

1 (2) 内陸地震

「内陸地震」計画推進部会長 松本 聡（九州大学大学院理学研究院）

副部会長 上嶋 誠（東京大学地震研究所）

1. 5年間の成果

はじめに

内陸地震の発生を予測するためには、広域的に内陸地殻に载荷される応力、地震断層周辺の応答、地震断層での応力状態と強度を把握し、その時間発展を求めなければならない。しかしながらこれらを直接見積もることは現状では困難である。そのため、今期計画においては観測、実験、理論的研究を総合し、地震発生場や地震発生モデル化の研究を進めてきた。特に、規模の大きな地震の発生する場の特性や影響を理解し、地震がどのように発生に至ったのかを解明するための研究をおこなった。今期の研究期間においても2011年東北地方太平洋地震による大きな内陸地震発生場の変化が継続していたと考えられ、地震に対する地殻応答を解明する重要な機会であった。そのため、前期計画に引き続き、地殻応答解明を重要なテーマの一つとして取り上げ、解明を進めた。また、今期計画中には、大きな被害を及ぼした2016年熊本地震（M7.3）が発生したため、その発生メカニズムを探るための多岐にわたる観測研究が推進された。また、地震発生場は火山の存在によって影響されることが考えられるため、地震火山相互作用の研究も進められた。

一方では、現象解明だけではなく、得られた発生場の特性から地震発生空間ポテンシャル評価に向けた研究、海溝—内陸におよぶ島弧システムの変形過程シミュレーションへ資するための構造共通モデル構築を進めた。同時に、地震動即時予測や予測検証実験に本部会で得られた成果を出力するなど、他部会との連携をすすめた。

図1に今期五年間の内陸地震関係研究推進体制を示す。以前の建議に沿った研究においては、小課題が乱立したことによって研究が必ずしも統一的に推進されず、成果も総合的に解釈することが困難であった。その反省を受け、今期においては、多くの方々の努力によって観測—実験—シミュレーションなどを包含する少数の総合研究課題を立ち上げ、その総合研究を推し進めた。また、これらを総合的に議論する課題を策定することにより部会全体で成果や問題点を共有することができた。さらに、将来のための技術開発に関する課題や、基礎的研究を地道に行う課題もあわせて、内陸地震研究は推進された。

以下では内陸地震発生場の解明に向けて行った研究の成果として、東北地方太平洋沖地震後の地殻応答、熊本地震、応力場、変形場、構造、強度、についての主要な成果、地震火山相互作用、地震発生空間ポテンシャルに関する研究や、構造共通モデル構築を目指した研究に関する成果を述べる。

(1) 平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震後の地殻応答

2011年3月11日に我が国観測史上最大のマグニチュード（M）9.0をもつ2011年東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震により、日本列島の地殻は大きな影響を受けた。GNSS観測によって東北日本は東西に伸張され、その後の繰り返し観測により少なくとも地震時・5ヵ年の地殻応答を観測することができた。また、各地で地震活動の活発化・静穏化が見られ、そのメカニズムについての知見が得られた。特に地殻応答の観測による検出・実験・シミュレーションにより内陸地殻のレオロジー構造を得

ることを目的とした研究[1203, 東北大学]が進められた。その結果, 1) 余効変動には粘性緩和の影響が大きく含まれており, また, データとモデルの比較により粘性率の不均質性や非線形性が次第に明らかになってきた。2) 余効滑りに起因する粘性緩和や, 粘性緩和による応力変化に起因する余効滑りの進展など, 余効滑りと粘性緩和の相互作用についても正しく評価することが, 余効変動の長期予測には極めて重要であることもわかってきた。3) プレート境界浅部の固着が数百年にわたり継続することで, マントルウェッジ及びプレート境界深部の粘性せん断帯における粘弾性緩和が進行してプレート境界深部のすべり欠損プレートが時間とともに増加し, 前弧域において巨大地震サイクル後半にかけて沈降速度が増加していくことが示された。このようにプレート境界型巨大地震の全体像と発生サイクルを理解するためには粘性緩和を正しく評価することが重要であることがしめされた(例えば図2のように粘性を適切に評価しないと, 地殻や上部マントルの地震の発震機構解を説明できない)。また, 地殻応答を支配する重要な要素である, 構造や応力場, 流体について, 1) 3次元比抵抗構造が次第に明らかになり, 東北地方の下部地殻は, いわき付近を除いて, 基本的に前弧は高比抵抗, 背弧は低比抵抗となっていることが明らかになってきており, これらの分布は地震活動の不均質性とも大局的には良く対応している。2) 内陸の地震発生域もプレート境界も, 強度が30 MPa程度以下しかないこと, 3) 様々な地震活動域の下には顕著な地震波反射面が検出された。これらのことから, 流体による強度低下や低差応力下の応力の擾乱が地震発生に大きくかかわっていることが示唆された。今後, 流体の分布や応力場不均質構造をさらに詳細に明らかにしていくことで, 地震が起りやすい場所が絞り出され, それによって内陸地震発生空間ポテンシャル評価につながる可能性がある。

(2) 平成28年(2016年)熊本地震

2016年4月14日, 熊本県熊本地方の深さ11kmでM6.5の地震が発生し, 熊本県益城町で震度7を観測した。その約28時間後の4月16日には深さ12kmでM7.3の地震が発生し, 熊本県益城町, 西原村で震度7を観測した。この地域は布田川断層帯, 日奈久断層帯, 別府-万年山断層帯が存在し, かねてから地震活動が活発であったため, 地震発生前から地震観測・GNSS観測が稠密に実施されていた[2201, 九州大学]。

今回の一連の地震活動領域には, 布田川断層帯, 日奈久断層帯, 別府-万年山断層帯が存在している。最大前震(M6.5)は日奈久断層側で発生し, 本震(M7.3)は日奈久・布田川断層ですべりを起こした(Asano and Iwata, 2016)。これらの地震に伴って, 布田川-日奈久断層帯の約31kmに渡って地表断層が出現し, 主として横ずれ断層すべりを呈することが明らかになった。地表踏査だけでなくDEMを用いた変位量の検討もなされ, 布田川で地震時の変位量が最大2.5m程度に及ぶことも明らかになった[1702: 名古屋大学]。

GNSS連続観測およびSAR干渉解析によると, 4月14日M6.5および4月15日M6.4の地震の震源断層は, 北東-南西方向のやや西に傾き下がる高角の断層が右横ずれ的に動いたと推定された。4月16日M7.3の本震は, 布田川断層帯および日奈久断層帯に沿った位置に震源断層が推定された[6001: 国土地理院]。一方, 余震活動から見積もられる断層は西傾斜の日奈久断層側, 北西傾斜の布田川断層側の主として2つの断層のほかに南東傾斜の2つの分岐した断層面が見出された。分岐断層にはM6.5, M7.3の地震の破壊開始点が位置し, 小さい断層から破壊が始まり, 日奈久・布田川断層帯の主断層で大きなすべりを起こしたことが見出された[2201: 九州大学]。

GNSSデータの時系列解析から, 地震発生直後60日間程度には急激な余効変動が継続したが, その後

はゆっくりとした変動が現在に至るまで継続していることが明らかにされた[6001:国土地理院, 2201:九州大学]。粘性緩和による変動を観測データから取り除いた後に、余効滑りをフォワードモデリングで求める試みもすすみ、余効滑りは布田川断層と日奈久断層帯の境界付近で大きな滑りが分布していることが見いだされた[6001:国土地理院]。

熊本地震を発生させた応力場については、この地震発生前から現地に展開されていた臨時地震観測網により詳細に捕らえられていた。それらによると、地震前から日奈久断層側では横ずれ応力場が卓越、布田川断層側では横ずれ・正断層応力場が卓越する顕著な空間不均質性が存在していた。M6.5, M7.3の最大前震や本震の地震時すべりはこの応力場と断層面形状から決められる最大せん断方向にほぼ従うことが示された。自然地震でこのような観測結果が検出されたのは世界初の成果であった。また、地震前の応力場と断層面形状から、断層面上に働く応力の影響が異なり、それが地震時のすべりを制御している可能性も示唆された(図3)。この結果は、地震前応力場と断層面を想定することで、地震の複雑なすべりを予測することが可能であることを示し、強震動予測や空間ポテンシャル評価に寄与するものである[2201:九州大学]。

また、2016年熊本地震の震源域を含む九州中部の地殻構造が詳しく調査され、本震後に活発化した熊本一大分の地震活動は、阿蘇山・九重山・鶴見岳といった活火山下の低比抵抗域を避けて発生していることが明らかにされた[2201:九州大学]。

(3) 応力場, 変形場

地殻応力・変形場は、地震発生予測に迫るための重要な情報である。近年発生した内陸地震震源域での高密度な地震観測データから、地殻内の応力場についてさまざまな成果が得られた。2011年東北地方太平洋沖地震によって大きな応力変化を受けた東北地方各地で発生した誘発地震は、その発生と応力変化の様式との間にあまり関連が認められないことから、地殻深部流体の上部地殻への流入で誘発されたことが示唆された。応力の主軸方向は大きくばらつくが、絶対応力値は必ずしも大きくないことが示唆された[1203:東北大学]。さらに、微小地震の発震機構解から列島規模の応力場が推定され、多くの活断層が現在の応力場に対して滑り易い方向に形成される傾向をもっていることがわかった[1905:京都大学]。また、内陸地震発生域などにおける稠密な地震観測によって、応力場は強い空間不均質を持つことが示された[1203:東北大学, 1905・1907:京都大学, 2201:九州大学, 5008:産総研]。また、地震の応力降下量も不均質であることが示されている[1101:弘前大学]。このように、観測事実として応力状態やその変化が複雑である結果は、地震発生ポテンシャル評価に向けた重要な進歩である。

一方で、変形場は地震発生領域に载荷する応力を検討するためにもきわめて重要な観測量である。GNSS観測でひずみ集中帯を見つけ、その特性を調べるのが重要であるが、山陰地方においても歪集中帯の存在が確認された[1907:京都大学]。また、2011年東北地方太平洋沖地震後に行われたGNSS繰り返し観測から、越後平野のひずみ集中帯で周辺に比べ小さな伸長ひずみが観測され、2011年東北地方太平洋沖地震のような遠方からの外力に影響されることなくひずみ集中が進行していることが明らかにされた[6001, 国土地理院]。さらに、跡津川断層周辺のGNSSデータを用いて東北地方太平洋沖地震前・地震後の歪速度場、および地震時の歪変化が推定され、これらから長波長トレンドを除去して局所的な歪速度の変化が調べられた。その結果、地震前および地震後の歪速度場は互いに似ており、また地震時の歪分布は全く異なるパターンを示した(図4)[1907:京都大学]。これらは、地殻が弾性的の

みではなく非弾性的に変形していることを示す結果で、変形場と応力場をつなぐための必須な情報であることが示された。実際、微小地震活動から見積もられた非弾性ひずみの大きな領域の端で2016年熊本地震が発生しており[2201:九州大学]、弾性・非弾性変形の見積もりは今後の研究展開にも重大な役割を担っていくことになる。

