

## 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 内田直希

(東北大学大学院理学研究科)

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、地震発生の切迫度への効果が物理的に明らかであり、予測への物理ベースの演繹的なアプローチが考えやすいという、ユニークな重要性があるため、観測・解析手法の高度化がはかられている。

プレート境界での地震モーメント保存則に基づき、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。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×地震性カップリング率)から見積もっているところに特色がある。推定された最大規模は、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程度となった (Hirose et al., 2019b, 気象庁 [課題番号: JMA\_01])。

プレート境界滑りの指標となるスロー地震は、現象のスケールと検出手段が非常に多岐にわたり、いまだに新たな観測・解析手法によって新しい現象が見い出され続けている段階なので、様々なカタログをコミュニティで共有することが重要である。そこで、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、現在まで47のカタログが登録された (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_12])。2019年度の地震学会では特別セッション「オープンデータと地震学」を開き、スロー地震データベースの現状と課題について報告と検討を進めた。また、新たなカタログとして、内陸の火山等直下に発生する深部低周波地震の網羅的な検出を行い (Kurihara et al., 2019), 多くの場合、鉛直方向に複数の離散的グループに分かれること、同一火山下に存在する複数の近接したグループ間でも活動様式は大きく異なること、いくつかの火山では地表火山活動と深部低周波地震活動が関連することなどが明らかになった (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_12])。

地震観測に関しては、基盤的地震観測網の維持が引き続き地殻活動モニタリングの重要な基盤となっている。これに加え、科研費・新学術領域研究「スロー地震学」において、スロー地震のモニタリングに関して、機動的広帯域地震観測を実施し、四国西部、紀伊半島、東海にそれぞれ6点、4点、4点を設置した。さらに深部低周波地震の高速移動現象の新たなモード検出を目指し、4つの稠密な地震計アレイを四国西部の低周波地震発生域の直上に設置して2019年12月下旬から連続波形記録の取得を開始した。各地震計アレイの口径は約1-2kmで、60-100点の3成分短周期地震計から構成される (東京大学地震研究所 [課題番号:

ERI\_12])。また、地震研究所一般共同利用で豊後水道の中心部に位置する水ノ子島に構築した臨時地震観測点でのデータ取得も継続した(図1)。水ノ子島では、2019年6月にデータ回収作業を実施した。得られた波形データのパワースペクトル密度(図2)を世界中の陸上観測点の平均的なノイズレベル(Peterson, 1993)と比較すると、上下動成分ではほぼ全帯域でhigh noise modelより低いことが明らかとなり、水ノ子島のような岩礁でも良好な地震波形データを得ることが分かった。しかし11月に2回目のデータ回収を行うために水ノ子島へ上陸したところ観測点が消滅していた。これは台風8号による高波により観測点が流出したためだと考えられ、観測点の再構築に向け新たな観測点設置方法の検討を行っている(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_12])。

繰り返し地震のモニタリングのための観測に関しては、2002年から継続している伊豆鳥島における地震観測(2Hz上下動1成分)を継続した(図3)。2015年からは新衛星携帯電話による3成分(1Hz上下動+2成分傾斜計)の地震観測システムを増設し、必要日時のデータをリモートで回収可能となっている。今年度は、新システムの連続地震波形データを現地回収するとともに、旧システムの2Hz地震計が故障したため交換作業を行った。また、繰り返し地震を含む釜石沖の地震クラスターでの地震活動の詳細を調べるための13ヶ所での陸域臨時観測を継続した(図4)(東北大学理学研究科[課題番号:THK\_09])。

地殻変動観測に関しては、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短期的スロースリップイベント(SSE)の検知確率の評価を行った(Nanjo, 2019)。M5.5程度のSSEなら、現状でもネットワーク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、さらに浜名湖付近に観測点を追加すると、検知可能域がかなり沖側へ広げられるとがわかった(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13])。また、前計画から開発を続けている、SAR衛星ALOSのデータを用いた定常的な地殻変動を2.5次元解析する手法について、今年度は特に上下方向の精度を検討し、御前崎、潮岬、室戸岬、足摺岬周辺でSARによって面的に詳細に求められたスムーズな定常地殻変動は、GNSS観測点の動きと上下方向で0.5cm/年の範囲内で調和的であることが確認できた(気象庁[課題番号:JMA\_01])。また、安価で短い工期でのボアホールひずみ観測の実現を目的として、小口径の多成分ひずみ計および既存井戸への設置手法を開発し、同ひずみ計を香川県三豊市の既存井戸に設置した(産業技術総合研究所[課題番号:AIST09])。さらに、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。図5に示すように、四国西部、豊後水道周辺、日向灘周辺等の地域に独自観測点を展開している。各観測点の維持作業を随時行い、安定してデータが取得できるように努めた。

スロースリップに伴う流体移動(例えば, Tanaka et al., 2018)の検出を目的とした重力及び電磁気観測を以下のように実施した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_12])。2019年6月には共同研究を行っている国土地理院が御前崎において絶対重力観測を実施し、重力増加の速度が小さくなっていることが分かった。2020年2-3月に絶対・相対重力観測を宮崎1点、東海2点(菊川・豊橋)及び豊後水道1点(足摺岬)で実施する予定である。石垣島地方気象台においては、気象研究所との共同研究として、相対重力計による連続重力観測を2020年1月より開始した。並行して土壌水分計も設置しデータを取得している。電磁気観測では、東海地方、石垣島、西表島において地磁気観測を行いデータを蓄積した。地磁気変化の異常場をデータから同定するために、地磁気変化の全国規模の標準場モデルの構築

を進めた。また、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滑り発生時の構造変化の検知可能性を検討した。

以上のように基盤的地震・測地観測に臨時観測を加えることにより、プレート境界滑りの時空間変化の把握能力が増強されており、向上したデータの質と量を活かして網羅的・客観的な解析が進んでいる。産業技術総合研究所と防災科学技術研究所および気象庁との共同研究では、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SSEを解析するシステムの運用を継続し、2018年11月-2019年10月の間に33の短期的SSEの断層モデルを決定した(図6)(落・他, 2019, 矢部・他, 印刷中, 産業技術総合研究所[課題番号:AIST09])。一方、長期的SSEによる滑り量を把握するために、気象庁は、中国地方を領域固定したGNSS日値のフィリピン海プレートの沈み込みと逆方向の成分について1年間の変化量を求め、これをあらかじめ南海トラフのプレート等深線25km上を中心とする矩形断層で一定の滑りを与えて計算した理論変位と比較することで、1年あたりの規模の時空間分布を得る手法を開発した(気象研究所, 2019b, 気象庁[課題番号:JMA\_01])。

また、関東地方に沈み込むフィリピン海プレート上面で発生するSSEに関しては、GNSSデータからの系統的検出を行い(高木・他, 2019, 東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_12])1996年から2018年の期間において、Mw6.6-6.8程度の既知の房総沖SSEに加え、Mw5.9-6.5程度の小規模SSEの可能性のあるイベントを25個検出した(図7, 8, 9)。小規模SSEの多くは、既知の房総沖SSEの東に位置する。既知の房総沖SSEに比べて発生間隔は短く、滑り量は小さいことから、安定滑りから間欠的な滑りへのプレート走向方向の滑り特性変化であると考えられる。また、2011年以降にSSEの発生数が増加しており、2011年東北沖地震以降のフィリピン海プレートの沈み込み速度上昇を反映している可能性がある。一方気象庁は、GNSS座標データを用い、2017年春から2018年秋にかけて発生した志摩半島付近の長期的SSEを詳細に解析した(Kobayashi and Tsuyuki, 2019)。長期的SSE発生期間には隣接する領域で短期的SSEが活性化され、短期的SSEによる変位を除くと、この長期的SSEの滑りの規模はMw6.4相当であった(気象庁[課題番号:JMA\_01])。

スロー地震の一種である超低周波地震については、防災科学技術研究所F-netの連続波形データに対して、東北地方太平洋沖のプレート境界やプレート運動を仮定して計算された理論波形をテンプレートとしてその検出を試みたところ、超低周波地震活動が2011年東北地方太平洋沖地震によって大きく影響を受け、その影響の内容が場所によって大きく異なることを見出した(図10)。東北沖地震震源域では、その発生前まで小規模な超低周波地震がエピソードに起き、東北沖地震後は完全に静穏化したのに対して、震源域外側の余効滑り域では東北沖地震後に急激に活発化した。これらの結果は、東北沖地震後のプレート間滑りの空間分布を反映していると考えられる(Baba et al., 2019, 東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_12])。一方気象庁は、2004年紀伊半島南東沖の地震後に行ったOBS観測から、浅部低周波地震が紀伊半島南東沖の地震の余震域と近接した場所で多数発生していたことを示し、さらに、浅部低周波地震が2004年新潟県中越地震や潮汐に敏感に反応していることも見出した(Tamaribuchi et al., 2019, 気象庁[課題番号:JMA\_01])。

繰り返し地震を用いた網羅的な滑りモニタリングのために、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。また、作成した繰り返し地震カタログを用いて、日本列島周辺における滑りの空間分布・時間変化の特徴を調べた。沈み込むプレートの境界における滑り速度は、ここ数年は、ほとん

どの地域でプレート間の相対運動速度よりも遅く、大地震の余効滑りの影響はわずかな地域で見られるのみであった（東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_09]）。

繰り返し地震から断層の固着状態の時空間変化を推定する新しい方法である、Brownian Passage Time (BPT) 分布更新過程から拡張した繰り返し地震群に対する時空間点過程モデル (Nomura et al., 2017) を用いて、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滑りの時空間的变化をスプライン関数により推定した (図11)。特に、2011年東北地方太平洋沖地震後の滑り速度の時空間変化 (図12) から、2016年までに東北沖の滑り速度がほぼ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台の地震を伴う滑り加速が発生した様子が捉えられた (野村, 2020, Nomura et al., 2020, 東北大学理学研究科 [課題番号:THK\_09])。

深部低周波微動から長期的SSEまで、いわゆるスロー地震は、Ide et al. (2007) のスケーリング則に従うことが知られているが、いまだにスロー地震が発見されていない周波数帯もあり、それが現象の真の欠如なのか、観測S/Nの問題なのかはわかっていない。レーザー式変位計とひずみ計のデータを用いて短期的SSEよりも短時間のスロースリップ現象がないか調査したところ、継続時間約1時間のスロースリップ現象を発見した。そのスロースリップは通常の短期的SSEが発生している期間の間に発生したもので、Mw5.0ほどの規模を持ち、Ide et al. (2007) のスロー地震のスケーリング則と調和的であった (気象庁 [課題番号:JMA\_01])。

モニタリングにより得られるスロー地震と中・大規模地震の関係を解明する試みとして、西南日本において繰り返し地震と他のスロースリップイベントの間の時空間的特徴の詳細を調べ、スロー地震が空間的に相補的な分布をしていること、異なる種類のスロー地震の活動に相互作用があることを明らかにした。また、九州沖から四国にかけてのプレート境界の深部および浅部で、時間スケールが異なる2つのスロー地震の長距離移動を見出した (図13) (Uchida et al., 2020, 東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_12])。さらに、四国西部域のGNSSデータを深部低周波地震活動を基準にして重合することで、深部で短期的スロースリップが発生している最中に固着域の深い側においても、わずかな滑りが起きていたことを見出した (Kano et al., 2019)。固着域の中で確認されたスロースリップという点が特徴的である。短期的スロースリップが起きる度に固着域深部側でわずかに滑りが進行することで、固着域に対して応力が間欠的に载荷されていると考えられ、短期的スロースリップと固着域の関係性を理解する上で重要な成果である (東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_12])。

以上のように、観測データに基づき、プレート境界滑りの時空間変化の把握が行われた。一方、このような解析の手法を高度化する取り組みも進めた。繰り返し地震の抽出では、局所性鋭敏型ハッシュ検索技術を応用した類似波形探索アルゴリズム (FAST; Yoon et al., 2015) をテスト的に実装した。同手法では、連続収録データ中に存在する類似波形をテンプレートなしに効率よく抽出することができる。同手法を山陰地方で展開されている稠密地震観測 (満点観測) で得られた、2011年6月4日に発生したM5.2の地震直後の連続収録データに適用し、類似波形イベントを検出できることを確認した (図14) (東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_09])。また、繰り返し地震の抽出方法について解析周波数帯 (図15) の影響を詳細に検討したレビュー論文 (Uchida, 2019) と、世界の繰り返し地震の研究履歴や動向のレビュー論文 (Uchida and Burgmann, 2019) を発表した (東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_09])。また、スロー地震やプレート間固着の解析技術の高度化に向けて、GNSS座標時系列データに含まれる同相誤差を推定して取り除くためのツールを開発した (廣瀬, 2019)。

図16に示した適用例のように、オリジナルの座標時系列(ここでは国土地理院GEONET F3解)に含まれる日々のばらつきのかなりの部分は同相成分にも表れており、これをオリジナル座標時系列から差し引くことで、日々のばらつきを低減できている。スロースリップイベントによる地殻変動をGNSSデータから検出する際にこの手法を適用することで、より小さい変位まで検出できると期待される(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_12])。

プレート境界の滑りモニタリングから、境界面の摩擦特性に関する情報を得ることもできる。相似地震の揺らぎの要因の一つである余効滑りの伝播現象について、伝播速度と摩擦特性との関係式を導出することに成功した(Ariyoshi et al., 2019)。これにより、大規模な地震が起きてから非相似地震が発生するまでの時間差から摩擦特性を絞り込めると期待される(東北大学理学研究科[課題番号:THK\_09])。

観測データから、プレート境界の滑りと、滑りを支配する物理モデル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の発展の予測にも使えるはずのものである。本年度は、2010年の豊後水道の長期的SSE(L-SSE)のデータ同化をアンサンブル・カルマンフィルタに基づいて行い、地殻変動データと速度・状態摩擦構成則(Dieterich, 1979)の両方に合うような滑りの時空間発展を推定した。均質な半無限弾性体中にフィリピン海プレートの三次元形状を導入した解析領域を設定し、断層面を5,400個の小断層セルに分割して、弾性体の準動的な運動方程式とSlowness型(Ruina, 1983)の速度・状態依存摩擦則を連立させ、各セルにおける滑り速度と状態変数の時間発展を計算した。ただし、L-SSE発生領域として、断層面に半径35kmの円形速度弱化パッチを設定している。観測データとしては、GNSSデータをインバージョン解析して得られたL-SSE領域における滑り速度(横井, 2019, 京都大学修士論文)を使用した。初期アンサンブルの摩擦パラメータの選出については、Hirahara and Nishikiori (2019)の手法にさらにグリッドサーチを組み合わせることで、初期値依存性の軽減と解析の不安定性の改善を同時に実現した。データを同化するとともにL-SSE領域における摩擦パラメータが収束し、円形パッチ内では観測値を用いて適切に修正された滑り速度の解析値が得られた。また、L-SSE発生期間中において、そのイベントの終了する時期の予測といった数か月程度の短期的な予測が可能であることが示唆された(京都大学理学研究科[課題番号:KUS\_01])。

一方、アジョイント法に基づくデータ同化手法の開発では、地表面で観測されたGNSSによる地殻変動データから、アジョイント法により直接プレート境界面の摩擦特性を推定する手法を整備・改良し、2003年十勝沖地震の余効滑りを模した数値実験により、開発手法の妥当性を検証した。これまでの数値計算では、アジョイント行列を直接演算していたが、このアジョイント行列は疎な行列であるため、微分方程式として解くことで計算時間を従来の数分の一程度に削減することができた(京都大学理学研究科[課題番号:KUS\_01])。

さらに、粘弾性緩和も考慮したモデルに対するベイズ的データ同化手法の開発も進めた。これは、特に余効変動や地震間の地殻変動をモデル化する場合に重要である。また、ベイズ的推定を行うことで、摩擦や粘弾性パラメータの最適値だけでなく、その不確実性も推定できることになる。今年度は、前計画の課題1803で開発した余効変動の物理モデルを測地的に観測された余効変動に適用してみた(Fukuda and Johnson, 2019a, 2019b)。このモデルでは、地震時の応力変化により余効滑りと粘弾性緩和が駆動され、余効滑りは定常状態を仮定した速度・状態依存摩擦構成則、粘弾性緩和はBurgers rheologyに従うと仮定している。また、余効滑りと粘弾性緩和の相互作用をモデルに取り入れている。本研究では、地震時の

滑り分布，これに対する平滑化パラメータ，断層の摩擦パラメータ(a-b)  $\sigma$ ，海洋・大陸マン  
トルのMaxwell及びKelvin粘性率を未知パラメータとし，これらを同時推定した。このモデル  
は計算コストが高いため，多数回のフォワード計算を必要とする標準的なベイズ推定手法を  
適用することは困難である。そこで，1) 既存のフォワード計算の結果からボロノイ分割を  
用いて近似的な事後確率分布を構築し，2) これをギブスサンプラーでサンプリングし，3)  
このサンプルに対してフォワード計算を実施する，というプロセスを反復して事後確率分布  
の推定を逐次的に改良するアルゴリズムを構築した。この手法は標準的なベイズ推定手法(マ  
ルコフ連鎖モンテカルロ法の一つであるMetropolis-Hastings法など)より必要なフォワード  
計算の回数が少なく，アルゴリズムの並列性が高いため，現実的な計算時間で事後確率分布  
を推定することができる。この手法を2011年東北沖地震の地震時及び地震後7年間の地殻変  
動データに適用しパラメータの事後確率分布を推定した(図17)。推定されたパラメータに  
よるモデル計算値は地震時及び地震後の観測を良く再現することができた。また，推定され  
たパラメータによるモデル計算の結果では，余効変動の初期段階から，粘弾性緩和の寄与が  
余効滑りの寄与に比べて大きかった(京都大学理学研究科 [課題番号: KUS\_01])。

スロースリップは，地震サイクルに比べれば支配方程式系がステップでないため，デー  
タ同化やそれによる予測が成功しやすいと期待される。そこで，琉球海溝南西部八重山諸島  
近傍においておよそ6ヶ月周期で繰り返し発生するSSEの解析を行い，滑りの時空間分布を  
推定した(京都大学理学研究科 [課題番号: KUS\_01])。Kano et al. (2018) は2010-2013年  
に発生したSSEに伴う断層滑り速度の時間発展の振る舞いがSSE毎に異なることを示してい  
るが，今年度は，解析期間を2018年まで拡張するとともに，2013年以降に整備された新規のGNSS  
観測点のデータを加えることで，より多くのSSEの解析に着手した。

プレート間固着の時間変化を推定・モデリングするためには，プレート境界周辺の物性や  
応力を知ることも重要である。南海トラフでは，海洋科学掘削で得られたロギングデータを  
解析し，付加体の空隙率と温度構造を従来より正確に推定する手法を開発した(図18)。空  
隙率は様々な物性値と相関することが知られている。船上の実験室で得られたデータをも  
とに空隙率と電気伝導度・熱伝導率の変換式を構築し，それらを同時に満たす空隙率・温度構  
造を推定した(Yabe et al., 2019, 産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09])。また，硬  
岩中に高い透水性を示す亀裂が存在する条件を明らかにするために，愛知県西尾市の観測井  
で物理検層とVSPにより検出した透水性亀裂の向きと水圧破碎法から得た応力場の関係につ  
いて解析した(図19)。透水性亀裂は，北北東-南南西を示す応力方位と40度程度以上の角度  
をなす走向が多いが，せん断型と引張り型の2つの亀裂モデルによる詳細な検討の結果，こ  
の向きを現在の応力場と直接関係付けて説明するのは難しいことがわかった(木口・桑原，  
2019, 産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09])。一方，構造探査からのアプローチとして，  
JAMSTECが過去に南海トラフで取得したマルチチャンネル反射法地震探査データの再解釈を  
行い，深海掘削(ODP/IODP)データとの統合を試みた。四国海盆から南海トラフまで分布す  
る三種類のタービダイト(西部タービダイト，中部タービダイト，東部タービダイト)が浅  
部プレート境界断層(デコルマ)の下部へ沈み込んでいることが示唆される(図20)(東京  
大学地震研究所 [課題番号: ERI\_12])。南海トラフの陸側へ既に沈み込んでいると推察さ  
れる3種類のタービダイトの空間分布と，海底地殻変動から推定されたプレート間固着度(カ  
ップリング)分布(Yokota et al., 2016)を比較すると，タービダイトの岩相と形状の違い  
が以下のようにプレート間固着度に影響していると解釈できる。1) シート状の形状を示し

ながら優れた排水能力を持つと考えられる西部タービダイトは、デコルマ付近で低間隙水圧や高有効応力の状態をもたらし、高い滑り欠損域（滑り欠損  $> 5\text{cm/yr}$ ）での高カップリングに影響したと推測される。2）浸食チャンネル、または海洋性地殻の起伏が作る小規模海盆に堆積した中部タービダイトはデコルマ付近で高間隙水圧の状態をもたらし、中位滑り欠損域（滑り欠損  $> 4\text{cm/yr}$ ）での低カップリングに影響したと推測される。3）シート状の形状を示しながら低浸透率の泥質タービダイトを挟んでいる東部タービダイトは、デコルマ付近で高間隙水圧や低有効応力の状態をもたらし、中位滑り欠損域（滑り欠損  $> 4\text{cm/yr}$ ）での低カップリングに影響したと推測される。

スロー地震の発生域が特徴的な地下構造に規定されている可能性を検討するために、2015年度に紀伊半島北東部の深部低周波地震の活動が活発な領域を通る「甲賀 - 南伊勢測線」の稠密地震観測で取得した低周波地震のP波・S波の検測値を用いて、低周波地震の震源決定を行った。また、観測した通常の自然地震の水平動成分記録では明瞭な後続波を確認することができたので、自然地震反射法解析を実施した。得られた反射法断面図からは、深さ25-30km付近に、フィリピン海プレート上面に対応すると考えられる北傾斜の反射層が確認できる。本研究で決定した低周波地震の震源は、プレート境界近傍に位置するものもあるが、その大部分が、プレート境界から5-10kmの深さに位置している。本地域下での沈み込むフィリピン海プレートの地殻の厚さが7-8kmである（例えば、Nakanishi et al., 2002; Iwasaki et al., 2008）ことを考慮すると、低周波地震の大部分は、沈み込む海洋性地殻内や海洋性マントル内で発生していると考えられ、トモグラフィ解析で得られた測線下の地震波速度構造（Kurashimo et al., 2019）と比較すると、低周波地震発生域の地震波速度は、P波速度が低下し、 $V_p/V_s$ 値は大きくなる特徴を示している。よって、流体の存在が、これら低周波地震の発生に寄与していると考えられる（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_12]）。

