

## 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」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、この地震のことを詳しく調べ、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、この中から、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も重要な役割を果たしている。

海溝型巨大地震がもたらす災害・被害予測のために、海溝型地震による木造建物の被害予測モデルをチューニングし、高振動数をカットするフィルターを最適化するとともに、その適切性について検討を加えた。さらに内陸地殻内地震の強震動に対してもそのフィルター定数で大きな変動が生じないことも検証の必要要件とした。その結果カットオフ振動数1Hz、ロールオフ振動数2Hzのハイカットフィルターを適用することが最も適切であることを検証した(拠点間連携[課題番号:2979])。

2011年東北地方太平洋沖地震時に東京湾西岸部において周期2~3秒の長周期地震動が局所的に卓越して観測された。この長周期地震動の成因を理解することを目的にして微動の共同観測を実施した。最もサイズの大きいアレイの記録の解析から3km/s程度の位相速度が得られ、中規模のアレイにおいても既往研究よりも低周波数での位相速度が得られるなど、本研究によって深部地盤のモデル化に有益な情報を取得することができた。また、単点観測の結果では、多くの観測点で、HVスペクトル比に0.1Hzと1Hz程度に顕著なピークが認められた。1Hz程度のピークについては、ほとんどの測線において臨海部で1Hz以下と低く、内陸に向かって徐々に振動数が高くなる傾向がある。特に、標高との相関は高く、台地ではピーク周波数が高い。これらは、この周期帯域のH/Vのピークが浅部地盤によるものであることを示唆している。現状では、強震動評価では、地盤の影響の評価にお

いて浅部地盤と深部地盤を分けて考慮することが多いが、本研究の結果は、周期 2~3 秒の長周期地震動の評価には、浅部深部統合地盤モデルが必要であることを示している（拠点間連携 [課題番号：2988]）。

巨大地震の災害リスク評価を行う上で、地震波による揺れの推定を高精度化する必要があるとの観点から、2003 年十勝沖地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震について、強震動生成域に対する強震動予測式の適用可能性を調べた。2003 年十勝沖地震については Kamae and Kawabe (2004) による一番目のアスペリティを、2011 年東北沖地震については Kurahashi and Irikura (2013) の SMGA1, SMGA3 を調査する強震動生成域として用い、それぞれからの PGA 及び PGV を読み取った。この結果、いずれの場合も強震動生成域とその Mw に対して、司・翠川(1999)の式を用いて予測した場合に観測値を説明できず相当過小評価することがわかった（拠点間連携 [課題番号：2991]）。

東日本大震災における被害構造に関して総括した上で理論的に導き出された作業仮説に基づいて、(1)空間、(2)防災意識・災害文化、(3)社会的凝集性、(4)災害対策の各側面について、調査研究を深化させた。東日本大震災被災地における過去 100 年間にわたる土地利用調査から、1970 年代以降のその変化において「堤防効果」あるいは「安全開発のパラドクス」と呼ばれる傾向が見られることがわかった。例えば、三陸沿岸では 1896 年と 1933 年の三陸沖地震及び 1960 年のチリ地震の後、約半世紀にわたって巨大な津波に襲われなかった時期に海岸部の都市的土地利用が進んだことで、津波に対する脆弱性を高めてしまった状況が浮き彫りになった（名古屋大学 [課題番号：1704]）。

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、過去の海溝型地震によって発生した大規模崩壊及び 2016 年熊本地震によって発生した降下火砕物斜面の崩壊について、それらの特徴を明らかにし、共通する地質・地形的特徴を抽出した。既往の南海トラフ及び相模トラフの海溝型地震による大規模な崩壊は、特に外帯の付加体に発生しており、地質構造的には流れ盤斜面の座屈した地層と曲げトップリングを起こした地層に発生していることが多いこと、さらに、これらは地形的特徴と概略地質構造によって抽出可能であることが明らかになった。また、熊本地震による降下火砕物斜面の 63 か所の崩壊を調査し、それらの滑り面を層序的に特定したところ、最も多いのは約 3 万年前の草千里ヶ浜軽石、次に約 7 千 3 百年前の喜界アカホヤ火山灰近傍の暗色土であることがわかった。これらの層には、層序を反映した化学成分の移動・集積によって粘土鉱物のハロサイトが生成しており、層序と風化作用の両面から地震時崩壊発生場所予測を行う見通しが得られた（京都大学防災研究所 [課題番号：1912]）。

東北地方太平洋沖地震が発生した際、震源から遠く離れた関東地方でも強い揺れを観測したが、緊急地震速報の従来の手法では、このような震源域の極めて広い地震の場合、強い揺れを精度良く予想することができないため、新たに PLUM (Propagation of Local Undamped Motion) 法を開発し、2018 年 3 月 22 日から運用を開始した。PLUM 法では、地震計で観測された揺れの強さから直接震度を予想するため、予想してから揺れがくるまでの時間的猶予は短時間となるが、広い震源域を持つ巨大地震であっても精度良く震度を予想することができる（気象庁 [課題番号：7014]）。

スロー地震タイプの津波地震の規模を即時かつ適正に推定することは津波災害軽減のために極めて重要である。地震波形の変位を積分すれば地震モーメントに比例することが期待されるため、そのような計算で規模が推定できるかどうか、様々な大地震の波形で検証してみた結果、 $M_w$  が大きな地震ほど変位の積分値が大きくなることが確かめられた(図 1)。この手法でスロー地震の規模も正しく評価できるかどうか、今後検証していく予定である(気象庁 [課題番号: 7009])。

防災科学技術研究所が設置を進めてきた日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) のうち、最後に設置された海溝軸外側の 25 点についても、2017 年 11 月 16 日より気象庁でデータ活用を開始した。S-net の全 150 点が気象庁で活用されることになり、太平洋沿岸では津波の検知がこれまでより最大約 25 分速くなると期待される(気象庁 [課題番号: 7012])。また、海溝軸外側の地震についても自動処理での震源の決定能力が格段に向上した(防災科学技術研究所 [課題番号: 3004])。

このような沖合で観測された津波波形の逆解析に基づき、津波の即時予測手法システムの構築が進められているが、2016 年 11 月 22 日に福島県沖で発生した  $M7.4$  の地震に伴う津波のように波源の広がり小さい津波では波源推定の空間分解能が十分でない場合があることがわかった。このため、解析領域全体の広さととの両立を図りつつ、場合によって波源の空間分解能を細かくする解析アルゴリズムを考案し、想定した性能を発揮することを確認した(気象庁 [課題番号: 7011])。

電子基準点リアルタイム解析システムにおいて用いている相対測位法に加え、精密単独測位法を用いた電子基準点リアルタイム解析のプロトタイプシステムを構築し、安定的に高精度(水平のばらつきが 2cm 以下)でリアルタイム解析ができることを確認した。精密単独測位法では相対測位法で用いる固定点が不要で、固定点付近で発生する地震についても正確に地殻変動を観測することが可能となるため、震源断層モデル推定の安定化が見込まれる。また、電子基準点と他機関が保有する GNSS 観測点について、精密単独測位法を用いた後処理キネマティック解析を行うシステムを構築した。これにより、定常解析(Q3 解)では困難だった熊本地震の二つの前震(4月14日の  $M6.5$  と 15日の  $M6.4$ )の分離が可能となった(国土地理院 [課題番号: 6004, 6012])。

