

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とする。

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、地震時の応力低下量が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、その変質度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、プ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]）。この森吉山の下に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圧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-Oki 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-0ki 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. Hiyarama, 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. Takahashih, 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・廣瀬丈彦・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. Amatyia, 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.

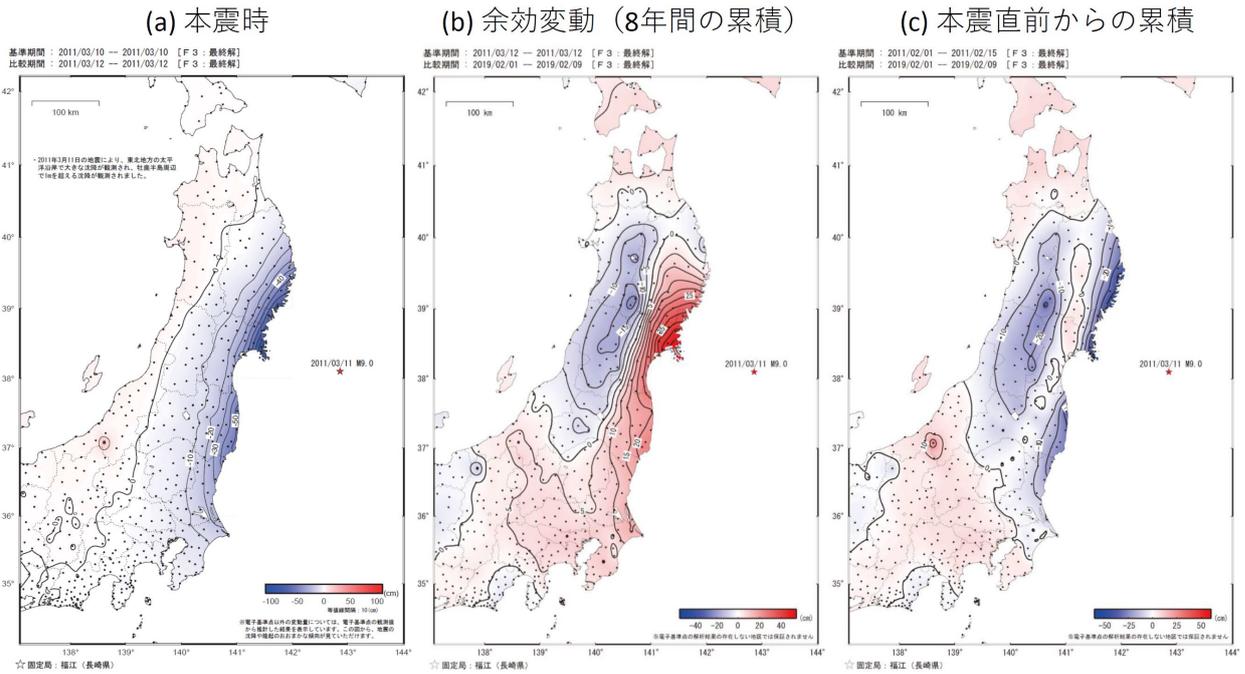


図1. GNSS連続観測により捉えられた2011年東北地方太平洋沖地震に伴う上下変動(国土地理院[課題番号:[課題番号:6005])。 (a) 本震時の上下変動。(b) 本震後8年間の余効変動。(c) 本震直前からの累積上下変動。

2 (2) 南海トラフの巨大地震総合研究

「南海トラフの巨大地震」総合研究グループリーダー 澁谷拓郎
(京都大学防災研究所)

1. 5年間の成果

(1) 概要

本研究グループは、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」において、海溝型地震部会、データベース・データ流通部会、地震動・津波等の事前予測・即時予測部会、史料・考古部会、地震・火山災害部会、地震先行現象・地震活動評価部会等で行われている南海トラフの巨大地震に関する研究について部会を横断する形でまとめ、総合的に推進することを目的とする。さらに、東京大学地震研究所と京都大学防災研究所という拠点間での連携共同研究における参加者募集型研究として実施される、「巨大地震のリスク評価の精度向上に関する新パラダイムの構築」による南海トラフ巨大地震のリスク評価についての研究とも連携を図って、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」による南海トラフ巨大地震の現象解明、発生予測、災害誘因予測を目指した研究と、拠点間連携共同研究のリスク評価の研究との橋渡しを模索することも、本研究グループの目的である。

(2) 研究スキームの設定

本研究グループでは、南海トラフ巨大地震の災害軽減に資する研究のスキームとして、図1に示すように、地震の発生、地震波の伝播という事象の時間経過およびそれらに伴う情報の伝達の方向性に従い、「震源・地震像」、「地殻構造・波動伝播」、「強震動・津波予測」、「地盤構造・地すべり」、「被害予測（建築物・構造物）」、「リスク評価」という研究項目が並び、これらを「基盤観測・データ流通・データベース・モニタリング」が支え、各研究項目から情報が社会に向かって発信されるという構図を考え、これをもとに南海トラフの巨大地震に関連する研究課題の成果をまとめた。

(3) 研究集会の開催

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」において、部会を中心に行われている研究のうち、南海トラフの巨大地震に関するものについて、部会を横断する形でまとめるため、研究集会を開催した。

第1回の研究集会は、平成27年5月に開催され、初年度（平成26年度）の成果に基づき、表1のような発表が行われた。発表1・2・4～6は海溝型地震部会、発表3は史料・考古部会、発表7～9は地震動・津波等の事前予測・即時予測部会、発表10・11は拠点間連携の研究として行われたものであるが、本研究グループで設定した研究項目で分類すると、発表1～4は震源・地震像、発表5・6は地殻構造、発表7・8は強震動予測、発表9は地すべり、発表10はリスク評価となる。研究項目を、図1に示すように、地震の発生、地震波の伝播という事象の時間経過およびそれらに伴う情報の伝達の方向性に従って並べたとき、上流あるいは下流の研究がどのような情報を欲しているかを考えながら研究を行うことが重要であることが、総合討論を通じて認識された。

南海トラフ巨大地震に対して、(1) どんな地震像が想定されるか、(2) どんな被害が想定されるか、(3) どんな情報を発信できるか、というような問いに答えるのが、本研究グループの究極の目的と考えられる。第2回の研究集会は、(1)をテーマに平成28年5月に開催された。発表者を表2に記す。地震規模を想定するためには、震源域の情報が必要であるが、これについては、平成27年度に海上保安庁の研究課題8001において、海底地殻変動観測データを用いた南海トラフ巨大地震の固着域の推定という研究がなされた(発表1)。また、発生時期を想定するためには、海底での地殻変動連続観測が不可欠であると考え、発表4・5においてその現状と課題について報告していただいた。総合討論において、そもそも「もっともらしい地震像」が必要かという問題提起があった。何のための情報かによって、用意すべきシナリオは変わるのであって、たとえば、命を守るための情報には、最悪のシナリオが必要なのではないかという意見が出された。また、シナリオの確率密度分布を作れないかという意見もあった。

第3回の研究集会は、平成29年10月に開催された。第2回に引き続き、「もっともらしい地震像」について、もう少し掘り下げてみることにした。発表者を表3に示す。次の南海トラフ巨大地震のもっともらしい地震像について議論するためには、過去にどのような地震が発生したのかという情報が必要であるので、史料地震学に基づいた講演をしていただいた(発表1)。南海トラフ沿いの地震の起き方は、従来考えられていたよりも複雑で類型化が難しいということであった。発表4・5では、南海トラフ巨大地震の発生前と発生時と発生後に震源域で何が起きているのかをリアルタイムでモニタリングすることの重要性が指摘された。総合討論では、「もっともらしい地震像」をあらかじめ絞り込むのは難しいので、いくつものシナリオに対して、どのような事象が発現するかをシミュレーションしておき、モニタリングにより、震源域で何が起きたのか、起きているのかをリアルタイムで把握し、起きる可能性の高いシナリオを絞り込むというような戦略をとる必要があること認識された。

発表2・4は、文部科学省科学技術試験研究委託事業の「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」での研究成果に基づく発表であった。南海トラフ巨大地震という課題に取り組むプロジェクト同士の連携を強化するため、平成31年2月に開催された第4回研究集会では、南海トラフ広域地震防災研究プロジェクトの概要と研究成果について報告していただくとともに、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画からも、震源、地殻構造、地盤構造と強震動予測、拠点間連携研究によるリスク評価などの成果について発表した。発表者は表4の通りである。

2. 平成30年度の成果

(1) 研究成果の概要

平成30年度の「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」における研究課題のうち、南海トラフの巨大地震に関する研究であることが自己申告されたもの、および研究成果報告からそう判断されるものは、56課題であった。部会別には、「海溝型地震」が15課題、「データベース・データ流通」が18課題、「地震動・津波等の事前予測・即時予測」が5課題、「史料・考古」が5課題、「地震・火山災害」が3課題、「地震先行現象・地震活動評価」が2課題、「拠点間連携」が8課題であった。さらに、主な成果について、上述のス

キームにおける研究項目で整理すると、「震源・地震像」が22課題、「地殻構造・波動伝播」が6課題、「強震動予測・津波予測」が5課題、「地盤構造・地すべり」が4課題、「被害予測（建築物・構造物）」が5課題、「リスク評価」が4課題、「基盤観測・データ流通」が22課題、「情報発信」が2課題（複数の研究項目に該当する課題あり）であった。以下に、主な研究項目の成果を述べる。

（2）震源・地震像

ア．プレート境界面の固着状態

東京大学地震研究所〔課題番号：1509〕は、豊後水道周辺における機動的GPS観測を強化・継続し、当該地域で繰り返し発生する長期的SSE（Slow Slip Event）の研究を行った。2015年12月ごろから2016年3月ごろまで四国南部を中心に長期的SSEの可能性のある小さな地殻変動が観測されたが、その変動量や推定されたモーメントマグニチュードは、豊後水道で想定されている長期的SSEの数分の1しかないことがわかった（Hirose et al., 2018）。2018年8月ごろから豊後水道南西部を中心に長期的SSEの可能性のある小さな地殻変動が観測されており、また2018年12月から豊後水道全域で2010年以来の大規模な長期的SSEが発生したと考えられる。東海地域に関しては、2013年頃から開始した長期的SSEに関して、時間発展インバージョンを用いた解析を実施し、結果の詳しい検討を行った。長期的SSEに加えて2013年から2016年1月に、少なくとも2回の短期的SSEが発生し、その位置は長期的SSEのプレート境界深部に位置する北西側であった。推定された短期的SSEのすべり速度は20～30cm/年であり、長期的SSEのすべり速度（約2.3cm/年）よりも1桁早い。長期的SSE領域では深部低周波微動が発生していないが、本研究の結果は微動の発生が周囲のスロースリップのすべり速度に依存しているという仮説（Wech and Bartlow, 2014）を支持する結果となった（Sakaue et al., 2018）。

海上保安庁〔課題番号：8001〕は、GPS－音響測距結合方式による海底地殻変動観測を南海トラフ域で継続し、プレート境界固着の影響による地殻変動を観測している。紀伊水道沖の観測点における2017年末頃からのデータから、浅部のスロースリップに起因すると考えられる非定常地殻変動を観測した（海上保安庁, 2018）。

イ．歴史地震の地震像

史料・考古の研究では、名古屋大学〔課題番号：1701〕は、三重県、愛知県の自治体史、郷土史などを中心とした史料調査により、南海トラフ地震を中心に地震情報の抽出を行った。ここで収集した史料について、eコママップを用いて地図と結びつけたデータベースを構築するため、高知県、三重県、愛知県、静岡県の明治期の旧版地形図のデジタル化を行った。

京都大学防災研究所〔課題番号：1901〕は、1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関して、複数の写本を検討し、より原本に近い史料を特定して未読箇所を翻刻した（服部・中西, 2017, 2018）。また、この地震と噴火について、現在知られているなかで最も完全で、かつ古い時代に書かれた史料を特定し翻刻した。これらの史料から、1707年宝永地震の本震と翌日発生した余震の震源域の推定に重要な情報が得られた。

東京大学史料編纂所〔課題番号：2601〕は、既刊地震史料集に記載されている史料につ

いて、歴史的に信頼できる原典史料に遡って、史料記述の間違いの修正や省略部分の補足を行う校訂作業を実施した。また、東海地方にあって長期間にわたる日記史料が現存する三河国田原藩（愛知県田原市）の「田原藩日記」（田原市博物館所蔵）の調査・撮影を実施した。これに関連して、嘉永七年十一月四日・五日（1854年12月23日・24日）の東海・南海地震関連の日記史料について集中的に調査を実施し、本震前後の期間における有感地震の記録について分析した。現段階での成果として、東海・南海地震の発生前に、太平洋沿岸地域では目立った有感記録の増加はみられないが、山陰地方や近畿地方北部では本震発生の5年前に有感地震の記録が増加している状況が判明した。

（3）地殻構造・波動伝播

ア．プレート形状・構造

東京大学地震研究所〔課題番号：1509〕は、四国西部地域における比抵抗構造をネットワークMT応答関数のインバージョンにより求め、地震波減衰構造（Kita and Matsubara, 2016）および長期的SSE域（Ozawa, 2017）と比較した。その結果、比抵抗の低いところは低 Q_p の減衰の大きな領域に対応し、長期的SSEにおいて滑り量の大きい領域の外側に分布することが分かった（Uyeshima et al., 2018）。

名古屋大学〔課題番号：1703〕は、東海地域においてACROSS震源を用いた地震波速度の時間変化の解析を行い、過去10年間、2011年東北地方太平洋沖地震時の地震波速度減少以外は定常的に地震波速度が増加していることを世界で初めて明らかにした。定常的な地震波速度の増加は、岩盤中のクラックが徐々に閉じることによる剛性の増加を表しており、地下水の化学成分の沈殿による割れ目の閉塞を表していると推測できる（Tsuji et al., 2018）。

京都大学防災研究所〔課題番号：1904〕は、米子－海陽測線の観測点で記録された遠地地震波形を用いてレシーバ関数解析を行い、レシーバ関数イメージを得た。四国東部下に沈み込むフィリピン海プレート内の海洋モホ面とプレート上面は、中国地方中部付近まで明瞭にイメージされた。この結果から四国東部下のフィリピン海プレートは、四国南端の深さ20kmから中国地方中部で深さ40kmに達していて、 6° 程度の傾斜角で沈み込んでいることが分かった（澁谷他, 2019）。

（4）強震動予測・津波予測

ア．震源パラメータの即時推定

産業技術総合研究所〔課題番号：5007〕は、ボアホール歪計を用いて巨大地震のモーメントマグニチュード(M_w)の即時推定を試み、水平歪4成分以上があれば、 $M9$ クラスの東北地方太平洋沖地震本震のほか、同地震の最大余震、近年発生した内陸地震でも M_w を推定可能であることを示した（Itaba, 2018）。

国土地理院〔課題番号：6004〕は、相対測位によるGEONETリアルタイム解析から得られる日本全国のリアルタイム地殻変動データを用いて、地震発生時に矩形断層モデルおよびプレート境界面上のすべり分布を即時推定する技術の開発を行い、電子基準点リアルタイム解析システムに実装した（Kawamoto et al., 2018）。

イ．津波予測

防災科学技術研究所〔課題番号：3004〕は、津波即時予測システムにおいて、DONETを用いたシステムの構築を海洋研究開発機構と連携して進め、すでに和歌山県、三重県、中部電力、尾鷲市に実装・運用しているが、複雑な地形を持つ瀬戸内海沿岸での即時津波予測システムの有効性を確認し（Takahashi et al., 2018）、坂出市と高松市を対象としたシステムを香川大学に構築した。

(5) 地盤構造・地すべり

ア．大阪堆積盆地モデルの検証

京都大学防災研究所〔課題番号：1911〕は、広帯域強震動予測のための震源モデルおよび震源から観測サイトまでの地殻・地盤速度構造モデルの高度化の一環として、2018年大阪府北部の地震の地震動モデリングによる大阪堆積盆地3次元速度構造モデルの検証を行った。大阪平野内の地震観測点の観測波形と比較すると、後続波の到来は観測とよく対応しており、速度構造モデルは表面波の形成・伝播などの盆地の応答はおおよそ再現できていると考えている。一方、計算地震動の振幅は観測に比べ全体的に小さく、震源モデルと3次元速度構造モデルのとくに浅部部分に原因があるのではないかと考えられる。また、盆地端部近くの観測点は、波形の再現がよくない点があり、堆積構造の急変地域でのモデル更新が課題としてあげられる（関口他, 2018）。

(6) リスク評価

ア．火災の発生件数のばらつきの評価

京都大学防災研究所〔課題番号：2957〕は、地震火災の発生件数を予測するため、人口一人あたりの出火確率に着目し、これを計測震度や電力の供給率から説明するモデルを定式化した。この出火モデルと地震動指標の距離減衰式を組み合わせることによって、南海トラフ地震の不確実性を考慮した日本全域での確率論的な出火シミュレーションを行った。ここでは、地震火災の発生件数に大きく影響する地震の不確実要因として、(1)震源域とそれが破壊された際の地震の規模、(2)地震の発生季節、(3)地震の発生時間帯の3種類の要因を仮定し、各要因のバリエーションの組み合わせからなる合計72の地震シナリオに重み係数を設定することによって、地震火災の発生件数と条件付き超過確率の関係を表す出火リスクカーブを消防本部の管轄範囲ごとに推定した。その結果、南海トラフ地震が発生した際、全国のほとんどの消防本部では、保有するポンプ車の台数を上回る数の火災が発生する確率は非常に小さく、水道管や防火水槽の耐震化によって地震時においても消防水利を確保することができれば、放任火災の発生を高い確率で防ぐことができることを明らかにした。

イ．エクスポージャ予測のためのモデル化手法

京都大学防災研究所〔課題番号：2952〕は、地震リスク評価におけるエクスポージャとして、人口および建物ストックの将来予測モデルの構築を試みた。高知県南国市を対象として、人口及び建物ストックの時系列分析を行った。また、その地方自治体での時系列変

化に影響を及ぼす要因についても分析し、人口と建物ストックの相関および建物ストックの時系列変化に関する簡易なモデルを構築した（河野・西嶋，2018）。

（7）情報発信

ア．防災情報の発信と防災知識の普及啓発

気象庁〔課題番号：7012〕は、気象庁から発表する地震・津波に関する防災情報の高度化を図るため、緊急地震速報評価・改善検討会などの検討会等を開催し、報道発表等により広く情報共有を行った。また、気象庁は「南海トラフ地震に関連する情報」を発表することとし、平成29年11月1日からその情報の運用を開始した。

気象庁〔課題番号：7020〕は関係機関と連携し、地域の状況に合った様々な手段を用いて、地震・津波及び火山に関する知識や防災行動についての普及啓発に継続的に取り組んだ。

これまでの課題と今後の展望

冒頭で述べたように、本研究グループの目的は、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」において、部会ごとに推進されている研究成果を部会を横断する形でまとめ、南海トラフ巨大地震の災害軽減に資する研究を総合的に推進することである。このために、本研究グループでは、地震の発生、地震波の伝播という事象の時間経過およびそれらに伴う情報の伝達の方向性に従い、「震源・地震像」、「地殻構造・波動伝播」、「強震動・津波予測」、「地盤構造・地すべり」、「被害予測（建築物・構造物）」、「リスク評価」という研究項目が並び、これらを「基盤観測・データ流通・データベース・モニタリング」が支え、各研究項目から情報が社会に向かって発信されるというスキームを設定した。それぞれの研究項目において、上流と下流でなされている研究や必要とされるアウトプットを認識し、研究を行うことが必要と考えられる。このため、研究項目間のコミュニケーションを図ることが重要であり、現行計画では、研究集会を通して研究項目間のコミュニケーションの活性化を実施してきた。しかしながら、年1回開催する研究集会のみでは十分なコミュニケーションを実現することには限界があると思われる。次期計画においては、関連する研究項目を代表する研究者が本研究グループを構成する体制とするなど、部会を横断する研究の推進に関する組織面でのサポートが必要であると考えられる。

成果リスト

服部健太郎・中西一郎，2018，1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する一史料（3）—元禄地震・宝永地震・宝永富士山噴火を記した「当山本宮記」—，地震2，71，131-137，doi: 10.4294/zisin.2017-17.