内陸の地震活動についても、応力場と断層滑りによるその再分配で理解できそうな現象は少ない。前計画で報告したように（例えば、Kato and Ueda, 2019）、2018年大阪府北部地震(Mj6.1)は、本震において逆断層と横ずれ断層がともに大きく滑った複雑な地震であった。今年度さらに3ヶ月間の余震活動の精密な震源位置と、多数の余震の滑りの向きを調べ、本震の横ずれ断層に斜交した別の2つの横ずれ断層（長さ1kmと4km）に沿って発展したことがわかった（Li et al., 2019）。こういった複雑な断層の間の相互作用は、静的な応力の変化・地域の応力場と整合的であった（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_13]）。また、みかけの前震活動を通じて、地震の強い可予測性をもたらす(Nakatani, 2020) ETASモデルも、第一義的には余震活動のモデルであり、応力再分配の観点から物理ベースでETASに匹敵する性能をもつモデルを作る努力が行われている（例えば、Iwata, 2016）。本年度は、地震が周囲に及ぼす応力的影響に異方性を許し、また、空間的減衰の鋭さもパラメータ化して最適化することを許した試みを行ったところ、期待通り、余震の空間分布に関して大きな改善がみられた。厳密な物理解釈は難しいが、トリガリングソースである個々の地震が点ではなく、二次元的な滑り域であるという効果を近似的に取り入れたことになるのかもしれない（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_13]）。純粹に経験的なモデルとしてのETASに関して、大きな地震からのトリガに関してその破壊域形状を考慮した取扱をする（Guo et al., 2015, 2017; 有限断層ETAS）、震源の深さの情報も用いる（Guo et al., 2015; 三次元ETAS）など、一層の改善の努力が進んでいる。本年度は、三次元有限断層ETASモデル（Guo et al., 2019）を開発し、2016年熊本地震周辺域の2010-2018年の地震活動に適用したところ、三次元化・有

限断層化とともにフィッティング性能に大きく貢献するとの結果が得られた。また、本震後30日間にわたって活動の予測を試みたところ、三次元化によって予測性能が改善していた。有限断層化（2つの大きな前震と本震を有限断層として扱った）も本震後1-2日に限っては予測を改善する効果があった（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_13]）。

地殻内で発生する大地震の余震活動や群発地震活動についてもあらたに系統的な繰り返し地震解析を行い、繰り返し地震を多数見つけた（東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_09]）。その多くはバースト的な活動を示し、地震活動の推移に従って活動度が減少する傾向にあった。一方で、1995年兵庫県南部地震の余震域等、長期間活動が継続する場所もいくつか見られた。地殻内の相似地震に対して、プレート境界で適用している滑り推定式を用いた場合、その推定値は、過大評価される傾向にある。ただし、東北沖地震発生後に地震が誘発された福島県南部～千葉県銚子沖の活動については、大規模な余効変動を示唆している可能性があり、さらなる検討が必要である。また、トルコアナトリア断層での繰り返し地震分布を推定し、過去の大地震の破壊域の端に分布していること、繰り返し地震の積算滑りから一部では、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明らかにした（図21）（Uchida et al., 2019, 東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_09]）。また、函館周辺で発生している地震・低周波地震の震源位置・波形について詳細に調べた。その結果、通常地震と低周波地震が近傍で発生していること、気象庁カタログでは浅い低周波地震が通常地震と分類されていること、通常地震が同一場所を繰り返し破壊させた可能性があることを示した（図22, 図23）（吉田・他, 2019, 東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_09]）。

#### イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

地震活動の様々な変動が地震の先行現象ではないかと提案されており、少なくとも、短期的な地震活動のクラスタリングは、明らかに存在するという強い傾向をもつ。また、地震活動は20世紀前半からの網羅的な観測データがあり、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。

中規模繰り返し地震について、発生状況のモニタリングから発生確率をプロスペクティブに予測する実験を継続的に行っている。今年度は、2016年2月、2017年2月、及び2018年2月に岡田・他（2007）のベイズ統計対数正規分布モデル（LN-Bayes,  $\phi=2.5$ ,  $\zeta=0.23$ ）を用いて予測した1年発生確率について、平均対数尤度（MLL）とブライアスコア（BS）の評価指標を使って予測成績を確認し、他の更新過程の小標本論対数正規分布モデル（LN-SST）、BPT分布モデル（BPT,  $\alpha=0.24$ ）及び指数分布モデル（Exp）の予測成績と比較した。結果は、2016年2月の予測はLN-SSTが他のモデルよりも成績が良く、2017年2月と2018年2月の予測はLN-Bayesが最も良かった。3回の実験はそれぞれ独立であり、3回の結果を一つにして得られる成績はLN-Bayesが最も良かった。要因は不明であるが、LN-Bayes, LN-SST及びExpの成績は徐々に悪化している、という結果を定量的に確認した（気象研究所, 2019d, 気象庁 [課題番号：JMA\_01]）。

国際的なプロトコルのもと、地震活動データにもとづくプロスペクティブな地震発生予測検証実験を継続的に行っているCSEP-Japanセンターでは、本年度3領域および4テストクラスの合計12のカテゴリーで実験を実施した（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_13]）。またCSEP-Japanに関する研究集会を開催し、10を超える研究発表を通して活発な議論を行った。今年度はさらに、CSEPに提出されている予測モデルのなかでも、過去の一定の期間（以後学

習期間)の地震活動の地域性のみに着目して予測を行う,単純で意味のつかみやすいRIモデルに関して,学習期間,学習対象のマグニチュード下限をさまざまに変えて,CSEPのプロスペクティブ予測実験開始以前も含む2005-2017年のレトロスペクティブな予測・評価を行った(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13])。図24aは,学習に使う地震の下限をM3.5と固定し学習期間の長さを変えたモデルにおいて,3ヶ月先までの関東地域内においてM4以上の地震が発生しやすい場所を予測できているかという観点での成績である。基本的には,長期間のデータを学習した方が予測成績がよい。2011年の東北地震の前と後において成績をみると,東北地震後の方が好成績で,場所による活動度の差が東北地震後の方がくっきりしているのだと解釈できる。図24bからは,小さい地震まで学習対象とした方が短期間で学習を完了することがわかる。つまり,RIモデルによる予測においては,学習でみる活動の期間の長さよりも,学習した地震の数が大事であることが示唆される(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13])。

一方,数十年スケールの長期的な地震危険度の空間分布を求めるために,中国北部における1980-2016年のM3以上の地震の空間分布に対して,実装が簡単な新規提案のものを含めて四種類の手法で空間平滑化を行った(Xiong et al., 2019)。いずれの手法も同様の結果を示し,またクロスバリデーションでも安定した結果を示したので,空間分布のロバストなモデルが推定されたと考えられる(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13])。

階層ベイズ型時空間ETASモデルは,日本周辺の地震活動の標準モデルをめざして,CSEPの評価を受けている。このモデルの常時地震活動度 $\mu(x,y)$ は,余震などのトリガ効果を除いた地震活動度の高低の地域性を表わすもので,様々な地震確率予測の妥当な出発点の一つだと考えられている。日本の内陸地震に関しては,2011年東北沖地震などにつづく活動の激変期のデータを含めてフィットしても, $\mu(x,y)$ はほぼ時間不変であることが確かめられている(Ogata, 2017)。本年度は,東北地方太平洋沖地域の $\mu(x,y)$ を求め,フィットに使うデータを(1926-1995:  $M \geq 5$ )としても,M9後の激しい活動を含む(1926-2012:  $M \geq 5$ )としてもほとんど同じ結果が得られることを確認した。さらに,2011年M9地震以前のデータから決めた $\mu(x,y)$ は,学習期間外になる2011年M9以後の大地震の位置ともよく対応することが確認された(図25左)。また,繰り返し地震の位置とも良く対応しているようである(図25右)。一方,日本内陸部の $\mu(x,y)$ は,内陸部地殻(上盤側プレート)内の繰り返し地震(五十嵐, 2019)のうち,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似ている(図26)(東北大学理学研究科[課題番号:THK\_09])。

前震識別による本震発生確率の予測手法として提案されたOUK法(Ogata et al., 1996)は,現時点での最大地震よりMが0.5以上大きい地震が30日以内におきる確率を予測する手法であり,クロス集計表により有効な予測であることが確認されている(Ogata and Katsura, 2012)。この手法を発展させ,確率の活動への依存性をより一般的なスプライン関数とした手法(野村・尾形, 2018; 以後NO法)はOUK法に似ているが,予測対象が少し異なり「現時点での最大地震よりMが少しでも大きい地震が30日以内におきる確率」である。本年度は,予測対象の違いをこえて性能を比較するために,簡便な方法でNO法の予測対象を変更することを試みた(野村・尾形, 印刷中)。予測対象のマグニチュードに関しては,最大前震と本震とのマグニチュード差の分布(図27a)に基いてNO法の予測対象をOUK法の対象と同様にした(予測確率値を0.48倍にする)場合の予測性能を調べ,その場合でも有効な予測となることを確認した。同じ原理で,予測対象のマグニチュード下限を絶対値で指定した予測への変換もで

き、M6以上を対象とした場合についても有効な予測になっていることを確認した。また、前震確率評価時点から本震発生までの日数の分布（図27b）に基づいて同様の補正をすることで予測期間を縮めた場合の発生確率に変換した結果も、有効な予測となっていた（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI\_13〕）。

地震活動の評価による地震発生予測を業務的に行う場合の問題点を洗い出すために、データの取り込みと予測のアップデートを自動的に行なう試行的な準リアルタイムシステムを作り始めた（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI\_13〕）。今年度はまず、予測アルゴリズムのベースとなる階層的時空間ETASモデルを過去の様々な期間のデータにフィットした。求めたパラメータ値はデータベースとして蓄積され、過去の任意の時期、もしくはリアルタイムで加わる新しいデータに基いて予測を速やかに作製するために使われる。さらに、パラメータの最尤推定値ではなく、直近の活動からベイズ推定したETASパラメータ値の事後分布に基づいて、今後短い期間内に特に大きな地震がおきる確率をロバストに推定する新しい手法も開発した（Shcherbakov et al., 2019）。また、予測値の可視化のために、断層や地震活動など様々な情報と組みあわせて二次元の地図に表示し、対話的に拡大・縮小や個別情報の詳細へのアクセスができるマッピングツールを試作した。さらに、3次元でのマッピングツールも試作し（井筒・他, 2019）、毎日更新取得する地震カタログを用いて計算される静穏化指標、b値、GEONETによる観測点変位や面積歪み、地震活動の短期的な空間集中化指標（Lippiello, 2012）などを表示できるようにした（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI\_13〕）。

大地震への先行傾向があるのではないかとされているb値の変化を、赤池情報量基準（AIC）を用いて客観的に評価するパラメータとして、大地震の直前・直後でない時期の地震をブートストラップ法でリサンプルし、参照b値を1000個求め、そのうち判定対象期間のb値とのAIC差が2以上になる割合（ $P(\Delta AIC \geq 2)$ ）を用いることを提案した。b値の低下が先行した過去のいくつかの大地震（2003年十勝沖地震M8.0、2011年東北沖地震M9.0、2008年中国四川地震M8.0、2016年熊本地震M7.3）に対して事例解析を行なったところ、地震の数ヶ月前に非常に顕著な変化がみられた（図28）（千葉大学〔課題番号：CBA\_01〕）。

### （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、また、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。

どんなものであろうと、何らかの自然現象がおきるとそのあと地震の確率が高いという先行傾向（Nakatani, 2020）の有無や程度を検証するには、地震の前だけでなく、普段からどの程度異常が起きているかを知ることが必要である。宏観異常現象に関して、そのようなデータを集める努力がなされている（公募研究、東海大学〔課題番号：KOB008〕）。前計画で、1928年11月26日から2011年3月11日まで日本近海での深海魚出現事例336件（ほとんどが大地震発生より前に報告されたものである）のデータベースを作製した。この期間に日本でM6以上100km以浅の地震は221個あったが、30日以内距離100km以内に深海魚出現が先行したものは一つだけであった（Orihara et al., 2019; 織原, 2019a）。また、2011年東北沖地震（M9）の7日前に鹿島灘で51頭のマス・ストランディングがあったことから注目された鯨類ストランディングの地震先行傾向については、日本鯨類研究所が公開するストランディングレコードに記録されている過去51件の鹿島灘でのストランディングと周辺のM6以上の地震発

生(21個)の間に統計的に有意な相関はないことを既に報告している(織原・野田, 2015)が、さらに多くのデータで検証するため、国立科学博物館がホームページ上で公開している情報からマス・ストランディング(2頭以上の同時座礁)377件のデータ(1886-2016年)をデータベース化した(東海大学[課題番号:KOB008])。

宏観異常現象は、日常生活の中で気付ける事象であるため、報道やネットで注目されることがある。2019年6月18日22時22分に発生した山形県沖の地震(M6.7, 最大震度6強)に関連して、6月21日の朝に秋田魁新報社と共同通信社が「地震雲?18日夕方に目撃情報太い棒状の雲、由利本荘市で」といったタイトルのウェブニュース記事を配信したことから、この地震に関する「地震雲」の調査を行った(東海大学[課題番号:KOB008])。具体的には、地震発生前にTwitter上で地震雲は騒がれていたのか?を探るため、Yahoo!リアルタイム検索を用いて、「地震雲」のキーワードでこのサービスの過去ログを検索した。その結果、ツイート数は地震当日が最も多かった(図29)。また、これを見ると地震2日前からツイート数が急増しているが、ツイートされていた雲の大半は秋田県由利本荘市の雲ではなく福岡県の雲であった(織原, 2019b, 2019c)。

先行現象としての大きな確率利得が強い有意性で確立している前震識別法の一つ(Maeda, 1996; 以後M法)について、その予測能力が余震トリガ効果から派生しているものにすぎないのか(Nakatani, 2020, for review),あるいは、本震の物理的準備過程の存在を示唆する(例えば, Kamogawa et al., 2019)ものなのかを調べるために、ETASモデルによって作製した人工的なカタログ(つまり、定常ランダムな地震の発生と余震的トリガ効果だけで起きる地震活動)に対してM法を適用してみた(弘瀬・他, 2019; 前田・他, 印刷中, 東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13])。図30は、伊豆地域(1977-2018年, ただし三宅島の活動があった2000年6-9月は除外)における予察的な結果であり、人工カタログ(1000通り作成)、実際のカタログに対してそれぞれ最適化した上で、それぞれのカタログ上での予測成績を示している。いずれの成績指標も実際の地震カタログに対する予測の方が明らかにすぐれている。図31は、それぞれのカタログで各々の本震時刻を基準に、M法で前震候補とみなす群発地震の累積回数を示す(余震は除いてある)。どちらのカタログでも本震に向って前震活動は加速するが、実際のカタログでは本震5日前程度の前震数がETAS人工カタログよりかなり多い。実カタログに対する最適化では3日以内にM3以上の地震が3個あれば前震活動とみなすのに対し、ETASカタログへの最適化では、5日以内に2個となっており、実際の前震は、ETASで予測されるより数が多いという特徴を活用してM法の識別条件が厳しく設定できたことが、偽陽性を減らし、パフォーマンスに貢献したと解釈される。一方で、M法をETASカタログへ適用した場合でも、確率ゲインで100程度の予測はできており、M法は、余震的トリガ効果だけによって生まれる活動であっても前震活動だと識別することも見てとれる(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_13])。

地震の動的破壊が開始した後、それが大きく成長しやすい物理的条件というものがあるか?というのは、地震の可予測性の程度の原理的限界に関わる重要な問題である。標準的な考え方は、そんなものはないということであり、大地震の発生確率は、小地震の発生確率にいつでも定まった小さな割合をかけたものである(地震の規模別頻度分布は時間不変)ということになる(Nakatani, 2020 for review)。この問いに対するヒューリスティックなアプローチとして、先述の前震識別による地震発生確率の経験的予測法(OUK法およびNO法)で、規模別頻度分布が時間変化することを許すことによって、予測が改善されるかどうかを調べ

てみた（野村・尾形，印刷中）。群発活動が生じた場合には次の地震のマグニチュード分布がより大地震の割合が大きいものになる（Ogata et al., 2018）という仮説をNO法に取り入れると，時間不変のGR則を仮定した場合より予測性能がよくなることがわかった（図32）。この仮説をOUK法に取り入れた場合には，少数の地震からなる群発活動に絞った時以外では，かえって性能を下げる結果となっていた（Ogata et al., 2018）が，NO法に取り入れた場合では，クラスタサイズに制約をかけなくても，この規模別頻度分布の変化を取り入れることで性能が改善された。この傾向は，日本の地震に対しても全世界の地震に対しても同じであった（東京大学地震研究所 [課題番号:ERI\_13]）。また，日本の内陸の地殻内で発生したM6.5以上の地震を対象に，地震規模との経験的關係から計算される余震域の広がり程度の範囲の地震活動を見ると，地震発生から半年程度以降はb値が地震発生前に比べて高く，相対的に規模の大きな地震の割合が少ない傾向があることが分かった（気象庁 [課題番号:JMA\_01]）。

この他，前震活動の例として，2015年の小笠原の深発地震(Mw7.9，深さ700km)に対して，3ヶ月前から逆大森則に従う前震が30個弱おきていたことを見いだした（Gardonio et al., 2019，東京大学地震研究所 [課題番号:ERI\_13]）。深発地震に対して明瞭な前震活動が見つかったのは世界初である。また，大森則にしたがう20個ほどの余震も見いだされた。これらのほとんどは，マッチトフィルター法によって見いだされたM1.9-4.8の小さな地震で，気象庁のカタログ（検出保証下限マグニチュード3.7）では，余震が4つ登録されていただけであった。

このように，地震カタログを充実させることは重要であり，また，精密な震源決定は，前震活動が（余震的）トリガリングによる確率論的なカスケードアップ現象なのか，プレスリップなどの前兆的物理状態を示したものなのかの議論に重要な役割を果たす（例えば，Ellsworth and Bulut, 2018）。気象庁では，東海大学と共同で駿河湾における海底地震計観測を行った（気象庁 [課題番号:JMA\_01]）。この臨時OBS観測は，前計画で駿河湾地域の地震検知限界を大きく改善することが確かめられている（Baba et al., 2015）。一方，南アフリカ金鉱山（例えば，Manthei et al., 2019），内陸地震の稠密観測などの，高い検知率と高精度な震源決定が期待できる超高密度ネットワーク観測のハイサンプリングデータに対して，高速で自動処理してカタログを充実させるために，深層学習等を取り入れた計算機負荷の少ない検出アルゴリズムの試行的適用をはじめた（東京大学地震研究所 [課題番号:ERI\_13]）。また，気象庁では，2011年3月の地震波形に震源自動決定システム（PF法）を適用し，現在の一元化震源カタログの2倍以上のイベントを検出した。その結果，東北地方では取り漏らしなく捕捉できるマグニチュードの下限を約1.0ほど下げられることを示した（気象庁 [課題番号:JMA\_01]）。

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り（例えば，Bouchon et al., 2011; Doi and Kawakata, 2012, 2013），このようなものは特異な活動として事前識別がつきやすいと期待される。このような活動を網羅的に走査するために，昨年度，相似地震と判断するための波形の類似度（相互相関係数）の閾値をAICを用いて客観的に決定する方法を開発し，長野県中部の地殻内地震（2011年，Mj5.4）の前2年間のデータを走査して，そのような活動はほぼ本震直前の時期だけにおきていたとの結果を得た（Hirano et al., 2019，立命館大学 [課題番号:RTM\_02]）。しかしこの手法は，計算された膨大な相互相関係数の分布を適切に表現するためのパラメータを最尤推定すること，および上位いくつまでを外れ値とするかを逐次検証するため膨大な計算コストを要する。そ

ここで今年度は、1) 相互相関係数の分布を表現するパラメータを厳密な最尤推定を行わずに近似すること、2) 外れ値の上位をひとつずつ検討するのではなく1) で近似的に求めたパラメータから直接的に閾値を求める、という改造を行い、計算の高速・効率化を達成した。さらに、テンプレートとして既知の地震波形を与えることなく、相似微小地震を効率よく見つけだすことを目指して、連続波形データから得られる短時間波形全ての組み合わせについて、その類似度を判定するための試みを開始した(立命館大学 [課題番号: RTM\_02])。この問題は類似音声探知の研究で発展した手法が地震研究にも応用され始めているが、判定正確性と計算効率はまだまだである。そこで短時間波形の特徴抽出のための新たな関数を2通り提案し、予察的な実験で、既存手法と同等以上の判定精度と劇的な計算効率の改善がみられた。

様々な外部条件の変化に、地震発生の確率が影響される可能性が提案されている。トンガ・ケルマディック海溝沿いで発生したプレート境界型の地震活動について、潮汐との相関を調査した。解析の結果、潮汐指標値の絶対値が大きいほど地震の選択性が顕著であること、せん断応力よりも法線応力の方が地震のトリガーに寄与していることがわかった(Hirose et al., 2019a, 気象庁 [課題番号: JMA\_01])。地震活動に季節性があることは以前より様々な地域で提案されており、これは、地震確率の時間変動の予測に使用できるはずの情報である。なるべく恣意性を除いた手法で余震を取り除いて独立地震に対して季節性があるかどうか客観的に評価するために、山陰地方の1980-2017年のM3以上の地震活動に対して時空間ETASを用いた確率的手法での余震除去カタログを10,000通り生成することによって、独立地震の発生数にみられる6ヶ月周期の変動が8シグマで有意であることを示した(Ueda and Kato, 2019a, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_13])。春と秋には平均より25%程度地震発生確率が高いという傾向であり、これは、解析期間を2つに分割しても安定してみられる傾向であった。余震除去を階層的時空間ETASで行ってみても結果はほぼ同じであった(図33a-c)。また、数が少ないのでそれ自体の有意性は評価しがたいが、1850-2017年および、1923-2017年のM6.2以上の地震だけについても、春と秋に多いという傾向はある。さらに、新潟地方の1980年からのM3以上の地震活動に対して同様の解析(図33d-f, Ueda and Kato, 2019b)を行うと、1年周期の変動が有意であった(夏に少なく、冬に多い)。これらの季節性の原因として、降水の地下浸透による間隙圧の増加、あるいは、降雪/雪解けによる鉛直応力の変化が考えられる。また、中国の天然ガス地層貯留フィールドでの地震活動データからETASモデリングから余震を除去することで、貯留によって人工的に誘発されたい地震活動の存在が示唆された(Zhou et al., 2019, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_13])。誘発された活動は、貯留層との流体移動が難しそうな場所にあり、間隙圧の効果ではなく、ガスの注入・回収によって生じる岩盤の変位に起因する弾性応力の変化ではないかと考えられる。

b 値の低いところで地震がおきる例がたびたび指摘されているが、2016年熊本地震震源域周辺の最近(2017年1月から2019年3月まで)の地震活動のb 値の空間分布を調べたところ、本震破壊域の南端10km程度の領域でだけ、地震前に比べて顕著にb 値が低下していることを見いだした。さらに、これより北の本震破壊域では大森-宇津則のp 値が $>1$ と余震の減衰が速いものに対して、日奈久断層のこれより南の部分ではp 値 $<1$ で余震の減衰が遅い。このことは、地震後の地殻変動観測から指摘(Pollitz et al., 2017)されている本震の破壊域での余効滑りと岩盤の粘弾性緩和から期待される断層上での不均質な応力変化と整合的(図34, Nanjo

et al., 2019) であり、熊本地震以降に本震破壊域南端での応力増加が進行している可能性を示唆する(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_13])。

