

南海トラフ沿いの巨大地震

「南海トラフ沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー 伊藤喜宏
(京都大学防災研究所)

1. 目的

内閣府および地震調査推進本部により南海トラフ沿いの巨大地震の地震シナリオおよび強震動予測はすでに実施され、公開されている。しかしながら、これまでに示された地震シナリオおよび強震動予測は過去の観測記録および歴史資料に基づいて構築されたものであり、現状の測地・地震観測により得られた知見を十分反映したものでない。南海トラフ巨大地震総合研究グループ（以下、南海総合G）では、南海トラフ巨大地震に関連した50課題の成果に基づき、地震・測地観測網で得られたプレート間固着やスロー地震の知見に基づき南海トラフ沿いの巨大地震の広帯域震源モデルを構築する。その上で地震波および津波の伝播モデルに基づき、西南日本地域の強震動および津波浸水モデルを提示することを目的とする。

2. 拠点間連携のフレームワークの利用

前5カ年計画の地震研究所—防災研究所拠点間連携（H26-H30）では、地震時のリスク評価の高精度化を目的として、震源モデル・シナリオ、地震波速度・減衰構造、浅部地盤応答、および構造物の脆弱性の各モデルを総合的に考慮したリスク評価の手法の提案および高精度化に関する研究が進められた。特に各課題が提案する複数の最適なモデルを組み合わせて不確実性を含む地震リスク評価の計算手法が提案された。南海総合Gでは、前計画の拠点間連携で得られた成果を取り入れて、各課題で得られた成果を実際に使用して、震源モデル・シナリオ—地震波伝播—工学的基盤までの地震動を計算することを目的とする。その上で、必要なアウトプットを関連課題の要請に基づき提供することとする。前5カ年計画の拠点間連携で研究対象とした大阪府および高知県について、浅部地盤応答も含めた地震動を求めて、構造物の脆弱性評価や地すべりのリスク評価などに活用する。

3. 震源モデル・シナリオの高度化に向けた今年度の取り組み

今年度は地下構造、特にプレート形状に関する研究の進捗状況について情報を収集した。その上で西南日本深部のプレート境界モデルについては関連課題（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI02]）から、さらに浅部については海洋研究開発機構による構造探査に基づくモデルの構築状況を調べた（海洋研究開発機構 [課題番号：JAMS01]）。

従来陸海域で実施された地震波構造探査に基づくモデルや、レシーバ関数、地震波トモグラフィや、それらをコンパイルして得られたプレート境界モデルが公開されており、コミュニティ内で利用されている。特に全国1次地下構造モデル（JIVSM）は、地震調査研究推進本部により作成され、防災科研では地震ハザードステーション（J-SHIS）で公開する全国地震動予測地図の作成で利用している。本観測研究計画において、課題（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI02]）でも深部におけるプレート境界モデルの調査が実

施されている。また、西南日本深部のプレート境界モデルがリニア地震計アレイ観測記録に基づくレシーバ関数解析により構築されつつある。結果として、スラブ上面に相当する低速度層上面からの変換波が四国側から中国地方中央部まで明瞭にイメージされた。また、その下部には海洋モホ面に相当する高速度層上面からの変換波が、同様に中国地方中央部までイメージされた。結果として、四国中央部から瀬戸内海、中国地方中央部まで低角に沈み込むフィリピン海プレートが確認された。

深部のスラブ形状について従来の結果と比較する。全体の傾向は一致するものの、細かく見ると、いくつかの地域において、その深度についていくつかの相違点を見出された。例えば、四国西部の足摺岬から八幡浜に至るプレートの沈み込み方向にほぼ並行な側線では、深部（八幡浜の直下）で従来のモデルよりもプレートの沈み込み角が大きい。また徳島から八幡浜に至る沈み込み方向にほぼ直交する側線では徳島の直下付近でプレート上面の深さが従来のモデルと比べて 5km 以上浅い。特に室戸岬から倉敷に至る側線（プレートの沈み込み方向にほぼ並行）では、プレート上面の深さが従来のモデルと比べて 10km 以上浅い。一方、海側、つまり沈み込み帯浅部では、従来のモデルと大きな差異は見出されていない。

4. 震源モデル・シナリオの高度化へのインパクトと今後の展望

プレート上面の深さが従来のモデルとの差が大きい領域は、南海トラフ巨大地震の地震時すべり域や強震動生成域から離れているため、強震動の計算時にはそれほど影響がないかもしれない。一方で、プレート境界モデルに依存するプレート間固着の推定や、地震発生シミュレーションの計算時には、これらの違いが影響する可能性を今後検討する必要がある。

フィリピン海プレートの沈み込み帯の浅部について、海洋研究開発機構がプレート境界を含む地下構造のモデルを構築している（海洋研究開発機構 [課題番号: JAMS01]）。その実施状況は、防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクトの成果をベースにして、これまでにいくつかの会議等で報告されている。強震動の長期評価と関連したプロジェクトと連携し、地震調査本部が公開する JIVSM に海域モデルを統合した地下構造モデルが構築される。この統合モデルの有用性は、本観測研究計画でも十分に認識されている。本研究観測計画の成果も、統合モデルの構築に貢献できるよう働きかけると共に今後も引き続き情報を収集していく必要がある。

成果リスト

特になし

首都直下地震

「首都直下地震」総合研究グループリーダー 酒井慎一
(東京大学情報学環・東京大学地震研究所)

1. はじめに

首都直下地震に関しては『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）の推進について（建議）』の中で「分野横断で取り組む総合的研究」の一つとして位置づけられている。この総合研究は前計画から始まった新しいカテゴリで「地震学・火山学的な見地のみならず災害科学的な重要性も鑑みて、複数の実施項目を横断する総合的な研究として推進する。総合的な研究を通して、専門分野の枠を超えた学際連携を現状よりも一層進め、地震学・火山学の成果を災害の軽減につなげるための方策を提案する。」とされ、他の8つの計画部会とは違った観点から結び付けた体制で研究が進められている。

第5章「研究を推進するための体制の整備」（2）分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制の項では「首都直下地震は、一旦発生すれば首都機能や我が国の経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高い。想定される多様な震源について、発生メカニズムや発生可能性を評価する研究を進める。詳細な地盤構造や多様な震源モデルによる揺れの予測に、稠密観測データや地震史料の情報を反映し、新たな地震動予測手法の開発を目指す。また、複雑な地殻構造を用いた大規模数値シミュレーションに基づいて、地震動を高精度に予測する手法を高度化する。さらに、各項目の研究成果を有機的に結び付け、高度に集約化された社会環境下での防災リテラシー向上に資する総合的研究を実施する。」と書かれ、首都直下地震ならではの総合的な成果が期待されている。

しかし、地震・火山現象の解明のための研究、地震・火山噴火の予測のための研究、地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究、地震・火山噴火に対する防災リテラシーの向上のための研究の4分野に、広くまたがるような総合的な研究課題は存在しない。そのため今年度は、それぞれの研究課題の中から首都直下地震に関連したものを集め、それら同士をつなげていくことを本総合研究グループの目標とした。

2. 令和3年度の成果

産業技術総合研究所は、房総半島南部の海岸段丘の年代を再評価し、過去の関東地震の発生年代と再来間隔について復元した。また伊豆半島東部における元禄地震の津波と地殻変動について検討を行った（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST08]）。

東北大学は、スラブから脱水した水と地震活動の関わりを調べるため、茨城県南西部下で発生するスラブ内の地震クラスターとその直上で活動するプレート境界地震、上盤プレート内クラスター周辺のP波減衰の時間変化の抽出を試みた。直上のMeS0-

net観測点の地震波形をスペクトル比法で解析した結果、スラブ内での減衰が1~1.5年間隔で増加する傾向が見られた。さらに、それより0.2~0.3年の位相遅れでプレート境界地震活動の活発化、上盤プレート内の減衰の増加も認められた。これら3つの現象に時間的な相関があることから、約1年周期で活発化するプレート境界のクラスタ活動の背景には、数ヶ月先行して満水期を迎えたスラブ内流体のプレート境界への排出が起こっている可能性がある（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_06]）。

東京大学地震研究所では、長周期地震動と津波の即時予測に向けて、K-NET、KiK-net強震観測データの時間反転逆伝播計算（DA-TRI）による震源モデルの即時推定手法の開発を継続して進めてきた。観測波形データと地震波伝播シミュレーションを同化しながら、発震時に時間を遡って地震波逆伝播計算を進めることで、陸域の観測網から離れた海溝型地震や、深い地震であっても高い解像度での震源イメージングを確認した。時・空間的に広がる大地震の断層すべり分布の推定に向けて、P波とS波エネルギーの相関に基づく震源イメージングの高分解能化を進めた。KiK-net強震観測記録を用いて、2008年及び2011年の茨城県沖の地震の断層すべり分布の即時推定実験を行い、100秒間の強震波形記録の地震波逆伝播計算により、太平洋プレート上面の断層すべり分布を推定することができた。得られた結果は、近地強震記録と遠地波形を用いた既往の震源インバージョン結果と良く対応した。また、陸域のKiK-net観測に加えて、S-net海域観測網による地震観測データの有効性を数値実験により確認した（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_14]）。

また、東京大学地震研究所は、強震動による地震災害誘因の分析のため、堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースの増強を引き続き行った。また、2021年10月7日に発生した千葉県北西部の地震（Mw5.9）の首都圏で観測された強震記録を限定公開した。この地震は、2005年7月23日に発生した千葉県北西部の地震（Mw5.9）との類似性が指摘されているため、観測記録の相関係数を計算し、2011年東北地方太平洋沖地震をはじめとする大振幅地震動による地盤増幅変化の影響があるかどうかを見積もった（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_16]）。

一方、東京大学地震研究所は、現代の地震観測で得られる知見を史料の分析結果と結びつけ、歴史地震の震度の検証および定量化を目標として、2020年9月から根津周辺における稠密観測を継続している。安政江戸地震の揺れの検証を目的のひとつとし、観測点は同地震の被害史料の分析から被害場所が特定できた地点とその近隣地点にした。観測点を徐々に追加していき、20地点にまで増やしたが、2022年2月時点では17点で観測をしている。これまでに文京区本郷で震度1以上を記録した地震は51回あり、それらのデータを用いた暫定的な結果では、観測点ごとの卓越周波数や振幅の違いが確認できた。また、MeS0-net等の観測記録を用いて首都圏に発生した地震の処理を行った（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_15]）。

東京大学情報学環は、地震・火山災害の発生確率、被害想定など災害情報に関する

調査を実施・分析した。地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化、災害情報が災害軽減に有効に活用されるための情報コミュニケーション手法を開発することを目的として、地震動予測地図において、これを分析するものである。

これまで「30年確率」で示されていた地震発生確率の表現について、全体的に見ると「10～20年確率」で示した場合より、対策の必要性の意識を高めることがわかった。また年齢が高いほど、この意識を高める年確率が短くなる。この意識は、居住地によっても違い、地震発生確率が相対的に低い日本海沿岸地域の住民において対策の意識が低かった。この結果は、地震動予測地図に示される地震の発生確率について、対策の必要性を示す相手の属性（年代や居住地）を考慮した表現を用いることで、より効果的に意識を高められる可能性を示している。地震の発生確率情報など災害に関する科学的知見の成果を公表する際には、科学的表現の正確性のみならず受け手の受け止め方を考慮し、最大の効果を発揮するような情報デザインが、地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化、災害情報が災害軽減に有効に活用されるための情報コミュニケーション手法として求められることがわかった（東京大学情報学環〔課題番号：III_01〕）。

そのほか、2022年1月11日に首都直下地震に関する意見交換会をオンラインで行った。関連する課題の研究者たち6名が集まり、それぞれの研究成果を紹介した。今後の総合研究としての研究計画の進め方を議論し、まずは、連携できる課題同士を探るところから始めることとしたが、コロナ禍で上手くいかない点もあったことが報告された。

3. 今後の展望

首都直下地震が発生した場合には、我が国の首都機能や経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高いことから、分野横断的に取り組む総合的な研究として推進するテーマの一つとされてきた。関連があると思われる課題で、総合研究グループが構成されているため、それぞれの課題は独立している。そのため、課題ごとの成果があったとしても、その成果は総合研究グループに対する関与が薄く、何をこのグループの成果とすべきかが曖昧である。網羅的に構成された研究課題群ではないので、首都直下地震に対して全体を通したストーリーを描けず、成果の寄与が不十分な研究課題に対する対応ができない体制であった。次期計画を策定する際には、総合研究グループとしての目標を掲げ、何をどこまで達成するのかを明確にし、それを実行するための課題群とそれらを運用する体制づくりが必要ではないだろうか。

成果リスト

特になし

千島海溝沿いの巨大地震

「千島海溝沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー 高橋浩晃
(北海道大学大学院理学研究院)

1. はじめに

太平洋プレートが沈み込む千島海溝南部では、縄文海進以降に津波堆積物が追跡可能である約 6,500 年間に繰り返し巨大津波が発生していることが確認されている。国の地震調査研究推進本部の長期評価では、M8.8 程度以上の超巨大地震の平均発生間隔は約 340-380 年、最新発生時期は 17 世紀前半、30 年間発生確率が 7~40%と発生が切迫していると評価している。国の中央防災会議（内閣府）は、2021 年 12 月 21 日に最大クラスの地震による被害想定を、2022 年 3 月 22 日にはその対策についての報告書を公表した。千島海溝モデルの場合、太平洋沿岸部で最大震度 7 の揺れとなり、地震発生後 20~30 分で高さ 20m を超える津波が到達する結果、最大約 10 万人の死者が発生し、その大半は津波によるものとした。また、低体温症要対処者数が 2 万人に上ることが明らかになった。一方、避難の迅速化や、津波緊急避難施設の活用・整備、建物の耐震化を進めることで、死者数が約 1 万 9 千人に減少するともした。加えて、M7 クラス以上の地震が発生した場合には、M9 クラスの巨大地震への注意を促す情報発表を行うこととした。

総合研究グループでは、千島海溝沿いの巨大地震をターゲットとした課題の成果に加え、建議研究で行われている様々な課題から得られるハザード評価手法や防災リテラシー研究の成果を有機的かつ総合的に取り入れることで、超巨大地震による地震動や津波による災害の軽減に必要な技術や評価手法の開発を進めている。リスク軽減に向け、津波被害の最小化に向けた津波避難の定量的な評価、リスク評価に必要な予測の振幅を内包した地震動と津波浸水の事前予測手法の高度化、津波発生ポテンシャル評価や地殻活動評価を支える観測やデータ解析、古地震や古津波の様相を記録する津波堆積物や遺跡液状痕跡データなど、関係課題の成果の統合化から地域の防災施策を支えるアウトプットの創出を目指す。

北海道太平洋沿岸部では、津波避難施設の整備や指定が進められているが、今般の国や道の被害想定をうけ、各市町で施設整備等の検討が加速すると見られる。一方、津波緊急避難場所は、収容人数や施設の空間密度だけではその機能を的確に評価することはできず、施設への津波到達時刻や周辺人口、人流速度などを考慮した評価手法を確立することが求められている。加えて、地震防災対策は長期的な取り組みが必要であり、人口減少下の厳しい自治体財源の中で、長中期的な財政安定化を見据えた最大効率化の要件を満たす必要がある。特に、北海道は人口の分散・低密度や広い土地という他地域とは異なる地理的特徴があり、徒歩原則による避難場所への移動を基本としながら、車利用避難のリスク・ベネフィットを評価することで、死者数最小化と財政負担最小化の両条件をクリアするモデルを検討することが必要である。

社会的な境界条件のもとにリスク評価を行うには、津波や地震動などハザード予測の振幅の情報に発生確率が加味された被害想定が必要となる。特に、津波浸水の時空間的なデータは、避難のリードタイムを検討する上で決定的な指標であり、起こり得る最悪ケースと、確率的に最も起こり得るケースとの差異を評価することが、避難困難区域

での施設整備や避難計画の重要な指標となる。また、中央防災会議の被害想定では、低体温症対策が死者数に大きく影響する可能性が示されたが、大量に発生する要対処者への対策はこれからの大きな課題である。現実的には、発災直後の医療アクセスは困難であることから、要対処者数を地区別に推計したうえで、自治体の地区ごとの備蓄体制に反映させる必要があり、きめ細かな検討が必要となってくる。

2. 令和3年度の主な成果

津波避難ビルなど、安全な高さまで階段を上る必要がある津波緊急避難場所の整備を行うには、津波到達までに浸水深よりも高層階に物理的に移動できる実人数を評価する必要がある。釧路市中心部にある収容人数1,000名の大規模な津波緊急避難ビルを対象に、マルチ・エージェント・シミュレーションを用いた避難行動分析を実施した。津波到達時（地震発生後30分）までに安全な階まで階段を上れるのは、ビルに到着した避難住民の3分の1程度であることが明らかにされた。津波緊急避難施設に物理的に十分な収容能力があり、津波到達時間までに住民が施設の前まで到着できたとしても、安全階まで避難できない住民が相当数出る可能性を示した重要な結果である。避難困難度の評価には、津波避難場所までの距離に加え、避難施設が持つ特性を評価する必要がある（北海道大学[課題番号：HKD_07]）。また、津波避難訓練時の災害情報伝達手段についてアンケート調査を実施し、エリアメールよりも、従来型の屋外スピーカーや個別受信機により避難スイッチが入った事例が多いことが明らかにされた。近年、エリアメールでの災害情報伝達が一般的であるが、屋外スピーカーの有用性が再確認された興味深い結果である（北海道立総合研究機構 [課題番号：HR0_02]）。

道路網が複雑である市街地での津波緊急避難施設への避難経路の検討や、施設の耐津波性能設計の仕様を検討する上で、防潮堤を越流した津波の市街地での浸水拡大パターンや、流速・流量・浸水深等の動的パラメータの検討を進める必要があるが、現状では実測データが限られている。ライブカメラから得られる動画映像は、2次元空間に配置された各ピクセルの輝度値の時系列変化データと捉えることが出来る。市街地に設置されているテレビ局の天気情報用ライブカメラを用い、2011年東北地方太平洋沖地震時に釧路市で撮影された映像を解析し、護岸に沿った津波水位の時間変化を抽出することに成功した（北海道大学[課題番号：HKD_09]）。

津波の死者を減らす上で、低体温症対策が極めて重要なパラメータであることが国の被害想定から示された。全世界の沈み込み帯を対象とし、被害津波を引き起こした過去の地震発生履歴、都市分布と人口、津波浸水予測範囲、各都市の月平均気温から、低体温症が発生する可能性を調査し、世界の中で北日本の都市のみが高い低体温症発生ポテンシャルを有することを明らかにした。津波災害における低体温症対策は日本独特の課題であるとともに、北日本の太平洋側・日本海側の都市部での対策の必要性が定量的に示された（Ohshiro et al. 2022）。

プレート間のすべり遅れの空間分布は、津波励起の空間特性に関係している可能性があり、津波浸水事前予測の観点で重要な情報である。令和元年度に根室沖に設置された3か所の海底地殻変動基準局において3回目の測定が実施され、予察的な変位ベクトルの推定が行われた。海溝軸付近のプレート境界浅部まで強く固着している可能性が示唆されたものの、観測時に海水温擾乱が見られ測定誤差が大きな結果となったため、誤

差評価を含めた変位ベクトルの評価は来年度以降のデータ蓄積を待つ必要がある（東北大学災害科学国際研究所[課題番号:IRID02]）（東京大学地震研究所[課題番号:ERI_05]）（北海道大学[課題番号:HKD_09]）。

十勝地方沿岸部において、珪藻等を用いて淡水・汽水・海水環境の時間変化から、過去約1,000年間の地殻上下変動時系列を明らかにする調査が継続された。標高の違う3地点間の比較を行うことで信頼性の向上が図られた。地震前には沈降が継続し、地震時の変動量は小さいこと、地震後に時間をかけて隆起が継続し、その後、沈降に転じて現在に至るといふ、地殻上下変動時系列の特徴が複数の地点で確認された（北海道大学[課題番号:HKD_01]）。

超巨大地震発生時の地震動による被害予測は、建物崩壊による脱出困難者を少なくし津波避難時間を確保する上で重要な課題である。根室沖で発生した地震を用いて、コーナー周波数と震源の深さや地震モーメントの比較がなされたが、プレート境界付近での地震活動が低く、解析に利用できる地震数が少ないため、明瞭な震源スペクトルの特徴の抽出には至っていない。サンプル数を増やすため、より小さな地震を用いた解析にも着手する予定である。遺跡の液状化痕跡からは、過去の強震動の履歴が得られる可能性がある。北海道東部の遺跡痕跡からは、過去約10,000万年間に最大で8回程度の痕跡が認められた。これは、津波堆積物から得られる過去6,500年間の津波発生回数に比べ半数程度である。超巨大地震が起こす地震動が、液状化を起こす割合が小さい可能性を示唆している（北海道大学[課題番号:HKD_09]）。

十勝沖の地下構造や地殻活動の時空間変化の検出を目指した構造探査データの解析や長期海底地震観測が実施された。十勝沖で見られる浅部微動の活動間隔が、2003年十勝沖地震の余効すべり速度の変化と相関している特徴が見られた。また、地震活動や微動活動に同期して、自己相関関数が増加している可能性が示唆された。これらの現象は、プレート境界の状態変化を反映している可能性があり、地殻活動モニタリングに利用できる可能性がある（東京大学地震研究所[課題番号:ERI_05]）。

地域防災力の向上を目指し、気象台に協力し自治体職員向けの津波警報に関する勉強会や、自治体のハザードマップ作製支援をオンラインで実施した。昨年来、オンラインでの講習が一般化してきており、対面開催に比べ多くの自治体関係者の参加が見られている。また、事前防災対策に加え、被災後の復旧復興を見据えたトータルな対策を目指した、事前復興に関する情報交換会を北海道庁や北海道開発局の協力のうえ実施した。一般住民を対象とした総合研究の成果を報告するシンポジウムをオンラインで開催し、180名を超える参加者があり、千島海溝沿いの巨大地震への関心の高さが伺われた（北海道大学[課題番号:HKD_09]）。

3. これまでの課題と今後の展望

中央防災会議の報告が発表されたことで、甚大な人的被害の発生可能性が具体的に示された。これを受けて、各市町では津波避難タワーなどの緊急避難施設整備に向けた検討を進めている。浸水予測範囲と人口分布データからは、相当数の避難施設の新設が必要となる地域も予想されるが、財政状況や利用可能な土地の面から、すべての住民を収容できる施設の整備は事実上難しい地域も出てくると考えられる。

津波の到達時間は地区ごとに異なることから、避難施設内移動を含めた避難に要する

時間をある程度定量的に検討することで、たとえば、津波到達時間が速い場合には小規模分散型、到達まである程度時間がある場合には大規模集中型施設を検討するなど、より効果的な避難施設の配置の検討に必要な知見が得られる可能性がある。また、津波避難施設の整備が難しいというえ徒歩避難が困難な場合や、災害対策基本法の改正で努力義務とされた要支援者の個別避難計画を考えた場合、車避難の可能性を具体的に検討する必要がある。これまで行われてきた避難シミュレーション技術を応用し、徒歩避難と車避難の避難方法に加え、避難施設の特性或季節ごとの環境変化や要支援者の人口動態パラメータを組み合わせた検討を行うことが望ましい。

M7以上の地震が発生した場合に発表される後発地震への注意を促す情報は、地殻活動モニタリングに深く関係する課題であり、地震活動や地殻変動データ等の観測データを活用する方策を今後検討すべきである。余効すべり速度に関係すると考えられる浅部微動活動の時間変化は、プレート境界の状態変化を示唆する可能性のある興味深い現象であり、長期的な活動状況をモニタリングしていくことが望ましい。遺跡痕跡から抽出された液状化痕跡の回数が津波堆積物より少ないことは、プレート境界の超巨大地震の震源特性を示す可能性があり、実データを用いた震源スペクトルの特徴との比較検討が望まれる。

成果リスト

Oshiro, K., Y. Tanioka, J. Schweizer, K. Zafren, H. Brugger, P. Paal, 2022, Prevention of Hypothermia in the Aftermath of Natural Disasters in Areas at Risk of Avalanches, Earthquakes, Tsunamis and Floods, International Journal of Environmental Research and Public Health, doi: 19,1098,10.3390/ijerph19031098.

