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い出した。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い出した。

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，2021年以降に発生した大地震発生に伴い小規模なプレート間非地震性すべりが発生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。

〇スロー地震

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ーを開発し，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からなる長期のカタログを得た。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 m^2/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Vp/Vs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カタログによって，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かり，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リ

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載荷を，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。一定載荷速度下では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，新しいものがみつかり，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Mc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，検測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測で得たピックに，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，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だろう地域や，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が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，地震活動を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個の余震を見い出した。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，地域の地震テクト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い出した。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と関連付けられた。

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い出した。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が，短期的な地震先行現象になっていることを見い出した。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い出した。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かっている。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調がみられ，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つかり，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。

〇衛星熱赤外

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≧6が対象の場合は半径380 km，M≧6.5が対象なら半径623 kmの範囲に警報を出した場合，M≧6対象では警報分率が1.7%で予知率7.5%，M≧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≧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デの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い出した。

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。

〇宏観現象

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焔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。噴出火焔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@善光寺界隈)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り合いが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い相関が示された（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。地震学的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ー解析を実施し，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Vp/Vs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，Vp/Vs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Vp/Vs構造より，深さ30-40 kmのVp/Vs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。Vp/Vs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Vp/Vs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(大畠， 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測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測のよる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Mc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℃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ない内陸断地震のストライク方向の破壊が，断層幾何の巨視的変化部位でないところで停止した2016年鳥取県中部地震(Mw6.2)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(Mw6.8)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て(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，D90，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に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て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おこるものがある(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的な波形比較を行って，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，載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れの差のゆらぎ，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日のリッジクレスト地震(M7.1)についても，地震発生時刻が近付くにつれて，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Mw7.5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 m^2/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てれおり，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のラプ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プチャが拡がったものであり，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で拡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圧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することが可能であり，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])。

〇宏観現象

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：KOBO30]）。

「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:KOBO30]，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焔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。噴出火焔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@善光寺界隈）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：KOBO31]，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変動についてもひ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，${}_0S_{29}$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－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－, 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：クラスター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・山﨑政彦・保坂勇人・本山真・岩田隆佑・中泉健太朗・曽根凪紗, 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/1 0.2467/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, e2023GL.105393, doi:10.1029/2023GL105393

Liu, J.-Y., X. Shen, F.-Y. Chang, Y.-I. Chen, Y.-Y. Sun, C.-H. Chen, S. Pulinets, 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・山本揚二朗・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・山本揚二朗・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-OS-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－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－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

太田悠一朗・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」

髙木涼太・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
溜渕功史，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
溜渕功史，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
溜渕功史・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
溜渕功史・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
溜渕功史・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・山﨑政・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・ 山口覚・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，中泉健太朗，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), Hirosaki

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 (IWEP7)

Zhuang, J. and Z. Xiong, 2023, Changes of global background and clustering seismicity during past twenty years, AGU fall meeting, S33H-0479

