

3 拠点間連携共同研究

東京大学地震研究所・京都大学防災研究所 拠点間連携共同研究研究代表者 松島信一
(京都大学防災研究所)
研究代表者 加藤尚之
(東京大学地震研究所)

これまでの地震火山観測研究計画では、地震や火山噴火の発生の予測を最大の目標とし、それにより地震や火山噴火による災害の軽減を目指してきた。しかし、平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震の発生により多くの犠牲者が出たことを踏まえ、地震や火山噴火の科学的な予測が極めて困難であっても、現在の地震学や火山学には災害軽減に役立てられる多くの知見が集積されていることから、平成 26 年度から開始された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」(建議)において大きく方針を変更し、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)」(建議)でもその方針が継続された。即ち、地震や火山噴火の発生予測の実現を重点とした方針から、それらの予測を目指す研究を継続しつつも、地震・火山噴火災害をもたらす誘因の予測研究に重点を置いて組織的・体系的に進める方針に転換した。そのため、地震学や火山学を中核とするものの、災害予測や防災を目的とした研究に注力するために関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野の研究者が参加して、協働して推進することになった。

平成 25 年までの建議に基づく観測研究計画では、自然現象である地震発生や火山噴火現象の理解に基づきそれらの科学的な予測を目指すという考え方から、「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所が中核となって計画を推進してきた。しかし、災害予測や防災に関連する研究者と協働して計画を推進するためには、東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所とが連携して、計画を進めることが有効であるとの結論に至り、両研究所が協働し、それぞれの分野の共同利用・共同研究拠点として、連携して共同研究を進めることとなった。具体的には、両拠点の研究者が中核となって建議に沿った大テーマを決め、それを実現するための研究について全国の研究者からの研究提案を公募して全国規模の共同研究を進める「重点課題研究」と両拠点がそれぞれ関連が深い地震火山研究コミュニティと自然災害研究コミュニティの2つの学術コミュニティに呼びかけ建議の主旨を踏まえた研究を公募する「一般課題型研究」を実施している。

1. 重点推進研究

(1) 総括研究

総括研究は「巨大地震のリスク評価の不確実性に関するパラダイム構築の推進」と題し、2020 年度に引き続き、(1)震源過程、(2)伝播・深部地盤構造、(3)強震動予測、(4)浅部地盤構造、(5)構造物被害予測、(6)リスク評価の研究グループに分かれ、それぞれの分野におけるリスク評価の不確かさの要因についての検討を進めるとともに、これらの知見を統合するための(7)プラットフォーム構築グループ、(8)ステー

クホルダの参画に関する研究グループおよび(9)大規模計算のためのコンピュータサイエンスグループの9グループで実施した(拠点間連携共同研究 [課題番号:CTOC01], Miyazawa et al., 2022, Fujita et al., 2022, 上田・他, 2023)。

震源過程・強震動予測について、プレート間巨大地震の強震動生成域に対する距離減衰の特徴をまとめた。震源像を推定するために、断層面におけるP波の反射・透過係数の違いから、摩擦強度を推定するための理論研究を拡張し、SH波が任意の角度でプレート境界に入射して反射する時に観測される反射波の震幅変化から、摩擦強度を推定することを検討した。

深部地盤・伝播経路については、2020年に1946年昭和南海地震震源域西端にあたる豊後水道沖で、海底地震計およびハイドロホン・ストリーマーを用い、エアガンを人工震源とする屈折法・広角反射法地震波構造調査を実施した。取得された波形に対して波形インバージョンを適用し、九州パラオ海嶺の沈み込みを含む不均質構造の詳細について、解析を進めている。また、紀伊半島沖で実施している海底地震計を用いた地震観測データに対して、レシーバー関数、および表面波構造解析の適用による、海底下S波速度構造の把握を進めている。

浅部地盤構造に関しては、液状化の可能性のある地盤上に構築された直接基礎建物を対象に、地盤物性の空間的不均質性を考慮した有効応力解析を実施した。その結果、液状化に伴う直接基礎建物の沈下・傾斜評価において地盤物性の空間的不均質性の影響が無視できず、振動後の過剰間隙水圧の消散過程が地点により異なるため建物の不同沈下や傾斜といった被害が誘発されることがわかった(図1)。

構造物被害予測の高度化のために、フラジリティ曲線の高度化と、地震被害発生時に即座に建物・インフラ施設の被災度を判定する技術の概要を調査するとともに、これまでに蓄積された膨大な地震被害写真を機械学習することによる被害判定システムの構築を試みた。来るべき都市直下での地震や東海・東南海・南海地震への備えとして、継続して研究を実施し、災害対応力をさらに高めておく必要がある。

リスク評価高度化のためには、対象となるエクスポージャー情報の精密化が必要不可欠である。このために、UAV等で撮影された写真やその他のリモートセンシング情報を用いて、エクスポージャーに関するパラメータを位置情報とともに取得し、地理空間情報システム上に展開するフレームワークを構築した。本年度は特に、地上設置型3Dスキャナにて取得した高密度点群による高精度な建物3D形状推定や赤外線カメラを用いた壁内の筋交い位置推定の可能性を検討した。地震や豪雨により、いったん被害が生じるとその影響が甚大で復旧にも時間がかかると考えられる高速道路、新幹線などの社会インフラが集中する地域で、土砂災害予測基本図と既往のCS立体図、また現在の技術で作成され公開されている土砂災害ハザードマップとの比較を行い、土砂災害が発生する箇所と現象について検討し、その危険度評価を行った(図2)。現状のハザードマップでは被害予測には不十分であり、CS立体図も個別の現象予測には情報不足であることが明らかになった。

プラットフォーム構築に関して、南海トラフ沿いで発生する巨大地震により引き起こされる、強震動、津波、地すべり、地盤変状、火災などのマルチハザードによって多様な災害が引き起こされることが想定されるが、それぞれの災害を単独で想定した場合

と、相互に関連したとして想定した場合では、災害の想定にどのような違いが出るかを把握することが重要である。また、多様な災害が相互にどのような影響を与え、それが災害の規模にどのような影響を与えるかを知ることは、災害の軽減に重要となる。これらについて、どのような調査方法があるかについて検討を行った。

コンピュータサイエンスでは、時刻歴発展問題を対象として、シミュレーション内で生成される過去時間ステップにおける解析結果を学習することで、解析効率を高めるアルゴリズムを開発し、地殻の粘弾性応答解析へ適用した。高詳細な実地殻構造モデルを用いた有限要素法による地殻変動の順解析が本手法により効率化されることを確認した(図3)。今後は、逆解析等との組み合わせにより、プレート間固着状態推定などのへの適用が期待される。

災害リスク情報・ステークホルダ参画に関して、平成3年度の分析結果をもとに改良したシステムにもとづき、地表における速度での内閣府の南海トラフ地震動想定の評価を行った。また、前年度の成果にもとづき改良したシステムを用い自治体職員に対するヒアリングを実施し、災害シナリオの多様性があることへの理解を深めるための方策の検討、さらには検討成果を踏まえシステムのさらなる改良を行う。

(2) 特定型(その3)

「不確実性を考慮した浅部地盤の非線形応答評価手法の検討」では、以下の成果が得られた(拠点間連携共同研究[課題番号:CT0C20], 浅見・他, 2022)。

(i) 室内土質試験の不確実性を考慮した浅部地盤の非線形応答評価

各種模型振動実験で用いられることの多い豊浦標準砂を対象に、傾斜地盤における初期応力状態を再現するため圧密後に排水条件で初期せん断を載荷した後、液状化試験(非排水繰返しせん断試験)を実施した。試験では、初期せん断応力比の大きさよりも繰返しせん断応力比が大きい両振りの載荷条件(緩傾斜地盤に相当)に加えて、初期せん断応力比が繰返しせん断応力比を上回る片振りの載荷条件(急傾斜地盤に相当)も併せて考慮した。これらの一連の結果を液状化回数比(=初期せん断ありの液状化までの繰返し回数/初期せん断なしの液状化までの繰返し回数)と初期せん断応力比の関係として整理したところ、初期せん断の影響により液状化回数比が小さくなる傾向が示された。

(ii) 水平2方向入力地震動が浅部地盤の非線形応答に及ぼす影響の評価

振動台実験の結果、1方向入力よりも2方向入力とした場合の方が、過剰間隙水圧の上昇が顕著であり、言い換えれば液状化の度合いが大きいことが確認された。本実験の入力である地震動は応答スペクトルで基準化されていることから、振幅レベルが揃っており、2方向入力が描く複雑な軌跡が水圧の上昇に寄与していることが確認された。2方向入力の軌跡特性の影響は現状の耐震設計では考慮されていないため、今度の耐震設計手法の改良に向けた貴重な結果であると言える。

(iii) Numerical analysis of adjacent pile supported structures and development of failure envelopes involving liquefaction-induced large deformations

本研究で用いた有限要素モデリング手法の妥当性を検証するため、京都大学防災研究

所の遠心力載荷装置を用いた地盤・構造物（杭）系の模型振動実験に対して、数値シミュレーションを実施した。次に、妥当性が検証された地盤の構成モデルおよび地盤と杭間の相互作用のモデル化手法を導入した2次元解析より、斜面下に向かって最も遠くに位置する杭が流動する地盤から最も大きな応力を受けることが明らかとなった。また3次元解析からは、液状化した杭の破壊位置と破壊の種類を決定するのは慣性力の大きさであることが示された。

（3）特定研究（その5）

「即時建物被害予測技術の高度化」では、以下の成果が得られた（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C21]，Huang et al, 2022，岸本・他，2022）。

地震発生前の対策としては、予測される地震に対する被害程度をあらかじめ推定し、その推定結果に基づいた対策を取ることが多い。構造被害に着目すると、過去の巨大地震における構造物の被害程度の調査結果から、確率的に構造被害を予測する方法が取られる。具体的には、地面での最大加速度や最大速度といった地震動の指標値を予測または計測し、経験的に求めたその指標値と被害率の関係をを用いて被害程度を推定する。この指標値と被害率の関係は「フラジリティ曲線」と呼ばれ、一般的にはこれまでの地震被害における実建物の被害程度と予測・観測された最大地動加速度（PGA）や最大地動速度（PGV）の関係から経験則として求められてきた。最近でも2016年熊本地震や2011年東北地方太平洋沖地震での被害を参考に、木造建物のフラジリティ曲線は更新されてきた。一方、近年の巨大地震では構造被害が限定的となりつつある鉄筋コンクリート造建物では、同様の手法でフラジリティ曲線を推定することは困難となりつつある。そこで本研究では、近年のフラジリティ曲線の検討例とともに、地震被害ではなく、非線形地震応答解析を援用したフラジリティ曲線の作成方法の開発についても、その可能性を検討した。

また、巨大地震発生時に早期に災害対応を実施し、二次被害を軽減するためには、迅速な被害把握が不可欠である。今日では、依然として被害把握には「応急危険度判定」や「被災度区分判定」といった、技術者の目視に依る方法を用いている。これらの方法は、非常に時間がかかり、またそもそも仕上げなどにより構造体が見えない超高層建物などで目視調査が現実的ではない、といった問題がある。これらの問題を解決するため、今日では、①機械学習を用いた構造被害程度把握の自動化、②ドローンなどの飛行体を用いた広域被害把握、③構造物に設置したセンサーを用いた被害把握、等の方法が精力的に開発されつつある。そこで本研究では、目視調査に代わる新たな方法として、上記①～③の手法に着目し、その概要と実現可能性について調査を行った。災害対応策として採用するためには、その精度評価が重要となるため、特に精度に関する情報の整理を行った。

（4）特定研究（その6）

「地震および豪雨による斜面災害発生個所の事前予測方法の統合」では、以下の成果が得られた（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C31]，齊藤，2022，齊藤，2023）。

いくつかの災害事例にこの手法を適用した結果、豪雨と地震と外力が異なっても、現

象の端緒となる箇所には共通する地形的特徴があることが判明した。豪雨の場合、いわゆる侵食前線の最先端である遷急点に隣接する谷頭部や遷急線として認められる段差の連続する箇所がその破壊の端緒となることが多くの事例で認められた。土砂災害予測基本図では、まず斜面の侵食量を算出しその傾斜量を得る。そのため、この遷急点あるいは遷急線が侵食のおよんでいる部分の境界部として視覚的に明瞭に認識されることになる。この部分は、谷の落水線上の段差として表現され、この段差の大きさも落水線に沿った河道縦断図から比較することが可能である。また、この谷を通過する落水線の集中が豪雨の場合の重要な特徴で、これも落水線に沿った上流域面積の急激な増加すなわち落水線の合流から得られる。加えて上部斜面の集水域に浸透能の低い岩石の露出あるいは土層が薄い場合には崩壊の端緒となると考えられ、広島市安佐南区の土石流の発生域の斑状流紋岩の岩脈でそれに相当する。さらに、この段差（谷頭部の境界部）の周辺の傾斜が大きいことにより崩壊が生じやすい傾向がある。この3つの量を三軸とし、それぞれの箇所の量をプロットし、原点からの距離を比較することでその危険度の順序付けが可能と考えられる。

