

## 1 (5) 災害誘因評価・即時予測

「災害誘因評価・即時予測」計画推進部会長 太田雄策  
(東北大学大学院理学研科)  
副部会長 三宅弘恵  
(東京大学地震研所)

地震・火山噴火という自然現象が引き起こす地震動、津波、火山噴出物、斜面崩壊等の災害誘因は自然や社会に潜在的に存在する脆弱性等の災害素因に働きかけ、これらの総合作用に応じて様々な規模の災害が発生する。すなわち災害誘因評価の高度化は、災害軽減を果たすために有効な手段である。こうした観点から、「災害誘因評価・即時予測部会」では災害誘因や災害リスクを事前に高い精度で評価する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化」ならびに地震や火山噴火が発生した直後に高精度かつ即時的に災害誘因を予測する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化」を推進するとともに、それら災害誘因予測を効果的に防災対策の推進に結びつけるための「地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究」を進める。

### 3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

#### (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

##### ア. 強震動の事前評価手法

##### ○震源モデルの高度化

M<sub>jma</sub> 6.7の2018年北海道胆振東部地震の断層破壊を強震記録を用いた波形インバージョン(周波数0.04-0.5Hz)および経験的グリーン関数法による強震動シミュレーションによるSMGAモデリング(周波数0.3-10Hz)により求めた(図1)。波形インバージョンにおいては、対象地域の複雑な地盤・地殻構造の影響を考慮して、全国一次地下構造モデル(Koketsu et al., 2012)による3次元地盤・地殻構造モデル(最小S波速度0.6km/s)を用いて理論グリーン関数を計算し、利用した。その結果、主破壊は深さ約22~32kmの震源(破壊開始点)より浅い、震源上方からやや南方に広がっていることが分かった。最大すべり量は約1.7mだった。この主破壊領域はこの地域の下部地殻に限定され、破壊は上部地殻までは達していないと考えられる。また、主破壊領域では余震活動が活発でないことも分かった。さらにこの震源断層モデルを3次元速度構造モデルに組み入れ、波動シミュレーションを行い、長周期地震動の伝播特性を調べた。震源域直上から西方向に広がる厚い堆積層を持つ勇払平野方向へ、大きな速度パルス波が伝播していく様子が見られた。さらに、経験的グリーン関数法(Irikura, 1986; 入倉・他, 1997)による広帯域強震動シミュレーションを行い、この地震の震源モデル(SMGA震源モデル)を推定した。推定された震源モデルは、2つのSMGAモデルで成り立っており、SMGA1が震源時の7.2秒後に破壊開始し、その破壊開始点は震源より約5.7km南西、震源より約10km浅く、SMGA1の大きさは7.2km×7.2km、地震モーメントは $5.1 \times 10^{18}$ Nm、応力降下量33MPaと求められた。SMGA2は震源時の12.9秒後に破壊開始し、破壊開始点は震源より約5.6km南西、震源より約13km浅く、SMGA2の大きさは5.4km×5.4km、地震モーメントは $1.2 \times 10^{18}$ Nm、応力降下量18MPaと求められた。またこの震源モデルを用いて、震度7を記録した地点のフォワードシミュレーションを行ったところ、観測に比して卓越周波数が高く最大加速度値が過大と

なることが確認され、これらの大震動時には、地盤の非線形応答があった可能性が示された (Asano and Iwata, 2019; Nagai et al., 2019, 京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI09])。

静岡県下の強震波形データを用いて、スペクトルインバージョン法による、震源、地震波伝播、サイト各特性の分離を行った。0.2-10Hzを解析対象範囲として、M3.5-6.0程度の震源スペクトルを求め、 $\omega^2$ 乗モデルを当てはめて応力降下量を求めた。このマグニチュード範囲では、応力降下量の地震規模依存性は明らかではなかったが、地殻内地震から沈み込むプレート内地震を含む、深さ1kmから121kmに分布する今回解析したイベントの応力降下量には深さ依存性が確認された(図2)(島津・他, 2019, 京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI09])。

2016年熊本地震を事例とした地表地震断層の詳細情報の精査とモデル化を行った。具体的には地震後のインバージョン結果に基づく地下の震源断層モデルと、地表で観察された地表地震断層の分布をそれぞれ100m間隔の3次元点群化モデルで表現した(図3)。次に、地下の震源断層モデルと地表地震断層の分布を考慮した地表下浅部の点群の接合・収斂について、地震・強震動分野の研究者と変動地形分野の研究者で議論を重ねて、複数のモデルを提案した。また、布田川断層からは遠隔にある清正公道沿いの地表変状(rupture)と被害の関係について見直した。ここでは地震時に右横ずれを伴うruptureが連続的に出現するとともに、近傍において強震動による構造物被害が生じた。その位置はかつての清正公道を埋め立てた際の盛り土境界付近に該当し、地盤の影響によるruptureである可能性も指摘されていた。しかし、2019年1年と11月にトレンチ調査を実施したところ、ruptureは盛り土境界ではなく、半固結ローム層を明瞭に断ち切り、系統的な右横ずれを伴う地震断層であることが判明し、清正公道断層と呼ぶべきものであることを明らかにした(名古屋大学 [課題番号: NGY\_05])。

## ○地下構造モデルの高度化

大阪、京都、奈良堆積盆地を中心とした地域で、2018年大阪府北部の地震の観測波形データの再現シミュレーションを通じて、既往地下構造モデル(Sekiguchi et al., 2016)の検証と盆地堆積層での地震動形成メカニズムの分析を行った。今年度は特に、堆積Q値の検討と大阪盆地地下構造モデルの改良を実施した。差分法計算でQ値を変えてシミュレーションを行い、観測波形と計算波形を狭帯域で比較することにより、0.1~2.0Hzの間のQ値の周波数依存性をモデル化した(図4)。既往地下構造モデルの大阪平野から大阪湾地域に関し、新たな探査データや表層地質情報を追加し、データの内外挿方法などモデル構築作業の改善を行い、モデルの改良を実施した(関口・他, 2019, 京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI08])。

静岡県地域の強震波形データを用いて、スペクトル・インバージョン法による震源、地震波伝播、サイト各特性の分離を行い、地震基盤以浅の地下構造モデルの検証を進めた。静岡県東西ブロックにおける各伝播経路特性として、分離によって得られたQ値を1.0-10Hzの周波数帯域においてモデル化した結果、西部では $Q=245.4f^{0.38}$ 、東部では $Q=74.1f^{0.96}$ と、異なる特徴を持つQ値が求まった。得られたサイト増幅特性を、東海地域の最新の浅部・深部統合地盤モデル(Wakai et al., 2019)の観測点直下のS波速度構造モデルを取り出して求められる1次元理論S波増幅率と比較すると、卓越周波数や増幅レベルといった点でよい対応を示した(図5)。また、2009年駿河湾の地震と2011年静岡県東部の地震でPGA200cm/s/s以上の強震動を観測した点の強震時のサイト増幅特性を、強震時サイト増幅特性=観測/震源特性/伝播特性として求め、弱震のサイト増幅特性と比較したところ、地盤の非線形応答の特徴と考えられるサイト増幅特性の卓越周波数の低周波側への移動が14観測点、多くはAVS30の小

さい軟弱な地盤上で確認された(島津・他, 2019, 京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI08])。

### ○強震動評価の高度化

大地震で生成し、近地～遠地で誘発地震やスロー地震を発生させる大振幅のLove波パルス(G波)の生成原因を評価した。具体的には標準地球モデルを用いた理論分散曲線の解析と、3次元差分法計算による地震波伝播シミュレーションから、薄い海洋構造では広い帯域(15～200秒)でLove波の分散性が弱く、また群速度と位相速度が近い値を持つために、波形位相を保って伝播することを確認した。2011年東北地方太平洋沖地震の近地強震波形と遠地広帯域波形を調べると、震源からのLove波の放射が強い西南日本と太平洋の対岸において振幅の大きなG波の到来が確認された(図6)。G波の到達直後に中部～西南日本で地震活動が活発化し、太平洋沿岸の沈み込み帯で低周波数地震や微動活動が報告されるなど(例えば、Miyazawa, 2011; Chao et al., 2013), 大地震による表面波の影響が全地球に広がったことが確認された(Furumura and Kennett, 2020, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_14])。

太平洋プレートで深発地震が発生すると、太平洋岸の震度が大きくなる異常震域が生じる。しかし、2013年5月24日のオホーツク海深発地震(610km, Mw 8.3)では、稚内や秋田など日本海側で最大震度3が観測され、通常の深発地震とは逆の震度分布となった。F-netとHi-net記録を解析し、日本海側の強い揺れは太平洋プレートを伝播した高周波数S波ではなく、(1)上部/下部マントル境界付近の深い震源から放射されたS波のcaustics, (2)地表でのsP変換波と後続のsPL波, そして(3)sS反射波により作り出されたことが確認できた(Kennett and Furumura, 2019; Furumura and Kennett, 2019, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_14])。

南西諸島域について地震の応力降下量の分布を調べた。対象とする地震は2002年6月から2017年5月までの15年間に発生したイベントで、F-netで地震モーメントが報告されている震源のみを選択した。その結果、応力降下量の値は1～100MPaの範囲(中央値はほぼ10MPa)に分布し、0th(2013)が推定した九州同様に比較的高い値が求まるとともに、琉球海溝から沖縄トラフにかけて応力降下量が低下する傾向にあること、沖縄トラフ内部では台湾周辺や宮古海山を除いた地域で低く、地殻熱流量が高い場所に対応することが分かった。また、琉球海溝沿いでは奄美大島北東沖(トカラ・ギャップの衝突域)などの応力降下量が特に高い領域が存在することが確認できた(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_14])。

3次元差分法に基づく地震波伝播シミュレーションのオープンコード(OpenSWPC; Maeda et al., 2017)について、利用者コミュニティからの改善点や機能追加に関するフィードバックを受けて改良と機能拡張を進めた(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_14])。

2016年熊本地震を例として、強震動計算手法の高度化のための検討を行った。観察された地表地震断層の長さ34kmに基づいて、地震本部の強震動予測手法「レシピ」に従った断層モデルにより熊本地震の強震動計算を行ったところ、地震モーメントや地震動が過小評価となった。一方、観測に基づく熊本地震の地震モーメントを既知として設定した断層モデルを「レシピ」で計算したところ、地震動分布は観測記録をおおむね説明できた。ただし、地表地震断層ごく近傍の観測点における周期1秒程度以上の地震動は過小評価のままであった。このことについて、地震発生層よりも浅い領域に断層すべりを考慮した断層モデルで計算を行うと、結果が改善することが確認された(名古屋大学 [課題番号: NGY\_05])。

## イ. 津波の事前評価手法

巨大地震に伴う海底斜面崩壊による津波の数値計算手法を開発し、1929年Grand Banksで発生した地震に伴う津波イベントに適用を試みた。巨大地震は発生しないとされているアメリカ東海岸の沖合で、1929年にGrand Banks地震 (M7.2)が発生した。この地震直後に震源近傍のケーブルが切断され、海底地すべりが発生していたことが確認されている。また、地震波形解析から地すべり自体が地震波を励起したとされている (Hasegawa and Kanamori, 1987)。さらにこの地震(海底地すべり)は津波を励起し、震源域近傍で大きな被害が報告されている。Halifax(カナダ)の検潮記録には津波波形も記録されている。そこで、先行研究で提示されている海底地すべり域を参考に地すべり域を仮定し、地すべりの層厚を変化させて、海底地すべりと津波の数値計算を実施し、Halifaxの津波波形(第1波)の再現実験を行った。その結果、海底地すべりの量は約100km<sup>3</sup>程度であることを見積もることに成功した(図7) (Ioki et al., 2019, 北海道大学 [課題番号: HKD\_05])。

## ウ. 大地震による災害リスク評価手法

強震動による地震災害誘因の分析のため、堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースの増強に着手した。堆積平野・堆積盆地の地震動増幅特性の定量化に向けて、東京大学地震研究所共同利用の枠組みで可搬型微動・強震観測システムを運用した。また、2018年北海道胆振東部地震や2004年米国パークフィールド地震、トルコ西部の被害地震等を対象として、国内外の強震記録の分析を行い、堆積平野・堆積盆地の地震動増幅特性を定量化すると共に、震源解析や強震動シミュレーションを行った(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_16])。

2016年熊本地震の際の建物被害についての分析を行った。具体的には益城町市街地において、詳細な地表地震の性状を解明し、建物被害との関係を明らかにした。その結果、①地震断層から120m以内の範囲に全壊家屋の総数の94%が集中すること、②被害率については近傍120mの範囲内において断層からの離隔距離と被害率には負の相関があること、③建築年代を昭和50年以前と以後に分けて分析すると新旧に寄らず②の関係が成立することが明らかとなった(図8) (名古屋大学 [課題番号: NGY\_05])。

