

### 3 拠点間連携共同研究

東京大学地震研究所・京都大学防災研究所 拠点間連携共同研究委員会  
委員長 松島信一  
(京都大学防災研究所)  
副委員長 市村 強  
(東京大学地震研究所)

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

これまでの建議に基づく観測研究計画では、自然現象である地震発生や火山噴火現象の理解に基づきそれらの科学的な予測を目指すという考え方から、「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所が中核となって計画を推進してきた。しかし、災害や防災に関連する研究者と協働して計画を推進するためには、東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所とが連携して、計画を進めることが有効であるとの結論に至り、両研究所が協働し、それぞれの分野の共同利用・共同研究拠点として、連携して共同研究を進めることとなった。具体的には、両拠点の研究者が中核となって建議に沿った大テーマを決め、それを実現するための研究について全国の研究者からの提案・参画を募集して全国規模の共同研究を進める「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ボトムアップ研究を公募する「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(拠点間連携研究[課題番号:CT0C01])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、平成30年度に引き続き、(1)震源過程、(2)伝播・深部地盤構造、(3)強震動予測、(4)浅部地盤構造、(5)構造物被害予測、(6)リスク評価の研究グループに分かれ、それぞれの分野におけるリスク評価の不確かさの要因についての検討を進めるとともに、これらの知見を統合するための(7)プラットフォーム構築グループおよび(8)ステークホルダの参画に関する研究グループにおいて、リスク評価およびその不確かさに関する検討を行った。2019

年度からは、さらに（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を加えた９グループで実施した。

震源過程および強震動予測について、巨大地震による強震動予測を目的とした、強震動生成域に対する距離減衰を求めるために、諸問題を整理し、強震動生成域の分かっている地震に対する波形処理を行った。深部地盤・伝播経路については、海洋研究開発機構の観測船「新青丸」を利用し、そのKS-19-18次航海で15台の海底地震計を7観測点に設置した。そのうちの5観測点では、それぞれ1台ずつの海底地震計を設置し、それ以外の2観測点は海溝軸近傍の微動や超低周波地震の発生域にあたり、5台の海底地震計を用いた半径およそ2kmの十字アレイを構築した（図1）。さらに今年度は、気象庁一元化震源カタログからマグニチュード2以上の地震を抽出し、これまでに南海トラフ周辺で得られた速度構造を参照して震源再決定を行うための準備を行なった。また、DONET観測波形を用いた海域から陸域まで通した地震波伝播特性を理解するため、精度を向上した震源情報に基づいた解析を行うための準備を行なった。浅部地盤構造に関しては、液状化の可能性のある2次元水平地盤を対象に、有効応力法に基づく逐次非線形地盤応答解析を実施した。解析では、地盤物性が解析領域において均質であると仮定したケースに加え、地盤物性の空間的なばらつきを考慮した不均質地盤に対する検討も行った。その結果、不均質性を考慮することで地表面加速度の増幅が均質地盤と比べ抑えられる傾向にあるものの、地盤の剛性・強度によりその傾向が変化することがわかった。構造物被害予測に関しては、建物被害のデータベースの構築とその応用を目的として、次の3点を検討した。1. 衛星やドローンを用いた広域被害の即時把握の可能性、2. 我が国の部材実験等の膨大な論文から作製したデータベースの活用と、論文中に示された荷重変形関係のデジタル化による非線形挙動特徴点の推定方法の開発、3. 過去の膨大な地震被害調査写真を用いたAI技術による被害程度判断技術開発の可能性。リスク評価については、経験的距離減衰式を用いた確率論的地震ハザード解析を実施する際の震源モデルについて、南海トラフ地震以外の震源域（プレート境界、活断層、それ以外）についてモデルパラメータを更新した。また、2016年熊本地震により阿蘇カルデラ内で多くの斜面崩壊・地すべりが発生したため、京都大学火山研究センターの周辺で発生した斜面崩壊・地すべりの発生メカニズムの初期段階に注目し、強振動の方向と移動土塊の方向との関係、崩壊が発生した地形に共通する特徴について検討を行った。詳細数値地形図(LiDAR-DEM, 1m)を用い、地形を視覚的に理解しやすく可視化する方法を用い、発生場の地形的特徴を明確にし、地震によって発生した斜面崩壊・地すべりの前後比較を行った。地形の変化部周辺の明瞭化を行い、変化のおよぶ範囲の特徴と移動土塊の移動痕跡を追跡した。その結果、地震を引き起こした断層運動によって生じた地表の振動方向と斜面崩壊・地すべりの発生箇所の斜面方向には、非常に良い一致が認められた。また、崩壊・地すべりの初動方向は、この方向と一致すること、崩壊箇所は移動する土塊の斜面下方にその土塊を支持する物質がないという共通する特徴が認められることが明らかになった（齊藤, 2020）。プラットフォーム構築では、地震時の総合的な影響評価にむけて、地震リスク評価の応用として病院建物の被害の程度と周辺のライフライン（水道管網）のリスク評価を考慮した病院建物での医療行為に対する影響について評価した（増田・他, 2020）。コンピュータサイエンスでは、大規模三次元地盤増幅解析手法の高度化を目

指し、液状化構成則の導入とそれに適した数値解析手法の構築を行った。これにより従来よりも広域をより高い分解能で高速に液状化解析できるようになった（Kusakabe et al., 2019）。今後も、地盤構造の曖昧さへの対処など大規模三次元地盤増幅解析手法の高度化を図る。災害リスク情報としては、災害リスク評価結果は想定シナリオ・手法により変化することから、防災計画を策定する場合には、災害リスク評価にばらつきが存在することを踏まえる必要があるため、昨年度は災害リスク評価のばらつきを防災計画に反映するためのハザードデータの構築手法についての基礎的検討を行った。今年度は、昨年度の基礎的検討結果にもとづき大阪府、高知県において様々な手法の組み合わせによる地震ハザードの計算の実施を行った。具体的には工学的基盤の地震動、表層地盤における地震動について様々な手法による組み合わせ計算を実施し、その結果を表示するシステムの開発を行った（図2）。

## （2）特定型（その1）

「ばらつきのある被害リスク評価をふまえた防災計画の検討 [課題番号:CT0C02]」では、シナリオ・手法の組み合わせにより変化する災害シナリオ評価結果を適切に理解することが可能なシステムの構築を行うことを目的とした研究を行った。これは、災害リスク評価結果は想定シナリオ・手法により変化するため、防災計画を策定する場合には災害リスク評価にばらつきが存在することを踏まえる必要があり、そのためには災害リスク評価のばらつきを理解することが重要であり、かつ、計画の目的に応じて適切な災害リスク評価結果を選択することが重要となるためである。昨年度は災害リスク評価のばらつきを防災計画に反映するためのハザードデータの構築手法についての基礎的検討を行った。今年度は、昨年度の基礎的検討結果にもとづき大阪府、高知県において様々な手法の組み合わせによる地震ハザードの計算の実施を行った。具体的には工学的基盤の地震動、表層地盤における地震動について様々な手法による組み合わせ計算を実施した。図3は、地震動予測と表層地盤増幅のばらつきの違いによる、高知県における地震動予測結果（最大速度）の違いを示す。

