

1 (4) 地震先行現象・地震活動評価

「地震先行現象・地震活動評価」計画推進部会長 中谷正生
(東京大学地震研究所)

現行計画には地震発生を予測するためのいくつかのアプローチが含まれている。地震先行現象・地震活動評価部会では、種々のモニタリングデータから断層面の滑り・応力等を推定し滑りの物理的予測モデルと対比するための研究、地震発生との因果関係に合意のとれた物理モデルがなくても、経験則として地震発生の予測に役立つ情報があるのかを統計的に吟味する研究、あるいは先行現象と目される事象の地震発生に対する物理的意義を解明するための研究を行っている。

2. 地震・火山現象の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

活断層周辺の応力状態を推定する手法として、昨年度に続き、P波初動(押し引き)をデータとした応力空間パターン推定手法(いわゆる「応力インバージョン」)の開発を行い、2000年鳥取県西部地震の余震域から得られた実データ(図1)への適用を試みた。手法は「断層面の向きは一樣ランダム」という仮定の下に、各余震の断層面の向きを求めることなしに、P波初動の適合性を説明する応力場を直接ベイズ推定するものである。図2(a)および(b)に、2000年鳥取県西部地震の余震域に対して推定された主応力軸および最大主応力軸の方位角(北から時計回り)の空間パターンを示す。断層南端で、断層をまたいで方位角の大きな変化が見られる。この空間的な方位角の変化は、本震発生時の断層運動から期待される応力場の回転(図2(c))と整合的である(東北大学[課題番号:1206])。

一方で、大深度での採掘が行われている南アフリカの鉱山では、実際に地震をおこした断層周辺の応力場を直接測定することが可能であり、ICDPのDSeis計画(Ogasawara et al., 2017; Voosen, 2017)では、M5.5震源断層(地下3.5-7km)の上方延長において非常に高いコア回収率で総延長1400mの掘削を終えた(図3)。DCDA法、現場応力解放法、ボアホール・ブレイクアウト(BB)、コア・ディスクキング(CD)による絶対応力情報と、反射法探査による断層系の再解釈(小笠原, 2018)を行うことで、M5地震の余震発生帯の上端部より深い領域では、系統的に差応力が10-20 MPa上昇することがわかった。差応力レベルは、採掘レベルである2.9km深以浅での応力解放法の結果の外挿では説明できない大きさであった(石田, 2018)。また、別の鉱山でのM3.5の地震発生場を貫通する2本の掘削コアに対してDCDA法とDRA法の応力測定を行い、BBやCDの結果も加味して応力分布を詳しく議論することができた(Abe, 2017; 石田, 2018)(立命館大学[課題番号:2401])。

余震活動を詳細に解析するためにETASモデルの改良を続けている。平成27年度に通常の点震源ETASモデルを拡張して有限断層ETASモデルを開発した(Guo et al., 2015)。今年度は本手法を用いて大地震の破壊幾何形状とすべり分布を推定することを試みた(Guo et al., 2017)。このモデルを気象庁一元化カタログとイタリアのISIDEカタログに適用したところ、本震に直接起因する余震活動はアスペリティの近傍に位置する場合が多く、一次余震は本震によるすべりを補完する部分に発生することがわかった(図4)。本手法は、二

次余震以降の余震活動をより適確に分類できる利点もあり、本震時のすべりインバージョンの高度化や本震後の短期の余震確率予測に役立つと思われる（東北大学〔課題番号：1206〕）。

地震誘発作用の観点から、活断層周辺の断層強度や応力状態の情報を得ることも検討した。2011年東北地方太平洋沖地震によって動的に誘発された西南日本の地震活動を防災科学技術研究所の波形データを使って詳細に調べた(Opris et al., 2018, 図5)。その結果、従来指摘されていたレイリー波による影響よりも、大振幅のラブ波到達とより相関が良いことがわかった。また、動的に誘発された地震活動の継続時間は7日間程度であり、長期に継続する静的応力変化による誘発地震活動との違いが浮き彫りになった(図6)。一方、2016年4月16日の熊本地震でも、広域で表面波による誘発地震(動的トリガリング)が発生した余震域3箇所(震源断層域、阿蘇地域、湯布院-別府地域)に大森-宇津則をあてはめてp値を求めたところ、火山・熱水地域である阿蘇、湯布院-別府地域では有意にp値が高いことが分かった(図7)。特に湯布院-別府地域は高い熱流量が推定され、応力緩和の効果によるものと考えられる（東北大学〔課題番号：1206〕）。

昨年度までに、札幌医科大学及び福島県立医科大学の大気中ラドン濃度の時系列と周辺地域の地震活動累積モーメント時系列に相関があるようだ指摘していた。本年度は、それぞれに特異スペクトル変換法を適用して異常度の時系列をつくり、動的時間伸縮法(中本ほか, 2003, 人工知能学会論文誌)を用いて類似性を解析したところ、実際に観測された程度以上に両者が類似することが偶然におきる確率は、札幌医科大学で $p=7.6\%$ 、福島県立医科大学で $p=13.4\%$ であるとの結果を得た(図8)。また、大気中および水中のラドン濃度測定手法の開発のために、様々な測定器の性能を評価した(Tanaka et al., 2017; 神代ら, 2017; 藤井ら, 2017; 吉井ら, 2017)（東北大学〔課題番号：1207〕）。

水文学的な手法による断層モニタリングにおいて、断層周辺の複雑な水理物性の把握は重要な課題である。三重県内の中央構造線断層帯(MTL)の透水係数を産総研が掘削した2本の井戸の水理試験と長期水位観測で求めた(Matsumoto and Shigematsu, 2018, 図9)。求めた透水係数は、MTLの露頭で断層帯の中央からの距離ごとにサンプリングされた岩石の実験から求めた詳細なMTLの透水構造を示した既往研究(Wibberley and Shimamoto, 2003)と類似した値となり、MTLの複雑な透水構造を反映していることがわかった。また、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共催し、プロシーディングスを公開した（産業技術総合研究所〔課題番号：5007〕）。

粉体層内における水などの流体の浸透状態の不安定化についての実験的研究を行い、粉体層内での流体浸透の不安定性は、粉体層を構成する粒子のサイズや形状に著しく影響されることが明らかとなった(Endo and Katsuragi, 2017)。特に水みちと呼ばれる流体の通り道の形成をより現実的に再現するためには、巨大な実験装置が必要であることがわかった（東京大学地震研究所〔課題番号：1512〕）。

神奈川県温泉地学研究所報告(観測だより)に掲載された「なまずの会」による井戸水位観測の結果をデジタル化した。このデータは日毎に異常がない場合は白丸、異常がある場合は黒丸で表され、水位の異常上昇または低下がセンチメートル単位で示されている。のべ234の個人や団体が参加したデータは、1977年2月1日から1986年12月31日までの10年10

ヶ月あった（東海大学〔課題番号：2901〕）。

断層の固着度とb値が関連しているという指摘は、日本海溝付近について以前なされたことがある（Yabe, 2003, BERI）。南海トラフ沿いについて、2006年以降の気象庁一元化カタログからフィリピン海プレート内とプレート境界の地震だけを用いてb値の詳細な空間分布を求めた（図10，楠城・吉田，2017）。1944年の東南海地震と1946年の南海地震で滑り量の大きかった領域ではb値が低く，また，その領域の間ではb値が高いことがわかった。南海トラフ沿いのプレート境界面はセグメント化されており，東北沖（Tormann et al., 2015）とは異なる性質を示している。より詳細に調べると，Yokota et al. (2016)の滑り欠損レートとb値に負の相関があることもわかった。b値が差応力と逆相関することが知られているので，カップリング域（滑り欠損が大きい）で差応力が大きいことを示しており，世界の他地域での観測事実とも調和的である。さらに，帯状分布する低周波地震と重なっているかそれより深い側にある四国北部から，伊勢湾北部にかけての30km以深の領域のb値が低いことも注目される。これは，この地域に推定されている高い間隙水圧のために，差応力比が高いことを示唆しているかもしれない。また，日本の太平洋側のプレート境界域に関して，細かいメッシュでb値のモニタリングを行うGISシステムを開発した（東京大学地震研究所〔課題番号：2902〕）。

地殻変動のモニタリングデータは，断層滑りの時空間履歴を計算・予測する物理モデルとあわせて地震発生の予測に使うことが原理的に可能であり，ゆっくりすべりイベント（SSE）などの非地震性すべりのモニターを高度化する努力が行なわれている。産総研と防災科研および気象庁との共同研究により，3機関のひずみ・地下水・傾斜データをリアルタイムで共有して南海トラフ周辺地域の短期的ゆっくりすべり（SSE）を解析するシステムの運用を継続した。2016年11月-2017年10月の間には，27の短期的SSEの断層モデルを決定した。さらに，短期的SSEの検出と断層すべり分布の時空間変化の推定を同時に行う新手法を提案した（Araki et al., 2017）。シミュレーションデータで検出精度を評価した結果，高い精度ですべり開始時点・終了を推定し，また，従来法に比べすべり量の時空間変化の推定精度の改善を確認した。実際の歪データを用いて推定したすべり開始・終了時点は微動発生期間と一致した（図11）（産業技術総合研究所〔課題番号：5007〕）。また，GNSS日値と一週間の傾斜をもつランプ関数の相関をとることで，南海トラフ沿いの短期的スロースリップ（数日から1週間程度の継続時間）の客観的な時空間分布を得る手法を開発し，さらに，ひずみ計データのスタッキングによる方法も開発した（気象庁〔課題番号：7006〕）。

速度状態依存摩擦則に従うバネブロックモデルが示す余効すべりやスロー地震の数値シミュレーションを行った。前年度までの1次元モデルを，今年度は2次元モデルへと拡張した。その結果，1次元の場合と同様，速度状態依存摩擦則を特徴づけるa, bパラメータの大小に応じ，三つの滑り様式（高速破壊・余効すべりを伴う高速破壊・スロー地震）が出現することが分かった。加えて，スロースリップ現象を記述する解析的な式を導出し，シミュレーション結果との比較検討を行った（東京大学地震研究所〔課題番号：1512〕）。

海底観測システムであるDONETの2015年9月から2016年4月までの連続地震記録を解析し，その結果南海トラフの島弧側において浅部微動活動が発生していることを確認した。微動活動は2015年10月と2016年4月に発生しており，深部の微動活動と同様に地震動によ

るトリガ現象が確認された。この微動活動はトリガ現象に見られるように応力状態に敏感であり、この周辺の応力状態をモニターする上でも重要な現象とみられる（気象庁〔課題番号：7006〕）。

滑りモニタリングに基づく予測を行なう上で、断層面の不均質は重要な課題である。アスペリティが多数配置されたゲル同士のスティックスリップ摩擦において、画像解析を用いて巨大イベントのすべりの破壊核形成・成長過程とすべり直前の応力分布との関係を調べた。図12に実験系の模式図を示す。実験の結果、初期条件はほぼ同一であるにも関わらず、前駆すべりの履歴によって巨大イベント直前のせん断応力場の違い(図13 (a) (c) 参照)が生まれ、その後の破壊挙動が大きく異なることが分かった。また、破壊伝播速度がS波速度を大きく上回る例が観測された(図13(b) (d))。とくに2つ目のイベント(図13(c) (d))では、ゆっくりとしたすべりが試料両端(せん断応力が高いところに一致)で始まり、中央に到達した後高速破壊に至る、特徴的な挙動がみられた（東京大学地震研究所〔課題番号：1512〕）。

南海トラフ沿いの巨大地震シミュレーションにおいて、巨大地震の発生履歴、比較的よくわかっている昭和東南海・南海地震のすべり分布、最新のすべり欠損レート分布、そして繰り返す長期的スロースリップを再現するモデルを構築した(図14)。各地震のすべり分布は概ね再現しているが、宝永→安政→昭和の発生順は再現できていない。また、東日本地域については、従来のアスペリティモデルと階層アスペリティモデルの2モデルを軸に、東北地方-関東地方の太平洋沖で発生するM7-9の主な地震を再現できるモデルを構築した。メッシュサイズの細密化により、規模の小さな地震発生の再現が可能となった（気象庁〔課題番号：7006〕）。

地震の確率予測を実現する基本的な戦略は、ベースとなる地震活動(定常的な地域性、余震活動のような広く認められる時間変化など)を統計モデルで表現し、それに先行現象で得られるゲインを組み込むことである(e. g., 尾形, 2015)。CSEPはベースとなる統計モデルを確立することを主要な目的としており、今年度は、各カテゴリーの検証実験、研究集会の開催を継続するかたわら、3ヶ月テストクラスのAllJapanとMainland領域における20ラウンドを超える結果について評価を実施した(Tsuruoka, 2017a)。RI10K, HISTETAS5PA, MARFSおよびMARFSTAの計4つのモデルについて、空間予測および地震数の予測の二つの観点から評価を行った。AllJapan領域では4つのモデルのパフォーマンスの差は小さかったが、MainlandにおいてはMARFSとMARFSTAの成績がよくないことがわかった。また、空間予測の情報利得は、MainlandよりもAlljapanがよくなる傾向があり、地震数の予測については、Mainlandにおいては2倍程度過大に予測する傾向があった。さらに、複数ラウンドにおいて複数モデルを評価する場合において、CSEPの標準的なN, M, S, Lテストは、モデルからの予測と観測を比較するテストであるため、モデル間の比較を直接できず、情報利得あるいは対数尤度そのもので比較することが直接的かつ容易であることが明らかとなった（東京大学地震研究所〔課題番号：1511〕）。

中規模繰り返し地震について、発生状況のモニタリングと発生確率予測を行い(田中, 2017; 田中ら, 2018), 2017年7月末で予測期間が終了した3年確率予測の予測成績を調べた。中規模の繰り返し相似地震79系列を対象に実施し、平均対数尤度とブライアスコアの指標による結果は、指数分布モデルよりも事前分布を用いたベイズ統計対数正規分布モデ

