

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発生との相関に関する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。

繰り返し地震は、プレート境界・断層の滑りを監視するすぐれた方法である。今年度、日本全国の定常地震観測データに基づく包括的な繰り返し地震カタログを出版した。同様のスコープをもつ以前のカタログ (Igarashi, 2010) は、2002年1月-2009年12月をカバーしていたが、今回は気象庁カタログに加えて地震研の震源カタログも用いることで、中日本を中心とする一部の地域については1981年からカバーできた。波形の相互相関を基準として、1981年7月18日から2019年12月18日までの期間に11,677グループ41,735イベントを繰り返し地震と認定しカタログ化して、一般に公開した (図1a)。長期的に活動が継続する繰り返し地震群の多くは沈み込むプレートの境界で発生しており、一方、地殻浅部で発生している繰り返し地震群の多くはバースト的な活動を示している。さらに、作成した繰り返し地震カタログを用いて、日本列島周辺の沈み込み帯における滑りの空間分布・時間変化の特徴を調べた (図1b)。得られた平均滑り速度は、プレート間巨大地震とその余効滑りの影響が見られる地域を除くと、プレート間の相対運動速度よりも遅い傾向が見られ、プレート境界面の固着状況を反映している (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、Igarashi, 2020)。

島嶼部観測空白域を減らすために2002年から始めた伊豆鳥島での地震観測は継続できている。また、繰り返し地震活動の更新過程によるモデル化に基づく、プレート準静的滑りの時空間変化の推定手法 (Nomura et al., 2017) のプログラムを、統計解析ソフトウェアRからMATLABへ移植し高速化した (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、野村, 2020)。

南海トラフでおきる長期的・短期的なスロースリップ・イベント (SSE) については、GNSS・地下水・歪み・傾斜の定常観測データから準リアルタイムで自動検出と滑り量推定が行われている (気象庁 [課題番号: JMA_01]、産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09]、

矢部・他，2020；2021)。GNSSを用いたSSEの客観検出に関しては、南海トラフ地震臨時情報の発出も含む監視業務での役割を検討した(気象庁[課題番号：JMA_01]、小林，2021)。

最近の目立ったイベントとしては、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が、2019年半ばから2020年半ばにかけて再び発生したことがあげられる(気象庁[課題番号：JMA_01]、気象研究所，2020a)。また、2019年豊後水道の長期的SSE(GNSS座標とひずみ計データの統合インバージョンからMw6.8相当)の影響を簡易的に除去したGNSSデータから、2019年に四国中部にも小規模な長期的SSE(Mw6.1)が発生していたことがわかった(気象庁[課題番号：JMA_01]、気象研究所，2020b)。2019年豊後水道の長期的SSEは予期されていたので、周辺地域には基盤的観測網のGNSS局を補完するようにならかじめ追加されたGNSS局があり、これらのデータも加えた解析(図2)からは、2019年豊後水道の大きなイベントの前後に日向灘北部や四国中部で小規模な長期的SSEが見つかった(東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12])。また、この地域に展開・維持している機動的広帯域地震計のデータを用いて超低周波地震(VLFE、0.02-0.05 Hz帯域)の検出能力を上げ、豊後水道では通常は約3か月間隔でエピソード的に発生する深部VLFEが、長期的SSE継続期間中には1か月以下の短い間隔でバースト的に発生することを見い出した。さらに、四国西部の低周波地震(LFE、1-10 Hz)発生域直上に4ヶ所設置した短周期地震計の小型(口径1-2 km)稠密アレーでは、2019年12月下旬から2020年5月まで連続波形が取得され、センブルンス解析によってLFEが数分の間100 km/hで高速移動する現象を捉えた(東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12])。

近年では、世界中の様々なグループが様々なタイプのスロー地震の検出手段を進化させており、本計画で維持・管理しているスロー地震データベースには約50種類のカatalogが登録されている。様々なスロー地震Catalogに基いて、多様性と系統性の観点から、日本のスロー地震活動の特徴や相互作用について整理を行った(東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]、Obara，2020)。

LFEはスロー地震の中では最も短周期である。LFEのモーメントと破壊時間のスケーリング則を得ることは、これまでSN比の低さから困難であったが、四国西部の1万イベント以上のLFE波形を精査することで、通常地震と同じくモーメントが破壊継続時間(コーナー周波数の逆数)の3乗に比例する相似性(いわゆるストレスドロップ一定則)があてはまることを見い出された。ただし、ストレスドロップ(と破壊伝播速度の積)の値は、通常地震より2-3桁低く、また、コーナー周波数より高い周波数成分は、通常地震は周波数の2乗で落ちてゆくがLFEは3乗で落ちる。これらは、LFEの正体解明につながる重要な発見である(東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]、Supino et al.，2020)。

LFEについて南海トラフでの長期的な挙動を見極めるために、2004年4月から2015年8月までのHi-net連続地震波形に、マッチドフィルター法を適用し、約51万個のLFEを検出し、スロー地震データベースでCatalogを公開した。この数は同期間の気象庁一元化処理震源Catalogに比べて約23倍多く、LFEの特徴的な活動パターンがいくつか見い出された。解析期間中に豊後水道で半年程度持続する長期的SSEが三度あり、それらの最中には、プレート境界の走向方向にゆっくりと移動するLFEの群発的な活動が頻繁に見られ、それは長期的SSEのMwが大きいくほど顕著であった。このようなLFEの長距離・低速移動は、豊後水道SSEの期間以外でも、南海トラフ全域で解析期間全体を通じて繰り返し起きていた。

これは、Mw6.0程度以上のSSEに伴うETS活動の一端であると考えられ、既によく知られている同時期の微動の活動と同様に、拡散係数 10^4 m²/s程度の拡散的なパターンの移動形式を示し、10日ほどかけてゆっくりと100 kmほど移動する。さらに、今回LFEの検出密度が激増したことにより、このような低速・長距離移動現象の中に、15 kmほどの短距離を10分程度で高速に移動する小スケールのLFE活動が多数含まれていることが見い出された。拡散的なパターンをあてはめると拡散係数は 10^5 m²/s程度となる。また、今回のカタログでは、2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）M9.0以降、豊後水道から四国東部までの250 kmという長距離にわたって、巨視的なセグメント境界を超えてLFEの活動が同期する傾向が見受けられる。理由は不明だが、Takagi et al. (2016) が示した豊後水道から四国中央部まで延びる小規模な長期的SSEの影響で滑りイベントの連結性が高まったのかもしれない。後述する、短期的SSEのサイズ増加 (Hirose and Kimura, 2020) と関係するのかもしれない (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Kato and Nakagawa, 2020)。

また、前計画において、紀伊半島の12年間の深部LFEの空間的にセグメント化した活動の相互作用パターンを、点過程用に開発した新たな隠れマルコフモデルで記述した (Wang et al., 2018)。今年度は、隠れマルコフモデルの当てはまりを評価する新たな方法を提案し、紀伊半島の例について検討した (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Buckby et al., 2020)。

0.02-0.05 Hz帯域のスロー地震である超低周波地震 (VLFE) について、プレート境界での滑りイベントを仮定して計算された理論波形をテンプレートとして防災科研のF-net連続波形をスキャンすることで、2003年から2019年の西南日本と東北地方太平洋沖の網羅的なVLFEカタログを作成した。浅部VLFEによるモーメント解放レートは深部VLFEより大きく、プレート境界浅部の不均質性が強いことが示唆される (図3)。プレート境界のカップリング率との関係 (図4) をみると、深部VLFEはカップリング率が0.5以下のところでしかおきないのに対して、浅部VLFEは様々なカップリング率の場所でおき、その活動度はカップリング率と逆相関を示す。浅部VLFEは地震波速度の遅い領域の周辺にみられる傾向もあり、流体の影響が示唆される (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Baba et al., 2020a; 2020b)。

一方、紀伊半島沖では、海底ボアホール内間隙水圧計が新たにDONETに接続され、データがリアルタイム伝送されて多くの浅部VLFEのモニタリングが可能になった。2020年3月に海溝近くで発生した浅部VLFEについて周辺の3つの間隙水圧計の記録 (図5) から、滑りは海溝に向かって伝播したが、最も海溝側のボアホール付近までは到達しなかったことが判明した (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、Ariyoshi et al., 2021)。

短期的SSEは継続時間が1週間程度のスロー地震である。四国で発生している短期的SSEについて、防災科学技術研究所のHi-netによる傾斜変化 (オフセット) データセットに基づいて、2001年から2019年にかけて発生した61イベントのすべり分布を推定した (図6)。短期的SSEによるすべり量は空間的に一様でなく、18年間の累積すべり量の分布によれば四国のETS領域が3つに区分されることが分かった。また、すべり領域のスラブ走向方向への長さは、2012年頃を境に、それ以降のSSEではより大規模のものが増えた (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Hirose and Kimura, 2020)。

以上のように、観測と解析の高度化、そして、良質なデータの蓄積が進んだことによってスロー地震の発生様式の理解は飛躍的に進展している。スロー地震の滑りが固着した大地震の震源域への応力载荷を進行させることは弾性論から明らかであるが、固着域にわずかな滑りを起こさせる例が観測からみつきり始めている。昨年度、LFEのタイミングを基準に四国西部のGNSSデータを重合することで、深部で短期的SSEが発生している最中に、固着域の深い側においても僅かな滑りが起きることを見出した (Kano et al., 2019) が、今年度は解析領域を拡げ、四国東部と東海地域でも同様の現象を見出した (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Kano and Kato, 2020)。

日本海溝の沈み込み帯では、前計画において、岩手県沖のプレート境界浅部のスロースリップが顕著な3年周期の変動を示し、M5以上の地震の多くはスロースリップが速い時期に起きていることを見出した (Uchida et al., 2016)。本年度は、Mw6.5以上の地震がなかった1996年から2003年前半の時期の繰り返し地震と陸域GNSS観測データに基づいて、スロースリップの時空間分布と地震活動の関係を調べた。岩手北部から青森にかけて、プレート境界深部で平均3 cm/年を超える滑りが続いているカップリングの弱い領域と、それを取りまくように存在するカップリングの強い領域があり、低カップリング域の滑りレート(3ヶ月窓の移動平均)は1年前後の周期で消長していること、滑りレートが高い時期には高カップリング域でのM4-6の地震活動度が高く、またb値が小さくなる傾向が見い出された。低カップリング域の滑りによる高カップリング域への応力载荷レートは、低カップリング域の滑りレートに合わせて0.5-1.2 MPa/yr程度の範囲で増減しており、これが地震活動の消長をもたらすと解釈できる。なお、期間中に高カップリング域でおきた5つのM6前半の地震のうち3つが载荷レートの高い時期におきていた (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Khoshrmanesh et al., 2020)。

スロー地震の振舞いからプレート境界の摩擦特性に関する知見を得ることもできる。本計画では、スロー地震に伴う流体移動 (Tanaka et al., 2018) を検出するための重力及び電磁気観測を行っている。本年度も、観測とデータの検討を継続した。本計画で使用している相対重力計の性能評価を行い、スロースリップが検出できる帯域を明らかにした (Tanaka et al., 2020a; 2020b)。また、四国西部で継続しているNetwork-MTデータから得られた3次元比抵抗構造に基づいて、構造変化検知の可能性を検討した (Uyeshima et al., 2020)。さらに、スロースリップに対する潮汐力の影響を、すべり面のダイラタンシーを考慮して物理的にモデル化し、深部低周波微動の潮汐応答の観察からスロースリップ域の摩擦特性を制約できる可能性を示した (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Sakamoto and Tanaka, 2020a; 2020b)。

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 (加納, 2020, for review) 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。SSE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ており、琉球海溝南西部八重山諸島近傍でおよそ6ヶ月周期で繰り返すSSEに焦点を絞ったGNSS観測を継続している。2013年以降に整備された新規の観測点も含めたデータ解析で、2010-2019年のあいだに16回のSSEによるすべり時空間発展が推定された。すべりが推定された位置や再来間隔については先

行研究と整合的で、SSEがプレート境界面の同じ場所で繰り返し発生していることを示唆している。この地域のSSEのすべり速度の加減速の時間変化の様式は2通りあることがKano et al. (2018) により報告されているが、今回の解析で、ゆっくりと加速してすべり速度が最大になった後ゆっくりと減速するという新たなパターンが見つかった。このパターンのSSEは16回中7回発生した（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_01]）。

代表的な手法の一つであるアンサンブル・カルマンフィルタを用いたデータ同化によって、豊後水道に一つの長期的SSEパッチを置いたモデルで滑りの再現と予測ができることを昨年度までに示した。今年度は、四国中部から日向灘にかけて南海トラフの走向に沿って長期SSEの再来間隔等に多様性があることを扱うために、まず複数のSSEパッチが相互作用するフォワードモデルを用いて多様性をもたらす要因を探った。SSEの基本的なふるまいはSSEパッチの幅と震源核臨界サイズの比で決まると考えられていたが、実際には、ほぼ全てのモデルパラメータが再来間隔に影響することがわかり、さらに、固着率と法線応力の不均質により走行方向での再来間隔、最大すべり速度、継続時間の変動が生じることが確認された（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_01]）。また、地震サイクルのデータ同化に機械学習を用いる試みとして、サイクルが繰り返すにつれて固着-滑りの大きさや間隔が徐々に変わっていく室内摩擦実験で得られた剪断応力・変位の時系列データ（Urata et al., 2018）に対して、1自由度の固着-滑りシミュレーションで作成したデータを用いて訓練したランダムフォレストモデルを適用し、速度・状態依存摩擦則を規定する摩擦パラメータの変化を推定した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]、石山・他, 2020）。

昨年度までに開発した、地表面の変位データからアジョイント法によりプレート境界面の摩擦特性を直接推定する手法を、2003年十勝沖地震の余効すべり時に得られたGNSSデータに適用した。地震後15日間に得られたGNSSデータに同化することで摩擦特性の空間分布を推定し、それを用いて、その後15日間の地殻変動が良好に予測できた（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_01]、Kano et al., 2020）。

複雑な物理メカニズムに支配された系のデータ同化を可能にするために、フォワードモデルの計算コストが高い場合に効率的にモデルパラメータを推定する手法開発を進めている。粘弾性応答と余効滑りの両方がおきている2011年東北沖地震後の地殻変動データに基いて、地震時のすべり分布、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粘性率の6つを未知パラメータとし、これらの事後確率分布を求めることに昨年度成功した。本年度は、同じデータに基づいて、推定パラメータ間のトレードオフの情報も含む二次元の同時事後確率分布を求めることに成功した（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_01]）。

室内実験では、音波の透過率や反射率が断層の摩擦強度を線形に反映することが知られており（Nagata et al., 2008;2012）、プレート境界等の強度変化を監視できる可能性が指摘されている（Kame et al., 2014）。本年度、ガウジ層を挟む模擬断層での音波透過率を調べることで、ガウジ層がない場合でも見られた時間依存性の摩擦強度変化（いわゆるlogtヒーリング）に対応した音波透過率の変化を確認した。さらに、ガウジ粒子の幾何学的再配置による構造変化を反映した非時間依存性の圧密強化メカニズム（Nakatani, 1998）に対応する音波透過率の変化も捉えた。しかし、logtヒーリングは、

断層全体としての摩擦強度には反映されないバルク部分でもさかんに起きており、ガウジが無い場合 (Nagata et al., 2008; 2012) のように音波透過率と断層強度が一对一に対応するわけではないことがわかった (気象庁 [課題番号: JMA_01]、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_06]、永田・他, 2020)。

プレート間固着の時間変化を推定し、その発展を予測するためには、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。摩擦や水理特性に大きな影響を与える粘土鉱物の含有量を、基礎的な検層種目である電気比抵抗検層と自然ガンマ線検層のデータから経験的に推定する手法を、南海トラフ付加体のデータに基づいて開発した (図7)。本手法によって、コアの取得が難しい地層でも、検層データから詳細な粘土鉱物量比の深さ分布を推定することが可能となる (産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09]、Yabe et al., 2020b)。

南海トラフデコルマ付近の浅部VLFEの要因として高間隙水圧が想定されている。浅部VLFEの活動が活発な室戸沖では、実際に高間隙水圧が確認されており (Tobin and Saffer, 2009)、この領域に沈み込む半遠洋性の泥岩層の低い透水性がデコルマの高間隙水圧をもたらしたと考えられる。そこで、逆に浅部VLFEがほとんど観測されない潮岬沖の構造を調べるため、マルチチャンネル反射法地震探査データ (測線KI01) を解析し (図8、9)、浅部デコルマ全域にわたるような低 V_p 層が存在しないこと、砂泥互層のタービダイトを含む四国海盆堆積層が浅部デコルマに沿って沈み込んでいることがわかった。透水性の高いタービダイトが沈み込む潮岬沖のデコルマでは、高間隙水圧が生成されにくいと推察されるため、浅部VLFEが検出されていないことと整合的である (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])。

南海トラフにおけるスロー地震発生域の構造的特徴について、昨年度は、紀伊半島北東部の甲賀-南伊勢測線での結果を報告した。本年度は、紀伊半島南部と四国西部の結果を報告する。紀伊半島南部のみなべ-下北山測線は、深部LFE発生域の直上にある。これらのLFEはフィリピン海プレート上面に対応すると解釈できる明瞭な反射帯 (深さ27-35 km) 付近でおきており、LFE発生域では V_p の低下が見られる。四国西部では、制御震源探査データの反射法断面図から、深さ25-33 kmにフィリピン海プレート上面に対応すると解釈できる反射帯が見えた。反射の程度は傾斜方向・走向方向どちらにも変化しており、短期的SSEの積算すべり量 (Nishimura et al., 2013) が大きいところに明瞭な反射帯がある傾向が見い出せた (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Kurashimo et al., 2020)。

東北日本においては、S-netで得られるようになった、太平洋側海域観測点での地震波形のS波偏向異方性を調べることで、前弧側のマントルウエッジは顕著なS波偏向異方性を持たないことが判明した。背弧側のマントルがスラブの沈み込みと調和的な流動を示唆する異方性を示すのとは対照的で、前弧側のマントルウエッジは固くて流動していないと考えられる。これは、沈み込み帯の変形や地震・火山活動を支配する重要な基本構造だろう (図10) (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Uchida et al., 2020a)。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

地震活動は20世紀前半からの網羅的観測データがあり、予測手法の検証・実践に関して格段のポテンシャルを有しているため活発な研究が続けられている。地震活動の様々な変調が地震の先行現象ではないかと提案されており、少くとも、短期的な地震活動のクラスタリング（余震的トリガ）は、明らかに存在する強い規則性であり、地震の確率予測に利用できる。

地震活動を独立地震とトリガされた地震に分けて把握すること（デクラスタ）は、今では地震活動解析の第一歩となっている。恣意的な基準を導入しないデクラスタ手法として、ETASを応用した方法（e.g., Zhuang et al., 2002）に加えて、リスケールされた時空間距離での最近接イベントとの距離に着目するZaliapin and Ben-Zion (2013) の手法がよく使われるようになってきている。本年度は、イタリア北東部の1977-2018年のカタログ（M2.0まで完備、約4000イベント）に対して、この二つの方法でのデクラスタリング結果を比較した。検出されたクラスタ内部でのイベント間のリンクの仕方は（当然）異っていたが、クラスタ分けの結果は各クラスタが含むイベントの構成を含めて非常によく一致していた。どちらの結果でも、地震の半分強は独立地震であり、その8分の1程度に、前震もしくは余震、あるいはその両方が伴った。非独立地震のうち9割弱は、クラスタ内の最大地震より後におきた余震、1割強は前におきた前震であった（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、Varini et al., 2020）。

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（気象庁 [課題番号：JMA_01]、気象研究所、2020d）。そこでは、発生間隔が一定の平均値をもつ定常的な統計分布に従うことを前提に、様々な定常更新過程による予測の性能を評価していたのだが、2011年東北沖地震以後の釜石沖繰り返し地震のように、周辺で起きた大地震の影響を受けて定常性が崩れることがある（図11）。このような場合でも、平均的な発生レートの変化に明かな法則性があれば、それに従って相対的な時間進行率を変化させることで、従来の定常更新過程モデルによる予測実験が継続できることを示した（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]、野村・田中，2021）。なお、釜石沖については、活動を詳細に把握するための13点による陸域臨時観測を維持している（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]）。

プレート境界の繰り返し地震は背景の非地震性滑りによって繰り返し載荷される小さな固着パッチの繰り返し破壊であるという解釈が確立しているが、観測例が増えてきた内陸の繰り返し地震については現象論的特徴も物理解釈も定まったものがない。昨年度、内陸地殻（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ものの震央分布が、ETASモデルの背景活動度 μ （余震的トリガの影響を除いた、独立地震の発生レート）の空間分布と似ていることを指摘したが、今年度、その相関が有意であることが示された。また、バースト型については、中越沖、兵庫県南部、鳥取県中部、熊本など15地震の余震中の繰り返し地震の減衰や継続時間を調べ、地震ごとに大きな違いがあることがわかった。繰り返し地震が本震断層の余効滑りで駆動されたとすると、余効滑りが本震による応力変化だけでなく、流体が関与しての強度変化の影響を受けることで、余効滑りに大きなバリエーションが出るということかもしれない（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]、尾形，2021）。

