

## (8) 名古屋大学環境学研究科

### 1. はじめに

名古屋大学環境学研究科附属地震火山研究センターは、犬山地震観測所（設置 1965 年、以下同）、高山地震観測所（1969 年）、三河地殻変動観測所（1969 年）、地震予知観測地域センター（1975 年）を 1999 年に統合・改組した地震火山地域観測センターを母体としている。当初は理学部附属施設であったが、2002 年に環境学研究科の附属施設になり、2003 年には地域防災分野を加えて、地震火山・防災研究センターとなった。

2012 年に全学組織として減災連携研究センターが設立された。これに伴い、地震火山・防災研究センターは地域防災分野を減災連携研究センターに移し、地震火山研究センターとなった。地震火山研究センターから専任教員 1 名が減災連携研究センターに異動したほか、複数名の教員が連携教員として関わっている。

2017 年には長野県・木曾町・王滝村の協力を得て御嶽山火山研究施設を開設した。

### 2. 御嶽山火山研究施設の開設

2014 年に発生した御嶽山噴火は戦後最大の火山災害を引き起こした。この災害において、地元自治体と専門家との十分な連絡体制ができていなかった反省から、長野県や地元自治体が御嶽山地域への研究施設の必要性を強く希望した。それを受けて、名古屋大学は長野県・木曾町・王滝村の協力を得て 2017 年度に地震火山研究センター内の御嶽山火山防災研究寄附分野を設置し、その活動拠点として御嶽山火山研究施設を木曾町三岳支所内に開設した。現在は長野県の支援による研究スタッフが週末を中心に勤務しており、火山活動状況の把握と評価、住民・行政と連携した防災力向上に積極的に関与していく体制を整えた。

### 3. 最近 10 年の観測網の変遷

最近 10 年で大学を取り巻く環境が大きく変わり、地震・地殻変動観測網を維持する予算が削減されている状況が続いている。これに伴い、観測網の維持管理や通信費等の合理化を実施してきたが、人員削減等もあり定常観測網の維持が困難になりつつある。名古屋大学では複数の定常地震観測施設、および地殻変動観測施設を廃止、あるいは他機関に移管するなどの対応を実施してきた。一方、御嶽山周辺の観測網を充実させるなどを実施し、観測網の「選択と集中」を模索する状況が続いている。

### 4. 主な研究成果

ここでは最近 10 年の主な研究成果をプレート境界域、

内陸域、海洋プレート域、火山域、および構造探査に分類して紹介する。

#### 4.1 プレート境界域

##### 4.1.1 海底地殻変動観測

名古屋大学では南海トラフ域、および琉球海溝域に海底地殻変動観測を展開しており、特に南海トラフ域では、フィリピン海プレート上にも海底局を設置することで、海溝軸を挟む海底地殻変動観測を実施している。紀伊半島沖の海底地殻変動観測の結果、海溝軸沿いの最も浅い領域のプレート間の固着率は約 70%と推定された<sup>1,2)</sup>。

一方、西南日本の海底地殻変動観測と GEONET の観測結果を統合した地殻変動速度場を用いて、マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法を用いた内陸のブロック運動を考慮した解析手法を確立し、南海トラフ域の空間的に不均質なプレート間固着の分布を明らかにした<sup>3)</sup>。また、琉球海溝域の海底地殻変動観測により沖縄本島の沖には強い固着領域が存在することを明らかにし、このセグメントは 1791 年の津波イベントの震源域と一致しているが、スロースリップイベントの活動地域と重複していないことを明らかにした<sup>4)</sup>。

##### 4.1.2 東海地方における精密制御震源システム

2006 年に岐阜県各務原市で稼働させていた精密制御震源装置を愛知県豊橋市の名古屋大学の三河観測所に移設し、稼働させている。このシステムによる東海地震震源域の固着状態のモニタリングの可能性を静岡大学、気象研究所とともに探っている。この研究の中で、約 10 年間の S 波速度の時間変化を調査したところ、2011 年東北地方太平洋沖地震（以下、2011 年東北沖地震）に伴う S 波速度のステップ的な低下（-0.01 ～ -0.04%）、および、S 波速度の経年的な増加（0.002 ～ 0.008 %/year）が観測された。これらの S 波の速度変化は観測領域全体で観測されており、速度変化の方位依存性が存在することを明らかにした<sup>5)</sup>。