ルの成績の方が良いことを定量的に確認した(気象庁[課題番号:7006])。

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

断層の破壊エネルギーの空間分布における階層的構造は、地震の可予測性に対して重要な原理的制約となる。北海道東北沖の繰り返し地震グループを用いて、プレート境界に存在する階層的構造の定量的把握を行った。さらに、釧路沖、釜石沖、那珂沖のプレート境界において約15年間に発生したM2-5の地震を対象として、高精度相対震源決定、震源すべりインバージョンを行った。予備的な成果として、M5級の地震ではすべり方向に伸びた領域に固有的な破壊が繰り返すものの、破壊伝播の方向性は必ずしも一定でないことがわかった。周辺では小さな地震も発生するので、破壊プロセスが階層性によって制約されていることもわかった(東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。

代表的な短期的先行現象とされる前震は、本震がおこってみるまでは、現象的には群発活動である。過去数年間開発してきた地震カタログから定量的に群発地震を検出する方法については、手法の詳細の説明と全世界的な応用までをまとめた(Nishikawa and Ide, 2017)。この手法を茨城沖の約30年の地震活動に適用することで、プレート境界に繰り返し発生する群発地震活動を客観的かつ定量的に検出することができた。多くの群発地震活動の中でも特に活発なものは1982年と2008年のM7の地震の前震活動に対応する(東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。

前震活動などを詳細に調べるために、相対震源決定、MatchedFilter法等を用いたカタログの整備・拡充を行った。2016年熊本地震発生後に展開された高密度な臨時観測点の波形データを用いて、前震から本震発生に至る過程について再度解析を行った。その結果、従来の結果に比べて、断層傾斜方向の前震域の拡大に関してより精確な様子を把握することができた。また、2016年鳥取県中部の地震(M6.5)に関して、長期間にわたる前震活動の時空間変化を明らかにした。本震発生の約2ヶ月前から、震源域周辺において、不連続な移動を起こしながら、前震活動が本震の破壊開始点へ近づいて行ったことが示された(図15)。山陰地方の断層帯の成熟度は相対的に低いため、複数の断層において前震活動が飛び飛びに発生したものと解釈される(東北大学[課題番号:1206])。

すべり方向に1.5m、すべり直交方向に0.5mの大きな岩石試料をもちいた模擬断層におけるスティック-スリップ実験において、断層ガウジが残置された条件下では、試料全面がすべる大規模な動的すべりイベント(「本震」)に先行して前震が発生することが確認され、昨年度、その中に、互いに波形が酷似したリピーター的な前震の発生が認識された。リピーター的な直前前震は、1999年イズミット地震でも報告(Bouchon et al., 2011)されており、「本震」の破壊準備過程に関する情報を与える可能性があり、本年度に精査した(辻村ら, 2017)。リピーター的な前震を含む検知された全ての前震イベントの震源決定(図16)を実施した後、広帯域弾性波センサで記録された波形の最大振幅を利用した相対的な振幅マグニチュードの推定や、P相とS相各々に対する最大相関を示すラグ・タイムを利用した相対震源決定などを実施した。最大のリピーター的な前震のクラスターでは、ランタイム全体を通じて22個の前震が確認された。それらは「本震」の直前を中心に発生しており、20個の「本震」に対して1, 2個ずつの発生であった。また、50回程度の繰り返し「本震」を経験する過程を通じて、これらリピーター的な前震の規模の系統的な変化について

ては認められなかった(図17)。その他にも、少なくとも13個のリピーター的な前震で構成されるクラスターの存在が確認された。また前震の発生環境に関する理解の一助として、ランは異なるが、ひずみ記録を精査することにより「本震」に先行するひずみの時空間変化を調べ、二次元的な破壊の進展に関する新たな知見が得られた(Yamashita et al., 2017; Fukuyama et al., in press) (立命館大学 [課題番号: 2402])。

粉体層の低速摩擦を調べるために、粉体層からワイヤーを低速で引き抜く際の摩擦抵抗を、粉体層の充填率をコントロールした上で計測した。計測した摩擦抵抗は、充填率のわずかな変化で劇的に変化することが明らかとなった(Furuta et al., 2017)。これは粉体層がせん断により固化しているために起こる現象と考え、ジャミング転移などの概念を含めた簡単なモデルによるデータ解析を進めている。また、気流や機械的振動を加えることにより流動化された粉体層の摩擦が劇的に減少することも実験的に確認した。以上の結果を総合すると、摩擦滑りが起こることにより発生する振動(地震動)が近隣の摩擦による固着を弱めるが、振動により充填率が減少(膨張)した層はわずかな滑り(せん断)により急激な固化も経験するということになる。これらの複雑な過程が関連しながら天然の断層では滑り状態などが決定されると考えられ、本実験はそれらの基礎過程に関する実験的研究と言える(東京大学地震研究所 [課題番号: 1512])。

地震活動の静穏化は、代表的な中期的先行現象と目され、実際ほとんどの大地震の前に静穏化がみつかることが報告されている(e.g., Katsumata, 2016)が、静穏化があっても大きな地震がおこらないことも多く、先行現象としての有意性は確立されていない。そこで、千島から伊豆小笠原にいたる海溝沿いの地域を網羅的に走査し、10.8年以上の静穏化が続けば、半径100kmの地域に4年間、大地震がおきやすいという予測(警報)を出すこととして、1990-2015年まで、1年更新で予測マップを試作した。警報はトータルの対象時空の24%を占め、一方予測対象であったMw7.5以上、80km以浅の地震10個のうち7個が警報域でおきた。確率利得は2.9であり、これが偶然の賜物である確率 p は0.24%となるので、長期静穏化は統計的に有意な地震の前兆であるといえる。静穏化判定の要件を加減して行ったROC解析を図18に示すが、安定した好成績をしめしているといえる。(東北大学 [課題番号: 1206], 東海大学 [課題番号: 2501])。昨年度も同様の試みをMw8.0以上の地震に対して行い、肯定的な結果をえていたが、検証に使える地震が3つしかなかった。

一方、 b 値の長期的低下傾向についても同様の調査を行った(楠城, 印刷中)。全世界で、 b 値が安定して計算できる活動度の高い地域を網羅的に走査し、地域の b 値が過去7年にわたって $-0.025/\text{年}$ よりも顕著に下っていれば、5年間の警報を出すこととした(図19)。予測対象としたM8以上の地震29個のうち55.5%が警報ONの時空で発生し、一方、地域の平均的活動度とGR則から期待されるM8の発生レートで重み付けした上で計算した警報分率は26.1%であった。確率ゲインは2.1、 p 値は0.75%であり、これも肯定的な結果となった(東海大学 [課題番号: 2501])。

熊本地震前における b 値解析では、 b 値そのものの時間変化は明瞭ではなく、将来の震源域で小さな b 値となっていた(Nanjo et al., 2016)。そこで、 b 値の小さかった領域だけに着目してナチュラリティ解析を行ったところ、地震の1年ほど前から κ 1値が臨界状態を示す0.07付近をふらつくようになっていた(東京大学地震研究所 [課題番号: 2902])。

東日本の太平洋沖で1990年以降に発生したM7.0以上の本震前の規模別頻度分布はGR則か

ら逸脱し、本震後にGR則に従う傾向にあることがわかった(弘瀬・前田, 2012)。この特徴に基づくシンプルな予測モデルを構築した。M7後半-M8前半(M7.6-8.5)の地震を予測対象とした場合、北海道東方沖及び関東東方沖~南東沖に顕著な異常が検出された(気象庁[課題番号: 7006])。

粉体のサイロ流において、出口の大きさに依存して間欠的目詰まり現象が起こることが知られており、これは間欠的に起こる様々な自然現象のシンプルなプロトタイプモデルとみなすことが出来ると考えられている。サイロ内に様々な形状の障害物を配置することにより流れ状態を制御する実験的研究を行った。その結果、流れの固化現象を効率的に下げするためには、流れの中の充填率を比較的小さく保つことが極めて重要であることが明らかとなった(Endo and Katsuragi, 2017; Endo et al., 2017)(東京大学地震研究所[課題番号: 1512])。

地震発生と潮汐との相関を表すp値について、先行研究において地震前における変化が報告されていたトンガ・ケルマディック海溝沿いのプレート境界地震の潮汐相関を追加調査し、p値を用いた地震予測の有効性は低い、M7.0以上の地震に限ればその発生時が特定の範囲の潮汐位相角の範囲内で発生している場合が有意に多いことがわかった(気象庁[課題番号: 7006])。

巨大地震直前のGNSS-TEC(電離圏全電子数)変化について、M7級の地震まで含めた解析を行い(He and Heki, 2017), Mwの大きな地震ほど異常の振幅が大きく、また、異常の先行時間が長いという傾向がますます明確になった。Mw>8.2の巨大地震では、宇宙天気がひどく荒れていて解析不可能であったNias地震以外の10個全てに前兆が現われている。それ以下の地震ではMが下るにつれ、この前兆が確認できないものの割合が増える。また、2011年東北地震に際しては、日本の磁気共役点となるオーストラリア北部でも、同様のTEC異常が捉えられていることがわかり(図20)、この異常が「電気仕掛け」であることが確認された(日置, 2018)。また、観測された程度の電離圏異常を起こすためには、地震破壊域程度の範囲にわたって地表に0.2V/m程度の電界異常がおきればよいことを理論的に示した(Kelley et al., 2017)(東海大学[課題番号: 2501])。

2001-2010年の気象庁柿岡観測所のULF帯地磁気データから、ノイズの少ない深夜帯だけに着目してローカル(鹿屋観測所ではみられない異常ということ)な異常を網羅的に検出し、周辺100km以内でおきたM4以上の地震52個と比較した(Han et al., 2017)。異常がみられてから8-9日後の間に地震がおきると仮定したときに最も有意性が高く、警報分率21%で、45%の予知率を達成でき、p値はほぼゼロとなる。異常定義の閾値を変えてROC解析(図21)をしても、全体的に高い有意性を示す結果がえられている(東海大学[課題番号: 2501])。

見通し外VHF伝播異常に関しては、観測の最大のノイズであるスプラディックE層の影響を電離圏TECによる推定で判定することを試みた。熊本地震発生日の4月14日朝に明瞭な異常電波が観測されたが、それをTECでみたところその時にはEスポの発生は見られないことが確認できた。さらにこの異常電波の到来方向を調べたところ、通常南東から来ている宮崎放送局からのFM電波がこのときはほぼ真東にある震央の方向を向いていることも分かった(東海大学[課題番号: 2501])。

見通し内VHF伝播異常(谷川ら, 2017)に関しては、観測点の増設と、異常判定法の改良

を行った。従来のレベル変動法では基礎データとして過去数年のデータが必要であったが、短期間の観測から電波伝搬異常の検出を可能にする方法として、1ヶ月間の観測データの平均値を求めることで受信強度データの変動分を算出し、その積分値がある閾値を超えた場合を伝搬異常と判定する方法(変動値積分法)を開発し、そのための観測データ処理用プログラムを作成した。この判定方法を用いた伝搬異常検出と地震発生に関連性を統計的に評価したところ、従来法(レベル変動検出法)の統計成績(Motojima and Ogura, 2017; 小倉・本島, 2017)を上回る結果となった(東海大学[課題番号: 2501])。

VLF帯パルス電磁波の観測点を増設し、中日本に5点とすることで、到着時間差による波源位置標定が改善された。観測点近傍で発生した最大の地震である2017年6月25日の長野県南部M5.6(深さ7km)の前5日と後1日だけを解析して、6月23日にだけパルスが震央付近から到達していることが判明した(図22)。この日に中部日本で雷活動はなかった(東海大学[課題番号: 2501])。

大気中ラドン濃度変動に関して、全国25の放射線管理施設からデータを得るネットワークができており、順次解析を進めている。今年度は、鳥取大学と信州大学での観測データに地震に先行するラドン濃度の増加を見いだした(図23, 図24)(東北大学[課題番号: 1207])。

地震の前兆ではないかとマスコミ等で話題にされることの多い、深海魚の出現について、全国紙の地方版や地方紙、水族館や博物館、過去の学術文献等の情報から、気象庁一元化震源カタログのある1923年以降で最初の深海魚出現日から3.11までの期間(1928年11月26日-2011年3月11日)のカタログを作成した。日本周辺のエリアを日本海側(九州-北海道)、東日本太平洋側(北海道-千葉)、神奈川・伊豆-東海-南海-鹿児島、南西諸島(奄美大島-石垣島)、小笠原周辺の5つのエリアに分け、深海魚出現日から30日後までに同一エリア内で地震が発生したかを調べた(織原ら2017a, b)。その結果、深海魚出現イベント総数に対する同一エリア内のM6以上の地震を伴った深海魚出現イベント数の割合は、1992年1月1日から2011年3月11日までが8.0%(=8/101)、1928年11月26日から2011年3月11日まで3.6%(=13/366)であった。(東海大学[課題番号: 2901])。

純粋に経験則だけに基づいて行う大地震の予測がどの程度のものなのかをみるために、M>6もしくは7に対して統計的に有意であることが示されている様々な予想手法の成績(予知率、適中率、警報分率、ゲイン)を文献情報から逆算してまとめた(中谷, 印刷中)。ETASによるトリガリング作用(これは大地震の準備過程進行の顕れという意味での物理的な前兆ではない)を考慮するだけで、数百倍のゲインをもつ短期的な予測ができ、さらにETASでは説明できない特徴(多分、物理的な前兆だろう)に目をつけた方法では、ゲイン1万倍を超えるような予測手法(Lippiello et al., 2012)も報告されている。また、複数の先行現象を組み合わせた方法でもやはり1万倍程度のゲインが可能である(Ogata, 2017)。日本のM7地震の平均発生ペースからすると、ゲイン1万倍の予報は、1日あたりの地震発生確率として数%という強い予報である(東海大学[課題番号: 2501])。

