションを伴う活動も複数回確認されたが、マイグレーション方向は南北両方向に存在している。また、断続的な活動ながらゆっくりとした速度でマイグレーションしている様な活動も見られ、この地域において複数のスロー地震活動パターンがあることが示唆された。浅部微動の分布は、前計画中に実施された臨時観測から求められている分布とも非常によく似ており、観測点数や配置が全く異なる観測網で同じような分布が得られたことから、浅部微動の分布形状の特徴は、この領域において普遍的なものである可能性が高い。

南海トラフ熊野灘での浅部低周波地震(VLFE)については、既存三次元地震探査データの再解析に基づき、地質構造と発生分布の関係を明らかにした(海洋研究開発機構[課題番号:JAMS02])。沈み込む海洋地殻の上面には地殻内断層に起因する起伏に富み、その上に位置する付加体には覆瓦衝上断層が発達しており、半遠洋性泥質物を主体とする厚い底付けされた堆積層の内部に衝上断層群のデタッチメントが複数確認された。さらに、衝上断層群を切る横ずれを伴う共役な断層群が認められ、プレート沈み込み方向と斜交する最大水平圧縮応力の方向が特定された。また、最大水平圧縮応力の方向は、局在するVLFEと海洋地殻隆起部との位置的関係および低角逆断層型VLFEのすべり方向と調和的であった。以上から、南海トラフ熊野灘では海洋地殻上面の起伏が上載堆積物内の応力場に影響を与え、堆積層内の既存すべり面に沿うVLFEの発生に寄与していると考えられる。

日向灘では、浅部低周波微動震源域下端と小繰り返し地震発生領域上端の境界付近に観測網を構築し、スロー地震と通常の地震の境界領域における地震活動、特にそれらの震源の位置関係や深さの議論を進めるための観測を開始した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]）。一方、これまでの観測で得られたデータの解析を進め、2017年～2018年にかけて発生した浅部微動活動の時空間発展を明らかにした。2013年と2015年にもマイグレーションを伴う比較的規模の大きな浅部微動活動が確認されているが、2017～2018年の活動はそれらに匹敵する活動であった。南から北へのマイグレーションとRTRを伴っていること、間を空けて複数回マイグレーションが発生していたこと、さらには観測網が全く異なっているにもかかわらず震央位置がほぼ同じ場所に決まっていることから、2017～2018年の活動は2013年活動の再来であったとも考えられる。この微動活動の南限が種子島東方沖まで連続的に広がっていることが確認されるとともに、その分布や活動度が九州パラオ海嶺の沈み込み構造によって規定されていると想定される。

日向灘ではさらに、3年間に3回にわたって発生した浅部超低周波地震活動の震央分布を調べたところ、沈み込んだ九州パラオ海嶺上の活動は深さ10 kmより深く、それから東に外れた活動は10 kmよりも浅いプレート境界で発生していることが明らかとなった（海洋研究開発機構[課題番号：JAMS02]）。低周波地震の活動に関しても、九州パラオ海嶺の沈み込み構造が影響していることが示唆される。

このようなプレート境界浅部におけるスロー地震については、海外における観測研究も進められている。2018年10月にヒクラン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がおこなわれた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_08]）。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。この領域では、2014年にSSEが発生し、そのすべりは沈み込む太平洋プレート上の海山を避けるように分布しており、またそれに伴う微動がその海山上に限って活動していることがわかっていた。2019年3月の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、およそ3週間にわたって継続したことがわかった。その活動規模は2014年の活動を遥かに凌ぐものではあるが、活動分布は2014年と同様に沈み込む海山上で発生していることが明らかとなった。本海域では国際協力で3次元屈折法地震波構造調査を実施しており、3次元P波速度構造とその方位異方性構造を推定した（海洋研究開発機構[課題番号：JAMS02]）。付加体内P波速度の速い軸はプレート沈み込み方向におおむね一致し、クラックの偏向と断層に沿って発達する粘土鉱物の層構造を反映していると考えられる。沈み込む海山の本体と考えられる高速度体も3次元的にイメージングされた。これらの結果から、海域下プレート境界における低周波地震の発生様式には、沈み込むプレートの表面形状が影響している可能性が示されている。

プレート内地震の研究では、東北地方・北海道下の上面地震帯の深さ100-130 kmで発生する6つの地震クラスターについて、波形相関走時差DD法による精密震源推定およびメカニズム解を推定した（東北大学[課題番号：THK\_06]）。その結果、どのクラスターも1-2 km四方の領域で主に逆断層型の地震活動であることがわかった。5つのクラスターでは正断層型地震も伴い、逆断層震源より浅い側で多く発生した。こうした downdip compression 場にもかかわらず発生する正断層地震は、地殻物質のエクロジャイト化によ

る引張場が原因であると解釈した。このことから、エクロジャイト化に伴う引張場の形成は極めて局所的であることが示唆される。

冷たい沈み込み帯における稍深発地震の原因の 1 つは、主要な含水鉱物であるローソンの脱水である可能性が提案されている。しかし、実験的研究は限られており、ローソンの脱水を伴う変形メカニズムは不明である。そこで、スラブ内地震の発生条件を模擬した、沈み込みに伴う加熱と変形が同時進行する変形実験をおこなったところ、ローソナイトの安定領域（500–550°C）内で、断層形成と応力降下を伴うすべりのイベントが観察された（東北大学[課題番号：THK\_06]）。微細組織観察からは、断層に沿って極細粒の非晶質物質が存在することが明らかになった。一方、脱水条件での変形実験では、脱水に伴い歪軟化するものの、急激な応力降下は見られなかったため、今後は実験で形成された断層物質の比較を行い、摩擦不安定性のメカニズムを明らかにしていく必要がある。

## イ. 内陸地震

内陸地震発生に関しては、地殻内流体の影響が大きいと考えられている。そのため、地球電磁気学的観測研究による地震発生場の研究が多くなされた。中国・四国地方の MT 観測予備調査ならびに四国地方の基盤的比抵抗構造解析を実施した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI03]）。三瓶山周辺域では全般的に地殻は高比抵抗領域として推定された。北部日本海側地点ならびに、三瓶火山直南地点の地殻浅部以外には低比抵抗領域はみられない。これらの構造は、北部の地殻浅部低比抵抗領域の位置などを除けば塩崎（1993）の研究結果と調和的である。浅野・他（1986）が指摘した中野原から三川を通り北西-南東方向に伸びる地震帯とこれに直交するように三瓶山から海岸線に平行して西南方向に伸びる二つの地震帯の交差するあたりで、2018 年島根県西部地震（M6.1）が発生したが、今回推定された北部の高/低比抵抗境界は、この地震の震源と関連するものかもしれないが、これまで山陰地方で指摘された  $10 \Omega \cdot \text{m}$  以下の地殻深部低比抵抗領域がみられないなどの相違点がある。また、三瓶山周辺から南東方向に伸びる地震活動は高比抵抗領域に対応している（図 9）。島根県東部地域は山陰地方の地震活動の帯の中にあって無地震域を形成している場所であり、既存研究からこの地域では、三瓶山周辺域と比べ低比抵抗な地殻構造が示されている（例えば、Shiozaki et al., 2006）。二つの地域の地震活動にみられる違いと比抵抗構造の違いがどのように関連するのか、水平方向の連続性を明らかにする本観測を実施することは、同地域の地震活動や応力の集中・緩和を考える上で重要である。島弧の軸方向の面的な基盤的比抵抗構造研究の必要性が示された（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI03]）。

地震メカニズムトモグラフィー法（FMT 法, Terakawa et al., 2010）による間隙流体圧場の推定と地震時応力変化による  $\Delta \text{CFS}$  の計算を通じて、2016 年熊本地震前後の地震活動度の変化における応力と間隙流体圧場の影響を定量的に調べた（Nakagomi et al., 2021）（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI03]）。図 10 は、地震時応力変化による  $\Delta \text{CFS}$  及び熊本地震発生前の間隙流体圧係数  $C$  と地震活動度の変化の関係を表している。ここで、間隙流体圧係数  $C$  は、間隙流体圧の静水圧からのずれを静岩圧と静水圧の差で規格化した無次元量である。図 11 は、地震活動度の顕著な変化（10 倍以上の増減）があった領域を  $\Delta \text{CFS}$  の分布上に表示したものである。これらの結果から、大きな特徴として、 $\Delta \text{CFS} > 0$  の領域では地震活動度が増加し、 $\Delta \text{CFS} < 0$  の領域では地震活動度が減少する傾

向が捉えられた。このことは、観測された地震活動度の変化は概ね地震時応力変化で説明できることを意味する。一方、本震前のC値が高い地域ほど、本震後に地震活動度が増加する傾向があることがわかった。図12は、地震活動度の増加があった領域を間隙流体圧分布上に表示したものである。とくに、熊本地震の震源断層の南側のセグメント付近の高圧間隙流体圧域では、熊本地震後に地震活動度が大きく増加する傾向があった。これは、 $\Delta CFS$ だけでなく、本震前の間隙流体圧場も地震活動度の変化に影響を与えていることを示している。 $\Delta CFS < 0$ にも拘わらず熊本地震後に地震活動度が増加した地域で発生した地震は、全体の約14~39%（評価点から3 km及び5 km以内で発生した地震の割合）を占めた。このような $\Delta CFS$ からの予想に反して地震活動度が増加する傾向は、 $\Delta CFS$ の負の影響が小さいほど、C値が高いほど顕著になる（図10）。これらの結果は、応力変化で説明できる余震活動の中に、間隙流体圧の上昇による断層強度の影響を受けて発生したものもあることを示唆する。

北茨城 - いわき地域は、前計画で地震の多発域の下15 kmから25 kmにおいて顕著な反射面の存在が示された。この反射面からの反射波の振幅等から、この反射面は地殻内流体を含む層であることが示された。地殻内流体が存在するのであれば、低比抵抗領域となっている可能性があるため、この反射面が存在する領域の比抵抗構造を調べた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_09]）。反射面が存在する深さ14 km~16 kmでの深さの比抵抗構造は、反射面の中心部分で低いことが分かった。また、比抵抗構造は深さが浅くなるにつれて構造が変化し、地震の多発域では筋状の低比抵抗構造が見られるようになり、活発化した地震の活動はその筋状の低比抵抗域に沿って発生していることを示した。さらに、これらの領域において水の体積分率の推定を行った。福島県浜通り地震（Mj7.0）の震源域の直下の反射面が存在する14 km - 16 kmの深さでは、水の体積分率が1%から数%の、非常に大きな値を示すことが分かった（図13a）。一方、福島県浜通り地震（Mj7.0）の震源域の深さ6 km周辺での水の体積分率は、0.001%から0.01%と非常に小さな値を示した（図13b）。

東北地方の地殻3次元比抵抗構造推定のため、これまで取得されている広帯域MTデータのコンパイルと解析を実施した（東北大学[課題番号：THK\_07]）。秋田市雄和地区の秋田空港付近から、仙北市角館町にかけてのほぼ北緯39°36'の緯線に沿う東西測線で、新たに得られたデータを加えた計17測点のデータを用い、2次元比抵抗断面モデルを得た（図14）。地震活動は、測線中央部の地殻内に存在する高比抵抗部内部から低比抵抗部の境界にかけて顕著であることが分かった。

2011年東北沖地震後に山形-福島県境付近に発生した群発地震において、様々なパラメータが50日ないし100日程度の時定数で急変していることが示されてきたが、今年度、震源域内の詳細な減衰構造（ $Q^{-1}$ 値）の時間変化を調べた結果、やはり同様の時定数で変化していることがわかった（図15）（東北大学[課題番号：THK\_02]）。この減衰の時間変化が間隙流体圧の変化に起因しているのであれば、この手法により断層帯内の間隙流体圧の時間変化を調べられる可能性がある。

物質科学的観点から地殻内流体について調べる研究もおこなわれた。岩相 - 水 - マグマの地殻および上部マントル条件での地震波速度および電気伝導度を再現するフォワードモデルを作成した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI04]）。上部および中部地殻には、粒界（mmスケール）から断層（kmスケール）まで、様々なスケールのクラックが存

在している。観測された電気伝導度構造から地殻の流体分布を推定するためには、様々なスケールのクラックが、それぞれ高圧下でどのような伝導経路として機能するかを理解することが必要である。粒界スケールのクラックについて理解するため、封圧下での含水岩石（庵治花崗岩）の弾性波速度・電気伝導度測定を行ってきた。開いた粒界においては、粒界の開口の大きな部分が高圧下でも開いた状態を維持すること、それが連結して伝導経路として機能していることが分かった。

地下深部の断層の位置を推定する研究もおこなわれた。大阪府北部の地震の余震データを用いて、有馬高槻断層帯（ATL）の深部の位置の推定を行った（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI03]）。今年も ATL の深部と余震域の相対的な位置関係の推定を試みた。このことは、大阪府北部の地震がどの活断層に関係した地震であるのかという未解決の問題や、今後の地震活動の推移を考える上で、重要な基礎的な知見を提供するものである。大阪府北部の地震の震源断層は、ATL の断層帯の北端に、その北側を限られた可能性が高い。断層帯の南端の位置については、そもそも明瞭な端があるのかも含めて今後の課題であるが、大阪府北部の震源断層は、ATL の断層帯の内部で発生した可能性が示唆される。特に、震源断層の北限が ATL によって限られていることは、この地震が、最深部から始まったにも関わらず、深さ 10 km 程度以深に断層が限られ浅部に破壊が進展しなかった M6 クラスの地震となったことと関係しているものと考えられる。

地震が発生した際に、地震断層の破壊の停止がどのような理由によって起こるかという問題は重要な課題である。断層の破壊の停止と地下構造の関係の研究も進められた。2016 年熊本地震合同地震観測データおよび 2016 年熊本地震以前のデータをもとに震源域の三次元地震波速度構造を決定し、震源再決定および震源メカニズムの推定を行った（九州大学[課題番号：KYU\_01]）。この研究で得られた速度構造と、MJ 7.3 の地震のすべり分布（Asano and Iwata, 2016）とを比較すると、すべりの大きかった領域は、 $V_p=6.0$  km/s、 $V_s=3.5$  km/s 程度の中庸な速度を持つ領域に対応している。また、より鮮明にイメージされた阿蘇山西側にある低速度領域は、すべりの大きかった領域の端に分布しており、低速度領域の存在により主要な破壊が停止したと解釈できる（図 16）。

熊本地震震源域周辺の比抵抗構造からは内陸地震ポテンシャル評価をする上で重要な結果が得られた（九州大学[課題番号：KYU\_01]）。前震、本震を含め M5 以上の規模の大きい地震は低比抵抗体の近傍で破壊が開始する一方で、M5 より規模が小さい地震は低比抵抗領域から離れた場所でも破壊が開始することが示唆された。また、低比抵抗体内部でも破壊は開始するが、それらはすべて規模が小さい地震であることが示された。低比抵抗体の端部付近から破壊が開始すると規模の大きい地震に成長しやすいことを示した結果であり、高温度、高間隙水圧領域から外側に向かって破壊が開始すると破壊が成長しやすいと解釈された。一方、破壊の停止については、熊本地震の本震および前震の破壊停止位置が低比抵抗体の端部に相当することから、高温度、高間隙水圧領域に向かって破壊が進展すると、破壊が停止しやすいことが示唆された。しかしながら、本震の大すべり域近傍にもやや低比抵抗な領域が存在し、高温度（200–400 °C）、高間隙水圧領域に向かって破壊が進展しても、かならずしも破壊は停止せず、場合によっては破壊が加速されることも示唆された。

断層に対する応力荷重も重要な問題である。地震発生ポテンシャルを評価するうえで重要な要素の一つは下部地殻から地震発生層への応力荷重が挙げられる。そこで地震発

生層での応力場が応力の連続性から下部地殻に影響していると考え、下部地殻の非弾性ひずみを検出する手法を開発した(九州大学[課題番号: KYU\_01])。その結果、地震活動が活発な別府—島原地域において下部地殻の非弾性ひずみレートが高いことが見いだされた。特に別府—阿蘇地域においては顕著であり、この領域は地温勾配が高く、低速度異常が下部地殻にあり、地震発生層が薄い領域であった。このことから、この領域の下部地殻においては相対的に粘性が低く、高いひずみレートで変形し、その結果として上部地殻に応力が载荷され、高い地震活動がみられると解釈できる。さらに、緑川断層など、別府—島原地域の西部の断層領域においては上部地殻の主応力方向と地表での主ひずみレート方向が斜交していることから、断層強度が弱いことが示唆された。このように、変形レート・応力を統合的に解釈することによって、下部地殻の非弾性ひずみの不均質によって、地震発生層である上部地殻に応力場が形成される様子をモデリングすることが可能となった(図 17)。

平成 28 年(2016 年)熊本地震による余効変動について、Tomita et al. (2020)の手法に倣い、余効すべりと粘弾性変形それぞれの寄与を同時に推定する手法を試験的に導入した(国土地理院[課題番号: GSI\_01])。厚さ 25 km の弾性層及びその下の Maxwell 粘弾性層の 2 層からなる半無限媒質を仮定し、Fukahata and Matsu'ura (2005)のプログラムを用いて、弾性及び粘弾性グリーン関数を計算した。地震時のすべり量については、3 枚の矩形断層(矢来・他, 2016)を仮定した。地震後 1 年間の水平方向の変位から粘弾性変形を考慮した余効すべりの推定を、MCMC 法を用いて行ったところ、粘弾性層の粘性率が  $2 \times 10^{18}$  Pa s 程度であれば観測データを最もよく説明できることが分かった(図 18)。また、同様の解析を地震後 3 年間の変位を用いて行ったところ、観測データを最もよく説明する粘性率は  $5 \times 10^{18}$  Pa s 程度であった。これらの結果は、粘弾性層における粘性率の時間変化を反映している可能性がある。

島弧全体の構造を考慮した研究もおこなわれた。3 次元余効変動解析から、2011-2016 年までの余効変動解析を実施した(東北大学[課題番号: THK\_07])。GEONET と東北大学の持つ宮城—山形、福島—新潟の稠密観測から島弧に沿う南北方向での余効変動の変化を明らかにし、モデル計算から地下のレオロジー構造の不均質性を調べた(図 19)。2 つの測線での観測を、海溝平行成分、直交成分、垂直成分に分け、モデルとの詳細比較を行い、福島測線に比べ、宮城測線の方が、前弧の高粘性領域(コールドノーズ)が狭いことが明らかになった。

重力の観測量を用いた研究も進められた。長野県松代における超伝導重力計 iGrav (28 号機)の観測を維持するとともに、各地で稼働している超伝導重力計の観測点において、絶対重力測定を実施した(東京大学地震研究所[課題番号: ERI\_10])。弟子屈の超伝導重力計(iGrav、17 号機)は機械的ドリフトが検定された。国立天文台水沢 VLBI 観測所(岩手県)において、ここ数年続いている重力減少の傾向が引き続き見られた。気象庁松代地震観測所(長野県)においては、2019 年までの重力減少の傾向と反して、重力増加を示す結果が得られた。

重力の観測値から伏在断層を検出する研究も進められた(東北大学[課題番号: THK\_07])。仙台平野南部は、長町—利府線断層帯の南方に位置し、また双葉断層の北部延長域でもあり、活断層が隣接する複雑な地域である。宮城県名取市から亘理町を経て南部へ連続すると考えられる伏在活断層と双葉断層帯との関係を明らかにするために、仙

台平野南部の宮城県山元町周辺において、重力探査を実施し、伏在活断層の連続性を明らかにすることを試みた。調査測線の北側 2 本では、微小ではあるが伏在活断層に関連する重力変化を捉えたが、南側の 2 本の測線では、その延長部分に有意な重力変化はなかった(図 20)。このことから、愛島丘陵から南方へ連続する伏在活断層は、宮城県亘理郡山元町付近が南端となっていると判断した。

海外での陸上観測の研究もおこなわれ、カイクウラ地震に関係した応力再配分を確認することを目的に、定常地震観測網と本課題で実施した臨時観測網のデータを用いて、カイクウラ地震震源域の S 波スプリッティング解析を行った(東北大学[課題番号: THK\_01])。期間は 2013 年から 2018 年である。得られた速い S 波の振動方向には空間変化が見られ、原因について検討をした結果、断層などの構造的異方性や応力による異方性など複数の要因が考えられた。S 波スプリッティング解析と  $V_p/V_s$  比の時間変化の検討を行ったが、震源分布の違いに応じ異なる異方性領域を通過したことが原因として考えられた。また、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、カイク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った。その結果、高精度化された震源位置決定により、微動発生域が領域内の特定の位置にクラスター状に存在している様子が明らかとなった。

地球化学的手法を用いた観測研究も進められ、装置を再設置して、和歌山県の本宮観測点での観測を再開することを目指して作業を行った(東京大学理学系研究科[課題番号: UTS\_04])。4He, N<sub>2</sub>, Ar の計測精度を向上させるために、スペクトルの解析を面積積算法に変更することで、質量数決定精度を改善した。

物質科学的研究も進められた。内陸断層の深部、脆性-塑性遷移付近の岩石変形の物理的性質の 3 次元構造モデルを地質調査から明らかにし、地震の破壊開始と断層深部の塑性流動との関わりを明らかにするために、調査範囲を断層の走向方向に 7km 程度に拡大し、この範囲の調査を開始した(産業技術総合研究所[課題番号: AIST05])。一方、断層内部構造形成・発展・力学挙動の物理過程を岩石変形実験で明らかにするための準備段階として斜長石の粒成長実験を実施した。まず、斜長石の Na 端成分である曹長石の焼結体合成に成功し、この焼結体を用い融点(1100 °C)に比較的近い 1065 °C、1050 °C、1030 °C において粒成長実験を実施し、粒成長の活性化エネルギーを含む基本パラメータを決定した。この結果、曹長石の粒成長は 1050 °C という高温においても 1 μm から 10 μm に成長するのに 1 世紀かかるという非常に遅い粒成長カイクネティクスが明らかになった。曹長石は地殻の幅広い条件で安定に存在する主要構成鉱物である。今回の実験結果は、曹長石の粒径依存クリープが地殻の幅広い条件で発現しうる地殻のレオロジーを考える上でも重要な変形機構であることが示唆された。

## エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

地殻浅部での低周波地震活動が見られる可能性がある地域として、北海道雌阿寒岳周辺で発生した地震を対象に、Frequency Index を用いて低周波地震の識別を行なった(弘前大学理工学研究科[課題番号: HRS\_01])。その結果、地殻浅部の低周波地震の中で火山活動との対応が見られない地震群が、雌阿寒岳北方で発生していたことがわかった。また、地殻深部低周波地震の中で、波形がよく似た地震が 1 週間程度の間隔で繰り返したことを見いだした。この繰り返し低周波地震とも呼ぶべき現象は、深部低周波地震の発

生メカニズムを考える上での有用な観測例である。

## オ. 構造共通モデルの構築

中国地域の地殻内応力マップを作成するため、過去12年間にわたるマグニチュード1.5以上の地震の発震機構解を決定した（産業技術総合研究所[課題番号：AIST07]）。気象庁一元化カタログもコンパイルし、10 kmメッシュの応力マップとして纏めた。この応力マップをもとに、地震調査研究推進本部地震調査委員会（2016）が評価対象とした30の活断層の活動性評価を行ったところ、28断層が現在の応力場、一般的な摩擦係数のもとで再活動する条件を満たしていることがわかった。残りの2断層が再活動するためには、異常間隙水圧の発生や隣接する活断層の破壊に伴う応力変化でトリガーされるなどの外的要因が必要になると考えられる。また、島根県・鳥取県の日本海側になると応力方位が時計回りに約20°回転して西北西－東南東方向を示すようになる原因について、先行研究で提案されている下部地殻における非地震性変形のほか、地震発生層深部の高重力異常帯に引き起こされる応力擾乱にある可能性を示した。

## 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、歴史地震学における震度の検証ならびにその定量化を図るため、根津周辺における稠密観測を開始した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_15]）。観測点は1855年安政江戸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設置し観測点数は19点となった。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。

## 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

海底において空間的に高密度でやや広帯域である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や固有周期120秒を用いた小型広帯域地震計を製作してきた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_23]）。120秒計を用いた台数の確保に努め、今年度には20台規模で観測に用いることができるようになった。海底での記録の蓄積から雑微動レベルについての知見が蓄積され、上下動成分ではセンサー帯域において低いレベルにとどまるが、水平動成分の雑微動レベルが上下動成分よりも高いことが確認されつつある。しかし、海底における雑微動レベルは一般的な地震観測としては低いレベルであり、スロー地震だけではなく、遠地地震・深発地震なども明瞭に記録された。

海底光ファイバー歪計や海底傾斜計による観測技術の開発を継続しておこなった（海洋研究開発機構[課題番号：JAMS02]）。掘削孔内の間隙水圧や傾斜計では2020年12月～2021年1月にかけて起こった南海トラフの近傍で発生したゆっくり滑りの検出に成功した。その変動量はトラフ近傍のごく浅い断層でのスロースリップによりモデル化されることが示され、その領域はこの期間中での低周波微動の発生域と整合的であることが分



かった。

## これまでの課題と今後の展望

低頻度で大規模な地震現象の発生履歴、規模、場所の解明は重要な課題である。近い将来発生が懸念される根室沖において GNSS-A を用いた海底地殻変動の観測研究が進み、データが取得できるようになった。安定した結果が得られるようになるとプレート間の固着状況についての情報が得られることが期待される。また、日本全体のプレート境界での固着状況の把握に対して、東北沖を含む日本海溝や南海トラフにおける GNSS-A を用いた海底地殻変動の観測も継続され、プレート間固着状況がモニタリングできるようになってきている。低頻度で大規模な地震現象の理解に向けて、メキシコやアラスカなど海外における低頻度巨大地震発生域における観測研究も進み、現象の包括的な理解が進んでいる。地震発生過程の解明とモデル化においては、アスペリティの階層性についても研究が行われ、理解が進展している。日向灘や南西諸島については微動現象やスロースリップについての観測による理解が進み、ニュージーランド等海外での観測事例のデータも積み重ねられ、沈み込みの多様性の理解についても進展がみられる。実験室でのサンプリング物質を用いた研究など、観測研究に加え物質科学的見地からの研究も進み、地震現象に対して包括的な理解が進んでいる。内陸地震に関しては、断層形状/微細構造・応力・強度の3要素の把握が順調に進んでおり、特に強度低下の原因として注目されてきた地殻内流体の関与については、2016年熊本地震などにおいてこの考えを支持する多くの成果が得られつつある。また、次のステップとして、地殻内流体の量や圧力の定量化が重要な課題であるが、水の体積分率の推定など定量的理解も進んでいる。前計画から続けられている粘弾性構造を含めた島弧モデルによるシミュレーションを用いた研究もなされ、列島規模での応力場・地殻変動・ひずみ場の時空間変化の理解が進みつつある。

このように様々な沈み込み帯での構造の解明や特徴の抽出が進んでいる。今後、得られた成果を予測に生かすためには、モデル化に向けた研究が必要であると考えられる。また、スロー地震や微動活動の現象解明にもとづき、プレート境界地震に関しての滑りの多様性の理解を進めていく必要がある。内陸地震においては、地殻内流体の関与を裏付ける成果が得られつつあるので、今後は定性的な理解の事例を加えていくとともに、定量的解析の研究も進めていく必要がある。さらに、地殻内流体の理解も踏まえた各地震・各地域の内陸地震発生過程のモデル化も重要なテーマである。このように、多様性の理解やその普遍性の抽出など、現象を理解する研究は進んでいるが、今後予測につなげるためには、モデル化をどう進めていくかが重要な課題となると考えられる。

## 成果リスト

- Abdallah, S., M. Utsugi, K. Aizawa, M. Uyeshima, W. Kanda, T. Koyama, and T. Shiotani, 2020, Three-dimensional electrical resistivity structure of the Kuju volcanic group, Central Kyushu, Japan revealed by magnetotelluric survey data, *J. Volcanol. Geothermal. Res.*, 400, 106898, doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.106898.
- 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 and 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 Planet. Space*, 73, 12, doi:10.1186/s40623-020-01340-w.
- Arai, R., S. Kodaira, S. Henrys, N. Bangs, K. Obana, G. Fujie, S. Miura, D. Barker, D. Basset2, R. Bell, K. Mochizuki, R. Kellett, V. Stucker, B. Fry and NZ3D Team, 2020, Three-dimensional P-wave velocity structure of the northern Hikurangi margin from the NZ3D experiment: Evidence for fault-bound anisotropy, *J. Geophys. Res.*, 125(12), e2020JB020433, doi:10.1029/2020JB020433-NA.
- Assah, A.N.E., T. Yokoyama, F.T. Aka, H. Iwamori, T. Kuritani, T. Usui, M.G. Dedzo, J. Tamen, T. Hasegawa, E.M. Fozing, M.J. Wirmvem, and A.L. Nche, 2020, Major/trace elements and Sr–Nd–Pb isotope systematics of lavas from lakes Barombi Mbo and Barombi Koto in the Kumba graben, Cameroon volcanic line: Constraints on petrogenesis, *J. African Earth Sci.*, 161, 103675, doi:10.1016/j.jafrearsci.2019.103675.
- Azuma, R., S. Kodaira, R. Hino, G. Fujie, K. Obana, F. Tomita, and Y. Ohta, 2020, Crustal structure of the incoming Pacific Plate off Hokkaido, the southern Kuril Trench subduction zone, by an active-source seismic survey using dense linear OBS array, *AGU Fall Meeting 2020*, T018-0004.
- Chang, J-H., J-O. Park, T-T. Chen, A. Yamaguchi, T. Tsuru, Y. Sano, H-H. Hsu, K. Shirai, T. Kagoshima, K. Tanaka, and C. Tamura, 2020, Structural-morphological and sedimentary features of forearc slope off Miyagi, NE Japan: implications for development of forearc basins and plumbing systems, *Geo-Marine Lett.*, doi.org/10.1007/s00367-020-00636-w.
- Farazi, A.H., E.S.M. Garcia, and Y. Ito, 2020, Stability of ambient noise H/V spectra obtained from OBS near the Japan Trench, Events, *EGU General Assembly 2020*, EGU2020-3999, doi:10.5194/egusphere-egu2020-3999.
- Fukahata, Y., A. Meneses-Gutierrez, and T. Sagiya, 2020, Detection of plastic strain using GNSS data of pre- and post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *Earth Planet. Space*, 72:18, doi:10.1186/s40623-020-1144-1.
- Fukahata, Y., K. Oohashi, Y. Takada, and A. Tanaka, 2020, Overview of the special issue Crustal dynamics (Part I): Toward the integration of geology and Geophysics, *地学雑誌*, 129(4), 443-445, doi:10.5026/jgeography.129.443.
- 深畑幸俊・大橋聖和・高田陽一郎・田中明子, 2020, 特集号「地殻ダイナミクス (Part II) -地質学と地球物理学の融合に向けて-」巻頭言, *地学雑誌*, 129(4), 447-450, doi:10.5026/jgopgraphy.129.447.
- Fukai, M., Y. Ogawa, S. Takakura, and M. Mishina, 2020, 3D imaging of NE Japan forearc: implications for fluid distribution and transport, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SEM21-05.
- Garcia, E.S.M. and Y. Ito, 2020, Incoming Plate Faulting at the Outer Slope of the Middle America Trench offshore Mexico, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SCG62-P01.

- Gou, T., D. Zhao, Z. Huang, and L. Wang, 2020, Structural heterogeneity in source zones of the 2018 Anchorage intraslab earthquake and the 1964 Alaska megathrust earthquake, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 21, e2019GC008812, doi:10.1029/2019GC008812.
- Graham, K.M., M.K. Savage, R. Arnold, H.J. Zal, T. Okada, Y. Iio, and S. Matsumoto, 2020, Spatio-temporal analysis of seismic anisotropy associated with the Cook Strait and Kaikoura earthquake sequences in New Zealand, *Geophys. J. Int.*, 223(3), 1987–2008, doi:10.1093/gji/ggaa433.
- Hamada, M., H. Iwamori, P.A. Brandl, T. Ushikubo, K. Shimizu, M. Ito, H. Li, and I.P. Savov, 2020, Temporal evolution of proto-Izu-Bonin-Mariana arc volcanism over 10 Ma: Constraints from statistical analysis of melt inclusion compositions, *J. Petrol.*, 61(1), egaa022, doi:10.1093/petrology/egaa022.
- Hashimoto, T.M., K. Aizawa, Y. Hayashida, Y. Yuasa, T. Matsushima, Y. Yamamoto, K. Tsukamoto, K. Miyano, S. Matsumoto, and H. Shimizu, 2020, Joint seismological-magnetotelluric investigation of shallow and implosive non-DC and DC earthquakes beneath the gravitationally unstable Heisei-Shinzan Lava Dome, Unzen Volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 406, 107066, doi:10.1016/j.volgeores.2020.107066.
- Henrys, S., D. Eberhart-Phillips, D. Bassett, R. Sutherland, D. Okaya, M. Savage, D. Evanzia, T. Stern, H. Sato, K. Mochizuki, T. Iwasaki, E. Kurashimo, A. Sewarc, and A. Wech, 2020, Upper plate heterogeneity along the southern Hikurangi margin, New Zealand, *Geophys. Res. Lett.*, 47(4), e2019GL085511, doi:10.1029/2019GL085511.
- 平出裕博, 2021, 仙台平野南部における伏在活断層の南方への連続性, 岩手大学卒業論文.
- Hirauchi, K., Y. Yoshida, Y. Yabe, and J. Muto, 2020, Slow stick-slip failure in halite gouge caused by brittle-plastic fault heterogeneity, *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 21(9), e2020GC009165, doi:10.1029/2020GC009165.
- Hirauchi, K., I. Katayama, and Y. Kouketsu, 2020, Semi-brittle deformation of antigorite serpentinite under forearc mantle wedge conditions, *J. Struct. Geol.*, 140, 104151, doi:10.1016/j.jsg.2020.104151.
- Honsho, C., M. Kido, T. Ichikawa, T. Ohashi, T. Kawakami, and H. Fujimoto, 2021, Application of phase-only correlation to travel-time determination in GNSS-Acoustic positioning, *Front. Earth Sci.*, 9:600732, doi:10.3389/feart.2021.600732.
- 本荘千枝・木戸元之・富田史章・太田雄策・市川俊人・大橋徹・川上太一, 2020, GNSS-Acoustic 測位精度向上にむけた解析手法の改良—位相相関を用いた走時決定と地球潮汐の影響評価—, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SCG66-04.
- Hsiung, K-H., T. Kanamatsu, K. Ikehara, K. Usami, C-H. Horng, N. Ohkouchi, N-O. Ogawa, S. Saito, and M. Murayama, 2021, X-ray fluorescence core scanning, magnetic signatures, and organic geochemistry analyses of Ryukyu Trench sediments: turbidites and hemipelagites., *Prog. Earth Planet. Sci.*, 8:2, doi:10.1186/s40645-020-00396-2.
- Hua, Y., D. Zhao, G. Toyokuni, and Y. Xu, 2020, Tomography of the source zone of the great 2011 Tohoku earthquake, *Nat. Commun.*, 11, 1163, doi:10.1038/s41467-020-14745-8.
- Huang, Y., T. Nakatani, M. Nakamura, and C. McCammon, 2020, Experimental constraint on

- grain-scale fluid connectivity in subduction zones, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 552, 116610, doi:10.1016/j.epsl.2020.116610.
- Hutchinson, J., H. Kao, M. Riedel, K. Obana, K. Wang, S. Kodaira, T. Takahashi, and Y. Yamamoto, 2020, Significant geometric variation of the subducted plate beneath the northernmost Cascadia subduction zone and its tectonic implications as revealed by the 2014 Mw 6.4 earthquake sequence, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 551, 116569, doi:10.1016/j.epsl.2020.116569.
- 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 three-dimensional electrical resistivity image by magnetotellurics, *Earth Planets Space*, submitted.
- 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, and T. Ueno, 2020, Stationarity of aftershock activities of the 2016 Central Tottori Prefecture earthquake revealed by dense seismic observation, *Earth Planet. Space*, 72:42, doi:10.1186/s40623-020-01161-x.
- 加納靖之, 2020, 紀伊半島における土地傾斜プ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, 印刷中.
- 今西和俊・内出崇彦・椎名高裕・松下レイケン・中井未里, 2020, 中国地域の地殻内応力マップの作成, 地質調査研究報告, 受理.
- Imanishi, K., M. Ohtani, and T. Uchide, 2020, Driving stress and seismotectonic implications of the 2013 Mw5.8 Awaji Island earthquake, southwestern Japan, based on earthquake focal mechanisms before and after the mainshock, *Earth Planet. Space*, 72:158, doi:10.1186/s40623-020-01292-1.
- 今西祐一・西山竜一, 2020, 弟子屈における絶対重力測定 (2019年および2020年), 東京大学地震研究所彙報, 95(1-4), 9-13.
- Iwamori, H., H. Nakamura, Q. Chang, N. Morikawa, and S. Haraguchi, 2020, Multivariate statistical analyses of rare earth element compositions of spring waters from the Arima and Kii areas, Southwest Japan, *Geochem. J.*, 54(4), 165-182, doi:10.2343/geochemj.2.0583.
- Kanagawa, K., H. Murayama, A. Sugita, M. Takahashi, M. Sawai, N. Furukawa, and T. Hirose, 2020, Weakening of quartz rocks at subseismic slip rates due to frictional heating, but not to lubrication by wear materials of hydrated amorphous silica or silica gel, *Tectonophys.*, 784, 228429, doi:10.1016/j.tecto.2020.228429.
- Kanagawa, K., S. Sagano, T. Nakanishi, J. Fujimori, and M. Sawai, 2020, Frictional properties of incoming sediments and rocks at shallow conditions of the Japan Trench subduction zone, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SCG61-03.
- 金川久一・杉田明日郁・高橋美紀・澤井みち代, 2020, 準地震性変位速度における石英質岩石の摩擦発熱による弱化, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS15-12.
- Kaneki, S. and H. Noda, 2020, On approximations of EASY%Ro solutions to estimate maximum temperature from vitrinite reflectance, *地質学雑誌*, 126(11), 655 - 661,

doi:105575/geosoc.2020.0035.

- 亀 伸樹, 2020, 地震発生を重力でとらえる—P波到着前の地震シグナル検知—, 地震ジャーナル, 69, 55-58.
- Kame, N., 2021, Pre-p gravity signals from dynamic earthquake rupture: modelling and observations, *Phill. Trans. A*, 379, 1-13, doi:10.1098/rsta.20200136.
- Kashiwagi, H., J. Nakajima, Y. Yukutake, R. Honda, Y. Abe, and S. Sakai, 2020, Seismic constraint on the fluid-bearing systems feeding Hakone volcano, central Japan, *J. Geophys. Res.*, 125, e2020JB020341, doi:10.1029/2020JB020341.
- 川畑亮二・宗包浩志, 2021, MCMC法を用いた震源断層及びすべり分布モデル推定のためのプロトタイププログラムの開発, *国土地理院時報*, 134.
- Kawakubo, S., R. Azuma, R. Hino, H. Takahashi, K. Ohta, and M. Shinohara, 2020, Shallow low-frequency tremor activity off Erimo, Hokkaido from 2006 to 2007 revealed from pop-up type ocean bottom seismometers, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A01-04.
- 河村優太・松本 聡・岡田知己・松野弥愛・飯尾能久・佐藤 将・Stephen Bannister・John Ristau・Martha Savage・Clifford Thurber・Richard Sibson, 2020, 高精度震源決定による2016年ニュージーランドカイクウラ地震におけるプレート境界面と断層形状の関係, *日本地震学会2020年度秋季大会*, S09-20.
- 木戸元之, 移動観測・海上多点観測を含むGNSS-音響観測の観測条件について, *日本測地学会第134回講演会*, 47.
- Kimura, M., 2021, Detection and quantification of pre-P gravity signals from the 2011 Tohoku-Oki earthquake—Proposal of pre-P gravity seismology through observation and theoretical modeling—, *Doctoral Dissertation*, University of Tokyo, Japan.
- 木村友季保・木戸元之・太田雄策・本荘千枝・富田史章, 2020, 根室沖の水平・鉛直地殻変動検出のための中心海底局を加えたアレイを用いたGNSS-音響観測, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, MIS13-P01.
- Kumazawa, T., Y. Ogata, and S. Toda, 2020, Wide-area seismicity anomalies before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. J. Int.*, 223(2), 1304-1312, doi:10.1093/gji/ggaa356.
- 熊澤貴雄・尾形良彦, 2020, 群発地震活動の非定常ETASモデルによる検出と測地学データに基づく予測可能性について, *地震予知連絡会会報*, 103(12-12), 378-384.
- Machida, Y., S. Nishida, T. Kimura, and E. Araki, 2020, Mobile pressure calibrator for the development of submarine geodetic monitoring systems, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2020JB020284, doi:10.1029/2020JB020284.
- Matsumoto, H. and E. Araki, 2021, Drift characteristics of DONET pressure sensors determined from in-situ and experimental measurements, *Front. Earth Sci.*, 8:600966, doi:10.3389/feart.2020.600966.
- Matsumoto, H., E. Araki, T. Kimura, G. Fujie, K. Shiraishi, T. Tonegawa, K. Obana, R. Arai, Y. Kaiho, Y. Nakamura, T. Yokobiki, S. Kodaira, N. Takahashi, R. Ellwood, V. Yartsev, and M. Karrenbach, Detection of hydroacoustic signals on a fiber-optic submarine cable, *Sci. Rep.*, 11, 2797, doi:10.1038/s41598-021-82093-8.
- Matsumoto, S., T. Okada, T. Terakawa, M. Uyeshima and Y. Iio, 2020, The advancement of

research on inland earthquake generation 2014–2018, *J. Disast. Res.*, 15, 96–105, doi:10.20965/jdr.2020.p0096.