##### 4.1.3 2011 年東北地方太平洋沖地震

2011 年東北沖地震の地震時の GPS 変位データ、および海底地殻変動データから地震時のすべり分布を求め、宮城沖と福島沖の 2 つの地震間すべり欠損域にまたがるバイモーダルな地震のすべり分布を推定した。宮城沖のすべり欠損域での異常に大きな地震すべりは、基盤となる 300 km サイズのアスペリティの完全な破壊を示唆していることを明らかにした<sup>6)</sup>。一方、地震波による解析では、2011 年の地震が過去に発生した M7-8 クラスの地震のアスペリティの連動であったことがわかった。また津波地震である明治三陸地震の震源域では、この地震

でも大きな地殻変動を伴って津波地震となったこともなかった<sup>7)</sup>。

地震後には GEONET、および海底地殻変動観測により余効変動が観測された。太平洋プレートの沈み込み帯を 3 次元有限要素法によって表現し、粘弾性応答を含むグリーン関数を用いて、観測された地殻変動時系列データから余効すべりの時空間発展を推定した。2011 年東北沖地震時のすべり域と余効すべり域とは相補的な関係にあることを示した<sup>8)</sup>。

一方、東北地方の太平洋沿岸では地震間に地盤沈下が観測されており、2011 年東北沖地震では 1m を超える地盤沈下が生じた。一方、地形学的証拠は、同じ地域で長期的にわずかに隆起していることを示している。この逆説的な上下変動履歴を解釈するために、地震サイクルを考慮した変形モデルを構築した。その結果、アセノスフェアの粘性緩和が地震サイクルの地殻変動パターンに大きく影響し、地震の発生間隔がアセノスフェアの粘性緩和時間よりも長い場合、地震間の変形パターンの時間変化が顕著になることを示した。地震サイクル内の粘弾性応答による不均一な上下変動の変化が、東北日本の不可解な上下変動の原因である可能性を示した<sup>9)</sup>。

#### 4.1.4 プレート間の衝突

プレート収束境界では、プレートの衝突とプレート境界面に沿った断層運動によって、プレート間の収束運動が吸収される。プレートの衝突は、プレート内部に応力場を生成することから、プレート内部の応力場のパターンから衝突速度分布を推定する手法を開発し、伊豆半島に適用した。その結果、高い衝突率の帯が伊豆半島の衝突部を取り囲んでおり、中央の衝突帯は、伊豆 - 小笠原島弧の衝突前線と一致していることから推定した衝突率分布がプレートの衝突プロセスを説明していることを示した<sup>10)</sup>。

## 4.2 内陸域

### 4.2.1 地形効果による地殻応力

岐阜県阿寺断層地域での水圧破碎試験から推定された応力は、断層運動と一致していない。地形荷重による応力を数値計算により求めたところ、最大圧縮応力方向は、水圧破碎深度での測定と一致した。この結果は、浅い深さでの地殻応力に対する地形効果の重要性を示し、水圧破碎から得られた応力が主に地形効果を反映していることを示した<sup>11)</sup>。

### 4.2.2 横ずれ断層の成長過程のシミュレーション

垂直な横ずれ断層形成の初期の段階では、地殻と上部マントルの変形は均質で単純な剪断応力によって支配される。断層が成長するに伴い、下部地殻の剪断応力が局所化し、塑性流動に起因する抵抗により、地震の発生

間隔は 1 桁減少する。断層が下部地殻まで完全に発達した後は、断層すべりは断層の相対運動速度に追いつき、地震は周期的に発生し、最初から数十万年で定常状態になる。このモデルは、プレート内の横ずれ断層周辺の応力の進化を再現し、下部地殻の局所的なせん断帯の発達とその相互作用を明らかにし、プレート内地震とレオロジー構造との相互作用の重要性を示した<sup>12)</sup>。

