

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）

内陸地震部会では、内陸地震発生のモデル化を進め、災害軽減に貢献するために、内陸地震の発生場と発生機構の解明、およびその発生予測に関する研究を推進している。また、空間的な地震発生ポテンシャルを推定する手法開発をめざした研究を進めようとしている。

内陸地震発生ポテンシャルを評価するための重要なパラメータとして、日本列島内陸にかかる広域的なローディング、それに対する地殻応答、個別の断層へのローディングと断層強度などがあげられる。今年度は、年度初頭に熊本地震が発生したため、その発生メカニズムの解明のための多岐にわたる観測研究が実施されたほか、2011年東北地方太平洋沖地震後の変動場を精密に観測することで、断層へのローディング機構や粘弾性構造などを推定する研究が実施された。その他の全国各地の内陸地震発生域においても、地殻活動の時空間的变化やその変化を担う背景構造の調査が進められた。また、地震発生ポテンシャル評価の確立に向けての試行が開始された。岩石や間隙流体の物理・化学的特性を明らかにするための室内における実験研究から、流体がレオロジー特性や速度構造・比抵抗構造特性に及ぼす影響について理解が進んだ。一方、様々な地殻変動モデリングを行う上で基本的な情報となる、日本列島基本構造モデルのコンパイルが進められた。また、関連する研究課題を取りまとめて得られる様々なパラメータを入力情報として、実際に地震活動評価を行い、災害発生予測や災害誘因予測につなげる研究手法の検討が始められた。以下にこれらの成果の概要を記す。

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整理

平成28年度においては、公表されている論文・報告書の中から活断層の活動性評価に関する重要な情報を含む資料を選定し、陸域8断層帯及び海域2断層帯についてのデータ化およびweb上での情報公開のためのデータ入力を実施した。2016年4月に熊本地震が発生した際には、この地震の震源である布田川・日奈久断層の活動履歴情報へのリンクをトップページに配置する措置を取った。地震発生直後のアクセス数は10万件を超えた。また、より良い情報公開のために、データベースのセキュリティ向上のための開発言語改修作業と、操作性・表示機能強化のための改善作業を実施した。（産総研[課題番号：5002]）。

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料、考古データ、地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

低頻度大規模地震現象の解明へのひとつのアプローチは、過去の大地震の痕跡を詳細に調査し、位置、規模、頻度などを復元することである。活断層が一般に千年程度以上の長い活動間隔を有することを考えれば、1：変動地形学的手法によって数千年～数万年の時間スケールでの調査によって活断層の位置形状を明らかにする、2：過去の「地震像」を復元して活動繰り返しパターンを明らかにする、3：活断層が実際に動いて出現した地表地震断層を精査してその位置形状と「地震像」を検証する、ことが不可欠である。とくに、個別断層が連動した活動は大規模地震へ直接つながるものであり、連動の条件を知ることが重要である。

2016年熊本地震は、まさにその低頻度大規模地震に該当すると考えられたため、その地表地震断層と活断層の調査を進めた。その結果、大学の研究グループは出現した地表地震断層がほぼ出現時の姿のままに残っている間にその全貌を把握することに成功した。多くの地点で右横ずれ変位が認められ、最大右横ずれ変位量は益城町堂園で約225cmであった。布田川断層沿いの鉛直変位は、南部では南西側上がり、北部では北東側上がりと

なり、右横ずれ断層で認められる鉛直変位のパターンと一致した。なお、鉛直変位は最大100cmであった。出ノ口断層に沿っては、一部左横ずれ変位を伴う北西落ちの正断層変位が認められ、その変位は最大2mに及んだ。地表地震断層の位置は、概ねこれまでに決定された推定活断層線に沿っているものの、一部では一致していない。山地でのくい違い地形の連続性に基づいて活断層線を引いていたところでも今回の地表地震断層が通らず、想定外のところを地表地震断層が通る場合があることや、左ずれ変位を示す共役断層が活動したことが明らかになった。この点は今後の内陸地震発生ポテンシャルや強震動評価のうえで検討すべき重要な点である。

2014年11月に発生した長野県北部の地震に関連して、神城断層において詳細な調査が進められている。今年度は累積変位を示す、変動地形に関する精査が進められた。また、LiDAR DEMの変位ベクトル分布を用いた変動量計測の高度化に成功した。地震前後の詳細なLiDARデータを比較し、ベクトル解析を行うことによって水平方向も考慮した変動量が得られた。ここで得られた地表変動は、地表断層だけでなく、干渉SARの結果や地震波速度構造・余震分布による震源断層域とも相関が見られ、その有用性が確かめられた。(名古屋大学[課題番号:1702])。

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ) 内陸地震と火山噴火

内陸地震発生場の解明のためには、日本列島を取り囲むプレート運動や沈み込みによって形成される広域の応力応荷とそれに対する内陸地殻の弾性・非弾性応答を観測し、そのモデル化を行うことで、内陸地殻の応答特性を明らかにすることが求められる。また、内陸地震の発生予測のためには、広域の応力応荷に対していかに個別の断層へ応力が集中するか、またどのような条件で断層強度が低下するかを明らかにする必要がある。特に今年度は4月に熊本地震が発生し、大きな被害を及ぼした。この活動の背景と地震像を明らかにすることがきわめて重要な課題となった。一方、東北地方は、東北地方太平洋沖地震の発生に伴って顕著な応力場の変化が起きたため、その地震時・余効変動の詳細な変化を観測によって明らかにして、応力変化に対する内陸域の応答特性を知りえる重要な時期にあると考えられる。本年度は従来得られている複数の地域における構造や地震活動を対比するための観測およびデータ整理を進めた。また、個別の地域における発生場の推定、それらのモデル化の試みが行われた。

本部会ではさらに他部会との連携を重視している。その一環として、昨年度、各地域で行われてきた研究結果を整理し、日本列島の内陸地震発生域での地震発生域と地震波速度構造との関係について見いだされた経験則を「(2) モニタリングによる地震活動予測、ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験」へ提供し、その経験則の有効性の検証を開始した(地震研[課題番号:1504])。

・2016年熊本地震

2016年4月14日から発生した熊本地震の一連の活動は、M6.5の最大前震から開始し、16日にM7.3の本震が発生し、その両方の地震をあわせて大きな被害を及ぼした。大学および関係機関は、その前震の発生後に直ちに現地で観測を開始したため、貴重な観測データを得ることができ、この一連の地震の特性がより明らかにされつつある。

地震の背景：熊本地震は別府一島原地溝帯と呼ばれる、九州でもっとも地震活動の高い領域で発生した。最大前震M6.5および本震M7.3は日奈久断層および布田川断層付近で発生した。この地域に働く広域偏差応力はほぼ南北の最小主圧縮応力が卓越し、そのほかの2つの主応力は近接する値を取る。このため、横ずれ断層地震、正断層地震のどちらも発生しやすい領域であった。また、震源は微小地震の非弾性ひずみが多い領域、比抵

抗構造でみると低比抵抗域の端に分布した。これは、流体などが関与し、変形しやすくなった領域に隣接した場所に応力が集中したことを示唆している（九州大[課題番号：2201]）。

断層形状：2016年熊本地震合同地震観測グループによる緊急観測データから、余震分布を基に推定される断層が、日奈久断層、布田川断層からなる断層面だけではなく、複数の断層面が存在していたことが明らかになった。これらの断層面の傾斜角は一定ではなく、空間的に変化が認められる。また、M6.5とM7.3の地震の断層面をつなぐ、ほぼ鉛直の深部断層の存在が示唆された。一方、1999-2000年に日奈久断層で発生したM5の地震を伴った地震活動が鉛直な断層面上での活動であったのに対して、熊本地震の活動はその断層面のやや西側で活動しているように見える。これらの複雑な形状は地表活断層との関係が必ずしも明確ではなく、今後の活断層評価にとって重要な知見であると考えられる（図1）。

応力場：M6.5の地震の発生以前のデータを用いて、応力テンソルインバージョンがおこなわれ、地震発生前の不均質な応力場が明らかにされた。さらに、その地震前応力場から期待される断層面上のすべり方向と、インバージョンによって決定された実際の地震時すべりには一致する部分が多いことが明らかになった。これは地震前の不均質な応力場が地震時のすべりを規定していることを示し、今後の地震動評価に資する結果であると評価できる。

地殻変動：日奈久断層を横断するGNSS繰り返し観測により、地震前後の変位ベクトルが得られた。これによると、変位の空間分布は日奈久断層の地表トレースより西側でパターンが変化しており、すべりがやや西側傾斜の断層面もしくは平行した断層で発生していたことが明らかになった。また、2016年熊本地震後に、8大学10部局が合同して21点のGNSS連続観測からなる余効変動観測を実施した。これらを解析した結果、布田川断層帯周辺の多くの観測点において、前震と本震の単純な2枚の断層面でのアフタースリップのみでは説明できない余効変動がとらえられていたことが明らかとなった。一方、日奈久断層帯周辺の観測点では、前述の単純なアフタースリップを仮定することにより、その余効変動がほぼ説明できることが示された（九州大[課題番号：2201]）。

一方、一連の地震に伴う地殻変動が、GNSS連続観測、緊急GNSS観測およびSAR干渉解析によりとらえられた。平成28年（2016年）熊本地震の前震および本震（4月14日M6.5、4月15日M6.4、4月16日M7.3）による地殻変動がGNSS連続観測によりとらえられたほか、4月18日M5.8熊本県阿蘇地方、4月29日M4.5大分県中部の地震に伴うわずかな地殻変動も検出された。SAR干渉解析によっても4月14日M6.5および4月16日M7.3の地震に伴う大規模な地殻変動の空間分布がとらえられた。これらのSARおよびGNSS連続観測で観測された地殻変動から、4月14日Mj6.5および4月15日Mj6.4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Mj7.3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。布田川断層帯では北西傾斜の断層面とその東側延長に南東傾斜の断層面、日奈久断層帯では北西傾斜の断層面で、それぞれ右横ずれ的な断層運動が生じたと推定された。また、一連の地震に伴った余効変動も観測された。震源域近傍では地震時と若干異なる変動を示す観測点があるが、その他は地震時とほぼ同じ変動パターンが観測されている。また地震後90日程度は急激な変動が続いたが、その後はゆっくりとした変動が継続した。（国土地理院[課題番号：6001]）。

速度構造：合同地震観測によって得られたデータを用いて、地震波速度DDトモグラフィ法による構造解析が実施された。その結果、熊本地震の余震活動や大きなすべりが地震波の高速域で発生していたことが明らかとなった（図2）。一方、阿蘇火山周辺域には低速度域が分布していて、地震時すべりとの関係が示唆された。

