

2 (1) 東北地方太平洋沖地震総合研究

「東北地方太平洋沖地震総合研究」グループリーダー 松澤 暢
(東北大学大学院理学研究科)

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (M9.0 ; 以下「東北沖地震」と呼ぶ) は、日本の観測史上最大の地震であり、約 40 万戸の家屋が全半壊し、死者・行方不明者が 1 万 8 千人を超えるという東日本大震災をもたらした。震災から 8 年が経過した平成 31 年 (2019 年) 3 月の時点でも、いまだ 2 千 5 百名以上の方々が行方不明のままである。これほどの大規模な地震にもかかわらず、我々はその地震の予知はおろか、その発生ポテンシャルを正しく推定することすらできなかつた。今後、同じような失敗を繰り返さないためには、この地震のことを詳しく調べ、将来の巨大地震に備えることが極めて重要である。

平成 26 年度から始まった「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」では、地震や火山の災害軽減のために様々な観測研究を実施してきた。ここでは、この 5 年間の計画の中で、東北沖地震に関係の深い課題の成果を紹介し、災害軽減につなげるために今後どのようにすべきかを論ずることにする。

5 年間の成果の概要

東北沖地震があのような巨大な災害を引き起こしたことについての地震研究者の大きな反省は、前述の通り M9 の地震が東北で発生するとは予見していなかつたことと、このために緊急地震速報をはじめとする緊急用の様々なシステムが M9 の地震に対応できるようになっていなかつたことである。このため、5 年間の計画で様々な成果が出てきているものの、その中での特に大きな成果として、「観察・観測・モデル化に基づく巨大地震発生に至る過程の理解」と「地震・地殻変動観測データの即時解析に基づく地震・津波の即時予測」を取り上げ、以下で、これらの成果の概要について述べる。

1. 観察・観測・モデル化に基づく巨大地震発生に至る過程の理解

東北沖地震が発生する前に、地震調査委員会で宮城県沖地震の長期評価で高い確率が示されていたために、文部科学省では平成 17-21 年度 (2005-2009 年度) に「宮城県沖地震における重点的調査観測」を実施しており、これにより宮城県沖では海底地震観測のみならず海底地殻変動観測も行われていた。これらの海底観測データと陸上のデータから、本震発生前から現在に至るまでの地殻変動が詳細に明らかになっている。

これらのデータの解析によれば、本震の 1 月くらい前からゆっくりとした滑り (スロースリップイベント ; SSE) が海溝付近のプレート境界で生じ、それが 3 月 9 日の最大前震をトリガし、その前震の余効滑りが本震をトリガしたことが前計画のもとで明らかになっている (Ito et al., 2012, Kato et al., 2012)。その後、東北沖の広い範囲でこのような SSE が数年程度のサイクルで発生していることが、繰り返し地震と GNSS データから明らかになった (Uchida et al., 2016, Nomura et al., 2017)。

このような SSE や余効滑りが大地震の発生を促進するのは明らかであり、多数のシミュレーションから次の大地震の発生を確率的に予測する試みも実施されるようになった

(Nakata et al., 2016)。

海底地殻変動から捉えられた余効変動には、西向きの変位が次第に卓越するようになり、余効変動は従来考えられていたような余効滑りのみならず、粘性緩和が大きな影響を及ぼすことが明らかになった (Sun et al., 2014, Tomita et al., 2015)。このような余効滑りと粘性緩和の分離は陸上の観測点のみでは不可能であり、長期にわたる海底地殻変動観測の観測が極めて重要である (Tomita et al., 2017)。

一方、巨大地震のサイクルを理解する上では、津波堆積物等の地質学的情報が極めて重要である。前述の「宮城県沖地震における重点的調査観測」により貞観地震の調査も精力的に行われて、貞観地震に匹敵する巨大地震が室町時代にも発生していた可能性が高いことが、東北沖地震の前年に指摘されていた。その後、この室町時代の巨大地震は歴史記録の少ない 1454 年の享徳地震の可能性が高いことが、古文書調査 (行谷・矢田, 2014) や津波堆積物の比較 (Sawai et al., 2015) で明らかになった。

このように東北日本弧で繰り返す巨大地震について研究者を悩ませてきたのが地震間の海岸線の沈降であった。東北地方の太平洋沿岸は普段から沈降をしており、さらに東北沖で大地震が起こるたびに沈降を繰り返しており、一方、地質学的には海岸線はほぼニュートラルか僅かに隆起が卓越していると考えられていた。この矛盾を解決するためには、通常の大地震よりもはるかに巨大な地震が稀に発生して、海岸線を隆起させるというアイデアもあったが、実際に東北沖地震が起こったときには海岸はさらに沈降した。その後、深部で大規模な余効滑りが発生して海岸が隆起すると考えられるようになり、実際、東北沖地震後には海岸は隆起に転じたが、その隆起速度は期待していたほどではなく、海岸線が元の高さに回復する前に余効滑りが終息しそうにも見えた。これに対して、粘性構造を入れたシミュレーションにより、地震の再来間隔が約 600 年と非常に長い場合には、本震後の隆起が約 300 年続き、それから約 300 年の沈降に転じて次の巨大地震に至ることがシミュレーションから明らかになった (Sagiya, 2015, Hashima and Sato, 2017, Sasajima et al., 2019)。

2. 地震・地殻変動観測データの即時解析に基づく地震・津波の即時予測

東北沖地震に際しては、気象庁の最初の規模推定が過小評価であったとの反省から、巨大地震にも有効な地震や津波の即時予測手法の開発が行われ、次第に現業で使われるようになってきている。

気象庁では、緊急地震速報においては、複数の地震の同時発生時にも的確に対応できる IPF (Integrated Particle Filter) 法を開発し、信頼度の高い震源と規模の自動推定を行えるようにした (溜淵・他, 2014)。さらに、震度予測については、これまでのような震源情報に依存したやり方のみならず、周囲の震度情報から隣の地点の震度を予測する PLUM (Propagation of Local Undamped Motion) 法と呼ばれる手法が開発された (Kodera et al., 2018)。IPF 法は平成 28 年 (2016 年) 12 月 14 日から運用が始まり、PLUM 法も平成 30 年 (2018 年) 3 月 22 日より運用がなされている。

大規模な地震が発生した場合、断層の広がりや規模を近地観測データから即時に把握するには、地震観測データよりも近地での永久変位 (近地項) をそのまま評価できる GNSS 観測データの方が有利である。このような観点から、GNSS の 1 秒サンプルデータから断

