

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う。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る。

2. 平成 28 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年熊本地震と一連の地震活動では、2016年4月14日21時26分に発生した $M_{JMA}6.5$ の地震（以下、最大前震と称する）の約28時間後の4月16日1時25分に $M_{JMA}7.3$ の地震（以下、本震と称する）が発生した。本課題では、マルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法を強震記録に適用し、最大前震と本震の震源破壊過程を推定した（図1）。最大前震については、直後の余震分布及び防災科学技術研究所F-netのモーメントテンソル解の情報から、日奈久断層帯北部に沿ったほぼ鉛直の断層面（走向212度、傾斜89度、長さ14km、幅13km）を仮定し、速度波形3成分（0.051Hz）のS波部分を解析した。深さ11.4kmの破壊開始点付近にすべりの大きな領域が見られたほか、北東側のやや浅い部分（深さ5km程度）にもすべりの大きな領域が推定された。地震モーメントは $2.04 \times 10^{18} \text{Nm}$ ($M_w6.1$)、平均すべり量0.4m、最大すべり量1.2mであった。本震については、余震の空間分布の特徴、各機関の現地調査による地表地震断層の出現情報、国土地理院による地殻変動の解析結果などの関連情報を参考にして、日奈久断層帯北部（走向205度、傾斜72度、長さ14km、幅18km）と布田川断層帯（走向235度、傾斜65度、長さ28km、幅18km）に沿った2枚の断層面からなるモデルを設定し、速度波形3成分（0.05～0.5Hz）のS波部分を解析した。日奈久断層帯北部の深部から破壊が開始し、日奈久断層帯北端付近の浅部にもやや大きなすべりが生じた。その後、破壊は布田川断層帯深部に伝播し、北東にユニラテラルに伝播しつつ、浅い方向へ広がっていった。すべりの大きな領域は阿蘇カルデラの内側（南阿蘇村付近）まで達している。地表に最も近いサブ断層のすべり量は1～3m程度である。また、断層面上のすべりのスナップシ

ョットと、布田川断層近傍の熊本県震度計観測点（益城町，西原村）の変位波形（インバージョンには使用していない）を比較したところ，観測点近傍の断層がすべる時刻に対応して，同程度の変位が観測されており，推定された破壊過程の妥当性を確認した。地震モーメントは $4.50 \times 10^{19} \text{Nm}$ ($M_w 7.0$)，平均すべり量 1.9m，最大すべり量 5.1m であった。以上のことから，日奈久断層帯北部での前震を伴い，本震時には日奈久断層帯北部から布田川断層帯にかけて，連続的に破壊が伝播したものと考えられる。また，日奈久断層帯北部の断層面は，最大前震時はほぼ鉛直に近い断層面が破壊したのに対し，本震時は北西に傾斜した断層面であった。このことから，最大前震と本震ではお互いに近接しているが，異なる断層面がそれぞれ破壊したものと考えている。2016年熊本地震本震では，地表地震断層が出現したが，その直近の2地点（益城町および西原村）において強震記録が得られた。この加速度記録を基線補正に注意しながら速度，および変位波形を得て，地震断層の運動に関係する情報を取り出した。断層直交方向の動きの変化に着目することによって，地震断層の破壊伝播を直接見積もることができる (Aki, 1968)。この方法によって，約 9 km 離れた2地点の見かけの破壊伝播速度は約 4.5 km/s となった。この速度は周辺の S 波伝播速度を越えているが，Supershear 破壊を表しているのではなく，破壊が下方から上方へ進んでいることに対応していると考えられる。2次元的な震源断層面における破壊伝播の推定や評価には，水平方向のみならず深さ方向の破壊伝播特性も考慮した分析が必要である。（京都大学防災研究所 [課題番号：1903]，浅野・岩田，2016；Asano and Iwata, 2016）

○地下構造モデルの高度化

2016年熊本地震 ($M_{JMA} 7.3$) の発生に伴い，熊本地震震源域における減衰構造のトモグラフィ推定を行った。2016年熊本地震における一連の地震は，本課題で扱ってきた南西諸島から九州西方にまで延びる沖縄トラフの延長上にある，布田川断層帯および日奈久断層帯，別府-島原地溝周辺で発生している。本課題では，この地域の詳細な地震波減衰構造を調査するため，P波およびS波の3次元減衰トモグラフィを実施した（図2）。データは，防災科学技術研究所のHi-netの波形記録（期間（2002/06～2012/05， $M_{JMA} 3.0 \sim 6.0$ ，イベント総数743個）で，3.0～30.0Hzの帯域を使用した。使用した地震は，2016年熊本地震よりも前のものである。トモグラフィのグリッドは，水平方向に0.125度間隔，深さ方向に5～50km間隔に設定した。トモグラフィの結果と余震活動を比較することにより，以下の特徴が明らかになった。本震の震源周辺に集中した余震の発生域は南西側の強い低減衰領域と北東側の布田川断層帯の強い低減衰領域の両者に挟まれている。布田川断層帯側に水平幅10km程度の低減衰領域が分布しており，この領域では余震が少ない。この領域は，上記Asano and Iwata(2016)によって推定された震源過程において，最もすべり量の大きかった領域に対応しており，断層内で強く固着されていたと考えられる。また，阿蘇や九重といった火山活動が活発な地域の周囲に，強い高減衰域があり，この領域の地震の震源は浅くなっている。地下での高温なマグマの供給により，地震発生層の下限が変化していると考えられる。さらに，深部のフィリピン海プレートからの脱水によるupwellingを示していると考えられる高減衰域が熊本地震の震源域の直下まで認められる。これは，このupwellingによる水の供給が地震発生に関与していることを示唆している。

近年のレシーバ関数解析によるスラブ深部構造の調査や、スラブの物性・熱力学的研究、そして遠地地震波伝播・波形解析に基づいて、スラブ深部のおよそ410-660kmで相転移遅れによる低速度異常が薄いくさび形に延びた状態で存在する (MOW: Metastable Olivine Wedge) ことが議論されている。北海道西方沖～ウラジオストックを震央とする、日本海下の深発地震 ($h=200\sim 570\text{km}$) の広帯域地震波形を詳しく調べたところ、深さ400km以深の地震においてS波初動部の波形が変化し、低周波数の先駆波が見られることがわかった。後続の高周波数の到着時刻との時間差が震源の深さとともに増大する特徴は、スラブ内部に薄い低速度層 (MOW) が存在し、先駆波はMOWの下面を屈折波として伝播し、後続相はMOW内部を遅く伝わることで良く説明できる。2010年2月12日に発生したウラジオストックの深発地震 ($h=578\text{km}$, $M_w6.8$) の地震波形を、こうした不均質なスラブ構造をモデル化した2次元差分法に基づき計算したところ、MOWの幅は100 km (深さ410km) ~ 10km (深さ660km) 程度の大きさを持ち、P波速度は-5%、S波速度は-7%程度の低速度異常を考えたモデルが観測された地震波形を良く説明することを確認した (図2)。こうしたスラブ深部のくさび状の低速度異常は、およそ周波数2~4Hz程度の地震動をスラブ上部に向けて強く放射する効果があることも確認できた。その効果はMOW 頭部の厚さが100km前後で最大となり、MOWが存在しない場合の3倍以上の導波効果がウラジオストックの深発地震の波動伝播シミュレーションから確認できた。また、この地震の地震波伝播の3次元数値シミュレーションから、深発地震がMOW内部で発生した場合には、スラブ深部にMOWが存在することで、北海道から関東にかけての太平洋岸では最大加速度が数倍大きく増幅され、かつS波の継続時間が長く延びる強い異常震域が現れること、そして、これが観測を良く説明することを確認した。以上のように、スラブ内部を伝わる地震波は、スラブ内部の多様なスケールの不均質構造の影響を強く受けており、地震波の導波効果には強い周波数依存性と震源の深さ依存性があることが確認できた。従って、深発地震による、高周波数かつ長い継続時間を持つ強震動の予測には、スラブ内の不均質構造の把握と、スラブ内部構造を適切にモデル化した大規模数値シミュレーションが不可欠である。(東大地震研 [課題番号: 1516], 古村, 2016; Furumura et al., 2016; Kennett and Furumura, 2016; Yoshimitsu et al., 2016; Maeda et al., 2016; Noguchi et al., 2016; Takemura et al., 2016)

京都盆地では反射法探査、重力探査、微動アレイ探査といった物理探査が行われ、堆積盆地基盤に至るまでの堆積層の速度構造モデルが作られている。このモデルに対して、実地震波形記録を用いたモデル検証はほとんど行われていないことから、近地地震のP波部分のRadial成分とVertical成分によるレシーバ関数 (以下R/Vレシーバ関数) を用いた検証を行った (図3)。京都盆地内外の各機関における強震・震度観測点42点の波形データを収集し、使用した。ここには本課題で継続している京都市内の強震観測点記録も利用している。各観測点におけるイベント毎のR/Vレシーバ関数は、震央方位や震源深さに依らず、類似していたので、観測点毎にR/Vレシーバ関数をスタックしたものを、観測R/Vレシーバ関数とし、その最大ピーク出現時刻を読み取った。観測R/Vレシーバ関数の最大ピーク出現時刻が、震源から観測点までの速度構造のうち、最も顕著な速度差をもつ盆地基盤上面と堆積層の境界におけるPS変換波と直達P波の走時差である観測PS-P走時差に対応すると考え、既存の京都盆地速度構造モデルから観測点直下の1次元速度構造

を抜き出し、モデルによるPS-P走時差と、観測PS-P走時差と比較すると、多くの観測点ではよい対応を示しているが、盆地端部に位置するいくつかの観測点では両者の比が大きく、モデルの修正が必要であることがわかった。観測PS-P走時差説明のため、観測点直下の1次元速度構造モデルの基盤深度を変化させてモデルの修正を行った。この観測R/Vレシーバ関数の最大ピークが、盆地基盤でのPS変換波によるものかどうかを、離散化波数法による1次元成層構造モデルにダブルカップル点震源を与えた理論波形から得られる理論R/Vレシーバ関数と比較することで確認を行った。改良地下速度構造モデルによって得られた理論R/Vレシーバ関数は、観測R/Vレシーバ関数をよりよく再現していること、また観測R/Vレシーバ関数に現れている後続のピークがPPPS変換波に対応するものであることがわかった。PPP-S時間差は一部の観測点で観測とモデルの対応していないことから、この点の修正を行うことで堆積層の速度構造モデルをさらに改良することができると思われる。

大阪堆積盆地の地下構造モデルに関して、モデルの妥当性検証を地震動シミュレーションによって継続している。2011年東北地方太平洋沖地震時の大阪盆地での長周期地震動観測の解析と震源域から観測サイトを含むモデルシミュレーションを行い、大阪湾岸地域や東大阪（河内平野）での長周期地震動応答特性の再現を行った。この結果、大阪盆地での長周期地震動は、主として福島・茨城県沖の強震動生成域によって励起されたことがわかった。

地震時の断層すべり破壊において、破壊がどのように伝播するかは、地震波の特に短周期成分の生成状況に大きな影響を与える。地震動予測のための震源モデルの設定において、妥当な短周期地震動を生成する妥当な破壊伝播の不均質性を設定する方法を見出すことを目的として、動力的シミュレーションによって得られた動力的震源モデルの破壊伝播の様相を調べた。用いた動力的震源モデルは、大阪平野に存在する上町断層帯の地震の震源過程を推定するために行われた動力的シミュレーションによって生成されたもので、初期応力場に断層面の幾何形状による長波長不均質および k^{-1} スペクトルを持つ短波長不均質を仮定している。この動力的震源モデルの破壊伝播速度、破壊伝播加速度、応力降下量、クラック抵抗の空間分布や、パラメータ間の相関を調べたところ、破壊伝播速度は k^{-1} スペクトルを持つこと、破壊伝播速度が大きいほど破壊伝播加速度の取る値の幅が狭まることがわかった。一方、破壊伝播速度と他のパラメータとの相関については、応力降下量との相関はほとんど見られず、クラック抵抗との相関は見られたがばらつきが大きい。既往研究ではクラック抵抗から疑似動力的に破壊伝播速度を導いているが、ここで解析した動力的震源モデルではクラック抵抗の値は、既往研究事例とはオーダーで異なり適用不能とわかった。

堆積盆地構造の地震応答を実測し、地盤構造モデルの改良に用いるため、京都盆地と関東平野の中川低地では、既設観測点の保守と観測継続を行い、強震データ蓄積を継続した。（京大防災研 [課題番号：1911]，Iwata et al., 2016；Sekiguchi et al., 2016；下村・他，2016）

○強震動評価の高度化

2016年4月16日に発生した熊本地震の本震（ $M_{JMA}7.3$ ）では、震源断層沿いの益城町や西原村で震度7の激しい揺れを観測したほか、布田川断層沿いには熊本から阿蘇30km

