

### 3 (1) 東北地方太平洋沖総合研究

「東北地方太平洋沖」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）

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）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6年が経過した2017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った。今後、同じような失敗を繰り返さないためには、この地震およびその影響について詳しく調べ、将来の巨大地震の際の災害軽減に役立てることが極めて重要である。特に、この地震の発生により、日本列島はこれまで我々の知っているそれまでの日本列島とは別の状態になっている可能性があり、日本各地の地震や火山に及ぼす影響を詳細に調べる必要がある。

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いる。ここでは、東北地方太平洋沖地震に関係の深い課題の成果を紹介し、それが災害軽減とどのように結びつくのかを論じることとする。

#### 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が重要な役割を果たしている。

巨大地震がもたらす災害・被害予測は、想定すべき複数の地震シナリオや、都市モデルの不確定性を考慮した計算が必要であり、その結果生じる膨大な量の解析結果の評価に関しても新しい方法論が必要である。このような観点から様々な都市を対象にした統合地震シミュレーション（Integrated Earthquake Simulation, IES）を実施した。仙台市を対象にしたシミュレーションでは、東北地方太平洋沖地震を含む1995年から2016年の間に発生した最大加速度100 gal以上の12の地震を対象とし、その結果を使って、各建物の被害状況と使用状況を基に、修復コストの算定を行った（拠点間連携 [課題番号：2977]）。

このような被害予測のためには、地震動に対する構造物の応答を非線形性も考慮して正しく理解する必要がある。このような観点から、東北地方太平洋沖地震の際の建物被害データと、その領域にあった強震観測点でのデータに非線形応答解析を用いた物理モデルによる被害予測の評価手法を用いて被害率を求めた結果と比較した。その結果、内陸地震を対象として構築された予測モデルは、海溝型地震の短周期に富む加速度の大きな波形に対して敏感に反応して過大な被害率を与えることが明らかになり、このような地震に対する非線形特性の見直しを行う必要があることが示唆された（拠点間連携 [課題番号：2979]）。

大地震によって生じる強震動は、場所によっては地滑りを生じ、これが新たな災害誘因となりうる。東北地方太平洋沖地震でも、実際に大きな地滑りが生じていた。どのような場所で地震時にどのような地滑りが生じやすいのかを明らかにするために、東京以西の過去の地震によって生じた地すべりの地質・地形的特徴の調査を開始した。箱根の東方では、1923年関東地震およびそれ以前の地震によって軽石が関与した地すべりが多数発生しており、将来的にも発生することが予測される。静岡・山梨では、堆積岩と変成岩のトップリング斜面の崩壊が6か所で発生しており、その地震時の脆弱性が確認された。また、地層の座屈（Buckling）に先行された崩壊も2か所で確認され、これらの構造が特に地震動に弱いことが予測される（京都大学防災研究所 [課題番号：1912]）。

被害予測において過去の事例研究は重要であるが、当時と現在の土地利用状況や地形の違いを正しく把握し、また開発によってどのような脆弱性が生まれるのかについて検討を行うことが重要である。本年度は岩手県釜石

市中心部と宮城県多賀城市周辺地区について、地形復元を実施し、地形の改変と被害状況との関係について検討を行った結果、釜石市で甲子川河口の干潟が埋め立てられている様子が確認でき、この大部分が東日本大震災時に津波被害を受けていることがわかった（拠点間連携 [課題番号：2982]）。

以上のように、大地震時に何が生じるのかということが次第に明らかになってきているものの、これらの災害の予測に関する情報が住民の防災意識向上に役立たなければ意味が無い。東日本大震災被災地の調査に基づき、科学的知識の有無や防災訓練への参加が必ずしも自己判断力に基づく避難行動に結びつかないとの仮説が生まれたため、その検証を南海トラフ地震の被害が予想される地域において行った。その結果、自然現象としてのハザードリスクは比較的良好に認知されているものの、身の危険に直接かかわるリスクとしての認知度は低く、災害への備えに結び付いていないことが明らかになってきた（名古屋大学 [課題番号：1704]）。このことは、自然現象としてのハザードの情報の提供だけでは被害軽減に結びつかない危険性を示しており、情報の提供の仕方を工夫しなければならないことを意味している。

一方、大地震発生時の強震動や津波について、より早く、より正確に情報を提供することは緊急対応に基づく減災にとって極めて重要である。このような観点から様々な機関で手法開発が進められている。

東北地方太平洋沖地震発生直後は、ほぼ同時に複数の余震が別の場所で発生することが多発し、このために緊急地震速報が結果的に「誤報」となってしまった例が少なからずあった。これに対応するため、気象庁は2016年12月からIPF法（Integrated Particle Filter法）を緊急地震速報に導入した。この手法では、少ない観測点でも多項目の情報を同時に用いるため、震源要素の信頼度を向上させることができる（気象庁 [課題番号：7014]）。

また、GNSSデータを用いて震源断層を即時に推定する手法の開発・改良がおこなわれており、今年度はマルチGNSSへの拡張、キネマティック解析の改良、ノイズに起因する滑り量の過大評価の改善、断層モデルの初期値の改善等が行われた（国土地理院 [課題番号：6004, 6012]、気象庁 [課題番号：7009]、東北大学 [課題番号：1209]）。

特に熊本地震（M7.3）については、本震の発震時刻から5分以内に、自動的に矩形断層モデルをリアルタイムで推定することに初めて成功し、布田川断層に沿った右横ずれのMw6.95の地震であったことを示すことができた。さらに、4月14日及び15日に発生した熊本地震の前震（M6.5, M6.4）、10月21日に発生した鳥取県中部の地震（M6.6）、及び11月22日に発生した福島県沖を震源とする地震（M7.4）においてはリアルタイムで地震時変動を検出することに成功した（国土地理院 [課題番号：6001, 6004, 6005]、Kawamoto et al., 2016, 川元・他, 2016）。

また、自動震源決定手法（PF法）の改良を行い、震源出力条件の見直し、複数の地震が発生した場合の最適化、走時残差が大きな相の取り扱いの改良を行った。その結果、島嶼部及び地震多発時における震源決定性能を向上させることができた（気象庁 [課題番号：7009]）。

さらに、津波予測の高度化のために、震源域内で観測される地震動・音波等の非津波成分に伴う圧力変動が津波予測精度に与える影響を、理論合成データを用いた数値実験により検証したところ、ローパスフィルタ適用後に残存する地震動に伴う圧力変化の影響で、観測波形が短い地震発生直後は精度が低下するものの、時間が経過して観測データが増えると、精度低下は大幅に改善することが明らかになった。また、遠地津波の減衰過程だけではなく成長過程までを含めた全期間の振幅時間変化を説明するため、津波エネルギーの伝達過程を踏まえた考察に基づき、波源と二次波源（散乱源）、伝播経路、観測点付近の効果の3つに区分して、それぞれの段階ごとに数理モデル化した。遠地津波の観測事例にこの数理モデルを適用して、減衰定数などのパラメータの推定を進めた（気象庁 [課題番号：7011]）。

## 2. 地震・火山噴火の予測のための研究

繰り返し回数が少ないときの小繰り返し地震の発生確率予測の精度を、日本海溝沿いで行った 2006 年から 2010 年の 4 回の確率予測実験データや対数正規乱数を用いたシミュレーションを用いて検討した。その結果、データが非常に少ない時は、事前分布に含まれる経験的な情報が予測精度の向上に大きく役立つことが明らかになった（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]）。

宮城県沖のプレート境界の変動シミュレーションを、多数のシナリオで実施して、M9 クラスの巨大地震の発生前後の仮想宮城県沖地震の発生頻度について検討をおこなった。多くのシナリオでは、宮城県沖地震の平均再来間隔が、M9 クラスの地震の発生後に、より短くなることが示された（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]，Nakata et al., 2016）。

東北地方太平洋沖地震の発生直後には、日本の広い領域で地震活動が一時的に活発化し、それはとくに火山地域で顕著であった。この現象の一つの解釈としては、大振幅の地震波動によってマグマや深部高圧水が強制的に振動させられたために、地震が起りやすくなったということが考えられる。その後、このような本震発生直後の地震活動の活発化は収まってきたものの、蔵王山では、以前と比べて活動度の高い状態が続いているように見えるため、今後の活動の推移予測が重要となっている。平成 27 年度に全国の大学と合同で実施した人工地震構造探査のデータ解析を進め、火口湖御釜及び地熱活動域を対象としたファン・シューティング解析を行い、御釜と地熱活動域を結ぶ領域が地震波の減衰域となっていることを明らかにした。蔵王山の全磁力繰り返し観測を 2016 年 8 月にも実施し、これまでの観測結果をまとめた結果、御釜から北東へ約 700m、深さ約 350m の位置に長径と短径がそれぞれ 500m と 400m で厚さ 190m 程度の扁平楕円体シル状の消磁域が推定され、蔵王山の噴火ポテンシャルは御釜直下ではなく、現在噴気を上げている振子沢、丸山沢の直下付近にあることが示唆された。一方、蔵王山直下浅部で発生する低周波地震・長周期地震の解析を継続したが、長周期地震の振動特性に明瞭な時間変化は見られず、浅部の熱水系に顕著な温度変化や物性的変化はないと考えられる（東北大学 [課題番号：1202]）。

