

1 (3) 地震 (中短期予測)

「地震 (中短期予測)」計画推進部会長 中谷正生

(東京大学地震研究所)

副部会長 川方裕則

(立命館大学)

本部会では、地震発生の確率が高まっている状態を定量的に評価する手法の開発を目的として、地殻活動のモニタリングや物理的解釈・数理モデル化、様々な自然現象の変調と地震の相関の調査などを行った。

5 年間の成果の概要と今後の展望

本部会の担当する3つの建議項目(2.(2)ア, 2.(2)イ, 2.(3))にわけて記述する。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界すべりの時空間変化の把握に基づく予測

プレート境界の固着・すべりの時空間履歴は、弾性体中の断層すべりの物理モデルに立脚した予測への演繹的アプローチが考えやすい。

○プレート運動とすべり遅れ収支

プレート境界のすべり遅れ収支は大地震発生に関するもっとも基本的で自明に重要な情報である。

想定される破壊域をもつ大地震が実際に発生するには、想定破壊域のすべり弱化に消費される破壊エネルギーを供給できるだけの歪みエネルギーがすべり遅れによって蓄積されている必要がある。南海トラフ域について、GNSS観測から直接インバージョンした剪断応力増加レートの分布を用いてこれを計算し、破壊力学的にどのような想定地震が発生可能か、いつ可能になるかを評価した。

一方、解放されるべき合計地震モーメントを、プレート収束速度×カップリング率から見積もることで、日本海溝から千島・カムチャッカ海溝沿いで発生しうる地震の最大規模を推定した。規模別頻度分布として切断G-R則を仮定した場合でM10程度、宇津の式を仮定した場合でM11程度である。

八重山諸島ではSSEのデータ同化研究のために続けている臨時GNSS観測10年間のデータから、SSE域のupdip側に位置する固着域の定常的なすべり遅れレートが17-47 mm/yrと求まった。この地域では1771年にあった津波被害を伴う地震以降250年間のすべり遅れの蓄積はMw7.5程度となる。ただし、この津波の波源域とされているプレート境界浅部は上記の陸域GNSS観測で見えておらず、海域での観測が必要である。

S-netおよび陸域観測点でのS波スプリッティングデータから、東北地方では、火山フロントを境に前弧では海溝平行の速いS波の振動方向がみられ、地下に冷たく動かない

マントルがあることがわかった。

また、S-netデータを用いることで、深さ30-60 kmの東日本太平洋沖プレート境界地震の破壊伝播方向を網羅的に推定し、その多くはupdip方向に破壊が進展したことを見出した。プレート境界の応力・固着状況についての重要な情報である可能性がある。

○リピータ

海域での測地観測が困難であることを考えれば、プレート境界のすべりに対する情報はリピータによるところが大きい。日本全国の定常観測網で観測された波形から日本および周辺地域で起きたリピータの検出を行い、カタログの更新を続けている。日本で長期的に活動するリピータ系列は、ほとんどが沈み込みプレート境界のものである。このカタログで監視できた世界の沈み込み帯について、メガスラスト地震のタイミングですべりレート時系列を重合して地震サイクルにおける平均的なパターンを得た。すべり速度は地震発生直後に急激に増加し、その後10年程度かけて徐々に減少したあと、地震発生から30年以上経過すると徐々に増加していく傾向が見い出された。これらは余効すべりとその収束後の応力レベルの上昇によるものであろう。一方、横ずれのプレート境界断層であるトルコアナトリア断層でのリピータ分布を推定し、過去の大地震の破壊域の端に分布していること、一部ではプレートの相対運動速度に近い速度で非地震的に変位していることを見出した。

2011年東北沖地震後のすべり状況変化について、宮城県北部では現在も余効すべりが継続している一方、その他の地域では地震発生後数年の間にほぼ収束したことを確認した。このような解析の新しい手法として、リピータ群を非定常更新過程としてモデル化し、1993年7月から2016年8月までの東日本太平洋プレート沈み込み帯におけるプレート境界上の準静的すべりの時空間変化をスプライン関数により推定した。特に、2011年東北沖地震後の余効すべりが2016年までに東北沖のすべり速度がほぼ2010年以前の水準に戻っていく様子や、2012年と2015年の二度にわたり三陸沖の同じ領域においてM6台の地震を伴うすべり加速が発生した様子が捉えられた。

すべりモニタの感度・分解能を上げるためには、より小さなリピータを用いることが本質的だが、類似波形検出のために波形相関を高サンプリングの連続波形から総当たりで計算するのに莫大な時間がかかることが障壁であった。微小なリピータは震源核でも期待されるため、これは2（3）においても重要な問題である。そこで、深層学習に基づくカタログ作成手法、及び近似近傍探索技術を応用した高速類似波形探索手法の検討を行った。類似波形探索手法においては、既存手法であるFASTのテストを行うとともに、深層ハッシュ技術を利用することで、波形の情報をコンパクトなバイナリコードに圧縮し、FAST法が抱えていたメモリ消費が大きいという問題を解決し、また、十分に実用的な速度が達成できた。一方、ハッシュを用いて決めた類似度と従来の相関関数でみた類似度とは必ずしも一致せず、少なくとも検証のために従来の相関関数の総当たり計算も必要である。この点についても、新たな計算アルゴリズムを開発して、高速化・省メモリを達成した。また、相似波形とみなす類似度の閾値をAICによって客観的に決める方法を提案した。

リピータの抽出方法について、解析周波数帯の影響を詳細に検討しそれをレビュー論文として発表した。また、世界のリピータの研究履歴や動向についてまとめ、それをレビュー論文として発表した。

○スロー地震

スロー地震は低周波地震(LFE)から長期的スロースリップ(L-SSE)まで幅広い時空間スケールのものがあり、さまざまな周波数帯域の測器を用いて研究されている。その検出には優れた観測網と高度な解析が要求され、この点において、この5年間に飛躍的な発展があった。観測網ではDONETとS-netの海底地震計網によって検出力が大きく向上した。海底地震計だけでなく、海底ボアホールでの間隙圧測定によって、浅部スロースリップを鋭敏に捉えられることも確認された。また、多くの独創的な解析手法が開発され、スロー地震データベースへの登録カタログ数は、この5年間で約70個増え約120個になり、スロー地震の多様性と系統性が明らかになってきた。震源パラメータやスケーリング、セグメントした活動の推移パターンなど新たな知見も数多く得られた。しかし、研究進展が非常に速いため、知見は必ずしも確定的でも整合的でもなく、全てが現時点ですべり監視に応用できるわけではない。

浅部スロー地震についてはこの10年で飛躍的に知識が増大し、地下構造、地質、室内実験研究を統合して、南海トラフ沿いの浅部スロー地震に関する多面的レビュー論文が出版された。海域地震波探査データと深海掘削のコア試料情報から、透水性の低い物質が沈み込み、間隙圧が高いところが浅部スロー地震の起きる場所であり、また、浅部固着度の走向方向の違いの一因でもあるとの示唆を得た。さらに、日本海溝沈み込み帯については、常時微動表面波トモグラフィを開発し、S-netと過去の海底地震観測データに適用し、S波速度は微動発生域で低く大地震発生域で高いとの結果を得た。

深部スロー地震については研究の歴史も長く、特に南海トラフのSSEについてはリアルタイム監視が行われている。GNSSデータを用いたL-SSEの客観的検知手法は、大地震発生後の余効変動中でも使えるよう改良した。短期的スロースリップ(S-SSE)の常時監視にも使われている産業技術総合研究所の地下水等総合観測施設は、南海トラフ周辺に20点の計画で2006年から整備しているが、この5年に2点新設し18点となった。また、理論波形をテンプレートとしてGNSSデータからS-SSEを自動的に検出する手法を新たに開発し、東海～九州地域で1997年から2020年の期間に発生した284イベントを検出した。これには日向灘などこれまでにSSEが未検知だった地域の活動も含まれる。

また、深部LFEの発生タイミングを基準にGNSSデータを重合し、南海トラフ沿いのS-SSE発生時のすべり量分布を感度よく求めたところ、深さ約35 kmの深部ETSゾーンに加えて、四国西部、四国東部、東海地域で、メガスラスト地震の固着域の深さ約20 kmあたりでわずかにすべった部分が見つかった。メガスラスト地震のサイクルで重要な役割を果たしている可能性があり、特に慎重な解明が望まれる現象である。

比較的遅れて認識されたスロー地震である超低周波地震(VLFE)は、巨大地震固着域のupdip側にもdowndip側にもあるが、SN比の低い周波数帯域の現象なので網羅的な検出が難しい。そこで、理論波形をテンプレートとして2003年から2019年のF-netの連続波形データを走査し、南海トラフ域と日本・千島海溝域の網羅的なVLFEカタログを作成した。期

間中に巨大地震があった後者の地域では、その余効すべりと整合的なモーメント解放率の時空間分布が得られ、スリップメータとしての資質が確認された。また、大きな地震の影響がない時期の結果から、深部VLFEはプレート境界のカップリング率が0.5以下の領域に限られ、一様に低いモーメント解放率を示すの対して、浅部VLFEは様々なカップリング率の場所で起き、モーメント解放率がカップリング率と逆相関を示すことがわかった。地震波速度の遅い領域の周辺に起きやすい傾向もあり、流体の影響が示唆される。キャンペーン広帯域地震計観測で検出したコスタリカのVLFEは、過去に発生したSSEと同じく巨大地震のupdip側に起きていた。VLFE時の微動のスケールドエナジーは南海の浅部スロー地震と同程度であった。

スロー地震で最も研究の歴史が長い深部ETS現象については、様々な時空間スケールでの活動の詳細が明らかになった。

2004年4月から2020年12月までのHi-net連続波形からマッチトフィルタ(MF)法で南海トラフで約74万個のLFEからなる長期のカatalogを得た。15 km程度の短距離においても、LFEは拡散的な高速移動(拡散係数 $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ オーダー)が起きることを見つけた。また、主要なエピソード中にLFEの高速移動が断続的に多数発生していたことも捉えられた。スロースリップには拡散プロセスによって制御される小規模な断層すべりイベントが多数含まれていると考えられる。さらに、四国西部で行った超稠密アレー観測からは、プレートの傾斜方向と走向方向の両方向へのLFEの高速移動が見られるとともに、順方向・逆方向の移動が頻繁に生じていることがわかった。この観測ではまた、LFEの多くは特徴的な2つの方向に線状配列していることがわかった。この向きが現在と過去のフィリピン海プレートの収束方向に合致することから、LFEは沈み込みに伴ってできた不均質構造と密接に関係していると思われる。また、巨視的な構造との関係としては、紀伊半島・四国東部・四国西部での地震波構造解析から得た V_p/V_s やプレート境界の反射強度の不均質に、S-SSEの積算すべり量や微動活動との対応がみられ、スロー地震が高間隙圧の場所で起きやすいとの通説を支持する。しかし、MT観測からは紀伊半島の深部微動・四国西部のL-SSEの発生域に低比抵抗は認められなかった。

上述の長期にわたるLFEカatalogによって、L-SSEの規模とLFEの活動度の正相関が明瞭になった。さらに、2011年東北沖地震以降、走向方向に四国全体を横断する大規模なLFEエピソードが継続的に発生している。2001-2019年の傾斜変化から網羅的に検出した南海トラフのS-SSE(61個)についても2012年から規模の大きいものが増えており、南海トラフのプレート境界の状態が変化したのかもしれない。

東海地方で世界で初めて捉えられたL-SSEと同期する重力異常は、流体が浅部に移動するセンスである。同様の重力異常が高時間分解能をもつ重力計のある石垣島でみつき、重力変化はイベントの前半に起きることが分かった。また、東海地方については、その後の観測データの蓄積により質量源が移動する可能性が明らかになった。まさにイベントと同期した事象であるので、かなり直接的に流体の役割を示す観察事実と言えるだろう。さらに、微動が潮汐に対して時間遅れで発生する観測事実を説明する物理モデルを提案し、そこからプレート境界の摩擦特性や透水構造の制約できる可能性を示した。

約6年周期で大きなL-SSEが起きる豊後水道から日向灘にかけてはカップリング率が低く種々のスロー地震が知られている。この地域を含む南海トラフ域で初の網羅的な

ピータの検出を行い、南海地震の固着域にはリピータが全くないが、日向灘の深さ15-30 kmではリピータの継続的な活動があることを見い出した。これで、四国から九州にかけての南海トラフでは、大きな地震の固着域以外のところは大体、リピータ、深部低周波微動、L-SSE、浅部VLFEという非地震性すべりのインディケーターのいずれかがあることになる。2003年、2010年の豊後水道の大きなL-SSEの折には、2年ほど前に日向灘深部のリピータとL-SSEが始まり、豊後水道L-SSE、さらに1年ほどで四国の深部L-SSEへと300 kmを北進した数年スケールの活動移動と、豊後水道L-SSEの半月ほど前に日向灘浅部のリピータとLVFEから始まり、豊後水道L-SSE、さらに半月ほどで四国の深部微動域へと進んだ1月スケールの活動移動が見られた。さらに、豊後水道周辺で2014年から行っている稠密GNSS観測とGEONETの定常観測データを合わせて、2018-2019の大きな豊後水道L-SSEと2015-2016年にその一部がすべった小さ目のL-SSEの時空間発展を詳細に捉えた。深部微動を伴わなかった後者では、SSEは深部ETSゾーンに侵入しなかったが、前者では、SSEが深部ETSゾーンに侵入していくのにあわせて深部微動が起きており、SSEのすべりによる直接的なトリガと考えられる。また、前者のイベントは、浅い方へ東向きの伝播もおこし、これは先述の四国西部でみつかった20 km深の固着域S-SSEの位置に達している。加えて、宮崎沖の深部ETSゾーンへの南向きの伝播もみつかった。前述のリピータ等から確認された低速の移動と向きは逆であるが、場所と移動速度は整合的である。このように、ある程度の規模のスロースリップの時空間発展は定量的に監視できているし、パタンのようなものも見えてきており、少なくともメガスラスト域への非定常な载荷を、観測データから推定することが可能である。

スローすべりイベントの相互作用のメカニズムを理解するための一つのアプローチとして摩擦断層の数値シミュレーションが挙げられる。実際のプレート境界の3次元形状を入れて、L-SSEを含めた地震サイクルの特徴を再現するところまではできているが、S-SSEまで扱える分解能でのシミュレーションには、計算速度が追いついていない。一方、平面断層上でのシミュレーションにおいては、L-SSEのセグメント化のメカニズムについて新たな知見が得られた。これまでセグメント化の原因は摩擦物性や断層形状の不均質だと考えられていたが、均質断層モデルでもすべりに伴い応力不均質が自己組織的することでSSEのセグメント化が起きることが見い出された。一定载荷速度下ではL-SSEのサイズは摩擦物性と断層幅で決まり、発生場所は固定されるが、近隣の地震発生領域の固着の強さや、地震発生等による大きな応力擾乱によって、L-SSEの発生場所・サイズ・発生間隔が変化することが見い出された。今後、上述のような観測で見える相互作用と比較することが重要であろう。

先述した2013年からの八重山諸島のGNSS臨時観測のデータを加えることで、2010年以降、およそ6か月周期で繰り返し発生するSSE16イベントを発見し、これらが同じ場所の繰り返しすべりであることを確認した。SSEにおけるすべりの加減速パターンは、従来2種と思われていたが、新しいものがみつき、16回のうち7回がこれであった。摩擦特性の時間変化を示している可能性がある。一方、固着すべりの室内実験では、機械学習モデルによって、すべりの時系列データからすべりの累積にともなう摩擦パラメータの変化を推定することができた。

このように、スロー地震については網羅的な検出手法が進歩した。これを下述の演繹

的な同化モデルへの入力として予測に役立てることはもちろん重要な目標であり続けるが、網羅的な検出ができる事象である以上、単に、地震発生に先行する傾向を調べて経験的な確率予測に役立てるという2. (3) のアプローチも試みるべきだろう。

○データ同化

SSEのデータ同化では、複数の手法で、L-SSEの実観測データを途中までをみて、そのイベントの収束を予測するところまではできるようになった。しかし、新たに導入した深層学習と物理法則を併用するPhysics-Informed Neural Networks (PINN)を含めて、イベント中の最大速度までのデータを見るか、あるいは、摩擦パラメータは地震ではなくSSEになるようなものであるという事前情報を与えないと、SSEではなく地震になるという誤予測になることが多い。これは、摩擦不安定という現象の予測の難しさを暗示する根本的な知見であるが、実際には深部ETSゾーンで地震が起きないことは仮定してよいし、学習期間に複数回のSSEを含めることなどで自然に問題が回避できるかもしれない。また、対象を巨視的な不均質を含む領域にまで拡大することでかえって同化が安定する可能性も考えられる。

余効変動に関するデータ同化では、余効すべりと粘弾性緩和を組み合わせた余効変動の物理モデルのパラメータとその不確実性をGNSSによる余効変動の観測データから推定する手法を開発し、2011年東北沖地震の余効変動に適用した。この手法は計算コストが高いため、未知パラメータ数が比較的小さいモデルにしか適用できなかった。そこで、多数の未知パラメータを持つモデルに適用可能な手法の開発を行い、その手法のテストを行った。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

地震活動は20世紀前半からの網羅的観測データがあり、予測手法の検証・実践に関して格段のポテンシャルを有しているため活発な研究が続けられている。

○地震観測

南海トラフの地震活動監視と津波早期警報に威力を発揮すると期待されているDONETの地震検知能力を、実際のデータで評価し、ネットワーク内ではM1以上なら、ネットワークの外でも周辺数十キロではM2以上ならほぼ取り漏らしはないことがわかった。DAS(分布型音響センシング)については、加振器を使って振幅再現性を検証した。さらに、東南海ケーブルを利用した海域での試験観測を開始し、浅海域における波浪によるものなどの振動現象を観測した。S-netのデータを用いることによって、陸域観測網から遠い日本海溝周辺の M_c が大幅に改善された。

○地震カタログ

地震活動の異常度を定量的に評価する新たな手法の開発を目指して、2000年から2020年8月までの日本全国の地震活動の規模別頻度分布、潮汐相関に関する指標値について、空間グリッドサイズ一定と、解析震源数一定の機械的な解析を行い、各指標値の頻度分布に着目して、全国的に他の活動と区別することができない“ふつう”の地震活動を特徴

づけ、これを基準として異常度を定量化した。

様々な機械学習手法により地震検出の性能が飛躍的に向上した。深層学習とアンサンブル学習を適用することで自動ピックの誤りの多くを除去する手法を開発した。東北沖地震の激しい余震活動により、多数イベントからの地震波が重畳し、検出にとって難しい条件であった2011年3月1日から2012年2月末までの1年間の陸域の観測点の波形から、一元化震源カタログの作成に使われているものと同じ従来手法の自動検出で得たピックに、この手法を適用し誤検知の割合を5%から1%に減らした結果、位置標定できた地震の数が3倍になった。活動が極度に高く、複数イベントからの地震波が複雑に重畳した東北地方沿岸部での改善が特に顕著で、 M_c が2.3から1.5になった。また、日本海側まで含む東北地方内陸部でも、活動の高かった時空間では M_c が大きく改善した。この結果、一元化震源カタログでは認識できなかった微小地震の特徴的な活動(森吉山での震源移動現象や、東北沖地震の9分後から始まった長野県北部M6.7地震の前震活動など)が、テンプレートを用いない自動処理カタログで認識された。また、このノイズ除去手法を適用して作ったS-netを含む観測網からの自動処理カタログでは、日本海溝沿いの微小地震がプレート等深線の深さ20-50 kmに集中しており、等深線10-20 kmのスロー地震とは相補的な分布をしていることが明瞭に確認された。

ピッキングの段階から深層学習を用いる手法についても、室内AE実験のデータや釜石の臨時稠密観測等のデータで試行して従来の方法と比較した。さらに、有効な特徴量を大量の学習データから自動で発見するという深層学習のコンセプトからすれば、このような地震学的な震源決定の考えに沿った段階を踏むやり方が正確な結果を産むとは限らない。そこで、1) 観測波形から走時の確率トレースを計算し、2) 多数の観測点の走時確率トレースから震源座標と発震時刻を推定するという2つのプロセスを深層学習で処理する仕組みを考案し、同様のAEデータを用いて訓練・検証・テストを行い数mmの精度を達成できた。(ただし、2)に関しては、深層学習で解くと精度を出すのが難しかったため、得られた走時確率トレースを最もよく説明する震源を差分進化で求めた。)

本計画の内外で、このような新技術による検出数の増加、精度の向上、そして、高速化で気軽に再解析がなされるようになったことにより、微小地震活動の移動や、マルチスケールな面構造への配列などが、実はかなり普遍的な現象であることが見えてきた。つまり、実際の地震活動は、これまでの(質の低い)カタログが与えた印象よりずっと構造化されている。地震活動の物理的理解や予測への利用も、全く新しい段階に入ることが予想される。

歴史時代の地震情報の正確化についても進展があった。大揺れ以外に対しては、夜間に検出感度が数割下がっていることをいくつかの史料で見い出し、これを補正する方法を提案した。また、史料の成立年代に着目した多数史料精査により、1092年の越後の大波は地震関連現象ではなかったことを見い出した。また、多数のローカル史料の精査により、1856年11月4日の関東の強い地震の震源が立川断層帯というのは非常に考えにくいことを見い出した。

○断層面解と応力インバージョン

津波や強震動のリスク評価では想定される地震のすべり方向が重要だが、これを広域

応力場から予測するWallace-Bolt仮説を、F-netのメカニズムカタログと比較したところ、最近大きな地震が起きて応力場が変化してしまっていたらう地域や、観測がまばらで、そもそもメカニズム解も、応力場マップも信用できないところ以外では、実際に起きた地震のすべり方向は、応力場からの予測とほとんどの場合で一致することがわかった。

前計画で開発したP波初動極性(押し引き)から直接応力場の空間パターンを推定する手法の空間解像度を上げるために、ドロネー三角形分割に基づく線形スプラインを導入した。改造前後の手法で2000年鳥取県西部地震の余震データから応力場を求めると、大局的なパターンは概ね同じであるが、改良手法では方位角の細かい空間変動がより明確となり、以前の手法では解像できていなかった断層北端部においても、理論的に期待される空間変化が解像された。一方で、応力空間パターンを3つの角度のパターンで表す方式を採用しているため、東北地方のような、応力比が1または0に近く、中間主応力軸と最小主応力軸、あるいは最大主応力軸と中間主応力軸が入れ替わり得るような状況では適切に働かないことがわかり、まだ改良の余地がある。解析対象領域を先験的に分割することなく応力場推定を行うという本手法の基本的な方針は、客観的・網羅的に応力場を推定するために有効であり、また、微小地震の検出力・位置精度が格段にあがったことでますます有用性を増すと思われる。

○予測実験

CSEP-Japanのプロスペクティブ予測実験は、10個程度のモデルについて継続した。

以前から継続している、個別のリピータ系列それぞれに対するプロスペクティブ予測実験は、2011年東北沖地震の影響により、発生間隔が急激に変化したため困難になっていたが、非定常更新過程の相対的な蓄積率の推移を、2011年東北沖地震からの大森・宇津則に従って変化させることで対応できた。

さらに、多数の系列を含む東北沖全域でのリピータ活動の時空間発展について、2.(2)ア.で述べた時空間点過程モデルを改造したモデルで予測を試みた。学習期間の相対的な応力蓄積率の時空間変化のスプライン関数を時間方向に短期外挿した応力蓄積率で非定常更新過程モデルを駆動することで、以後の3か月毎のリピータ発生確率の空間分布を予測し、ポアソン過程に比べて十分に高い予測性能を分割表で確認した。

四川―雲南地方においては、活断層データと過去の地震活動データからM6以上の地震を予測するモデルを作り、交差検証でゲイン2―4倍程度の予測能力を確認した。どちら情報も有意な予測能力をもつが、2つの情報を適当な重みで組み合わせたものが最も性能がよかった。今後力を入れていくべき課題であると思われる複数項目の組み合わせによる予測については、これがもっとも手軽なアプローチだろう。

○ETAS

階層ベイズ型時空間ETASモデルによる東北沖地域の常時地震活動度の空間パターンは東北沖地震後のデータを含めても含めなくてもほぼ同じで、学習期間外の大地震(M6.8以上)やリピータの分布と良好な対応を示した。また日本内陸部の常時地震活動度は内陸部地殻(上盤側プレート)内のリピータで大きめの地震直後のもの(バースト型)を除いた非バースト型の震央分布とよく対応している。したがって、常時地震活動度の空間分布は、

地震活動予測の出発点として妥当なレファレンスと考えられる。

ETAS効果による、見かけの前震現象は、100倍程度の短期予測ゲインがあり、経験的な先行現象のなかで圧倒的に強力なので、ETASの改善は地震予測の直接的な改善となる。前計画で開発した深さも入力情報とする三次元化、大きな本震を点震源でなく有限サイズの面として扱う有限断層化を、熊本地震や南カリフォルニアのいくつかのM7級地震に適用し、活動のフィッティングと予測が改善することを確認した。また、高緯度域や非常に広域への適用のために、球面版のETASモデルを開発した。

歪み集中帯にあるいくつかの地域で、歪み速度と背景地震レートが相関すること、活火山近傍ではさらに活動度が高い傾向を見い出した。さらに、定常ETASモデルによる予測地震数に対する実際の地震数の比が、最大せん断ひずみ速度と良い空間相関を示すことを見い出した。これを利用してETASモデルの予測性能を上げられる可能性がある。

ETASモデル自体は、ある閾値以上の地震発生数を予測するものであるが、これに特定の規模別頻度分布(FMD)を組み合わせれば、大地震の発生確率予測となる。このような予測をロバストにするために、ETASパラメータの最尤推定値ではなく事後分布に基いて大地震発生確率を予測をする手法を開発した。また、ETASを応用したデクラスタは今や非常に重要な解析手法となり広く使われているが、最近注目されている、リスケールされた時空間距離に着目したデクラスタ手法との比較をイタリア北部のカタログで行ってみたところ、どちらの方法でもクラスタ分けの結果はよく似ていた。

余震の物理モデルであるDieterichモデルとETASを組み合わせるモデルを提案し、そこから背景応力の時間変化を推定することも試みた。また、動的トリガリングの余震に対する効果を調べるために、北茨城—いわきの稠密観測で捉えた破壊伝播方向の明瞭な地震58個の余震について調べたところ、破壊フロントが向かう側に起きた余震のほうに2倍多いことがわかった。また、余震活動には、ETASモデルのトリガリング項の時間遅れとも符合する大森則を説明できるDieterich理論のように、トリガ源地震の変位が母岩を介して伝達した応力変化に駆動されるもの以外に、SSEや余効すべりなどの巨視的な非地震性すべりに付随するものが考えられる。東北沖地震の震源域の余震活動をETASモデルの背景活動とトリガされた活動に分離したところ、背景活動と判断される余震は、余効すべりに駆動されていたらしいことがわかった。

○自動更新システム

地震カタログは準リアルタイムで更新され、オンライン取得できるため、これに基づく予測手法は、原理的に自動化が可能である。将来の社会実装を意識して、様々な手法による予測確率や、あるいはさまざまな活動の指標値を、自動的に更新して可視化・配信するシステムをいくつか試作して試験的に運用した。

また、大きな地震などの地学的イベントをきっかけとして地殻の物理的な状態が変化し、地震活動の特徴づけるパラメータが変わる場合があることはよく知られている。そのような変化点の出現を常に監視しながら必要なときにパラメータの変化を自動で行うための決定木アルゴリズムを開発した。また、大きな地震があったあとの活動のb値の変化を監視して、さらに大きい地震が起きそうかを予報する交通信号システムのセットアップには、専門家の判断が必要なパラメータ設定等がいくつかあったが、それを全て

自動化するアルゴリズムを開発し、専門家の関与なしに大きな地震発生から数時間以内に予報の出力を始められるアルゴリズムを開発した。

（３）先行現象に基づく地震発生の確率予測

何らかの自然現象の変調と、それに続く期間の地震発生レートに相関があれば、経験則として地震発生の確率予測に取り入れることができるし、地震発生に至るプロセス解明のヒントになることも期待できる。

○地震の可予測性

大地震の前に見られるなんらかの変調は、大きな地震が起きやすい物理状態から派生するサインであるという解釈が直感的であるが、コサイスミックな破壊の観察などから、地震の成長は強い不均質の中で実質確率的なプロセスとの見方もある。地震の成長を確率的分岐過程とみる分岐クラックモデルは、GR則や地震の成長の不規則性を説明できる。このモデルでは個々のイベントの大きさは予測不能だが、成長確率が臨界値になっている臨界ゾーンのサイズが現在可能な最大地震サイズとなるため、大地震発生の必要条件という意味で中期的な先行現象を説明しうることを指摘した。

短期的な可予測性に関する中心的な論点ともいえる、GR則は時間不変なのかという問題を扱った29本の論文をメタ解析したところ、形勢は互角であった。GR則の履歴依存性を意味するマグニチュードの相関について、Amatrice-Norciaの1年間の高分解能カタログを用いてETASトリガリングによる各イベント間の親子関係を推定した上で調べ、相関は小さい地震の取り漏らしによる、見かけのものに過ぎない可能性が高いことを示した。しかし一方で、ある種の前震識別のモデルでは、GR則の時間的変化を認めた方がデータをよく説明できることが、日本の地震活動、および世界の地震活動データの両方についてロバストに示された。

精密な震源過程逆解析からは、途中で止まりかけたり、破壊の向きを変えたりという予測の難しそうな成長の様子がいくつかの地震について確認された。一方、2016年鳥取県中部地震(Mw6.2)の余震を用いた精密な応力インバージョンからは、本震の停止が地震発生前の巨視的な低応力バリアに支配されていた可能性が示唆された。また、稠密・広範囲の余震観測からは、マルチスケールの断層構造の複雑さが、本震の破壊や地域の地震活動の特徴や速度構造的な特徴と関連しているという示唆も得られた。

2つの同程度の大きさの固着パッチが隣接している例が気仙沼沖で見い出された。2015年に宮城沖で発生したMw6.8地震はこの2つのパッチの連動破壊であったが、西側のパッチだけの破壊によるMw6.0-6.3の地震はずっと頻繁に起きている。また、大きさの違うパッチのカスケード破壊の例としては、2021年3月に宮城沖で発生したMw7.0地震の破壊が、その内部のMw5-6の準リピータから開始したことを示した。

○前震

進行中の群発的な活動の特徴にもとづいて、より大きな地震が続くかを予測する前震識別手法について、ETAS効果による見かけ上の前震では説明できない前震活動の存在によってETASを超える予測能力を発揮していることを示した。バイナリ予測の確率ゲイン

でみると、ETASに対してさらに数倍よくなっている。また、前田の前震識別法については、それが好成績な地域の特徴から、スロースリップや流体活動による群発活動を前震として認識している可能性を提案した。一方、閾値以上の地震が一定の期間に起きる確率値を出力するタイプの前震識別手法では、予測対象地震の大きさや予測期間を柔軟に変えられるようにして実用性を増した。また、群発地震の特徴量から前震確率をはじき出す関数を機械学習によって作成することを試みたが、現在のところ、従来より大きく性能が向上するようなものは見つかっていない。

2024年1月1日能登半島地震M7.6の約1時間前から見られた前震活動について、連続波形記録を用いた解析によって、M3未満の前震がM7.6の震央近傍約1 km以内の狭い範囲に集中して発生していたことが見い出された。このような地震直前に連発する前震は以前から指摘されており、本震との物理的因果関係がプレスリップに付随するものなのか、カスケード連鎖なのかということが注目されている。気象庁カタログのM4以上でETASモデルから独立地震と判断された約2000個の地震のうち直前10分以内に4つ以上の前震があった数例について調べたところ、前震は本震の破壊開始点近傍に集中していたが破壊域は互いにあまり重ならず、カスケードであったように見える。他方、2011年東北沖地震の13時間後に長野県北部で起きたM6.2地震では300個近い微小前震があったが、本震断層面に沿う前震の震源移動が見られたことなどから、東北沖地震の大きな表面波に誘起された間隙流体の移動によってゆっくりすべりが始まり、それがM6.2地震の震源核になったことを提案した。また、2013年2月に発生した栃木県北部地震M6.3の前震活動を解析することで、複数の時間スケールにおいて前震活動の段階的な活発化が起きるとともに、約1時間前から前震活動域が拡大したことを明らかにした。2011年東北沖地震の発生前に見られた前震活動域の拡大の様子と類似性が見られ、スロースリップが本震の発生を促した可能性が考えられる。このような最近の観測・理論・実験的研究の成果に基づいて大地震発生に至るプロセスの多様性・複雑性を概観し、大地震の発生過程の概念モデルを提案した。また、室内実験においては、前震的AEがいつどこでどのように発生するかを調べるために、内部に低摩擦面をもつ模擬試料の作成方法を確立した。さらに、AEセンサの受波面サイズを考慮した上で、走時の読み取り精度と震源位置標定の精度の関係を調べた。

MF法を用いて検出限界を下げることで、2015年の小笠原の深発地震(Mw7.9、深さ700 km)の3か月前から逆大森則に従う30個の前震、大森則に従う20個の余震を見出した。これは、通常手法のカタログに基くこれまでの深発地震前後の活動の常識から大きく逸脱した発見である。

○前震以外の地震活動

中期的な先行現象ではと考えられている10年程度の長期静穏化について、千島から小笠原の沈み込み域で、学習期間と検証のデータを分けて警報条件の最適化と交差検証を行い、最適な警報の条件が安定して得られ、M7.5以上の数年単位の予測について2倍程度のゲインが得られることを示した。また、これらの静穏化のいくつかがSSEによって起きた可能性を提案した。また、静穏化判定に用いる空間サイズを客観的に自動決定する手法を提案した。長期静穏化による予測には数割の見逃し、空振りがある。南米地域の空

振り事例については静穏化につづいて顕著な群発活動が起きた例があり、地域の地震テクニクスにもとづいて何が起きたのかを検討した。また、ルーマニアのVrancea地方のプレート内中深発地震域において、M6.9以上の大地震3つのうち一つだけに非常に顕著な静穏化が先行したことを見い出した。

次のメガスラスト地震の発生が懸念される北海道東方沖について、中期的先行現象と言われているものの現況を、最近のデータを追加して集中的に検討し、絶対的静穏化およびETAS比の相対的静穏化が継続していることを確認し、さらに、顕著な b 値の低下もおきていることを見い出した。また、2021年に宮城県沖のプレート境界で起きたM6.9とM6.8の地震の震源域でも、その数年前から b 値が顕著に減少していたことを見い出した。

2016年熊本地震による剪断ひずみエネルギー変化の空間分布を b 値の変化の空間分布と比べたところ、剪断歪みエネルギー変化が増加した場所では、一連の活動の開始前に比べて b 値が有意に低下していた。

マグニチュード系列のnatural time解析では、1984年から2011年東北沖地震までの日本のM7.6以上の地震6つの全てで、数か月以内に先行する異常が生じたが、さらに、東北沖地震を含むいくつかの大きな地震の数日から数時間前に、マグニチュードnatural time系列のエントロピーと時間反転系列のエントロピーの差のゆらぎや、Tsallisエントロピーで定義したそれに、異常が現れたことを見い出した。

比較的大きな地震が起きた場合に、それに続く活発な地震活動の b 値を見ることで、その後さらに大きな地震が起きる可能性を判断する交通信号システムが提案されている。熊本地震、リッジクレスト地震、トルコ・シリアの地震等について、詳細な b 値の時空間変化を調べ、本震の破壊が b 値の低下したところで起きた場合も、そうでないところで起きた場合もあることを指摘した。また、余震 p 値、地震活動の空間集中化指標、地殻変動の短期的な変化なども見て、複数の大地震を含むこれらシーケンスを応力の観点から総合的に解釈・評価した。

また、AICとブートストラップ法をあわせて、 b 値の時系列にみられる変化の異常度を客観的に計量する方法を提案し、いくつかの大地震に数か月先行する b 値の減少と、その異常度の増加を確認した。

閾値CCを下げたMF法を用いて、2003-2019年の富士山の下火山性LFEを多数検出した。LFEの活動は、2011年東北沖地震の4日後に富士山の麓地下10 kmで起きたM5.9の静岡県の地震(LFE域の応力を0.1-1MPa程度変えたと考えられる)直後に顕著に活発化し、その後余震的に減衰したが、このLFE活動にETASモデルをあてはめてみると、活動度はまだ東北沖地震以前のレベルに戻ってはおらず、富士山下のマグマシステムは活性化されたままの状態が続いていると考えられる。

○潮汐同期

地震活動が潮汐に同期するようになることが大地震の中期的先行現象になっていると指摘されているトンガ・ケルマデック地域について、系統的なROC解析によって、潮汐同期による予測手法の最適化と成績評価を行った。M6.5以上の地震を予測対象とした場合は確率利得が1.7倍程度で、 p 値は1%を切る。予測対象地震が大きいほど高い確率利得が得られる傾向がある。

豊後水道における深部微動と潮汐との相関の長期的な時間変化を調査した。L-SSEの隣接領域ではせん断応力による潮汐感度が高く、潮汐応力値が大きいほど深部微動が発生しやすい。また、L-SSE期には潮汐感度が高まることもわかった。

2020年末からの能登地方の群発地震活動については、深部の流体源に近い深さ15-20 kmの活動クラスタだけが潮汐相関を示し、また、ここだけb値が異様に高いことを見出した。この領域は非常に間隙圧が高いことが推察される。

○地殻変動

地殻変動の指標化として2000年以降のGNSSデータから格子化ひずみ速度場を計算し、大きなひずみ速度を示した地域や時期を抽出すると、東北日本の広範囲における2011年東北地方太平洋沖地震による影響、房総半島や四国西部におけるスロースリップイベントによる影響などに関連付けられた。

気象庁が展開する東海地方の歪み計ネットワークによるS-SSEの検知確率の評価を行った。M5.5程度のSSEならネットワークのあるところから、ネットワークの幅程度離れたところまで90%を超える検知率があるが、浜名湖付近に観測点を追加すると、検知領域がかなり沖側へ広げられることがわかった。

中国全土での1997-2017年の地震発生レートがその期間のGNSSから求めた最大剪断歪みの空間分布とよく相関しゲイン2倍程度の情報をもつことを見出した。また学習期間より後の2017-2019年の地震活動とも同様の相関を示した。

龍門山断層帯周辺の広い範囲にあるボアホール歪み計の7観測点の波形相関が高まることから、短期的な地震先行現象になっていることを見出した。先行時間1日としてM5以上の地震(26個)を対象とした場合で4倍近い確率ゲインが得られた。

○地殻流体

中国の2013年Lushan地震(Ms7.0)および2017年Jiuzhaigou地震(Ms7.0)のそれぞれ2, 3年前から広域(100 kmスケール)で大きな地下深部の密度変化があったことを重力の繰り返し観測から見出した。後者については、群発地震のマイグレーション等もみられ、深部からの流体移動があったことを提案した。

一方、この例や先述の長野県北部M6.7地震の前震のように先行事象となったもの以外にも、MF・精密相対位置標定・機械学習などで小さな地震まで検出することによって、流体移動の関与が示唆される地震活動が多く見つかっている。能登半島の群発活動中に起きた2023年5月5日のMj6.5地震直後1000秒間の余震活動は、本震破壊域に沿って深部から浅部へ20 km/hで拡がった。また、2020年3月末から半年以上続いた岐阜・長野県境付近の群発地震活動では、約20万個の微小地震を検出し、多数の平行な断層面を描き出すこれらの活動が全体に南から北へと数十km/dayで拡大した。高圧流体の移動によるスロースリップによる活動であるという根拠は、活動が巨視的な面をなし、活動域の拡大速度がそれらしいからというだけであるが、物理的には非常にもっともな解釈であり、例外的な事象というわけでもなさそうである。今後、地震予測に対する含意を積極的に検討することが重要だろう。

大気中ラドン濃度の変動については、放射線管理施設から得られた排気データを用い

て地震との関係を調べている。参画施設は5年で2つ増えて27となった。これまでに、地震に先行する異常はいくつか見つかっているが、統計的に有意な先行性を確認する調査はまだなされていない。一方、個々の事例については様々な解析がなされ、興味深い事象がみついている。1995年神戸地震前に変動が報告されている神戸薬科大学での大気中ラドン濃度変動データについて、1984-1988年にはみられなかったK1分潮成分が神戸地震前の1990-1994年の期間では有意に認められることを見い出した。この時期は、地震活動や地殻歪にも変動がみられ、関係している可能性がある。また、2018年6月の大阪北部地震発生前後に大阪医科薬科大学で観測された大気中ラドン濃度は、地震の約1年前から減少し、本震後2020年6月まで低かったことを見い出した。観測点周辺での地震活動も地震前に比べて減少しており、さらに、本震後の地震活動も余震域を除く近畿地方全域で低下していたことが原因かもしれない。

また、大気中ラドン濃度の時系列から異常を抽出するために季節変動を除く手法としてランダムフォレストによる季節変化のモデリングを試し、いくつかの地震の前に大きな異常が検出できることを確認した。また、1990-1992年に、先述の1995年神戸地震前の地震活動静穏化が原因と考えられる大気中ラドン濃度の低下も確認された。さらに、平常期間の選び方で異常抽出結果が左右されることを避けるために、季節性に対応した線形時系列モデルの1つであるSARIMAモデル及び標準偏差変動を想定したGARCHモデルを併せて使用し、福島県立医科大学で観測された大気中ラドン濃度データにおいて、特異値分解（SST）による異常度変動解析のピーク位置とほぼ同時期にピーク位置が検出されることを確認した。また、地下でのラドン動態を明らかにするために、空間線量率の高い黒色頁岩の露出する牡鹿半島において空間線量率と降雪の影響を明らかにすると共に、様々な測器を用いた並行測定も行った。

一方、房総と茨城でULF帯電磁場観測、地中・大気ラドン濃度観測、大気電場観測、気象観測を同一地点で行う総合観測を行った。房総の旭観測点では、地中ラドン濃度から気圧・気温の影響を取り除いて推定したラドンフラックス時系列に、地震の数日前に大きな正異常が出た例を多く見い出したが、強い降雨の直後にラドンフラックスが増えることも見付き、地震前の異常の内いくつかは強い降雨の直後でもあった。降雨の影響を除去することを目指して、土壌水分や、複数深さでの地中ラドン測定を追加して、観測を続けている。

○衛星熱赤外

ひまわり6, 7号の2005年6月から2015年12月までの11年間の夜間衛星画像にロバスト衛星技術データ分析手法を用いて、晴天地域での衛星熱異常(3.5σ 異常)を検出し、デクラスタした地震カタログと比較したROC解析により先行性があるかを検討したところ、 $M \geq 6$ が対象の場合は半径380 km、 $M \geq 6.5$ が対象なら半径623 kmの範囲に警報を出した場合、 $M \geq 6$ 対象では警報分率が1.7%で予知率7.5%、 $M \geq 6.5$ 対象では警報分率が3.6%で予知率16%が達成された。いずれも確率ゲインは4倍を超え、またp値は5%を悠々と切っている。対象時空間で合計29回の異常のうち、その後30日以内に $M \geq 6$ が起きたケースが13例と、空振りが少ないのが好成績につながっている。解析対象時空間では2011年東北沖地震の余震が多く、東北地方によくでる異常であれば、見かけ上地震と相関がよくなると

いう批判があるが、今回の29個の異常のうち東北沖地震の余震時空のものは数個しかなく、その疑いは小さい。

○電磁気

房総半島と伊豆の2000-2010年のULF磁場観測データにみられる異常の先行性を、ROC解析によって評価した。先行時間を5日とした場合、どちらの観測点でも先行性が有意であることが示され、特に、伊豆においては確率ゲインが4倍程度と性能がよい。また、大きい地震ほど、前兆がつく割り合いが高いことも確認された。また、1958-2019年の国分寺のイオノゾンドのNmF2データについても、異常が距離200 km以内M6.4以上の地震に10日先行するとした場合で4倍を超える確率利得が取れる。海の地震より陸の地震の方が予知率がよいこと、近くて大きくて浅い地震の方が予知率がよいことも確認された。この2つの異常は先行時間やROCが似ており、今後、同じ地震に関連して両方の異常が出ているかなど、両者の異常に関連性に関する調査が望まれる。

2018年7～8月にインドネシアのロンボク島で発生した4つのM6級の浅い地震の数日前に、中国の地震電磁気衛星(CSES-1)のin-situ電離圏電子数変動データに正のプラズマ摂動があったことがわかった。そこで、CSES-1の打ち上げ以前のGIMTECを2007-2017のインドネシアのM5.8以上の浅い地震35個と比較したところ、地震1～7日前に先行して異常が現われる傾向が有意に示された。さらに、2018年7～8月のCSESデータとGIMTECの全球での空間分布を調べ、地震先行異常時はこれらの異常が震源域に局在しており、磁気嵐に伴う異常のように、グローバルに現れてはいなかったことを見出した。

DEMETERの観測で有意な先行性が示されている地震前4時間以内のin-situVLF帯電磁波の観測をハイサンプリングで超廉価に行う超小型衛星の開発については、JAXAの搭載ロケットが決定し、ミッションデザイン、エンジニアリングモデルの製作・検証を終え2024年度にJAXAへの納品のため、フライトモデルの設計および一部の製作開始まで進んだ。超廉価であるため、衛星群化が容易で発展性の高いプロジェクトである。

2011年東北沖地震に関して、日本の地磁気共役点であるオーストラリア北部のGNSSによって観測された電離圏総電子数(TEC)を解析したところ、日本で地震直前に観測されたものと同様なTECの正異常があった。異常の開始時間は地震の41.5分前であり、日本で観測された時間に非常に近く、日本とほぼ同じ磁気経度で発生していた。これは、電離層内の電場が大地震の直前に電子を再分布させたというモデルを支持する。また、2011年東北M9地震の直前のTEC異常の3次元トモグラフィーを行い、2015年イラペル地震でみられたのと同様に、低高度に正の異常が、高高度に負の異常が、磁力線に沿って並んでいた。これは、地表に正の電荷が表われたときに期待される形である。また、直前異常の場所は主に津波によるpostseismicな異常とはずれていること、陸域に限られていることが見い出された。さらに、これまでRinexデータが提供されていなかった2008年中国四川地震(Mw7.9)についても、直前37分に始まり、地震開始時には背景TECの5%に達する異常がみつかった。これは、今までの20事例から得たスケーリング則におおむね合っているが、やや強め、やや早めである。

また、電離圏の擾乱事例に適用していたニューラルネットを用いた3次元TECトモグラフィー手法はTECのSN比が低い夜間を苦手とするため、カルマンフィルタを用いた新手法

を開発した。この手法で、2011年3月8日から3月9日かけてのTEC異常が夜間も継続していたことがわかった。地震動や津波による電離圏の擾乱もこのトモグラフィーできれいに捉えることができ、それぞれの擾乱の水平方向、垂直方向の波長を世界で初めて捉えることができた。これらの力学的な擾乱は音波および内部重力波として伝わり、それらの振幅比が地震の大きさによることもわかった。また、火山噴火に起因する電離圏の擾乱の伝播も捉えられた。これらの知見・技術は津波の早期警報に利用可能である。

○宏観現象

あまり注目されていない地震関連の災害誘因として、地震活動に伴って地中から火焰が噴出したという記述を、1855年安政江戸地震以前の歴史地震史料から多数見つけた。これらはいずれも地下に天然ガスを胚胎し、表面ガス兆候が見られる地域にある。噴出火焰から火災に至ったと判断できる証言も複数見つかった。また、地震直前という例も二つ(1703年元禄地震@小田原、1947年善光寺地震@善光寺界限)ある。

大きな地震があったとき(2019年6月18日山形県沖M6.7、最大震度6強;2021年5月1日宮城県沖M6.8;2023年2月6日トルコ・シリア地震、M7.8;2024年1月1日能登半島地震、M7.6)に、地震雲や前兆などのキーワードでソーシャルメディア等で、当該地震の前兆の可能性のある事例が報告されていたか、あるいは、地震前に地震前兆関連の投稿数が増え変化していないかを調査したが、そういうことはなかった。

また、2021年5月1日宮城県沖M6.8地震については、4月26日にNEWSポストセブンで発信されていた民間会社の警報時空間に入っていたため、ヤフーコメントでの受けとられ方を地震の前後で調査した。適中によって好意的なコメントの割合が15%から31%に増えたが、それでも批判的なものの方が44%と多く、そのほとんどは警報の時空間が広いので当って当然だという統計的な理解に基いていた。

また、2023年の3月に岩手県大船渡市、陸前高田市および宮城県気仙沼市の漁港を中心とした計31ヶ所で、地震前兆として言い伝えられている海鳴りとキジ鳴きの認知度・経験度を効きとり調査した。前者については、そもそも海鳴りという言葉・事象の認知度が低かった。後者については、実際に地震の揺れの直前もしくは地鳴りと同時にキジ鳴きを聞いたことがある人が59%いた。ただし、P波に反応して鳴いたものである可能性が高い。

また、1996年4月1日～2022年6月30日のボラの100匹異常の大量死37件と最大深度6強以上の地震21個のうち、ボラ死の30日以内に300 km以内で地震が発生した組み合わせは、2022年3月6日東京都大田区ボラ1000匹死と2022年3月16日福島県沖の地震のみである。

また、「なまずの会」による地下水データ(1977-1988)と地震の対応を調べたところ、神奈川県を中心に分布する39個の井戸のうち6つが好成績のようであった。

令和5年度の成果

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界すべりの時空間変化の把握に基づく予測

プレート境界の固着・すべりの時空間履歴は、地震発生の切迫度への影響が物理的に明らかであり、予測への演繹的アプローチが考えやすい。本項目では、スロー地震と繰り返し地震の検出を中心とした非地震性すべりのモニタリングに基づく物理モデルの構築と予測の研究を行っている。

○地殻変動

新潟－神戸歪み集中帯の変形構造を調査するため、GNSSデータをインバージョン解析して、地殻内で発生する非弾性変形の大きさに対応する3次元モーメント密度分布を推定した。その結果、地殻深部は一つの基盤断層を境界とした2つの地殻ブロックが相対運動するのに対し、地殻浅部は活断層に沿って非弾性変形が集中する複雑な構造をしていることが分かった（気象庁[課題番号：JMA_01]，野田・他，2023，野田，2023）。

GNSSデータのスタッキング解析により2011年東北地方太平洋沖地震の本震発生約2時間前から始まる加速的な先駆すべりの存在を示唆する結果が得られたという報告の検証のため、GNSSとは独立な防災科学技術研究所のHi-net高感度加速度計（傾斜計）記録を同様な手法で解析した。その結果、ノイズレベルを超えるような数時間の加速的な変動は見られなかった（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]，廣瀬・他，2023）。

2023年3月に熊野灘で浅部SSEが発生したことを、海底のボアホール観測から明らかにした。海洋研究開発機構では、間隙圧変化から海底地殻変動による体積歪変化をナノスケールで抽出する手法を確立し、今回のSSEは発生から1日後に検出することが可能となった（東北大学理学研究科[課題番号：THK_09]）。

ベイズ的逆解析の拘束条件としてよく使われるなめらかさ（空間二階微分）を数値的に求めることが、地球物理のデータモデリングに便利な観測点に即したメッシングであるドロネー分割においては高コストだという問題点に対して、新しい数値計算スキームを提案し、ドロネー分割を用いた重力異常の逆解析で良好に働くことを確認した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，Niu et al.，2023）。

○繰り返し地震

東北沖において、ケーブル式の海底地震観測網であるS-netを活用し、小さな地震まで繰り返し地震の解析に用いるため、深層学習モデル（PhaseNet）による地震の検知を行い、気象庁によるカタログの1.6–6倍程度の地震を同定することができた（東北大学理学研究科[課題番号：THK_09]，Uchida et al.，2023）。

日本全国の定常観測網で観測された地震波形データを蓄積し、日本列島周辺で発生した繰り返し地震活動の検出を行った。その結果、スラブ内地震の余震中にも繰り返し地震活動が確認された。そこで、スラブ内地震の影響を避けるよう繰り返し地震とその周辺で発生する地震活動を選択使用し、プレート間非地震性すべりの時空間変化の推定を試みた。その結果、2021年以降に宮城県沖・福島県沖で発生したいずれのスラブ内大地震発生後においてもプレート間非地震性すべりの加速が見られた。スラブ内大地震の発生によりプレート間の応力が増加してプレート間非地震性すべりが生じ、また、プレート間のすべりによる応力増加がスラブ内のダウンディップコンプレッション型地震の発生

を促した可能性を示唆している（東北大学理学研究科[課題番号：THK_09]）。

地震波形の相関を用いて東北日本沖合で発生した2003年から2023年の地震の震源を再決定し、繰り返し地震の検出を行った。断層サイズ程度に離れた距離で、繰り返し地震の集中域が多く存在することが明らかになった。それらの繰り返し地震の震源時間関数を推定し、東北沖地震後の規模変化の際には、継続時間と振幅の双方が変化していたことを示した（東北大学理学研究科[課題番号：THK_09]，吉田，2023）。

茨城県北部地域で2011年と2016年に発生し、地殻変動データ等から繰り返し地震と考えられていたMw5.8地震が、実際には異なる領域を破壊した地震であったことを波形インバージョンから示した（東北大学理学研究科[課題番号：THK_09]，吉田・福島，2023）。

○深部スロー地震

産総研・防災科研・気象庁の3機関は、ひずみ・地下水・傾斜データをリアルタイムで共有して南海トラフで起きる短期的SSEを解析するシステムを運用しており、2022年11月～2023年10月までの1年間では、40個の震源断層が決定された（産業技術総合研究所[課題番号：AIST09]，落・他，2023，矢部・他，印刷中）。

昨年度開発して日向灘に適用した、GNSSによる地殻変動データから大地震発生後の余効変動の逐次推定・除去処理を行う手法（小林，2023）を、他の現象が同時に発生している場合にも分離して余効変動を評価できるようにし、2013年から2016年にかけて発生していた東海地方の長期的SSEと東北地方太平洋沖地震の余効変動を適切に分離し、長期的SSEの監視が行えるようになることを確認した（気象庁[課題番号：JMA_01]）。

南海トラフ沈み込み帯の深部低周波地震（LFE）の長期的な挙動に関する理解を深めるために、先行研究（Kato and Nakagawa，2020）によって構築された低周波地震カタログのアップデートを行った。2015年9月から2020年12月までの連続波形記録にテンプレートマッチング法を適用することで約23万個のLFEを検出した。その結果、長期的SSEの規模が大きいほどLFEの活動度も高くなる傾向が見い出された。また、2011年東北地方太平洋沖地震以降、走向方向に四国全体を横断する主要なLFE活動が継続して発生しており、プレート境界の状態が変化した可能性が示唆される（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]）。

微動活動の解析に使われるようになった（Wang et al.，2017，2018）隠れマルコフモデルの隠れステートの数 m を選ぶのにAICを使うと m が大きすぎ、BICを使うと小さすぎるということが指摘されていた。様々な情報量規準をシミュレーションモデルで試してみたところ、BICにサンプルサイズに依存する項を加えた調整BICが良好であり、紀伊半島のトレマに適用したところ、最適 m が17から19になり、 $m=17$ のモデルでは認識されなかった活動パターンが拾われるようになった（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，Buckby et al.，2023）。

紀伊半島で発生しているLFEとスラブ内地震の波形を比較分析することで、低周波に卓越するLFEの波形の特徴はプレート境界周辺域の特殊な減衰構造等に起因するのではなく、スローな震源過程を反映していることを実証した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]，Wang et al.，2023）。

前計画・科研費等で構築してきた、豊後水道周辺地域におけるGNSS連続観測および座

標値解析を継続して実施した。それらの観測データに基づき、2015～2016年頃および2018～2019年頃に豊後水道で発生した2つのSSEのすべり域を推定した。これらと深部微動活動を比較したところ、豊後水道では微動発生域へのSSEすべりの進展と微動活動により相関が示された（図1，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]，Hirose et al.，2023）。

昨年度に引き続き、東海、四国南西部、宮崎で絶対・相対重力観測を実施し、重力異常のデータを蓄積した。東海では、この数年のデータ蓄積により、重力異常がプレート境界の浅部に位置する観測点から深部に位置する観測点へ伝播するように見えることが分かった。また、能登半島の群発地震域で4回の重力観測を行い、令和5年5月、6年1月に発生した大地震に伴う重力変化を検出した。これらの重力変化は弾性ディスロケーション理論では説明できない負の質量変化を含んでおり、この地域に大量に含まれる地殻流体の変動により説明できるか検討中である。また、石垣島のSSE発生域において、時間分解能を大幅に改善した連続観測可能な重力計による観測を継続している（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]，Tanaka，2023；Tanaka et al.，2023）。

四国西部域においてネットワークMT観測を継続し、そのデータから得られた3次元比抵抗構造に基づいて構造変化検知可能性を検討した。さらに、スロースリップ域の空間的特性を明らかにするため、四国地方や紀伊半島域での既存のネットワークMT観測のデータをコンパイルし、紀伊半島については3次元比抵抗構造推定を行った（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]，Shi・他，2023，Watanabe et al.，2023）。

○浅部スロー地震

拡充されたスロー地震データベースを活用し、南海トラフ沿いで発生する浅部スロー地震の特徴をまとめた。地震学のおよび測地学的な浅部スロー地震の分布を明らかにするとともに、浅部プレート境界へのインプット、室内実験、プレート境界のすべり欠損や地下構造を総合して（図2），浅部スロー地震の分野間共通理解を目指すレビュー論文を出版した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]，Takemura et al.，2023）。

○スロー地震と構造の関係

JAMSTECが過去に南海トラフで取得した反射法探査データを深海掘削データと組み合わせ、海溝で沈み込む深海堆積物を分析した。その結果、中新世に堆積した3つのタービダイトがプレート境界に沿って深部へ沈み込んでいることを発見した（図3）。砂層に富むタービダイトが、スロー地震活動の静穏域（プレート間固着の強い領域とほぼ一致する）に集中して分布している。透水性の優れたタービダイトがプレート境界断層の間隙水圧を低下させ、断層面の剪断強度が大きくなることで、スロー地震活動が静穏化したという解釈が考えられる。今後、南海トラフ沿いのプレート境界断層の間隙水圧を高精度・広域的に調査することで、巨大地震に影響するスロー地震に関する理解が進展し、巨大地震発生予測モデルの高度化への貢献が期待される（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]，Park and Jamali Hondori，2023）。

今年度までに開発してきた常時微動表面波トモグラフィー手法をS-net及び過去に実施された稠密海底地震観測網のデータに適用し、日本海溝沈み込み帯におけるS波速度構造を推定し、空間的に相補的に分布する微動発生域と大地震すべり域に対応したS波

速度構造の空間変化を明らかにした。また、異方性構造の推定へ向けた検証を行い、常時微動源の非等方性の影響をモデリングできた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]，高木・他，2023，高木・西田，2023）。

令和3年12月から令和5年3月まで、四国東部地域において実施した稠密地震観測で取得したデータを用いた地震波トモグラフィ解析を実施し、スロー地震のすべり特性を規定する地下構造の特徴把握を行った。南北測線の V_p/V_s 構造を既存の反射法断面図（蔵下・他，2007）と比較すると、フィリピン海プレート上面近傍の反射層が厚く確認できる領域で、 V_p/V_s 値が特に大きくなる特徴を示し、流体の存在が示唆される。南北測線下での考察を踏まえると、得られた東西測線下の V_p/V_s 構造より、深さ30-40 kmの V_p/V_s 値が周囲より大きな領域は、沈み込むフィリピン海プレートの海洋性地殻に対応すると解釈できる。 V_p/V_s 値は東西方向に変化が確認でき、深部低周波微動活動が活発な領域は、低調な領域に比べて V_p/V_s 値が高くなる特徴が見られ、深部低周波微動活動度と沈み込むフィリピン海プレート内の構造不均質との関連が示唆される（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]，蔵下・他，2023）。

○スロー地震と地震発生の関連性

2020年3月末から半年以上にわたって、岐阜・長野県境付近において群発地震活動が発生した。機械学習モデルによる地震波の読み取りや震源再決定、テンプレートマッチング法を適用することで、約20万個のイベントから成る包括的な地震カタログを構築した。群発地震は主に東西走向もしくは北西-南東走向の高角傾斜の多数の断層面に分布し、活動域は南側から北側へと徐々に拡大した。また、活動域の拡大フロントの移動速度は約10-150 km/日であり、沈み込み帯で見られるスロー地震の移動速度と類似する。流体に駆動されたスロースリップが群発地震の発生に関与している可能性が考えられる（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]，Kato et al.，2023）。

2018年6月に発生した房総沖スロースリップに伴う群発地震活動に対してMF法を適用することで地震活動の再検出を行った。その結果、過去のスロースリップ発生時と同様に、群発地震活動は沖合の東北東から陸域の西南西に向けて移動を示した。移動速度は2007年と2014年のスロースリップ発生時とほぼ同じ約3 km/日であった。また、スロースリップのすべり速度が大きくなる後半に地震活動が活発化を示した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]）。

背景地震活動度の時間変動を許す時空間ETASモデルを用いて、2001～2013年の期間の南海トラフでの群発地震を網羅的に検出した。背景地震活動度が2年間の移動平均より2割以上高ければ群発活動だと定義すれば、M1以上の地震の18%が群発活動に含まれ、主に下盤内の活動であった。群発イベントの7割が四国西部から西であり、日向灘が最も多かった。水平位置でみて、群発活動とSSEの発生域はおおまかには相補的だが、四国西部と豊後水道では重なった。また、長期的および短期的SSE活動と群発活動は、全体としては相関がなかったが、1－2割のSSEについては、他地域の先行研究(e.g.，Hirose et al.，2014，Nishikawa and Ide，2017，Peng et al.，2021)と同じく群発地震と正の相関があった（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，Guo et al.，2023）。

○地震・スロー地震の物理モデル

地震発生シミュレーションの計算高速化に関する手法について調査し、Hマトリクス法コードを用いることにより、これまで開発してきたコードに比べ、比較に用いたケースでは1/3程度計算時間の短縮が図られることを確認した。(気象庁[課題番号：JMA_01])。

○断層すべりのデータ同化

アンサンブルカルマンフィルター(EnKF)に基づくデータ同化を行う際には、初期アンサンブルとして断層面上の摩擦パラメータをうまく与えることが必要であると考えられる。そこで、豊後水道のL-SSEのセグメント化が摩擦特性不均質に起因するとの考えのもと、観測されるL-SSEのセグメントサイズ・発生間隔やすべり量をもつSSEがどのような摩擦パラメータ分布により生じるかを、フォワード計算により調べてきた。しかし、昨年度は新たに、一様な均質断層であっても、走向方向に長い断層面では自己組織化される歪みの不均質により、L-SSEのセグメント化・L-SSEの伝播が起きること、またL-SSEのサイズは震源核形成サイズ h^* (Ruina, 1983; Rice, 1993)により決まり、セグメント数は h^* に反比例することを、数値実験により示した(大島, 2023)。本年度、均質平面断層面上で起こるSSEセグメンテーションの性質を詳細に調べた結果、SSEのセグメント数は概ね h^* に反比例するが、摩擦パラメータの比 a/b 、有効法線応力 σ にも依存し、またL-SSEの伝播方向は摩擦パラメータの組み合わせによって双方向や単方向など様々な向きをとることがわかった。これらL-SSEセグメントのサイズおよび個数、伝播方向は、L-SSE以浅の地震発生領域の固着状態にも依存し、また近隣で地震が発生するなど、外部から強い応力擾乱を受けると変化する。EnKFの適用時には、これら周囲の実際の状況を反映したモデルが必要である(京都大学理学研究科[課題番号：KUS_01])。

昨年度に引き続き、iterative ensemble smootherとensemble transform Kalman filterを用いてパラメータとその不確実性の空間分布を推定する手法の開発を行った。手法の定式化を工夫し、より良い推定を行えるようにした。この手法の性能を評価するために、余効変動の物理モデルのパラメータ(プレート境界の摩擦パラメータ、マントルの粘性率、地震時の応力変化等の空間分布)とその不確実性を推定する数値実験を行った。未知パラメータが多数あっても適用可能で、7000個程度の未知パラメータをリーズナブルな計算コストで推定できることを確認した(京都大学理学研究科[課題番号：KUS_01])。

豊後水道で2010年に発生したL-SSEを対象に、MCMC法を用いた摩擦特性推定手法と断層すべりの短期推移予測手法を開発した。同地域の断層モデルとして、円形パッチでSSE発生域を模したHirahara and Nishikiori(2019)を用いた。円形パッチ内外では摩擦特性を一様と仮定し、それぞれの摩擦特性をGNSSデータから推定した。まず、SSE全期間を含む2008年5月～2011年5月の地殻変動データを同化すると、データに整合的な摩擦特性が推定された。さらに、現在進行形で発生しているSSEの短期的な推移予測の性能を評価するために、同化するデータの期間を0.5年から3年へと段階的に変化させてデータ同化を実施し、その後のSSEの推移予測を計算した。その結果、断層すべり速度が最大値に達する前の地殻変動データのみでは、その後の推移として高速すべりが予測されるのに対し、断層すべり速度が最大となって以後のデータも併せて同化すると、SSEのようなゆっくり

とした断層すべりが予測された。一方で、SSEが発生するという摩擦特性の事前情報をデータ同化に組み込むと、すべりが最大に達する以前のデータのみを用いても、ゆっくりとしたすべりが予測された(京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01], Kano et al., 2023)。

観測データとモデルの融合による断層すべりモニタリングの新たな方法として、深層学習を用いた物理方程式の求解手法であるPhysics-Informed Neural Networks (PINN)を用いた断層すべりモニタリング手法を開発した。PINNは初期・境界条件と偏微分方程式を損失関数として取り込み、損失関数を最小化するように学習させることで、ニューラルネットワーク(NN)を用いて偏微分方程式の解を近似する手法である。PINNでは偏微分方程式の求解という順問題に加え、データとNNの出力の残差を損失関数に加えることで、摩擦特性のようなパラメータを推定する逆問題にも応用が可能である。PINNを用いた断層すべりモニタリング手法に向けて、一次元断層すべりモデルであるばねブロックモデルを用いて、(a)SSEを計算する順問題、(b)摩擦特性の推定を試みる逆問題、さらに(c)進行中のSSEのすべりの推移予測の試行、を試みた。(a)においては、PINNによる断層すべりの数値計算結果が、従来の数値積分による断層すべりの結果と相対誤差 10^{-1} 程度で一致していることを確認した。(b)については、(擬似)観測データの情報を損失関数に加えることで、摩擦特性を正しく推定できていることが確認できた。さらに、(c)では、観測データの前半部分のみを用いた場合の、摩擦特性の推定とその後のSSEの推移予測を試行した。すべり速度が最大に達する以前の観測データしか用いていない場合には、NNの初期値に依存して、摩擦特性の推定・すべりの予測ともに成功する場合と失敗する場合が存在した(図4左, 中)のに対し、最大すべり速度以後のデータまで用いると摩擦特性の推定やデータが得られていない期間のすべりの推移予測が正しく行える(図4右)ことが確認できた(京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01], Fukushima et al., 2023)。

固着すべりを同一試料で続けた実験からわかるように、断層面の摩擦特性は累積すべりとともに徐々に変化する(e.g., Urata, 2017)。物理的なすべりモデルのデータ同化で予測を行う場合には、摩擦特性の変化を捉えて摩擦パラメータを更新すべきである。固着すべりの数値シミュレーションデータを用いて、固着すべりの特徴量(すべり弱化レート、イベント間隔)からRSF摩擦パラメータ(a, b-a, Dc)を推定するように訓練した機械学習モデル(ランダムフォレスト)によって、室内実験の固着すべり履歴から摩擦特性の変化を推定した。実験での摩擦特性の変化は、ガウジ層の発達による部分が大きいように見える(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13], Ishiyama et al., 2024)。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

地震活動は20世紀前半からの網羅的観測データがあり、予測手法の検証・実践に関して格段のポテンシャルを有しているため活発な研究が続けられている。

○地震観測手法

DAS(光ファイバー振動計)による東南海ケーブルを利用した海域での試験観測を開始し、浅海域における波浪によるものなどの振動現象を観測した(気象庁[課題番号:JMA_01], 田中, 2023)。

南海トラフの地震活動監視と津波早期警報に威力を発揮すると期待されているDONETの地

震検知能力を、2015年10月1日から2019年4月1日までのデータで評価した。ネットワーク内ではM1以上なら、ネットワークの外でも周辺数十キロではM2以上ならほぼ取り漏らしはない（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，Nanjo et al.，2023）。

DONETやS-netなどの海域の定常観測網による浅部微動や浅部超低周波地震の解析の高精度解析へ向け、海底地震計での高周波地震動の特性を明らかにした（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]，Takemura et al.，2023）。

地震観測網の手薄なイタリアのファノ沖合30 kmのアドリア海浅部で2022年11月9日に起きた2つのM5+の地震の余震活動について、内陸の2点の地震計だけを使って、最近開発された新しいマスターイベント法(Grigoli et al.，2021)で震源再決定を行った。誤差1 kmで良好な位置決定のできた余震分布から本震の断層dip(30-40度)がしっかり押さえられた。これは本震のメカニズム解や、反射法探査の結果と整合的であった。この手法は、地震観測網が手薄な地域での津波リスク評価につながる（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，An et al.，2023）。

○震源カタログ

東北地震の激しい余震活動により、多数イベントからの地震波が重畳し検出にとって難しい条件であった2011年3月1日から2012年2月末までの1年間について、一元化震源カタログの作成に使われているものと同じ自動検出によるP/Sピックに、深層学習(Ross et al.，2018，Kudo et al.，2023))とアンサンブル学習(Tamaribuchi et al.，2021)による誤検出除去手法を適用し、自動ピックの誤りの8割を除去することができた。その結果、従来の3倍にあたる92万個の微小地震カタログが作成された。活動が極度に高く、複数イベントからの地震波が複雑に重畳した東北地方沿岸部での改善が特に顕著で、Mcが2.3から1.5になった。また、日本海側まで含む東北地方内陸部でも、活動の高かった時空間ではMcが大きく改善した。この結果、一元化震源カタログでは認識できなかった微小地震の活動、たとえば、秋田県の森吉山(第四紀後期火山)での震源移動現象や、東北地震の9分後から始まった長野県北部M6.7地震(2011年3月12日午前3:59)の前震活動(Shimojo et al.，2014，2021)などが、テンプレートを用いない自動処理カタログで認識された（気象庁[課題番号：JMA_01]，Tamaribuchi et al.，2023）。

科研費・新学術領域研究「スロー地震学」で構築したスロー地震データベースを安定的に維持・管理するとともに、データベースへのカタログ登録を継続的に呼びかけ、現在では約120のカタログが登録されている（東京大学地震研究所[課題番号：ERI12]）。

閾値CCを下げたMF法を用いて、2003～2019年の富士山の下の火山性LFEを多数検出した。LFEの活動は、2011年東北沖地震の4日後に富士山の麓地下10kmで起きたM5.9の静岡県の地震(LFE域の応力を0.1-1 MPa程度変えたと考えられる)直後に顕著に活発化し、その後余震的に減衰したが、このLFE活動にETASモデルをあてはめてみると、活動度はまだ東北沖地震以前のレベルに戻ってはおらず(図5)、富士山下のマグマシステムは活性化されたままの状態が続いていると考えられる（東京大学地震研究所[課題番号：ERI13]，Nanjo et al.，2023）。

歴史記録から過去の地震の情報を得るときには、史料そのものの信頼性に注意する必要がある。寛治六年(1092年)八月三日の越後の大波について、これに関する記述のある

26件の史料を精査した。これが地震に関連した事象であることを示唆する史料は、いずれも江戸時代以降の成立であり、また、地震動による具体的な被害を記述した史料もない。一方、八月三日ないし四日に、日本の広い範囲に洪水や高潮を伴う大規模な気象災害があったことは、同時代および江戸時代以前に成立した史料に記述されている。よって、これは気象災害であって地震はなかった可能性が高い(石辺・他, 2024)。また、安政三年十月七日(1856年11月4日)の関東の地震については、立川断層帯付近を震央とし、所沢・東村山(久米川)・立川に震度5弱ないし5強に相当する大被害を引き起こした地震と考えられてきたが、多摩・入間地域の同時代史料多数を精査したところ、この地域に大きな被害があったという記述はなかった。史料で強い揺れの記述があるのは、むしろ東京都中心部より北東側であり、震源が立川断層帯であったということは非常に考えにくい(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13], 石辺・他, 2024, 原田・他, 2024)。