## 2. 地震・火山噴火の予測

大学及び研究機関の放射線管理施設が有する排気モニターを用いて、全国で大気中ラドン濃度の測定を行い、地震前や地震時の大気中ラドン濃度変動と地震との間に相関があるかどうかを調べてきた。本年度は、札幌医科大学と福島県立医科大学の観測データに関して、大気中ラドン濃度変動と地震活動の類似性の解析を行った。具体的には特異スペクトル変換法により大気中ラドン濃度と積算地震モーメントの両方の「異常度」を求め、両者の「非類似度」を並べ替え検定により検証した。その結果、札幌医科大学のデータについては 7.6%、福島県立医科大学については 13.4%と「非類似度」となり、二つのデータは「全く似ていないとは言えない」程度の類似度があることがわかった(東北大学 [課題番号: 1207])。

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、それは特に火山地域で顕著であった。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。2018年1月28日から2月初めにかけて蔵王山周辺では数回の火山性微動が発生し、明瞭な傾斜変化が観測された。変動源を暫定的に推定したところ、蔵王の御釜のすぐ南の、上端の深さが約1km、長さも幅も約2km、開口量約0.1mでほぼ鉛直の開口断層でほぼデータを説明できることがわかった。この傾斜変化は変動量も変動速度も過去最大級であり、今後の活動の推移を注意深く見守る必要がある（東北大学 [課題番号：1202]）。

### 3. 地震・火山現象の理解

#### （プレート境界）

東北地方太平洋沖地震後のGNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測で得られた結果を見ると、陸に最も近くて、陸上の観測点と同様に東向きの変位を示していたMYGW観測点も、最近では西向きの変動を示しており、福島沖では東向きの変動が継続しているものの、その大きさには鈍化傾向が見られる（図2）。これらは余効滑りよりも粘性緩和の影響が次第に卓越してきていることを示しているものと解釈される（海上保安庁 [課題番号：8001]）。

海陸の地震観測データからプレート境界付近の地震を抽出して規模別頻度分布を作成して、b値の空間変化を調べたところ、東北地方太平洋沖地震前と後で、b値の分布やG-R則からの逸脱の仕方が異なっていることがわかった（図3）。地震カタログのcompleteness magnitude ( $M_c$ )は既存地震カタログと比較して1以上小さく、地震検出能力の高さを示している。特に、震源域の北・南限域で地震後に低b値またはb値の低下が見られ、破壊に伴う差応力の増加を示しているものと考えられる（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

日本全国の定常観測網で観測された地震波形データを蓄積し、また、波形相関のみならずS-P時間差の調査や地震の震源再決定を行うことにより、より信頼度の高い相似地震カタログを作成した。また、相似地震カタログを用いて不均一な点配置に基づくデロネー分割による四面体補間を用いて滑り速度の時空間変化を推定する統計的手法を開発した。相似地震の各震源の時空間座標をデロネー分割の点配置として利用することで、相似地震の密集域における微細な滑り速度の変化を捉えることが可能となった。また、岩手県沖での2011年東北沖地震前後の繰り返し地震の活動を詳細に調べた。その結果、複数の場所で、東北沖地震後、繰り返し地震の規模が大きくなるだけでなく、これまでプレート境界で地震が発生していなかった場所で新たに地震が発生していたことが明らかになった。これは、東北沖地震の余効滑りによる载荷レートの増加により、それまで非地震的に滑っていた場所が、地震的に滑ったためと考えられる（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]）。

東北地方における超低周波地震活動は、岩手沖と福島・茨城沖のクラスタについては、2011年の東北地方太平洋沖地震後に活発化して2017年度も活動が見られた。岩手沖では断続的ながらも本震前よりも高い頻度で発生を続けており、一方、福島・茨城沖は本震直後に非常に活発化したが2012年から活動が低下し始めて現在は本震前と同程度に落ち着きつつあるように見える。一方、本震の大滑り域付近では、本震後については全く検出されずに6年以上が経過している（防災科学技術研究所 [課題番号：3002]）。

様々な条件下で地震発生サイクルのシミュレーションを行ってきたが、本年度は特に、地表に達する傾斜した断層で bimaterial（断層を挟んで左右で媒質が異なる）場合において、地震サイクル計算を行った結果、震源核の形成場所が低速度の媒質の変位の向き（positive direction）に偏っていることがわかった。プレート境界は物質境界であるため bimaterial な状況になっているため、この結果は、震源核の形成しやすい場所が、均質なモデルでの計算位置より positive direction 側に偏っている可能性を示唆している（京都大学理学研究科 [課題番号：1801]）。

2011年東北沖地震時の地殻変動を把握するため、地震後の日本海溝の海底地形データを取得して地形の変化を抽出した。北緯 38.0 度から 38.5 度にかけて顕著な 50-70m の滑りに相当する変動を検出し、それ以外の領域の変動は小さいことがわかった。大きな津波が遅れて生じた可能性が指摘されている岩手県沖についても、測定誤差を上回る変化は検出されなかった。また、日本海溝の海溝軸から沖合側にかけて超深海型海底地震計を用いた海底観測を実施し、アウターライズで起こる正断層型地震の震源断層の実態について調査した結果、ホルスト・グラベン構造を形成するような正断層が複数存在し、深さ 40km 付近まで伸びている可能性が示された（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]）。

#### （内陸）

GEONET による地殻変動連続観測データの解析により、東北地方太平洋沖地震の直前から 7 年間の累積上下変位を調べたところ、東北地方太平洋沿岸では地震前に比べてまだ相対的に沈降した状態であり、本震前の状態に戻るには、まだ長い年月が必要であることがわかった。一方、脊梁山地付近では、余効変動のために本震前よりも沈降しており、これが今後どのような形で解消されるのかをよく検討する必要がある（国土地理院 [課題番号：6005]）。

東北地方の 5 点及び北海道太平洋岸の 3 点、関東地方 2 点で、精度 1 マイクロガル程度の高精度絶対重力測定を実施した。そのうちの仙台、江刺（岩手県）、筑波山について、2011 年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。このことは 2014 年頃から粘弾性効果が次第に顕著になったことを強く示唆する（東北大学 [課題番号：1203]）。

不均質レオロジー構造（図 5 a）を考慮した地表上下変動のモデル化を通じて、2011 年東北沖地震前約 100 年間続いていた東北日本前弧域の大きな沈降（3-4mm/yr；図 5 b）のメカニズムの解明を試みた。有限要素法を用いて巨大地震サイクルのモデル計算を行った結果、浅部アスペリティの固着が数百年にわたり継続することで、マントルウェッジ及びプレート境界深部の粘性剪断帯における粘弾性緩和の進行により、プレート境界深部の滑り欠損レートが時間とともに増加するという結果が得られた。それにより前弧域は巨大地震サイクル後半にかけて沈降速度が増加していき、一方、巨大地震後 50-100 年は、地震後の粘性剪断帯における粘弾性緩和に律速される長い時定数の余効滑りが生じることで、前弧域に大きな隆起（0.5-1.5m）が生じることが示された（図 5 c；東北大学 [課題番号：1203]）。