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。神奈川県温泉地学研究所が中心となって1976年に設立されたアマチュア研究グループ「なまずの会」が記録した国内の132個の井戸の水位データ(1977年2月1日-1987年3月31日)と地震(M6.0以上、井戸との距離はマグニチュードに応じて100-250km以内)を比較したところ、地震直前に水位が異常を示していた井戸は6個であった(織原, 2019d; 織原・長尾, 2019; 織原・他, 2019, 東海大学 [課題番号: KOB008])。また、産業技術総合研究所が中心となって行っている台湾・国立成功大学との共同研究の一環として、水文学的・地球化学的手法による地震予知研究についての日台国際ワークショップを主催しプロシーディングス(Matsumoto and Shieh, 2019)を公開した(産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09])。

全国25施設の医薬系放射線管理施設が参画する大気中ラドン濃度のモニタリングネットワークでは、計画的に各施設からの過去データを回収し順次解析を行っている(Nakatani, 2020, for review)。神戸薬科大学での観測された大気中ラドン濃度変動データにおいては、1995年兵庫県南部地震(Mw6.9)の1ヶ月前から大きな変動があったことが知られている(Yasuoka et al., 2006)。このデータに対し昨年度から進めていた分潮解析の結果を精査し、1984-1988年にはなかったK1分潮成分(周期23.934時間)が、兵庫県南部地震前の1990年-1994年の期間では認めらるという傾向が、誤差を考慮しても有意と思われることを見いだした(図35, 東北大学 [課題番号: THK\_10])。また、大阪薬科大学で観測された大気中ラドン濃度の経年変化と正弦回帰した平均変動解析を進め、2018年大阪府北部地震(Mj6.1)の約1年前から大気中ラドン濃度が低下していたことを発表した(三浦・他, 2019, 東北大学 [課題番号: THK\_10])。また、より多くの放射線管理施設のデータが利用できるよう、室温制御なしの環境で測定されたデータでも、温度補正によって空气中ラドン濃度の測定が可能になることを示した(東北大学 [課題番号: THK\_10])。また、液体シンチレーションカウンターのようにより有機溶媒を使用しないことから使い易いRAD7装置によっても、水中のラドン濃度が10-90Bq/Lの範囲なら測定が可能であることを報告した(Higuchi et al., 2019, 東北大学 [課題番号: THK\_10])。

各観測点で測定される大気中ラドン濃度変動が、どのくらい広い範囲に影響しているのか、またどのくらいの規模の地震が寄与するのかを明らかにするために、福島県立医科大学と札幌医科大学における大気中ラドン濃度変動度(連続データ)と地震系列(非連続データ)の強度関数が近くなるように地震を選択することで、大気中ラドン濃度変動度に寄与する地震の条件の予察的な推定をおこなった。これにより、大気中ラドン濃度異常においても、地震に伴う地下水位の異常の場合(Matsumoto et al., 2003)と同様な閾値マグニチュード-震源距離の関係が認められた(図36, 東北大学 [課題番号: THK\_10])。

ラドンは地殻岩石中において常に生成されているため、そのフラックスは地殻の透水性を反映すると期待され、大気中ラドン濃度は、気象による変動を補正することによって、地殻からのガスフラックスを反映していると期待される。一つの可能性として、土壌中でラドン測定を行えば、地殻フラックスをより正確に反映する可能性がある。活性炭を用いたラドン収集器(PicoRad)を用いてこれを行うための校正係数を導出し出版した(Wakabayashi et al., 2019, 東北大学 [課題番号: THK\_10])。さらに、ラドンフラックスが大気電場に影響を与えうることも提唱されているため、千葉県旭市で地中及び地表付近のラドン濃度と大気

電場、ULF電磁場のパイロット観測（大村，2019）を行い，また，50km離れた茨城県美浦に同様の観測点を追加した（図37，千葉大学 [課題番号：CBA\_01]）。旭のパイロット観測から得られた時系列データ（2018年2月13日-2018年12月31日）について，地中ラドン濃度・気温・気圧のマルチチャンネル特異スペクトル解析から気象要素の影響を除去し地中ラドンフラックスを求め，観測点周囲50kmでの地震活動と比べてみると，旭観測点直下で地震が発生した数日前に地中ラドンフラックスの $3\sigma$ を超える異常を示す傾向が感じられる（図38）。また，国土地理院のF3解を用いて面積ひずみを求めて比較したところ，地中ラドンフラックスは，弾性圧縮に対して増加し，弾性膨張に対して減少する傾向がみられた（千葉大学 [課題番号：CBA\_01]）。

近年，地震に先行する電離圏電子数異常の報告が多くされている。例えば，Kon et al., (2011) は，日本上空における電離圏総電子数（TEC）は浅い $M > 6$ の地震1-5日前に正の有意相関があることを示した。しかし，GNSSデータは1990年代以降しか存在しない。そこで，1958年以降の長期にわたるデータが存在する地上の電離圏観測機器であるイオノゾンデに注目し，電離圏の最大電子密度（NmF2）とその高度（hmF2）について地震との相関解析を行った（千葉大学 [課題番号：CBA\_01]）。NmF2とhmF2について前15日間の中央値と四分位範囲（IQR）を用いて，観測値が中央値+1.5IQR，または中央値-1.5IQRを超える場合，異常と定義した。また，電離圏擾乱は地磁気擾乱によっても発生する。したがって，地磁気擾乱に起因する電離圏異常の特徴を調査し，そのデータを取り除いた。イオノゾンデから半径1000kmおよび半径350km以内で発生した $M \geq 6$ ，深さ $\leq 40$ kmの地震の発生と電離圏異常の発生の時間的相関をSuperposed Epoch Analysis（SEA）で探った。SEAの結果（図39b-d）から，NmF2は半径1000km以内では地震前6-10日間，半径350km以内では地震前1-10日間の正の有意な異常を示した。hmF2については有意な異常はなかった。さらに，ROC解析によってNmF2の先行傾向の評価を行った（図39e）。ROC解析を最も有意な異常を示した5日カウントで6-10日前，1日カウントでの7日前に適用すると，確率ゲインは1をわずかに超え，非常に弱いながらも先行傾向がある可能性がある。

フランスの地震先行現象検知衛星DEMETER（2004-2010運用）での観測データから，地震に数時間先行してVLF電磁波強度が減少する傾向が主張されている（Nemec et al., 2008）。しかしその統計解析においては時空間解析領域における地震数のばらつきを整えるために多数の仮定を設けていた。本年度は，このばらつきを無くすために別手法の解析を行い，それでも類似した先行性が認められた（静岡県立大学 [課題番号：KOB009]）。また，DEMETER衛星の上位互換的なスペックである中国のCSES衛星（2018年2月打ち上げ，現在運用中）のデータで同様の相関解析を行うための前処理を行った（静岡県立大学 [課題番号：KOB009]）。また，VLF電磁波強度に絞ってDEMETER（約130kg）の廉価版の超小型衛星（約10kg）多数による観測を目指すPrelude計画は，ブレッドボードモデルからエンジニアリングモデルの段階に進んだ（児玉，2019；児玉・他，2019，宇宙航空研究開発機構 [課題番号：KOB007]）。

### これまでの課題と今後の展望

プレート境界の滑りのモニタリングは，スロー地震と繰り返し地震の解析を中心に高度化し，その時空間変化に対して定量的・網羅的な結果が得られるようになってきている。このことによって，大地震発生のサイクルにおけるスロースリップの役割をデータから実証的に提案するような成果も得られはじめています。また，滑り特性の空間不均質の原因も構造など

との比較から検討されはじめています。物理モデルの拘束を含むデータ同化も、実際の観測データへの適用が成功しはじめており、既に進行中のスロースリップの終期が予測できる可能性が示されている。今後、物理モデルに基づく滑り予測は、着実に進展することが期待される。経験的な地震活動のモデリングによる地震予測は、特に短期的な前震に関して、前震を含む全ての地震についての余震的トリガ作用を考慮するETASモデルだけでは説明できない現象であることが示唆されたのは重要な進歩である。さらに、前震の解析方法に関しても、網羅的・客観的な新たな方法が提案され始めており、今後もいっそうの前進が期待される。一方、地震の規模と数の関係を表すb値等の、中期的な地震活動の変化に関しては、新たなケーススタディはでていないが、先行傾向が統計的に有意であるかの評価が重要な課題である。これは、地殻流体にみられる先行現象候補の研究にもあてはまる。電磁気的な現象に関しては、短期的なもので、低いゲインながらも有意な先行傾向が示されたものはいくつかあり、人工衛星による観測を含めたデータの拡充、解析技術の向上によって研究の量を増やしていくことが、メカニズムの解明への道を拓くかもしれない。

## 成果リスト

- Ariyoshi, K., J-P Ampuero, R. Burgmann, T. Matsuzawa, A. Hasegawa, R. Hino, T. Hori (2019), Quantitative relationship between aseismic slip propagation speed and frictional properties, *Tectonophysics*, 767, 128151, doi:10.1016/j.tecto.2019.06.021
- Baba, S., A. Takeo, K. Obara, T. Matsuzawa, T. Maeda (2019), Comprehensive detection of very low frequency earthquakes off the Hokkaido and Tohoku Pacific coasts, northeastern Japan, *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 125, doi:10.1029/2019JB017988
- Escobar, M. T., N. Takahata, T. Kagoshima, K. Shirai, K. Tanaka, J.-O Park, H. Obata, Y. Sano (2019), Assessment of Helium Isotopes near the Japan Trench 5 Years after the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *ACS Earth and Space Chemistry*, 3 (4), 581-587, doi:10.1021/acsearthspacechem.8b00190
- Fukuda, J. (2019), Variability of the space-time evolution of slow slip events off the Boso Peninsula, central Japan, from 1996 to 2018 (Invited), 日本地球惑星科学連合2019年大会, SCG48-01
- Fukuda, J., K. M. Johnson (2019a), Bayesian parameter estimation of a physics-based model of postseismic crustal deformation (Invited), 日本地球惑星科学連合2019年大会, MGI30-12
- Fukuda, J., K. M. Johnson (2019b), Bayesian inverse modeling of postseismic deformation following the 2011 Tohoku-oki earthquake using mechanically coupled models of coseismic slip, stress-driven afterslip, and viscoelastic relaxation, AGU Fall Meeting 2019, T11A-04
- Fukushima, Y., M. Hashimoto, M. Miyazawa, N. Uchida, T. Taira (2019), Surface creep rate distribution along the Philippine fault, Leyte Island, and possible repeating of Mw 6.5 earthquakes on an isolated locked patch, *Earth Planet. Space*, 71(1), doi:10.1186/s40623-019-1096-5

- Gardonio, B., A. Schubnel, S. Das, H. Lyon-Caen, D. Marsan, M. Bouchon, A. Kato (2020), The preseismic and postseismic phases of the ~700-km deep Mw7.9 Bonin Islands earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2019GL085589, doi:10.1029/2019GL085589
- Goto, S., R. Uchida, K. Igarashi, C. - H. Chen, M.-H. Kao, K. Umeno (2019), Pre-seismic ionospheric anomalies detected before the 2016 Taiwan earthquake, *J. Geophys. Res.:Space Physics*, 124(11), 9239-9252, doi:10.1029/2019JA026640
- Guo, Y., J. Zhuang, Y. Ogata (2019), Modelling and forecasting aftershocks can be improved by incorporating rupture geometry in the ETAS model, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 12881-12889. doi:10.1029/2019GL084775
- Higuchi, S., Kamishiro, Y., Ishihara, M., Yasuoka, Y., Mori, Y., Hosoda, M., Iwaoka, K., Tokonami, S., Takahashi, R., Janik, M., Muto, J., Nagahama, H., Mukai, T. (2019), Evaluation of a radon air monitor in the measurement of radon concentration in water in comparison with a liquid scintillation counter, *Radiation Protection Dosimetry* 184, 426-429
- Hirahara, K., K. Nishikiori (2019), Estimation of frictional properties and slip evolution on a long-term slow slip event fault with the ensemble Kalman filter: numerical experiments, *Geophys. J. Int.*, 219, 2074-2096, doi:10.1093/gji/ggz415
- Hirano, S., H. Kawakata, I. Doi (2019), Foreshock activity detection by a threshold-free matched-filter technique, *JpGU Meeting 2019*, SSS04-05
- 弘瀬冬樹, 溜渕功史, 前田憲二 (2019), 自然地震カタログとETASカタログに内在する前震活動の特徴の違い:前震予測モデルを用いた検証, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SSS09-P02
- Hirose, F., K. Maeda, O. Kamigaichi (2019a), Tidal Forcing of Interplate Earthquakes Along the Tonga - Kermadec Trench, *J. Geophys. Res.*, 124, 10498-10521, doi:10.1029/2019JB018088
- Hirose, F., K. Maeda, Y. Yoshida (2019b), Maximum magnitude of subduction earthquakes along the Japan-Kuril-Kamchatka trench estimated from seismic moment conservation, *Geophys. J. Int.*, 219, 1590-1612, doi:10.1093/gji/ggz381
- 廣瀬仁 (2019), GNSS座標時系列データに含まれる common-mode error 除去手法の開発, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 23, 18-25
- Hirose, H., W. Tamura, T. Kimura (2019c), Cumulative slip distribution of short-term slow slip events in the western Shikoku area, southwest Japan based on tilt change measurements, *JpGU Meeting 2019*, SCG48-02
- Hirose, H. T. Kimura (2019), Slip distributions of short-term slow slip events in the Shikoku area, southwest Japan from 2001 to 2019 based on tilt change measurements, *International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019*, P2-05
- Honsho, C., M. Kido, F. Tomita, N. Uchida (2019), Offshore Postseismic Deformation of the 2011 Tohoku Earthquake Revisited: Application of Improved GPS-Acoustic

- Positioning Method Considering Sloping Sound Speed Structure, *J. Geophys. Res.*, 124(6): 5990-6009, doi:10.1029/2018JB017135
- Ito, A., T. Tonegawa, N. Uchida, Y. Yamamoto, D. Suetsugu, R. Hino, H. Sugioka, K. Obana, K. Nakahigashi, M. Shinohara (2019), Configuration and structure of the Philippine Sea Plate off Boso, Japan: constraints on the shallow subduction kinematics, seismicity, and slow slip events, *Earth Planet. Space*, 71(1), doi:10.1186/s40623-019-1090-y
- Iwasaki, T., N. Tsumura, T. Ito, K. Arita, M. Makoto, H. Sato, E. Kurashimo, N. Hirata, S. Abe, K. Noda, A. Fujiwara, S. Kikuchi, K. Suzuki (2019), Structural heterogeneity in and around the fold-and-thrust belt of the Hidaka Collision zone, Hokkaido, Japan and its relationship to the aftershock activity of the 2018 Hokkaido Eastern Ibari Earthquake, *Earth Planet. Space*, 71, 103, doi:10.1186/s40623-019-1081-z
- 岩田貴樹, 吉田圭佑, 深畑幸俊 (2019), 地震学的データを用いた応力インバージョン, *地学雑誌*, 128, 797-811, doi:10.5026/jgeography.128.797
- 井筒潤, 楠城一嘉, 鴨川仁, 織原義明, 長尾年恭 (2019), 地震災害予測のための地球観測データのデジタルアースによる可視化, *東海大学海洋研究所研究報告*, 41, 1-15
- Kakinaka, S., K. Umeno (2020), Characterizing Cryptocurrency Market with Levy's Stable Distributions, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 89, 024802, doi:10.7566/jpsj.89.024802
- Kamogawa, M., K. Z. Nanjo, J. Izutsu, Y. Orihara, T. Nagao, S. Uyeda (2019), Nucleation and cascade features of earthquake mainshock statistically explored from foreshock seismicity, *Entropy*, 21(4), 421, doi:10.3390/e21040421
- 鴨川 仁, 児玉哲哉, 長尾年恭 (2019), DEMETER衛星によって検知された地震先行的VLF強度現象時のELF帯電波強度について, *日本地球惑星科学連合2019年大会*, MIS22-P04
- Kano, M., A. Kato, K. Obara (2019), Episodic tremor and slip silently invades strongly locked megathrust zone at the Nankai Trough subduction, *Scientific Reports*, 9, doi:10.1038/s41598-019-45781-0
- Kano, M., Y. Kano (2019), Possible slow slip event beneath the Kii Peninsula, southwest Japan, inferred from historical tilt records in 1973, *Earth, Planet. Space*, 71:95, doi:10.1186/s40623-019-1076-9
- 木口努, 今西和俊, 松本則夫 (2019), 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果 (2018年11月~2019年4月), *地震予知連絡会報*, 102, 212-213
- 木口努, 今西和俊, 松本則夫 (印刷中), 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果 (2019年5月~2019年10月), *地震予知連絡会報*, 103
- 木口努, 桑原保人 (2019), 孔井内測定で検出した透水性亀裂の方向と応力場の関係: 産総研西尾善明観測点の結果, *活断層・古地震研究報告*, 19, 33-59
- 木口努, 松本則夫, 北川有一, 板場智史, 落唯史, 佐藤努 (2019), 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果 (2018年11月~2019年4月) (59), *地震予知連絡会会報*, 102, 201-208

- 木口努, 松本則夫, 北川有一, 板場智史, 落唯史, 矢部優, 佐藤努 (印刷中), 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2019年5月~2019年10月)(60), 地震予知連絡会会報, 103
- 気象研究所 (2019a), 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, 102, 17-20
- 気象研究所 (2019b), 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, 102, 277-279
- 気象研究所 (2019c), 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, 102, 280-283
- 気象研究所 (2019d), 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率 (2019), 地震予知連絡会会報, 102, 380-384
- 北川有一, 板場智史, 松本則夫, 落唯史, 木口努 (2019), 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果 (2018年11月~2019年4月), 地震予知連絡会会報, 102, 284-294
- 北川有一, 板場智史, 武田直人, 松本則夫, 落唯史, 木口努, 矢部優 (印刷中), 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果 (2019年5月~2019年10月), 地震予知連絡会会報, 103
- 北川有一, 松本則夫, 佐藤努, 板場智史, 落唯史, 木口努 (2019), 近畿地域の地下水位・歪観測結果 (2018年11月~2019年4月), 地震予知連絡会会報, 102, 295-298
- 北川有一, 松本則夫, 佐藤努, 板場智史, 落唯史, 木口努, 矢部優 (印刷中), 近畿地域の地下水位・歪観測結果 (2018年11月~2019年4月) 地震予知連絡会会報, 103
- Kobayashi, A., T. Tsuyuki (2019), Long-term slow slip event detected beneath the Shima Peninsula, central Japan, from GNSS data, *Earth Planet. Space*, 71, 60, doi:10.1186/s40623-019-1037-3
- 児玉哲哉 (2019), S-Booster2018参加報告, 日本地球惑星科学連合2019年大会, MIS22-05
- 児玉 哲哉, 山崎政彦, 鴨川仁 (2019), 地震先行現象検証超小型衛星:Preludeの現状, 第16回宇宙環境シンポジウム
- Kono, A., T. Sato, M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, K. Uehira, T. Shinbo, Y. Machida, R. Hino, R. Azuma (2020), 2D spatial distribution of reflection intensity on the upper surface of the Philippine Sea plate off the Boso Peninsula, Japan, *Tectonophysics*, 774(5), 228206, doi:10.1016/j.tecto.2019.228206
- Kurashimo, E, T. Iidaka, N. Tsumura, T. Iwasaki (2019), Earthquake reflection imaging of subduction structure beneath the eastern part of the Kii Peninsula, southwestern Japan, AGU Fall Meeting 2019, T51G-0367
- Kurihara, R., K. Obara, A. Takeo, Y. Tanaka, 2019, Deep low-frequency Earthquakes associated with the eruptions of Shinmoe-dake in Kirishima Volcanoes, *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 124, doi:10.1029/2019JB01803
- Lee., H, H. Kim, T. Kagoshima, J.O. Park, N. Takahata, Y. Sano (2019), Mantle degassing along strike-slip faults in the Southeastern Korean Peninsula, *Scientific Reports*, 9, 15334, doi:10.1038/s41598-019-51719-3

- Li, Y., D. Wang, S. Xu, L. Fang, Y. Cheng, G. Luo, B. Yan, B. Enescu, J. Mori (2019), Thrust and Conjugate Strike - Slip Faults in the 17 June 2018 MJMA 6.1 (Mw 5.5) Osaka, Japan, Earthquake Sequence, *Seismol. Res. Lett.*, 90 (6), 2132-2141, doi:10.1785/0220190122
- Liu, J.-Y., C.-Y. Lin, Y.-L. Tsai, T.-C. Liu, K. Hattori, Y.-Y. Sun, T.-R. Wu (2019), Ionospheric GNSS total electron content for tsunami warning, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 13, 05n06, 1941007, doi:10.1142/S1793431119410070
- 前田憲二, 弘瀬冬樹, 溜瀨功史 (印刷中), 群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測手法(5):最近の活動事例による検証とETASモデルとの比較, *地震予知連絡学会報*, 103
- Manthei, G., K. Plenkers, J. Philipp, M. Naoi, H. Moriya, M. Nakatani (2019), In-Situ Acoustic Emission Monitoring in Mines, ARMA19-1711
- Matsumoto, N., C.-L. Shieh eds. (2019), Proceedings of the 18th Taiwan-Japan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, <https://unit.aist.go.jp/ievg/tectonohydro/topics/workshop/2019/18thProceeding.pdf>
- 三浦直, 吉井未来, 安岡由美, 床次眞司, 長濱裕幸, 向高弘 (2019), 監視モニタによる空气中ラドン濃度測定の見直し, 第69回日本薬学会関西支部総会・大会, P-AM-43
- Nakatani, M. (2020), Evaluation of phenomena preceding earthquakes and earthquake predictability, *J. Disaster Res.* 15(2), 112-143, doi:10.20965/jdr.2020.p0112
- Nanjo, K. Z. (2019), Capability of Tokai strainmeter network to detect and locate a slow slip: First results, *Pure and Applied Geophysics*, doi:10.1007/s00024-019-02367-1
- Nanjo, K. Z., J. Izutsu, Y. Orihara, M. Kamogawa, T. Nagao (2019), Changes in Seismicity Pattern Due to the 2016 Kumamoto Earthquakes Identify a Highly Stressed Area on the Hinagu Fault Zone, *Geophys. Res. Lett.*, 46(16), 9489-9496, doi:10.1029/2019GL083463
- Nishikawa, T., T. Matsuzawa, K. Ohta, N. Uchida, T. Nishimura, S. Ide (2019), The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories, *Science*, 365, 808-813, doi:10.1126/science.aax5618
- Noda, Y., H. Hirose (2019), The b-value of the earthquake swarm activities accompanied by the Boso slow slip events, JpGU Meeting 2019, SCG48-P45
- 野村俊一, 尾形良彦 (印刷中), 多様な予測方式に対する前震識別モデルとその予測性能評価, *地震予知連絡学会報*, 103
- 野村俊一 (2020), Inversion of spatio-temporal variation in - 147 - interpolate slip rate from repeating earthquakes (招待講演), 第10回データ同化ワークショップ
- Nomura, S., Y. Ogata, N. Uchida, M. Matsu'ura (2020), Spatio-temporal renewal model for repeating earthquakes to estimate interplate slip rate (招待講演), ISM Symposium on Environmental Statistics 2020