○断層面解と応力インバージョン

近地地震波形を用いた震源過程解析の自動化について、南海トラフ沿いで発生した地震を解析したところ構造不均質の影響により妥当な解が得られなかった。この影響を回避するため、あらかじめ沈み込むプレート面上に小断層を配置して三次元速度構造に基づくグリーン関数を計算しておく手法の開発を進め、プロトタイプを構築した。南海トラフ沿いでは観測事例が少ないため合成波形を作成し、開発した手法の検証を行った(気象庁[課題番号:JMA_01], 西宮・弘瀬, 2023)。

前計画で開発した、P波初動極性(押し引き)から直接応力場の空間パターンを推定する手法(Iwata, 2018)の特徴は、解析対象領域を先験的に分割することなく応力場推定を行う点にある。この手法の改良として、推定の空間解像度を上げることを試みた。以前の手法では、すべらかな応力場(主応力軸の向き)の空間パターンを表現するために節点間隔5 kmの3次のB-splineを用いていた。節点間隔を短くすれば空間解像度を上げることは出来るが、スプラインの節点間隔は解析領域全体で一定とすることが多く、単純に節点間隔を短くすることは計算負荷の面で困難である。データの生じる地点、すなわち震央の空間密度に応じてスプライン密度を変化させることも考えられるが、具体的にどうするかは単純ではない。そこで、ドロネー三角形分割に基づく線形スプラインを用いることを試みた。この改良手法をIwata(2018)で解析した2000年鳥取県西部地震の余震データに適用した。大局的な応力空間パターンは概ね同じであるが、改良手法では方位角の細かい空間変動がより明確となり、以前の手法では解像できていなかった断層北端部においても、鳥取県西部地震の左ずれ断層運動と東西圧縮の背景応力場に整合的な結果が得られた(京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01], 岩田, 2023)。

○地震の可予測性

大地震の根本的な可予測性を否定する論拠として、次に起きる地震のマグニチュードについては、過去の履歴に依存しない固定した確率分布(GR則など)に従っているという考えがある。実際のカタログにはマグニチュードの相関が見られることがあるのだが、これは初期余震の観測で小さい地震が見逃がされることによる虚像とも考えられ、互角の論争が続いていることを昨年度メタ解析により報告した(Petrillo and Zhuang, 2022)。

今年度は、機械学習ピックを用いて作成されたAmatrice-Norciaの1年間の高分解能カタログ(Tan et al., 2021)に対して、ETASトリガリングによる各イベント間の親子関係を推定した上で(先行研究は、一定の時空間範囲に入るものを全て比較しており、独立地震も含まれていた)、トリガされたイベントのマグニチュードが、トリガしたイベントのマグニチュードと相関するかを調べた。マグニチュード相関がない場合(帰無仮説)の挙動は、普通のOFCモデル(Olami et al., 1992)に遅れ応力伝播を可能にする延性層をつけて、GRに加えてリアルな感じの余震を産み出せるようにした2層OFCモデル(Petrillo et al., 2020)による合成カタログから作成した。実カタログでも $M > 3$ では相関は見られなかったが、 $M < 3$ では、トリガするイベントと、されるイベントのマグニチュードが近いという相関が見られた。実カタログの M_c が3程度であることはマグニチュード閾値を変えて作ったCDFの比較から明かであり、この実カタログでみられた相関は小さな地震の取り漏らしによる虚像と考えられる(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13], Petrillo and Zhuang, 2023)。

時間不変のGR則に象徴されるような予測不能性は、破壊開始した地震破壊がマルチスケールで複雑な強度と応力の空間分布のなかで、どこまで成長を続けられるかが実質的に偶然で決まる(e.g., Ide and Aochi, 2005)せいであると考えられる。一方で、破壊深さの300°C限界(これ以深では定常クリープするので、すべり遅れ・応力蓄積がない)のような決定論的な破壊停止要因もたしかにあるが、脆性層で有意な非地震性すべりが無い内陸断地震のストライク方向の破壊が、断層幾何の巨視的变化部位でないところで停止した2016年鳥取県中部地震($M_w 6.2$)のような場合には、そこで停止したことに関して決定論的な要因はなさそうに思われる。しかし、この事例について、非常に多数の余震の良く決まった断層面解を用いた高分解能の応力インバージョンを行ったところ、破壊域のstrike両端のすぐ外側では、地震前には差応力がほぼゼロ(cf. すべり域内部は20 MPa以上)だったことがロバストに推定された。同地域の2000年鳥取県西部地震に関しても同様のことが見受けられる。これらの位置には低速度異常もあり(Iio et al., 2021)、低応力バリアによって発生前から地震がここで停止することが決まっていたと解釈できる(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13], Iio et al., 2023)。

他方、2023年モロッコのハイ・アトラス地方の地震($M_w 6.8$)に対して行った遠地P波によるポテンシー密度テンソル逆解析では、10 kmほどに成長した破壊が直径6 kmほどの高強度バリアにあたってそこへの侵入を拒まれ、1秒かけて回り込んでから結局そのバリアを破壊したという様子がロバストに推定された。この地震に関して近地強震計の記録はないが、このようなギクシャクした破壊は強い短周期地震動を生成するから、深くPで(20-30 km)地表まで破壊が到達しなかったわりに大きな被害を出した理由の一つと考えられる(東京大学地震研究所[課題番号:ERI13], Yagi et al., 2024)。

○ETAS

ETASモデルによる予測地震数と観測地震数の比を、GNSSデータから計算した最大せん断ひずみ速度に加えて、震央距離、 D_{90} 、地震波速度構造とも空間相関を比較したが、最大せん断ひずみ速度との正の相関が最も高く、2012年2月のデータまで拡張しても同様の傾向が見られた。これは、最大せん断ひずみ速度が、ETASモデルの高精度化に有効であ

る可能性を示唆している（気象庁[課題番号：JMA01]，Tamaribuchi and Kimura, 2023）。

Dieterich(1994)の余震の物理モデルは、RSF則にもとづく遅れ破壊として余震レートを予測するもので、背景応力が一定レートで増加する場合には、 p 値が 1 の大森・宇津則が、背景応力が経過時間の対数に従う変化をすれば、1 以外の p 値が再現できる。これを用いて、実際の余震活動での背景応力の時間変化を推定することを試みた。余震活動はETASに従うクラスタ成分（二次余震）と、Dieterichモデルに従う比較的長期的活動変化であるトレンド成分からなると仮定し、さらに、背景応力の変化レートは地震発生時のみステップ変化すると仮定のもと、1995年神戸地震の余震データに適用したところ、大まかには本震からの経過時間の対数に従いつつ、余震活動の複雑さに呼応した細かな時間変動を伴う背景応力の時間変動を得ることができた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，岩田，2023）。

余震活動には、上記で考えたような各地震イベントのすべりが母岩の弾性を通じて起こす応力変化によるトリガリング以外に、余効すべりによって駆動されるものもあると考えられている(e.g., Asano et al., 2011; Perfettini and Avouac, 2004)。2011年東北沖地震からの10年間の活動にHIST-ETASを適用し、確率的デクラスタ手法(Zhuang et al., 2022)を用いて、観測された地震活動を背景地震活動とトリガリングによる地震活動の時空間分布に分離した（図6）。トリガリングによる活動は本震の大すべり域による静的応力上昇による余震として理解できるものだったが、背景地震活動は大すべり域のdowndip側の余効すべり域と一致し、その活動の時間的減衰は、相似地震(Igarashi, 2020)や測地観測から推定(Fukuda and Johnson, 2021)された余効すべりの減速とよく一致しており、余効すべりに駆動された余震活動であったとみるのが妥当である。このような活動の分離解析は、余震活動の理解と予測の向上や、測地データがない場合の余効すべりの推定に役立つだろう（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，Ueda and Kato, 2023）。

（3）先行現象に基づく地震発生の確率予測

地震先行現象の候補として提案されている様々な自然現象について、地震発生との相関の有無と程度を評価しておけば、その知見を経験的に地震発生確率の予測に取り入れることができるし、物理ベースの演繹的予測法のヒントになることも期待できる。

○前震

2024年1月1日能登半島地震M7.6の約1時間前から見られた前震活動について連続波形記録を用いた解析を行った。その結果、M3未満の前震がM7.6の震央近傍約1km以内の狭い範囲に集中して発生していたことが明らかになった（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]）。

現在進行中の群発的な地震活動がより大きな地震の前震である(i.e., 現時点までの最大地震より大きな地震が近々起きる)確率を、群発活動のさまざまな特徴量からの回帰モデルとして求める確率予測モデルを開発してきた(e.g., 野村・尾形, 2018)。前震である確率が高い活動の特徴は、クラスタ内の大きい方2つのマグニチュード差が小さい、活動に含まれる地震数が少ない、クラスタに含まれるイベント間の距離が大きいなどで

あり、さらに、地域的な前震確率の大小がある。これらの特徴を併せたモデルを日本の1926～1999年の地震に基いて作成し、2000～2017年10月末までの活動で検証したところ、どちらの場合も、本震発生確率の予測値と実際に本震が発生した割合は、クロス表で同程度によく一致していた。また、ETASによる合成カタログに適用すると実際のカタログに適用したときよりも尤度が有意に下がるので、余震トリガリング効果では説明できない、真の前震の特徴を利用できていることも確認できた。このモデルは群発地震内の最大地震より大きいものが30日以内に起きる確率（オッズ）をフィッティングすること（図7）で作成したが、その確率を簡単な方法で任意のM以上の地震が任意の日数内に起きる確率に変換できるので、最近群発活動のあった地域に関しては、予測対象地震のスペックを柔軟に設定して確率予報を業務的に行える。本モデルで採用した前震候補活動の特徴量は、小さな地震の取り漏らしの影響を受けにくいという点でも実用的である。これに、群発活動がおきていないところでも、地震発生確率を出せるETASモデルを組み合わせCSEP Japanへの提出を目指している（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，Nomura and Ogata, 2023）。

○微小リピータ前震

前震の中には、本震の破壊開始点近傍で本震直前に多数の微小な相似地震として起こるものがある(e.g., Bouchon et al., 2011, Doi and Kawakata, 2012, 2013)。非常に小さな地震であるためETAS的なトリガリングで本震を起こした可能性は低く、震源核の形成が示唆されるが、先行現象であるかどうかを検証するためには、大地震の直前だけでなく、全ての時間・空間においてテンプレートなしで総当たりの波形比較を行って、微小な相似地震を網羅的に検出する必要がある。昨年度、連続波形記録同士の総当たり計算をフーリエ変換も用いて大幅な高速化を行う手法を開発したが、年単位の処理などデータ量が多くなると、連続波形記録を現在の一般的なワークステーションが搭載可能なメモリに格納できないため、そのまま利用することはできない。そこで、本年度は、気象庁一元化震源カタログに記載済みの地震の波形記録を、テンプレートとして活用することとし、テンプレート群と連続波形記録の相互相関の高速計算について検討した。広く行なわれている正規化相互相関関数の全チャンネル平均値(NCC)の計算にあたっては、計算機上、離散Fourier逆変換(IDFT)にかかる時間が処理のボトルネックとなっていることが考えられる。しかし新たに開発された高速処理アルゴリズムDiallelXにおいては、IDFTを実施する前に平均値を計算することで、IDFTの回数を、全チャンネル数の逆数倍に削減することができる。能登半島珠洲市付近の群発地震活動を対象として、テストを実施した。2017年1月～2022年7月までの67か月間の防災科研Hi-net連続波形記録、および同期間に発生した地震（気象庁一元化震源カタログ記載済みであり、2022年6月19日に発生したMj 5.4の地震の震央から水平距離10 km以内で発生したMj -1.0以上の地震）928個ぶんのテンプレート波形記録（珠洲と柳田の2観測点3成分の計6成分）を使用した。市販の24コア搭載CPUのPC環境において2.5時間程度で処理できることがわかった。暫定的な結果ではあるが、群発活動開始後には多数の高NCCを示す波形ペアが検出されただけでなく、群発活動開始前にも高NCCを示す波形ペアが検出された。このうち、2019年9月2日1時42分の地震（Mj 0.4）記録と似た波形を示した2019年2月18日21時46分は気象

庁一元化震源カタログに地震は記載されておらず、カタログ未記載の相似地震を検出した可能性がある。今後、このような大規模地震発生と直接関係しない類似波形ペアについて、詳細に調べていく必要がある（立命館大学[課題番号：RTM_02]）。

○前震の室内実験

室内実験において前震的微小破壊（アコースティック・エミッション，以下AE）イベントの発生状況を調べるために，人為的に低摩擦面を試料内部に配置する手法を検討した。天然岩石試料中に低摩擦面を埋め込むことは極めて困難であるため，セメントモルタル試料を使用した。傾けた円筒容器にセメントモルタルを流し入れることで下層を作成し，低摩擦面としてテフロンシートを下層表面上に配置する。円筒容器を立てて再度セメントモルタルを流し入れることで上層を作成し，試料を完成させる。なお，上層の流し入れを下層の完全硬化後におこなう，あるいは硬化前であっても表面処理をせずにおこなうと，上層と下層の境界全体が低摩擦面となり，破壊強度を有意に下回る低強度での破壊に至ったため，下層表面には表面処理を実施した。このようにして確立された作成手順をもとに試料を作成し，一軸圧縮破壊試験を実施した。試験機の性能上，軸応力を破壊に向けて制御することが困難であるため，クリープ試験を実施したが，クリープ開始後1時間以上経過しても破壊に至らず，AE活動も低調であったため，载荷をリスタートしたところ，数分後に突然制御が不安定になり，軸応力が振動したのちに試料が破壊した。破壊は，一軸破壊的な縦割れとせん断破壊が混在するようなモードで発生し，せん断破壊部分の一部にテフロンシートの面が含まれていた。震源決定の精度の課題もあり，縦割れとせん断破壊のいずれが先行したか，低摩擦面が破壊過程にどのように寄与したかについて，判断するまでには至らなかったが，低摩擦面が最終破断面の一部に含まれていたことから，試料内部に破壊に寄与する低摩擦面を含む試料の作成に成功したと言える。今後，低摩擦面と前震的AE活動との関係，前震的AEの震源パラメータの特徴などについて検討できるものと期待される（立命館大学[課題番号：RTM_02]，Inanishi et al.，2023）。

○前震以外の地震活動異常

長期静穏化は $G=2$ 程度の巨大地震発生危険度の高まりを示す(Katsumata and Nakatani, 2021)が，空振りはたくさん含まれている。例えば，2005年以降にPMAP法(Katsumata and Zhuang, 2020)で p 値が0.0007を切る非常に顕著な静穏化を示した7ケースのうち4つは，その後M8以上の地震が起きなかった空振りである。そのうち静穏化後に中規模地震を含む顕著な群発活動地震が起きた2つの地域の地震テクトニクスを検討した。2009年に群発地震が起きた地域は，もともと地震カップリング率が0に近いセグメントであり(Nocquet et al., 2014)，そもそも巨大地震の起きそうな場所ではない。ここで起きた静穏化現象は，一時的に固着が強くなって，定常的クリープに伴う地震活動が止んだだけと考えられる。他方，2009年に群発地震が起きた地域は，過去にM8級が起きた高カップリング域の縁辺部にあたる。2009年の群発地震は震源のmigrationを伴ったので，スロースリップが起きていたことが疑われる。最終的にはM6.6，M6.5も起きており，固着の剥がれが進んだが，サイクルシミュレーションでよく見られるように，まだ応力蓄積が不十

分だったために(e.g., Noda et al., 2013; Ohtani et al., 2019) M8級アスペリティ本体の破壊には進展しなかったのだろうと考えられる(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13], 勝俣, 2023)。

ルーマニアのVrancea地方の中深発地震は、百年に2～3個のM6.5以上の大きな地震を含み、その前に静穏化が起きたケースが知られている。1960-1999年の60 km以深の活動について、Matthews (1988)の β 値を調べたところ、1977年のM7.4に先立って非常に顕著な静穏化があったが、1986年のM7.1、1990年のM6.9の前には有意な静穏化は見られなかった。また、深さ情報の信頼できる2003-2013年のカタログ(この期間にはM5.5以上の地震はおきていない)では、地震活動度は時間変化は見られなかったが、活動域の最深部にあたる140-160 kmでだけ b 値が低いことがわかった。先行研究(Radulian et al., 1996, Hurukawa et al., 2010)では、ここで次の大地震に向う応力蓄積が進んでいるのではという指摘もある(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13], Enescu et al., 2023)。

前計画において、1984年から2011年3月11日までの6つのM7.6以上の日本の大地震全てについて、日本全域の地震マグニチュードのnatural time系列(e.g., Varotsos et al., 2011)の秩序パラメータ変動度から、これら6つの地震の発生時期と場所を数か月、数百km程度に絞り込めた可能性を示した(Sarlis et al., 2013, 2015)。その後、さらなる時間の絞り込みに使えそうな現象として、マグニチュードnatural time系列のエントロピーと、時間反転した系列でのその差のゆらぎ、および長距離相関のある系へのエントロピーの拡張である、非加法的なTsallisエントロピー(e.g., Tsallis, 2009)のゆらぎに、 t の $1/3$ 乗で増えるLSW相転移(Lifshitz and Slyozov, 1961, Wagner, 1961)と思われる挙動を見い出した。2011年3月11日14時46分のM9東北沖地震については、2010年12月22日の父島近海地震(M7.8, 深さ60 km)や、2011年3月9日11時45分のM7.3前震を契機としてこれらの現象が現れたように見える。また、2017年6月14日のチアパス地震(M8.2)、2017年9月19日のメキシコのフラット・スラブで起きたM7.1地震、2019年7月6日のリッジレスト地震(M7.1)についても、地震発生時刻が近づくにつれて、地震発生時刻を数時間に絞り込むことに役立ちそうな同様の現象が確認できた(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13], Varotsos et al., 2023)。

北海道東方沖の沈み込み帯においては、Katsumata and Nakatani(2021)の解析期間の最後2015年の時点で11年間以上 $M>5$ の地震がない状態が続いており、7年の間に75%の確率で $M_w7.5$ 以上の地震が起きるとの警報が出されていた。また、Matsu'ura(2019)も、千島海溝西端部で2009年からETASモデルから顕著に乖離した静穏化を指摘している。そこで、最近のデータを追加して解析したところ、Katsumata and Nakataniの警報は、根室・十勝沖から千島南部であいかわらずONであった。一方、Matsu'uraの対ETAS静穏化については、地震活動の低調さは減少しているが、まだ-1シグマ未満で停滞しており、静穏化が終了したのかどうかははっきりしない。しかし、その北東側のロシア領の地域では既にETAS効果を伴った活動が現れている。そこで、2011年東北沖地震に起因する粘弾性的影響を計算すると、千島海溝西端部では地震活動を促進するセンスの応力変化が期待されることがわかった。これを考慮すれば、2009年からの静穏化はまだ終了していないと見る方が妥当かもしれない。さらに、 b 値についても最近のデータを含めて検討したところ、2003年十勝沖地震の震源域の東側では b 値減少中で、現在0.6を切っていることがわかっ

た（図8）。この領域はb値の減少に加えて、スロー地震関連現象の起きる領域に隣接しているが重なってはいない(Nishikawa, 2019)という点でも、2011年東北沖地震、2003年十勝沖地震前の状況と似ている。また、1983年日本海中部地震の余震域を含む日本海沿岸域で2011年5月に始まった、ETASモデルからの顕著な乖離（ETAS効果による余震が消滅）を示す静穏化についても、その後の状況を調べたところ、2019年の山形県沖地震（M6.7）およびその余震活動にもかかわらず、ETAS効果が復活していないことがわかった（松浦・他、2023）（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，勝俣，印刷中，松浦・他，印刷中，楠城，印刷中）。

2023年2月6日にトルコ南部の東アナトリア断層で起きたM7.8の地震について、この地震の破壊開始域あたりに群発活動があり、2022年後半から、その活動が盛んになるとともに、b値が顕著に低下していたことを見い出した。また、M7.8地震の北東延長では、その9時間後に別の断層で起きたM7.5地震の影響もあってCFFがかなり増加した(Toda et al., 2023)のに余震活動が少ない。これは、この部分が2020年に起きたM6.8の破壊域であり、応力が抜けていたからだと考えられる（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，Nanjo et al., 2023）。

○地殻流体

同一地点に深さの違う3つの井戸を設置し、地下水位・歪・傾斜を観測する産業技術総合研究所の地下水等総合観測施設は、南海トラフの想定震源域に20点を計画し、2006年から順次整備を進めている。本年度は香川県綾歌郡綾川町に新規地下水等総合観測施設を設置した（産業技術総合研究所[課題番号：AIST09]，北川・他、2023）。

2013年4月20日のLushan地震（Ms7.0）は、2008年四川地震（Ms8.0）が起きた龍門山断層の南部セグメントを破壊した。この周辺400 kmほどの地域では、絶対重力観測点3つと140をこえる相対重力観測点をもちいた年2回の繰り返し重力観測がなされていた。観測が精密になった2010年8月からLushan地震までの間のデータをベイズ同化モデルで逆解析したところ、Lushan地震の震源域南側の広い（200 km）領域で23 uGal/yr. という、計器誤差や浅部地下水等の変化では到底説明のつかない顕著な重力増加が示唆された。密度変化が地下の円板状領域で起きたとすると、半径が82 km、厚味0.7 kmの領域が深さ26 kmに推定された（図9）。この場所では、2010年8月ごろから群発活動が深さ26 kmから10 km程度にかけて 10^{-2} m²/s程度の拡散的なmigrationを示したことや、マントル起源流体の検出もあり、大規模な地殻流体の移動がLushan地震に先行したと考えられる（気象庁[課題番号：JMA01]，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，Wang et al., 2023）。

能登半島における群発地震活動について、2018年始めから2022年末までの20 km以浅、M1.3以上の活動をデクラスタした上で、潮汐との関係を調査した結果、活動は5つのクラスタに分かれており、南東部の深さ14 kmより深い領域の活動のみ潮汐相関が示唆された（図10）。また、このクラスタのみが1.85と異様に高いb値を示している。このクラスタの領域では、深部流体によって断層面が強度低下し、潮汐力の影響を相対的に受けやすいことを反映している可能性がある（気象庁[課題番号：JMA_01]，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，弘瀬・他、2023）。

能登半島の群発活動で2023年5月までに起きた一番目と二番目に大きい地震である

2023年5月5日のMj6.5, 2022年6月19日のMj5.4の直後を含む余震活動について, PhaseNet(Zhu and Beroza, 2019), REAL (Zhang et al., 2019)など最新の技法を用いたカタログをもとにMF(Kato and Ueda, 2019)による検出補強で本震直後の取り漏らしを大幅に減らして, DD(Waldhauser and Ellsworth, 2000)による正確な位置決定をして活動の特徴を調べた。2023年5月5日のMj6.5は, まず2022年6月19日のMj5.4のラブチャ域を再度すべらせ, さらにその断層の続きを浅部側へとラブチャが広がったものであり, さらに, この地震の直後1000秒間の余震活動は, 本震破壊域に沿って深部から浅部へと20 km/hで広がったことがわかった。直後余震のこのような高速拡大が捉えられたのはたぶん世界初だが, この場所では既に深部の高压流体の存在も推定されており, Mj6.5の本震によって, 断層に沿って透水性が大幅に増加した断層バルブ現象(Sibson, 2007)であると考えられる(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13], Kato, 2024)。

大気中ラドン濃度については, 令和5年度までに全国27施設の医薬系放射線管理施設が参画しているモニタリングネットワークによってデータ収集・解析を続けている(東北大学[課題番号: THK_10])。また, 旭観測点に設置した地中ラドン観測器に不良が発生し, 修理とWindows11への対応作業を実施した。また, また地中ラドン濃度の測定を60 cmおよび100 cmの2つの深度で行うようにした(千葉大学[課題番号: CBA_01])。

1995年1月17日の兵庫県南部地震の前1~2か月に, 震源域の東方, 芦屋断層上にある神戸薬科大学で測定した大気中ラドン濃度に平年のパターンから大きく外れた顕著な変動があったことはよく知られている。昨年度は, 気温と同データの日変化解析から, 測定場所付近でのラドン散逸はむしろ減少していたのだが, 兵庫県南部地震の震源域でのラドン散逸によってラドン濃度が高くなった大気が混入してきたとの仮説を提唱した。今年度は, 大気の混合層の高さと大気中ラドン濃度との関係に着目し, この仮説を支持する結果を得た(東北大学[課題番号: THK_10])。

また, 昨年度, 大気中ラドン濃度変動の異常を機械学習(ランダムフォレスト)によって検出することを試み, 神戸薬科大学では1994年末から予測値と観測値の差がそれらの標準偏差の3倍を超えていたことを報告したが, 本年度は, 1990年から1992年に, 地震発生前の地震の静穏化が原因と考えられる大気中ラドン濃度の低下も確認された(東北大学[課題番号: THK_10], Tsuchiya et al., 2023)。

上記の異常検出手法は, 平常期間の選び方によって解析結果が左右される。そこで, 季節性に対応した線形時系列モデルの1つであるSARIMAモデル及び標準偏差変動を想定したGARCHモデルを併せて使用した。このSARIMA-GARCHモデルは, より柔軟に季節性を減らすことが可能であり, モデル選択時の曖昧性も存在しない。福島県立医科大学で観測された大気中ラドン濃度データに適用したところ, Iwata et al. (2018)の特異値分解(SST)による異常度変動解析のピーク位置とほぼ同時期に, ピーク位置が認められた(東北大学[課題番号: THK_10])。

○宏观現象

ソーシャルメディアに上がった情報の傾向調査については, 検索ワード「前兆 地震」と「地震雲」の2種類で, X(旧ツイッター)の投稿をピックアップするYahoo!の機能を利用して, 能登半島地震前の投稿数の増加や地震を想起させるような投稿があったかを

調べた。検索ワード「前兆 地震」と「地震雲」を含む投稿数は、地震が発生した1月1日に投稿数が急増している。ただし、そのほとんどは地震発生後の投稿であり、地震直前に投稿が増えたわけではない。なお、「地震雲」12月27日の投稿数は、前後に比べてやや多い。この日は、愛知県で穴あき雲、関東では波状のうろこ雲またはひつじ雲が観測され、投稿数が多くなった。能登半島地震の前兆を示すような投稿はあったのかについては、いずれの検索ワードでもなかった、といえる（公募研究、東京学芸大学[課題番号：K0B030]）。

「キジがしきりに鳴けば地震がある」といった言い伝えが日本各地に残っている（大後、1985）。また、2011年東北地方太平洋沖地震の前日3月10日に、宮城県気仙沼市波路上地区の住民が、激しい海鳴りとキジの鳴き声を2回ずつ聞いていた、とある（河北新報、2011）。これを受けて、気仙沼市とその周辺の三陸沿岸で、地震前の海鳴りとキジの鳴き声に関する認知度を探るため、聞き取り調査（2023年3月20、21、29、30日の計4日間；岩手県大船渡市、陸前高田市および宮城県気仙沼市の漁港を中心とした計31ヶ所）を行った。海鳴りに関しては、聞いたことがあると答えた人が一人いたが、地震前に聞いたことがある人は一人もいなかった。また、海鳴りを「沖の荒れた天候によって生じた波浪が崩れる際に出す大きな音」と認識している人は少なく、海鳴りといった言葉自体を知らない人もいた。さらに、地震前の地鳴りを海から来る海鳴りと認識していた人もいた。キジの鳴き声については、地震前や地震時に鳴くと答えた人が23名と、全体の3分の2以上いた。そのうち、揺れの前もしくは地鳴りと同時に鳴くと答えた人が20名（59%）いた。一方、キジは地震前や地震時に鳴くと答えた人の約6割の人（14名）が、キジは地震がないときでも鳴くと答えた。地震の揺れの前にキジの鳴き声を聞いたことがある人が20名（59%）いたことから、「地震の前にキジが鳴く」といった言い伝えは正しかったと考えられる。ただし、それは地震の揺れの直前のことである。本間（1942）によれば、「キジはP波発震後1、2秒後のきわめて短周期の部分に敏感のようである」とある。本調査からは、キジはP波に反応していると考えられる（公募研究、東京学芸大学[課題番号：K0B030]、織原、2023）。

あまり注目されていない地震関連の災害誘因として、地震活動に伴って地中から火焰が噴出したという記述を、1855年安政江戸地震以前の歴史地震史料から多数見つけた（図11）。これらはいずれも地下に天然ガスを胚胎し、表面ガス兆候が見られる地域にある。噴出火焰から火災に至ったと判断できる証言も複数見つかった。また、地震直前という例も二つ（1703年元禄地震@小田原、1947年善光寺地震@善光寺界限）ある（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]、榎本・他、2023）。

○電磁気的な地震先行現象

北海道えりも観測点のULF磁力計装置の移設を9月に実施し、調整を11月に実施した（千葉大学[課題番号：CBA_01]）。

DEMETER衛星で観測され、統計的に有意な地震先行性がよく確認されている（Nemec et al., 2008, 2009, Pistaet al., 2013, 新田・他、2016）地震数時間前のVLF帯電磁波強度異常に特化した廉価な超小型衛星Preludeは宇宙航空研究開発機構（JAXA）の革新的衛星技術実証プログラム4号機でのロケットに搭載が決定しており、JAXAに2024年度に納品

予定である。本年度は、昨年度に作ったミッションデザインに基づき、実現性を確認するためのエンジニアリングモデル(EM)の設計修正を行ない、環境試験(振動試験)および宇宙環境でのシミュレーション(電力, 熱, 姿勢, 通信)により衛星の設計の妥当性とフライトモデル設計・開発に向けた課題を洗い出した。また, 宇宙航空研究開発機構(JAXA)の革新的衛星技術実証機のチームとの打ち合わせを毎月行い, 打ち上げロケットとのインターフェース調整と周波数調整を行った。調整によって変化した設計要求に基づき, エンジニアリングモデルの修正・検証とフライトモデルの設計と一部部品の製造を実施した(公募研究, 日本大学[課題番号: KOB031], 山崎, 2023)。

昨年度に引き続き, 2018年2月2日に打ち上げられた中国の地震電磁気衛星(CSES-1)のIn-situ電離圏電子数変動と地震との関係の調査を行った。全球電離層マップ(GIM)の電離圏総電子数(TEC)とCSESの電子密度(温度)の異常な増加(あるいは減少)が, 震源域において地震の1~5日目に出現することがわかった。また, このような地震先行異常(PEIA)と地磁気嵐期間中にグローバルに発生する異常が異なる特徴をもつことがわかり, CSES電子密度データの空間解析は, PEIAをグローバルな影響から識別し, 震源を特定できる可能性があることがわかった(千葉大学[課題番号: CBA_01], Liu et al., 2023)。

巨大地震の直前におけるTEC変化(see Heki, 2020 for review)について, 2008年中国汶川地震(Mw7.9)の時期のRinexデータを入手して解析した。本震の37分前に擾乱が始まり, バックグラウンド値の5%に達した直前異常が見い出された。Mw7.3以上の過去20ケースの結果は, 先行時間は断層の長さで決まり, 異常の振幅のバックグラウンドに対する割合は断層面積で決定するという単純な関係を示している。2008年汶川地震の直前の異常は, これらトレンドと整合的だが, マグニチュードのわりに先行時間がやや長めで, 強度もやや強かった(千葉大学[課題番号: CBA_01], 東京大学地震研究所[課題番号: ERI13], Heki et al., in press)。

中日本の5観測点で超低周波(VLF)帯パルス電磁波の観測を継続している。地震に先行したと思われるパルス(Asada et al., 2001, Nagao et al., 2021)は雷放電によるものと似ているので, 雷放電の同定が重要である。そこで, 近年世界的に展開されている超低周波(VLF)電磁波受信機で測定された, 空電から雷放電の位置を特定するためのボランティアベースのネットワークであるBlitzortung.orgについて, 日本における雷放電の検出効率と位置精度を評価した。その結果, 関東など受信局が密集している地域では十分な能力があったが, 受信局が少ない地域では十分に検知できていないことがわかった。関東圏の対地雷に対するBlitzortung.orgの最新の検出効率は約90%であり, 平均位置精度はおおよそ5.6 kmであることがわかった。VLFは長距離伝播するのでBlitzortung.orgの結果には注意する必要がある(千葉大学[課題番号: CBA_01], Kamogawa et al., 2023)。

LF帯の地震前電磁放射については多くの報告があるが, その多くは狭帯域パルスの強度に関するものであり, 発生源の位置に関する議論は少ない。そこで, LF帯広帯域干渉計の開発を進めている。干渉計素子の開発が終了し, 素子による連続観測を行っている。波形解析の予備的な結果, 対地雷によるLF/VLF波形信号を正常に記録することがわかった。また, 上記の対地雷起源の波形とは異なるLF帯信号も検出した。この信号は雲内放電である可能性もあるが, 地震に関連している信号である可能性も棄却できないことがわかった(千葉大学[課題番号: CBA_01], 太田・他, 2023)。

○地震・火山・津波等からメカニカルに誘起されるTEC変動

早期警報等に役立つと期待される、地震・津波・火山によって励起されるTEC変動についても引き続き事例解析を進めた。

2023年2月6日のトルコ東アナトリア断層の地震Mw7.8(EQ1)が発生した。これは陸上で記録された横ずれ地震の中で最大級のもので、約9時間後にEQ1の北側でMw7.7の地震(EQ2)が発生した。音響波による地震発生時の電離圏電子数変動(CIP)を調査したところ、観測されたCIP周期はEQ1の方がEQ2よりも幾分長かった。また、EQ1ではCIPの振幅に方位角依存性が見られた。地磁気や視線幾何学などの既知の要因では説明できないCIP振幅の方位依存性を示した。EQ1によるCIPは、断層に沿った一連の震源を想定することにより、よく再現されることが数値実験により明らかになった。振幅と周期の方位依存性は複数の震源からのAWの干渉によるものであった。また、横ずれ地震のCIP振幅は、dip-slip地震よりも小さい傾向があることもわかった(千葉大学[課題番号:CBA_01],Bagiya et al., 2023)。

昨年度報告した2022年のトンガの火山噴火に伴う日本やインドネシア上空のTEC異常変動について、本年度は、ニュージーランドや台湾上空のTEC異常変動についても調査した。気象衛星ひまわり8号の画像は、噴火によって誘導された上層対流圏の擾乱が高度8.2 kmで水平速度約315 m/sのラム波モードで世界中に伝播していることを示している。ニュージーランドではラム波によって励起された津波前方電離圏擾乱と、その後の太平洋を伝播する津波との関連を示唆している。第二の擾乱は噴火の約2時間後に始まった。これはラム波の通過によって励起された内部重力波であると考えられる。対流圏のラム波による移動性大気擾乱(TAD)が11:30UTに台湾に到達すると、98基の地上気圧計が11:50UT頃に気圧の上昇とピークを記録し、28基の検潮儀が14:30UT頃から17:30UT頃に海面変動の上昇と最大を記録し、イオノゾンデが14:30UT頃に電離層が最高高度に達することを観測した。台湾の10台の磁力計で測定された地球磁場の水平成分の変化は、11:00-12:00UTの対流圏ラム波面到達時には、ほぼすべてトンガ火山の方向を指し、22:00-23:00UTには火山から遠ざかり、高度約130 kmの487 m/sのTAD(または熱圏ラム波面)も活性化していることを示唆している。世界の69個のINTERMAGNET磁力計の磁場変化の水平成分は、トンガ火山噴火によって引き起こされる対流圏と熱圏のラム波が非常に強力で、地球上に強烈なダイナモ電流と電場を誘発することを示唆することがわかった(千葉大学[課題番号:CBA_01], Muafiry et al., 2023, Liu et al., 2023)。

一方、連続的なプリニアン噴火では、しばしば約3.7 mHzと約4.4 mHzの大気モードが励起され、全地球航法衛星システム(GNSS)受信機によってTECの高調波振動として観測される。このようなTEC振動は、2022年トンガ・ハアパイ海底火山(HTHH)が噴火した直後に始まった。ここでは、火山から約4000 km以内の観測点におけるGNSSデータを解析し、このような大気モードの時間的・空間的分布を調べたところ、噴火直後から3.7 mHz程度の強いTEC振動が観測され、火山からの音速とともに外側に伝播した。その後、TEC振動は再び強くなり、HTHHから約1400 kmの距離で振幅のピークを示した。このような遠距離磁場振動は、HTHHから約3000 km離れたニュージーランドやソロモン諸島の上空でも発生した。これらの振幅は、 s_{29} 固体地球モードの振幅と相関があり、大気モードの維持に、その下

の鉛直表面振動が一役買っている可能性を示唆している。遠距離TEC振動の開始は、現地の日の出と同期しており、電離層電子密度の日周変動によって制御されている可能性があることもわかった(千葉大学[課題番号:CBA_01], Muafiry et al., 2023, Heki, 2024)。

○自動更新予測システム

日常的な短期地震確率予報発表の試行として、公開されているHi-Net自動処理震源リストを毎日自動的にダウンロードしてカタログを更新し、FORTRANプログラムとして公開されているHIST-ETAS(Ogata et al., 2021)で計算したM6以上の地震が1日以内に起きる確率の地図を毎日定時にXの鍵付き非公開アカウントに自動ポストするシステムを作った(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13], Nanjo et al., 2023)。

b値を用いた短期的な大地震予測手法として、やや大きな地震後の活発な地震活動に注目する交通信号システム(Gulia and Wiemer, 2019)があるが、地域の特性や短期的な余震の継続時間、カタログの完備マグニチュード下限など、専門家の判断が必要なところがあった。そこで、b-positive estimator(van der Elst, 2021)を用いて自動化したコードを作り、専門家の関与なしに数時間以内に交通信号システムが出力を始められるようにした(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13], Gulia et al., 2023)。

成果リスト

- An, L., F. Grigoli, and B. Enescu, 2023, Off-shore Fault Geometry Revealed from Earthquake Locations Using Inland Seismic Stations: The Case of the 2022 Adriatic Sea Earthquake Sequence, JpGU2023 年大会, SSS03-08
- 安藤忍・小林昭夫, 2023, 干渉 SAR 時系列解析手法を用いた御前崎周辺の定常的な地殻変動, 気象研究所研究報告, 71, 1-11, <https://doi.org/10.2467/mripapers.71.1>
- 新井海斗・本島邦行, 2023, 見通し内 VHF 帯複数放送波の電波伝搬異常と地震発生との関連性解析, 電気学会計測研究会, 東京都千代田区, IM-23-020
- Bagiya, M.S., K. Heki, and V.K. Gahalaut, 2023, Anisotropy of the near-field coseismic ionospheric perturbation amplitudes reflecting the source process: The 2023 February Turkey earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2023GL103931, doi:10.1029/2023GL103931
- Basak, T., Y. Hobara, S. Pal, T. Nakamura, J. Izutsu, and T. Minatohara, 2023, Modeling of Solar Eclipse effects on the sub-ionospheric VLF_LF signals observed by multiple stations over Japan, *Adv. Space Res.*, 73, 736-746, doi:10.1016/j.asr.2023.09.063
- Buckby, J., T. Wang, D. Fletcher, J. Zhuang, A. Takeo, and K. Obara, 2023, Finding the number of latent states in hidden Markov models using information criteria, *Environmental and Ecological Statistics*, 30, 797-825, doi:10.1007/s10651-023-0584-5
- Diba, D., M. Uyeshima, M., Ichiki, S., Sakanaka, M. Tamura, Y. Yuan, M. Gresse, Y. Yamaya, and Y. Usui, 2023, On a large magmatic fluid reservoir oblique to the volcanic front in the southern part of NE Japan revealed by the magnetotelluric survey, *Earth Planets Space*, 75(146), doi:10.1186/s40623-023-01899-0

- Enescu, B., C. Ghita, I.-A., Moldovan, and M. Radulian, 2023, Revisiting Vrancea (Romania) Intermediate-Depth Seismicity: Some Statistical Characteristics and Seismic Quiescence Testing, *Geosciences*, 13, 219, doi:10.3390/geosciences13070219
- Enescu, B., K. Furuya, and T. Matsumoto, 2023, Investigation of a possible relationship between crustal heat flow and aftershock parameters of inland sequences occurred in Japan after the year 2000, JpGU2023 年大会, SSS03-07
- 榎本祐嗣・長尾年恭・李文超・水原和行・山辺典昭・杉浦繁貴・近藤斎, 2023, 歴史地震史料に見る天然ガス由来の火災, *歴史地震*, 38, 167 - 176
- Fukushima, R., M. Kano, and K. Hirahara, 2023, Physics-informed neural networks for fault slip monitoring: Simulation, frictional parameter estimation, and prediction on slow slip events in a spring-slider system., *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128, doi:10.1029/2023JB027384
- 後藤悠希・本島邦行, 2023, MF 帯放送波の受信可能時間遅延と地震発生との関連性解析, 日本地震予知学会第 10 回学術講演会, 東京都調布市, 23-03
- Gulia, L., S. Wiemer, E. Biondini, G. Vannucci, and B. Enescu, 2023, Overcoming the Achilles' heel of the Foreshock Traffic Light System, AGU fall meeting, S331-0492
- Guo, Y., J. Zhuang, and H. Zhang, 2023, Characterization of seismicity in Nankai and its association with long-term slow slip events, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128, e2022JB025984, doi:10.1029/2022JB025984
- 原田智也・西山昭仁・石辺岳男, 2024, 安政三年十月七日（1856 年 11 月 4 日）関東の地震は立川断層帯で発生した地震ではなかったー多摩・入間地域の同時代史料に無い所沢・東村山・立川の大被害ー, *地震第 2 輯*, 76, 251-285, DOI: 10.4294/zisin.2022-21
- Heki, K. (Invited), 2023, Ionospheric seismology and volcanology, URSI General Assembly
- Heki, K. (Invited), 2023, Recent topics in ionospheric seismology and volcanology, IUGG General Assembly, IUGG23-0316
- Heki, K. (Invited), 2023, Recent topics on the ionospheric changes immediately before large earthquakes, IUGG General Assembly, IUGG23-1037
- Heki, K. (Invited), 2023, What happened in the sky immediately before and after the 2008 Wenchuan earthquake?, TibXS 11th meeting, Dali, China
- Heki, K., 2024, Atmospheric resonant oscillations by the 2022 January 15 eruption of the Hunga-Tonga Hunga-Ha'apai volcano from GNSS-TEC observations, *Geophys. J. Int.*, 236, 1840-1847, doi:10.1093/gji/ggae023
- Heki, K., M. Bagiya, and I. N. Muafiry (Invited), 2023, Ionospheric disturbances before and after the 2023 February earthquake in Turkey from GNSS-TEC observations, *Int. Symp. Satellite Navigation (ISSN 2023)*, Jiozuo, China
- Heki, K., M. Nakatani, and W. Zhan, in press, Ionospheric changes immediately before the 2008 Wenchuan earthquake, *Advances in Space Research*
- Higa, T., H. Hirose, T. Kimura, 2023, Development of a machine learning model to detect short-term SSEs from tilt records, *International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023*, P56

- 比嘉友香・廣瀬仁・木村武志, 2023, 傾斜データに基づく短期的スロースリップイベント検出のための機械学習手法の開発, 日本地球惑星科学連合 2023 大会, SCG55-P02
- 弘瀬冬樹・溜渕功史・小林昭夫・前田憲二, 2023, 非定常 ETAS モデルによる背景地震確率を考慮した能登半島の群発地震と潮汐との関係, JpGU2023 年大会, SSS10-P02
- 弘瀬冬樹・溜渕功史・小林昭夫・前田憲二, 2023, 非定常 ETAS モデルによる背景地震確率を考慮した能登半島の群発地震と潮汐との関係, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S22P-02
- 廣瀬仁, 2023, statsmodels を用いた GNSS 座標時系列データのスムージング, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 27, 1-8
- 廣瀬仁・加藤愛太郎・木村武志, 2023, 2011 年東北地方太平洋沖地震直前の傾斜変動再訪: スタッキングによる検証, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S08-15
- Hirose, H., T. Matsushima, T. Tabei, T. Nishimura, 2023, Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada, 日本地球惑星科学連合 2023 大会, SCG45-04
- Hirose, H., T. Matsushima, T. Tabei, T. Nishimura, 2023, Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada, southwest Japan, Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada, southwest Japan, Earth Planets Space, 77, 75, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01833-4>
- Iio, Y., S. Matsumoto, Y. Yamashita, S. Sakai, K. Tomisaka, M. Sawada, T. Iidaka, T. Iwasaki, M. Kamizono, H. Katao, A. Kato, E. Kurashimo, Y. Teguri, H. Tsuda, and T. Ueno, 2023, Spatial change in differential stress magnitudes around the source fault before intraplate earthquakes, Geophysical Journal International, 233, 1279-1295, doi.org/10.1093/gji/ggac521
- Inanishi, T., H. Kawakata, S. Hirano, M. Nakayama, 2023, Source parameters of AE events in uniaxial compression tests of cement mortar specimens, AGU 2023 Fall Meeting, S21D-0322
- 稲西 輝紀・川方 裕則・平野 史朗・中山 雅之, 2023, Elastic wave transmission experiment to evaluate the accuracy of absolute AE locations in an acrylic cylindrical specimen, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, SSS07-08
- 石辺岳男・石辺（五島）朋子・片桐昭彦・原田智也・中村亮一・室谷智子・佐竹健治, 2024, 気象災害であった可能性が高い 1092 年（寛治六年）の越後の大波, 地震第 2 輯, 76, 233-250, DOI:10.4294/zisin.2022-20
- 石辺岳男・松浦律子・佐竹健治, 2023, 発生時の無作為（ランダム）性から探る史料中の有感記録の完全性, 歴史地震, 38, 15-27
- 石辺岳男・水野 嶺・松浦律子・佐竹健治, 2023, 『日光社家御番所日記』に記録された有感地震の発生時刻: 有感記録の完全性ならびに地震活動の復元についての検討, 第 40 回歴史地震研究会
- 石辺岳男・小川陽子・田中裕人・木内亮太・高浜 勉・坂元一雄・西條裕介・古村 美津子・松浦律子, 2023, 震度分布データを用いた機械学習による震源推定の試み, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S21-01

- Ishibe, T., T. Terakawa, A., Hashima, M. Mochizuki, and R.S. Matsu'ura, in press, Can the Regional 3D Stress Field according to the Wallace-Bott Hypothesis predict fault slip directions of future large earthquakes?, *Earth Planets and Space*
- 石辺岳男・寺川寿子・橋間昭徳・Thystere Matondo Bantidi・望月将志・松浦律子, 2023, 主要活断層帯を対象とした広域三次元応力場ならびに Wallace-Bott 仮説を用いた断層すべり角推定～断層形状の不確定性が推定に及ぼす影響について～, 日本活断層学会 2023 年度秋季学術大会
- Ishiyama, R., B. Enescu, E. Fukuyama, and F. Yamashita, 2023, Matched filter detection of foreshocks in a large-scale friction experiment, *JpGU2023 年大会*, SSS06-P07
- Ishiyama, R., E. Fukuyama, and B. Enescu, 2024, Estimation of time-variable friction parameters using machine learning, *Geophysical Journal International*, 236, 395-412, doi.org/10.1093/gji/ggad422
- Iwata, T., 2023, Flexible estimation approach of background stress changes based on the rate- and state-friction seismicity model, *IUGG2023*
- 岩田貴樹, 2023, ETAS モデル: クラスタ性を表すための点過程モデル, 第 13 回横幹連合コンファレンス予稿集, 2022, C-4-4, doi.org/10.11487/oukan.2022.0_C-4-4
- 岩田貴樹, 2023, 空間分解能向上のための応力空間パターン推定手法の改良, 2023 年地球惑星科学連合大会
- 岩田貴樹, 2023, 摩擦構成則に基づく背景応力場の時間変動推定, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S09P-15
- Kamogawa, M., T. Suzuki, Y. Minamoto, T. Nagao, T. Kodama, H. Fujiwara, and T. Kudo, 2023, Continued atmospheric electric field measurements following cessation of the long-term water dropper potential equalizer at Kakioka, Japan, *Geosci. Data J.*, 00, 1-9, doi:10.1002/gdj3.224
- Kamogawa, M., T. Suzuki, H. Fujiwara, T. Narita, E. Wanke, K. Murata, T. Nagao, T. Kodama, J. Izutsu, A. Matsuki, N. Tang, and Y. Minamoto, 2023, Characteristics of the Blitzortung.org Lightning Location Catalog in Japan, *Atmosphere*, 14(10), 1507, doi:10.3390/atmos14101507
- 鴨川仁・山崎政彦・保坂勇人・本山真・岩田隆佑・中泉健太郎・曾根風紗, 2023, 地震先行電磁気現象検知衛星 PRELUDE のミッション概要, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, OS19-7 革新的衛星技術実証プログラム, 3B06
- Kano, M., Y. Tanaka, T. Iinuma, T. Hori, 2023, Data assimilation for reproducing and predicting the fault slip behavior in the 2010 Bungo Channel long-term slow slip event, *IUGG2023*
- Kato, A., S. Nakagawa K. Fujita, T. Ichimura, and H. Nagao, 2023, A comprehensive earthquake catalog for the 2020 seismic swarm in the central Japan, 日本地球惑星科学連合 2023 大会, SCG45-15
- Kato, A., 2024, Implications of Fault-Valve Behavior From Immediate Aftershocks Following the 2023 Mj6.5 Earthquake Beneath the Noto Peninsula, Central Japan, *GRL*, 51, e2023GL106444, doi.org/10.1029/2023GL106444

- 勝間田明男・島淳元・西宮隆仁, 2023, 能登半島で発生している群発地震について(2), JpGU meeting 2023, SSS10-P03
- 勝俣啓, 2023, 南米地域の地震活動静穏化と空振り事例について, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S09-14
- 勝俣啓, in press, 地震活動静穏化仮説に基づく予測実験, 地震予知連絡会会報, 111
- 川本奈々帆・齋藤華子・武本樹音・合田奈央・安岡由美・長濱裕幸・武藤潤・床次眞司・細田正洋・大森康孝, 2023, 活性炭捕集器による屋内ラドン濃度のスクリーニング測定, Proceedings of the 24th Workshop on Environmental Radioactivity, KEK, Tsukuba, Japan, Bessho, K., H. Matsumura, and G. Yoshida (eds.), 93-97.
- 木口努・今西和俊・松本則夫, 2023, 岐阜県東部・長野県西部における地殻活動観測結果 (2022 年 11 月～2023 年 4 月), 地震予知連絡会報, 110, 182-184
- 木口努・今西和俊・松本則夫, 2024, 岐阜県東部・長野県西部における地殻活動観測結果 (2023 年 5 月～2023 年 10 月), 地震予知連絡会報, 111, 印刷中
- 木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努・矢部優, 2023, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2022 年 11 月～2023 年 4 月)(67), 地震予知連絡会報, 110, 177-181
- 木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努・矢部優, 2024, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2023 年 5 月～2023 年 10 月)(68), 地震予知連絡会報, 111, 印刷中
- 気象研究所, 2023, 全国 GNSS 観測点のプレート沈み込み方向の位置変化, 地震予知連絡会会報, 110, 20-24
- 気象研究所, 2023, 内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測, 地震予知連絡会会報, 110, 307-310
- 気象研究所, 2023, 南海トラフ沿いの長期的スロースリップの客観検知, 地震予知連絡会会報, 110, 287-289
- 北川有一・板場智史・松本則夫・落唯史・木口努・矢部優, 2024, 紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水 観測結果 (2023 年 5 月～2023 年 10 月), 地震予知連絡会報, 111, 印刷中
- 北川有一・木口努・松本則夫・千葉昭彦・長谷和則・小野雅弘, 2023, 産総研日高川和佐観測点の地質概要とコア資料, 地質調査総合センター研究資料集, 743
- 北川有一・松本則夫・佐藤努・板場智史・落唯史・木口努・矢部優, 2023, 近畿地域の地下水位・歪観測結果 (2022 年 11 月～2023 年 4 月), 地震予知連絡会報, 110, 322-325
- 北川有一・松本則夫・佐藤努・板場智史・落唯史・木口努・矢部優, 2024, 近畿地域の地下水位・歪観測結果 (2023 年 5 月～2023 年 10 月), 地震予知連絡会報, 111, 印刷中
- 木村久夫・山本剛靖・小林昭夫・露木貴裕, 2023, 日本全国を対象とした地殻変動の異常検出の試み, JpGU meeting 2023
- 小林昭夫, 2023, GNSS データによる非定常地殻変動検知手法の改良ー共通ノイズ除去手法の改善・日向灘への対象領域の拡張・余効変動を除去した非定常変位監視手法の提案ー, 気象研究所研究報告, 71, 13-23, <https://doi.org/10.2467/mripapers.71.13>
- Kodera, Y., 2023, Automatic unsupervised classification of tectonic tremor signals in continuous seismic records, 第 28 回国際測地学地球物理学連合総会 (IUGG2023)

- Kodera, Y., 2023, Automatic classification of tectonic tremors with an unsupervised machine learning algorithm, JpGU meeting 2023
- 工藤祥太・下條賢梧・溜渕功史, 2023, 1次元畳み込みニューラルネットワークを用いた地震波形検測, 験震時報, 86, 4
- 蔵下英司・飯高隆・津村紀子, 2023, 四国東部地域における稠密地震観測, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S02-P12
- 栗山あかね・樋口舞・西村夏樹・森花恵・安岡由美・長濱裕幸・武藤潤・細田正洋・床次眞司・大森康孝, 2023, 排気モニタによる大気中ラドン濃度の測定, Proceedings of the 24th Workshop on Environmental Radioactivity, KEK, Tsukuba, Japan, Bessho, K., H. Matsumura, and G. Yoshida (eds.), 87-92
- Liu, J.-Y., T.-H. Kao, T.-C. Liu, B.-S. Huang, P.-H. Lee, Y.-Y. Sun, C.-H. Chen, K. Hattori, P.-H. Liao, I.-T. Lee, C.-L. Su, C.-T. Terng, and T.-S. Huang, 2023, Magnetic field signatures of tropospheric and thermospheric Lamb modes triggered by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption, Geophys. Res. Lett., 50, e2023GL105393, doi:10.1029/2023GL105393
- Liu, J.-Y., X. Shen, F.-Y. Chang, Y.-I. Chen, Y.-Y. Sun, C.-H. Chen, S. Pulnits, K. Hattori, D. Ouzounov, V. Tramutoli, M. Parrot, W.-S. Chen, C.-Y. Liu, F. Zhang, D. Liu, X.-M. Zhang, R. Yan, and Q. Wang, 2023, Spatial analyses on pre-earthquake ionospheric anomalies and magnetic storms observed by China seismo-electromagnetic satellite in August 2018, Geoscience Lett., 11(4), doi:10.1186/s40562-024-00320-2
- Liu, X., P. Han, K. Hattori, H. Chen, J. Chen, L. Jiao, J. Tu, Y. Lei, and J. Zhao, 2023, Seasonal Variations of Sq Current System in Different Longitudinal Sectors and Solar Activities, J. Geophys. Res. Space Phys., 129, e2023JA031956, doi:10.1029/2023JA031956
- 松原賢哉・安岡由美・長濱裕幸・武藤潤・尾上昌平・向高弘, 2023, 鹿児島における大気中ラドン濃度変動, 第 60 回アイソトープ・放射線研究発表会
- 松浦律子・橋間昭徳・石辺岳男, 2023, 2011 年 5 月から継続中の日本海東縁の ETAS 効果の消滅について, JpGU2023 年大会, SSS10-11
- 松浦律子・石辺岳男, 2023, 十年前に相対的静穏化が検出された北海道南東沖の地震活動度の現在の状態, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S09-12
- 松浦律子・石辺岳男・橋間昭徳, in press, 北海道東方沖の相対的地震活動度の静穏化のその後: 有意検出から 10 年後の現状, 地震予知連絡会会報, 111
- Mezentsev, A., A.P. Nickolaenko, A.V. Shvets, Yu.P. Galuk, A.Yu. Schekotov, M. Hayakawa, R. Romero, J. Izutsu, and I.G. Kudintseva, 2023, Observational and Model Impact of Tonga Volcano Eruption on Schumann Resonance, J. Geophys. Res. Atmospheres, 128(7), e2022JD037841, doi:10.1029/2022JD037841
- Motojima, K. and Y. Goto, 2023, Pre-earthquake phenomena in MF radio band propagation around sunset time, Japan Geoscience Union Meeting 2023, MIS04-P10
- Motojima, K. and Y. Goto, 2023, Statistical association of earthquakes and MF radio wave propagation anomalies, 7th International Workshop on Earthquake Preparation

- Process ~ Observation, Validation, Modeling, Forecasting ~ (IWEP7), Chiba, Japan
- Muafiry, I. N., D. D. Wijaya, I. Meilano, and K. Heki, 2023, Diverse ionospheric disturbances by the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption observed by a dense GNSS array in New Zealand, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 128, e2023JA031486, doi:10.1029/2023JA031486
- 中川茂樹・青山裕・高橋浩晃・前田拓人・山本希・鶴岡弘・青木陽介・内田直希・前田裕太・大見士朗・中道治久・大久保慎人・松島健・八木原寛・汐見勝彦・植平賢司・上田英樹・下山利浩・溜渕功史・大竹和生・本多亮・関根秀太郎, 2023, マルチプラットフォーム次世代WINシステムの開発(3), 日本地震学会 2023 年度秋季大会
- Nanjo, K., 2023, A Preliminary Report on Evaluating Online Seismicity: a Demonstration Experiment Using the Space-time ETAS Model, AOGS2023, SE13-A011
- 楠城一嘉, 2023, Hierarchical Space-Time ETAS (HIST-ETAS) モデルを用いたオンライン地震活動評価の実証実験: 序報, JpGU2023 年大会, SSS10-P19
- 楠城一嘉, in press, 北海道・東北沖の地震サイズ分布(b 値)の時空間変化, 地震予知連絡会会報, 111
- Nanjo, K., J. Izutsu, M. Kamogawa, T. Hori, T. Nagao, and K. Oike, 2023, Seismicity before and after the 2023 M7.8 and M7.5 earthquake sequence in Turkey: a preliminary report, IUGG2023
- 楠城一嘉・井筒潤・鴨川仁・堀高峰・尾池和夫, 2023, Spatial variability of the response of the Nagano seismicity to the 2011 Tohoku-oki earthquake, in Japan, JpGU2023 年大会, SSS10-13
- Nanjo, K.Z., Y. Yamamoto, K. Ariyoshi, H. Horikawa, S. Yada, and N. Takahashi, 2023, A completeness analysis of Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET), AGU fall meeting, S51D-0233
- 楠城一嘉・山本揚二郎・有吉慶介・堀川博紀・矢田修一郎・高橋成美, 2023, DONET の地震検知能力に関する研究, 日本地震学会 2023 年度秋季大会
- 楠城一嘉・山本揚二郎・有吉慶介・堀川博紀・矢田修一郎・高橋成美, 2023, DONET データを用いた地殻活動モニタリングと b 値, ワークショップ: 海底ケーブルの科学利用と関連技術に関する将来展望 -第 6 回-
- Nanjo, K.Z., Y. Yukutake, and T. Kumazawa, 2023, Activated volcanism of Mount Fuji by the 2011 Japanese large earthquakes, *Scientific Reports*, 13, 10562, doi:10.1038/s41598-023-37735-4
- Nanjo, K.Z., Y. Yukutake, and T. Kumazawa, 2023, Volcanism of Mount Fuji activated by the 2011 Japanese large earthquakes, EGU2023, EGU23-2186
- 楠城一嘉・行竹洋平・熊澤貴雄, 2023, A preliminary analysis of seismic activity off the coast of Ito, Shizuoka, JpGU2023 年大会, SVC33-03
- 楠城一嘉・行竹洋平・熊澤貴雄, 2023, 静岡県伊東沖の地震活動の解析, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S09-17
- 直井誠・平野史朗, 2023, 深層 Hashing による効率的な類似波形探索, 2023 年度人工知能学会全国大会, 1L3-0S-17-02

- 直井誠・平野史朗, 2023, 深層 Hashing による類似波形を持つイベントの効率的探索, 地球惑星連合大会, SCG55-05
- Naoi, M. and S. Hirano, 2024, Efficient similar waveform search using short binary code obtained by deep hashing technique, *Geophys. J. Int.*, 237, 604-621, doi:10.1093/gji/ggae061
- 直井誠・溜渕功史・大柳修慧・加藤慎也, 2024, 一元化震源データを利用した深層学習検測器の再学習の試み, 地震研共同利用研究集会:固体地球科学的諸現象の即時解析・即時予測とその利活用:更なる高度化と新たな展開
- 根岸幹・小原一成・武村俊介・悪原岳・山下裕亮・杉岡裕子・篠原雅尚, 2023, Source-Scanning Algorithm を共通的に用いた浅部微動・浅部 VLFE の時空間発展の推定, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S09-30
- Nishida, K., R. Takagi, and A. Takeo, 2024, Ambient noise multimode surface wave tomography, *Prog Earth Planet Sci.*, 11, 4, <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00605-8>
- 西宮隆仁・弘瀬冬樹, 2023, 南海トラフ沿いのプレート間地震を対象とした近地震源過程解析手法, 日本地震学会 2023 年度秋季大会
- 西宮隆仁・弘瀬冬樹, 2023, 疑似観測波形を用いた南海トラフ地震の近地震源過程解析の試み, JpGU meeting 2023, SSS07-P06
- 西尾友克・安岡由美・長濱裕幸・平野光浩・武藤潤・向高弘, 2023, 1995 年兵庫県南部地震直前における大気中ラドン濃度変動と気温の解析, *Proceedings of the 24th Workshop on Environmental Radioactivity*, KEK, Tsukuba, Japan, Bessho, K., H. Matsumura, and G. Yoshida (eds.), 98-103
- Niu, Y., J. Zhuang, and Z. Xiong, 2023, Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation in Bayesian geophysical inversion, *Spatial Statistics*, 54, 100735, doi:10.1016/j.spasta.2023100735
- Noda, A., 2023, Stress accumulation on the plate interface in the Kanto region and rupture scenarios for great thrust-type earthquakes, 関東地震 100 年国際シンポジウム
- 野田朱美, 2023, プレート境界の力学的カップリング・インバージョン:地震シナリオの不確定性評価に向けて, 震源インバージョンワークショップ〜震源インバージョンは地震現象をどこまで解像できるのか?, S08
- 野田朱美, 2023, 測地データから推定された新潟ー神戸歪み集中帯の変形構造と活断層の関係, 「長岡平野西縁断層帯の地震活動性に関する調査研究」研究委員会
- Noda, A. and T. Saito, 2023, Mechanical plate coupling along the Sagami trough estimated from GNSS data and implication for the generation mechanism of great thrust-type earthquakes and slow slip events, *International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023*
- 野田朱美・齊藤竜彦, 2023, プレート境界の力学的固着の推定と巨大地震シナリオ構築への応用, 第 16 回日本地震工学シンポジウム
- 野田朱美・齊藤竜彦・福山英一, 2023, 新潟ー神戸歪み集中帯の測地学・地質学的観測を説明す

る深さ依存の変形構造, JpGU meeting 2023

- Nomura, S. and M. Tanaka, 2023, Forecasting repeating earthquakes with a nonstationary renewal process, 27th APRIA 2023 Annual Conference
- Nomura, S. and Y. Ogata, 2023, Cluster-based foreshock discrimination model with flexible time horizon and mainshock magnitudes, *Progress in Earth and Planetary Science*, 10, 20, doi.org/10.1186/s40645-023-00548-0
- 落唯史・矢部優・板場智史・松本則夫・北川有一・木口努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦, 2023, 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント(2022年11月～2023年4月), 地震予知連絡会報, 110, 129-176
- 太田悠一郎・三浦健伸・吉野千恵・服部克巳・今住則之, 2023, 容量性円形平板アンテナによる地震関連 LF 帯電磁放射の波形観測システムの開発, *J. Atmospheric Electricity*, 42(1), 19-24
- 織原義明, 2023, 地震前の海鳴りとキジの鳴き声に関する聞き取り調査, 日本地震予知学会第10回学術講演会, 23-14
- Panayotopoulos, Y., H. Baba, and T. Nishimiya, 2023, Ocean Bottom Seismometers in Suruga Bay reveal a shear zone inside the Philippine Sea plate slab, *Tectonophysics*, 861, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229902>
- Panayotopoulos, Y., H. Baba, and T. Nishimiya, 2023, Seismological evidence of a shear zone inside the Philippine Sea plate slab in Suruga Bay, 日本地震学会 2023 年度秋季大会
- Park, J.-O. and E. Jamali Hondori, 2023, Link between the Nankai underthrust turbidites and shallow slow earthquakes, *Scientific Reports*, 13, 10333, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37474-6>
- Petrillo, G. and J. Zhuang, 2023, Verifying the magnitude dependence in earthquake occurrence, *Physical Review Letters*, 131, 154101, doi:10.1103/PhysRevLett.131.154101
- Petrillo, G., J. Zhuang, and E. Lippiello, 2023, Is the stress relaxation relevant for long term forecasting?, *EGU General Assembly 2023*, EGU23-1035, doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1035
- Saito, T. and A. Noda, 2023, Mechanically Coupled Areas on the Plate Interface in the Kanto Region, Central Japan, Generating Great Earthquakes and Slow-Slip Events, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113, 1842-1855, <https://doi.org/10.1785/0120230073>
- 櫻井豪流・本島邦行, 2023, VHF 帯放送波の電波伝搬路に対する伝搬異常を伴った地震の分布, 日本地震予知学会第10回学術講演会, 東京都調布市, 23-04
- Shi Yujie・上嶋誠・村上英記・塩崎一郎・山口覚・臼井嘉哉, 2023, 四国中国地?ネットワーク MT 法観測データ解析, 地震研究所共同利用研究集会「地球電磁気学的手法による地球内部構造研究と室内実験結果の総合解釈」
- 高木涼太・東龍介・日野亮太・西田究・篠原 雅尚, 2023, 常時微動を用いた日本海溝・千島海溝会合部における S 波速度構造推定, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S06P-05

- 高木涼太・西田究, 2023, S-net で観測された常時微動表面波の位相速度の方位依存性, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, SSS07-P08
- 武本樹音・川本奈々帆・安岡由美・長濱裕幸・武藤潤・床次眞司・細田正洋・大森康孝・飯本武志・向高弘, 2023, 活性炭捕集器による屋内ラドン濃度の測定, 第 60 回アイソトープ・放射線研究発表会
- Takemura S., 2023, Slow earthquakes around shallower extension of megathrust zone in Nankai, AGU fall meeting 2023, TA51-09 (invited talk)
- Takemura, S., K. Emoto, and L. Yamaya, 2023, High-frequency S and S-coda waves at ocean-bottom seismometers, *Earth Planets Space*, 75, 20, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01778-8>
- Takemura, S., Y. Hamada, H. Okuda, Y. Okada, K. Okubo, T. Akuhara, A. Noda, and T. Tonegawa, 2023, A review of shallow slow earthquakes along the Nankai Trough, *Earth Planets Space*, 75, 164, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01920-6>
- 武村俊介・濱田洋平・奥田花也・岡田悠太郎・大久保蔵馬・悪原岳・野田朱美・利根川貴志, 2023, 南海トラフ浅部スロー地震の理解へ向けた多面的レビュー, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S09-P01
- 竹尾明子・宮川幸治・西本太郎・安藤美和子・佐伯綾香・田中伸一・大塚 宏徳・藤田親亮・浜本未希・柴田律也・加藤翔太・加藤慎也・増田滉己・加納将行・武村俊介・小原一成, 2023, 深部超低周波地震を対象とした西南日本における広帯域地震観測, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S02-P05
- Tamaribuchi, K. and H. Kimura, 2023, Detection of hidden earthquakes after the 2011 Mw9.0 Tohoku earthquake and their relation to regional crustal deformation, 第 28 回国際測地学地球物理学連合総会 (IUGG2023)
- Tamaribuchi, K. and H. Kimura, 2023, Relationship between inland seismicity and crustal deformation after the 2011 Tohoku earthquake derived from the refined earthquake catalog, Asia Oceania Geosciences Society 20th Annual Meeting (AOGS2023)
- Tamaribuchi, K., S. Kudo, K. Shimojo, and F. Hirose, 2023, Detection of hidden earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake by automatic hypocenter determination combined with machine learning, *Earth, Planets and Space*, 75, 155, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01915-3>
- 溜瀧功史, 2023, 地震識別手法の高度化に基づく地震動即時予測の改善と特異な地震活動の解明, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S20-04
- 溜瀧功史, 2024, 機械学習を実装した自動震源決定システムの開発 (その 2), 東京大学地震研究所共同利用研究集会
- 溜瀧功史・木村久夫, 2023, 自動震源カタログによる 2011 年東北地方太平洋沖地震後の内陸地震活動度の定量評価, JpGU meeting 2023
- 溜瀧功史・木村久夫・弘瀬冬樹・山本剛靖, 2023, 2011 年東北地方太平洋沖地震後の内陸地震活動と地殻変動の関係, 日本地震学会 2023 年度秋季大会
- 溜瀧功史・工藤祥太・下條賢梧, 2023, 機械学習を併用した自動震源決定による微小地震の検出, 地震予知連絡会会報, 110, 455-458