内陸で繰り返し地震が見られた2つの興味深い事例について、詳細で包括的な解析を行った。まず、昨年度報告した、函館での非火山性LFEと通常地震(M1級)を含むクラスタについては、下部地殻の深さ15~35 kmにかけてLFEのみが起きる傾いた円柱状のクラスタがあり、その延長線に位置する上部地殻の深さ10 kmあたりで、LFEと通常地震が混在して活動していることがわかった。通常地震には明らかな繰り返し地震が含まれていて、それらは、応力降下量が小さい、繰り返し間隔が短い(10分程度)など、人工注水で誘発される繰り返し地震(e.g., Lengline et al., 2014)に似ていた。深部からの流体によって間隙圧が上昇することにより発生している可能性があり、その場合には、下部地殻のLFEクラスタと合せて水道になっているのかもしれない(東北大学理学研究科[課題番号:THK_09]、Yoshida et al., 2020a)。一方、2017年に秋田大仙市でおきたM5.3の地震については、一枚の断層上で、前震・本震・余震の破壊域が棲み分け、さらに本震破壊開始点にむかう前震活動の移動、余震活動域の拡大が見い出された。プレート境界の地震と同じように、本震前後の非地震性滑りがあった可能性がある。実際、余震フロントでは繰り返し地震も見い出された(東北大学理学研究科[課題番号:THK_09]、Yoshida et al., 2020b)。

繰り返し地震に限らず、地震活動の特徴の地域性を理解することは、経験的な確率予測の助けとなる。グーテンベルグ-リヒター則のa値は、地域の地震活動度の指標のひとつであるが、その最尤推定量と推定誤差の計算方法、統計学的根拠については、これを明示した文献が見あたらないので、解説論文にまとめた(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_12]、京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01]、岩田・尾形, 2020)。

階層的時空間ETASモデルにおける背景地震活動度 μ も地域の地震活動度の指標である。日本海東縁地域で近接しておきた1964年新潟地震(Mj7.5)と2019年山形地震(Mj6.7)周辺地域の地震活動(1998-2019年, Mj1.8以上)に、背景地震活動度 μ と余震生産性Kの空間分布のロバストな特徴が見つかり、地学的特徴との対応を検討した(図12)。 μ は東西短縮の歪み速度(Menesses-Gutierrez and Sagiya, 2016)と正の相関をもち、両地震とも、新潟-神戸歪み集中帯の北部延長とされる速い東西短縮の地域でおきた東西圧縮の逆断層地震である。また、新潟地震の震源域はKが低く地震発生深度でのP波速度(Matsubara et al., 2020)が高い。山形地震の震源域はこの逆である。岩石実験での微小破壊の活動を参考にすれば、山形地震の震源域のほうが地殻の損傷程度が高く、脆性破壊が拡がりにくいと解釈できる。山形地震の震源域に新潟地震の破壊域が侵入しなかったのは、そのせいかもしれない(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、Ueda et al., 2021)。

このように、地殻構造の不均質を精度よく決めることの意義は、今後ますます高まると思われる。最近よく使われるようになった速度推定手法である空間自己相関(SPAC)法について、小規模アレー観測に適用する際の解析可能波長の上限が、アレーサイズに信号対雑音比の平方根を乗じた程度であることを理論的に示し、また表層減衰の推定に使える可能性も示した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01]、長・岩田, 2020、Cho and Iwata, 2021)。

一方、断層面の幾何学的複雑さが地震破壊に与える影響も近年さまざまな事例で示唆されている。今年度は、2000年鳥取県西部地震(Mj7.3)の破壊域(水平方向30 km、鉛直

方向15 kmの鉛直な左横ずれ断層)を覆う地表に約1 km間隔で面的に配置された地震計1000点のアレーで得た、2017年4月から2018年4月までの13ヶ月間の連続記録を解析した。得られたカタログはM-0.6まで完備で、4033個の微小地震(最大でM2.6)の震源分布は、2000年の地震直後の余震域全体にわたって、いまだに集中的な活動(本震破壊面を描き出すような余震分布)が保たれていることを示しており(図13a)、現代の技術による超高感度観測で超微小地震まで観測することで、昔の地震の破壊面の情報を得られる可能性がある。圧倒的な観測点密度を利用して、必要な場合には数mの相対精度で決定された震源は、長さ約20 kmの主断層以外にも5 km(図13a)から30 m(図13b)までの様々な大きさの明瞭な鉛直板状の分布を示し、小スケール断層の雁行配列(図13b)まで描き出されている。2000年の地震では主断層と平行および共役な方向の、あらゆるスケールの横ずれ断層が動いたと考えられる。また、図13bのような小さな面上でも活動の移動が観察され、その速度(約30 m/日)からして流体移動が関与が推察される。また、この観測ではP波速度のトモグラフィも0.5 kmという高い空間分解能が達成された(図13c)。2000年地震の破壊開始点から走向に沿って約6 km北に明瞭な速度境界があり、それより南東の高速度域では震源が主断層に集中しているのに対して、北西の低速度域でははっきりした主断層がなく、多数の共役面を含む複雑な分布をしている。2000年の地震で大きな滑りがあったのは南東側の高速度域で、北西側の低速度域は連続性のよい長い断層がない未熟な剪断帯の段階と考えられる(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、Kato et al., 2021)。地震の決定論的予知が原理的に困難であると考えられる主要な理論的根拠は、断層のフラクタル的な不均質である(e.g., Ide and Aochi, 2005)から、大地震の断層の複雑さを直接マルチスケールで捉えた鳥取の観測は、地震の可予測性の研究を新たな段階に進める契機となりえよう。

微小地震のメカニズム解からは、さまざまなスケールでの応力場、あるいは断層の構造を得ることが期待される。そのためには、地震のメカニズム解を極力多く集めることが重要である。通常は誤差の大きいメカニズム解は解析に利用されないが、誤差を正しく見積もることが出来れば、その誤差情報も含んだ上で得られたメカニズム解を全て用いた解析が可能となる。そこで、P波初動極性(押し引き)データを元にしたメカニズム解の誤差を推定する手法を開発した。ある地震に対して得られたP波初動のデータに対し、適当なメカニズム解を仮定すると、そのメカニズム解から期待される極性と合致しているものの個数・全体の個数・極性が合致する確率から、尤度(データとモデルの合い具合に関する統計的評価関数)を作ることが出来る。これに節面の向きおよび極性が合致する確率が一様分布に従うという仮定を置き、これをベイズ推定における事前分布として先の尤度と掛け合わせることでメカニズム解の事後分布を得る。ただし、事後分布を解析的に得ることは困難であるため、棄却法(von Neumann, 1951)によるサンプリングで近似的に得ることとした。これにより多数のメカニズム解の集合、即ちメカニズム解の確率分布を得ることが出来た。この分布全体を用いることで、応力場推定など、メカニズム解を元にした様々な統計的推定を従来よりも合理的に行い得る(京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01]、Yukutake et al., 2020)。

上述の2000年鳥取県西部地震でもそうであったが、やはり内陸地震である1976年唐山地震(M7.8)の破壊域でもいまだに地震活動が見られ、最近では2019年12月5日に豊南地

区でM4.5が起きている。余震継続期間は地域のテクトニック载荷レートに反比例するという、速度・状態依存摩擦則のもつ遅れ破壊的性質に基く余震の物理モデル (Dieterich, 1994; Toda and Stein, 2018) からは、唐山の余震は100年以上続くと考えられる (e.g., Zhong and Shi, 2012)。そこで今年度、唐山地震震源域を含む約300 km四方程度の領域について、1970年から2019年12月5日までの地震活動を有限断層ETASモデル (Guo et al., 2017; 2019) を用いて解析した。その結果、現在の地震活動は、独立地震と過去の地震の余震がほぼ半々な、余震期と通常期の境目の状態であることが示唆された。また、現在の独立地震の活動度は、唐山地震前の数年間におけるレベルより明らかに低い。これは単に余震期が終わったということでは説明できず、唐山地震後はテクトニックな応力载荷速度が低下したと考えられる (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Liu et al., 2021)。

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の開発を継続している。今年度は、種々の情報を重ねあわせて対話的に表示するマッピングツールを使いやすくするため、GISソフトウェアを用いたものを試作した。また、2020年11月6-7日に青森県沖でM5.5とM5.2の地震が近接しておきたため、昨年度開発した計算・マッピングツール (井筒ら, 2019) を用いて、前震識別手法として提案されている短期的な空間集中化指標 (Lippiello et al., 2012) の推移を見守った。この2つの地震によって集中化スコアは上がり、2020年12月31日時点でも高止まりしているが、これはその後の地震活動が低調であったために値が更新されないだけである。また、この地震から150 kmほど南西で12月12日にM5.6、50 kmほど西で12月22日にM6.5の地震が起きたが、それらに先立つ地震活動の集中化はなく、12月22日の地震はむしろ活動の分散化傾向がみられる場所で起きたものであった (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])。この青森県沖の地震活動を受けて、COVID-19感染症のため再開が遅れていた北海道えりも観測点の3成分磁力計の観測を2020年11月中に再開した (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。先行現象に関する国際ワークショップとして千葉大で開催予定であった7th Int'l Workshop on Earthquake Preparation Processは、COVID-19感染症の影響を受け中止した。JpGU-AGU2020の国際セッションInterdisciplinary studies on pre-earthquake processesはオンラインで開催した (千葉大学 [課題番号: CBA_01])。

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性 (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。そのために、非研究目的で行政等が観測していた様々なデータを集めている。宮城県は漁海況調査として、沿岸と

沖で海水温と塩分の定点観測を長期にわたって行っている。このデータ（書類）のデジタル化が1978年度分まで完了したので、1978年2月20日のM6.7地震、1978年6月12日のM7.4宮城県沖地震の震源に近い定点観測3地点（大島、江ノ島、田代島、いずれも宮城県）の海水温データ変化を時系列プロットしてみた。地震に先行する時期に3地点に共通した顕著な異常はみられなかったが、江ノ島においては1978年1月始めにトレンドよりも高温を示す日が数日あった（図14）。しかし、これはプロット期間中に何度も見られる程度の変動である。また、1日以内の変動に異常がみられるかもしれないと考え、各日の午前10時と午後3時の差の時系列をつくってみたが、地震に関係していそうな異常は見うけられない（公募研究、東京学芸大学〔課題番号：KOB008〕）。

日本のプレート境界沿いの中規模繰り返し地震について、近傍のM6クラス以上の地震との関係を調査した。中規模繰り返し地震の発生間隔が平均よりも長くなった後、複数の系列にて常にはないが、次の繰り返し地震までの間に近傍でM6クラス以上の地震の発生が見られた。ただし、2011年東北沖地震以降、その影響を受けた系列では繰り返し間隔が非常に短かつ非定常になり、そのような関係をうかがい知ることができない（気象庁〔課題番号：JMA_01〕、東北大学理学研究科〔課題番号：THK_09〕）。

短期的な前震活動は、飛び抜けて高い確率ゲインを示す先行現象で、その先行傾向の有意性には疑いがない。しかし、地震活動の活発化を先行現象とみなすわけだから、本震が前震の余震としておきたものを捉えているだけ（Helmstetter et al., 2003、Felzer et al., 2015）である可能性があり、それだけでは、本震につながる特別な物理過程（e.g., Kamogawa et al., 2019、Lippiello et al., 2012; 2019）が存在するという証拠にはならない（Nakatani, 2020）。この疑いを晴らすには、ETASモデルによって作製した人工的なカタログ（つまり、独立地震のランダムな発生と余震的トリガ効果だけで構成された地震活動）に対して、主張する前震現象を用いた予測を行い、同じ方法を実カタログに適用した場合よりも予測性能が劣ることを示せばよい。数十キロ四方内に一定規模（ M_{f0} ）以上の地震数個（ N_f ）が数日（ T_f ）以内に起きた場合に、そのあと数日（ T_a ）以内に、予測のターゲットとする大きな（ $\geq M_{m0}$ ）地震がおきるというアラームを立てるMaeda（1996）の前震識別法（以後M法）について、昨年度は伊豆諸島地域でのみ予察的な解析を行った（弘瀬ら, 2019、前田ら, 2020）が、本年度はM法が特によい成績（確率ゲイン300-1600）を示す伊豆諸島、長野県北中部、岩手・宮城県沖、茨城県沖の4地域（前田・弘瀬, 2016）で本格的な検証を行った。人工カタログを作るためのETASパラメタはそれぞれの地域に合わせたものを用い、さらに、人工カタログに対するM法の適用においては、各地域で1000通り作成した人工カタログのそれぞれについてM法のパラメタを最適化し、人工カタログにとって不利にならないよう工夫した。成績の比較表を図15に示すが、いずれの地域でも実カタログに対しての方が成績がよい（確率ゲインで1.16-5.64倍高い）。人工カタログに対しても70-500と、1よりずっと大きい確率ゲインで予測できているので、余震トリガ効果に助けられている面はあるにせよ、それだけではない、物理的な前震ならではの特徴を利用できていると言える。実際、各地域で予測ターゲットとした地震の前の地震活動を比べてみると（図16）、ETASカタログと実カタログでは明らかに時間的推移の特徴が異っている（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕、弘・他, 2020a、Hirose et al., submitted）。

そこで、どのような物理過程がM法の拾い上げる特徴的な前震を産み出しているかを推察するために、M法による予測成績の空間分布を、それぞれの地域での既知の地震テクトニクス情報と比較した。プレート境界である岩手・宮城県沖および茨城県沖でM法が成功するのは、VLF（超低周波地震）や微動の見られる地域に隣接し、且つ背景地震の群発活動（Nishikawa et al., 2019）が見られる地域であり（図17a、17b）、SSEによる地震活動がM法で前震として捉えられている可能性がある。また、M法が成功するのは、そのような背景地震の群発活動のなかでも、プレート境界直上の低速度異常域（縁の部分）である（図17c）。さらに、岩手県沖（図18の領域N）に関しては、ターゲット地震もアラームも、大部分はUchida et al. (2016) が見つけた3.09年周期のプレート間滑り速度の増減リズムにおいて、ゆっくり滑りが速い時期に発生しており、予測が成功したのは全てがそのような時期であった。このことも、SSEに引き起こされる群発活動が前震として拾い上げられているという推察を支持する。

一方地殻内地震では、流体活動に関連する群発活動を前震として捉えていると推察される。長野県北中部でM法が成功するのは、新潟－神戸歪み集中帯および糸魚川－静岡構造線である（図19a、19b）。ただし、図中cの地震はM法に予知されたことになっているが、2011年東北沖地震の13時間後で、また、適中アラームとなった地震ともやや離れているので、前震－本震の関係ではなく、どちらも極度に頻発していた誘発群発活動の一環ということにすぎない可能性が高い。そうすると、M法が成功するのは新潟焼岳以西ということになり、ここは流体（部分熔融）やマグマ活動によると思われる低速度異常が地殻から上部マントルまでひろがっている（Nakajima and Hasegawa, 2007）地域である。伊豆諸島に関しては、活動的な火山列からなる七島・硫黄島海嶺に沿ってほぼ満遍なくM法が成功している（図19c、19d）。なかでも、マグマ貫入に伴う地殻変動と群発地震の対応がよい（e.g., Kumazawa et al., 2016）ことで有名な伊豆半島東部は、予知率12/13、適中率5/6と抜群の成績であり、M法はマグマ活動にともなう群発地震を前兆としてとらえていると推察される。また、例外的に成績が悪い（空振りアラームのみが27個もある）新島付近は、流紋岩質で中部地殻が薄いなど、伊豆諸島の中では特異な地質構造をもつことも注目される（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、弘瀬ら, 2020b、Hirose et al., submitted）。

上述のM法においてもそうであったが、経験的な先行現象の研究では、余震的トリガリング（ETAS）効果から数百倍程度の確率ゲイン、本震につながる特別な物理過程から産み出されたとされる異常現象から数倍の確率ゲインが得られることが多い（Nakatani, 2020, for review）。かつて地震予知の本筋と期待された、「壊れ始め」という特別な物理過程から派生する決定論的な前兆に期待された姿からはほど遠いが、これは、一旦開始した地震破壊がどこまで成長するかが、実質的には確率的なプロセス（e.g., Ide and Aochi, 2005、Noda et al., 2013）であるせいだと考えられている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、中谷, 2020a; 2020b）。

今年度、確率的な地震破壊成長の抽象的微視モデルである分岐クラックモデル（図20a、Vere-Jones, 1977）に臨界ゾーンという概念を導入して、可予測性に関する上述のような経験的特徴を整理する枠組みが提案された。このモデルは、一つの微小クラックの破壊が、ある確率で次世代における隣接の微小クラックの破壊をトリガするということを

繰り返す確率過程で、1つのクラックがトリガするクラックの数の期待値 ν (臨界度) が 1 未満なら破壊のカスケードは速やかに終息、1 なら必ず終息するけれども寿命が長くなる。このモデルによる地震のサイズ分布は図20bのようになり、 $\nu < 1$ では、システムサイズとは無関係に地震サイズに上限がある。モデルの破壊単位(微小クラック)を岩石破壊のAE程度と仮定すれば、 $\nu < 1$ における上限サイズはM-2.5程度となり、一般的な観測下限より小さい範囲に留まる。すなわち、通常の観測で捉えられている地震は、基本的に $\nu = 1$ のゾーン(臨界ゾーン)でしか発生せず、現在可能な地震の最大サイズは連続的な臨界ゾーンのサイズと考えられる。臨界ゾーンでおきる地震の破壊の成長は複雑(図20c)で、個々の地震のサイズを決定論的に予測できないことには変わりはないが、臨界ゾーンの検出によって、地震発生の必要条件が整っている時空間を同定できれば、確率ゲインが上乘せできるはずである。 ν が低い側から1に迫ることは、物理的には強度の余裕が高い側からゼロに漸近することに対応するだろう。

臨界ゾーンの見地からは、先行異常は決定論的な震源核のように破壊開始点付近に限定されず、臨界ゾーン全体でみられると考えられる。このことは、経験的に提案されている低確率ゲインの先行現象[e.g., モーメント放出の加速(Bowman et al., 1998)、b値の低下(Nanjo et al., 2012)、地球潮汐による載荷/除荷時の地震活動変化の比(Yin et al., 2006)、重力変化(Chen et al., 2016)、電磁気変化(e.g., Han et al., 2017、Zhuang et al., 2013)、GPS変位異常(Wang et al., 2013)など]が広範囲に観測されることと調和的である。とくにb値については、図20bで上限サイズより小さい直線部分のb値(=0.75)が自然地震でのb=1より小さいことに注意すれば、先行現象としてのb値の低下は、 ν が1に迫るときに上限サイズが増加して、b=0.75の部分が観測にかかるようになったと解釈できる。また、この上限マグニチュードの上昇は、ETASの背景地震発生レートやクラスタリングの強さの時間の上昇としても捉えられるはずである。間接的ではあるが、Mignan (2014) は、本震のマグニチュードよりも3以上小さなマグニチュードから構成される地震活動を検出できた場合には、定常ETASから外れる前震が見つかる傾向があると指摘している(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13]、Zhuang et al., 2021)。

非常に小さい地震を検出する手法として、既知のテンプレート地震との波形相関をとることがおこなわれているが、バイアスのかからない一様な検出のためには、本来すべての連続波形から切り出された短時間波形同士の相互相関を計算する(以下、総当たり)ことが求められる。Yoon et al. (2015) は、スペクトログラムによる特徴抽出の結果(FingerPrint)に局所鋭敏性ハッシュによる高速検索(類似音声信号の探知に用いられる)を用いて総当たりによる地震検出方法を提案した。昨年度、この方法で特徴抽出を行う関数として別のものを2種類用いることで、計算時間が劇的に短縮し、且つ、FingerPrintよりも検知された相似波形同士の相関係数が概して高いことがわかった(駒形・他, 2020)。本年度は、2018年大阪府北部の地震(Mj6.1)発生直後の活動(震央近傍のHi-net観測点における6分間の連続波形)を対象に総当たりによる性能評価を試みた。その結果、特徴抽出関数を用いて得られる類似度と、元の波形の相互相関の順位相関が必ずしも高くない、すなわち、同じペアであっても用いる手法ごとに「類似の程度」の高低が異なる場合があることが判明した。いずれの手法においても気象庁一元化地震

カタログに掲載のない波形を検出したが、検出される波形は一部異なっており、ペアも一部異なった。そのため、単なる「計算コストを削減した代替手法の性能評価」にとどまらず、どのような特徴を共有する場合にいずれの指標において高い類似度と評価されるかを精査する必要が出てきた。このことは、「検出」という観点からは後退にも見えるが、特徴抽出という点において高度化への有意義な知見が得られたといえる（立命館大学〔課題番号：RTM_02〕）。

