

## 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ている。

## 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. プレート境界滑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・滑りの時空間履歴は、地震発生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、非地震性滑りのモニタリングに基づく物理モデルの構築と予測を目指して研究を行っている。

#### ○地殻変動

地殻変動データからプレート境界での剪断応力蓄積速度を直接推定する「力学的カップリング・インバージョン手法」を提案し、南海トラフ沿いプレート境界に適用した。更に応力蓄積速度の推定結果に基づき、前震・余効滑り・本震から成る一連の地震シナリオを作成した (気象庁 [課題番号: JMA\_01], Saito and Noda, 2022; 野田, 2023a)。また、地殻変動の指標化として 2000 年以降の GNSS データから日本全域の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した結果、東北日本の広範囲における 2011 年東北地方太平洋沖地震による影響、房総半島や四国西部におけるスロースリップイベントによる影響などに関連付けられることを示した (気象庁 [課題番号: JMA01], 木村・他, 2022a)。

#### ○繰り返し地震

繰り返し地震 (相似地震) は、プレート境界・断層の滑りを監視するすぐれた方法であり、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、日本列島周辺及び世界で発生した繰り返し地震活動の検出を行って繰り返し地震カタログを継続的に更新している。2011 年東北地方太平洋沖地震の大滑り域周辺において、巨大地震発生後の滑り状況変化について調べたところ、宮城県北部では現在も余効滑りが継続しているものの、その他の地域では本震後数年の間にほぼ収束していること、2021 年から 2022 年にかけて発生した M6, M7 クラスの地震発生に伴い非地震性滑りが発生したことを確認した (東北大学理学研究科 [課題番号: THK09], Igarashi and Kato, 2022)。

滑り分布モニタの時空間分解能を上げるためには、より小さな繰り返し地震を用いる

ことが本質的であるが、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。本年度、波形の特徴を 64bit 程度のコンパクトなバイナリコードに圧縮するハッシュ関数を深層学習を用いて作成し、総当たりで波形類似度を計算したところ、120 スレッド並列化のもとで、16 ch、100 Hz サンプリング、5.8 年分に相当するサンプル数の連続データを 15.5 時間で処理できるという、十分に実用的な速度が確認できた（東北大学理学研究科[課題番号:THK\_09]）。

釜石市周辺に 2018 年から 13 点の臨時観測点を置いて行っていた稠密観測については、東北沖地震から 10 年が経ち十分なデータが得られたことから撤収した。観測網の効果を調べるために、2018 年 8 月 1 日からの 10 日間について、臨時観測点のデータ使用前後の釜石沖地震周辺の地震の震源分布を比較したところ、それ以前に比べて 1.7 倍の個数の震源を決めることができていた（東北大学理学研究科[課題番号:THK\_09]）。

### ○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おきる短期的なスロースリップ・イベント(SSSE)を解析するシステムを運用しており、2021 年 11 月-2022 年 10 月までの 1 年間では、SSSE46 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、2022、2023）。

一方、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を開発した。この手法を日向灘の GNSS 客観検知に適用したところ、余効変動が除去され長期的スロースリップイベント(LSSE)のみが検出されるようになった（気象庁[課題番号:JMA\_01]、小林・木村、2022）。

また、東海大学と気象庁は、定常観測の感度が低い駿河湾における海底地震計観測を行ってきた。過去 10 年間の駿河湾の海底地震計のデータに微動活動にともなう振動が記録されていないか調査したところ微動活動は認められなかった（気象庁[課題番号:JMA\_01]、Panayotopoulos et al., 2022; 永井・他、2022b; 西宮・他、2022）。

豊後水道周辺地域で実施している GNSS 連続観測のデータに基づき、2015-2016 年頃および 2018-2019 年頃に豊後水道で発生した 2 つのスロースリップイベント(SSE)の滑り域を推定した。2015-2016 年の SSE では顕著な微動活動が伴わなかったのに対し、2018-2019 年の SSE では明らかな深部微動を伴った。推定された滑り過程から、前者では SSE の滑りが微動発生域に達しなかったのに対し、後者では微動発生域まで滑りが伝播していた。このことより豊後水道では微動発生域に滑りが達することによって微動が誘発されることが強く示唆される（東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_12]）。

豊後水道については、深部微動と潮汐との相関の長期的な時間変化の調査も行った。LSSE の隣接領域での微動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く、また、LSSE 期とそれ以外の期間の比較では潮汐感度は LSSE 期の方が大きいことが見い出された（気象庁[課題番号:JMA\_01]、弘瀬・他、2022）。

SSE における流体の役割を解明するために西南日本で精密重力観測を行ってきた。本年度は、時間分解能を絶対重力観測から大幅に改善した連続観測可能な重力計を用いて観測を行った。その結果、比較的規模の大きい SSE の発生中に、地殻上下変動では説明できない重力変化を石垣島で検出した(図 1)。負の重力異常が観測された事実は東海

やカスカディアと共通する（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，平松，2023）。

### ○浅部スロー地震

DONET 観測点を用いた浅部低周波微動のモニタリングシステムを常時稼働させた（気象庁[課題番号：JMA\_01]，Tamaribuchi et al.，2022）。

紀伊半島南東沖でこれまでに発生した浅部超低周波地震の震央位置や滑り過程の再評価を行い，詳細な発生様式を明らかにした。主な特徴としては，沈み込んだ古銭洲海嶺の西端で浅部超低周波地震のモーメント解放が大きく，主要な浅部超低周波地震エピソードはその活発域全体で繰り返し発生しているのに対して，小規模なエピソードは活発域の一部のみで発生し，必ずしも場所が固定されていないことなどが挙げられ，スロー地震活動の多様性が改めて示された（図2，東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，Takemura et al.，2022a）。また，それぞれの浅部スロー地震エピソードの震源パラメータのスケーリング則を明らかにした（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，Takemura et al.，2022b）。

### ○スロー地震と構造の関係

南海トラフ沈み込み帯の深部低周波地震(LFE)の移動現象を解明するために，四国西部に展開された稠密な短周期地震計アレイにより取得された連続波形記録の解析を続けた。LFEの大規模活動が生じた2020年2月下旬前後約1カ月間の波形データを用いて，センブルンス値に基づいてLFE震源の時空間発展を推定した。低周波地震は，2020年2月18日から約10日間にわたって活発化し，海溝軸に平行な方向の移動を示した。また，低周波地震の震央分布は，現在のフィリピン海プレートの収束方向と平行な西北西－東南東の走向に加えて，過去の収束方向に平行な北西－南東走向の2つで概ね特徴づけられ，低周波地震の分布はプレートの沈み込みにより生成された構造に規定されていると解釈される（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，Kato et al.，2023）。

南海トラフで浅部スロー地震を引き起こす「浅部プレート境界断層」(=デコルマ)の断層強度や滑り挙動を評価するために，比較対象となる日本海溝の反射法地震探査データを解析し，海底下のP波速度構造と間隙水圧を求め，有効応力比(:=P波速度から推定される有効鉛直応力 ÷ 正常圧密で期待される有効応力)を推定した。有効応力比が低いほど断層強度は弱く，滑りやすい。過剰間隙水圧の状態が考えられる四国室戸岬沖南海トラフ(Tobin and Saffer, 2009)と宮城沖日本海溝(本研究)デコルマの有効応力比の比較を図3に示す。海溝軸に近いZone Iにおいて，南海トラフの有効応力比は日本海溝より著しく低く，南海トラフのデコルマがより滑りやすく浅部スロー地震が起きやすい状態であると考えられる。沈み込む太平洋プレート上面のグラーベン構造の発達域にあたる，日本海溝のZone Iには付加体内部の複数のスラスト断層がグラーベン構造内部まで発達し，スラスト断層の優れた排水作用が相対的に高い有効応力比をもたらしたのかもしれない。一方，南海トラフのZone Iでは，透水性の低い泥岩層により排水作用が劣ることで，低い有効応力比が維持されていると考えられる（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，Jamali Hondori and Park, 2022）。

近年急速に発展する海底観測網をスロー地震発生場の解明に活用するために，海底地

震計データを用いて水平・深さ方向ともに高分解能な3次元S波速度構造を推定できる常時微動表面波トモグラフィ手法を開発した。開発手法をS-netデータに適用し、日本海溝沈み込み帯前弧最先端部の付加堆積物や海洋性地殻に対応する低速度領域のイメージングに成功した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，高木・西田，2022）。

令和3年12月から継続している四国東部地域における稠密地震観測で得た連続記録については，気象庁一元化震源カタログの震源時刻に従ってイベント毎のデータ編集を実施し，地下深部からの反射波と思われるフェイズを確認することができる信号対雑音比の良好な観測データが取得できていることがわかった（図4，東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]）。

### ○地震・スロー地震の物理モデル

南海トラフの実際のプレート形状を仮定したサイクルシミュレーションでは，摩擦特性や有効法線応力の分布を調節することによって，各セグメントの過去の巨大地震の発生様式，日向灘M7.5の発生間隔・深部で繰り返すLSSEなどと同時に再現することに成功した（気象庁[課題番号：JMA\_01]，Hirose et al.，2022a）。さらに，SSSEまで含めた再現を目指して，平面断層上ではあるが，より細かいシミュレーションメッシュを用いて各種パラメータに対するモデルの挙動を検証した。昭和東南海地震時の東海沖の割れ残りを想定して地震発生層（アスペリティ）のパラメータを東西で変え，その深部にLSSEとSSSEに対応するパッチを配置した。その結果，M8クラスの地震（西側アスペリティの破壊2回と全域破壊1回を繰り返す）間に10年間隔でM6クラスのLSSE，2ヵ月間隔でM5クラスのSSSEが現れ，各現象の発生間隔や規模を概ね再現できた。なお，LSSEは全域破壊後には現れないが，SSSEは定常的に発生している（気象庁[課題番号：JMA\_01]）。

スロー地震の物理モデルとして，スロー地震域を安定滑り帯の中に近接した多数の不安定パッチがあると仮定し，一つの不安定パッチの破壊がその周りに引き起こす余効滑りによって隣りのパッチが破壊されることの連鎖によって伝播現象がおきるというモデルが提案されている。これに速度状態依存摩擦構成則を適用して，継続時間の長い破壊過程を定量的に説明することに成功した。これにより観測された伝播速度から摩擦特性を推定した（東北大学理学研究科[課題番号：THK\_09]，Ariyoshi，2022）。

また，微動活動が潮汐に対して時間遅れで発生する観測事実を，流体挙動を考慮した物理モデルで説明することで，プレート境界の摩擦特性や透水構造が制約できることを示した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，Sakamoto and Tanaka，2022）。

### ○断層滑りのデータ同化

観測データからプレート境界の滑り履歴と摩擦特性を同時に推定するデータ同化は，原理的には，そのまま今後の滑り予測にも使えるはずである。

昨年度着手した2003年十勝沖地震直後の初期の余効滑りを正確に把握するためのデータ同化手法の開発を継続した。まずデータ処理として高サンプリングのGNSSデータをItoh et al. (2021)の手法に基づいて前処理し，地震後5日間の6時間間隔の変位時系列データを得た。次にマルコフ連鎖モンテカルロ法による摩擦特性推定手法を開発し，擬似データによる数値実験で性能を評価した。その後，現実の観測データに適用し，摩擦特

性の空間分布を推定した。得られた摩擦特性の空間分布で観測変位の時系列データは説明可能であるが、摩擦特性には大きな空間変化を必要とする（京都大学理学研究科[課題番号：KUS\_01]）。

観測データから、モデルパラメータの最適値のみならず、その不確実性を明らかにするためには、逆問題をベイズ的に定式化し、パラメータの事後確率分布を推定する必要がある。しかし、多数の未知パラメータを持つ非線形モデルに対する事後確率分布推定は一般に計算コストが非常に高い。昨年度から検討している、iterative ensemble smoother と ensemble transform Kalman filter を用いる手法について、本年度は、空間的に変化するパラメータの事後確率分布を現実的な計算コストで近似的に推定する手法を開発した。この手法では、事前確率分布からサンプリングされた粒子を観測データとモデル計算結果に基づいて反復的に更新し、最終的に事後確率分布のサンプルを得る。この手法の性能を評価するために、余効滑りと粘弾性緩和を組み合わせた余効変動の物理モデルを用いて人工的な GNSS 時系列データを作成し、このデータからモデルのパラメータ（プレート境界の摩擦パラメータ、マンツルの粘性率、地震時の応力変化等の空間分布）の事後確率分布を推定した。その結果、推定された事後確率分布の平均値は真値を良く再現していた。また、地震時の応力変化が大きい場所でパラメータの不確実性（事後確率分布の標準偏差）が小さく、小さい場所で大きいという妥当な結果が得られた（京都大学理学研究科[課題番号：KUS\_01]）。

SSE のデータ同化をアンサンブルカルマンフィルタの枠組みで行う際に、推定される摩擦パラメータの初期分布を適切に与えることが重要である。昨年度から、どのような摩擦パラメータ分布を与えると現実的なセグメントサイズ・再来間隔・累積滑り量をもつ SSE が生じるかを、フォワード計算によって検討してきた。今年度は、走向方向に完全に一樣な摩擦パラメータを仮定しても SSE がセグメントに分かれて発生しうること、そのセグメントの空間的な大きさが Ruina(1983)による震源核形成サイズ  $h^*$  で決まり、断層の幅との大小によって SSE に成長したりできなかつたりすることを明らかにした。一方で、Takagi et al. (2019) は、観測される SSE の累積滑り量や再来間隔の走向方向のバリエーションが、SSE の発生領域に隣接する領域の非一樣な固着度と相関していることを指摘している。そこで、SSE 域の摩擦特性は一樣とした上で、隣接領域の固着度を運動学的に走向方向に非一樣に設定したフォワード計算を試みたところ、SSE はセグメント化し、セグメントごとの SSE の再来間隔が異なるという結果が得られた。したがって、実際のデータ同化では、このようなアンサンブルも考慮する必要がある（京都大学理学研究科[課題番号：KUS\_01]）。

## 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。

### ○新しい地震観測手法

これまでの地震観測は、観測点の振動を地震計で測り、振動の空間分布は、多数の独立型の観測点を比較して得られる離散的なものであった。最近、長い光ファイバを敷設

することによって、振動の空間分布を光ファイバに沿って連続的に得る DAS 技術が注目されている。そこで、DAS の試験観測を静岡県浜松市天竜区の船明トンネル内にて行い、自然地震の観測と DAS の振幅情報の再現性を調査した。周辺で発生した自然地震を DAS は多数捉えた。また、小型の加振器を用いて、DAS と地震計に地中を介して人工的に振動を与えると、周波数固定で与える振動の大きさを段階的に変えたとき、DAS と地震計が捉えた人工振動の振幅の大きさは加振器が与えた振動と線形傾向にある。しかし、周波数及び与える振動の大きさを固定して、DAS と地震計で長期間観測を実施すると、地震計の振幅は一定であるが、DAS の振幅には周期に規則性のない揺らぎが見られた（気象庁[課題番号：JMA\_01]，田中・小林，2022）。