地震の場合、谷地形をしているかはそれほど重要ではなく、斜面下方に土層あるいは斜面を支持する構造のない箇所の崩壊が多く、これは豪雨の場合と同様に段差として認識可能で土砂災害基本図でも検出が容易な箇所である。地震前後の地表変位検出は、2016年熊本地震の阿蘇カルデラ周辺を対象として実施したので、その例を示す。当初、地震波の伝搬によってその地点の卓越する振動方向との関係を重視していたが、地表変位が傾斜の下方すなわち斜面下方に認められることから考察した変位出現、破壊出現のモデルを示す。この段差周辺の谷による侵食が斜面の傾斜方向にある場合の段差付近、谷内の土層のうすい箇所、段差よりも斜面上方の箇所の振動の比較を観測した例も示すことができた。

（5）特定研究（その7）

「巨大地震によるマルチハザードリスク評価手法に関する検討」では、以下の成果が得られた（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C32]，Nishino, 2023, 大邑, 2022a, 大邑, 2022b）。

南海トラフ沿いで発生する巨大地震により引き起こされる、強震動、津波、地すべり、地盤変状、火災などのマルチハザードによって多様な災害が引き起こされることが想定されるが、それぞれの災害が単独で想定した場合と、相互に関連したとして想定した場合では、災害の想定にどのような違いが出るかを把握することが重要である。また、多様な災害が相互にどのような影響を与え、それが災害の規模にどのような影響を与えるかを知ることは、災害の軽減に重要となる。これらについて、どのような調査方法があるかについて検討を行った。

また、確率論的地震リスク評価を地震火災を含めた手法に拡張し、京都市上京区の木造密集市街地を対象に様々な不確実性を考慮した地震動と火災のマルチハザードリスク評価を実施した。対象とした地震は、琵琶湖西岸断層帯、花折断層帯、有馬一高槻断層帯、生駒断層帯、京都西山断層帯、六甲一淡路断層帯の6断層帯で発生するものである。火災関連の偶発的不確実性として、出火の数・場所、気象条件（気温、風速、風向）、

消防隊の火災覚知時間，地震動による家屋の構造被害に伴う防火性能の低下を考慮しており，認識論的不確実性として，経験的出火予測式の不確実性（地震間の変動性）を考慮した。その結果，地震動とそれに伴う火災によるリスク（建物損失額）の50年超過確率が図4に示すように推定された。地震動と火災の複合効果を考慮した損失超過確率曲線は，超過確率が高い領域では地震動だけを考慮した時の曲線に，超過確率が低い領域では地震火災だけを考慮した時の曲線に支配され，超過確率が中位の領域では両方の曲線に大きく依存する。すなわち，地震動だけを考慮した従来のシングルハザードのリスク評価では，損失の超過確率が過小評価され，特に，頻繁には起こらないものの地震後の火災が地域に壊滅的なインパクトを及ぼし得る点が見落とされることになる。この結果は，マルチハザードリスク評価の重要性を強調している。一方，津波火災については，津波の伝播・浸水，津波による石油タンクの移動，石油の流出・拡散，石油の燃焼拡大，火災からの熱放射，の一連の現象を様々な不確実性を考慮して数値的にシミュレートするための計算枠組みを構築し，大阪市港湾エリアに適用して，確率論的津波火災ハザード評価を実施した。

さらに，地震と洪水による複合災害の事例として，1830年8月19日（文政十三年七月二日）に発生した京都盆地北西部付近を震源とする地震による被害を調査した。京都盆地南部の巨椋池周辺の堤防に亀裂や堤体の沈下が発生し，これらの地域は地震発生の半月後に豪雨に見舞われ，堤防が決壊して宇治川が流れを変え巨椋池に流れ込む状況となったことが分かった。

2. 一般課題型研究

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，斜面崩壊などの災害誘因が，自然や社会に潜在的に存在する脆弱性などの災害素因に働きかけ，これらの誘因と素因の組み合わせと相互作用の状態に応じて様々な規模の災害が発生する。そのため災害誘因予測の高度化は，災害の軽減に結びつく有効な手段の一つである。このような視点から，一般課題型研究では，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の研究」，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の研究」，災害誘因予測を防災対策の推進に効果的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」に関連する研究を公募した。

2022年度は新規8課題と継続4課題が東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会の審査を経て採択された。

（1）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化の研究

「津波被害予測における震源モデルの不確実性の評価」では，多様な津波波源を考慮した地形による津波増幅率の推定や，津波の応答関数推定などにより，防災工学的な側面に立った社会実装のための準備を行った。

津波増幅率については，高速で簡便に沿岸域の津波水位を求めるため，メキシコ太平洋側で発生する海溝型地震を対象に，地形の効果による津波の増幅率を推定した。増幅

率の推定では、多数の地震シナリオに基づいた数値計算結果と津波発生時の水位の空間分布を用いて、最大津波波高から波源の影響を除くことを試みた。求めた増幅率と波源の情報を用いて沿岸域の最大津波波高を推定し、数値計算結果との比較を行った。初期水位分布全体を考慮し、波動方程式の解の重ね合わせによって算定したパラメータは、最大津波波高との強い相関が確認された。これによって、波源の情報を表すパラメータと当該地点での津波の増幅率を表す回帰係数への分離が可能となった。さらに、この波源の代表パラメータと増幅率を用いて沿岸の最大津波波高を簡便に予測するモデルを構築したところ、メキシコのゲレロ州沿岸域においては水深 10 m 程度まで数値モデルと同様な確率分布を得た。以上の結果より、この津波増幅率は、波源の特性に依存しない周辺地域との相対的な津波ハザードの大きさを表す指標として有用であることが示唆された。この成果は Pure and Applied Geophysics に掲載された。

地形による津波の応答関数については、南海・東南海地震想定域で多数の地震津波シナリオにもとづいた津波計算を行い、対象地域は駿河湾内部およびその周辺沿岸域の地形による津波の周波数応答特性を求めた。まず、確率論的過程にもとづいて震源断層モデルを多数生成し、生成したそれぞれについて津波計算を行い、波源域・沿岸域での時系列波形のスペクトル解析を行うこと津波の応答関数を求めた。この波源域沿岸域の評価地点の選定には、津波の波線追跡から伝播経路を抽出し、その経路上の地点を用いた。求めた応答関数については、地形形状から概算した固有周期と比較し、その妥当性について評価する。その結果、対象地点間のスペクトル比のシナリオ間アンサンブルをすることで、津波伝播過程でのそれぞれのスケールに対応した卓越周期が抽出された。また、抽出した応答関数は単純化した地形条件での理論的な共振周期と一致し、本手法の妥当性が示された。本研究で求めた応答関数は、波源スペクトルからの畳み込みによる沿岸域の最大津波振幅の予測や、津波の継続時間の定量的予測への応用が期待される。以上の成果は、土木学会論文集 B2 (海岸工学) に掲載され、海岸工学講演会で口頭発表された (拠点間連携共同研究 [課題番号: CT0C22], Chida et al., 2023, Fukui et al., 2022, Miyashita et al., 2022a, Mori et al., 2022, 宮下・他, 2022a, 菅沼・他, 2022a, Miyashita et al., 2022b, 宮下・他, 2023, 宮下・他, 2022b, 菅沼・他, 2022b, Miyashita et al., 2022c)。

「1m-LiDAR DEM を用いて検出された地すべりなどの不安定土塊の微動及び地震動観測による相対的危険度評価」では、現在、変位が継続している徳島県三好市西井川の地すべり地において、末端、地すべり土塊内部、その隣接する谷部、谷部の地下水位の高い部位で、長周期速度計により地震に対する応答の比較観測を実施した。地すべり土塊の末端は、南北に切り取り部があり東西方向に指示する構造がない。また、地震計を設置した隣接する谷部は東西方向で、地すべり土塊の側方を侵食する構造である。震源がほぼ西に位置する 2022 年 11 月 22 日 10:24、深さ 46km M3.7 豊後水道を震源とする地震、震源がほぼ南に位置する 2022 年 12 月 29 日 01:47、深さ 35km M4.4 高知県東部を震源とする地震について、地すべり土塊の特徴的な地形を有する地点の地震波への応答を比較し、各部位の地震に対する危険度の評価をおこなった (拠点間連携共同研究 [課題番号: CT0C26], 齊藤, 2022, 齊藤, 2023)。

「活断層末端の活火山地域における大規模斜面崩壊の発生予測に関する研究 -1858

年（安政五年）立山，鳶崩れを例として-」では，コア掘削調査に先立ち，国土交通省北陸地方整備局立山砂防事務所が2017年に実施した航空レーザー測量のデータ（1 m グリッド数値標高モデル）から作成したMPI赤色立体地図実体視画像（Kaneda & Chiba, 2019）を使用し，鳶崩れ周辺を含む立山カルデラ全域の山体重力変形地形マッピングを行った。その結果，カルデラ東縁部（室堂山～獅子岳にかけての地域）および南縁部（鳶崩れ～五色ヶ原にかけての地域）にとくに山体重力変形地形が集中することが明らかとなった。とくに南縁部には，多数の山体重力変形地形と鳶崩れを含む新鮮な大規模崩壊地形が共存することから，この周辺は，山体重力変形が十分に進行して大規模崩壊へと移行するステージにある可能性がある。一方，鳶崩れ周辺に着目すると，鳶崩れ方向（北西方向）への斜面変形を示唆する山体重力変形地形群（図5の赤字 a 周辺）と，北方向への斜面変形を示唆する山体重力変形地形群（図5の赤字 b 周辺）の2系統の山体重力変形地形が確認でき，この山（大鳶山）が大きく2方向に変形していることが明らかとなった。

次に，鳶崩れにいたる山体重力変形過程を明らかにするため，鳶崩れの滑落崖直上に位置する重力性凹地（小湖沼）において，可搬型パーカッションコアリングシステム（金田ほか，2018）によるコア掘削調査を実施するとともに，採取したコア試料について，テフラ分析および放射性炭素（C-14）年代測定を実施した。掘削を行った凹地は，2系統の山体重力変形地形のうち北方向の斜面変形に伴うもので，稜線直下にあるもの（「大鳶小池」と呼ぶ）とそれより南側のやや低い位置にあるもの（「大鳶池」と呼ぶ）の2箇所である（図5，挿入図）。2022年7月12～17日に現地確認のための偵察調査を行ったのち，9月2～9日に本調査（現地への機材運搬およびコア掘削）を実施した。コア掘削機材については，別調査のため，前年（2021年）夏にヘリコプターを用いて掘削地から約2 kmの距離にある五色ヶ原山荘に運搬・越冬保管されていたものを使用し，山荘から現地までは人力で運搬した。また，掘削したコアについては，登山口である室堂ターミナルまで人力運搬の後，研究室に郵送した。なお，調査のベースとする予定だった五色ヶ原山荘が新型コロナウイルス感染発生によって本調査直前に閉鎖となってしまったことや天候不順の影響により，実際にコア掘削を行うことができたのは9月5日の1日のみであった。

最初に掘削を行った大鳶池では，深度187 cmまでのコアが採取された（図6 a）。コアは大きく，上位から黒褐色～褐色有機質シルト層（A層；深度0～66 cm），細～小礫混じりの明褐色シルト～砂層（B層；同66～149 cm），礫層（C層；同149～187 cm）の3層で構成される。層相や周辺の露頭情報から，B層・C層は凹地形成前の稜線上緩斜面に堆積した風成・崖錐堆積物である可能性が高く，現在と同様の湖沼環境が推定されるA層の基底がこの凹地（大鳶池）の形成層準と考えられる。テフラ分析の結果，A層の基底直上に明瞭な火山ガラス含有率のピークが認められ，火山ガラスの形態や鉱物組成などからこれはK-Ahテフラ（7196～7307年前；Smith et al., 2013）と考えられる。3箇所の有機質堆積物試料のC-14年代測定からもK-Ahと矛盾しない結果が得られ，これらの情報に基づいて凹地形成年代を外挿によって求めると7700～8500年前となる。