層モデルを即時推定する RAPiD (Real-time Automatic detection method for Permanent Displacement) が前計画で開発された (Ohta et al., 2012)。国土地理院では、この RAPiD をさらに発展させた電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD; Real-time GEONET Analysis system for Rapid Deformation monitoring) を東北大学と共同で開発 (Kawamoto et al., 2017) し、平成 28 年 (2016 年) 4 月から運用している。運用開始直後に平成 28 年熊本地震が発生し、この地震について信頼性の高い矩形断層モデルを推定することに成功した。

津波の即時高精度予測のために、気象研究所では沖合の津波観測データをもとに海岸での津波の高さを高精度で予測する tFISH (tsunami Forecasting based on Inversion for initial sea-Surface Height) の開発・改良を行ってきた (Tsushima et al., 2009, 2012)。気象庁では、この tFISH を平成 31 年 (2019 年) 3 月 26 日から、津波警報を更新する新たな手法として運用を開始した。この tFISH と前述の RAPiD を組み合わせるなど、よりロバストな津波予測手法の開発も進められている (Tsushima and Ohta, 2014)。

平成 30 年度の成果

1. 災害の予測のための研究

新しい計画では、これまでの地震・火山噴火予知研究計画とは異なり、災害誘因 (ハザード) の研究の推進に力を入れており、また、災害誘因の影響を正しく理解するために、災害素因 (脆弱性) の研究も進めている。これらの研究においては東京大学地震研究所と京都大学防災研究所の拠点間連携も重要な役割を果たしている。

平成 30 年北海道胆振東部地震時の斜面崩壊の原因を探るために、札幌市及び厚真町の谷埋め盛土において調査を行い、旧谷筋周辺を 2-3 m 程度埋めた盛土が地すべり状の変状を呈したことを明らかにした (京都大学防災研究所 [課題番号: 1912])。この斜面崩壊の多くは、流れ盤構造をなす降下火砕物の特定層準にハロイサイトが形成されて、そこに滑り面が形成されていることと、被災地周辺の丘陵地の斜面は下部に遷急線を持っていて斜面下部からの支えが少なくなっていたという共通の特徴があることがわかった。

沖合で観測された津波波形の逆解析に基づく津波の即時予測手法システム (tFISH) について、地震発生時に海底水圧データに記録される非地殻変動オフセット及びトレンド変化のノイズへの対処策として、波形逆解析において津波成分とノイズ成分を同時推定して分離できるように改良した (気象研究所 [課題番号: 7011])。また、電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD) において、計算負荷が非常に軽いという利点を持つ精密単独測位法を導入し試験運用を開始した (国土地理院 [課題番号: 6012])。

2. 地震・火山噴火の予測

茨城沖では群発地震活動が M7 級の地震になる場合 (前震的活動) とならない場合があり、前震的な活動は、それ以外の群発地震活動より活動度が高い傾向にあることがわかった (東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402], Nishikawa and Ide, 2018)。このような傾向が他の群発地震でも見られれば、群発地震が大きな地震の発生に繋がるか否かの判定に将来は使えるようになる可能性がある。

蔵王火山では東北沖地震の後、しばらくしてから活動が活発になり、2012年から深部低周波地震が、2013年以降は浅部長周期地震が発生するようになった。この長周期地震の波動エネルギーが増大してくると、浅部地震活動が活発化し、地震活動が低下すると長周期地震のエネルギーも低下するという相関があることがわかった（東北大学 [課題番号：1202]）。したがって、このような長周期地震のエネルギーをモニターすることが、火山活動の予測にとって重要であると考えられる。

3. 地震・火山現象の理解

（プレート境界）

東北沖地震前と地震後における東北日本前弧域の上盤内応力場の形成メカニズムを明らかにするために、プレート沈み込み及び重力に伴う島弧-海溝系の絶対応力場の二次元モデリングを、不均質非線形レオロジーを考慮した有限要素法を用いて行った。モデル計算の結果、前弧海域下の上盤内では、「地形・密度構造から重力が作る引張力」及び「定常沈み込みが作る曲げ応力」により、浅部が引張・深部が圧縮の応力場が本震前から形成されていたことがわかった。複数のモデル結果と観測との比較を通じて、東北沖地震後のプレート境界（海溝から40-150 kmの範囲）の摩擦応力は5-11 MPa程度と推定され、地震時の応力降下量が10-20 MPa程度ということ考えると、プレート境界の強度は30 MPa程度以下と非常に弱いことが示唆された（東北大学 [課題番号：1203]）。

日本海溝沿いのGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）による海底地殻変動観測は東北沖地震前から現在に至るまで継続されている。東北沖地震の主破壊域の中では、2018年時点でも本震前より大きな速度で西向きに動いているものの、その速度は本震直後に比べて減少してきている。一方、主破壊域の周辺域では、本震直後よりも西向きの速度が大きくなっているが、2018年時点では本震よりもまだ小さい速度である。福島沖以南については、本震後に東向きの変動が顕著であったが、現在は大きく減衰している（海上保安庁 [課題番号：8001]）。

2013年9月から2014年9月までのほぼ1年間実施した東北沖地震の震源域北部における海底地震観測によって震源分布を求めたところ、本震直後には活動が低調であったプレート境界付近での活動が観測され、これらの地震の発震機構解も逆断層型が卓越していることがわかった（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。したがって地殻変動のみならず、地震活動も本震発生直後とは異なってきているようである。

千島海溝域及び日本海溝域において地下構造探査観測研究を実施し、アウターライズ地震断層の発達に伴い海底面付近からマントルに至るまで地下構造が変質していること、その変質割合は両海溝域間で顕著に異なることを明らかにした。また、福島沖での海溝域の陸側斜面やアウターライズの活構造に対応した地震活動が確認され、該当域での地震発生のポテンシャルに関する知見が得られた（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]）。

（内陸）

日本列島全域下の(i)流体付加前のマントル組成と(ii)付加流体量を、主に第四紀火山岩のSr-Nd-Pb同位体比空間における統計解析としてクラスター分析(k-means法)と独立成分分析法を併用して解析したところ、いずれも島弧セグメントごとに違いがあり、