阿蘇カルデラ周辺観測点で得られた遠地地震波形の RF 解析から、カルデラの地殻～上部マントルの S 波速度構造が決定された。その結果、中央火口丘の下、8～15km の深さに S 波低速度領域（S 波速度は最小で 2.2km/s）が存在することが明らかになった。これは DD トモグラフィ法で決定された低速域とほぼ同様の位置にある。さらに、この RF 解析により、阿蘇カルデラ西部の 15～23km の深さに別の低速度層が見いだされた。この領域では、余震の発生深度が東側に比べて浅くなっている。このため、この低速度層の存在や布田川断層帯東縁の構造と、地震発生との関係を明らかにしていくことが今後重要であると考えられる（九州大[課題番号：2201]）。

・東北地方の地殻応答

東北地方太平洋沖地震後の地殻変動が継続している今期計画の研究期間は、その現象の詳細を観測によってとらえることで、定常的な地殻変動下では決定しづらいレオロジー構造を推定しえる重要な機会であると考えられる。このことをふまえ、今年度においても、地震・GNSS 観測を実施して変動場の把握を継続する一方で、地震発生直後から現在に至る時間的変動についての議論を展開した。また、現有のデータや物質科学的条件から地殻変動のシミュレーションを行い、不均一なひずみ速度分布を説明するモデルの検討が進められた。

東北沖地震後に発生した内陸地震群について、稠密地震観測を実施し、定常観測網だけでは推定できない小さな地震についてもメカニズム解を推定し、応力テンソルインバージョンにより、東北沖地震後の応力場の時間変化について検討を行った。それぞれの地震群について、東北沖地震直後と約 4 年半経過した後での応力場が概ね同じであったことが確認できた（図 3）。これは、地震発生直後から約 4 年半の期間では地殻応力状態があまり変化しなかったことを示すものであり、今後どのように推移していくのかをモニタリングすることが必須である（東北大[課題番号：1203]）。また、秋田県北部、南部地域での誘発地震活動には時空間的に消長が認められたが、その活動の消長が東北地方太平洋沖地震発生時とその後の応力変化によって引き起こされたとは考えづらい。従って、一つの可能性として、誘発地震は流体の存在による地殻強度の低下によって発生し、地震活動の時空間変化は流体分布の時空間変化を反映するという考えが提出された（弘前大[課題番号：1101]）。

東北地方における 3 次元レオロジーモデル構築に向けて複数の課題（東北大[課題番号：1203, 1204]、東大地震研[課題番号：1408]、京都大学[課題番号：1905]）が連携して、研究を進めている。今年度は、

1. 稠密な GPS 観測網により余効変動の時空間変化を把握するデータを蓄積すると同時に、GNSS データのクラスタ解析によって東北地殻において脊梁を境にしたブロック構造を持つことが示唆された。
2. 臨時地震・電磁気観測により、新潟ーいわき測線下では深さ 5–10km の地震発生帯に高速度・高比抵抗層が存在し、その下部に低速度・低比抵抗層が分布していることが明らかになった。
3. ハイブリッド重力観測により余効変動中の上下変動と質量移動を把握することが可能となった。

これらの結果および従来得られている結果を基に、東北日本弧内陸の歪を説明するレオロジー構造モデルの構築を進めた。とくに、2 次元沈み込み帯熱対流モデル(Horiuchi and Iwamori, 2016、京都大学[課題番号：1905])に基づいて、余効変動を再現するモデルが提案された。これらは、物質科学的情報と地震波速度構造から推定される物質情報をもとに客観的にモデル化されたものであり、それが実際に観測された余効変動をある程度再現するものであることから、きわめて重要な成果であると考えられる（図 4）。（東北大[課題番号：1203, 1204]、京都大学[課題番号：1905]）

このほか、新潟県佐渡市ー阿賀町における GNSS 繰り返し観測から、新潟県周辺では東北地方太平洋沖地震の余効変動により、地震直後は東西方向の伸張が卓越していたが、時間と共に伸張は小さくなってきていること、2015 年 10 月～2016 年 10 月の 1 年間では、一部の場所において北西ー南東方向の短縮が卓越し、面積歪で短縮に転じている場所もあることが分かった（国土地理院[課題番号：6001]）。

・その他の内陸地震活動域での応力場、ひずみ速度場、地震発生場の研究

地殻構造と地震発生場

活断層の分布や内陸大地震、また定常的な地震活動がどのような物理的要因によって支配されているかを明らかにするために、地下構造と応力場の関係を調べ、モデル化することが重要である。昨年度までに山陰地方の地震帯における浅部の3次元地震波速度構造、地震メカニズム解、電気比抵抗構造等の解析から、地震帯直下の下部地殻内の「やわらかい」領域におけるゆっくりすべりが直上の地震発生域へ応力集中をもたらすことや、2000年鳥取県西部地震や1978年の三瓶山の地震(M6.1)などの余震域の両端における応力緩和の可能性が示されていた。今年度は、さらに、下部地殻の低速度域の幅が深さ18kmにおいては深さ25kmよりも狭く限られていることが明らかになった。このような低速度域の幅の変化が、応力場の回転や応力集中をもたらす可能性が示された。これは、応力載荷メカニズムを検討するうえで考慮すべき重要な成果である。(京都大学[課題番号:1907])

応力場

2000年鳥取県西部地震域での稠密地震観測データの整備を行い、震源断層周辺で発生した余震約4000イベントの発震機構解データをもとに本震断層周辺の主応力軸の空間分布を求めた。その結果、余震域の大部分では、この地域の広域応力場と整合的な北西-南東方向の水平最大応力軸が推定された一方で、余震域南端では東西方向の水平最大圧縮応力軸が推定された。さらに、本震断層面と余震分布との関係について詳細に調べた結果、余震は本震断層面から鉛直に1.0~1.5kmの幅で分布し、火山の活動に伴う現象と比較しても、断層露頭観察から得られた断層破碎帯の幅や流体拡散により引き起こされたと考えられている箱根火山の群発地震の震源分布幅よりも有意に広く分布していることが分かった。また、余震メカニズム解の節面での本震すべりによる静的応力変化(Δ CFF)を求めた結果、本震断層周辺の9割近くの余震が正の Δ CFFを持つことが分かった(図5)。以上の結果から、余震は本震断層の再破壊ではなくほとんどが本震断層の周辺で独立して起きている現象であること、余震は断層破碎帯や群発地震の震源分布より広い幅の領域で起きていること、余震分布の幅が本震の破壊により生じた静的応力変化にコントロールされていることが分かった。この結果は、断層破壊によって生じた応力変化が余震を引き起こす主要因になっていることを示唆し、また、こうした情報は今後余震データを用いて断層周辺の応力場を議論する上で重要となる(京大防災研[課題番号:1905])。

関東地方については、文部科学省活断層の地域評価(関東地域)の評価範囲に合わせるため、解析領域を少し広げ、322個の発震機構解を追加した。これにより関東地域の地殻応力場が一通り完成した。これらの情報の地殻応力場データベース(<https://gbank.gsj.jp/crstress/>)への登録は、結果を最終確認した上で、次年度の早い時期に達成できる見込みである。

山梨県北東部において約2年間にわたって行われた臨時観測のデータを用いて同地域での応力場が求められた。その結果、南北約40km、東西約30kmの調査地域において、5つの応力区に分かれることが明らかになった。この応力区境界の一部には活断層と構造線が分布する。

震源域の応力状態とそこで発生する地震の発生様式を調査するため、茨城県北部・福島県浜通り地域における地震を重点的に調査した。詳細な解析によってM3級の地震の震源スペクトルが標準的な ω^2 モデルから明確に外れる地震が多数発生していることが明らかとなった(Uchide and Imanishi, 2016)。国内の他地域における地震についても同様の傾向が見いだされた。 ω^2 モデルは小地震の応力降下量を見積もる際に仮定されるモデルであるので、今後、より現実的なモデルを仮定することで、小地震の応力降下量の見積もりが正され、その背景にある応力状態や断層強度の情報が適切に引き出されることが期待される(産総研[課題番号:5008])。

御嶽山においては、VTイベントのメカニズム解と御嶽山周辺域の広域応力場との関係から、山頂直下の局所応力場の時間変化をスカラー量により定量的に評価する手法が開発された(Terakawa et al., 2016)。同法の

適用例については、後の地震火山相互作用の項目のところで記述する。

変形場

GNSS データを用いて、跡津川断層近傍における東北地方太平洋沖地震前・地震時・地震後の地殻変動パターンを求め、地震前・地震後とも跡津川断層およびその東西両端の火山地域に歪速度が集中していることが明らかとなった。弾性歪を示すものと思われる地震時の歪は、地震前および地震後の歪速度場と全く異なる空間パターンを呈する(図6)。地震前・地震後に見られる歪速度の局在域では非弾性歪が進行していることが示唆される。次に、地震前と地震後を比較すると大局的には良く似ている。このことは、東北沖地震(および余効変動)によって日本列島全体の歪速度が大きく変わっても、跡津川断層近傍の非弾性変形は変わらずに進行しており、本質的にはその変形が長い時間スケールで蓄積した絶対応力により駆動されていることが示唆される(京大防災研[課題番号: 1907])。

また、鳥取県中部地震、茨城県北部の地震、新潟-神戸ひずみ集中帯、長野県北部の地震などの地域において、GNSS 連続観測およびALOS-2衛星によるSAR干渉画像を用いた地殻変動の検出が行われた。データを複合的に用いることによって、それぞれの地震時および地震後の断層上の不均質なすべりの検出に成功した(国土地理院[課題番号: 6001])。

断層の詳細構造

地震の震源分布からの断層形状の推定について、稠密な地震観測データ、手法の高度化などにより大量のイベントが検出され、より詳細な形状が明らかにされるようになってきた。昨年度においては茨城県北部における詳細かつ複雑な断層形状が明らかにされたが、さらに他地域でもその複雑な形状が検出された。

熊本地震をひきおこした断層の詳細な形状についてはすでに述べたが、昨年度の成果としてあげられていた2011年東北沖地震後に誘発された仙台大倉における移動性の群発地震活動について、気象庁一元化カタログデータに加えて、波形相関およびクロススペクトル法による到達時刻差データにDouble-Difference法を適用した再決定震源を得た。その震源は、複数の面状に分布し、その面の方向はメカニズム解の片方の節面の方向とほぼ一致した。この方向は広域応力場から見て想定される方向と異なるため、その面の摩擦強度が著しく低下している必要性が指摘された。震源の移動は流体拡散に伴う間隙水圧の増加で説明されていたが、摩擦強度の低下も同様に間隙水圧の増加により説明可能であろう。(東北大[課題番号: 1203])。

