

## 1 (3) 地震（中短期予測）

「地震（中短期予測）」計画推進部会長 川方裕則

（立命館大学総合科学技術研究機構）

副部会長 中谷正生

（東京大学地震研究所）

予測の対象となる大規模地震の発生確率を時空間的に求める手法を開発し、その手法を時間更新させながら適用することで、中短期レベルでの予測可能性を調査し、精度の向上を図ることを大きな目標として課題ごとに研究をおこなっている。令和6年度は主として、予測モデルの構築・適用において欠かせない観測の維持と拡充、物理モデルの構築・改善に資する研究、経験的な確率予測モデルの構築・改善に資する研究をおこなった。

## 2. 地震・火山噴火の予測のための研究

### (2) 地震発生確率の時間更新予測

#### ア. 地震発生物理モデルに基づく予測と検証

物理モデルに基づくアプローチでは、物理モデル構築・改善に不可欠な観測を維持・拡充し、様々な地殻活動観測データからプレート境界や断層の状態を推定するとともに、個別の地震の予測可能性について研究がすすめられた。

#### ○繰り返し地震

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おこなった（図1）。能登半島北東部では、2020年1月から2024年1月1日のM7.6までの間に発生したM2~4の地震を対象としてDouble-Difference法を用いて震源再決定をおこなった上で、波形相似性と震源域の重複度の評価により繰り返し地震を同定した。その結果、解析した地震の12.8%にあたる236個の地震を含む、102系列の繰り返し地震が見つかった（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_10]）。

能登半島北東部の繰り返し地震では、気象庁マグニチュード差が1以上の繰り返し地震ペアが存在していたが、スペクトル振幅から計算されたモーメントマグニチュード差は最大でも0.9であった。一定の断層サイズを仮定した場合、この差は応力降下量が20倍程度異なることに対応する。群発活動域の中で北西に位置するクラスター内の繰り返し地震の空間的な特性を評価した結果、繰り返し地震の震源域は他の繰り返し地震を含む周囲の地震と重なっていることが多く、繰り返し地震パッチは従来解釈されてきたように孤立してはいないことがわかった（小松，中島，2024a, b, 東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_10]）。

#### ○スローイベント

産総研と防災科研および気象庁との共同研究に基づき、3機関のひずみ・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周辺地域の短期的ゆっくりすべり（SSE）を

解析するシステムの運用を継続した。2023年11月～2024年10月の間に短期的SSEの断層モデルを32個決定した（産業技術総合研究所[課題番号：AIST07]）。

大分県佐伯市に新規地下水等総合観測施設を設置し、観測を開始した（産業技術総合研究所[課題番号：AIST07]）。

東海地方2点でのキャンペーン重力観測を実施し、石垣島の連続重力観測を継続した。2023年奥能登地震、2024年能登半島地震前後に観測した震源域近傍の重力変化を解析した。四国西部と九州東部域におけるネットワークMT観測を継続した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_11]）。

地震学的スロー地震の長周期側シグナルである超低周波地震を観測するため、前計画から四国・紀伊・東海地域に維持している17観測点について地震計やモバイル通信に関する保守作業をおこないつつ観測を継続した。また科研費プロジェクトと合同で2観測点を追加した。定常観測網による超低周波地震の検知下限（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_11], Takemura et al., 2024a）に加え、本計画の準定常広帯域観測点（17+2観測点）を加えることによる超低周波地震の検知能力を評価し、微小な超低周波地震検知に寄与することを確認した。

検出されたスロー地震の震源特性の把握を高度化すべく、南海浅部あるいは日本海溝沿いの地震波伝播特性を評価した。その結果、浅部微動記録に含まれる堆積層による伝播増幅効果（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_11], Takemura, et al., 2024b）の評価、標準的な海域の地震動予測式（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_11], Nakanishi and Takemura, 2024）の構築が実現した。

高精度に震源決定されたテクトニック微動の震源分布、反射法地震探査、海底地形のデータを活用することで、スロー地震発生域に特徴的な地質構造を調査した。その結果、テクトニック微動の分布と地質構造には良い対応関係が見られ、微動は覆瓦スラスト帯で発生し、より海溝に近い前縁スラスト帯ではほとんど発生していないことが明らかとなった。とくに発生域の上端はデコルマ面が高角度に立ち上がる場所と一致するなど、背景のスロースリップの進展が断層面の幾何形状によって妨げられている可能性が示唆された（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_11], Akuhara et al., 2024）。

プレートマッチング手法を連続波形データに適用し、2022年4月から2024年8月までの深部低周波地震活動の様子を明らかにした。2024年豊後水道のスラブ内で発生したM6.6の地震の発生直前に着目すると、北東方向へ移動する低周波地震活動の主要なエピソードが起きていたことがわかった。主要なエピソードの移動方向とは逆方向の移動（RTR）がM6.6の震源域を通りこした後に、M6.6の地震が発生した。さらに、M6.6地震後には豊後水道で低周波地震の活動が活発化し、高速移動を示す筋状の活動（Streak）が多数発生した。この結果は、スロー地震とスラブ内地震の間に相互作用が働いていた可能性を示唆する（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_11]）。

断層すべりは岩石の摩擦実験から得られた速度状態依存摩擦則（RSF則；Dieterich, 1979; Ruina, 1983）に基づいてモデル化され、現実の断層で見られる不均質なすべりは通常、摩擦特性や断層形状の不均質性により解釈される。数値計算において、非地震性のすべりイベントであるスロースリップイベント（SSE）は、地震と同様に速度弱化ではあるが、走向方向に長い断層においては断層面上の不均質がなくても、地震とは異なりセグメントに分裂して発生することが報告されている（大畠, 2023）。速度弱化領域で発生

する SSE の発生様式を網羅的に調べる数値実験を実施し、数値計算における初期値依存性が地震と SSE で異なることを見出した。地震の場合とは対照的に、SSE ではイベントの発生による緩やかな応力変化は初期条件を打ち消すには不十分であると考えられる（京都大学理学研究科[課題番号：KUS\_01]）。

### ○応力場

地震波データを元にした応力インバージョンから得られた応力場の空間的な不均質、特に主応力軸の空間的な差異（応力回転）に着目することで、すべり分布の推定精度・分解能向上に寄与できる可能性がある。その基礎的な試みとして、2000年鳥取県西部地震の余震域において推定された応力回転とすべり分布から地中の背景応力場推定をおこなった（京都大学理学研究科[課題番号：KUS\_01]）。

