

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や断層強度などがあげられる。昨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の理解が進んだ。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。

さらに、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、背景地図の多様化と活断層線および調査地点情報の検索方法の修正を行っていた。

平成 29 年度の成果として、背景地図の多様化については、現在のシステムで表示が可能な「Google Maps」, 「簡易地図」, 「地理院地図」に加えて、地形陰影図や航空写真等を表示させる機能を実装した。これにより、活断層と地形や事物との関係の認識がより容易になることが期待される。活断層線および調査地点情報は、改良を加え、緯度経度情報に基づいて情報が得られるように改良した。（産総研[課題番号：5002]）。

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

A. 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にある。明瞭な地表地震断層を出現させた神城断層地震および熊本地震の調査は、こうした観点からきわめて重要な意味を持つ。平成 29 年度には、熊本地震や神城断層

地震の調査を継続しながら、高解像度DEMデータの活用手法の確立と歴史地震の再検証を行った。

DEMデータの活用手法に関しては、人口集中域でも使用可能な軽量 UAV による空撮画像を用い、SfM-MVS 解析による地形モデルの作成を試みた。得られた地形モデルは、地表踏査による計測結果と一致し、十分な精度が達成されていることが明らかになった。海陸を統合した地形データによる沿岸域の変動地形については、沿岸海底の地形データを可能な限り収集して数値標高モデル (DEM) を生成し、陸上の DEM とあわせ、1 枚の画像で海陸を判読できる統合した地形アナグリフを作成した。その方法に基づいて南西諸島南部の石垣島とその周辺の変動地形を解析した結果、石垣島南東沖で北東―南西方向に延びていると推定されていた活断層に調和的な変動地形を抽出することができた。

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は、糸魚川―静岡構造線活断層帯神城断層中北部、庄内平野等で進められている。

また、地震断層の形状・変位量・変位様式と、甚大な建物被害が発生した領域との関連性について、調査が進められた。2016 年熊本地震では、倒壊などの建物の甚大な被害が偏在し、特に地震断層（＝活断層）から数百メートル以内の範囲で発生したことが特徴の一つとして挙げられていた。この甚大被害の集中要因を明らかにするため、地震断層の分岐・ステップ形状、断層末端部の形状について定性的な検討を行った。その結果、断層の分岐部や末端部に特に甚大被害が集中していたことが明らかにされた。一方、表層地質も被害の増大を大きく規定していることが明らかとなった。（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

内陸地震発生機構解明のためには、地震発生域に載荷される応力とその領域の強度との関係を把握し、推定された応力・強度分布と地震発生の時空間分布との相関を明らかにする必要があるが、現実的にはなかなか容易に達成されることではない。そこでまず、ある領域の地震発生ポテンシャルの把握に向けた研究の推進が必要である。そのためには、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載荷の状況を明らかにし、その応力載荷に対する内陸地殻の弾性・非弾性応答を把握するための観測や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。さらに、個々の内陸地震の発生予測のためには、広域の応力載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それぞれの断層の強度が低下するかを明らかにする必要がある。

昨年度の熊本地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震が発生したことで、日本列島規模の顕著な応力場変化が起きていることは論を待たない。このため、その応力変化が継続しているこの数年間は、現実の観測から、内陸域の応答特性を把握し得る非常に貴重な時期にさしかかっていると考えられる。そのことを念頭において、本年度においても、従来実施してきた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、およびデータ整理が進められた。また、個別の地域において、発生場の推定、それらのモデル化が試みられた。

本部会では、さらに他部会との連携を重視してきた。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。

震源分布を詳細に検討した結果、震源断層の形状が求められた。その結果：1) 最大前震 (M6.5) は東南東傾斜の断層から破壊が始まり、西傾斜の断層へ広がった。2) 本震 (M7.3) は深部の東南東傾斜横ずれ断層から開始し、布田川断層走向と日奈久断層走向の二つの面で大きなすべりを起こした。3) 複数の断層面は複雑に分布している。ことなどが明らかになった。また、余震活動や構造、応力場解析からは：1) 地震時のすべり方向は応力場によって規定されている。2) 地震前の応力場に対して、最適な面で大きなすべりが起こったが、周辺域まですべりが及んだ。3) 大きなすべりは D95 の範囲内で発生している。4) 地震後、活動は下部に拡大し断層の下部延長の存在が示唆された。5) 低比抵抗層が本震の発生に関連がある可能性が明らかになった。これらの結果 (図 1) は、強震動予測の高度化が可能であることを示すと同時に、正しいすべり分布の推定のために、応力場の事前把握が重要であること、適切な断層面形状の設定が必要であることを示す。(九州大[課題番号：2201])。

熊本地震震源域周辺の 80 点のデータを用いて行った比抵抗構造 3 次元解析では、本震時の大きなすべり域の近傍には高比抵抗が存在することが明らかになった。また、熊本地震震源域に低比抵抗体がイメージングされた。深さ 13km では東西 10 km、南北 5 km ほどの広がりをもつ低比抵抗領域が推定され、前震、本震の破壊開始点はこの低比抵抗体の北縁に位置している。余震はこの低比抵抗体を避けるように分布している。深さ 18km では北北東―南南西方向に 50km ほど伸びる低比抵抗体が推定され、先に述べた深部震源域の地震はこの低比抵抗体の東縁で発生している。本震発生や日奈久、布田川断層にわたる地震の運動は深部低比抵抗層が強く関与していることを示唆している。また、熊本地震発生後、震源の西側に面上に拡大していった余震群はすべて高比抵抗領域で発生している。より広域的には、阿蘇山直下にも低比抵抗がイメージングされ、これと、熊本地震震源域の 2 つの低比抵抗体に挟まれた領域で熊本地震本震の破壊が生じたことが示唆された。(九州大[課題番号：2201])

一方、InSAR 解析から余効変動の抽出、余効変動のモデル化を実施した。2 方向の SAR 干渉データを用いることで、地表の準東西、準上下成分を抽出した。布田川断層周辺で西向き及び隆起が、それより西側の宇土区間周辺では東向き及び沈降が検出した。注目すべき点は、地震時に大きく滑った布田川断層を境にして変位の食い違いが見られないことで、断層の南北側とも隆起および西に変位していることが分かった。GNSS データの時系列解析から、余効変動は、地震直後 60 日間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続いている。変動速度は小さいものの、2018 年 2 月現在も継続している。水平二層構造のモデリングから粘性緩和による変動を観測データから取り除き、余効滑りをフォワードモデリングで求めた。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見出された (図 2)。また、粘性緩和による変動は徐々に減衰するものの 10 年後でも年間数 mm の変動が予測されることが分かった。(国土地理院[課題番号：6001])。

・ 東北地方の地殻応答

東北地方太平洋沖地震 (以下、東北沖地震) 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。

東北沖地震後に活発化した内陸地震群について、震源域での応力場を求めた。その結果、現在は地震活動が低下しているものの、応力場は変化しておらず、東北沖地震の影響が未だに残っていると考えられた（図3）。これは、地殻強度や絶対応力の値、その空間変化を知る上できわめて重要な情報であり、今後も応力場の時間変動を継続的に測定する必要がある。

東北沖地震後の1ヶ月後に発生した福島県浜通りの地震（M7.0）震源域の稠密地震観測網で観測された自然地震波形から地殻内のS波反射面のイメージング解析を行った。地震活動域下部に見つかった顕著な2つの反射面群は低速度・高ポアソン比とされる領域の上端に位置するため、地殻内流体の存在を強く示唆し、地震活動は地殻流体によって引き起こされたと考えられる。これは地殻応答が地域によって異なることを示す。（東北大[課題番号：1203]）。

一方、このような地域による地殻応答の違いはGNSS解析によってその領域区分が見出されうることが示されている。東北沖地震前の2010年1月1日から2011年3月8日までの期間の北海道のGNSS速度データに対してクラスタ解析を適用した結果、オホーツクプレートの運動を代表とするクラスタと太平洋プレートとのプレート間カップリングによるプレート内変形の影響を強く受けているクラスタが得られ、クラスタ境界は既存断層系や先行研究によるブロック境界と良い一致が見られた。（東北大[課題番号：1203]）

また、地殻応答に強く関連している粘性構造についての示唆が重力測定から得られている。東北地方の5点及び北海道太平洋岸の3点、及び関東地方2点で、精度1マイクロガル程度の高精度絶対重力測定を実施した。そのうちの仙台、江刺（岩手県）、筑波山について、2011年～2014年に見られていた隆起と重力減少の対応関係が、2014年以降は消失しており、2014年ごろから粘弾性効果が次第に顕著になったことを強く示唆する。2017年5～7月に、東北全域及び北海道の太平洋岸の約60点で、精度10 μ ガル程度のハイブリッド重力観測を実施した結果、2014年を境に空間的な重力変動パターンも大きく変わっていることがわかった。（東北大[課題番号：1203]）

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は、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Barbot et al. (2017) によるプログラムを使用し、Tomita et al. (2017) で報告された2016年までのデータを元に、東北沖地震の余効変動のモデリングを行った。定常粘性の推定のために、Horiuchi and Iwamori (2016) による沈み込み帯のコーナーフローを含む数値計算によって推定された温度構造を用い、カンラン石のべき乗流動則とBurgers レオロジー、および速度強化摩擦則を用いて余効すべりをモデル化した。その結果、本モデルは、水平方向・上下方向ともに余効変動データをよく再現している。

また、不均質レオロジー構造を考慮した地表上下変動のモデル化を通じて、2011年東北沖地震発生前に約100年間続いていた東北日本前弧域の大きな沈降(3-4mm/yr)のメカニズムの解明を試みた。有限要素法を用いて巨大地震サイクルのモデル計算を行った結果、浅部アスペリティの固着が数百年に

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剪断帯における粘弾性緩和が進行し、プレート境界深部のすべり欠損レートが時間とともに増加するという結果が得られた。これは、前弧域での大きな隆起(0.5-1.5m)が、巨大地震サイクル後半にかけての沈降速度増加、巨大地震後50-100年の地震後の粘性剪断帯における粘弾性緩和に律速される長い時定数の余効すべりによって生じる事を示している。(東北大[課題番号:1203,1204])

・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

規模の大きな地震の特性：

鳥取県中部の地震

2016年鳥取県中部の地震の発生を受けて、その断層端の特性を解明することなどを目的として、京大、九大および東大地震研により余震観測を行った(新学術領域「地殻ダイナミクス」との共同研究)。図4は余震域の南端付近におけるP軸およびT軸の方位分布を深さ5km水平面に投影したものである。P軸、T軸とも、推定断層の中央部($X=-0.42$ 付近)を境に、その東西で方位にギャップが見られる。これは、Yukutake et al. (2007)による鳥取県西部地震の南端付近で発見されたものと同様のもので、本震による応力変化と調和的な方位分布となっている。図4左における各P軸の丸印の色はP軸のplungeを示している。推定断層の東側、南端付近に正断層を示すP軸のplungeの大きな余震が集中して起きている。メカニズム解の2つの節面に対する本震のすべりによる応力変化(dCFF)をみると、多くの余震に対してdCFFがプラスの値となっている。これらのことは、鳥取県中部の地震に関しては、単純なすべり分布にも関わらず、余震は、基本的には、本震による応力変化により引き起こされていることを示している。鳥取県西部地震の結果とも調和的である(Yukutake and Iio, 2017)。鳥取県中部の地震に関しては、余震の発生において、間隙水圧による強度低下を考慮しなくても良い可能性を示唆している。

また、本震と同じ横ずれ断層に対するdCFFをみると、断層端で大きな値となっているが、それに対応するような横ずれ型の余震は、その付近では起こっていない。応力変化の極めて大きな断層端において、応力変化と調和的な余震が発生しないことは、断層端において、本震を起こしたような横ずれ型のせん断応力が断層の強度よりかはるかに小さいことを示唆している。これは、断層端において地震前に応力緩和が起こっていたか、あるいは、そもそも応力集中が起こっていなかった可能性が考えられる。いずれにしても、大地震前の応力場の不均一により、来るべき地震のサイズが規定されており、断層端は、せん断応力が小さい特殊な領域である可能性が考えられる。この推定が正しければ、今後、隣接領域で大地震が続いて発生する可能性は極めて低いものと予想される。(京大防災研[課題番号:1907])

鳥取県中部の地震(Mj6.6)について、InSAR, GNSS, 強震計による変位データを用い、地震時及び地震後のすべり分布の推定をおこなった。推定された地震時すべり分布より、すべりの大きな領域は震源の北西側にあり、地表にはすべりが達していないことがわかった。最大すべり量は1.34mであり、地震モーメントはF-net モメントテンソル解(Mw 6.2)とほぼ等しい。

地震後7ヶ月間の余効すべり分布から、余効すべりは震源断層の地震時すべり域の浅部に発生していることがわかった。余効すべり量は最大14cmに達し、深さ6kmより深部では有意なすべりは推定されなかった。余効すべりのモーメントは、 $2.54 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m}$ (Mw 5.54)と推定され、本震の~11%に相当する。地震時すべりと余効すべりが相補的な空間分布をしていることは、余効すべりが本震の応力変化