## （3）特定型（その2）

「定常的地震活動の震源および地震波速度構造の精度向上による地震波動場推定の高度化 [課題番号:CT0C03]」では、南海トラフ沿いの海域に設置されている海底ケーブル地震観測網のデータを利用し、詳細な沈み込み構造および精度の高い震源を決定するとともに、震源・伝播経路・サイトの特性を求めることによって、将来発生が予測されている巨大地震の震源域モデル、またそれによる陸域における地震動予測の高度化を詳細に検討することを目的として実施した。

南海トラフ沿いでは、2010年以降、ケーブル式の地震・津波観測監視システム（DONET1および2）が整備され、海域における地震活動をリアルタイムで詳細に把握することが可能となった。その結果、紀伊半島南東沖の熊野灘海底下のプレート境界ではスロースリップや微動、超低周波地震などのスロー地震が南海トラフ軸近傍まで発生していることが確認されている。この南海トラフ周辺の海域下で発生する地震について、DONETの観測記録を用いることによって、海底下地震波速度構造を詳細に決定し、さらには震源の決定精度を上げることが可能となり、巨大地震発生震源域の検討や地震波伝播特性につ

いても、詳しい議論が可能となる。一方で、熊野灘より海溝軸近辺のスロー地震が比較的頻繁に発生する場所では、DONET1とDONET2の観測網の間に若干のカバーできていない領域も存在するため、海底地震計を用いた機動的観測を行うことによって、速度構造や震源決定の精度を向上させることができる。

今年度は、気象庁一元化震源カタログからマグニチュード2以上の地震を抽出し、これまでに南海トラフ周辺で得られた速度構造を参照して震源再決定を行うための準備を行なった。また、DONET観測波形を用いた海域から陸域まで通した地震波伝播特性を理解するため、精度を向上した震源情報に基づいた解析のための準備を行なった。

一方、DONET1およびDONET2の観測網でカバーされない領域においては、海洋研究開発機構の観測船「新青丸」を利用し、そのKS-19-18次航海で15台の海底地震計を7観測点（SHM1～SHM7）に設置した。それぞれの海底地震計は固有周期1Hzの3成分速度計を装備している。SHM1からSHM5の5観測点では、それぞれ1台ずつの海底地震計を設置し、SHM6およびSHM7の2観測点では、5台の海底地震計を用い、中心に1台、残りの4台をおよそ2km離して設置して十字アレイを構築した。海底地震計は舷側から海底まで自由落下で設置し、正確な設置位置は船舶からの音響測距で測定した。

## 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。

2019年度は新規10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

「不均質な断層すべり分布を考慮した津波の確率論的予測と不確実性の評価 [課題番号：CTOC04]」では、東京大学地震研究所と京都大学防災研究所のグループがワークショップを開催し、確定論的な津波解析結果と確率論的な予測手法に関する情報交換および確率論的な手法の高度化に向けた共同研究を行った。令和元年9月19日に京都大学防災研究所において両グループの合同セミナーを行い、東京大学地震研究所から大学院生2名、研究員2名が、京都大学防災研究所から大学院生2名、特任助教1名が、それぞれの研究内容を発表し情報交換を行った。また東京大学地震研究所の大学院生だった1名が9月からJSPS研究員として京都大学防災研究所グループに加わり、2018年インドネシア（スラウェシ）地震について、地震波・地殻変動（InSAR）・津波データから、そのメカニズムや断層面上のすべりの不均質性を調べ、そのモデルに基づくパル湾における津波

の浸水について計算した。その結果を、京都大学防災研究所の現地調査結果と比較したところ、パル湾南部のパル市周辺では、実測された浸水深や浸水距離を説明できず、断層すべり以外にも二次的な津波波源が必要であることが示された (Tung-Cheng Ho et al., 2019)。

「強震観測点におけるサイト特性評価手法の開発に関する多国間共同研究 [課題番号:CTOC5]」は、米国・イタリア・フランスとの多国間共同研究により、我が国で開発されてきた強震観測点におけるサイト特性評価手法と彼らの国で標準的に用いられている評価手法との相互比較を行い、我が国で開発されてきた手法の優位性を実証することにより、その国際展開を図ることが目的である。米国についてはAlan Yong氏が京都大学防災研究所に12月半ばから1か月間滞在し、今後の研究方針について議論するとともに、検討対象とその優先順位を決定した。そして彼の協力のもとでカリフォルニア州の強震観測点における強震観測データを公開サイトからダウンロードするとともに、微動データも入手し、それをターゲットに我々の開発した地下構造同定手法を適用してその実施可能性を確認した。Imperial Valley内の観測点において地震動EHVRを求めて地下構造を同定し、Alan Yongらの浅部調査のみの構造から求めた理論解と比較したところ、2Hz~10Hzの高振動数域では両者は比較的よく対応しているが、浅部のみの彼らの構造では周期8秒の最大ピークを再現することはできないことがわかった (Nagashima and Kawase, 2019, Nagashima et al., 2020, Yong et al., 2020)。イタリアに関してはINGVのDaniela Famiani研究員が2019年9月から約1か月間日本に滞在して、当方の解析プログラムに習熟し、Amatrice地震の観測データの解析の実施に着手した。解析の結果わかったことは、彼らが地震直後(2週間以内)に計測したMHVRは同地点のEHVRとほとんど同じである一方で、本研究代表者とCecile Cornou教授がINGVと共同で地震から約1年後に観測したMHVRは日本のEMRの約半分ほどのEMRが生じていたことである。今後これらのデータに対してEHVR同定法およびMHVR+EMR同定法を適用し、得られた地下構造をアレー微動で求めた地下構造と比較しその妥当性を検証する。フランスに関しては防災研究所の特定研究員が2018年度にGrenobleに赴きGrenoble盆地およびアルプス周辺での強震観測データおよび微動観測データを入手しその解析に着手していた。今年度はまず盆地内の強震観測点5地点でのEHVRとMHVRの比からGrenoble盆地特有のEMR (EMR\_G)を求め、それが微動データから擬似EHVRを計算するのに適切なものであることを示すとともに、EHVRから得られた地震基盤までの地下構造を別途求められていた重力による基盤の深さに対応づけて、微動の基本ピーク振動数から深部の速度構造を推定する回帰式を求めた。このEHVRから得られた構造の重要な点は、地質境界は $V_s=1.3\text{km/s}$ の層境界に対応しており、 $V_s=3\text{km/s}$ 以上の地震基盤そのものではないこと、地質境界の前後で速度構造は漸増する傾向を示しており、それによって基本ピークにおける振幅が決定されている、ということである。さらに回帰式でMHVRの基本ピーク振動数から初期モデルを構築し、MHVRとEMR\_Gから計算した擬似EHVRを用いて微動観測データしかない盆地を横断する観測線上の速度構造を求めた。上述のEHVRから求めた速度構造と同じく、 $V_s=1.3\text{km/s}$ の層境界が重力異常から求められている地質境界とよく対応していることがわかる (Ito et al., 2019, Kawase et al., 2019, Ito et al., 2020)。