福島県立医科大学で観測された大気中ラドン濃度の残差の積算値を調べたところ、2003 年以降から大気中ラドン濃度の積算値がべき乗則に従い増加し、2011 年の東北地方太平洋沖地震まで継続していたことがわかった。2011 年の東北地方太平洋沖地震では 1990 年以降の M6 以上の地震の積算ベニオフ歪に関してもべき乗則の増加エネルギー散逸が報告されており（Xue et al., 2012）、大気中ラドン濃度の変動にも同様のエネルギー散逸則が認められたことになる（東北大学 [課題番号：1207]）。

### 3. 地震・火山現象の解明のための研究

#### （プレート境界）

東北地方太平洋沖地震の最大すべり域付近の日本海溝において、2013 年および 2014 年から 2015 年にかけて、海溝軸を跨ぐ形で 2 回の海底間音響測距観測を行い、さらに 2015 年からは、新しい仕様の 5 台の機器を同海域に設置した。本年度 2016 年 9 月にこのうち 2 台を回収し、ほぼ 1 年間の連続データを得た。温度・圧力補正後の見かけ基線長は、主に設置状態の過渡現象による姿勢変化を描いており、姿勢補正により基線長変化はなくなるセンスであることが予想される。これは、2013 年から実施してきた同海域での先行観測と整合する結果である（東北大学 [課題番号：1210]）。

2012 年から 2016 年 5 月までに実施した 6 回の GPS/音響方式海底地殻変動観測により、日本海溝近傍における 2011 年東北沖地震後の地殻変動を明らかにした（図 1）。観測された地殻変動の変位速度ベクトルは、海溝沿いに南北で大きくことなることが明らかとなった。東北沖地震で大きな地震時すべりがあった中部では粘弾性緩和による顕著な西向き変位が観測されるが、南部の広い範囲では逆に東向き変位が観測され、プレート境界線部で余効すべりが進行していることを示唆する。これに比べ、北部では地震後地殻変動による変位速度は非常に小さい（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

北緯 39 度付近の日本海溝陸側斜面で、東北沖地震発生前の 1996 年と 2001 年に実施した構造探査実験と同一測線での構造探査実験を 2013 年と 2014 年に実施し、東北沖地震前後において、ほぼ同じ記録断面を得ることができた。一方、プレート境界からの反射強度については、暫定的ではあるが、東北沖地震発生前に強度が強かった場所では発生後に強度が低下し、発生前に弱かった場所では発生後に強度が上がるといった傾向があるように見える結果となっている（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

房総沖スロースリップ領域において水圧計のデータ解析を進めた。2015 年度では観測点 2 点の差を取って海洋変動等を除去していたが、2016 年度は陸上の GNSS データに用いられている解析方法と同様に、線形成分、1 年と半年周期の周期成分、対数成分、ギャップ成分の 4 つの成分からなる関数をフィッティングして、データ解析を行った。その結果、水圧計による海底の上下変動は、各点において深さに換算して約 1cm の精度で観測できることが示された。2013 年 12 月から 2014 年 1 月の房総沖スロースリップに近い観測点で 2cm を超える有意な隆起が認められ、スロースリップから遠い観測点では有意な隆起はなかったことがわかった。この解析方法の開発によって、海底水圧計はセンチオーダーの変化を捉えられることができ、スロースリップのような小さな変化の観測にも有用であることを示すことができた（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

日本海溝プレート境界断層浅～中部の性質を理解するため、統合国際深海掘削計画第 343 次研究航海 (JFAST) によって採取された日本海溝付近のプレート境界断層試料の高温高圧摩擦実験を行い、プレート境界断層試料の摩擦特性が温度や変位速度によってどのように変化するか調べた。その結果、(a-b) 値は 50~100 °C でのみ 0 に近い負の値を取り、150 °C 以上では正となることがわかった。スロー地震は (a-b) 値が負でかつ小さな値をとるような条件で発生しやすいと考えられており、また東北沖沈み込み帯の温度構造から、スロー地震の下限はおよそ 150 °C だと推定されているため、本実験結果は観測結果とよく整合している（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

海底掘削孔 C0010 の孔内計測装置を DONET への接続をおこないリアルタイム計測を開始した。2016 年 4 月 1 日に三重県南東沖での地震 (Mw6.0) に伴い発生したゆっくり滑りに対応した孔内間隙水圧の変動を観測した。またゆっくり滑りは周辺で発生した超低周波地震の活動を伴うことを示した。DONET のデータの解析によるとこの地震の余震群や超低周波地震は本震の発生域とは空間的に離れた場所で発生しており、深部側と浅部側双方にひずみが伝播したことが示唆される（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]）。

陸上の GPS 観測網に加えて海底の GPS/音響測位結合方式による地殻変動データ、水圧計による地殻変動上下成分をデータとしてプレート境界上での東北沖地震後の余効すべりの分布を高分解能で推定した。得られた分布は東北沖地震の発生時のすべり領域とはほぼ重ならないことが示された（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]、Iinuma et al., 2016）。

琉球海溝南部では津波地震、低周波地震のようなゆっくりした地震の発生域が深部にまで隣接しており、測線構造探査においても発達した低速度 wedge の存在が確認され、プレート間の固着の弱い領域が支配的に存在することが明らかになった。更に自然地震の精緻な解析によりプレート間地震を抽出したところ、普通の地震とスロースリップや低周波地震との空間的な棲み分けがなされていることが判明した（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]、Arai et al., 2016）。

ブロック断層モデリングを時間変化も含めて解析できるようにし、東北地方太平洋沖地震前の日本列島の解析を行った。その結果、2003 年の十勝沖地震のアフタースリップが明瞭に捉えられた。2005 年の宮城県沖の地震のため、2006 年に宮城沖合のすべり欠損が小さくなる様子が捕らえられた。また 2008 年の茨城沖、福島沖の地震後の余効変動のために、2008 年以降、茨城沖、福島沖でのプレート境界のすべり欠損が小さくなっていることが推定された。西南日本のフィリピン海プレートと陸側プレート間の滑り欠損では、豊後水道の長期的なスロースリップ、東海の長期的なスロースリップ、九州東岸のスロースリップをとらえられた。2013 年以降の全国の解析でも、東海スロースリップ、紀伊水道のスロースリップ、豊後水道のスロースリップ及び九州東岸のス

ロースリップが検出され、本解析手法の有効性が確認された（国土地理院 [課題番号：6003]）。

摩擦実験における変位速度急変時に現れる摩擦強度の変化を表す量  $a$  や  $b$  は、実験条件に依存する。その様な複雑な挙動を表現可能な摩擦構成則を定式化した上で、上述の日本海溝付近の JFAST 試料の摩擦実験から得られた摩擦の性質、及び実測された水理的性質と摩擦発熱による間隙水圧上昇を考慮した動的地震サイクルシミュレーションを行った。平時の有効垂直応力分布に関してパラメータスタディをする事により、スーパーサイクル挙動、海溝まで達する巨大地震の頻度、深部のみの大地震の頻度、巨大地震時のすべり量と発熱量、長期的摩擦発熱量の全てにおいて観測結果とよく一致するケースを実現する事に成功した（図2）。またこのモデルでは、再浅部のみが  $\text{cm/s}$  程度の速度ですべるイベントが確認できた（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

2011年東北地方太平洋沖地震の震源域で、前震による余効すべりと本震による高速すべりがオーバーラップしている領域が発見されたことに基づき、天然のプレート境界における摩擦強度の変位速度依存性の実証的な評価を行い、インバージョン解析により求めた変位プロファイルから応力変化を計算するとともに、その結果を速度と応力変化の関係としてコンパイルした結果、顕著な動的弱化現象が観察された。この結果は、従来の高速摩擦実験の結果（例えば Di Toro et al., 2011）とも調和的と言える（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

