

## 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。

### 1. (1) 5年間の成果の概要

観測データから大地震が発生しそうな気配を察知して、大地震発生の確率密度を時空間にわたってマッピングすることが地震予測の目標である。

かつては、固着断層への応力蓄積モデルとGriffithのエネルギーバランスに基づいて、物質、特に不均質な物質は、弾性波速度で伝播する動的な破壊の直前には、多数の微小な破壊、あるいは、限定された領域でのゆっくり滑りが準静的～準動的に進行する「壊れかけ」の状態を経るはずであるから、現行犯逮捕的な直前予知くらいは原理的に可能だろうと考えられていた。しかし、地震サイズと面積あたりの破壊エネルギーが比例することが広く観察された現在では、狭い領域で開始した地震破壊がどこまで拡がれるかについて、このような「壊れかけ」の前兆はほぼ情報をもたないはずだから、少なくとも「現行犯逮捕の直前予知」は、原理的に困難だろうとの見方が優勢である。

にもかかわらず、「これこれのこと」があれば、当分の間は大地震の発生確率が普段より高いと経験的に言える(つまり予測能力をもつ)ような「これこれのこと」—地震先行現象と呼ぶことにする—が、数分から十年程度まで、様々な先行時間で発見されている。前兆と呼ばないのは、このような意味での先行現象は、必ずしも、大地震の発生が近付いている、あるいは大地震が発生しやすい物理的状態から派生したサイン—先行期間に関わらず「前兆」という言葉にはこのタイプの因果関係が無意識に想定されている—であるとは限らず、先行現象自体が大地震がそのタイミングで起きた原因となったようなものもありうる(中谷, 2019, 東北大学 [課題番号: 1206], 東海大学 [課題番号: 2501])からである。実際、前震活動という現象はかなりの程度まで、本震をトリガした地震活動が結果として前震活動として認識されているのだという解釈で説明できるし(e.g., Helmstetter et al., 2003), また、本震に先行したスロースリップも兆しではなく原因としての解釈が可能である(e.g., Roeleoffs, 2006)。

以上の認識のもと、データを評価し、そこから読みとれる危険度を定量的に示すためには以下の3つを進展させる必要がある。(1)地殻活動に関連している可能性のある異常を客観的に定義し、その大地震発生との相関を統計によって評価できるだけの量のデータを集めるために、観測と解析の技術を向上すること。(2)客観的に定義できる異常が地震に

先行する傾向を，統計によって評価すること。(3)先行現象が地震の発生とどう物理的に関係しているのかを解明すること。以下，これらについてこの5年間で得られた主要な成果をレビューする。様々な事例に渡って，3つの側面がかみ合いながら目標に向かって進展したことがわかるであろう。

## 1. (2) 5年間になされた主要な成果その1：観測と解析の技術

### 地震活動

地震活動の観測・解析における一つの重要な要素は，検出もれを減らすことである。これは，ゆっくり滑りの鋭敏なセンサーである微小なリピーターの検出，統計地震モデルによる活動予測のための良質のカタログの確保などを通じて予測能力の向上に不可欠である。馬場・他(2015)は，駿河湾でOBS観測を行い，一元化地震カタログに比べて10倍程度の検知率が得られることを示した(東海大学[課題番号:2501])。Iwata(2014)は，地震検知能力の長期的変化と季節変化とを分離して推定することで，カタログの地震捕捉率を時系列で詳細に評価する新手法を開発した(東北大学[課題番号:1206])。

リピーターの検出に関しては，テンプレート波形との相関によって高ノイズな連続波形の中からも多数の小さなイベントを抽出できるマッチト・フィルター(MF)法が多くの事例に適用され，後述するように，ゆっくり滑りが大地震の発生を促進したと思われる多くの事例が見つかった。MF法に関する大きな技術的進歩として，AICを用いることによって，マッチするイベント検出のための相関係数の閾値を，恣意性を排除して決定する方法が提案された(Hirano et al., 2018a, b, 立命館大学[課題番号:2402])。

リピーター活動から断層のクリープ速度を推定することは，ある程度のクリープ速度があるプレート境界でしか行われていない。南アフリカCooke4鉱山内の地質断層上で，M-4級のきわめて小さリピーターが多数発見され，その単位クリープ量当たりの発生レートは，プレート境界でおこるリピーターに対する経験則(Nadeau and Johnson, 1998)とは全く異なり，非常に小さなリピーターでは，Nadeau and Johnsonから期待されるより何桁も高いことがわかった(東北大学[課題番号:1206], Naoi et al., 2015a)。これは，非常に小さい地震までモニタすることで内陸断層の低速度クリープがモニターできる可能性を示唆する。

統計モデルによる予測のためのカタログでは，個々のイベントを検出せずとも，統計的性質を正しく保てるようにとりもらしを補完すれば用が足りる場合がある。Zhuang et al. (2017, 2019)は，GR則を仮定せずに，発生する地震のマグニチュードと発生時刻は独立であるということだけを仮定して欠測を埋めることのできる，バイスケール変換を用いた新手法を開発し，2016年4月の熊本地震の余震系列に適用した。この手法により補充された余震データセットでは，ETASパラメータの最尤推定値が十分に安定しており，また，4月14日Mj6.5前震の余震活動に，中期的先行現象としての統計的有意性が確立されている(Ogata, 2001)相対的静穏化が検出された(東北大学[課題番号:1206])。この静穏化は，前震のあった日奈久断層の北側の布田川断層付近で見られた，本震1日前からのp値やb値の顕著な増加(東海大学[課題番号:2501], Nanjo and Yoshida, 2017)とも対応しており，同時期にあったゆっくり滑り(Kato et al., 2016b, 東北大学[課題番号:1206])による応力変化と関係していた可能性がある。

大きな地震が発生した場合に余震を予測するにはリアルタイム処理で得られる品質のカタログで予測を出す必要がある。Omi et al. (2016)は、最近の国内のいくつかの内陸地震について、リアルタイム処理のHi-Net自動震源カタログによって余震の確率予測を行い、後にJMAが手動検出した、より信頼度の高いカタログを用いた場合と同程度の予測成績が得られることを示した。前者のカタログで、予測式のパラメタを対象の活動にチューニングした場合の成績は、後者のカタログに予め固定されたパラメタ値を適用して予測するよりも良かった。Omi et al. (2019)は、大地震の3時間後から1時間更新で予測を出すリアルタイム予測システムを実装した(東北大学[課題番号:1206])。

地震活動の変調を検出するには、地震活動最大の癖である余震活動の影響を適切に取り除くことが必須であり、大森-宇津の余震法則を一般化したETASモデル(Ogata, 1989)が標準的な手法となっている。Tsuruoka and Ogata (2015)は、GUIにより直感的に操作しながらETAS解析ができるソフトウェアXETASを開発した(東北大学[課題番号:1206])。

ETASは、異常抽出および評価のための基準活動モデルとしての重要であるだけではない。前震という現象のかなりの部分がETAS的トリガリングによると考えられる(Helmstetter et al., 2003)以上、ETASの高度化は予測能力の直接的な向上にもつながる。CSEP-JapanでのAllJapanテスト領域での25ラウンドを超える検証では、ETASモデル(HISTETASPA1205)がベストの成績を収めている(Hirata and Tsuruoka, 2017)。しかし、東北地方太平洋沖地震後は、ETASを含めてどのモデルでも総地震数の予測成績が相当に低下した(Hirata et al., 2015)。実のところ、対象地域全体の実際の地震数の推移は、東北地方太平洋沖地震を起点とした大森-宇津則で良好にフィットできるものであり、時空間の関数としての地震確率を与える統計モデルにはまだ大幅な改善の余地がある(東京大学地震研究所[課題番号:1511])。

まず、空間的に不均質であるETASモデルのパラメタを妥当に推定する方法として、重み付き尤度関数を採用した残差解析による推定法を開発し、日本列島の地震活動の地域性を特徴づけた(東北大学[課題番号:1206], Zhuang, 2015)。さらに、Guo et al. (2018)は、ETASモデルを3次元に拡張し、関東地域のデータにおいて予測性能が向上することを示した(東京大学地震研究所[課題番号:1511])。また、一般的なETASモデルでは大きな地震であっても点としてのトリガ源として扱うため、影響カーネルは空間的に等方であるが、実際の余震活動の分布は本震断層面の存在に強く影響された異方性をもつ。この問題を解決するため有限断層ETASモデルを開発した(Guo et al., 2015)。いくつかの大地震の余震分布に適用したところ、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示された(Guo et al., 2017; Zhuang et al., 2018)。ETASモデルそのものの向上として地震予測に寄与するとともに、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も役立つだろう(東北大学[課題番号:1206])。また、ETASをはじめ、ほとんどの地震活動の統計モデルは、地震の時間的クラスタリングを点過程としてモデリングするものであるが、新しいアプローチとして、地震活動をARでモデリングする理論的枠組みが提案され、2010年ダーフィールド地震系列の事後予測で機能することが確認された(Wang et al., 2018a, 東北大学[課題番号:1206])。

ふだんの地震活動のリファレンスとなるモデルを作るために、Nishikawa and Ide (2015)

は、ETASを用いたモデリングにより、全世界の沈み込み帯での定常的な地震活動度をマッピングした。活動度は、基本的には沈み込み速度に比例するが、プレートが大きく屈曲していると大きくなる傾向も見つかり、沈み込み前後のプレート内部への水の輸送過程との関係を指摘した。Nishikawa and Ide (2017)は、この手法で時間変化を扱えるよう発展させ、世界の沈み込み帯の群発的な地震活動を、それまでに知られていものの7倍近い435件検出した。プレートの屈曲との関連も見い出され、群発活動の多くは地殻流体が豊富なところで起きやすいSSEによるものではないかと提案した(東京大学理学系研究科 [課題番号:1402])。

ETASは、まず地震活動のパターンに関して大森-宇津則という明示的に式化できる規則性に人間が気付き、それをパラメタ化したものである。深部低周波微動の活動にもマイグレーションなど、明らかなパターンはあるが、バリエーションに富んでいて明示的なモデルを作るのは難しい。Wang et al. (2018b)は、2次元隠れマルコフモデルを用いて南海トラフの深部低周波微動をモデリングすることで、ほぼ何も仮定せずに、活動の階層的な空間セグメンテーション、マイグレーションパターンをなどの特徴を自動的に抽出することに成功した。2日間程度であれば、微動活動はうまく予測できる(東北大学[課題番号:1206])。

後述するように、地震活動の変化を応力の変化と関係づけるには、小さい地震までメカニズム解がわかっていることが重要である。Ishibe et al. (2014)は、Hi-NetやF-netによってメカニズム解整備が開始される以前の1985-1998年の地震について、JUNECによって取得された波形に基づきM2までを網羅するメカニズム解カタログを作成した(東北大学[課題番号:1206])。また、ベイズ推定の枠組みで、メカニズム解を経ずに、P波初動の押し引きから直接応力インバージョンを行う方法を開発し、2000年鳥取県西部地震などで地震前後の応力場の変化を捉えた(Iwata, 2018)。さらに、合成データによるテストで、こうして推定した応力場の情報をとり入れることによって、個々のイベントのメカニズム解の推定も向上できることも示した(東北大学[課題番号:1206])。

## 測地

地殻へのひずみの蓄積、部分的な断層のゆっくり滑りなどは、地震発生に対する効果が最も物理的に推察しやすいものであり、その直接的な観測である測地は、物理モデルによる地震予測の根幹である。

新しい面的な観測手段である干渉SARによって、御前崎・潮岬・室戸岬・足摺岬周辺の定常的な地殻変動の検出を行い、良好な結果を得た。視線距離だけでなく、水平変位と上下変位を分解することもできている(気象庁 [課題番号:7006])。また、東北地方太平洋沖地震の余効変動は長期・広域に及んでいるため、その他の原因による地殻変動の検出を難しくしている。そこで、GNSS日値を再調査し、新たなパラメタで余効変動を除去したデータを作成し、南海トラフ沿いのGNSS日値を用いた面的監視処理について、監視範囲も変更して、東海地方の長期的SSEを検出しやすくした。さらに、地殻変動監視の速報性を向上するために、国土地理院のGNSS日座標値R3解(速報解)について、基線解析やGNSS面的監視(1ヶ月/3ヶ月)についてはF3解と同程度の精度で監視ができることを確認し、F3解と同様に気象庁本庁においてR3解をWeb上で閲覧できる仕組を構築した(気象庁[課題番号:7006])。

現代的な観測のなかった時代の地殻変動を評価することも行われた。梅田・板場 (2018)

は、紀伊半島の5地点において、国土地理院の測量と水路局の潮位データを組み合わせて1944年東南海地震・1946年南海地震による変動を分離した上下変動時系列を求めた(産総研[課題番号:5007])。また、弘瀬・中西(2015)は、高知県の古文書「蕨岡家文書」の再解読から得られた安政南海地震後の井戸の水位低下が断層モデルから期待される体積ひずみと調和的であることを見出した(気象庁[課題番号:7006])。

南海トラフでのSSEのモニタリングに関しては、中国地方を領域固定したGNSS日値を用い、フィリピン海プレートの沈み込みと逆方向の成分について、SSE発生領域であるプレート境界等深線25kmおよび30km沿いに並べた地点を中心とする一定範囲内の平均を求め、1年および1週間の傾斜期間を持つランプ関数との相関を取ることで、長期的(2年から数年程度の継続期間)および短期的(数日から1週間程度の継続時間)SSEの時空間分布を得るシステムを開発した(気象庁[課題番号:7006])。また、ひずみ計データでも、スタッキングや降水補正等を工夫することでスロースリップの検出ができることが示された(宮岡・木村, 2016, 気象庁[課題番号:7006])。また、産総研の北勢観測井戸をパッカー密閉し、地下水圧の地殻ひずみ感度を著しく向上させて、伊勢湾周辺での深部低周波微動活動に同期した水圧変化を捉えることができた(北川・松本, 2016, 産総研[課題番号:5007])。また、スロースリップの敏感なセンサーになっていると考えられる微動活動については、これまで地震発生帯の深部側延長で観測されてきたが、新たな海底観測システムであるDONET, DONET2の展開に伴い、南海トラフ島弧側のプレート境界浅部の複数の地域で微動活動が見い出された。深部微動と同様に、地震波でトリガされることも見い出されている(気象庁[課題番号:7006])。