一方，続いて掘削した大鳶小池では，時間的な制約から深度102 cmで掘削を中止せ

ざるを得なかったが、採取されたコアは、一部に礫層を挟むものの深度 102 cm まで湖沼成の黒褐色～暗褐色有機質シルト層であり、この堆積物はさらに深部まで続いていると考えられる（図 6 b）。このコアにおいても、深度 85～90 cm 付近に K-Ah テフラと考えられる火山ガラス含有率のピークが認められた。有機質堆積物試料の C-14 年代値については、1 試料に K-Ah 層準との矛盾が認められたため、(1) この年代値のみを棄却した場合、および (2) このコアのすべての C-14 年代値が信頼できないと考えて K-Ah 層準のみを使用した場合の 2 通りのケースを想定し、外挿によって深度 102 cm の年代を求めると 8100～10600 年前となる。したがって、大鷲小池の形成は、少なくともこの年代より遡ると考えられる。

以上のコア掘削結果から、大鷲池や大鷲小池は 1858 年の鷲崩れ発生時に形成されたものではなく、これに先立つこと少なくとも 8000 年以上前に開始した山体重力変形によって形成され、その後、長い準備期間を経たのちに鷲崩れにいたったことが明らかとなった。この山における山体重力変形の開始時期については現時点では定かではないが、おそらく 10000 年以上前に最初に大鷲小池を形成する山体重力変形が発生し、その後、7700～8500 年前に大鷲池を形成する山体重力変形が生じた可能性が高い。ここで興味深いことは、大鷲池の形成年代が跡津川断層の 4 回前の活動時期（7500～8100 年前；地震調査研究推進本部地震調査委員会，2004）とよく合致することである。地震時に山体重力変形が進行した事例が多く知られていることや（Ponti & Wells, 1991 など）、鷲崩れが跡津川断層の最新活動（1858 年飛越地震）により発生していることなどを考えると、跡津川断層の活動のたびに大鷲山の山体重力変形が間欠的に進行したのちに、ついに 1858 年の活動時に大規模崩壊にいたった可能性がある（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC33]，福井・金田，2022）。

「活断層により形成される盆地端部構造と歴史地震の被害分布との関係に関する研究」では、既往の文献調査に加え古文書の調査などに基づき、1894 年（明治 27 年）庄内地震の被害について調査した。1894 年庄内地震の被害は、地震発生直後に行われた被害調査の報告から南北走向の庄内平野東縁断層帯に沿う地域に加え、庄内平野を流れる最上川、赤川、京田川の流域周辺を中心に酒田市の沿岸部に至る地域にまで東西方向に広がっていたとされている（小藤，1895；水田・鏡味，2011；水田・鏡味，2013 など）。この被害を説明するために「矢流沢（やだれざわ）断層」と呼ばれるほぼ東西方向に伸びる地表地震断層が図示されていたが、近年の地下構造・活断層調査により、その存在は否定されている。被害分布図からは庄内平野東縁断層帯（北部）に沿った被害分布が認められるほか、余目背斜と呼ばれる地下構造が存在する地域で被害が少なかったことが読み取れる。このことから、余目背斜上では、地震基盤が浅く、軟弱な表層地盤が薄いために地震動の増幅が比較的小さかったことが推定される。また、矢流沢断層が想定された地域において被害が大きかったことについては、最上川沿いに軟弱な地盤が厚く堆積していることと関連が深いことが想定される。一方、既往の地下構造調査により、庄内平野の東端では庄内平野東縁断層帯の活動による褶曲構造により、基盤が西方向に基盤が深くなるように傾斜していることがわかっている（地震調査研究推進本部，2009）。さらに、既往研究の庄内平野における地震動観測記録の分析により盆地中央部より盆地西部の沿岸部（酒田市周辺）で基盤が深いと推定されており（佐藤・他，

2009), 盆地東端部だけではなく, 盆地内でも基盤深さが変化していることが示唆される。庄内平野の盆地端部構造及び庄内平野東縁断層帯の地下形状によって, 平野内に被害集中域が発生した可能性も考えられる。ところが, 地震動予測式を用いた地震動予測では, 被害分布に対応するような地震動分布は再現されない(地震調査研究推進本部, 2009)。このことから, 1894年庄内地震の被害と地震動およびそれに大きな影響を与える基盤構造との関係を調査するためには, 庄内平野東縁部のみならず, 盆地全体の基盤構造を詳細に調査する必要があることが分かった。加えて, 1894年庄内地震に関する既存の文献資料(水田・鏡味, 2013)に関するデータの収集も行った。2023年度には, これら結果を踏まえて調査・観測を計画・実施する一方で, 集落ごとの被害統計をGISデータ化し分析を行う。

1830年文政京都地震の震央は京都盆地北西部端付近と推定されているが, 建物・人的被害は京都盆地東縁部に沿って南北に被害が集中していたことがわかっており(大邑, 2019), その原因に関して盆地端部構造との関係について調査した。その結果, 被害が集中した五条通から伏見稻荷大社にかけて地域や伏見の辺りの地域では街道沿いで建物が多く存在していたということもあるが, 盆地境界の直上ではなく盆地端部から数百m西に離れた地域に盆地境界に沿って続いていることが分かる。また, 被害集中域よりも北側では, 盆地境界の位置が東に移動するため, 被害箇所も同じように東に移動する。この現象は, エッジ効果(Kawase, 1996)によるものと推察されるが, 京都盆地東縁端部を模した単純な基盤構造モデルによる地盤増幅特性のシミュレーションでは, 建物被害に大きな影響を与える周期1秒前後の地震動の増幅は盆地端部より西側に数百m離れた場所で最も大きくなることを示した(図7)。このことから, 1830年文政京都地震の際の被害の集中は, 盆地端部におけるエッジ効果によるものと推察された(拠点間連携共同研究[課題番号:CT0C35], 松島・他, 2022)。

「日本の強震観測点におけるESG研究成果の収集および分析」では, まず, 研究会を開催し, 研究参加者が研究実績のある地域を選び, 強震観測点でのESGに関する研究文献などを収取した。図8には, 2016年熊本地震の発生後に行われたKiK-net益城強震観測点での微動アレイ観測の結果をまとめたものである。6グループによって微動アレイ観測が行われ, レイリー波位相速度が得られている。すべての位相速度は, 比較的よくまとまっており, 大きな系統的な差異はない。図には, 検層によるS波速度構造に対する理論位相速度も示されている。検層による理論値は, 周波数8~20Hzですべての観測結果よりも大きくなり, 検層によるモデルのS波速度の値に改良の余地があることを示している。図には, 各グループにより得られたS波速度構造モデルも示されている。観測位相速度のばらつきに比べて, モデルのばらつきは大きいことがわかる。逆解析時の異なる仮定が使われており, その違いがモデルの推定に大きい影響を与えていると考えられる。図9は, 各モデルに対する1次元増幅特性を示している。増幅特性は類似しており, 各地盤モデルが位相速度で拘束されているために, モデルの波動的特徴(増幅倍率やピーク周期など)が類似することを示唆している。

本研究では, ESG6で議論された熊本平野での強震動のブラインドテストの結果についても詳しく調べた。ステップ1として行われた微動及び表面波探査の観測データの分析とS波速度モデルの推定では, 複数の参加者による位相速度の推定結果は類似してい

るが、S波速度構造モデルは大きく異なっていることがわかった。これは、上記のKiK-net 益城での結果と同様である。この2つの事例は、今後、モデルの推定時の合理的な仮定の設定に関するコンセンサスの必要性を強く示している。さらに、ブラインドテストのステップ2および3として行われた弱震動および強震動の推定結果に関する議論も行った。図10左には、2016年熊本地震の本震の強震動の予測結果が示されている。これらの予測波形を用いて、Anderson (2004)によるGOF (Goodness-of-fit) 分析のうち、Arias duration (C1), Energy duration (C2), Arias intensity (C3), Energy integral (C4), Peak acceleration (C5), Peak velocity (C6), Peak displacement (C7), Response spectra (C8), Fourier spectra (C9)の比較指標で検討した。図10右に、本震の予測結果に対する各指標が示されている。下段は、各予測のGOFの平均である。また、中段は各指標の平均であり、C3, C4およびC9の値が低くなっているが、その他の指標は高い値である。下段は、手法別の評価値である。各手法に対する周波数0.5–1, 1–2 HzのGOF分析結果では、2Dおよび3D手法の予測結果が高くなっている。このことは、岩盤サイトで観測された記録を利用した1D手法よりも盆地生成表面波や盆地転換表面波を考慮できる3D手法が有効であることを示していると考えられる(拠点間連携共同研究[課題番号:CT0C37], 津野・他, 2023)。

「1923年関東地震の木造建物被害率に基づく震源破壊プロセスの解明」では、まず関東地震による震源インバージョンに関する研究論文、および建物被害に関連する資料および論文を収集し、短周期地震動生成域を求めるための拘束条件となる大被害地域、無被害地域、そして各地域における地震発生当時の市街地中心部を当時の地形図によって把握することにより、計算対象となる強震動評価地点を決定し、その計算地点中で大被害地域内にある各地点において微動観測を行って、微動の水平上下スペクトル比MHVRを計算した。そしてKawase et al. (2018)の提案したEMR法で擬似地震動水平上下動比pEHVRを求め、それに対してNagashima et al. (2014)の拡散波動場に基づく地盤構造同定手法を適用して、当該地点でのサイト増幅特性を求めた。MHVRからこの地点では卓越振動数が1Hz付近にあり、その増幅度も大きいことから、大被害の発生に当該サイト特有のサイト増幅特性が寄与していたものと考えられる。

このMHVRをEMR法によりpEHVRに変換し(図11), Nagashima et al. (2014)の拡散波動場理論によるEHVRからの速度構造同定手法を利用して速度構造を同定した。さらにその構造から一次元のS波サイト増幅特性を求め統計的グリーン関数を用いた波形合成法の計算準備を整えた。

一方震源のモデル化については研究計画に従い、Sekiguchi and Yoshimi (2011)の手法により1923年関東地震の不均質震源モデルを構築し、SMGAのサイズや面積が強震動予測レシピに従うものとなっていることを確認した。

建物モデルの年代別存在比率については文献および資料を収集し、1923年当時の年代別存在比率を計算した(拠点間連携共同研究[課題番号:CT0C39])。

「既存来木造建物に大きな被害を引き起こす地震動の発生要因に関する研究」では、2003年十勝沖地震のKiK-net 厚真のような2秒よりやや長い周期が卓越して揺れの数が多い地震動の発生要因について表層地盤を対象に分析を行った。過去に発生した地震動の卓越周期と繰り返し回数を求め、これらとVs30(表層30mの平均せん断波速度)

の対応関係を図 12 に示す。これを見ると、揺れの数が 2 秒よりやや長く揺れの数が多い地震動は、 V_s が 200m/s 以下の軟弱地盤で発生していることがわかったが、表層地盤が軟弱でも必ずしもそのような地震動が発生するとは限らず、引き続き発生要因について検討が必要である。

また、KiK-net 厚真の強震記録を、開発した実大 1 層縮約試験体（図 13）に入力した振動実験を行った。その結果、非常に大きな被害となり、解析的な結果が確認された。得られた変形角－ベースシア係数関係を図 14 に示す。最大変形角は、1/10 近くに達し、内外装材が剥落後、両筋交が座屈して全壊に至った（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC40]、境・他，2022，汐満・他，2022）。

（2）地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化の研究

「リアルタイム地震情報配信手法の高度化に向けた地盤特性の影響度評価」では、建物の図面が現存していない、70 年代以前に竣工された L 字型平面を有する低層 RC 造病院建物を対象に、モード情報を踏まえた振動解析により建物各部の詳細な応答を予測した。モード情報の同定には令和 3 年夏に実施した微動観測記録を用いた。また予測結果の検証には、令和 3 年春から稼働する建物の基礎階と上部階の 2 か所での地震観測システムで得られた実際の地震応答記録を利用した。建物の損傷および建物内の室内被害に用いる応答について、現状では観測階の加速度応答の最大値や積分により得られた変位を基礎階と上部階で線形補間して非観測階の加速度波形や層間変形角を予測するに留まっている。図 15 に振動モデルによる予測結果と実際の地震応答記録を比較する。左図は地震観測点（7 と 19）および微動観測軸である。中央図に示す予測波形の最大振幅は、最も精度の高いモデルパラメータでは多くの地震で誤差 30% 以内に収まった。観測点は 2 点に留まるが、振動モデルを利用することで、各部の応答を詳細に予測することが可能となる。右図では建物の両端部のモード振幅が大きくなるねじれモードや、中央部分がたわむモード、屋上階塔屋の局所モード、の影響を表現できている。

また地盤モデルを考慮した数値解析モデルの構築方法を検討した。対象建物の候補は、観測対象の病院建物である。解析方法は、地表面－建物間の伝達関数を用いた周波数応答解析とし、解析モデルは①質点系のスウェーローッキングモデル、② 3D-FEM 解析モデルの 2 種類を検討した。構築した 3D-FEM 解析モデルの一例を図 16 に示す。構築した解析モデルを用いて、拠点となる建物の強震記録から対象地域の地表面地震動の評価方法を検討した。さらに、建物基礎部と周辺の地表面で観測された地震動のスペクトル特性を分析し、建物と地盤の相互作用の影響について議論した。