- 松本 聡・河村優太・岡田知己・松野弥愛・飯尾能久・Rick Sibson・Martha Savage・Kenny Graham・鈴木真奈美・Stephen Bannister, 2020, 2016年カイクウラ地震震源域下のS波反射面の検出およびその本震・余震活動との関連, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SSS11-03.
- 松野弥愛, 2020, 2016年ニュージーランド・カイクウラ地震震源域における応力場の時空間変化, 東北大学修士論文.
- Matsushima, N., M. Utsugi, S. Takakura, T. Yamasaki, M. Hata, T. Hashimoto, and M. Uyeshima, 2020, Magmatic-hydrothermal system of Aso Volcano, Japan, from electrical resistivity structures, *Earth Planet. Space*, 72:57, doi:10.1186/s40623-020-01180-8.
- McHugh, C., M. Seeberb, L. Rasburyc, T. Strasserd, M. Kioka, A. Kanamatsu, T. Ikehara, and K. Usami, 2020, Isotopic and sedimentary signature of megathrust ruptures along the Japan subduction margin, *Marine Geology*, 428, 106283, doi:10.1016/j.margeo.2020.106283.
- Mindaleva, D., M. Uno, F. Higashino, T. Nagaya, A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 2020, Rapid fluid infiltration and permeability enhancement during middle-lower crustal fracturing: Evidence from amphibolite-granulite-facies fluid-rock reaction zones, Sør Rondane Mountains, East Antarctica, *Lithos*, 372-373, 105521, doi:10.1016/j.lithos.2020.105521.
- Mitogawa, T. and T. Nishimura, 2020, Coulomb stress change on inland faults during megathrust earthquake cycle in southwest Japan, *Earth Planet. Space*, 72:60, doi:10.1186/s40623-020-01174-6.
- Nishimura, T., 2020, Slow slip events in the Kanto and Tokai regions of central Japan detected using GNSS data during 1994–2020, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 22(2), e2020GC009329, doi:10.1029/2020GC009329.
- Mitsuoka, A., A. Shito, S. Matsumoto, Y. Yamashita, M. Nakamoto, S. Sakai, Y. Iio, H. Shimizu, K. Goto, T. Okada, M. Ohzono, Y. Yamanaka, M. Kosuga, M. Yoshimi and Y. Asano, 2020, Spatiotemporal Change in the Stress State Around the Hypocentral Area of the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2019JB018515, doi:10.1029/2019JB018515.
- Mitsuoka, T., A. Toramaru, A. Harijoko, and H.E. Wibowo, 2021, Eruption types and conduit dynamics of Kukusan and Genteng volcanoes of the Ijen volcanic complex, Indonesia, *Memoirs of the Faculty of Sciences, Kyushu University, Series D Earth and Planetary Sciences, Volume XXXV, 1*, 1–17.
- 水田達也・岡田知己・Savage Martha・高木涼太・吉田圭佑・八木原寛・松島 健・片尾 浩・山中佳子・小菅正裕・勝俣 啓・大園真子・中山貴史・平原 聡・河野俊夫・松澤 暢・2011年東北地方太平洋沖地震緊急観測グループ, 2020, S波スプリッティング解析による東北地方の地震波速度異方性測定(2), 日本地震学会2020年度秋季大会, S06P-03.
- Mngadi, S., A. Tsutsumi, Y. Onoe, M.S.D. Manzi, R. Durrheim, Y. Yabe, H. Ogasawara, S. Kaneki, N. Wechsler, A. Ward, M. Naoui, H. Moriya, and M. Nakatani, 2020, The effect

of a gouge layer on rupture propagation along brittle shear fractures in deep and high-stress mines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 137, doi:10.1016/j.ijrmmms.2020.104454.

Motoyama, A., M. Ichiki, Y. Ogawa, M. Uyeshima, K. Asamori, T. Uchida, T. Koyama, S. Sakanaka, H. Hase, K. Aizawa, and Y. Yamaya, 2020, A three-dimensional electrical conductivity model of the crust beneath the southern Tohoku district, NE Japan, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SIT24-P03.

村田耕一・佐藤利典・塩原 肇・篠原雅尚・山田知朗, 2020, マルチチャンネル特異スペクトル解析とパラメトリック関数のフィッティングを併用した海底圧力計データの解析, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS14-P15, 2020.

永田広平・中谷正生・吉田真吾, 2020, 透過弾性波を用いたガウジ層内を含む断層内部状態の観察, 日本地震学会 2020 年度秋季大会, S12-P04.

Nakagomi, K., T. Terakawa, S. Matsumoto, and S. Horikawa, 2021, Stress and pore-fluid pressure control of seismicity rate changes following the 2016 Kumamoto earthquake, Japan, *Earth Planet. Space*, 73:11, doi:10.1186/s40623-020-01329-5.

Nakamura, H., A. Sano, S. Kagami, T. Yokoyama, A. Ishikawa, T. Komiya, and H. Iwamori, 2020, Compositional heterogeneity of Archean mantle estimated from Sr and Nd isotopic systematics of basaltic rocks from North Pole, Australia, and the Isua supracrustal belt, Greenland, *Precambrian Res.*, 347, 105803, doi:10.1016/j.precamres.2020.105803.

Nakamura Y., T. Fujiwara, S. Kodaira, S. Miura, and K. Obana, 2020, Correlation of frontal prism structures and slope failures near the trench axis with shallow megathrust slip at the Japan Trench, *Sci. Rep.*, 10:11607 doi:10.1038/s41598-020-68449-6.

Nakata, R., T. Hori, and R. Hino, 2020, Modelling of spontaneous and periodic slow slip in the northern part of the Japan Trench, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SCG61-P04.

仲谷幸浩・八木原寛・平野舟一郎・中尾 茂・宮町宏樹・小林励司・山下裕亮・清水 洋・松島 健・内田和也・中東和夫・阿部英二・山田知朗・篠原雅尚, 2020, 南西諸島海溝北部の準定常海底地震観測網により検出された相似地震の発生間隔と空間分布, 日本地震学会 2020 年度秋季大会, S22-05.

Nakatani, Y., H. Yakiwara, S. Hirano, R. Kobayashi, H. Miyamachi, S. Nakao, Y. Yamashita, K. Uchida, T. Matsushima, H. Shimizu, K. N., T. Yamada, H. Abe, and M. Shinohara, 2020, Similar earthquake activity in the northern part of the Ryukyu subduction zone observed by onshore and offshore seismic data, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS03-P10.

Noda, H., D.S.K. Sato, and Y. Kurihara, 2020, Comparison of two time-marching schemes for dynamic rupture simulation with a space-domain BIEM, *Earth Planet. Space*, 72:76, doi:10.1186/s40623-020-01202-5.

Noda, H. and K. Okazaki, 2020, A fault constitutive law in a brittle-plastic transitional regime accounting for geometry of deformation in a shear zone, JpGU-AGU Joint Meeting, SSS15-08.

- Noda, H., 2021, Shear strength of a shear zone in the brittle-plastic transition based on tensorial strain partitioning, *J. Struct. Geol.*, in press.
- 野村俊一・尾形良彦, 2020, 多様な予測方式に対する前震識別モデルとその予測性能評価, *地震予知連絡会会報*, 103 (12-8), 361-366.
- 小笠原宏, 2020, 南アフリカ大深度金鉱山の地震リスク低減 - 2010~2015 年度 SATREPS 研究成果の概要 -, *地震ジャーナル*, 70, 32-41.
- Ogasawara, H., B. Liebenberg, Y. Yabe, Y. Yokoyama, T. Hirono, D.M. Nisson, T.C. Onstott, T.L. Kieft, E. van Heerden, T. Wiersberg, T. Noda, M.S.D. Manzi, S.B. Mngadi, R.J. Durrheim, Y. Yamamoto, T. Ito, A. Funato, M. Ziegler, J.J. Mori, C. Dinske and the DSeis team, 2020, The seismogenic zones of an M2.0-5.5 earthquakes successfully recovered in deep South African gold mines: the outcomes and the follow-up plan, *EGU General Assembly 2020*, EGU2020-12094, doi:10.5194/egusphere-egu2020-12094.
- Ogata, Y., K. Katsura, M. Tanemura, D. Harte, and J. Zhuang, 2021, Bayesian seismicity analysis based on Delaunay triangle nets: Hierarchical Space-Time Point Process Models (HIST-PPM; including HIST-ETAS model) *Computer Science Monograph No. 35*, Institute of Statistical Mathematics, <https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index.html>.
- Ogata, Y., 2021, Visualizing heterogeneities of earthquake hypocenter catalogs: modeling, analysis, and compensation, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 8:8, doi:10.1186/s40645-020-00401-8.
- Ogata, Y. and T. Omi, 2020, Statistical monitoring and early forecasting of the earthquake sequence: Case studies after the 2019 M 6.4 Searles Valley earthquake, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 110(4), 1781-1798, doi:10.1785/0120200023.
- 尾形良彦, 2020, 階層的時空間 ETAS モデルによる短期・中期予測, *地震予知連絡会会報*, 103(12-13), 385-387.
- Ohtani, M., M. Nakatani, and N. Kame, 2021, Time to seismic failure induced by repeating SSEs in a single-degree-of-freedom spring-slider model, *Geophys. J. Int.*, 224(2), 1242-1255, doi:10.1093/gji/ggaa489.
- Okada, T., M. Matsuno, S. Matsumoto, Y. Kawamura, Y. Iio, T. Sato, T. Nakayama, S. Hirahara, S. Bannister, J. Ristau, M. Savage, C. Thurber, and R. Sibson, 2020, Possible involvement of overpressured fluid in multi-fault rupture inferred from seismic observations of the 2016 Kaikoura earthquake, *Annual Conference of Geoscience Society of New Zealand*, Christchurch, New Zealand.
- 大橋聖和・竹下 徹・平内健一, 2020, 断層帯と断層レオロジーの進化, *地学雑誌*, 129(4), 473-489, doi:10.5026/jgeography.129.473.
- 大竹和機・亀 伸樹・大谷真紀子, 2020, 構造不均質中の 2 次元地震サイクルシミュレーションで必要となる静的 XBIEM 核関数の全導出, *日本地震学会 2020 年度秋季大会*, S08P-11.
- Ootani, Y., J. Xu, N. Takahashi, K. Akagami, S. Sakaki, Y. Wang, N. Ozawa, T. Hatano, K. Adachi, and M. Kubo, 2020, Self-Formed Double Tribolayers Play Collaborative Roles in Achieving Super-Low Friction in Aqueous Environment, *J. Phys. Chem. C*, 124, 15, 8295-8303, doi:10.1021/acs.jpcc.0c02068.
- Plata-Martinez R.O., S. Ide, M. Shinohara, E.S.M. Garcia S., N. Mizun, L.A. Dominguez,



- T. Taira, Y. Yamashita, A. Toh, T. Yamada, J.A. Real, V.M. Cruz-Atienza, A. Husker, and Y. Ito, 2020, First detection of shallow tremor at the Guerrero gap, Mexico, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, S-CG58.
- Plata-Martinez R.O., Y. Ito, and V.M. Cruz-Atienza, 2020, Explorando nuestro planeta para descifrar sus secretos: ejemplo de un proyecto multidisciplinario entre México y Japón, Reunión Anual de la Union Geofísica Mexicana 2020, SE12-01.
- Plata-Martinez R.O., S. Ide, M. Shinohara, E.S.M. Garcia S., N. Mizun, L.A. Dominguez, T. Taira, Y. Yamashita, A. Toh, T. Yamada, J.A. Real, V.M. Cruz-Atienza, A. Husker, and Y. Ito, 2020, Shallow slow earthquakes and mechanical properties at the Guerrero seismic Gap, Mexico, AGU Fall Meeting 2020, S027-0013.
- Romanet, P., F.A. Antoniow, R. Ando, S. Bannister, C. Chamberlain, Y. Iio, S. Matsumoto, T. Okada, R.H. Sibson, A. Toh, and S. Ide, 2021, Detection of tremor in the Marlborough region and its relationship with the 2016 Mw 7.9 Kaikoura (New Zealand) earthquake, EGU General Assembly 2020, EGU21-637, doi:10.5194/egusphere-egu21-637.
- Roy R. and T. Hatano, 2020, Creep failure in a threshold activated dynamics: Role of temperature during a sub-critical loading, *Phys. Rev. Res.*, 2, 023104, doi:10.1103/PhysRevResearch.2.023104.
- Saitoh, K., T. Hatano, A. Ikeda, and B.P. Tighe, 2020, Stress Relaxation above and below the Jamming Transition, *Phys. Rev. Lett.* 124, 118001, doi:10.1103/PhysRevLett.124.118001.
- Sano, Y., T. Kagoshima, N. Takahata, K. Shirai, J.-O. Park, G.T. Snyder, T. Shibata, J. Yamamoto, Y. Nishio, Ai-Ti Chen, S. Xu, D. Zhao, and D.L. Pinti, 2020, Groundwater Anomaly Related to CCS-CO<sub>2</sub> Injection and the 2018 Hokkaido Eastern Ibari Earthquake in Japan, *Front. Earth Sci.*, 8:611010, doi:10.3389/feart.2020.611010.
- Sato, Y., S. Shinzato, T. Ohmura, T. Hatano, and S. Ogata, 2020, Unique universal scaling in nanoindentation pop-ins, *Nat. Commun.*, 11, 4177, doi:10.1038/s41467-020-17918-7.
- Sawai, M., J. Fukami, M. Takahashi, Y. Hayasaka, and K. Kanagawa, 2020, Frictional properties of greenstone: Effects of the seamount subduction on faulting at the subduction zone, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SCG57-P03.
- Sawa, S., N. Miyajima, J. Muto, and H. Nagahama, accepted, Strain-induced partial serpentinization of germanate olivine with a small amount of water, *Am. Mineral.*, doi:10.2138/am-2021-7735.
- Sawa, S., N. Miyajima, J. Muto, and H. Nagahama, 2020, Strain-induced partial serpentinization of germanate olivine under unsaturated, limited amount of water, The 61st High Pressure Conference of Japan.
- Sawa, S., N. Miyajima, J. Muto, and H. Nagahama, 2021, Microstructure evolution of olivine-spinel phase transformation under differential stress for deep-focus earthquakes by phase field method, ICOTOM 19 (March 1-4, 2021).
- Sawaki, Y., Y. Ito, K. Ohta, T. Shibutani, and T. Iwata, 2020, A new approach to clarify slow earthquake source regions: Multi-band receiver function analysis including

local deep-focus events, EGU General Assembly 2020, EGU2020-4921, doi:10.5194/egusphere-egu2020-4921.

Sawaki, Y., Y. Ito, K. Ohta, T. Shibutani, and T. Iwata, 2020, Multi-band receiver function analysis including Local Deep-focus Events in Northeastern Kii, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SCG58-14.

佐脇泰典・植村美優・片山郁夫・伊藤喜宏, 2020, 室内摩擦実験におけるレシーバ関数法の適用, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS15-P16.

Seki, K., W. Kanda, K. Mannen, S. Takakura, T. Koyama, R. Noguchi, Y. Yukutake, M. Ishikawa, M. Fukai, M. Harada, and Y. Abe, 2021, Imaging the source region of the 2015 phreatic eruption at Owakudani, Hakone Volcano, Japan, using high-density audio-frequency magnetotellurics, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2020GL091568, doi:10.1029/2020GL091568.

澁谷拓郎・中川潤・長岡愛理・三浦勉・山下裕亮・山崎健一・小松信太郎, 2020, 四国下に沈み込むフィリピン海プレートのレシーバ関数イメージング(3), 日本地震学会2020年度秋季大会, S06-08.

Shito, A., S. Matsumoto, T. Ohkura, H. Shimizu, S. Sakai, Y. Iio, H. Takahashi, H. Yakiwara, T. Watanabe, M. Kosuga, T. Okada, M. Yoshimi, and Y. Asano, 2020, 3-D intrinsic and scattering seismic attenuation structures beneath Kyushu, Japan. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2019JB018742, doi:10.1029/2019JB018742.

志藤あずさ・光岡郁穂・松本聡・松島健・相澤広記・清水洋・内田和也・神薊めぐみ・手操佳子・中元真美・宮町凜太郎・一柳昌義・大園真子・岡田和見・勝俣啓・高田真秀・高橋浩晃・谷岡勇市郎・山口照寛・小菅正裕・東龍介・内田直希・江本賢太郎・太田雄策・岡田知己・海田俊輝・小園誠史・鈴木秀市・高木涼太・出町知嗣・中原恒・中山貴史・平原聡・松澤暢・三浦哲・山本希・今西和俊・内出崇彦・吉見雅行・青井真・浅野陽一・上野友岳・藤田英輔・阿部英二・飯高隆・岩崎貴哉・加藤愛太郎・蔵下英司・酒井慎一・椎名高裕・芹澤正人・田中伸一・中川茂樹・平田直・増田正孝・宮川幸治・八木健夫・渡邊篤志・後藤和彦・伊藤武男・奥田隆・寺川寿子・堀川信一郎・前田裕太・松廣健二郎・山中佳子・渡辺俊樹・飯尾能久・片尾浩・加納靖之・津田寛大・三浦勉・村本智也・山下裕亮・大久保慎人・山品匡史・大倉敬宏・中尾茂・平野舟一郎・宮町宏樹・八木原寛, 2020, 2016年熊本地震合同地震観測データ—地震学的解析の基礎的資料として—, *地震*, 2, 73, 149-157, doi:10.4294/zisin.2019-11.

清水以知子・岡本あゆみ・A. Niemeijer・中谷正生・荒井駿・C. Spiers・竹下徹・上田匡将, 2020, 中央構造線の断層強度と脆性-延性遷移, JpGU-AGU Joint Meeting, SCG63-12.

Shimizu, K., Y. Yagi, R. Okuwaki, and Y. Fukahata, 2020, Development of an inversion method to extract information on fault geometry from teleseismic data, *Geophys. J. Int.*, 220, 1055-1065, doi:10.1093/gji/ggz496.

Shimizu, K., Y. Yagi, R. Okuwaki, and Y. Fukahata, 2021, Construction of fault geometry by finite-fault inversion of teleseismic data, *Geophys. J. Int.*, 224, 1003-1014, doi:10.1093/gji/ggaa501.

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.*, 8(3), e2020EA001359, doi:10.1029/2020EA001359.
- 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.2020.599810.
- 塩原 肇・杉岡裕子・太田豊宣・大西信人, 2020, -自律型新方式海底地震計の開発試験に向けた深海用-小型ビデオカメラの開発, *東京大学地震研究所技術研究報告*, 26, 1-9.
- Shiraishi K., Y. Yamada, M. Nakano, M. Kinoshita, and G. Kimura, 2020, Three-dimensional topographic relief of the oceanic crust may control the occurrence of shallow very-low-frequency earthquakes in the Nankai Trough off Kumano, *Earth, Planet. Space*, 72:72, doi:10.1186/s40623-020-01204-3.
- Shiraishi, R., J. Muto, A. Tsunoda, S. Sawa, and A. Suzuki, 2020, Semi-brittle behavior of lawsonite in high pressure deformation experiments, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SCG69-02.
- 白石令・武藤 潤・久保友明・森悠一郎・本田陸人・肥後祐司・丹下慶範, 2020, 高温高压下におけるローソナイトの変形挙動, 第 61 回高压討論会, 2P28.
- Suzuki, T., 2020, Introducing linear marginal stability hypothesis for obtaining slip-front-propagation velocity with the slip- and slip-velocity-dependent friction law, *AGU Fall Meeting*, S31-0012.
- Suzuki, T. and H. Matsukawa, 2020a, Systematic understanding of slip-front-propagation velocity with the slip-velocity-dependent friction law, *Slow Earthquakes Workshop*, P-C2-07.
- Suzuki, T. and H. Matsukawa, 2020b, Slip-front-propagation velocity with non-vanishing friction stress at infinitely large slip velocity, *JpGU-AGU Joint Meeting*, SCG58-31, 12-15 July, online.
- 鈴木岳人, 2020, 2種類の滑り端伝播と線形臨界定性解析によるその伝播速度の解析, *日本地震学会 2020 年度秋季大会*, S08-16.
- Suzuki, T., 2021, Characteristic sensitivity of turbulent flow within a porous medium under initial conditions, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 90, 024401, doi:10.7566/JPSJ.90.024401.
- Tanaka, Y., V. Klemann, and Z. Martinec, 2020, Estimating the effects of laterally heterogeneous elasticity on coseismic deformation -a rotationally symmetric case, *AGU Fall Meeting 2020*, G53B-0615.
- Takagi, R., G. Toyokuni, and N. Chikasada, 2021, Ambient noise correlation analysis of the S-net records: extracting surface wave signals below instrument noise levels, *Geophys. J. Int.*, 224, 1640-1657, doi:10.1093/gji/ggaa548.
- Takahashi, H., R. Hino, N. Uchida, K. Ohta, and M. Shinohara, 2020, Low-frequency tremor activity along northern Japan Trench before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *AGU Fall Meeting 2020*, T003-0013.
- 田上綾香, 2020, 日本海東縁地域の応力場と発生した地震の断層面との関係, *東北大学修士論文*.
- Terakawa, T., W. Seo, K.H. Kim, and J.H. Ree, 2020, 3D pore-fluid pressures in source

region of 2017 Pohang earthquake inferred from earthquake focal mechanisms, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2019GL085964.

寺川寿子・中込広大・松本聡・堀川信一郎・2016年熊本地震合同地震観測グループ, 2016年熊本地震の余震発生における間隙流体圧の影響, JpGU-AGU Joint Meeting, SSS15-14.

寺川寿子・Wooseok Seo・Kwang-Hee Kim・Jin-Han Ree, 2017年韓国浦項地震の発生メカニズム, 日本地震学会2020年度秋季大会, S08-03.

Tomonaga, Y., K. Yagasaki, J.-O. Park, J. Ashi, S. Toyoda, N. Takahata, and Y. Sano, 2020, Fluid dynamics along the Nankai Trough: He isotopes reveal direct seafloor mantle-fluid emission in the Kumano Basin (southwest Japan), *ACS Earth Space Chem.*, 4(11), 2105-2112, doi:10.1021/acsearthspacechem.0c00229.

Tonegawa, T., Y. Yamashita, T. Takahashi, M. Shinohara, Y. Ishihara, S. Kodaira and Y. Kaneda, 2020, Spatial relationship between shallow very low frequency earthquakes and the subducted Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-nada region of the Nankai subduction zone, *Geophys. J. Int.*, 222, 1542-1554, doi:10.1093/gji/ggaa264.

Tonegawa, T., T. Kimura, and E. Araki, 2021, Near-field body-wave extraction from ambient seafloor noise in the nankai subduction zone, *Front. Earth Sci.*, 8, 699, doi:10.3389/feart.2020.610993.