「テフラの成層構造の発達と風化に伴う物性変化を考慮した斜面崩壊発生場の予測 [課題番号:CTOC6]」は、山地の斜面に成層構造をもって堆積した未固結の降下火砕物

(以下、テフラという)が、強震動を誘因として高速で長距離を流動的に滑動する現象に着眼し、その発生場を予測する手法を開発することを目的とした。本年の研究により、テフラの給源火山の噴火史に基づき、山地の斜面におけるテフラの供給と再堆積のシミュレーションを行うプログラムを開発することができた。このモデルでは、火山学的に復元されたアイソパックマップに基づくテフラの降下供給量の空間分布を入力し、地形に依存したテフラの二次移動を計算する。このモデルを検証するため、熊本地震や胆振東部地震での発災地を対象に、地形条件の異なる多数地点で鉛直試孔の断面記載により実際のテフラ堆積量を測定したが、火山活動の静穏期に供給される風成物のローカルな集積が実際のテフラ累層の積分厚みに大きな影響を及ぼすことが分かった。そのため、単純な対比によるモデルの精度・確度の検証には至らなかった。テフラのもつ水理・力学的な物性についても、降下堆積以降の風化作用による透水性の減少や保水性の増大、あるいはせん断強度の低下といった斜面災害に関連する特性を定量化することができた。一方、定置後数千年程度の長い時間スケールでの、元素の溶脱やガラス基質の水和と粘土鉱物の沈殿といった化学・鉱物組成の変化が、どのような機構によって進行するのかについては、十分に明らかにすることはできなかった。粘土鉱物の定量法や生成機構にかかわる議論については分析手法の開発を含め前進があったものの、環境中での実際の水岩石反応や地中水文過程との関連については、不明な点が多く残った。テフラ累層中での長期間にわたる間隙水の不均質な透過とそれに伴う風化変質の追跡が課題である。特にアルミノケイ酸塩を母材として生成するアロフェンやハロイサイトといった粘土鉱物の生成がテフラの強度低下をもたらす過程を解明する必要がある。また、これらが、テフラ累層中に偏在することで、将来的にすべり面となりうる水理・力学的な不連続面を生じさせる過程をモデル化することが必要である。

「強震動のブラインド予測のための共用地盤モデルの構築に関する研究 [課題番号: CT0C07]」は、2021年3月第6回ESG国際シンポの強震動のブラインド予測で用いる熊本市のテストサイトに対する浅部深部統合地盤の共用1次元モデルを構築することを目的とした。第6回ESG国際シンポジウムで実施される2016年熊本地震の強震動のブラインド予測でのテストサイトでの浅部および深部地盤の暫定的な1次元速度構造モデルを作成した。テストサイトは、図4のLL1で示す熊本市蓮台寺付近に位置し、その周辺で微動のアレイ観測と表面波探査を実施した。微動観測では、浅部地盤および深部地盤のS波速度構造モデルを推定するために、1mから約1kmまでのサイズの二重三角形アレイを展開した。最も大きなアレイの観測点配置図を図4に示し、測定された上下成分の微動の例を図5上に示す。これらのデータからSPAC係数を求め、レイリー波の位相速度を推定した。また、強震計の近傍であるLL1地点では、浅部地盤を探査するために、表面波探査を約30mの測線で実施した。測線の両端の地表での上下加振により得られた上下成分の速度波形の例を図5下に示す。それらのデータからも周波数一波数スペクトル法によってレイリー波の位相速度を得た。テストサイトでは、浅部地盤のボーリング調査が別途実施されており、ボーリング調査の際に、テストサイトおよびその周辺地域の地形を視察し、現地での研究会において研究の進め方および共用地盤モデル作成方針について議論を行った。研究会で検討したモデル化の方針に沿って、既存の地下構造モデル情報を参考にして、これらの2つの位相速度から、浅部地盤と深部地盤の1次元S波速度構造モデルを作成した。このモデルをブラインド予測での共用地盤モデルの暫定版とし、上記のボー

リングの結果などを考慮して、浅部地盤の修正が必要となる可能性がある。さらに、共用地盤モデルの1次元仮定の妥当性について検討するために、テストサイト周辺において中小地震を対象にした臨時観測の準備を実施した。現在のところ、2020年3月に観測機器を設置し、臨時観測を開始する予定で観測場所の交渉を行っている。

「火山砕屑物からなる斜面の崩壊に対する地震とその前後の降雨の影響評価 [課題番号：CTOC08]」では、京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を用い、年度当初の計画通り模型実験を行った。予備実験として、新たに作成した遠心場の降雨発生装置の調整を行った。本実験ではマサ土を用いた斜面模型を作成し、加振の有無がその後の降雨時の斜面挙動に与える影響を検討した。計画では火山性砕屑物を使用する予定であったが、今年度は火山性砕屑物との比較のため、入手が容易であったマサ土を利用した。結果として、今年度実施した実験条件では降雨前の加振による斜面の変状が小さかったため、その後の降雨による斜面挙動に対して加振の明確な影響はみられなかった (Xu et al., 2020)。引き続き、事前降雨量、加振力、加振後の降雨量などをパラメータとして実験を実施し、地震とその前後の降雨が斜面の安定性に与える影響を定量的に評価する。

「活断層における地殻変動に伴う盆地形成過程から推定される盆地端部での基盤構造を考慮した地震動増幅特性に関する研究 [課題番号：CTOC09]」では、まず、既往の調査観測などから研究対象とすべき盆地を選定し、既往文献や微動観測などと活断層における地殻変動に伴う盆地形成過程を考慮し、盆地端部での基盤構造の形状や深さなどについて把握した。その結果、邑知潟平野を対象とすることとした。邑知潟平野は石川県中部に分布する邑知潟断層帯に接する平野である。邑知潟断層帯は今後30年の地震発生確率が日本の主な活断層の中ではやや高いグループに属しており、その規模は気象庁マグニチュード7.6程度と推定されている。このような場所では地盤の増幅特性を把握することが地震被害予測と対策のために非常に重要である。そして地盤増幅率を把握するためには地盤構造を推定することが必要である。そこで、邑知潟平野で常時微動観測を行い、その観測記録に基づき地盤構造を推定した。邑知潟平野の北西—南東方向に4測線、北東—南西方向に2測線、合計72地点で単点観測を行った。また、盆地中央の測線間にアレイを2つ配置し同時観測を実施した (図6)。単点においては、独立して30分ずつ観測した。アレイ観測によって得られたデータについて微動解析プログラムBIDOを用いて解析し、得られたレーリー波の位相分散曲線と微動の水平上下スペクトル比 (MHVR) から速度構造モデルを推定した。ただし、1100m以深の構造は地震調査研究推進本部の全国一次深部地盤データ (JIVSM) を利用した。単点観測地点については、MHVRのピーク振動数とピーク振幅を読み取り、アレイによる速度構造モデルを基準として地盤構造を推定した。図7に03-9地点におけるMHVRを観測と理論を比較して示す。図8に03測線 (図7赤色) で推定された地盤構造を示す。これにより、邑知潟平野南西部では北から南に向かって基盤が深くなっていることが確認された (中山・松島, 2020)。

## (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

「建物の応答を考慮した高精度地震情報配信手法の開発 [課題番号：CTOC10]」では、震源特性と伝播経路特性、立地地盤の特性、建物の諸元、さらには建物内の上層階と下層階での被害差などを考慮した高精度地震情報配信手法の開発を命題に、建物の応答予測としてより確度の高い情報を提供するために、A) 建物と地盤の動的相互作用のモード