産総研・防災科研・気象庁では、3機関のひずみ・地下水・傾斜データをリアルタイムで共有して自動解析するシステムを運用し、2013年11月以降5年間で162個のSSEイベントの断層モデルを決定した(産総研[課題番号:5007])。Araki et al. (2017)は、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たな発想の解析手法を開発し、合成データでの評価では、高い精度でのすべり開始・終了時点の推定と、すべり量の時空間変化の推定精度の改善がみられた。実際のひずみ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(産総研[課題番号:5007])。また、津波の早期警報のため、ボアホールひずみ計を用いて巨大地震のモーメントマグニチュードを即時推定する手法も開発された(Itaba, 2018, 産総研[課題番号:5007])。

応力に関して普通の測地学的方法で推定できるのは時間変化のみであるが、ボアホール掘削ができる場合には、絶対値を知ることができる。岩石強度に近い差応力にまで適用できるよう新たに開発された小径のオーバーコアリング法(Ogasawara et al., 2014)と、コアの外径を測るのみで効率的に計測できるDCDA法(Funato and Ito, 2017)が開発され、後述するように複数の震源域の絶対応力を知ることができた(立命館大学[課題番号:2401])。

### 地殻流体

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。Matsumoto and Shigematsu (2018)は、三重県内の中央構線断層帯(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。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(Wibberley and Shimamoto, 2003)と調和的で、MTLの複雑な透水構造を反映していることがわかった(産総研[課題番号:5007])。また、南海トラフ地震発生帯掘削計画の一環として熊野灘沖合に設置された長期孔内観測システム(LTBMS)の水圧計が周辺の掘削作業に伴って大きく変化していることを受け、これをクロスホール透水試験に見立てて原位置透水係数の推定を行って、先行研究の室内実験や数値シミュレーションの結果と比較することで、スケールが大きくなるほど断層やクラックの数が増え、それらが連結することでより水が流れやすくなることを示唆する結果を得た(Kinoshita and Saffer, 2018, 産業技術総合研究所[課題番号:5007])。

地下水位/水圧の変動は、弾性的な地殻のひずみを反映している可能性と、非可逆的な損傷を含む透水性の変化を反映している可能性がある(e.g., 小泉, 2013)。小泉・木下(2015)は、地震の前後で道後温泉の地下水位が4 m以上上昇した2014年伊予灘の地震(M6.2, 松山市内の震度4)に際して、水頭拡散率は地震前後で有意に変化しなかったことを示した。また、比嘉・他(2016)は、台湾の地震時地下水位変化の解析から、地震動の寄与の周波数依存性が不圧地下水と被圧地下水で違うことを明らかにした(産総研[課題番号:5007])。

大気中ラドン濃度は、1995年兵庫県南部地震、2011年東北地方太平洋沖地震に数ヶ月先行して顕著な変動をみせたため、地震の短期的先行現象の有力な候補となった。特筆すべきは、放射線管理施設の排気監視モニタデータにバックグラウンドとして計測されているため、既にかなり長期の連続データが国内各所にわたって存在することである。そこで医薬系を中心とした全国の施設に協力を依頼してモニタリングネットワークを作り、現在25施設が参加している(東北大学[課題番号:1207])。研究目的で取得されているデータではないので、測定方式には施設によってバリエーションがあるが、代表的な測定装置について、現地で感度を検定、十分な性能をもつことを確認した(Tanaka et al., 2017, Ishihara et al., 2018)。また、補完的な測定のために使い勝手の違う様々なタイプのラドン測定装置の精度を検証した(Higuchi et al., 2019; Wakabayashi et al., 2019, 東北大学[課題番号:1207])。

大気中ラドン濃度は地殻状態だけでなく、気象条件等にも大きく影響を受けるので、異常を抽出する前にまずその補正を行う必要がある。まず、日変化については基本的には大気が安定成層する夜間に濃度が高くなることを確認し、下層大気の熱交換プロセスに基づいてラドン収支に関するボックスモデルを高度化した(Omori and Nagahama, 2016)。これは、地殻状態を反映する地表でのラドンフラックス推定に役立つ。年周変化については、大気中ラドン濃度の年変動は、季節による気団の入れ替わりが支配的要因で露点と逆相関になることを明らかにし(Hayashi et al., 2015)、国内の大半の地域では、日最小値のデータから正弦回帰による平年変動パターンを引いた残差をみることで、地殻活動に関連する異常抽出のための基本的な手法となることを示した(Kobayashi et al., 2015)。後述のように、この方法で様々な地殻変動との対比をみる事例研究を行った。しかし、この補正方法は過去の長いデータを必要とするため、リアルタイムでの異常検出には向いていない。Iwata et al. (2018)は直近の観測データより構成される部分時系列に対して異常部位を検知するデータサイエンス的な手法である部分空間法(e.g., Ide and Inoue, 2005)を導入した(東北大学[課題番号:1207])。

地下水位等については、非研究目的の井戸で、日常的に使用されていたり、あるいは、地盤沈下監視等の目的で記録がとられているものが存在する。後で結果を紹介するが、2011年東北地方太平洋沖地震、および2016年熊本地震に先行した変化がなかったかを調べるために、これらの地域で広汎な調査がなされた(東京学芸大学[課題番号:2930])。

### 電磁気

地震に数日先行して発生すると報告されていたVLF帯電磁波パルス(Asada, 2001)について、メンテナンスの容易な観測装置を開発し(長尾・他, 2016)、中日本に5点の観測網を作って観測を復興した。予察的な解析ではAsada(2001)が指摘していたような直線偏波の電磁波はそれほど多くなく、到達時間差による震源決定が必須である。感度帯域は100kHzまでであるが、ハイサンプリングによって到達時間差による発生源の位置標定に成功し、ARとAICを用いたパルスの到達時間決定手法(Takanami and Kitagawa, 1991)をルーチンで適用する解析システムを作った(東海大学 [課題番号:2501])。

前期計画から継続して維持した伊豆諸島・北海道・九州に加えて、高知県黒潮町内の2カ所にULF帯地磁気、VHF帯電磁波伝播異常、大気電界の観測点を新設した(東海大学 [課題番号:2501])。VHF帯電磁波伝播異常に関しては、見通し内伝播異常(受信強度が異様に上がる)にも地震発生との相関が指摘された(Motojima and Ogura, 2017)ため、清水に観測点を新設した(東海大学 [課題番号:2501])。

DEMETER衛星で取得したVLF帯電磁波の強度データにM>4.8地震の数時間前での減少傾向(Nemec et al., 2008)が知られている。この項目に限って、より高性能かつ圧倒的安価な観測を超小型衛星(CubeSAT)で行うための測器開発が進んでおり、ブレッドボードモデルが製作された(児玉, 2018; 菊地ら, 2018; 鴨川ら, 2018, JAXA [課題番号:2901])。また、この現象の新たな異常定量化手法として、近隣雷によるノイズを分位解析で除去して平滑化曲線を求めたあと、関数主成分分析を施して第3主成分スコアを用いることが有効であることを見出した。この解析では、電磁波強度が減少を示す事例は、先行現象の条件を満たす全軌道に対してほぼ1割であった(Kamogawa et al., 2018, 東京学芸大学 [課題番号:2501])。

### その他

地震活動に先行して海棲生物の行動異常が見られることがある(e.g., Terada, 1932; Tomoda and Hironaga, 1989)。深海魚の出現が地震の前兆ではないかとは、よく巷間ささやかれることであるし、三陸地方においては1868年明治三陸地震(M8.2)、1933年昭和三陸地震(M8.1)の前にイワシやマグロの漁獲異常があった(吉村, 2004)。また、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)の一週間前には、鹿嶋市の下津海岸でカズハゴンドウ54頭のマス・ストランディングがあった。しかし、これらの現象に有意な先行性があるかは、地震のない時の現象発現レートを知らないとは判断できない(織原・長尾, 2015)ため、系統的なデータの収集を行った。漁獲量については、1973年以降宮城県内の漁港・魚種・月別の漁獲量資料をデジタル化した(織原ら, 2014)。深海魚については、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、1923年以降で最初の深海魚出現日から2011年3.11までの期間のカタログを作成した(Orihara et al., 2018)。336件あり、ほとんどが

地震発生以前に報告がなされたものである。鯨類のストランディングは、日本鯨類研究所が公開するストランディングレコードがあり、全国から報告が集まるようになった近年では年間200-250件になる。また、2頭以上のマス・ストランディングは年間数回程度で1923年以降48件である(織原・野田, 2015)。先行性について正式な統計的評価はできていないが、予知率も適中率も低いところは明らかになった(東海大学[課題番号:2501, 2901])。

周波数コームの原理で、地下の弾性波構造のわずかな変化をとらえる能動弾性波探査技術であるアクロス(気象庁 [課題番号: 7006])で、走時に持続的に小さくなってゆく変化及び年周変化があること、また、2011年東北地方太平洋沖地震発生は大きな地震波速度低下を引き起こしたことを見出した。さらに、國友・他(2014)は、複数のアクロス送信点からの観測結果を説明できる浅部からフィリピン海プレート境界にいたるP波及びS波の地下構造モデルを構築した(気象庁 [課題番号: 7006])。これは、変化源の特定に向けて必要なステップである。また、Kame et al. (2014)は、室内滑り実験での音波透過計測結果をスケールリングして、地震サイクル後半における長期的な固着の剥れによる断層面の弾性波反射率の変化を見積もり、反射探査によって検出できる可能性を示している(東京大学地震研究所[課題番号:1507])。

### 1. (3) 5年間になされた主要な成果その2：先行現象の発見と評価

#### 予測評価の手法

よほど自明なメカニズムが想定できる例外的なケースを除けば、どの異常がどの地震の発生に関連していたかということ特定しがたいので、ある種の現象が地震に先行する傾向があるかということは、その現象によって試行的に予測を行い、それがランダムな予測よりもよい成績を示すか、すなわち予測の評価を通してしか行うことができない(中谷, 2016, 東海大学 [課題番号: 2501])。ここで検証されている命題は、実際に地震に先行して起きたその種の異常の中に、そのあと地震が起きたものが含まれているか?であって、実際に先行した異常には偽陽性も含まれていることを織り込み済みで評価できていることに注意すべきである(Nakatani, 2018a, b, 2019, 東海大学 [課題番号: 2501])。

試行予測の作成と評価はふつう回顧的に行われるが、この場合には、既にあるデータで、既に発生日時を知っている地震を予測できるように予測手法をチューニングできるから、有意な相関を示せたからといって、真のバリデーションにはならない。この点で、真に prospectiveな予測実験であるCSEP(東京大学地震研究所[課題番号:1511])の取り組みは特筆に値する。JAPANセンターにおいては、実験に用いるカタログ(気象庁一元化震源)の品質検証(Shorlemmer et al., 2018a), GR則を仮定した地震カタログ生成のためのシステムを開発などを行った上で、多数の実験ラウンドを重ね(Shorlemmer et al., 2018b), 空間予測の情報利得はMainlandよりもAlljapanがよくなる、Mainlandでは地震数を過大予測しがち、といった現在の統計モデルの一般的傾向や、また、モデルの学習曲線の特徴が見い出された(Tsuruoka, 2017a, b)。さらに、評価法そのものに関する知見も得られた。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、現行のCSEPの標準的な評価法は、モデルからの予測と観測の比較であるため、モデル間の直接比較ができない。この目的にためには、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(東京大

学地震研究所, 2019)。また, 大きな地震のあった地域に領域をしぼった予測実験を事後的に試行するなど, 臨機応変な試みも行われた(東京大学地震研究所[課題番号:1511])。

CSEPはプロトコルで定められた全時空間グリッドに対して予測を出すことを求めており, また, 回顧的な予測を評価するCSEP以外の普通の研究でも, データ(と研究資源)の許す全時空間に予測を作成して評価するのが普通である。しかし, それができる手法と状況は限られている。庄・尾形(2015)は, 出したい時にだけ, 気紛れに出した予測であっても, 地震発生のベースレートに従って予測に校正なオッズをつけてギャンブリングスコア法(Zhuang, 2010)を用いれば, 客観的で公正な評価ができることを指摘した。予測ごとに対象地域やマグニチュードがまちまちでも, 一元的な成績をつけることができる(東北大学[課題番号:1206])。ただし, このような場合は, 予測が事前に出されたものであることが絶対の前提条件である。

### 前震活動

多くの本震について, その前の地震活動をスタックすることで明瞭にみられる逆大森則(e. g., Jones and Molnar, 1979)に象徴されるように, 統計的な傾向としての短期的な前震活動の存在は明らかである。前震活動, すなわち, 地震活動がさかんな時期には大地震が発生する可能性がふだんよりずっと高いということは, 必ずしも本震発生の近付いた何らかの意味で臨界的な物理状態の産物として前震が発生するのではなくとも, 先述したように, 活発な地震活動の余震の一つとして本震が起きたという解釈でも説明できる(Helmstetter, 2013)。Zhuang et al. (2018)はイタリアの地震活動をETASモデルで解析し, M2.9以上の地震の61%がトリガー型地震であり, その1/4が5つの大地震によって直接誘発された地震であることを見出した。また, 2005-2016年に発生した6つの大地震のうち5つは誘発性であり, イタリアでは前震現象が顕著である。統計的除群法を用いてイタリア全土を16区域に分けて解析したところ, 常時地震活動自体がこれらの主要地震に影響を受けており, それぞれ地震活動のフェーズが異なっていることがわかった(東北大学[課題番号:1206])。

