

1 (5) 地震動・津波等の事前予測・即時予測

「地震動・津波等の事前予測・即時予測」計画推進部会長 香川敬生

(鳥取大学大学院工学研究科)

副部会長 太田雄策

(東北大学大学院理学研究科)

1. はじめに

地震、火山噴火に伴う地震動、津波、地すべり、山体崩壊、火山灰や溶岩の噴出などの災害誘因を、その発生前に高精度に評価しておくことは、これらの災害対策に資するために重要である。また、各種観測データの利用法や解析手法を開発、高度化し、地震・火山噴火発生直後に高精度かつ即時的に災害誘因の規模を予測して情報伝達することは、災害および2次災害の軽減にきわめて有効である。そのため本テーマでは、本計画で得られる地震発生や火山噴火の理解や構造モデルなど最新の研究成果を利用して、地震動・津波等の事前予測・即時予測を通じた災害軽減に資する研究を行った。同時に、事前予測・即時予測結果を効果的に社会に還元するため、防災工学や社会科学との連携、および防災に関する現業での活用を指向して研究を進めた。

2. 5年間(平成26-30年度)の成果

(1) 5年間の成果概要

事前評価については地震動および地震時地すべりに、即時評価については地震、津波、地殻変動、火山灰拡散と、地震、火山噴火に伴う多岐にわたる災害誘因を対象とした研究を実施した。その結果、何れの項目についても災害軽減のための現業と密接に連携し、また現業の支援に貢献する成果を得ることができたと考える。以下、大学が実施した研究の5年間の成果のうち、代表的なものをまとめる。

(2) 地震動事前評価手法の高度化

2011年東北地方太平洋沖地震における周波数別地震波生成の空間的な棲み分けをはじめ、国内外で発生した被害地震の震源インバージョン解析を広帯域で精力的に実施し、既往スケーリング則との整合性を通じて強震動予測の高度化を進めた。(京都大学防災研究所[課題番号:1903])

京都盆地および関東平野中川低地において強震観測を維持管理し、堆積盆地構造の地震応答の実測と地盤構造モデルの改良を継続的に行い、特に大阪堆積盆地、京都盆地、奈良盆地を対象として3次元速度構造モデルを高度化した。構築したモデルを用いて2018年大阪府北部の地震(震源モデルは上記[課題番号:1903]による)をシミュレーションした結果(図1)、直達波および明瞭な後続波の多くの相(多重反射、盆地端部・基盤の段差構造で発生する表面波)を良好に再現することができた。(京都大学防災研究所[課題番号:1911])

関東平野での3次元地震動伝播シミュレーションから、長周期地震動の生成にPL波が強く関与していることが示された。PL波は、Rayleigh波と同様に震源の深さに敏感である

ため、P波直後に観測されるPL波の震幅から後続の長周期地震動(Rayleigh波)を予測する、長周期地震動の即時予測の可能性が示唆された。さらに、地震動予測の広帯域化、高解像度化の到達点として、観測データとの同化に基づく長周期地震動シミュレーションを試み、現時点で地震波伝播速度の8倍の速さでの予測が可能となっている(図2)。このことにより、データ同化による長周期地震動の即時予測の可能性をも示すことができた。(東京大学地震研究所[課題番号:1516])

(3) 地すべり事前評価手法の高度化

今期5ヶ年期間中に発生した地震時地すべりと過去の地すべりの調査によって、地震時に発生する地すべりの地質・地形的特徴が明らかになった(図3)。具体的には、火山地域では軽石自体あるいは軽石直下の火山灰土がすべり面となるケースが多く、非火山地域では重力斜面変形あるいは過去の地すべりに関連している。これらより、火山地域・非火山地域ともに、ハザードマップ作製方法の大枠を構築することができた。また、様々なタイプの地すべりにおいて地震動、微動、間隙水圧等の観測を行い、地形や地すべりブロックの形状、地すべり土塊の厚さや地下水位に起因する斜面の揺れ方を明らかにし、強震時の過剰間隙水圧の生成や斜面の変形に関するデータを収集することに成功した(京都大学防災研究所[課題番号:1912])。

(4) 地震動即時評価手法の高度化

緊急地震速報を高度化、高精度化するためには、観測点の密度を高くすることが解決方法のひとつである。そこで、現状で最も高密度に配置されている自治体震度計のうち鳥取県の震度観測ネットワークを対象に1秒パケットで最大加速度およびその時点の震度情報を配信できるようにシステム更新をおこない、そのデータにPLUM法を適用し、準リアルタイムに県内震度分布の推移を表示するシステムを作成した。さらに、震度の距離減衰の考慮、予測する1kmメッシュ点の全てを2次震源とする波動伝播の導入、P波振幅より震度を予測する手法の追加、により迅速かつ精度の高い準リアルタイム震度分布の予測を可能とした(図4)。(鳥取大学工学研究科[課題番号:2001])

(5) 津波即時評価手法の高度化

リアルタイム浸水予測手法(NearTIF)の高度化を実施し、W-phaseインバージョンに加えてGNSSデータを利用したRAPIDや津波波源データを利用したtFISHデータから得られる津波波源モデルに対する有効性を示した。新たに、震源直上の海底圧力波形を用いたデータ同化手法を開発し、30km間隔で観測が実施された場合、地震の情報が無くても、データ同化により数分で津波波源場を予測できることを示した。この手法と上記NearTIFを組み合わせることで2011年東北地方太平洋沖地震津波に適応し、10分以内に高精度な浸水予測までを可能とする手法開発に成功した。さらに、複雑な津波数値計算などを実施することなく、S-Netの観測圧力波形(500秒以内)の処理のみで津波波源域(隆起域)とそれを発生させた地震の規模を推定する手法を開発し、1952年および1968年十勝沖地震の津波に適応し有効性を確認した(図5)。なお、ケーブル式津波観測網が無い地域を対象に、W-phaseインバージョン結果に深さ依存の剛性率を加えることで適切な断層モデルを推定する手法を開発し、1992

年ニカラグア津波地震を含む全ての地震の津波波高及び津波浸水域を高精度で予測可能であることを示した。（北海道大学〔課題番号：1005〕）

（6）地殻変動即時評価手法の高度化

地震規模を即時的に推定するための技術開発として、GNSS 搬送波位相データから断層すべりを直接推定する手法を用いた地震時すべり推定の高度化を行い、2016年熊本地震 や 2011年東北沖地震の最大余震である茨城沖地震等で実用性を示した。また、リアルタイムに推定される断層すべりの不確実性を定量評価するための手法開発を行い、一枚矩形断層におけるMCMCを用いたアルゴリズムの開発を行った。これは改良を加えた形で2019年2月段階で国土地理院に技術移転され、今後の活用が期待される。また、リアルタイム用途を念頭に同手法のすべり分布への拡張を行ない（図6）、国土地理院と共同で開発しているリアルタイム地殻変動監視システム(REGARD)の高度化に貢献した。さらに、REGARD 等の結果を津波浸水推定に活用するための技術開発を進め、内閣府の総合防災情報システムの機能の1つに実装された。（東北大学〔課題番号：1209〕）

（7）火山灰拡散即時予測手法の高度化

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・拡散過程を把握することができた。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、気象条件に関わらずその有効性が示された（図7）。桜島の噴火については、観測された反射強度の空間分布と地上降灰量を対比し、反射強度と火山灰量との経験式を構築した。ライダー観測により、噴火発生時に加え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を確認し、偏光解消度により粒子の形状が推測可能であることを示した。さらに、火山噴火の噴煙により、GNSSによる搬送位相遅延量とSNRに顕著な変化があることが桜島、阿蘇山の噴火で確認され、衛星-受信機を結ぶ異常伝搬経路の交線から噴煙高度を推定することができた。降下火山灰シミュレーションによって得られる予測量が観測データと良好に対応することを示し、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。（京都大学防災研究所〔課題番号：1913〕）

3. 平成30年度の成果概要

（1）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 地震動の事前評価

○震源モデルの高度化

2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震(M_{JMA} 6.6)について、いくつかの観測点では2つの波群が確認されているため、経験的グリーン関数法により2つのSMGAからなる強震動震源モデルを推定した。2つ目のSMGA2の破壊開始点はSMGA1の破壊開始点より北北西に7.5km、また傾斜方向には5km浅い位置で、4.4秒後に破壊したと推定された。SMGA1および2の設定位置に近い余震記録を経験的グリーン関数として波形フィッティングを行った結果、SMGA1のサイズは $6 \times 6 \text{ km}^2$ 、SMGA2のサイズは $4.8 \times 4.8 \text{ km}^2$ と求められ、破壊

はどちらも深い方から浅い方へ進展した。応力降下量は両 SMGA とも約 7MPa と同様の地殻内地震のそれに比してやや小さい値に求まっている。波形インバージョン結果によるすべり分布と比較すると、SMGA1 はすべりの大きい領域に対応する一方、SMGA2 の位置は波形インバージョンによるすべりの大きい位置とはやや異なる位置に求まっていることがわかった。

2018 年 6 月 18 日に大阪府北部で発生した地震 ($M_{JMA}6.1$) の震源過程を強震記録の波形インバージョン解析(対象周波数帯域 0.1~2Hz)により推定した(図 8)。ほぼ南北走向の逆断層(断層 1)と北東-南西走向の右横ずれ断層(断層 2)の 2 つの震源断層が関わっていることが明らかとなった。なお、余震のメカニズム解析から推定した応力場は σ_2 と σ_3 がほぼ等しいことが分かっており、この地域では逆断層型、右横ずれ型の両方の地震が起こりえる環境にあり、本震の破壊過程とも矛盾しない。この地震の破壊は、最初に断層 1 で始まり、約 0.3 秒後に断層 2 の破壊が始まり、その破壊は南西の浅い側に向かって進展した。断層 1 および 2 はいずれも 4~5 km 四方の震源断層であり、主たるすべりは深さ 10~13km の範囲に集中し、震源断層の破壊は地表には到達していない。断層 2 は有馬-高槻構造線断層帯の 2~3km 南に位置する伏在断層の一部(伊丹断層の東部延長)と考えられ、今回の地震の破壊域の西端は 1987 年 8 月 21 日の右横ずれ型の地震 ($M_{JMA}4.2$) の余震域の東端に対応しており、一連の地震活動と考えられる。(京都大学防災研究所 [課題番号:1903], 浅野・他, 2018, Asano et al., 2018, 岩田・浅野, 2018, 岩田・他, 2018(1); 永井・他, 2018(1, 2, 3))

○地下構造モデルの高度化

大阪平野とその周辺の数値構造モデルを検証するため、2018 年 6 月大阪府北部の地震を対象に地震動シミュレーションを行った。用いた 3 次元速度構造モデルは大阪盆地モデルと奈良盆地モデル(関口・他, 2019)であり、後者は平成 29 年度の本研究で作成したものである。震源モデルには、前述の研究によるもの(Asano et al., 2018)を用いた。地震動シミュレーションは、震源モデルと大阪堆積盆地の 3 次元速度構造モデルを与えて 3 次元差分法により周波数 2Hz までの計算を行い、さらに沖積層等からなる浅部の地震動応答を浅層地盤構造モデルを用いて等価線形化法により計算した(図 1)。計算された地震動最大速度分布では、震央からみて南西~西方向に相対的に大きい値が広がった。これは北東南西走向の横ずれ断層のメカニズムに対応する S 波のラディエーションパターンと破壊伝播の影響が大阪堆積盆地による地震動の増幅効果が加わって形成されたと解釈できる。また、大阪盆地北縁部や上町断層帯北部の佛念寺山断層の西側に沿って帯状に最大速度が大きい地域が見られた。これは、基盤深さの急変により地震波の波面が大きく曲げられ、波のエネルギーに集中が起きたことによると考えられる。このような分布形状は大局的には観測値の分布と整合している。計算波動場には、直達波の後に堆積盆地基盤面と地表との間の多重反射波(例えば、岩田・他, 2018)や盆地端部および平野下に伏在する活断層による基盤の段差構造から発生した表面波など後続波の発生が見られ、場所によっては直達 S 波より大きな振幅を生じている。大阪平野内の地震観測点の観測波形と後続波の到来はよく対応しており、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られる。一方、計算地震動の振幅は観測に比べ全体的に小さく、また盆