特性変動としての評価，B) 揺れ継続時間の推定式の提案，に取り組んだ。得られた知見は次の通りである。

課題A：建築研究所が収集した建物内の強震記録を利用して，揺れ継続時間の推定を試みた。揺れ継続時間の定義は，能島の研究に従って，全パワーで正規化された累積パワー曲線において5～95%の占有時間(s)とする。能島では，K-NETの地表記録を用いて，モーメントマグニチュードと震源距離，揺れ継続時間の経験式を作成している。本研究では，この経験式を建物内の基礎部で記録された強震動記録に適用して，妥当性を検証した(図9)。その結果，建物によって経験式の整合性が良いものと悪いものがあり，その差は建物階数と相関があることが分かった。つまり，建物階数が高く固有周期が長い建物ほど，基礎部での揺れ継続時間が長くなる傾向にある。そのため，経験式に建物階数の項を追加し，新たな経験式を回帰分析で求めた。新しい経験式は，能島よりも誤差が小さく，建物基礎部での揺れ継続時間を良く表現できる。

課題B：建築研究所が長年に亘って地震観測記録を蓄積している建物から，建物内とその周辺地盤の地表面に記録がある6棟を選び，建物と地盤の動的相互作用の影響を調べた。いずれの建物もコンクリート系の6～8層の耐震構造で，最上階，基礎部および地表面の3ヵ所で加速度が記録されている。今年度は，解析モデルを事前にもたずに，振動記録だけで建物と地盤の動的相互作用がどこまで評価できるかを検討した。建物が剛構造で，観測点数は少ないことから，1次モードの等価線形特性を同定した。特に2011年東北地方太平洋沖地震の前震，本震，余震の記録を詳細に分析した。図10aに示す結果では，動的相互作用により建物の見かけの固有振動数は低下し，本震では低下率が-20%に達している建物が多かった。一方，図10bに示すモード減衰比は建物自体に比較して2～6%上昇していた。この変化には振幅依存性があり，それは大きい振動ほど顕著であった。建物の重量に関する情報があれば，得られたモード特性から，簡易モデルによって水平地盤ばねを評価する方法も提案した。現時点では，建物図面，地盤構造および地表観測点の情報が不足しており，その情報を入手して，分析を深めることが必要である。

### (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

「地震発生 of 切迫性を伝える災害情報モデル構築～北海道胆振東部地震の主要被災3町(厚真・むかわ・安平)における人的被害に関する全世帯調査を通して～[課題番号:CT0C11]」では，人的被害の発生メカニズムは複雑であり，地震動の大きさ，建物被害，室内散乱，避難様態，復旧状況など様々な要因が関わってくることを踏まえ，世帯に発生した一つ一つの事例を丹念に追跡し，シナリオ解析して行く必要があることから，これまでの当研究室で開発してきた調査法(アンケート震度調査，建物外観調査，アンケート個別被害調査，室内ヒアリング，精神的ストレス調査，等々)を，適所に応用した関連資料収集・分析を通し，上記問題に取り組んだ。発生が予想される地震の人的被害情報からその切迫性を伝える方法を提案することを目的に，2018年9月に発生した北海道胆振東部地震による人的被害を調査し，地域ごと・世帯ごとに異なる被害シナリオを明らかにすべく，以下の調査を実施した。調査対象は，北海道胆振東部地震の主要被災地である厚真町，むかわ町，安平町である。

#### (1) 被災エリアの建物被害外観調査

むかわ町と安平町について，特に建物被害が多く発生していた道道10号線沿いの商店

街を中心に，713棟を外観目視により破壊パターン・構造種別・建築年・構造要素別被害状況等を実態調査した。岡田・高井による木造建物破壊パターンと被害棟数との関係を図11に示す。全壊のほとんどが層崩壊に至らないD4レベルに留まっていた。建物被害の多くは専用住宅ではなく，耐震性に乏しい1階の壁が少ない店舗あるいは店舗併用住宅に集中している（岡田・中嶋，2019，岩崎・他，2019，中嶋・岡田，2019）。

## （2）3町の全世帯被害アンケート調査

計測震度7を観測したが，建物被害は小規模であった。その理由並びに人的被害との関係を探るべく，厚真町（2000世帯），むかわ町（4000世帯），安平町（4000世帯）の全世帯を対象に以下の項目についてアンケート調査を実施した。回収率は全体で22.7%であった。

- 1) 地域の揺れを算定するための震度調査：太田によるアンケート震度調査項目を踏襲した設問から求めた各町の平均震度と全壊率との関係を図12に示す。他の地震と比較してあるが，北海道は全国と比較して同震度での被害率は小さく「（1）被災エリアの建物被害外観調査」の結果を支持している。
- 2) 被災前の建物耐震診断：旧建設省住宅局監修・（財）日本建築防災協会編集『わが家の耐震診断と補強方法』にならい簡易的に耐震診断値を計算できるように，質問が設定されている。世帯ごとに求められた耐震診断値に，各町単位で対数正規確率分布を当てはめたものを図13に示す。3町とも住家の耐震性は全国平均よりも高く，住家被害率が小さかった理由を説明している。
- 3) 建物被害：アンケート回答者に自宅の被害状況を岡田・高井の破壊パターンから選択してもらった。「2）被災前の耐震診断値」との関係は図14のとおりである。耐震診断値が小さい建物ほど被害程度（D-Level）は大きいとの関係が見てとれ両者の関係は明快である。
- 4) 人的被害状況：負傷状態は災害医療分野で標準化されている外傷重症度指標（Injury Severity Score：ISS）で議論するため，居住者各人ごとに負傷部位とその程度を選択する方式を採用している。入院が必要なISS=9以上と判断された住人は20名で，全員が入院治療を受けていた。しかし負傷のほとんどはISSが小さく，未明午前3時に発生した地震にもかかわらず軽症に留まったケースが多いようである。
- 5) 居住者の被害回避行動状況：地震発生直前にいた室内環境及び居住者の状態，地震発生直前・最中・地震直後の行動について選択式質問群を設定している。未明にもかかわらず，回答者の20%近くが起床していた。その中での地震発生であり，意識的行動がとれなかった割合は40%であった。昼間に発生した他の地震では，危険回避できなかった住人の割合は25%程度であるので，夜間，しかも全道がブラックアウトのため暗闇での回避行動という状況にあった。
- 6) 室内散乱状況：そのような悪条件下にあっても，負傷率・負傷程度は小さい。その理由を以下の負傷世帯発生率から推測する。一般に負傷世帯発生率（Injury）は，居室人数nに対して負傷者xが0より多く発生する確率として求められ，家具転倒領域率（R）と負傷回避行動率（B）との間に以下の関係が成立する。

$$\text{Injury} = P_x(x > 0) = \{1 - P_x(x = 0)\} = \{1 - nC0R0 \{1 - (1 - R)^n\} (1 - B)\} = \{1 - (1 - R)^n\} (1 - B)$$

ここに，(1-B)は上記の非回避行動率である。個々の変数をアンケートから求める

と表1となる。一般に負傷者が発生する転倒領域率は50%以上であるので、当該地域の小ささが際立っている。アンケートより家具固定率を推計すると、38%となり、全国平均(37%)とほぼ同じで、特段に家具固定対策を率先しているわけではない。常時からの寝室における家具配置密度が低かったことが深夜においても負傷を軽度留めた大きな理由と考えられる(西嘉山・他, 2019)。