一方で, プレスリップ的な震源核の存在を思わせる事例として, Mw2.2地震発生の6ヶ月前から, 本震破壊面内いくつかのクラスターとして極小地震(AE)の活動が観測されていた南アフリカの鉱山内地下3 kmでは, そのうちの1つのクラスターの活動が本震の一週間前から加速し, 破壊開始点に向かったことが見い出された。ただし加速活動から予測された時刻より本震の発生は一日遅れており, 加速する震源核がスムーズに地震につながったわけではない。最後の1日にはこのクラスタでは前震はなく, そのあと本震破壊開始点に位置するクラスタで本震の数分前に前震が1つおきて本震に至った(Yabe et al., 2015, 東北大学[課題番号:1206])。また, 2014年長野県北部地震(Mw6.3)でも本震の震源近傍で前震活動が見られた(東北大学[課題番号:1206])。いっぽう, 2011年東北地方太平洋沖地震の13時間後に発生した長野県北部の地震(Mw6.2)の前震活動は, 東北沖地震の表面波通過時から始まっており, また, 活動の様子は浅部地殻流体の温度と相関があった。Mw6.2は, 深部からの地殻流体の移動でトリガされた可能性がある。(Shimojo et al. (2014), 東北大学[課題番号:1206])。

本震破壊直前(時間オーダー)に微小なりピーター前震が多数, 破壊開始点に集中して起

きる現象は、国内外のいくつかの地震で見つかっており (Bouchon et al., 2011 ; Doi and Kawakata, 2012, 2013), 準静的プレスリップによる震源核形成を強く示唆するものである。Toyomoto et al. (2016)は、高感度地震計が本震直上にあった国内のケースを精査し、新たに、2011年長野県中部のM5.4地震の13時間前から20個程度の極微小なリピーター前震があったことを見出した(立命館大学 [課題番号: 2402])。このケースでは、本震近くに4つの高感度三成分地震計があったため、先述の恣意的基準を用いないMF法によって、本震前2年間の連続記録を走査した。新たにみつかったのは4つだけで、しかも、うち3つは地震の3-4日前にまとめて起きたものだった。これは、前震活動が定常的な微小地震の巨大化・頻発化と呼べるものではなく、過去2年間に殆ど例のなかったイベント群の発露であったことを示している (Hirano et al., 2018a, b, 立命館大学 [課題番号: 2402])。

前震活動と本震の物理的関係がどんなものであれ、活発な地震活動によってアラームを立てることで数百倍以上の高い予測ゲインが得られることは事実である。現状、20倍を超える予測ゲインをもつ先行現象は前震活動以外には見つかっていないのに対して、前震活動を用いた予測手法では100-1万倍という高いゲインが得られる(中谷, 2018c, 東海大学 [課題番号: 2501])。大地震のベース発生レートは極端に小さな数字であるため、短期的に予測できる地震確率の絶対値は、1000倍程度のゲインをもってしても、極端な対応をとるレベルにはならない。しかし、数倍のゲインをもつ長期・中期の先行現象と共起した場合には、かなりの絶対確率が生じることがある。Ogata (2017)は、2016年熊本地震に対して、それまでに統計的にゲインが確定していた短期(前震(Ogata and Katsura, 2002))・中期(2005年及び2016年の九州地方のM7地震の余震の相対的静穏化(Ogata, 2001))・長期(地震調査委員会(2015)による30年確率)の先行現象から得られるゲインの積により、2016年4月14日のMj6.5の後には、M7の発生確率として、1日で2-10%, 30日で39-79%が得られると指摘している。この時の前震のみでのゲインは300-600倍程度、M7の1日確率にして0.2%, 30日で5%であり、それほどものではないが、他の低ゲインの先行現象とかけあわさって生活感覚に訴えるレベルの数字を産み出す要としての決定的な役割を果たしている(中谷, 2018c, 2019, 東海大学 [課題番号: 2501])。今起きた地震が前震かどうかは本震が起きてからしかわからない、というのはよく言われる通りであって、前震で決定論的なコンセプトによる予測ができるということはないが、確率的なコンセプトに基く予測であっても、高い確率値が出た場合には、効果は同じである。

前震を用いた予測にはいくつかの手法が提案されている。複数の中規模地震が時空間的に強く集中して起きた場合に、数日以内により大きな地震が起きる可能性が高いというアラームを出すMaeda(1996)の方法について、日本周辺の様々な地域で回顧的に成績を見たところ、確率利得で100-400倍、予知率20-70%, 適中率2-20%程度で、三陸沖・伊豆地域については、特に成績良好であった(e.g., 前田・弘瀬, 2017, 気象庁 [課題番号: 7006])。また、Nishikawa and Ide (2018)は、ETAS解析とリピーター解析を組合せて、茨城沖の30年間の地震活動を吟味し、このあいだに(プレート境界のスロースリップによるらしい)群発地震的な活動は19件あったが、その後にM7級の地震が続いたケースは相対的に活動度が高かったことを見出し、前震活動が識別できる可能性を示した(東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。

前震識別法は、その後大地震が起きやすそうな地震活動のパターンをヒューリスティッ

クに提案し、それを定量的にチューニング、評価をするという形で開発されてきた(e.g., Maeda, 1996; Ogata and Katsura, 2012)が、最近、統計的なクラスタリング等で恣意性を排して地震活動をタイプ分けする方法が提案されている(e.g., Zaliapin and Ben-Zion, 2013)。Tamaribuchi et al. (2018)は、自動処理の改良によって地震数が増加した2016年4月以降の一元化カタログ、及び1997年10月以降の一元化震源カタログに対して最近傍法による客観的かつ自動的なクラスタリング処理を行い、前震・本震・余震の分類を行って、前震のb値がわずかに小さいこと、前震の発生率が広いM範囲で概ね30~40%程度であること、最大前震と本震の関係はM、時間、空間においてべき乗則に従うこと、といった前震活動の特徴を明らかにした(気象庁 [課題番号:7006])。

前震のb値が小さいというのは、前震識別の手がかりとして古くから言われていることだが、個々のケースをみると、そうであることも、そうでないこともある。2009ラクイラ地震の前震では、b値の低いパッチの周りを取り囲んで、b値の低くないリピーターの活動があったことがわかり、強く固着した領域が周囲のクリープによって加速されていたことが推察される(Sugan et al., 2014; Vuan et al., 2018, 東北大学 [課題番号:1206])。また、熊本地震では前述したように4月14日M6.5の地震発生後にb値が増加した場所があり、M6.5地震によって誘起されたクリープ(Kato et al., 2016b, 東北大学 [課題番号:1206])との関連が指摘されている(東海大学[課題番号:2501])。

#### 地震活動の中期・広域的变化

2014年の長野県神城断層地震(M6.7)においては、震央を中心とした半径150kmの範囲の地震を用いてb値を求めても異常な値は観測されなかったが、断層系に沿って、近傍の地震だけを用いてb値を計算してみると、地震発生1年半ほど前から先行的に顕著なb値の上昇が観測された(井筒・長尾, 2016, 東京大学地震研究所[課題番号:2931])。このように、小さい地震までよく震源決定できる観測のある現代では、高い空間分解能でb値を求めることができ、新たな可能性が出てきた。

b値に関してより先行時間の長い現象として、10年程度の長期にわたる低下傾向がいくつかの巨大地震の前にあったことが指摘されている(Nanjo et al., 2012)。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場合、予測対象としたM8以上の地震29個のうち56%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%であった。確率ゲインは2.1、p値は0.75%となり、肯定的な結果である(楠城, 2018, 東海大学[課題番号:2501])。一方、弘瀬・前田(2017)は、東日本の太平洋沖で1990年以降に発生したM7.0以上の地震6個のうち5個で、地震サイクル後半では規模別頻度分布がそもそもGR則から有意に逸脱したことを指摘し、それを鍵としたシンプルな予測手法で回顧的な評価を試みた。M7.5以上を予測対象とすれば、適中率は低いものの数倍の確率利得がえられた(気象庁 [課題番号:7006])。

同様の先行期間をもつ現象として、10年を超えるような長期的な静穏化が指摘されている。2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の前に23年(Katsumata, 2011)、2004年Sumatra(Mw9.1)の前に13年(Katsumata, 2015)という長期静穏化が認識されたことを契機に

系統的な調査を行った。Katsumata (2016)では、1976-2012年の日本周辺の海溝沿いのMw8.25以上の地震3個と9年以上の網羅的に検出した長期静穏化(11件)を比較し、有意な先行性(確率利得6.7倍、p値0.3%)があることを示した。さらに比較できる地震数を増やすため、Mw7.5以上9個を予測するように最適化しても、静穏化の継続時間の閾値としてはやはり10年程度となり、p値は1%を切り有意性が確かめられた(勝俣・中谷, 2018a)。オーバーチュールニングの問題を検証するためのクロスバリデーションでは、検証に使える地震数が数個となるため、5%を切るp値は得られなかったが、ゲイン(数倍)や予測手法の最適パラメータは安定している(勝俣・中谷, 2018b)。また、先行性の評価は行われていないが、全世界の1990-2014年のM8以上の地震23個について、地震活動の長期的静穏化が先行していたかどうかを調査したところ、バックグラウンドの地震活動が極めて低い静穏化の有無が判断できなかった4例を除く19例について、本震発生前に10年程度以上の長期静穏化が見られた(東北大学[課題番号:1206], 東海大学[課題番号:2501])。

2016年熊本地震の前には、Z値解析とRTM解析によって、熊本地震の震源域から九州西方海域にわたる広範囲な静穏化が2014年末ごろから開始していたことが判明した(Nanjo et al., 2016, 東海大学[課題番号:2501])。ただし、この地域では2015年11月に薩摩半島西方でM7.1の地震も発生している。いっぽう、吉川(2015)は、国内のM7クラス以上の大地震を対象にeMAP法による地震活動の静穏化・活発化解析を行い、破壊開始点と静穏化域との距離、静穏化領域の大きさ、先行時間それぞれに地震規模との相関を見出した。さらに静穏化事例の8割で地震発生前までに静穏化領域が破壊領域を囲むドーナツパターンがあったことがわかった(気象庁[課題番号:7006])。

地震活動の潮汐への同期性の出現は、いくつかの大地震の中期的な先行現象だったのではないかと目されている(e.g., 鶴岡, 1995; Tanaka, 2002 et al.; Li and Xu, 2012; Tanaka, 2012)が、先行性が統計的に有意であるかの検証はなされていない。複雑な解析を要するこのトピックについて網羅的な検証を行うための方策を考察したレビューを行った(岩田, 2015, 東北大学[課題番号:1206])。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についての調査では、中小の地震までまとめてみると有意な相関はないが、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])。

このような潮汐敏感性の出現は断層の物理状態を反映した、本来の意味での「前兆」でありうるが、一方で、潮汐力そのものが日オーダーの先行現象となるような事例も見い出された。Ide et al. (2016)は、朔望周期程度で変化する潮汐応力と地震の相関を調べ、解析できたM8.2以上の地震12個のうち9個が潮汐応力の振幅が上位1/3の時期に起きたことを見出した。このような傾向は巨大地震についてしか見られず、また、同じ解析によって、b値と潮汐力に負の相関が見い出されたことから、潮汐力の高い時には、開始した破壊が止まりにくいのではないかという解釈を提案した(東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。潮汐力の大小は、天体の運行であらかじめ決まっていることで、断層状態の変化を反映した「前兆」ではありえないが、にもかかわらず(中谷, 2019, 東海大学[課題番号:2501])、有意な先行現象として予測には役立つという、「結果としてなる先行現象」のわかりやすい例である。

一方、地殻の物理状態の変化を反映したと思われる新たな現象として、地震波による動

的トリガリングに対する感受性の変化がみつかった。Enescu et al. (2016)は、2016年4月16日の熊本地震の表面波による誘発地震(動的トリガリング)が非常に広域で発生したことを見出した。誘発された活動は遠くは北海道の阿寒湖火山にまで及び、これらは数kPa～数10kPaといった小さな動的応力変化で誘発されている。誘発地震がおこった地域には、以前の大地震(e.g., 2000年鳥取県西部地震Mj7.3など)によって今回以上の応力擾乱を受けたが地震が誘発されなかったところもある。一つの解釈として、2011年東北地方太平洋沖地震の影響で地殻の状態が変化し地震が誘発されやすくなっていたことが考えられる(東北大学[課題番号:1206])。これを受けて動的トリガリング現象の調査を広く進め、静的トリガリングに比べて、現象の継続時間が短い(一週間程度)などの性質が見い出された(Opris et al., 2018, 東北大学[課題番号:1206])。

また、複雑系の臨界現象ではないかと提案されている現象として、さまざまな規模のイベントの発生順序をみるナチュラルタイム解析によって見い出された(Sarlis et al., 2013), 1984-2011の日本付近のM7.6以上の浅発地震6個の全てに数ヶ月先行して起きた活動異常(そのうち最大のもは2011年東北地震)が、震央周辺の活動変化に起因することが示された(Sarlis et al., 2015, 東京大学地震研究所[課題番号:2931])。ただし、この異常は偽陽性も多く、先行性が有意かどうかは検証されていない。