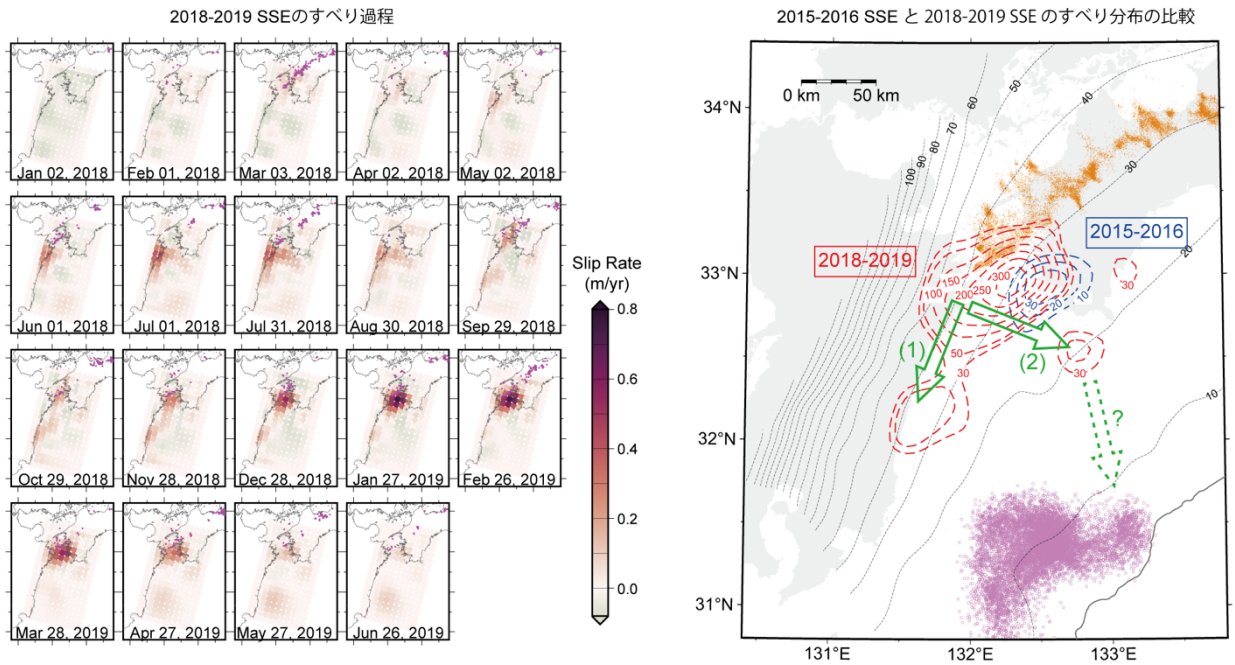

図１．2018-2019 豊後水道・日向灘 SSE のすべりの時間発展と微動の比較（Hirose et al., 2023 より改変，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]）

（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 日ごとにカラースケールで示す。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。

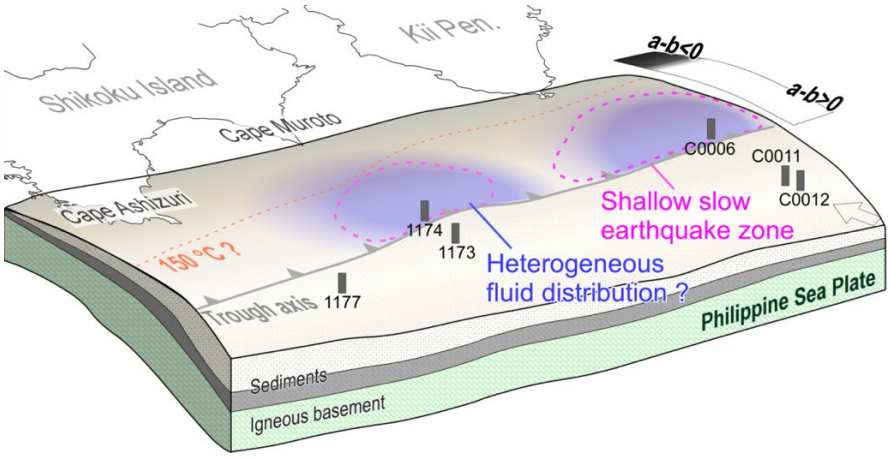

図２．南海トラフ沿いの浅部スロー地震発生域の概略図（Takemura et al., 2023 より改変，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]）