求められた応力不均質を生み出す、応力集中・緩和のメカニズムは、変形場や構造とともに検討される必要がある。今期計画においては、さまざまなアプローチを用いてそれに迫ることができた。たとえば、地殻変動データに基づく西南日本地域のブロック断層モデルからは、明瞭な活断層が見られない山陰地方と南九州にひずみ集中帯が存在することが明らかになった。[1907:京都大学]。このブロック断層モデルは、ひずみ集中などの特異な構造を明らかにする有力な手段であり、今後、ブロック内部の弾性・非弾性変形をさらに確かなものにするることによって、断層への応力集中の推定精度をあげる必要がある。

(4) 構造

内陸地震発生モデル化に向けて地殻深部から上部マントルに至る広域の地震波速度や比抵抗の構造が推定された。今期計画においては稠密地震観測による詳細な速度構造だけでなく、広域かつ3次元的な比抵抗構造が求められ、大地震時や地震活動との対比をおこなうことによって、発生メカニズムに関する知見が多く得られた。東北地方の下部地殻は、いわき付近を除いて、基本的に前弧は高比抵抗、背弧は低比抵抗となっていることが明らかになっている(図5)。これらの分布は地震活動の不均質性とも大局的には良く対応している[1203:東北大学]。近畿地方北部においては、S波反射面の推定によるイメージングがおこなわれた。この結果、下部地殻で広域に反射強度の強い反射面が見つかると同時に、活断層との関連も見出された。これらは地殻流体の存在を示唆し、応力集中・強度低下メカニズムを理解するうえで重要な知見が得られた[1907:京都大学]。その他の地域についても、構造、震源モデルとの比較から、多くの場合、規模の大きな内陸地震発生域の直下には低速度かつ低比抵抗域が存在し、大滑り域は対照的に高速度かつ高比抵抗であることがわかった。

また、震源分布の高分解能推定からは、規模の小さな地震でも階層的な断層構造を持ち、その破壊様式が複雑であることも示された[1204:東北大学]。これは断層帯が階層的にさまざまなスケールの断層によって構成されている可能性を示唆し、今後の地震発生予測にとって重要な知見である。

(5) 強度

地震発生を制御するもうひとつの重要なパラメータは断層等の媒質強度である。内陸地震の発生における間隙流体は強度低下の重要なメカニズムとして考えられ、その役割を理解することを目指して研究が進んだ。広域の流体供給源としては沈み込むスラブの影響が考えられる。地震学的方法や岩石学的方法を用いてその供給について検討がなされ、1)日本列島には、「スラブから直接由来した可能性が高い深部流体」としての有馬型塩水が、有馬-高槻構造線および中央構造線沿いに分布し、その組成、特に希土類元素の分析と統計解析から、深部流体の上昇過程が明らかになった。(2)島弧セグメントの接合部、特に中部日本から東北日本弧への遷移の様子が火山岩組成から詳細に議論され、フィリピン海プレートの北東端が東北日本弧南部にまで広がり、スラブ由来流体が南に向かって吸い寄せられていることなどが明らかとなった。(3)日本列島全域にわたるスラブ由来流量やマントル組成の大域的性質が明らかとなった。[1905:京都大学]。御嶽山周辺域では地震メカニズムトモグラフィー

法 (Terakawa et al., 2010) を適用し、御嶽山周辺域の 3 次元間隙流体圧場が推定された (Terakawa et al., 2013; Terakawa, 2017)。この結果、群発地震発生域に静水圧を 15 ± 5 MPa 程度上回る間隙流体圧が 5 年以上に亘って維持されていることがわかり、活発な地震活動が高い間隙流体圧に駆動されて発生している可能性が示された (図 6) [1907: 京都大学]。

流体が断層運動に与える影響は地震発生において重要な役割を担っている。地震波を用いて推定される強い不均質 (反射面など) の分布は流体分布を示唆するため、その時間変化を見出すことが断層運動の挙動解明へつながると考えられる。この方針に従って、2011 年東北地方太平洋沖地震後に発生した山形-福島県境付近の群発地震活動が丹念に調べられ、カルデラの周りに地震波反射面が分布していることが明らかとなった。このことによって、カルデラ壁に沿って流体が存在している可能性が示された。また、この群発地震活動については、深部から浅部に向かって移動していること、活動の様々なパラメータが活動開始から 50 日くらいまで異常な値を取ることで、それ以降は普通の値に落ち着くことなどが明らかとなった。このことは、群発地震活動の初期の活動が間隙圧増加による強度低下によって生じていたことを強く示唆する [1204: 東北大学]。

また、実験に基づき、溶解した石英の析出によるシール形成を再現することに成功した。また、下部地殻の条件下で、水があると強度が下がって変形が進み、さらに水が入って変形しやすくなることを明らかにした [1204: 東北大学]。

以上のように、少なくとも群発地震については、流体の急激な上昇によって発生するというメカニズムの妥当性が高いことが示された。また、下部地殻の剪断帯に水が入り込むと、ますます変形が進み、さらに水が入り込むという正のフィードバックが働くことから、水が存在すると強度が低下するのみならず、応力・歪が集中していくことも明らかになった。これにより、断層スケールでも、反射面や比抵抗分布等から水の存在範囲を調べることで、応力や強度についての情報をモデル化することができ、地震の発生しやすい場所をあらかじめ特定できる可能性が示された [1204: 東北大学, 1907: 京都大学]。

(6) 地震火山相互作用

火山の存在は周辺の応力状態の変化を生み出し、流体の供給による強度低下を引き起こす。その結果、火山周辺域では地震活動が活発化することが予想されたものの、それを実証するためのモデル化可能な観測・実験が必ずしも進んではいなかった。今期においてはこれに対しても進展があり、さまざまな成果が得られた。伊豆大島では、火山性地震の地震活動度と深部からのマグマ供給に伴う山体変形の間接関係を、揮発性成分増加による断層面の流体圧の増減の効果と岩石の摩擦構成則を組み合わせることでモデル化することができた [東大地震研: 1508]。富士山では、その山麓部で発生した 2011 年静岡県東部地震 (M6.4) の震源域に流体の通路を示唆する低比抵抗域が見出された。また、岩石空隙中の気体が 2011 年東北地方太平洋沖地震による震動で離脱上昇した結果、間隙水圧が高まり、地震が誘発されたとするモデルが提案された [2201: 九州大学]。御嶽山では、2014 年の噴火の 2 週間前から、山頂直下での応力場の変化があったことが多数の地震の発震機構解の解析により明らかにされ、火山活動の活発化にともなうマグマだまりの膨張を反映したものと解釈された [1907: 京都大学]。また、研究期間中の 2014 年 9 月 27 日には、御嶽山で水蒸気噴火が発生した。この噴火に伴う火山性地震のメカニズム解が詳細に調べられ、噴火を境に東西伸張の正断層・横ずれ断層型から東西圧縮の逆断層型に推移したことがつきとめられた (Terakawa et al., 2016)。これらのデータの分析から、応力場の時

間変化を監視することによる御嶽火山のモニタリング法に対する新しい提案が提出された[1907: 京都大学]。

(7) 構造共通モデル

近年、詳細な地震観測網の整備による高精度震源分布や大規模な制御震源による地殻構造探査や地震波トモグラフィ、レシーバ関数解析等によって、日本列島の沈み込みシステムの基本構造についての知見が著しく増加した。しかしながら、これらの情報が組織的・統一的に集約され統合的な共通モデルが構築されているわけではない。日本列島の基本構造に対するコミュニティ・モデルの構築とそれらの更新は、日本列島の活動予測にとって本質的に重要であり、現状を把握し、今後の観測を合理的に進めていくためにも欠かせないものである。本研究は、既往の成果を可能な限り収集・整理し、基本構造デジタルモデル構築を目指した。

1. プレート境界モデルの構築

プレート境界位置の設定及びフィリピン海プレート-太平洋プレートとの接合部の形状モデルの検討をおこなった。また、関東域における構造探査を元に、同地域の複雑なフィリピン海プレート形状の再定義を試みた。太平洋プレート及びフィリピン海プレートモデルについて、下記のサイトからの公開を開始した。

<http://evrrss.eri.u-tokyo.ac.jp/database/PLATEmodel/>

2. 日本列島及びその周辺の震源断層モデルの構築

九州・関東・東北・中国・四国・近畿地域において、これまで実施された主な反射法地震探査データを収集するとともに、活断層に関する変動地形・第四紀地質学的データを説明する活断層の幾何学的形状を推定した。このような地質学的データ・解析に基づき断層面の傾斜を推定すると共に、Hi-netの地震活動データに基づく D90 から求められた地震発生層の厚さや、断層深部の地震活動を用いて、九州・関東・東北・中国・四国・近畿地域の内陸活断層について、震源断層モデルを推定した。

3. リソスフェア・アセノスフェア境界の構築

日本海直下のリソスフェア・アセノスフェア境界 (LAB) の検出を目指して、大和海盆および日本海盆において、海底地震計による自然地震観測を行った。これまでに、大和海盆では3年間、日本海盆では1年間の観測データが得られている。これらのデータに対して、実体波トモグラフィ解析・表面波トモグラフィ解析・レシーバ関数解析が適用された。いずれの解析からも、LABを示唆する地震波低速領域が、深さ約60km以深に見られている。

4. 日本列島下のモホ面及び脆性・延性域境界モデルの構築

Matsubara et al. (2017)によるモホ面データをプレートの形状を考慮して切り取るとともに、Matsubara et al. (2017)に含まれない領域についてはグローバルなモホ面モデル (crust1.0, Laske et al., 2013)を用い、これらを滑らかに接続して、モデル領域全体にわたるモホ面モデルを提出した(図7)。

(8) まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震の発生後、内陸地殻には大きな力学的変化があり、従来解決できなかった問題の解決が飛躍的に進んだ。広域のローディングー地震発生領域の変形—断層帯の応答というシステムの中でどのように応力が伝わり、地震発生に至るのか？という問題が定量的に見積もられつつある。さらに内陸地震発生過程の理解・予測へつなげるためにはプレート相対運動など長期広域の応力载荷に関わる問題から断層の応答までさまざまなスケールの研究を統一的に進める必要がある。

2. 平成30年度の成果

平成30年度は5カ年の最終年度として、各課題の成果が取りまとめられた。主だった成果は、上記に記述されている。そこで取り上げられなかったいくつかの成果を以下にまとめる。

(1) 応力場・変形場

差応力の推定

2011年東北地方太平洋沖地震後に活発化した秋田県中部での応力場が求められた。2011-2013年の期間と2014-2017年の期間を比較すると領域全体の応力場（北東-南西方向の最大主応力軸を持つ横ずれ断層型）に顕著な時空間変化はないが、震源域が徐々に拡大した南端付近では逆断層型の応力場も見え、この地域の応力場の不均質性を反映している可能性がある（図8）[1203:東北大学]。

2000年鳥取県西部地震域で得られた約4000イベントの余震の発震機構解（メカニズム解）から、本震断層周辺域の応力場の不均質性の評価及び本震時の静的応力変化に基づいた絶対応力場の推定が行われた。本震前の差応力レベルが3.2MPa/km程度の場合に、観測されたのと同程度の応力不均質を再現できることが示された[1905:京都大学]