によって駆動されたことを示していると考えられる。(京大防災研[課題番号：1907])。

カイクウラ地震：

ニュージーランド南島北部で発生した、2016 年カイクウラ地震の本震発生前後で行われた臨時地震観測のデータを使用して、地震の発震機構解から地震前後の応力場や強度を求めた。その結果、本震前後での応力場の主軸方向の変化は大きくなく、日本などで行われた既往研究と比べて差応力が大きい可能性があることがわかった。(東北大[課題番号：1203])。

地殻構造と地震発生場

東北日本：

2008 年岩手・宮城内陸地震の余震には南北圧縮の発震機構解を持つ地震が、余震域の中心付近で発生しており、しかも東傾斜の面状の震源分布を示している。面の走向・傾斜と発震機構解の節面の走向・傾斜がまったく異なるので、この分布は弱帯の分布を表すと考えて、応力場と V_p/V_s 構造を検討したところ、余震域はほとんどが V_p/V_s が 1.70 未満の領域となっているのに対して、このような特異な地震は本震による南北圧縮の差応力増加が 8 MPa 以上で、 V_p/V_s が 1.70 程度の場所で発生していることがわかった(図 5)。東北地方の上部地殻は石英が多くて基本的に V_p/V_s が 1.50–1.70 程度であり、水がクラック状に含まれていると 1.70 以上となると解釈される。(東北大[課題番号：1204])

マグマ生成場については、島弧接合部およびスラブ端での流体・マグマ生成過程に注目し、島弧火山岩の化学・同位体組成からマンツルのマグマ生成場や地殻流体の発生と移動の制約を試みた(Nakamura et al., 2018)。具体的には、中部日本、東北日本、およびその遷移帯の火山で岩石学的・地球化学的研究を行った結果、(1) 関東北部から東北南部にかけて沈み込んだフィリピン海スラブについて、従来、地震学的制約からその北限とされていた境界よりもさらに北の火山からも、フィリピン海スラブ由来と考えられる流体成分が検出された。詳細な検討の結果、フィリピン海スラブの物質学的北限が、地震学的北限よりも 100 km 近く北まで伸びていることが示された。(京大防災研 [課題番号：1905])

中四国：

2014 年度以降、四国地方の大局的な比抵抗構造の地域特性を解明するために、比抵抗調査空白域において経度及び緯度方向に 10 分毎のメッシュを設定し、基盤的比抵抗構造研究を実施している。現在までに得られた MT 応答関数から、determinant impedance を計算し、それらに 1 次元 Occam inversion を適用することで深度別比抵抗分布を推定した。その構造的特徴は、深度 2km では、四国地方の中央構造線をはじめとする顕著な構造線の走向方向とおおむね調和するようにみえる。深度 15km の比抵抗分布は、中央構造線周辺域を境とする相対的な高/低の比抵抗構造の存在を示唆する。深さ 15km 以浅の震央分布との対応をみれば、中央構造線周辺より北側では高比抵抗域と明瞭な対応がみられる。一方、南側は必ずしもそうではなく、分解能をあげた面的な観測を実施する必要がある。また、気象庁の一元化データを用いて推定された下部地殻深度 18km の P 波速度偏差図(津田, 2017)との対応をみれば、低速度域と低比抵抗領域との対応関係が確認された。(京大防災研[課題番号：1907])

九州：

広帯域 MT 観測を、雲仙、霧島山麓、宮崎県の 合計 170 点で実施した。これまでに蓄積してきた広帯域 MT データと併せて九州全域を対象に 1 次元解析した結果、場所によって 4 桁程度、比抵抗値が変化することが明らかになった。1993 年 1 月から 2017 年 12 月までの地震分布と比較すると、顕著な低比抵抗領域では地震の発生頻度は低いが、大崩山花崗岩体など顕著な高比抵抗を示す領域も同様に地

震の発生頻度が低いことが明らかになった。(九州大[課題番号：2201])

応力場

2000 年鳥取県西部地震域での稠密地震観測データを用いて推定された約 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についての評価を行った。その結果、余震域全体でみると空間的に均質な応力場が卓越していた。一方で、本震時に大きな滑りを生じた余震域南部、本震断層南端部では不均質性が大きい。この領域では、応力逆解析法により、本震すべりによる静的応力変化の方向と調和的な応力軸の東西方向への回転が推定された。この領域での応力場の不均質性は、本震断層端での応力集中によってもたらされた可能性がある。(京大防災研[課題番号：1905])。

関東地方において発震機構解をコンパイルし、関東地域の応力マップを作成した。応力マップを作成するには応力テンソルインバージョンを使用することが多いが、今年度は SHmax 方位と応力場のタイプを簡便に推定する方法を検討した。同法によって推定された応力分布の特徴は、応力テンソルインバージョンによる結果と調和的であった。同法は、応力テンソルインバージョン法と比較すると、応力比を推定できない欠点はあるが、断層面の選択をしないで解析が行えるという大きな利点がある。

震源域の応力状態とそこで発生する地震の発生様式の関連性を明らかにするため、複数の地震について調査を進めた。2014 年長野県北部地震については、前震活動の震源特性を詳しく調べたところ、通常地震と異なり、Mw1.5 以下で震源パラメータの相似則が崩れることが明らかとなった(Imanishi and Uchide, 2017)。また、適切な応力場と断層形状を与え、動的破壊シミュレーションにより、本震の破壊過程の再現にも成功した(Ando et al., 2017)。茨城県北部・福島県浜通りにおける地震について、微小地震のモーメントマグニチュード(Mw)と気象庁マグニチュード(Mj)との比較を行った結果、Mj が Mw に比べて系統的に小さいことが見いだされた(Uchide and Imanishi, 2018)。これは、主に地震波形のデジタル変換におけるアンチエイリアシングフィルタに起因すると考えられ、Gutenberg-Richter 則の b 値は、Mj を用いたときに比べて、Mw を用いたときの方が大きくなることが示された。さらに、観測事実に基づいて、Mj と Mw の変換式が定められた。この結果は、地震活動を用いた地震発生予測等の研究に直接影響を与え、より地震の実態に即したパラメータを用いた研究が行えるようになるものである。

2016 年大韓民国慶州(キョンジュ)地震については、韓国地質資源院(KIGAM)と共同研究が実施された(Uchide and Song, GRL, under review)。本震(ML 5.8)と最大前震(ML 5.1)について、強震波形を用いた断層すべりインバージョン解析を行った結果、両者の破壊伝播方向が逆向きであったと推定された。また、応力降下量は、平均で 10 MPa を超える高い値が示された。さらに、余震分布の解析から、両者が平行な 2 枚の断層でそれぞれ発生したことも明らかになった。これらの結果は、雁行配列をした断層における応力集中により、強度の高い断層が破壊された可能性を示唆する。(産総研[課題番号：5008])。

変形場

中部日本：

跡津川断層系において臨時 GNSS 観測を実施し、ALOS 衛星が撮像した SAR 画像の長波長ノイズを GNSS データから得た速度場を用いて補正した上で InSAR 時系列解析を行い、地震間地殻変動を非常に高い

解像度で検出することに成功した(Takada et al., 2018)。変位勾配は跡津川断層系の主要な断層の一つである牛首断層を挟んで大きな勾配を持つことが明らかになった。このように、InSAR と GNSS を組み合わせることで、歪集中帯内部の歪が不均質であることが明らかになってきた。さらにこの時系列解析の妥当性を検証するために、解析領域をさらに東西方向に広げ、歪集中域における総変位量が時間とともにどのように増加したかの検討を行った。その結果、総変位量は、多少のゆらぎはあるものの、時間とともに着実に増加していたことが明らかとなった。このことによって、水蒸気に起因する擾乱の影響を完全には除去しきれていない可能性は残されたものの、確かに地殻変動が検出できていることが検証された。(京大防災研[課題番号：1907])。

北海道：

屈斜路カルデラ周辺において GNSS 観測を実施し、カルデラ周辺の地殻変動速度・ひずみ場の推定を行った。またこの結果に基づいて今後のモデル化に必要な力源等について検討を行った。連続および繰り返し GNSS 観測の結果から、カルデラ内の地殻変動が少なくとも 2013 年から 2016 年までは一定の線形的な変動となっていたことが確認された。従来のグリッドを用いた手法、および三角網を用いた手法から推定したひずみ速度場から、1993-1995 年の膨張イベントおよびその収縮域と一致するカルデラ中心部において、1ppm/yr を超える収縮が捉えられた。また、三角網を利用して速度のデータ補間を行うことで再推定したひずみ分布からは、カルデラ南西部での北北東-南南西から北東-南西方向に右横ずれの軸を持つ 1ppm/yr 以上の大きな最大せん断ひずみの存在が明らかとなった。この地域は、過去に M6 クラスの地震を発生させた領域とも重なるため、捉えたせん断ひずみが弾性的に蓄積されているとすれば、この地域が現在も地震発生ポテンシャルを維持している可能性を示唆する。得られたひずみ場から、今後のモデル化には、これまでに得られたカルデラ下の不均質構造のもとで、プレートの沈み込みに伴う広域の北東-南西方向の短縮に加え、カルデラ内や周辺の火山性の力源の考慮が必要であることを把握することができた。(九州大[課題番号：2201])

九州：

現在の地殻変動状態の長期間にわたる詳細な把握は、応答特性を知る上で重要である。そこで、今年度も GNSS による観測を継続した。九州全域における変位速度場、ひずみ変化の定常状態を調べるため、豊後水道で発生した 2010 年 2 月から 10 月のスローイベントの影響を除いてこれらを計算した。その結果、大分県付近に高い最大せん断ひずみ速度域が分布していることがわかった。昨年度に実施した 2011 年東北地方太平洋地震の地震時の変位速度の空間分布と比較すると、前弧域に位置する大分県付近に高い最大せん断ひずみ速度領域が存在する点が異なっていた。これは、地殻の弾性応答が数年スパンの定常変動と異なることを意味し、今後のモデリングにとって重要な意味を持つと考えられる。(九州大[課題番号：2201])

変形・流動場：

島弧リソスフェアの粘弾性変形を含む流動-変形場の理解は本研究計画における一つの重要な柱である。粘弾性層を含む系で数値計算を試みると、粘弾性層の名目的な緩和時間(Maxwell 緩和時間 τ ；粘性率と剛性率の比で定義される)よりも実際の緩和には遥かに長い時間を要したり、粘性緩和による変動のセンスが途中で入れ替わったりなど奇妙な振る舞いをすることが知られている。本研究では、その原因を理論的に明らかにした(Fukahata & Matsu'ura, 2017)。表層弾性体-下層 Maxwell 粘弾性体の半無限 2 層平行成層という非常にシンプルな系においても、実は粘性緩和は異なる 3 つの時定数

の和として解析的に表現される (Matsu'ura et al., 1981)。今年度の研究により、それらの緩和時定数が一部を除き空間波数に依存して大きく変化することが分かった。このように、複数の緩和時間が存在し、そのそれぞれが空間波数に依存することが複雑な挙動の原因である。各緩和時定数の重みを空間波数の関数として表すと (図6)、緩和時定数の重みが何桁にもわたって変化していることが示された。例えば、非常に長波長 (数百 km 以上) の水平変位については、 $\tau = 4.6$ 年にも拘わらず、実際には数百年以上もの時間が粘性緩和にかかることを示している (図6, 左上・左下図)。垂直変位についても、50 - 100 km の波長の変形が、100 年以上の実効的緩和時間を持つことが分かる (図6, 右上図)。このことが、実際の緩和時間が名目的な Maxwell 緩和時間 τ よりもずっと長くなることの原因である。(京大防災研[課題番号: 1905])

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。

2011 年東北沖地震後に山形県と福島県の県境で発生した群発的地震活動域直下では、明瞭な反射面が確認された。このような反射面は、地殻流体の存在を示唆する。高精度の震源再決定によりこの山形-福島県境付近の地震活動には明瞭なマイグレーションが認められ、深部から浅部に向かう地震活動が見出された。震源はさらにいくつもの面上に分布しており、しかも、その面の傾斜・走向は、その面に属する地震の発震機構解の一つの節面の傾斜・走向とよく一致しており、これらの「面」が弱面として使われて地震が発生したことを強く示唆する。さらに東北沖地震直後の 50 日間とそれ以降では、規格化された摩擦係数・応力降下量・ b 値・背景の地震発生レート等が大きく異なっており、初期の頃の地震活動は間隙圧の上昇による強度低下によって生じたことが強く示唆される。(東北大[課題番号: 1204])。

プレート間相対運動の分配の推定

西南日本活動期のシミュレーション:

本研究では、西南日本内陸における応力場の変化や内陸活断層におけるクーロン応力を計算機上でモデル化することで、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することを目指している。計算にあたっては、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する。そのすべり相互作用の計算に必要な実データに即した断層ジオメトリの設定のために、前年度に引き続き、ブロック断層モデルを用いた地殻変動のモデル化を行った。本年度の主な改良点として、ブロック内での一様な非弾性変形を考慮してモデル化を行った点があげられる。