服部健太郎・中西一郎，2018，訂正：1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する一史料（3）—元禄地震・宝永地震・宝永富士山噴火を記した「当山本宮記」—，地震2，71，151-152，doi:10.4294/zisin.2018-4.

- 服部健太郎・中西一郎, 2019, 1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する史料—富士山宝永噴火に先行した地震活動に関する記述の検証—, 地震 2, 71, 219-229, doi: 10.4294/zisin.2018-5.
- Hirose, H., T. Matsushima, T. Tabei, and T. Nishimura, 2018, A small slow slip event in Bungo Channel from December 2015 to March 2016 detected by a GNSS observation network, T33E-0457, AGU Fall Meeting 2018, Washington, D.C., 10-14 December.
- Itaba, S., 2018, Rapid estimation of the moment magnitude of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0) from static strain changes, Earth, Planets and Space, 70, doi:10.1186/s40623-018-0894-5.
- 海上保安庁, 2018, 南海トラフ沿いの海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 101.
- 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, Journal of Disaster Research, 13, 440-452, <https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0440>.
- 河野祐哉, 西嶋一欽 (2018) 高知県南国市を例とした建物ストックの時系列変化の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集.
- Sakaue, H., T. Nishimura, J. Fukuda, T. Kato, 2018, Spatio-Temporal Evolution of Long-Term and Short-Term Slow Slip Events in the Tokai Region, Central Japan Estimated from a Very Dense GNSS Network, During 1996-2016, SE27-A016, AOGS 15th Annual Meeting, Honolulu, USA, 3-8 June.
- 関口春子・岩田知孝・浅野公之, 2018, 2018年6月18日大阪府北部の地震時の強震動シミュレーション, 日本地震学会2018年度秋季大会, S24-15, 2018年10月.
- 澁谷拓郎・三浦 勉・長尾愛理・小松信太郎・山崎健一・山下裕亮・井口正人・為栗健・園田忠臣・大倉敬宏・吉川 慎, 南海トラフ巨大地震の予測高度化を目指したフィリピン海スラブ周辺域の構造研究(5), 京都大学防災研究所研究発表講演会, P14, 宇治市, 2019年2月, 2019.
- Takahashi, N., Imai, K., Sueki, K., Obayashi, R., Ishibashi, M., Tanabe, T., and Kaneda, Y. (2018). Real-Time Tsunami Prediction System Based on Seafloor Observatory Data Applied to the Inland Sea, Japan. Marine Technology Society Journal, 52(3), 120-127.
- Tsuji S, Yamaoka K, Ikuta R, Kunitomo T, Watanabe T, Yoshida Y, Katsumata A (2018) Secular and coseismic changes in S-wave velocity detecting using ACROSS in the Tokai region, EPS, doi.org/10.1186/s40623-018-0917-2
- Uyeshima, M., Hata, M., Ichihara, H., Yoshimura, R. and Aizawa, K. A progress report on the subsurface electrical resistivity structure obtained from the Network-MT survey in the vicinity of area with a forth-coming slow slip event in the SW part of the Shikoku Island, SW Japan, 24th EM Induction Workshop, Helsingoer, Denmark, 2018.

南海トラフ巨大地震の災害軽減

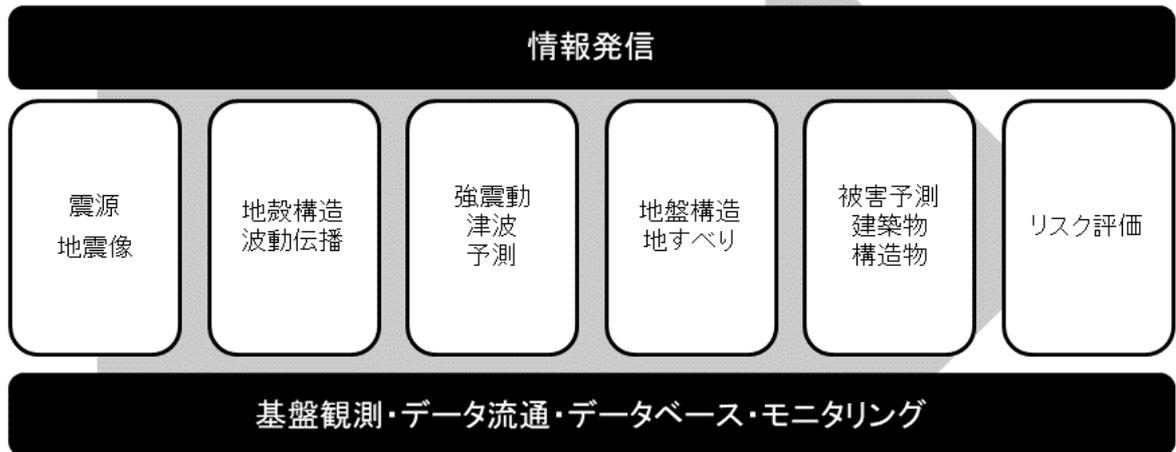


図1 南海トラフ巨大地震総合研究のスキーム

表1 第1回研究集会での発表

	発表タイトル（課題番号）	発表者（所属）	備考
1	プレート境界すべり現象モニタリングに基づくプレート間カップリングの解明（1509）	蔵下英司 （東大・地震研）	震源
2	南海トラフ域における巨大地震断層域の力学・変形特性の把握（1703）	山岡耕春 （名大）	震源
3	古文書解読による南海トラフ巨大歴史地震像の解明（1701）	山中佳子 （名大）	地震像
4	海溝型巨大地震の履歴とメカニズム解明（5004）	宍倉正展 （産総研）	地震像
5	海域地震発生帯研究開発（4002）	仲西理子 （海洋研究開発機構）	地殻構造
6	南海トラフ巨大地震の予測高度化を目指したフィリピン海スラブ周辺域の構造研究（1904）	澁谷拓郎 （京大・防災研）	地殻構造
7	広帯域・高解像度強震動シミュレーションに基づく大地震の強震動評価の高度化（1516）	古村孝志 （東大・地震研）	強震動 予測
8	プレート境界巨大地震等の広帯域強震動予測に関する研究（1911）	関口春子 （京大・防災研）	強震動 予測
9	強震動によって発生する地すべり現象の発生ポテンシャル評価と事前予測手法の高度化（1912）	千木良雅弘 （京大・防災研）	地すべり
10	地震リスク評価に関する不確実性～定量的評価に向けたプラットフォームの構築～	西嶋一欽 （京大・防災研）	リスク 評価
11	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の枠組み	川瀬 博 （京大・防災研）	拠点間 連携

表2 第2回研究集会の発表

	発表タイトル（課題番号）	発表者（所属）	備考
1	海底地殻変動観測による南海トラフ巨大地震の固着域の推定（8001）	石川直史 （海上保安庁）	震源
2	南海トラフ巨大地震のシミュレーション（4002）	堀 高峰 （海洋研究開発機構）	震源 地震像
3	スロー地震と巨大地震の相互作用（3002）	松澤孝紀 （防災科研）	震源
4	海溝軸近傍での海底地殻変動観測	太田雄策（東北大学）	モニタ リング
5	DONETによるモニタリングの現状と展望（4001）	高橋成実 （海洋研究開発機構）	モニタ リング
6	南海トラフ巨大地震の研究において理学コミュニティに期待することー効果的な災害対応，復旧・復興のためにー	牧 紀男 （京大防災研）	拠点間 連携
7	拠点間連携共同研究（南海トラフ）のH27年度成果	松島信一 （京大防災研）	拠点間 連携

表3 第3回研究集会の発表

	発表タイトル（課題番号）	発表者（所属）	備考
1	史料地震学でみた南海トラフ巨大地震の発生履歴の問題点	石橋克彦 （神戸大）	地震像
2	南海トラフ地震の規則性・不規則性とその課題	古村孝志 （東大地震研）	地震像
3	固着の剥がれ方の多様性と大地震の発生	加藤愛太郎 （東大地震研）	震源
4	南海トラフ域でのモニタリングと推移予測のための不均質構造モデル構築と解析手法の高度化	堀 高峰 （海洋研究開発機構）	モニタ リング
5	次の南海トラフ巨大地震発生前・時・後に何が起きるのかをモニタリングする調査観測	平原和朗 （京大理）	モニタ リング
6	巨大地震による強振動予測のための強振動生成領域に対する距離減衰式の適用	宮澤理稔 （京大防災研）	拠点間 連携

表4 第4回研究集会での発表

	発表タイトル	発表者（所属）	備考
1	南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト （文部科学省科学技術試験研究委託事業）	平原和朗（理研） 堀 高峰 （海洋開発研究機構）	
2	海陸地殻変動観測データに基づく南海トラフ 沿いのプレート間固着分布	西村卓也 （京大防災研）	震源
3	南海トラフ巨大地震の予測高度化を目指した フィリピン海スラブ周辺域の構造研究	澁谷拓郎 （京大防災研）	地殻構造
4	大阪盆地，奈良盆地の地盤構造モデルとプレ ート境界地震の強震動震源モデル	関口春子 （京大防災研）	地盤構造 強震動 予測
5	南海トラフ巨大地震の地震被害リスク評価に 関する拠点間連携共同研究の成果	松島信一 （京大防災研）	拠点間 連携
6	次期計画における南海トラフ巨大地震総合研 究グループの役割	宮澤理稔 （京大防災研）	

2 (3) 首都直下地震総合研究

「首都直下地震」総合研究グループリーダー 酒井慎一

(東京大学地震研究所)

1. はじめに

首都直下地震については「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（建議）」の中で、災害科学の発展に著実に貢献できることや、発生した場合の社会への影響の甚大さを考慮して、総合的な研究として優先して推進するとされている。しかし、地震・火山現象の解明のための研究、地震・火山噴火の予測のための研究、地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究の3分野に、広くまたがるような総合的な研究課題は存在しなかった。そのため、三つの分野に存在している研究課題の中から、首都直下地震に関連した研究成果を集めて統合し、社会的にも重要である首都直下型地震による災害の軽減につなげることが、本総合研究グループの目標であるとした。

2. 5年間（平成26年-30年度）の成果

(1) 5年間の成果の概要

大学や気象庁・国土地理院・防災科学技術研究所等の各機関は、首都圏においても基盤観測網の維持・拡充を行い、安定的にデータを流通させてきた。その結果、これらの基礎的なデータは、国内外の多くの研究に利用され、多くの成果を得ることに貢献してきた。

速度構造、震源分布、断層パラメータ等の推定によって、関東平野の下に沈み込むフィリピン海プレート内で発生する孤立的な地震の多くは、周辺と温度構造や応力状態に特別な差異が見られないことから、スラブ内の局所的な含水化が原因であると推測された。2014年に房総沖で発生したスロースリップ(SSE)に対する観測とシミュレーションによって、SSEの発生が、ある条件下の速度・状態依存摩擦構成則によりモデル化できることが示された。

関東平野に入射する表面波について、震源の放射指向性の影響と堆積平野の3次元構造による複雑な表面波増幅・伝播特性の影響の二つについて地震波シミュレーションを行い、長周期地震動の生成・増幅特性の方位依存性を明らかにした。首都圏に多く存在する丘陵地帯を切り拓いて作った造成地では、地震動によって地すべり現象を引き起こす可能性があるため、そのような地域での増幅特性を見積もった。地震動の推定に必要な地下構造の分解能を知るために臨時観測を行ったところ、約100m間隔の近距離でもゆれの振幅比が約2倍になる場合があった。また、安政江戸地震における文献や絵画を検討し、余震が続く中での避難方法や避難場所、幕府側の施策、余震の発生状況や気象条件に起因する避難状況の変化などが明らかになった。過去にプレート境界で発生した地震の履歴と隆起パターンなどを復元することで、関東地震の多様性を評価した。

(2) 基盤観測網の維持・拡充

全国の大学だけでなく気象庁・国土地理院・防災科学技術研究所等の機関は、首都直下地震の研究に必要となる基盤観測網の維持・拡充を進めた。それらの基礎的なデータを継続的に安定して取得するために、膨大なデータを効率的に流通させるためのシステムを構築してきた（東大地震研 [課題番号：1518]、国土地理院 [課題番号：6005, 6006, 6012]、気象庁 [課題番号：7012, 7014, 7020]、海

上保安庁〔課題番号：8001, 8002, 8004〕)。

(3) 首都直下地震の解明のための研究

首都直下地震は、統一した地震像が示されていないため、関東地方の平野部に存在する活断層で発生する地震、沈み込むプレートの境界部分で発生する地震、沈み込むプレート内で発生する地震などが考えられている。本計画では、沈み込むプレート内で発生するプレート内地震に関する研究課題において、関東平野下のP波減衰構造を推定し、フィリピン海プレートのマントル東端部で、顕著に高い減衰を示すことを明らかにした。この高減衰域の広がりには蛇紋岩化していると解釈されている地震波低速度の領域とほぼ一致する。一方、高精度震源分布と断層パラメータの推定によって、相似地震のグループ毎の断層面が互いに重ならず相補的であることや起震応力場が空間的に大きく変化していることを明らかにした。また、伊豆半島の北方で孤立して発生する地震群は、震源および推定された発震機構解から、その多くがプレート内で局所的に発生していたことがわかった。周辺と温度構造や応力状態に特別な差異が見られないことから、局所的な含水化が発生原因であると推測された(東北大〔課題番号：1201〕)。

(4) 首都直下地震の予測のための研究

首都直下のプレート境界部分で発生する地震に関しては、地震活動や地殻変動を詳細に観察することによって、プレート間の固着状態をモニタリングしようとする試みがなされてきた。本計画の実施期間中の2014年に房総半島沖でSSEが観測され、それに伴って発生した地震活動や地殻変動から、SSEの発生に関する研究が進められた。

房総半島沖のSSEは、これまで約6年の間隔で発生していたが、2011年の東北地方太平洋沖地震の発生によって、発生間隔が乱された可能性がある(東大地震研〔課題番号：1509〕)。一方で、小繰り返し地震によるすべりの調査によると、SSEの発生間隔は、東北地方太平洋沖地震によって短くなったものの、その後、元の発生間隔に戻りつつあると考えられる(東大地震研〔課題番号：1510〕)。2014年のSSEに関して、傾斜変動データおよびGNSSデータを用いて断層モデルを推定した所、すべり域はこれまでのSSEにおけるすべり域と重なるが、地震モーメントは約半分と小さく推定された(防災科研〔課題番号：3002〕)。過去のSSEについても解析を行い、SSEの規模や破壊過程はイベントごとに大きく異なることが示された。特に、2018年に発生したSSEは、2011年のSSEと比較して、地表変位は房総半島中部ではほぼ同程度であるが、北部ではやや大きく、房総半島で観測されたSSEとしては最大規模であると推定された(東大地震研〔課題番号：1509〕)。

房総半島沖SSE発生時のフィリピン海プレート上面におけるすべり・すべり速度の時空間発展を、臨時観測点を加えたGNSS時系列データを用いて、時間依存インバージョン解析により推定した。この推定結果と地震活動の時間変化とを比較すると、群発地震活動がSSEによる応力変化によってトリガーされたことが示唆される。さらに、推定されたSSE発生時のすべりや応力の時空間発展を速度・状態依存摩擦構成則に基づいてモデル化した。すべり速度をインバージョン解析からの推定値に固定し、摩擦パラメータ等を未知パラメータと仮定して摩擦構成則の式を数値的に計算し、インバージョン解析から求められた応力の時空間変化を再現できるような摩擦パラメータ等を推定した。応力の時空間変化は速度・状態依存摩擦構成則で良く説明でき、推定されたパラメータからSSE発生域における臨界断層長は30~50km程度と見積もられた。推定されたSSEのすべり域の半径は臨界半径と同程度かそれよりも

やや小さくなり、これは SSEの発生が条件付安定の摩擦特性に支配されていることを示唆する (Fukuda, 2018) (東大地震研 [課題番号: 1509])。

(5) 首都直下地震の災害誘因予測のための研究

将来発生が予想されている首都直下地震による強震動や長周期地震動の事前予測の高度化を図った。関東平野における長周期地震動の生成・増幅特性には方位依存性があり、その原因として、震源から関東平野に向けての表面波の放射指向性の影響、堆積平野の3次元構造による複雑な表面波増幅・伝播特性の影響の2つが考えられた。まず震源からの放射特性の影響を評価するためにシミュレーションを行い、都心部での速度応答スペクトルの強度を比べた。その結果、関東平野を伝播する表面波は、2004年新潟県中越地震では強く、2011年福島県浜通りの地震では弱かった。また、長周期地震動に関しては、中越地震では、断層の走向を変えてもあまり変わらないが、浜通りの地震では走向の変化による変動が大きく、発震機構に敏感であることがわかった (東大地震研 [課題番号: 1516])。

次に、関東平野の3次元堆積層構造と長周期地震動の増幅の方位依存性を検討した。中越地震では、関東平野の深い溝状構造で表面波が焦点を結ぶように集まり増幅すること、および、山地を伝わって屈折してきた表面波が合流するため長い波群を作り出すことが確認できた。一方、浜通りの地震では、筑波山付近の浅く緩い堆積層構造を通して平野に入射する際に波面が拡散することで振幅が小さくなること、および、揺れの継続時間も短くなることが確認できた。この特徴は、同じ方位で発生する他の地震でも見られ、関東平野で一般的な現象である (東大地震研 [課題番号: 1516])。

大地震の震動による地すべり現象は災害要因の一つであるが、首都圏では丘陵地帯を切り拓いて作った造成地に多くの住居があることから、そのような地域の増幅特性を見積もった。人工的に改変された盛土では、S波の上下動成分の10Hz前後に顕著な増幅が見られ、揺れの大きさは地山に比べて約3倍に増幅することがわかった。大正関東地震の時に地滑りが発生した地域の調査を行い、一回の地震ですべての地すべりが生成されたのではなく、繰り返す地震によって何度も発生していることが分かった。そのような地域では、今後も地滑りが起こる危険性があることが示唆された。さらに、甚大な地すべり被害を引き起こす降下火砕物について、航空レーザー計測データを活用して分布域を推定し、ハザードマップに反映させる手法の試案をとりまとめた。関東地方南西部の降下火砕物の分布しているところでは、大正関東地震などによって流動的崩壊が多数発生したことがわかった (京大防災研 [課題番号: 1912])。

地震動の推定を行う際には、地盤や地下構造の不均質を知る必要がある。地盤による差が、どの程度の分解能で表れるのかを知るため、約100m間隔の近距離で地震計を設置したところ、観測された地震波形の振幅比が約2倍になる場合があった。揺れの推定には、より高分解能な構造の違いを考慮する必要があることを確認した (東大地震研 [課題番号: 1514])。

首都圏全体に被害を及ぼすような首都直下地震は、大正関東地震を除いて、地震計によって観測されたことが無いため、明確な地震像は得られていない。そのため、歴史資料や地質情報等などに基づく検討がなされた。現代とは異なる社会状況の下で発生した災害への対応を読み解くことにより、今後の防災・減災施策や復興計画などの検討に資する材料を提示することができる。安政江戸地震(1855年)における文献や絵画を検討し、余震が続く中で町の町人の避難方法や避難場所、幕府側の施策、余震の発生状況や気象条件に起因する避難状況の変化などが明らかになった。江戸市中での被害と復興の様子を描いた絵巻「江戸大地震之図」(島津家文書)の舞台が薩摩藩芝屋敷の周辺であることが判

明し、基本史料として用いることが可能となった（東大地震研 [課題番号：1513]）。

また、過去の関東地震の履歴と隆起パターンなどを復元することにより、関東地震の多様性を評価した。房総半島南部千倉低地の海岸段丘について、ボーリングコア試料の解析から離水年代の再検討を行った結果、従来知られていた年代よりも全体的に新しくなった。さらに、房総半島九十九里浜において津波堆積物調査を実施し、これまで歴史上に知られていない津波の痕跡を検出した。房総半島南部の海岸段丘について、詳細DEM（数値標高モデル）の解析とボーリングコア試料の解析から段丘の分布パターンと離水年代の再検討を行った。その結果、段丘の区分と年代が更新され、再来間隔が非常にばらつくことが明らかになった（産総研 [課題番号：5004]）。