これまでの課題と今後の展望

先行現象の発生とその後の地震の発生確率の相関を統計的に評価するという目標が様々な現象に対して達成された。また、大地震直前の TEC 変動に関してはそのスケーリングが確かなものとなり、電離圏の変動の様子から固体側でいかなる電気現象が起きているか、かなり納得のいく推察がなされた。今後、地震発生の物理シナリオとこのような現象の関係を明らかにしていく必要がある。特に多方面からの観測的サポートが得られはじめた階層アスペリティ仮説との関係について考えていく必要があるだろう。地震活動の高度な解析によって、断層面の不均質が描きだされるようになっているので、実証的な解明が進んでいきそうである。滑りのモニタリングの技術は格段の進歩をとげ、今後、地震活動の予測に貢献するものであるか検討すべきである。また、現状、強度の強い予測が出うるものは、圧倒的に群発活動(あとからみれば前震)を用いたものであり、この方面では、前震の事前識別技術の追求とともに、予測情報の社会への影響が具体的に検討される必要があろう。また、直接の実用価値がみいだせそうにもない、中規模地震を対象とした低ゲインの短期予測をもたらす前兆の有意性も確立した。ゲインは低くても、正味の異常出現率はそれなりに高いので、やはり地震発生のシナリオにおいて何らかのはっきりした役割をもっているはずである。さらに、10 年程度の中期前兆でも統計的有意性が示されたものが複数でたことは重要である。中期的な準備過程の存在を示唆するとともに、先行期間が長いものは、ゲインが低くても、実用的価値が考えうる。

成果リスト

- Aizawa K., W. Kanda, Y. Ogawa, A. Yokoo, and M. Iguchi, 2009, Shallow resistivity changes of Sakurajima volcano from magnetotelluric continuous observation, CA 研究会2010 年論文集, 80.
- Abe, S., 2017, In-situ stress in the close vicinity of source fault in South African deep gold mine, 東北大学理学研究科, 修士論文, pp.158.
- Annoura, S., T. Hashimoto, N. Kamaya, and A. Katsumata, 2017, Shallow episodic tremor near the Nankai trough axis off southeast Mie prefecture, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 44.
- Araki., T., Ochi, T., Matsumoto, N., and Akaho, S., 2017, Simultaneous estimation of spatio-temporal distribution and duration of slow slip event by switching model, *Journal of Signal Processing*, 21, 297-308.
- Cho, I., and Iwata, T., 2017, The relationship between normalized horizontal-to-vertical spectral ratios (HVSRS) of microtremors and the F distribution, *Exploration Geophysics*, EG17110, doi:10.1071/EG17110.
- Endo, K. and H. Katsuragi, 2017, Statistical properties of gravity-driven granular discharge flow under the influence of an obstacle, *EPJ Web of Conferences* 140, 03004.
- Endo, K., K. Anki Reddy, and H. Katsuragi, 2017, Obstacle-shape effect in a two-dimensional granular silo flow field, *Phys. Rev. Fluids* 2, 094302.
- 藤井さとみ, 新井友里愛, 安岡由美, 飯本武志, 床次眞司, Mirosław Janik, 長濱裕幸,

- 武藤 潤, 向 高弘, 2017, 活性炭型ラドン検出器による屋内ラドン濃度測定の検討. 第67回日本薬学会近畿支部大会, 2017年10月14日, 兵庫医療大学.
- Fukuyama, E., K. Tsuchida, H. Kawakata, F. Yamashita, and S. Xu, 2018, Spatiotemporal complexity of 2-D rupture nucleation process observed by direct monitoring during large-scale biaxial rock friction experiments, *Tectonophys.*, In press.
- 福山英一, 土田琴世, 川方裕則, 山下太, 溝口一生, 徐世慶, 2017, 2次元地震破壊伝播の実験室における直接観察, 日本地震学会 2017 年度秋季大会, S08-28.
- Furuta, T., K. Katou, S. Itoh, K. Tachibana, S. Ishikawa, and H. Katsuragi, 2017, Geometry-dependent constitutive law for granular slow frictional drag, *Int. J. Mod. Phys. B* 31, 1742006.
- Genzano, N. C. Filizzola, K. Hattori, M. Lisi, R. Paciello, N. Pergola, and V. Tramutoli, 2017, Robust Satellite Techniques to support the short-term assessment of the seismic hazard in Japan: an analysis on 11 years (2005-2015) of MTSAT TIR observations, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, Oral, EGU2017-16056, 2017/4/23-28.
- Goto, M., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Muto, J., Omori, Y., Ihara, H. and Mukai, T., 2017, Anomalous changes in atmospheric radon concentration before and after the 2011 northern Wakayama Earthquake (Mj 5.5). *Radiation Protection Dosimetry*, 174, 412-418.
- Guo, Y., Zhuang J., Hirata N., Zhou S., 2017, Heterogeneity of direct aftershock productivity of the main shock rupture. *Journal of Geophysical Res., Solid Earth*, 122, doi:10.1002/2017JB014064.
- Han, P., Hattori, K., Zhuang, J., Chen, C-H., Liu, J-Y., and Yoshida, S., 2017, Evaluation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kakioka, Japan by using Molchan's error diagram, *Geophys. J. Int.*, vol.208, Issue 1, 482-490, doi: 10.1093/gji/ggw404.
- Han, P., K. Hattori, Q. Huang, 2017, On the seismo-magnetic phenomena associated with the 2011 Tohoku earth- quake (Mw 9.0): the possible coupling of multiple pre-earthquake phenomena, The 13th China Interna- tional Geo-electromagnetic Workshop, Wuhan, China, 2017/11/10-11/12.
- Han, P., J. Zhuang, K. Hattori, 2017, Assessing the potential earthquake precursory information in ULF magnetic data recorded in Kanto, Japan during 2000-2010, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 幕張メッセ, 千葉県 千葉市, MIS04-04, 2017/5/20-25
- Han, P., J. Zhuang, K. Hattori, Y. Ogata, 2017, Earthquake modeling incorporating non-seismic data, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 幕張メッセ, 千葉県千葉市, SSS05-03, 2017/5/20-25.
- 韓鵬, 服部克巳, 山口拓人, 廣岡伸治, 吉野千恵, 2017, 2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0)に関連する地磁気日変化異常の時空間的特徴, 電気学会論文誌A(基礎・材料・

- 共通部門誌), vol.137, no.2, 119-127, doi: 10.1541/ieejfms.137.119.
- Hattori, K., 2017, ULF magnetic signals as the potential earthquake precursory information in Japan, 中国地球科学連合学術年会, Beijing International Convention Center, Beijing, China, 2017/10/15-10/18. (招待講演).
- Hattori, K. and P. Han, 2017, ULF magnetic signals as the potential earthquake precursory information and assessment for the practical forecast in Japan, 日本地震予知学会 第4回学術講演会, 電気通信大学, 調布市, 東京都, 2017/12/25-12/26.
- Hattori, K. and P. Han, 2017, Geomagnetic Diurnal Variations Analysis in Space and Time Associated with the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0), EGU General Assembly 2017, Vienna, Austria, EGU2017-12314, 2017/4/23-28.
- Hattori, K., P. Han, S. Hirooka, M. Yagmur, Chie Yoshino, T. Kobari, A. Honma, and J.Y. Liu, 2017, Characteristics of 2D and 3D structures of Ionospheric anomalies preceding the large earthquake, 32nd URSI2017GASS, the Montreal convention center, Montreal, Canada, GEH3-1, 2017/8/19-8/26. (招待講演)
- Hattori, K. M. Yagmur, S. Hirooka, and J.Y. Liu, 2017, Characteristics of Ionospheric Electron Distribution for large Earthquakes around Japan, IAG-IASPEI2017, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, S11-1-03, 2017/7/30-8/4. (招待講演)
- 服部克巳, 韓鵬, 廣岡伸司, Yagmur Mustafa, 吉野千恵, 小張剛照, 劉正彦, 2017, 2D and 3D structures of Ionospheric anomalies preceding the large earthquake, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 幕張メッセ, 千葉県千葉市, MIS12-03, 2017/5/20-25.
- He, L. and K. Heki, 2017, Ionospheric anomalies immediately before Mw 7.0-8.0 earthquakes, J. Geophys. Res. Space Phys., 122, 8659-8678, doi:10.1002/2017JA024012.
- Heidarzadeh, M., O. Necmioglu, T. Ishibe, and A.C. Yalciner, 2017, Bodrum-Kos (Turkey-Greece) Mw 6.6 earthquake and tsunami of 20 July 2017: a test for the Mediterranean tsunami warning system, Geoscience Letters, 4:31, doi:10.1186/s40562-017-0097-0.
- Heidarzadeh, M., T. Harada, K. Satake, T. Ishibe and T. Takagawa, 2017, Tsunamis from strike-slip earthquakes in the Wharton Basin, northeast Indian Ocean: March 2016 Mw 7.8 event and its relationship with the April 2012 Mw 8.6 event, Geophys. J. Int., doi:10.1093/gji/ggx395.
- Heki, K., 2017, Pre-, co-, and postseismic ionospheric disturbances, Asia Oceania Geoscience Soc., SunTec Convention Center, Singapore, Aug. 7-11, 2017.
- 日置幸介, 2016年熊本地震直前に現れた非移動性MSTID, SGEPSS秋季講演会, 京都大学宇治キャンパス, 京都, Oct.16-19, 2017. (招待講演)
- 日置幸介, 2018, 地震直前の電離圏変化, パリティ, Vol.33, No.2, 52-56.

- Heki, K., L. He, and I. N. Muafiry, 2017, Preseismic ionospheric anomalies: Current overview and perspective, 2nd Geo-lab and RISH Joint Workshop on GNSS and SAR Technologies for Atmospheric Sensing, Uji, 7 Mar., 2017. (招待講演)
- Heki, K. and L. He, 2017, TEC anomalies preceding large earthquakes: Review and perspective, JPGU 2017 Assembly, Makuhari Messe, Chiba, May 20-25, 2017. (招待講演)
- Heki, K. and L. He, 2017, TEC anomalies immediately before large earthquakes: Review and perspective, IAG- IASPEI 2017 Joint Scientific Assembly, Kobe International Conference Center, Kobe, Hyogo, Jul.31- Aug.4, 2017. (招待講演)
- Heki, K. and L. He, 2017, Feasibility study of short-term earthquake prediction using ionospheric anomalies immediately before large earthquakes, AGU Fall Meeting, Dec. 11-15, New Orleans. (招待講演)
- 日置幸介, 賀黎明, 2017, 大地震直前に現れる電離圏異常の物理モデル, 日本測地学会秋季講演会, 瑞浪市 総合文化センター, 岐阜, Oct.4-6, 2017.
- 弘瀬冬樹・前田憲二, 2017, 本震前に現れるG-R則からの逸脱と, その特徴に基づいた地震予測モデルの提案. 地震, 70, 21-40.
- Huang, Q., K. Hu, K. Hattori, 2017, Probability tomography and wavelet analysis of self-potential data, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 幕張メッセ, 千葉県千葉市, MIS04-03, 2017/5/20-25.
- Huang, Q., K. Hu, K. Hattori, 2017, Probability tomography and wavelet analysis of self-potential data and possible application in landslide monitoring, IAG- IASPEI2017, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, S12-2-03, 2017/7/30-8/4. (招待講演)
- Ishibe, T., Y. Ogata, H. Tsuruoka, K. Satake, 2017, Testing the Coulomb stress triggering hypothesis for three recent megathrust earthquakes, Geoscience Letters, 4:5, doi:10.1186/s40562-017-0070-y.
- 石田亮壮, 2018, 南アフリカ金鉱山地域 M2~5.5 級の地震発生域でのコア変形法による応力測定, 立命館大学理工学研究科修士論文.
- Iwata, D., Nagahama, H., Muto J. and Yasuoka, Y., 2017, Change point in log-periodic power law time series of atmospheric radon concentration. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, May 20-25th.
- 神代悠希, 石原万己, 藤井さとみ, 安岡由美, 細田正洋, 岩岡和輝, 床次眞司, Mirosław Janik, 武藤 潤, 長濱裕幸, 向 高弘, 2017, バブリング法による水中ラドン濃度測定について, Proceeding of the 18th Workshop on Environmental Radioactivity, 333-33, 高エネルギー加速器研究機構(KEK).
- Kawamura, H., Y. Ueda, S. Kakui, S. Morimoto and T. Yamamoto, 2017, Statistical properties of the one-dimensional Burridge-Knopoff model obeying the rate and state dependent friction law, Phys. Rev. E 95, 042122.
- Kelley, M. C., W. E. Swartz, and K. Heki, 2017, Apparent ionospheric total electron content variations prior to major earthquakes due to electric fields created

- by tectonic stresses, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 122, 6689-6695, doi:10.1002/2016JA023601.
- 気象研究所, 2017a, 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, 98, 313-316.
- 気象研究所, 2017b, 海溝と直交する方向の全国の基線長変化. 地震予知連絡会会報, 98, 24-28.
- 北川有一・板場智史・武田直人・松本則夫・落唯史・木口努, 2017, 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2016年11月~2017年4月), 地震予知連絡会会報, 98, 325-338.
- 北川有一・板場智史・武田直人・松本則夫・落唯史・木口努, 2018, 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2017年5月~2017年10月), 2018, 地震予知連絡会会報, 99, 印刷中.
- 木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努・武田直人, 2017, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果 (2016年11月~2017年4月)(55), 地震予知連絡会会報, 98, 275-281.
- 木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努・武田直人, 2018, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2017年5月~2017年10月)(56), 地震予知連絡会会報, 99, 印刷中.
- Kobayashi, A., 2017, Objective detection of long-term slow slip events along the Nankai Trough using GNSS data (1996-2016). *Earth, Planets and Space*, 69, 171.
- 小林孝央, 本島邦行, 2018, 任意座標におけるVTEC推定法, 日本大気電気学会, 新宿区, 2018年1月6日.
- Liu, J.Y, C.H. Chen, T.Y. Wu, H.C. Chen, K. Hattori, T. Bleier, K. Kappler, I.C. Yang, Y. Xia, W. Chen, Z. Liu, 2017, Co-seismic signatures in magnetometer, geophone, and infrasound data during the Meinong Earthquake, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol.28, No. 5, pp.683-692, doi: 10.3319/TAO.2017.03.05.01.
- Liu, J.Y., K. Hattori, and TIGER (Taiwan Ionospheric Group for Education and Research), 2017, Measuring the Seismo-generated Electric Field in the Ionosphere before Large Earthquakes, 32nd URSI2017GASS, the Montreal convention center, Montreal, Canada, GEH3-2, 2017/8/19-8/26. (招待講演)
- 前田憲二・弘瀬冬樹, 2017, 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: 最近の活動事例による検証(3), 地震予知連絡会会報, 98, 465-469.
- Maeda, S., T. Matsuzawa, S. Toda, K. Yoshida and H. Katao, 2018, Complex microseismic activity and depth-dependent stress field changes in Wakayama, southwestern Japan, *Earth, Planets and Space*, 70:21, doi:10.1186/s40623-018-0788-6.
- Marsan, D., M. Bouchon, B. Gardonio, H. Perfettini, A. Socquet, and B. Enescu, 2017, Change in seismicity along the Japan trench, 1990-2011, and its relationship with seismic coupling, *J. Geophys. Res., Solid Earth*, 122, 4645-4659, doi:10.1002/2016JB013715.