地震被害想定における不確実性を低減することを目的として、鳥取県大山町役場と連携して、微動を用いた町内の面的な地盤震動特性の把握、および地下速度構造の推定を実施した。あわせて、同町内の避難所施設として指定されている20棟の建物(主に体育館)内で微動観測を実施し、振動特性(卓越周期)の調査を行った。また、2016年鳥取県中部の地震で被害を生じた県中部域(倉吉市、湯梨浜町、北栄町)において微動観測を追加するとともに、これまでに実施した調査(余震観測、微動探査、重力探査)を総合的に再解析し(図9)、地下構造のモデル化を行った。さらに、2000年鳥取県西部地震で被害を生じた鳥取県境港市の強震観測記録を精査し、強震動の面的予測において表層地盤の非線形地盤応答特性の評価に一般的に用いられる等価線形手法のパラメータの合理的設定に向けた検討を開始した。具体的には、小地震と大地震の地震観測H/Vに拡散波動場理論を適用し、それぞれの地盤ひずみレベルに応じた等価線形地盤(地震波速度、減衰)を同定し、小地震の地盤(線形)を初期値として大地震の等価線形地盤に移行するような地盤の非線形応答特性を逆推定するための検討を行った(香川・他, 2019, 鳥取大学 [課題番号: TTR\_01])。

津波避難モデル地域(北海道八雲町、神恵内村等)において、実測した歩行速度に基づき避

難場所までの避難シミュレーションを行い、想定津波における避難困難地区を特定した。シミュレーションでは、避難設備の現地での確認調査を踏まえて発災時に使用できないと判定された避難路を除外して計算を実施した。避難困難地区の対策を自治体・地域住民と協議し、新たに避難路の整備が必要な個所を抽出したほか、役場庁舎の建て替えに合わせて庁舎に津波避難ビル機能を持たせることを決定した。庁舎の設計では、想定津波に耐える強度、冬季を想定した発災下での暖房の確保、想定される避難人数などを考慮した。新設する避難設備を条件に組み込んで再度避難シミュレーションを実施し、避難困難地区が解消されることを確認するとともに、地区ごとの避難場所の最適化を図った（図10）。以上に加えて、地震の強震動や液状化による道路破損を想定した車避難のリスク評価を行い、渋滞発生箇所を推定した。これらの研究データは今後、地域の避難計画の更新に活用する予定である（北海道立総合研究機構地質研究所〔課題番号：HR0\_02〕）。

## エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

地震動に伴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さらなる高度化を進めるために、観測による災害誘因メカニズムの検討を行った。具体的には9000年から12万年前までの軽石が10cm以上の厚さで分布している範囲を新編火山灰アトラスから抽出（図11）し、関東から北海道にかけて分布図を作成し、既往地震地すべりとの比較を行ったところ、地震時地すべりのすべり面となる可能性が特に高い降下火砕物は、9000年よりも古い軽石およびそれに伴う火山灰土であることが分かった。少なくともこの範囲は今後の地震時地すべりの要注意域と考えられる。

地すべり内での地震動のばらつき、伝播特性を把握するために、紀伊山地における深層崩壊のすべり残りブロック上に多点の稠密地震観測アレイを設置し、観測を開始した。谷埋め盛土斜面における間隙水圧変動について同時に記録された地震動との関係から議論した。観測されたPGAが120galまでのイベントに対し、間隙水圧の上昇量はPGAやArias Intensityと強い相関があること、間隙水圧の立ち上がり時刻は、そのタイミングにおける瞬間的な揺れの強さで決まること、間隙水圧の上昇時間は比較的強い揺れが続く継続時間に由来することが示された。さらに北海道南東部の再活動型地すべりにおいては、素因として、海岸浸食や間隙水圧の上昇に伴ってどの程度地すべりの安定性が低下しているのかを連続観測データから示した。また、北海道胆振東部地震によって変状が現れた谷埋め盛土斜面で表面波探査を実施し旧地形に対応する地下構造を推定することによって、谷埋め盛土と地山のテフラ層が一体となって地震時に地すべり性の変状を示したことが明らかになった。

また、2018年北海道胆振東部地震により、厚真町のテフラ斜面において発生した地すべりを調査した結果、すべり面には多くの地震による崩壊斜面のすべり面から検出されている粘土鉱物の薄板状ハロイサイトが含まれていることが分かった。さらに同ハロイサイトの特徴を調べたところ、チューブ状のハロイサイトの含有量が増えるにしたがって、試料全体のせん断抵抗が下がり、保水力が上昇すること、すなわち、せん断された際には内包された水を原因として流動性が増すことが明らかになった（Chigira et al., 2019; Doi et al., 2019; Liu and Wang, 2020, 京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI10〕）。

宮城県荒砥沢地区ならびに熊本県南阿蘇村立野に設置している2台のGB-SARの連続計測を継続し、GB-SARデータを取得した。南阿蘇立野地区には2017年に地上設置型合成開口レーダ(GB-SAR)を設置した（図12）。主に2019年1月から11月までのデータから推定した面的変位

速度からは大きな変位は確認されていない。同地区はこれまで2016年熊本地震による崩落地帯の安定化、国道ならびに鉄道の復旧工事が行われてきたが、これらの工事が年度末でほぼ終了する見込みである。斜面の安定化事業により、GB-SARで観測してきた地域は金属ネットで覆われ、植生が進められた結果、従来の計測状態から変化したため、安定化の確認が主たる目的となっている。しかし例えば2019年6月30日に大雨により崖面一部の崩落が観察されたが、GB-SARではこれを的確に捉えることに成功した。

SAR画像のピクセルごとの位相・強度情報を用い、2枚のSAR画像を干渉させる(位相の差をとる)ことにより、2回の観測の間における変位量を推定する。しかし、観測間において大気屈折率が時間的・空間的に変化した場合、その変化量は電波の伝搬速度を変化させ、結果的に干渉SARにおける位相差として現れる。この大気誤差を軽減するため、多数のSAR画像を使用して変位速度を推定するPersistent Scatter Interferometry (PSI)技術を使用した。PSI技術により、2枚のSAR画像間で変位量を求める従来手法よりも少ない誤差で変位を推定することができる。同解析を南阿蘇におけるGB-SARデータに適用した。現場ではバックホウにより掘削作業が行われており、発生した土砂により干渉画像が著しく変化していることが確認できた。さらに宮城県荒砥沢地区におけるGB-SAR観測では2019年10月の豪雨に伴う斜面の侵食が確認された。この時、斜面各点で計測した地表面変位から変位による体積変化を推定した。これは土砂の流出量に対応すると考えることができる。更に降雨量と地表面変位の相互相関をとると、降雨後4日程度で地表面変位が現れることを見いだした。同手法は、今後の土砂侵食の予想へつながる成果と考えられる(佐藤・他, 2019, 東北大学災害科学国際研究所 [課題番号: IRID03])。

#### オ. 火山噴火による災害誘因の事前評価手法

火砕流の発生メカニズムの解明を目的とし、桜島火山における地盤変動、火山性地震、空気振動、火山ガス、映像等の観測を行い、爆発的噴火および火砕流のデータを収集した。特に今年度は、火砕流の流下パターンや堆積量を知るために桜島島内の黒神観測点において小型船舶レーダーを用いた観測を開始した。レーダー設置後に火砕流を伴う噴火かは発生していないが、例えば2019年11月8日の噴煙をレーダーで明瞭に捉えることに成功している。また、過去の火砕流を伴う噴火の前駆地震・地殻変動データの解析から、火砕流を伴う噴火では直前の膨張停滞時間が30分以上継続すること、火砕流を伴う噴火では47例中27例で前駆地震が発生することが明らかになった。これは火砕流を伴う噴火では火道中で通常の噴火とは異なる現象が発生している可能性を示唆する結果である(京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI11])。

### (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

#### ア. 地震動の即時予測手法

大地震による大規模平野での長周期地震動の即時予測の実現に向け、観測・計算データ同化に関する研究を進めた。データ同化・予測では、同化波動場を初期値としてスパコンを用いた3次元差分法計算に基づき、数十秒先の波動場を予測する手法(Furumura et al., 2019)を用いた。今年度は予測の高速化を目指し、予め計算した同化観測点～予測地点の伝達関数(グリーン関数)を用いて、評価地点の揺れを瞬時に予測する方法を検討した。さらに本手法を用いて、南海トラフ巨大地震の長周期地震動の即時予測の可能性を検討した。まず、内閣

府の1944年東南海・1946年南海地震震源モデルとJIVSM 地下構造モデル(Koketsu et al., 2008)を用いて模擬強震記録を合成し,これを観測波形と見なして同化・予測実験を行った(図13)。その結果, DONETやN-net(計画中)により震源域直上で地震発生直後にデータ同化を進めることができれば, 数十秒以上の猶予時間をもって関東平野等の遠地での長周期地震動の即時予測が可能であることが示された (Oba et al., 2019; Oba, 2020, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_14])。

PLUM法の高度化に関する研究を進めた。具体的には, S波群中のP波を検知する方法を発展させ, 上下動成分のみから得られる震度を予測に用いることを検討した。また, 距離減衰を導入することを考察した。これらにより, PLUM法が, 揺れの強さを予想してから実際の揺れが来るまでの時間的猶予が短時間になるという弱点を軽減する可能性を見出した(図14)。また, 予測計算の堅牢化のために, 機械学習によって観測点の品質を自動的に監視する方法を検討した。継続時間も含めた揺れの予測の精度向上を目指し, 減衰・散乱・速度構造などの地下構造の詳細な推定や地盤増幅特性のモデル化を進めた。また, データ同化や波動伝播シミュレーションでの計算時間を短縮する方法について開発に着手した。さらに, 詳細な観測網が利用可能な状況では, (断層破壊の全体を捉える) モーメントマグニチュードの即時推定による即時地震動予測では強い揺れの到来に間に合わず, 揺れをモニターする方法が有効であることを示唆する結果を得た (Cochran et al., 2019; Kodera, 2019; Meier et al., 2019; Kodera et al., 2020, 気象庁 [課題番号: JMA\_06])。

## イ. 津波の即時予測手法

Green関数を用いたデータ同化に基づく津波即時予測手法 (GFTDA; Wang et al., 2017) を海底地震津波観測網DONETが捉えた2016年鳥島沖地震津波に対して適用し, 津波即時予測実験を行った(図15)。同試行はリアルタイムに取得された記録に対してデータ同化手法を適用した初めてのケースである。同地震は海底火山カルデラ内で約10年周期で繰り返し発生する津波地震 (Fukao et al., 2018) であり, その津波の規模に比して地震動は極めて小さく, かつ励起源がカルデラ床の上下変位が支配的なCLVDメカニズムのため, 地震動からの解析によって津波を即時的に予測することが困難な事例である。しかしデータ同化手法を適用することで, 同イベントに対する津波予測を迅速に行い得ることを示した。さらに, リアルタイムな実データに対して適用するための信号処理手法の検討も開始した。実データは単にばらつきやノイズ成分が多いだけでなく, 地震動や潮汐成分も重畳している。そこで, 大気分野で活用されている経験的モード分解法を海底圧力計記録の津波信号に適用し, 津波信号の効果的な抽出を試みた。また, 地中海西部において仮想的な海底津波観測網を考え, 津波データ同化による予測実験から海底観測網とそれに基づく津波即時予測の有効性を検討した (Wang et al., 2019; Heidarzadehetal., 2019, 弘前大学理工学研究科 [課題番号: HRS\_02])。

搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法 (Phase To Slip, 以下PTS) の性能評価を目的とし, 2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) とそれに引き続く岩手県沖地震 (Mw 7.4) および最大余震である茨城県沖地震 (Mw 7.8) に対して同手法を適用した。データには関東から東北にかけてのGEONET観測点62点の1秒ごとの搬送波位相データを用いた。沈み込む太平洋プレート上面を386の小断層に分割し, それら小断層上のすべり分布を平滑化拘束を課した状態で推定した。グリーン関数にはOkada (1992) の手法を用いた。推定された断層面上でのすべり分布を見ると, 2011年東北地方太平洋沖地震本震については陸上GNSSの変位デ

ータを用いたものとはほぼ同等の結果が得られた。さらに引き続く余震に注目すると、明瞭なすべり量のステップが岩手県沖地震、茨城県沖地震双方で確認できた。さらにそれらのすべり分布についても先行研究とはほぼ同等の結果が得られた。これらの成果は、PTSによって1日以下で連続する地震現象のモニタリングが可能であることを示唆する結果と考えられる(図16)。また、実海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる海底圧力観測システムのプロトタイプ機を開発し、同機を実海域に短期間設置することでその動作確認を行った結果、想定した通りの動作を確認することができた。さらに、リアルタイムGNSSによる震源断層即時推定における不確実性の定量評価をマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)で行うための技術開発を進めた。本年度は、単一の矩形断層モデルをリアルタイムGNSSによる永久変位場にもとづき即時的に得ることを目指したアルゴリズム開発を行った。同手法ではリアルタイムでの活用を念頭に、各パラメータの初期値や、尤度関数やそれを規定するパラメータ等を自動設定するアルゴリズムを構築した(田中・他, 2019; 大野・他, 2019, 東北大学理学研究科 [課題番号: THK\_12])。