## ○震源カタログ

地震活動を用いる研究においては、地震カタログの質と量がまずもって重要である。地震カタログ作成の新しい手法として機械学習の利用が注目されている。本年度、室内水圧破碎実験で得られた連続収録 AE データ (24 ch) に対し、深層学習を用いてイベント検出・走時検出を行い震源カタログを作成することを試み、古典的手段の組合せ (STA/LTA による波形切り出し-AR-AIC モデルによる P 波走時検出-非線形最小二乗法による震源決定) で作成したものと比較した。機械学習では、イベント存在確率を出力とする深層学習ネットワークでイベント検出・波形切出を行い、PhaseNet (Zhu & Beroza, 2019) に似た深層学習ネットワークでチャンネル別に走時確率値を評価、REAL アルゴリズム (Zhang et al. 2019) を高速化した独自手法で Phase Association し、非線形最小二乗法で震源決定した。黒髭島花崗岩 10 供試体、イーグルフォード頁岩 2 供試体の実験で得られた高精度な検出値等を用いて訓練したシステムを、ウルフキャンプ頁岩供試体の実験で得られた連続収録 AE 波形データに適用したところ、従来法 (927 個) の数倍以上の個数の震源を得ることができた。ただし、スコアが低いピック値を使うと誤検出と思われるものが多く、品質管理が課題である (図 5, 東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13], 直井・他, 2022)。一方、有効な特徴量を大量の学習データから自動で事象を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・テストを行った。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ることで数 mm の震源座標精度を達成できた (東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13], 直井, 2022)。

臨時稠密観測網は定常観測網より分解能に優れるが、サイト補正等をして、イベントのマグニチュードを定常観測からのものと整合的に決めるのが難しく、特に、臨時観測のみで検出されたイベントのマグニチュード情報を用いたいときに問題となる。そこで、ベイジ的な考え方で臨時観測のマグニチュードを簡単に補正できる新たな手法を開発した。Xichang 地域の臨時網と中国の定常網のデータを用いて補正すると (図 6), 臨時網で決めたマグニチュードは平均で 0.5 程度上方補正され、さらに、定常網のマグニチュードも補正量の平均値はゼロであるが、個々のイベントには +/-0.1 程度の補正がかか

った。ベイズ推定の観点からは、後者の補正は、臨時観測の情報が追加されたことで定常網を用いたマグニチュード決定もより正確になったと考えられる（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_13], Si et al., 2022）。

地震カタログにおける大きな問題の一つは、本震直後の地震検知率の低下とその後の急激な回復である。検知能力の時間変化は、状態空間モデルを用いて推定することが多いが、時間変化が局所的に急激であるために、状態の時間変化の確率分布(システムノイズ)をうまく仮定する必要がある。そこで、地震検知能力を表すモデルに Ogata and Katsura (1993)を用いて、改良大森則に基いて作った 250 例の合成カタログに対して、システムノイズとして、正規分布(ばらつきの時間変化なし/あり)、コーシー分布(ばらつきの時間変化なし/あり)の 4 種を仮定した粒子フィルタアルゴリズムで検知能力の変化を推定してみたところ、コーシー分布(ばらつきの時間変化あり)による成績が概ね良好であった。コーシー分布は、裾が重く外れ値を正規分布より許容し得ることから、急激な変化への対応に向いていると考えられる。この知見は、地震や SSE のサイクルをデータ同化する際にも参考になろう（京都大学理学研究科[課題番号：KUS\_01]）。

歴史資料から過去の地震活動を読み解くにあたっては、夜には寝ていることの多かった昔の人間という計器の特性に注意する必要がある。土佐市の真覚寺の日記は、1854 年南海トラフ地震から 1858 年まで、1732 件の有感記録を、揺れの程度を大・中・小に分類して収録している。中・大の地震に限れば時間帯に対する有意な依存性は見られないが、小に対しては夜間のレートが 35%ほど低く、Schuster 検定を行うと p 値は  $2E-15$  となり、夜間の検知率が低いことは間違いがない。大きさを分けずに分析した場合でもやはり夜間に少ない傾向は p 値が  $2E-9$  と確実であり、有感地震数全体としては 2 割程度が見逃がされていると考えられる。なお、日記期間が南海トラフ地震から始まっているが、上記のような傾向が南海トラフ地震直後の一過性のものでないことも確認できた。さらに、地震の大きさの記述がない津軽藩御国日記や盛岡藩雑書でも同様の発生時間帯の偏りがあり、p 値は  $1E-4$  以下と明らかに有意であった（図 7，東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_13], 石辺ら, 2023 in press）。

## ○地震の可予測性

地震活動が余震的トリガリング作用をもち、それによって時空間クラスタリングすることは疑いがなく、それを利用した ETAS モデルなどだけでも、ランダム予測より数十から数百倍のゲインは得られる(e. g., Nakatani, 2020)。しかし「地震の可予測性の問題」と呼ばれる問題の肝は、このような時空間クラスタリング以上に、何か非ランダムな要素があるか、特に、地震の規模別頻度分布に非定常性があるかという問いであり、2004 年に南カリフォルニアのデータで次におこる地震のマグニチュードは一つ前の地震のマグニチュードと相関をもつと主張されて以来、論争が続いている。本年度、この問題に関する 29 本の論文のメタ解析を行った。カタログの完全性に問題があると疑似的な相関が出ることには合意があるが、相関の存在に対する結論(yes/no)と使用データのコンプライトネスやサイズには有意な相関がなく、今のところ形勢は互角である。この問題は時間更新型確率予測にとって根本的に重要であり、カタログ品質をさらに向上させて検証すべきである（図 8，東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_13], Petrillo and Zhuang, 2022）。

地震が本質的に事前予測困難と考えられる理由の一つは、地震の高速破壊そのものの成長過程が複雑で、始まった地震がどこまで大きく成長するかが断層・応力の強い不均質性に支配されているように見えることである。本年度、2022年9月の台湾の台東地震(M7.1)とその16時間前の最大前震(M6.6)について、断層モデルを仮定せずロバストな結果が得られるとされるポテンシー密度テンソルインバージョン法(PDTI法)による震源インバージョンを行った。本震のモーメントレートは、途中で一度落ちて前半と後半にはっきり分かれており、本震後半の破壊は、前震破壊と本震前半の破壊の間から始まった。また、前震でも本震でも、途中で破壊伝播方向の急激な変化が見られた。階層パッチモデル(Ide and Aochi, 2006)ならこういった破壊の様子が無理なく説明できる(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13], Yagi et al., 2023)。

将来発生する地震の強震動・津波を定量的に予測するには、予測する地震での断層滑り方向を仮定する必要がある。一つの方法は、広域応力場と断層の姿勢から断層面に働くトラクションの剪断成分の方向を求め、この向きに滑ると考えるWallace-Bolt仮説を採用することである。この方法の妥当性を調べた先行研究(Ishibe et al., 2020)では、Terakawa & Matsu'ura (2010)で推定された三次元広域応力場から期待される滑り方向とF-netメカニズム解を比較し、両者が概ね30度以内で一致することを見出した。本年度は、より小さな地震についての検証のために、Uchide (2020)の微小地震のメカニズム解カタログを用いて同様の調査を行った。最近起きた大地震の影響を受ける地域以外では、概ね30度以内で一致したが、小さい地震ほどミスフィット角が大きくなる傾向が見い出された。一つの解釈として、小規模地震ほどその滑り方向に短波長の応力不均質を反映しているという可能性が考えられる(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13], 石辺ら, 2022b)。

## ○地震の周期性

繰り返し地震は周期性があることがよく確認できているため、ゆらぎを考慮した更新過程での確率予測実験が行われてきた。しかし、東北地震でステップ的に増加した背景滑り速度の長期的な減衰の影響で、繰り返し地震の予測実験が一時不可能になっていたが、2020年度に報告したように、非定常更新過程モデルの導入によって再開できた(野村・田中, 2021)。本年度は、2014-2020年の発生データから作成した相対的な応力蓄積率の時空間変化のスプライン関数を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して2020年中の四半期毎の繰り返し地震発生確率を予測した。発生実績と比較したところ、ポアソン過程に比べて有意に高い予測性能が示された(図9, 東北大学理学研究科[課題番号:THK\_09], 野村・他, 2022)。

繰り返し地震がなぜ良好な周期性を示すかは、地震の可予測性の問題に重要なヒントと考えられ、繰り返し地震の破壊域内に階層的な強度構造が示唆されている(e.g., Ide, 2019)。2021年3月と5月に宮城県牡鹿半島沖で発生したMw7.0とMw6.7のプレート境界型地震の破壊過程と周辺の地震の震源分布を調べたところ、2021年3月Mw7.0の地震が、東北沖地震後に出現したMw5-6の準繰り返し地震の震源から開始したこと、Mw5-6準繰り返し地震の震源域の内部で更に小さい繰り返し地震が複数発生していたことが分かった(図10, 東北大学理学研究科[課題番号:THK\_09], Yoshida et al., 2022)。一方、



2015年5月に宮城県気仙沼沖で発生した Mw6.8 の地震は、2002年、2011年3月、2011年5月、2012年、2020年に Mw6.0-6.4 の地震と同じ地震性パッチを破壊していたが、2015年の場合だけ、隣接する同等サイズのパッチをも破壊していたことがわかった（東北大学理学研究科[課題番号：THK\_09]，Yoshida，2023）。

活断層における大地震の発生確率の評価方法の一つは、その発生にある程度の周期性を期待して、平均再来間隔と最新大地震からの経過時間を BPT モデルに代入して求めることであり、地震調査研究推進本部による評価では、再来間隔のゆらぎパラメタ AP を長期履歴のよくわかった4つの大きな断層のデータから 0.24 としている。AP の値は予測確率に大きく影響する。そこで、繰り返し相似地震の最新のカタログ(Igarashi，2020)を用いて AP を求めたところ、平均値は 0.20 と地震調査研究推進本部が仮定している値に整合的だが、再来間隔が長いものほど AP が小さくなる傾向が見つかった（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_13]，石辺・松浦，2022）。

### ○ETAS による地震発生予測

地震活動に基づく短期的地震発生確率予測の手法として、ETAS モデルは最もよく確立されたものである（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_13]，岩田，2022；Zhuang，2022）。将来的な社会実装を検討するために、気象庁震源を自動取得し、HIST-ETAS モデルによる発生確率の空間分布を常時更新、その結果を柔軟な GUI によって指定できる条件で地震活動等と重ねた地図を取得するシステムはほぼ完成し、安定的に運用できるようになった（図 11，東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_13]）。

一方で、ETAS モデルそのものの高度化も進めている。大きめの地震の発生など、ある時期を境に ETAS モデルのパラメタが変化する例は多く知られている。ルーチン的な運用のためには、このような変化を準リアルタイムで自動検出し、変化前と変化後のパラメタを自動で決めなおして運用を継続する必要がある。本年度、データに適切な個数の変化点を見付ける決定木アルゴリズムを開発した。M5.5-6.5 の規模が比較的大きめの地震 5 個を含む 2005-2017 年のイタリア中央アペニン地方のカタログに適用したところ、2016 年の M6，2017 年の M5.5 の少し後に変化点があると判定され、そこで背景地震レートが大きく変わったことが見い出された。また、主要な活動域の場所にも対応した変化が見られた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_13]，Benali et al.，2022）。高緯度地域、あるいは世界規模での ETAS 解析を適切に行えるよう、球面幾何を考慮した得た ETAS モデル(SETAS)を作り、FORTRAN のプログラムパッケージを作成した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_13]，Xiong and Zhuang，2023）。

### ○トリガリング

余震活動が、静的および動的応力におよぶトリガリングであることは広く認められている。例えば、南カリフォルニアの先行研究で、熱流量が高い地域ほど余震の生産性が低いことが示されている(Yang and Ben-Zion，2009；Enescu et al.，2009)し、日本でも、火山地域では動的トリガリングが圧倒的に起きやすいことがよく知られている。このようなトリガリング敏感性に影響する地学的特徴を見出すために、本年度は 2000 年以降に日本内陸でおきた 20 km 以浅 M5.5 以上の地震 18 個の余震活動パラメタを求め、防災科

学技術研究所が所有する地殻熱流量データ (Matsumoto, 2007) と比較した。その結果、有意な相関は認められなかった。一方で、南カリフォルニアと比べて ETAS のアルファ値が低い傾向にあり、日本の方が群発的な活動が多い可能性が示唆された。また、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生前の東北日本では、大森・宇津則の余震生産性が比較的高かった。これは解析に用いた地震群の本震が逆断層であることや断層系が複雑なことと関係しているのかもしれない(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13], Enescu and Furuya, 2022)。

### (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。

#### ○複数項目による経験的地震発生予測

大地震発生確率を評価する直感的な方法として、過去の地震活動からの時空間距離をもとに推定する方法 (Proximity-to-Past-Earthquakes, PPE モデル, Jackson and Kagan, 1999) と、長期滑りレートの高い活断層からの空間距離をもとに推定する方法 (Proximity-to-Mapped-Faults, PMF モデル) が考えられる。これらの方法、および、両者の荷重平均を用いる Proximity-to-Known-Sources (PKS) モデルを四川-雲南地方について作り、M6 以上の地震の発生確率を計算して実際におきた M6 以上の地震 14 個と比べて成績を評価した。どのモデルもランダム予測に対しては 1 を超える確率利得を示したが、PKF はぎりぎり 1 を超える程度であった。最もよかったのはハイブリッド方式の PKS である (図 12, 東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13], Zhang et al., 2023, in press)。

#### ○前震識別

野村・尾形の前震識別モデルは、任意の地震群内のマグニチュード差や時空間的距離に着目して、30 日以内に現時点での群内の最大地震より大きな地震が起きる確率を経験的に評価するもので、地域性だけに基いて予測した場合より性能が高いことが示されている(野村・尾形, 2018)。この前震識別モデルの具体形はロジスティック回帰で作ったものだったが、今年度、ニューラルネットワークやランダムフォレストなど様々な機械学習手法でこのモデルを作ってみた。それらは、野村・尾形(2018)のオリジナルモデルより性能が悪かったが、アンサンブル学習を導入して複数の機械学習手法を組合わせた場合には、前震識別精度を野村・尾形(2018)より僅かながら向上させることができた(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13], 鈴木・野村, 2022)。