### スロースリップ

固着域の周辺で、きたるべき本震と同じセンスの滑りが起きれば、固着域の载荷が増し、地震の発生を促進する効果があることは自明である。2011年東北地方太平洋沖地震(Kato et al., 2012, Ito et al., 2013; Kato, 2014)以降、観測例が続々と見つかっている(e.g., 加藤, 2018; Kato, 2019 for review)。本計画の本期間で新たに見つかったもの(東北大学[課題番号:1206])としては、2014年イキケ地震(M8.2)(Kato et al., 2016a), 2009年ラクイラ地震(M6.3)(Sugan et al., 2014), 2016年熊本地震(Kato et al., 2016b)などで、破壊開始点へ向う活動のマイグレーションがみられる。また、測地やリピータによるスロースリップの観測がない場合でも、大きな地震に関連した地震活動のマイグレーションがみられる場合もある。2007年能登半島地震(Mw6.7)の本震断層走向方向への余震域の拡大(Kato and Obara, 2014), 2016年鳥取県中部の地震(M6.5)の前2ヶ月間にわたる前震活動では、マイグレーションは飛び飛びに起きており、スロースリップが絡んでいるかはともかく、複雑な断層構造を反映していると考えられる(東北大学[課題番号:1206])。2018年大阪府北部地震の北部延長では、地震活動が遅れて活発化し、その領域の背景地震活動度は時間とともに徐々に増加する傾向を示した。本震によって震源域の北部延長(地殻内)で非地震的な変形が引き起こされたのかもしれない(Kato and Ueda, 2019, 東北大学[課題番号:1206])。

また、小林・弘瀬(2016)は2000年と2005年の銚子市付近、千葉市付近のM6級地震に伴い、地震が発生した太平洋プレート上面付近において、地震時の数倍の規模の非地震性すべりが1-数ヶ月にわたって発生していたことを見出した(気象庁[課題番号:7006])。三陸沖の長期データの調査では、中規模以上の地震が、数年周期で消長を繰り返すゆっくり滑りのさかんな時期に集中する傾向(Uchida et al., 2016)もみられている(東京大学地震研究所[課題番号:1510])。2011年東北沖地震の発生直後には、房総半島沖で地震にSSEが誘発されたと思われるケースもみつかった(Kato et al., 2014, 東北大学[課題番

号:1206])。深部低周波微動のようなもっと小規模なスロースリップは、非常に応力に敏感であることはよく知られている(Obara and Kato, 2016 for review)。深部低周波地震(LFE)の潮汐相関を、豊後水道・東海地方・紀伊半島東部で調べ、相関の程度はそれぞれの地域内で空間的に不均質であることがわかった。豊後水道ではLFE活動の特に高い領域において、その潮汐相関の程度が長期的ゆっくり滑りに関連した時間変化を示したが、東海地方では長期的ゆっくり滑りに関連した時間変化はなく、体積収縮時にLFEが発生する傾向があった(気象庁[課題番号:7006])。また、先述した2次元隠れマルコフモデルを用いて、南海トラフの深部低周波微動の活動に、短期的SSEに週オーダーで先行する特徴や、長期的SSEと関連するかもしれない、数年オーダーの長周期の消長が指摘されている(Wang et al., 2018b, 東北大学[課題番号:1206])。

巨大な深部スロースリップが大地震を誘発したと思われるケースで、時系列が細かく分かっている稀有な例として、1946年の南海地震直前のものがある。Linde and Sacks (2002)は、土佐清水の検潮記録から、本震破壊域の深部延長において2mのスロースリップがあり、四国の海岸部で30cm程度の急速な隆起をもたらしたと推定している。Ohtani et al. (2019)は、サイクルシミュレーションを用いて、深部延長の摩擦がカットオフタイムの長い強度回復機構に支配されることを仮定すれば、このような巨大で急速なSSEが巨大地震の直前に先行するのは、ありふれた現象であり、また、非常に高い確率ゲインをもたらすことを示した(東京大学地震研究所[課題番号:1507])。このシミュレーションで起きた巨大SSEは、あくまで、地震発生域以深の応力蓄積によってタイミングが決ったものであって、固着域の「ぎりぎりさ」を反映したと解釈できるような節は見あたらなかった。すなわち、「前兆」ではなく、先行現象にすぎないようである。1946年南海地震直前の地殻変動の計器観測は、震源域の西の外れで感度の期待できない土佐清水の検潮記録しかないが、過去数回において地震直前(日オーダー)の井戸の水位低下が伝承され、とくに1946年のものについては多数の非常に具体的な証言(中村, 2009)から、数mの水位低下が推定されている。これに関しては海岸部の10cm程度の隆起(Linde and Sacks, 2002)で説明できるとする説(梅田・板場, 2018)も出されているが、同じ地震で多数目撃された直前(半日程度)の数mまでの海水面低下については、その空間・時間分布が複雑で解釈が提出されていなかった。梅田・板場(2018)は、目撃証言の補強と仔細な検討によって、振動性の海水面変動があったと考えるべきと結論し、小さな津波のようなものが地震に先行して起きていたという解釈を提案した(産総研[課題番号:5007])。

また、エピソティックに起きるSSEとは別に、長期的に固着率が下がってゆくという現象も指摘された。Reverso et al. (2016)は、1990年からの房総沖の地震活動度に基づいて、1990年から2011年東北地方太平洋沖地震まで滑り速度が持続的な長期的加速をしていたことを示した(東北大学[課題番号:1206])。これは、同じ時期に指摘されている房総の長期的SSEの間隔低下(Ozawa, 2014)とも調和的である。「壊れ始め」から派生する、真の(津村, 1996)前兆は、むしろ、こういう中期的な時間スケールの現象として現れるのかもしれない(Sagiya, 2018)。

### 地震サイクルと長期予測

長期予測における地震発生確率の時間変化は、地震後経過率のコンセプトによっている。

東北地方太平洋沖地震による内陸断層での地震活動変化の関係を調べたところ、予察的ではあるが、地震後経過率が0（例えば丹那断層）または1に近い（例えば牛伏寺断層）、すなわち最近に活動したかあるいはほぼ満期に近い活断層帯ほど顕著な変化を示す傾向が見られた（東北大学[課題番号:1206]）。また、2014年長野県北部地震（神城断層地震）、2016年熊本地震において、古地震データの再解析や現地調査から、2つの地震ともに地震サイクル後期であったことを確認した。しかし、今まで評価されていた以上に活動間隔や破壊長の大きなゆらぎがあることも明らかになった（Okada et al., 2015；石村・他, 2015；堤・他, 2018；遠田・石村, 2019；Ishimura et al., 2019, 東北大学[課題番号:1206]）。また、2018年大阪府北部地震（Mw5.6）においては、逆断層が最初にずれ、0.3秒後に近くの横ずれ断層も破壊を開始、その後は両方の断層がともに運動したことがわかり（Kato and Ueda, 2019）、水平圧縮応力場が卓越する近畿圏においては、逆断層と横ずれ断層が同時に活動することで1つの地震になる場合があることが明示された。これは、現状の長期評価で考慮されていない要因である（東北大学[課題番号:1206]）。また、この地震は、経過率が高いと考えられている上町断層帯のCFSを0.1MPaほど増加させた（遠田, 2018；Kato and Ueda, 2019, 東北大学[課題番号:1206]）。

現行の長期確率予測の最も基本的なコンセプトは地震の繰り返し性である。繰り返し回数が非常に少ないときの長期的発生確率予測の信頼度について、繰り返し小地震を使った予測実験と、合成データを用いた予測手法の検討を行った。（田中・他, 2018, 気象庁[課題番号:7006]）。基本的には、ベイズ統計対数正規分布モデルに基づく予測が優れており、かなりの好成績で予測できるが、経験した繰り返し回数が4回以下では、回数が少なくなるにつれて成績が着実に悪くなることが定量的に示された。

### 地殻流体

先述の大気中ラドン濃度モニタリングネットワークでは、毎年数施設ずつの過去データをまとめて回収しており、その解析を順次行った（東北大学[課題番号:1207]）。以下に、今期計画期間中の解析によって、平年変動からの残差に異常が見い出された時期に地殻イベントが発生したケースを列挙すると、2003年9月26日十勝沖地震（Mw8.0）の1-4ヶ月後@札幌医科大学；2011年3月11日東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）の4ヶ月前から@札幌医科大学、福島県立医科大学、東北医科薬科大学、獨協医科大学；2008年5月8日茨城県沖地震（Mw6.8）から2008年7月19日福島県沖地震（Mw6.9）の間@福島県立医科大学；2010年3月14日福島県沖地震（Mw6.5）の前1年から後10ヶ月@福島県立医科大学；2011年7月5日和歌山北部の内陸浅部地震（Mj5.5）の前数ヶ月@和歌山県立医大；2014年11月22日長野県神城断層地震（Mj6.7）の前1ヶ月@信州大学松本キャンパス；2016年10月21日鳥取中部地震（Mj6.6）の前1ヶ月@鳥取大学；2018年6月18日大阪府北部地震（Mj6.1）から3ヶ月間@大阪薬科大学、となる。2018年9月6日北海道胆振東部地震（Mj6.7）の時期の札幌医科大学のデータには特に異常はなかった。なお、異常は地殻イベントのない時でも発生しており、後述する札幌医科大学と福島県立医科大学のデータ以外では、相関が有意であるかの検証はなされていない。

大気中ラドンは、地殻ガス起源であるから、面積ひずみとの比較も行われた。2003年9月26日十勝沖地震を含む2002-2006年札幌医科大学での大気中ラドン濃度の平年変動から

の残差時系列を、周辺の面積ひずみの時系列と比較すると、地震後にみられた大気中ラドン濃度が増加は、面積ひずみ(速度)が増加( $4 \times 10^{-7}$ 程度)した時期と同じか、やや遅れていた。福島医科大(2002-2011年)でも面積ひずみの増加( $1 \times 10^{-7}$ 程度)時期と大気中ラドン濃度の変動時期に関係があるようにみえる。

札幌医科大学と福島県立医科大学のデータについては、先述の部分空間法による異常検出を行い、異常度の時系列と、周辺の地震活動度時系列(地震モーメントの時間積算)との時系列類似度を動的時間伸縮法(Berndt and Clifford, 1994)で求めたところ、両者に相関がないという帰無仮説のp値は、札幌医科大学で1.9%、福島県立医科大学で13.2%であった(Iwata et al., 2018)。なお、この時系列類似度の算出においてはラドン異常と地震のどちらが先かは問うていない。

また、大気中ラドン濃度の外的刺激への応答性が、大地震と関連して変化したと思われる例も見つかった(東北大学[課題番号:1207])。神戸薬科大学のデータの潮汐分潮解析では、1984-1988年では認められなかったK1分潮に対する変化が兵庫県南部地震前の1990年-1994年の期間では認められた。札幌医科大学データの季節変動の振幅は東北地方太平洋沖地震を境に増加したことが見い出された。

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の前には様々な先行時間の異常があった(Nagao et al., 2014 for review, 東海大学[課題番号:2501])。井戸水の水位低下・混濁については、1933年の昭和三陸地震(Mw8.4)の20日前から3カ所で確認され(吉村, 2004)ているため、三陸地方で今回も同様の現象がなかったか調査した(東京学芸大学[課題番号:2930])。水温と水位の連続記録をとっていた大船渡市の五葉温泉の源泉井戸(深井戸, 被圧)では、上述の大気中ラドン濃度変動とほぼ同じ時期である、地震の三ヶ月前に水位と水温が大きく低下し地震発生までその状態が持続していた(Orihara et al., 2014)。このような大きな変動は、データのある3.5年間にこの一度だけであった。また、仙台市のもつ地下水観測井44個のうちの一つでもほぼ同時期に急激な水位低下があった。また、宮城県石巻市から岩手県山田町までの三陸海岸地域の聞き取り調査で異常の有無が確認できた17カ所のうち異常があったのは大船渡市の正源寺(1ヶ月前から水位低下)と気仙沼市の万福寺(開始時期不明)の2カ所であった(織原・鴨川, 2016)。どちらも、不圧の浅井戸である。前者では、昭和三陸地震の時も20日前から混濁があった。さらに、より北部の宮古市から青森県八戸市についても聞き取りと、自治体の所有井戸の記録の調査をしたが、東北地方太平洋沖地震に先行した異常は見つからなかった。また、2016年熊本地震の発生をうけて、熊本市が公開している日次データ(深井戸16本, 浅井戸8本, 震源から約10km以内)を精査したが地震の先行変化といえそうなものはなかった(織原・他, 2016, 東京学芸大学[課題番号:2930])。

## 電磁気

気象庁柿岡地磁気観測所の2001-2010年のULF帯地磁気3成分データについて、人工ノイズを避けるため夜中の0.01Hz帯だけを見て、日毎の異常の有無と周辺100km以内のM>4の地震50個との関係性を評価したところ、地震の8日前に前兆的異常があるとして予測を作った場合に3倍強の確率利得がえられ、また、ROC解析で安定して95%有意をクリアできていることがわかった(Han et al., 2017, 東海大学[課題番号:2501])。

先述のVLF帯電磁波パルスについては、観測点ネットワークの中で起きた2017年6月25日

の長野県西部の地震(M5.6)の5日前から翌日までのデータを精査したところ、地震の2日前だけに7個のパルスが観測されていた。それらは、波形・スペクトルが互いによく似ている。落雷情報データから、この時刻に中部日本で雷活動は発生していなかったことを確認している。到達時間差から位置標定された電磁パルスの波源は、いずれも震央から約20km以内であり、特に決定精度の高かった2つは震央から10km弱のほぼ同じ位置に決まっている(Nagao et al., 2018, 東海大学 [課題番号: 2501])。また、位置標定はできていないが、4月14日の熊本地震(M6.5)の2日前にも、全国的に雷フリーであった時刻に、小金井と静岡で九州方面から到来した電磁パルスが観測された(東海大学 [課題番号: 2501])。

先述のVHF帯FM放送波を利用した見通し外伝播異常(e.g., Moriya et al., 2010)の検出においては、地震活動の活発な日高山脈上を通る広尾放送局-えりも観測点の経路について、2006年3月1日から2014年12月31日までの連続受信強度記録から客観的な基準で回顧的に予測を作成し、有意な先行性が認められるかを評価した。異常判定の閾値を固定して作った予測では、異常から4日間警報をたてた場合、警報分率17%で、半径100km以内のM>5地震19個のうち7個が警報ONの時に起きたことになり、確率ゲインが2.1、p値が3.6%となった(森田・他, 2016)。さらに、異常判定の閾値を過去30日のデータからadaptiveに決めるように工夫すると、警報分率を大きく抑えることができ、警報期間3-5日で確率ゲインが6以上、p値が5%以下を安定して達成することができた(東海大学 [課題番号: 2501])。