### ○地震発生場の階層的構造

地震発生場の階層的構造の特徴を評価する手法の開発と適用、および Ide & Aochi (2005, IA05) モデルのサイクル計算への拡張を重点的におこなった。前者では、Chang and Ide (2021) の手法を東北地方全域に適用し、繰り返し地震を含む約 40 の領域において、震源とセントロイドの同時推定をおこなった。多くの地域で震源、セントロイドはそれぞれが集中的に起きる場所が限られており、震源破壊プロセスの限定的予測可能性を示す。また海外データへの適用に向けて、カリフォルニアの地震について、Ide (2019) のように大きさの異なる地震が同じ波形を持つ例を調査した。後者では、三陸沖をターゲットとして、過去の地震履歴に基づいて 4 階層の円形パッチの分布を仮定し、IA05 のルールに基づいてそれぞれのパッチにパッチサイズに依存した  $D_c$  を持つすべり弱摩擦則を与える。このシステムに一定のローディングを与えて、準動的地震サイクルシミュレーションをおこなった。このシステムでは M6 弱から M8 までの様々なサイズが発生し、M8 の地震はほとんどが M6 以下の地震のパッチのどれかから始まる。一方で内部に多数の階層性を持っていても、巨大パッチが孤立して存在する場合には、その周期は小スケールの不均質にあまり影響されない（東京大学理学系研究科[課題番号：UTS\_05]）。

### イ. 観測データに基づく経験的な予測と検証

観測データに基づく経験的アプローチでは、観測データを入力とする客観的アルゴリズムによる試行予測と検証をおこない、予測アルゴリズムを改善する。先行現象を網羅的に検出する方法を開発するほか、機械学習等のデータ駆動科学の導入により、人間の直感では気付きにくい先行現象も探索する。

### ○スローイベント検出

測地データと深層学習を用いた SSE 検出手法についての検討と、ゆっくりすべり (SSE) 検出における各種データの現状能力と今後の潜在力（利用可能なデータの期間・量・質、今後の見込み等）の整理をおこなった。SSE 検出手法については、別プロジェクトと連携で開発中の CNN（畳み込みニューラルネットワーク）を用いた手法を検討した結果、検知能力、安定性、複数のデータ種類や解析領域に対する応用性などの観点でこの手法が適していることがわかった。各種データの現状能力と潜在力について検討した結果、当面

は GNSS 変位データを柱として SSE 検出手法を開発し、その後に他種データを組み込むように拡張するのが妥当であるという結論を得た（東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID03]）。

### ○地震カタログ

地震カタログの作成，地震活動の解析，地震動の予測，地殻変動に関係した測地データ解析に関する機械学習の応用をレビューした論文を出版した（（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，Kubo et al.，2024）。深層学習を用いた有名な地震波検測ツールである PhaseNet を，2013～2022 年の日本の定常観測データによって再訓練した。カリフォルニアのデータで訓練されたモデルで見えていたバイアス等がなくなり，性能が改善したことが確認できた。気象庁のデータ処理に使われる PF 法を使ってカタログを作成したところ，内陸の小さい地震をより多く検出できるようになった（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_10]，Naoi et al.，2024，東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，立命館大学[課題番号：RTM\_01]）。

### ○プレスリップ

多数の GNSS 観測点での 5 分間隔の GNSS 記録から，プレスリップで期待される方向の成分をスタックしたところ，2011 年 3 月 11 日の M9 東北地方太平洋沖地震の 2 時間前から Mw6.9 相当の加速的なプレスリップが見い出されたという報告（Bletery & Nocquet, 2023, 以下 BN2023）は大いに注目されたが，Bradley & Hubbard (2023) は，GNSS 観測特有の同相ノイズを補正すると BN2023 のみつけたプレスリップ状の変化は見えなくなると反論した。そこで，GNSS 以外の地殻変動観測手段である傾斜計を用いて BN2023 と同様の手法で東北地震から 500km 以内にある Hi-net の傾斜記録をスタックしたところ，2 時間前に加速するような変化はみられなかったため，当該時期の傾斜記録ノイズレベルに相当する Mw6.4 を超えるような直前数時間のプレスリップはなかったと結論できる（図 2，東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_11]，東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，Hirose et al.，2024b）。

### ○地震活動

大きな地震等をきっかけに，真の  $b$  値が不連続に変化したと思われる例は多いが， $b$  値の時間変化を追跡するときに，（重みつき）移動平均を使う従来の方法は追従が悪いと考えられる。そこで，真の  $b$  値の遷移を状態空間モデルで表して，それを粒子フィルターで推定する手法を開発した。2011 年 M9 東北地方太平洋沖地震の震源域に適用したところ，2015 年から 2022 年にかけて  $b$  値が 1.1 から 1.3 に上昇しており，Tormann et al. (2015) が指摘したような大地震のリスク上昇は示唆されない。他方，2016 年の M7 熊本地震の後 2019 年末までの周辺領域の  $b$  値の解析で唯一  $b$  値が低下しており大地震のリスクを警告していた布多川断層中部の 10km 程度の領域（Nanjo et al.，2019）について，新しい解析法で 2023 年半ばまで  $b$  値の推移を調べたところ，現在も 0.7 程度の低い値が維持されているため，相変わらず心配な状況と考えられる（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，Iwata & Nanjo, 2024）。