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いるが、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。

2011年東北地方太平洋沖地震の後、山形県と福島県の県境で群発的地震活動が発生した。波形の相関を利用した高精度の震源再決定を行ったところ、この山形-福島県境付近の地震活動は明瞭なマイグレーションが認められ、また深部から浅部に向かって地震活動が移動している。図6にこれらの地震クラスタのうちの一つの例を示す。震源はさらにいくつも面状に分布しており、しかも、その面の傾斜・走向は、その面に属する地震の発震機構解の一つの節面の傾斜・走向とよく一致しており、これらの「面」が弱面として使われて地震が発生したことを強く示唆する。さらに東北沖地震直後の50日間とそれ以降では、規格化された摩擦係数・応力降下量・ $b$ 値・背景の地震発生レート等が大きく異なっており、初期の頃の地震活動は間隙圧の上昇による強度低下によって生じたことが強く示唆される（東北大学 [課題番号：1204]）。

秋田県の森吉山地域でも東北地方太平洋地震後に地震活動の活発化が見られている。臨時地震観測波形データについて、クロススペクトルを用いて高分解能の位相差の読み取りを行い、 $S$ 波スプリッティング解析を実施した。その結果、速い $S$ 波と遅い $S$ 波の時間差は地震活動度と相関があることが明確となった。速い $S$ 波の偏向方向は地震のメカニズム解の節面の方位と調和的であるため、地殻流体の流入によって既存の断層面が開くとともにその周囲での地震活動度が高まり、やがて流体が拡散することで異方性が弱まり地震活動度が低下する、という解釈が考えられる（弘前大学 [課題番号：1101]）。

阿武隈山地南部でも、東北沖地震後の1ヶ月後の4月11日に福島県浜通りの地震（ $M7.0$ ）が発生した。稠密地震観測網で観測された自然地震波形を用いて、逆VSP（Vertical Seismic Profile）解析による地殻内の $S$ 波反射面のイメージング解析を行った。顕著な二つの反射面群のうち、反射面1は深さ15-20 kmの地震活動域下部に求められ、これは先行研究によって低速度・高ポアソン比とされる領域の上端に位置するため、この反射面は地殻内流体の存在を強く示唆し、そのすぐ上に地震活動域が存在することから、これらの地震活動は地殻流体によって引き起こされた可能性が考えられる。一方、反射面2はその深さからモホ面であると考えられる（東北大学 [課題番号：1203]）。

中部日本、東北日本、及びその遷移帯の火山を、これまであまり調査や分析のなされていない群馬-新潟-福島にかけての火山（守門、浅草、枡形、飯士）も含めて、岩石学的・地球化学的研究を行った。その結果、関東北部から東北南部にかけて沈み込んだフィリピン海スラブについて、地震学的に提案されている北限境界よりもさらに北の火山からも、フィリピン海スラブ由来と考えられる流体成分が検出されており、しかもこの北限境界のすぐ北側の火山で流体量（太平洋スラブ由来、及びフィリピン海スラブ由来の両方の成分とも）が最大となり、そこから北に向かうにつれて、流体量は減少することがわかった。これらのことから、フィリピン海スラブの物質学的北限は、地震学的北限よりも100 km近く北まで伸びており、茨城下付近に存在するマントルー太平洋スラブ-フィリピン海

スラブの3重会合コーナーポイントに向かい、島弧沿いにも、また島弧横断方向にも流体が集中して流れている可能性が考えられる（京都大学防災研究所 [課題番号：1905]）。

#### （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。

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か国共同で大規模海域地球物理観測 HOBITSS（Hikurangi Ocean Bottom Investigation of Tremor and Slow Slip）を行った。ヒ克蘭ギ沈み込み帯では、これまでに繰り返しスロースリップイベント（SSE）の発生は認められてきたが、微動の活動については必ずしも明らかとなっていなかった。HOBITSS 観測で得られた海底地震計の記録を用いて、目視による微動の検出とエンベロープ相関法による微動の震源決定を行った結果、SSEに伴った微動と考えられる活動が1日あたり0～12個程度、特にSSE活動の後半から2週間程度の期間に認められ、その震源はSSEの断層滑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。S波の地震波偏向方向解析を行った結果、2014年9月下旬-10月上旬のSSEの後、振動方向の揃った微動がほとんど中断なく2週間程度連続して発生していることが明らかになった（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。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る。このような観点から様々な取り組みが多く機関によって行われている。

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。前年度までの作業を元に、今年度はプレート境界位置の修正及びフィリピン海プレートの、太平洋プレートとの接合部の形状モデルの検討を行った。また、関東域における構造探査を元に、同地域の複雑なフィリピン海プレート形状の再定義を試みた。このうち、前年度までに決定した太平洋プレート及びフィリピン海プレートモデルについて、東京大学地震研究所のWebサイトでの公開を開始した。（東京大学地震研究所 [課題番号：1505]）。

海域の地震も活用して、日本海から日本列島、太平洋沖にかけての繋ぎ目のない三次元地震波速度構造モデルを構築し、2018年3月から防災科学技術研究所のWebで公開している。また、Double-Difference法により日本全国の震源を高分解能で再決定した地震カタログも2018年1月から公開している（防災科学技術研究所 [課題番号：3004]）。

海底地殻変動の時系列データも海上保安庁海洋情報部のWebサイトで公開されている（海上保安庁 [課題番号：8001]）。

#### 4. これまでの課題と今後の展望

##### (東北地方太平洋沖地震による地震発生場のさらなる理解)

東北地方太平洋沖地震については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、数百年と考えられる長い地震発生サイクルのうちの、ほんの一角程度以下の期間しか近代的観測ができていないことを忘れてはならない。この地震の前に我々が抱いていた様々な先入観や誤解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。これにより、余効滑りの詳細な時空間分布と地震時滑りについての情報も得られ、プレート境界の摩擦パラメータの分布の推定にもつながる。こうして、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。

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断層も、これまで考えられていたよりも強度が1/10程度となっている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つため、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あと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。

東北地方太平洋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うことについて自覚的に対処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、

- 海溝付近より陸の近くで大きく滑る可能性はないのか？
- 海溝近くから陸の近くまで全部が大きく滑るのでは？
- 巨大な海底地滑りが生じて、さらに大きな津波を起こす可能性は？
- 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うえで、極めて重要と考えられる。

## 成果リスト

Ando, R., K. Imanishi, Y. Panayotopoulos, and T. Kobayashi, 2017, Dynamic rupture propagation on geometrically complex fault with along-strike variation of fault maturity: insights from the 2014 Northern Nagano earthquake, *Earth Planets Space*, 69, 130, doi:10.1186/s40623-017-0715-2.