- 田中勇・山崎政・鴨川仁, 2023, CubeSat 用 3U サイズハイブリッド型プラズマ・電場センサー, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 1P15
- 田中昌之, 2023, 光ファイバセンサの発展と地震観測への活用, 第 41 回レーザセンシングシンポジウム, S2
- 田中昌之, 2023, 分布型音響センシング (DAS) を用いた東南海沖ケーブルでの振動観測, 日本地震学会 2023 年度秋季大会
- 田中昌之・小林昭夫, 2023, DAS で捉えた人工振動の振幅について (2), JpGU meeting 2023
- Tanaka, Y., 2023, Terrestrial and satellite gravity observations of earthquake-related phenomena -an overview, 1st Workshop on Earthquake Early Detection using Superconducting Gravimetry
- Tanaka, Y., Y. Hiramatsu, H. Sakaue, A. Kobayashi and T. Tsuyuki, 2023, Gravity anomaly in the slow slip area along the southern Ryukyu subduction zone captured by continuous parallel observation using two gPhoneX gravimeters, AGU fall meeting 2023, T04-04
- Tiampo, K.F., W. Klein, and B. Enescu, 2023, Earthquake Forecasting - Applications and Limitations, AGU fall meeting, S331-0497
- Tiwari, S.H., M.S. Bagiya, S. Maurya, K. Heki, and A.P. Dimri, 2024, On the role of volcanic plume heights in the excitation of free oscillations of the solid earth and the atmosphere: case study, Adv. Space Res., 73(6), 2988-2998, doi:10.1016/j.asr.2024.01.001
- Tsuchiya, M., H. Nagahama, J. Muto, M. Hirano, and Y. Yasuoka, 2023, Detecting earthquake precursor phenomena in atmosphere radon concentration fluctuations using Random Forest analysis, Proceedings of the 24th Workshop on Environmental Radioactivity, KEK, Tsukuba, Japan, Bessho, K., H. Matsumura, and G. Yoshida (eds.), 104-109
- 土谷真由・長濱裕幸・武藤潤・平野光浩・安岡由美, 2023, ランダムフォレスト解析を用いた大気中ラドン濃度変動による地震の先行現象の検出, 日本地球惑星科学連合 2023
- 露木貴裕, 2023, 今津・敦賀での地殻変動連続観測記録における長期的変化, JpGU meeting 2023, SGD02-P10
- Uchida, N., R. Suzuki, W. Zhu, G. C Beroza, T. Nakayama, G. Toyokuni, R. Takagi, R. Azuma, K. Yoshida, and A. Hasegawa, 2023, Offshore microseismicity in NE Japan constrained by S-net and PhaseNet: insights on the forearc circulation of fluids and interplate coupling, AGU fall meeting 2023, S43A-03
- Ueda, T. and A. Kato, 2023, Aftershocks following the 2011 Tohoku-Oki earthquake driven by both stress transfer and afterslip, Progress in Earth and Planetary Science, 10, 1-14, doi.org/10.1186/s40645-023-00564-0
- Varotsos, P.A., N.V. Sarlis, E.S. Skordas, T. Nagao, M. Kamogawa, E.L. Flores-Marquez, A. Ramirez-Rojas, and J. Perez-Oregon, 2023, Improving the Estimation of the Occurrence Time of an Impending Major Earthquake Using the Entropy Change of Seismicity in Natural Time Analysis, Geosciences, 13(8), 222,

doi:10.3390/geosciences13080222

- Varotsos, P.A., N.V. Sarlis, E.S. Skordas, T. Nagao, and M. Kamogawa, 2023, Natural time analysis together with non-extensive statistical mechanics shorten the time window of the impending 2011 Tohoku M9 earthquake in Japan, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 125, 107370, doi:10.1016/j.cnsns.2023.107370
- Varotsos, P.A., N.V. Sarlis, E.S. Skordas, T. Nagao, and M. Kamogawa, 2023, Natural time analysis together with non-extensive statistical mechanics shorten the time window of the impending 2011 Tohoku M9 earthquake in Japan, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 125, 107370, doi.org/10.1016/j.cnsns.2023.107370
- Varotsos, P.A., N.V. Sarlis, E.S. Skordas, T. Nagao, M. Kamogawa, E.L. Flores-Marquez, A. Ramirez-Rojas, and J. Perez-Oregon, 2023, Improving the Estimation of the Occurrence Time of an Impending Major Earthquake Using the Entropy Change of Seismicity in Natural Time Analysis, *Geosciences*, 13, 222, doi.org/10.3390/geosciences13080222
- Wang, L., S. Chen, J. Zhuang, B. Zhang, W. Shi, J. Yang, and W. Xu, 2023, Gravity field changes reveal deep mass transfer before and after the 2013 Lushan earthquake, *Communications of Earth & Environment*, 4, 194, doi:10.1038/s43247-023-00860-z
- Wang, Q.Y., W.B. Frank, R.E. Abercrombie, K. Obara, and A. Kato, 2023, What makes low-frequency earthquakes low frequency, *Science Advances*, 9, 32, doi:10.1126/sciadv.adh3688
- Watanabe, A., M. Uyeshima, S. Yamaguchi, Y. Usui, H. Murakami, T. Ogawa, N. Oshiman, R. Yoshimura, K. Aizawa, I. Shiozaki, and T. Kasaya, 2023, The 3-D electrical conductivity structure modeling of the Network-MT observation dataset in the Kii Peninsula, southwestern Japan, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2023 年秋季年会, R003-08
- 渡部 熙・上嶋 誠・山口 寛・臼井 嘉哉・村上 英記・小河 勉・大志 万直人・吉村 令慧・相澤 広記・塩崎 一郎・笠谷 貴史, 2023, 紀伊半島における Network-MT 法データを用いた広域深部電気比抵抗構造モデリングの現状と解釈について, 地震研究所共同利用研究集会「地球電磁気学的手法による地球内部構造研究と室内実験結果の総合解釈」
- Xiong, Z. and J. Zhuang, 2023, SETAS: A spherical version of the space-time ETAS model, *Seismological Research Letters*, 94, 1676-1688, doi.org/10.1785/0220220198
- 矢部 優・落唯 史・板場 智史・松本 則夫・北川 有一・木口 努・木村 尚紀・木村 武志・松澤 孝紀・汐見 勝彦, 2024, 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント(2023 年 5 月～2023 年 10 月), 地震予知連絡会報, 111, 印刷中
- Yagi, Y., R. Okuwaki, S. Hirano, B. Enescu, M. Chikamori, and R. Yamaguchi, 2024, Barrier-Induced Rupture Front Disturbances during the 2023 Morocco Earthquake, *Seismological Research Letters*, XX, 1-8, doi.org/10.1785/0220230357
- Yamamoto, M. (Invited), 2023, Infrasound, inaudible over-pressure waves coupled with many kinds of geophysical events in the atmosphere, TSU (Taiwan Space Union) PRISM Seminar, Online (Taiwan)

- 山崎政彦, 2023, 革新的衛星技術実証 4 号機ロケットに搭載する地震先行現象検知 CubeSat のフライトモデルの開発, 第十三回気象文化大賞
- 山崎政彦, 鴨川仁, 岩田隆佑, 保坂勇人, 中泉健太郎, 谷口由奈, 2023, 地震先行電磁気現象検知衛星 PRELUDE 衛星の概要, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, OS19-7 革新的衛星技術実証プログラム, 3B05
- 山本真行 (Invited), 2023, インフラサウンド帯域の開拓と地域防災への応用, IEEE AP-S Kansai Joint Chapter 特別講演会 / 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会 特別講演会, 高知県高知市
- Yamada, M., K. Tamaribuchi, S. Wu, and D.Y. Chen, 2023, IPFx: extended integrated particle filter method for earthquake early warning and application to the international networks, AGU Fall Meeting 2023, NH13C-0691
- 山田真澄・鶴岡弘・溜渕功史, 2024, ETAS モデルを考慮した震源推定: 能登半島地震のケーススタディ, 東京大学地震研究所共同利用研究集会
- Yasuoka, Y., J. Takemoto, N. Kawamoto, N. Goda, H. Saito, H. Nagahama, J. Muto, S. Tokonami, M. Hosoda, Y. Omori, T. Iimoto, and T. Mukai, 2023, Determination of screening values for radon concentration in indoor air using an activated-charcoal radon collector, International Symposium on Natural and Artificial Radiation Exposures and Radiological Protection Studies (NARE2023), Hiroasaki
- 吉田圭佑, 2023, Moment-rate functions of repeating earthquakes of varying magnitude and surrounding earthquake distribution, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会
- 吉田圭佑, 福島 洋, 2023, Possibility of shallow repeating aseismic slip associated with the 2011 Mw5.8 and 2016 Mw5.9 crustal earthquakes in northern Ibaraki Prefecture, Japan, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会
- 吉田圭佑, 松本圭晶, 織茂雅希, 2023, Double-difference 法による大量地震の効率的な震源再決定と高精度震源分布のリアルタイム・モニタリング, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会
- 于凡・Jamali Hondori, E.・朴進午, 2023, Application of Convolutional Neural Networks for Seismic Velocity Model Building Using “Realistic” Synthetic Data, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, S21-03
- Zhuang, J., 2023, On extending the ETAS model (invited), 10th International Workshop on Applied Probability (IWAP 2023)
- 庄建倉, 2023, Evaluating earthquake forecasting models with likelihood based marginal and conditional scores (invited), 第 7 回 国際ワークショップ「地震準備プロセス」: 観測, 検証, モデリング, 予測 (IWEPT)
- Zhuang, J. and Z. Xiong, 2023, Changes of global background and clustering seismicity during past twenty years, AGU fall meeting, S33H-0479

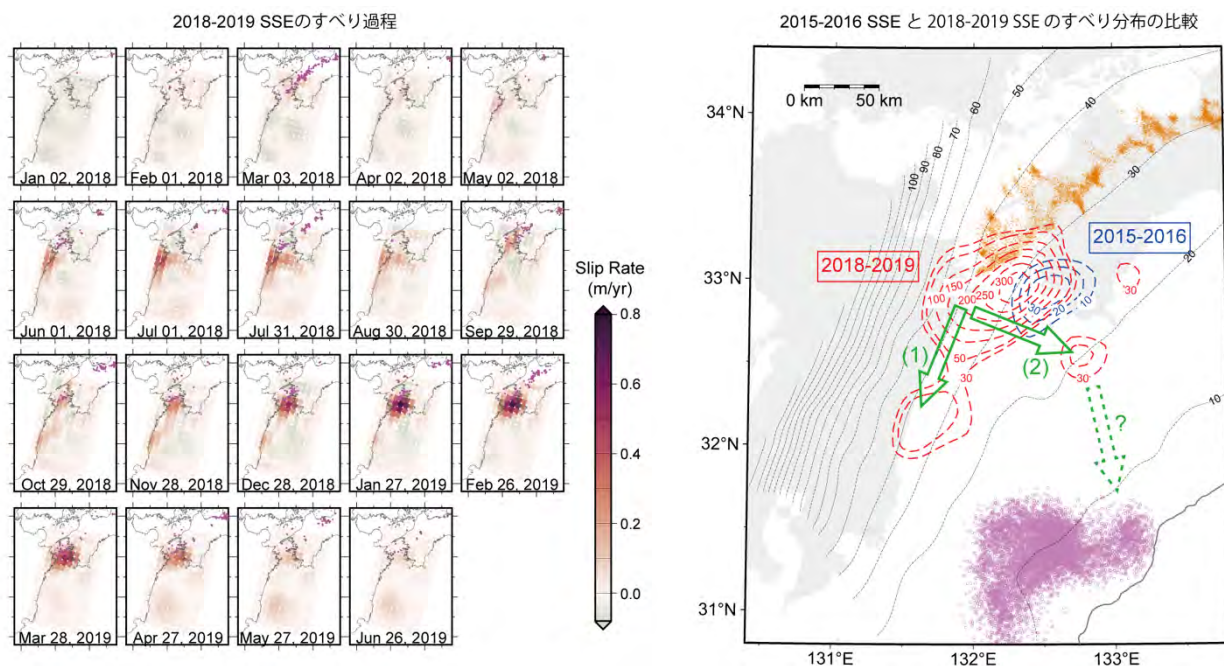


図 1．2018-2019 豊後水道・日向灘 SSE のすべりの時間発展と微動の比較 (Hirose et al., 2023 より改変, 東京大学地震研究所[課題番号: ERI_12])

(左) GNSS データから推定した SSE のすべりの時間発展。各フレームの下に表示した日付におけるプレート境界面上のすべり速度を 30 日ごとにカースケールで示す。紫色の点は当該時間窓に発生した微動の震央(防災科研の微動カタログによる)。(右) 2015-2016 SSE(青コンター)および 2018-2019 SSE(赤コンター)のすべり分布の比較。橙点は深部微動の震央(防災科研カタログ), 紫丸印は浅部微動の震央(Yamashita et al., 2015, 2021)。緑矢印(実線)は 2018-2019 SSE 期間中に見られたすべり伝播方向, 緑矢印(点線)は, 存在するかも知れない, より浅部へのすべり伝播経路。

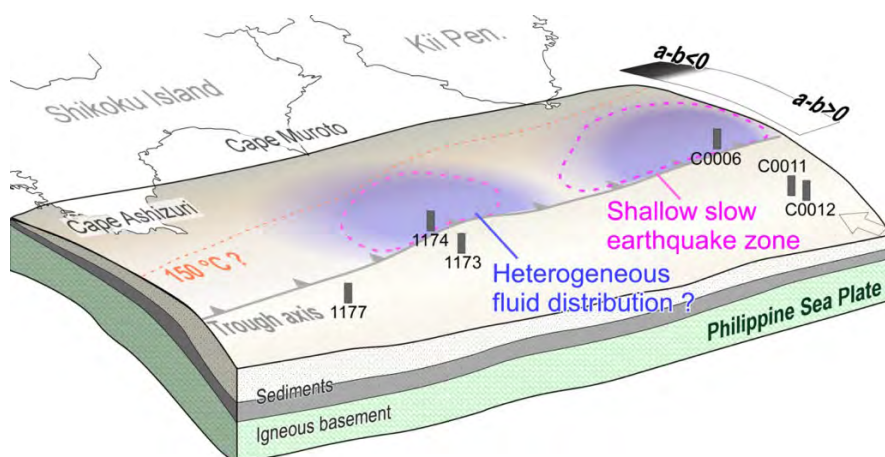


図 2．南海トラフ沿いの浅部スロー地震発生域の概略図 (Takemura et al., 2023 より改変, 東京大学地震研究所[課題番号: ERI_12])

青色が濃い領域ではプレート境界断層周辺で流体圧が高いと考えられ, 浅部スロー地震の活動域とよく一致している。図中の灰色の柱はコアサンプルが得られているボーリングの位置, 矢印はフィリピン海プレートの沈み込み方向を示す。

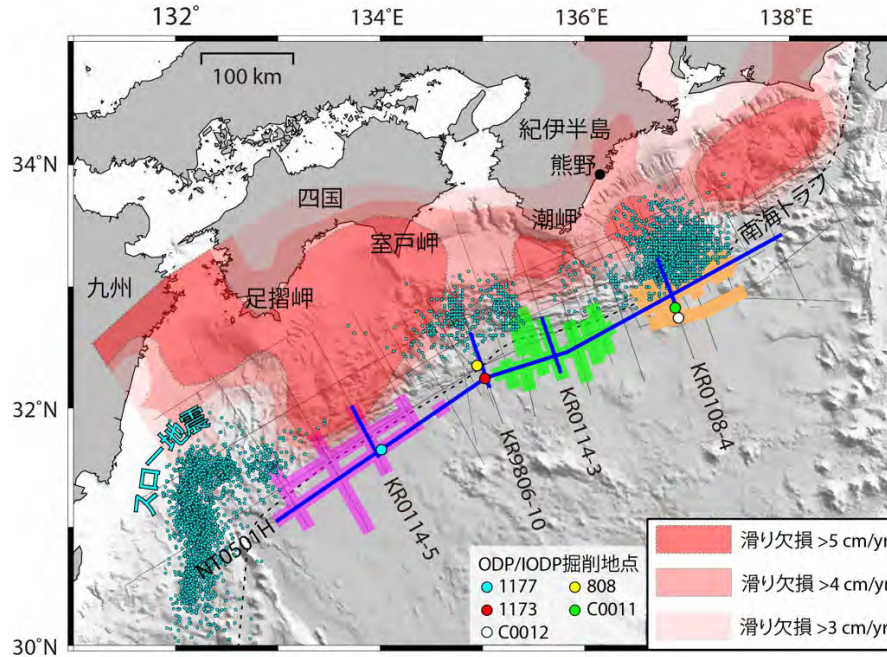


図 3. 南海トラフ沿いの反射法探査測線とタービダイトの分布 (Park and Jamali Hondori, 2023 より改変, 東京大学地震研究所[課題番号: ERI_12])

反射法探査測線(灰色)上で確認された 3 つのタービダイト(西側, 中央, 東側)をそれぞれ紫, 緑, オレンジ色で示す。シヤンの丸は浅部スロー地震(Kano et al., 2018)を示す。プレート間の固着を表すすべり欠損(Yokota et al., 2016)を赤のグラデーションで示す。黒点線は南海トラフの軸を表す。

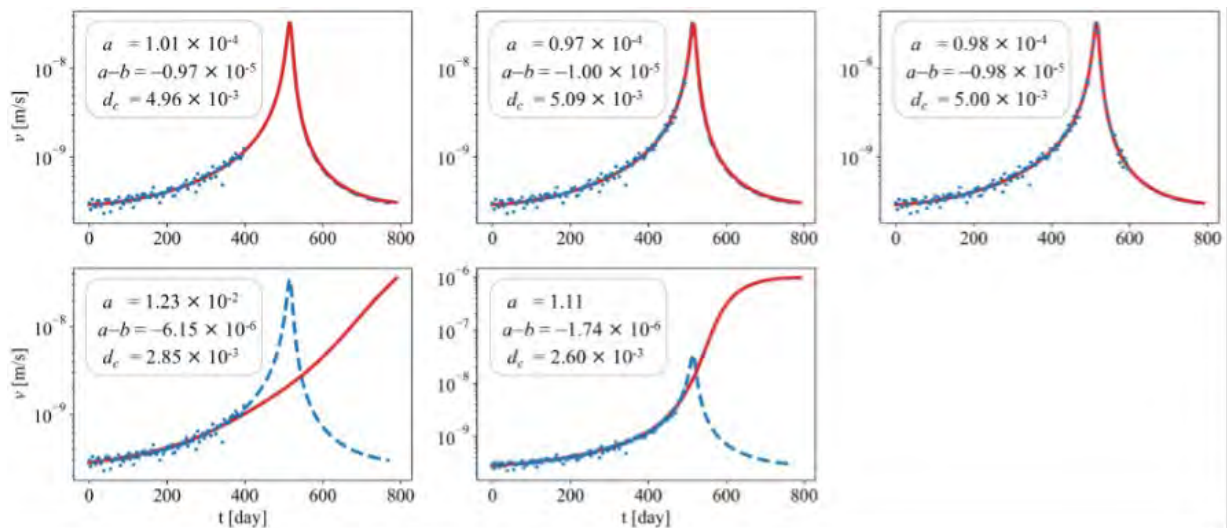


図 4. PINN による断層すべりの予測結果の例 (Fukushima et al., 2023 より改変, 京都大学理学研究科[課題番号: KUS_01])

青丸が使用した擬似データを, 赤線が PINN による断層すべりの数値計算結果を表す。(左) 400 日, (中) 500 日, (右) 600 日のデータを用いた場合の結果。

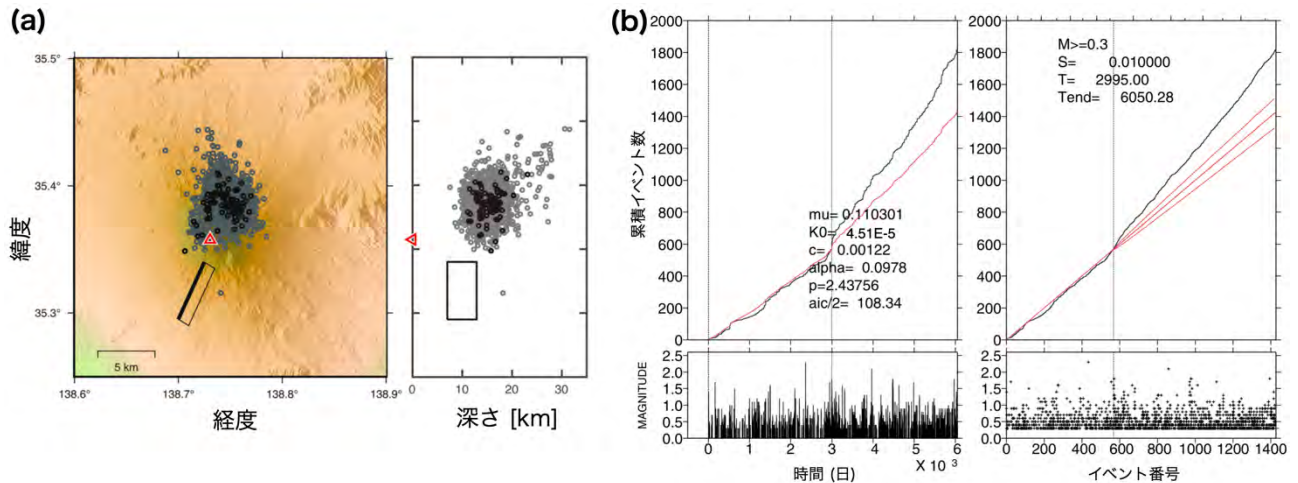


図 5. 2011 年 3 月 15 日の静岡県東部の地震(M5.9)による富士山直下の LFE 活動の活発化 (Nanjo et al., 2023 より改変, 東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13])

(a) JMA カタログに載っている富士山直下の LFE の分布。うち 87 個(黒丸)を MF 法のテンプレートに用いた。長方形は, 2011 年 3 月 15 日の静岡県東部の M5.9 地震の震源域。赤三角は富士山頂の位置。(b) 黒線は 2003 年から 2019 年までの富士山直下の LFE(CC=0.25 の MF で検出)の累積イベント数。左パネルでは横軸を時刻, 右パネルでは横軸をイベント番号(発生順序)としてプロットした。赤線は 2011 年 3 月 15 日の静岡県東部の M5.9 地震(縦線のタイミング)の直前までの活動を ETAS でフィットし, それ以降はそのモデルを外挿したもの。右パネルには外挿の 95%CI も示した。

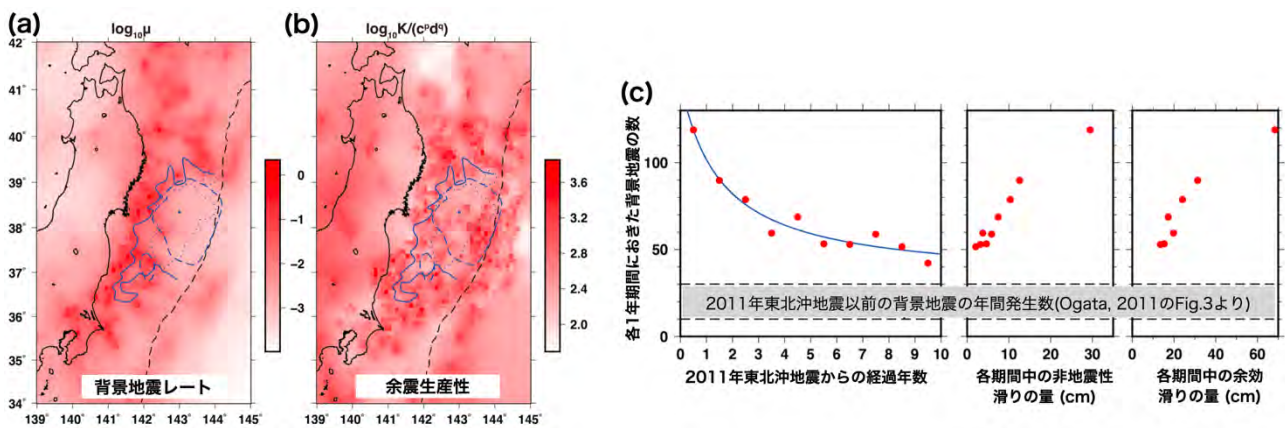


図 6. 2011 年東北沖地震(M9)の余震を応力変化によるものと余効すべりによるものに分けた解析 (Ueda and Kato, 2023 より改変, 東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13])

HIST-ETAS のフィッティングで求めた (a) 背景活動レート, (b) 余震生産性の空間分布。(c) 確率的デクラスタリングで求められた背景活動の地震数は年々減少していて, かつ相似地震カタログ(Igarashi, 2020)から求めた非地震性すべりの量や, 測地データから推定(Fukuda and Johnson, 2021)された余効すべりの量に比例している。

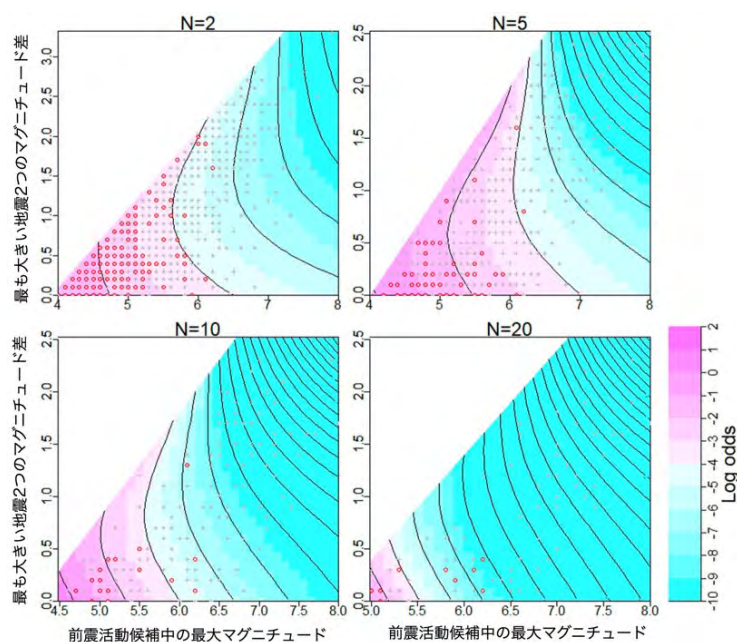


図 7．群発活動が前震である確率の、最大イベント 2 つのマグニチュード差、最大マグニチュード、クラスタが含むイベント数への依存性 (Nomura and Ogata, 2023 より改変, 東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13])

対数オッズの上記 3 変数への依存性をフィットする 3 次スプラインを、クラスタが含むイベント数 N が 2, 5, 10, 20 の場合について示した。丸印は前震であった(その後 30 日以内により大きい地震が起きた)クラスタ、プラス印は前震でなかったクラスタを表す。

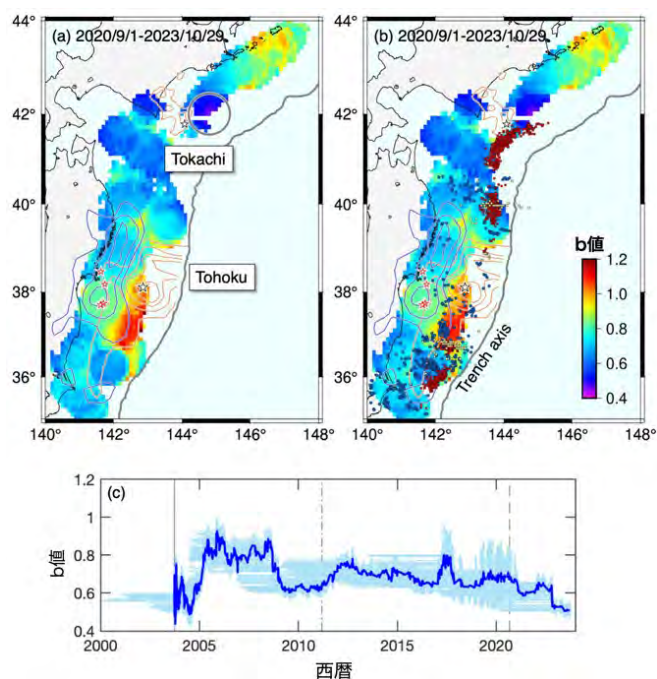


図 8．東北から北海道の太平洋側の b 値の時空間変化 (楠城, in press より改変, 東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13])

(a) 2020 年 9 月 1 日から 2023 年 10 月 29 日の $M2.5$ 以上で求めた b 値の空間分布。黒色の星は東北沖地震と十勝沖地震の震源を示す。オレンジ色と青色のコンターは、それぞれコサイスミ

ックとポストサイスミックのすべり領域を示す(東北沖地震は Ozawa et al., 2012, 十勝沖地震は Yagi, 2004 より入手)。赤色の星は M6.8 以上の地震。(b) スロー地震関連現象(Nishikawa et al, 2019)を(a)に重ねたもの。黄色の四角は超低周波地震, 青色の丸は繰り返し地震を含む群発地震。(c) (a)に示す直径 100 km の円内の地震活動の b 値の時間変化。一点鎖線は東北沖地震のタイミング。

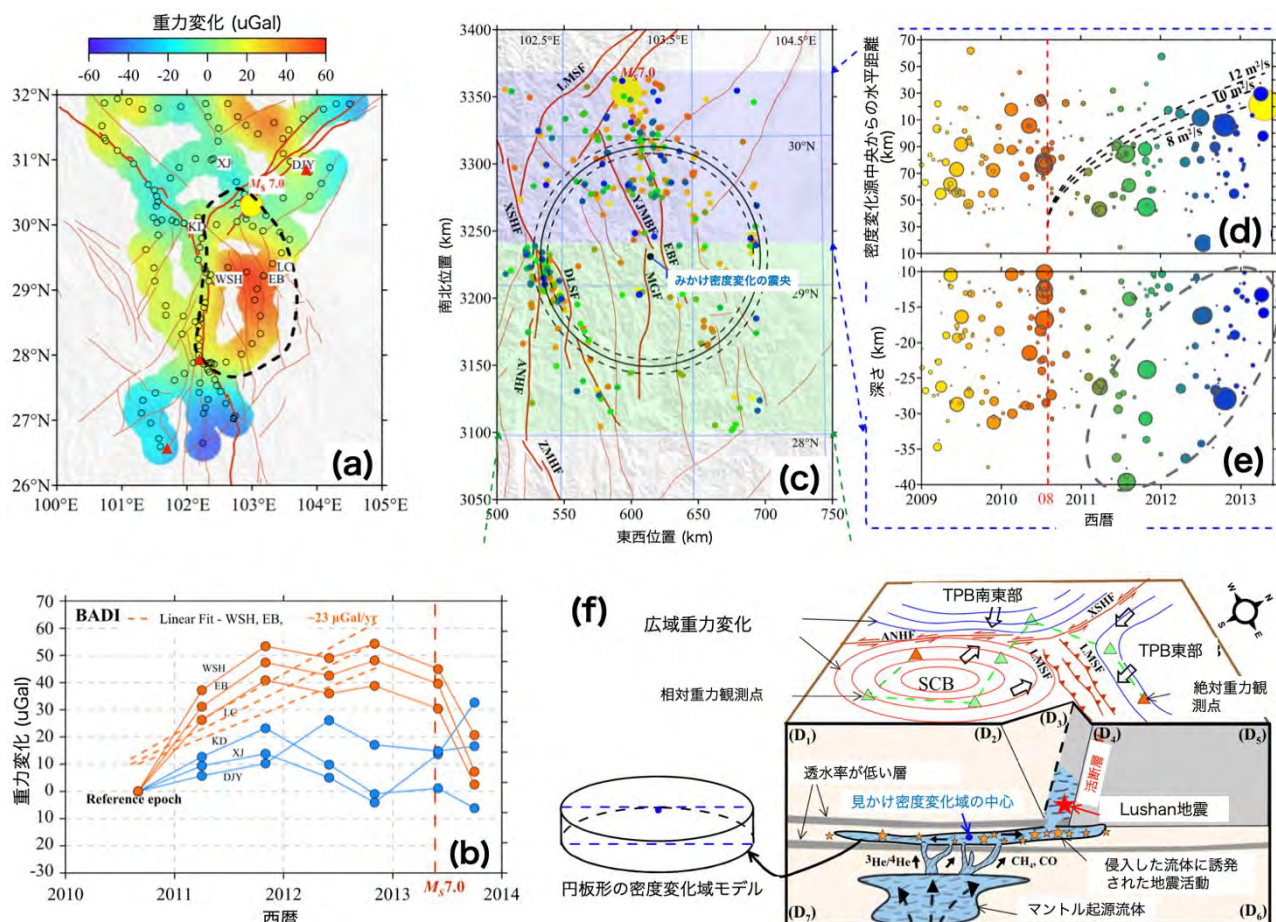


図9. 2013年4月20日のLushan地震(Ms7.0)に先行した重力変化(Wang et al., 2023より改変, 東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13])

(a) ベイズ的データ同化によるインバージョン結果。2010年8月を基準に2012年10月の変化量を示した。空丸は相対重力観測点。赤三角は絶対重力観測点。大きな黄色丸はLushan地震の震源。(b) (a)に示した6つの地点における重力(ベイズ的データ同化インバージョンの結果)の経時変化。顕著な重力増加が広域的に見られた(a)の点線で囲んだ地域内のものを赤, それ以外の場所のものを青で示した。(c-e) 2009年からLushan地震までの, 10 km以深の地震活動。色は発生時期。大きな黄色丸はLushan地震。(c)の円は, 円板状を仮定して推定された密度変化域。破曲線は2010年8月に始まったように見える震源マイグレーション。(f) 総合的な解釈。D1-D7はモデル切断面。TPB: チベット高原ブロック。SCB: 南中国ブロック。ANH: Anninghe断層。XSHF: Xianshuihe断層。LMSF: Longmenshan断層。

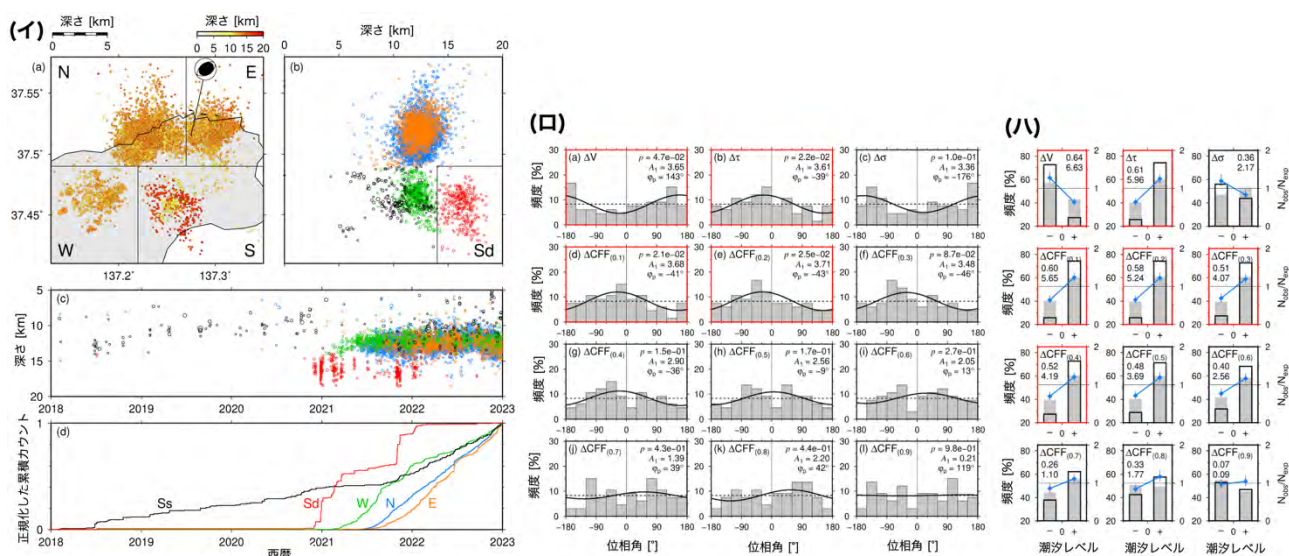


図 10. 能登地方の群発地震活動の潮汐相関調査（弘瀬・他，2023 より改変，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]，気象庁[課題番号：JMA_01]）

（イ）活動は5つのクラスタ(N, E, W, Ss, Sd)に分かれている。サブパネル b-d では、カラーコードでクラスタを区別した。サブパネル a のビーチボールは2022年6月19日に領域Eで発生したMj5.4の地震の気象庁CMT解で、今回の群発活動において典型的である。全てのイベントについて潮汐力は、走向 45° ，傾斜角 45° ，すべり角 90° の断層を仮定して計算した。また、 ΔCFF については、仮定する摩擦係数(下付きカッコ内に記した)を0.1から0.9まで0.1刻みで変えて全て検討した。（ロ）Sdクラスタの活動に対するSchuster検定の結果。p値5%で相関ありとみなせた項目は枠を赤にした。（ハ）Sdクラスタの活動に対するHoustonプロット。応力区間は正負の2分割とした。塗り潰し棒は無相関の場合の期待頻度(N_{exp})。各パネルの上段の数字はNobs/ N_{exp} の差の絶対値で青線の傾斜に対応。下段の数字はカイ二乗値。p値5%(カイ二乗値で3.8415に相当)で相関ありとみなせた項目は枠を赤にした。なお、(ロ)でも(ハ)でも、24時間空かない地震はトリガ関係にあるとみなして先頭の地震だけを残すデクラスタを行った後の66個のイベントを対象としている。



図 11. 地震活動に伴って地中から火焰が噴出した歴史地震の震央（榎本・他，2024 より改変，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]）
黒塗りの地域は天然ガス鉱床分布（石油技術協会，1983）。

1（4）火山

「火山」計画推進部会長 中道治久

（京都大学防災研究所）

副部会長 前野 深

（東京大学地震研究所）

火山の噴火災害を軽減するためには、火山噴火の発生の場所・規模・時期を予測することおよび火山噴火現象に対応する噴火災害の推移を予測することが重要である。またこれらの予測のためには、火山噴火現象を解明することも重要である。「火山」計画推進部会では、「火山活動の事象分岐の条件・論理を明らかにし、火山活動推移モデルを構築し、発災の原因である火山噴火を予測すること」を上位目標にすえ、低頻度で大規模な現象を含む火山現象の解明とモデル化、火山活動を支配する場の解明とモデル化、中長期的な火山活動の評価、観測手法の開発および体制の整備に関する研究を5年間にわたり推進してきた。ここでは、5年間の成果の概要を述べたのちに、令和5年度の成果を詳述する。

〔1〕5年間の成果

1. 5年間の国内の火山活動と成果の概要

この5年間においては、人的被害が出た噴火はなかったが、離島や海域における噴火が顕著であった。まず、この5年間における国内の噴火について述べる。2013年から2015年、2017年に噴火した西之島は2019年から2023年においては断続的に噴火を繰り返してきた。南硫黄島付近の福岡ノ場の海域から2021年8月13日に大規模噴火が起こり、8月15日には噴火と新島の存在が確認されるとともに、大量の軽石が北西方向に60 kmに蛇行して浮遊していることが確認された。この浮遊軽石は2021年の秋に沖縄や奄美の海岸に漂着して、港湾設備に被害が生じた。南西諸島の離島である諏訪之瀬島では2019年4月～2024年3月の期間において噴火が発生しており、特に2020年12月下旬から2022年10月中旬までの期間は月に20回から多い時は550回を超える頻度で爆発があった。2023年は2月と3月は50回を超える頻度で爆発があったが、その後は頻度が急激に減少した。桜島は2017年11月から南岳山頂火口にて噴火活動があり、2019年と2020年は400回程度噴火しており、2021年は150回弱、2022年は240回弱、2023年は215回の噴火があった。1970年代や80年代の南岳山頂火口の噴火と比べると頻度は少ないが、それ以上に降下火山灰量が1桁少ない。したがって、噴火が頻発している桜島であっても過去と比べると噴火活動が高いわけではないため、陸域の噴火活動は低調であったと言える。

このような全国の火山活動が発生している期間において、「火山」計画推進部会では、噴火予知を目指す観測研究を継続し、「火山噴火の先行現象から噴火、そして噴火の終息までを一連の現象として捉えた火山活動推移モデルを構築し、噴火事象における分岐・論理を明らかにし、火山活動推移モデルによる火山噴火予測をすること」を上位目標にすえ、低頻度大規模噴火を含めた火山現象の解明とモデル化、マグマ供給系・熱水系の構造解明、中長期の火山活動の評価について比較研究と、観測・解析技術の開発をもとにし

た研究体制の整備を推進してきた。また、課題の成果を災害誘因予測のための研究や防災リテラシー向上のための研究につなげることも意識して研究を進めてきた。

以下では、まず5年間になされた主要な成果を紹介し、つぎに令和5年度の成果を述べる。

2. 5年間になされた主要な成果

2. 1 マグマ溜まりの時間発展と噴火様式との関連性

将来の噴火の様式や規模が物質科学的に予測できるか否かは、(1)マグマ供給系の連続性が担保されていること、(2)噴火様式がマグマの性質によって支配されていることの2点に強く依存している。そこで、比較的単純なマグマ供給系が想定され、かつ爆発的噴火も非爆発的噴火も回数が多い富士火山での噴火に焦点を絞り、上記2点が実際の火山で成立しているか否かが検討された。マグマ供給系の連続性については、山頂・山腹からの爆発的噴火が断続的に発生する約3,500年前以降の降下火砕物について、全岩・斑晶化学組成、石基組織などの分析を行った結果、上記の期間中にマグマ供給系が2回ほど大きく変化するもののそれ以外は数百年にわたってマグマや斑晶の組成が連続的に変化していることが確認された。また、噴出物の特徴から浅部マグマの影響をほとんど受けずに深部マグマ溜まりから直接的に地表に噴出する噴火が主体であった時期の存在が確認された。そこで、単純なマグマ供給系モデル(深部マグマ溜まり単独)にあてはめてその時代の噴出物量や噴火間隔のデータの再現を試みたところ、マグマ溜まりの実効的な大きさに対して制約が得られた。さらに噴出量が数桁にわたり変化していることを考慮すると、噴火未遂により地表に到達しないマグマが多量に存在することが示唆され、いかにして噴火未遂量を評価するかが、今後の噴火予測の精度向上のための課題であることも明らかになった。噴火様式とマグマの性質との関連については、マグマの含水量はある程度は噴火様式に影響を与えることは確かだが、それ以外の要因(火道の広がり、上昇速度など)もまた噴火様式に影響を与えている可能性が高く、単純にマグマ溜まりでのマグマの性質だけには帰着できないこともわかった。

2. 2 極小規模噴火を含めた草津白根火山の噴火履歴の解明と噴火ポテンシャル評価

草津白根火山の最近の活動場である本白根火砕丘群、逢ノ峰火砕丘群、白根火砕丘群について、山頂域に分布するマグマ噴火噴出物の層序が解明され、噴出量・全岩化学組成がほぼ明らかになった。これにより本火山のマグマ噴出物に関する地質学的岩石学的知見が大幅に刷新された。また、積算マグマ噴出量階段図が完成し、各火砕丘群の噴火ポテンシャルの評価が可能になった。マグマ噴火噴出物についての物質科学的解析も進められ、最近の3つの活動場でのマグマ噴火が、共通するデイサイト質マグマとそこへ噴火毎に供給された苦鉄質マグマの混合により開始されたことが明らかになった。山頂域から山麓に分布するテフラ調査、¹⁴C年代測定、粒子構成比分析、XRD分析に基づき、完新世のテフラ層序も確立され、白根火砕丘群は約16,000~3,800年前にマグマ噴火、約7,600年前~明治時代まで水蒸気噴火を10回以上発生したこと、本白根火砕丘群は約11,000~1,400年前までマグマ噴火、約4,800~400年前には水蒸気噴火を発生したことがわかった。これにより両火砕丘群がマグマ噴火主体の活動から水蒸気噴火主体の活動へ推移したこ

とが明らかとなった。

2. 3 大規模噴火に伴う諸現象とそれを駆動するマグマ溜まりー火道システムの解明

伊豆大島については、18世紀安永噴火など大規模噴火の噴火様式およびその推移と、それらを駆動したマグマの蓄積場や上昇過程の描像が明確になった。とくに大規模噴火の際に時間とともに斜長石斑晶量が増加するという推移パターンが明らかになり、大規模噴火の推移予測や伊豆大島の噴火シナリオの改訂に繋がる成果が得られた。また、一回の大規模噴火の推移で見られる斜長石斑晶量の増加と同様に、中規模噴火から小規模噴火へと数十年かけて推移していく過程で、斜長石斑晶量がしだいに増加していることも明らかになった。斜長石斑晶量、噴火規模、時間の関係性が見出されたことは、伊豆大島の噴火の中長期予測に貢献する。西之島の噴出物の物質科学的研究では、2019-2020年噴火における噴火様式や化学組成の劇的変化が、より深部に由来する苦鉄質マグマの上昇に起因することが明らかになった。伊豆大島と西之島の大規模噴火の推移における共通点として、年単位の断続（継続）的かつ弱い活動の後に、それまでとは異なるマグマによる高噴出率の爆発的活動が続くことが挙げられるが、このような噴火様式の急変の原因として、苦鉄質マグマに特徴的な芋づる式のマグマ供給系の構造が関係している可能性を提案した。浅間山については18世紀天明噴火の噴出物の物性、化学組成および発泡組織等のデータの解析に基づきマグマ上昇過程について考察し、火砕流由来の噴出物で気泡数密度が顕著に大きな値を示すことから、噴火様式遷移がマグマの減圧率（上昇速度）に強く影響を受けた可能性を提案した。霧島火山群については、近年の小中規模噴火（2017-2018年新燃岳）および歴史時代の大規模噴火の噴火様式と推移、噴出物の特徴、マグマ上昇過程が明らかになり、霧島火山群全体における噴火推移パターンが整理された。近年と歴史時代の噴火やマグマ供給系モデルにもとづき霧島火山群全体に対する火山活動推移モデルも作成された。

2. 4 大規模噴火に関わるマグマプロセスの時間スケールの解明

火山岩試料を対象としたU-Th放射非平衡分析法の立ち上げが行われた。白頭山10世紀噴火の噴出物に適用することにより同火山のマグマ供給系の時間発展が明らかにされ、U-Th放射非平衡分析法の有用性が確認された。また、支笏・屈斜路・洞爺・始良・十和田の噴出物に適用した結果、支笏カルデラにおいてはカルデラ噴火に関わった一部の珪長質マグマについて具体的なマグマ生成率（約15 km³/万年）が推定された。始良カルデラについてはカルデラ噴火に至る珪長質マグマ系の時間発展が明らかになるなど（Kuritani, 2023）、U-Th放射非平衡分析法を用いたマグマプロセスの時間スケール情報の抽出が実現された。

2. 5 多項目観測データに基づく噴火過程の解明とモデル化

火口近傍の多項目観測が引き続き行われるとともに、ドローンや衛星データの活用がより積極的に行われた。噴火に前駆した微動振幅の増加がいくつかの火山において観測された。例えば、霧島山では新燃岳の2018年噴火に前駆してバックグラウンド微動の振幅の加速的増大が見られ、阿蘇山では2014年11月の噴火に前駆して長周期微動の振幅増

大が観測された。これらの振幅増大はマグマの上昇に対応していると考えられ、噴火過程の解明に示唆を与えた。

ドローンや無人ヘリによる空中磁気測量とデータ解析から、伊豆大島、三宅島、霧島山の浅部の詳細な構造推定と、繰り返し観測による構造の時間変化の検出に成功した。2019年から2020年の西之島の活動について、マルチ衛星観測によって、地形・噴出物分布状況の変化、熱異常からの噴出率変化、溶岩と火砕物の割合の変化、二酸化硫黄放出率の変化、変色海域の把握を行うことにより噴火プロセスを推定した。

2. 6 霧島山新燃岳の溶岩ドームにおける爆発条件、噴火遷移、帯磁率変化の推定

霧島山新燃岳の2011年噴火の岩片試料の分析から、溶岩ドーム形成過程において、ナノライトの結晶化により、メルトとマグマの粘性が上昇したことが分かり、この粘性上昇により気泡過剰圧が溶岩ドームの破砕強度を超えることで、爆発が発生することが分かった。マグマ水蒸気爆発からマグマ噴火に遷移した新燃岳の2018年噴火の火山灰試料の帯磁率の測定により、噴火活動の推移と帯磁率の増加の対応が見られ、帯磁率が相対的に低い粒子の量比がマグマ噴火に近づくにつれて低下することが分かった。

2. 7 草津白根火山の精緻な地下構造推定と2018年本白根山噴火と流体移動との関係

稠密および広域の観測によって、より精緻で広域までカバーされた草津白根火山周辺の比抵抗構造が推定された。推定された構造と、各種観測から推定された流体流動の情報をもとに2018年本白根山噴火と unrest の関係の議論が進んだ。比抵抗構造からは、白根火砕丘の地下浅部に釣鐘状に広がる cap rock のほか、その下の海拔0から海拔4 km程度の広い範囲に流体貯留域、およびマグマ溜まりに対応する領域が見いだされた。2018年本白根山噴火に関しては、火口直下において繰り返し開閉する鉛直開口クラックが見いだされたほか、噴火前後の流体移動と構造との関係が議論された。さらに、湖水や火山ガスの化学的特徴を解析する手法が新提案され、マグマガスと地下水循環の時間変動が示された。

2. 8 鬼界海底カルデラにおけるマグマ供給系の構造・進化の解明

鬼界カルデラのマグマ供給系の構造を正確に把握するために、地球物理学的な長期観測とデータの解析が進められた。地磁気観測データの3次元解析によりカルデラ下の深さ1-5 kmに低比抵抗領域、地震波トモグラフィー解析によりカルデラ下の深さ10-20 kmに低速度領域が存在することがそれぞれ示唆された。反射法地震探査により得られた層構造と噴出物との対比からは、2回の大規模火砕流噴火に相当する堆積物が海底に厚く堆積していることが明らかになり、鬼界アカホヤ噴火に相当する地層の空間分布をもとに堆積物総量が71 km³以上と推定された。また、海底堆積物の層厚や粒度、構成物、化学組成の水平変化から、水中での火砕流の流動過程が議論された。噴出物の岩石記載、全岩、斑晶、石基、メルトインクルージョンの主要および微量元素組成分析からは、(1) 3回の大～中規模の火砕流噴火においてマグマ組成変化が見られ、マグマの起源物質および地殻内分化過程の変化が起きたこと、(2) 鬼界アカホヤ噴火では広い組成幅のマグマが噴出したがそれらは下部地殻の部分溶融により生成したマグマであること、(3) 鬼

界アカホヤ噴火直後には、アカホヤ噴火の出残りマグマが活動し、その後に岩石学的性質の異なる新たな珪長質マグマと苦鉄質マグマが浅部でマグマ供給系を作り、この供給系が巨大溶岩ドームや薩摩硫黄島の活動を引き起こしていること、(4) 鬼界アカホヤ噴火後のマグマの変化は、マグマ溜まりに残された結晶に新たなマグマが混合することにより起こった変化であることなどが明らかになった。

2. 9 富士山の事象系統樹を精緻化するための噴火履歴の研究

富士山の噴火履歴を精緻化するための噴出物層序の確立、年代測定（古地磁気年代、放射性炭素年代）、富士山のマグマ組成の特徴を把握するための噴出物の化学組成分析（全岩化学組成分析、LA-ICP-MS分析）、および既存文献をもとにした噴出物データベースの作成が行われた。これらの結果、年代未詳であった溶岩流・火砕流堆積物やテフラ層の年代、宝永山の形成過程が明らかになるとともに、湖底堆積物を用いた年代測定手法が確立された。

2. 10 火山活発化指数VUIを用いた客観的火山評価の試行

複数火山において観測によるモニタリングを継続するとともに、定期的に研究集会を行って、観測研究成果を共有してきた。それにより火山活発化指数（VUI）の試験的導入の取り組みが進んだ。とくに十勝岳、阿蘇山、吾妻山、草津白根山、雌阿寒岳についてVUI基準の試作を通じて、ノウハウの蓄積が進んだことにより、作成手順の標準化作業が進んだ。これによって、他の火山へのVUIの導入を円滑に進めることが可能となった。VUIの利点として、観測データのみに基づくため客観性が高いこと、そして多項目データを統合するため特定の観測項目に評価が偏重しないこと、単純な論理であるため基準を定義することで自動化が容易であることが挙げられる。この特徴は火山活動の確率的評価・予測に取り組む際に有用であると言える。

2. 11 多項目観測データと物質科学的データからの火山活動推移モデル化と事象分岐判断

多項目観測データの解析結果や物質科学的データの分析結果を整理して、火山活動推移のモデル化や噴火事象系統樹の分岐判断指標の作成や、分岐判断にとって重要な事象の解析を進めた。地震、地殻変動、磁場変動、熱などのデータを用い、吾妻山と十勝岳の浅部の力学源の時空間分布に基づく火山活動の理解とモデル化、マグマ挙動の理解に基づく噴火に前駆する地震や地盤変動の理解、および噴火発生との関係の評価を行った。また、火口湖の熱・物質収支モデルの構築、噴出物の全岩化学組成や斑晶量などの物質化学的データおよび噴出物量や岩脈分布などのデータから噴火様式や推移の特徴抽出を行った。さらに、多孔媒質の熱流体モデルの数値計算から、複数のシナリオにおける地球物理学的観測量の時空間変化を求め、火山活動推移モデルの検討を行った。

2. 12 火山活動推移の事象分岐理解のための桜島火山における噴火過程、および脱ガスが卓越する南岳噴火活動と昭和火口再噴火の前駆現象の解明

過去の地震火山観測研究計画によって行われた人工地震探査によって得られた地震波

速度構造を用い、初動解析および波形インバージョンによって爆発地震の震源再決定が行われた。その結果、爆発的噴火の励起源が火口底から数100 mといった従前の研究よりもかなり浅部に推定された。また、桜島の爆発的噴火に伴う地震、空振、傾斜データの解析から、爆発的噴火の励起源は南岳A火口、B火口および昭和火口のそれぞれの火口底直下にあることと、マグマ供給源は共通して南岳A火口直下にあることが明らかになった。また、ミュオグラフィ観測から噴火頻度が高い火口直下では密度が高くなることが明らかになった。これらの結果から、精度の高い地下構造の情報を加味することで、噴火活動や噴火過程の理解が格段に進むことがわかった。一方、空気振動を用いることで災害誘因である火山岩塊の最大到達距離を評価できる可能性を見出した。これは、災害誘因予測に寄与し、噴火災害の軽減に繋がる成果と言える。

2017年秋から現在までの南岳山頂火口の噴火活動期においては、二酸化硫黄放出率が高く、火山灰降下量が2015年前半までの昭和火口噴火期に比べて少ないという特徴がある。現在の南岳噴火活動期において桜島中央部の沈降が見出された。また、この期間において、桜島における重力増加が継続していることが明らかになった。始良カルデラおよび桜島の起震応力場には時間変化がみられず、GNSS観測結果から始良カルデラのマグマ蓄積の増加率はほぼ一定である。そして、桜島直下の圧力源は減圧傾向にあり、その一方で質量増加していることから、噴火活動においては脱ガスの卓越が継続していることが明らかになった。全体として、桜島の噴火活動は低調で、安定したマグマ供給、深部マグマ停滞と脱ガスが卓越する一方で、間欠的なマグマ上昇があったと推察される。また、2023年2月から8月の昭和火口の噴火活動に前駆した2023年1月からの火口からの活発な噴気活動と顕著な火山性微動は、火道浅部への新しいマグマ上昇とガスだまりの形成と振動を示唆し、噴火開始後に微動が消滅したことからガスだまりが破壊されたと解釈されるなど、噴火事象分岐の理解が進んだ。このことから火山活動推移モデルの構築と予測に対する重要な知見が得られたと言えよう。

2. 13 堆積物に基づく噴火物理化学パラメータ推定手法の高度化と事象分岐判断への活用

霧島火山群 2017-2018 年噴火について、噴火時の調査・観察と火山灰の全岩化学組成分析、軽石の物性および組織分析にもとづき、表面現象や噴火様式推移の詳細が明らかになった。この研究は噴出物組織の迅速な解析の重要性を示すとともに、安山岩質マグマの噴火様式多様性の原因の理解に貢献した。また、霧島火山の噴火推移パターンの抽出、近年と歴史時代の観測・観察事例の整理、マグマ供給系のモデル化が行われ、火山活動推移モデルが作成された。浅間、阿蘇、諏訪之瀬島、榛名、硫黄島等においては代表的な噴火の噴出物の構成物、組成、組織の時系列変化を明らかにする研究が進められた。浅間山の2019年極小規模噴火では、降灰調査、噴出量推定、火山灰構成物解析に基づく噴火様式の推定が課題参加機関で協力して実施された。2021年阿蘇中岳噴火の際の降灰調査では、火山データ共有システムであるJVONを活用した複数機関による連携調査がはじめて実施され、降灰分布や噴出量の迅速な推定が行われた。即時的な噴火現象の把握及び調査の実践として、西之島2019-2020年噴火の噴出物採取や地形データの取得が関係機関の協力により実施された。アクセス困難な地域の試料採取や地形調査の迅速な実施

においてドローンの活用が有効であることが示された。福德岡ノ場 2021 年噴火については、遠隔観測・観察を活用した噴火様式や推移の把握、定常一次元モデルを用いた噴出率等の噴火パラメータ推定、化学分析にもとづくマグマの特徴把握や SO_2 収支推定などが行われ、噴火の全体像と浅海でのマグマと海水との相互作用のプロセスが明らかになった。

〔2〕令和 5 年度の成果

1. 地震・火山現象の解明のための研究

（1）地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

長期間における火山現象とそれに伴う災害を正確に把握するためには、地質データ等を収集して調査・分析を行い、データベースを整備・拡充することが重要である。そこで、マグマの性質と噴火の爆発性の関連性を調べるために、富士火山の溶岩およびスコリアを対象として、かんらん石斑晶と斜長石斑晶とメルトとの平衡からマグマの温度と含水量を算出し噴火様式との関連を調べた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_02]）。その結果、噴火前のマグマ含水量が高い方が爆発的な噴火となる傾向が見えた。 t 検定では溶岩噴火がスコリア噴火に比べて噴火前のメルトが低含水量という仮説が支持された。さらに、噴出物組成や噴出量、噴火間隔の時間発展についてマグマ供給系モデルをもとにして検討した結果、マグマ溜まりの実効的な大きさについて制約が得られたほか、実際の噴火で噴出量が 2-3 桁に渡り変化していることを説明するためには、マグマが上昇途中で固化し噴出できない場合や、マグマ溜まりの粘弾性変形によるマグマと周辺物質の密度差の浮力への変換によりマグマの上昇力が維持される場合を考慮する必要があることが示唆された（図 1，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_02]）。約 7,600 年前の摩周カルデラ形成期の降下軽石と火砕流堆積物中の軽石を対象に $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ を検討した結果、火砕流の軽石の $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比は降下軽石のそれと比較して低い傾向があることを見出した。そして、 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比の変化は噴火時の噴煙の温度を反映し、火砕流堆積物中の軽石の $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比は火砕流発生時の噴煙の温度低下を記録している可能性があることを指摘した（公募研究[課題番号：KOB021]）。本白根火砕丘群、逢ノ峰火砕丘群、白根火砕丘群のマグマ噴火噴出物の層序確立、各マグマ噴火噴出物の年代測定、QGIS を用いた噴出量推定に基づく各火砕丘群の積算マグマ噴出量階段図作成を行った（図 2，富山大学[課題番号：TYM_01]，石崎・他，2023）。これにより各火砕丘群のマグマ噴火ポテンシャルの評価が可能となった。草津白根火山全体を見ると、約 5,000 年前の殺生溶岩の噴火後は活動が低調化したこと、約 2,000 年前には白根火砕丘群と本白根火砕丘群が相次いでマグマ噴火を起こしたこと、約 1,200 年前には本白根火砕丘群と逢ノ峰火砕丘群が相次いでマグマ噴火を起こしたことが明らかになるなど、火砕丘群間でマグマ噴火の連動があったことを窺わせる知見が得られた。将来噴火する可能性の高い活火山の中長期的活動評価と予測のため、活動的火山の地質図作成を進めた（産業技術総合研究所[課題番号：AIST03]）。秋田焼山・御嶽山・雌阿寒岳の火山地質図の取りまとめを進め、秋田焼山については完新世噴火史を論文として公表した（産業技術総合研究所[課題番号：AIST03]，南・他，2023）。伊豆大島では沿岸部水深 400 m 程度までをカバーする陸海シームレス赤

色立体地図を作成し、火口位置と噴火履歴を盛り込んだ噴火口図を作成した。また、阿蘇カルデラ阿蘇4火砕流堆積物分布図、阿蘇カルデラ阿蘇3火砕流堆積物分布図を整備した(星住・他, 2023)。日本列島の火山の地質情報を最新の知見に基づいて収集・整理し、日本の火山データベースを更新・拡充した(産業技術総合研究所[課題番号:AIST03])。

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

低頻度で大規模な火山噴火現象の発生履歴、規模等を解明するためには、史料・考古データ、地質データ等の分析を着実に進める必要がある。そこで、浅間山16 ka大規模珪長質噴火の一連の活動のうち、2つのプリニー式噴火(YP, YPk)の噴火推移やマグマ溜まり条件を明らかにした(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_03])。火砕物の粒径変化と異質岩片量変化の関係からは、YP噴火では火道壁の破壊と共に噴火強度が減少した一方、YPk噴火では火道径を拡大しながら噴火強度が増していった可能性が示された。

霧島火山群については、新燃岳、御鉢、えびの高原硫黄山、御池の起源マグマの共通性を明らかにするために、全岩主要、微量元素、Sr-Nd-Pb同位体比組成分析を行った。その結果、前三者は同位体3元素それぞれについてほぼ同様の組成比を有することから共通の起源物質に由来すること、御池は異なり、地殻物質の混染の影響を強く受けた起源物質に由来することなどを明らかにした(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_03])。

十和田カルデラ噴出物の基礎分析およびU-Th放射非平衡分析と、桜島完新世噴出物の試料採取および基礎分析を実施した(北海道大学[課題番号:HKD_02])。その結果、十和田火山Episode QからAでは時代とともに $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が上昇および $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比などが減少する傾向が見られ、Episode L(カルデラ噴火)直後のEpisode KからFにかけてはその傾向が乱れることが確認された。このことから、カルデラ噴火によりマグマ系がリセットされ、5千年ほどの時間をかけてマグマ系の再構築が行われていたことが示唆された。桜島北岳と南岳の噴出物については、主要元素・微量元素組成のみならずSr-Nd-Pb同位体比でも両者が明瞭に区別されることが明らかとなった。鬼界カルデラにおいて、複数回の研究航海により取得した地球物理学的観測データの解析と、掘削とピストンコア、ドレッジおよび陸上で採取された試料の岩石学的、地球化学的・地質学的解析を進めた(神戸大学[課題番号:KOBEO1])。観測データの解析より、鬼界カルデラ下深さ10-20 kmに低速度領域が存在することなど地殻・マントル構造を推定した。反射法地震探査のデータ解析と試料分析により鬼界アカホヤ噴火の噴出物と認定した堆積層の厚さ変化を明らかにし、堆積物量や火砕流の流動堆積過程について議論した(神戸大学[課題番号:KOBEO1], Shimizu et al., 2024)。堆積物・岩石試料について、微量元素や揮発性成分など物質科学的分析を進めることで、鬼界アカホヤ噴火とその後に活動した溶岩ドームのマグマ供給系の変遷過程について考察した。また、大規模火砕流堆積物については、化学組成分析、古地磁気測定による定置温度の推定などを進め、海面および海底を流動する火砕流の運搬堆積様式および冷却過程について検討を行った。

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

多様な火山現象を理解するためには、多項目の観測を行い、進行する火山現象を時空

間的に定量化するとともに、火山噴出物の分析、マグマの物理・化学的な実験および数値モデルによる理論解析を行う必要がある。霧島火山の地震・空振観測データから、衛星を含めた多項目データと先行結果とあわせて新燃岳と硫黄山の活動を検討したところ、2017年噴火の半年前から新燃岳火口近傍にて発生する振幅が小さく常時発生しているバックグラウンド微動の振幅に加速的増大がみられ、硫黄山の噴火活動との連動が見出された。また、新燃岳の2018年噴火に前駆してバックグラウンド微動の振幅の加速的増大が見られ、微動源の移動ののち、2018年4月の硫黄山噴火が発生した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_07]，Ichihara et al., 2023）。微動の震源の移動や振幅の加速的増大が噴火に先行して見られたことから、微動の活動把握が噴火発生予測に有用であることを示している。調和的な火山性微動の発生モデルによる震源時間関数とグリーン関数をたたみ込み積分することで、箱根火山の深部低周波微動の観測波形を説明することに成功した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_07]，Ozaki et al., 2023）。桜島の爆発的噴火に伴う地震・空振・傾斜の解析と噴出物の物質科学分析の結果、および火道流モデルにもとづく数値計算結果から、爆発的噴火は火口底から下0.5-1 km付近の数十mの領域における増圧によって開始され、噴出時に南岳A火口直下が減圧し、大きな噴火の場合は減圧が深さ数kmにまでおよぶことが明らかになった（東北大学理学研究科[課題番号：THK_03]，Nishimura et al., 2024）。

海底火山活動中に発生する顕著な現象の一つに、変色海水がある。岩石-酸性化海水反応実験を行い組成変化と火山活動との関係を考察し、火山活動の活発化に伴って生成される熱水はFeの割合が高く、沈静化に伴ってFeとAlの割合が低くなり、Siの割合の高い熱水が生成されることがわかった（東京工業大学[課題番号：TIT_01]）。

弥陀ヶ原火山の地獄谷にて水準測量を毎年行い、2020年以降の地盤隆起を水平開口割れ目で説明することができた（富山大学[課題番号：TYM_02]，堀田・他，2023）。

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

噴火事象の分岐は、火道上昇中のマグマの発泡・脱ガス現象の起こり方の違いに起因すると考えられる。溶岩ドームの爆発が起こるためには、溶岩ドーム内でのガスによる過剰圧の増加が必要であり、それを引き起こす原因として溶岩ドーム内のマグマで多孔質組織が形成されることが知られている。再現実験により、多孔質組織が、ソリダス近傍の水飽和条件下において4日から8日で形成されることが明らかになった（東北大学理学研究科[課題番号：THK_04]，Sakurai et al., 2024）。

（５）地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造解明

火山地域において、地震波速度・減衰構造や比抵抗構造等を明らかにすることで、火山活動を支配する場のモデル化を進める必要がある。地震波形の相関解析から御嶽山の山頂から深さ5 km付近までの地震波速度構造と反射面を推定し、マグマ溜まり上面や低透水層の境界面に対応する反射面が見出され、震源分布との対応から火山性流体や熱輸送に関する描像が得られた（東北大学理学研究科[課題番号：THK_08]，Maeda and Watanabe, 2023）。鹿児島湾奥に存在する海底火山である若尊カルデラにおいて、定期的

にヘリウム観測を行い、熱水性ヘリウムのフラックスの推定を行ったところ、2015年の桜島の火山活動活発化の時期において若尊カルデラの活動度が変化していなかったことを明らかにした（東京大学大気海洋研究所[課題番号：AORI02]，公募研究[課題番号：KOB032]，Nakajima et al.，2024）。稠密MT観測から2018年に噴火した本白根火砕丘の浅部には白根火砕丘のような釣鐘状cap rockが発達していないことが明らかとなった（東京工業大学[課題番号：TIT_03]，Honda et al.，2023）。2018年本白根山噴火に伴う地震波解析から鉛直開口クラックの上の浅部にシル状の圧力変動源が求まった。このことは、開口クラックを通じて上昇してきた流体の一時的な停留を示唆していることが分かった（東京工業大学[課題番号：TIT_03]，Yamada et al.，2023）。鬼界カルデラ周辺にて行われた反射法地震探査のデータ解析と研究航海にて採取された火砕物堆積物や岩石試料の分析によって、鬼界アカホヤ噴火の噴出物であると認定した堆積層の厚さの変化が、噴出の給源からの積算面積に対して指数関数的に減少すること、そしてその減少の係数が極めて小さいことが明らかになった（神戸大学[課題番号：KOB01]，Shimizu et al.，2024）。また、この研究は、火砕物が希薄な密度流を形成して拡散したこと、巨大噴火により発生した火砕流が、水深が十分ある海中に入ると、水中では希薄な密度流を形成して拡散していくことを初めて明らかにした（神戸大学[課題番号：KOB01]，Shimizu et al.，2024）。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

（4）中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

火山噴火の長期活動については、火山ごとに噴火の特徴と履歴を明らかにするとともに、年代測定精度の向上や階段ダイアグラムの高精度化、物質科学的解析に基づいて評価を行う必要がある。そこで、富士山のマグマ全体の化学的な特徴を把握するために、文献などから計1,417の噴出物の全岩主要元素組成を収集し、このデータセットに対しk-平均法クラスターリング解析（KCA）および主成分分析（PCA）を行った（山梨県富士山科学研究所[課題番号：MFRI_01]）。PCAの結果からは、4つの主成分で全体の95%以上を、6つの主成分で全体の98%以上を説明できることが判明した。第1主成分はマグマの分化過程あるいはマグマ溜まりの違いを反映し、第2主成分は活動期ごとのマグマの系統的な組成変化・違いを反映している。また、詳細なテフラ層序を確立するため、富士山の北麓から東麓で地表露頭調査およびトレンチ調査を実施し、山中湖の堆積物コア試料も活用して地層対比を行った結果、北東麓には指標テフラであるZuとHoの間に比較的規模の大きなテフラ層が6枚あることが明らかとなり、これらの噴火年代の推定も行った（山梨県富士山科学研究所[課題番号：MFRI_01]）。伊豆大島、浅間山、霧島山において、過去数100年の噴火を対象とした噴出物の地質調査を行い、テフラ層の区分や特徴の明確化と、岩石鉱物化学組成・組織など物質科学的情報の収集を進めた（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_03]）。伊豆大島では、歴史時代大規模噴火の噴出物の物性、化学組成、組織分析を行い、大規模噴火に共通する性質および、噴火推移やマグマ溜り条件に制約を与える研究を進めた。とくにY1噴火については噴火様式と噴火推移、マグマの関係を明らかにした成果を論文として出版した（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_03]，

Ikenaga et al., 2023)。高分解能で噴火履歴を解明し、中長期的活動評価と予測を行うために、御嶽火山・秋田焼山等の岩石試料を対象とした感度法K-Ar及びAr/Ar年代測定を実施し、10万年前より若い火山噴出物の噴火年代を明らかにした（産業技術総合研究所[課題番号：AIST03]）。

イ. モニタリングによる火山活動の評価

火山活動の数ヶ月から数年の中期的な時間スケールについては、多項目の地球物理学的・地球化学的なモニタリングにより火山の状態を把握することで、火山現象と噴火の関係を定量的に明らかにする必要がある。人工衛星と地上トラバースによって十勝岳の二酸化硫黄放出率の観測を行った。そして、冬期における1,000トン/日を超える高い放出率の原因を検討した結果、風速の過剰見積りに起因する誤差、積雪時の反射率が適切に考慮されていないことによる誤差、積雪と雲の誤認に起因する誤差にて冬期放出率の過剰な見積りの大半を説明できることが分かり、これらの誤差に対する補正をすることで、冬期においても高頻度かつ高確度の二酸化硫黄放出率データを得ることができるようになった（図4，北海道大学[課題番号：HKD_04]，東京大学理学系研究科[課題番号：UTS_06]，Yamaguchi et al., 2023）。

雌阿寒岳，十勝岳，樽前山，倶多楽，有珠山および北海道駒ヶ岳において、地球化学的・地球物理学的モニタリングを継続して行ったが、明らかな活動の活発化を示唆する変化は確認されなかった。また、雌阿寒岳の温泉・噴気観測の結果から熱水系の概念モデルを構築した（北海道立総合研究機構[課題番号：HR0_01]，Takahashi et al., 2023）。

（5）火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

噴火事象系統樹をさらに発展させ、火山噴火に先行する現象、噴火発生、噴火規模や様式の時間変化、終息までを一連の現象として捉えた火山活動推移モデルを構築する必要がある。そこで、観測データの解析結果や物質科学的データの分析結果を整理して、火山活動推移のモデル化や噴火事象系統樹の分岐判断指標の作成、分岐判断に重要な事象の解析を進めた（東北大学理学研究科[課題番号：THK_11]）。

例えば、十勝岳では浅部の地殻変動源の膨張収縮とマグマからの熱および物質供給の関係を、阿蘇山では噴火前駆地震と噴火様式および規模との関係を議論し、吾妻山では長周期地震からの深部からの流体収支推定が行われた（東北大学理学研究科[課題番号：THK_11]）。さらに、御嶽山や草津白根山については数値モデリングによって、それぞれ高圧流体による火山構造的な地震活動活発化や、湖底熱活動の評価が行われた（東北大学理学研究科[課題番号：THK_11]）。また、日本国内外の噴火に関連する火山活動の推移について、1）噴火前駆過程において地殻変動のみが起こる非破壊性マグマ貫入から、火山構造的な地震を伴う破壊性マグマ貫入への移行、2）マグマ貫入速度と噴火の爆発力が比例、3）古い噴出物を排出して新鮮なマグマを放出、4）マグマ噴火は揮発性成分が卓越する噴火から脱ガスしたマグマ物質が卓越する噴火へ移行するという4段階からなる基本的なモデルを提示した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI06]）。

桜島において地震、地殻変動などの連続観測と、海底地震観測、水準測量、重力測定などのキャンペーン観測を実施した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI07]）。2023年2

月には約5年ぶりに桜島昭和火口で噴火が再開したが、噴火に前駆して噴気が増加し、火山性微動の活動が活発化した。地震計アレイ解析の結果、火山性微動は実体波もしくは表面波からなり、時間的に変化しない火口下の極浅部を震源としていたことが分かった。火山性微動は昭和火口の噴火発生によって消滅したことおよび、振動のピーク周波数と周波数半値幅の時間変化から、火山性微動の震源域と想定される火口直下にあったガスポケットが噴火によって破壊されたと推察した（図5、京都大学防災研究所[課題番号:DPRI07]）。

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

（2）地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

噴火発生直後に火山噴出物などの災害誘因を高精度かつ即時的に予測する手法を開発することは重要である。そこで、堆積物解析手法の高度化と、噴出物時系列解析・分析手法の高度化を目指し、霧島、阿蘇、諏訪之瀬島、榛名、硫黄島、福德岡ノ場等の活動的火山で研究を進めた（東京大学地震研究所[課題番号:ERI_17]）。

霧島新燃岳については、2017-2018年噴火の表面現象・噴火様式推移を、噴火時の調査観察（踏査およびドローン）と火山灰の全岩化学組成分析、軽石の物性および組織分析にもとづき詳細を明らかにした。その結果、観測された噴火様式とその変遷は、山頂火口直下の地質構造とマグマ上昇速度の影響を強く受けたこと、爆発と溶岩ドーム形成を同時に発生するハイブリッド噴火により、2011年噴火には認められない高結晶度の軽石が生じたことなどがわかった。高結晶度の軽石は、準プリニー式噴火には至らない程度のゆっくりとしたマグマ上昇速度を反映した噴出物と考えられ、ハイブリッド噴火特有の噴出物の可能性がある。この研究は、噴出物組織の迅速な解析の重要性を示すとともに、安山岩質マグマの噴火様式多様性の原因について理解を進めることに貢献する（Maeno et al., 2023）。さらに霧島火山群全体については、完新世の噴火履歴を整理するとともに、一回の噴火の規模や噴火様式の変化の共通性等を考慮し、噴火推移パターンを7タイプに分類した。そして、この噴火推移パターンと近年や歴史時代の観測・観察事例、マグマ供給系モデルにもとづき、霧島火山群全体に対する火山活動推移モデルを作成した。また、各噴火事象の発生頻度をもとに分岐確率についての評価も行った（東京大学地震研究所[課題番号:ERI_17]）。

5. 研究を推進するための体制の整備

（1）推進体制の整備

火山災害の軽減するためには、火山活動の推移を把握し、必要に応じて発生しうる火山災害への対策を講じる必要がある。新たな体制となった火山噴火予知連絡会において、2023年7月と2024年2月に定例会が開催され、全国の火山活動の状況について取りまとめられた（気象庁[課題番号:JMA_08]）。また、口永良部島では、約200年噴火が発生していない古岳火口で火山活動が活発化したことを受けて、火山活動評価検討会の地域会合を開催し、火山活動の総合的判断を行った（気象庁[課題番号:JMA_08]）。この会合は火山噴火予知連絡会の新たな体制において初めての地域会合である。さらに、火山調

査研究検討会設立に向けた準備会では、火山噴火に伴うハザードの評価も行う噴火災害特別委員会について、緊急時に機能するための方策を検討した（気象庁[課題番号：JMA_08]）。

（３）研究基盤の開発・整備

火山現象の解明と予測のための研究を進め、災害関連情報の迅速な発信や、火山活動評価の高度化をするためには、観測基盤を維持・整備するとともに、必要に応じて観測体制の強化をする必要がある。全国50火山を対象に地震計、空振計、GNSS、監視カメラ等による連続監視観測を継続した（気象庁[課題番号：JMA_12, JMA_15]）。全国の活火山についてGNSS繰り返し観測、熱観測等の調査的な機動観測を計画的に実施した（気象庁[課題番号：JMA_12, JMA_15]）。阿蘇山や桜島等のガス放出が継続している火山において、二酸化硫黄ガス放出率観測を繰り返し実施し、倶多楽、吾妻山、弥陀ヶ原、口永良部島にてドローンによる可視・熱赤外観測を実施し、火山活動評価に活用した（気象庁[課題番号：JMA_12]）。観測結果については噴火警報、火山の状況に関する解説情報、火山活動解説資料や気象庁ホームページなどにて公表した（気象庁[課題番号：JMA_12, JMA_15]）。光計測技術を用いた重力計と地震計の開発を引き続き実施した。重力計については落下装置の改良を行い、地震計については観測坑道にて性能評価を行い、遠地地震等を観測できる性能を有することを確認した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_20]）。桜島の南岳火口と昭和火口の両方についてミュオグラフィ観測データを解析し、噴火活動のある火口と火口底下の密度に相関を見出し、南岳火口の噴火時期に南岳火口下の密度が高く、昭和火口の噴火時期に昭和火口下の密度が高いことが明らかになった（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_21]）。航空機による南方諸島および南西諸島における海域火山の定期巡回監視観測を実施した（海上保安庁[課題番号：JCG_04]）。西之島と硫黄島については監視体制を強化し、月1回程度の監視観測を実施した。鳥島近海については、測量船による海域火山基礎情報調査を2024年1月に実施した（海上保安庁[課題番号：JCG_04]）。

これまでの課題と今後の展望

この5ヶ年の観測研究計画において、前述の通りいくつかの重要な成果が得られた。その中には、今後の研究に繋がる芽がいくつかある。例えば、非爆発的噴火から爆発的噴火への遷移について溶岩ドームにおける爆発的噴火を支配する指標が得られる可能性がある。VUIの複数の火山への適用に代表されるように、火山活動の定量的評価に関する試みが行われた。火山活動の定量的評価における様々な課題を解決しつつ、火山活動の定量的評価を進め、火山活動推移モデルに基づく予測の試行と検証が次期研究計画において遂行されることを期待する。予測の試行と検証においては、火山体構造推定によって得られた火山現象発生場の理解を進めると同時に、比較的単純なマグマ供給系モデルで噴出量と噴出物組成の時間変化の検討を進めるという方向性がでてきた。噴火活動推移のモデル化をさらに進めることによって、火山災害の推移を事前に検討することができるようになる。これらの課題に対して着実に成果を出すことにより、次期研究計画がより噴火災害の軽減に貢献するものとなろう。

成果リスト

- Conway, C.E., L. R. Pure and O. Ishizuka, 2023, An assessment of potential causal links between deglaciation and eruption rates at arc volcanoes, *Front. Earth Sci.*, 11, 1082342, doi:10.3389/feart.2023.1082342.
- Honda, A., Kanda, W., Koyama, T., Takakura, S., Matsunaga, Y., Nishizawa, T. and Ikezawa, S., 2023, Shallow resistivity structure around the 2018 craters of Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by audio-frequency magnetotellurics, *Earth Planets Space*, 75, 43, doi:10.1186/s40623-023-01799-3.
- 星住英夫・宝田晋治・宮縁育夫・宮城磯治・山崎 雅・金田泰明・下司信夫, 2023, 阿蘇カルデラ 阿蘇4火砕流堆積物分布図. 大規模火砕流分布図, 産総研地質調査総合センター, no., 3.
- 堀田耕平・高橋秀徳・本田裕也・剣持拓未, 2023, 水準測量から明らかになった立山火山地獄谷の再隆起—2020年9月～2021年9月—, *火山*, 68, 2, doi:10.18940/kazan.68.2_83.
- Ichihara, M., Kobayashi, T., Maeno, F. et al., 2023, The sequence of the 2017-2018 eruptions and seismo-acoustic activity at Kirishima volcano group, *Earth Planets Space*, 75, 144, doi:10.1186/s40623-023-01883-8.
- Ikenaga, Y., F. Maeno and A. Yasuda, 2023, Temporal change in eruption style during the basaltic explosive An'ei eruption of the Izu-Oshima volcano, Japan: insights from stratigraphy and chemical composition analyses, *Front. Earth Sci.*, 11, 172615, doi:10.3389/feart.2023.1172615.
- 石崎泰男・沼田和佳子・亀谷伸子, 2023, 草津白根火山のマグマ噴出量階段図, 防災科学技術研究所研究報告, 500, 61-69.
- Kuritani, T., 2023, Geochemical constraints on the evolution of the magmatic system leading to catastrophic eruptions at Aira Caldera, Japan, *Lithos*, 450-451, 107208, doi:10.1016/j.lithos.2023.107208.
- Maeda, Y. and Watanabe, T., 2023, Seismic structure and its implication on the hydrothermal system beneath Mt. Ontake, central Japan, *Earth Planets Space*, 75, 115, doi:10.1186/s40623-023-01870-z.
- 前野 深・池永有弥, 2023, 伊豆大島のマグマ噴出量階段図, 防災科学技術研究所研究資料, 500, 71-77.
- Maeno, F., S. Shohata, Y. Suzuki, N. Hakanishi, A. Yasuda, Y. Ikenaga, T. Kaneko and S. Nakada, 2023, Eruption style transition during the 2017-2018 eruptive activity at the Shinmoedake volcano, Kirishima, Japan: surface phenomena and eruptive products, *Earth, Planets and Space*, 75, 76, doi:10.1186/s40623-023-01834-3.
- 南 裕介・伊藤順一・草野有紀・及川輝樹・大場 司, 2023, 秋田焼山火山における過去6000年間の爆発的活動による降下火砕物の層序, 年代, 化学的特徴. *火山*, 68, 39-57, doi:10.18940/kazan.68.2_39.
- Nakajima, M.T., Takahata, N., Obata, H., Kagoshima, T. and Sano, Y., 2024, An easier approach from helium isotope flux estimation in submerged caldera, *Geochemical J.*, doi:10.2343/geochemj.GJ24004.