図7にシミュレーションの結果を示す。推定されたブロック相対運動と内部変形速度 (青矢印) を見ると、北陸ブロック (HO)、中部ブロック (CH)、琵琶湖ブロック (BI)、大阪ブロック (OS)、四国ブロック (SH)、九州中部ブロック (CK) で、10nanostarin/yr 以上の顕著な内部変形が生じていることが推定された。これらは、ブロック内部にある活断層や微小地震活動に表されるような変形が、内部一様非弾性変形として推定されていると解釈される。また、内部変形を考慮すると、ブロック境界における相対変位速度が小さくなる傾向があり、中央構造線、濃尾断層帯、糸魚川-静岡構造線断層帯に相当する境界ではそれぞれ、3-9mm/年、1-2mm/年、1-5mm/年と推定された。これらは、地質学的なすべり速度とほぼ一

致する。それ以外の活断層に対応するブロック境界では、依然として本研究による測地学的変位速度が地質学的変位速度を上回る場合が多いが、ブロック内部変形を考慮することの重要性が明らかとなった。(京大防災研[課題番号：1907])。

間隙流体圧場：

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。これまでに、御嶽山周辺域の間隙流体圧分は、日本列島全域を対象とした空間解像度 20 km 程度の広域応力場 (Terakawa & Matsu'ura, 2010) を基に、名古屋大学の臨時地震観測 (2009 年 8-11 月, 2010 年 6 月-11 月, 2011 年 6-11 月) 及び定常地震観測 (2012 年 5-8 月) で得られた地震のメカニズム解から推定されている (Terakawa et al., 2013)。しかし、数 km 程度の解像度で間隙流体圧分布を求めるためには、より高解像度の応力場が必要である。

本研究では、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 (解析期間 1：2012 年 5 月～2014 年 7 月, $M > 1$) から推定された解像度 2-5km 程度 (以後、解像度 5 km と省略する) の地域応力場 (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、参照した応力場の違いによる間隙流体圧場の推定結果への影響を調べ、背景応力の推定が推定値に及ぼす重要性を指摘した (Terakawa, 2017)。

図 8 に、推定された御嶽山周辺域の 3D 間隙流体圧場 (Terakawa, 2017) を示す。2009 年 8 月～2012 年 8 月 (解析期間 1) の各メカニズム解に対して、震源域の応力場を推定誤差の範囲で変動させ、そのイベントを引き起こした平均的な間隙流体圧レベルを見積もり、これらをデータとすることで簡易的に応力場の推定誤差を考慮した間隙流体圧分布の推定を行った。この結果、御嶽山の北麓に 50 ± 20 MPa 程度、東麓に 30 ± 10 MPa 程度の間隙流体圧場の高まりが存在した可能性があることがわかった (Terakawa, 2017)。

更に、2012 年 9 月～2014 年 7 月 (解析期間 2) のデータを用いて、同様の FMT 解析を実施した。この解析期間 2 においても、東麓に 15 ± 5 MPa 程度の間隙流体圧場の高まりがあり、深い領域 (深さ 7.5 km) で明瞭であることが確認された。これらを比較すると (図 9)、本研究の結果、東麓では、少なくとも 5 年間に亘って高压な間隙流体圧場が維持されていることがわかった。このような高压流体が活発な微小群発地震活動を継続させる重要な原因になっている可能性がある。また、本研究で比較的に安定した間隙流体圧の高まりが推定された位置では、これまで別種のデータと手法による解析・分析からも流体の存在が指摘されてきており、本手法による解析結果の妥当性を指示するものである。(京大防災研[課題番号：1907])。

噴火発生場：

九重火山

2015 年 9 月初頭から 10 月末日までの期間におこなった電磁場の連続観測データを用い 2 次元比抵抗構造解析を行い、地下比抵抗分布を求めた。この結果、硫黄山の直下に非常に低い抵抗値を示す低比抵抗帯、またその下位に $100 \Omega\text{m}$ を超える比較的高い比抵抗値を示す領域が存在し、浅部の低比抵抗帯がこの高抵抗域に沿って南北に広がっていることが示された。これは地下から供給される火山ガスの溶存成分を豊富に含む地下水が九重火山浅部に存在し、これがその下位の緻密な岩体に沿って、天水による希釈を受けながら流下していることが示唆される。

阿蘇火山

阿蘇では水準測量、GPS 観測などの結果から草千里の地下に圧力源が求められており、これが阿蘇火山のマグマだまりであると考えられている。地殻変動データの解析によるマグマだまりにおける体積変化と火山ガス放出によるマグマ消費量の見積から、マグマだまりからの H_2O 放出による体積減少を見積もった。阿蘇中岳火口から放出される高温火山ガスの $\text{H}_2\text{O}:\text{SO}_2$ のモル比は約 50:1、重量比で H_2O は SO_2 の 14 倍であると仮定すると、気象庁による中岳火口からの SO_2 放出質量の観測から、火山ガスにより放出される H_2O の質量が推定できる。そこから H_2O 放出によるマグマ体積変化のおおまかな推定を行った結果、マグマ供給量は、静穏期(2004.9 - 2008.9)で約 $0.7 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{year}$ 、2014 年噴火の直前で $3.78 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{year}$ 、2015 年 9 月の噴火直前で $2.20 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{year}$ 、2016 年 10 月の噴火直前で $2.95 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{year}$ であると試算された。(九州大[課題番号:2201])

地震火山相互作用:

昨年度に引き続き、室内間欠泉における微動のメカニズムの解明に関する研究を行った。気泡生成・離脱・上昇に伴う間欠泉流体系の振動の励起メカニズムを解明するために、液柱の振動とチャンバー内圧の振動の同時観測を実験的に行った。実験結果から、液柱高さのスペクトル変化は、間欠泉噴出の終了から開始までに現れるチャンバー内圧のスペクトルの系統変化と一致すること分かった。また、液柱の高さ変動は、チャンバー内圧力の変動と半周期ずれることが明らかになった。このチャンバー内圧と液柱高さの相関を説明するモデルを提案し、そのモデルから、これらの振幅比は、チャンバー内流体の実効的体積弾性率と液柱断面積の積をチャンバー体積で割ったものに等しくなることがわかった、このことから噴出の準備期間で現れる火山性微動周波数の系統的長周期化は、体積弾性率の系統的減少で説明できることがわかった。このことを天然の火山性微動に適用すると、火山性流体の実効的体積弾性率すなわちガス量の推定が可能となる。(九州大[課題番号:2201])。

(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

以下には、(1)を除く項目について、詳述する。

- (2) プレート境界モデルの構築

日本列島周辺域プレート境界モデル(Regional Model)の修正

日本列島周辺においては、様々な地球物理的観測・解析が行われており、広域モデルより高精度のプレート境界位置が求められている。前年度までの作業を元に、今年度はプレート境界位置の修正及びフィリピン海プレートの、太平洋プレートとの接合部の形状モデルの検討を行った。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。このモデルでは、伊豆半島北部から北西方向に顕著な屈曲が見られ、今後の詳細な検討が必要である。

また、前年度までに決定し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/>

(地震研[課題番号：1505])

(3) 日本列島及びその周辺の震源断層モデルの構築

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、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。(地震研[課題番号：1505])

(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

前年度までに、日本列島下のモホ面に関する既往成果の収集を図り、その grid データ化を行ってきた。前年度の 3 月からその詳細な比較検討を開始しているところである。既往成果間には、場所によって少なくとも 10km 以上の違いのあることは注意すべきである。本研究のモデル領域全体にわたる Moho 面分布を作成することとし、そのための program 開発を行った。そのテストとして、日本列島周辺域の Moho 面データとして global な Moho 面モデル (crust1.0, Laske et al., 2013) を用い、Katsumata (2010) による列島下のデータと滑らかに接続して、本研究のモデル領域全体にわたるモホ面モデルを提出した。

脆性・延性域境界については、日本列島の外側のデータがない。そのため、Katsumata (2010) によるコンラッド面分布と crust1.1 モデルを結合した、モデル領域全体のコンラッド面モデルを作成した。

(地震研[課題番号：1505])

(5) リソスフェア・アセノスフェア境界の構築

ベイズ統計に基づくレシーバ関数のインバージョン手法を導入することで、リソスフェア・アセノスフェア境界 (LAB) の深さ、およびその誤差を推定することを目指した。F-net 観測点へ本手法を試験的に適用した結果、LAB を検出できる見込みがあることが分かった。2013 年から文部科学省委託研究により、大和海盆において海底地震計を用いた自然地震観測が行われている。同海底地震計のデータにインバージョン手法を適用したところ、深さ 70 km 程度に LAB がある可能性が示唆された (地震研[課題番号：1505])

(6) 日本列島下の岩石モデル・レオロジーモデルの構築

地殻深部に由来する岩石の弾性波速度に基づく日本列島周辺の地殻構成岩石モデルについては、こ

れまでの研究成果を公表論文として整理した。一方で、地殻構成岩石モデルからレオロジーモデルに発展させるためには温度構造を制約する必要がある。地殻深部やマントル由来の岩石の弾性波速度の温度微分係数は、地殻深部～マントルの温度構造のゆらぎを推定する上でも重要である。本年度は、地殻深部～マントルの温度に相当する高温高压（最大圧力 1.0GPa、最高温度 800℃）条件で、隠岐捕獲岩のパイロキシナイトの弾性波速度を測定し、その温度微分係数を求めた。これまでの実験結果との比較については今後検討する予定である。（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。本年度においては、室内実験および観測・観察から、これらの基本的な挙動についての解明が進展した。

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。（京大防災研[課題番号：1907]）。

地殻流体と地震火山相互作用を考える上で、深部低周波地震は重要な研究対象である。本年度は東北日本の 10 か所を対象に、地震波形のコヒーレンスを用いて地震のグループ化を行い、震源分布との対応を調べた。グループ化の結果、低周波地震の波形には、低周波地震共通のメカニズムによる振動、発源地域の特徴を反映した振動、個々の震源の特徴を反映した振動が重なり合っていることが判明し、流体分布や構造との特徴の把握の重要性が示唆された。（弘前大[課題番号：1101]）

岩石の変形特性に及ぼす高間隙水・フュガシティの効果

これまで、下部地殻を構成する主要構成鉱物である斜長石多結晶体の塑性流動強度に及ぼす水の効果を明らかにすることを目的とした実験を行ってきた。今年度は、これまで歪量が不十分であった封圧 1GPa の追加実験を行い、またこれまでの実験の回収試料について赤外分光法により含水量の測定を行った。含水量と強度の関係を見ると、含水量が増えるほど強度が低下することがわかった。今後は、もっと長い変形時間での含水量と時間の依存性を調べる必要がある。また、フュガシティと強度の関係を調べることによって、既存の構成則（Rybacki et al., 2006; Rybacki and Dresen, 2000）の予測より弱化していることを昨年度に報告したが、今年度、Kido et al. (2016)の方法で応力補正を行うと、さらに強度が低くなることがわかった。（東北大[課題番号：1204]）。

CT 観察による地殻流体の実態の把握

これまでの一ノ目湯捕獲岩の研究により、水に富む玄武岩（ H_2O 3wt%以上）の下部地殻における結晶分化作用によって、角閃石斑れい岩を主とする沈積岩が生成されていることがわかった。下部地殻相当の圧力下に高含水量のマグマがあれば、 SiO_2 の低い角閃石・磁鉄鉱が多く分別して、 SiO_2 の高い珪長

質（花崗岩質）マグマが、効率的に生成する（親マグマの 25%）。つまり、下部地殻は平均的には斑れい岩質でも、部分的には石英に富む（20-25vol.%）花崗岩質マグマ溜りが存在してよいことになる。そのようなマグマが固結すると、大量の H_2O が分離するため、これが下部地殻での低周波地震や上部地殻での地震発生を促進する可能性が考えられる。（東北大[課題番号：1204]）。

地震発生帯における地殻流体の熱力学情報の精密化と実フィールドでの検証

地震発生時には断層面の近傍で破碎が生じ、間隙圧が急減することが期待される。これに伴う水-岩石相互作用で、亀裂が修復されるのか、それともより拡張されるのかを理解することは、地震発生サイクルを理解するうえで重要である。本年度はまず昨年度定式化した 1 m NaCl 溶媒の見かけの比誘電率の式を、4 kb (400 MPa) まで拡張した。これにより深さ 10 数 km の静岩圧下の塩水と鉱物（岩石）の相互作用の解析が可能となった。これを用いて、地震性断層運動などで考えられる急激な亀裂の形成・発達による流体の断熱（等エンタルピー）的な減圧に伴う石英と方解石の沈殿／溶解量をシミュレートした。地温勾配により 200 °C から 450 °C の深さにあった流体の静岩圧から静水圧への断熱減圧では、石英は減圧により沈殿を生じ、温度が高いほど（深部になるほど）沈殿量が多くなる。これに対し、方解石は水では石英と同様の沈殿傾向を示すものの、350-400 °C 付近では減圧により溶解が進むことが分かった。（東北大[課題番号：1204]）。