かつ (i)は東日本と西日本で系統的に異なり、ブルーム由来成分が明瞭に分かれることがわかった。これらの違いについては、(i)は地球規模の東西半球構造に関連し、(ii)は沈み込むスラブの温度や沈み込み角度及び組成（特に堆積物成分）の違いを反映していることが明らかとなった（京都大学防災研究所 [課題番号：1905]， Nakamura et al., 2019）。

GNSS 連続観測（GEONET）による日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングを着実に実施し、東北地方太平洋沖地震後の継続的な余効変動を図1のように明らかにした。本震後の8年間で、背弧側では地震時の隆起よりも地震後の沈降の方が上回り、火山フロントのすぐ東側では地震時の沈降よりも地震後の隆起が上回っているものの、太平洋沿岸は仙台湾付近を除いて地震後の隆起が地震時の沈降をまだ上回っておらず、地震前の海岸線の高さまで回復するまでまだかなり時間がかかることがわかる（国土地理院 [課題番号：6005]）。

東北全域及び北海道の太平洋岸において、ハイブリッド重力観測を毎年実施してきて、2018年5-7月にも実施した。表層30 kmが弾性体で、それ以深に 5×10^{18} Pa・sの粘性率を持つ層を仮定して、粘弾性球対称地球モデルに基づく理論に基づいて、重力変化の予測値を計算し、観測値と比較した。東北地方太平洋側では観測値と理論計算値とが良く一致し、 $4 \mu\text{gal/年}$ の変動が認められた。一方、脊梁山脈を越えた日本海側では、太平洋側に比べて、観測量も理論計算値もともに小さいことがわかった。重力変動を引き起こしている原因を調べるため、地球内部の体積歪変化の理論計算を行った結果、東北地方太平洋側直下では、弾性層が圧縮に向かう傾向の方が、粘性層が膨張に向かう傾向よりも卓越していることがわかり、これによる密度場変動で重力変動を説明することができた。一方、日本海側のそれは、弾性層と粘弾性層の効果が拮抗しているため、太平洋側に比べて重力変動が小さくなることがわかり、実際の観測とも整合する結果を得た（東北大学 [課題番号：1203]）。

東北沖地震後の2012年に設置されたGNSS稠密観測網磐越測線の余効変動プロファイルを用いて、3次元不均質粘弾性構造モデルを推定した。余効滑りと粘弾性変形の同時計算にはLambert and Barbot (2016)による等価体積力法を使用し、1日ごとに計算される応力変化から余効滑り及び全体の粘弾性変形を逐次計算した。余効滑りの計算には速度-状態依存摩擦構成則を、粘性計算にはべき乗則Burgersモデルを用いた。得られた最適モデルは、マントルウェッジの100 km以深全体の低粘性と、70 km以浅での火山フロント及びその西側下部の相対的低粘性で特徴づけられる。また、地温勾配分布等に基づいて島弧走向方向の不均質性も考慮したモデルにより面積ひずみ分布を計算したところ、Miura et al. (2014)によって推定された面積ひずみ分布を概ね再現することがわかった（東北大学 [課題番号：1203]）。

秋田県森吉山周辺地域には地震波散乱体が存在することが知られていたため、震源域北方において小アレイ観測を実施し、そのデータのセンブランス解析から散乱体の位置推定を行った。その結果、散乱体は従来の推定よりも東側の、地震クラスターのやや南の深さ13 km程度に存在することが明らかになった（弘前大学 [課題番号：1101]）。この森吉山の下の比抵抗構造を調べてみたところ、森吉山の地震活動域直下の深さ15-30 kmに顕著な低比抵抗帯があることがわかった（東北大学 [課題番号：1203]）。このように地殻深部に流体

が存在しているがためにその上端が顕著な地震波散乱帯となっていて、この流体が森吉山の地震活動を引き起こしている可能性がある。

山形-福島県境付近では、東北沖地震によって東西圧縮の応力が弱まったにもかかわらず、本震の後に群発地震活動が発生し、この震源分布は多数の面状構造を成し、また地震活動は深部から浅部にマイグレーションしており、その深部には地震波反射面が存在していることがわかった。さらに、地震活動・震源過程・構造等を特徴づける様々なパラメータが、活動開始から 50-100 日程度は異常な値を示していたことがわかった。これらのことから、この群発地震は、深部に存在していた高压流体が東北沖地震後に急激に上昇してきたことによって生じたものと考えられる（東北大学 [課題番号：1204], Yoshida and Hasegawa, 2018)。

4. これまでの課題と今後の展望

(東北沖地震による地震発生場のさらなる理解)

この 5 年間で東北沖地震について様々な情報が得られ、巨大地震に対する我々の視野は大きく拡大した。一方で、この地震の前に我々が抱いていた様々な先入観がこの地震によって打ち砕かれたのと同様に、今現在も我々は何かを見落とし、何かを誤解していて、それらが今後の余効変動や他の巨大地震の観測研究によって是正される可能性は極めて高い。

特に余効変動について、変位・歪・応力・重力等を長期にわたって追跡し、その結果から粘弾性構造モデルを構築していくことが重要である。これまでに得られた結果から、地震時滑りによる応力変化のみならず、余効滑りや地震間固着に伴う応力変化によっても粘性緩和が生じ、これが巨大地震間の海岸の隆起・沈降に関わっていたことが明らかになりつつある。このようなシミュレーションと海陸の地殻変動観測と繰り返し地震観測データにより余効滑りの影響と粘性緩和の影響とが正しく分離できれば、プレート境界の摩擦パラメータ分布と 3 次元粘弾性構造の高精度推定が可能となる。このようにプレート境界と媒質の詳細な情報が得られることによって、ようやく、巨大地震の地震発生サイクルについて信頼度の高いシミュレーションが行えるようになる。

また、このような研究は内陸の非弾性的性質もモデル化することを意味しており、それは内陸地震の発生機構の解明にも大きく役立つはずである。東北地方太平洋沖地震の発生によって東北地方内陸の東西圧縮の応力はかなり緩和されたはずで、少なくとも東西圧縮の逆断層型の大地震は、当面、東北地方内陸では発生しにくいように見える。しかし、そのような考え方では、1896 年の 6 月 15 日の明治三陸地震の僅か 2 ヶ月後の 8 月 31 日に陸羽地震が発生した事実を説明できないため、大地震発生を理解するためには、応力の時空間変化のみならず、強度の時空間変化を詳しく検討する必要がある。