## ○前震

能登半島北部の地震活動について、2020年11月からの活発な群発活動が始まる前の2018年初頭から2024年1月1日M7.6能登半島地震後の2024年2月19日まで、能登半島地震の余震域（北西～南東走向、160km程度）を対象に、25,711個の地震（気象庁カタログ：M1.3以上）の相対震源位置をhypoDDにより決定した。2024年1月1日のM7.6地震の余震分布は、走向160kmにおよび、南東傾斜のF43断層（内閣府、2014）と一致するが、最北部は北西傾斜のF42断層の南端部にかかっている。M7.6地震の破壊開始点を含む群発活動域では、深さ15km程度からスプレー状に3枚にわかれる南東45°前後に傾斜した断層が推察され、深さ15km以深では、群発活動をもたらした高圧流体の侵入による開口と非地震性すべりが推定されている傾斜の浅い断層(Nishimura et al., 2023)に続くようである。3枚の断層のうち最も上位にあるのはF43断層の中央部(珠洲沖セグメント)で、M7.6地震の主要なすべりはこの断層で起きた。いっぽう、M7.6地震の破壊開始、240秒前のM5.5前震、14秒前のM5.9前震、2023年5月のM6.5地震の破壊開始はいずれも中位の断層で、120秒前のM4.6前震と2022年6月のM5.4の地震は最下位の断層で起きた。いずれも12～17kmと深く、上述の深部低角断層からの高圧流体の影響が考えられる。水平位置も10km以内に集まっており、M7.6地震に至る一連の活動は、近接した複数枚の断層間での応力および間隙水圧を介した複雑な相互作用によるものだと推察される。さらに、本震破壊開始点直近の地震計では240秒前のM5.5前震から14秒前のM5.9前震の間に、多数の小さな前震が連発しており、非地震性プレスリップの可能性を示唆する。実際、3つの直前前震のうち最初に起きた240秒前のM5.5によるすべりは、本震や14秒前のM5.9の破壊開始点に地震が起きにくくなる向きの応力を加えており、前震～本震の因果関係を単純なカスケード破壊として理解することはできない。さらに、M7.6地震の遠地波形のバックプロジェクションは、最初の11秒程度は破壊開始点周辺での勢いの弱い破壊であり、そのあと南東および北西に勢いの強い破壊が伝播したことを示している。本震14秒前のM5.9前震を既に本震の一部とみれば、低調な初期破壊フェーズは25秒も続いたことになる。強い破壊が始まるまでに時間がかかったのは、先述した複数枚の近接断層間での破壊の乗り移りや流体圧の再分配に加えて、F43断層の走向が10°弱折れ曲っているところから始まった地震であることが寄与したかもしれない（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]、Peng et al, 2025）。

## ○地震の動的トリガ

短期的な応力擾乱による地震の誘発現象として、(大)地震からの地震波によって地震が誘起される動的トリガリングと呼ばれる現象がある。日本では動的トリガリングを起こすのに振幅30kPa以上の地震波が必要と指摘されていた(Van der Elst & Brodsky, 2010)が、2016年M7熊本地震からの地震波による動的トリガリングは遠く離れた中部地方から北海道にかけて数kPaの波動で起きたことがわかり、2011年3月11日のM9東北地震によって、東北日本の地殻状態が変わって動的トリガが起きやすくなったのではないかと提唱され、また、動的トリガが見られたのは火山地域が多かったため、流体圧の増加を介した効果だろうと推察された(Enescu et al., 2016)。そこで、東北地震後に群発活動が起きた5つの地域（山形～福島県境、秋田駒ヶ岳南西、飛騨、いわき、山形中央；いわき以外は火山地域）において、東北日本に1～50 kPa程度の表面波を届けた49個の

遠地地震（東北地震より前が 25 個，東北地震より後が 24 個）それぞれについて，表面波の振幅と，それによって誘発された地震の有無を調べた。山形～福島県境，秋田駒ヶ岳南西，飛騨で誘発事例数は東北地震の（前→後）でそれぞれ（4→8），（3→6），（7→10），誘発に成功した表面波の振幅の最低値はそれぞれ（8.7kPa → 1.1kPa），（8.7kPa → 1.5kPa），（3.8kPa → 1.3kPa）と，東北地震より後の方が誘発が起きやすいように見える。有意水準 5%の K~S テストで誘発応力の分布が変わったとは言えなかったが，それはサンプル数が足りないだけのこともかもしれない。一方，山形中央の誘発事例は東北地震より前の 1 つだけで，1.6kPa の表面波で起きた。それよりずっと大きい表面波が来ていた多くの例で一度も誘発されなかったため，この 1 例も誘発ではなく，偶然のタイミングの一致だったのかもしれない。いわきは，火山もなく地熱地帯でもないが，誘発事例数が（0→4）と増加し，また最低誘発応力は（31.6kPa でも誘発できなかった → 1.6kPa）と大きく下がったため，M9 によってトリガされやすくなったように思われる（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，Takeda et al.，2024）。

### ○微小地震検出

微小地震を発見するために，膨大な連続地震波形データの中から，既知の地震波形（テンプレートと称する）と類似する波形を探索する方法がある。波形相関法と呼ばれるこの方法は，しかしながら計算コストが高く，これまで多くの研究では探索対象となる連続地震波形の期間が数週間程度に留まる。唯一，米国カリフォルニア州において 10 年分の連続波形に対し波形相関法の適用事例があるが，これには大規模な GPU クラスタが利用されており，コストの高さゆえに多数の研究者が容易に真似できるものではない。そこで今回，市販のワークステーション程度でも数年分以上の連続データに波形相関法を適用可能なアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムに基づき DiallelX と称するプログラムを開発した（立命館大学[課題番号：RTM\_01]）。

これまでに検出されているよりも小さい微小地震・破壊を検出することに加え，それらの震源を決定し，破壊現象解析の時空間分解能を向上させることで，より多くの知見を得られることが繰り返し確認されている。室内水圧破碎実験で得られた弾性波連続記録を対象として，近年活発に研究されている深層学習による走時検測をおこない，それを元に検出された微小破壊（AE）の波形をテンプレートとして DiallelX を活用した Matched Filter 解析をおこない，古典的な STA/LTA 法や AR-AIC 法で作成したカタログよりも 10 倍多くの震源を含むカタログを作成することに成功した。上記の深層学習検測器は古典的手法による自動処理結果を元に訓練することで，手動によるラベル付けを必要としない解析ルーチンを構築している。非常に多くの震源決定をおこなうため，検出走時をイベントに関連付ける Phase Association のプロセスでは，従来使われていたグリッドサーチによる手法を差分進化アルゴリズムで解くことによって高速化し，現実的な処理時間で震源カタログを作成することができた。得られたカタログでは，水圧破碎の主亀裂造成過程を従来より明瞭に示すとともに，破碎後に現れる低周波微動のようなシグナルの中に，ほぼ同位置に震源が求まるイベントが多数存在することを明らかにした（立命館大学[課題番号：RTM\_01]，直井ほか，2024）。