地熱流体と内陸地熱誘発地震

地殻内に剪断破壊等が発生すると、例えばプルームのような空間が発生する。この空間は、いわば真空状態であり、断層内などに蓄積されていた流体がこの真空空間に噴出し、沸騰する。この現象（Flash Vaporization）は、地殻流体の減圧沸騰-断熱膨張-冷却-熱応力の発生-熱破壊の一連の現象を引き起こす。このことを実験的に明らかにするため、超臨界状態にある岩石の急減圧実験を行い、岩石内の亀裂の形成を引き起こすとともに、実験後の弾性波伝播速度の計測を行った。この結果、急激な減圧により岩石は破壊し、伝播速度はなんと水中の伝播速度（1.45km/s）と同程度となった。すなわち、熱応力破壊により、粒界が開き、弾性波伝播速度の急激な減少を引き起こすとともに、この急減圧を複数回繰り返すことで、亀裂が進展する。この亀裂進展の様子を X 線 CT 画像により確認することができた。すなわちこれは地震による岩石の脆弱化のアナログ実験と考えることができる。（東北大[課題番号：1204]）。

地震断層すべり物理モデルの構築

これまでの研究により、内陸地震発生域の強度は差応力で数十 MPa 程度しかないことが明らかになってきた。特に群発地震では地震活動のマイグレーションが見られることから、この低強度をもたらした原因として、流体による間隙圧の上昇が第一に考えられる。これらの水は下部地殻をこれまで知られていた以上に軟化させる可能性が高いことも明らかになってきたため、下部地殻で局所的に水が多ければ、その上部地殻には応力・歪を集中しやすくなると期待される。マントルから供給された含水量の多いマグマが分化していくなかで SiO_2 が濃集していき、中部地殻付近でマグマから水が分離していく過程も明らかになってきた。さらに、高間隙圧を作り出す地下での石英や方解石の沈殿プロセスも明らかになって来ており、島弧における地震断層すべりの物理モデルが次第に構築されつつある。（東北大[課題番号：1204]）。

含水岩石物性（クラック密度とクラック連結度）：

（１）アルミナ多結晶体を用いたクラック・パーコレーションの検証：細粒アルミナ焼結体を用いて、どのくらいの量のクラックが存在すると連結経路が形成されるかを調べた。出発試料には空隙がほとんど存在しないが、1800-1900℃の高温で 5-50 時間焼鈍して粒成長させ、熱クラックを生じさせた。平均粒径の大きい試料ほど弾性波速度の大きな低下が見られ、SEM によっても粒界クラックが観察できた。ただし、電気インピーダンス測定からは、連結に必要なだけのクラック量はまだ形成されていないと考えられる。

（２）電気伝導度と弾性波速度の同時測定によるクラック連結度の研究：電気伝導度と弾性波速度の同時測定によってクラックの連結度を調べた結果、花崗岩はクラックのパーコレーションに関係する大きな電気伝導度変化を示した。クラックがほぼ閉じるような高封圧下での電気伝導度は、試料によって大きく異なっており、この違いは粒界の微細構造の違いを反映しているのではないかと考えている（京大防災研[課題番号：1905]）。

断層周辺の流体挙動

アクロス連続運転による野島断層近傍の地震波伝播特性の測定

アクロス震源と 800m 孔底地震計の間の伝達関数から P 波および S 波の走時と振幅の経年変化を推定した。P 波および S 波の走時の経年変化は、1999 年～2018 年にかけて、S 波については約 2 ms ($2 \text{ ms} / 500 \text{ ms} = 4 \text{ ‰}$) 程度速くなる傾向があり、P 波については約 4 ms ($4 \text{ ms} / 250 \text{ ms} = 1.5 \text{ ‰}$) 程度速くなっていた。この結果は、長期的に、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大（強度回復）が起こっていたことを示唆している。ただし、観測開始当初の 1999 年から 2000 年にかけては、特に P 波で走時が増大（速度が減少）していた。

2011 年以降の実験で、S 波走時の変化が小さい一方で P 波走時が速くなっている原因として、例えば、これらの期間ではクラック密度は変化しないままクラックの水飽和率が増加した等、水の動きが関与している可能性も考えられる。（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。昨年度に開発した、不均質減衰構造を考慮した地震動即時予測プログラムを用いて、2005 年 3 月に発生した福岡県西方沖の地震(Mj7.0) について地震動即時予測シミュレーションを行った。結果は熊本地震の場合と同様に、不均質な減衰構造を考慮することによって震度予測精度の RMS 値が約 10～15%改善することが確認できた。福岡県西方沖の地震のシミュレーション結果を検討すると、不均質構造を考慮することにより九州中部などの強減衰領域での予測精度が向上する一方、震源からみてその強減衰領域の影となる地域でやや予測精度が悪化しているようである。この予測精度の悪化は、2 次元空間の仮定の下で行っている地震動予測シミュレーションと実際の 3 次元空間の波動伝播の違いによる可能性があるため、内部減衰と散乱減衰の 3 次元不均質構造推定に取り組むこととした。Eulenfeld and Wegler (2016) と Takeuchi (2016)

の定式化を活用して 3 次元不均質構造を推定したところ、解像度の詳細な検討が必要であるものの、九州中部で内部減衰・散乱減衰が共に深さ依存性を持つような結果を得ることができた。福岡県西方沖の地震のシミュレーション結果は不均質構造の 3 次元性を考慮する必要性を示している可能性がある。(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：

レーザー技術を利用した変位センサーを製作し、所期の高い検出性能を確認した。また、これまでに地震計およびレーザー干渉計部分の高温試験を実施し、後者については光学素子の保持部材として高温用バネ材であるインコネルが有効であり 340℃においてもレーザー干渉計が機能することが確認されている。今年度はこれらの結果の検討および、光ベースの大深度ボアホール用地震地殻変動観測装置で必要となる光ファイバー長距離伝送の基礎実験を実施した。

300℃を超える温度で、インコネルを用いた光学部品の保持機構で干渉信号が適正に得られることを示したが、冷却時に光軸ずれが発生した。また加熱の際も常温での干渉計コントラストからの若干の低下が認められた。いずれも光ファイバー保持部の温度サイクルによるずれと考えられたため、その要因を考慮して、振動検知部も含めた高温地震計の設計を進めた。

また、装置を大深度ボアホールに設置した場合を想定した、光ファイバーによる信号の長距離伝送の実験を行い、信号劣化等の評価を行った。これは課題 1506 と連携し、東北大学電気通信研究所で開発された通信波長帯の 1550nm 光源を 26km の伝送路で小型絶対重力計に導入し、測定値の誤差などを評価した。その結果、重力の計測値は数メートル長の光ファイバー伝送の場合と比べ、少なくとも 7 桁のレベルでは特段の誤差は認められず、通常地震観測には影響がない誤差のレベルであることがわかった。光アンプを用いた増幅後も劣化はなく、～30km の距離の光ファイバー伝送については大きな問題が伴わないと見込まれた。(東大地震研 [課題番号：1522])。

精密制御震源システム：

第 2 世代震源装置について、基礎の周辺地盤が損傷して異常振動を起こしていたことが判明したので、本格的な補修を行い、補修の効果を検証した。また補修した基礎に、九州大学が第 2 世代震源装置として新たに作成した小出力の震源を設置して動作試験を行った。また、平成 29 年 12 月より、補修した震源を用いた長期間の連続運転を開始した。補修後は Z 方向と Y 方向の振幅がほぼ一致し、20Hz まで問題なく計測が可能になったことが示された。なお、低周波側で計測値が乱れたが、これは振動計測にノイズが混入したことによるものと考えられる。(名大[課題番号：1705])。

地殻流体の連続化学観測：

29 年度は 28 年度に引き続き、装置の耐久性の確認を実施し、野外における連続運転に関連して発生する問題点を解決した。また、観測データの変動成分について情報を蓄積した。28 年度に見いだされた、溶存ガス中の N₂-He-Ar 三成分比が、マントル起源ガスと大気起源ガスの混合線上を時間変化する、というデータが、29 年度も引き続き確認できた。この中で、地下水溶存ガスの分離に用いる分離装置

の高度化を図ると共に、溶存ガス濃度および組成の高精度分析を行う方法を確立した。(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。

今年度は昨年度に発生した熊本地震に関する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も投げかけられた。熊本地震を引き起こした断層群は複雑な形状を持ち、地震前の応力場に従って地震時にすべりが発生しており、地震前の応力状態を把握することでより現実に近い強震動予測が可能となることは示されたものの、その発生メカニズムや断層の発達過程については解明が待たれる。特に、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全く解明が進んでいない。この点については、速度、比抵抗構造に基づいて断層を取り巻く地殻の物理・化学的狀態を明らかにした上で、強度弱化や応力集中メカニズムをモデル化する必要がある。そこに、断層周辺域の応力载荷プロセスを考慮したシミュレーションをおこなうことによって、初めて予測に資することが可能となるが、現状ではその実現は容易ではない。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6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することで、いわゆる“絶対応力問題”の解決に挑む必要がある。また、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、震源メカニズムを用いた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。今年度は特に流体供給を示唆する構造検出や流体圧の大きさ推定がなされている。これらの結果と実験・シミュレーション研究の融合をさらに推し進め、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について、地震断層のみに着目するのではなく、領域に対するポテンシャルを評価することもひとつのアプローチであると考えられる。GNSSや地震活動、活断層の情報をもとに地域区分を行い、そこでのポテンシャル評価をおこなうのも重要な方向性であろう。そのためにも網羅的な活動監視や均質な構造推定を進める必要がある。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

- ・ 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.
- ・ 悪原 岳・中東和夫・篠原雅尚・山田知朗・山下裕亮・塩原肇・望月公廣, レシーバ関数による大和海盆下のリソスフェア構造推定, 日本地球惑星科学連合大会 2017, 幕張
- ・ Akuhara, T., Nakahigashi, K., Shinohara, M., Yamada, T., Yamashita, Y., Shiobara, H., and Mochizuki, K., Lithospheric Structure of the Yamato Basin Inferred from Trans-dimensional Inversion of Receiver Functions, 2017 AGU Fall Meeting, New Orleans
- ・ Ando, R., K. Imanishi, Y. Panayotopoulos and T. Kobayashi (2017), Dynamic rupture propagation on geometrically complex fault with along-strike variation of fault maturity: insights from the 2014 Northern Nagano earthquake, *Earth Planets Space*, 69:130, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0715-2>.
- ・ 新谷昌人, 光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, 23, 202-204, 2017.
- ・ 吾妻 崇, 2017, 講座「地盤に刻まれた巨大地震の痕跡 7. 活断層データベースとその活用」. 地盤工学会誌, 65(9), 2-9.
- ・ Chiba K., 2017: b-values distribution in and around Mt. Tarumae, Japan, AGU 2017 Fall meeting, V23E-0515.
- ・ Chiba, K., H. Ueda, and T. Tanada, 2017: Relationship Between b-value Distribution and the Magma Plumbing System in and around Mt. Tarumae, Japan, *Journal of Disaster Research*, Vol. 12 No. 5, 932-943.
- ・ Fukahata, Y. and M. Matsu'ura, 2017, Characteristics of viscoelastic crustal deformation following a megathrust earthquake: discrepancy between the apparent and intrinsic relaxation time constants, *Pure Apply. Geophys.*, (in press).
・ Fukuda, J., J. Muto, and H. Nagahama, 2018, Strain localization and fabric development in polycrystalline anorthite + melt by water diffusion in an axial deformation experiment, *Earth Planets Space*, 70, 3, doi:10.1186/s40623-017-0776-2.
- ・ Fukui, M., Matsushima, T., Yumitori, N., Oikawa, J., Watanabe, A., Okuda, T., Ozawa, T., Kohno, Y. & Miyagi, Y., 2017: Pressure sources of the Miyakejima volcano estimated from crustal deformation studies during 2011 - 2013, *International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH) - Proceedings of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH)*. Springer Verlag, Vol. 145, 117-123.
- ・ 堀川信一郎・山中佳子・寺川寿子・前田裕太・奥田隆 (名大環)・荻原宏之・柏渕和信・山口充孝・五十嵐竜也・木村高志 (株計測技研), 小型軽量地震テレメータ装置の開発—長野県南部の地震の余震観測での活用—, 日本地震学会 2017 年秋季大会, S02-P07, 鹿児島, 2017.10.26.