土山絢子・中島淳一, 2020, 深発の相似地震における震源パラメータの多様性, 日本地震学会2020年度秋季大会, S09-24.

Tsuru, T., J.-O. Park, K. Amakasu, T. No, K. Arai, T. Inoue, S. Furuyama, K. Uchida, and Y. Nakamura, 2020, Possible fluid discharge associated with faults observed by a high-resolution dense-2D seismic reflection survey in Uchiura Bay off Numazu, Japan, *Earth Planet. Space*, 72:121, doi:10.1186/s40623-020-01242-x.

Uchide, T., 2020, Focal mechanisms of small earthquakes beneath the Japanese islands based on first-motion polarities picked using deep learning, *Geophys. J. Int.*, 223(3), 1658-1671, doi:10.1093/gji/ggaa401.

Ueda, T., A. Kato, Y. Ogata, and L. Yamaya, 2021, Spatial Variations in Seismicity Characteristics in and Around the Source Region of the 2019 Yamagata-Oki Earthquake, Japan, *Earth Planet. Space*, doi:10.1186/s40623-020-01325-9.

Ueki, K., T. Kuwatani, A. Okamoto, S. Akaho, and H. Iwamori, 2020, Thermodynamic modeling of hydrous-melt-olivine equilibrium using exhaustive variable selection, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 300, 106430, doi:10.1016/j.pepi.2020.106430.

Wang, Z.W., and D. Zhao, 2021, 3D anisotropic structure of the Japan subduction zone, *Sci. Adv.* 7, eabc9620, doi:10.1126/sciadv.abc9620.

Yabe, Y., M. Kanematsu, M. Higashi, R. Tadokoro, S. Yoshida, K. Sugimura, H. Ogasawara, T. Ito, A. Funato, M. Ziegler, B. Liebenberg, B. Watson, S. Mngadi, M. Manzi, and R. Durrheim, 2020, Stress state in the upper margin of the aftershock zone of the 2014 Orkney earthquake (M5.5), South Africa, estimated from analyses of drill cores and borehole breakouts of ICDP-DSeis drillings, EGU General Assembly 2020, EGU2020-3288, doi:10.5194/egusphere-egu2020-3288.

Yabe, S., Y. Hamada, and T. Suzuki, 2020, Competing thermal pressurization and dilatancy

hardening realizes coexistence of fast and slow slip on the shallow plate boundary fault, AGU Fall Meeting, S31-0004.

矢部 優, 鈴木岳人, 2020, スロー地震と巨大地震が共存する浅部デコルマの断層破壊メカニズム: 掘削試料を用いた断層破壊数値計算による検討, JpGU-AGU Joint Meeting, SSS15-18.

Yamasaki, T., H. Takahashi, M. Ohzono, T. J. Wright, and T. Kobayashi, 2020, Time influence of elastic thickness non-uniformity of viscoelastic crustal response to magma emplacement: application to the Kutcharo caldera, eastern Hokkaido, Japan, *Geophys. J. Int.*, 224, 701-718, doi:10.1093/gji/ggaa440.

Yamashita S. and A. Toramaru, 2020, Control of magma plumbing systems on long term eruptive behavior of Sakurajima volcano: Insights from CSD (Crystal Size Distribution) analysis, *Dynamic Magma Evolution, Geophysical Monograph 254, First Edition*, Edited by Francesco Vetere, doi:10.1002/9781119521143.ch4.

山下裕亮・仲谷幸浩・八木原寛・平野舟一郎・中尾 茂・宮町宏樹・小林励司・清水 洋・松島 健・内田和也・中東和夫・阿部英二・山田知朗・篠原雅尚, 2020, 喜界島東方海域における浅部低周波微動活動(その1), 日本地震学会2020年度秋季大会, S22P-04.

Yamashita, Y., M. Shinohara, H. Sugioka, and A. Ito, 2020, Shallow low-frequency tremor at Hyuga-nada (2017-2018), *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A01-16.

Yamashita, Y., K. Mochizuki, M.K. Savage, E. Warren-Smith, and L.M. Wallace, 2020, Ocean bottom seismological observation of slow earthquake activity in the northern part of the Hikurangi subduction margin, New Zealand, AGU Fall meeting 2020, T017-0001.

Yamaguchi, Y., S. Biswas, T. Hatano, and L. Goehring, 2020, Failure processes of cemented granular materials, *Phys. Rev. E* 102, 052903, doi:10.1103/PhysRevE.102.052903.

Ye, T., X. Chen, Q. Huang, L. Zhao, Y. Zhang, and M. Uyeshima, 2020, Bifurcated crustal channel flow and seismogenic structures of intraplate earthquakes in western Yunnan, China as revealed by three-dimensional magnetotelluric imaging, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2019JB018991, doi:10.1029/2019JB018991.

Yoshida, K., T. Taira, Y. Matsumoto, T. Saito, K. Emoto, and T. Matsuzawa, 2020, Stress release process along an intraplate fault analogous to the plate boundary: A case study of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake, NE Japan, *J Geophys. Res.: Solid Earth*, 125(5), e2020JB019527, doi.10.1029/2020JB019527.

吉田圭佑・松澤 暢, 2020, 近年の地震観測により得られた東北日本の応力場の不均質性と断層強度および地震発生機構の関係, *地学雑誌*, 129(4), 451 - 471, doi:10.5026/jgeography.129.451.

Yoshida, K., 2021, Detection of temporal change in near-source attenuation during intense fluid-driven seismicity following the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. J. Int.*, 224, 138-150, doi:10.1093/gji/ggaa421.

Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi, and K. Kasahara, 2020, Low-frequency earthquakes observed in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan, *Geophys. J. Int.*, 223, 1724-1740,

doi:10.1093/gji/ggaa418.

Yoshida, K., N. Uchida, S. Hirahara, T. Nakayama, T. Matsuzawa, T. Okada, Y. Matsumoto, and A. Hasegawa, 2020, 2019 M6.7 Yamagata-Oki earthquake in the stress shadow of 2011 Tohoku-Oki earthquake: Was it caused by the reduction in fault strength?, *Tectonophys.*, 793, 228609, doi:10.1016/j.tecto.2020.228609.

Yu, Z. and D. Zhao, 2020, Seismic evidence for water transportation in the forearc off Northern Japan, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2019JB018600, doi:10.1029/2019JB018600.

行竹洋平, 2020, 箱根火山の深部低周波地震, *地震ジャーナル*, 69, 31-41.

Yukutake, Y., T. Iwata, and Y. Iio, 2020, Estimation of the heterogeneity of stress fields using misfit angles in focal mechanisms. *Tectonophys.*, 290, 228553, doi:10.1016/j.tecto.2020.2285533.

Zhao, D., 2021, Seismic imaging of northwest pacific and east Asia: New insight into volcanism, seismogenesis and geodynamics, *Earth Sci. Rev.*, 214, 103507, doi:10.1016/j.earscirev.2021.103507.

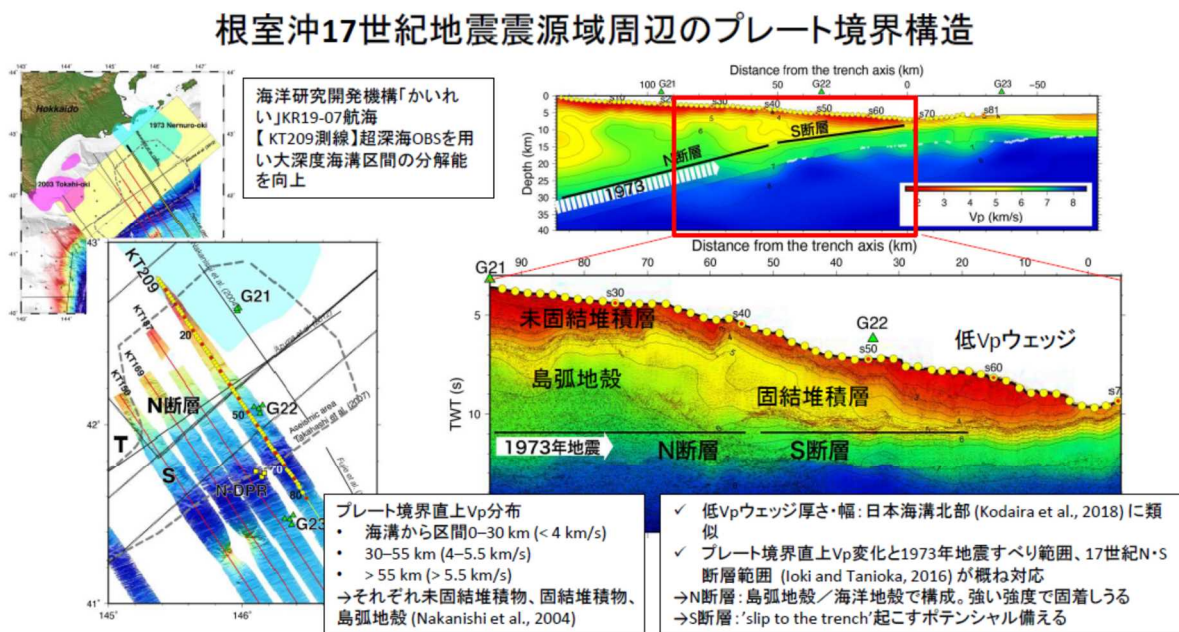


図1. 根室沖17世紀地震震源域周辺のプレート境界構造 (東京大学地震研究所[課題番号: ERI\_05])。

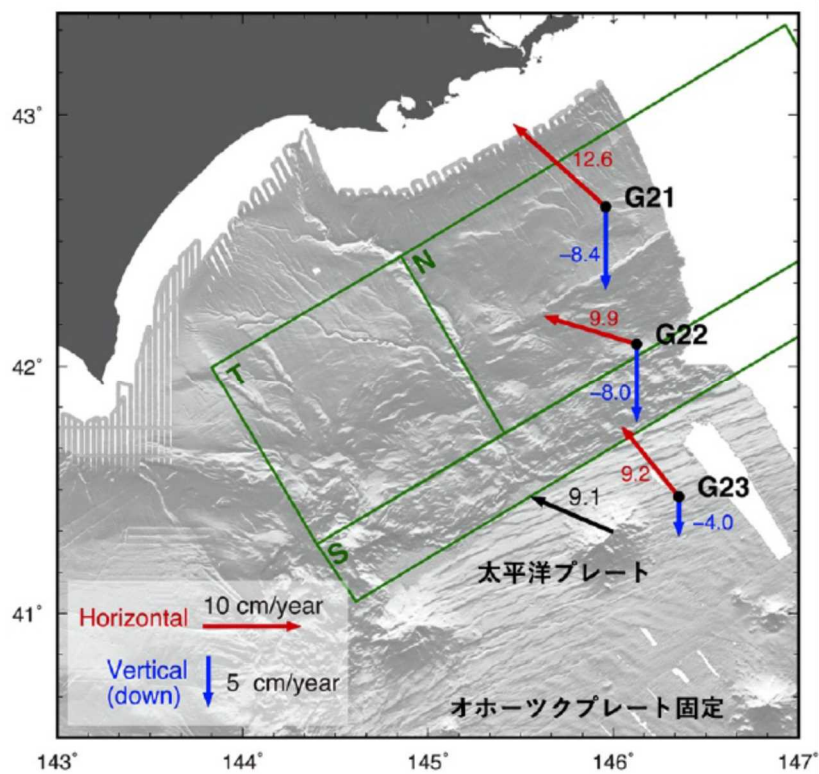


図 2 . GNSS-A による地殻変動の暫定推定結果 (東京大学地震研究所 [課題番号 : ERI\_05]、東北大学災害科学国際研究所 [課題番号 : IRID02])  
 15 ヶ月の間をあけた 2 回の GPS-A 観測から得られた地殻変動速度の暫定的な推定結果。水平動を赤、上下動を青ベクトルで示す。緑の矩形は Ioki and Tanioka (2016) による 17 世紀型超巨大地震の想定断層。

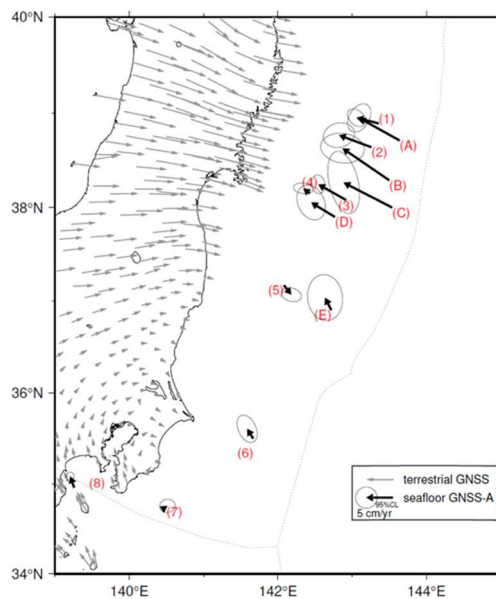


図 3 . 日本海溝沿いの直近約 4 年間の水平移動速度 (海上保安庁 [課題番号 : JCG\_03])  
 北米プレートを固定している。



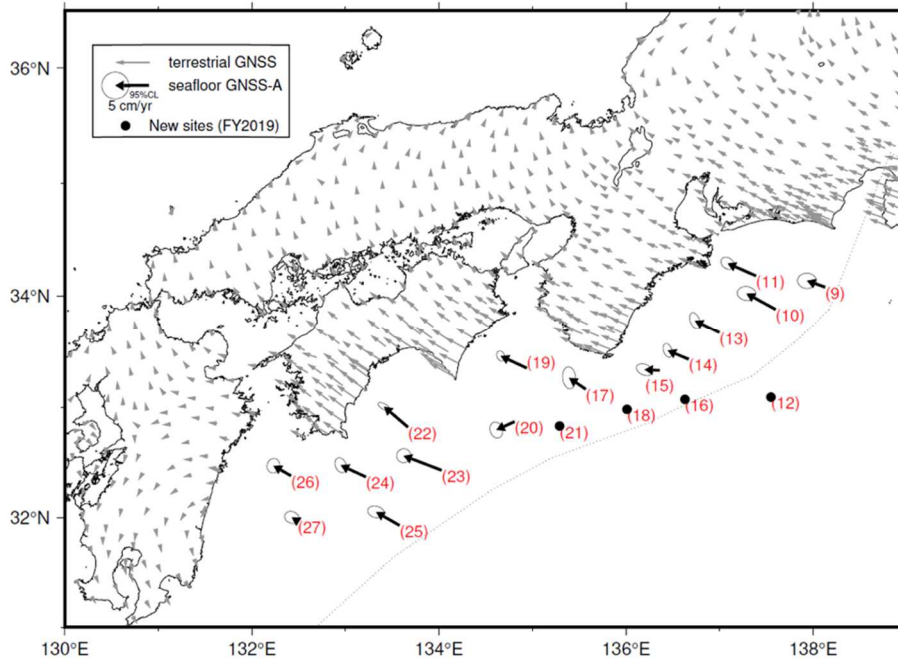


図4. 南海トラフ沿いの直近約4年間の水平移動速度(海上保安庁[課題番号: JCG\_03])  
アムールプレートを固定している。

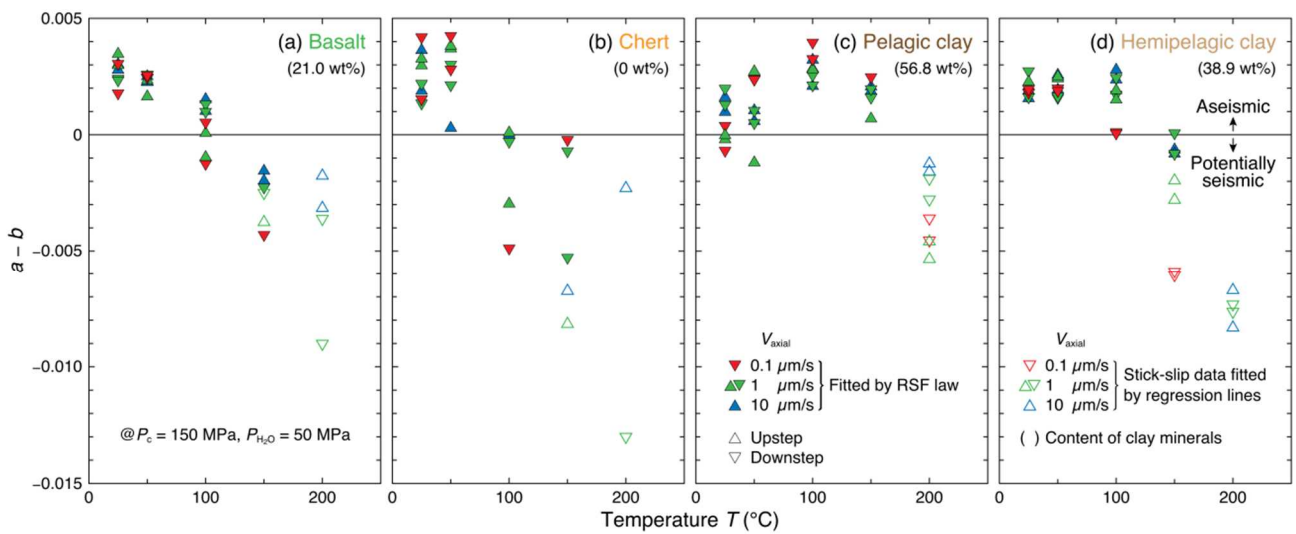


図5. 玄武岩試料 (a)、チャート試料 (b)、遠洋性粘土試料 (c) および半遠洋性粘土試料 (d) の  $a - b$  値の温度変化(東京大学地震研究所[課題番号: ERI\_05])

( ) 内の数値は各試料の粘土鉱物含有量。



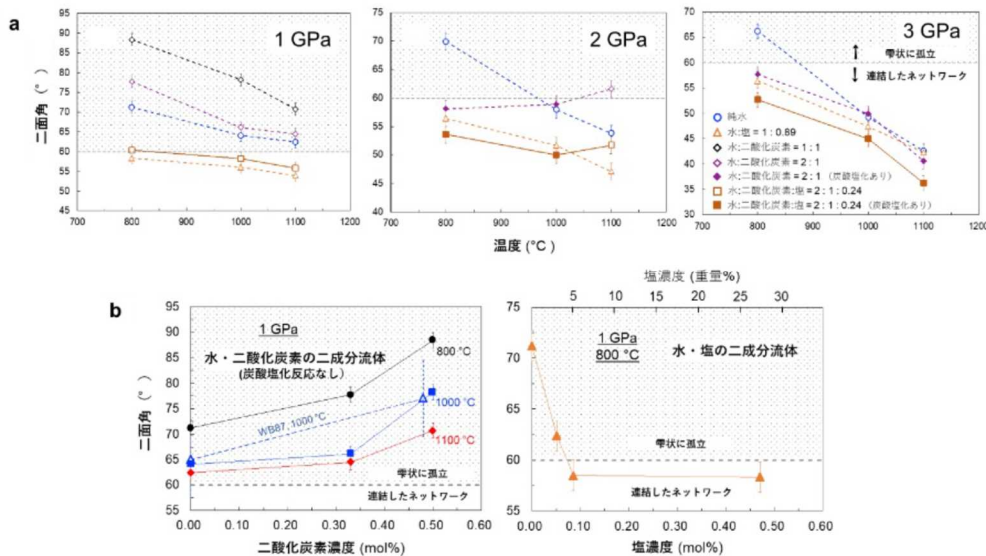
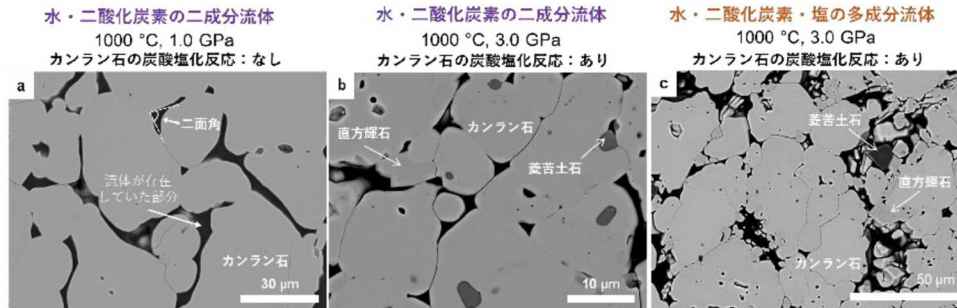


図 6. カンラン石の粒間における超臨界流体（東北大学[課題番号：THK\_02]、Huang et al., 2020）

上) 超臨界流体を粒間に含んだカンラン石（マンツルの主要構成鉱物）の多結晶体（実験産物）の電子顕微鏡写真。暗い部分が高温高压下で流体が存在していた部分。(a)水・二酸化炭素の二成分流体では、カンラン石の炭酸塩化が起こらない低圧条件下で、図の二面角が  $60^\circ$  より大きくなり流体は孤立して存在する。(b)高压条件になると、炭酸塩化が起こり、直方輝石と炭酸塩鉱物の菱苦土石が生じる。炭酸塩化の効果で、二面角が  $60^\circ$  より小さくなり、3 次元的に鉱物の稜に沿って連結した流体ネットワークが形成される。(c) 水・二酸化炭素・塩の多成分系になると、カンラン石の炭酸塩化の効果に加え、流体中の塩の効果で二面角がさらに小さくなる。