桜島大規模火山噴火

「桜島大規模火山噴火」総合研究グループリーダー 井口正人
(京都大学防災研究所)

活発な噴火活動を60年以上続け、今後、大規模噴火の発生が予想される桜島を対象に、各研究項目間で緊密な連携と成果の共有を図り、住民避難を視野に入れた総合的研究を推進する。観測研究を通じて、マグマの動きとマグマ供給系への理解を深め火山活動推移モデルを高度化することで、噴火発生予測研究を進展させる。噴火発生前の規模の予測と、噴火発生直後の噴出物の把握を即時的に行うことで災害予測研究を進める。災害予測に基づき、住民への情報伝達などの火山災害情報に関する研究と、避難や交通網の復旧などの対策に資する研究を行う。他の火山における類似研究と連携し、都市、中山間地域、離島などの地理的、社会的環境による対策の違いなど幅広い研究を目指す。本総合研究グループには異なる部会に属する27の研究課題が参画している。令和3年度も、12月に対面とオンラインによるハイブリッド研究集会を開催し、グループに参画している課題の成果から大規模噴火研究に資する知見を取りまとめた。

桜島ではマグマ蓄積が進行していると考えられる始良カルデラの隆起と膨張が観測されている。始良カルデラの比高は、1914年に発生した大正噴火直前のレベルに近づいており、今後、同等規模の噴火発生が懸念される。大規模噴火に伴い、桜島島内では以前から島外避難の対策の高度化が進められてきた。桜島からの島外避難に加え、鹿児島市街地側の広域避難のための対策も進められようとしている。幸いなことに21世紀の我が国における住民の避難を要する噴火は、2000年に発生した有珠山噴火及び三宅島噴火、2011年霧島新燃岳噴火、2015年口永良部島噴火、2015年桜島群発地震にとどまっており、最大の避難人口は2000年有珠山噴火の1万6千人であった。一方、世界では令和3年度だけでも、セントビンセント島のLa Soufriere火山、コンゴのNyiragongo火山、カナリア諸島ラ・パルマ島のCumbre Vieja火山、インドネシアのSemeru火山、トンガのHunga Tonga-Hunga Ha'apai火山（以下、HTHH火山）において噴火が発生し、数千人から数十万人の住民が避難した。桜島の大規模噴火では鹿児島市は38万人の住民の避難を想定しており、まさに世界クラスの噴火に対する予測と災害研究が必要とされている。

La Soufriere火山やCumbre Vieja火山では有感となる火山構造性地震が多発した。La Soufriere火山では、M4級の火山構造性地震が避難の意思決定のトリガーとなっているし、Cumbre Vieja火山の火山構造性地震は深部から溶岩を流出した火口に向かって見事に移動している。桜島の大正噴火に前駆して有感を含む火山構造性地震が群発し、噴火開始から8時間後にはM7級の地震を発生させている。極めてクラシックな研究課題であるが、火山噴火の発生予測研究において今一度火山構造性地震の研究に立ち戻るべきと考える。HTHH火山噴火においては、2022年1月15日に発生した極めて強い爆発と津波は想定外であったかもしれないが、その前日には爆発が発生しているし、前駆的な噴火活動は前年12月から始まっており、その噴煙高度も10kmをはるかに超えるものであった。

一方、Semeru火山の溶岩ドーム崩壊による火砕流発生では前駆的な異常が検知されていない。溶岩ドームは12年の歳月をかけて成長したため、その成長速度が極めて遅く、溶

岩ドームの成長を忘れさせてしまった可能性がある。このような例外があるものの、一般的には大規模噴火には前駆的な強い異常現象がみられ、詳細な観察と研究が必要である。

大規模噴火では、その災害要因の複合性は極めて高い。桜島の過去の大規模噴火でも降下火山灰・軽石、火砕流、溶岩流、地震、津波、土石流など様々な現象が災害を引き起こしている。ハザード予測は初期条件を与えれば可能となる段階まで進んできているが、初期条件の与え方とハザードの順序については依然として研究が必要である。総マグマ量については、地盤変動などからある程度予測は可能であるが、それが、どのハザードに分配されるかは過去の噴火記録に立ち戻り詳細検討する必要がある。Explosiveな噴火であれば、降下火山灰と軽石が卓越するであろうし、Effusiveな噴火であれば、溶岩流となる。桜島の大正噴火では溶岩流の量が多いが、これに相当するマグマ量がExplosiveな噴火で噴出すれば、多量の火山灰と軽石が降下することになる。ハザードの視点に立てば、噴火様式に対応するマグマのハザード要因ごとの分配が問題となる。

桜島の大規模噴火を想定した島内からの避難計画は改良を繰り返されている。避難訓練は50年以上の歴史をもち、防災リテラシーはかなり高いレベルにある。一方、大規模噴火によって鹿児島市街地側への大量降灰災害についてはリテラシーは低い。鹿児島市が想定する38万人の事前避難を実現するためには、火山の予知・予測情報が適切な避難へと結びつくような情報の作成と、不断の対話を通じての専門家と住民との共創が必要である。

本建議研究計画の総合研究グループは、実施課題が部会をまたがって連携することが基本である。現状の総合研究グループは、グループの意思とは無関係に立ち上げられた各課題の寄せ集めにすぎない。建議で実施される課題を集めるだけでは、総合研究グループの目標に到達できるはずもなく、建議以外のプロジェクトとの連携が必須である。総合研究グループには研究集会を実施する程度の予算配分しかなく、実施体制は極めて脆弱である。課題の寄せ集め体制とはいいい加減に決別し、総合研究グループを中核課題とし、それを中心とした課題募集と、グループリーダーによる予算配分を行うべきである。現在の専門分野ごとの部会を中心とした実施体制は、専門分野の研究を高度化するには有効であるが、本建議が目標とする「災害軽減」の道筋が見えにくくなっており、部会体制は限界にあると考える。

総合研究グループのような連携を進めるためには、それを組織化する必要がある。京都大学防災研究所は、令和3年12月に火山防災連携ユニットを立ち上げた(図1)。火山防災連携ユニットは、火山観測データに基づく噴火発生予測をもとに、ハザード予測、リスク評価、対策研究までを一気通貫で進める。すなわち、火山観測から得られるデータから複雑な推移を示す火山噴火の様式と規模を逐次予測し、火山噴火発生に起因する災害の要因ごとのハザード評価研究を行う。さらに、交通など様々なインフラ等へのリスク評価と対策研究を行う。さらに、発生予測にもとづく火山噴火の切迫性評価を避難等の対策に活用する研究を行う。また、これまで構築されてきた国際協力関係を発展・拡充し、世界の火山災害の軽減に資することを目指すものである。連携ユニット自体に予算が配分されるわけではないが、研究組織を構築することが、連携の第一歩と考える。

成果リスト

- Diaz Vecino, M. C., E. Rossi, V. Freret-Lorgeril, A. Fries, P. Gabellini, J. Lemus, S. Pollastri, A. P. Poulidis, M. Iguchi, and C. Bonadonna, 2022, Aerodynamic characteristics and genesis of aggregates at Sakurajima Volcano, Japan, *Scientific Reports* 12, 2044.
- Iguchi, M., T. Yamada, and T. Tameguri, 2022, Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, as revealed by non-eruptive deflation, *Frontiers in Earth Science* doi:10.3389/feart.2022.727909.
- Kosei Takishita, Alexandros P. Poulidis, Masato Iguchi (2022, In-situ measurement of tephra deposit load based on a disdrometer network at Sakurajima volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 421, 107442, doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107442.
- Liu, M., T. Maruyama, K. Sasaki, M. Inoue, M. Iguchi, and E. Fujita, 2021, Measurement of aerodynamic characteristics using cinder models through free fall experiment, *Atmosphere* 12, 5, 608, doi:10.3390/atmos12050608.
- Maki, M., R. Takaoka, and M. Iguchi, 2021, Characteristics of Particle Size Distributions of Falling Volcanic Ash Measured by Optical Disdrometers at the Sakurajima Volcano, Japan, *Atmosphere* 12, 5, 601, doi:10.3390/atmos12050601.
- Maki, M., Y. Kim, T. Kobori, K. Hirano, D. I. Lee, and M. Iguchi, 2021, Analyses of three-dimensional weather radar data from volcanic eruption clouds, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 412, 107178, doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107178.
- Poulidis, A. P., A. Shimizu, H. Nakamichi, and M. Iguchi, 2021, A computational methodology for the calibration of tephra transport nowcasting at Sakurajima volcano, Japan, *Atmosphere* 12, 1, 104, doi:10.3390/atmos12010104.
- Poulidis, A. P., S. Biass, G. Bagheri, T. Takemi, and M. Iguchi, 2021, Atmospheric vertical velocity - a crucial component in understanding proximal deposition of volcanic ash, *Earth Planet. Sci. Lett.* 566, 116980, doi:10.1016/j.epsl.2021.116980.
- Poulidis, A., and M. Iguchi, 2021, Model sensitivities in the case of high-resolution Eulerian simulations of local tephra transport and deposition, *Atmospheric Res.*, 247, 1, 105136, doi:10.1016/j.atmosres.2020.105136.
- Sasaki, K., M. Inoue, T. Shimura, and M. Iguchi, 2021, In situ, rotor-based drone measurement of wind vector and aerosol concentration in volcanic areas. *Atmosphere* 12, 3, 376, doi:10.3390/atmos12030376.
- Shimizu, A., M. Iguchi, H. Nakamichi, 2021, Seasonal variations of volcanic ash and aerosol emissions around sakurajima detected by two lidars, *Atmosphere* 12, 3, 326, doi:10.3390/atmos12030326.
- Syarifuddin, M., S. F. Jenkins, B. Taisne, S. Oishi, A. Basuki, and M. Iguchi, 2021, Estimating the velocity of pyroclastic density currents using an operational dual-PRF radar, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 29, 107462, doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107462.
- Takebayashi, M., M. Onishi, and M. Iguchi, 2021, Large volcanic eruptions and their

influence on air transport: The case of Japan, J. Air Trans. Manag., 97, 102136, doi:10.1016/j.jairtraman.2021.102136.

Takemi, T., A. P. Poulidis, and M. Iguchi, 2021, High-resolution modeling of airflows and particle deposition over complex terrain at sakurajima volcano, Atmosphere 12, 3, 325, doi:10.3390/atmos12030325.

Takishita, K., A. P. Poulidis, and M. Iguchi, 2021, Tephra4d: A python-based model for high-resolution tephra transport and deposition simulations- applications at sakurajima volcano, Japan, Atmosphere 12, 3, 331. doi:10.3390/atmos12030331.

京都大学防災研究所火山防災連携研究ユニット

所内のダブルアポイントメント. 所外, 学外からの参画も可能とする.

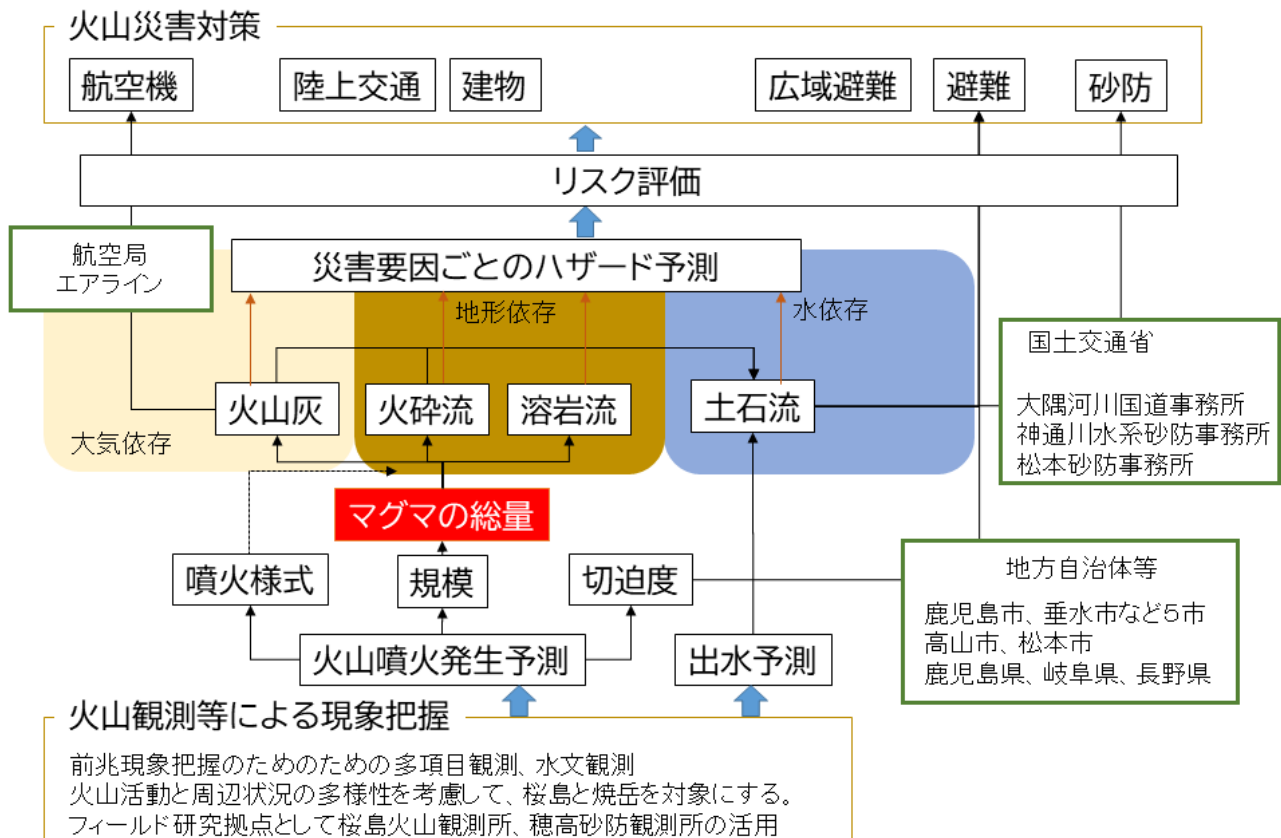


図1. 桜島総合研究グループ設置背景を考慮した研究体制の組織化の事例。京都大学防災研究所火山防災連携研究ユニット。

高リスク小規模火山噴火

「高リスク小規模火山噴火」総合研究グループリーダー 大湊隆雄
(東京大学地震研究所)

目的

火山では、噴気地帯や山頂火口近傍に、多くの観光客や登山客が訪れたり、観光施設が設けられている場合が多く、平成26年の御嶽山噴火や平成30年の草津本白根山噴火のように、規模が小さくても人的・物的被害等が生ずる場合がある。また、小規模な噴火は発生頻度が相対的に高いことから、観光客や登山客等の災害リスクの低減という観点から重要な研究対象である。そこで、噴火災害に関する史料の収集、地質調査による水蒸気爆発等の噴火履歴調査、各種観測による活動把握、災害誘因である噴石や土石流などの予測研究、災害情報の発信に関する研究等を実施する。これらの成果を総合的に検討し、研究の課題や方向性を明らかにする。

実施方法

(1) 既存課題の成果を活用

- ・噴火災害資料の収集、災害発生状況の整理、災害発生時の火口からの距離等の文献調査、災害関連学会での情報収集
- ・地質調査による水蒸気爆発等の噴火履歴調査
- ・地球物理・地球化学的各種観測による活動把握
- ・比抵抗調査等による熱水系の構造探査による水蒸気噴火ポテンシャルの評価
- ・災害情報の発信に関する研究の活用 (御嶽, 本白根の事例研究など)

(2) 建議の研究の枠外(社会科学, 災害科学分野など)の成果を活用

- ・災害関連学会等からの情報収集
- ・社会科学, 災害科学分野等の研究者に, 火山分野への応用を検討してもらうための方策(集会・セミナー等)の検討

(3) 既存研究成果を精査し, 研究分野の過不足の有無を洗い出し, あらたな研究課題や研究の方向性の提案につなげる。

(4) 上記に関連する研究集会の企画

本年度の実施内容

本研究グループに関連する課題は, 大きく次の5つの項目に分類することができる。

1) 災害情報の発信に関する研究, 2) 小規模噴火の発生する場の把握, 3) 観測による火山の活動把握, 4) 噴火の予測に関する研究, 5) 小規模噴火災害の資料収集。

今年度は2022年1月18日にオンラインで研究集会を実施し, 関連課題代表者による研究成果発表および議論を行った。昨年度は2)から4)に対応する報告が多かったが, 今年度は1)に関する報告が増えた。また, 高リスク小規模噴火を含む火山災害全般に関

する一般の方々の知識や認識に関するオンラインアンケートを 2022 年 3 月に実施した。

以下では、研究集会における報告を中心として、各項目毎の成果を紹介する。各課題の成果はその課題が属する部会報告でも報告されており、内容的に重なる部分もあるが、本総合研究グループの目標への寄与という視点に立って紹介する。オンラインアンケートについては実施概要の報告に留め、次年度以降アンケート結果の解析を進めた上で報告する予定である。

1) 災害情報の発信に関する研究

ニュージーランドで開発された VUI (火山活発化指数) を日本の火山に適用するための具体的な検討を進めている。VUI とは、噴火前の各種観測データの変化から火山活動の活発化の度合いを客観的に評価する指標である。VUI は本総合研究の対象である高リスク小規模噴火の評価にも応用できる可能性があり、災害情報としてどのような情報を発信することが可能であるかを評価することにつながる。昨年度までに十勝岳と阿蘇山を対象に VUI の評価基準の作成と VUI 値の月別推移の試行的作成を行ったが、今年度は吾妻山に関する VUI の評価を進めた (北海道大学 [課題番号: HKD_04], 京都大学理学研究科 [課題番号: KUS_02])。なお、VUI の評価は火山活動の状況把握そのものでもあり、この研究は、3) 観測による火山の活動把握、との関係も深い。

外国人 (観光客あるいは在留外国人) への火山に関する情報提供方法を検討した。具体的事例として、北海道胆振東部地震の事例を検討した。この事例は火山とは直接の関係は無いが、外国人に対する災害情報発信の対応事例として大いに参考になる。この例から得られた知見として、観光客が団体客なのか個人客なのかによって、避難情報を得る経路が異なる点が挙げられる。団体客は大使館や総領事館経由の場合が多いが、個人客は観光協会や観光窓口で情報を得る場合が多い。また、観光客に情報を提供する場合は英語あるいは多言語が効果的であったが、在留外国人に対してはやさしい日本語が効果的であった。これらの知見は、火山を訪れる外国人に対する情報提供方法を検討する場合にも活かすことができる。また、火山における観光客への対応例として、箱根火山の 2015 年の大涌谷噴火を受けて、行政・観光協会・温泉地学研究所が協力して対応した例を挙げることができる (兵庫県立大学 [課題番号: HYG_01])。これらの取り組みは、高リスク小規模噴火に関する情報を外国人観光客にどのように提供するか、という問題を考える際に大いに参考になる。

御嶽山噴火を受けて、名古屋大学は 2017 年に御嶽山火山研究施設を設け、「火山活動評価力の向上」、「地域主体の防災力向上を支援」、「火山防災人材の育成と火山に対する知見の普及」を目標とした活動を続けている。その活動の一環として、御嶽山地域の火山防災に関する知識の効果的普及・啓発や火山と共生する地域のすばらしさを内外に伝える役割を持つ御嶽山火山マイスターの活動を支援している。御嶽山火山マイスター制度の向上を目指し、他火山における火山防災に関する先進的な取り組みとの比較を進めており、今年度は島原半島・雲仙ジオパーク、桜島・錦江湾ジオパーク、磐梯山噴火記念館の火山防災に関する取り組みに対する調査・比較を進めた。調査の結果、頻度の低い噴火現象だけでなく毎年のように発生する土石流災害など砂防という観点から防災意識を高めることが重要、火山地域は観光が主たる収入源であることから啓発・教育において

火山の恵みも伝えることが必要，子供を対象とすることが効果的，ボランティアではなく有償化により責任を持たせることでガイドの質を担保することが必要，などの知見が得られた。次年度以降は阿蘇火山博物館，伊豆大島および洞爺湖・有珠山のマイスター制度の調査を予定している（名古屋大学〔課題番号：NGY_07〕）。

阿蘇山を訪れる観光客を対象として，観光客が退避壕に入るという安全確認行動を促進する要因はなにか，を明らかにするためのアンケート調査を実施した。2021年2月26日から3月2日の期間，インターネット調査を実施し，400人の有効回答を得た。看板設置，噴火の痕跡を残すこと，気象庁による噴火警戒レベルの情報提供が有効であること，阿蘇中央火口周辺の掲示板・音声ガイダンスが有効であることが分かった。一方，これら掲示板・音声ガイダンスは火山ガスの危険性を喚起することが主目的であり，退避壕への避難はガス対策として有効でないにもかかわらず，退避壕避難を促す理由を明らかにすることは今後の検討課題である。火口近くで配布するパンフレットはあまり有効でないという結果が出たが，その詳細も今後の検討課題として残された（東北大学〔課題番号：KOB024〕）。

火山災害軽減のためのリスクコミュニケーションに関する研究の一環として，自治体における噴火時対応タイムラインの作成と訓練及び研修の実進を進めている。これまでに実施した訓練や，防災研修，自治体に対する調査の結果，噴火を想定した防災訓練へのニーズが得られたことを受けて，これまでに実施した手法を用いた訓練と研修の実進に向けた準備を開始した（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED01〕）。

阿蘇山では，環境省による退避壕更新や，警戒範囲を回避するように登山道を変更する事業が進められている。阿蘇山における登山客の火山認知度，噴火警戒レベルの理解度に関するアンケート調査によると，阿蘇が活火山だと認知していた観光客は7割に過ぎないことが分かった。また，警戒レベルの理解度は火山毎に違うこともわかった。2021年10月噴火の際には，早朝から登る登山客に対応できなかったという情報伝達に関する課題も明らかになった（京都大学理学研究科〔課題番号：KUS_03〕）。

ここまでで紹介した，御嶽山，阿蘇山などにおける情報発信に関する取り組みは，高リスク小規模噴火に関する情報発信という課題においてもそのまま活用することができる。

本総合研究グループ独自の取り組みとして，以下の内容を目的とするインターネット調査を実施した。1）火山噴火など火山の様々な活動に伴って発生する自然災害について一般の方々がどのような知識や認識を持っているか，2）特に，噴火災害のなかでどのような災害を危険だと思っているか，3）噴火の規模と被害の関係についてどのような認識を持っているか，4）火山周辺を訪れたことがある方や火山周辺に居住する方とそうでない方々との認識の違いはあるか。調査は2022年3月18日から22日にかけて実施し，8000件のサンプル数を得た。得られたデータの解析は来年度に実施する予定である。

2）小規模噴火の発生する場の把握

草津白根山の湯釜は，火口湖が定常的に存在し熱的な活動度が高い状態が続いており，過去に小噴火を繰り返している。しかし，地震や地殻変動，熱活動の活発化である unrest がしばしば見られるものの，全ての活発化が噴火に至るとは限らない。これに対し，湯釜の南方に位置する本白根山は，普段の活動度は低いにもかかわらず2018年に不意打ちともいえる噴火が発生し，人的被害が出た。両火口の unrest の現れ方の違い

と噴火発生の関係について、比抵抗探査や震源分布、地殻変動解析などから推定されている浅部構造の違いに着目して検討を進めた。一方、湯釜においては、過去に側噴火の事例が数多くあるにもかかわらず、火口中心からの距離に応じて警戒範囲が設定されており、側噴火の発生リスクが十分に考慮されているとは言い難い状況である。そこで、側噴火によるリスク軽減を目指した地球化学的観測の試行として、土壌拡散気体である水銀の検出、希ガスの同位体分析、光ファイバー温度計を用いた熱異常の検出などによるモニタリングを開始した（東京工業大学〔課題番号：TIT_03〕）。草津白根山周辺は、小規模高リスク火山噴火の発生場を理解する上で最適なフィールドの一つであり、本課題で得られる知見は、草津白根山にもならず、水蒸気噴火の発生が予測される他火山においても大いに活用することができる。

3) 観測による火山の活動把握

噴火の早期検知手法として、空中電界変動を活用する手法の開発を進めている。桜島での観測からは、爆発的噴火だけでなく地震・空振をあまり励起しない灰噴火も検出可能であることが判った。他の観測項目と合わせることで、噴火の検知能力が上がることを期待される。阿蘇山では2021年10月噴火に伴う電界変動を検出した。浅間山においても2点による観測を開始した（東北大学〔課題番号：THK_03〕）。本課題で想定する小規模水蒸気噴火は、地震・地殻変動・空振などの既存の地球物理的観測手段では見落とされるおそれがあり、新たな噴火検出手法の開発には大きな期待を寄せている。