Barth, A. P., K. Tani, S. Meffre, J. L. Wooden, M. A. Coble, R. J. Arculus, O. Ishizuka, and J. T. Shukle, 2017, Generation of silicic melts in the early Izu-Bonin arc recorded by detrital zircons in proximal arc volcanoclastic rocks from the Philippine Sea, *Geochem. Geophys., Geosys.*, doi:10.1002/2017GC006948.

千木良雅弘・笠間友博・鈴木毅彦・古木宏和, 2017, 1923 年関東地震による震生湖地すべりの地質構造とその意義, *京都大学防災研究所年報*, 60B, 417-430.

Chiyonobu, S., Y. Yamamoto, and S. Saito, 2017, Calcareous nannofossil biostratigraphy and geochronology of Neogene trench-slope cover sediments in the south Boso Peninsula, central Japan: Implications for the development of a shallow accretionary complex, *Tectonophys.*, 710-711, 56-68, doi:10.1016/j.tecto.2016.11.030.

- Cho, I. and T. Iwata, 2018, Development and numerical tests of a Bayesian approach to infer shallow velocity structures using microtremor arrays, *Exploration Geophysics*, doi:10.1071/EG18011.
- Delbridge, B. G., S. Kita, N. Uchida, C. W. Johnson, T. Matsuzawa, and R. Burgmann, 2017, Temporal variation of intermediate-depth earthquakes around the time of the M 9.0 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 3580-3590, doi:10.1002/2017GL072876.
- 土井一生・釜井俊孝・佐藤朗・王功輝・千木良雅弘・小川内良人・川島正照, 2017, 重力変形斜面の地震時挙動の観測－新しい加速度センサー・傾斜センサー一体型プローブを用いて－, *応用地質*, 58, 94-101.
- Emoto, K., T. Saito, and K. Shiomi, 2017, Statistical parameters of random heterogeneity estimated by analysing coda waves based on finite difference method, *Geophys. J. Int.*, 211, 1575-1584, doi:10.1093/gji/ggx387.
- Fujiwara, T., C. dos Santos Ferreira, A. K. Bachmann, M. Strasser, G. Wefer, T. Sun, T. Kanamatsu, and S. Kodaira, 2017, Seafloor displacement after the 2011 Tohoku-oki earthquake in the northern Japan trench examined by repeated bathymetric surveys, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 11833-11839, doi:10.1002/2017GL075839.
- Fukahata, Y. and M. Matsu'ura, 2017, Characteristics of viscoelastic crustal deformation following a megathrust earthquake: discrepancy between the apparent and intrinsic relaxation time constants, *Pure Apply. Geophys.*, 175, 549-558, doi:10.1007/s00024-017-1735-3.
- Fukuda, J., 2018, Variability of the space-time evolution of slow slip events off the Boso Peninsula, central Japan, from 1996 to 2014, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, doi:10.1002/2017JB014709.
- Fukuda, J., J. Muto, and H. Nagahama, 2018, Strain localization and fabric development in polycrystalline anorthite + melt by water diffusion in an axial deformation experiment, *Earth Planets Space*, 70, 3, doi:10.1186/s40623-017-0776-2.
- Goto, M., Y. Yasuoka, H. Nagahama, J. Muto, Y. Omori, H. Ihara, and T. Mukai, 2017, Anomalous changes in atmospheric radon concentration before and after the 2011 northern Wakayama Earthquake (Mj 5.5), *Radiation Protection Dosimetry*, 174, 412-418.
- Hatakeyama, N., N. Uchida, T. Matsuzawa, and W. Nakamura, 2017, Emergence and disappearance of interplate repeating earthquakes following the 2011 M9.0 Tohoku-oki earthquake: Slip behavior transition between seismic and aseismic depending on the loading rate, *J. Geophys. Res.*, 122, 5160-5180, doi:10.1002/2016JB013914.
- 林為人・廣瀬丈洋・谷川亘・濱田洋平, 2017, 科学掘削による地震断層の応力状態・物性・すべりパラメーターの評価, *地学雑誌*, 126, 223-246.

- 五十嵐俊博, 2017, 日本列島周辺の地震クラスター—検出および時間・空間的特徴—, 地震 第2輯, 70, 183-194, doi:10.4294/zisin.2017-4.
- 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.
- 石川正弘, 2017, 岩石の弾性波速度に基づく島弧地殻深部及び最上部マントルの構成岩石の推定: 伊豆弧と東北本州弧, *地質学雑誌*, 123, 355-364.
- Ishiyama T., H. Sato, N. Kato, S. Koshiya, S. Abe, K. Shiraishi, and M. Matsubara, 2017, Structures and active tectonics of compressionally reactivated back-arc failed rift across the Toyama trough in the Sea of Japan, revealed by multiscale seismic profiling, *Tectonophys.*, 710-711, 21-36, doi:10.1016/j.tecto.2016.09.029.
- Ito, Y., M. Ikari, K. Ujiie, and A. Kopf, 2017, Coseismic slip propagation on the Tohoku plate boundary fault facilitated by slip-dependent weakening during slow fault slip, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 8749-8756, doi:10.1002/2017GL074307.
- Katsumata, A., Y. Hayashi, K. Miyaoka, H. Tsushima, T. Baba, P. A. Catalan, C. Zelaya, F. R. Vasquez, R. Sanchez-Olavarria, and S. Barrientos, 2017, Stand-alone tsunami alarm equipment, *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.*, 17, 685-692, doi:10.5194/nhess-17-685-2017.
- 川元智司, 2018, GNSS の GGOS への貢献と今後の展望, *測地学会誌*, 63, 81-94, doi:10.11366/sokuchi.63.81.
- 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.
- Kawamoto, S., N. Takamatsu, S. Abe, K. Miyagawa, Y. Ohta, M. Todoriki, and T. Nishimura, 2018, Real-time GNSS analysis system REGARD: an overview and recent results, *J. Disaster Res.*, 13, 440-452, doi:10.20965/jdr.2018.p0440.
- 川村喜一郎・金松敏也・山田泰広, 2017, 海底地すべりと災害—これまでの研究成果と現状の問題点—, *地質学雑誌*, 123, 999-1014, doi:10.5575/geosoc.2017.0031.
- 木村学・木下正高・金川久一・金松敏也・芦寿一郎・斎藤実篤・廣瀬丈洋・山田泰広・荒木英一郎・江口暢久・Sean Toczko, 2018, 南海トラフ地震発生帯掘削がもたらした沈み込み帯の新しい描像, *地質学雑誌*, 124, 47-65, doi:10.5575/geosoc.2017.0069.
- Kitamura, M. and T. Hirose, 2017, Strength determination of rocks by using indentation tests with a spherical indenter, *J. Struct. Geol.*, 98, 1-11, doi:10.1016/j.jsg.2017.03.009.
- Komori, J., M. Shishikura, R. Ando, Y. Yokoyama, and Y. Miyairi, 2017, History of the great Kanto earthquakes inferred from the ages of Holocene marine terraces revealed by a comprehensive drilling survey, *Earth Planet. Sci.*