- ・後藤秀昭, 2017, 海陸を統合した地形データを用いた変動地形学的研究—石垣島の海成段丘の傾動と海底地形—, 日本活断層学会 2017 年度秋季学術大会, P-16
- ・Goto, H, 2017, Late quaternary slip rates and vectors on the Median Tectonic Line active fault zone in eastern Shikoku, southwest Japan, *Quaternary International*, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.013>
- ・廣内大助・松多信尚・石山達也・杉戸信彦・竹下欣宏・水谷光太郎・安江健一・藤田奈津子・澤 祥・道家涼介・佐藤善輝・堤浩之・越後智雄・池田一貴・鈴木康弘・神城断層調査グループ, 2018, 糸魚川—静岡構造線活断層帯神城断層中北部における断層活動, 2018 日本地理学会春季大会
- ・Iidaka, T., T. Igarashi, A. Hashima, A. Kato, T. Iwasaki, The Research Group for the Joint Seismic Observations at the Nobi Area, Receiver function images of the distorted Philippine Sea Slab contact with the continental crust: implications for generation of the 1891 Nobi earthquake (Mj 8.0), *Tectonophysics*, 717, 41–50, 2017.
- ・Iio, Y., Yoneda, I., Sawada, M., Miura, T., Katao, H., Takada, Y., & Horiuchi, S. (2017). Which is heterogeneous, stress or strength? An estimation from high-density seismic observations. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 144. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0730-3>
- ・Iio, Y., S. Kishimoto, S. Nakao, T. Miura, I. Yoneda, M. Sawada, H. Katao (2017), Extremely weak fault planes: an estimate of focal mechanisms from stationary seismic activity in the San'in district, Japan, *Tectonophysics*, 10.1016/j.tecto.2017.12.007.
- ・飯尾 能久, 地震観測システムの小型化・軽量化・低コスト化, 日本地震工学会誌, 32, 8-12, 2017.
- ・飯尾能久, 2016 年熊本地震の発生過程について, 防災研究所年報, 60 A, 158-163, 2017.
- ・飯尾能久, 米田 格, 澤田麻沙代, 伊藤喜宏, 片尾 浩, 富坂和秀, 長岡愛理, 松本 聡, 宮崎真大, 酒井慎一, 加藤愛太郎, 林 能成, 山品匡史, 大久保慎人, 野口竜也, 香川敬生, 鳥取県西部地域における満点地震観測, 防災研究所年報, 60 B, 382-389, 2017.
- ・Imanishi, K., and T. Uchide (2017), Non-self-similar source property for microforeshocks of the 2014 Mw 6.2 Northern Nagano, central Japan, earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5401-5410, doi:10.1002/2017GL073018
- ・今西和俊 (2017), 講座 地盤に刻まれた大地震の痕跡 5.地震の連鎖, 地盤工学会誌, 65. No.7, 49-56.
- ・Iriyama, Y., A. Toramaru, T. Yamamoto, 2018: Theory for deducing volcanic activity from size distributions in plinian pyroclastic fall deposits, *J. Geophys. Res.* (in press).
- ・入山宙, 寅丸敦志, 2017: 粒径分布の層序変化からみた新燃岳 2011 年準プリニー式噴火, *JpGU 2017 MIS02-05*
- ・入山 宙, 寅丸敦志, 山本哲生, 2017: 鉛直 1 次元ソース一定モデルの開発と降下火砕堆積物への応用, 日本火山学会 2017 年度秋季大会, 9 月 22 日発表.
- ・石川 正弘, 2017, 岩石の弾性波速度に基づく島弧地殻深部及び最上部マントルの構成岩石の推定: 伊豆弧と東北本州弧. *地質学雑誌*, 123 巻, p. 355-364.
- ・石山 達也・佐藤比呂志・加藤直子・阿部 進, 2017, 反射法地震探査・地質学的データに基づく関東地域の震源断層モデル, 日本地球惑星科学連合 2017 大会, SSS16-09, 日本地球惑星科学連合.
- ・岩佐佳哉・熊原康博・後藤秀昭・中田 高, 2017, 益城町堂園地区における熊本地震の地表地震断層

の詳細な分布と共役断層の活動履歴, 日本活断層学会 2017 年度秋季学術大会講演予稿集, P-3

・岩崎 貴哉・佐藤 比呂志・篠原 雅尚・石山 達也・橋間 昭徳・松原 誠・雨宮 由美, 2017. 日本列島基本構造モデルの構築 -II, 日本地球惑星科学連合 2017 大会, SSS16-01, 日本地球惑星科学連合.

・鍵山恒臣, 吉川 慎, 宇津木充, 2017: 表層電気伝導度から示唆される阿蘇火山の活動様式と中部九州の活構造, 2017 年度日本火山学会秋季大会

・神薗めぐみ・他, 2017: 2016 年熊本地震活動域における背景減衰構造と強散乱体の分布, 日本地震学会 2017 年度秋季大会 S22-10.

・木下茜, 寅丸敦志, 2017: Guinness で特徴的な気泡粗密波に関する実験的研究, JpGU 2017 MIS15-06.

・Kobayashi, T., Y. Morishita, and H. Yarai, 2017, SAR-revealed slip partitioning on a bending fault plane for the 2014 Northern Nagano earthquake at the northern Itoigawa-Shizuoka tectonic line, Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2017.12.001.

・小西由利子, 寅丸敦志, 2017: Formation process of plagioclase aggregates of the 1991-1995 eruption at Unzen, JpGU 2017 SVC50-P17.

・小西由利子, 寅丸敦志, 2017: 雲仙 1991-1995 年噴火の噴出物における集斑状斜長石の形成プロセス, 日本火山学会 2017 年度秋季大会, 9 月 23 日発表.

・小菅正裕・野呂康平・増川和真, 2017, 東北日本で発生する深部低周波地震の震源の時空間分布の特徴と地震波形の多様性, 地震研究所彙報, 92, 63-80.

・Matsumoto, S., Y. Yamashita, M. Nakamoto, M. Miyazaki, S. Sakai, Y. Iio, H. Shimizu, K. Goto, T. Okada, M. Ohzono, T. Terakawa, M. Kosuga, M. Yoshimi, and Y. Asano, 2018: Prestate of stress and fault behavior during the 2016 Kumamoto Earthquake (M7.3), Geophys. Res. Lett., 45, doi:10.1002/2017GL075725.

・松本聡・他, 2017: 2016 年熊本地震前後の応力場変化 2, 日本地震学会 2017 年度秋季大会 S22-09.

・森田花織・他, 2017: 精密水準測量で検出された霧島・硫黄山の上下変動(2012 年 3 月~2016 年 11 月), JpGU 2017, SVC47-P24.

・Nakagawa, T., and Iwamori, H. (2017) Long-term stability of plate-like behavior caused by hydrous mantle convection and water absorption in the deep mantle. Journal of Geophysical Research - Solid Earth, doi: 10.1002/2017JB014052.

・Nakamura, H., Iwamori, H., Ishizuka, O., Nishizawa, T. (2018) Distribution of slab-derived fluids around the edge of the Philippine Sea Plate from Central to Northeast Japan. Tectonophysics 723, 297-308. Doi:10.1016/j.tecto.2017.12.004.

・中尾茂・他, 2017: Post-seismic deformation of 2016 Kumamoto Earthquake by continuous GNSS network, JpGU 2017, SSS10-05.

・Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro, and T. Ochi, Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, Geosphere, 14, doi:10.1130/GES01529.1, 2018

・Nishizawa, T., H. Nakamura, T. Churikova, B. Gordeychik, O. Ishizuka, S. Haraguchi, T. Miyazaki, B.S. Vaglarov, Q. Chang, M. Hamada, J. Kimura, K. Ueki, C. Toyama, A. Nakao, H.

Iwamori (2017) Genesis of ultra-high-Ni olivine in high-Mg andesite lava triggered by seamount subduction, *Scientific Reports*, 7, DOI:10.1038/s41598-017-10276-3.

・ Ogawa, Y., and M. Ichiki, 2017, On the supercritical fluid under the brittle-ductile boundary imaged by magnetotelluric studies in NE Japan, 39th New Zealand Geothermal Workshop, Rotorua, New Zealand, 2017.11.22-24.

・ 小木曾 仁・干場充之・志藤あずさ・松本 聡, 2017, 不均質構造を考慮した「揺れの数値予報」: 2016 年熊本地震を例に, JpGU-AGU Joint Meeting, SCG72-13

・ Ogiso, M., M. Hoshiba, A. Shito and S. Matsumoto, 2017, Numerical shake prediction incorporating heterogeneous structure: the 2016 Kumamoto Earthquake, IAG-IASPEI Joint Scientific Assembly, J04-P03

・ 小木曾 仁, 2017, 多重散乱の効果を考慮した内部減衰・散乱減衰の同時インバージョンの試み, 日本地震学会 2017 年秋季大会, S01-07

・ Ogiso, M., 2017, Simultaneous inversion of intrinsic and scattering attenuation parameters incorporating multiple scattering effect, AGU Fall Meeting, S53B-0666

・ Okamoto, A., H. Shimizu, J. Fukuda, J. Muto, and T. Okudaira, 2017. Reaction-induced grain boundary cracking and anisotropic fluid flow during prograde devolatilization reactions within subduction zones, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 172, 75, doi:10.1007/s00410-017-1393-6.

・ Okubo, S., X. Zhang, Y. Tanaka, Y. Imanishi, S. Miura, S. Ueki, H. Oshima, T. Maekawa, K. Okada, and M. Ando, 2017. Afterslip and viscoelastic components observed in surface gravity change after the 2011 Great Tohoku earthquake, in Joint Scientific Assembly of the International Association of Geodesy and the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, pp. J05-P-09, Kobe International Conference Center.

・ Ono, K., Harada, Y., Yoneda, A., Yamamoto, J., Yoshiasa, A., Sugiyama, K., Arima, H., and Watanabe, T., 2017, Determination of elastic constants of single-crystal chromian spinel by resonant ultrasound spectroscopy and implications for fluid inclusion geobarometry, *Phys. Chem. Minerals*, <https://doi.org/10.1007/s00269-017-0912-3>.
・ 大橋 正俊, 市原 美恵, 武田 志緒里, 桑野 修, 寅丸 敦志, 2017: 硬化過程におけるフォームの変形実験 -Tube Pumice の履歴を探る-, JpGU 2017 SCG74-17.

・ 大橋正俊, 市原美恵, 寅丸敦志, 2017: 膨張と合体を考慮した気泡サイズ分布時間発展の数学的な取り扱い, 日本火山学会 2017 年度秋季大会, 9 月 22 日発表.

・ 大倉敬宏・宇津木充・横尾亮彦・吉川 慎・井上寛之・鍵山恒臣・山本 希・及川 純, 2017:阿蘇火山 2014 -2016 年の噴火活動について, 2017 年度日本火山学会秋季大会.

・ Saishu, H., A. Okamoto, and M. Otsubo, 2017, Silica precipitation potentially controls earthquake recurrence in seismogenic zones. *Sci. Rep.*, 7, 13337, doi:10.1038/s41598-017-13597-5.

・ Saito, Z., Y. Ogawa, M. Ichiki, H. Satoh, Y. Kinoshita, A. Suzuki, and P. Amatyakul, 2017, 3D magnetotelluric imaging of fluid distribution in a seismogenic region, Miyagi, NE Japan, JpGU-AGU joint meeting, Chiba, 2017.5.23.

・ Saito, Z., Y. Ogawa, M. Ichiki, and H. Satoh, 2017, 3d distribution of fluids and their origins in a seismogenic zone, Northern Miyagi, NE Japan, IAG-IASPEI 2017, Kobe, 2017.8.2.

- ・ 佐藤将, 2017, ニュージーランド南島北部の 2016 年カイコウラ地震震源域およびその周辺における応力場の推定, 東北大学修士論文.
- ・ Sema, F., and Watanabe, T., 2017, Determination of elastic constants of a single-crystal topaz and their temperature dependence via sphere resonance method, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 271, 64-62.
- ・ Shimizu H. and Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquakes, 2017: Complex seismicity and hypocenter distribution of the 2016 Kumamoto earthquakes, Kyushu, Japan, and their relation to the stress field and crustal structure, IAG-IASPEI 2017, invited.
- ・ 清水洋・他, 2017: 稠密地震観測から推定される熊本地震の発生機構, 京都大学防災研究所平成 29 年度一般研究集会「リモートセンシング技術の進展と活断層・内陸地震研究」
- 清水洋, 2017: 平成 28 年熊本地震災害に関する総合調査, 第 54 回自然災害科学総合シンポジウム.
- ・ 清水洋, 2017: 平成 28 年熊本地震と布田川・日奈久断層帯, 日本火山学会第 24 回公開講座.
- ・ 清水洋, 2017: 2016 年熊本地震とその教訓, 日本地震学会 2017 年度秋季大会一般公開セミナー.
- ・ 清水洋・他, 2017: 九州中部における最近の地震活動と地殻変動, 日本地震学会 2017 年度秋季大会 S22-02.
- ・ 清水洋・他, 2017: 熊本平野西部における反射法地震探査:熊本-宇土測線, 日本地震学会 2017 年度秋季大会 S22-P04
- ・ Shito, A., S. Matsumoto, H. Shimizu, T. Ohkura, H. Takahashi, S. Sakai, T. Okada, H. Miyamachi, M. Kosuga, Y. Maeda, M. Yoshimi, Y. Asano and M. Okubo, 2017, Seismic velocity structure in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 7766-7772, doi: 10.1002/2017GL074593
- ・ 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, 2017, 布田川-日奈久断層帯の地震波速度構造, 日本地震学会 2017 年秋季大会, S22-11
- ・ 志藤あずさ・他, 2017: Seismic wave attenuation and local depth of seismogenic layer in the crust beneath Kyushu, Japan, *JpGU 2017*, SSS16-P11.
- Suzuki,Y., Nakata, T., Watanabe, M., 2017, Extremely severe house damage confined to narrow zones along the surface fault ruptures in Mashiki by 2016 Kumamoto earthquake, Japan. *AGU Fall Meeting*, T43C-0712.
- ・ 水藤 尚・小林知勝・川元智司・森下 遊, 2017, ひずみ集中帯の地殻変動特性に関する研究 (第 2 年次), 国土地理院調査研究年報 (平成 29 年度), 印刷中.
- ・ 水藤 尚, 2017, 日本列島下の粘性構造の推定に関する研究 (第 1 年次), 国土地理院調査研究年報 (平成 29 年度), 印刷中.
- ・ 鈴木康弘・渡辺満久・中田 高・田中 圭, 2017, 益城町市街地の地震断層と建物被害, 日本活断層学会 2017 年度秋季学術大会講演予稿集, O-3
- ・ 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市街地の地震断層-変動地形学的意義と建物被害への影響-. *活断層研究*, 48, 印刷中.
- ・ 鈴木康弘・渡辺満久・中田高, 2017. 2016 年熊本地震を教訓とする活断層防災の課題と提言. *科学*, 86, 839-847
- ・ 高橋直也・石村大輔・遠田晋次・中田 高・渡辺満久, 2017, 布田川断層に並走する正断層の平均

変位速度：熊本県益城町下陳金山川沿いに現れた地震断層露頭，活断層研究，46，27-32.