今後の連携活動の研究シーズとして、海域観測網などの異なる観測網を統合的に用いて、緊急地震速報を更なる高精度・迅速化を目指す取り組みや、深層学習を活用した地震カタログの高精度化、スロー地震の一種である浅部微動のモニタリングシステムといった地震解析処理の最新の取り組みについて議論した。また地震情報配信の実例や、長周期波動場のモニタリングによるリアルタイム地震解析システム (GRiD MT) の詳細および緊急地震速報配信における予報業務許可に関する地震研究所（および東京大学）における運用の実例について情報を共有した（拠点間連携共同研究[課題番号：

CTOC23]]。

「連続地震動観測による大規模地すべりの再活動危険度評価」で得られた成果の概要は以下の通りである（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC36]，王，2022，Wang，2022）。

（i）西南日本で発生した再活動型大規模地すべり地において，6台の地震計により連続地震動観測，ほぼ全体をカバーするような稠密微動観測，高精度表面波探査及び電気探査などを行った結果，大規模地すべりにおける地震動特性を推測する場合には，斜面の地質特性や地形特性による影響を別々に考える必要があることを明らかにした。また，斜面における大規模地すべり土塊は，大地震時には豪雨時とは異なったすべり面を形成し，移動する可能性があることがわかった。

（ii）2018年北海道胆振東部地震により幌内地区（砂岩泥岩互層地域）において発生した大規模岩盤地すべり地における3台の地震計を設置し，連続地震観測を行った。また，地すべり地の源頭部および末端付近にすべり面を形成した土層から土試料を採取し，異なる載荷条件下でせん断実験を実施した。地震観測データについての解析は進行中であるが，採取した土試料に対するせん断実験を実施した結果，（a）砂層から採取した試料を用いた飽和・非排水せん断においては，高い過剰間隙水圧が発生しうること；（b）泥質土層から採取した試料のせん断強度（摩擦角度）は10度前後で，極めて低いこと，が分かった。

（iii）地震で大規模崩壊を発生させた地域（大歩危南方地域）を調査し，その地形・地質条件をまとめた。その結果，調査した崩壊地では断層，節理，劈開などの不連続面構造が存在する場合に，そこが分離面またはすべり面となることが示された。不連続面構造の分布や形態が地域的に集中している場所があり，また河川侵食による斜面下方の切断があるような不安定条件を備えた場所で最近の崩壊が発生していることが示された。崩壊が発生した場合に，上流に広大な水域がある河川をブロックする場所があることも判明し，地震直後に河道閉塞のおそれがある地域も存在することが示された。

（iv）1686年の貞享安芸伊予地震等がきっかけとなり崩壊が繰返し発生してきた高知県大豊町のトウジ山周辺を地質踏査した。トウジ山が位置する北東—南西方向に伸びる尾根沿いには硬質な珪質片岩，塩基性片岩が分布し南東へゆるく傾斜している。尾根を挟んで北西側と南東側は主に泥質片岩からなり，徐動性地すべりが多数分布し，徐々に斜面下部に移動するため尾根が常に先鋭化する作用が働いている。このような地形は地震動が増幅されやすく崩壊発生の素因の一つになっていると推測される。

（v）安政東海・南海地震（1854）により発生した善徳地すべりと有間大崩壊についての現地調査を実施した。善徳地すべりは，吉野川右支川祖谷川の中流域，徳島県三好市西祖谷山村善徳の両岸に位置している。またこの地すべりは，日本の地すべり分類のなかで破碎帯地すべりの最大級のものとして知られている。この地すべりの滑動は，記録が乏しいものの，安政地震（1854年）を端に発していると言われ，現在も継続している。昭和57年（1982年）より建設省（現国土交通省）の地すべり対策直轄事業が展開されている。有間の大崩壊は，吉野川支流の平石川上流部，土佐町有間に位置する。この崩壊も，安政地震（1854年）時に推定土量570万立米の土砂移動が発生した。その後，有間地区は明治26年（1893年）の豪雨，昭和21年（1946年）の昭和南海地震，

昭和 51 年（1976 年）の台風 17 号の豪雨により崩壊域が拡大している。このような大きな土砂の履歴以降、地すべり滑動が拡大し、昭和 53 年度より高知県による地すべり・崩壊対策事業が展開された。

（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

「ばらつきを考慮したハザード想定結果の「受け取られ方」に関する評価研究」では、平成 3 年度の分析結果をもとに改良したシステムにもとづき地表における速度での内閣府の南海トラフ地震動想定の評価を行った。また、前年度の成果にもとづき改良したシステムを用い自治体職員に対するヒアリングを実施し、災害シナリオの多様性があることの理解を深めるための方策の検討、さらには検討成果を踏まえシステムのさらなる改良を行う。ただし、自治体職員のヒアリングについては本年度の地震動評価をふまえて実施するため本報告には反映されていない。

本研究では地表面における速度を用いて地震動シミュレーション結果のばらつきについての評価を行っている。しかし、内閣府が公表している地震動推定結果は、地表面では震度であり速度については工学的基盤の強震波形のみが公開されている。そのため内閣府のシミュレーション結果を、地表面での最大速度に変換する作業を昨年度から実施している。昨年度は、簡易的な手法を用いて変換を行った結果、60 cm/s を超える最大速度が多く算出された。また 200 cm/s を超えるような地点も多く、最大の地表最大速度（PGV）は高知県で約 680 cm/s となった。

一方、過去の代表的な地震の最大速度は 2016 年熊本地震で約 240 cm/s、2011 年東北地方太平洋沖地震では約 100 cm/s であり、第一段階として観測上の最大値である約 240 cm/s を地表最大速度（PGV）の上限値として内閣府による地震動シミュレーション結果の変換を行った（図 17）。さらに検討を進め内閣府（2012）の前身である内閣府（2009）による表層地盤モデルを用いて南海トラフ巨大地震に対して地震応答解析を実施した（図 18、拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC30]）。

「桜島大規模噴火による大量軽石火山灰降下に対する事前広域避難に向けた実践的研究」は、大量軽石火山灰降下による被害の恐れがある鹿児島市街地の八幡校区の住民を対象に桜島の大規模噴火の切迫期における実行可能な危機対応体制を構築し、被災影響の軽減を図るものである。本研究の特徴は、専門家が住民に対して何が正しいかを教えるのではなく、住民が主体的に検討し、専門家は住民の検討を支えるメンターとして位置づける点にある。

令和 3 年度までに、2 回のワークショップ（以下 WS）を実施しており、大量軽石火山灰降下が生じた時の状況を想像し、WS 参加者がおのおの生じる問題について考えることを通じてハザードの理解を深めた。令和 4 年度は、2023 年 1 月 13 日現在、2 回の WS（第 3、4 回）を実施している。

第 3 回（2022 年 6 月 22 日）は、同校区の広域避難先に指定されている南さつま市の現地視察を行った（図 19 参照）。その結果、参加者は都市部の住民を受け入れるだけの収容能力が不足していることを明確に認識するに至った。第 4 回（2022 年 10 月 24 日）は参加者に事前に避難するか、自宅にとどまるかの意思決定をしてもらい、その判断のもとで懸念される事項について考える機会とした。興味深いことに、第 2 回終了時点で

は、「事前避難」の選択が多数派だったが、現地視察後は、「自宅にとどまる」との選択が多数派となった。言うまでもなく、これは正しい答えがあるような問題ではない。しかし、こうした思索を通じて、住民、研究者が状況改善の糸口を見いだすことが可能となる。これまでのWSを通じたリスクコミュニケーションのプロセスは図20の通りである（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C34]，Onishi et al.，2022，大西，2022）。

「リスクコミュニケーションを推進するための地震・火山災害に関する意識調査の標準的な質問紙設計とその有効性の検証」では、火山災害に関する先行研究をレビューし、先行研究を踏まえつつ、できるだけ標準的な調査項目として、以下の6項目を設定した。1. 火山現象の特性の理解，2. 対象とする火山が噴火した場合に発生する各噴火現象の理解，3. 溶岩流，火砕流，融雪型火山泥流・土石流の移動速度の理解，4. 避難等に係る用語の認知，5. 各噴火現象と居住地域への影響の認識，6. 避難先や移動方法など。

常時観測火山の近くに立地する9道県15市町村（北海道：伊達市，壮瞥町，洞爺湖町，豊浦町，森町，七飯町），福島県（猪苗代町，二本松市），栃木県（那須町），神奈川県（箱根町），新潟県（糸魚川市），長野県（軽井沢町，御代田町），熊本県（阿蘇市，高森町，南阿蘇村），大分県（由布市，別府市），鹿児島県（鹿児島市）を対象として、作成した質問紙票の質問項目をベースに、オンライン調査を実施し、各地域住民の火山災害に関する意識を明らかにするとともに、設計した調査票の有効性について検討した。

調査結果の一部として、「火山ガス」，「大きな噴石」，「降灰」を図21～図23に示す。まず、活火山を周辺地域として12地域を設定した。各地域ごとに、噴火現象の理解度に違いがあることが確認された。この違いがどのような要因については、本調査結からは確認することができない。しかしながら、こうした意識調査票を作成することにより、同じもの差しで地域間の火山に対する意識を比較することが可能となった。また、ハザードマップの認知と保管状況について調査した（図24，図25）。ハザードマップを見たことがあるのは、もっとも高い地域で約9割，低い地域で約4割に留まるなど，地域ごとにかかなりの差が見られた。

詳細な分析は今後行う必要があるが、設計した調査票は火山に関する標準的な質問紙として機能すること，本調査票を用いることにより，地域間の火山に関する住民意識の比較が可能であることが確認された（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C38]）。

これまでの課題と今後の展望

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

拠点間連携共同研究の重点推進研究は、「巨大地震のリスク評価の不確実性に関するパラダイム構築の推進」を主要テーマとして推進し，総括研究において震源から被害予

測及びそのステークホルダまでの伝達までを一貫して行い、さらにステークホルダとの協働の成果をフィードバックすることで、研究の方向性を議論している。また、総括研究において見いだされた課題や新たな展開を特定型において掘り下げて詳細に検討するとともに新しい技術や考え方について検討し、その成果を総括研究にフィードバックする。さらに総括研究で新たに出た課題を特定型で掘り下げる、という循環により研究の高度化を目指している。

今後は、重点推進研究の中での循環による研究を進めることと並行して、一般課題型研究で提案され、実施されてきた研究課題による成果や手法などを取り込む枠組みを構築することで、災害の軽減に貢献するための研究を高度化しながら継続し、高度化した成果を供出することを目指す。そのためには、実際に被害を受ける構造物や社会システムに直接携わっている工学、人文・社会科学の分野が理学分野の成果を咀嚼して活用出来るような体制を整える必要がある。つまり、観測計画において、これまでの理学的な観測網の維持のみならず、工学、人文・社会科学の研究の発展に必要な観測計画の立案が必要になると考えられる。

成果リスト

- 浅見健斗・井上和真・上田恭平・芹川由布子・下保亮太・服部孝生，2022，水平2方向入力地震動に対する砂地盤の非線形応答に関する解析的検討，日本地震工学会第17回年次大会，F-12-4 (TS 20220283)
- Chang, Chengrui and G. Wang, 2022, Pre-failure Kinematics Strongly Modulated by Shear Localization: An Experimental Study and Its Implication for the Failure-time Forecast of Landslide, JpGU2022, HDS07-13
- Chida, Y., and Mori, N., 2023, Numerical modeling of debris transport due to tsunami flow in a coastal urban area, Coastal Engineering, 179, 104243, doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104243
- Fujita, K., S. Murakami, T. Ichimura, T. Hori, M. Hori, M. Lalith, N. Ueda, 2022, Scalable Finite-Element Viscoelastic Crustal Deformation Analysis Accelerated with Data-Driven Method, ScalAH22: 13th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Heterogeneous Systems
- 福井幸太郎・金田平太郎，2022，立山カルデラの重力断層の現在の活動状況と形成年代，日本山の科学会2022年秋季研究大会，0-15
- Fukui, N., Mori, N., Miyashita, T., Shimura, T., and Goda, K., 2022, Subgrid-scale modeling of tsunami inundation in coastal urban areas, Coastal Engineering, 177, 104175, doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104175
- Liu, B. and G. Wang, 2022, Development of Micro-fractures within Shear Zone Revealed by X-ray Micro-CT Scan: Examples from Rock Halite in Ring-shear Experiments, JpGU2022, HDS07-12
- 松島信一・劉之偉・宮腰淳一，2022，盆地端部の複雑な基盤段差構造の形状と地盤増幅特性の関係，日本地震工学会大会第17回年次大会梗概集，A-22-6