下) 超臨界流体—カンラン石間の二面角（実験結果）。(a) 温度圧力依存性。水・二酸化炭素・塩からなる多成分流体の二面角（濃いオレンジ色の凡例）は、カンラン石の炭酸塩化が起こらない高温低圧条件では、 $800^\circ\text{C}$ 、 $1.0\text{ GPa}$  の条件を除き、二面角が  $60^\circ$  より小さくなるが、水・塩の 2 成分流体の二面角（黄色い凡例）よりは大きい。一方、カンラン石の炭酸塩化が起こる低温高压条件では、常に二面角が  $60^\circ$  より小さくなり、すべての実験系の中で、二面角が最も小さくなる。流体中の成分比はモル数で表している。(b) 二面角の二酸化炭素濃度および塩濃度依存性。純水に二酸化炭素が少量加わっても、二面角は緩やかにしか上昇しない一方、塩が少量加わると二面角は急激に減少する。ゆえに、二酸化炭素および塩を少量含む多成分流体では、塩の二面角を減少させる効果が、二酸化炭素の二面角を増加させる効果を上回る。

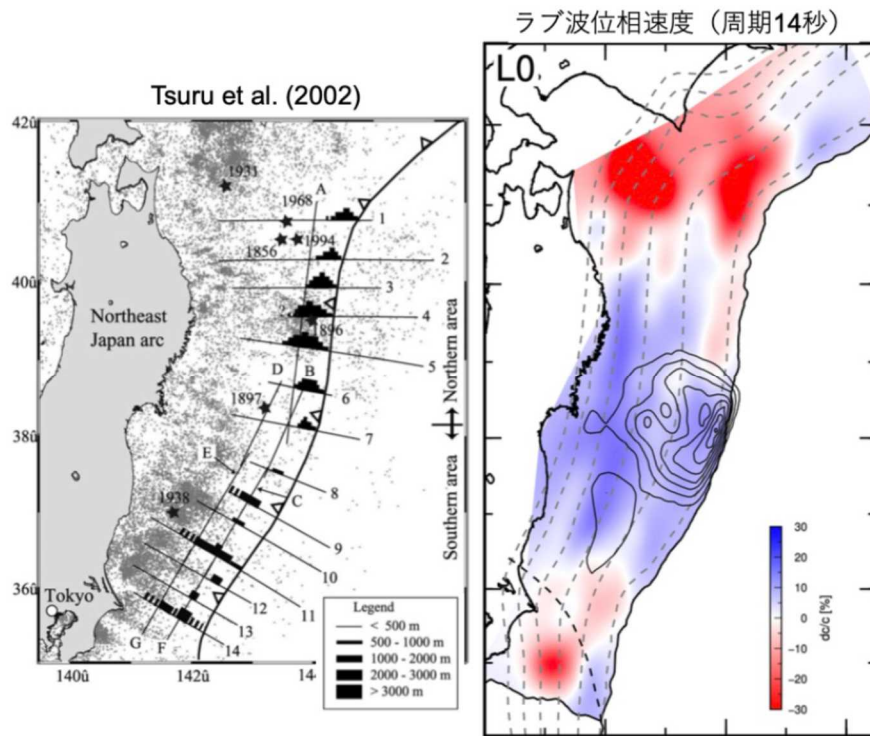


図7. Tsuru et al. (2002) による低速度物質の空間分布 (左) と S-net 常時微動データから推定したラブ波位相速度マップ (右) (東北大学[課題番号: THK\_02])  
 点線のコンターはプレート境界等深線 (Kita et al., 2010、 Nakajima and Hasegawa, 2006)、実線コンターは 2011 年東北沖地震のすべり分布 (Iinuma et al., 2012) を示す。

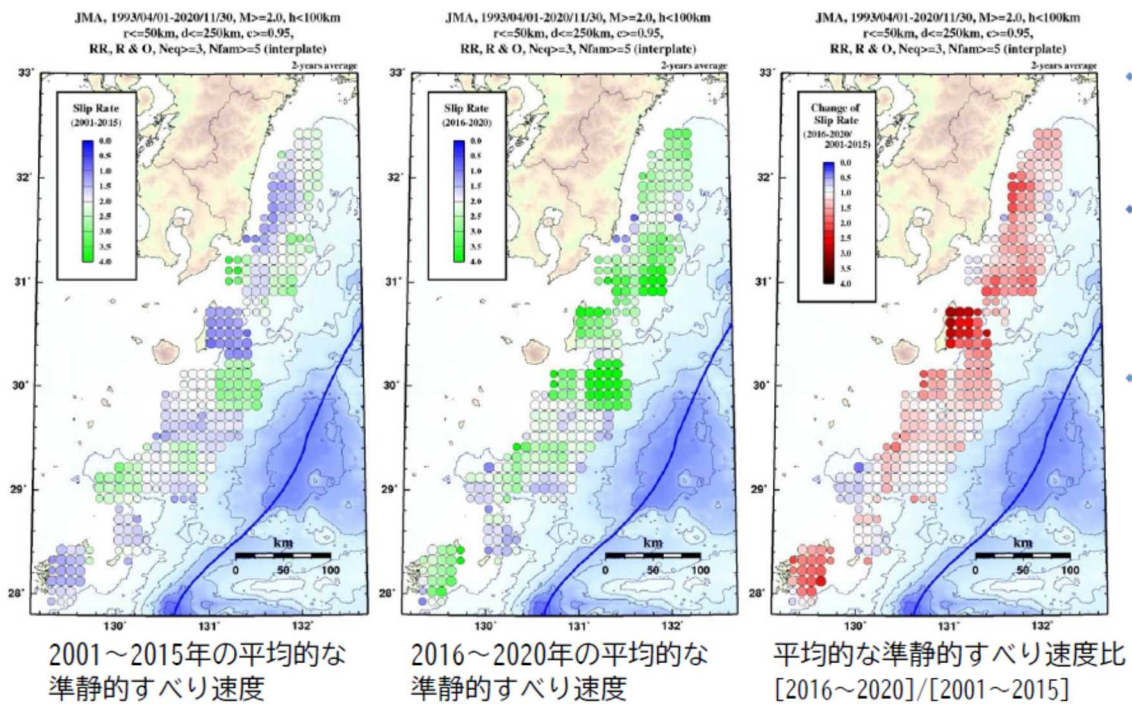


図8. 日向灘-南西諸島北部域の準静的すべり速度の時空間変化 (鹿児島大学[課題番号: KGSM01])。

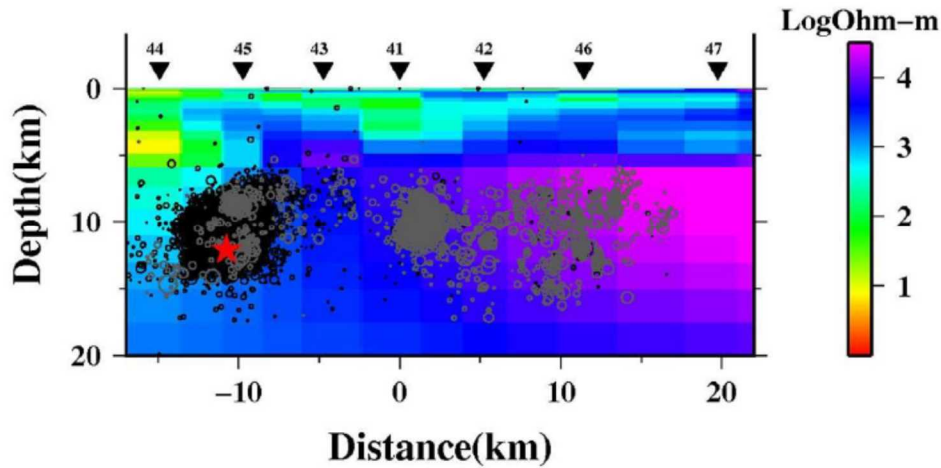


図 9. 三瓶山周辺域の 2 次元比抵抗構造断面図 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI03]) 測線を中心として幅±5km の範囲に含まれる震源データ (灰色: 2000 年 1 月 1 日~2018 年 3 月 31 日、黒色: 2018 年 4 月 1 日~2018 年 12 月 31 日) を気象庁ホームページ「地震月報」よりダウンロードして描画した。2018 年島根県西部地震の震源を赤星印★でプロットした。

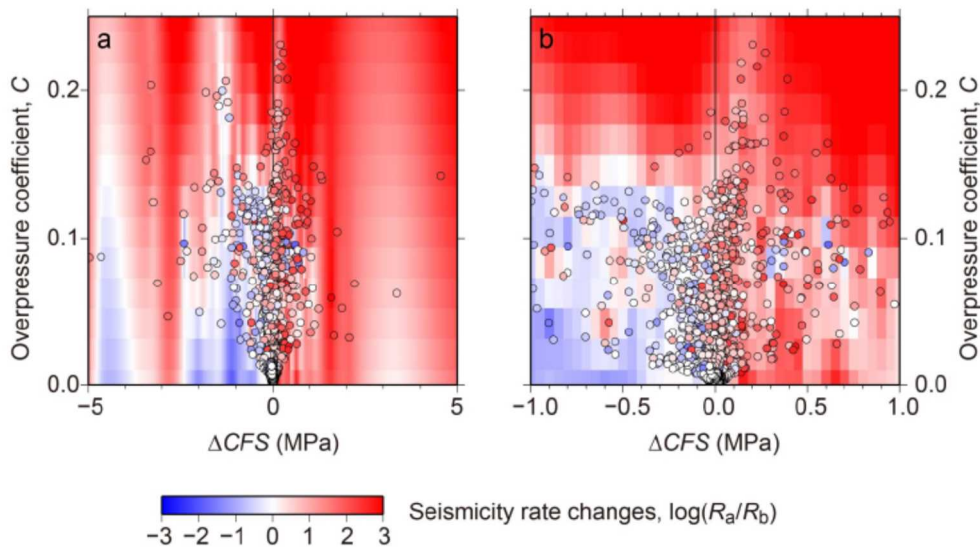


図 10. 2016 年熊本地震による  $\Delta CFS$  及び地震前の間隙流体圧と地震活動度の変化の関係 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI03]、Nakagomi et al., 2021)

a.  $-5 \text{ MPa} \leq \Delta CFS \leq 5 \text{ MPa}$ 、 b.  $-1 \text{ MPa} \leq \Delta CFS \leq 1 \text{ MPa}$ 。 間隙流体圧係数  $C$  は、 $C = (P_f - P_H) / (P_L - P_H)$  で定義される無次元数である ( $P_f$ : 間隙流体圧,  $P_H$ : 静水圧,  $P_L$ : 静岩圧)。地震活動度の変化は、地震前 3 年間 (2013 年 4 月 14 日~2016 年 4 月 13 日) の地震数 ( $R_b$ ) に対する地震後 3 年間 (2016 年 4 月 14 日~2019 年 4 月 13 日) の地震数 ( $R_a$ ) の比で表現した。○は各評価点での結果で、○のカラーは地震活動度の変化を示す。背景のカラーは、これらの結果を補間したものである。



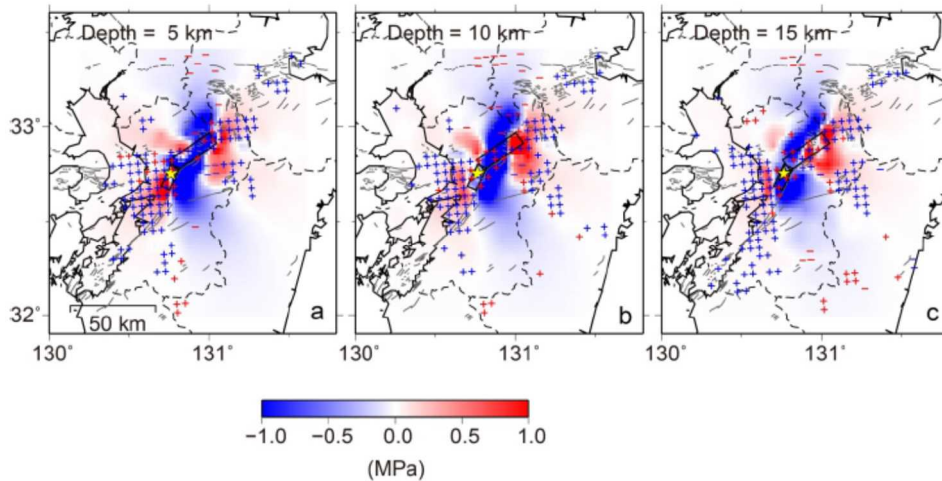


図 11.  $\Delta CFS$  と地震活動度の変化の関係（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI03]）。  
 a-c は、それぞれ、深さ 5 km、10 km、15 km の結果を示す。青と赤の+は、 $\Delta CFS > 0$  及び  $\Delta CFS < 0$  の領域で、熊本地震後に地震活動が 10 倍以上に増加した領域である。青と赤の-は、 $\Delta CFS > 0$  及び  $\Delta CFS < 0$  の領域で、熊本地震後に地震活動が 1/10 以下に減少した領域である。 $\Delta CFS$  の値は、-1 MPa~1 MPa までの範囲内で打ち切って表示している。☆は 2016 年熊本地震の震源、矩形は熊本地震震源断層の北部及び南部セグメント（Asano and Iwata, 2016）、点線は県境、グレーの線は活断層を表す。

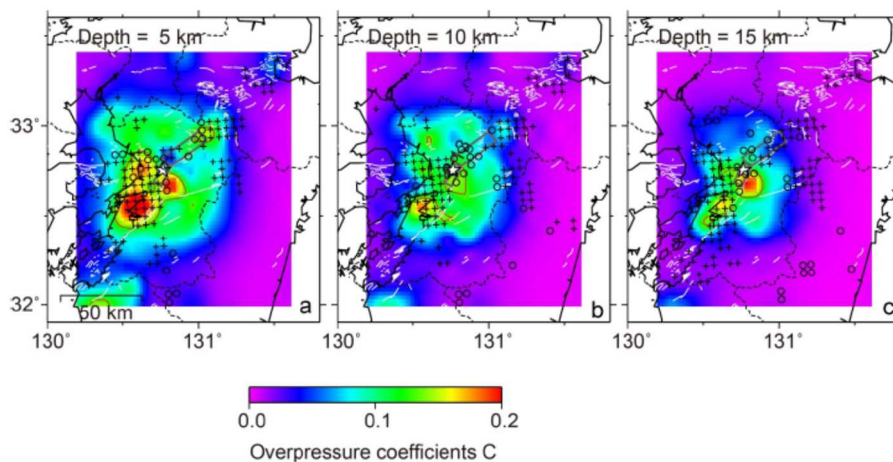


図 12. 間隙流体圧係数と地震活動度の増加の関係（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI03]）  
 a-c は、それぞれ、深さ 5 km、10 km、15 km の結果を示す。+及び○は、 $\Delta CFS > 0$  及び  $\Delta CFS < 0$  の領域で、熊本地震後に地震活動が増加した領域を示す。カラーは間隙流体圧係数 C の値を示す。赤い線は、 $C=0.13$  のコンター線を示す。☆は 2016 年熊本地震の震源、矩形は熊本地震震源断層の北部及び南部セグメント（Asano and Iwata, 2016）、点線は県境、グレーの線は活断層を表す。

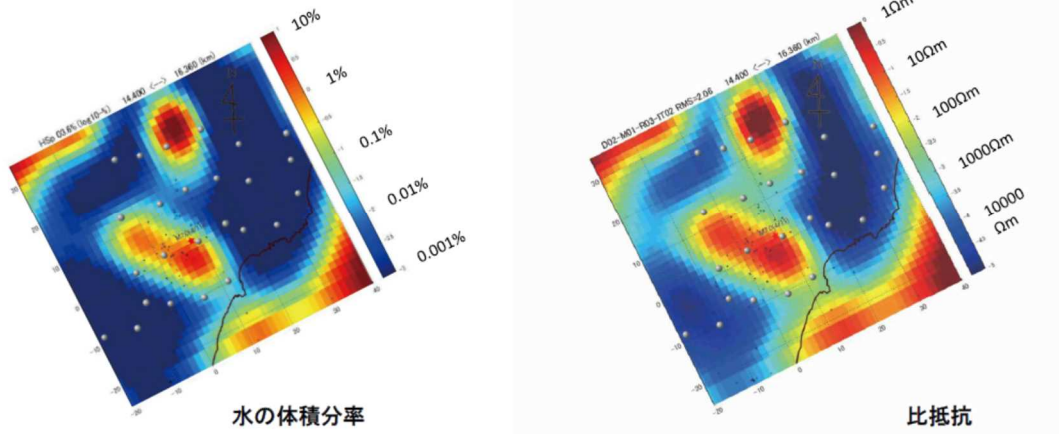


図 13 a . 比抵抗構造と水の体積分率(15 km 周辺)(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_09])

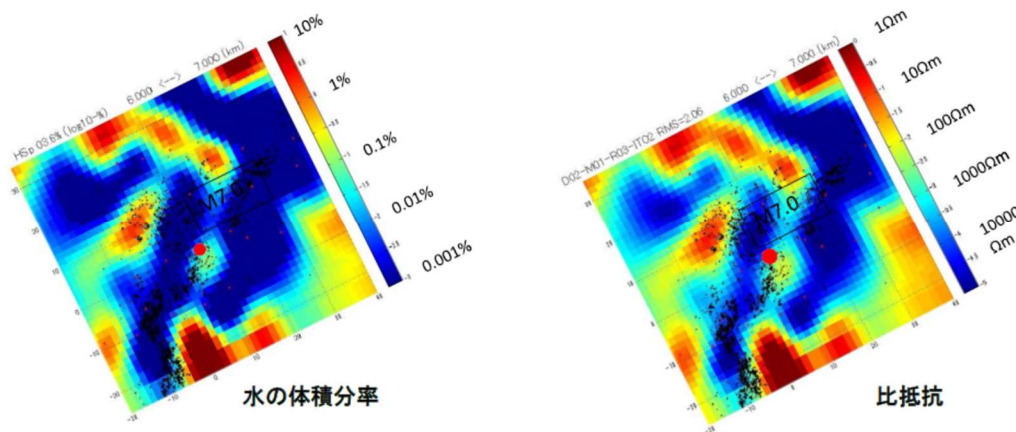


図 13 b . 比抵抗構造と水の体積分率(7 km 周辺)(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_09])

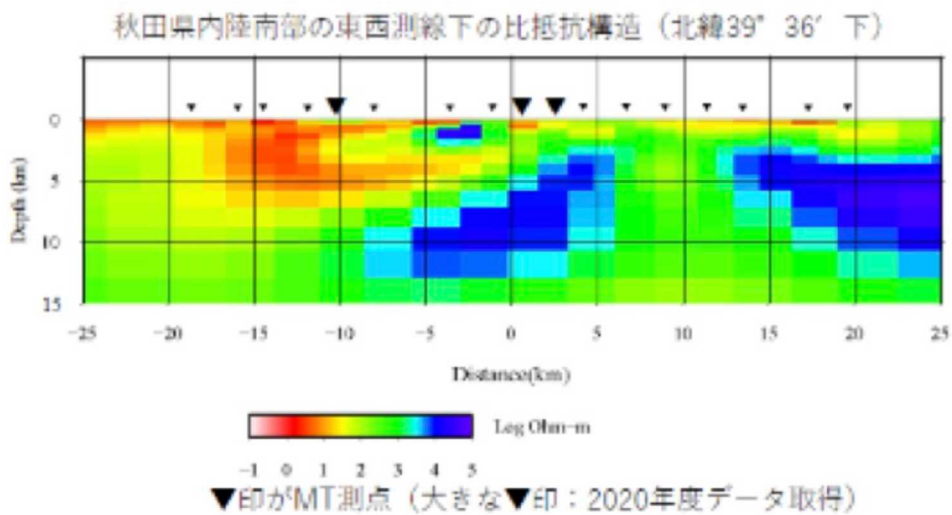


図 14. 秋田市雄和地区の秋田空港付近から、仙北市角館町にかけてのほぼ北緯 39° 36' の緯線に沿う東西測線での比抵抗構造 (東北大学[課題番号:THK\_07])