### (3) 3町の建物復旧状況調査

上記調査より、北海道で初めて計測震度7を観測した地震であったが、住居及び人的被害など個人世帯に与えた被害は軽度に留まった。しかし、復旧は大幅に遅れており思うようには地域復興は進んではいない。特に、被害が顕著であった商店は後継者がいないこともあり、ヒアリングによりこの地震を機会に閉店・廃業を決定した世帯が多いことが分かった。仮に家屋被害がD3程度の軽微被害であっても、解体撤去や他地域(主に札幌圏)への転出を選択するなど、地震後10ヶ月を経過しても未補修の世帯が安平町(75%)、むかわ町(73%)もあり、商店街の消滅、そして地方消滅への端緒となりかねない。

### (4) みつかった新たな課題総括

当該地域は北海道危機対策課により想定地震Mw7.16(気象庁マグニチュードM7.7程度以上)による被害想定がなされていた。実際に発生した胆振東部地震はM6.7であるが、それとの比較検証の結果(想定|実数)、揺れによる建物全壊棟数(1,661棟|462棟)、それによる死者数(36人|0人)、急傾斜地崩壊による建物全壊数(2棟|不明)、それによる死者数(0.2人|36人)、札幌市の液状化による建物全壊数(7棟|40棟以上)であり、土木系の想定被害はかなりの過小評価であった。これは、当該地震が地震動に加え前月から続いた多量の降雨を主な原因とする斜面崩壊の誘因複合化が重なったためである。地球温暖化が進む中、自然環境変化による異常気象と地震等の他の災害誘因との同時発生あるいは後続発生による複合災害が常態化しつつあること、それにより災害シナリオがインフレーション化する懸念があり、それを踏まえた災害対策が今後重要となっていくであろう。本編では触れてはいないが、かつては北海道には生息していなかったシロアリによる蟻害も発見された。自然環境変化は、災害の様相をも変えつつある。また、それらへの対策の早期順応が求められていることに気づくべきであろう。そして、少子高齢化現象という社会環境変化が加わり、特に地方において複合災害による脆弱さが際立つことが、当該地震により示唆された。すなわちこの変化は地域生業の後継者育成を阻害し、店舗のメンテナンス軽視を助長し災害発生を契機に復旧断念・廃業そして地方消滅の道を加速させる(岡田, 2019a, 岡田, 2019b, 岡田, 2019c, 岡田・他, 2020)。

「訪日外国人旅行者に対する地震・火山に関する情報提供と風評被害対策に関する事例分析 - 2018年胆振東部地震, 2018年大阪府北部地震, 2018年草津白根噴火, 2015年箱根山噴火を対象として - [課題番号: CT0C12]」では、1)訪日外国人旅行者を対象として、地震や火山噴火において、時間軸の中でどういった災害情報の提供時の課題、2)地震が発生した応急対応、火山の前兆時・噴火時については、大規模な宿泊施設を対象として、外国人旅行者に対してどのような情報が提供され、どういった課題が発生したのか、3)復旧復興期(または終息時)の風評被害の影響を軽減し、いち早く平常時に戻すための情報戦略について、また平常時の観測情報やハザードマップ等の情報提供について、アンケートやヒアリング調査により明らかにすることを目的とした。得られた主な成果は次の3点である。

## 1. 文献調査

主に東日本大震災以降の訪日外国人旅行者に対する災害情報提供に関するマニュアルやガイドライン、主な地震や火山噴火時の対応事例について資料や文献の収集を行った。時間軸の取り扱いや訪日外国人旅行者向けで留意すべき事項について整理を行った。

## 2. ヒアリング調査

訪日外国人旅行者に対する災害情報提供について、2018年胆振東部地震、2018年大阪北部地震、2015年箱根山噴火、2014年御嶽山噴火を対象として、北海道、札幌市、大阪府、神奈川県、箱根町、長野県にヒアリング調査を実施した。対応における課題と教訓について整理を行った。

## 3. 宿泊施設へのアンケート調査

訪日外国人旅行者を受け入れ旅行者への災害情報の提供を担う宿泊施設に対して、アンケート調査を実施した。2018年胆振東部地震と2018年大阪北部地震を対象とし、札幌市と大阪市内のホテルを対象に質問紙の郵送による調査を実施し、訪日外国人旅行者への情報提供の実態と課題を明らかにした。

以上の調査結果を踏まえて、今後の風評被害対策に関する知見をとりまとめた（南沢・秦，2019）。

「災害に備えた文化財等データベースの作成と防災マップの構築 [課題番号:CTOC13]」では、国や自治体が指定する文化財やこれに類する歴史資料、歴史的建造物の所在情報をデータベース化し、災害時のレスキューや保全活動を想定した所在マップを作成し、加えて文化財等所在マップの情報を地震調査研究推進本部の公開する全国地震動予測地図、産業技術総合研究所の公開する活断層データベースのほか、各自治体が作成・公開しているハザードマップなどの各種災害危険度情報を重ね合わせることで、文化財・史料に対して危惧される災害被害を予測するための災害危険度マップを作成し、将来の災害における文化財・史料に対する具体的な防災対策を計画・立案することに資することを目指した。

全国の指定文化財のうち、①国宝・国指定の文化財、②各都道府県の指定文化財の合計約35,000件の所在情報のうち、約20,000件についてデータ化を完了した。また、東北6県の市町村指定文化財の入力を完了した。これらのデータを文化財について、国宝・国指定、都道府県、市町村に加え種別（美術・工芸、建造物、歴史・考古資料、史跡、天然記念物）に分類し、Googleマップ上の文化財マップを構築した（図15）。また、これらの文化財マップの活用・運用について、2回の研究会を開催した。この文化財マップを活用し、2019年6月18日に発生した山形沖地震において震度6を観測した山形・新潟地域において、クライシスレスポンスサイトで公表された震度推定分布をGoogle Earth上で重ね合わせた文化財被害予測マップを作成し、新潟資料ネットの事務局が置かれている新潟大学へ提供した（図16）。また、2019年10月の台風19号被害においては、宮城県をはじめ、福島県・茨城県・長野県において水害の懸念される地域について、国土地理院が公開した浸水段彩図などを重ねあわせ、各地の文化財関係者や歴史資料ネットの関係者に提供した（図17）。さらに、宮城県においてはこの文化財危険度推定マップを活用して被災地の文化財被災状況の巡回調査を行うとともに、被災地の災害ゴミ集積所において、廃棄されている襖の下張り文書などを救出することができた。

また、Googleをプラットフォームとした場合の限界性から、eコミマップをプラット

フォームとした文化財マップの構築に着手し、現在東北6県分のデータベースの構築まで完了した。

### これまでの課題と今後の展望

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

拠点間連携共同研究の重点推進研究は、「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伝達までを一貫して行い、総括型研究で出た課題などを特定型研究において掘り下げ、その成果を総括型にフィードバックするとともに、さらに総括型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、重点推進研究を進めることと並行して、一般課題型研究で提案されて来ている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継続して行う。そのためには、実際に被害を受ける構造物や社会システムに直接携わっている工学、人文・社会科学の分野が理学分野の成果を咀嚼して活用出来るような体制を整える必要がある。つまり、観測計画において、これまでの理学的な観測網の維持だけではなく、工学、人文・社会科学に必要な観測計画の立案が必要になると思われる。

