

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・大学院理学研究科)

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関して知ることは災害の軽減を目指すうえで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・実験研究による多面的なアプローチが不可欠である。

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ために、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日に発生した東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震)は、国内の観測史上最大の地震であり、近代測器が整備された状況において発生した巨大地震であった。地震発生に伴う断層面での大きな変位に加えて、発生以降も長期にわたり大規模な余効変動が続き、これら一連のプレート境界での動きが島弧に大きな影響をもたらすことが考えられる。そのため、東北沖地震発生以降、この地震に関する研究が継続的に進められてきた。

宮城県沖で実施してきたOBS繰り返し観測で得られたデータを用いて、東北沖地震の前後におけるプレート内の応力場を推定した。地震後の上盤内では最大主応力軸がプレート境界面にほぼ直交する一方、中間主応力および最小主応力の方位がプレート境界面からの距離に応じて変化することがわかった。この変化を東北沖地震に伴う地震時応力変化によって引き起こされたと仮定すると、地震前の水平面内での差応力の大きさは15MPa程度と推察される(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_05])。

海溝の海側には、アウターライズ(海溝外縁隆起帯)と呼ばれる、海洋プレートの屈曲によって生じる地形的高まりが一般的に認められる。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、海洋地殻を断ち切る正断層群が発達することによりホルスト・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。日本海溝では、1896年明治三陸地震(海溝型巨大地震, M8.5)の37年後に1933年昭和三陸地震(大規模アウターライズ地震, M8.1)が発生し、津波災害による約3000名の死者が報告されている。

一方、東北沖地震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。2019年4月、宮城沖や三陸沖日本海溝海側のアウターライズでマルチチャンネル (Multi-channel Seismic: MCS) 反射法地震探査 (「新青丸」KS-19-5 次航海) が実施され、合計2測線 (全長150kmの測線1と全長100kmの測線5) でMCSデータを取得した。これを用いた重合前深度マイグレーション (Pre-stack Depth Migration) 処理の結果、ホルスト・グラベン構造を形成する多数の海底活断層 (アウターライズ断層) の高解像度構造のイメージングに成功した (図1) (東京大学大気海洋研究所 [課題番号: AORI01])。海溝での沈み込み直前における彎曲変形に伴うプレート上面での構造の変化が明らかになった。

水平方向に移動してきた太平洋プレートは、日本海溝から日本列島の下に沈み込むにつれて大きな変形を被るため、沈み込むスラブの上部とスラブ深部では、応力やひずみが異なる可能性が考えられる。それらの違いは、プレート内地震の発生パターンに影響を及ぼすため、スラブ内部の構造や応力・ひずみを知ることが重要である。2012年12月7日にアウターライズ域で発生したスラブ内ダブルット地震の震源モデルを、震源近傍の海底圧力計、遠地地震波形、余震分布から推定した (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_06])。その結果、浅部正断層型地震の断層下端と深部逆断層型地震の断層上端はそれぞれ約35km、約45kmの深さにあり、正断層型地震発生層の下限は2007年の宮城県沖アウターライズ正断層地震活動の下限 (約25km) に比べ有意に深く、東北沖地震によって正断層型地震の活動域が深くなったと考えられる。こうした正断層型地震発生層の下限の深さ変化を東北沖地震による応力変化で説明するには、正断層型地震が発生する範囲での摩擦係数は大きくとも0.2でなければならない。これは、プレート内の断層に沿って間隙流体が深さ30-35kmまで浸透しているために岩石のせん断強度が大幅に低下している可能性を示唆する。曲げ変形によるひずみ速度が遅いプレート内深部では定常的な地震活動度が低いが、摩擦強度が低下しているために東北沖地震による応力変化で正断層型地震の活動が顕在化したと解釈された (図2) (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_06])。

東北沖地震 (M9) のあと、東日本を中心とした広い範囲で大きな地殻変動が起きているが、それと同時に大きな重力変化も起きており、その変動をとらえる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])。さらに、海陸の地殻変動データに加え、今後のデータ取得が進む衛星重力データの利用まで視野に入れた広域粘弾性変形モデルを開発することで、地震サイクルの各段階における列島規模の地殻変動の理解を深めることを目的とする研究もおこなわれている (東京大学理学系研究科 [課題番号: UTS_02])。密度と弾性定数の水平不均質が余効変動に与える影響を見積もる前段のステップとして、それらの水平不均質が表層荷重に対する変形に与える影響を2次元回転対称の地球モデルに対して推定する手法が開発された。

プレート境界周辺で観測される現象を、数値計算やコンピュータによるシミュレーション等で検証していくことも重要なことである。東北沖地震前のおよそ100年間に、東北地方沿岸部にみられた沈降 (特に加速する沈降) の原因、および地震後、現在もなお続く大きな隆起の原因が、いずれもマントルにまでおよぶ (深さにして200 km程度) 温度-流体分布とその結果としての粘性構造に由来するものであることが数値シミュレーションの結果から明らかにされた (図3) (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI04])。

今後巨大地震の発生が懸念される千島海溝沿いや南海トラフ沿いの研究も重要である。千

島海溝根室沖において、GNSS/A (GPS/A) 観測を開始した。具体的には海溝軸より海側に1点 (G23)、海溝よりも陸側の斜面に2点 (陸側よりG21, G22) のGNSS/A観測点を新設した (図4) (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_05])。各観測点は3局ないし4局のミラートランスポンダーから構成されている。さらに、海溝軸を跨ぐ形で3点の海底間音響測距機器を設置し、観測を開始した (図4)。また、ドリフト自己校正機能付海底圧力観測装置のプロトタイプ機を用いて試験観測を実施した。本年度は開発した機構の動作確認を根室沖で実施した。その結果、2700mの水深下でドリフト自己校正のための機構が想定通り動作することが確認された。さらに、根室沖におけるプレート間固着率の評価のためのレオロジー構造の検討を開始した。

また、日本海溝と千島海溝の会合部におけるプレート境界の挙動を把握することは重要であり、そのためには超低周波地震に代表されるスロー地震の観測も必要であるが、通常海底地震観測では検知困難である。そこで、会合部に海底地震計群列 (Array of Array, 以下AoA) を設置して、地震・微動観測も併せて開始した (図4)。AoA は5台の長期観測型海底地震計から構成され、中心には、Nanometrics社Trillium Compact (固有周期120秒) 地震計をセンサーとする小型広帯域海底地震計を設置し、周辺に固有周期1秒の長期観測型海底地震計を配置した。設置は2019年7月に行われ、消費電力の関係から、観測可能期間は中心の小型広帯域海底地震計で1年、周辺の長期観測型海底地震計で2年と見積もられている (東京大学地震研究所 [課題番号ERI_05])。

南海トラフ沿いで取得された過去の海底地殻変動観測データを統計的に解析することで、スロースリップに由来する非定常の地殻変動を複数の観測点で検出した (図5) (Yokota and Ishikawa, 2020, 海上保安庁 [課題番号: JCG_03])。また、海中音速の空間的傾斜を推定する手法を開発し、GNSS/A 観測が海洋学的なシグナルを捉える可能性を有することを示した (Yokota and Ishikawa, 2019)。

沈み込むフィリピン海プレートの形状や深さについての研究は、今後発生が懸念される南海トラフ巨大地震の被害想定において重要な情報をもたらす。四国の徳島-西予測線の27観測点 (臨時15+定常12) の2015年12月から2018年5月までのデータを解析し、レーザ関数イメージを作成した (図6) (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI02])。0Mとラベルした赤線の背景にある正 (赤) の振幅強度の連なりは高速度層の上面と考えられるので、フィリピン海スラブ内の海洋モホ面と解釈できる。その上方にあるSTとラベルした青線は低速度である海洋地殻の上面、すなわちフィリピン海スラブの上面と考えられる。ここでは海洋地殻の厚さはほぼ一定 (7~8km程度) と考え、明瞭な海洋モホ面 (0M) の上方の青いイメージの連なりに解釈線 (ST) を置いた。 $-80 < x < 50\text{km}$ ではスラブ上面 (ST) の上方に濃い青のイメージが見られ、低速度層の存在が示唆された。その低速度層は、スラブ起源の流体に起因すると考えられる (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI02])。

海域の観測においては、観測機器の開発やその高度化も非常に重要な課題である。次世代型広帯域海底地震計 (BBOS-NX) の自律展開設置・自己浮上回収方式への機能高度化が進められた (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_23])。また、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なっている (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_23])。この小型広帯域地震計には、固有周期20秒のNanometrics社Trillium Compact Broadband Seismometerが用いられた。開発された長期観測型小型広帯域海底地震計は、主にプレート境界浅部で発生するスロ

一地震を観測対象としているが、深部構造研究のための深発地震や遠地地震の観測、海底火山の観測への利用も可能である。また、海底地殻変動を測る目的での計測機材の開発と観測も開始されている（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID02〕）。

沈み込み帯全体の広域構造について普遍的な理解を深めるために海外の沈み込み帯での研究も実施された。ユーラシアプレート、オーストラリアプレートとフィリピン海プレートが複雑に相互作用を及ぼしているフィリピン地域の地震発生メカニズム、島弧マグマの成因及び沈み込みダイナミクスに関する研究によって、沈み込み帯ダイナミクスへの重要な情報が得られた。また、フィリピン沈み込み帯において実体波異方性トモグラフィ法を用いて、3次元P波異方性構造も推定された（東北大学理学研究科〔課題番号：THK_05〕）。

（3）地震発生過程の解明とモデル化

地震発生過程の解明とそのモデル化においては、断層滑りの多様性、地震時の動的破壊過程、複雑な断層系における断層間の力学的相互作用、地震活動の階層性等に関する研究を通して地震発生過程の解明を進めることが重要である。また、地球物理・地球化学的観測、野外観察、海域・陸域の科学掘削、室内実験や数値シミュレーションなどを通して、断層面の摩擦特性や地殻流体の挙動等に関する理解を深め、地震断層滑りの物理・化学モデルの構築を行う必要がある。このような研究対象領域としては、日本周辺にとどまらず、世界的な沈み込み帯において、スロー地震から通常の地震まで、それぞれの地域で特徴的な活動を包括的に理解することが重要である。そのため、世界各国の沈み込み帯においてスロー地震を含む地震活動の特徴の把握、さらにその発生メカニズムの類似性・関連性の解明のための研究が実施された。

4月中旬に喜界島東方海域において8台の長期収録型自己浮上式海底地震計（LOBS：固有周期1Hz）を投入し、小スパン海底地震観測網による機動観測（第1期）を新たに開始した（図7）（鹿児島大学〔課題番号：KGSM01〕）。また、従来の観測によって取得されたデータの解析も行われた。前計画での約5年間にLOBSで取得された海溝軸側の3点のデータを解析し、低周波微動の検出を行った。検出の方法は、各LOBS観測点において、低周波微動が卓越する低周波帯域（概ね2Hz前後）、および概ね10Hz前後の高周波帯域のエンベロープ波形を求め、それぞれの振幅比、またノイズレベルとの比を1秒毎に求め、一定の基準を10秒以上連続して超えた場合に1イベントとカウントした。平成26年（2014年）4月から令和元年（2019年）10月までの解析結果を示す（図8）（鹿児島大学〔課題番号：KGSM01〕）。今年度新たに加わった平成30年（2018年）4月以降の結果について、バースト的な活動が平成30年（2018年）11月に見られたが、それ以外に特に際立った活動は見られなかった。同海域において東京大学地震研究所と地震予知総合研究振興会が共同で実施している海底地震観測データを加え、検出されている浅部低周波微動の震源決定を実施した（図9）（鹿児島大学〔課題番号：KGSM01〕）。

また、科研費等により2017年から2018年にかけて実施された日向灘の観測記録の解析を進めた。その結果、2013年の活動域の一部と領域がほぼ重なる微動活動が2017年12月から2018年1月にかけて観測された。観測された微動の移動は、2013年に観測された微動分布の折れ曲がりの部分で停止した。2013年の活動で見られた2回の移動のうち1回目は今回観測された微動の移動と同じ場所で停止した。停止した領域は、九州パラオ海嶺が沈み込む領域に対応し、沈み込む海嶺が微動活動域の広がりやを規定する構造的要因であることが示唆される

(京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI01])。

海底の地震活動の現状把握と実態解明のためには、広域かつ精緻な観測データをリアルタイムで取得する海底地殻変動・地震活動観測技術システムを開発し、海域に展開する必要がある。特に、巨大地震・津波の発生源として緊急性や重要性が高い海域を中心に3次元地殻構造や地殻活動、断層物性、地震活動履歴等に係る調査が実施された(海洋研究開発機構 [課題番号：JAMS02])。房総半島沖での地震観測データを用いて速度構造解析とレシーバー関数解析が行なわれた。その結果、フィリピン海プレート上面の深さは、陸上での地震観測データに基づく先行研究の結果よりも3-6km浅いことがわかった。また、房総半島沖で繰り返し発生しているスロースリップは、北米プレートとフィリピン海プレートの地殻同士が接している部分でのみ発生していることが明らかとなった。

さらに、海外の沈み込み帯でも観測研究が実施され、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の回収作業、機器の回収・再設置作業を継続して実施した(京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI01])。加えて、GNSS音響結合方式による海底地殻変動観測(GNSS/A観測)による測地観測点3点の観測も継続して実施した。特に2019年度は、長期型海底圧力計1台の機器回収、長期型海底圧力計3台のデータ回収作業、海底地震計8台の設置・回収作業およびウェーブライダーを用いたGNSS/A観測を実施した。2017年以降に調査海域で取得されたマルチビームソナーの記録の再解析も実施し、2019年までに回収した海底地震・測地観測記録のデータサーバーを構築した。2018年度に回収された9台の地震計記録を解析し、微小地震活動および非火山性微動の分布を求めた。約800個の微小地震について目視でP波およびS波の検測を行いそれらの震源を決定したところ、微小地震の震源は主として、ゲレロ空白域北西端に設置された観測網の周囲に分布し、特にゲレロ空白域の主要部では周囲に比べて微小地震活動が低調であった。微小地震の一部に小繰り返し地震が含まれることを陸上の観測網記録との比較から確認した。この研究では、継続時間が10-100秒の非火山性微動を検出し、エンベロープ相関法によりそれらの震源を求めた。解析の結果得られた130個の震源は、海溝軸付近に複数のクラスターを形成して分布した。各クラスターの活動周期は、おおよそ2-3ヶ月間隔であった(京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI01])。

ニュージーランドのヒ克蘭ギ沈み込み帯でも研究が行われた。今年度は、予定していた海底圧力計5台の設置を行った。また、2015年6月に設置したGNSS/A観測のための海底局3台、2018年10月に設置した海底圧力計5台に加え、海底地震計5台については全台回収することに成功した(東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_08])。本海域では、2019年3月から4月にかけて大規模なスロースリップが発生し、これに伴い地震活動が活発となっていることが陸上観測網から認められている。これらの事から今後の解析結果に期待ができる。

観測データに基づいた解析が進められている一方で、このようなスロースリップイベント(SSE)を数値シミュレーションによって解明する研究も進められた(東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_06])。SSEによる荷重が地震をトリガする効果の基礎的な見通しを得るために、1自由度バネブロックモデルを用いたシミュレーションを行った。SSEを模した小さなステップ的な荷重が、定常的なプレート運動からの荷重に周期的に重畳している系のふるまいをサイクルシミュレーションによって調べたところ、総体的にみれば定常荷重に近く、頻繁に繰り返す小さなSSEの場合ですら、地震の発生サイクルがSSEのサイクルに完全に同期してしまう「引き込み現象」が生じることが見いだされた(Ohtani et al., 2019)。同程度の大

きさの摩擦ブロック間での引き込み現象は既に知られている(Sugiura et al. 2014) が、この研究での結果は大きな規模の地震のリズムが、それよりずっと小さな規模のSSEのリズムに引き込まれてしまうことを意味する(図10)。この引き込み同期現象は、非常に広い条件範囲で普遍的に生じるが、その発生パターンは、SSE周期の整数倍の一定周期で地震が起こる単純なものから、地震数回をひとつの単位としてSSE周期の整数倍になり、そのあいだ地震発生間隔がきまったパターンで平均から増減する複雑なものまで様々である(図10)。基本的には、1回のSSEが大きなインパクトをもち頻度が少ないほど単純な同期パターンになりやすい傾向があり、SSEはそのインパクトの大きさに応じて、地震発生間隔をSSEの影響がない場合の自然な周期からずらす力をもつように見える(図10)。ただし、どのような同期パターンでも、地震の発生がとりわけSSEの発生後短期間に集中する傾向は見られない。なお、SSEが瞬間的なステップではなく、現実のSSEのように有限の期間をもって滑る場合であっても、引き込み同期現象は同じように起こることも確認された(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_06])。

2019年山形沖で発生したM6.7の地震に伴う余震活動に関して、定常地震観測網の波形データを用いて震源再決定を行った(図11)(吉田・他, 2019)。その結果、余震活動が数枚の面構造に集中し、その震源が深部から浅部へ移動することが分かった(図12)。同様の震源移動は、2017年秋田県大仙市で発生したM5.1の地震や2017年の鹿児島湾のM5.1・M5.3地震の前後にも見られた。これらの震源移動は、地震活動の発生要因として流体移動や非地震性滑りなどが関係していることを示唆する(東北大学理学研究科[課題番号:THK_07])。