・高橋浩晃，大園真子，一柳昌義，岡崎紀俊，鈴木隆広，秋田藤夫，2017：屈斜路，カルデラ周辺の温度構造とひずみ分布，日本地震学会 2017 年秋季大会，S05-01.

・高橋浩晃，大園真子，岡崎紀俊，鈴木隆広，秋田藤夫，2017：屈斜路カルデラ周辺の地温勾配分布，日本火山学会 2017 年度秋季大会，B2-14

・Takada, Y., Sagiya, T., Nishimura, T., Interseismic crustal deformation in and around the Atotsugawa fault system, Central Japan, detected by InSAR and GNSS. Earth Planets and Space, accepted.

・竹原瑞樹，寅丸敦志，2017：Textural analysis of Blast deposits from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens, JpGU 2017 SVC50-P22.

・Terakawa, Y. Yamanaka, Y. Maeda, S. Horikawa, and T. Okuda, Monitoring eruption activity using temporal stress changes at Mount Ontake volcano, IASPEI 2017, S01-4-03, Kobe, Japan.

・寺川寿子，御嶽山周辺の群発地震発生域の間隙流体圧分布の再評価，日本地球惑星科学連合 2017 年大会，SSS17-P07，千葉，2017.5.21.

・寺川寿子，CMT データインバージョン法による応力場の推定と誤差評価：東北地方太平洋沖地震前後の応力場の解析例，日本地震学会 2017 年秋季大会，S08-14，鹿児島，2017.10.25.

・Teshima N, A. Toramaru, 2017: Experimental study on precursory pressure oscillation in the experimental geyser system, JpGU 2017, S-VC45.

・寅丸敦志，2017：マグマにおける結晶成長と結晶中の累帯構造，JpGU 2017, MIS11-01（招待講演）

・寅丸敦志，山下俊介，2017：巨大噴火の長期予測への戦略，JpGU 2017 SVC50-13.

・土屋範芳，2017，超臨界地熱貯留層の可能性について．地熱技術 42, 43-52.

・塚本果織・他，2017：霧島硫黄山周辺の 1 次元抵抗構造と震源再決定，JpGU 2017, SVC47-P23.

・Tsuno, S., Korenaga, M., Okamoto, K., Yamanaka, H., Chimoto, K. & Matsushima, T.. 2017: Local site effects in Kumamoto City revealed by the 2016 Kumamoto earthquake 2016 Kumamoto earthquake sequence and its impact on earthquake science and hazard assessment, Earth, Planets and Space. 69, 1, 37.

・Tsunomori F., Shimodate T., Ide T., Tanaka H. (2017) Radon concentration distributions in shallow and deep groundwater around the Tachikawa fault zone, Journal of Environmental Radioactivity, 172, 106-112.

・Uchide, T., & Imanishi, K. (2018). Underestimation of microearthquake size by the magnitude scale of the Japan Meteorological Agency: Influence on earthquake statistics. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123. <https://doi.org/10.1002/2017JB014697>.

・Ueki, K., Iwamori, H. (2017) Geochemical differentiation processes for arc magma of the Sengan volcanic cluster, Northeastern Japan, constrained from principal component analysis. Lithos 290-291, 60-75. 10.1016/j.lithos.2017.08.001. ・Uno, M., A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 2017, Excess water generation during reaction-inducing intrusion of granitic melts into ultramafic rocks at crustal P-T conditions in the Sør Rondane Mountains of East Antarctica. Lithos, 284–285, 625–641, doi:10.1016/j.lithos.2017.04.016.

・臼田 優太，反射法解析を稠密アレイ自然地震記録に適用した阿武隈山地南部の地殻構造の研究，

東京大学修士論文, 2018 年

- ・宇津木充, 2017: 電磁気学データから見た阿蘇火山 2014 年噴火及びそれ以降の火山活動について, 2017 年度日本火山学会秋季大会.
- ・渡辺満久・中田 高・水本匡起, 2017, 富士川谷に見いだされた断層変位地形と断層露頭, 活断層研究, 45, 9-15.
- ・渡辺満久・中田 高・後藤秀昭, 2017, 変動地形学的特徴にもとづく立川断層南部の存在の再確認, 地震, 第 2 輯, 70, 81-87.
- ・渡辺満久・越谷 信, 2017, 北上低地帯北部における変動地形と活断層の再検討, 活断層研究, 46 (印刷中).
- ・渡辺満久, 2017, 広い撓曲崖を形成する六ヶ所断層－原子力規制委員会による適正な審査のために－, 科学, 88, 72-76.
- ・Watanabe, N., T. Numakura, K. Sakaguchi, H. Saishu, A. Okamoto, S. Ingebritsen and N. Tsuchiya, 2017, Potentially exploitable supercritical geothermal resources in the ductile crust, *Nature Geosci.*, 10, 140-144, doi:10.1038/ngeo2879.
- ・Watanabe, N., M. Egawa, K. Sakaguchi, T. Ishibashi, and N. Tsuchiya, 2017, Hydraulic fracturing and permeability enhancement in granite from subcritical/brittle to supercritical/ductile conditions, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5468-5475, doi:10.1002/2017GL073898.
- ・Watanabe, N., T. Kikuchi, T. Ishibashi, and N. Tsuchiya, 2017, ν -X-type relative permeability curves for steam-water two-phase flows in fractured geothermal reservoirs, *Geothermics*, 65, 269-279, doi:10.1016/j.geothermics.2016.10.005.
- ・Yamazaki, T., T. Kobayashi, T. Wright, and Fukahata, Y., 2018. Viscoelastic crustal deformation by magmatic intrusion: A case study in the Kutcharo caldera, eastern Hokkaido, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 349, 128-145.
- ・Yanagida, Y., M. Nakamura, A. Yasuda, T. Kuritani, M. Nakagawa, and T. Yoshida, 2018, Differentiation of a hydrous arc magma recorded in melt inclusions in deep crustal cumulate xenoliths from Ichinomegata Maar, NE Japan, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, doi:10.1002/2017GC007301, accepted.
- ・Yukutake Y, Iio Y (2017) Why do aftershocks occur? Relationship between mainshock rupture and aftershock sequence based on highly resolved hypocenter and focal mechanism distributions *Earth, Planets and Space* 69:68 doi:10.1186/s40623-017-0650-2

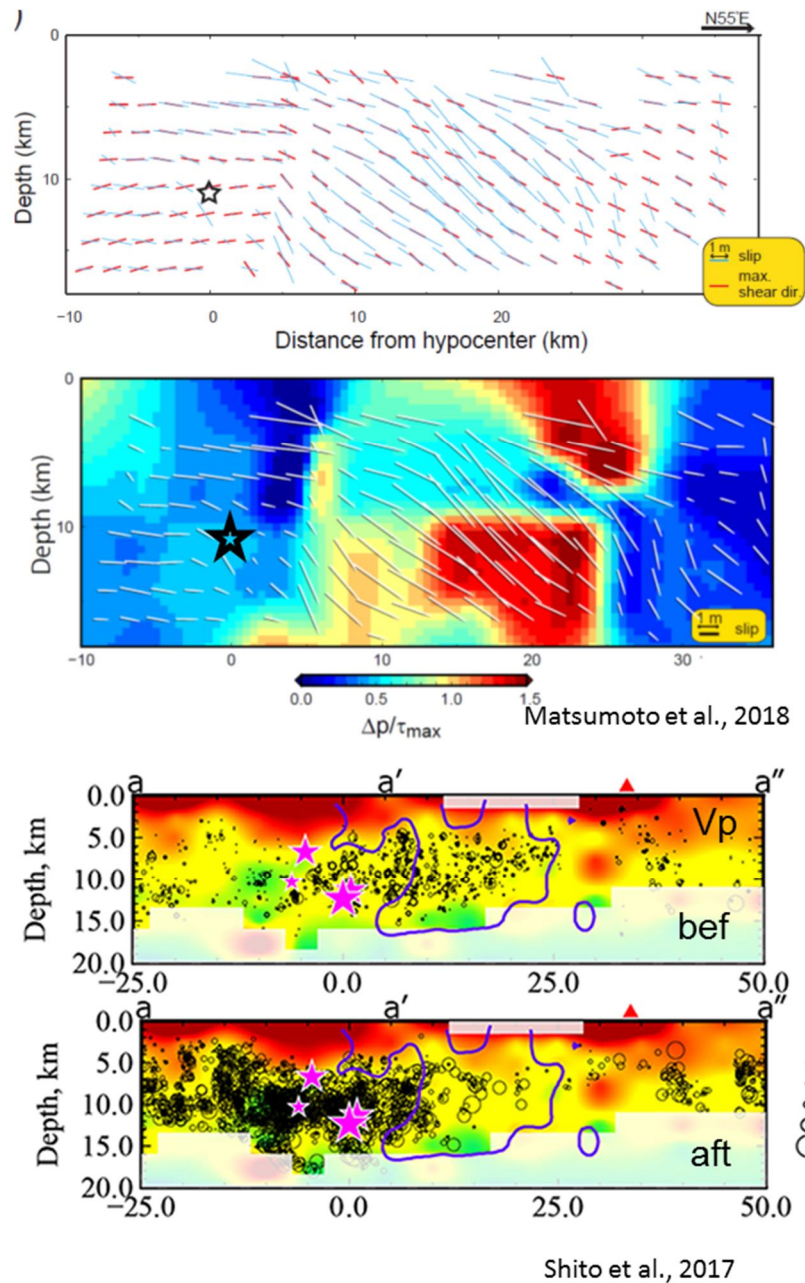


図 1. A) 発震機構解から推定した応力場と本震断層面から求められた、応力場から期待されるすべり方向と Asano & Iwata, (2016)による地震時すべりと、断層面と応力場に対する最適方向のずれを示した図（赤がずれの大きい部分）。(B) 断層面沿いの P 波速度構造。プロットしているのは熊本地震前の震源(上)と発生後の震源（下）。(九州大[課題番号：2201])。