#### ○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の波形比較を行って微小な相似地震を網羅的に検出する必要がある。波形の相互相関関数を用いた方法では計算時間がかかりすぎて実行困難であるために、昨年度までに波形の情報量を削減するハッシュ関数を用いる方法を提案したが、相互相関関数に比べれば偽陽性・偽陰性共に多く、少なくともベンチマークとして相互相関関数による検出を行なう必要がある。そこで、本年度は、連続波形から切り出した全ての固定長の窓に対し、Fourier スペクトルを事前に計算しておき、それら同士の積の Fourier 逆変換を計算して相互相関関数を求めるコードを開発・実装し、100 Hz の波形 15 チャンネル(5 観測点の 3 成分)に相当するデータであっても、2 週間分の連続波形を 5 時間程度で処理できることがわかった。このアルゴリズムを、大阪府北部の地震(2018 年 6 月 18 日 07 時 58 分, Mj6.1)発生時を含む 10 日間の Hi-net 交野観測点と久御山観測点(震央距離 10-12 km)の 3 成分速度波形に適用したところ、気象庁カタログに未記載の地震によるものと見られる波形を複数発見できた(図 13, 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) イベントが前震的に起きることがあるが、その発生位置と断層面の空間的な関係を調べるためには、AE 震源の相対的な分布だけでなく、絶対位置を精度よく知る必要がある。そこで、沈み込むスラブ内浅部の温度圧力条件下での実験が可能なマルチアンビル型装置を用いた高圧試験における震源決定精度の評価を行った。マルチアンビル型高圧発生装置は固体媒体によって圧力をかけるため、試料に直接 AE センサを貼り付けることはできず、圧媒体の外側に配置される 6 個のアンビル背面に貼り付けて計測する。すなわち、AE シグナルは試料内部、圧媒体、アンビルを伝播してから記録される。また、試料の大きさが直径 5 mm 弱、高さ 10 mm 弱と非常に小さいため、試料の大きさ、すなわち AE の震源域に対してトランスデューサ受感面の大きさが無視できない。これらの影響を調べるために、仮想震源をコンピュータ内で再現してその計算走時を利用して絶対震源位置の推定精度評価を実施した。仮想震源を試料内部に配置させ、試料、圧媒体、アンビルの 3 層構造を仮定し、さらにトランスデューサは直径 6 mm に設定したうえで、受感面の中で最も早く波が届く点までの走時を計算した。計算走時に乱数的な読み取り誤差を与えて到達時刻データとして、受感面中心を受振点座標として、また構造を単純化させた一様構造を仮定して震源決定を実施した。適切な弾性波速度を与えることができた場合には、読み取り誤差がなければ、震源位置のずれは約 0.01 mm 以内と無視できるほど小さかった。これはトランスデューサを試料から 20 mm 近く離れた位置に配置していることで受感面の大きさの影響が低減されていることに起因する。 $\pm 0.1$  マイクロ秒以内の一様乱数ノイズを計算走時に加算した場合には、 $0.5 \pm 0.5$  mm 程度のずれが発生した。このことは、de Ronde et al. (2007) の先駆的研究のサンプリング速度(10 Msps)では不十分であり、10 Msps がかつ、高周波まで受感できるトランスデューサを用いた計測が必須であることを示している(図 14, 立命館大学[課題番号: RTM\_02], 川方・大内, 2022)。

### ○複合的なメカニズムによる前震活動

2013年2月25日に発生した栃木県北部地震 M6.3 の前震活動を再解析した。本震発生前後に発生した地震 1193 個に対して波形相関による相対走時差データを用いて震源を再決定し、これらをテンプレートとして 2013 年 1 月-2 月の連続波形記録からイベント検出を行った結果、合計 15786 個の地震を検出した。前震活動は、本震の約 1 箇月前から発生数が徐々に増え、数日前に発生率が一時的に増加し、約 1 時間前にはさらに活発になった。このように、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確認された。また、本震約 1 時間前に M3.6 の地震が発生して以降は、前震活動域が本震の断層面の走向方向に加えて深さ方向にも拡大した。活動域の拡大速度は約 10 km/日で拡散的な様式を示した。時空間スケールは異なるが、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（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]）。

### ○ふつうの地震活動

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-2020 年 8 月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、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ことを昨年度報告した。本年度は、この手法で「ふつうの地震活動」とされたものについて、その全数からなる母集団の規模別頻度分布を定式化するとともに、活動指標の時間変化を評価するときに解析される典型的な 50-100 イベント程度から得た指標値 ( $b$  と  $\eta$ ) のみかけのゆらぎの意義を検討した。母集団の頻度分布は、完全な GR 則 ( $b = 1$ ,  $\eta = 2$ ) よりは少し勾配がゆるく、また、僅かに上に凸 ( $b = 0.9$ ,  $\eta = 1.8$ ) であり、Lomnitz-Adler and Lomnitz (1979) の式 (LL 式) でよくフィットされる。これに対して、小集団から求めた  $b$  値は、最尤推定値 ( $b = 0.9$ ) は正しいものの、 $\pm 0.3$  程度ゆらいでみえるが、これはサンプル数が少ないことによる影響が大きく、LL 式を用いたシミュレーションによって、ふつうの地震活動における  $b$  値のゆらぎは  $\pm 0.1$  程度であると推定された。一方、 $\eta$  値については、Utsu (1988) が指摘しているように、サンプルが少ないと最頻値すら過小評価される傾向がある。また、みかけのゆらぎも大きい (1.4-2.2 程度) が、これもサンプル数が少ないことによる影響が大きく、LL 式を用いたシミュレーションから推定した  $\eta$  値の真のゆらぎは、ふつうの地震活動においては 1.7-1.9 程度である（気象庁[課題番号：JMA\_01]，Nagata et al., 2022）。

### ○前震以外の地震活動異常

地震活動の長期静穏化が千島の巨大地震に対する中期的先行現象である可能性が指摘されている (e.g., Katsumata & Nakatani, 2021)。本年度は、1969, 1975 年の北海道東方沖地震の震源域で 2003 年 2 月に群発地震があり、その後 16 年以上にわたり顕著な長期静穏化が継続している (Katsumata & Zhuang, 2020) ことに着目して、長期静穏化現象のメカニズムについて一つの仮説を提案した。津波地震であった 1975 年の震源域 (海溝軸近くでゆっくり滑りしやすい物性) での SSE が、その down-dip 側のプレート境界にお

ける 2003 年 2 月の群発地震活動を誘発したものだと考えれば、この SSE は、同時に down-dip 側のスラブ内に圧縮力を加えるため、太平洋スラブ内部で発生していた down-dip-extension 型の地震活動が減少することが期待され、観察された静穏化を説明する。このような見方をすると、2019 年 12 月に同じ場所でおきた群発地震活動も 2003 年と同様、1975 年の震源断層面上における SSE が要因と推察される（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_13]，勝俣，2022）。

## ○地殻流体

地殻流体に見られる変動もしばしば地震に先行することがある。同一地点に深さの異なる 3 つの井戸を設置し、地下水位・歪・傾斜を観測する産総研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。本年度は和歌山県日高郡日高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]）。

大気中ラドン濃度については、令和 4 年度までに全国 25 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。

1995 年 1 月 17 日の兵庫県南部地震の前 1-2 箇月に、震源域の東方、芦屋断層上にある神戸薬科大学で測定した大気中ラドン濃度に平年のパターンから大きく外れた顕著な変動があったことはよく知られている。本年度は、同データの日周変化パターンを解析した。一般的な日変動のパターンは、日没から日の出までの気温低下時には、空気の安定度が増加することで測定場所付近の地下からのラドン散逸を反映してラドン濃度が上昇し、逆に、日の出以降の気温が上昇時には、空気の混合によってラドン濃度が下降するというものであり、実際 1994 年の 10 月から 12 月のデータもこの日周変化に従っていた。しかし、1995 年 1 月 1 日から 1 月 16 日の地震直前期間においては、気温下降時のラドン濃度の上昇は平年より小さく、測定場所付近のラドン散逸が減少していたと思われる。また、気温が上昇する 7 時から 12 時にかけて、ラドン濃度は減少せず、異常に高い値に留まった。一方、ラドン濃度の日最低値からは、より広域的には 12 月以降は平年に比べて顕著にラドン濃度が高い状態が続いていたことが示唆される。両者を考えあわせると、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、混入してきたと考えられる（東北大学[課題番号：THK\_10]，西尾・他，2023）。

また、大気中ラドン濃度変動を機械学習(ランダムフォレスト)によって検出することを試みた。福島県立医科大学(平常時：2002 年から 2007 年を学習し、2008 年から 2011 年を予測)では、東北地方太平洋沖地震(2011 年 3 月 11 日)前にあたる 2011 年において予測値と観測値から求めた決定係数の値が顕著に低く、また 2010 年 10 月、11 月に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。一方、神戸薬科大学(平常時：1984 年から 1988 年を学習し、1990 年から 1995 年を予測)では、1994 年 12 月に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（東北大学[課題番号：THK\_10]，土谷・他，2023）。

2011 年東北地方太平洋沖地震前の異常の有無を調べることを目的として、宮城県県政情報センターに所蔵されている行政資料から、宮城県水産技術総合センター内水面水産試験場(大和町吉田字旗坂地内)の伏流水と河川水の水温データと、宮城県栽培漁業センター(石巻市谷川浜字前田 22)の地下水水温データ(1 日 1 回計測)をデジタル化した。いずれのデータに

においても、2011年東北地方太平洋沖地震前の顕著な異常は見られなかった（公募研究，東京学芸大学[課題番号：KOB008]）。

2022年3月16日，福島県沖を震源とする最大震度6強（M7.4）の地震が発生した（気象庁，2022）。一方，この地震の前に東京と大阪でほぼ同時期にボラが大量死し，インターネット上では，この地震の前兆ではないかとする書き込みが散見された。3月16日福島県沖の地震の前兆ではないか，とされたボラ大量死は，3月6日東京都大田区の呑（のみ）川で約1000匹が死亡した件と，3月7，8日の両日に大阪市の平野川と第二寝屋川であわせて約7500匹が大量死した件である（産経新聞社，2022；中日新聞東京本社，2022）。そこで，ボラの大量死と，一般の人がその発生をより意識しやすい震度を基準として，最大震度6強以上の地震との関係を調べた。調査期間は，気象庁の震度階級が現在の10階級になった1996年4月1日から2022年6月30日とし，この間に該当する地震は21個あった。ボラの大量死は，概ね100以上の場合を大量死とし，過去の新聞記事およびインターネット検索から拾い上げた。また，複数の魚種が示された記事については，ボラが先頭に示されているものだけを選んだ。その結果，ボラ大量死は37件となった。関連を疑う先行時間を，Orihara et al. (2019)にならって，大量死から30日後まで，大量死の場所から地震までの距離を，2022年3月のボラ大量死（東京都大田区）にあわせて半径300 km以内とすると，ボラ大量死から30日後までに半径300 km以内で震度6強以上の地震が発生したケースは，2022年3月6日東京都大田区ボラ大量死と2022年3月16日福島県沖の地震のみであった（図15，公募研究，東京学芸大学[課題番号：KOB008]，織原，2022a）。

同様にネットで話題になった例として，2023年2月6日未明にトルコとシリアの国境付近で発生したM7.8の地震の18日前にトルコ・ブルサ県（震源から約700 km）で出現していた赤みを帯びたレンズ状の雲が，前兆だったのではないかという話がある。この件に関し，Yahoo! ニュースに「トルコ大地震で目撃“地震雲”の正体に気象学者・荒木健太郎氏「雲は地震の前兆にはなりません」との談話が発表されたが，この記事に対するヤフーコメントの批判的な意見は，荒木氏の断定的な否定に対して，「なぜ“ない”言い切れるのか？」といった内容のものが目立った。ないことを証明することは，悪魔の証明などと言われることもあり，大変困難である。たとえ科学的に正しいといえる内容であっても，断定的に「ない」と否定してしまうと反発を招く恐れがある。表現の仕方には注意を払う必要がある（公募研究，東京学芸大学[課題番号：KOB008]）。

## ○電磁気的な地震先行現象

東北地方太平洋沖地震に関して，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。異常の開始は地震の41.5分前であり，日本の異常開始時刻と非常に近く，また，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している（千葉大学[課題番号：CBA\_01]，He et al., 2022）。

一方，同地震数日前の3月8日昼頃から3月9日に昼頃にかけて，東北地方上空で電子密度の負の異常があったことが先行研究(Hirooka et al., 2016; Liu et al., 2018)で指摘されているが，そこで用いられた非線形トモグラフィー手法では，そもそも電子密度の低い夜

間も異常が継続していたかはわからなかった。そこで、昨年度報告した改良線形正則化法 (Song et al., 2021) を適用したところ、震央上空 250 km を中心に電子密度が減少する領域が、3月8-9日に20時間以上、夜間も含めて安定的に存在していたこと、その周囲では電子密度が増加していたことがわかった (図 16, 千葉大学[課題番号: CBA\_01])。

### ○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 変動についても事例解析を進めた。上述 Song et al. (2021) の例からもわかるように、これらのメカニズムや大きさがはっきりした事象による TEC 変動は電離圏にあらわれる先行現象の解析の基礎となると同時に、災害の早期警報に役立つと期待される (千葉大学[課題番号: CBA\_01], 鴨川, 2022)。

2022年フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の大規模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、電離圏擾乱の伝播速度は大気ラム波と同じ速さであり、対流圏からの上方へのエネルギー漏洩が起源であることを示唆した。また電離圏擾乱は少なくとも4回日本上空を通過したことを確認した (千葉大学[課題番号: CBA01], Heki, 2022; Muafiry et al., 2022)。

また、トンガの大規模噴火により、2022年1月15日04:05UTCに地表面近くにて発生した顕著な移動性大気擾乱 (TAD) について、台湾に設置されたフラックスゲート磁力計、気圧計、潮位計およびイオノゾンデデータを調査した。地表付近の大気圧は11:30UTCに上昇し始め、11:50UTCにピークに達した。海面変動は12:00UTCに始まり、14:00UTC以降に顕著になった。電離層は12:00UTCに突如上昇し、14:30UTCに最高高度に達し、東向きの電場が出現したことを示唆した。さらに、14:00-15:00UTCの間には、TADによって生成された東向きのダイナモ電場と調和的な変化が検知された。津波による TAD 変動の解析にも有効な情報が得られたといえる (千葉大学[課題番号: CBA\_01])。

また、先述の改良線形正則化法 (Song et al., 2021) によるトモグラフィーを用いて台風によって励起された電離圏擾乱を解析した結果、擾乱は大気重力波によって励起され、台風の強さだけでなく、中性風の重要性 (中性風速度が10-20 m/sで弱い条件であること) を初めて観測学的に示した (千葉大学[課題番号: CBA\_01], Song et al., 2022)。

### これまでの課題と今後の展望

スロー地震に関しては、様々な時空間スケールにおける相互作用が見えてきて、物理的な解釈もなされている。現実のプレート境界の不均質の理解も進んでおり、モニタリング・予測に必要なデータ同化手法も着実に進展しており、物理モデルに基づくスロー地震の予測は、もうすぐ一定程度には成功すると期待できる。通常地震についても、複数のスケールでのアスペリティを取り込んで、南海トラフで見られる複雑さと周期性の両方を再現することに成功しており、また、階層的破壊の実例観察も充実してきた。これらの物理的理解は、自然地震の可予測性を支配する本質的な要素を備えており、経験則の追究を含めて新たな展開が生まれるかもしれない。経験的な手法による予測に関しては、洗練された統計モデルによる予測が着実に進むとともに、機械学習等の利用が始ま

った。まだ、華々しい成果はないが、様々な面から考えて機械学習が経験的な地震予測の性能を大きく改善する可能性は高いだろう。一方で、予測の大前提である、地震カタログ等の基礎データの充実における機械学習の威力はまざまざと示された。