間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場のモデル化法が開発され、1992年ランダース地震震源域の絶対応力場が推定された（Terakawa and Hauksson, 2018）。その結果、ランダース地震震源域での最適参照間隙流体圧係数が見積もられ、その係数から、深さ5kmでの最大剪断応力が 44 ± 15 MPaであることが見積もられた[1907:京都大学]。

熊本地震震源域において、応力場が地震の発震機構解から推定され、熊本地震の前と後で変化していたことが明らかとなった。布田川断層延長部や日奈久断層延長部では、せん断応力の増加が検出された。また、差応力推定からは、布田川—日奈久断層において、地震前から数Mから数十MPaの差応力が存在していたという結果が得られた。すなわち、相対的に差応力が高かった領域で大地震が発生したことになる。また、熊本地震発生後も必ずしも領域全体で応力が低下したわけではなく、依然として高い差応力が維持されていることも明らかになった[2201:九州大学]。

前震と余震の応力降下量

2016年11月2日に、森吉山の北西8km程度の領域でM4.2の地震が発生した。この領域では、その1月ほど前から地震活動が見られていた。その前震と余震の応力降下量をS波のスペクトル比から求めた結果、前震が比較的狭い範囲で発生し、それらのマグニチュード・応力降下量ともに大きい値を示していたことが明らかにされた。それに対して、余震では活動域は広がったが、マグニチュード・応力降下量ともに小さいという違いが認められた。このことから、前震と本震において相対的に大きな応

力降下があったために、余震発生時の応力レベルが低下したと考えられた(図9)[1101:弘前大学]。

変形場

山陰ひずみ集中帯(SSZ)の地殻変動を詳細に調べるために、2011年東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動分布の短波長・長波長成分の分布の特徴と深部剪断帯の幅の推定が行われた。ひずみ速度分布は地震前、地震後の2つの期間において、いずれも顕著な右横ずれ運動を示していたことが明らかになった。SSZにおけるひずみ集中機構が、幅をもった地下深部の延性剪断帯の運動によるものと仮定し、その幅の推定を試みた。平行な横ずれ断層が剪断帯内に多数配置されるモデルを用いて、地殻変動観測データを説明するパラメータを推定した。鳥取県西部と中・東部のひずみ集中帯を横切る2つの断面における水平変位速度分布は、前者に比べ後者の方がより変形が集中している様相を呈し、その結果、深部剪断帯の幅はそれぞれ60kmと21.5kmと推定された。ただし、地殻変動観測データは、今回の有限の幅を持った深部剪断帯モデルに基づくことでより良く再現されたが、横ずれ断層1枚(幅が0)のモデルでも、データはある程度は説明可能であったため、GNSSデータだけでは、下部地殻の剪断帯の幅を推定することは困難であることが明らかとなった[1907:京都大学]。

一方、2016年熊本地震の余効変動の観測が継続された。余効変動が継続中とされていた日奈久断層東側の観測点で、2018年7月ころから東西成分の余効変動が止まったように見える。一方で、南北成分については、変動は小さくなったものの現在も余効変動が継続しているように見えた[2201:九州大学]。

(2) 構造

いわきの地震活動域は、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震以降活発となった。図10には、3つの期間の震央分布と反射面の俯瞰図が示されている。一連の地震活動と反射面との位置関係から、3月11日の活動は反射面が分布する領域の上部で始まり(図10a)、4月10日までに反射面を中心に広がっていったことが明らかとなった(図10b)。反射面の分布領域の北部に地震活動の低いところがあり、そこを埋めるように、4月11日の福島県浜通りの地震が発生していた(図10c)[1203:東北大学]。

熊本地震震源域周辺の80点のデータを用いて行った3次元解析により、1) M5クラスより規模の大きい地震の破壊開始点は、低比抵抗領域のへりから外側5km以内に位置すること、2) 熊本地震の大きい領域は、低比抵抗領域にはさまれた数100から数1000 Ωm の高比抵抗領域に対応していることなどが明らかになった。これらは、本震発生や日奈久、布田川断層にわたる地震の運動に、深部低比抵抗層が示す流体の存在が強く関与していたことを示唆する。また、低比抵抗値を定量的な基準を持って評価する試みが始められた。これらは地震発生ポテンシャル推定にとって重要なアプローチである[2201:九州大学]。

断層構造

ここでは、地表地震断層を活用した過去の地震像の解明に関する調査について述べる。神城断層域における地表地震断層の地上踏査を用いた変位量分布調査と、強震動データを用いた震源破壊過程モデルに基づく地表でのすべり量分布との間には、震源中部においてやや齟齬が生じていた。ところが、DEMを用いた地震前後の差分を用いることにより、1km程度の測線でとらえることができる長波長の変位量が、震源破壊過程モデルに基づくすべり量分布と良い一致を示すことが明らかとなった。これは、

地表地震断層の断層近傍の短波長の変位量分布のみでは、深度 1km 以深の断層運動の解明には不十分である場合があることを示唆する。一方、断層トレースの活動履歴調査から、神城断層には複数の地震像が併存していることが明らかにされ、それらは地震像ごとに変位が生ずる断層が異なる可能性が指摘された[1702:名古屋大学]。

野島断層周辺域では、断層およびその周辺構造の時間変化を調べるため、1999年6月より地震アクロス観測が実施されている。アクロス震源と800m孔底地震計の間の伝達関数を調べることで、全体の傾向として1999年～2018年の19年間において約2ms(約6%)程度の微小な変化の検出に成功した[1906:京都大学]。

(3) 強度

山形-福島県境付近では、2011年東北地方太平洋沖地震の後、stress shadow になっているにもかかわらず、地震活動が活発化した。経験的グリーン関数法から得られた震源時間関数のパルス幅の方位依存性から、破壊の進行方向を推定した結果、地震活動は時間とともに深部から浅部に移動していく(Yoshida and Hasegawa, 2018a)が、破壊伝播はむしろ浅部から深部に向かう場合が多いことが明らかになった(図11)[1204:東北大学]。

熊本地震震源域、九重山、鶴見由布、霧島山の4つの地域において、内陸地震と比抵抗構造の関係を探るための80点規模の広帯域MT観測が実施され、そのデータを用いて3次元比抵抗構造が推定された。得られた構造から、1)中下部地殻の10 Ω m以下の領域の地震活動は低く、その周辺の数100から数1000 Ω mの領域で地震活動が活発であること、2)M5クラスより規模の大きい地震の破壊開始点は、前述の低比抵抗領域のへりから外側5km以内に位置すること、3)熊本地震の大すべり領域は、前述の低比抵抗領域には含まれた数100から数1000 Ω mの高比抵抗領域に対応していたことなどが明らかとなった。

中下部地殻の10 Ω m以下の低比抵抗領域を温度400 $^{\circ}$ Cを超える超臨界水に代表される流体が豊富に存在する領域と解釈すると、高温で流体が豊富な領域では地震活動が低く規模の大きな地震が起こらないこと、微小破壊の開始から地震規模が大きくなるために流体が役割を果たしていることが示唆される。さらに流体は破壊の収束にも寄与している可能性も示唆された。M5より規模の大きい地震は数100～数1000 Ω mの高比抵抗領域で起こり、10 Ω m以下の低比抵抗領域、10000 Ω mを超える超高比抵抗領域では、規模の小さい地震に限定されるという対応関係が得られた[2201:九州大学]。

変形実験との比較のため、静水圧実験(封圧1GPa、温度900 $^{\circ}$ C)が行われ、高圧下での変形時間と含水量の関係が調べられた。その結果、変形によって通常よりも早い速度で水の拡散が進行し、それによってさらに変形が促進される正のフィードバックが示唆された[東北大学:1204]。

地震時に断層が急速に動くと、断層のジョグでは流体圧が静水圧よりも低くなる「Flash vaporization」が起こる可能性が指摘されている(Wartherlay and Hanley, 2013)。平成30年度には、同様の条件のFlash実験が行われ、シリカ析出様式が検討された。その結果、100-5000nm程度の球形のアモルファスシリカ粒子が形成されることがわかった。このようなシリカ粒子は、移動性が高く、目詰まりさせるために、亀裂や断層の強度、水理学的特性に大きな影響を与えられられる[東北大学:1204]。

地下深部において低周波地震などの現象が頻発し、地下深部ガスが地上まで上昇していると考えられる地域で、地下水溶存ガスに関する連続的モニタリング観測を実施することにより、地下水溶存ガ

スの成分変化が、地下深部の状態変化によるものか地殻内のチャンネル変化によるものを分離できる可能性がある。そこで、平成 30 年度より、本宮観測点にて観測が開始された。一方、跡津川観測点では、He・N₂・Ar をつかったガスの成分比が時間とともに変化し、大気と地下深部ガスの混合比が変動することが見いだされた[1401:東京大学理]。

(4) モデリング

沈み込み帯の熱対流モデルによる温度構造 (Horiuchi and Iwamori, 2016) を用いて, Unicycle (Barbot et al, 2017) による 2 次元解析が行われた。解析においては、ベキ乗流動則と Burgers レオロジーが用いられ、応力依存の余効すべり (速度強化摩擦則) が組み込まれている。上記のモデルにより、観測データ (2011~2016 年までの海陸余効変動観測データ (Tomita et al, 2017) と GNSS 時系列データ) をほぼ再現することに成功した。さらに、東北沖地震後の 2012 年に設置された GNSS 稠密観測網磐越測線の余効変動プロファイルを用いて、3 次元不均質粘弾性構造モデルが推定された[東北大学:1203]。

2011 年東北沖地震前及び地震後における東北日本前弧域の上盤内応力場を再現し、その形成メカニズムを明らかにするために、有限要素法を用いたプレート沈み込み及び重力に伴う島弧-海溝系の絶対応力場の二次元モデリングが行われた。その結果、東北沖地震後のプレート境界 (海溝から 40-150 km の範囲) の摩擦力は 5-11 MPa 程度と推定され、地震時の応力降下量が、10-20MPa 程度ということと考えると、プレート境界の強度が 30MPa 程度以下と非常に弱い事が示唆された[東北大学:1203]。

西南日本の内陸地震の活動期をモデル化するために、粘弾性緩和を考慮して南海トラフを模した単純な斜め沈み込み帯における内陸断層のクーロン応力変化 (ΔCFS) を計算し、その結果に対する考察が行われた (水戸川・西村, 2018)。モデル計算の結果は、西南日本で南海トラフ地震前 50 年間、地震後 10 年間に内陸地震が多く発生していたという観測事実 (例えば, Hori and Oike, 1999) を概ね再現していた[1907:京都大学]。

(5) 構造共通モデル

H30 年度においては、6 月に発生した大阪府北部の地震 (M6.1) の震源域周辺の反射法地震探査データを収集するとともに、Sato et al. (2009) の大大特データについて MDRS 法などによる再解析から構造解釈を行い、上町・仏念寺山断層の下方延長部が震源域近傍まで延びていたことが示された [1505:東大地震研]。