プレート間相対運動の分配の推定

南海トラフにおける固着と滑りや東北日本と西南日本間の東西圧縮、内陸活断層におけるすべり相互作用を考慮して、西南日本内陸における応力場の空間変化や内陸活断層におけるクーロン応力が計算された。そのクーロン応力の空間分布特性から、南海トラフ巨大地震と西南日本内陸地震の活発化・静穏化の因果関係を解明しようとする研究が実施されている。昨年度に引き続き、実データを整合的に説明するような断層ジオメトリを考え、ブロック断層モデルを用いて地殻変動のモデル化を行う研究が継続された。陸上GNSSデータに加えて、新たに海底地殻変動データ(GPS/A)データを用い、ブロック断層モデルの解析領域やジオメトリに改良を加えた結果、アムールプレートとフィリピン海プレート間の相対運動が、主に4つの変動帯でまかなわれており、日本海~朝鮮半島、山陰ひずみ集中帯、中央構造線~新潟-神戸ひずみ集中帯、南海トラフでの運動速度は、概ね1:1:2:7の割合となっていることが推定された。このように、内陸域の変動帯もプレート相対運動の解消に大きな役割を果たしていることが明らかとなった(京大防災研[課題番号: 1907])。

応力からとらえた地震火山相互作用

御嶽山の火山活動と周辺域の地震活動との相互作用を調べることを目的として、前述した局所応力場の時間変動を定量的に評価する手法を、御嶽山南東麓の群発地震活動域へ適用した。2014年8月から2015年3月までのVTイベントデータから、噴火前の約2週間には火山活動の活発化により広域応力場を乱す東西引張の応力変動場が形成されていたことや、噴火後は広域応力場に支配されて地殻が収縮する過程が進行することなどが示された。このことは、山頂直下の局所応力場を通じて、火山の状態が捉えられる可能性を示唆する。今年度においても、御嶽山周辺域での局所応力場の時間変化モニターを継続した(Terakawa et al., in prep.)。その結果、2014年の噴火以降に有意な応力変動場が形成された可能性がある時期は、2015年1~2月、2015年10~11月、2016年1月~9月頃であると考えられた(京大防災研[課題番号:1907])。

地殻強度低下メカニズム

地震メカニズムトモグラフィ法(Terakawa et al., 2010, 2014)により、御嶽山周辺域の間隙流体圧分布を調べた。名古屋大学の定常地震観測で得られた地震のメカニズム解(2012年5月~2014年7月, $M > 1$)から推定された解像度2-5km程度の広域応力場(Terakawa et al., 2016)を用いて、Terakawa et al. (2013)と同じデータセットから間隙流体圧場を推定した。その結果、間隙流体圧のレベルが静水圧状態を10-30 MPa程度上回るという結果が得られた。また、基にした応力場の空間分解能の違いによる間隙流体圧場の推定結果への影響を調べ(Terakawa et al., in prep.)、より高解像度の応力場を基にした結果の方が高い信頼性を持つことがわかった(京都大学[課題番号:1907])。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 地震現象のモデル化

ア) 構造共通モデルの構築

構造共通モデル(コミュニティモデル)は、シミュレーション研究などでの活用をめざし、従来までに得られているさまざまな情報から作成される統一的な構造モデルである。既往の成果を可能な限り収集・整理し、下記の6つの要素についてのデジタルモデル(grid データ)の構築を進めた(地震研[課題番号:1505])。

- (1) 地形・海溝軸モデルの構築
- (2) プレート境界モデルの構築
- (3) 日本列島及びその周辺の震源断層モデルの構築
- (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
- (5) リソスフェア・アセノスフェア境界の構築
- (6) 日本列島下の岩石モデル・レオロジーモデルの構築

1. 地形・海溝軸モデルの構築

昨年度から継続して実施しているモホ面モデルでは、各プレート境界を明確に特定、数値化する必要がある。本年度は、フィリピン海プレート西縁部のマニラ海溝及びフィリピン海溝を対象とするモデルを海底地形データから求めた。(地震研[課題番号:1505])。

2. プレート境界モデル

日本列島周辺においては、多種類かつ高密度な地球物理的観測とその解析が行われており、上記の広域モデルより高精度にプレート境界位置が求められている。昨年度までに、当該範囲における構造探査・地震波トモグラフィ解析等の既往成果(59論文)をコンパイルし、自然地震に基づく広域モデル(base model)を修正する形でプレート境界モデル(regional model)を構築した。本年度は、特にフィリピン海プレート東部に焦点を

当て、既往の探査データ、地震波トモグラフィーの結果を再吟味して、太平洋プレート接合部までの形状モデルの試作を行った（地震研[課題番号：1505]）。

3. 日本列島及びその周辺のマホ面及び震源断層モデルの構築

日本列島及びその周辺域のマホ面形状のモデル化のため、日本列島直下で提出されているマホ面構造と、広域的なマホ面構造（Crust 1.0 (Laske et al., 2012)）を接続したモデルを試作した。更に High-net による地震波トモグラフィーの成果を用いて、地殻下部から上部マントルの地震波速度の変化について検討した。その結果、P 波速度の 7.2 km/s あたりが、P 波速度の変化が大きく、かつ制御震源によるマホ面とよく一致することが明らかになった。このためマホ面に類似した構造として、7.2 km/s 等速度面を用いることにした。また、九州地域の震源断層モデルを作成するとともに、既存の地下構造データを基に、関東地域の震源断層モデルを更新した（地震研[課題番号：1505]）。

4. リソスフェア・アセノスフェア境界の構築

日本海におけるリソスフェア・アセノスフェア境界（LAB）モデルをめざした情報収集を引き続き実施した。2001 年から 2004 年にかけて、日本海大和海盆で実施された広帯域海底地震計による長期地震観測では、深部構造が求められていた。また、2013 年から、文部科学省委託研究により、同じく大和海盆で、LAB を求めるための長期広帯域海底地震観測が実施されている。本年度は、2015 年に大和海盆に設置した長期観測型海底地震計の回収作業が実施され、大和海盆における全観測が終了した。解析の暫定的な結果では、実体波トモグラフィーにより、大和海盆南部において、深さ約 65km から、約 90km までの低速領域がイメージされた。レーンバー関数解析からは、深さ 70km 程度から深部を低速とする構造が観測波形を比較的良く説明する。その低速層の上面が LAB となっている可能性が高く、今後解析を継続する予定である（地震研[課題番号：1505]）。

イ) 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

断層滑りの物理モデル構築のためには断層周辺の応力や強度の振る舞いを知る必要がある。本年度は、実験および観測・観察においてこれらの基本的な挙動の解明が進展した。

電気伝導度と物性等の関係解明

地震波速度・電気伝導度統合インバージョンによる流体分布やその応力場との関係性の解明を目指して、含水岩石の電気伝導度を実験と理論の両面から研究した。クラック密度の増加に伴う電気伝導度の増加は、クラック密度 0.1 を境にして大きく変化している。クラック密度 0.1 以下では緩やかな増加、それ以上では急激な増加が見られる。X 線 CT 観察により、岩石試料内のクラックは主として開いた粒界であることが分かっている (Watanabe and Higuchi, 2015) ため、立方体粒子の集合を考え、どれだけの割合の粒界が開くと連結した経路が形成されるのか、数値実験を行った。開いた粒界が全粒界の 20%を超えると、系全体に渡る連結した経路が形成される。この閾値をクラック密度に換算すると、0.1 になる。したがって、クラック密度 0.1 以上での急激な電気伝導度の増加は、クラック（開いた粒界）のパーコレーションによるものと考えられる。地殻内で観測されている電気伝導度の大きな空間変化は、地殻内のクラック密度がパーコレーション閾値付近にあることを意味している可能性がある。（京大防災研[課題番号：1905]）。

地殻流体の実態の把握

蛇紋岩化した前弧マントルウェッジの弾性波速度は、含水相として主に蛇紋石 (Antigorite) のみを想定し解釈されてきた (e. g., Reynard, 2007)。しかし、実際に高温高压での加水反応実験を行った結果、かんらん

石より Si に富む輝石の反応性が高いため、蛇紋石より Si に富む滑石も同時に生成することが分かった（最大で蛇紋石と同量）。実験結果を元に、含水鉱物として滑石を含む場合の弾性波速度を計算した結果（VRH 平均）は、含水化の程度が同じでも、蛇紋石を含む場合より V_p と V_s の低下量は約 1/3 にとどまり、また V_p/V_s は無水の場合とほとんど変わらない。このことは、観測で V_p や V_s の低下量が小さく、また V_p/V_s が大きくないと推定された場所でも、含水化が進んでいる可能性を示している。そのような特徴が見つかる場所では、摩擦強度が低い滑石の存在により弱화가起っている可能性がある（Hirauchi et al., 2016）ため、速度構造から岩石の性質を推定するには注意が必要である。

一方、実験により前弧マントルウェッジの蛇紋岩化速度を求め、それに基づき、スラブからマントルウェッジに供給された水が地表に湧出してくる際の条件について検討を行った（Nakatani and Nakamura, 2016）。その結果、四国やカスケードのような温かい沈み込み帯では反応速度が速いので、前弧マントルが十分に飽和してから水が湧出してくるのに対して、九州やコスタリカのように中間的な温度の沈み込み帯では反応速度が比較的遅いことなどから、マントルによる吸水が遅くて水に未飽和なマントルを通過して水が湧出している可能性が高いことが分かった。このことは、温かい沈み込み帯であるにもかかわらず、トモグラフィーの結果が前弧マントルの含水鉱物化を示さない場合には、流体はスラブ・マントルウェッジ境界にトラップされている（e.g., Seno, 2005）可能性が高いことを示しており、そのような場所では間隙圧が高くて深部低周波微動が起りやすい（Nakajima and Hasegawa, 2016）という解釈を支持する。（東北大[課題番号：1204]）。

地熱流体と内陸地熱誘発地震

断層での強度低下は高間隙水圧の流体が貫入することによって起こると考えられるが、流体圧を高めるための不透水層や流体の局在するメカニズムを明らかにする必要があった。今年度は岩石-流体相互作用による、岩石の溶解と析出による地殻の透水-不透水層境界の形成についての実験的検証を行った。その結果、350 °C 以下でゆるやかにシリカの沈殿が進行するのに対して、350 °C の温度付近では溶解度の急激な上昇が起こることが確かめられ、350 °C 付近での流体貯留スポットの形成メカニズムが示唆された。さらにその下部領域で 400 °C 前後になるとシリカ溶解度は急激に低下し、沈殿による不透水層形成の可能性が指摘された（図 7）（東北大[課題番号：1204]）。