3. 平成 30 年度の成果の概要

首都直下地震の解明のための研究、首都直下地震の予測のための研究、首都直下地震の災害誘因予測のための研究に必要な基盤となる観測網の維持・拡充を進め、データを継続的に取得すると共に、膨大なデータを効率的に流通させるためのシステムを構築してきた（東大地震研 [課題番号：1518]、国土地理院 [課題番号：6005, 6006, 6012]、気象庁 [課題番号：7012, 7014, 7020]、海上保安庁 [課題番号：8001, 8002, 8004]）。

首都直下地震は、統一した地震像が示されていないため、関東地方の平野部に存在する活断層で発生するもの、沈み込むプレートの境界部分で発生するもの、沈み込むプレート内で発生するものが考えられている。沈み込むプレート内で発生する地震に関しては、東北地方中央部の太平洋スラブ上面で発生している地震の震源とメカニズム解を決定したところ、正断層地震と逆断層地震が100 m 以内という非常に近接した場所で発生していることが明らかになった。この結果は、沈み込むプレートのエクロジャイト化に伴う体積減少によりプレート表面近くで正断層地震が発生するという従来の解釈を支持するものであるが、相転移による応力擾乱は極めて局所的であることを強く示唆している。中部地方下の深発地震（深さ約350 km）の波形解析により発見された二つの相似地震グループは、数百m から数km 離れた一つの断層面上で発生していた。深発地震が既存の弱面の再活動で発生していることを強く示唆している（東北大 [課題番号：1201]）。

千葉・茨城で行っている臨時観測点と周辺の観測点のデータを解析し、2018年6月～7月に房総半島でSSEによると考えられる地殻変動が起きたことが分かった。2011年のSSEと比較して、地表変位は房総半島中部ではほぼ同程度であるが、北部ではやや大きく、房総半島で観測されたSSEとしては最大規模であると考えられる。過去のSSEの時空間発展をGNSS時系列データと改良型のNetwork Inversion Filter を用いて推定した結果、すべりの加速様式、すべりの伝播方向、伝播速度など、すべりの時空間発展のイベント毎の共通性と違いが明らかになった。SSEの発生と同時に、地震活動や相似地震活動が増加したが、推定される滑り量は、過去に発生したものと同程度であった（東大地震研 [課題番号：1509, 1510]）。

大地震の際に平野で発生する長周期地震動の即時予測の実現に向けた、高速計算環境による観測データと高速シミュレーション同化の実現可能性を数値実験により評価した。データ同化手法には、震度や津波の即時予測で広く活用されている最適内挿法を用いた。データ同化は、領域内のK-NET、KiK-net強震観測データを用いて行い、地震発生から30, 50, 70, および90 秒までデータ同化を行った後に、高速計算により未来（地震発生から160 秒後）の長周期地震動を予測した。予測精度と猶予時間にはトレードオフがあるが、データ同化が進むにつれ、長周期地震動の振幅と継続時間が良く予

測できることが確認された。評価領域外で発生した、2011年東北地方太平洋沖地震においても本即時予測手法が適用できることを確認した。データ同化完了後に100秒後の波動場の予測に要する時間は、東大と筑波大が共同運用するOakforest-PACS 計算機の並列計算（2048 CPU）で12.4秒であった。これは、長周期地震動の伝播にかかる実時間よりずっと短く、観測データの取得に合わせて即時予測を繰り返し進め、予測の精度を高めることが可能である。差分法計算の解像度（格子サイズ）を2倍に広げ、長周期地震動の評価対象を5.4秒以上に限定すれば、より小規模の計算機システム（128 CPU 程度）でも同程度の時間で実施可能である（東大地震研 [課題番号：1516]）。

昨年度の臨時観測では、約100mしか離れていない観測点でも、ゆれの振幅が約2倍になることを示した。今年度は、その観測領域を広げて、14ヶ所で臨時観測を行ったところ、ゆれの大きさの分布に特徴が見られた。近傍のボーリングデータと比較をしたところ、揺れの大きさは、浅部の地質構造との関係が深いことが明らかになり、揺れの推定には、より高分解能な地盤構造の違いを考慮する必要があることを確認した（東大地震研 [課題番号：1514]）。

安政江戸地震は、安政二年十月二日（1855年11月11日）夜に発生し、関東地方南部に甚大な被害をもたらした地震である。薩摩の島津家に伝来した「江戸大地震之図」（東京大学史料編纂所蔵島津家文書）には地震に襲われた江戸市中の状況が描かれており、地震後に発生した火事で被害がさらに拡大した様子を見とることができる。関連する文献史料をあわせて検討した結果、絵巻にある火災の場面は、薩摩藩芝屋敷の北に位置し一町が全焼した町を描いたものと判断される。被災した屋敷や町など特定の場所を描いていると判明したことで、絵巻における被災状況の描写の史料的価値が認められ、地震に起因しない火災がたびたび起きていた江戸で、火災後に復興していく市中の様相を知るうえでもこの絵巻を史料として活用できる可能性が示された（東大地震研 [課題番号：1513]）。

房総半島南部の海岸段丘について、おもに平砂浦地域で地中レーダ探査および掘削調査を実施し、また詳細DEMの解析を行った（産総研 [課題番号：5004]）。

4. 今後の展望

首都直下地震が発生した場合には、我が国の首都機能や経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高いことから、総合的な研究として優先して推進するテーマの一つとされてきた。ただ、本計画を作る最後の段階で、この考え方が示されたため、解明のための研究、予測のための研究、災害誘因予測のための研究の三分野に、広くまたがるような総合的な研究課題がなかった。そこで、研究課題の中から、首都直下地震に関連した研究成果を集めて統合させることが、本総合研究グループの目標であるとしてきた。しかし、関連する研究課題数は多くはなく、総合的に研究を推進するという体制を組むこともできなかつたため、それらの研究成果を統合させることができなかった。

そこで、今後は、首都直下地震の発生による被害を軽減させるために、どんな研究が必要なのかを検討するための体制づくりから始める必要がある。首都圏という人口の密集地および政治経済の中心地での大地震発生が、どのような複合的な被害を引き起こしてしまうのか、首都圏が被災するということが、日本全体に与える影響といった視点もスコープに入れるべきであろう。そのような、理学だけでは対応できない様々な研究分野を総合的に推進させるような体制が必要であると思われる。

具体的な研究課題は、首都直下地震として想定される多様な震源について、発生メカニズムや発生可能性を評価する研究を行う。それらの地震が発生する場として、関東平野下の詳細な地盤構造やプレート構造を明らかにして、地震発生環境をモニターする研究を行う必要がある。さらに、多様な震

源モデルによる揺れの予測に稠密観測データや地震史料の情報を反映し、新たな地震動の予測手法の開発を目指す。また、関東平野の複雑な地殻構造を用いた大規模数値シミュレーションに基づいて、地震動を高精度に予測する手法を高度化する。そして、各項目の研究成果を有機的に結び付け、高度に集約化された社会環境下での防災リテラシー向上に資する総合的研究を実施することが必要である。

成果リスト

- Chigira, M. & Suzuki, K. 2016. Prediction of earthquake-induced landslides of pyroclastic fall deposits. In: Aversa et al. (eds.) Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice. Associazione geotecnica Italiana, Rome, 93-100. Invited paper.
- 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.
- Furumura, T., Maeda, T., and Oba, A. (2019), Early forecast of long - period ground motions via data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations, *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1029/2018GL081163>.
- Igarashi, T., Aseismic slip histories inferred from sequences of small repeating earthquakes beneath the Boso Peninsula, central Japan, American Geophysical Union Fall Meeting, T33F-0481, Washington, D.C., 2018.
- Komori, J., Shishikura, M., Ando, R., 2017, History of the great Kanto earthquakes inferred from the ages of Holocene marine terraces revealed by a comprehensive drilling survey, *Earth Planetary Science Letters*, 471, p74-84.
- Nakajima, J., and N. Uchida, Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip, *Nature Geo-science*, 11, 351-356, doi:10.1038/s41561-018-0090-z, 2018.

2 (4) 桜島火山噴火総合研究

「桜島火山噴火」総合研究グループリーダー 井口正人
(京都大学防災研究所)

桜島噴火総合研究グループは、桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究を中核として、ミュオグラフィーなどの新手法を適用しつつ、火山現象を解明し、低頻度大規模現象の再考も含めた事象分岐論理の構築と火山灰拡散予測研究を行うことにより最終的に火山災害軽減研究を推進する。

5年間の成果

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

桜島大正噴火の前駆地震の震度から、マグニチュードおよびエネルギーを算出し、前駆地震全体のエネルギーを 1.3×10^{14} Jと推定した。また、噴火開始後ではあるが、最大地震の桜島地震の震源位置を鹿児島測候所から南南東方向約6 kmの鹿児島市街地沖の極浅部に推定した。さらに、この地震のメカニズムを検討し、桜島の南西沖5 kmの深さ10 kmの正断層のメカニズムが最も観測波形と適合することを示した。

(5) 火山現象のモデル化

近年の桜島の活動を以下にまとめる。

昭和火口における噴火は2006年6月4日に58年ぶりに発生した。まず、桜島昭和火口噴火の前兆現象について述べる。1955年から繰り返されていた南岳におけるブルカノ式噴火活動は2001年以降低下したが、2003年からA型地震が南西部の深さ6-9kmや若尊火山周辺で発生するようになり、地震活動が高まった。また、2004年10月～2005年2月にかけて、GNSS観測によって基線長の顕著な伸長が観測された。2006年に入り、昭和火口周辺の噴気活動が高まるとともに、地表面の温度上昇と熱異常域の拡大が検出された。

次に、噴火活動の推移について述べる。2006年6月4日に始まった昭和火口における噴火は約2週間続いて終息した。2007年も5月から約3週間同様な噴火が発生した。2006年と2007年の噴火はマグマ水蒸気噴火であった。

2008年2月3日と2月6日に火砕流を伴う噴火が発生し、2008年は7月28日まで噴火が間欠的に発生した。2008年2月の噴火の前には、昭和火口周辺の噴気活動が活発化し、白煙は約1kmの高度に達した。

2009年から昭和火口におけるブルカノ式噴火活動が活発化し、噴火活動期は2015年6月頃まで続いた。この間に噴火活動の消長が見られるが、噴火活動活発化とほぼ期を同じくして顕著な地盤の膨張が検出されるという特徴がある(2009年10月～2010年5月, 2011年11月～2012年2月, 2015年1月～6月)。マグマ貫入と同時に噴火活動が活発化するの、開口型火道へのマグマ貫入の特徴といえよう。

2015年8月15日には急速な地盤変動と火山性地震の群発現象が発生したが、噴火活動に直接的に結び付かなかった。先に述べた開口型火道へのマグマ貫入では、等方的な膨張が見

られるのに対し、2015年8月15日の地盤変動では、北西-南東方向への伸長が卓越することから、北東-南西方向に走向をもつ開口割れ目へのマグマの貫入モデルが提示された。

その後、昭和火口における噴火活動は著しく低下した。2017年4月以降に、噴火発生回数は持ち直したが、2017年11月以降は、南岳において噴火活動が発生するようになり、昭和火口の活動は停止した状態にある。

このような活動の下でデータの蓄積が進んだ結果、以下の知見が得られた。

[1]昭和火口において発生する個々の噴火の約90%について前駆する山体膨張と噴火に伴う収縮が観測された。噴火発生に先行する伸長時間、伸長量、伸長量と収縮量の比について統計解析を行ったところ、先行伸長継続時間の頻度、伸長量および伸長速度の頻度、伸長量と収縮量の比の頻度は対数正規分布を示す。これらのことは、爆発に先行する伸長継続時間から発生時刻を、また、膨張量から爆発の規模を確率的に予測することが可能であることを意味する。さらに、噴火発生に先行する伸長ひずみは時間の経過とともに減速、停滞することが多い。この時、BH型地震（卓越周波数5Hz）が加速度的に多発する場合があるので、この場合は、噴火発生時刻の予測が可能となる。

[2]GNSS、水準、傾斜・ひずみの複合的地盤変動観測から、昭和火口噴火活動期の地盤変動は、始良カルデラ下深さ10kmと北岳下4kmの2つの増圧源および南岳下1kmの減圧源によりモデル化された。始良カルデラおよび北岳にはマグマは供給され体積が増加したが、噴火口に近い南岳下では活発な噴火活動を反映して供給量を放出量が上回りマグマの体積が減少した。

[3]2009年～2016年に、反射法探査を毎年繰り返すことにより、始良カルデラから桜島へのマグマの供給路があるとされる桜島北東部において、2009年10月以降の高温で新鮮なマグマ貫入によるマグマ溜まりの速度低下と解釈できる地下構造の時間変化を検出した。人工地震探査に加え、地震波干渉法による地下構造の変化の抽出を試み、波形の相関係数の変化が捉えられつつある。

[4]2009年のマグマ貫入期に先行して同年4月～5月には昭和火口の東4kmにある黒神観測井の温泉ガス中の二酸化炭素および水素の濃度が急激に増加した。これは、2009年のマグマ貫入期に先行する唯一の現象である。また、2009年10月～2010年5月、2015年1月～6月のマグマ貫入期には、噴出物のガラス中の二酸化ケイ素の組成は低下し、玄武岩マグマの関与が指摘されている。火山灰に付着する塩素イオンと硫酸イオンの比は2009年10月以降のマグマ貫入期に対応して増加した。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

先に述べた昭和火口の噴火活動期において得られた知見に、1914年大正噴火、1946年昭和噴火、1955年～2005年の南岳山頂噴火に関する考察を加えることにより、桜島火山へのマグマの貫入速度を分岐条件とする経験的な噴火事象分岐論理を構築した（図1）。南岳を中心とする既存火道系へマグマが貫入する場合は、ブルカノ式噴火（ $1-8 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$ ）>連続火山灰放出（ $\sim 1 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$ ）>ストロンボリ式（ $0.2-2 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$ ）噴火の順にマグマの貫入速度が大きい。昭和火口のブルカノ式噴火はこれらよりもさらに小さく

10⁴m³/日のオーダーに過ぎない。ただし、溶岩噴泉のような噴火に至る前は、10⁵m³/日のオーダーに達し、さらに昭和噴火のような2億 m³級溶岩流出では、10⁶m³/日のオーダーと推定される。一方、新規火道を形成する場合、10⁶m³/日級のマグマ貫入では、噴火は発生していない（2015年8月15日マグマ貫入イベント）が、プリニー式噴火から始まる山腹噴火である大正噴火では、マグマの貫入速度が2×10⁸m³/日と推定された。地盤変動がほとんど検出できていない場合（2006年、2007年昭和火口噴火）は、温度上昇、噴気量の増加などが指標として考えられる。この場合の噴火様式は、水蒸気噴火もしくはマグマ水蒸気噴火である。

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

降下火山灰の即時予測手法として以下の成果が得られた。[1] 桜島の火口を取り巻くように設置された13台のディストロメータによって降下火山灰量及び密度がリアルタイムで把握できるようになった。[2] XバンドMPレーダーによって、霧島新燃岳、桜島、口永良部島、諏訪之瀬島の噴火に伴う噴煙の高度等の外形情報、噴煙柱形成、移流・拡散過程が把握できた。特に、冠雲によって噴煙が目視できない時でも、レーダーにより噴煙を可視化できるので、悪天候時における有効性が示されたといえる。光を使用するライダー観測は極めて希薄な噴煙も捕捉できるところに特徴がある。静穏時でも微小な火山灰粒子を含む白煙が放出されていることが確認され、偏光消度から粒子の形状が推測可能であることが示された。火山噴火の噴煙をGNSS衛星からの電波が通過する際に、搬送位相遅延量とSNRに顕著な変化があることが桜島、阿蘇山の噴火で検出され、衛星と受信機を結ぶ異常伝搬経路の交線から噴煙高度が推定された。[3] XバンドMPレーダーによって観測された桜島噴火の噴煙の反射強度の空間分布を地上降灰量分布と対比することにより、レーダー反射強度から地上降灰量を求める経験式が得られた。[4] PUFFモデルを用いたシミュレーションによって得られる降下火山灰予測量と観測データを対比して、良好な結果が得られた。[5] 噴火に伴う地震動振幅と地盤変動の線形結合から火山灰放出率と噴煙高度を決定し、それを入力条件とする火山灰拡散予測シミュレーションを実装した（図2）。

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

噴火活動が激化している桜島において、火山噴火予知研究成果をレビューするセミナーを開催するとともに、噴火事象系統図にリストアップされる桜島の噴火の規模と様式について、前駆活動及び火山噴火推移の事象の発現に沿った避難計画策定の可能性について検討した。前兆事象と噴火規模・様式との対応は上記2.（4）に述べたとおりである。これまでの観測研究から、始良カルデラにおけるマグマの蓄積量は、最近10年間で1914年の大正噴火のマグマ量に匹敵する量に達していることが明らかとなっている。したがって、防災対策を要する噴火規模としては、まず、大正噴火級を想定した。大正3年の噴火に前駆する活動では火山性地震のエネルギー積算量が10¹⁴Jに達するなど、顕著な違いが見られるので、地震エネルギー積算量は前兆事象と噴火規模・様式との対応において判断条件となる。大正噴火前の住民の証言から噴火に至る前駆過程を考察し、それに基づいたシナリオに沿って自治体の机上防災訓練が行われた。

本研究課題においては、現在の避難計画でも1914年大正噴火級で避難が必須とされる桜島島内よりもさらに広域における大量降灰からの避難について5年間かけて検討した。まず、対象区域において広域避難を実施する場合の対象人口及び避難に要する時間を算出した。その後、住民の避難意向アンケートを実施し、避難する住民の人口を限定したうえで、シミュレーションを行い。長距離避難の意向を持つ20%の住民が避難するのに要する時間は約5時間という結果を得た。一方、大量降灰を想定した避難の場合、影響を受ける区域とその人口は気象条件に大きく依存する。最近の長期間の気象条件を考慮したシミュレーションを行い、夏季において対象人口が大きく増加する結果を得た。

さらに、噴火災害時における早期復旧計画についても検討した。2011年霧島新燃岳噴火について、降灰量と道路の通行規制の有無の関係を機能的フラジリティ曲線で近似し、降灰量に対する通行規制の確率分布を求めた。これを用いて、噴火による交通量の初期低下率を把握することが可能となる。さらに、道路の清掃時間、交通量、交通量の低下率の積をすべての道路について足し合わせたものを目的関数として、最適な交通ネットワークの復旧分析を行った。ここで得られた機能的フラジリティ曲線は他の火山にも応用可能であり、噴火発生前のハザード評価に活用できる。

平成30年度の成果

今年度の成果として特筆すべきものとして以下の事項があげられる。①火砕流の発生は、地盤変動の収縮期（マグマからの脱ガスが進行した一連の活動期の後半）に多いことが指摘できた。②2015年8月15日の開口割れ目へのマグマ貫入に伴う火山性地震について、震源域の深部への延伸と開口割れ目の開口方向に整合的なメカニズム解が得られた。③XバンドMPレーダーによる観測により、口永良部島などの噴煙観測事例が充実してきた。④大規模噴火を想定した際の要避難人口の既設依存性が指摘できた。

これまでの課題と今後の展望

始良カルデラでの地盤の隆起は依然として続いており、今後10～20年で、1914年噴火時に沈降した地盤は噴火直前の状態に回復すると予想される。噴火ポテンシャルとしてはすでにVEI5級の噴火の発生が指摘できるので、大規模噴火の直前の変化を捉えることが最も重要である。1914年噴火の前には、南九州における地震活動が活発化したとされており、噴火が近づくにつれ、異常現象が把握される範囲が局在化し、強度を増した。始良カルデラから50km程度の範囲の下部地殻・上部マントルの深さまでの地震活動の推移の検討や、桜島北東部および南西部における詳細な地盤変動の観測が必要である。

平成26年から30年までの計画においては、桜島で発生している昭和火口の噴火を念頭に、降下火山灰の影響の即時予測を行ってきた。今後、発生する噴火の規模をVEI4または5級に設定するのであれば、多様な災害形態を考慮しておく必要がある。代表的なものに火砕流と溶岩流があげられる。火砕流の発生予測についても現計画でも研究を行っているが、ハザードとしては、火砕流の流下範囲の予測に広げていく必要がある。また、噴火が終息しても土石流の発生は続くので、土石流の発生予測の研究も必要である。特に、大規模噴火を想定すれば、土石流の発生域は桜島から周辺30km程度の距離まで広がると思われるので、これまで土石流の発生が想定されていない地域においても土石流ハザードの評価が必要で