東北地方太平洋沖を契機として、断層強度の理解が大きく進み、プレート境界も内陸の地震発生域も、これまで考えられていたよりも強度が 1 桁小さい可能性が高いことがわかってきた。このように強度が低い理由としては、スラブから供給されてきた水によって間隙水圧が上昇しているためというのが最もありそうな仮説ではあるが、これもまだ完全には解明されたわけではなく、今後、さらなるデータの蓄積が必要である。また、スラブから供給された水は断層強度を下げるのみならず前述の粘弾性構造にも大きな意味を持った

め、スラブへの水の取り込みと放出過程についても、今後、さらなる研究を進めていく必要がある。

東北地方太平洋沖地震によってこれまで極めて多くの知見が得られ、今後も得られるものと期待されるが、単年度あたりに得られる情報量は、当然のことながら時間とともに減少していく。一方で、長期的な観測によって初めて得られる情報もあるため、今後、長期にわたって持続可能な観測研究を設計し、継続していくことが重要となっている。1896年の明治三陸地震の後40年近くたって1933年の昭和三陸地震が発生しているわけで、今後、M8級の最大余震が発生するとしても、何十年もたってからとなる可能性は否定できない。したがって、東北地方の災害軽減のためにも、東北地方における観測研究は、今後も長期にわたって継続する必要がある。

(次の巨大地震災害の軽減のために)

日本付近で、次にM9の巨大地震災害が生じるとしたら、千島海溝か南海トラフ沿いの可能性が高いと考えられる。これらの巨大地震の災害を軽減するためには、東北沖地震前と似た現象が出現していないかどうかの検討と同時に、東北沖との類似点と相違点をよく検討することが必要である。

過去のM9地震の知見がなまじあったことが、東北沖でM9が予見できなかった大きな理由となっていたことを忘れてはならない。東北沖地震について知見が増えれば増えるほど、M9の地震について新たな先入観が生じてしまいやすいことについて自覚することが重要である。むしろ、東北沖地震では生じなかったことが、本当に他の場合でも起こらないのか、よく検討する必要がある。たとえば、

- 次の巨大地震は海溝付近より陸の近くで生じるのでは？
- 海溝近くから陸の近くまで全部が大きく滑る地震もありうるのでは？
- 巨大な海底地すべりが生じて、さらに大きな津波を起こすのでは？
- 巨大な分岐断層が動いて、効率よく津波を励起するのでは？
- スラブ内大地震や内陸大地震が連鎖するのではないか？
- 火山噴火が連動するのでは？
- 南海トラフで予想されている「最大規模」を上回る可能性はないのか？

といった検討が必要である。

我々研究者は、過去に起こったことを説明できるモデルや、過去に起こらなかったことを説明できるモデルを探しがちである。しかし、それが「想定外」を生み出すものになっていることを自覚する必要がある。「過去に起こった証拠の無いことは本当に将来も起こらないのか？」という検討こそが、次の巨大地震災害を軽減する上で、極めて重要と考えられる。

成果リスト

「5年間の成果の概要」での引用文献

Hashima, A., and T. Sato, 2017, A megathrust earthquake cycle model for Northeast

- Japan: bridging the mismatch between geological uplift and geodetic subsidence, *Earth Planets Space*, 69:23, doi:10.1186/s40623-017-0606-6.
- Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, and J. Ashi, 2012, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, 600, 14-26, doi:10.1016/j.tecto.2012.08.022.
- Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2012, Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, 335, 705-708, doi:10.1126/science.1215141.
- Kawamoto, S., Y. Ohta, Y. Hiyama, M. Todoriki, T. Nishimura, T. Furuya, Y. Sato, T. Yahagi, and K. Miyagawa, 2017, REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 1324-1349, doi:10.1002/2016JB013485.
- Kodera, Y., Y. Yamada, K. Hirano, K. Tamaribuchi, S. Adachi, N. Hayashimoto, M. Morimoto, M. Nakamura, and M. Hoshihara, 2018, The propagation of local undamped motion (PLUM) method: A simple and robust seismic wavefield estimation approach for earthquake early warning, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 108, 983-1003, doi:10.1785/0120170085.
- Nakata, R., T. Hori, M. Hyodo and K. Ariyoshi, 2016, Possible scenarios for occurrence of M7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation, *Sci. Rep.*, 6:25704, doi:10.1038/srep25704.
- 行谷佑一・矢田俊文, 2014, 史料に記録された中世における東日本太平洋沿岸の津波, *地震* 2, 66, 73-81, doi:10.4294/zisin.66.73.
- Nomura, S., Y. Ogata, N. Uchida, and M. Matsu'ura, 2017, Spatiotemporal variations of interplate slip rates in northeast Japan inverted from recurrence intervals of repeating earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 208, 468-481, doi:10.1093/gji/ggw395.
- Ohta, Y. T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Iinuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono, and N. Umino, 2012, Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0), *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 117, B02311, doi:10.1029/2011JB008750.
- Sagiya, T., 2015, Paradoxical vertical crustal movement along the Pacific coast of northeast Japan, *Int. Assoc. Geod. Symp.* 145, 73-78, doi:10.1007/1345_2015_189.
- Sasajima, R., B. Shibasaki, H. Iwamori, T. Nishimura, and Y. Nakai, 2019, Mechanism of subsidence of the Northeast Japan forearc during the late period of a gigantic earthquake cycle, *Sci. Rep.*, 9:5726, doi:10.1038/s41598-019-42169-y.
- Sawai, Y., Y. Namegaya, T. Tamura, R. Nakashima, and K. Tanigawa, 2015, Shorter