の区間にわたって最大 2m のズレを伴う明瞭な地表地震断層が現れた。住宅倒壊や土砂災害など大きな被害をもたらした熊本地震の強震動の特徴と被害の成因を探るために、断層近傍で記録された強震動を調査し、過去に震度 7 を記録した 1995 年兵庫県南部地震や、2004 年新潟県中越地震の強震動と周波数特性を比較した。熊本地震では、震源断層に近い、西原村や益城町の震度計（加速度計）と KiK-net 益城観測点（KMMH16）の加速度記録には、強い揺れの時間は十数秒と短いものの、1G を超える激しい強震動が確認された。これらの強震動の速度応答スペクトルには、木造家屋に大きな被害をもたらす、周期 1~2 秒の地震動成分が強く ($>200\text{cm/s}$)、そのレベルは、西原村では兵庫県南部地震 ($M_{\text{JMA}}7.3$) の鷹取地点や 2004 年新潟県中越地震 ($M_{\text{JMA}}6.8$) の小千谷地点と同程度、益城町ではそれを大きく上回っていた (図 4)。こうした、この地震に含まれる周期 1~2 秒の強い地震動成分が木造家屋の被害に結びついた可能性が高い。一方、東北地方太平洋沖地震で震度 7 を記録した築館の強震動には、こうした成分は弱く ($<100\text{cm/s}$)、震度の指標だけからは被害を正確に見積もることが難しい問題が再確認された。

熊本地震の本震では、周期 3 秒~10 秒の長周期地震動も強く発生し、熊本と阿蘇地方において気象庁長周期地震動震度階級 4（最大ランク）が発表された。益城町や西原村の疑似速度応答スペクトルには、前述の短周期強震動に加え、固有周期 3 秒~10 秒の長周期帯でも $200\sim300\text{ cm/s}$ の強い応答レベルが確認できた。これは、2003 年十勝沖地震 ($M_{\text{JMA}}8.0$) において石油タンクがスロッシング被害を起こした苫小牧地点（HKD129）のレベル（固有周期 7 秒前後で 120cm/s ）の 2 倍以上になる。熊本地震では、長周期地震動が原因と考えられる被害は報告されていないが、仮に布田川断層沿いに長大構造物があったならば、大きな影響を受けた可能性が高い。布田川断層近傍の 4 観測点での加速度記録を積分して地動変位を求めると、断層ごく近傍の西原村と KMM005 観測点では数秒をかけて緩やかに西方向に動き、最終的に 2~1m の大きな静的変位が残った。この量は、地表地震断層のズレの大きさに相当し、動きの時間変化は立ち上がり時間が 2.6 秒のランプ関数で良く近似できた (図 5)。すなわち、断層の極近傍の観測点での変位記録の動きにおいて、断層運動により放射された地震動よりも、断層の動きそのものの寄与が圧倒的に大きいと判断できる。なお、断層運動に伴う地震動 (Far-field term; 遠地項) は、断層距離 (D) とともに幾何減衰 $1/D$ のオーダーで緩やかに弱まるのに対し、静的変位 (Near-field term; 近地項 + Intermediate term; 中間項) の幾何減衰はこれよりずっと大きく、 $1/D^2$ のオーダーで急激する。このため、断層ごく近傍で観測された、静的変位を含む断層運動に含まれる長周期地震動の成分は、断層から離れるにつれて急激に弱まる)。これまで長周期地震動の特徴として、たとえば南海トラフ巨大地震 ($M8\sim9$) 地震において関東平野、濃尾平野、大阪平野などの大規模平野で何分間にもわたって長く続く揺れをイメージすることが多かった。だが、今回の内陸 $M7$ 級地震で観測された、断層ごく近傍での長周期地震動は、揺れの継続時間は十数秒と短いものの、周期 3~10 秒以上の広い帯域で強烈なパワーを持つものであった。断層ごく近傍では、断層運動に伴う地震波放射の Directivity による断層直行方向の強震動だけでなく、断層の動き自体が作る断層平行成分も強い。こうした長周期地震動成分は、最大 10m にもなる明瞭な地表断層を伴った 1999 年台湾集集地震 ($M7.6$) の石岡ダム (TCU068) 地点でも観測されるなど、断層が地表を切る浅い大地震で起きると考えられる。また、断

層近傍長周期地震動の特性は、地震規模と断層運動の特性を強く反映する。台湾集集地震は規模が大きく、かつ断層滑り速度が遅かったため、長周期地震動のピークはより長周期側（9.5 s）にあり、周期2～5秒では熊本地震の西原村より小さかった。（東大地震研〔課題番号：1516〕，Furumura, 2016）

イ. 地震動による構造物被害の事前評価

十万・百万のオーダーの建築建物や交通・ライフライン等の大規模社会基盤施設を有する都市に対して、巨大地震がもたらす災害・被害の評価のため、理学・工学・社会科学の各分野で培われた数値解析手法が適用できるような都市全体の解析モデルを構築し、実際に、巨大地震がもたらす災害・被害予測を行うことを目的とした研究を進めている。平成27年度に統合地震シミュレーション(Integrated Earthquake Simulation, IES)が共有された、東北大学・新潟大学・東京工業大学・山梨大学・神戸大学・香川大学・高知工科大学・九州大学と理化学研究所計算科学研究機構の協力により、仙台・新潟・東京・甲府・兵庫県下複数都市・高松・高知・福岡を対象としたIESの活用が行われた。このうち、兵庫県下複数都市および高松市では津波遡上、さらに高松市では避難シミュレーションの連成が実施されている(図6)。(拠点間連携研究〔課題番号：2977〕，縣・他, 2065；藤田・他, 2016)

ウ. 地震による地すべりの事前評価

航空レーザー計測データを活用したハザードマップ作成手法について、甚大な被害を引き起こす降下火砕物についての試案をとりまとめた。西南日本の海溝型地震による既往斜面崩壊分布を文献調査し、現地調査を開始した。関東地方南西部の降下火砕物には1923年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り、また、西南日本外帯の付加体の堆積岩と変成岩の大規模崩壊には地質・地形的タイプがあることの見通しが得られた。昨年度末にインストールした新しい加速度・傾斜センサーによって2016年4月1日11:39に三重県の南東沖で発生したマグニチュード6.5の地震について、基盤から移動土塊、地表面に至る地震動の増幅過程を明らかにすることに成功した。

盛土における地震時の不安定度の危険度評価をおこなうため、kHzオーダーのサンプリング周波数を持つ計測システムを導入し、高感度加速度計を用いた屈折法探査を実施することにより、アスファルトに覆われた地盤でも簡便に地下水位を非破壊で推定することに成功した。

2016年4月16日に発生した平成28年(2016年)熊本地震による斜面災害の分布を調査し、さらに現地調査をおこなった。自然斜面の地すべり・崩壊は、カルデラ内の西部とカルデラ壁斜面において集中的に発生し、岩盤急斜面の崩壊とともに、傾斜10度前後の緩斜面でも急速な地すべりが発生したことがわかった(図7)。後者の多くは草千里ガ浜軽石などの風化した軽石またはその近傍、および黒土にすべり面を持つことが明らかになった。阿蘇大橋西側の崩壊は、その前兆として、事前に斜面が重力によってずり下がり、小崖が形成されていたことがわかった(図8)。軽石層からサンプルを採集し含水比、密度など各種パラメータを推定したうえで、リングせん断試験機を用いてせん断実験をおこなったところ、軽石層の強度や間隙水圧の発生メカニズムが明らかになった(図9)。

(谷埋め)盛土斜面において、亀裂分布から地すべりは旧谷地形と一致し、また、その領域で被害が卓越することがわかった。南阿蘇村の住宅地の地すべりにおいては、同定

した地すべりブロック内を横切って地表（分岐）断層の変位が見られた。実施した表面波探査によっても断層が深部から地表まで続く低速度帯としてイメージされた（図10）。

（京都大学防災研究所〔課題番号：1912〕，Chigira and Suzuki, 2016；Wang et al., 2016；千木良・他，20176；釜井・他，2016；王・他，2016；土井・他，2015；釜井，2016）

エ．火山灰や溶岩噴出の事前評価

2016年7月26日桜島（昭和火口）噴火（噴煙の高さ：火口縁上5000m）に伴う降灰予報について検証を行った。総噴出量を降灰調査の結果に基づき、噴煙の高さが同じであった2013年8月18日噴火の1/10に設定して再計算した結果、予想降灰域は大きく変化しないが、予報過多であった予想降灰量は改善することを示した。

2016年10月8日阿蘇山噴火に伴う降灰予報について、噴煙高度を気象レーダー・衛星で解析された海拔11kmから14kmまで変えて再計算を行った。降灰の観測あり／なしに対するカテゴリ検証の結果、海拔13km付近の噴煙高度を供給源とした場合が降灰分布をもっとも再現することを示した。しかし遠地の予想降灰量は過多の傾向であり、移流拡散モデルで考慮していない凝集の影響が示唆された。

降灰予報で使用している領域移流拡散モデル本体について、次世代非静力学モデル（asuca）である気象庁局地モデルのモデル面GPVを直接入力できるように改修し、従来の非静力学モデル（NHM）互換GPVを入力した場合と同等の予測結果が得られることを確認した。あわせて気象庁局地解析も入力できるように拡張した。（気象庁気象研究所〔課題番号：7010〕，新堀，2016）

（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

地震動の即時予測の新たな方法として、震源とマグニチュードの推定を介さず、リアルタイムの揺れの実況値から直接揺れの伝播を予測する方法の開発を進めている。この方法は、現在の緊急地震速報で取られている、震源とマグニチュードを決定し、震源を設定して震度の空間分布を推定する方法に比べ、安定した予測が可能になる。平成28年（2016年）熊本地震（ $M_{JMA}6.5, 7.3$ ）等で観測された実波形データに適用し、散乱・減衰構造の導入を行うなど予測モデルの改良を行った。その結果、一様構造を用いた場合と比べて、遠い未来においても、正確な構造モデルを用いれば予測震度が概ね震度差1以内に収まる精度で行えることを確認した（図11）。また、現在業務への導入が検討されている PLUM 法（本研究課題の手法の簡易版に相当する。伝播方向や距離減衰が入っていない簡易手法のため10秒以上遠い未来の予測には向かない）を熊本地震のデータに適用したところ、複数地震同時発生時にも安定した予測を行うこと、さらに、気象庁津波地震早期検知網（全国で約270観測点）に気象庁震度観測網（約400点）を加える効果などにより、おおよそ2～4秒早めることができること、を確認した。

従来手法における正確なマグニチュード推定のため、海底地震計の筐体の回転など強震入力時の挙動の解析を進めた（回転がおこると、加速度波形のゼロ点がずれ、変位波形に変換すると見かけ上の大振幅が現れる）。H27年度までの解析で、上下動成分には筐体の回転の影響が比較的現れにくいこと、また、地盤の増幅特性の地域性が（水平動に比べて）比較的小さいこと、が分かったので、H28年度は、この知見を実データに適用しながら、精度の良いマグニチュード推定の解析を進めた。（気象庁気象研究所〔課

題番号：7008] , Ogiso et al., 2016 ; Koderu et al., 2016)

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にリアルタイム震度と最大加速度値の1秒パケット送信機能の付与を受け、鳥取県情報ハイウェイを介してその情報を安定的に受信、表示する受信側のシステム開発をおこない、常時接続状態での安定稼働を確認できうるまでに至った(図12)。表示システムの作成が2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震以降になったことは残念であるが、上記パケットを受信し、表示するシステムも現時点では安定して動作している。計測震度観測点以外への面的な補間、伝播予測とデータ同化を活用した即時震度予測に向けて開発を継続している。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。平成28年度は、既往観測点分布が粗な地域のうち、境港市、湯梨浜町羽合・東郷地区および鳥取市鹿野町・青谷町を対象とし、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。(鳥取大学[課題番号：2001] , 香川・野口, 2016 ; 野口・他, 2016 ; Noguchi et al., 2016)

輻射伝達理論に基づくMultiple Lapse Time Window法によって九州地方の散乱減衰と内部減衰の同時推定を行った。昨年度より使用観測点を増やし、また、解析に用いる地震の条件を吟味するなどした結果、昨年度明らかになった活火山周辺に加え、一部の活断層周辺においても局所的に散乱及び内部減衰が大きいことが明らかとなった(図13)。加えて、地震動即時予測においても減衰構造とともに速度構造の影響が予想されることから、走時トモグラフィを用いた高解像度の速度不均質推定にも着手した。不均質な減衰構造の推定とともに地震動即時予測スキームの拡張を進め、不均質な散乱・減衰構造を取り込んだ計算が行えるようになった。この拡張したプログラムを用いて、平成28年熊本地震の一連の活動のうちの最大地震(4月16日1時25分, $M_{JMA}7.3$)の地震動即時予測シミュレーションを行ったところ、不均質構造を取り込むことによって、震度予測残差の2乗平均平方根(RMS)が約10%程度(10秒後の震度予測の場合)改善されることがわかった(図14)。また、より未来の予測になると予測残差のRMSの改善度合いが向上することが分かった。これは、リードタイムの長い予測を行う場合には不均質構造を考慮することが必須であることを示している。また、地震動即時予測に不可欠な観測点のサイト特性を補正する時系列フィルタの推定を行った。(公募研究[課題番号：2935] , Ogiso et al., 2016 ; 小木曾・他, 2016 ; 志藤・他, 2016)