2016年の熊本地震系列は、4月14日21時26分のMw6.0の地震から開始したが、島原観測点では、4月14日の朝に、伝播経路に熊本地震の震源域を挟む宮崎放送局からの見通し外伝播が発生していた。到来方向を調べたところ、通常、宮崎局からの電波は南東から到来するが、このときは、ほぼ真東にある震央の方向を向いていた。また、TEC(電離層全電子数)データの解析によれば、この時にスポラディックE層は発生していなかった。そこで、2015年1月1日から2016年11月30日までの宮崎-島原間の受信強度時系列を網羅的に調査したが、地震発生との統計的に有意な相関はみつからなかった(森田・他, 2018, 東海大学 [課題番号: 2501])。

一方、VHF帯放送波の見通し内伝播異常(谷川・他(2017))についても、群馬大学での観測データについてROC解析で先行性を検証し、M>4.5、深さ50km以内、震央が伝播パスから100km以内であれば95%の有意水準で相関があるといえることがわかった。さらに、異常の閾値を決めるための長期データの必要がない方法として変動値積分法を導入したところ、従来法を上回る予知率20%をえた(Motojima and Ogura, 2017, 東海大学 [課題番号: 2501])。

Heki(2011)が地震先行現象だと指摘した、東北地方太平洋沖地震の40分前からの異常を含む、最近のMw8.3以上の4つの地震に同オーダーの先行時間で起きたTECの正の異常(Heki, 2011)については、異常を定義するための基準曲線を推定するにあたって、地震のある程度以上前とある程度以上後ろのデータを多項式フィットで内挿しているが、実は地震後のTEC擾乱(基本的には減少)が想定より長く続くために、推定された基準曲線は本来あるべき平常日変化よりも下ぶれしており、そのせいでアーティファクトとして地震前の正の異常が見えたのだろうとの批判(Kamogawa and Kakinami, 2013; Masci et al., 2015)があった。しかし、Heki and Enomoto (2015)は、地震後のデータを見ない折れ曲り解析によって、折れ曲りがAICによる客観的判断で検出できることを示し、さらに、主に太陽活動起源である多数の異常を排除する努力を全くしない場合でも、この異常の先行性は統計的に有意であ

ることを示した。さらに、He and Heki (2017)は、数値思考実験によって、いったん、地震前の異常が存在することを認めれば、異常を定義するのに上述のような基準曲線を用いても顕著なアーティファクトは産み出されないことを指摘している。酷いプラズマバブルの発生中で異常の見分けようがないタイミングで起きた2005年Nias地震(Mw8.6)をのぞけば、GNSS-TECデータのあるMw>8.2地震8個の全てに同じパターンの異常が先行し、さらにその折れ曲りの強度、および先行時間が、今から起きる地震のMwに正の依存性をもつことも判明した。数十分という直前の先行現象が高い再現性をもって、しかも地震サイズが破壊開始以前(原理的には異常の開始直後)に予見できるというようなものは、これ以前には全く知られておらず、革命的な発見である。また、地震前の異常の振幅は、その時々背景TECのレベルにも正の依存性を持ち、He and Heki(2017)は、M7級の地震でも背景TECの特に高い時には地震サイズに対して同様のスケーリングを示す先行異常が見られることを示した(日置, 2018, 東海大学 [課題番号: 2501])。

上記の直前異常とは別に、TECには、以前から、台湾、および全世界での統計調査にもとづいて、地震に数日先行する異常が指摘されている(e.g., Liu et al., 2006)。同様の異常を、2000年以降の日本で発生した被害地震12個(M6.5-9.0)に先行する期間で探した。2007年能登半島地震(M6.9)でTECの先行的な増加、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)で先行的な減少が見られたが、それ以外の地震では顕著な異常は見られなかった。東北地方太平洋沖地震の3-4日前のものは非常に顕著であり、廣岡・他(2016)は、ニューラルネットワークを用いたトモグラフィによって高度400km付近に広汎な+190%、250km付近に-60%の異常がみられた。この時、太陽活動は比較的穏やかであった(東海大学[課題番号:2501])。

先述のDEMETER衛星のVLF電磁波強度の減少の地震への先行性については、Nemec et al.(2008, 2009), Pista et al.(2013)が統計的な有意性を示しているが、震源距離に関するbinをサンプル数がイーブンになるようにとりなおし、また地震との時間関係の探索範囲や使用データの拡充も含めた独立な検証を行い、先行研究の結論を支持する結果を得た。また、個別の衛星軌道について、テンプレートをもちいた異常検出を行い、異常判定を厳しくするほど適中率が向上することを確認した。これは、異常に地震先行現象が含まれていたことの明白な証拠である(新田・他, 2016, 東京学芸大学 [課題番号: 2943])。

### その他

チベット盆地の各地では2, 3年おきに絶対重力が計測されており、計測確度を大きく超える、地下物質の密度変化によると思われる時間変化が観測されている。Chen et al., (2015)は、この時間変化と2007-2010年に同地域で起きた $M_s > 6.0$ の13個の地震を比較し、重力変化が地震に数年先行するとして予測した場合に、地震活動度の地域性から作った予測に対して2倍程度の確率ゲインがとれることを示した。ROC解析は、この傾向が99%の有意水準をクリアしていることを示している(東北大学[課題番号:1206])。

## 1. (4) 5年間になされた主要な成果その3:メカニズムの解明

### 断層

プレート境界断層での応力蓄積について、測地学的な滑りの推定を精密にすることによ

って新たな知見が得られた。Ochi (2015)は、中国・四国地方のGNSSデータを解析して求めた1997-2010年のプレート間固着と長期的SSEの履歴の比較から、長期的SSEにより解放されるプレート間固着は滑り欠損により蓄積した量のたかだか40%程度であると結論した。また、6-7年周期で繰り返す長期的SSEから固着状態への回復は1年程度で完了することも見出し出している(産総研[課題番号:5007])。さらに、スロースリップの時期以外でも固着のゆらぎと微動活動のゆらぎに相関があることを見出し、四国地方でみつかった相関のよい場所では、微動発生レートがゼロになるときは固着速度がプレート収束速度に近くなることが期待されることがわかった(Ochi and Tanaka, 2018, 産総研[課題番号:5007])。これは、微動の観測によってプレート境界の固着度の絶対値が推定できることを示唆しており、力学モデルによる発生予測に向けた重要な進展である。

内陸断層での応力について、南アフリカの大深度鉦山で最近大きな地震が発生した、いくつかの断層近傍の絶対応力が様々な方法で測定された(立命館大学[課題番号:2401])。2014年8月のM5.5地震の震源域(地下3.5-7 km)では、ICDP-DSeis計画(Ogasawara et al., 2017)でその上端付近がフルコア掘削され、コア試料の解析(東北大学流体研究所[課題番号:2948])からM5地震の余震発生帯の上端部以深で系統的に差応力が10-20MPa高いことがわかった。断層からは滑り強化性を持つTalcやBiotiteが確認され、活動が新しいことを示唆する非晶質も確認された(金木・他, 2018)。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、地下3 km深で起きたM2.2の破壊開始点そばを貫通した掘削からは、地震前後及び断層や地質構造との位置関係によって有意に異なる応力値が得られた(Abe, 2017)。その差応力レベルはByerlee則に従う高い摩擦係数を示唆するものであった(東京大学地震研究所[課題番号:1507])。

最近の震源決定精度の向上によって、地殻の定常的な地震活動は、地質断層周辺に広がるダメージゾーンに体積的に分布しているのであって、断層面あるいは断層コアに特異的に集中しているわけではないと指摘されている(Hauksson, 2010; Powers and Jordan, 2010)。しかし、南アフリカの鉦山地下では、地質断層の破断面を、その曲りやjog, branch構造まで精細に描き出すような、微小破壊のすぐれて二次元な集中がみられた(Naoi et al., 2015b)。これらの活動にはb値が1より有意に大きい傾向もみうけられ、地殻体積中の地震のpopulationとは別に、断層「面」の性質を反映した、面上の微小破壊のpopulationというものが存在することを示唆している。大地震が既存断層の破壊であることを考えると、こういった面上に局在する活動は、より直接的な情報を持っている可能性がある(東北大学[課題番号:1206])。

成熟した断層においては、母岩同士が直接接触せず、粉体層が介在しており、断層の変位の大部分は粉体層内及び粉体層と母岩の境界でまかなわれている(e.g., Cehster and Chester, 1998)。粉体層のレオロジーについて、粉体層からの棒状固体引き抜きによる粉体層の固化と摩擦抵抗増大(Furuta et al., 2017, 2019)、凝着性を持つ湿った粉体層中の空隙構造の強度や衝突起因流動崩壊(Shinoda et al., 2018; Takizawa et al., 2019)、粉体サイロ流の流れ場制御(Endo et al., 2017; Katsuragi et al., 2018)の室内実験を行って、ドライな粉体層のせん断による固化と破壊、凝着性粉体層の衝突による流動化など、粉体系特有のレオロジー特性を明らかにした。天然の断層では固化と流動化がこれらの複

雑な過程で関連しながら滑りが発生すると考えられる（東京大学地震研究所 [課題番号：1512]）。

### ETASの物理

先述のように、ETAS的な余震トリガは、短期的な前震活動のメカニズムのかなりの部分を占めている。余震の大森則自体には、本震による周辺応力場の変化による遅れ破壊の時間的集中(Dieterich, 1994)という一応の標準的な物理メカニズムがあるが、このモデルで実際の余震活動を予測するとETASよりずっと性能が悪いことが指摘されている。ETASは現状、あくまで経験的なモデルである。Iwata (2016)は、Dieterichモデルに二次余震を取り入れられるように改良し、ETASには及ばないまでも大幅な改善を得た(東北大学[課題番号:1206])。また、Dieterichの物理モデルでは、地域の応力載荷速度と余震継続時間が反比例するべきことが理論的に予想されるが、Toda and Stein (2018)は東北地方太平洋沖地震による12箇所の広域余震活動および東北地方での本震—余震活動8ケースでこの点を検証し、余震継続時間がマグニチュードに依存しないこと、余震継続時間と長期変位速度に負の相関があること、余震継続時間と常時地震活動に負の相関があることを見いだした(東北大学 [課題番号：1206])。この知識は、現在の地震活動が地震サイクルのどこに位置するかを推定する助けになる。

### 階層アスペリティ

地震の動的成長がカスケード的な階層間のトリガリングによる(e.g., Meier et al., 2016)ことなどから、そもそも地震の大きさは地震が発生した時点では決定しておらず、したがって、サイズに関する予見性をもつような先行現象は原理的にありえないのではないか、というのは、この頃ではかなり定着した見方になっている。具体的な階層構造を観測から求める試みとして、釧路沖、那珂沖のM5程度の繰り返し地震グループについて詳細な震源すべり分布を求め、これらの地域ではM5, M4, M3程度の地震性パッチの階層的な構造の存在が示唆された(Okuda and Ide, 2018a, 東京大学理学系研究科 [課題番号：1402])。さらに、これらの中に、異なる規模の地震でも破壊成長曲線がその初期において絶対値で重なる例が見い出された(Okuda and Ide, 2018b, 東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。

b値の一つの解釈として、カスケードアップのしやすさであるという見方だできるだろう。先述したIde et al. (2016)の潮汐応力とb値の負の相関(東京大学理学系研究科[課題番号：1402])は、まさにそれであるが、「地震の止まりにくさ」が時間的に変化しているという事象が見い出されたことには大きな意味がある。例外的な要因であるにしろ、個々の地震の大きさは、時間的に不変なGR則にしたがったサイコロをふる以上に予測のしようがないという常識を覆す(Ogata et al., 2018, 東京大学地震研究所 [課題番号：1511])からである。先述のb値の長期低下や規模別頻度分布のGR則からの逸脱が大地震に対して予測ゲインをもつというのは、そうした例である。

### 準静的な震源核

Noda et al. (2013)は、数値シミュレーションによって、階層的なアスペリティ構造があり、カスケードアップ地震が起きるような断層であっても、地震の最終破壊サイズに応じ

たサイズの準静的震源核を経て地震が起きる場合も可能であることを示している。南アフリカ鉱山では、先述の地震一週間前から加速した前震活動以外にも、準静的な滑りによる震源核形成の可能性を示唆する事例が見つかった；採掘前線による応力の集中を受けた既存の古い地質断層面上に微小破壊の活動域が出現し、さしわたし20m程度まで準静的に拡大してゆく現象が発見された(Naoi et al., 2015c)。その後大きな地震が起きたわけではないので前震ではないが、準静的なすべりが、このような大きなスケールにまで拡がりうることを示す。なお、このサイトで後に行われた絶対応力測定では、非常に高い差応力がみられ(立命館大学 [課題番号：2401])、また、この断層の周囲では多数のドリリングや採掘活動が行われて、高間隙水圧は存在しなかったことがわかっているため、天然断層のもつ臨界滑り距離が実験室での模擬断層面のそれよりずっと大きかったことが示唆される(東北大学 [課題番号：1206])。

また、準静的な滑りによる震源核の形成を示唆する極微小なリピーター前震(前述)を念頭に、すべり方向に1.5m、すべり直交方向に0.5mという大きな断層面をもちいた室内スティック・スリップ実験において、試料内に多数の弾性波センサを埋設して、ごく微小な面上のごく微小地震(AE)を検出・位置標定した。断層ガウジが残置された場合のみ、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、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回の「本震」に対して毎回1-3個ずつ発生した。50回程度の繰り返し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变化は認められなかった(辻村・他, 2017, 立命館大学 [課題番号：2402])。対して、先述の南アフリカの鉱山地下の地質断層面上で発見されたM-4程度の微小リピーター(Naoi et al., 2015a)については、アスペリティの摩耗を示唆する、繰り返しに伴う系統的なマグニチュードの減少がみられた。さらに、この断層では、逆に新たな噛み合いの生成を示唆するような時空間パターンで、全体的な活動の途中の時期から出現したリピーター群もみられた(Yamaguchi et al., 2018, 東北大学 [課題番号：1206])。また、10cm程度の岩石の三軸圧縮破壊試験でも、主破壊に先行して発生した微小破壊の中に、主破壊面に沿う位置に高い波形相関を示すイベントのクラスタを検出した。これらクラスタに属する微小破壊(M-7相当)が自然地震からのスケール則に従うことも見いだされた(Yoshimitsu et al., 2014, 立命館大学 [課題番号：2402])。