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。

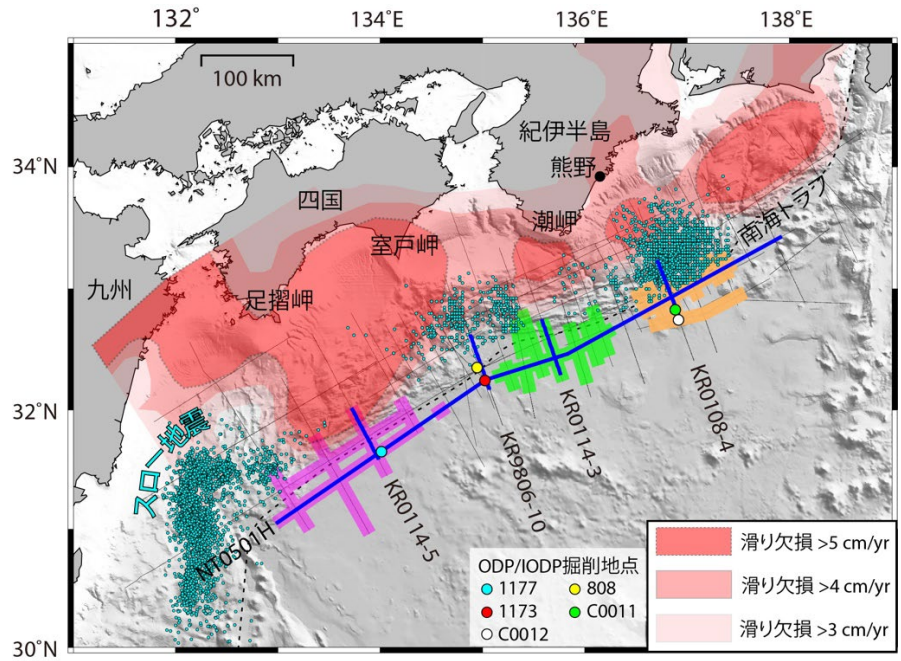

図３．南海トラフ沿いの反射法探査測線とタービダイトの分布（Park and Jamali Hondori, 2023 より改変，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]）

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。シア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。