先述の臨界ゾーン（Zhuang et al., 2021）に関連する先行現象の候補の中でも、b 値の低下は多数の事例が報告されている。2016年熊本地震による剪断ひずみエネルギー変化の空間分布（Noda et al., 2020）を b 値の変化の空間分布と比べたところ、剪断歪みエネルギーが増加した場所では、一連の活動の開始前に比べて b 値が有意に低下していた（気象庁〔課題番号：JMA_01〕）。

M6.4地震の34時間後にM7.1地震（7月5日）がおきた2019年のリッジレスト地震に関して、詳細な地震活動の解析を行なった（図21）。まずM6.4地震の前10年間には、この地震の震源の周囲10 kmに集中した b 値の顕著な低下域が認められた。M6.4の地震は共役な二つの断層が滑ったものであり、そのうちのひとつでM7.1の地震が発生した。M6.4の直接的な余震活動は両方の断層で見られたが、M7.1が起きる方の断層の、M6.4の震源からM7.1の震源までの約5 kmの区間において低い b 値が見られた。この部分では余震活動の減衰が悪く（大森—宇津則の p 値が低い）、また、M6.4の地震によってクーロン破壊応力が顕著に増したはずの場所である。よって、観察された b 値の低下は、期待通り応力の増加を捉えたと思われる。さらに、短期的前震の特徴であると指摘されているLippiello et al. (2012) の空間集中化傾向がこの領域に限定して見られることも確認された。M6.4地震以降の34時間にこの領域の損傷が急激に進んだという、物理的な意味での前震活動であった可能性が示唆される（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕、Nanjo, 2020a; 2020b; 2020c、楠城, 2020b）。

上述のリッジレスト地震の例のように、b 値の低いところで大きな地震が発生し、そのあと b 値が下がったところで短時間のうちにまた大きな地震が起きたという事例は、世界でいくつか知られている。大きな地震がおきた直後は地震数が多いので短時間で b 値を評価でき、また地震活動が高くて大地震のベースレートも高くなっているから、それに b 値の増減を加味すれば、かなり大きな地震発生確率を予報できる可能性がある。Gulia and Wiemer (2019) は、世界のM6地震の例を調べ、地震が起きた直後の b 値がそれ以前より10 %以上高くなった19例では、その後M6以上は起きなかった（真陰性）に対して、10 %以上低くなった4例のうち3例でもう一度M6以上がおきた（真陽性）と報告している。2016年熊本地震系列は真陽性のうちのひとつに数えられているが、Nanjo et al. (2019) の高分解能の解析では、一発目（4月14日、M6.5）直後の数時間にはその余震域全体で b 値が低下したものの、そのあと本震がおきるまでの1日間は、余震域北部の b 値は逆に高くなっており、本震（4月15日、M7.3）はその領域で起きたので、データを丁寧にみて予報を出していれば偽陰性を出してしまっただと指摘した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕、楠城, 2020a）。しかし、これを偽陰性に数えたとしても、適中率は2/4であり、M6以上が短期間に連発するベース確率を5 %（Reasenber and Jones, 1990、Roeloffs and Gloyz, 2017）としても確率ゲインが10倍あり、p 値も1.4 %で、や

はり有意な予測性が認められる。したがって、Gulia and Wiemer (2019) が指摘するように、大きな地震がおきたあとの b 値を見てもう一発が来る確率を予報することは十分検討に値するだろう。なお、Gulia and Wiemer (2019) では accuracy 95 % という数字があげられているが、これは、検証された例のほとんどを占める真陰性ケースからの貢献が主であり、これをもってこの手法が高性能だと受けとるべきではない。むしろ、 b 値が低下した場合の $M6$ 以上の地震発生確率 ($3/4$ もしくは $2/4$) がベースレート 5 % に比べて 10-15 倍になっているという確率ゲインが適切な性能指標であろう。これは、余震トリガリング効果以外の先行現象の確率ゲインとしては、最も高い部類である。一方、陰性 19 例のうち、地震がおきたケース (偽陰性) が 0 であったということを経験情報ととらえれば、ベースレートで 95 % だった安全率が 100 % になったということだから、確率ゲインは 1 をわずかに超える程度である。

このように、大きな地震が発生した後の b 値をモニタリングすることで、そのあと大きな地震がもう一度起きる確率の有効な予報ができる可能性がある。本年度、国内の $M6.5$ 以上の内陸地震周辺の $M2.0$ 以上の地震活動について、 M 系列データの積算の傾きの変化を見ることで平均的な規模の時間変化を調査した結果、検知力低下の疑われる地震直後の期間を除いても、数ヶ月程度以上にわたり徐々に平均的な地震規模が低下 (すなわち b 値が増加) する傾向が見られた (気象庁 [課題番号: JMA_01])。これは、大多数の場合には b 値が上り、2 発目の大地震はやってこないという Gulia and Wiemer (2019) の論と整合的である。

スロー地震や震源核のプレスリップのように、地震発生を促進する効果が単純な力学から期待できるもの以外にも、地殻変動データの正体不明な異常が有意な地震先行傾向をもつ例が知られている (e.g., Wang et al., 2013)。本年度は、2008 年の四川大地震 $M8.0$ を契機に、龍門山断層帯周辺 600 km 四方程度の範囲に設置された 4 成分ボアールひずみ計 (YRY-4、設置深度約 50 m、1 分サンプリング) 6 台の記録を様々な観点から解析し、地震先行現象らしきものが見られないか探索した。

この地域で 2013 年 4 月 20 日におきた Lushan 地震 ($Mw6.6$) に関しては、GNSS (Xu et al., 2019) や、震源に最も近い YRY-4 型歪み計 (Chi et al., 2013) で、4 日前及び 4-6 ヶ月前に異常があったと報告されている。そこで、YRY-4 歪み計 6 台の記録それぞれに対して適応カルマンフィルターを用いて、気圧、潮汐、水位の影響を除去した歪みデータ時系列 (2011 年 1 月 1 日から 2014 年 1 月 1 日まで) から、最も乱雑な状態であるガウス分布に比してのエントロピーの低さの指標であるネグントロピー (Hyvarinen and Oja, 2000) の時系列を求めたところ、Lushan 地震の 4-6 ヶ月前に、短期間の増加が何度も起きていた。これらの異常は、Lushan 地震に近い 3 つの観測点でほぼ同時に起きていた。また、同じ時期に b 値がやや低下していた (千葉大学 [課題番号: CBA_01]、Yu et al., 2021 a)。

次に、同じ歪みデータの観測点間の相関に着目した。今回は、マルチチャンネル特異スペクトル解析で周期成分 (主に潮汐) とランダムノイズを除いた残りの歪み時系列データに着目し、1 日単位で全ての観測点ペアの相関係数を求めた。各日において、0.8 を超える相関係数が出た観測点の組み合わせの割合をネットワーク結合度と定義し、これが 80 % を超える日を異常結合日とみなして、地震のエネルギーに観測点までの距離を加

味したEs指数 (e.g., Han et al., 2014) と比較した。Es $>10^7$ J/km²である地震が13個 (Ms4.6-7.0) あったが、そのうち11個では20-60日前に異常結合日が頻発しており、異常頻度ピークから地震までの時間は30日以内であった (千葉大学 [課題番号: CBA_01]、Yu et al., 2020)。

さらに、異常結合が地震に先行する傾向が統計的に有意と言えるかを調べるためにROC解析を行った。ただし今回は、上記2つの研究より北の観測点も使い、ネットワークの南北範囲は1500 kmほどにわたる。また、調査期間も拡大して2010年1月1日から2017年8月10日までとした。地球潮汐除去等の前段処理は行わなかった。予測対象をEs $>10^7$ J/km²の地震 (26個, Ms4.9-7.0) とした場合、直近14日中7日以上でネットワーク結合度異常がある場合に、1日長のアラームを出すとした場合が最も成績がよかった。この条件で異常判定の閾値を変えて作ったROCカーブは、ランダム予測のはるかに上を推移し (AUC=0.81)、先行傾向の有意性を示した。また、予測対象を規模の小さな地震にすると予知率が下がることから、この前兆は大きな地震の前の方が現れやすい、もしくは、異常が大きくて見付きやすいという本震サイズへの依存性を持つようだ (千葉大学 [課題番号: CBA_01]、Yu et al., 2021b)。

このように、離れた観測点間の相関が強くなることが大地震の先行現象となることは、複雑系物理における協調臨界現象と関係するかもしれない。先行現象候補として地殻変動の空間相関が検討されたのは今回が初めてだと思うが、地震活動に関しては、カリフォルニアの大地震の数年前に地震活動の相関距離が増加することが多いと報告されている (Zoller et al., 2001)。また、日本のいくつかの大地震の発生数ヶ月前にナチュラルタイム秩序パラメータの低下がおきたことを以前に報告したが (Sarlis et al., 2013; 2015)、この現象について、ROC解析で先行傾向の有意性が示された (Sarlis et al., 2020)。

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。兵庫県南部地震 (1995年1月17日、Mw6.9) の4ヶ月前ごろから、阪神間の地下水中の塩素濃度 (Tsunogai and Wakita, 1995) やラドン濃度 (Igarashi et al., 1995) が顕著に上昇したのは有名だが、これらと軌を一にする変動が、神戸薬科大学で観測されていた大気中ラドン濃度に見つかった (Yasuoka and Shiogi, 1997)。これらの短期的な先行現象は、大気中ラドン濃度を含めて、阪神間の地殻変動が圧縮から伸長に転じ、また地下水湧出量の顕著な増加なども見られた1994年秋から始まっており、同じプロセスの結果である可能性が高い (Omori et al., 2009)。これに対して、1991-1994年の時期には、地殻変動の変調 (六甲の隆起、東西短縮の鈍化など)、地震活動の変調 (b値、静穏化など) などが知られており、兵庫県南部地震の中期的前兆だった可能性が指摘されている。昨年度までに報告してきた、1990-1994年の期間から現れ始めた大気中ラドン濃度のK1分潮 (周期23.934時間) 応答は、時期からみて、これらに関連した中期前兆であった可能性を指摘した。さらに、K1応答での大気ラドン濃度の感度 (=大気ラドン濃度の変動/地殻歪みの変動) は、短期前兆でのその25倍程度であったことを見い出した。よって、K1に応答した大気ラドン濃度変化は、短期前兆に対して推測されている断層帯透水性の変化とは違うメカニズムによるもので、様々な状況証拠から判断して、マントル流体の湧昇が原因ではないかと提案した (東北大学 [課題番号: THK_10]、Omori et al., 2021)。

地殻の透水性の変化は、地殻流体に見られる先行現象において、まず第一に検討されるメカニズムである。昨年度、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、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を報告した（木口・桑原，2019）。今年度は、愛知県、紀伊半島、四国の16の観測井の各種孔井内測定データ（図22）から、透水性亀裂の向きは応力方位よりも全亀裂の走向に支配される傾向があり、また全亀裂の卓越方向は地質構造の特徴的な方向に近い傾向があることがわかった（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST09〕、木口・桑原，2021）。

大気中ラドン濃度に反映される固体地球側の要素は地表ラドン散逸率だが、散逸率の変化をもたらす地殻内プロセスは、上述の神戸地震の例で論じたように、一つではない。そのプロセスを解明するために、地表から放出されるラドンを捕集し、それを測定器にポンプで導入することで地表ラドン散逸率を測定するとともに、土壌中の深さ20、40、80 cmの3地点でラドン濃度を測定し、両者を比較した。測定場所は茨城県に位置する棚倉破碎帯の南端（地質：新第三系泥岩、白亜系花崗岩、土壌：粗粒灰色低地土壌）を選定した。調査の結果、土壌ラドン濃度変化とラドン散逸率変化の明確な関係性は認められなかった。土壌ラドン濃度は、夏から秋は土壌水分の変化に依存したものの、冬は土壌水分が高いため水分の変化に依存しなかった。また、明らかな周期的変動は認められなかった。一方、ラドン散逸率は日変動を示し、周期的な気温と地温の変化に従った。降雨による散逸率の上昇が見られたが、これは、測定系の直下が降雨の影響を受けていないことによる人為的な要因と、土壌に浸透した雨水が土壌中の空気を圧縮したことによる移流発生によると考えられる（東北大学〔課題番号：THK_10〕、大森，2020）。

昨年度、千葉県旭市の千葉大観測点における地中ラドン濃度観測データに対して、マルチチャンネル特異スペクトル解析により気圧および温度による変動を除去して地表ラドン散逸率を推定することを提案したが（小島ら，2020）、このデータにおいても2時間の降雨量が20 mmを超える場合に、推定された地表ラドン散逸率に有意な増加があることがわかった。やはり、降雨による荷重増加と雨水の浸透による地中ラドンフラックス増加が原因であると考えられる。また、昨年度茨城県三浦に作った同様の総合観測点（ULF帯電磁場観測、地中・大気ラドン濃度観測、大気電場観測、大気イオン濃度観測、気象観測）のデータ取得が2020年9月に開始した（千葉大学〔課題番号：CBA_01〕）。

宮城県牡鹿半島にある宮城県原子力センターモニタリングステーション（女川、小積、飯小浜地区）でアルファガードを使用して観測されている大気中ラドン濃度データの時間変化については、これまで何度か報告して来た。今年度は、この地域における大気中ラドン濃度の空間分布の特徴を見るために、2010年3月に行った、空間放射線量率の自動車走行サーベイの結果を解析した。先行研究において太平洋沿岸地域では降雪による線量率の変化は生じないと報告されていたが、サーベイの結果では降雪により線量率の上昇が認められた。これは、空気中を浮遊するラドン子孫核種（大陸性気団によって冬季にアジアから運ばれてくる）が降雪にとらえられて地表に沈着したことによるものだろう。一方、線量率の大局的な空間分布は、宮城県牡鹿半島の中中部と東部で高く、南部と北西部で低い。この分布は地表地質の分布と対応を示しており、黒色頁岩（有機物に富む泥岩、有機物が分解されない還元的な環境で堆積するため水溶性ウランが流れ込むと還元され

て析出しやすくなる) に富むジュラ系の砂岩泥岩互層が高線量率地域であり、ここが牡鹿半島で測定されるラドンの主な供給源になっている能性がある(東北大学[課題番号: THK_10]、Tamakuma et al., 2021)。

本計画も参画している医薬系放射線管理施設を中心とした大気中ラドン濃度のモニタリングネットワークには現在25施設が参画している。放射線管理施設では、放射性同位元素の漏洩を監視する排気モニタ(通気式電離箱)が稼働しているが、屋外空気の放射線管理施設への換気回数が多ければ、排気モニタから大気中ラドン濃度が推定できるはずで、その検証を行っている。今年度は従来より長期間のデータを用いた検証を行い、換気回数が13回/時間である施設では、壁材等によるオフセットを差し引くだけで、排気モニタから屋外ラドン濃度を概ね推定(相関係数0.85)できることがわかった(東北大学[課題番号: THK_10]、森・他, 2020)。

衛星画像等でみられる熱異常が地震に先行したという例は多い(e.g., Tramutoli et al., 2005)。今年度、日本の気象衛星ひまわり6、7号のデータの2005年6月から2015年12月までの11年間の夜間衛星画像(波長10.8 μm , 00:30LT)にロバスト衛星技術データ分析手法(Tramutoli, 1998; 2007, Eleftheriou et al., 2016)を用いて、晴天地域での衛星熱異常(3.5 σ 以上)を検出し、デクラスタした地震カタログと比較したROC解析により先行性があるかを検討した(図23)。異常から30日長のアラームを、Dobrovolsky et al. (1979)の経験式によって、 $M \geq 6$ が対象の場合は半径380 km、 $M \geq 6.5$ が対象なら半径623 kmの範囲に出した場合、 $M \geq 6$ 対象では警報分率が1.7%で予知率7.5%、 $M \geq 6.5$ 対象では警報分率が3.6%で予知率16%が達成された。いずれも確率ゲインは4倍を超え、またp値は5%以下であり、今回定義された衛星熱異常は有意な先行性をもっているといえる。また、対象時空間で合計29回の異常のうち、その後30日以内に $M \geq 6$ がおきたケースが13例と適中率は非常に高い。解析対象時空間には、2011年東北沖地震に関連する余震活動が多くあり、東北地方によく出現する異常であれば、みかけ上地震と相関がよくなるという批判があるが、今回の29個の異常のうち2011年東北沖地震の余震の時空間窓に入るものは数個しかなく、その疑いは小さい。さらに、地震の場所を保ったまま発生時期をランダム化した疑似カタログでは、衛星熱異常との相関がみられないことも確認できている(千葉大学[課題番号: CBA_01]、Genzano et al., 2021)。

前計画において、気象庁柿岡でのULF地磁気異常のROC解析を行い、周辺100 km以内の $E_s > 10^8 \text{ J/km}^2$ 地震に対してリードタイム10日程度の先行傾向があることを報告した(Han et al., 2017)。本計画で維持している千葉大学の清越観測点(伊豆半島)と清澄観測点(房総半島)のULF磁場データについては、発震時刻でそろえてスタックした時系列解析(Hattori et al., 2013)およびROC解析(Hattori and Han, 2018)から同様の短期的先行傾向があることが指摘されている。本年度は、予測対象とする地震の大きさや、観測点からの距離によって、予測性能がどう変化するかを調べた(図24)。確率ゲインが最大になるのは、清越では、距離100 km以内、 $E_s > 10^{8.75} \text{ J/km}^2$ を、清澄では、距離180 km以内、 $E_s > 10^{8.75} \text{ J/km}^2$ を対象にしたときで、どちらもp値<5%をクリアしている。また、予知率から警報分率を引いたものは、(偶然の時の一致でない)前兆がつく地震の割合ということになるが、これについても同様の地震を対象にした場合が好成績であった。これらの解析から、大きな地震のほうが前兆が付きやすいという傾向も見てと

れる（千葉大学 [課題番号：CBA_01]、Han et al., 2020）。

上述のULF磁場に対するのと同様のアプローチで、情報通信機構の国分寺イオノゾンデ観測データ（1958年1月1日-2019年9月30日）の地震前兆性に関する統計解析を進めている。今年度は、NmF2異常は地震との間に有意相関があり、より震央距離が近い地震ほど、より震源が浅い地震ほど、よりマグニチュードが大きい地震ほど前兆的となることがわかった。NmF2異常から10日長のアラームを出すと、震源の深さ20 km以浅、震央距離200 km以内、マグニチュード6.4以上の地震を対象として予知率が46 %であった（千葉大学 [課題番号：CBA_01]、三石・他、2021）。

2018年2月2日に打ち上げられた中国の地震電磁気衛星（CSES-1）の初期データのチェックをかねて、In-situ電離圏電子数変動（ラングミュアプローブによって検出された電離層電子密度の移動中央値）と2018年7-8月にインドネシア・ロンボク島付近で発生したM6クラスの4つの浅い地震（7月28日M6.4、8月5日M6.8、8月9日M5.9、8月19日M6.9）との関係を調査したところ、7月27日の軌道#2660-0、7月31日の軌道#2721-0と#2728-1、8月7日の軌道#2827-0と#2735-1、8月14日の軌道#2934-0で顕著な電子密度の増加がみつかった。これらの電子数異常を検知した場所は震源から2000 km以内の北-北東部であった。これらの軌道と時空間的に近接する軌道データ、および国際電離圏モデル2016（IRI-2016）の予測値とを比較検討したところ、CSES-1のデータは4つの地震に先行する電離圏電子数異常を検知した可能性が高いと考えられる。さらに説得力のあるものにするために、ヨーロッパの軌道決定センターが発表している全球電離圏マップ（CODE-GIMTEC）を調査したところ、時空間分布の両方で同様の異常があった。そこで、CODE-GIMTECを用いて、2007年から2017年にインドネシアで発生した35個の $M \geq 5.8$ 、深さ ≤ 50 kmの地震に対して、発震時刻でそろえてスタックした時系列をみると、震源から2000 km以内で、地震の1-7日前に電離圏電子数変動の有意な正の異常があったことが判明した（千葉大学 [課題番号：CBA_01]、Song et al., 2020）。

フランスのDEMETER衛星が捉えた、リードタイム4時間以内で先行傾向が見られるVLF帯電場強度異常について、雷放電起源のホイスラー波を利用して、電離圏D領域の電子密度の増加によるものであると、昨年度までに提案した。本年度は、VLF帯航行用電波（雷電波と違って周波数が一定であり、送信出力強度も一定であるため信頼性の高い評価が期待できる）を用いても、先行的なD領域電子密度上昇が確認できることを示した（公募研究、静岡県立大学 [課題番号：KOB009]）。また、VLF帯電場強度の計測に特化した小型衛星を多数うちあげるPrelude計画は、ミッションデザインおよび概念設計に基づき、実現性を確認するためのエンジニアリングモデルの製作を行ない、目的を達成するには6Uサイズ（10×20×30 cm）のCubeSatで実現可能とわかった。DEMETER（130 kg）での観測力を超えるミッションを、6U（10 kg程度）のCubeSatで実現できることになる（公募研究、宇宙航空研究開発機構 [課題番号：KOB007]、山崎、2020）。