Brownian Passage Time (BPT) 分布更新過程から拡張した時空間更新過程モデル (Nomura et al., 2017) を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震までの太平洋プレート境界における準静的滑りの時空間的变化を小繰り返し地震を用いて推定した。その結果、十勝沖～釧路沖において2003年十勝沖地震後の滑り速度が長期にわたって以前より高い水準にあること、三陸はるか沖地震の余効滑りの減衰期間が深さにより異なること、三陸沖や福島沖では間欠的にM6クラスの地震や群発地震に伴う滑り加速が見られることなどがわかった。さらに、GPSインバージョンによる同地域の滑り欠損分布の推定結果との比較を行い、全体的に同じ傾向が捉えられていることを示した（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]）。

沈み込みプレート境界における小繰り返し地震のすべり方向の相対変化を精密に推定できる方法を開発し、東北地方太平洋沖地震前後のフィリピン海プレートの上面と下面の相似地震に適用した。すべり速度の時間変化の結果と組み合わせることで、東北地方太平洋沖地震後に太平洋プレート・フィリピン海プレートの両方の沈み込み速度が一時的に加速したことが推定された（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]）。

南海トラフ沿いにおいて、海陸の測地観測データを用いてインバージョンを行い、プレート境界のすべり欠損速度の分布を推定した。東北地方太平洋沖地震の観測結果への影響は Iinuma et al. (2012) 及び Sun and Wang (2015) のモデルを用いて取り除いた。結果として、内閣府による南海トラフ巨大地震の想定震源域の全体は正のすべり欠損速度を持っていることがわかった。また、1940年代の東南海・南海地震の震源域よりも外側にすべり欠損速度の高い領域が広がっていることも示された。逆にすべり欠損速度の低い領域はVLFEの分布と整合的であり、周辺に海山の沈み込みも見られることから、これらの現象とプレート境界のすべり欠損の状態は何らかの物理的相関を持つことが初めて示された（海上保安庁 [課題番号：8001], Yokota et al., 2016）。

2つの速度弱化パッチの相互作用を考慮したモデルによる数値シミュレーションを行い、地震発生サイクルの複雑性を調べた。サイスミックカップリングが急変する時に多重周期や非周期的なサイクルが発生しやすいことがわかった。また、大規模な余効すべりをはじめとする、準静的なすべりの伝播過程について、小繰り返し地震解析結果を基に数値シミュレーションで再現した結果を参考に、摩擦構成則に基づいて摩擦特性と伝播速度の関係式を導出した（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]）。

摩擦構成則に従う余効すべりと、地震時のすべり及び余効すべりによるマンタルの粘弾性応力緩和の双方を考慮した余効変動モデルを構築した。このモデルのパラメータは摩擦パラメータやマンタルの粘性率等であり、初期条件は地震時のすべり分布で決まる。このモデルを東北地方太平洋沖地震の余効変動に適用し、パラメータと初期条件が余効変動に与える影響について調査したところ、地震時のすべり分布によっては、モデルが余効変動の上下変動の観測値を説明できないことが分かった。この結果は、余効変動の観測データから余効すべり域の摩

擦パラメータを推定する際には、地震時のすべり分布も同時推定する必要があることを示すとともに、余効変動データから地震時すべり分布に拘束を与えることができることを示している（京都大学理学研究科 [課題番号：1803]）。

2011年東北地方太平洋沖地震による津波堆積物の各種分析を通して、津波堆積物の識別手法や浸水域の復元手法などに向けた調査研究を各地で行った。青森県三沢市およびおいらせ町で珪藻分析を行った結果、この地震による内陸の津波堆積物には海生・汽水生の珪藻よりも淡水生の珪藻のほうが多く含まれており、また含まれている海生珪藻も現在の海岸の砂で優勢な珪藻とは異なる海生種が優勢であることがわかった。これは、珪藻分析に基づく古津波堆積物の同定においても注意すべき重要な結果である（Tanigawa et al., 2017）。さらに、 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比を調べたところ、東北沖地震の津波堆積物も、また千島海溝の連動型巨大地震による北海道東部沿岸の津波堆積物も、その周りの土壌よりも低い $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比を示すことが分かった。このことは、 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比を津波堆積物研究における地球化学的指標として広く用いることができる可能性を示している（産業技術総合研究所 [課題番号：5004]）。

### （内陸）

2011年東北地方太平洋沖地震の発生から5年以上が経過しても、東北地方内陸での誘発地震活動は依然として継続しており、活動には時空間変化がある。これらの現象を東北地方太平洋沖地震発生時の応力変化だけで説明することは困難であり、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仮説が、一つの可能性として考えられる。森吉山周辺地域においては、単独観測点での平均的なS波エンベロップを用いたback-projection解析から、地震波散乱体が森吉山の北西約5 km、深さ13 km付近に存在するという結果を得ている。本年度は、2012年11月から2014年5月までの期間に実施した震源域周辺において9点の3成分地震計から成るアレイ観測データのセンブルランス解析から散乱体の位置推定を試みた。センブルランス解析の結果を震源に近い地震についてスタックすることで、散乱波の到来方向、見かけ速度、到達時刻を特定でき、上記の散乱体から到来したと考えられる後続波を検知することができた（弘前大学 [課題番号：1101]）。

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（図3）。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（東北大学 [課題番号：1204]）。

福島県のいわき-猪苗代湖測線に約1.5 km間隔で臨時観測点50点を設置し地震観測を行った。2014年10月～2016年6月に発生した震央距離 $30^\circ \sim 90^\circ$ のMw5.9以上の地震を用いて観測されたレシーバ関数を計算し、S波速度構造を与えて計算された理論レシーバ関数との間で最急降下法を用いて波形適合を行い、最も合う地震波速度構造を推定した。また、新潟-福島横断測線におけるMT観測データに対して2次元断面の比抵抗構造を推定した結果、背弧側新潟平野の地下10～20 km、前弧側郡山盆地と阿武隈高地との境にあたる領域の地下10～30 km、島弧中央部西会津地下全般に低比抵抗域がそれぞれ推定された。2011年の東北太平洋沖地震の直後から前弧側にあたる茨城県-福島県境付近で活発な誘発地震活動がおり、同地震の前に郡山盆地西側の奥羽山脈の地下浅部でもまとまった地震活動が起こっていた。これらの地震活動は、前弧側の低地震波速度-低比抵抗領域の浅部に位置する高地震波速度-高比抵抗域で起こっていることが分かった。ただ当該測線では、背弧側の日本海に面する領域ではその地下に低比抵抗域が捉えられているものの、顕著な地震活動は今のところ起きていないようである（東北大学 [課題番号：1203]）。

このように地震学的・電磁気学的に地下の流体の存在が示唆されているが、このような流体が地下に存在するためには、不透水層が形成されている必要がある。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（東北大学 [課題番号：1204]）。

また、含水岩石の電気伝導度がクラック密度 0.1 を境にして大きく増加することと、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を示す X 線 CT 観察を元に、立方体粒子の集合を考え、どれだけの割合の粒界が開くと連結した経路が形成されるのか、数値実験を行った。その結果、開いた粒界が全粒界の 20%を超えると規格化された最大長が 1 に達する（すなわち、系全体に渡る連結した経路が形成される）ことがわかった。このパーコレーションの閾値をクラック密度に換算すると 0.1 になるため、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示唆している（京都大学防災研究所 [課題番号：1905]）。

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。GNSS 観測によれば本震直後と同様のセンスの余効変動が継続しており、大地震によって生じた応力場の変化は、短期間では解消しないことが明らかになりつつある（東北大学 [課題番号：1203]）。

2016 年 12 月 28 日に、東北沖地震の広義の余震と考えられる Mj6.3 の地震が茨城県北部で発生した。この地震による地殻変動を GNSS 連続観測および ALOS-2 衛星による SAR 干渉解析により検出した。最大の地殻変動が観測される領域では、長さ約 2 km の変位の不連続が認められた。矩形断層一様滑りの震源断層モデルを推定した結果、南西傾斜の断層面上における正断層運動が推定された。変位の不連続が見られた最大変位域では、直下のごく浅部に局所的な滑りが求められた（国土地理院 [課題番号：6001]）。

2000 年鳥取県西部地震域での稠密地震観測データによる震源断層周辺で発生した余震約 4000 イベントを詳細に調べた結果、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よりも有意に広く、また、本震断層周辺の 9 割近くの余震が正の  $\Delta$  CFF を持つことが分かった。以上の結果は、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り、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を示している（京都大学防災研究所 [課題番号：1905]、Yukutake and Iio, 2017）。

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。そのうちの仙台と江刺について、2011 年以降の重力及び楕円体高の時間変化を図 4 に示す。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 年以降は消失していることがわかる。この傾向は関東地方（筑波山、東京）でも認めることができた。このことは東北地震後の粘弾性効果が次第に、afterslip の効果と同程度に成長していることを強く示唆する結果である。また、2016 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  $\mu$  ガル程度のハイブリッド重力観測を実施した。2012~2014 年と、2014~2016 年の 2 つの期間について 2 年間の重力変動を図 5 に示す。2014 年を境に空間的な重力変動パターンも大きく変わりつつあることが見出された（東北大学 [課題番号：1203]）。