地端部近くの観測点には波形の再現がよくない点があり、構造急変地域でのモデル更新が課題としてあげられる。(京都大学防災研究所 [課題番号: 1911], 岩田・他, 2018(2); 関口・他, 2018; 関口・他, 2019(1, 2))

秋田県横手盆地において常時微動単点およびアレイ観測を実施し、地盤構造モデルを作成した。それを用いて、横手盆地東縁断層北部が活動したとし 1896 年陸羽地震の強震動シミュレーションを実施し、J-SHIS モデルとの比較をおこなった(図 9)。その結果、同地域で基盤が深くなっていることが陸羽地震の被害域が南に延びた主要因であることが分かった。(拠点間連携研究 [課題番号: 2953], 佐藤・他, 2018; 佐藤・他, 2019)

2011 年東北地方太平洋沖地震の際に周期 1~3 秒の大きな地震動が観測された東京湾西岸部と小田原地域を対象に、J-SHIS モデル、微動探査結果などを対象に浅部深部統合初期モデルを作成し、1 次元重複反射を仮定したハイブリッドヒューリスティック法による地盤増幅特性の逆解析によって、S 波速度および Q 値を同定した(図 10)。2018 年北海道胆振東部地震の被災域への適用のため、微動探査を実施している。(拠点間連携研究 [課題番号: 2955], 津野・他, 2019)

同じ土質試験結果を対象としても、解析パラメータ設定のばらつきにより、技術者毎に解析結果に大きな違いが生じる場合があることを確認した。また、2 次元有効応力解析 FLIP を用いて、強震動下の液状化地盤応答を検討した。地盤増幅率と周期比(地盤と入力地震動)の関係では、入力波が増加すると地盤増幅率の変動幅が小さくなる傾向を示した。なお、一般的な液状化指数(PL)では明瞭な傾向が見えなかったが、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(LRI)が大きくなる時、地盤増幅率の変動幅が有意に小さくなることが分かった(図 11)。(拠点間連携研究 [課題番号: 2990], 地元・他, 2019; 一井・他, 2019; 田中・他, 2019)

○強震動評価の高度化

2019 年 1 月 3 日に発生した熊本県熊本地方の地震(M5.1)は、震源が浅い(気象庁暫定値 10 km)横ずれ型のメカニズムを持つものであった。この地震により熊本県和水町で震度 6 弱、熊本市北区と熊本県玉東町で震度 5 弱を観測し、住宅の瓦のずれやガラスの破損、神社の石灯籠などに被害が出た。和水町の震度計の波形記録を調べると、S 波に後続して表面波とみられる周期 0.5 秒程度の長い波群が確認された。速度応答スペクトルを求めると、周期 0.5 秒の狭い周期帯に 110 cm/s の強い速度応答が確認された(図 12)。この周期帯は計測震度を大きくするが、木造家屋の倒壊を起こす周期帯(1~2 秒)より短いことから、被害が限定的であった可能性がある。和水町では、2016 年 4 月 14 日の熊本地震前震(M6.5)と 4 月 16 日の本震(M7.3)でも震度 6 弱と 5 弱が観測されている。いずれの地震波形も同様の周期特性を示しており、地盤の影響が考えられる。なお、熊本地震本震では、周期 0.5 秒の強い応答に加え周期 1~2 秒にもやや大きい(>40 cm/s)応答が見られた。これに対して、2019 年 1 月の地震は M が小さく、震源スペクトルが長周期帯で弱かったものと考えられる。(東京大学地震研究所 [課題番号: 1516], 古村, 2018; Furumura and Kennett, 2018; 向井・他, 2019)

2011 年東北地方太平洋沖地震について、Kurahashi and Irikura(2013)による SMGA1(M7.55)からの地震動を、前弧および背弧側に分けて距離減衰式と比較し、PGA, PGV

とも過小評価となることを示した（図13）。2003年十勝沖地震についても同様であった。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。（拠点間連携研究〔課題番号：2991〕，Ishibe et al., 2018；木内・他，2019）

災害リスク評価のばらつきを理解するため、震源モデル（6通り）、強震動予測モデル（5通り）、表層地盤増幅率（3通り）、これらに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。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。（拠点間連携研究〔課題番号：2951〕）

イ．地震動による構造物被害の事前評価

将来時点の予測をおこなうことを前提に、木造戸建住宅の棟数および築年数分布の将来予測方法を検討した。高知県南国市を対象に、固定資産課税台帳から抽出されたデータを用いて、築年数ごとの建物残存率を疑似的に推定した。これに加え、住民基本台帳から抽出されたデータを用いて、建物用途種別、居住率、1棟あたりの平均居住世帯数の時系列変化を分析した。これらに基づき、固定資産課税台帳から抽出されたデータを用いて将来予測を行った（図14）。（拠点間連携研究〔課題番号：2952〕，河野・西嶋，2018）

ウ．地震による地すべりの事前評価

2008年中国ブン川地震、2015年ネパールゴルカ地震による斜面崩壊の分析を進めた結果、谷の侵食加速による谷中谷に数多くの崩壊が集中していることが明らかになった。我が国でも特に西南日本外帯には谷中谷が広く分布していることが判明しつつあり、特に南海トラフ地震時に要注意であることが明らかとなった。2018年北海道胆振東部地震によって発生した壊滅的な地すべりでは、強風化軽石およびその直下の火山灰土にすべり面が生じた（図15）。その他の過去の事例も踏まえると、降下火砕物斜面の地震時地すべりのすべり面形成層準として、風化した軽石とその近傍の地層が地震時地すべりに対して最も危険であることがわかった。これらの分布は、火山灰層序学的に調べることが可能である。

谷埋め盛土において、事例収集できたPGAが200 galまでのイベントでは、PGA、PGV、AI (Arias Intensity) と間隙水圧の上昇量は高い正の相関を示すとともに、震動の周波数特性が異なり、長周期 (>1秒)成分を多く含んだイベントはPGVの大きさに比して間隙水圧の上昇量は小さかった（図16）。

四国の大規模地すべり斜面における稠密な常時微動観測から、H/V スペクトルのピーク周波数が空間的に連続性を持つことがわかり、その連続性が地表変位によって判別した地すべりブロック分割とは異なることが明らかになった。平成30年大阪府北部の地震において、谷埋め盛土における擁壁の変形メカニズムを明らかにするとともに、高い地下水位を持つ公園での地すべり現象を調べた。また、平成30年北海道胆振東部地震において、札幌市および厚真町の谷埋め盛土にて調査をおこない、旧谷筋周辺を2～3m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。厚真町の大規模岩盤地すべりにおいては余震観測をおこない、特有の周波数(2 Hz)で長く震動することが分かった。（京都大学防

災研究所 [課題番号：1912]，Chigira et al.，2018；土井・他，2018；Doi et al.，2019；Ma et al.，2019；Tsou et al.，2018；Zhao et al.，2018)

斜面崩壊に伴う地震動の特徴を検討した(表1)。高周波卓越周波数はおおむね1-10Hz程度で崩壊タイプに大きく依存しない。継続時間は概ね30～200秒程度で、イベントの長さを反映していると考えられる。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20mを超える大規模な地すべり性崩壊で確認されることが推察される。あわせて地形がシミュレーションに及ぼす影響も評価している。(拠点間連携研究[課題番号：2994]，土井・他，2018；Doi，2018)

エ．火山灰や溶岩噴出の事前評価

大規模噴火を想定した JMA-RATM による降灰シミュレーションから降灰確率を求めた結果，富士山で宝永規模の噴火が起きた場合に，都心で10cm以上の降灰になる確率は3.3%，桜島で大正規模の噴火が起きた場合に鹿児島市街で1cm以上の降灰になる確率は7.8%と試算された。(気象庁気象研究所 [課題番号：7010])

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア．地震動の即時予測

現在の緊急地震速報で用いられている“震源とマグニチュードの早期決定”という考え方に加えて“揺れから揺れを予測する”という考え方で研究を進めている。平成30年度は地震波の散乱や減衰構造の精緻化，PLUM法の高度化，地盤増幅特性の適正化に取り組んだ。これにより，これまで以上の精度や堅牢性・迅速性が得られ，速度構造，散乱・減衰構造をとり入れることで，さらに早い段階で精度よく予測できることが分かった。また，強震入力時の海底地震計の挙動とその対策や，地震動の伝播方向をリアルタイムで推定することの考察を進めた。“揺れから揺れを予測する”という考え方は，長周期地震動に対しても十分に適用できることが示された。(気象庁気象研究所 [課題番号：7008]，Kodera，2018；Kodera et al.，2018；Ogiso et al.，2018)

上記研究のように揺れの実況分布から揺れの伝播を予測するには，観測点密度が重要なため，気象庁観測点よりも高密度で配置されている自治体震度計の利活用を目指した検討を行っている。鳥取県管理の計測震度計34点からの1秒パケットのリアルタイム震度と最大加速度値を，鳥取県情報ハイウェイを介して継続受信し，気象庁緊急地震速報で導入されるPLUM法を用いたリアルタイム震度の表示システムを昨年度に試作した。今年度は，これにPLUM法では考慮されていない距離減衰を導入し，また1kmメッシュとした予測点全てを2次震源とする波動伝播を考慮した。さらに，P波を用いた震度予測の概念の導入も試みた。これらを2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震のリアルタイム震度を模擬したデータに適用したところ，より早く，かつ精度良く震度分布の予測が可能となった(図4)。

震度計観測点における震度情報から周辺の非観測点での震度を予測することを想定し，常時微動を用いた地盤震動特性の稠密把握および地下構造モデルの構築を実施した。今年度は，既往観測点分布が粗な地域のうち，北栄町，倉吉市関金地区，および智頭町を対象とし，既往データを補間した卓越周期分布および浅層地下構造モデルを得ることができた。2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震(M6.6)の被災域および2000年鳥取県西部地震

の境港市では、常時微動を用いた地盤卓越周期や地下構造モデルでは説明できない強震動が観測された。これらは非線形地盤応答による卓越周期の長周期化や短周期地震動の減衰による影響考えられ、これらの観測点における非線形地盤応答の実態について検討をおこなった。(鳥取大学工学研究科 [課題番号: 2001], 香川, 2018(1, 2), 2019; 香川・野口, 2018; 香川・他(2018); 神定・他, 2018; 神定・他, 2019; 西村・他(2018); 野口・他, 2018(1, 2, 3), ; 吉田・他, 2018)

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。データ同化手法は、震度の即時予測(Hoshiba and Aoki, 2015)や津波の即時予測(例えば, Maeda et al., 2015)で広く活用されている最適内挿法を用いた。2007年新潟県中越沖地震(Mw6.6)の強震観測データ同化と予測では、評価領域を480km×480km×55kmとし、J-SHIS地下構造モデルを0.24kmの格子間隔で離散化して3次元差分法計算により長周期(> 2.7秒)地震動を計算した。データ同化は、領域内の482点の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。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(2048CPU)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、予測精度を高めることが可能である。2011年東北地方太平洋沖地震への適用例を図2に示した。近年の海域強震観測網(DONET, S-NET)の整備により震源域近傍でのデータ同化が可能となり、より猶予時間のある即時予測が可能になると期待できる。(東京大学地震研究所 [課題番号: 1516], Furumura et al., 2019)

利用者が多い大規模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、建物入力地震動のリアルタイム分類、揺れ継続時間の予測、に取り組んだ。地震の位置・規模・メカニズムの即時決定システム(GRID MT)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。これらを直接建物の被害把握などに用いることはできないが、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上で、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。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。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振動特性を考慮した揺れ継続時間を分析した。図17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。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。

(拠点間連携研究 [課題番号: 2958])