### 4.2.3 歪み集中帯における非弾性変形の重要性

2011 年東北沖地震の地震前、地震時、および地震後の期間の GNSS 解析に基づくひずみ分析によりひずみ集中帯の非弾性プロセスの評価を行った。地震時の東西方向のひずみは弾性伸長を示すが、40 ~ 60 km 幅の短波長成分の局所的な収縮は、地震の前後でも持続しており、非弾性プロセスが持続していることを示した<sup>13)</sup>。また、局所的な変形の振幅と水平方向の位置の違いは、地震の前後で異なる変形様式であること示唆している。この変形様式は、上部地殻と下部地殻の一部を切断する断層、および断層の上に位置する幅 40 ~ 60 km の弱い弾性領域によって説明可能であり、ひずみ集中帯の変形機構には弾性と非弾性の両方が不可欠であることを示した<sup>14)</sup>。

### 4.2.4 地震の発生メカニズムと間隙流体の役割

地震のメカニズム解から間隙流体圧場を推定する地震メカニズムトモグラフィー法を開発した<sup>15)</sup>。本手法をスイス・バーゼル地熱貯留層で誘発された地震活動に適用し、注水実験に応じた間隙流体圧の時空間変動を推定した。その結果、多くの地震は間隙流体圧の上昇によって引き起こされていることがわかった。これは、断層強度の低下が誘発地震の主な原因であることを示唆し、これまでの理論的考察をデータ解析により実証した<sup>16)</sup>。また、同手法のアイデアを使って、2011 年東北沖地震の誘発地震に間隙流体圧の上昇が関与していることを示した<sup>17)</sup>。さらに、同手法を御嶽山麓で発生する群発地震活動にも適用し<sup>18)</sup>、地震の発生メカニズムと間隙流体の役割について調査した。

### 4.2.5 絶対応力場の推定

間隙水圧をパラメータとして、地震の震源メカニズム解から 3 次元の絶対応力場を推定する手法を開発した。本手法を南カリフォルニアのメカニズム解カタログに適用し、1992 年ランダース地震の直前の絶対応力場を推定した。その結果、南カリフォルニアの内陸地殻は岩石の標準状態にあり、深さ 5 km および 10 km の最大剪断応力はそれぞれ  $44 \pm 15 \text{ MPa}$  および  $79 \pm 24 \text{ MPa}$  と見積もられた<sup>19)</sup>。

### 4.2.6 明治 22 年熊本地震の震度分布

地球科学的観測が始まる前に発生した熊本地震（1889 年 7 月 28 日； $M = 6.3$ ）について、地方史や郷土史、

新聞等から被害情報を抽出し、この地震の詳細な震度分布を求めた。現在の表層地盤増幅率 (J-shis) と比較すると、地盤の悪い場所にある構造物被害が大きいこと、当時の集落は地盤のよいところに位置していたことなどがわかった。現在の集落は地盤の悪い地域にまで広がっており、当時は被害が小さかった地域でも今後は大きな被害出る可能性があることを示した<sup>20)</sup>。

#### 4.2.7 スマトラ島の GNSS 観測網 (AGNeSS)

2005 年にスマトラ島の北西部に GNSS 観測網 (AGNeSS) を構築し、観測された 2004 年スマトラアンダマン地震の余効変動から、粘弾性緩和を考慮した余効すべりを推定した。最適レオロジー構造を推定して、余効すべり分布を推定した結果、地震のすべり分布と余効すべり分布は互いに補完的であることを明らかにした<sup>21)</sup>。一方、スマトラ島の内陸部にはスマトラ断層が存在しており、地震の発生が危惧されていることから、AGNeSS によりスマトラ断層沿いの地震発生ポテンシャルの評価を行った。解析の結果、スマトラ断層の北部地域にてクリープセグメントと固着セグメントが推定され、空間的に不均質な固着状態であることを示し、特に固着セグメントではマグニチュード 7.0 クラスの地震が発生する可能性を指摘した<sup>22)</sup>。