北海道から東北沖の沈み込み帯における階層的地震発生構造を解明するために、階層的地震破壊の実例を多数調査した。M4.5以上の大地震と、M4以下の中小地震の波形の立ち上がりをも網羅的に比較した結果、多くの大地震の波形の立ち上がりが、小地震と同じであることを発見した(図13)。これは階層的な地震破壊が起きていることを示唆する。具体的には低角逆断層の沈み込みタイプの地震899イベントのうち170イベントが該当する。但しこの割合は低角逆断層でない地震の場合には極めて低くなる。その低い割合は、地震の震源核形成過程にとって重要な示唆を与える結果である(Ide, 2019, 東京大学理学系研究科[課題番号:UTS_03])。

非線形動力学・計算材料科学的アプローチに基づいた地震研究も行われている。この課題では、摩擦の速度依存性の微視的モデル、断層相互作用系フルモデルの効率的シミュレータ開発、摩擦不安定性におけるノイズや応力摂動の効果に関する力学系理論的研究の視点からの研究が行われた。その一例として、地震発生における応力摂動の効果をより物理的に解明すべく、高精度の制御と計測が可能な岩石破壊実験において、応力変動効果と微小破壊の関係を定量的に確立することが試みられた。流体圧を変動させることによって有効封圧を変動させ、差応力の変化と微小破壊発生率の関係を調べた。その結果、差応力に対して0.1%程度の微弱な流体圧変動が微小破壊発生率と有意に相関することが確かめられた。

地震発生場の詳細を、南アフリカの大深度金鉱山における至近距離地震観測によって描き出そうという試みもなされている(立命館大学[課題番号:RTM_01])。1996年に行われた3次元地震反射法探査データの再解析を進めたところ、未解釈だった採掘レベル以深で、本震時に周囲より大きく滑った領域(Mori et al., 2019)および余震のギャップと、反射体が分布する領域との位置関係が相補的であることがわかった(Noda et al., 2019)。地球化学的見地から断層運動を明らかにする研究もなされており、地殻流体の連続化学観測にもとづ

いた地殻の状態評価システムの開発も行われた。四重極質量分析計での観測を本宮観測点などにおいて実施し、周囲の地震火山活動とHe, N₂, Arの組成の時間変化との対応関係について検討した（東京大学理学系研究科[課題番号：UTS_04]）。

（５）地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化においては、プレート境界域や海洋プレート内部、内陸を含む地殻・マントル内の地震発生域及び火山地域において、地震波速度・減衰構造、地震活動、応力場、変形場、比抵抗構造、レオロジー構造等を明らかにすることで、地震や火山活動が発生する場のモデル化を進める必要がある。また、大地震によって火山噴火が誘発される可能性や火山活動が地震活動へ及ぼす影響など、地震火山の相互作用に関する研究を進めることも大切である。

日本列島の日本海側の新潟から神戸にかけてひずみ速度の大きい、新潟-神戸ひずみ集中帯が存在する。この新潟-神戸ひずみ集中帯では、歴史的に見ても大きな内陸地震が発生している。1995年の兵庫県南部地震、2004年の新潟県中越地震や2007年の新潟県中越沖地震と近年でも大きな内陸地震が発生している。このようなひずみ集中帯形成の原因を明らかにすることは重要である。地温勾配の分布から推定した温度構造、水の分布、既存の地質構造を考慮し、東西方向に短縮させることで、中部日本における歪・応力集中過程を再現した。新潟地域のリフト構造（強度の弱い領域）及び飛騨山脈周辺の高温度域を考慮することで、新潟から飛騨山脈周辺までの歪集中帯が再現された。深さ14kmでの応力場と震源分布（深さ13-15km）と比較すると、低応力の延性領域では地震活動度は低く、高応力の脆性領域で地震が多く発生していることが分かる（図14）（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_07]）。

内陸地震の発生過程を考える上で、下部地殻の強度弱化域の変形による直上の断層への応力集中機構が注目されてきた。その一方で、2016年鳥取県中部の地震の断層の両端で地震前に応力緩和していた可能性が示された。山陰地方の地震帯では、鳥取県西部地震などの震源域両端に低速度異常域が推定されている。また、鳥取県から山口県にかけて下部地殻に低速度異常が存在することが推定されている。東部においては低速度異常は地震発生層の下限（D90）の浅い領域とよい対応関係を示す（図15）（Tsuda et al., 2019, 京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI03]）。断層両端付近の特性は、大地震の起こる場所とその大きさや隣接領域での大地震の続発性という観点で重要であり、今後の成果が期待される。

都市部での断層構造や浅部地下構造推定のために、大都市大震災軽減化特別プロジェクト（大大特プロジェクト）などの既存の地殻構造探査結果の再解釈が行われ、2018年大阪府北部の地震の震源域周辺において、以前から特定されている活断層の延長部に、伏在する活断層が発見された（図16）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI03]）。有馬-高槻断層帯を構成する真上断層の東の延長は男山丘陵の南側の地質境界へ延びること、枚方とう曲の北方延長は淀川低地帯の南東縁を横切って、真上断層の東方延長部まで延びることが分かった（堤・飯尾, 2019）。また、精度の高い発震機構解により断層面近傍の詳細な応力分布についても研究が進んだ。解析には、京都大学防災研究所・九州大学・東京大学地震研究所・関西大学合同観測班、満点計画および周辺の高感度定常観測点(NIED, KyotoUniv., JMA, AIST)のデータを用いた（図17）。一例として、深さ11kmにおけるP軸の方位とT軸の傾斜角の分布を示す（図17）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI03]）。T軸が鉛直に近い逆断層型の余震は北側に多く、T軸が水平に近い横ずれ型の余震は南側に多く分布する。図中には、本震の

断層モデルから計算された ΔCFF の空間分布も示す。 ΔCFF の0.1 MPaのコンターは、それぞれの型の余震分布とよく対応しているため、多くの余震は本震滑りにより引き起こされたと考えられる。ただし、余震は、北方の定常的に微小地震活動のある領域など、推定断層面からかなり離れたところまで分布しており、そこでは、断層の強度とせん断応力が近い状態にあることが示唆される。P軸の方位と傾斜およびT軸の傾斜角とも色々な値をとっており、近年の内陸大地震について報告されているように、個々の余震の断層の大部分は、本震の推定断層面と平行ではなく、様々な向きを向いていることが分かる(図17)。このことから、余震域における応力場は、北側では逆断層型、南側では横ずれ型であると予想されるが、応力逆解析により、Y=2~4km付近においては逆断層的な応力場が、それ以外では横ずれ型の応力場が推定された。これは地震後の応力場であるが、浅野による断層モデルの滑り方向と調和的であり、余震域とその周辺においては、本震前から応力場の空間的な不均質があったことが示唆される。

近年、内陸地震発生においては地殻内流体の役割が重要であることが指摘されている。地殻内流体の検出には、地震学的構造に加えて電磁気学的(比抵抗)構造も欠かせない。2016年熊本地震震源域を含む九州中央部では、20~30kmの帯状の活発な地震活動域とそれに囲まれた地震空白域(南島原一天草)が存在する。地震・測地データを使用した解析により、この領域の非弾性変形と応力集中プロセスや地震空白域との関係を検討した(九州大学[課題番号: KYU_01])。応力の連続性から、上部地殻から下部地殻まで応力テンソルの形状は大きく変化しないと仮定し、発震機構解から推定される上部地殻の偏差応力を拘束条件として下部地殻の非弾性変形方向と大きさを推定する手法を開発した(Yuasa et al., 2020)。その結果、地震活動が活発な領域下に高い非弾性歪み速度($10^{-7}/\text{yr}$)を有する領域があることが分かった。さらに、その直上の上部地殻では非弾性変形によって効果的に応力集中が進行していることが示唆された。一方、南島原一天草の地震空白域の下部地殻も歪み速度はそれほど顕著ではないものの、周囲と同程度に非弾性変形しており、10年の単位では上部地殻に応力を蓄積しつつあることが示唆された。地震空白域は、地震波速度構造から高速度異常(Saiga et al., 2010)及び広帯域MT探査から明瞭な高比抵抗体に対応することが明らかになった。以上から、南島原一天草の地震空白域の特に上部地殻に相当する深度に深成岩体のような、温度が低く、水をあまり含まない破壊強度が高い物質が存在し、そのことが地震空白域の要因であると示唆される。大局的な観点から深成岩体などの破壊強度が強い領域が地震空白域の原因と推定されたが、比抵抗構造と内陸地震の震源分布の対応を見ると、地震活動が活発な領域は巨大な高比抵抗体の端部であり、その近傍には流体と解釈される低比抵抗体が存在する(九州大学[課題番号: KYU_01])。熊本地震震源域を対象に新規データを加えた3次元比抵抗構造を推定し、震源と比抵抗の空間的な対応を精査したところ、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高比抵抗領域でも破壊が開始することが示唆された(相澤・他, 2019a)。同様の関係は九重山周辺で行った広帯域MT観測からも推定され(相澤・他, 2019b)、流体が破壊の成長に影響していることを示す結果と考えられる。流体が破壊の成長、特にその初期段階に役割を果たしていることは稠密地震観測からも示唆される(図18)(九州大学[課題番号: KYU_01])。

東北沖地震発生後、M7の福島県浜通りの内陸地震が発生し飛躍的に地震活動が増加した、いわき地域の活動も地殻内流体の関与が示唆されている。その仮説を明らかにすべく、地震活動の増加が見られなかった北関東から2004年新潟県中越地震の震源域を通る島弧を横断す

る測線を調査対象とする地震観測とMT観測の研究も進められている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_09]）。

内陸地震の発生メカニズムの解明に向けて、海外の沈み込み帯での研究もおこなわれている（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_01]）。日本と同様に沈み込み帯に位置するニュージーランドにおいて地震観測を実施し、地震発生過程の理解を普遍化する研究が行われている。ニュージーランドでは、南島北部において、2010年・2011年クライストチャーチ地震や2016年カイクウラ地震が発生し、甚大な被害を生じた。カイクウラ地震・クライストチャーチ地震は、地震時あるいは地震後に複数の断層が連動して破壊した地震であると考えられており、2016年熊本地震において指摘されたような複雑な断層系の相互作用や断層端の特性の理解の上で最適な研究対象である。この地域においても、地震活動や3次元トモグラフィーの結果から、地震活動と流体との関連が示唆された（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_01]）。

地殻のレオロジーや地震発生に対して重要な役割を果たす地殻内流体が、沈み込み帯でどのように供給されるのかを調べるため、 H_2O 、 CO_2 、 $NaCl$ 三成分系の沈み込み流体と楔形マン托ルの主要構成鉱物であるカンラン石間の二面角を決定する高温高压実験を行った（Huang et al, 2019）（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_02]）。 $H_2O-NaCl$ 系流体について調べたところ、二面角を引き下げる $NaCl$ の効果が極めて大きいことが明らかになった。わずか数wt %の塩濃度でも、楔形マン托ルの広い領域をカバーする温度圧力条件において、二面角が連結閾値である 60° を有意に下回ることが示された（図19）（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_02]）。

沈み込み帯で流体が、蛇紋岩として固定される前弧域と、マン托ルを融解させる領域の間にはマン托ル岩の粒間に流体が共存する領域があり、その上部には、近年、前弧下部地殻付近で発見されている高電気伝導度帯が位置している（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_02]）。沈み込んだ流体がマン托ルを浸透して前弧域に直接抜けていると考えると、この高電気伝導度帯が形成される原因と、沈み込み帯への流体の流入フラックスと放出フラックスが合わない「Missing fluid」問題に対する一つの解答も得られることがわかった。

岩手県南部から宮城県北部の3次元地殻比抵抗構造において、中部地殻に火山フロントから深さ30kmに渡って東側に低比抵抗帯が存在することが分かり、マン托ルから供給されている流体が一部は火山フロントを超えて東側へ供給されることが分かった。長周期MTデータに基づく東北地方全域の比抵抗構造を見直すと、マン托ルウェッジ内の深さ70-80kmより浅い側が高抵抗、深い側が高伝導になっていることが分かり、この結果は室内実験による橄欖岩の二面角の実験結果と合致し、火山フロントがプレート境界の深さ80kmとほぼ一致することを上手く説明する（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_07]）。

内陸断層の深部、脆性-塑性遷移付近における、応力・歪といった変形の不均質を削剥断層（三重県中央構造線）の地質調査により、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により明らかにする研究もなされた（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST05]）。その結果、調査範囲内の岩石は変形温度 $450^\circ C$ 付近から $250^\circ C$ 付近までと脆性-塑性遷移領域をまたぐ条件での断層運動を被ったことが明らかになった。岩石が被った差応力は脆性-塑性遷移付近で200MPa程度であるが、この値は脆性-塑性遷移より深い $450^\circ C$ 付近においても大きく変化していないことが示唆された。

将来発生する地震の最大規模や発生様式の評価を行うため、可能な限り小さな地震まで解

析し、高い空間分解能を有する日本列島の地殻応力マップを整備することは重要である。関東地域の10kmメッシュの応力マップに関する成果が、地質調査研究報告に掲載され（今西ほか、2019）、産総研の地殻応力場データベース（<https://gbank.gsj.jp/crstress/>）でも公開された（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST07]）。

大地震によって火山噴火が誘発される可能性や火山活動が地震活動へ及ぼす影響など地震火山の相互作用に関する研究を進めることも重要である。火山現象と地殻内流体との関係を明らかにするため、箱根火山における深部低周波地震活動（DLFE）の詳細な時系列をマッチドフィルター法により推定した。その結果、浅部の活発な地震活動や火山性地殻変動に先行し、低周波地震の活発化が起きていることが明らかになった（図20）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI04]）。

また、箱根カルデラ内において2019年5月に発生した群発地震活動について高精度震源決定並びに地震検出を行った結果、震源はほぼ鉛直な面上に集中し、前駆的な比較的ゆっくりとした震源移動から、拡散的により高速度で移動する地震活動に変遷する過程が明らかになった（図21）（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_02]）。こうした震源移動様式は、断層帯内での流体圧の拡散様式の変化、もしくは高圧流体に励起された非地震性滑りの寄与を示唆している。

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

地震・火山噴火という自然現象が引き起こす地震動、津波などの災害誘因が自然や社会に潜在的に存在する脆弱性などの災害素因に働きかけ、これらの誘因と素因の組み合わせと相互作用の状態に応じて様々な規模の災害が発生する。そのため災害誘因予測の高度化は、災害の軽減に結びつく有効な手段の一つである。

海底地震津波観測網DONETで捉えられた2016年鳥島沖地震津波についてデータ同化が適用され、Green関数を用いたデータ同化に基づく津波即時手法（GFTDA; Wang et al., 2017）の適用に基づいた津波即時予測実験が実施された（Wang et al., 2019）。これはリアルタイムに実施されたものではないが、リアルタイムに取得された記録を用いたデータ同化に基づく津波予測が初めて実現されたものである（弘前大学 [課題番号：HRS_01]）。

建物被害の軽減を考える際には、揺れの不均質に応じた的確な対策が必要である。そこで、稠密な観測により揺れの違いを詳細に観測し、地形や地下構造との関連性を明らかにする必要がある。歴史地震の被害分布と対比させることで、首都直下地震の地震像を解明する研究もなされている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_15]）。1855年安政江戸地震を対象として研究を進め、成田山新勝寺や佐倉城址等の江戸時代から続く建物や施設が千葉県成田市周辺にあり、過去の地震被害の記述が多く残されている。そこで、それらの記述から被害地点を特定して地震計を設置し、古文書に記録されている揺れの大きさについて比較検討を開始した。この観測を行うことで、古文書等に記述のあった地点での揺れを参考とし、古文書に記載のなかった地点での揺れも推定できることを確認した。

（2）地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

即時警報を画期的に早めうる方法として、光速で伝播するP波到着前の即時重力信号の検出が挙げられる。このP波前信号を、東北沖地震のF-netで取得された広帯域地震波形を重合

することで検出することに成功した。先行研究に比べて高い統計的有意性を実現した。また、即時重力変化が引き起こす弾性変形は、総内力ゼロとなる不思議な変形であることを理論的に示した。これは、今後の信号検出および検出装置開発の指針となる（図22）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI06〕）。

これまでの課題と今後の展望

低頻度大規模地震の解明においては、千島海溝沿いや三陸沖において新たな海域観測が開始され、地震・地殻変動データが徐々に得られつつある。これらのデータを用いた今後の成果が期待される。また、滑りの多様性の理解を深めるために、様々な沈み込み帯において低周波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、今後得られる成果を比較検討し、それぞれの地域の特徴の類似点・相違点を明らかにしたうえで、現象を普遍的に理解していく必要がある。また、断層滑りの多様性の理解のために室内実験も進められており、実際に観測されるプレート境界の滑り現象と関連付けながら研究を進めていく必要がある。観測結果と数値シミュレーションの比較研究もなされており、摩擦特性や流体挙動など、地震発生につながる本質的に重要な要素を明らかにしていく必要がある。内陸地震については、それぞれの地域で起きている現象が明らかにされ、内陸地震と地殻内流体との関連性が多くの地域で議論される中で、沈み込み帯における水の流れに着目しつつ断層強度の時間変化に関する研究を進めていくことが大切である。この部会は、観測に基づく研究が多く、今年度は実施初年度ということもあり、観測点の展開等、観測開始に関する報告が多くみられた。今後は得られてくる成果を包括的にまとめ、地震発生過程の解明とモデル化に向けた研究を進めていく必要がある。また、得られた成果を他部会と共有することで、地震の発生予測手法の高度化につなげていくことが重要である。

