「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,発生場 と発生機構の解明,および発生予測に関する研究を推進した。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へ向けたアプローチの研究を進めた。

内陸地震発生ポテンシャル評価には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が重要なパラメータとなる。今年度は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行われた。同様に、全国各地において地殻活動の時空間的変化や背景の構造の調査が進められた。また、ポテンシャル評価の試行が開始された。実験的な研究から、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検討が進んだ。一方、情報発信として重要な、日本列島基本構造モデルのコンパイルが進められるとともに、関連する研究課題を取りまとめて得られるパラメータを地震活動評価実験などへ利用する手法を検討することで、発生予測や災害誘因予測研究へのアプローチをすすめた。以下にこれらの成果の概要を記す。

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と 入力作業を実施した。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・日奈久起震断層、布田川活動セグメントおよび日奈久活動セグメントへのリン 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。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年熊本地震に地表地震断層と活断層の調査を進めた。大学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で残っている間にその全貌を把握することに成功し た。その結果、多くの地点で右横ずれ変位が認められ、最大右ずれ変位量は益城町堂園 で約225cm である。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する。なお、 鉛直変位は最大100cmであった。出ノロ断層に沿っては、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、最大2mに及ぶ。地表地震断層の位置は概ね既存の活断層 線に沿っているものの、一部では一致していない。山地の連続性に基づいて活断層を引 いていたところでも地表地震断層が通らず、想定外のところに地表地震断層が通ること や、左ずれ変位を示す共役断層の存在が明らかになった。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 なされている。今年度は累積変位を示す変動地形に関する精査を進めた。また,LiDAR DEM の変位ベクトル分布による変動量計測を高度化できた。 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。この結果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載荷とそれに対する内陸地殻の弾性・非弾性応答を観測・モデル化し、その特性を明らかにすることが求められる。また、地震発生に大きく寄与する、広域の応力載荷に対する個別の断層への応力集中メカニズムや断層強度低下メカニズムも解明する必要がある。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である。また、東北地方においては、東北地方太平洋沖地震の地震時・余効変動とその応答を観測できることから、応答特性を知りうる重要な機会である。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、個別の地域においての発生場の推定、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検証した結果を「(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」へ提供しその効果の検討を開始し 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、16日にM7.3の本震が発生し、

最大前震M6.5とあわせて大きな被害を及ぼした。大学および関係機関は現地で観測を開 始し, この地震の特性が明らかになってきた。

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大きい領域, 比抵抗構造では低比抵抗域の端で発生した。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で応力が高かっ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 布を基に得られる断層が日奈久断層,布田川断層だけでなく複数の断層面が存在してい ることが明らかになった。これらの断層は空間的にも傾斜角を変化させている特徴を持 つ。また,M6.5とM7.3の断層をつなぐ,ほぼ鉛直の深部断層の存在が示唆された。一 方,また,1999-2000年に日奈久断層で発生したM5を伴った活動は鉛直な断層面で の活動であったことに対して,熊本地震の活動は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 以前のデータを用いて, 応力テンソルインバージョンをおこなった。 その結果, 応力場は地震発生前に不均質な状態であったことが明らかになった。また, 地震時すべりインバージョンによる結果と, 地震前応力場から期待される断層面上のす べり方向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。

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 トルがえられた。これによると変位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声しているこ とが明らかになった。また,2016 年熊本地震後8大学共同10部局合同で21点の GNSS 連続観測を実施し,余効変動観測を実施している。これらを解析した結果,布田 川断層帯周辺の観測点の余効変動が単純な2 枚の断層面でのアフタースリップのみでは 説明できていない観測点が多い。一方,日奈久断層帯周辺の観測点では余効変動がアフ タースリップを仮定することによりよく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をGNSS 連続観測,緊急GNSS観測およびSAR 干渉解 析により捉えた。また,得られた地殻変動から断層モデルの推定を行った。

・地殻変動の把握: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) による地殻変動をGNSS 連続観測により捉えた。また、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した。一方、SAR 干渉解析からも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が捉えられた。