- 落唯史, 板場智史, 松本則夫, 北川有一, 武田直人, 木口努, 木村尚紀, 木村武志, 松澤孝紀, 汐見勝彦 (2019), 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 (2018年11月~2019年4月), 地震予知連絡会会報, 102, 184-200
- Ogata, Y., K. Katsura, H. Tsuruoka, N. Hirata (2019), High-resolution 3D earthquake forecasting beneath the greater Tokyo area, *Earth Planet. Space*, 71, 113, doi: 10.1186/s40623-019-1086-7
- 尾形良彦 (2019), Delaunay三角形網による高分解能地震活動モデル, 日本地震学会2019年度秋季大会, S14-05
- Ogata, Y. (2019), High resolution seismicity models using interpolation with Delaunay triangulation, 11th International Workshop on Statistical Seismology (第11回統計地震学国際ワークショップ)
- 大村潤平, 大山佳織, 韓鵬, 吉野千恵, 小島春奈, 服部克巳, 下道國, 小西敏春, 古屋隆一, 山口弘輝 (2019), 房総半島における大気電気パラメータの観測, *Journal of Atmospheric Electricity*, 38, 37-52, doi:10.1541/jae.38.37
- 織原義明 (2019a), 深海魚と地震, *地震ジャーナル*, 68, 40-43
- 織原義明 (2019b), 2019年6月18日山形県沖の地震前後の地震雲発生のうわさから考える Twitter ユーザーの科学リテラシー, 東海大学海洋研究所研究報告, 41, 16-31
- 織原義明 (2019c), 2019年6月18日山形県沖の地震前後の地震雲に関する「つぶやき」から考えるツイッターユーザーの科学リテラシー, 日本地震学会2019年秋季大会, S24-11
- 織原義明 (2019d), 地震予知を目指したアマチュア研究グループによる地下水データの再検証, 日本地震予知学会第6回学術講演会アブストラクト集, No.19-02
- Orihara, Y., M. Kamogawa, Y. Noda, T. Nagao (2019), Is Japanese folklore concerning deep-sea fish appearance a real precursor of earthquakes?, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 109(4), 1556-1562, doi:10.1785/0120190014
- 織原義明, 長尾年恭 (2019), アマチュア研究グループ“なまずの会”による地下水異常と地震との関係についての再調査, 日本地震学会2019年度秋季大会, S14-04
- 織原義明, 鴨川仁, 長尾年恭 (2019), なまずの会による地下水異常と地震との関係についての再調査, 日本地球惑星科学連合2019年大会, MIS22-04
- Osawa, Y., Y. Ogura, K. Motojima (2019), Statistical relation between earthquakes and radiation dose increments at the radiation monitoring post, *Journal of Atmospheric Electricity*, 38(1), 11-21, doi:10.1541/jae.38.11
- Sakamoto, R., Y. Tanaka (2019), Theoretical consideration on a relationship between tidal periods and permeability on the plate interface with high-pressure fluids, AGU Fall Meeting 2019, T43H-0423
- Shcherbakov, R., J. Zhuang, G. Zoeller, Y. Ogata (2019), Forecasting the magnitude of the largest expected earthquake, *Nature Communications*, 10:4051, doi:10.1038/s41467-019-11958-4
- 高木涼太, 内田直希, 小原一成 (2019), 関東地方におけるスロースリップイベントの系統的検出の試み, 日本地震学会2019年度秋季大会, S03P-034,

- Takagi, R., N. Uchida, T. Nakayama, R. Azuma, A. Ishigami, T. Okada, T. Nakamura, K. Shiomi, 2019a, Estimation of the Orientations of the S-net Cabled Ocean-Bottom Sensors, *Seismol. Res. Lett.*, 90, 2175-2187, doi:10.1785/0220190093
- Takagi, R., N. Uchida, K. Obara (2019b), Along-strike variation and migration of long-term slow slip events in the western Nankai subduction zone, Japan, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2018JB016738
- Tamaribuchi, K., A. Kobayashi, T. Nishimiya, F. Hirose, S. Annoura (2019), Characteristics of Shallow Low-Frequency Earthquakes off the Kii Peninsula, Japan, in 2004 Revealed by Ocean Bottom Seismometers, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 23, doi:10.1029/2019GL085158
- Teshiba, S., H. Hirose (2019), Interplate slip around the Hyuganada-Bungo Channel from 1996 to 1998 based on GNSS data, *International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019*, P2-11
- Tramutoli, T., F. Marchese, A. Falconieri, C. Filizzola, N. Genzano, K. Hattori, M. Lisi, J.-Y. Liu, D. Ouzounov, M. Parrot, S. Pulinetz (2019), Tropospheric and ionospheric anomalies induced by volcanic and Saharan dust events as part of geosphere interaction phenomena, *Geosciences*, 9(4), 177, doi:10.3390/geosciences9040177
- Tsuru, T., K. Amakasu, J.-O Park, J. Sakakibara, M. Takanashi (2019), A new seismic survey technology using underwater speaker detected a low-velocity zone near the seafloor: an implication of methane gas accumulation in Tokyo Bay, *Earth Planet. Space*, 71:31, doi:10.1186/s40623-019-1011-0
- Uchida, N. (2019), Detection of repeating earthquakes and their application in characterizing slow fault slip, *Prog. Earth. Planet. Sci.*, 6(1): 40, doi:10.1186/s40645-019-0284-z
- Uchida, N., R. Burgmann (2019), Repeating earthquakes, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 47, doi: 10.1146/annurev-earth-053018-0601191
- Uchida, N., D. Kalafat, A. Pinar, Y. Yamamoto (2019), Repeating earthquakes and interplate coupling along the western part of the North Anatolian Fault, *Tectonophysics*, 769, 228185, doi:10.1016/j.tecto.2019.228185.
- Uchida N., R. Takagi, Y. Asano, K. Obara (2020), Migration of shallow and deep slow earthquakes toward the locked segment of the Nankai megathrust, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 531, 115986, doi:10.1016/j.epsl.2019.115986
- Ueda, T., A. Kato (2019a), Seasonal variations in crustal seismicity in San-in district, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 3172-3179, doi:10.1029/2018GL081789
- Ueda, T., A. Kato (2019b), Seasonal variations in crustal seismicity in several tectonic regions in Japan, *AGU Fall Meeting 2019*, S13D-0471
- Umemiya Y., Y. Tanaka (2019), Possibility of crustal deformation caused by deep fluid flow during long-term slow slip events in the Tokai area, *AGU Fall Meeting 2019*, T43H-0433

- Wakabayashi, A., Y. Yasuoka, M. Janik, H. Nagahama, N. Fukuhori, Y. Mori, Y. Arai, S. Fujii, T. Mukai (2019), Derivation and validity evaluation of calibration factors for activated-charcoal radon collectors, *Radioisotopes* 68, 317-329, doi:10.3769/radioisotopes.68.317
- Wang, K., L. Brown, Y. Hu, K. Yoshida, J. He, T. Sun (2019), Stable forearc stressed by a weak megathrust: Mechanical and geodynamic implications of stress changes caused by the M=9 Tohoku-oki earthquake, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124(3), 6179-6194, doi:10.1029/2018JB017043
- Xiong, Z., J. Zhuang, S. Zhou (2019), Long-term earthquake hazard in North China estimated from a modern catalog, *Bull. Seismol. Soc. Ame.*, 109, 2340-2355, doi:10.1785/0120190006
- 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 (印刷中), 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 (2019年5月~2019年10月), 地震予知連絡会会報, 103
- Yabe, S., R. Fukuchi, R. Hamada, G. Kimura (2019), Simultaneous estimation of in situ porosity and thermal structure from core sample measurements and resistivity log data at Nankai accretionary prism, *Earth Planet. Space*, 71, doi:10.1186/s40623-019-1097-4
- Yoshida, K. (2019), Prevalence of asymmetrical rupture in small earthquakes and its effect on the estimation of stress drop: A systematic investigation in inland Japan, *Geosci. Lett.*, 6, 16, doi:10.1186/s40562-019-0145-z
- Yoshida, K., T. Saito, T. Taira, K. Emoto, T. Matsuzawa (2019), Stress release process ongoing along a crustal fault examined through the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen, NE Japan, earthquake, 日本地震学会秋季大会2019年大会, S08-23
- Yoshida, K., T. Saito, K. Emoto, Y. Urata, D. Sato (2019), Rupture directivity, stress drop and hypocenter migration of small- and moderate-sized earthquakes in the Yamagata-Fukushima border swarm triggered by the upward pore pressure migration after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Tectonophysics*, 769, doi:10.1016/j.tecto.2019.228184
- 吉田圭佑, 長谷川昭, 野口科子 (2019), 北海道函館周辺の深部低周波地震と内陸の繰り返し地震, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SCG61-18
- Zhou, P., H. Yang, B. Wang, J. Zhuang (2019), Seismological investigations of induced earthquakes near the Hutubi underground gas storage facility, *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 124, 8753-8770, doi:10.1029/2019JB017360

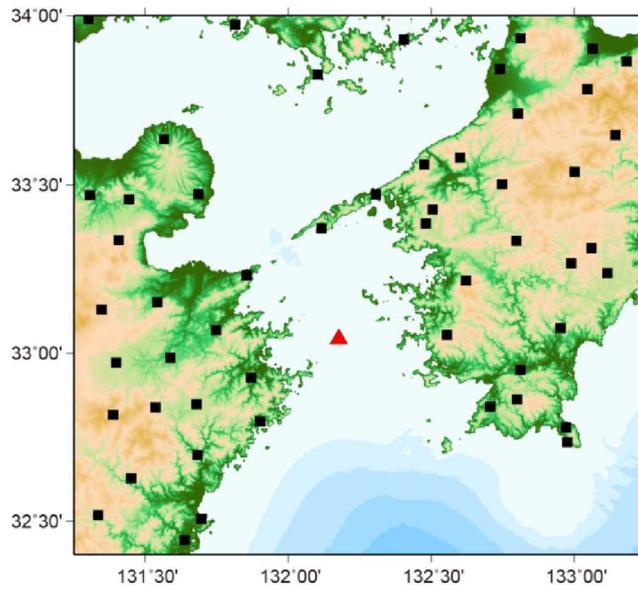


図1. 水ノ子島観測点および周辺の観測点配置図。赤色三角：水ノ子島観測点，黒色四角：定常地震観測点（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_12]）。

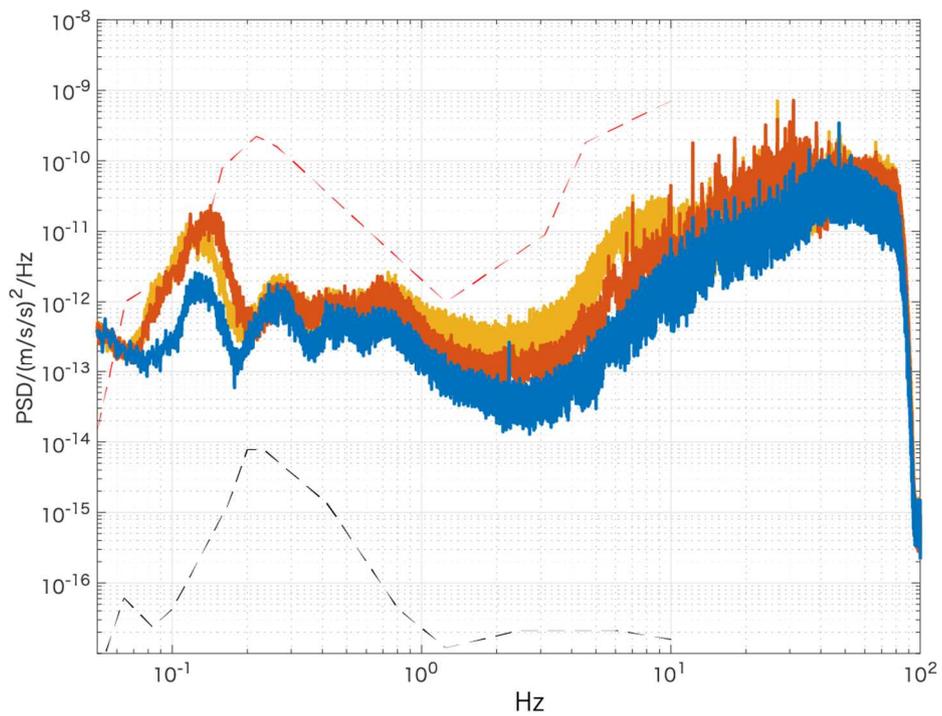
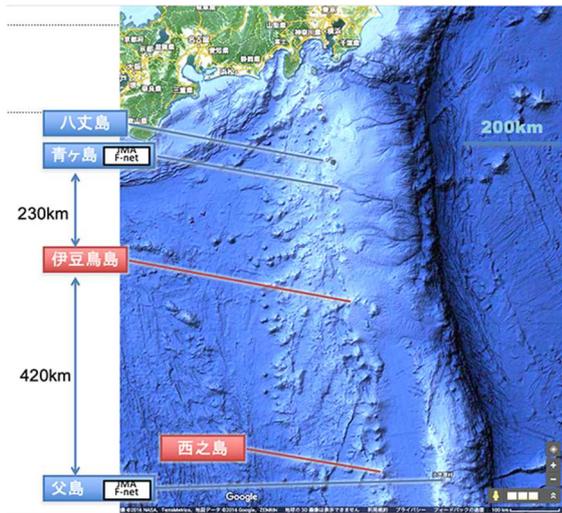


図2. 水ノ子島観測点で得られた波形のパワースペクトル密度。青：上下動成分，赤：南北成分，オレンジ：東西成分，赤破線：high noise model，黒破線：low noise model（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_12]）。



### 最近の波形例

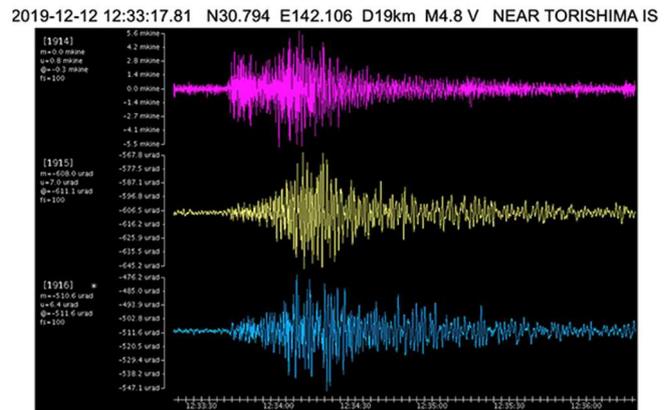


図 3. 伊豆鳥島における地震観測（東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_09]）。

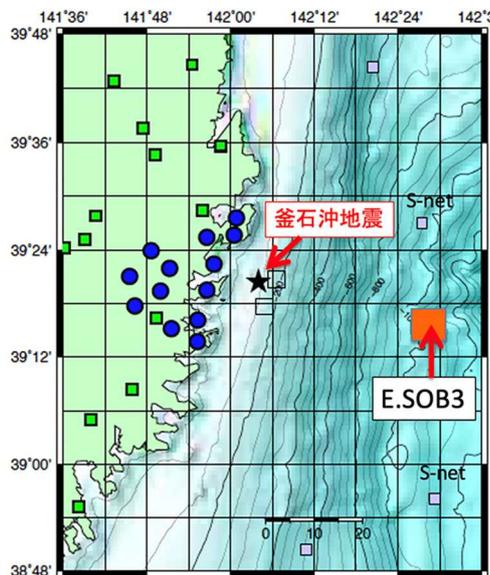


図 4. 釜石市周辺の臨時地震観測網（青丸）（東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_09]）。

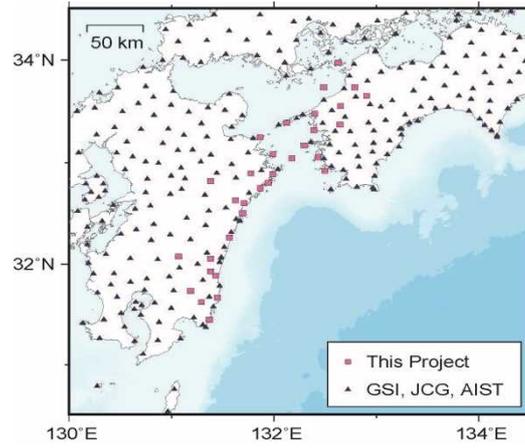


図5．本計画の研究グループで維持しているGNSS連続観測点の（ピンク四角）分布図。他機関のGNSS観測点でデータの利用できる地点を青三角で示した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI\_12〕）。

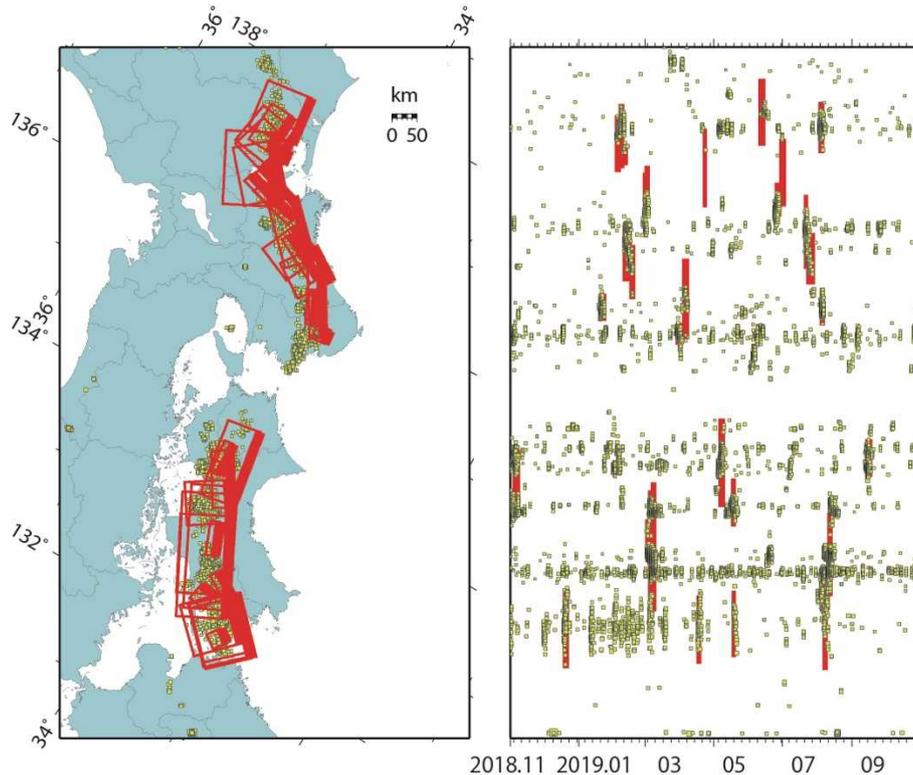


図6. 産業技術総合研究所・防災科学技術研究所・気象庁の歪・地下水・傾斜データにより決定した短期的 SSE の断層モデルおよび時空間分布。2018年11月-2019年10月に決定された33個の短期的 SSE (左図の赤四角, 右図の赤線)。黄色の四角は同期間の気象庁カタログによる深部低周波地震(微動)の震源位置と時空間分布 (産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09])。

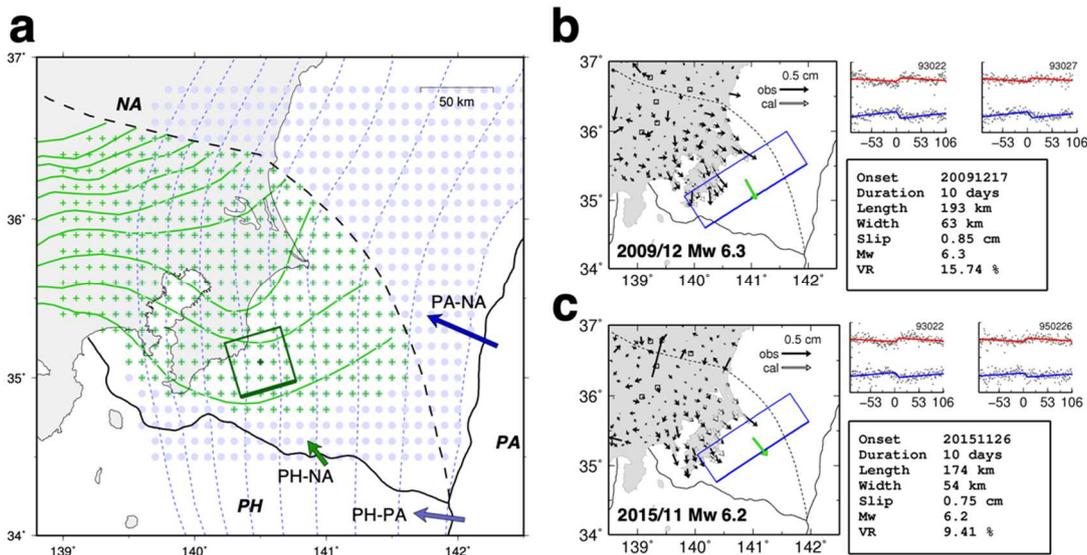


図7. 関東地方に沈み込むフィリピン海プレート上面で発生する SSE の検出。(a) SSE の検出に使用したグリッド配置。緑のフィリピン海プレート上面のグリッドのみで検出を行った。(b) 検出された小規模 SSE の例。このイベントは防災科学技術研究所 (2010) も Hi-net 傾斜計 1 点での非定常変動を報告している。(c) 検出された小規模 SSE の別の例 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_12])。