### 成果リスト

Tung-Cheng, H., K. Satake, S. Watada, I. E. Mulia, R. Y. Chuang, Y. Aoki (2019),

Source Analysis for the 2018 M7.5 Sulawesi Earthquake and Tsunami, AGU 2019 Fall Meeting, NH43D-0966

Ito, E., C. Cornou, H. Kawase, F. Nagashima (2019), Estimation of EMR correction factor in the Grenoble Basin; an attempt to establish a simple method to get earthquake HVR from microtremors, 2019 SSA Annual Meeting, 22-26 April 2019

Ito, E., H. Kawase, K. Nakano (2020), Empirical Horizontal Site Amplification Factor (HSAF) from Observed Earthquake Horizontal-to-Vertical Ratio (EHVR) and Vertical Amplification Correction Function (VACF), 2020 SSA Annual Meeting, 27-30 April 2020 (abstract投稿済, 発表はキャンセル)

岩崎祥太郎・中嶋唯貴・岡田成幸・植松武是・松島信一・佐伯琢磨, 2019, 2018年北海道胆振東部地震の被害調査 その2 被災中心地域の住家被害悉皆調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 21183

Kawase, H., F. Nagashima, E. Ito, C. Cornou (2019), S-wave velocity inversion based on microtremor HVR: Effectiveness of the EMR correction for the Grenoble basin, 7th ICEGE

- Kusakabe, R., K. Fujita, T. Ichimura, M. Hori, L. Wijerathne (2019), A Fast 3D Finite-Element Solver for Large-Scale Seismic Soil Liquefaction Analysis, In: Rodrigues J. et al. (eds) Computational Science - ICCS 2019, ICCS 2019, Lecture Notes in Computer Science, vol 11537, Springer, Cham
- 増田 峻介, Pierre Gehl, 松島 信一 (2020), 高知県南国市における南海トラフ地震による水道管網被害の病院機能への影響評価, 京都大学防災研究所令和元年度研究発表講演会, P17
- 南沢 修, 秦康 範 (2019), 自治体の火山担当者の育成及び火山災害経験者の活用, 日本災害情報学会, 第21回研究発表大会予稿集, B1-1
- Nagashima, F., H. Kawase (2019), Subsurface structure identification based on H/V ratio and surface to borehole ratio, 7th ICEGE
- Nagashima, F., Y. Mori, E. Ito, H. Kawase (2020), Velocity structure inversion based on diffuse field concept for earthquake, together with the earthquake-to-microtremor ratio (EMR) method for microtremors, 2020 SSA Annual Meeting (abstract投稿済, 発表はキャンセル)
- 中嶋 唯貴, 岡田 成幸 (2019), 2018 年北海道胆振東部地震の被害調査 ―その 3 安平町全世帯アンケート調査の基礎解析―, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 21184
- 中山 智貴, 松島 信一 (2020), 邑知潟平野における微動観測記録に基づく推定地盤構造, 京都大学防災研究所令和元年度研究発表講演会, B22
- 西嘉山 純一郎, 中嶋 唯貴, 岡田 成幸, 寺西 祐平 (2019), 2018年北海道胆振東部地震の被害調査 ―厚真町全世帯アンケート調査の基礎解析―, 地域安全学会梗概集, 41
- 岡田 成幸 (2019a), 北海道胆振東部地震にみる積雪寒冷地住宅の強靱さと新たな問題, 特集北海道胆振東部地震 (平成30年), 消防防災の科学, 138, 22-29
- 岡田 成幸 (2019b), 地震動による人的被害と室内被害軽減のための自助マネジメント, 平成30年北海道胆振東部地震を振り返り, 今後の減災・復興を考えるシンポジウム, 厚真町総合福祉センター
- 岡田 成幸 (2019c), 家庭でできる地震防災対策 ―北海道胆振東部地震からの教訓―, 北海道大学公開講座「北海道の地震と防災」
- 岡田 成幸, 中嶋 唯貴 (2019), 2018 年北海道胆振東部地震の被害調査 その 1 北海道全域のアンケート震度マクロ調査と被害概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 21182
- 岡田 成幸, 中嶋 唯貴, 松島 信一, 瀬瀬 一起 (2020), 地震による被災から回復までの個人世帯生活被災度時間関数の構築, 令和元年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D27
- 齊藤 隆志 (2020), 2016年熊本地震の崩壊発生初期過程と振動方向の関係, 京都大学防災研究所令和元年度研究発表講演会, A28
- Xu, J., R. Uzuoka, K. Ueda (2020), Centrifuge model tests on the dynamic response of slopes subjected to water storage at the toe area, 8th Japan-China Geotechnical Symposium
- Yong, A., F. Nagashima, E. Ito, H. Kawase, J. B. Fletcher, K. Hayashi, A. Martin, A. Grant, E. Yu, S-L. Chen (2020), Comparison of VS30 and f0 values by the single station earthquake-to-microtremor ratio (EMR) method to those by traditional multi-station array-based site characterization methods, 2020 SSA Annual Meeting, 27-30 April 2020 (abstract投稿済, 発表はキャンセル)