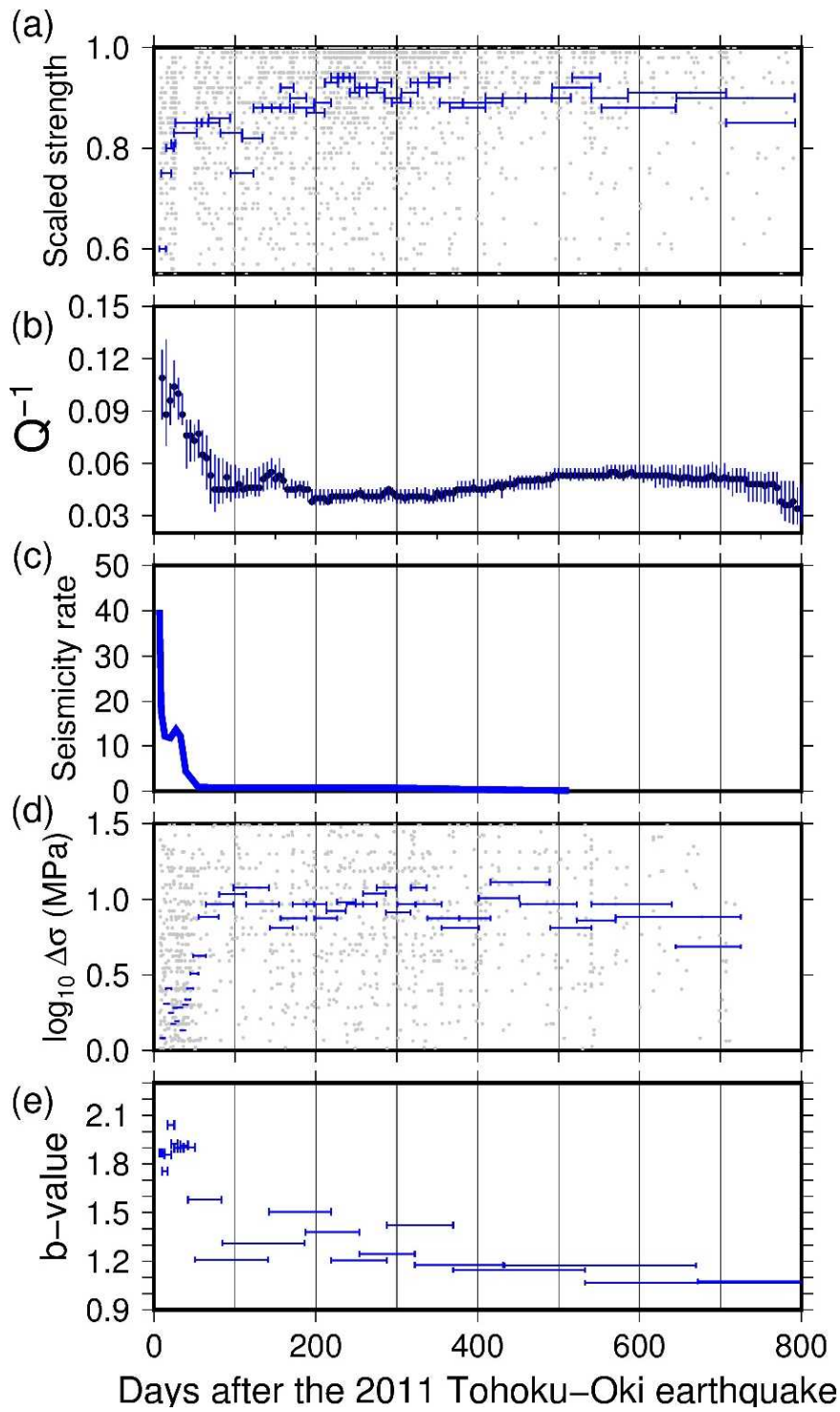


図 15. 2011 年東北沖地震後に山形-福島県境で発生した群発地震およびその地震発生域の様々なパラメータ（東北大学[課題番号：THK\_02]、Yoshida, 2021）

(a) Scaled Strength, (b)  $Q^{-1}$ , (c) Seismicity Rate, (d)  $\Delta \sigma$ , (e) b 値)の時間変化。



# 地震波速度構造 (熊本)

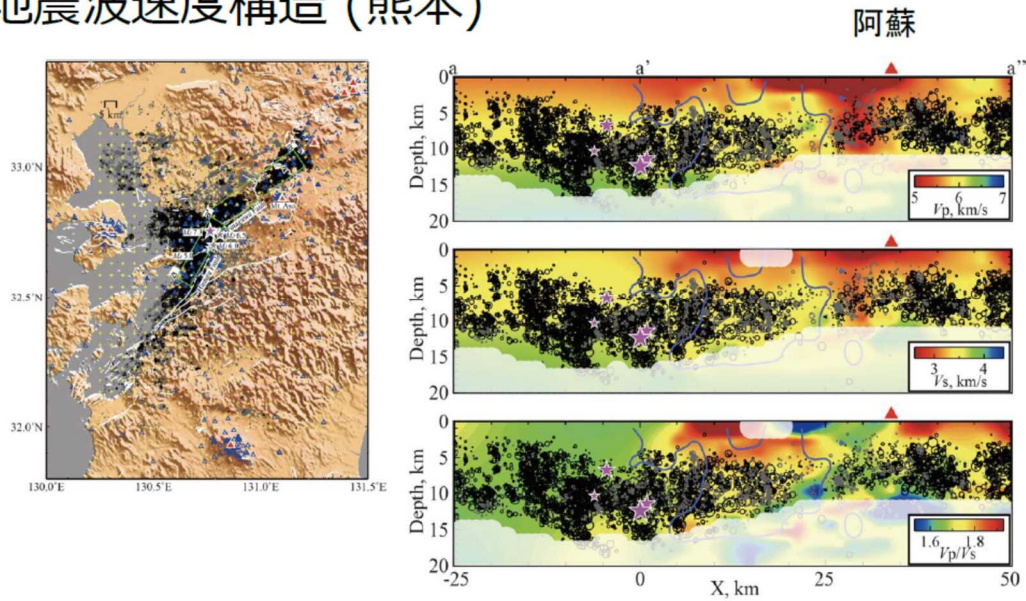


図 16. 地震波速度構造と滑り分布 (九州大学[課題番号: KYU\_01])

(左図) 震源分布図、(右図上) 震源分布断面図とP波速度構造、(右図中) 震源分布断面図とS波速度構造、(右図下) 震源分布断面図と  $V_p/V_s$  構造。

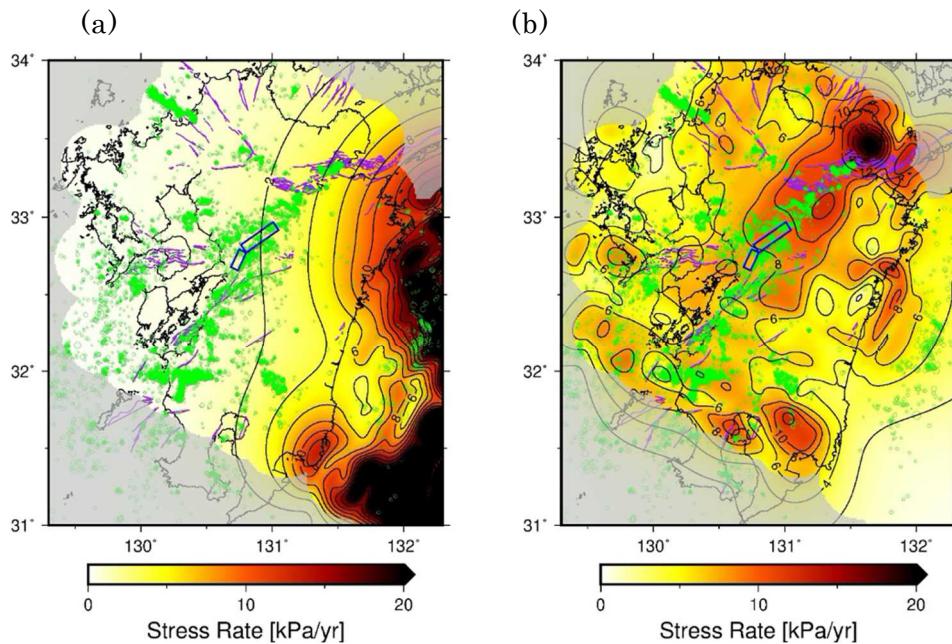


図 17. 深さ 7km での応力変化速度と地震活動 (九州大学[課題番号: KYU\_01]、Yuasa and Matsumoto, submitted)

(a) プレート間固着による応力変化と震源分布(緑丸)、(b) 下部地殻の非弾性変形による応力変化と震源分布(緑丸)。

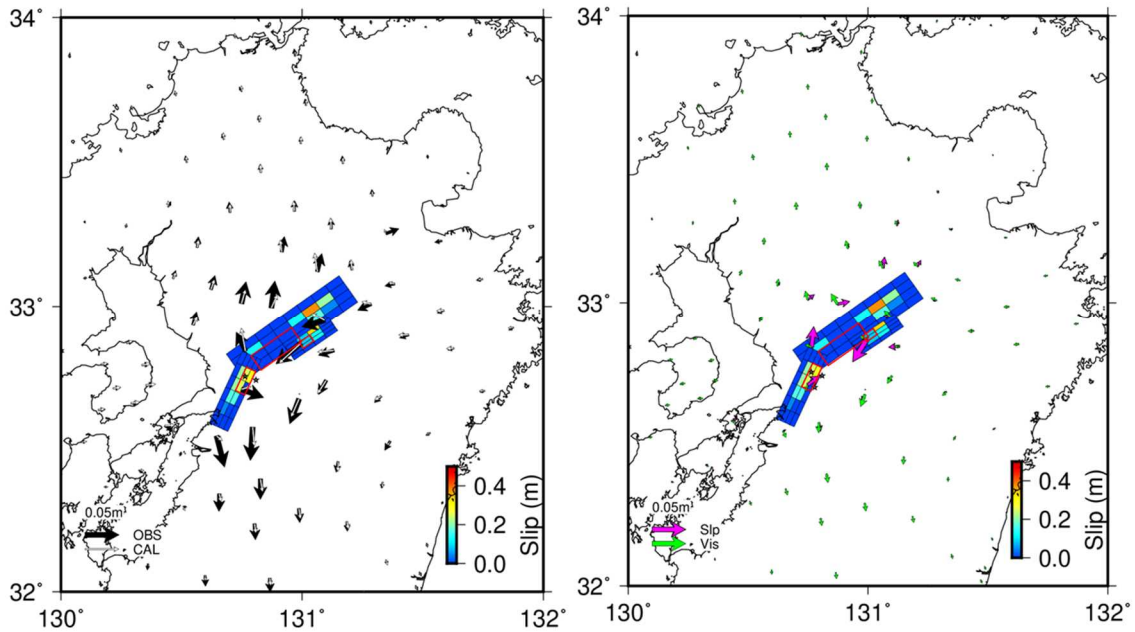


図 18. 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震後 1 年間の変動量から推定した余効すべり分布 (国土地理院 [課題番号: GSI\_01])。

(左) 水平方向の変位の観測値 (黒) 及び計算値 (白)。(右) 水平方向の変位の計算値のうち、余効すべり (マゼンタ) 及び粘弾性変形 (緑) の寄与。地震時のすべりを与えた断層パッチ (矢来ほか 2016) を赤枠で囲っている。なお、上端を除く断層端のすべり量は 0 に固定している。粘性率は  $2 \times 10^{18}$  Pa s を使用した。

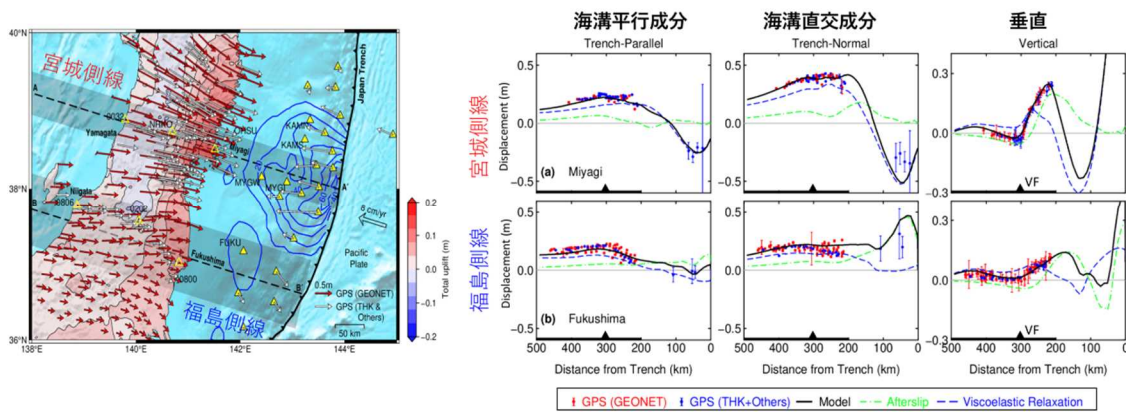


図 19. 2011-2016 年までの東北沖地震の余効変動解析 (東北大学 [課題番号: THK\_07])  
 GEONET と東北大の持つ宮城-山形、福島-新潟の稠密 GNSS 観測から島弧に沿う南北方向での余効変動の変化を解明。2 つの側線での観測を、海溝平行成分、直交成分、垂直成分に分け、モデルとの詳細比較 (右)。上段が、宮城測線、下段が、福島測線。線の色は計算値を表す。緑: 余効すべりによる変位、青: 粘弾性緩和による変位、黒: 余効すべりと粘弾性の合算変位 (モデル計算)、赤シンボル: GEONET 観測値、青シンボル: 東北大の稠密観測値。



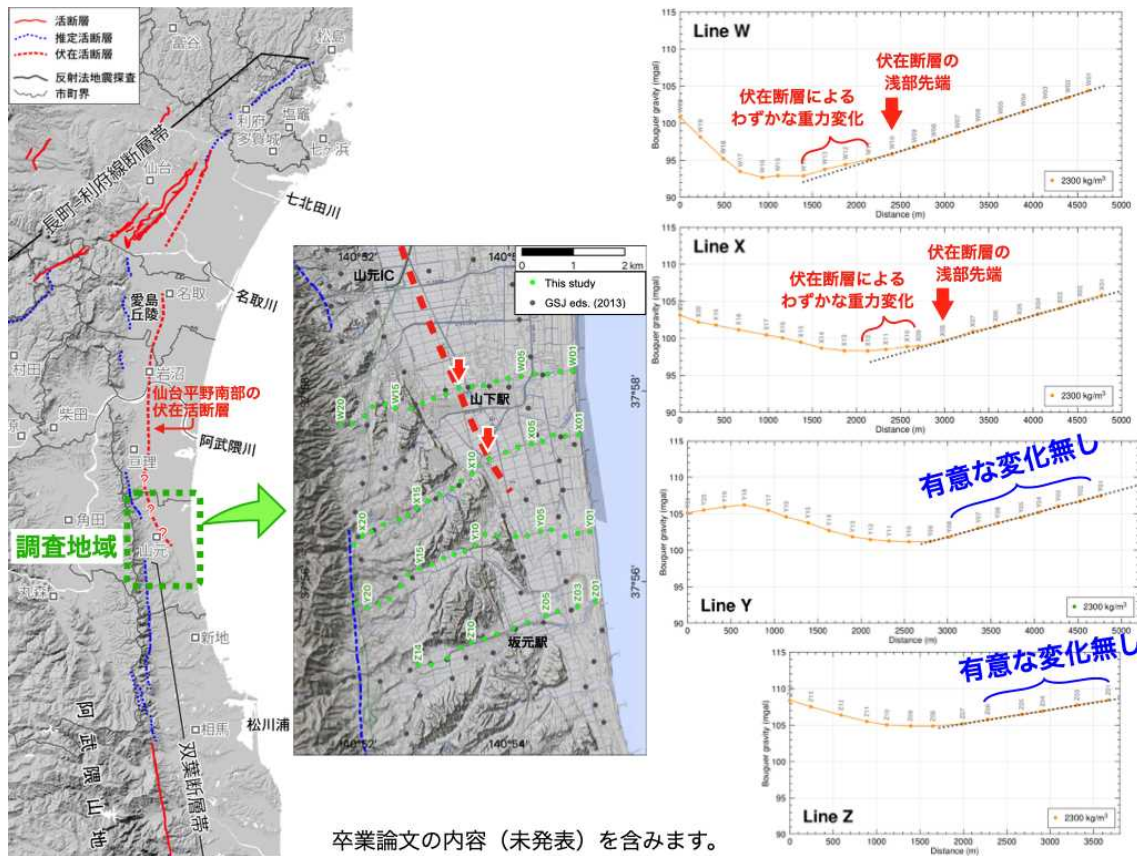


図 20. 仙台平野南部，宮城県山元町付近でのブーゲー重力異常の結果（東北大学[課題番号：THK\_07]、平出，2021）。

仮定密度は  $2300 \text{ kg/m}^3$  を適用した。4 測線のうち北側 2 本では、微小ではあるが伏在活断層に関連する重力変化を捉えたが、南側の 2 本の測線では、その延長部分に伏在活断層によると考えられる有意な重力変化はなかった。測線西側の高ブーゲー重力異常は、阿武隈山地の頂部付近に分布する白亜紀後期の花崗閃緑岩に伴う重力変化であり、伏在活断層に伴う重力変化は、その東側に検出される。

## 地震（長期予測）

「地震（長期予測）」計画推進部会長 西村卓也

（京都大学防災研究所）

副部会長 宍倉正展

（産業技術総合研究所）

大地震の長期予測は、日本国内では地震調査研究推進本部による長期評価という形で実施され、その評価結果は全国地震動予測地図などの形で社会に公表されている。大地震の長期予測は、災害軽減や防災対策の立案に役立てられることが期待されるが、大地震の発生は極めて低頻度な現象であるため、おもに過去の地震の発生履歴に基づいて行われてきた長期予測には大きな不確定性が伴っている。本部会では、地質・地形データや史料・考古データを活用して地震の発生や地殻変動の履歴を解明する手法の高度化を進めるとともに、各地域での調査から過去の履歴データを蓄積して、大地震の予測精度の向上を目指した観測研究を行う。さらに、これまでは十分に活用されていなかった地殻変動や地震活動などの地球物理学的観測データや地震発生の物理モデルの利用により、長期予測手法の高度化を目指した観測研究を行う。以下では、本部会に属する各課題について令和2（2021）年度の成果の概略と今後の展望について述べる。

### 1. 地震・火山現象の解明のための研究

#### （1）地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

##### イ. 考古データの収集・集成と分析

1707年の宝永南海地震前後の京都における有感地震の推移について、京都の2か所で記された日記史料に基づき調査した。どちらの日記史料にも地震直後の約1ヶ月間は有感地震が頻繁に記されているが、地震から1～数年後には、地震前と同じ年1回程度に減少し、減少後の数年間で見ると、宝永地震前後で顕著な差は見られないことがわかった。また、日記史料有感地震データベースと気象庁の震度データベースを比較して、地震の震央候補を推定する手法の改良に取り組み、19世紀中頃に発生した地震の震央推定に向けた研究を実施した。1855年の安政遠江・駿河の地震と安政米子の地震について震央の推定を試みた結果、前者の地震は現在の静岡県焼津市域の近傍で発生した内陸地震であった可能性がある。また後者の地震は、米子城での被害が前年（1854年）の嘉永（安政）南海地震による被害であったと考えられ、京都近傍で発生した内陸地震であった可能性がある（東京大学地震火山史料連携研究機構〔課題番号：HMEV02〕）。

##### ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

海溝型地震の発生履歴に関する調査としては、引き続き沿岸での津波堆積物や巨礫群を用いた古津波と、海岸段丘地形や生物痕跡に基づく地震性隆起の評価が行われた。北海道太平洋岸の津波堆積物について年代測定の追加により、17世紀のイベントだけでなく12世紀のイベントについても、十勝地域と釧路根室地域とで年代が異なることが示唆された。また、十勝の当縁川河口域において、珪藻分析から10世紀から18世紀までの地殻変動史を構築し、14-15世紀頃に地震間地殻変動が隆起から沈降に転じたことと17世紀のイベントの変動量が12世紀と比べて2倍程度大きかったことがわかった（北海道大学〔課題番号：HKD\_01〕）。さらに北海道東部において、無人航空機測量や地中レーダー探査により津波浸水計算の基礎となる古地形の復元が行われた（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。

南海トラフ沿いでは、高知県、愛媛県、宮崎県で津波堆積物調査が実施された（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。南西諸島海溝沿いでは、喜界島で隆起サンゴ調査、宮古島で巨礫の分布調査がそれぞれ行われた（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。琉球列島中部では、台風の高波起源の巨礫が存在しており、過去に津波が発生していたとしてもこれらの巨礫のサイズ・空間分布は大幅に変わらなかったと考えられることから、現在の巨礫分布を制約条件とする津波数値計算により、既往の津波および地震の規模の上限値を推定した（東京大学大学院理学系研究科〔課題番号：UTS\_01〕）。

相模トラフ沿いで発生する関東地震に関連する房総半島南部の沼段丘面に対して、数値標高モデル（DEM）に基づく海岸段丘面の標高分布をK-meansクラスタリング法を用いて区分する地形解析アルゴリズムを構築し、従来の目視ベースの地形判読による段丘区分を見直す結果を得た（Komori et al., 2020）。また、段丘面形成年代の推定手法の高度化を行い、再堆積効果を定量的に考慮したベイズ推定を用いて、多くの年代値データから信頼度を含めて年代推定できる手法を開発した（東京大学大学院理学系研究科〔課題番号：UTS\_02〕、産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。

内陸地震の発生履歴に関する調査としては、中央構造線断層帯の讃岐山脈南縁区間鳴門南断層において三次元的トレンチ調査を実施した。古地震イベントは不確かなものを含めて3回が検出され、最新イベントは12世紀ないし鎌倉時代以降に生じたと推定される。この結果は、最新活動が16世紀以降であるとする多くの先行研究と矛盾しないものである（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST02〕）。2016年熊本地震の震源断層である布田川―日奈久断層帯については、御船町高木においてトレンチ調査を行い、2251-1561 calBPと3977-2768 calBPの少なくとも2回のイベントと、トレンチ壁面には明瞭な痕跡を残していない2016年熊本地震の計3回の断層運動があったことが明らかになった。2016年熊本地震はほぼ純粋な右横ずれで、それ以前のイベントはそれぞれ右横ずれと東側が低下する変位が主体であった。このような活動毎に異なる変形様式が見られることは、布田川断層帯と日奈久断層帯の活動セグメントが重複する地点であることが原因である可能性があり、1900 calBP頃のイベントは布田川断層帯の活動、3400 calBP頃のイベントは日奈久断層帯の活動であった可能性がある（図1）（名古屋大学〔課題番号：NGY\_03〕）。糸魚川―静岡構造線活断層系南部周辺では航空レーザ測量（LiDAR）に基づく数値標高モデルから変動地形の再判読と地表踏査を行い、詳細な活断層の分布が明らかとなった。これにより明らかになった白州断層においてトレンチ調査を行ったところ、最近2回の断層運動が確認された。最新活動の上下変位量は1回前のイベントより2倍以上大きい可能性があり、この違いは、2回の活動が異なる区間で発生し、最新活動ではより長い区間で変位が生じたためである可能性がある（名古屋大学〔課題番号：NGY\_03〕）。また、日本海沿岸域の島根県西部では、1872年浜田地震に関する史料および地形・地質調査を実施した。生物痕跡から地震時に1 m程度の隆起が推定されたが、隆起量にはかなりの地域差があることがわかった（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕、宍倉・他、2020）。