- Lett., 471, 74-84, 74-84, doi:10.1016/j.epsl.20.
- Kono, A., T. Sato, M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, K. Uehira, T. Shinbo, Y. Machida, R. Hino, and R. Azuma, 2017, Geometry and spatial variations of seismic reflection intensity of the upper surface of the Philippine Sea plate off the Boso Peninsula, Japan, *Tectonophys.*, 709, 44-54, doi:10.1016/j.tecto.2017.05.001.
- 小菅正裕・野呂康平・増川和真, 2017, 東北日本で発生する深部低周波地震の震源の時空間分布の特徴と地震波形の多様性, *地震研究所彙報*, 92, 63-80.
- Kubota, T., T. Saito, W. Suzuki, and R. Hino, 2017, Estimation of seismic centroid moment tensor using ocean bottom pressure gauges as seismometers, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 10907-10915, doi:10.1002/2017GL075386.
- Maeda, T., S. Takemura, and T. Furumura, 2017, OpenSWPC: An open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media, *Earth Planets Space*, 69:102, doi:10.1186/s40623-017-0687-2.
- Matsubara, M., H. Sato, K. Uehira, M. Mochizuki, and T. Kanazawa, 2017a, Three-dimensional seismic velocity structure beneath Japanese Islands and surroundings based on NIED seismic networks using both inland and offshore events, *J. Disaster Res.*, 12, 844-857, doi:10.20965/jdr.2017.p0844.
- Matsubara, M., H. Sato, T. Ishiyama, and A. D. Van Horne, 2017b, Configuration of the Moho discontinuity beneath the Japanese Islands derived from three-dimensional seismic tomography, *Tectonophys.*, 710-711, 97-107, doi:10.1016/j.tecto.2016.11.025.
- Miyoshi, T., M. Obayashi, D. Peter, Y. Tono, and S. Tsuboi, 2017, Adjoint tomography of the crust and upper mantle structure beneath the Kanto region using broadband seismograms, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 4:29, doi:10.1186/s40645-017-0143-8.
- Mizutani, T., K. Hirauchi, W. Lin, and M. Sawai, 2017, Depth dependence of the frictional behavior of montmorillonite fault gouge: Implications for seismicity along a décollement zone, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5383-5390.
- 望月公廣, 2017, 沈み込み帯におけるプレート境界面の不均質と地震活動—日本海溝およびヒクランギ沈み込み帯を例として— (総説), *地学雑誌*, 126, 207, doi:10.5026/jgeography.126.207.
- 森下知晃・藤江剛・山野誠・中西正男・尾鼻浩一郎・中村恭之・斎藤実篤・小平秀一・木村純一・黒田潤一郎・小野重明, 2017, 古い海洋プレートの沈み込み直前での屈曲断層形成に伴う加水作用解明に向けた海洋掘削計画概要, *地学雑誌*, 126, 247-262, doi:10.5026/jgeography.126.247.
- Munekane, H., 2018, A GNSS kinematic analysis system for Japanese GEONET stations, *J. Disaster Res.*, 13, 433-439, doi:10.20965/jdr.2018.p0433.
- 宗包浩志, 2018, キネマティック GNSS 時系列に含まれる微小信号の抽出, *測地学会誌*, 64,

- 1-11, doi:10.11366/sokuchi.64.1.
- Nakagawa, T. and H. Iwamori, 2017, Long-term stability of plate-like behavior caused by hydrous mantle convection and water absorption in the deep mantle, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, doi:10.1002/2017JB014052.
- Nakamura, H., H. Iwamori, O. Ishizuka, and T. Nishizawa, 2018, Distribution of slab-derived fluids around the edge of the Philippine Sea Plate from Central to Northeast Japan, *Tectonophys.*, 723, 297-308, doi:10.1016/j.tecto.2017.12.004.
- Nishikawa, T. and S. Ide, 2017, Detection of earthquake swarms at subduction zones globally: Insights into tectonic controls on swarm activity, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 5325-5343, doi:10.1002/2017JB014188.
- Nishizawa, T., H. Nakamura, T. Churikova, B. Gordeychik, O. Ishizuka, S. Haraguchi, T. Miyazaki, B.S. Vaglarov, Q. Chang, M. Hamada, J. Kimura, K. Ueki, C. Toyama, A. Nakao, and H. Iwamori, 2017, Genesis of ultra-high-Ni olivine in high-Mg andesite lava triggered by seamount subduction, *Sci. Rep.*, 7, doi:10.1038/s41598-017-10276-3.
- Noda, H., M. Sawai, and B. Shibasaki, 2017, Earthquake sequence simulations with measured properties for JFAST core samples, *Philos. Trans. Royal Soc.*, A375, doi:10.1098/rsta.2016.0003.
- 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.
- 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.
- Okamoto, A., H. Shimizu, J. Fukuda, J. Muto, and T. Okudaira, 2017. Reaction-induced grain boundary cracking and anisotropic fluid flow during prograde devolatilization reactions within subduction zones, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 172, 75, doi:10.1007/s00410-017-1393-6.
- Ono, K., Y. Harada, A. Yoneda, J. Yamamoto, A. Yoshiasa, K. Sugiyama, H. Arima, and T. Watanabe, 2017, Determination of elastic constants of single-crystal chromian spinel by resonant ultrasound spectroscopy and implications for fluid inclusion geobarometry, *Phys. Chem. Minerals*, doi:10.1007/s00269-017-0912-3.
- Saade, M., J.P. Montagner, P. Roux, K. Shiomi, B. Enescu, and F. Brenguier, 2017, Monitoring of seismic anisotropy at the time of the 2008 Iwate-Miyagi (Japan) earthquake, *Geophys. J. Int.*, 211, 483-497, doi:10.1093/gji/ggx321.
- Saishu, H., A. Okamoto, and M. Otsubo, 2017, Silica precipitation potentially