### 4.3 海洋プレート域

#### 4.3.1 非線形レオロジーモデル

AGNeSS によって 2012 年インド洋地震発生後の 2 ヶ月間に急激な変動が生じ、その後に緩やかな推移する余効変動パターンを観測した。この変動パターンを説明するために、不均質構造を考慮した非線形レオロジーの 3 次元有限要素モデルを構築して、応力駆動型の余効すべりモデルと組み合わせて解析した。その結果、地震後の急速な余効変動を再現するためには非線形レオロジーが必要不可欠であることを示した<sup>23)</sup>。

#### 4.3.2 海洋プレート内地震とプレートの熱収縮

海洋リソスフェアの年齢に対する海洋プレート内地震の  $b$  値の正の相関を発見した。最も若い (10 Ma 未満) 海洋リソスフェアの  $b$  値は約 1.0 であるが、中～古い (> 20 Ma) 海洋リソスフェアは 1.5 を超える。この  $b$  値のプレート年齢依存性は温度構造ではなく、ひずみ速度と相関があることを明らかにした<sup>24)</sup>。また、海洋プレート内地震と数値シミュレーションによる海洋プレート内の応力解放の解析により、若い海洋リソスフェア (5～15 Ma) の水平方向の熱収縮について調査した。水平方向の応力解放割合に大きな不均質があることを発見した。これは海洋リソスフェアの熱応力に関する進化の数値シミュレーションと整合的であり、海洋リソスフェアの底面に働く抵抗力が 0.44 MPa 未満である可能性を指摘した<sup>25)</sup>。

### 4.4 火山域

#### 4.4.1 2014 年御嶽山噴火直前の変化

2014 年御嶽山水蒸気噴火前の地震活動は主に 2014 年 8 月から 9 月に浅い火山性地震と長周期地震が発生しており、震源の再決定を行った。その結果、地震は NNW-SSE の方向に垂直に整列し、マグマ-熱水の流体の通り道で発生したことを示唆した<sup>26)</sup>。一方、長周期地震は噴火開始 25 秒前に発生し、噴火口から 300～1000 m の深さでの垂直クラック亀裂による変動によって発生したと推定された。この亀裂の方向は、地震の分布と一致しており、深部から地表へのガスの上昇により噴火の直前に開かれた既存の断層で発生したと解釈できる<sup>27)</sup>。さらに、噴火開始 7 分半前から始まる傾斜変動の解析により、深部からの熱供給による地下水の沸騰や減圧によって生じる水の沸騰と解釈できる波形の特徴が抽出できた。このことから、流体が上方に移動する際に浸透率バリアを破壊して、噴火につながったと解釈できる<sup>28)</sup>。また、火山直下の局所応力の変化から、火山活動をモニターする手法を検討した<sup>29)</sup>。

#### 4.4.2 箱根山における S 波スプリッティング解析

箱根火山で発生した 2009 年群発地震の震源域周辺で S 波スプリッティング解析を実施した。その結果、群発地震の断層走向に対して平行に整列したクラックと 3.5%～5.9% のクラック密度の空間不均質があると推定した。これは、既存のクラック密度の高い領域に地殻流体が選択的に注入され、その結果群発地震が引き起こされたと考えられる<sup>30)</sup>。

#### 4.4.3 桜島における精密制御震源システム

桜島に精密制御震源システムを設置し、火山における連続モニタリングを 2012 年から実施している。信号は震源システムから 28 km の地点でも検出され、桜島火山周辺の信号の振幅減衰特性を明らかにした<sup>31)</sup>。また、桜島の火山活動に関係して、伝達関数の後続波のエネルギーの減少が確認されている。この後続波のエネルギーの減少は噴火活動に対応し、火山活動に伴う地下構造変化によって引き起こされたと考えられる<sup>32)</sup>。

### 4.5 構造探査

#### 4.5.1 自然地震による構造探査

濃尾平野の地震観測点で得られた自然地震の強震記録に自己相関解析とレーシーバー関数解析を適用し、地下構造を推定した。推定された地下構造は既存の 3 次元速度構造モデルや速度モデルと比較して、局所的な構造の特徴および全体的な地下構造に関して良好な一致を示した<sup>33)</sup>。