- 宮下卓也, 森信人, 志村智也, 2023, 複雑な幾何形状をもつ湾内の長波による水面の応答振動特性, 令和4年度 京都大学防災研究所 研究発表講演会, C314
- Miyashita, T., Mori, N., and Gómez-Ramos, O., 2022a, Local Tsunami Amplification Factors due to the Bathymetric Effect and its Application to Approximate Hazard Assessment on the Zihuatanejo Coast, *Pure and Applied Geophysics*, 179(12), 4301-4322, doi.org/10.1007/s00024-022-03177-8
- Miyashita, T., Ho T.C., Mori, N., & Shimura, T., 2022b, Tsunami Responses along the Japanese Coast Due to Bathymetry Effect, *Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 19th Annual Meeting*, OS17-A005
- 宮下卓也, HO, T.C., 森信人, 志村智也, 2022a, 日本の太平洋沿岸を対象とした地形効果による津波の周波数応答特性の推定, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 78(2), I_55-I_60, doi.org/10.2208/kaigan.78.2_I_55
- 宮下卓也, HO, T.C., 森信人, 志村智也, 2022b, 日本の太平洋沿岸を対象とした地形効果による津波の周波数応答特性の推定, 第69回海岸工学講演会, 14
- Miyashita, T., Suganuma, R., Mori, N., and Shimura, T., 2022c, SEISMIC AND TSUNAMI HAZARD ASSESSMENT OF COASTAL BUILDINGS IN WEST COAST OF JAPAN, 37th International Conference on Coastal Engineering
- Miyazawa, M., R. Kiuchi and K. Koketsu, 2022, Attenuation Characteristics of High-Frequency Ground Motions from Local Sources Caused by Great Subduction Zone Earthquakes in Northeast Japan, *Seismological Research. Letters* 93(5), 2686-2699, https://doi.org/10.1785/0220210353
- Mori, N., Satake, K., Cox, D., Goda, K., Catalan, P. A., Ho, T.C., Imamura, F., Tomiczek, T., Lynett, P., Miyashita, T., Muhari, A., Titov, V., and Wilson, R., 2022, Giant tsunami monitoring, early warning and hazard assessment, *Nature Reviews Earth & Environment*, (3), 557-572, doi.org/10.1038/s43017-022-00327-3
- Nishino, T., 2023, Probabilistic urban cascading multi-hazard risk assessment methodology for ground shaking and post-earthquake fires, *Natural Hazards*, https://doi.org/10.1007/s11069-022-05802-0
- 大邑潤三, 2022a, 1927年北丹後地震による淀川堤防被害の分析, *鷹陵史学*, 48, 27-54, https://cir.nii.ac.jp/crid/1520293954148859904?lang=ja
- 大邑潤三, 2022b, 1830年京都の地震による堤防被害とその後発生した水害について, *日本地震学会 2022年度秋季大会*, S10-06
- 大西正光, 2022, 長期的視野のリスクコミュニケーション: 桜島大規模噴火に備える地域との協働活動の現在位置, 2022年度桜島大規模火山噴火総合研究グループ研究集会
- Onishi, M., M. Iguchi, G. Nakano, K. Takenouchi, Y. Yama, and K. Yamori, 2022, Designing the Collaborative Process between Residents and Experts for Risk Governance: A Case Study on the Construction of a Wide-Area Evacuation System for the Sakurajima Large-Scale Eruption, *IDRiM 2022 - The 12th International Conference of the International Society for the INTEGRATED*

DISASTER RISK MANAGEMENT

- 齊藤隆志, 2023, 地震および豪雨による斜面災害発生個所の事前予測方法の統合, 京都大学防災研究所 年次講演研究発表会
- 齊藤隆志, 2022, 土砂災害予測基本図による地形変化検出とそれに基づく豪雨・地震による崩壊モデルの提案, 日本地形学連合 2022 年秋季大会
- 境有紀・汐満将史・五十田博・江口直希, 2022, 地震動の破壊力を測ることを目的とした簡易木造試験体の開発 (その1) 研究概要と静的実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集
- 汐満将史・境有紀・五十田博・江口直希, 2022, 地震動の破壊力を測ることを目的とした簡易木造試験体の開発 (その2) 振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集
- 菅沼亮輔, 宮下卓也, 志村智也, 森信人, 2022a, 大阪市を対象とした南海トラフ地震による津波および強震動被害の複合評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 78(2), I_205-I_210, doi.org/10.2208/kaigan.78.2_I_20555
- 菅沼亮輔, 宮下卓也, 志村智也, 森信人, 2022b, 大阪市を対象とした南海トラフ地震による津波および強震動被害の複合評価, 第69回海岸工学講演会, 48
- 津野靖士・山中浩明・長嶋史明・川瀬博・松島信一, 2023, 2016年熊本地震の弱震動および強震動ブラインド予測結果のGOF分析への適用, 令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会
- 上田恭平・芹川由布子・井上和真, 2023, 液状化に伴う直接基礎建物の沈下・傾斜被害に及ぼす地盤物性の空間的不均質性の影響, 土木学会論文集, 79(13)
- 王功輝・巫昇山・古谷元・部直喜, 2023, 2018年北海道胆振東部地震時に発生した大規模岩盤地すべりについて, 京都大学防災研究所年次講演研究発表会, D209
- 王功輝, 2022, 降下火砕物斜面における地震時地すべりの発生・運動機構についてー日本で近年発生した土砂災害を例としてー, 2021年度土砂災害予測に関する研究集会プロシーディング, P89-90. 防災科学技術研究所研究資料, 480
- Wang, G., 2022, Some Recent Coseismic Landslides, Coseismic Landslides: Phenomena, Long-Term Effects and Mitigation (eds: Towhata, Wang, Xu, Massey), Springer, 1, 169-203, ISBN: 978-981-19-6597-5
- Wang, G., B. Liu, I. Doi, T. Kamai, T. Ohkura, 2022, Unraveling the role of halloysite on the initiation and movement of coseismic landslides of pyroclastic fall deposits: a case study, JpGU2022, HDS07-10
- Wu, S., G. Wang, 2022, Shear rate-dependent frictional properties of nanomaterials and implication for high mobility of rock avalanches, JpGU2022, HDS07-14

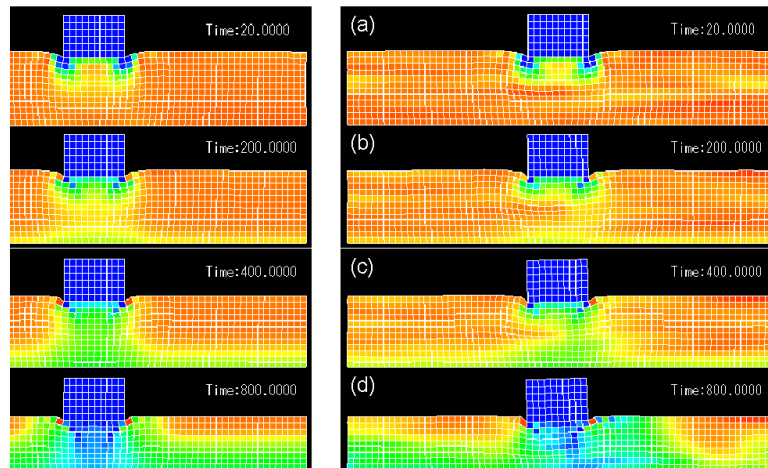


図 1. 液状化の可能性のある地盤上に構築された直接基礎建物を対象に地盤物性の空間的不均質性を考慮した有効応力解析による過剰間隙水圧比の分布（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C01]，上田・他，2022）

- ・液状化に伴う直接基礎建物の沈下・傾斜評価において，地盤物性の空間的不均質性の影響が無視できない。
- ・基盤面や地表面に傾斜がなく，地震動が正負対称であったとしても，振動後の過剰間隙水圧の消散過程が地点により異なるため，建物の不同沈下や傾斜といった被害が誘発される。

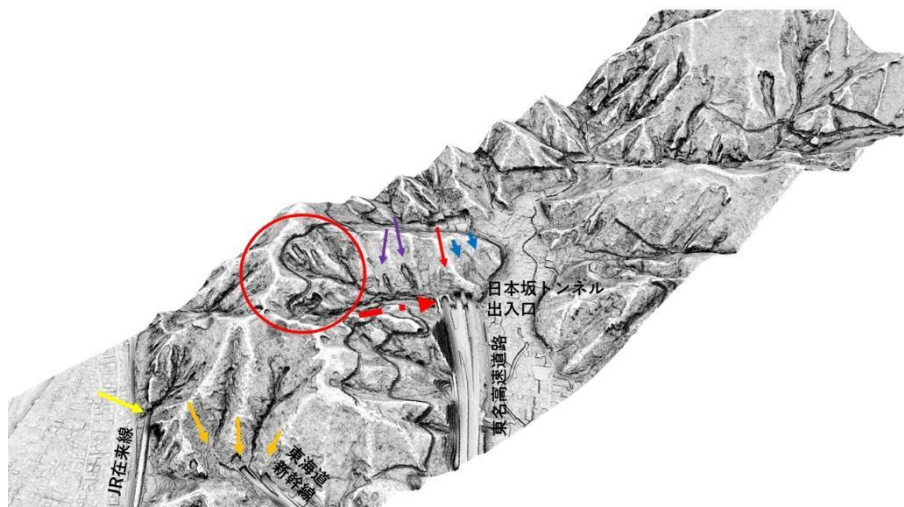
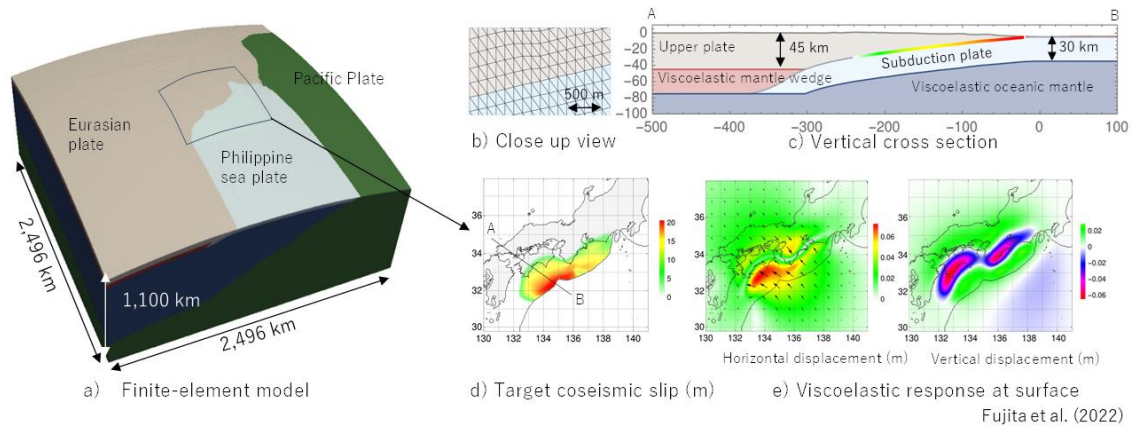


図 2. 地震と豪雨による斜面崩壊に対する高速道路・新幹線などの社会インフラの危険度評価（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C01]）

- ・東名高速道路日本坂トンネル出入口の直上（赤↓）には北向き斜面にみられる地すべり性の土砂移動（青↓）が起こっていない。
- ・南側の過去に土石流性の崩壊が多発した斜面（赤○）の前兆と考えられる侵食谷（紫↓）が形成されている。
- ・過去の土石流の流下経路（赤い太点線→）を遮断してトンネル出入口道路が建設されている。
- ・JR在来線のトンネル出入口（黄↓）と東海道新幹線の出口（橙↓）を含めて，いずれも地震や豪雨に対して，土石流や斜面崩壊が発生する可能性が高いと考えられる地形がみられる。



Fujita et al. (2022)

図 3. Data-driven method を活用した高詳細粘弾性地殻変動解析（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC01], Fujita et al., 2022)

- ・ 過去時間ステップのデータを使うことで粘弾性地殻変動解析の精度を落とすことなく高速化する手法を開発。通常の方法と比べて最大 84 倍速。
- ・ 富岳の大規模並列環境を高効率で使える方法とすることで、南海領域の高詳細 3 次元粘弾性地殻変動解析を実施。