(6) 地震火山相互作用

御嶽山周辺域の地震活動を理解するために、詳細な発震機構が求められた。火山性地震は、2014 年 9 月の噴火以降減少傾向にあるが、未だに噴火前の平常時には戻っていない。規模の大きい火山性地震は、広域応力場と調和的なタイプとなる傾向がみられた。また、2014 年噴火の火口付近に、広域応力場では説明できないタイプのイベントが多く発生していたことが明らかにされた。2014 年の噴火では、火山性地震のメカニズム解が、噴火を機に、東西伸長の正断層・横ずれ断層型から東西圧縮の逆断層型に変化していた。この火山活動による、応力場変化に着目し (Terakawa et al., 2016), 2007 年噴火に伴う火山性地震のメカニズム解の時間変化を調べ、噴火日を推定する試みが行われた。その結果、2014 年の噴火と同様に噴火を示唆する変化が認められていたことが明らかとなり、検出されてい

ない噴火現象をこの方法によって見出せる可能性が示された[1907:京都大学]。

富士山では、その山麓部で発生した 2011 年静岡県東部地震 (M6.4) が岩石空隙中の気体が 2011 年東北地方太平洋沖地震による震動で離脱上昇した結果、間隙水圧を高め地震を誘発したとするモデルが提案された[2201:九州大学]。このように、地震-火山相互作用を考える上で、気泡挙動の物理モデルを確立することは重要な意味を持つ。そのために、アナログ物質を用い、気泡挙動を実験的に検討する研究が開始された。静止場において気液界面張力を変化させた実験を行い、気泡の離脱条件を決定し、気泡の変形による necking が、気泡の離脱の基本過程であることを明らかにした。静止場での気泡の離脱条件を振動場に応用し、2つの無次元パラメータ(気泡径と振動場の振幅の比、および振動の加速度と重力加速度の比)によって離脱条件が決定されていることが明らかとなった[2201:九州大学]。

成果リスト

相澤 広記, 上嶋 誠, 小山 崇夫, 長谷 英彰, 山谷 祐介, 宇津木 充, 神田 径, 橋本 武志, 塚本 果織, 村松 弾, 桜島・霧島・富士山・九重山での広帯域 MT 連続観測により推定される比抵抗構造時間変化, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉幕張.

Akuhara, T., M. G., Bostock, , A. P., Plourde, M. Shinohara, ,2019, Beyond Receiver Functions: Green's Function Estimation by Trans - Dimensional Inversion and Its Application to OBS Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JB016499>

雨澤勇太, 森吉山の群発地震における散乱波群とその波形形状の時間変化, 弘前大学理工学研究科平成 30 年度修士論文.

Amaya, A., N. Hirano and N. Tsuchiya, 2018, Thermal prospection of geothermal reservoirs by using thermoluminescence of quartz, *Geothermal Resources Council Trans.*, 42.

新谷昌人, 2018, ファイバーネットワークを用いた地震・津波・地殻変動の計測技術に関する研究, 東北大学電気通信研究所研究活動報告, 24, 129-131.

Becker, W.T., A. Hashima, A. M. Freed, H. Sato, 2018, Stress change before and after the 2011 M9 Tohoku-oki earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, 504, 174-184.

Fukahata, Y., 2019. Estimate of the contraction rate of central Japan through the deformation of the Philippine Sea slab, *Progress in Earth and Planetary Science*, 6:4, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0251-0>.

深井雅斗, 小川康雄, 曾國軒, 市來雅啓, 高倉伸一, 2019, 北上山地の三次元比抵抗構造解析, CA 研究会論文集, 印刷中.

Fukushima, Y., S., Toda, S., Miura, D., Ishimura, J., Fukuda, T., Demachi, K., Tachibana, 2018, Extremely early recurrence of intraplate fault rupture following the Tohoku-Oki earthquake. *Nature Geoscience*, 11, 777-781, DOI: 10.1038/s41561-018-0201-x

Hata, M., M. Uyeshima, Y. Tanaka, T. Hashimoto, N. Oshiman, and R. Yoshimura, 2018, Three-dimensional electrical resistivity distribution beneath the Beppu-Shimabara graben with a focus on Aso caldera, Southwest Japan subduction zone, *J. Geophys.*

- Res., 123, 6397-6410.
- Hata, M., N. Matsushima, S. Takakura, M. Utsugi, T. Hashimoto, and M. Uyeshima, 2018, Three-dimensional electrical resistivity modeling to elucidate the crustal magma supply system beneath Aso caldera, Japan, *J. Geophys. Res.*, 123, 6334-6346.
- Hanyu, T., K. Shimizu, T. Ushikubo, J.-I. Kimura, Q. Chang, M. Hamada, M. Ito, H. Iwamori, T. Ishikawa, 2019, Tiny droplets of ocean island basalts unveil Earth's deep chlorine cycle. *Nature Comm.*, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07955-8>.
- Haraguchi, S., K. Ueki, K. Yoshida, T. Kuwatani, M. Mohamed, S. Horiuchi, H. Iwamori, 2018, Geochemical database of Japanese islands for basement rocks: compilation of domestic article. *J. Geol. Soc. Japan*, 124, 1049-1054.
- 林田 祐人, 松本 聡, 飯尾 能久, 酒井 慎一, 加藤 愛太郎, 0.1 満点地震観測グループ, Characteristics of focal mechanism solution of the earthquakes in the source region of the 2000 Western Tottori Earthquake based on "0.1 Manten" hyper dense seismic observation, SCG57-P20, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018. 5. 20-24, 幕張
- 林田祐人, 松本聡, 飯尾能久, 酒井慎一, 加藤愛太郎, 0.1 満点地震観測グループ, 0.1 満点観測によって得られた鳥取県西部地震震源領域における微小地震のメカニズム解の特徴について, S08-P13, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018. 10. 9-11, 郡山市
- Ichiki, M., T. Kaida., and Y. Ogawa, 2018, Investigation of flow reverse towards backarc side in the mantle wedge: Electrical conductivity distribution of subduction zone beneath the northern part of NE Japan, AGU Fall Meeting, T31H-0399.
- 石川正弘, 2018, 本州弧の地殻深部及び最上部マンツルの構成岩石の推定, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会
- Ishimura, D., S., Toda, S., Mukoyama, S., Homma, K., Yamaguchi, T., Takahashi, (in press) Three-dimensional surface displacement and surface ruptures associated with the 2014 Mw6.2 Nagano earthquake using differential LiDAR. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- 石山達也, 佐藤比呂志, 阿部 進, 2018, 大阪堆積盆地の震源断層モデル, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, S24-04.
- 伊藤嘉秋, 2018, 2011 年東北地方太平洋沖地震の余効変動に基づく不均質レオロジーに関する研究, 東北大学修士論文, 132pp.
- Iwamori, H., H. Nakamura, M. Yoshida, Nakagawa, T., Ueki, K., Nakao, A., Nishizawa, T., Haraguchi, S., 2018, Trace-element characteristics of east-west mantle geochemical hemispheres. *Comptes Rendus Geosci.*, <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.09.007>.
- 神菌 めぐみ, 松本 聡, 志藤 あずさ, 山下 裕亮, 中元 真美, 宮崎 真大, 酒井 慎一, 飯尾 能久, 2016 年熊本地震 合同地震観測グループ, 2016 年熊本地震震源域における地震波減衰構造, SSS10-11, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018. 5. 20-24, 幕張
- Kaneda. H. T. Chiba, 2019, Stereopaired morphometric protection index red relief image maps

- (Stereo MPI-RRIMs): effective visualization of high-resolution digital elevation models for interpreting and mapping small tectonic geomorphic features, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 109, 2370-2391.
- 金田平太郎, 柏原真太郎, 小村慶太朗, 2018, 山上湿地掘削のための可搬型パーカッションコアリングシステム, *月刊地球*, 号外 69, 112-120.
- Katoh, S., Y., Iio, H., Katao, M., Sawada, K., Tomisaka, T., Miura, I. Yoneda, , 2018, The relationship between S-wave reflectors and deep low-frequency earthquakes in the northern Kinki district, southwestern Japan. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 149. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0921-6>
- Kobayashi, F., H. Sumino, R. Burgess, S. Nakai, T. Iizuka, J. Nagao, H. Kagi, M. Nakamura, E. Takahashi, T. Kogiso, and C. J. Ballentine, 2019, Halogen heterogeneity in the lithosphere and evolution of mantle halogen abundances inferred from intraplate mantle xenoliths, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, doi: 10.1029/2018GC007903.
- 小菅正裕, 2019, 地殻浅部での低周波地震活動, *東北地域災害科学研究*, 55.
- Maeda S., T. Matsuzawa, T. Shinji, K. Yoshida, and H. Katao, 2018, Complex microseismic activity and depth-dependent stress field changes in Wakayama, southwestern Japan, *Earth Planets Space*, 70:21, doi: 10.1186/s40623-018-0788-6.
- Masyitha Retno Budiati Kiraman, G. Toyokuni, T. Okada, 2018, Depth estimation of Moho discontinuity beneath Central Indonesia by the cross-correlation analysis of seismic ambient noise, *AGU Fall Meeting*, T23A-0345.
- 松本 聡, 光岡 郁穂, 飯尾 能久, 酒井 慎一, 2016 年熊本地震 合同地震観測グループ, 2016 年熊本地震震源域における応力場のモデル化 (3), SSS15-12, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018. 5. 20-24, 幕張
- 松本聡, 飯尾能久, 酒井慎一, 加藤愛太郎, 0.1 満点地震観測グループ・鳥取県西部満点地震観測グループ, 0.1 満点地震観測でみた鳥取県西部地震震源域の余震活動による非弾性ひずみ, S23-05, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018. 10. 9-11, 郡山市
- 松野弥愛, 2018, 2016 年ニュージーランド・カイクウラ地震における本震断層と余震メカニズム解の幾何形状の類似性の評価, *東北大学卒業研究*.
- Meneses - Gutierrez, A., T., Nishimura, M. Hashimoto, 2019, Coseismic and Postseismic Deformation of the 2016 Central Tottori Earthquake and its Slip Model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JB016105>
- 光岡 郁穂, 松本 聡, 山下 裕亮, 中元 真美, 宮崎 真大, 酒井 慎一, 飯尾 能久, 2016 年熊本地震 合同地震観測グループ, Change in state of stress around Hinagu fault zone through the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, SCG57-26, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018. 5. 20-24, 幕張
- 光岡郁穂, 松本聡, 志藤あずさ, 山下裕亮, 中元真美, 宮崎真大, 飯尾能久, 酒井慎一, 2016 年熊本地震合同観測グループ, 2016 年熊本地震震源断層および日奈久断層周辺の応力場の時空間変化について, S08-P15, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018. 10. 9-11, 郡山市
- 村上英記, 野本和希, 注水実験時に観測された自然電位変動解明のためのアナログ実験 (序報), 第