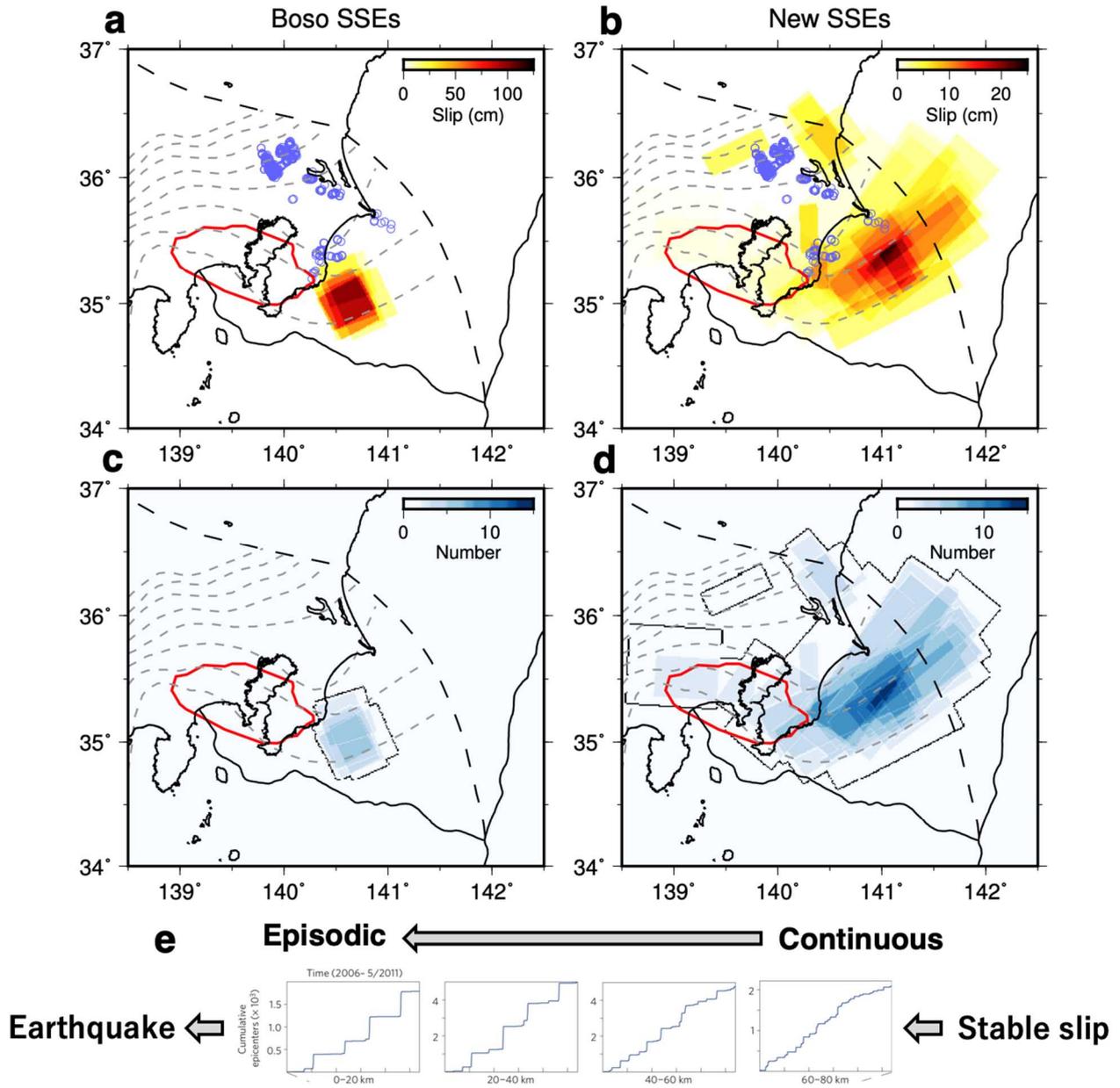


図8. 既知の房総沖 SSE と新たにみつかった小規模 SSE。(a) 既知の房総沖 SSE の積算滑り量。赤線は関東地震の滑り域、青丸は小繰り返り地震 (Uchida et al., 2016), 灰色破線はフィリピン海プレート上面深さ 10km 間隔の等深線 (Nakajima et al., 2019), 黒色破線はフィリピン海プレート北東端 (Uchida et al., 2010)。(b) 新たに検出された小規模 SSE の積算滑り量。(c) 既知の房総沖 SSE の発生個数。(d) 新たに検出された小規模 SSE の発生個数。(e) Cascadia における低周波微動発生様式のプレート沈み込み方向の変化。Wech and Creager (2011) の図に加筆 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_12])。

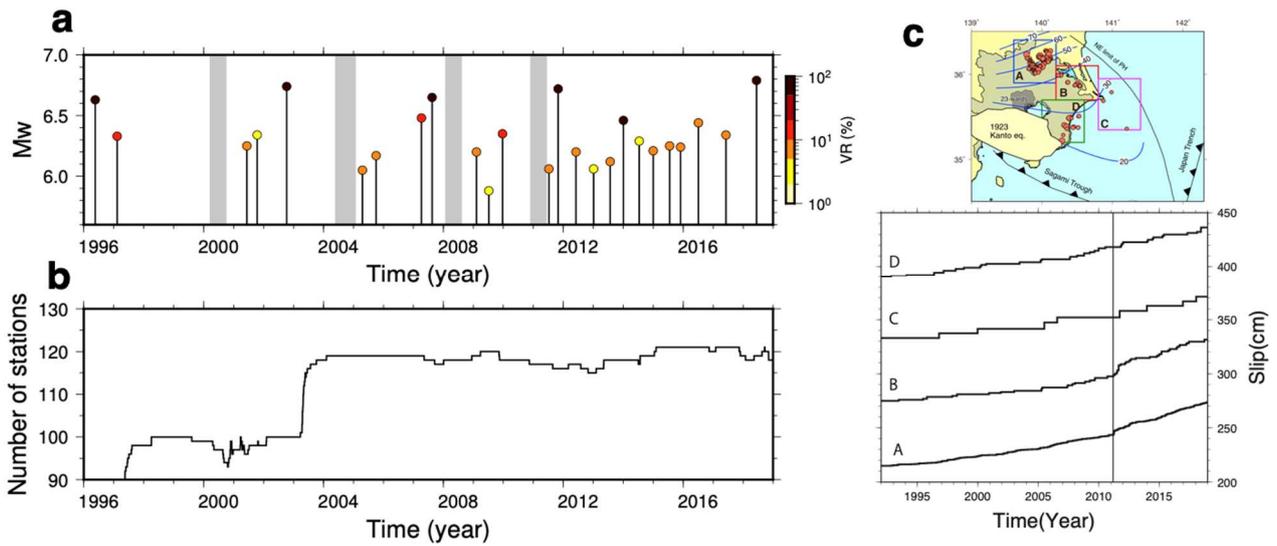


図9. 関東地方に沈み込むフィリピン海プレート上面で発生する SSE 活動の時間変化。(a) 検出された SSE の MT 図。色は観測 GNSS 時系列とモデル時系列の Variance Reduction を表す。灰色の領域は、大地震による地殻変動により SSE 検出ができなかった期間を示す。(b) 使用した GNSS 観測点数。(c) 小繰り返し地震活動から推定される非地震性滑り。Uchida et al. (2016) をアップデート (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_12])。

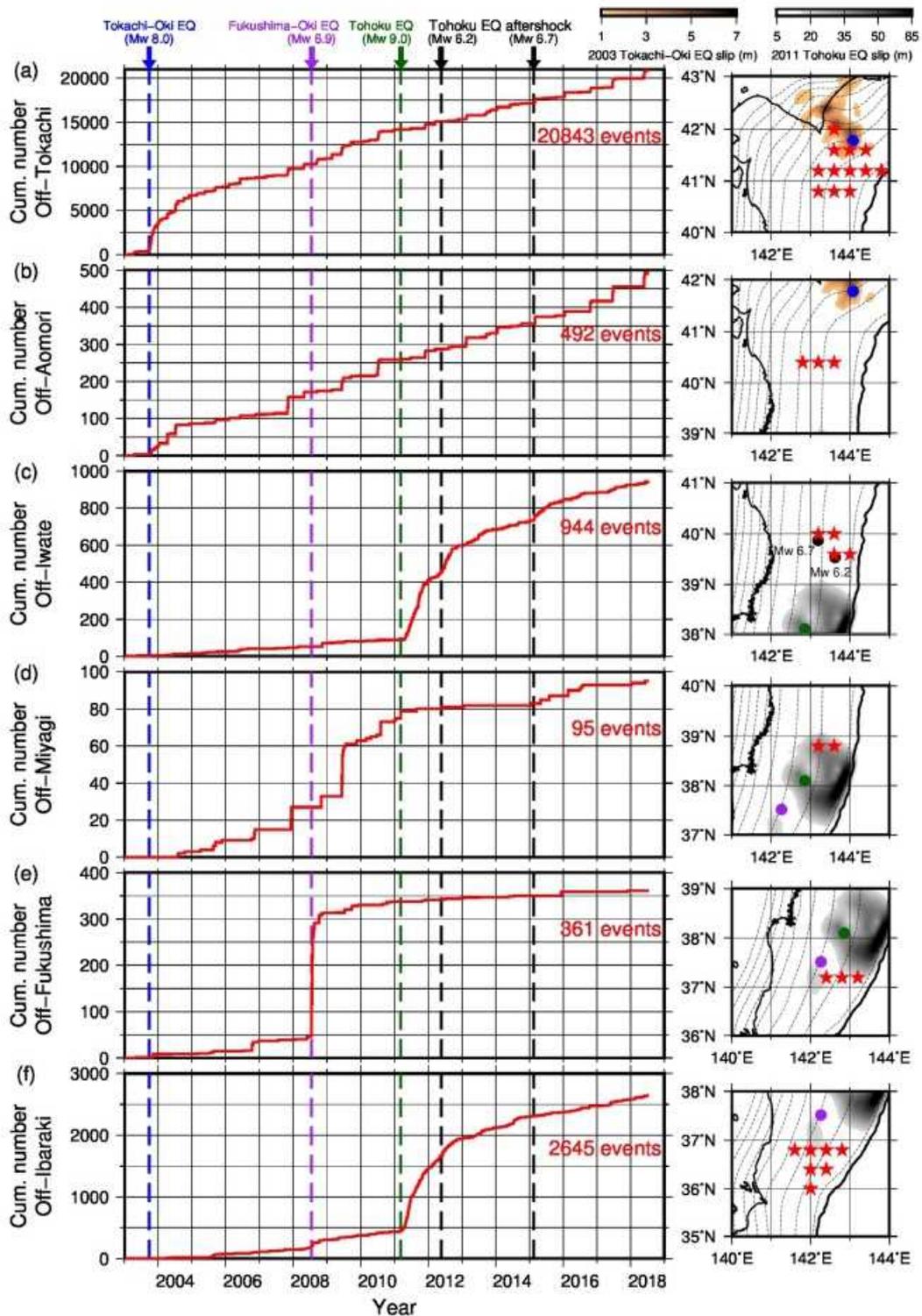


図 10. 東北地方太平洋沖における 2003 年 1 月-2018 年 7 月の浅部超低周波地震活動の時間変化。(a) - (f) はそれぞれ十勝沖, 青森沖, 岩手沖, 宮城沖, 福島沖, 茨城沖。右図に示す各地域の赤星のグリッドに配置したテンプレートにマッチした超低周波地震の積算個数を左図に示す。破線は周辺に発生した顕著な地震活動を示す(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_12])。

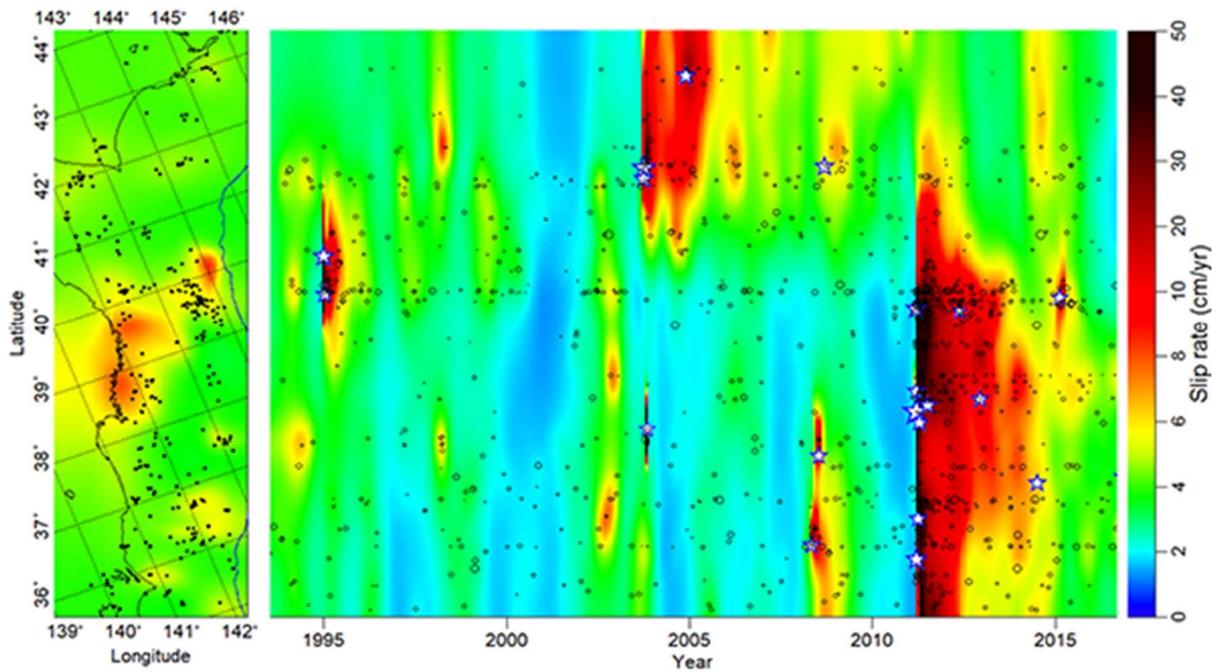


図 11. 繰り返し地震から推定された 1993 年から 2016 年までの滑り速度分布の全期間平均値 (左) と時空間推移 (右)。黒丸は繰り返し地震の震央位置および発生時点, 青星は繰り返し地震の余震を多数伴った M6 以上の地震の震央位置および発生時点を示している (東北大学理学研究科 [課題番号: THK\_09])。

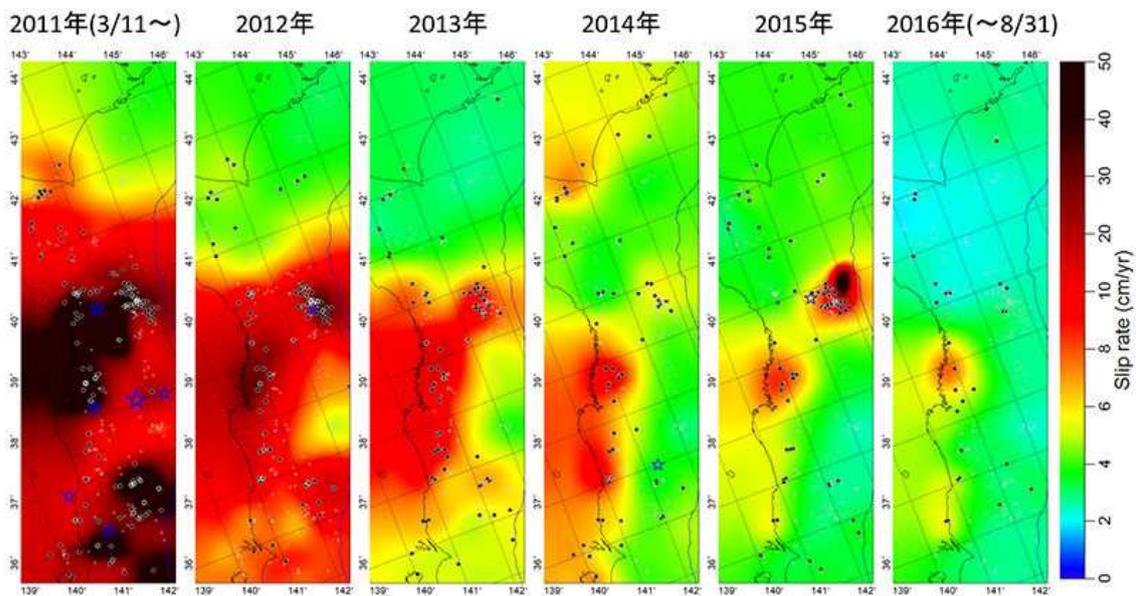


図 12. 繰り返し地震から推定された 2011 年東北地方太平洋沖地震から 2016 年までの滑り速度分布の年平均値の推移。黒点および青星は, 各年に発生した繰り返し地震および繰り返し地震の余震を多数伴った M6 以上の地震の震央位置を表す (東北大学理学研究科 [課題番号: THK\_09])。

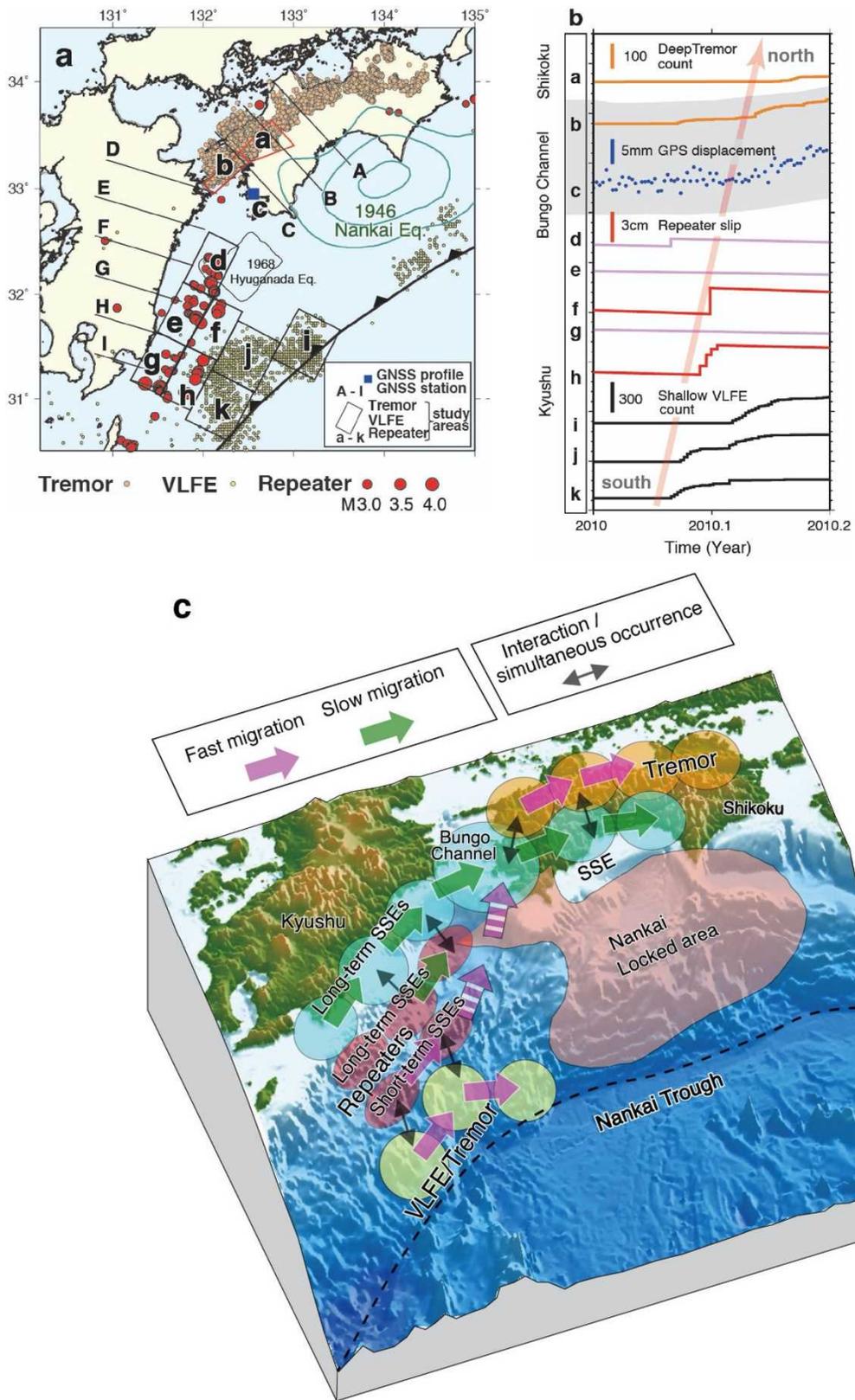


図 13. 繰り返し地震と様々なスロー地震の併合解析で見つかったゆっくり滑りの大規模な移動。(a) 南海トラフでの繰り返し地震 (赤丸) および他のスロー地震 (黄色丸・橙色丸) の分布。(b) 繰り返し地震およびスロー地震から推定される長距離のスロースリップの移動の例。(c) スロースリップ移動のモデル (緑は数年かけた移動, ピンクは1ヶ月程度での移動) (東北大学理学研究科 [課題番号: THK\_09])。