関東平野の堆積層構造とプレート構造を考慮した3次元地下構造モデルを用いて、関東周辺で発生する地震について、水平・鉛直方向に10km間隔でグリーン関数を計算し、データベース化した。1次元地下構造を仮定して求めたグリーン関数(3次元グリーン関数)との比較を行なったところ、波線が堆積層を通過し表面波の励起が強い地震や、プレート内を遠距離伝わる地震伝播経路で3次元地下構造の影響が大きく、グリーン関数の初動到着時刻、P波・S波振幅、後続相の継続時間の違いが大きくなることが確認された。また、3次元グリーン関数と1次元グリーン関数の違いは、地震波の周期帯が短いほど大きくなること、関東周辺で発生する地震においては、周期30~50秒の長周期帯で

も差が見られることを確認した。次に、3次元グリーン関数をリアルタイムモーメント・テンソルインバージョンシステム (Grid MT) に導入し、関東周辺の地震活動モニタリングを行った。2016年11月～12月の1ヶ月間に11個の震源を求めたところ、半数以上において従来の1次元グリーン関数を用いたインバージョン結果より波形の説明が良いことを、波形の一致具合 (Variance Reduction) から検討した。なお、モニタリングは継続中であり、推定結果の気象庁一元化震源による震源位置の確認やプレート上面深度との関係等からの結果の妥当性の検討を行うとともに、現在30秒までの解析周期帯を、より短周期に拡大するなど、リアルタイムモーメントテンソルインバージョンの精度向上をはかる。(東大地震研 [課題番号: 1516])

イ. 津波の即時予測

防災科学技術研究所は日本海溝・千島海溝に沿って約125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)として設置中である。震源域直上近傍にS-Netのように密な海底圧力観測網があれば、地震の震源過程や波源を推定せずとも、直接観測波形データから津波数値計算を開始する新しい手法を開発することが重要だ。ここで問題となるのが、震源域直上の海底圧力計の場合、地震による海底地殻変動により海底圧力計も隆起または沈降するため、実際の海底変動(津波初期波形)が記録できないことにある。昨年度はそれを解決する手法の開発に成功した、本年度はその手法を2011年東北地方太平洋沖地震の津波に適応し津波浸水域の予測を試みる。震源モデルを用いて津波を計算し約30km間隔に設置された場所で津波計算波形を出力した。その波形を用いて新しい手法で震源域での津波波高分布を推定し、その波高分布から津波を計算した。震源モデルから直接津波を計算した結果と30km間隔の観測波形から計算された波高分布を比較すると、短波長の津波はやはり上手く再現できていないが、長波長の津波は上手く再現できていることが分かる。さらに、Gusman et al. (2014)の手法を用いて、山田・釜石・陸前高田・南三陸・仙台平野での津波浸水域及び浸水高の予測を試みた(図15)。南三陸では津波浸水域・遡上高とも上手く予測できているのが分かる(図16)。他の地点でもある程度上手く予測できることが分かった。つまり、2011年東北地方太平洋沖地震の発生前に30km間隔の海底圧力観測が実施されていれば、本手法とGusman et al. (2014)の手法を用いることで、地震の破壊過程終了後2～3分程度で津波浸水予測が出来ていたことになる。

2012年ハイダグワイ巨大地震(Mw7.8)がカナダ太平洋沖で発生し、その津波が太平洋を伝播した。当時米国オレゴン沖には10kmから50km間隔で海底地震計が設置されていた。これらの地震計網には海底圧力計も搭載されていたため、津波波形を観測することが可能となった。これらの津波波形をデータ同化により津波の伝播を直接計算するMaeda et al. (2015)の手法を用いて津波伝播を予測した。震源モデルから計算される津波と観測波形からデータ同化により計算される津波を比較すると、観測網に入った津波は多くの観測点を通過する毎に再現性が良くなっている様子が良く分かる。遠地の津波に対して観測波形のみを用いたデータ同化による津波予測がオレゴンの沿岸に到達するころには非常に上手く行っていることが良く分かる。津波即時予測の有効性が十分に確認された。(北海道大学 [課題番号: 1005], Gusman and Tanioka, 2016; 谷岡・Gusman, 2016)

震源域内で観測されうる地震動・音波等の非津波成分に伴う圧力変動が津波予測精度に与える影響を、理論合成データを用いた数値実験により検証した。ローパスフィルタ適用後に残存する地震動に伴う圧力変化の影響で、観測波形が短い地震発生直後は精度が低下するものの、時間が経過して観測データが増えると、精度低下は大幅に改善することを明らかにした。沖合と海岸の観測点での津波高の関係について、沖合から海岸へと津波の高さが水深比の1/4乗に比例して増幅することが経験的に導かれていたが、2011年東北地方太平洋沖地震津波で得られた観測値から、大津波まで含めると増幅率が水深の1/5乗に比例することを見いだした。遠地津波の減衰過程だけではなく成長過程までを含めた全期間の振幅時間変化を説明するため、津波エネルギーの伝達過程を踏まえた考察に基づき、波源と二次波源（散乱源）、伝播経路、観測点付近の効果の3つに区分して、それぞれの段階ごとに数理モデル化した。遠地津波の観測事例にこの数理モデルを適用して、減衰定数などのパラメータの推定を進めた。（気象庁気象研究所[課題番号:7011]）

津波生成磁場を陸上の磁場観測で検知することを目的として、高知県馬路村土川地区において地磁気観測を行っている。津波生成磁場は室戸観測点（国土地理院）と馬路観測点の磁場のベクトル差によって検出可能と考えられるが、馬路観測点での観測開始以降、津波の発生はなく、津波生成磁場検出の例はまだない。室戸観測点と馬路観測点の磁場のベクトル差を求めると、Z成分で差の変化が大きかったことがわかった。これは室戸観測点が半島の先端に位置しており、外部磁場変化に伴い海水中に誘導された電流が半島を避けて流れることによるいわゆる半島効果で説明できることがわかった。

2011年東北地方太平洋沖地震では父島において地磁気Z成分に津波起源と考えられる1nT程度の明瞭な磁場変動が観測された。そこで2006年11月15日千島列島東方の地震（Mw8.3）による津波の例についても調査した。その結果、父島観測点において津波到達の20分程前からZ成分に0.2~0.3nT程度の微弱な磁場変化が観測されていることがわかった。さらに、津波生成磁場の数値シミュレーションを用いて観測結果と比較したところ、観測結果をほぼ説明できることが確かめられた。（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年度は主として3つの研究項目を実施した。1点目が平成27年度に実施したキネマティック精密単独測位法における最適対流圏遅延パラメータ決定の網羅的探索であり、2点目が精密可動台を用いた移動体におけるリアルタイム・キネマティックGNSS解析の精度評価である。また、3点目がゆっくりとした地殻変動場を捉えることを目的とした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精度評価である。

平成27年度に実施した、キネマティックPPP解析における対流圏遅延に関する未知パラメータの推定時に使用するハイパーパラメータ（解析時に必要とするカルマンフィルタのプロセスノイズ）の最適値探索の時間的な安定性を評価した。具体的には平成27年度に実施した座標時系列の擾乱がもっとも小さくなる（標準偏差がもっとも小さくなる）天頂湿潤大気遅延量とその勾配量のグリッドサーチによる探索を、特定の観測点において1年間通じて行うことで、推定される最適対流圏遅延パラメータの時間変化を確認した。その結果、天頂湿潤大気遅延量とその勾配量ともに冬季は値が小さく、夏季は大きいという年周変化が確認された（図17）。特に、勾配量において年周変化の振幅が大きく、最適値の振幅が冬季と夏季で1桁異なる結果が得られた。さらにそれらの特徴は観測点毎

に異なることも明らかになった。これらは、キネマティックPPP解析の高精度化において、各観測点、日付毎に最適対流圏遅延パラメータを推定することで座標値推定精度が向上しうることを示す重要な成果である。

平成27年度に開発した3軸精密可動台を用いたキネマティックGNSS時系列の精度評価を行った。特に移動体特有の動きを可動台に与え、その動きをGNSSでどの程度再現できるかについて検証を行った。今回使用した3軸可動台は水平1軸の移動に加えて、回転、傾斜を同時に駆動できる。可動台には海上のブイの動揺を模した動きを与えた。GNSSは10Hzサンプリングでデータを取得した。GNSSアンテナにはアンテナ位相特性がほぼゼロオフセットのTrimble社製のZepher Geodeticアンテナを用いた。解析にはきわめて短い基線長(~10m)での基線解析を採用した。GNSSデータで得られた解析時系列を確認すると、可動台で与えた動きをキネマティックGNSSはおおよそ再現できているものの、可動台に回転成分を与えた場合に、その一致度が低下することが明らかになった。そのため、可動台に周期20秒で±50度の回転成分のみを与えて、同様にキネマティックGNSS解析を行いその挙動を見た。その結果、本来であればほぼ変位が確認されないはずの条件下における実験にもかかわらず、周期が20秒程度で振幅が10mm程度の明瞭な変位がキネマティックGNSS時系列に確認された。可動台が持つ可動精度は十分高いことや、回転にのみ現れる変位であることから、当該の動きは実際のアンテナ位置の変位ではなく、GNSSアンテナの回転によるPhase wind up効果である可能性が高いと結論付けた。同効果は、特に海上等での移動体における高精度な測位におけるノイズ源となりうる。一方で、回転角度を別データから知ることができれば、これらの補正は可能であると考えられる。次年度以降、可動台に与えた回転角度データからPhase wind up効果の補正を試み、移動体におけるGNSS測位解精度の向上を目指す。

数日から1日以下程度の時定数を持つ地殻変動場を精密に捉えるためのGNSS解析の高精度化に係る研究開発を主として進めている。特にキネマティックGNSS解析では、対流圏遅延に起因する未知パラメータと座標値との分離が原理的に困難であり、その精度向上を困難にしている。さらに、そのようにして推定されたキネマティックGNSS時系列には、対流圏遅延に起因する誤差がその量の多寡は別として重畳し、最終的に求めたい地震・火山現象（例えば断層すべりの時間発展）の推定の妨げとなる。このような観点から、通常キネマティックGNSS解析を行って座標値を推定し、それを用いて断層すべりを推定する方法ではなく、GNSSの搬送波位相データから直接断層すべりを推定する手法が提案されている。同手法では対流圏遅延等の誤差を座標値に押し付けることなく、断層すべりを直接推定する。そのため、それら誤差を含めて一連の解析の中で推定することが可能である。本年度は、同手法の適用可能性を評価するために、まず地震時変位をどの程度正確に推定できるかの検証を実施した。対象とした地震は2016年熊本地震である。問題を単純化するために地震時断層面は先行研究(Kawamoto et al., 2016)で示されている1枚の矩形断層を仮定し、断層面上での地震時横ずれ成分のみを推定した。震源域周辺8点のGEONETデータを用いた。その結果、地震発生時刻を境として、約3.6mの地震時すべりが推定され、同手法によって一定程度地震時すべりを推定できることが明らかになった。その一方で、断層すべりの中長期的なふるまいを見ると、対流圏に起因すると考えられる長周期の誤差成分が卓越することも明らかになった。次年度以降は、こうした

長周期の誤差成分がどのようなふるまいを示すかの検討をより詳細に進める。（東北大学 [課題番号1209]， Hirata and Ohta, 2016；Inazu et al., 2016；井上・他, 2016；Kawamoto et al., 2016；太田, 2016）

観測点周辺の地物からのマルチパス誤差を，長期間の位相残差データをスタックし数値化することで，マルチパス誤差を定量的に評価する手法を開発した。また，得られたマルチパス誤差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。さらにGEONETリアルタイム解析システムで用いている有限断層モデル推定ルーチンの改良を行った。まず，海溝沿いのすべり分布モデルを，適用する地震の対象領域を絞ることで誤ったモデル推定を行う可能性を軽減した。また，矩形断層モデルの評価に用いるVariance Reduction (VR) の計算方法の見直しを行い，固定点で変位が発生した際にも適切なVRが算出されるよう改修を行った。さらに，すべり分布モデルにおける地震規模計算時に一定のモデル誤差を下回るすべりを除外する処理により，M7.5を超える地震で適切な地震規模が算出されるよう改修を行った。（国土地理院地殻活動研究センター [課題番号：6004]，川元・他, 2016；Kawamoto et al., 2016）

地震直後に地震の規模や断層の広がりやを推定する手法として，国土地理院との共同研究としてGNSSデータ 1 Hzサンプリングデータを用いた震源断層解析手法の開発を継続して実施し，2003年十勝沖地震に適用し手法の有効性を確認した（気象庁気象研究所 [課題番号：7009]）