近地津波について、後続波で高い津波が観測された過去事例を収集し、津波数値計算で再現するため初期波源など条件設定の検討を行い、福島県沖から関東東方沖にかけての海域を波源とする津波が福島県沿岸で反射して東北地方沿岸に後続波をもたらす事例を再現した(図17)。遠地津波について、南米沖及び南太平洋西部を波源とする津波に加えて北太平洋を波源とする津波についてその減衰過程を近似する関数形の解析を行い、指数関数的に減衰する過程の初期振幅が地震の規模に比例することを確認した。スロー津波地震の規模推定法として開発した積分変位を用いた手法を日本近海の地震に対して適用し、マグニチュード7クラス以上の地震についてはモーメントマグニチュードの差が十分に小さく推定できることを確認した。この規模推定法を代表的な津波地震である1992年ニカラグア地震の観測波形に適用し、従来の変位振幅に基づく手法に比べて適正に規模を推定できる可能性が高いことを示した。2018年スラウェシ島パル湾で発生した津波について、観測された遡上高・ビデオ記録から再現された津波波形などを説明しうる海底地すべりによる津波のモデルを提示した(気象庁 [課題番号: JMA\_06])。

#### ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

焼岳における昭和37年噴火後の土石流の発生に関して、従来の研究から発生ポテンシャルの変化に関する知見を得た。また、ポテンシャルが低下する中、昨年18年ぶりに発生した土石流は、10分間雨量とその降雨域がその発生要因であることを明らかにした。以上より、噴火後の土石流発生ポテンシャルの変化と発生条件に関するモデルのフレームワークを明確にした(図18)。シナブン火山の噴火後のラハールについては、観測を継続した。焼岳の融雪型火山泥流については、融雪実験結果を整理し、泥流モデルへの導入を開始した。桜島の土石流については、土砂濃度特性の観測や斜面侵食過程に関する検討のために、基礎調査や計測機器の開発を行った(京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI\_12])。

気象研究所XバンドMPレーダーおよびKuバンド高速スキャンレーダーによる噴煙観測と2次元ビデオディストロメーター(2DVD)による降灰観測を実施した。2DVDによる観測では、扁平な小粒子が多いことが確認された。このことは、大きな粒子の離脱によって、小さな粒子が数多く残った噴煙または火山灰雲をMPレーダーで観測した際に、反射因子差が増加することに対応すると考えられる。また、気象庁一般気象レーダーにより噴火事例(2019年8月



7日浅間山，2020年1月11日・2月3日口永良部島）を解析するとともに，一般気象レーダーによる噴煙高度の確率的推定手法について，桜島の遠望観測データを用いた手法の検証を試行し，降水エコーとの区別など検証をする上での問題点を整理した。さらに全球移流拡散モデルと領域移流拡散モデルを統一した新しい気象庁移流拡散モデル（JMA-ATM）について，開発に着手した。2016年10月8日阿蘇山噴火の事例について，降灰データを逆解析して新旧移流拡散モデルを実行し，初期値の不確定性を示した（図19）（佐藤 他，2019，気象庁〔課題番号：JMA\_07〕）。

### （3）地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震・火山災害情報の活用のための住民の知識体系に関する基礎調査を行った。具体的には日本放送協会による「体感・首都直下地震ウィーク」を刺激とする社会的実験調査（パネル調査）を実施し，認知，知識，行動，態度，確率評価への効果を検討した。ここで社会的実験調査とは，通常の調査とは異なり，ある対象（今回の場合は特定の放送キャンペーン）に接した人（実験群）と，接していない人（統制群）に分類し，キャンペーン（実験刺激）の効果を見る手法である。その結果，番組内で強調された火災旋風のみ単語としての認知度が向上したことや，NHKスペシャル「パラレル東京」を「見た人」の方が新たに（改めて）地震対策をとっていること，さらに番組を見た人，見ていない人双方ともに「火災からの避難を第一に考えるべき」という知識のみが上昇し，直接の視聴効果にとどまらず，話題性効果があることが明らかになった。一方で「地震発生確率，被害発生確率」などの用語や，「不安感」などの「感情」には態度変化が確認されず，簡単にそれらを変化させることが容易ではないことも同時に明らかになった（図20）（東京大学情報学環〔課題番号：III\_01〕）。

ハザード事象系統樹の設計について検討した。系統樹は，起こりうる現象のシナリオの選択肢を整理し視覚化するのには優れているものの，時間的な変化の表現には課題があることが分かった。そこで，起こりうる現象の発生確率の時間変化の表現方法について検討を行った。その結果，確率の時間変化の表現には系統樹よりも表形式のほうが適しているという結論を得た。さらに，その基本スキームを構築した（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID04〕）。

2018年1月の草津白根山の噴火事例において，噴火に関する情報が火山近傍の関係団体にどのように伝達され，理解されたのか，情報内容に課題があったのかを分析することを目的とし，草津白根火山近傍の「草津温泉スキー場」の利用者を対象としたインターネット調査を実施した。アンケートは2020年1月31日から2月2日にかけて実施した。アンケートの質問項目は，2018年1月23日の草津白根山での噴火についておぼえているか，草津白根山が活火山であることを知っていたか，水蒸気噴火について，噴火警報・噴火警戒レベル・噴火速報について，回答者自身の情報入手についてなど，合計20問で構成した。結果として，全体的に火山防災の専門用語や知識についての理解が低調であることが分かった。一方で，2018年1月の本白根山の噴火を「はっきりおぼえている」群と，そうではないグループに分けて比較すると，「はっきりおぼえている」群では，顕著に理解度や知識量が高い傾向にあることが明らかになった。一方で，噴火の記憶がはっきりしていないグループは，理解度や知識が低い傾向がある。加えて，情報伝達については携帯電話を用いても情報は届かない可能性が高いことが明らかになった。これらのことから，不特定多数のゲレンデ利用者といっても，利用者の特徴ごとにいくつか細分化して，どのような項目の知識を高めるべきか，情報伝達

をすべきかについて検討を進めるのが今後の課題と考えられる(図21)(公募研究, 東北大学[課題番号: KOB016])。

地震波形・GNSS・傾斜計等のデータを即時解析して震源や地盤変動源を表示するシステムに新たに導入するコンテンツとして, 振幅震源自動推定ツールと地殻変動源自動推定ツールの基本設計に取り組んだ。振幅震源自動推定ツールについては, Battaglia and Aki(2003)およびKumagai et al. (2010)の解析手法を用いて試作を進めた。winシステムでテレメータされている地震波形のデータを用いて, 専用の解析サーバー上で震源を逐次推定し, 結果を画像として保存していく処理系を設計した。本年度はwin-UDPパケットを受信して自動解析を行うプログラムの試作と北海道大学のサーバ内での試運転を開始した。地殻変動源自動推定ツールについては, リアルタイムでテレメータされるGNSSデータを念頭に置いたソース推定について概念設計を行った。具体的にはあらかじめ火山周辺にグリッド状に圧力源モデルを配置し, 観測データが流れ込むに従って, それぞれのグリッド点における膨張・収縮量の最適値を推定・表示する仕様を検討した。このようなシステムにより, ソース推定の不確かさの情報も含めて表示できるため, 意思決定に役立つことが期待される(北海道大学[課題番号: HKD\_06])。

#### これまでの課題と今後の展望

「災害誘因評価・即時予測部会」では災害誘因や災害リスクを事前に高い精度で評価する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化」ならびに地震や火山噴火が発生した直後に高精度かつ即時的に災害誘因を予測する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化」を推進するとともに, それら災害誘因予測を効果的に防災対策の推進に結びつけるための「地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究」を進めている。計画初年度である本年度においては, それぞれの研究課題において既往研究の高度化や新たな取り組みに関して成果が着実に得られつつある。特に今計画から新しく加わった「地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究」では, 災害誘因予測情報の受け手の視点から, どのようにそれら情報を有効活用すべきかについて研究が進展していることは, 最終的な目的である災害の軽減という観点からきわめて重要である。以下に, 各小項目において取り組むべき事項および展望について示す。

##### (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

強震動の事前評価手法における震源モデルの高度化については, 広帯域震源モデル・プロトタイプの改良を行うとともに, 極大地震動を生成する要因の検討を観測記録に基づいて継続する。また, 断層ごく近傍域での強震動予測精度の向上を目指して, 2016年熊本地震の地震断層周辺全域への適用・モデル改良を進め, 強震動分布を説明できる計算モデルを確立することを目指す。

地下構造モデルの高度化については, 大阪盆地, 奈良盆地等での地盤モデルの地震動応答特性評価を継続する。また地震動の再現性が低い地域, 地盤情報の少ない地域における微動・地震観測を実施する。

強震動の事前評価手法における強震動評価の高度化については, 近地～遠地地震観測により捉えられた広帯域(短周期～長周期)強震動の成因を, 震源特性と不均質地殻・マントル構造における地震波伝播の観点から評価する。そして, これらの効果を適切に評価できる震源・

地下構造モデルを用いた地震波伝播シミュレーションを行い、強震動の事前評価の精度向上に取り組む。また、2016年熊本地震において強震動の出現に著しい地域差があることに注目して、地震断層・活断層の特徴との相関を分析する。また、断層近傍における強震動分布の詳細な地域差を表現できる断層モデルおよび強震動計算方法を検討し、強震動予測手法の高度化を目指す。

津波の事前評価手法の高度化については、令和元年度に引き続き、1929年Grand Banks Tsunamiの再現実験を完成させることで、海底地すべり数値計算手法の妥当性を検証する。第2段階として1998年パプアニューギニア地震津波への適用を試みる。

大地震による災害リスク評価手法に関する研究では、堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースの増強を完了させると共に、人口密度が高く災害リスク評価において脆弱と捉えられている堆積平野・堆積盆地などを対象に、地震災害の素因と誘因の関係や災害発生機構を多面的に分析し、災害を軽減するための要件を明らかにする。さらに鳥取県内の地震動予測高度化のため、主に微動探査・重力探査・観測地震動の解析を通じた地盤震動特性および地下構造の把握を継続的に実施する。鳥取県が令和2年度に市町村と共有する危機管理情報の高度化に合わせ、これと連携して、鳥取県震度計ネットワークを用いた地震動即時予測の実務への取り込みと地域に固有の災害リスク評価手法の検討を加速する。さらに令和元年度に行った津波避難モデル地域(北海道八雲町、神恵内村等)における避難シミュレーションにもとづく避難場所の最適化等の成果をもとに、市町村に向けて成果の普及活動を行う。

地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法の高度化では、災害復旧に重要な役割をすると予想される四国にある国道196号線および32号線に沿って、地震時不安定地形・地質構造を抽出し、抽出された箇所の追加調査により危険性判定を行うとともにこれらを総合した危険斜面分布図の作成を行う。また、引き続き四国の大規模地すべり斜面に対する稠密地震動観測を行い、斜面对策工事の進行に伴う地すべり土層の震動特性変化を調べ、対策工事による斜面の安定化過程の評価手法を開発する。そして、紀伊山地の大規模地すべりにより形成された天然ダムの堤体において、高密度電気探査および微動観測を行い、ダム堤体の内部構造を解明すると共に、その内部構造と地すべりの地質、地形および崩土運動特徴との関係を解明する。

さらに、北海道胆振東部地震によりテフラ斜面において発生した地すべりに対する現地調査を行い、テフラの堆積層準、風化特性と斜面の保水力を調べて、地震時すべり面となる層準を探る。また、地震観測を継続し、地震動だけではなく変位、変形量や間隙水圧等のデータの収集に引き続き努める。強震動を受けた斜面の変位や変形量、間隙水圧について揺れとの関係について解析を継続する。また地すべり内で実施しているアレイ観測のデータを用いて、センブランス解析など地すべり内での地震動の伝播特性について特徴を抽出する。

また、熊本県南阿蘇村高野台地域の崩壊していない斜面に対して、降雨前後において電気探査を行い、降雨による雨水の浸透過程を解明する。また、斜面の異なる土層から土試料を採取し、これらの土試料に対して異なる含水量で土質せん断実験を実施し、降雨や地震による斜面崩壊の発生危険度を評価する。

この他、宮城県荒砥沢地区ならびに熊本県南阿蘇村立野に設置している2台のGB-SARの連続計測を継続し、GB-SARデータの取得を継続する。現在開発中のMIMOレーダによる計測システムの置換を検討し、長期モニタリングの信頼性向上を目指す。またGB-SAR解析時の大気補正手法についても検討を継続する。

火山噴火による災害誘因の事前評価手法の高度化では、令和元年度に引き続き、過去の火砕流を伴う噴火の地震・地盤変動・空気振動など地球物理学的観測データを基に火砕流の物理学的特徴を明らかにする。噴火に伴う地盤収縮量から求められる噴出物量と降灰量観測とを比較することにより総噴出物量に占める火砕流への配分比を決定する。降下火山灰量を非火砕流により上方へ噴出した噴出物量とし、降下火山灰量を差し引くことにより、噴出物の火砕流配分比を決定することを試みる。また、レーダー観測を継続し、火砕流を検知できるか実証を行う。さらに、火山灰の上方への移動量と火砕流となって山腹を下降する量が検出可能かについて調査を行う。