- Matsumoto, N. and Shigematsu, N., 2018, In-situ permeability of fault zones estimated by hydraulic tests and continuous groundwater-pressure observations, *Earth, Planets Space*, 70, 13, doi:10.1186/s40623-017-0765-5.
- Moyer, P.A., M.S. Boettcher, W.L. Ellsworth, H. Ogasawara, A. Cichowicz, D. Birch, and G. van Aswegen, 2017, Call for models – a test case for the source inversion validation: the 2014 ML 5.5 Orkney, South Africa, earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, 88, doi:10.1785/0220160218
- Motojima K. and Y. Ogura, 2017, Statistical consideration of relationship between occurrences of earthquake and fluctuations in the radio wave propagation, *International Workshop on Earthquake Preparation Process 2017*, Chiba, May 26–27, 2017.
- Murakami, T., S. Yarimitsu, N. Sakai, K. Nakashima, T. Yamaguchi, Y. Sawae, A. Suzuki, 2017, Superior lubrication mechanism in poly (vinyl alcohol) hybrid gel as artificial cartilage, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 231, 1160–1170.
- 長尾年恭・中谷正生, 2017, 地震予知が当たっているとは?, 日本地震予知学会, 調布市, 2017年12月25–26日.
- 中谷正生, 2017, 経験則による大地震の確率予測-相場と意義, 日本地震学会秋季大会, S21-06, 鹿児島, 2017年10月26日.(招待講演)
- 中谷正生, 経験則から期待される大地震発生の確率:相場のレビュー, 2018, 第217回地震予知連絡会会報, 第99巻, 印刷中.
- 中谷正生, 経験則から期待される大地震発生の確率:相場のレビュー, 2017, 第217回地震予知連絡会重点検討課題「予測実験の試行」, 東京, 2017年11月22日.
- Nanjo, K. Z., A. Yoshida, 2017, A systematic investigation into b values prior to coming large earthquakes (MR42A-02), 2017 AGU Fall Meeting, 2017 年 12 月 11–15 日, New Orleans (米国).
- 楠城一嘉, 吉田明夫, 2017, 南海トラフ沿いのフィリピン海スラブ内地震活動のb値の時間変化, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*, SSS14-P05, 2017 年 5 月 20–24 日, 幕張メッセ.
- 楠城一嘉, 2018, b値にもとづく全地球規模の大地震発生予測のモデル, 2018, 第217回地震予知連絡会, 地震予知連絡会会報, 第99巻, 印刷中.
- Nishikawa, T., and S. Ide, 2017, Detection of earthquake swarms at subduction zones globally: Insights into tectonic controls on swarm activity, *J. Geophys. Res., Solid Earth*, 122(7), 5325–5343, doi: 10.1002/2017JB014188, 2017.
- 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, 2017, 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(2016年11月~2017年4月), 地震予知連絡会会報, 98, 263–274.
- Ogasawara, H., R.J. Durrheim, Y. Yabe, T. Ito, G. van Aswegen, M. Grobbelaar, A. Funato, A. Ishida, H. Jnr, Ogasawara, S. Mngadi, M.S.D. Manzi, Z. Martin, A. Ward, P. Moyer, M. Boettcher, P. Dight, W. Ellsworth, B. Liebenberg, N.

- Wechsler, T. Onstott, N. Berset, and the DSeis Team, 2017, Drilling into seismogenic zones of M2.0-M5.5 earthquakes from deep South African gold mines (DSeis): establishment of research sites, Proc. Afrirock Symposium 2017 (ISRM), 30 September - 6 October 2017, Capetown, 237-248.
- 小笠原宏幸, 2018, 反射法地震探査データを使った2014年オークニーM5.5地震の速度構造および断層構造解析, 立命館大学理工学研究科修士論文, pp. 52.
- 小倉佑哉, 本島邦行, 2017, Molchan's Error Diagram による見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震の関連性解析, 日本地震予知学会, 調布市, 2017年12月25-26日.
- 大澤祐輝, 本島邦行, 2017, モニタリングポストにおける空間線量異常と地震の統計的関連解析, 日本地震予知学会, 調布市, 2017年12月25日.
- Opris, A., B. Enescu, Y. Yagi and J. Zhuang, 2018, Triggering and decay characteristics of dynamically activated seismicity in Southwest Japan, *Geophys. J. Int.*, 212(2), 1010-1021, doi:10.1093/gji/ggx456.
- 織原義明, 2017, 海のなんでだろう, 第90回 深海魚の出現と地震との関係, 月刊磯・投げ情報, 25(11), 82.
- 織原義明・鴨川仁, 2017, 熊本市が公開する地下水位データを用いた2016年熊本地震の先行的变化の検証, 地震2輯, 70, 147-152.
- 織原義明・鴨川仁・野田洋一・長尾年恭, 2017a, 日本周辺における深海魚の目撃と地震との関係, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 予稿集, MIS12-01.
- 織原義明・鴨川仁・野田洋一・長尾年恭, 2017b, 日本周辺における深海魚の目撃と地震との関係に関する考察, 日本地震学会講演予稿集2017年度秋季大会, S14-02.
- Saade, M., J.P. Montagner, P. Roux, K. Shiomi, B. Enescu and F. Brenguier, 2017, Monitoring of seismic anisotropy at the time of the 2008 Iwate-Miyagi (Japan) earthquake, *Geophys. J. Int.*, 211(1), 483-497, doi:10.1093/gji/ggx321.
- 田中昌之, 2017, 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率(2017). 地震予知連絡会会報, 98, 437-442.
- 田中昌之, 岡田正実, 内田直希, 2018, 繰り返し回数の少ない繰り返し地震系列に対する長期的地震発生確率予測の成績と検証, 地震, 70, 195-213.
- Tanaka, H. and T. Hatano, 2017, Statistical properties of Olami-Feder-Christensen model on Barabasi-Albert scale-free network, *Eur. Phys. J. B* 90, 248.
- Tanaka, A., Minami, N., Yasuoka, Y., Iimoto, T., Omori, Y., Nagahama, H., Muto, J., Mukai, T., 2017, Accurate measurement of indoor radon concentration using a low-effective volume radon monitor. *Radiation Protection Dosimetry*, 177, 324-330.
- 谷川廣祐, 本島邦行, 羽賀望, 2017, 見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震及び地表面平均風速の統計的関連性, *J. of Atmos. Electr.*, Vol. 37, No. 1, pp.11-24.
- 辻村優志, 川方裕則, 福山英一, 平野史朗, 山下太, 徐世慶, 溝口一生, 滝沢茂, 2017, 大型岩石試料のスティック・スリップ試験中に発生した繰り返し地震的活動について, 日本地震学会2017年度秋季大会, S08-26.
- Tsuruoka, H., 2017a, CSEP Japan results of 3-month and 1-year testing class, SCEC

- Annual Meeting 2017, PalmSprings.
- Tsuruoka, H., 2017b, CSEP-Japan results of 1-day testing class and development of Kanto 3D earthquake forecast model, SCEC Annual Meeting 2017, PalmSprings.
- 露木貴裕, 長谷川浩, 近澤心, 木村久夫, 棚田理絵, 沼野あかね, 2017, 新しい地震活動等総合監視システム(EPOS)における地殻変動監視手法の改善, 験震時報(論文), 81.
- Voosen, P., 2017, Deep in a South African gold mine, scientists drill for the heart of an earthquake, Science, doi:10.1126/science.aan6905.
- Vuan, A., M. Sgan, G. Amati and A. Kato, 2018, Improving the Detection of Low-Magnitude Seismicity Preceding the Mw=6.3 L' Aquila Earthquake: Development of a Scalable Code Based on the Cross-Correlation of Template Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 108, 471-480, doi: 10.1785/0120170106.
- Yamaguchi, T., H. Ohtsubo, Y. Sawae, 2018, Critical Scaling and Prediction of Snap-Through Buckling. In: van Meurs P., Kimura M., Notsu H. (eds) Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications II. CoMFoS 2016. Mathematics for Industry, 30, 51-57 Springer, Singapore.
- Yamashita, F., E. Fukuyama, S. Xu, H. Kawakata, K. Mizoguchi, and S. Takizawa, 2017, Two types of foreshock activities observed on meter-scale laboratory faults: Slow-slip-driven and cascade-up, AGU Fall Meeting 2017, S34B-07.
- 吉井未来, 石原万己, 南のどか, 安岡由美, 床次眞司, 長濱裕幸, 向高弘, 2018, ラドン濃度測定における管理モニタの校正. 第19回「環境放射能」研究会, 2018年3月13日, 高エネルギー加速器研究機構(KEK).

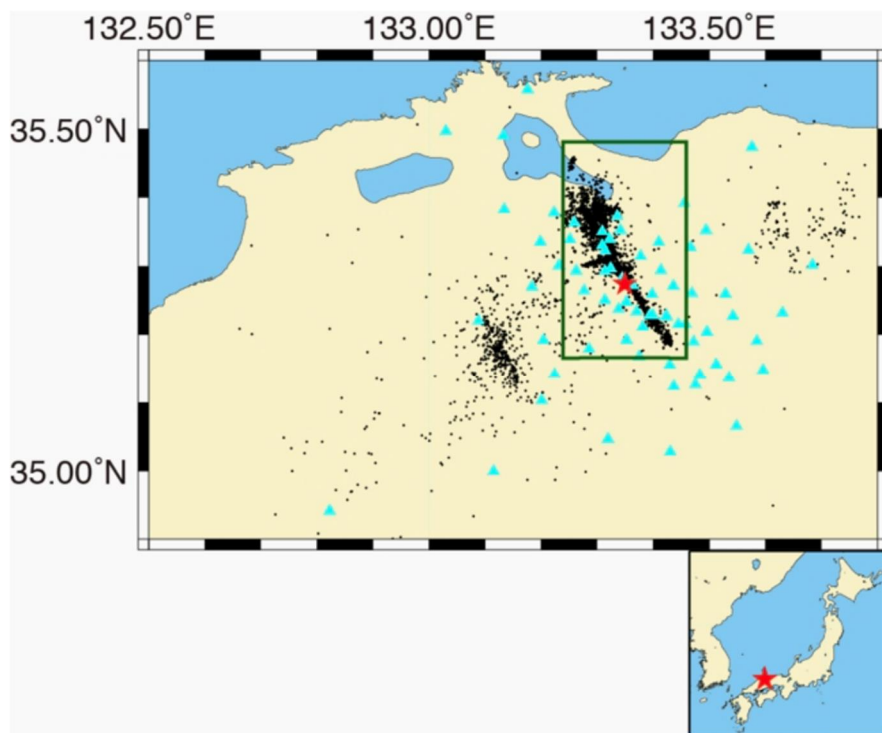


図1. 応力空間パターン推定手法を適用した2000年鳥取県西部地震の余震データとその解析領域(深緑の四角: 東西20km x 南北35km) (東北大学[課題番号: 1206])
赤星は本震震央を, 水色三角は稠密観測による臨時観測点をそれぞれ表す。