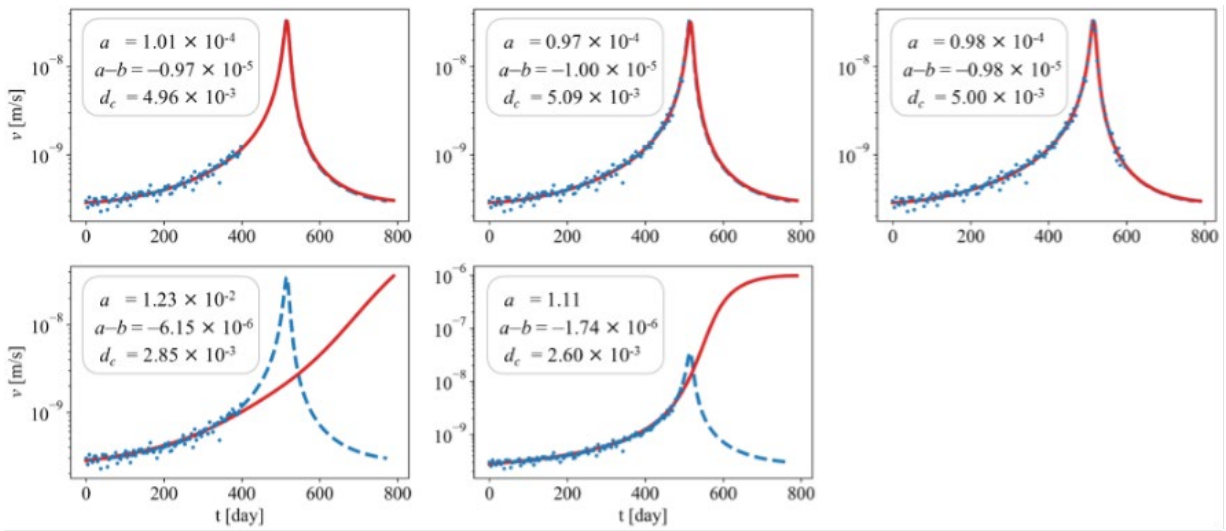

図４．PINN による断層すべりの予測結果の例（Fukushima et al., 2023 より改変，京都大学理学研究科[課題番号：KUS_01]）

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。

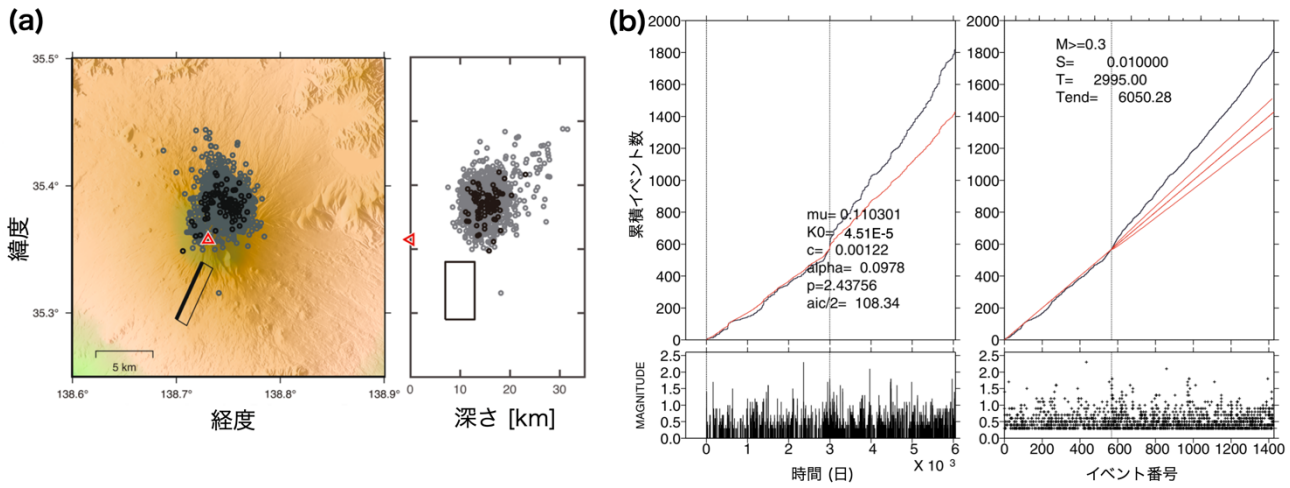

図５．2011 年３月 15 日の静岡県東部の地震(M5.9)による富士山直下の LFE 活動の活発化（Nanjo et al.，2023 より改変，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]）

（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。

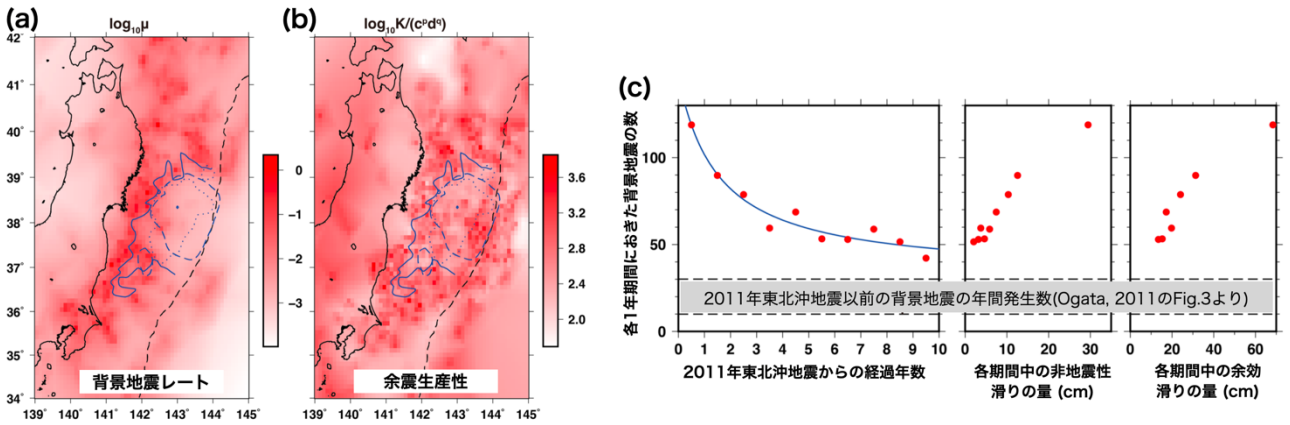

図６．2011 年東北沖地震(M9)の余震を応力変化によるものと余効すべりによるものに分けた解析（Ueda and Kato，2023 より改変，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]）

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。

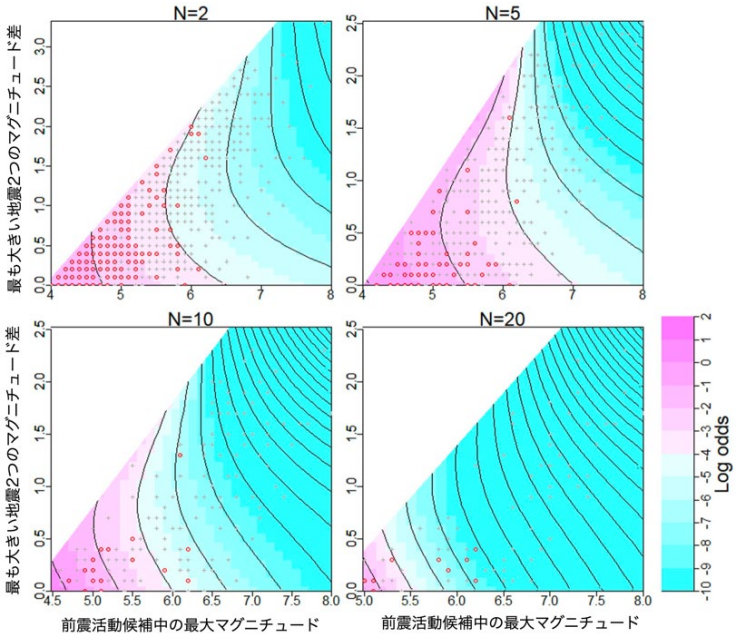

図７．群発活動が前震である確率の，最大イベント２つのマグニチュード差，最大マグニチュード，クラスタが含むイベント数への依存性（Nomura and Ogata, 2023 より改変，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]）