- controls earthquake recurrence in seismogenic zones, *Sci. Rep.*, 7, 13337, doi:10.1038/s41598-017-13597-5.
- Sato, T., S. Hasegawa, A. Kono, H. Shiobara, T. Yagi, T. Yamada, M. Shinohara, and N. Usui, 2017, Detection of vertical motion during a slow-slip event off the Boso Peninsula, Japan, by ocean-bottom pressure gauges, *Geophys. Res. Lett.*, 44, doi:10.1002/2017GL072838.
- Sawai, M., A. R. Niemeijer, T. Hirose, and C. J. Spiers, 2017, Frictional properties of JFAST core samples and implications for slow earthquakes at the Tohoku subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 8822-8831.
- Sema, F. and T. Watanabe, 2017, Determination of elastic constants of a single-crystal topaz and their temperature dependence via sphere resonance method, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 271, 64-62.
- Shiraishi, K., G. Fujie, T. Sato, S. Abe, E. Asakawa, and S. Kodaira, 2017, Interferometric OBS imaging for wide-angle seismic data, *Geophysics*, 2017, 82, Q39-Q51, doi:10.1190/geo2016-0482.1.
- Takahashi, M. and K. Muroi, Eds, 2017, International Comparative Study on Mega-earthquake Disasters. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University: Nagoya, 153pp., ISBN: 9784904316153
- Takahashi, N., K. Imai, M. Ishibashi, K. Sueki, R. Obayashi, T. Tanabe, F. Tamazawa, T. Baba, and Y. Kaneda, 2017, Real-time tsunami prediction system using DONET, *J. Disaster Res.*, 12, 766-774, doi:10.20965/jdr.2017.p0766.
- Takemura, S., M. Kobayashi, and K. Yoshimoto, 2017, High-frequency seismic wave propagation within the heterogeneous crust: Effects of seismic scattering and intrinsic attenuation on ground motion modelling, *Geophys. J. Int.*, 210, 1806-1822, doi:10.1093/gji/ggx269.
- Tanaka, A., N. Minami, Y. Yasuoka, T. Iimoto, Y. Omori, H. Nagahama, J. Muto, and T. Mukai, 2017, Accurate measurement of indoor radon concentration using a low-effective volume radon monitor, *Radiation Protection Dosimetry*, 177, 324-330.
- 田中昌之・岡田正実・内田直希, 2018, 繰り返し回数の少ない繰り返し地震系列に対する長期的地震発生確率予測の成績と検証, *地震 第2輯*, 70, 195-213, doi:10.4294/zisin.2016-17.
- 田中重好・高橋誠・黒田達朗編, 2017, 『新しい防災の考え方を求めて(シリーズ3): コミュニティ防災を考える』, 名古屋大学大学院環境学研究科, 198pp., ISBN:9784904316146.
- 溜瀧功史, 2017, 波形相関による自動震源分類の効率化, *験震時報*, 81:6, 1-8, [http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kenshin/vol81\\_6.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kenshin/vol81_6.pdf).
- 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.

- Ueki, K., and H. Iwamori, 2017. Geochemical differentiation processes for arc magma of the Sengan volcanic cluster, Northeastern Japan, constrained from principal component analysis. *Lithos*, 290-291, 60-75, doi:10.1016/j.lithos.2017.08.001.
- Umino, S., K. Kanayama, K. Kitamura, A. Tamura, O. Ishizuka, R. Senda, and S. Arai, 2017, Did boninite originate from the heterogeneous mantle with recycled ancient slab? *Island Arc*, 27, e12221, doi:10.1111/iar.12221.
- 臼田優太, 2018, 反射法解析を稠密アレイ自然地震記録に適用した阿武隈山地南部の地殻構造の研究, 東京大学修士論文.
- Viens, L., M. Denolle, H. Miyake, S. Sakai, and S. Nakagawa, 2017, Retrieving impulse response function amplitudes from the ambient seismic field, *Geophys. J. Int.*, 210, 210-222, doi:10.1093/gji/ggx155.
- Watanabe, N., M. Egawa, K. Sakaguchi, T. Ishibashi, and N. Tsuchiya, 2017, Hydraulic fracturing and permeability enhancement in granite from subcritical/brittle to supercritical/ductile conditions, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5468-5475, doi:10.1002/2017GL073898.
- Watanabe, N., T. Kikuchi, T. Ishibashi, and N. Tsuchiya, 2017,  $\nu$ -X-type relative permeability curves for steam-water two-phase flows in fractured geothermal reservoirs, *Geothermics*, 65, 269-279, doi:10.1016/j.geothermics.2016.10.005.
- 山田泰広・Jim Mori・氏家恒太郎・林為人・小平秀一, 2018, 東北地方太平洋沖地震後の緊急調査掘削 (IODP 第 343 次航海: J-FAST) の成果, *地質学雑誌*, 124, 67-76, doi:10.5575/geosoc.2017.0080.
- Yanagida, Y., M. Nakamura, A. Yasuda, T. Kuritani, M. Nakagawa, and T. Yoshida, 2018, Differentiation of a hydrous arc magma recorded in melt inclusions in deep crustal cumulate xenoliths from Ichinomegata Maar, NE Japan, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 19, 838-864, doi:10.1002/2017GC007301.
- Yano, T. E., T. Takeda, M. Matsubara, and K. Shiomi, 2017b Japan unified high-resolution relocated catalog for earthquakes (JUICE): Crustal seismicity beneath the Japanese Islands, *Tectonophys.*, 702, 19-28, doi:10.1016/j.tecto.2017.02.017.
- 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.

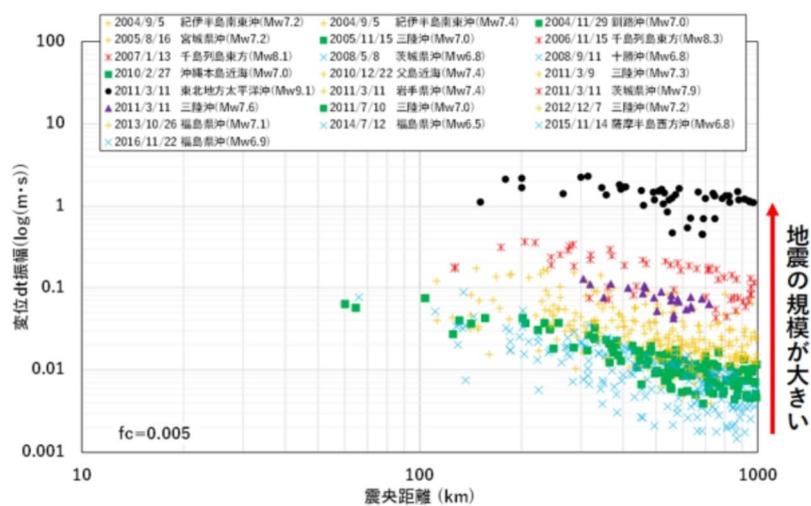


図1. 変位を時間積分した波形の振幅と震央距離の関係（気象庁 [課題番号：7009]）。同じ震央距離で見ると、地震の規模が大きいほど振幅が大きくなっており、このような計算によってスロー地震についても規模が正しく評価できると期待される。