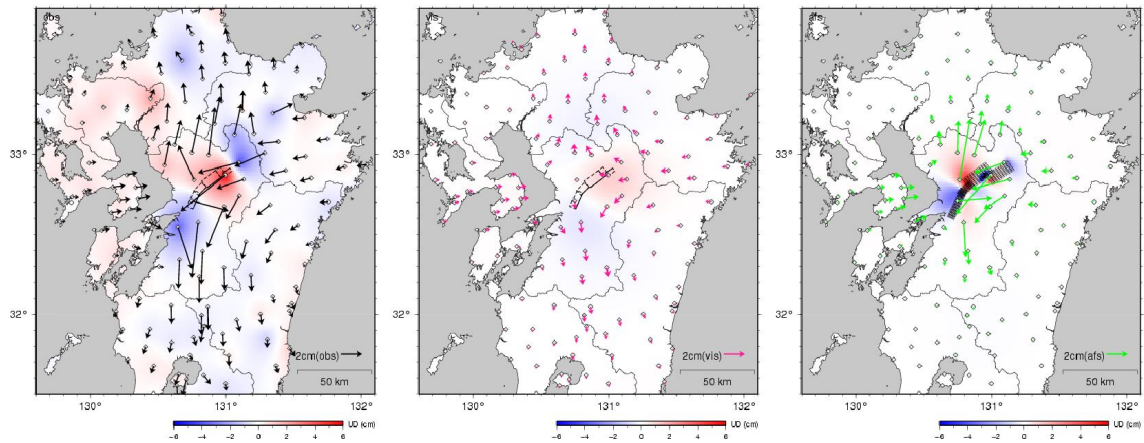


図 2. 熊本地震の 1 年間の余効変動。(左) 観測値。(中央) 粘性緩和による変動。(右) 余効滑りによる変動。(国土地理院[課題番号：6001])。

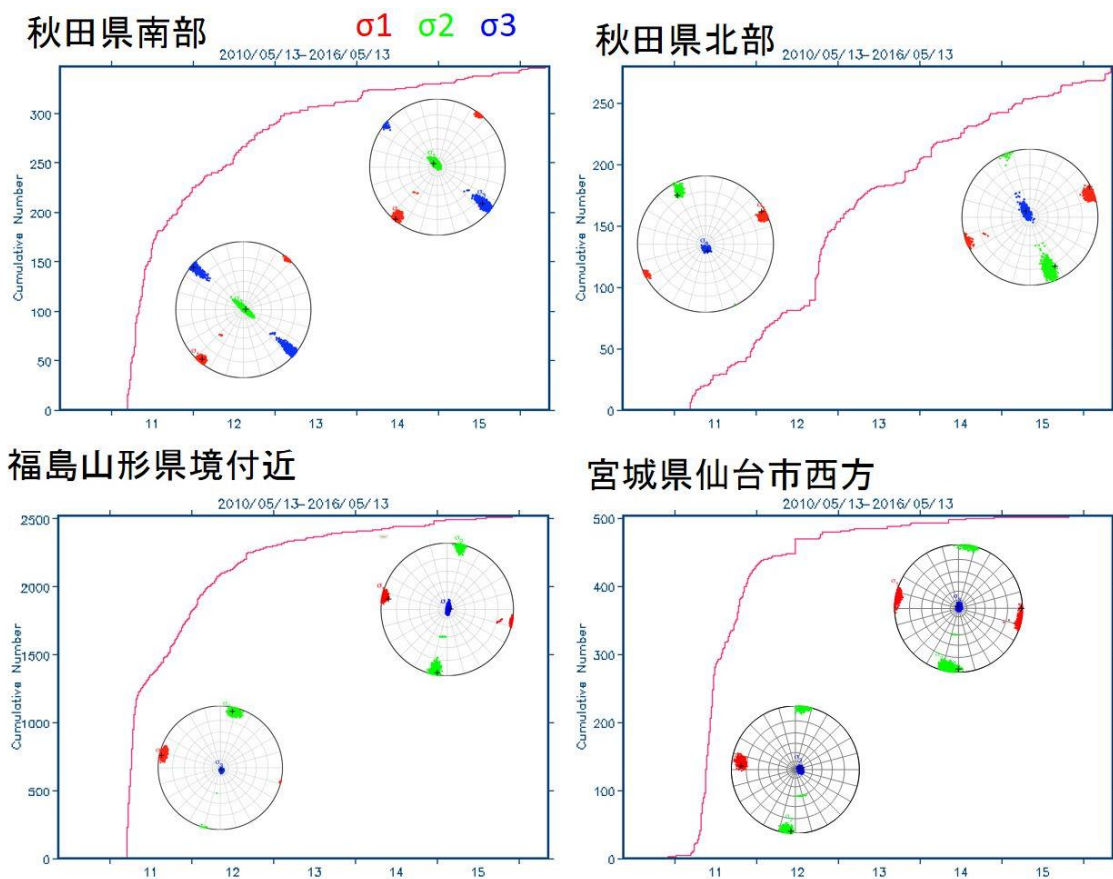


図 3. 東北沖地震後に活発化した内陸群発震源域での応力場。

各領域の M2 以上の地震の累積個数と、2011 年 (左)・2016 年 (右) の応力場 (赤： σ_1 , 緑： σ_2 , 青： σ_3) の 95%信頼区間を示す。(東北大[課題番号：1203])。

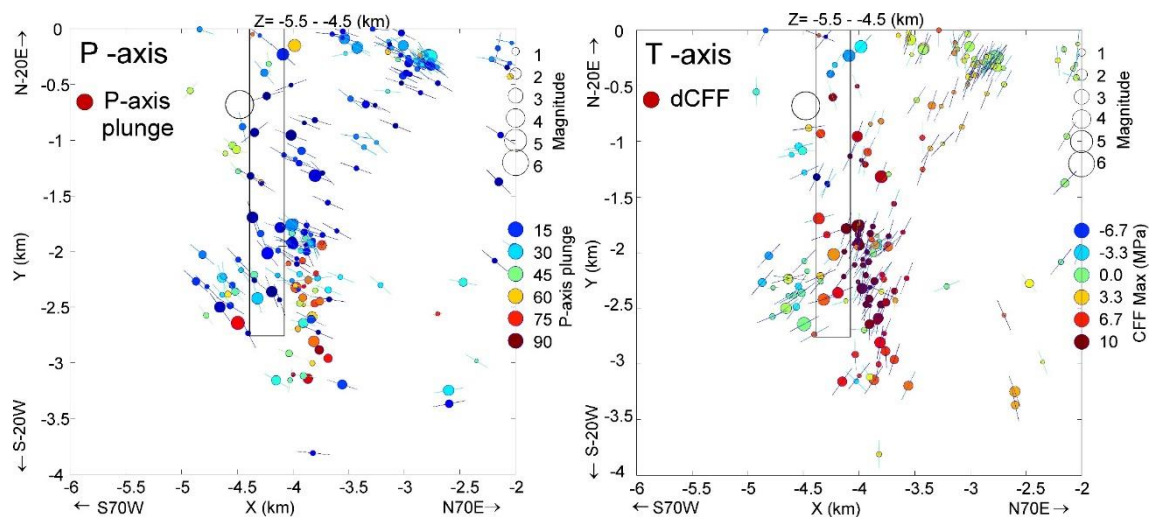


図4. 2016年鳥取中部地震の余震域南端付近におけるP軸およびT軸の方位分布

深さ5km 水平面から0.5km 以内，メカニズム解の精度が比較的高いもののみ(Kagan 角で60度以内)のみを示す。P軸の丸印の色はP軸のplunge，T軸の丸印の色は，最適なメカニズム解の2つの節面に対する本震のすべりによる応力変化(dCFF)の大きい方を表している。(京大防災研[課題番号:1907])。

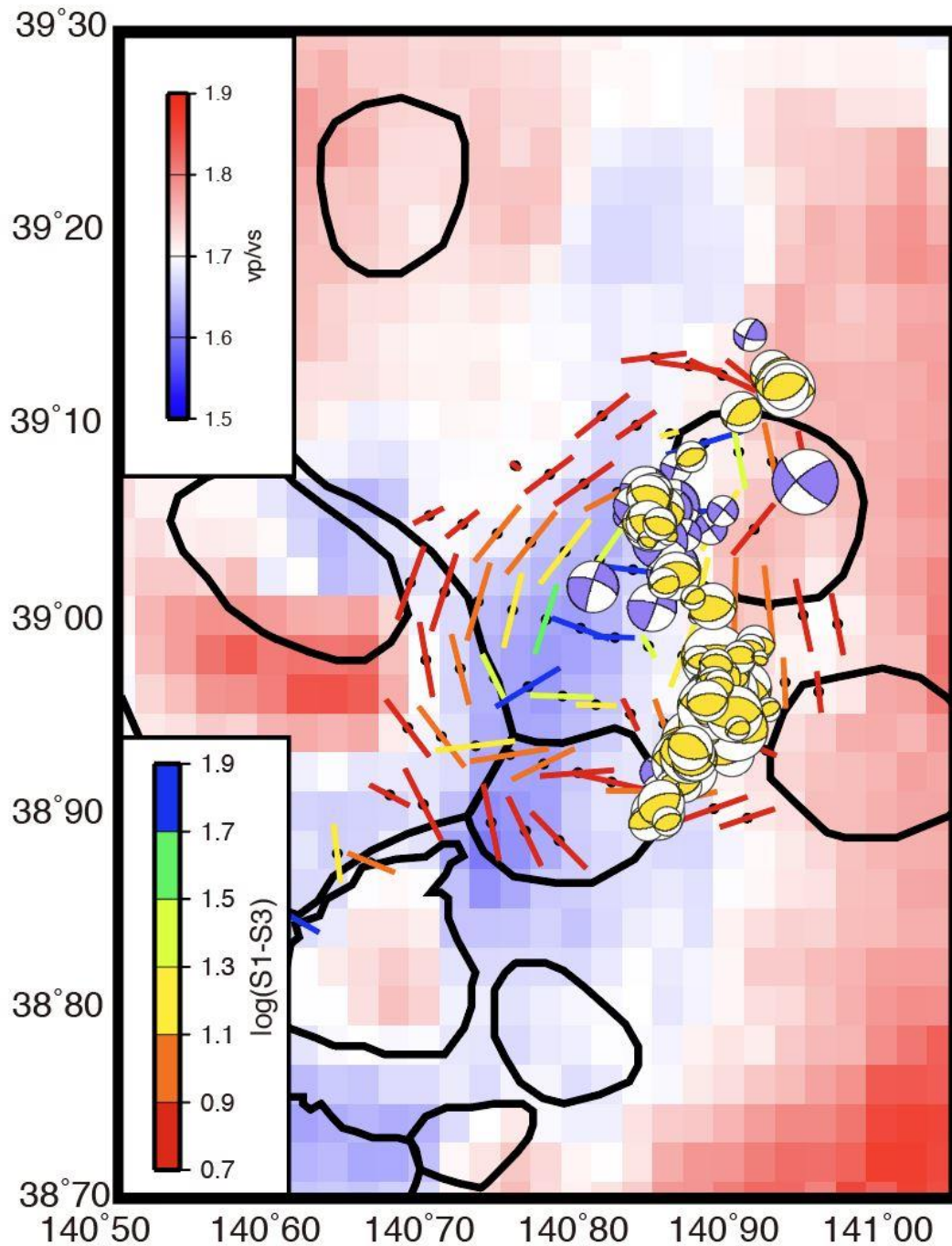
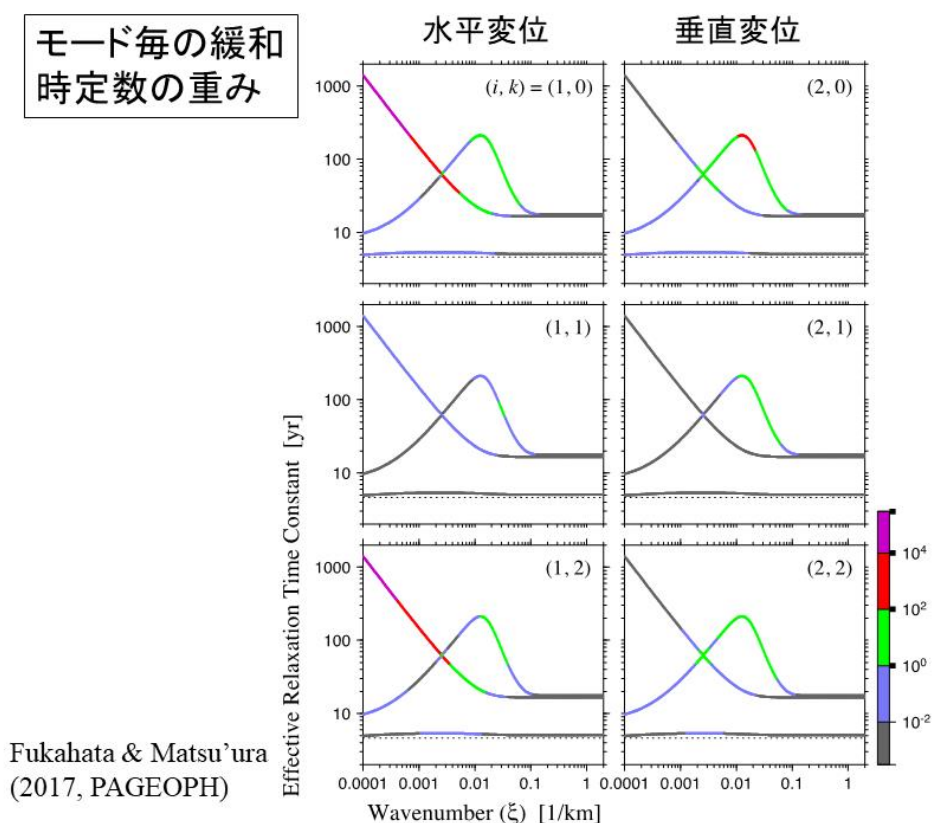


図 5. 2008 年岩手・宮城内陸地震の特異な余震と応力場と V_p/V_s 比構造の比較。

南北圧縮の逆断層型（黄色）と横ずれ断層型（紫色）の余震の発震機構解の分布，Okada et al. (2012) による V_p/V_s 比，Yoshida et al. (2014) による本震後の応力変化の分布を重ねて示す。線分は，差応力変化が 5 MPa 以上の応力変化の分布を表す。 σ_1 の方向を水平面に正射投影して示し，色が差応力の大きさ (MPa) の常用対数を表す。黒線はカルデラの分布（布原・他，2010）を示す。（東北大[課題番号：1204]）。