## 成果リスト

- Ariyoshi, K., 2022, Extension of aseismic slip propagation theory to slow earthquake migration, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 127, 7, e2021JB023800, 10.1029/2021JB023800
- Benali, A., J. Zhuang, A. Talbi, 2022, An updated version of the ETAS model based on multiple change points detection, *Acta Geophys.*, 70, 2013-2031, doi:10.1007/s11600-022-00863-y
- Chen, H., P. Han, K. Hattori, 2022, Recent Advances and Challenges in the Seismo-Electromagnetic Study: A Brief Review, *Remote Sensing*, 14(22), 5893, doi: 10.3390/rs14225893
- Chujo, N., H. Hirose, T. Kimura, 2022, Changes in long-term activity patterns of interplate slip from short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula, Japan, *JpGU Meeting 2022*, SCG44-P25
- 土井一生, 小原一成, 王功輝, 釜井俊孝, 千木良雅弘, 2022, 愛媛県久万高原町南東部において観測される繰り返し地震波形の時間分布, *JpGU Meeting 2022*, SSS13-05
- Enescu, B., K. Furuya, 2022, Investigation of a possible relationship between aftershock parameters for sequences occurred inland Japan after 2000 and crustal heat flow, *JpGU Meeting 2022*, SSS05-P01
- Enescu Bogdan, 下條賢悟, 八木勇治, 武田哲也, 2022, 稠密地震観測網で捉えられた長野県北部の地震の前駆過程, *地震ジャーナル*, 74, 10-17
- 後藤悠希, 本島邦行, 2022, MF帯放送波の伝搬異常と地震発生との予測を見据えた関連性解析, *日本地震予知学会第9回学術講演会*, 22-05
- Hamama, I., M. Yamamoto, M.N. ElGabry, N.I. Medhat, H.S. Elbehiri, A.S. Othman, M. Abdelazim, A. Lethy, S.M. El-hady, H. Hussein, 2022, Investigation of near-surface chemical explosions effects using seismo-acoustic and synthetic aperture radar analyses, *J. Acoust. Soc. Am.*, 151(3), 1575, doi: 10.1121/10.0009406
- He, L., L. Wu, K. Heki, C. Guo, 2022, The conjugated ionospheric anomalies preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Front. Earth Sci.*, 10, 850078, doi: 10.3389/feart.2022.850078
- Heki, K., 2022, Ionospheric signatures of repeated passages of atmospheric waves by the 2022 Jan. 15 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption detected by QZSS-TEC observations in Japan, *Earth Planet. Space*, 74:112, doi: 10.1186/s40623-022-01674-7
- Heki, K., M.S. Bagiya, Y. Takasaka, 2022, Slow fault slip signatures in coseismic ionospheric disturbances, *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2022GL101064, doi: 10.1029/2022GL101064



- Heki, K., T. Fujimoto, 2022, Atmospheric modes excited by the 2021 August eruption of the Fukutoku-Okanoba volcano, Izu-Bonin Arc, observed as harmonic TEC oscillations by QZSS, *Earth Planet. Space*, 74:27, doi: 10.1186/s40623-022-01587-5
- 平松祐一, 2023, 相対重力計 gPhoneX による連続観測で捉えた石垣島のスロースリップ域における重力異常の短期的なふるまい, 修士論文, 東京大学大学院地学系研究科
- 平松祐一, 田中愛幸, 小林昭夫, 2022, スロースリップ信号の検出に向けた石垣島地方気象台における連続重力データの解析 (第二報), *日本測地学会第 138 回講演会*, 61
- Hirano, S., H. Kawakata, I. Doi, 2022, A matched-filter technique with an objective threshold, *Sci. Rep.*, 12, 22090, doi: 10.1038/s41598-022-25839-2
- 弘瀬冬樹, 小林昭夫, 前田憲二, 2022, 長期的スロースリップイベント時に上昇する豊後水道の深部微動の潮汐相関, *日本地震学会 2022 年度秋季大会*, S09P-03
- Hirose, F., K. Maeda, K. Fujita, A. Kobayashi, 2022a, Simulation of great earthquakes along the Nankai Trough: reproduction of event history, slip areas of the Showa Tonankai and Nankai earthquakes, heterogeneous slip-deficit rates, and long-term slow slip events, *Earth Planet. Space*, 74, 131, doi:10.1186/s40623-022-01689-0
- Hirose H., N. Chujo, T. Kimura, 2022b, Periodic changes in activity pattern of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula, Japan, *International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022*, P048
- 保坂勇人, 山崎政彦, 鴨川仁, 飯田智之, 本山真, 武田龍亮, 大谷響心, 小林伶士, 2022, 地震に先行する電離圏変動現象の観測衛星 Prelude の地震検知数について, *第 66 回宇宙科学技術連合講演会*, 3H12
- Igarashi, T., A. Kato, 2022, Spatiotemporal Changes of Inter-plate Aseismic Slip before and after Megathrust Earthquakes Determined from Repeating Earthquakes Recorded by the Japanese Seismic Network, *AGU Fall meeting*, S22C-0183
- Iida, T., M. Yamazaki, M. Kamogawa, 2022a, Development of a Prelude Satellite Equipped with Electric Field and Plasma Measurement Sensors Based on Statistical Evaluation of Seismic Precursors Using Artificial VLF Radio Waves Obtained from In-Orbit Observations, *Proceedings of AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 1-7
- Iida T., M. Yamazaki, M. Kamogawa, 2022b, Statistical Evaluation of Seismic Precursors by Artificial VLF radio waves using on-orbit Data, *33rd International Symposium on Space Technology and Science*, 2022-f-22
- 稲西輝紀, 川方裕則, 平野史朗, 中山雅之, 2022, 円筒形試料内で発生する AE 震源の絶対位置精度を評価するための弾性波透過実験, *日本地震学会 2022 年度秋季大会*, S12-05
- 石辺岳男, 松浦律子, 2022, Aperiodicity Parameters Estimated From the Recent Repeating Earthquake Catalogs and Implication for Seismic Hazard Assessment, *Japan Geoscience Union Meeting 2022*, SSS11-06
- 石辺岳男, 松浦律子, 佐竹健治, 2022a, 発震時刻の無作為 (ランダム) 性から探る有感記録の完全性, *第 39 回歴史地震研究会*
- 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, in press

- 石辺岳男, 寺川寿子, 橋間昭徳, 望月将志, 松浦律子, 2022b, 広域応力場から Wallace - Bott 仮説を用いて断層すべり角を推定する手法の検証ー微小地震発震機構解カタログを対象にー, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, S08-15
- Ishiyama, R., E. Fukuyama, and B. Enescu, 2022, What do the time-variable friction parameters in laboratory experiments tell us about sliding dynamics?, JpGU Meeting 2022, SSS07-14
- 岩田貴樹, 2022, ETAS モデル: クラスタ性を表すための点過程モデル, 第 13 回横幹連合コンファレンス
- Jamali Hondori, E., J.-O. Park, 2022, Connection between high pore-fluid pressure and frictional instability at tsunamigenic plate boundary fault of 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Sci. Rep.*, 12, 12556, doi:10.1038/s41598-022-16578-5
- 鴨川仁, 2022, 電離圏変動検知による早期津波予測の可能性, 津波とその予測 II, 月刊地球, 44(9), 440-448
- Kato, A., A. Takeo, K. Obara, 2023, Striations of tectonic tremor and implication for fluid channels based on a dense seismic array in western Shikoku, Japan, 11th ACES (APEC Cooperation for Earthquake Science) International Workshop
- 勝俣啓, 2022, 1975 年北海道東方沖の津波地震の震源域で発生したスロースリップによって誘発された群発地震と地震活動静穏化, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, S-SS11
- 勝間田明男, 島淳元, 西宮隆仁, 2022, 能登半島で発生している群発地震について, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, S09P-07
- 川方裕則, 大内智博, 2022, GPa オーダーの高圧試験時に発生する AE の震源決定精度の評価, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, S12-04
- 川本奈々帆, 齋藤華子, 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, ラドン測定 2: 活性炭捕集器によるスクリーニング測定, 環境放射能研究会, 3 月 6 日~3 月 8 日, 茨城県つくば市, 高エネルギー加速器研究機構
- 木口努, 今西和俊, 松本則夫, 2022a, 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果 (2021 年 11 月~2022 年 4 月), 地震予知連絡会報, 108, 306-307
- 木口努, 今西和俊, 松本則夫, 2023a, 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果 (2022 年 5 月~2022 年 10 月), 地震予知連絡会報, 109, 319-320
- 木口努, 松本則夫, 北川有一, 板場智史, 落唯史, 佐藤努, 矢部優, 2022b, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果 (2021 年 11 月~2022 年 4 月) (65), 地震予知連絡会報, 108, 299-305
- 木口努, 松本則夫, 北川有一, 板場智史, 落唯史, 佐藤努, 矢部優, 2023b, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果 (2022 年 5 月~2022 年 10 月) (66), 地震予知連絡会報, 109, 314-318
- 木村久夫, 小林昭夫, 山本剛靖, 露木貴裕, 2022a, 地殻変動データの指標化に向けた試行, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, S03P-01
- 木村亮太, 安藤芳晃, 服部克巳, 早川正士, 2022b, WLP-FDTD 法を用いた地殻変動に伴う ULF 帯電磁放射の波源電流強度推定の高精度化, *J. Atmospheric Electricity*, 41(2), 52-57, doi: 10.1541/jae.41.52

- 気象研究所, 2022a, 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, 108, 439-441
- 気象研究所, 2022b, 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, 108, 24-28
- 気象研究所, 2022c, 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, 108, 442-445
- 北川有一, 板場智史, 松本則夫, 落唯史, 木口努, 矢部優, 2022a, 紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2021年11月～2022年4月), 地震予知連絡会報, 108, 446-456
- 北川有一, 板場智史, 松本則夫, 落唯史, 木口努, 矢部優, 2023a, 紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2022年5月～2022年10月), 地震予知連絡会報, 109, 457-467
- 北川有一, 松本則夫, 佐藤努, 板場智史, 落唯史, 木口努, 矢部優, 2022b, 近畿地域の地下水位・歪観測結果(2021年11月～2022年4月), 地震予知連絡会報, 108, 457-460
- 北川有一, 松本則夫, 佐藤努, 板場智史, 落唯史, 木口努, 矢部優, 2023b, 近畿地域の地下水位・歪観測結果(2022年5月～2022年10月), 地震予知連絡会報, 109, 468-471
- 小林昭夫, 木村一洋, 2022, 発生した地震の余効変動を除去した GNSS 非定常変位の検出, JpGU meeting 2022, SGD01-P05
- Koge, H., J. Ashi, J.-O. Park, A. Miyakawa, S. Yabe, 2022, Simple topographic parameter reveals the along-trench distribution of frictional properties on shallow plate boundary fault, *Earth Planet. Space*, 74, 56, doi:10.1186/s40623-022-01621-6
- Kojima, S., R. Niwa, N. Iwamoto, H. Kaneda, K. Hattori, K. Komura, T. Yamazaki, K. Yasunaga, 2022, Development History of Deep-Seated Gravitational Slope Deformation (DSGSD) in the Kanmuriyama Area, Central Japan, *J. the Japan Society of Engineering Geology*, 63(1), 2-12, doi: 10.5110/jjseg.63.2
- 栗山あかね, 樋口舞, 西村夏樹, 安岡由美, 長濱裕幸, 武藤潤, 細田正洋, 床次眞司, 大森康孝, 飯本武志, 向高弘, 2023, ラドン測定1:排気モニタによる測定,環境放射能研究会, 3月6日～3月8日, 茨城県つくば市, 高エネルギー加速器研究機構
- Minamoto, Y., M. Kamogawa, A. Kadokura, M. Sato, S. Omiya, 2022, An alternative methodology of fair-weather identification for ground-based measurement of AEF at the polar region, *J. Geophys. Res. Atmos.*, e2021JD035732, doi: 10.1029/2021JD035732
- 百本直輝, 津村紀子, 2022, S-net データを用いた福島県沖の震源決定への観測点補正值の影響, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, S19P-03
- Motojima, K., N. Takezawa, 2022, Statistical relationship between earthquakes and anomalous propagations on MF band at sunset time, JpGUnion Meeting 2022, MIS10-06
- Muafiry, I.N., I. Meilano, K. Heki, D.D. Wijaya, K.A. Nugraha, 2022, Ionospheric disturbances after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption above Indonesia from GNSS-TEC observations, *Atmosphere*, 13, 1615, doi: 10.3390/atmos13101615
- 永井あすか, 馬場久紀, 笠谷貴史, 横山由香, 中尾風佐, 佐柳敬造, 大上隆史, 西宮隆仁, 坂本泉, 阿部信太郎, 篠原雅尚, 2022a, Exploration of Turbidity Current occurred in northern Suruga Bay by Typhoon No. 24 in 2018. -Traces Turbidity Current survey by R/V Shinsei Maru KS-21-1 Cruise-, JpGU Meeting 2022, SCG48-06

- 永井あすか, 西宮隆仁, 中尾風佐, 馬場久紀, 長尾年恭, 2022b, 駿河湾の海底地震計で観測される波形の種類について—巨大地震震源域での低周波微動検出の試み—, 日本地震予知学会 2022 年度学術講演会, 22-02
- 永田広平, 溜渕功史, 弘瀬冬樹, 野田朱美, 2022, 統合的な地殻活動指標の構築に向けて—“ふつう”の地震活動の特徴に基づく異常度評価—, JpGU Meeting 2022, SSS11-P03
- Nagata, K., K. Tamaribuchi, F. Hirose, A. Noda, 2022, Statistical study on the regional characteristics of seismic activity in and around Japan: frequency-magnitude distribution and tidal correlation, *Earth Planet. Space*, 74, 179, doi:10.1186/s40623-022-01722-2
- 直井誠, 2022, 走時の確率トレースを利用した深層学習による震源決定, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会
- 直井誠, 陳友晴, 有馬雄太郎, 2022, 深層学習を利用した室内水圧破碎誘発 AE のイベントカタログ作成, 日本地震学会 2022 年秋季大会, S21P-02
- Naoi, M., K. Imakita, Y. Chen, K. Yamamoto, R. Tanaka, H. Kawakata, T. Ishida, E. Fukuyama, Y. Arima, 2022, Source parameter estimation of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in the laboratory, *Geophys. J. Int.*, 231, 408-425, doi:10.1093/gji/ggac202
- Nickolaenko A.P., A.Y. Schekotov, M. Hayakawa, R. Romero, J. Izutsu, 2022, Electromagnetic manifestations of Tonga eruption in Schumann resonance band, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.*, 237, 105897, doi:10.1016/j.jastp.2022.105897
- Nishikawa, Y., M. Yamamoto, K. Nakajima, I. Hamama, H. Saito, Y. Kakinami, M. Yamada, T.C. Ho, 2022, Observation and simulation of atmospheric gravity waves exciting subsequent tsunami along the coastline of Japan after Tonga explosion event, *Sci. Rep.*, 12, 22354, doi: 10.1038/s41598-022-25854-3
- 西宮隆仁, 永井あすか, 中尾風佐, 馬場久紀, 小林昭夫, 溜渕功史, 2022, 駿河湾における OBS 観測の概要と観測記録への微動検出手法適用の試み, 2022 年度第 1 回「南海トラフ～南西諸島海溝の地震・津波に関する研究会」
- 西尾友克, 安岡由美, 長濱裕幸, 平野光浩, 武藤潤, 向高弘, 2023, ラドン測定 3 : 1995 年兵庫県南部地震前における気温を用いた変動解析, 環境放射能研究会, 3 月 6 日～3 月 8 日, 茨城県つくば市, 高エネルギー加速器研究機構
- 野田朱美, 2022, 測地データと地震データを用いた 3 次元モーメント密度分布のインバージョン解析, 震源インバージョンワークショップ 地震発生物理の包括的理解に向けた手法開発とその実践
- 野田朱美, 2023a, 力学的カップリングに基づくプレート境界大地震のシナリオ作成手法の開発, *Slow-to-Fast 地震学ニュースレター*, 2
- 野田朱美, 2023b, 南海トラフで将来発生するのはどんな地震?—プレート境界における地震シナリオ作成手法の開発—, 日本地震学会広報誌「なみふる」, 132, 6-7
- Noda, A., T. Saito, 2022a, Energy-based scenarios for Nankai trough earthquakes: The impacts of aseismic slip events on strain energy accumulation, *International Joint*

Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022

- Noda, A., T. Saito, 2022b, Energy-based scenarios for interplate great earthquakes taking aseismic slips outside seismogenic zone into account, JpGU Meeting 2022, SCG44-22
- Noda, A., T. Saito, 2022c, An Inversion Method to Estimate Mechanically Coupled Areas on the Plate Interface, AGU Fall Meeting 2022,
- 野田朱美, 齊藤竜彦, 2022, プレート境界の力学的カップリングの推定: 相模トラフ沿いプレート境界で発生する大地震の多様性, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, S08-19
- 野村俊一, 内田直希, 尾形良彦, 2022, レート間非地震性すべり速度の時空間変化を考慮した繰り返し地震の短期予測, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, S23-03
- 小原一成, 2022, 通常とは異なるスロー地震活動とは何か, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, S09-09
- 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, 2022, 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 (2021 年 11 月~2022 年 4 月), 地震予知連絡会報, 108, 232-298
- 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 5 月~2022 年 10 月), 地震予知連絡会報, 109, 255-313
- 小河勉, 2022a, 拡張村上モデルの導出, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, SEM16-12
- 小河勉, 2022b, 拡張村上モデルにもとづく流動電位起源静電磁場と重力異常・磁気異常の比較, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 152 回講演会, R003-P03
- 織原義明, 2022a, ボラの大量死と地震との関連性の検討, 東海大学海洋研究所研究報告, 44, 27-36
- 織原義明, 2022b, 海鳴りと地震・津波, 日本地震予知学会第 9 回学術講演会アブストラクト集, 22-14
- Panayotopoulos, Y., S. Abe, H. Baba, N. Nakao, T. Nishimiya, 2022, Report from 5 years Ocean Bottom Seismometer observations in Suruga Bay, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, S09P-16
- Petrescu, L., B. Enescu, 2022, Nearest-neighbour cluster analysis of intraslab seismicity in the Vrancea Seismic Zone, Romania, JpGUnion Meeting 2022, SCG43-03
- Petrillo, G., J. Zhuang, 2022, The debate on the earthquake magnitude correlations: a meta-analysis, Sci. Rep., 12, 20683, doi:10.1038/s41598-022-25276-1
- Saito, T., A. Noda, 2022, Mechanically Coupled Areas on the Plate Interface in the Nankai Trough, Japan and a Possible Seismic and Aseismic Rupture Scenario for Megathrust Earthquakes, J. Geophys. Res.:Solid Earth, 127, e2022JB023992, doi:10.1029/2022JB023992
- Sakamoto, R., Y. Tanaka, 2022, Frictional and Hydraulic Properties of Plate Interfaces Constrained by a Tidal Response Model Considering Dilatancy/Compaction, J. Geophys. Res.:Solid Earth, 127, e2022JB024112, doi:10.1029/2022JB024112
- Si, Z., J. Zhuang, C. Jiang, 2022, A Bayesian algorithm for magnitude determination by

- merging multiple seismic networks, *Chin. J. Geophys. (Acta Sin. Geophys.)*, 65(6), 2167-2178, doi:10.6038/cjg2022P0138
- Song, R., K. Hattori, X. Zhang, J.-Y. Liu, 2022, The Two-Dimensional and Three-Dimensional Structures Concerning the Traveling Ionospheric Disturbances Over Japan Caused by Typhoon Faxai, *J. Geophys. Res.:Space Physics*, 127(11), e2022JA030606, doi: 10.1029/2022JA030606
- 鈴木暁大, 野村俊一, 2022, アンサンブル学習を用いた前震活動の確率的識別モデル, 日本保険・年金リスク学会 第20回研究発表大会
- 高木涼太, 西田究, 2022, 常時微動トモグラフィーによる日本海溝・千島海溝沿い前弧海域下の3次元S波速度構造, 日本地震学会2022年度秋季大会, S22P-03
- Takagi, R., K. Nishida, 2022, Multimode dispersion measurement of surface waves extracted by multicomponent ambient noise cross-correlation functions, *Geophys. J. Int.*, 231, 1196-1220, doi:10.1093/gji/ggac225
- Takahashi, H., R. Hino, N. Uchida, T. Matsuzawa, Y. Ohta, S. Suzuki, M. Shinohara, 2022, Tectonic tremors immediately after the 2011 Tohoku-Oki earthquake detected by near-trench seafloor seismic observations, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 9, 66, doi:10.1186/s40645-022-00525-z
- Takemura, S., K. Obara, K. Shiomi, S. Baba, 2022a, Spatiotemporal Variations of Shallow Very Low Frequency Earthquake Activity Southeast Off the Kii Peninsula, Along the Nankai Trough, Japan, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 127, e2021JB023073, doi: 10.1029/2021JB023073
- Takemura, S., S. Baba, S. Yabe, K. Emoto, K. Shiomi, T. Matsuzawa, 2022b, Source characteristics and along-strike variations of shallow very low frequency earthquake swarms on the Nankai Trough shallow plate boundary, *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2022GL097979, doi:10.1029/2022GL097979
- Tamaribuchi, K., M. Ogiso, A. Noda, 2022, Spatiotemporal distribution of shallow tremors along the Nankai Trough, Southwest Japan, as determined from waveform amplitudes and cross-correlations, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 127, e2022JB024403, doi:10.1029/2022JB024403
- 田中昌之, 2022, 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率(2022), 地震予知連絡会会報, 108, 608-612
- 田中昌之, 小林昭夫, 2022, DASで捉えた人工振動の振幅について, 日本地震学会2022年度秋季大会, S02P-04
- Tanaka, Y., H. Sakaue, Y. Hiramatsu, 2022, Temporal gravity anomalies in long-term slow slip areas along the Nankai Trough and Cascadia, *International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022*, 0-30
- Tonegawa, T., R., Takagi, K. Sawazaki, K. Shiomi, 2023, Short-term and long-term variations in seismic velocity at shallow depths of the overriding plate west of the Japan Trench, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 128, e2022JB025262, doi: 10.1029/2022JB025262

- 土谷真由, 長濱裕幸, 武藤潤, 平野光浩, 安岡由美, 2023, 機械学習による地震活動に伴う大気中ラドン濃度の異常検知, 環境放射能研究会, 3月6日~3月8日, 茨城県つくば市, 高エネルギー加速器研究機構
- Ukawa, T., H. Hirose, 2022, Stress changes caused by Boso slow slip events inferred from seismicity data, JpGU Meeting 2022, SCG44-P24
- Xie, W., K. Hattori, P. Han, H. Shi, 2022, Temporal Variation of b Value with Statistical Test in Wenchuan Area, China Prior to the 2008 Wenchuan Earthquake, *Entropy*, 24(4), 494, doi:10.3390/e24040494
- Xiong, Z., J. Zhuang, 2023, SETAS: A Spherical Version of the Space-Time ETAS Model, *Seismol. Res. Lett.*, doi:10.1785/0220220198
- Xue, J., Q. Huang, S. Wu, T. Nagao, 2022, LSTM-Autoencoder Network for the Detection of Seismic Electric Signals, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 5917012, doi: 10.1109/TGRS.2022.3183389
- Yagi, Y., R. Okuwaki, B. Enescu, J. Lu, 2023, Irregular Rupture Process of the 2022 Taitung, Taiwan, Earthquake Sequence, *Sci. Rep.*, 13, 1107, doi:10.1038/s41598-023-27384-y
- Yamada, M., T.C. Ho, J. Mori, Y. Nishikawa, M. Yamamoto, 2022, Tsunami Triggered by the Lamb Wave From the 2022 Tonga Volcanic Eruption and Transition in the Offshore Japan Region, *Geophys. Res. Lett.*, 49(15), e2022GL098752, doi:10.1029/2022GL098752
- 山崎政彦, 2022, 地震先行電離圏変動現象検知のための CubeSat のフライト・モデル製作に向けて: 衛星バス・サブシステムの打ち上げ環境および宇宙環境適応試験, 第十二回気象文化大賞
- 柳原大輔, 山崎政彦, 鴨川仁, 飯田智之, 佐藤匠, 小林伶士, 田中勇夢, 山田啓侃, 岩田隆佑, 保坂勇人, 本山真, 2022, 地震に先行する電離圏変動現象の観測衛星 Prelude のエンジニアリングモデル開発, 第66回宇宙科学技術連合講演会, 3H11
- 安岡由美, 長濱裕幸, 平野光浩, 西尾友克, 2023, ラドン測定4: 気象データを用いた地震前のラドン異常の検出, 環境放射能研究会, 3月6日~3月8日, 茨城県つくば市, 高エネルギー加速器研究機構
- 吉田圭佑, 2022, 同一アスペリティで発生する地震破壊の多様性と共通点: 2015年宮城沖の Mw6.8地震と Mw6.0-6.4の準繰り返し地震, 日本地震学会2022年度秋季大会, S08P-03
- Yoshida, K., 2023, The Mw 6.0-6.8 quasi-repeating earthquakes off Miyagi, Japan with variable moment release patterns due to a hidden adjacent slip patch, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 128(2), e2022JB025654, doi:10.1029/2022JB025654
- Yoshida, K., T. Matsuzawa, N. Uchida, 2022, The 2021 Mw7.0 and Mw6.7 Miyagi-Oki earthquakes nucleated in a deep seismic/aseismic transition zone: Possible effects of transient instability due to the 2011 Tohoku earthquake, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 127, 8, doi:10.1029/2022JB024887
- 吉田圭佑, 松澤暢, 内田直希, 2022, The 2021 Mw7.0 and Mw6.7 Miyagi-Oki earthquakes, northeastern Japan, nucleated at a seismic/aseismic transition zone in the postseismic period of the 2011 M9 Tohoku earthquake, 日本地球惑星科学連合2022年大

会

- 吉田圭佑, 内田直希, 2022, 地震の破壊過程の複雑性の決定要因: 繰り返し地震と他の地震の比較からの示唆, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会
- 吉光奈奈, 川方裕則, 2022, 岩石圧縮試験を通じた異なる深さにおける地震活動特性の評価, 日本地震学会 2022 年秋季大会, S09-23
- Yu, F., E. Jamali Hondori, J.-O. Park, 2022, Pore-fluid pressure estimation for the Nankai Trough plate-boundary fault: Implications for shallow very low frequency earthquakes, JpGU Meeting 2022, S-CG44-28
- Zhang B., S. Chen, J. Zhuang, B. Zhang, X. Wu, 2023 in press, Statistical evaluation of earthquake forecast efficiency using earthquake-catalog and fault slip rate in the Sichuan-Yunnan region, China, *Front. Earth Sci.*, 11:1091408. doi: 10.3389/feart.2023.1091408
- Zhuang, J., 2022, Statistical Seismology, In: Daya Saga B. S., Cheng Q., McKinley J., Agterberg F. (eds) *Encyclopedia of Mathematical Geosciences*. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, doi: 10.1007/978-3-030-26050-7\_34-1



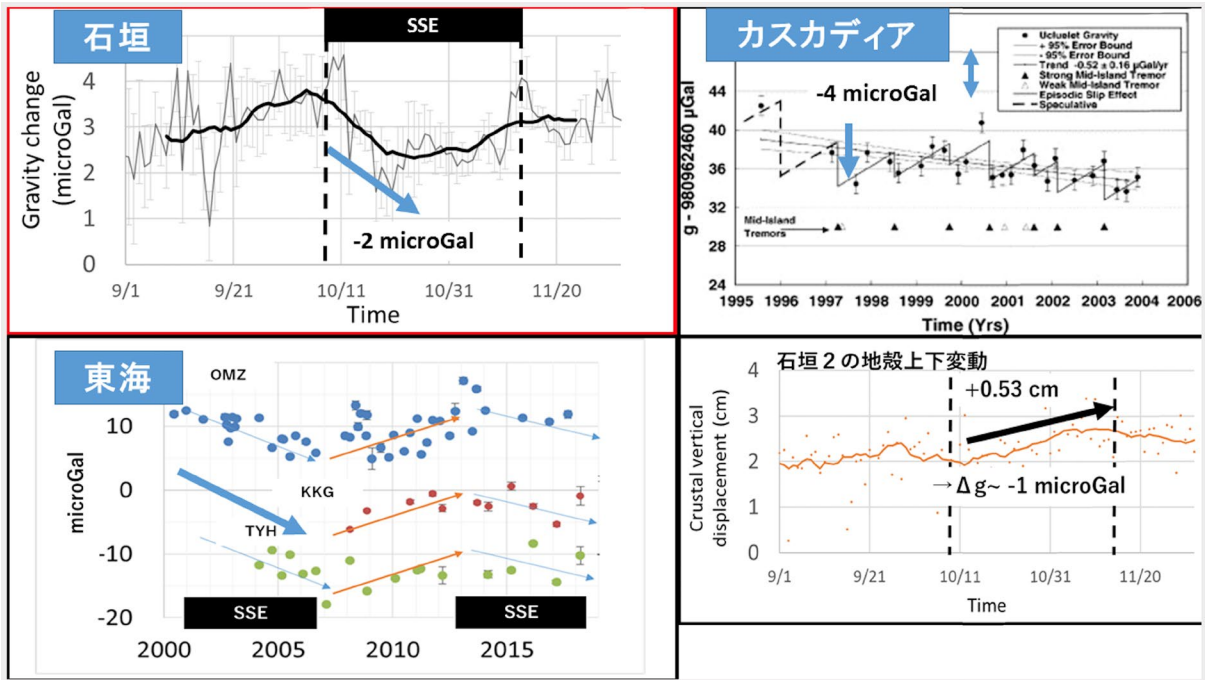


図 1. 石垣島で観測されたスロースリップ中の重力変化。スロースリップの開始と同時に重力が約 2 microGal 減少する（左上）。東海（左下）やカスカディア（右上）の観測結果と異なり連続的な重力データを取得した。GNSS による地殻上下変動の寄与は約 -1 microGal で、スロースリップ期間全体にわたり一様な速度で生じるが（右下）、重力変化は期間の前半に起きている（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，平松，2023 より改変）。