#### 4.5.2 電磁気観測による構造探査

御嶽山の群発地震発生域で 2017 年 6 月 25 日に M5.6



地震が発生した。余震地域周辺で MT 観測を実施し、3 次元比抵抗地下構造を推定した。その結果、2 箇所の導電性領域が推定され、余震域はこれら 2 つの導電性領域の間の非導電性領域に位置している。この特徴は不均一性な岩石、温度、間隙流体分布と関連性を示している可能性があり、比抵抗構造の調査は、潜在的な地震の規模の推定とリスクの評価に貢献する可能性があることを指摘した<sup>34)</sup>。

#### 4.5.3 海洋潮汐応答を利用した構造探査

海洋潮汐応答を GNSS 観測網により観測し、解析することで、地下構造を推定する手法を開発した。本手法を北アメリカ大陸西部地域に設置されている 702 点の GNSS 観測網に適用し、アセノスフェアが周囲よりも 50kg/m<sup>3</sup> 程度低い密度であることを定量的に示した<sup>35)</sup>。

### 5. おわりに

この 10 年間に、1 名の教員の転出、2 名の教員と 1 名の技術職員の定年退職を迎えた。一方で、新たに 3 名の教員が着任し、当センターの研究分野が大幅に広がった。次の 10 年はこれらの新たな研究分野と既存の研究分野をうまく融合し大きな成果に繋げることを期待してやまない。

(伊藤 武男)

### 参考文献

- 1) Tadokoro, K., R. Ikuta, T. Watanabe, M. Ando, T. Okuda, S. Nagai, K. Yasuda, and T. Sakata, 2012, Interseismic seafloor crustal deformation immediately above the source region of anticipated megathrust earthquake along the Nankai Trough, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L10306, doi:10.1029/2012GL051696.
- 2) Yasuda, K., K. Tadokoro, S. Taniguchi, H. Kimura, and K. Matsuhiro, 2017, Interplate locking condition derived from seafloor geodetic observation in the shallowest subduction segment at the Central Nankai Trough, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 3572-3579, doi:10.1002/2017GL072918.
- 3) Kimura, H., K. Tadokoro, and T. Ito, 2019, Interplate Coupling Distribution along the Nankai Trough in Southwest Japan estimated from the Block Motion Model based on Onshore GNSS and Seafloor GNSS/A Observations, *J. Geophys. Res.*, **124**, 6140-6164, doi:10.1029/2018JB016159.
- 4) Tadokoro, K., M. Nakamura, M. Ando, H. Kimura, T. Watanabe, and K. Matsuhiro, 2018, Interplate Coupling State at the Nansei-Shoto (Ryukyu) Trench, Japan, Deduced From Seafloor Crustal Deformation Measurements, *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 14, 6869-6877, doi:10.1029/2018GL078655.
- 5) Tsuji S., K. Yamaoka, R. Ikuta, T. Kunitomo, T. Watanabe, Y. Yoshida, and A. Katsumata, 2018, Secular and coseismic changes in S-wave velocity detected using ACROSS in the Tokai region, *Earth Planets and Space*, **70**, 146, doi:10.1186/s40623-018-0917-2.
- 6) Hashimoto, C., A. Noda, and M. Matsu'ura, 2012, The Mw 9.0 northeast Japan earthquake: total rupture of a basement asperity, *Geophys. J. Int.*, **189**, 1-5, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05368.x.
- 7) 山中佳子, 2012, 東北地方太平洋沖地震の震源課程から見えた課題, 地震学会, A22-06.
- 8) Ito, T., S. Suzuki, K. Sato, and M. Hyodo, 2018, Spatio-temporal afterslip distribution following the 2011 Tohoku-Oki earthquake using 3D viscoelastic green' s functions, *AIP Conference Proceedings*, **1987**, 020056, doi:10.1063/1.5047341.
- 9) Sagiya, T., 2015, Paradoxical Vertical Crustal Movement Along the Pacific Coast of Northeast Japan, *International Symposium on GENAH*, **145**, 73-78, doi:10.1007/1345\_2015\_189.
- 10) Hashimoto, C. and T. Terakawa, 2018, Stress data inversion to estimate collision rate distribution and its application to the Izu Peninsula, Japan, *Tectonophysics*, **744**, 47-57, doi:10.1016/j.tecto.2018.06.001.
- 11) Kumagai, K. and T. Sagiya, 2018, Topographic effects on crustal stress around the Atera Fault, central Japan, *Earth Planets and Space*, **70**, 186, doi:10.1186/s40623-018-0961-y.
- 12) Zhang, X. and T. Sagiya, 2018, Intraplate strike-slip faulting, stress accumulation, and shear localization of a crust-upper mantle system with nonlinear viscoelastic material, *J. Geophys. Res.*, **123**, doi:10.1029/2018JB016421.
- 13) Meneses-Gutierrez, A., and T. Sagiya, 2016, Persistent inelastic deformation in central Japan revealed by GPS observation before and after the Tohoku-oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **450**, 366-371, doi:10.1016/j.epsl.2016.06.055.
- 14) Meneses-Gutierrez, A., T. Sagiya, and S. Sekine, 2018, Crustal deformation process in the Mid-Niigata region of the Niigata-Kobe Tectonic Zone as observed by dense GPS network before, during and