成果リスト

- Amagai, T., A. Okamoto, T. Niibe, N. Hirano, K. Motomiya, N. Tsuchiya (2019), Silica nanoparticles produced by explosive flash vaporization during earthquakes, *Sci. Rep.*, 9:9738, doi:10.1038/s41598-019-46320-7
- Amanda, F.F., R. Yamada, M. Uno, S. Okumura, N. Tsuchiya (2019), Evaluation of caldera hosted geothermal potential during volcanism and magmatism in subduction system, NE Japan, *Geofluids*, 2019:3031586, doi:10.1155/2019/3031586
- Chanard, K., A. Nicolas, T. Hatano, F. Petrelis, S. Latour, S. Vinciguerra, A. Schubnel (2019), Sensitivity of acoustic emission triggering to small pore pressure cycling perturbations during brittle creep, *Geophys. Res. Lett.*, 46, doi.org/10.1029/2019GL082093
- Chang, T. W., S., Ide (2019), Empirical relocation of large subduction-zone earthquakes via the teleseismic network correlation coefficient method, *Earth Planet. Space*, 71(1), 79, doi:10.1186/s40623-019-1057-z
- Chang, J.-H., J.-O. Park, T.-T. Chen, A. Yamaguchi, T. Tsuru, Y. Sano, H.-H. Hsu, K. Shirai, T. Kagoshima, K. Tanaka, 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 Letters*, 40(3), 309-324, doi:10.1007/s00367-020-00636-w
- Chiba, K. (2020), Stress state along the western Nankai Trough subduction zone inferred from b-values, long-term slow-slip events, and low-frequency earthquakes, *Earth Planet. Space*, 72, 3, doi:10.1186/s40623-020-1130-7
- Escobar, M. T., N. Takahata, T. Kagoshima, K. Shirai, K. Tanaka, J.-O. Park, H. Obata, Y. Sano (2019), Assessment of Helium Isotopes near the Japan Trench 5 Years after the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *ACS Earth and Space Chemistry*, 3(4), 581-587, doi:10.1021/acsearthspacechem.8b00190
- Fan, J., D. Zhao (2019), P-wave anisotropic tomography of the central and southern Philippines, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 286, 154-164, doi:10.1002/2015JB012098
- Fujita, M., T. Nishimura, S. Miyazaki (2019), Detection of small crustal deformation caused by slow slip events in southwest Japan using GNSS and tremor data, *Earth Planet. Space*, 71:96, doi:10.1186/s40623-019-1075-x
- Fukahata, Y., A. Meneses-Gutierrez, T. Sagiya (in press), Detection of plastic strain using GNSS data of pre- and post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *Earth Planet. Space*
- Fukahata, Y., K. Oohashi, Y. Takada, A. Tanaka (2019), Overview of the special issue "Crustal dynamics (Part I): From a macroscopic view", *J. Geography (Chigaku Zasshi)*, 128, 681-683
- 深畑幸俊, 大橋聖和, 高田陽一郎, 田中明子 (2019), 特集号「地殻ダイナミクス (Part I) -主としてマクロな視点から-」巻頭言, *地学雑誌*, 128, 685-687, doi:10.5026/jgeography.128.685
- Fukao, Y., T. Miyama, Y. Tono, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, M. Yamashita, S. Varlamov, R. Furue, Y. Miyazawa (2019), Detection of ocean internal tide source oscillations on the slope of Aogashima Island, Japan, *J. Geophys. Res. Oceans*, 124, 4918-4933, doi:10.1029/2019JC014997
- Fukuda, J., H. Raimbourg, I. Shimizu, K. Neufeld, H. Stunitz (2019), Experimental grain growth of quartz aggregates under wet conditions and its application to deformation in nature, *Solid Earth*, 10:621-636, doi:10.5194/se-10-621-2019
- Hara, S., Y. Fukahata, Y. Iio (2019), P wave first motion polarity determination of waveform data in western Japan using deep learning, *Earth Planet. Space*, 71:127, doi:10.1186/s40623-019-1111-x
- Hayashida Y. S., Matsumoto S., Y., Iio S., Sakai, A., Kato (in press), Non-double-couple micro-earthquakes in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake (M 7.3) via hyperdense seismic observations, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2019GL084841
- Heidarzadeh, M., Y. Wang, K., Satake, I.E., Mulia (2019), Potential deployment of offshore bottom pressure gauges and adoption of data assimilation for tsunami warning system in the western Mediterranean Sea, *Geosci. Lett.*, 6(1),

doi:10.1186/s40562-019-0149-8

- Hirauchi, K., Y. Yamamoto, S. A. M. den Hartog, A. R. Niemeijer (2020), The role of metasomatic alteration on frictional properties of subduction thrusts: An example from a serpentinite body in the Franciscan Complex, California, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 531, 115967, doi:10.1016/j.epsl.2019.115967
- Honsho, C., M. Kido, F. Tomita, N. Uchida (2019), Offshore postseismic deformation of the 2011 Tohoku Earthquake revisited: Application of an improved GPS-Acoustic positioning method considering horizontal gradient of sound speed structure, *J. Geophys. Res.*, 124, 5990-6009, doi:10.1029/2018JB017135
- Huang, Y., T. Nakatani, M. Nakamura, C. McCammon (2019), Saline aqueous fluid circulation in man-tle wedge inferred from olivine wetting properties, *Nature Comm.*, 10:5557, doi:10.1038/s41467-019-13513-7
- Hutchinson, J., H., Kao, G., Spence, K., Obana, K., Wang, S. Kodaira (2019), Seismic characteristics of the Nootka Fault Zone: Results from the Seafloor Earthquake Array Japan-Canada Cascadia Experiment (SeaJade) *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 109, 2252-2276, doi:10.1785/0120190008
- Ide, S. (2019), Frequent observations of identical onsets of large and small earthquakes, *Nature*, 573(7772), 112-116, doi:10.1038/s41586-019-1508-5
- Ikeda, A., T. Kawasaki, L. Berthier, K. Saitoh, T. Hatano (2020), Universal relaxation dynamics of sphere packings below jamming, *Phys. Rev. Lett.*, 124, 058001, doi:10.1103/PhysRevLett.124.058001
- Ikeda, H., R. Takagi (2019), Coseismic changes in subsurface structure associated with the 2018 Hokkaido Eastern Iwate Earthquake detected using autocorrelation analysis of ambient seismic noise, *Earth Planet. Space*, 71:72, doi:10.1186/s40623-019-1051-5
- Imano, M., M. Kido, C. Honsho, Y. Ohta, N. Takahashi, T. Fukuda, H. Ochi, R. Hino (2019), Assessment of directional accuracy of GNSS-Acoustic measurement using a slackly moored buoy, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 6 No56, doi:10.1186/s40645-019-0302-1
- Ito, A., T. Tonegawa, N., Uchida, Y., Yamamoto, D., Suetsugu, R., Hino, H., Sugioka, K., Obana, K., Nakahigashi, M., Shinohara (2019), Configuration and structure of the Philippine Sea Plate off Boso, Japan: constraints on the shallow subduction kinematics, seismicity, and slow slip events, *Earth Planet. Space*, 71, 111, doi:10.1186/s40623-019-1090-y
- 岩森光, 行竹洋平, 飯尾能久, 中村仁美 (2019), 地殻流体の起源・分布と変動現象, *地学雑誌*, 128, 761-783, doi:10.5026/jgeography.128.761
- Iwamori, H., H., Nakamura, Q., Chang, N., Morikawa, S., Haraguchi (in press), Multivariate statistical analyses of rare earth element compositions of spring waters from the Arima and Kii areas, Southwest Japan. *Geochem. J.*
- Iwamori, H., H., Nakamura, M., Yoshida, T., Nakagawa, K., Ueki, A., Nakao, T., Nishizawa, S., Haraguchi (2019), Trace-element characteristics of eastwest

- mantle geochemical hemispheres, *Comp. Ren. Geosci.*, 351, 209-220,
doi:10.1016/j.crte.2018.09.007
- 岩田貴樹, 吉田圭佑, 深畑幸俊 (2019), 地震学的データを用いた応力インバージョン, 地学雑誌, 128, 797-811, doi:10.5026/jgeography.128.797
- Kame, N., M. Kimura (2019), The fundamental nature of a transient elastic response to prompt gravity perturbations, *Geophys. J. Int.*, 218,
doi.org/10.1093/gji/ggz196
- Kaneko, T., T., Nakakuki, H., Iwamori (2019), Mechanical coupling of the motion of the surface plate and the lower mantle slab: Effects of viscosity hill, yield strength, and depth-dependent thermal expansivity, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 294, doi:10.1016/j.pepi.2019.106274
- Kano, M., Y. Kano (2019), Possible slow slip event beneath the Kii Peninsula, southwest Japan, inferred from historical tilt records in 1973, *Earth Planet. Space*, 71, 95, doi:10.1186/s40623-019-1076-9
- Kashiwagi, H., J. Nakajima (2019), Three-dimensional seismic attenuation structure of central Japan and deep sources of arc magmatism, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 13,746-13,755, doi:10.1029/2019GL084793
- Kharitonova, N., G., Chelnokov, I., Bragin, H., Nakamura, H., Iwamori, N., Morikawa, A., Korzun (2019), The geochemistry of water and gas phases from high pCO₂ sparkling springs within the northern Sikhote-Alin ridge region (Russian Far East), *E3S Web of Conferences* 98, 01025,
doi:10.1051/e3sconf/20199801025
- Kimura, M., N. Kame, S. Watada, M. Ohtani, A. Araya, Y. Imanishi, M. Ando, T. Kunugi (2019a), Earthquake-induced prompt gravity signals identified in dense array data in Japan, *Earth Planet. Space*, 71, doi:10.1186/s40623-019-1006-x
- Kimura, M., N. Kame, S. Watada, M. Ohtani, A. Araya, Y. Imanishi, M. Ando, T. Kunugi (2019b), Reply to comment by Valee et al. on " Earthquake-induced prompt gravity signals identified in dense array data in Japan" , *Earth Planet. Space*, 71, doi:10.1186/s40623-019-1099-2
- 木村将也, 亀伸樹 (2019), 表現定理とグリーン関数(3) ——全無限グリーン関数の2階微分を用いた点震源が引き起こす歪み・応力・密度摂動場の表現——, *地震*, 71, 153-160, doi:10.4294/zisin.2017-20
- Kitamura, M., H. Kitajima, H. Sone, Y. Hamada, T. Hirose (2019), Strength profile of the inner Nankai accretionary prism at IODP Site C0002, *Geophys. Res. Lett.*, 46 , 10791-10799, doi:10.1029/2019GL083732
- Kodaira S., T., Fujiwara, G., Fujie, Y., Nakamura, T., Kanamatsu (in press), Large Coseismic Slip to the Trench During the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*
- Kono, A., T. Sato, M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, K. Uehira, T. Shinbo, Y. Machid, R. Hino, R. Azuma (2019), 2D spatial distribution of reflection intensity on the upper surface of the Philippine Sea plate off the Boso

- Peninsula, Japan, *Tectonophysics*, 774, doi:10.1016/j.tecto.2019.228206
- Kumazawa, T., Y., Ogata, H., Tsuruoka (2019), Characteristics of seismic activity before and after the 2018 M6.7 Hokkaido Eastern Iburi earthquake, *Earth Planet. Space*, 71, 130, doi:10.1186/s40623-019-1102-y
- Lanza, F., C. J. Chamberlain, K. Jacobs, E. Warren-Smith, H. J. Godfrey, M. Kortink, C.H. Thurber, M. K. Savage, J. Townend, S. Roecker, D. Eberhart-Phillips (2019), Crustal fault connectivity of the Mw 7.8 2016 Kaikoura earthquake constrained by aftershock relocations, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 6487-6496, doi:10.1029/2019GL082780
- Lee, H., H., Kim, T., Kagoshima, J.-O., Park, N., Takahata, Y., Sano (2019), Mantle degassing along strike-slip faults in the Southeastern Korean Peninsula, *Sci. Rep.*, 9, 15334, doi:10.1038/s41598-019-51719-3
- Matsui, R., M. Kido, Y. Niwa, C. Honsho (2019), Effects of disturbance of seawater excited by internal wave on GNSS-acoustic positioning, *Mar. Geophys. Res.*, 40, doi:10.1007/s11001-019-09394-6
- Matsumoto S., T. Okada, T. Terakawa, M. Uyeshima, Y. Iio (2020), The advancement of research on inland earthquake generation 2014-2018, *J. Disaster Res.*, 15(2), 96-105, doi:10.20965/jdr.2020.p0096
- Meneses-Gutierrez, A., T. Nishimura (2020), Inelastic deformation zone in the lower crust for the San-in Shear Zone, Southwest Japan, as observed by a dense GNSS network, *Earth Planet. Space*, 72:10, doi:10.1186/s40623-020-1138-z
- Miyake, Y., H. Noda (2019), Fully dynamic earthquake sequence simulation of a fault in a viscoelastic medium using a spectral boundary integral equation method: does interseismic stress relaxation promote aseismic transients?, *Earth Planet. Space*, 71:137, doi:10.1186/s40623-019-1113-8
- Mori, J., T. Yasutomi, H. Ogasawara, S.N. Somala, S. Sangaraju (2019), Near-Field Observations of the Rupture for the M5.5 Orkney, South Africa Earthquake, SSA Annual Meeting 2019, *Seismol. Res. Lett.*, 90, 936-936
- Muto, J, J. D. P. Moore, S. Barbot, T. Iinuma, Y. Ohta, H. Iwamori (2019), Coupled afterslip and transient mantle flow after the 2011 Tohoku earthquake, *Sci. Adv.*, doi:10.1126/sciadv.aaw1164
- Nakagawa, T., H., Iwamori (2019), On the implications of the coupled evolution of the deep planetary interior and the presence of surface ocean water in hydrous mantle convection, *Comp. Ren. Geosci.*, 351, 197-208, doi:10.1016/j.crte.2019.02.001
- Nakajima, J., (2019), Revisiting intraslab earthquakes beneath Kyushu, Japan: Effect of ridge subduction on seismogenesis, *J. Geophys. Res.*, 124, 8660-8678, doi:10.1029/2019JB017869
- Nakamura, H., H. Iwamori, M. Nakagawa, T. Shibata, J.-I. Kimura, T. Miyazaki, Q. Chang, B. S. Vaglarov, T. Takahashi, Y., Hirahara (2019), Geochemical mapping of slab-derived fluid and source mantle along Japan arcs, *Gondwana Res.*, 70,

36-49, doi:10.1016/j.gr.2019.01.007

- 七條彰啓, 中尾茂, 松島健, 大倉敬宏 (2019), ブロック断層モデルを用いた鹿児島一宮崎・熊本県境付近のブロック境界の検討, 鹿児島大学理学部紀要, 52, 15-22
- Noda, N., M. Manzi, H.Y. Ogasawara, L. Linzer, S. Enslin, R. Durrheim, H. Ogasawara (2019), ICDPDSeis 8: the M5.5 fault structure and reflective intrusives in legacy 3DSeismic reflection data, JpGU 2019 Meeting, MIS02-P11
- Nohara, T., M. Uno, N. Tsuchiya (2019), Enhancement of permeability activated by supercritical fluid flow through granite, *Geofluids*, 2019:6053815, doi:10.1155/2019/6053815
- Ogasawara, H., B. Liebenberg, M. Rickenbacher, M. Ziegler, v. H. Esterhuizen, T. C. Onstott, R. J. Durrheim, M. S. D. Manzi, S. Mngadi, Y. Yabe, H. Y. Ogasawara, S. Kaneki, E. Cason, J. G. Vermeulen, E. an Heerden, T. Wiersberg, M. Zimmer, C. Kujawa, R. Conze, G. van Aswegen, N. Wechsler, A. K. Ward, S. Enslin, S. Tau, M. S. Bucibo, the DSeis Team (2019a), 2019 status report: Drilling into seismogenic zones of M2.0-5.5 earthquakes in South African gold mines (DSeis project), *Proc. 9th Int. Congr. Deep and High Stress Mining, Symposium Series S98, Southern African Inst. Min. Metal.*, 375-384, doi:10.36487/ACG_rep/1952_28_Ogasawara
- Ogata, Y., K., Katsura, H., Tsuruoka, N. Hirata (2019), High-resolution 3D earthquake forecasting beneath the greater Tokyo area, *Earth Planet. Space*, 71, 113, doi:10.1186/s40623-019-1086-7
- Ohta, K., Y. Ito, R. Hino, S. Ohyanagi, T. Matsuzawa, H. Shiobara, M. Shinohara (2019), Tremor and inferred slow slip associated with afterslip of the 2011 Tohoku Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 4591-4598, doi:10.1029/2019GL082468
- Ohtani, M., N. Kame, M. Nakatani (2019), Synchronization of megathrust earthquakes to periodic slow slip events in a single-degree-of-freedom spring-slider model, *Sci. Rep.*, 9, 8285, doi:10.1038/s41598-019-44684-4
- Oikawa, G., N. Aso, J. Nakajima (2019), Focal mechanisms of deep low-frequency earthquakes beneath Zao volcano, northeast Japan, and its relationship to the 2011 Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 7361-7370, doi:10.1029/2019GL082577
- Okada, T., Y. Iio, S. Matsumoto, S. Bannister, S. Ohmi, S. Horiuchi, T. Sato, T. Miura, J. Pettinga, F. Ghisetti, R.H. Sibson (2019), Comparative tomography of reverse-slip and strike-slip seismotectonic provinces in the northern South Island, New Zealand, *Tectonophysics* 765, 172-186, doi:10.1016/j.tecto.2019.03.016
- Okamoto, A. S., B. A. Verberne, A. R. Niemeijer, M. Takahashi, I. Shimizu, T. Ueda, C. J. Spiers (2019), Frictional properties of simulated chlorite gouge at hydrothermal conditions: Implications for subduction megathrusts, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 124, 4545-4565, doi:10.1029/2018JB017205