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年夏以降，桜島の噴火活動は低下しており，2016年は43回の爆発しか発生しなかった。そのうち，2016年7月26日の爆発は，噴煙高度5000mに達した2016年では規模の大きい噴火であるが，GNSSとXバンドMPレーダーでは顕著な変化を検出することができなかった。これは，噴煙高度は高いものの火山灰濃度が低いためと考えられる。その理由は，噴火に伴う地盤の収縮量から火山灰量は600トン程度と推定されること，地上降灰量観測からも同程度と見積もられることによる。噴煙高度が5000mに達した2013年8月18日の爆発に伴う火山灰量は15万トンと見積もられており，2016年7月26日の爆発に伴う火山灰量は，はるかに少ない。このことは，噴煙高度をパラメータとして噴出量を見積もることの限界を示している。光学観測であるライダーでは火山灰を検知しており，高い偏光解消度が得られた。

ライダー (Light Detection and Ranging) 装置から発射されるレーザーを2016年7月26日の爆発に伴う噴煙に照射することにより，散乱強度と偏光解消度（散乱粒子の扁平度を示すパラメータで，粒子が球形であれば，偏光解消度は0であるが，扁平になるにつれて偏光解消度は増加する）の時空間分布を調べた。散乱強度と偏光解消度の時間変化及び火口からの距離による低下から，爆発直後の火口上空では極めて高い散乱強度と偏光解消度が得られた（図18）。散乱強度は火口からの距離が離れるにつれ，また，時間が経過するにつれて減少する。散乱強度の現象は，散乱する粒子の濃度の低下を示すので，噴煙の拡散及び火山灰粒子の地上への落下による火山灰粒子濃度の低下がその原因と考

えられる。一方、偏光解消度は、爆発直後の火口上空において0.7という極めて高い値が得られた。爆発発生から約9分間は0.5~0.7という高い値であったが、その後は、0.4~0.45程度の値で安定した。2016年7月26日の爆発以外についても調べたが、0.7程度の偏光解消度が観測されるのは、爆発直後の火口上空（距離500m程度）に限られることがわかった。火山から100km以上離れたライダーにより火山灰を捕捉した先行研究でも偏光解消度は0.4以下であり、今回得られた値は、ライダー観測による偏光解消度として世界最大の値が得られたといえる。微弱な火山ガス放出時においても、ライダーによって散乱体の検出ができた。散乱強度は火口からの距離が離れるに従い減少し、粒子数の低下を意味する。一方、偏光解消度は火口上空では0.1以下で小さいが、火口から離れるに従い、0.4程度まで増加する。火口上空の偏光解消度0.1程度の値は、火山ガスが冷却され、球形の水滴が形成されているものと考えられる。偏光解消度の増加は相対的に球形粒子に対して非球形粒子が増加していることを示す。散乱強度が低下して粒子数が減少していることを考慮すると、球形粒子である水滴が乾燥により減少していると考えるのが妥当である。爆発直後の火口直上において、0.7という高い偏光解消度が得られたことは、球形粒子が少ないことを示唆する。熱赤外映像観測によれば、爆発直後の噴煙の温度は表面においても600℃であり、爆発後数分間は200℃以上の高温を示す。高温状態では、球形粒子は存在できないので、噴煙中の粒子は非球形である火山灰粒子のみで構成される。この状態は短時間しか続かず、偏光解消度は0.5付近まで急激に低下する。粒径の大きい火山灰粒子の落下と温度低下による水滴の形成が、非球形粒子数の減少と球形粒子数の増加という相対的な非球形粒子濃度の減少を引き起こしたと考えられる。

2016年10月8日に阿蘇山で爆発が発生した。この爆発による噴煙柱形成はGNSS解析の位相残差とその信号強度であるSN比の変化として検出できた（図19）。GEONET703観測点では噴火発生直から最大10cmのLC位相残差増大と3~4dBのSN比の低下が観測されたが、474観測点では明瞭な変化がなかった。703で変化を検出した衛星の高度と変化がなかった474観測点の火口方向の衛星の高度を考慮すると噴煙の高度は8.0km~12.5kmと推定される。より時間分解能を高めるために1秒サンプリングのデータの解析も行った。SN比の減少は噴火後約400秒で終息したが、位相残差の増加は600秒程度まで継続した。4-6cmの位相残差の増加に対して4dB-Hz程度のSN比の減少となった。SN比変化の位相残差の増加に対する割合は、1~1.5dB-Hz/1cmとなり、桜島南岳噴火時の位相残差の増加の割合（5db-Hz/1cm）と比べると少ない。

噴煙粒子の形状と落下速度の関係を明らかにすることを目的として、桜島で採取した噴煙粒子のサンプルを、防災科学技術研究所の大型降雨実験施設内で自由落下させ、地上に設置した2次元ビデオディストロメータにより測定することで落下速度、形状、落下姿勢などの噴煙パラメータを求めた。得られた粒子の軸比と落下姿勢から、噴煙粒子の形状を球状、扁平楕円体の水平および鉛直、偏長楕円体の水平および鉛直の5種類に分類し、それぞれの粒子の落下速度を求めた。落下姿勢の観点からは、水平向きの粒子の終端速度は鉛直向きの粒子よりも遅いことが確かめられた。形状の観点からは、扁平楕円体の粒子の終端速度は偏長楕円体粒子の終端速度よりも遅いことがわかった。これらの情報は噴煙のふるい分け効果に伴うレーダー反射強度や反射因子差の水平分布などの時間変化の解釈や降灰のナウキャスト手法の開発に役に立つであろう。（京都大学防災研究所

[課題番号：1913] , Elosson et al., 2016 ; Iguchi, 2016 ; Maki et al., 2016 ; Oishi et al., 2016 ; Tanaka et al., 2016)

2016年3月26日桜島(昭和火口) 噴火(噴煙の高さ：火口縁上2,700m)に伴う噴煙について、Kuバンド高速スキャンレーダーによる観測データの初期解析を行い、噴煙の3次元構造及び観測サイトにおける天頂方向のドップラー速度分布を得ることが出来た。この観測データは、世界で初めて、約1分毎に火山噴煙の詳細な3次元構造を捉えたものである。XバンドMPレーダーについても噴煙の観測を行い、複数の事例について、噴煙の二重偏波パラメータの取得に成功し、初期解析を行った結果、噴煙内部の二重偏波パラメータの空間的・時間的構造の定性的な変化傾向を掴むことが出来た。2016年10月8日阿蘇山噴火に伴う噴煙の高さについて、気象研究所で開発した気象レーダーを用いた噴煙高度の確率的推定手法を用いて解析を行った結果、海拔 $12,000 \pm 687\text{m}$ (1σ) となり、合成レーダーによるエコー頂高度である海拔約15,000mを良く補正している。

気象庁レーダー観測網による日本国内における火山噴火噴煙の検知能力、各火山・高度別の検知時間間隔や高度分解能について調査し、小規模な噴火が検知困難な火山や、大規模噴火の検知高度分解能について明らかにした。近年、発生した火山噴火(浅間山2009年、霧島山新燃岳2011年、御嶽山2014年、口永良部島2015年、阿蘇山2016年噴火)について気象庁レーダー観測網で観測されたエコー頂高度の時間変化より、噴出物総量を推定し、野外調査から求められている噴出物総量と比較した。両者は概ね一致し、気象レーダーにより噴出物総量を推測できることを示した。(気象庁気象研究所[課題番号：7010] , 佐藤, 2017 ; 高木・他, 2016)

3. これまでの課題と今後の展望

研究計画の3年目として、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用化に近づきつつある。実用化に向け、残る課題を追求するため、以下を当面の方針として次年度以降の検討をおこなう。また、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模索する。

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

震源モデルの高度化については、プレート境界巨大地震の強震動生成過程についての検討を継続するとともに、期間中に発生した被害地震等の震源モデリングを行う。2次元的な震源断層面における破壊伝播の推定や評価には水平方向のみならず深さ方向の破壊伝播特性も考慮した分析が必要であることが2016年熊本地震で判明したため、その精度向上も視野に入りたい。

地下構造モデルの高度化に関して、観測記録に基づく堆積盆地地盤応答特性の抽出と分析を継続し、既往の地下速度構造モデルの妥当性検証と改良を継続する。広帯域強震動予測を目的とする巨大地震の震源モデル検討を行う。引き続き強震観測を行い、地盤応答特性把握のための記録の取得に努める。また、2016年熊本地震や鳥取県中部地震のデータ解析を通じて西南日本と東北日本の表面波伝播の地域性と地下構造との対応を明確化し、浅い地殻内地震による強震動と長周期地震動の伝播特性と予測精度の向上を

はかる。南西諸島全体のシームレスな減衰トモグラフィーを実施し、熊本地震等の震源域周辺の減衰構造との比較から、地震発生との関係を調査する。

南海トラフ地震等の巨大地震による長周期地震動の予測の高度化に向け、関東平野等の主要平野における長周期地震動増幅強度の方位性とその成因を、地震観測データ解析と地震波伝播の差分法シミュレーションに基づき検討する。得られた成果を、南海トラフ地震等の巨大地震による長周期地震動の予測の高度化に繋げる。また、深発大地震に伴う高加速度強震動の予測に向け、深発地震による高周波数かつ長時間継続する強震動の生成過程を、不均質なスラブ内部の地震波の伝播・導波特性と鉛直入射波の地殻での増幅特性の観点から詳しく検討する。

地震時地すべりの事前評価に関して、南海トラフおよび相模トラフの海溝型地震によって発生した深層崩壊について、航空レーザー計測データを用いて地形解析するとともに、現地調査を行い、それらの特徴を明らかにし、また、共通する地質・地形的特徴を抽出し、今後の海溝型地震による発生場所予測手法を検討する。また、これまで地震観測を展開してきた四国の受け盤大規模岩盤斜面、紀伊山地の重力変形斜面、東京都の盛土斜面、北海道の海岸地すべりにおいて継続して観測をおこなう。さらに、観測されたデータの解析や波動シミュレーションから、斜面の地震応答特性を見積もり斜面全体の揺れ方を把握し、斜面安定性に影響を与える地震動の特徴抽出をおこなう。また、水圧や傾斜、地表変位などの他項目観測との比較から、地震時の斜面内部で起こっている現象や斜面が不安定となる地震動の大きさを見積もる。

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

地震動の即時予測について、実データへの適用を進め、未解決の問題を検討するとともに、減衰構造や速度構造の精緻化により予測モデルの構築を進める。自治体震度計からの毎秒パケットを受信、表示する基本システムに地盤増幅特性（観測点補正值）を適用し、即時予測システムへと拡張する。鳥取県中部の地震で得られた記録を用いて、システムの検証と運用のチェックをおこなうと同時に、実務でのシステムを試用試みる。また、鳥取県中部の地震で被害を生じた地域をモデル地区として、より詳細な地震動分布を把握するため、常時微動観測を主とした調査を実施する。

津波の即時予測については、これまでに開発手法の有効性が検証されたので、対象域を北海道太平洋沿岸にも拡大し、沿岸主要地域での津波浸水予測データベースを作成し、その有効性を確かめる。

地殻変動データの利活用については、数日から1日以下程度の時定数を持つ地殻変動場を精密に捉えるためのGNSS解析の高精度化に係る研究開発を主として進める。特に平成28年に検討を開始した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数日から1日以下程度の時定数を持つ地殻変動現象への適用可能性についての検討を主として進める。また3軸精密可動台を用いた可動試験をより多様かつ長時間のデータに対して適用し、精度評価を進める。また、こうした結果にもとづいて地殻変動を自動検知・推定するアルゴリズム(RAPiD)の高精度化を進める。さらに火山活動の変化に伴って観測される山体変形を準実時間で確実に把握し、その変動源の時空間変化を推定する技術開発を継続する。

火山灰や溶岩噴出の即時予測について、XバンドMPレーダー観測、ライダー観測、GNSS

観測を継続し、地上降灰量や大気中その場観測と照合することにより、反射強度、散乱強度等のリモートセンシングパラメータを定量化する。また、地殻変動、地震観測データに基づいて、火山灰噴出率と噴煙高度のリアルタイム評価手法を開発し、拡散シミュレーションのさらなる即時化を試みる。

成果リスト

- 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).
- 浅野公之・岩田知孝，2016. 強震記録による 2016 年熊本地震の震源破壊過程，日本地球惑星科学連合 2016 年大会，MIS34-P61.
- Asano, K. and T. Iwata, 2016. Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth Planets Space*, 68, 147, doi:10.1186/s40623-016-0519-9.
- Chigira, M. and 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.
- 千木良雅弘，・古木宏和・笠間友博・鈴木毅彦，2016. 震生湖をつくった地すべりは神奈川から東京に広く 分布する東京軽石層内にすべり面をもっていた 日本地球惑星科学連合大会 2016，幕張.
- 土井一生・釜井俊孝・佐藤朗・王功輝・千木良雅弘・小川内良人・川島正照，2016. 加速度・傾斜一体型センサーの開発とクリープ斜面での観測事例，日本地すべり学会第 55 回研究発表会高知大会，1-35.
- 土井一生・釜井俊孝・村尾英彦・久保久彦，2016. 平成 28 年(2016 年)熊本地震に伴う阿蘇谷北西部 における亀裂の分布と成因 -特異な地震波形記録との関連-, 2016 年日本地震学会秋季大会予稿集，S3-P21.
- 土井一生・釜井俊孝・佐藤 朗・王 功輝・千木良雅弘・小川内良人・川島正照，2016. 新しい傾斜計・加速度計一体型センサーの開発，平成 28 年度応用地質学会研究発表会予稿集，67-68.
- Elisson, J., Weber, K., Vogel, A., P lsson, T., Yoshitani, J., Miki, D., 2016. Investigation and separation of turbulent fluctuations in airborne measurements of volcanic ash with optical particle counters, *Jour. Disast. Res*, 11, 72-84.
- Eliasson, J., Yoshitani, J., Miki, D., Weber, K., B lke C., Scharifi, E., 2016. Measurements of particle distribution and ash fluxes in the plume of Sakurajima volcano with optical particle counter, *Jour. Disast. Res*, 11, 85-95.
- 藤田航平・市村強・堀宗朗・Wijerathne Maddegedara 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).