- after the Tohoku-oki earthquake, *J. Geophys. Res.*, **123**, 7, doi:10.1029/2018JB015567.
- 15) Terakawa, T., A. Zoporowski, B. Galvan, and S.A. Miller, 2010, High pressure fluid at hypo-central depths in the L' Aquila region inferred from earthquake focal mechanisms., *Geology*, **38**, 11, 995-998, doi:10.1130/G31457.1.
  - 16) Terakawa, T., 2014, Evolution of pore fluid pressures in a stimulated geothermal reservoir inferred from earthquake focal mechanisms, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 21, 7468-7476, doi:10.1002/2014GL061908.
  - 17) Terakawa, T., C. Hashimoto, and M. Matsu'ura, 2013, Changes in Seismic Activity Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake: Effects of Pore Fluid Pressure, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **365**, 1, 17-24, doi:10.1016/j.epsl.2013.01.017.
  - 18) Terakawa, T., Y. Yamanaka, H. Nakamichi, T. Watanabe, F. Yamazaki, S. Horikawa, and T. Okuda, 2013, Effects of pore fluid pressure and tectonic stress on diverse seismic activities around the Mt. Ontake volcano, central Japan, *Tectonophysics*, **608**, 138-148, doi:10.1016/j.tecto.2013.10.005.
  - 19) Terakawa, T. and E. Hauksson, 2018, Absolute Stress Fields in the Source Region of the 1992 Landers Earthquake, *J. Geophys. Res.*, **123**, 10, 8874-8890, doi:10.1029/2018JB015765.
  - 20) 山中佳子, 新井田倫子, 2018, 明治 22 年熊本地震の詳細震度分布, 地震 2, **70**, 233-248, doi:10.4294/zisin.2017-7.
  - 21) Gunawan, E., T. Sagiya, T. Ito, F. Kimata, T. Tabei, Y. Ohta, I. Meilano, H. Z. Abidin, Agustan, I. Nurdin, and D. Sugiyanto, 2014, A comprehensive model of postseismic deformation of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake deduced from GPS observations in northern Sumatra, *J. Asian Earth Sci.*, **88**, 218-229, doi:10.1016/j.jseaes.2014.03.016.
  - 22) Ito, T., E. Gunawan, F. Kimata, T. Tabei, M. Simons, I. Meilano, Agustan, Y. Ohta, I. Nurdin, and D. Sugiyanto, 2012, Isolating along-strike variations in the depth extent of shallow creep and fault locking on the northern Great Sumatran Fault, *J. Geophys. Res.*, **117**, B06409, doi:10.1029/2011JB008940.
  - 23) Pratama, C., T. Ito, R. Sasajima, T. Tabei, F. Kimata, E. Gunawan, Y. Ohta, T. Yamashina, N. Ismail, I. Nurdin, D. Sugiyanto, U. Muksin, I. Meilano, 2017, Transient rheology of the oceanic asthenosphere following the 2012 Indian Ocean Earthquake inferred from geodetic data, *J. Asian Earth sci.*, **147**, 50-59, doi:10.1016/j.jseaes.2017.07.049.
  - 24) Sasajima, R., and T. Ito, 2016, Strain rate dependency of oceanic intraplate earthquake b-values at extremely low strain rates, *J. Geophys. Res.*, **121**, 6, 4523-4537, doi:10.1002/2016JB013221.
  - 25) Sasajima, R., and T. Ito, 2017, Anisotropic horizontal thermal contraction of young oceanic lithosphere inferred from stress release due to oceanic intraplate earthquakes, *Tectonics*, **36**, 1988-2021, doi:10.1002/2017TC004680.
  - 26) Kato, A., T. Terakawa, Y. Yamanaka, Y. Maeda, S. Horikawa, K. Matsuhira, and T. Okuda, 2015, Preparatory and precursory processes leading up to the 2014 phreatic eruption of Mount Ontake, Japan, *Earth Planets and Space*, **67**, 111, doi:10.1186/s40623-015-0288-x.
  - 27) Maeda, Y., A. Kato, T. Terakawa, Y. Yamanaka, S. Horikawa, K. Matsuhira, T. Okuda, 2015, Source mechanism of a VLP event immediately before the 2014 eruption of Mt. Ontake, Japan, *Earth Planets and Space*, **67**, 187, doi:10.1186/s40623-015-0358-0.
  - 28) Maeda, Y., A. Kato, Y. Yamanaka, 2017, Modeling the dynamics of a phreatic eruption based on a tilt observation: Barrier breakage leading to the 2014 eruption of Mount Ontake, Japan, *J. Geophys. Res.*, **122**, 2, 1007-1024, doi:10.1002/2016JB013739.
  - 29) Terakawa, T., A. Kato, Y. Yamanaka, Y. Maeda, S. Horikawa, K. Matsuhira, T. Okuda, 2016, Monitoring eruption activity using temporal stress changes at Mount Ontake volcano, *Nature Communications*, **7**, 10797, doi:10.1038/ncomms10797.
  - 30) Nihara, Y., K. Tadokoro, Y. Yukutake, R. Honda, and H. Ito, 2013, Spatial distribution of crack structure in the focal area of a volcanic earthquake swarm at the Hakone volcano, Japan, *Earth Planet and Space*, **65**, 1, 51-55, doi:10.5047/eps.2012.05.005.
  - 31) Yamaoka, K., H. Miyamachi, T. Watanabe, T. Kunitomo, T. Michishita, R. Ikuta, and M. Iguchi, 2014, Active monitoring at an active volcano: amplitude-distance dependence of ACROSS at Sakurajima Volcano, Japan, *Earth Planets and Space*,