富山県弥陀ヶ原火山の全体像は、過去の各種観測やその解析結果によって以下の様に捉えられている。深部ではマグマ供給に関連すると見られる低周波地震の活動が報告されている。深さ4 km付近には地震波低速度領域が見出されており、深部マグマだまりの可能性もある。比抵抗探査からは深さ50 m付近に熱水・ガスだまりがあり、その膨張収縮が干渉 SAR で捉えられている。地表においては2011年ごろから地獄谷において噴気活動の活発化が見られるが干渉 SAR では地殻変動が検出されていない。

この弥陀ヶ原火山において、活動状態を把握するための多項目地球物理観測を継続しており、弥陀ヶ原火山全体の活動状況把握を目指す広域地震観測、地獄谷における浅部熱水・ガスだまりの活動推移の把握を目指した水準測量とGPS観測、噴気活動の定量化を目指す微動観測、熱水流動経路の把握を目指す熱活動観測を実施している。地獄谷遊歩道沿いで実施した水準測量により検出された2.9 cm/年の沈降は、活発な噴気活動が継続している紺屋地獄・新噴気帯付近に位置するほぼ鉛直なダイクの閉口により説明された。地獄谷では2020年8月と10月にGPS繰り返し観測を実施していたが、2021年8月からは連続的観測に移行した（富山大学〔課題番号：TYM_02〕）。噴気地帯に隣接する観光地は、本総合研究グループの重要な研究対象であるが、多項目の観測が行われている事例は少ない。弥陀ヶ原における観測により貴重な観測データの蓄積が進むことが期待される。

4) 噴火の予測に関する研究

噴火・災害ポテンシャル評価のためのモデリング研究の一環として、水蒸気噴火を駆動した熱水量の見積を行った。噴出物の到達範囲は水蒸気噴火を駆動する熱水の量に支配されることから、熱水量は防災上重要な情報である。地球物理的手法で求められる固

体と熱水を合わせた総噴出量と、地質学的手法で求められる固体噴出量から熱水量を見積もる手法を開発し、硫黄島の水蒸気噴火に適用した。地震・空振シグナルから見積もられた固体と熱水の総噴出量は $4.3 \times 10^4 \sim 7.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、地質調査による固体噴出量は $8.0 \times 10^2 \sim 1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ であり、これらの観測量に対して新たに開発した手法を適用することにより熱水量を $2.4 \times 10^4 \sim 4.2 \times 10^6 \text{ kg}$ と見積もることができた。また、火道を上昇するマグマの振る舞いを調べるため、高粘性流体中の発泡シミュレーション手法の開発を進めており、計算上の各種設定や計算手法を変えてシミュレーションを行い結果の比較を行った（防災科学技術研究所 [課題番号：NIED01]）。このような、噴火ポテンシャル評価を目指す研究の成果は、小規模水蒸気噴火においても活用できると考えられる。

5) 災害発生状況の調査・整理

ドローンの小型化、高性能化とともに、災害発生時の被害情報把握へ応用するための研究が進められている。ドローン調査により得られる「噴出物の飛散範囲等の動的情報」と「人・家・施設等の静的情報」を組み合わせ、被害情報を迅速に把握することが期待される。ドローンの飛行範囲や運用コストは、本研究のターゲットである小規模噴火に対し、過大でも過少でもない適度な規模であり、将来的な活用が期待される（富山大学 [課題番号：TYM_03]）。

これまでの課題と今後の展望

・これまでの課題

火山活動による人的被害の程度は必ずしも噴火規模に依らない。噴火が発生する場所からの「距離」が人的被害の規模を大きく左右する。大規模噴火であっても十分な距離まで避難できれば人的被害は生じない。逆に小規模噴火であっても近くで発生すれば人的被害はまぬかれない。

マグマ噴火等の大規模噴火の場合はほとんどの場合明瞭な先行現象があり、噴火前に避難し人的被害が少ない場合が多い。また、噴火規模が大きくても周囲に人がいなければ被害が無い。これに対し、水蒸気噴火、ガス噴出、ガスの滞留等の比較的規模の小さい火山活動については、先行する現象が弱いかあるいは無いために事前把握が難しく、危険性がわかりにくい。噴気地帯などはそのまま観光スポットになっていることも多く、観光客や登山客が危険性がわからないまま接近し、被害が出る場合がある。

小規模噴火にもかかわらず高リスクである理由の一つは、上記で述べたように発生場所や時期が予測困難だという点である。また、高リスクであるもう一つの理由として社会的要因も考えられる。各自治体が発行する防災マップや、噴火に関する情報発信を担う気象庁が設定している噴火警戒レベルを見ると、防災マップの多くは噴火がある程度予測できることを前提とした記述となっており、高リスク小規模噴火に関する記述はほとんど見られず、危険性の存在が周知されにくい。噴火警戒レベルについても、非専門家が正確にその内容を理解しているとは考えにくく、専門家と非専門家の認識が大きく乖離している可能性がある。例えば、レベル1であれば安全であると考え、火口付近に無防備に接近して突発的な噴火に巻き込まれるという事が起こり得る。

・今後の展望

本課題のターゲットである小規模火山噴火は、データの収集が難しく、科学的な研究の対象とするためには困難を伴うため、観測研究計画の中でこれを明示的にターゲットとする研究は限られていた。しかしながら、小規模ゆえに発生頻度が高く人的被害も少ない現象に対して、被害低減につながる具体的な方策を探るための研究は本観測研究計画の中で実施されてしかるべきものであった。そこで、2019年度に始まった観測研究計画において「高リスク小規模火山噴火総合研究グループ」を立ち上げ、その活動を開始した。

本総合研究は、予測困難性と社会的要因に着目して研究の方向性を検討し、将来の研究課題のシーズを育てることを目標とする。予測困難性に関しては、これまでの知見を活用することで予測可能性を高めることはできないか、あるいは、予測可能性を高めるためにはどのような研究を新たに立ち上げるべきか、という観点から検討を進める。社会的要因に関しては、専門家と非専門家の認識のギャップを埋め、どうすれば非専門家が危険性を正しく理解することができるのか、そのためには何をすべきか、という観点から社会科学的、防災科学的研究の方向性に関して検討を進める。

3年目となる今年度は、関連する研究課題の整理と問題点の洗い出しを継続して進めた。昨年度に本総合研究で実施すべき研究項目を1) 災害情報の発信に関する研究、2) 小規模噴火の発生する場の把握、3) 観測による火山の活動把握、4) 噴火の予測に関する研究、5) 小規模噴火災害の資料収集、の5つに整理した。昨年度までの関連課題の研究成果を見ると、1) に関する課題の成果を十分に把握することができていなかった。これに対し今年度の研究集会では、1) に関する社会学的、情報学的な成果報告が増えた。また、5) に関連する報告もあった。2) ~ 4) については継続して成果が報告されている。来年度以降も、それぞれの項目に関する成果の掘り起こしと整理を進める予定である。また、今年度末に実施したアンケート調査結果を整理し、高リスク小規模火山噴火に関する効果的な情報発信を検討するための情報抽出を目指したい。

成果リスト

特になし

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 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(拠点間連携共同研究[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、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。

震源過程および強震動予測について、プレートの沈み込み帯で発生するプレート間大地震・巨大地震に伴う強震動の距離減衰の特徴を調べるために、2003年十勝沖地震、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netで観測された強震動を解析し、本研究で提唱した個別の強震動生成域に対する地震動の距離減衰式を、地震毎の強震動生成域に対する距離減衰式と比較するために、線形混合効果モデルにより評価を行った。前者の方がintra-event variabilityの値が有意に小さく、距離に対する分布に偏りが見られないことが確認された（図1、図2）。

深部地盤および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盛土構造物を対象に、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、液状化層の地盤物性を均質と仮定した確定的なケースに加え、地盤物性の空間的な不確実性を考慮した検討も行った（図3）。その結果、不確実性を考慮した場合の盛土沈下量のばらつきは、確定的なケースで地盤物性を平均値±標準偏差とすることで包含できることがわかった（図4）。

構造物被害予測のために、RC造建物を対象に、速度応答を指標とした地震応答解析に基づく被害率関数の構築手法に関する研究について議論を行った。研究では、被害率と重み付け速度応答積分値の関係について検討を行った。重み付け速度応答積分値とは、速度応答スペクトルのその周期帯の値である。また、重み付け速度応答積分値をPGV相当に戻して、既往の被害率関数と比較し、その有効性を確認した。また、地震被害発生後に、地震発生から建物の被害までを横断的にカバーする新しい重点研究の可能性についても議論を行った。

リスク評価については、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、構築したフレームワーク上に展開する一次情報として、建物フットプリントと建物高さ、二次情報として建物固有周期を検討した。

プラットフォーム構築としては、地震発生時の総合的なリスクに関する影響評価にむけて、南海トラフ沿いに発生する巨大地震の多くのバリエーションを考慮する方法について検討した。

コンピュータサイエンスに関して、Capability/capacity computingにより生成された大規模データセットを用いたサロゲートAI構築手法の開発を行った。液状化現象の大規模3次元シミュレーションを多数回実行可能なGPUを活用した高速3次元動的有限要素解析手法を開発し、これを活用することで生成された液状化の大規模データセットを学習してサロゲートAIを構築することで液状化推定のさらなる低コスト化の可能性を示した。

液状化をはじめとした複雑な現象のUQや最適化への適用が期待される。

ステークホルダ参画では、様々な地震動想定を表示可能なシステムについて過大評価、過少評価等で推定結果を示すことが可能なシステムについて、新たな推定結果をシステムに取り組むためのインターフェースの構築を行い、システムの改良を行った。

(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:CTOC02]」においては、これまで、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ってきており、高知県の地震動想定結果のばらつき表示を行ってきている。昨年度から、内閣府の地震動想定結果の検討を実施している。内閣府の想定では地表面での速度推定は行われておらず、公開されている震度データを童・山崎(1996)の方法を用いて、簡易的に速度データに変換し、ばらつき表示の試行を行った(図5)。また、その結果もふまえより厳密に地表面での速度データを得るための方法論についての検討を行った。

(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:CTOC03]」について、沈み込み帯でのプレート間固着強度分布を把握するためには、海底地殻変動データに加え、通常地震からスロー地震まで、プレート境界周辺での断層すべり運動の性質を理解することが重要である。南海トラフ沿い巨大地震断層域に当たる紀伊半島沖では、ケーブル式地震・津波観測監視システムDONETによって、海域下の多様な地震活動をリアルタイムで観測している。ここで観測される地震活動を詳細に把握するためには、特に速度の遅い堆積層を含む海底下S波速度構造を考慮に入れ、精度の高い震源分布を求める必要がある。これまでに、DONETの観測記録を用いたレーシーバー関数解析によって、構造探査に匹敵する解像度でS波速度構造を推定できることを示している。

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、紀伊半島南東沖のDONET1と紀伊半島南西沖のDONET2の間に若干の観測網でカバーできていない領域が存在するため、海底地震計を用いた機動的観測を行うことによって海底下速度構造および震源決定の精度を向上させることができる。この目的のために、2019年6月に紀伊半島沖南海トラフ沿いに15台の海底地震計を設置して観測を開始した。2021年6月に、この海底地震計を全台回収し、良好な観測記録が得られていることを確認した。本観測記録中の2020年12月から2021年1月にかけて、この観測網周辺にて活発な微動活動も発生しており、プレート境界の空間的特徴を把握するためには通常地震と微動との判別をする必要が生じた。これには機械学習による手法の適用を念頭に検討を進めており、海底地震計観測波形から代表的な地震は検出可能であることを確認した。さらに、微動と地震の検出判定に関して、その判別精度の確認を進めている。

(4) 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 [課題番号:CTOC20]」について、地盤地震工学の分野において液状化実験等で用いられることの多い豊浦標準砂

を対象に、異なる3組の実験班による一連の室内土質試験を実施した。まず、地盤工学会基準に基づき物理試験（土粒子の密度試験、粒度試験、砂の最小・最大密度試験）を実施することで、豊浦標準砂の物理特性を把握するとともに、結果に及ぼす不確実性の因子（実験者の違い等）について分析した。また、中空ねじりせん断試験装置を用いて液状化試験（非排水繰返しせん断試験）を実施することで、豊浦標準砂の液状化強度や繰返しせん断特性の評価を行った。この際、供試体の密度や外力（せん断応力）といった定量化しやすい違いに加えて、実験者の個体差が試験結果に及ぼす影響についても分析した。その結果、すべての実験者の平均的な傾向と実験者毎の個体差とを適切に考慮することで、試験結果に基づく液状化強度等の予測区間を従来よりも合理的に評価できることが示された。

（5）特定型（その4）

「巨大地震による斜面災害発生個所の事前予測方法の検討[課題番号:CTOC14]」では、2016年熊本地震により阿蘇カルデラ内に発生した地表（平坦地・尾根部・斜面など）の亀裂を抽出する方法を開発し、その手法を阿蘇カルデラの西半分に適用し、亀裂の位置・大きさを図化した。また、この手法を適用する際に、地表面の変位の方向と大きさを図化する方法を開発した。この手法を斜面崩壊の発生した箇所周辺に適用すると、地表の振動方向・地表の変位方向・崩壊土砂の移動方向の関係を明らかにすることが可能となった。Particle motion は、地殻変動、地表の地震動、そして構成する母材の力学的特性を含めた設置点の地震中の移動軌跡を示している。地表に出現する永久変位は亀裂を生じない程度の変位（破損以下）、亀裂を生じる弾性変形、塑性変形、さらに母材が二つ以上の物体に分離する破断（崩壊）の範囲を示すと考える。このうち、土砂災害を引き起こす斜面崩壊や地すべりは、仮にその土塊の上に地震計があったとすると、Particle motion の軌跡の途中で大きく変位し、記録として残らないであろう。ここでは、KiK-netの観測点阿蘇の記録をFujiwara et al. (2016)から引用し、地形を視覚的に理解しやすくする方法（以下、土砂災害基本図）を地震の前後の比較からの結果と変位量を比較すると、北北西に約1.4mとほぼ一致する。このことから、永久変位が小さい塑性変形までの範囲の場合は、土砂災害予測基本図を用いた手法は、永久変位を良く再現するとし、破断が生じた部分の周辺の地殻変動と地表の地震動による永久変位出現の効果はほぼ破断が生じた部分と一致すると仮定し、破断は構成する母材の物性の差によるとして、議論を進める。この母材の物性の効果には、地形および地質の影響が含まれると考える。また、尾根部での地震波の収斂などの効果は、考えていない。阿蘇カルデラのほぼすべての地域を解析対象として進めた。その中で、次の地域に特徴的な傾向が認められた。

- ・傾斜の小さい田んぼなどに生じた亀裂
- ・傾斜の少し大きな斜面に生じた斜面崩壊（京都大学火山研究センター周辺）
- ・さらに傾斜の大きな斜面で生じた阿蘇大橋を破壊した斜面崩壊
- ・北向山断層として新たに認められた地表断層の近傍の大きな地すべり性変位

次に手法の比較を検討した。

二時期の土砂災害予測基本図を比較、差分、そしてPIV(Particle Image Velocimetry)を用いた結果の比較の3手法である。比較は、二時期の土砂災害予測基本図をアニメーションのように表示することで、視覚的にどの部分に大きな変位が生じているか、直感

的に把握しやすい。土砂災害予測基本図の中の一情報である侵食量の傾斜は、地形的に特徴の縁辺境界を視覚的にとらえやすくする。この情報は、道路の両端、田んぼの畔、地表に生じた亀裂、尾根部に生じた亀裂を特徴的に表現可能である。同様の手法の赤色立体図では、尾根部に生じた亀裂を表示することはできない。土砂災害予測基本図の侵食量の傾斜(値は0-90度)の二時期の差分(Diff=Slope of Erosional Volume(Post-event)-Slope of Erosional Volume(Pre-event))は、変位が生じていると地震前の位置は負の値で、変位先の値は正の値で示され、道路の両端や、田んぼの畔などが連続的に示される。この負の連続した値の線と正の連続した値の線を追跡することで水平的な変位量を得ることが可能である。また、注目する地点の地震前後の標高値の差分から鉛直方向の変位をえることができる。すなわち、粒子追跡が可能である。同様に、PIV(Particle Image Velocimetry)を用いて変位の方角と大きさを求めた。地震前後の二時期の差分とほぼ同様の結果を得ることができた。しかし、PIVでは破断(崩壊)が発生した箇所は変位が大きすぎることと追跡する対象が消失していることから、その部分ではマスクを用いる必要があること、さらに前出の差分の方法よりも極端に大きい変位が表示される例があることが明らかになった。この点は、注意を要する。

以上のことから、斜面崩壊・地すべりなどの初期過程は、地殻変動・断層運動をふくむ地表の振動方向、地表の傾斜量の大きさとその方向、最大傾斜方向の斜面下部にすぐ直上の部分を支持する構造が存在しない地形的特徴があること、母材を構成する物質の強度などが主に寄与していることが明らかになった。

(6) 特定型(その5)

「即時建物被害予測技術の高度化[課題番号:CT0C21]」については、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用いて被害程度を推定する方法はこれまでも広く用いられてきた。この指標値と被害率の関係は「脆弱性曲線」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、木造建物の脆弱性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、同様の手法で脆弱性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、近年の脆弱性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脆弱性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。特に、鉄筋コンクリート造については、木造建物と比較すると地震被害を受けた建物棟数が少なく、その多くが甚大な被害をもたらした兵庫県南部地震による被害であり、被害関数はこの被害に適合するように作成されていることがほとんどである。そこで、一質点系モデルの地震応答解析による被害関数の構築手法に関して検討をおこなった。RC建物モデルとしてTAKEDAモデルを用いた。建物モデルの弾性周期と降伏時ベースシア係数のばらつきは、建物階数別の棟数統計データ・既往文献をもとにそのばらつきを確率密度関数として仮定し、これらの分布に沿うような一質点系モデルを一万通り作成した。入力地震動としては観測点周りの建物被害率が求められている53か所の強震観測記録を、建物弾性周期の4倍の周期分布で重みづけした速度応答値で基準化して使

用した。地震応答解析による最大応答値が閾値（ここでは塑性率4）を超えるものを大破と判定することとして、解析ケースの半数が大破となる時被害率50%であるとして被害関数を構築し、既往の被害率関数に概ね対応した結果が得られた。

衛星を用いた被害把握では、人工衛星搭載の合成開口レーダ（SAR）を用いて熊本地震の全壊判定の建物の詳細被害（層破壊、傾斜、壁・屋根被害）の検出可能性について検討を行い、地震前後の位相情報の干渉性から、被害程度を検出できる可能性があることを明らかにした。また、建物の被災度は現状では目視調査により区分判定を実施しているが、ドローンを用いて被害把握を実施する可能性について検討した。建物の被災度を無被害・軽微・小破・中破・大破・倒壊に分類する手法を開発し、木造建物の振動台実験をドローンにより撮影することによりその有効性を確認した。インフラ設備については、2016年熊本地震の熊本市および益城町、2011年東北地方太平洋沖地震の仙台市と福島県いわき市、2007年新潟県中越沖地震の新潟県柏崎市の上水道管路の被害データを用いて、現行の被害予測式との比較を行った。具体的には、上水道管路の被害率に対する様々な要因の影響度を明らかにするために、これらの上水道管路被害データを用いて、管路被害率を目的変数とした数量化理論I類による回帰分析を行った。その結果、PGVの影響度が最も大きく、次いで管種、液状化の影響度が大きいという結果になった。微地形、微地形境界条件の影響度はほぼ同程度で、あまり大きくないことが分かった。

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。

2021年度は新規9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。また、新型コロナウイルス感染症対策対応のため、2020年度からの研究期間延長課題4課題が実施された。

（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]」に関して、2018年9月にインドネシア・スラウェシ島で発生した地震(Mw=7.5)によって、パル湾南岸で浸水深約4mの津波が発生し、被害をもたらした。この地震についてまず遠地地震波形の解析を行い、震源から南へ延びる横ずれ断層上のパル湾周辺で大きなすべりがあったことを確認した。このモデルから計算した津波は、パル湾内で記録された津波波形と同程度の振幅を生じることから、この津波波形と合成開口レーダデータを用いて、断層を3つのセグメントに分けて詳細なすべり分布を求めたところ、

パル湾付近のセグメント上で大きなすべりが推定された。このすべりによって浸水深 2 m 程度の津波は発生するが、パル湾南岸での津波を完全に再現するためには、地滑りなどの二次的な波源が必要であることもわかった。

南海トラフ巨大地震を想定した津波計算を行い、京大防災研グループが開発しているランダムにすべり分布を生成する確率津波モデルと、内閣府中央防災会議モデルの 2 種類の津波高の特性を比較した。確率津波モデルについては、中央防災会議のモデルと同じ Mw9.1 の津波シナリオを 300 ケース生成した。全シナリオ中の平均的な津波高は、外洋に面した高知県沿岸などについては確率津波モデルの方が大きい。大阪湾湾奥部では中央防災会議モデルの津波高さが相対的に高い傾向にあった。この傾向の差異は、評価地点に対する支配的な断層領域の平均すべり量で説明できることがわかった。この結果は、断層すべりの深さ方向の多様性が津波高の不確実性の大きな要因となりうることを示している（図 6）。

「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：CTOC07]」について、昨年度までの研究によって、第 6 回 ESG 国際シンポジウム (ESG6) の熊本テストサイト周辺の 20 地点における臨時地震観測によって強震記録が得られている。図 7 に示すように ESG6 のテストサイトは、熊本平野西部の JR 貨物熊本駅付近の強震観測点であり、その周辺の 200m 程度の狭い範囲の 20 地点に臨時に強震計が約半年間設置された。ESG6 のブラインド予測の強震観測点は、臨時観測の観測点 16 の近傍にある。臨時観測点の多く（観測点 1～11）は、北東—南西方向に並んでいる。観測点数はこの方向に少ないが、直交する方向にも観測点（観測点 14～21）を配置した。また、ブラインド予測での岩盤サイトの観測点である金峰山の SEV0（九州大学地震火山観測研究センターの熊本地震観測点）地点でも臨時強震観測を行った。

得られた 33 地震の地震記録からテストサイト近傍の観測点 16 に対する各点の水平および上下成分のフーリエスペクトルの比を求めた。水平スペクトルの算出は、S 波部分の水平 2 成分の相乗平均を用いた。また、上下成分は、P 波部分を用いた。図 8 に示す水平スペクトル比は、周期 0.5 秒以上の帯域では、ほぼ 1 倍であり、この周期帯域の地震動特性は、テストサイト周辺でほぼ同様であると考えられる。一方、周期 0.5 秒以下では、スペクトル比の変動が大きくなり、各観測点は、テストサイトの地震動特性と異なる特性を持っている。とくに、周期 0.3 秒付近では 1 倍を下回る地点が多く、周期 0.2 秒付近では 1 倍を超える地点が多い。上下成分のスペクトル比は、より短周期の 0.2 秒までフラットな形状である。なお、両成分ともに、周期 3 秒程度以上では、スペクトル比に大きな違いが認められるが、これらは小地震の記録を用いているために生じたノイズによるものと考えられる。図 9 には、水平成分のスペクトル比の空間的な分布が示されている。周期 0.8–1.6 秒の比は、空間変動が小さいが北側の地点ほど比率が小さくなっている。周期 0.3 秒付近のスペクトル比は、テストサイトの強震観測点から離れると、小さくなる。さらに、短周期の 0.2 秒付近のスペクトル比は、空間変動が大きく、テストサイトの南東側で大きくなる。

以上の観測結果から、テストサイト周辺 200m 程度の範囲においては、周期 0.3 秒以上の地震動の特性は、ほぼ同じであると考えられる。すなわち、周期 0.3 秒以上の地震動特性を評価する際に、1 次元速度構造モデルの仮定が成り立ち、地下構造の不整形性の影響

は小さいと考えられる。しかし、周期0.3秒以下に影響を与える極表層部については、地盤構造に空間的に変化がある可能性もあり、短周期地震動の評価に際しては注意が必要である。