ある。実際、1914年噴火後には大隅半島の広い範囲で土石流や洪水が頻発している。

広域避難については、現計画においても取り扱っているが、避難の方法などより高度化した避難に関する研究が必要である。重要なことはインフラの復旧方法など、レジリエンスに関する研究である。すでに降灰後の道路啓開など、火山灰除去に関する問題は行政も注目しており、効率的な火山灰除去順序などを提案していく必要がある。特に、交通網においては、道路だけでなく、鉄路、航空機、海上交通など多岐にわたり、その特性を考慮した研究が必要である。航空路が影響を受けやすい広域火山灰の拡散については、日本全土に及ぶ可能性も十分あり、火山災害を特定の地域の問題として片づけるわけにはいかないであろう。

大規模噴火の発生は決して桜島だけの問題ではない。ここでは、住民の避難を必要とする規模の噴火と定義しなおしてよい。火山噴火予知計画が開始された1974年以降でも住民の避難が実施された火山は、十勝岳、有珠山、伊豆大島、三宅島、雲仙岳、桜島、口永良部があり、決して特殊事例とは言えない。桜島の大規模噴火では火山と都市域の問題があげられるが、完全な離島である伊豆大島、三宅島、口永良部島では状況が異なる。最近、中山間地での避難の例はないが、今後その必要が生じることは、十分考えられる。地理的、社会的環境による対策の違いなど幅広い研究をめざす必要がある。

成果リスト

- Araya, N., M. Nakamura, A. Yasuda, S. Okumura, T. Sato, M. Iguchi, D. Miki, N. Geshi, 2019, Shallow magma pre-charge during repeated Plinian eruptions at the Sakurajima volcano, Scientific Reports, doi:10.1038/s41598-019-38494-x.
- 堀田耕平・井口正人, 2018, 2017年の南岳爆発に前後する傾斜ひずみ変化, 京都大学防災研究所年報, 61B, 324-329.
- 井口正人・中道治久・為栗 健・堀田耕平・園田忠臣, 2018, 2017年8月桜島溶岩噴泉活動に伴う地震活動及び地盤変動, 京都大学防災研究所年報, 61B, 318-323.
- Iguchi, M., 2018, Volcanic Activity of Sakurajima Monitored Using Global Navigation Satellite System, Journal of Disaster Research, 13, 3, 518-525, doi:10.20965/jdr.2018.p0518.
- 風間卓仁・山本圭吾・平良真純・大島弘光・前川徳光・岡田和見・園田忠臣・井口正人, 2018, 桜島火山における繰り返し相対重力測定(2017年5月~2018年2月), 京都大学防災研究所年報, 61B, 330-336.
- Muramatsu, D., K. Aizawa, A. Yokoo, M. Iguchi, T. Tameguri, 2018, Estimation of Vent Radii From Video Recordings and Infrasonic Data Analysis: Implications for Vulcanian Eruptions From Sakurajima Volcano, Japan, Geophysical Research Letters, 45, 12829-12836, doi:10.1029/2018GL079898.
- Murata, T., M. Iguchi, 2019, Deep Modular Multimodal Fusion on Multiple Sensors for Volcano Activity Recognition, Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases, doi:10.1007/978-3-030-10997-4 37.

- 中道治久・井口正人・下村 誠・竹中悠亮, 2018, 南九州の火山における小型Xバンド偏波レーダーの展開と噴火観測事例, 京都大学防災研究所年報, 61B, 337-343.
- Poulidis, P, A., T. Takemi, A. Shimizu, M. Iguchi, S. Jenkins, 2018, Statistical analysis of dispersal and deposition patterns of volcanic emissions from Mt. Sakurajima, Japan, Atmospheric Environment, 179, 305-320, doi:10.1016/j.atmosenv.2018.02.021.
- Shimura, T., M. Inoue, H. Tsujimoto, K. Sasaki, M. Iguchi, 2018, Estimation of wind vector profile using a hexa-rotor unmanned aerial vehicle and its application to meteorological observation up to 1000 m above Surface, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 35, 8, 1621-1631, doi:0.1175/JTECH-D-17-0186.1.
- Syarifuddin, M., S. Oishi, H. Nakamichi, M. Iguchi, 2018, Spatiotemporal distribution of rainfall in mount Sakurajima based on weather radar, Annual journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 63, I 187-192.
- 為栗 健・井口正人, 2018, 桜島火山昭和火口で発生する火砕流の特徴, 京都大学防災研究所年報, 61B, 312-317.
- Tameguri, T., M. Iguchi, 2019, Characteristics of micro-earthquake swarms preceding eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano, Japan, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 372, 24-33, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2019.01.016.
- Tanaka, L, H., M. Iguchi, 2019, Numerical Simulations of Volcanic Ash Plume Dispersal for Sakura-Jima Using Real-Time Emission Rate Estimation, Journal of Disaster Research, 14, 1, 160-172, doi: 10.20965/jdr.2019.p0160.

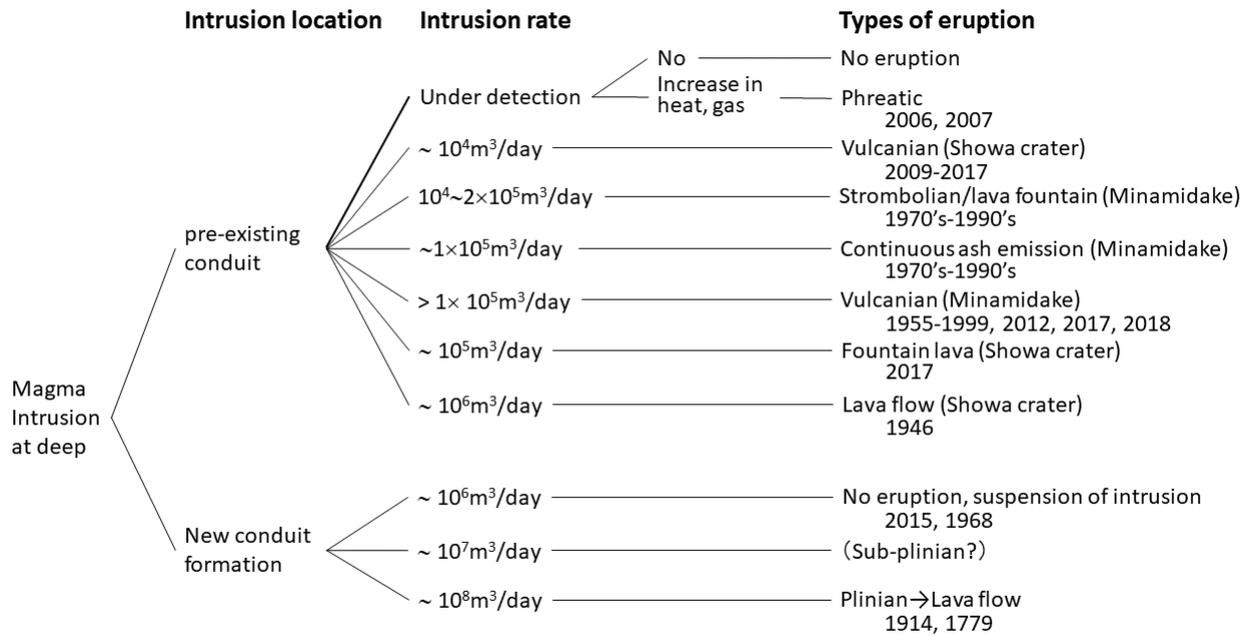


図 1. マグマ貫入速度と噴火様式，規模との関係（京都大学防災研究所 [課題番号：1908]）

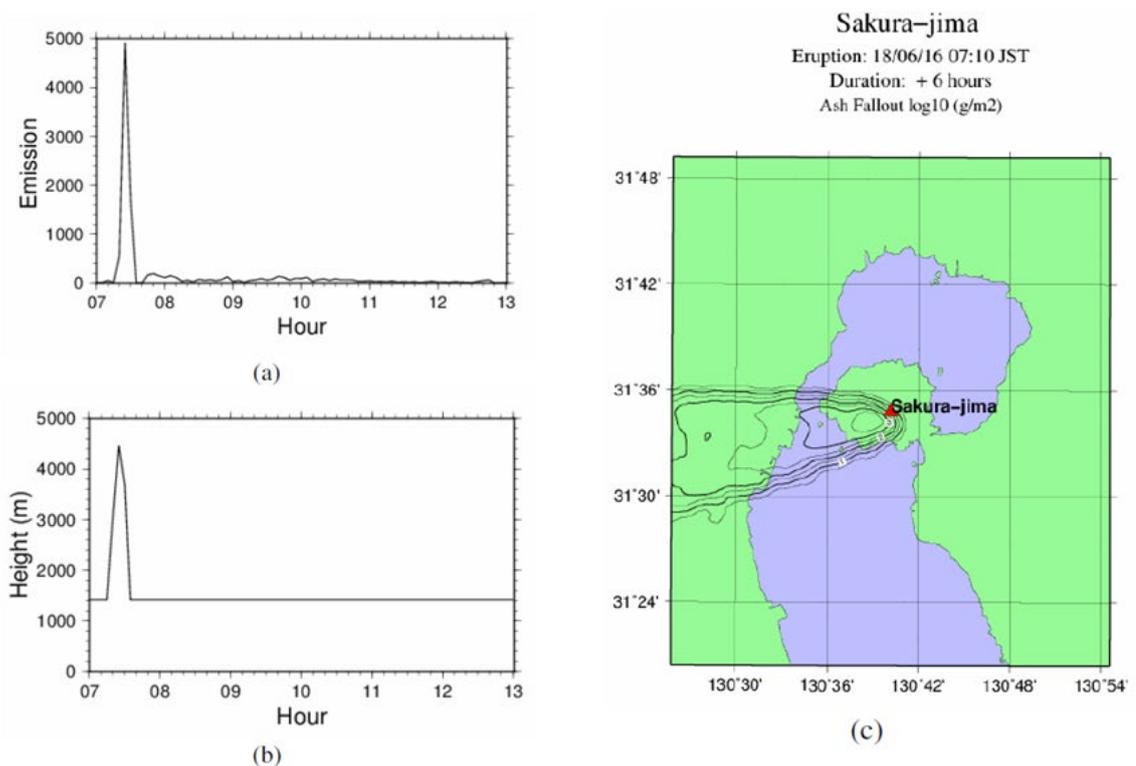


図 2. 桜島南岳において発生した爆発により放出された火山灰の拡散シミュレーション。a: 地震動と空気振動から算出された噴出率，b: 経験式を用いて噴出率から算出された噴煙高度，c: 降下火山灰量。等高線は，単位面積当たりの降灰量 g/m² の対数を示す（京都大学防災研究所 [課題番号：1913]）。

3 拠点間連携共同研究

東京大学地震研究所・京都大学防災研究所 拠点間連携共同研究委員会

委員長 松島信一
(京都大学防災研究所)
副部長 佐竹健治
(東京大学地震研究所)

これまでの地震・火山観測研究計画では、地震や火山噴火の発生の予測を最大の目標とし、それにより地震や火山噴火による災害の軽減を目指してきた。しかし、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の発生により多くの犠牲者が出たことを踏まえ、地震や火山噴火の科学的な予測が極めて困難であっても、現在の地震学や火山学には災害軽減に役立てられる多くの知見が集積されていることから、平成26年度から開始された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」(建議)において大きく方針を変更した。即ち、地震や火山噴火の発生予測の実現を重点とした方針から、それらの予測を目指す研究を継続しつつも、地震・火山噴火災害をもたらす誘因の予測研究も組織的・体系的に進める方針に転換した。そのため、地震学や火山学を中核としつつも、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野の研究者が参加して、協働して推進することになった。

これまでの建議に基づく観測研究計画では、自然現象である地震発生や火山噴火現象の理解に基づきそれらの科学的な予測を目指すという考え方から、「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所が中核となって計画を推進してきた。しかし、災害や防災に関連する研究者と協働して計画を推進するためには、東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所とが連携して、計画を進めることが有効であるとの結論に至り、両研究所が協働し、それぞれの分野の共同利用・共同研究拠点として、連携して共同研究を進めることとなった。具体的には、両拠点の研究者が中核となって建議に沿った大テーマを決め、それを実現するための研究について全国の研究者からの提案・参画を募集して全国規模の共同研究を進める「参加者募集型研究」と両拠点がそれぞれ関連が深い地震火山研究コミュニティと自然災害研究コミュニティの2つの学術コミュニティに呼びかけ建議の主旨を踏まえたボトムアップ研究を公募する「課題募集型研究」を平成26年度から開始した。

1. 参加者募集型研究

5年間の成果の概要

参加者募集型研究については、平成26年度の拠点間連携共同研究の開始時に、主として両研究所の中堅研究者からなるワーキンググループで議論し、南海トラフで発生が懸念される巨大地震のリスク評価の精度向上を目指した様々な分野の研究を推し進めることが重要であると合意し、平成26年10月6日～7日に地震研究所で研究集会「地震・火山科学と総合防災学の両共同研究拠点主催シンポジウム 南海トラフ巨大地震の災害リスク評価 ―社会の影響から地震発生まで振り返り、評価の不確実性と影響評価について考える―」を開催した。そこでは、巨大地震の震源過程、震源から居住地域までの深部地下

(地殻)構造・波動伝播, 強震動, 浅部地下構造, 津波, 構造物等の特性をそれぞれの分野の専門家が議論して, それぞれの部分の想定や評価における精度や不確かさを議論するとともに, それらがどのように関連し, 最終的な被害につながるかの科学的なリスク評価方法の確立を目指すことを確認した。さらに, リスク評価に基づき, 事前の災害情報, 災害発生後の対応等のあり方など, 巨大災害の発生から災害発生後の対応まで, 巨大地震に伴い予測される一連の事象に関して, 防災・減災に向けて機能するための研究を発展させることを目指すことになった。主要テーマを「巨大地震のリスク評価の精度向上に関する新パラダイムの構築」として, 全体の研究を, (1) 想定される南海トラフ地震の震源過程, (2) 深部地下(地殻)構造とそれが波動伝播に及ぼす影響, (3) 強震動予測手法の高度化, (4) 浅部地下構造が地震動に及ぼす影響, (5) 津波予測モデルと津波被害予測手法, (6) 構造物の被害予測手法の高度化, (7) 災害のリスク評価と意思決定, (8) 災害情報の外部発信とステークホルダの関与, (9) コンピュータシミュレーションを用いた新たな地震リスク評価手法の開発, の9分野に分け, それぞれの分野で研究を深化するとともに, 各分野の相互連携を図る地震リスク評価プラットフォーム構築を目指した。

平成27年度は, 上記9分野のうち, (7) 災害リスク評価と意思決定および(9) コンピュータシミュレーションを用いた新たな地震リスク評価手法の開発を特定分科研究とし, それぞれの分野の全国の研究者と協力して研究を進めるとともに, 他の7つの分野については総括研究として並行して推進し, 定期的に情報交換を行いリスク評価手法の構築に努めることとなった。平成28年度は, 前述の2分野に加え, (1) 想定される南海トラフ地震の震源過程および(6) 構造物の被害予測手法の高度化も特定分科研究とした。平成29年度は, 平成28年度に加えた2分野に(4) 浅部地下構造が地震動に及ぼす影響(巨大地震時における地盤増幅率の予測手法の高精度化)(拠点間連携共同研究[課題番号:2990])および(3) 強震動予測手法の高度化(震源モデルに着目した巨大地震に伴う強震動予測の高度化)(拠点間連携共同研究[課題番号:2991])を加えた4分野について特定分科研究を進めた。平成30年度は, 平成29年度に加えた2分野に, (8) 災害情報の外部発信とステークホルダの関与(ばらつきのある被害リスク評価をふまえた防災計画の検討)(拠点間連携共同研究[課題番号:2951])および(7) 災害リスク評価と意思決定(将来時点でのエクスポージャ予測のためのデータ解析とモデル化手法の構築)(拠点間連携共同研究[課題番号:2952])を特定分科研究として推進した。各年度とも特定分科研究と並行して総括研究を推進し, 特定分科研究でえられた成果を総括研究に組み込むことで手法の高度化を図って来た。

平成27年度から平成30年度までの各年度において, 参加者募集型研究に申請された研究提案と参画グループについて, 東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会により審査され, 参加者募集型研究の趣旨に適合する研究提案・参画グループが採択された。

平成30年度の成果の概要

(1) 総括研究

総括研究(拠点間連携研究[課題番号:2975])は「巨大地震のリスク評価の精度向上に関する新パラダイムの構築」と題し, 平成29年度に引き続き, (1) 震源過程, (2) 伝播・

深部地盤構造，(3)強震動予測，(4)浅部地盤構造，(5)構造物被害予測，(6)リスク評価の研究グループに分かれ，それぞれの分野におけるリスク評価の不確かさの要因についての検討を進めるとともに，これらの知見を統合するための(7)プラットフォーム構築グループおよび(8)ステークホルダの参画に関する研究グループにおいて，リスク評価およびその不確かさに関する検討を行った。

震源過程および強震動予測について，南海トラフ巨大地震の震源像構築に関し一様な断層の滑りモデルから震源モデルの高度化を図るにあたり，強震動生成域を考慮した場合の強震動予測に関する問題点を整理した。深部地盤・伝播経路については，過去に南海トラフに沿った海域で行われてきた人工震源構造調査および自然地震観測の結果について，陸域の地震観測データと合わせて南海トラフ全域にわたる海陸統合した地震波速度構造の再解析が進められている。紀伊半島沖では新たに人工震源構造調査も進められ，また，自然地震観測が計画されている。これらの結果について検討を行い，さらなる構造解明のための観測計画について策定を行なった。浅部地盤構造については，公開地盤情報および過去の地震記録を用いて，地盤の強非線形性を厳密に考慮した逐次非線形地盤応答解析（非液状化解析および液状化解析）を多数実施した。その結果に基づき表層地盤の加速度増幅率を算出したところ，入力地震動のレベルに応じた増幅率の変化に加え，液状化解析の場合には液状化指数（PL値）や液状化危険度指数（LRI）といった液状化指標に増幅率が大きく影響されることがわかった。構造物被害予測について，1900年以前に建てられた古民家の引き倒し実験およびその解析を行い，その静的非線形挙動を把握した上で古民家の地震被害予測モデルを構築し，その妥当性について検討を加えた。リスク評価に関しては，特定の市区町村を対象に南海トラフ地震による影響を受けるエクスポージャ（戸建住宅）の情報を整備した。また，過去のエクスポージャの経時変化をもとに将来のエクスポージャを予測したうえで築年数に応じた地震脆弱性関数を適用し，将来の地震リスクの経時変化を評価した。また，西日本広域の震源データをアップデートし，確率論的地震ハザード解析の計算環境を整備した。プラットフォーム構築については，地震リスク評価のばらつきの要因について分析を行うとともに，評価に用いるモデルの違いによるばらつきの違いの公正な比較のための検討を行った。また，地震時の総合的な影響評価にむけて，病院建物の被害の程度による，医療行為に対する影響評価について地理空間情報を用いて評価した。災害リスク情報に関しては，災害リスク評価のばらつきを理解するため，様々な震源モデル（6パターン），強震動予測モデル（5パターン），表層地盤増幅率（3パターン），倒壊率を組み合わせて，評価結果のばらつきを容易に理解することが可能な表示システムの構築を行った（図1）。またばらつきのある災害リスク評価結果を防災計画の策定に活用するという観点から，命を守る，財産を守る，業務・生活・地域を守るという3つのレベルの達成目標に応じたハザードシナリオ選択の考え方についての整理を行った。

(2) 特定分科研究

特定分科研究（その5）「巨大地震時における地盤増幅率の予測手法の高精度化」（拠点間連携研究〔課題番号：2990〕）では，技術者の特性に依存した解析パラメータのばらつきが地震応答特性の評価精度に及ぼす影響の検討の結果，解析パラメータの設定のばらつきの程度や，そのばらつきが解析結果に及ぼす影響について検討した。その結果，地盤だ