2016 年 9~11 月に新潟県佐渡市から阿賀町における GNSS 繰り返し観測を実施した。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。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]）。

沈み込むプレート、脱水反応と流体移動、対流するマントルウエッジと流体の反応、流体濃度と温度に依存す

る粘性率を考慮した、沈み込み帯スケールでの2次元2相対流モデルを構築し、東北日本に適合する条件で計算を行った。その結果、含水量数%, 蛇紋岩およびカンラン岩に関する粘性率の水・温度依存性が実験推定値程度の場合に、地震波トモグラフィ、地殻熱流量、火山帯の位置と幅・安定性を再現するモデルが提案された(京都大学防災研究所 [課題番号: 1905], Horiuchi and Iwamori, 2016)。また、この沈み込み帯熱対流モデルを用いて、2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動を解析した結果、基準粘性を  $10^{19}$  Pa s とし、海洋マンツルの粘性は Muto et al. (2016) で推定されたモデルの値を採用し、余効すべりを考慮すれば、海陸の観測データを概ね説明できることがわかった(東北大学 [課題番号: 1203])。

東北沖地震間における東北日本弧の上下変動のモデル化を有限要素法により行った。島弧内陸の不均質粘弾性構造とスラブを考慮した場合、沈降域が太平洋沿岸から火山フロント周辺まで拡大することがわかった。また、粘弾性モデルでも深部固着が必要であるが、弾性体に比べて深部の固着の割合は小さくても前弧の沈降を説明可能であることがわかった。観測から明らかにされているおよそ100年間における東北日本背弧での隆起は、東北沖地震震源域から深部までの固着の影響を受けていた可能性がある(東北大学 [課題番号: 1203])。

### (他の沈み込み帯との比較)

国内で発生する巨大地震の頻度は低いため、巨大地震の研究を進め、減災のうえで何に注意すればよいのかを知るためには、国内の観測研究だけでは限界があり、海外の地震との比較研究が極めて重要となる。

世界および東北沖の地震活動と、朔望周期程度で変化する潮汐応力の振幅を比較したところ、振幅が大きいきには、地震のサイズ頻度統計が変化し、Gutenberg-Richter 則の b 値が小さくなることがわかった。地震の破壊過程が階層的であり、その階層進展確率が、潮汐によって変化すると考えるとこの結果は理解しやすい(東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。

2014年チリ Iquique 地震の発生に至るまでの地震活動解析を行った。2008年から2014年までの波形データと USGS 地震カタログを用いて、Matched Filter 法により震源カタログを新たに構築した。本震発生の約270日前から、地震活動度、小繰り返し地震から推定される非地震性滑り量、ETAS モデルの background rate が間欠的に増加し始め、その増分も時間とともに大きくなり、本震発生に至ったことが明らかとなった。また、震源移動現象の発生頻度も本震発生に向かって増加した傾向が見られた。これらの解析結果に基づくと、地震性すべりに加えて非地震性すべりもプレート境界面上で同時に進行し、本震破壊領域の端で固着が間欠的に緩み破壊域への応力集中が生じたことで本震の発生が促進されたと考えられる(東京大学地震研究所 [課題番号: 1510])。

2014年5月10日から2015年6月にかけて、ニュージーランド (NZ) 北島ギズボーン沖合にて日・NZ・米3か国で大規模海域地球物理観測を実施し、その海底圧力計のデータを調べたところ、2014年9月から10月にかけて観測網直下において発生した大規模なスロースリップに伴う1.5~5.4 cm の海底上昇を記録していることがわかった。この海底上昇は陸上のGPS観測網によってスロースリップが捕らえられる数日前から開始しているように認められ、したがってスロースリップのすべりはプレート境界の浅部から深部へと進行したことが示唆される。海底上昇量は海溝軸に向かって小さくなるものの、スロースリップによる断層すべりがほぼ海溝軸まで達したことを観測データは示している。ここで得られたスロースリップに伴う断層すべりについて、反射法地震波構造調査によって得られているプレート境界の形状と比較すると、沈み込んだ海山を避けるように分布していることがわかった。また、スロースリップに伴った微動と考えられる活動が認められ、その震源はスロースリップの断層すべりが及ばない沈み込んだ海山の基底部周辺に集中しているように見える(東京大学地震研究所 [課題番号: 1524])。

### (災害軽減の基盤となるデータ・知見の流通・公開)

災害軽減のためには、予測のみならず、過去に起こったことと現在起こっていることをわかりやすく社会に伝



えることが重要である。そのような取り組みが様々な機関で進められている（例えば、気象庁〔課題番号：7012, 7020〕）。特に気象庁では、平成28年熊本地震を踏まえ、大地震発生直後においては、大地震と同程度の地震への注意も喚起するような防災上の呼びかけを行うことにした（気象庁〔課題番号：7012〕）。

また、災害軽減のための研究を効率よく、かつ多彩な視点から進めるためには、良質のデータが生産され、それが研究者に提供されることが重要であり、そのような取り組みも行われている（気象庁〔課題番号：7014〕、国土地理院〔課題番号：6005, 6006, 6008〕、防災科学技術研究所〔課題番号：3004〕、東京大学地震研究所〔課題番号：1518〕）。特に、地震観測データの一元的な処理に関して、平成28年4月より大幅に自動処理を導入した処理方法の改善を行った（気象庁〔課題番号：7014〕）。また、これらのデータを処理した結果は、地震調査委員会による地震活動の見通しの検討の際にも利用されており、この意味でも災害軽減に貢献している。

平成23年度から構築を進めている日本海溝海底地震津波観測網(S-net)については、平成28年度に海溝軸外側（北海道沖～千葉県）の敷設工事を行い、また、平成27年度までに整備を行った海溝軸外側以外の5海域125観測点について、試験運用を開始し、気象庁にもデータの配信を開始した。これらの海底下の観測点の本格運用が行われるようになれば、地震や津波の即時予測の迅速化と高度化ができ、さらに日本海溝沿いの地震・津波活動について重要な情報を提供してくれるものと期待される（防災科学技術研究所〔課題番号：3004〕）。

このような観測の一次データだけでなく、ある程度、成熟した研究領域については、一次データを加工して得られた二次データについても共有したほうが研究の進展を促すと期待される。たとえば、東北地方太平洋沖地震後の日本列島の挙動の理解にむけた研究を推進するためには、日本列島の基本構造モデルが共有されていることが望ましく、そのような観点からのモデルの構築が進められている（東京大学地震研究所〔課題番号：1505〕）。

#### 4. これまでの課題と今後の展望

##### （今後の巨大地震災害の軽減のために）

今期の5ヶ年計画では、災害誘因（ハザード）までがターゲットであり、災害素因（脆弱性）までは大きく踏み込んでいない。しかし、将来的には、災害素因も十分検討する必要がある、今回の5ヶ年はそのための「準備期間」と位置付けるべきであろう。実際、社会科学者との連携も進んできており、次の5ヶ年ではさらに災害素因の研究も進展させることができると期待される。

1970年代末から1980年代にかけて「比較沈み込み帯学」が構築され、M9の巨大な地震は若いプレートが沈み込む場所や、付加体型の沈み込み帯で生じるものと考えられていた。海洋性プレートが若ければ浮力が働いて沈み込みにくくなり、その上の堆積物も海溝で削り取られやすくなって、付加体が形成されていく、ということから、このようなプレート境界で固着が強くなり、巨大な地震が起こりやすい、というのは、わかりやすい話であったため、このような考え方は多くの地震学者に受け入れられ、やがて「常識」になってしまっていた。しかし、このロジックの帰結は、古いプレートが沈み込む場所や、造構性浸食型沈み込み帯で、M9の地震が相対的に起こりにくいということであって、M9の地震の発生が不可能というわけではない。そのことに我々は、もっと慎重に考えるべきであった、というのが、東北地方太平洋沖地震の大きな反省であった。

しかし、そのようにM9の発生の「有無」ではなく、「傾向」を決めるパラメータは、いくつかあると考えられ、そのような「傾向」を把握して、新しい「比較沈み込み帯学」を構築する努力は、前にもまして重要となっている。その際には、くれぐれも、得られた「傾向」が、M9の地震の将来にわたっての「有無」を表すわけではなく、あくまでも統計的な「起こりやすさ」を表しているということに留意する必要がある。