イ. 津波の即時予測

日本海溝・千島海溝に沿って150の津波計(圧力計)と地震計がケーブル式ネットワークシステム(S-Net)として設置された。昨年度は、地震発生後500秒の圧力観測波形の形状のみを利用して海溝型巨大地震による津波発生域(隆起域)を推定する手法を開発した。今年度は、推定された津波発生域の大きさから巨大地震の規模を推定する手法を開発した。まず過去に提案された4つのスケーリング則(宇津・関(1955), Wells and Coppersmith(1994), Somerville et al.(1999), Blaser et al.(2010))に従って、Mw8.0, 8.2, 8.4, 8.6, 8.8のそれぞれに対する断層モデルを千島海溝沿いにまんべんなく配置し、S-Net観測点で観測圧力波形を数値計算により作成した(図5)。それらの想定観測波形から、昨年度開発した手法により津波発生域を推定した(図5)。その津波発生域の面積を計算し、それらの対数をMwに対してプロットする(図18)。津波発生域の面積の対数とMwの関係を線形で近似するとともに、その誤差(標準偏差 Mw0.08)を推定した。この結果を用いれば津波を発生させた地震の規模を推定することができる。今回開発された手法を1952年十勝沖地震と1968年十勝沖地震の津波に適用し、その有効性を確かめた。1952年十勝沖地震についてはHirata et al.(2003), 1968年十勝沖地震についてはSatake(1989)のすべり量分布からS-Net観測点での海底圧力波形を計算した。それらの観測波形から津波発生域を本研究で開発された手法を用いて推定し、地震の規模を推定した。その結果、図18に示すように津波発生域は高精度で推定され、1952年十勝沖地震の規模は $Mw8.2 \pm 0.08$, 1968年十勝沖地震の規模は $Mw7.9 \pm 0.08$ と精度良く推定された。

なお、上記のようなケーブル式津波観測網がない地域では、地震波形解析により適切な断層モデルを推定する手法を開発する必要がある。特に津波地震に対応できる断層モデルを適切に推定することが重要となる。昨年度は深さに依存する剛性率を仮定することにより、津波地震による津波浸水予測にも対応できる手法を開発した。今年度は上記手法をインドネシアのスマトラ島沿岸では発生した2007年Bengkuru巨大地震(Mw8.4)と2010年Mentawai津波地震(Mw7.8)に適用した(図19)。典型的な巨大地震であるBengkuru地震の津波も、津波地震であったMentawai地震も、津波を上手く予測できることが分かった。さらに、1992年ニカラグア地震については、Gusman et al.(2014)の手法(NearTIF)を用いて津波浸水の即時予測が高精度で可能であることを示した。(北海道大学[課題番号:1005], Inoue et al., 2018. Ratnasari et al, 2018(1, 2); Tanioka, 2018; Tanioka and Gusman, 2018; Tanioka et al., 2018(1-4))

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について、海底水圧データに記録される津波成分とノイズ成分を波形逆解析において同時推定して分離できるように改良した。また、予測精度をリアルタイムに評価する指標を検討し、概ね適切に評価できることを確認した。津波の減衰過程の予測のため、昨年度の南米沖に加え、ニューギニア島からサモア諸島にかけて発生した地震に伴う遠地津波の減衰過程の特徴について調査を行い、減衰過程における振幅がマグニチュードと関係していることを明らかにした。リアルタイムGNSS測地データ解析によって推定される震源断層解との統合、波源の広がり小さな津波に対応するための段階的処理手法の導入等、手法の改良を行ったことに加え、波源推定に基づかない予測手法について、データ同化による津波面的把握とそれを用いた津波予測について検討し、マグニチュード8クラスの波源の広がり大きい津波に対しては概ね適切な予測ができることを確認した。遠地津波の継続時間の予測手法

について、沿岸津波観測データの移動自乗平均振幅の成長・減衰過程を数理モデルで表現し、地震のマグニチュードとの関係を明らかにすることで、継続時間の予測可能性を示した。（気象庁気象研究所〔課題番号：7011〕）

遠地実体波のスペクトル解析から得たスロー地震タイプの津波地震のスペクトルレベルをもつ近地の地震波形を理論波形として合成し、それらの津波地震に対する気象庁マグニチュード等の値を推定した。その結果、気象庁マグニチュードでは津波地震に対して1以上の過小評価の可能性があることを明らかにした。解析結果の公表までに時間を要していた遠地実体波震源過程解析の迅速化のため、サンプリング間隔・基底関数の数等を最適化し、比較的短い処理時間で安定して解が得られるよう処理の自動化を図った。（気象庁〔課題番号：7009〕，安藤，2018；Tamaribuchi，2018；Tamaribuchi et al.，2018；溜瀧，2017）

津波生成磁場に関して、Tyler(2005)による2次元線形長波津波モデルによる津波生成磁場の解析解の改良を試みた。Tyler(2005)の解は津波ダイナモ効果を引き起こす背景主磁場をZ成分のみとして求めたが、本研究では水平成分の効果も考慮した。新しい解は、鉛直分力が非常に小さくなる磁気赤道付近でも津波生成磁場を検出する可能性を示唆するものと考えられる。（気象庁〔課題番号：7007〕）

ウ. 地殻変動のリアルタイムモニタと震源断層の即時推定

平成28年度、29年度と開発を継続してきた、GNSS搬送波位相データから断層すべりを直接推定する手法の高度化について、海溝型地震に対して同手法を適用し、その性能評価を行った。また、平成29年度より開発を開始したリアルタイムGNSSデータによって推定される震源断層即時推定における不確定性の定量的評価の高度化については、すべり分布推定への拡張を行った。GNSS搬送波位相データから断層すべりを直接推定する手法（Phase To Slip, 以下 PTS と表記）を用いて、海溝型巨大地震の地震時すべり分布推定を試みた。

2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震では非常に活発な余震活動が見られ、本震発生から1時間のあいだにM7級の大きな余震が3つ相次いで発生した。このうち、本震から約30分後の15時15分に茨城県沖で発生したMw7.8の地震（以降、茨城沖地震）に対してPTSを適用した。解析では震央から半径100kmにある40点のGEONET点で記録された搬送波データを使用した。解析においては、GNSS衛星の軌道暦としてInternational GNSS Serviceが提供する精密暦（最終暦）と、GNSS衛星から直接送信される放送暦の両者を比較のために用いた。茨城沖地震は、プレート境界で発生した地震であるため、プレート境界面を仮定し、そこに矩形断層を配置することで断層面とした。具体的にはプレート境界等深線に沿って、震央を中心に288枚の矩形断層を仮定した。図20にPTSによって推定された茨城沖地震のすべり分布の結果を示す。地震時すべり量は地震発生時刻の15分前から5分前の10分間の平均をその値とした。精密暦・放送暦の場合でほぼ同様の結果となった。また、全体的に放送暦の方がわずかに大きいすべりが推定された。両者によるすべり量の差異は断層面全体の平均で5cmとなった。最大のすべりは震央からおよそ40km海溝軸寄りの位置で推定され、1.9~2.0mとなった。平均すべりは0.6~0.7mで、Mw7.8相当である。すべりの方向は大部分の断層面でほぼ純粋な逆断層性を示している。これら得られた結果は、例えば強震データから推定されたすべり分布（Honda et al.，2013）とも概ね調和的であり、PTSが海溝型巨大地震に対しても有効であることが明らかになった。また、IGS精密暦と放送暦

の両者がよく一致する結果を示したことは、外部情報に依拠しない地震時すべり分布推定が可能であることを改めて示唆する結果と考えることができる。一方、PTSで推定されたすべり時系列は地震に伴うステップ状の断層すべりは明瞭に捉えているものの、それ以外の時間帯域における安定性は低い。また計算に要する時間もまだ短縮の必要があり、今後も継続した技術開発が必要と考えられる。

リアルタイムGNSSデータによって推定される震源断層即時推定における不確定性を定量的に評価することを目標として、マルコフ連鎖モンテカルロ法(Markov Chain Monte Carlo methods: 以下, MCMC)を用いた震源断層推定の不確実性定量評価の高度化を進めた。具体的には、より複雑な断層破壊を表現するために、プレート境界におけるすべり分布推定誤差の定量評価を試みた。すべり分布を推定するためにはプレート境界面上を小断層に分割する必要があるが、多数の小断層上でのすべりをそのままMCMCによって推定しようとする、解の収束に膨大な時間を要し、リアルタイム用途には適さないことが明らかになった。そのため、解析を複数ステージに分割し、ステージが進行するに従ってすべり量が多い領域のみ徐々に小断層のサイズを小さくすることで、すべり量が少ない部分への計算コストを下げる四分木アルゴリズムを開発した。適用事例は2011年東北地方太平洋沖地震であり、地震後600秒後時点のキネマティックPPP解析の結果をデータとして用いた。ステージは全部で4つとし、1, 2ステージでは断層面は8枚と31枚に設定し、その後のステージ3および4では、直前のステージ2もしくは4で、モーメント解放量が全体の上位80%を占める小断層のみを細分化した。これによって、MCMCによるすべり量推定を大幅に効率化することに成功し、観測点267点、サンプル数が 3.1×10^6 の場合で900秒程度で計算を終えることができるようになった。各ステージ毎の、各小断層毎に得られる事後確率分布(PDF)の中央値によるすべり分布を図6に示した。ステージが進むに従い、すべり量が細分化されていく様子が明瞭に分かる。今後は、このように得られた断層すべりの不確実性をどのように活用していくかの検討が必要である。(東北大学[課題番号1209], Kawamoto et al., 2018; Musa et al., 2018; 大野・太田, 2018; Ohta et al., 2018; Tanaka et al., 2019)

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及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。加えて、電子基準点リアルタイム解析システムにおいて、相対測位法に加え、固定点が不要なため震源断層モデルが安定的に推定できると見込まれる精密単独測位法を試験的に導入した。さらに、観測点周辺の地物からのマルチパス誤差を定量的に評価する手法を開発し、これを補正值としてキネマティック GNSS 解析に用いることで、精度の向上が見込めることを確認した。(国土地理院[課題番号: 6004], Kawamoto et al., 2018)

エ. 火山灰や溶岩噴出の即時予測

2009年以降、ブルカノ式噴火の発生頻度がきわめて高い桜島を対象に、噴火に伴う噴煙の早期検知と粒子密度の推定を目的とした地上観測を実施した。地上からのリモートセンシング観測で用いた手法はGNSS, XバンドMPレーダー, ライダーであり、この順に波長が短くなる。2015年後半以降、桜島の噴火活動は低レベルで、2017年および2018年の爆発回数は76回及び254回であり、1000回近い爆発が発生した2010年~2015年の1/5程度である。2017

年10月までは昭和火口において噴火が発生したが、2017年11月以降は南岳のB火口において噴火が発生し、昭和火口の噴火活動は概ね停止した状態にある。

XバンドMPレーダーによる噴煙観測を霧島、桜島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島において継続した。このうち2018年において噴火が発生したのは、霧島新燃岳、桜島、口永良部島、諏訪之瀬島であり、いずれの火山においてもレーダーにより噴煙を検出できた。図7に2018年12月18日に口永良部島で発生した噴火のレーダー画像を示した。噴煙に対応する強い散乱体が火口上の4500m程度上空まで確認できる。噴火発生時は、口永良部島新岳の火口上低い高度に雲があり、目視観測では噴煙の最高到達高度は確認できないが、XバンドMPレーダーを使用することにより、冠雲時でも噴煙を可視化できることを示すことができた。

火山灰拡散シミュレーションには多くのコードがあるが、大気中浮遊または降下火山灰を量的に自動的に予測するものは無い。火山灰粒子の移流を決める風の場合は、気象庁により予測公開されているが、噴出した火山灰量を即時的に評価するシステムが無いためである。また、噴煙高度についても上述したように常に目視観測が可能な訳ではない。Iguchi (2016) は火山噴火に伴う地震動の振幅と地盤変動から評価される圧力源の体積変化量の線形結合から火山灰放出量を評価する手法を開発した。この手法により火山灰放出率をリアルタイムで評価し、経験的に導出された噴出率と噴煙高度の経験式を用いて即時的に火山灰の拡散および降下量を予測することが可能となる。京都大学及び筑波大学のサーバーに火山灰予測を実装した。火山灰拡散予測の結果を図21に示す。火山灰の拡散方向は概ね一致している。降下火山灰量についても、 $2\text{kg}/\text{m}^3$ に達する桜島南西部の降灰量を予測できた。(京都大学防災研究所 [課題番号: 1913], 中道・他, 2018; Tanaka and Iguchi, 2019)

気象研究所で開発した気象レーダー観測網を用いた噴煙高度の確率的推定手法を用いて、霧島山(新燃岳)(2017~2018年)、草津白根山(本白根山)(2018年)、口永良部島(2019年)の噴火事例を解析した。航空路火山灰情報(VAA)業務で作成している現業者による火山灰雲の解析結果を火山灰データ同化システム(プロトタイプ)に取り込めるよう機能を拡張した。これにより多くの事例で火山灰雲領域の過大予測が抑制され、予測精度が改善された。(気象庁気象研究所 [課題番号: 7010], 石井・他, 2018(1, 2); Sato et al, 2018; 佐藤・他, 2018(1-4); 新堀・他, 2018)