- intervals between great earthquakes near Sendai: Scour ponds and a sand layer attributable to A.D. 1454 overwash, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 4795–4800, doi:10.1002/2015GL064167.
- Sun, T., K. Wang, T. Iinuma, R. Hino, J. He, H. Fujimoto, M. Kido, Y. Osada, S. Miura, and Y. Ohta and Y. Hu, 2014, Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Nature*, 514, 84–87, doi:10.1038/nature13778.
- 溜淵功史・山田真澄・Stephen WU, 2014, 緊急地震速報のための同時多発地震を識別する震源推定手法, *地震* 2, 67, 41–55, doi:10.4294/zisin.67.41.
- Tomita, F., M. Kido, Y. Osada, R. Hino, Y. Ohta, and T. Iinuma, 2015, First measurement of the displacement rate of the Pacific Plate near the Japan Trench after the 2011 Tohoku-Okai earthquake using GPS/acoustic technique, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 8391–8397, doi:10.1002/2015GL065746.
- Tomita, F., M. Kido, Y. Ohta, T. Iinuma, and R. Hino, 2017, Along-trench variation in seafloor displacements after the 2011 Tohoku earthquake, *Sci. Adv.*, 3, e1700113, doi:10.1126/sciadv.1700113.
- Tsushima, H., R. Hino, H. Fujimoto, Y. Tanioka, F. Imamura, 2009, Near-field tsunami forecasting from cabled ocean bottom pressure data, *J. Geophys. Res.*, 114, B06309, doi: 10.1029/2008JB005988.
- Tsushima, H., R. Hino, Y. Tanioka, F. Imamura, H. Fujimoto, 2012, Tsunami waveform inversion incorporating permanent seafloor deformation and its application to tsunami forecasting, 117, B03311, doi:10.1029/2011JB008877.
- Tsushima, H., and Y. Ohta, 2014, Review on near-field tsunami forecasting from offshore tsunami data and onshore GNSS data for tsunami early warning, *J. Diast. Res.*, 9, 339–357, doi:10.20965/jdr.2014.p0339.
- Uchida, N., T. Iinuma, R. M. Nadeau, R. Bürgmann, and R. Hino, 2016, Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan, *Science*, 351, 488–492, doi:10.1126/science.aad3108.

平成 30 年度の主要成果リスト

- Agata, R., S. D. Barbot, K. Fujita, M. Hyodo, T. Iinuma, R. Nakata, T. Ichimura, and T. Hori, 2019, Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake. *Nature Comm.*, 10:1385, doi:10.1038/s41467-019-08984-7.
- Akuhara, T., M. G. Bostock, A. P. Plourde, and M. Shinohara, 2019, Beyond receiver functions: Green's function estimation by trans-dimensional inversion and its application to OBS data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124, 1944–1961, doi:10.1029/2018JB016499.
- Ando, R., and Y. Kaneko, 2018, Dynamic rupture simulation reproduces spontaneous multifault rupture and arrest during the 2016 Mw 7.9 Kaikoura earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 12,875–12,883, doi:10.1029/2018GL080550.

- 安藤忍, 2018, 陸域観測技術衛星「だいち 2 号」(ALOS-2/PALSAR-2) を用いた合成開口レーダ (SAR) 干渉解析, 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震調査報告, 気象庁技術報告, 135, 35-45.
- Arai, R., S. Kodaira, T. Takahashi, S. Miura, and Y. Kaneda, 2018, Seismic evidence for arc segmentation, active magmatic intrusions and syn-rift fault system in the northern Ryukyu volcanic arc, *Earth Planets Space*, 70:61, doi:10.1186/s40623-018-0830-8.
- Azuma, R., R. Hino, Y. Ohta, Y. Ito, K. Mochizuki, K. Uehira, Y. Murai, T. Sato, T. Takanami, M. Shinohara, and T. Kanazawa, 2018, Along-arc heterogeneity of the seismic structure around a large coseismic shallow slip area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake: 2-D Vp structure estimation through an airgun-ocean bottom seismometer experiment in the Japan Trench subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 123, 5249-5264, doi:10.1029/2017JB015361.
- Becker, W. T., A. Hashima, A. M. Freed, and H. Sato, 2018, Stress change before and after the 2011 M9 Tohoku-oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 504, 174-184, doi:10.1016/j.epsl.2018.09.035.
- Doi, I., T. Kamai, R. Azuma, and G. Wang, 2019, A landslide induced by the 2016 Kumamoto Earthquake adjacent to tectonic displacement - Generation mechanism and long-term monitoring, *Eng. Geol.*, 248, 80-88, doi:10.1016/j.enggeo.2018.11.012.
- Fujie, G., S. Kodaira, Y. Kaiho, Y. Yamamoto, T. Takahashi, S. Miura, and T. Yamada, 2018, Controlling factor of incoming plate hydration at the north-western Pacific margin, *Nature Commn.*, 9:1, doi:10.1038/s41467-018-06320-z.
- Fujino, S., H. Kimura, J. Komatsubara, D. Matsumoto, Y. Namegaya, Y. Sawai, and M. Shishikura, 2018, Stratigraphic evidence of historical and prehistoric tsunamis on the Pacific coast of central Japan: Implications for the variable recurrence of tsunamis in the Nankai Trough, *Quat. Sci. Rev.*, 201, 147-161, doi:10.1016/j.quascirev.2018.09.026.
- 富士原敏也・金松敏也・笠谷貴史, 2018, 佐田岬半島沖瀬戸内海における海底地形, 浅層構造, 重力調査, *JAMSTEC Rep. Res. Devel.*, 27, 13-25, doi:10.5918/jamstecr.27.13.
- Fukahata, Y., 2019. Estimate of the contraction rate of central Japan through the deformation of the Philippine Sea slab, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 6:4, doi:10.1186/s40645-018-0251-0.
- Hamada, Y., T. Hirose, A. Ijiri, Y. Yamada, Y. Sanada, S. Saito, N. Sakurai, T. Sugihara, T. Yokoyama, T. Saruhashi, T. Hoshino, N. Kamiya, S. Bowden, M. Cramm, S. Henkel, K. Homola, H. Imachi, M. Kaneko, L. Lagostina, H. Manners, H.-L. McClelland, K. Metcalfe, N. Okutsu, D. Pan, M. J. Raudsepp, J. Sauvage, F. Schubotz, A. Spivack, S. Tonai, T. Treude, M.-Y. Tsang, B. Viehweger, D. T. Wan, E. Whitaker, Y. Yamamoto, K. Yang, M. Kinoshita, L. Maeda, Y. Kubo, Y.