- 144 回地球電磁気・地球惑星圏学会, R003-P14, 2018 年 11 月 25 日 (名古屋市) .
- 村上英記, 野本和希, 地下水流動モニターにボーリング孔ケーシングパイプを利用する際の留意点, Conductivity Anomaly 研究会, P01, 2019 年 1 月 10 日 (宇治市) .
- 村上英記, 野本和希, 地下水流動モニターにボーリング孔ケーシングパイプを利用する際の留意点, Conductivity Anomaly 研究会論文集 2019 (印刷中)
- Muramatsu D., K., Aizawa, A., Yokoo, M., Iguchi, T. Tameguri, 2018, Estimation of Vent Radii from Video Recordings and Infrasond Data Analysis: Implications for Vulcanian Eruptions from Sakurajima Volcano, Japan, *Geophysical Research Letters*, 45, 12, 829-12, 836. <https://doi.org/10.1029/2018GL079898>. Nakagawa, T., H. Iwamori, R. Yanagi, A. Nakao (2018) On the evolution of the water ocean in the plate-mantle system. *Prog. Earth Planet. Sci.*, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0209-2>.
- 村松 弾, 相澤 広記, 横尾 亮彦, 井口 正人, 為栗 健, 桜島昭和火口におけるブルカノ式噴火の初期段階について—可視映像および空振観測から得られる知見, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉幕張.
- Muramatsu, D., K., Aisawa, A., Yokoo, M., Iguchi, T. Tameguri, Initial Phase of Vulcanian Eruption at Showa Crater, Sakurajima Volcano, Japan: Insight from the Visual Movie and Infrasond Data, AOGS 15th annual meeting, 2018 年 6 月, Hawaii USA
- 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. *Comptes Ren. Geosci.*, in press.
- Nakamura, H., H. Iwamori, M. Nakagawa, T. Shibata, J.-I. Kimura, T. Miyazaki, Q. Chang, B.S. Vaglarovb, T. Takahashih, Y. Hiraharai, 2019, Geochemical mapping of slab-derived fluid and source mantle along Japan arcs. *Gondwana Res.*, in press.
- 中尾 茂, 松島 健, 田部井 隆雄, 大久保 慎人, 山品 匡史, 大倉 敬宏, 西村 卓也, 澁谷 拓郎, 寺石 眞弘, 伊藤 武男, 鷺谷 威, 松廣 健二郎, 加藤 照之, 福田 淳一, 渡邊 篤志, 三浦 哲, 太田 雄策, 出町 知嗣, 高橋 浩晃, 大園 真子, 山口 照寛, 岡田 和見, 2016 年熊本地震後の GNSS による地殻変動観測 (3), 日本測地学会第 130 回講演会予稿集, 173-174, 2018. 高知市, 10 月
- 中尾 茂, 松島 健, 田部井 隆雄, 大久保 慎人, 山品 匡史, 大倉 敬宏, 西村 卓也, 澁谷 拓郎, 寺石 眞弘, 伊藤 武男, 鷺谷 威, 松廣 健二郎, 加藤 照之, 福田 淳一, 渡邊 篤志, 三浦 哲, 太田 雄策, 出町 知嗣, 高橋 浩晃, 大園 真子, 山口 照寛, 岡田 和見, Post-seismic deformation of 2016 Kumamoto Earthquake by continuous GNSS network (2), 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, SSS09-P04, 2018. 千葉県幕張, 5 月
- Nakao, A., H. Iwamori, T. Nakakuki, Y. Suzuki, H. Nakamura, 2018, Roles of Hydrous Lithospheric Mantle in Deep Water Transportation and Subduction Dynamics. *Geophys. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1029/2017GL076953>.
- 大久保修平, 高木悠, 今西祐一, 田中愛幸, 渡邊篤志, 安藤美和子, 張新林, 大島弘光, 前川徳光, 岡田和見, 三浦哲, 植木貞人, 2018, 2011 年東北地方太平洋沖地震後の東日本広域重力変

- 動一粘弾性変形の検出, 日本地震学会秋季大会, S22-06.
- 岡田篤正, 金田平太郎, 杉戸信彦, 中田 高, 2018, 1:25,000 活断層図 濃尾断層帯とその周辺「大野」「冠山」「能郷白山」「谷汲」「美濃」「岐阜」解説書. 国土地理院技術資, D1-No. 912, 29 p.
- 岡田知己, 中山貴史, 平原聡, 堀修一郎, 佐藤俊也, 松澤暢, 2011 年東北地方太平洋沖地震合同余震観測グループ, 2018, 稠密地震観測で見た, 東北沖地震後の内陸誘発地震, 地震学会秋季大会, S22-03.
- Okada, T., T. Sato, Y. Iio, S. Matsumoto, S. Bannister, J. Ristau, S. Ohmi, S. Horiuchi, T. Miura, M. Savage, J. Pettinga, F. Ghisetti, and R. H. Sibson, 2018, Stress and strength control on the 2016 Kaikoura earthquake inferred from a seismic observation, Annual Meeting of Geoscience Society of New Zealand.
- Okuwaki, R., Kasahara, A., Yagi, Y., Hirano, S. & Fukahata, Y., 2019. Backprojection to image slip, *Geophys. J. Int.*, 216, 1529-1537, doi: 10.1093/gji/ggy505.
- 大槻憲四郎, 2018, A 断層は B 断層で切られたのか, B 断層で停止したのか?, 地質学会第 125 年大会.
- Oyanagi, R., A. Okamoto and N. Tsuchiya, 2018, Multiple kinetic parameterization in a reactive transport model using the exchange Monte Carlo method, *Minerals*, 8, 579, doi: 10.3390/min8120579.
- 櫻木 颯, 石川 正弘, 2018, Elastic wave velocity change caused lawsonite decomposition in blueschist at 1.0 GPa and up to 550 °C, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会
- 志藤あずさ, 松本聡, 大倉敬宏, 九州地方における地殻の内部減衰と散乱減衰の三次元構造, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, S06-P14, 2018 年 10 月, 郡山市
- Shito A., S., Matsumoto, T., Ohkura, Towards more appropriate mapping of scattering and intrinsic attenuation in Kyushu, 2018 JpGU, SSS11-P15, 2018 年 5 月, Makuhari, Japan.
- 杉戸信彦, 後藤秀昭, 2018, 長野県大町市街地の活断層分布に関する一検討, *活断層研究*, 49, 17-22.
- Sugito, N., H. Sawa, K. Taniguchi, Y. Sato, M. Watanabe, and Y. Suzuki, 2019, Evolution of Riedel-shear pop-up structures during cumulative strike-slip faulting: A case study in the Misayama-Godo area, Fujimi Town, central Japan, *Geomorphology*, 327, 446-455.
- 鈴木真奈美, 2018, 東北地方米沢-喜多方地域における地震波反射面の空間分布, 東北大学修士論文, 134pp.
- Suzuki, M., A. Hasemi, T. Okada, T. Matsuzawa, N. Umino, T. Yamashita, N. Tsumura, and Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, 2018, Spatial distribution of seismic wave reflectors beneath the Yonezawa-Aizu region, northeastern Japan, AGU Fall Meeting, T31H-0400.
- 鈴木康弘, 2018, 日本活断層学会設立から 10 年: 200~2017, *活断層研究*, 49, 57-62
- 鈴木康弘, 渡辺満久, 中田 高, 2018, 2016 年熊本地震における益城町中心市街地内の地震断層一変

動地形学的意義と建物被害への影響. 活断層研究, 48, 13-34

Takada, Y., T., Sagiya, T., Nishimura, 2018, Interseismic crustal deformation in and around the Atotsugawa fault system, Central Japan, detected by InSAR and GNSS, *Earth Planets and Space*, vol. 70:32 doi:10.1186/s40623-018-0801-0

高田陽一郎, 跡津川断層近傍における変形運動と応力蓄積過程, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会 (招待講演)

武石貢佑, 神田径, 木下貴裕, 関香織, 宇津木充, 小山崇夫, 上嶋誠, 霧島火山での広帯域 MT 観測, 日本火山学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月, 秋田.

丹羽雄一, 遠田晋次, 石村大輔・森 良樹, 小俣雅志, 2018, 神城断層の極浅部における断層形状と平均上下変位速度:長野県北安曇郡白馬村神城地区におけるボーリング調査. 活断層研究, 49, 1-16.

立岩和也, 岡田知己, 2018, P 波の変位振幅の立ち上がりのマグニチュード依存性, 地球惑星科学連合大会, SSS15-P15.

立岩和也, 岡田知己, 内田直希, 2018, P 波の変位振幅の立ち上がりのマグニチュード依存性 (2), 日本地震学会秋季大会, S08-P19.

Terakawa, T. E. Hauksson, Absolute Stress Fields in the Source Region of the 1992 Landers Earthquake, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 23 (B10), 8874-8890, doi: 10.1029/2018JB015765, 2018.

Terakawa, T., Roles of tectonic stress and pore fluid pressure in earthquake generation, 2nd Asia-Pacific Workshop on Lithosphere and Mantle Dynamics, Yokohama, 2018.8.7. (invited).

Terakawa, T., E. Hauksson, 3D Absolute Stress Fields in the Source Region of the 1992 Landers Earthquake, AGU 2018 Fall Meeting, S21E-0484, 2018, Washington D.C., USA.

寺川寿子, E. Hauksson, 1992 年ランダース地震震源域の絶対応力場, 日本地球惑星連合大会, 千葉, 2018.5.22.

寺川寿子, 間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場のモデル化と推定, 東濃地震科学研究所・平成 30 年度第 1 回地殻活動研究委員会, 瑞浪, 2018.9.5. (invited)

寺川寿子, E. Hauksson, 1992 年ランダース地震震源域の絶対応力場, 日本地震学会 2018 年秋季大会, 郡山, 2018.10.11.

Triahadini, A., K. Aizawa, Dan Muramatsu, Kaori Tsukamoto, Keita Chiba, Saki Watanabe, Yui Odasaki, Makoto Uyeshima, Yoshiko Teguri, MAGNETOTELLURIC TRANSECT OF THE UNZEN GRABEN, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉幕張.

Triahadini, A., K. Aizawa, Y. Teguri, K. Tsukamoto, T. Koyama, D. Muramatsu, K. Chiba, S. Watanabe, M. Uyeshima, Magnetotelluric transect of the Unzen graben and its correlation with seismic profile, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2018 年秋学会, 2018 年 11 月, 名古屋.