Furumura, T., 2016. Destructive near-fault strong ground motion from the 2016 Kumamoto Prefecture, Japan, M7.3 earthquake, Landslides, accepted.

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 NewsLetter, 16 号, pp2.

Furumura, T., BLN Kennett, and S. Padhy, 2016. Enhanced waveguide effect for deep-focus earthquakes in the subducting Pacific slab produced by a meta-stable olivine wedge, J. Geophys. Res., accepted.

Gusman, A. R., A. F. Sheehan, K. Satake, M. Heidarzadeh, I. E. Mulia, and T. Maeda, 2016. Tsunami data assimilation of Cascadia seafloor pressure gauge records from the 2012 Haida Gwaii earthquake, Geophys. Res. Lett., 43, doi:10.1002/2016GL068368

Gusman, A. R., A. F. Sheehan, K. Satake, M. Heidarzadeh, I. E. Mulia, and T. Maeda, 2016. Tsunami data assimilation of Cascadia seafloor pressure gauge records from the 2012 Haida Gwaii earthquake, 日本地球惑星連合大会.

Hirata Y. and Y. Ohta, 2016. Spatial and temporal characteristics of optimum process noise values of tropospheric parameters for kinematic analysis of Global Navigation Satellite System (GNSS) sites in Japan, Earth, Planets Space, 68:203, doi: 10.1186/s40623-016-0578-y.

Iguchi, M., 2016. Method for real-time evaluation of discharge rate of volcanic ash? case study on intermittent eruptions at the Sakurajima volcano, Japan?, Jour. Disast. Res, 11, 4-14.

Inazu, D., T. Waseda, T. Hibiya and Y. Ohta, 2016. Assessment of GNSS-based height data of multiple ships for measuring and forecasting great tsunamis, Geosci. Lett., 3(25), doi:10.1186/s40562-016-0059-y.

井上拓也・太田雄策・越村俊一・日野亮太・川元智司・檜山洋平・道家友紀, 2016. GNSS によるリアルタイム断層推定情報の津波解析への適用手法の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 72(2), doi:10.2208/kaigan.72.I 355, 355-360.

Iwata, T., H. Kubo, K. Asano, K. Sato, and S. Aoi, 2016. Long-period Ground Motion Characteristics and Simulations in the Osaka Basin during the 2011 Great Tohoku Earthquake, Proc. 5th IASPEI/IAEE Int. Symp. on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Taipei, paper I101A.

香川敬生・野口竜也, 2016. 自治体震度計によるリアルタイム情報配信の試み-鳥取県の事例-, 日本地球惑星科学連合大会 2016 年大会, SSS29-P05.

釜井俊孝・土井一生・稲垣秀輝, 2016. 谷埋め盛土を含む ”街” の地震応答, 日本地すべり学会第 55 回 研究発表会高知大会, 1-36.

釜井俊孝, 2016. 2016 年熊本地震による斜面災害, 日本地震工学会誌, 29, 27-32.

Kawamoto S., Y. Hiyama, Y. Ohta and T. Nishimura, 2016. First Result from the GEONET

- Real-time Analysis System (REGARD): the Case of the 2016 Kumamoto Earthquakes, *Earth, Planets Space*, 68 (190), doi:10.1186/s40623-016-0564-4.
- 川元智司・檜山洋平・古屋智秋・佐藤雄大・太田雄策・西村卓也・等々力賢, 2016. 電子基準点リアルタイム解析システム(REGARD)プロトタイプの開発, *国土地理院時報*, 128.
- Kawamoto, S., B. Miyahara, Y. Hiyama, Y. Sato, T. Furuya, Y. Ohta, T. Noshimura, and M. Todoriki, 2016. Real-time GNSS positioning system REGARD for rapid earthquake moment estimates, *Proceedings of FIG 2016*.
- Kawamoto, S., Y. Ohta, Y. Hiyama, M. Todoriki, T. nishimura, T. Furuya, Y. Sato, T. Yahagi, and K. Miya-gawa, 2017. REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET, *J. Geophys. Res.*, in press.
- Kennett, BLN, and T. Furumura, 2016. Multi-scale seismic heterogeneity in the continental lithosphere', *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. G3, vol. 17, no. 3, pp. 791-809.
- 気象庁, 気象研究所, 2016. 平成 28 年(2016 年)熊本地震. 地震予知連絡会会報, 96, 492-556.
- Kodera, Y., J. Saitou, N. Hayashimoto, S. Adachi, M. Morimoto, Y. Nishimae, and M. Hoshiba, 2016. Earthquake Early Warning for the 2016 Kumamoto Earthquake: Performance Evaluation of the Current System and the Next-Generation Methods of the Japan Meteorological Agency, *Earth, Planets and Space*, 68:202, DOI: 10.1186/s40623-016-0567-1.
- 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.
- Maki, M., Iguchi, M., Maesaka, T., Miwa, T., Tanada, T., Kozono, T., Momotani, T., Yamaji, A., Kakimoto, I., 2016. Preliminary results of weather radar observations of Sakurajima volcanic smoke, *Jour. Disast. Res*, 11, 15-30.
- 中田健嗣・小林昭夫・平田賢治・対馬弘晃・山崎 明・勝間田明男・前田憲二・馬場久紀・一ノ瀬里美・牛田 堯・石原昂典・稲村嘉津也・蓮澤 豪, 2017. 自己浮上式海底地震計観測によって推定された紀伊半島南方の南海トラフ軸南側の地震活動. *地震*, 69, 59-68.
- 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.
- 野口竜也・西川隼人・吉田昌平・香川敬生, 2016. 鳥取県内の地震観測点における地盤構造の把握とサイト特性の評価, *土木学会論文集 A1, Vol.72, No.4(地震工学論文集第 35 巻)*, I 646-I 658.
- Noguchi, T., T. Kagawa, S. Yoshida, and H. Ueno, 2017. Estimation of Subsurface Structure based on Microtremor and Gravity Survey in the Shikano Area, Tottori Prefecture, Japan, 16th World Conference on Earthquake Engineering.
- 野口竜也・西川隼人・香川敬生・吉田昌平, 2016. レシーバー関数を用いた鳥取県内の地震観測点における地盤構造推定, *日本地球惑星科学連合大会 2016 年大会*, SSS25-P25.
- 野口竜也・池上柊真・上野太士・中井翔・有村翔也・吉見和・香川敬生・吉田昌平, 2016. 鳥

取県中部地域における地下構造探査および地震記録の分析, 日本地球惑星科学連合大会
2016年大会, SSS25-P26.

Ogiso, M., S. Aoki, and M. Hoshiya, 2016. Real-time seismic intensity prediction using frequency-dependent site amplification factors, *Earth Planets Space*, 68:83, doi: 10.1186/s40623-016-0467-4.

小木曾仁・干場充之・志藤あずさ・松本聡, 2016. 減衰構造を取り入れた揺れから揺れの即時予測の試み: 2016年熊本地震, 日本地震学会 2016年秋季大会, S21-P08.

Ogiso, M., M. Hoshiya, A. Shito, and S. Matsumoto, 2016. Real time numerical shake prediction incorporating attenuation structure: a case for the 2016 Kumamoto Earthquake, AGU Fall Meeting, S23A-2746.

太田雄策, 2016. リアルタイム・キネマティック GNSS データ解析の高度化およびそれにもとづく巨大地震の震源断層即時推定手法に関する研究, 測地学会誌, 62(1), 1-19.

Oishi, S., Iida, M., Muranishi, M., Ogawa, M., Hapsari, R. I., Iguchi, M., 2016. Mechanism of volcanic tephra falling detected by X-band multi-parameter radar, *Jour. Disast. Res*, 11, 43-52.

佐藤英一, 2017. Ku バンド 高速スキャンレーダーによる降水コアの観測と気象レーダーを用いた火山噴煙の観測計画について, 気象研究ノート「気象レーダー 60年の歩みと将来展望」(印刷中) .

Sekiguchi, H., K. Asano, T. Iwata, M. Yoshimi, H. Horikawa, H. Saomoto, and T. Hayashida, 2016. Construction of a 3D Velocity Structure Model of Osaka Sedimentary Basin, Proc. 5th IASPEI/IAEE Int. Symp. on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Taipei, paper P103B.

志藤あずさ・松本聡・清水洋・2016年熊本地震合同観測グループ, 2016. 2016年熊本地震震源域の3次元地震波速度構造, 日本地震学会 2016年秋季大会, S21-P28.

下村智也・浅野公之・岩田知孝, 2016. レシーバ関数を用いた京都盆地の地震基盤深度の推定, 2016年地震学会秋季大会, S16-P12.

新堀敏基, 2016. 火山灰輸送:モデルと予測, *火山*, 61, 399-427.

高木朗充・長岡優・福井敬一・安藤忍・木村一洋・土山博昭, 2017. 2013-2015年西之島噴火のモニタリングに関する研究, 気象研究所技術報告(印刷中).

Takemura, S., T. Maeda, T. Furumura and K. Obara, 2016. Constraining the source location of the 30 May 2015 (Mw 7.9) Bonin deep-focus earthquake using seismogram envelopes of high-frequency P waveforms: Occurrence of deep-focus earthquake at the bottom of a subducting slab, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4297-4302.

Tanaka, H. L., Iguchi, M., Nakada, S., 2016. Numerical simulations of volcanic ash plume dispersal from Kelud volcano in Indonesia on February 13, 2014, *Jour. Disast. Res*, 11, 31-42.

谷岡勇市郎・A. R. Gusman, 2016. 海底圧力観測波形から直接津波数値計算を実施し即時予測を行う手法開発-2011年東北地方太平洋沖地震により発生した津波への適応-, 日本地球惑星連合大会.

Yoshimitsu, N., T. Furumura, and T. Maeda, 2016. Geometric effect on a laboratory-scale

wavefield inferred from a three-dimensional numerical simulation, *J. Appl. Geophys.*, 132, 184-192, doi:10.1016/j.jappgeo.2016.07.002.

Wang, G., Chigira, M., Suzuki, T., 2016. Post shear behavior of pyroclastic fall deposits and landsliding phenomena during the 1949 Imaichi earthquake Japan Geosciences Union Meeting 2016, Makuhari.

王功輝・土井一生・釜井俊孝, 2016. 平成 28 年(2016 年)熊本地震時に生じた南阿蘇村の流動性崩壊, 日本地すべり学会第 55 回研究発表会高知大会, 1-31.