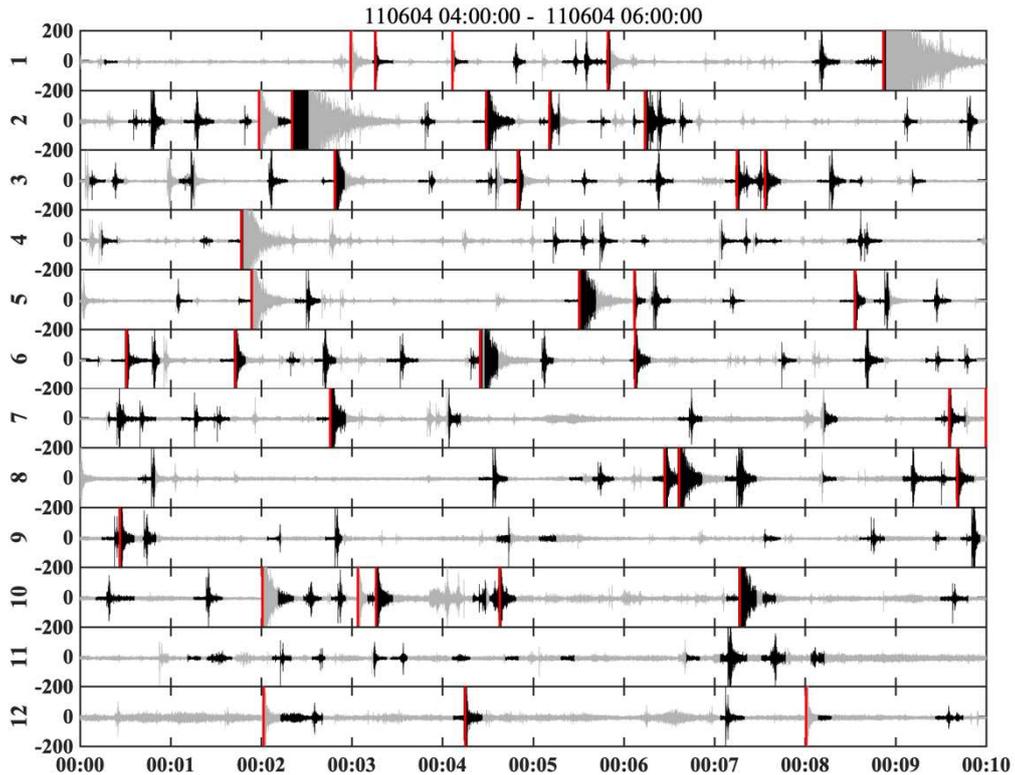


図 14. 満点観測網のある観測点で得られた上下動成分の連続波形記録（2 時間分；250 Hz サンプルング）からのイベント検出。黒線で示した部分は FAST によって類似波形として認定された波形を含む窓を表す。赤線は付近のある定常観測点において、気象庁一元化カタログ中に検出記録が存在するタイミングを表す（東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_09]）。

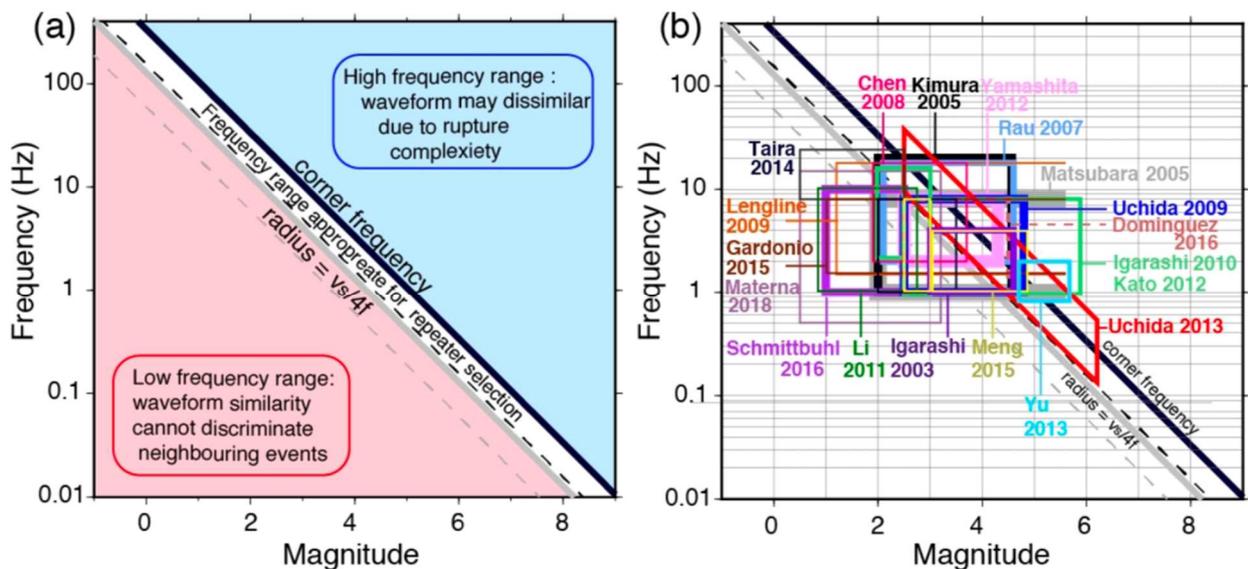


図 15. 繰り返し地震の抽出に用いる周波数帯域の検討。(a) マグニチュードとコーナー周波数および断層サイズを考慮した解析周波数帯。(b) 過去の研究で用いられた解析周波数帯（東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_09]）。

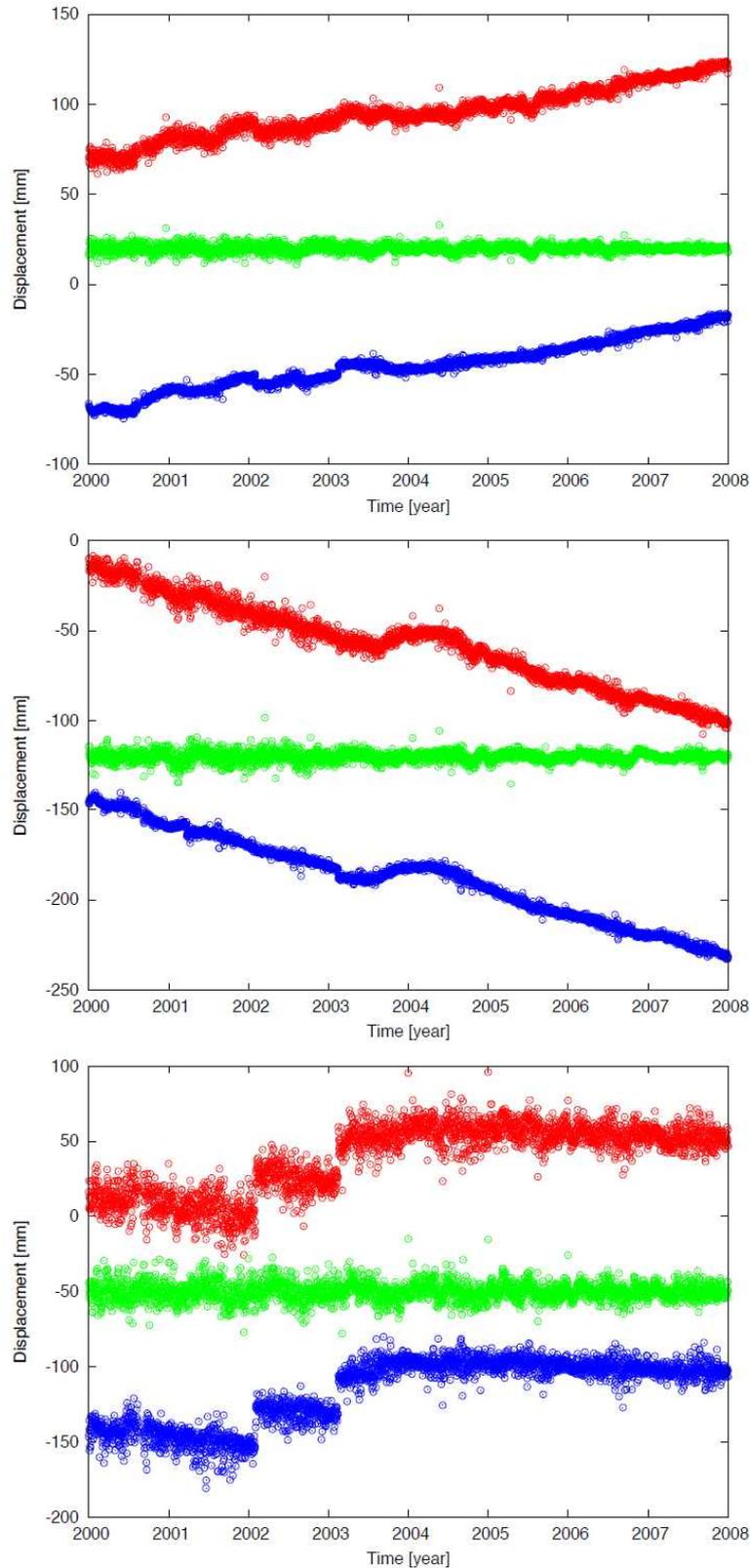


図 16. 観測点 940085 (大分佐伯) の GNSS 座標時系列データ。(上) NS 成分, (中) EW 成分, (下) UD 成分。赤点は元データである F3 解, 緑点は推定された common mode のうち並進成分, 青点はこの観測点に対して求められた common mode 計算値を元データから差し引いたもの。それぞれのトレースは縦軸方向に適当にオフセットさせている (廣瀬, 2019, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_12])。

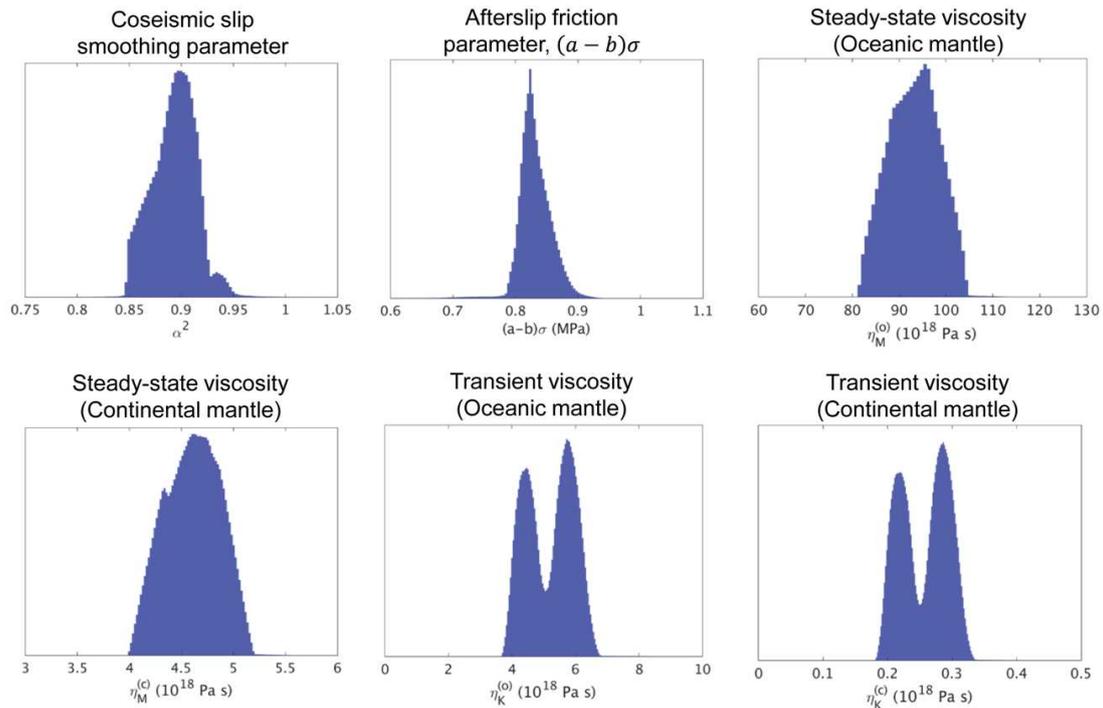


図 17. 粘弾性緩和も考慮したモデルに対するベイズ的データ同化。2011 年東北沖地震の地震時及び地震後 7 年間の地殻変動データを用いて推定された地震時滑り分布に対する平滑化パラメータ、プレート境界の摩擦パラメータ  $(a-b)\sigma$ 、海洋・大陸マンタルの steady-state viscosity 及び transient viscosity の事後確率分布（京都大学理学研究科 [課題番号：KUS\_01]）。

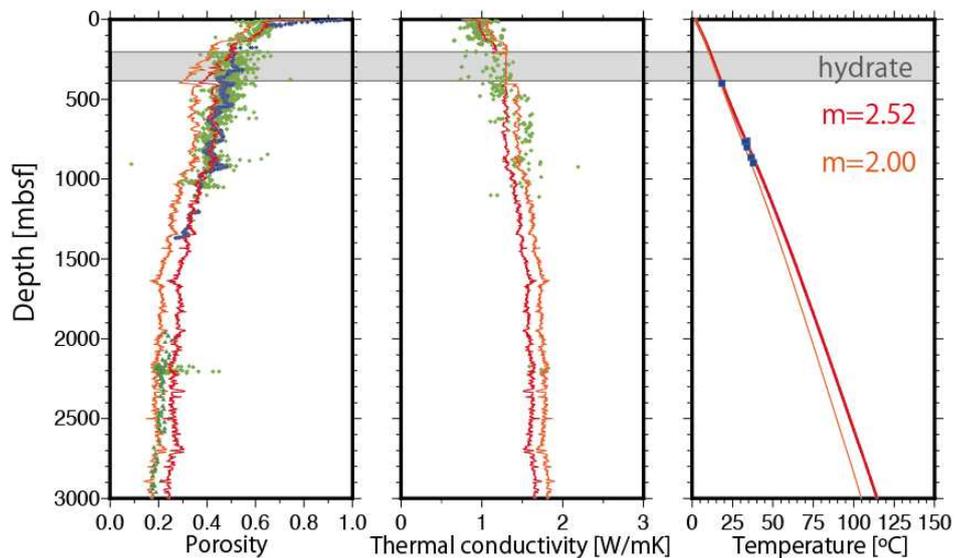


図 18. 掘削ロギングデータから推定された空隙率・温度構造と測定値の比較。赤線と橙線は推定値。ただし、空隙率と電気伝導との変換式に現れるパラメーター  $m$  の値が異なる。緑の点は船上の実験室での測定値。青線は密度検層による測定値。青点は孔内に設置された温度計による測定値と BSR による推定値。灰色の領域はハイドレートの存在が確認されており、本手法による推定が不適切な領域（Yabe et al., 2019, 産業技術総合研究所 [課題番号：AIST09]）。

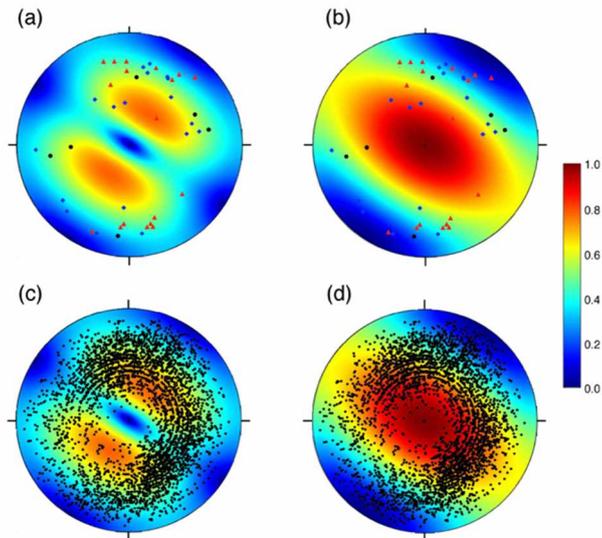


図 19. 愛知県西尾市の観測井の応力場から計算した slip tendency 及び dilation tendency と亀裂の向きを重ね合わせた下半球等積投影図。(a) slip tendency と透水性亀裂。(b) dilation tendency と透水性亀裂。(c) slip tendency と全ての亀裂。(d) dilation tendency と全ての亀裂。2つの tendency において tendency が高い領域と対応する向きの亀裂もあるが、それらの亀裂は必ずしも透水性亀裂ではなく、むしろそれらよりも低い値となる向きの亀裂が高い透水性を示す傾向である（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST09]）。

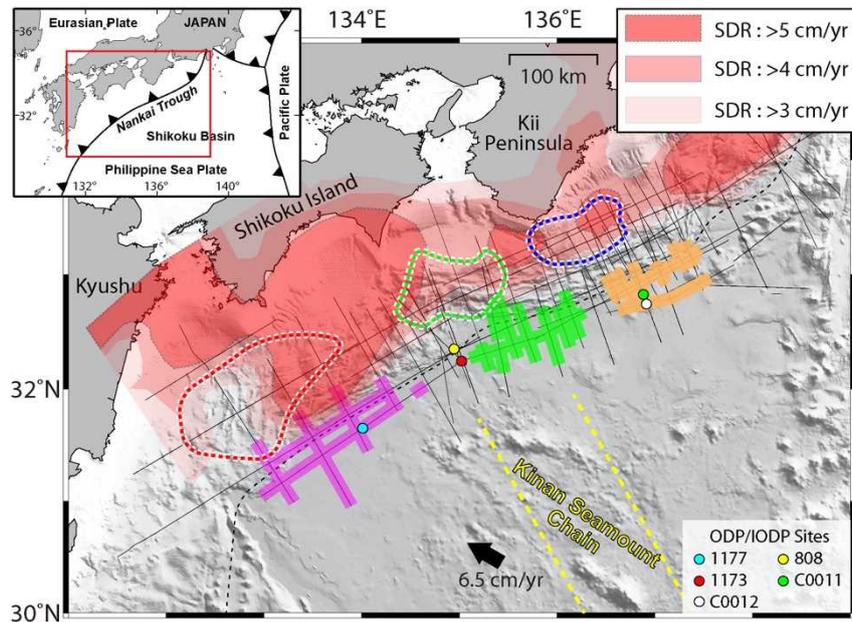


図 20. 南海トラフのタービダイトと固着度の比較。灰色の細線は JAMSTEC が取得したマルチチャンネル反射法地震探査データの測線を示す。MCS 測線上の太いピンク線、緑線、オレンジ線は、四国海盆で同定された西部タービダイト、中部タービダイト、東部タービダイトを示す。太いピンク点線、緑点線、オレンジ点線のポリゴンは、既に陸側へ沈み込んだ西部タービダイト、中部タービダイト、東部タービダイトを示す。海底地殻変動から推定された滑り欠損 (Slip-deficit Rate; SDR) 分布 (Yokota et al., 2016) は透明な赤色エリアで示されている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_12]）。

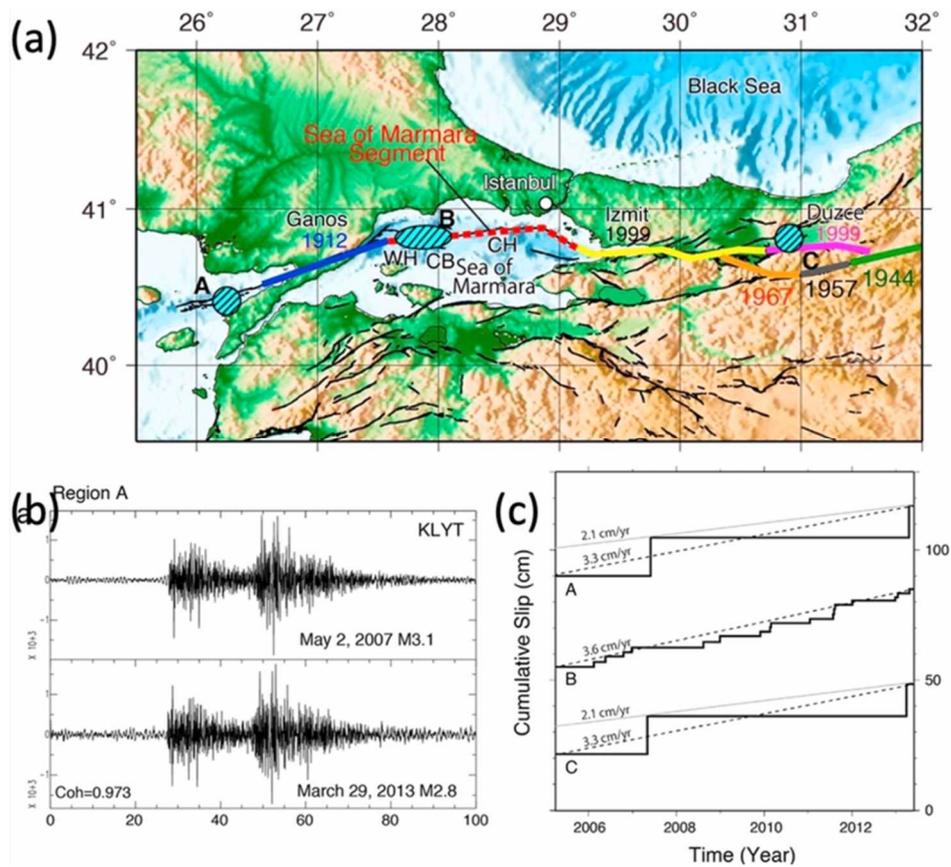


図 21. トルコ、マルマラ海周辺で発見された繰り返し地震発生領域。(a) 繰り返し地震発生領域 A-C。(b) そこでの繰り返し地震の波形例。(c) 3 領域で繰り返し地震から推定したプレート境界のすべりレート (Uchida et al., 2019, 東北大学理学研究科 [課題番号:THK\_09])。

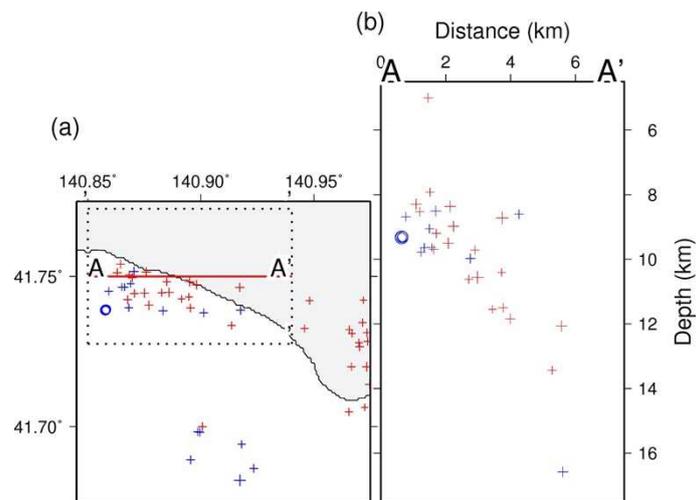


図 22. 震源再決定により求めた函館周辺で発生する通常地震活動と低周波地震の震源分布。青丸で通常地震を示し、十字で低周波地震を表す。低周波地震を表す十字が青色と赤色のものは、それぞれ気象庁一元化震源で低周波地震と通常地震と分類されているもの (東北大学理学研究科 [課題番号:THK\_09])。