各観測点では、地表付近のS波速度を知るために簡易な表面波探査を実施した。測線長は、7mであり、固有周波数4.5Hzの地震計を1m間隔に設置し、ハンマー加振による上下成分を計測した。得られた記録の周波数一波数スペクトル解析によって、図10左に示すレイリー波の位相速度を得た。すべての地点で位相速度は、測線長が短いため、位相速度は周波数約15Hz以上に限定されるが、ほぼ一定値に収束している。これは、レイリー波の高周波数の位相速度の下限值を示しており、近似的に地表付近のS波速度とみなせると考えられる。そこで、各地点での20から40Hzの位相速度を平均して、図10右の平均位相速度を求めた。テストサイトの強震観測点近傍では、130m/s以下の平均位相速度が多く、離れると150m/s程度となっている。この空間分布は、周期0.3秒のスペクトル比の分布と類似しており、地表付近のS波速度の違いが周期0.3秒の地震動の空間的変化の原因であると考えられる。

「津波被害予測における震源モデルの不確実性の評価[課題番号:CTOC22]」では、数値モデルによる浸水評価の不確実性については、和歌山県海南市の詳細な地形モデルを用いて、津波浸水に対する4つの非線形長波方程式を基礎とする数値モデルの性能を水槽実験の結果と相互に比較した。水槽実験は2018年に京大防災研グループによって行われたものである。また、比較する4つの数値モデルの中には、これまでに東大地震研グループと京大防災研グループがそれぞれ多く用いてきたJAGURSやTUNAMI-N2のモデルを含んでいる。モデル間比較によって次のような結果が得られた。(1)常に湿っている地域ではモデル間の変動は小さい。(2)wet-dry境界の伝播により浸水到達時間、最大水位、流速のモデル間変動が大きくなる。(3)浸水域と最大水位は、浸水先端部の速度や最大流速に比べてモデル間の変動が小さい。この原因は、wet-dry条件に関する詳細な実装の手法の差異と考えられる。これらの結果から、建物を対象としたシミュレーションによる浸水域と水位は比較的高い信頼性を持つが、速度の予測値はいずれも誤差が大きく、シナリオアンサンブル計算を使用する場合のみ考慮すべきである。以上の成果は、Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineeringに掲載済である。

地形による津波の応答関数については、メキシコ太平洋沿岸と日本の駿河湾を対象に、確率津波モデルによる多数の津波計算結果から、スペクトル解析を用いて沿岸地点における周波数応答関数を推定した。さらに推定した地形による応答関数をもとに、沿岸域のスペクトルから津波波源の影響と地形による影響を分離し、波源と地形のそれぞれが津波のエネルギーに寄与する割合を求めた。この寄与率を多数のシナリオおよび複数の地点で求め、その寄与率の範囲と空間特性の統計的特性について把握した。主要な結論は以下の通りである。沿岸地点の津波のスペクトルと波源のスペクトルの比から応答スペクトルを求め、さらに外洋・陸棚・湾と3つの異なる空間スケールの応答スペクトルの抽出を行った。求めた応答スペクトルの卓越周期は、観測データや湾の形状を考慮して概算した固有周期と概ね一致した。応答スペクトルより確率津波モデルは任意の地点での波の応答特性を求めることが可能であり、津波の地域特性評価に有用であることがわかった。この成果は国際会議International Tsunami Symposiumで口頭発表された。

「強震動のブラインド予測結果に基づく強震動予測技術の精度と信頼性に関する研究 [課題番号:CT0C24]」において、ESG6でのブラインド予測の結果と観測記録との一致の程度を定量的な指標によって評価した。ここでは、最大余震による強震動を予測するステップ2 (BP2) に対して評価した結果を説明する。図11には、Anderson(2004)の指標による各参加者の計算値と観測値との比較を示している。これらの指標は、継続時間(C1-2)、エネルギー(C3-4)、最大値(C5-7)、スペクトル特性(C8-9)、相互相関係数(C10)の10個である。さらに、これらを平均した総合指標S1も比較に用いた。相互相関係数(C10)は、全体的に低い値であり、S波走時などの不一致による低下であると考えられる。しかし、継続時間、最大値、スペクトル特性に関する指標は、高い値である。とくに、継続時間は、BP参加者間でのばらつきも小さく、安定した強震動予測が行われていると考えられる。一方、最大値は、ばらつきが大きく、予測時の適切な仮定が必要であると考えられる。

ESG6のブラインド予測(BP)では、減衰特性も含めて地下構造モデルのチューニングも行われている。熊本平野のテストサイトKUMAでは、PS検層に基づく詳細な地下構造モデルを事前に提供した。一方、岩盤サイトでは、特定の地下構造モデルを事前に与えていなかった。上記のBPの結果のばらつきの一因には、岩盤サイトの地下構造情報が少ないことが考えられる。そこで、本研究では、BPの岩盤サイトKU.KMP1において微動探査と表面波探査を実施し、地下構造情報を得ることを試みた。

図12に示すように、表面波探査は3つの測線で行われた。各測線では、1もしくは2m毎に上下成分地震計を設置した。測線の両端および中心点で上下加振が行われ、その地動速度を24chの探鉱器で計測した。表面波探査のうちで最も長い測線1の結果について説明する。測線1の北側での加振による上下成分の速度記録を図13左に示す。分散性を持つ波動が顕著に認められる。距離12-40mの波形に対してビームフォーミング解析を適用し、図13右に示すように位相速度を得た。10~60Hzの周波数帯域では、周波数の増加に伴って位相速度は徐々に小さくなる。さらに、60~80Hzでは、位相速度が大きくなり、高次モードの影響の可能性が高いと考えられる。しかし、この周波数帯域でも基本モードに対応する振幅の大きい位相は認められる。

微動探査では、測線1付近で2つの異なるサイズのアレイで微動の上下成分の計測が行われた。それぞれのアレイは、半径が29mと12mの円形上の3点と中心点の4点で構成されている。微動のアレイ記録を81.92秒間のセグメントに分割し、SPAC法による解析から、図14左に示す位相速度を求めた。各セグメントの位相速度を平均して最終的な位相速度とした。図には、測線1での北西端の加振による記録による位相速度も示されている。微動探査による位相速度は、周波数7~14Hzの間で表面波探査による値とよく一致している。

熊本平野のテストサイトKUMAでの地表から地震基盤までの1次元S波速度構造モデルを参考にして、表層地盤1層と地震基盤を含めた深部地盤5層で構成される6層モデルを仮定した。図14右に逆解析結果を示す。S波速度3.2km/sの地震基盤までの深度は、約150mである。一方、S波速度430m/sの工学的基盤の深さは、3m程度と浅い。岩盤サイト近傍では、ボーリングによる土質調査が行われている。地表から2.8mまでは粘土化した凝灰岩風化層であり、さらに、深さ25mまでは角礫凝灰岩となっている。地表付近の風化層の厚さは、探査の結果と同様である。

得られた地下構造モデルを用いて地盤増幅特性の特徴を検討する。各地層の影響を理解するために、増幅特性を計算するモデルの最下層を順に浅くして、S波の1次元増幅特性を計算した。Q値は、S波速度(m/s)の1/10の一定値を仮定した。計算の結果を図15に示す。地震基盤まで含めたモデルでは、周波数3Hzでピークがみられる。最下層のS波速度を低下させると、この周波数の増幅倍率は徐々に小さくなる。この周波数の増幅特性には、深部地盤、とくに、1.1km/s以上のS波速度を持つ層の影響が大きいことがわかる。また、周波数8~12Hzのピークは、表層地盤のみのモデルの増幅特性でも同様に認められ、表層地盤の影響が支配的になっている。

「地震により被害を受けた事業継続建築物の火災リスク評価手法の開発[課題番号：CT0C25]」では、建物の地震レジリエンス性能を火災リスクの観点から定量的に評価するための枠組みを構築した。ここでの地震レジリエンス性能とは、地震後の出火率や防火関連設備の地震脆弱性に基づいて評価される地震後の火災リスクが平常時のそれと同等になるような使用可能床面積を地震からの経過日数の関数として評価したものを言う(図16)。将来的にこうした観点を事業継続計画の中に盛り込むことを目指し、①建物が極めて稀に発生する地震動(震度6強程度)を受ける場合の評価が可能であること、②火災性状や避難行動の予測によらず簡易に評価が可能であること、③建物の地震対策が地震後の火災リスクや地震レジリエンス性能に与える効果を考慮できること、を重視した枠組みを整備した。

まず、建築物の火災リスクを、複数の防火関連設備の奏功・不奏功の組み合わせから成る各火災シナリオの生起確率と各火災シナリオで生じる死傷者数の積の和、すなわち、日間(または年間)火災死傷者数の期待値と定義し、①地震後の出火率、②防火関連設備の地震被害率、③防火関連設備の復旧率をパラメータとして火災リスクを地震からの経過日数の関数として定式化した上で、地震後の火災リスクが平常時のそれと同等になるような使用可能床面積の簡易算定式を誘導した。

評価に必要な地震後の出火率については、日本火災学会の2011年東北地方太平洋沖地震の出火記録や産業技術総合研究所の東北地方太平洋沖地震の推定地震動マップを活用し、出火率を地震動強さ指標で説明する回帰式を作成した。防火関連設備の地震被害率については、研究代表者らが熊本地震の影響を受けた病院を対象に実施したアンケート調査データを活用し、被害件数の多かった火災感知器・スプリンクラーヘッド・防煙垂れ壁・防火戸について、それぞれの被害率を代表最大床応答加速度または代表最大層間変形角で説明する回帰式を作成した。防火関連設備の復旧率については、建築設備技術者協会による熊本地震の建築設備被災状況調査の結果を活用し、建築設備の被害事例381件の復旧日数別単純集計結果から、復旧率を地震からの経過日数の関数として近似した。

建物や揺れの条件等を仮定したケーススタディを行った(図17)。ここでは、6階建ての建物が計測震度6.2、最大地動速度0.8m/sの地震動を受ける場合を想定した。簡単のため、各階は一樣な最大床応答加速度を受けるものとし、その値に日本建築構造技術者協会が提案する建物の耐震余裕度レベルに応じた限界値(10.0、5.0、2.5m/s²)を設定することで、建物応答を安全限界値以下に制御することが地震レジリエンス(使用可能床面積率)の向上にどの程度つながるのかを調べた。地震から1日間は、出火率が非常に高いため、使用可能床面積率は耐震余裕度が高くても約5%となり、火災リスクの観点からは

ほとんどの人を屋外に退避させる必要性が示唆される。その後、約一週間程度で出火率が平常時のレベルに戻るため、耐震余裕度がない場合で約47%、耐震余裕度が高い場合で約81%まで回復する。その後は長い日数をかけて設備の復旧が期待されるため、使用可能床面積率はゆっくりと増加していく。地震による建物応答を抑えるほど設備の地震被害率が低下するため、耐震余裕度を高めることで火災リスクの観点からも建物の継続使用性が向上することが分かる。ただし、ここでの結果はあくまで計算例であり、評価に用いる防火関連設備の復旧率関数などには改善の余地がある。

「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[課題番号：CT0C26]」では、2016年熊本地震前後で得られた1m-LiDAR DEMに地形を視覚的に見やすく表現する手法を適用して抽出された立野地区の地すべり土塊の範囲を図化した。その地すべり土塊の周辺に発生し、確認された斜面上の地表亀裂を同図に示した。これらの結果から、地震計の設置位置を決定した。平行して地震計の現地設置のための準備を継続中である。

初年度の研究成果は、PIV手法で周辺よりも変位の大きいと考えられる地すべり土塊の範囲を抽出し、これに地震前後の標高変化も重ねて示すことにより、地すべり土塊は斜面上方では沈降しながら斜面下方に移動したこと、斜面下方では約8メートル斜面下方に移動し隆起していることが明らかになった。また、地すべり土塊の末端部では、谷状地形の部分に斜面崩壊が多発していることも現地での観察で明らかになった。これは、谷頭部では下に支持する構造が欠落していることに加えて斜面上方の土塊がこの不安定な土塊を斜面上方から押して崩壊の端緒となったと考えることができる(図18)。この二つの量から三次元的な粒子追跡が可能となる。この作業中に、対象とした地すべり土塊の範囲外に、北向山断層による地表の永久変位を確認することができた(図19)。図19はPIV手法とは異なる変位量の検出方法で、たとえば図中の赤は地震前の特徴的な地物(例えば道路の両端や田んぼのあぜなど)の位置、青は地震後のもので、地震前後で建設された林道は、地震前の赤部がなく、青のみで示される。同様に、地震後に出現した地表断層も青のみで示される。このような斜面末端部の谷頭部、すべり土塊の中央部に近い部分また地すべり土塊の範囲外の地盤を選び、危険度の評価を実施するために、複数の長周期サーボ型速度計3成分(東京測振製)により微動および地震動観測を実施した(図18の中に、微動観測を実施した点を▲で示す)。この斜面は、大津町の所有地であるが、立ち入りには建設省立野ダム工事所の許可が必要であった。立野ダム工事事務所指定の駐車場から斜面上方(標高差約150メートル)に観測機材を観測地点一点につき約50キロ(地震計10キロ、記録計10キロ、電源バッテリー20キロ、他物品10キロ)の物資輸送を研究分担者で実施した。当初この作業を委託する予定であったが、適当な受け手がなく、受け手を探すのに時間を要し、観測実施に遅れが生じた。この地震動記録の一例を図20に示す。詳細は、現在解析中であるが、斜面上の不安定と考えられる谷頭部や崖の縁辺と地すべり土塊の中央部、地すべり土塊の範囲外で異なる特性がとらえられている可能性があり、今年度の残りの期間に観測点を増設し計測を継続する。

「邑知瀧平野の推定地盤速度構造の非線形地盤応答を考慮した強震動予測[課題番号：CT0C27]」では、邑知瀧平野の地盤構造を推定するため、図21に示す地点において常時微

動観測を行い、3地点で常時微動アレイ観測を行った。アレイ半径はLLL:400m、LL:135m、L:45m、M:15m、S:5m、SS:1.5m、SSS:0.5mの7サイズとし、LL~Mは60分、S~SSSは30分の同時観測とした。また、盆地を横切る方向に測線01~07の7測線を、盆地に沿う方向に測線08の1測線を設定し、計99地点で独立した30分の常時微動単点観測を行った。さらに、南東側の山中でも同様に14地点の単点観測を行った。

常時微動アレイ解析には微動解析プログラムBIDO (Tada et al., 2010) を用い、全アレイサイズのRayleigh波位相速度分散曲線を求めた。そして各アレイサイズに応じた周波数帯を接続したものを最終的なRayleigh波位相分散曲線とみなした。常時微動単点観測点での解析は以下の手順で行った。まず、観測によって得られた30分間分の加速度時刻歴データを50%オーバーラップさせ、40.96秒の小区間に切り出す。次に、切り出した各小区間でNS、EW、UD成分のフーリエスペクトルを計算し、NS/UD、EW/UDの微動フーリエスペクトル比 (MHVR) を算出する。算出された小区間ごとのスペクトル比の平均を各地点のMHVRとした。ただし交通振動などのノイズの影響を取り除くため、ノイズの大きい区間を30~80%除外している。

防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET) のK-NET七尾 (ISK007) とK-NET羽咋 (ISK008) の土質データおよび地震ハザードステーション (J-SHIS) の深部地盤データを参考に全地点共通の層構造の物性値を定めた。次に、アレイ観測地点で観測されたMHVRと位相速度分散曲線に理論値が近づくように各層の層厚を合わせ、それを推定モデルとした。理論MHVRの計算には拡散波動場理論に基づき理論MHVRを計算し、理論位相速度分散曲線の計算には成層地盤におけるグリーン関数及び正規モード解を計算する公開プログラム (Hisada, 1995) を用いた。そして、アレイ地点での推定モデルを基準とし、単点微動観測点において理論MHVRが観測MHVRに近づくように層厚を決め、地盤構造を推定した。強震動シミュレーション用の地盤構造モデルは、推定した地盤構造における第4層~第10層の下面深さを補間することで、三次元地盤構造モデルを作成した (図22)。ただし、邑知潟平野の南東側では盆地端部から約10kmの範囲を最表層が $V_s=1100\text{m/s}$ の山地部と想定し、平野と山地部以外の地域はJ-SHIS深部地盤構造をそのまま用いた。

微動観測により得られた推定地盤構造モデルをもとに、防災科学技術研究所公開の差分法プログラムGMSを用いて強震動シミュレーションを行った。計算の簡略化のため、推定地盤構造のうち層4~層10の7層をモデルとして計算に用い、各層の物性値はJ-SHIS深部地盤構造モデルv3.2と同一とした。強震動シミュレーションには、地震調査研究推進本部の公開する邑知潟断層帯の想定地震ケース2を用いた。その結果、推定地盤構造モデルを用いたシミュレーションでは、J-SHISモデルに比べて、邑知潟平野内でモデル最上面での最大速度 (PGV) が大きくなる範囲が広くなり、特に邑知潟平野の中部から南西部の盆地南東端に沿ってPGVが大きくなることが分かった (図23)。推定地盤構造モデルは邑知潟平野の盆地境界部の構造についてより詳しい調査結果に基づいてモデル化したことで、J-SHISモデルと比べて盆地による地盤増幅特性がより確からしいものとなったと考えられる。

「既存在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 [課題番号:CT0C28]」では、今年度は、実大木造建物の復元力特性を再現する実大1層4P試験体の開発を行った。まず静的試験を行ってその結果を重ね合わせ、想定するベースシア

係数になるように錘の重量を調整、二層から一層になることによる周期を地震動の時間刻みを補正することで振動実験を行い、実際の被害を再現できることを確認した。

将来発生する地震動が木造建物にどの程度の被害を引き起こすか、即ち、地震動の破壊力を測る方法として、実大在来木造建物（以下、木造建物）を使った振動実験が有効であるが、多大な費用と労力がかかる。様々な被害関数も提案されているが、過去の強震記録と被害データに基づいたものであり、将来これまでにない性質をもった地震動が発生すれば、被害予測を誤る可能性がある。地震応答解析によって求める方法も開発されているが、非構造部材の影響や復元力特性モデルにおける繰り返し特性など未だに不明な点も多い。

そこで、将来発生し得るこれまでにない性質をもった地震動の破壊力を測る手段として、実大木造建物の挙動を再現できる簡易試験体の開発を行った。

今回の試験体は、大地震で被害を受ける日本に存在する木造建物の中でも耐震性能が低い建物を想定し、木造建物の平均的な降伏ベースシア係数 C_y の分布における、累積確率の下位5%を目標と定めた結果、 $C_y=0.2$ とした。そこで、 $C_y=0.2$ となる試験体を作成するために、静的実験を行い、性能を把握した後、振動実験を行う際の付加重量を設定し、振動実験を行った。

試験体は幅4000mm、高さ2910mmの構面で、軸組のみが1体（試験体名：FR）、壁を2ヶ所に配置したものを2体（試験体名：WL、WL-BR）作成し、配置した壁はWLがサイディングおよび石膏ボード、WL-BRがサイディング・石膏ボードおよび三ツ割筋かいとなっている。次に、振動実験の試験体の性能を把握するために、静的実験の結果を加算した。ここで、振動実験の試験体は全3構面のため、FRを2構面、WLもしくはWL-BRを1構面用いることとし、それぞれを加算した性能を比較した。ここでは、最低限の筋かいが入っている建物を想定し、振動実験の試験体はFRを2構面・WL-BRを1構面用いることとした。

振動実験の試験体は、加振方向4000mm、直交方向1925mmの1層の箱型試験体とし、外側に静的実験のFR、内側にWL-BRを配置した。試験体に付加する重量は、静的実験の荷重を加算（この際、P- Δ 効果を考慮した）し、総重量で割ったものが1/120rad時で $C_y=0.2$ となるよう、合計4tonの錘を天井に配置した。

入力地震動は、既存の建物は大地震を受ける前に中小地震を経験していると考え、2003年宮城県沖の地震のJMA大船渡を震度5強程度となるよう50%に縮小したものを入力した後、震度6強の大地震を入力した。具体的には周期0.5秒以下の極短周期が卓越した2003年十勝沖地震のK-NET 広尾N50W方向と、建物の大きな被害と相関がある周期1-1.5秒が卓越した1995年兵庫県南部地震のJR鷹取NS方向の2種類を用いた。なお、2層を1層に縮約しているため、1層と2層の周期の違いを補正するために、地震動の時間軸を0.91倍に縮小した。

K-NET広尾は震度6強であったが周辺に全壊といった大きな被害を受けた建物が見られていない一方、JR鷹取は木造全壊率59.4%と甚大な被害が生じている。なお、大地震入力前の損傷レベルを揃えるために、K-NET 広尾入力後に壁の交換といった試験体の復旧を行い、ステップ加振を行って復旧できていることを確認した。

実験結果として、K-NET広尾では、最大変形角は0.01radであり、サイディングの割れといった軽微な被害に留まった。JR鷹取では、最大変形角は0.25radと非常に大きく、筋かいの座屈・折損が見られ、全壊程度の大きな被害となった。以上の結果は、実際の強震観

測点周辺の被害状況と対応している。

静的実験と振動実験の性能を比較については、全体的に振動実験の方が大きく、振動実験の試験体のベースシア係数 C_y (1/120rad時)は0.26と静的実験に対して1.3倍程度となった。この要因としては、鉛直荷重・試験方法・載荷速度の違いが考えられる。

(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[課題番号：CT0C23]」では、令和3年度は京都市左京区内の医療施設地震時応答観測網の対象建物のうち、日本バプテスト病院、吉川病院において、ミニアレイ微動観測を実施し地盤特性を推定した。図24に、病院の位置関係と花折断層の破壊により生じる地震動(PGA)の推定マップ(京都府, 2010年)を重ねる。地震動の予測では、鴨川に近い京大病院と吉川病院が同等で600-1000 cm/s^2 程度、山間に位置する日本バプテスト病院は400-600 cm/s^2 程度である。

図25左は吉川病院駐車場で実施した微動アレー観測の様子である。地盤の微動観測記録に自己空間相関法(SPAC法)を適用し、表層地盤の速度構造を探索した。図25右に得られた位相曲線を示す。位相曲線から表層地盤(地表からおよそ30m程度の深さまで)の平均S波速度を推定すると300 m/s 程度と大きな値となり、吉川病院の建物応答推定においては、一般的な地盤における増幅を考慮するのみで良いと考えられる。ただし、建物の形状はL字型で特徴のある平面を有し、さらに屋上の塔屋はスレンダーな形状をしているため、建物応答が複雑である可能性が高いと判断された。そのため、無線式の小型微動計による多点常時微動計測を実施し、応答特性の分析を進めることとした。現在、観測データを分析中で詳細は割愛するが、塔屋が大きく揺れる振動モードが多く、またL字型平面に起因するねじれ振動モードも多く抽出されている。

日本バプテスト病院の敷地は斜面に位置しており、病院の入り口は1階だが、建物裏側に位置する駐車場への出入り口は3階になる。地盤の擁壁と建物の間にはスペースが設けられているが、擁壁の剛性を確保するためか、建物との間に控え壁が配置されており、建物と地盤が完全に独立していない。控え壁上部と建物の接続部には、地震に起因するとみられる亀裂が見られた。このように建物には変土圧が作用している可能性があり、多点常時微動計測を同時に実施した。現在、データを分析中である。微動アレー観測を実施した位置と位相曲線を図26に示す。地盤は予想よりも良好で、特にサイト特性による地震動の増幅が大きくなる可能性は見いだせなかった。しかしながら、敷地内で盛土造成されたとみられる一部の地盤は比較的柔らかいことが、周辺ボーリングデータから確認できた。

(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

「桜島大規模火山噴火を対象とした事前避難を実現するためのリスクコミュニケーション方法に関する実践的研究[課題番号：CT0C16]」は、鹿児島市街地における桜島の大規模噴火に伴う大量軽石火山灰降下による被害軽減に資する事前広域避難の実現に向けて、住民自身がいざという時に、避難行動を実際に実行し、円滑に避難が実現するための体制作りを専門家と避難主体である住民が協働して目指す実践的研究である。令和3年度前半も依然として新型コロナウイルス感染拡大によって、対面でのイベントが実施でき