- Plata-Martinez, R., Y. Ito, S. Ide, N. Mizuno, M. Shinohara, T. Yamada, A. Husker, J. Real, V. M. Cruz-Atienza, Y. Yamashita, A. Toh (2019), OBS detection of shallow tremors at the Guerrero Gap, Mexico, Reunion Anual Geofisica Mexicana 2019, SE12-3 0487
- Sakaue, H., T. Nishimura, J. Fukuda, T. Kato (2019), Spatiotemporal evolution of long- and short-term slow slip events in the Tokai region, central Japan estimated from a very dense GNSS network during 2013-2016, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 124, doi:10.1029/2019JB018650
- Sasajima, R., B., Shibazaki, H., Iwamori, T., Nishimura, Y., Nakai (2019), Mechanism of subsidence of the Northeast Japan forearc during the late period of a gigantic earthquake cycle, *Sci. Rep.*, 9:5726
- Sawa, S., J. Muto, H. Nagahama, N. Miyajima (2020), Grain size dependency of the olivine-spinel phase transformational faulting mechanism responsible for deep-focus earthquakes, Annual Report, Bayerisches Geoinstitut
- Shibazaki, B., L. M., Wallace, Y., Kaneko, I., Hamling, Y., Ito, T., Matsuzawa (2019), Three-dimensional modeling of spontaneous and triggered slow-slip events at the Hikurangi subduction zone, New Zealand, *J. Geophys. Res.*, 124, 13,250-13,268, doi:10.1029/2019JB018190
- 澁谷拓郎, 寺石眞弘, 小松信太郎, 山崎健一, 山下裕亮, 大倉敬宏, 吉川慎, 井口正人, 為栗健, 園田忠臣 (2019), 地震学的手法による南九州下のフィリピン海スラブの構造の推定, 京都大学防災研究所年報, 62B, 279-287
- Shimizu, K., Y., Yagi, R., Okuwaki, Y., Fukahata (in press), Development of an inversion method to extract information on fault geometry from teleseismic data, *Geophys. J. Int.*
- Shiobara, A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara (2019), New Era of Ocean Bottom Broadband Seismology with Penetrator System of the Autonomous BBOBS-NX (NX-2G), 27th IUGG General Assembly, S05a, IUGG19-0453
- 篠原雅尚 (2019), 海底における地震・津波・地殻変動のモニタリング —海底ケーブルネットワーク—, *海洋調査技術*, 31(1), 11-16
- Shiraishi, K., G. F., Moore, Y., Yamada, M., Kinoshita, Y., Sanada, G., Kimura (2019), Seismogenic Zone Structures Revealed by Improved 3-D Seismic Images in the Nankai Trough off Kumano, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, John Wiley & Sons, Ltd., 20, 2252-2271, doi:10.1029/2018gc008173
- Shiraishi, K., Y. Yamada, T. Nibe (2019), Thermogenic petroleum potential of the Nankai subduction zone, offshore SW Japan, *J. Pet. Geol.*, 42, 417-434, doi:10.1111/jpg.12744
- Suemoto, Y., T. Ikeda, T. Tsuji, Y. Iio (2020), Identification of a nascent tectonic boundary in the San-in area, south-west Japan, using a 3D S-wave velocity structure obtained by ambient noise surface wave tomography, *Earth Planet. Space*, 72, 15, doi:10.1186/s40623-020-1139-y
- Suzuki, T. H. Matsukawa (2019), Transition between Macroscopic Steady Slippage and

- Creep Motion in a System with Velocity-Dependent Friction Stress, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 88, 114402, doi:10.7566/JPSJ.88.114402
- Takahashi, A., M., Hashimoto, J.-C., Hu, K., Takeuchi, M.-C., Tsai, Y., Fukahata (2019), Hierarchical cluster analysis of GPS data and examination of the nature of the clusters associated with regional tectonics in Taiwan, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 124, doi:10.1029/2018JB016995
- Terakawa, T., M. Matsu'ura, A. Noda (2020), Elastic strain energy and pore-fluid pressure control of after-shocks, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 535, doi:10.1016/j.epsl.2020.116103
- Tomita, F., M. Kido, C. Honsho, R. Matsui (2019), Development of a kinematic GNSS-Acoustic positioning method based on a state-space model, *Earth Planet. Space*, 71(1), 102, doi:10.1186/s40623-019-1082-y
- Tsuda, H., Y. Iio, T. Shibutani (2019), Origin of the seismic belt in the San-in district, southwest Japan, inferred from the seismic velocity structure of the lower crust, *Earth Planet. Space*, 71, 109, doi:10.1186/s40623-019-1091-x
- Tsuru, T., K. Amakasu, J.-O. Park, J. Sakakibara, M. Takanashi (2019), A new seismic survey technology using underwater speaker detected a low-velocity zone near the seafloor: an implication of methane gas accumulation in Tokyo Bay, *Earth Planet. Space*, 71:31, doi:10.1186/s40623-019-1011-0
- 堤浩之, 飯尾能久 (2019), 地形・地質・物理探査データに基づく2018年大阪府北部の地震の震源域周辺の活構造の再検討, *地震2*, 72, 57-67, doi:10.4294/zisin.2018-16
- Uchida, N., D. Kalafat, A. Pinar, Y. Yamamoto (2019), Repeating earthquakes and interplate coupling along the western part of the North Anatolian Fault, *Tectonophysics*, 769, 228185, doi:10.1016/j.tecto.2019.228185
- Ueki, K., T., Kuwatani, A., Okamoto, S., Akaho, H., Iwamori (in press), Thermodynamic modeling of hydrous melt? olivine equilibrium using exhaustive variable selection, *Phys. Earth Planet. Inter.*
- Wang, K., L. Brown, Y. Hu, K. Yoshida, J. He, T. Sun (2019), Stable forearc stressed by a weak megathrust: Mechanical and geodynamic implications of stress changes caused by the M=9 Tohoku-oki earthquake, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124(3) 6179-6194, doi:10.1029/2018JB017043
- Wang, Y., K. Satake, O. Sandanbata, T. Maeda, H.-Y. Su (2019), Tsunami data assimilation of cabled ocean bottom pressure records for the 2015 Torishima volcanic tsunami earthquake, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124(10), 10413-10422, doi:10.1029/2019JB018056
- Warren-Smith, E., B. Fry, L. Wallace, E. Chon, S. Henrys, A. Sheehan, K. Mochizuki, S. Schwartz, S. Webb, S. Lebedev (2019), Episodic stress and fluid pressure cycling in subducting oceanic crust during slow slip, *Nature Geo.*, 12, 475-481, doi:10.1038/s41561-019-0367-x
- Watanabe, T., M., Makimura, Y., Kaiwa, G., Desbois, K., Yoshida, K., Michibayashi (2019), Elastic wavevelocity and electrical conductivity in a brine-saturated

- rock and microstructure of pores, *Earth Planet. Space*, 71:129,
doi:10.1186/s40623-019-1112-9
- Watanabe, N., K. Sakaguchi, R. Goto, K. Yamane, T. Ishibashi, Y. Chen, T. Komai, N. Tsuchiya (2019), Cloud-fracture networks as a means of accessing superhot geothermal energy, *Sci. Rep.*, 9:939, doi:10.1038/s41598-018-37634-z
- Yarce, J., A.F. Sheehan, J.S. Nakai, S.Y. Schwartz, K. Mochizuki, M.K. Savage, L.M. Wallace, S.A. Henrys, S.C. Webb, Y. Ito, R.E. Abercrombie, B. Fry, H. Shaddox, E.K. Todd (2019), Seismicity at the northern Hikurangi Margin, New Zealand, and investigation of the potential spatial and temporal relationships with a shallow slow slip event, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 124, 5, 4751-4766, doi:10.1029/2018JB017211
- Yokota, Y., T. Ishikawa (2020), Shallow slow slip events along the Nankai Trough detected by GNSS-A, *Sci. Adv.*, 6(3), eaay5786, doi:10.1126/sciadv.aay5786
- 吉田圭佑, 平原聡, 中山貴史, 内田直希, 岡田知己, 松澤暢 (2019), 2019年山形沖M6.7地震の余震の詳細な震源分布とその時空間発展, 日本地震学会2019年度秋季大会, S24-02
- Yoshida, K. (2019), Prevalence of asymmetrical rupture in small earthquakes and its effect on the estimation of stress drop: A systematic investigation in inland Japan, *Geosci. Lett.*, 6:16, doi:10.1186/s40562-019-0145-z
- Yoshida, K., T. Saito, K. Emoto, Y. Urata, D. Sato (2019), Rupture directivity, stress drop and hypocenter migration of small- and moderate-sized earthquakes in the Yamagata-Fukushima border swarm triggered by the upward pore pressure migration after the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, 769:228184, doi:10.1016/j.tecto.2019.228184
- Yuasa Y., S., Matsumoto S., Nakao T., Matsushima T., Ohkura (2020), Inelastic strain rate and stress fields in and around an aseismic zone of Kyushu Island, Japan, inferred from seismic and GNSS data, *Geophys. J. Int.*, ggaa008, doi:10.1093/gji/ggaa008
- Yukutake, Y., Y., Abe, R., Doke, R. (2019), Deep low-frequency earthquakes beneath the Hakone volcano, central Japan, and their relation to volcanic activity, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 20, 11035-11043, doi:10.1029/2019GL084357
- Zal, H., K. Jacobs, M. Savage, J. Yarce, S. Mroczek, K. Graham, E.K. Todd, J. Naka, Y. Iwasaki, A. Sheehan, K. Mochizuki, L. Wallace, S. Schwartz, S. Webb, S. Henrys (2019), Temporal and spatial variations in seismic anisotropy and Vp/Vs ratios in a region of slow slip, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 532, 115970, doi:10.1016/j.epsl.2019.115970

Kirchhoff Prestack Depth Migration (Line 1)

17

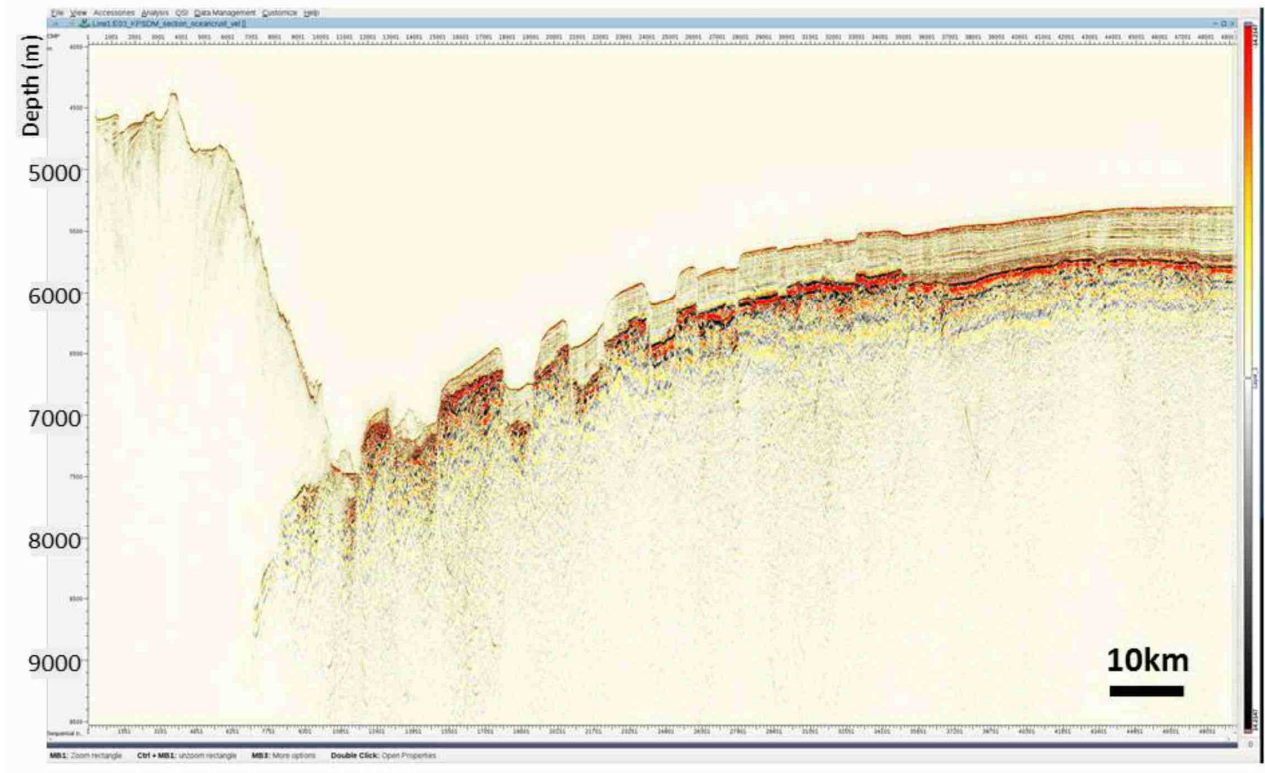


図1. 三陸沖日本海溝海側のアウターライズ断層構造を示す重合前深度マイグレーション (Pre-stack Depth Migration) 処理結果 (東京大学大気海洋研究所 [課題番号:AORI01])。

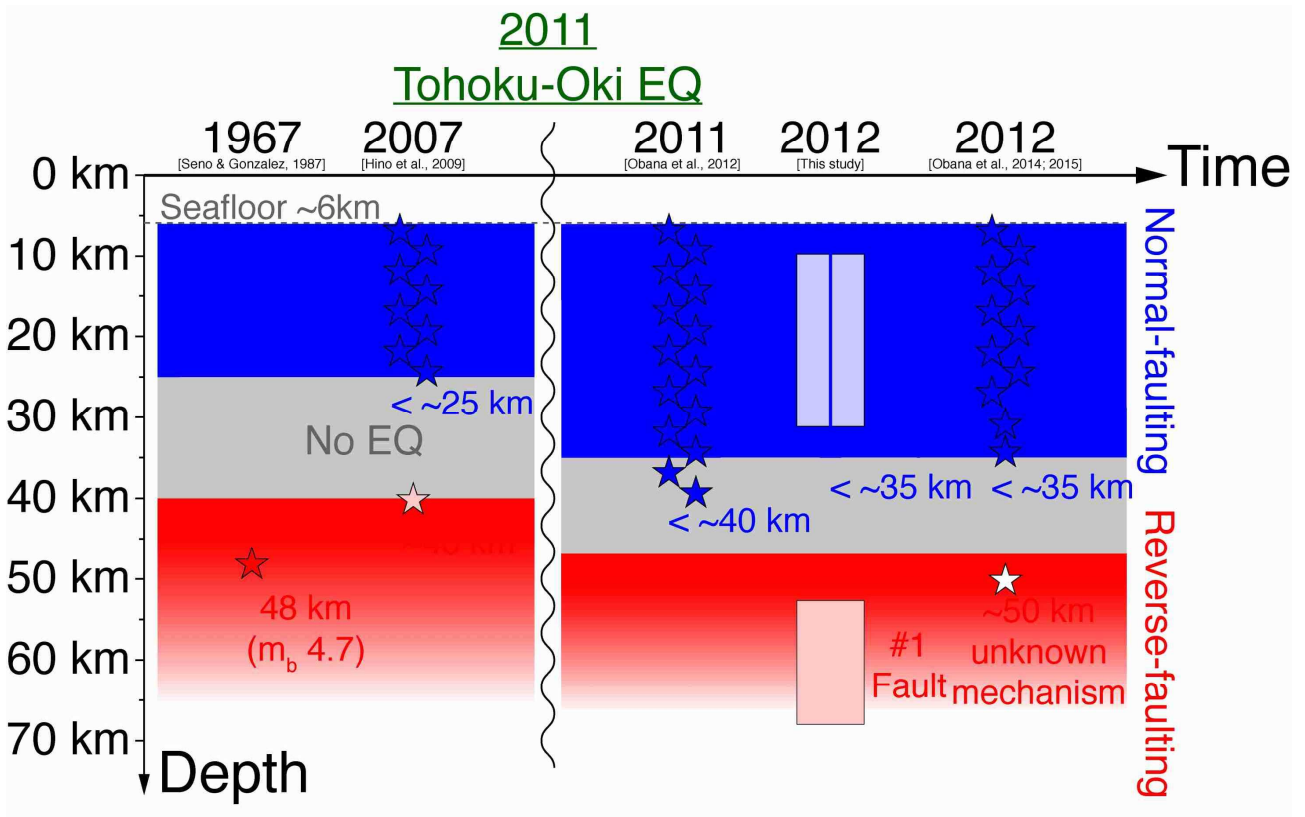


図 2. 宮城県沖の沈み込むプレート内における応力深さプロファイルの時間変化の模式図 (Kubota et al., 2019)。赤色は深部における水平圧縮応力 (逆断層型地震活動), 青色は浅部における水平引張応力 (正断層型地震活動)。正断層型地震の発生下限深さは 2011 年東北沖地震後に有意に深くなっている (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_06])。