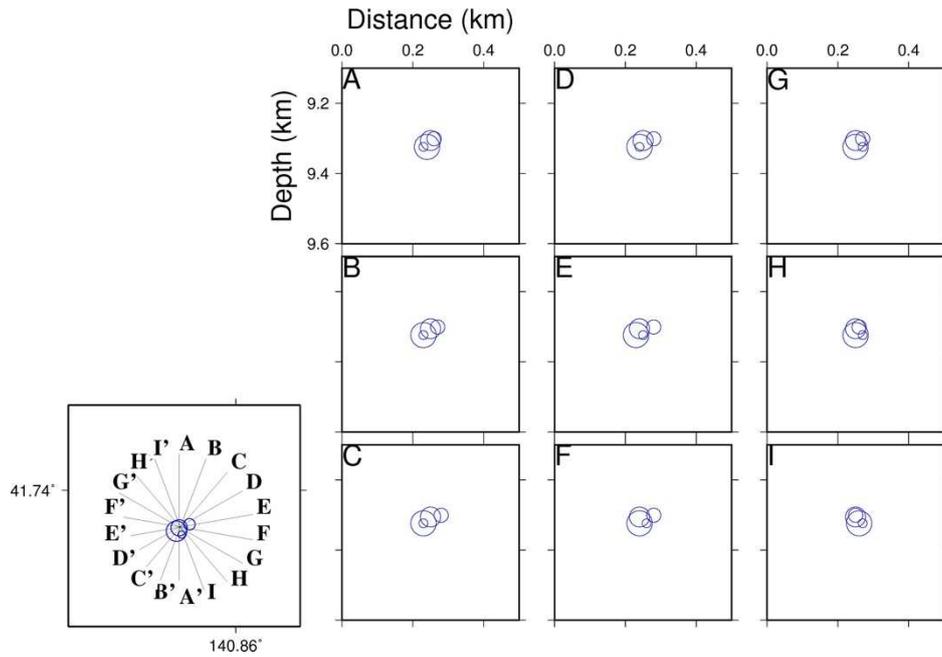


図 23. 函館周辺の低周波地震 (図 22) の近傍で発生している, 繰り返し地震の可能性のある通常地震クラスター。丸の大きさを, 応力降下量 3MPa を仮定した断層サイズに合わせてプロットした (東北大学理学研究科 [課題番号: THK\_09])。

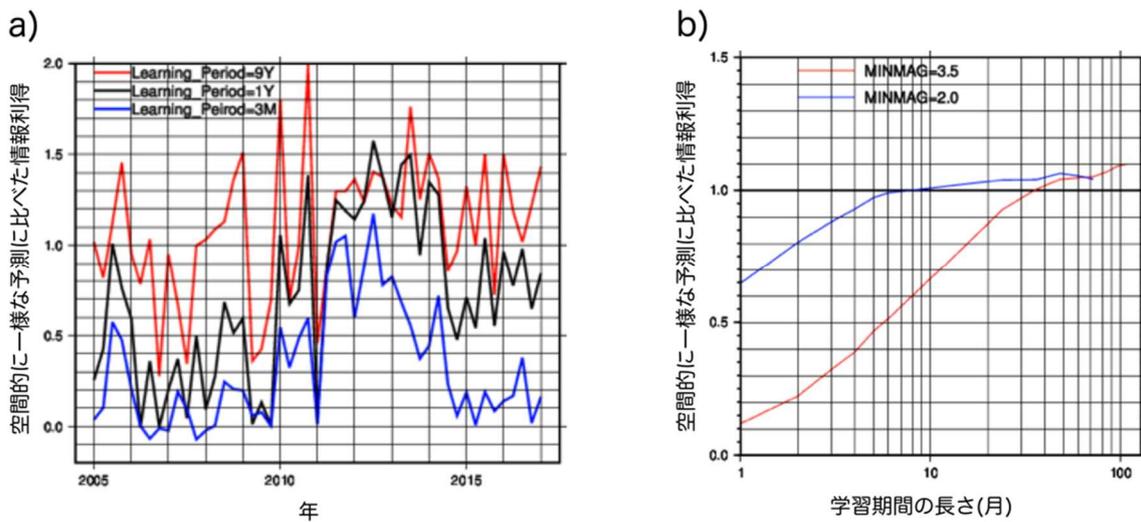


図 24. RIモデルによる関東地域の3ヶ月先までの地震予測の成績。a) 成績の推移。学習期間を3ヶ月(青線), 1年(黒線), 9年(赤線)とした場合それぞれについて示した。b) 学習期間の長さに対する成績の変化。学習に用いる地震の下限をM3.5(赤線)にした場合とM2.0(青線)にした場合を示した (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_13])。

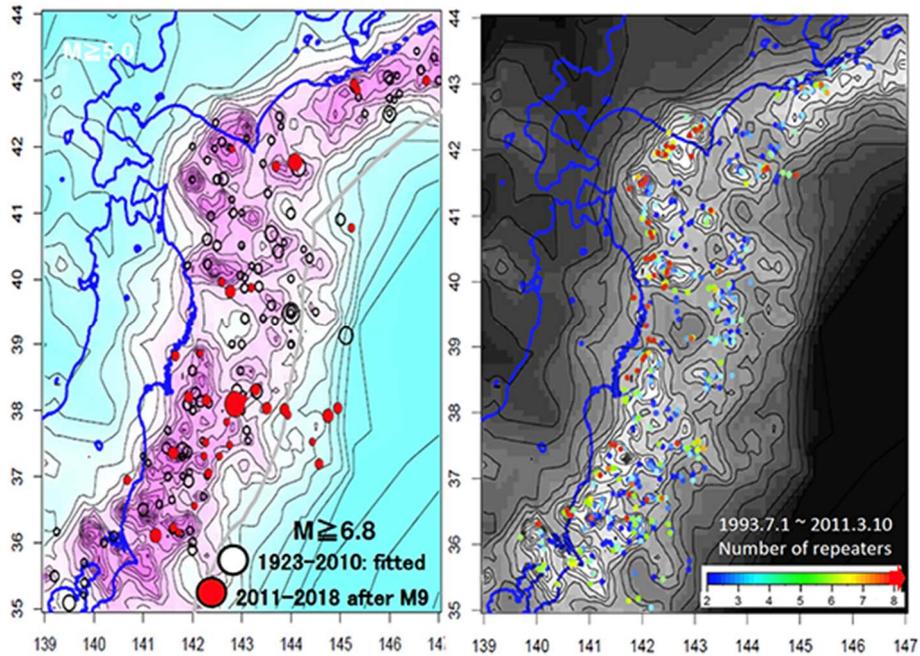


図 25. 階層的時空間 ETAS モデルによる  $M \geq 5$  地震の常時地震活動度（1 日  $\times$  1 度<sup>2</sup>あたりの発生率）。常時地震活動度は、約 3 倍ごとの対数等間隔スケールの等高線で示されている。（左図）東北沖地震より前（白丸）と後（赤丸）の大きな地震の震央と比較。（右図）繰り返し地震の震央と比較（東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_09]）。

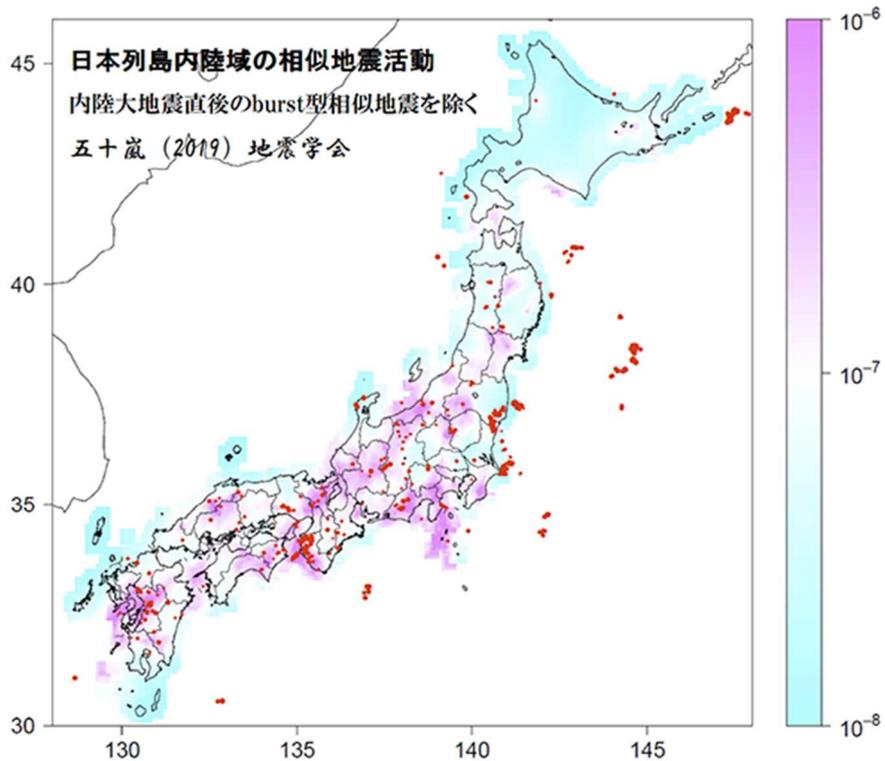


図 26. 階層的時空間 ETAS モデルの  $M \geq 4$  地震の常時地震活動度（カラスケール）と非 burst 型相似地震活動（赤点）の比較。常時地震活動度の単位は、1 日  $\times$  1 km<sup>2</sup> あたりの発生率（東北大学理学研究科 [課題番号：THK\_09]）。

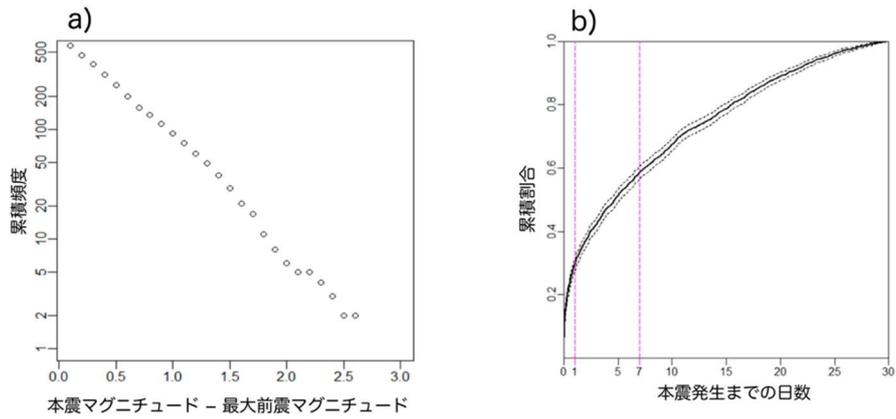


図 27. 前震確率 NO 予測法 (野村・尾形, 2018) の予測対象を簡便に変更するための基礎となる統計分布。a) 本震と最大前震のマグニチュード差の累積分布。b) 前震確率 (30 日確率) 評価時点から本震発生までの期間の累積分布 (黒実線) とその 95%信頼区間 (黒破線)。1 日と 7 日のところに引いた縦の点線は、1 日予測に変換するには 30 日確率に約 0.3 を、7 日予測に変換するには 30 日確率に約 0.6 を、乗じればよいことを示す (野村・尾形, 印刷中より改変, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_13])。

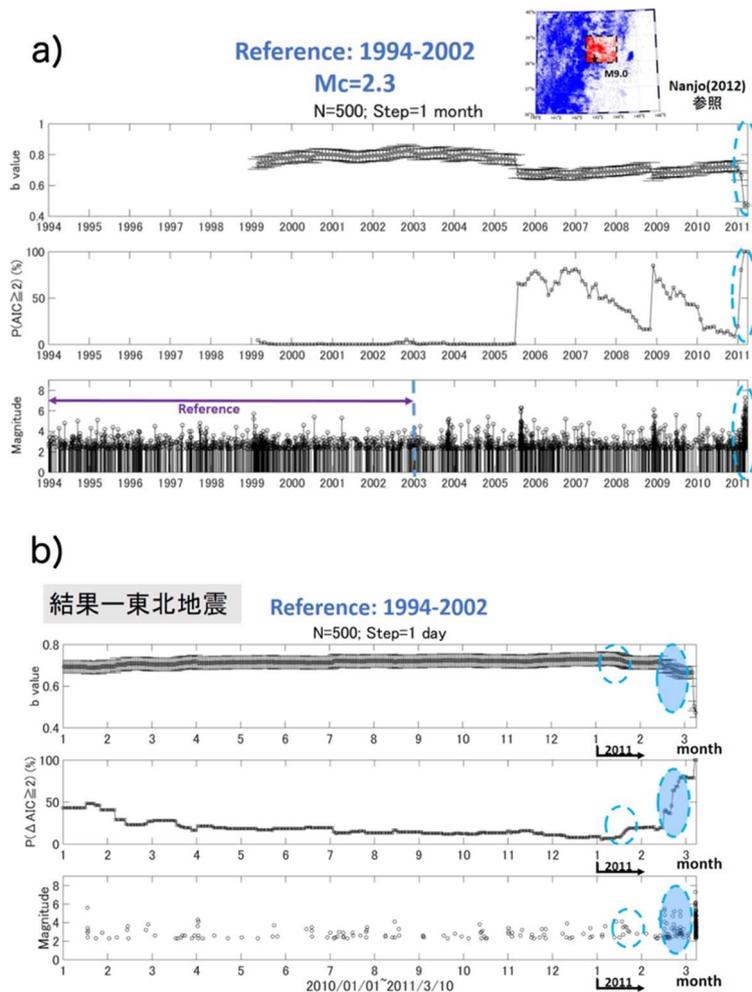


図 28. 2011 年東北地震に先行する期間における、b 値変化の新たな評価パラメタ ( $P(\Delta AIC \geq 2)$ ) の解析例。a) 1994 から 2011 年 M9 地震直前まで。b) 2010 年 1 月 1 日から 2011 年 3 月 10 日まで (千葉大学 [課題番号: CBA\_01])。

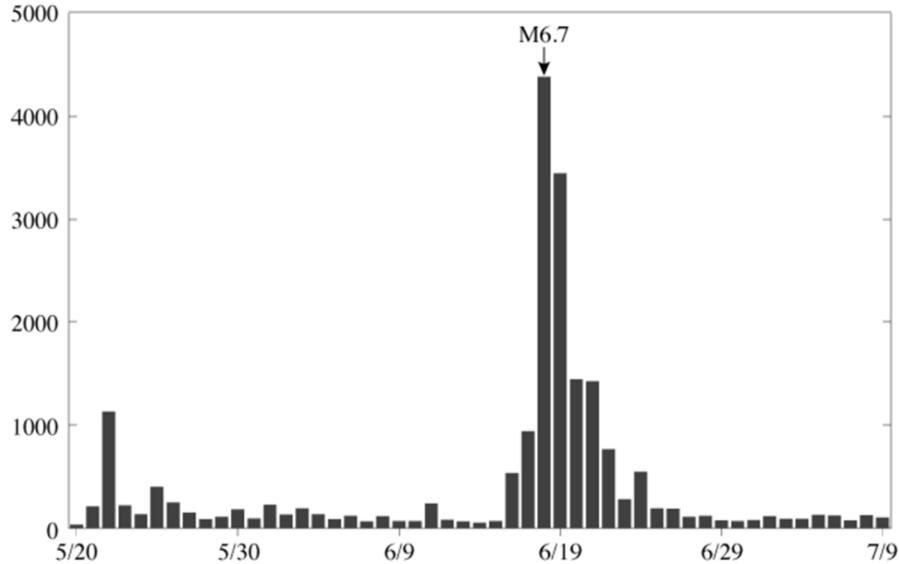


図 29. 2019 年 6 月 18 日 22 時 22 分に発生した山形県沖の地震（M6.7，最大震度 6 強）の前後の「地震雲」に関するツイート数（東海大学 [課題番号：KOB008]）。

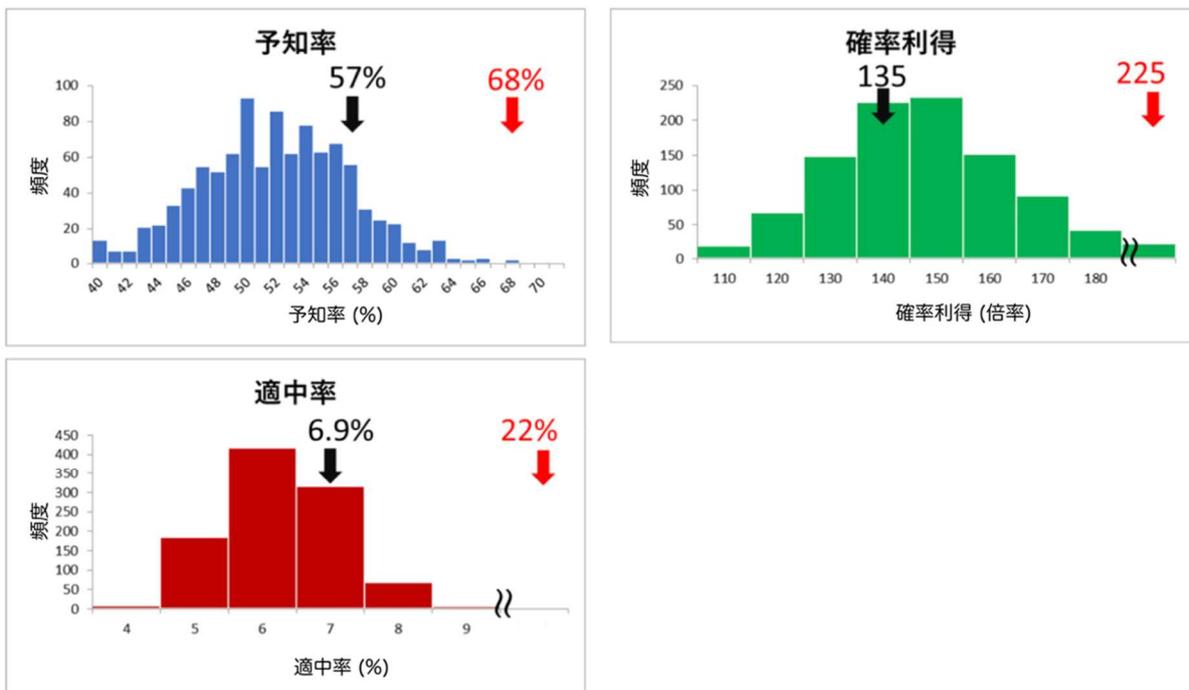


図 30. 伊豆地域の地震活動に対する Maeda (1996) の前震識別法の成績。三宅島の活動があった 2000 年 6-9 月を除いた，1977-2018 年の活動を用いた検討。赤矢印は実データに最適化された前震識別パラメータによる，実データに対する成績。ヒストグラムは，実データから求めた時空間 ETAS モデルによって合成した 1000 通りのカタログについて，合成カタログに最適化された前震識別パラメータを用いた場合の成績分布。黒矢印は，合成カタログに最適化されたパラメータによる，最適化に用いた合成カタログに対する予測の成績（前田ら，印刷中より改変，東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_13]）。

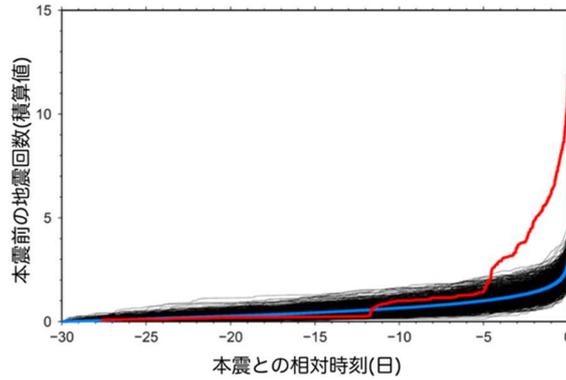


図 31. 伊豆地域の地震活動に対する本震前の地震活動の加速。赤太線は前震候補とみなす(余震ではないと判断された) 群発地震活動内の累積数を, 本震発生時刻をそろえて(ゼロとして)示した。多数の黒細線は, 図 30 で用いた 1000 個の ETAS 合成カタログを用いた場合で, 青太線は黒細線を平均したもの。いずれも, 前震の回数は, 本震 1 個あたりの数に正規化してある(前田・他, 印刷中より改変, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_13])。

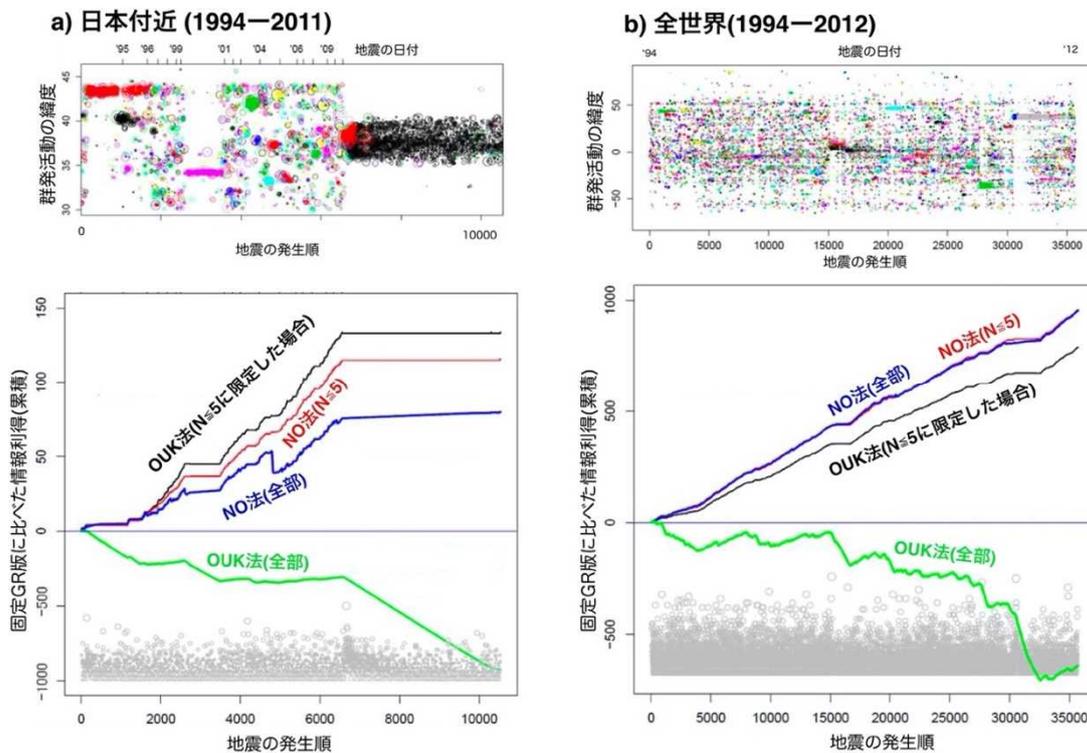


図 32. 履歴依存の地震サイズ分布 (Ogata et al., 2018) を取り入れることによる前震確率予測の成績改善。上段: 「前震らしさ」の評価対象となった群発活動の場所と時期を示し, 同じ群発活動に属するものは同じ色で示してある。下段: 成績。このグラフが右上りであるほど, 地震サイズ分布が時間的に不変 (GR 則) と仮定した場合より優れた予測ができています。右下りの場合は, かって予測性能が悪くなったことを示す。a) 1994-2011 の気象庁カタログを用いて日本付近の M4 以上の地震活動を用いた結果。b) 1994-2012 の全世界の M4.7 以上の地震活動を用いた結果 (野村・尾形, 印刷中より改変, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_13])。