## (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

地震動の即時予測の高度化については、高密度地震観測データの波動逆伝播シミュレーションに基づいて、震源要素(位置・深さ、震源域の広がり)の即時推定手法を開発する。陸域と海域の高密度強震観測から、M7地震の正確な位置(プレート境界 or プレート内)と、M8-9巨大地震の震源域の強震動生成域と震源域の広がり の推定可能性を検討する。また、地震波伝播計算と強震動被害の事前評価の高度化に向け、地震波伝播オープンコード(OpenSWPC)への断層型震源の導入ツールの整備や、令和元年度に導入された Oakbridge-CX スパコンでの性能チューニングとコードの改良を進める。強震動の事前評価モデルの改善に向けて、南西諸島域の地盤構造モデルを改良する。また、緊急地震速報のさらなる精度向上・迅速化・堅牢化を目指して、データ同化手法を用いて波動場を正確に推定し、そこから未来の波動場を予測する手法を発展させる。そのために PLUM 法の改良を進め、伝播経路特性については地下構造の精緻化を図る。地盤増幅特性の中の位相特性を検討し、長周期地震動を含めた即時予測での継続時間の予測の精度向上を目指す。

津波の即時予測手法の高度化では、近地津波について津波後続波の観測事例の整理を行い、それらの観測事例を再現する津波波源を推定する。遠地津波の減衰過程を説明する近似関数パラメータの改良についてまとめる。遠地津波と近地津波のそれぞれについて観測事例を用い、長時間津波伝播計算による後続波と減衰過程の再現の精度向上のため、沿岸域地形データ等の計算条件設定の改良を試みる。また、津波地震の規模推定手法の検証を進める。巨大津波は低頻度巨大災害のため、海底観測網で捉えられる僅かな記録のみで手法を構築することは困難である。そのため地震・津波双方を含むできるだけ現実的な記録を数値的に合成し、それに対して予測手法のテストを行うというプロセスが重要となる。そのため3次元的な地震・津波運動を計算できる融合数値計算法 (Maeda and Furumura, 2013) から海底圧力を合理的に再現できる地震津波シミュレーション手法 (Saito et al., 2016) をシームレスにつなぎ、実用的かつ現実の不均質構造を組み込んだ地震に伴う全波動現象を実現する。そのため、これまで国内コミュニティで開発してきたオープンソースの地震動シミュレーションコード OpenSWPC (Maeda et al., 2016) と津波シミュレーションコード JAGURS (Baba et al., 2015) を利用し、その成果もオープンソースとして広く公開する。

超巨大地震等に伴う津波の即時予測を達成するためには、測地観測データの高度化も重要な課題である。そのため、令和元年度に進めた搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法(PTS)の性能評価を継続し、特に1日以下の時間窓におけるモニタリング能力の精度向上を目指した対流圏遅延推定のためのハイパーパラメータ等の最適化を行う。また実海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる海底圧力観測システムのプロトタイプ機でより長

期間の海域試験を行い、その精度評価を行う。さらに、リアルタイム GNSS による震源断層即時推定における不確実性の定量評価をマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) で行うための技術開発を継続するとともに、それらを災害情報として活用するための方策について検討を開始する。

火山噴出物による災害誘因の即時予測手法の高度化については、令和元年度に焼岳を対象に構築した、噴火後の土石流の発生ポテンシャルの変化を考慮した土石流発生予測モデルのフレームワークを桜島に適用するために、流域の火山灰の堆積による降雨浸透能の変化モデルの構築について検討を開始する。

気象レーダー等、リモートセンシング技術で得られた観測結果が噴煙のどの部分に対応しているかを知ることが、その結果の解釈を行う上できわめて重要である。そのため、気象レーダー等による噴煙の解析結果を降灰や大気中の火山灰の実観測データによって検証するスキームを確立する。また、領域移流拡散モデルと全球移流拡散モデルを統一した新しい移流拡散モデルを開発する。さらに、火山灰データ同化システムと新しい移流拡散モデルを結合した火山灰データ同化・予測システムで予報官による(実況)解析の利用について必要な機能を追加する。

### (3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震・火山災害情報の活用のために住民の知識体系に関する基礎的調査の解析を行う。令和元年度に実施した調査に加えて追加のアンケート調査を行い、それらを統合した結果の分析を行う。特に知識や不安感などに関して、災害から一定の時間が経過した後、どの程度変化するか住民の災害に対する知識体系を明らかにする。

令和元年度にハザード事象系統樹に代わる表現方法として提案した表形式の基本スキームに基づき、M8クラス(半割れ)およびM7クラス(一部割れ)の地震発生後の後発する地震の発生確率について、最近100年間のグローバルな地震カタログを用いて計算する。この際、内閣府が公表した南海トラフ地震臨時情報の防災対応検討ガイドラインと整合させるために、地震発生直後から一週間後、および、地震発生から一週間後～二週間後の2期間の時間ウィンドウを用いる。これにより、片割れケースと一部割れケースの場合について、ハザード事象の確率推移表の基本形を完成させる。

また、地震波形・GNSS・傾斜計等のデータを即時解析して震源や地盤変動源を表示するシステムの開発を継続する。振幅震源自動推定ツールについては、テスト運用の結果に基づいて不具合の修正や改良を行い、表示システムへの実装試験までを行う。地殻変動源自動推定ツールについては、ノイズ付きのシンセティックデータを用いて茂木モデルによるソース推定ツールを試作する。

### 成果リスト

秋山祐也, 佐藤源之 (2019), MIMOレーダを用いた干渉SARによる表面変位測定, 信学技報, vol. 119, no. 55, EMT2019-5, 23-28

秋山祐也, 佐藤源之 (2019), MIMOレーダのアジマス分解能評価, 信学技報, vol. 119, no. 121, SANE2019-32, 79-84

浅野公之 (2019), 気仙沼沖 M6 級繰り返しプレート境界地震の震源特性のばらつき評価, 日本地震工学会論文集, 19(5), 34-45

- Asano, K., T. Iwata (2019a), Source rupture process of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake deduced from strong-motion data considering seismic wave propagation in three-dimensional velocity structure, *Earth Planet. Space*, 71:101, doi:10.1186/s40623-019-1080-0
- Asano, K., T. Iwata, (2019b), Source Rupture Process and 3D Long-period Ground Motion Simulation of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, Japan, AGU Fall Meeting, S33A-06
- Baichuan LIU, G. Wang (2020), Role of halloysite on the initiation and movement of coseismic land- slides occurring on tephra slopes, 令和元年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D08
- Chigira M., J. Tajika, S. Ishimaru, T. Suzuki (2019), Geological features of landslides of pyroclastic fall deposits induced by the 2018 Eastern Iburi Earthquake and other previous earthquakes, Japan Geosciences Union meeting 2019, HDS14-P10
- 千木良雅弘, 田近淳, 石丸聡 (2019), 2019年胆振東部地震による降下火砕物の崩壊:特に火砕物の風化状況について, 京都大学防災研究所年報, 62B, 348-356
- Cochran, E., J. Bunn, S. Minson, A. Baltay, D. Kilb, Y. Kodera, M. Hoshihara (2019), Event Detection Performance of the PLUM Earthquake Early Warning Algorithm in Southern California. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 109(4), 1524-1541, doi:10.1785/0120180326
- Doi, I., T. Kamai (2020), Relationship between earthquake-induced excess pore water pressure and strong ground motion observed in a monitored fill slope, *Engineering Geology*, 266, 105391, doi:10.1016/j.enggeo.2019.105391
- 土井一生, 大澤光, 松浦純生 (2019), Seismological and geotechnical surveys on the landslides induced by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, HDS09-09
- 土井一生, 東良慶, 釜井俊孝 (2019), 平成30 (2018)年北海道胆振東部地震による厚真町における谷埋め盛土の崩壊, 日本地すべり学会研究発表会熊本大会, P37
- Furumura, T., BLN Kennett (2020), Propagation of distinct Love-wave pulses from regional to teleseismic distances in continental and oceanic environments, *Geophys. I. Int.*, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa028>
- Furumura, T., T. Maeda., A. Oba (2019), Early forecast of long - period ground motions via data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations, *Geophys. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1029/2018GL081163>
- Gonda Y., S. Miyata, M. Fujita, D. Legono, D. Tsutsumi (2019), Temporal Changes in Runoff Characteristics of Lahars After the 1984 Eruption of Mt. Merapi, Indonesia, *J. Disaster Res.*, 14(1), 61-68, doi:10.20965/jdr.2019.p0061
- Heidarzadeh, M., Y. Wang, K. Satake, I. E. Mulia (2019), Potential deployment of offshore bottom pressure gauges and adoption of data assimilation for tsunami warning system in the western Mediterranean Sea, *Geoscience Lett.*, 6(1), doi:10.1186/s40562-019-0149-8
- 平川泰之, 岡野和行, 植野利康, 里深好文, 堤大三, 宮田秀介 (2019), 近年の雲仙普賢岳における土石流発生の地形・地質的条件, *砂防学会誌*, 72(1), 21-31

- HoushmandViki, A., H. Hamzehloo, H. Miyake, A. Ansari (2019), Estimation of strong motion generation area for the 2004 Parkfield earthquake using empirical Green's function method, *Pure Appl. Geophys.*, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02327-9>.
- Hurlimann, M., V. Coviello, C. Bel, X. Guo, M. Berti, C. Graf, J. Hubl, S. Miyata J.B. Smith, H-Yuan Yin, 2019, Debris-flow monitoring and warning: review and examples, *Earth Science Reviews*, 199, 102981, doi:10.1016/j.earscirev.2019.102981
- Ioki, K., Y. Tanioka, H. Yanagisawa, G. Kawakami (2019), Numerical simulation of the landslide and tsunami due to the 1741 Oshima-Oshima eruption in Hokkaido, Japan, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2018JB016166
- 岩城麻子, 森川信之, 藤原広行, 前田宜浩, 久保久彦, 藤原広行 (2019), 平成30年北海道胆振東部地震の広帯域地震動シミュレーション, 日本地球惑星連合2019年大会, SSS13-P08
- 香川敬生 (2019a), 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-, 土木学会論文集 A1, Vol. 75, No. 4(地震工学論文集第38巻), pp. 1674-1677
- 香川敬生 (2019b), 自治体震度計ネットワークによるリアルタイム震度評価の高度化 -鳥取県の事例-, 日本地球惑星科学連合大会2019年大会, SCG59-07
- 香川敬生 (2019c), 地震ハザードマップへの非線形地盤応答の影響, 日本地球惑星科学連合2019年大会, U07-05
- 香川敬生, 星山賢太郎, 野口竜也 (2019), 2000年鳥取県西部地震境港市役所における強震動の推定, 土木学会第74回年次学術講演会, CS12-21
- 香川敬生, 星山賢太郎, 野口竜也 (2019), 2000年鳥取県西部地震による気象庁境港観測点における非線形地盤応答特性と境港市役所における観測記録の再現, 土木学会第39回地震工学研究発表会, B12-1411
- Kagawa T., Y. Ohta (2020), Prior and Real-Time Estimations of Ground Motions, Tsunamis, and Other Geodynamic Hazards, *J. Disaster Res.*, Vol. 15, No. 2, pp. 144-151, doi:10.20965/jdr.2020.p0144
- 香川敬生, 吉田昌平, 野口竜也 (2019), 鳥取県境港市で観測されるやや長周期地震動, 日本地震学会2019年度秋季大会, S21-P09
- 釜井俊孝 (2019), 宅地崩壊-なぜ都市で土砂災害が起こるのか, NHK出版新書(4/10刊行), pp. 233
- Kennett, BLN, T. Furumura (2019), Significant P wave conversions from upgoing S waves generated by very deep earthquakes around Japan, *Prog. Earth, Planet. Sci.*, 6, 49, doi:10.1186/s40645-019-0292-z
- Kobayashi, H., K. Koketsu, H. Miyake (2019), Rupture process of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earth-quake derived from strong motion and geodetic data, *Earth Planets Space*, 71:63, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1041-7>
- Kodera, Y. (2019), An Earthquake Early Warning Method Based on Huygens Principle: Robust Ground Motion Prediction Using Various Localized Distance - Attenuation Models, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124, 12981-12996, doi:10.1029/2019JB017862
- Kodera, Y., N. Hayashimoto, K. Moriwaki, K. Noguchi, J. Saito, J. Akutagawa, S. Adachi, M. Morimoto, K. Okamoto, S. Honda, M. Hoshiba (2020), First-Year Performance of a Nationwide Earthquake Early Warning System Using a Wavefield-Based Ground-Motion