東北沖でなぜM9が生じたのかについては、いくつかの仮説が提案されている。どれが主要原因であったのかについて、当初、いろいろと議論があったが、今となってみると、どれも何らかの寄与があったと考えるべきであろう。少なくとも、原因を絞り込みすぎないようにする必要がある。なぜなら、今回は主要原因にならなかったことが、次のM9の地震の主要原因になるかもしれないからである。今後、「想定外」を減らすためには、可

能性が低いと判断されてもむやみに切り捨てず、僅かな可能性であっても、「ありうる」として留意しておくことが重要である。

一方、今回の地震では、海溝付近が大きく滑って大きな津波を生じており、また、過去にM7の地震を生じていた場所で高周波サブイベントが生じていたようにも見える。このような傾向が他の沈み込み帯で、どのくらい共通の性質なのかを調べることは、将来の津波ハザードや地震ハザードを絞り込むために重要であり、今後、このような観点でも「比較沈み込み帯学」の研究を進展させることが重要である。

沈み込み帯の特徴を抽出するうえで留意すべき点として、プレート境界の性質の時間変化がある。東北沖地震の前の1ヶ月間くらいにスローイベントとして滑った場所が、本震のときにも大きな高速滑りを生じたことが明らかになっており、また、これまでプレート境界地震が生じていなかった場所でも、大きな余効すべりが生じている期間だけ地震が発生している例がかなりあることが分かってきている。したがって、これまでのような単純な「スローイベントと地震の棲み分け」は厳密には成立せず、「地震性滑りが卓越する場所・時期」があるという観点で、時空間的に変化に注意しながら特徴を抽出していく必要がある。

一方、東北地方太平洋沖地震では、スローイベントや余効すべりと地震性すべりが連鎖的に発生して本震に至ったということが明らかになっている。したがって、決定論的な短期予知は困難ではあるものの、地震のトリガしやすさを考慮した、「確率論的短期予知」はある程度可能と考えられ、今後、このような地震のトリガ源としての、スローイベント/余効すべりの時空間分布の研究が重要となっている。

#### (次の巨大地震災害の軽減のために)

東北地方太平洋沖地震のあと、その震源域の北と南のプレート境界、および沖合のアウトターライズ領域でM8級の巨大な余震が起こることが、東北沖発生直後から心配されてきた。今のところ、それは発生していないものの、1986年の明三陸地震のあと、その沖合のアウトターライズ域で1933年の昭和三陸地震が生じたことを考えれば、今後100年くらいは、そのようなことが十分起こりうると考えて警戒を続ける必要がある。

特に、北側でM8級の「最大余震」が生じれば、それは北海道の沖合まで連動して、次のM9地震まで成長する可能性もあり、今後、過去の北海道沖合の巨大地震の履歴の調査をさらに推進するとともに、GNSS観測や地震観測を通じて、プレート境界の固着状況や地震活動に変化が生じていないか、慎重にモニタリングを続けていく必要がある。

このような次の巨大地震の予測のためには、余効変動の正しい理解が重要である。これまでの研究により、M9の地震では余効すべりのみならず粘性緩和の影響が無視できないことが明らかになっており、このような余効変動の詳細なモデル化は、M9の地震発生サイクルを理解して、次のM9地震の予測にとって重要であるのと同時に、「最大余震」の発生予測にとっても、また、今後の内陸の地震・火山活動の予測のためにも、極めて重要な意味を持つ。したがって、今後、観測と理論、数値計算の集合知として、余効変動のモデル化を強力に推進していく必要がある。

#### 成果リスト

- Ando, R., 2016, Fast Domain Partitioning Method for dynamic boundary integral equations applicable to non-planar faults dipping in 3-D elastic half-space, *Geophys. J. Int.*, 207, 833-847.
- Arai, R., T. Takahashi, S. Kodaira, Y. Kaiho, A. Nakanishi, G. Fujie, Y. Nakamura, Y. Yamamoto, Y. Ishihara, S. Miura, and Y. Kaneda, 2016, Structure of the tsunamigenic plate boundary and low-frequency earthquakes in the southern Ryukyu Trench, *Nature Comm.*, 7:12255, doi:10.1038/ncomms12255.
- Arai, R., S. Kodaira, Y. Kaiho, T. Takahashi, S. Miura, and Y. Kaneda, 2017, Crustal structure of the

- southern Okinawa Trough: Symmetrical rifting, submarine volcano and potential mantle accretion in the continental back-arc basin, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 622–641, doi:10.1002/2016JB013448.
- Burgmann, R., N. Uchida, Y. Hu, and T. Matsuzawa, 2016, Tohoku rupture reloaded?, *Nature Geosci.*, 9, 183–184, doi:10.1038/ngeo2649.
- Freed, A. M., A. Hashima, T. W. Becker, D. A. Okaya, H. Sato, Y. Hatanaka, 2017, Resolving depth-dependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-oki, Japan Earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 459, 279–290, doi:10.1016/j.epsl.2016.11.040.
- 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.
- Goto, M., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Muto, J., Omori, Y., Ihara, H., Mukai, T., 2017, Anomalous changes in atmospheric radon concentration before and the after 2011 northern Wakayama Earthquake (Mj 5.5), *Radiation Protection Dosimetry*, 174 (3), 412–418, doi:10.1093/rpd/nw142.
- Harris, R., L. Wallace, S. Webb, Y. Ito, K. Mochizuki, H. Ichihara, S. Henry, A. Trehu, S. Schwartz, A. Sheehan, R. Lauer, and D. Saffer, 2016, Investigations of shallow slow slip offshore of New Zealand, *Eos*, 97, 701–704, doi:10.1029/2016E0048945.
- Hashima, A., T. W. Becker, A. M. Freed, H. Sato, D. A. Okaya, 2016, Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku earthquake: influence of 3-D elastic structure around Japan, *Earth Planets Space*, 68:159, doi:10.1186/s40623-016-0535-9.
- Hatakeyama, N., N. Uchida, T. Matsuzawa, T. Okada, J. Nakajima, T. Matsushima, T. Kono, S. Hirahara, and T. Nakayama, 2016, Variation in high-frequency wave radiation from small repeating earthquakes as revealed by cross-spectral analysis, *Geophys. J. Int.*, 207, 1030–1048, doi:10.1093/gji/ggw313.
- Hirata, Y., and Y. Ohta, 2016, Spatial and temporal characteristics of optimum process noise values of tropo-spheric parameters for kinematic analysis of Global Navigation Satellite System (GNSS) sites in Japan, *Earth, Planets Space*, 68:203, doi:10.1186/s40623-016-0578-y.
- Hirono, T., K. Tsuda, W. Tanikawa, J.-P. Ampuero, B. Shibazaki, M. Kinoshita, and J. J. Mori, 2016, Near-trench slip potential of megaquakes evaluated from fault properties and conditions, *Sci. Rep.* 6:28184, doi:10.1038/srep28184.
- 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, 2016, GEONET による熊本地震に伴う地殻変動, *国土地理院時報*, 128, 163–168.
- 檜山洋平・川元智司・甲斐玲子・山口和典・高松直史・佐藤明日花・宮原伐折羅・三浦優司・山下達也・矢来博司・森下遊, 2017, GEONET 及び SAR 干渉解析による鳥取県中部の地震に伴う地殻変動, *国土地理院時報*, 129, 印刷中.
- 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.
- Ide, S., S. Yabe, and Y. Tanaka, 2016, Earthquake potential revealed by tidal influence on earthquake size-frequency statistics, *Nature Geosci.*, 9, 834–837, doi:10.1038/ngeo2796.