- Nishihara A., Y. Tatsumi, K. Kaneko, J. Kimura, Q. Chang, N. Geshi, T. Miyazaki, B. V. aglarov, H. Hinata and K. Suzuki-Kamata, 2024, Voluminous magma formation for the 30-ka Aira caldera-forming eruption in SW Japan: contributions of crust-derived felsic and mafic magmas. *Front. Earth Sci.*, 11, 1283844, doi: 10.3389/feart.2023.1283844.
- Nishimura, T., Kozono, T., Matsumoto, A., Nakagawa, M., and Iguchi, M., 2024, Vulcanian eruptions at Sakurajima Volcano: geophysical data, numerical modeling, and petrological evidence, *Bull. Vol.*, 86, 27, doi:10.1007/s00445-024-01722-y.
- 及川輝樹・池上郁彦・渡部将太, 2023, 多量の漂流軽石を発生させる噴火-南西諸島における軽石の漂着記録とその給源火山の活動から. *火山*, 68, 171-187, doi:10.18940/kazan.68.3_171.
- Ozaki, T., Yukutake, Y., and Ichihara, M., 2023, Linking the flow-induced tremor model to the the seismological observation: application to the deep harmonic tremor at Hakone volcano, Japan, *Earth Planets Space*, 75, 111, doi:10.1186/s40623-023-01865-w.
- Sakurai, R., Nakamura, M., Okumura, S., Mujin, M. and Nakatani, T., 2024, Vapor-phase crystallization from a hydrous silicate melt: an experimental simulation of diktytaxitic texture, *Contrib. Mineral Petrol.*, 179, 23, doi:10.1007/s00410-024-03105-4.
- Shimizu, S., Nakaoka, R., Seama, N., Suzuki-Kamata, K., Kaneko, K., Kiyosugi, K., Iwamaru, H. Sano, M. Matsuno, T., Sugioka, H. and Tatsumi, Y., 2024, Submarine pyroclastic deposits from 7.3ka caldera-forming Kikai-Akahoya eruption, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 448, 108017, doi:10.1016/j.jvolgeores.2024.108017.
- Takahashi, R., Ogino, T., Ohmori, K. and Murayama, Y., 2023, Chemical and thermal changes in hot spring waters and fumarolic gases related to volcanic unrest at Meakandake volcano, Japan: Results of long-term geochemical monitoring from 1986 to 2022, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 443, 107934, doi:10.1016/j.jvolgeores.2023.107934.
- Yamada, T., Terada, A., Noguchi, R., Kanda, W., Ueda, H., Aoyama, H., Ohkura, T., Ogawa, Y. and Tanada, T., 2023, The onset, middle, and climax of precursory hydrothermal intrusion of the 2018 phreatic eruption at Kusatsu-Shirane volcano, *J. Geophys. Res Solid Earth*, 128, e2023JB026781, doi:10.1029/2023JB026781.
- Yamaguchi, K., Tanaka, R., Morita, M., Mori, T. and Kazahaya, R., 2023, Sulfur dioxide flux measurement at Mount Tokachi, Japan, with TROPospheric Monitoring Instrument, *Front. Earth Sci.*, 11, doi:10.3389/feart.2023.1145343.
- Yamamoto, S., Kametani, N., Yoshimoto, M., Miyairi, Y., Yokoyama, Y., 2023, Eruptive history of Mt. Fuji over the past 8000 years based on integrated records of lacustrine and terrestrial tephra sequences and radiocarbon dating, *Quaternary Science Advances*, 100091, doi:10.1016/j.qsa.2023.100091.
- 安田 敦, 2023, 推移予測にはどのような物質科学的データが必要か, 間に合うか, 防災科学技

術研究所研究資料，487，114-118.

安田 敦・亀谷伸子・嶋野岳人・吉本充宏・田島靖久，2023，類似したテフラを識別・対比する定量的な方法の数学的な取り扱いについて，月刊地球，45，55-64.

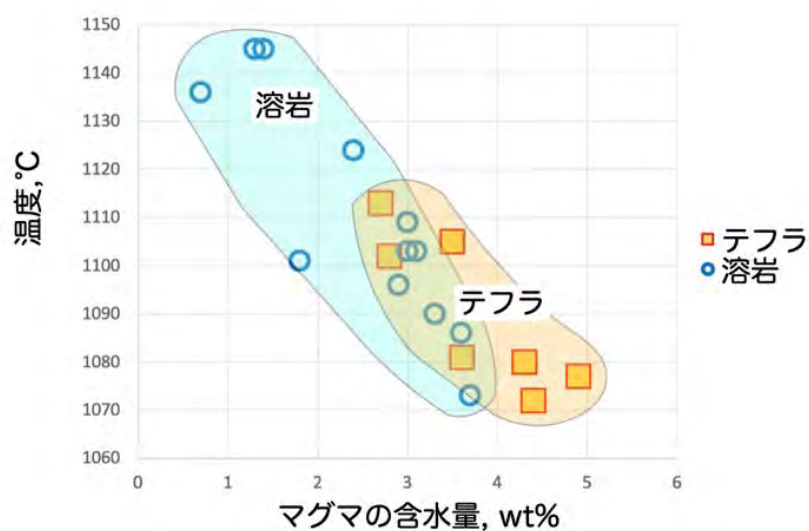


図 1．富士山の溶岩試料とスコリア試料の含水量と温度（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_02]）
含水量が高いと爆発的な噴火をする傾向が見て取れるが、爆発的噴火と非爆発的噴火の範囲は重なっており、含水量と温度以外に噴火様式を制御する要因があることが示唆される。

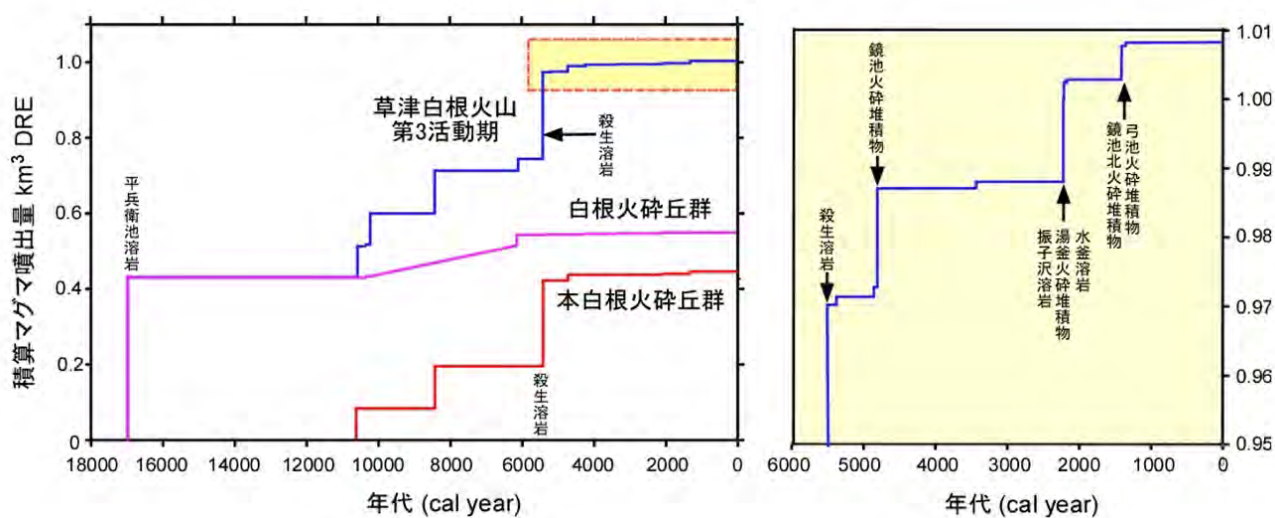


図 2．草津白根火山のマグマ噴出量階段図（富山大学[課題番号：TYM_01]）
最近18,000年間の階段図（左）と最近6,000年間の階段図（右）。逢ノ峰火砕丘群の噴出量は白根火砕丘群と一括して示した。第3活動期とは平兵衛池溶岩の噴出から始まる草津白根火山の最新の活動期のことである。

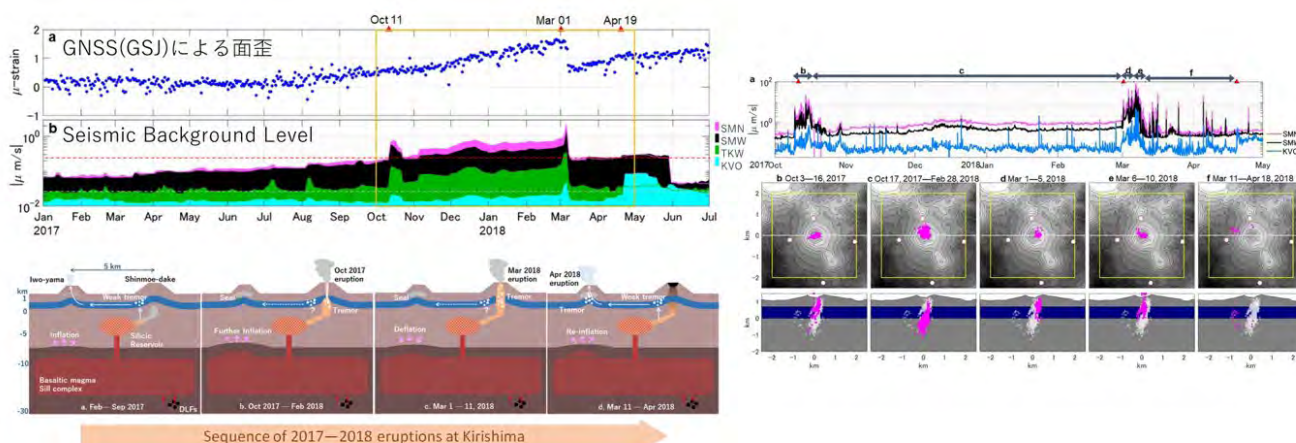


図 3．多項目データから見た霧島火山の2017年～2018年噴火の推移（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_07〕）

GNSSによる面積歪と霧島火山周辺の観測点におけるseismic background leve (SBL)の時間変化（左上）。新燃岳と硫黄山の膨張とSBLが連動していることを示す模式図（左下）。左上図の黄色で示す枠内の期間における連続微動の振幅（右上）。振動源の位置（赤丸）の推移と全期間における微動源の位置（白丸）（右下）。

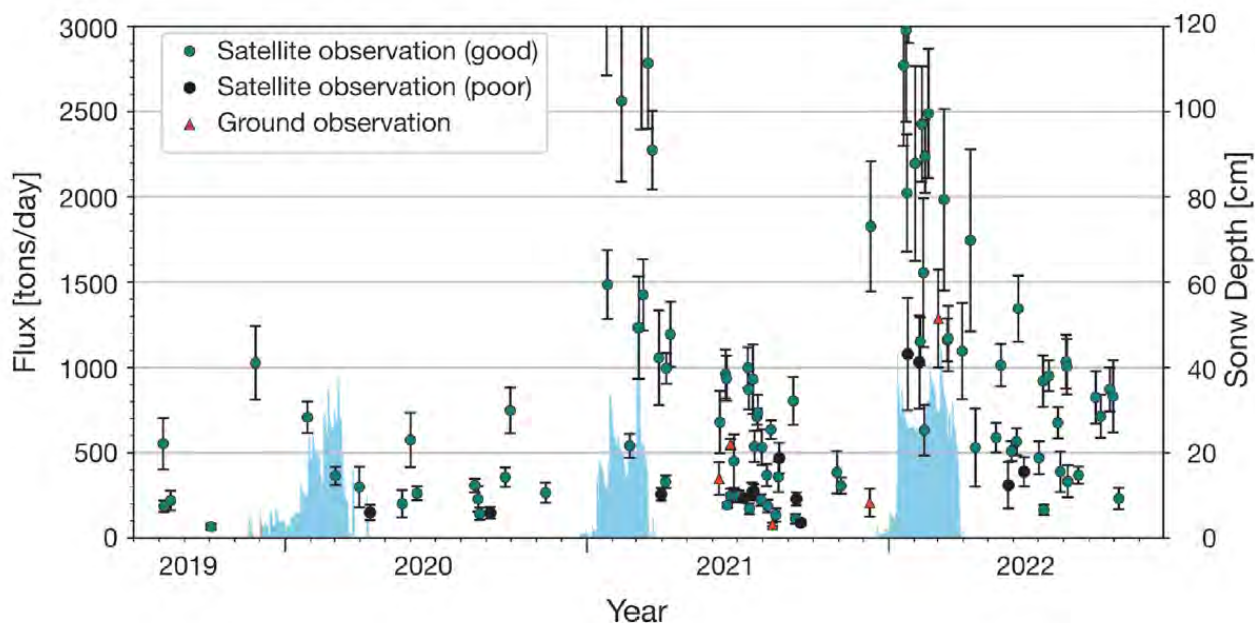


図 4．十勝岳の火口から放出された二酸化硫黄放出率の推移（北海道大学〔課題番号：HKD_04〕）人工衛星データ（OMI, TROPOMI）を利用することで、従来は夏季に限られた放出率データが通年で使えるようになった。背景の水色の棒グラフは積雪高を示す。

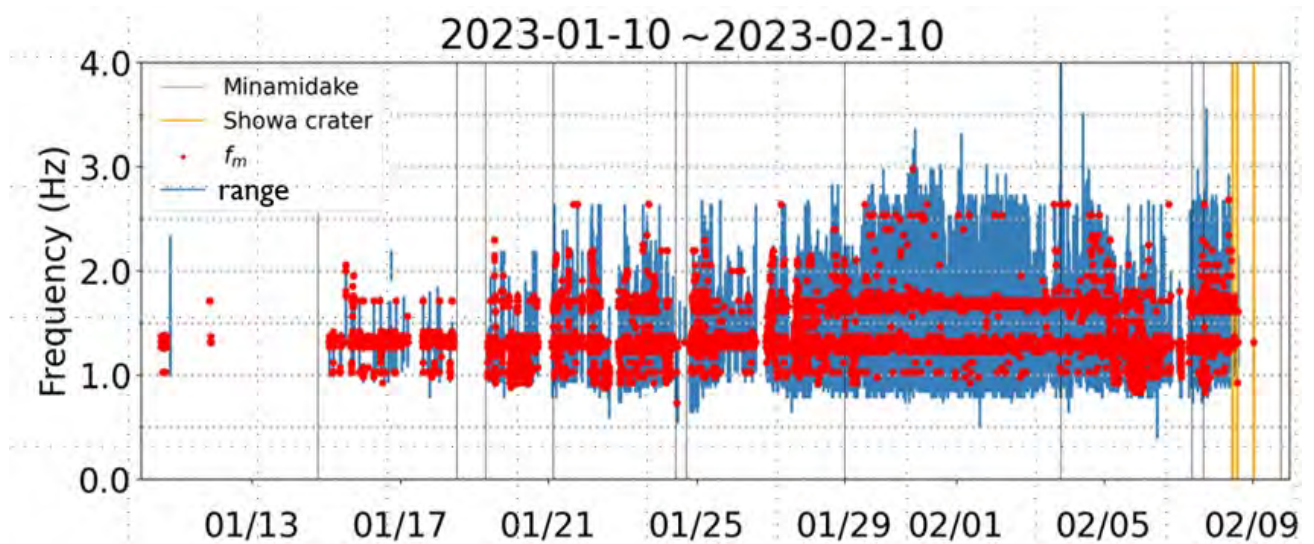


図 5．桜島の昭和火口噴火に前駆した火山性微動のピーク周波数と周波数半値幅の変化（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI07]）

赤丸がピーク周波数を示し，青の縦実線が周波数半値幅を示す。黒色とオレンジの縦実線はそれぞれ南岳山頂火口と昭和火口の噴火・爆発の時間を示す。

1 (5) 災害誘因評価・即時予測

「災害誘因評価・即時予測」計画推進部会長 太田雄策
(東北大学大学院理学研究科)
副部会長 為栗 健
(京都大学防災研究所)

はじめに

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

5 年間(令和元年-5 年度)の成果

5 年間の成果概要

本部会では、事前予測については強震動および斜面崩壊、また土石流や火山噴火にともなう火砕流等を、即時予測については強震動や津波、火砕流等をその対象として研究を推進してきた。その結果、いずれの項目についても、災害軽減に資する重要な成果が得られた。以下、大学が実施した研究の5年間の成果のうち、代表的なものをまとめる。

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

広帯域強震動予測の高度化のため、強震動予測のための震源断層モデルや広帯域地震動特性に強く関係する浅部・深部地盤構造モデルの検証と改良を目的とし、大阪・京都・奈良盆地の地盤構造モデルに対して、対象地域の各機関の強震観測波形データを収集し、地震動シミュレーションを実施して観測記録と比較することにより、モデルの妥当性の検証や改善点の洗い出しを実施した。また、モデル構築時に用いられていない探査データを取り入れる方法を開発し、モデルの修正を行った。また、強震記録を用いたスペクトルインバージョン法により、静岡県及び北陸地域における強震観測点のサイト増幅特性を求めた(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI08])。

計画期間中に発生した顕著な地震の震源過程を、強震記録を用いて求め、その特徴をこれまでの解析で進めてきている強震動予測のための震源断層モデルの統計的特徴と比較することにより、モデル設定の妥当性やばらつきを評価するとともに、極大地震動の特徴

について震源過程や地盤構造の観点から検討し、それらのモデルの高度化に必要な要素を抽出した。具体的には 2018 年北海道胆振東部地震 (M6.7), 2023 年能登半島北部の地震 (M6.5), そして令和 6 年 (2024 年) 能登半島地震 (M7.6) の分析を進め、例えば 2018 年北海道胆振東部地震 (M6.7) では強震記録をもちいた断層破壊過程を推定して、すべりの特徴を分析するとともに、広帯域地震動シミュレーションにより、強震動生成域 (SMGA) の位置を求め、従来の強震動予測のための震源断層モデルの考えが妥当であることを示した。地盤構造の観点からは、例えば、2024 年能登半島地震において、微動や小地震での卓越周期が 1 秒程度である地点で長周期化が起き、一般家屋でより厳しい周期の地震動が長時間続いたことで被害が拡大した可能性があることを指摘した (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI09])。

2000 年鳥取県西部、2016 年鳥取県中部の地震など西日本の地殻内地震で観測され、変位振幅から推定する M_j の過大評価の原因となる、周期 6~20 秒の Love 波パルスの生成メカニズムを、地下構造と Love 波の群速度の分散曲線との特徴から説明した (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14])。深発地震で太平洋岸での震度が大きくなる異常震域に対し、2013 年オホーツク海深発地震 (610 km, Mw8.3) では、稚内や秋田など日本海側の震度が大きな、通常と逆の震度分布となった。Hi-net 波形解析と地震波伝播シミュレーションにより、この原因が、1) 上部/下部マントル境界での S 波の caustics, 2) 地表での sP 変換波と sPL 波, 3) 地表での sS 反射波であることを確認した (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14], Kennett and Furumura, 2019)。地震波伝播シミュレーションオープンコード (Open SWPC; Maeda et al., 2017) の国内外からのフィードバックを受けて機能拡張を行った (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14])。

常時微動を用いて建物振動特性を把握するため、複数台の地震計による同時観測から、並進およびねじれ振動を分離し、人力加振によらずとも減衰特性を抽出できる RD 法の導入により、簡易判定に必要な固有周期と、減衰および地盤に対する振動倍率を評価するルーチンを確立した (鳥取大学 [課題番号: TTR_01])。

熊本地震の際の建物被害を分析し、地表地震断層から百メートルの範囲に集中すること、被害率と断層距離との間に負の相関があること、またその原因を地盤効果等で説明できないことを明らかにするとともに、地下 2 km 以深にのみ震源断層モデルを想定する従来の手法では地表変位や地震動を説明できないことを明らかにした。さらに、地表地震断層と深部の震源断層モデルを接合させる手法を検討し、新たな強震動発生モデルの検討を進めた (名古屋大学 [課題番号: NGY_05])。

イ. 津波の事前評価手法

巨大地震に伴う海底斜面崩壊による津波の数値計算手法を開発し、1929 年 Grand Banks Tsunami の再現実験に適用した。海底斜面崩壊による津波の励起の数値計算は Tsunami Square の手法を改良し、海底斜面崩壊と津波を同時に計算した。その結果、Halifax (カナダ) の検潮記録と海底ケーブルの切断時間を再現できる海底斜面崩壊モデルを推定する事に成功した。火山島の山体崩壊による津波の即時予測手法の開発も行い、2018 年アナクラカトア火山噴火 (インドネシア) による地すべりを念頭に、クラカトアの周辺の諸島に 6 つの仮想観測点での津波波形が得られるものとして、これらの地点での波形を用いて、ジ

ャワ島西岸やスマトラ島東岸での津波を予測する手法を開発した（北海道大学[課題番号：HKD_05]）。

ウ．大地震による災害リスク評価手法

シナリオ地震の強震動評価として，日本で開発された強震動予測手法を国際的なプラットフォームに実装すると共に，確率論的地震動評価に役立つ，地震動予測式の非エルゴード性の定量化を行った。これにより，世界複数国の重要構造物の入力地震動に検討される可能性が生まれた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_16]）。

エ．地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

崩壊発生場の抽出に関する成果として，主に南海トラフ巨大地震時の深層崩壊を念頭に置き，過去の斜面崩壊に共通する地質的特徴の洗い出し，高密度航空レーザーデータや国土地理院による干渉 SAR 解析画像を用いた危険斜面の抽出，地震時に斜面崩壊を発生しうるテフラの分布図（東日本版）を作成した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI10]）。地すべり発生地の空間的に多様な地震動特性の抽出，地すべり変位の地震直前の安全率依存性，盛土材質による間隙水圧応答特性の違い，粘土鉱物ハロイサイトの構造の違いとせん断特性などについて明らかにした（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI10]）。地震地すべりの先行降雨の影響を見積もるため，および，強震後の長期的な斜面の変形を明らかにするため，傾斜計・間隙水圧計・インターバルカメラを 2016 年熊本地震で崩壊した熊本県南阿蘇村のテフラ斜面上方に設置し，令和 3 年度から観測を継続し，年間 0.005 度程度の傾斜変化を伴う定常的な変形が現在も進行していることを確認し，さまざまな降水イベントに対する土壌水分の時間変化を捉えた（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI10]）。

山間部での地すべりや氷河計測を対象とした GB-SAR データを活用し，大気誤差補正アルゴリズムを提案した。特に，屈折率の変化が InSAR の位相に与える影響を統計的に表し，補正手法に組み込むことで，山間部などの大気の状態変化が著しい場所でも高精度に変位を計測できることを実証した（東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID03]）。

オ．火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

火砕流の発生予測に関して，地盤変動，火山性地震，空気振動，火山ガス，映像等の観測データを収集し，火砕流発生に関わる物理パラメータを明らかにした。火砕流を伴う噴火は長期的に収縮傾向の脱ガスが進んでいる際に発生し，噴火直前に見られる地盤変動の膨張時間，前駆地震の発生頻度と振幅の上昇から火砕流の発生危険度のリアルタイム予測の検討を行った（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI11]）。火砕流の発生危険度および，流下予測をリアルタイムに判定し描画するシステムの構築を実施した。発生危険度については，前駆する群発地震活動と地盤変動の膨張・停滞の変化から，危険度を上げて危険度を色表示し，地盤変動膨張量からその時点で噴火が発生すると，火砕流としてどの程度流下するかをリアルタイム表示するシステムを作成した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI11]）。

（２）地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測手法

鳥取県内を中心に、微動および重力探査を実施し、地盤震動特性および地下構造を把握し、Web-GIS としてとりまとめた。対象としては、地震被害に影響する厚い堆積層を有する地域を均一に測定することを主としつつ、地すべり地形、切盛造成地、地表地震断層ごく近傍など、山間部での地震被害が懸念される領域にも広げた（鳥取大学[課題番号：TTR_01]）。鳥取県内 34 計測震度観測点からの 1 秒パケットでリアルタイム震度を表示する Web 公開（クローズ・ネットワーク）するシステムを構築した（鳥取大学[課題番号：TTR_01]）。

強震観測波形データと地震波伝播シミュレーションのデータ同化に基づく、未来の時刻の揺れの広がりや長周期地震動の即時予測に向けた研究開発を行なった。2007 年新潟県中越沖地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震の K-NET, KiK-net 強震波形と東京大学情報基盤センターの Oakforest スパコンの超並列（2048CPU）計算により、都心で強い揺れが発生する数十秒前に揺れの波形予測の実現性を確認した（Furumura et al., 2020）。さらに、即時予測の高速化に向けて、同化地点から予測地点の揺れの伝播を、伝達関数（グリーン関数）を用いて瞬時に予測する手法改良を行った（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_14], Oba et al., 2019）。

同化波動場からの地震波の逆伝播計算により、震源イメージングを行う新たな手法開発を行なった。KiK-net データを用いて 2004 年新潟県中越地震と 2008 年茨城県沖の地震の震源イメージングを実行し、従来の Back Projection 法や Time Reversal 法に比べて粗い（20 km 程度）観測点配置でもシャープな震源モデルが得られることを確認した（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_14], Furumura & Maeda, 2021）。

イ. 津波の即時予測手法

リアルタイム GNSS による震源断層即時推定における不確実性の定量評価をマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC）で行うための技術開発を行い、単一の矩形断層モデルをリアルタイム GNSS による永久変位場から推定する Real-time automatic UNcertainty Estimation of the coseismic single rectangular fault model based on GNSS data (RUNE) を開発した。RUNE の精度評価を実施し、2022 年 3 月 16 日に発生した福島沖の地震の断層モデルを自動推定することに成功した。これらの結果を受け、RUNE は次期の REGARD 内の 1 枚矩形断層推定のメインアルゴリズムとして実装・運用されることが決定した（東北大学[課題番号：THK_12]）。ハミルトニアンモンテカルロ法（HMC 法）を用いた 1 枚矩形断層モデル推定アルゴリズムの開発を行い、メトロポリスヘイスティングス(M-H)と比較して数%程度の連鎖数で必要な事後確率分布が得られることを明らかにした（東北大学[課題番号：THK_12]）。

ソフトバンクが運用する独自 GNSS 観測網データを用いて、2021 年 2 月 13 日に福島沖で発生した M7.3 の地震による地震時地殻変動場を検出することに成功した。「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」を設立し、地震学・火山学を含む幅広い地球科学用途でのデータの利活用に道筋を付けた（東北大学[課題番号：THK_12]）。

最適内挿法に基づくデータ同化による津波即時予測の応用と、次世代に向けた高精度な

手法の開発とその準備を進めた。具体的にはグリーン関数型津波データ同化手法の実観測記録への活用や、データ同化手法と組み合わせることを前提とした経験的モード分解法に基づく津波検知手法の開発（令和元年度）と実応用、地震動や海底の動的変動まで含んだより現実的な数値記録合成法の開発等を通じて、データ同化による津波即時予測における基礎技術を確立した（弘前大学[課題番号：HRS_02]）。

ウ．火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

火山防災上重要な2つの現象、すなわち火山灰堆積後の降雨による土石流・泥流の発生および噴火時の融雪型火山泥流の発生に関して、その危険度や規模を予測する手法の確立を目的とし、桜島火山、焼岳火山、メラピ火山等の火山を対象に観測と予測モデル開発を行った。時間的に変化する泥流・土石流の発生危険度や規模を予測する手法を検討するとともに、融雪型火山泥流の発生に関する従来の研究をさらに進展させた（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI12]）。

（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

過去約110年間の世界の地震カタログを用いて、M8クラスの地震が近傍で連発する確率（半割れケース）、M7クラスの地震のあとに近傍でM8クラスの地震が発生する確率（一部割れケース）の評価を行った。南海トラフにおける過去の歴史研究や地質学の研究の文献を系統的にレビューし、過去の南海トラフ地震発生履歴における連発の有無や可能性について再評価した。その結果を用い、南海トラフの固有性を考慮したM8クラス地震の連発確率を評価した。また、半割れ地震が起こったあとの後発地震による津波リスクの評価手法も検討した（東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID04]）。

地震学・火山学の成果として可視化・定量化・精緻化されてきている災害情報が、市民・社会の防災対策の推進に必ずしもつながっていないのではないかという問題意識にもとづき、地震学・火山学におけるシーズと社会の側のニーズが一致していないこと、地震学者・火山学者と社会の間にコミュニケーションギャップが存在することを明らかにした。例えば、地震調査研究推進本部が作成している地震動予測地図では「30年確率」を用いているが、受け手側の年代によって対策の必要性の意識が高まる「x年確率」の値が異なることが明らかになった（東京大学情報学環[課題番号：III_01]）。

令和5年度の成果概要

3．地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

（1）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア．強震動の事前評価手法

京都盆地及び奈良盆地内を対象に、国立研究開発法人防災科学技術研究所、気象庁、京都市、京都府及び奈良県の強震観測点・震度観測点の波形記録を収集、整理、解析した。収集した波形記録に対し、直達波部分のTransverse成分の自己相関関数を計算し、多数の記録の自己相関関数をスタックすることで得られる盆地基盤面での反射SH波の往復走時を読み取った。スタックにはPhase Weighted Stack法を用い、震央距離と震源深さ、入射

角による地震記録選択条件を与えた。その結果、奈良盆地の多くの地点では観測往復走時と理論往復走時の差異は20%以内であるが、山科盆地と京都盆地の境界付近の狭窄部や基盤形状急変部などでは顕著な差異がみられ、より詳細な調査が必要と考えられる地点が見出された（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI08]）。

2023年5月5日能登半島北東部の地震（M6.5）の震源過程および強震動生成モデルを推定した。M6.5の地震の震源過程については、能登半島周辺の強震波形（速度，0.1-1 Hz）を用い、マルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法によって推定した。その結果、破壊開始点（約12 km）より北の浅部に向かって、主として破壊が進行したと推定された。すべり方向は逆断層すべりが卓越し、最大すべり量は約1.0 m、平均すべり量は約0.3 mと推定された。また、M6.5の地震の震源断層は、2022年6月19日のM5.9と同じ断層面（南東に下がる断層面）に位置し、2022年6月19日のM5.9の地震よりも浅い部分を破壊したことが示唆された。M6.5の断層破壊過程モデルを参照し、震源近傍の観測点の広帯域シミュレーションに基づく強震動生成モデルを求めた。波形からは初期破壊過程があることがわかっていることから、震源から離れたところに強震動生成域の推定を行った。その結果、震源より浅い場所に3 km四方の強震動生成域をおくことで、広帯域波形の再現ができた。この位置は波形インバージョンによるすべりの大きい領域に対応する（図1，京都大学防災研究所[課題番号：DPRI09]）。

地表付近の強震動計算の高度化に資するため、とくに震源断層浅部の破壊進展を新たにモデル化して強震動を試算した。具体的には、2016年熊本地震を対象として、すべり時間関数形状・すべり量・ライズタイムについて複数の手法に基づきモデル化に必要なパラメータやそれぞれのモデルの特徴を整理した。続いて、震源断層が地表に達する断層モデルを想定し、断層浅部のモデル化におけるすべり時間関数、すべり量、破壊伝播速度についてパラメータスタディを行って断層近傍強震動の計算結果に与える影響を調べた（名古屋大学[課題番号：NGY_05]）。

イ．津波の事前評価手法

前年度までに実施してきた1929年Grand Banksの津波の再現実験を完成した。オリジナルのTsunami Square数値計算手法は海底斜面崩壊に対応できるよう改良した。斜面崩壊は地震によりトリガーされたとし、震源近傍の急斜面で最初に発生し、その崩壊が徐々に深海域へと進展するモデルを開発する事で、海底ケーブルの断線時刻を再現し、さらに崩壊量はHalifax（カナダ）の検潮記録を再現することで推定した。崩壊量は540立方kmと推定された（図2）。火山性の山体崩壊の津波の即時予測手法の開発においては、駒ヶ岳山体崩壊に津波について実施した。まず、1640年駒ヶ岳山体崩壊による津波の再現実験を実施し、津波堆積物調査結果や崩壊地形などを再現できる山体崩壊のモデルを推定する事に成功した。さらに、将来発生するであろう山体崩壊による津波の特性を数値実験により明らかにし、将来噴火湾沿岸の津波を予測するための手法開発への基礎的知見を得る事に成功した（北海道大学[課題番号：HKD_05]）。

ウ．大地震による災害リスク評価手法

強震動による地震災害誘因の分析に必要な、国内外の地震に対する強震動記録の分析や

強震動予測を進めると共に、地震動予測式の非エルゴード性に関する日米比較を取り入れた国際共同研究を行った。その結果、国際的に構築された沈み込み帯の地震動フラットファイル NGA-Subduction に比べ、日本の強震観測網による地震動フラットファイル NIED flatfile が不確実性を排除するために非常に有効であることを定量的に確認した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_16]）。

鳥取市鹿野町に立地し、1943 年鳥取地震を経験した伝統的木造建築物（文久年間 1861-1863 建築）において実施した微動観測結果に整合するように稠密にモデル化し、個別要素法による震動実験をおこなった。その結果、現在の住宅に適用される、固有振動数と減衰および地盤に対する応答倍率から評価される簡易判定よりも高い耐震性を有することが示唆された（図 3，鳥取大学[課題番号：TTR_01]）。

エ．地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

四国・九州内における過去の災害履歴を検討し、付加体地域内に分布する砂岩領域において地すべり・深層崩壊が多発していることを明らかにした。砂岩が顕著に崩壊を発生させることはこれまで知られていなかったが、特に砂岩地域の中でもメランジュと呼ばれる変形帯の砂岩は深部まで亀裂が形成されており、さらには断層破碎作用によって中小角礫化している場所も分布していることを明らかにした。また、2022 年 12 月 31 日に融雪による間隙水圧の上昇で発生したと考えられる山形県鶴岡市の斜面崩壊について、2019 年 6 月 18 日の山形県沖の地震時に崩壊しなかった理由について現場で採取した試料に対してリングせん断試験を実施することで明らかにした（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI10]）。

インドネシアのメラピ火山は、過去に溶岩ドームの崩落が頻繁に発生し、大規模な被害を引き起こしてきた。2020 年頃から、メラピ山の溶岩ドームの一部が十数メートル変位しており、将来的には崩落し火砕流を引き起こす危険性が懸念されている。この背景から、GB-SAR 高精度化アルゴリズムを用いた溶岩ドームの計測を提案し、令和 5 年度は、その実現に向けた準備を進めた（東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID03]）。

オ．火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

昨年度に構築した地盤変動、火山性地震、空気振動、火山ガス、映像等の観測データから火砕流の発生危険度をリアルタイム判定するロジックを高度化し、過去の火砕流発生時の前駆現象から危険度を判定するパラメータのチューニングを行い、より適切な火砕流発生危険度を評価可能にした（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI10]）。

（２）地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア．地震動の即時予測手法

鳥取平野を対象に、鳥取県の地震被害想定（2018 年度）に用いられた地下構造モデルを新たな視点で更新した。平野内の地震観測点において拡散波動場理論を介して地震基盤までの地下構造モデルを推定して物性の標準値を設定し、微動大アレイ観測点での位相速度分散曲線と微動 H/V の卓越周期を満足するよう標準値に基づく地下構造を推定した。これら地震波速度に基づく層境界と面的に実施されている重力異常に基づく密度層境界の対応を吟味して、重力異常の形状を用いた RBF 法（CG における点群補間に活用されている）

による面的補間をおこなうことで、対象領域で実施された微動観測を満足する3次元地下構造モデルを構築した（鳥取大学[課題番号：TTR_01]）。

2 観測点間の地震波伝播を表す伝達関数を、2 観測点の強震波形データのデコンボリューション（逆畳み込み）から予め求めてデータベース化し、大地震の強震観測記録に伝達関数をコンボリューション（畳み込み）することで、遠地の地点の揺れを即座に予測する手法の有効性を検討した（Enari and Furumura, 2023；江成, 2024）。具体的には2007年新潟県中越沖地震（M6.7）の際の横浜地点の長周期地震動の予測を行った結果、観測された長周期地震動の波形と良く一致することを確認した（図4，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_14]）。

イ．津波の即時予測手法

アジョイント方程式に基づく波動場現況推定手法の定式化をさらに拡張し、波動方程式に類する一般の方程式に対して、その時間発展を支配する微分方程式から、アジョイント方程式を最適制御理論に基づいて導出するための一般的な方法論を検討した。その応用として、津波のみならず、地震波を記述する弾性体の運動方程式と、異方性を含む一般的な線形構成関係式に対するアジョイント方程式も導出した（前田, 2023a）。津波の場合と同様、運動方程式と構成関係式に形式上等価な量（アジョイント変数）に関する方程式を、終端0条件から時間逆方向に解いた初期値時間における解が、観測と予測の間の2乗残差を最小化する目的関数の、初期条件場に対する勾配に関係することが示された。ただし、アジョイント変数が実空間の速度応力にそのまま対応するのではなく、特に応力テンソル相当のアジョイント変数は、弾性コンプライアンステンソルを介して実空間の応力テンソルの更新に寄与することが明らかになった。これは、これまでの津波方程式のアジョイント方程式に数学的に等価な地震波のSH波の方程式系に対して、応力相当のアジョイント変数は剛性率で除すことで、実空間の応力に変換していたことを一般化するものである（弘前大学[課題番号：HRS_02]）。

国土地理院で運用しているREGARDへと技術移転した1枚矩形断層推定をMCMC法によってリアルタイムで実現するアルゴリズム “Real-time automatic uncertainty estimation of the coseismic single rectangular fault model based on GNSS data (RUNE)” の精度評価を継続した。2024年1月1日に発生した能登半島地震発生時に、RUNEによって断層モデルを自動推定することに成功した。推定された地震規模はMw7.4であり、地震規模はおおよそ正確に推定することに成功した。データの欠落等により能登半島内で使用できた観測点が減少したことから、断層の傾斜角を過小評価するなどの課題も確認できた（東北大学[課題番号：THK_12]）。

令和4年度に構築した「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」（図5）の活動を活発化させ、3300点超の全データを専用線経由でソフトバンクから東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センターに集約し、それらをコンソーシアム加盟機関に提供する枠組みを構築するとともに、それらデータのルーチ的な日座標解析のシステム構築を実現した（東北大学[課題番号：THK_12]）。

ウ．火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

焼岳火山北西の足洗谷流域を対象として、土砂動態シミュレーションモデル SiMHiS を用いて土石流発生ポテンシャルの変動に関する検討を行った。足洗谷流域では、凍結・融解作用で基岩が土砂化し、河道に不安定土砂として供給される。過去の観測により、河床に堆積した土砂が豪雨によって土石流化すると示唆されている。そのため、本研究では土石流の起源となりうる源頭部河道での河床堆積物の厚さを土石流ポテンシャルの指標とした。土石流が 2019, 2020 年に発生した 2 支流（白水谷、黒谷）での土石流発生ポテンシャルを検討した。毎年の凍結・融解作用で生産された土砂により河床堆積土砂が増加し、ポテンシャルが、ある程度高まった状態で豪雨を受けると土石流が発生し、堆積物が全て流出することでポテンシャルは 0 となり、また経年的にポテンシャルが増加していく、というサイクルを再現することができた（図 6，京都大学防災研究所[課題番号：DPRI12]）。

（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

高知県において、南海トラフにおける M8 クラスの地震の連発の発生確率等に関する成果報告をするとともに、南海トラフ地震臨時情報の実効的活用に向けた課題に関する意見交換を行った。その結果、市民の理解不足や興味不足の課題が浮かび上がり、今後も臨時情報の啓発等のために連携を継続していく方針を確認した。また、静岡県とも連携し、臨時情報に関する啓発セミナーの講師を務めるなど社会発信をしつつ、自治体やメディア関係者等と意見交換を行った（東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID04]）。

首都直下地震に関する認知体系について、都民に対するアンケート調査をもとに明らかにした。その結果、そもそも国（内閣府）や東京都の公表している被害想定の内容に対する認知が低く、信頼性に課題があること、また、それらを住民が認知したとしても、その内容に沿った地震対策が行われるわけではないということが実証された。かつ、「都民の考える被害想定」も地震対策に結びついていないわけではないことが明らかになった（東京大学情報学環[課題番号：III_01]）。

今後の展望

5 か年の研究計画における最終年として、それぞれの個別課題において既往研究成果の高度化が順調に進展するとともに、特に地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究については、新規課題として新しい成果を得た。今後は、さまざまな手段で推定される災害誘因予測の情報をよりの確に災害情報につなげるための研究を加速させるとともに、事前・即時予測技術のさらなる底上げが重要になると考える。

成果リスト

荒井紀之・山崎新太郎・土井一生，2023，三波川帯における深層崩壊斜面の地震動計測－高知県大豊町トウジ山の地すべりを事例として－，日本地すべり学会誌，60，6，doi:10.3313/jls.60.265.

Asano, K. and T. Iwata, 2023, Rupture Process and Strong Ground Motions of an M6.5 Earthquake in a Long-lasting Earthquake Swarm in the Northeastern Noto Peninsula, Japan, AGU 2023 Fall Meeting, S13D-0383.

浅野公之・岩田知孝，2023，強震波形記録による2023年5月5日石川県能登地方の地震（M6.5）の震

- 源過程，日本地震学会2023年秋季大会，S22-08.
- 浅野公之・岩田知孝・関口春子，2024，不均質震源断層モデルのすべり角のばらつき，地震第2輯，76，287-294，doi:10.4294/zisin.2023-14.
- 浅野公之・岩田知孝・関口春子，2023，不均質震源断層モデルのすべり角のばらつきの特性化，日本地球惑星科学連合2023年大会，SCG60-P02.
- 浅野公之・関口春子・岩田知孝，2023，強震記録の自己相関関数を用いた京都－奈良盆地深部地盤構造モデルの検証，第16回日本地震工学シンポジウム，DDay1-G417-15
- 地頭菌隆，2023，諏訪之瀬島の降灰状況および土石流発生の危険性確認調査報告，令和5年度鹿児島県土砂災害対策アドバイザー会議
- 土井一生・釜井俊孝，2023，谷埋め盛土における地震時の過剰間隙水圧の振る舞い－横浜市内における観測データからの結果－，日本地すべり学会誌，60，2，doi:10.3313/jls.60.72.
- 土井一生・釜井俊孝，2023，谷埋め盛土における稠密常時微動観測，（公社）日本地すべり学会第62回（2023年度）研究発表会，2-8.
- 土井一生・松浦純生・大澤光・岡本隆・柴崎達也・土佐信一，2023，稠密地震観測から推定される地すべり内の地震波伝播の不均質性（その2），Japan Geoscience Union Meeting 2023，SSS07-P02.
- 江成徹平・古村孝志，2023，強震波形記録による伝達関数を用いた長周期地震動の即時予測の数値実験，日本地震学会2023秋期大会，S15-02.
- 江成徹平・古村孝志，2023，長周期地震動の即時予測に向けた地震波干渉法によるグリーン関数の活用，日本地球惑星科学連合2023大会，SSS09-15.
- ERSOZ, T. and Y. GONDA, 2024, Investigation of different lahar types with rainfall intensity duration curves in Arimura river basin of Sakurajima volcano, International Journal of Erosion Control Engineering, 17(1), 1-14, <https://doi.org/10.13101/ijece.17.1>.
- Ersöz, T., K. Haneda, A. Kuribayashi, Y. Gonda, 2023, Temporal changes in lahar sediment run-off characteristics and run-off coefficients in the Arimura River basin of Sakurajima volcano, Japan, Earth Surface Process and Landforms, 48(14), 2682-2703, <https://doi.org/10.1002/esp.5654>.
- Ersoz, T., K. Haneda, A. Kuribayashi, Y. Gonda, 2023, Temporal Change of Lahar Runoff Coefficient in Arimura River Basin of Sakurajima Volcano, Proceedings of INTERPRAEVENT 2023, P2-5.
- 福島洋，2023，「南海トラフ地震臨時情報」を知り地震によりよく備える，第153回ふじのくに防災学講座.
- 福島洋・中鉢奈津子・栗山進一，2023，行動変容に着目した地震防災の取り組みの試行的体系整理と地震警戒・注意情報の有効活用へ向けた検討，第16回地震工学シンポジウム.
- Furumura, T. and BLN Kennett, 2023, Distinctive seismic reflections from the subducting Pacific slab for earthquakes in the Ryukyu arc, Geophys. J. Int., 233, 1213-1228, <https://doi.org/10.1093/gji/ggac514>.
- 古村孝志，2023，物理情報ニューラルネットワーク（PINN）を用いた津波伝播評価，日本地球惑星科学連合2023大会，SCG55-P14.

- 古村孝志・大石裕介, 2023, 深層学習に基づく長周期地震動の即時予測実験(その2) 高層ビルの揺れの予測, 日本地震学会2023秋期大会, S15P-10.
- 羽田京香・権田豊・Timur Ersoz, 2023, 桜島有村川流域における土石流の流出解析モデルの改良～表層の浸透過程の再検討～, 令和5年砂防学会研究発表会, 401-402.
- 林能成・高橋浩晃・元吉忠寛, 2023, 北海道における北海道・三陸沖後発地震注意情報の認識状況とその地域差, 社会安全学研究, 14.
- Hayashi, Y., 2023, Correction of Applied Equations used to Assess the Amplification between Offshore and Coastal Tsunami Heights, Journal of JSCE・土木学会, 11, 23-17036, 10.2208/journalofjsce.23-17036.
- Hayashi, Y., 2023, Examining the reliability of historical teletsunamis reaching Japan using literature review, 第28回国際測地学地球物理学連合総会(IUGG2023), JP05p-084, 10.57757/IUGG23-0802.
- 林 豊, 2023, 1780年ウルフ島地震による日本への津波到達に関する真偽の検証, 歴史地震・歴史地震研究会, 38, 1-14, <http://histeq.jp/kaishi.html>.
- 林 豊, 2023, 文献調査による日本への歴史遠地津波の真偽の検証, 第40回歴史地震研究会, P-14.
- Hayashi, Y., M. Kiyomoto, G. Tange, K. Noguchi, S. Harada, and Y. Nishimae, 2023, Modifying the pre-computed tsunami database for real-time tsunami forecasting after the 2016 off-Fukushima earthquake by an unpredicted mechanism, 第28回国際測地学地球物理学連合総会(IUGG2023), IUGG-0781, 10.57757/IUGG23-0781.
- Hayashi, Y., M. Kiyomoto, G. Tange, K. Noguchi, S. Harada, and Y. Nishimae, 2023, Modification of the pre-computed tsunami database for real-time tsunami forecasting by the JMA: Response to the 2016 off-Fukushima earthquake by the unexpected mechanism, 11th International Conference on Asian and Pacific Coasts 2023, Paper 148.
- 日高一・香川敬生・野口竜也, 2023, 微動観測による鳥取県第2庁舎の振動特性の把握, 第75回2023年度(令和5年)土木学会中国支部研究発表会, I-6.
- 日野亮太・久保田達矢・近貞直孝・太田雄策・大塚英人, 2023, 地殻変動検知に向けたS-net海底水圧データのノイズレベル評価, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS12-P05.
- Hirata, k., R. Hino, H. Otsuka, Y. Ohta, N. Usui, 2023, Revisiting seafloor pressure records prior to the 2011 Tohoku earthquake, AGU Fall Meeting 2023, G43B-0492.
- 平田京輔・日野亮太・大塚英人・太田雄策・碓氷典久, 2023, 2011年東北沖地震以前の海底水圧データの再解析, 日本地震学会2023年度秋季大会, S43-07.
- Hoshiba, M., 2023, Does moment magnitude matter for earthquake early warning in the near-fault region?, 5th International Conference of Earthquake Early Warning
- Hoshiba, M., 2024, Overview of the 2024 Noto peninsula earthquake, 2024 Northern California Earthquake Hazards Workshop.
- Hoshiba, M., 2024, Review of nationwide earthquake early warning in Japan: 15 years' operation by JMA, 2024 Northern California Earthquake Hazards Workshop.
- 飯沼卓史・木戸元之・福田達也・太田雄策・富田史章・プラターマルティネス ライムンド・日野亮太・高橋浩晃・堀高峰, 2023, ウェーブライダーを用いたGNSS-音響測距結合方式の改定地殻変動観測(その4), 地球惑星科学連合2023年大会, SSS12-P01.

- 今井俊輔・高橋浩晃, 2023, 応力条件を拘束したインバージョン法による千島海溝南部プレート間固着状況, 日本地震学会2023年秋季大会, S03-06.
- Ishii, K., M. Hayashi, H. Ishimoto, and T. Shimbori, 2023, Prediction of volcanic ash concentrations in ash clouds from explosive eruptions based on an atmospheric transport model and the Japanese meteorological satellite Himawari-8: A case study for the Kirishima-Shinmoedake eruption on April 4th 2018, *Earth Planets Space*, 75, 37, doi:10.1186/s40623-023-01790-y.
- 岩城麻子・森川信之・先名重樹・藤原広行・鈴木康弘, 2023, 活断層の詳細位置形状を取り入れた断層近傍の強震動予測, 第16回日本地震工学シンポジウム論文集, G417-13.
- 岩田知孝, 2023, 観測地震動に学んだ, 第51回地盤震動シンポジウム論文集, 35-42.
- Iwata, T. and K. Asano, 2023, Estimation of Rupture Velocities of the Amonos Segment during the 2023 South-Eastern Türkiye Earthquake of Mw 7.8, AGU 2023 Fall Meeting, S13C-0362.
- 岩田知孝・浅野公之, 2023, Strong Ground Motion Characteristics of the 2023 South-Eastern Turkey earthquake of Mw 7.8, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG60-02.
- 岩田知孝・浅野公之・宮本英, 2023, 能登半島北東部の群発地震によるK-NET正院の地震動特性と地下構造, 日本地震学会2023年秋季大会, S22-10.
- Izumi, Y. and M. Sato, 2023, Evaluation of Atmospheric Phase Correction Performance in 79 GHz Ground-Based Radar Interferometry: A Comparison with 17 GHz Ground-Based SAR Data, *Remote Sensing*, 15, <https://doi.org/10.3390/rs15163931>.
- Izumi, Y., O. Frey, M. Sato, S. Baffelli, G. Nico, I. Hajnsek, 2023, A Novel Atmospheric Phase Correction Based on Kriging Incorporating Temporal Phase Evolution for Ground-Based SAR, 2023 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), doi:10.1109/APSAR58496.2023.10388907.
- Izumi, Y., R., Saito, A. S. Abd El-Hameed, J. Fujiwara, M. Sato, 2023, Evaluation of Atmospheric Phase Screen in 79 GHz MIMO Radar Interferometry, IGARSS 2023, doi:10.1109/IGARSS52108.2023.10281709.
- 香川敬生・末久由香子・野口竜也, 2023, 1927年北丹後地震で現れた郷村断層近傍の震動特性と地盤構造, JpGU 2023, SSS09-P13.
- Kodera, Y., 2023, Automatic unsupervised classification of tectonic tremor signals in continuous seismic records, 第28回国際測地学地球物理学連合総会 (IUGG2023), S04p-320, 10.57757/IUGG23-4852.
- 小寺祐貴, 2023, 機械学習から推定した伝播方向を用いた地震動即時予測: 距離減衰を導入したPLUM法の改善, 日本地震学会2023年度秋季大会, S15P-11.
- 小寺祐貴, 2024, 機械学習による単独観測点からの波動伝播方向推定およびPLUM法への応用, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象の即時解析・即時予測とその活用: 更なる高度化と新たな展開」, (13).
- 前田拓人, 2023a, 地震・津波波動場の時空間状態を推定するためのアジョイント方程式の導出, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS07-P17.
- 前田拓人, 2023b, アジョイント方程式に基づく津波波動場推定の数値実験, 日本地震学会2023年

秋季大会.

- 前田拓人, 2023c, アジョイント法による地震・津波波動場の把握:最適制御理論に基づく導出と即時予測に向けた数値実験, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震波形解剖学3.0」-高密度観測・高周波数地震動で見る地殻・マントル不均質構造
- Maeda, T., 2023d, Forward/inverse problems and data assimilation in earthquake seismology, 日本地球惑星科学連合2023年大会, MGI26-05.
- Minami, M., 2023, Comparison of the Friction Term in Difference Equation of Non-linear Long-wave Equation - Which Method is Superior, the Semi-implicit Method or the Fully Implicit Method?, 11th International Conference on Asian and Pacific Coasts 2023, Paper 128.
- 南雅晃, 2023, 津波数値計算における正確な減衰を表現するための新たな摩擦計算の検討, 日本地震学会2023年度秋季大会, S17-06.
- 南雅晃, 2023, 津波数値計算における正確な減衰を表現するための新たな摩擦計算の検討, 第13回 巨大津波災害に関する合同研究集会, 2-4.
- Miyake, H., J. J. Mori, D. J. Wald, H. Kawase, S. Toda, and P. M. Mai, 2023, Introduction to the Special Section for the Centennial of the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 113, 1821-1825, 10.1785/0120230200.
- 宮本 英・浅野公之・岩田知孝, 2023, 強震動生成メカニズムと動的パラメータとの関係ー平成28年熊本地震を例にー, 日本地震学会2023年秋季大会, S15-09.
- Miyata, S., Nonaka, M., Kubo, S., Fukunaga, K., Ando, S., Fujita, M., 2023, A novel approach to measuring pore fluid sediment concentrations of debris flows in a volcanic torrent, 8th International Conference of Debris Flow Hazard Mitigation, 100.
- 宮田秀介・野中理伸・藤田正治・安藤詳平・久保世紀, 2023, 桜島における土石流間隙流体土砂濃度の観測, 令和5年砂防学会研究発表会, P-111.
- 森田寅靖・古村孝志・前田拓人, 2023, アジョイント方程式に基づく, 2次元P-SV波動場及び震源推定の試み, 日本地震学会2023秋期大会, S01-10.
- 永田秀尚・山崎新太郎, 2023, 付加体に発達するスラストをすべり面とする熊本県宮目木谷地すべりと2020年7月豪雨による崩壊, 日本地すべり学会誌, 60, 6, doi:10.3313/jls.60.259.
- Nakagaki, T., and Y. Tanioka, 2023, Numerical Simulation of Submarine Landslide Tsunami due to the 1946 Aleutian Tsunami Earthquake, APAC 2023, 14-17 Nov., Kyoto, Japan.
- 中里友輔・堤大三・宮田秀介・山野井一輝・井口正人, 2023, 火山噴出物の飛来・積雪層貫入・融雪を組み込んだ融雪型火山泥流の解析, 令和5年砂防学会研究発表会, R8-4.
- 西田良平・香川敬生・池本美緒・横山展宏・村瀬謙介・櫻井修, 2023, 鳥取の震災-あの日から80年過去から学び備える今-, (一社)鳥取市社会教育事業団.
- 野上風馬・野口 朗・隈元 崇, 2023, ETAS 地震発生シミュレーションによる背景地震の規模別頻度分布評価, 2023年日本活断層学会学術大会.
- 野口恵司・溜渕功史・林元直樹・小寺祐貴, 2023, 緊急地震速報の震源推定手法のIPF法への一本化, 日本地震学会2023年度秋季大会, S15-01.
- 野口竜也・河野勝宣, 2023, 微動観測に基づく地すべり地域ー島根県多伎町ーの地盤震動特性と地盤構造, 日本地震学会2023年度秋季大会, S16P-04.

- 野口竜也・黒岩綾香・今津慶大・西村武・香川敬生, 2023, 稠密微動観測に基づく堆積層の急変地域における地盤構造の推定, JpGU 2023SSS09-P03, SSS09-P03.
- 野口竜也・西村武・香川敬生, 2023, 1943年鳥取地震における吉岡断層近傍の地盤振動特性と地盤構造, 第16回日本地震工学シンポジウム, G417-21.
- 緒方夢顕・浅野公之・岩田知孝, 2023, 熊本県地域の強震記録のS波自己相関関数を用いた堆積層－基盤岩速度境界面の検出, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS09-20.
- Ogiso, M., 2023, Estimation of high-frequency source radiation energy of small earthquakes in Japan using seismogram envelopes considering the heterogeneous seismic structure, 第28回国際測地学地球物理学連合総会 (IUGG2023), S03p-063, 10.57757/IUGG23-0642.
- Ogiso, M., 2023, Depth dependency in high-frequency source radiation energy of small earthquakes in Japan estimated from full seismogram envelopes, Asia Oceania Geosciences Society 20th Annual Meeting (AOGS2023), SE17-A007.
- 小木曾仁, 2023, 地震動エネルギーの逆伝播を用いた面的震度分布の事後推定, 第16回日本地震工学シンポジウム, Day1-G417-26.
- 小木曾仁, 2023, 不均質な地下構造の影響を考慮した地震波エンベロープを利用した震源放射エネルギーの推定, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震波形解剖学 3.0」－高密度観測・高周波数地震動で見る地殻・マントル不均質構造－, S23-P03.
- 小木曾仁・対馬弘晃, 2023, 海洋波のグラディオメトリ解析(2): 振幅項に着目した2022年トンガ津波の伝播過程, 日本地震学会2023年度秋季大会, S17-05.
- 小木曾仁・対馬弘晃, 2024, 海洋波のグラディオメトリ解析: 津波即時予測への活用へ向けた検討, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象の即時解析・即時予測とその利活用: 更なる高度化と新たな展開」, (20).
- 大熊祐里英・隈元 崇, 2024, 文禄五年閏七月九日の伊予・豊後地震に関する特性化震源モデルを用いた中央構造線活断層帯の断層パラメータの検証, 文明動態学, 3, 21-40, Doi 10.18926/66189.
- Ohta Y., 2023, A review of the contribution of real-time GNSS to disaster prevention and mitigation in Japan, 28th IUGG General Assembly, IUGG23-1032.
- Ohta Y., K. Ohno, S. Abe, T. Miyazaki, N. Takamatsu, S. Kawamoto, 2023, Development of a fault model estimation method based on real-time MCMC and its implementation to a real GNSS network, 28th IUGG General Assembly, IUGG23-0751.
- 大野圭太郎・太田雄策・高松直史・宗包浩志, 2023, 推定の不確実性を定量化した圧力源モデルリアルタイム推定手法の開発, 日本測地学会第140回講演会, 27.
- Oprsal, I., H. Sekiguchi, T. Iwata, and J. Burjanek, 2023, Influence of low-velocity superficial layer on long-period basin-induced surface waves in eastern Osaka basin, Earth Planets Space, 75, 287-294, doi:10.1186/s40623-023-01804-9.
- 大澤光・土井一生・荒井紀之・東良慶・渡壁卓磨・山川陽祐, 2023, 線状凹地を有する地すべり地における地盤構造の推定, Japan Geoscience Union Meeting 2023, HDS10-02.
- 大澤光・土佐信一・松浦純生・柴崎達也・土井一生・岡本隆, 2024, 大変位高速地すべりのための高分解観測システムの開発とその観測事例, 日本地すべり学会誌, 受理済み.

- Otsuka H., Y. Ohta, R. Hino, T. Kubota, D. Inazu, T. Inoue, N. Takahashi, 2023, Non-tidal oceanographic fluctuation characteristics recorded in DONET ocean-bottom pressure time series using principal component analysis, *Earth Planets Space*, 75, 112, 10.1186/s40623-023-01862-z.
- Otsuka H., Y. Ohta, R. Hino, T. Kubota, D. Inazu, T. Inoue, N. Takahashi, 2023, Evaluation of the ability to extract crustal deformation signal from ocean bottom pressure time series using principal component analysis, 28th IUGG General Assembly, IUGG23-1390.
- 大塚英人・太田雄策・日野亮太, 2023, OBPデータに対するPCA適用によるSSE検出能力の事例研究—ヒクラング沖, アラスカ半島沖の場合—, 日本地震学会2023年度秋季大会, S43-08.
- 大塚英人・太田雄策・日野亮太, 2023, 海底水圧計に主成分分析を適用した非定常地殻変動検出の試み, 日本測地学会第140回講演会, 04.
- 大塚英人・太田雄策・碓氷典久・日野亮太・久保田達矢, 2023, MRI.COM-JPNモデルを用いた日本近海における海底水圧記録の海洋変動低減効果の定量評価, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS12-07.
- Ratnasari, R.N., Y. Tanioka, Y. Yamanaka, and I. E. Mulia, 2023, Development of early warning system for tsunami accompanied by collapse of Anak Krakatau volcano, Indonesia, *Frontiers in Earth Science*, 11, 1-13, doi:10.3389/feart.2023.1213493.
- Ratnasari, N. R., Y. Tanioka, and Y. Yamanaka, 2023, Development of Real-Time Forecasting Method for Anak Krakatau Volcanic-induced Tsunamis, Indonesia, IUGG 2023, 11-20, Berlin, Germany.
- Ratnasari, N. R., Y. Tanioka, Y. Yamanaka, and I. E. Mulia, 2023, Development of Real-Time Forecasting Method for Anak Krakatau Volcanic-induced Tsunamis, Indonesia, APAC 2023, 14-17 Nov., Kyoto, Japan.
- 齋藤さやか・安本真也・関谷直也, 2024, 震動予測地図における確率表現のリスク認知—全国意識調査をもとに—, 東京大学大学院情報学環紀要 情報学研究・調査研究編, 40, 査読無, (印刷中)
- Satake, K., 2023, History and improvements of the Japanese tsunami warning system, 20th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society, OS06-A001.
- 佐藤英一, 2023, 二重偏波気象レーダーによる火山灰の定量的推定について, 日本地球惑星科学連合大会, MIS23-P05.
- 佐藤英一, 2023, 二重偏波気象レーダーによる火山噴煙の観測と応用について, 日本火山学会, A1-03.
- 関口春子・浅野公之・吉見雅行, 2023, 浅層ボーリングデータを用いた大阪盆地地盤構造モデルの修正, 京都大学防災研究所年報, 66B, 1-4.
- 関谷直也, 2023, 関東大震災の社会的影響, 大正関東地震100年シンポジウム.
- 新堀敏基・林 昌宏・石元裕史, 2023, 気象衛星による大規模噴煙解析—2022年1月15日トンガ海底火山噴火の事例—, 験震時報, 87, 2, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kenshin/vol187_2.pdf.
- 新堀敏基・橋本明弘・石井憲介・林 洋介, 2023, 移流拡散モデルによる再飛散火山灰予測, 日本火山学会, A3-26.