モード毎の緩和
時定数の重み



Fukahata & Matsu'ura
(2017, PAGEOPH)

図 6. 各緩和時定数の重みは、係数 a_{ikm} で表される。この図は、その係数の大きさの空間波数依存性を示している。係数の大きさが桁で変わること（右下のカラーバーがスケール）。紫や赤の部分が、粘性緩和において主要な役割を果たす。つまり、非常に長波長（数百 km 以上）の水平変位については、 $\tau = 4.6$ 年にも拘わらず、実際の緩和には数百年以上もの時間がかかることが分かる（左上・左下図）。垂直変位についても、50 ~ 100 km の波長の変形が、100 年以上の緩和時間を持つことが分かる（右上図）。実際の緩和には名目的な Maxwell 緩和時間 τ よりもずっと長く時間がかかることの原因である。ただし、なぜ緩和時定数が 3 つあるのか、またなぜそれらに波数依存性があるのかという問題については、数学的には非常に明らかであるが、物理的に説明することはなかなか難しい。（京大防災研[課題番号：1905]）。

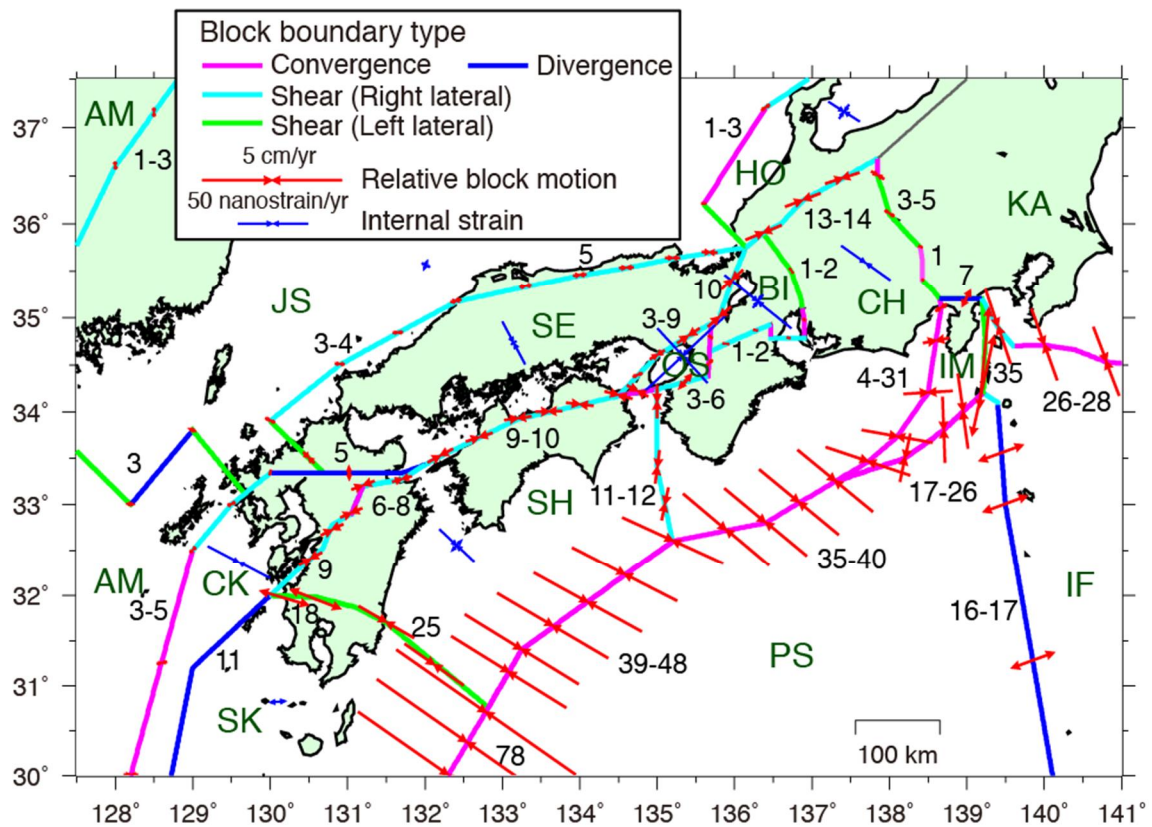


図 7. 海陸地殻変動データからブロック断層モデルを用いて推定されたブロック間相対運動。数字は、相対運動速度 (mm/yr) を表す。(京大防災研[課題番号：1907])。

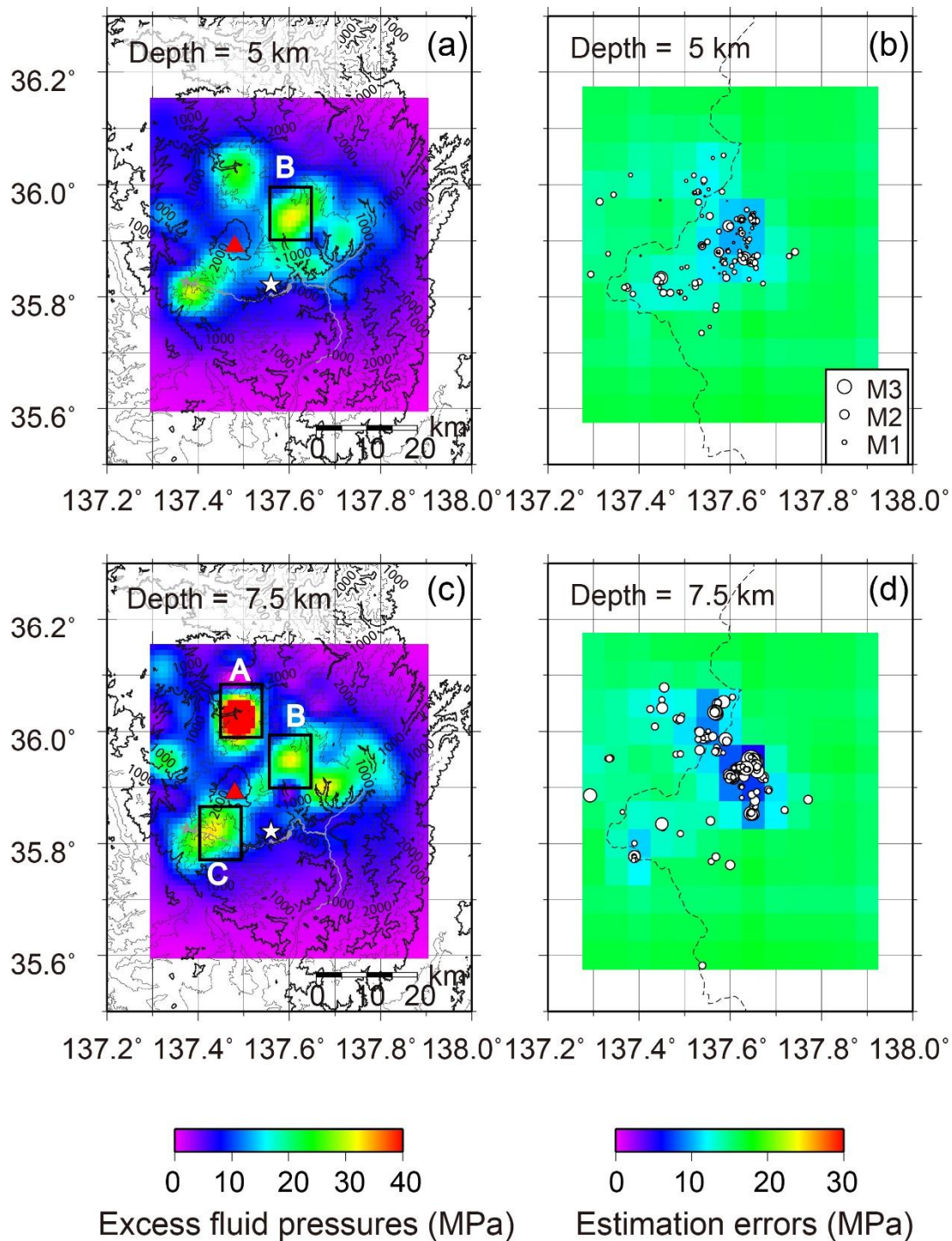


図 8. 御嶽山周辺域の 3D 間隙流体圧場 (Terakawa, 2017)

(a) 深さ 5 km での間隙流体場, (b) 深さ 7.5 km での間隙流体場, (c) 深さ 5 km で推定誤差分布, (d) 深さ 7.5 km で推定誤差分布。(c)及び(d)の白丸は、解析に用いたデータ（各水平面から 1.25 km 以内のもの）を示す。☆は 1984 年長野県西部地震の震央を示す。矩形 A-C は、解析期間（2009 年 8 月～2012 年 8 月）において間隙流体圧場の高まりがあった可能性がある領域を示す。（京大防災研[課題番号：1907]）。

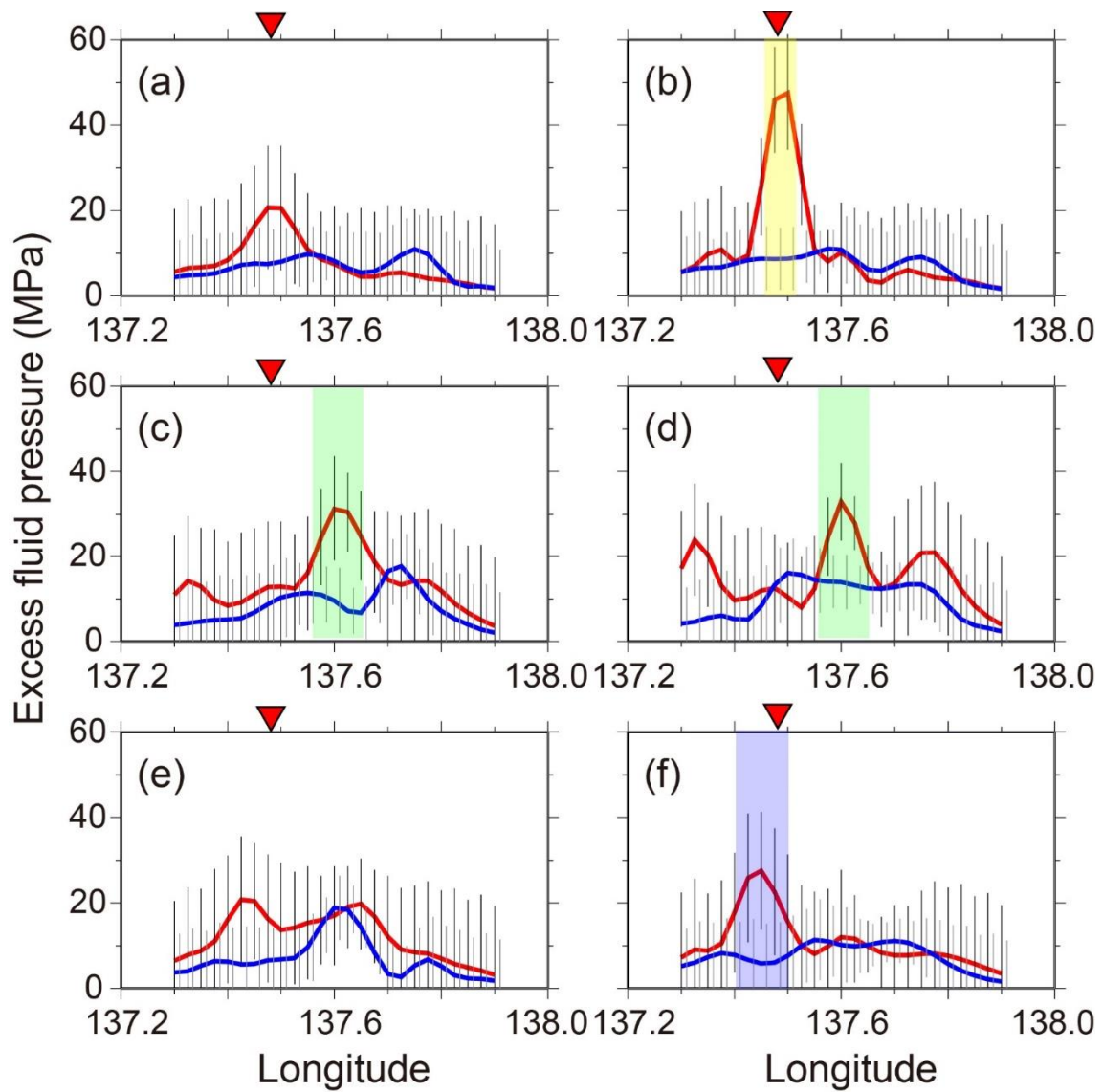


図 9. 御嶽山周辺域での間隙流体圧場の時間変化 (Terakawa, 2017)

赤線と青線は、それぞれ 2009 年 8 月～2012 年 8 月と 2012 年 9 月～2014 年 7 月のデータによる結果を示す。(a)–(f)、カラーの網掛け領域は図 16 と同様である。(京大防災研[課題番号：1907])。