巨大地震の数十分前に報告されている先行的なTEC変動（e.g., Heki and Enomoto, 2015）及び、地震によって引き起こされる地震時のTEC変動を概観した解説論文（Heki, 2020）を書いた。地震の隆起/沈下は音波を励起し、周期4-5分の成分が電離圏F層に伝播してTEC振動を引き起こすので、地震の約10分後に、約1 km/sの速度で磁気赤道に向かって伝播する突然のTEC振動として出現する。非常に大きな地震の後には、何時間も続

く共鳴大気振動が続くことが多い。レイリー表面波も音波を発生させ、震源地から数千キロメートル離れた場所でTEC振動を引き起こす。一方、大地震の直前に発生するTECの変化は、地震の10-80分前に始まり、破壊しそうな断層の上に正の電子密度異常として現れる。Mw7.3-9.2の地震18個の直前変動は、リードタイム、TECの変化率、および累積的な異常振幅の観点でMwと正の相関を示した。先行的な電子密度異常の3次元構造（チリの地震、He and Heki, 2016）は、電離圏を介した、おそらく表面電荷による電場の浸透によって引き起こされたExBドリフトによって形成される（Kelly et al., 2017）ことを示唆する。解説論文の執筆後に、新たに2011年東北沖地震の直前・直後の電離圏トモグラフィー（Muafiry and Heki, 2020）を行ったところ、先行的な異常と本震後の異常（主に津波による）の場所がずれていること、また、先行的な異常は陸域に限られることが見いだされた。これらは、上述の大枠の理解と整合的である（千葉大学[課題番号:CBA_01]）。

一方、2011年東北沖地震に関して、震源から遠く離れた場所での津波による電離層の擾乱は、上述の理解から予想されるよりも顕著に大きかったことが見いだされており（Liu et al., 2019）、現在その原因を考察している。いずれにしろ、津波やレーリー波に誘起される電離層の擾乱は、その移動速度から容易に見分けがつく。2018年9月28日、インドネシア・スラウェシ島のMw7.8の地震で大きな津波が発生したが、電離層の擾乱を解析することで津波の波源を特定することができた（Liu et al., 2020）。また、インドネシアの2010年Merapi火山噴火（Cahyadi, et al., 2020）、2020年8月4日のレバノンの大爆発（Kunduet al., 2021）に関連する電離圏電子密度の擾乱が確認できた。大規模な災害事象の迅速な把握に役立つ可能性がある（千葉大学[課題番号:CBA_01]）。

これまでの課題と今後の展望

様々な観測で、良質なデータがそれなりの期間蓄積され、解析技術の進歩にも助けられて、様々な興味深い事実が見いだされた。また、スロースリップや地震活動、地震波速度構造などの地学条件も、観測と解析の時空間分解能が向上して、それらの不均質に相関が見えるようになってきた。前震のつきやすさの地域性が、定量的な地学条件と比較できたのは、画期的である。データ同化等の物理モデリング技術の開発も進展し、これまで計算量の壁でできなかったことが少しずつできるようになってきている。

なかでも、地震活動については、検出下限を下げるとイベント数がGR則に従って増えるために、時空間分解能もベキ的に改善する。このような技術の改善で、大地震では時間のかかる経験を積むスピードを上げることがひとつの現実的な方向であろう。その場合には、小地震での知識が大地震に通用するかが問題になるが、それに関して、先行現象の現われる割合が本震のサイズによることが示され始めたのは重要である。

また、前震について、本震との因果関係を問うような検証がされたのは意義深い。また、先行現象と本震の関係について提唱された臨界ゾーンという概念は、今後の中短期予測の研究発展を大きく加速するかもしれない。

成果リスト

- Abdallah, S., M. Utsugi, K. Aizawa, M. Uyeshima, W. Kanda, T. Koyama, and T. Shiotani, 2020, Three-dimensional electrical resistivity structure of the Kuju volcanic group, Central Kyushu, Japan revealed by magnetotelluric survey data, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 400, 106898, doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.106898.
- Ariyoshi K., T. Inuma, M. Nakano, T. Kimura, E. Araki, Y. Machida, K. Sueki, S. Yada, T. Nishiyama, K. Suzuki, T. Hori, N. Takahashi, and S. Kodaira, 2021, Characteristics of slow slip event in March 2020 revealed from borehole and DONET observatories, *Front. Earth Sci.*, 8:600793, doi:10.3389/feart.2020.600793.
- Baba, S., A. Takeo, K. Obara, T. Matsuzawa, and T. Maeda, 2020a, 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.
- Baba, S., S. Takemura, K. Obara, and A. Noda, 2020b, Slow earthquakes illuminating interplate coupling heterogeneities in subduction zones, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2020GL088089.
- Buckby, J., T. Wang, J. Zhuang, and K. Obara, 2020, Model checking for hidden Markov models, *J. Comput. Graph. Stat.*, 29(4), 859–874, doi:10.1080/10618600.2020.17.
- Cahyadi, M. N., R. W. Rahayu, K. Heki, and Y. Nakashima, 2020, Harmonic ionospheric oscillation by the 2010 eruption of the Merapi volcano, Indonesia, and the relevance of its amplitude to the mass eruption rate, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 405, 107047, doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.107047.
- Chang, J.-H., J.-O. Park, T.-T. Chen, A. Yamaguchi, T. Tsuru, Y. Sano, H.-H. Hsu, K. Shirai, T. Kagoshima, K. Tanaka, and C. Tamura, 2020, Structural-morphological and sedimentary features of forearc slope off Miyagi, NE Japan: implications for development of forearc basins and plumbing systems, *Geo-Marine Letters*, doi:10.1007/s00367-020-00636-w.
- Chen, H., R. Wang, M. Miao, X. Liu, Y. Ma, K. Hattori, and P. Han, 2020, A statistical study of the correlation between geomagnetic storms and $M \geq 7.0$ global earthquakes during 1957–2020, *Entropy*, 22(11), 1270, doi:10.3390/e22111270.
- 長 郁夫・岩田貴樹, 2020, SPAC法の解析可能最大波長とSN比の関係式, 日本地震学会2020年度秋季大会, S15P-18.
- Cho, I. and T. Iwata, 2021, Limits and benefits of the spatial autocorrelation microtremor array method due to the incoherent noise, with special reference to the analysis of long wavelength ranges, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, 2020JB019850, doi:10.1029/2020JB019850 (in press).
- Chujo, N., H. Hirose, and T. Kimura, 2020a, Slip distributions of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula based on NIED Hi-net tilt measurements, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SCG58-P22.
- Chujo, N., H. Hirose, and T. Kimura, 2020b, Slip distributions of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula based on NIED Hi-net tilt measurements, *Slow*

Earthquakes Workshop 2020, P-A02-01.

- Enomoto, Y., K. Heki, T. Yamabe, S. Sugiura, and H. Kondo, 2020, A possible causal mechanism of geomagnetic variations as observed immediately before and after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Open J. Earthq. Res.*, 9, 33-49, doi:10.4236/ojer.2020.92003.
- Genzano, N., C. Filizzola, K. Hattori, N. Pergola, and V. Tramutoli, 2021, Statistical correlation analysis between thermal infrared anomalies observed from MTSATs and large earthquakes occurred in Japan (2005-2015), *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126(2), doi:10.1029/2020JB020108.
- Han, P., J. Zhuang, K. Hattori, C.-H. Chen, F. Febriani, H. Chen, C. Yoshino, and S. Yoshida, 2020, Assessing the potential earthquake precursory information in ULF magnetic data recorded in Kanto, Japan during 2000-2010: distance and magnitude dependences, *Entropy*, 22, 859, doi:10.3390/e22080859.
- Hashima, A., H. Sato, and T. Sato, 2020, Stress loading and the occurrence of normal-type earthquakes under Boso Peninsula, Japan, *Earth Planet. Space*, 72:79, doi:10.1186/s40623-020-01201-6.
- Heki, K., 2020, Chapter 5-3: Ionospheric disturbances related to earthquakes in *Advances in ionospheric research: Current understanding and challenges*, Wiley/AGU Book Space Physics and Aeronomy, Volume 3, edited by C. Huang and G. Lu, pp.320, ISBN:978-1-119-50755-0 (preprint).
- Hirose, F., K. Tamaribuchi, and K. Maeda, submitted to JGR, Does a stationary ETAS model dream of foreshocks? Application of an earthquake forecasting method based on swarm-like activity to synthetic catalogs produced by ETAS models.
- 弘瀬冬樹・溜淵功史・前田憲二, 2020a, 自然地震カタログと時空間ETASカタログに内在する前震活動の特徴の違い: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モデルを用いた検証, JpGU-AGU Joint Meeting, SSS13-03.
- 弘瀬冬樹・溜淵功史・前田憲二, 2020b, ETASモデルは前震の夢を見るか?:群発的地震活動に基づく地震予測手法を用いた検証, 日本地震学会2020年度秋季大会, S09P-08.
- 廣瀬仁・卯川知希, 2020, 地震数データから応力変化量を推定する手法の試行, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 24, 10-17.
- Hirose, H. and T. Kimura, 2020, Slip distributions of short-term slow slip events in Shikoku, southwest Japan from 2001 to 2019 based on tilt change measurements, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2020JB019601. doi:10.1029/2020JB019601.
- 廣瀬仁・木村武志, 2020a, Slip distributions of short-term slow slip events in Shikoku, southwest Japan from 2001 to 2019 based on tilt change measurements, スロー地震学 A01-A02班合同オンライン研究会.
- 廣瀬仁・木村武志, 2020b, Slip distributions of short-term slow slip events in Shikoku, southwest Japan from 2001 to 2019 based on tilt change measurements, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A02-02.
- Huang, Q., P. Han, K. Hattori, and H. Ren, 2020, Electromagnetic Signals Associated

With Earthquakes: A Review of Observations, Data Processing, and Mechanisms in China, Seismoelectric Exploration: Theory, Experiments, and Applications, edited by Grobbe, N., Revil, A., Zhu, Z., Slob, E, Wiley, 415-436, doi:10.1002/9781119156949.ch26.

- Igarashi, T., 2020, Catalog of small repeating earthquakes for the Japanese Islands, Earth Planet. Space, 72:73, doi:10.1186/s40623-020-01205-2.
- 池田里奈・吉田圭佑・高橋 諒・松澤 暢・長谷川昭, 2020, 2011年東北沖地震後から福島-茨城県境周辺で活発化した地震活動に見られる内陸の繰り返し地震, 日本地震学会2020年度秋季大会, S09P-05.
- 石山 諒・福山英一・B. Enescu, 2020, Temporally variable estimation of friction parameters using machine learning, 日本地震学会2020年度秋季大会, S08-21.
- 岩田貴樹・尾形良彦, 2020, Gutenberg-Richter則におけるa値の最尤推定, 地震2, 73, 93-96, doi:10.4294/zisin.2020-1.
- 金子 柊・茂木 透・服部克巳, 2020, マルチチャンネル特異スペクトル解析(MSSA)を用いたMTデータのノイズ除去法の開発, J. Atmospheric Electricity, 39(1), 37-41, doi:10.1541/jae.39.37.
- 加納将行, 2020, データ同化に基づく断層すべりの理解・予測と波動場推定の高度化に向けた研究, 地震, 73, 69-91, doi:10.4294/zisin.2019-9.
- Kano, M. and A. Kato, 2020, Detailed spatial slip distribution for short-term slow slip events along the Nankai subduction zone, southwest Japan, J. Geophys. Res.: Solid Earth, 125, e2020JB019613, doi:10.1029/2020JB019613.
- Kano, M., S. Miyazaki, Y. Ishikawa, and K. Hirahara, 2020, Adjoint-based direct data assimilation of GNSS time series for optimizing frictional parameters and predicting postseismic deformation following the 2003 Tokachi-oki earthquake, Earth Planet. Space, 72, 159, doi:10.1186/s40623-020-01293-0.
- Kato, A. and S. Nakagawa, 2020, Detection of deep low-frequency earthquakes in the Nankai subduction zone over 11 years using a matched filter technique, Earth Planet. Space, 72:128, doi:10.1186/s40623-020-01257-4.
- Kato, A., S. Sakai, S. Matsumoto, and Y. Iio, 2021, Conjugate faulting and structural complexity on the young fault system associated with the 2000 Tottori earthquake, Commun. Earth Environ., 2, 13, doi:10.1038/s43247-020-00086-3.
- 川畑拓矢・上野玄太・中野慎也・藤井陽介・三好建正・小守信正・増田周平・眞木貴史・土居知将・野村俊一・雨宮 新・山崎 哲・露木 義, 2020, 第10回データ同化ワークショップの報告, 天気, 67(8), 27-30.
- Khoshmanesh, M., M. Shirzaei, and N. Uchida, 2020, Deep slow-slip events promote seismicity in northeastern Japan megathrust, Earth Planet. Sci. Lett., 540, 116261, doi:10.1016/j.epsl.2020.116261.
- 木口努・桑原保人, 2021, 地下透水性亀裂の方向の支配要因:産総研地下水等総合観測井(愛知県・紀伊半島~四国)の16地点の孔井内測定データからの考察, 活断層・古地震研究報告, 20 (印刷中).

- 木口努・今西和俊・松本則夫, 2020a, 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11月～2020年4月), 地震予知連絡会報, 104, 272-273.
- 木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努・矢部優, 2020b, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2019年11月～2020年4月)(61), 地震予知連絡会会報, 104, 265-271.
- 木口努・今西和俊・松本則夫, 2021a, 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果(2020年5月～2020年10月), 地震予知連絡会報, 105 (印刷中).
- 木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努・矢部優, 2021b, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2020年5月～2020年10月)(62), 地震予知連絡会会報, 105 (印刷中).
- 気象研究所, 2020a, 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, 104, 366-368.
- 気象研究所, 2020b, 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, 104, 22-26.
- 気象研究所, 2020c, 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, 104, 369-372.
- 気象研究所, 2020d, 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率(2020), 地震予知連絡会会報, 104, 448-452.
- 気象研究所(勝間田明男), 2020, 天竜船明レーザー式変位計による地殻変動観測, 地震予知連絡会会報, 104, 212-215.
- 北川有一・板場智史・松本則夫・落唯史・木口努, 2020a, 紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2019年11月～2020年4月), 地震予知連絡会会報, 104, 373-383.
- 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, 2021, 紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2020年5月～2030年10月), 地震予知連絡会会報, 105 (印刷中).
- Kitagawa, Y., N. Matsumoto, and T. Kimura, 2020, Estimation of fault models for short-term slow slip events from groundwater pressure in soft sedimentary layers, *Earth Planet. Space*, 72:90, doi:10.1186/s40623-020-01218-x.
- 北川有一・松本則夫・佐藤努・板場智史・落唯史・木口努・矢部優, 2020b, 近畿地域の地下水位・歪観測結果(2019年11月～2020年4月), 地震予知連絡会会報, 104, 384-387.
- 小林昭夫, 2021, GNSSによる長期的スロースリップ客観検出手法の応用ー短期的スロースリップの検出と長期的スロースリップの規模推定ー, 気象研究所研究報告, 69, 1-14.
- 児玉哲哉, 2020, 地震予防説: Bertholon's Earthquake Rodを求めて, 第7回日本地震予知学会学術講演会.
- 小島春奈・吉野千恵・根本和秀・服部克巳・小西敏春・古屋隆一, 2020, 千葉県旭観測点における地中ラドン濃度のマルチチャンネル特異スペクトル解析: 地中ラドンフラックス変動の推定と地震活動との関係の序報, *J. Atmospheric Electricity*, 39, 46-51, doi:10.1541/jae.39.46.
- 駒形亮太・平野史朗・川方裕則・直井誠, 2020, Locality Sensitive Hashingを用いた波形の特徴抽出と類似波形検出, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS12-P02.
- Kundu, B., B. Senapati, A. Matsushita, and K. Heki, 2021, Atmospheric wave energy of

- the 2020 August 4 explosion in Beirut, Lebanon, from ionospheric disturbances, *Sci. Rep.*, 11, 2793, doi:10.1038/s41598-021-82355-5.
- Kurashimo, E, K. Mochizuki, T. Iidaka and K. Obara, 2020, Seismic reflection profiling across deep low-frequency tremor zone in western Shikoku, southwestern Japan, JpGU-AGU joint Meeting 2020, SCG58-P17.
- Liu, J.-Y., C.-Y., Liu, Y.-I. Chen, T.-R. Wu, M.-J. Chung, T.-C. Liu, Y.-L. Tsai, L. C. Chang, C.-K. Chao, D. Ouzounov, and K. Hattori, 2020, The Source Detection of 28 September 2018 Sulawesi Tsunami by Using Ionospheric GNSS Total Electron Content Disturbance, *Geosci. Lett.*, 7, 11, doi:10.1186/s40562-020-00160-w.
- Liu, Y., J. Zhuang, and C. Jiang, 2021, Background seismicity before and after the 1976 Ms7.8 Tangshan earthquake: Is its aftershock sequence still continuing?, *Seismol. Res. Lett.*, 92(2A), 877-885, doi:10.1785/0220200179.
- 前田憲二・弘瀬冬樹・溜淵功史, 2020, 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, *地震予知連絡会会報*, 103, 356-360.
- Matsumoto, S., T. Okada, T. Terakawa, M. Uyeshima, and Y. Iio, 2020, The Advancement of Research on Inland Earthquake Generation 2014-2018, *J. Disaster Res.*, 15(2), 96-105, doi:10.20965/jdr.2020.p0096.
- Matsushima, N., M. Utsugi, S. Takakura, T. Yamasaki, M. Hata, T. Hashimoto, and M. Uyeshima, 2020, Magmatic-hydrothermal system of Aso Volcano, Japan, inferred from electrical resistivity structures, *Earth Planet. Space*, 72:57, doi:10.1186/s40623-020-01180-8.
- 宮岡一樹・小林昭夫, 2020, 南海トラフ地域のスロー地震(2)気象庁・気象研究所による観測, *地震予知連絡会50年のあゆみ*, 148-150.
- 森花恵・安岡由美・三浦直・吉井未来・飯本武志・床次眞司・長濱裕幸・向高弘, 2020, 排気モニタによる大気中ラドン濃度の推定, *日本保健物理学会第53回研究発表会Web大会*, 2-5.
- Muafiry, I. N. and K. Heki, 2020, 3D tomography of the ionospheric anomalies immediately before and after the 2011 Tohoku-oki (Mw9.0) earthquake, *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 125, e2020JA027993, doi: 10.1029/2020JA027993.
- 長尾年恭・鴨川仁, 2020, 地震・火山噴火予知研究と電磁気観測, *日本磁気学会『まぐね』*, 15(5), 264-271.
- 中谷正生, 2020a, あんた、地震の何なのさ?-短期前兆のメタ理論と予知の可能性, *東京大学地震研究所公開講義*, 9月21日, オンライン.
- 中谷正生, 2020b, 階層的アスペリティを前提とした短期前兆のメカニズムについて, *第229回地震予知連絡会重点検討課題「予測実験の試行」(07)*.
- 中谷正生, 2020c, 地震に先行する現象の評価:災害情報への利用可能性, *地震・火山噴火予測研究のサイエンスカフェ第3回*.
- Nakatani, M., 2020, Evaluation of phenomena preceding earthquakes and earthquake predictability, *J. Disast. Res.*, 15(2), 112-143, doi:10.20965/jdr.2020.p0112

- Nanjo, K. Z., 2020a, Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes?, *Nat. Commun.*, 11:3082, doi:10.1038/s41467-020-16867-5.
- Nanjo, K. Z., 2020b, Changes in stress state associated with the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes, *JpGU-AGU Joint Meeting*, SSS08-06.
- Nanjo, K., 2020c, Changes in stress state and seismicity pattern responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes, *AGU fall meeting*, S029-0007.
- Nanjo, K. Z., 2020d, Capability of Tokai strainmeter network to detect and locate a slow slip: First results, *Pure Appl. Geophys.*, 177, 2701-2718, doi:10.1007/s00024-019-02367-1.
- 楠城一嘉, 2020a, b値にもとづく大地震発生予測のモデルのレビュー, 第229回地震予知連絡会重点検討課題「予測実験の試行」(07).
- 楠城一嘉, 2020b, 小さな地震が大地震を探るカギ?—カリフォルニアの直下型大地震の解析から異常をとらえ、防災につなげる, *academist journal*, <https://academist-cf.com/journal/?p=14310>.
- 野村俊一, 2020, 繰り返し地震に基づくプレート間滑り速度の時空間変動の逆推定, 統計数理研究所共同研究集会「諸科学における大規模データと統計数理モデリング」.
- 野村俊一・尾形良彦, 2020, 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, 地震予知連絡会会報, 103, 361-366.
- Obara, K., 2020, Characteristic activities of slow earthquakes in Japan, *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 90, 29-315, doi:10.2183/pjab.96.022.
- Obara, K. and T. Nishimura, 2020, Main results from the program promotion panel for subduction-zone earthquakes, *J. Disast. Res.*, 15, 87-95, doi:10.20965/jdr.2020.p0087.
- 岡田悠太郎・西村卓也・田部井隆雄・松島健・廣瀬仁, 2020, GNSSデータを用いた短期的スロースリップイベントの検出手法の開発と南海沈み込み帯への適用, 日本測地学会第134回講演会, 27.
- Okada, Y., T. Nishimura, T. Tabei, T. Matsushima, H. Hirose, 2020a, Detection of short-term slow slip events and estimation of their duration by using three components of GNSS data in the Nankai subduction zone, southwest Japan, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SCG58-08.
- Okada, Y., T. Nishimura, T. Tabei, T. Matsushima, and H. Hirose, 2020b, Development of the Detection Method for Short-term Slow Slip Events by Using GNSS Data And its application to the Nankai Subduction Zone, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A02-05.
- 大森康孝, 2020, 地表ラドン散逸率の変動要因: 多深度土壌ラドン濃度測定に基づく検討, 日本保健物理学会第53回研究発表会Web大会, 2-8.
- Omori, Y., H. Nagahama, Y. Yasuoka, and J. Muto, 2021, Radon degassing triggered by tidal loading before an earthquake, *Sci. Rep.*, 11, 4092, doi:10.1038/s41598-021-83499-0.
- 織原義明, 2020, 「深海魚出現は地震の前兆」は本当か?, 日本地震学会広報誌「なみふる」, 121,

6-7.