- 染矢真好・古村孝志, 2023, Physics-Informed Neural Network (PINN) による地震波伝播の予測 : 2次元音響場での数値実験, 日本地震学会2023秋期大会, S01-P06.
- 末久由香子・香川敬生・野口竜也, 2023, 微動探査から推定される郷村断層(京都府京丹後市)近傍の地盤構造, 第75回 2032年度(令和5年)土木学会中国支部研究発表会, I-5.
- Sung, C.-H., H. Miyake, N. Abrahamson, and N. Morikawa, 2024, Nonergodic Ground-Motion Models for Subduction Zone and Crustal Earthquakes in Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 114, 10.1785/0120230258.
- 高松直史・宮崎隆幸・大野圭太郎・村上真亮・小代知波・太田雄策, 2023, リアルタイム GNSS 測位におけるノイズ特性 -地殻変動の即時把握の高度化に向けて-, 日本測地学会第140回講演会, 26.
- 武田歩真・田中 良・中島悠貴・村上 亮・鈴木敦夫・山口照寛・青山 裕・太田雄策, 2023, 有珠山におけるマルチGNSS観測データのリアルタイム解析に向けてーキネマティック測位の精度検証ー, 日本地球惑星科学連合大会, SVC31-P03.
- 溜淵功史, 2023, 地震識別手法の高度化に基づく地震動即時予測の改善と特異な地震活動の解明, 日本地震学会2023年度秋季大会, S20-04.
- 為栗健・井口正人, 2023, 火砕流のリアルタイム流下予測, 令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会, A302.
- Tanioka, Y., and Y. Yamanaka, 2023, Recent progress in research on source processes of great earthquakes using tsunami data, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 10, 61, doi:10.1186/s40645-023-00593-9.
- 田屋大輝・古村孝志, 2023, 畳み込みニューラルネットワークによる長周期地震動予測, 日本地球惑星科学連合2023大会, SCG55-13.
- Taya D. and T. Furumura, 2023, A forecast of long-period ground motions by using a convolutional neural network, IUGG The 28th General Assembly, Berlin, IUGG23-2681.
- Taya S. and T. Furumura, 2023, Real-time forecast of long-period ground motions by Green's function obtained from seismic interferometry, IUGG The 28th General Assembly, Berlin, IUGG23-2334.
- Tsushima, H., 2023, Capability of inversion of dense offshore tsunami measurements to constrain spatio-temporal evolution of tsunami source process, 第28回国際測地学地球物理学連合総会 (IUGG2023), JP05p-097, 10.57757/IUGG23-3548.
- Tsushima, H., Y. Hayashi, and T. Yamamoto, 2023, Impact of tsunami measurements from dense offshore network on modeling of tsunami source and propagation, 第28回国際測地学地球物理学連合総会 (IUGG2023), IUGG-1610, 10.57757/IUGG23-1610.
- 対馬弘晃・山本剛靖, 2023, 環太平洋で発生する津波の顕著後続波の可能性: 津波伝播数値計算による試算, 日本地震学会2023年度秋季大会, S17P-02.
- 対馬弘晃・山本剛靖, 2023, 環太平洋で発生する津波の顕著後続波の可能性: 津波伝播数値計算による試算, 第13回 巨大津波災害に関する合同研究集会, 1-1.
- Tsushima, H., Y. Hayashi, and T. Yamamoto, 2023, Impact of Tsunami Measurements from Dense Offshore Network on Modeling of Tsunami Source and Propagation: A Case Study of the 2016 Mw 6.9 Off-Fukushima Earthquake, 11th International Conference on Asian

and Pacific Coasts 2023, Paper 146.

戸松 誠, 竹内慎一, 川村 壮, 今井崇嗣, 小野塚仁海, 2023, 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に係る被害想定及び防災対策効果に関する研究, 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 建築研究本部 北方建築総合研究所調査研究報告, 434.

富田史章・木戸元之・飯沼卓史・太田雄策・日野亮太・大園真子・高橋浩晃・プラターマルティネ・ライムンド・野徹雄・中東和夫・中村恭之, 2023, 日本海溝・千島海溝沿いにおける GNSS 音響海底測地観測とその成果, 日本地震学会2023年秋季大会, S03-05.

G. Wang, S. Wu, I. Doi, G. Furuya, N. Watanabe, 2023, A translational deep-seated bedrock landslide triggered by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, XIV IAEG Congress 2023, B621.

王功輝・巫昇山・土井一生・古谷元・渡部直喜, 2023, On the initiation and movement of a deep-seated bedrock landslide triggered by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, Japan, Geoscience Union Meeting 2023, HDS05-P19.

Yamada, M., K. Tamaribuchi, S. Wu, and D.Y. Chen, 2023, IPFx: extended integrated particle filter method for earthquake early warning and application to the international networks, AGU Fall Meeting 2023, NH13C-0691.

Yamada, T. and Y. Ohta, 2023, Evaluation of self-similarity of a coseismic slip by estimating a correlation length in von Karman autocorrelation, AGU Fall Meeting 2023, T33E-0240.

Yamada, T. and Y. Ohta, 2023, Development of the simultaneous estimation method of slip distribution and its correlation length based on the assumption of self-similarity, 28th IUGG General Assembly, IUGG23-0630.

山田太介・太田雄策, 2023, すべり分布推定における相関距離の同時評価とその適用, 日本測地学会第140回講演会, P27.

山田太介・太田雄策, 2023, 自己相似性を仮定したすべり分布推定における相関距離の同時推定, 日本地球惑星科学連合2023年大会, STT44-03.

山崎新太郎, 2023, 特徴的な変形作用を受けた結晶片岩で発生する四国山地の深層崩壊, 日本地球惑星科学連合2023年大会, HDS10-03.

山崎新太郎, 2023, 砂岩の変形と風化がもたらした深層崩壊の集中的発生場, 日本地質学会第130年学術大会, G3-0-1.

山崎新太郎, 2023, 四国山地の斜面災害発生場の特徴と徳島県・有瀬地すべりについて, 砂防学会中四国支部 2023年シンポジウム.

山崎新太郎, 2023, 付加体メランジュの砂岩地域における深層崩壊の多発, 日本地すべり学会第62回研究発表会, 2-5.

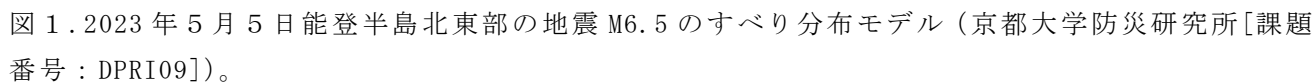
山崎新太郎, 2024, 国土地理院・干渉SAR時系列解析結果を用いた四国山地の斜面変動推定領域の抽出, 日本地すべり学会誌, 受理済み.

山崎新太郎・渡邊達也, 2023, 砂岩の風化した断層破碎帯を素因とする破壊的流動性崩壊, 日本地すべり学会誌, 60, 6, doi:10.3313/jls.60.274.

山下日和・鈴木康弘・向山 栄・室井翔太・山下久美子・福場俊和・村木昌弘・杉本 惇・小俣雅志, 2023, 2016 年熊本地震の地表地震断層周辺における地表変形特性の分析, 2023年日本活断層

安本真也, 2023, 大規模災害時における情報の課題—地震と流言・避難—, 第13回災害コミュニケーションシンポジウム (DCS2023) ～関東大震災から100年目の災害情報処理とは～.

安本真也・葛西優香・富澤周・内田充紀・関谷直也, 2023, 地震防災における感情的アプローチの可能性—ドラマ「パラレル東京」による認知の変化についての追加分析—, 日本災害情報学会第27回学会大会.



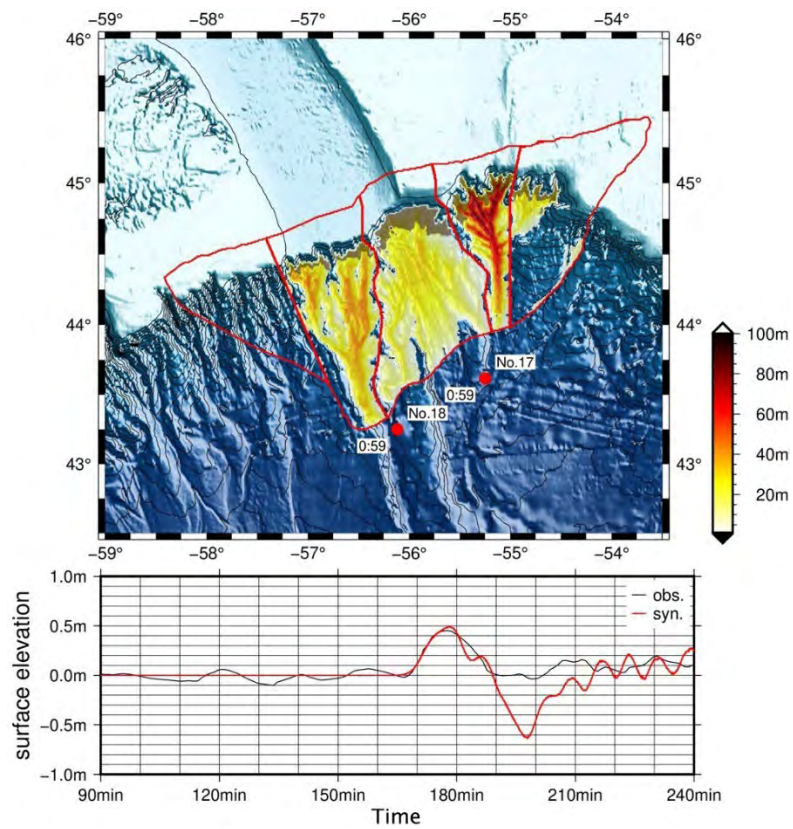


図 2. 1929 年 Grand Banks の海底斜面崩壊による津波の再現実験の結果。上) 斜面崩壊の層厚分布，下) Halifax の検潮記録と計算記録の比較（北海道大学[課題番号：HKD_05]）。

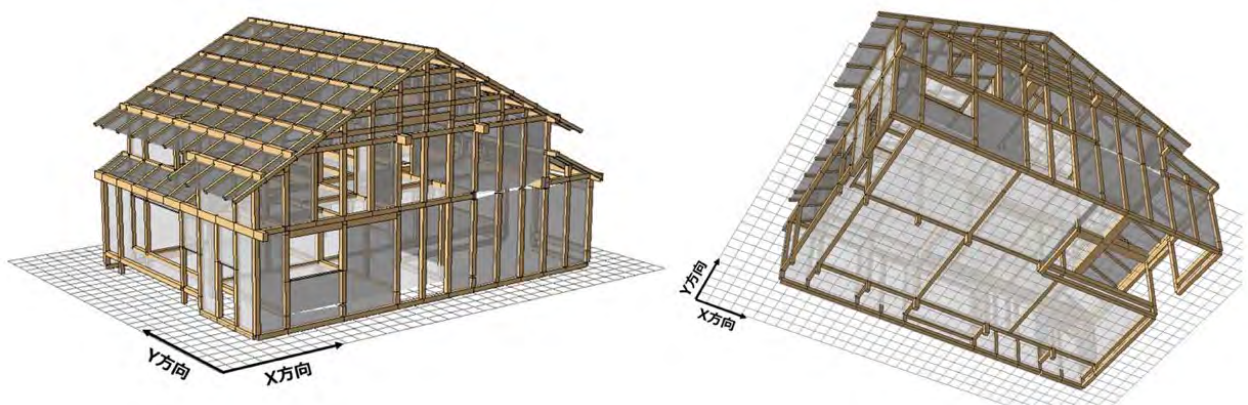


図 3. 1943 年鳥取地震を経験した伝統構法建築物のモデル（左：北東側から，右：基礎側から）（鳥取大学[課題番号：TTR01]）。

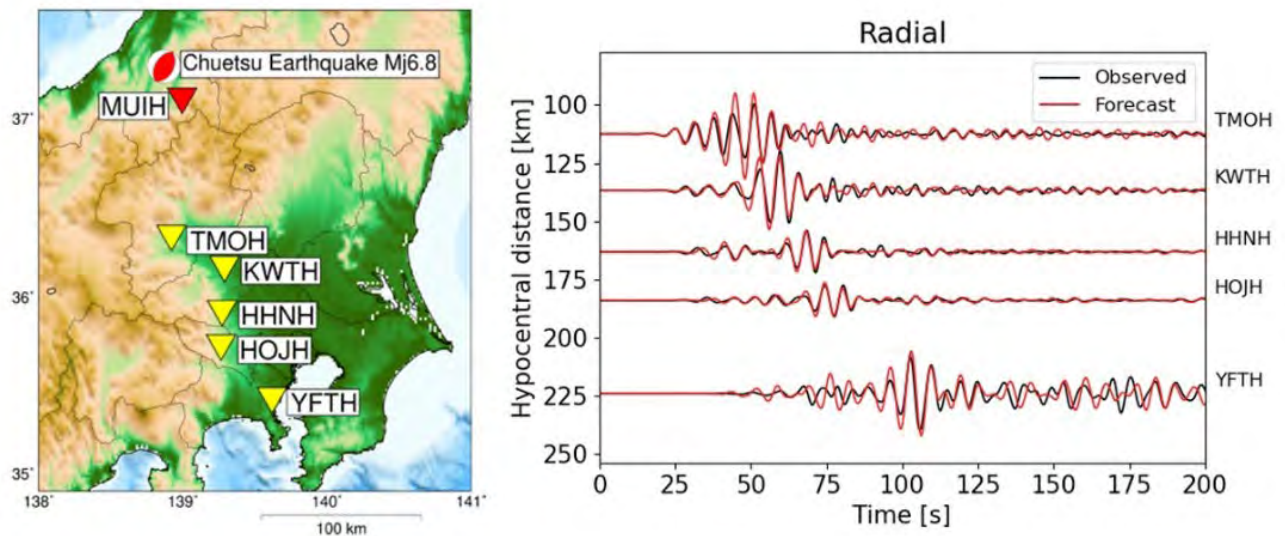


図4. 伝達関数を用いた長周期地震動の予測例。2004年新潟県中越地震における予測地点（黄色▽）の地震動の予測結果（赤線）と実際の観測波形（黒）の比較。赤▽は入力地点を表す（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_14]）。

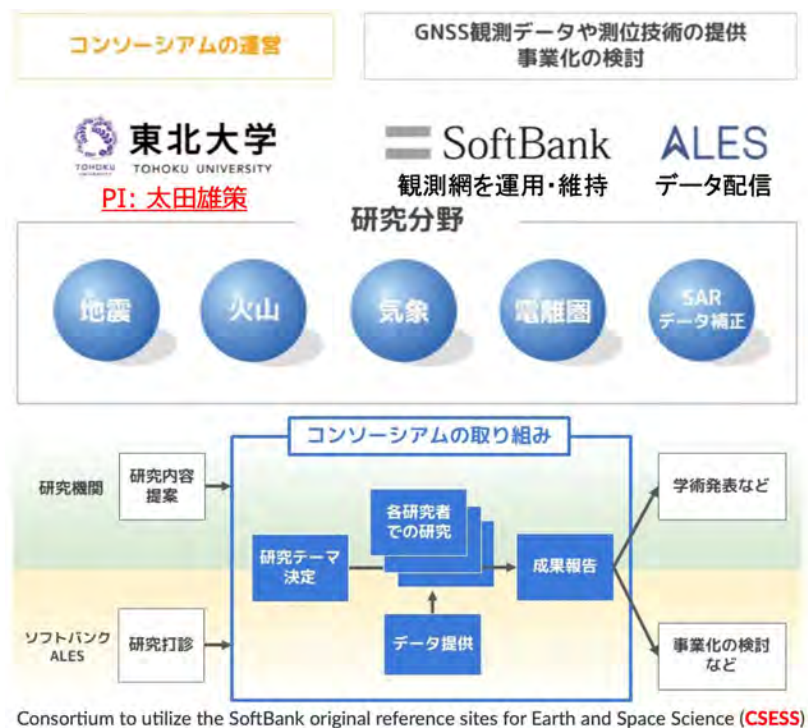
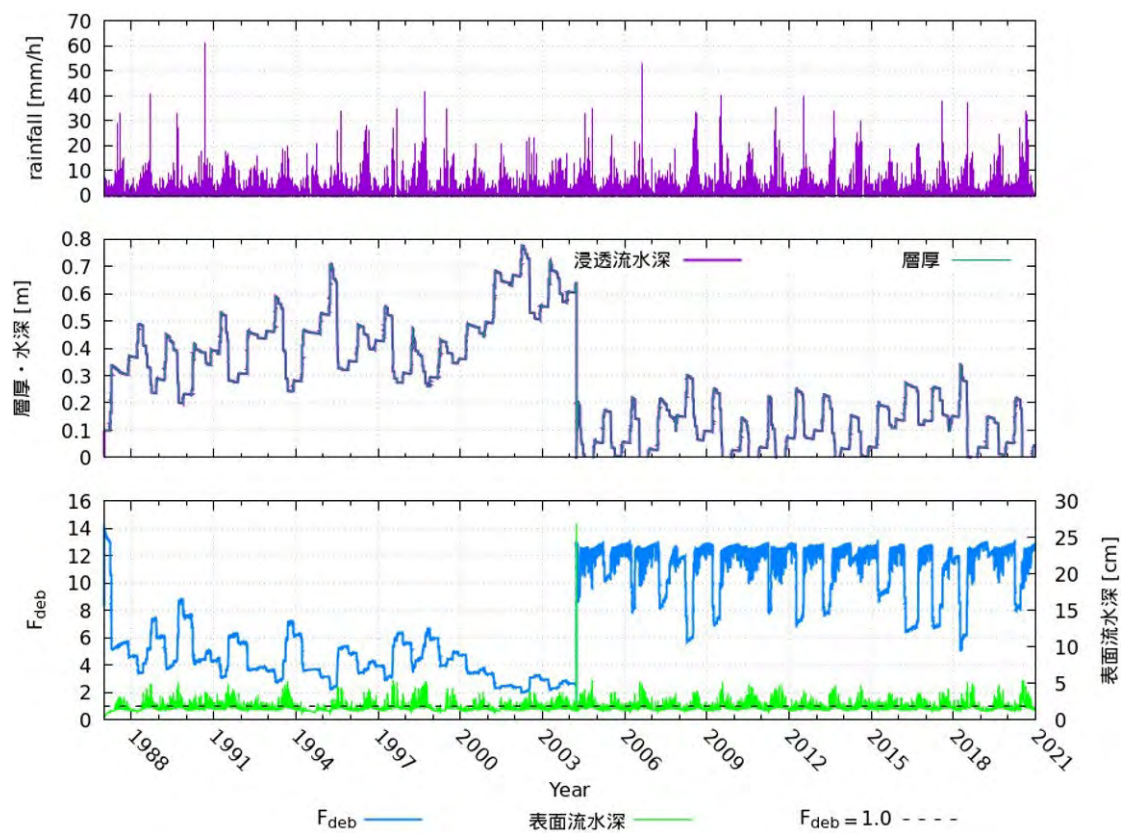


図 5 . ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアムの枠組み（東北大学[課題番号：THK_12]）。

図 6 . 白水谷源頭部河道のシミュレーション結果。層厚は河道堆積土砂厚(=土石流ポテンシャル), F_{deb} は河床堆積物の安全率を示し, $F_{deb} < 1$ のときに河床堆積物が起源となった土石流が発生する（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI12]）。



1 (6) 防災リテラシー

「防災リテラシー」計画推進部会長 高橋 誠

(名古屋大学大学院環境学研究科)

副部会長 井ノ口 宗成

(富山大学都市デザイン学部)

地震・火山噴火現象の理解・予測を災害の軽減につなげるためには、地震・火山噴火といった自然現象に起因する災害誘因（外力）だけでなく、地形・地盤などの自然環境や、人間の持つ特性や社会の仕組みといった災害素因（自然素因と社会素因）を理解し、地震・火山噴火による災害の発生機構を総合的に解明することが必要であり、また、それらの研究成果を社会に対して適切に還元することが求められる。そのためには、社会が地震・火山噴火災害による被害の発生を抑止したり軽減したりするために必要とされる知識体系を明らかにすることが必要である。

現時点における研究成果に鑑みると、災害誘因としての自然事象に関する理解や予知・予測、災害誘因と災害素因との結び付きによって災害が発生する要因や機構に関する理解から、被害が発生した場合の対応にかかわる方策を得ることによって、災害の軽減を図ることが目指されている。とりわけ災害素因については、構造物や土地利用にとどまらず、人間の認知や行動、企業やコミュニティなどにおける脆弱性の理解といった災害予防の側面に重点が置かれる。また、過去の地震・津波・火山災害事例の被害・応急・復旧・復興といった災害過程、あるいは、将来の地震・火山噴火災害への備えに焦点を当てた研究が行われている。一方、社会における防災リテラシーの実態やニーズに関する調査に基づいてその向上のために必要とされる知識要素を探り、研修プログラムや教材の開発につなげるような実践的な試みも行われている。その際、大学の研究施設のみならず、行政機関や地域社会、広く市民社会との連携も試みられている。

防災リテラシー部会は、基本部分を前計画における地震・火山災害部会から引き継ぎながら新たに設置された。防災・減災に対する社会の要請を意識し、理学・工学・人文社会科学の研究者が連携することによって、災害事例に基づき、災害の発生要因を災害誘因と災害素因とに関連づけて解明する研究を従前どおり推進する。また、マイクロジオデータやオープンサイエンスの手法なども活用し、産業界や行政機関、一般市民などのステークホルダーとの連携を深めつつ、社会における防災リテラシーの実態調査や災害軽減に効果的な知識体系要素の探求などを通して、地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究を行うものである。

5年間の成果の概要

第2次の観測研究計画では、地震・火山噴火現象の理解・予測を災害の軽減につなげるための災害科学の確立を目標として、防災・減災に対する社会の要請を意識しながら、全国の大学における理学・工学・人文社会科学の研究者が連携することによって、地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の研究と、地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究を実施してきた。

具体的に、地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の研究においては、近世・近代の史料を批判的に検討し、1855年安政江戸地震や1640年北海道駒ヶ岳噴火など、災害の具体像を復元するとともに社会の対応を分析した。また、東日本大震災などの近年の災害を事例にしながら、災害復興や防災対策、防災教育などの社会対応の課題に関する検討を蓄積してきた。とりわけ、自治体の応急対応や防災計画に加え、企業やコミュニティが南海トラフ地震などの将来の災害に備えるための課題に関する示唆を得た。地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究に関しては、GISなども利用しながら、災害の社会素因である脆弱性を個人レベルで評価・可視化する手法を開発するとともに、様々な地域や集団を対象に社会の防災リテラシーの実態把握を蓄積した。オープンサイエンスやリスクコミュニケーションなど新しい手法を取り入れ、行政機関や一般市民などと連携しながらリスク認知能力を涵養したり知識レベルを向上させたりする取り組みを展開し、具体的に研修プログラムの体系化を行い、教材コンテンツを作成した。これらの取り組みの中では、人文社会科学の研究者が地震学や火山学の研究者と連携して研究を進め、地域住民や観光客等、様々なステークホルダーに応じて行政機関や地域の学習・研究施設などと協働する仕組みを整えた。以上の成果の一部は、それぞれ著書や論文として発表したほか、Journal of Disaster Research (Vol.19, No.1, 2024年)において、「Literacy for Disaster Resilience: Building a Societal Capacity for Reducing Disasters Due to Earthquake and Volcanic Eruption」と題する特集号（論文10篇，調査報告5篇を収録）として刊行した。

今後は、本計画における研究による知見をもとに、次期計画等において、「防災リテラシー」の概念を中軸に、さらなる検証や体系化・理論構築を図っていくことが重要である。地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明においては、近年の地震・津波・火山災害を中心に自然災害事例を蓄積し、とりわけ土地利用や地域社会の脆弱性と結び付けて災害発生機構の理論を洗練させ、効果的な防災政策や計画手法として実装化を目指す。また、人間のリスク認知や行動特性に関して、心理・脳科学に加え行動経済学のアプローチを導入し、災害の予測や予防、災害対応にかかわる知識要素と結び付けて検討することによって実践的な防災リテラシーを獲得する。地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究においては、これまで把握してきた防災リテラシーの実態やニーズに基づき、他の計画推進部会や総合研究グループと連携しながら、防災リテラシーを高めるために必要とされる知識・技能要素の整理と体系化を図り、評価尺度や方法を検討しながら、地震や火山噴火の自然科学的特性を踏まえた防災教育・研修プログラムの開発を継続する。その際、行政やコミュニティ等の様々なステークホルダーとの協働、情報技術やGISなどの新しい手法の活用を進めることが重要である。

令和5年度の成果の概要

4. 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

（1）地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

地震・火山噴火災害の発生機構を理解するためには、災害事象を、それが生じる場所や地域の歴史的・地理的・社会的特性と関連づけて分析することが重要である。

近代以前に発生した地震・火山災害については、1640年北海道駒ヶ岳噴火と同時代の

史料の調査・分析から噴火の推移を再検討し、7月31日の噴火以前にも火山活動がみられた可能性があることなどの知見を得た。また、地震後の調査をまとめた史料をもとに、1855年安政江戸地震において怪我人が出た状況について整理し、「江戸大地震之図」にも同様の描写があることを確認するとともに、地震対策となる地震口がその後の1910年代にも東京で採用されていた事例（図1）を検討した。東京帝国大学では、1923年大正関東地震に伴う火災によって図書館等の多くの蔵書が焼失したが、貴重書としての史料の保管場所が、震災時の搬出に不便な位置であった点が災いしたことなどを明らかにし、史料の防災対策の難しさを指摘した（東京大学史料編纂所[課題番号：UTH_02]）。

津波災害はとりわけ地形環境とその変化に大きく影響を受ける。前年度まで復原を進めてきた岩手県宮古市の歴史地形の痕跡や、2011年の東日本大震災における被害状況を確認するために、フィールドワークを実施した。その結果、岩手県宮古市の市街地の南岸を流れる閉伊川の河口に前近代まで存在した砂州が埋め立てられ陸地化した状況や、宮古市街地を流れる山口川で前近代の流路が変更され、旧河道が暗渠化されている現状を確認した。東日本大震災においては、かつての砂州を埋め立てた場所に建設されていた当時の宮古市役所庁舎が津波で被災し、また市街地にも山口川の旧河道に沿って津波が侵入しており、歴史地形と2011年の津波被害の間に明確な因果関係があることを確認した（東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID05]）。

東日本大震災については、復興後の被災地の防災力は強化されたのかという問題について、宮城県女川町を事例に検証を行った。高台への居住地移転や低地の土地利用規制などによって津波からの安全性は向上したが、その過程において人口の著しい流出がもたらされ、結果として、震災前と比較して世帯の分解・縮小が顕著に進んだこと、コミュニティの近隣関係・地域活動・生活条件は顕著に衰退・悪化したこと、地域の防災活動も著しく停滞した状態にあることなどを明らかにした。南海トラフ地震対策に関する高知市の調査も踏まえ、ハザードに対する科学的な理解や制御と、こうした社会的な観点に立った災害・防災の捉え方とを組み入れた防災計画の必要性を指摘した（名古屋大学[課題番号：NGY_06]）。

南海トラフ地震によって大規模な被害が発生した場合、避難生活の長期化が予測される。兵庫県による南海トラフ地震の被害想定から、被害想定の小さい兵庫県北播磨地域において被災者受け入れの意向を把握し、広域避難に伴う問題点を検討した。その結果、空き家活用特区制度について、かなり前向きな意見が多く、とりわけ人口減少・高齢化・空き家増加が課題となる地区において、平時の地域活性化の仕組みとしてこの制度に対する期待が高いことが明らかになった。ただ、都市部から人が流入する際の懸念に関しては特に高齢世代について高く、たとえば二地域居住（図2）といった、平時からの実験的な取り組みを通じて関係構築を進めておかないと、新規居住者と旧来からの住民との間に軋轢が生じる可能性も明らかとなった（兵庫県立大学[課題番号：HGY_02]）。

2021年の阿蘇山噴火は災害にまでは至らなかったが、噴火発生時に火口から1～2 kmの登山道に10名を超える登山者がおり、一歩間違えば人的被害に繋がっていた可能性のあるインシデントである（図3）。そこで、これまでの阿蘇山での火山活動とそれによる災害、防災対策、火口周辺の利活用などに関する文献調査を行うとともに、このインシデントの発生過程を現地調査に基づいて整理した。その結果、火山活動の活発化にともな

い、気象庁からの情報は段階的に発表されていたが、それが速やかで効果的な登山道閉鎖には繋がらなかったこと、また、登山者の火山情報収集にも課題があったことなどが明らかになった（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_03]）。

（２）地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

社会における防災リテラシーの実態の把握については、本年度も、応急期を想定したシナリオに基づいて、個人および集団レベルにおけるリスク認知や避難行動の量的分析を行う研究が蓄積された。

北海道太平洋沿岸部の津波浸水想定区域の更新に伴う津波避難の課題を抽出するために、これまでの分析を継続しつつ、本年度は自治体・住民組織を対象とした災害関係の情報流通に関する分析を行った。ここでは、防災・減災の対策を、各種避難警報やハザードマップなどを要素とした情報の流通に関して検討し、災害リスクを軽減させるために国・地方自治体・住民組織・住民個人の間で、どのような情報流通を行う必要があるかを明らかにした。また、この情報流通を加速させる手段について、自治体と協力し実証実験を行った。ここでは、自宅から避難場所までの住民行動を総合的に扱い、避難開始や避難場所選定などに関する住民の意思決定についてはファジーAHPなどの手法で分析した。また、避難移動に関しては現実空間の模擬避難実験と仮想空間の避難シミュレーションを統合して分析した（北海道大学[課題番号：HKD_07]）。

災害情報が被害の発生抑止・軽減に資する過程を明らかにするために、行動実験データと、これを用いて行った脳活動計測実験のデータの詳細分析を行った。とりわけ後者については、平均課題脳反応と「感情制御」得点の負相関が感情反応領域（両側島皮質・前帯状回）で、感覚課題脳反応とリスク感受性の負相関が感情反応領域（前帯状回）で、数値課題脳反応とリスク精査傾向の正相関が記憶関連領域（右海馬）でそれぞれ見られた（図４）。これらの結果から、リスクに関わらず「まず避難」する意思決定特性（リスク感受性）や、これと正相関する「感情抑制」特性は、脳内の感情反応領域の抑制と関連し、一方、避難意思決定にあたってリスクを精査する傾向は記憶参照過程と関連することが示唆された（東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID06]）。

ひとたび災害が発生すると被災者は様々な財産を失う一方で、生活再建にかかる公的な支援策が多岐にわたるために、被災自治体にとって被災者ニーズを的確にとらえることが迅速な復興に向けた課題となる。本年度は、避難行動に特化しハザードの理解および建物構造、家族構成、避難方法についての理解を深め、防災リテラシーの向上に資する仕掛けとしてタイムライン作成支援ツールの開発と検証を実施した。また、生活再建支援に焦点を当てて、相談対応に関するデータ分析を実施し、対話型での相談対応システムの基礎を整備した（図５）。2024年1月1日に能登半島地震が発生したことを受け、富山県内でも家屋の被害が多数発生し、特に被害が集中した氷見市をフィールドとして、これまでに蓄積された住家被害認定調査・罹災証明書交付にかかる知見をもとに、現場支援のあり方について実地研究を実施した（富山大学[課題番号：TYM_03]）。

2014年に深刻な御岳山噴火被害を経験した長野県木曽地域のように、日本の多くの火山地域では、登山客や観光客を対象とした防災・減災策が課題となっており、併設されるジオパーク・博物館・ビジターセンターの学習施設としての役割が期待されている。これ

まで実施してきた各火山地域における観光施設の調査データを分析し、各火山地域に共通する主な課題として「噴火災害経験の継承」、「地域住民への火山防災啓発」、「登山者・観光客への火山防災啓発」、「観光と防災の両立」の4つを指摘した上で、御嶽山火山マイスター制度を、火山防災意識を持続し、噴火災害経験を継承していく仕組みであると結論づけた（名古屋大学[課題番号：NGY_06]）。

日本の火山地域の中でも、桜島には大学の観測研究施設が所在し、地域の火山防災に対する基幹的な役割が期待されている。京都大学防災研究所附属火山活動研究センター桜島火山観測所では、一般公開行事として、観測施設を巡るバスツアーを年1回の頻度で行い、そのつど参加者へのアンケート調査を行ってきた。本年度実施したアンケート調査データを分析した結果、バスツアーを知ったきっかけとして知人や家族の紹介が最も多く、新聞掲載が重要だった10年前の調査と比較すると、毎年開催されることによってイベントの認知度が上がったことがうかがわれた。また、参加者が最も関心を持った展示や施設は観測坑道（図6）であり、そこに立ち入ることについての希少性と非日常性が理由であると考えられた（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI13]）。

また、地震火山観測に関する科学的知見を、事前復興や防災リテラシーに生かすための方策について、桜島火山観測所による観測データの公開や施設公開等のオープンサイエンスの実践から検討した。さらに、市民参加による火山観測の仕組み構築の実践に取り組んだ歴史的事例として、有珠山噴火（1910年、1944年、1977年）の取り組みを調査した。明治時代から昭和初期にかけては、火山防災の専門家の数が限られていたことから、観測に市民の参画を得る形で火山研究の取り組みが進められた歴史がある。桜島火山観測所と桜島で活動する団体との連携が深まるにつれて、科学的な研究を伝える活動が市民（非専門家）に対してより開かれたものになっていることが明らかになった（兵庫県立大学[課題番号：HYG_01]）。

京都大学防災研究所阿武山観測所は、科学者と一般市民との連携手法としてオープンサイエンス手法（市民参画型科学、市民参画型データ収集・管理）を取り入れながら先端的な取り組みを行ってきた。本年度においても、（1）サイエンスミュージアム「阿武山地震観測所」の運営による地震リテラシーの向上、（2）地震・津波避難訓練支援ツール「逃げトレ」の導入による市民参画型地震・津波訓練の推進、（3）自然災害に関する歴史資料の解説を行う「みんなで翻刻」プロジェクトの推進、（4）内陸地震観測「満点計画・0.1満点計画」によるオープンサイエンス型地震学の試行の4つの研究を継続実施した。主な成果として、（1）については制度的基盤としてNPO法人による運営を開始した。

（2）については、高知県等のテストフィールドでの実証実験を行い、パイロット版をフル版へと向上させた。（3）についてはシステム運用を継続し、さらに参加者、解析文献数を増加させた。（4）については、これまでの結果を踏まえて新たに開発した教育ツール「満点地震計ボックス」を完成させた（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI14]）。

最後に、本部会の重点課題として、地震・火山噴火災害における被害軽減のために利活用可能な要素・知識体系の整理・検証を進めてきた。これまでに仮説化された理解枠組みである、育成したい人材の特性、能力、態度、貢献の諸点において観測研究計画の成果を活用して研修プログラムを構築し、研修プログラムの実装環境を整え、研修体系の整備を進めた。また、関東地震100周年を契機として開催されるイベント等の機会をとらえ、

これまでの観測研究計画において同定された知見を整理し、(1)現象と被害、(2)地震の過去と未来、(3)新たな研究について啓発コンテンツを開発し発信につとめた。特に関東地震と南海トラフ地震の共通性と独自性を整理することで、地震現象の理解枠組みの整理を実施した(図7)。併せて、2024年1月1日に発生した能登半島地震において、これまでの理解枠組みと研究コンテンツ開発の技術を活かし、応援職員の研修コンテンツの整備と実装を行った(新潟大学[課題番号:NGT_02])。

成果リスト

- Ebina E., D. Sugawara, 2024, Reconstructing historical terrain to elucidate the causes of disaster occurrence and improve disaster prevention literacy, *J. Disaster Res.*, 19, 38-49, doi:10.20965/jdr.2024.p0030.
- Fukada H., Y. Hashimoto, M. Oki, Y. Okuno, 2023, Proposal and evaluation of tsunami disaster drill support system using tablet computer, *International Journal of Information Technology*, 15, 4029-4039, doi:10.1007/s41870-023-01465-7.
- 橋本雄一編著, 2023, 「地理総合」とGIS教育:基礎・実践・評価, 古今書院.
- 橋本雄一, 三橋浩志, 大塚孝泰, 石橋生, 栗山絵理, 田中隆志, 森泰三, 木村圭司, 塩崎大輔, 2023, 「地理総合」とGIS教育:教育の実践・評価および教員養成, *E-journal GEO*, 18(2), 442-445, doi.org:10.4157/ejgeo.18.442.
- Horii, M., K. Yamaoka, H.-Y. Kim, S. Takewaki, T. Kunitomo, 2024, Comparative study of literacy enhancement on volcanic disaster reduction for the residents and visitors in Mt. Ontakesan and other volcanic areas, *J. Disaster Res.*, 19, 159-172, doi:10.20965/jdr.2024.p0159.
- 井ノ口宗成, 2023, 被災者生活再建支援を見据えたマイタイムライン策定支援ツールの提案, *電子情報通信学会信学技報*, 123(31), 52-57.
- 井ノ口宗成, 2023, 生活再建を中心とした共起ネットワークの年次変化の把握:東日本大震災に関する新聞記事を事例として, *情報科学技術フォーラム講演論文集*, 22, 359-362.
- Inoguchi, M., 2024, Development of cloud-based support tools for effective evacuation focusing on time-phase from pre-registration to post-incident response to improve literacy for disaster resilience, *J. Disaster Res.*, 19, 56-71, doi:10.20965/jdr.2024.p0056.
- 工藤由佳, 橋本雄一, 2023, 路面状況と道路ネットワーク途絶を考慮した積雪寒冷地における津波避難困難地域の推定:千島海溝地震による津波の浸水想定事例, *地理学論集*, 97(1), 1-12, doi.org:10.7886/hgs.97.1.
- 宮崎太良, 井ノ口宗成, 2023, 参画型リスクマップ作成システムにおける実証実験の自由記述データの分析:取得情報の自立化をめざして, *電子情報通信学会信学技報*, 123(218), 6-11.
- Muroi, K., 2024, Literacy for disaster resilience from "Downstream": From a case study of the Nankai Trough earthquake countermeasures in Kochi City, *J. Disaster Res.*, 19, 113-123, doi:10.20965/jdr.2024.p0113.
- Nakamichi, H., 2024, Open-door events of the Sakurajima Volcano Observatory, Kyoto University in the last ten years, *J. Disaster Res.*, 19, 147-153,

doi:10.20965/jdr.2024.p0147.

- 中道治久, 阪本真由美, 2023, 桜島火山における2020年6月の火山岩塊落下を受けて実施した火山情報に関する住民意識調査, 京都大学防災研究所年報, 66B, 111-120.
- 奥野祐介, 橋本雄一, 2023, 千島海溝沿岸自治体における津波防災対策の現状と課題: 北海道釧路市を例として, 地理情報システム学会講演論文集, 32, D6-02.
- Ohkura, T., 2024, Vulnerability of Aso Volcano's disaster mitigation system, as revealed by the phreatic eruption of October 20, 2021, J. Disaster Res., 19, 50-55, doi:10.20965/jdr.2024.p0050.
- 小野塚仁海, 橋本雄一, 2023, 携帯電話データを用いた災害発生直後の都市における人口分布に関する地理学的研究, 地理情報システム学会講演論文集, 32, F5-02
- Sakamoto, M., H. Nakamichi, 2024, Open science initiatives by Sakurajima Volcano Observatory, J. Disaster Res., 19, 154-158, doi:10.20965/jdr.2024.p0154.
- Sawada, M., T. Sato, 2024, The possibility of wide area evacuation in the event of natural disasters: a survey in Amagasaki City, Hyogo Prefecture, J. Disaster Res., 19, 105-112, doi:10.20965/jdr.2024.p0105.
- 塩崎大輔, 橋本雄一, 2023, GPSを用いた非日常空間における津波避難行動に関する空間分析, 情報処理学会研究報告, 2023-IS-165(15), 1-6.
- Shiozaki, D., Y. Hashimoto, 2024, System development for tsunami evacuation drill using ICT and tsunami inundation simulation data, J. Disaster Research, 19, 72-80, doi.org:10.20965/jdr.2024.p0072.
- Sugimori, R., 2024, Damage by the 1855 Edo earthquake and response to the disaster: study based on Edo Ohjishin no Zu (Picture Scroll of the 1855 Edo earthquake), J. Disaster Res., 19, 38-49, doi:10.20965/jdr.2024.p0038.
- Takubo, M., M. Sugiura, R. Ishibashi, N. Miura, A. Tanabe-Ishibashi, 2024, A Risk-scrutinizing attitude is independent of risk-sensitive attitude and may hamper a proper protective Response: a tsunami simulation experiment, J. Disaster Res., 19, 81-93, doi:10.20965/jdr.2024.p0081.
- Takubo, M., M. Sugiura, R. Ishibashi, N. Miura, A. Tanabe-Ishibashi, 2024, How disaster prevention videos contribute to tsunami evacuation: subjective motivation and risk-sensitive attitude in a simulation experiment, J. Disaster Res., 19, 94-104, doi:10.20965/jdr.2024.p0094.
- Tanaka, T., 2023, The 2011 Great East Japan earthquake and tsunami: the highest casualties and largest reconstruction funds - characteristics of major disasters and future challenges in developed countries, Japanese Journal of Sociology, 32(1), 7-24, doi:10.1111/ijjs.12147.
- 田中重好, 2024, 「復興の優等生」は復興の最適解か: 宮城県岩沼市を事例にして, 名古屋大学社会学論集, 44.
- Xu, J., M. Takahashi, W. Li, 2024, Identifying vulnerable populations in urban society: a case study in a flood-prone district of Wuhan, China, Natural Hazards and Earth System Sciences, 24, 179-197, doi:10.5194/nhess-24-179-2024.

Yamori, K., 2024, Open science for fostering seismologic science literacy, J. Disaster Res., 19, 139-146, doi:10.20965/jdr.2024.p0139.

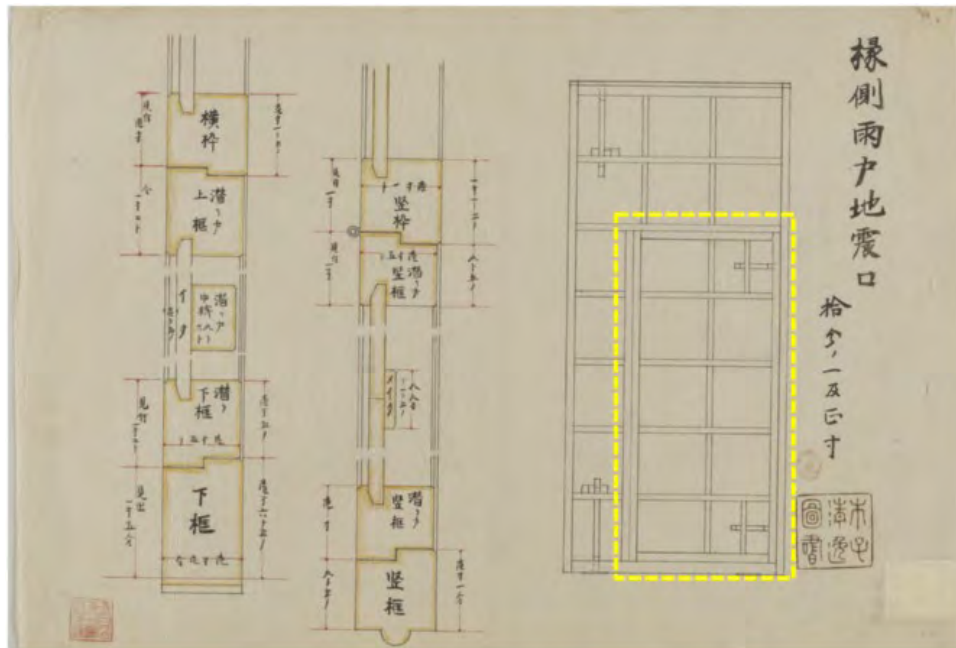


図1．雨戸に設置された地震口の図（1917年小石川・山田邸，黄色の破線は杉森による）
（Sugimori, 2024：東京大学史料編纂所[課題番号：UTH_02]）

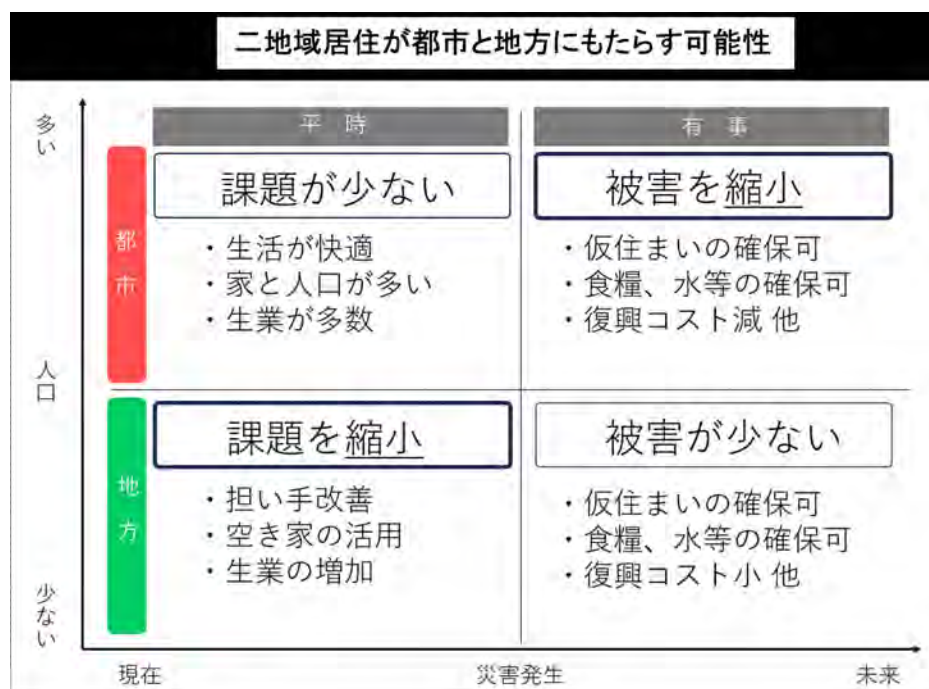


図2．二地域居住がもたらす都市と地方の効果（兵庫県立大学[課題番号：HGY_02]）



図3．阿蘇山河口付近の登山ルートと入山規制区域，過去の噴火時における死者発生地点（黒四角：左図），2021年噴火時に気象庁の監視カメラに写り込んだ登山者（A～B地点：右図）（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_03]）

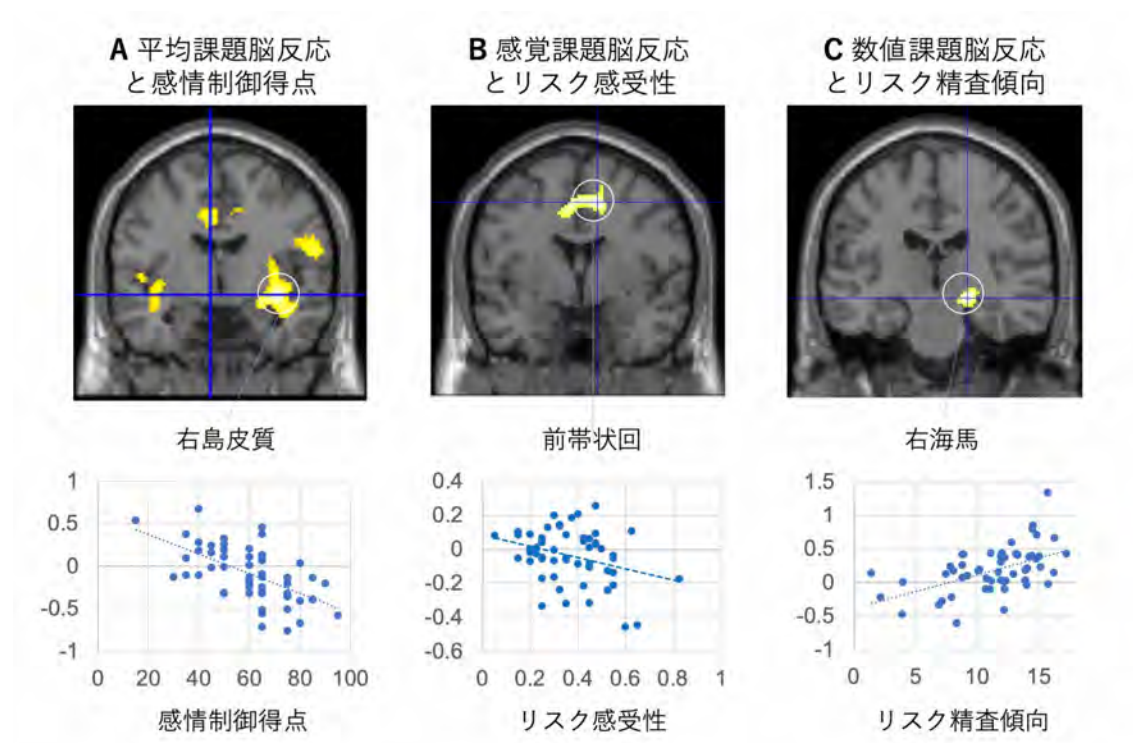


図4．脳活動計測実験データの分析結果（A：平均課題脳反応と「感情制御」得点の負相関が有意な領域，B：感覚課題脳反応とリスク感受性の負相関が有意な領域，C：数値課題脳反応とリスク精査傾向の正相関が有意な領域）（東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID06]）

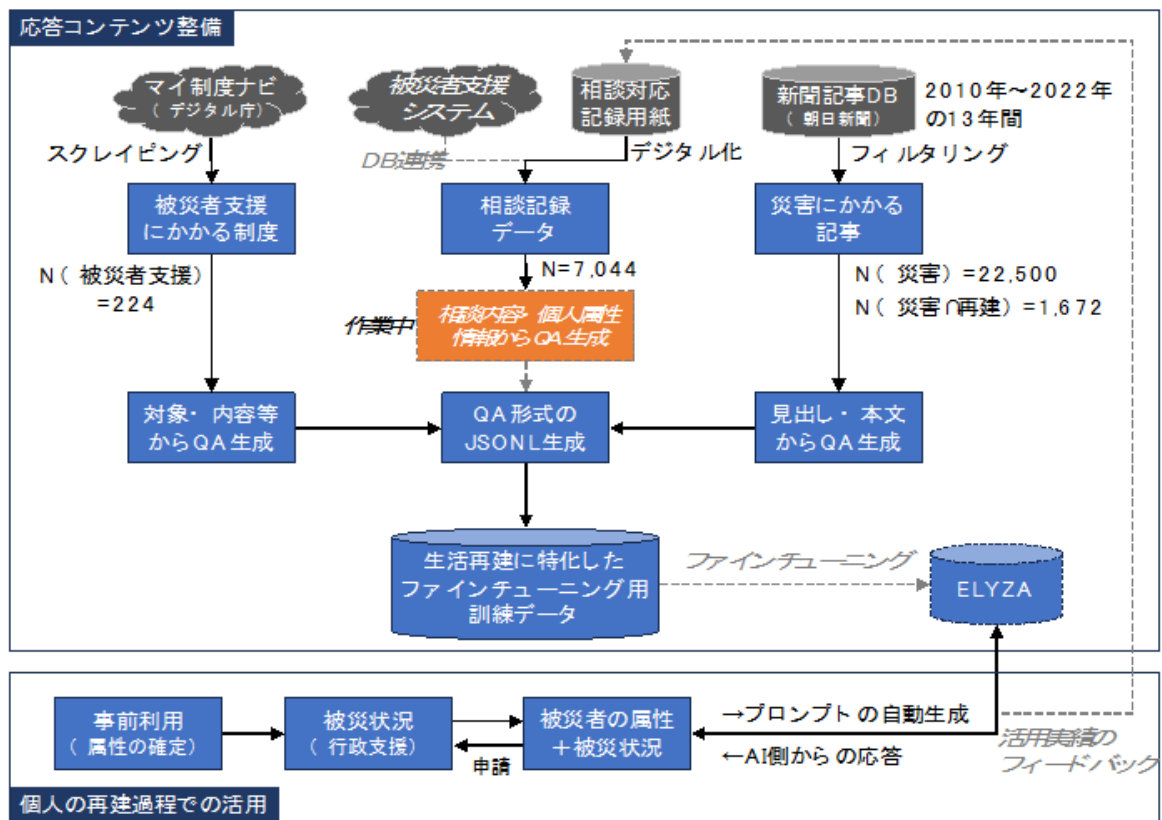


図5．生活再建相談支援ツールの応答コンテンツ整備にかかるデータセット準備と活用方法 (富山大学[課題番号：TYM_03])



図6．桜島火山観測所の観測坑道による歪み・傾斜観測 (京都大学防災研究所[課題番号：DPRI13])



図 7. 関東地震100周年を契機とした、地震火山噴火観測研究計画からの理解枠組みの発信事例
(新潟大学[課題番号: NGT_02])

1 (7) 史料・考古

「史料・考古」計画推進部会長 蝦名裕一

(東北大学災害科学国際研究所)

副部会長 山中佳子

(名古屋大学大学院環境学研究科)

日本列島において近代的な観測機器による地震観測が開始されたのは明治時代前期以降であり、それ以前に発生した地震・火山噴火現象、またはそれらによる災害に関する知見を得るためには、史料や考古資料に基づく地震や火山噴火のデータが必要不可欠である。そのため、日本における地震火山関連史料の収集・編纂とそれらを用いた地震や火山噴火の研究は、明治時代後期より実施されており、各種の地震史料集や火山噴火史料集が刊行されている。

史料や考古資料に基づく地震火山関連のデータは、人間の感覚による記録や地中に残された痕跡に基づくデータであるために、近代的な観測機器を用いた地震・火山の観測データと比較して、その精度が格段に劣るのは当然である。そこで重要になってくるのが、歴史学の手法を用いた史料とその記述の正確な分析・解読や、地質学的な手法を活用した考古遺跡における災害痕跡の分析といった、これまでの地震・火山噴火の研究において積極的に用いられてこなかった手法の導入である。地震・火山噴火関連の史料データ・考古データのデータベースの構築や統合とともに、これらのデータを活用した新たな研究手法の検討や利用も重要な研究課題である。このような新たな研究への取り組みは、史料や考古資料に関する読解や分析が十分とは言えなかった従来の研究手法を改善し、それぞれの分野の学術研究に裏打ちされた精度と確度の高い研究を目指すものである。この取り組みによって、地震学や火山学の分野から信頼性が問題視されてきた史料・考古データや、それらに基づく研究成果について、これまで以上の信頼性を確保できると考える。

5 年間の成果の概要

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ア. 史料の収集とデータベース化

・地震火山関連史料の収集・分析とデータベースの構築・公開

高精度OCRによるテキスト化の方式を導入することにより、本計画期間中に既刊地震史料集全28巻(計22,771頁)全ての全文デジタルデータ化が完了し、地震史料集テキストデータベース(<https://materials.utkozisin.org/>)として公開した。公開に際しては利用の便宜のために、用語・年月日による基本検索のほかに、(1)年月ごとの地震史料数の一覧表から検索する方法、(2)史料の所在地名から検索する方法、(3)理科年表掲載の歴史地震名から検索する方法を整備した(東京大学史料編纂所[課題番号: UTH_01], 東

京大学地震火山史料連携研究機構[課題番号：HMEV01])。

既刊地震史料集の校訂作業について、作業負担の軽減化と効率化を図った。現在、予定している全10冊のうち、5冊については史料校訂が終了し、データ修正と公開の準備を進めているところである。2冊については史料校訂が6割程度進捗している（東京大学史料編纂所[課題番号：UTH_01]）。

史料と史料に登場する地名の関係を、Web GISベースのシステムを介して可視化（地図上に表示）するために、自然言語処理を専門家とする情報工学研究者と連携して、AIによる史料中の地名表現の自動抽出、および地名表現のマークアップに取り組んだ。期間地震史料集4冊を対象に、学習データの追加、および実践的な自動地名付与を行った（東京大学史料編纂所[課題番号：UTH_01]）。

史料調査を実施し、地震史料集テキストデータベースに収録されているデータの校正および追加収録するデータの収集を行うとともに、日記史料有感地震データベース（<http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/HEVA-DB/>）に追加収録するデータの整理を行った（東京大学史料編纂所[課題番号：UTH_01]）。新たに見つかった安政東海・南海地震、安政江戸地震について書かれている大沢家本願寺関係文書（岐阜市・大沢喜久氏蔵）について史料調査を行い、それらの翻刻と目録作成を行った。また、災害かわら版（公益社団法人全国市有物件災害共済会蔵）、鳥羽御城石垣御修復一件（鳥羽藩士による安政東海地震・津波での鳥羽城の被害と石垣修復に関する記録）、違変記（福岡藩士による災害等の記録の集成）の翻刻を進めた。また、災害かわら版については、その解説書を出版するとともに、各種防災イベント等におけるワークショップに活用している（名古屋大学[課題番号：NGY_01]）。

これまで構築してきた地震史料検索システム高速化のため、データベースの再構築、更新を行い、検索後の表示方法などシステムの改良も行った。またこれとは別に宇佐美龍夫氏が収集整理してきた日本歴史地震総表2020についてもWEB上で検索できるシステムを新たに構築した（名古屋大学[課題番号：NGY_01]）。

・日本海沿岸地域を中心とした地震・火山現象の解明のための史資料調査と解析

地震による家屋倒潰率と一軒当たり死亡者数について、1751年越後高田地震、1804年象潟地震、1828年三条地震、1854年東海地震の被害事例を分析し活断層や震源域との位置関係を調べた。1891年濃尾地震では一軒当たり死亡者数が0.20人以上の村の分布により震源域の範囲を把握できることを示した。各地に残る年代記を史料学的に検討し、その信憑性を評価した。また1454年享徳地震が陸奥のみならず関東でも「大地震」と認識される地震であったことや、1498年東海地震に先行する1493年12月7日に京都～遠江の広範囲大地震が発生したことを示した。1611年会津地震で形成された山崎南湖について、先行研究による復原図より小さいことを明らかにした。1847年善光寺地震の被害について、地震本来の被害、地震後の火災や犀川水害、5日後の高田地震被害それぞれの実態を明らかにした。1828年越後三条地震について多くの史料を収集精査し紹介するとともに、豪雨・台風の被災と大飢饉の中で発生した多重複合災害であったこと明らかにした。1854年安政南海地震の被害について、徳島県海陽町の「宋喰浦荒図面」や和歌山県立文書館所蔵「津浪之由来」について分析し、信頼性や社会経済的要因との関係性を示した。1855年江戸地

震の被害境界について四ツ谷通り下町の割から中野宿（中野区）まで辺りになると明らかにした。その他、1961年長岡地震、1923年関東地震に関して史料の収集・分析を行った（新潟大学[課題番号：NGT_01]）。

・東北地方における地震・津波・火山情報に関する歴史資料の所在調査とデータ収集

1804年象潟地震について、由利郡関村伝来文書を継続的に調査し、地震発生当時の集落の様子を文書や絵図から再現し、同地における象潟地震の被害の詳細を解明した。陸前高田市図書館所蔵『古新集鑑』を調査し、同史料に収録される1611年慶長奥州地震津波、1856年安政八戸沖地震津波の情報や、1896年明治三陸地震津波における死者数に関する新たな数値を得た。先行研究においてしばしば指摘されてきた元和二年（1616）仙台地震における津波の存在について、その発端が大槌地方の史料における1611年慶長奥州地震津波の年代の誤記であり、これが1935年に刊行された『宮城県昭和海嘯誌』において元和二年津波と混同され、さらに『増訂大日本地震史料』（1951）に引用されたことによって定着した偽津波であることを明らかとした（東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID01]）。

・史料を地震研究に活用する方法についての検討

寺院の建物被害を用いた歴史を通じて地震の揺れの強さを示す指標の検討やフリーGISのe-コミマップを用いた南海トラフ巨大地震史料の見える化を行った（名古屋大学[課題番号：NGY_01]）。地震火山史料のGISデータ化と分析、およびオープンデータとしての公開を実施した（東京大学地震火山史料連携研究機構[課題番号：HMEV01]）。

・研究コミュニティの構築・教育・市民への普及

長岡市立中央図書館文書資料室との共編で『災害史研究とチラシ・ポスター・絵葉書の資料学』を刊行した。歴史学・地理学・考古学の成果を報告する研究会を年1回計5回開催し、共同研究メンバーの成果を発表する『災害・復興と資料』を年1回5号分刊行した（新潟大学[課題番号：NGT_01]）。2021年に1611年慶長奥州地震津波410周年シンポジウムを開催し、同地震津波について文系・理系双方からの最新の研究成果を報告した（東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID01]）。地震史料シンポジウムII「災害史料研究が拓く歴史学の新たな方法」を開催した。東京大学教養学部前期課程において、学術フロンティア講義「歴史資料と地震・火山噴火」を開講した（東京大学地震火山史料連携研究機構[課題番号：HMEV01]）。古文書解読のための定期的な勉強会や合宿形式の勉強会を継続的に開催した。参加者の解読技術の向上をはかるとともに、これまで歴史地震研究に関わっていなかった研究者や学生、あるいは市民の方々に研究を普及する機会となった。みんなで翻刻に登録した地震や火山噴火に関連する資料を含む多様な資料を分析した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_01]）。

イ．考古データの収集・集成と分析

・考古・文献資料からみた歴史災害情報の収集とデータベース構築・公開ならびにその地質考古学的解析

考古発掘調査に伴って検出される災害痕跡を主体に集成した「歴史災害痕跡データベース（Historical Disaster Evidence Database: HDE-GISdb）」の一般公開を開始した。さらに、東京大学史料編纂所の有する災害史料データベースとの連携検索システムを構築するために、「歴史災害痕跡データベース」に歴史資料データ表示機能を搭載した。また、API機能も搭載し、前述の災害史料データベースに加え、様々なデータベースとのリレーションを行える準備をした。歴史災害痕跡データベースを構成するデータは、地震痕跡については奈良県および京都府を中心に年間8千～1万件のデータを、火山噴火災害については約5千件のデータを蓄積した。全国で年間8千件を上回る発掘調査が行われるなか、データベースの全国化を促進するためのデータ入力体制についての課題が残るが、災害痕跡データを蓄積する方針が一律化した成果は大きい。全国の発掘調査現場に赴き、担当者とともに調査を実践したり、奈良文化財研究所が開催する文化財調査担当者に対する研修において調査法の普及に努めたりするなど、災害痕跡調査法を積極的に情報発信した（奈良文化財研究所[課題番号：NAB_01]）。

・縄文時代前期の東北・関東両地方における大規模地震の検討

縄文時代中期の三陸地震津波について岩手県山田町浜川目沢田1・2遺跡、仙台市上野遺跡など集落遺跡を分析し、大木8-9式期に宮古・山田・大槌湾岸や仙台湾岸まで東日本太平洋岸に広く及んだことや、集落の被災・復興・移転を明らかにした。縄文時代後期の三陸海岸津波の年代について検討し、海浜集落の衰退から、縄文時代後期前葉の崎山弁天1式期と後期中頃の浜川目沢田式期の直後時期に巨大津波が発生した可能性が高いとした。高精度の土器編年に基づく考古学データを使う方法を提示した（新潟大学[課題番号：NGT_01]）。

令和5年度の成果の概要

1. 地震・火山現象の解明のための研究

（1）地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

史料や考古資料の分析に基づいて、近代的な機器観測が開始される前に発生した低頻度で大規模な地震・火山噴火やそれらによる災害を調査・研究することは、今後発生するそれらの現象や災害の様相を予測し、その被害の軽減に貢献できると考えられる。百数十年から数百年の期間において同一地域で発生する低頻度大規模地震や火山噴火は、明治時代に開始された近代的な機器観測を用いて、それぞれ数回の事象に関して観測データが取得されているのみである。しかし、低頻度の現象や災害は機器観測の開始以前にも発生しており、機器観測によるデータは皆無であるが、歴史学や考古学で用いられる史料や考古資料には、地震や火山噴火に関連した記述や災害痕跡が含まれている。このような史料や考古資料について地震学や火山学の研究に役立てるためには、従来のような史資料の収集・編纂のみに止まらず、観測データとの比較・検討を目的としたデジタルデータ化とデータベースの構築が必要になってくる。これによって、地震学や火山学の研究に史料や考古資料を活用する際の利便性が向上するだけでなく、信頼性の高い史料・

考古データをデータベース化することで、歴史地震や火山噴火の研究における信頼性を高めていけると考える。

ア. 史料の収集とデータベース化

・地震火山関連史料の収集・分析とデータベースの構築・公開

地震史料集テキストデータベースの原典による史料校訂、およびデータ修正の作業を進めた（東京大学史料編纂所[課題番号：UTH_01]）。『新収日本地震史料』の編纂時の資料（史料写真）をデジタル化した（東京大学地震火山史料連携研究機構[課題番号：HMEV01]）。

史料中に記された地名を地図上に表示させるシステムを構築するために、自然言語処理を専門とする情報工学研究者と連携して、AIによる史料中の地名表現の自動抽出や地名表現のマークアップに取り組んだ。今年度は『新収日本地震史料』第3巻と第4巻を対象に、学習データの追加、および実践的な自動地名付与を行った（東京大学史料編纂所[課題番号：UTH_01]）。『日本歴史地名大系』地名項目データセットの活用手法を検討した（東京大学地震火山史料連携研究機構[課題番号：HMEV01]）。

安政東海・南海地震、安政江戸地震について書かれている大沢家本願寺関係文書の翻刻を行った。また「鳥羽御城石垣御修復一件」（鳥羽藩士による安政東海地震・津波での鳥羽城の被害と石垣修復に関する記録）、「違変記」（福岡藩士による災害等の記録の集成）の翻刻を進め、前者についてはその翻刻と解説集を発行した（名古屋大学[課題番号：NGY_01]）。

・日本海沿岸地域を中心とした地震・火山現象の解明のための史資料調査と解析

日本海沿岸地域を中心とした地震・火山現象を解明するため、各地の史料保存機関に所蔵される史資料の調査と分析、既刊の地震・火山噴火史料集に所収される史料の原本調査に基づく校訂作業を実施した。成果を年代順に記す。（1）年代記の史料学的検討により、1561年に上野国（現群馬県）で成立し1606年に書写された『新選和漢合図』の1442～1598年の地震関連記事8件（とくに浅間山噴火記事6件）、武蔵国埼玉郡（現熊谷市）伝来の『龍淵寺年代記』の1556～1598年の地震関連記事5件は信憑性が高いことを確認した。（2）1751年越後高田地震の名立小泊村の被害を記す文書の原本調査を行い、先行研究の誤りを確認し、山抜・築埋は80軒、家屋全壊率92.3%を導き出した。（3）1828年越後三条地震について永青文庫、京都府立京都学・歴彩館、新発田市立歴史図書館等の所蔵史料原本を精査し、同年春以降繰り返す豪雨・台風の被災と大飢饉の中で発生した三条地震の被災は多重複合災害であり復興に多年を要したことを立体的に明らかにした。

（4）1714年信濃小谷地震に関わる史料調査により高井郡東江部村山田家文書、松代藩『家老日記』に新史料を確認した。1804年出羽象潟地震の出羽庄内藩被害報告書（茨城県立歴史館鹿島（則）家文書）の原本調査を行い、既刊史料集の未読文字等を明らかにした。1858年飛越地震・大町地震関係を中心に長野県大町市の櫻井家文書・清水家文書の原本調査を行った。（5）新潟地方気象台所蔵の『管内地震報告』（1915～36年の新潟測候所分2冊、1923～1937年の高田測候所分2冊）を調査した。管内各地で（1）発震時刻と震動時間、（2）震度・性質に大きな差異があり、各観測所の観測体制に留意し地域差を

考慮する必要が見られた（新潟大学[課題番号：NGT_01]）。

・東北地方における地震・津波・火山情報に関する歴史資料の所在調査とデータ収集

1611年慶長奥州地震津波における関東地域の地震動について、『言緒卿記』の記述の分析を行った。『言緒卿記』では慶長十六年十月二十八日（1611年12月2日）条「辰刻大地振」、翌二十九日条に「至夜地動」と記されているが、この地震の規模についてはこれまで詳しい分析はされず、震度3程度とみる見解などもある。『言緒卿記』の中に記される地震記事は合計16回、そのうち「大地振」「大地震」と記されているのは、慶長奥州地震津波と、伝聞で聞いた慶長会津地震の記事、慶長十九年十月二十五日（1614年11月26日）の京都での地震の3回であった。『言緒卿記』では、未刻に「大地震」があったため、作者・山科言緒は二条城に滞在していた徳川家康に面会、その後院に参内し、地震被害の見回りを行っている。この地震による京都周辺の被害について、他史料の記述をみると、『当代記』・『慶長日記』（米沢市図書館所蔵）などは二条城周辺には家屋倒壊はなかったものの、天水桶が落下する被害があった。一方、後代の史料となるが『難波戦記』には家屋の転倒、『徳川実紀』では二条城周辺で被害がなかったものの、地震によって死者2名、けが人370人余があったと記される。ここから山科言緒の「大地震」の記述には、震動によって落下物や建物被害が生じる程度、震度4以上の地震動のことであるということが出来る（東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID01]）。

・史料を地震研究に活用する方法についての検討

e-コミマップを使った南海トラフ巨大地震史料の見える化を行った。昨年度までの三重県の歴史地震史料の可視化によって、過去の南海トラフ地震の比較検討が可能であることがわかり、史料の可視化の重要性、有効性を示すことができた。そこで今年度は静岡県、和歌山県、高知県に対して史料の可視化を行うため、入力史料の収集を行うとともに一部e-コミマップへの入力を行った。また、南海トラフ巨大地震の前に発生した内陸被害地震の1つである安政伊賀上野地震についても可視化を行い、表層地盤と被害の関係を確認した。今後南海トラフ巨大地震の破壊過程を考える上で参考になる津波堆積物調査の結果も、このe-コミマップで合わせて見られるよう入力を行った。作業を行っている中で、三重県および和歌山県の一部の地域では、地震後浜に集まって評議するといった特徴的な避難行動があることもわかった（名古屋大学[課題番号：NGY_01]）。

国会図書館の次世代デジタルライブラリーで公開されているテキストデータを活用して、『賀茂社記録』から「地震」をキーワードとして検出された記述を分析し、これまで知られていなかった地震記述を発見した。また、地震被害のマルチスケール要因分析に関する書籍を出版した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_01]）。

・研究コミュニティの構築・教育・市民への普及

2023年11月18日に第11回歴史地震史料研究会をオンラインにて開催し、本課題研究者メンバーを中心とした歴史学者13人・考古学者1人・地理学者1人による研究発表・討議を行った（参加者36人）。共同研究メンバーの昨年度の成果を発表する『災害・復興と資料』15号を刊行した（新潟大学[課題番号：NGT_01]）。

古文書解読のための定期的な勉強会（週 1 回，京都とつくばの 2 か所，オンラインまたはハイブリッド）を継続的に開催している。また，合宿形式の勉強会（2023年 8 月 24 日～26 日ハイブリッド，2024年 3 月 21 日～23 日ハイブリッド）を開催した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_01]）。

イ．考古データの収集・集成と分析

・考古・文献資料からみた歴史災害情報の収集とデータベース構築・公開ならびにその地質考古学的解析

全国の考古発掘調査に伴って検出される災害痕跡を集成した「歴史災害痕跡データベース (Historical Disaster Evidence Database: HDE-GISdb)」の一般公開 (<https://hde-gis.nabunken.go.jp/>) を開始した (図 1)。また公開に向けて，研究成果を下記内容についてまとめ，反映させた。a) データベース・レコードを構成するデータ項目を決定した。b) 災害痕跡の表示マーカーについて，デザイン開発を行いデータベース表示に反映させた。デザインについては，Web アンケート調査を用いてデザイン理解度や視認性を調査し，形状や表示色，表示方法の有効性の調査研究成果に基づき決定した。c) 「歴史災害痕跡データベース」の有効性の検証を進めた。長岡京跡（京都府）および周辺域や，奈良盆地北部の災害痕跡データの拡充を進め，その分布の特徴について調査を進めた。その結果，地震痕跡が既知の活断層（檜原断層や光明寺断層など）の延長域に分布する傾向や，これまで認識されていなかった軟弱地盤域での分布の集中傾向が明らかとなった。d) 遺構や遺物，放射性炭素年代測定による災害痕跡の形成時期の特定から，災害発生時期の検証を進めた。その結果，長岡京跡周辺で検出された地震痕跡は，大きく A) 縄文時代晩期中葉～末，B) 弥生時代前期末～弥生時代後期末，C) 古墳時代，D) 平安時代初頭～中世末，E) 近世初頭～現代であることが明らかとなった。また，「歴史災害痕跡データベース」のなかで，災害に関わる史料データを表示する機能を搭載した (図 2，奈良文化財研究所[課題番号：NAB_01])。

・縄文時代前期の東北・関東両地方における大規模地震の検討

縄文時代前期 (7050-5415 calBP) に本州東部で発生した地震活動について，縄文集落の分析から考古年代の特定等の基礎的な検討を行った。神奈川県小田原市羽根尾貝塚での活動を終焉させた地震を伴う隆起活動（房総半島先端部の隆起と連動した相模トラフ地震の可能性が高い），および三陸の海岸低地帯の集落動向からよみとれる津波を伴う大地震は，いずれも考古年代前期後葉の大木 3 - 諸磯 a 式古段階の時期であると推測した（新潟大学[課題番号：NGT_01]）。

（２）低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

近代的な機器観測による観測データ取得開始以前に発生した地震・火山噴火について知るためには，歴史学や考古学で用いる史料や考古資料に基づいて，調査・研究を実施していく必要がある。これらの史料や考古資料をデータベース化し，位置情報や時間情報を付与して被害分布図等を作成することによって，近代的な機器観測に基づく観測デー

タとの比較・検討が可能になる。このような被害分布図等を活用して、前近代に発生した低頻度大規模地震や火山噴火現象とそれらによる災害の実態を解明することは、長期的な災害対策の策定に寄与できると考える。

・史料を用いた地震・火山現象の分析

1800年から安政東海・南海地震に至るまでの期間の九州を中心とした西日本における記録を調査した。(1) 山口県文書館では毛利家文庫「浦日記」は既刊史料集に部分的に採録されているが、未採録の記事について調査をすすめ展既刊史料集に示された記主の所在地(震動の記録された場所)について多数の要訂正箇所があることが判明した。(2) 公益財団法人宇和島伊達文化保存会では「宇和島伊達家文書」・「桜田家文書」を調査し、天保十四年三月二十六日に蝦夷地で起こった地震津波に関する松前藩士山田三郎(三川)の六月二十六日(天保十四年)付書状を発見した。(3) 佐伯市歴史資料館では「佐伯藩郡方町方御用日記」を調査し、既刊史料集未採録の嘉永七年(安政元年)十一月四日・同五日・同七日の東南海地震に関する佐伯藩におけるまとまった記録を確認した。(4) 熊本博物館では肥後国玉名郡の住人坂本淳蔵が著した「東海道地震記録」や「加賀山家文書」のうち「日録」を調査した。その他、熊本大学附属図書館寄託「永青文庫史料」・同館所蔵「古閑家文書」、および鹿児島大学附属図書館所蔵「肝付家文書」の調査を行った(東京大学史料編纂所[課題番号:UTH_01])。1729年8月1日(享保十四年七月七日)に発生したM6.6~7.0と推定される地震について、複数の史料に記載された被害と有感地震数について再検討し、被害についてはWebマップを作成した(東京大学地震火山史料連携研究機構[課題番号:HMEV01])。

成果リスト

・論文・報告書等

榎原雅治・水野嶺・加納靖之, 2023, 19世紀前半九州中南部における地震記録—天保・弘化の「大地震」—, 歴史地震, 38, 37-49.