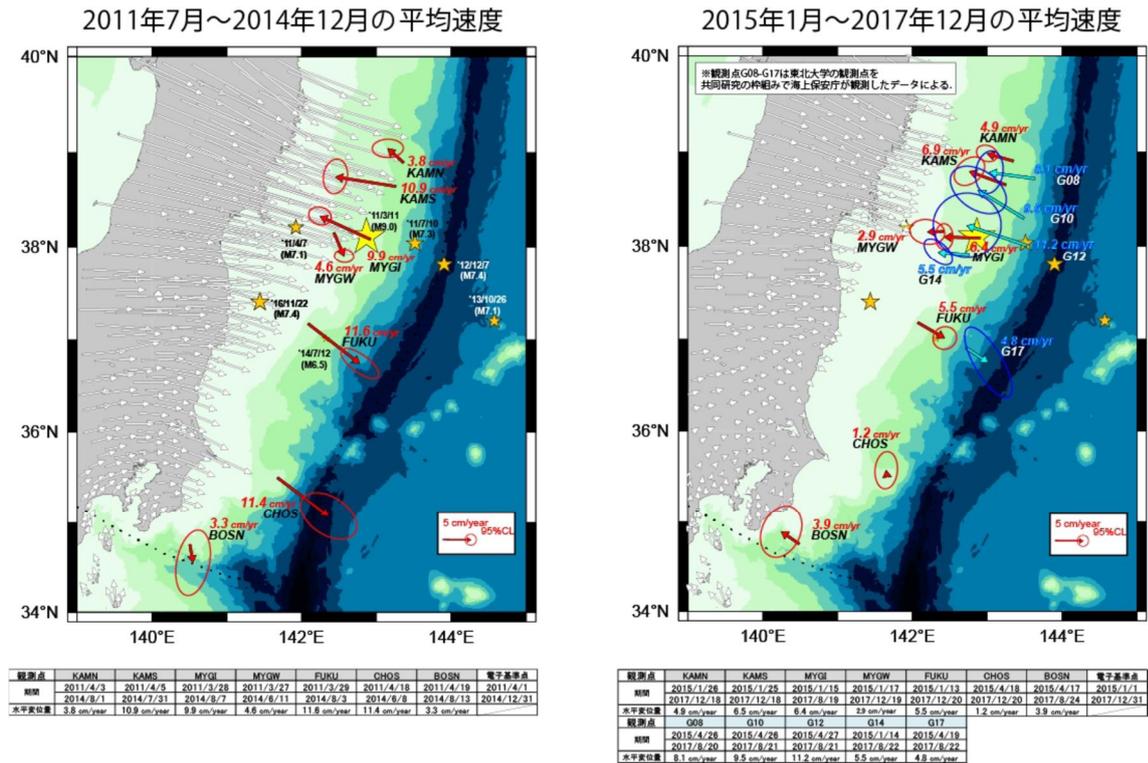


図 2. 日本海溝沿いの海底の水平地殻変動（海上保安庁 [課題番号：8001]）。東北地方太平洋沖地震後の最初の三年半（左図）と最近の三年間（右図）における GNSS-音響測距結合方式観測で得られた海底の地殻変動速度について示す。陸上の変動ベクトルは GEONET の F3 解による。黄色の星は 2011 年東北地方太平洋沖地震の本震，オレンジの星は海底の観測点において 1cm 以上の地殻変動が推定される余震を示す。

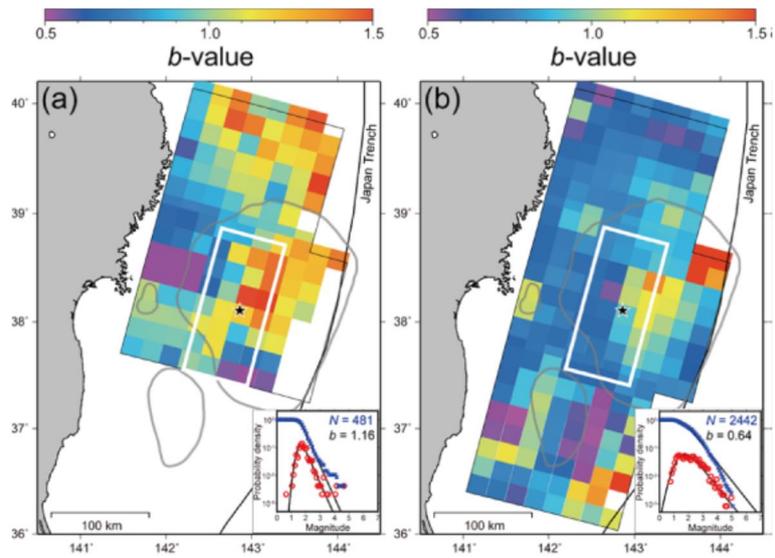


図 3. 海陸観測データから推定した東北沖のプレート境界付近で発生している地震の  $b$  値の分布（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

(a) 東北地方太平洋沖地震発生前（2007 年 10 月～2008 年 6 月）。(b) 東北地方太平洋沖地震発生後（2011 年 3 月～6 月）。 $b$  値推定手法は Maximum Curvature 法 (Wiemer and Wyss, 2000) による。星印は東北沖地震の震源，灰色コンターは Iinuma et al. (2012) による本震時滑り分布 (10m) を表す。挿入図は，地図上の白色矩形域内で発生した地震 ( $N$ : 全地震数) の規模別頻度分布 (赤: 非累積頻度, 青: 累積頻度) を示す。ただし，挿入図での  $b$  値は Ogata and Katsura (1993) の最尤推定モデル (黒線) による。