- Prediction Algorithm in Japan, *Seis. Res. Lett.*, doi:10.1785/0220190263
- Ling, S., M. Chigira (2020), Characteristics and triggers of earthquake-induced landslides of pyroclastic fall deposits: An example from Hachinohe during the 1968 M7.9 Tokachi-Oki earthquake, Japan, *Engineering Geology*, 264, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105301
- Meier, M. A., Y. Kodera, M. Bose, A. Chung, M. Hoshiya, E. Cochran, S. Minson, E. Hauksson, T. Heaton (2020), How often can Earthquake Early Warning systems alert sites with high-intensity ground motion?, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2019JB017718, doi:10.1029/2019JB017718
- Miyake, H., G. Tanircan, H. Yamanaka, O. Ozel (2019), Large stress release during normal-faulting earthquakes in western Turkey supported by broadband ground motion simulations, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 21, EGU2019-12094-1
- Miyake, H., S. Babita, K. Koketsu, S. N. Sapkota (2019), Broadband source modeling for the Himalayan collision zone, *JpGU Meeting 2019*, SSS13-24
- Nagai, K., K. Asano, T. Iwata (2019), A SMGA Source Model of the 2018 Hokkaido Eastern Iwate, Japan, Earthquake, *AGU Fall Meeting*, S31C-0529
- 西川隼人, 野口竜也, 西村武, 宮島昌克, 香川敬生 (2019), 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, *土木学会論文集 A1*, Vol.75, No.4(地震工学論文集第38巻), pp. I383-I390
- 西川隼人, 野口竜也, 宮島昌克, 香川敬生 (2019), 微動 H/V の 1 次ピークの振動数と振幅に基づいた地盤増幅度評価式の検討, *日本地震工学学会論文集*, Vol.19, No.7, pp. 7\_41-7\_55, doi:10.5610/jaee.19.7\_41
- 西村武, 野口竜也, 香川敬生 (2019), 微動探査に基づく鳥取県湯梨浜町における地盤構造の推定, *土木学会第39回地震工学研究発表会*, B11-1401
- 西村武, 野口竜也, 香川敬生 (2019), 鳥取県湯梨浜町小鹿谷・高辻の稠密微動探査による地盤構造の推定, *土木学会中国支部第71回研究発表会*, I-3
- 西村武, 野口竜也, 香川敬生 (2019), 鳥取県北栄町西園・由良地域における稠密微動探査と地盤構造の推定, *土木学会第74回年次学術講演会*, CS12-14
- 野口竜也, 西川隼人, 吉田昌平, 香川敬生 (2019), 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, *日本地震工学学会論文集*, Vol.19, No.6, pp. 6\_258-6\_271
- Oba, A., T. Furumura, T. Maeda (2019), Early forecast of long-period ground motions for large earthquakes in the Nankai trough based on data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations, *AGU 2019 Fall meeting*, S53G-0552
- Oba, A. (2020), Data-assimilation-based early forecasting of long-period ground motions for large earthquakes along the Nankai Trough, Master's thesis, Dep. Earth and Planetary Science, Graduate School of Sciences, The University of Tokyo
- 大野圭太郎, 太田雄策 (2019a), MCMCによる震源断層モデル推定の不確実性リアルタイム評価手法の開発, *日本地球惑星科学連合2019年大会*, SCG59-10
- 大野圭太郎, 太田雄策 (2019b), GNSSによる断層すべり分布推定の不確実性定量評価-南海トラフを対象とした数値シミュレーション-, *日本測地学会第132回講演会*, 52



- 大野圭太郎, 太田雄策, 村松弘規, 阿部聡 (2019), 震源断層モデル推定の不確実性リアルタイム評価手法の開発 -2019年山形県沖の地震への適用-, 日本地震学会2019年秋季大会, S24P-04
- 齋藤さやか, 関谷直也, 安本真也 (2020), 地震対策行動の規定因に関する探索的研究, 9. 22, 第38回日本自然災害学会学術講演会, II-7-5
- 先名重樹 (2019), 熊本平野における広帯域強震動評価のための浅部・深部統合地盤モデルの構築, 「平成28年(2016年)熊本地震とESG研究」シンポジウム (10/21) 講演集, 日本地震工学会
- 先名重樹, 若井淳, 谷田貝淳, 稲垣賢亮, 松山尚典, 藤原広行 (2019), 阿蘇地域全域における微動アレイ観測結果, 第54回地盤工学研究発表会, 0954
- 佐藤英一, 福井敬一, 新堀敏基, 石井憲介, 徳本哲男 (2019), 気象レーダーで観測した2019年1月17日口永良部島噴火に伴う噴煙・火山灰雲エコーについて, 火山噴火予知連絡会会報, 132, 420-426
- 佐藤源之, 鄒立龍, ジョバンニ ニコ, 菊田和孝 (2019), GB-SAR(地表設置型合成開口レーダ)による変位・振動計測, 電子情報通信学会B論文誌, vol. J-102B, no. 11, 844-852
- 関口春子, 浅野公之, 岩田知孝 (2019), 2018年大阪府北部の地震の大阪平野における強震動シミュレーション, 日本地震学会2019年秋季大会, S16P-14
- 島津颯斗, 岩田知孝, 浅野公之, 染井一寛 (2020), 静岡県の強震観測網を用いた震源特性, 伝播経路特性, サイト増幅特性評価, 令和元年度京都大学防災研究所研究発表講演会, B17
- Suzuki, Y., M. Watanabe, T. Nakata, 2020, Extremely strong ground motions associated with the 2016 Kumamoto earthquake: Special references to Mashiki and Ozu areas. HOKUDAN2020
- 田中優介, 太田雄策, 宮崎真一 (2019), PTSによる地震時および地震後の断層すべり現象の検出: 2011年東北地方太平洋沖地震の事例, 日本測地学会第132回講演会, 10
- Tanircan, G., H. Miyake, H. Yamanaka, O. Ozel (2019), Large stress release during normal-faulting earthquakes in western Turkey supported by broadband ground motion simulations, Pure Appl. Geophys., <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02357-3>
- 堤大三, 孝子綸図, 山野井一輝, 藤田正治 (2019), ストリームチューブによる地形分割を基にした表層崩壊解析手法, 砂防学会誌, 72(2), pp. 3-13
- 王功輝, 古谷元, 渡部直喜, 土井一生, 馬寧 (2019), 平成30年北海道胆振東部地震による土砂災害の特徴, 京都大学防災研究所年報 第 62 号 A: 48-56
- Valentine D. C., M. Sato (2019a), Integration of GB-SAR and Spatial Data Processing for Real-Time Landslide Monitoring, IEICE Technical Report, vol. 119, no. 121, SANE2019-31, 73-78
- Valentine D. C., M. Sato (2019b), Integration of GB-SAR and Spatial Data Processing for Real-Time Landslide Monitoring, Remote Sensing Society of Japan (RSSJ) annual meeting
- Wang, Y., K. Satake, O. Sandanbata, T. Maeda, H.-Y. Su (2019), Tsunami data assimilation of cabled ocean bottom pressure records for the 2015 Torishima volcanic tsunami

earthquake, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124(10), 10413-10422,  
doi:10.1029/2019JB018056

渡辺満久, 鈴木康弘 (2020), 清正公道に沿って現れた2016年地表地震断層と地震被害, 日本地理学会講演要旨, doi:10.14866/ajg.2020s.0\_317

山口翔大, 宮田秀介, 堤大三, 村重慧輝, 藤田正治 (2019), 数値解析による積雪条件の異なる融雪型火山泥流予測, 砂防学会誌, 71(6), 3-13

安本真也, 石濱陵, 森野周, 関谷直也 (2020), 「南海トラフ地震に関連する情報」に対する住民の反応, 災害情報18, 日本災害情報学会誌, 95-97

安本真也, 田中淳, 関谷直也 (2020), 漁港における津波対策の現状と課題—沿岸部自治体の悉皆調査結果より—, 自然災害科学特別号, 日本自然災害学会, 38, S06, 109-122,  
doi:1024762/jnds.j.28.S06\_109

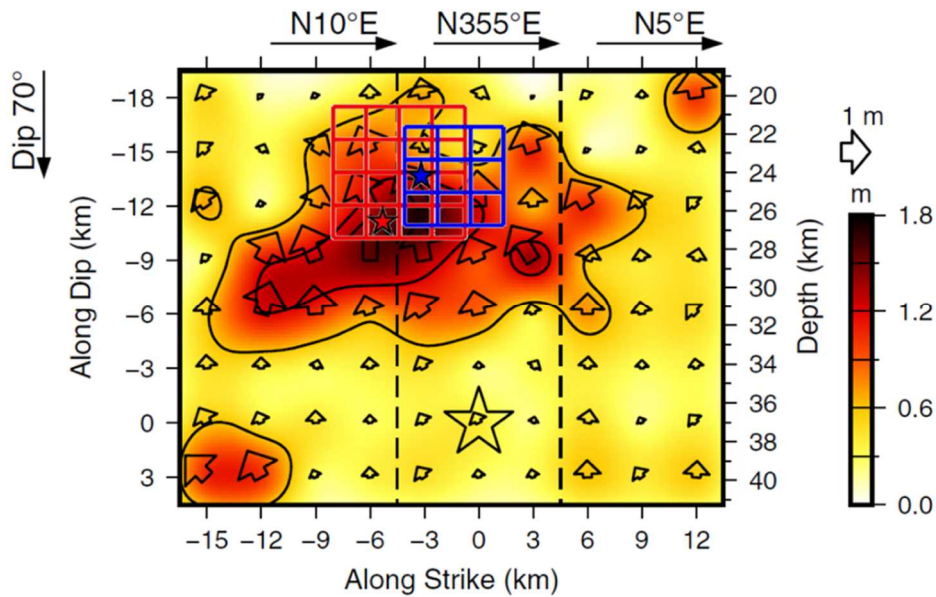


図 1. 2018 年北海道胆振東部地震の強震波形インバージョンによるすべり分布 (Asano and Iwata, 2019) と強震動シミュレーションに基づく SMGA モデル (永井・他, 2020) の比較: すべりの大きい場所 (カラーコンターですべり量を示す) と SMGA (赤と青の矩形で示した領域) が対応 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI09])。

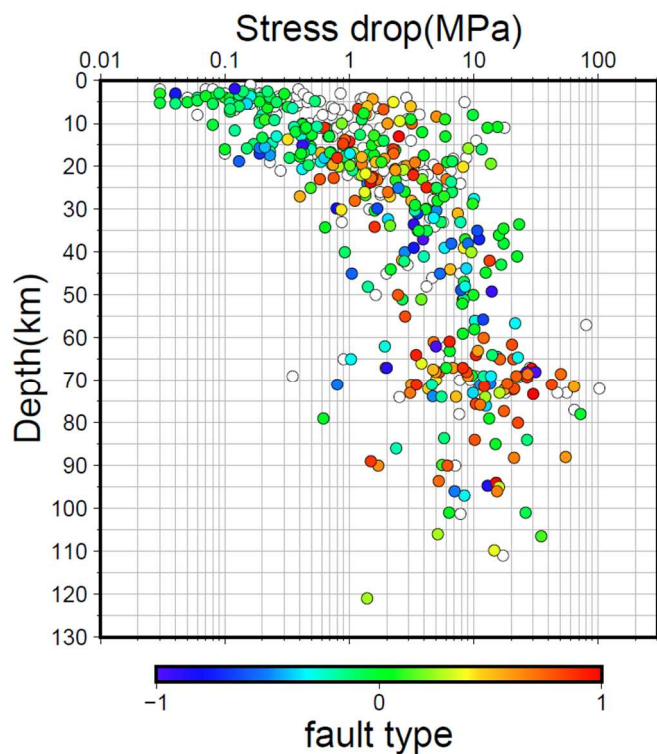


図 2. 静岡県下の強震観測点 (SK-net を含む全 166 点) 記録を用いたスペクトルインバージョンにより推定された震源特性で深さ 2~120km で発生したイベントの応力降下量は深さ依存性を示す。色は断層タイプ (-1 (正断層型) ~0 (横ずれ断層型) ~+1 (逆断層型)) を示す (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI09])。

100m点群化モデルA  
(地表地下収斂)

100m点群化モデルB  
(地表地下独立)

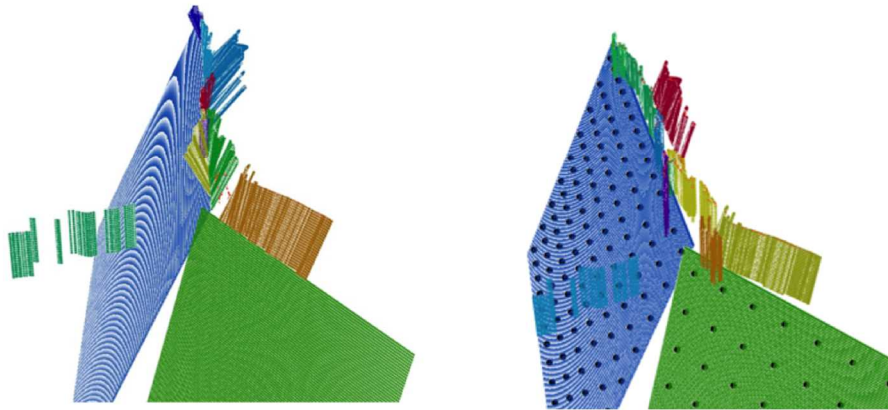


図3. 2016年熊本地震で観察された地表地震断層の極近傍での建物被害の原因を探るため、また、地震計に記録されたメートルオーダーの永久変位を説明するために地下の震源断層と地表地震断層とのモデル化を実施した。図は2つの点群化モデルをそれぞれ示す。左図：浅部と深部を震源断層上端で収斂させたモデル。右図：高角の浅部の断層と深部が独立しているモデル（名古屋大学 [課題番号：NGY\_05]）。