蝦名裕一, 2023, 東北地方太平洋沿岸における歴史津波の評価をめぐって, 第2回 日本災害・防災考古学会研究会資料・予稿集, 2, 138-145, doi.10.24484/sitereports.132325.

減災古文書研究会, 2024, 『鳥羽御城石垣御修復一件』翻刻.

原直史, 2023, 大名留守居廻状と災害情報の共有—文政11年三条地震を中心に, 災害・復興と資料, 15, 11-19.

原田和彦, 2023, 渡辺敏と善光寺地震研究, 災害・復興と資料, 15, 56-72.

石川寛, 2023, 「安政東海地震における尾張徳川家の救済活動」, 愛知県公文書館研究紀要, 創刊号, 101-107.

片桐昭彦, 2023, 中世関東の災害記録としての年代記—『年代記配合抄』・『赤城神社年代記』—, 災害・復興と資料, 15, 27-37.

片桐昭彦, 2023, 中世武蔵国における地震と年代記, 多摩のあゆみ, 192, 14-23.

栗畑光博・水野嶺, 2023, 中世における桜島火山噴火の年代と災害, 第2回日本災害・防災考古学界研究会資料・予稿集, 40-47.

名古屋大学減災連携研究センター古文書勉強会，2023，西尾市教育委員会蔵 田中長嶺『尾濃震災図録』翻刻。

大邑潤三，地震被害のマルチスケール要因分析，小さ子社。

杉森玲子・榎原雅治，2023，歴史資料から読み解く大地震，「関東地震」「南海トラフ地震」に備える（予知協），6-7。

山中佳子，2023，「高知県神社明細帳」にみる南海トラフ地震，中部「歴史地震」研究年報，11，149-157。

・学会・シンポジウム等での発表

蝦名裕一，2023，東北地方太平洋沿岸における歴史津波の評価をめぐって，第2回日本災害・防災考古学会，10。

原直史，2023，文政11（1828）年複合災害の様相—豪雨・飢饉・台風・地震—，第11回歴史地震史料研究会，9。

原田和彦，2023，安政江戸地震と松代藩の対応，第11回歴史地震史料研究会，13。

平井敬，2023，減災古文書研究会の活動紹介，関西歴史災害研究懇談会。

加納靖之・山本宗尚・橋本雄太・青池亨・中西一郎・大邑潤三・濱野未来，みんなで翻刻「賀茂社関係文書翻刻プロジェクト」から得られた地震記事，第40回歴史地震研究会，P-15。

加納靖之・大邑潤三，2023，地震史料集テキストデータベース中の地理情報，日本地球惑星科学連合2023年大会，MIS22-P05。

片桐昭彦，2023，『新選和漢合図』にみる地震・噴火，第40回歴史地震研究会（小田原大会），0-28。

片桐昭彦，2023，明応4年8月15日の「洪水」は地震津波か，第11回歴史地震史料研究会，4。

水野嶺・榎原雅治，2023，19世紀前半の阿蘇山火山活動履歴の再構築，京都大学火山研究所・熱学研究施設セミナー。

中村元，2023，1920・30年代地方測候所の地震調査について—新潟測候所の事例に即して—，第11回歴史地震史料研究会，15。

小野映介・小岩直人・柴正敏・高橋未央，2023，津軽平野中部における完新世の堆積環境変遷と地形変化，日本地理学会2023年秋季学術大会，P012。

小野映介，2023，平安京左京南部における地形環境変遷と地盤環境，第11回歴史地震史料研究会，2。

齋藤瑞穂・鈴木正博，2023，縄文三陸地震津波研究（6）—縄文時代最後の地震・津波は弥生化をどのくらい妨げたか？—，第11回歴史地震史料研究会，1。

山中佳子，2023，南海トラフ巨大地震解明に向けた史料の見える化 その2，中部『歴史地震』研究懇談会。

矢田俊文，2023，八戸藩における1843年・1858年の地震による津波被害，第11回歴史地震史料研究会，10。

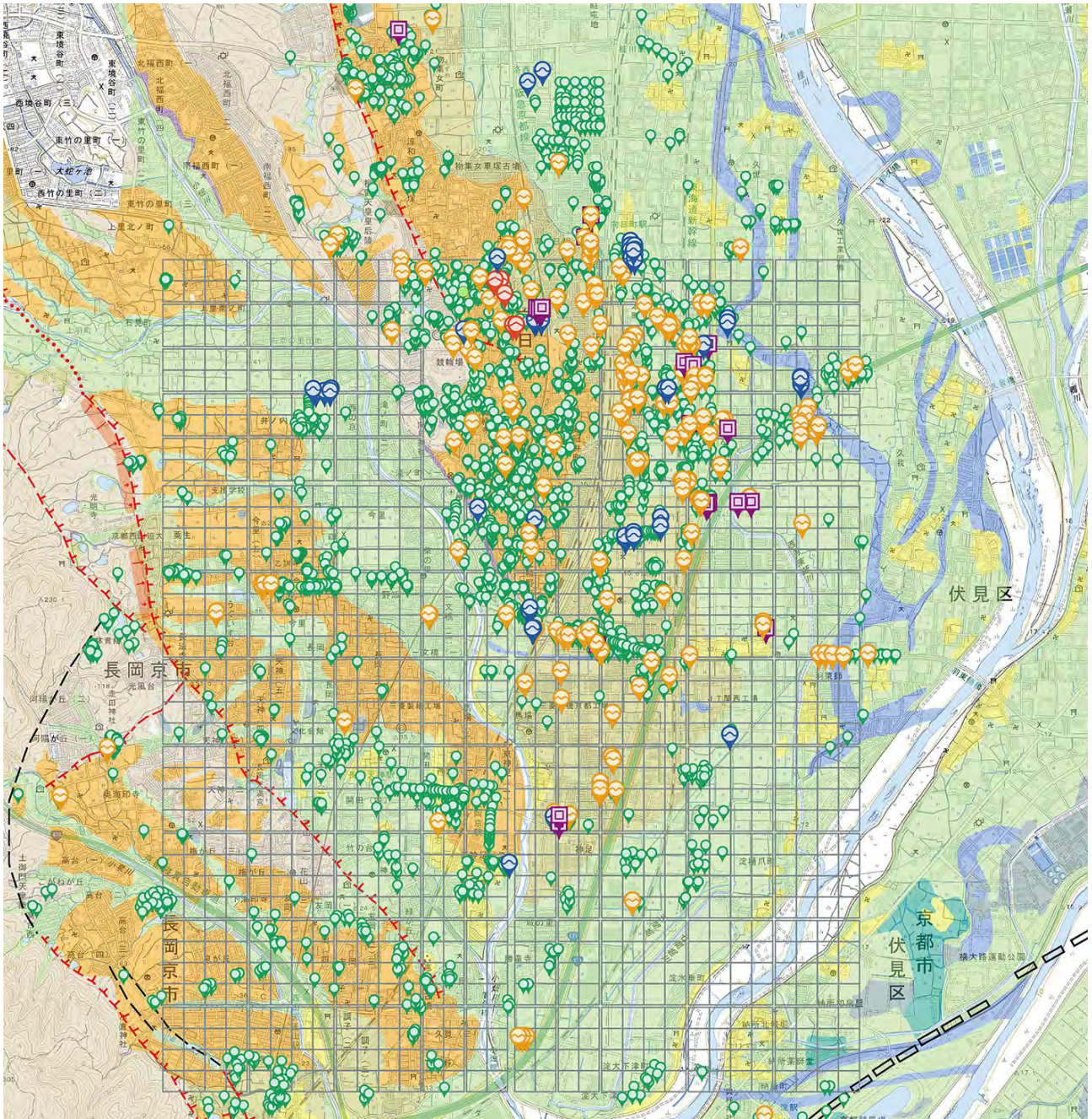


図 1．歴史災害痕跡データベースの画面例（奈良文化財研究所[課題番号：NAB_01]）

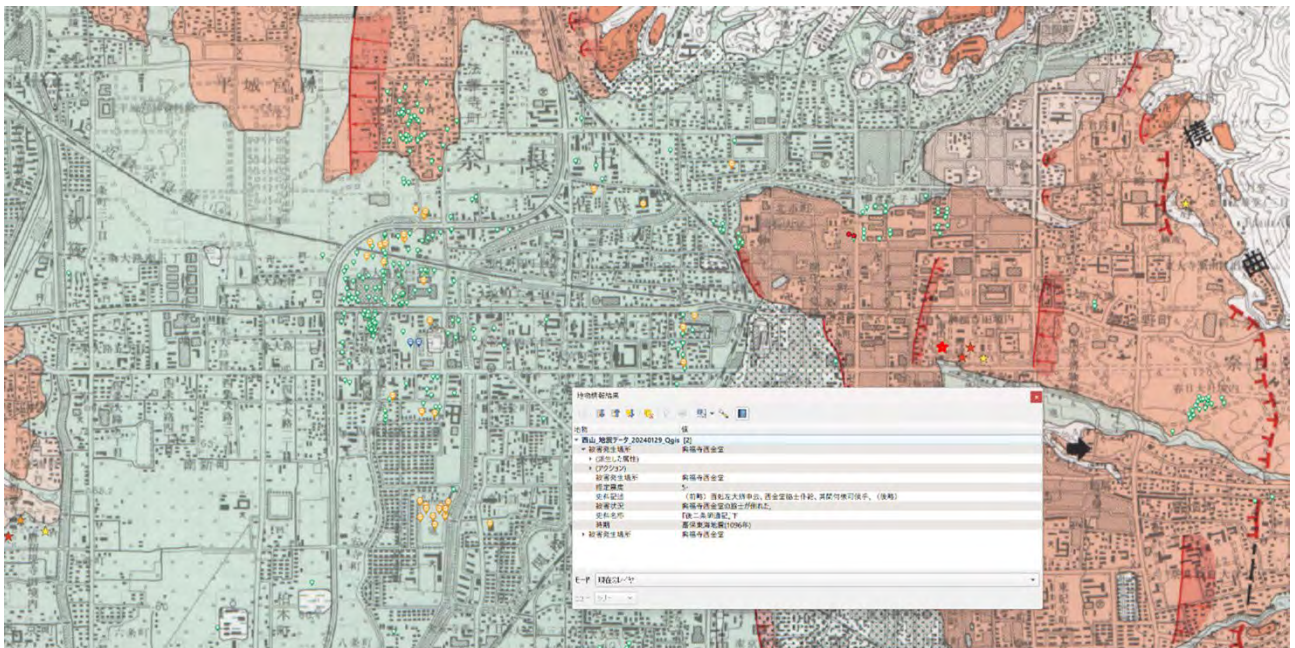


図 2．歴史災害痕跡データベースでの史料データの表示例（奈良文化財研究所[課題番号：NAB_01]）

1 (8) 観測研究基盤

「観測研究基盤」計画推進部会長 鶴岡 弘

(東京大学地震研究所)

副部会長 松島 健

(九州大学)

観測研究基盤部会のミッションは、地震火山観測研究にとって不可欠である観測データを安定的かつ継続的に取得するために、日本全国に展開されている陸域および海域の地震、地殻変動、津波、潮位、電磁気、重力等の観測基盤を維持すること（観測基盤の整備）、さらにこれらの観測データの解析技術等の開発・高度化（観測・解析技術の開発）を進展させること、観測データをリアルタイムに効率的に流通する基盤（地震・火山現象のデータ流通）を維持するとともに、観測データの公開や研究成果を共有するシステムの開発（地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開）である。以下に令和5年度の成果の概要と本計画における簡潔な成果の概要をまとめた。

令和5年度の成果の概要

5. 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

防災科学技術研究所においては、陸海統合地震津波火山観測網(MOVLAS)及び首都圏地震観測網(MeSO-net)の安定した運用により得られたデータを集約・公開するとともに、被害地震等の発生に際してはその活動状況のモニタリング結果を地震調査委員会・地震予知連絡会等またはWebを通して随時提供した。石川県能登地方において2023年5月5日14時42分にMj6.5、同日21時58分にMj5.9の地震が発生した。これらM5を超える地震は、2021年夏ごろに活性化した地震活動の北側で発生し、M5を超える地震を含めた地震活動は2021年夏ごろ以降の地震活動域と重なるが、さらに北(海)側にも分布していることを示した。DD法を用いた震源分布から、余震は北東-南西に15 km程度、北西-南東に10 km程度の領域内に南東傾斜で分布していること、最大余震は本震の断層面よりも深部で発生したことがわかった。また、本地震発生と15時間の高周波エネルギー輻射量について調べたところ、本震のエネルギー輻射量に対する余震からの積算エネルギー輻射量の割合は42%であった。2023年10月9日午前5時～6時半頃に鳥島近海においてM4～5地震が10回以上発生し、関東から沖縄の広い範囲で津波が観測された。F-net広帯域地震計の記録は、2～6 Hzの帯域では直達波に比べてTフェーズが顕著であるという特徴を持つことを示した。DONET及びS-netでは地震規模から予想されるよりも大きな振幅の水圧変動が記録された。能登地方における5月5日Mj6.5の地震以降の活発な地震活動は時間の経過とともに発生数が減少していたが、2024年1月1日に能登半島地震(Mj7.6, 最大震度7強)が発生し、その後の地震活動が北東-南西方向約160 kmにわたって分布していることがわかった。発生当日には強震観測網サイトより令和6年能登半島地震による強震動ペ

ージを公開し、その後数日以内にMOWLAS特集ページ、能登半島版強震モニタを公開した。また、1月2日の地震調査委員会臨時会及び11日の地震調査委員会1月定例会には、詳細震源分布、F-netによるメカニズム解、強震動、震源過程、高周波エネルギー輻射量について資料を提出し、直ちにWebで公開した。また、この地震の発生により大規模な停電が発生したが、リモート監視により観測点の状況を随時確認し、停電した10観測点の保守作業を複数回実施することにより観測網の維持管理に努めた。N-netにおいては、沖合システムと沿岸システムの2つのシステムのうち、沖合システム18台において製造を終え、積込み前に観測機器とケーブルを接続した状態でのシステムアセンブリ試験を実施した上で、10月よりケーブル敷設船に積込み、海底への敷設を実施した。また串間および室戸ジオパーク陸上局内に陸上部機器を設置しシステムの動作確認をし、海底からのデータ取得が可能になった（防災科学技術研究所[課題番号：NIED05]）。

気象庁は地震観測網や地殻変動観測網などの観測基盤を維持し、関係機関の地震観測データの一元的処理結果の関係機関への提供を行った。顕著な地震活動や地殻変動観測結果について、定期・臨時に情報発表・記者会見等を行うとともに、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会や地震調査委員会において報告を行った。震源データを日々更新するとともに、2022年9月までの精査後の震源データ（確定値）を公開した（気象庁[課題番号：JMA_09]）。

国土地理院は、全国において、GNSS連続観測点を維持し、観測を継続した。また、新たに国際GNSS事業(IGS)解析センターの認定を受け、GNSS精密暦の提供を開始した。加えて、地殻変動監視において必要となる「電子基準点日々の座標値」の算出を着実に継続した。また、GEONETによる日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングを着実に実施し、令和5年5月5日と令和6年1月1日に発生した石川県能登地方の地震活動に伴う地殻変動を検出した。さらに、2019年春頃から四国中部、2020年夏頃から紀伊半島西部・四国東部や九州南部、2022年初頭から静岡県西部・愛知県東部で発生したプレート間ゆっくりすべり(スロースリップ)現象に伴う非定常的な地殻変動、硫黄島の火山活動に伴う地殻変動等を検出するなど、防災や地震発生・火山活動のメカニズムに関する研究等に寄与した。これらのモニタリング結果は、速やかにホームページなどで公表するとともに、地震調査委員会、火山噴火予知連絡会等に報告した(国土地理院[課題番号：GSI04])。全国の電子基準点を対象とした電子基準点リアルタイム解析システム(REGARD)を引き続き運用した。令和6年能登半島地震において、輪島で水平約1.3mの地殻変動をリアルタイムに検知し、「電子基準点日々の座標値」による後処理解と概ね整合する結果を得た。得られた地殻変動は国土地理院ホームページで公表するとともに、関係機関に断層モデルを含め情報提供を行った。REGARDにおけるMCMC法による断層推定の本格運用に向けて、関係機関との調整を実施した。また、PPPによる測位の本格運用に向けて、令和4年度に構築したプロトタイプシステムの冗長系を構築した。REGARDの信頼性向上を目的として導入したリアルタイム測位解の品質に着目した異常値判定の仕組みを引き続き運用した。千葉県房総半島に設置している小型で機動性に優れたGNSS観測装置計30点について、前年度に引き続き観測を継続した。観測データを用いてF5準拠の座標値を日々更新することにより、当該地域について、稠密のGNSS観測および解析を実現した(国土地理院[課題番号：GSI_08])。ALOS-2のSARデータを使用して北方四島を含む国土全域を対象に定常的

にSAR干渉解析を行った。また、ALOS-2の蓄積された観測データを用いた干渉SAR時系列解析を国内の火山を対象として行ったほか、全国の地盤・地殻変動を把握するため、全国を対象とした干渉SAR時系列解析を実施した。さらに、国内外で発生した地震や火山活動に伴う地殻変動を検出するため、緊急観測データを用いて解析を実施した。国内で発生した地震では、2023年5月5日に発生した石川県能登地方の地震、2024年1月1日に発生した令和6年能登半島地震において、地震に伴う地殻変動が検出された。特に、令和6年能登半島地震では能登半島北部の広い範囲で隆起が検出され、輪島市西部では約4 mもの隆起が検出された（図1，国土地理院[課題番号：GSI_07]）。

大学は、地震観測データ流通網JDXnetの安定的な運用を継続し、令和6年3月26日にデータ流通ワークショップを開催した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_19]）。高知大学においては、実験のため上限500 Hzサンプリングでの観測と微動アレイ解析、HVSAR解析を実施し、半径2 m以内というごく局地的な範囲であっても地震動として観測可能なコヒーレントな信号は概ね20 Hzまでの範囲に限定される結果を得た（高知大学[課題番号：KOC_01]）。

気象庁、国土地理院及び海上保安庁は、潮位連続観測を継続した（気象庁[課題番号：JMA_10]，国土地理院[GSI_05]，海上保安庁[JCG_02]）。気象庁は、柿岡、女満別、鹿屋及び父島での地磁気4成分観測を実施し、陸域、海域での磁気測量をはじめ、大学等による電磁氣的観測研究あるいは幾つか提案されている日本域における標準的な全磁力磁場モデルの算出方法の検証・改良を進めるために、高精度の地磁気基準値を提供した。火山活動起源のシグナルを抽出するために用いられる「参照データとの差を求めて局所的な磁場変動だけを取り出す」という手法に加え、地域によって変化の大きさ、傾向が異なることに対処する上で必要となる地域毎の基準値の観測精度を維持するため、地磁気観測点への車両や建築物等による人工的な磁気擾乱の監視観測を維持し、異常値の検出・補正処理を施した（気象庁[課題番号：JMA_11]）。国土地理院は、重力測量において、全国の航空重力測量を完了した。得られた重力データを利用して、精密重力ジオイドの計算を実施した。地磁気測量については、測地観測所等（鹿野山測地観測所、水沢測地観測所及び全国10か所に設置している地磁気連続観測装置）において、地磁気連続観測データを取得するとともに、地磁気絶対観測等を実施した（国土地理院[課題番号：GSI_06]）。

山梨県富士山科学研究所は、重力観測網の拡充及び、前年度より継続したキャンペーン観測を実施した。これまではスバルラインの起点付近の富士山科学研究所点と終点の5合目点において絶対重力測定が実施できる環境を整備し、中間各点を相対重力計によって測定してきた。富士山から距離のある都留文科大学の図書館内の一室に新たな基準点を設け絶対重力測定を実施した（山梨県富士山科学研究所[課題番号：MFRI02]）。

北海道立総合研究機構地質研究所は、雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、倶多楽、有珠山及び北海道駒ヶ岳において、地球化学的・地球物理学的モニタリングを継続して行い、火山活動の変化を捉えるためのデータの蓄積を行った。いずれの火山においても、明らかな活動の活発化を示唆する変化は認められなかった。得られたデータについては、気象庁や大学、地元自治体と随時情報を共有し、各火山の監視や防災対策に活用された。十勝岳や雌阿寒岳での長期間にわたる温泉・噴気観測の結果をまとめ、温泉や噴気の変化と火山活動との関係を検討した（北海道立総合研究機構地質研究所[課題番号：HR0_01]）。

気象庁は、大学や防災科学技術研究所等関係機関の協力の下、火山噴火予知連絡会で中長期的な火山監視体制の強化が必要とされた50火山の連続的な監視観測を継続した。これらの観測成果は、噴火警報等の防災情報の発表や火山解説資料の作成に利用するとともに、地震火山月報(カタログ編)や火山年報に取りまとめて公表した(気象庁[課題番号：JMA_12])。

イ. 観測・解析技術の開発

東京大学地震研究所は、高信頼性を保ち、大規模展開に適した対費用効果をあげるケーブルシステムの開発、研究の進展に伴い観測高度化可能なシステム、GNSS/A や海底孔内観測システムなどと統合できるシステムの開発については、既設の三陸沖海底光ケーブル式地震津波観測システムおよび新規開発した海底光ケーブル式地震津波観測システムの両方を用いた併行観測を継続しており、両システムの保守および改良を引き続き実施した。分散型音響センシングなどの最新技術を取り入れたケーブルシステムの開発として、三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムの予備光ファイバおよび新潟県粟島周辺に設置されている海底ケーブル地震観測システムのファイバに、DAS 計測を適用することによって、空間的に高密度の海底地震観測を実施した(東京大学地震研究所[課題番号：ERI_22])。

東北大学では、広域火山観測網について、全キャリアが圏外となる2点以外について全点を冗長化した4G携帯回線化した。観測・伝送装置を低消費電力化・DC駆動に切り替えたことで、非常時においても蓄電池で長時間の観測継続が可能となった。また、稼働状況についてzabbixで一括監視できるようになった。低速サンプリングデータについては、920MHzLoRaでの通信試験を引き続き実施した。さらにStarLink衛星通信を用いたデータ伝送の試行を行い、WINシステムを用いた地震観測データの伝送に問題ないことを確認した。ただし、消費電力等が大きいことや着雪の影響については今後の課題とした。また、能登半島北東部で2022年より実施した臨時地震観測データを用いて、群発地震震源域のS波スプリッティングと地震波速度構造を推定することができた。令和4年度に構築した「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の活動の一環として、RTCM形式でのソフトバンク独自基準点のリアルタイムGNSSデータ数点の提供を受け、その地殻変動観測観点からの精度評価を開始した(東北大学[課題番号：THK_13])。名古屋大学においては、試作機のテスト運用、評価を実施した。改良を施した現用機(3G通信)を御嶽山山頂の試験観測地10点に配置し、通年地震テレメータ観測の实地試験を継続した。改良以降、電力供給量が低下する冬季の運用成績が改善された。試作機は大きな問題を発生することなく、保守負担の少ない安定した運用が実現され、完成度の高い観測機器として評価できた(名古屋大学[課題番号：NGY_08])。

情報通信研究機構においては、機械学習を用いてPi-SAR観測データから浸水領域を抽出するモデルを構築するなど、データ解析手法の開発を行った。また、CSAR(Circular SAR)の机上検討を行った。Pi-SAR X3の観測では、能登半島地震の被災エリアの15cm分解能での観測を実施した(情報通信研究機構[課題番号：NICT01])。

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

北海道大学は、地殻変動等多項目データの全国流通・一元化・蓄積・公開を行うデータサーバーを安定的に運用し、大学・気象庁等関係機関データの充実を図った。長期間データの簡易解析の機能拡張として、ひずみ解析及び、ひずみストリーミング解析機能に対し、4成分ひずみ計の場合には成分を選択できる機能を付与した。学部生・大学院生を対象とした地殻変動観測技術の研修を実施した（北海道大学[課題番号：HKD_08]）。

東京大学地震研究所は、試作してきた次世代の対話検出処理ソフトウェアに、ランニングスペクトルの表示(図2)や波形の選択部分のスペクトルの表示機能を追加した。これにより、例えば火山で観測されるような波形やノイズを含んだ波形などの周波数解析が容易に可能である。また、伝送系システムの仕様について検討した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_24]）。高知大学においては、WIN波形データ伝送プロトコルの内容整理および次世代における波形フォーマットや伝送プロトコルの策定・提言を行なった（高知大学[課題番号：KOC_02]）。

エ. 地震・火山現象のデータデースの構築と利活用・公開

東京大学地震研究所では機関リポジトリ(UTokyo Repository)に外部で公開しているデータベース等のメタデータを登録できる。東京大学地震研究所は、いくつかのデータをこのリポジトリに登録し、DOI付与も実現した。機関リポジトリを通じて「データカタログ横断検索システム」やGoogle Dataset Searchなどにも登録された。さらに、防災科学技術研究所のMOWLASの観測網に付与されているDOIを用いて、データの引用状況について分析した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_18]）。

気象庁は、地震カタログ(震源、発震機構)を令和3年4月から令和5年3月まで作成し、地震月報(カタログ編)として気象庁ホームページに公開した。震源過程解析については、令和6年能登半島地震のM7.6のイベント含む国内外の地震について解析を行い断層すべり分布を推定し、解析結果を気象庁ホームページに公開した（気象庁[課題番号：JMA_14]）。定常観測点の4地点(柿岡、女満別、鹿屋、父島)に、調査観測点の祓川を加えた5観測点における地磁気4成分連続観測データを、月毎に地磁気観測所データベースに登録、公開するとともに、定常観測点のデータを国際的なデータセンターに提供した。また、今年度の地磁気アナログ記録のデジタルデータ化は、女満別(1962年)、鹿屋(1962～1963年)の地磁気アナログ記録をデジタル画像化したほか、女満別・鹿屋(1967年)のデジタル画像を高時間分解能のデジタルデータへ変換した。さらに、柿岡(1958年)の変換が困難だった顕著現象について、デジタルデータへ変換した(気象庁[課題番号：JMA_13])。常時観測火山に選定された全国の50活火山について、東京の火山監視・警報センター、札幌、仙台、福岡の地域火山監視・警報センター、及び鹿児島地方気象台において、地震計、空振計、GNSS等の観測データを常時収集するとともにデータの解析を行い、それらの成果の蓄積を進めた（気象庁[課題番号：JMA_15]）。

産業技術総合研究所は、火山関連データベースとして、大規模噴火の特徴・推移、中長期的前駆活動を取りまとめた大規模噴火データベースの構築を進め、新たに屈斜路カルデラ、鬼界カルデラの情報を収集し、これまでの摩周・支笏・洞爺・濁川・十和田・始良・阿多・池田カルデラと合わせて合計10つのカルデラ火山の詳細情報を取りまとめた(図3)。目撃事例のある火砕噴火の中長期的・短期的前駆活動、噴火推移情報を取りまとめ

た噴火推移データベースについても構築を進め、新たに北海道駒ヶ岳1929年噴火、アグン1963年噴火等を追加し、合計18の噴火の詳細情報を取りまとめた(図4)。日本国内外の噴火で噴出した火山灰粒子の実体顕微鏡画像などの情報を収録した火山灰データベースでは、新たに噴出年代別の検索機能を追加するとともに、桜島・スメル・新島・諏訪之瀬島・浅間山・伊豆大島等のデータを追加し、合計の試料数1,144、火山灰粒子の画像データ等のコンテンツ数11,949となった(図5)(産業技術総合研究所[課題番号:AIST11])。

国土地理院は、令和4年度に作成した「北海道駒ヶ岳」「白山」「鶴見岳・伽藍岳」「九重山」(くじゅう連山)の火山基本図を刊行するとともに、数値データを公開した。また、令和4年度に調査を実施した「蔵王山」の火山土地条件図を刊行するとともに、画像データを公開した。「アトサヌプリ」「樽前山」「三宅島」「青ヶ島」の火山基本図及び数値データの作成、並びに「焼岳」の火山土地条件調査を実施した。長町-利府線断層帯とその周辺「松島」、会津盆地西縁・東縁断層帯とその周辺「田島」、長野盆地西縁断層帯とその周辺「坂城」、伊那谷断層帯とその周辺「満島」、屏風山・恵那山断層帯及び猿投山断層帯とその周辺「師崎」、弥栄断層とその周辺「浜田南部」「益田南部」、糸魚川-静岡構造線断層帯とその周辺「韮崎 改訂版」の8面について1:25,000活断層図を公開した。また、雫石盆地西縁-真昼山地東縁断層帯、北上低地西縁断層帯、柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯及び湖北山地断層帯、釜戸断層、鹿野-吉岡断層、上町断層帯、有馬-高槻断層帯及び六甲・淡路島断層帯を調査した(国土地理院[課題番号:GSI_10, GSI_09])。

研究成果共有システムの運用について運用責任は戦略室とし、戦略室が中心となってポリシーの検討、コンテンツの調整、課題や部会への関係情報収集や依頼、周知広報を継続して実施した。実際のシステム運用は、企画部の学術専門職員と戦略室教員及び課題担当者にて継続して行った。課題間連携及び部会間・総合研究グループ間連携で必要となるメタ情報を中心としてデータの収集を行なった。部会内や部会間・総合研究グループ間連携を促進するための共有オンラインストレージ(Nextcloud)を継続して運用した。令和4年度における観測や開発したソフトウェア等のメタ情報を整理して研究成果共有システムにて公開を行なった(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_25])。

本計画における成果の概要

本計画期間内において、日本付近で発生した被害地震は、令和6年1月1日に発生した能登半島地震(M7.6)を筆頭におよそ25地震であり、マグニチュード7を超える地震は、令和6年1月1日に発生した能登半島地震(M7.6)および令和4年3月16日の福島県沖(M7.4)、令和3年2月13日の福島県沖(M7.3)の3地震であった。これらの地震観測データは、防災科学研究所、気象庁、国土地理院、海上保安庁、産業技術総合研究所、大学等により管理・運用されている日本全国の陸域・海域に展開された地震、地殻変動、津波、潮位、電磁気等の観測基盤により取得され、本計画において高度化された解析技術により調査がなされ、解析結果は、地震調査委員会、地震予知連絡会やWebなどに随時提供された。防災科学研究所は、陸海統合地震津波火山観測網(MOWLAS)および首都圏地震観測網(MeS0-net)の安定的な運用に加え、南海トラフ海底地震津波観測網(N-net)の整備を進めた。気象庁は、関係機関の地震観測データを一元的に処理するEPOS(Earthquake Phenomena Observation System:地震活動等総合監視システム)およびREDC(Regional

Earthquake Data Center System：地域地震センターデータ処理システム）の更新を実施し、一元化処理による震源カタログについては、令和5年3月までが作成された。また、一元化処理においては、令和2年9月から海域観測網（S-net, DONET2）のデータの活用が開始され、自動震源決定の際にノイズとなるエアガン起源のシグナルの除去ロジックについても令和3年7月から適用された。東京大学地震研究所においては、DAS計測やGNSS/Aや海底孔内観測システムなどと統合できるシステムの開発が進められた。国土地理院においては、電子基準点リアルタイム解析システム（REGARD）の高度化が進められ、MCMC法による断層推定、測位解の品質による異常値判定、PPP（精密単独測位）に基づく解析が実装された。さらに、汎用的なGNSS機器を用いた小型GNSS観測装置の開発なども進められた。また、ALOS-2の後継機であるALOS-4による高頻度観測データを用いた解析を可能とするための解析手法の高度化やシステム構築が進められた。情報通信研究機構では、Pi-SAR X3による15 cm分解能での火山観測に成功し、新たな火山の観測体制が整備された。山梨県富士山科学研究所においては、重力観測網の構築により火山のモニタリング体制が整えられた。北海道立総合研究機構においては、継続的な地球物理学的・地球化学的モニタリングが実施され、気象庁や大学と共有するとともに、地元自治体等へ情報を提供された。地震データ流通においては、大学等により運用されている観測データ流通網（Japan Data eXchange network）JDXnetの運用が安定的に行われた。北海道大学では、地殻変動連続観測等の多項目観測データの全国流通・一元化によりデータの蓄積・公開が実施され、気象庁のひずみ計観測網データのリアルタイム流通が実現した。東京大学地震研究所においては、全国規模のデータ流通及びデータ処理で広く用いられているプログラム(win)について、その近代化と機能向上が着実に進められるとともに、伝送プロトコルの検討が高知大学においても進められた。東北大学においては、免許帯である400 MHz帯のほか、2012年の電波法の改正に伴って新設された920 MHz帯の利用等の検討が進められた。名古屋大学においては、小電力・小型・携帯テレメータ地震観測装置の改良開発が進められ、令和4年2月からの御嶽山の火山活動の活発化の際には、リアルタイムデータ取得に活用され現象の把握に貢献した。

データベースの構築と利活用・公開については、東京大学地震研究所において、Digital Object Identifier（論文等の永続的識別子）としてよく知られるDOIの適切な利用の検討が進められ、データジャーナルやデータリポジトリの活用の事例や可能性についても提示された。また、以下に本計画で開発・公開されたデータベースやDOIをリストアップした。

- 大規模噴火データベース <https://gbank.gsj.jp/volcano/ledb/>
- 噴火推移データベース <https://gbank.gsj.jp/volcano/esdb/>
- 火山灰データベース https://gbank.gsj.jp/volcano/volcanic_ash/
- 火山ハザード情報システム <https://volcano.g-ever1.org/>
- アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システム
<https://ccop-gsi.org/gsi/geohazard/>
- 潮位観測データ <https://cais.gsi.go.jp/cmdc/centerindex.html>
- 地磁気観測所が公開する各種データ資料

https://www.kakioka-jma.go.jp/info/kmo_datadoi.html

最後に，研究成果共有システムの構築については，戦略室によりそのデータフォーマットやポリシー等が検討され，観測や開発したソフトウェア等のメタ情報が令和3年度以降の一覧が<http://evrrss.eri.u-tokyo.ac.jp/database/index.html> から閲覧可能となっている。

次期計画への展望

観測研究基盤については関係機関による不断の努力によって適切に維持がなされ，質の高いデータが着実に蓄積されている。また，データ流通基盤も同様に柔軟な運用がなされリアルタイムかつ連続での集配信が実現できている。解析システムについても粛々と高度化がなされ整備が進んだ。また，個々のデータベースについても着実に整備が進められている。さらに，研究成果についても戦略室による方針のもと運用が昨年度より開始され，本計画において取得されたデータや開発されたソフトウェアの公開が進んだ。次期計画に向けては，これらの公開をさらに進めるとともに，データ連携やデータベースの統合化，並びに研究成果共有システムのさらなる構築が求められる。

成果リスト（令和5年度分）

- Aoi, S. T. Takeda, T. Kunugi, M. Shinohara, T. Miyoshi, K. Uehira, M. Mochizuki, N. Takahashi, 2023, A new seafloor cable-type observation network in the western half of the anticipated Nankai Trough earthquake source area: N-net, IUGG, IUGG23-1127
- Miyoshi, T., T. Takeda, S. Aoi, M. Shinohara, 2023, Nankai Trough Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis (N-net): Contribution to Early Detection of Seismic Waves and Tsunamis, IUGG, S02p-126
- Takamatsu, N., S. Abe, K. Ohno, S. Kawamoto, K. Akiyama, 2023, Precise orbits determination results for GNSS using MADOCA, IUGG 2023 Berlin
- Takamatsu, N., K. Ohno, S. Abe, T. Miyazaki, Y. Takei, S. Murakami, and S. Kawamoto, 2023, Improving REGARD: real-time finite fault estimates with dense GNSS CORS network in Japan, IUGG 2023, Berlin
- Kobayashi, T., H. Munekane, M. Kuwahara, H. Furui, 2023, Insights on the 2023 Kahramanmaraş Earthquake, Turkey, from InSAR: Fault Locations, Rupture Styles, and Induced Deformation, Geophysical Journal International, 236, 1068-1088, <https://doi.org/10.1093/gji/ggad464>
- Takagi, Y., M. Ishigaki, T. Nakakuki, H. Yoshifuji, M. Honda, K. Mori, and Y. Sato, 2023, Status of the Ishioka Geodetic Observing Station, EVGA Meeting 2023, P-23
- Ueshiba, H., H. Yoshihiji, M. Honda, and K. Kokado, 2023, Status report of Tsukuba VLBI Correlator, 15th DiFX Users and Developers meeting
- Matsumoto, S., H. Furui, H. Yoshifuji, H. Ueshiba, A. Suzuki, M. Honda, K. Kumagai, T. Kobayashi, and K. Kokado, 2023, The 2023 Local-tie surveys conducted by GSI, The 13th General Meeting of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry

- Kokado, K., M. Honda, H. Ueshiba, H. Yoshifuji, M. Ishigaki, H. Furui, and A. Suzuki, 2023, Activities of GSI on VLBI operation and monitoring, The 13th General Meeting of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
- Ishigaki, M., K. Le Bail, M. Mouyen, R. Haas, and T. Nilsson, 2023, How does station position modelling affect the VLBI scale in ITRF2020, The 13th General Meeting of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
- M. Nakashima · T. Ogawa · Y. Sugawara · K. Sakai · C. Kato · K. Ichimura · K. Matsuo, 2023, Nationwide airborne gravity surveys for developing a new precise gravimetric geoid model in Japan, AGU Fall Meeting 2023, G33A-0531
- 今西祐一・西山竜一・本多亮, 2023, 絶対重力計を用いた重力鉛直勾配の測定, 測地学会誌, 69, 8-17
- Takahashi, R., T. Ogino, K. Ohmori and Y. Murayama, 2023, Chemical and thermal changes in hot spring waters and fumarolic gases related to volcanic unrest at Meakandake volcano, Japan: Results of long-term geochemical monitoring from 1986 to 2022, J. Volcanol. Geotherm. Res., 443, doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107934
- Shinohara, M., S. Aoi, M. Mochizuki, K. Uehira, T. Yamada, T. Kunugi, T. Takeda, R. Noda, S. Iwai, 2023, Field evaluation of newly developed MEMS technology silicon resonant sensor for seafloor pressure observation, IUGG, S02p-133
- Shinohara, M, 2023, Development of ICT seafloor cable observation system and its operation, New Technology-Enabled Discoveries To Understand Earth' s Seafloor for Hazards and Sustainability
- Shinohara, M, 2023, Continuous monitoring of earthquakes and tsunamis for seven years by ICT seafloor cable observation system in Japan, SMART Cables, Science and Society Workshop
- Takeda, T., S. Aoi, T. Kunugi, M. Shinohara, T. Miyoshi, K. Uehira, M. Mochizuki, N. Ta, 2023, System Design of Nankai Trough Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis (N-net) and its Long-Term Reliability, IUGG, S02p-135
- Yin, J., W. Zhu, J. Li, E. Biondi, Y. Miao, Z. J. Spica, L. Viens, M. Shinohara, S. Ide, K. Mochizuki, A. L. Husker, and Z. Zhan, 2023, Earthquake magnitude with DAS: A transferable data-based scaling relation, Geophys. Res. Lett., 50, e2023GL103045, <https://doi.org/10.1029/2023GL103045>
- Masanao SHINOHARA, 2023, Pioneering Seafloor Seismic Observations Using Distributed Acoustic Sensing Technology, Twenty-eighth International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-28), Plenary Session III
- Okada, T., Savage, M.K., Sakai, S., Yoshida, K., Uchida, N., Takagi, R., Kimura, S., Hirahara, S., Tagami, A., Fujimura, R., Matsuzawa, T., Kurashimo, E., Yoshihiro, 2024, Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm and their relation with earthquake swarm activity in the Noto Peninsula, central Japan, Earth, Planets Sp., 76, 24, doi:10.1186/s40623-024-01974-0

- Y. Maeda, T. Watanabe, 2023, Seismic structure and its implication on the hydrothermal system beneath Mt. Ontake, central Japan, *Earth, Planets and Space*, 75:115
- 児島 正一郎 他, 2023, DeepLab v3+を用いたPi-SAR2画像からの浸水被害地域の抽出解析, *土木学会論文集*, 79, 1, <https://doi.org/10.2208/jscej.23-17199>
- Gocho, M., 2023, Sparse Reconstruction and Resolution Improvement of Synthetic Aperture Radar Using Deconvolution ISTA, *IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, 106, 1363, <https://doi.org/10.1587/transcom.2023CEP0013>
- Kojima et al., 2023, DEVELOPMENT STATUS OF NICT' S NEW X-BAND AIRBORNE SAR (PI- SAR X3), *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*
- Tamaribuchi, K., F. Hirose, A. Noda, K. Iwakiri and H. Ueno, 2021, Noise classification for the unified earthquake catalog using ensemble learning: the enhanced image of seismic activity along the Japan Trench by the S-net seafloor network, *Earth, Planets and Space*, 73, doi:10.1186/s40623-021-01411-6
- 宝田晋治・Bandibas, J.・河野裕希・金田泰明・米谷珠萌・長田美里, 2023, 火山ハザード情報システムの構築., *地質調査総合センター速報*, 84, 153-161
- 宝田晋治・Bandibas, J.・滝口亜紀・元島温子, 2023, 火口地形のデジタル化と閲覧検索システムの構築., *地質調査総合センター速報*, 84, 49-53

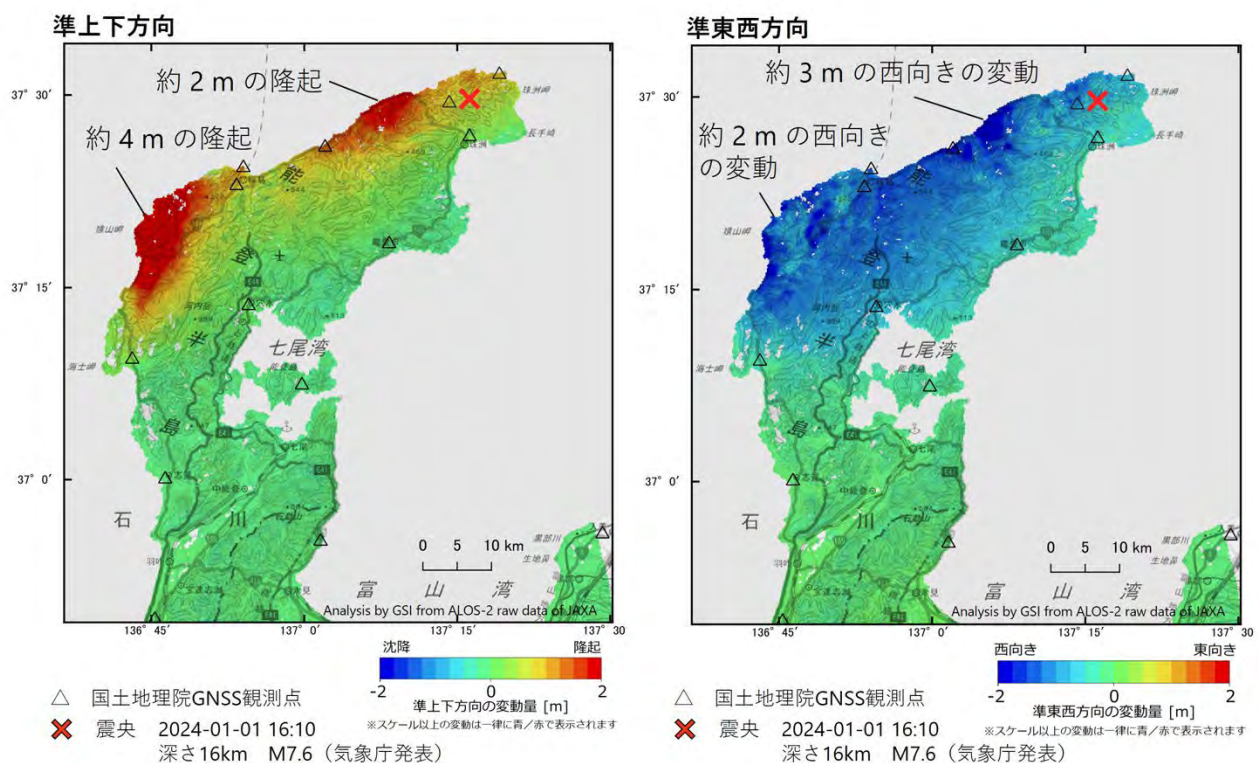


図 1. ALOS-2観測データを用いた2.5次元解析による令和 6 年能登半島地震に伴う地殻変動(左: 準上下方向, 右: 準東西方向の変動分布) (国土地理院[課題番号: GSI_07])

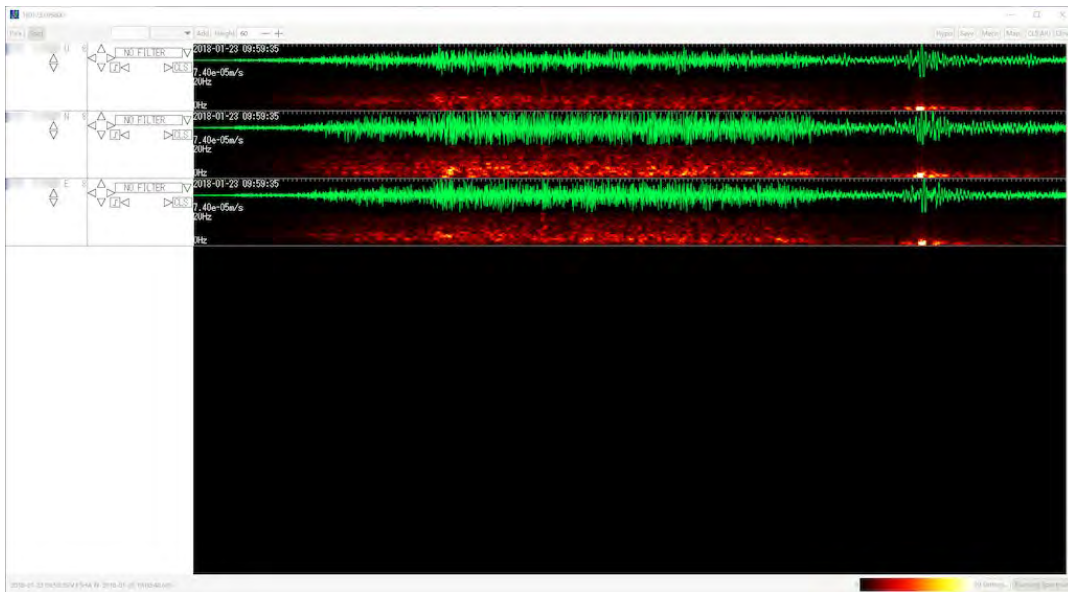


図 2. ランニングスペクトルの表示例（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_24]）

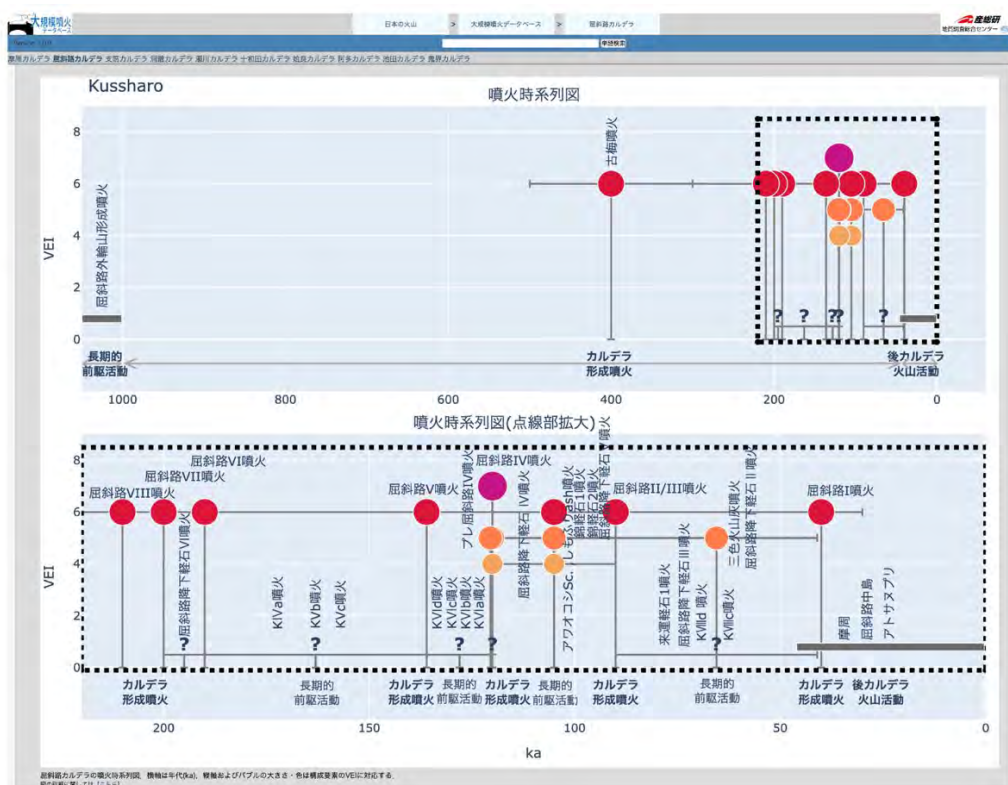


図 3. 大規模噴火データベース

屈斜路カルデラ火山の噴火時系列図（産業技術総合研究所[課題番号：AIST11]）



図4．噴火推移データベース
北海道駒ヶ岳火山1929年噴火の事例（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST11〕）

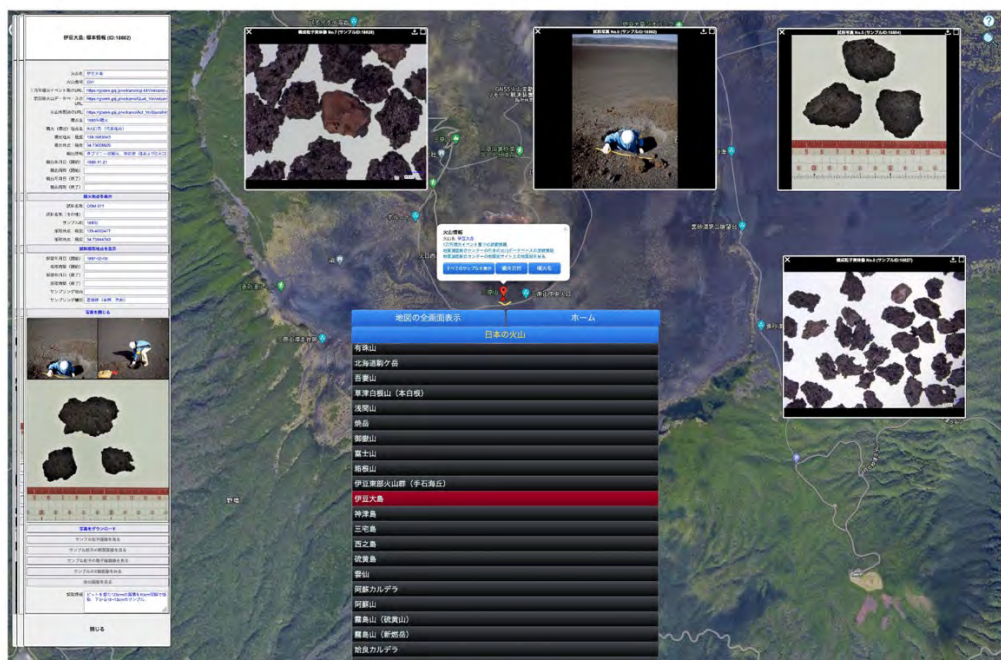


図5．火山灰データベース
伊豆大島火山 1986年噴火の噴出物の事例（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST11〕）

2（1）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. 概要と目的

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既に公開されている。しかしながら、従来の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き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といえない。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いた南海トラフ沿いの巨大地震の広帯域震源モデルの構築に必要な情報を整理する。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スキームの検討と構築を目的とする。

2. 拠点間連携のフレームワークの利用

前5か年計画の地震研究所一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を進めた。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ることで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に基づき、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の計算に向けたスキームの整理と構築を目的とする（図1）。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情報を整理する。前5か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への活用を目指す。

3. 令和5年度の成果：成果の社会実装・アウトリーチ・ステークホルダーへの還元

今年度は、次年度以降の新たな5か年の計画に向けて、成果の社会実装・ステークホルダーへの成果の還元を目的とした活動を実施した。

日向灘では、30-35年間隔で繰り返しM7クラスのプレート境界型地震が発生している。また、プレート内でもM6-7の地震が度々発生する。1968年にはM7.5の地震が発生し、津波も観測された。特に1662年にもM7.6の日向灘地震（外所地震）が発生したことが知られている。このような背景の下、2023年8月30日に宮崎県との共催で南海トラフ地震臨時情報に関する自治体向けのセミナーを実施した。宮崎県内の特に沿岸部の市町村の防災担当者らを対象として、「臨時情報に関する解説」、「臨時情報の対応計画に関する全国調査報告」の後、宮崎県と新富町における事例報告を参加者で共有した。その後、参加者を複数のグループに分けた後、グループ毎で臨時情報が発表された場合の自治体対

応の問題点の共有を図るワークショップを開催した。

メキシコ太平洋沿岸部は、将来の巨大地震・津波に伴う災害リスクが高い地域である。特にゲレロ州沖合のゲレロ地震空白域では過去 100 年間で M8 を超える地震が発生しておらず、将来の巨大地震および津波に伴う災害の軽減に向けた研究・開発が急務となっている地域の一つである。近年、ゲレロ地震空白域の一部ではテクトニック微動の発生が知られており、またその深部延長部では、様々なサイズのスロー地震の発生がよく知られている。2024 年 2 月 26-27 日にワークショップ「International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes in Mexico」をメキシコシティのメキシコ国立自治大学で開催した。日本から 22 人の参加者があり、メキシコからの参加者も合わせて 68 名が参加した。ワークショップの中では南海トラフ沿いのスロー地震、巨大地震及びそれらの相互作用に関する研究報告に加えて、メキシコにおける地震津波災害軽減に向けた学際的な研究報告や社会心理学的な視点からの地震津波防災に向けた国際的な取り組みが紹介された。その上で、研究成果の社会への実装と還元について課題を共有して議論を進めた。

4. 5 か年の成果：地震・津波災害の予測の高度化に向けた 5 か年の取り組み

（１）地震・地殻変動モニタリングに基づく震源モデル・シナリオの高度化

昭和東南海・南海地震やそれより以前の震源モデルに基づく地震シナリオに加えて、現在の測地学・地震学モニタリングにより得られる知見に基づく地震シナリオの作成の準備が必須である。特に、陸上 GNSS および海底 GNSS-A 観測から得られるデータに基づき、将来の地震時すべり域の設定とシナリオの検討が重要である。最近、地震間に GNSS 観測で得られる地殻変動記録に基づき地震間のすべり欠損をモデル化して巨大地震の破壊シナリオを提案する新たな手法が示された（防災科学技術研究所[課題番号:NIED03], Noda et al., 2021）。ここでは、GNSS 記録から予測される断層上の歪エネルギーと断層すべりにより解消される歪エネルギーの差に注目し、エネルギー収支の観点から起こりうるシナリオが検討される。応力蓄積期間を 150 年として、起こりうるシナリオを複数評価した結果、そのシナリオの 1 つは過去の南海地震で得られたモデルとよく一致することが示された。これらのモデルには南海トラフ全体を破壊するシナリオも含まれる。すなわち、地殻変動や地震のモニタリング結果をリアルタイムで取り入れ、起こりうるシナリオの逐次評価が重要となる。

スロー地震のモニタリングおよび過去の研究事例に基づき、破壊の開始点の想定も必要であろう。今後は、特に東北地方太平洋沖地震やメキシコ、チリのプレート間大地震に先行したスロースリップと破壊の開始点の位置関係を参考に（例えば、京都大学防災研究所[課題番号:DPRI01], Cruz-Atienza et al., 2021）、破壊の開始点をいくつか設定した上で、強震動の予測に至るプロセスの検討も重要となる。

（２）地下構造とプレート境界モデルの高度化

地下構造、特にプレート形状に関する研究は、震源モデルの高度化に加えて、強震動予測の上でも重要となる。特に、西南日本の深部のプレート境界モデル（京都大学防災研究所[課題番号:DPRI02]）や、浅部の JAMSTEC による構造探査に基づくプレート境界モデ

ルの構築状況（海洋研究開発機構[課題番号：JAMS01]）を整理する必要があった。従来の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結果から、プレート境界モデルがいくつか公開されている（例えば、海洋研究開発機構[課題番号：JAMS01], Bassett et al., 2022）。また、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されている。

特に紀伊半島から四国下のプレート境界モデルの調査を、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した。ここでは、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を詳細にイメージングした。さらに、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ングされた。結果として、特に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明瞭なフィリピン海プレートが確認された（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI02]）。

深部のスラブ形状について従来の結果と比較したところ、全体の傾向は一致するものの、詳細に見るといくつかの地域や深さにおいて、相違点が見出された。具体的には、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測線では、特に深部（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測線では、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5 km以上浅い。特に室戸岬から倉敷に至る測線（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10 km以上浅い（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI02]）。

結果として、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おらず、先に述べたすべり欠損の見積もりに際して従来のプレート境界モデルの妥当性が検証された。深部のプレート境界モデルは精査されるべきであるが、災害軽減の視点として、特に震源モデルの構築においては、特に深部のスロー地震発生域と巨大地震との関連は未だ不明であり、今後より慎重に議論されるべきである（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]、伊藤，2023a、伊藤，2024）。

（3）地盤応答モデルの高度化

地盤応答モデルの高度化では、既に構築された地盤応答モデルが注目する周波数帯域の応答をどの程度再現できるかが、強震動予測の上で重要となる。ここでは、石川県邑知潟平野の地盤応答調査と強震動シミュレーションの事例に着目する（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C27]）。また、令和元～3年度に文部科学省が重点的な活断層調査の一環として実施した「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」により京都盆地と奈良盆地で得られた浅部地盤構造モデルにも着目する（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI08]）。

石川県の邑知潟平野は邑知潟断層帯の北西に位置する。邑知潟断層帯は今後30年の地震発生確率が日本の主な断層帯の中でもやや高いグループに属しており、その規模は地震調査研究推進本部によりM7.6程度と推定されている。邑知潟平野で常時微動観測を行

い、単点観測による微動 H/V スペクトルとアレイ観測による位相速度分散曲線から 3 次元地盤構造モデルを構築した。また、邑知潟断層帯による想定地震ケース（地震調査研究推進本部）を用いて、新たに得た 3 次元地盤構造モデルと J-SHIS 深部地盤構造モデルによる強震動シミュレーションの結果を比較し、強震動シミュレーションにおける地盤構造の影響を調べた。その結果、新たな 3 次元地盤構造モデルを用いたシミュレーションでは、J-SHIS モデルと比べて、邑知潟平野内で最大速度（PGV）が 0.6 m/s を超える範囲が広がること、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確認された（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC27]）。

南海トラフ大地震を含む将来の大地震の強震動評価の高度化のため、西南日本の堆積平野や堆積盆地の地盤構造モデルの高度化を進めた。特に奈良盆地・京都盆地に関して、反射法地震探査・ボーリング・微動観測のデータを用いることで、水平方向 250 m メッシュ、深さ方向 1 m メッシュでの新たな浅部地盤構造モデルの構築に成功した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI08]）。

奈良盆地中央付近を流れる大和川付近では、その南側で層厚が相対的に厚く 40 m に達する。ここでは工学的基盤面（S 波速度 350 m/s）に SH 波を鉛直入射させ、Haskell Matrix 法で地震応答を計算することで、周波数別の地盤増幅率を求めた。その結果、浅部地盤構造による地盤増幅率は、周波数 1 Hz では調査対象領域全体で小さく、大阪平野で先に得た結果と異なっていた。2 Hz では、京都盆地南部の三川合流域周辺や奈良盆地南部での増幅が顕著であり、3 Hz 以上となると、京都府南部の木津川流域（木津川低地帯）も含め、ほぼ対象領域全体で地震動の増幅が見られた。

現在、J-SHIS 深部地盤構造モデルの公開に伴い、全国的に地盤応答モデルの構築が可能となった。一方で、建物被害の予測に際して特に重要な 1-2 Hz 付近の地盤応答モデルの高度化に向けて、今後も地域毎のより詳細な調査が必須である。建物や人的被害の地震リスク評価の高度化に向けて、地盤構造の調査及びモデル化を今後も強力に推進すべきである。

（４）津波浸水モデルの高度化

津波浸水モデリングの高度化に関して、1662 年日向灘地震（外所地震）による津波浸水モデルに注目する（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]，Ioki et al., 2023）。日向灘では、30-35 年間隔で繰り返し M7 クラスのプレート境界型地震が発生している（例えば、京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]，Yamashita et al., 2021）。また、プレート内でも M6-7 の地震が度々発生する。1968 年には M7.5 の地震が発生し、津波も観測された。1662 年にも M7.6 の日向灘地震（外所地震）が発生したことが知られている。この地震による被害は現在の宮崎市南部で特に大きく、宮崎市青島と並んで海側に突き出した位置にあった外所村が海中に没したとの記録が残されている。

宮崎県沿岸部での津波堆積物の調査結果に基づき、1662 年日向灘地震の震源モデル及び津波波源モデルを構築し、津波浸水シミュレーションにより観察された津波堆積物の分布を説明した。得られた震源モデルは 1968 年日向灘地震の震源域とは重ならず、その南西に位置し、海岸線下の深さ 25 km 付近からトラフ軸に向かって深さ 10 km の範囲にプレート境界に沿って幅 70 km、長さ 70 km の範囲に広がる。この震源モデルには

1996 年 10 月と 12 月にそれぞれ発生した M6.9 と M6.7 の地震の震源域がほぼ含まれる。また、震源モデルの浅部側は、その一部が浅部スロー地震発生域と重なり、すべり量も 8 m と深部側の 2 m と比べて大きい（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]）。

1662 年日向灘地震に関して新たに得た震源モデルは直近 100 年の地震活動のみからの予測は難しく、津波堆積物の調査と津波浸水シミュレーションにより得られた新たな知見として注目すべき成果と言える。さらに重要な点として、得られた知見は、宮崎県の防災担当者らと即時共有され、地震・津波防災の見直しに向けた取り組みが開始された（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]）。

得られた津波浸水モデルに基づき小中学校等での津波避難訓練を検討するなど、成果の社会実装・アウトリーチ・ステークホルダーへの還元に向けた取り組みが実施されつつあり、理学的な知見で得られた成果を社会に還元できた一つのモデルケースとしても注目に値する。

5. 成果の社会実装・アウトリーチ・ステークホルダーへの還元と今後の展望

2024 年以降に実施される新たな 5 か年の計画では、成果の社会実装・ステークホルダーへの成果の還元を目的とした活動が重要となる。

先に述べた日向灘の大地震の成果（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01], Yamashita et al., 2021）を受けて、2023 年 8 月 30 日に宮崎県との共催で南海トラフ地震臨時情報に関する自治体向けのセミナーを実施した。宮崎県内の特に沿岸部の市町村の防災担当者らを対象として、「臨時情報に関する解説」、「臨時情報の対応計画に関する全国調査報告」の後、宮崎県と新富町における事例報告を参加者で共有した。その後、参加者を複数のグループに分けた後、グループ毎で臨時情報が発表された場合の自治体対応の問題点の共有を図るワークショップを開催した。同様のセミナーやワークショップは、今後も継続的に実施されるべきである。

メキシコ太平洋沿岸部は、将来の巨大地震・津波に伴う災害リスクが高い地域である（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01], 伊藤・吉岡, 2021, 伊藤, 2023b）。特にゲレロ州沖合のゲレロ地震空白域では過去 100 年間で M8 を超える地震が発生しておらず、将来の巨大地震および津波に伴う災害の軽減に向けた研究・開発が急務となっている地域の一つである。近年、ゲレロ地震空白域の一部ではテクトニック微動の発生が知られており（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01], Plata-Martinez et al., 2021 ），またその深部延長部では、様々なサイズのスロー地震の発生がよく知られている。2024 年 2 月 26-27 日に学術変革領域研究（A）Slow-to-Fast 地震学と共同で、ワークショップ「International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes in Mexico」をメキシコシティのメキシコ国立自治大学で開催した。ここでは、南海トラフ沿いのスロー地震、巨大地震及びそれらの相互作用に関する研究成果の共有に加えて、メキシコにおける地震津波災害軽減に向けた学祭的な研究報告や社会心理学的な視点からの地震津波防災に向けた国際的な取り組みについて情報が共有された。その上で日本とメキシコにおける地震・火山災害の共通の問題点の抽出が重要であるとの理解に至った。

今後は地震・火山災害の軽減に向けた学際的な研究を国際共同研究として推進することに加えて、それぞれの地域で得られる成果の比較研究が重要となろう。

成果リスト

- Bassett D., A. Arnulf, S. Kodaira, A. Nakanishi, A. Harding, and G. Moore, 2022, Crustal Structure of the Nankai Subduction Zone Revealed by Two Decades of Onshore - Offshore and Ocean - Bottom Seismic Data: Implications for the Dimensions and Slip Behavior of the Seismogenic Zone, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(10). doi:10.1029/2022jb024992.
- Cruz-Atienza V. M., J. Tago, C. Villafuerte, M. Wei, R. Garza-Giron, L. A. Dominguez, V. Kostogrodov, T. Nishimura, S. I. Franco, J. Real, M. A. Santoyo, Y. Ito, and E. Kazachkina, 2021, Short-term interaction between silent and devastating earthquakes in Mexico, *Nature Communications*, 12(1), 2171. doi:10.1038/s41467-021-22326-6.
- Ioki K., Y. Yamashita, and Y. Kase, 2022, Effects of the Tsunami Generated by the 1662 Hyuga-Nada Earthquake off Miyazaki Prefecture, Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 180(6), 1897-1907, doi:10.1007/s00024-022-03198-3
- 伊藤喜宏, 2023, 南海トラフ沿いの巨大地震のメカニズム：事前の備えと心構え, *日本旅行医学会学会誌*, 18(1), 67-73.
- 伊藤喜宏, 2024, 南海トラフ沿い巨大地震の地震像とスロー地震の関係ーその巨大地震への備え日に向けてー, *消防防災の科学*, 155, 5-12.
- 伊藤喜宏, 2023b, SATREPSにおける地震防災分野の国際協力 メキシコ沿岸部の大地震・津波災害の軽減に向けた総合的研究, *日本地震工学会誌*, 48, 19-22.
- 伊藤喜宏・吉岡祥一, 2021, メキシコにおける巨大地震・津波災害の軽減に向けた学際的研究の立ち上げと地震学的成果, *神戸大学都市安全研究センター研究報告*, 25, 145-152.
- Noda A., T. Saito, E. Fukuyama, and Y. Urata, 2021, Energy - Based Scenarios for Great Thrust - Type Earthquakes in the Nankai Trough Subduction Zone, Southwest Japan, Using an Interseismic Slip - Deficit Model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(5), doi:10.1029/2020jb020417
- Plata-Martinez R., S. Ide, M. Shinohara, E. S. Garcia, N. Mizuno, L. A. Dominguez, T. Taira, Y. Yamashita, A. Toh, T. Yamada, J. Real, A. Husker, V. M. Cruz-Atienza and Y. Ito, 2021, Shallow slow earthquakes to decipher future catastrophic earthquakes in the Guerrero seismic gap, *Nature Communications*, 12, 3976, doi:10.1038/s41467-021-24210-9
- Yamashita Y., M. Shinohara, and T. Yamada, 2021, Shallow tectonic tremor activities in Hyuga-nada, Nankai subduction zone, based on long-term broadband ocean bottom seismic observations. *Earth, Planets and Space*, 73(1). doi:10.1186/s40623-021-01533-x



図 1. 「南海トラフ沿いの巨大地震」研究グループのワークフロー

2（2）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
(東京大学地震研究所)

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1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ーで、「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で構成される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。

令和元年度から令和5年度の成果

産業技術総合研究所は、房総半島南部沿岸の海岸段丘について掘削調査を行い、得られた試料の年代測定値の統計処理を行うことで、離水年代の再評価を行った。これにより、過去の関東地震の発生年代と再来間隔について復元することができた。また、1703年元禄津波や相模トラフ沿岸を襲った津波の歴史記録について整理を行い、それに関連した野外調査を実行することで、当時の津波の高さについて検討を行った（産業技術総合研究所[課題番号:AIST08]）。活断層データベースは、これまで実施された約2万地点に及ぶ活断層調査地点の情報を収録するとともに、最新の知見もデータベースに取り込むことで、地震現象の解明に貢献した（産業技術総合研究所[課題番号:AIST01]）。

新潟大学は、1855年江戸地震の被害境界について、武蔵国多摩郡蔵敷（東京都東大和市）名主の『里正日誌』所収「安政二卯年十月二日大地震略記」を検討し、四ツ谷通り下町の割から中野宿（中野区）辺りまでになることを明らかにした。1923年関東地震について新潟県高田村（現柏崎市）神職の日記と『新潟新聞』の当日記事を検討し、当時の新潟測候所の所見が1917年以来の測候所の地震観測にあり、所見を述べた佐々木蘆蔵所長の地震学説は日下部四郎太の物理学的地震研究を基礎としていたことを確認した（新潟大学[課題番号：NGT_01]）。

東北大学理学研究科は、近地地震と遠地地震からの大量のP波走時データの同時インバージョンを行い、東日本地域の地殻と上部マントルの高分解能3次元P波速度構造と異方性分布を求めた。その結果、関東地方下に沈み込む太平洋プレートやフィリピン海プレートの形状の詳細が明らかになり、今後の震源断層モデルの推定に資する情報を得た（東北大学理学研究科[課題番号：THK_05]）。また、スラブ内地震では、同程度のマグニチュードの地殻・プレート境界地震に比べて破壊の継続時間が短く短周期地震動を励起しやすいこと、スラブ内の地震活動深さとプレート年代が相関することを明らかにした（東北大学理学研究科[課題番号：THK_06]）。さらに、繰り返し地震のモニタリングを通して、地震の発生サイクルにおける断層面のすべり・固着状態の短期・局所的な変動から長期・広域にわたる変化を明らかにした。地震の再来特性の調査および断層面の固着状態の推定のさらなる高精度化により、将来発生する大地震の発生ポテンシャルや発生予測につながる事が期待できる。高精度震源再決定に基づき、大量の繰り返し地震を検出することが可能なことを示し、プレート境界でのすべりの時空間変化の把握に基づく予測のための基礎データ構築に貢献した（東北大学理学研究科[課題番号：THK_09]）。

東京大学地震研究所では、震源域近傍で記録された強震波形データを入力して、関東平野の都心部での長周期地震動の速度応答スペクトル及び地震波形を予測する深層学習（CNN）モデルを開発した。能登半島～山形沖の地震をターゲットとして、2004～2011年に発生したM4.5以上の地震の入力観測点（Hi-net群馬観測点；TAYHなど）における速度波形と、予測地点（Hi-net横浜観測点；YFTH）における速度応答スペクトルの関係を学習し、2011年以降に発生した大地震（ $M \geq 6.0$ ）の長周期地震動（1～10秒）の予測実験を行ない、速度応答スペクトルの高い予測性能（PV；スペクトルの予測／観測比＝0.8-1.2）を確認した。一方、2019年山形沖地震のように学習データに含まれない規模の大きな地震（ $M_w 6.7$ ）や、佐渡沖の地震のように学習データに含まれない場所での地震については予測性能が低くなった（ $PV=0.5-2$ ）。そこで、多様な位置と規模の地震波形を日本列島の地下構造モデル（JIVSM）を用いた差分法計算（OpenSWPC）から求め、これを訓練データに加えた強化学習を行ない、CNN予測モデルの汎用性を高めることに成功した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_14]）。さらに、地震の災害誘因の事前評価手法の高度化に関する研究を実施し、シナリオ地震の強震動評価として、日本で開発された強震動予測手法を国際的なプラットフォームに実装するとともに、確率論的地震動評価に役立つ、地震動予測式の新エルゴード性の定量化を行った。その結果は、世界複数国の重要構造物の入力地震動として検討される可能性があり、災害の軽減に貢献する一助となる（東京大学地震研究所[課題番号：

ERI_16])).