断層周辺の流体挙動

野島断層におけるこれまでの注水実験（1800m 深度および 540m 深度）やアクロス連続運転データの解析を進め、断層近傍岩盤の透水係数が、1997 年から 2003 年頃にかけて急速に 44% まで低下したことが推定された。また、アクロス震源の連続運転を今年度行ない、従来の結果と統一的に解析した結果、長期的には、断層近傍でのクラック密度の減少による地震波速度の増加（強度回復）を示唆する結果が得られた（京大防災研[課題番号：1906]）。

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

内陸地震研究を進める中で得られた情報を即時予測手法の高度化にフィードバックすることは、きわめて重要である。まず、昨年度に引き続いて、輻射伝達理論に基づく Multiple Lapse Time Window 法によって、九州地方の散乱減衰と内部減衰の同時推定を行った。昨年度より使用観測点を増やし、また、解析に用いる地震の条件を吟味するなどした結果、昨年度明らかになった活火山周辺に加え、一部の活断層周辺においても局所的に散乱及び内部減衰が大きいことが明らかとなった。加えて、地震動即時予測においても減衰構造とともに速度構造の影響が予想されることから、走時トモグラフィーを用いた高解像度の速度不均質推定にも着手し

た。

不均質な減衰構造の推定とともに地震動即時予測スキームの拡張も進め、不均質な散乱・減衰構造を取り込んだ計算が行えるようになった。この拡張したプログラムを用いて、平成 28 年熊本地震の一連の活動のうち最大地震(4 月 16 日 1 時 25 分、マグニチュード 7.3) の地震動即時予測シミュレーションを行った。地震発生 10 秒後の震度予測において、震度予測残差の 2 乗平均平方根(RMS) が、不均質構造を取り込むことによって、不均質構造を考慮しない場合に比べて約 10%程度改善されることがわかった。また、予測タイミングがより後になるほど予測残差の RMS の改善度合いが向上することが分かった。これは、リードタイムの長い予測を行う場合には不均質構造を考慮することが必須であることを示している。また、地震動即時予測に不可欠な観測点のサイト特性を補正する時系列フィルタの推定を行い、その成果を論文として公表した(九州大[課題番号: 2935])。

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

レーザー技術を用いた大深度ボアホール観測装置：

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」において開発された、レーザー技術を利用した広帯域地震計および傾斜計に対する機能特性が昨年度までに把握できたことから、今年度は光ベースの大深度ボアホール用地震地殻変動観測装置の設計作業を進めた。

装置は地震計、傾斜計、温度計、歪計より構成される。地震計と傾斜計は板バネとマスを組み合わせた構造をしており、バネ材としてインコネルを用いる。いずれもマスにコーナープリズムを取り付け、その動きを高温用レーザー干渉計ユニットで高精度に計測する。温度計および歪計は光ファイバーグレーティング (FBG) を用いて、温度あるいは歪による光ファイバーの微小伸縮をレーザー吸収波長の変化から計測する。すべての装置は通信波長帯 1.55 μm のレーザー光源で動作できるように構成されていて、長距離伝送や複数のセンサーのネットワーク化に適している。次年度に本機の試作を行い、その特性を実測する予定である(東大地震研[課題番号: 1522])。

精密制御震源システム：

昨年度に発生した、震源装置の振動が異常に大きくなるという障害の原因を調査した結果、震源基礎部分と地盤との間にせん断滑りが生じていることによることが判明し、平成 27 年度末に石英砂を用いた補修作業を行った。その対策の結果を検証するために、平成 27 年度末に振動測定実験を行い、本年度はその解析を行った。その結果、補修後、1 割程度は異常振動が減少したものの、補修の十分な効果は認められなかった。このため、新たな方法による基礎の補強を行い、効果の検証のための実験を行う予定である(名大[課題番号: 1705])。

地殻流体の連続化学観測：

地球化学観測のために掘削された跡津川観測井において観測されたデータについて、地下水溶存ガスの組成変化を検討した。ガス組成のうち酸素の成分は大気由来であると考え、標準大気の組成に基づいて、記録された溶存ガス組成から大気の混入成分を差し引いた。この補正データを用いて $\text{N}_2\text{-He-Ar}$ の三成分プロットを行うと、溶存ガスの組成は、マグマ起源ガス・地殻起源ガス・大気起源ガスを端成分とする領域に収まるだけでなく、大気とマンツルの混合線上にも分布し、時間経過とともに混合線上を移動することが認められた。このように、溶存ガスの $\text{N}_2\text{-He-Ar}$ 三成分プロットは、簡便に三つの端成分の混合状態を評価する良い方法であること

がわかった。

次に、マグマ起源ガス・地殻起源ガス・大気起源ガスそれぞれの N_2 -He-Ar 三成分比を定め、地下水溶存ガスの組成から、三つの端成分の混合比の時系列変化を計算した。マグマ起源ガスの組成はわずかな変動を示し、地殻起源ガスと大気起源ガスの比率が主要な変動成分であることが確認された（東大理[課題番号：1401]）。

これまでの課題と今後の展望

これまで、内陸地震による災害軽減に資するために、全国の大学および関係機関は協力して、地震の発生場や発生機構を解明し、発生予測へ向けた観測・研究を順調に進展させた。また、それらの成果を発信し、災害誘因の評価・予測研究への橋渡しするための研究も進められるようになった。

今年度は特に、熊本地震の発生を受けて、その詳細かつ多岐にわたる調査から、いくつかの重要な成果が上がるるとともに問題点が投げかけられた。そのうちのひとつは起震断層の形状である。熊本地震を引き起こした断層群は複雑な形状を持ち、相互作用をしているようにも見られた。また、地震時すべりも地震前応力を反映したすべりを起こしていた。これらの点は地震発生ポテンシャル評価や強震動予測に資するものであるが、M6.5の最大前震とM7.3の本震の連動メカニズムについてはまったく解明が進んでいない。この点については、断層周辺域の応力載荷、変形（応力集中メカニズム）、強度、そして破壊の発生・停止のメカニズムが相互に関連していると考えられる。つまり、地震発生の物理モデルを構築しなければ予測にいたることは難しい。しかしながら、これらを目指して現在の内陸地震発生域においてそれぞれのパラメータを精度よく推定し、結合していく観測研究をより一層推進する必要がある。

地震発生から5年が経過し、地震活動・応力場などの時間的変化が検出しうる段階に至っている2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻応答を対象とした研究に対しては、高精度の観測を継続し、断層強度の時間変化や応力集中機構のモデル化に資するデータを着実に取得していくことが重要である。特に、誘発地震の発生と地殻流体の関係、余効変動場の空間的不均質性への粘弾性構造の影響、震源メカニズムによる応力場の時空間特性、などの内陸地震発生に影響を与えるパラメータの推定につながる観測研究やモデル研究を引き続き実施することが必須である。

内陸地震発生域において、下部地殻をも含めた地殻構造や地殻流体との関係を検討するためのデータの整理を開始し、個別の断層の特徴が速度などの構造パラメータによって規定されている結果も得られつつある。今年度は実験的な研究が進歩し、流体の分布状況を規定する物理化学的条件が実験的にも明らかになってきた。このような実験・観測・シミュレーション研究の融合をさらに推進し、低地震波速度・低比抵抗領域と流体との関係、流体圧と地震活動の関係を定量的に比較していく必要がある。特に大すべり域や余震、誘発地震域と流体圧の関係を統一的に説明できる物理モデルを構築していくことが重要である。また、断層への応力集中機構に大きな役割を果たす地殻の弾性・非弾性構造の検出やモデル化を進め、様々な条件下での地殻の応答特性の解明を進める必要がある。

地震発生ポテンシャルを考える上で重要な地震活動のリニアメントと活断層との空間的、力学的関連性について、地下深部においては詳細なリニアメント構造が明らかになりつつあるが、浅部における形態が重要であるにもかかわらず、地震発生が限られているためにその部分の推定が困難である。今後、検出能力の向上を含めた観測研究も必要であろう。さらに、地震のソースフォルト推定の緻密化を目指した研究が必要である。地震波速度、比抵抗構造、重力、地質等のさまざまなデータを統合し、着実にコミュニティモデルの構築を進めることが重要である。

内陸地震研究からは、詳細な地震波速度・減衰構造や比抵抗構造、応力場などのアウトプットが得られつつある。これらのデータを地震発生予測や災害誘因予測研究で活用するために、内陸地震研究から得られる結果を、予測研究で活用できるよう、関連部会との連携体制を継続することが求められる。また、得られたデータ

や構造を関連研究者が広く活用できる道筋を確立することが急務であろう。

内陸地震発生メカニズムの物理モデル構築には多くの課題が残されているが、それらを解決していく過程で得られたさまざまな情報を整理して発信することが必要である。特に、今年度から進めている、地殻構造と地震活動との関連性に関する研究を深化させるため、統計的手法による地震発生予測研究、災害即時予測研究との連携を強めていくことが必要であろう。

成果リスト

- Abe, Y., T. Ohkura, T. Shibutani, K. Hirahara, S. Yoshikawa, H. Inoue, 2017, Low velocity zones in the crust beneath Aso caldera, Kyushu, Japan, derived from receiver function analyses, *Journal of Geophysical Research*, in press, DOI: 10.1002/2016JB013686
- Aizawa K., H. Asaue, K. Koike, S. Takakura, M. Utsugi, H. Inoue, R. Yoshimura, K. Yamazaki, S. Komatsu, M. Uyeshima, T. Koyama, W. Kanda, T. Shiotani, N. Matsushima, M. Hata, T. Yoshinaga; K. Uchida, Y. Tsukashima, A. Shito, S. Fujita, A. Wakabayashi, K. Tsukamoto, T. Matsushima, M. Miyazaki, K. Kondo, K. Takashima, T. Hashimoto, M. Tamura, S. Matsumoto, Y. Yamashita, M. Nakamoto, and H. Shimizu, 2017, Seismicity controlled by resistivity structure: the 2016 Kumamoto earthquakes, Kyushu Island, Japan. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 4, doi:10.1186/s40623-016-0590-2.
- 相澤 広記, 2016, 火山電磁気観測の進展, *火山*, 61, 2, 345-365.
- 檜山洋平・川元智司・古屋智秋・甲斐玲子・山口和典・鈴木 啓・菅富美男・嵯峨諭, 2017, GEONETによる熊本地震に伴う地殻変動, *国土地理院時報*, 128, 印刷中.
- Aoki, S., Y. Iio, H. Katao, T. Miura, I. Yoneda, M. Sawada, 2016, Three-dimensional Distribution of S-wave Reflectors in the Northern Kinki District, Southwest Japan, *Earth Planets Space*, 68:107, DOI 10.1186/s40623-016-0468-3.
- Freed, A.M., A. Hashima, T.W., Becker, D.A., Okaya, H., Sato, Y., Hatanaka, 2017. Resolving depth-dependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-oki, Japan Earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 459, pp. 279-290.
- 藤牧良太, 2017, 地震観測記録の分析による東北町周辺の地表付近の地震波速度構造の検討, 弘前大学大学院理工学研究科修士論文.
- Fukahata Y. and M. Hashimoto, 2016, Simultaneous estimation of the dip angles and slip distribution on the faults of the 2016 Kumamoto earthquake through a weak nonlinear inversion of InSAR data, *Earth Planets Space*, 68, 204, doi: 10.1186/s40623-016-0580-4.
- 長谷見 晶子・高橋 承之・岡田 知己, 2016, 山形県米沢一福島県会津の誘発地震域における反射波の検出, 日本地球惑星科学連合2016年大会, SSS26-P02.
- Hashima, A., T.W., Becker, A.M., Freed, H., Sato, D.A., Okaya, 2016, Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku earthquake: influence of 3-D elastic structure around Japan, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, pp. DOI: 10.1186/s40623-016-0535-9.
- Hashima, A., H. Sato, and T. Ishiyama, 2016. Simulation for Inland Stress accumulation due to Interseismic Coupling in the Southwest Japan Arc, AGU fall meeting.
- Hashima, A., T.W. Becker, A.M. Freed, H. Sato, D.A. Okaya, H. Suito, H. Yarai, T. Ishiyama, and T. Iwasaki, 2016. Near-field and far-field effects of elastic structure on coseismic deformation of