けでなく、解析全体のパラメータの設定方法を含めた議論が必要であり、機械的に地盤物性のパラメータを変更した場合は、同じ土質試験結果を対象に設定したパラメータであっても、技術者の違いにより大きな解析結果の違いが生じる場合があることが確認された。また、表層地盤構造のモデル化手法の統合解析による地盤増幅特性評価の高度化について検討した結果、微動アレイ探査結果に加えて表面波探査による高周波数帯域の位相速度も逆解析から第1層目の V_s が既往の研究に比べて小さく推定される結果となった。さらに、地盤の非線形性を考慮した表層地盤増幅率の評価法に関する検討では、非液状化解析により得られた地盤増幅率と周期比の関係では、周期比が0.5付近で、増幅率は最大値をとり、地盤増幅率の変動幅は、入力波が増加すると、小さくなる。また、液状化解析により得られた地盤増幅率と周期比の関係では、入力波が増加すると、地盤増幅率の変動幅は小さくなる傾向にあり、特に、入力地震動が800 galのとき、増幅率はおよそ0.5となった(図2)。液状化解析時の地盤増幅率を評価するために、液状化判定指標を用いた場合、地盤増幅率と液状化指数の大小関係には明瞭な対応は見られなかったが、有効応力減少比を用いて過剰間隙水圧を直接考慮できる液状化危険度指数を用いた場合、地盤増幅率の変動幅は液状化程度で分類できた。液状化解析時の地盤増幅率は、入力地震動に関わらず0から2.5の幅で変動する。液状化危険度指数が大きくなるとき、地盤増幅率の変動幅は0から1.5と小さくなる(図3)。

特定分科研究(その6)「震源モデルに着目した巨大地震に伴う強震動予測の高度化」(拠点間連携研究[課題番号:2991])では、観測された強震動生成域(SMGA)からのPGA、PGVと距離との関係を、前弧・背弧を考慮した距離減衰式(GMPE)と比較した。ただし、観測データがSMGAからの距離を用いているのに対して、比較するGMPEは断層層最短距離が距離の関数として定義されている。2003年十勝沖地震では、観測されたPGAおよびPGVがKamae & Kawabe(2004)によって推定されたMw7.5相当のasperity(SMGA)からの地震波に起因するとして比較を行った。観測された地震動はPGA、PGVともにGMPEから予測される地震動よりも大きな値で、とりわけ近距離側でその差が大きかった。また本震のマグニチュードM8.3を用いて比較した場合、観測された地震動との誤差は小さくなったが同様の特徴が見られた。一方、2011年東北地方太平洋沖地震については、Kurahashi & Irikura(2013)によって5つのSMGAが推定されているが、そのうち対応するPGAとPGVが観測波形から明瞭に判別できる2つのSMGA(SMGA1:M7.55, SMGA3:M7.81)を比較するデータとして使用した。PGAは2003年十勝沖地震のケースと同様に、本震のマグニチュードM9.1を用いてもGMPEから予測された値が特に近距離側で過小評価となった。また距離減衰に関しては、観測された地震動が前弧側と背弧側で異なる傾きを持っているが、背弧側では特にGMPEで予測されるよりも強く減衰することが分かった。PGVについては、それぞれのSMGAのマグニチュードを用いた場合に過小評価となることが分かった。2011年東北地方太平洋沖地震によって各地で誘発された地震活動については、東北沖地震の発生前に震源域あるいはその周辺域において様々な地震活動変化があったことが明らかにされてきた。また地震発生から8年近くが経過し、地震発生直後には追いつかなかった膨大な数の地震に対する震源決定が進み、各地の地震活動変化に関する詳細な調査研究からその要因に関する考察がなされている。そこで東北沖地震の発生後に生じた地震活動変化について既往研究を交えながら概観し、それらの地震活動変化を引き起こした要因について整理した。

特定分科研究(その7)「ばらつきのある被害リスク評価をふまえた防災計画の検討」(拠点間連携研究[課題番号:2951])では、災害リスク評価結果は想定シナリオ・手法により変化する。したがって、防災計画を策定する場合には、災害リスク評価にばらつきが存在することを踏まえる必要がある。そのためには、災害リスク評価のばらつきを理解することが重要であり、また計画の目的に応じて適切な災害リスク評価結果を選択することが重要になる。本研究では、災害リスク評価のばらつきを理解するため、様々な震源モデル(6パターン)、強振動予測モデル(5パターン)、表層地盤増幅率(3パターン)、倒壊率を組み合わせて、評価結果のばらつきを容易に理解することが可能な表示システム(図1)の構築を行った。またばらつきのある災害リスク評価結果を防災計画の策定に活用するという観点から、命を守る、財産を守る、業務・生活・地域を守るという3つのレベルの達成目標に応じたハザードシナリオ選択の考え方についての整理を行った。

特定分科研究(その8)「将来時点でのエクスポージャー予測のためのデータ解析とモデル化手法の構築」(拠点間連携研究[課題番号:2952])では、人口および建物ストックの将来予測モデルの構築を目的として、高知県南国市における人口及び建物ストックの時系列分析を行った。まず、平成17, 22, 29年度の固定資産台帳から抽出したデータを用いて、疑似的に残存率を計算する方法を提案した。提案した方法は、築年数が同じであるが建築年が違う場合に異なるであろう残存率の違いを考慮できないものではあるが、異なる2期間のデータがあれば疑似的に残存率を計算できるものである。提案した方法で疑似残存率を計算した結果を図4に示す。一般的に平成22年度と29年度のデータを用いた場合のほうが残存率が高いという結果になっており、近年になるほど住宅の寿命が長くなる傾向を示した。次に、固定資産課税台帳から抽出されたデータと住宅基本台帳から抽出されたデータをアドレスマッチングすることで、住宅種別や築年数などの情報と世帯数や家族人数などの居住者に関する匿名情報とを統合した。統合したデータを用いて、住宅の種別ごとの居住率および1棟あたりの平均世帯数の時系列変化を分析した。その結果、専用住宅および共同住宅等での居住率が増加傾向にあること、専用住宅では1棟あたりの平均世帯数が減少傾向にある一方で、共同住宅等では増加傾向にあることなどが明らかになった。さらに、平成17, 22, 29年度の課税台帳を整理し、各年度における木造戸建住宅棟数と滅失、新設住宅棟数をまとめた。この結果を用いて、築年数ごとに住宅の滅失確率を計算した。また、過去のデータから住宅の1年あたりの変化率を推定した。住宅ストックの変化に対する数学モデルを構築し、上記で得られた過去の変化が将来に外挿できると仮定し、将来時点での木造戸建住宅の棟数および築年数分布を予測した(図5)。住宅戸数の変化率が一定とした今回の仮定の下では、平成29年においては築35年あたりにあったピークは、時間とともにピークが平準化されつつ築年数の平均値が大きくなっていくという結果が得られた。

2. 課題募集型研究

5年間の成果の概要

課題募集型研究では、地震や火山噴火の発生から、それによって引き起こされる災害の発生や推移を総合的に理解し、それを防災・減災に活かすための研究課題を広い視野から募集することとし、以下の分類で公募した。(1)地震・火山噴火の災害事例の研究、(2)地震・火山噴火災害発生機構の解明、(3)地震・火山噴火災害誘因の事前評価手法の高度

化，(4)地震・火山噴火災害誘因の即時予測手法の高度化，(5)地震・火山噴火災害軽減のための情報の高度化，(6)地震・火山噴火災害時の災害対応の効率化，(7)実践的人材育成の仕組みに関する研究の7項目である。

課題募集型研究については，平成26年度は新規12課題，平成27年度は新規4課題，継続8課題，平成28年度は新規11課題，平成29年度は新規6課題，継続5課題が東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会の審査を経て採択された。平成30年度は，6件の新規課題と1件の継続課題が採択された。5年間において，のべ53課題が採択された。

以下に，平成30年度の成果を示す。

平成30年度の成果の概要

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

「歴史被害地震の活動セグメントの推定とそれを考慮した強震動・建物被害シミュレーションに基づく震源破壊過程の推定に関する研究」(拠点間連携研究[課題番号:2953])では，横手盆地における地盤構造モデルの構築のためにまず常時微動観測によって得られたデータから，40.96秒の小区間を50%オーバーラップさせて観測時間分の区間を切り出し，区間毎に微動の水平上下スペクトル比(MHVR)を計算してその平均をとった。このとき，NS/UD，EW/UDはそれぞれ別々に計算している。また，交通振動等のノイズによる影響を避けるため，振幅の二乗和平均が大きい区間は除外した。横手市周辺や盆地北部の地点におけるピーク振動数が低くなっており，それらの地点では深い構造となっていることが推測できる。K-NET横手とJ-SHIS深部地盤地下構造モデルを参考に層構造モデルを作成した。ただし，層2の V_s は層1と層3の中間となるような値を設定し，層1~3の V_p ， ρ は V_s からLudwig et al.(1970)の関係式より算出した。次にアレイ3，4において，理論位相速度分散曲線および理論MHVRが観測したものに近づくような1次元地盤構造モデルを構築した。そして，この地盤構造モデルを基に，単点観測点においても観測MHVRのピーク振動数に理論MHVRのピーク振動数が近づくように地盤構造の推定を行った。その際，1次ピークはアレイの構造の層3~層9について，各層の層厚比を固定した上で層厚を変化させることで，2次ピークは層1，層2の層厚を定義することによってピークを再現した。推定した1次元地盤構造と方位依存係数，および重力図を参考に盆地境界(地震基盤深さ0m)を定め，これを考慮して推定した1次元地盤構造をGMTのsurface関数で補間することにより3次元地盤構造を作成した。スペクトルエレメント法の1つであるEFISPEC3D(De Martin, 2011)を用いて，推定した3次元地盤構造の増幅特性を評価した。ただし，層1の物性値を層2と同値としている。入力用モデルの作成にはCUBITを用いた。領域は経度緯度で140.17/140.83/38.97/39.83の範囲とし，メッシュサイズは，深さ20000m以深は5000m，以浅は1667m，盆地内は185mの有効振動数1.89Hzとした。このモデルにスペクトル振幅 $1\text{m}\cdot\text{s}$ のデルタ関数を変位として，深さ20kmからEW方向に平面波入射をした。有効振動数以上の影響を除くため，出力結果に1Hzのローパスとして4次のButterworthフィルターをかけている。1896年陸羽地震は横手盆地東縁断層帯の北部が活動したものと考え，横手盆地東縁断層帯北部の想定地震のケース1のシミュレーションを，推定した地盤構造モデルを用いて行った。比較のために，J-SHISモデルでの計算も併せ

て行った。推定地盤構造モデルはEFISPECにより、J-SHISモデルについてGMSによって行った。その結果、図6に示すように、推定地盤構造モデルによる計算では、震源近傍のみならず横手市の西側まで最大速度の大きい領域が現れた。これは、基盤が深くなっていることによることが原因であると考えられ、1896年陸羽地震の際に被害域が南に延びた主な原因であることが示唆される。

「歴史地震評価のための振動計測と引き倒し実験による伝統木造建造物の耐震性能評価」（拠点間連携研究〔課題番号：2954〕）では、今回実施した独自の古民家の微動計測値および過去の計測済み微動計測値、さらに文献に記載されている古民家の微動計測値を収集整理し、その年代別の共振振動数の平均値と分布を把握した。その結果江戸時代後期から明治時代中期までの古民家の振動特性に大きな変化がないことがわかった。築100年以上の古民家の静的挙動を把握するため、1888年頃に建てられた岡山県井原市の伝統構法木造民家IBR01に対して引き倒し実験を実施した。引き倒し実験は、IBR01のY5構面の高さ2271mmの梁に鉄骨を当てその鉄骨の4か所にワイヤーを接続し、梁間方向に均等に加力した。両端構面の層間変位が300mmになるまで加力した結果、最大水平力は102.2kNであり、ベースシア係数は0.32であった。最大変形時の水平力は約78kNであり、ベースシア係数は0.25であった。対象古民家は層間変形角0.13radまで変形させても自重を保持し続けたことから高い変形性能を有していることが確認できた。構造解析用ソフトSNAPを用いてこの引き倒し実験の再現解析を行った。解析結果ではX2Y1のNo.2-2の加力時の層間変形角がわずかに過大評価となった。また、建物全体が非線形した後の除荷ループを再現することはできていない。しかしながら、概ね実験結果のスケルトンカーブを再現することができており、既往の解析用モデルを用いることで、古民家の建物全体が非線形化するまでの挙動を再現できた（図7）。現行の一般木造建造物の年代別被害予測モデルの構築手法に従い、設計基準等から作成した標準建物モデルに対する古民家の耐力比および、耐力分布を決定することで、1900年以前に建てられた古民家の被害予測モデルを構築した。構築手順を以下に示す。

1) 建物の固有振動数の二乗と耐力が比例すると仮定する、2) 木造建物262棟の常時微動計測結果に基づく固有振動数とその建築年の関係から、各建築年に対する木造建物の平均固有振動数推定式を決定した、3) 各建築年に対する平均固有振動数推定式から求めた各年代区分別の固有振動数の二乗と一般木造建造物の年代別被害予測モデルの耐力比の関係から、古民家の耐力比を0.99と推定した、4) 古民家の固有振動数の二乗が対数正規分布に従うとし、未補強の古民家17棟の常時微動計測結果に基づく固有振動数から古民家の耐力分布を算定した。

ここで3)において、耐力比と固有振動数の二乗が平均的には比例することが確認できた。従って、1)の仮定は成り立つと考えられる。また、IBR01の引き倒し実験の再現解析結果を用いてIBR01の建築当初と推定される建物モデルを作成したところ、その耐力は本研究で作成した古民家の地震被害予測モデルの耐力分布の幅に収まっており、本地震被害予測モデルの妥当性を支持しているということがわかった。

（2）地震・火山噴火の災害発生機構の解明

「地震による被災から回復までの個人世帯生活被災度時間関数の構築」（拠点間連携研

究〔課題番号：2956〕）では、日本の標準世帯として木造戸建て住宅を想定した。住家被害を損傷度（Damage Index）、並びに7階級の損傷区分（Damage Level）で評価する関数（損傷度関数）を提案し、世帯住家の耐震補強の有無や補強程度を木造住家耐震評点をパラメータとすることで様々な世帯構成及び対策の条件設定が可能となった。また想定される地震動入力を確定的（想定PGV、あるいは想定震度）のみならず発生確率を考慮した扱いも可能とするものであり、住家耐震対策の将来的効果評価やリスク評価のばらつきも検討可能なモデルとなっている。住家被害及び室内散乱に伴う死傷程度を災害医療で用いられている多発外傷重症度指標（ISS）で評価するモデルを構築し、この指標導入により負傷の場合は、治療による全快時間が評価できるため、身体被害－回復モデルへと展開が可能となった。また、死亡発生確率が高い結果となった場合は、それを防ぐための住家耐震補強対策や室内安全化対策の条件を変えることで、対策の人的被害に与える影響が検討可能となった。個人世帯の家計のバランスシートをベースにした生涯資産評価モデルの標準世帯版を構築した。個人資産は世帯ごとに大きく異なるが、今回の提案は生命保険のライフプランを参考に標準的サラリーマン世帯をモデル構築した。個人世帯により収入支出項目は大きく異なるはずであり、項目数を今後増やすことにより汎用的利用が可能となろう。このライフプラン上で災害発生を想定することで、（1）住家損傷度評価モデルにより住家損傷を含む物的被害の算定と復旧（住家再建費用等）及び（2）身体的被害－回復モデルにより家族の身体的被害治療費等）等々との経済的因果関係がシミュレーション可能となった。また、災害時の公的助成金や地震保険の加入の有無等を考慮することで、資産回復の予測もシミュレーションでき、資産対策の重要性を伝えるツールとしても活用可能である。精神的な障害度をKesslerの指標（K6）で定量化し、その時系列変化を追跡する精神被害－回復モデルを提案した。種々のインシデントをモデルに組み込むことが可能となり、本人の物理的被害よりも家族が傷つくことによる精神的被害の大きさが計量された。高知県南国市を例に、夫婦30代・子6歳で築40年の戸建て木造住宅（持ち家）に住むサラリーマン世帯を想定する。地震動は内閣府が公表しているレベル2クラスの南海トラフ巨大地震のうち陸側に震源を想定した最大地震動の震度分布を与えると、全壊の確率は50%を超え、死亡発生確率14%を得る。この状態に避難生活と収入減少のインシデントが加わった場合の資産及び心の回復シミュレーションを行った。さらに事前対策として耐震改修と地震保険の加入及び事後の生活再建支援法による助成の減災効果をシミュレーションし、FCPの有用性を確認した。本年度は3軸（人的被害、経済被害、精神被害）による個別評価に留まった。しかしこのモデルにより、地震が原因の家屋倒壊→室内破壊→人的被害→資産損傷＋精神被害→回復の定量化と時間シミュレーションが可能となった。そしてそのシミュレーションの中に様々な対策を入れることで効果評価も可能となった。しかし今回は結果を十分に可視化するまでには至っていない。一般住民に活用してもらうには可視化も重要なことと考えている。今後は総合評価軸として原点から3次元面までの汎距離を求めることで総合評価が可能となろう。それを時間軸で動かすことで、ライフプランに拡張された対策－被災－回復が一望され、世帯個別の自助対策の診断ツールとなる。

「地震随伴火災の経時的な発生予測モデルの開発と出火防止対策の有効性評価」（拠点間連携研究〔課題番号：2957〕）では、地震火災の発生件数を予測するため、人口1人あ

たりの出火確率に着目し、これを計測震度や電力の供給率から説明するモデルを定式化するとともに、2011年東北地方太平洋沖地震の出火記録を再現できるよう、モデルの未知パラメータを同定することによって、プレート境界地震に伴う火災の発生件数の予測に利用可能な統計モデルを整備した。特に、感震ブレーカーといった出火防止対策の普及率向上による効果を評価できるよう、発火要因を(1)電気器具・電気配線、(2)ガス器具、(3)石油暖房器具、(4)その他の4つに分類し、それぞれについてモデルを構築した。上記で開発した出火モデルと地震動指標の距離減衰式を組み合わせることによって、南海トラフ地震の不確実性を考慮した日本全域での確率論的な出火シミュレーションを行った。ここでは、地震火災の発生件数に大きく影響する地震の不確実要因として、(1)震源域とそれが破壊された際の地震の規模、(2)地震の発生季節、(3)地震の発生時間帯、の3種類の要因を仮定し、各要因のバリエーションの組み合わせからなる合計72の地震シナリオに重み係数を設定することによって、地震火災の発生件数と条件付き超過確率の関係を表す出火リスクカーブを消防本部の管轄範囲ごとに推定した。その結果、南海トラフ地震が発生した際、全国のほとんどの消防本部では、保有するポンプ車の台数を上回る数の火災が発生する確率は非常に小さく、水道管や防火水槽の耐震化によって地震時においても消防水利を確保することができれば、放任火災の発生を高い確率で防ぐことができることを明らかにした。また、出火防止対策として、感震ブレーカーの普及率が25%に向上した場合の評価を行い、出火リスクカーブがどのように変化するかを確認した。

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

「強震動評価のための浅部地盤と深部地盤の統合モデル化に関する研究」(拠点間連携研究[課題番号:2955])では、2011年東北地方太平洋沖地震の際に周期1~3秒付近で大きな地震動が観測された東京湾西岸地域と小田原地域を対象として、1次元浅部深部統合地盤モデルを構築することを試みた。既存の地下構造情報と地震観測記録を用いて、周波数0.5-20Hzの観測増幅特性から、1次元浅部深部統合地盤モデルのS波速度構造と減衰構造を同定する。まず、Miyakoshi et al.(2019)による関東地域の強震観測点の中小地震の地震動記録のS波部分のスペクトル分離解析による東京湾西岸部の強震観測点(図8)での周波数0.5~20Hzの帯域の増幅特性を得た。この解析による増幅特性は、S波速度2.5km/sの地震基盤よりも浅い地層による増幅であると解釈されている。次に、J-SHISなどから既往の深部S波速度構造モデルを収集した。さらに、微動アレイ探査(地元ほか、2018)や検層による強震観測点直下の浅部S波速度構造モデルも得た。これらの既存の地盤情報を用いて、1次元浅部深部統合地盤の初期モデルを作成した。この初期モデルを参考にして、1次元重複反射を仮定して、ハイブリッドヒューリスティック法(山中、2007)による上記の増幅特性の逆解析によって、1次元浅部深部統合地盤モデルのS波速度およびQ値を同定した。なお、減衰構造のモデル化には、佐藤・山中(2010)によるバイリニア型のQ値モデルを仮定した。図8には、東京湾西岸部のUK1222で得られた1次元浅部深部統合地盤モデルを示す。比較のために、J-SHISの深部地盤モデル、J-SHISと微動アレイ探査による初期地盤モデルも示されている。UK1222の浅部深部統合地盤モデルは、J-SHISモデルよりも-200m程度の深度のS波速度が遅く、地震基盤深度は1km程度浅くなっている。図8に示した増幅特性では、得られた浅部深部統合地盤モデルが周波数0.8Hz