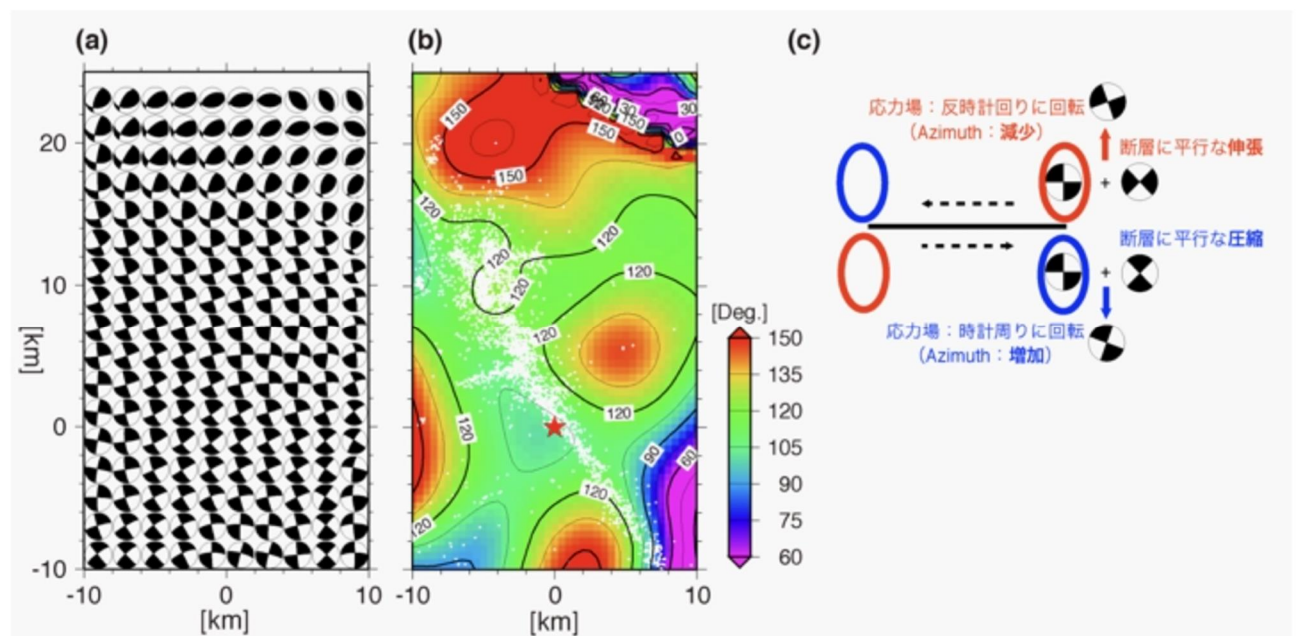


図2. 2000年鳥取県西部地震の余震域に対する推定結果 (東北大学[課題番号: 1206])
推定された(a)主応力軸の向き(震源球を用いて表現)および(b)最大主応力軸の方位角(北から時計回り)それぞれの空間パターン。(c)左横ずれ断層において期待される応力場の回転。圧縮/伸張が生じる領域で最大主応力軸がそれぞれ時計/反時計回りに変化する。

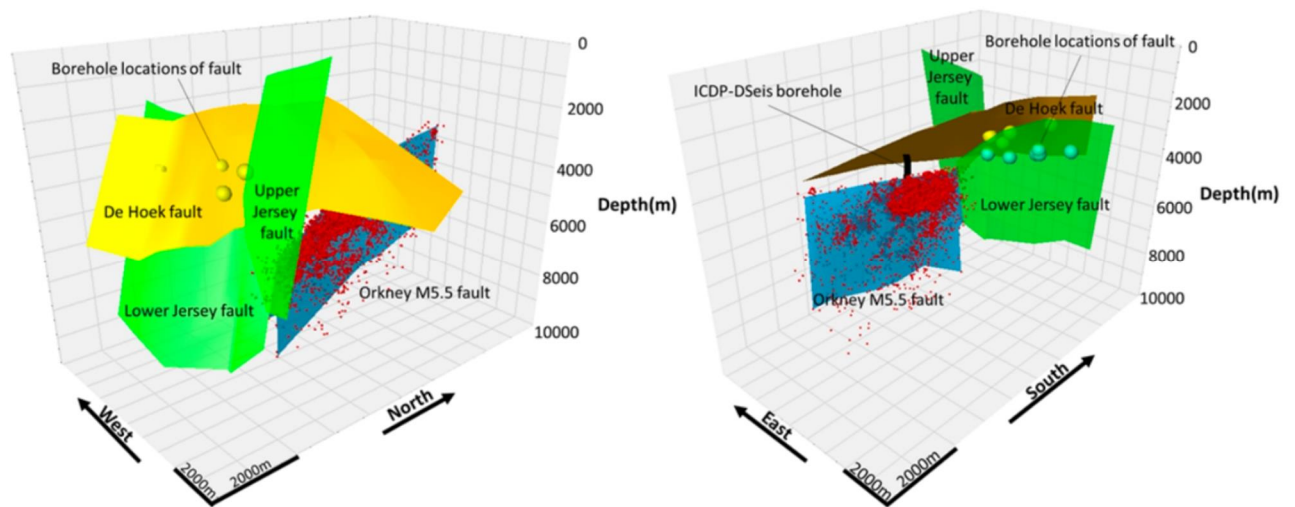


図3. 地下2-3kmの採掘レベルで確認されている正断層, M5.5断層およびDSeis科学掘削との位置関係(小笠原, 2018) (立命館大学 [課題番号: 2401])

反射法探査データの再解析で, M5.5地震に対応する断層帯が, 採掘レベルよりも下に見つかった。余震活動の南限は, 採掘レベルで確認されている正断層の下方延長とほぼ一致した。黄色と青の大きめの球: 地表からの探査掘削と正断層との交差点。右図のほぼ中央の黒の短い太線: ICDP DSeis計画の817m孔。

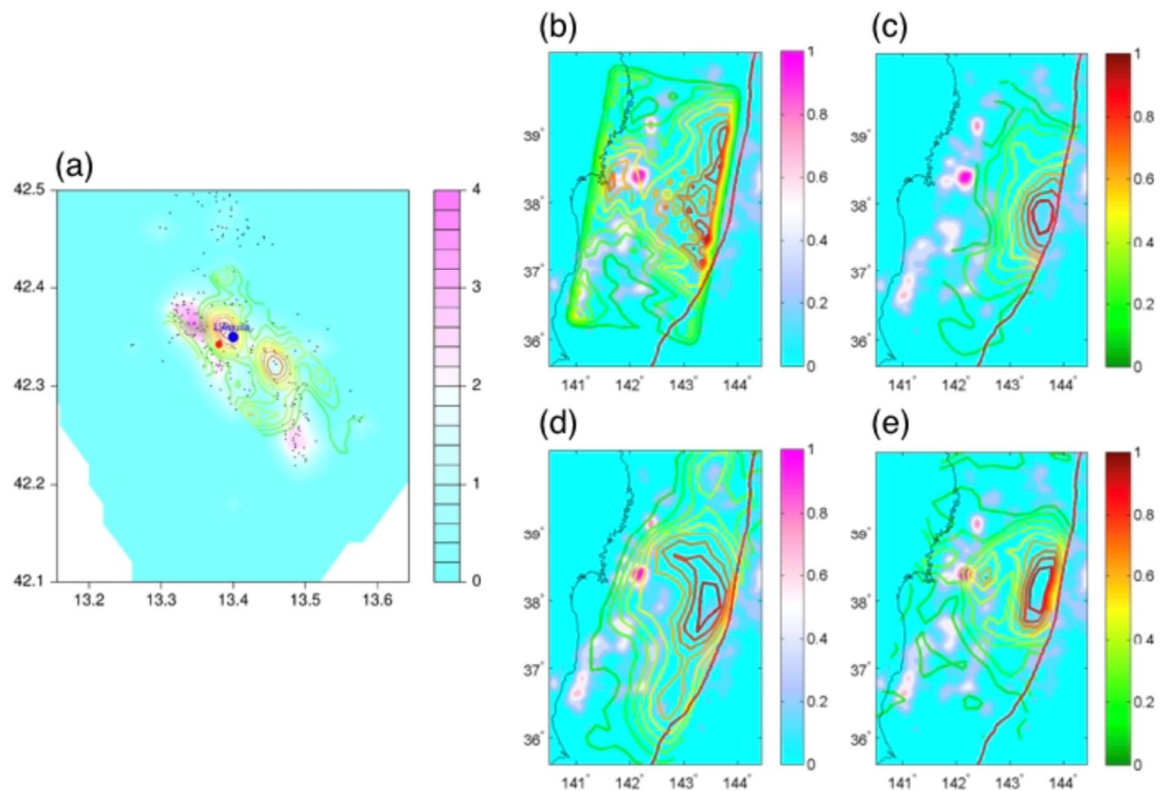


図4. 有限断層ETASモデルによって求められた相対的余震生産性の分布（東北大学〔課題番号：1206〕）

(a) イタリア, ラクイラ地震, (b-e) 東北地方太平洋沖地震(震源断層モデルは, それぞれ (b) Ide et al. (2011), (c) Yagi and Fukahata (2011), (d) Wei and Sladen (2011), (e) Hayes (2011))。

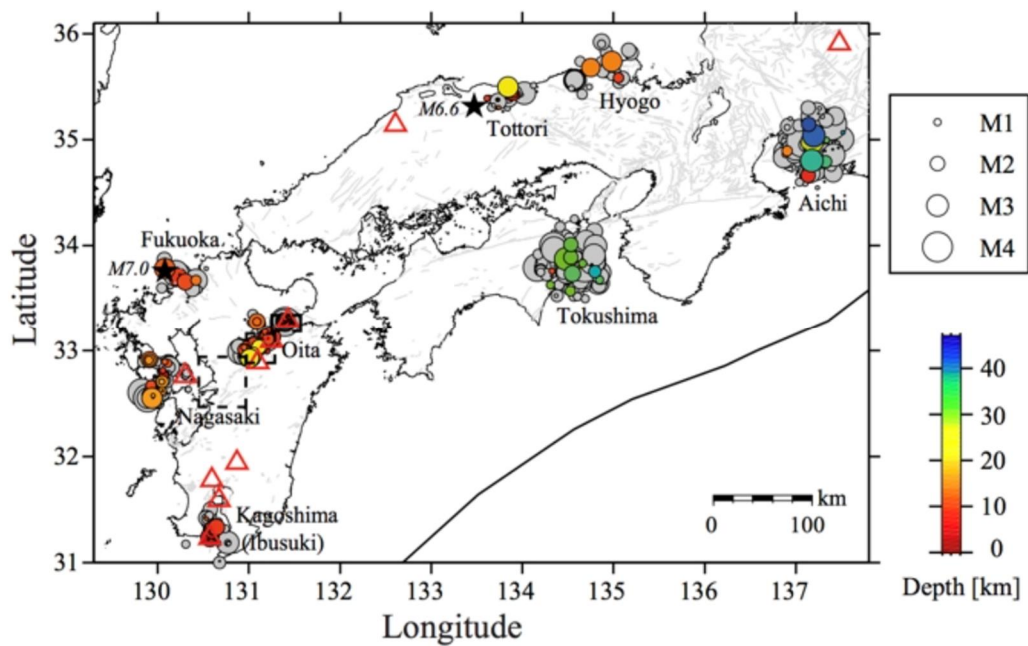


図5. 2011年東北地方太平洋沖地震によって動的誘発地震活動が観測された地域 (Opris et al., 2018) (東北大学 [課題番号: 1206])

灰色の円は最初に誘発地震が検出された地域から半径30km以内の気象庁一元化震源。期間は東北沖地震の前後60日。色付きの円は最初の1週間。黒星印は2000年鳥取県西部地震, 2005年福岡県西方沖地震の震央を示す。九州の破線のボックスは熊本地震の3つの余震域。赤三角は活火山を示す。

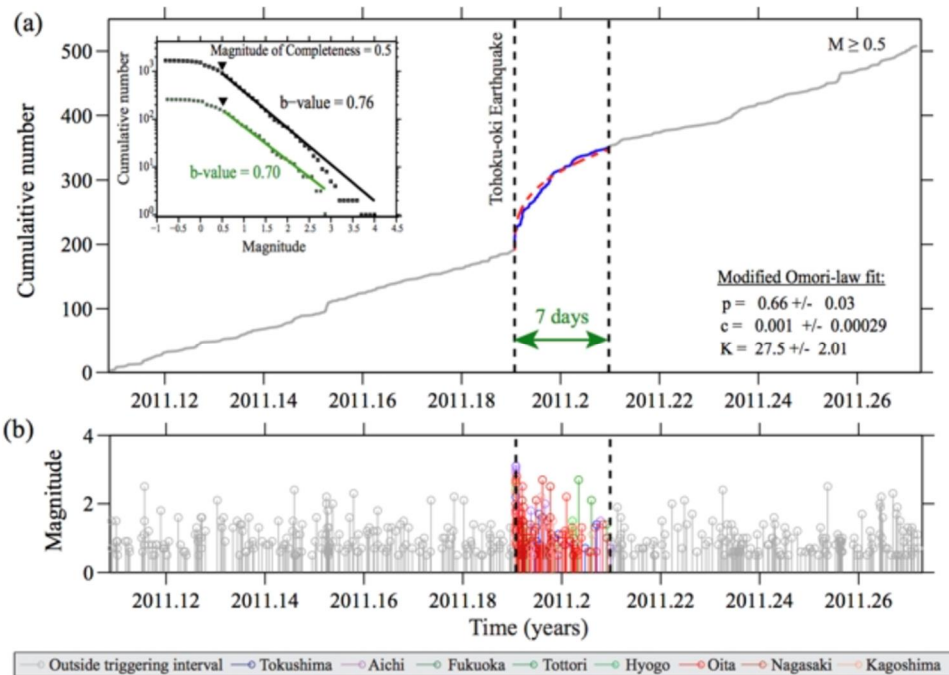


図6. 遠地誘発地震活動がみられた地点での東北地方太平洋沖地震前後の地震活動の時系列(Opris et al., 2018) (東北大学 [課題番号: 1206])

(a) すべての地点をスタックした地震活動積算曲線。東北沖地震後の7日間の活動は青線で示す。赤破線は大森-宇津則による理論曲線。左上は前期間のM-頻度分布。(b) 同じ期間のMTダイアグラム。東北沖地震後のステムプロットの色は地域毎に変えている。