### 中期・広域的地震活動

先に、前震活動に関して、加速するプレスリップ vs. ETASによる(カスケード的)トリガリングという解釈を述べたが、これらは、主に短期的な前震活動に関するものと考えられる。しかし、いざ動的破壊が始まった場合にカスケード成長が止まりにくい状況の実現といったような、中期的な準備過程であれば、サイズ予見性をもつことは可能だろう。Lippiello et al. (2012)は、カリフォルニア内陸地震の前後の地震の空間分布の解析から、地震の前には、既にその破壊域全体(=余震域)にあたる領域での地震密度が高まっており、この意味での中期的な前震域の広さがマグニチュード依存性をもつことを見出した。日本の内陸・海域、台湾の地震カタログで同様の解析を行ったところ、いずれにおいても同様の傾向が見いだされた(東京大学地震研究所 [課題番号：2902])

いっぽう、Moriya et al. (2015)は、南アフリカ鉱山地下のインタクトな岩盤内で、推定破壊サイズ数センチの微小破壊(AE)が、厚味2-3m、さしわたし20m程度の大きな板状クラスタを形成する現象を見出した。クラスタは採掘前線の10m程度前方の最大剪断応力ゾーンで形成し、その後採掘位置が前進して高応力ゾーンから外れると活動を止め、その時点の最大剪断応力ゾーンの位置にまた新たなクラスタが形成されるというパターンを繰り返すものであり、既存の弱構造を反映するものではない。クラスタサイズに比肩するような大きな地震は起きなかったため、これは前震ではないが、微小破壊が自発的に集中した巨視的構造を作り出すという、10cm程度の岩石試料で巨視的破壊の準備過程として知られている微小破壊間の相互作用による広域的にコヒーレントな活動がこのようなスケールでも起きることを示しており(Naoi et al., 2016)、中期的・広域的な前震活動(e.g., Zoller, 2001)のメカニズムのヒントになる可能性がある。その後の追加解析では、できかけの断層に特徴的な雁行的階層構造もみつき(山形ら, 2016)、また、採掘域に対する上下の非対称性が岩質境界によるらしい(Mngadi et al., 2019)こともわかった(東北大学[課題番号:1206])。

#### 応力インディケータとしての地震活動

Schorlemmer et al. (2005)、Scholz (2015)は、比較地震テクトニクス的な解析によって、b値の地域性が差応力の地域性を反映していると提案している。全世界の沈み込み帯でのb値をマッピングしたNishikawa and Ide (2014)は、b値に安定した地域性があることを見だし、スラブ浮力が高くプレート境界面が強く押しつけられている地域ほどb値が低い傾向を見出した(東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。

深さ方向に分解能のある震源をうまく活用することで、プレート境界にそ沿ったb値の不均質性を高い空間解像度で求めことにも成功した。Nanjo and Yoshida (2018)は、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ることでb値の詳細な空間分布を求め、巨大地震のアスペリティと対応したセグメント化を見出し、さらに、Yokota et al. (2016)の求めた滑り欠損レートとb値に負の相関があることも見出した。高カップリング域(滑り欠損が大きい)で差応力が大きいことを示唆している。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のかもしれない(東京大学地震研究所[課題番号:2902])。内陸地震の例では、2016年熊本地震に関して、2000年から4月14日のM6.5前震直前までのb値の空間分布を調べたところ、熊本地震はb値の最も低い領域を破壊したことが判明した(Nanjo et al., 2016, 東海大学[課題番号:2501])。さらに、この領域だけでナチュラルタイム解析を行ったところ、2年ほど前から $\kappa_1$ という統計量の値が臨界状態の理論値である0.07を前後してふらつくようになっていたことが見いだされた(東京大学地震研究所[課題番号:2902])。これらの例は、b値が小さいところは、応力が高く大地震の起きるポテンシャルがある場所を探すがかりになる可能性を示している。一方で、Tormann et al. (2015)は、日本海溝から沈み込む太平洋プレート沿いに深さ200km程度までのb値分布を求め、大局的なテクトニクスを反映した差応力の強弱を描き出すことがうかがわれる結果を得たが、それによっ

て個々の巨大地震の発生領域を特定することは困難にみえる(東北大学[課題番号:1206])。

地震活動の増減に関する最も古典的な説明はCFSの時間変化である。しかし、地殻には様々な向きの断層があるので、地震活動の静穏化・活発化とCFSの関連を検証するには、トリガされた地震個々の断層の向きを考慮して行う(東北大学[課題番号:1206])のが本来的に正しいやり方である。Ishibe et al. (2015)は、2011年東北地方太平洋沖地震前後の関東地方の地震活動をこのやり方で解析し、CFSによる解釈を支持する結果を得た。また、Ishibe et al. (2017)は、先行研究(Miao and Zhu, 2012)で静的応力変化のパターンが余震活動と一致しないと指摘されていた最近の3つのメガスラスト地震(2004年スマトラ沖地震・2010年マウレ地震・2011年東北地方太平洋沖地震)について、常時地震・余震のメカニズム節面へのクーロン応力変化( $\Delta$ CFS)を計算し、それらの時系列変化を調べて、3地震とも $\Delta$ CFSが正の地震の割合が本震後に増加、本震前にはほぼ0であった $\Delta$ CFSの中央値が本震後には正の値を示し、時間経過と共に徐々に減衰することを見出した。なお、減衰度は地震毎に特徴があり、スマトラ沖・マウレ地震が1-2年程度でもとに戻ったのに対し、東北沖地震では5年以上高い状態が継続している(東北大学[課題番号:1206])。また、2011年東北地方太平洋沖地震による2008年岩手・宮城内陸地震の余震の静穏化についても、メカニズム解の考察からクーロン応力によると解釈できることが示された。また、2011年東北地方太平洋沖地震後の日本海遠縁部の顕著な静穏化(石辺・他, 2019)についてもメカニズムの変化がみられ、やはり同様の解釈ができる(東北大学[課題番号:1206])。

かねてから、先行現象としての静穏化のメカニズムとして、断層(深部延長)のスロースリップによるCFSの減少が提案されている(e.g., Ogata, 2007)。先述の熊本地震系列での余震静穏化の例に加えて、長期静穏化についても、東北地方太平洋沖地震前の長期静穏化(Katsumata, 2011)の位置は、2002年頃開始した長期的SSE(Yokota and Koketsu, 2015)とほぼ同じであり、また、2004年スマトラ地震前の長期静穏化域(Katsumata, 2015)は、本震震源域の深部延長が先行的に長期的スロースリップを起こしていたとすると、応力的な説明がつく(東北大学[課題番号:1206])。

### 断層力学

断層面の摩擦と周辺岩盤の弾性応答による力学モデルは、比較的アドホックな仮定の少ない物理モデルであり、先行現象の解釈や、演繹的な予測のための手段となる。弘瀬・他(2015)は、南海トラフ沿いのプレート境界形状を用いた地震サイクルシミュレーションにおいて、南海トラフ沿いの巨大地震の発生履歴、比較的良好に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、そして繰り返す長期的スロースリップを再現したが、宝永→安政→昭和の発生順は再現できていない(気象庁[課題番号:7006])。

ある程度大きな地震が、固着域の内部で発生した場合には当然その周囲にかなりの応力集中を起すから、巨大地震を誘発するおそれがある。弘瀬・他(2016)は、このモデルを用いて、2016年4月に紀伊半島南東沖で発生したようなM6クラスの地震が南海トラフ巨大地震に与える影響について数値モデルを用いて調査した。低角・M6.5の地震を仮定した場合、サイクル終盤に擾乱を投入すると擾乱の半年-1年以内に巨大地震を誘発し、規模は若干小さくなった。その他の場合は、巨大地震にはほとんど影響を与えない(気象庁[課題番号:7006])。

前震の問題に限らず、地震断層の不均質と破壊の階層性(e. g., Ide and Aochi, 2005; Noda et al., 2013)は、地震発生の可予測性に関して根本的に重要な問題であり、階層性を具体的にとりこんだ断層モデルのシミュレーションがいくつか行われた。この問題に関するレビューであるIde and Aochi (2014)では、歴史地震とb値分布を用いて階層的パッチの具体的な配置を求め、2011年東北地方太平洋沖地震の破壊過程を再現した例(Ide and Aochi, 2013)を示している。さらに、b値を用いてパッチモデルを構築することが可能であることを、北海道沖で実際にb値の分布を計算して説明し、そのパッチモデルから定性的に将来の地震のシナリオを検討した(東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。いっぽう、日本海溝沿いの広域な領域に対して、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M7-9の主な地震の再現計算を行う試みがなされた(気象庁[課題番号:7006])。M7-8クラスの地震がそれぞれ単独で発生する様子はどちらのモデルでも概ね再現できた。また、M9クラスの地震の破壊域及び余効すべりは階層アスペリティモデルでは概ね再現できた。さらに、津波インバージョンによる断層モデルや過去の大地震周辺の地震活動等からアスペリティの位置をより詳細に設定することで、過去の大地震で見られるような統一的な地震発生パターンを再現できた。

弘瀬・他(2015)は、先述の南海トラフ沿いのプレート境界形状を用いた地震サイクルシミュレーションに階層性を取り込む試みとして、紀伊半島沖のプレスリップ域に小アスペリティを設定した。プレスリップやそれによる陸上観測点で期待される地殻変動の大きさは $\alpha$ (大小アスペリティの大きさの比)に反比例して小さくなり、小アスペリティの破壊が大地震の核形成を代用するカスケードアップ型の地震が発生することがわかった。また、紀伊半島沖に $\alpha=8$ の小アスペリティを設定するだけで、東海地域が割れ残るケースが出現した。このパターンは東海地域の固着の剥がれが不十分な状態で周囲から破壊が進展してきた場合に現れる。東海地域の割れ残りを再現するために、東海地域に沈み込んだ海山を模したパラメータ(大きな特徴的すべり量)を必ずしも与える必要はないことを示している(気象庁[課題番号:7006])。

また、階層的な不均一性の影響のより一般的な考察として、コントロール集合的な摩擦の不均質性を仮定したシミュレーションにおいて、破壊エネルギー等の摩擦エネルギーや実行的な臨界滑り距離のスケール依存性が現れることが示された。また、不均質の統計的特徴によって、断層すべりの脆性度が系統的に変化することも示された(Yabe and Ide, 2017, 東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。いっぽう、Yabe and Ide (2018)は、摩擦の不均質性によって、プレスリップによる震源核から逆大森則に従う前震活動が産みだされているような状況でも、前震による擾乱のため、プレスリップが単調に加速していくとは限らないことを示した(東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。

弾性体中の応力分布を可視化しながら滑り実験が行えるゲルシートを用いたアナログ実験では、従来のゲル対固い物体の実験(e. g., Rubinstein et al., 2004)ではなく、ゲル同士の滑り実験が可能になり、天然の断層に近い状況が再現できるようになった。摩擦面の凹凸や法線応力の不均一性がすべりダイナミクスに大きな影響を与える様子を詳細に解明した。例えば、ゆっくりすべりと高速破壊の共存、スーパーシアア破壊、イベントサイズ vs 持続時間のスケーリング、ゆっくりすべりと微動の同期など、断層でみられる多彩な地震現象を再現することができた(Yamaguchi et al., 2015a, b, 2016, 東京大学地震研究所)

[課題番号：1512] )。また、大型岩石試料にひずみゲージを多数配置した滑り実験でも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してゆっくり滑りとカスケードアップの役割を観察した(Yamashita et al., 2017; Fukuyama et al., 2018, 立命館大学[課題番号:2402])。また、数理モデルでは、RSFを用いた一次元・二次元のバネブロックモデルにおいて、破壊核形成過程～高速破壊(本震)～余効すべりという一連のすべり挙動のみならず、摩擦パラメタに応じて短期的・長期的なスロースリップイベント等の多様なすべり様式が現われることを、シミュレーションと数学的解析により示した(Ueda et al., 2015; Kawamura et al., 2018a,b, 東京大学地震研究所 [課題番号：1512] )。

### 臨界現象

一般に、ナチュラルタイム解析で得られる $\kappa 1$ パラメタは、臨界状態において0.07に近付くとされる。粉体層に金属球を押し込んだときにバースト的に発生する弾性波放射イベント(AE)がGR則にしたがうことに着目し、そのナチュラルタイム解析を行ったが、AEバーストの実験では様々な値がみられ、GR則が成り立つからといって系が臨界状態にあるとは限らないことが示唆された。一方で、二つの連続するAEの振幅差が、自己組織化臨界現象に特徴的なq-ガウス分布にしたがうことがみつかった(Tsuji and Katsuragi, 2015, 地震研[課題番号:1512])。

1995年の兵庫県南部地震に先立つ大気中ラドン濃度の異常は、臨界現象理論で知られる対数周期振動を示し、べき的に増加した(Yasuoka et al., 2006)ことが知られている。同様に、季節変化と長期トレンド除去後の福島県立医科大学データの積算値が、2008年以降東北地方太平洋沖地震まで対数周期振動を示し、べき的に増加していたことが確認された(東北大学[課題番号:1207])。同地震では、地震活動の積算ベニオフひずみに関しても同様の傾向(Xue et al., 2012)が報告されている。発散に向う振動現象は、先述のゲルシートを使った摩擦実験においても観察されており、そこでは、ゆっくりすべりの継続時間が系の駆動速度とべき的な関係をもつことも見い出された(東京大学地震研究所 [課題番号：1512] )。