### ○大規模地震間の過渡的地震活動

能登半島北部沿岸域断層帯の 10 年超の長期のデータにも適用し、2007 年能登半島地震の余震活動から 2024 年能登半島地震の発生に至る過程の微小地震活動について、DiallelX を利用した Matched Filter 解析をおこなった。2024 年能登半島地震の際に大すべりが推定された猿山沖セグメントの西側において、互いに相似な波形を示す特徴的なイベント群が見つかった。一つ目は 2007 年能登半島地震の余震活動期から 2024 年能登半島地震に発生に至るまで継続的に活動が見られるもの、二つ目は震源分布域をオーバーラップさせるが 2018 年ごろを境にして異なるイベント群に分かれるもの、三つ目は 2007 年能登半島地震余震活動期に遅れる形で 2009 年ごろからやや定常的な活動を見せたのちに 2023 年から活発化を見せるものである。なお、三つ目の再活動に関連する  $M_j \geq 2.5$  の地震の発生は確認されていない（立命館大学[課題番号：RTM\_01], Sasaki et al., 2024）。

### ○大気中ラドン

1995 年兵庫県南部地震に関しては、神戸薬科大学が提供する排気モニターの大気中ラドン濃度データを用い、1984 年から 1988 年の期間を平常期として学習し、1990 年から 1995 年の予測期間における実測値との比較をおこなった。その結果、1994 年末から観測値が予測値を上回る傾向が継続し、地震発生の 25 日前において観測値と予測値の差分が  $3\sigma$  を超える異常が確認された。2011 年東北地方太平洋沖地震に関しては、福島県立医科大学において、排気モニターで観測された電離電流値をラドン濃度と線形関係にある指標として利用して、2002 年から 2007 年を平年変動として教師データに設定し、2008 年から 2011 年の期間における電離電流値を予測した。その結果、2010 年 10 月末において観測値と予測値との差分が  $3\sigma$  を超える異常が検出された（東北大学理学研究科[課題番号：THK\_08], Tsuchiya et al., 2024）。

排気モニタで室内のラドン濃度を測定し、そのラドン濃度をラドン簡易モニタの PicoRad という活性炭コレクターにより決定する方法で、排気モニタの作動確認をおこなった。PicoRad のカットオフ値は  $80\text{Bq m}^{-3}$  であり、この値以下であれば、ラドン濃度が安全範囲にあると判断できることが示された。本研究により得られた簡易計測器のカットオフ値は、ラドン濃度の事前調査やリスク管理において役立つ指標となり、PicoRad を用いた断層からのラドン散逸の空間変化などの解析にも資することが期待される（東北大学理学研究科[課題番号：THK\_08], Yasuoka et al., 2024）。

### ○電磁気的な地震先行現象

地震に関連した ULF 電磁場を発生させる電流強度を、震源に流れる電流を起源とし、すべてのケースで同じ周波数依存性を持つと仮定して推定した。電流強度を推定するために、本研究で開発した吸収境界条件を用いて、地殻の導電率分布を考慮した ULF 電磁場シミュレーションをおこなった。ロマ・プリエタ、スピタク、グアム、ビアク、鹿児島、岩手県内陸北部、伊豆諸島、ジャンムー・カシミール、アルムロック、汶川、ラクイラで発生した 11 の地震を解析した。その結果、11 事象のうち 9 事象において、電流強度と地震マグニチュードの間に正の相関があることが示され、測定された ULF 場が地震活動に由来することが示唆された（千葉大学[課題番号：CBA\_01], Kimura et al., 2024）。

2024 年 M7.5 能登半島地震の約 9 分後に電離圏総電子数の正の異常が出現した。最初

の鋭いピークは、約 100km にわたる断層の両端で励起された 2 つの音波パルスで構成され、その後の一連のより小さな振幅の広いピークが続き、そのうち最大のピークは、本震の約 8 分後に断層の北東端付近でゆっくりとした断層破壊によって励起された可能性があることがわかった。これらの信号は、波面が中規模の移動性電離層擾乱の波面と重なる場所で大きくなり、電離圏内の高電子密度領域の下方への変位によって coseismic 信号が増強される可能性があることを示唆している(千葉大学[課題番号:CBA\_01], Heki et al., 2024)。

2023 年のトルコ南部の Mw7.8 カフラマンマラシュ地震とその直後の Mw7.5 地震について電離圏総電子数変動を調査したところ、最初の地震の約 23 分前に TEC の正の変化が始まり、異常が背景の約 2%に達したことがわかった。この値は過去の経験値と一致していた。一方、2 回目の地震直前の変化は移動性電離層擾乱活動により検出できなかった(千葉大学[課題番号:CBA\_01], Muafiry et al., 2025)。

地震先行現象検証超小型衛星 PRELUDE (Precursory Electric field observation CubeSat demonstrator) の打ち上げモデル(フライトモデル)開発を主眼として、以下の成果を得た。

1. 衛星バス部分の設計・評価の進捗: データ処理系・電源系・通信系・姿勢制御系・熱系・構造系を含むバス技術のフライトモデル設計を実施し、一部コンポーネントにおいては製造を完了した。エンジニアリングモデル統合で得られた改良点を反映させるために、各サブシステム間のインターフェースを見直し、振動試験や熱真空試験などの環境試験に向けた設計評価をおこなった。
2. 電場・プラズマハイブリッドセンサユニットの設計・製造・評価: 地震先行電離圏変動現象を観測するための電場・プラズマハイブリッドセンサユニットに関して、伸展部(ブームなど)の展開メカニズム・耐久性評価を実施した。センサ部の性能評価を進め、ノイズ特性や感度の測定を通じて、フライトモデルとしての改良点を明確化した。
3. 運用準備の具体化: 打ち上げ後の運用体制構築を進めるため、国際周波数調整の手続きを継続するとともに、クラウド型地上局運用会社との運用計画の詳細化をおこなった。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号機に搭載が決定していることから、2024年度の衛星引き渡し(納品)スケジュールに合わせた進捗管理を継続している(公募研究, 日本大学[課題番号:KOB004])。

## ○宏観現象

2024年能登半島地震で前兆ではないかと一部で言われたイワシの大量死・大量漂着について、過去の同様な事例を調べ、大地震との対応を検証した。2012年6月4日から日向灘の地震があった2024年8月8日までの4449日間に記録された異常は31回であり、同期間に日本周辺で発生したマグニチュード: M6.5以上、深さ100km以浅の地震32個(気象庁一元化地震カタログ)との対応を調べた。異常(Anomaly)による地震検出可能な時空間で警報(Alarm)が出ている時空間の割合 $P(A)$ が概ね0.7より小さい範囲ではランダム予知と同等であることがわかった。地震前兆は「震源付近を中心に地震発生直前に顕著に現れる」と仮定すると、先行時間が80日以内かつ震央距離350km以下の組み合わせが1つもないイワシ大量死・大量漂着は、大地震の前兆とは考えにくいといえる(公募研究, 東京学芸大学[課題番号:KOB003], 織原, 2024)。