と 3Hz の観測ピークを最も良く説明していることが分かる。このように、1次元浅部深部統合地盤モデルは、既存モデルよりもより広帯域で地震動を説明可能なモデルとなっていることが分かる。図 9 に、足柄平野中央部 (NRD) で得られた 1次元浅部深部統合地盤モデルが示されている。図には、J-SHIS による深部地盤モデル、J-SHIS と微動アレイ探査による初期モデル、既存モデル (Tsuno et al., 2018) も比較されている。NRD の浅部深部統合地盤モデルは、J-SHIS モデルよりも深さ-100m 程度で S 波速度が遅く、地震基盤深度は 400m 程度浅くなっている。図 9 右に示した観測増幅特性では、得られた浅部深部統合地盤モデルが周波数 2Hz と 3Hz の観測ピークを最も良く説明している。一方で、1Hz 付近の観測サイト特性を説明できておらず、初期モデルなどの設定など、モデル化に再検討が必要であることを示唆している。以上のように、東京湾西部地域と小田原地域での 1次元浅部深部統合地盤モデルを構築することを試み、本研究による 1次元浅部深部統合地盤モデルは、既存の 1次元地下構造モデルよりもより広い周波数帯域で地震動特性を説明可能なモデルとなることを示した。本研究では、2018 年 9 月に胆振東部地震が発生したことを踏まえて、同地震の被災地域において共同微動観測を実施し、同地域の浅部深部統合地盤モデルを作成するための資料を得た。この地域では、気象庁や防災科研による強震観測点で震度 7 の強震記録が本震時に得られている。さらに、高井ほか (2018) によって余震観測が実施され、中小地震による強震動記録も得られ、堆積層による増幅効果が強震動特性に及ぼす影響が大きいことも指摘されている。鶴川町地域での強震観測点では微動アレイ探査と表面波探査が行われ、図 10 に示すように広い周波数帯域のレイリー波を位相速度を得ることができた。図には、既存の地盤情報に基づく理論位相速度も示されており、観測値との矛盾は少ない。今後、これらの結果と強震観測による地震観測記録を合わせて、上記のような分析を行うことによって、浅部深部統合地盤モデルを推定することを考えている。

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

「地震時の斜面災害軽減を目的とした地震波動伝播シミュレーションの利活用」(拠点間連携研究 [課題番号: 2994]) では、斜面崩壊による地震動の特徴の再現し、これまでの研究で明らかにした地形に対応した地震動の特徴を明らかにすることを目的に検討を行った。2017 年 5 月 19 日に発生した長野県飯山市における斜面崩壊に伴って周囲 50 km 程度の Hi-net 観測点において地震波が観測された。地震波は、継続時間 100-200 秒で約 3 km/s の伝播速度を持つ波群に加え、約 6 km/s の伝播速度で上下動成分のみに卓越し立ち上がり明瞭な波群から構成された。伝播速度約 3 km/s の波群に対し、振幅を用いた震源決定法 (Kumagai et al., 2010) によって波源を推定したところ、崩壊源から地震波が放射されたとして矛盾のない結果が得られた。一方、約 6 km/s で伝播する波の初動到達時刻を読み取り、JMA2001 (上野ほか, 2002) の P 波速度構造を仮定して震源決定をおこなったところ、崩壊源周辺に震源が決まった。このことから、崩壊源周辺においては、継続時間が長く徐々に震動が大きくなる力源と比較的短い時間間に大きな震動を作り出す力源の 2 種類が存在することが分かった。斜面崩壊による地震動において、短周期地震波の初動の読み取りが可能な地震波形記録は稀であり、移動土塊の対岸への衝突など何らかの斜面現象を反映している可能性がある点でも特筆すべき点である。また、表 1 に示

す、地震動が検知された斜面崩壊の特徴と地震動の特徴（2015/2016年厚岸町の事例を除く）から、高周波地震波の卓越周波数はおおむね1-10 Hz程度に分布し崩壊のタイプには大きく依存しないことがわかった。継続時間もおおむね30-200秒程度であり、イベントの長さを反映しているものと考えられる。周期10秒以上の長周期信号は、崩壊域が数百m四方にわたり厚さが20mを超えるような大規模な地すべり性崩壊で確認されることが推察された。さらに、斜面崩壊による地震動の再現の検討において、シミュレーションでは1 Hz前後の表面波が極めてよく卓越する理由について検討するため、地形にさまざまなローパスフィルターを施すことで、1 Hz前後の表面波がどの程度卓越するかを調べた。その結果、ある波長よりも短い成分をカットした地形においては1 Hz前後の表面波が生成されないことが結果となった。このことから、地形の短波長不均質による散乱がこのような表面波を作り出し、この効果は地表震源の場合に特に強調されることが分かった。

（5）地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

「建物個別の応答予測と揺れ継続時間のリアルタイム情報配信」（拠点間連携研究〔課題番号：2958〕）では、利用者が多い大規模な建物や災害拠点となる施設を対象として、固有周期や立地条件が異なる個別の建物の、（A）建物入力地震動のリアルタイム分類、（B）揺れ継続時間の予測、に取り組んだ。まず、東京大学地震研究所が公開している即時に地震の位置・規模・メカニズムを決定するシステム（GRiD MT、主開発者：鶴岡弘）を利用し、地震発生直後に災害拠点などで震源情報を有効利用する方法について議論した。図11は2018年に発生したモニタリング領域内で発生した地震に対して、GRiD MTにより決定された震源メカニズム解を示している。GRiD MTは、20～50秒の長周期波動場をリアルタイムにモニタリングすることにより、震源情報を必要とせず地震発生後ほぼ3分で震源位置・モーメントマグニチュード・震源メカニズムを同時に決定するシステムである。震源位置やそのメカニズムは直接には建物の被害把握などに用いることはできないが、地域全体の災害拠点となる建物においては、中長期的に避難準備や避難継続の判断、あるいは地域レベルでの復興支援体制の構築を考えるうえで、震源に関する情報を随時提供することは有意義と考えられる。震源情報については気象庁より地震後に発表があるが本震や大きな余震にとどまるため、より詳細な情報が提供された場合の利用法について、検討を続ける。またGRiD MTが持つ即時計算処理能力を用いた新たな防災情報の提供についても議論した。一方、揺れ継続時間の予測：建物利用者の心理的不安軽減を図るおよび地震収束後の復旧・退避行動の迅速化には、揺れの大小のみならず、揺れ継続時間の情報が必要である。国立研究法人建築研究所に依頼して、地震計を設置している建物の建物応答観測記録および観測地点の詳細な地盤情報の提供を受けた。次に、震源特性・震源距離・地盤特性、をパラメータとした、敷地地盤の影響等を含む建物の振動特性を考慮した揺れ継続時間を分析した。能島（2015）の既往研究を参考に、累積パワーが95%となる区間を揺れ継続時間と定義し（図12参照）、建物内で得られた観測記録の揺れ継続時間を求めた。図13は398地震の観測記録に対して、建物の基礎および上部階で得られた揺れ継続時間を示している。縦軸は揺れ継続時間（秒）の対数表記、横軸は地震のマグニチュードを示している。ばらつきはかなり大きいですが、マグニチュードが大きくなるにつれて揺れ継続時

間の中央値は大きくなる。また、建物の上部階の方が、基礎よりも継続時間が長くなる傾向が見られる。建物の高さや地盤条件に対しても揺れ継続時間との相関性が一部確認されているが、理論的解釈が成立するかも含めて、今後詳細について慎重に検討を進める予定である。

これまでの課題と今後の展望

これまでの地震・火山観測研究計画では、地震や火山噴火の発生の予測を最大の目標とし、それにより地震や火山噴火による災害の軽減を目指してきたが、災害の軽減への貢献が限定的であることから、現行計画では、地震・火山噴火災害をもたらす誘因の予測研究を新たに組織的・体系的に進める方針に転換した。そのため、地震学や火山学を中核としつつも、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野の研究者が参加して、協働して推進することになり、主に全国の工学、人文・社会科学の分野の研究者が拠点間連携共同研究を推進してきた。

拠点間連携共同研究の参加者募集型研究は、「巨大地震のリスク評価の精度向上に関する新パラダイムの構築」を主要テーマとして推進し、総括研究において震源から被害予測及びその伝達までを一貫して行い、総括研究で出た課題などを特定分科研究において掘り下げその成果を総括研究にフィードバックするとともにさらに総括研究で新たに出た課題を掘り下げる、という循環により研究の高度化を行ってきた。

今後は、参加者募集型研究を総括研究・特定分科研究として推進するとともに、課題募集型研究で提案された課題による成果などを取り込む枠組みを構築しつつ、両者を並行して行うことで、災害の軽減に貢献するための研究を継続して行う。そのためには、実際に被害を受ける構造物や社会システムに直接携わっている工学、人文・社会科学の分野が理学分野の成果を咀嚼して活用出来るような体制を整える必要がある。つまり、観測計画において、これまでの理学的な観測網の維持だけではなく、工学、人文・社会科学に必要な観測計画の立案が必要になると思われる。

成果リスト

(H30年度)

地元孝輔，山中浩明，是永将宏，津野靖士，2019，KiK-net 益城観測点におけるレイリー波位相速度と見かけ比抵抗の同時逆解析，平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演，P04.

土井一生・前田拓人・釜井俊孝・王功輝，2018，斜面崩壊によって励起された地震動波形の特徴－2017年の事例－，日本地球惑星科学連合2018年大会，HDS07-05.

Doi, I. ,2018, Development of a New academic field "Slope seismology", International Seminar on Geoscience and Disaster Mitigation in Japan and South Korea.

一井康二・植村一瑛・生頼直樹・兵頭順一，2019，地震応答解析における技術者の違いによるパラメータのばらつきの影響，平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会，D29.

- Ishibe, T., M. Miyazawa, Y. Ogata, H. Tsuruoka, and K. Satake, 2018, Seismicity Rate Change in Japan Following the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, AOGS 15th Annual Meeting, Hawaii Convention Centre, 3-8 June 2018, Honolulu, USA.
- 木内亮太・宮澤理稔・額綱一起, 2019, 沈み込み帯巨大地震の強震動生成域からの地震動と既存予測式の比較, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D31.
- 河野祐哉・西嶋一欽, 2019, 過去の統計データに基づく高知県南国市における木造戸建住宅の棟数および築年数分布の将来予測, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, B29.
- 河野祐哉・西嶋一欽, 2018, 高知県南国市を例とした建物ストックの時系列変化の分析, 日本建築学会2018年大会学術講演梗概集, F, pp.93-94.
- 増田竣介・佐伯琢磨・松島信一・西嶋一欽・河野裕哉, 2019, 南海トラフ地震による高知県南国市における主要な病院の建物被害予測に基づく影響評価, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P03.
- 増田竣介・佐伯琢磨・松島信一・西嶋一欽・河野祐哉, 2018, 南海トラフ地震による高知県南国市における地震危険度解析に基づく病院被害による影響人数推定, 第37回日本自然災害学会学術講演会, III-4-6.
- 増田竣介・松島信一, 2018, 南海トラフ地震による高知県南国市における病院被害による影響人数予測に関する研究, 平成30年度(2018年度)日本建築学会近畿支部研究発表会, 2040.
- Nishino, T. and Hokugo, A., A Stochastic Model for Time Series Prediction of the Number of Post-Earthquake Fire Ignitions in Buildings Based on the Ignition Record for the 2011 Tohoku Earthquake, Earthquake Spectra (submitted).
- 岡田成幸・中嶋唯貴・牧紀男・額綱一起, 2019, 地震による被災から回復までの個人世帯生活被災度時間関数の構築, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D27.
- 佐伯琢磨・西嶋一欽・松島信一, 2019, 地震リスク評価における不確実性の分布について, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D28.
- 佐伯琢磨・西嶋一欽・松島信一, 2018, 不確実性を考慮した地震リスク評価に関する研究その1南海トラフ地震を想定した感度分析, 日本建築学会2018年大会学術講演梗概集, B2, pp.559-560.
- 佐藤啓太・松島信一・松下隼人・増田竣介・吾妻崇・野澤貴, 2018, 微動観測記録に基づく横手盆地の地下構造の推定, 第15回日本地震工学シンポジウム, 0S2-01-03.
- 佐藤啓太・松島信一・松下隼人・増田竣介・吾妻崇・野澤貴, 2019, 微動観測記録に基づく横手盆地の推定地下構造の増幅特性評価, 京都大学防災研究所研究発表講演会, B06.
- 田中宣多・Adapa GAUTHAM・澤田凱人・上田恭平, 2019, 液状化現象を含む地盤の非線形性を考慮した表層地盤増幅率の評価, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D30.
- 津野靖士・山中浩明・地元孝輔・宮腰寛之・三宅弘恵・高井伸雄・重藤迪子・神野達夫・佐藤浩章・額綱一起・松島信一・川瀬博, 2019, 足柄平野と東京湾西岸部における地震観測点の1次元浅部深部統合地盤モデル, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P54.

(平成26年度～平成29年度)

- Adapa, G., K. Sawada, K. Ueda, 2018, Evaluation of Amplification Factor Considering Soil Non-Linearity including Liquefaction, 平成29年度京都大学防災研究所研究発表講演会, A33.
- 有吉一葉・岡田成幸・中嶋唯貴, 2017, Kesslerの心理的苦痛測定指標(K6)による被震に伴う精神的被害の計量およびその時間推移モデルの構築 その2 各種発生事象のK6評価, 日本建築学会大会(広島)梗概集, B-2, 487-488.
- 土井一生・前田拓人, 2018, 2017年5月19日長野県飯山市における斜面崩壊に伴う短周期地震波形の特徴, 東大地震研共同利用「地震波形解剖学の計算科学的新展開」研究集会, 東京, 2018-03-09.
- 土井一生・前田拓人・釜井俊孝・王功輝, 2018, 「斜面崩壊による地震動波形の特徴と崩壊発生メカニズム -2017年の事例-」, 京都大学防災研究所研究発表講演会, 宇治, P05, 2018-02-21.
- 土井一生・釜井俊孝・片尾浩・三浦勉, 2017, ごく近傍に設置された地震計によって捉えられた豪雨による斜面崩壊 -2013年9月京都府京都市山科区における事例-, 平成29年度日本応用地質学会研究発表会, 岡山, 60, 2017-10-13.
- 原田智也・西山昭仁・佐竹健治・古村孝志, 2017, 明応七年六月十一日(1498年6月30日)の日向灘大地震は存在しなかった -『九州軍記』の被害記述の検討-, 地震2, 70, 89-107.
- 原田智也・佐竹健治・古村孝志・室谷智子, 2017, 1944年東南海地震(M7.9)の震度分布 -発生直後に行われたアンケート調査資料の再検討-, 東京大学地震研究所彙報, 92, 1-30.
- Kanaya, N., T. Maeda, K. Obara, and A. Takeo, 2017, Significant Anomalies in Seismograms for Intra-slab Earthquakes Observed in Kanto area, Japan, and their Interpretation, AGU Fall Meeting 2017, New Orleans, USA, S21C-0717, 2017-12-12.
- 是永将宏・津野靖士・地元孝輔・山中浩明, 2018, 熊本市花岡山近傍で観測された地震動特性とその表層地盤構造, 平成29年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P04.
- Lee, S. H., K. Nishijima, S. Matsushima, M. Miyazawa, K. Mochizuki, T. Iidaka, K. Ueda, H. Kawase, and N. Maki, 2017, Issues and Challenges in Seismic Risk Evaluation and its Uncertainty Reduction for the Nankai Trough Earthquake, DPRI Annuals, No. 60B.
- 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.
- Miyake, H., 2017, Seismic hazard assessment of the 1995 Kobe earthquake: Before and after, IAG-IASPEI 2017, S07-2-04.
- Miyake, H., T. Furumura, T. Nishimura, K. Mochizuki, K. Obara, T. Harada, and N. Sekiya, 2017, Variation of earthquake source scenarios along the Nankai Trough for hazard

- and risk assessment, IAG-IASPEI 2017, S13-6-06.
- Morioka, H., H. Kumagai, and T. Maeda, 2017, Theoretical basis of the amplitude source location method for volcano-seismic signals, *J. Geophys. Res.*, 122, 6538-6551, doi:10.1002/2017JB013997.
- Mukai, Y., T. Furumura and T. Maeda, 2017, Characterizing directional variations in long-period ground motion amplifications in the Kanto Basin, Japan, AGU Fall Meeting 2017, New Orleans, USA, S31B-0813, 2017-12-13.
- Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro, and T. Ochi, 2018, Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from GNSS and GPS-A data, *Geosphere*, 14(2), doi:10.1130/GES01529.1.
- Nishimura, T., 2018, A trial of application of geodetic data for assessing activities of inland faults - Coulomb stress changes estimated from GNSS surface displacements, *Journal of Disaster Research*, in press.
- 岡田成幸・中嶋唯貴・有吉一葉・牧紀男・額額一起, 2017, 被災者の心の復興 ～精神的苦痛の計量及びその時間推移モデルの構築～, 日本地震学会2017年度秋季大会予稿集, S15-07.
- Padhy, S., T. Furumura, and T. Maeda, 2017, Waveform anomaly caused by strong attenuation in the crust and upper mantle in the Okinawa Trough region, AGU Fall Meeting 2017, New Orleans, USA, T23A-0593, 2017-12-12.
- 齋藤さやか・関谷直也・田中淳, 2017, 地震予知に関する日本海沿岸部と太平洋沿岸部の住民意識—地震予知, 地震動予測地図とリスク認知を中心に, 第36回自然災害学会学術講演会.
- 齋藤さやか・関谷直也, 2017, 地震発生確率とリスク認知—地震動予測地図の確率表現に関する調査研究, 地域安全学会論文集, 30.
- 齋藤さやか・関谷直也, 2017, 地震発生確率とリスク認知—地震動予測地図の認識に関する基礎的検討, 地域安全学会第40回研究発表大会(春季).
- 齋藤さやか・関谷直也, 2017, 地震動予測地図をめぐる信頼と構成要素, 日本リスク研究学会第30回年次大会.
- 関谷直也・齋藤さやか・田中淳, 2017, 地震予知に関する日本海沿岸部と太平洋沿岸部の住民意識—想定周知, 表現技法を中心に, 第36回自然災害学会学術講演会.
- 棚田嘉博・佐藤公則・井口正人・豊平隆之, 2017, 擬似雑音多重弾性波を用いた火山域の地下探査, 第34回センシングフォーラム資料, 1B2-1, 117-122.
- Tanada, Y, Sato, K, Iguchi, M and Sai, B, 2017, Construction of ZCZ Huffman Sequences for Underground Multiplexing Sonar, *Proc. IWSDA'17*, 122-126.
- 棚田嘉博・井口正人・佐藤公則・豊平隆之・田中幹也, 2017, 高減衰媒質中の波動伝搬への Huffman 系列の適用, 平成29年度電気・情報関連学会中国支部連合大会予稿集, R-17-15-09, 1-2.
- 棚田嘉博・井口正人・山本圭吾・中道治久・森田裕一, 2017, Huffman 系列を用いた火山域の弾性波地中探査システム, 平成29年度計測自動制御学会九州支部大会予稿集, 101A5, 11-14.