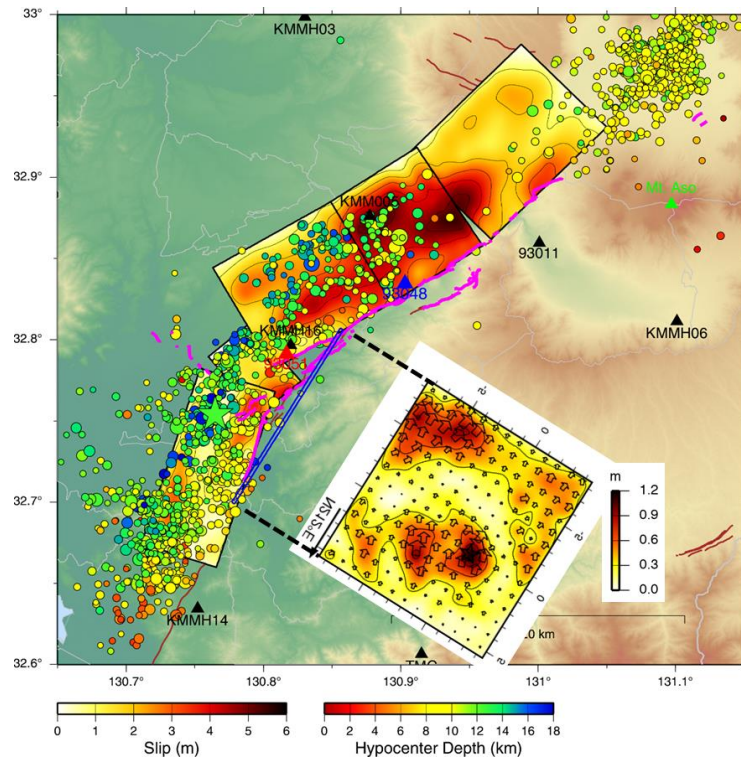


図1. 熊本地域で発生した2016年4月14日 (Mw6.1) および16日 (Mw7.1) の震源バージョン結果 (京都大学防災研究所 [課題番号: 1903])

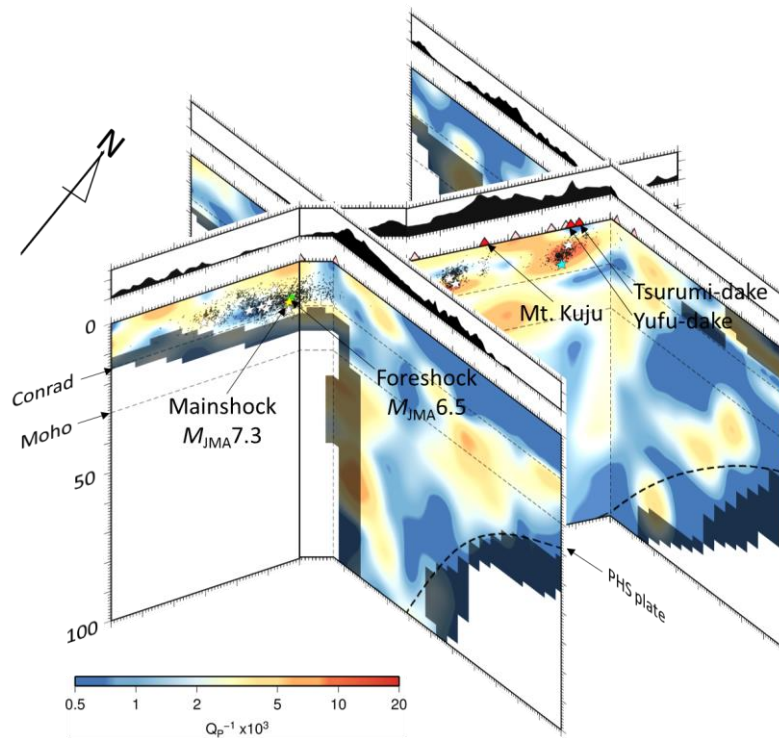


図2. 熊本地震震源域の鉛直断面およびフィリピン海プレートの走向に直行する断面における Q_p .

暖色系は高減衰，寒色系は低減衰を表す．黄色の星，緑色の星，白色の星は熊本地震本震，前震， $M \geq 5.0$ の余震の震源をそれぞれ示す．黒点と桃色三角，赤三角は $M \geq 2.0$ の余震の震源と第四紀火山，活火山を表す．（東京大学地震研究所 [課題番号：1516]）

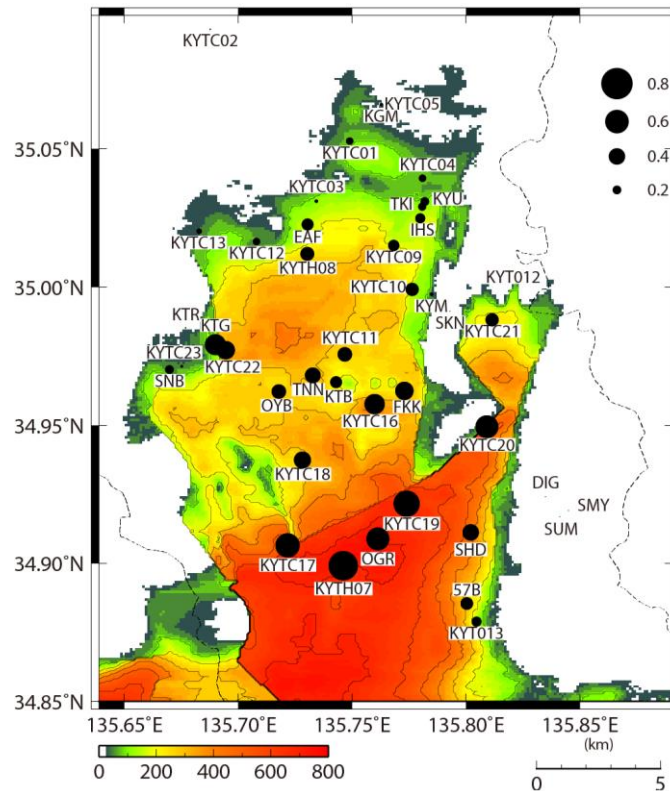


図3. 京都盆地内各観測点での観測PS-P走時差
カラーコンターは京都盆地速度構造モデルの基盤深度（京都大学防災研究所 [課題番号：1911]）

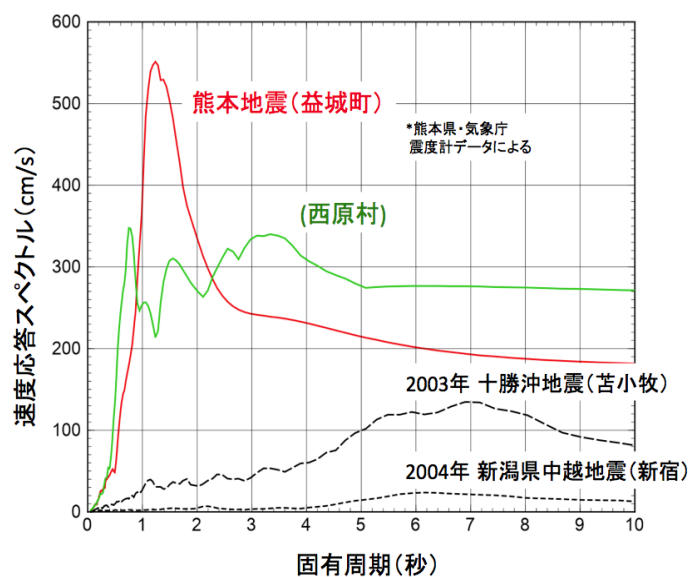


図4. 長周期地震動の速度応答スペクトルの比較（減衰定数5%）

益城町や西原村では、固有周期2～10秒以上の広い範囲で、200～300cm/sの強い速度応答が見られた。これは、十勝沖地震において石油タンクのスロッシング火災が起きた苫小牧地点を2倍以上上回る（東京大学地震研究所〔課題番号：1516〕）

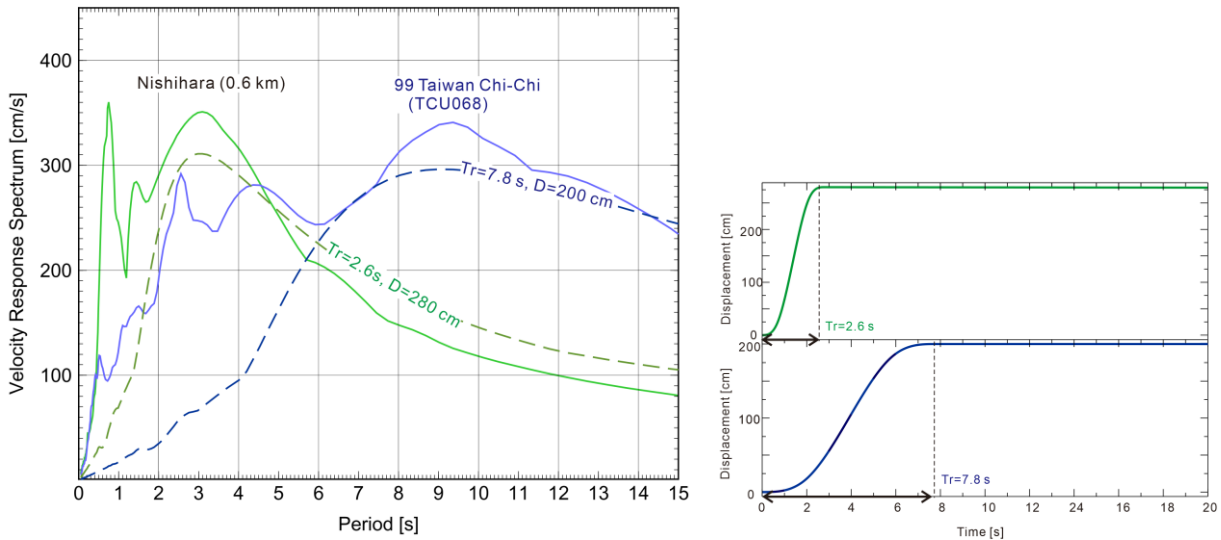


図5. 熊本地震（緑：西原村地点）と台湾集集地震（青：石岡地点）の断層ごく近傍の長周期地震動と、断層ずれうごき運動のランプ関数による近似（点線）の速度応答スペクトル
断層ごく近傍で観測された長周期地震動は、断層の動きそのもの（近地項）が持つ長周期成分によることがわかる。（東京大学地震研究所〔課題番号：1516〕）

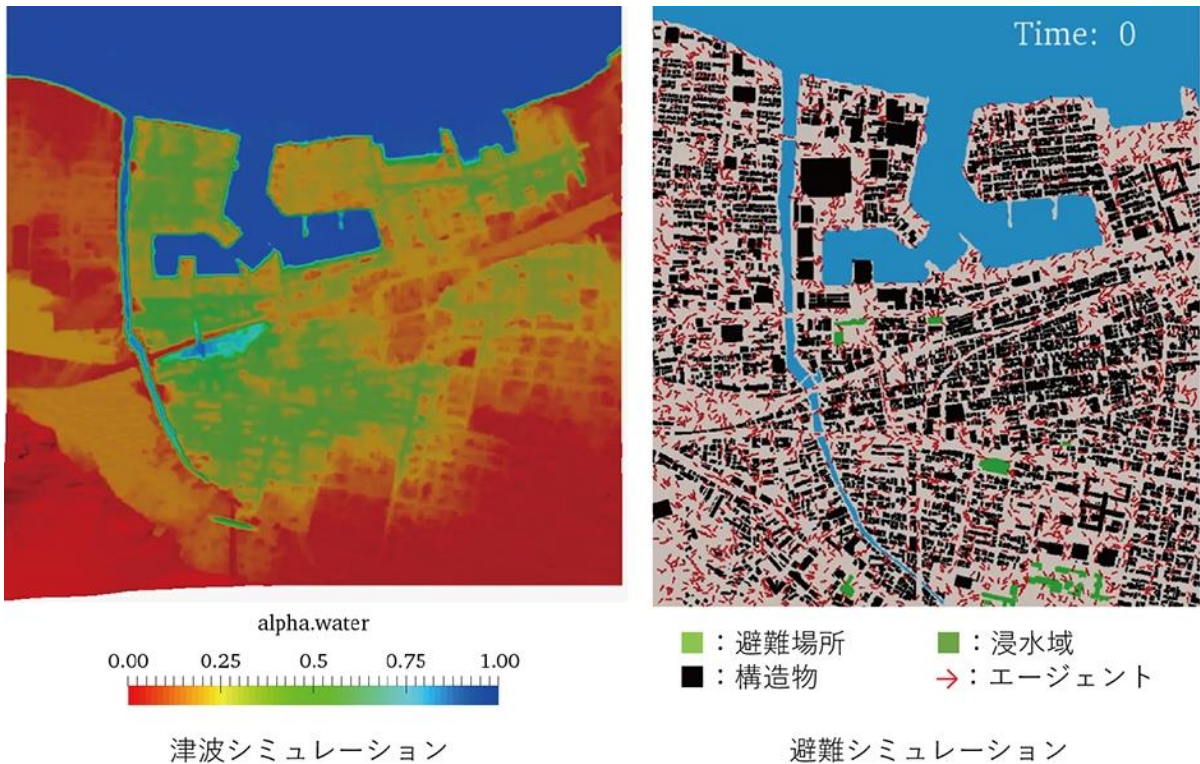


図6. 高松市の津波シミュレーションと避難シミュレーションの例(津波シミュレーションの出力を避難シミュレーションの入力とすることで連成)(拠点間連携研究[課題番号:2977])