- Morono, F. Inagaki, and V. B. Heuer, 2018, In-situ mechanical weakness of subducting sediments beneath a plate boundary décollement in the Nankai Trough, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:70, doi:10.1186/s40645-018-0228-z.
- Hamahashi, M., G. Kimura, W. Tanikawa, Y. Hamada, Y. Hashimoto, and S. Saito, 2018, Physical property anisotropy of foliated fault rocks: Study from the Nobeoka Thrust, Shimanto Belt, southwest Japan, *Island Arc*, 27, e12257, doi:10.1111/iar.12257.
- Han, R., J.-S. Kim, C.-M. Kim, T. Hirose, J. O. Jeong, and G. Y. Jeong, 2019, Dynamic weakening of ring faults and catastrophic caldera collapses, *Geology*, 47, 107-110, doi:10.1130/G45687.1.
- Hanyu, T., K. Shimizu, T. Ushikubo, J.-I. Kimura, Q. Chang, M. Hamada, M. Ito, H. Iwamori, and T. Ishikawa, 2019, Tiny droplets of ocean island basalts unveil Earth's deep chlorine cycle, *Nature Comm.*, 10:60, doi:10.1038/s41467-018-07955-8.
- Haraguchi, S., K. Ueki, K. Yoshida, T. Kuwatani, M. Mohamed, S. Horiuchi, and H. Iwamori, 2018, Geochemical database of Japanese islands for basement rocks: compilation of domestic article. *J. Geol. Soc. Japan*, 124, 1049-1054, doi:10.5575/geosoc.2018.0027.
- Higuchi, S., Y. Kamishiro, M. Ishihara, Y. Yasuoka, Y. Mori, M. Hosoda, K. Iwaoka, S. Tokonami, R. Takahashi, M. Janik, J. Muto, H. Nagahama, and T. Mukai, 2019, Evaluation of a radon air monitor in the measurement of radon concentration in water in comparison with a liquid scintillation counter, *Rad. Prot. Dosim.*, ncz070, doi:10.1093/rpd/ncz070.
- 本田昌樹・山下達也・上芝晴香・攪上泰亮・林京之介・桑原將旗・松本紗歩・仲井博之・酒井和紀・宮原伐折羅・宗包浩志・飛田幹男・矢来博司・小林知勝・森下遊・藤原智, 2018, だいち 2 号 SAR データの解析による霧島山噴火に伴う地表変動の検出, *国土地理院時報*, 130, 93-108.
- Iinuma, T., 2018, Monitoring of the spatio-temporal change in the interplate coupling at northeastern Japan subduction zone based on the spatial gradients of surface velocity field, *Geophys. J. Int.*, 213, 30-47, doi:10.1093/gji/ggx527.
- Ishikawa, T., and Y. Yokota, 2018, Detection of seafloor movement in subduction zones around Japan using a GNSS-A seafloor geodetic observation system from 2013 to 2016, *J. Disast. Res.*, 13, 511-517, doi:10.20965/jdr.2018.p0511.
- Iwamori, H., H. Nakamura, M. Yoshida, T. Nakagawa, K. Ueki, A. Nakao, T. Nishizawa, and S. Haraguchi, 2018, Trace-element characteristics of east-west mantle geochemical hemispheres. *Comptes Rendus Geosci.*, 351, 209-220, doi:10.1016/j.crte.2018.09.007.
- Iwata, D., H. Nagahama, J. Muto, and Y. Yasuoka, 2018, Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. *Sci. Rep.*, 8, 13028, doi:10.1038/s41598-018-31341-5.

- Kameda, J., and K. Hirauchi, 2018, Rheological properties of composite serpentine-brucite suspensions: Implications for mudflow behavior on forearc seamounts, *Marine Geology*, 403, 191-196, doi:10.1016/j.margeo.2018.06.004.
- Kano, M., N. Aso, T. Matsuzawa, S. Ide, S. Annoura, R. Arai, S. Baba, M. Bostock, K. Chao, K. Heki, S. Itaba, Y. Ito, N. Kamaya, T. Maeda, J. Maury, M. Nakamura, T. Nishimura, K. Obana, K. Ohta, N. Poiata, B. Rousset, H. Sugioka, R. Takagi, T. Takahashi, A. Takeo, Y. Tu, N. Uchida, Y. Yamashita, and K. Obara, 2018, Development of a Slow Earthquake Database, *Seismol. Res. Lett.*, 89, 1566-1575, doi:10.1785/0220180021.
- Katakami, S., Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, S. Suzuki, and M. Shinohara, 2018, Spatiotemporal variation of tectonic tremor activity before the Tohoku-Oki earthquake, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 9676-9688, doi:10.1029/2018JB016651.
- Kawamoto, S., N. Takamatsu, S. Abe, K. Miyagawa, Y. Ohta, M. Todoriki, and T. Nishimura, 2018, Realtime GNSS analysis system REGARD: an overview and recent results, *J. Disast. Res.*, 13, 440-452, doi:10.20965/jdr.2018.p0440.
- Kobayashi, T., H. Yarai, S. Kawamoto, Y. Morishita, S. Fujiwara, and Y. Hiyaroma, 2018, Crustal deformation and fault models of the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Foreshocks and main shock, In: Freymueller J., Sánchez L. (eds) *International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World*, Springer, Cham, 149, 193-200, doi:10.1007/1345_2018_37.
- Kobayashi, T., 2018, Locally distributed ground deformation in an area of potential phreatic eruption, Midagahara volcano, Jpana, detected by single-look-based InSAR time series analysis, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 357, 213-223, doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.04.023.
- Kobayashi, T., Y. Morishita, and H. Munekane, 2018, First detection of precursory ground inflation of a small phreatic eruption by InSAR, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 491, 244-254, doi:10.1016/j.epsl.2018.03.041.
- Kubota, T., W. Suzuki, T. Nakamura, N. Y. Chikasada, S. Aoi, N. Takahashi, and R. Hino, 2018, Tsunami source inversion using time-derivative waveform of offshore pressure records to reduce the effects of non-tsunami components *Geophys. J. Int.*, 215, 1200-1214, doi:10.1093/gji/ggy345.
- Ma, N., G. Wang, T. Kamai, I. Doi, and M. Chigira, 2019, Amplification of seismic response of a large deep-seated landslide in Tokushima, Japan, *Eng. Geol.*, 249, 218-234, doi:10.1016/j.enggeo.2019.01.002.
- 森下遊・小林知勝, 2018, ALOS-2 干渉 SAR 時系列解析で検出された霧島山の地表変位と大気遅延誤差低減処理の効果, *測地学会誌*, 64, 28-38, doi:10.11366/sokuchi.64.28.
- Morishita, Y., T. Kobayashi, S. Fujiwara, and H. Yarai, 2018, Complex crustal deformation of the 2016 Kaikoura, New Zealand, earthquake revealed by ALOS-2,