- Parrot, M., V. Tramutoli, Tiger J.Y. Liu, S. Pulinetz, D. Ouzounov, N. Genzano, M. Lisi, K. Hattori, and A. Namgaladze, 2021, Atmospheric and ionospheric coupling phenomena associated with large earthquakes, *Eur. Phys. J. Special Topics*, 230, 197-225, doi:10.1140/epjst/e2020-000251-3.
- 坂本龍之輔, 田中愛幸, 2020, ばねブロックモデルでの周期外力に対するダイラタンシー効果, 日本物理学会, 75.
- Sakamoto, R., and Y. Tanaka, 2020a, A physical model of tremor response to periodic external stress in poroelastic medium, *JpGU-AGU joint Meeting 2020*, SCG58-P19.
- Sakamoto R., and Y. Tanaka, 2020b, A physical model of tremor response to external stress in poroelastic medium, *AGU Fall Meeting 2020*, S031-0001.
- Sano, Y., T. Kagoshima, N. Takahata, K. Shirai, J.-O. Park, G. T. Snyder, T. Shibata, J. Yamamoto, Y. Nishio, A-T Chen, S. Xu, D. Zhao, and D. L. Pinti, 2020, Groundwater anomaly related to CCS-CO2 injection and the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake in Japan, *Front. Earth Sci.*, 8:611010, doi:10.3389/feart.2020.611010.
- Shiozaki, I., T. Uto, M. Uyeshima, H. Hataoka, H. Murakami, N. Oshiman, Y. Iio, and K. Ando, 2020, A research report on the fundamental investigations of an electrical resistivity structure beneath Chugoku and Shikoku regions, southwestern Japan, 2019, *JpGU-AGU joint Meeting 2020*, SEM21-P03.
- Song, R., K. Hattori, X. Zhang, and S. Saito, 2020, Seismic-ionospheric effects prior to four earthquakes in Indonesia detected by the China Seismo-Electromagnetic Satellite, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.*, 205, doi:10.1016/j.jastp.2020.105291.
- Supino, M., N. Poiata, G. Festa, J.P. Vilotte, C. Satriano, and K. Obara, 2020, Self-similarity of low-frequency earthquakes, *Sci. Rep.*, 10, doi:10.1038/s41598-020-63584-6.
- Susukida, Y., K. Katsumata, M. Ichianagi, M. Ohzono, H. Aoyama, R. Tanaka, M. Takada, T. Yamaguchi, K. Okada, , H. Takahashi, S. Sakai, S. Matsumoto, T. Okada, T. Matsuzawa, H. Miyamachi, S. Hirano, Y. Yamanaka, S. Horikawa, M. Kosuga, H. Katao, Y. Iio, A. Nagaoka, N. Tsumura, T. Ueno, and The Group for the Aftershock Observations of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, 2021, Focal mechanisms and the stress field in the aftershock area of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake (M-JMA=6.7), *Earth Planet. Space*, 73:1, doi:10.1186/s40623-020-01323-x.
- Takagi, R., N. Uchida, and K. Obara, 2020, Detection of slow slip events on the Philippine Sea plate beneath the Kanto region, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A02-06.
- 高風佑衣・安岡由美・細田正洋・床次眞司・長濱裕幸・岩岡和輝・向 高弘, 2020, 空気用ラドンモニタを用いた水中ラドン濃度測定におけるスクリーニング法の検討, 日本保健物理学会第53回研究発表会Web大会, 2-10.
- Tamakuma, Y., M. Hosoda, Y. Omori, H. Nagahama, T. Ishikawa, M. Shimo, and S. Tokonami,

- 2021, Car-borne survey for a black shale area and influence of snowfall on absorbed dose rate in air of a coastal area, *Radiat. Environ. Medicine*, 10, 2 (in press).
- Tanaka, Y., C. Shibata, Y. Tamura, and A. Kobayashi, 2020a, Calibration of portable relative gravimeters toward the detection of gravity signals accompanied by slow slip events, *JpGU-AGU joint Meeting 2020*, SCG58-06.
- Tanaka, Y., C. Shibata, Y. Tamura, and A. Kobayashi, 2020b, Toward the detection of gravity signals accompanied by slow slip events, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A02-07.
- Teshiba, S. and H. Hirose, 2020a, Spatiotemporal evolution of interplate slip in the Hyuganada and the Bungo Channel from 1996 to 2000 based on GNSS data, *JpGU-AGU Joint meeting 2020*, SCG58-P38.
- Teshiba, S. and H. Hirose, 2020b, Slow slip events in the afterslip area of the 1996 Hyuganada earthquakes, based on GNSS data, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A02-08.
- Teshiba, S. and H. Hirose, 2020c, Slow Slip Events in the Afterslip Area of the 1996 Hyuganada Earthquakes, Southwest Japan, Based on GNSS Data, *AGU Fall Meeting 2020*, S027-0015.
- Tomita, F., T. Iinuma, Y. Ohta, R. Hino, M. Kido, and N. Uchida, 2020, Improvement on spatial resolution of a coseismic slip distribution using postseismic geodetic data through a viscoelastic inversion, *Earth Planet. Space*, 72:84, doi:10.1186/s40623-020-01207-0.
- Tomonaga, Y., K. Yagasaki, J.-O. Park, J. Ashi, S. Toyoda, N. Takahata, and Y. Sano, 2020, Fluid dynamics along the Nankai Trough: He isotopes reveal direct seafloor mantle-fluid emission in the Kumano Basin (southwest Japan), *ACS Earth and Space Chemistry*, 4 (11), 2105-2112, DOI:10.1021/ac-searthspacechem.0c00229.
- Tsuru, T., J.-O. Park, K. Amakasu, T. No, K. Arai, T. Inoue, S. Furuyama, K. Uchida, and Y. Nakamura, 2020, Possible fluid discharge associated with faults observed by a high-resolution dense-2D seismic reflection survey in Uchiura Bay off Numazu, Japan, *Earth Planet. Space*, 72, 121, doi:10.1186/s40623-020-01242-x.
- Tsutsumi, R., K. Hattori, C. Yoshino, and N. Genzano, 2020, Detection of thermal changes related to the 2011 Shinmoedake volcano activity, Japan: Spatiotemporal variation of singularity of MODIS data after discriminating false changes due to cloud, *Remote Sensing*, 12, 2637, doi:10.3390/rs12162637.
- Uchida, N., J. Nakajima, K. Wang, R. Takagi, K. Yoshida, T. Nakayama, R. Hino, T. Okada, and Y. Asano, 2020a, Stagnant forearc mantle wedge inferred from mapping of shear-wave anisotropy using S-net seafloor seismometers, *Nat. Commun.*, 11(1), 5676, doi:10.1038/s41467-020-19541-y.
- Uchida, N., R. Takagi, Y. Asano, and K. Obara, 2020b, Migration of shallow and deep slow earthquakes toward the locked segment of the Nankai megathrust, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 115986, doi:10.1016/j.epsl.2019.115986.

- Ueda, T., A. Kato, Y. Ogata, and L. Yamaya, 2021, Spatial variations in seismicity characteristics in and around the source region of the 2019 Yamagata-Oki Earthquake, Japan, *Earth Planet. Space*, 73:40, doi:10.1186/s40623-020-01325-9.
- Ukawa, T. and H. Hirose, 2020a, An estimation of stress changes based on earthquake swarm seismicity accompanied by Boso slow slip events, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SCG58-P39.
- Ukawa, T. and H. Hirose, 2020b, 房総スロースリップイベントに伴う群発地震活動に基づく応力変化の推定, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A02-09.
- Uyeshima, M., R. Yoshimura, M. Hata, H. Ichihara, and K. Aizawa, 2020, On 3-D resistivity structure in the SW part of Shikoku-Island, SW Japan, and sensitivity of the Network-MT responses to the structure, *JpGU-AGU joint Meeting 2020*, SCG58-P11.
- Varini, E., A. Peresan, and J. Zhuang, 2020, Topological comparison between the stochastic and the nearest-neighbour earthquake declustering methods through network analysis, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125(8), e2020JB019718, doi:10.1029/2020JB019718.
- Wada, Y., T. Enoto, Y. Nakamura, T. Morimoto, M. Sato, T. Ushio, K. Nakazawa, T. Yuasa, D. Yonetoku, T. Sawano, M. Kamogawa, H. Sakai, Y. Furuta, K. Makishima, and H. Tsuchiya, 2020, High peak-current lightning discharges associated with downward terrestrial Gamma-ray flashes, *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 125(4), e2019JD031730, doi:10.1029/2019JD031730.
- 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, 2020, 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11月~2020年4月) 地震予知連絡会会報, 104, 216-264.
- 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, 2021, 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 (2020年5月~2020年10月), 地震予知連絡会会報, 105 (印刷中).
- Yabe S., K. Imanishi, and K. Nishida, 2020a, Two-step seismic noise reduction caused by COVID-19 induced reduction in social activity in metropolitan Tokyo, Japan, *Earth Planet. Space*, 72, 167, doi:10.1186/s40623-020-01298-9.
- Yabe, S., R. Fukuchi, Y. Hamada, and G. Kimura, 2020b, A new method for the empirical conversion of logging data to clay mineral fraction in the Nankai accretionary prism, *Earth Planet. Space*, 72, 166, doi:10.1186/s40623-020-01303-1.
- 山崎政彦, 2020, 地震先行現象検出特化型 CubeSat のエンジニアリング・モデル製作, 第十回 気象文化大賞.
- Ye, T., X. Chen, Q. Huang, L. Zhao, Y. Zhang, and M. Uyeshima, 2020, Bifurcated Crustal Channel Flow and Seismogenic Structures of Intraplate Earthquakes in Western Yunnan, China as Revealed by Three-Dimensional Magnetotelluric Imaging, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125(9), e2019JB018991, doi:10.1029/2019JB018991.
- 吉田圭佑・高木涼太・内田直希・池田里奈, 2020, 東北地方太平洋沖で発生した小中地震の破壊伝播指向性と応力降下量: S-net を用いた解析, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SSS15-

- Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi, and K. Kasahara, 2020a, Low-frequency earthquakes observed in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan, *Geophys. J. Int.*, 223, 1724-1740, doi:10.1093/gji/ggaa418.
- Yoshida, K., T. Taira, Y. Matsumoto, T. Saito, K. Emoto, and T. Matsuzawa, 2020b, Stress Release Process Along an Intraplate Fault Analogous to the Plate Boundary: A Case Study of the 2017 M5.2 Akita-Daisen Earthquake, NE Japan, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2020JB019527, doi.org/10.1029/2020JB019527.
- Yu, Z., K. Hattori, K. Zhu, C. Chi, M. Fan, and X. He, 2020, Detecting earthquake-related anomalies of a borehole strain network based on multi-channel singular spectrum analysis, *Entropy*, 22, 1086, doi:10.3390/e22101086.
- Yu, Z., K. Zhu, K. Hattori, C. Chi, M. Fan, K. Li, X. He, and W. Xie, 2021a, Investigation of pre-seismic borehole strain data associated with the 2013 Lushan earthquake, *IEEE Access*, 9, 12167-12179, doi:10.1109/ACCESS.2021.3051614.
- Yu, Z., K. Hattori, K. Zhu, M. Fan, D. Marchetti, X. He, and C. Chi, 2021b, Evaluation of pre-earthquake anomalies of borehole strain network by using Receiver Operating Characteristic Curve, *Remote Sensing*, 13(3), 515, doi:10.3390/rs13030515.
- Yuan, Y., M. Uyeshima, Q. Huang, J. Tang, Q. Li, and Y. Teng, 2020, Continental-scale deep electrical resistivity structure beneath China, *Tectonophys.*, 790, 228559, doi:10.1016/j.tecto.2020.228559.
- Yukutake, Y., T. Iwata, and Y. Iio, 2020, Estimation of the heterogeneity of stress fields using misfit angles in focal mechanisms, *Tectonophys.*, 790, 228553, doi:10.1016/j.tecto.2020.228553.
- Zhuang, J., M. Matsu'ura, and P. Han, 2021, Critical zone of the branching crack model for earthquakes: Inherent randomness, earthquake predictability, and precursor modelling, *European Physical Journal Special Topics*, 230:409-424, in "The Global Earthquake Forecasting System: Towards Using Non-seismic Precursors for the Prediction of Large Earthquakes" (Eds. F. Freund, A. Mignan, G. Ouillon, and D. Sornette), doi:10.1140/epjst/e2020-000272-7.

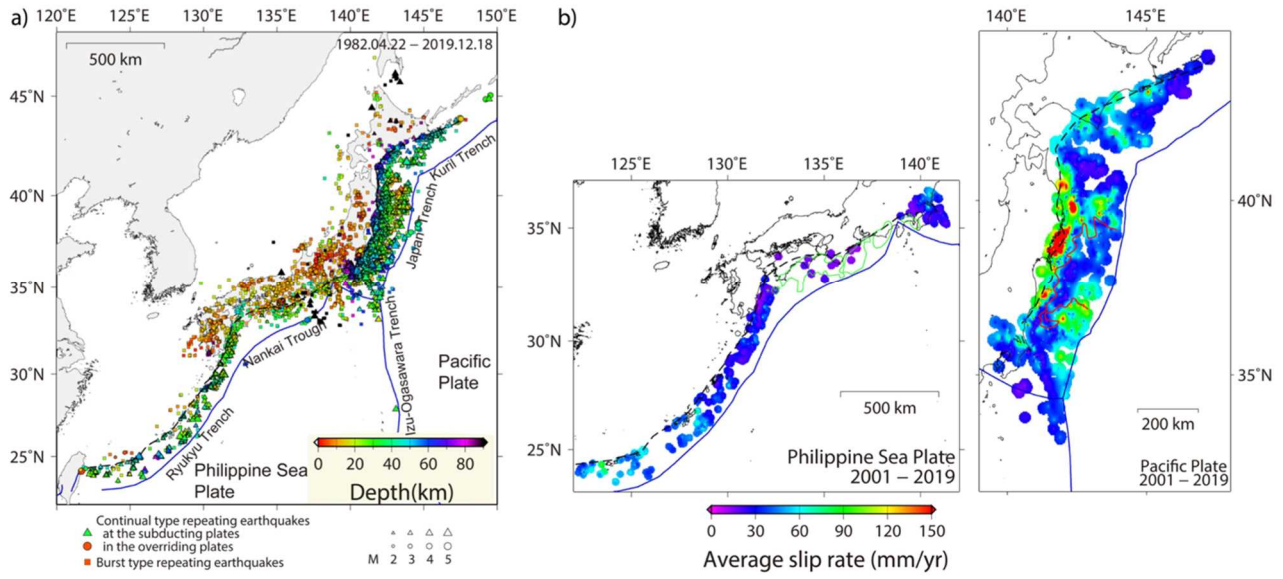


図1. 日本列島周辺における小繰り返し地震（東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、Igarashi, 2020 より改変）

a) 空間分布。

b) 繰り返し地震から推定された平均すべり速度。

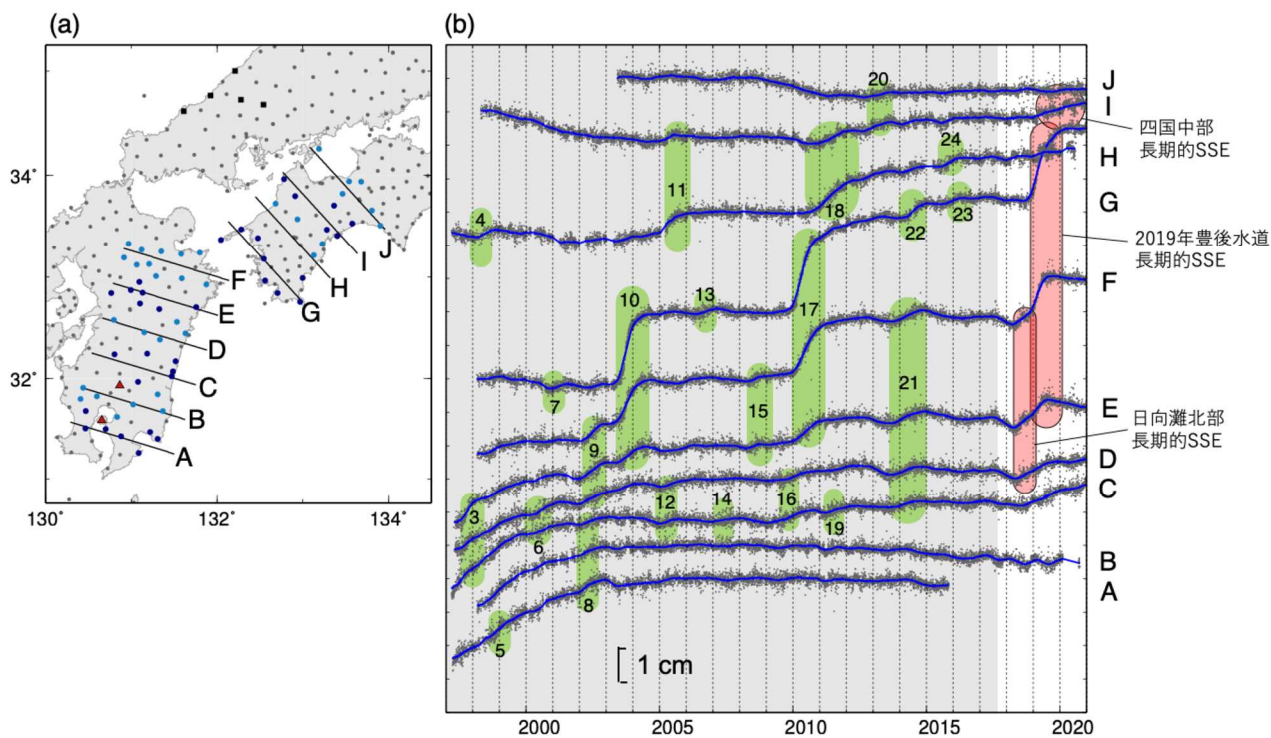


図 2. 定常観測点と臨時観測点の GNSS 記録を測線にそって重合した時系列による長期的 SSE の検出 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])

(a) GNSS 観測点分布。各測線に沿った色付きの観測点を使用。

(b) 各側線の観測点でスタックした測線と平行方向の変位時系列。灰色は Takagi et al. (2019) の解析期間。2017 年 10 月以降は新たに追加した期間。緑色の範囲は Takagi et al. (2019) によって検出された長期的 SSE。