- Todoriki, M., T. Furumura, and T. Maeda, 2017, Effects of seawater on elongated duration of ground motion as well as variation in its amplitude for offshore earthquakes, *Geophysical Journal International*, 208, 226-233.
- Todoriki, M., T. Furumura, and T. Maeda, 2017, Effects of seawater on elongated duration of ground motion as well as variation in its amplitude for offshore earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 208(1), 226-233, doi:10.1093/gji/ggw388.
- Toya, M., A. Kato, T. Maeda, K. Obara, T. Takeda, and K. Yamaoka, 2017, Down-dip variations in a subducting low-velocity zone linked to episodic tremor and slip: a new constraint from ScSp waves, *Scientific Reports*, 7, 2868, doi:10.1038/s41598-017-03048-6.
- 和田拓也・新本翔太・倉田真宏・山田真澄・楠浩一・柏尚稔, 2017, 拠点モニタリングを利用したエリア防災のための建物群地震応答の即時推定, *日本建築学会近畿支部研究報告集構造系*, 57, 485-488.
- 和田拓也, 2017, 拠点モニタリングを利用したエリア防災のための建物群地震応答の即時推定(優秀卒業論文賞推薦理由, 2017年日本建築学会優秀卒業論文賞), *建築雑誌*, 1701, 113.
- 和田拓也・新本翔太・倉田真宏・山田真澄・楠浩一・柏尚稔, 2017, 拠点モニタリングを利用したエリア防災のための建物群地震応答の即時推定, *日本建築学会(中国)学術講演梗概集, 構造系*, 377-378.
- 和田拓也・新本翔太・倉田真宏・山田真澄・楠浩一・柏尚稔・池田芳樹, 2018, 緊急地震速報と建物モニタリング情報を利用した地震災害誘因の同定 ―建物頂部変形角の推定―, *京都大学防災研究所研究発表講演会梗概*, A31.
- Yu Nandar Hlaing, K. Ichii, 2017, Ground Response Analysis and Site Characterization of Mandalay City, Myanmar Engineering Society Annual General Meeting (2017), 13th Annual Seminar on Research and Engineering (19-20 January 2018), Myanmar Engineering Council Building, Yangon, Myanmar.
- Lee, S.H, K. Nishijima, S. Matsushima, 2016, Investigation of possibilities to reduce uncertainties of seismic risk evaluation for Nankai Trough earthquakes, 5th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, August 15-17, 2016.
- Lee, S.H., K. Nishijima, S. Matsushima, M. Miyazawa, K. Mochizuki, T. Iidaka, K. Ueda, H. Kawase, N. Maki, 2017, Issues and Challenges in Seismic Risk Evaluation and its Uncertainty Reduction for Nankai Trough Earthquake, *京都大学防災研究所 平成28年度研究発表講演会 特別セッション*.
- 縣亮一郎・市村強・兵藤守・堀高峰・平原和朗・堀宗朗, 2016, 震源断層の想定高度化に関する基礎研究--高詳細な三次元地殻構造モデルを用いた地殻変形解析手法の開発--, *土木学会論文集A1(構造・地震工学)*.
- 藤田航平・市村強・堀宗朗・Wijerathne Maddeggedara Lalith Lakshman・田中聖三, 2016, 都市の高分解能な地震被害想定的高速化のための基礎的研究, *土木学会論文集A1(構造・地震工学)*.

- 藤田航平・市村強・堀宗朗・Wijerathne Maddeggedara Lalith Lakshman・田中聖三, 2016, 多数の地震シナリオに対する高分解能な都市震災想定のためのHPCによる基礎検討, 土木学会論文集A2 (応用力学) .
- 古村孝志, 2016, 昭和南海地震から考える, 次の南海トラフ地震と前後の内陸地震への備え, 日本地震工学会JAEE NEWSLETTER, 5(3), 2.
- Obara, K. and A. Kato, 2016, Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, *Science*, 353 (6296), 253-257, doi:10.1126/science.aaf1512.
- 原田智也・西山昭仁・佐竹健治・古村孝志, 2016, 明応七年六月十一月(ユリウス暦1498年6月30日)の大地震に関する『九州軍記』の被害記述の検討, 日本地球惑星科学連合2016年大会, SSS31-12.
- Miyake, H., 2016, Long- and short-period characteristics of megathrust source models and ground motions (invited), UK-Japan Disaster Research Workshop: Cascading Risk and Uncertainty Assessment of Earthquake Shaking and Tsunami.
- Guo, Y., K. Koketsu, and H. Miyake, 2016, Propagation mechanism of long-period ground motions for offshore earthquakes along the Nankai Trough: Effects of the accretionary wedge, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 106, 1176-1197, doi:10.1785/0120150315.
- Kawase, H., S. Matsushima, F. Nagashima, Baoyintu, and K. Nakano, 2017, The cause of heavy damage concentration in downtown Mashiki inferred from observed data and field survey, *Earth, Planet, and Space*, 69:3, DOI :10.1186/s40623-016-0591-1.
- 松島信一・佐藤啓太, 2017, 横手盆地の盆地境界の推定のための地下構造調査, 京都大学防災研究所研究発表講演会, P61.
- Okada S., T. Nakashima, A. Iida, M. Kitahara, 2017, A NEW CAUSALITY MODEL FOR EVALUATING THE PROBABILITY OF HUMAN DAMAGE FROM INJURY TO DEATH IN COLLAPSED BUILDINGS, 16th World, Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2938, pp.1-10, Santiago Chile, January 9th to 13th 2017.
- Iida A., S. Okada, T. Nakashima, M. Kitahara, 2017, Volumetric Loss Estimation for Collapsed Buildings during Earthquakes, 16th World, Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2938, pp.1-11, Santiago Chile, January 9th to 13th 2017.
- 村口紗也・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 地震災害素因の時間変動性を考慮した宅地供給に関するリスクマネジメントの考え方 -札幌市を事例として-, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 89, 63-66.
- 松本将武・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 地震破壊シミュレーションによる建物内死者発生推定のための建物ボリュームロス評価法の検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 89, 83-86.
- 松本将武・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 地震破壊シミュレーションによる建物内死者発生推定のための建物ボリュームロス評価法の検討, 日本建築学会大会(九州)梗概集.
- 村口紗也・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 地震災害素因の時間変動性を考慮した宅地供給に関するリスクマネジメントの考え方 -札幌市を事例として-, 日本建築学会大会(九州)梗概集.

- 中嶋唯貴・岡田成幸, 2016, 少子高齢化の進展が地震時建物倒壊による推定死者数へ及ぼす影響, 日本建築学会大会(九州)梗概集.
- 高橋遥・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 居住環境を考慮した地震時室内変容による人的被害の地域精算評価手法の提案, 日本建築学会大会(九州)梗概集.
- 岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 震後復旧費用個人負担の地域格差, 日本地震学会2016年度秋季大会(名古屋), S15-18.
- 岡田成幸・中嶋唯貴, 2017, 社会動態が地震災害に及ぼす将来的影響の定量評価, 平成28年度京都大学防災研究所 研究発表講演会.
- 倉田真宏・新本翔太・和田拓也・山田真澄・楠浩一・柏尚稔・溜淵功史, 2017, 緊急地震速報と建物モニタリング情報を利用した地震災害誘因の同定, 京都大学防災研究所年次発表会梗概, OSK4.
- 津野靖士・地元孝輔・三宅弘恵・佐藤浩章・松島信一・重藤迪子・高井伸雄・神野達夫・瀨瀨一起・山中浩明・川瀬博, 2017, 足柄平野西部における地盤震動特性の評価, 平成27年度京都大学防災研究所研究発表講演会.
- 地元孝輔・津野靖士・東貞成・佐藤浩章・重藤迪子・高井伸雄・松島信一・早川崇・山中浩明・川瀬博, 2017, K-NET日立近傍における地震と微動観測による地盤震動特性の評価, 平成27年度京都大学防災研究所研究発表講演会.
- Maeda, T., K. Nishida, R. Takagi, and K. Obara, 2016, Reconstruction of a 2D seismic wavefield by seismic gradiometry, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 3, 31, doi:10.1186/s40645-016-0107-4.
- Maeda, T., H. Tsushima, and T. Furumura, 2016, An effective absorbing boundary condition for linear long-wave and linear dispersive-wave tsunami simulations, *Earth Planets Space*, 68, 63, doi:10.1186/s40623-016-0436-y.
- Noguchi, S., T. Maeda, and T. Furumura, 2016, Ocean-influenced Rayleigh waves from outer-rise earthquakes and their effects on durations of long-period ground motion, *Geophys. J. Int.*, 205(2), 1099-1107, doi:10.1093/gji/ggw074.
- 関谷直也, 2016, 企業の防災対策におけるBCPとCSR: 大企業に対する実証調査より, *Nextcom25*, 4-15.
- 関谷直也・田中淳, 2016, 避難の意思決定構造—日本海沿岸住民に対する津波意識調査より—, *自然災害科学J. JSNDS* 35 特別号 91-103, 91.
- 吾妻崇, 松島信一, 市村 強, 野澤 貴, 2016, 活断層と建物被害の情報に基づく歴史被害地震の断層モデル構築に関する研究, 京都大学防災研究所 平成27年度研究発表講演会, P02.
- 新本翔太, 倉田真宏, 鈴木明子, 李小華, 2015, 余震リスク評価に基づく被災建物継続使用の迅速な意思決定支援, *地域安全学会論文集No.27*.
- Fujita, K., T. Ichimura, M. Hori, L. Maddegadara and S. Tanaka, Scalable many-case urban earthquake simulation method for stochastic earthquake disaster estimation, *Procedia Computer Science*, 51, 1483-1493, 2015.
- 林能成, 山田俊弘, 栗田敬, 野内玲, 2015, 地球科学における学際的分野への参入過程—島津康男教授・熊沢峰夫教授のオーラルヒストリーから—, *地球惑星科学関連合同学*

会，幕張メッセ。

廣川夕貴，松島信一，川瀬博，T. Naing, M. Thant, 2016, ミャンマー・ヤンゴン市における常時微動を用い

- 213 -

た地盤構造の推定，日本地震工学会論文集，第16巻，第1号特集号「第14回日本地震工学シンポジウム」その2，49-58.

Ichimura, T., K. Fujita, P. E. B. Quinay, L. Maddegedara, M. Hori, S. Tanaka, Y. Shizawa, H. Kobayashi and K. Minami, 2015, Implicit Nonlinear Wave Simulation with 1.08T DOF and 0.270T Unstructured Finite Elements to Enhance Comprehensive Earthquake Simulation, SC15: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, doi: 10.1145/2807591.2807674.

飯田彬斗，岡田成幸，中嶋唯貴，地震時人的被害推定高度化のための建物内部空間被災度関数の再構築，日本建築学会大会（関東）梗概集，2015.

金幌淑，田中傑，牧紀男，岸川英樹，事前復興計画のあり方に関する基礎的な考察－第1回事前復興計画研究会を通して，地域安全学会梗概集，No. 36，地域安全学会，115-116，2015

倉田真宏，新本翔太，鈴木明子，山田真澄，楠浩一，宮本匠，残存性能モニタリングと広域余震ハザードに基づく被災建物健全性の時間変化予測，京都大学防災研究所年次発表大会梗概，2016.

Kurata M., Suzuki, A., Li, X., Nishino, H., Residual Performance Assessment of Steel Frames through Ambient Strain-Based Model Update: Application to Collapse Test of Steel Frame using Shake Table, Proc. Eng. Mech. Inst. Conf., June 16-19, 2015.

Lee, S.H., K. Nishijima, S. Matsushima, M. Miyazawa, K. Mochizuki, T. Iidaka, T. Tobita, H. Kawase, N. Maki, Investigation of Possibilities to Reduce the Uncertainty of Disaster Risk, 京都大学防災研究所平成27年度研究発表講演会特別セッション，K01，2016.

松島信一，伊藤光菜，2016，1847年善光寺地震における地震動と建物被害の関係把握のための表層地盤構造の推定 京都大学防災研究所 平成27年度研究発表講演会，E21.

Melgar, L. E. A., W. M. L. Lakshman, M. Hori, T. Ichimura and S. Tanaka, 2015, On the Development of an MAS Based Evacuation Simulation System: Autonomous Navigation & Collision Avoidance, Lecture Notes in Artificial Intelligence (in press).

中嶋唯貴，岡田成幸，2015，震動及び津波の複合災害を想定した人的被害推定手法の提案，日本建築学会北海道支部研究報告集，88，101-104.

西嶋一欽，2016，地震リスク評価に伴うモデル不確実性の感度解析，第22回信頼性設計技術WS&第35回最適設計研究会，岡山大学.

岡田成幸，中嶋唯貴，2015，地震時建物倒壊に伴う人的被害の因果律を踏まえた詳細評価手法～建物棟別評価から行政区単位評価まで～，日本建築学会大会（関東）梗概集.

Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura, Kazuro Hirahara, Mamoru Hyodo, Takane Hori, Chihiro Hashimoto and Muneo Hori, 2015, Numerical verification criteria for

- coseismic and postseismic crustal deformation analysis with large-scale high-fidelity model, *Procedia Computer Science*, 51, 1534-1544.
- 清田和宏, 地元孝輔, 佐口浩一郎, 津野靖士, 山中浩明, 2015, 立川断層近傍における表層地盤S波速度構造の空間変動評価の稠密微動探査, 第132回学術講演会講演論文集, 141-143.
- Seita, K., K. Chimoto, K. Saguchi, S. Tsuno, H. Yamanaka, 2015, Application of microtremor exploration to shallow dipping layers under the assumption of horizontally stratified structure, *Proceedings of 12th SEGJ International Symposium -Geophysical Imaging and Interpretation-*, S2-1, Tokyo, Nov. 2015.
- Tsuno, S., K. Chimoto, K. Saguchi, H. Sato, S. Matsushima, M. Shigefuji, N. Takai, T. Kanno, H. Yamanaka and H. Kawase, 2015, Detailed spatial variation of short-period earthquake ground motion in the vicinity of Tachikawa-Fault, *Proceedings of 12th SEGJ International Symposium -Geophysical Imaging and Interpretation-*, P6, Tokyo, Nov. 2015.
- 津野靖士, 佐口浩一郎, 地元孝輔, 佐藤浩章, 松島信一, 重藤迪子, 高井伸雄, 神野達夫, 山中浩明, 川瀬博, 2015, 立川断層近傍における短周期地震動の空間変動特性, 地球惑星関連合同大会講演予稿集S-SS25-P16.
- 山田俊弘, 2015, 拡大された地球科学概念からトランス・サイエンスまで—島津康男教授と1970年代科学史—, 地球惑星科学関連合同学会, 幕張メッセ.
- 山田俊弘, 2015, シームレスな地球科学をめざして—島津康男とディシプリンの越境: 1966-1983年, 日本科学史学会, 大阪市立大学.
- 山田俊弘, 2015, 1970年代の科学教育における変容の性格—島津康男の拡大された地球科学, トランス・サイエンス, 環境学—, 東京大学大学院教育学研究科基礎教育学研究室研究室紀要, 41号, 183-194.
- 西村裕一・中村有吾・添田雄二, 2015, 浦幌町豊北の湿原における古津波堆積物のトレンチ調査, 浦幌町立博物館紀要, 15, 39-47.
- 添田雄二・西村裕一・中村有吾, 2015, 浦幌町で実施した地層剥ぎ取り標本の作成について, 浦幌町立博物館紀要, 15, 49-56.
- 津野靖士, 佐口浩一郎, 地元孝輔, 佐藤浩章, 松島信一, 重藤迪子, 高井伸雄, 神野達夫, 山中浩明, 川瀬博, 2015, 立川断層近傍における短周期地震動の空間変動特性, 2015年地球惑星科学連合大会
- 清田和宏, 地元孝輔, 佐口浩一郎, 津野靖士, 山中浩明, 2015, 立川断層近傍における表層地盤S波速度構造の空間変動評価の稠密微動探査, 物理探査学会第132回(平成27年度春季)学術講演会講演論文集, 141-143, 2015
- 古谷元・牟田庄吾・竹内篤雄・王功輝・油谷洋志・林久夫, 2014, 併用調査により古いため池の地盤構造と流動地下水脈経路の推定, 平成26年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 57-58.
- 佐竹亮一郎・若井明彦・古谷元・王功輝・土井一生, 2015, 古いため池堤体材料の空間的不均質性が力学挙動の不確実性に与える影響, 第18回応用力学シンポジウム, 土木学会応用力学委員会, 印刷中.

佐竹亮一郎・若井明彦・古谷元・王功輝・土井一生，2015，堤体材料の空間的不均質性と系の挙動の不確実性に関する検討(ため池を例に)，第70回年次学術講演会講演概要，土木学会，印刷中。

Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura, Kazuro Hirahara, Mamoru Hyodo, Takane Hori and Muneo Hori, Several hundred finite element analyses of an inversion of earthquake fault slip distribution using a high-fidelity model of the crustal structure, *Procedia Computer Science*, 29, pp.877-887, 2014. DOI:10.1016/j.procs.2014.05.079

関谷直也，2014，地震「想定」を考える，南海トラフ巨大地震の災害リスク評価－社会の影響から地震発生まで振り返り，評価の不確実性と影響について考える－，地震・火山科学と総合防災学の両共同研究拠点主催シンポジウム，2014年10月6日 東京大学地震研究所

関谷直也，2015，「想定を考える」，鉄道気象連絡会，2015年5月20日，ステーションコンファレンス万世橋。

Kurata M., Suzuki, A., Li, X., Nishino, H. “Residual Performance Assessment of Steel Frames through Ambient Strain-Based Model Update: Application to Collapse Test of Steel Frame using Shake Table”, *Proc. Eng. Mech. Inst. Conf.*, June 16-19, 2015.

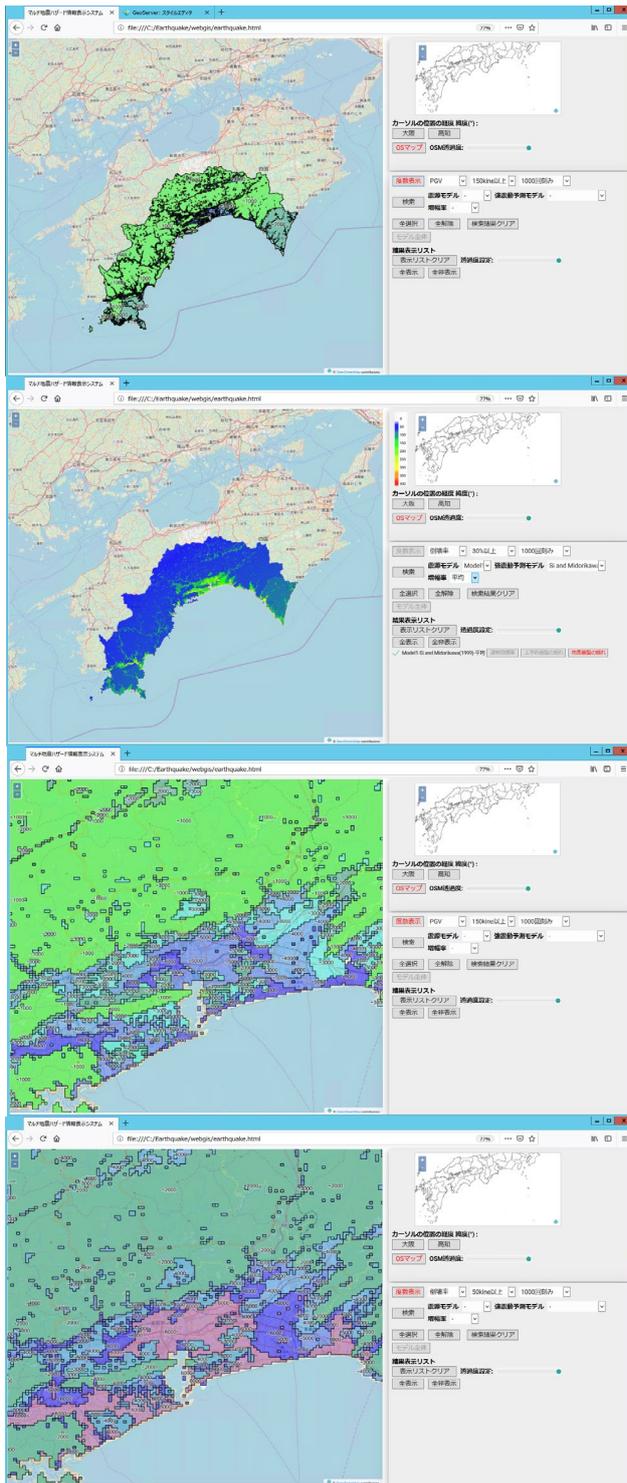


図1. 評価結果のばらつきを容易に理解することが可能な表示システムの表示例（拠点間連携共同研究 [課題番号：2975, 2951]）

左上：最大地表速度が150cm/sを超える回数の度数分布表示例：高知県全域（モンテカルロシミュレーション全体:10,000回）

右上：震源モデルと強震動予測モデルの組み合わせた地表の揺れ表示例：高知県全域

左下：地表最大速度が150cm/sを超える回数の度数分布表示例：高知県庁付近（モンテカルロシミュレーション全体:10,000回）

右下：建物倒壊率が30%を超える回数の度数分布表示例：高知県庁付近（モンテカルロシ

シミュレーション全体:10,000回)