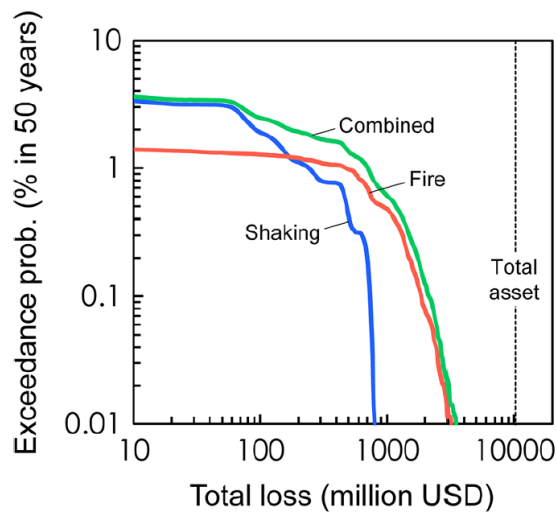


図 4. 京都市上京区の木造密集市街地における地震動とそれに伴う火災の複合効果を考慮したマルチハザードリスク（建物損失額の 50 年超過確率）（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC32], Nishino, 2023)

対象とした 6 つの内陸地震による京都市上京区の木造密集市街地における地震動とそれに伴う火災の複合効果を考慮したマルチハザードリスク（建物損失額の 50 年超過確率、緑色の線）。青線は地震動だけを考慮した時の建物損失額の 50 年超過確率、赤色は地震火災だけを考慮した時の建物損失額の 50 年超過確率。Total asset は、対象地域全体での建物構造別の延床面積から算定される建物価値の合計。

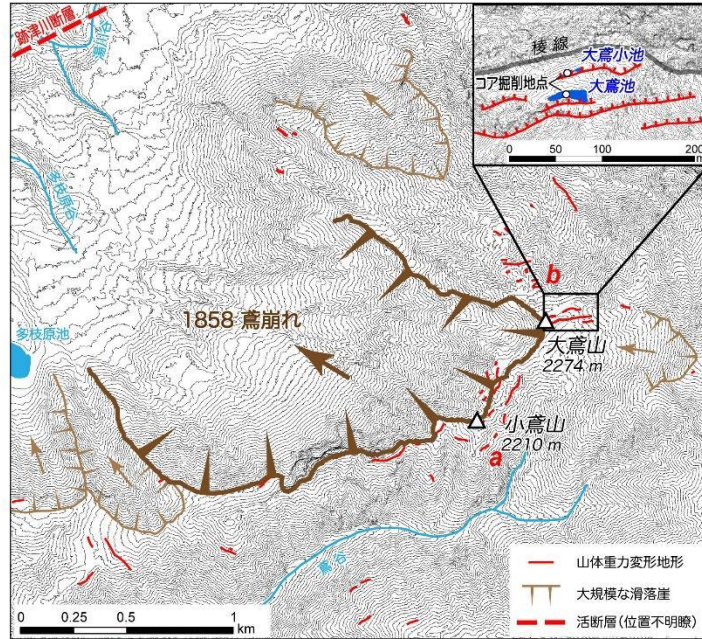


図 5. 鷲崩れ周辺の山体重力変形地形・大規模滑落崖の分布と本研究のコア掘削地点（挿入図，拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC33]）

国土地理院 1:25000 活断層図（金田ほか，2019）による跡津川断層のトレースも併せて示した。等高線（10 m 間隔，挿入図は 1 m 間隔）は国土交通省北陸地方整備局立山砂防事務所が 2017 年に実施した航空レーザー測量のデータ（1 m グリッド数値標高モデル）に基づく。

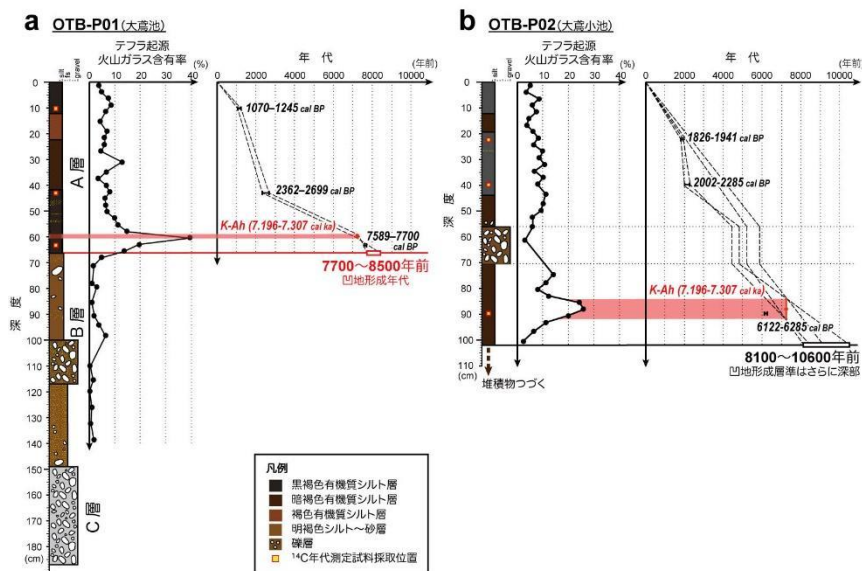


図 6. 大鷲池コア（a）および大鷲小池コア（b）の柱状図，テフラ分析結果および深度-年代曲線（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC33]）

最初に掘削を行った大鷲池では，深度 187 cm までのコアが採取された（図 6 a）。大鷲小池では，時間的な制約から深度 102 cm で掘削を中止せざるを得なかったが，採取されたコアは，一部に礫層を挟むものの深度 102 cm まで湖沼成の黒褐色～暗褐色有機質シルト層であり，この堆積物はさらに深部まで続いていると考えられる（図 6 b）。

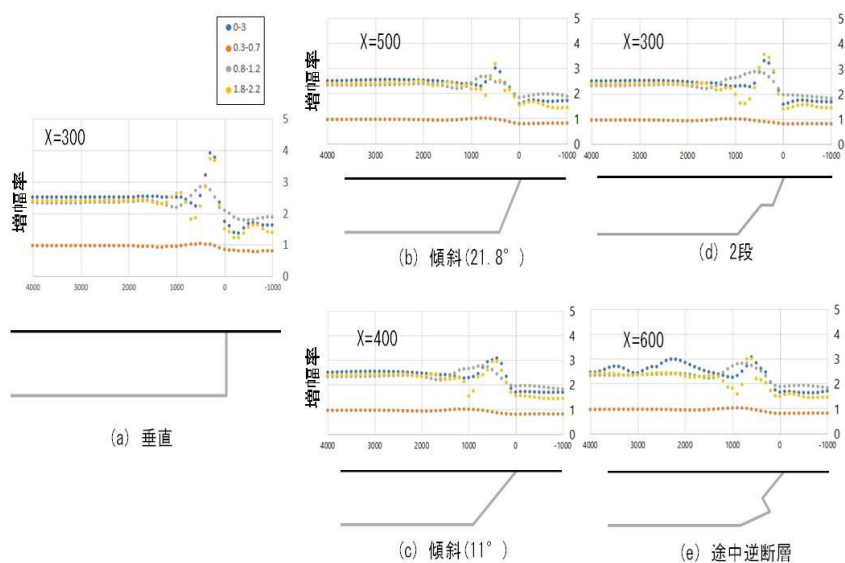


図 7. 平面波入射により計算される盆地端部における地盤による速度増幅率（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC35]，松島・他，2022）

鉛直下方より平面波入射した際のモデル最上面での入射波に対する速度増幅率。全振動数，中心振動数 0.5 Hz，同 1.0 Hz，同 2.0 Hz の地盤増幅率をそれぞれ青，橙，灰，黄の●で示す。

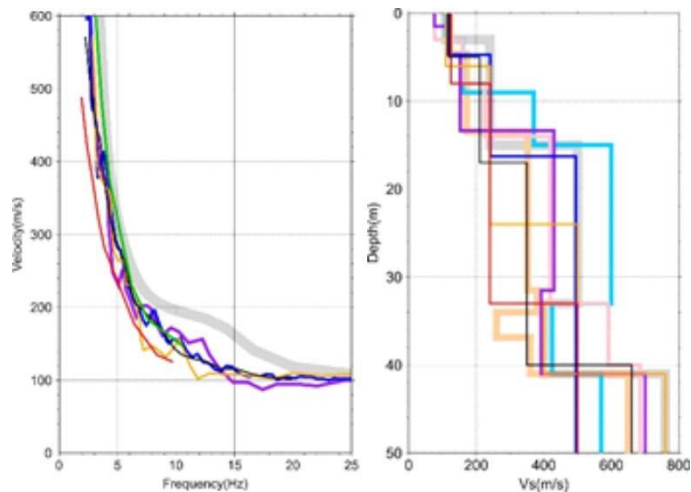


図 8. 2016 年熊本地震の発生後に行われた KiK-net 益城強震観測点での微動アレイ観測の結果（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC37]，津野・他，2023）

KiK-net 益城での微動探査による位相速度（左）と S 波速度構造（右）。

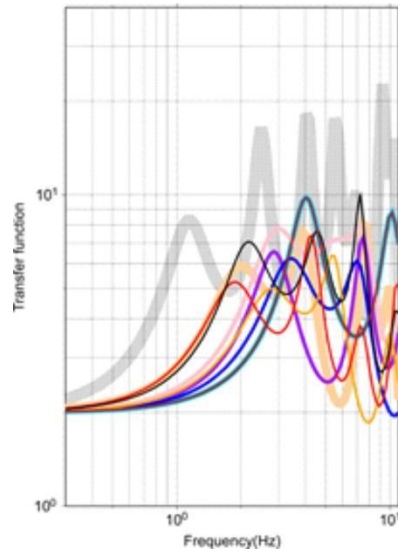


図 9. 図 8 の地盤構造モデルの S 波の 1 次元増幅特性（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC37]，津野・他，2023）
 増幅特性は類似しており，各地盤モデルが位相速度で拘束されているために，モデルの波動的特徴（増幅倍率やピーク周期など）が類似することを示唆している。

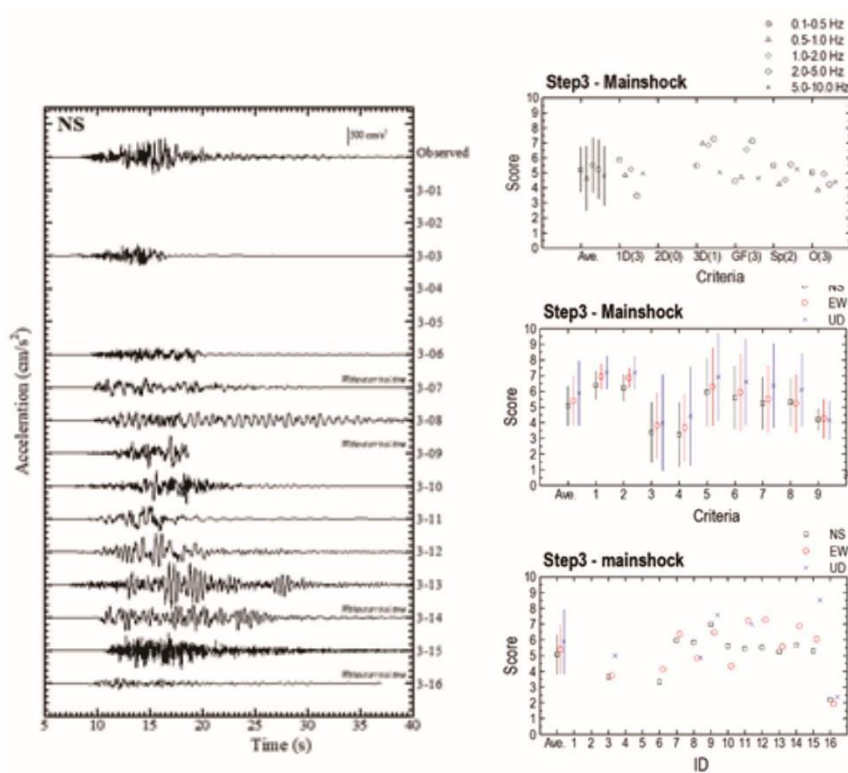
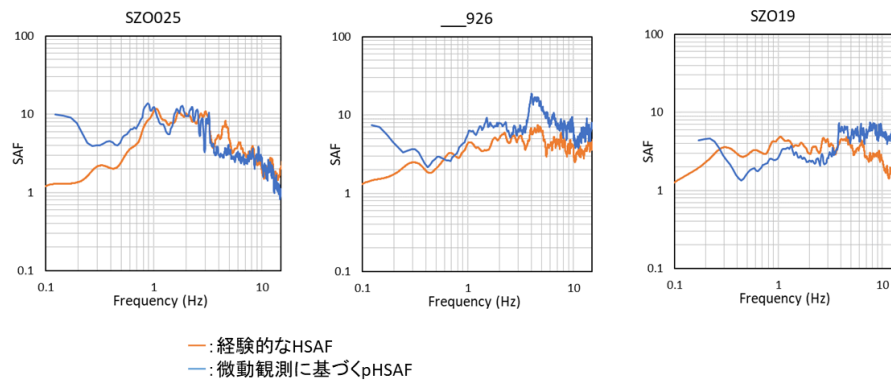