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、歴史地震の震度を検証および定量化したいと考え、谷中・根津・千駄木および上野周辺において稠密観測を行った。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。この4年間に文京区本郷で震度1以上を記録した地震は200回以上あり、それらのデータを用いた解析結果では、観測点ごとの卓越周波数や振幅の違いが確認できた。その違いは、過去の地震による建物被害の記述の地域差とおおむね対応していた。しかし、いくつか相違する地点も見つかっていて、それらには別の要因を考える必要があると思われる。たとえば、建物の築年数によって強度が低下したり、建築手法の違いによっても耐震強度に違いが出たりする可能性がある。それらの建物に関する情報を知ることは困難であるため、このような現代の地震観測を通して、地下構造や地盤特性以外による揺れと被害の関係性を見いだす必要がある（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_15]）。

京都大学防災研究所は、斜面崩壊の発生場抽出に関する成果として、過去の斜面崩壊に共通する地質的特徴の洗い出し、高密度航空レーザーデータや国土地理院による干渉SAR解析画像を用いた危険斜面の特定、地震時に斜面崩壊を発生しうるテフラの分布図（東日本版）の作成をおこなった。また、崩壊発生メカニズムに関する成果として、地すべり地における空間的に多様な地震動特性の抽出、地すべり変位の地震直前の安全率依存性、盛土材質による間隙水圧応答特性の違い、粘土鉱物ハロイサイトの構造の違いとせん断特性などについて明らかにした。これらのことから、現場安全率や現場地震動を考慮した斜面安定計算手法や地震時の斜面変位の見積もり手法について高度化を進める見通しを得た。さらに、地震地すべりの先行降雨の影響を見積もるため、および、強震後の長期的な斜面の変形を明らかにするため、傾斜計・間隙水圧計・インターバルカメラを設置し、令和3年度から観測を継続した。その結果、年間0.005度程度の傾斜変化を伴う定常的な変形が現在も進行していることを確認し、さまざまな降水イベントに対する土壌水分の時間変化を観測できた。地震後の長期的な斜面変形についての知見や先行降雨が地震時地すべりに与える影響を見積もるための基礎情報を得た（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI10]）。

千葉大学は、地震に関連して発生する電磁気的な現象について、地震との有意相関解析や前兆性を評価するためのROC解析等に基づいて地震活動の短期予測に資する研究を国内外の研究者と協力して実施した。ULF電磁場変動や電離圏電子数変動、気象衛星ひまわりの衛星熱赤外データの解析結果は統計的には地震前兆的であることが示唆されつつある。また、電離圏電子変動の直前変動についてはその変動の規模と地震の規模等との経験則を示唆するデータが蓄積されつつある。地震動や津波、規模の大きな火山噴火に起因する電離圏電子数変動は物理機構まで解明されつつある。地球磁場変動や電離圏電子数変動などの地球物理観測データの統計解析により地震との有意相関性や地震前兆性を示す現象の存在が明らかとなってきた一方、単独の現象の解析では、現実的な予測の点からは合格点には至らないこともわかってきた（千葉大学[課題番号：CBA_01]）。

東京大学大学院情報学環は、地震に関する認知構造を把握したうえで、住民が理解

しうる情報（被害想定）体系を考案してきた。まず、首都直下地震に関する認知体系について、都民に対するアンケート調査を行い、国（内閣府）や東京都の公表している被害想定の内容に対する認知度が低く、信頼性に課題があることを示した。また、それらを住民が認知したとしても、その内容に沿った地震対策が行われるわけではないということを実証した。かつ、「都民の考える被害想定」も地震対策に結びついていないわけではないことがわかった。そこで、被害想定という科学的な成果としての情報の活用方策を検討するため、内閣府（2013）が公表した被害想定を基に制作され、実際に放送された『パラレル東京』の前後で、縦断型のアンケート調査を行った。住民が地震発生時の被害を想定（イメージ）することは、それほど重要ではなく、被害想定という情報の活用を考えたときに、感情を刺激することこそ、地震防災において重要であるという結論が得られた（東京大学大学院情報学環[課題番号：III_01]）。

そのほか、毎年、首都直下地震に関する意見交換会をオンラインで開催し、関連する課題の研究者たち約10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すところから始めることとしたが、コロナ禍で連携が不足した点もあったことが報告された（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_15]）。

次期計画以降の展望

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、本総合研究グループは、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、何を本総合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。特に、これまで取り上げて来なかった首都圏ならではの問題点を明確にし、首都圏に焦点を当てた課題にも取り組むべきであると思われる。

2（3）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

千島海溝は地震活動が活発であり、有史以来多くのM8クラス地震の発生が知られている。津波堆積物研究の進展から、歴史記録による地震活動履歴が辿れる19世紀以前に、巨大津波を伴うイベントの存在が明らかにされてきた。地震本部は、2017年の千島海溝沿いの長期評価（第三版）において、M8.8程度以上の超巨大地震の評価を示し、発生が切迫していると評価した。中央防災会議は、2021年に発表した被害想定において、最大クラスの地震により最大約10万人の死者が発生し、冬季間は積雪寒冷条件のため約2万人の低体温症要対処者が生じるとした。人的被害の大部分は津波によるものと想定されている。

千島海溝南部の巨大地震による人的被害を軽減するためには、津波からの的確な避難が最も重要である。国による被害想定と、それに基づく特別措置法の改正が2022年に行われ、自治体等による地震津波対策は新たなフェーズに入っており、現在、津波避難施設や津波避難道路の整備等が進められている。また、千島海溝・日本海溝では過去に先発地震後により大きな後発地震が発生した事例があることから、気象庁と内閣府は2022年より、北海道・三陸沖後発地震注意情報の運用を開始しており、対象地域でMw7.0以上の地震が発生した場合には情報発表が行われる。

千島海溝沿いの巨大地震総合研究グループは、今期の建議から開始された新たな研究グループである。津波堆積物の調査や、地殻活動の現況把握に関する手法の高度化、地震動・津波の事前評価及び即時予測など、地域防災力の向上を目指した総合的研究を実施するとされている。総合研究グループでは、リスク管理やリスク評価を支える情報の創出を目標として、関連課題から得られるハザード評価等に関する成果を有機的に連結することで、災害軽減に貢献する戦略のもと活動を行っている。地域防災対策の強化を支える地震動や津波予測等のハザード予測の高度化を進めるとともに、実際に避難行動を行う人間の行動特性や避難用施設の受容性能の評価、防災情報の高度化を目指した地殻活動モニタリングの拡充などを総合して、複線的な防災対策の強化に貢献する学際的な研究を行ってきた。

2. 令和5年度の主な成果

これまで実施してきたGISを用いた津波浸水被害や津波避難行動解析の成果に基づき、災害情報流通に関する分析を実施した。また、高校「地理総合」での防災リテラシーの向上に向けたシンポジウムを開催し、学校現場での課題について検討を行った（北海道大学[課題番号: HKD_07]）。自動車避難の可能性を検討するため、実験に基づきシミュレーション条件の設定に関する検討を実施した（北海道立総合研究機構[課題番号: HR0_02]）。北海道・三陸沖後発地震注意情報の認知度調査を行った（北海道大学[課題番号: HKD_01]）。

胆振地方の厚真町とむかわ町で面的な津波堆積物調査を実施し、堆積物の層厚・粒度の空間分布を明らかにした。トレンチによる2次元的な津波堆積物分布から、層厚が短

波長の不均質性を持つ可能性が示された。また、津波堆積物層内の隣接する凸凹部で得られたサンプルにおいて年代が100年程度異なることが示された（北海道大学[課題番号：HKD_01]）。

根室沖に設置した海底地殻変動基準局3点で船舶及びウエーブグライダーでの観測を実施した。データを解析した結果、昨年までの傾向と同じくプレート相対運動方向の変位が検出され、プレート境界浅部まで強く固着している可能性が示された（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]）。応力条件を付加する手法でプレート境界面の固着状況の推定が行われ、摩擦的な固着はプレート境界深さ20-30 km付近で見られ、それに伴う運動学的固着が海溝軸付近のプレート境界浅部に達していることが示唆された（北海道大学[課題番号：HKD_09]）。また、海溝軸付近のウェッジ部は高間隙圧状態で低剛性となっている可能性が示された（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_05]）。千島海溝からカムチャツカ・日本海溝の広域的な地震活動度を過去に遡るかたちで調査したところ、十勝根室沖から千島海溝南部が静穏化の状態であることが示された（北海道大学[課題番号：HKD_09]）。

非線形を考慮した津波波形インバージョン法を2003年十勝沖地震に適用したところ、後続波の再現性能が向上し地震モーメントと最大すべり量が増加した。測地的な即時震源断層モデルと津波データ同化を組み合わせる即時津波予測手法を検討し、震源近傍の津波観測点を除いた場合でも有効であることを数値実験で検証した。震源特性の調査が継続され、スペクトルインバージョン法で地域性や深さ依存性の調査が行われた（北海道大学[課題番号：HKD_09]）。

3. 5か年の主な成果

津波避難に焦点を当てた地理空間情報を活用した研究が行われ、津波避難困難区域の空間分析法の開発、集団実験による津波避難の実証試験、VR技術を活用した疑似避難訓練システムの開発等を実施した。積雪や道路ネットワークの途絶を含めた現実的なシミュレーションから、避難困難人口が道路網や人口密度などの地域特性に大きく影響を受けて増減する可能性が定量的に示された。集団避難実験やマルチエージェント解析から、混雑時の避難速度や、津波避難ビルの階段歩行速度の見積が行われ、津波避難施設の分散配置等を検討する必要があることが示された。また、高校総合地理においてGISを用いた防災リテラシー教育を実践するための副読本を出版した。（北海道大学[課題番号：HKD_07]）。モデル自治体で避難実験を行い、歩行速度を実測して避難困難地域を抽出し、避難を可能とする新たな避難路を整備につなげた。車避難実験を実施して渋滞予想地域や歩行者との輻輳地域の抽出を行い、シミュレーションを通じて車避難の検討を進めた（北海道立総合研究機構[課題番号：HRO_02]）。

津波堆積物の調査から、十勝地方の沿岸部の約千年間にわたる長期間の地殻上下変動時系列が解明され、地震前には沈降が継続し、地震時には上下変動は小さく、地震後に時間をかけて隆起する特徴が明らかになった。この情報は、すべり域下端の情報を与えるとともに、地震間地殻変動のモデル化に大きく貢献する成果である。また、胆振地方東部の沿岸部では、いわゆる17世紀前半の津波と、1640年北海道駒ヶ岳山体崩壊津波が別のイベントであることが明らかになった。一方、胆振地方東部では17世紀イベントの前に

は数千年間にわたり津波堆積物は見出されておらず、津波波源の多様性を示唆する情報である（北海道大学[課題番号：HKD_01]）。

千島海溝で初めてとなる海底地殻変動観測が開始された。根室沖のプレート沈み込み方向に3か所の基準局が設置され、船舶及びウエーブライダーを用いた測定が毎年実施された。5年間の観測から速度ベクトルが求められ、海溝軸に近い観測点でもプレート間相対運動速度に近い値が得られた。海中音速構造が不安定な時期があり、測定誤差の評価が必要ではあるが、得られた速度ベクトルはプレート境界浅部までが強く固着している可能性を示唆しており、津波ポテンシャル評価に大きく貢献するデータである。また、根室沖プレート境界浅部の詳細な構造が調査され、東北沖地震の大すべり域に類似したプレート境界の強反射やウェッジの低剛性高間隙水圧状態等が明らかにされた（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]）。千島海溝周辺の長期的な地震活動度の時間変化が調査された。過去に遡って静穏化を判定すると、予測精度が2倍程度向上した（北海道大学[課題番号：HKD_09]）。

北海道では史料が限られており、19世紀以前の古地震履歴のデータが本州以南に比べ極めて少ない。全道の遺跡発掘報告書を網羅的に調査し、噴砂・断層・亀裂等の地震性液化化痕跡と考える記述を調べ、過去数千年にわたる強震動履歴に関する情報を収集した。3,587件の調査報告書が調べられた結果、全道で231件の噴砂・亀裂・地すべり痕跡が抽出された。道東地域の痕跡年代コンパイルからは、津波堆積物イベントに比べ液化化は発生頻度が低い特徴が見られている。また、道央の活断層系等に対応すると考えられる痕跡の情報も多く収集された（北海道大学[課題番号：HKD_09]）。十勝根室沖で発生する地震の震源特性の調査が進められ、地域や深さによる違いが見られる可能性が示唆された（北海道大学[課題番号：HKD_09]）。

北海道・三陸沖後発地震注意情報の認知度等の時間・属性変化をモニターするためのアンケート調査が実施された。また、自治体・インフラ産業・報道機関の防災施策への助言を行ったほか、職員向け・一般住民向けのセミナーや公開講座、勉強会を主催して実施した（北海道大学[課題番号：HKD_09]）。

4. 今後の展望

地震津波の災害軽減へは多様なアプローチが必要とされる。総合研究グループでは、関連課題から得られる成果をハザード評価とリスク評価の視点から整理し、災害軽減へのロードマップの上で期待される役割を示している。防災施策の基本となる被害想定は、地震動と津波の事前予測に基づき推計が行われており、これらのハザードの事前予測の高度化は着実に推進する必要がある。これまでの研究から、地震動や津波浸水範囲は地盤や地形などのローカルな地域特性が大きく影響することが示されており、非線形性がアンサンブルメンバーに及ぼす影響などを含めた予測幅の定量的な検討が必要である。また、S-netを活用したデータ同化等による津波即時予測手法の検討が進められたが、防災情報システムとしての確実性・堅牢性を含めた開発を進める必要がある。令和4年から開始された北海道・三陸沖後発地震注意情報の認知度調査で6割程度の人が実際に後発地震が発生すると考えている結果は、この情報に地震予知的な過大な期待があることを示している。確度が低く・あいまい・発表頻度が低い情報の取り扱いについて引き続き

検討していく必要がある。地域防災力の向上には学校での防災教育が極めて効果的であり、必修化された高校地理のカリキュラムでの具体的な活用方法の提示や地域教材の開発等も重要である。

現在進められている津波避難タワーなどのハード整備や、避難訓練などのソフト対策について、それらの効果を現実的な条件下で定量的に評価し、課題を明らかにしていく取り組みが必要となる。本計画で行われた高層避難施設での人流停滞シミュレーションや、積雪凍結時の歩行速度の低減に基づく避難可能範囲縮小評価、車避難の評価など、実際の社会環境下でもロバスト性が担保される避難を実現するための取組を進めて行く必要がある。また、人口減少が急速に進む中で地域を継続させるためには、被災後の復興を迅速に進めることが必須である。ハザードが地域にもたらす被害の全体像を地域経済を含めて分析し、多段的な輸送網やサプライチェーンの整備につなげるような検討も開始すべきである。また、復旧復興の基盤となる道路や上下水道、送電網等の社会インフラについても、経験的予測に加え、演繹的な手法を組み合わせたピンポイントな被害予測手法を検討する必要がある。

海底地殻変動観測から、根室沖ではプレート境界浅部まで強く固着している可能性を示唆するデータが得られ、津波が効率よく励起される可能性が示された。観測領域を十勝沖まで拡張し、プレート境界の固着状況の空間的な分布を明らかにする必要がある。また、千島海溝南部と日本海溝北部との連動可能性評価は未達であり、関係するデータの取得を行う必要がある。根室沖の強い固着を示す領域は、東北沖地震の大すべり域と同様の構造的な特徴を有していることも明らかになっている。スローイベントを含めた地震活動と構造との関係を調査することが必要である。長期広域的な地震活動からは、静穏化と巨大地震との統計的な関係が示唆されており、プレート間固着や地下構造との空間的な関係性を含めた検討を進める必要がある。

津波堆積物調査や遺跡の液状化痕跡等から、古地震・古津波に関するデータが得られつつあるが、広域的な津波浸水範囲や、断層モデル、強震動特性などの地震像を復元する手法は未達である。地域ごとの災害履歴として防災対策に活用する手法の検討も必要である。また、遺跡から見出された液状化痕跡データを地震動予測に組み込むスキームについても検討を始める必要がある。

地震津波災害は多面的な様相で発生し、その対策も複線かつ重層的に進める必要がある。総合研究グループで対象としている要素は限られているものの、ハザードやリスク評価に貢献可能な成果が着実に得られている。北海道・三陸沖後発地震注意情報のような、地殻活動の推移予測に関する情報は、多くのエンドメンバーが想定され、可能性のあるシナリオ也多岐に渡る。社会のリスク管理に対し、どのようなリスク評価を提供していけるのかという視点から、観測研究を進めて行くことも必要である。

2（4）桜島大規模火山噴火

「桜島大規模噴火」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。研究は年次的に研究集会をハイブリッド開催することで進めた。大規模噴火研究を総合的に進めるために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）の研究課題だけでは不足なので、文部科学省の委託研究である次世代火山研究推進事業のうち課題D「火山災害対策技術の開発」と京都大学防災研究所に設置された火山防災連携研究ユニットが研究集会に参加している。

5年間の成果

1914年に桜島で発生した大規模噴火は、20世紀以降我が国における最大規模の噴火である。火山灰軽石などの堆積量は0.6立方キロメートルで、VEI（火山爆発強度指数）4とされるが、溶岩の流出が多く、1.5立方キロメートルのマグマが噴出した。また、噴火開始から8時間後にM7の地震が鹿児島湾において発生した。

本総合研究グループにおける研究発表は以下の4つに分けられる。1）現象解明のための観測、過去の噴火履歴・火山の基本場、モデル化など現象の理解、2）火山活動推移モデルの構築を目指した火山噴火発生予測の研究、3）ハザード予測の高度化、4）防災リテラシーの向上と対策研究である。

1）現象解明のための観測、過去の噴火履歴・火山の基本場、モデル化など現象の理解

この大規模噴火に前駆して様々な異常現象が観測されたが、大規模噴火に至るまでの過程は、始良カルデラ下のマグマ溜まりの膨張による地殻内応力集中による桜島から離れた場所での地震発生（1913年6月）、桜島島内での二酸化炭素濃度の増加（7月）、桜島島内の弾性変形を伴う非地震性地盤変動（7月～12月）、噴火の30時間前からの群発地震と急速な地盤変動、の4段階に整理される。前駆過程において重要なのは「マグマ貫入に伴う火山体の弾性変形と応力集中→応力が岩石の破壊強度を超えることによって発生する火山構造成地震→噴火の発生」というプロセスをとることであり、このプロセスは世界の多くの火山においてみられる。

南岳山頂噴火の最盛期（1970年代から1990年代前半まで）には、地盤沈降から予測さ

れる以上に重力値が増大し桜島直下のマグマの質量の増加があった。このことから、マグマからの揮発性成分の分離が進行し、脱ガスした重いマグマの蓄積が進行したことが推定される。最近の南岳の噴火活動においても二酸化硫黄放出量が多い状態が続いており、脱ガスが進行している。今後、多量のマグマが貫入するとき最初に噴出するのは脱ガスした重いマグマに相当する溶岩と考えられ、過去の大規模噴火のようなプリニー式噴火から始まるシナリオとはならない可能性が高い。したがって、噴火シナリオの多様化が望まれる。実際、セントビンセント島のLa Soufriere火山噴火は2020年12月に溶岩流出で始まり、翌年4月にプリニー式噴火に移行・拡大した。

1914年噴火後の地盤変動測定により、桜島の北部は北へ、南部は南へそれぞれ数メートル変位したことが知られており、20 m開口した東西方向の割れ目によりモデル化されている。このことから噴火発生前のマグマのダイク貫入が重要であることが指摘できる。東西方向の割れ目は、広域応力場に整合的に東南東－西北西に開口した2015年8月15日の群発地震を伴った開口性のマグマ貫入イベントの割れ目の北北東－南南西方向の走向に共役的である。この群発地震活動における火山構造成地震の震源分布とメカニズム解（Koike and Nakamichi, 2021）を詳細にみると、後半に発生したやや深部の地震活動は、主断層の開口に共役的に発展しようとした断層の初期段階を見ているのかもしれない。大規模噴火に伴うマグマ貫入には、ダイクの発展過程にしたがって、広域応力場に整合的な断層の動きだけでなく、共役的な地震活動にも注目する必要がある。

2) 火山活動推移モデルの構築を目指した火山噴火発生予測の研究

大正噴火、昭和噴火と様々な噴火様式（ブルカノ式、ストロンボリ式、火山灰連続放出）をもつ南岳・昭和火口山頂噴火活動について、地盤変動などから見積もられるマグマの貫入速度と噴火規模・様式との関係を整理した。この手法はインドネシアのメラピ火山にも適用することが可能であり、水蒸気噴火ではマグマの貫入速度は検出限界以下であるが、プリニー式噴火では著しく大きい。マグマの貫入速度は、噴火の規模と様式を予測する指標となりうる。

地盤変動はマグマ性噴火発生前に確実に検知できる段階となったが、そのデータの初期段階から噴火の発生時刻と規模を予測することは依然として難しい。そこで、確率的発生予測の考え方を導入し、確率的な発生時刻と規模の予測を行った。南岳と昭和火口における山頂噴火発生前の地盤変動に関するビッグデータを取り扱うことにより、統計的な処理を進め、確率的発生予測手法を提案した。

3) ハザード予測の高度化

ハザードごとの予測においては噴火の規模を予測することが最も重要である。大規模噴火では、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ハザード要因となる。このうち降下火山灰・軽石の拡散と降下域の予測については、次世代火山研究推進事業のサブテーマ「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」によって、噴火発生に伴う地震動と地盤変動の線形結合により噴出率を即時的に解析し、その時点の風速場に基づいて火山灰の拡散範囲をシミュレーションすることにより予測する手法を開発した。さらに、噴火前の地盤の膨張量から噴出マグマ量を予測し、火山近傍

の高分解能の風速データをもとに噴火発生前の拡散予測も行っている。

火砕流についても同様にシミュレーションにより予測可能である。しかし、噴出するマグマのうちどれぐらいが火砕流として流下するか、その配分予測に依然として問題が存在する。また、火砕流は常に発生するわけではないので、その発生そのものの発生予測も重要なテーマである。これまで昭和火口の噴火活動からの解析から、地盤変動量が大きい場合や、数か月程度の地盤の収縮期において火砕流が発生しやすいことが知られている。2009年以降の桜島の噴火活動においては、一連の噴火活動は爆発を頻発させながら地盤が膨張する期間と、火山灰を多量に噴出しながら地盤が収縮する期間からなる。膨張期は揮発性成分を多量に含んだマグマの貫入に対応し、収縮期は脱ガスしたマグマの火山灰噴出に対応することがマグマの見かけ密度の推移から知られているので、火砕流はマグマの見かけ密度が大きくなった時に発生しやすいといえる。

降雨がトリガーとなる桜島の土石流の予測については、土石流発生ポテンシャルの把握と、1回の土石流の流出土砂量を規定する雨の降り方の把握が重要であることから、焼岳等における知見を桜島にも活用できるかどうかを評価するために観測を進めた。また、土石流発生ポテンシャルは降下火山灰量に依存するので、降下火山灰の評価が重要である。土石流発生予測には降雨量と降灰量の観測が重要であるが、山頂近傍では直接観測をすることができない。それを可能にする手法が気象レーダ観測である。気象レーダにより流溪ごとの降雨量が把握でき、土砂流出量の予測が可能となっただけでなく、レーダの反射強度の空間分布を降灰量の評価にも活用する手法が開発された。

4) 防災リテラシーの向上と対策研究

桜島の大規模噴火を想定した防災リテラシーについては、現在の火山活動状態と今後中期的に起こりうる噴火への認識、噴火前後の危機的状況における避難等の行動、避難時の災害イメージの醸成、復旧・復興への行動イメージなどを考慮する必要がある。現在の活動状態と警報は気象庁の発表する噴火警戒レベルにより情報が提供されるが、桜島周辺ではその認知度は高い。一方、2022年7月24日の桜島南岳の爆発では、火山岩塊が2.4 kmを超えて飛散したとして気象庁は噴火警戒レベルを5（避難）に引き上げ、桜島の一部住民の避難が行われた。この事例においては、火山岩塊の飛散距離推定値に疑問はあるものの、警報とその後の避難指示等の防災対策に関わる情報に関して大きな問題が顕在化した。レベル5は噴火の影響が居住地域に及ぶことを表しているだけであり、警戒を要する範囲の情報が十分に反映されていない。レベルよりも警戒を要する範囲を前面にだした警報発表が望まれる。

大規模噴火においては、風向きによっては鹿児島市街地側への大量降灰災害が予想される。大幅に被災影響を軽減できると考えられる市街地側住民の事前避難の実現を目指し、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を、ワークショップにおける専門家と住民との対話を通じて共創する研究に着手した。これまでに9回のワークショップを開催し、住民の大量降灰からの避難に関する意識を高めた。

令和5年度の成果

マグマのダイク貫入が大規模噴火においても重要であることが提起された。南岳活動

期においてもダイク貫入イベントは発生しているが、大規模噴火の前駆過程においてもダイクの発達過程が重要である。桜島南岳噴火に関連するビッグデータを取り扱うことにより、より詳細な圧力源モデルが提示され、統計的な処理と確率的発生予測の考え方が進んだ。火山灰ハザード予測について多くの知見が得られるとともに、火山岩塊、火砕流、土石流についても研究が進んだ。大規模噴火とそれからの避難について様々な取り組みが行われた。噴火発生前の警戒を要する範囲（ハザード予測）の設定は依然として重大な問題であり、広域避難周知の長期的な視野の取り組みが必要である。

これまでの課題と今後の展望

これまでの研究において欠けている課題として、大規模噴火に対してレジリエントな災害対応戦略、情報伝達（特に警戒を要する範囲の重要性）、ハザード予測の高度化があげられる。特に噴火切迫時においては、モニタリングデータからリアルタイムでハザードを評価していく必要があり、そのためにはハザード要因に対応する噴火様式とそれぞれのハザード要因ごとの噴出物量が重要である。噴火発生前の警戒を要する範囲（ハザード予測）は、火山防災協議会において避難計画の基礎データとして決められているが、過去と同様の噴火規模と噴火様式が繰り返される保証はないので、警戒を要する範囲の設定は依然として重大な問題であるし、モニタリングによってしっかり答えを出せる研究が必要である。

大規模噴火による多量の軽石降下からの避難の意識は依然として低いままである。避難は必然的に広域避難にならざるを得ないし、その周知に向けて長期的な取り組みが必要であろう。さらに、桜島の大規模噴火では火山灰が東北地方南部まで達すると予想されるため、航空機、鉄道、道路などの全国的な交通網に影響が発生すると考えられる。このための対策研究も加速する必要がある。

本建議は元々は観測研究計画から発展してきている。そもそも、大規模噴火に向けての観測は何を目指すかの議論が不足しており、現在進行中の火山活動を追いつけることに注視しすぎている。先に起こるであろう活動を予測した上での観測研究戦略が必要である。

成果リスト

- 井口正人・為栗健・平林順一・中道治久, 2019, マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理, 火山, 64, 2, 33-51.
- Iguchi, M., Nakamichi, H., Takishita, K., Poulidis, A. P., 2022, Continuously operable simulator and forecasting the deposition of volcanic ash from prolonged eruptions at Sakurajima Volcano, Japan, Jour. Disast. Res., 17, 805-817.
- Iguchi, M., Yamada, T., Tameguri, T., 2022, Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan, as revealed by non-eruptive deflation, Frontiers in Earth Science, 10, 727909, <https://doi.org/10.3389/feart.2022.727909>.
- Kobori, T., Maki, M., Fujiyoshi, Y., Iguchi, M., Fukushima, S., 2022, Estimating volcanic eruption column height and growth rate using X-band marine radar at the Sakurajima Volcano, Scientific Online Letters on the Atmosphere, 18, 231-235, doi:

10.2151/sola.2022-037.

Koike, M., Nakamichi, H., 2021, Dike Inflation Process Beneath Sakurajima Volcano, Japan, During the Earthquake Swarm of August 15, 2015, *Front. Earth Sci.* 8:600223. doi: 10.3389/feart.2020.600223.

真木雅之・鈴木郁子・井口正人・Shakti P.C., 2019, 気象レーダによる降灰量推定－2013年8月18日桜島噴火のZ-RA関係式－, *火山*, 64, 219-241.

Rahadiano, H., Tatano, H., Iguchi, M., 2024, Uncertainty analysis of the prediction of massive ash fallout from a large explosive eruption at Sakurajima volcano, *Earth and Space Science*, 11, e2023EA003174. <https://doi.org/10.1029/2023EA003174>.

Takebayashi, M., Ohnishi, M., Iguchi, M., 2021, Large volcanic eruptions and their influence on air transport: the case of Japan, *Journal of Air Transport Management*, 97, 102136, doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102136.

Takishita, K., Poulidis, A. P., Iguchi, M., 2024, Tephra segregation profiles based on disdrometer observations and tephra dispersal modeling - Vulcanian eruptions of Sakurajima volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, 76, 29.

2（5）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、噴火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、噴火災害に関する資料の収集、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 2024 年 2 月 26 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。表 1 に研究集会での発表一覧を示す。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集会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。

1) 災害情報の発信に関する研究

北海道大学からは、前年度に引き続いて、予測可能性とリスク評価に関する提言がなされた。本総合研究の名称にある「高リスク」とはどの程度のリスクを指すか、という問いに対し日本ではまだ答えが無いことを念頭に置き、ニュージーランドにおいて、研究者のフィールドワーク実施可否判断に実際に使用されている VoLREst (Volcano Life Risk Estimator) というリスク評価ツールを紹介した。このツールの運用のやり方、ツールの限界などから判断して、登山者や作業者の安全確保を目的とする短期的リスク評価を行うためには、ハザード評価が必須であり、そのためには観測データに基づいて噴火確率をもとめるプロトコルが不可欠との提案があった。また、御嶽山への適用事例がある噴火確率評価ツール HASSET も紹介された（北海道大学[課題番号：HKD_06]）。

名古屋大学は、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、御嶽山火山マイスター制度の向上に資するため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いる。今年度はこれまでの成果の総括を行い、比較調査を行った全ての地域において、火山防災啓発の対象として地元小中高生を重視して出前授業や講師派遣などを行っており、子供への啓発がその親である地域住民への啓発にもつながっていること、また、地域外からの小中高生への啓発活動として、修学旅行や野外見学などを行っていることなどがわかった。各地域の火山防災啓発における課題と各地域の対応をわかりやすい図にまとめた（図1，名古屋大学[課題番号：NGY_07]）。

東京工業大学は、高リスク小規模噴火に関する様々な課題に対する解決策や方向性を示すこと自体が容易ではないことを踏まえ、その前段階として研究者と社会が問題点を共有する場としてシンポジウムを活用することを試みた。研究者と地元自治体等の協力の下で実施されたシンポジウムにおいては、研究者側は火山研究や防災の状況を伝え、社会側は地域社会での防災への取り組みや課題・要望を紹介し、事後アンケートによりシンポジウムの開催効果を評価した。その結果、シンポジウムは関係者のコミュニケーション改善に貢献できること、研究者側の講演内容と参加者の要望が必ずしも一致しない場合があるが、それは参加者が火山現象そのものを理解したいのではなく火山研究の成果がどのように役立つかを知りたいからであり、説明の工夫で改善可能であること、視覚に訴える工夫された図を活用することで参加者の理解度が大きく向上すること、研究者と地元関係者を結ぶ存在として地元の研究所の存在が大きいこと、大学の「社会貢献」をアピールする場として活用できるメリットが大きいこと、などがわかった（東京工業大学[課題番号：TIT_03]）。

京都大学は、2021年10月に阿蘇山で発生した水蒸気噴火の際、登山道閉鎖が遅れたために火口周辺に10人以上の登山者が取り残されたという重大インシデントに関し、阿蘇市及び阿蘇警察からの情報提供と研究者自身の体験に基づいてその発生過程を時系列に沿って整理し、いくつかの問題点を明らかにした。一つは、この噴火においては火山活動

活発化の情報が段階的に気象庁から出されていたものの、速やかで効果的な登山道閉鎖につながらなかった点である。受け手による情報の理解度を検証する必要がある。もう一つは、登山届を提出していた登山者が少なく警察による安否確認に支障が出た点である。活火山での登山における努力義務に関する啓発活動が重要である（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_03]）。

また、火山活動に関する正確な知識を観光客に伝達するうえでの課題を検討するため、観光客の火山防災に関する意識調査を東北大学と共同で実施した。その結果、観光客の情報入手方法としては、現地での注意喚起看板や放送が最も効果的であること、噴火の影響が直感的に理解できる噴石跡が防災行動につなりやすいことなどが明らかになった（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_03]）。

東北大学は、箱根において観光と火山防災に関するアンケート調査を実施した。旅行者の6割は旅先での災害を想定せず、火山噴火に関する情報を自発的に収集する割合は3割程度と低い。現地のリスク喚起媒体としてはチラシより看板が効果があり、避難場所の認知は4割以下と低かった。また、リスク喚起が観光地のイメージダウンにつながると考える人は35%程度であった。これらの情報は、観光客に対する情報発信における基礎的な情報となる（東北大学[課題番号：THK_11]）。

兵庫県立大学からは、噴火警戒レベルに基づく災害対策に関する報告があった。行政の災害対応は噴火警戒レベルに基づいて行われるため、噴火警戒レベルの引き上げが間に合わないと考えられる水蒸気噴火に対しては、噴火警戒レベル以外の情報に基づく災害対応体制を整備することが必要である。御嶽山噴火についてのアンケート調査から、噴火に至らない可能性があってもデータに異常が見られたら知らせたい、という回答が圧倒的多数であることから、地域住民による異常発見情報を積極的に活用することが有望と考えられる。火山の異常に関する情報の発見とその伝達には地域住民の役割が重要であり、いくつかの自治体では住民からの情報をくみ上げ、それを伝達する仕組みが地域防災計画に明確に定義されている。また、住民からの情報が防災体制立ち上げの基準の一つとなっている自治体もある。さらに、得られた情報を伝達する仕組みにも地域ごとに工夫が見られる。これらを全国的な仕組みにするためには、国の防災基本計画の中で市町村が住民情報をくみ上げて活かす仕組みを具体的に示すことが有効であろう（兵庫県立大学[課題番号：HYG_01]）。

2) 小規模噴火の発生する場の把握

今年度は、本項目に関する報告は無かった。

3) 観測による火山の活動把握

富士山研は、富士山周辺での重力観測網の構築とその活用に関する研究を進めている。標高 1029 m の富士山研と標高 2298 m の 4 合目観測点の間には 1270 m の標高差により 294 mGal もの大きな重力差がある。この 2 ヶ所で重力の差分観測を行うことにより、火山性でない擾乱シグナルの除去や、マグマの貫入・上昇に伴う重力差の変化を捉えられる可能性がある。また、2 点の標高差を活かした観測により、重力測定において重要となる重力計固有の重力値への換算係数（スケールファクター）を精度よく決定できる可能

性がある。その他にも、富士山研は重力測定精度向上のため、絶対重力計の個体差の検定や重力の鉛直勾配精密測定などに取り組んでおり、他機関による富士山の重力観測の拠点にもなっている。更に、標高 510 m の都留文化大学に新たな基準点を設け、観測網の拡大を進めている（山梨県富士山科学研究所[課題番号：MFRI_02]）。

京都大学は、阿蘇山における多項目観測を継続しており、2019 年と 2021 年の噴火活動について、前兆現象と分岐指標の整理を行った。両者の活動において水蒸気噴火が発生したが、その発生前に共通して見られる事象として、マグマ溜まりを挟む基線長の伸び、浅部の昇温、長周期微動の増加、火山ガスの増加、短周期微動振幅の増大が挙げられる。また、水蒸気噴火後にマグマ噴火に移行した 2019 年噴火では長周期微動の振幅増加が見られたが、マグマ噴火に移行しなかった 2021 年噴火では微動振幅の増大が見られなかったことがわかった。また、2021 年水蒸気噴火前には地殻変動と微動振幅変化の対応が詳細に捉えられた（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_02]）。

富山大では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実施している。観測項目は、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・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などである。地殻変動観測結果を説明する収縮膨張源モデルは観測期間によって異なっており、長期にわたる変動を統一的に説明するモデルの構築には更なるデータ蓄積やパラメタ化の工夫、新たな観測項目の導入などが必要であろう。多項目観測の継続により、地盤変動と熱活動の定性的な対応の発見や、噴気音観測による噴気活動の定量的評価の試みなど、新たな成果が得られつつある（富山大学[課題番号：TYM_02]）。

4) 噴火の予測に関する研究

東北大学は、地震・噴火の国際的なデータベースを調べることで、大地震と火山噴火の関係を統計的に評価した。その結果、火山が大地震の影響で $0.5 \mu \text{ strain}$ 以上の静的膨張場に晒されると VEI2 以上の噴火発生確率が 2 倍に増加する、大地震発生後に火山性地震活動が活発化しその影響が 1 年以上続く火山がある、噴火発生前に地震活動が活発化しているとは言えない、等の知見が得られた（東北大学[課題番号：THK_11]）。

富山大学は、極小規模噴火を含めた見逃がしのない「真の噴火履歴」解明を目指した取り組みを進めている。平成 30 年草津本白根山噴火など VEI1 クラスの小規模噴火では、火口近傍を除いてテフラは地表からほぼ消失し、噴出物は地表に地層として残らないため、そのような噴火は存在しなかったと見なされることになる。このように、地表露頭のみを観察からは把握できない小規模噴火が多数存在し「真の噴火履歴」の解明はほぼ不可能である。火口内や火口近傍の湖沼堆積物に噴火堆積物が保存されている可能性があり、微小な噴火の新たな情報源として有望である。弥陀ヶ原で令和 4 年に実施した予備調査に続き令和 5 年度は本調査を実施して縞状硫黄層と縞状粘土層のサンプル 2 m を 3 ヶ所で採取した。高知コアセンターの TATSCAN での分析ではテフラ層の化学的特徴を持つ層が複数見出された。さらに ITRAX を用いた測定間隔 0.2 mm の高分解能分析の実施を予定している。次期計画では、草津白根山や志賀火山で同様の調査を行うことを計画している（富山大学[課題番号：TYM_01]）。

5) 災害発生状況の調査・整理

今年度は、本項目に関する報告は無かった。

5か年の主な成果

本総合研究グループと関連する各分野の連携を整理するための連携図を作成するとともに、関連分野の成果の取り入れ方や研究の過不足等について検討を進め、本総合研究で取り組むべき研究項目とその進捗状況を以下の様に整理した。

研究項目	進捗
1) 災害情報の発信に関する研究	→ 関連する研究課題はあるが問題点の整理がまだ必要な段階
2) 小規模噴火の発生する場の把握	→ 関係各課題で実施中
3) 観測による火山の活動把握	→ 関係各課題で実施中
4) 噴火の予測に関する研究	→ 関係各課題で実施中
5) 災害発生状況の調査・整理	→ 未実施

以下では、それぞれの研究項目毎に特筆すべき成果をまとめた。

1) 災害情報の発信に関する研究

特筆すべき成果の一つとして、VUI (Volcano Unrest Index, 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試みが大きく進展したことを挙げることができる。VUI は各種観測データから、噴火前における火山活動の活発化の度合いを客観的に評価する試みであり、この5年間に、十勝岳、吾妻山、阿蘇などにおいて VUI を求めるために必要となるワークシートの試作が進んだ(北海道大学[課題番号: HKD_04], 東北大学[課題番号: THK_08], 京都大学理学研究科[課題番号: KUS_02])。

火山防災において有効な火山情報発信とはどのようなものか、という問題に関する知見の蓄積が進んだ点も重要である。火山の観測情報はそのまま伝えれば良いというものではなく、例えば吾妻山での観測情報に関しては、大学から現地の関係者に直接活動状況を伝えることもあるが情報過多気味であり、伝えるべき情報を工夫する必要があることが分かっている(東北大学[課題番号: THK_08])。

アンケート調査などを通じ、火山に関する情報を非専門家に伝える際に、どのような情報をどのような形で伝えることが効果的であるか、が少しずつ明らかになってきている。例えば、非専門家の火山に関する知見は、専門家が期待するよりもはるかに限られている場合があり、専門家の発信する情報が非専門家である受け手にはあまり伝わらないということが往々にして起きる。情報の発信側は受け手をよく理解し、適切な内容・タイミング・方法での発信に努める必要がある。

阿蘇山を訪れる観光客を対象としたアンケートからは、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、警戒レベルの理解度は火山毎に違うことがわかった。また、安全確認行動を促進するためには看板の設置、噴火の痕跡を残すことや気象庁に

よる噴火警戒レベルの情報提供，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。（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_03]，東北大学[課題番号：KOB024]）。

箱根における観光と火山防災に関するアンケートからは，旅行者は旅先での災害をあまり想定しておらず，火山噴火に関する情報を自発的に収集することは少なく，避難場所の認知度も低いなどの情報が得られている。（東北大学[課題番号：KOB024]）。

2021 年 10 月に阿蘇山で発生した水蒸気噴火の際，登山道閉鎖が遅れたために火口周辺に 10 人以上の登山者が取り残されたという重大インシデントが発生した。これに関し，阿蘇市及び阿蘇警察署からの情報提供と研究者自身の体験に基づいてその発生過程を時系列に沿って整理し，いくつかの問題点を明らかにした点は火山防災に関する情報発信を考える上で極めて重要である（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_03]）。

名古屋大学は，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おり，御嶽山火山マイスター制度の向上を目指して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調査を進めている。この調査を通じて得られた火山防災に関する知識不況・啓発に関する様々な知見は重要である。例えば，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であること，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であること，子供を対象とすることが効果的であること，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であること，などが挙げられる（名古屋大学[課題番号：NGY_07]）。

東京工業大学が行った研究者と社会が問題点を共有する場としてシンポジウムを活用する試みも災害情報の発信に関する研究において重要である（東京工業大学[課題番号：TIT_03]）。

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の検討においては，団体客か個人客かによって避難情報の入手経路が異なることや，観光客へは英語あるいは多言語による情報提供が効果的だが在留外国人に対してはやさしい日本語が効果的であることなど，多様な対応が求められることが分かった。また，火山災害発生時の市町村による災害対応におけるボトルネックの検討結果も重要である。マンパワーが限られる小規模な市町村では多岐にわたる事項すべてに対応することが難しい場合があり，噴火の影響範囲の拡大に応じて「市町村」→「県」→「国」と対応主体を拡大するという考え方では必ずしも対処できないことや，噴火の影響が複数の「市町村」にまたがる場合，自治体間の連携をどこがコントロールすべきかも課題として挙げられた。また，行政の災害対応は噴火警戒レベルに基づいて行われるが，噴火警戒レベルの引き上げが間に合わないと考えられる水蒸気噴火に対しては噴火警戒レベル以外の情報に基づく災害対応体制の整備が求められており，これに対しては地域住民による異常発見情報を積極的に活用する方策の検討などが有望と考えられる（兵庫県立大学[課題番号：HYG_01]）。

防災科学技術研究所は，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施を進めているが，これも災害情報の発信に関する研究において重要な取り組みと言える（防災科学技術研究所[課題番号：NIED_01]）。

2) 小規模噴火の発生する場の把握

東工大は、小規模噴火発生場の把握に関する先進的な取り組みとして、草津白根湯釜において土壌ガスに基づく側噴火リスク評価を試みている。土壌ガスとは地下起源のガスが破碎帯などの透水係数の高い領域を通過して地表に達するものであり、地下の熱水貯留域に存在する火山性流体は破碎帯を通路として上昇すると考えられる。地下の熱水貯留域は水蒸気爆発の発生場となり得ることからマグマ起源ガスが含まれる土壌ガスの放出域を把握することは将来の噴火発生場所の予測につながる。草津白根山の湯釜周辺では高い土壌ガスフラックスを示す場所が複数見つかり、その中にマグマ起源ガスが多い場所と少ない場所があることが分かった。マグマ起源ガスが卓越する場所は破碎帯であり、かつそれがマグマから分離したガスの上昇経路と接続していることを示唆しており、将来の側噴火の可能性が比較的高い場所だと考えられる。(東京工業大学[課題番号：TIT_03])。

広帯域MT観測により検出される浅部の低比抵抗層は水蒸気噴火と関係の深いキャップロック構造の存在を示唆しており、水蒸気噴火が発生する火山の多くで観測されている。湯釜直下から本白根山にかけても深さ 1-3 kmに広がる低比抵抗域が検出されており、水蒸気噴火発生場の詳細と噴火ポテンシャル評価に寄与する重要な成果と言える(東京工業大学[課題番号：TIT_03])。

富山大は本白根火砕丘群の山頂域に分布する小火口の活動年代を検討し、各火口を形成した水蒸気噴火の発生年代を推定するとともに、水蒸気噴火の発生場として国内外に有名な白根火砕丘群の形成史の解明のため地質図の試作と各火砕丘の活動年代推定を実施した。これは地質学的手法による発生場把握の試みとして特筆できる成果である(富山大学[課題番号：TYM_01])。

3) 観測による火山の活動把握

多項目観測による火山の活動把握が多くの火山で進められている。

東北大学は、火山活動の中心と観光の対象が 1 km 程度と至近距離にある吾妻山を観測の対象としている。観測データから、吾妻山の活動は、深さ 10~15 km の深部における膨張が先行し、深さ 4 km の地殻変動源での膨張加速、浅部地震活動や浅部地殻変動・熱・ガスの変化という経緯をたどること、また、地震波形には流体の関与を示唆する特徴があることが分かった(東北大学[課題番号：THK_08])。

伊豆大島においては、人工電流源による地下比抵抗連続モニタリング(ACTIVE)と直流法による比抵抗モニタリングが実施されているが、いずれも顕著な変動は認められていない(東京工業大学[課題番号：TIT_03])。

草津白根火砕丘周辺では多項目観測を継続しており、活動の低下傾向を示す様々な観測的事実が得られている。本白根山 2018 年噴火時に発生した火山性微動の発生位置から、噴火に関与した流体が北方由来であること、および、噴火発生時の傾斜変動と噴火噴煙放熱量の比較から、噴火に関与した熱水が比較的低温であった可能性が示唆されている(東京工業大学[課題番号：TIT_03])。草津白根山ではさらに、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が開始された（東京工業大学[課題番号：TIT_03]）。

弥陀ヶ原火山においては，活動状態を把握するための多項目地球物理観測を開始した。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 GNSS 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。これまでの観測に比べて観測項目数や観測密度が格段に向上したことから，活動状況に関する重要な基礎データの蓄積が進み，地盤変動と熱活動の定性的な対応の発見や，噴気音観測による噴気活動の定量的評価の試みなど，新たな成果が得られつつある（富山大学[課題番号：TYM_02]）。

富士山周辺での重力観測網の構築とその活用に関する研究の進展も重要である。富士山研は，標高差を活かした複数観測点による広域重力観測網の構築を進めている。また，重力測定精度向上のため，絶対重力計の個体差の検定や重力の鉛直勾配精密測定などにも取り組んでおり，他機関による富士山における重力観測の拠点の役割も果たしている（山梨県富士山科学研究所[課題番号：MFRI_02]）。

京都大学は，阿蘇山における多項目観測を継続しており，2019 年と 2021 年の噴火活動について，噴火に先行する現象と分岐指標の整理を行った。両者の活動において水蒸気噴火が発生し，その発生前に共通して観測された事象として，マグマ溜まりを挟む基線長の伸び，浅部の昇温，長周期微動の増加，火山ガスの増加，短周期微動振幅の増大を挙げることができる。一方，2つの噴火で異なる観測量もあった。長周期微動の振幅は，水蒸気噴火後にマグマ噴火に移行した 2019 年噴火では振幅増加が見られたが，マグマ噴火に移行しなかった 2021 年噴火では振幅増大が見られなかった。（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_02]）。

防災科学技術研究所は多項目観測データによる火山現象・災害過程の把握のための研究を進め，基盤的火山観測網（V-net）等の JVDN システムに集約されたデータの活用を進めている（防災科学技術研究所[課題番号：NIED_01]）。国土地理院は火山活動の監視および現象の理解等に必要となる基礎資料を提供するため，熊本において絶対重力観測を実施した。また，富士山において全磁力連続観測を実施した（国土地理院[課題番号：GSI_06]）。気象庁は，小規模火山噴火に関する研究の推進にむけて火口近傍の観測体制の充実を図っており，活火山の常時監視体制の継続や，地震計や監視カメラの増強を進めている（気象庁[課題番号：JMA_12]）。

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大きな期待が寄せられている。東北大学は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行っており，桜島，阿蘇山，浅間山，霧島山での観測を行っている。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り，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で期待される。阿蘇山では2021年10月噴火に伴う電界変動を検出した（東北大学[課題番号：THK_03]）。

4) 噴火の予測に関する研究

観測データの解析結果や物質科学的データの分析結果を整理することで、火山活動推移のモデル化や、噴火事象系統樹の分岐判断指標の作成が進んだ。吾妻山や十勝岳を対象とした火山性地震発生域や膨張・収縮源、低比抵抗領域、活動様式についての比較研究の進展、十勝岳の熱水系を念頭においた熱水流動シミュレーションによる地下熱水系の評価、湖水の熱・化学パラメータの数値的検討に基づいた火山活動に対する火口湖の応答評価など、噴火予測に資する基礎的な知見が増した。十勝岳の地質学的調査からは、マグマ噴火は約1800年前までであり、その後は水蒸気噴火および小規模な山体崩壊が散発的に発生していることがわかったものの、小規模噴火の発生については不確実性が高く、現在活発な活動を示す火口以外も対象として、調査・評価する必要があることが改めて示唆された（東北大学[課題番号：THK_11]）。

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。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も進めている。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（防災科学技術研究所[課題番号：NIED01]）。

富山大学が進める、極小規模噴火を含めた見逃がしのない「真の噴火履歴」解明を目指した取り組みも重要な成果である。平成30年草津本白根山噴火など VEI1 クラスの小規模噴火では、火口近傍を除いてテフラは地表からほぼ消失し噴出物は地表に地層として残らないため、従来の露頭調査などからはそのような噴火は存在しなかったと見なされることになる。このように、地表露頭のみを観察からは把握できない小規模噴火は多数存在するため、「真の噴火履歴」の解明は極めて難しい。火口内や火口近傍の湖沼堆積物に噴火堆積物が保存されている可能性があり、微小な噴火の新たな情報源として有望である。弥陀ヶ原で実施した調査で得た縞状硫黄層と縞状粘土層のサンプルからはテフラ層の化学的特徴を持つ層が複数見出された（富山大学[課題番号：TYM_01]）。

5) 小規模噴火災害の資料収集

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

被害はまぬがれない。

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

5か年の研究を総括すると、1) 災害情報の発信に関する研究に関しては、問題点の整理がある程度進み、火山の活動段階をわかりやすく示す指標の作成も進んでいる。しかしながら、いずれも更なる研究が必要な段階に留まる。2) 小規模噴火の発生する場の把握に関しては、様々な調査・研究により水蒸気噴火の発生場の構造に関する理解が大きく進み、発生場を特徴づける構造が見えつつあり、今後も研究の継続が望まれる。3) 観測による火山の活動把握に関しては、観測項目の増加と噴火事例の積み重ねにより、小規模噴火につながる活動状態の変化の特徴が捉えられてきている。この項目についても研究の長期的な継続を期待したい。4) 噴火の予測に関する研究は、観測データの増加と比較研究の進展により、火山活動推移のモデル化や分岐判断指標の作成が進んでいる。また、噴火現象の背後にある物理機構を数値シミュレーションなどによって理解するための研究も進められている。5) 災害発生状況の調査・整理に関しては、本総合研究内では十分に進展したとは言いがたい。

個々の研究課題はそれぞれ重要な成果を出しており、課題間の連携もうまく行っていると見えるが、火山研究における学術的成果と火山防災の実現について社会が求める情報との乖離はまだ非常に大きい。高リスク小規模火山噴火の研究においては、社会がどのような情報をどのような形で受け取りたいのかを知る努力がますます必要とされており、そのためには情報の出し手と受け手の関係構築が必須である。最終年度には、研究者と社会が問題点を共有する場としてシンポジウムを活用する試みが行われたが（東京工業大学[課題番号:TIT_03]）、これは情報の出し手と受け手の関係構築において非常に有効な手段の一つと考えられる。令和6年度から始まる新たな5か年計画においては、このような試みの更なる発展に期待したい。

成果リスト

関係各課題が属する部会報告において報告されているため、本報告では特に挙げない。

表 1. 令和 5 年度成果報告会 発表タイトル

本多 亮	富士山重力観測網の構築とその活用
大湊隆雄	総合グループ成果 取りまとめの方向性について
阪本まゆみ	噴火警戒レベルに基づく災害対応を考える
齋藤さやか	観光客の防災意識一箱根来訪者を対象としたアンケート調査をもとに
橋本武志	「高リスク小規模噴火」の予測可能性とリスク評価について(その2)
高木朗充	想定火口から居住地域までの距離と噴火頻度によるリスク
寺田暁彦	地域と共催の火山防災シンポジウムの試み
大倉敬宏	阿蘇火山における水蒸気噴火の予測と防災対応
石崎泰男	湖沼堆積物を用いた噴火履歴解明の試み
堀田耕平	富山県弥陀ヶ原火山におけるこれまでの地球物理学観測と今後の展望
西村太志	大地震による火山活動の誘発

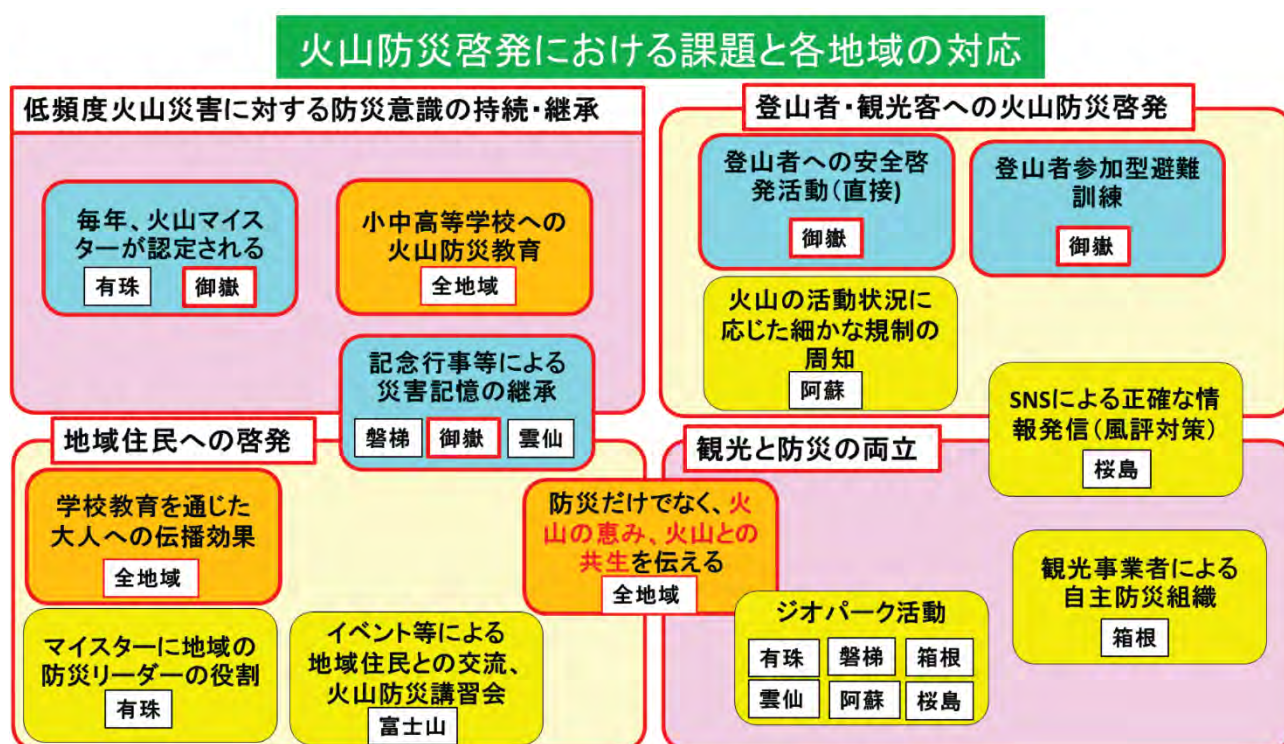


図 1. 火山防災啓発における課題と、各地域における対応の状況

3 拠点間連携共同研究

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

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

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

1. 重点推進研究

5年間の成果の概要

総括研究は「巨大地震のリスク評価の不確実性に関するパラダイム構築の推進」と題し、(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。

総括研究では5年間の間、一貫して南海トラフ沿いで巨大地震が発生した際の地震リスク評価の方法論や、実際のリスク評価やその影響について検討を行った（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C01]）。特定研究として、令和元年度には前述9分野のうち、（8）ステークホルダの参画に関する研究（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C02]）と（2）伝播・深部地盤構造に関する研究（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C03]）を進めた。令和2年度には前述2分野に加え、（6）リスク評価に関する研究（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C14]）において、斜面災害発生箇所のリスク評価について検討した。令和3年度には、令和2年度に新型コロナウイルス感染症対策の影響により十分に研究が進められなかったこともあり、令和2年度の特定研究を継続しつつ、（4）浅部地盤構造に関する研究（拠点間連携共同研究[研究課題CT0C20]）と（5）構造物被害予測に関する研究（拠点間連携共同研究[研究課題CT0C021]）を加え、5つの特定研究を実施した。令和4年度には、令和3年度に追加した2分野に加え、（6）リスク評価に関する研究（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C31]）と（7）プラットフォーム構築グループによる研究（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C32]）を実施した。令和5年度には、令和4年度に追加した2分野に加え、（6）リスク評価に関する研究（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C41]）をもう一つと（3）強震動予測に関する研究（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C42]）について研究を推進した。

平成31年度/令和元年度から令和5年度までの各年度において、重点推進研究の総括研究と特定研究に申請された研究提案について、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により審査され、重点推進研究の趣旨に適合するものが採択された。

令和5年度の成果の概要

（1）総括研究

総括研究は「巨大地震のリスク評価の不確実性に関するパラダイム構築の推進」と題し、2022年度に引き続き、（1）震源過程、（2）伝播・深部地盤構造、（3）強震動予測、（4）浅部地盤構造、（5）構造物被害予測、（6）リスク評価の研究グループに分かれ、それぞれの分野におけるリスク評価の不確かさの要因についての検討を進めるとともに、これらの知見を統合するための（7）プラットフォーム構築グループ、（8）ステークホルダの参画に関する研究グループおよび（9）大規模計算のためのコンピュータサイエンスグループの9グループで実施した（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C01]、藤本・他、2023a, Chida and Mori, 2023, Morgado et al., 2023, Zhang et al., 2024, 泉・他、2023, 泉・友清, 2024）。

震源過程について、プレート境界面における反射係数の違いから摩擦強度の分布を推定し、将来発生する南海トラフ地震の地震像に迫るために、解析に用いる地震波形記録の整理作業を行った。強震動予測に関しては、南海トラフ巨大地震のリスク評価の向上を目指し、2016年4月1日に紀伊半島沖で発生した地震(Mj6.5)について、瀬戸内海側、日本海側での違いを見るために、岡山市、鳥取市でのHi-netで観測された地震動スペクトルの比較検討を行った。深部地盤・伝播経路については、南海地震震源域西端にあた

る、豊後水道沖の海域における地殻内地震波速度構造の詳細な解析を進めた。その結果、地震波構造調査で取得した海底地震記録に対して走時トモグラフィーおよび全波形インバージョン法を適用し、沈み込んだフィリピン海プレート上の海山に対応するように、P波速度の遅い領域が認められた。また、S波速度構造については地震波干渉法による解析を進めており、これまでにS波速度構造0.5~1.0 km/sを持つ海底下浅部の構造を明らかにしている。さらに本海域周辺での広い範囲における地殻構造の高度化を進めている。浅部地盤構造に関しては、液状化地盤上に構築された隣接する2つの直接基礎建物の間隔が、地震時の建物傾斜角に及ぼす影響について、遠心力場における一連の模型振動実験により調べた。実験では、建物の幅に対する間隔の比率（0.05, 0.4, 0.7, 1.0）を変化させたケースに加え、比較対象として1つの建物に対する振動実験も実施した。その結果、建物の幅に対する間隔の比率が小さいと、隣接する2つの建物は互いに向かい合って倒れ込むように傾斜するのに対し、比率が大きくなると互いに離れるように傾斜する（比率0.7で相対傾斜角が最大となる）ことがわかった。構造物被害予測については、 fragility 曲線の高度化と地震被害発生時に即座に建物・インフラ施設の被災度を判定する技術の概要を調査するとともに、これまでに蓄積された膨大な地震被害写真を機械学習することによる被害判定システムの構築を試みた。来るべき都市直下での地震や東海・東南海・南海地震への備えとして継続して研究を実施し、災害対応力をさらに高めておく必要がある。リスク評価高度化に関しては、これまでに高精度姿勢位置情報が付与された写真と、緯度・経度・高度によって表現された点群データや3次元ポリゴン等を、幾何学的情報や特徴点に関する情報などを用いて多角的に照合することにより、撮影された写真から建物および建物の部位を自動的に判別する手法を開発してきた。今年度の研究では、これらを地理空間情報システム上で統合することで、リスク評価や被害分析に資する曝露の情報および被害情報に関するデータベースを構築し、高精度なデータベース構築に向けた課題を抽出した。具体的には、（1）デジタルツインを活用し仮想空間内に被害画像のデータベースを構築するとともに、（2）UAV空撮画像から生成した点群をもとに屋根形状を有する3D建物ポリゴンの作成を試みた。その結果、特定の条件下で、点群生成の精度が低下すること、スマートフォンやタブレットのGNSSおよび9軸センサの測位・位置推定の誤差が大きくなることにより、曝露対象の位置や形状推定や画像の3D建物ポリゴンへのマッピングが正しく行われなかったことが明らかになった。また、能登半島地震で土砂災害により道路の分断によって集落が孤立した件について、地震の前後の50 cm-DEMを用いた土砂災害予測基本図を用いて、道路被害があった箇所近傍の地形解析を珠洲市逢坂トンネル付近で実施した。土砂が崩落した箇所には、傾斜が大きく斜面下部に上部の土塊を支持する構造がない地形的特徴（遷急点や遷急線）があった。道路設置の際の切り取りが原因と考えられる箇所や、既往の地すべり地を横断する部分での変位が大きい例があった。さらに、津波被害について、南海・東南海地震津波に対して断層パラメータの不確実性に対する津波波高のばらつきに対する感度解析を実施した。ついで、津波によって発生する漂流物の挙動について実験結果をもとにモデリングを行い、津波漂流物の漂流特性を明らかにした。プラットフォーム構築に関しては、南海トラフ沿いで発生する巨大地震により引き起こされる強震動による建物被害の推定方法について、令和4年度までに木造建物に対して実施してきたが、鉄筋コンクリート造

(RC造)と鉄骨造(S造)によるものを実施できるように高度化を行った(図1,図2)。これにより、木造、RC造、S造の建築物被害推定を同時に行うことで、それぞれの構造形式に与える影響について検討することができるようになった。今後、実際に存在している建築物の位置と構造種別を把握することにより、実在する建物を考慮した建物被害推定を実施するための準備ができた。また、南海トラフ沿いで発生する巨大地震により引き起こされる津波の災害について、震源パラメータの不確実性を考慮した確率論的評価を実施した。コンピュータサイエンスについては、時刻歴発展問題を対象として、シミュレーション内で生成される過去時間ステップにおける解析結果を学習することで、解析効率を高めるアルゴリズムを開発し、地殻の粘弾性応答解析へ適用した。高詳細な実地地殻構造モデルを用いた有限要素法による地殻変動の順解析が本手法により効率化されることを確認した。今後は、逆解析等との組み合わせにより、プレート間固着状態推定などへの適用が期待される。災害リスク情報・ステークホルダ参画に関しては、平成3年度の分析結果をもとに改良したシステムにもとづき、地表速度での内閣府の南海トラフ地震動想定の評価を行った。また、前年度の成果にもとづき改良したシステムを用い、自治体職員に対するヒアリングを実施し、災害シナリオの多様性があることの理解を深めるための方策の検討、さらには検討成果を踏まえシステムのさらなる改良を行う。

(2) 特定研究(その6)

「地震および豪雨による斜面災害発生個所の事前予測方法の統合」では、以下の成果が得られた(拠点間連携共同研究[課題番号:CTOC31],筒井・齊藤, 2023, 筒井・齊藤, 2024)。

2016年熊本地震、2018年胆振東部地震の前後の詳細数値地形図を用いて地形変化部を抽出し、地震により斜面の土塊が移動を始める箇所とその移動様式を検討した。その結果、傾斜が大きく斜面下方に支持する構造のない箇所が最大傾斜方向に移動することが崩壊、土石流や地すべりの端緒となっていることが明らかになった。また、尾根に亀裂の出現する箇所と、尾根をはさむ斜面の土塊は、最大傾斜方向に変位してその間に位置する尾根で土塊が両側に移動するために陥没や亀裂が生じていることが明らかになった。これまで集合的に土塊が移動したように考えられていた大規模な崩壊でも、斜面下方に位置する、斜面の下部に支持する構造がない部分から順に上部に破壊が遡上する形式と考えると、非常に合理的な場合があることが明らかになった。このような下部に支持する構造のない箇所は、地形学的には遷急点あるいは遷急線に相当し、この付近の傾斜が大きい方が不安定で遷急線の場合は線の長さが長く、その遷急線をはさむ線状構造が斜面上方に延びている場合は不安定度が高いと考えられる。豪雨の場合もこのような地形的特徴を有する箇所に落水線が集中する場合に、不安定度が高いことがわかっているので、このような箇所を抽出することが、位置予測すなわちハザードマップ作成の出発点となる。この箇所は、土砂災害予測基本図を用いると容易に特定することができる。土砂の移動開始箇所を特定し、次にその土塊が下方に流動または移動する過程を再現し、堆積する範囲を特定することが、ハザードマップ作成にとって重要である。そのために、土砂流動再現モデルであるiRICを用いて試算をおこなった(図3~6)。土塊が流動し流下する際の側岸、流路底面からの取込量は一律と仮定して計算を実施する場合が多いが、

今回の計算を実施する際には、この仮定を緩める改善をおこなった。この結果、堆積域の建築物も考慮し、被害範囲のみならず避難方向や経路を考察できる情報を得ることが可能となった。

（３）特定研究（その７）

「巨大地震によるマルチハザードリスク評価手法に関する検討」では、以下の成果が得られた（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC32]，Miyake et al.，2023，Scowthorn et al.，2023，Muhammad et al.，2024）。

令和５年度で100年を迎えた1923年関東地震について、震源・地下構造・強震動予測等の歴史的経緯を踏まえて最新の知見を収集し、今後のハザード・災害リスク評価に必要な課題をまとめた。1923年の関東大震災から100年を契機として、我が国の歴史的な地震火災の教訓を国際的に広く共有し、地震の多い国々での今後の防災に活かすべく、カリフォルニア大学、香港大学、国際基督教大学の研究者らと共同（土木工学、建築火災安全工学、歴史学の国際文工異分野連携）で、東京で発生した同時多発大規模火災の実態を多面的に整理した。また、近年の地震火災の傾向や国外の地震火災事例も参照し、現代においても潜在する地震火災リスクを見落としてはならないことを強調した。

確率論的な津波ハザードとエージェントベースの避難モデリングを組み合わせた統合津波リスクフレームワークを開発した。この枠組みを、人口約2,200人がM9クラスの地震により重大な津波現象に遭遇すると予想される高知県黒潮町佐賀のケースに適用した。まず、2つのマグニチュード（M8.8とM9.0）の確率的震源モデルを生成し、確率論的津波浸水シミュレーションを実行した。次に、MATSimによるエージェントベースの津波避難モデリングを、4つの異なるモード、単一モード（歩行者もしくは自動車）と2つのマルチモードシナリオ（自動車と歩行者の混合）、によるシナリオを考慮して実行した。確率論的津波シミュレーションとエージェントベースの避難モデリング結果を統合してリスクを推定した。また、既存の津波避難場所と津波避難タワーがリスクの軽減に与える影響も評価した。このような統合枠組みは最終的に、津波危険度の高い地域での津波被害軽減戦略を推奨するために使用する。結果として、佐賀地区では重大な津波危険度（最大15メートルの津波深さ）が予想され、到達時間は5分から30分であることを示した。さらに、高台にある避難場所は、特に歩行者モデルとマルチモードモデルの場合は影響を受ける人数が少なくなる（10～100人）ことから、地域住民の人命救助に効果的であることが分かった。ただし、避難手段が車のみの場合は最大1,000人が影響を受ける可能性がある。したがって、沿岸地域の住民には徒歩での避難が推奨される。この研究により、津波被害リスクを軽減するには、十分な高台と垂直避難の場所を特定して確保することが不可欠であることを定量的に示した。

（４）特定研究（その８）

「巨大地震・津波を起因とする火災リスク評価の高度化」では、以下の成果が得られた（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC41]，Nishino，2023，Nishino et al.，2024，Akizuki，2024，北後，2023）。

テーマ１：地震火災・津波火災のリスク評価手法の高度化

地震火災については、地震火災の出火件数予測における認識論的不確実性について検討した。具体的には、1995年から2022年までに日本で発生した6つの地震の出火記録を用いて、人口一人あたりの出火確率と地震動強さ指標の統計的な関係（出火モデル）を推定した。その結果、出火モデルは地震イベントによって大きく変動すること、および、この出火モデルの不確実性は地震火災リスク評価におけるポートフォリオ損失超過曲線を大きく変動させることが分かった。津波火災については、不確実性を考慮した津波起因の石油流出火災の定量的ハザード評価手法を開発した。提案する手法は確率論的津波ハザード評価の拡張であり、津波による石油貯蔵タンクの移動、それに伴う石油の流出、津波による石油の拡がりや燃焼の拡大、火災の熱放射を組み込んでいる。また、断層すべり分布、石油貯蔵タンクの液面高さ、出火の時刻と位置の不確実性を考慮する。確率的に生成される多数のシナリオについて数値シミュレーションを実施し、火災ハザードの定量的尺度である最大放射熱流束の超過確率を面的に表示する。大阪湾岸の石油コンビナートに適用し、南海トラフ地震を想定したケーススタディを通じて、火災がもたらし得る影響に関して理解を深められることが示された。