- Bull. Seismol. Soc. Am., 108, 1746-1756, doi:10.1785/0120180070.
- Morishita, Y., T. Kobayashi, S. Fujiwara, and H. Yarai, 2018, Complex crustal deformation of the 2016 Kaikoura, New Zealand, earthquake revealed by ALOS-2, Bull. Seismol. Soc. Am., 108, 1746-1756, doi:10.1785/0120180070.
- 名古屋大学大学院環境学研究科コミュニティ防災研究会, 2018, 「東日本大震災後の復興と防災に関する調査報告書(速報版)」, 名古屋大学大学院環境学研究科, 37pp.
- Nakagawa, T., and H. Iwamori, 2019, On the implications of the coupled evolution of the deep planetary interior and the presence of surface ocean water in hydrous mantle convection, *Comptes Rendus Geosci.*, 351, 197-208, doi:10.1016/j.crte.2019.02.001.
- Nakagawa, T., H. Iwamori, R. Yanagi, and A. Nakao, 2018, On the evolution of the water ocean in the plate-mantle system. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:51, doi:10.1186/s40645-018-0209-2.
- Nakajima, J., and N. Uchida, 2018, Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip, *Nature Geosci.*, 11, 351-356, doi:10.1038/s41561-018-0090-z.
- Nakamura, H., H. Iwamori, M. Nakagawa, T. Shibata, J.-I. Kimura, T. Miyazaki, Q. Chang, B. S. Vaglarovb, T. Takahashi, and Y. Hiraharai, 2019, Geochemical mapping of slab-derived fluid and source mantle along Japan arcs, *Gondwana Res.*, 70, 36-49.
- Nakano, M., M. Hyodo, A. Nakanishi, M. Yamashita, T. Hori, S. Kamiya, K. Suzuki, T. Tonegawa, S. Kodaira, N. Takahashi, and Y. Kaneda, 2018, The 2016 Mw 5.9 earthquake off the southeastern coast of Mie Prefecture as an indicator of preparatory processes of the next Nankai Trough megathrust earthquake, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:30, doi:10.1186/s40645-018-0188-3.
- Nakao, A., H. Iwamori, T. Nakakuki, Y. Suzuki, and H. Nakamura, 2018, Roles of hydrous lithospheric mantle in deep water transportation and subduction dynamics. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 5336-5343, doi:10.1029/2017GL076953.
- Nishikawa, T., and S. Ide, 2018, Recurring slow slip events and earthquake nucleation in the source region of the M 7 Ibaraki-Oki earthquakes revealed by earthquake swarm and foreshock activity, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 7950-7968, doi:10.1029/2018JB015642.
- Obana, K., Y. Nakamura, G. Fujie, S. Kodaira, Y. Kaiho, Y. Yamamoto, and S. Miura, 2018, Seismicity in the source areas of the 1896 and 1933 Sanriku earthquakes and implications for large near-trench earthquake faults, *Geophys. J. Int.*, 212, 2061-2072, doi:10.1093/gji/ggx532.
- Okuda, T., and S. Ide, 2018, Hierarchical rupture growth evidenced by the initial seismic waveforms, *Nature Comm.*, 9:3714, doi:10.1038/s41467-018-06168-3.
- Okuda, T., and S. Ide, 2018, Streak and hierarchical structures of the Tohoku-Hokkaido subduction zone plate boundary *Earth Planets Space*, 70:132, doi:10.1186/s40623-018-0903-8.

- 奥田貴・内田直希・浅野陽一, 2018, Matched Filter 法を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震直後の小地震の検出 - 釜石沖繰り返し地震クラスターへの適用 -, 地震 2, 71, 87-101, doi:10.4294/zisin.2017-8.
- Okuwaki, R., A. Kasahara, Y. Yagi, S. Hirano, and Y. Fukahata, 2019, Backprojection to image slip, *Geophys. J. Int.*, 216, 1529-1537, doi:10.1093/gji/ggy505.
- Shibazaki, B., H. Noda, and M. J. Ikari, 2019, Quasi-dynamic 3D modeling of the generation and afterslip of a Tohoku-oki earthquake considering thermal pressurization and frictional properties of the shallow plateboundary, *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-018-02089-w.
- 高橋美紀・廣瀬丈洋・飯尾能久, 2018, 断層の強度に関する論争と学際的アプローチの必要性. *地質学雑誌*, 124, 725-739, doi:10.5575/geosoc.2018.0015.
- Takahashi, N., K. Imai, K. Sueki, R. Obayashi, M. Ishibashi, T. Tanabe, and Y. Kaneda, 2018, Real-time tsunami prediction system based on seafloor observatory data applied to the Inland Sea, Japan. *Marine Tech. Soc. J.*, 52, 120-127, doi:10.4031/MTSJ.52.3.12.
- Takemura, S., H. Kubo, T. Tonegawa, T. Saito, and K. Shiomi, 2019, Modeling of long-period ground motions in the Nankai subduction zone: Model simulation using the accretionary prism derived from oceanfloor local S-wave velocity structures, *Pure Appl. Geophys.*, 176, 627-647, doi:10.1007/s00024-018-2013-8.
- Takemura, S., T. Matsuzawa, T. Kimura, T. Tonegawa, and K. Shiomi, 2018, Centroid moment tensor inversion of shallow very low frequency earthquakes off the Kii Peninsula, Japan, using a three-dimensional velocity structure model, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 6450-6458, doi:10.1029/2018GL078455.
- Tamaribuchi, K., 2018, Evaluation of automatic hypocenter determination in the JMA unified catalog, *Earth Planets Space*, 70:141, doi:10.1186/s40623-018-0915-4.
- Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018, Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog. *Earth Planets Space*, 70:90, doi:10.1186/s40623-018-0866-9.
- 田中重好・黒田由彦・横田尚俊・大矢根淳編, 2019, 「防災と支援 - 成熟した市民社会に向けて」, シリーズ 被災地から未来を考える 第 2 巻, 有斐閣, 382pp., ISBN 978-4-641-17439-9.
- Tanigawa, K., M. Shishikura, O. Fujiwara, Y. Namegaya, and D. Matsumoto, 2018, Mid to late Holocene marine inundations inferred from coastal deposits facing the Nankai Trough in Nankoku, Kochi Prefecture, southern Japan, *The Holocene*, 28, 867-878, doi:10.1177/0959683617752837.
- Todd, E. K., S. Y. Schwartz, K. Mochizuki, L. M. Wallace, A. F. Sheehan, S. C. Webb, C. A. Williams, J. Nakai, J. Yarce, B. Fry, S. Henrys, and Y. Ito, 2018, Earthquakes and tremor linked to seamount subduction during shallow slow slip at the Hikurangi margin, New Zealand, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 6769-6783, doi:10.1029/2018JB016136.