坪川 祐美子, 石川 正弘, 2018, Ultrasonic velocity measurements of pycrystalline clinopyroxene under high P-T conditions, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会

Tsukamoto K., K., Aizawa, K., Chiba, W., Kanda, M., M., Uyeshima, T., Koyama, M., Utsugi,

- K., Seki, T., Kishita, 2018, Three-dimensional resistivity structure of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to shallow seismicity, surface uplift, and a small phreatic eruption, *Geophysical Research Letters*, 45, 12, 821-12, 828. <https://doi.org/10.1029/2018GL080202>.
- 塚本 果織, 相澤 広記, 千葉 慶太, 神田 径, 上嶋 誠, 小山 崇夫, 宇津木 充, 関 香織, 木下貴裕, 手操 佳子, 村松 弾, Agnis Triahadini, 湯浅 雄平, 岩佐 優一, 林田 祐人, Alutsyah Luthfian, 霧島硫黄山の三次元比抵抗構造と 2013 年ごろからの火山活動について, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉幕張
- 堤 浩之, 遠田晋次, 後藤秀昭, 熊原康博, 石村大輔, 高橋直也, 谷口 薫, 小俣雅志, 郡谷順英, 五味雅宏, 浅野公之, 岩田知考, 2018, 熊本県益城町寺中における 2016 年熊本地震断層のトレンチ調査. *活断層研究*, 49, 31-39.
- Yoshida, K., A. Hasegawa, 2018a, Hypocenter migration and seismicity pattern change in the Yamagata-Fukushima border, NE Japan, caused by fluid movement and pore pressure variation, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123 (6), 5000-5017, doi: 10.1029/2018JB015468.
- Yoshida, K., A. Hasegawa, 2018b, Sendai-Okura earthquake swarm induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in the stress shadow of NE Japan: Detailed fault structure and hypocenter migration, *Tectonophysics*, 733, 132-147, doi: 10.1016/j.tecto.2017.12.031.
- Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Yoshida, and T. Matsuzawa, 2018, Heterogeneities in stress and strength in Tohoku and its relationship with earthquake sequences triggered by the 2011 M9 Tohoku-Oki earthquake, *Pure and Applied Geophysics*, doi: 10.1007/s00024-018-2073-9.
- Yoshida, K., T. Kuwatani, T. A. Yasumoto, S. Haraguchi, K. Ueki, H. Iwamori, 2018, GEOFCM: a new method for statistical classification of geochemical data using spatial contextual information. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, <https://doi.org/10.2465/jmps.171127>.
- 湯浅 雄平, 松本 聡, 中尾 茂, 松島 健, 大倉 敬宏, Characteristics of the seismic gap in west part of the central Kyushu, Japan, SCG57-P18, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018. 5. 20-24, 幕張
- 湯浅雄平, 松本聡, 松島健, 中尾茂, 大倉敬宏, 天草地震空白域における非弾性ひずみの検出, S23-P16, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018. 10. 9-11, 郡山市
- 渡邊 了, 2018, 地震波速度・電気伝導度から推定される地殻内の流体分布, *地震予知連絡会会報*, 100, 427-430.

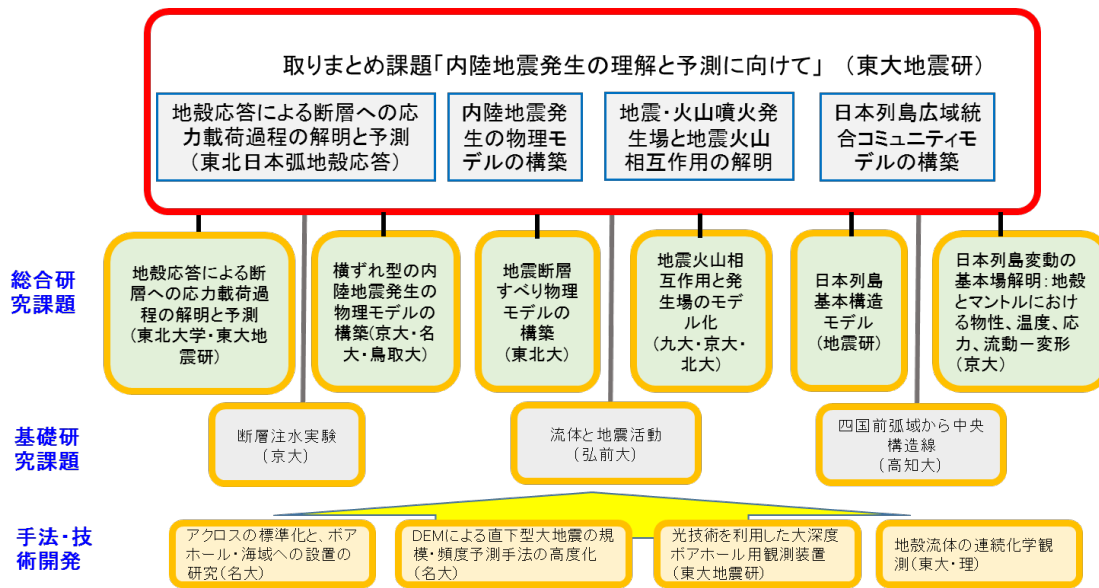


図1. 今期の内陸地震研究推進体制。各枠には課題の中心テーマと代表担当機関を記している。

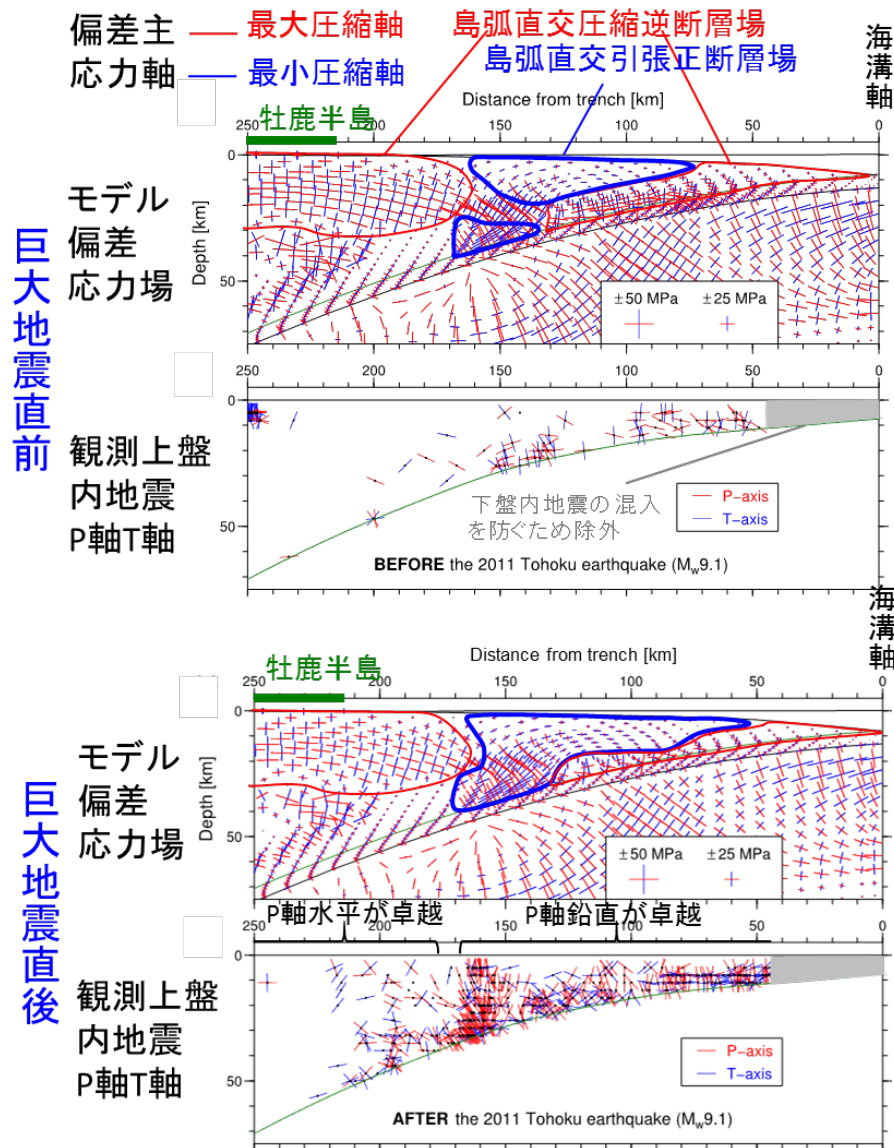


図2. 東北日本島弧の東北沖地震前後における絶対応力場のモデリング。
 巨大地震後のプレート境界の平均摩擦力が9MPaのケース（ベストモデル）の結果の、巨大地震発生前（上）と直後（下）の、モデルから計算される偏差応力場と観測された上盤内の地震の発震機構解のP軸とT軸の分布の前弧付近における拡大図を示す[1203:東北大学]。

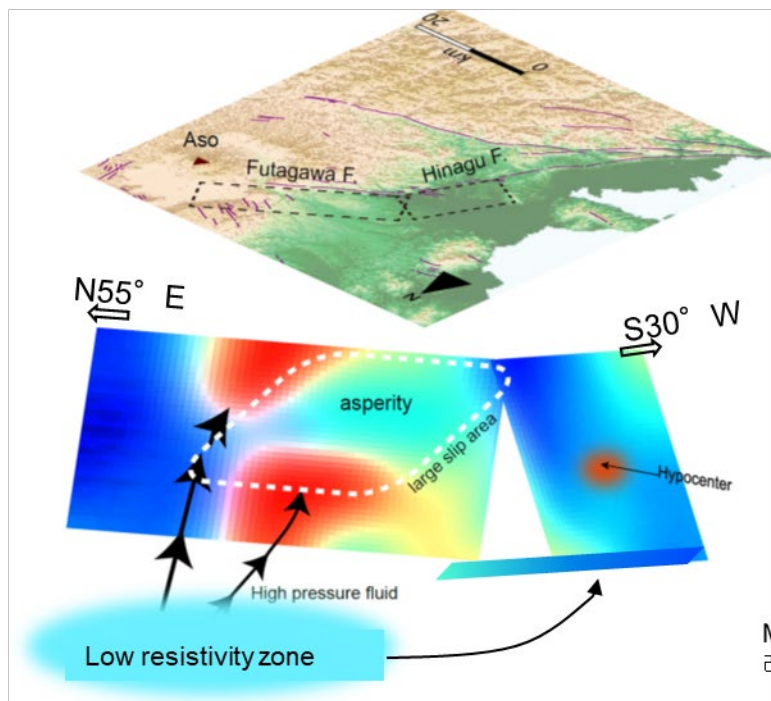
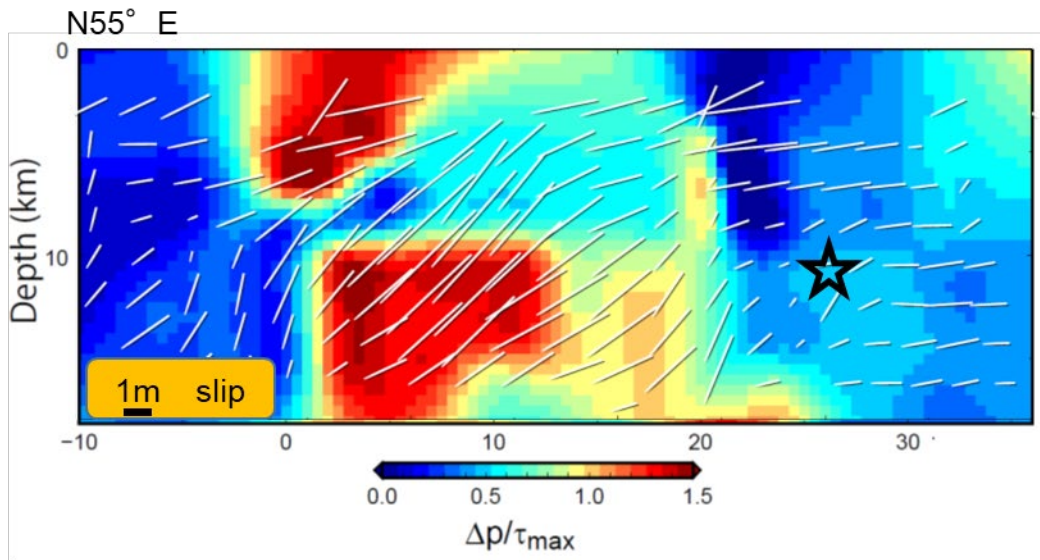