4. 今後の展望

5ヶ年の研究計画における最終年として、それぞれの研究課題において既往研究成果の高度化が進み、また新たな取り組みに関して成果が継続して蓄積されており、地震・火山噴火の災害誘因の事前評価や即時推定における実務での活用が試みられている。これを承け、さらなる高度化に向けて継続的な第二次の検討を継続実施する。その際、これら事前・即時予測に関する情報を効果的に社会に伝達し減災に繋げるため、社会科学と連携した検討を引き続きおこない、社会から個人に至る行動を災害の軽減に向けて集約する手法を模索し続ける。

成果リスト

- 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.
- 浅野公之, 岩田知孝, Miroslav HALLO, 2018, 強震記録による2018年6月18日大阪府北部の地震の震源過程, 日本地震学会2018年秋季大会, S24-09.
- Asano, K., T. Iwata, and M. Hallo, 2018, Rupture Process of the 2018 Northern Osaka Earthquake (Mw 5.6), an Earthquake Involving Both Thrust and Strike-slip Faults Near a Junction of Major Active Fault Systems Surrounding the Osaka Basin, Japan, AGU 2018 Fall Meeting, S43C-0602.
- Asano, K., 2018, Source Modeling of an Mw 5.9 Earthquake in the Nankai Trough, Southwest Japan, using Offshore and Onshore Strong Motion Waveform Records, Bull. Seismol. Soc. Am., 108, 1231-1239.
- Chigira, M., Sato, T., Matsushi, Y. & Suzuki, T., 2018, Landslides induced by the 2016 Kumamoto earthquake and its application to future earthquake-induced landslides (Invited), The 5th International symposium on Mega earthquake induced geo-disasters and long term effects, Chengdu, 7-8.
- 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.
- 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, Engineering Geology, 248, 80-88.
- 土井一生, 釜井俊孝, 王功輝, 千木良雅弘, 2018, 地震時地すべり減災に向けた観測研究 - 斜面地震学の展開 -, 日本地球惑星科学連合2018年大会, 招待講演, HDS11-01.
- 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 Geo-science and Disaster Mitigation in Japan and South Korea.
- Furumura, T. and BLN Kennett, 2018, Regional distance PL phase in the crustal waveguide - An analog to the teleseismic W phase in the upper-mantle waveguide, J. Geophys. Res., 123, <https://doi.org/10.1029/2018JB015>.
- 古村孝志, 2018, 2015年5月30日小笠原諸島西方沖深発地震と異常震域の謎, 地震ジャーナル, 66, 40-51.
- 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>.
- 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, D29.

- Inoue, M., Y., Tanioka, Y. Yamanaka, 2018, Simple method for real-time tsunami source estimation using seafloor pressure sensor network in Japan, AOGS meeting 2018.
- 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.
- 石井憲介, 新堀敏基, 佐藤英一, 徳本哲男, 林勇太, 2018(1), 2016年10月8日阿蘇山噴火で放出された二酸化硫黄の静止気象衛星ひまわり8号による観測結果, 火山噴火予知連絡会会報, 126, 181-182.
- 石井憲介, 新堀敏基, 佐藤英一, 徳本哲男, 2018(2), 2017年10月10日から17日にかけての新燃岳の気象衛星ひまわり8号による観測結果, 火山噴火予知連絡会会報, 128, 324-326.
- 岩田知孝, 2018, 震源断層近傍の強震動特性, 2018, 第15回日本地震工学シンポジウム論文集, 698-703.
- 岩田知孝, 飯尾能久, 松島信一, 2018(1), 2018年6月18日大阪府北部の地震, 地震ジャーナル, 66, 1-8.
- 岩田知孝, 浅野公之, 田中宏樹, 2018(2), 大阪堆積盆地北西部の尼崎観測点で観測される繰り返し地震波後続波群の特徴と3次元地震動シミュレーション, 第15回日本地震工学シンポジウム論文集, G010-01-11.
- 岩田知孝, 浅野公之, 2018, 2018年6月大阪府北部の地震時の強震動, 第55回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, 65-66.
- 香川敬生・野口竜也, 2018, 自治体震度計ネットワークを用いたリアルタイム震度評価の試み -鳥取県の事例-, 日本地球惑星科学連合大会2018年大会, SCG65-06.
- 香川敬生, 2018(1), 自治体震度計ネットワークを用いたリアルタイム震度評価の試み -鳥取県の事例-, 土木学会第38回地震工学研究発表会, C12-1294.
- 香川敬生, 2018(2), 高密度の震度計ネットワークを用いた震度分布の即時推定 -鳥取県の事例-, 日本地震学会2018年度秋季大会, S13-12.
- 香川敬生・野口竜也・向坊恭介, 2018, 1943年鳥取地震による鹿野断層近傍における強震動の推定と被害との対応, 第15回日本地震工学シンポジウム, 0S2-03-07.
- 香川敬生, 2019, 鳥取県震度計ネットワークを利用した震度分布の即時推定-課題と対応-, 平成30年度東京大学地震研究所協同利用研究集会「地震動のリアルタイム解析:防災・減災に向けた即時的な活用を目指して」, 講演番号6.
- 神定 健二・高橋 功・篠原芳紀・香川 敬生・三宅弘恵, 2018, 東京都市部における地震防災のための震度分布図のリアルタイム推定, 日本地球惑星科学連合大会2018年大会, SCG65-05.
- 神定健二・高橋功・篠原芳紀・香川敬生・三宅弘恵, 2019, 自治体震度計観測網の次期更新計画への提案-観測網の拡充とデータのリアルタイム化-, 平成30年度東京大学地震研究所協同利用研究集会「地震動のリアルタイム解析:防災・減災に向けた即時的な活用を目指して」, 講演番号7.

- Kawamoto S., N. Takamatsu, S. Abe, K. Miyagawa, Y. Ohta, M. Todoroki, and T. Nishimura, 2018, Real-time GNSS analysis system REGARD: an overview and recent results, *J. Disaster Res.*, 13, No. 3, 440-452, doi:10.20965/jdr.2018.p0440.
- 木内亮太, 宮澤理稔, 瀬藤一起, 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, *D31*, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演会.
- Kodera, Y., Y. Yamada, K. Hirano, K. Tamaribuchi, S. Adachi, N. Hayashimoto, M. Morimoto, M. Nakamura, and M. Hoshiba, 2018, The Propagation of Local Undamped Motion (PLUM) method: a simple and robust seismic wavefield estimation approach for earthquake early warning. *Bulletin of Seismological Society of America*, 108(2), 983-1003.
- Kodera, Y., 2018, Real-time Detection of Rupture Development: Earthquake Early Warning Using P Waves from Growing Ruptures. *Geophysical Research Letters*, 45, 156-165.
- 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.
- 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, *Engineering Geology*, 249, 218-234.
- 向井優理恵, 古村孝志, 前田拓人, 2019, 関東平野における長周期地震動強度の特徴的方位依存性とその要因, 東京大学地震研究所彙報, 印刷中.
- Musa, A., O. Watanabe, H. Matsuoka, H. Hokari, T. Inoue, Y. Murashima, Y. Ohta, R. Hino, S. Koshimura, and H. Kobayashi, 2018, Real-time tsunami inundation forecast system for tsunami disaster prevention and mitigation, *J. Supercomput.*, 74, 3093-3113, doi:10.1007/s11227-018-2363-0.
- 永井夏織, 浅野公之, 加藤護, 岩田知孝, 2018(1), 経験的グリーン関数法を用いた 2016 年鳥取県中部の地震の広帯域震源モデル, 第 15 回日本地震工学シンポジウム論文集, 110-118.
- 永井夏織, 浅野公之, 加藤護, 岩田知孝, 2018(2), 経験的グリーン関数法を用いた 2016 年鳥取県中部の地震の震源モデルの推定, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, SSS14-P30.
- 永井夏織, 浅野公之, 加藤護, 岩田知孝, 2018(3), 経験的グリーン関数法を用いた 2016 年鳥取県中部の地震の SMGA モデル, 日本地震学会 2018 年秋季大会, S14-05.
- 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.
- 西村武・西川隼人・野口竜也, 2018, 2016年鳥取県中部の地震を対象とした木造建物の最大応答変形角評価式の検討, 土木学会第38回地震工学研究発表会, A22-1363.
- 野口竜也・西川隼人・香川敬生・吉田昌平, 2018(1), 2016年鳥取県中部の地震における非線形地盤応答の基礎的検討, 土木学会論文集A1, Vol. 74, No. 4(地震工学論文集第37巻), I_1010-I_1016.

- 野口竜也・中井翔・吉見和・上野太士・日高大我・西川隼人・吉田昌平・香川敬生, 2018(2), 2016年鳥取県中部の地震による被害要因と地盤震動特性の把握, 日本地球惑星科学連合大会2018年大会, SSS14-P16.
- 野口竜也・中井翔・日高大我・吉見和・西川隼人・吉田昌平・香川敬生, 2018(3), 微動および地震観測に基づく鳥取県中部域の地盤構造推定と地盤震動特性の把握, 第15回日本地震工学シンポジウム, OS2-03-08.
- Ogiso, M., M. Hoshiya, A. Shito, and S. Matsumoto, 2018, Numerical Shake Prediction for Earthquake Early Warning Incorporating Heterogeneous Attenuation Structure: The Case of the 2016 Kumamoto Earthquake. *Bulletin of Seismological Society of America*. 108 (6): 3457-3468.
- 大野圭太郎, 太田雄策, 2018, MCMC を用いたリアルタイム GNSS データによる単一矩形断層推定の不確実性定量評価の試み - 2011年東北地方太平洋沖地震への適用例 -, 測地学会誌, 64, 39-50, doi: 10.11366/sokuchi.64.39.
- Ohta Y., T. Inoue, S. Koshimura, S. Kawamoto, and R. Hino, 2018, Role of real-time GNSS in near-field tsunami forecasting, *J. Disaster Res.*, 13, No. 3, 453-459, doi:10.20965/jdr.2018.p0453.
- Ratnasari, R. N., Y. Tanioka, and A. R. Gusman, 2018(1), Rapid Determination of Source Models for Tsunami Early Warning Using a Depth Dependent Rigidity Curve: Case Studies for the 2007 Bengkulu and 2010 Mentawai Tsunami Earthquakes, AOGS meeting 2018.
- Ratnasari, R. N., Y. Tanioka, and A. R. Gusman, 2018(2), Rapid determination of source models for Tsunami Early Warning using a depth dependent rigidity curve: case studies for Indonesia, SCSTW 2018 (3rd place of the best presentation award).
- Sato. E, K. Fukui, and T. Shimbori, 2018, Aso volcano eruption on October 8, 2016, observed by weather radars. *Earth, Planets and Space*, 70:105, 1-8.
- 佐藤英一, 新堀敏基, 福井敬一, 石井憲介, 徳本哲男, 2018(1), 気象レーダーで観測された2016年10月8日阿蘇山噴火に伴う噴煙エコー, 火山噴火予知連絡会会報, 126, 175-180.
- 佐藤英一, 福井敬一, 新堀敏基, 石井憲介, 徳本哲男, 2018(2), 気象レーダーで観測された2017年10月霧島山(新燃岳)噴火に伴う噴煙エコー, 火山噴火予知連絡会会報, 128, 316-319.
- 佐藤英一, 新堀敏基, 福井敬一, 石井憲介, 徳本哲男, 2018(3), 気象レーダーで観測された2018年1月23日草津白根山噴火に伴う噴煙エコー, 火山噴火予知連絡会会報, 129, 78-82.
- 佐藤英一, 福井敬一, 新堀敏基, 石井憲介, 徳本哲男, 2018(4), 気象レーダーで観測した2018年3月から5月にかけての霧島山(新燃岳)噴火に伴う噴煙エコー, 火山噴火予知連絡会会報, 130, 292-298.
- 佐藤啓太, 松島信一, 松下隼人, 増田峻介, 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, OS2-01-03.
- 佐藤啓太, 松島信一, 松下隼人, 増田峻介, 吾妻崇, 野澤貴, 2019, 微動観測記録に基づく