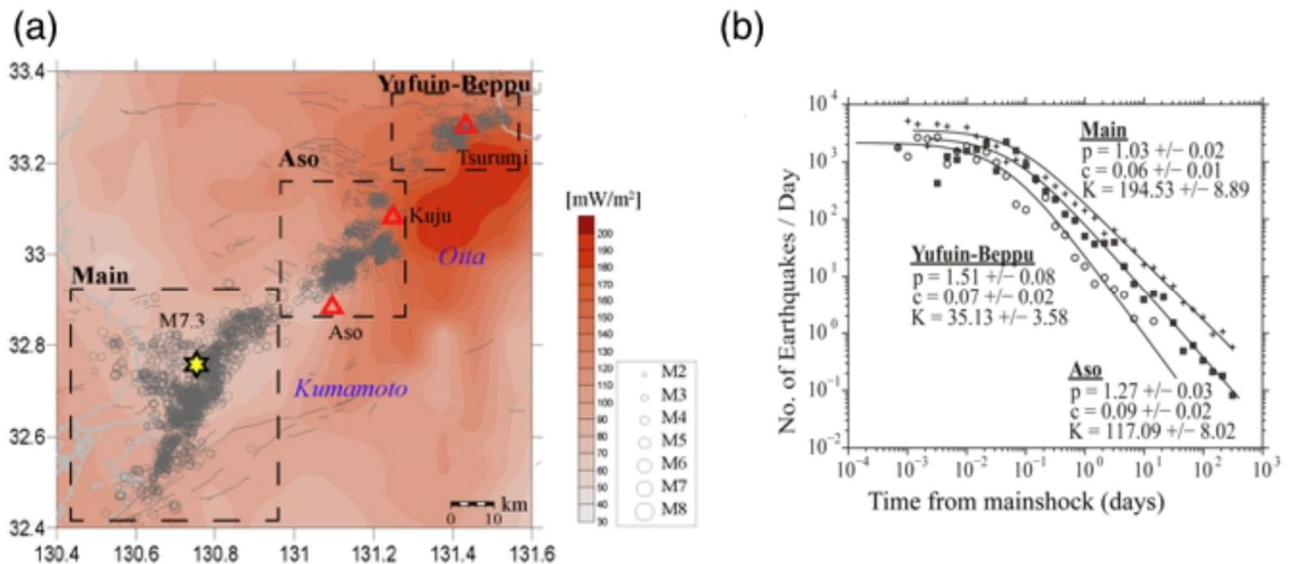


図7. 2016年熊本地震の3つの余震活動域と地殻熱流量, 余震減衰p値との関係(Opris et al., 2018) (東北大学 [課題番号: 1206])

(a) 熊本地震の余震分布(気象庁一元化データ, 2016年4月16日-2017年2月14日)と地殻熱流量分布 (b) 3地域(震源断層域, 阿蘇地域, 湯布院-別府地域)における余震減衰と大森-宇津則の最適パラメータ値。

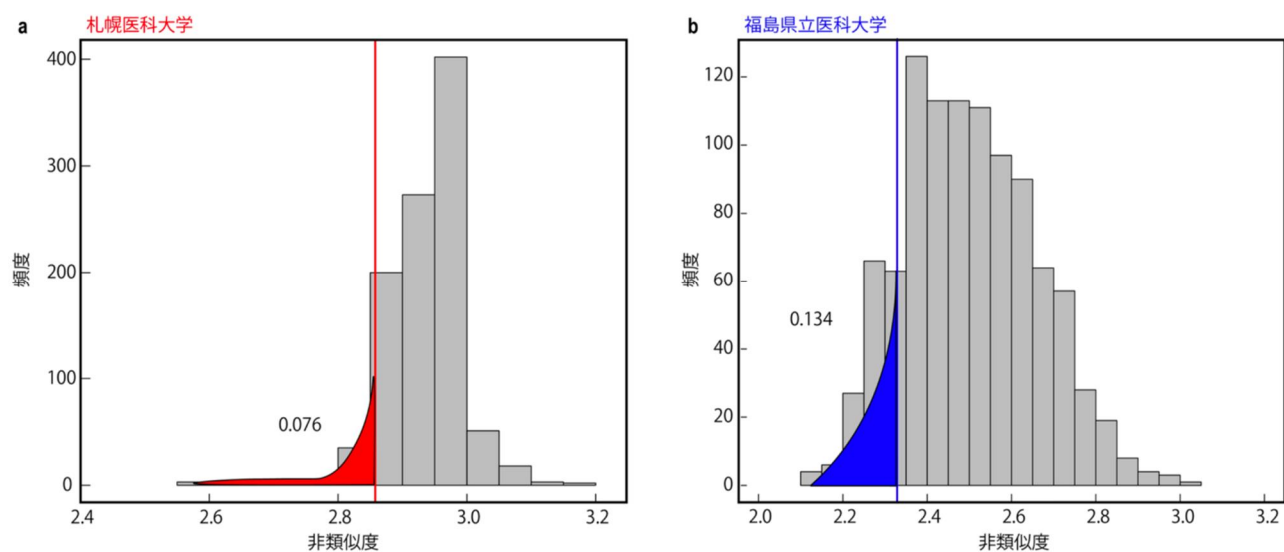


図8. 大気中ラドン濃度変動と地震の非類似性（東北大学〔課題番号：1207〕）

(a) 札幌医科大学, (b) 福島県立医科大学. ヒストグラムはランダムな地震時系列とラドン濃度との非類似性を示し, 縦線は実際の地震系列とラドン濃度との非類似性を表す. 非類似性の値が小さいほど地震活動と大気中ラドン濃度変動との相関が高い。

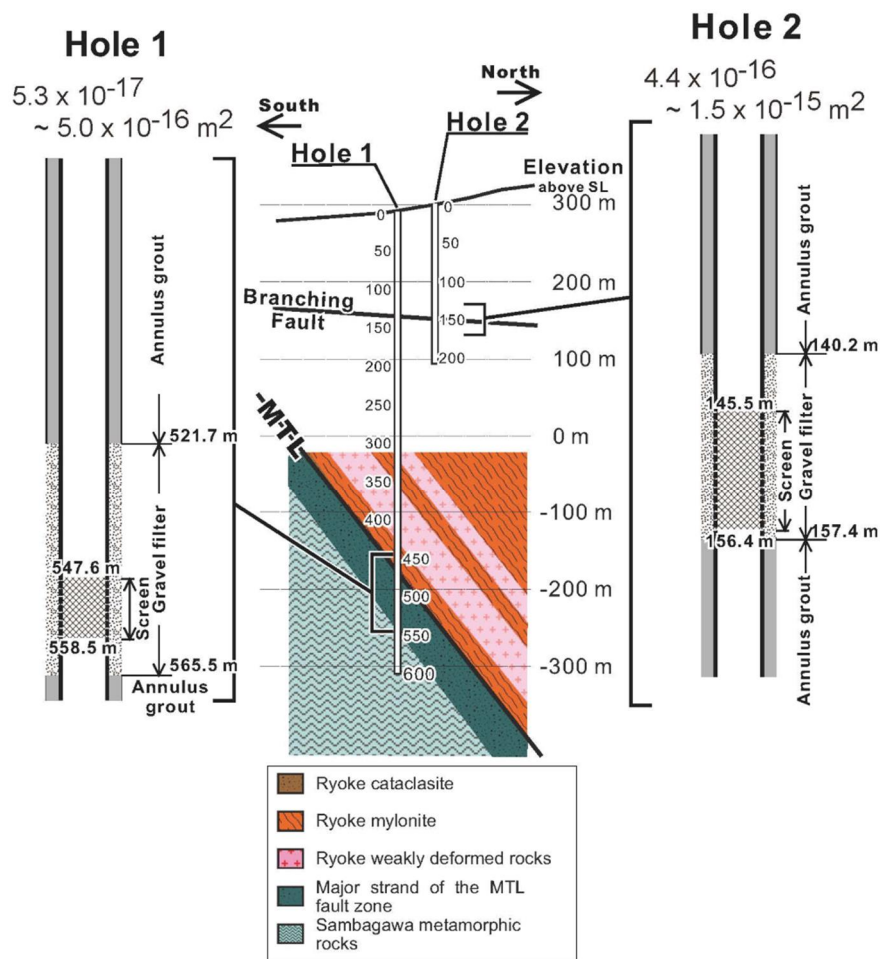


図9. 松阪飯高観測点における中央構造線断層帯の断面図と掘削した2本の井戸の構造および水理試験などで求めたそれぞれの井戸の透水係数(Matsumoto and Shigematsu., 2018) (産業技術総合研究所 [課題番号: 5007])

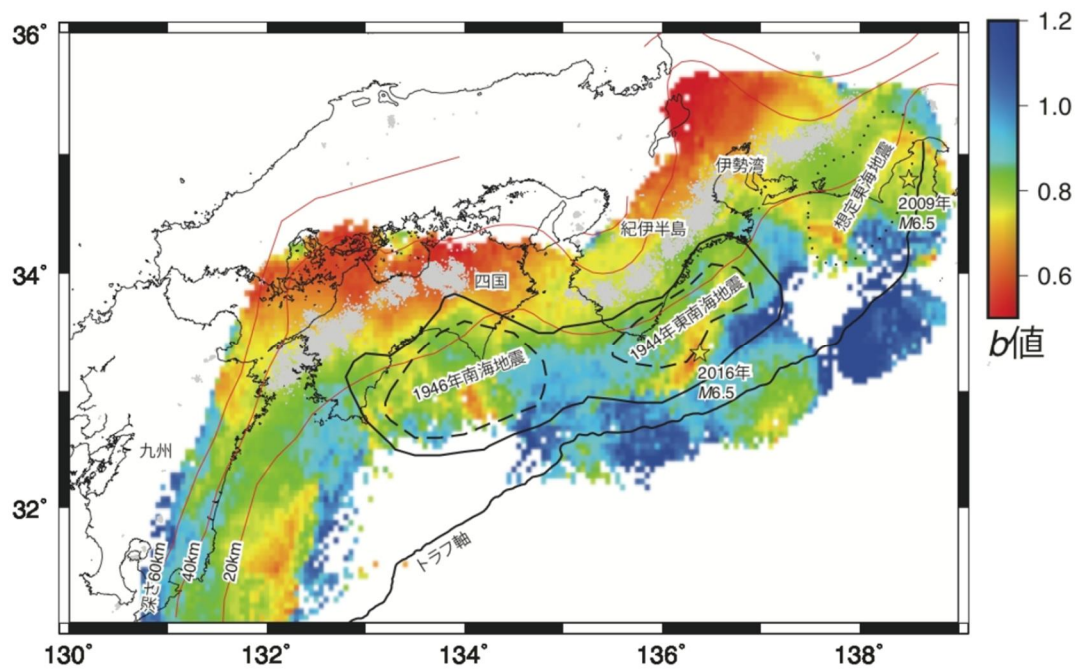


図10. 南海トラフ沿いのb値分布(楠城・吉田, 2017) (東京大学地震研究所 [課題番号 : 2902])

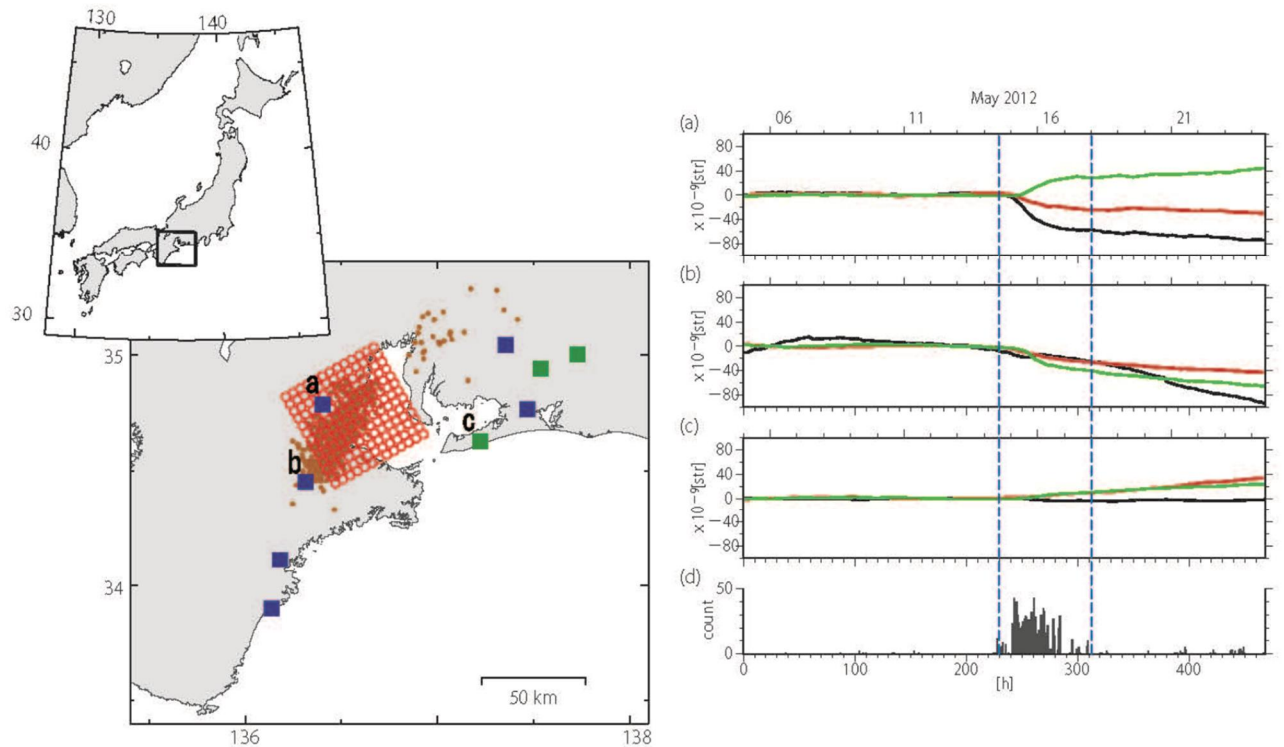


図11. 短期的SSEの検出と断層すべり分布の時空間変化の推定を同時に行う新手法 (Araki et al., 2017) による結果の一例 (産業技術総合研究所 [課題番号 : 5007])

左上図, 四角: 研究対象領域. 左下図, 青四角: 産総研のひずみ計の位置, 緑四角: 気象庁のひずみ計の位置. 赤丸: 仮定した小断層の位置. オレンジの小丸: 深部低周波微動の震源位置. 右図, (a) (b) (c): 左下図に示した観測点 a, b, c での2012年5月のひずみデータ (トレント 成分除去済). 青点線: 提案した方法によるSSEの開始と終了の推定時刻. (d): この地域で発生した微動の個数. 推定したSSEの開始時刻と終了時刻が微動の発生した期間と一致する.