- Iinuma, T., R. Hino, N. Uchida, W. Nakamura, M. Kido, Y. Osada, and S. Miura, 2016, Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake, *Nature Comm.*, 7:13506, doi:10.1038/ncomms13506.
- Inazu, D., T. Waseda, T. Hibiya and Y. Ohta, 2016, Assessment of GNSS-based height data of multiple ships for measuring and forecasting great tsunamis, *Geosci. Lett.*, 3:25, doi:10.1186/s40562-016-0059-y.
- 井上拓也・太田雄策・越村俊一・日野亮太・川元智司・檜山洋平・道家友紀, 2016, GNSS によるリアルタイム断層推定情報の津波解析への適用手法の検討, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 72(2), doi:10.2208/kaigan.72.I\_355, 355-360.
- 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.
- 磯部渉, 2017, 稠密アレイを用いたレシーバ関数解析による東北南部前弧域の地殻・マントル構造の研究, 東京大学修士論文.
- Ito, A., H. Sugioka, K. Obana, R. Hino, D. Suetsugu, K. Nakahigashi, M. Shinohara, M. Nakano, and Y. Yamamoto, 2017, Upper boundaries of the Pacific and Philippine Sea plates near the triple junction off the Boso Peninsula deduced from ocean-bottom seismic observation, *Earth Planets Space*, 69:30, doi:10.1186/s40623-017-0608-4.
- 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.*, doi:10.1002/2016GC006663.
- Kato, A., J. Fukuda, T. Kumazawa, and S. Nakagawa, 2016, Accelerated nucleation of the 2014 Iquique, Chile Mw 8.2 Earthquake, *Scientific Reports*, 6, 24792, doi:10.1038/srep24792.
- Kato, N., 2016, Earthquake cycles in a model of interacting fault patches: Complex behavior at transition from seismic to aseismic slip, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 106, doi: 10.1785/0120150185.
- 川元智司・檜山洋平・古屋智秋・佐藤雄大・太田雄策・西村卓也・等々力賢, 2016, 電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD) プロトタイプの開発, *国土地理院時報*, 128.
- 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.
- Kawamoto, S., Y. Hiyama, R. Kai, F. Suga, K. Yamaguchi, T. Furuya, S. Abe, and N. Takamatsu, 2016, Crustal deformation due to the Kumamoto Earthquake revealed by GEONET, *Bull. GSI*, 64, 27-33.
- 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.
- 小林広明・越村俊一・下條真司・有吉慶介, 2016, 防災減災に資する Urgent Computing への挑戦, *ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム論文集*, vol. 2016, 128-129.
- 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, 139-144.
- Kubota, T., R. Hino, D. Inazu, Y. Ito, T. Iinuma, Y. Ohta, S. Suzuki, and K. Suzuki, 2016, Coseismic slip model of offshore moderate interplate earthquakes on March 9, 2011 in Tohoku using tsunami

- waveforms, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 458, 241-251.
- Matsubara, M., H. Sato, T. Ishiyama, and A. V. Horne, 2016, Configuration of the Moho discontinuity beneath the Japanese Islands derived from three-dimensional seismic tomography, *Tectonophys.*, in press, doi:10.1016/j.tecto.2016.11.025.
- Mizoguchi, K., and T. Hirose, 2016, Transient water adsorption on newly formed fault gouge and its relation to frictional heating, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7921-7927.
- 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.
- 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.
- Nakamura, W., N. Uchida, and T. Matsuzawa, 2016, Spatial distribution of the faulting types of small earthquakes around the 2011 Tohoku-oki earthquake: A comprehensive search using template events, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 2591-2607, doi:10.1002/2015JB012584.
- Nakano, M., T. Hori, E. Araki, N. Takahashi, and S. Kodaira, 2016, Ocean floor networks capture low-frequency earthquake event, *Eos*, 97, doi:10.1029/2016E0052877.
- 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.
- 中田健嗣・小林昭夫・平田賢治・対馬弘晃・山崎 明・勝間田明男・前田憲二・馬場久紀・一ノ瀬里美・牛田 堯・石原昂典・稲村嘉津也・蓮澤 豪, 2017, 自己浮上式海底地震計観測によって推定された紀伊半島南方の南海トラフ軸南側の地震活動, *地震*, 69, 59-68.
- 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.
- 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.
- 太田雄策, 2016, リアルタイム・キネマティック GNSS データ解析の高度化およびそれにもとづく巨大地震の震源断層即時推定手法に関する研究, *測地学会誌*, 62(1), 1-19.
- 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.
- Sawai, M., A. R. Niemeijer, O. Plumper, O., T. Hirose, and C. J. Spiers, 2016, Nucleation of frictional instability caused by fluid pressurization in subducted blueschist, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 2543-2551.
- 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.
- Suzuki, K., M. Nakano, N. Takahashi, T. Hori, S. Kamiya, E. Araki, R. Nakata, and Y. Kaneda, 2016, Synchronous changes in the seismicity rate and ocean-bottom hydrostatic pressures along the Nankai

- trench: A possible slow slip event detected by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET). *Tectonophys.*, 680, 90–98, doi:10.1016/j.tecto.2016.05.012.
- Takagi, S., and S Okubo, 2016, Internal deformation caused by a point dislocation in a uniform elastic sphere, *Geophys. J. Int.*, 208, 973–991.
- Takaesu, M., H. Horikawa, K. Sueki, N. Takahashi, A. Sonoda, and S. Tsuboi, 2016, Development of a web application system for seismic waveform data observed in real time with the seafloor seismic network DONET, *Marine Technol. Soc. J.*, 50, 3, 87–91, doi:10.4031/MTSJ.50.3.14.
- Tanigawa, K., Y. Sawai, and Y. Namegaya, 2017, Diatom assemblages within tsunami deposit from the 2011 Tohoku-oki earthquake along the Misawa coast, Aomori Prefecture, northern Japan, *Marine Geology*, doi:10.1016/j.margeo.2016.11.016.
- Uchida, N., T. Iinuma, R. M. Nadeau, R. Burgmann, R. Hino, 2016, Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan, *Science*, 351, 488–492, doi:10.1126/science.aad3108.
- Uchida, N., Y. Asano, and A. Hasegawa, 2016, Acceleration of regional plate subduction beneath Kanto Japan, after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 9002–9008, doi:10.1002/2016GL070298.
- Uchida, N., S. Kirby, N. Umino, R. Hino, and T. Kazakami, 2016, The great 1933 Sanriku-oki earthquake: reappraisal of the mainshock and its aftershocks and implications for its tsunami using regional tsunami and seismic data, *Geophys. J. Int.*, 206 (3), 1619–1633.
- Wada, J., K. Kanagawa, H. Kitajima, M. Takahashi, A. Inoue, T. Hirose, J. Ando, and H. Noda, 2016, Frictional strength of ground dolerite gouge at a wide range of slip rates, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 2961–2979, doi:10.1002/2015JB012013.
- Wallace, L., S. C. Webb, Y. Ito, K. Mochizuki, R. Hino, S. Henrys, S. R. Schwartz, and A. F. Sheehan, 2016, Slow slip near the trench at the Hikurangi subduction zone, New Zealand, *Science*, 352, 701–704, doi:10.1126/science.aaf2349.
- 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/NGEO2879.
- Yabe, S., and S. Ide, 2017, Slip-behavior transitions of a heterogeneous linear fault, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 387–410, doi:10.1002/2016JB013132.
- Yamamoto, N., S. Aoi, K. Hirata, W. Suzuki, T. Kunugi, and H. Nakamura, 2016, Multi-index method using offshore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast, *Earth Planets Space*, 68:128, doi:10.1186/s40623-016-0500-7.
- Yamamoto, N., K. Hirata, S. Aoi, W. Suzuki, H. Nakamura, and T. Kunugi, 2016, Rapid estimation of tsunami source centroid location using a dense offshore observation network, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4263–4269, doi:10.1002/2016GL068169.
- Yamamoto, Y., Y. Hamada, N. Kamiya, T. Ojima, S. Chiyonobu, and S. Saito, 2016, Geothermal structure of the Miura-Boso plate subduction margin, central Japan, *Tectonophys.*, doi:10.1016/j.tecto.2016.11.004.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada, 2016, Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, 534, 374–377, doi:10.1038/nature17632.

Yukutake, Y., and Y. Iio, 2017, Why do aftershocks occur? Relationship between mainshock rupture and aftershock sequence based on highly resolved hypocenter and focal mechanism distributions, *Earth Planets Space*, 69:68, doi:10.1186/s40623-017-0650-2.