- Tsou, C. Y., M. Chigira, D. Higaki, G. Sato, H. Yagi, H. P. Sato, A. Wakai, V. Dangol, S. C. Amatya, and A. Yatagai, 2018, Topographic and geologic controls on landslides induced by the 2015 Gorkha earthquake and its aftershocks: an example from the Trishuli Valley, central Nepal. *Landslides*, 15, 953-965, doi:10.1007/s10346-017-0913-9.
- Uchida N, and R. Bürgmann, 2019, Repeating earthquakes, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 47, 305-332, doi:10.1146/annurev-earth-053018-060119.
- Uemura, M., Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, and M. Shinohara, 2018, Spatio-temporal changes in the seismic velocity induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and slow slip event revealed from seismic interferometry, using ocean bottom seismometer's records, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:87, doi:10.1186/s40645-018-0240-3.
- Usami, K., K. Ikehara, T. Kanamatsu, and C. M. McHugh, 2018, Super cycle in great earthquake recurrence along the Japan Trench over the last 4000 years, *Geosci. Lett.*, 5:11, doi:10.1186/s40562-018-0110-2.
- Wakabayashi, A., Y. Yasuoka, M. Janik, H. Nagahama, N. Fukuhori, Y. Mori, Y. Arai, S. Fujii, and T. Mukai, 2019, Derivation and validity evaluation of calibration factors for activated-charcoal radon collectors, *RADIOISOTOPES*, 68, 317-329, doi:10.3769/radioisotopes.68.317.
- Wang, K., T. Sun, L. Brown, R. Hino, F. Tomita, M. Kido, T. Iinuma, S. Kodaira, and T. Fujiwara, 2018, Learning from crustal deformation associated with the M9 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geosphere*, 14, 552-571, doi:10.1130/GES01531.1.
- Yabe, S., and S. Ide, 2018, Variations in precursory slip behavior resulting from frictional heterogeneity, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:43, doi:10.1186/s40645-018-0201-x.
- Yamamoto, R., M. Kido, Y. Ohta, N. Takahashi, Y. Yamamoto, A. Pinar, D. Kalafat, H. Özener, and Y. Kaneda, Seafloor geodesy revealed partial creep of the North Anatolian Fault submerged in the Sea of Marmara, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 1268-1275, doi:10.1029/2018GL080984.
- Yasuoka, Y., H. Nagahama, J. Muto, and T. Mukai, 2018, The anomaly in atmospheric radon concentrations prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake in Japan. *Radiat. Environ. Med.*, 7, 86-948.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, and S. Watanabe, 2018, Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography, *Marine Geophys. Res.*, doi:10.1007/s11001-018-9362-7.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, and S. Watanabe, 2018, Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations, *Sci. Data*, 5:180182, doi:10.1038/sdata.2018.182.
- Yoshida, K., T. Kuwatani, T. A. Yasumoto, S. Haraguchi, K. Ueki, and H. Iwamori, 2018, GEOFCM: a new method for statistical classification of geochemical data using spatial contextual information. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 113, 159-169,

doi:10.2465/jmps.171127.

Zhao, S., M. Chigira, and X. Wu, 2018, Buckling deformations at the 2017 Xinmo landslide site and nearby slopes, Maoxian, Sichuan, China, Eng. Geol., 246, 187-197, doi:10.1016/j.enggeo.2018.09.033.

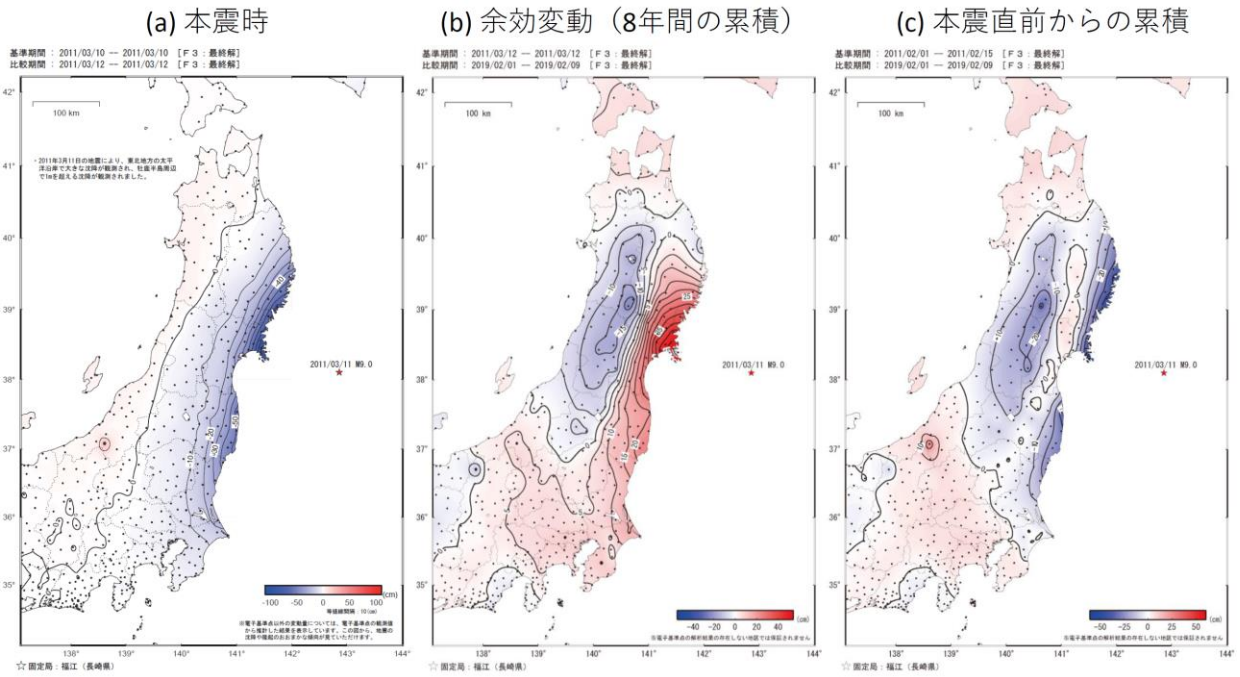


図1. GNSS連続観測により捉えられた2011年東北地方太平洋沖地震に伴う上下変動（国土地理院 [課題番号：[課題番号：6005]]）。(a) 本震時の上下変動。(b) 本震後8年間の余効変動。(c) 本震直前からの累積上下変動。