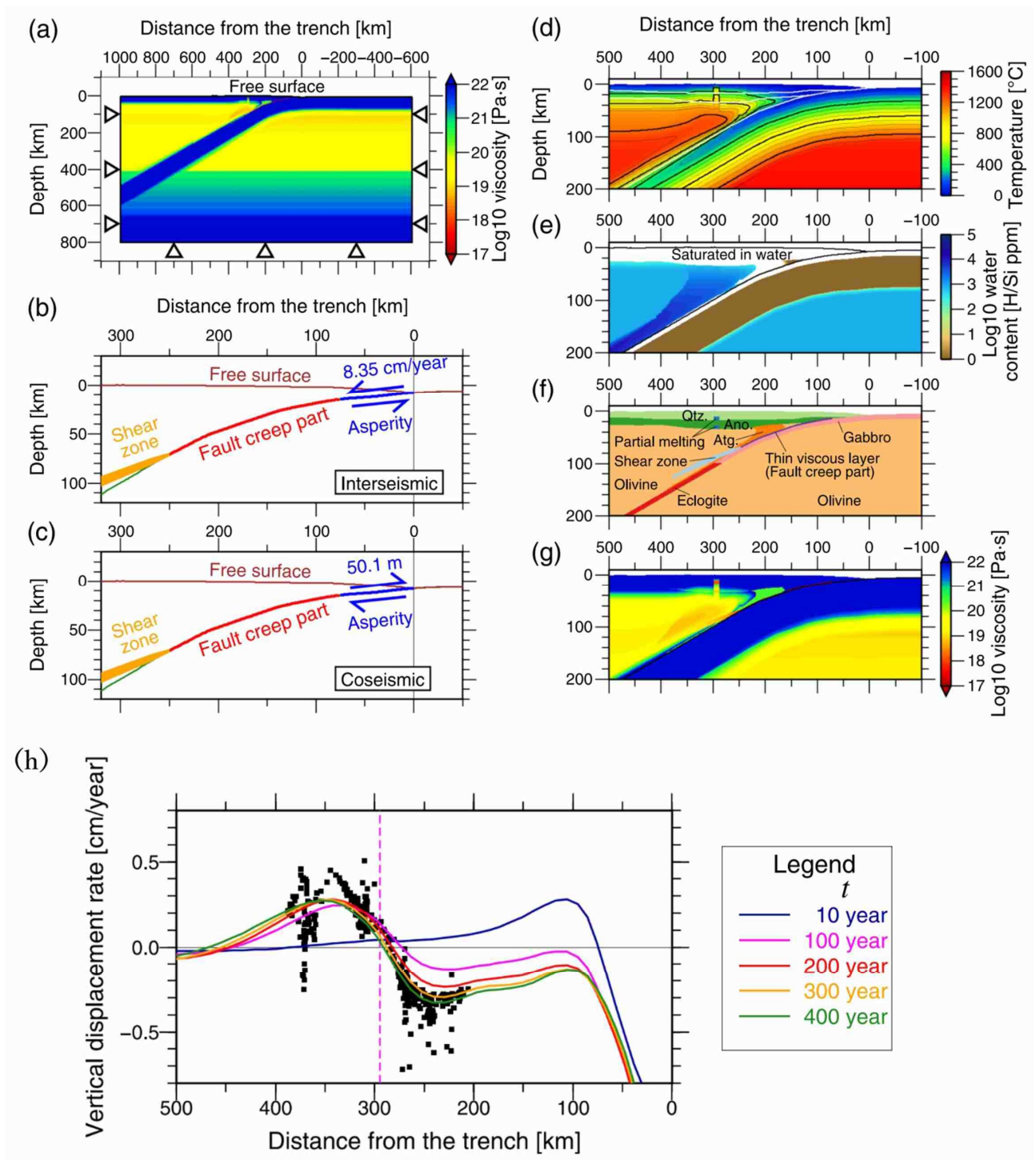


図 3. 東北沖地震前の沈降（および地震後の隆起）を再現する数値モデル（Sasajima et al., 2019）。(a) モデル領域，(b) 巨大地震前後のすべりに関する境界条件，(c) 巨大地震時のすべりに関する境界条件，(d) 温度場，(e) 水分分布，(f) 主要・重要鉱物の分布，(g) 粘性率，(h) これらの条件をもとに計算された垂直変位とその時間変化（色付きの実線），および観測値（黒四角の点）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI04]）。

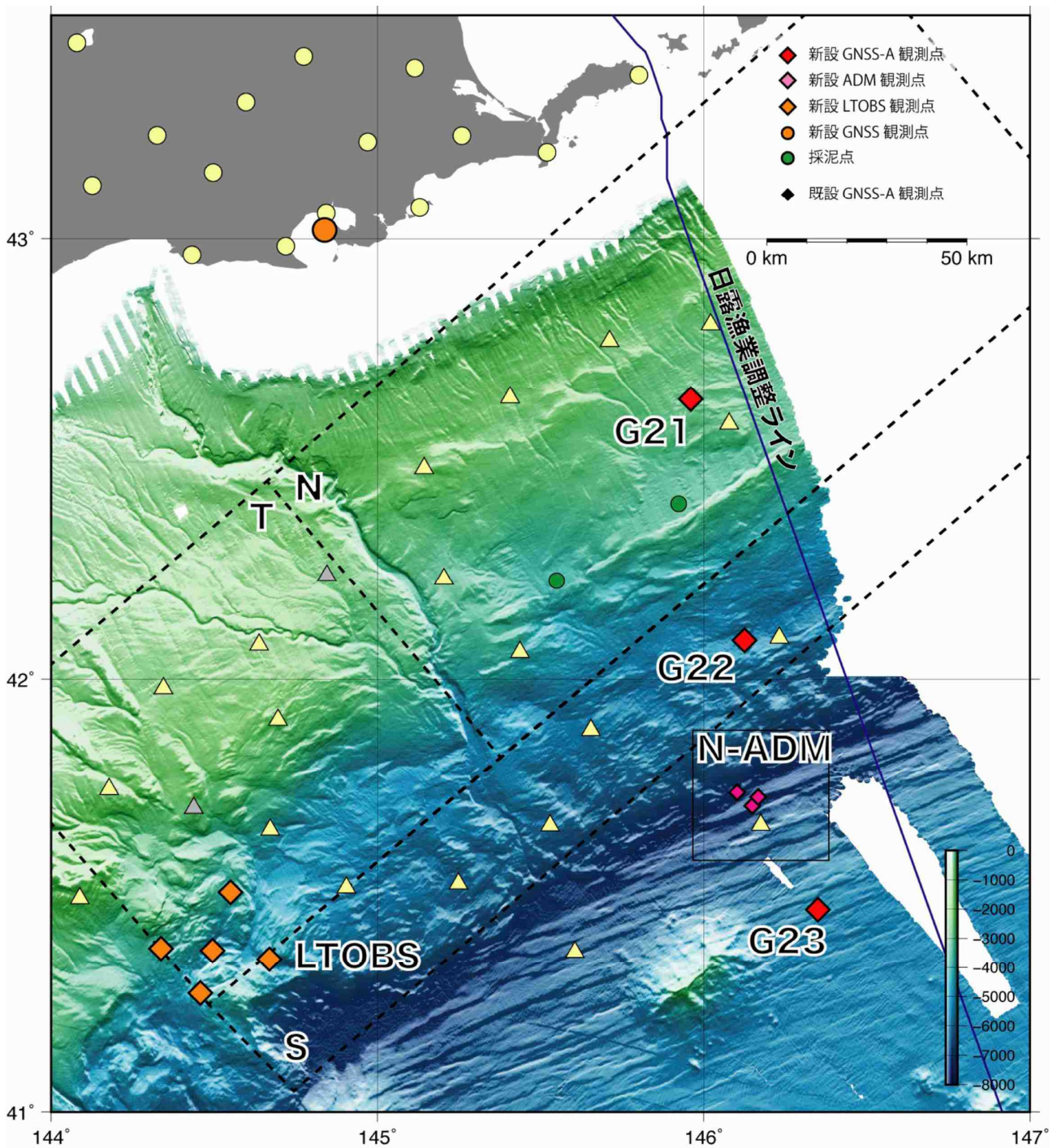


図4. 千島海溝根室沖に新設した海底測地観測網の配置図。G21, G22, G23 が GNSS/A 観測点, N-ADM が海底間音響測距の観測点をそれぞれ示す。陸上の黄色丸印は GEONET 観測点, オレンジ色の丸印が GNSS/A 観測のために新設した陸上 GNSS 観測点をそれぞれ示す。オレンジ色の四角は, 地震・微動を観測する AoA を構成する海底地震計の位置を示す (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_05])。

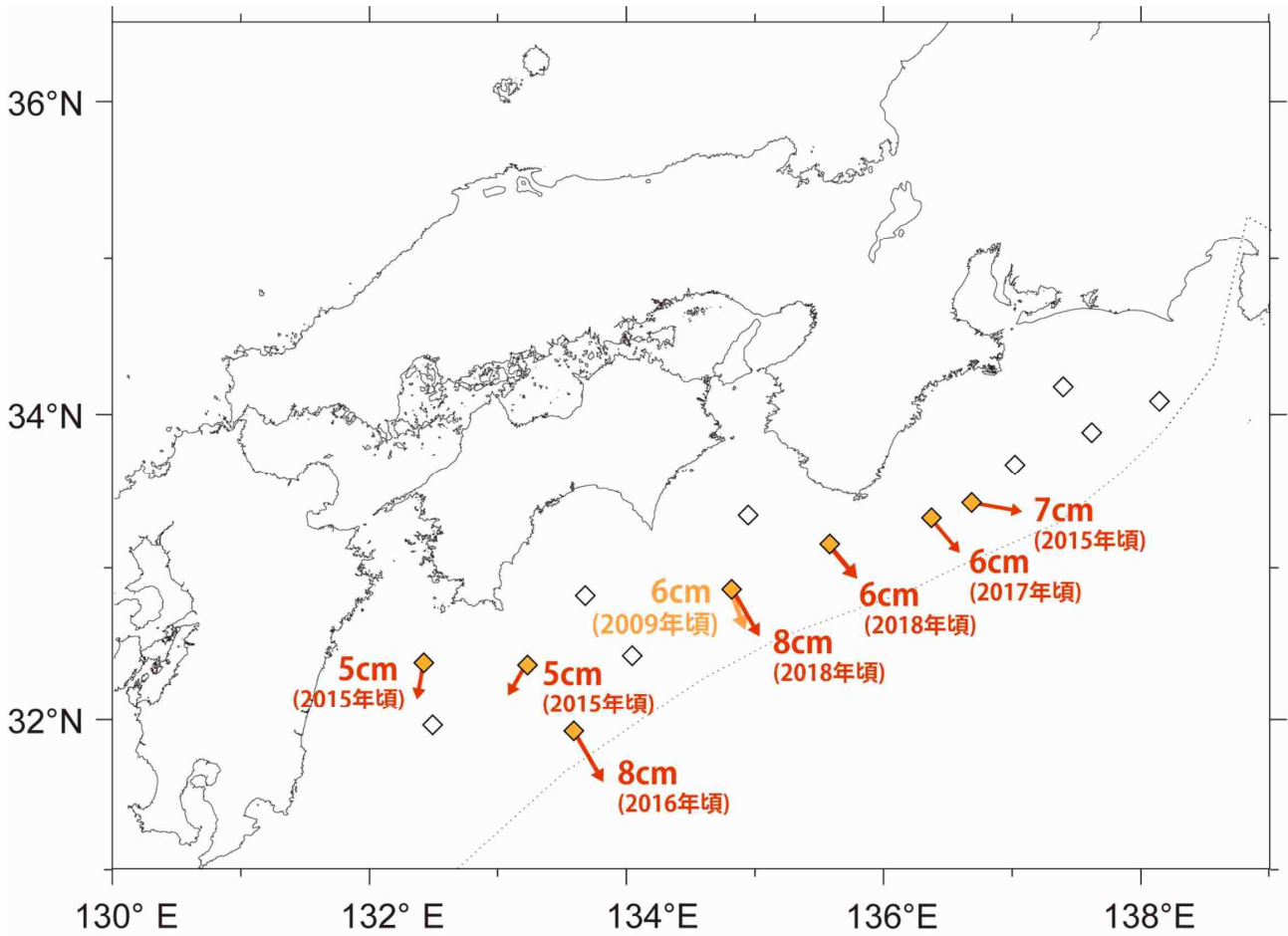


図5. 南海トラフ沿いの海底地殻変動観測により検出された SSE 由来と考えられる非定常変動の水平ベクトル（定常変動からの差）を示す（海上保安庁 [課題番号：JCG_03]）。

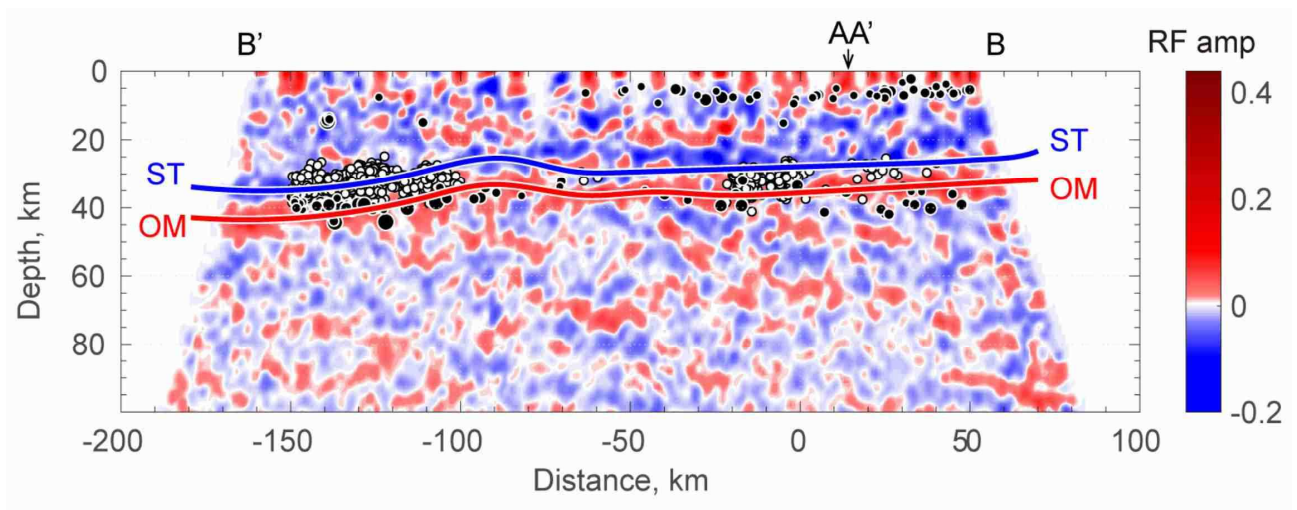


図6．四国を東西に横断する測線（B'：西予，B：徳島）におけるレーザー関数イメージ。解釈線STとOMは、それぞれフィリピン海スラブ上面とスラブ内の海洋モホ面を示す。白丸は深部低周波地震を，黒丸は通常の地震を示す。AA'は四国を南北に縦断する海陽－綾川測線の位置を示す（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI02〕）。

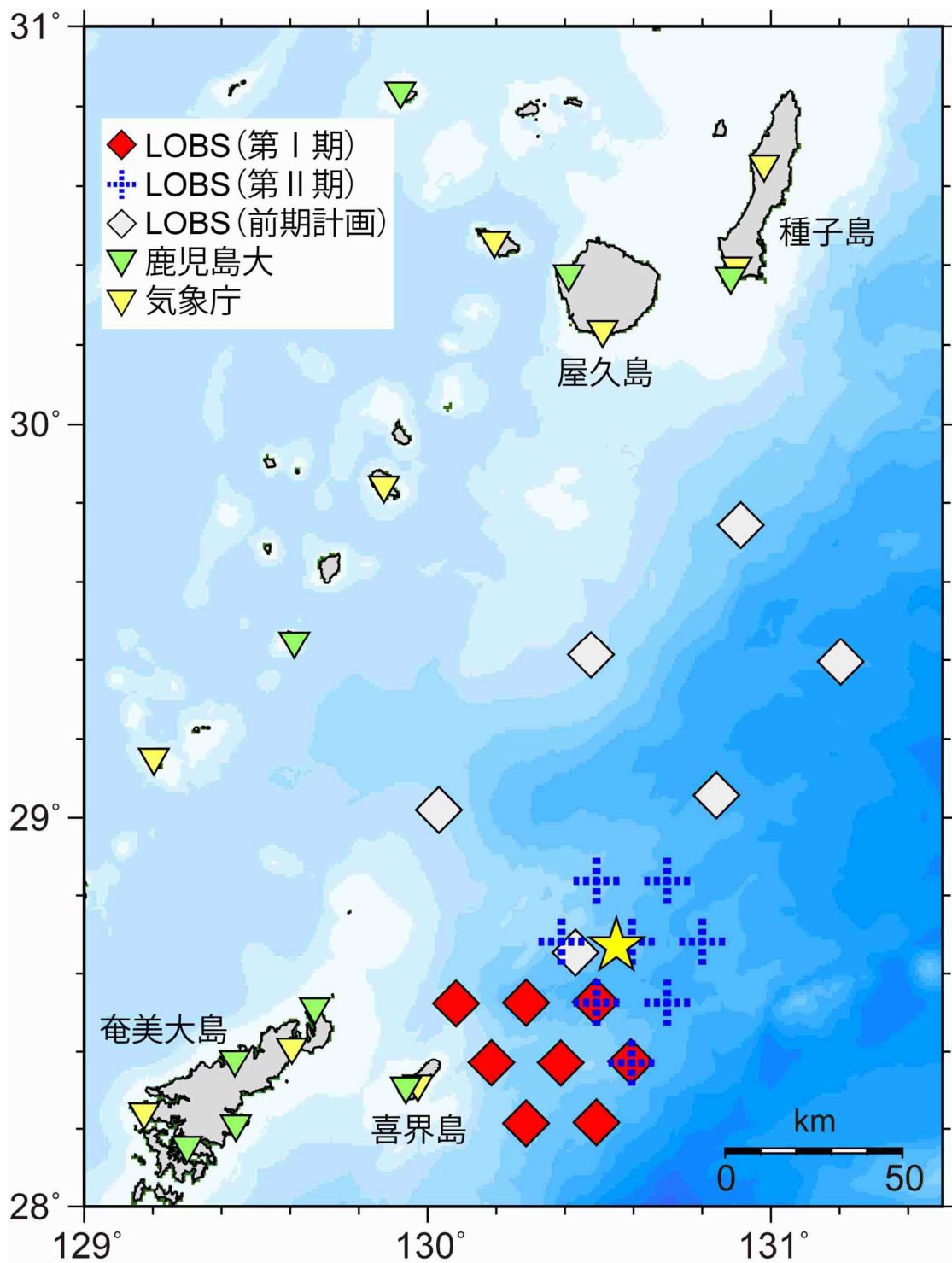


図7. 海底および島嶼部の地震観測点配置。赤四角が2019年度に新規投入された第I期LOBSの位置を示す。青十字は、2020年度に入れ替えらえる第II期LOBS、灰四角は前計画でのLOBSの設置位置である。星印は、1911年に発生したM8.0喜界島近海地震の想定震源(後藤, 2013)を示す。逆三角形のシンボルは、島嶼部の定常地震観測点である(鹿児島大学[課題番号: KGSM01])。