地震活動の複雑さの背後にある物理メカニズムを考察するために、岩石破壊の離散モデル(ファイバーバンドルモデル)の数学解析と数値実験を行った(Roy and Hatano, 2018, 東京大学地震研究所 [課題番号：1512] )。このモデルはレオロジー的仮定を一切含まないが、構成要素の微小破壊に伴う応力再配分によりクリープ破壊的挙動が再現されることを示し、そのメカニズムがサドルノード分岐であることを示した。応力をステップ関数的に載荷した際の緩和挙動は大森則に従い、系が完全に破壊される直前には逆大森則に従って破壊が加速することを発見した。さらに、大森則におけるc値の決まり方に注目して解析を行い、c値が応力について弱い正の依存性をもつこと、および、系の不均質性が増すとc値は減少することを示した。特に後者は「複雑な断層形状ほど小さいc値をもつ」ことを示唆する。

ETASは、確率的なトリガリングの繰り返しで表現されたモデルであり、その振舞いを数学的に解析することができ(東北大学[課題番号:1206])、分岐比とよばれるパラメタが1未満である時には活動は必ず収束する。Luo and Zhuang (2016)は、分岐比が1である場合の解析が先行研究全てで間違っていたことを示し、一発目の地震のマグニチュードによって、

そのあと起きる最大の地震の確率分布を求め、ETASパラメタの $\alpha$ （余震生産性のマグニチュード依存性）とGR則の $b$ 値の比によって、そのふるまいが3つの領域に別れることを示した。最大余震の大きさに関するバスの法則も導かれている。分岐比は、応力レベル等の物理条件で時空間変化するはずであるから、これが、本報告でいうところの中期・広域的な地震活動の変調を用いた地震の予測性の源である可能性が考えられる(Zhuang, 2018)。いっぽう、分岐モデルを動的な破壊成長のモデルとみなした場合には、GR則やその破れ、破壊成長曲線の多様性などが説明できる(Zhuang et al., 2016, 東北大学[課題番号:1206])。

静穏化時に地震数が減少するのはある程度以上の大きさの中規模地震であるという指摘(e.g., Smith and Sacks, 2013, Suyehiro et al., 2014)がある。Suyehiro et al. (2015)は、破壊強度がわりふられた個々のセルが破壊を起こすと周囲に応力を再分配するセルオートマトンモデル(e.g., Rydelek and Sacks, 1996)を用いた地震サイクルのシミュレーションにおいて、ダイラタンシーハードニングを模擬して最も破壊強度に近い応力がかかっている小数のセルで強度をわずかに増加させるとこの現象が再現されることを見いだした(東海大学[課題番号:2501])。

### 電磁気

He and Heki (2016)は、先述の巨大地震直前数十分のGNSS-TEC変化について、GNSS局の配置が良かったチリの2010年マウレ(Mw8.8)、2014年イキケ(Mw8.2)、2015年イラペル(Mw8.3)地震直前の電離圏の異常の空間分布を調べた。それぞれMwに応じた空間的広がりを持つ異常が、Mwに応じた先行時間をもって、Mwに応じた強さであらわれていた。特にGNSS局の分布が良い2015年イラペル地震に関して三次元トモグラフィーを行った結果、磁場に沿って低高度に正の異常が、高高度に負の異常が並んで生じる構像を見出した。このような異常の空間構造と、異常の強度が背景TECへ依存することをヒントに、Kelley et al. (2017)は、震源域の地表に0.2V/m程度の電界異常が起きれば観測された程度の異常が説明できることを示した。また、2011年東北地方太平洋沖地震については、震源域の地磁気共役点であるオーストラリアでも、同様の異常がみつかっており(日置, 2018)、この先行現象が「電気仕掛け」であることをサポートする(東海大学[課題番号:2501])。

先述のDEMETER衛星で観測された地震数時間前のVLF電磁波強度の減少について、地震に先行した変動がみられた衛星軌道の電場データをスタックすると震央最接近の時刻で平均強度が減少することを見出した(Togo et al., 2016)。さらに、メカニズムの解明のために、雷によって発せられたホイスラー波強度を分析したところ、伝搬経路が地震の震央付近を通る場合には強い吸収を受けることを見出した(Nitta et al., 2016)。伝搬経路シミュレーションからは、そのような吸収がおこるのは高度90-200 kmの電離圏下部で数十パーセント電子密度が増加した場合であることが示唆される(東京学芸大学[課題番号:2943])。先述の巨大地震数十分前のGNSS-TECの異常と関連している可能性も考えられる。

地電位の観測データに先行現象が含まれる場合があることには、統計的な有意性が示されているケース(e.g., Zhuang et al., 2005)もある。界面導電現象はしばしばそのメカニズムとして取り上げられる。地殻での因果関係の明白な例として、三宅島で2000年にカルデラ陥没に先立って火口付近に繰返し発生した時定数20秒程度の力学的イベントに伴い、全島で観測された時定数100秒程度のコサイスマミックな地電位の変化(Sasai et al., 2001,

2002)がある。Kuвано et al. (2015)はこのデータをモデリングし、これまでいわれていた力学現象のソース域での水流ではなく、コサイスミックなひずみによる間隙弾性効果による水流が観測点の周囲におこした界面動電現象であるとして定量的に説明できることを示した(東海大学 [課題番号: 2501])。

## 成果リスト(5ヶ年用)

- 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.
- 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.
- 馬場久紀, 平田賢治, 山崎明, 対馬弘晃, 勝間田明男, 前田憲二, 上野寛, 青木重樹, 小林昭夫, 中田健嗣, 木村一洋, 弘瀬冬樹, 藤田健一, 長尾年恭, 2015, 自己浮上式海底地震計(OBS)を用いた駿河湾石花海周辺海域における連続地震観測, 東海大学海洋研究所研究報告, 36, 23-39.
- Chen, S., C. Jiang, and J. Zhuang, 2015, Statistical Evaluation of Efficiency and Possibility of Earthquake Predictions with Gravity Field Variation and its Analytic Signal in Western China, *Pure and Applied Geophysics*, 173, 305-319, doi:10.1007/s00024-015-1114-x.
- 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.
- Enescu, B., Shimojo, K., Opris, A., and Y. Yagi, 2016, Remote triggering of seismicity at Japanese volcanoes following the 2016 M7.3 Kumamoto earthquake, *Earth, Planets and Space*, 68:165, doi: 10.1186/s40623-016-0539-5.
- 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*, 733, 182-192, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.12.023>.
- Funato, A., T. Ito, 2017, A new method of diametrical core deformation analysis for in-situ stress measurements, *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, 91, 112-118.
- 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.
- Furuta, T., S. Kumar, K. Anki Reddy, H. Niiya, and H. Katsuragi, 2019, Packing-dependent granular friction exerted on a rod withdrawn from a granular layer: the role of shear jamming, *New J. Phys.* accepted.
- Guo, Y., J. Zhuang, and S. Zhou, 2015, An improved space-time ETAS model for inverting the rupture geometry from seismicity triggering, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 3309-3323, doi:10.1002/2015JB011979.

- 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.
- Guo, Y., J Zhuang, N Hirata, 2018, Modelling and forecasting 3D-hypocentre seismicity in the Kanto region, *Geophys. J. Int.*, ggy154, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy154>.
- 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, *Geophysical Journal International*, 208, 482-490, doi:10.1093/gji/ggw404.
- Hayashi, K., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Muto, J., Ishikawa, T., Omori, Y., Suzuki, T., Homma, Y., and Mukai, T., 2015, Normal seasonal variations for atmospheric radon concentration: A sinusoidal model. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 149-153.
- He, L. and K. Heki, 2016, Three-dimensional distribution of ionospheric anomalies prior to three large earthquakes in Chile, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7287-7293, doi:10.1002/2016GL069863.
- 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.
- Heki, K. and Y. Enomoto, 2015, Mw dependence of the preseismic ionospheric electron enhancements, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, DOI: 10.1002/2015JA021353.
- 日置幸介, 2018, 地震直前の電離圏変化, *パリテイ*, Vol.33, No.2, 52-56.
- Higuchi, S., Kamishiro, Y., Ishihara, M., Yasuoka, Y., Mori, Y., Hosoda, M., Iwaoka, K., Tokonami, S., Takahashi, R., Janik, M., Muto, J., Nagahama, and H., Mukai, T., 2019, Evaluation of a radon air monitor in the measurement of radon concentration in water in comparison with a liquid scintillation counter. *Radiation Protection Dosimetry*, in press.
- Hirano, S., Y. Toyomoto, H. Kawakata, and I. Doi, 2018a, Application of Extreme Value Theory to a Matched-Filter Analysis, 10th ACES International Workshop -Toward Comprehensive Understanding of Earthquake Physics-.
- Hirano, S., Y. Toyomoto, H. Kawakata, and I. Doi, 2018b, Objective matched-filter analysis for detecting small events, International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop on Earthquake Preparation Process, ~Observation, Validation, Modeling, Forecasting~, Chiba, Japan.
- Hirata, N. and H. Tsuruoka, and D. Schorlemmer, 2015, Five-year Japanese earthquake predictability experiment with multiple runs since 2009 including the 2011 Tohoku-oki earthquake, Abstract of the 9th International Workshop on Statistical Seismology (StatSei9) in Potsdam.
- Hirata, N. and Tsuruoka, H., 2017, CSEP-Japan earthquake predictability experiment

- and testing results, Abstract of the 10th International Workshop on Statistical Seismology (StatSei10) in Wellington.
- 廣岡伸治, 市川卓, 服部克巳, 韓鵬, 吉野千恵, 劉正彦, 2016, 2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) に先行する電離圏異常の時空間分布, 電気気学会論文誌基礎・材料・共通部門誌, 136, 265-271, DOI: 10.1541/ieejfms.136.265.
- 弘瀬冬樹・中西一郎, 2015, 1854年安政南海地震による愛媛県最南端(愛南町)での地震動・津波被害・地下水位変化-庄屋史料と藩史料の比較から分かる庄屋史料の有用性と地殻変動推定の可能性-, 地震 2, 68, 107-124.
- 弘瀬冬樹・前田憲二・藤田健一, 2015, 南海トラフ沿い巨大地震とスロースリップ, 地震予知連絡会会報, 93, 429-431.
- 弘瀬冬樹・前田憲二・藤田健一, 2016, 三重県南東沖の地震(2016年4月1日, M6.5)による南海トラフ大地震に対する影響, 地震予知連絡会会報, 96, 311-316.
- 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.
- Ide, S., and H. Aochi, 2014, Modeling earthquakes using fractal circular patch models with lessons from the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Journal of Disaster Research, 9(3), 264-271.
- Ide, S., S. Yabe, and Y. Tanaka, 2016, Earthquake potential revealed by tidal influence on earthquake size-frequency statistics, Nature Geoscience, 9, 834-837.
- Ishibe, T., H. Tsuruoka, K. Satake and M. Nakatani, 2014, A Focal Mechanism Solution Catalog of Earthquakes in and around the Japanese Islands for 1985-1998, Bull. Seism. Soc. Am., 104, 1031-1036, doi: 10.1785/0120130278.
- Ishibe, T., K. Satake, S. Sakai, K. Shimazaki, H. Tsuruoka, Y. Yokota, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2015, Correlation between Coulomb stress imparted by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and seismicity rate change in Kanto, Japan, Geophys. J. Int., doi: 10.1093/gji/ggv001.
- 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.
- 石辺岳男・橋間昭徳・松浦律子・津村建四朗, 2019, 東北地方太平洋沖地震の背弧側における地震活動度の変化について, CSEP-Japan (日本における地震活動に基づく地震発生予測検証実験) 研究集会, 2019年1月28-29日, 東京大学地震研究所, 東京都文京区.
- 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.
- Ishihara, M., Yoshii, M. Minami, N., Yasuoka Y., Tokonami, S., Nagahama, H., and Mukai, T., 2018, Airborne radon concentration measurements using gas-flow Ionization chambers and the effects of temperature changes. Proceeding of the 19th Workshop on Environmental Radioactivity, Bessho, K., Matsumura, H., Miura, T, Tagami, K., Takamiya, K., (Eds). (2018, May). Tsukuba, p. 288-293.
- 石村大輔・岡田真介・丹羽雄一・遠田晋次, 2015, 2014年11月22日長野県北部の地震 (Mw6.2)

- によって出現した神城断層沿いの地表地震断層の分布と性状, 活断層研究, 43, 95-107.
- Ishimura, D., S. Toda, S. Mukoyama, S. Homma, K. Yamaguchi, and N. Takahashi, 2019, Three-dimensional surface displacement and surface ruptures associated with the 2014 Mw6.2 Nagano earthquake using differential LiDAR, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, in press.
- Itaba, S., 2018, Rapid estimation of the moment magnitude of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0) from static strain changes, *Earth, Planets and Space*, 70, doi:10.1186/s40623-018-0894-5.
- Iwata, T., 2014, Decomposition of seasonality and long-term trend in seismological data: a Bayesian modelling of earthquake detection capability, *Australian & New Zealand Journal of Statistics*, 56, 201-215.
- 岩田貴樹, 2015, 地球潮汐と地震活動との相関を用いた地震活動予測, *統計数理*, 63, 129-144.
- Iwata, T., 2016, A variety of aftershock decays in the rate- and state-friction model due to the effect of secondary aftershocks: Implications derived from an analysis of real aftershock sequences, *Pure and Applied Geophysics*, 173, 21-33.
- Iwata, T., 2018, A Bayesian approach to estimating a spatial stress pattern from P wave first-motions, *J. Geophys. Res.*, 123, 4841-4858, doi:10.1002/2017JB015359.
- Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., and Yasuoka, Y., 2018, Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes, *Scientific Reports*, 8(1), 13028.
- 井筒 潤, 長尾年恭, 2016, 地震災害予測のためのb値の空間分布マッピングと時系列変化, *東海大学海洋 研究所研究報告*, 37, 21-28.
- Kame, K., K. Nagata, M. Nakatani and T. Kusakabe, 2014, Feasibility of acoustic monitoring of strength drop precursory to earthquake occurrence, *Earth Planets and Space*, 2014, 66:41, doi:10.1186/1880-5981-66-41.
- Kamogawa et al., 2018, Evaluation of the pre-seismic DEMETER's VLF intensity decrease identified by the functional principal component analysis, *The 3rd International Workshop of CSES Mission*, 16-18 Nov. 2018, Beijing, China.
- 鴨川仁, 山崎政彦, 日置幸介, 長尾年恭, 八木橋 宏之, 児玉哲哉, 2018, 超小型衛星群とグローバル地上局ネットワークによる地震発生予測, *宇宙ビジネスアイデアコンテスト (S-Booster) ファイナリスト*.
- 金木俊也・横山友輝・廣野哲朗・矢部康男・小笠原宏, 2018, M5.5 Orkney 地震の余震発生帯から回収された断層岩の鉱物学的特徴 (ICDP DSeis project), *日本地震学会*, S08-06, 郡山, 2018年10月10日.
- Kato, A., 2014, Slow Slip Transients Before the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Journal of Disaster Research*, 9, 311-316.
- Kato, A. and K. Obara, 2014, Step-like migration of early aftershocks following the 2007 Mw 6.7 Noto-Hanto earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL060427.