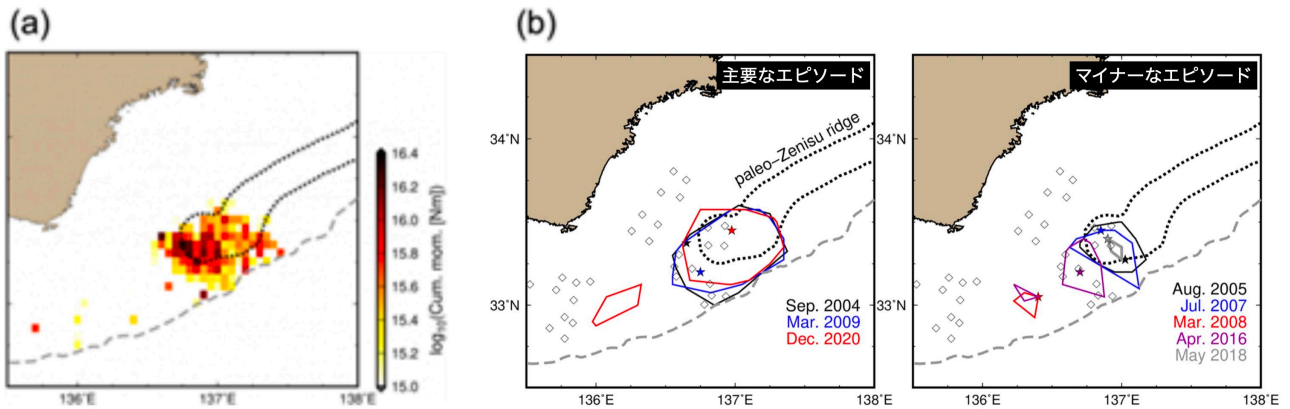


図 2. 紀伊半島南東沖の浅部超低周波地震。(a)浅部超低周波地震による 2004 年 4 月 - 2021 年 3 月の 17 年間の積算モーメントの空間分布と (b) 浅部超低周波地震活動の活動域。図中の破線は南海トラフ，点線は Park et al. (2004) による古銭洲海嶺の位置を示す（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，Takemura et al., 2022a より改変）。

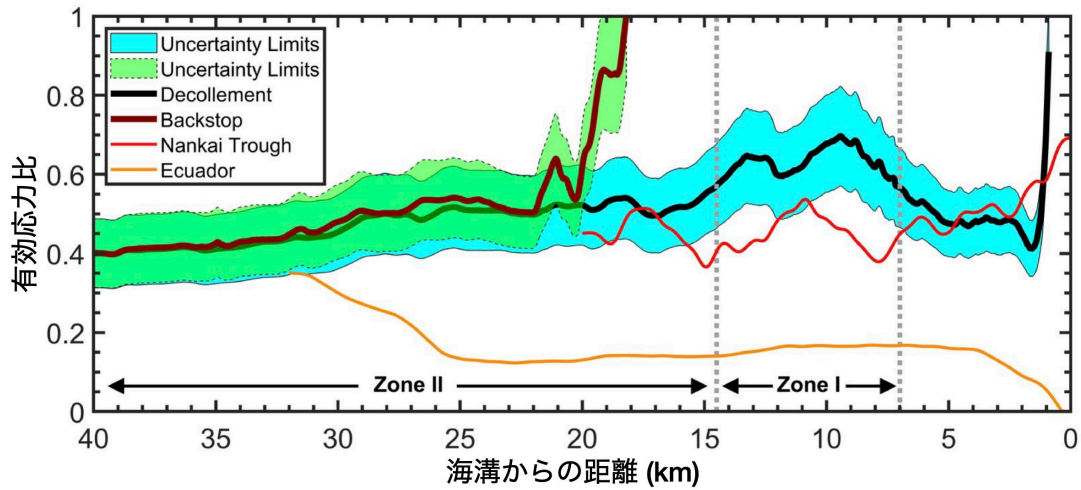


図 3. 四国室戸岬沖南海トラフと宮城沖日本海溝におけるデコルマの有効応力比。赤線は南海トラフでの値を示し，黒線は日本海溝での値を示す（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]，Jamali Hondori and Park, 2022 より改変）。

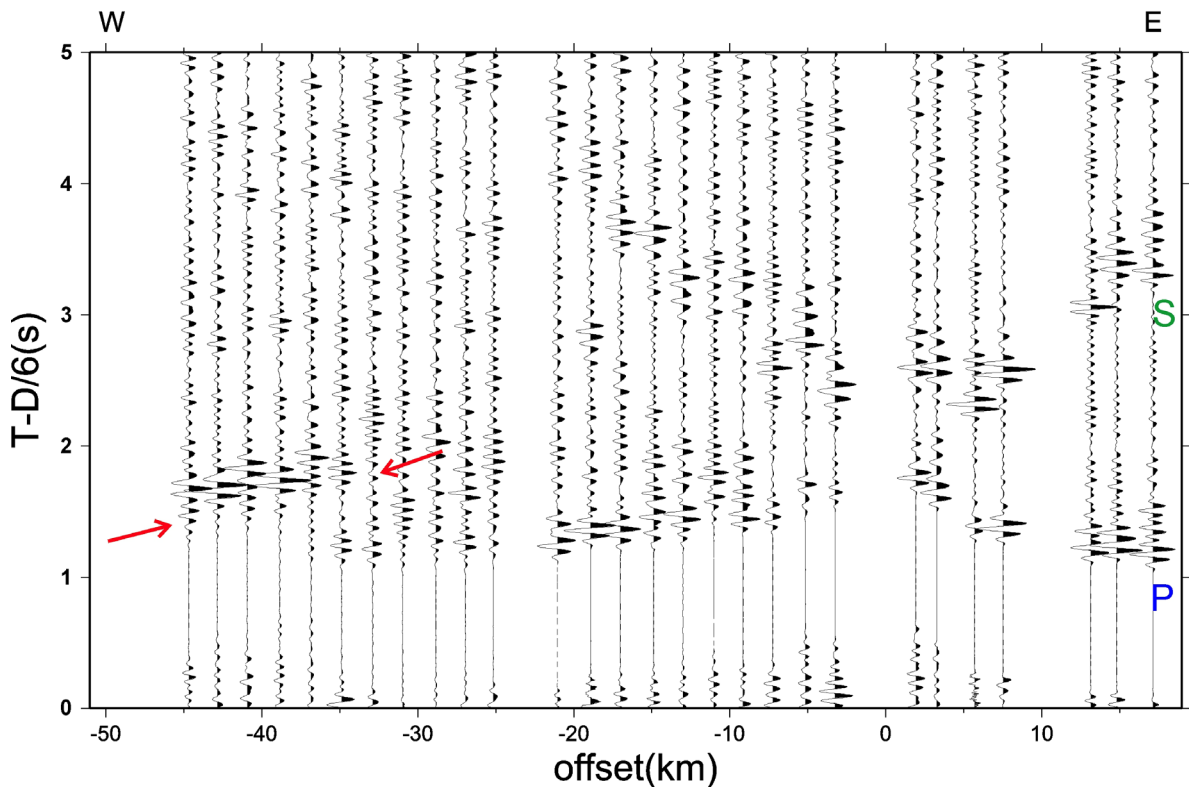


図 4. 四国東部の臨時稠密観測網の東西測線上の観測点で収録した地震の観測波形例（上下動成分）。( $M_{JMA} = 2.3$ , 発震時刻：2022/4/22 11:00:43.66, 震源位置：33.99367°N 134.16817°E 6.6 km deep)。横軸は震央距離，縦軸の時間は原点が震源時に対応する。振幅には AGC 処理を施している。リダクション速度:6.0 km/s。Band pass filter:5-20 Hz。地下深部からの反射波と思われるフェイズ(赤色矢印)が確認できる（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_12]）。

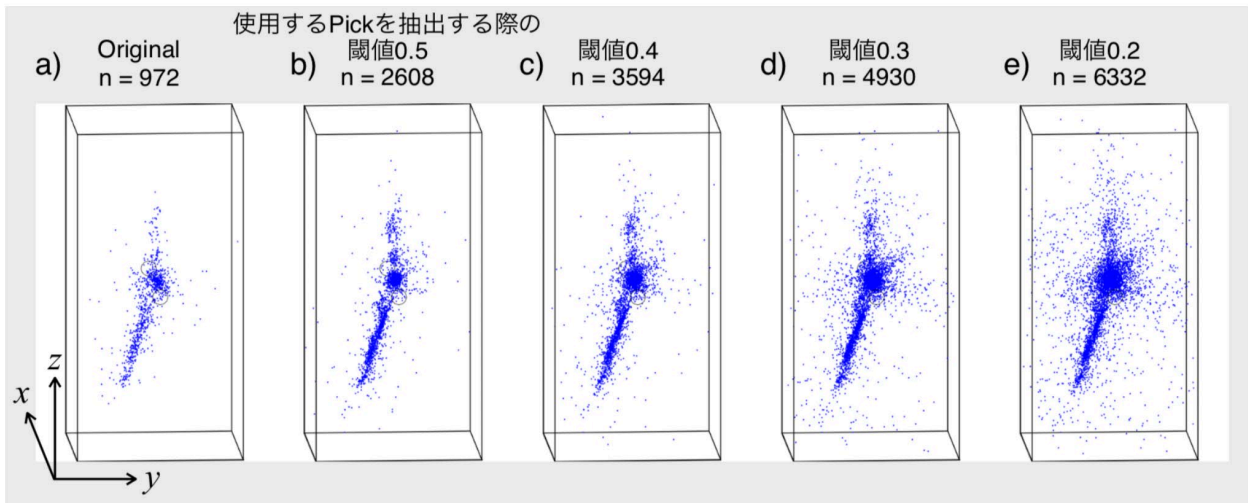


図 5. 室内水圧破碎実験で得られた AE 連続波形から深層学習を利用して作成した震源分布。a) 従来手法で決定した結果。b)–e) 深層学習を利用して決定した結果。走時検出におけるピック候補抽出時の閾値を変えて Association・震源決定を行い、従来手法と同じ走時誤差の選別基準で抽出 (P 波走時 8 個以上, 最大誤差 10mm 以下) した結果を示している (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_13], 直井・他, 2022 より改変)。

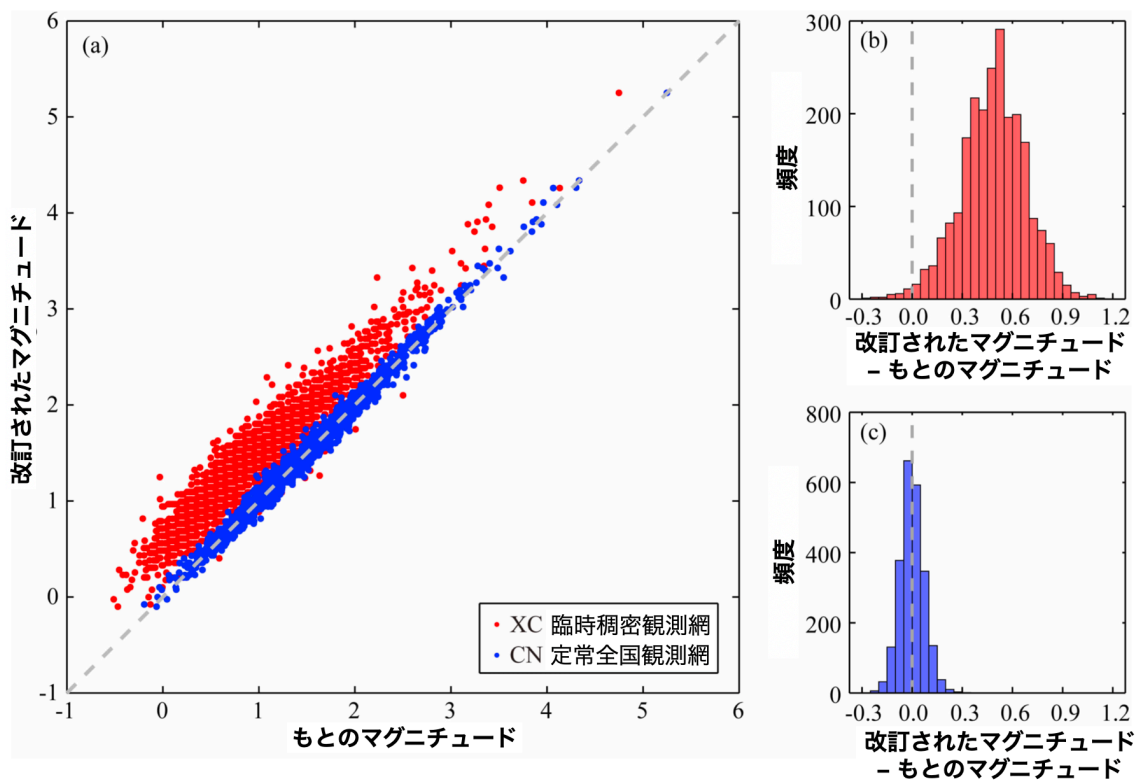


図 6. Xichang 地域の臨時ネットワークと中国の定常ネットワークそれぞれで決めたマグニチュードを補正した結果。(a) 補正結果。(b) Xichang 地域の臨時観測網で決めたマグニチュードに対する補正量の分布。(c) 定常観測網 (中国地震観測網) で決めたマグニチュードに対する補正量の分布 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_13], Si et al., 2022 より改変)。