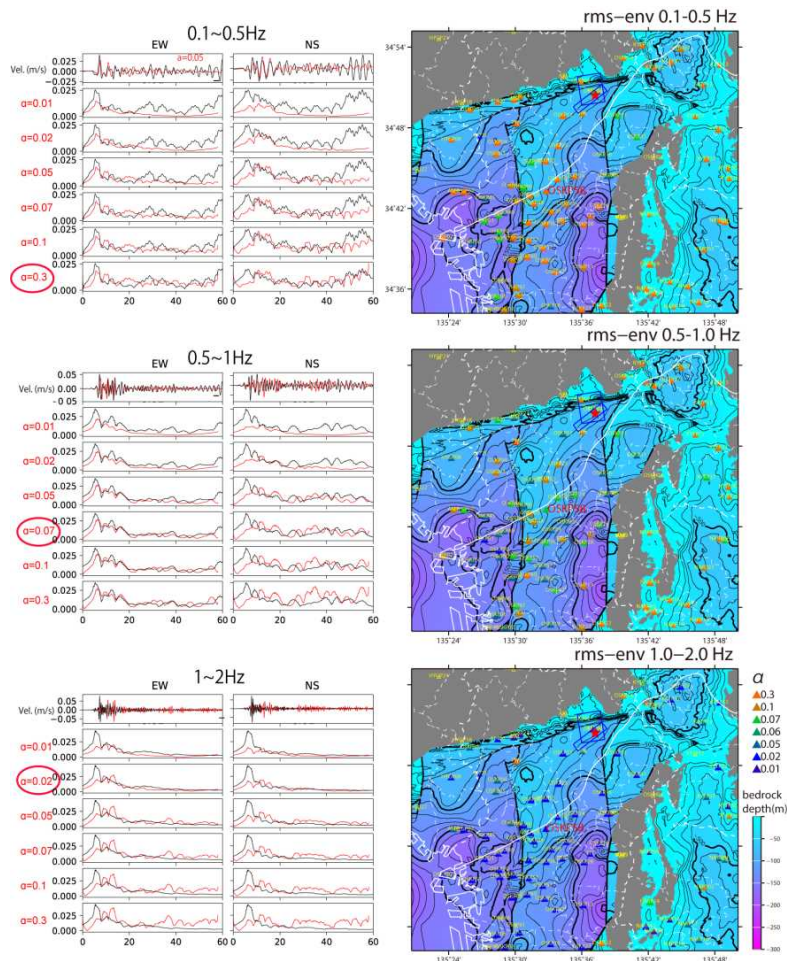


図4. 2018年大阪府北部地震の再現シミュレーションによる既往地下構造モデルの検証。堆積層Q値を変えた場合の観測波形と理論波形の狭帯域における比較。上から0.1~0.5Hz, 0.5~1.0Hz, 1~2Hzをそれぞれ示す（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI08]）。

浅部地盤の統合による説明力の向上について 深部地盤モデルと浅部・深部統合地盤モデルでの比較例  
 Wakai et al.(2019)

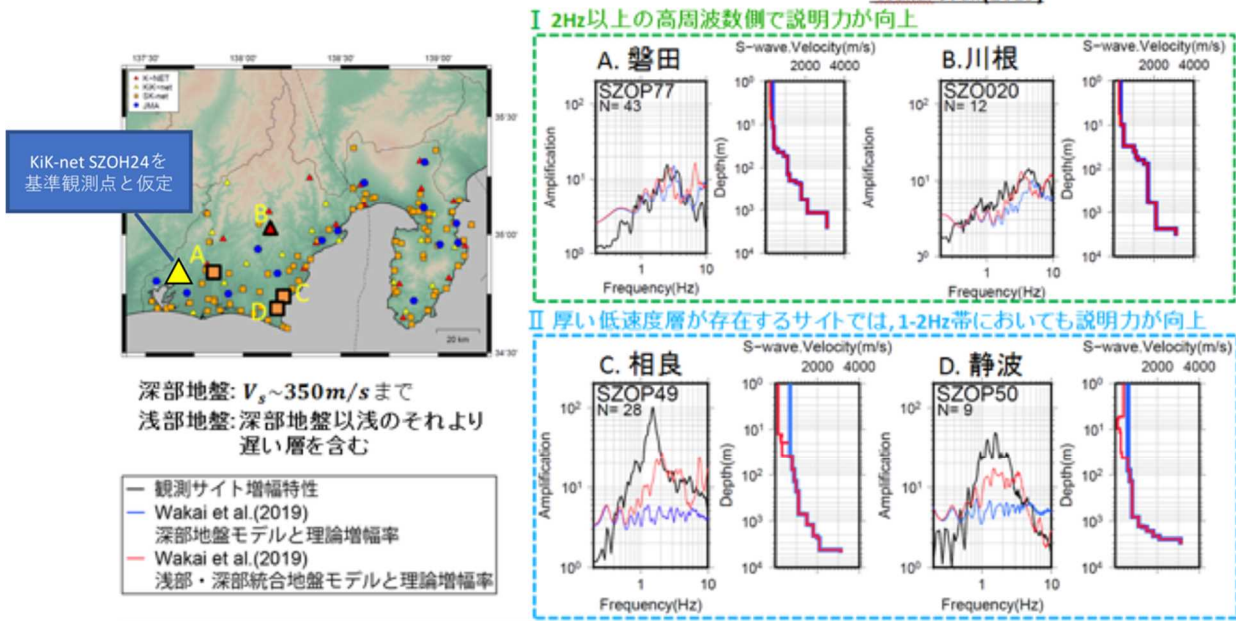


図5. 静岡県下の強震観測点 (SK-net を含む全 166 点) 記録を用いたスペクトルインバージョンにより観測サイト増幅特性を推定し, 堆積層構造モデル (Wakai et al., 2019) の理論増幅特性と比較した結果 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI08])。

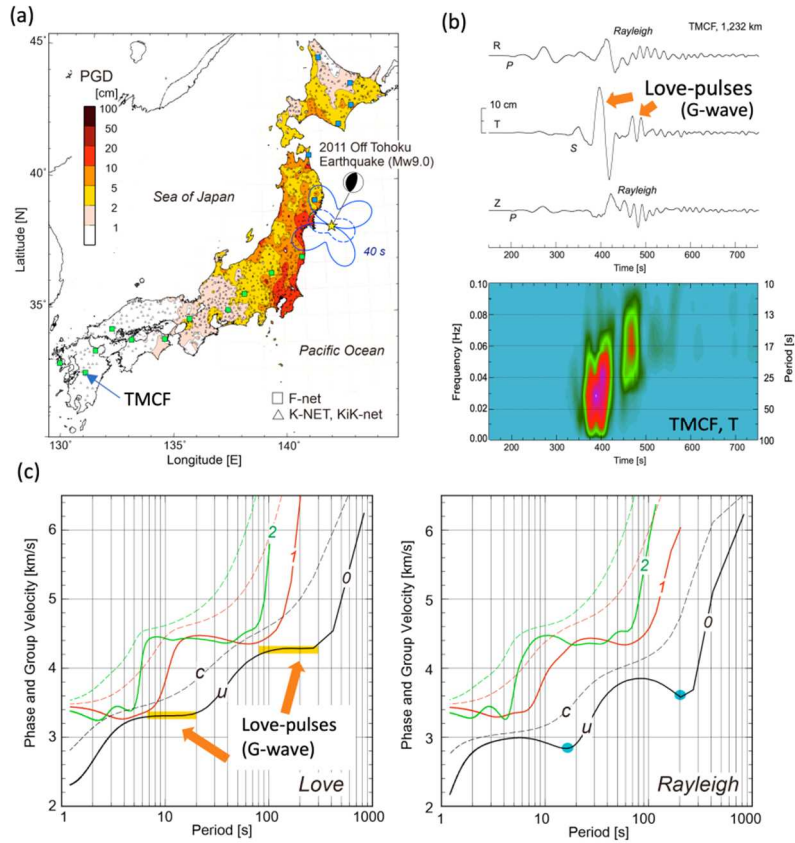


図6. 2011年東北地方太平洋沖地震のLove波伝播による近地—遠地強震動。(a) Love波の放射パターン(青実線)と最大地動分布(PGD) (b)九州 TCMF 観測点の3成分変位波形 T成分に見られる二つのLove波パルスと周波数特性, (c左) Love波理論分散曲線(0:基本モード, 1,2:高次モード, u:群速度, c:位相速度)に見られる, 二つの位相速度一定の領域(黄色ハッチ), (c右) Rayleigh波理論分散曲線と Airy phase (青)(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_14])。

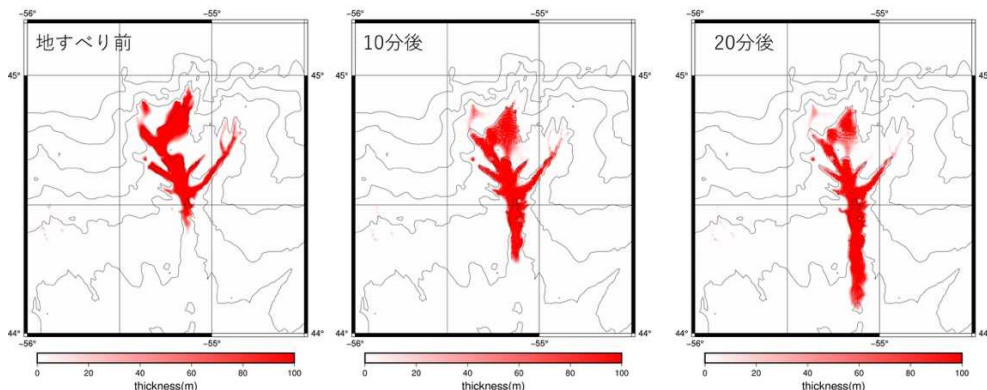


図7. 1929年Grand Banks地震(M7.2)に伴う海底地すべりによる津波を, 先行研究で提示されている地すべり域を参考に, 地すべりの初期の層厚を変化させて津波数値計算を実施した。図は海底地すべりの数値計算結果で赤色でその量を示す。(北海道大学 [課題番号: HKD\_05])。

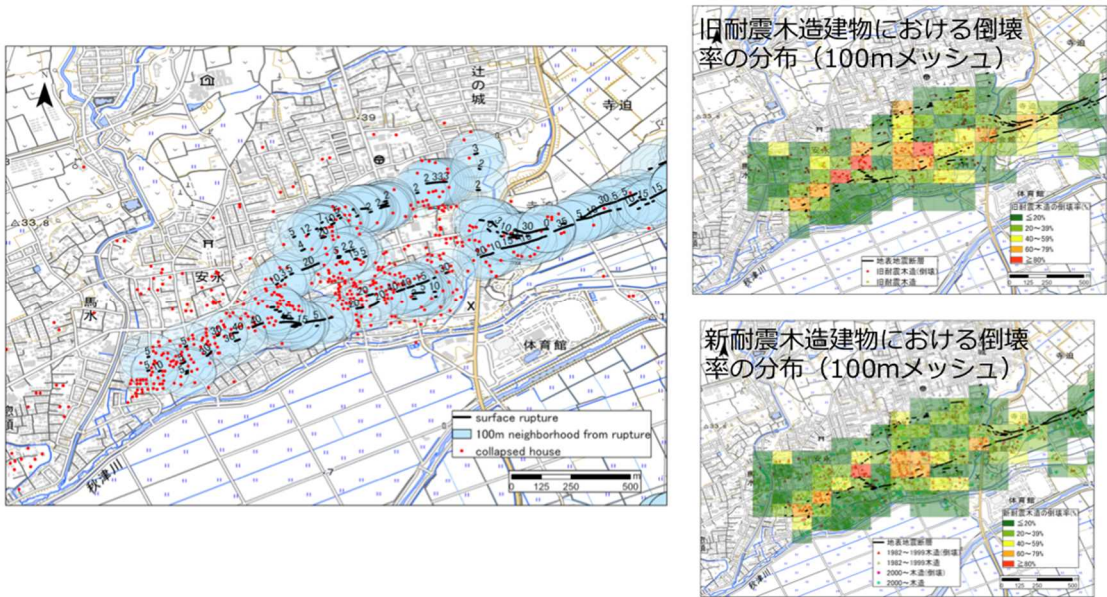


図 8 . 2016 年熊本地震の際の建物被害についての分析。(左図) 益城町における倒壊建物と地表地震断層の分布。数字は右横ずれ変位 (cm) を示す。(右図上) 旧耐震木造建物における倒壊率の分布。100m メッシュで色で倒壊率を示す。(右図下) 新耐震木造建物における倒壊率の分布。地表地震断層から 100m の範囲に倒壊建物の約 80% が集中していること, 旧耐震基準, 新耐震基準ともに地表地震断層より北側で倒壊率が高いことが分かる (名古屋大学 [課題番号: NGY\_05]) 。