・断層モデルの推定: 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。

・余効変動:一連の地震に伴い余効変動が観測されている。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 変動が続いている。(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から,地震波速度DDトモグラフィ法 により構造を求めた。熊本地震の余震活動や大きなすべりは速度の高い部分で発生して いることが明らかになった(図2)。

また、阿蘇火山では低速度域が明らかになり地震時すべりとの関係が示唆される。阿蘇 カルデラ周辺観測点で得られた遠地地震波形の RF 解析により、カルデラの地殻〜上部 マントルのS 波速度構造を決定した。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 ほぼDDトモグラフィ法による速度構造と同様の位置にある。さらに、この RF 解析に よると、阿蘇カルデラ西部の 15~23km の深さには別の低速度層がある。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。この低速度層の存在と布田川断層 帯の東縁の構造の関係を明らかにしていくことが今後重要である(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およびその後も変動が進行している今期計画の研究期間は、こ れらの現象を観測によりとらえて、定常的な活動下では検出できないレオロジー構造を 推定する重要な機会である。今年度も地震、GNSS 観測点の展開を進める一方、地震発生 直後から現在までの時間的変動についても議論が可能になった。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4年程度経過した後で応力場は概ね同じであるこ とが確認できた(図3)。これは、地殻応力状態にその絶対値としてどのような時空間 変化が起こっているかを知る上で重要な情報であり、今後のモニタリングが必須である (東北大[課題番号:1203])。また、東北地方内陸(秋田県北部、南部)での誘発地震 活動は時空間的に消長があり、東北地方太平洋沖地震発生時の応力変化に起因すると考 えることは困難である。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間変化を反映するというのが、一つの可能性とし て考えられる(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 データのクラスター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 に高速度・ 高比抵抗層が存在していることがあきらかになった。

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すすめた。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])を用いて、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、速度構造などから客観的にモ デル化され、それが観測事実と整合するものであることからきわめて重要である(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—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-南東方向の短縮が卓越し,面積歪では短縮になっている場所もある ことが分かった。(国土地理院[課題番号:6001])

・応力場・ひずみ速度場等,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等を調べ,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,塩崎・他による低比抵抗域 から推定される,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 りによる直上の地震発生域への応力集中や,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大きさ変化などの構造不均質局在化は 応力場の回転や応力集中を生む可能性があり,応力載荷メカニズムを検討するうえで重 要である。(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,断層露頭観察から 得られた断層破砕帯の幅及び流体拡散により引き起こされた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 に作用した本震すべりよる静的応力変化(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起きている現象であること、余震分 布の幅は断層破砕帯や群発地震の震源分布より広い幅で起きていること、余震分布の幅 は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。断 層破壊による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が本研究によ り確かめられ,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、解析領域を少し拡げ、322 個の発震機構解を追加した。これにより関東地域の 地殻応力図が一通り完成した。地殻応力場データベース

(https://gbank.gsj.jp/crstress/) への反映は、結果を最終確認した上で、次年度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年間にわたる臨時観測を行い,データを用いて応力場を求めた。解析した結果,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震が多数発生している ことを明らかにした(Uchide and Imanishi, 2016)。同様の傾向は国内の他地域におけ る地震についても見つかった。ω 2 モデルは小地震の応力降下量を見積もる際に仮定 されるが、今後はより現実的なモデルを仮定することで、小地震の情報、ひいてはその 背景にある応力状態や断層強度の情報を適切に引き出す上では重要な成果である(産総 研[課題番号:5008])。

一方,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を開発した(Terakawa et al., 2016)。このように応力場を時空間的にモニタリングする手法の適用が重要である。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 態を捉えることができる可能性を示唆する。今年度は御嶽山における局所応力場の時間 変化をモニターすることを継続した(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る(京大防災研[課題番号: 1907])。