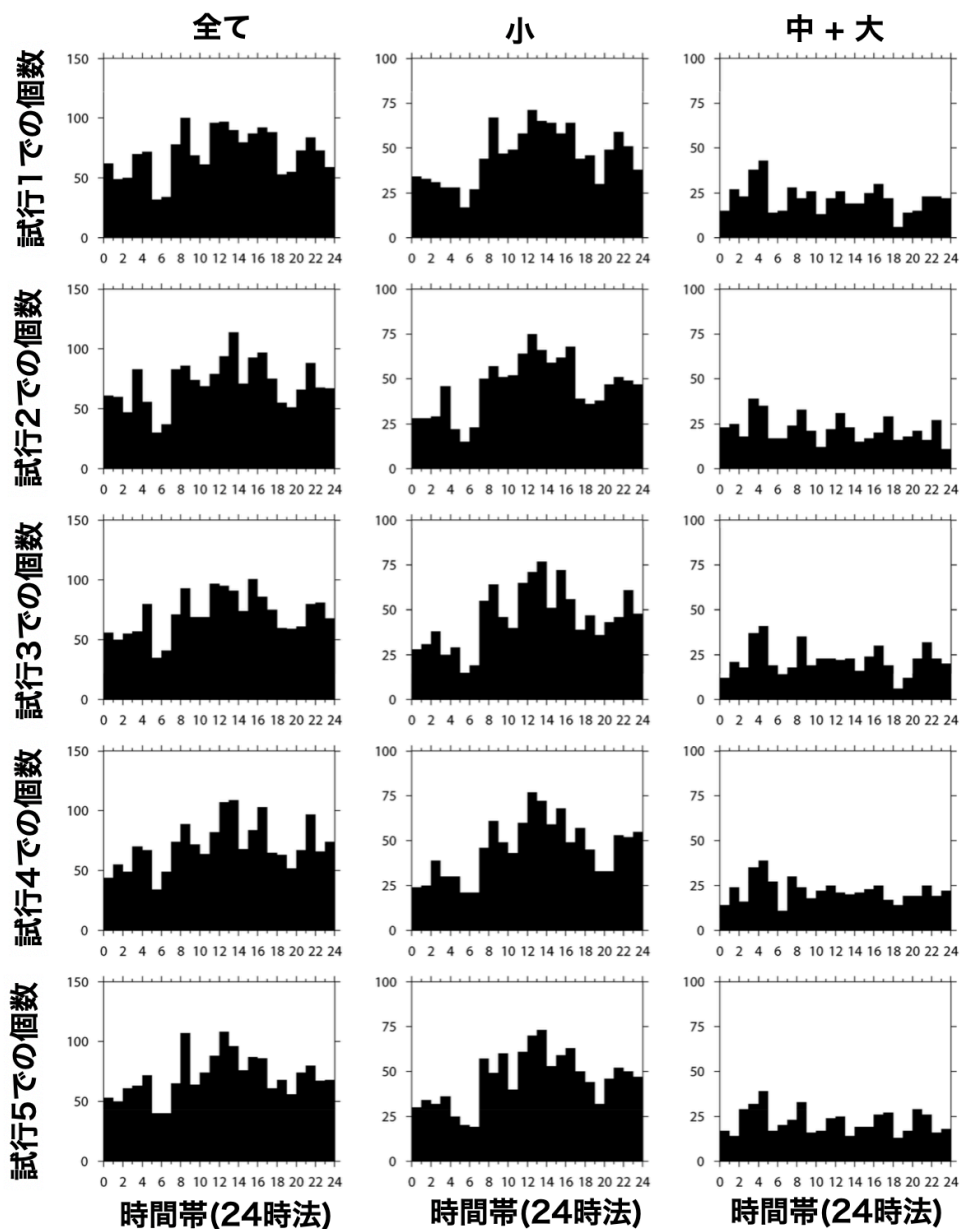


図7. 真覚寺日記に収録された有感地震の発生時間帯のヒストグラム。不定時法で記された時間帯情報を24時法に変換するとき乱数を用いた。その変換の試行のうち5回を示す。左列:すべての有感記録を用いた場合, 中列:揺れの程度「小」のみを用いた場合。右列:揺れの程度「中・大」のみを用いた場合(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13], 石辺ら, 2023 in pressより改変)。

番号	出版年	使用データ	手法	相関あり?	著者
1	1989	Numerical	Heuristic	No	Bak & Tang
2	2002	SCSN	Statistics	No	Christensen et al.
3	2004	CMT,NEIC,CNSS	Statistics	No	Felzer et al.
4	2004	SCSN	Heuristic	Yes	Yang et al.
5	2005	SCSN	Heuristic	No	Corral
6	2006	ANSS	Statistics	No	Helmstetter et al.
7	2006	NEIC-PDE	Statistics	No	Corral
8	2007	ANSS	Statistics	Yes	Lippiello et al.
9	2007	ANSS	Statistics	Yes	Lippiello et al.
10	2007	NCEDC	Physics	No	Caruso et al.
11	2008	NCEDC	Statistics	Yes	Lippiello et al.
12	2009	SCEC,JMAEC	Statistics	Yes	Sarlis et al.
13	2009	NCEDC	Statistics	Yes	Lippiello et al.
14	2010	CMT	Statistics	No	Yoder et al.
15	2010	CMT	Statistics	No	Aalsburg et al.
16	2011	Numerical	Physics	No	Zhang et al.
17	2011	SCEC, CMT	Statistics	Yes	Sarlis
18	2011	<sup>38</sup>	Statistics	No	Davidson
19	2012	<sup>40</sup>	Statistics	Yes	Lippiello et al.
20	2012	<sup>42</sup>	Statistics	No	Davidson et al.
21	2013	Numerical	Physics	Yes	Lippiello et al.
22	2013	CMT	Statistics	Yes	Nichols et al.
23	2013	Numerical	Physics	No	Shcherbakov et al.
24	2016	ISIDE, <sup>46</sup>	Statistics	Yes	Spassiani et al.
25	2016	Numerical	Statistics	Yes	Spassiani et al.
26	2018	TABOO,SOCAL,JMA	Statistics	No	Stallone et al.
27	2019	SCSN	Statistics	No	Zambrano
28	2019	CMT	Statistics	Yes	Nandan et al.
29	2022	ANSS	Statistics	Yes	Nandan et al.

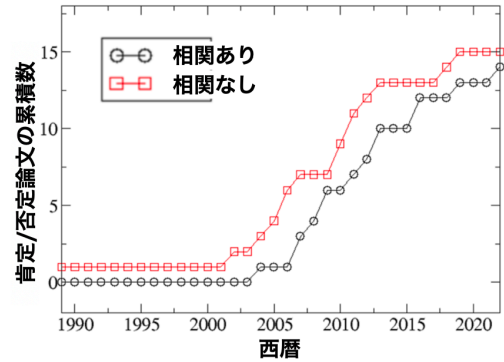


図 8. マグニチュード相関の有無に関する論争。左の表にある 29 本の論文を有り派と無し派に分け、それぞれの累積出版数を追ったのが右の累積カウント図（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_13]，Petrillo and Zhuang, 2022 より改変）。

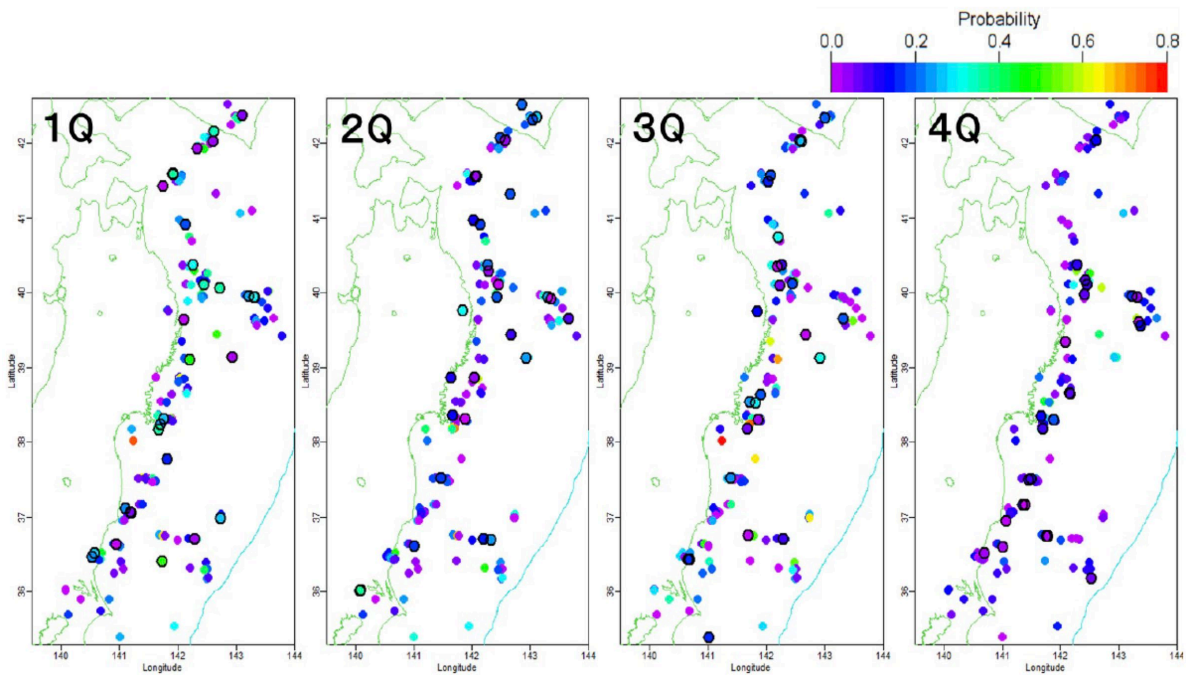


図 9. 2020 年の各四半期を予測期間として、直前までの発生状況から評価した繰り返し系列毎の地震発生確率。黒囲みは予測期間内に実際に発生した繰り返し系列（東北大学理学研究科[課題番号：THK\_09]，野村・他, 2022 より改変）。



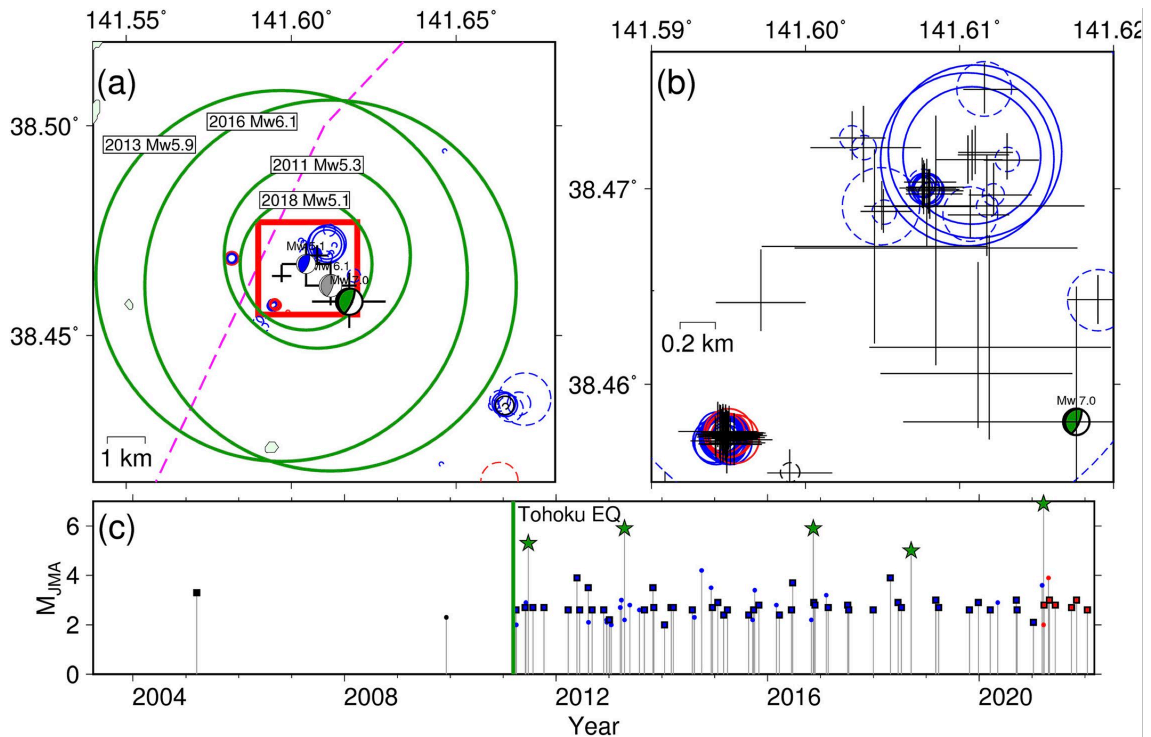


図 10. 2021 年 3 月 Mw7.0 地震震源周辺の地震活動。地震の規模を応力降下量 3MPa に相当する丸のサイズで表す。(b)は(a)の領域の赤枠部分の拡大図。(c)地震の発生時とマグニチュードの関係。星は Mw5-6 の準繰り返し地震と 2021 年 3 月 Mw7.0 地震（東北大学理学研究科[課題番号：THK\_09], Yoshida et al., 2022 より改変）。

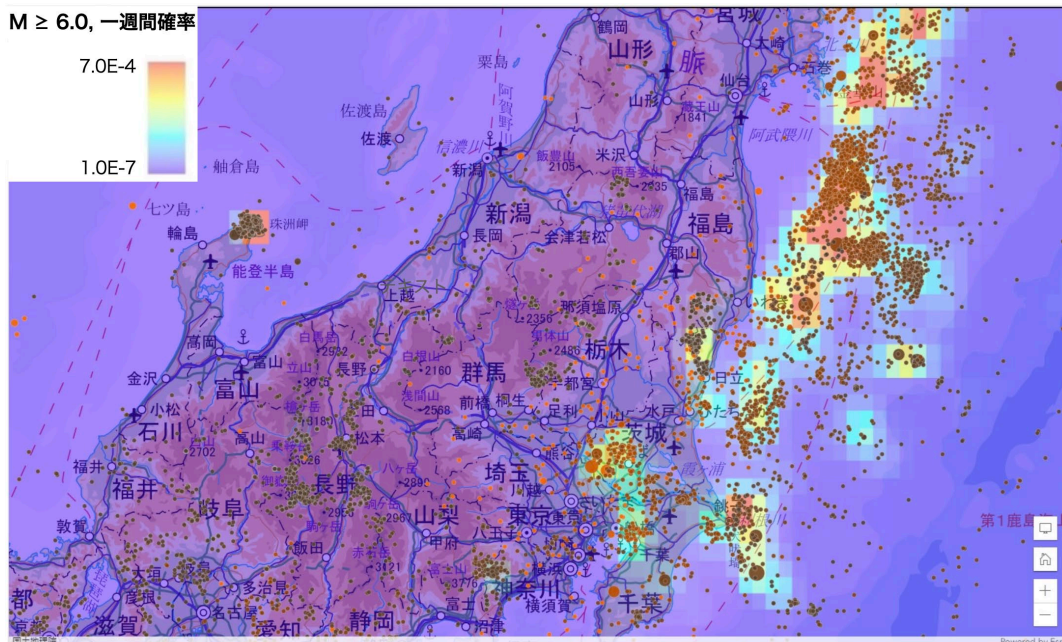


図 11. 地震発生確率ルーチン更新システムの画面例。カラースケールの確率値は 0.1 度 x 0.1 度のグリッドに対する M6 以上の発生確率。他の様々な情報をレイヤーで追加できる。この例では直近一ヶ月の震源だけを選択した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI\_13]）。