- the 2011 Tohoku earthquake, Japan, European Geosciences Union General Assembly 2016.
- 橋間昭徳・T.W. Becker・A.M. Freed・佐藤比呂志・D.A. Okaya・水藤尚・矢来博司・松原誠・武田哲也・石山達也・岩崎貴哉, 2016. 粘弾性と余効すべりを考慮した2011年東北沖地震による関東地方の応力変化モデル, 日本地球惑星科学連合 連合大会2016年大会.
- 橋間昭徳・A.M. Freed・T.W. Becker・佐藤比呂志・D.A. Okaya・畑中雄樹, 2016. 2011年東北沖地震後の地殻変動データを用いた粘性構造と余効すべりの推定, 第212回地震予知連絡会.
- Horiuchi, S., and H. Iwamori, 2016, A consistent model for fluid distribution, viscosity distribution, and flow-thermal structure in subduction zone, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 3238-3260, doi:10.1002/2015JB012384.
- Ichimura, T., R. Agata, T. Hori, K. Hirahara, C. Hashimoto, M. Hori, and Y. Fukahata, 2016, An elastic/viscoelastic finite element analysis method for crustal deformation using a 3D island-scale high-fidelity model, *Geophys. J. Int.*, 206, 114-129, doi: 10.1093/gji/ggw123.
- Iidaka, T. Y., Hiramatsu, The Research Group for the Joint Seismic Observations at the Nobi Area, Heterogeneous mantle anisotropy and fluid upwelling: Implication for generation of the 1891 Nobi earthquake, 2016. *Earth, Planets and Space*, 2016 68: 164, DOI: 10.1186/s40623-016-0540-z.
- Iio, Y., 2016. Fluid Path in the lower crust Estimated by S-Wave Reflection Analysis (招待講演), Goldschmidt 2016, .
- Iio, Y., 2016. Fluid Path Below a Seismogenic Fault Estimated by S-Wave Reflection Analysis (招待講演), AOGS 12th Annual meeting, SE10-A006.
- 飯尾能久, 2017. 熊本地震はなぜ起こったのか?、日本の科学者, 52, 6-11.
- 今西和俊・内出崇彦・松下レイケン, 2016, 臨時地震観測による山梨県北東部の微小地震の発震機構解と応力場, 活断層・古地震研究報告, (印刷中)
- 石川正弘, 谷健一郎, 桑谷立, 金丸龍夫, 小林 健太, 2016, 丹沢山地の地質: 伊豆衝突帯のジオダイナミクス. *地質学雑誌* 122, 291-304.
- Ishikawa, M., 2016, Crustal and uppermost mantle lithology of the NE Japan arc from comparison with the measured and calculated rock velocity and observed seismic velocity. *International Symposium on Geofluid3*, 2016年3月 (招待講演)
- 磯部渉, 2017. 稠密アレイを用いたレシーバ関数解析による東北南部前弧域の地殻・マントル構造の研究, 東京大学修士論文.
- 伊藤嘉秋, 2017, 東北地方におけるGNSS速度場のクラスタ解析, 東北大学卒業研究.
- Iwamori, H., K. Yoshida, H. Nakamura, T. Kuwatani, M. Hamada, S. Haraguchi, K. Ueki, 2017, Classification of geochemical data based on multivariate statistical analyses: Complementary roles of cluster, principal component, and independent component analyses, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 10.1002/2016GC006663.
- Iwasaki, T., H. Sato, M. Shinohara, T. Ishiyama & A. Hashima, 2016, Fundamental structure model of island arcs and subducted plates in and around Japan, 17-th SEISMIX International Symposium (International Symposium on Multi-scale Seismic Imaging of the Earth's crust and Upper Mantle), Aviemore, Scotland, May. 15-20.
- 岩崎 貴哉・佐藤 比呂志・篠原 雅尚・石山 達也・橋間 昭徳・程塚 保行・雨宮 由美, 2016, 日本列島基本構造モデルの構築 -海溝軸・プレート境界モデル-, 日本地球惑星科学連合2016大会, 幕張メッセ, 5月22日~26日, SCG63-25, 日本地球惑星科学連合.

- Kawamoto, S., Y. Hiyama, Y. Ohta, and T. Nishimura, 2016, First result from the GEONET real-time analysis system (REGARD): the case of the 2016 Kumamoto earthquakes, *Earth Planets Space*, 68:190, doi:10.1186/s40623-016-0564-4.
- Kitagawa Y. and Y. Kano, 2016, Changes in permeability of the Nojima fault damage zone inferred from repeated water injection experiments. *Earth Planets Space* 68:185 DOI 10.1186/s40623-016-0566-2.
- Kobayashi, T., 2017, Earthquake rupture properties of the 2016 Kumamoto earthquake foreshocks (Mj6.5 and Mj6.4) revealed by conventional and multiple-aperture InSAR, *Earth Planets Space*, 69:7, doi:10.1186/s40623-016-0594-y.
- Kosuga, M., 2016, Fracture induced shear wave splitting in a source area of triggered seismicity by the Tohoku-oki earthquake in northeastern Japan, *Proceedings of the 11th Asian Seismological Commission General Assembly*.
- 小菅正裕, 2017, 東北地方太平洋沖地震後の秋田県内の誘発地震活動の推移, *東北地域災害科学研究*, 53.
- Matsubara, M., H. Sato, T. Ishiyama, A. Van Horne, Configuration of the Moho discontinuity beneath the Japanese Islands derived from three-dimensional seismic tomography, *Tectonophysics*, in press.
- Matsumoto, S., 2016a, Method for estimating the stress field from seismic moment tensor data based on the flow rule in plasticity theory, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL070129.
- Matsumoto, S., T. Nishimura, T. Ohkura, 2016b, Inelastic strain rate in the seismogenic layer of Kyushu Island, Japan, *Earth, Planets and Space*, 68:207, DOI: 10.1186/s40623-016-0584-0
- 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, 2016, 2016 年熊本地震断層周辺の応力場とその変化, *日本地震学会秋季大会*, S21-02, 名古屋, 10月.
- 松島 健・手操 佳子・中尾 茂・清水 洋・松本 聡・中元 真美・内田 和也, 2016, GNSS Campaign観測で捉えられた 2016年熊本地震の地殻変動, *日本地球惑星科学連合2016年大会*, MIS34-P32, 幕張, 5月.
- 村上英記, 2016. 野島断層注水実験に伴う自然電位変動の原因, *日本地球惑星圏科学連合2016年大会*, SEM35-P08, 2016年5月25日 (千葉市) .
- 村上英記, 2013. 2013年野島注水実験で自然電位変動が観測されなかった原因について, *第140回地球電磁気・地球惑星圏学会*, R003-P08, 2016年11月21日 (福岡市) .
- Muto, J., B. Shibazaki, T. Iinuma, Y. Ito, Y. Ohta, S. Miura, and Y. Nakai, 2016, Heterogeneous rheology controlled postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL068113.
- Nagasaki, S., H. Ishibashi, Y. Suwa, A. Yasuda, N. Hokanishi, T. Ohkura, K. Takemura, 2017, Magma reservoir conditions beneath Tsurumi volcano, SW Japan: evidence from amphibole thermobarometry and seismicity, *LITHOS* in press, DOI:10.1016/j.lithos.2017.01.011
- 中東和夫・山下裕亮・山田知朗・望月公廣・塩原肇・篠原雅尚, 2016. 日本海大和海盆下の上部マントル構造, *日本地震学会2016年度秋季大会*, S07-P04.
- Nakahigashi, K., Y. Yamashita, T. Yamada, K. Mochizuki, H. Shiobara, M. Shinohara, 2016. Mantle wedge structure beneath the Yamato Basin, southern part of the Japan Sea revealed by long-term seafloor seismic observations, 2016 American Geophysical Union Fall meeting, T31D-2933.
- Nakamura, H., K. Chiba, Q. Chang, N. Morikawa, K., Kazahaya, H. Iwamori, 2016, Origin of the Arima-type and Associated Spring Waters in the Kinki District, Southwest Japan, *J. Geol. Geophys.*, 5:240. doi:10.4172/2381-8719.1000240.
- 中尾 茂, 松島 健, 田部井 隆雄, 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, GNSSによる2016年熊本地震発生後の地殻変動観測, 日本地球惑星科学連合2016年大会, MIS34-P31, 2016. 幕張, 5月.
- 中尾茂, 松島健, 田部井隆雄, 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, 2016年熊本地震後のGNSSによる余効変動の観測, 日本地震学会2016年秋季大会, S21-17, 名古屋, 10月.
- 中尾茂, 松島健, 田部井隆雄, 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, 2016年熊本地震後のGNSSによる地殻変動の観測, 日本測地学会第126回講演会講演予稿集, 141-142.
- Nakatani, T., and M. Nakamura, 2016, Experimental constraints on the serpentinization rate of fore-arc peridotites: Implications for the upwelling condition of the slab-derived fluid, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, doi:10.1002/2016GC006295.
- 前田裕太・加藤愛太郎・寺川寿子・山中佳子・堀川信一郎・松廣健二郎・奥田隆, 2016. 傾斜波形解析から示唆される御嶽山2014年噴火の浸透率増大モデル, 日本地球惑星科学連合大会.
- 西村卓也, 2016. GNSSデータから見出される日本列島のひずみ集中帯と活断層及び内陸地震, S-5 (招待講演), 日本活断層学会講演会2016年秋季学術大会.
- Nishimura, T., 2016. Interplate coupling strain partitioning and block motions deduced from GNSS and GPS/A data in southwest Japan, AGU 2016 Fall Meeting, T31E-2950.
- Ogiso, M., S. Aoki, and M. Hoshiya, 2016, Real-time seismic intensity prediction using frequency-dependent site amplification factors, *Earth Planets Space*, 68:83, doi: 10.1186/s40623-016-0467-4.
- 小木曾仁・干場充之・志藤あずさ・松本聡, 2016, 減衰構造を取り入れた揺れから揺れの即時予測の試み: 2016年熊本地震, 日本地震学会2016年秋季大会, S21-P08, 2016年10月
- Ogiso, M., M. Hoshiya, A. Shito, and S. Matsumoto, 2016, Real time numerical shake prediction incorporating attenuation structure: a case for the 2016 Kumamoto Earthquake, AGU Fall Meeting, S23A-2746
- 太田雄策, 大園真子, 高橋浩晃, 日野亮太, 2016, キネマティックPPP解析を用いた2016年熊本地震による動的歪み場の特徴, 日本測地学会第126回講演会, 70, 2016年10月, 水沢市文化会館.
- 大槻憲四郎, 2016, 熊本地震前後のb-値の時空間変化, 日本地質学会第123年学術大会講演要旨, R-14-03.
- 大園真子, 高橋浩晃, 2016, GNSSデータに基づく2016年熊本地震の前震・本震時のひずみ・応力変化, 日本測地学会第126回講演会, 71, 2016年10月, 水沢市文化会館
- Okada, T., T. Nakayama, S. Hirahara, S. Hori, T. Sato, and T. Matsuzawa, 2016, Effect of stress and fluid pressure change on shallow earthquake swarm induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake inferred from dense seismic observation, JpGU 2016 Annual Meeting, STT18-03.
- 岡田知己・中山貴史・平原聡・堀修一郎・佐藤俊也・松澤暢・長谷川昭・吉田圭佑・2011年東北地方太平洋沖地震合同余震観測グループ, 2016, 稠密地震観測で求めた, 東北沖地震後の内陸誘発地震のメカニズム解, 日本地震学会2016年度秋季大会, S09-15
- Saito, Z., 2017, 3D magnetotelluric imaging of fluid distribution in a seismogenic region, Miyagi, NE Japan, 東京工業大学修士論文.