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。弾性歪を示す地震時歪は,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 進行しており,本質的には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 ことを意味する。(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,新潟ー神戸ひずみ集中帯,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 た地殻変動を検出した。データを複合的に用いることによって,地震時および地震後の 断層上の不均質なすべりを検出することができた(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推定される断層形状は, 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を検出し, 詳細に明らかにされるようになってきた。昨年度は 茨木県北部において詳細かつ複雑な断層形状が明らかになったが, さらに他地域でもそ の複雑な形状が検出された。

熊本地震については上述したが、そのほか、昨年度の2011 年東北沖地震後に誘発さ れた仙台大倉におけるmigration する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り得られた到達時刻差データに Double-Difference 法を適用して震源再決定を行った。得られた震源は、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する。この方向は 広域応力場から見てunfavorably-oriented であり、その面の摩擦強度が著しく低下し ていたことを示唆する。震源のmigrationは流体拡散に伴う間隙水圧の増加で説明で き、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る。(東北大[課題番 号:1203])。

地震発生場のモデル化

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変化や内陸活断層にお けるクーロン応力を計算することによって、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が本研究の目的であるが、すべり相互作用の 計算に必要な断層ジオメトリを実データに合うように設定するために、ブロック断層モ デルを用いた地殻変動のモデル化を前年に引き続き行った。陸上 GNSS データに加え て、海底地殻変動データ(GPS/A)データを新たに用いたり、ブロック断層モデルの解 析領域やジオメトリを変更したり改良を加えた結果、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は、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の割合であることが推定され、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わかった(京大防災研[課題番号: 1907])。

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に、御嶽山南 東麓の群発地震活動域の応力場の時間変化を調べた。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、火山の状態を捉えることができる可能性を示唆する。今年度は御嶽山に おける局所応力場の時間変化をモニターすることを継続した(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る (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ー法(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は静水圧状態を 10-30 MPa 程度上回る結果となった。また、基にした応力場の空間分解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 Manila trench 及び Philippine trench model 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、様々な地球物理的観測・解析が行われており、上記の広域 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。前年度までに、当該範囲にお ける構造探査・tomography 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、tomography 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震源断層モデルの構築

日本列島及びその周辺域の Moho 面形状のモデル化のため,日本列島直下で提出され ているモホ面構造と,広域的なモホ面構造 (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 が,P 波速度の変化が大きく,かつ制御震源によるモホ面とよく一致する ことが明らかになった。このため Moho 面に類似した構造として,7.2 km/s の等しい

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る。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,大和海盆における観測を終了した。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 までの低速度域がイメージされた。レシーバー関数解析からは,深さ70km 程度か ら深部を低速度とする構造が観測波形を比較的良く説明する。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ヴァ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 合の粒界が開い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 高温高圧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)を図4 に示す。含水化の程度が同じでも、蛇紋石を含む場合よりVp とVs の低下量は約1/3 にとどまり、またVp/Vs は無水の場合とほとんど変わらない。 このことは、観測でVp やVs の低下量が小さく、またVp/Vs 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化が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際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 Cascadia 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 Costa Rica 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 起こりやすい(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

流体による強度低下は東北地方でもその可能性が示唆される観測結果が得られてい る。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-流体相互作用により、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、実験的に明らかにした。その結果、350 ℃の温度付近では急 激な溶解による流体貯留スポットの形成、400℃前後でのシリカの急激な沈殿による不 透水層の形成を示すことが出来た(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・再解析をすすめ、。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えられた。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ことから、昨年度に引き続き、今年度はこれらを進めた。 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の最大地震(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ところ,不均質構造を取り 込むことによって,震度予測残差の2乗平均平方根(RMS)が約10%程度(10秒後の震度 予測の場合)改善されることがわかった。また,より未来の予測になると予測残差の 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特性や機能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 μ m のレーザー光源で動作できる構成であり,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。ほぼ当初計画に沿って進められてい る。次年度に試作を行い,特性を測定する予定である。(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 も1割程度の減少があったものの補修の十分な効果は認められなかった。このため月) に,あら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をして いる。(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。この補正データをもちいて N2-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,大気とマントルの混合線上 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 N2-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 N2-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 の研究も進めている。