- 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.
- 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.
- 関口春子, 岩田知孝, 浅野公之, 2019(1), 2018年6月18日大阪府北部の地震による大阪平野の強震動シミュレーション, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, A18.
- 関口春子, 浅野公之, 岩田知孝, 2019(2), 奈良盆地の3次元速度構造モデルの構築と検証, 地質学雑誌, 受理済.
- 新堀敏基, 石井憲介, 佐藤英一, 徳本哲男, 森健彦, 林洋介, 吉田知央, 松田康平, 2018, 2017年10月霧島山(新燃岳)噴火に伴う降灰予測, 火山噴火予知連絡会会報, 128, 320-323.
- Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018, Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog. *Earth Planets and Space*, 70, 90.
- Tamaribuchi K., 2018, Evaluation of automatic hypocenter determination in the JMA unified catalog, *Earth Planets and Space*, 70, 141.
- Tanaka, H., M. Iguchi, 2019, Simulations of volcanic ash plume dispersal for Sakura-jima using real-time emission rate estimation, *Jour. Disast. Res.*, 14, 160-172.
- 田中宣多, Gautham Adapa, 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, D30.
- Tanaka Y., Y. Ohta, and S. Miyazaki, 2019, Real-time Coseismic Slip Estimation via the GNSS Carrier-Phase to Fault Slip Approach: A Case Study of the 2016 Kumamoto Earthquake, *Geophysical Research Letters*, 46, doi:10.1029/2018GL080741.
- Tanioka, Y., A.G. Cabrera, and Y. Yamanaka, 2018(1), Determination of a Fault Size from a Dispersive Character of a Tsunami: a Case Study for the 2016 El Salvador-nicaragua Outer-ride Earthquake, AOGS meeting 2018.
- Tanioka, Y., G. Arguello, U. Grillo and A. Cabrera, 2018(2), Real time tsunami inundation forecast method developed for Central America Region, SCSTW 2018.
- Tanioka, Y., A.G. Cabrera, and Y. Yamanaka, 2018(3), Simulation of a Dispersive Tsunami due to the 2016 El Salvador? Nicaragua Outer-Rise Earthquake (Mw 6.9), *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-018-1773-5.
- Tanioka, Y., G.J. Arguello, and A.R. Gusman, 2018(4), Rapid Determination of Appropriate Source Models for Tsunami Early Warning using a Depth Dependent Rigidity Curve: Method and Numerical Tests, EGU meeting 2018.
- Tanioka, Y., 2018, Tsunami simulation method assimilating ocean bottom pressure data near a tsunami source region, *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-017-1697-5.
- Tanioka, Y., and A.R. Gusman, 2018, Near-field tsunami inundation forecast method assimilating ocean bottom pressure data: A synthetic test for the 2011 Tohoku-oki tsunami, *Phys. Earth Plan. Int.*, doi: 10.1016/j.pepi.2018.08.006.
- Tsou, C. Y., Chigira, M., Higaki, D., Sato, G., Yagi, H., Sato, H. P., Wakai, A., Dangol,

V., Amatya, S.C. & Yatagai, A., 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.

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，瀨瀬一起，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。

吉田昌平・香川敬生・野口竜也，2018，2016年鳥取県中部の地震における臨時余震観測に基づいた広域の強震動評価，土木学会論文集A1, Vol. 74, No. 4(地震工学論文集第37巻), I_417-I_428.

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

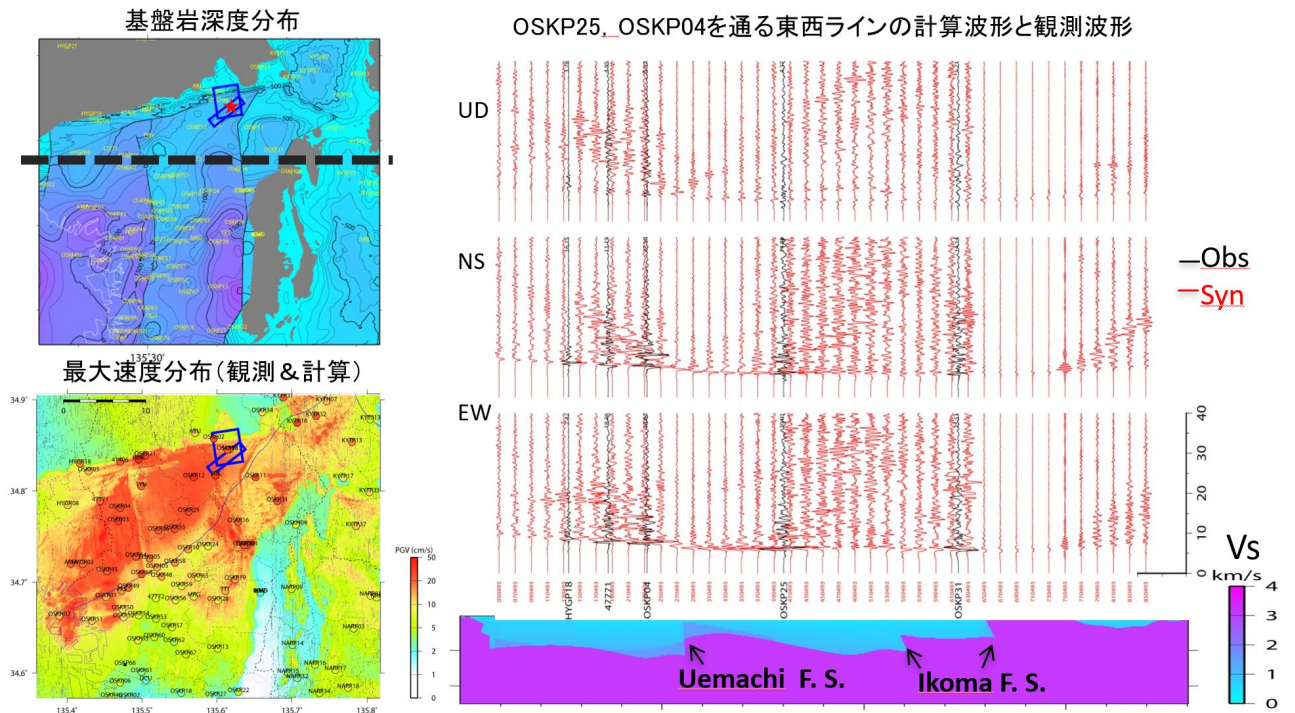


図1. 2018年6月18日大阪府北部の地震 ($M_{JMA}6.1$) による大阪平野-奈良盆地の地震動シミュレーション (京都大学防災研究所 [課題番号: 1903, 1911])

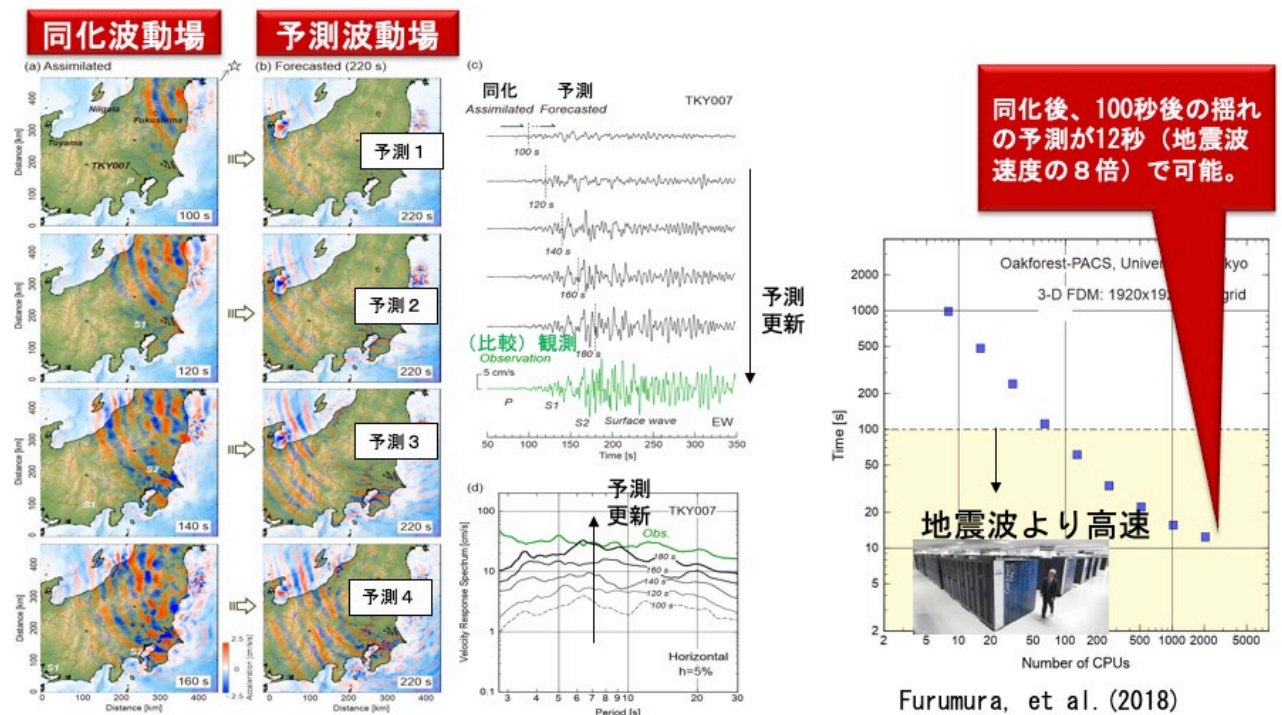


図2. 2011年東北地方太平洋沖地震のデータ同化によるシミュレーション (東京大学地震研究所 [課題番号: 1516])

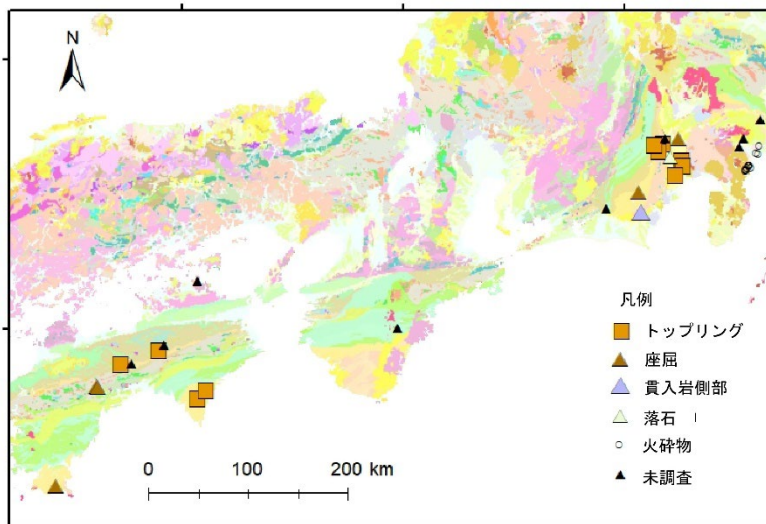
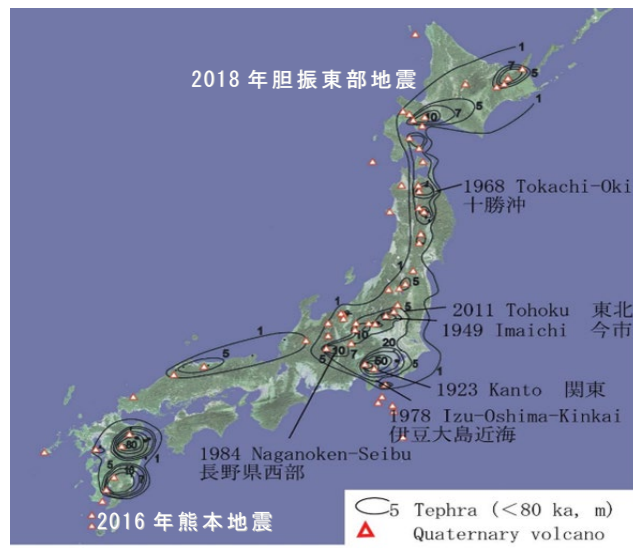