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。

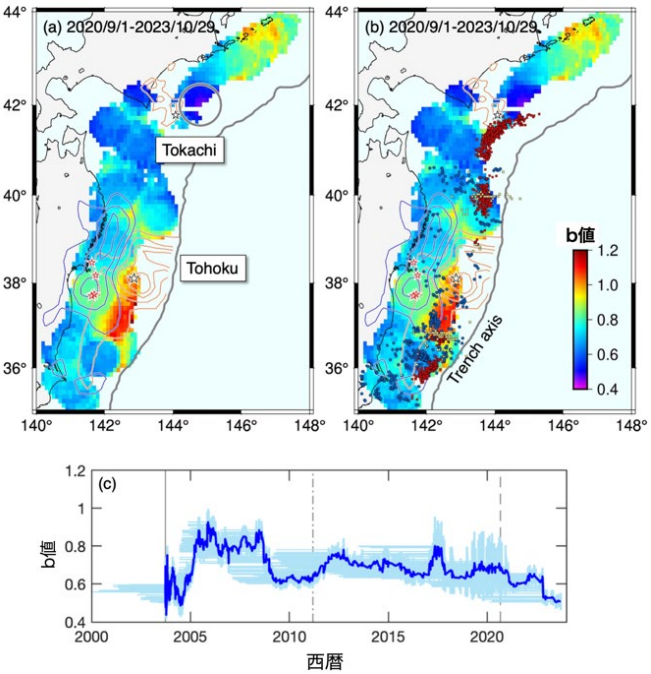

図８．東北から北海道の太平洋側の b 値の時空間変化（楠城，in press より改変，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]）