図 10. ESG6 のブラインドテストの結果（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC37]，津野・他，2023）
 左は 2016 年熊本地震の本震の加速度波形の予測結果，右は予測値と観測値を用いて得られる Anderson(2004) の比較指標である。右下：各強震動ブラインド予測結果に対する GOF，右中：各クライテリアに対する GOF，右上：各手法に対する GOF。

強震動観測地点での経験的なHSAFとpHSAFの比較 (pHSAFの妥当性の確認)



pHSAFは既に得られている強震観測地点での経験的なHSAF(仲野,2019)と調和的。

図 11. 微動と地震動の増幅の比較 (拠点間連携共同研究[課題番号: CT0C39])
強震動観測点で分離した水平動のサイト増幅特性と微動の水平上下比に地震動と微動のスペクトル比と地震動の上下動増幅率を補正して得られた推定サイト増幅特性を比較したもの。両者は微動のノイズが影響している低振動数域以外はよく一致している。

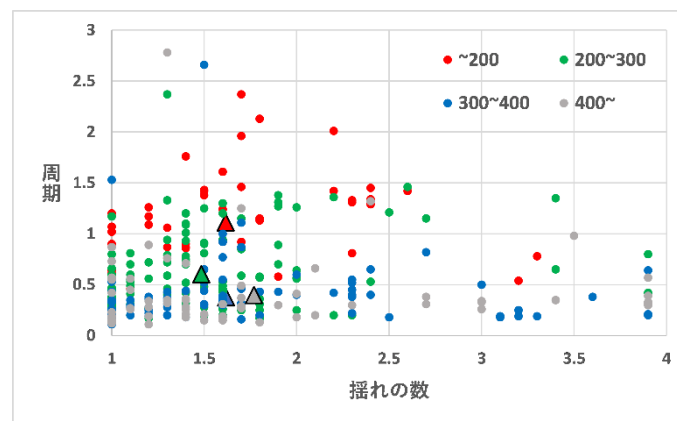


図 12. 過去に発生した地震動の揺れの数と周期と V_{s30} の対応 (拠点間連携共同研究[課題番号: CT0C40])

過去に発生した地震動の卓越周期と繰り返し回数を求め、これらと V_{s30} (表層 30m の平均 S 波速度) の対応関係 (凡例: V_{s30} (m/s))。

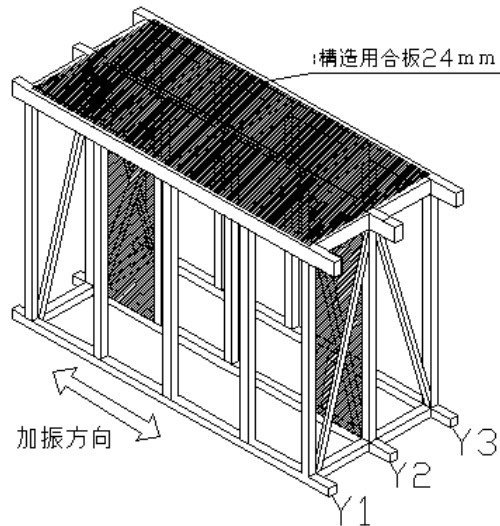


図 13. 本研究で開発した実大 1 層縮約試験体鳥瞰図（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC40]，境・他，2022）

最低限の筋かいの入った建物を想定した「軸組のみ 2 構面分と筋かい+面材 1 構面分」を用いた試験体。

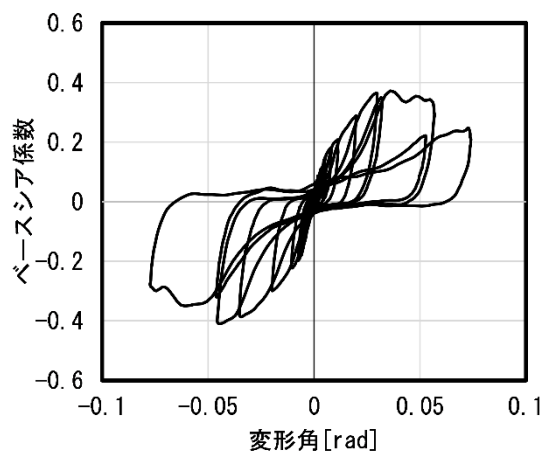


図 14. 実大 1 層縮約試験体を用いた振動実験結果の変形角－ベースシア係数関係（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC40]）

KiK-net 厚真の強震記録を開発した実大 1 層縮約試験体に入力した振動実験の結果，最大変形角は，1/10 近くに達し，内外装材が剥落後，両筋交が座屈して全壊に至った。

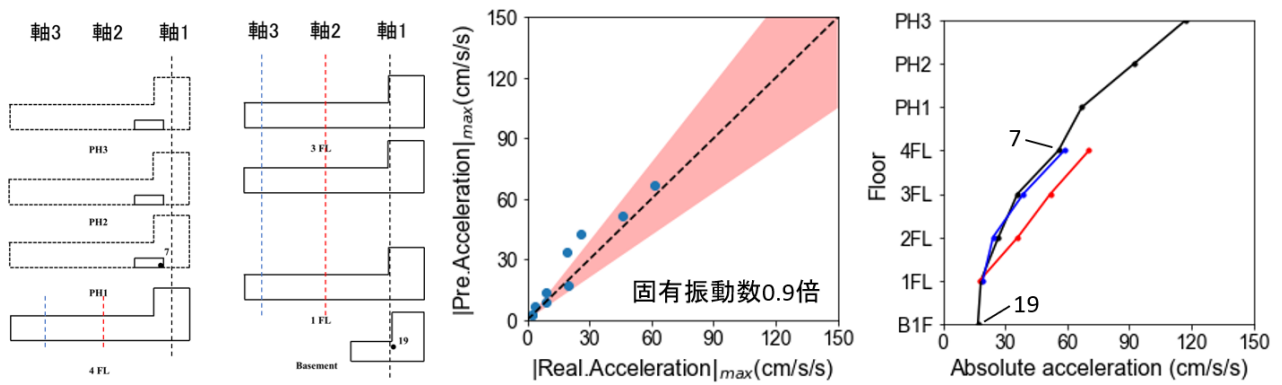


図 15. 微動観測から構築した振動モデルを利用した建物各部の応答予測（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC23]）

左図は地震観測点（7 と 19）および微動観測軸である。中央図に示す予測波形の最大振幅は、最も精度の高いモデルパラメータでは多くの地震で誤差 30%以内に収まった。観測点は 2 点に留まるが、振動モデルを利用することで、各部の応答を詳細に予測することが可能となる。右図では建物の両端部のモード振幅が大きくなるねじれモードや、中央部分がたわむモード、屋上階塔屋の局所モード、の影響を表現できている。

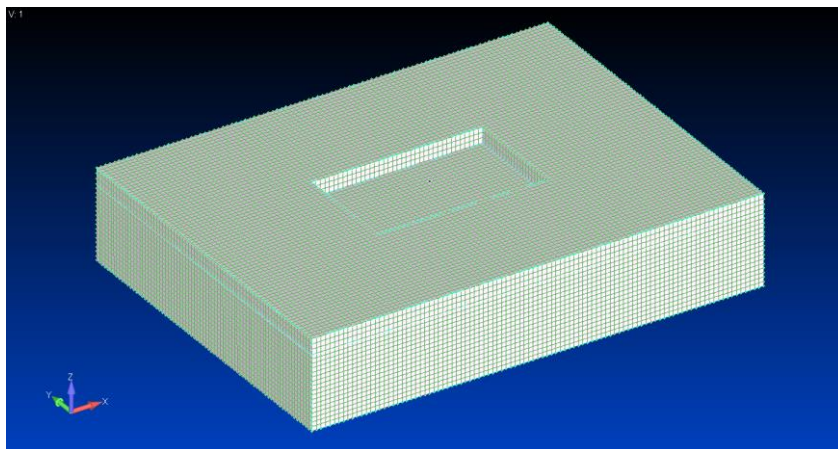
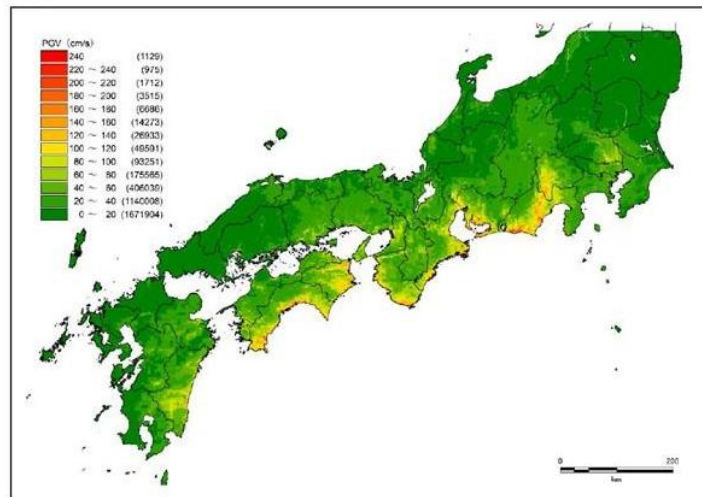


図 16. 地盤の FEM 解析モデルの検討例（直接基礎）（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC23]）

地表面－建物間の伝達関数を用いた周波数応答解析とし、解析モデルは①質点系のスウェーローッキングモデル、②3D-FEM 解析モデルの 2 種類を検討した。

(基本ケース)



240cm/sを最大値としたPGV分布図

図 17. 240 cm/s を最大値とした PGV 分布図（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC30]）
観測上の最大値である約 240 cm/s を PGV の上限値として内閣府（基本ケース）による
地震動シミュレーション結果の変換を行った。

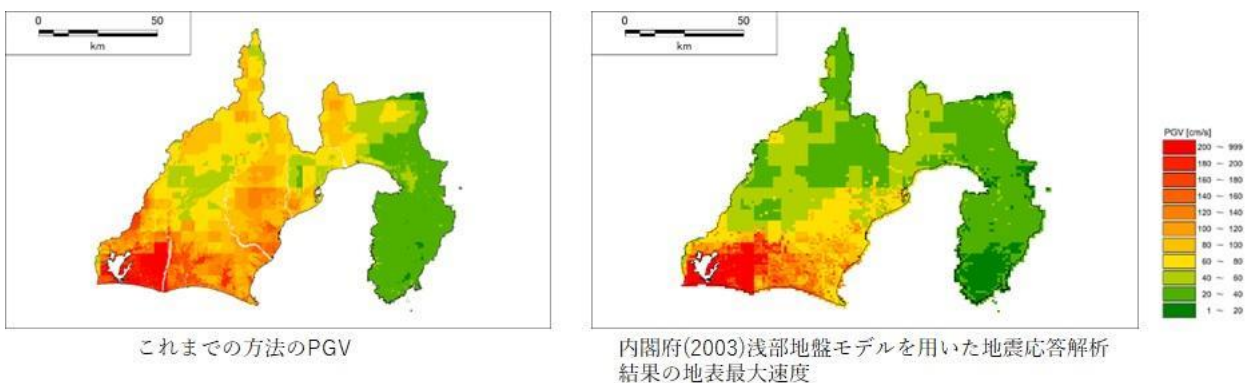


図 18. 内閣府(2003)浅部地盤モデルを用いた地震応答解析結果の地表最大速度（拠点
間連携共同研究[課題番号：CTOC30]）
内閣府(2012)の前身である内閣府(2009)による表層地盤モデルを用いて南海トラフ巨
大地震に対して地震応答解析を実施。



図 19. 指定広域避難集合場所の視察（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC34]）
 鹿児島市街地の八幡校区の広域避難先に指定されている南さつま市の現地視察の様子。