図3. 火山地域(上)および非火山地域(下)の地震時崩壊の分布と種類

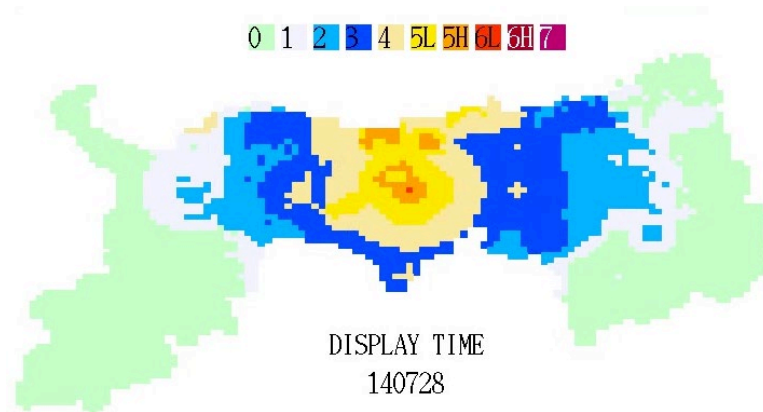


図4. 鳥取県震度ネットワークを用いた2016年鳥取県中部の地震の事後評価：緊急地震速報第1報が出された時刻における予測震度分布（鳥取大学工学研究科 [課題番号：2001]）

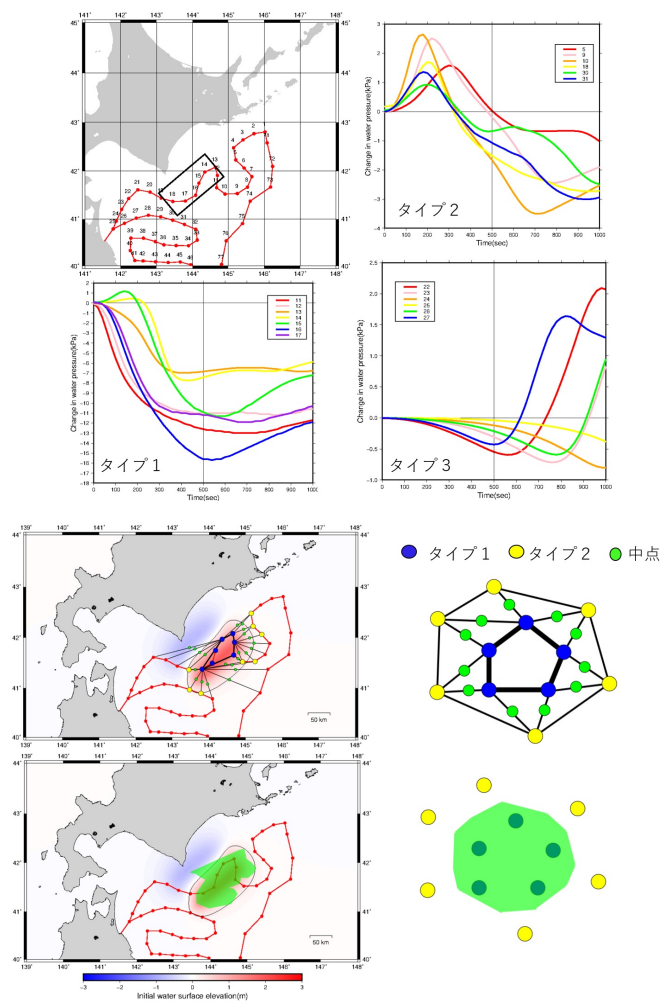


図5. S-NET 観測波形から直接波源を推定する手法：数値計算による津波圧力波形を波源との位置関係で分類し、観測された波形から津波波源を推定（北海道大学 [課題番号：1005]）

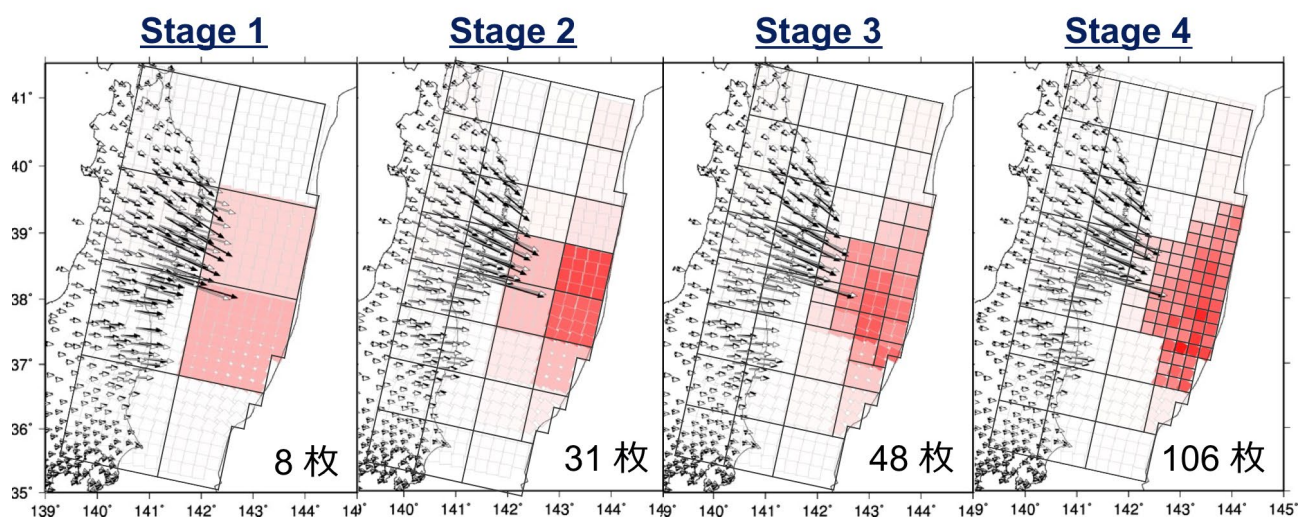


図6. 四分木アルゴリズムによるすべり分布推定：断層面が細分化され不確実性をリアルタイム把握できる可能性がある（東北大学 [課題番号：1209]）

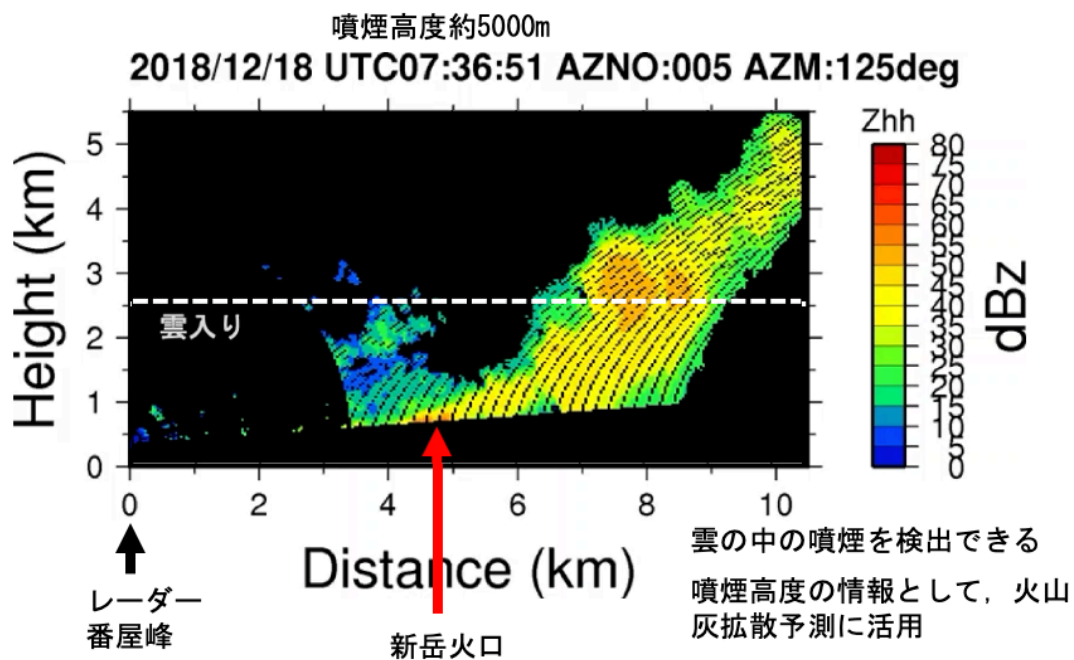


図7. XバンドMPレーダーにより検知された2018年12月の口永良部島噴火の噴煙
(京都大学防災研究所 [課題番号: 1913])

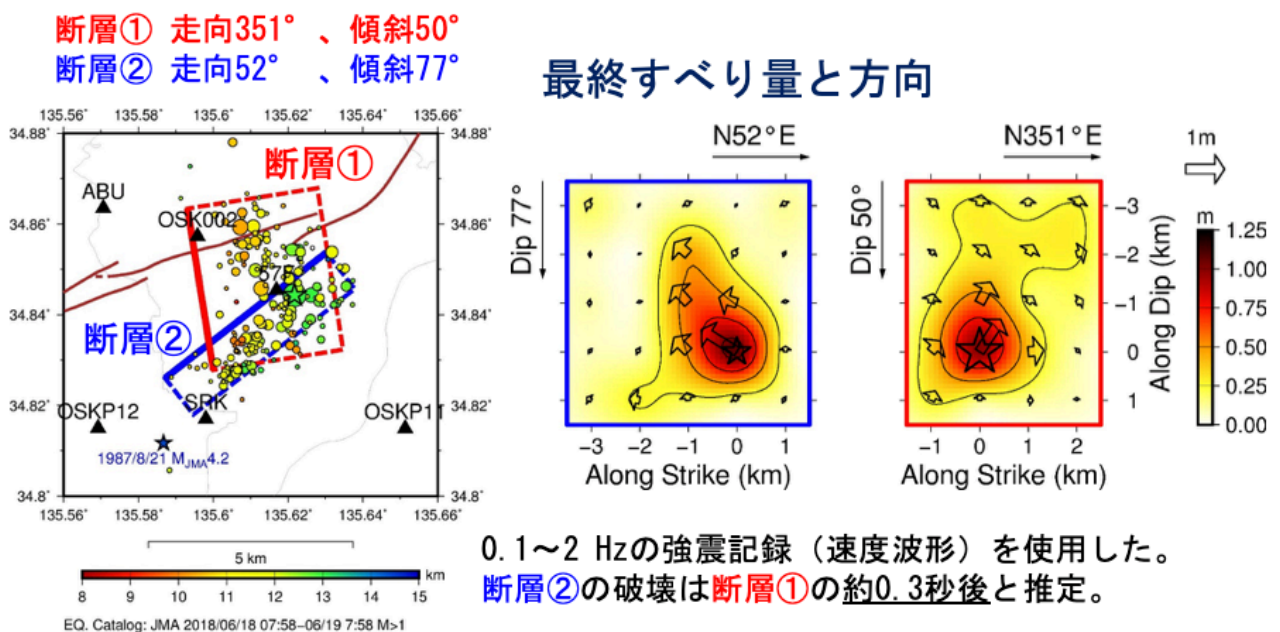
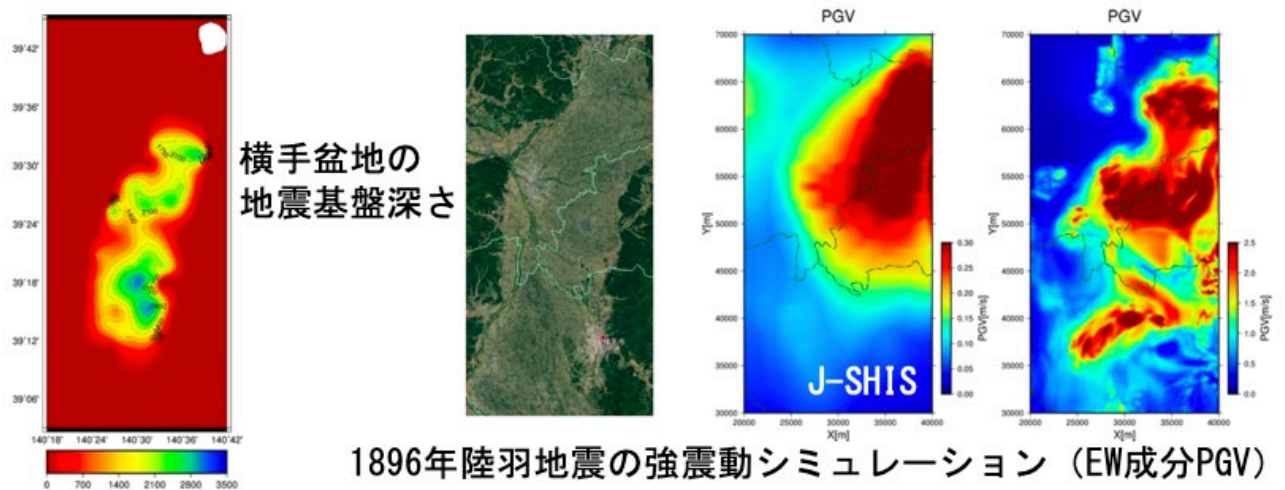