図3. 上) 本震断層沿いでの断層面と応力場最適面の関係。赤いほど面のずれが大きい(最大せん断応力で規格化された間隙流体圧変化として表示, Matsumoto et al. 2018 を改変)。星は破壊の開始点。下) 上図と低比抵抗域の関係を示した模式図[2201:九州大学]。

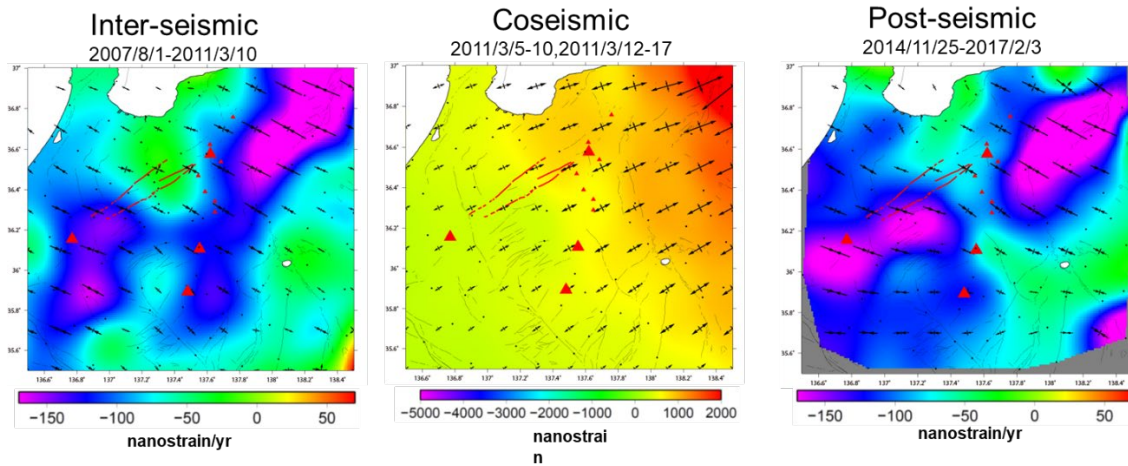


図4. (a) 東北沖地震前および(b) 地震後の面積歪速度 (短波長成分)。 (c) 東北沖地震時の面積歪。赤線が跡津川断層系, 三角は火山, 黒点が GNSS 観測点 [1907: 京都大学]。

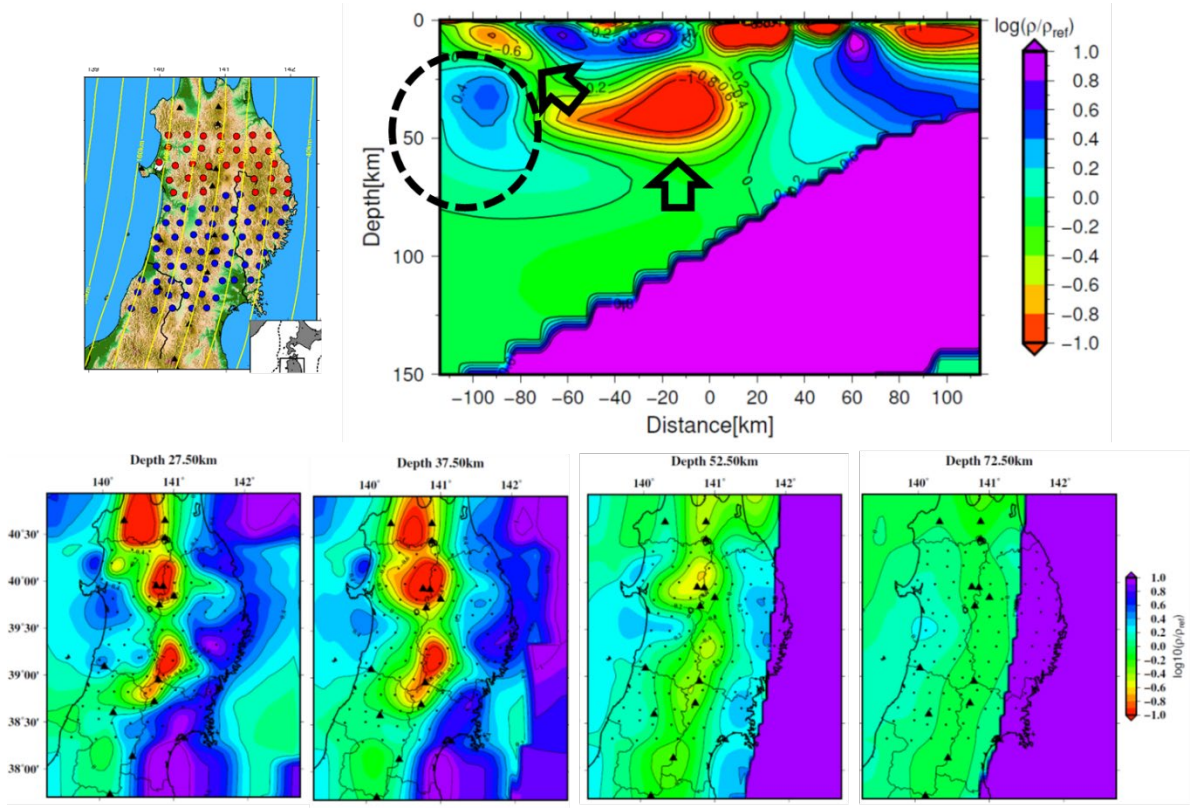


図5. 長周期 MT 観測から推定された 3 次元比抵抗構造。
 左上: 観測点配置と断面図の位置。右上: 森吉山・八幡平付近を通る東西断面。下: 各深さにおける比抵抗分布 [1203: 東北大学]。

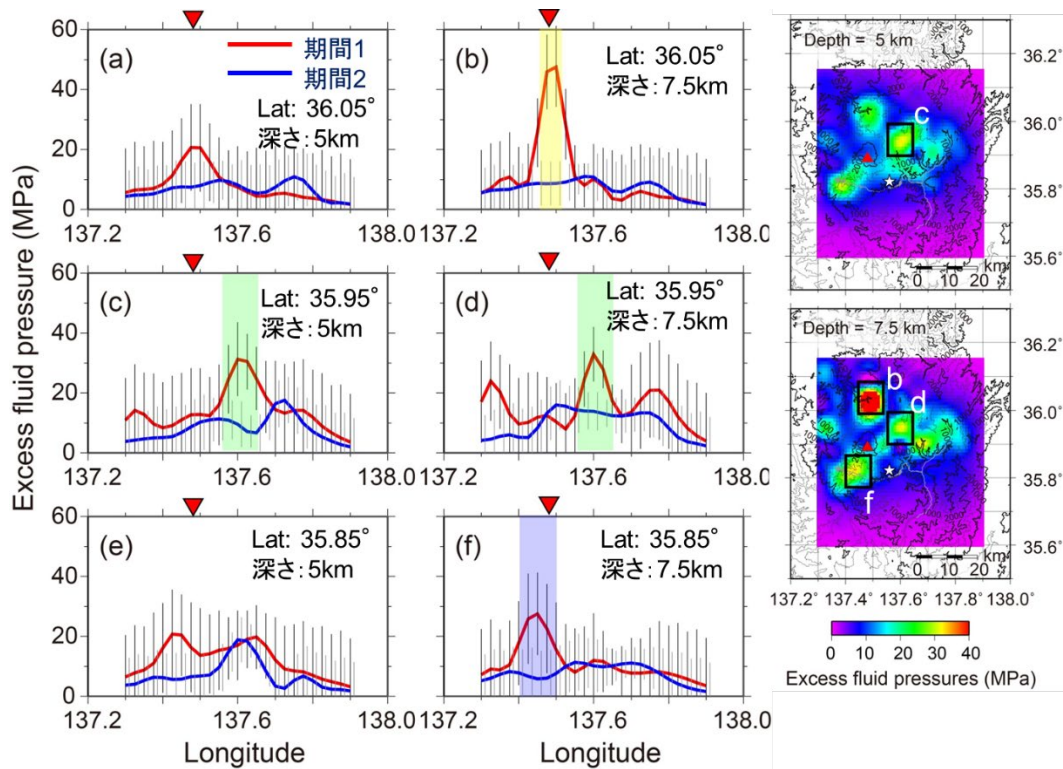


図6. 御嶽山周辺域の3D間隙流体圧場 (Terakawa, 2017)。

深さ5 kmと7.5 kmでの間隙流体圧場と時間変化。右図) 上下はそれぞれ5, 7.5 kmの流体場, 左図) 赤線と青線は, それぞれ期間1 (2012年5月~2014年7月), 期間2 (2012年9月~2014年7月)の結果である (Terakawa et al., 2013; Terakawa, 2017) の結果である。黒及び灰色の縦線は, 68%信頼区間を示す。赤い逆三角形は, 御嶽山山頂の経度を表す。緯度36.05°における (a) 深さ5 km, (b) 深さ7.5 kmの間隙流体圧分布。緯度35.95°における (c) 深さ5 km, (d) 深さ7.5 kmの間隙流体圧分布。緯度35.85°における (e) 深さ5 km, (f) 深さ7.5 kmの間隙流体圧分布。黄色い網掛け領域は, Terakawa (2017) と Terakawa et al. (2013) で参照した応力場の違いが大きい領域 (テンソルの内積の平均は0.56) である [1907: 京都大学]。

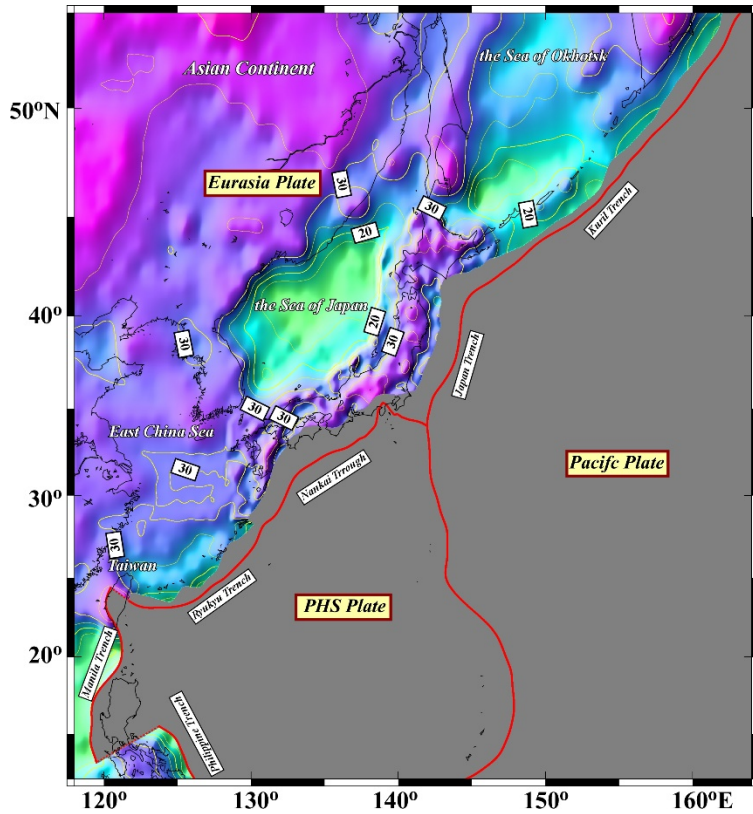


図7. ユーラシアプレートのモホ面。日本周辺は Matsubara et al. (2017), 周辺域は crust1.0 (Laske et al., 2013)による結果を用いた。更に本研究で求めた太平洋プレート境界面で切り取った。