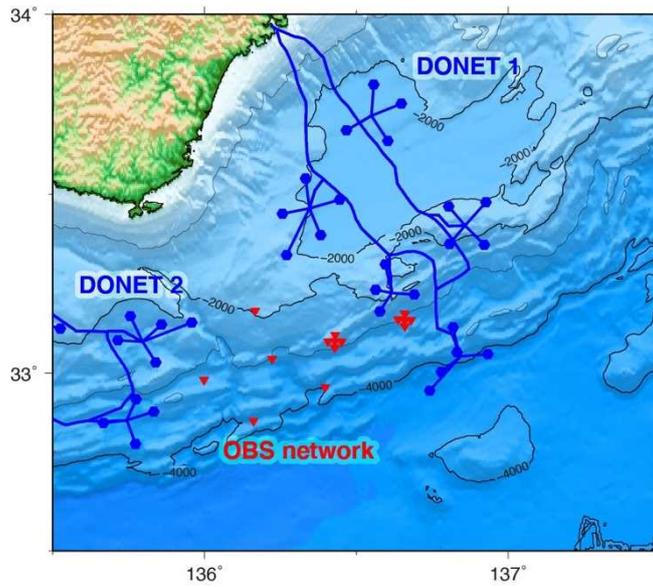


図 1 . 海底地震計観測網の配置図 [課題番号 : CT0C01]。

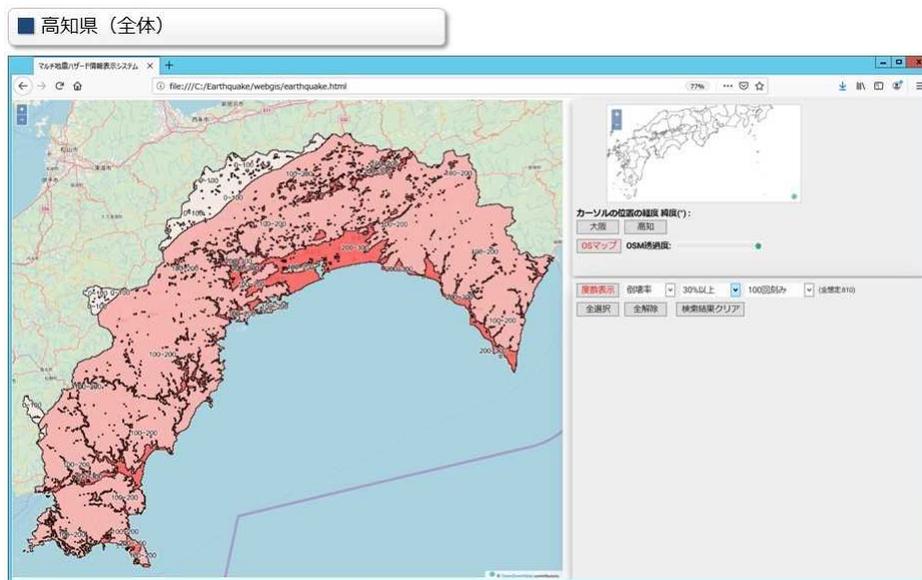
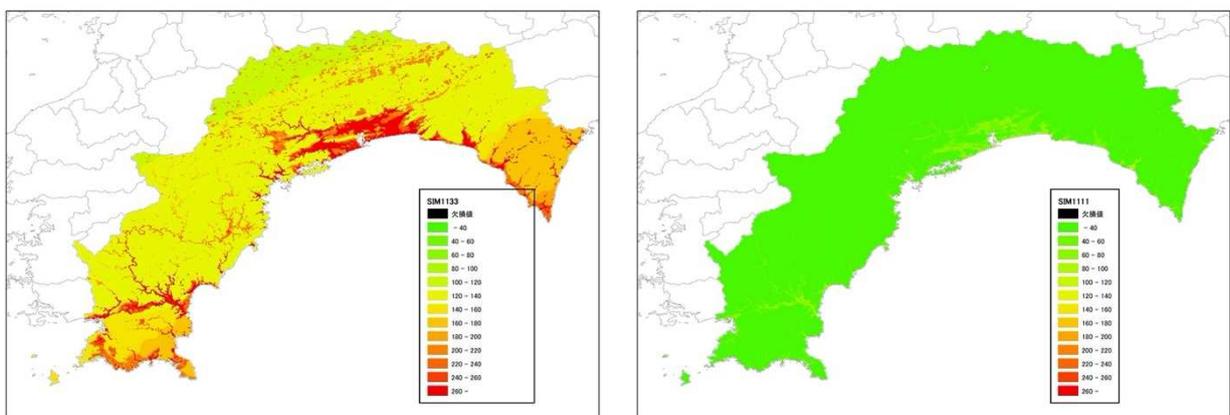