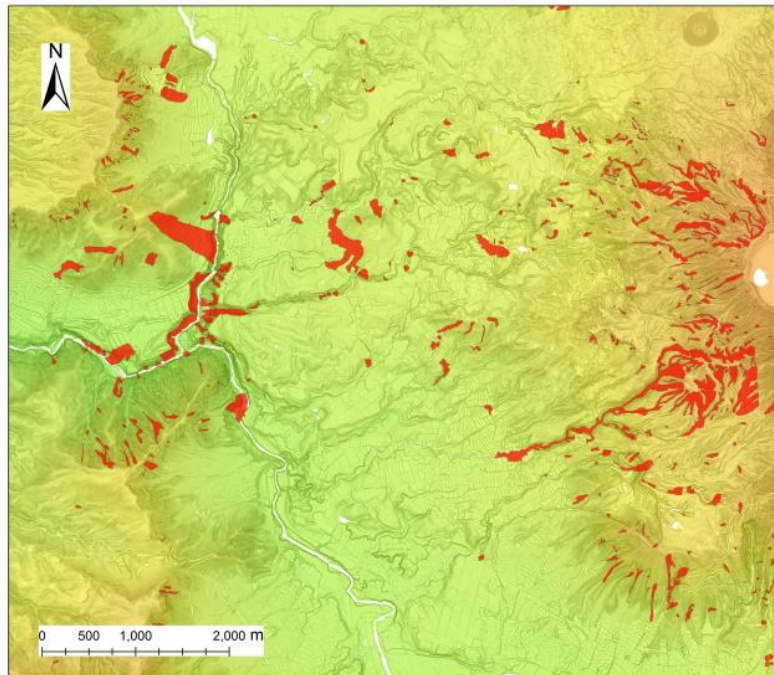


図7. 熊本地震によって発生した斜面崩壊の分布

国土地理院の 1mDEM から作成した傾斜・表構図にプロット。
 使用したデータ:Google Earth(4月15日,4月16日,4月19日画像
 取得)・地理院地図(京都大学防災研究所[課題番号:1912])
 ([https://maps.gsi.go.jp/index.html#11/32.938963/131.060715 /&base=std&ls=std&disp=1&lcd= 20160414kumamoto0416dol4&vs=c1j0l0u0f0&d=v1](https://maps.gsi.go.jp/index.html#11/32.938963/131.060715/&base=std&ls=std&disp=1&lcd=20160414kumamoto0416dol4&vs=c1j0l0u0f0&d=v1))

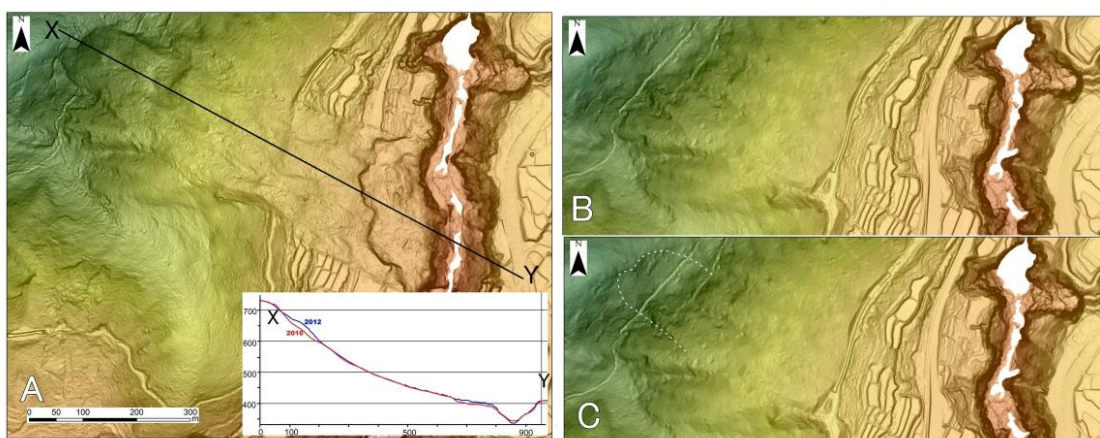


図8. 阿蘇大橋西側の斜面崩壊(京都大学防災研究所[課題番号:1912])

A:発生後の傾斜図。B:発生前の傾斜図。C:発生前の傾斜図に崩壊の輪郭を破線で図示。発生前に白線に沿うような小崖があったことがわかる。発生前の傾斜

図は国土地理院の1mDEMから作成。発生後の傾斜図は，近畿地方整備局の1mDEMから作成。

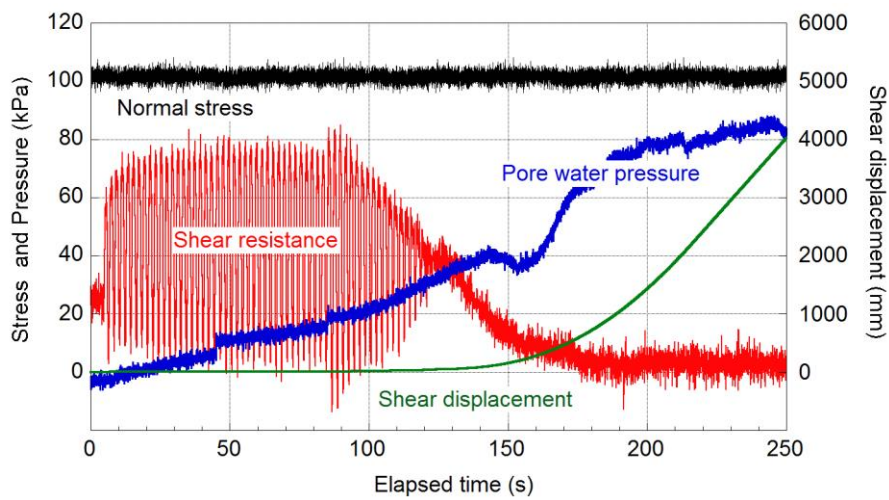


図9. 自然含水状態における降下軽石に対する繰り返しせん断試験結果
(京都大学防災研究所 [課題番号：1912])

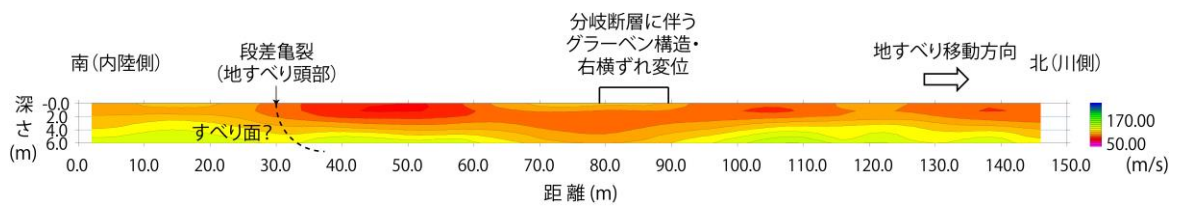


図10. 南阿蘇村の住宅地で見られた地すべりの縦断面における表面波探査の結果
地すべり内を本震分岐断層が横断し地表で右横ずれの変位とグラーベン構造を呈している (京都大学防災研究所 [課題番号：1912])

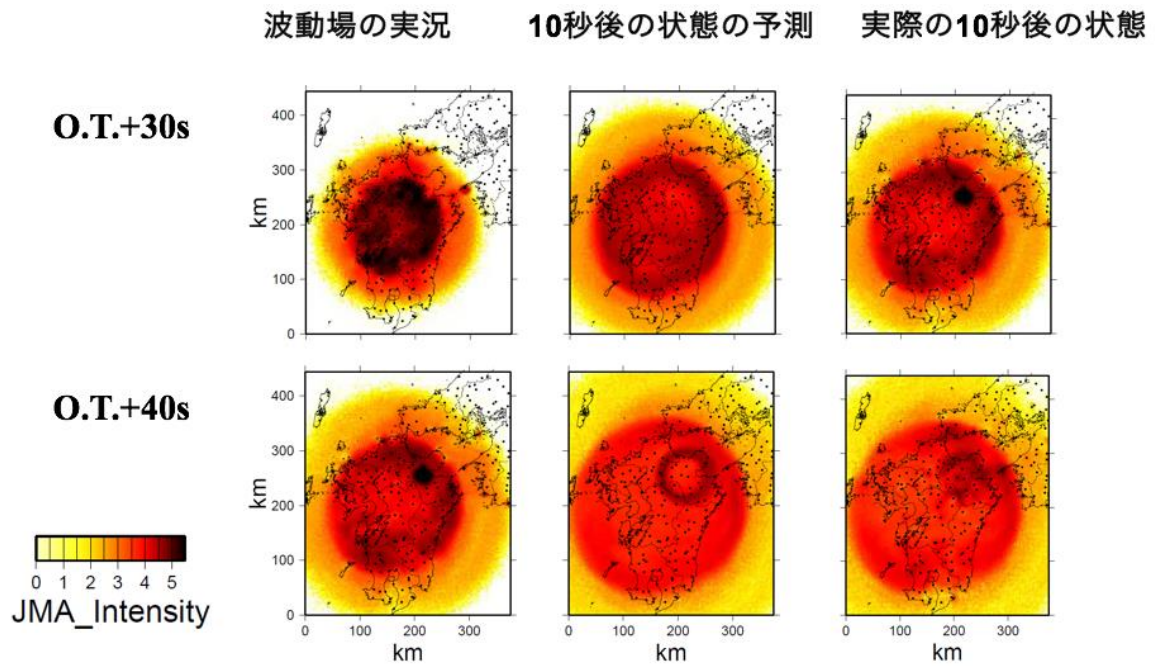


図11. 熊本地震（M7.3）での“揺れの数値予測”
震源時から30秒と40秒の時点での、波動場の実況、10秒後の予測、
実際の10秒後の状態。

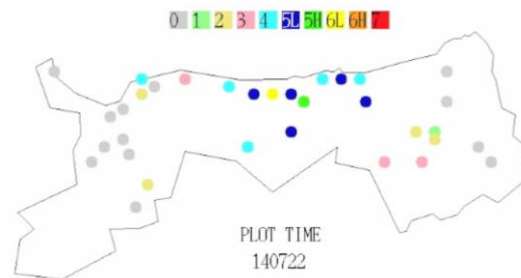


図12. 平成28年10月21日鳥取県中部の地震の自治体震度計における震度伝播スナップショット
(当日は稼働しておらず、観測記録を基に再現したもの)

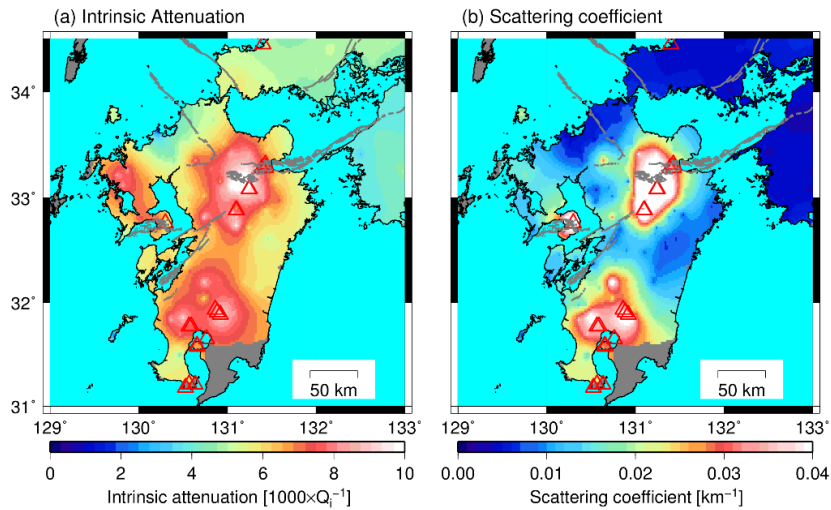


図13. 九州地域の減衰構造(左)と散乱減衰(右) (公募研究 [課題番号 : 2935])

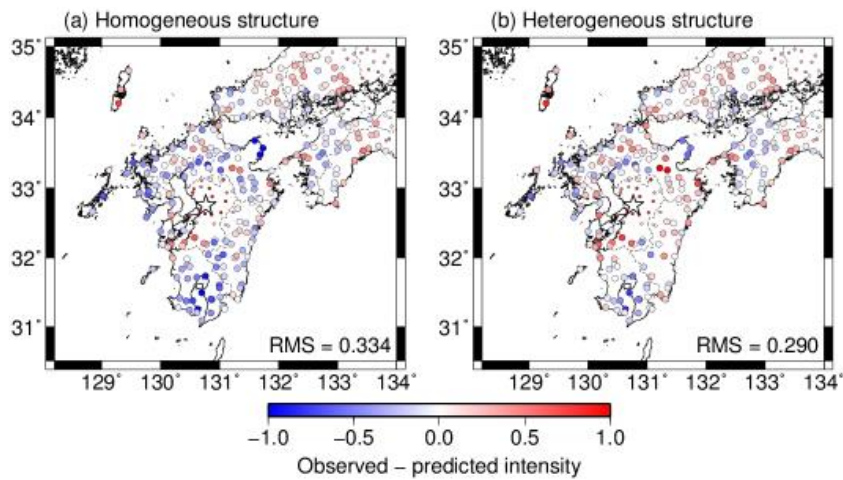
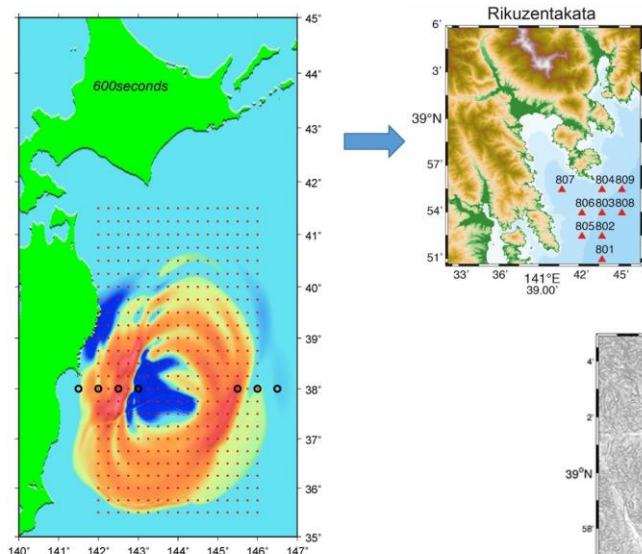