## これまでの課題と今後の展望

今年度から開始された観測研究計画においては、予測の対象となる大規模地震の発生確率を時空間的に求める手法を開発し、その手法を時間更新させながら適用することで、中短期レベルでの予測可能性を調査し、精度の向上を図ることを大きな目標として、全国の大学、研究機関が協力して地殻活動のみにとどまらない多岐にわたる観測、研究を実施した。その結果、数多くの重要な知見が加えられたが、一方で様々な環境で発生する多くの地震に対して、その普遍性と個性を見極めることと、その個性が環境によって定められているものであるか、確率的な偶然性を持つものであるかを明らかにすることも望まれる。これを明らかにするためには、高品質の観測データをもつ大規模地震の数が少ないという課題が見えてきた。この課題は、正攻法では克服は困難であるため、今後は、これまでの研究を更に進めるとともに、機械学習などを活用しつつ、人間の眼では気づくことができない関係性の抽出などを通して、中短期的な大規模地震の発生確率の推定精度向上に資する研究をおこなうことが重要である。

## 成果リスト

- Akuhara, T., K. Shiraishi, T. Tsuji, Y. Yamashita, H. Sugioka, A. H. Farazi, S. Ohyanagi, Y. Ito, R. Arai, E. Araki, G. Fujie, Y. Nakamura, T. Tonegawa, R. Azuma, R. Hino, K. Mochizuki, S. Takemura, T. Yamada, and M. Shinohara, 2024, Geometrical barrier determines the updip limit of slow earthquake slip, *Research Square*, doi:10.21203/rs.3.rs-4591362/v1.
- An, L., B. Enescu, Z. Peng, M. Miyazawa, H. Gonzalez-Huizar, and Y. Ito, 2024, Dynamically triggered seismicity in Japan following the 2024 Mw7.5 Noto earthquake, *Earth Planets and Space*, 76:181, doi:10.1186/s40623-024-02127-z.
- An, L., F. Grigoli, B. Enescu, M. Buttinelli, M. Anselmi, I. Molinari, and Y. Ito, 2024, Offshore Fault Geometry Revealed from Earthquake Locations Using New State-of-Art Techniques: The Case of the 2022 Adriatic Sea Earthquake Sequence, *Seismological Research Letters*, 95, 2779-2790, doi:10.1785/0220230264.
- Ariyoshi, K., A. Nagano, T. Hasegawa, T. Iinuma, M. Nakano, D. M. Saffer, H. Matsumoto, S. Yada, E. Araki, N. Takahashi, T. Hori, and S. Kodaira, 2024, A physical explanation for an unusually long-duration slow slip event in the Nankai Trough, *Tectonophys.*, 887, 230439, doi:10.1016/j.tecto.2024.230439.
- Bantidi, T.M., T. Ishibe, G.M. Tuluka, and B. Enescu, 2024, Estimating spatio-temporal variable parameters of Epidemic Type Aftershock Sequence model in a region with limited seismic network coverage: a case study of the East African Rift System, *Geophysical Journal International*, 239, 882-900, doi:10.1093/gji/ggae299.
- Bernabeu A., J. Zhuang, and J. Mateu, 2024, Spatio-temporal Hawkes point processes: a review, *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, doi:10.1007/s13253-024-00653-7.
- Chen H., P. Han, and K. Hattori, 2024, Ultra-low frequency Geomagnetic Signal Extraction: An Interstation Transfer Function Method based on Multivariate Wavelet

- Coherence, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 5926711, doi:10.1109/TGRS.2024.3456433.
- Enomoto R., H. Nakata, R. Song, K. Hattori, K. Hosokawa, and H. Ohya, 2024, Analysis of Concentric Traveling Ionospheric Disturbances associated with typhoon Faxai in 2019 using HF Doppler Soundings, *J. Atmospheric Electricity*, 43, 1-7, doi:10.1541/jae.43.1.
- Fujimoto, T., M. Furuya, and K. Heki, 2024, Fine structure of a daytime mid-latitude sporadic-E revealed by GNSS TEC, InSAR, and MAI, *Earth Planets Space*, 76, 138, doi:10.1186/s40623-024-02086-5.
- Gentili S., P. Brondi, M. Sukan, G. Petrillo, J. Zhuang, and S. Campanella, 2024, Seismic clusters and fluids diffusion: a lesson from the 2018 Molise (Southern Italy) earthquake sequence, *Earth Planets Space*, 76:157, doi:10.1186/s40623-024-02096-3.
- Gulia, L., S. Wiemer, E. Biondini, B. Enescu, and G. Vannucci, 2024, Improving the Foreshock Traffic Light Systems for Real-Time Discrimination Between Foreshocks and Aftershocks, *Seismological Research Letters*, 95, 3579 - 3592, doi:10.1785/0220240163.
- Guo Y., J. Zhuang, and H. Zhang, 2024, Statistical modeling of 3D seismicity and its correlation with fault slips along major faults in California, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 638: 118747, doi:10.1016/j.epsl.2024.118747.
- Hammond C. R., J. Zhuang, C. LeBlanc, S. Rahimi-Ardabili, T. Zhang, R. Good, and F. J. Loge, 2024, Conceptual Water Main Failure Risk: Self-Excitation, Pipe Age, and Statistical Modeling Performance, *J. Water Resources Planning and Management*, 150: 04024042, doi: 10.1061/JWRMD5.WRENG-6432.
- Heki, K., 2024a, Decoding multiple source signatures in coseismic ionospheric disturbances of the 2024 January Mw7.5 Noto-Peninsula earthquake, Central Japan, *Earth Planet. Sci., Lett.*, 640, 118796, doi:10.1016/j.epsl.2024.118796.
- Heki, K., 2024b, GNSS applications for ionospheric seismology and volcanology, Chapter 8 of "GNSS Monitoring of the Terrestrial Environment: Earthquakes, Volcanoes, and Climate Changes" edited by Y. Aoki and C. Kreemer, Part I Monitoring earthquakes and volcanoes, Elsevier, doi:10.1016/B978-0-323-95507-2.00014-1.
- Heki, K., M. Nakatani, and W. Zhan, 2024, Ionospheric Changes Immediately before the 2008 Wenchuan Earthquake, *Advances in Space Research*, 73, 4539 - 4545, doi:10.1016/j.asr.2024.02.011.
- 平野史朗・直井 誠, 2024, DiallelX: ネットワーク関連法のための fortran コード, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SSS04-P05.
- Hirose, F., K. Tamaribuchi, A. Kobayashi, and K. Maeda, 2024a, Relation between Earthquake Swarm Activity and Tides in the Noto Region, Japan, *Earth Planets and Space*, 76, 37, doi:10.1186/s40623-024-01985-x.
- Hirose, H., A. Kato, T. Kimura, 2024b, Did Short-Term Preseismic Crustal Deformation Precede the 2011 Great Tohoku-Oki Earthquake? An Examination of Stacked Tilt Records,