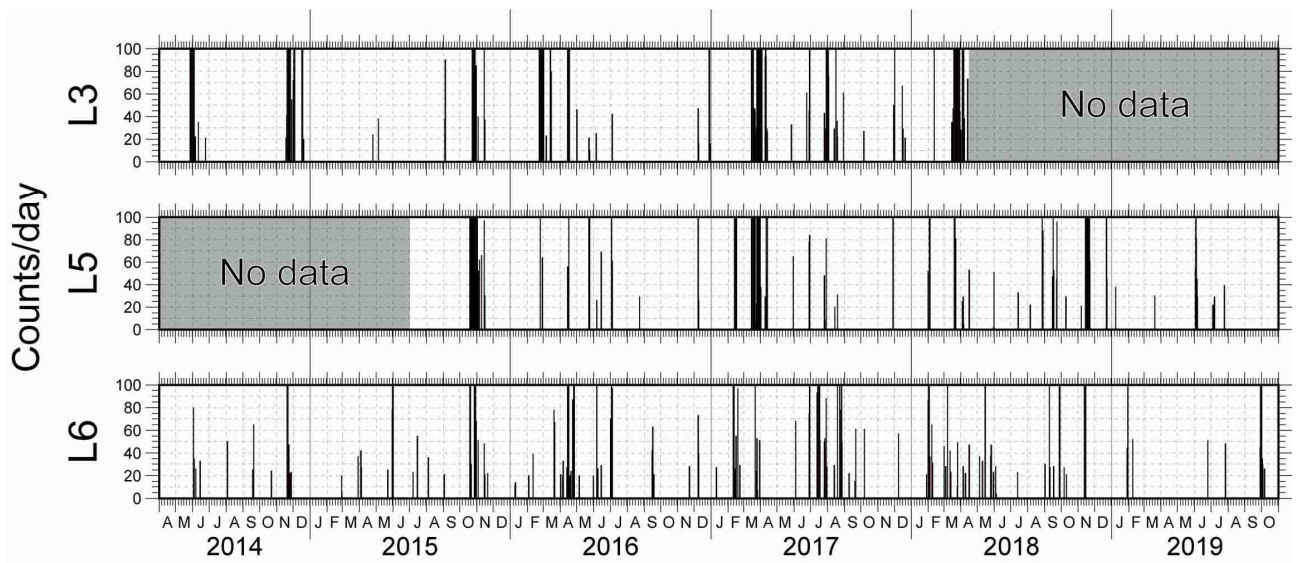


図 8 . 2014 年 4 月～2019 年 10 月の約 5 年間における海溝軸側観測点 (L3, L5, L6 ; 図 9 参照) で検出された低周波微動の日回数の時系列を示す。グレーの時期はデータが存在しない期間に相当する (鹿児島大学 [課題番号 : KGSM01])。

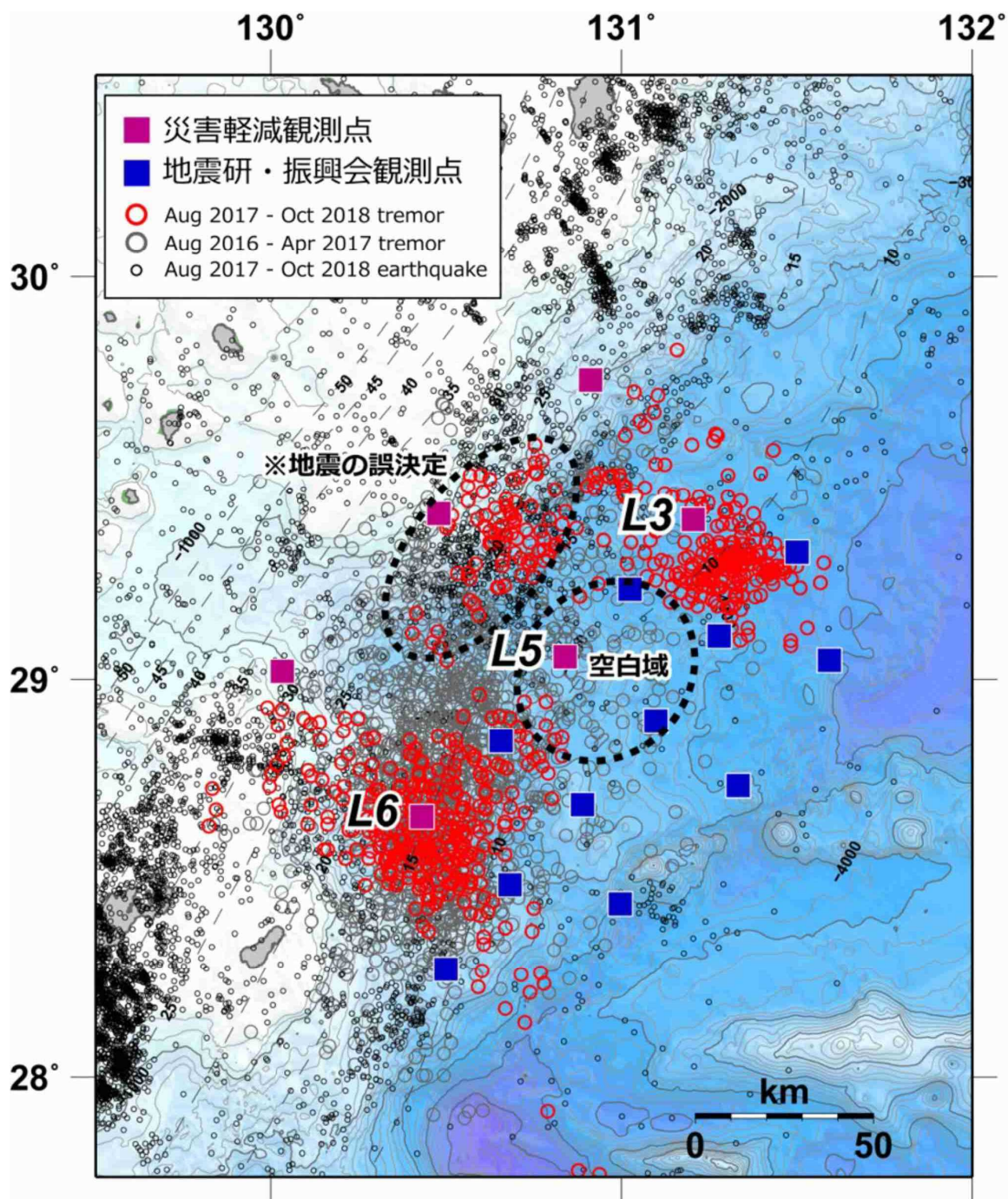


図9. スロー地震（浅部低周波微動）の震央分布。赤丸が決定されたスロー地震の震央，黒丸は通常の地震の震央（気象庁の一元化震源）を示す。四角はLOBS観測点で，このうち紫と青はそれぞれ，前計画の課題で実施した準定常（繰り返し）観測点，東京大学地震研究所と地震予知総合研究振興会が共同で設置した観測点である（鹿児島大学 [課題番号:KGSM01]）。

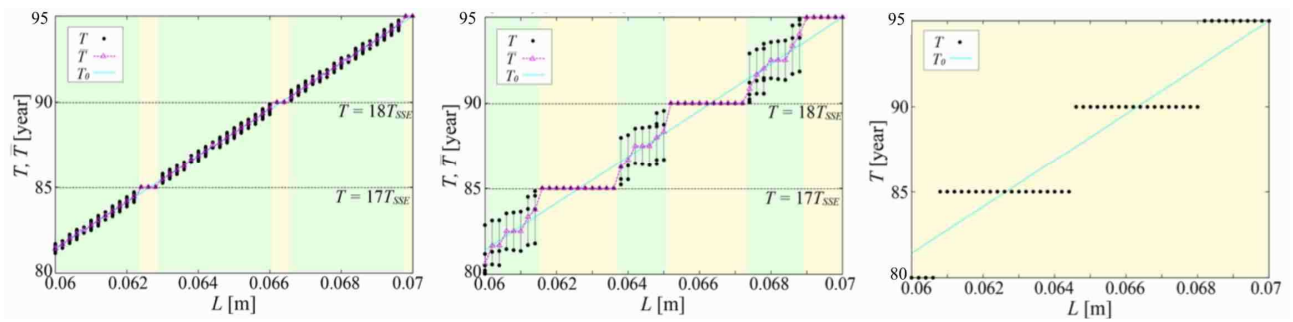


図 10. 5 年周期で起きる SSE の影響を受ける場合の地震の発生間隔 (Ohtani et al., 2019 より改変)。横軸：摩擦則の特徴的滑り距離 L 。縦軸：(黒丸) 地震の発生間隔 T 。青色の三角印は、複数の T が現れる場合の $T(L)$ の平均値、青色実線は、定常的な载荷の場合 (SSE が ない場合) の地震の発生間隔。(a), (b), (c) の順に仮定した SSE の規模が大きくなる。薄黄の塗色部では、SSE 周期の整数倍の T が 1 種類だけ現れる。薄緑の塗色部では、複数の地震をひとつのまとまりとする周期的ふるまいとなり、その間に複数の T が現れ、それらの合計が SSE 周期の整数倍になる (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_06])。

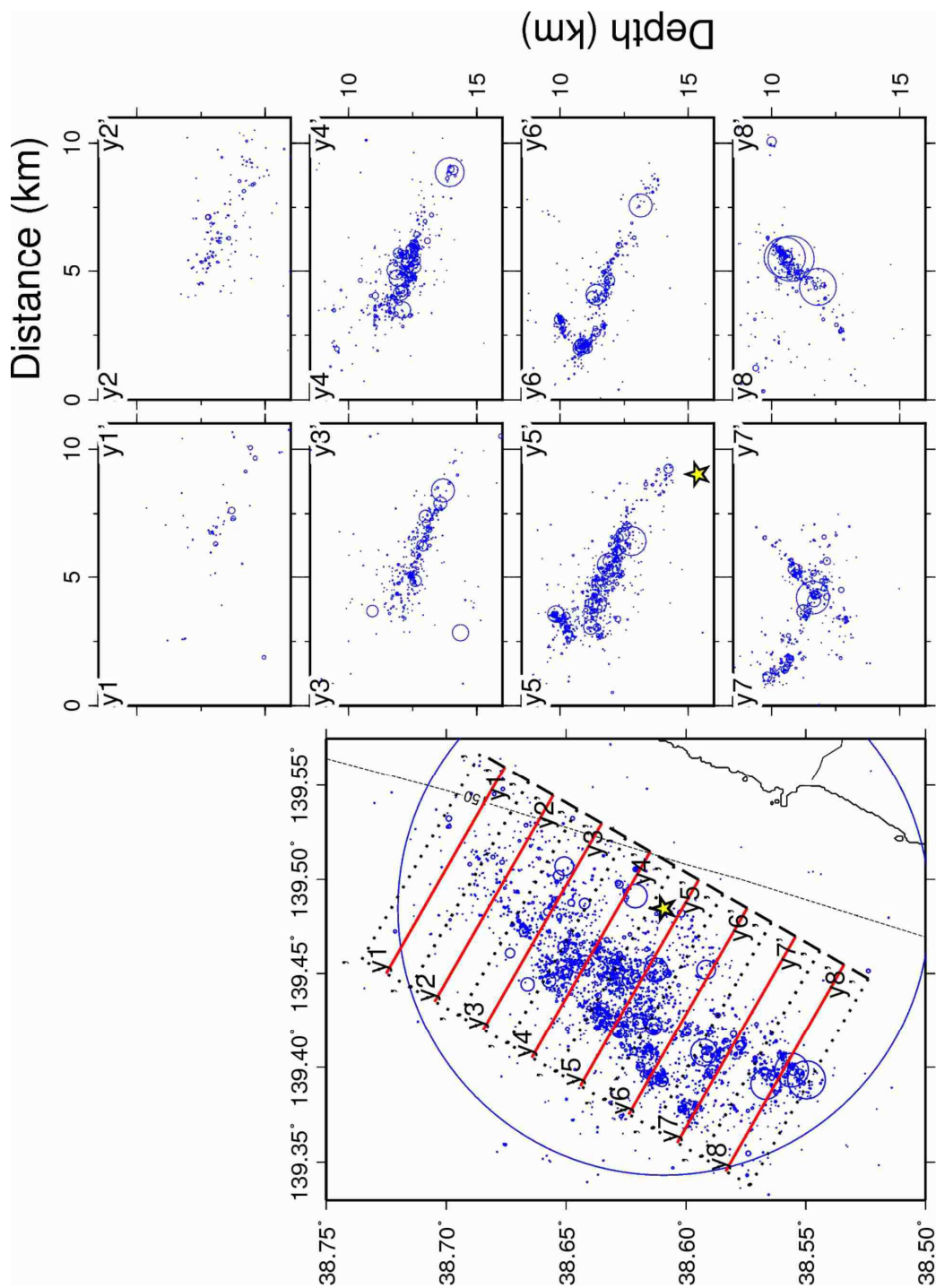


図 11. 震源再決定により推定された 2019 年山形県沖の地震の余震の震源分布（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_07]）。黄色の星印は、山形県沖の地震の震源を表す。

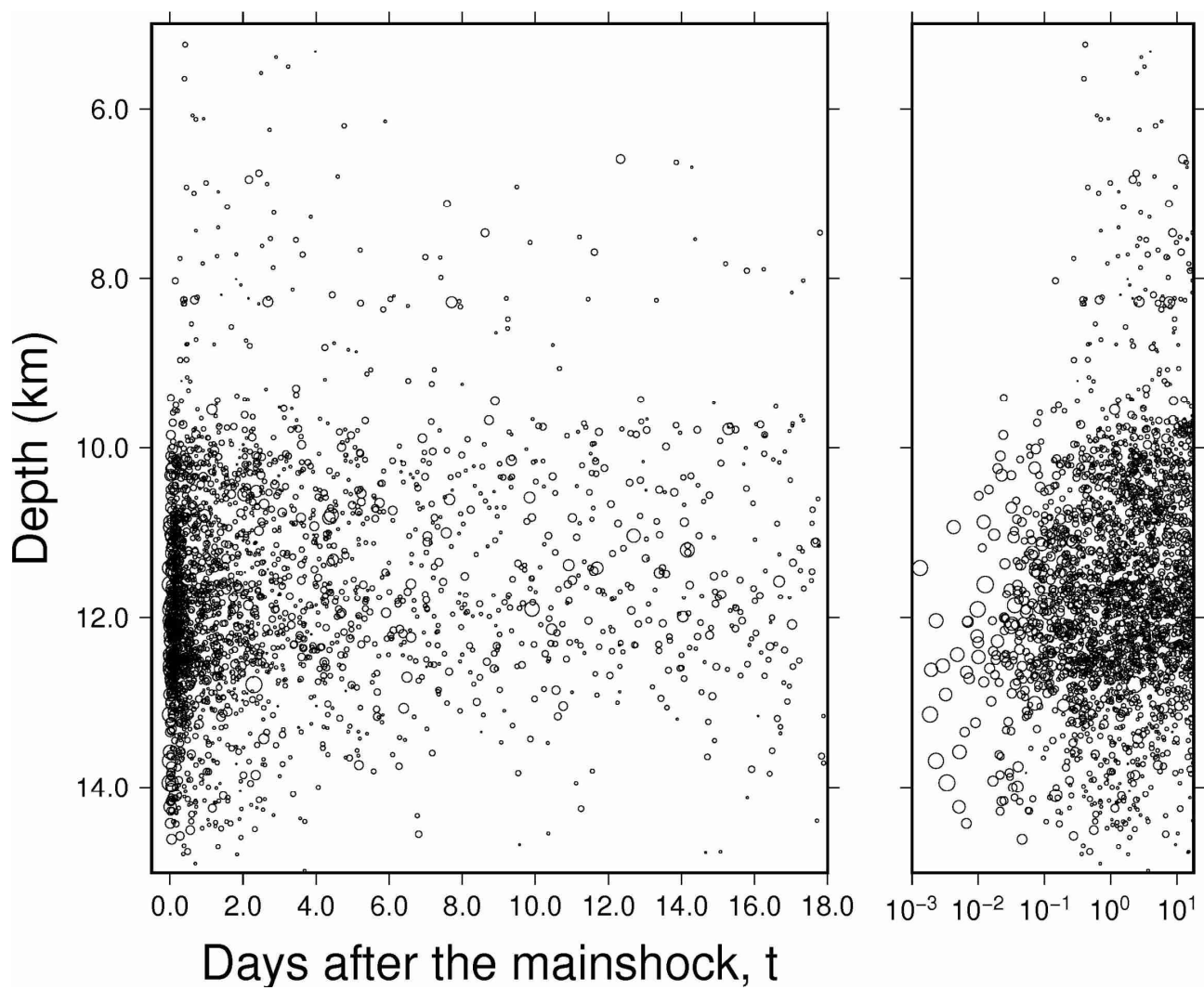


図 12. 2019 年山形県沖の地震の余震の震源深さと経過時間の関係（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_07]）。