図8. 強震記録を用いた2018年6月18日大阪府北部の地震 ($M_{JMA}6.1$) の震源過程の推定
(京都大学防災研究所 [課題番号: 1911])



1896年陸羽地震の強震動シミュレーション (EW成分PGV)

図9. 横手盆地の地下構造モデルと1896年陸羽地震の強震動シミュレーション
(拠点間連携研究 [課題番号: 2953])

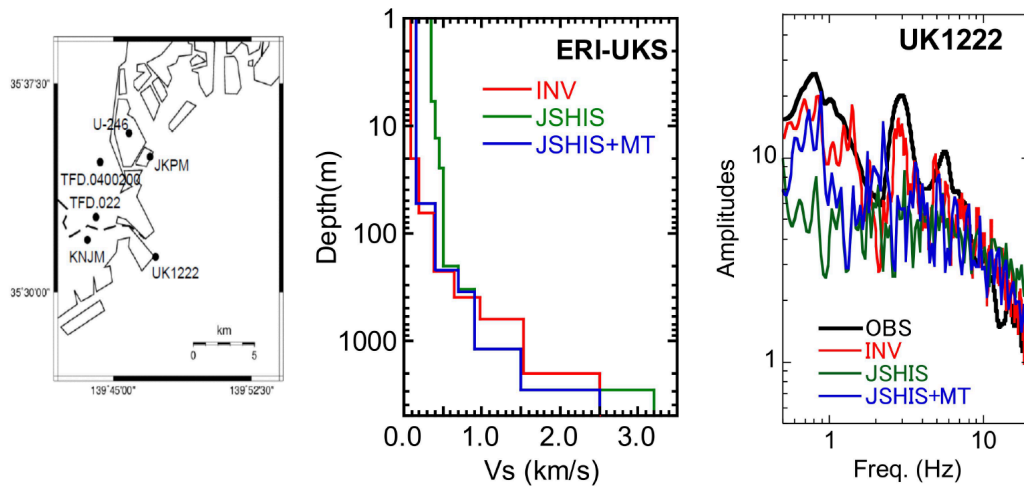


図10. 東京湾西岸部(UK1222)の1次元浅部深部統合地盤モデルとサイト特性の比較
(拠点間連携研究 [課題番号: 2955])

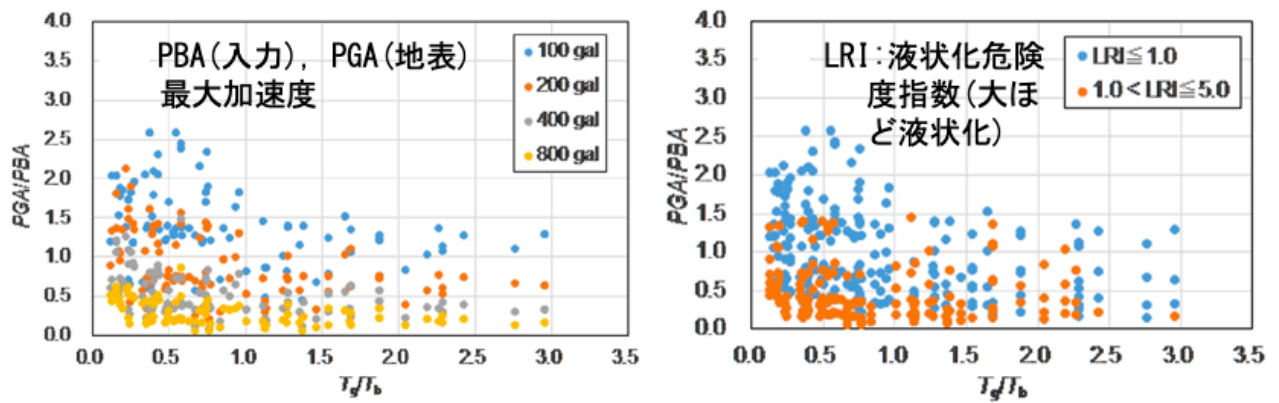


図11. 地盤増幅率（縦軸）と周期比（横軸： T_g (地盤)と T_b (入力地震動)の固有周期)の関係：左は入力加速度で、右は液状化危険度指数(LRI)で分類（拠点間連携研究 [課題番号：2990]）

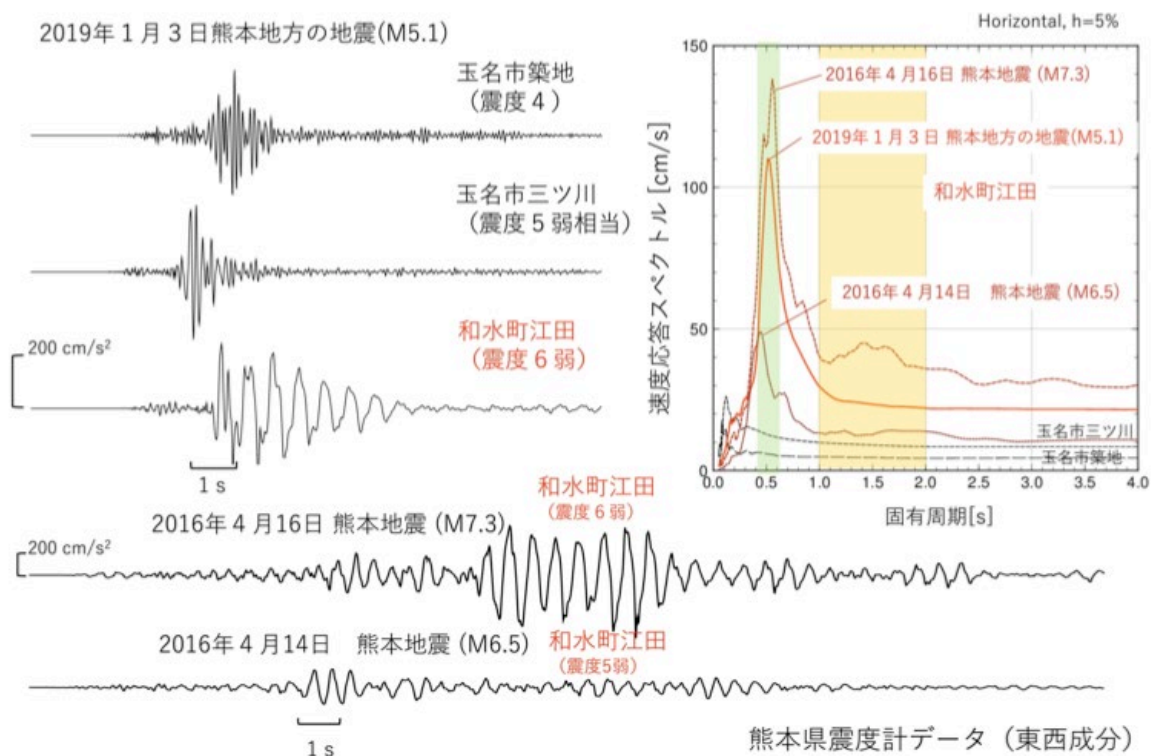


図12. 2019年1月3日熊本地方の地震(N5.1)の強震動(東京大学地震研究所[課題番号:1516])

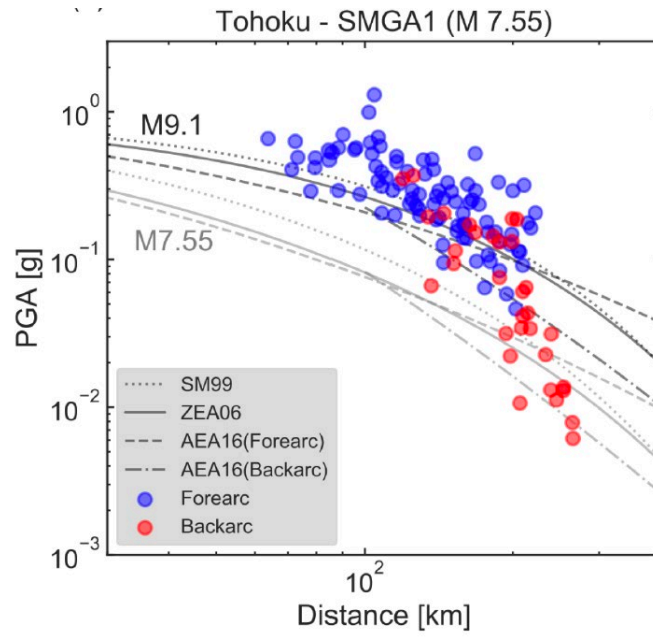


図13. 2011年東北地方太平洋沖地震の強震動生成域(SMGA1)に対する距離減衰
(拠点間連携研究 [課題番号: 2991])

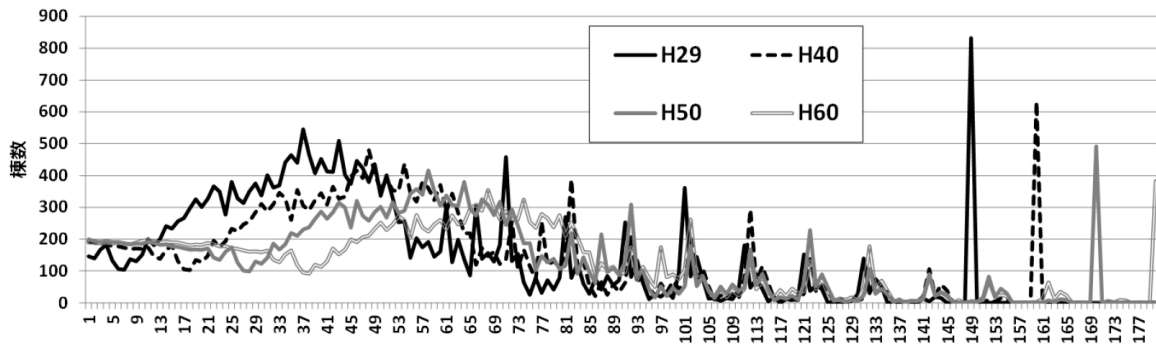


図14. 将来時点での築年数(横軸)ごとの木造戸建住宅の棟数(縦軸)予測
(拠点間連携研究 [課題番号: 2952])

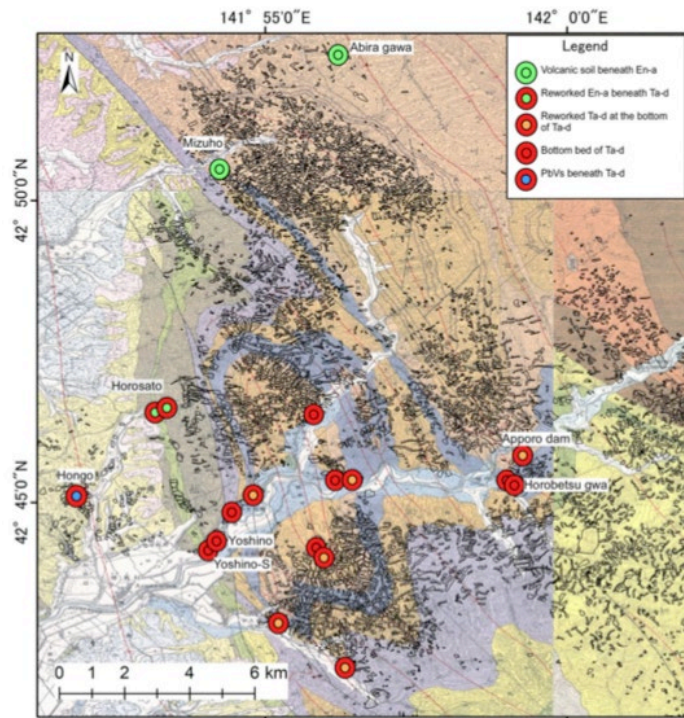


図15. 2018年北海道胆振地震によって発生した地すべりのすべり面の分布：すべり面は、樽前火山から9000年前に噴出したTa-d軽石の最下部で強く風化した層に形成された場合が多かった（京都大学防災研究所〔課題番号：1912〕）