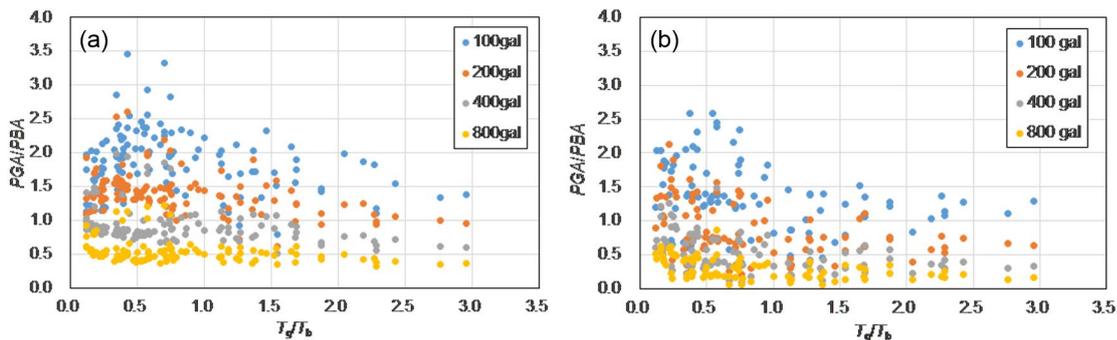


図2. 地盤増幅率と周期比の関係 (拠点間連携共同研究 [課題番号: 2990])

左: 非液状化解析

右: 液状化解析

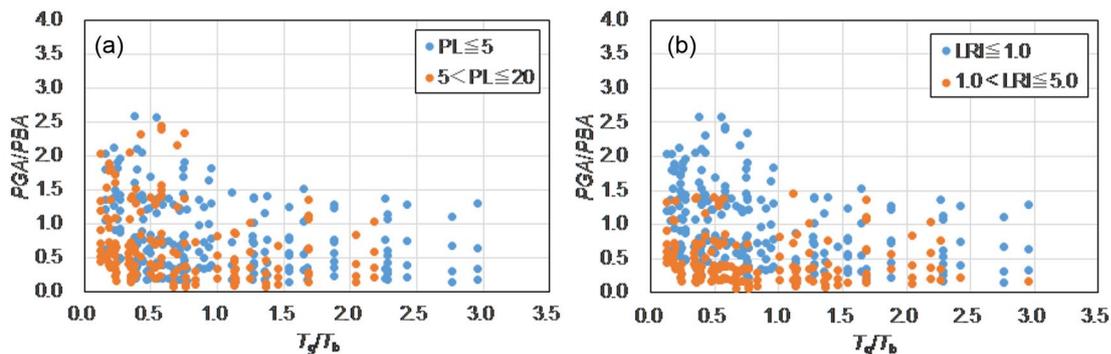


図3. 幅率と周期比の関係 (拠点間連携共同研究 [課題番号: 2990])

左: PLで分類した結果

右: LRIで分類した結果

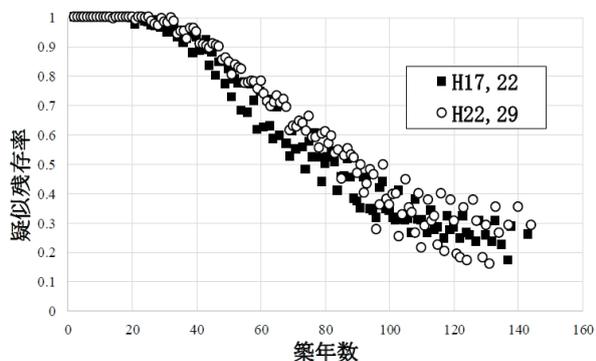


図4. 南国市における建物 (住宅) 残存率 (拠点間連携共同研究 [課題番号: 2952])

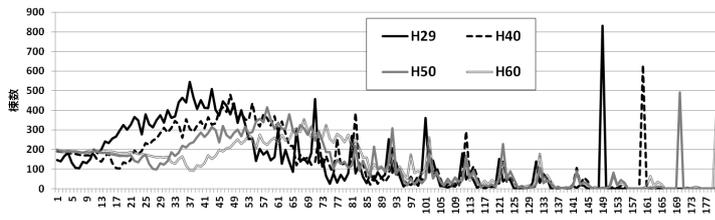


図5. 将来時点での築年数ごとの木造戸建住宅の棟数予測（拠点間連携共同研究 [課題番号：2952])

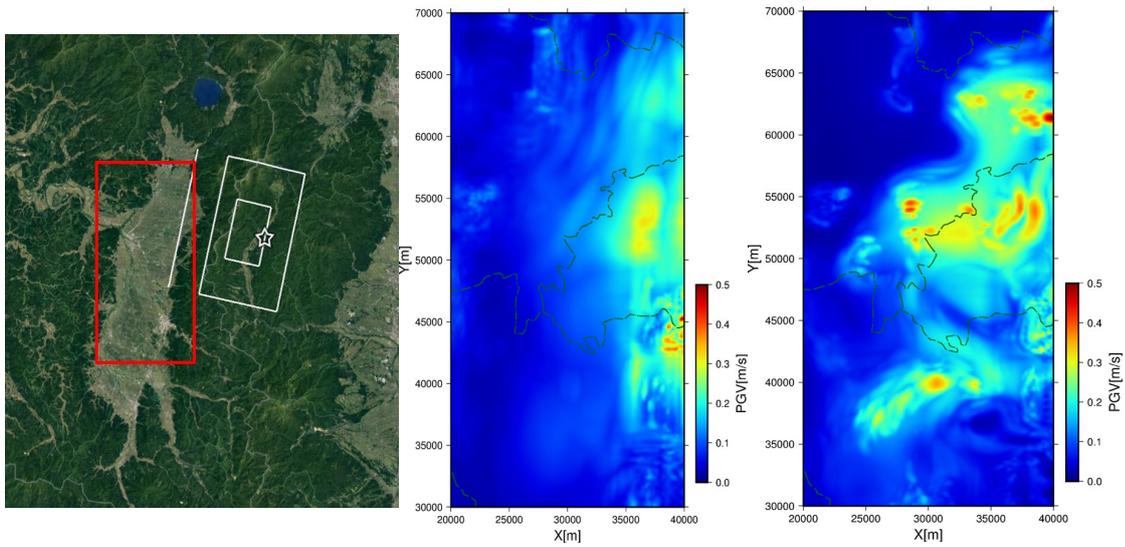


図6. 1896年陸羽地震の強震動シミュレーションによる最大速度分布（EW成分）（拠点間連携共同研究 [課題番号：2953])

左：1896年陸羽地震の震源断層と計算領域（赤枠）の関係

中：J-SHIS深部地盤構造モデルによる結果

右：本研究の推定地盤構造モデルによる結果

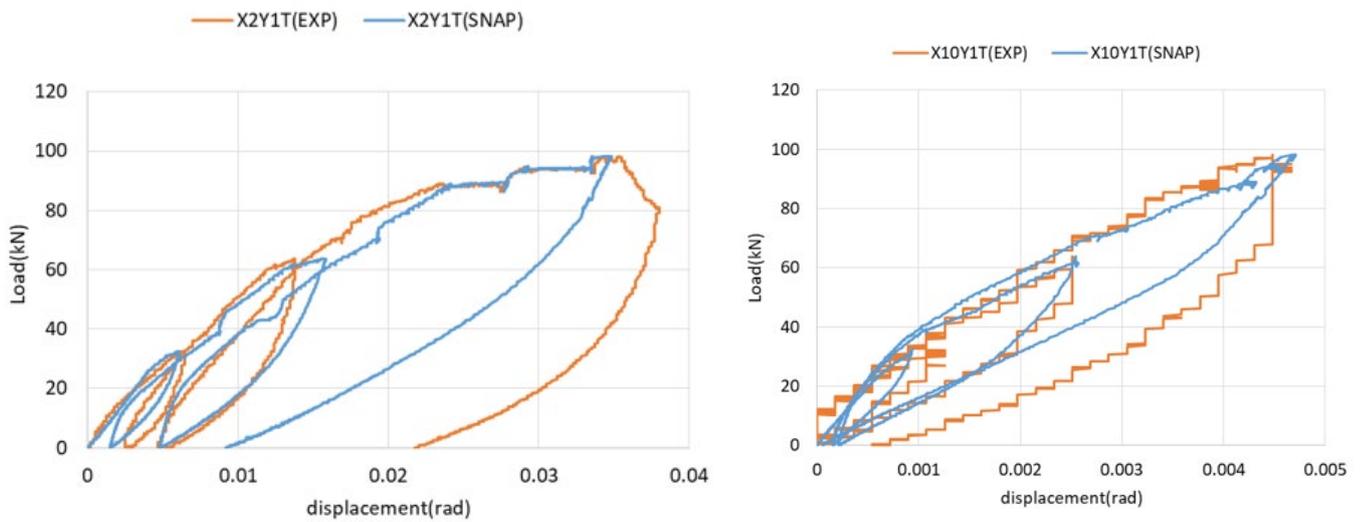


図7. 古民家の変位－荷重関係の再現解析結果（拠点間連携共同研究〔課題番号：2954〕）
 橙線（EXP）は実験結果、青線（SNAP）は構造解析用ソフト SNAP による解析結果。
 左：X2-Y1 位置
 右：X10-Y1 位置

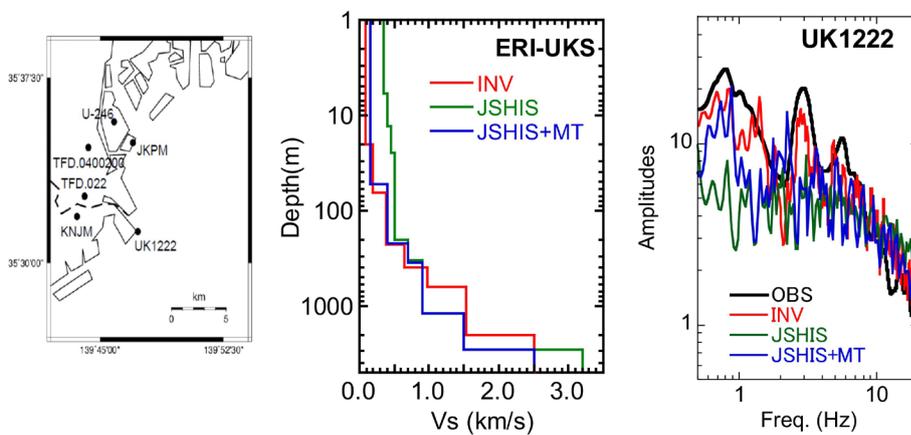


図8. 東京湾西岸部 (UK1222) の1次元浅部深部統合地盤モデルとサイト特性の比較（拠点間連携共同研究〔課題番号：2955〕）
 左：観測点位置
 中：1次元浅部深部統合地盤モデル
 右：地盤増幅特性

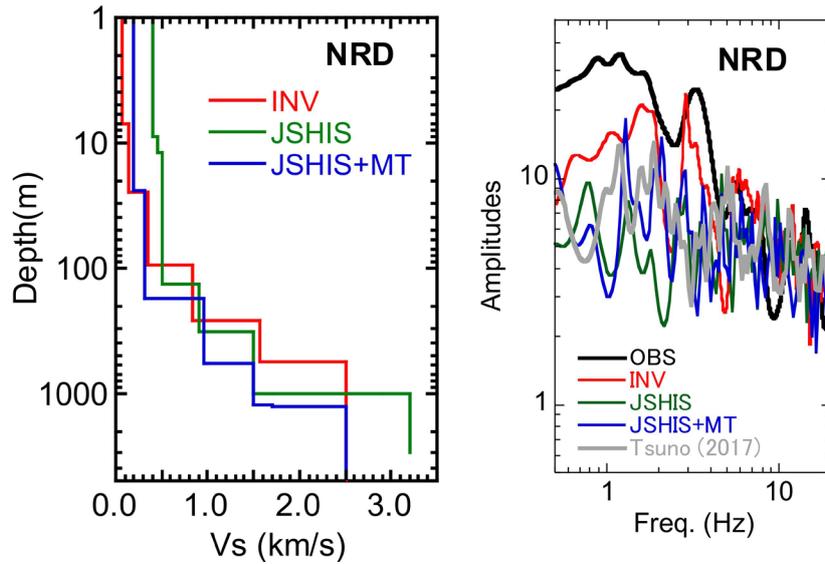


図9. 足柄平野 (NRD) の1次元浅部深部統合地盤モデルとサイト特性の比較 (拠点間連携共同研究 [課題番号: 2955])

左: 1次元浅部深部統合地盤モデル
 右: 地盤増幅特性

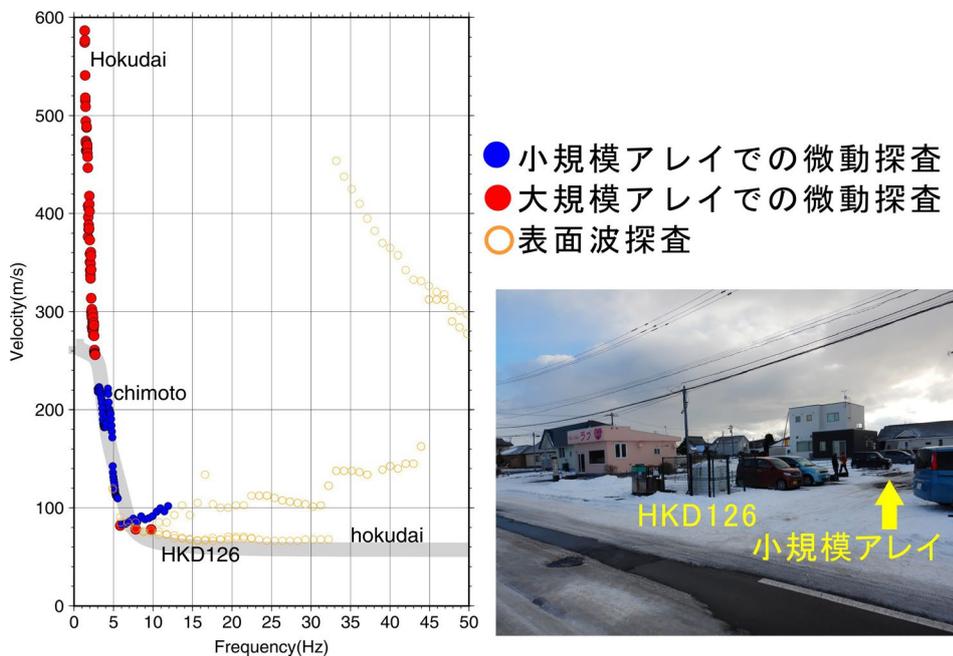


図10. HKD126 (K-NET 鷺川) での微動および表面波探査の結果 (拠点間連携共同研究 [課題番号: 2955])

左: 推定されたレイリー波位相速度
 右: 観測点位置

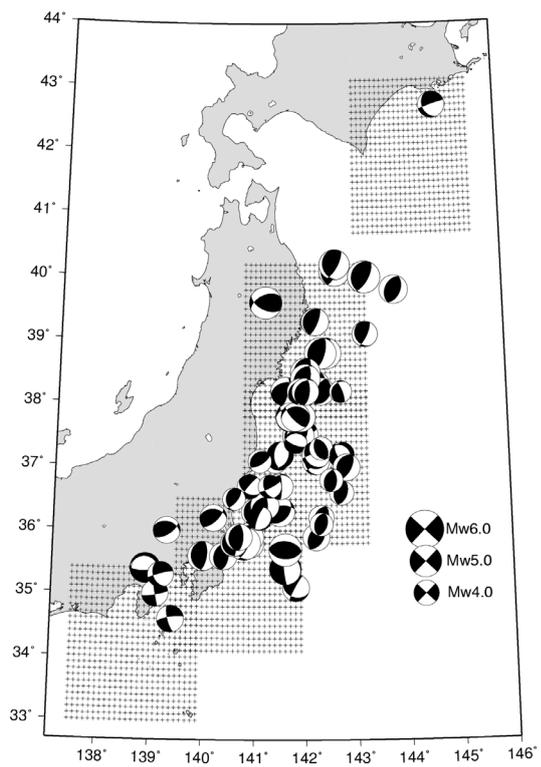


図11. GRiD MTにより決定された震源メカニズム解（拠点間連携共同研究 [課題番号: 2958]）

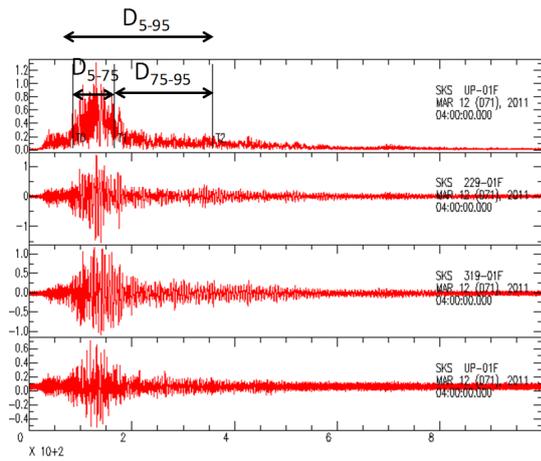


図12. 揺れ継続時間の定義（拠点間連携共同研究〔課題番号：2958〕）

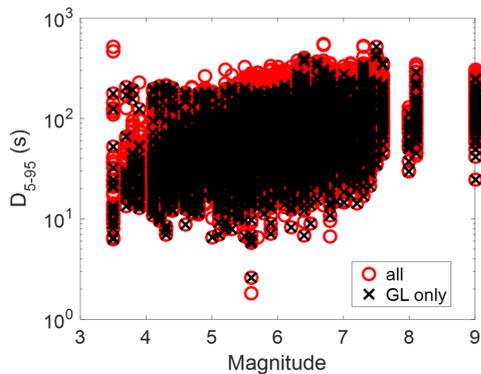


図13. 揺れ継続時間とマグニチュードの関係（拠点間連携共同研究〔課題番号：2958〕）

表1. 崩壊とそれに伴う地震動の特徴（拠点間連携共同研究〔課題番号：2994〕）

年・場所	2011年 紀伊半島	2013年 京都市	2013年 伊豆大島	2014年 南木曾町	2015・2016年 厚岸町	2017年 飯山市	2017年 日田市
崩壊のタイプ	深層崩壊	表層崩壊・土石流	表層崩壊・土砂流	土石流	再活動型地すべり	地すべり性崩壊・土石流	地すべり性崩壊
地質	付加体堆積岩	粘性土・盛土	テフラ	花崗岩	粘性土	凝灰岩	安山岩溶岩・凝灰角礫岩
長さ・流走距離	1 km	30 m (崩壊) 100 m (土石流)	50-500 m (崩壊) 2 km (土石流)	2 km	70 m	300 m 800 m (土石流)	200 m
幅	400 m	20 m	50-300 m	50-100 m	30 m	150-200 m	150-200 m
厚さ	60-100 m	1 m	1 m	N/A	5 m	20-50 m	10-20 m
卓越周波数 (震央距離)	1-4 Hz (10-70 km)	3-10 Hz (50 m)	2-6 Hz (500 m - 5 km)	3-30 Hz (500 m - 30 km)	震動なし (5 m)	0.5-2 Hz (8-60 km)	1-4 Hz (8-20 km)
継続時間	50-100 s	50-100 s	30-200 s	20 min	移動時間は 20 h	200 s	30-50 s
長周期 (> 10 s) 信号の有無	○	×	×	?	×	○	×
引用文献	Yamada et al. (2012)	土井ほか(2017)	Ogiso, Yomogida (2015) Doi et al. (2016)	本研究	土井ほか(2017)	本研究 Yamada et al. (2017)	本研究

科学技術・学術審議会測地学分科会
地震火山部会

〒100-8959 東京都千代田区霞が関3-2-2
文部科学省研究開発局地震・防災研究課

電話：03-6734-4137 FAX：03-6734-4139

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/index.htm