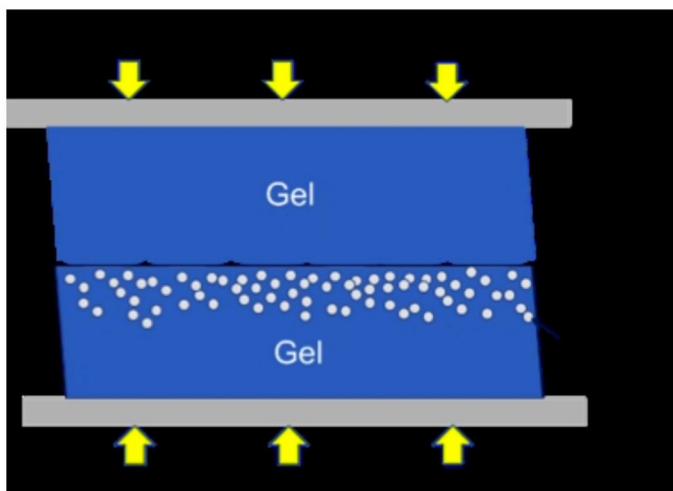


図12. 摩擦実験装置の概略 (東京大学地震研究所 [課題番号 : 1512])

面形状によるアスペリティを多数配置した。

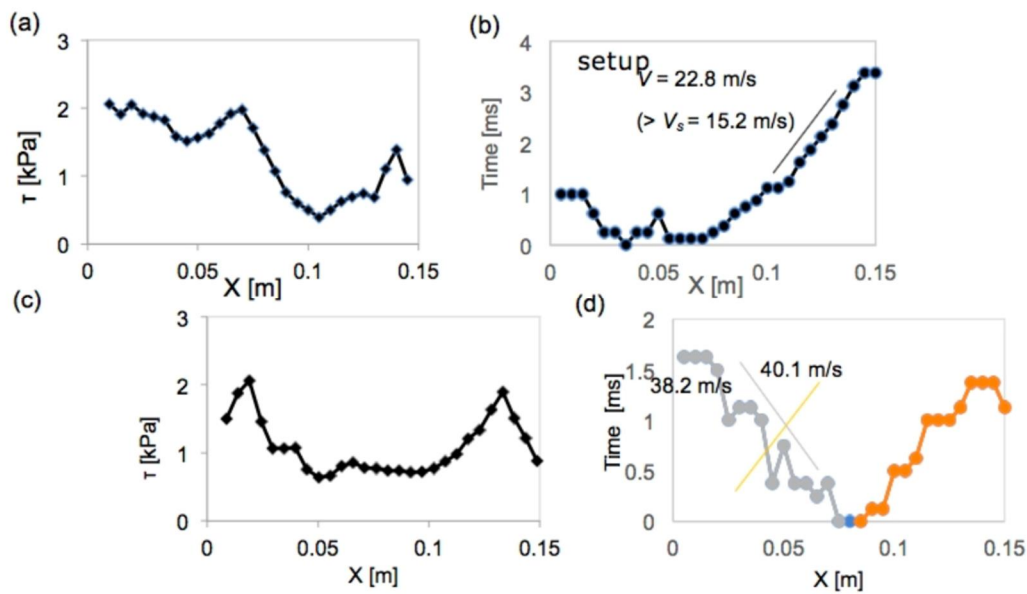


図13. 図12の実験装置での滑りイベント2回分の様子(東京大学地震研究所 [課題番号 : 1512])

(a) (b)が1回目, (c) (d)が2回目. (a) (c)は剪断応力, (b) (d)は滑り先端の位置。

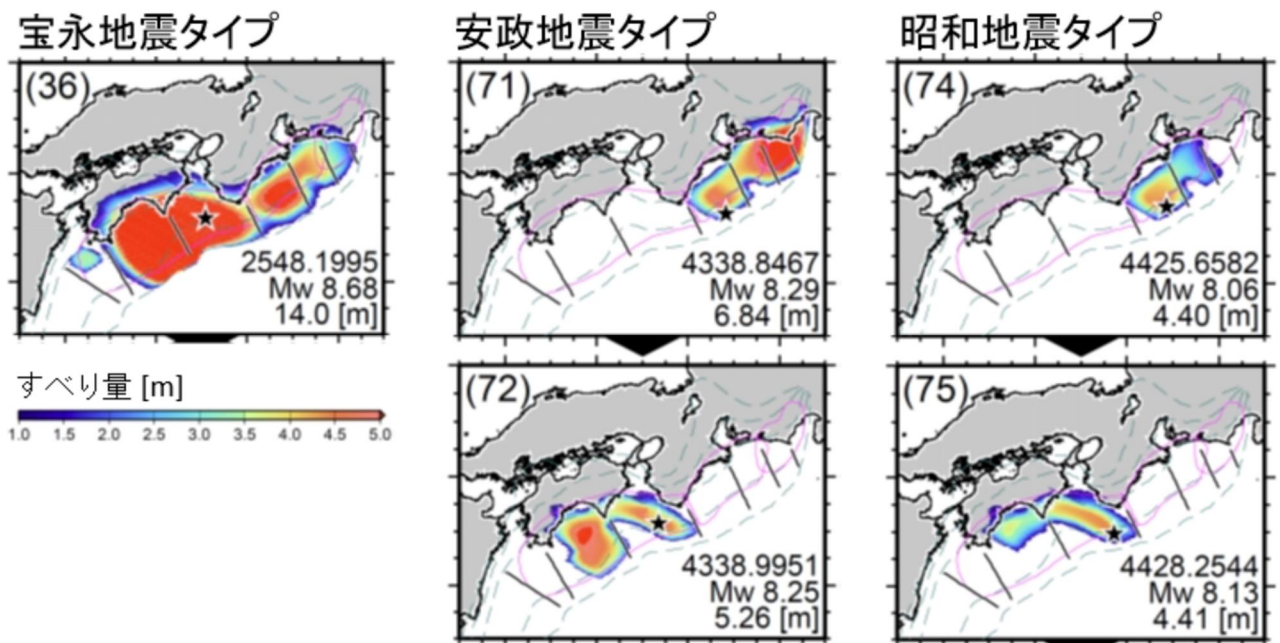


図14. 南海トラフ沿い地震発生シミュレーション (気象庁 [課題番号 : 7006])
各地震のすべり分布は概ね再現できている。

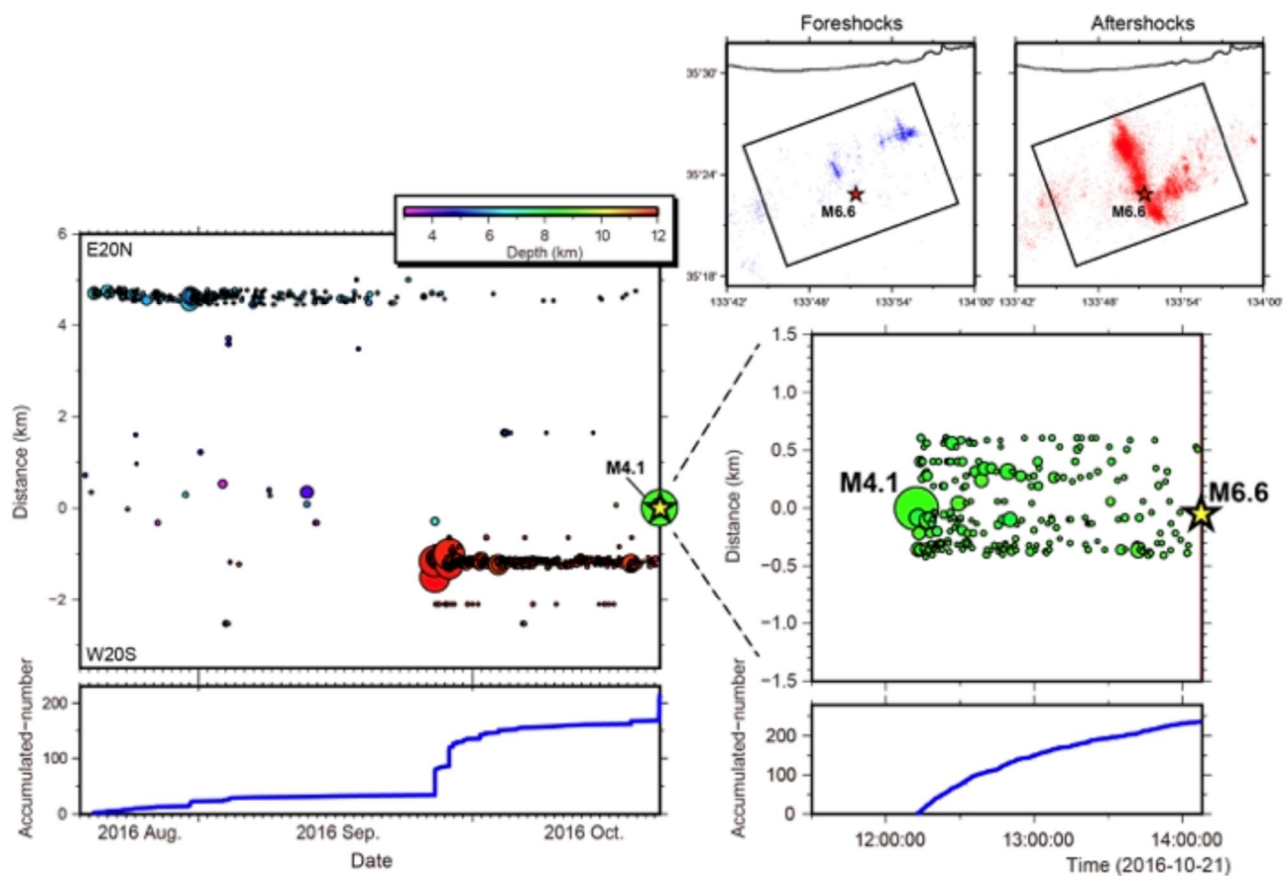


図15. 2016年鳥取県中部地震の発生前に見られた地震活動の時空間発展図（東北大学〔課題番号：1207〕）

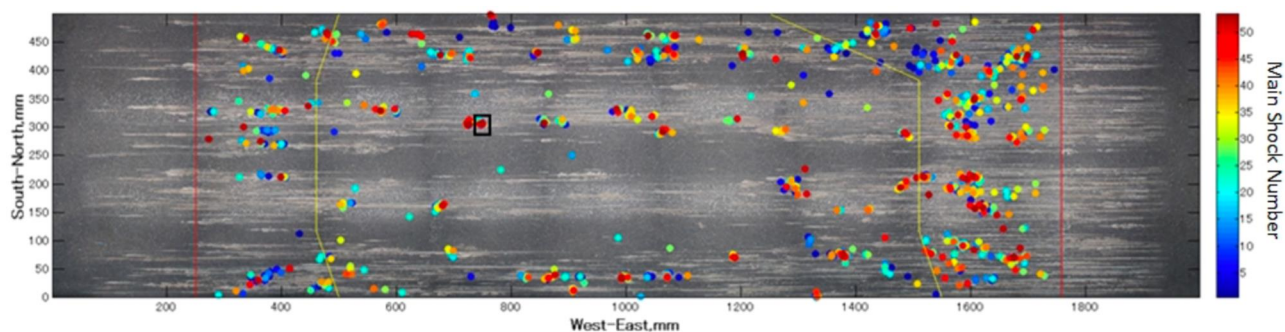


図16. リピーター的な前震を含む検知された全ての前震イベントの震源（立命館大学〔課題番号：2402〕）

丸の色は対応する本震番号, 左右の赤線はこのランにおける上側試料の接触部分(断層)の範囲, 左右の黄線は弾性波センサのネットワークの範囲を表している。黒枠内の前震が最大のリピーター的な前震クラスタ(図17参照)を構成している。