- Geophys. Res. Lett., 51, 12, <https://doi.org/10.1029/2024GL109384>.
- Hirose, F. and A. Kobayashi, 2025, Tidal correlation of deep tectonic tremors increases during long-term slow slip events in the Bungo Channel, southwest Japan, *Earth Planets and Space*, 77, 18, doi:10.1186/s40623-025-02145-5.
- 本庄悠成, 三浦諒馬, 山崎政彦, 鴨川仁, 2024年, 地震先行電離圏変動現象検知衛星PRELUDEの電場・プラズマハイブリッド観測ユニットの模擬観測実験による性能評価及び検証, 日本機械学会 第33回スペース・エンジニアリング・カンファレンス.
- Ishibe, T., T. Terakawa, A. Hashima, M. Mochizuki, and R. S. Matsu'ura, 2024, Can the Regional 3D Stress Field According to the Wallace-Bott Hypothesis Predict Fault Slip Directions of Future Large Earthquakes?, *Earth Planets and Space*, 76:26, doi:10.1186/s40623-023-01955-9.
- 石辺岳男・寺川寿子・橋間昭徳・望月将志・松浦律子, 2024, 三次元広域応力場から将来発生する大地震のすべり方向(すべり角)を予測可能か?, *地震ジャーナル*, 78, 54-66.
- Iwata, D. and K. Z. Nanjo, 2024, Adaptive estimation of the Gutenberg-Richter b value using a state space model and particle filtering, *Scientific Reports*, 4, 4630, doi:10.1038/s41598-024-54576-x.
- Iwata, T., 2025, Mixture of linear and non-linear Hawkes processes and its application to real earthquake sequences, *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, doi:10.1007/s13253-025-00681-x.
- Iwata, T., The background stress estimated from stress rotation using a Bayesian approach, *The 4th International Conference on Mathematics and Statistics (ICMS25)*, 2025.
- Kimura R., Y. Ando, L. Kukiya, T. Masuzawa, K. Hattori, and M. Hayakawa, 2024, A Numerical Consideration on the Correlation Between Magnitude of Earthquakes and Current Intensity Causing ULF Electromagnetic Wave Emission, *Radio Science*, 59(7), e2023RS007923, doi: 10.1029/2023rs007923.
- 北出明嗣, 金子柊, 吉野千恵, 服部克巳, 2024, ひまわり8号AHIデータを用いた溶岩噴出前の地表面温度変化の検知, *大気電気学会誌*, Vol.18(1) (No.104), 48-49.
- 小松真喜・中島淳一, 2024a, 能登半島群発地震における繰り返し地震の時空間分布, 日本地球惑星科学連合2024年大会, U15-P16.
- 小松真喜・中島淳一, 2024b, 能登半島群発地震における繰り返し地震分布の時空間的特徴, 日本地震学会2024年度秋季大会, S08-14.
- Kubo, H., M. Naoi, and M. Kano, 2024, Recent Advances in Earthquake Seismology using Machine Learning, *Earth Planets and Space*, 76:36, doi:10.1186/s40623-024-01982-0.
- Li Y., J. Zhuang, C. Shi, Y. Guo, and Z. Xiong, 2024, A 3D spherical ETAS model: A case study in the Alaska-Aleutian region, *Seism. Res. Lett.*, 95(6): 316103173, doi:10.1785/0220230440.
- Liu Y., J. Zhuang, Y. Guo, C. Jiang, Q. Tain, Y. Zhang, and F. Long, 2024, Background and clustering characteristics of recent seismicity in Southwestern China, *Geophys. J. Int.*, 238: 1291-1313, doi:10.1093/gji/ggae211.
- Mizrahi, L., I. Dallo, N. J. van der Elst, A. Christophersen, I. Spassiani, M. J.,

- Werner, P. Iturrieta, J. A. Bayona, I. Iervolino, M. Schneider, M. T. Page, J. Zhuang, M. Herrmann, A. J. Michael, G. Falcone, W. Marzocchi, D. Rhoades, M. Gerstenberger, L. Gulia, D. Schorlemmer, J., Becker, M. Han, L. Kuratle, M. Marti, and S. Wiemer, 2024, Developing, Testing, and Communicating Earthquake Forecasts: Current Practices and Future Directions, *Reviews of Geophysics*, 62:e2023RG000823, doi:10.1029/2023RG000823.
- Mizuno A., M. Kao, and K. Umeno, 2024, A capacitive coupling model between the ionosphere and a fault layer in the crust with supercritical water, *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.*, 18, e01003, doi:10.34343/ijpest.2024.18.e01003.
- Muafiry, I. N., I. Meilano, D. D. Wijaya, E. Sentürk, and K. Heki, 2025, Ionospheric changes immediately before the 2023 February Kahramanmaras earthquakes, Turkey, *Adv. Space Res.*, 75, 3150–3158, doi:10.1016/j.asr.2024.11.011.
- 長尾年恭, 2024, 地震予知研究の最前線, *Ocean Newsletter*, 570, 6-7.
- Nakanishi, R., S. Takemura, 2024, Development of an offshore ground motion prediction equation for peak ground acceleration considering path effects based on S-net data. *Earth Planets Space* 76, 146, doi:10.1186/s40623-024-02078-5.
- 中田 令子・堀高峰・青地秀雄・井出哲, マルチスケール円形パッチモデルを用いた準動的地震発生サイクルシミュレーションで得られた大地震の繰り返し, 日本地震学会秋季大会, S08-20
- 楠城一嘉, 2024, 富士山直下で発生する低周波地震, *金属*, 94, 44-46.
- Nanjo, K. Z., Y. Yamamoto, K. Ariyoshi, H. Horikawa, S. Yada, and N. Takahashi, 2024, Earthquake detection capacity of the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET), *Journal of Seismology*, 28, 787–810, doi:10.1007/s10950-024-10219-2.
- 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 (preprint ver.: arXiv:2310.02653).
- 直井 誠・平野史朗・陳友晴, 2024, 深層学習とMatched Filter analysisによる水圧破碎に伴う微小破壊活動の解析, 日本地震学会2024年度秋季大会, S08-31.
- Naoi, M., K. Tamaribuchi, K. Shimojo, S. Katoh, and S. Ohyanagi, 2024, Neural phase picker trained on the Japan Meteorological Agency unified earthquake catalog, *Earth Planet Space*, 76, 150, doi:10.1186/s40623-024-02091-8.
- 西村卓也, 田部井隆雄, 松島健, 廣瀬仁, 2024, 測地観測に基づく九州の地殻変動分布と活断層との関係, *活断層研究*, 60, 39-44.
- 織原義明, 2024, イワシの大量死および大量漂着と大地震との関連性の調査, *東海大学海洋研究所研究報告*, 46, 1-11.
- Peng, Z., X. Lei, Q. Wang, D. Wang, P. Mach, D. Yao, A. Kato, K. Obara, and M. Campillo, 2025, The Evolution Process between the Earthquake Swarm beneath the Noto Peninsula, Central Japan and the 2024 M 7.6 Noto Hanto Earthquake Sequence, *Earthquake Research Advances*, 5:100332, doi:10.1016/j.eqrea.2024.100332.
- Petrescu, L. and B. Enescu, 2025, Seismicity of a relic slab: space-time cluster analysis in the Vrancea Seismic Zone, *Earth Planets and Space*, in press,