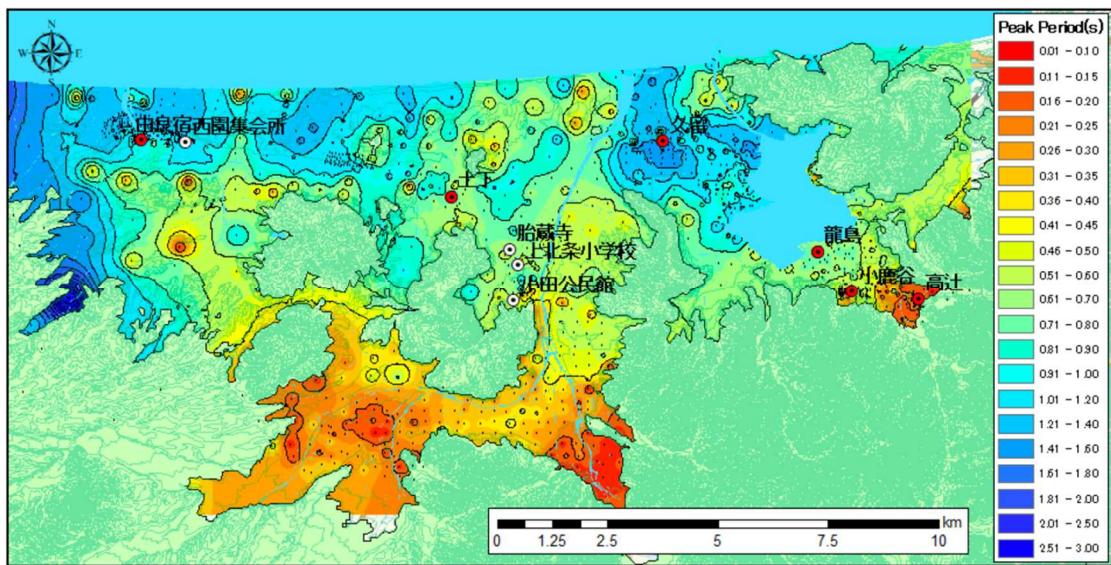


図 9 . 鳥取県中部域の微動卓越周期分布。色で卓越周期を示す(鳥取大学 [課題番号: TTR\_01])。

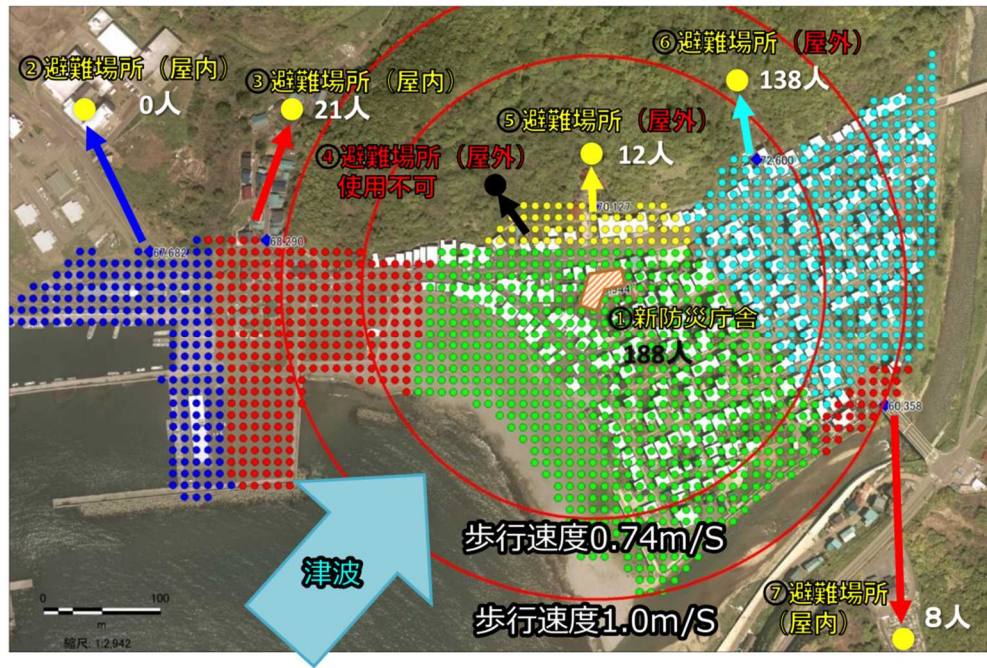


図 10. モデル地区における避難シミュレーションに基づくリスク評価例。実測した避難速度 (1.0m/s) を元に、それぞれのエリア毎 (色で区分) に最適な避難場所 (①～⑦) を設定することで最適化を図った (北海道立総合研究機構地質研究所 [課題番号: HRO\_02])。



図 11. 新編火山灰アトラスから抽出した関東以北における 9000 年から 12 万年前の時代で厚さ 10 cm 以上の軽石層の分布範囲 (灰色線)。風化が進んだ 9000 年以上前の軽石層がすべり面形成に大きな役割を果たしており、これらの地域が地震によるテフラの崩壊の発生が危惧される場所と考えられる (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI10])。



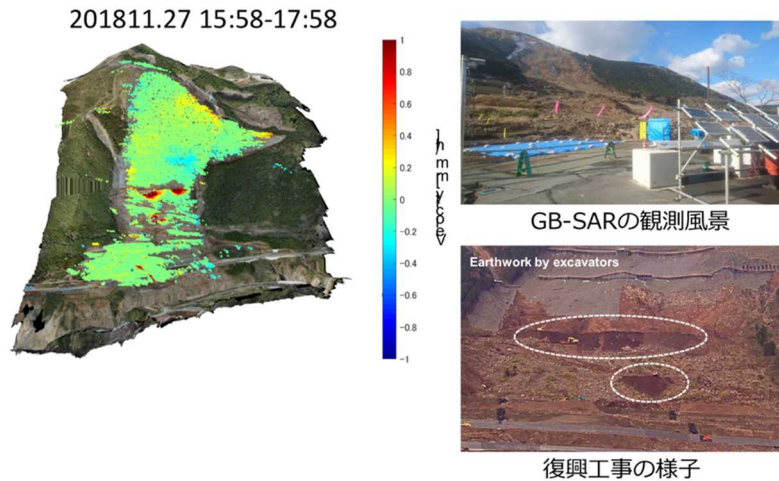


図 12. 熊本県南阿蘇村立野に設置している 2 台の GB-SAR の連続計測による計測結果。工事に伴う変位を観察したところ明瞭な対応（左図中の赤色で示された部分）が確認できた（東北大学災害科学国際研究所 [課題番号：IRID03]）。

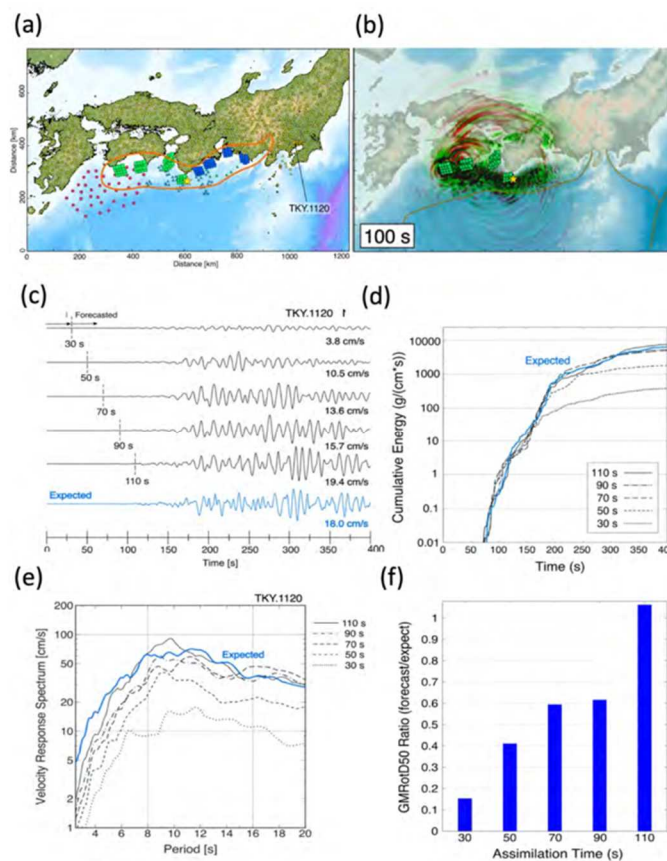


図 13. 南海トラフ地震による長周期地震動のデータ同化と即時予測実験。(a) 南海トラフ地震震源モデル（内閣府による）と陸域及び海域観測点の配置，(b) 南海地震モデルによる地震波伝播シミュレーション，(c) 都心部の長周期地震動の予測結果（同化時間 30 秒，50 秒，・・・110 秒の場合）と期待される地震動（青線）の比較，(d) それぞれのデータ同化時間による予測波形と期待波形の弾性エネルギーの積算値の比較，(e) 速度応答スペクトルの比較，(f) 固有周期 8 秒での速度応答スペクトル比（予測／期待）の比較（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_14]）。

P波検知方法、上下動震度の活用を検討

現在は、S波が観測されるまで待つ必要がある

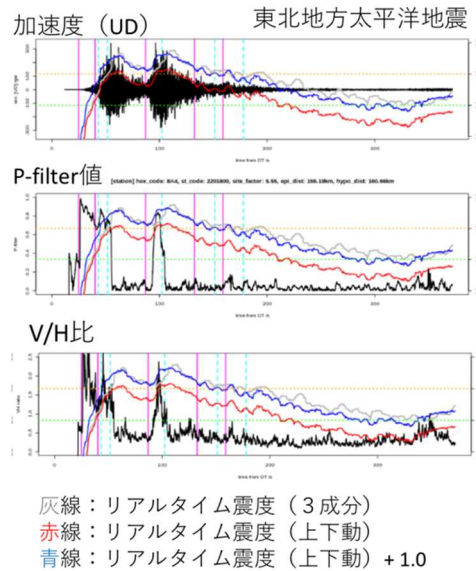
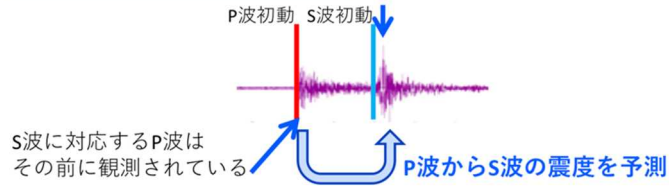


図 14. PLUM 法の機能向上の概念図。S 波群中の P 波を検知する方法を發展させ、上下動成分のみから得られる震度を予測に用いることで PLUM 法が持つ近い未来しか適用できないという弱点を克服できる可能性を示した（気象庁 [課題番号：JMA\_06]）。

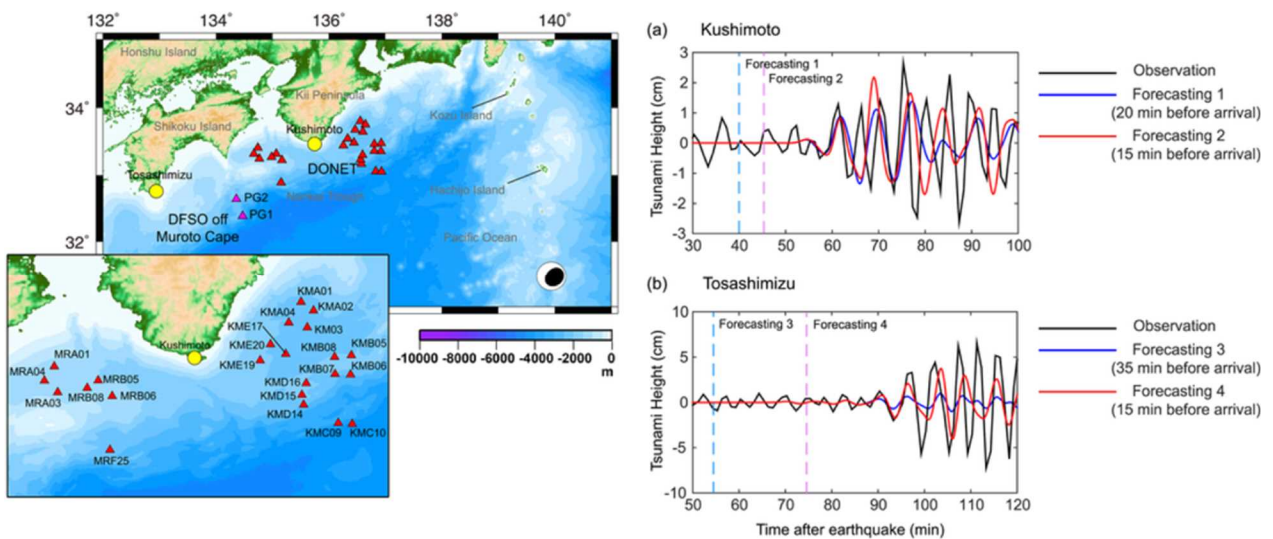


図 15. 2016 年鳥島沖地震に対する Green 関数を用いたデータ同化に基づく津波即時予測手法結果。左図：震源と同化に利用した観測点（赤）予測ターゲット地点（黄）を示す。右図：縦点線の時点における津波予測（青、赤の線）と観測記録（黒線）との比較を示す（弘前大学理工学研究科 [課題番号：HRS\_02]）。