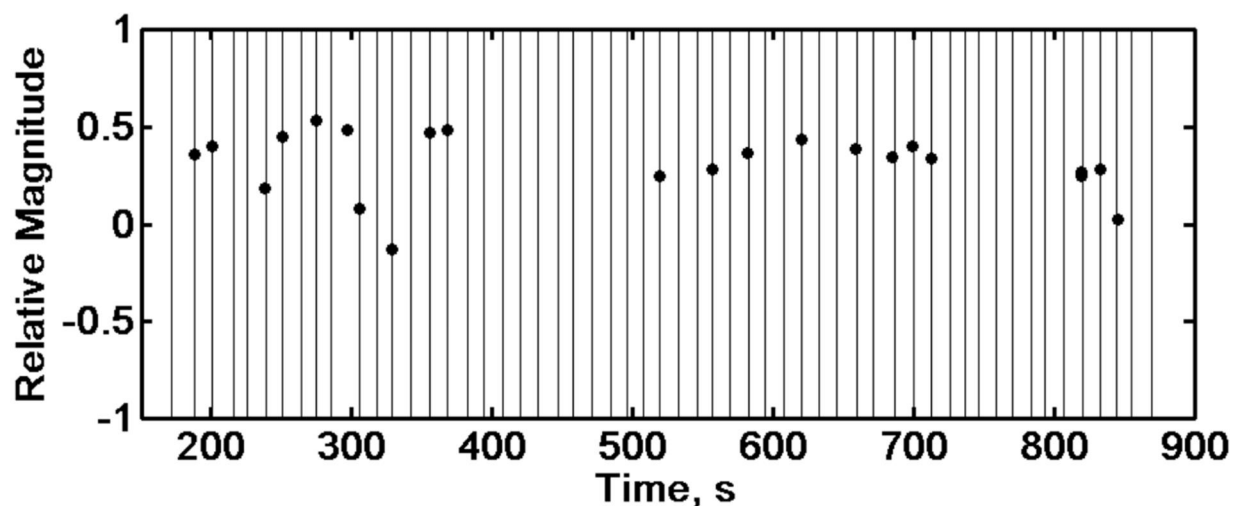


図17. 図16の実験で見いだされた最大のクラスターを構成するリピーターの前震の発生時刻と相対マグニチュードの関係（立命館大学〔課題番号：2402〕）

縦線は「本震」の発生時刻を表す。

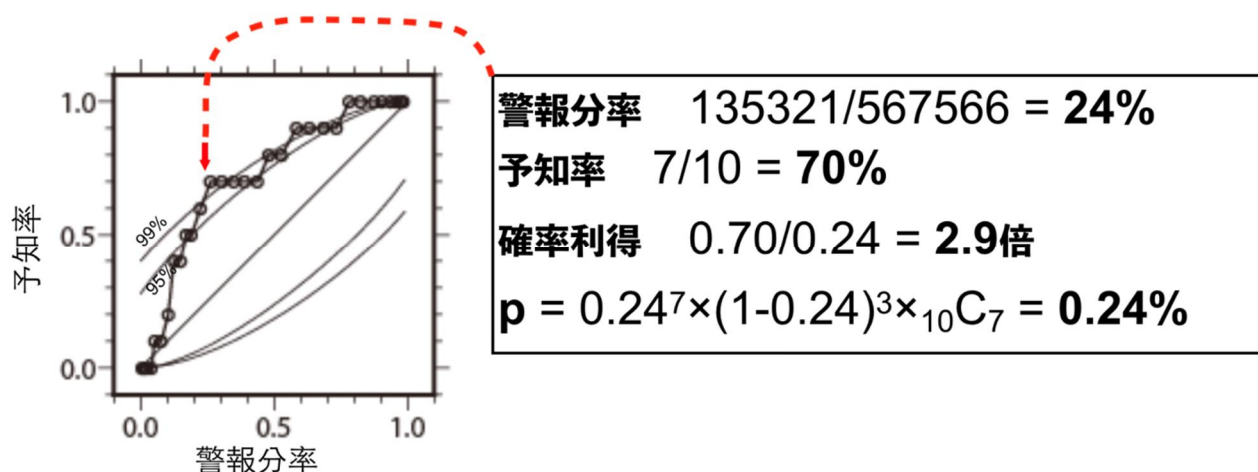


図18. 地震活動静穏化にもとづく予測マップの性能評価（東北大学〔課題番号：1206〕，東海大学〔課題番号：2501〕）

静穏化継続の要件を様々に変えて描いたROC曲線。

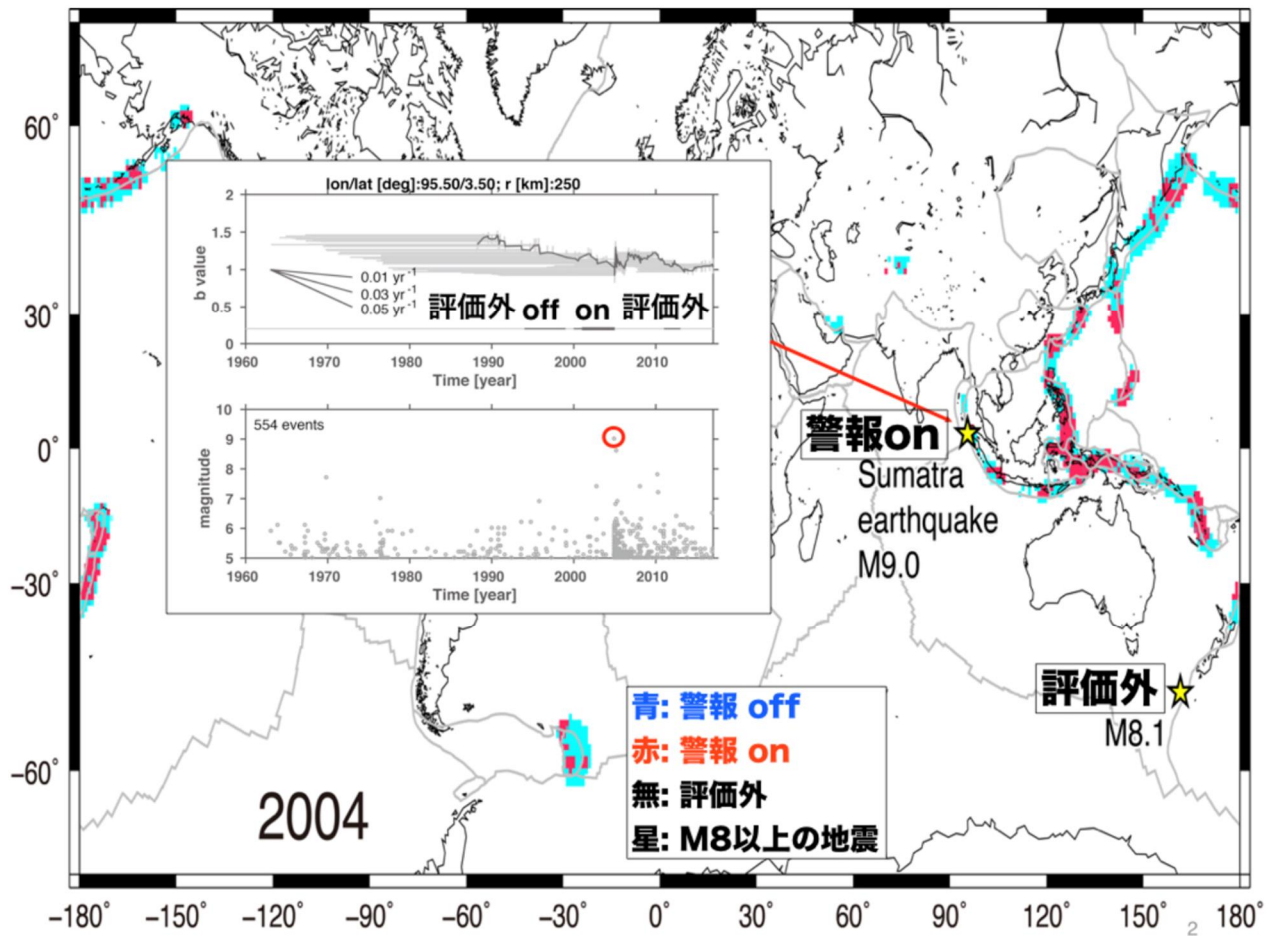


図19. b値解析による2004年のM8クラス地震の予測マップ(楠城, 2018) (東海大学 [課題番号: 2501])

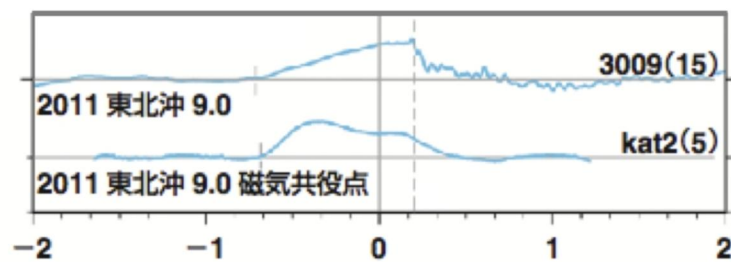


図20. 東北地方太平洋沖地震前後の地磁気共役点近傍のTEC変動(日置, 2018) (東海大学 [課題番号: 2501])

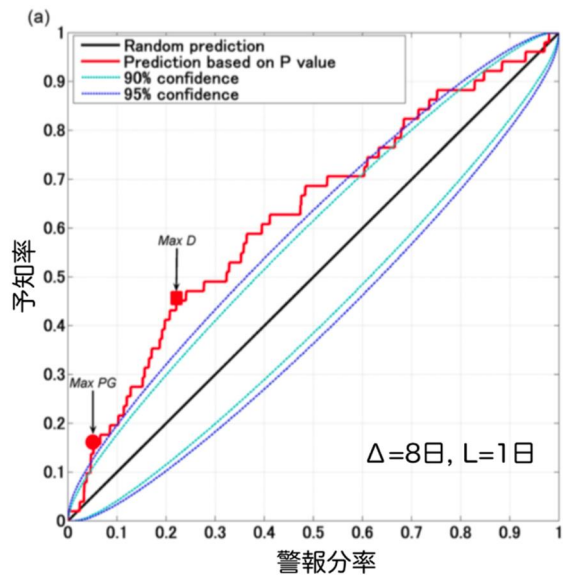


図21. 柿岡地磁気観測所の3成分地磁気データによる予測の成績 (Han et al., 2017) (東海大学 [課題番号: 2501])

異常定義の閾値を様々に変えて描いたROC曲線。

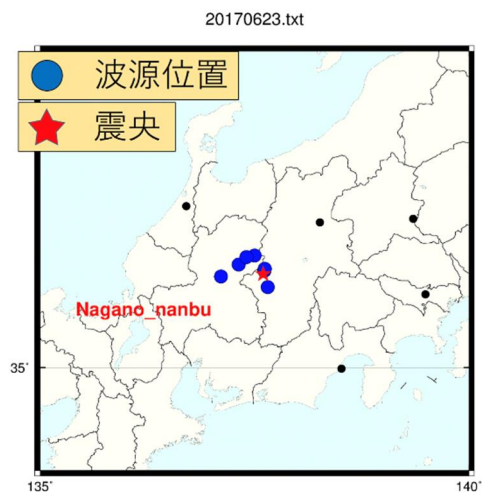


図22. 長野県南部の地震 (M5.6, 深さ7km) の震源付近から2日前に放射されたVLF帯パルス電磁波 (東海大学 [課題番号: 2501])

黒丸は観測点。

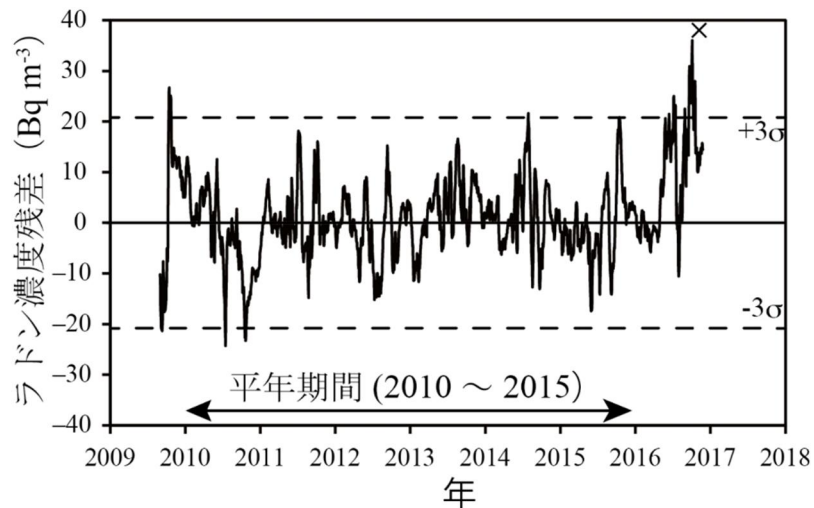


図23. 鳥取大学鳥取地区放射性同位元素施設(鳥取県鳥取市)の排気モニタの計測データによる大気中ラドン濃度変動残差(東北大学〔課題番号:1207〕)
 長期成分(経年変動成分)と季節変動成分を取り除いた残差値。×印は鳥取中部地震(Mj6.6, 深さ10 km)の発生日時(2016年10月21日)。観測点からの震央距離は32.5 km。
 点線は平年期間のラドン濃度残差値標準偏差の3倍を示す。

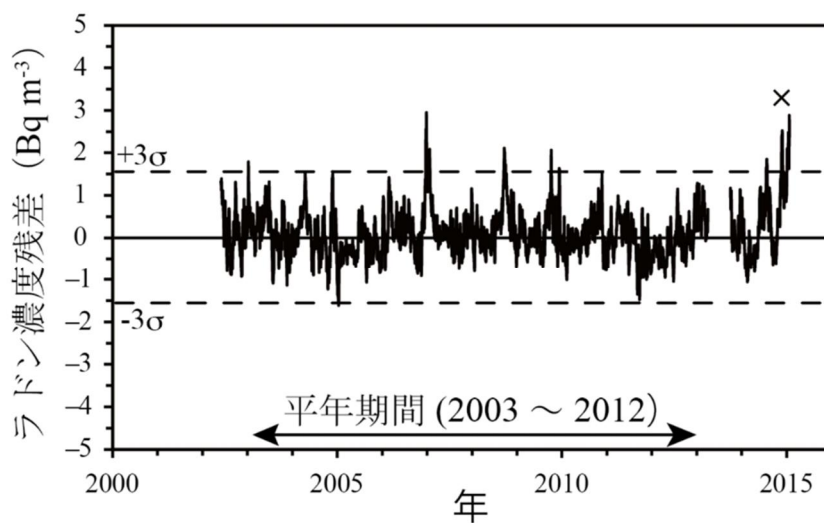


図24. 信州大学松本キャンパスRI実験施設(長野県松本市)の大気中ラドン濃度変動残差(東北大学〔課題番号:1207〕)
 長期成分(経年変動成分と12年周期成分)と季節変動成分を取り除いた残差値。×印は長野県神城断層地震(Mj6.7, 深さ5 km)の発生日時(2014年11月22日)。観測点までの震央距離は50 km。点線は平年期間のラドン濃度残差値標準偏差3倍を示す。