これらの地質データを簡単に検索、表示できるデータベースは、引き続き充実が図られている。産業技術総合研究所では、活断層及び津波浸水履歴情報を「活断層データベース」「津波堆積物データベース」として整備しており、「活断層データベース」では活断層の断層線や調査地の位置精度の向上が行われた（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST01、AIST04〕）。

### （3）地震発生過程の解明とモデル化

#### ア．地震断層滑りのモデル化

変斑レイ岩の摩擦特性のスケール依存性を確認するため、E-ディフェンス施設における大型振動台を利用して低速～中速域のすべり速度でメートルスケールのガウジ摩擦実験を実施した。そこで得られた実験データを解析し、速度-状態依存摩擦構成則のパラメタが過去の研究成果と調和的であることを確認した。また4 m長岩石試料を用いた摩擦実験を実施し、増強した測定網により詳細な弾性波データを収録した(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02])。

## (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

### ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

100 kmスケールの地下構造の不確かさを考慮するために、多数の地下構造モデルの候補をアンサンブルの形で取り込むことができる断層すべり推定手法を開発し、数値実験により有効性を確かめた(海洋研究開発機構 [課題番号: JAMS01]、Agata et al., 2021)。日本海溝と南海トラフ沿いのプレート境界での単位すべりに対する地表での弾性応答のグリーン関数ライブラリを構築した。ライブラリでは、世界測地系で用いられる準拠楕円体や全球でのジオイドモデルと日本列島の地下構造として全国一次地下構造モデルを取り入れており、ユーザが容易に地下構造不均質の影響を考慮して地殻変動をモデル化できる環境が整備された(海洋研究開発機構 [課題番号: JAMS01]、Hori et al., 2021)。

基盤的地震観測網で観測された遠地地震波形データの解析から、四国西部下に沈み込むフィリピン海プレートからの脱水が、その上部のマントルウェッジの蛇紋岩化や深部低周波微動の発生に寄与していることを示した(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02]、Shiomi et al., 2021)。

### イ. 内陸地震

令和元年度に実施された東北日本を横断する日本海溝から大和堆までの海陸合同構造探査のデータを用いて、陸域部における波線追跡法を用いたモデル構築を行った。上部地殻基盤層(いわゆる6 km/s層)より浅部の構造は、4層の堆積層でモデル化された。各々の速度は、1.6-2.0、1.8-3.5、3.5-4.5及び4.5-5.5 km/sと推定される。堆積層全体の厚さは、測線東端部を除いて3.5-5 kmで、著しい変形を示す(図2)(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_11])。様々な観測データや得られた地震カタログ等を用いて、将来的に大地震の震源域となりうる領域を把握するための研究開発を進めた。東北地方太平洋沖地震によって東北日本・中部日本の内陸域にもたらされた剪断ひずみエネルギー変化と地震活動の変化を比較したところ、剪断ひずみエネルギーが増加した地域と東北地方太平洋沖地震後に地震活動が活発化した地域が良く対応することを明らかにした(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02])。陸域地殻内地震の地震発生層の下限について、三次元地震波速度構造を使って再決定した震源に基づくD90(当該地域で発生する地震数の90%がこれより浅部に存在するという深さ)とD300℃(地下の温度が300℃となる深さ)の分布は基本的に同傾向にあることを示した。この結果は、地震活動が少ない地域における地震発生層下限の評価においては、D300℃が一つの指標となり得ることを意味する(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02])。

### オ. 構造共通モデルの構築

東北日本弧(青森平野・庄内平野・新庄盆地等)、富士川河口断層帯、中央構造線活断層系、琵琶湖西岸断層帯などで近年取得された反射法地震探査断面について、地質構造解釈・変動地形との整合性の考察を行い、断層モデルを推定した。また、日本海とその沿岸海域について、反射法地震探査などの資料をとりまとめて震源断層モデルを作成した(図3)(東京大学地震研究所[課題番号: ERI\_11])。

## 2. 地震・火山噴火の予測のための研究

### (1) 地震発生新たな長期予測

#### ア. 海溝型巨大地震の長期予測

南西諸島海溝沿いでは、沖縄本島南東沖と波照間島沖でそれぞれGNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測を実施した。過去の観測データと合わせて地殻変動速度を推定すると、沖縄本島南東沖では沖縄本島（沖縄ブロック）に対して北に $17.0 \pm 0.95$  mm/yr、西に $4.7 \pm 0.96$  mm/yrの変位速度が得られた。この結果は、海溝付近のプレート間固着を示唆するものである。一方、波照間島南方沖の速度は、揚子江プレートに対して南に $64.2 \pm 11.2$  mm/yr、東に $25.8 \pm 9.8$  mm/yrであり、沖縄トラフにおける伸張を示す。この伸張の速度は、西表島、波照間島と同程度かそれ以上である。また、約25 mm/yrの非常に速い沈降も併せて観測され、高速の海溝後退による前弧プリズムの薄化を示唆するものであるが、このデータのみで海溝軸付近の固着状態を拘束することは難しい（名古屋大学〔課題番号：NGY\_02〕）。

南海トラフ沿いの海溝型巨大地震を引き起こす応力蓄積の状況を明らかにするために作成した応力分布モデルをもとに、今後起こりうる大地震発生シナリオを作成した。さらに、作成した破壊シナリオの中から実現性の高いシナリオを選択することを目的に、経験的摩擦則とエネルギーバランスを利用する基本手法の開発を開始した（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED02〕）。

#### イ. 内陸地震の長期予測

構造探査が行われた庄内-新庄測線周辺の精密数値標高モデルや既存の層序データに基づき、庄内平野・新庄平野の伏在活断層における平均変位速度などのこの地域の活褶曲や伏在断層による長期間地殻変動を推定した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI\_11〕）。

西南日本における沈み込み帯でのプレート間固着と上盤プレート内部の地震活動の関連性を明らかにするために、日本列島域の粘弾性を考慮した有限要素モデルを作成し、地殻変動データのインバージョンにより、南西諸島海溝-南海トラフ沿いのすべり欠損速度分布を求めた。得られたすべり欠損速度分布を用いて、有限要素モデルにより西南日本の震源断層におけるクーロン応力変化( $\Delta CFF$ )を求めた。九州では $\Delta CFF$ が正の震源断層が多く、近年発生した3つのM7級地震の震源断層も正であった。これらの断層では、プレート境界での力学的作用により、破壊を促進する方向に応力がかかっていることを意味している（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI\_11〕）。

物理モデルと観測データの統合による地震規模を含む動的破壊過程予測手法の開発と検証のために、2018年北海道胆振東部地震を対象として解析を行った。本地震を選択したのは、余震分布と発震機構の観測から示唆される震源の複雑性の効果を調べることを重視したためである。断層形状を余震分布から広域応力場を事前の地震活動から拘束して、動力学的破壊シミュレーションを行った（図4）。運動学的滑りインバージョン結果で推定された動的破壊過程と滑りの空間分布の主たる特徴が、シミュレーションにより再現されることが確認された。これは、それら動的パラメタが非平面的な断層形状を反映した初期応力分布に強く依存したためと解釈される（東京大学大学院理学系研究科〔課題番号：UTS\_02〕、Hisakawa et al., 2020）。

大地震が連発したり、大地震により周辺の地震活動度が変化した事例は多く、布田川-日奈久断層帯での2016年熊本地震や米国東カリフォルニア剪断帯の2019年リッジレスト地震はその一例である。このような活動を予測するために速度および状態依存型クーロンモデルを改良し（図5a）、リッジレスト地震の地震活動に適用した。その結果、同地震の推移と周辺の地震活動を的確に説明する

ことができた（図5b）。特に、近傍の主要活断層帯であるガーロック断層やサンアンドレアス断層モハベ区間で、地質学的長期評価と組み合わせることにより、より現実的な予測確率と確率利得を提示することができた（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI05]、Toda and Stein, 2020）。測地データから内陸地震の発生ポテンシャルを評価するために、今年度は東日本を対象にSavage and Simpson(1997)の手法を用いてGNSS測地ひずみ速度をモーメント速度に換算し、内陸地震の発生確率の試算を行った。ポアソン過程を仮定した場合の30年間に各0.2度グリッドでM6.8以上の内陸地震が発生する確率は、日本海東縁～新潟～神戸ひずみ集中帯、南関東・伊豆地方、奥羽脊梁山地沿いで1%を超え、高くなった（図6）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI05]）。

## （2）地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

### ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

GNSSデータと時間依存のブロック断層解析手法を用いて、Loveless and Meade(2010)の断層形状に基づいた全国の断層すべりの解析を行った。その結果、日向灘、豊後水道、四国中部、紀伊水道、志摩半島でSSEを検出した。志摩半島では、SSE が2017年3月頃から2018年3月頃までと、2019年1月頃から2020年4月頃まで発生した。四国中部では、2019年1月頃からSSEが始まり、2020年末に終息している。紀伊水道でのSSEは、2019年4月頃から始まり、2020年末に終息している。2018年6月頃から始まった日向灘北部SSEは2019年初めまでに豊後水道に移動し、2019年中頃に終息したが、2020年7月頃から日向灘北部と南部で再び発生している事がわかった（国土地理院 [課題番号：GSI\_02]）。

防災科学技術研究所では、MOWLAS等の観測データを用いた地殻活動モニタリングを継続するとともに、その高度化に努めた。東北地方太平洋沖地震のような大規模な地震の発生を念頭に、即時震源パラメタ解析システムAQUAの改良を行った。具体的には、一定規模以上の地震が発生したと判断された場合、広帯域地震計に代えて速度型強震計のデータを解析対象とするとともに、断層破壊の継続時間を考慮した解析パラメタに切り替える等の仕組みを導入した。その結果、東北地方太平洋沖地震の再現では約7分後に低角逆断層型Mw8.6の解が得られたほか、リアルタイム処理でM7以上の4地震を適切に処理することに成功した(防災科学技術研究所 [課題番号：NIED02]、Kimura et al., 2020)。S-netデータを用いた高精度震源決定のため、S-net観測点周辺で実施されたマルチチャンネル反射法地震データから観測点補正值を求めた。さらに、一次元速度構造と補正值に基づく震源位置を、稠密な臨時海底地震観測により求められた震源位置と比較し、処理のルーティン化に向けた課題を抽出、検討した(防災科学技術研究所 [課題番号：NIED02]）。南海トラフ周辺地域を対象に、三次元地震波速度構造を用いたセントロイドモーメントテンソル（CMT）解析を自動的に実施するためのシステム開発を行った。スロー地震に関しては、S-netデータを用いた日本海溝沿いの低周波微動検知の自動処理化に着手した。大地震発生後数時間程度の連続波形記録から、揺れの最大振幅の超過確率を用いることにより、その後の余震活動の推移を予測する手法を開発した。この手法は震源カタログを必要とせず、単点の地震波形のみを用いることが大きな特徴である(防災科学技術研究所 [課題番号：NIED02]）。

## 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

#### イ. 津波の事前評価手法

南海トラフでのプレート境界巨大地震における津波シナリオを策定するために、震源域での滑り分布の長期間の平均と考えられるプレート境界での滑り遅れ速度に比例する確率分布にもとづき、シナ

リオ地震の震源断層上の滑り分布をランダムに生成する手法を構築した（海洋研究開発機構〔課題番号：JAMS01〕、Nakano et al., 2020）。

## 5. 計画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

ノイズ変化に影響されないアクロス信号の振幅時間変化の評価手法の開発を行い、野島断層近傍におけるアクロスの観測に適用した。その結果、2000年鳥取県西部地震と2001年芸予地震の際に振幅が小さくなったことが明らかになった。これらの地震時には地盤の地震波速度が減少し、S波の速度変化に異方性があることが明らかになっていた（Ikuta et al., 2002）が、S波の振幅変化にも異方性があり、鳥取県西部地震では速度と振幅の減少の大きな方向が一致していることがわかった。これらの現象は、震動によってクラックが開き、地盤の減衰が増大したことで統一的に説明できる。以上のことから、アクロス信号の振幅を用いて地震時の地盤による減衰や異方性の変化のモニタリングが可能であることが示された（名古屋大学〔課題番号：NGY\_04〕）。

海域に拡充された地震観測網によって取得した地震波形データの評価を行った。日本海溝海底地震津波観測網（S-net）等のインライン型の海底観測網では、約3 Hz以上の周波数帯域において、観測波形に筐体の固有振動が含まれることを確認するとともに、この事象の特徴精査、原因の考察を行った（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED02〕、Sawazaki et al., 2020）。海底圧力計記録に関しては、2010年チリ地震時の地震計データとの比較検討を通じ、海底圧力計が地震による表面波（レイリー波）およびその分散性を明瞭に観測する能力があることを示した（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED02〕、Kubota et al., 2020）。

#### これまでの課題と今後の展望

2年目を迎える本計画において「地震（長期予測）」計画推進部会に所属する各課題では、最終的なアウトプットが地震調査研究推進本部の長期評価の高度化に貢献することを目標として、個々の研究が実施された。今年度はコロナ禍のため、特にフィールドでの調査が大きく制限され、計画通りに研究を進められなかった課題もあるが、その分、室内での分析や考察、定常観測網のデータや過去に取得されたデータを用いた解析、数値実験に基づく解析などが進められ、予定以上の成果も挙がっている。その中でも、地質痕跡から過去に発生した大地震を明らかにするだけでなく、過去に発生した津波・地震の規模の上限値を制約する研究が、琉球諸島中部における沿岸巨礫を用いた解析や日向灘沿岸地域における津波堆積物の調査に基づいて行われていることは、該当地域での長期予測において重要な知見を提供するものである。また、海底地殻変動観測により南西諸島域におけるデータの蓄積により、島嶼部とは速度場が異なっていることがほぼ確実にようになってきており、この地域の地震発生ポテンシャルを示す重要なデータである。

GNSSデータを用いたプレート間の固着、SSEなどのすべりのモニタリングについても着実に高度化が進められている。地下の断層すべりによって生じる地表での地殻変動については、均質半無限弾性体を仮定した研究が広く行われてきたが、観測精度の向上や海域などの断層近傍での観測が増えるにつれ、地下構造の不均質や地形の影響は無視できなくなりつつある。今年度の成果として、地下構造の不確定性を考慮したインバージョン手法が提案されたり、南海トラフや日本海溝域での地下構造を考慮した地表地殻変動の数値ライブラリーが公開され、各研究者が比較的簡便に不均質の影響を考慮



した解析ができるような環境が整備されつつあることは、モニタリングの高度化においても大きく貢献する研究である。

本計画の重点的な観測研究と位置づけられている新たな長期予測手法については、前年度から引き続き、GNSS等によって観測された地殻変動データから試算された内陸地震の発生確率が、歴史地震や最近100年間の背景地震活動度と比較され、整合的な地域とそうでない地域があることがわかってきた。地殻変動データなどを用いた新たな長期予測の実用化には、まだ多くの課題が残されているが、少なくとも定量的な試算と過去の地震活動との比較が本部会も協力して組織的に実施されていることは特筆すべきであろう。また、地震等による応力変化を地震活動予測に組み入れた予測手法は、実際の地震活動に合わせてパラメータを調整することにより、実際の地震活動が良く説明できることが示されており、今後さらに実用化に向けた研究が進められるべきである。物理モデルと観測データに基づいた応力分布などを用いて、実際に発生した地震の震源過程を説明する研究やエネルギーバランスから巨大地震の発生シナリオを制約する研究も確実な成果を挙げており、来年度以降も研究を継続することにより、長期予測手法の高度化に貢献することが期待できる。

## 成果リスト

- Agata, R., A. Kasahara and Y. Yagi, 2021, A Bayesian inference framework for fault slip distributions based on ensemble modeling of the uncertainty of underground structure - With a focus on uncertain fault dip, *Geophys. J. Int.*, 225, 1392-1411, doi:10.1093/gji/ggab033.
- Fujita, R., K. Goto, Y. Iryu, and T. Abe, 2020, Millennial paleotsunami history at Minna Island, southern Ryukyu Islands, Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.* 7:53, doi:10.1186/s40645-020-00365-9.
- Hisakawa, T., R. Ando, T. E. Yano, M. Matsubara, 2020, Dynamic rupture simulation of 2018, Hokkaido Eastern Iburi earthquake: Role of non-planar geometry, *Earth Planet. Space*, 72:36, doi:10.1186/s40623-020-01160-y.
- Hashima, A., Sato, H., and Sato, T., 2020, Stress loading and the occurrence of normal-type earthquakes under Boso Peninsula, Japan, *Earth Planet. Space*, doi:10.1186/s40623-020-01201-6
- Hori, T., R. Agata, T. Ichimura, K. Fujita, T. Yamaguchi and T. Iinuma, 2021, High Fidelity Elastic Green's Functions for Subduction Zone Models Consistent With the Global Standard Geodetic Reference System, *Earth Planet. Space*, 73:41, doi:10.1186/s40623-021-01370-y.
- 岩田貴樹・尾形良彦, 2020, Gutenberg-Richter則におけるa値の最尤推定, *地震*2, 73, 93-96, doi:10.4294/zisin.2020-1.
- Kimura, H., T. Kimura, Y. Asano, T. Kunugi, and S. Aoi, 2020, An improved rapid-source parameter determination system (AQUA) for giant earthquakes, *IEEE Syst. J.*, 14, 3, 3451-3462, doi:10.1109/JSYST.2020.2983430.
- Kubo, H. and T. Nishikawa, 2020, Relationship of preseismic, coseismic, and postseismic fault ruptures of two large interplate aftershocks of the 2011 Tohoku earthquake with slow-earthquake activity, *Sci. Rep.*, 10, 12044, doi:10.1038/s41598-020-68692-x.
- Kubota, T., T. Saito, N. Y. Chikasada and W. Suzuki, 2020, Ultra-broadband seismic and tsunami wave observation of high-sampling ocean-bottom pressure gauge covering periods from seconds to hours, *Earth Space Sci.*, 7, e2020EA011972, doi:10.1029/2020EA001197.
- Kumazawa, T., Ogata, Y. and Toda, S., 2020, Wide-area seismicity anomalies before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. J. Int.*, 223, 1304-1312, doi:10.1093/gji/ggaa356.



- 熊澤貴雄・尾形良彦, 2020, 群発地震活動の非定常ETASモデルによる検出と測地学データに基づく予測可能性について, 地震予知連絡会会報, 103, 378-384.
- Ogata, Y., Katsura, K., Tanemura, M., Harte D., and Zhuang J., 2021, Bayesian Seismicity Analysis based on Delaunay Triangle Nets: Hierarchical Space-Time Point Process Models (HIST-PPM; including HIST-ETAS model) Computer Science Monograph No. 35.
- Ogata, Y. and Omi, T., 2020, Statistical Monitoring and Early Forecasting of the Earthquake Sequence: Case Studies after the 2019 M 6.4 Searles Valley Earthquake, California, Bull. Seismol. Soc. Am., 110(4), 1781-1798, doi:10.1785/0120200023.
- 尾形良彦, 2020, 階層的時空間ETASモデルによる短期・中期予測, 地震予知連絡会会報, 103, 385-387.
- Ozawa S, Kawabata, R, Kokado K, Yarai, H., 2020, Long-term slow slip events along the Nankai trough delayed by the 2016 Kumamoto earthquake, Japan, Earth Planet. Space, 72:61, doi:10.1186/s40623-020-01189-z.
- 小沢慎三郎, 2020, 広域地殻変動データに基づくプレート境界の固着とすべりの時間変化に関する研究, 国土地理院調査研究年報 (令和2年度) .
- Nakano, M., S. Murphy, R. Agata, Y. Igarashi, M. Okada and T. Hori, 2020, Self-similar stochastic slip distributions on a non-planar fault for tsunami scenarios for megathrust earthquakes, Prog. Earth Planet. Sci., 7:45, doi:10.1186/s40645-020-00360-0.
- Sawai, Y., 2020, Subduction zone paleoseismology along the Pacific coast of northeast Japan -progress and remaining problems-, Earth-Sci. Rev., 208, 103261, doi:10.1016/j.earscirev.2020.103261.
- Sawazaki, K. and T. Nakamura, 2020, "N" -shaped Y/X coda spectral ratio observed for in-line-type OBS networks; S-net and ETMC: interpretation based on natural vibration of pressure vessel, Earth Planet. Space, 72:130, doi:10.1186/s40623-020-01255-6.
- Shiomi, K., T. Takeda, and T. Ueno, 2021, Seismological evidence of a dehydration reaction in the subducting oceanic crust beneath western Shikoku in southwest Japan, Geophys. J. Int., 224, 1, 151-168, doi:10.1093/gji/ggaa423.
- 宍倉正展・行谷佑一・前杵英明・越後智雄, 2020, 1872年浜田地震による石見畳ヶ浦の隆起-離水生物遺骸群集と地形データによる検証-, 地震2, 73, 159-177, doi:10.4294/zisin.2020-4.
- 宍倉正展・越後智雄・行谷佑一, 2020, 能登半島北部沿岸の低位段丘および離水生物遺骸群集の高度分布からみた海域活断層の活動性, 活断層研究, 53, 33-49.
- 高橋浩晃, 2020, 北海道胆振東部地震などの地表に痕跡を残さない地震の特徴, 地震予知連絡会会報, 104, 467-469.
- Takahashi, N., and S. Toda, 2021, Evaluating variability in coseismic slips of paleoearthquakes from an incomplete slip history: an example from displaced terrace flights across the Kamishiro fault, central Japan, Prog. Earth Planet. Sci., 8:15, doi:10.1186/s40645-021-00407-w.
- 高橋直也・内田嗣人・池田倫治・遠田晋次, 2020, 2019年カリフォルニア州リッジレスト地震の概要と最近の地震断層調査の動向, 活断層研究, 53, 51-65.
- Toda, S. and R. S. Stein, 2020, Long- and Short-term stress interaction of the 2019 Ridgecrest sequence and Coulomb-based earthquake forecasts, Bull. Seismol. Soc. Am., 110, 1765-1780, doi:10.1785/0120200169.