今年度は特に、熊本地震を受けて重要な成果が上が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についてである。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ているすべりを起こしている。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,M7.3の連動についてはまったく解明で きていない。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進める高い必要性がある。

また、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 取得することが重要である。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ている。今年度は実験的な研究が進歩し、流体の分布形 態の発達など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 やモデル化をすすめ、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や活断層との空間 的、力学的関連性について、詳細な断層形状が明らかになってきているが、特に浅部に おいての形態が重要であるにもかかわらず、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 密化を含め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、詳細な地震波や比抵抗の構造、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、データや構造も出るなどの広く活用できる情報を 発信する道筋が十分でないことから、この整備が必須である。

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発信することを目指す。特に、今年度 から進めている、地殻構造や地震活動の情報は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。

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, 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, 2016.

• Freed, A.M., Hashima, A., Becker, T.W., Okaya, D.A., Sato, H., Hatanaka, Y.: 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, 2017.

・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., Becker, T.W., Freed, A.M., Sato, H., Okaya, D.A., 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, Simulation for Inland Stress accumulation due to Interseimic Coupling in the Southwest Japan Arc, AGU fall meeting, 2016.

• Hashima, A., T.W. Becker, A.M. Freed, H. Sato, D.A. Okaya, H. Suito, H. Yarai, T. Ishiyama, and T. Iwasaki, Near-field and far-field effects of elastic structure on coseismic deformation of the 2011 Tohoku earthquake, Japan, European Geosciences Union General Assembly 2016, 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, 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, 2016.

・橋間昭徳・A.M. Freed・T.W. Becker・佐藤比呂志・D.A. Okaya・畑中雄樹, 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, 2016.

• 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., Fluid Path in the lower crust Estimated by S-Wave Reflection Analysis (招待講演), Goldschmidt 2016, 2016.

• Iio, Y., Fluid Path Below a Seismogenic Fault Estimated by S-Wave Reflection Analysis (招待講演), AOGS 12th Annual meeting, SE10-A006, 2016.

・飯尾能久, 熊本地震はなぜ起こったのか?, 日本の科学者, 52, 6-11, 2017.

・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, 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, 2017

・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., Sato, H., Shinohara, M., 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,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,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-P04,2016

• Nakahigashi, K., Y. Yamashita, T. Yamada, K. Mochizuki, H. Shiobara, M. Shinohara, 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,渡邉 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・渡邉篤志, 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,渡邉篤志,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, 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, 日本地球惑星連合大会, 2016. ・西村卓也, 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,2016.

Nishimura, T., Interplate coupling strain partitioning and block motions deduced from GNSS and GPS/A data in southwest Japan, AGU 2016 Fall Meeting, T31E-2950, 2016
Ogiso, M., S. Aoki, and M. Hoshiba, 2016, Real-time seismic intensity prediction using frequency-dependent site amplification factors, Earth Planets Space, 68:83, doi: 10.1186/s40623-016-0467-4.

・小木曽仁・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. Hoshiba, 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, 2016.

• 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, 2016.

・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, 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, 2016.

• 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. 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,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秋季大会,S08-P13,2016.

• Terakawa, Temporal stress changes at Mt. Ontake volcano, Crustal Dynamics 2016, A08, 2016.

• Tsunomori F., Shimodate T., Ide T. and Tanaka H., 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 omegasquare 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・撹上泰亮・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. Kagiyama , 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 wideband MT data across southern part of Tohoku, NE Japan, and evaluation of interstation horizontal component geomagnetic transfer functions, The 23rd Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, Chiang Mai, Thailand, August 14-20, 2016.

・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, 6.4, 7.3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)。上から, P, S波速度, Vp/Vs比。青色が低速度を示す。黒〇は震源を示す(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1020 Pas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1019 Pasとし,赤線はHoriuchi and Iwamori 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. 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)。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 上:地震前(歪速度),上:地震時(歪),左: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 ℃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])。