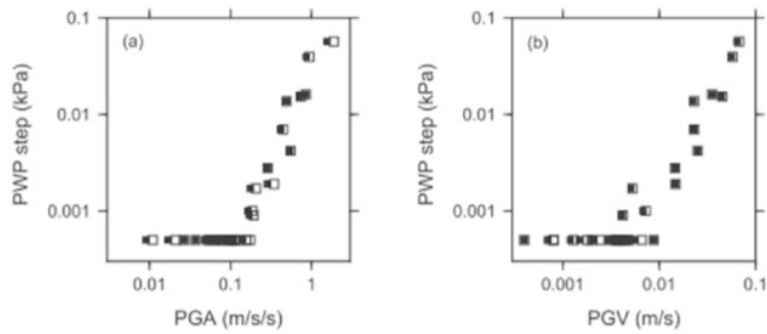


図16. 谷埋め盛り土内における過剰間隙水圧の大きさと (a)PGA, (b)PGVとの関係（京都大学防災研究所〔課題番号：1912〕）

表1. 谷埋め盛り土内における過剰間隙水圧の大きさと (a)PGA, (b)PGVとの関係
(拠点間連携研究 [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

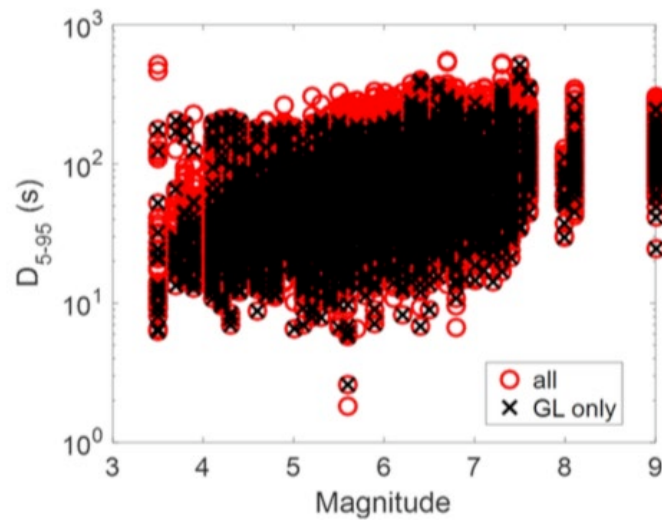


図17. 揺れ継続時間とマグニチュードの関係 (拠点間連携研究 [課題番号: 2958])

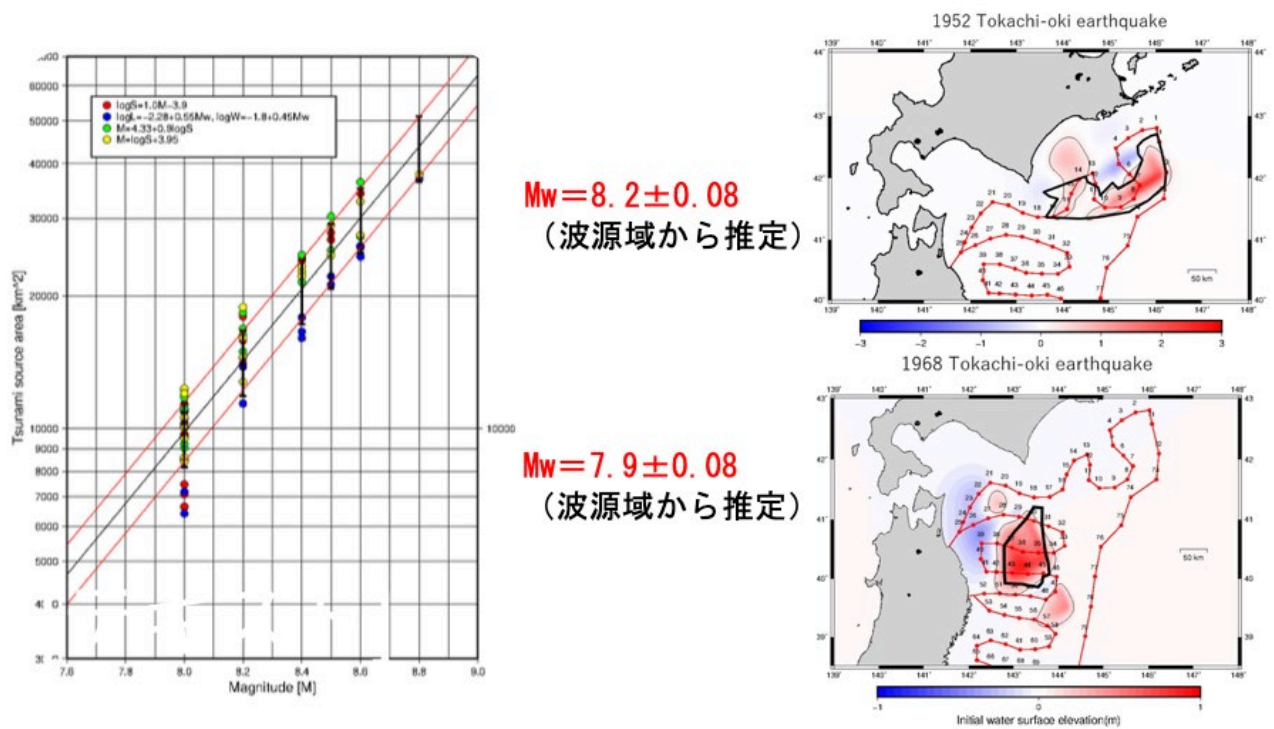


図18. 図5の手法で推定された津波波源域の面積とマグニチュードの関係(左)と1952年および1968年十勝沖地震への適用例(右) (北海道大学 [課題番号: 1005])

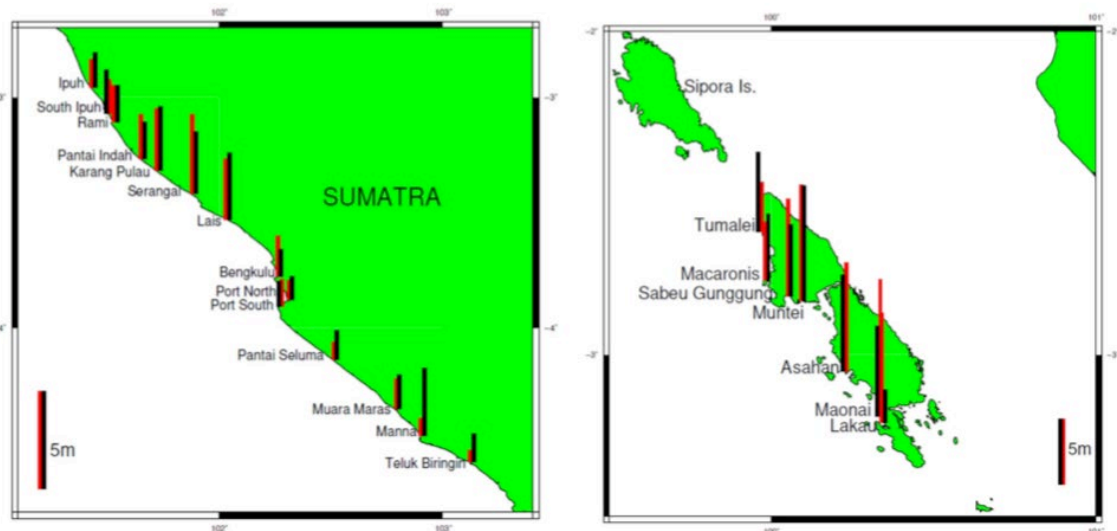


図19. S-NETのような観測点が無い場所の津波地震にも対応できるように開発した津波即時予測手法の2007年Bengkuru巨大地震(M_w8.4)と2010年Mentawai津波地震(M_w7.8)への適用: 黒が調査, 赤が計算 (北海道大学 [課題番号: 1005])

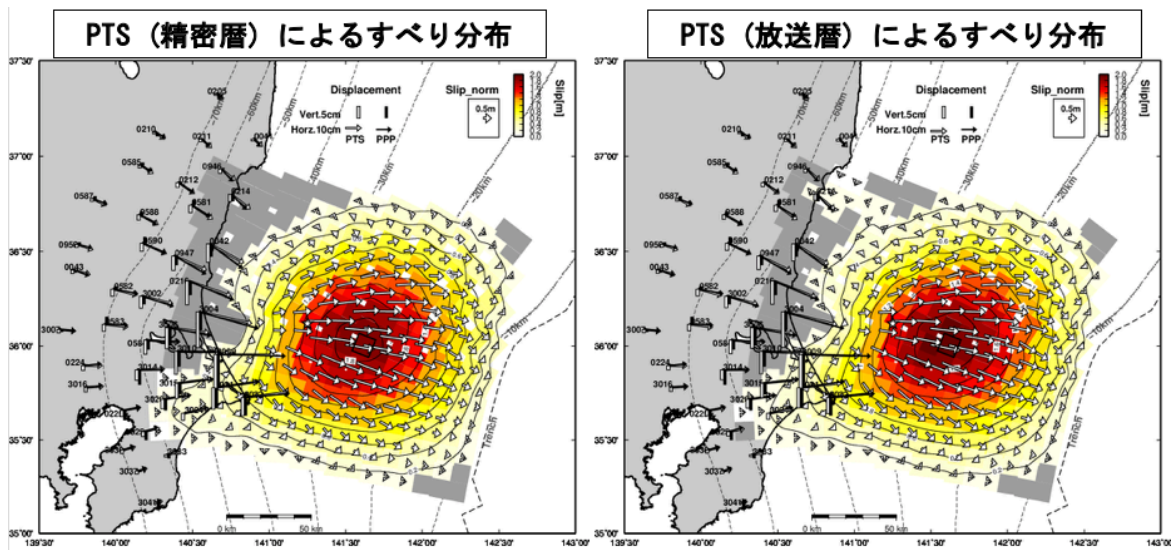


図 20. PTS で推定されたすべり時系列をもとに描画した茨城沖地震のすべり分布
(a) 精密層, (b) 放送層を用いた場合 (東北大学 [課題番号: 1209])

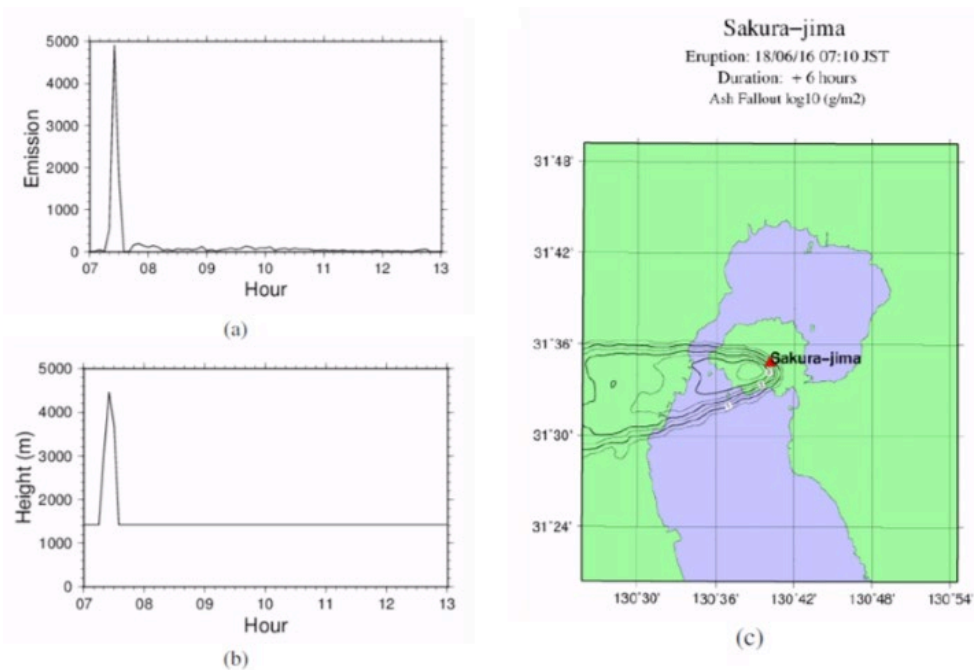


図 21. 桜島南岳において発生した爆発により放出された火山灰の拡散シミュレーション: (a)地震動と空気振動から算出された噴出率, (b)経験式を用いて噴出率から算出された噴煙高度, (c)降下火山灰量(等高線は, 単位面積当たりの降灰量 g/m^2 の対数) (京都大学防災研究所 [課題番号: 1913])