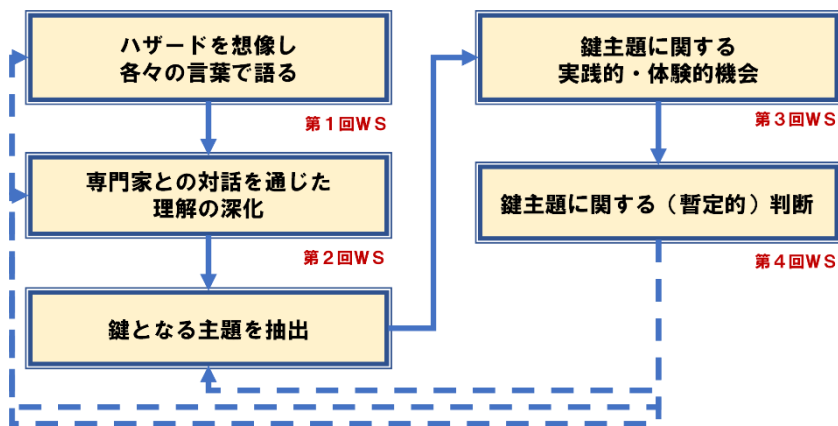


図 20. リスクコミュニケーションのプロセス（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC34]，大西，2022）
 鹿児島市街地の八幡校区の広域避難先に指定されている南さつま市の現地視察の様子。

1.火山ガス

・全体では、「ある程度知っている」が44.6%で最も高く、次いで「言葉だけは聞いたことがある」が36.6%で続く。
 ・「割付」では、「森町、七飯町」で「言葉だけは聞いたことがある」、「軽井沢町、御代田町」で「ある程度知っている」、「糸魚川市」で「言葉だけは聞いたことがある」、「由布市」で「まったく知らない（言葉を聞いた記憶もない）」、「別府市」で「まったく知らない（言葉を聞いた記憶もない）」、「阿蘇市、高森町、南阿蘇村」で「内容を含めてよく知っている」が全体

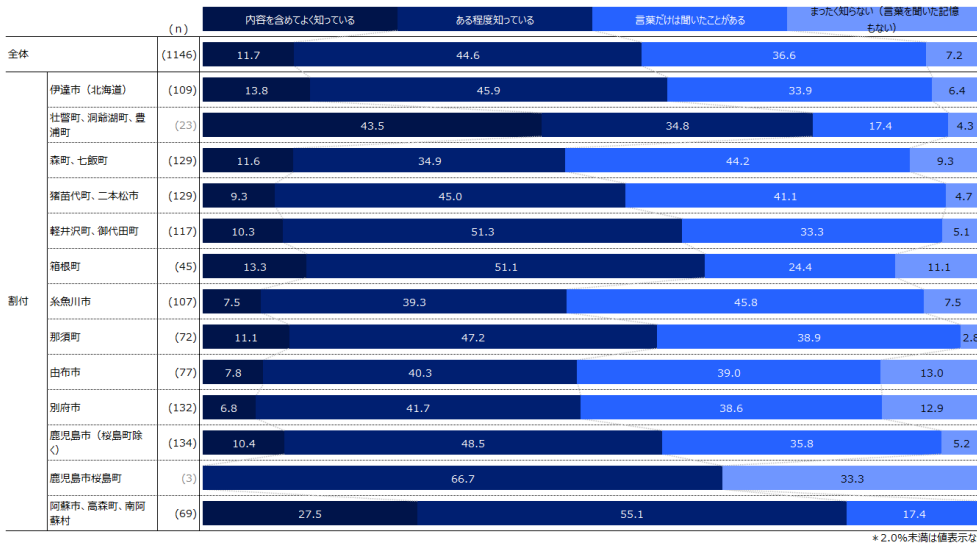


図 21. オンライン調査に基づく噴火現象の理解（火山ガス）（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C38]）

常時観測火山の近くに立地する9道県15市町村を対象として、作成した質問紙票の質問項目をベースに、オンライン調査を実施した。

3.大きな噴石

・全体では、「ある程度知っている」が50.2%で最も高く、次いで「内容を含めてよく知っている」が24.3%で続く。
 ・「割付」では、「伊達市（北海道）」で「内容を含めてよく知っている」、「箱根町」で「まったく知らない（言葉を聞いた記憶もない）」、「糸魚川市」で「言葉だけは聞いたことがある」、「那須町」で「ある程度知っている」、「別府市」で「言葉だけは聞いたことがある」、「鹿児島市（桜島町除く）」で「内容を含めてよく知っている」、「阿蘇市、高森町、南阿蘇村」で「内容を含めてよく知っている」が全体と比較して高い。

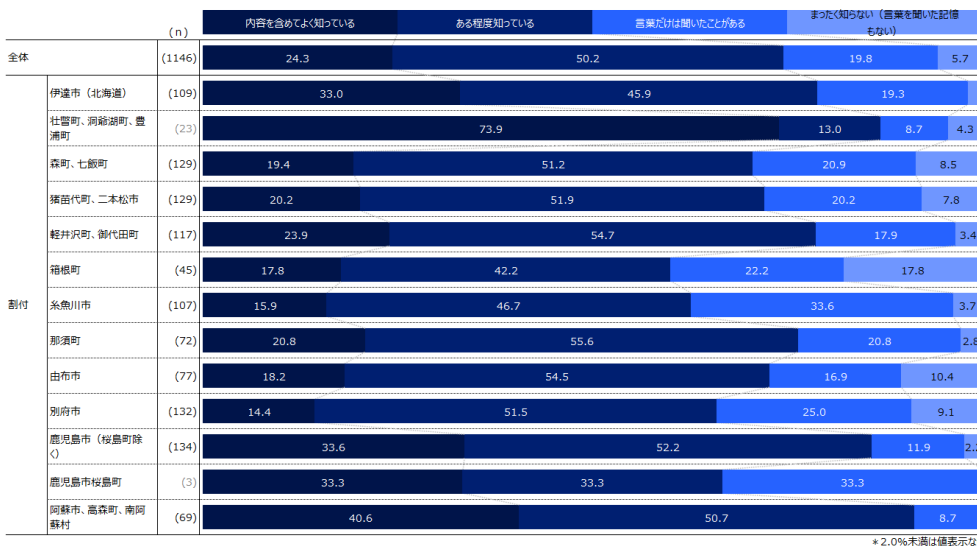


図 22. オンライン調査に基づく噴火現象の理解（大きな噴石）（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C38]）

常時観測火山の近くに立地する9道県15市町村を対象として、作成した質問紙票の質問項目をベースに、オンライン調査を実施した。

5.降灰
 全体では、1.ある程度知っているが45.5%で最も高く、次いで1.内容を言めよく知っているが36.0%で続く。
 ・「割付」では、「伊達市（北海道）」で「内容を言めよく知っている」、「森町、七飯町」で「ある程度知っている」、「猪苗代町、二本松市」で「ある程度知っている」「言葉だけは聞いたことがある」、「軽井沢町、御代田町」で「ある程度知っている」、「箱根町」で「まったく知らない（言葉を聞いた記憶もない）」、「糸魚川市」で「言葉だけは聞いたことがある」「ある程度知っている」、「那須町」で「ある程度知っている」、「由

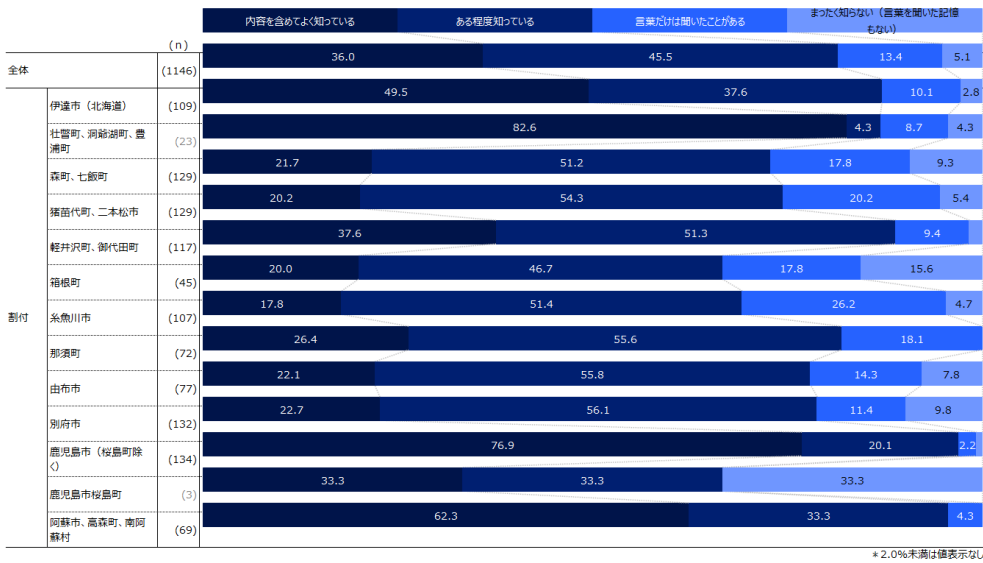


図 23. オンライン調査に基づく噴火現象の理解（降灰）（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC38]）

常時観測火山の近くに立地する9道県15市町村を対象として、作成した質問紙票の質問項目をベースに、オンライン調査を実施した。

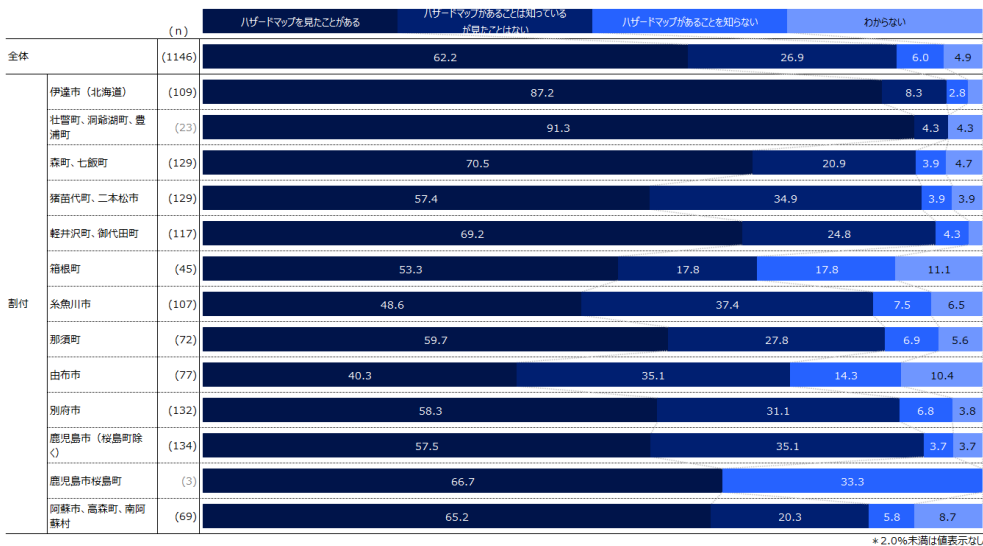


図 24. ハザードマップの閲覧状況(%)（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC38]）
 常時観測火山の近くに立地する9道県15市町村を対象としたハザードマップの認知と保管状況についての調査結果。ハザードマップを見たことがあるのは、もっとも高い地域で約9割、低い地域で約4割に留まるなど、地域ごとにかかなりの差が見られた。

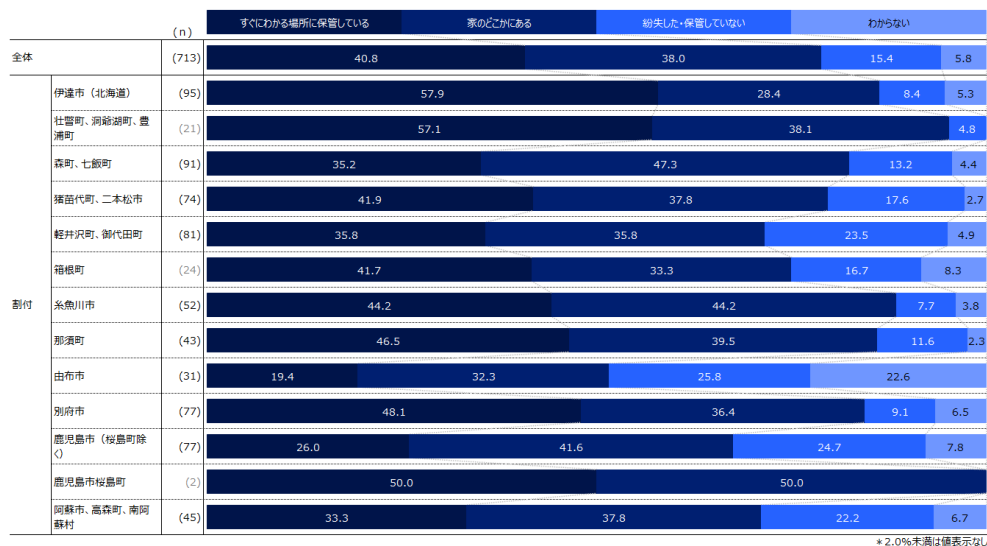


図 25. ハザードマップの保管状況(%)（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C38]）
 常時観測火山の近くに立地する 9 道県 15 市町村を対象としたハザードマップの認知と保管状況についての調査結果。