図 2 . マルチ地震ハザード情報表示システムの表示例 [課題番号 : CT0C01]。



(a)ばらつき大

(b)ばらつき小

図 3 . 高知県における、地震動予測・表層地盤増幅のばらつきの違いを考慮した地震動予測結果 (最大速度) [課題番号 : CT0C02] 。

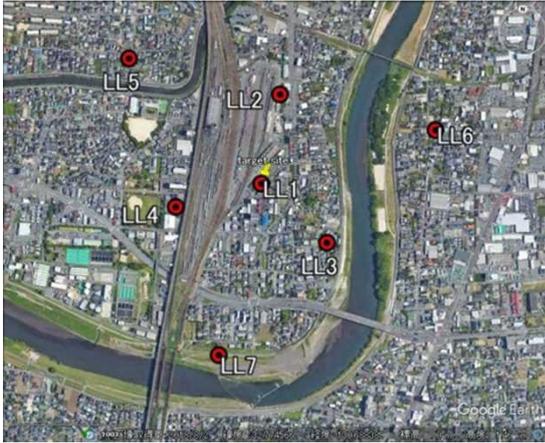


図4. テストサイト (LL1) と微動観測アレイの位置 [課題番号: CT0C07]。



図6. 邑知潟平野における微動観測点配置 (Google Mapに加筆) [課題番号: CT0C08]。

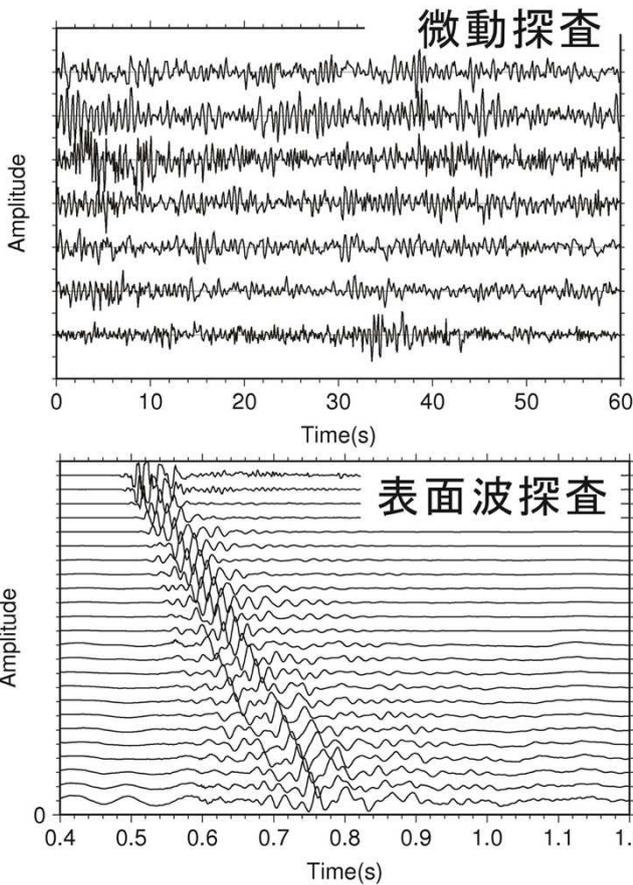


図5. 微動探査 (上) と表面波探査 (下) での上下成分の観測記録の例 [課題番号: CT0C07]。

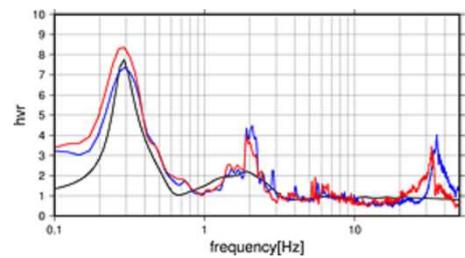


図7. 地点03-9における観測と理論のMHVR (青: 観測NS/UD, 赤: 観測EW/UD, 黒: 理論) [課題番号: CT0C08]。

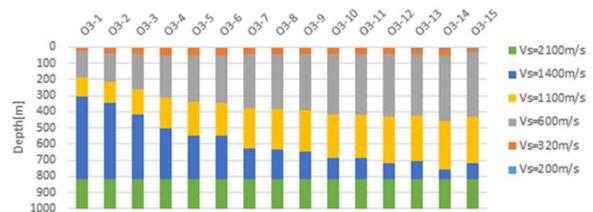


図8. 推定された測線03の地盤速度構造 [課題番号: CT0C08]。

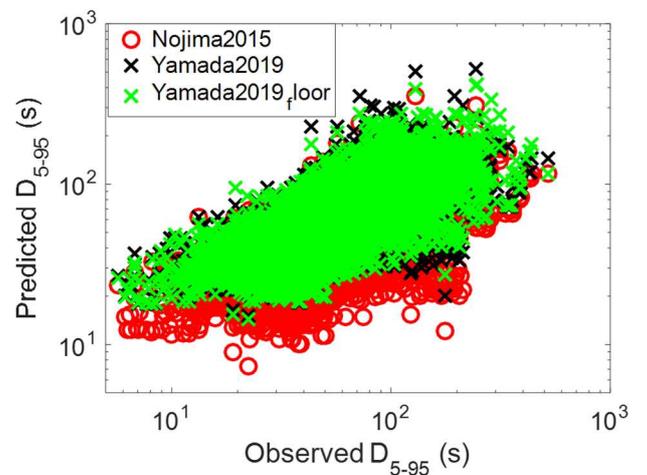
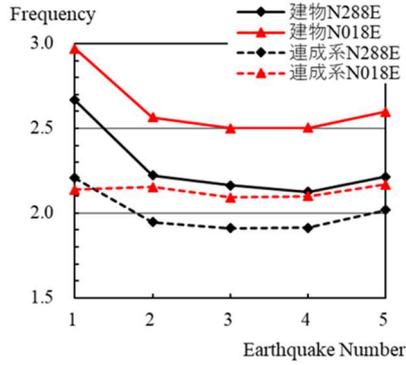
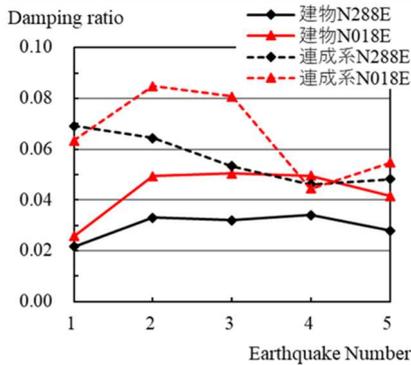


図9. 揺れ継続時間: 観測結果 (横軸) と3つの経験式による予測値 (縦軸) [課題番号: CT0C10]。



(a) 固有振動数



(b) 減衰定数

図10. 6層建物の1次モード特性の地震による変化 [課題番号: CT0C10]。

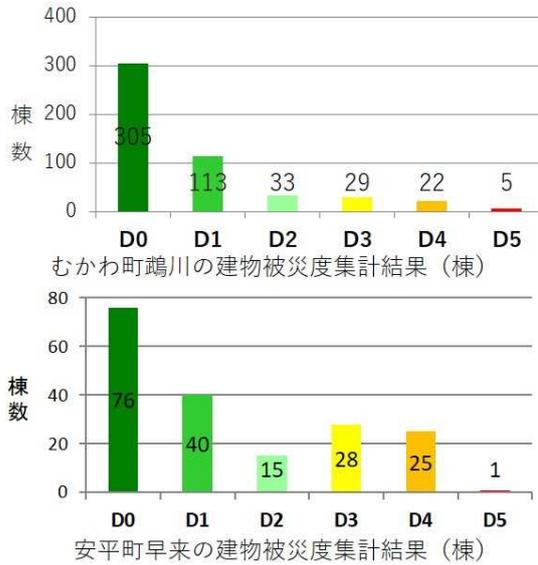


図11. 悉皆調査による木造住家被災度の集計結果 [課題番号: CT0C11]。

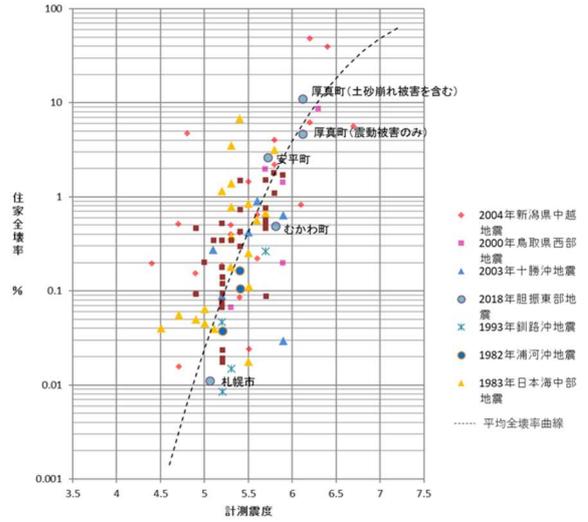


図12. 市町村単位でみた震度と住家全壊率の関係と全国比較 [課題番号: CT0C11]。

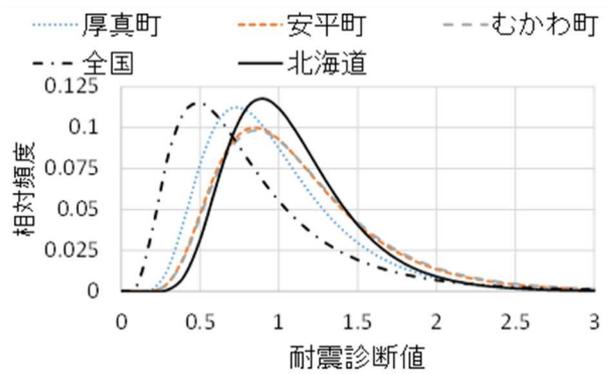


図13. アンケートによる住家耐震診断値の集計結果 (対数正規分布で近似) [課題番号: CT0C11]。

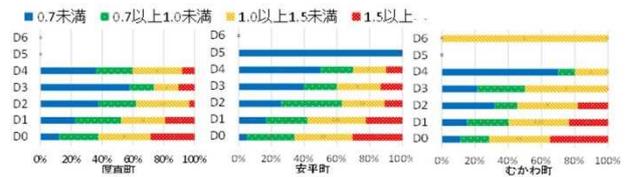


図14. 耐震診断値と建物被災度との関係 [課題番号: CT0C11]。

表1. 家具転倒領域率の推定結果 [課題番号: CT0C11]

	$I_{injury}$ [%]	$n$ [人/フロア]	$I-B$ [%]	$R$ [%]
厚真町	18.8	1.661	46.1	27.1
安平町	12.4	1.775	36.6	20.9
むかわ町	23.3	1.876	40.6	36.6

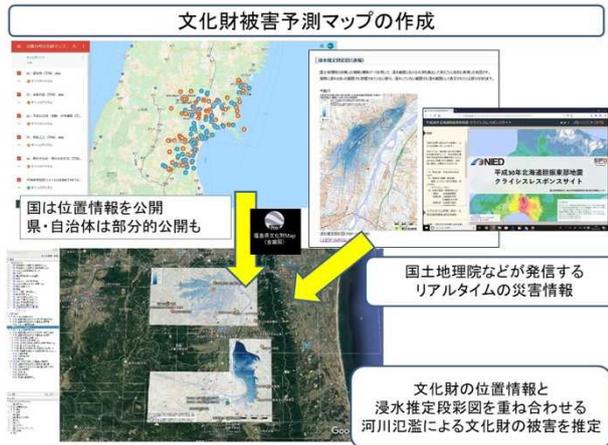


図15. 文化財マップの構成 [課題番号：CTOC13]。



図16. 2019年6月山形沖地震に対応した文化財マップ [課題番号：CTOC13]。



図17. 2019年10月台風19号に対応した文化財マップ [課題番号：CTOC13]。