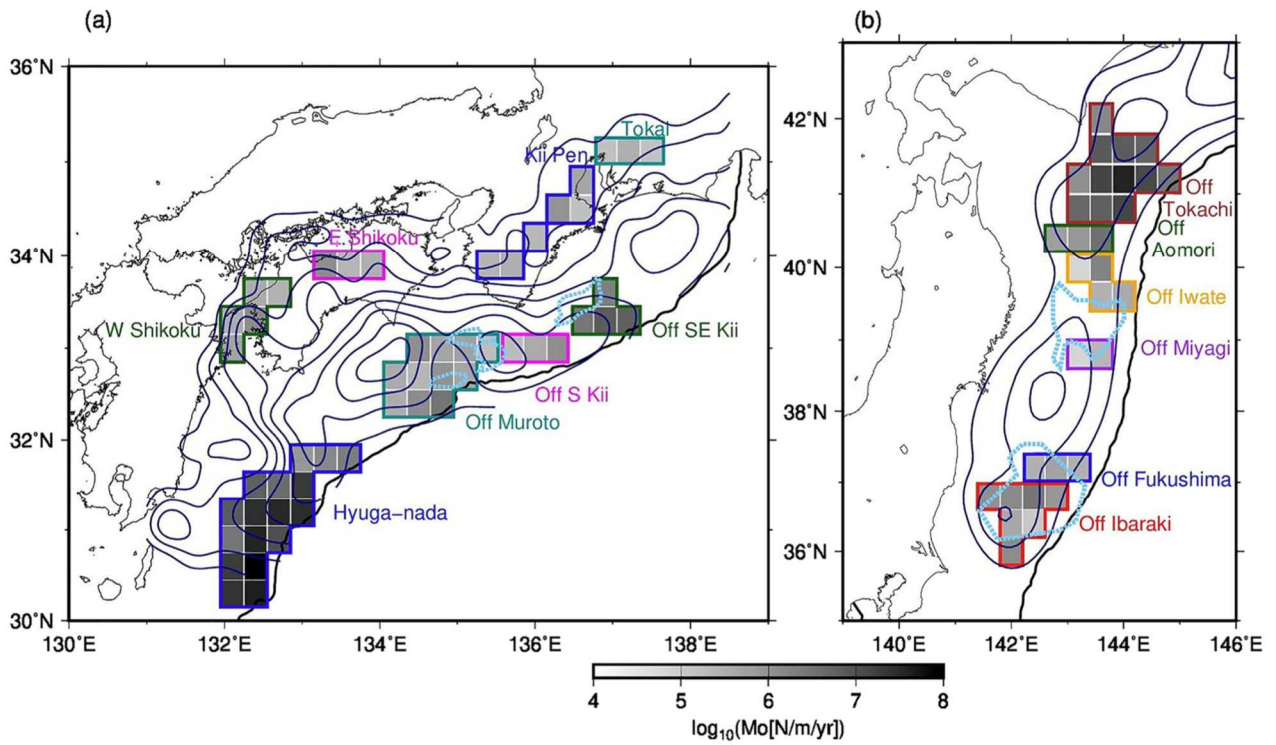


図 3. 超低周波地震 (VLFE) による地震モーメント解法レートの分布 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Baba et al., 2020b より改変)

(a) 西南日本、(b) 東北日本。

コンターは各地域のすべり欠損速度((a):10 mm/年間隔、(b):30 mm/年間隔)。薄青点線は各地域の地震波速度の遅い領域を示す。

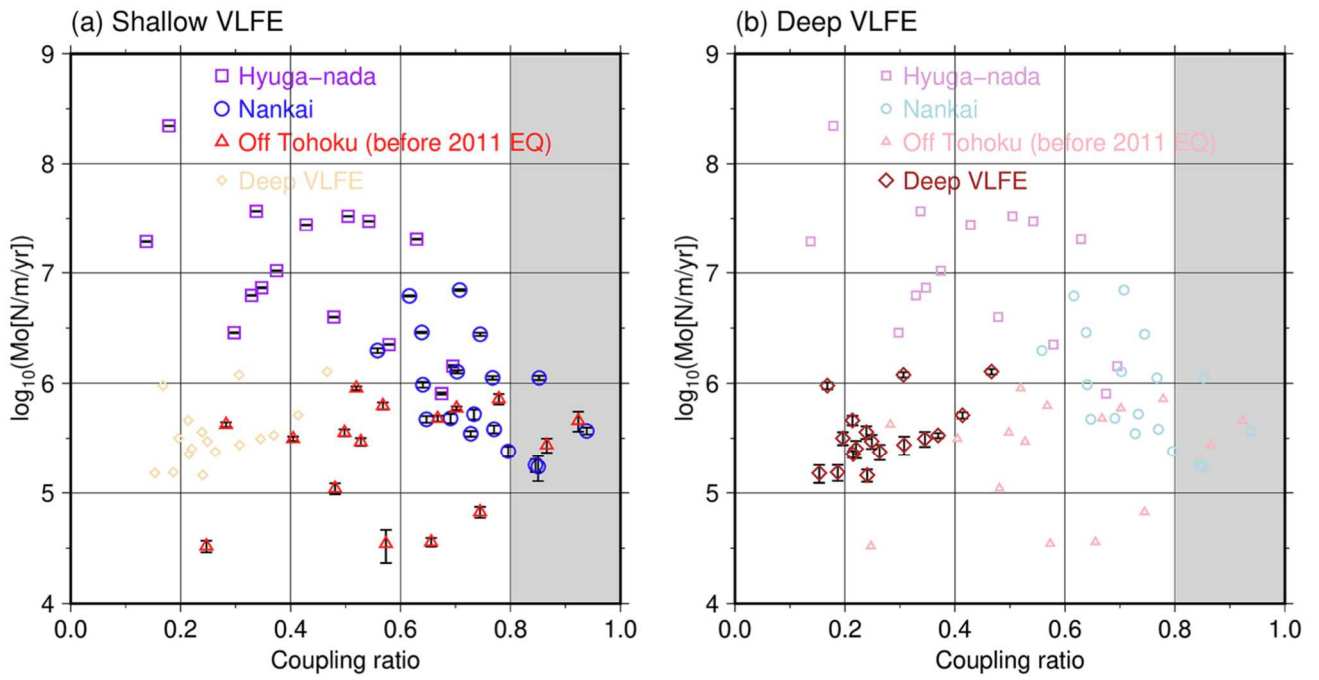


図4．超低周波地震（VLFE）の地震モーメント解放レートの常用対数（縦軸）とカップリング率（横軸）の関係（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12]、Baba et al., 2020b より改変）

(a) 浅部超低周波地震、(b) 深部超低周波地震。

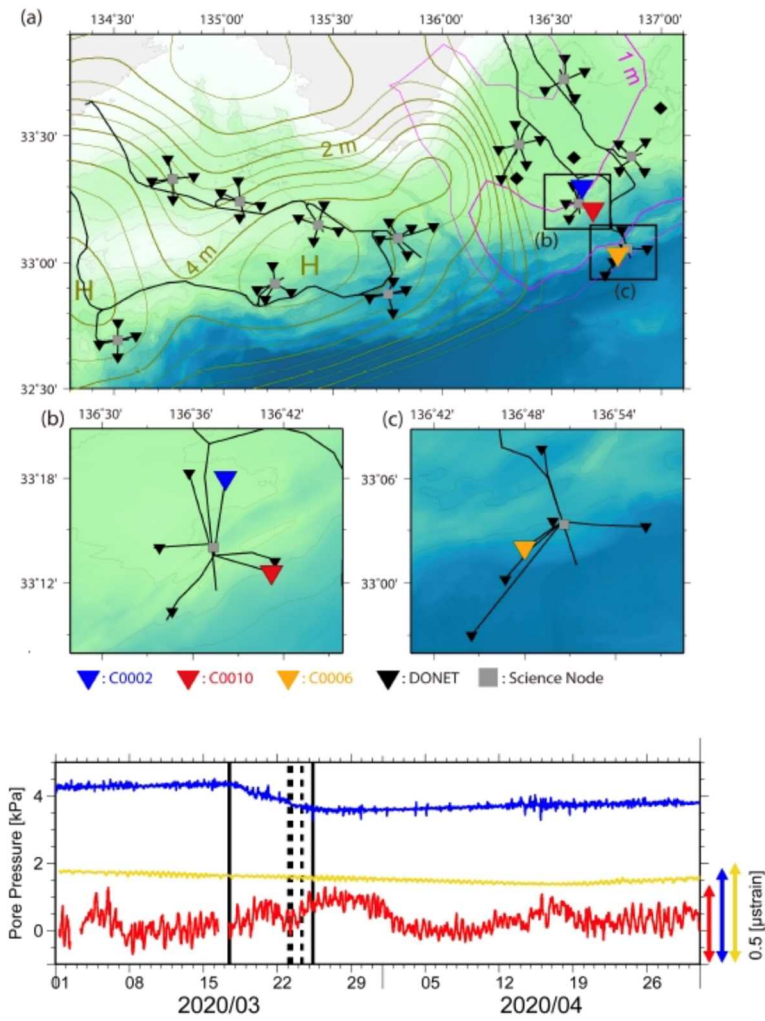


図 5 . DONET へ接続された孔内観測点(逆三角)とその記録(下) (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、Ariyoshi et al., 2021 より改変)
 間隙水圧記録の色はそれぞれの観測点に対応する。

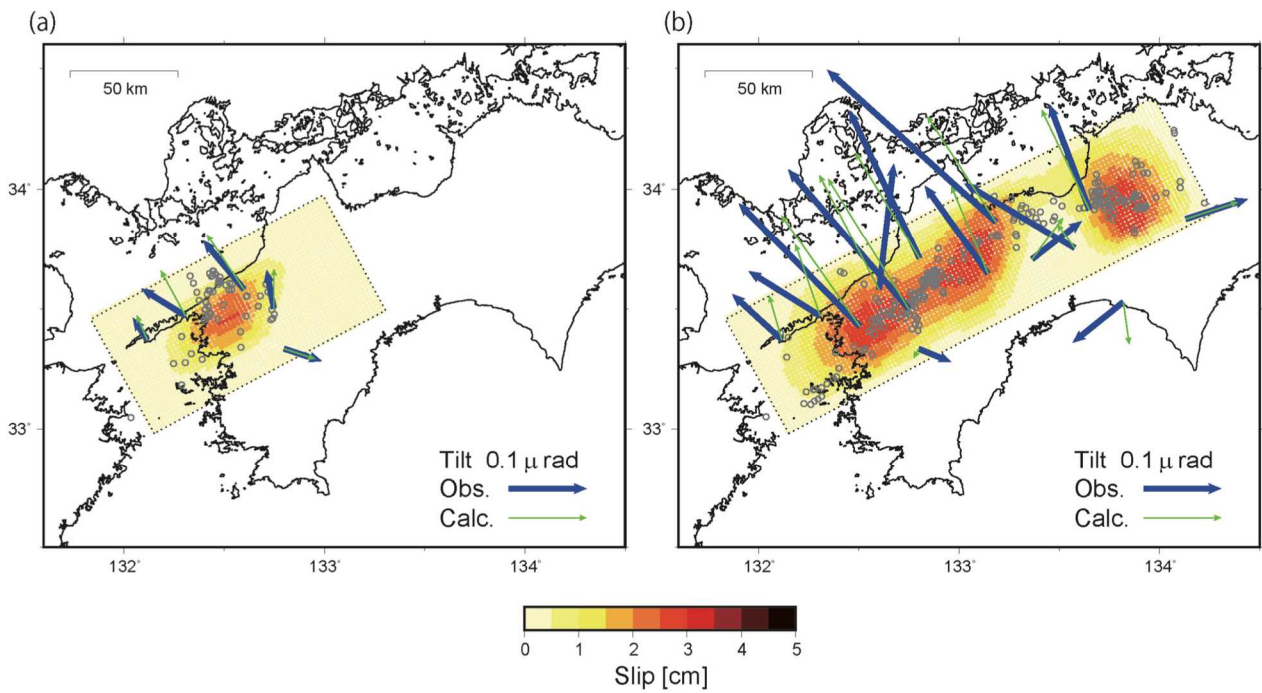


図 6. 四国で発生した短期的 SSE のすべり分布の例（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12]、Hirose and Kimura, 2020 より改変）

(a) 2006 年 4 月の SSE、(b) 2018 年 2 月の SSE。

すべり量を色で表す。青の矢印は観測された傾斜変化ベクトル、緑の矢印は計算された傾斜変化ベクトル。灰色の円はそれぞれの SSE 継続中に発生した微動の震央。

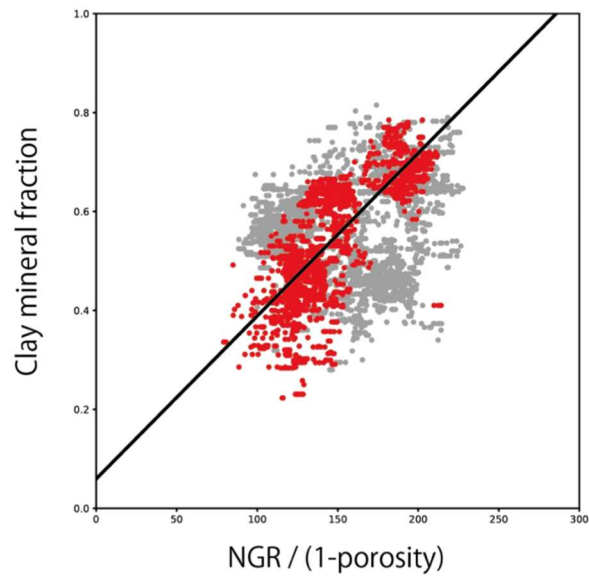


図7. 南海トラフにおける検層データとコア計測粘土鉱物量比のコンパイル結果（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST09]、Yabe et al., 2020b より改変）
 横軸は自然ガンマ線検層のデータを電気比抵抗検層のデータを用いて推定した空隙率を用いて規格化した値を示す。縦軸は取得したコアを用いて XRD によって計測された粘土鉱物量比。灰色の点は全てのデータをプロットしている。これらのうちから火山灰を多く含むなど傾向が異なると考えられる層を除いたデータ(赤点)は線形のトレンドを示しており、これを用いて経験式を構築した。

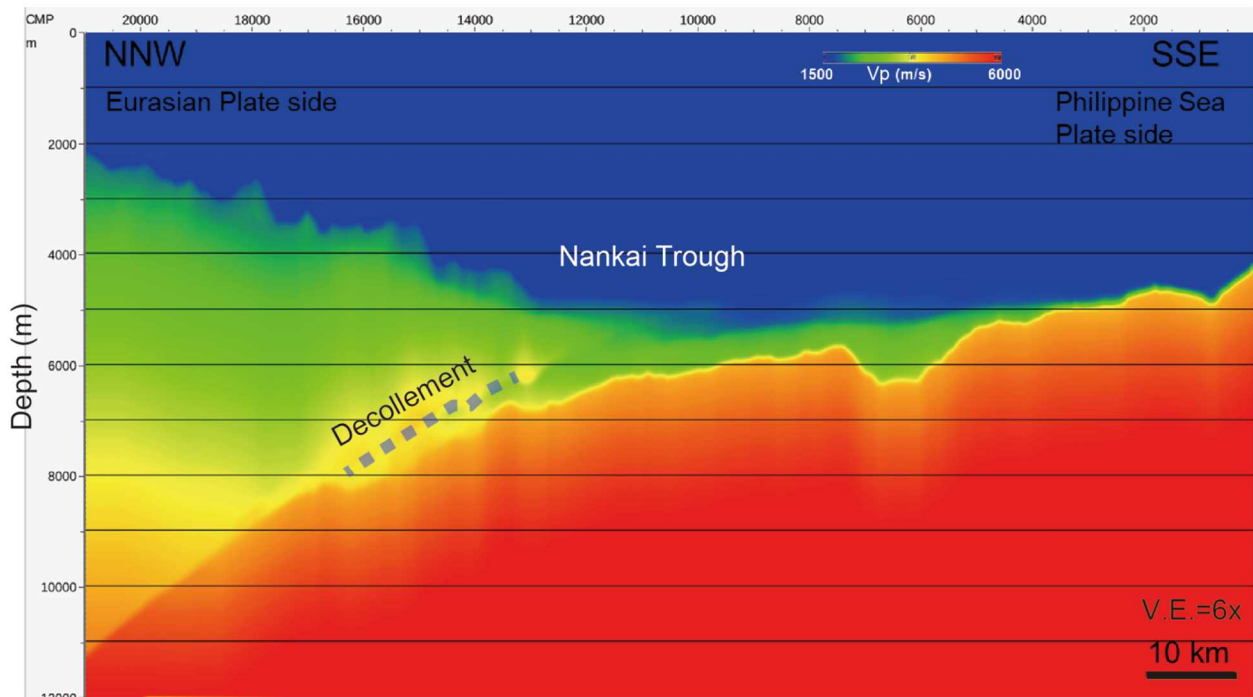


図 8. マルチャンネル反射法地震探査データ (測線 KI01) の暫定的な P 波速度構造モデル (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])
 PSDM (重合前深度マイグレーション) 処理によって P 波速度構造モデルを推定した。灰色の点線は浅部デコルマ表す。

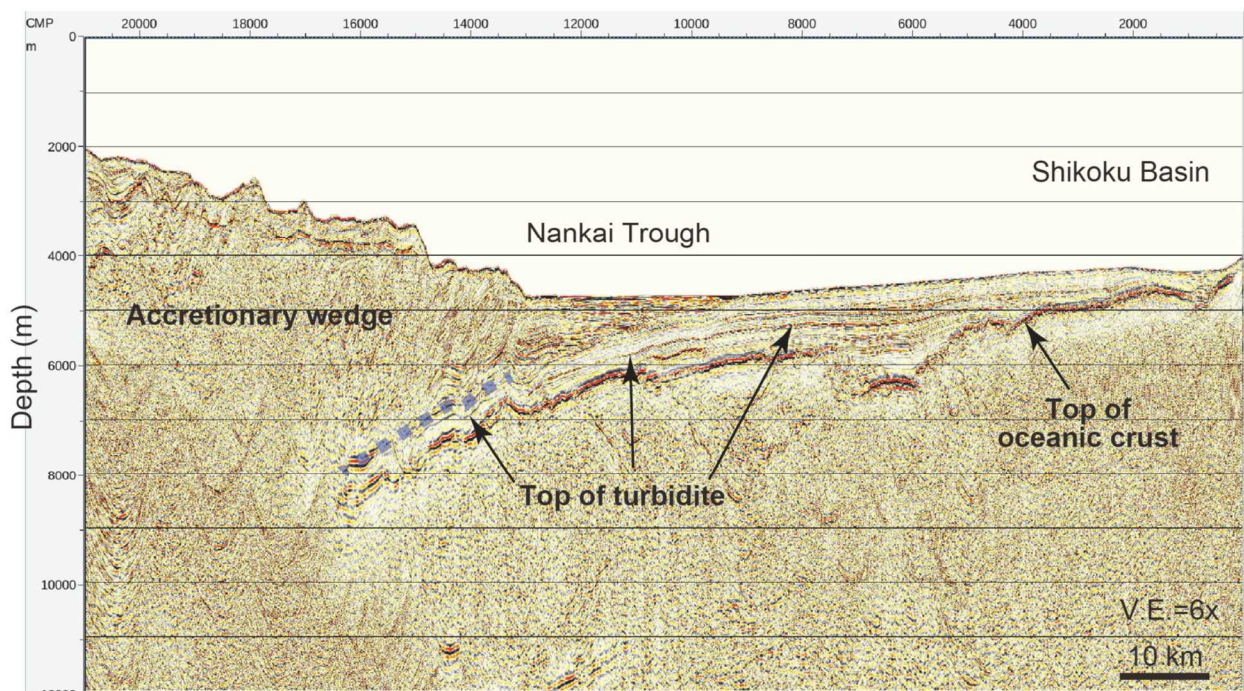


図 9. マルチャンネル反射法地震探査データ (測線 KI01) の暫定的な PSDM 断面図 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])
 灰色の点線は浅部デコルマを表す。

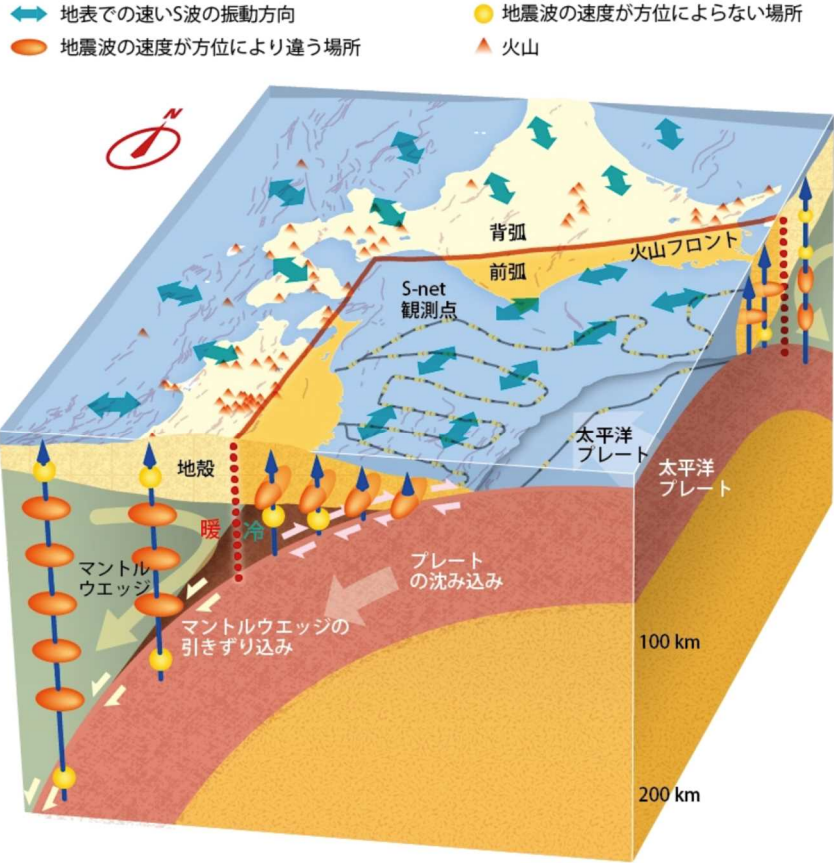


図 10. S波偏光異方性の分布から推察される東北日本のプレートダイナミクス（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12]、Uchida et al., 2020 より改変）