テーマ2：地震後火災リスク軽減のための避難路照明計画に関する研究

直進以外のルートで出口まで移動しなければならない実験空間を設定し、床から900 mm高さの壁面に連続して有機ELを設置した上で、光源輝度を蓄光型誘導標識レベルの1 cd/m^2 から高濃度下でも視認可能な1000 cd/m^2 まで4段階設定し、白煙濃度を0（無煙）～2.0 m^{-1} の濃度での様々な点灯パターンでの避難経路の視野輝度分布を計測した。有機ELを連続的に点灯させることで高濃度下でも迷わずに避難経路をたどれるが、その光源輝度が高すぎると誘導灯に散乱重畳して、誘導灯と周囲との輝度対比が減少し視認距離が短くなるため、有機EL光源輝度を適正レベルに設定する必要があることを明らかにした。

テーマ3：地震火災・津波火災の発生・被害拡大を抑制する対応行動モデルの策定

近年の調査研究の傾向としては、阪神・淡路大震災以降の通電火災、電気火災の増加に対応して、地震後の出火危険への対応行動に関する調査研究・検討事例が多い傾向があり、これらに基づいた地震火災の発生予防の施策が展開されている傾向があることを示した。一方、令和6年度には、激震災害となった令和6年1月1日に発生した能登半島地震で現地調査を実施したところ、建物倒壊が起因となった火災の発生が見られ、激震による初期消火の困難性や消防活動の阻害条件の発生によって、大規模延焼火災となった事例が発生した。これは、阪神・淡路大震災時に見られた出火原因が不明とされた大規模火災と同様に激震による消防活動の阻害条件等によるものであったことが想起される。

（5）特定研究（その9）

「地震ハザードにおける地下構造の影響の定量的評価の研究」では、以下の成果が得られた（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C42]，野口・河野，2023，野口・他，2023）。

関西における大都市は、堆積盆地等比較的柔らかな地盤の上に大きな都市が発達している。ここでは、まず盆地である京都盆地を対象の一つとして研究を進めた。京都盆地は、東西約10 km南北約25 kmの、大阪層群、段丘堆積物相当層、沖積層に埋積された堆

積盆地である。自治体や研究機関等によって実施された地下構造調査によると、堆積層の厚さは盆地中央部を北東-南西方向に延びる宇治川断層より北側では100～300 m程度、南側では400～700 m程度である。対象とする地震は、京都盆地の北西約15 kmで発生した2022年3月31日のMw4.2の地震を用いた。この地震では、最大震度4を亀岡市、京都市で記録している。地震動シミュレーションは、差分法を用いた。最小S波速度は350 m/sまで考慮し、堆積層中のグリッド間隔を25 mとして、2Hzまでを有効周波数とした。計算された波形の時空間分布を見ると、京都盆地の地震動応答は、直達波の後、多重反射、盆地縁部で発生する表面波が、狭い盆地内を交差し、複雑な様相を呈することがわかった。盆地縁の形状は出入りが多く複雑であり、盆地縁で発生した表面波が強め合う尾根が、盆地縁の屈曲部を始点として形成されていることが示唆された。

瀬戸内海沿岸には、岡山や広島等大きな都市が存在している。またそれらの都市は、海拔の低い海岸から山地に向かって広がっており、堆積層の厚さが変化し、地域の特徴の変化が予想される。そのため、それらの地盤構造の特徴を知ることは災害の予測を行う上で非常に重要である。そこで、岡山県内において広範囲な領域で高密度な震度観測点における地盤増幅率と地盤構造の推定をおこなった。この研究では、岡山県内にある自治体の震度計観測網（岡山県震度情報ネットワーク）と気象庁の震度観測点や防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netなどの強震観測点の計119地点で観測された地震の波形記録からその各地点の地盤特性を抽出した。地震は、中国地方、四国地方、近畿地方で発生し、岡山県震度情報ネットワークの観測波形記録が入手できたイベント約20個を用いた。地盤特性は地震基盤からの地盤増幅率で、スペクトル・インバージョンによって求めた。その結果、岡山県のほぼ全域において様々な地点の地盤特性を抽出することができた。また、児島湾周辺を中心とする地点の地盤構造の推定や岡山大学津島キャンパスにおける微動探査も行った。これら岡山県における地盤増幅特性や地盤構造モデルは、南海トラフの地震を含む巨大地震に対する防災や減災のための重要な情報となり得ると期待される。

中国四国地方は山間部も多く、南海トラフの巨大地震発生時の地すべりの発生が懸念される。そのため、鳥取県の地すべり地域において中山間地域の不整形地盤が想定される地すべり地域及び断層近傍において、微動および重力探査を実施し、地盤震動特性の把握及び地盤構造の推定を行った。島根県多伎町内の小田地区と田儀地区の地すべり地域では微動探査と重力探査、徳島県三好市の地すべり地域では微動探査、三野断層近傍では動探査と重力探査を実施した。地すべり地域では、すべ落崖やその周辺でH/Vの卓越周期が長くなる傾向やピークが大きくなる傾向がみられた。多伎町では大きな移動体ブロック内で複雑に変化する様子、三好市では小ブロック毎に形状が異なることがわかった。

2. 一般課題型研究

令和5年度の成果の概要

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。

一般課題型研究については、令和元年度は新規10課題、令和2年度は新規5課題、継続・期間延長7課題、令和3年度は新規9課題、期間延長4課題、令和4年度は新規8課題、継続4課題が東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会の審査を経て採択された。令和5年度は、6件の新規課題と5件の継続課題が採択された。5年間で、のべ58課題が採択された。

令和5年度の成果の概要

（1）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化の研究

「活断層により形成される盆地端部構造と歴史地震の被害分布との関係に関する研究」では、以下の成果が得られた（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC35]，松島・他，2023，山本・他，2024）。

図7に微動のアレイ観測及び単点観測を行った地点と水田・鏡味(2013)における震度7の地点を示す。アレイ観測は計6地点で行ったが、その内3地点は背斜構造が見られる余目周辺で行った。アレイの形状は原則、一辺が45 m, 15 m, 5 m, 1.67 mである同心円の正三角形とした。単点観測は主として東西方向に7測線84地点で行い、間隔が狭い所では1 km間隔，広い所では2 km間隔で観測点を配置した。さらに測線間を補完するように測線外に11か所の観測点を設けた。また、観測には加速度地震計SMAR-6A3PとJU410を用いた。サンプリング周波数は200 Hzとし、単点観測では30分以上、アレイ観測では大きさに応じて最低10分以上の計測を行った。

単点微動観測記録からは各地点での水平上下（H/V）スペクトル比を算出した。まず、得られた加速度時刻歴データを50%オーバーラップさせて40.96秒の小区間に区切り出し、NS・EW・UDの3成分の振幅二乗和が小さい15区間を抽出した。区間の前後1秒にコサインテーパーによる処理を施し、高速フーリエ変換を用いて各区間のフーリエスペクトルを求めた。さらにバンド幅0.1 HzのParzenウィンドウを用いて平滑化した後にH/Vを求め、15区間の幾何平均をとった。微動アレイ観測記録からは微動アレイ解析ツールBIDO(ver. 3.2))を用いてSPAC法によりレイリー波の位相速度を求めた。解析パラメータは、セグメント平均の際のセグメント長、セグメント数はそれぞれ10.24秒、10個であり、Parzenウィンドウのバンド幅は0.3 Hzとした。解析結果の一例として図8にEWD測線におけるH/Vスペクトル比を示す。位相速度は0.4 Hzから12 Hz程度まで得られた。H/Vスペクトル比については盆地構造に起因する方位依存性や卓越周期の変化を期待したが、空間的傾向を明確には確認できなかった。

「1923年関東地震の木造建物被害率に基づく震源破壊プロセスの解明」では、令和4年度に建物被害に関する資料及び論文より決定した強震動評価地点のうち、地盤の微動

観測を遂行できていなかった地点での観測を引き続き行い、微動の水平上下スペクトル比MHVRを計算した。そしてKawase et al. (2018)の提案した地震動微動補正係数EMRをMHVRに乗じることで擬似地震動水平上下動比pEHVRを求め、それにIto et al. (2021)で提案された上下動補正係数VACFを乗じることで観測地点全地点における疑似サイト増幅特性pHSAFを求めた。

その上でまず、建物倒壊率とpHSAFの一次ピーク振動数を確認した。図9にその結果を示す。多くの地点で一時ピーク振動数は建物の大被害に直結する0.5~2 Hzの間にあることが分かった。さらに建物倒壊率と0.5~2.0 Hzにおけるピーク振幅の関係性を確認した。図10にその結果を示す。20地点では0.5~2.0 Hzでの振幅が10を超えており、大きな増幅があることが分かった。また、両者には正の相関があり、サイト増幅特性が建物の大被害に寄与したことは明らかだといえることが分かった。一方で、ピーク振幅が大きくなっても、建物被害が大きかった地点もあり、このような地点では、サイト増幅特性以外の要因、すなわちSMGAとの距離やディレクティビティ効果といった震源の影響を建物被害の要因の可能性として考える必要がある。

震源モデルについては、上記で得られたサイト増幅特性が大きくなっても建物被害が大きかった地点の位置関係を拘束条件としてSMGA配置を置き換えたモデルを複数構築した。当初の計画4の建物被害率計算については、令和6年に入り実行予定であったが、元日に発生した能登半島地震の調査・データ解析のため、着手に至っていない。現在、変位が継続している徳島県三好市西井川の地すべり地において、末端、地すべり土塊内部、その隣接する谷部、谷部の地下水位の高い部位で、長周期速度計により地震に対する応答の比較観測を実施した。地すべり土塊の末端は、南北に切り取り部があり東西方向に支持する構造がない。また、地震計を設置した隣接する谷部は東西方向で、地すべり土塊の側方を侵食する構造である。震源がほぼ西に位置する2022年11月22日10:24、深さ46 km M3.7 豊後水道を震源とする地震、震源がほぼ南に位置する2020年12月29日01:47、深さ35 km M4.4高知県東部を震源とする地震について、地すべり土塊の特徴的な地形を有する地点の地震波への応答を比較し、各部位の地震に対する危険度の評価をおこなった(拠点間連携共同研究[課題番号:CTOC39], 伊藤・他, 2023a, 伊藤・他, 2023b, Ito et al., 2023)。

「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」では、以下の成果が得られた(拠点間連携共同研究[課題番号:CTOC40], 藤田・境, 2023, 汐満・他, 2023)。

令和4年度に2003年十勝沖地震のKiK-net厚真のような、2秒よりやや長い周期が卓越して揺れの数が多い地震動の発生要因について、過去の震度6弱以上を記録したKiK-net観測点の強震記録を対象として検討を行った結果、AVS30(表層30 mの平均せん断波速度)が小さい軟弱地盤で発生していることがわかったが、その条件を満たしても、該当地震動が発生していない場合もあったため、更に、条件の絞り込みを行った。その結果、表層地盤については、AVS30が140 m/s以下、等価一次周期が1-1.5秒、基盤動(KiK-net観測点の地中記録)の地動最大速度(PGA)が30 cm/s以上だと、そのような地震動が発生していることがわかった(図11, 12)。そして、そのような条件を満たす表層地盤を探すと、埼玉県北西部など、多数存在することがわかった。

一方、開発した実大1層縮約試験体に入力した振動実験は、昨年度、KiK-net厚真を入力して、大きな被害となった試験体に、震度6強で短周期が卓越した2003年十勝沖地震のK-NET広尾の強震記録を入力したところ、ほとんど被害が生じないことを確認するとともに、KiK-net厚真と同様の2秒よりやや長い周期が卓越して揺れの数が多い地震動である、2007年新潟県中越沖地震のK-NET柏崎を入力し、こちらも大きな被害となることを確認した。

「コミュニティ断層モデルの試作」では、以下の成果が得られた（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C43]，安藤・他，2023，吾妻・他，2023）。

本年度は試作版の作成として、地震本部の示した全国の主要活断層帯から半数にあたる平均変位速度の高い上位50断層を選定し、3次元断層形状モデルを作成した。モデル作成は、以下の手順で行った。1) 産総研活断層データベースの地表トレースをもとに、副次断層や細かな屈曲を単純な表現にした、単純化地表トレースを作成する。2) 長期評価およびJ-SHISモデルでの傾斜角のカタログ値を用いて、一様傾斜角を仮定して、地表トレースから断層面を地下に延長することで、非平面の3次元断層形状を得る。また、地震活動データを用いて、地震発生層下限を定義して、各断層の下限を与える。モデル作成にあたっては、今回の試作版は、米国での例(15年以上更新を続け最新はVer. 6.0 (2023))のように、今後の観測や解釈の発展によりモデル更新していくものの端緒として位置付けられる。

今後、ワークショップ形式などで、試作モデルの評価と修正を広くコミュニティに公開して行うことを検討している。

「確率論的津波漂流物評価手法構築に向けた数値的検討」では、令和5年度は、沖合観測網と多数の津波シナリオを用いた沿岸域の津波予測システムの構築、津波波源の不確実性を考慮した漂流物の影響評価に関する基礎的検討や漂流物モデルの高度化などにより、防災工学的な側面に立った社会実装のための準備を行った。

まず、沖合観測網S-netが密集して設置されている東北沿岸に着目し、深層学習アルゴリズムの一つであるノイズ除去オートエンコーダ(DAE)モデルにより津波予測システムを開発・構築した。確率論的震源モデル(M7.0-8.8)にもとづく800の津波シナリオの計算を教師データとした。44のS-net観測点における合成津波波形を入力とし、4つの沿岸潮位計における波形を出力とした。別の200の津波シナリオや、2016年福島県沖地震の津波でモデルの性能を検証した結果、構築モデルは沿岸の時系列波形を良好に再現した。将来的には、より多くの津波シナリオを学習し、正断層型や気象津波など異なる種類の津波に対する頑健性を高める見込みである。この成果は、Earth, Planets and Spaceに掲載されている。南海トラフ想定震源域における断層パラメータの不確実性が津波高さに及ぼす影響についても検討を行った。断層パラメータのうち、断層深さを4種類、すべり角を5種類、確率津波モデルにより生成した100種類のすべり量分布により初期津波波源を生成した。生成した津波波源を用いて津波伝播計算を実施し、西日本沿岸での津波高さを比較した。内閣府モデルに対して断層深さを5 km深くした場合に沿岸の津波波高の中央値が外洋で1 m程度、内湾で0.4 m程度大きくなることなどが分かった。この成果は、土木学会論文集に掲載され11月に行われた海岸工学講演会で口頭発表された。津波漂流物の影響評価に関する基礎検討として、確率津波モデルを用いて南海トラフ沿いの

津波波源を多数生成し、東京湾、伊勢湾を対象にした津波伝播計算を実施し、漂流物の挙動に対して大きな影響を及ぼす津波流速についてばらつきを評価した。今後これらのばらつきが漂流物に及ぼす影響について調査する。津波漂流物の挙動を推定する数値計算モデルに関して、水槽実験との比較を通じた津波漂流物モデルの改良と精度検証を実施した。実地形のような複雑な海底地形と漂流物底面との局所的な接触や多数陸上構造物との接触による漂流挙動の変化を追跡できるような改良を行うことで、水槽実験における平均的な漂流挙動やそのばらつきを表現可能であることを示した。さらに、津波漂流物の挙動推定における作用力推定方法や漂流物と流体の相互作用方法の精度について検証を行い、これらの手法間の違いについて定量的な評価を行った。これらの成果の一部は11月に行われた海岸工学講演会で口頭発表された。また、1月に発生した能登半島地震では複数の漁船が能登半島から新潟県沿岸に到達した。1月後半時点で提案されているいくつかの断層パラメータを用いた津波計算及び漂流物計算を実施したところ、津波の伝播だけでは新潟県沿岸への移動を説明できず、潮汐や風の影響を考慮する必要があることを示唆する結果を得た（拠点間連携共同研究[課題番号:CT0C44], Nishino et al., 2024, Fukui et al., 2024, Miyashita et al., 2023, Wang et al., 2023, 藤本・他, 2023a, 西野・他, 2023a, 千田・森, 2023, 宮下, 2023, 藤本・他, 2023b, 西野・他, 2023b, 宮下・他, 2023)。

5月に開催された津波漂流物に関するワークショップでは、津波漂流物の挙動推定に関する計算精度、予測手法の高度化、今後の国際的な取り組みについて国内外の津波漂流物研究者と議論した。9月には東京大学地震研究所の佐竹グループと京都大学防災研究所の森グループによる合同セミナーを開催した。

「地盤と建物特性を考慮した建物被害分析と後発地震への応答予報モデルの構築」では、以下の成果を得た（拠点間連携共同研究[課題番号:CT0C45]）。

対象地域の平均的な敷地地盤特性と拠点建物で観測された強震記録を用いて、その地域の任意の地点における入力地震動（地表面地震動）と被害を評価する手法について検討した。評価方法は、地表面－建物間の伝達関数を用いた周波数応答解析により、強震記録から地表面地震動を逆算する方法である。令和5年度は、解析モデルに不可欠な基礎－地盤間のインピーダンスを評価した。図13に、対象建物の3D-FEM解析モデルを示す。対象建物の基礎版のみを無質量でモデル化し、インパルス加振によりインピーダンスを算定する。地盤は線形弾性でモデル化する。解析モデルの底面部および側面部には無反射境界を設定し、地盤の半無限性を考慮する。本モデル化手法により、半無限地盤におけるインピーダンスの理論解と概ね整合するインピーダンスを評価できることを別途確認している。図14に得られたインピーダンスのうち、水平成分の実部の特性を示す。今後、得られたインピーダンスを用いた周波数応答解析により地表面地震動を推定し、観測記録との整合性を検討する。

建物特性を考慮した病院建物被害分析として、構造躯体だけではなく、医療機器・非構造部材の評価も含めて病院の機能維持性を評価する手法を構築し、花折断層地震を想定した地震動に対する京都市内の病院機能維持性を評価した。構造躯体についての被害推定では、対象建物について、Google Earth, PLATEAUでの事前調査と現地調査を実施して、建物階数や建物の高さやエキスパンジョイントの有無などを調査した。また、自治体

の被害想定に使用されている構造特性係数と建物の等価 1 次固有周期に対応する加速度応答スペクトルの関係から被害を判定した。図15に構造躯体のみを考慮した場合の被害推定結果を示す。次に、構造躯体の被害判定に、応答スペクトル法と損傷確率関数を利用した非構造部材の被害推定を組み合わせた建物被害の総合判定を実施した。図16に示す総合判定結果では、構造躯体が無損傷の30病院のうち、総合判定で小破に変わった病院が17病院、構造躯体が小破の27病院のうち総合判定で中破に判定が変わった病院が11病院存在し、被災度区分が変化することを確認した。さらに非構造部材まで評価に加えると、構造躯体のみで評価した被害程度に比べて被害程度が大きくなるが、さらに医療機器の評価を加えることでは、被害程度はあまり変化しなかった。ただし、実験結果や実際の被害との対応については、更に検証が必要である。

後発地震の発生確率を評価するため、過去の地震カタログに基づいた地震の発生のしやすさ (space-time ETAS model, Ogata 2022) を求めるプロトタイプシステムを構築した。時空間 ETASモデルでは、過去の地震カタログを利用して翌 1 日に、あるマグニチュード以上の地震が何個発生するかを求めている。本課題では 1 日ごとに時空間ETASモデルを計算し、その空間分布を分析した。例として、図17に令和 5 年 1 月 1 日に発生した能登半島地震前後における、マグニチュード 4 以上の後発地震発生数の予測結果を示す。本震発生を受けて、能登半島の震源域及びその周辺で後発地震の発生予測数が大幅に増加している。

「土砂災害のサイレントキラーとなる地震による地表変状の研究 2022年12月31日山形県鶴岡市西目の斜面崩壊に与えた2019年山形県沖地震の影響評価」では、以下の成果が得られた(拠点間連携共同研究[課題番号:CT0C46], 齊藤, 2023, 古谷・齊藤, 2024)。

1970年代に行われた土砂採取によって出現した急傾斜の平坦な切り取り斜面には、2019年山形県沖地震によって生じたと考えられる斜面上部の亀裂と斜面下部の小崩壊があることが、1m-LiDAR DEMを用いた土砂災害予測基本図によって確認された。斜面上部の亀裂は、斜面に浸透する降水や融雪の鉛直浸透を助長し、2022年12月31日に発生した崩壊性の地すべりの発生原因となったと考えられる。斜面下部に存在した小崩壊は、この地震によって生じたと考えられ、今回の崩壊性地すべりの規模を大きくした可能性がある。これは、切り取り斜面の下部に認められる遷急線の上部が破壊され移動していることと関連している。図18内の赤枠の範囲が崩壊後の土砂災害予測基本図から読み取った崩壊範囲で、斜面下部に上部斜面を支持する構造がなく、これはいわゆる遷急線と一致する。切り取り斜面や盛り土斜面などは、地震後に発生する亀裂の有無、斜面下部の崩壊などのモニタリングを実施する必要があると考えられる。

「社会の要請に基づく首都圏における災害の誘因予測のための官民連携のフレーム検討・構築」では、日本学術会議が主催した持続可能な社会のための科学と技術に関する国際会議2023「壊滅的災害に対してレジリエントで持続可能な社会への変革」において、過去に壊滅的地震災害のあったトルクメニスタン等国内外の有識者からの知見を得た。また、台湾・国家災害防救科技中心(NCDR: National Science and Technology Center for Disaster Reduction) とのワークショップ及び台湾・国家地震工程研究中心(NCREE: National Center for Research on Earthquake Engineering) の研究者・技術者との会議において、社会のレジリエンス強化のため、地震災害を含む自然災害に関する観測と

そのデータの活用方策と情報共有，防災対策のあり方や官民連携，社会的課題の抽出，地震工学の動向や及び地震減災に関する建造物の構造研究について議論を踏まえ，次に関する研究成果を得た：1）災害リスクについての理解の深化と展開，2）災害に対処する新しいガバナンスの確立，3）災害に対する財政支出・人材育成・技術開発投資の確実な実行，4）より良い復興（Build Back Better）を可能にするための事前方策の確立（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C47]，Ahmedova，2023，Lee，2023，Tabata，2023）。

（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

「桜島大規模噴火による大量軽石火山灰降下に対する事前広域避難に向けた実践的研究」では，令和5年度には，合計4回のワークショップを行った。通算で6回目のワークショップでは，大規模噴火が迫った段階での避難対応行動について参加者各自に検討してもらうために，「何とか生き残るシナリオ」を考えるというテーマを設定した。大規模噴火の予兆現象の発生から大規模噴火に至るまでの状況設定を専門家側で作成し，参加者各自で各段階でどのような避難準備あるいは避難を行うかについて検討を行ってもらった。通算7回目のワークショップでは，参加者が各自で検討した生き残るためのシナリオを専門家側でレビューを行い，その問題点や改善点を考えるためのフィードバックを行い，さらに各自でどのような改善点や自らで解決できない課題についても参加者に検討してもらった。通算第8回のワークショップでは，これまで行ってきた検討の内容を取りまとめ形に残すための検討を行った。とりわけ，住民が主体となって成果を取りまとめる点，さらに取りまとめの枠組みについても広報の専門家を交えて検討を行った。通算第9回は，大正噴火の際に降り積もった軽石を掘削したトレンチを実際にワークショップ参加者に見てもらい，身体的に軽石が降り積もった状態を実感する機会を設けた。この通算第9回のワークショップは事前に計画をしていなかったが，大規模噴火の様相を身体的に理解する重要な契機であると考え追加的に実施した（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C34]，矢守・他，2023，大西・他，2023，Onishi，2023，大西，2023）。

「リスクコミュニケーションを推進するための地震・火山災害に関する意識調査の標準的な質問紙設計とその有効性の検証」では，以下の成果が得られた（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C38]）。

地震に関する質問紙調査の先行研究をレビューし，先行研究を踏まえつつ，できるだけ標準的な調査項目として，地震に係る用語の認知と備えや準備の状況とした。用語の認知については，ハザード（震度，マグニチュード，震源，震央，本震，余震，長周期地震動，海溝型地震，活断層型地震），情報（緊急地震速報，津波注意報，津波警報，大津波警報，南海トラフ地震臨時情報，北海道・三陸沖後発地震注意情報，長周期地震動に関する観測情報），その他（地震予知，地震動予測地図，ローリングストック，フェーズフリー）の20用語を取り上げた。備えや準備については，耐震化・家具固定や飲料水の備蓄などである。

調査対象は，太平洋側，日本海側の地域をできるだけ幅広く選定する方針の下，8市区（仙台市，秋田市，東京23区，新潟市，金沢市，名古屋市，大阪市，鳥取市）を選定した。作成した質問紙票の質問項目をベースに，オンライン調査（サンプル数は各市200，年齢性別で均等割付を行った。なお，鳥取市のみ190である。）を実施し，各地域住民の

火山災害に関する意識を明らかにするとともに、設計した調査票の有効性について検討した。調査期間は、2024年1月10日～15日である。1月1日に発生した能登半島地震の直後に行われているため、直近に発生した地震の影響が反映されている可能性が高いことに留意する必要がある。

調査結果の一部として、「震度」、「緊急地震速報」、「南海トラフ地震臨時情報」についての認知を図19～21に示す。内容を含めて良く知っている、ある程度知っているをあわせると、全体で震度92.5%、緊急地震速報91.5%、南海トラフ地震臨時情報46.9%であった。南海トラフ地震臨時情報については、名古屋市55.5%が最も高く、新潟市38.0%が最も低かった。

地震への備えや準備として、ここでは家具固定（図22）と食料の備蓄（図23）について調査した。家具固定は、大部分固定、一部固定をあわせて仙台市71.0%が最も高く、新潟市43.0%が最も低かった。食料の備蓄は、備蓄がないと回答したのは仙台市26.0%が最も低く、鳥取市43.2%が最も高かった。全体的な傾向として太平洋側の地域では用語の認知や地震への備えや準備が進んでおり、日本海側の地域で低調な傾向が示された。

詳細な分析は今後行う必要があるが、設計した調査票は地震に関する標準的な質問紙として機能すること、本調査票を用いることにより、地域間の地震に関する住民意識や備えや準備の状況について比較が可能であることが確認された。

「長寿命化改修を実施した高経年建物の被害把握のための地盤と建物の地震観測に関する基礎的検討」では、長寿命化改修を実施した高経年建物の被害把握を目的とした。対象とした建物は平面が9 m×84 mと細長い平面を有する板状建物であり、振動時にねじれて東西で異なる挙動を示すことが予測されることから、頂部は東西2か所にセンサーを設置している。また、近傍の地盤においても強震観測を続けており、この地盤観測点は建物改修に関係なく今後も観測を継続予定である。改修工事後に再度建物内にセンサーを設置し、改修を繰り返した高経年建物の改修前後における地震入力、および上部構造の固有振動数の変化、地震時挙動を明らかにすることで、高経年建物の地震時被害把握の精度向上を目指す。

改修工事が遅延しており現在まだ改修中である。改修前に実施した強震観測、および微動の結果を分析しつつ、既存鉄筋コンクリート建物の観測記録に関する文献調査、改修後の観測を充実させるために準備を行った。既に発表してきた通り、本建物の卓越周期は季節変動しており、その変動幅はコンクリートの剛性の変化だけでは説明がつかないほど大きい。また文献調査の結果によると、サンプル数はとても少ないが、古い建物ほど、且つ大きな地震を受けているほど変動幅が大きくなっている可能性もある。本建物は今回の改修に伴い行ったコンクリートのコア抜き試験ではコンクリート強度が非常に小さいことが判明したため、それを反映した解析モデルを作成して比較した（図24、図25）（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C48]）。

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へ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、特定研究において掘り下げて詳細に検討するとともに、新しい技術や考え方について検討し、その成果を総括研究にフィードバックするとともに、さらに総括研究で新たに出た課題を特定研究で掘り下げる、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。また、最近の地震後の災害では、地震発生にともない災害誘因は強震動に留まらず、津波、地盤変状、地すべり、火災などが相互に影響を与えたり、連鎖的に起こるようなマルチハザードに対する災害リスクを評価することの重要性が明らかとなっている。さらに、地震発生前後の降雨状況が地盤変状や地すべりに与える影響は大きく、地震時の災害リスクを評価する上で重要となっていることも明らかとなっている。このため、これらのマルチハザードによる災害リスク評価を行うためにはより広範な研究領域の研究者と協働することと、災害の軽減のための対策を考える、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

- Ahmedova, S., 2023, Focus zones of strong earthquakes occurring in Turkmenistan - Disaster and recovery after Ashgabat earthquakes of 1948, International Conference on Science and Technology for Sustainability 2023 -Transforming Society to Become Resilient and Sustainable beyond Catastrophic Disasters-, Science Council of Japan
- Akizuki Y, 2024, Evacuation route design based on visibility for reducing evacuation delays, Fire Safety Journal, 144, 104099
- 安藤亮輔・吾妻崇・コミュニティ断層モデル有志グループ, 2023, コミュニティ断層モデルの構築に向けて, 日本地震学会秋季大会, S19P-01
- 吾妻 崇・安藤亮輔・コミュニティ断層モデル有志グループ, 2023, 日本の主要活断層帯のコミュニティ断層モデルの構築, 日本活断層学会秋季学術大会, 0-01
- Chida, Y., N. Mori, 2023, Numerical modeling of debris transport due to tsunami flow in a coastal urban area, Coastal Engineering, Elsevier, 179, 104243,

<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104243>

- 千田優, 森信人, 2023, 実地形への適用性向上を目指した漂流物モデルの開発と検証, 第70回海岸工学講演会
- 藤本健太, 宮下卓也, 森信人, 志村智也, 2023a, 南海トラフ地震の断層パラメータの不確実性が西日本沿岸の津波波高に与える影響, 土木学会論文集, 79(17), 23-17048, <https://doi.org/10.2208/jscej.23-17048>
- 藤本健太, 宮下卓也, 森信人, 志村智也, 2023b, 南海トラフ地震の断層パラメータの不確実性が西日本沿岸の津波波高に与える影響, 第70回海岸工学講演会
- 藤田雄大, 境有紀, 2023, 表層地盤と基盤動に着目した周期2秒程度で揺れの数が多い地震動の発生条件, 日本建築学会大会
- Fukui, N., Mori, N., Kim, S., Shimura, T., Miyashita, T, 2024, Application of a subgrid-scale urban inundation model for a storm surge simulation: Case study of typhoon Haiyan, Coastal Engineering, 188, 104442, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104442>
- 古谷 元・齊藤隆志, 2024, 土砂災害のサイレントキラーとなる地震による地表変状 -鶴岡市西目で発生した地すべりを例として, 令和5年度 京都大学防災研究所 研究発表講演会, P17
- 北後明彦, 2023, 地震火災・津波火災の発生・被害拡大を抑制する対応行動の事例研究の整理, 第16回日本地震工学シンポジウム, Day1-G414-11
- 泉都喜嗣, 友清衣利子, 西嶋一欽, 中嶋唯貴, 2023, 被害調査資料データベースの構築のための建物3次元ポリゴン作成の試み, 日本建築学会大会学術講演(近畿), 20079
- 泉都喜嗣, 友清衣利子, 2024, 複雑な屋根形状を有する建物の3次元ポリゴン作成の試み, 日本建築学会九州支部研究発表会, 208
- 伊藤恵理・長嶋史明・孫紀凱・川瀬博, 2023a, 1923年関東地震の大被害地域におけるサイト増幅特性の評価, 2023年度日本建築学会大会, 構造II 21393
- 伊藤恵理・長嶋史明・孫紀凱・王 自謙・川瀬博, 2023b, 1923年関東地震の大被害地域における微動観測データを用いたサイト増幅特性の評価, 第16回日本地震工学シンポジウム, Day3-G415-03
- ITO, Eri, Fumiaki NAGASHIMA, Jikai SUN, Ziqian WANG and Hiroshi KAWASE, 2023, Evaluation of the site amplification factors on the severely damaged sites during the 1923 Kanto earthquake for delineating the complex source process, 2023 Seismological Society of America Annual Meeting
- Lee, W.S., 2023, Enable an Information Supply Chain for Disaster Risk Management - Innovation, Inclusion and Intelligence, International Conference on Science and Technology for Sustainability 2023 -Transforming Society to Become Resilient and Sustainable beyond Catastrophic Disasters-, Science Council of Japan
- 松島信一, 山本耕平, 周宇廷, 長嶋史明, 大邑潤三, 加納靖之, 吾妻崇, 石瀬素子, 2023, 1894年庄内地震の地震被害の原因解明のための常時微動に基づく庄内平野の地盤構造の推定, 第16回日本地震工学シンポジウム, Day3-G415-02
- 宮下卓也, 2023, 複雑形状をもつ湾における長周期波の応答振動解析, 第13回巨大津波災害に関する合同研究集会

- 宮下卓也, 森信人, 志村智也, 2023, ヘルムホルツ方程式を用いた日本主要湾における長周期波の振動応答特性の数値的評価, 第70回海岸工学講演会
- Miyashita, T., Nishino, A., Ho, T.-C., Yasuda, T., Mori, N., Shimura, T., Fukui, N., 2023, Multi-scale Simulation of Subsequent Tsunami Waves in Japan Excited by Air Pressure Waves Due to the 2022 Tonga Volcanic Eruption, *Pure and Applied Geophysics*, 180(9), 3195-3223, <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03332-9>
- Morgado, Y., O.S. Areu Rangel, O.S., R. Silva-Casarin, T. Miyashita, N. Mori, T. Tomiczek, 2023, Using the SPRC methodology to assess tsunami risk in Zihuatanejo, Mexico, *Coastal Engineering Journal*, Taylor & Francis, 65(2), 256-276, <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2172992>
- 西野藍, 宮下卓也, 安田誠宏, 志村智也, 森信人, 2023a, 2022年フンガトンガ火山噴火に伴う日本沿岸における最大水位の要因推定, *土木学会論文集*, 79(17), 23-17032, <https://doi.org/10.2208/jscej.23-17032>
- 西野藍, 宮下卓也, 安田誠宏, 志村智也, 森信人, 2023b, 2022年フンガトンガ火山噴火に伴う日本沿岸における最大水位の要因推定, 第70回海岸工学講演会
- Nishino T, 2023, Post-earthquake fire ignition model uncertainty in regional probabilistic shaking-fire cascading multi-hazard risk assessment: A study of earthquakes in Japan, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 98, 104124
- Nishino T, Miyashita T, Mori N, 2024, Methodology for probabilistic tsunami-triggered oil spill fire hazard assessment based on Natech cascading disaster modeling, *Reliability Engineering & System Safety*, 242, 109789
- 野口竜也・河野勝宣, 2023, 微動観測に基づく地すべり地域ー島根県多伎町ーの地盤震動特性と地盤構造, 日本地震学会2023年度秋季大会, S16P-04
- 野口竜也・西村武・香川敬生, 2023, 1943年鳥取地震における吉岡断層近傍の地盤震動特性と地盤構造, 第16回日本地震工学シンポジウム, Day1-G417-21
- 大西正光, 鈴木駿介, 矢守克也, 井口正人, 山泰幸, 中野元太, 竹之内健介, 2023, 長期的視野のリスクコミュニケーション: 桜島大規模噴火に備える地域との協働活動, 令和4年度防災研究所研究発表講演会
- Masamitsu Onishi, 2023, Implementation Gap: Case of Evacuation from an Inexperienced Hazard, The 13th International Conference of the International Society for the Integrated Disaster Risk Management
- 大西正光, 2023, 次なる桜島大規模噴火に向けた専門家と地域の共同活動: 現在の立ち位置, 2023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, 2023, 土砂災害のサイレントキラーとなる地震による地表変状ー鶴岡市西目で発生した地すべりを例として, 第43回日本自然災害学会予稿集, p. 125-126
- 汐満将史, 日塔未来, 境有紀, 五十田博, 江口直希, 藤田雄大, 2023, 2003年十勝沖地震におけるKiK-net厚真を入力した木造建物の振動実験および地震応答解析, 第16回日本地震工学シンポジウム
- Tabata, K., 2023, Achievements and Future Prospects Contributing to the Research Infrastructure for Disaster Risk Reduction with E-Defense, 3rd Workshop between the

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience of Japan and
the National Science and Technology Center for Disaster Reduction of Taiwan

筒井和男・齊藤隆志, 2023, 侵食量に着目した土石流被害予測計算の高度化, 第43回日本自然災害学会予稿集, p.11-12

筒井和男・齊藤隆志, 2024, 侵食量に着目した土砂流動モデルによる被害範囲の予測, 令和5年度 京都大学防災研究所 研究発表講演会, P18

Wang, Y., Imai, K., Miyashita, T., Ariyoshi, K., Takahashi, N., Satake, K, 2023, Coastal tsunami prediction in Tohoku region, Japan, based on S-net observations using artificial neural network, *Earth, Planets and Space*, 75(1), 154, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01912-6>

山本耕平, 松島信一, 長嶋史明, 周宇廷, ティンザーヤダナー, 五熊大, 2024, 微動のアレイ観測及び単点観測記録に基づく庄内平野の地盤構造推定, 令和5年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P25

矢守克也, 大西正光, 鈴木駿介, 2023, 火山災害からの避難に関する基礎的考察, 令和4年度防災研究所研究発表講演会

ZHANG, Zhuocheng, Kyohei UEDA, Yuko SERIKAWA, 2024, EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON SEISMIC RESPONSE OF ADJACENT STRUCTURES ON LIQUEFIABLE GROUND, DPRI Annual Meeting 2024, P13

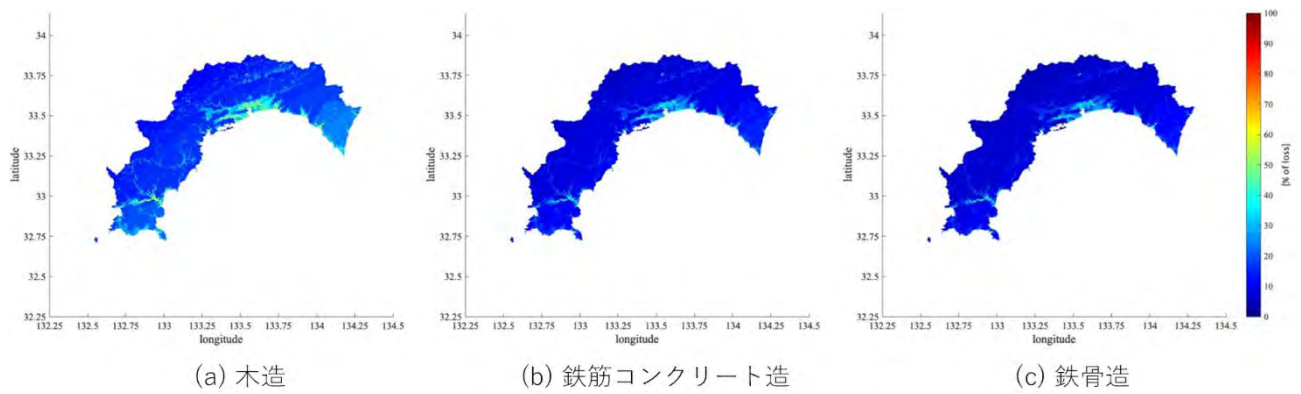


図 1．高知県における建物損失率。南海トラフ沿いの巨大地震が発生した際に高知県において生じる構造種別ごとの建物損失率の期待値を示す。最大で、木造では60%，鉄筋コンクリート造と鉄骨造では30%程度である（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C01]）。

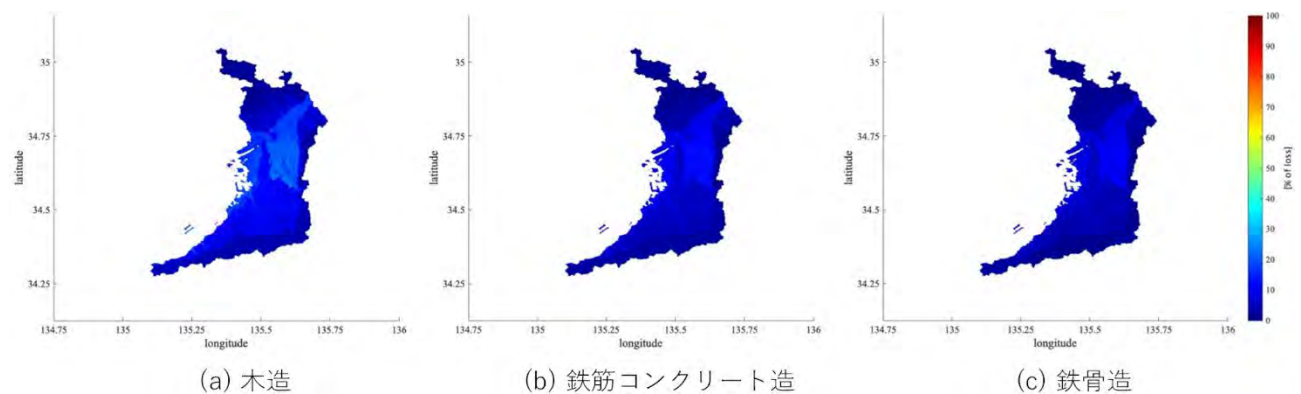


図 2．大阪府における建物損失率。南海トラフ沿いの巨大地震が発生した際に大阪府において生じる構造種別ごとの建物損失率の期待値を示す。最大で、木造では35%，鉄筋コンクリート造と鉄骨造では20%程度である（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C01]）。

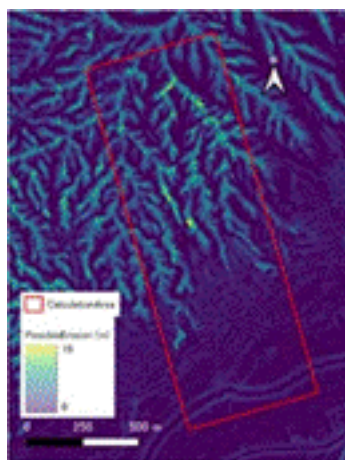


図 3．iRIC 計算範囲内の可能
侵食量の分布



図 4．流動深の空間分布の
与え方の例(100 秒後)



図 5．標高変化
(150 秒後)

（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C31]）

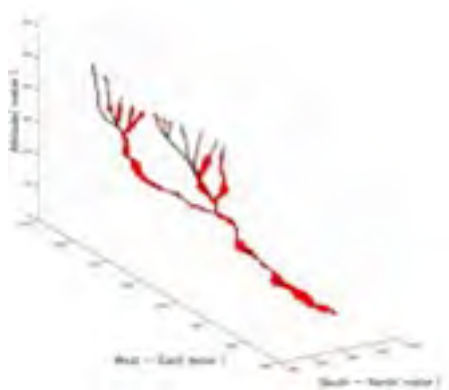


図 6．土石流発生後谷線での侵食量 赤丸の大きさが侵食量を示す（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC31]）。



図 7．微動観測点地点。庄内平野で実施した微動観測地点の分布（青マーカは単点微動観測地点，黄マーカは微動アレイ観測地点，赤丸は，水田・鏡味(2013)による震度7地点を示す）（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC35]）

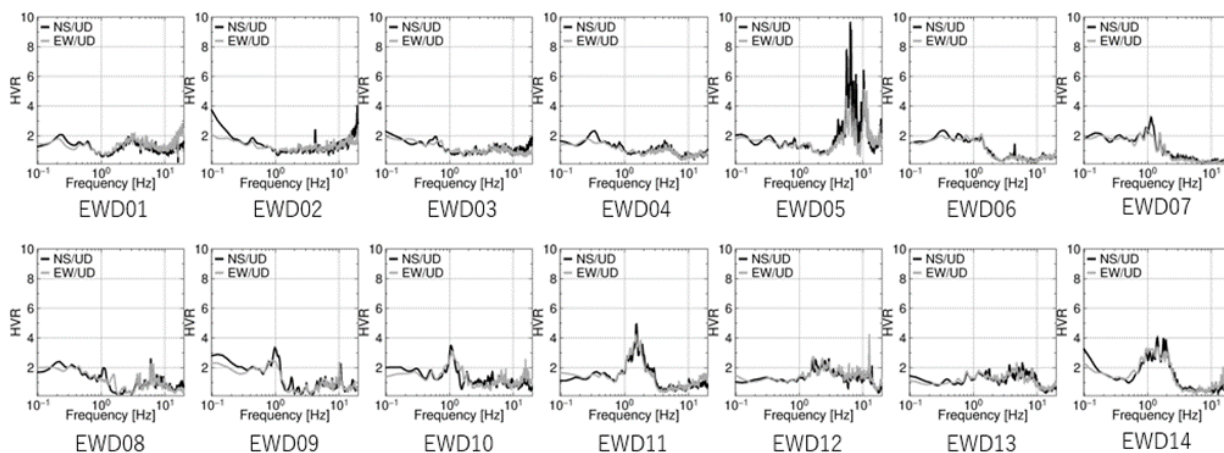


図 8．EWD測線の微動水平上下スペクトル比。EWD測線における微動水平上下スペクトル比（水平

2成分をそれぞれ上下成分で除したもの）（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C35]）

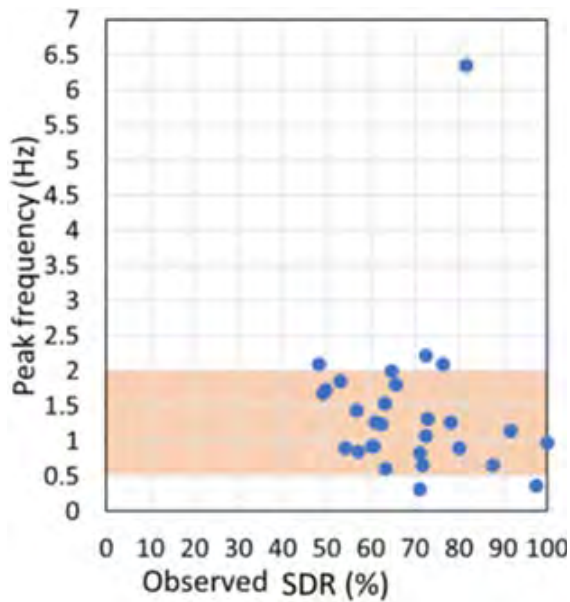


図9．建物被害率と擬似サイト増幅特性の一次ピーク振動数の関係（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C39]）

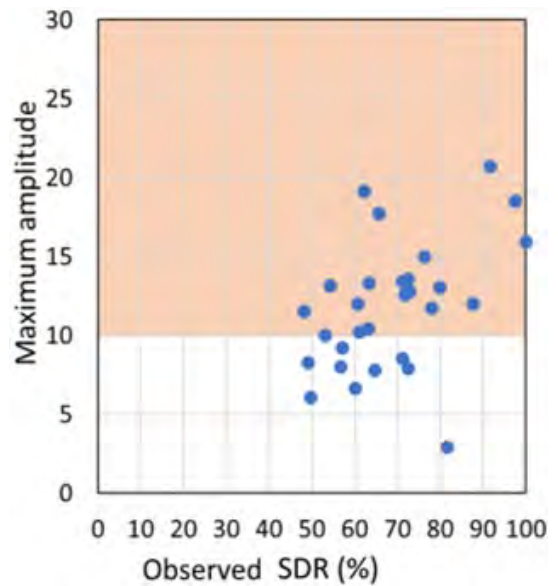


図10．建物被害率と0.5～2.0 Hzにおけるピーク振幅の関係（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C39]）

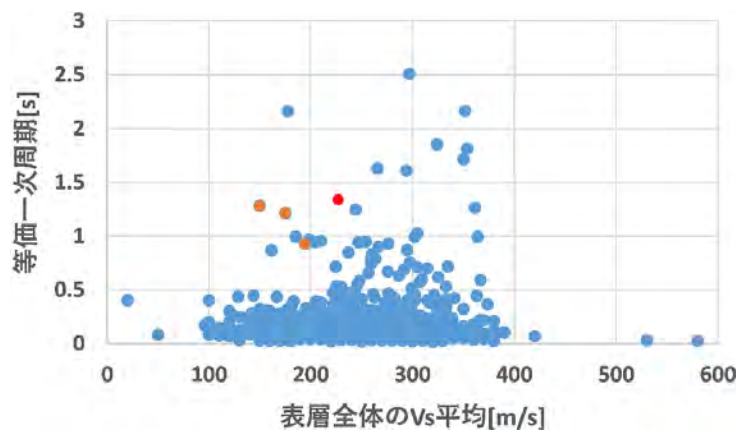


図11．KiK-netで震度6弱以上を記録した地震動の表層全体のVsと表層地盤の等価一次周期（赤とオレンジは、該当地震動）（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C40]）

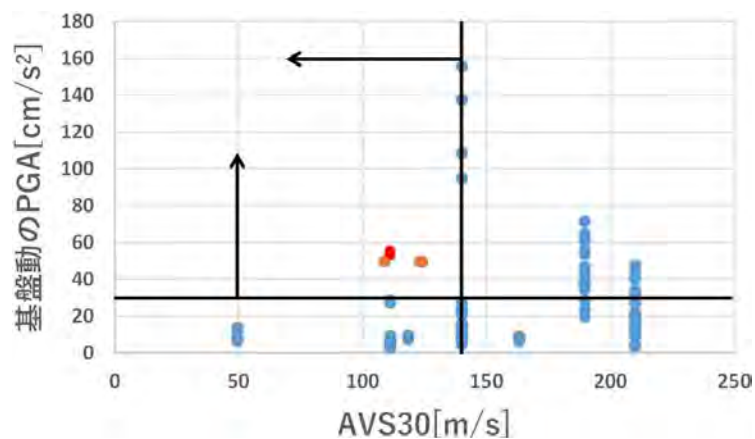


図12．表層全体のVsが250 m/s以下で等価一次周期が1-1.5秒の表層地盤におけるAVS30と 基盤動

(KiK-netの地中記録)のPGAの関係(赤とオレンジは、該当地震動)(拠点間連携共同研究[課題番号:CT0C40])

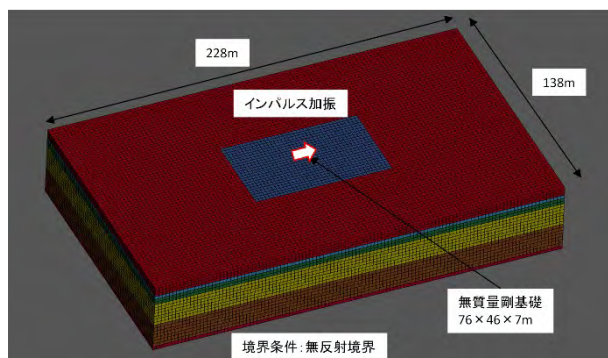


図 13. 地盤の FEM 解析モデル (直接基礎)
(拠点間連携共同研究[課題番号:CT0C45])

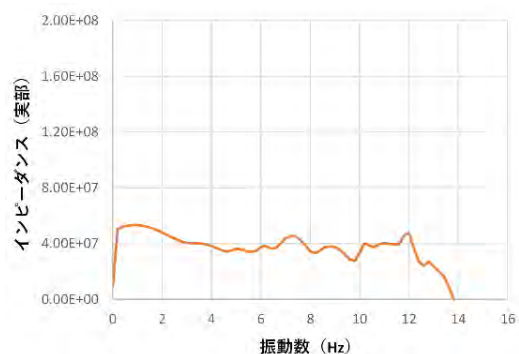


図 14. 算定されたインピーダンス (実部)
(拠点間連携共同研究[課題番号:CT0C45])

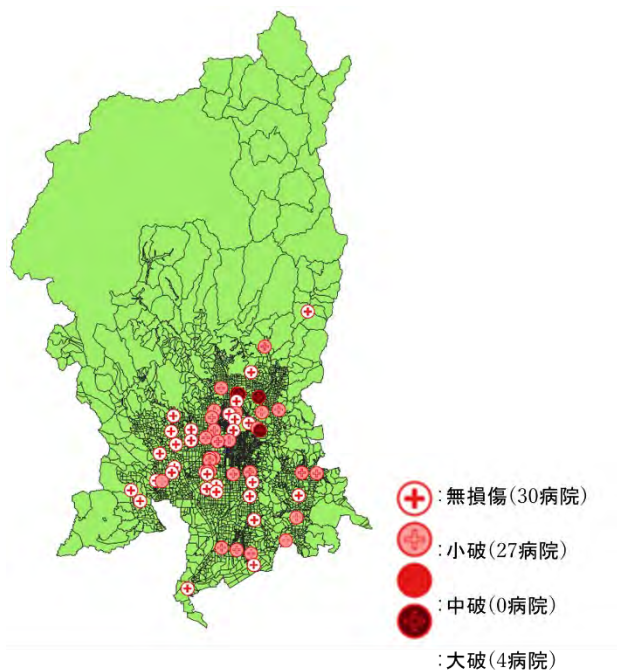


図 15. 構造躯体の被害 (全 61 病院) (拠点間
連携共同研究[課題番号:CT0C45])

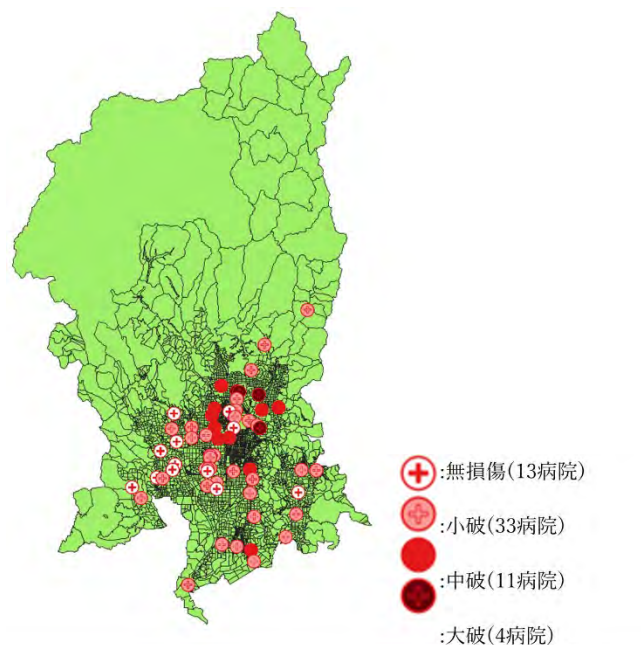


図 16. 非構造部材を含めた地震被害推定
の総合判定 (全 61 病院) (拠点間連携
共同研究[課題番号:CT0C45])

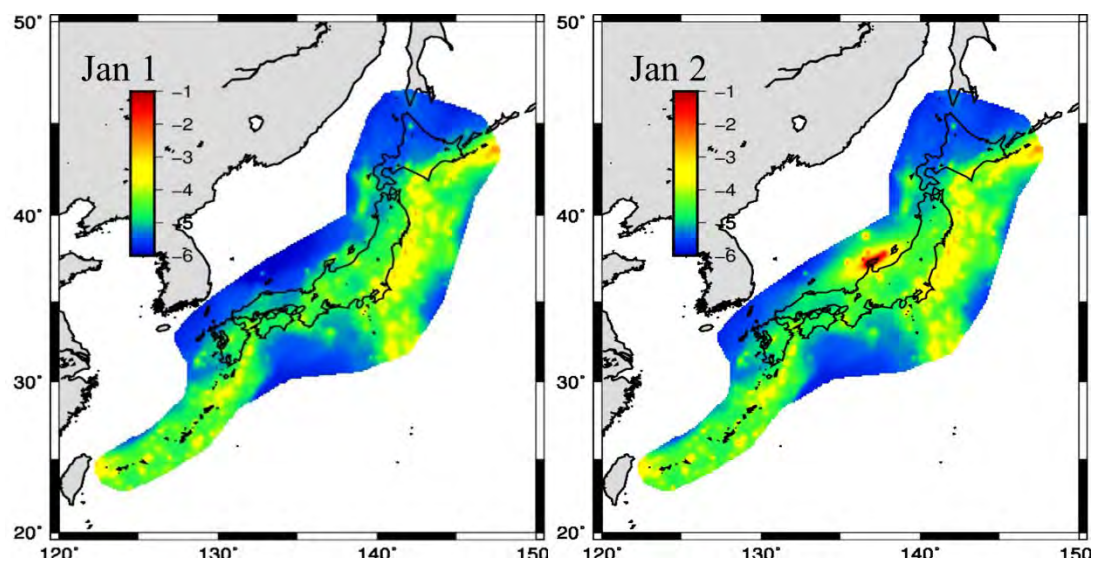


図17. M>4の地震の発生数の予測（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C45]）

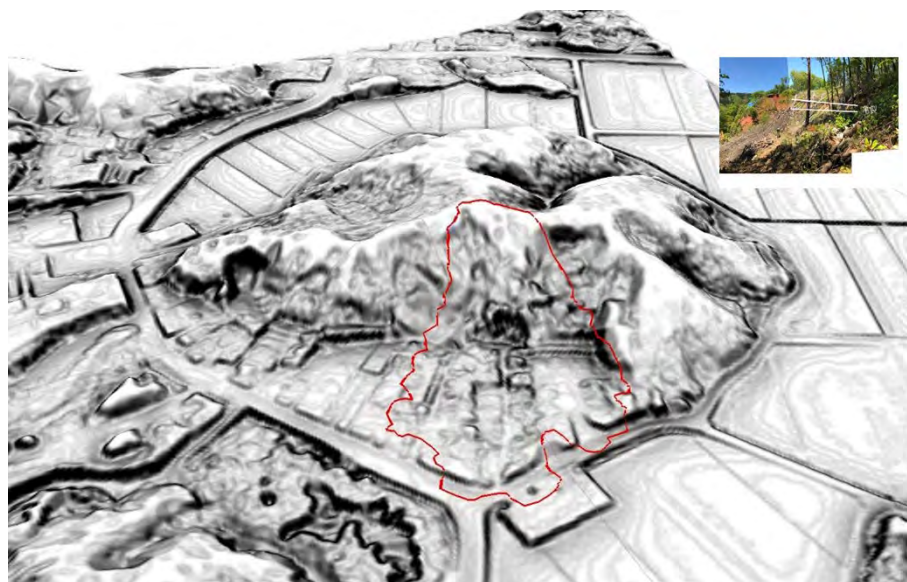


図18. 土砂災害予測基本図鳥観図（2019年6月測量実施）赤実線は地すべり部[課題番号：CT0C46]

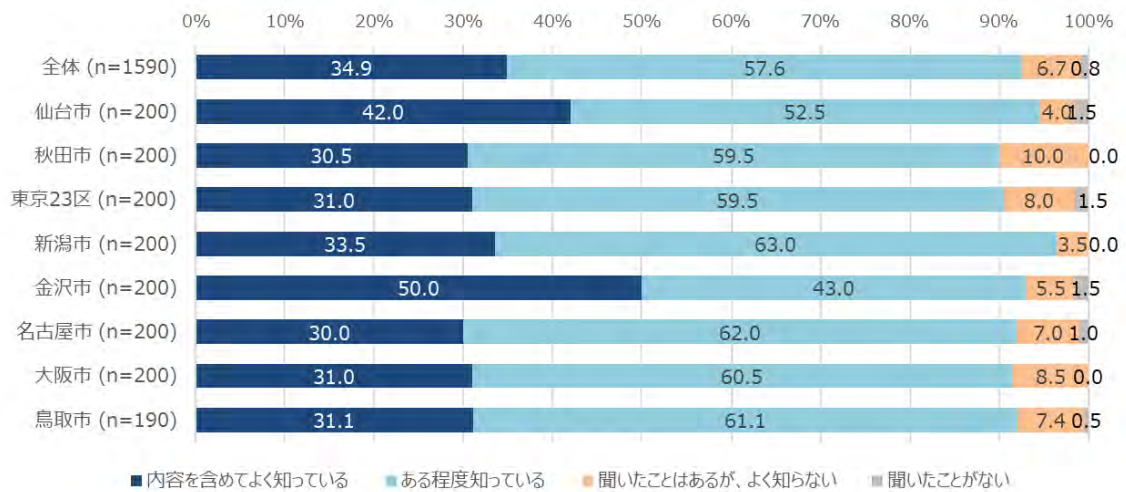


図19. 各地域住民の火山災害に関する意識についてオンライン調査による、震度の認知（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC38]）

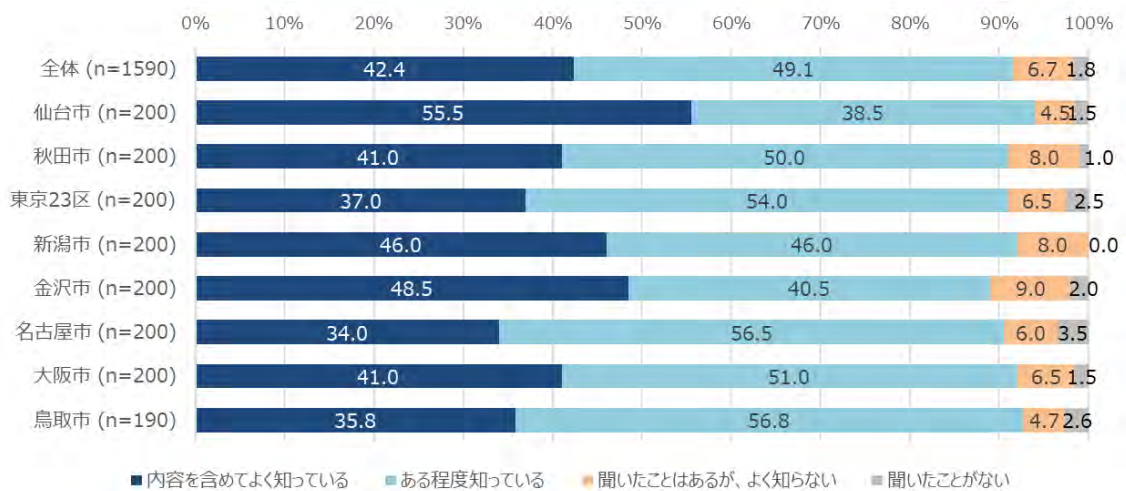


図20. 各地域住民の火山災害に関する意識についてオンライン調査による、緊急地震速報の認知（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC38]）

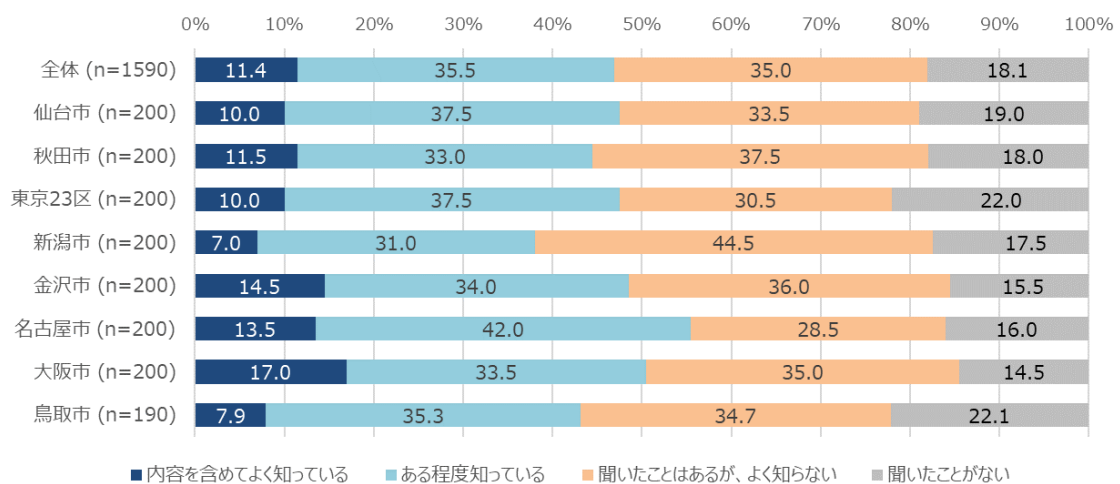


図21. 各地域住民の火山災害に関する意識についてオンライン調査による、南海トラフ地震臨時

情報の認知（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C38]）

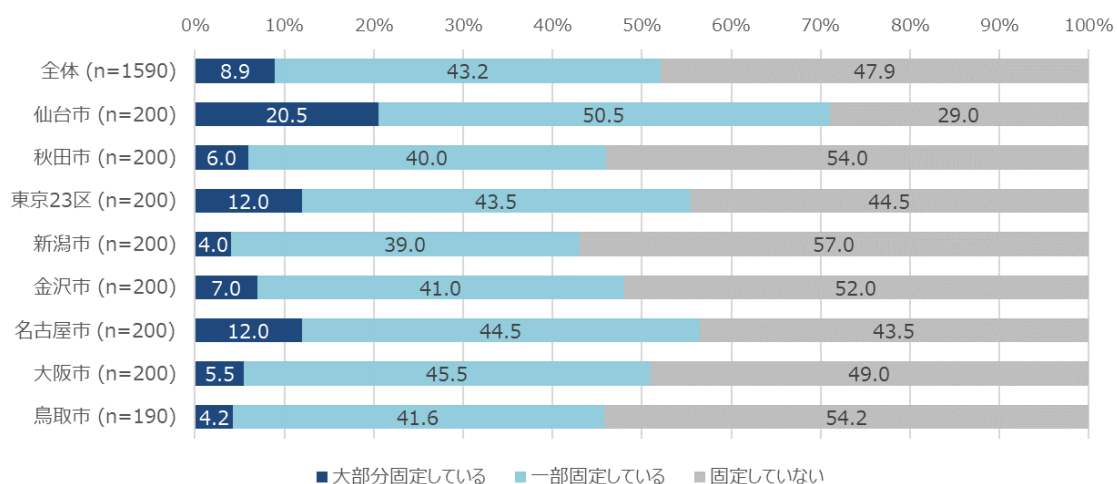


図22. 各地域住民の火山災害に関する意識についてオンライン調査による，家具固定の実施状況（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C38]）

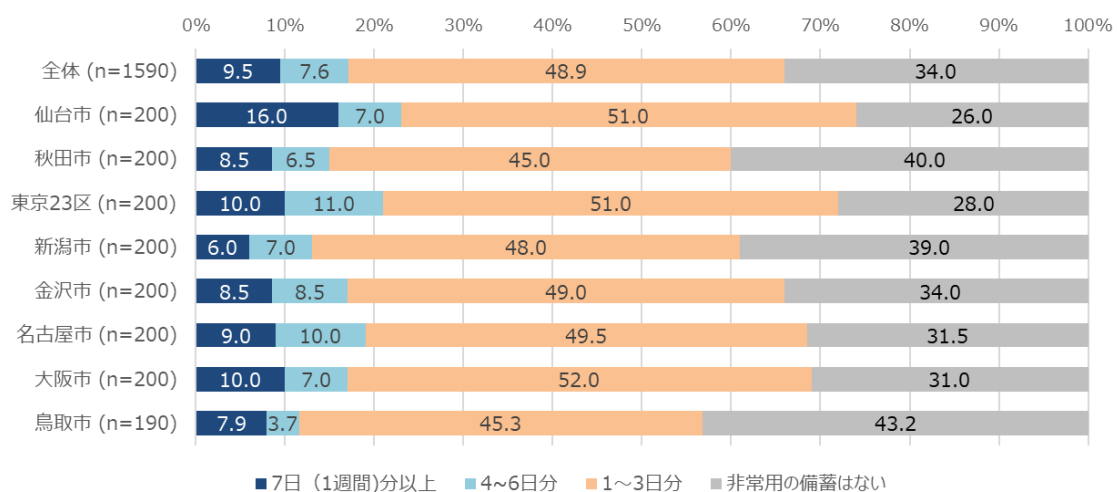


図23. 各地域住民の火山災害に関する意識についてオンライン調査による，食料の備蓄状況（拠点間連携共同研究[課題番号：CT0C38]）

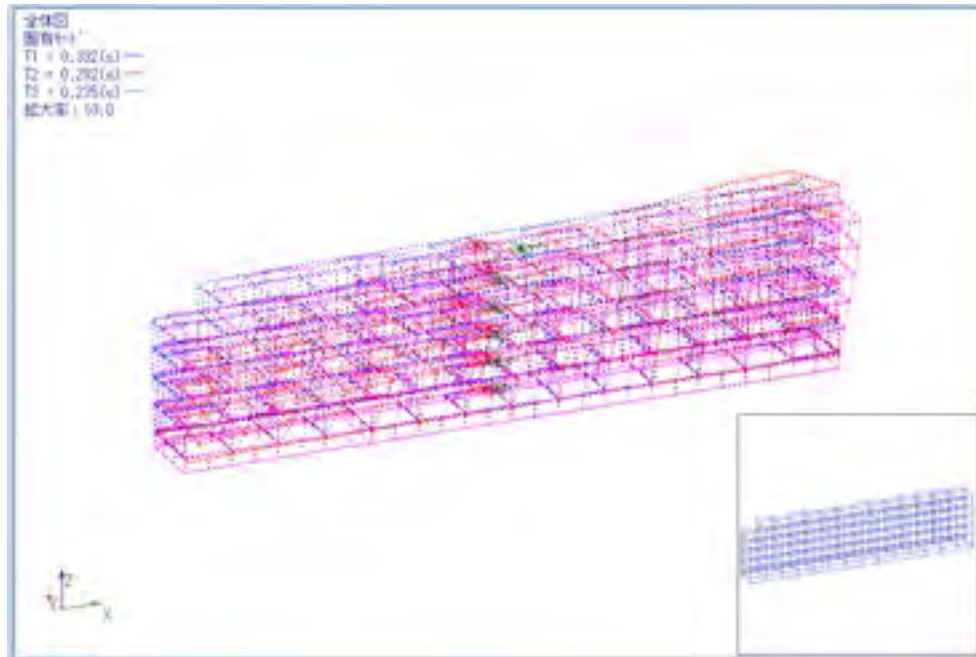


図24. 対象建物_3次元解析モデル_モード図。コンクリートの弾性係数は設計基準強度より算定。
1次固有周期は0.332秒（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC48]）

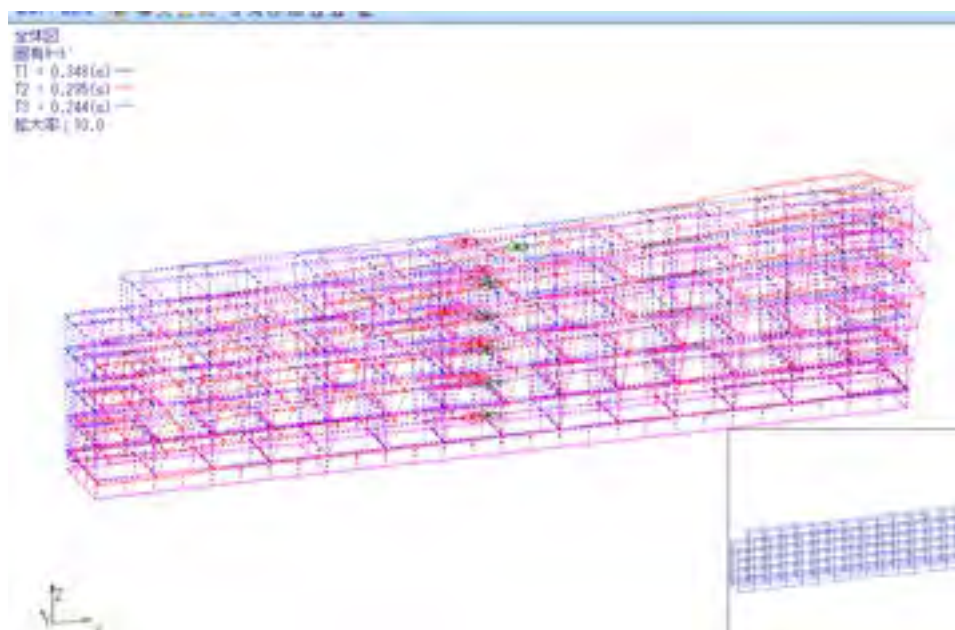


図25. 対象建物_3次元解析モデル弾性係数修正_モード図。コンクリートの弾性係数は各層ごとのコア抜き試験で最小であった15.43より算定。1次固有周期は0.348秒となったが振動モード形に大きな違いはなかった（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC48]）。

科学技術・学術審議会測地学分科会

地震火山観測研究計画部会

〒100-8959 東京都千代田区霞が関 3-2-2

文部科学省 研究開発局 地震火山防災研究課

電話 : 03-6734-4137

https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/index.htm