ない状況が続いていた。第1回のワークショップは2021年11月22日に、最大1mの降灰が予想されている鹿児島市八幡校区のコミュニティ協議会を実施主体として開催した。本研究では、「生命を守るのは自分自身である」という理念に基づき、「検討の場の主体は、あくまでも住民であり、専門家はサポート役であるという関係性」と「長期的継続」という2点について、専門家と住民との間で共有して進めた。住民が避難動機を持つためには、まずは「大量軽石火山灰降下によって、何が起こるのか？」について明確に認識する必要があるという問題意識から第1回は、50cmの軽石火山灰が降り積もった場合の状況をイメージしてもらい、「どのような懸念事項があるか」、そして「今後、どのようなことを考えていく必要があるか」についてグループに分かれて話し合ってもらった。その結果、主に、生き残れるかどうかという不安、避難、事前の備えの必要性、高齢者・身障者支援の必要性などの話題が中心となった。これらのテーマは専門家の間では当たり前のことであるが、住民自身からの語りでこれらのテーマが提起されたことに意義がある。これを受けて、専門家を交えず、住民自身が検討をしていく自主勉強会が立ち上がることとなった。また、住民の問題意識を受けて、専門家側からのフィードバックを行うことで、住民の関心に沿った情報をドラフトすることができた。

「地震発生の切迫性を伝える災害情報モデルとシナリオの構築～北海道胆振東部地震からみえた新たな課題としての複合連鎖問題の解釈を通して～[課題番号:CTOC17]」は、令和元年度に始まり、今年度をもって3カ年の区切りとする。

地震に代表される被害想定は、減災目標の設定と目標達成のための対策検討に資することであり、そのために想定ハザードに対する被害評価がマクロ的には国（中央防災会議、以下内閣府とも記載）が、また各地方においては地方公共団体（都道府県、市町村）が実施し、結果が公表されている。しかし、想定されている被害内容・公開情報は減災対策検討に十分なものであるだろうか。その検証は十分になされているとは言えない。たとえば南海トラフ巨大地震の被害想定第一次報告（平成24年8月29日、中央防災会議）には、被害想定は意義として以下要約するに「具体的な被害を算定し被害の全体像を明らかにすること、その上で各種の防災対策を立案する」とある。さらに続けて「防災対策を講ずることによる具体的な被害軽減効果を示すことで、防災対策を推進するための国民の理解を深める」とある。すなわち、被害想定と被害軽減効果は別途計算し、国民の対策への理解を求めることが被害想定は目的であり意義と謳われている。本研究はここに異議を唱え、本来あるべき被害想定は目的とするための被害想定方法を提案し、それを胆振東部地震の被害実態と検証することで、中央防災会議が提唱する被害想定は標準方法が抱える問題点を明らかにしたことを、この3カ年の成果として以下にその概要を報告する。

（i）災害誘因予測に基づく被害想定が災害軽減に貢献する情報足る条件

本来、具体的軽減対策はその対策実施による被害軽減量を被害想定手法により算定し、対策の有無による被害量の差をもってその効果評価とし、その基で対策の適否判断がなされるべきである。そのプロセスを省略し軽減効果として公表したとしても、真にそれだけの効果があるのかの検証が得られていない故に、国民の納得は得られないであろう。この理由から、被害想定手法は対策の効果評価が可能な形で考慮されていなければならないのは明らかである。すなわち、被害量を単に見積もるだけの相関モデルではなく、対

策の手段が「陽」の形で検討可能な因果モデルで構成される必要があるが、標準の想定手法として中央防災会議が提示している手法はその条件を十分に満たしていると言えるのであろうか。加えて、モデルの基となる被害データ（公表値）は地域被害及びその後の対策（復旧）の実態を捕まえた量であるのは当然であるが、意外とその検討はされていないことに気づくべきである。

（ii）想定地震と2018年北海道胆振東部地震とのハザード比較

北海道は地震防災対策の基礎調査資料として、2011年に道内及び周辺に31 地震193 パターンの地震動分布を、その6年後に平成28年度地震被害想定調査結果報告を公表している。胆振東部地震に震源位置が最も近似している想定地震は石狩低地東縁断層帯南部（モデル30_5）と称するものである（図27右）。震源諸元を比較すると両者の震源形状は大きく異なり当該地震は想定震源ではない。また道内で観測された計測震度を想定地震の自治体単位最大震度と比較すると（図27左）、想定地震の方が大きな震度を与えている。よって、被害が広域に及ぶ土木系被害の検証には十分とは言えないが、厚真・安平・むかわの被災3町については胆振東部地震とほぼ同じ震度が計算されており、地震動を1指標（震度あるいはPGV）で代表し被害計算するのが一般的な単独被害（木造住家被害や人的被害）の検証には3町の被害比較は問題なく、災害誘因予測の意義を災害対策と結びつける検証にもなろう。

（iii）木造住家の被害比較と対策に必要な情報について

当該地震の被災3町の木造住家についての公表被害実数と、想定地震を対象に内閣府の方法と北海道の方法による被害数比較を表1に示す。内閣府の想定手法は阪神・淡路大震災の被災地の住家築年代と被害率の関係をを用いて計算する（図28）。一方、北海道の方法は当該地域の住家の耐震性能のばらつきを加味するため耐震診断値（耐震評点）を確率分布で与え、岡田・高井（2004）による損傷度関数（震度-耐震評点-損傷度の関係）を用い、より詳細なDamage Index (D-Index) またはDamage Level (D-Level) による損傷度評価を行っている（図28）。胆振東部地震の被害実数との比較は、地域性の考慮のない内閣府の方法に比べ、北海道は実態に近い被害評価を与えており、木造住家の被害想定には地域性（住家耐震評点の実分布）の考慮の重要性が確認できる。

さらに、必要な住家被害情報について注目したいのは実被害の判定基準である。実被害の実態公表値となる災害対策本部発表の「全壊」の定義は、「居住のための基本的機能喪失が床面積の70%以上、または経済的被害の損害割合が50%以上」とされており、罹災証明の判定基準にほぼ等しい。それに対し被害想定は一般に建築構造的損傷度により判断するものであり、両者は乖離している（図28）。表1からは当該地震の公表被害実数で厚真町が他2町よりも大きい。3町で1981年以前の古い木造住家割合はそれぞれ55%・48%・61%であり、構造耐震性に然程の差は認めがたく、同表に併記した罹災証明で認定された被害率からも、厚真町は構造損傷よりもむしろ復旧に関わる経済的損傷の観点から被害認定した可能性は否定できない。罹災証明による被害認定は、その後の復旧助成に大きく関わることから、地域復旧の遅速にも影響することが予想される。それが発端となり集落消滅など地域の将来的社会構造から都市再生マスタープランにまで影響する。実際、当該地域は他の地震（中越、九州地方）に比べ、全半壊住家共に「再建」の費用工面ができず、罹災証明による被害判定で応急修理助成が受けられる「補修」で対応する世帯が多かった事実が、その後の調査により判明している（図29、岩崎・他，2020）。災害

対策の観点からは、被害想定には構造的被害に加え復旧に関わる被害認定の指標も同時に検討する重要性を指摘しておきたい。なお、住家被害損傷度（D-Index）は罹災証明の判定区分とも相性が良い（図28）。

（iv）人的被害の比較と対策に必要な情報について

住家被害に伴う人的被害についての手法比較を図30に示す。内閣府の方法は近年発生の5地震に関する全壊建物棟数と死者数の相関関係から求めるものである。阪神・淡路大震災で判明したとおり、全壊といえども層崩壊しない建物（D-Level D4）では死者は殆ど発生しない。北海道が採用している建物損傷度D-Index（D-Level1）に基づく棟死亡率関数による人的被害評価法（田畑・岡田，2006）のほうがより精度が高い。死傷者の実数比較（表2）においても内閣府の方法では負傷者の全員が重傷者にカウントされており不自然であるが、北海道は実数と想定に乖離は認められない。

人的被害情報についても、これまで議論の中心とされてこなかった被害定義の問題を指摘しておく。災害対策本部が公表値として集計する死傷者の定義は、交通事故統計あるいは警察出動有無判断で用いる傷度3区分（死/重傷/軽傷）にほぼ近い。すなわち、当該災害が原因で死亡した者（または死亡したことが確実な者）を、災害発生時に滞在していた市町村の死者として扱い、負傷し1ヶ月以上の治療を要した者を重傷、1ヶ月未満を軽傷とする。しかし、この数値が防災対策に活用されていない実態に留意すべきである。本来災害時においては医療態勢に関わる情報がより重要なはずであり、消防庁（災害救急）で用いる症度（重症/中等症/軽症）で判断すべきであろう。平常時においては入院加療を要する中等症であっても、大災害時においては二次救急病院における重症患者措置を必要としない判断もある。症度情報は傷度情報と同様に人的被害情報として必要である。この情報は事前の医療防災対策の観点からも重要であり、想定被害情報としても有効なはずである。このことに配慮できる外傷重症度指標ISS（またはAIS）評価を推奨する。本研究では当面、内臓損傷（ $ISS \geq 12.5$ または $AIS \geq 4$ ）以上を重症とする。医療処置は必要だがより症度の軽い火傷・捻挫・脱臼・単数骨折程度（ $12.5 > ISS \geq 3$ または $4 > AIS \geq 2$ ）を中等症とする（図31）。

もう一つの問題は被害実数の信憑性である。重軽傷者の定義の曖昧さに加え、対策本部が把握し公表している負傷者数は災害対策本部基準によれば、災害時において救急医療チームが当該自治体の第二次救急病院に搬送した負傷者のみをカウントしているケースが多く、災害発生時に居留の市町村負傷者数から漏れてしまうこともあるということである。事実、当該地震において厚真町の公表重傷者はゼロであるが、足部骨折により他市の病院に救急搬送され入院加療1ヶ月以上を要した重傷者がいた。当研究グループが被災3町全世帯を対象に実施したアンケート調査による負傷者数を集計し表2中に示す。公表値に比べアンケートでは他市町病院に入院した重傷患者をも捕捉しており、負傷率に不自然さはない。被害データ（公表値）は、種々の評価式構築のための基礎となる値であり、この値に信憑性がなくなると被害評価そのものの信頼性が失われ由々しき事態となる。公表値といえどもデータの収集法、また定性的データの場合はその尺度の定義を含め、細心の注意が必要である。

（v）シナリオ連鎖型被害評価法の提案

南海トラフ巨大地震被害想定報告書には「建物の現状の耐震化率（約8割）を約9割まで上げることによって、全壊棟数は約4割減少すると推計される」との記載がある。また

「家具等の転倒・落下防止対策の実施率の現状は約26%であり、実施率を75%に強化した場合、それによる死者数は約半減すると推計される」とある。しかし内閣府の被害推定手法によりこの軽減効果を合理的に説明するのは不可能である。なぜなら、同手法では住家の建築年をパラメータとした被害推計であり、耐震化強化策による耐震性能向上を陽の形で検討はできないし、家具固定もその実施率強化が対策ではあるものの、推定式内での実施率とは何らかの固定対策を実施している世帯割合であり、世帯による固定家具数の違いについては何の配慮もなく、実質的家具固定率ではない。

人的被害は建物倒壊に伴う部材落下によるもの、それに加えて室内の家具配置密度（これは地域性や世帯年代、加えてライフスタイルが強く反映する）に大きく左右される室内散乱状態下における居住者の避難行動の適否（これは地震発生時間帯が大きく影響する）、家具等との接触状態など、種々の物理的条件とその時間展開の中で発生する。これらを被害推定式で因果関係として記載し、さらに先に提案の被害指標に従った被災状態推定により、始めて具体的軽減対策情報となり対策の効果評価も可能となる。内閣府と北海道の方法比較において胆振東部地震の被害検証を通して北海道の有意性を明らかにしたところではあるが、まだ不十分であることがこれからも明らかであろう。図32～34は住家と人的被害に関するそのための被害想定手法の提案である（岡田・中嶋，2018）。

この被害想定手法で計算した結果は表2中の最右列である。ハザードは想定震度分布ではなく、胆振東部地震のQuiQuake分布を用いたため想定被害と直接比較はできない。また、負傷者数は多少多く推定されているが、その理由を提案式から検討した。推定に用いるパラメータは「揺れている最中の負傷非回避行動能力 $(1-B) = 100\%$ （回避行動は全くとれなかったとした）」と「家具配置密度に関わる家具転倒領域率 $R = 15\%$ （全国消費実態調査報告の北海道の平均値を採用）」としたが、実際には被災3町の寝室の家具転倒領域率がそれぞれでかなり小さかった（ $11.8\% \cdot 7.2\% \cdot 13.2\%$ ）ことが理由に挙げられ、このように室内状況の地域性も検討可能となる（図35）。

「文化遺産の所在情報と災害情報の重ね合わせによる文化遺産災害情報マップの構築と活用[課題番号：CTOC29]」について、令和3年度は、北海道・東北地方の市町村が指定する文化財、総数約18000件の位置情報を収集し、文化遺産マップへの登録作業を進めた（図36）。市町村指定文化財については、自治体別に公開の有無、情報の詳細が異なり、位置情報の把握が困難なものも多く、位置情報が判明しないものについては、周辺情報や座標情報を収集し、これらを登録した。現段階で、国指定・都道府県指定の指定文化財35000件に、今年度収集した情報を加えた約5万件のデータベースを収集し、eコミマップをプラットフォームとした文化遺産マップを構築した。また、神戸大学の資料ネットと連携し、神戸市域の指定文化財を登録した文化遺産マップを作成した（図37）。

災害時における文化遺産マップの活用については、令和4年1月22日に発生した日向灘の地震について、気象庁の発表した想定震度分布をもとに、大分県・宮崎県の国・県の指定文化財に加え、震度5強を観測した自治体の指定文化財情報を収集し、現地の資料保全関係者に共有するとともに、1月26日に被災地の資料保全ネットワークや現地の博物館関係者などとオンラインによる会議を開催し、文化遺産マップ（図38）を媒介として、被害状況の情報共有と今後の対応について協議した。

「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[課題番号：CT0C30]」では、地震ハザードシナリオに多様性、さらには多様な地震ハザードシミュレーションにおける自治体のシミュレーションの位置づけを示すことが可能なシステム(図39)についての自治体職員に対するヒアリング調査を実施し、システム改良点ならびに、システムを用いた災害シナリオの多様性の理解についての調査を行い、調査結果をもとにシステムの改良を行うとともに、災害シナリオの多様性理解を深めるためのあり方についての検討を行う予定であった。しかし、新型コロナウイルスの影響でインタビュー調査を実施することが困難であったため、システムの改良の作業を行うとともに、ヒアリング時に利用する内閣府による地震動想定を表層での速度シミュレーション結果についての見直しを実施した。

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、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し、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

Chimoto, K., H. Yamanaka, S. Tsuno, M. Shigefuji, T. Kanno, H. Sato, S. Higashi, D. Shinoyama, M. Yoshimi, T. Sugiyama, N. Takai, S. Matsushima, F. Nagashima, H. Kawase, T. Hayakawa, T. Uetake, S. Senna, Y. Inagaki, T. Hayashida, and S. Oji, 2021, Results of blind prediction step 1: Subsurface velocity structure model of Kumamoto test

site, The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, SS102.

Fukui, N., Chida, Y., Zhang, Z., Yasuda, T., Ho, T.-C., Kennedy, A., & Mori, N., 2022, Variations in Building-Resolving Simulations of Tsunami Inundation in a Coastal Urban Area, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 148(1), doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000690.

福井信気, 森信人, 千田優, 安田誠宏, 2021, 都市地形を対象とした津波浸水時の陸域の流速場の比較検討, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, 77(2), I_211-I_216, https://doi.org/10.2208/kaigan.77.2_I_211.

福井信気, 森信人, 千田優, 安田誠宏, 2021, 都市地形を対象とした津波浸水時の陸域の流速場の比較検討, 第68回海岸工学講演会.

Ho, Tung-Cheng, 2021, What we learned from the 2011 Tohoku Tsunami that unveils the 1960 Chile Earthquake, *The 30th International Tsunami Symposium*, e90130.

Ho, T.-C., Satake, K., Watada, S., and Fujii, Y., 2021, What we learned from the 2011 Tohoku Tsunami that unveils the 1960 Chile Earthquake., *The 30th International Tsunami Symposium*.

Ho, T., Satake, K., Watada, S., Hsieh, M., Chuang, R. Y., Aoki, Y., Mulia, I. E., Gusman, A. R., & Lu, C., 2021, Tsunami Induced by the Strike - Slip Fault of the 2018 Palu Earthquake (Mw=7.5), Sulawesi Island, Indonesia, *Earth and Space Science*, 8(6), doi.org/10.1029/2020EA001400.

小林純平・中嶋唯貴・岡田成幸, 2021, 夜間発生地震に対する人体損傷度関数の適合性並びに応用拡張性の検討, 第48回地域安全学会研究発表会(春季), C-9.

Kusakabe, Ryota, Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Muneo Hori, Lalith Madgededara, 2022, GPU-accelerated Multiphysics-based Seismic Wave Propagation Simulation and its Surrogate Model with Machine Learning, *HPC Asia 2022: The International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region*.

Maki, N., T. Baba, K. Nishijima, T. Saeki, S. Shite, 2021, How can we communicate with people about variety of hazard simulation outputs? shaking and tsunami of Nankai trough earthquake, *17th World Conference on Earthquake Engineering*, N° C001878.

Matsushima, S., H. Yamanaka, S. Tsuno, H. Sato, and Y. Inagaki, 2021, Results of borehole survey at the target site of ESG6 blind prediction exercise and laboratory tests, *The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, SS101.

松島信一・吾妻崇・市村強・野澤貴・中山智貴・中嶋唯貴, 2022, 邑知潟平野の推定地盤速度構造の非線形地盤応答を考慮した強震動予測, 拠点間連携共同研究実施報告書(研究実績報告書).

Miyashita, Takuya, 2021, Estimation of tsunami response functions considering bathymetry in the pacific coast of Japan, *The 30th International Tsunami Symposium*, e90039.

中山智貴・松島信一, 2022, 邑知潟平野の地盤構造推定とそれを用いた強震動予測に関する研究, 京都大学防災研究所令和3年度研究発表講演会, B118.

中山智貴・松島信一, 2021, 常時微動を用いた邑知潟平野の地盤構造推定, *日本地震工学会・大会 - 2021*, B-4-7.

- 宮下卓也・倉田一輝・安田誠宏・森信人・志村智也, 2021, 確率津波モデルを用いた南海トラフ巨大地震による津波高の不確実性評価, 土木学会論文集B2(海岸工学), 77(2), 1_181-1_186, https://doi.org/10.2208/kaigan.77.2_I_181.
- 宮下卓也, 倉田一輝, 安田誠宏, 森信人, 志村智也., 2021, 確率津波モデルを用いた南海トラフ巨大地震による津波高の不確実性評価, 第68回海岸工学講演会.
- Miyashita, T., Mori, N., and Ho, T-C., 2021, Estimation of Tsunami Response Functions Considering Bathymetry in the Pacific Coast of Japan, The 30th International Tsunami Symposium.
- 岡田成幸・中嶋唯貴・竹内慎一, 2021, 地震被害想定を検証 その2 ー対策に必要な人的被害情報とその評価法ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 21024.
- 岡田成幸・中嶋唯貴・岩崎祥太郎・竹内慎一・松島信一・三宅弘恵, 2022, 北海道胆振東部地震からみえた地震被害想定情報の新たな課題, 令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会, B119.
- 大西正光, 2021, 大量軽石火山灰降下からの事前広域避難体制確立に向けた実践的研究, 2021年度桜島大規模火山噴火総合研究グループ研究集会.
- 齊藤隆志, 2022, 地震前後の地表変位から考えられる斜面崩壊・地すべりの発生メカニズム, 京都大学防災研究所令和3年度研究発表講演会, D101.
- 菅沼亮輔, 宮下卓也, 森信人, 志村智也, 2022, 南海トラフ地震を対象とした津波および強振動被害の複合評価, 令和3年度防災研究所研究発表講演会.
- 竹内慎一・岡田成幸・中嶋唯貴・森松信雄・宮内淳一・長瀬拓也・齊藤隆典・戸松誠, 2021, 北海道胆振東部地震の被害を考慮した木造被害率関数の検討 ーその1 地震被害情報による被害率関数のベイズ更新ー, 第94回日本建築学会北海道支部研究発表会, No. 112.
- Tsuno, S., H. Kawase, H. Yamanaka, S. Matsushima, T. Iwata, T. Hayakawa, T. Ikeura, S. Noguchi, and K. Kaneda, 2021, Results of blind prediction step 2: Simulation of weak motions observed at the Kumamoto test site, The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, SS103-BP2.
- Tsuno, S., H. Kawase, H. Yamanaka, S. Matsushima, T. Iwata, T. Hayakawa, T. Ikeura, S. Noguchi, and K. Kaneda, 2021, Results of blind prediction step 3: Simulation of strong motions observed at the Kumamoto test site, The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, SS103-BP3.
- 山中浩明・津野靖士・地元孝輔, 2021, 熊本地震の強震動のブラインド予測, 日本地震工学会誌, 第43号.
- 山中浩明, 津野靖士, 重藤迪子, 神野達夫, 高井伸雄, 松島 健, 2021, 2016年熊本地震の強震動ブラインド予測の岩盤サイトにおけるS波速度構造探査, 物理探査学会第145回(2021年度秋季)学術講演会, 63-65.
- Yamanaka, H., S. Tsuno, M. Shigefuji, T. Kanno, K. Chimoto, T. Matsushima, and S. Matsushima, 2021, Temporary strong motion observation around kumamoto test site for blind prediction of strong ground motion, The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, GS5-P36.