地表の三角は火山、赤線は火山フロント、青い両矢印は観測された速いS波の振動方向。黄色と灰色の曲線は海底のS-netの観測点とケーブル。地下の楕円体は推定された地震の波が伝わる速度が方向により異なる場所、球は地震の波が伝わる速度が振動方向によらない場所を示す。太平洋プレート上面に沿った浅部でのピンクの小さい矢印はプレート境界を境とした食い違い、深部でのうす緑色の矢印はマンテルウエッジ領域を引きずり込む運動を表す。マンテルウエッジ領域の大きく曲がった矢印は、この領域での流動を表す。

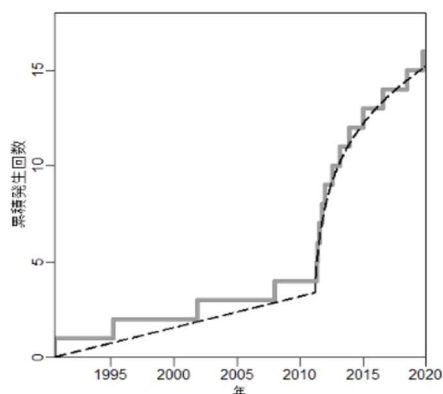


図 11. 釜石沖の繰り返し地震系列 (2019 年末までの発生状況) (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、野村・田中, 2021 より改変)

点線は 2011 年東北沖地震後の発生間隔の系統的变化を大森・宇津則の形でフィットしたもの。

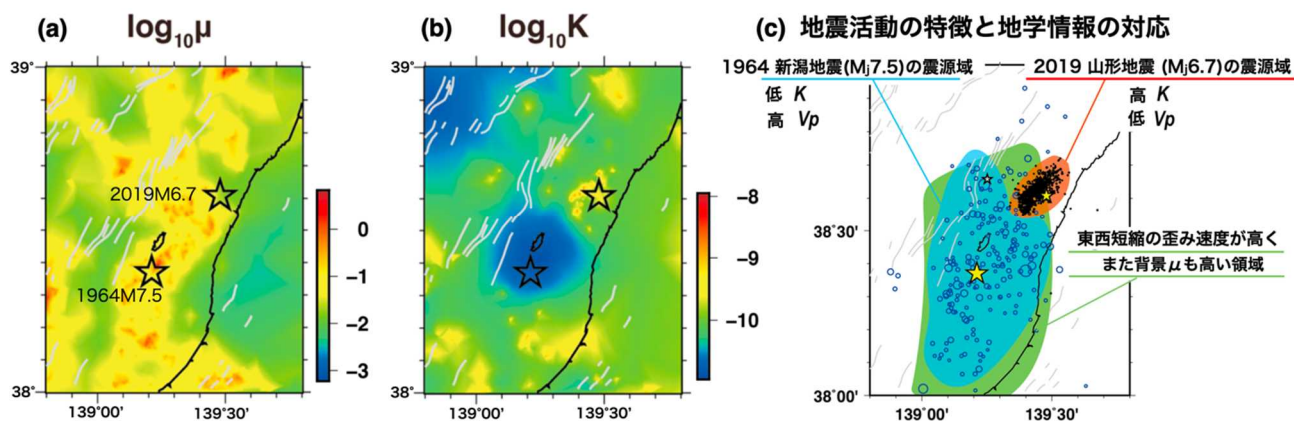


図 12. 日本海東縁地域の時空間 ETAS パラメタの空間分布と歪み速度、P 波速度の比較 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Ueda et al., 2021 より改変)

(a) 独立地震発生レート μ の空間分布、(b) 余震生産性 K の空間分布、(c) 東西短縮速度および P 波速度の空間分布との対応のまとめ。

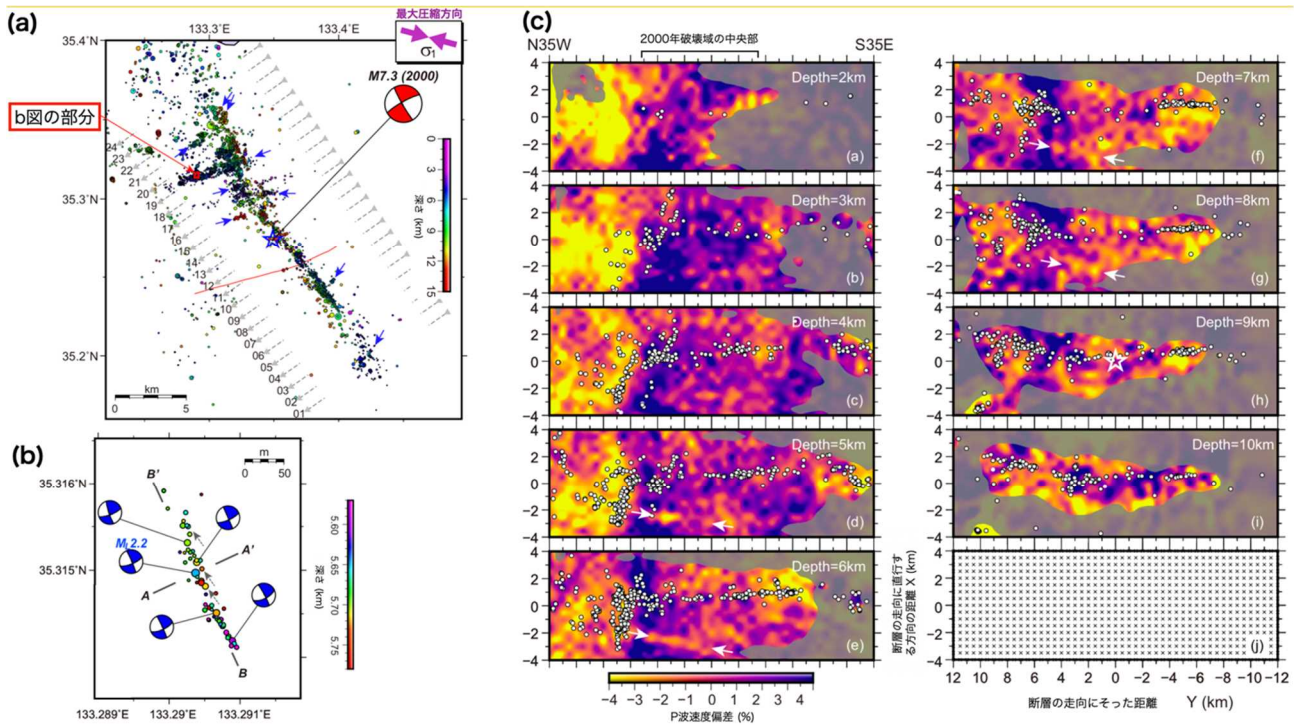


図 13. 2000 年鳥取県西部地震の震源域での超稠密アレーによる観測結果(2017 年 4 月-2018 年 4 月) (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Kato et al., 2021 より改変)
 (a) 震源分布。青い矢印は、本震断層に共役な走向をもつ鉛直な板状クラスタ。(b) a 図の一部の拡大。点線矢印の走向をもつ 30 m 程度の鉛直板状クラスタが雁行配列している。これらの地震は、2017 年 12 月の M2.2 の地震の余震活動 (約 2 日間) と、5 日後から 4 日間続いた群発的活動として発生した。(c) P 波速度のトモグラフィ結果。白丸は 2000 年鳥取県西部地震 (白星 (気象庁)) の再決定された余震分布。

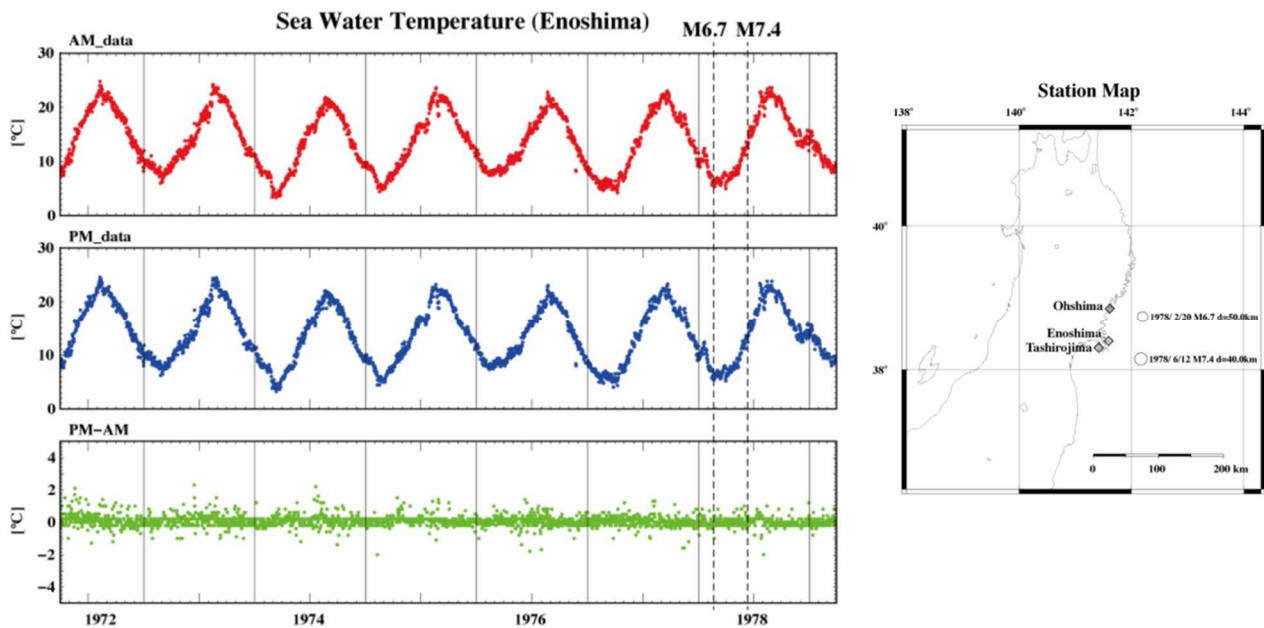


図 14. 宮城県江ノ島の海水温記録（公募研究、東京学芸大学 [課題番号：KOB008]）
AM は午前 10 時、PM は午後 3 時。

適用対象	期間	M法のパラメタ					予知率		適中率		ゲイン
		M_{j0}	T_f (日)	N_f	T_a (日)	M_{m0}	%	対象地震数	%	アラーム数	
岩手・宮城県沖 (実カタログ)	1961–2010	5.0	9	3	4	6.0	33.3	24	24.4	41	340.5
岩手・宮城県沖 (ETASカタログ)	1961–2010	5.0	1	2	2	6.0	9.1	20	8.3	25	292.7
茨城県沖 (実カタログ)	1961–2010	5.0	3	2	1	6.0	66.7	6	30.8	13	1567.5
茨城県沖 (ETASカタログ)	1961–2010	5.0	1	2	1	6.0	14.3	8	15.4	8	446.5
長野県北中部 (実カタログ)	1998–2019	2.0	1	5	5	5.0	40.0	15	9.6	73	439.9
長野県北中部 (ETASカタログ)	1998–2019	2.0	4	2	4	5.0	29.6	26	0.7	1299	78.0
伊豆諸島 (実カタログ)	1977–2019	3.0	1	2	4	5.0	72.3	65	20.1	314	338.0
伊豆諸島 (ETASカタログ)	1977–2019	3.0	1	2	2	5.0	68.4	128	9.0	1331	133.4

図 15. M法 (Maeda, 1996) 前震識別を実カタログと ETAS による合成カタログに適用した場合の成績の比較 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Hirose et al., submitted より改変)

ETAS シミュレーションによる合成カタログは各地域で 1000 回の試行で作成し、1000 回の試行のそれぞれに対して M 法のパラメタを最適化したので、ETAS カタログでの最適パラメータと成績は、1000 回試行の中央値を示した。また、適中したアラームの数と予知できたターゲット地震の数が必ずしも一致しないのは、1つのアラームで複数個のターゲット地震が予知できた場合があるからである。

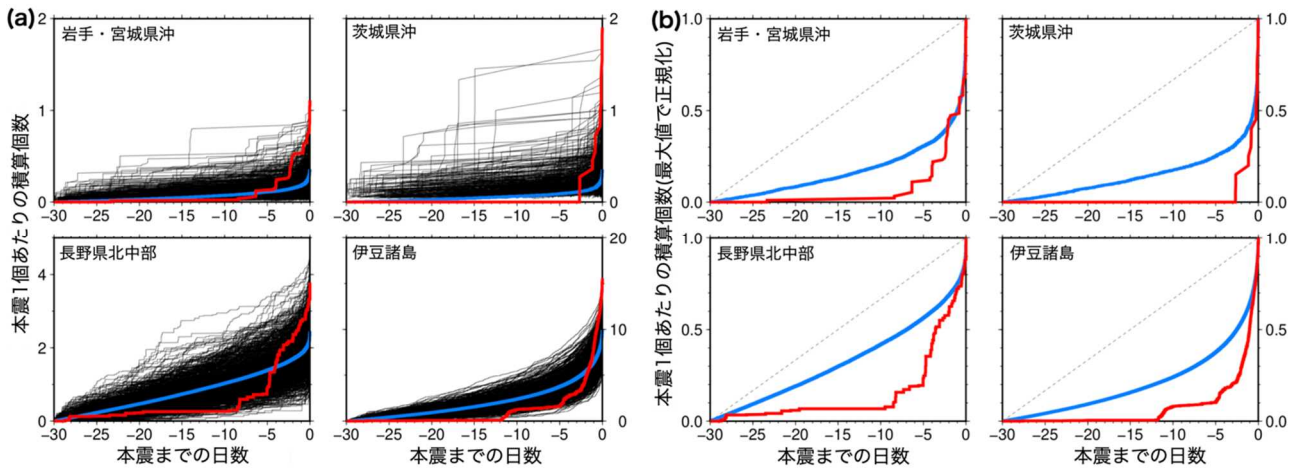


図 16. 前震活動の時間推移（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、Hirose et al., submitted より改変）

赤線は実カタログ、黒細線は ETAS シミュレーションによる合成カタログ (1000 回の試行)、青線は ETAS カタログの平均。いずれのカタログでも、M法の成否にかかわらずそこに含まれる全てのターゲット地震前 30 日間の活動をスタックして、ターゲット地震 1 個あたりの個数になおして示した。(b) では、前震活動の時間的特徴が比較しやすいよう縦軸を正規化して示した。実カタログでは地震前数日に強く集中していることがわかる。

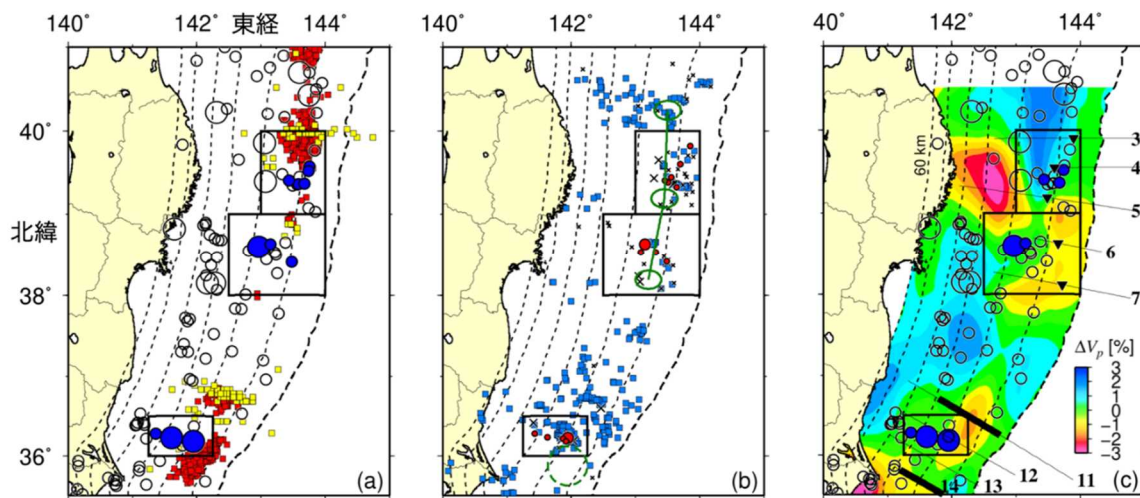


図 17. 日本海溝地域の地震テクトニクスとM法予測の当たり外れ（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、Hirose et al., submitted より改変）

点線は太平洋プレート上面の等深線 (10km 間隔)。

(a)、(c) 青丸: 予知された対象地震。白丸: 見逃がした対象地震、(b) 赤丸: 適中アラームとなった地震。x 印: 空振りアラームとなった地震。

(a、b) では岩手・宮城県沖に、(c) では茨城県沖に最適化したM法のパラメタを日本海溝域全てに適用したので予測結果が微妙に異っている。地震テクトニクス情報としては、(a) には Nishikawa et al. (2019) による継続時間 80 秒以上の微動 (赤四角) と VLF (黄四角) を、(b) には Nishikawa et al. (2019) による背景地震の群発活動 (青四角) を、(c) には Hua et al. (2020) による太平洋プレート上面での P 波速度偏差を示した。

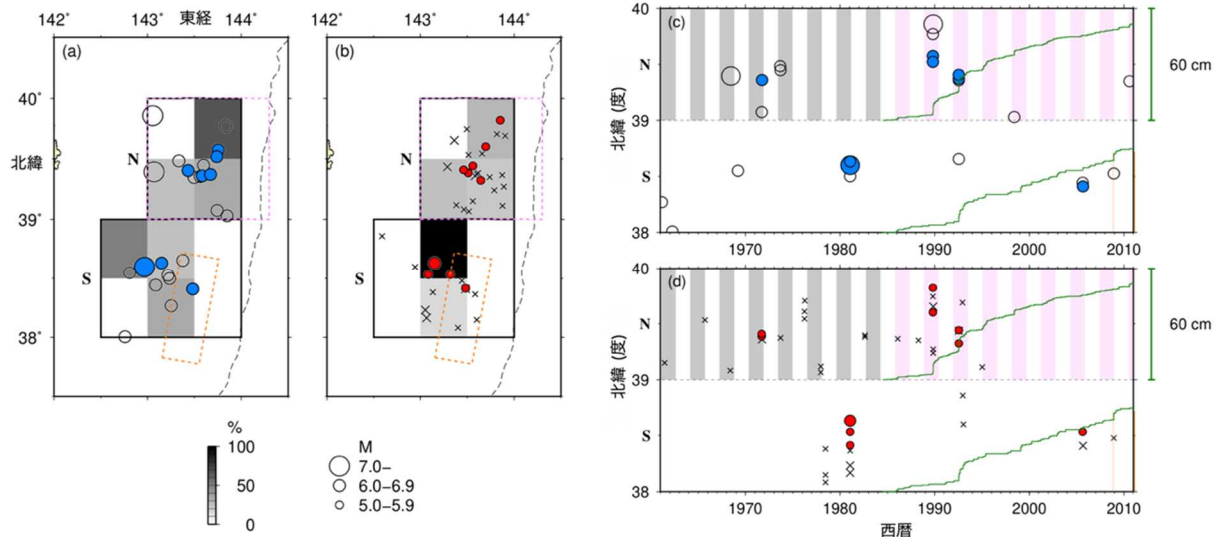


図 18. 岩手県沖（領域N）と宮城県沖（領域S）でのM法予測の当たり外れとスロースリップの周期性（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、Hirose et al., submitted より改変）

青丸、白丸、赤丸、x印の意味は図 17 と同じ。（a）のグレースケールは予知率。（b）のグレースケールは適中率。（a、b）のピンク破線は Uchida et al. (2016) が 3.09 年周期のスロースリップの加減速をみつけた領域。オレンジ破線は Ito et al. (2013) によって SSE が検出された領域。（c、d）のストライプは Uchida et al. (2016) の 3.09 年周期のスロースリップのリズムでの速期。ただし 1984.5 年以前はそれ以降のリズムを外挿した。（c、d）の緑線は、繰り返し地震から推定した領域N、領域Sそれぞれの累積すべり量。オレンジの縦線は Ito et al. (2013) の見つけた SSE の時期。