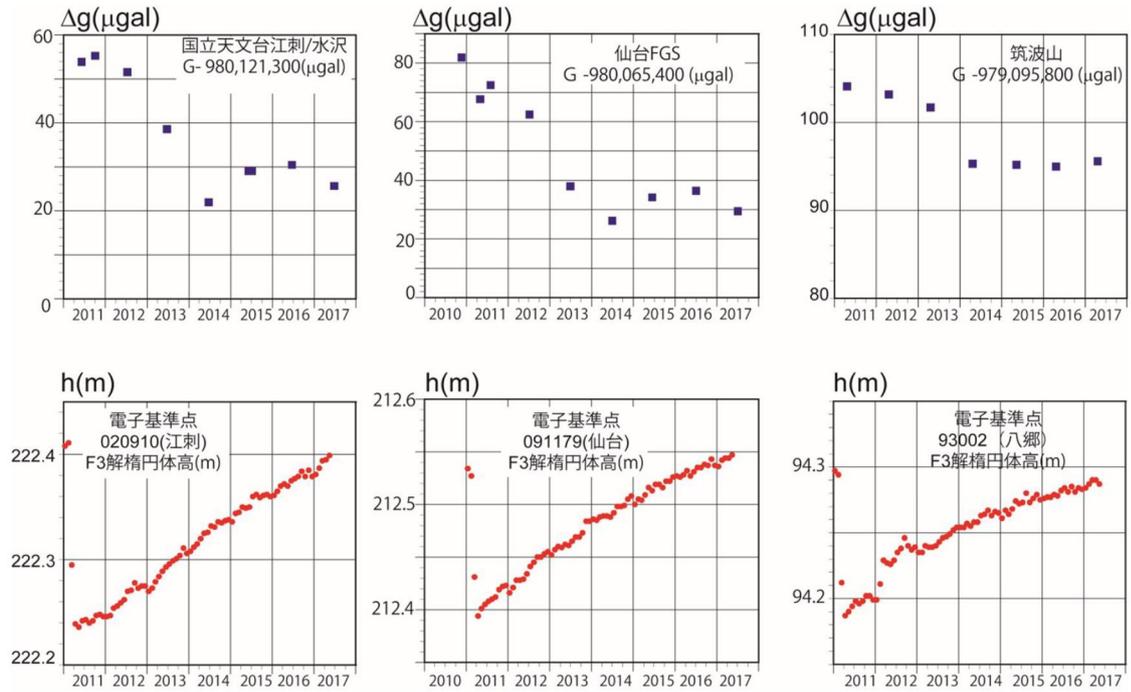


図 4. 江刺，仙台，及び筑波山における，重力変化（上図）と上下変動（下図）（東北大学 [課題番号：1203]）。

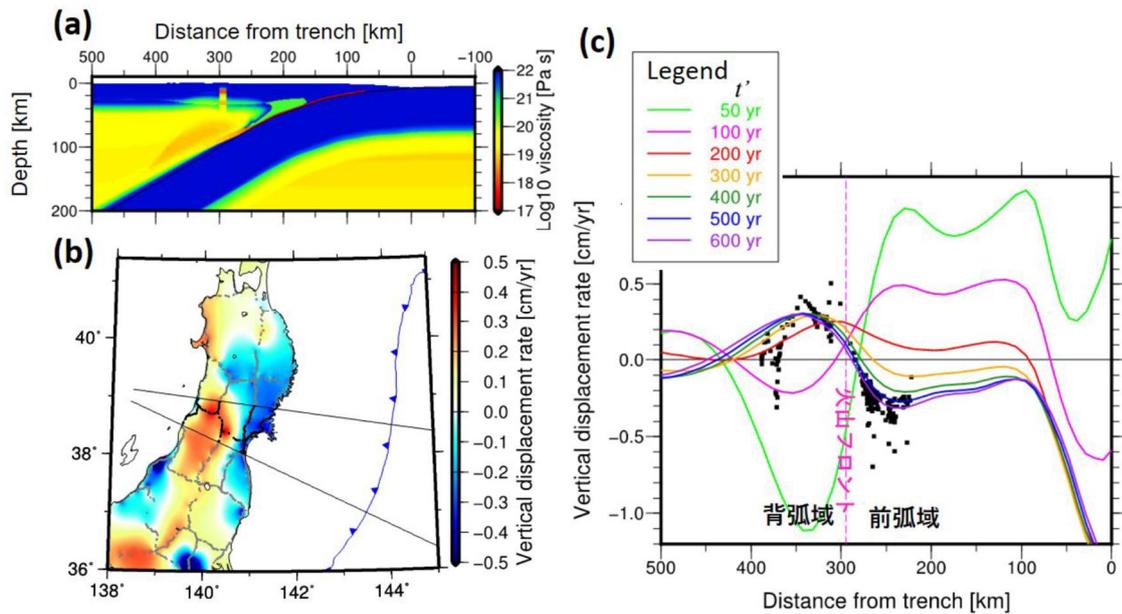


図 5. 東北沖地震前約 100 年間に於ける東北日本島弧内陸に於ける上下変動のモデル化 (東北大学 [課題番号: 1203])。

(a) 本研究に用いた二次元不均質レオロジー構造の拡大図。Horiuchi and Iwamori (2016) によるマントルウェッジの温度構造・含水量分布・蛇紋岩化域などを元に作成。(b) 水準測量による東北沖地震前約 100 年間の地表上下変動速度 (元データは国見・他 (2001) による)。(c) 本モデルによる地表上下変動速度の時間発展。中部東北日本 (図 8b の二つの直線で挟まれた範囲内) の上下変動速度を海溝直交測線に投影して黒点で示す。曲線はモデルによる計算値で、レジェンドに示した  $t'$  は、巨大地震発生後の経過年数を示す。

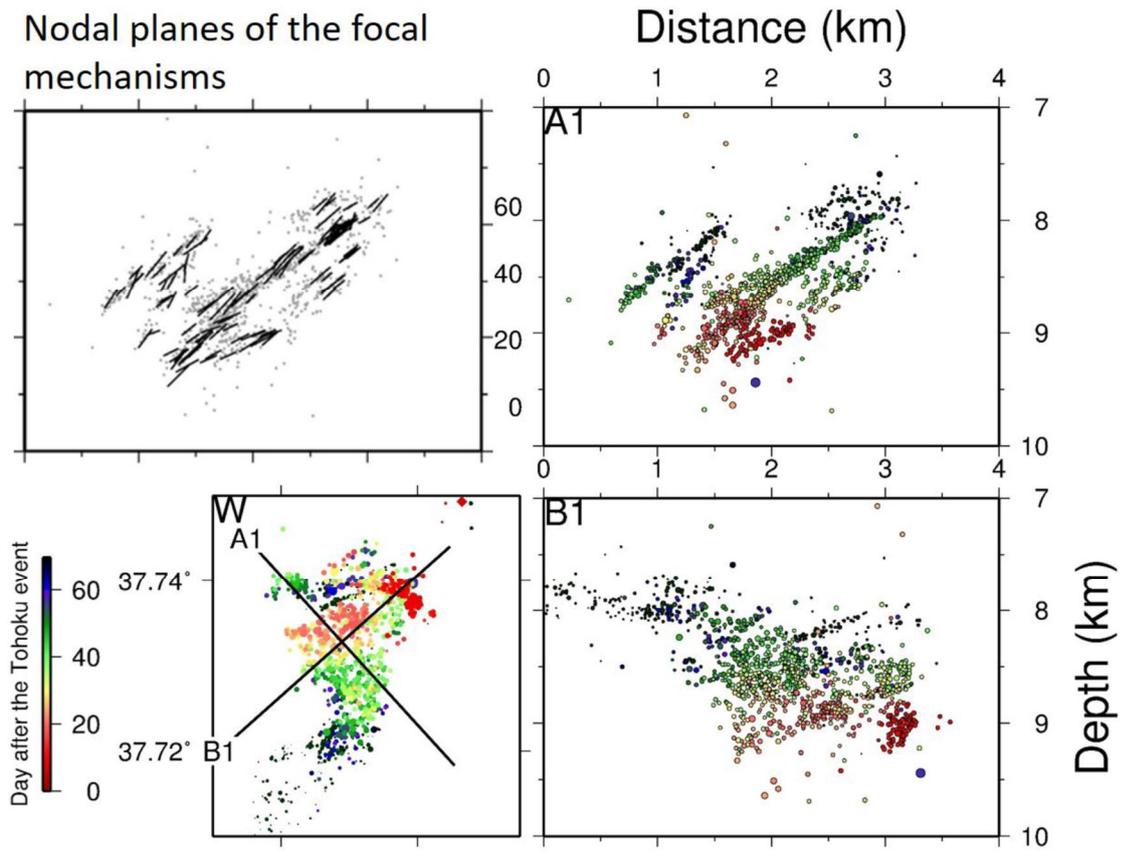


図 6. 山形-福島県境付近の地震クラスタの一つの高精度震源分布（東北大学 [課題番号：1204]）。

（左下）震央分布。色は東北地方太平洋沖地震からの日数を表す。（右）震央分布図の A1 と B1 の測線に沿った鉛直断面図。（左上）発震機構解の節面の分布。A1 断面に投影して示す。