- Saito, Z., Y. Ogawa, M. Ichiki, A. Suzuki, Y. Kinoshita, and P. Amatyakul, 2016, 3D magnetotelluric imaging of fluid distribution in a seismogenic region, Miyagi, NE Japan, The 23rd Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, Chiang Mai, Thailand, August 14-20.
- Shibazaki, B., T. Okada, J. Muto, T. Matsumoto, T. Yoshida, and K. Yoshida, 2016, Heterogeneous stress state of island arc crust in northeastern Japan affected by hot mantle fingers, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 3099-3117, doi:10.1002/2015JB012664.
- 清水・他, 2016, 2016年熊本地震の緊急合同地震観測 - 地震活動の特徴と背景 -, 日本地球惑星科学連合2016年大会, MIS34-P02, 2016. 幕張, 5月.
- 志藤あずさ・松本聡・清水洋・2016年熊本地震合同観測グループ, 2016, 2016年熊本地震震源域の3次元地震波速度構造, 日本地震学会2016年秋季大会, S21-P28, 2016年10月
- 志藤あずさ・松本聡・清水洋・2016年熊本地震合同地震観測グループ, 2016, 2016年熊本地震震源域の3次元地震波速度構造, 日本地震学会秋季大会, S21-P28, 10月, 名古屋市.
- 水藤 尚・小林知勝・川元智司・森下 遊, 2015, ひずみ集中帯の地殻変動特性に関する研究(第2年時), 国土地理院調査研究年報(平成28年度), 印刷中.
- Suzuki, A., Y. Ogawa, Z. Saito, M. Ushioada, H. Ichihara, M. Ichiki, and M. Mishina, 2016, 3D fluid distribution and co-, and post-seismic deformation: MT imaging of focal zone of 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, Japan, The 23rd Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, Chiang Mai, Thailand, August 14-20.
- 鈴木真奈美, 2017, メカニズム解による米沢-会津地域の断層面の推定, 山形大学卒業論文, 30pp.
- Takada, Y., K. Katsumata, H. Katao, M. Kosuga, Y. Iio, T. Sagiya, 2016. The Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at the Niigata-Kobe Tectonic Zone. Stress accumulation process in and around the Atotsugawa fault, Central Japan, estimated from focal mechanism analysis. *Tectonophysics* 682, 134-146.
- Takagi, S., and S. Okubo, 2016, Internal deformation caused by a point dislocation in a uniform elastic sphere, *Geophys. J. Int.*, 208, 973-991.
- Takahashi, H., M. Ohzono, K. Minato, N. Okazaki, T. Suzuki, T. Takahashi, F. Akita., 2016. Magma, thermal structure, strain concentration and active seismicity in Kussharo caldera, Hokkaido, Japan, JKASP2016, Fairbanks, AK, USA, 31/05/2016.
- 寺川寿子・加藤愛太郎・前田裕太・山中佳子・堀川信一郎・松廣健二郎・奥田隆, 2016. 応力場の時間変化に基づく御獄火山のモニタリング, 日本地球惑星連合大会, 2016.
- 寺川寿子・山中佳子・前田裕太・堀川信一郎・松廣健二郎・奥田隆, 応力場の時間変化に基づく御獄火山のモニタリング, 日本地震学会2016年秋季大会, S08-P13.
- Terakawa, 2016. Temporal stress changes at Mt. Ontake volcano, *Crustal Dynamics 2016*, A08.
- Tsunomori F., T., Shimodate T., Ide, and H., Tanaka, 2017, Radon concentration distributions in shallow and deep groundwater around the Tachikawa fault zone. *Journal of Environmental Radioactivity*, in press.
- 内田康人, 岡崎紀俊, 山崎新太郎, 高橋浩晃, 音響調査による屈斜路湖の湖底地形・堆積構造と内陸地震の関係について, 日本地震学会講演予稿集, 2016年10月, 名古屋国際会議場
- Uchide, T., H. Horikawa, M. Nakai, R. Matsushita, N. Shigematsu, R. Ando, and K. Imanishi, 2016, The 2016 Kumamoto-Oita earthquake sequence: Aftershock seismicity gap and dynamic triggering in volcanic areas, *Earth Planets Space*, 68, 180, doi:10.1186/s40623-016-0556-4.

- Uchide, T., and K. Imanishi , 2016, Small earthquakes deviate from the omega-square model as revealed by multiple spectral ratio analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 106, 1357-1363, doi:10.1785/0120150322.
- 上芝晴香・三浦優司・宮原伐折羅・仲井博之・本田昌樹・攪上泰亮・山下達也・矢来博司・小林知勝・森下 遊、2017, だいち2号SAR干渉解析による熊本地震に伴う地殻変動の検出, *国土地理院時報*, 128, 印刷中.
- Usui Y., Y. Ogawa, K. Aizawa, W. Kanda, T. Hashimoto, T. Koyama, Y. Yamaya, and T. Kagiya , 2016, Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano revealed by data-space magnetotelluric inversion using unstructured tetrahedral elements. *Geophysical Journal International*, 208 (3), 1359-1372. doi: 10.1093/gji/ggw459.
- Uyeshima, M., M. Ichiki, S. Sakanaka, and M. Tamura, 2016, 2-D analysis of wide-band MT data across southern part of Tohoku, NE Japan, and evaluation of inter-station horizontal component geomagnetic transfer functions, *The 23rd Electromagnetic Induction in the Earth Workshop*, Chiang Mai, Thailand, August 14-20.
- 山下裕亮・松本聡・中元真美・宮崎真大（京大防災研）・松島健・清水洋・飯尾能久・2016 年熊本地震合同地震観測グループ , 2016, 稠密観測データによって再決定された余震分布から推定される平成 28 年（2016 年）熊本地震の断層構造, *日本地震学会秋季大会*, S21-P26, 10月, 名古屋市
- 矢来博司・小林知勝・森下 遊・藤原 智・檜山洋平・川元智司・上芝晴香・三浦優司・宮原伐折羅, 2017, 熊本地震に伴う地殻変動から推定された震源断層モデル, *国土地理院時報*, 128, 印刷中.
- Watanabe, N., T. Numakura, K. Sakaguchi, H. Saishu, A. Okamoto, S. E. Ingebritsen, and N. Tsuchiya, 2017, Potentially exploitable supercritical geothermal resources in the ductile crust, *Nature Geosci.*, doi: 10.1038/NGE02879.