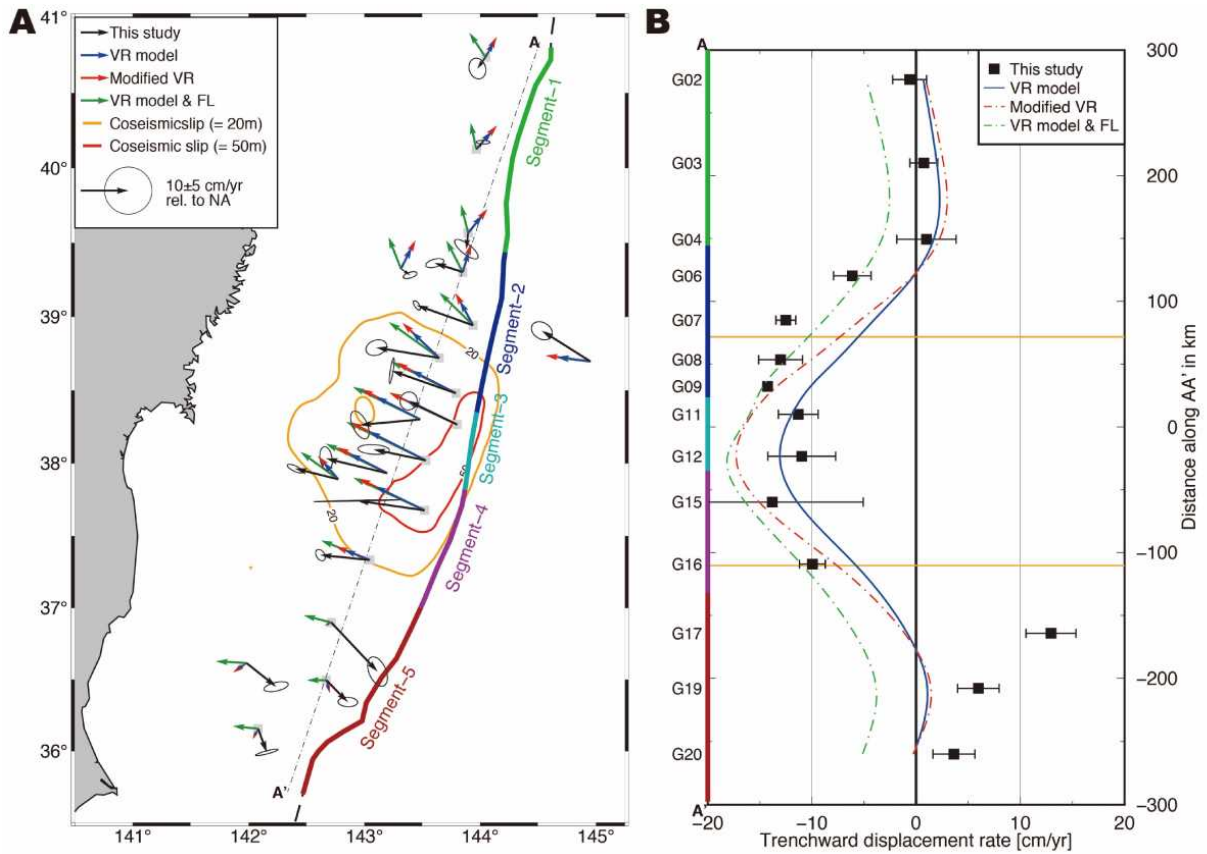


図1. 日本海溝近傍における2011年東北沖地震後の地殻変動。

A: 変位速度ベクトル。Inuma et al. (2012) による本震時すべりの等値線 (20m と 50m) とともに示す。B: 変位速度の海溝と直交する成分の南北変化。Sun et al. (2014) による粘弾性緩和変形モデル (青), 粘性係数を小さくしたモデル (赤), 粘弾性緩和に加えてプレート境界全面での100%固着を仮定した場合 (緑) のそれぞれにおける変位速度の計算値をあわせて示す (東京大学地震研究所 [課題番号: 1503])。



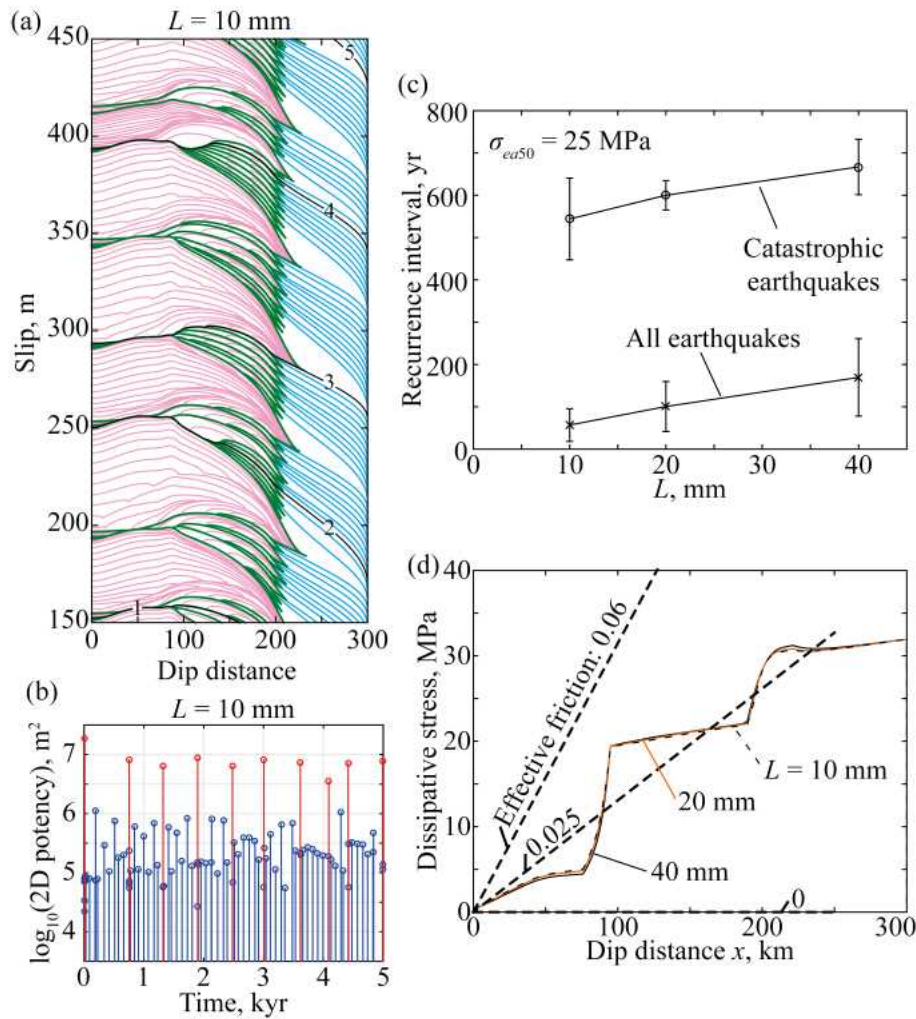


図2. (a) 地震サイクルシミュレーションの結果。累積変位量を一定の時間間隔でプロットしている。浅部（横軸 100 km 程度まで）には JFAST 試料，深部（横軸 100 km から 200 km 程度まで）には藍閃石片岩試料のそれぞれの摩擦特性を用い，浅部は摩擦発熱による間隙圧上昇の影響を組み込んでいる。黒：1000 年毎，青：50 年毎，ピンク：地震時 10 秒毎，緑：地震の初めと終わりのスナップショット。(b) (a) に示したケースの M-t 図。(c) 摩擦の状態遷移すべり量に関するパラメータスタディの結果による，海溝まで達する巨大地震の再来周期と，深部のみを割る大地震の再来周期。(d) 長時間平均の摩擦発熱量に対応する剪断応力レベル。採用した有効垂直応力分布では，試した範囲の  $L$  の値によらず Gao and Wang (2013) の見積もり（有効摩擦係数 0.025）によく一致する（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

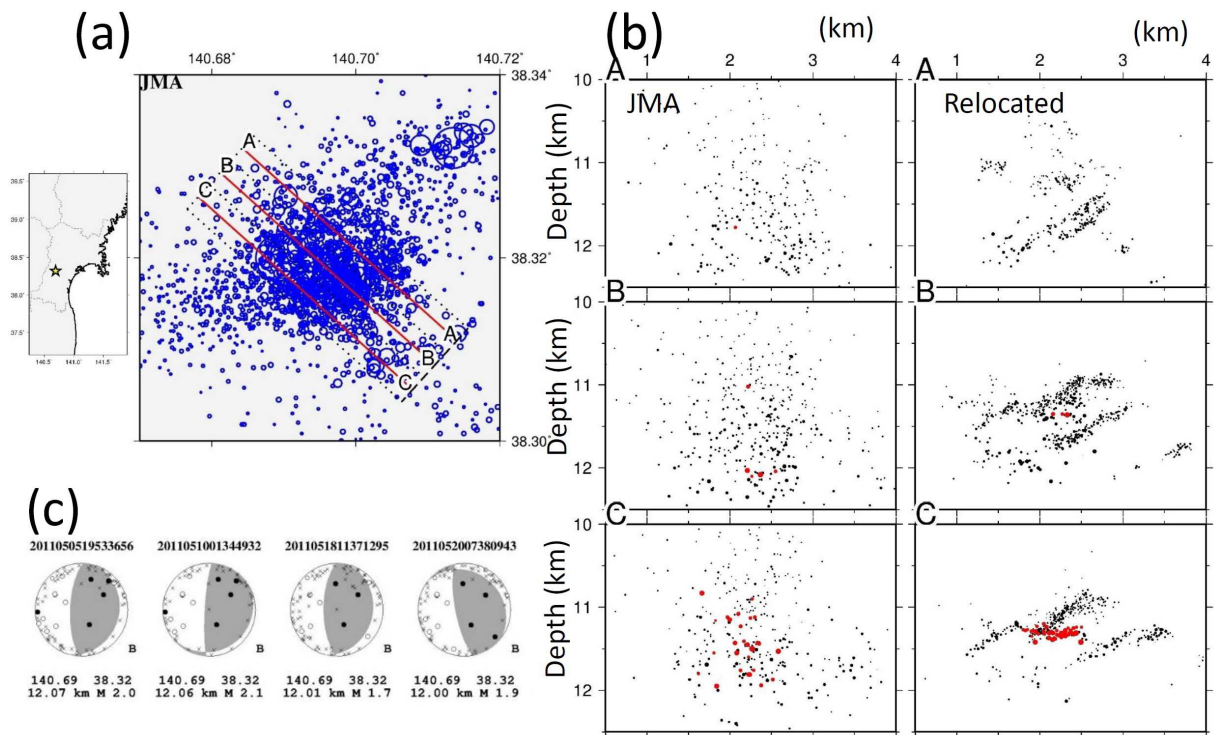


図3. 東北沖地震後に仙台市大倉ダム周辺で誘発された migration する群発地震活動。

(a) 気象庁による震央分布。(b) 図 (a) に示した A, B, C の測線の断面図。気象庁による震源分布 (左) と、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結果 (右) を示す。(c) 図 (b) の赤丸で示した地震のメカニズム解の例。水平に近い節面が断層面と考えられる (東北大学 [課題番号: 1204])。