（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。

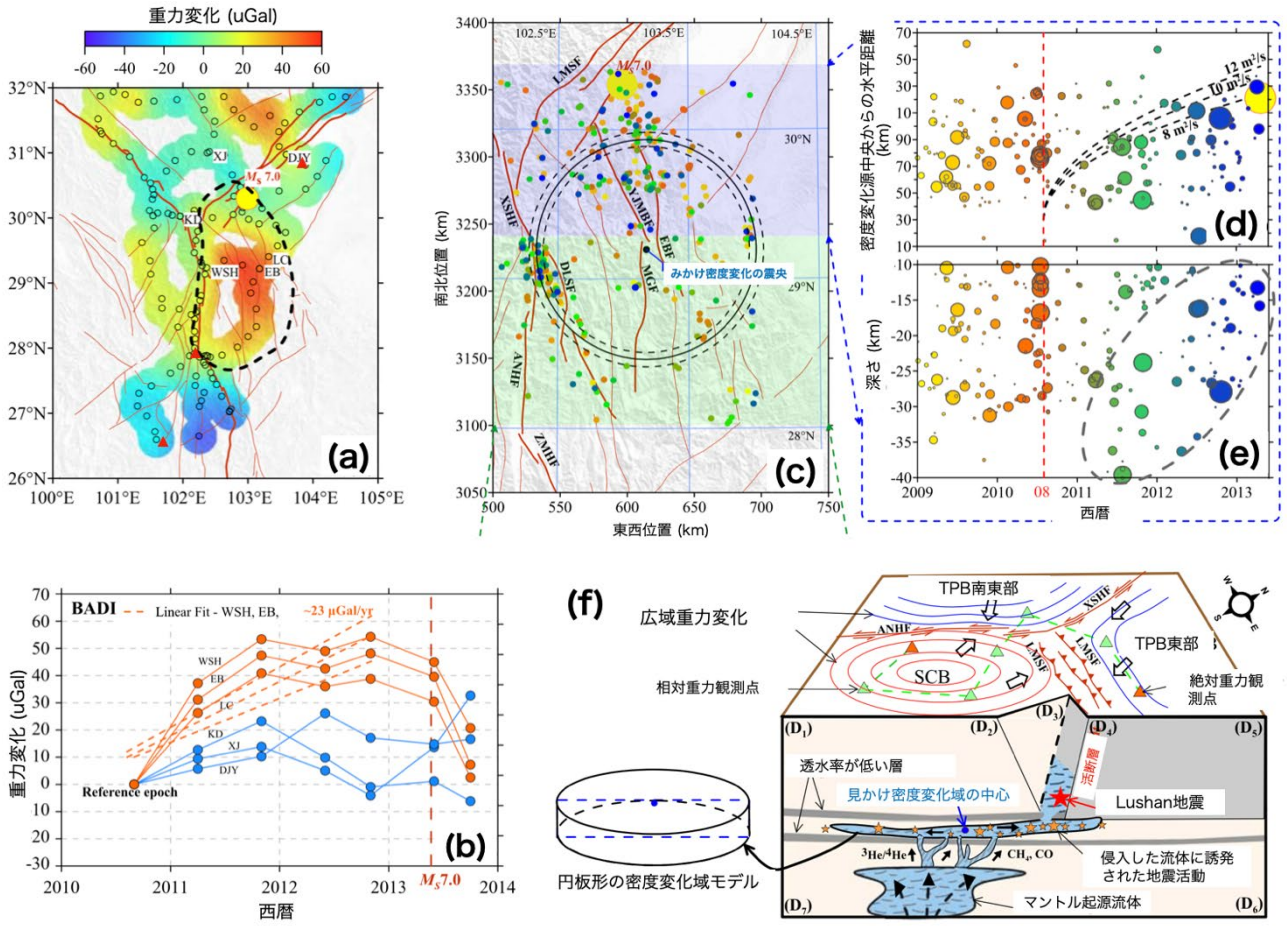

図９．2013 年４月 20 日の Lushan 地震(Ms7.0)に先行した重力変化（Wang et al., 2023 より改変，東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]）

（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。空き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。ANHF：Anninghe 断層。XSHF：Xianshuihe 断層。LMSF：Longmenshan 断層。

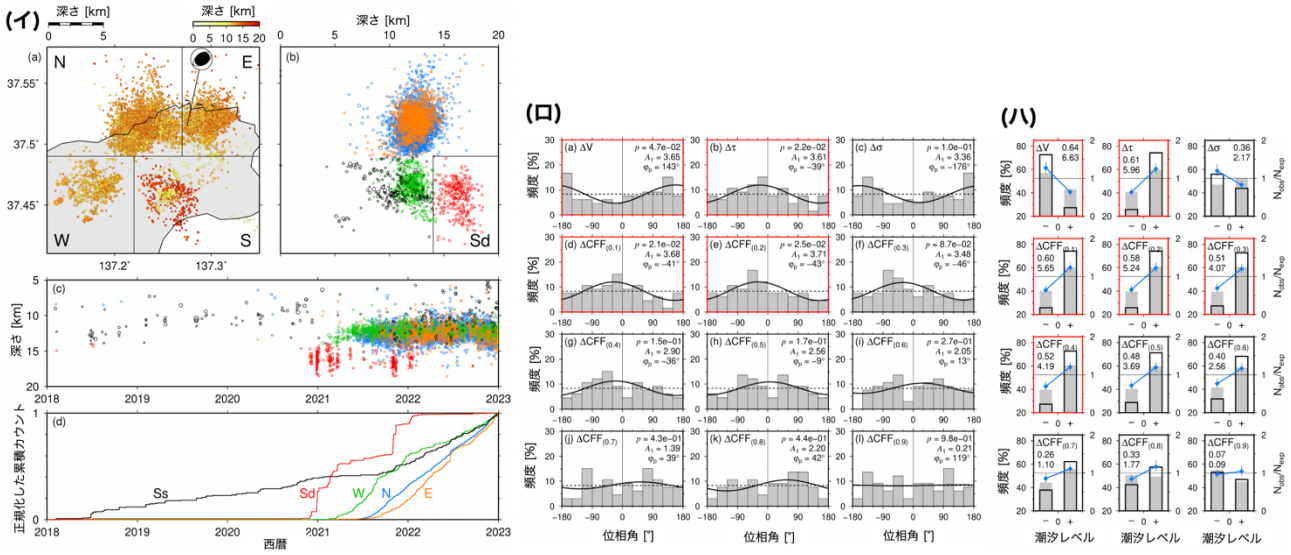

図 10. 能登地方の群発地震活動の潮汐相関調査（弘瀬・他, 2023 より改変, 東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13], 気象庁[課題番号：JMA_01]）

（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(Nexp)。各パネルの上段の数字は Nobs/Nexp 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焔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)。