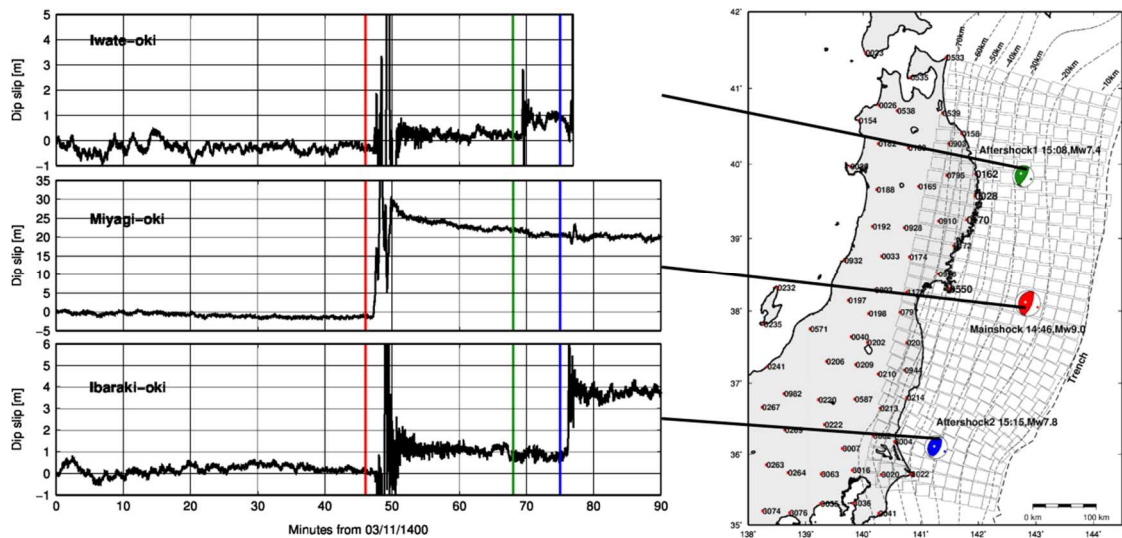


図 16. PTS によって推定された 2011 年東北地方太平洋沖地震とそれに引き続く余震に伴う断層すべりの時系列。右図の各断層パッチのすべり時系列を左に示す。左図中の赤線が 2011 年東北地方太平洋沖地震本震，緑線がそれに引き続く岩手県沖地震，青線が最大余震である茨城沖地震の発生時刻を示す（東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_12]）。

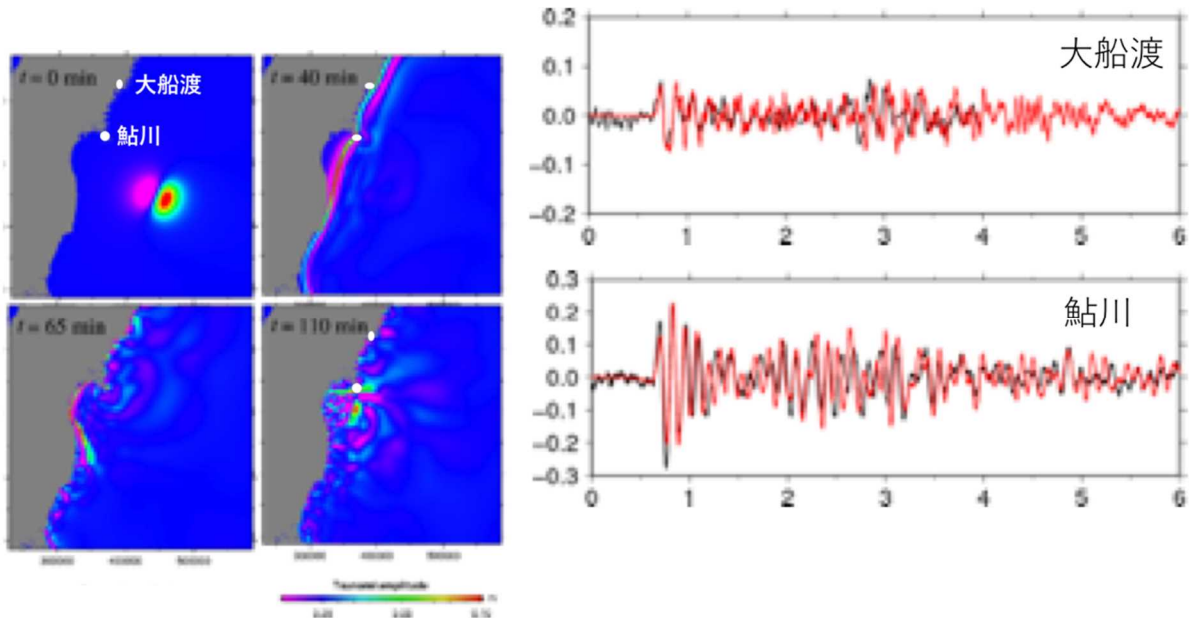


図 17. 2008 年 7 月 19 日 福島県沖の地震 (M6.9) の観測事例の津波数値計算による再現。左図：波面場の時間発展。右図：赤色が大船渡と鮎川における津波の計算値，黒色が観測値をそれぞれ示す。縦軸の単位は m (気象庁 [課題番号：JMA\_06])。

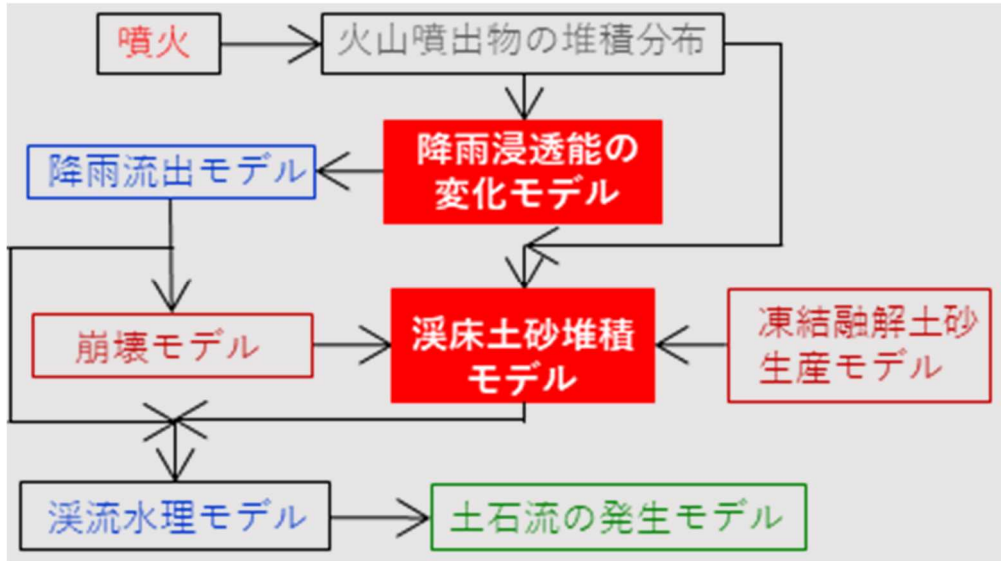


図 18. 噴火後の長期的な土石流発生モデルのフレームワーク。降雨浸透能は火山灰の堆積により減少するが、徐々に回復する。一方で渓床堆積土砂量は、土砂生産現象により増加、土石流が発生すると減少する（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI\_12]）。

現初期値 (Suzuki, 1983)  
+ 新ATM (開発中)

逆解析値 (Ishii, 2018)  
+ 新ATM (開発中)

Total Deposition (g/m<sup>2</sup>)

Total Deposition (g/m<sup>2</sup>)

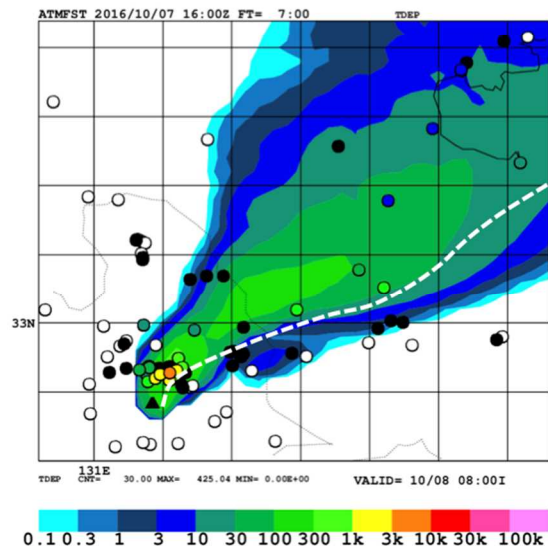
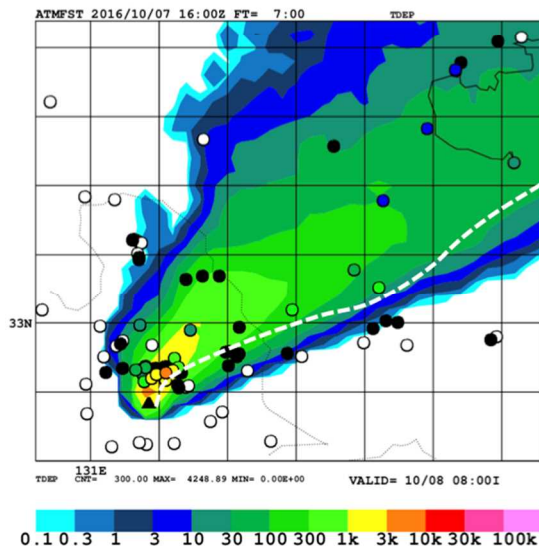


図 19. 降灰のデータ同化による初期値の不確定性。2016年10月8日01時46分阿蘇山噴火に対して降灰データを逆解析して新しい気象庁移流拡散モデル (JMA-ATM) を実行し、初期値の不確定性を示した。図中の黒丸が降灰があった箇所、白丸が降灰が無かった場所をそれぞれ示す (気象庁 [課題番号：JMA\_07])。



図 20. 日本放送協会による「体感・首都直下地震ウィーク」を刺激とする社会的実験調査（パネル調査）の実施結果（東京大学情報学環 [課題番号：III\_01]）。

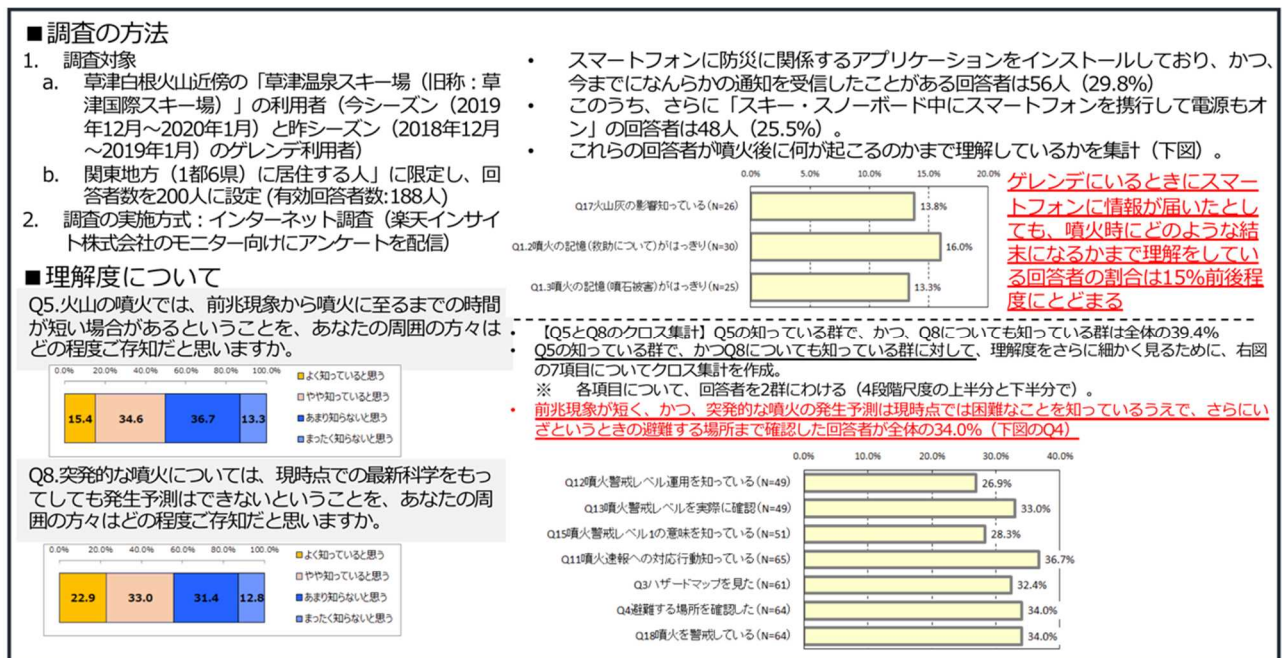


図 21. 2018年1月の草津白根山の噴火事例において、噴火に関する情報が火山近傍の関係団体にどのように伝達され、理解され、情報内容の課題があったのかを分析することを目的とし、草津白根火山近傍の「草津温泉スキー場」の利用者を対象としたインターネット調査結果の抜粋（公募研究，東北大学 [課題番号：KOB016]）。