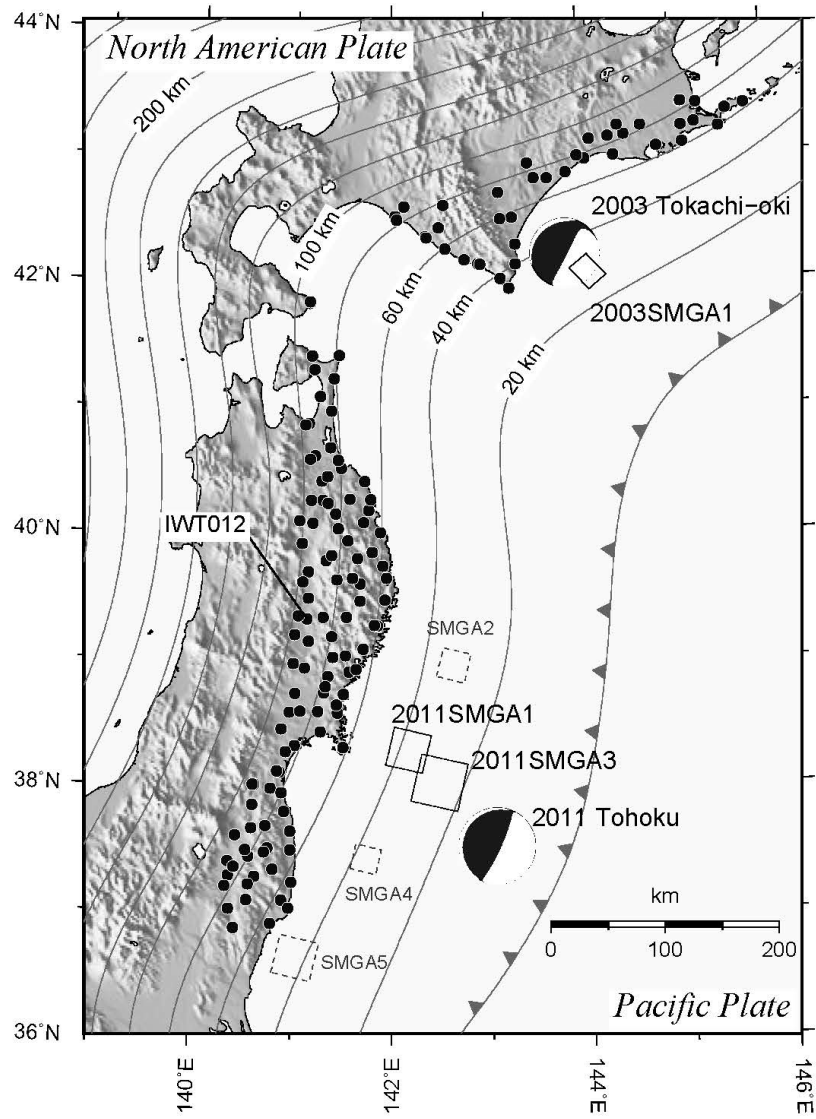
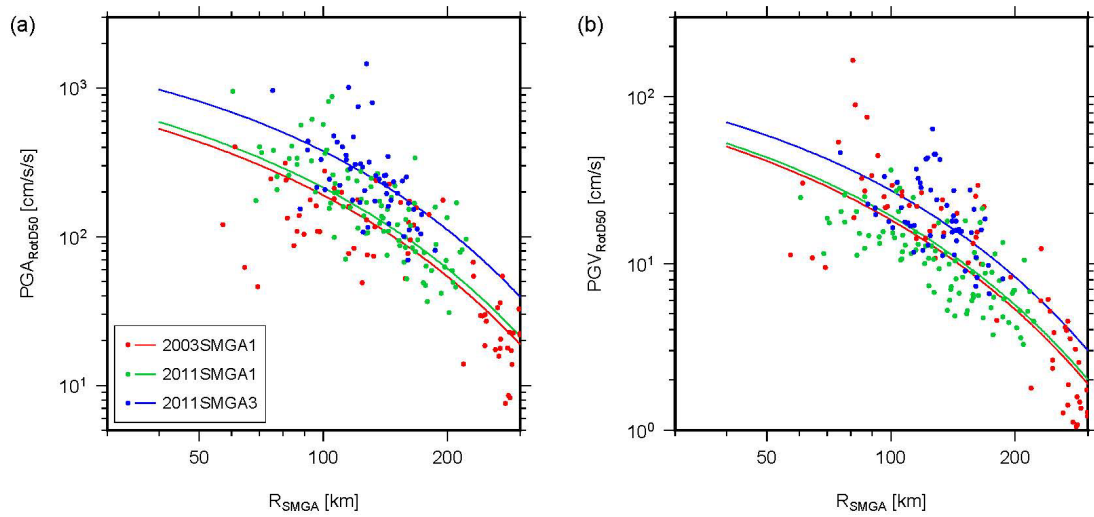
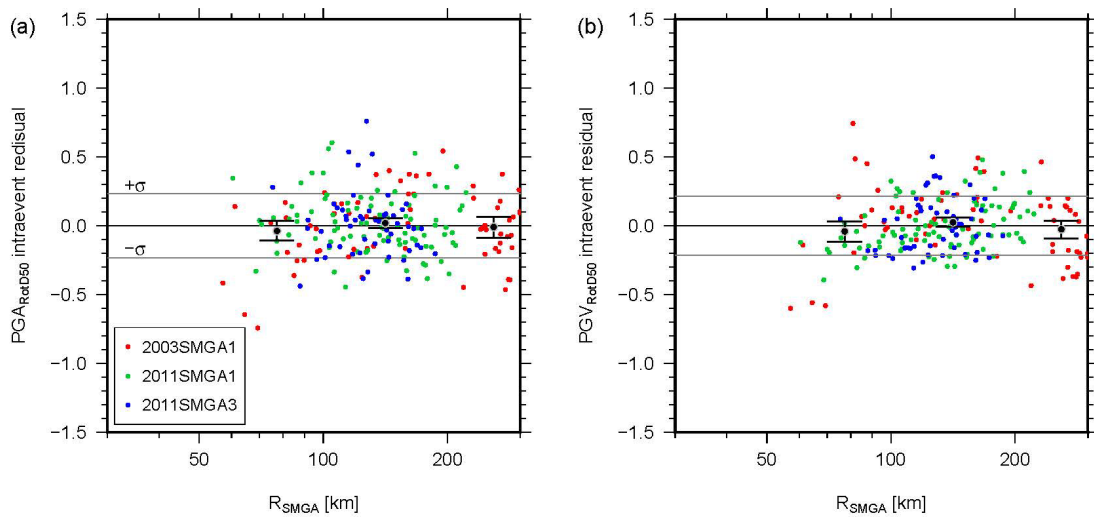


図1. 2003年十勝沖地震と平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の強震動生成域と解析に用いた観測点位置



(a) RotD50の最大加速度 (PGA) (左) とRotD50の最大速度 (PGV) (右)



(b) RotD50のPGAのinter-event残差 (左) とRotD50のPGVのinter-event残差 (右)

図 2. 強震動生成域に特化した地震動の距離減衰式 [課題番号: CT0C01]

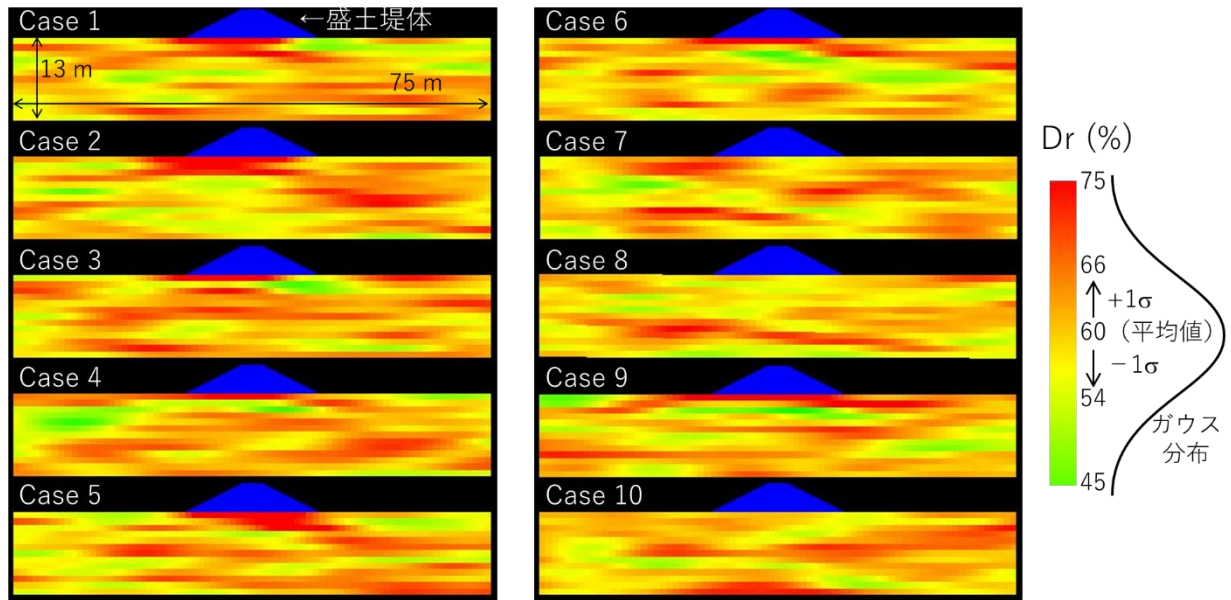
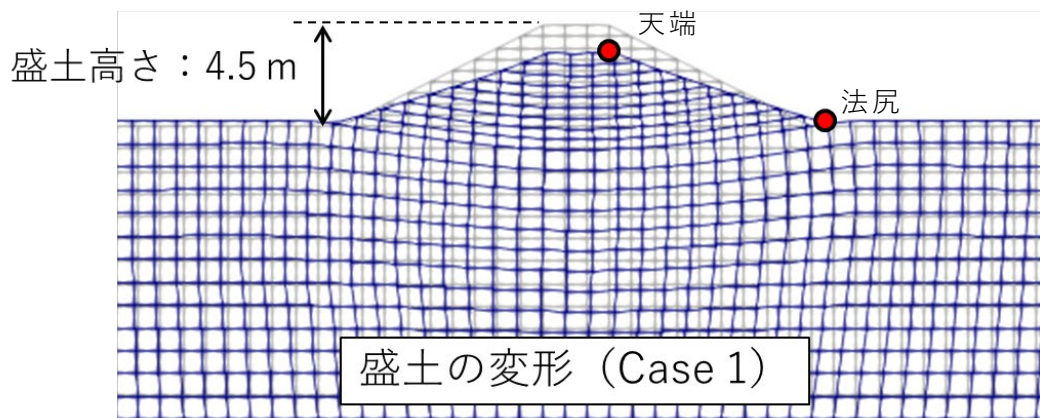
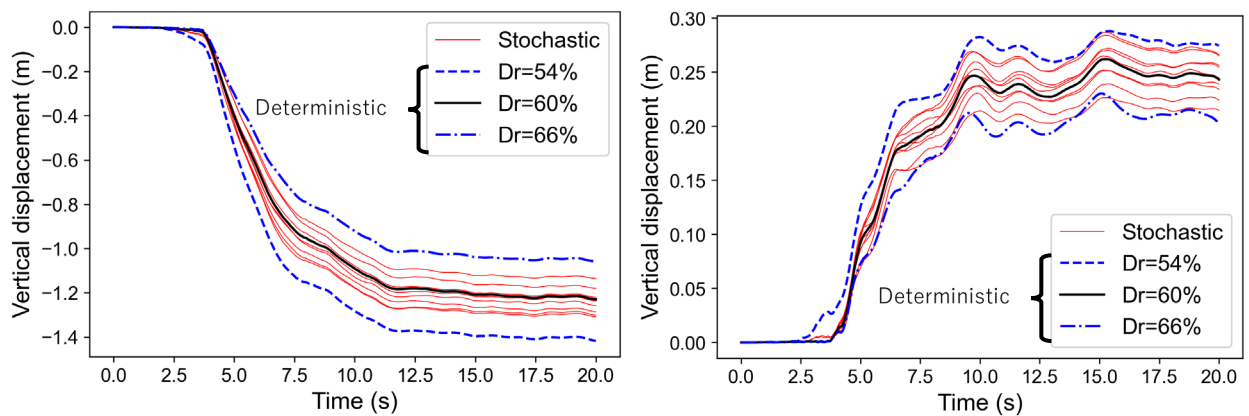


図 3. 基礎地盤における相対密度 (Dr) の空間的不均質性 [課題番号 : CT0C01]



(a) 盛土および基礎地盤の変形の例



(b) 盛土の天端 (左) と法尻 (右) での沈下量

図 4. 基礎地盤における相対密度の空間的不均質性を考慮した場合と平均値±標準偏差の確定的な相対密度を用いた場合の盛土沈下量 [課題番号 : CT0C01]

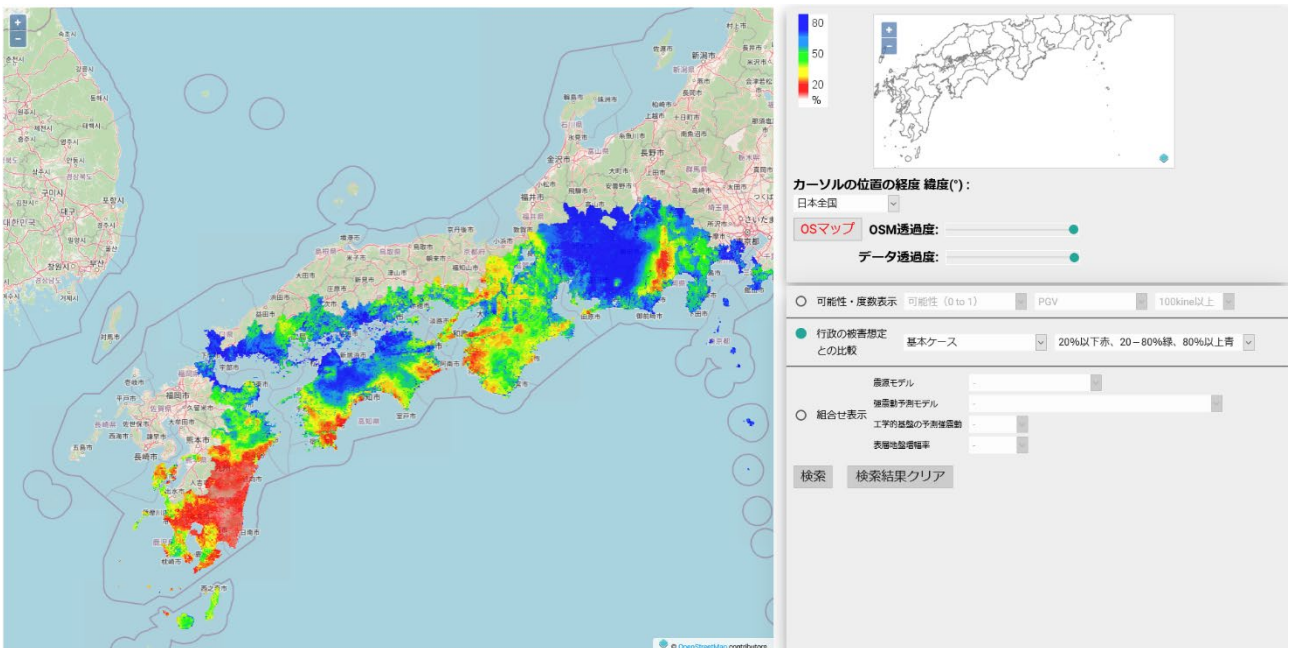


図5. 南海トラフ地震の地震動評価のばらつき評価の試行（基本ケース） [課題番号：CTOC02]

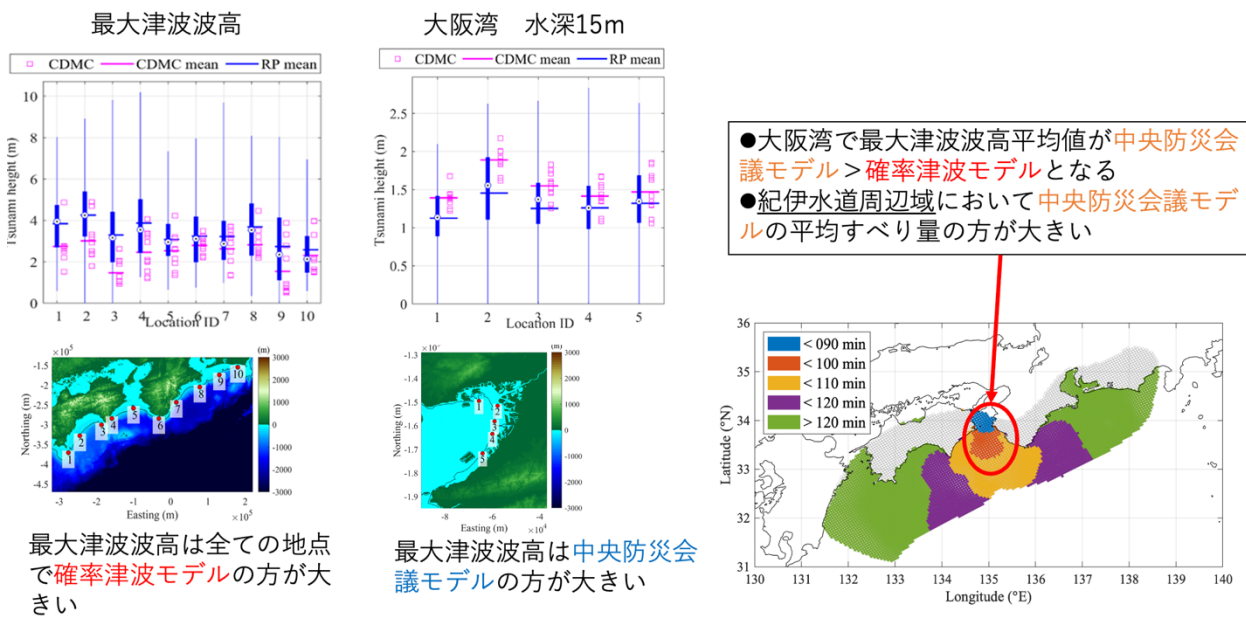


図6. 京大防災研グループが開発しているランダムにすべり分布を生成する確率津波モデルと、内閣府中央防災会議モデルの2種類の津波高の特性の比較 [課題番号：CTOC04]

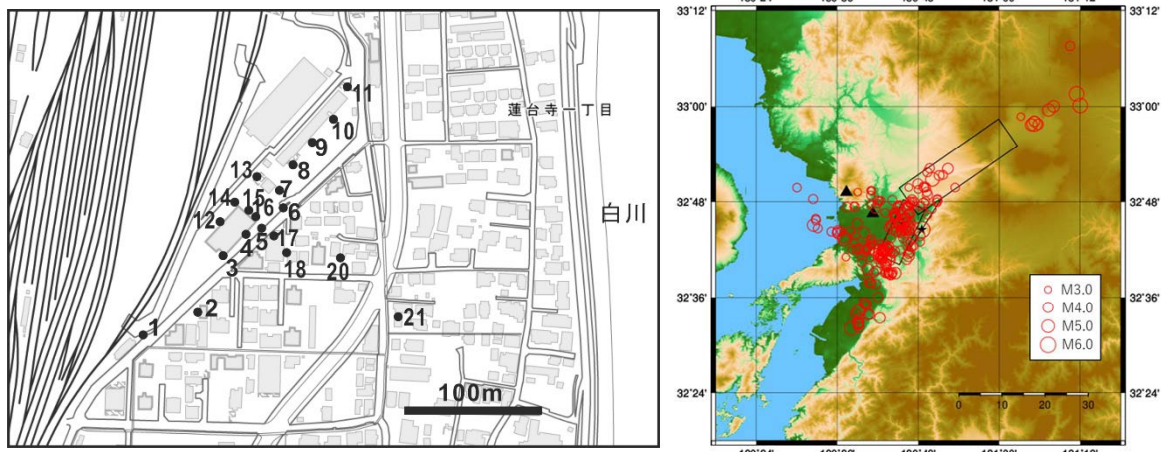


図7. 臨時観測点の位置（左）と観測された地震の震央（右） [課題番号：CT0C07]

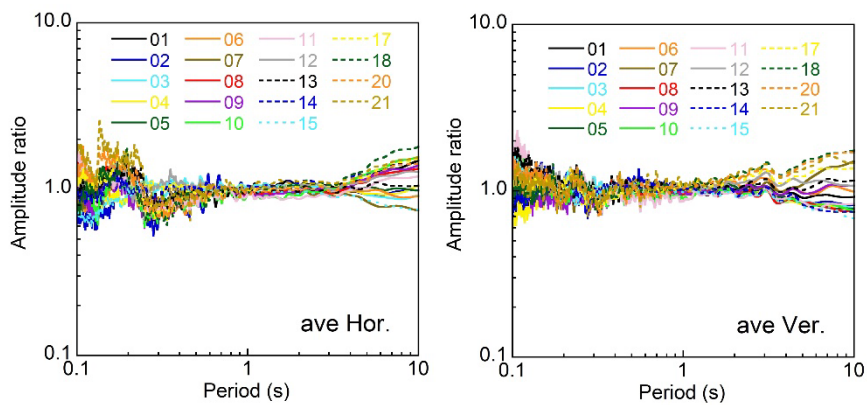


図8. 観測点16に対する水平（左）および上下（右）成分のスペクトル比 [課題番号：CT0C07]

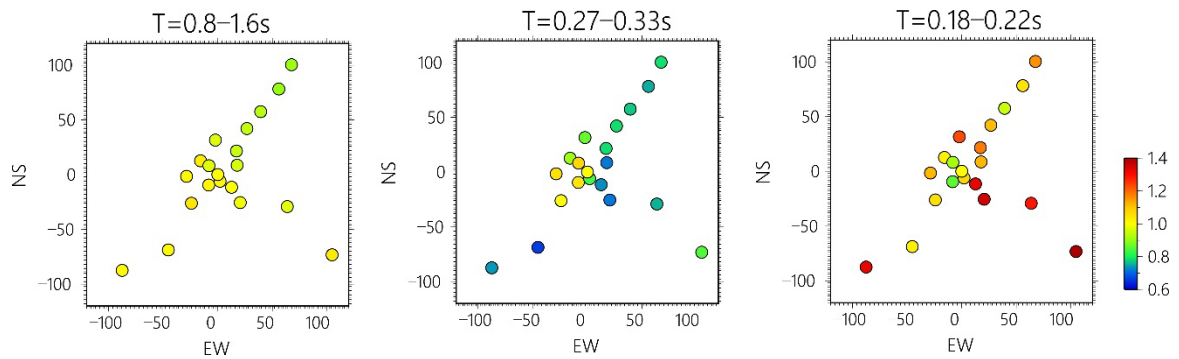


図9. 周期毎の水平成分のスペクトル比の分布 [課題番号：CT0C07]

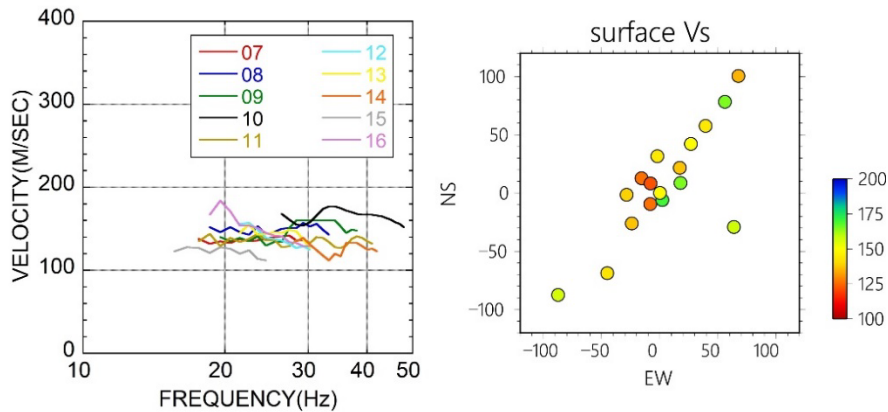


図10. 各観測点での表面波探査の結果 [課題番号：CT0C07]

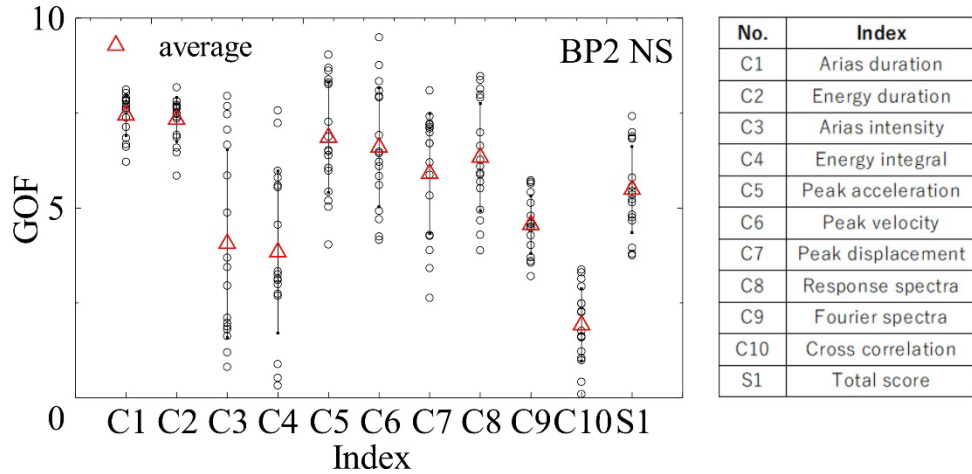


図11. ESG6での強震動のブラインド予測 (BP2) の結果の定量的評価 [課題番号 : CT0C24]

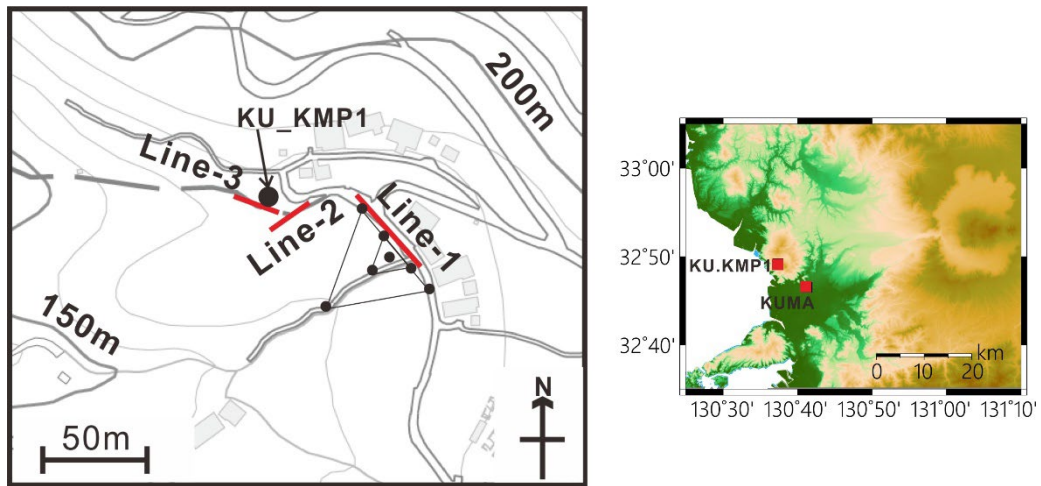


図12. 表面波探査を実施した3測線とアレイ微動観測地点 (左) と岩盤サイトKU.KMP1とテストサイトKUMAの位置関係 (右) [課題番号 : CT0C24]