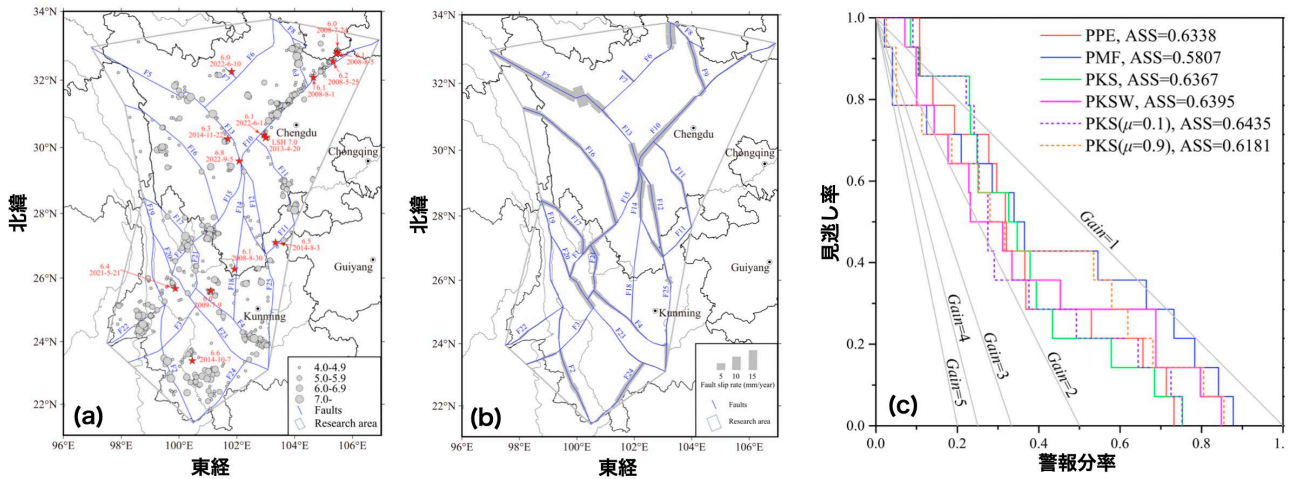


図 12. 四川-雲南地方で過去の地震活動データと活断層データから M6 以上地震を予測するレトロスペクティブ実験。(a)PPE 予測モデルで用いる地震。CENC カタログより 1970-2022 年の 50 km 以浅, M4 以上の 1234 イベントを使用。赤字は実験で予測ターゲットとする M6 以上の地震 14 個。青字は PMF 予測モデルで用いる断層。(b)PMF 予測モデルで用いる断層(青線)の長期滑りレートを灰色線の太さで示した。(c)実験結果のモルチャン成績図。ASS はエリアスキルスコアで、大きい方が好成績。PKS モデルに関しては、重みづけの違う 4 種類を試した。重みづけ係数ミューが大きいほど PMF 重視となる。PKS とだけ書かれているのは、最尤法で決めたミューを用いたもの。PKSW は、重みづけをマグニチュードで変える(Hiemer et al., 2013)もの(東京大学地震研究所[課題番号: ERI\_13], Zhang et al., 2023, in press より改変)。

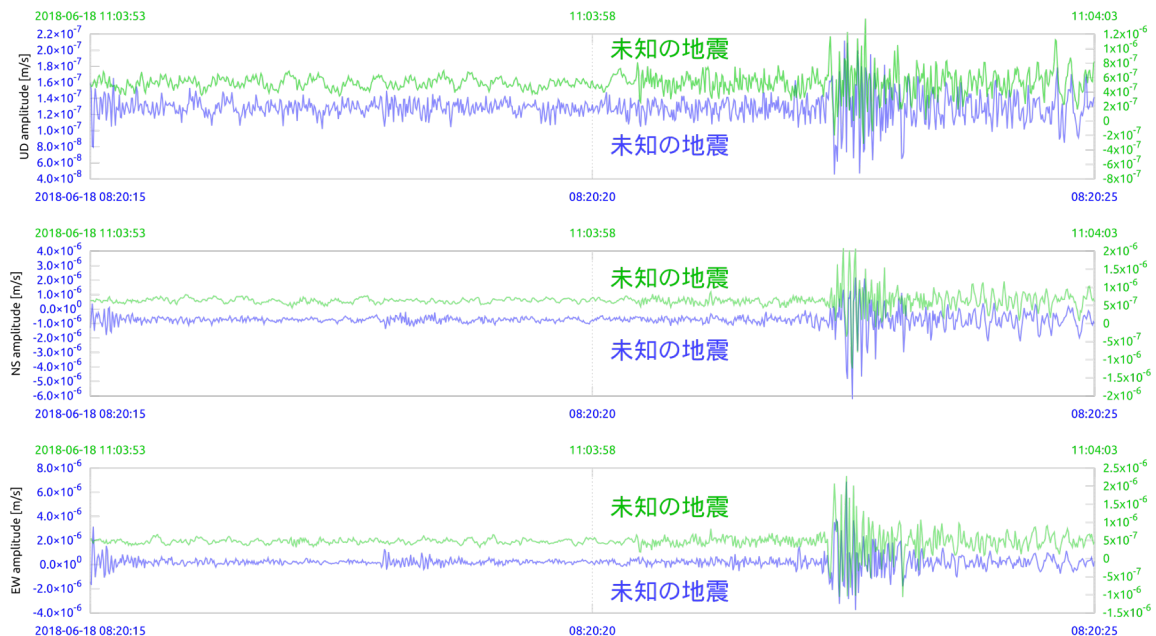


図 13. Hi-net 久御山観測点の連続波形記録から、相互相関関数の計算により新たに発見された地震波形のペア。いずれも本震後の大きなノイズに埋もれ、P 波の立ち上がりを正確に読み取ることは困難と思われるが、波形の類似性により検知が可能となった(立命館大学[課題番号: RTM\_02], 高山・他, 2021 より改変)。

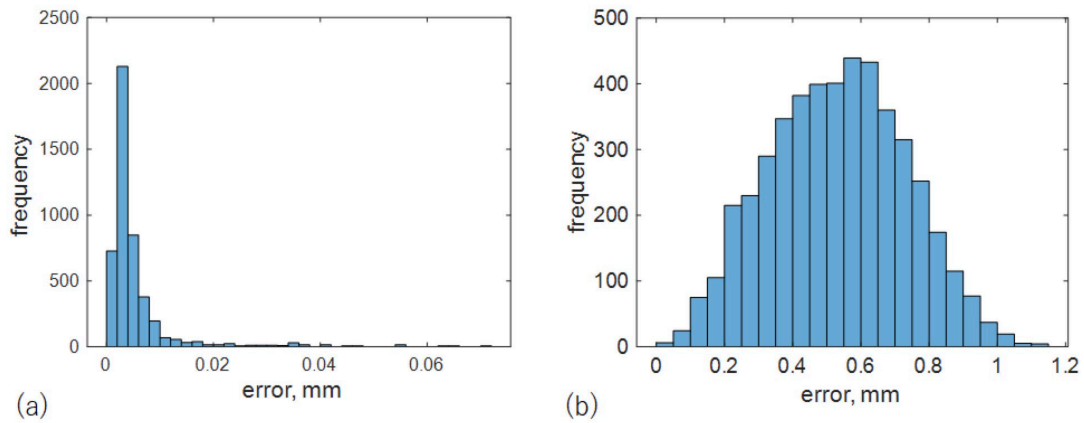


図 14. 受信位置を点で仮定し、一様構造を仮定した場合の震源決定誤差の頻度分布。(a)読み取り誤差を与えなかった場合。(b)  $\pm 0.1$  マイクロ秒以内の一様乱数ノイズを読み取り誤差として計算走時に加算した場合（立命館大学[課題番号：RTM\_02]，川方・大内，2022 より改変）。

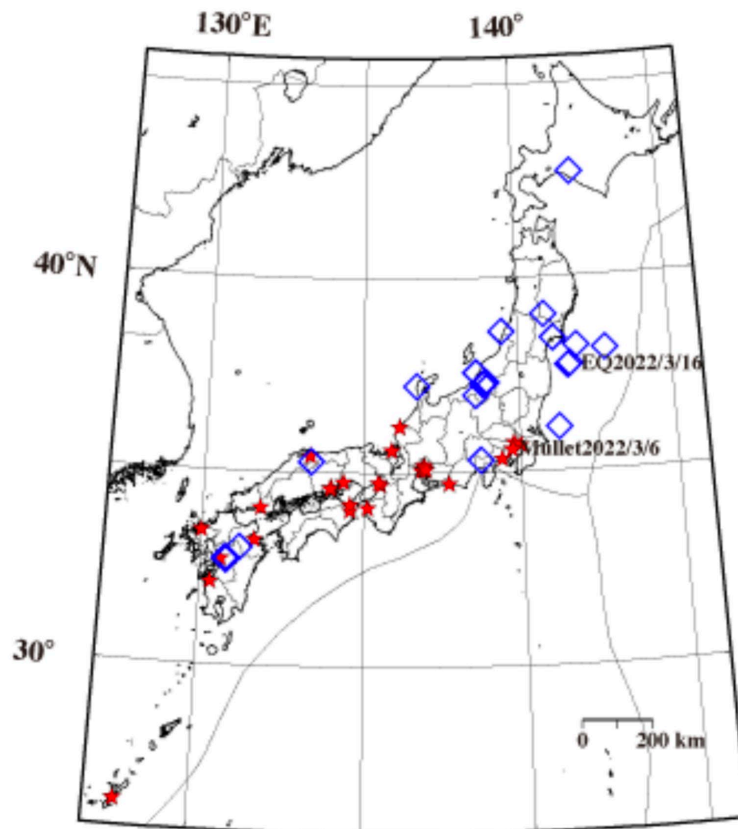
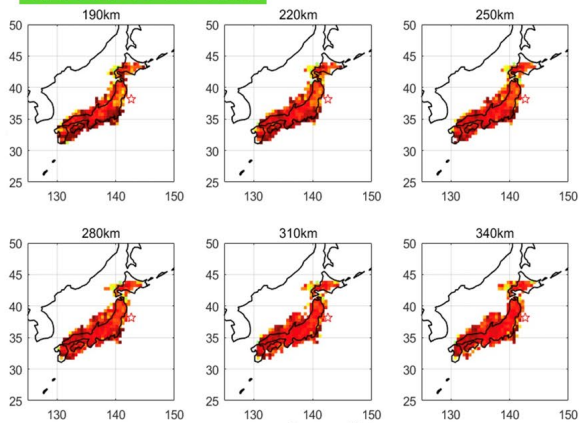


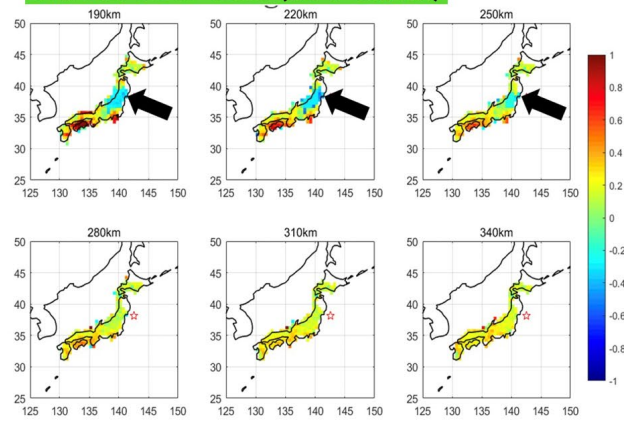
図 15. 最大震度 6 強以上の地震（青色ひし形）とボラ大量死の発生場所（公募研究，東京学芸大学[課題番号：KOB008]，織原，2022a より改変）。



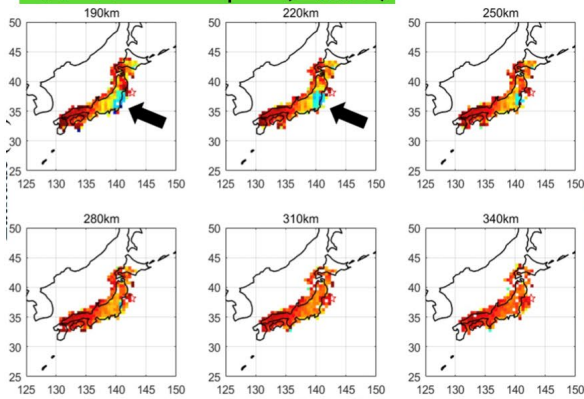
3月8日 JST:11am



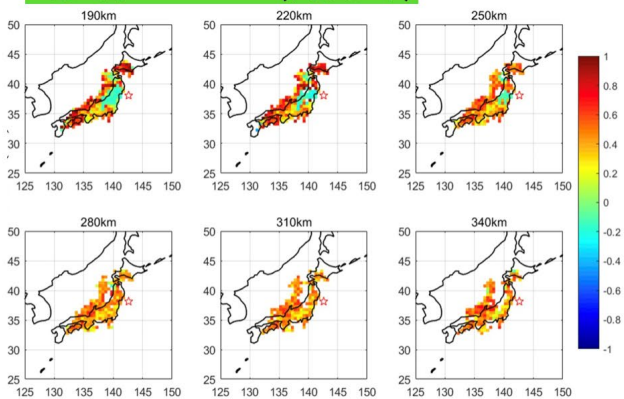
3月9日 JST: 4am (夜でも継続)



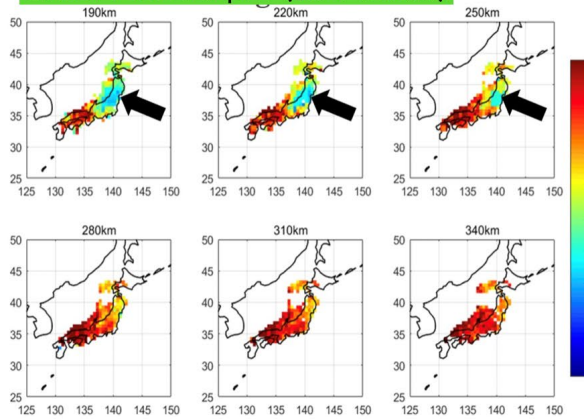
3月8日 JST:13pm (出始め)



3月9日 JST: 9am (終りかけ)



3月8日 JST:22pm (夜でも継続)



3月9日 JST: 11am (正常)

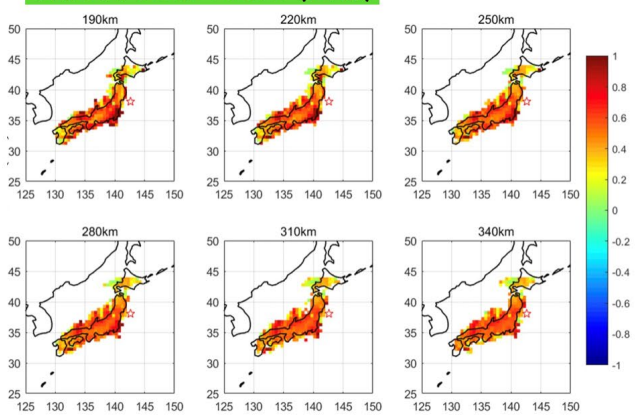


図 16. 2011 年 3 月 8 日から 3 月 9 日にかけての TEC 異常。GNSS-TEC から Song et al. (2021) の 3D トモグラフィー手法で再構成。過去 15 日間の同時刻の電子密度分布の中央値を基準モデルとした差分値を表示。太い黒矢印で異常をハイライト。この後、3 月 9 日 11:45am(JST)に M7.3, 3 月 11 日 14:46pm(JST)に M9.0 の地震が宮城県沖で起きた(千葉大学[課題番号: CBA\_01])。