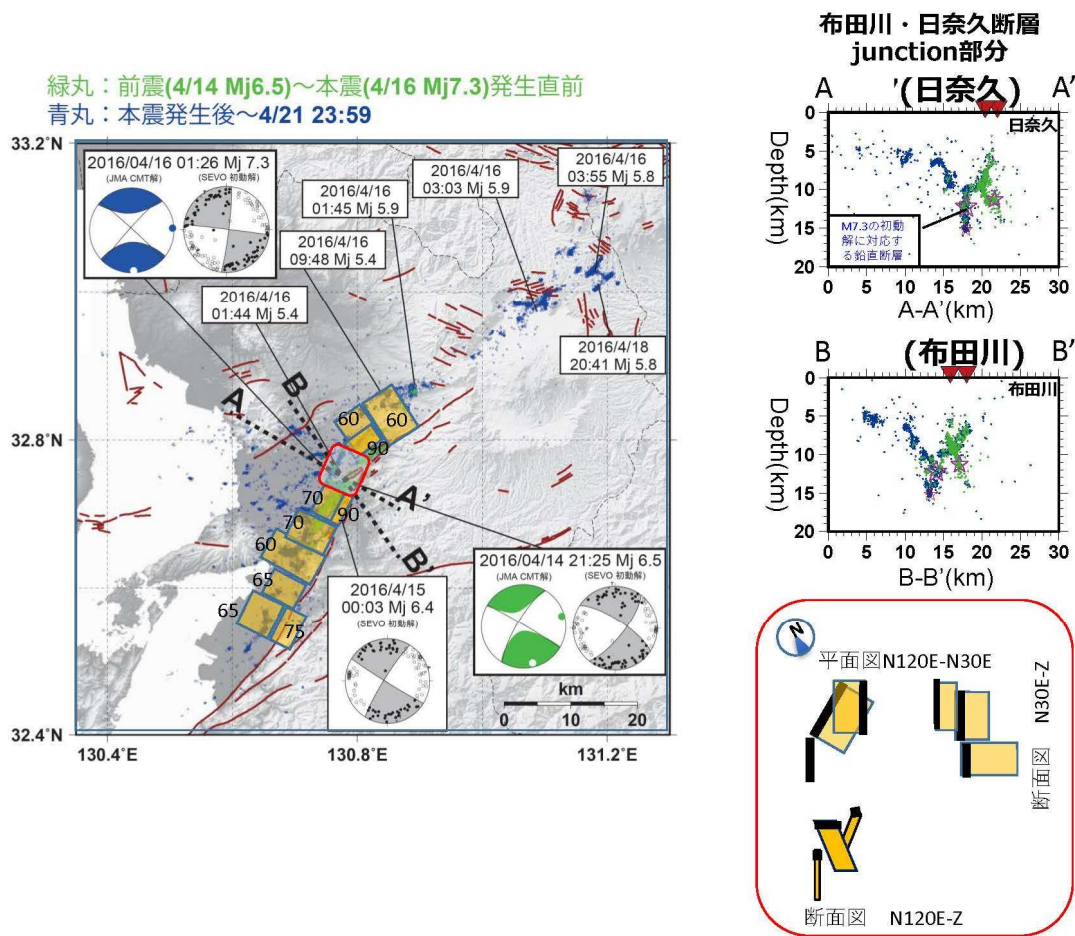


図1. 臨時観測点データを加えた精度の高い余震分布(山下・他, 2016に加筆)。M6.5, M6.4, M7.3の地震のP波初動から得たメカニズム解と気象庁によるM6.5, M7.3の地震のモーメントテンソル解。オレンジの矩形は震源分布から読み取った断層面形状。右に断層接合部の余震分布および読み取った断層形状を示す(九州大[課題番号: 2201])。

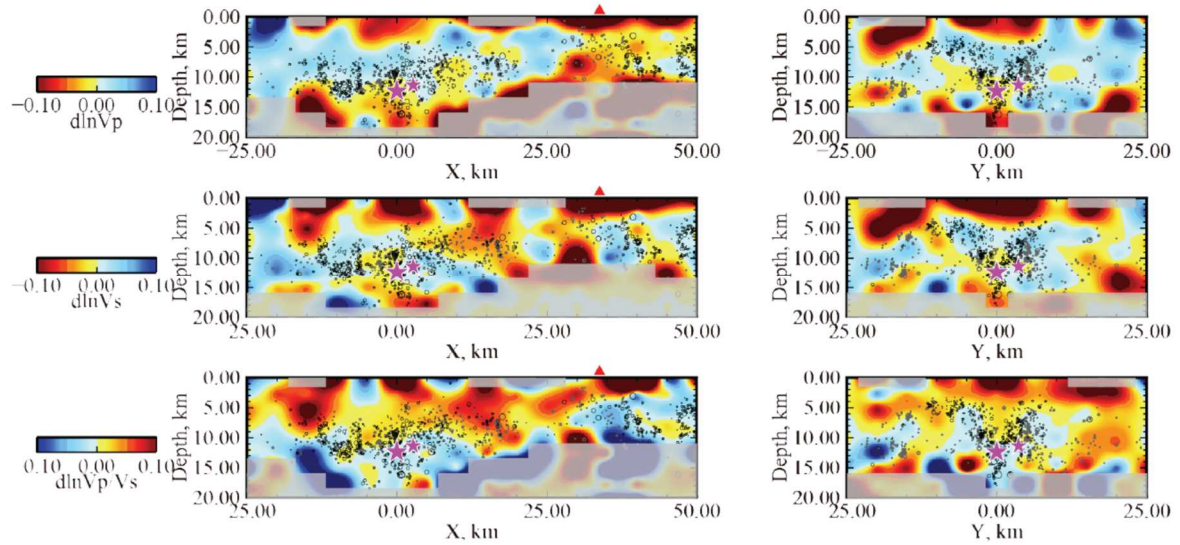


図2. 布田川断層に平行、直行断面での速度構造偏差 (志藤・他、2016)。それぞれ、P波速度偏差(上)、S波速度偏差(中)、Vp/Vs比(下)。暖色(赤色)が低速度を示し、寒色(青色)が高速度を示す。星印は最大前震と本震の位置を、黒○は余震の震源を示す (九州大[課題番号: 2201])。

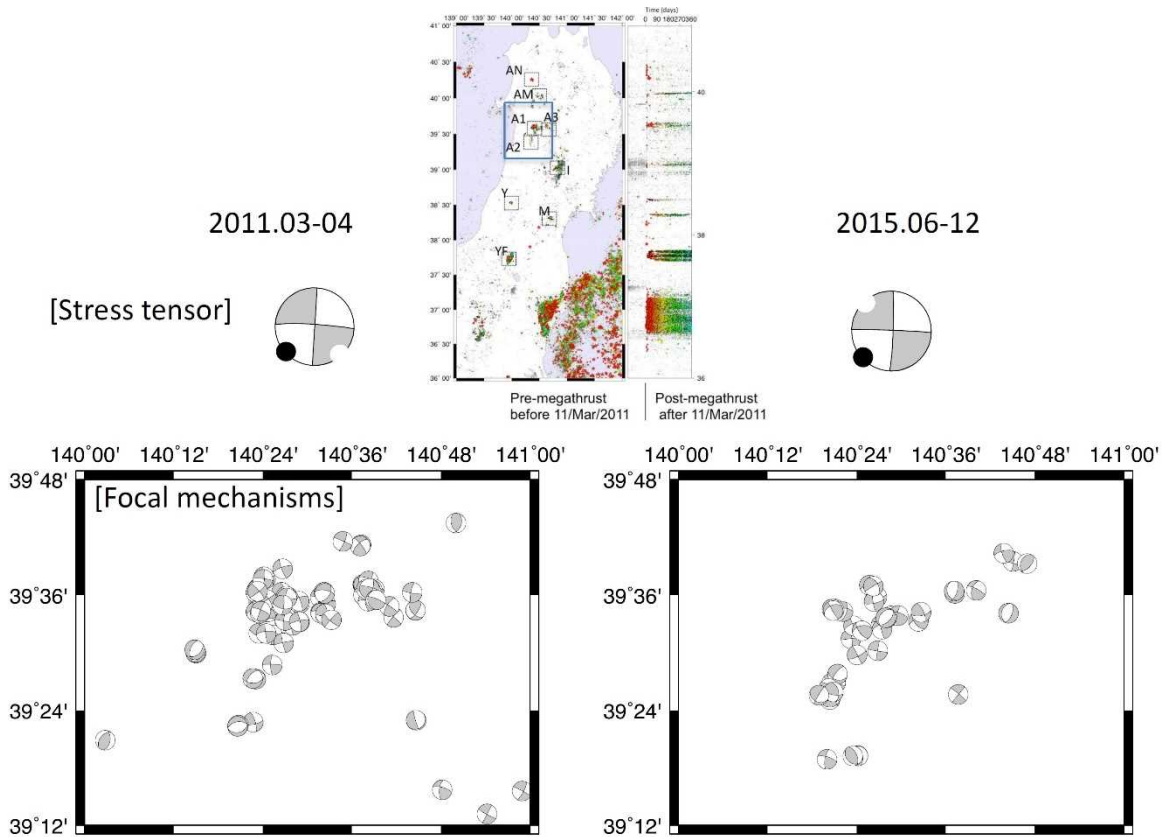


図3. 秋田県南部における東北地方太平洋沖地震発生直後の2011年3月-4月 (左図) と約4.5年後の2015年6月-12月 (右図) に発生した地震のメカニズム解の分布と、これらの地震から推定した応力テンソル (東北大[課題番号: 1203])。

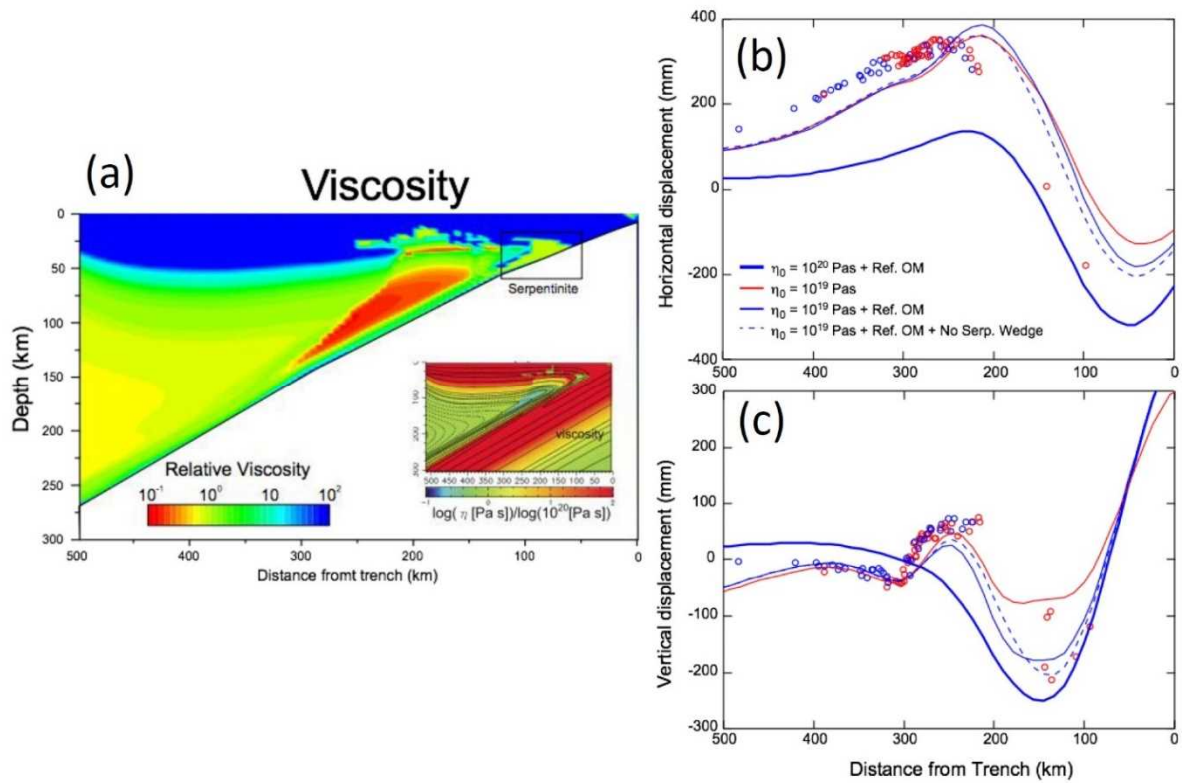


図4. 沈み込み帯熱対流モデルを用いた2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動解析結果。

解析期間は2011年4月23日から12月11日。(a) Horiuchi and Iwamori (2016)による沈み込み帯熱対流モデルに基づき構築した相対粘性分布。(b) 水平変動。(c) 上下変動。青太線は基準粘性を 10^{20} Pa s とし海洋マントル粘性構造としてMuto et al. (2016) での最適解を与えたモデル。赤線、青細線、青破線はいずれも基準粘性を 10^{19} Pa s とし、赤線はHoriuchi and Iwamori (2016)によるモデル、青細線は赤線に対してMuto et al. の海洋マントル粘性構造を与えたモデル、青点線は青細線から前弧の蛇紋岩低粘性体を削除したモデルによる結果を示す(東北大[課題番号: 1203])。