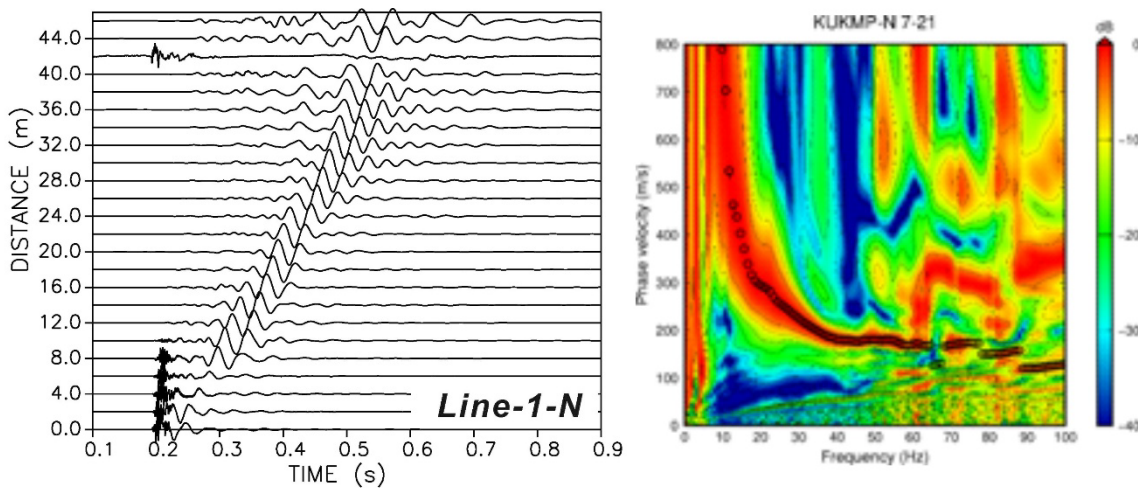


図13. 測線1の北側での加振による上下成分の速度記録 (左) とビームフォーミング解析により得られた位相速度 (右) [課題番号 : CT0C24]

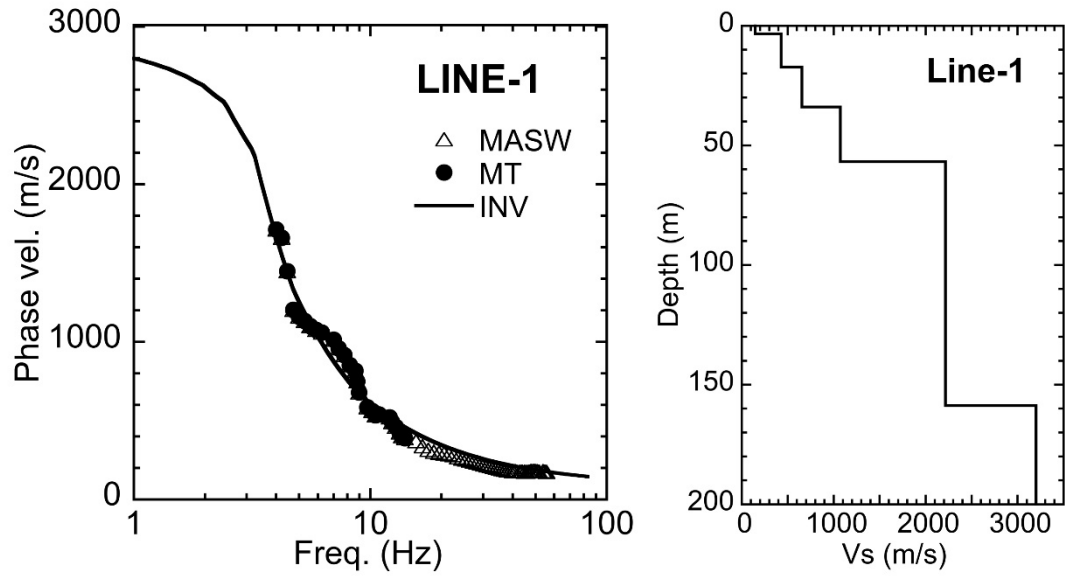


図14. 岩盤サイトでのレイリー波の位相速度（左）と逆解析されたS波速度構造モデル（右） [課題番号：CT0C24]

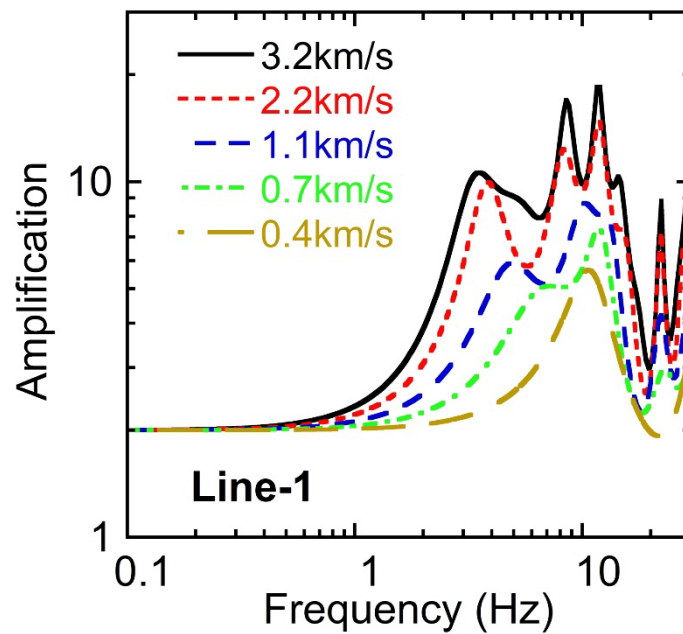


図15. 岩盤サイトの地下構造モデルの最下層を変えた場合の増幅特性 [課題番号：CT0C24]

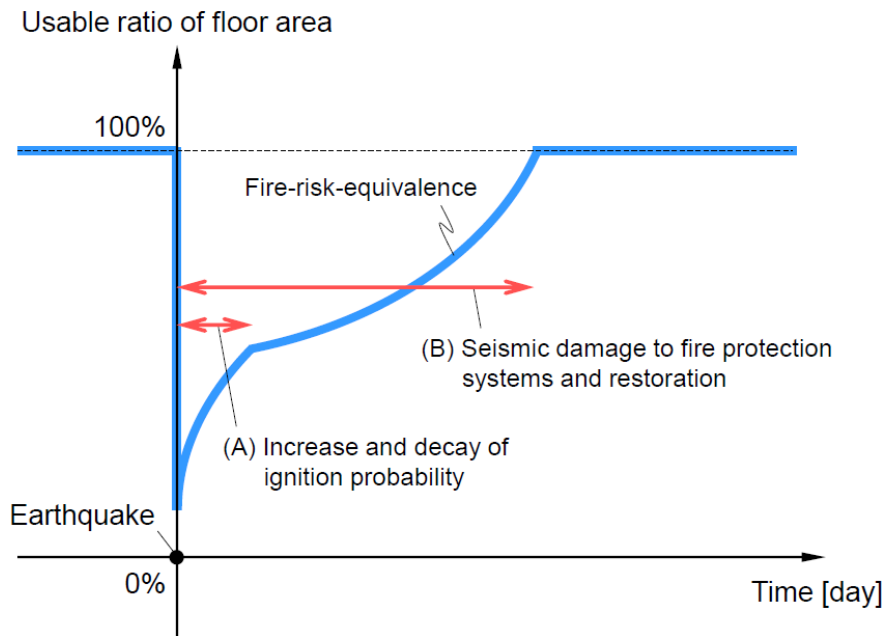


図16. 火災リスクの観点からの地震レジリエンス評価の概念 [課題番号：CT0C25]

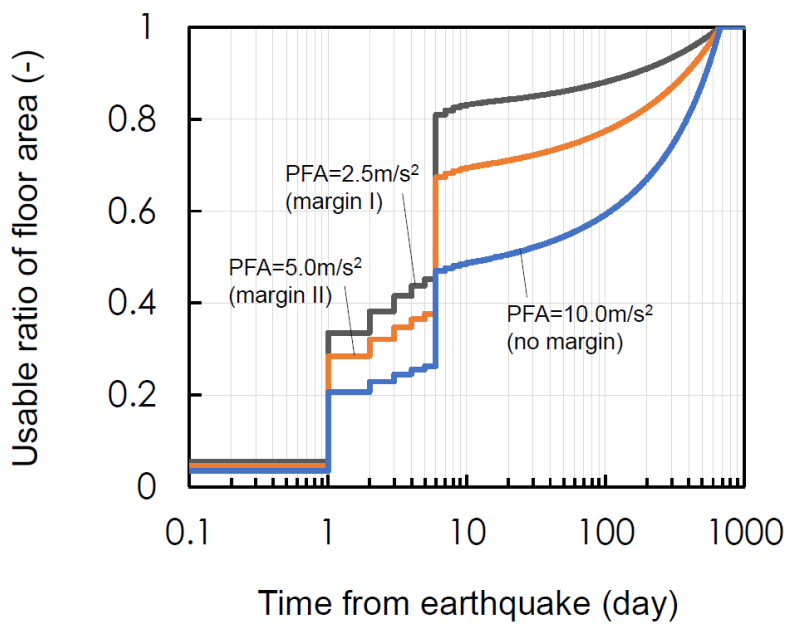


図17. 計算例 [課題番号：CT0C25]

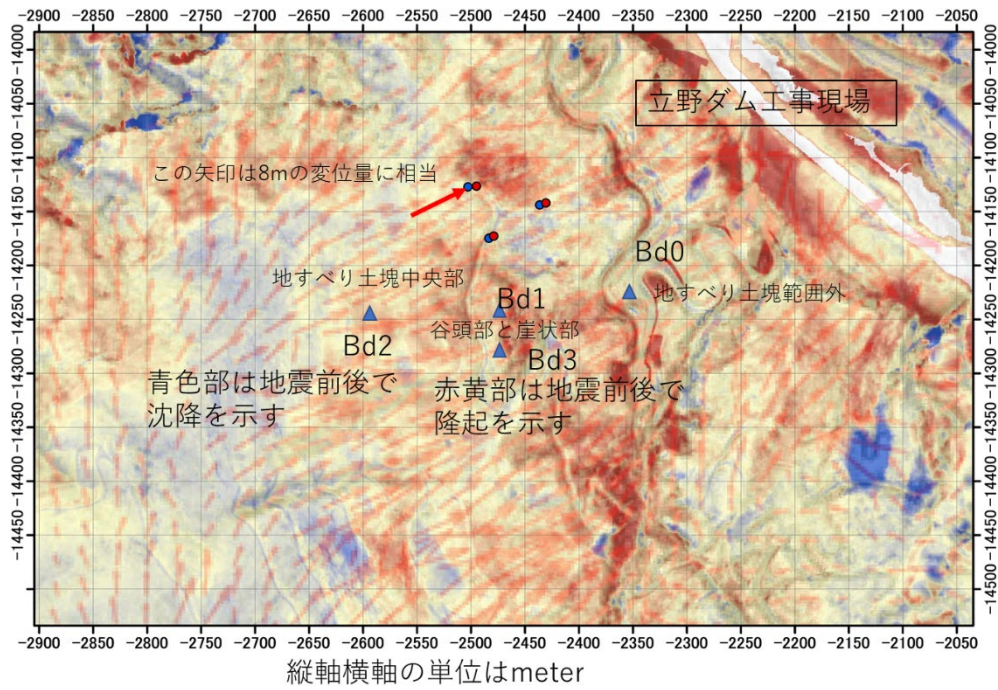


図18. 熊本立野地区の地震前後PIVによる地表変位および観測点など [課題番号:CT0C26]

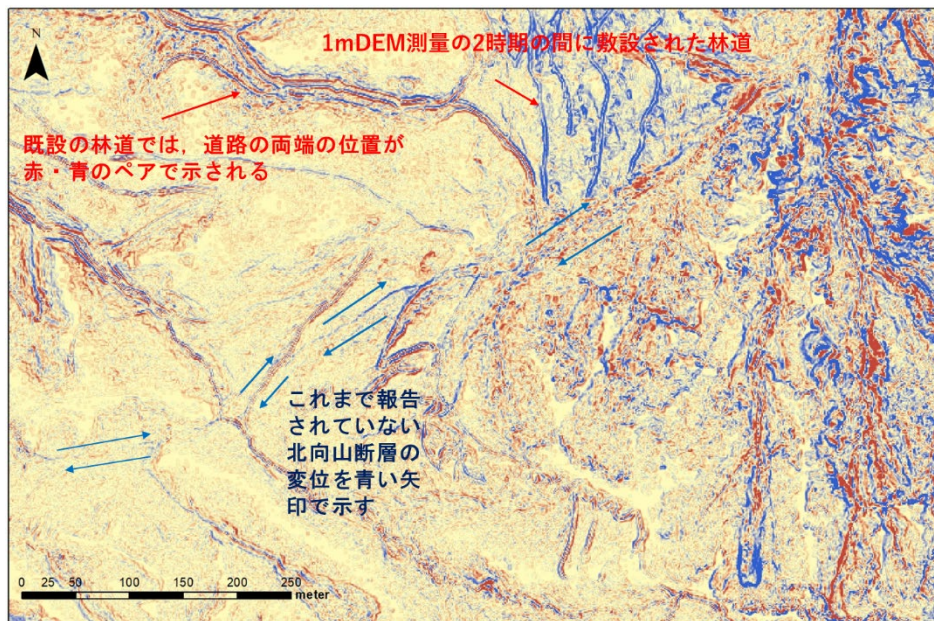


図19. 本手法で検出された地表変位（北向山断層） [課題番号:CT0C26]

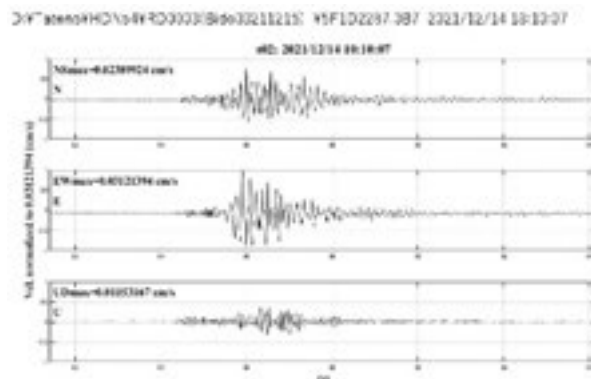


図20. 地震動観測で得られた波形例 [課題番号:CT0C26]

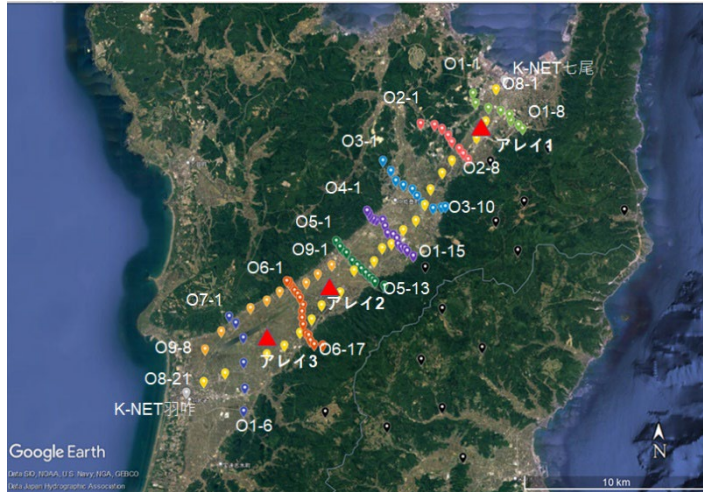


図21. 微動観測点配置 (Google Mapに加筆) [課題番号: CT0C27]

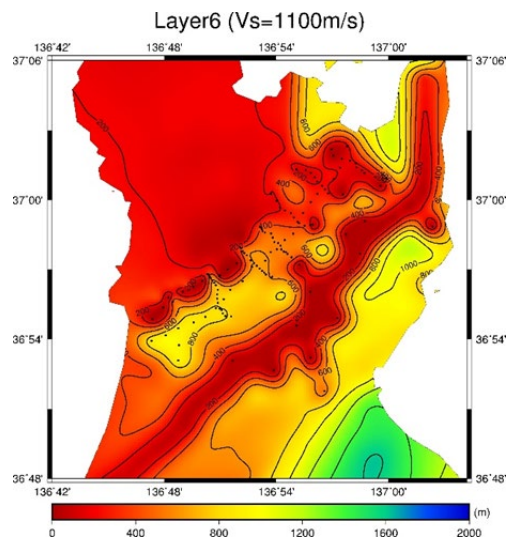


図22. 推定地盤構造モデル ($V_s=1100\text{m/s}$ 上面深さ) [課題番号: CT0C27]

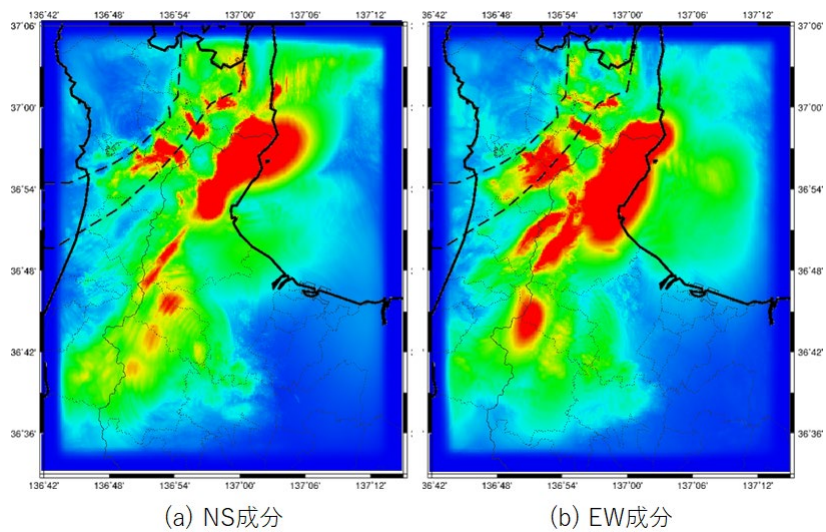


図23. 邑知潟断層帯の想定地震ケース2によるモデル最上面最大速度分布 [課題番号: CT0C27]

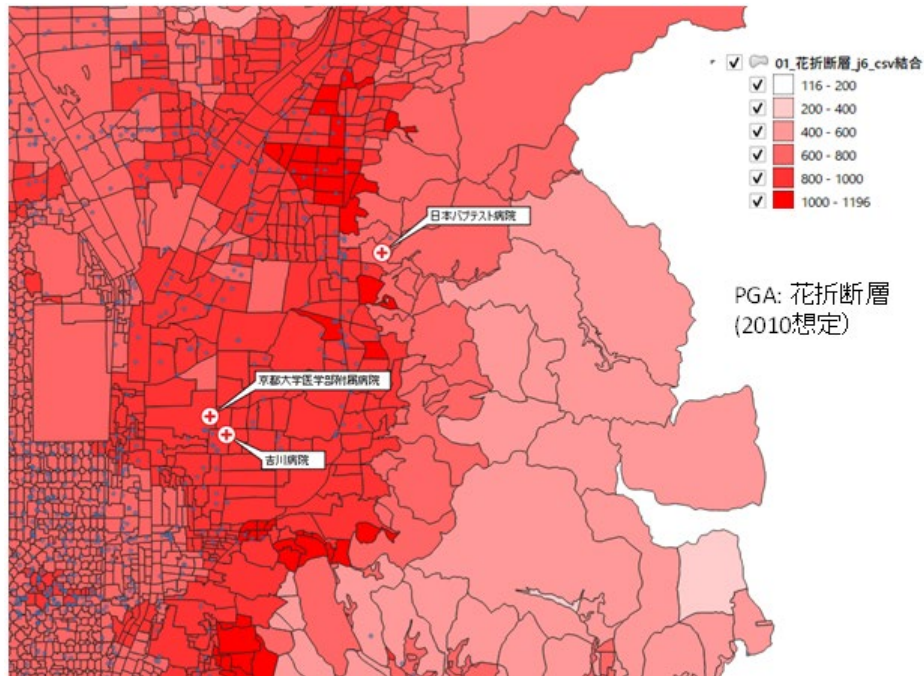


図24. 観測中の医療施設 [課題番号: CT0C23]

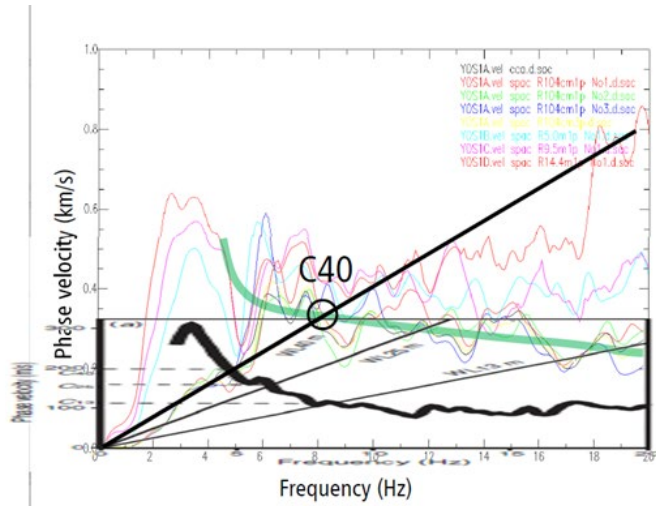


図25. 吉川病院の微動観測と地盤位相曲線 [課題番号: CT0C23]

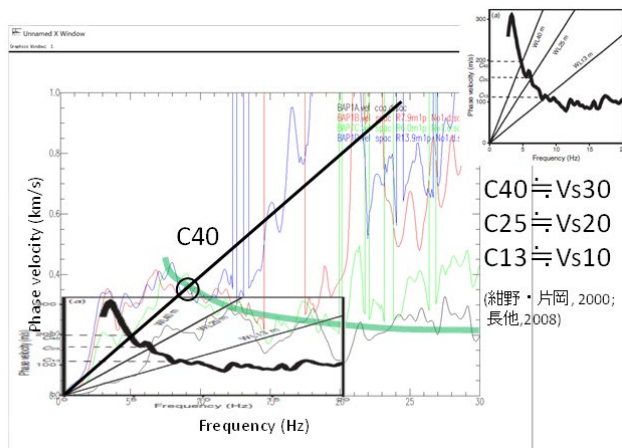


図26. 日本バプテスト病院の微動観測と地盤位相曲線 [課題番号: CT0C23]

表1. 木造住家に関する想定地震と胆振東部地震との比較 [課題番号: CT0C017]

被害種別	被害		想定地震		胆振東部地震		
	程度	対象地域	北海道	内閣府	公表被害実数	全世界アンケート 住人判定 罹災証明	
木造住家	全壊数 (全壊率)	厚真町	196棟 (10.40%)	1,014棟 (53.82%)	235棟 (12.47%)	(7.04%)	(10.26%)
		安平町	175棟 (5.90%)	1,219棟 (41.09%)	93棟 (3.13%)	(2.31%)	(2.53%)
		むかわ町	174棟 (5.19%)	1,405棟 (41.93%)	40棟 (1.19%)	(1.91%)	(0.64%)
	半壊数 (半壊率)	厚真町	284棟 (15.07%)	459棟 (24.36%)	335棟 (17.78%)	(4.90%)	(15.90%)
		安平町	333棟 (11.22%)	838棟 (28.24%)	366棟 (12.34%)	(2.93%)	(12.10%)
		むかわ町	398棟 (11.88%)	1,015棟 (30.29%)	186棟 (5.55%)	(2.80%)	(5.52%)

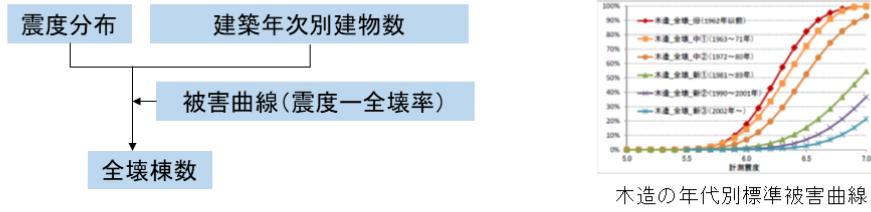
表2. 人的被害に関する想定地震と胆振東部地震の比較 [課題番号: CT0C017]