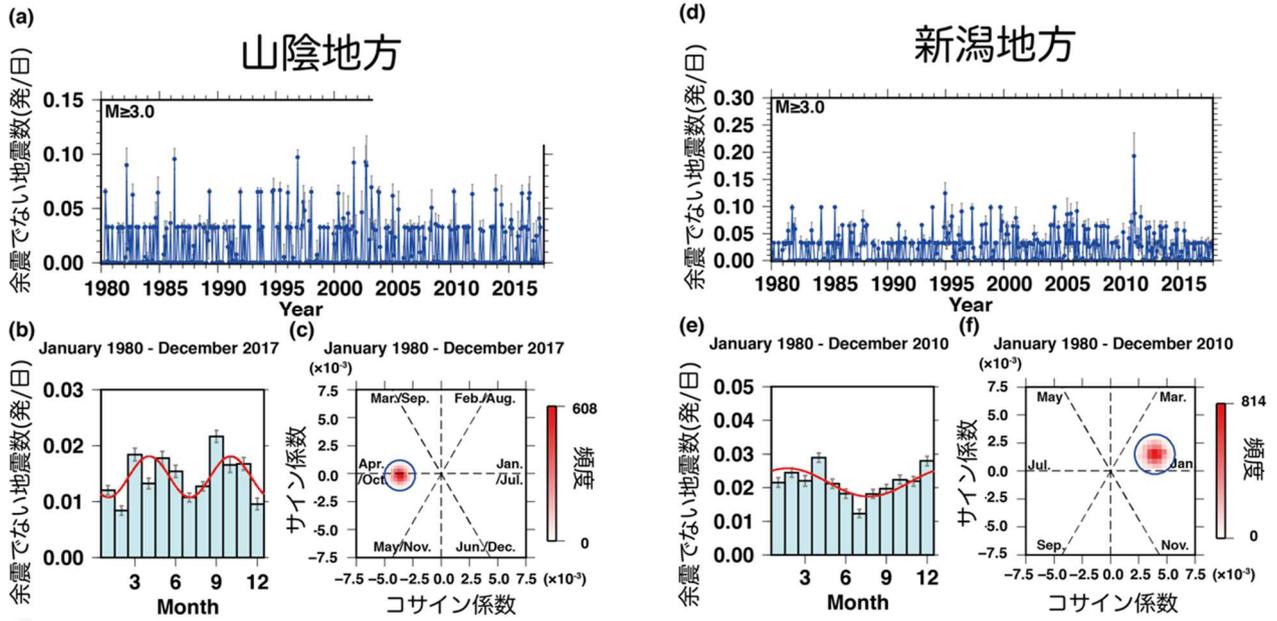


図 33. 階層的時空間 ETAS を用いて余震活動を除いた地震活動度に見られる季節性 (Ueda and Kato, 2019b より改変, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_13])。

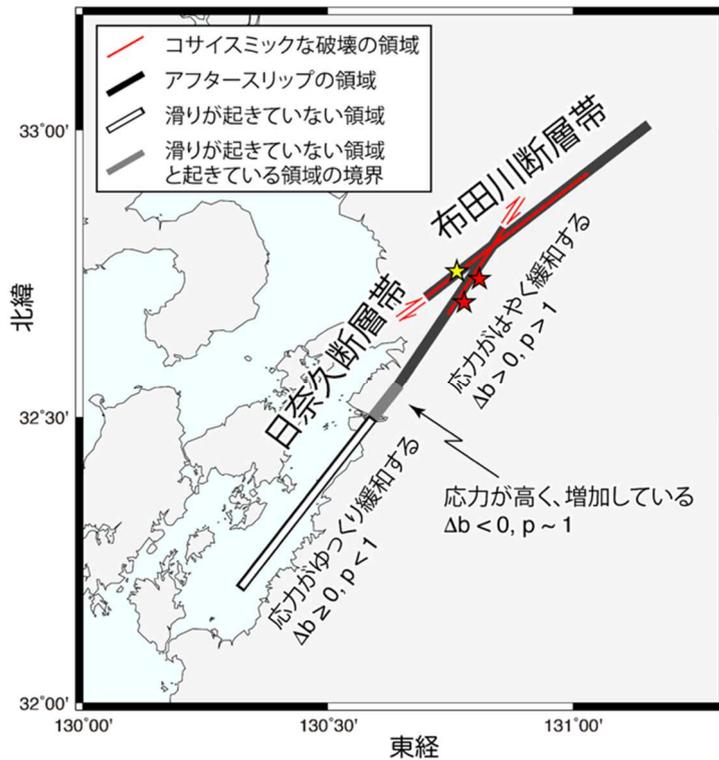


図 34. 2016 年熊本地震震源断層周辺での最近 (2017 年 1 月から 2019 年 3 月まで) の地震活動 (b 値の変化と p 値の空間分布) に対する解釈 (Nanjo et al., 2019 より改変, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_13])。

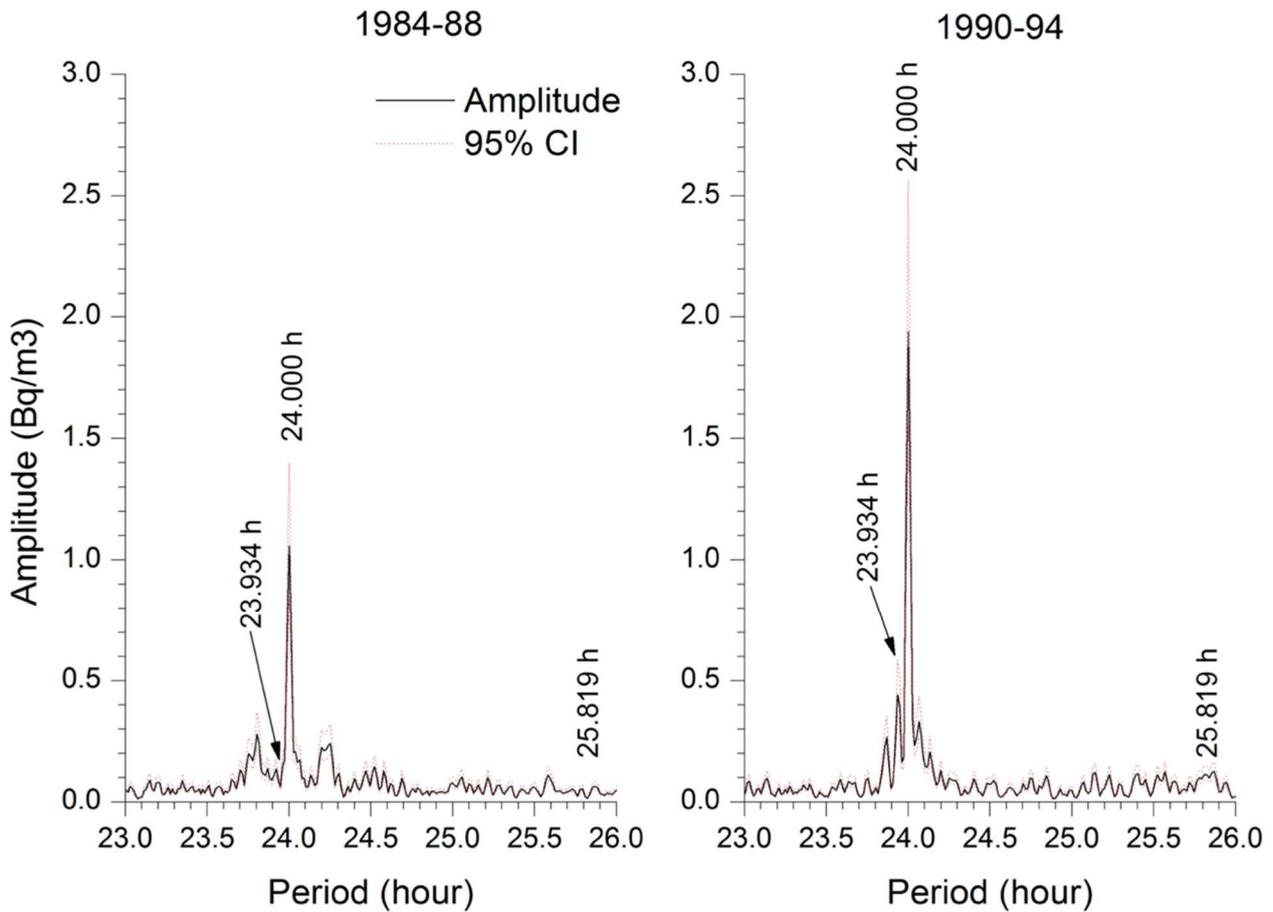


図 35. 神戸薬科大学で観測された大気中ラドン濃度変動データのスペクトル。実線は振幅スペクトル，点線はその 95%信頼区間。左図：1984-1988 年。右図：1990-1994 年（東北大学 [課題番号：THK\_10]）。

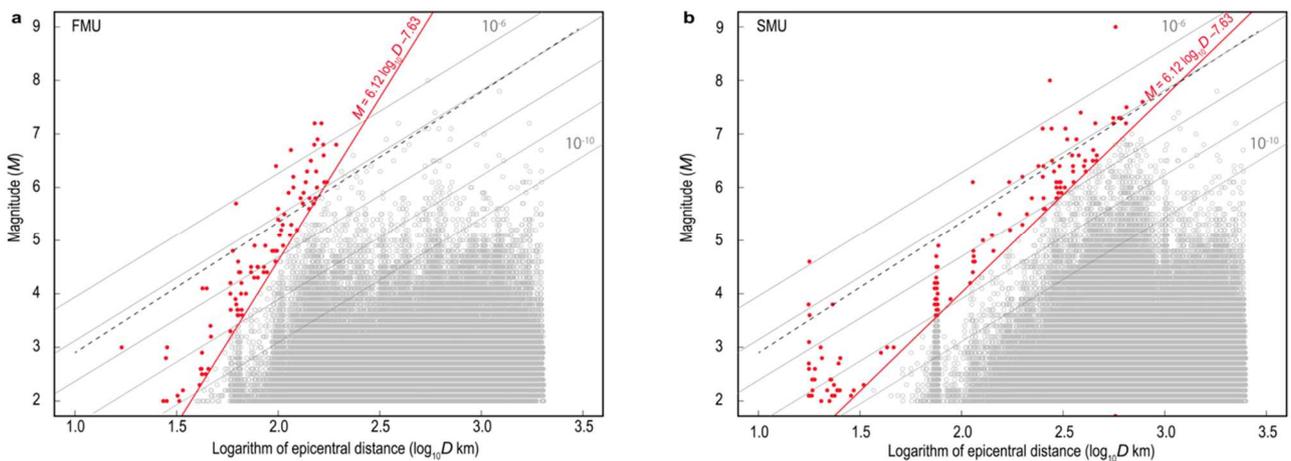


図 36. 大気中ラドン濃度変動に寄与する地震の規模と震源距離。福島県立医科大学（左），札幌医科大学（右）。赤丸が大気中ラドン濃度変動に寄与した地震，中ぬき灰丸が大気中ラドン濃度変動に寄与しない地震。赤線が閾値，黒破線が地下水位変動に寄与した地震の閾値，灰実線は地殻歪を表す（東北大学 [課題番号：THK\_10]）。

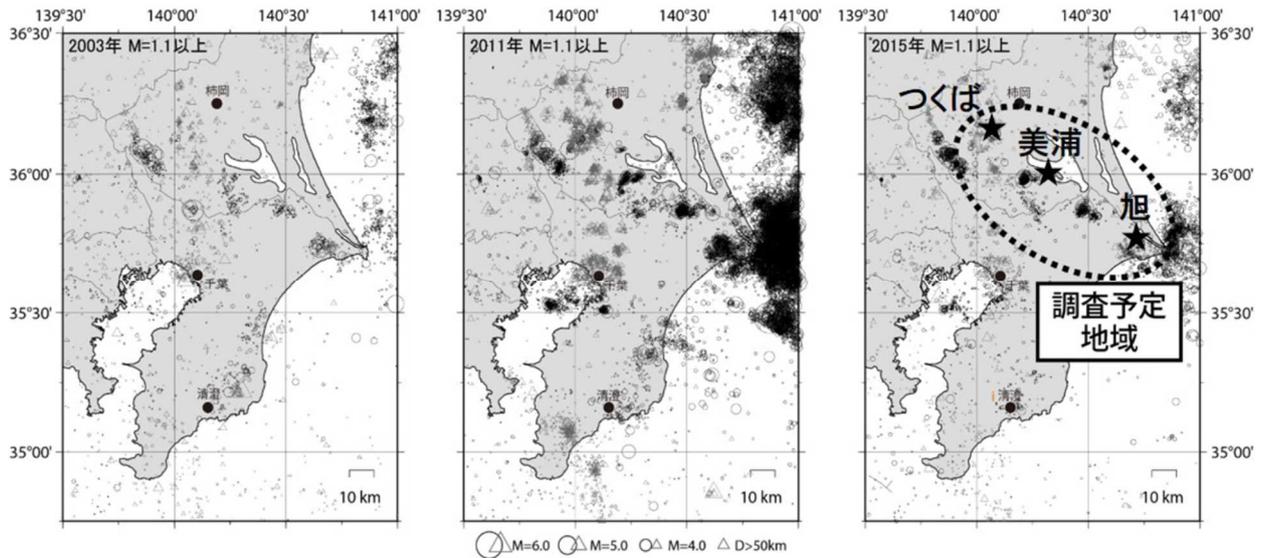


図 37. 地中ラドン濃度ネットワーク観測と地震活動度の変化。(左：2003 年 (2011 年東北地震前)，中：2011 年，右：2015 年 (2011 年東北地震後))。旭 (既存観測点)，美浦 (R1 年度に設置した観測点)，つくば (R2 年度設置候補地) (千葉大学 [課題番号：CBA\_01])。

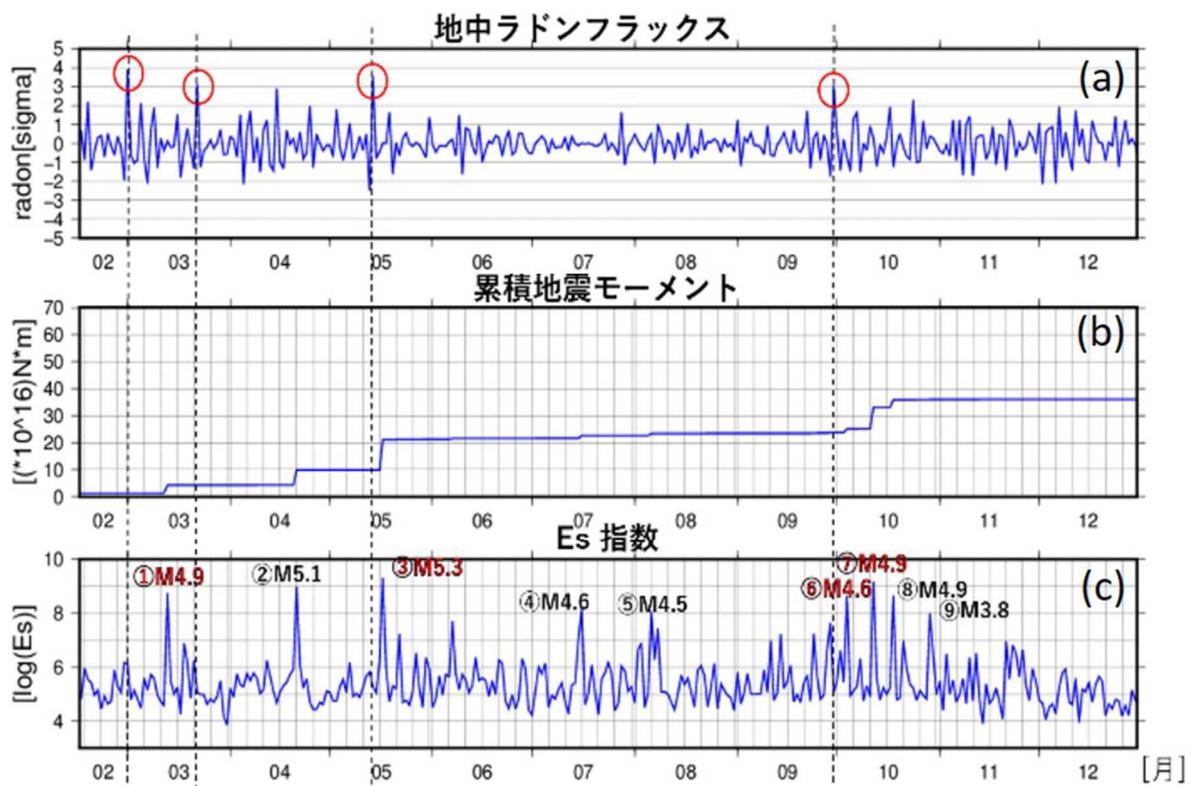


図 38. 旭観測点における地中ラドンフラックスの変動と旭観測点から半径 50km で発生した地震活動の関係 (2018 年 2 月 13 日-2018 年 12 月 31 日)。(a) 規格化された 1 日積算値の Rn フラックス，(b) 累積地震モーメント，(c) Es 指数；1 日間に周辺でおきた地震のエネルギーを観測点への近さで重みづけしたものの総和 (例えば，Han et al., 2017) (千葉大学 [課題番号：CBA\_01])。

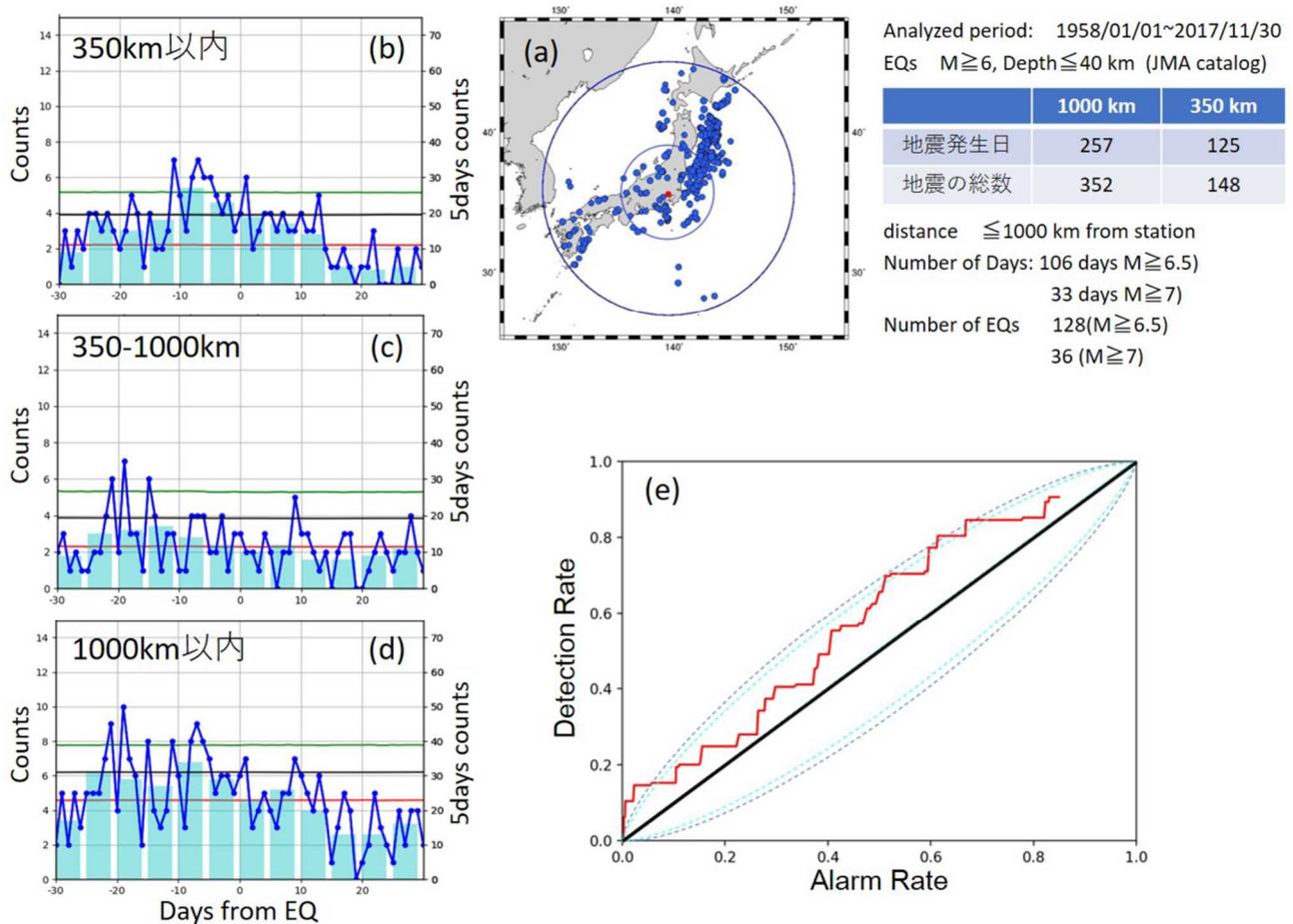


図 39. 国分寺イオノゾンデ (1958/01/01-2017/11/30) 観測値の異常と周辺の地震発生の比較。(a) 比較対象地震。イオノゾンデから 350km 以内, 1000km 以内。(b) SEA 解析による統計的有意性の調査結果 (350km 以内)。緑線: 5 日間カウントの有意レベル, 黒線: 1 日カウントの有意レベル, 赤線: 5 日カウントのランダム平均。5 日間カウントでは半径 350km 以内の地震 1-10 日前に異常が多いという傾向が有意である。(c) SEA 解析による統計的有意性の調査結果 (350-1000km 以内)。有意性なし。(d) SEA 解析による統計的有意性の調査結果 (1000km 以内)。5 日間カウントにおいて半径 1000km 以内では地震前 6-10 日間において正の有意な異常を示す。(e) イオノゾンデの異常から 5-10 日後を警報 ON とする試行予測を, 異常判定の閾値をさまざまに変えて行った ROC 解析の結果。横軸は対象期間に対する警報 ON の期間が占める割合 (アラームレートは「警告率, またの名を予知率」の意味に使われることが多いので, 本当はアラームフラクションとラベルすべき), 縦軸は対象地震のうち警報 ON の期間におきた地震の割合, すなわち予知率。水色と青色の点線は 90%および 95%信頼区間 (千葉大学 [課題番号: CBA\_01])。