doi:10.1186/s40623-025-02136-6.

- Petrillo G., T. Kumazawa, F. Napolitano, P. Capuano, and J. Zhuang, 2024, Fluids-Triggered Swarm sequence supported by a non-Stationary Epidemic-like description of Seismicity, *Seism. Res. Lett.*, 95(6): 3207-3220, doi:10.1785/0220240056.
- Petrillo, G. and J. Zhuang, 2024, Bayesian earthquake forecasting approach based on the Epidemic Type Aftershock Sequence model, *Earth Planets and Space*, 76, 78, doi:10.1186/s40623-024-02021-8.
- Poveda-Brossard, V., K. Nishida, B. Enescu, and R. Takagi, 2025, Ocean microseisms recorded by the Cuban seismic network: time variation, spectral features and source directionality characteristics, *Seismological Research Letters*, 96 (2A): 758-771, doi:10.1785/0220240351.
- Ray, S., B. Senapati, B. Kundu, and K. Heki, 2024, A global perspective on the interaction between Earth's magnetic field and ionospheric disturbances, *Adv. Space Res.*, doi:10.1016/j.asr.2024.06.072.
- Sasaki, M., H. Kawakata, S. Hirano, 2024, Spatio-temporal variation of seismicity in the Noto Peninsula region using long-term continuous seismograms of nearby stations, 2024 AGU Fall Meeting, NH31G-2176.
- Schoenberg F., W. Werner, Y. Rong, D. Marsan, and J. Zhuang, 2024, Preface to the focus section on statistical seismology, devoted to the memory of the late Yan Kagan, Dave Jackson, and Ilya Zaliapin", *Seism. Res. Lett.*, 95(6): 3156-3160, doi:10.1785/0220240370.
- Shen X., and J. Zhuang, 2024, Residual analysis based model improvement for state space models with nonlinear responses, *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 8: 1728-1743, doi:10.1109/TETCI.2024.3355813.
- Si, Z., J. Zhuang, S. Gentili, C. Jiang, and W. Wang, 2024, A Bayesian merging of earthquake magnitudes determined by multiple seismic networks, *Seismological Research Letters*, 95, 3221-3233, doi:10.1785/0220230404.
- Si Z., J. Zhuang, C. Jiang, S. Gentili, and W. Wang, 2024, A Bayesian merging of earthquake magnitudes determined by multiple seismic networks, *Seism. Res. Lett.*, 95:3221-3233, doi:10.1785/0220230404.
- Sone, N., M. Yamazaki, M. Kamogawa, 2024, DESIGN OF THE PRELUDE CUBESAT FOR OBSERVING ELECTROMAGNETIC PERTURBATIONS ASSOCIATED WITH SEISMIC ACTIVITY, 2024 International Astronautical Congress, Minan IAC-24,B4, 4, 10, x86372.
- Spassiani I., G. Petrillo, and J. Zhuang, 2024, Distribution related to all samples and extreme events in the ETAS cluster, *Seism. Res. Lett.*, 95: 3234-3242, doi:10.1785/0220230324.
- Takeda, Y., B. Enescu, M. Miyazawa, and L. An, 2024, Dynamic Triggering of Earthquakes in Northeast Japan before and after the 2011 M 9.0 Tohoku - Oki Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 114, 1884-1901, doi:10.1785/0120230051.
- Takemura, S., S. Baba, S. Yabe, Y. Yamashita, K. Shiomi, T. Matsuzawa, 2024a, Detectability analysis of very low frequency earthquakes: Methods and application