被害種別	被害		想定地震		胆振東部地震		
	程度	対象地域	北海道	内閣府	公表被害実数	全世界アンケート 換算値 提案手法 非回避行動 率1.0	
住家被害に伴う人的被害	死者数 (死者率)	厚真町	5人 (0.11%)	10人 (0.21%)	0人 (0%)	0人 (0%)	5人 (0.11%)
		安平町	4人 (0.05%)	12人 (0.15%)	0人 (0%)	0人 (0%)	7人 (0.09%)
		むかわ町	4人 (0.05%)	13人 (0.16%)	0人 (0%)	0人 (0%)	3人 (0.04%)
	重傷者数 (重傷者率) A IS ≤ 4 (重症)	厚真町	4人 (0.09%)	32人 (0.69%)	0人 (0%)	0人 (0.00%)	20人 (0.43%)
		安平町	7人 (0.09%)	53人 (0.65%)	7人 (0.09%)	4.7人 (0.06%)	33人 (0.40%)
		むかわ町	8人 (0.10%)	67人 (0.80%)	27人 (0.32%)	4.3人 (0.05%)	14人 (0.17%)
	軽傷者数 (軽傷者率) 2 ≤ A IS < 4 (中等症)	厚真町	64人 (1.37%)	0人 (0%)	61人 (1.31%)	19.9人 (0.43%)	241人 (5.17%)
		安平町	66人 (0.81)	0人 (0%)	10人 (0.12%)	32.6人 (0.40%)	463人 (5.66%)
		むかわ町	80人 (0.95%)	0人 (0%)	250人 (2.98%)	60.0人 (0.67%)	286人 (3.41%)



図27. 北海道の想定地震と2018年北海道胆振東部地震の震源及び市町村震度比較 [課題番号: CT0C017]

■内閣府の標準的方法(南海トラフ巨大地震被害想定、2019)



■北海道独自の方法

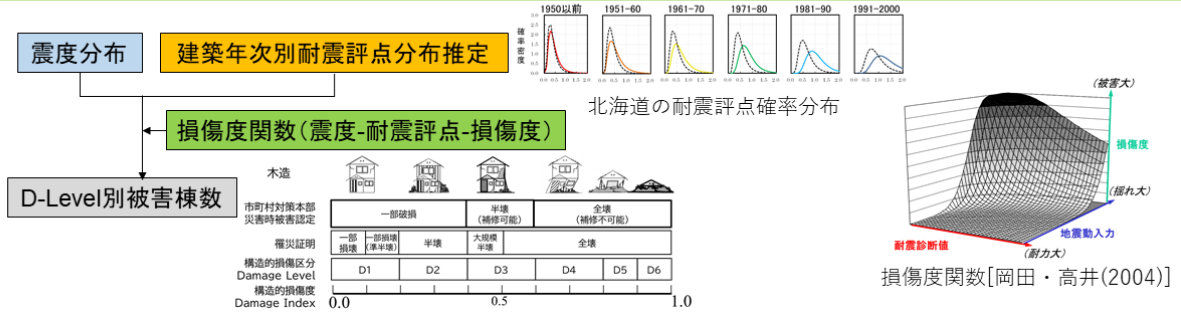
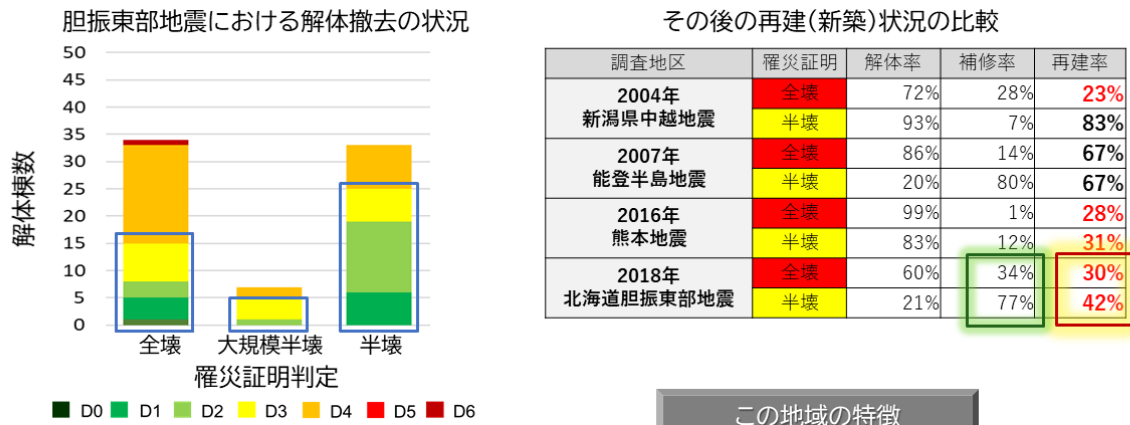


図28. 木造住家被害想定手法の比較 [課題番号：CTOC017]

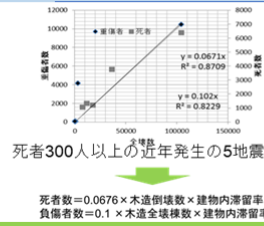
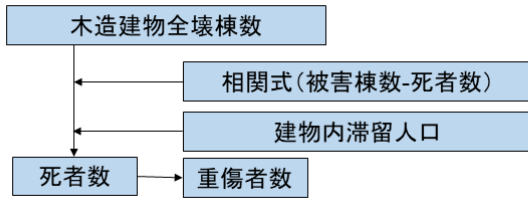


- この地域の特徴
- 構造被害が小さくても(D0~D3)、全壊判定されるケースがある。
 - 構造被害が小さくても、解体撤去するケースが多い。
 - 撤去後の再建率が低く、その後町を離れるケースが多い。
 - 全・半壊共に再建費用が工面できず、助成のある補修で対応する世帯が多い。

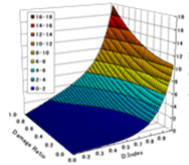
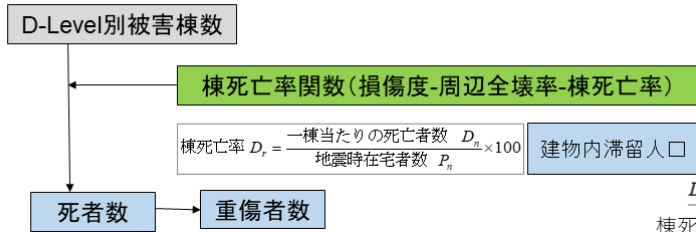
⇒世帯復旧には「罹災証明判定」が有用。対策に直接関与する被害認定基準の導入の必要性。

図29. 復旧と罹災証明の実態：地震後1～2年後の調査から [課題番号：CTOC017]

■内閣府の標準的方法(南海トラフ巨大地震被害想定、2019)



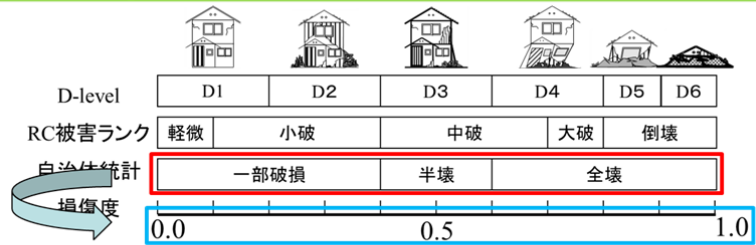
■北海道独自の方法



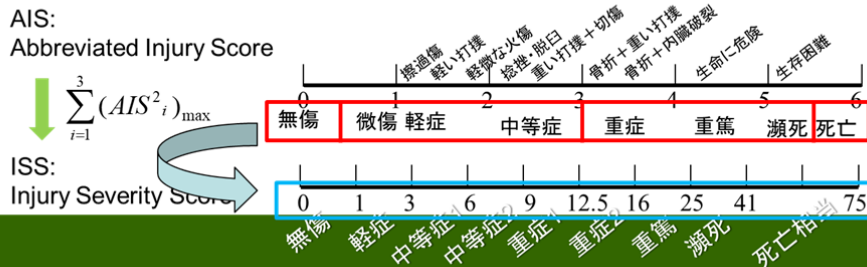
$D_r(x, y) = 0.0104e^{6.68x} + 11.0xy^2$
 棟死亡率関数[田畑・岡田(2007)]

図30. 人的被害想定手法の比較 [課題番号: CT0C017]

■建物損傷度: Damage Index



■人体損傷度: 多発性外傷重症度指標 Injury Severity Score (ISS)



⇒この指標によるシナリオ連鎖型評価式で減災対策の適否を検討

図31. 新たな被害指標の導入 [課題番号: CT0C017]

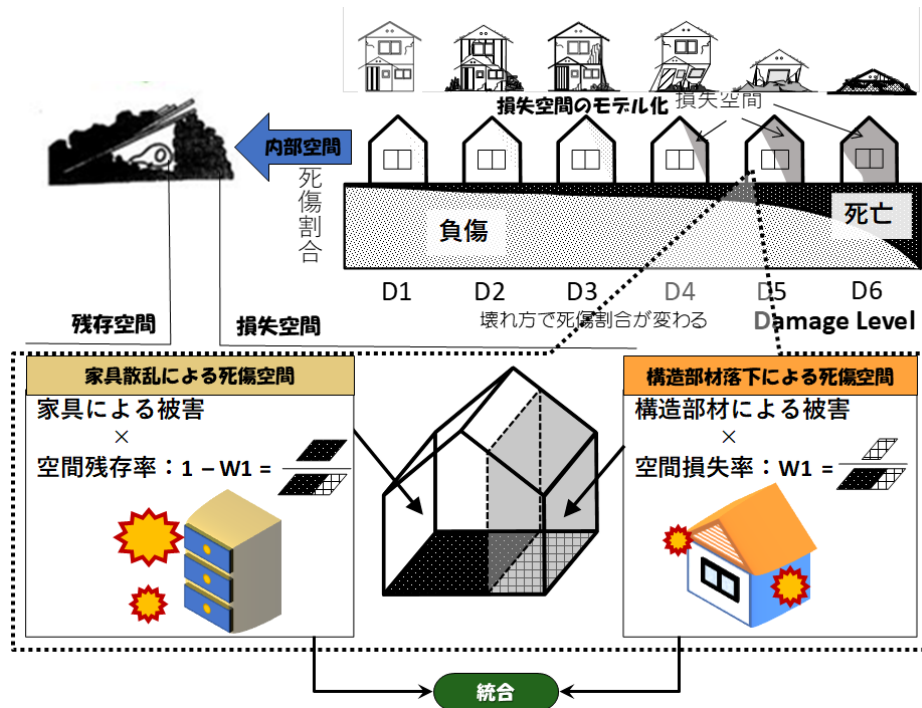


図32. 人的被害に結びつくシナリオ連鎖型（構造被害+室内被害）統合式 [課題番号：CTOC017]

建物損傷度別木造住宅内人的重症度分布(人)

築年代分布・木造率でモデル化 ⇒ 地域内損傷度分布 ⇒ 地域内のISS値を確率分布

$$M_{ISS}(\theta) = \sum_{\Delta x=0.6}^{1.0} \sum_{l=0}^{7.4} M_f(l) \cdot P(l, \Delta x) \cdot W_{\Delta x} \cdot f''_{\Delta x}(\theta)$$

→ $P(l, \Delta x)$: 岡田・中嶋の損傷度関数による損傷度 Δx の超過確率

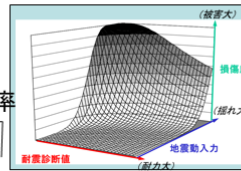
→ $M_f(l)$: 木造住宅内震度暴露人口

$W_{\Delta x}$: 建物内部空間損失率(W値)

$f''_{\Delta x}(\theta)$: 建物損傷度別ISS発生確率
(岡田・中嶋: 阪神淡路大震災のデータからベイズ更新)

〈計算時に参照するデータ〉

- 人口分布: 総務省国勢調査(2015)
- 震度分布: 各自治体想定(札幌市: 250m区画)
- 木造率: 総務省住宅土地統計(~1950, 1951, 1961, 1971, 1981, 1991~)
- 築年代分布(耐震評点分布): 総務省住宅土地統計(同上)



住家の損傷度関数
[岡田・高井(2004)]

耐震評点確率分布

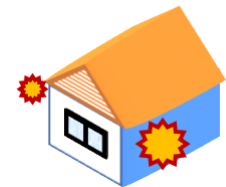
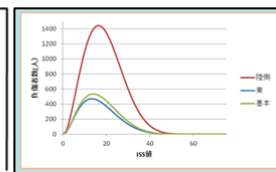
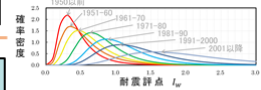
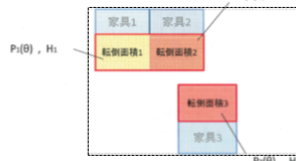


図33. 建物損失空間における構造物落下による人的被害の評価 [課題番号：CTOC017]

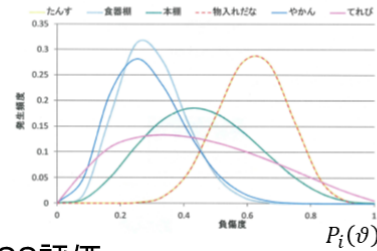
室内被害：家具転倒による人的ISS分布(人)

■ 既往研究：1世帯における家具転倒による人的ISS評価

(1) 家具転倒領域率による負傷確率(名知・岡田2007)



$$P_X(x = k) = {}_n C_k \cdot R_{tr}^k \cdot (1 - R_{tr})^{n-k}$$



(2) 家具転倒による人的ISS評価(岡田2011)

$$p(\vartheta|y) = k \cdot l(y|\vartheta) \cdot p(\vartheta) \\ = Be(a_0 + r, b_0 + n - r)$$

地域に拡張

■ 提案式：地域の家具転倒による人的ISS評価

地域の世帯人員別の保有家具種類・家具数の平均モデル化

$$F_{I,T,U}(\vartheta) = \sum_{n=1}^6 \{ P_{n,I}(\vartheta) \times U \times N_n(I) \times T \}$$

家具配置密度, 行動能力, 世帯人数, 地震時の在宅率,

図34. 建物残存空間における人的被害想定式の構築 [課題番号：CTOC017]

家具転倒によるISS評価式：

$$F_{I,T,U}(\vartheta) = \sum_{n=1}^6 \{ P_{n,I}(\vartheta) \times U \times N_n(I) \times T \}$$

負傷世帯発生率(I_{njury}):

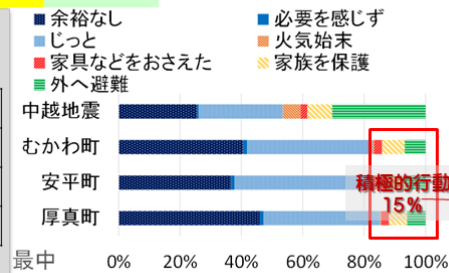
居室人数 n に対して負傷者数 x が0より多く発生する確率として

以下の式で表される。 R : 家具転倒領域率、 $1-B$: 非回避行動率

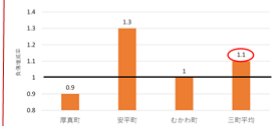
$$I_{njury} = P_x(x > 0) = \{ 1 - (1 - R)^n \} (1 - B)$$

	I_{injury} [%]	n [人/フロア]	$1-B$ [%]	R [%]
厚真町	18.8	1.661	100	11.8
安平町	12.4	1.775	100	7.2
むかわ町	23.3	1.876	100	13.2

北海道の二人世帯の転倒領域率平均値は 15%



回避行動有効率 = 非行動負傷率 / 回避行動負傷率



(1-B) = 85%

昼間に発生した中越地震 (1-B) = 25%

図35. 室内家具転倒による負傷確率算定式から【夜間でも負傷者が少なかった理由を】推測する [課題番号：CTOC017]

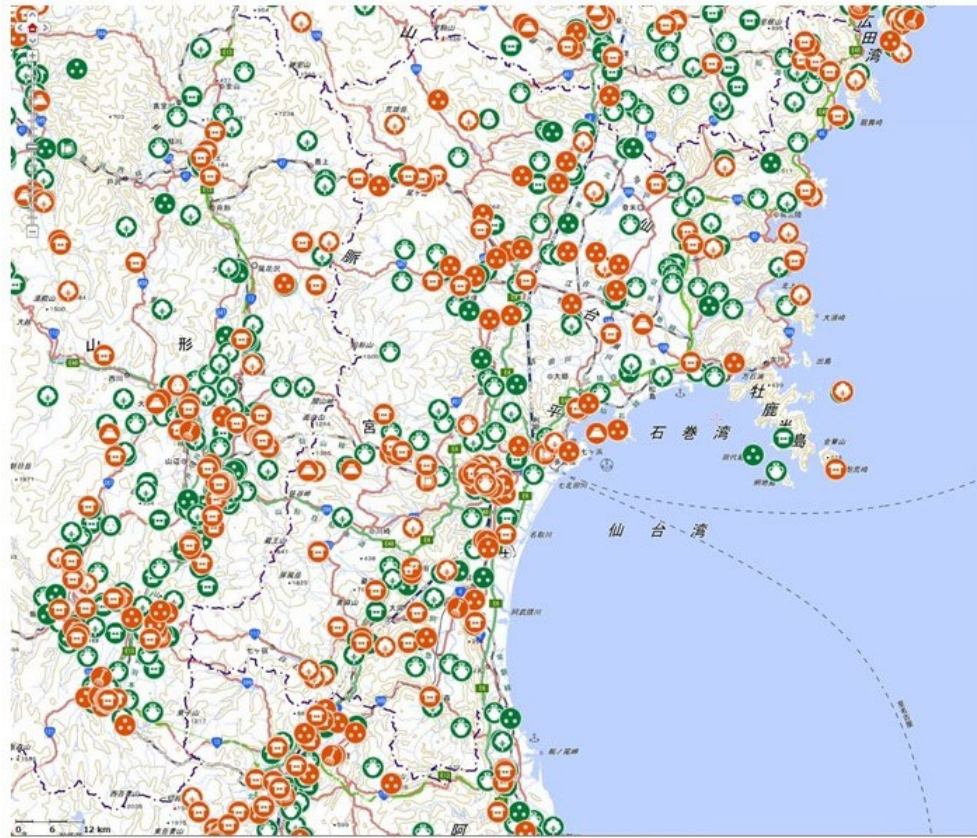


図36. 東北地方の文化遺産マップ [課題番号：CTOC029]

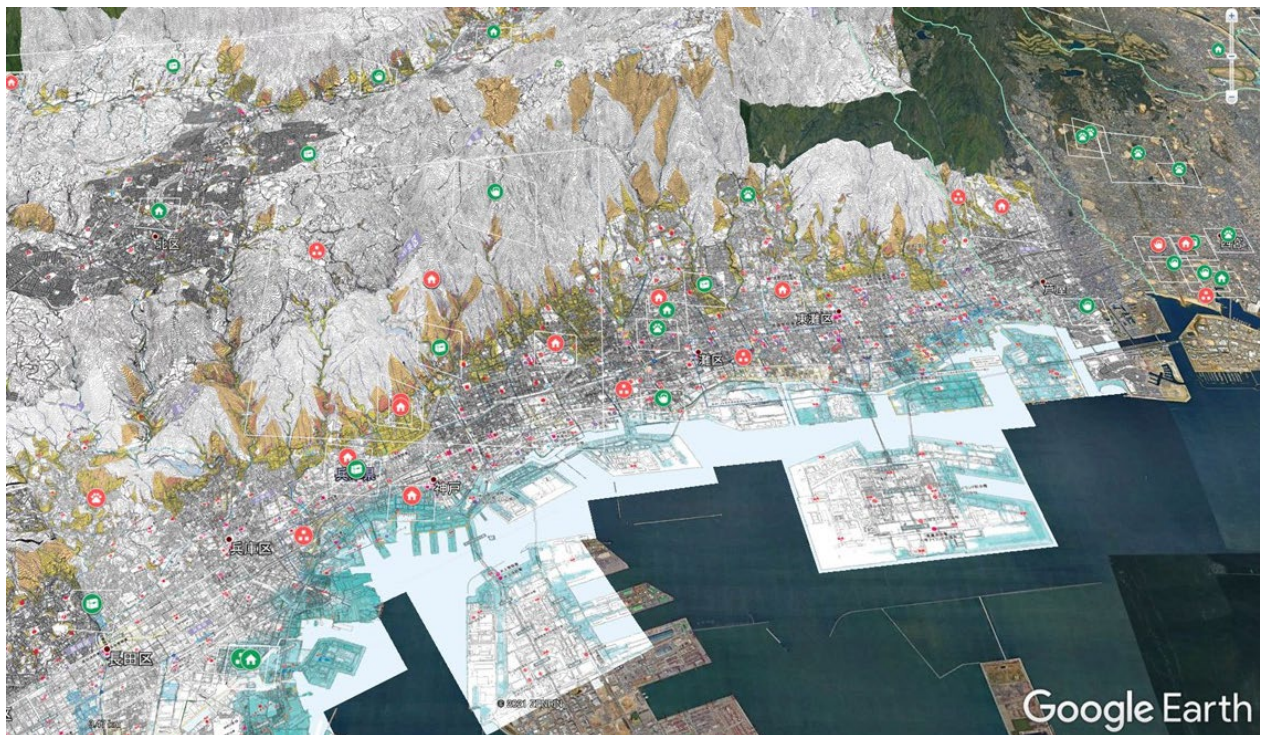


図37. 神戸市の文化遺産マップとハザード情報 [課題番号：CTOC029]

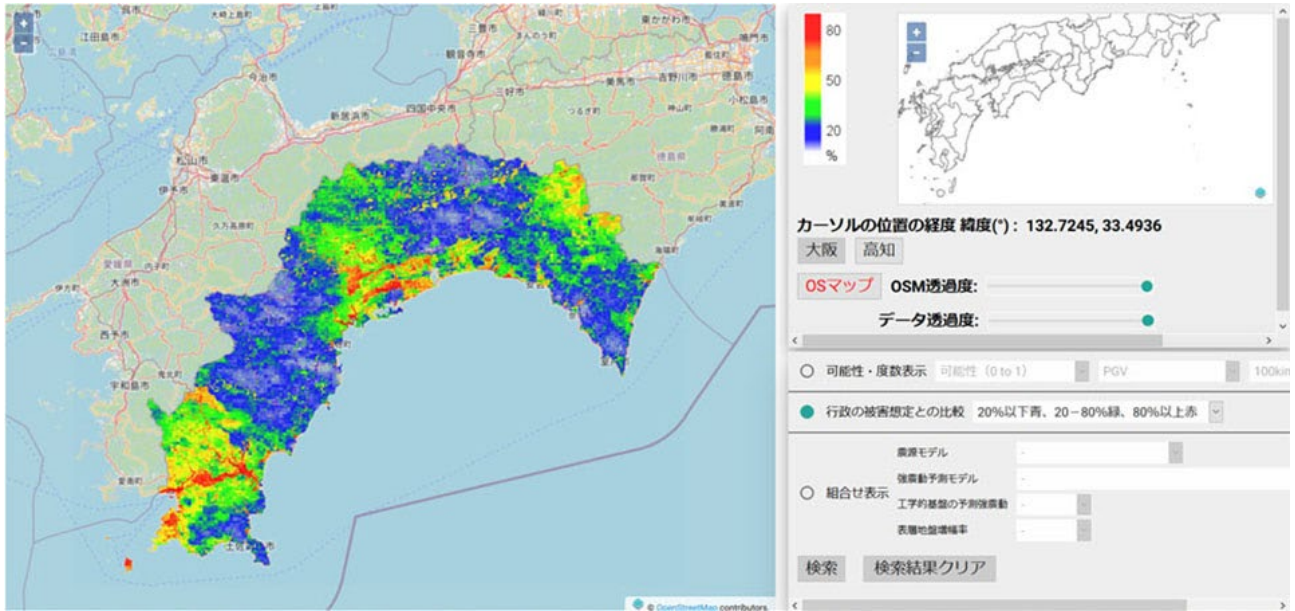


図39. 地震動推定結果のばらつき表示 [課題番号：CTOC030]

本表示は青が過小評価、赤が過大評価。赤が過小評価、青が過大評価という表示も可能