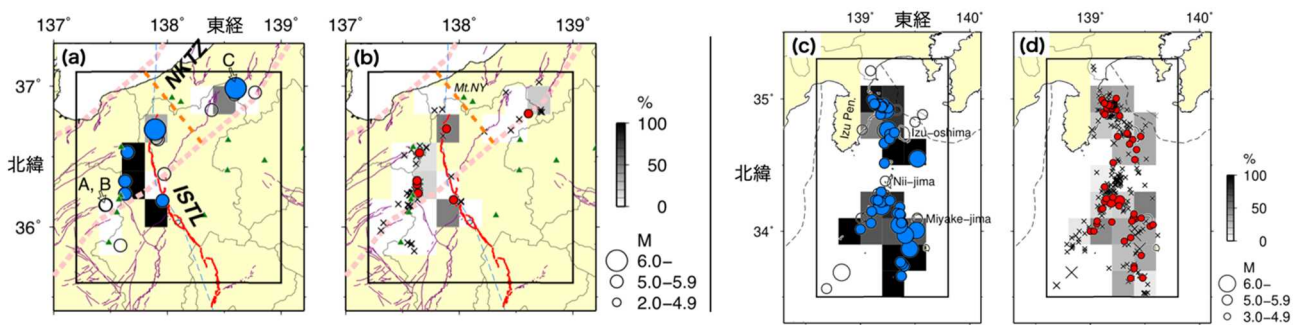


図 19. 長野県北中部と伊豆諸島におけるM法予測の当たり外れ（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、Hirose et al., submitted より改変）

青丸、白丸、赤丸、x印の意味は図 17 と同じ。

（a）長野県北中部の予知率、（b）長野県北中部の適中率、（c）伊豆諸島の予知率、（d）伊豆諸島の適中率。

（a、b）で青い破線はアムールプレートとオホーツクプレートの境界（Bird, 2003）。二本の平行なピンク破線の間が新潟－神戸歪み集中帯（NKTZ）。オレンジ破線は地殻速度偏差（Nakajima and Hasegawa, 2007）に見られる境界。赤い線分たちは糸魚川－静岡構造線（ISTL）。三角印は活火山。Mt. NY は新潟焼岳。

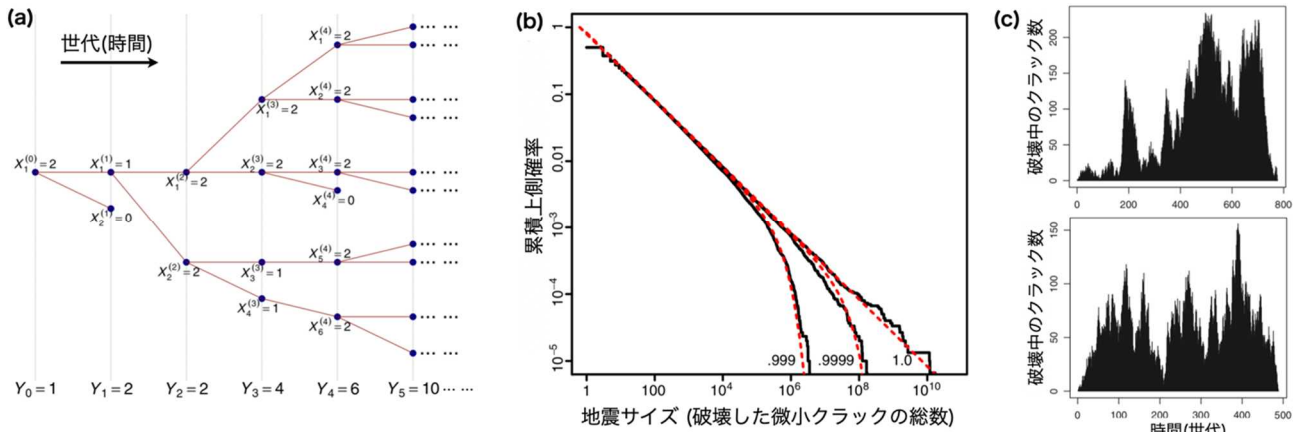


図 20. 分岐クラックモデルとそのふるまい (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Zhuang et al., 2021 より改変)

(a) 分岐クラックモデルの時間発展の様子。第 $n+1$ 世代に破壊する微小クラックの数 Y_{n+1} は、第 n 世代の各クラック $X_j^{(n)}$ に直接トリガされたクラックの総数である。

(b) ν が 0.999, 0.9999, 1 の場合のサイズ頻度分布。赤破線は打ち切り Pareto ($\nu < 1$ の場合) もしくは Pareto ($\nu = 1$ の場合) 関数による漸近線。

(c) $\nu = 1$ の二分岐モデルで起きた大地震 2 例の震源時間関数。いったん終息しかけてから、それ以前にも増して大きなモーメントレートが出るような不規則性は分岐クラックモデルの本質的なランダム性の顕れである。

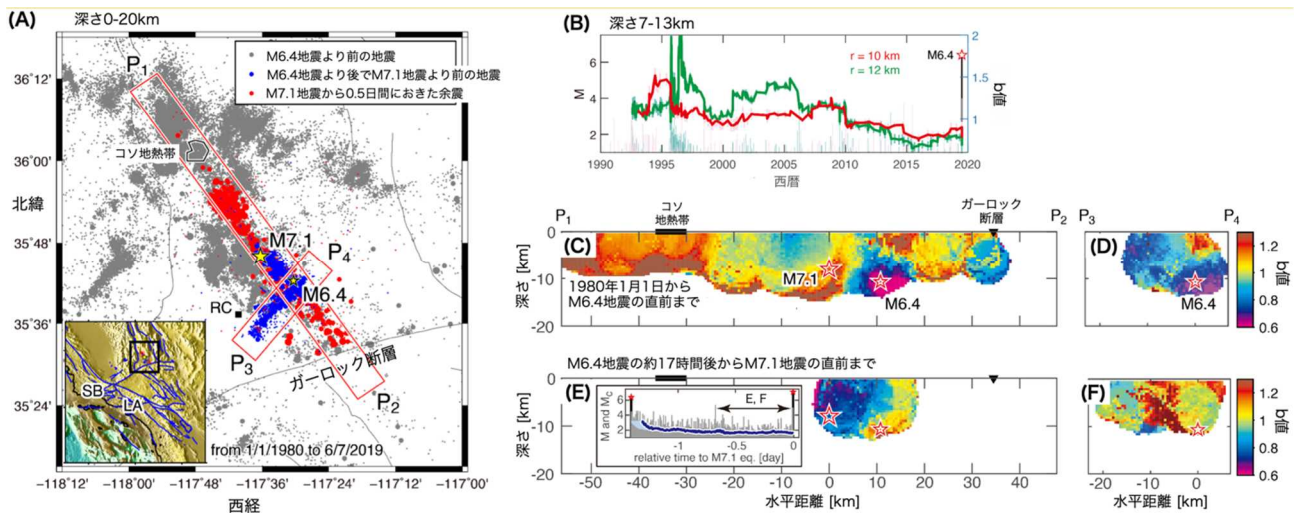


図 21. 2019 年リッジレスト地震に至る期間の地震活動 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Nanjo, 2020a より改変)

(A) 1980 年以降の地震活動の分布。

(B) M6.4 地震までの震源周辺の b 値の推移。灰色は MT ダイアグラム。

(C、D) M6.4 地震までの b 値の分布の鉛直断面投影図。

(E、F) M6.4 地震から M7.1 地震までの期間の b 値の分布の鉛直断面投影図。ただし、M6.4 地震直後のデータは信頼性が落ちるため、後半のみで b 値を計算した。

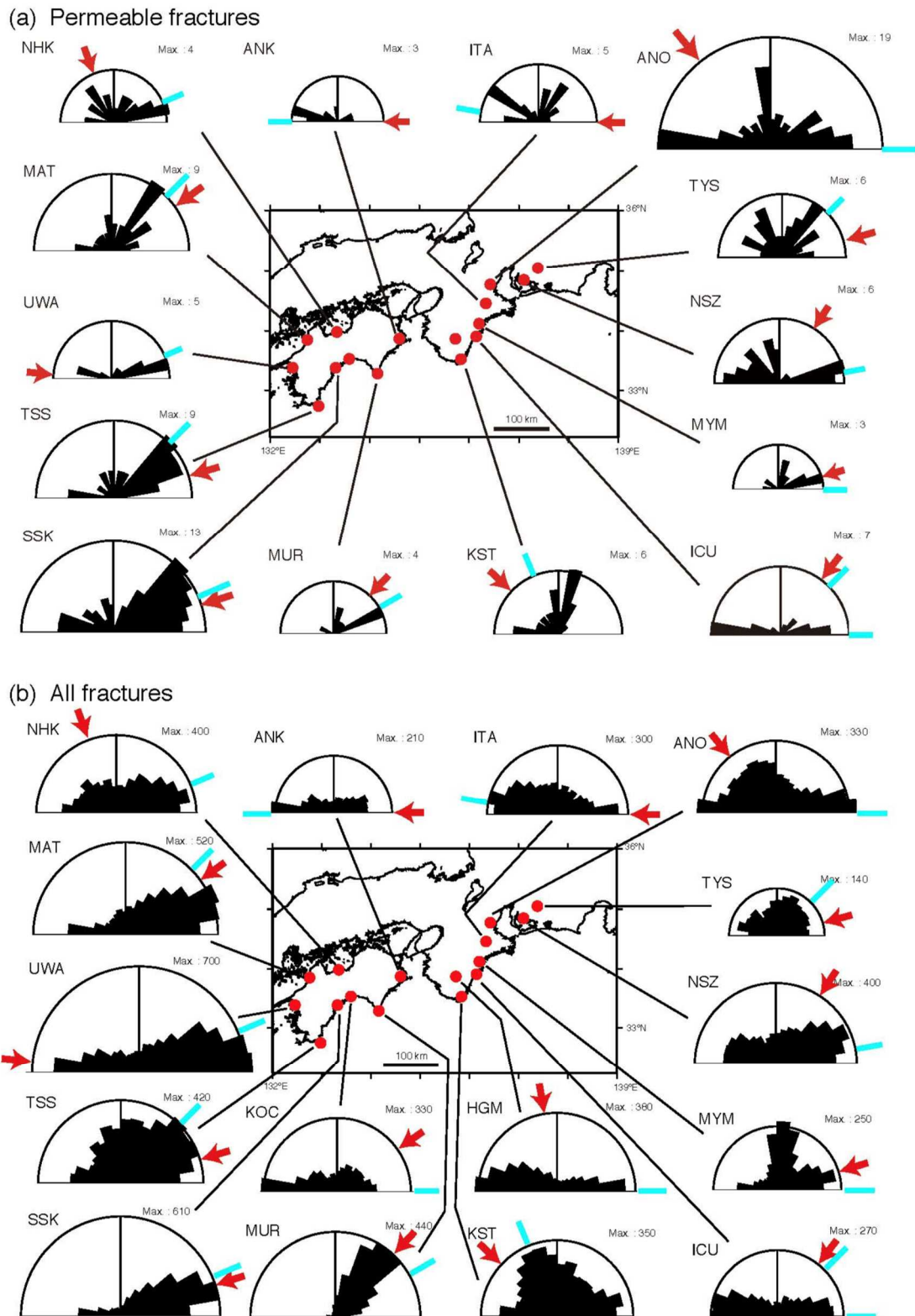


図 22. 16 地点の観測井孔壁面に見られる亀裂の走向のローズダイアグラムの分布図（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST09]、木口・桑原，2021 より改変）

（a）透水性亀裂、（b）全亀裂。

各観測点の応力方位（赤矢印）と地質構造の特徴的な方向（青実線）も示す。（a）と（b）のローズダイアグラムの大きさは、それぞれの図のローズダイアグラムの最大数の平方根に比例。

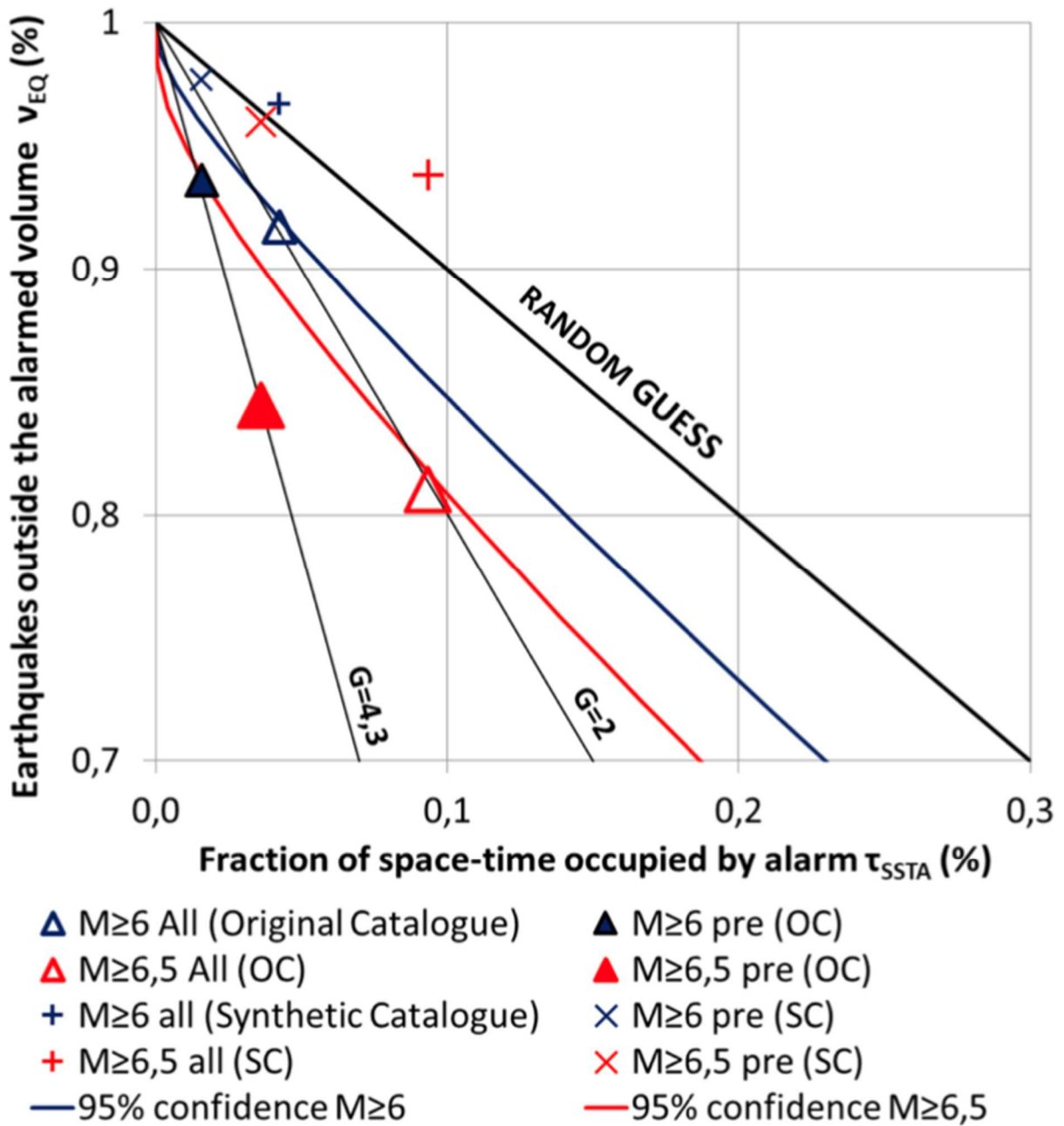


図 23. ひまわり 6、7号で観測された衛星熱異常と地震の相関を示す ROC ダイアグラム (千葉大学 [課題番号: CBA_01]、Genzano et al., 2021 より改変)
 縦軸は見逃し率 (=1-予知率)、横軸は警報分率 (予測対象時空間にしめるアラーム領域の割合)。pre は地震の前 30 日の間に異常があったかを、all は地震の前 30 日から地震後 15 日の間に異常があったかを調べたもの。

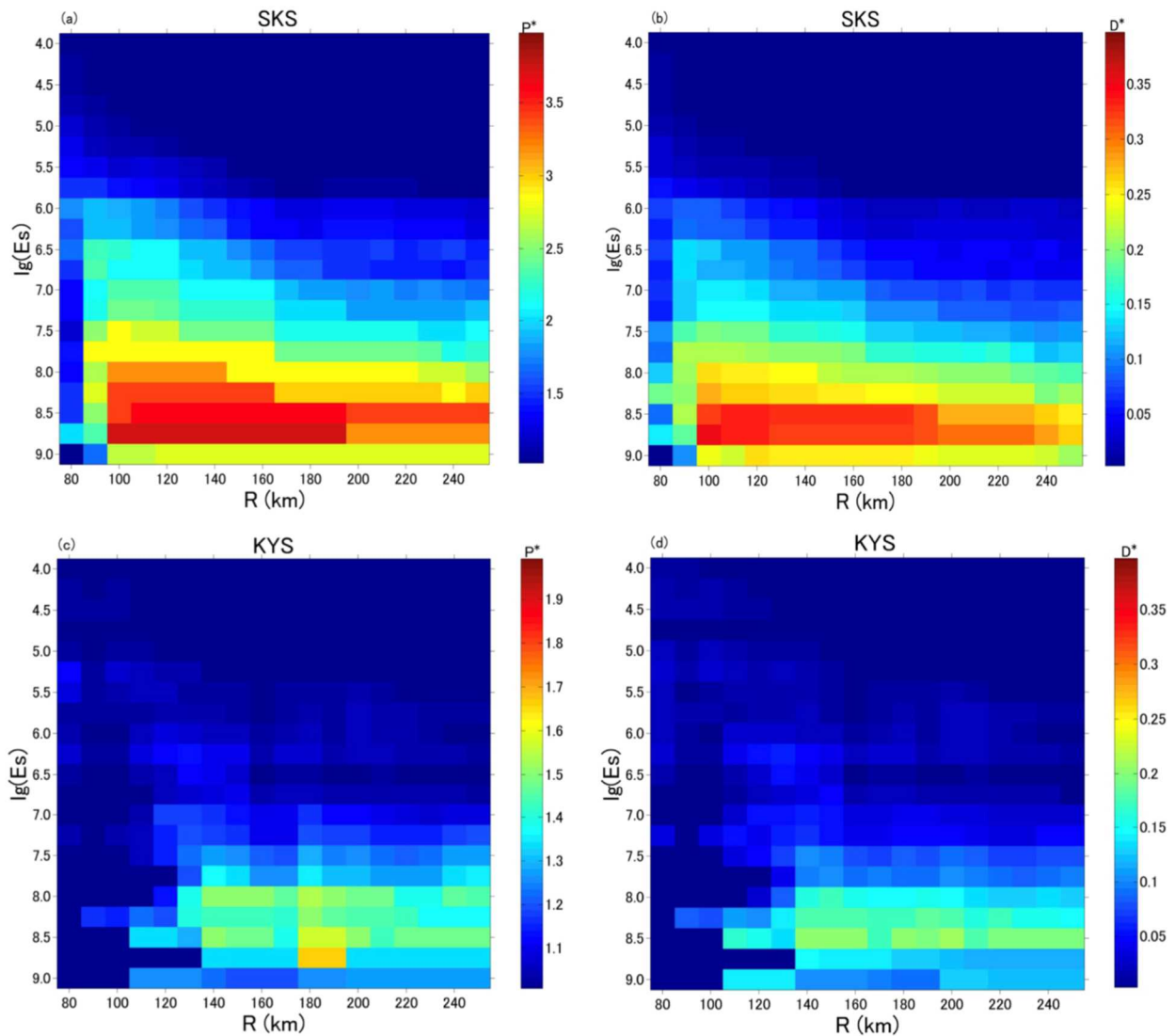


図 24. ULF 地磁気異常による地震予測性能に関する図。縦軸は予測対象地震の大きさ (E_s)、横軸は観測点からの距離 R を表す (千葉大学 [課題番号: CBA_01]、Han et al., 2020 より改変)

SKS は千葉大学の清越観測点 (伊豆半島)、KYS は千葉大学の清澄観測点 (房総半島)。 P^* は、「予知率/p 値 5 %を達成するための予知率」として定義され、この値が 1 を超えていれば、前兆性が統計的に有意と認められる。また、同じ警報分率、予測対象地震数のもとでは、「予知率/警報分率」で定義される確率ゲインの単調増加関数になるので、 P^* が大きいほど予測の効率がよいことになる。 D^* は、「予知率-p 値 5 %を達成するための予知率」として定義され、この値が正であれば、前兆性が統計的に有意と認められる。また、(予知率-警報分率)で定義される実効予知率 (Nakatani, 2020) の単調増加関数になるので、この値が大きいほど、地震に前兆がつく割合が高いことになる。