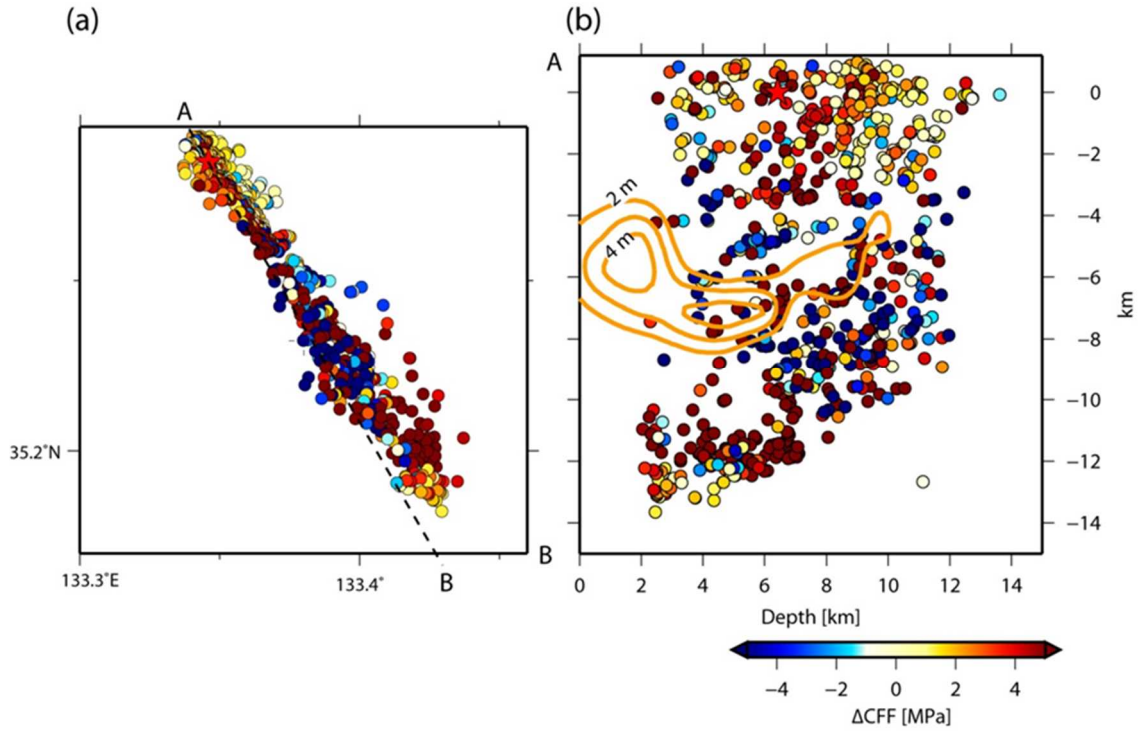


図5. 2000年鳥取県西部地震の余震域南部での余震メカニズム解節面に作用する ΔCFF (Yukutake and Iio, under review)。(a)、(b)はそれぞれ断層面に垂直, 平行な断面を示す。コンターラインはIwata and Sekiguchi (2002)により推定された、本震時の滑り分布を示す(京大防災研[課題番号:1905])。

東北沖地震を挟む跡津川断層近傍の歪・歪速度場 (最大せん断歪)

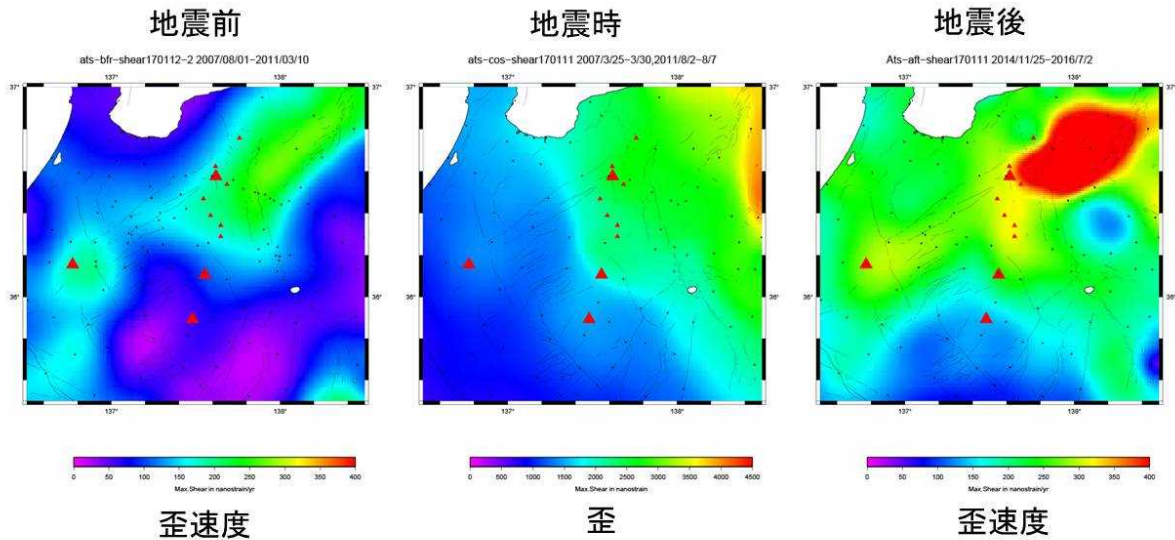


図6. 東北地方太平洋沖地震前・地震時・地震後の跡津川断層近傍の最大せん断歪。左:地震前(歪速度)、中:地震時(歪)、右:地震後(歪速度)。黒点はGPS観測点。黒線は活断層。大三角は主な火山(東から立山、乗鞍、御嶽、白山)。小三角は飛騨山脈(京大防災研[課題番号:1907])。

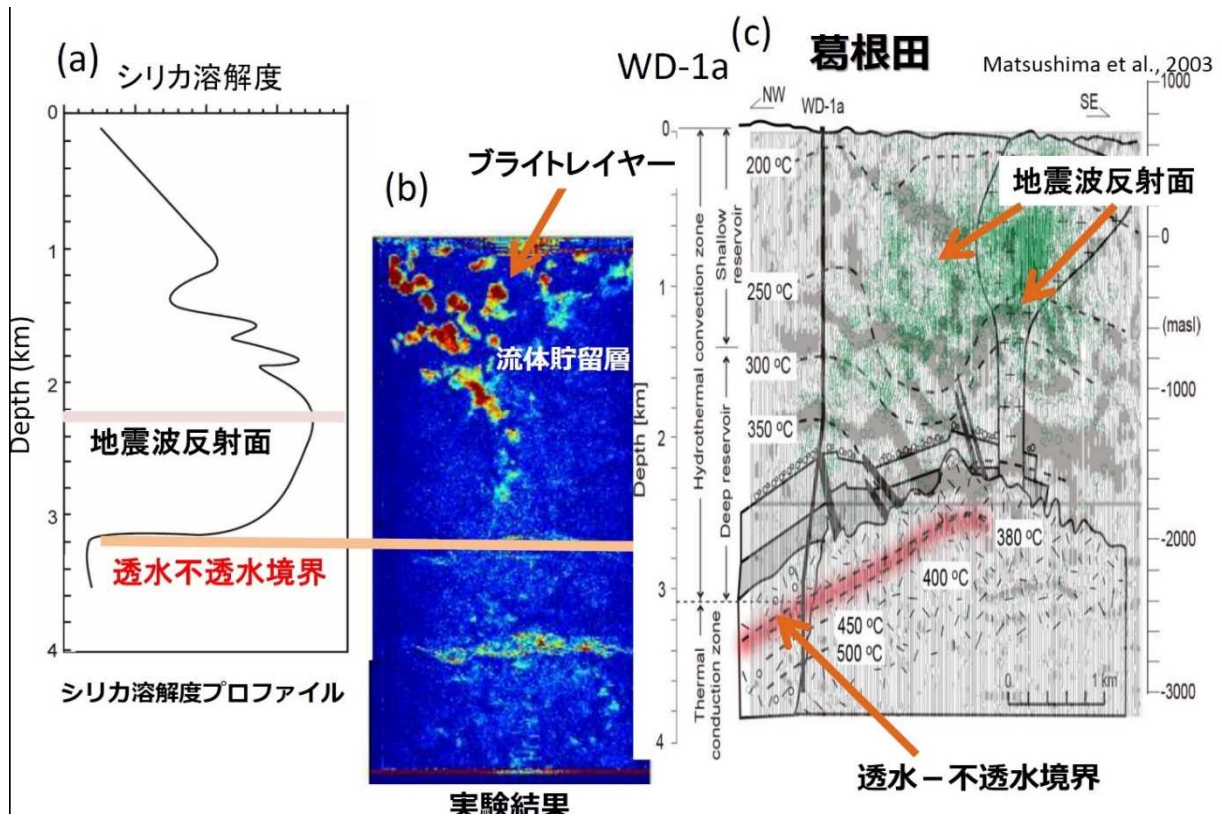


図7. 透水-不透水境界の再現実験結果。(a) 期待される石英の溶解度の深度プロファイル。(b) 実験で再現された流体貯留層と透水-不透水境界。(c) 葛根田における地震波反射面（ブライトレイヤー）と透水-不透水境界。地温勾配が高いため、深さ2 km程度という浅部で超臨界水となるために石英の溶解度が上がり、450 °C付近で急激に溶解度が下がるために沈殿が生じる。このため、深さ2 km付近に流体貯留層が形成され地震波反射面（ブライトレイヤー）となって観測されることになる（東北大[課題番号：1204]）。