- in Nankai using F-net and DONET broadband seismometers, *Geophysical Journal International*, 237 (1), 49-63, <https://doi.org/10.1093/gji/ggae033>.
- Takemura, S., K. Emoto, and S. Yabe, 2024b, Revisiting seismic energy of shallow tremors: Amplifications due to site and propagation path effects near the Nankai Trough. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129, e2024JB029168, <https://doi.org/10.1029/2024JB029168>.
- 田中愛幸, 2024, 衛星重力観測で捉えられた巨大地震数カ月前の重力変化 (解説), *地震ジャーナル*, 77, 69-75.
- Tanaka, H. and K. Umeno, 2024a, Bayesian Updating on Time Intervals at Different Magnitude Thresholds in a Marked Point Process and Its Application to Synthetic Seismic Activity, *J. the Physical Society of Japan*, 93, 024001, 1-26, doi:10.7566/JPSJ.93.024001.
- Tanaka, Y., R. Nishiyama, A. Araya, H. Sakaue, K. Nakakoji, T. Takata, T. Nishimura, Y. Hiramatsu, A. Sawada, 2024b, A possibility of fluid migration due to the 2023 M6.5 Noto Peninsula earthquake suggested from precise gravity measurement, *Earth Planets and Space*, accepted.
- Ueda, T., A. Kato, C.W. Johnson, and T. Terakawa, 2024, Seasonal modulation of crustal seismicity in northeastern Japan driven by snow load, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129, e2023JB028217, doi:10.1029/2023JB028217.
- 上嶋誠, 2024, 比抵抗構造研究の内陸地震発生科学への貢献と今後の展望, *地震ジャーナル*, 77, 2-10.
- Varotsos, P. A., N. V. Sarlis, and T. Nagao, 2024, Complexity measure in natural time analysis identifying the accumulation of stresses before major earthquakes, *Scientific Reports*, 14:30828, doi:10.1038/s41598-024-81547-z.
- Wang Y., R. Wang, P. Han, T. Zhao, M. Miao, L. Su, Z. Jin, and J. Zhuang, 2025, Statistical characteristics of strong earthquake sequence in northeastern Tibetan plateau, *Entropy*, 27:174, doi:10.3390/e27020174.
- Yoshida, K., Y. Fukushima, and Y. Kaneko, 2025, Near-Field Imaging of Near-Identical Mw5.9 Earthquakes in the Crust of Ibaraki, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, accepted.
- 太田悠一郎, 吉野千恵, 三浦健伸, 服部克巳, 2024, 波形解析によって同定した非対地雷LF帯電磁パルス数の時間変化の特徴について, *大気電気学会誌*, Vol.18(1) (No.104), 77-78.
- Zhuang J., 2024, Earthquake predictability and forecast evaluation using likelihood based marginal and conditional scores, *Seism. Res. Lett.*, 95(6): 3593-3603, doi:10.1785/0220240256.

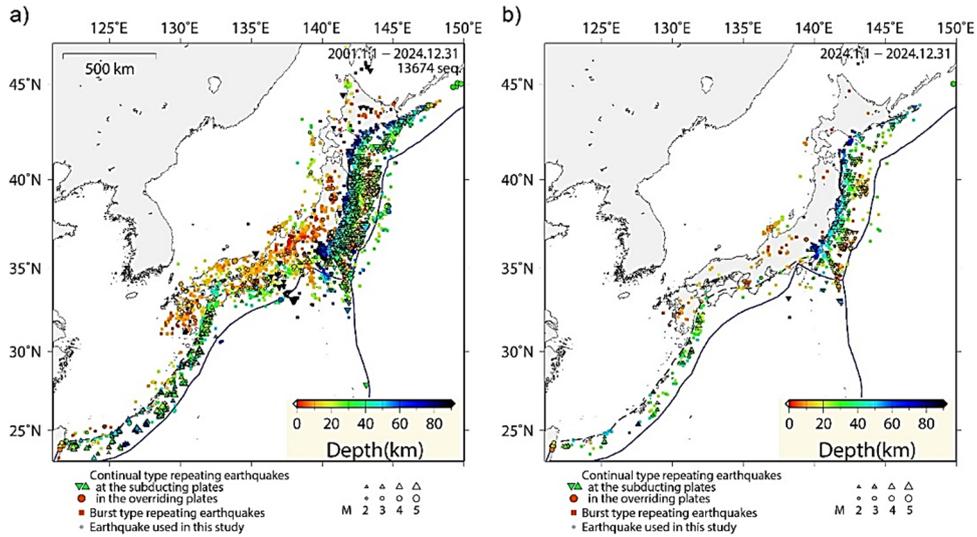


図1. 日本列島周辺で発生した小繰り返し地震の空間分布(東京大学地震研究所[課題番号: ERI\_10])。

(a) 2001年1月～2024年12月。(b) 2024年1月～2024年12月。

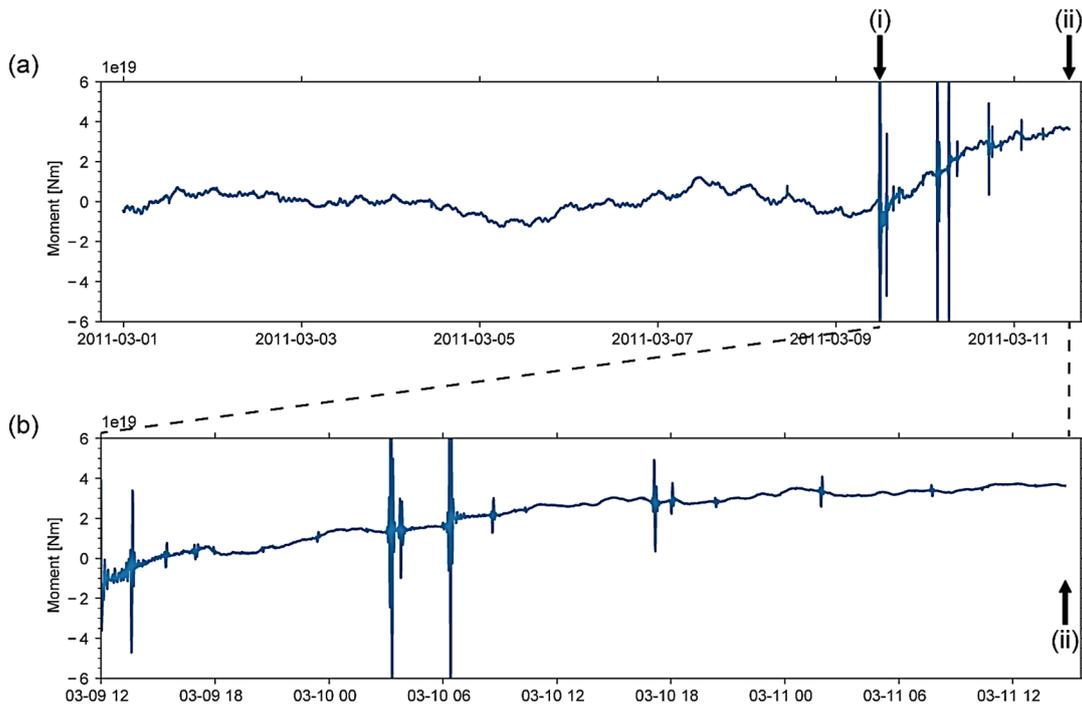


図2. 2011年東北地方太平洋沖地震発生直前の傾斜記録に対するスタッキング処理の結果。震源での地震モーメント相当量に換算したもの(Hirose et al., 2024bを改変, 東京大学地震研究所[課題番号: ERI\_11, ERI\_12])。

(a) 2011年3月1日から本震発生直前まで。(b) 本震発生前約51時間。図中の矢印は(i) 3月9日最大前震; (ii) 本震発生時; をそれぞれ示す。