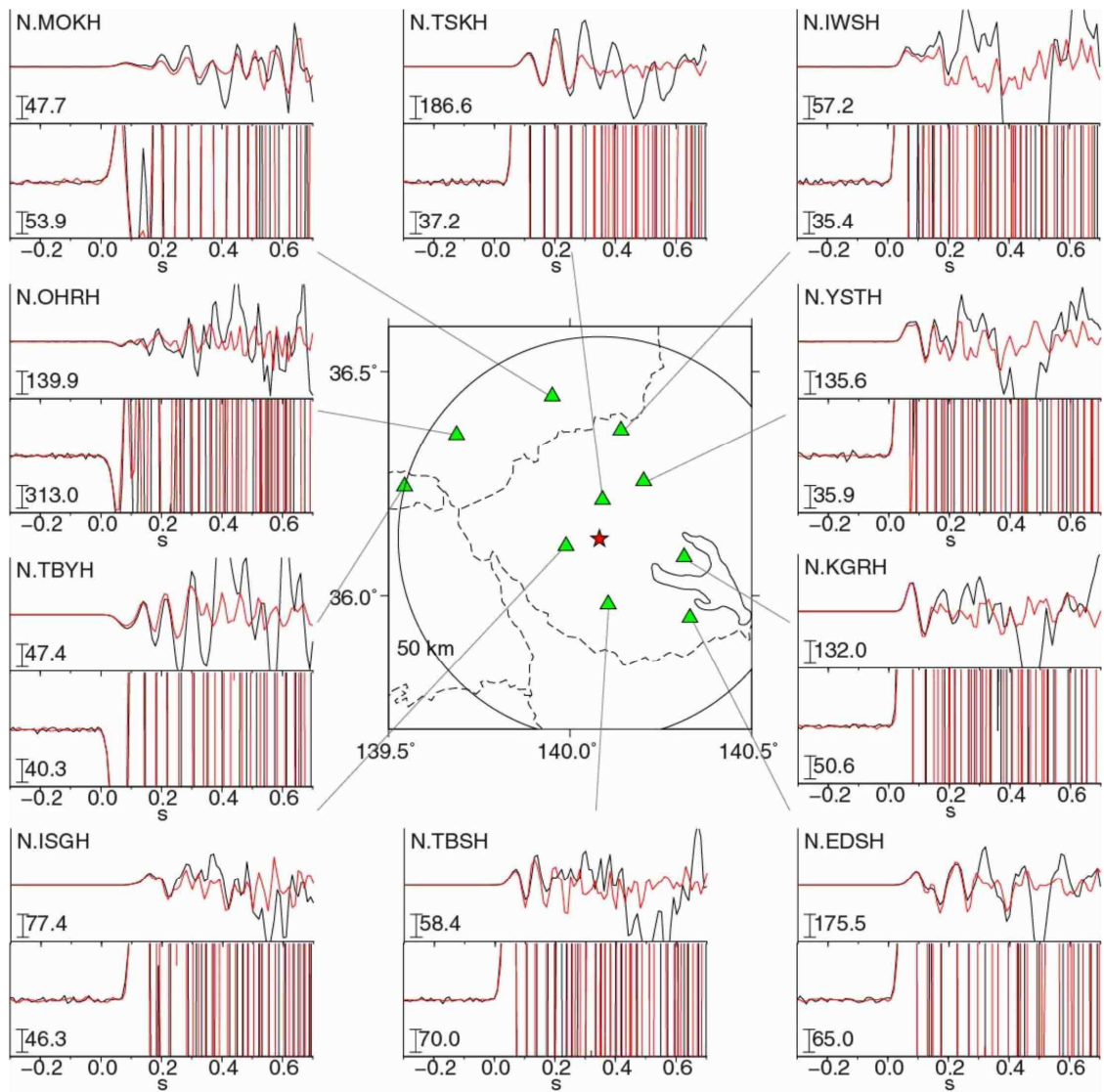


図 13. 北海道から東北沖の沈み込み帯における階層的地震発生構造を解明するために、M4.5 以上の大地震と、M4 以下の中小地震の波形の立ち上がりを網羅的に比較した結果（東京大学理学系研究科 [課題番号：UTS_03]）。

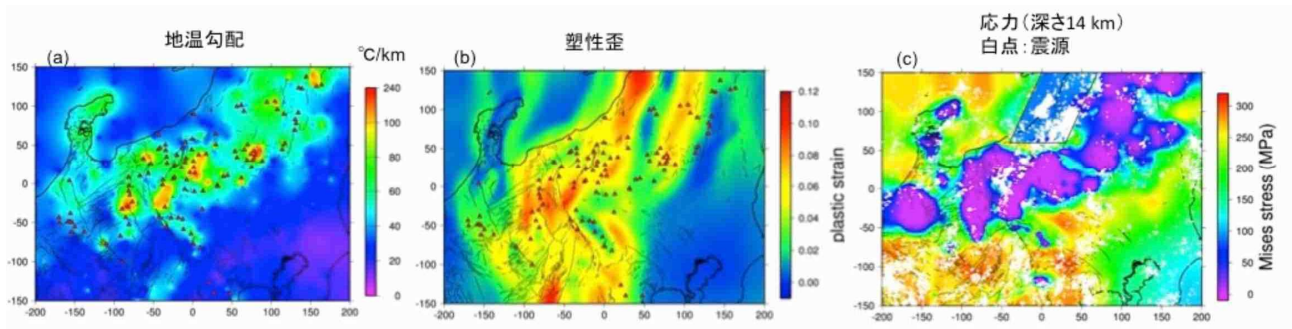


図 14. 中部日本歪集中帯・応力場のモデル化。地温勾配の分布 (a)から推定した温度構造、水の分布、既存の地質構造を考慮し、東西方向に短縮させることで、中部日本における歪・応力集中過程を再現した。新潟地域のリフト構造（強度の弱い領域）及び飛騨山脈周辺の高温度域を考慮することで、新潟から飛騨山脈周辺までの歪集中帯を再現した (b)。(c) に深さ 14 kmでの応力場と震源分布（深さ 13-15 km）を示す。低応力の延性領域では地震活動度は低く、高応力の脆性領域で地震が多く発生する（東北大学理学研究科 [課題番号:THK_07]）。

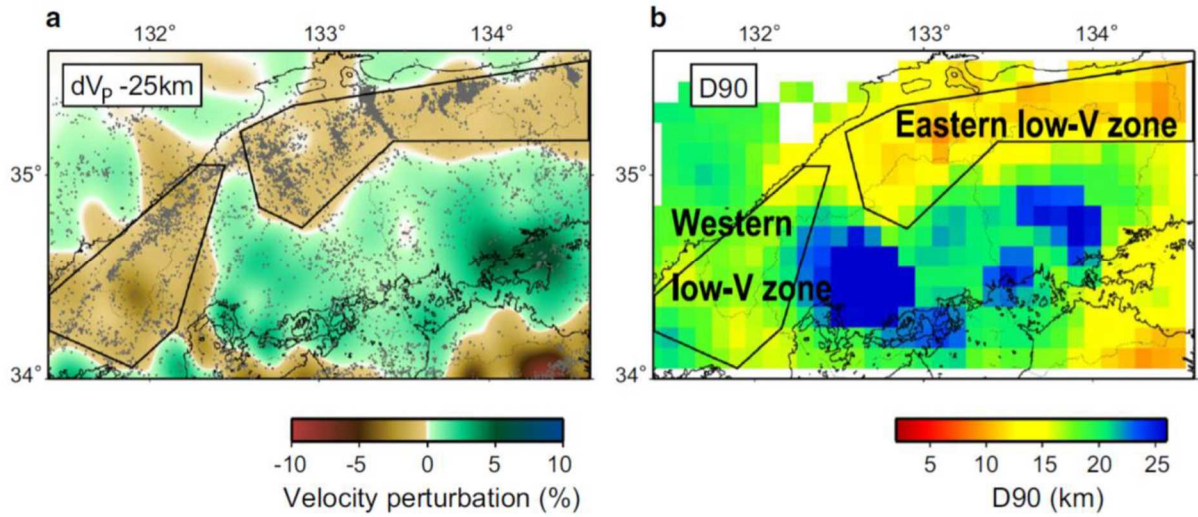


図15. 山陰地方の地震帯直下の下部地殻の速度構造とD90の分布 (Tsuda et al., 2019)。
 (左) 地震波トモグラフィーにより気象庁一元化処理震源データから推定された深さ25kmにおけるP波速度偏差, (右) 気象庁一元化処理震源で推定されたD90の空間分布 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI03])。

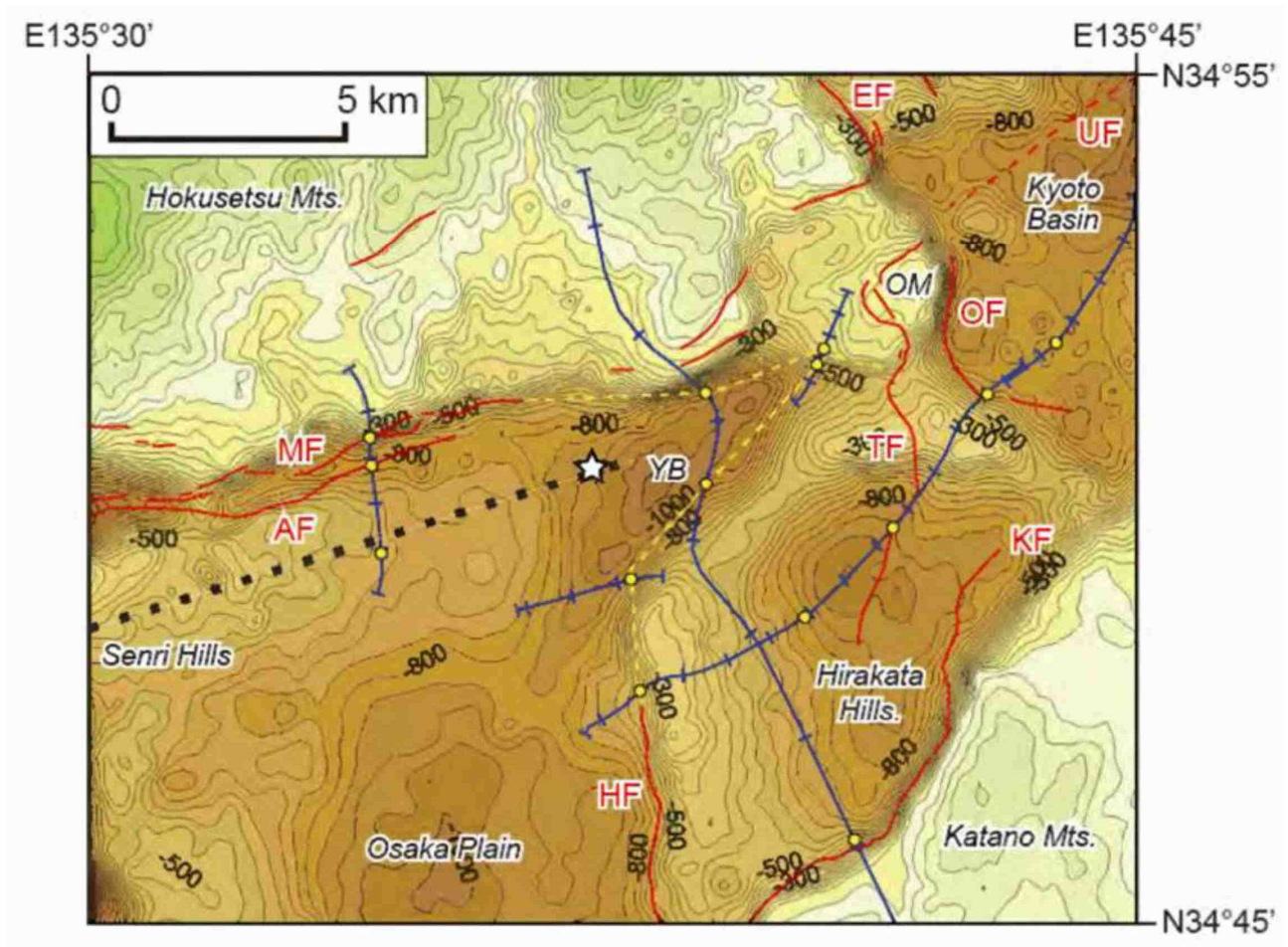


図 16. 地下構造探査結果の再解釈から新たに発見された伏在活断層（黄色の破線）（堤・飯尾，2019）。赤線は以前から特定されている活断層，MF:真上断層，AF:安威断層，EF:円明寺断層，UF:宇治川断層，OF:男山断層，TF:田口断層，KF:交野断層，HF:枚方とう曲。背景は重力基盤地図（赤松・他，2007）。青線:反射法探査測線，測線上の黄色の円は，反射法で特定された断層の位置。青点線は微小地震活動の線上配列（リニアメント）。星印は，大阪府北部の地震の震央。OM:男山丘陵，YB:淀川地溝（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI03〕）。

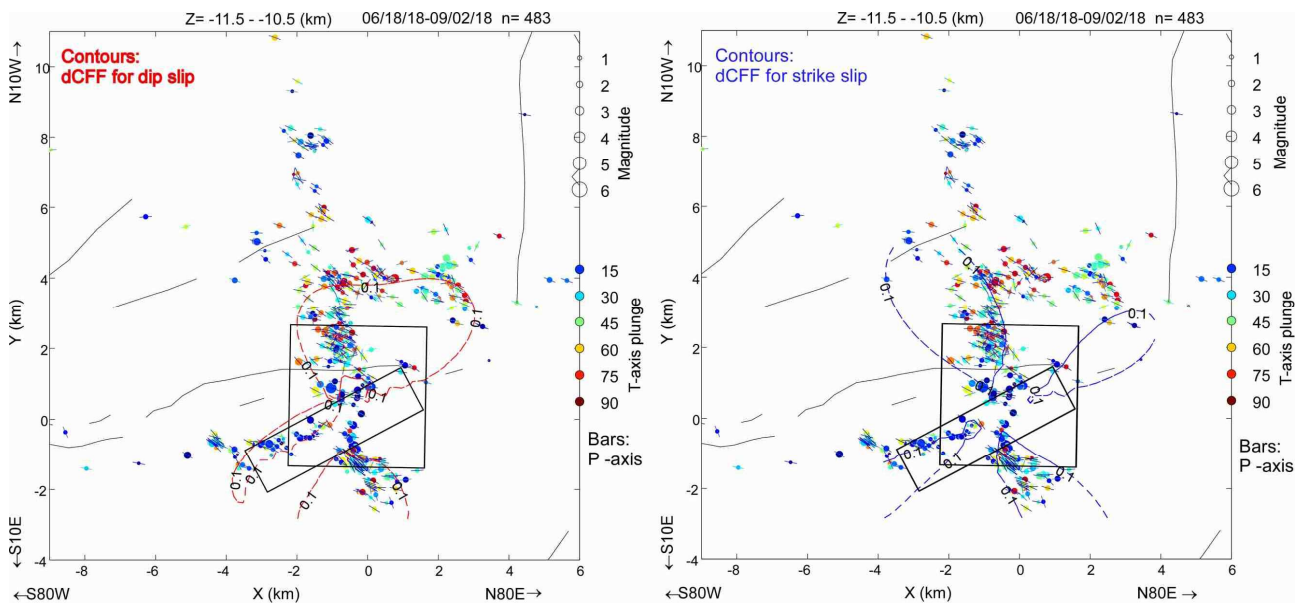


図 17. 大阪府北部の地震の余震の P 軸の方位と T 軸の傾斜角の分布。深さ 11km (± 0.5 km) の水平面へ投影した P 軸の方位と T 軸の傾斜角の分布。丸の塗りつぶしの色が赤系統の余震は T 軸が鉛直に近い逆断層型。京都大学防災研究所地震災害研究分野（浅野公之）による南側の高角の断層面 ($N52^{\circ} E$, 77° 南傾斜) と北側の東傾斜の断層面 ($N351^{\circ} E$, 50° 東傾斜) も水平面に投影。浅野により波形インバージョン解析によって推定された本震の断層モデルを近似したすべり分布による DCFE の 0.1MPa のコンターを表示。左：上記の東傾斜の断層面と同じ向きの逆断層に対する DCFE，右：上記の高角の断層面と同じ向きの横ずれ断層に対する DCFE（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI03]）。