Ueda, T., A. Kato, Y. Ogata, and L. Yamaya, 2021, Spatial Variations in Seismicity Characteristics in and Around the Source Region of the 2019 Yamagata-Oki Earthquake, Japan, Earth Planet. Space, 73, 40, doi:10.1186/s40623-020-01325-9.

Wallis, S. R., F. Maeno, and S. Toda, 2020, Encyclopedia of Geology 2nd Edition Tectonics and Structural Geology: Japan and Korean Peninsula, 526-543, ISBN:978-0-08-102909-1, Academic Press Elsevier Ltd..

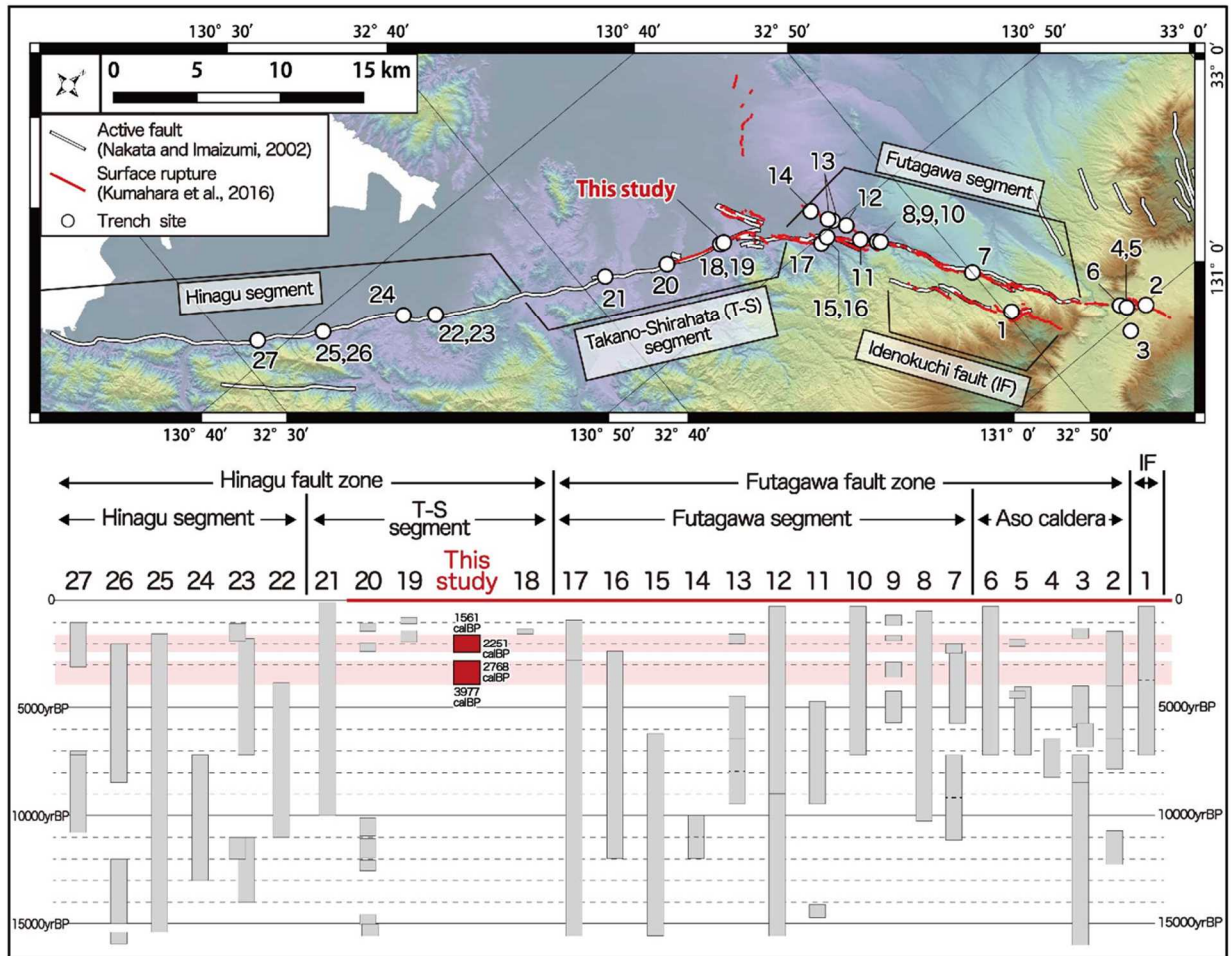
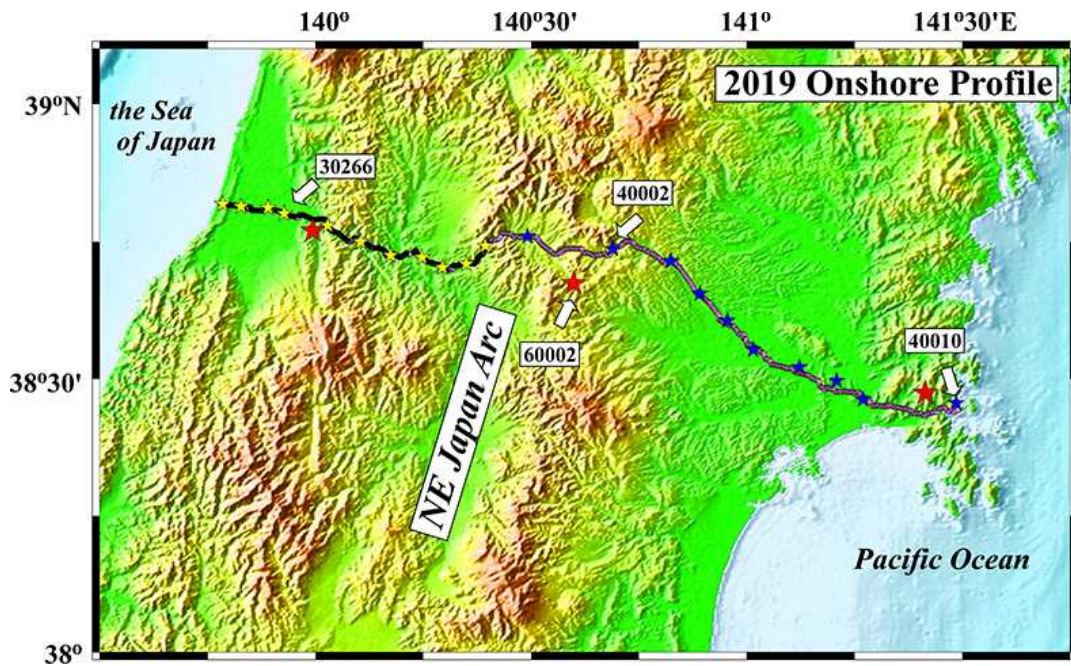


図1. 2016年熊本地震で地表地震断層が現れた御舟町高木トレンチにおける布田川・日奈久断層帯との連動性(予察) (名古屋大学 [課題番号:NGY\_03])

(a)



(b)

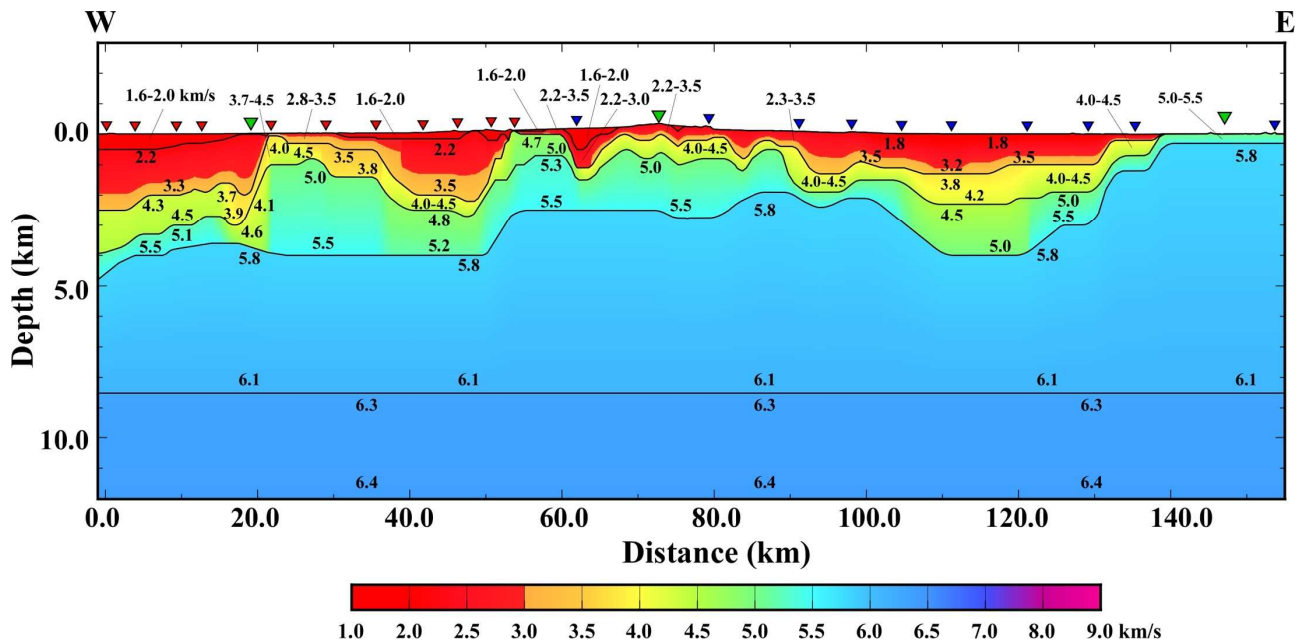


図2. 東北日本を横断する構造探査(令和元年度実施)の陸域部の測線と地殻浅部の暫定速度構造モデル(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_11])

(a) 測線図。ダイナマイト発震点と震源車による多重発震点をそれぞれ赤と黄・青の星印で示した。  
(b) 波線追跡法で求めた暫定P波速度構造モデル。図上部の逆三角印は発震点位置を示す。緑:ダイナマイト発震点。赤及び青:震源車多重発震。



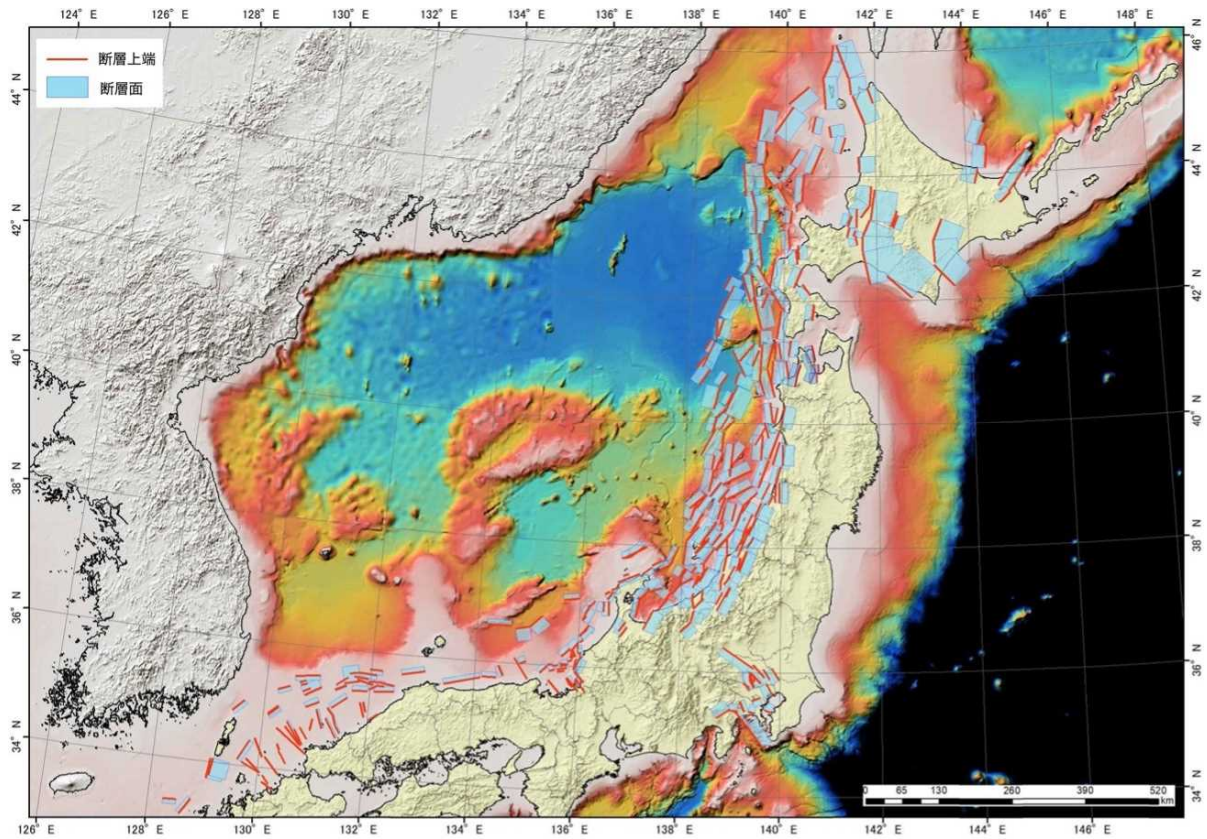


図3. 日本海及び沿岸地域における震源断層の矩形モデル(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_11]、佐藤・他, 2020)

関東地域は Ishiyama et al. (2013)による。

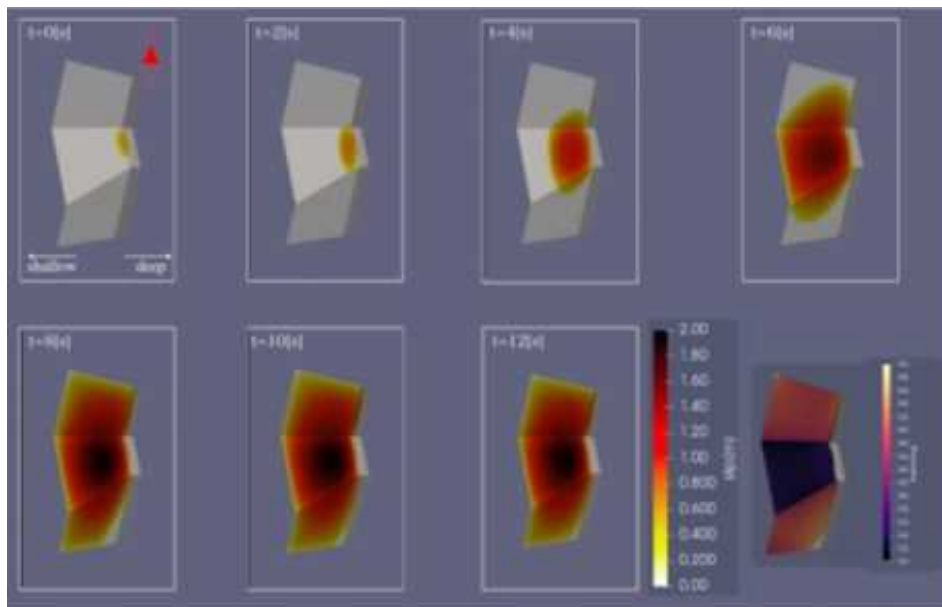
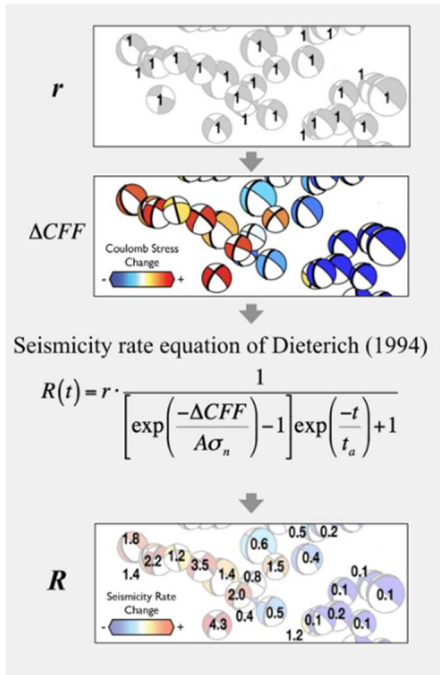


図4. 2018年胆振東部地震の動的破壊シミュレーション(東京大学理学系研究科[課題番号:UTS\_05]、Hisakawa et al., 2020)

滑り量の2秒ごとのスナップショットと滑り角の空間分布(右下)。断層傾斜が高角となっている断層深部の滑りが抑制され、断層走向が変化している中部の滑り角が変化しているが、運動学的な滑りインバージョン結果と調和的である。

(a)



(b)

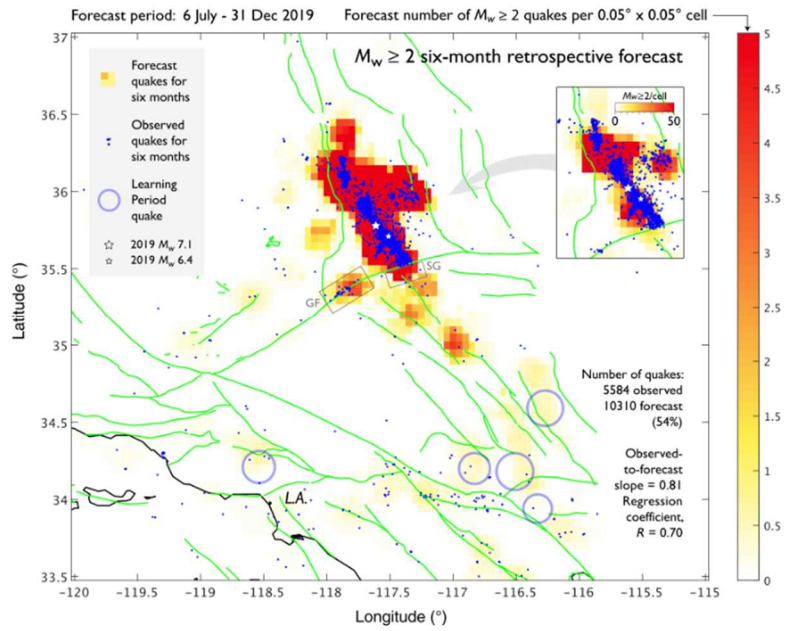


図5. 2019年リッジレスト地震に適用した応力変化—地震応答予測手法と予測結果（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI05]、Toda and Stein, 2020）

(a) 予測手法の概念図。常時活動時の個々の地震レートを基準として（1段目の  $r$ ）それぞれのメカニズム解節面へのクーロン応力変化を計算し（2段目）、Dieterich(1994)の速度および状態依存則から個々に直接レート変化 ( $R$ ) を求め、空間スムージングによって地震活動変化をマッピングする（4段目）。

(b) リッジレスト地震後6ヵ月間の予測（カラースケール）と観測された地震（青点）。予測と観測された地震の分布は概ね整合する。GFはガーロック断層帯のうち、地震活動が活発化した区間。

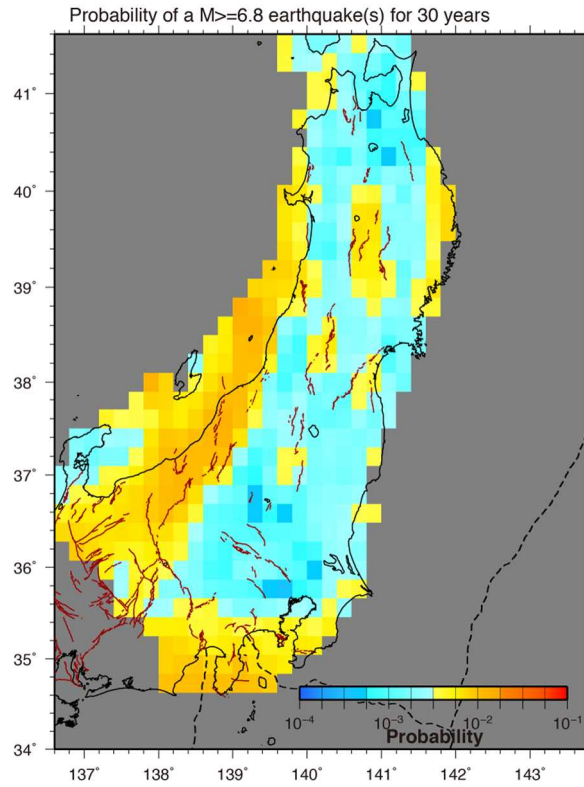


図6. 東日本のGNSSデータに基づく30年間にM6.8以上の内陸地震が発生する確率の試算例（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI05〕）

カラスケールは、 $0.2^\circ$  毎のグリッドにおける発生確率を表す。用いたGNSSデータの期間は、2005年5月-2008年4月。