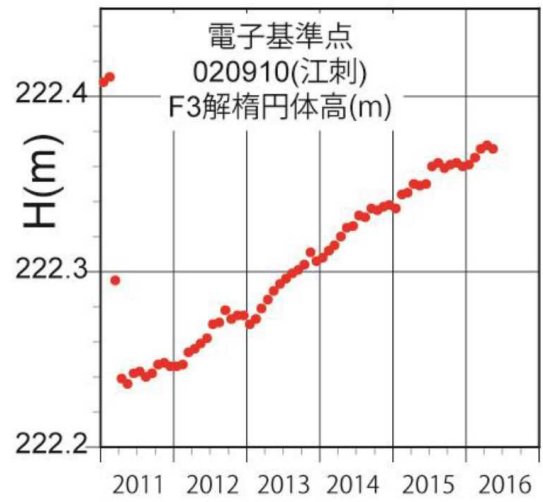
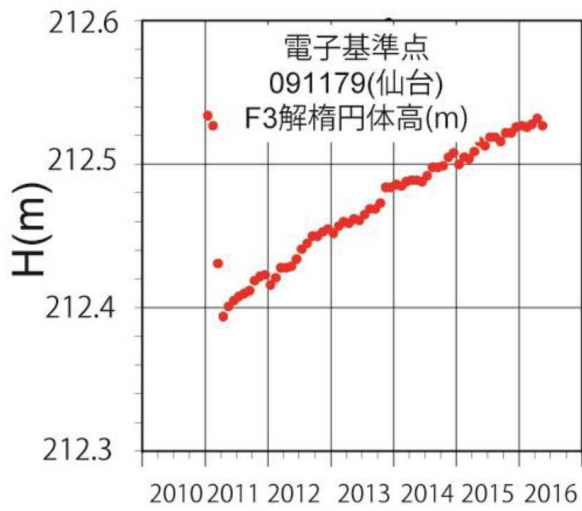
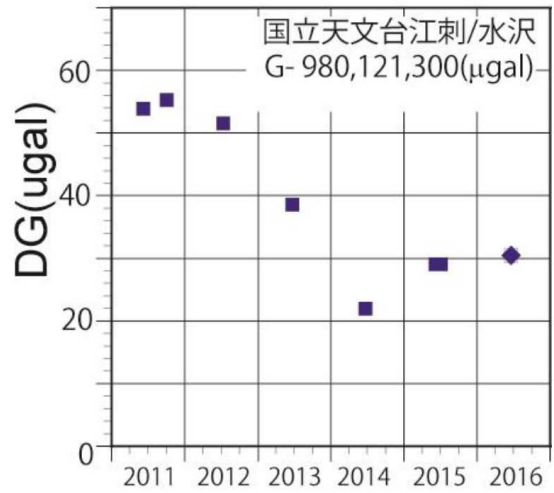
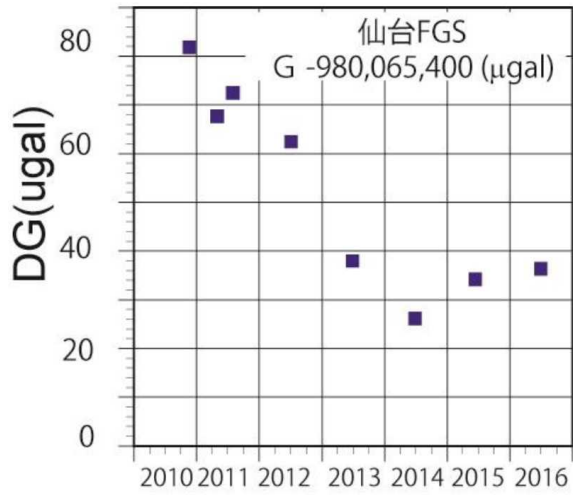


図4. 仙台(左図)と江刺(右図)における, 重力変化(上図)と上下変動(下図)(東北大学[課題番号:1203])。

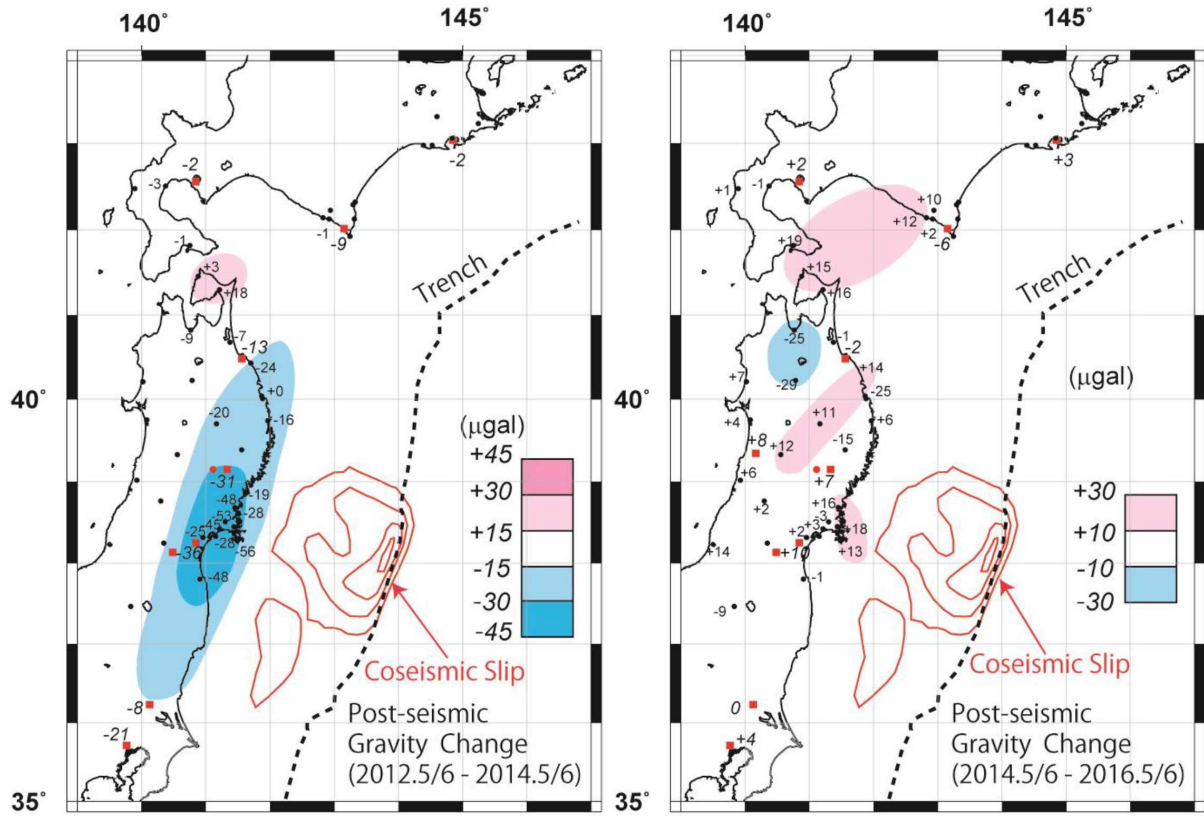


図5. ハイブリッド重力観測によって推定された東日本の重力の時空間変動。

左図：2012～2014年。右図：2014～2016年。図中の■は絶対重力点(10点)，●は相対重力点(約50点)，赤の等値線はIinuma et al. (2012)による東北地方太平洋沖地震時のすべり量(10, 30, 50, 70 m)を表す(東北大学[課題番号:1203])。