- 66, 32, doi:10.1186/1880-5981-66-32.
- 32) Maeda, Y., K. Yamaoka, H. Miyamachi, T. Watanabe, T. Kunitomo, R. Ikuta, H. Yakiwara, and M. Iguchi, 2015, A subsurface structure change associated with the eruptive activity at Sakurajima Volcano, Japan, inferred from an accurately controlled source, *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 13, 5179-5186, doi:10.1002/2015GL064351.
- 33) Watanabe, T., H. Shimizu, J. Tobita, S. Abe, and K. Shiraishi, 2011, Imaging basement structure beneath the Noubi Plain, central Japan using strong motion records of natural earthquakes, *Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium -Imaging and Interpretation-*, 96-99, doi:10.1190/segj102011-001.24.
- 34) Ichihara, H., J. Kanehiro, T. Mogi, K. Yamaoka, N. Tada, E. A. Bertrand, and M. Adachi, 2018, A 3D electrical resistivity model around the focal zone of the 2017 southern Nagano Prefecture earthquake (M-JMA 5.6) : implications for relationship between seismicity and crustal heterogeneity, *Earth Planets and Space*, **70**, 182, doi:10.1186/s40623-018-0950-1.
- 35) Ito, T., and M. Simons, 2011, Probing asthenospheric density, temperature and elastic moduli below the Western United States, *Science*, **322**, 6032, 947-951, doi:10.1126/science.1202584.