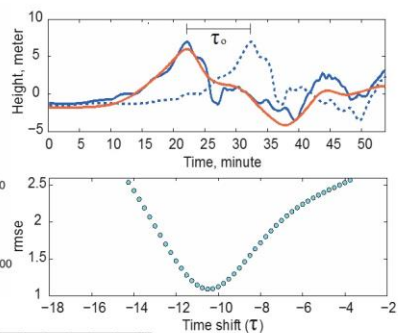
図14. 熊本地震の地震動即時予測シミュレーションを行ったときの、10秒後の予測震度と観測震度の残差分布。(公募研究 [課題番号 : 2935])

(a) 一様構造 ($Q_i=200$, $g_0=0.005\text{km}^{-1}$) を仮定した場合と、(b) 図13の不均質構造を取り入れた場合をそれぞれ示す。震源の位置は星印である。また、右下の震度予測残差のRMS値は震源距離が 50km以上300km以下の観測点について計算した。

1) Real Time tsunami simulation



2) Search Engine



Gusman et al. (2014)

図15. 本手法により計算された津波からGusman et al. (2014)のNearTifモデルを用いて津波浸水予測を実施。(北海道大学 [課題番号: 1005])

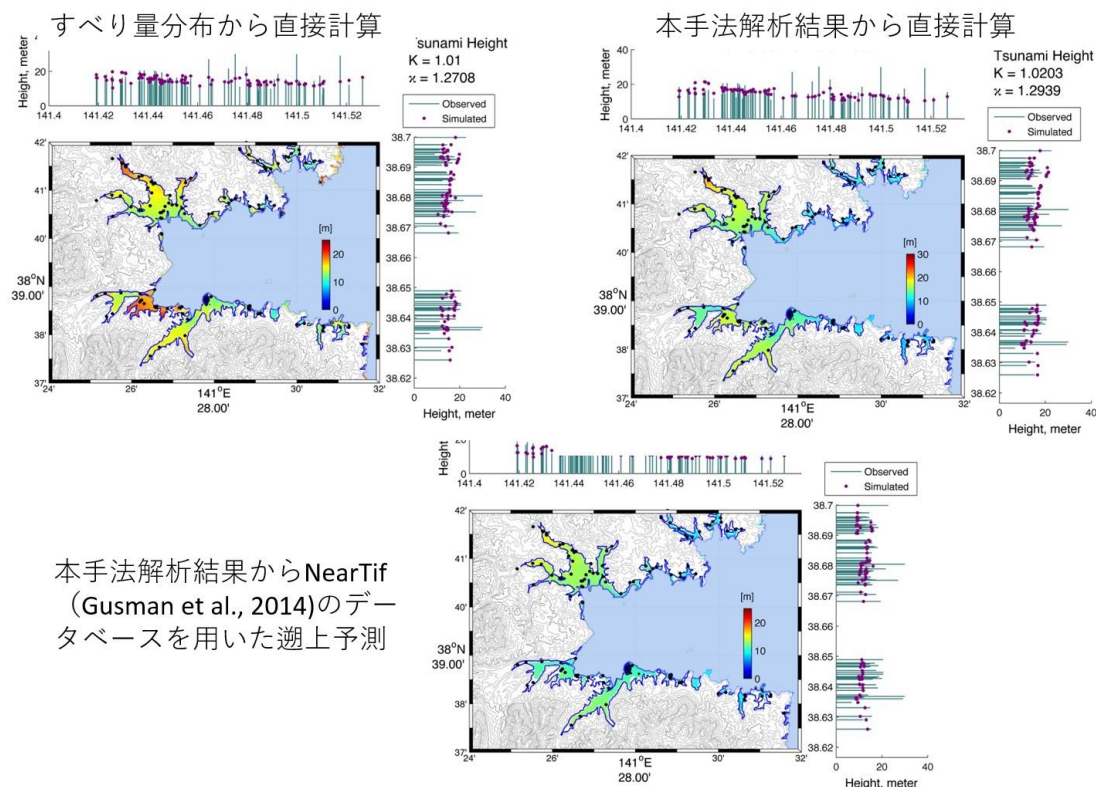


図16. 南三陸で調査された2011年東北地方太平洋沖地震の津波遡上域と津波高と、(左上)すべり量分布から直接計算された津波遡上の比較、(右上)本手法により観測波形からの津波計算から津波遡上まで計算した結果との比較、(下)NearTif(Gusman et al., 2014)により予測された津波遡上結果との比較 (北海道大学 [課題番号: 1005])

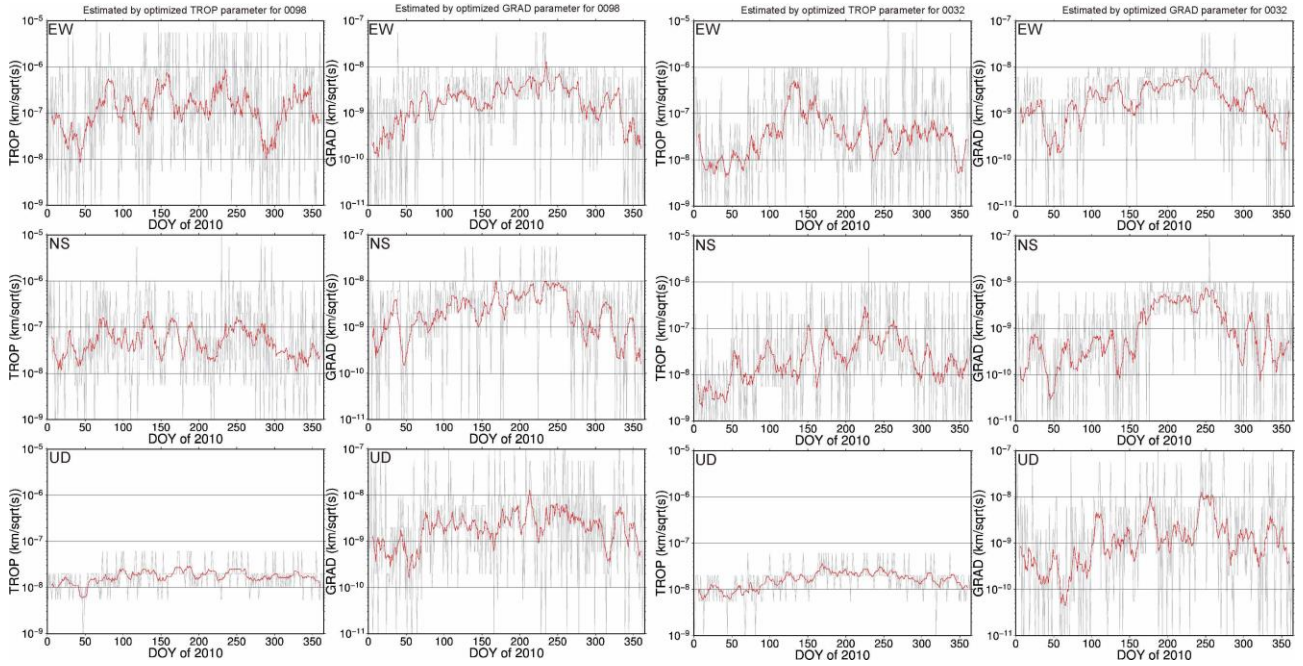


図17. 推定された各座標成分（東西，南北，上下）最適対流圏遅延パラメータの時間変化（東北大学 [課題番号：1209]）

左側のパネル6枚がGEONET 0098観測点，右側のパネル6枚がGEONET0032観測点の結果をそれぞれ示す。TROPが湿潤天頂大気遅延量推定用プロセスノイズ，GRADがその勾配量推定用のプロセスノイズをそれぞれ示す。灰色線が日々推定された最適値，赤色線が11日の移動平均を取ったものを示す。

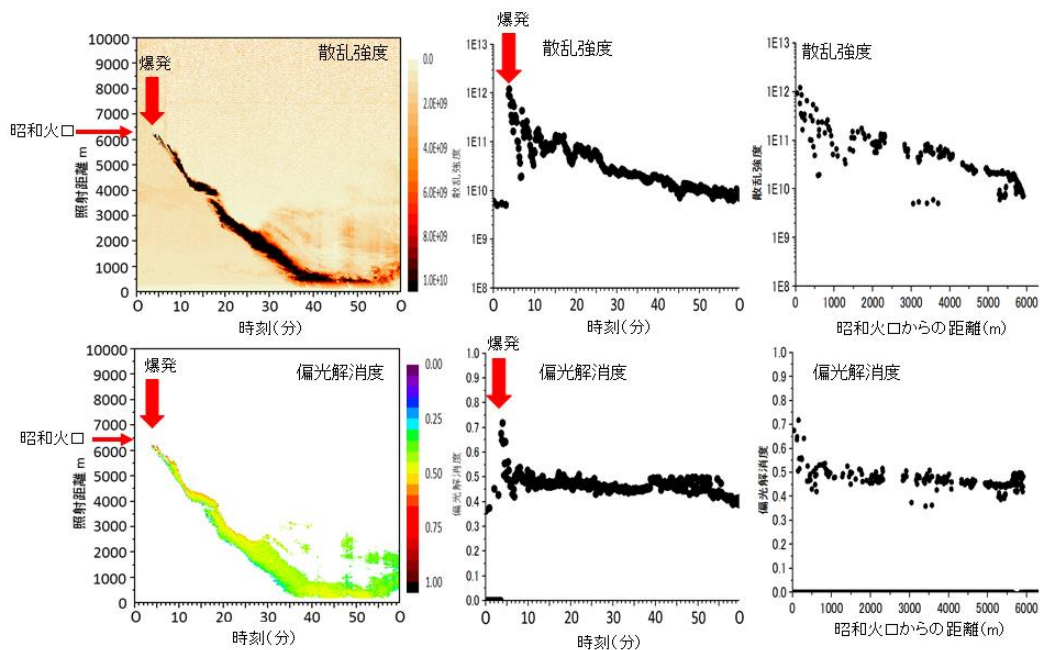


図18. 爆発発生時のライダー観測による散乱強度及び偏光解消度の時間変化及び空間分布（京都大学防災研究所 [課題番号：1913]）上図：散乱強度，下図：偏光解消度

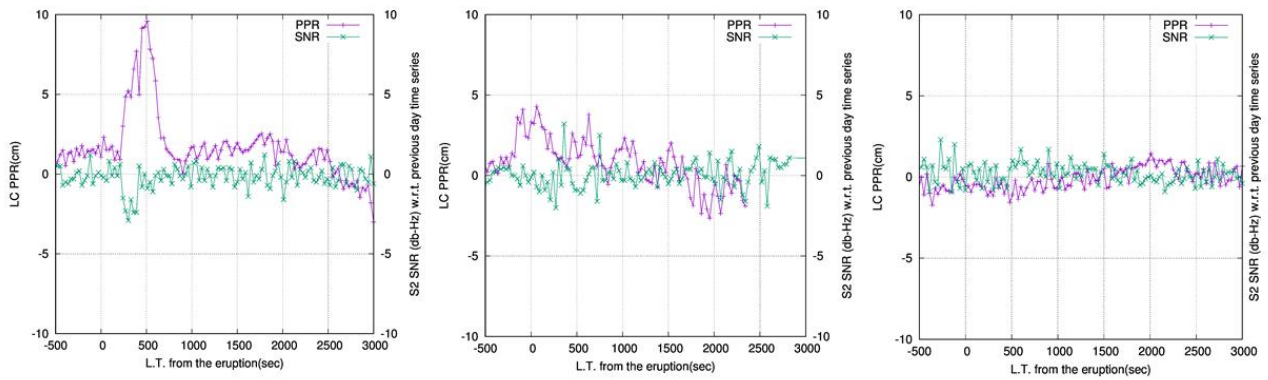


図19. 阿蘇山の2016年10月8日の爆発に伴う噴煙放出によるGNSSの位相残差及びSN比の時間変化（京都大学防災研究所 [課題番号：1913]）