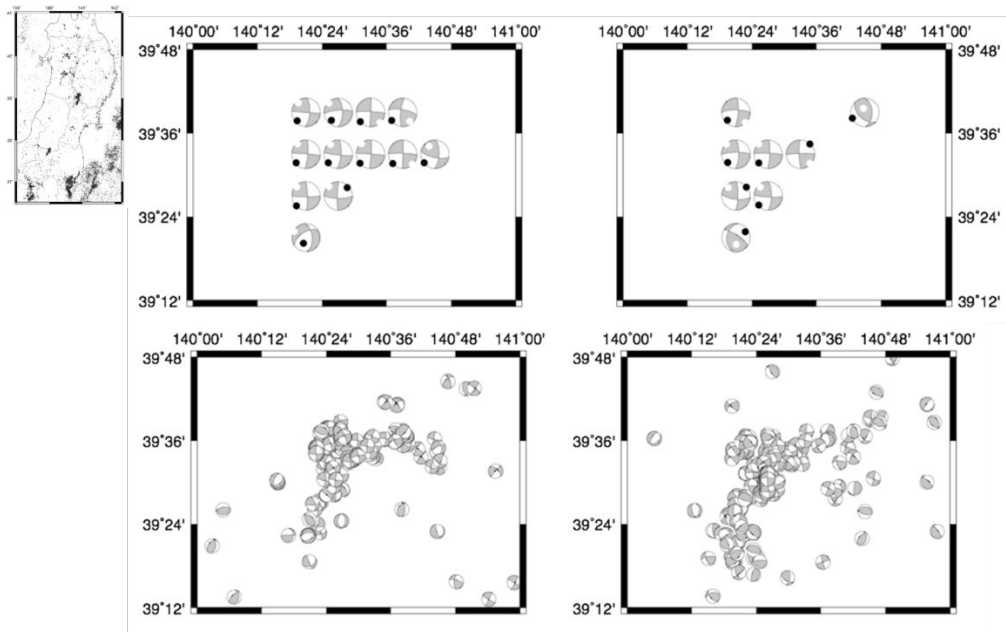


図8. 秋田南部地域における応力インバージョン結果（上）とメカニズム解（下）。左）2011-2013年の期間と右）2014-2017年の期間をそれぞれ示す。

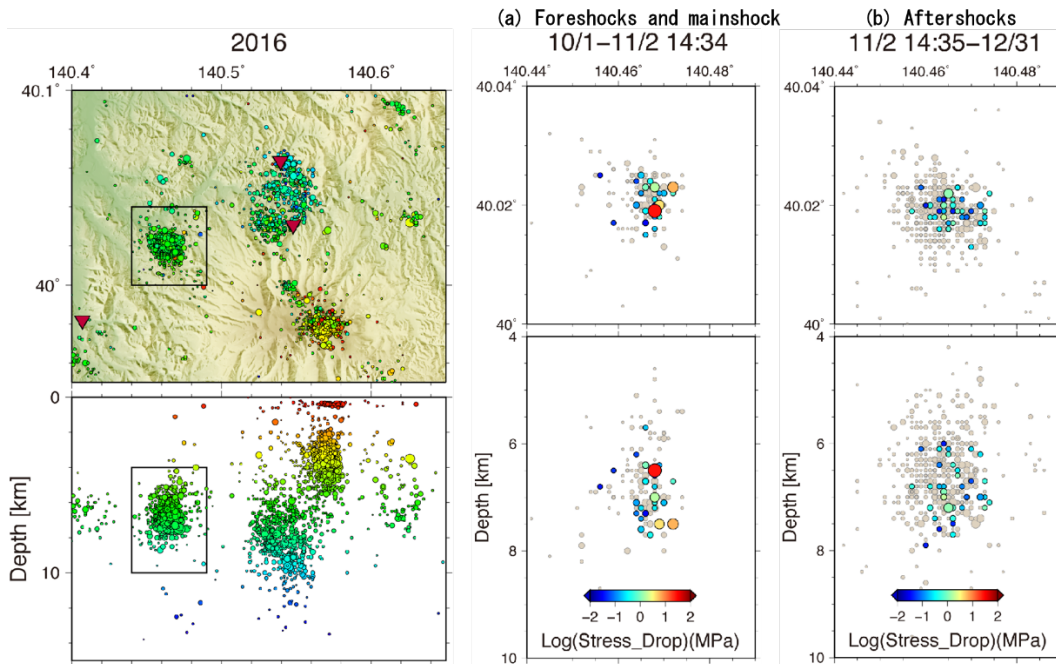


図9. 森吉山北西で発生した地震群の応力降下量の空間分布。

左) 2016年に森吉山とその周辺で発生した地震の震源分布。赤い三角印は観測点の位置を示す。四角の中の領域を右に示す。四角の中において、最大規模のM4.2の地震の発生前の地震を前震、発生後の地震を余震とした。右) (a) M4.2の本震とその前震の応力降下量の分布。(b) 余震の応力降下量の分布。(a) (b)とも、シンボルの丸の大きさはマグニチュードを、色が応力降下量を表す。灰色の丸はそれぞれの期間に発生した地震の震源を示す[1101:弘前大学]。

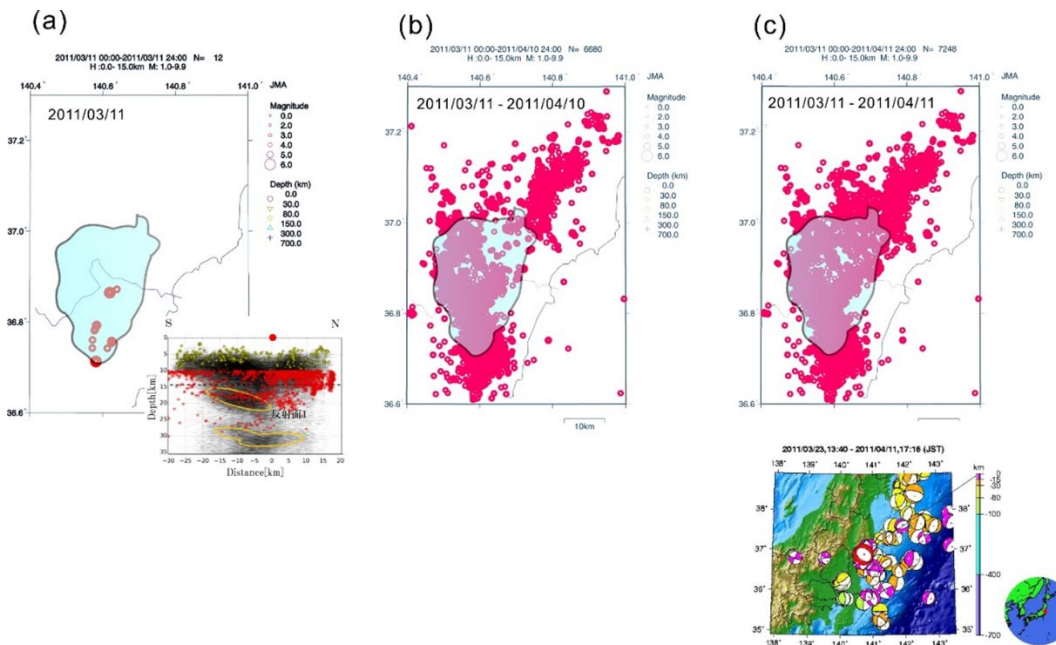


図10. いわきにおける地震活動と地震波反射面の関係。

(a) いわきの地震活動域での3月11日に発生した15 km以浅のM1以上の地震の震源の位置と地殻内反射面の位置。反射面の位置は水色で示してある。挿入図は臼田により求められた反射面の深さ分布

(臼田修士論文, 2018)。(b) いわきの地震活動域での 2011 年 3 月 11 日-4 月 10 日に発生した 15 km 以浅の M1 以上の地震の震源の位置と地殻内反射面の位置。(c) いわきの地震活動域での 2011 年 3 月 11 日-4 月 11 日に発生した 15 km 以浅の M1 以上の地震の震源の位置と地殻内反射面の位置。防災科研による 4 月 11 日の福島県浜通りの地震のメカニズム解を挿入図で示した[1203:東北大学]。

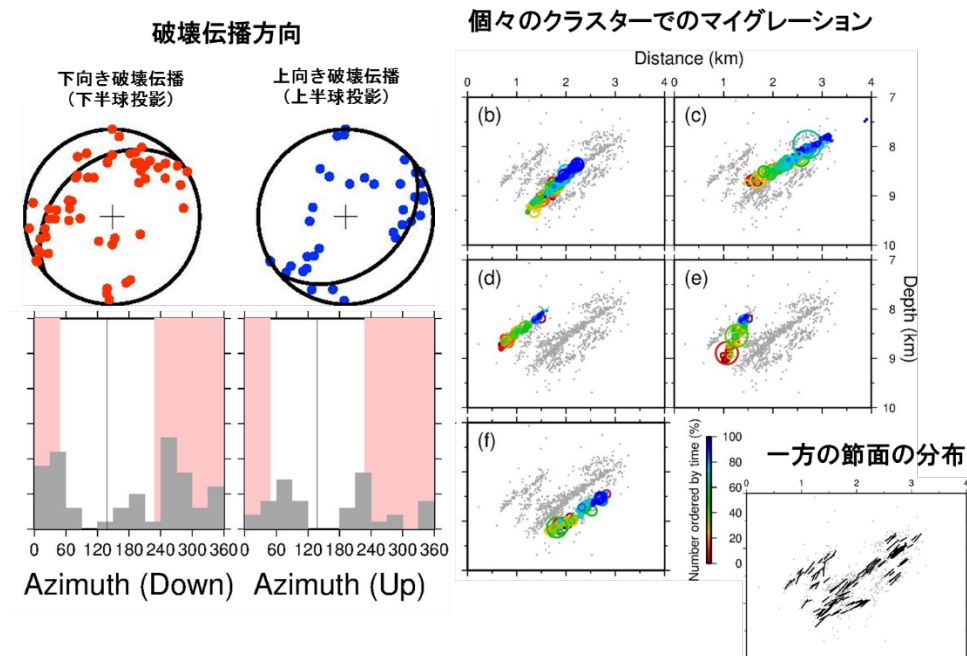


図 11. 経験的グリーン関数法から推定した破壊指向性。

左：経験的グリーン関数法から得られた震源時間関数のパルス幅の方位依存性から、破壊の進行方向を推定した結果。破壊伝播はやはり震源分布と整合する節面に沿って進む場合が多く、また、上向き（青丸）よりも下向き（赤丸）に破壊が伝播した例が多いことがわかる。右：福島-山形県境付近で発生した群発地震のマイグレーション (Yoshida and Hasegawa, 2018a)。色は発生時期をしめしており、地震活動は時間とともに深部から浅部に移動していった。震源分布は発震機構解の一方の節面と同様の傾斜を示しており、この方向に断層が生じていたことを示唆する[1204:東北大学]。