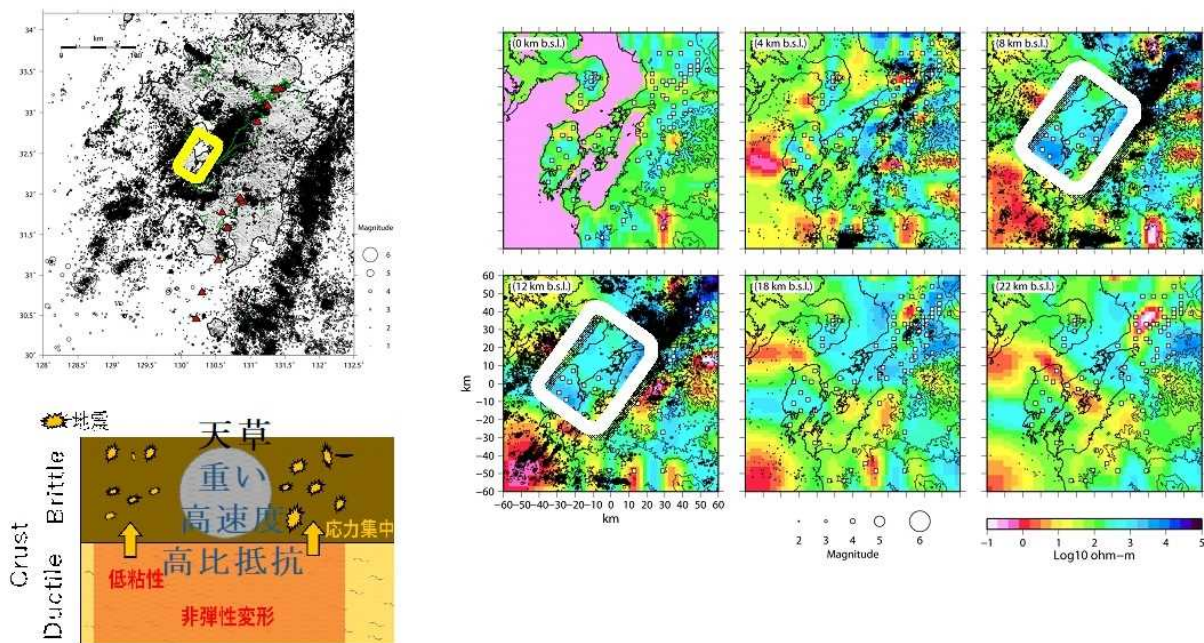


図 18. 南島原の地震空白域周辺で実施された MT 観測の解析結果 (九州大学 [課題番号 : KYU_01])。

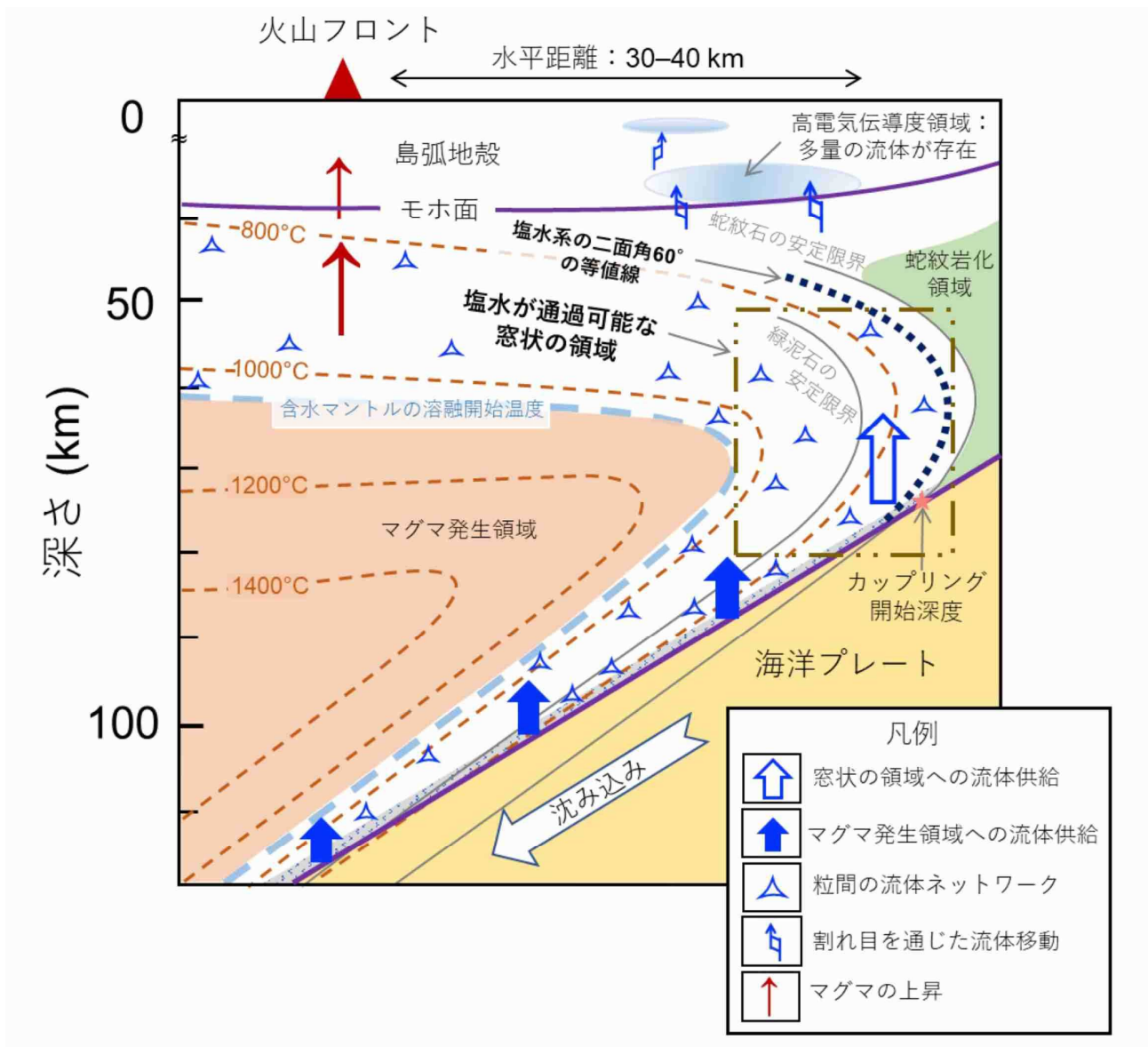


図 19. カンラン石間の二面角を決定する高温高圧実験の結果に基づき提案された沈み込み帯の水循環モデル (Huang et al., 2019)。沈み込んだプレート（スラブ）から放出される塩分を少量含んだ水を主成分とする超臨界流体は、地殻との間の“楔形マントル”のほぼ全域で岩石の粒間に浸透できる。前弧（島弧の海溝側）域の地下には、流体成分が、含水鉱物を形成して固定される海溝付近と、マントルを熔融させてマグマに溶け込む領域の間で、スラブから放出された流体が粒間を浸透して移動できる領域が、窓のように存在すると考えられる。このような流体の移動経路は、前弧のモホ面近傍に電気伝導度の高い領域が形成されることを説明できるとともに、スラブから供給された流体が何処に運ばれるのか、という問題の解決につながる（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_02]）。

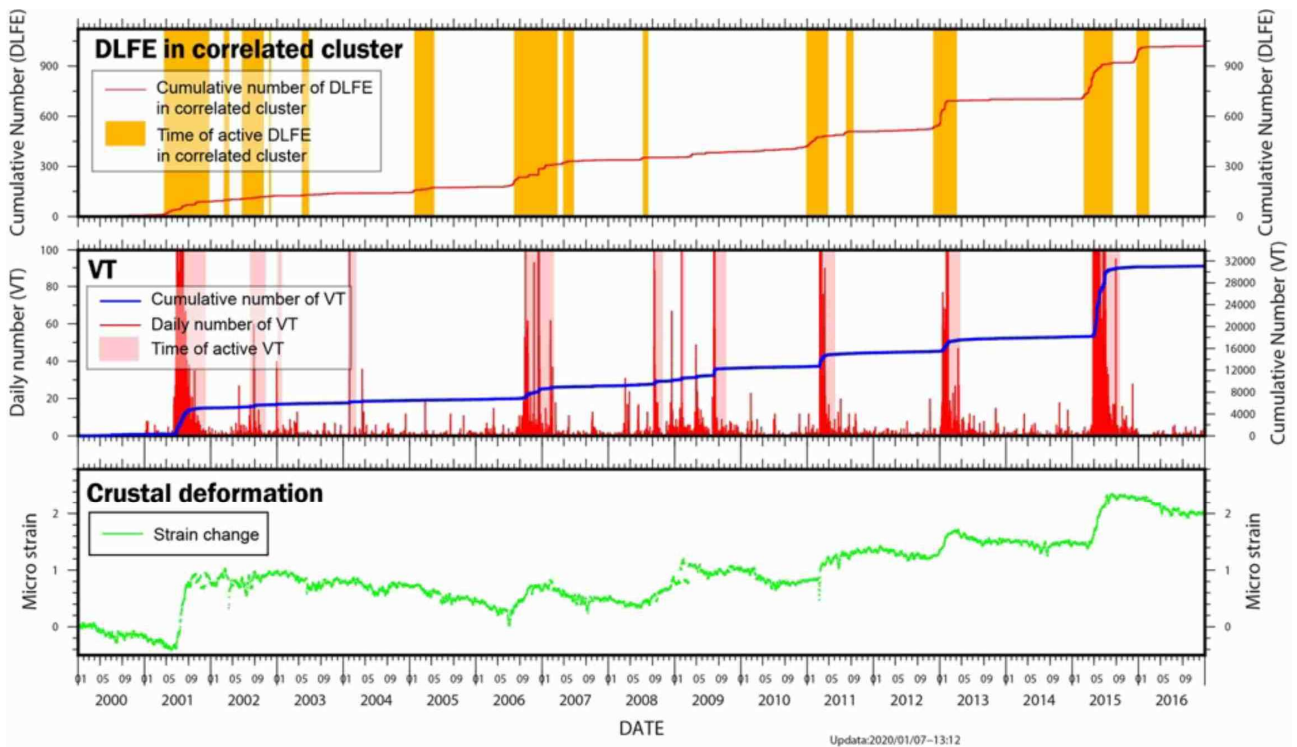


図 20. 箱根深部低周波地震活動（DLFE）と浅部群発地震（VT）及び火山性歪み変化時系列との関係（Yukutake et al., 2019 を一部改変）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI04]）。

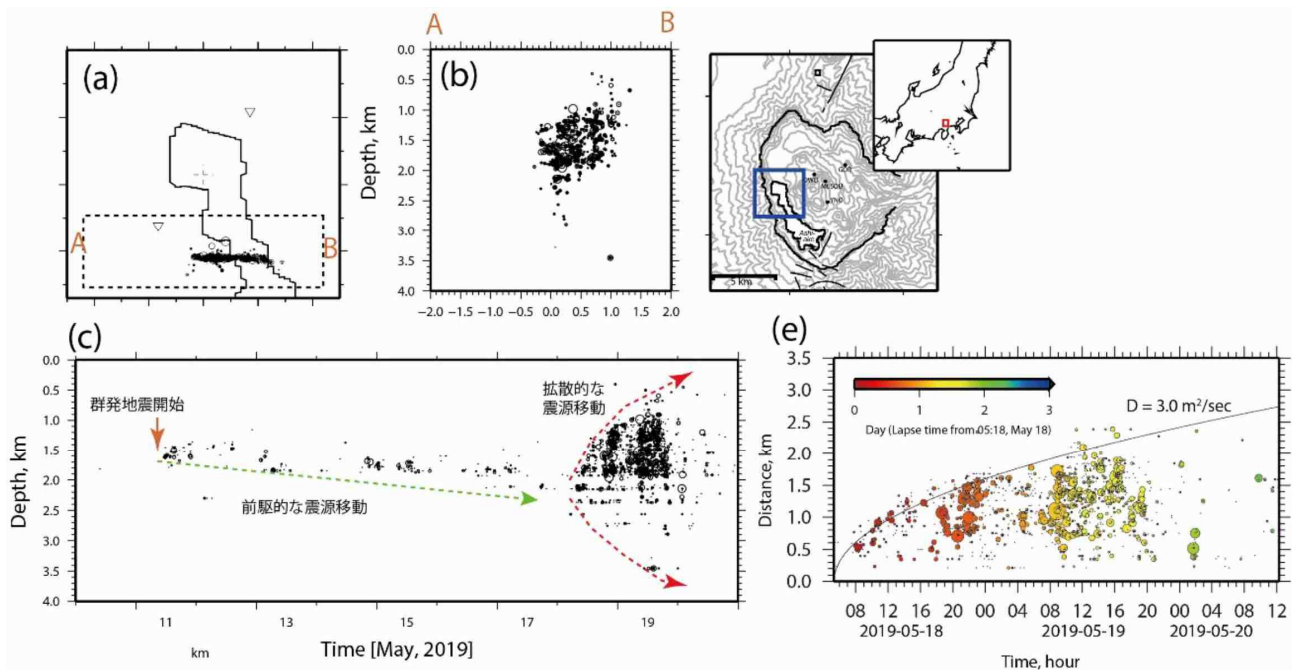


図 21. 2019 年 5 月箱根カルデラ内での群発地震の時間空間分布。(a) 震央分布，(b) 矩形 A-B に沿った深さ断面，(c) 矩形 A-B における時間—震源深さとの関係，(d) 5 月 18 日未明から始まった拡散的な震源移動現象における，時間—初期イベントからの距離との関係（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_02]）。

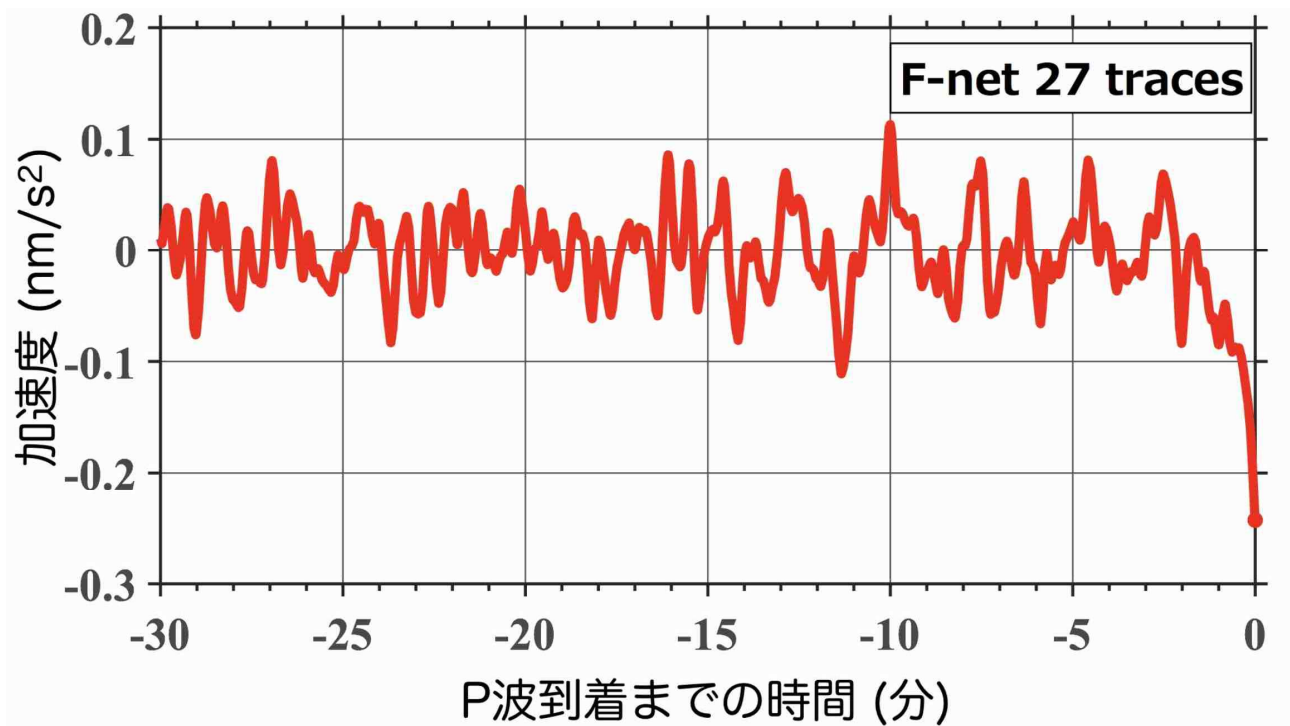


図 22. 2011 年東北地震による即時重力波 (Kimura et al., 2019 より改変)。日本の広帯域地震計網 (F-net) の 27 観測点の P 波到着前の下向き加速度を P 波到着時刻 (=0 分) をそろえて平均した。P 波到着前 30 秒間で重力値が変化している。27 観測点の震源距離は 505-1421km の範囲にあり, 平均距離 987km において P 波到着直前の重力加速度は平均 0.25 nm/s² の減少を示す (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_06])。