- Kato, A. T. Igarashi and K. Obara, 2014, Detection of a hidden Boso slow slip event immediately after the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL061053.
- Kato, A., J. Fukuda, T. Kumazawa and S. Nakagawa, 2016a, Accelerated nucleation of the 2014 Iquique, Chile Mw 8.2 Earthquake, *Scientific Reports*, 6, 24792, doi: 10.1038/srep24792.
- Kato, A., J. Fukuda, S. Nakagawa and K. Obara, 2016b, Foreshock migration preceding the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL070079.
- 加藤愛太郎, 2018, 間欠的な固着のはがれと大地震の発生, *パリテイ*, 33, 06, 48-51.
- Kato, A, 2019, The evolution of fault slip rate prior to earthquake: The role of slow and fast slip modes, *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, in press.
- Kato, A. and T. Ueda, 2019, Source fault model of the 2018 Mw 5.6 northern Osaka earthquake, Japan, inferred from the aftershock sequence, *Earth Planets Space*, 77, 11, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-0>.
- Katsumata, K., 2015, A Long - Term Seismic Quiescence before the 2004 Sumatra (Mw 9.1) Earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 105:167-176; doi:10.1785/0120140116.
- Katsumata, K., 2016, Long-term seismic quiescences and great earthquakes in and around the Japan subduction zone between 1975 and 2012, *Pure and Applied Geophysics*, doi:0.1007/s00024-016-1415-8.
- 勝俣 啓・中谷 正生, 2018a, 静穏化による地震の長期予測の試行~千島・東北・伊豆小笠原沈み込み帯の場合, *地球惑星連合大会, SSS13-04, 幕張, May 24, 2018*.
- 勝俣啓・中谷正生, 2018b, 静穏化による長期予測の試行~予測と検証, *日本地震学会秋季大会, 2018年10月10日, 郡山, S23-01, 2018*.
- Katsuragi, H., K. Anki Reddy, and K. Endo, 2018, Shape dependence of resistance force exerted on an obstacle placed in a gravity-driven granular silo flow, *AIChE J.* 64, 3849-3856.
- Kawamura, H., Maho Yamamoto and Yushi Ueda, 2018a, Slow-slip phenomena represented by the one-dimensional Burridge-Knopoff model of earthquakes. *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 053001-(1-4).
- Kawamura, H., K. Yoshimura, and S. Kakui, 2018b, Nature of the high-speed rupture of the two-dimensional Burridge-Knopoff model of earthquakes. *Phil. Trans. R. Soc. A* 377 20170391.
- 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.
- 菊池秀乙, 山崎政彦, 鴨川仁, 宮崎康行, 2018, 地震先行現象検証衛星 PRELUDE の自動運用システムの研究開発, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3M14, 1-6.

- Kinoshita, C., and D. M. Saffer, 2018, In Situ Permeability and Scale Dependence of an Active Accretionary Prism Determined From Cross-Borehole Experiments, *Geophysical Research Letters*, 45, 6935-6943, doi:10.1029/2018gl078304.
- 北川有一・松本則夫, 2016, 井戸密閉化による地下水位の地殻ひずみ応答の改善-北勢観測点の場合-, 日本地震学会 2016 年秋季大会, S13-01.
- Kobayashi, Y., Yasuoka, Y., Omori, Y., Nagahama, H., Sanada, T., Muto, J., Suzuki, T., Homma, Y., Ihara, H., Kubota, K., and Mukai, T., 2015, Annual variation in the atmospheric radon concentration in Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 146, 110-118.
- 小林昭夫・弘瀬冬樹, 2016, 千葉県北部の地震活動と同期した非地震性すべり, *地震*, 69, 1-9.
- 児玉哲哉, 2018, 01新世紀地震フロンティア研究: 地上-衛星連携による地震先行現象の確立, *パリティ Vol. 33(5)*.
- 小泉尚嗣・木下千裕, 2015, 2014年3月14日の伊予灘の地震(M6.2)に伴う道後温泉の水位変化, *東濃地震科学研究所報告*, 34, 45-52.
- 國友孝洋・山岡耕春・渡辺俊樹・吉田康宏・勝間田明男・生田領野・加藤愛太郎・飯高 隆・津村紀子・大久保慎人, 2014, 弾性波アクロスによる東海地域地殻のP波およびS波速度構造の推定, *地震2*, 67, 1-24.
- Kuwano, O., S. Yoshida, M. Nakatani, and M. Uyeshima, 2015, Origin of transient self-potential signals associated with very long period seismic pulses observed during the 2000 activity of Miyakejima volcano, *J. Geophys. Res.*, 120, 3544-3565, doi:10.1002/2014JB011740.
- Luo, J. and J. Zhuang, 2016, Three regimes of the distribution of the largest event in the critical ETAS model, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 106(3), 1364-1369. doi:10.1785/0120150324.
- 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.
- 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.
- 宮岡一樹・木村久夫, 2016, ひずみ計によるスタッキング法を用いた長期的ゆっくりすべりの検出, *験震時報*, 79, 15-23.
- Mngadi, S. B., R. J. Durrheim, M. S. D. Manzi, H. Ogasawara, Y. Yabe, H. Yilmaz, N. Wechsler, G. Van aswegen, D. Roberts, A. A. K. Ward, M. Naoi, H. Moriya, M. Nakatani, A. Ishida, SATREPS Team, and ICDP Dseis Team, 2019, Integration of underground mapping, petrology, and high-resolution microseismicity analysis to characterise weak geotechnical zones in deep South African gold mines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 114, 79-91, doi: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.003.
- 森田 笙, 中谷 正生, 茂木 透, 2016, 簡単な客観手法で作成した予測マップによるVHF電波伝播異常と地震発生の相関, *JpGU meeting*, 2016年5月.

- 森田 笙・中谷 正生・日置 幸介・茂木 透, 2018, 島原におけるFM電波伝播異常の観測と2016年熊本地震前の異常について, 地球惑星連合大会, MIS09-03, 幕張, May 22, 2018.
- Moriya, H., M. Naoi, M. Nakatani, G. van Aswegen, O. Murakami, T., Kgarume, A. K. Ward, R. J. Durrheim, J. Philipp, Y. Yabe, H. Kawakata, and H. Ogasawara, 2015, Delineation of large localized damage structures forming ahead of an active mining front by using advanced acoustic emission mapping techniques, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, 157-165, doi: 10.1016/j.ijrmms.2015.08.018.
- 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.
- Nagao, T., Y. Orihara, and M. Kamogawa, 2014, Precursory Phenomena Possibly Related to the 2011M9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Journal of Disaster Research*, vol. 9, No. 3, 303-310.
- 長尾年恭・鴨川 仁・馬場久紀・成嶋友祐・高村直也・櫻田哲生・上原 宏, 2016, 東海大学方式VLF帯パルス電磁波観測装置の開発 -地震先行現象の存在証明にむけて-, 東海大学海洋研究所研究報告, 37, 29-36.
- Nagao, T., J. Izutsu, M. Kamogawa, Y. Orihara, S. Sugiura, H. Kondo, 2018, Electromagnetic observation addressed to the short-term earthquake prediction research in VLF band, *Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes 2018 (EMSEV2018)*, Potenza, Italy, September 2018.
- 中谷正生, 2016, 巨大地震の前兆現象, シンポジウム「南海トラフ巨大地震の予測に向けた観測と研究」, 東京, 2016年9月30日.
- Nakatani, M., 2018a, Short-Term Precursors, Why do I care? (invited), *International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process*, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27.
- Nakatani, M., 2018b, Statistical Evaluation of Precursory Phenomena ? A Review (invited), the 17th Japan-Taiwan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, Tsukuba, 4 September, 2018.
- 中谷正生, 2018c, 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, *地震予知連学会会報*, 99, 465-469.
- 中谷正生, 2019, 地震のメカニズム解明—本当に地震予知はナンセンス? あんた, 地震の何なのさ?—短期前兆のメタ理論, *パリティ*, Vol.34, No.2, 84-88.
- Naoi, M., M. Nakatani, T. Igarashi, K. Otsuki, Y. Yabe, T., Kgarume, O. Murakami, T. Masakale, L. Ribeiro, A. Ward, H. Moriya, H., Kawakata, S. Nakao, R. Durrheim, H. Ogasawara, 2015a, Unexpectedly frequent occurrence of very small repeating earthquakes ( $-5.1 < M_w < -3.6$ ) in a South African gold mine: implications for monitoring intraplate faults, *J. Geophys. Res.*, 120, 8478-8493, doi:

- 10.1002/2015JB012447.
- Naoi, M., M. Nakatani, K. Otsuki, Y. Yabe, T. Kgarume, O. Murakami, T. Masakale, L. Ribeiro, A.K. Ward, H. Moriya, H. Kawakata, R. J. Durrheim and H. Ogasawara, 2015b, Steady activity of microfractures on geological faults loaded by mining stress, *Tectonophysics*, 649, 100-114.
- Naoi, M., M. Nakatani, T. Kgarume, S. Khambule, T. Masakale, L. Ribeiro, J. Philipp, S. Horiuchi, K. Otsuki, K. Miyakawa, A. Watanabe, H. Moriya, O. Murakami, Y. Yabe, H. Kawakata, N. Yoshimitsu, A. Ward, R. Durrheim and H. Ogasawara, 2015c, Quasi-static slip patch growth to 20 m on a geological fault inferred from acoustic emissions in a South African gold mine, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2014JB011165.
- Naoi, M., M. Nakatani, H. Moriya, and Y. Yabe, 2016, Acoustic emission monitoring for mitigating seismic risks in deep gold mines in South Africa, *International Journal of the JSRM*, 12, 19-22.
- Nanjo, K. Z., J. Izutsu, Y. Orihara, N. Furuse, S. Togo, H. Nitta, T. Okada, R. Tanaka, M. Kamogawa and T. Nagao, 2016, Seismicity prior to the 2016 Kumamoto earthquakes, *Earth, Planets and Space*, 68:18, DOI:10.1186/s40623-016-0558-2.
- Nanjo, K. Z., and A. Yoshida, 2017, Anomalous decrease in relatively large shocks and increase in the p and b values preceding the April 16, 2016, M7.3 earthquake in Kumamoto, Japan, *Earth, Planets and Space*. 69:13, DOI: 10.1186/s40623-017-0598-2.
- 楠城一嘉, 2018, b値に基づく全地球規模の大地震発生予測のモデル, *地震予知連会会報*, 99, 459-462.
- Nanjo, K.Z. and A. Yoshida, 2018, A b map implying the first eastern rupture of the Nankai Trough earthquakes, *Nature Communications*, 9:1117, DOI:10.1038/s41467-018-03514-3.
- Nitta, H., S. Togo, T. Kodama and M. Kamogawa, 2016, Physical mechanism of pre-seismic VLF intensity decrease observed by DEMETER satellite, In *Proceedings of the CSES workshop, China, 23 August 2016*.
- 新田英智・東郷翔帆・Jean-Jacques Berthelier・児玉哲哉・長尾年恭・鴨川 仁, 2016, DEMETER 衛星の連続 サンプリング VLF帯データを用いた地震先行電離圏擾乱の統計的研究, *大気電気学会第95回研究発表会*, 2017年1月17日.
- Nishikawa, T. and S. Ide, 2014, Earthquake size distribution in subduction zones linked to slab buoyancy, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo2279.
- Nishikawa, T., and S. Ide, 2015, Background seismicity rate at subduction zones linked to slab-bending-related hydration, *Geophysical. Res. Lett.*, 42, 7081-7089, doi:10.1002/2015GL064578.
- Nishikawa, T., and S. Ide, 2017, Detection of earthquake swarms at subduction zones globally: Insights into tectonic controls on swarm activity, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 122(7), 5325-5343, doi:10.1002/2017JB014188.

- Nishikawa, T., and Ide, S., 2018, Recurring slow slip events and earthquake nucleation in the source region of the M 7 Ibaraki - Oki earthquakes revealed by earthquake swarm and foreshock activity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(9), 7950-7968.
- Ochi, T., 2015, Temporal change in plate coupling and long-term slow slip events in southwestern Japan, *Earth Planet Sci. Lett.* 431, 8-14, 118, 4847-4860, doi: 10.1016/j.epsl.2015.09.012.
- Ochi, T., and N. Takeda, 2018, Relation between the coupling and tremor rates in the transition zone around the Shikoku region, *Earth, Planets and Space*, 70, doi:10.1186/s40623-018-0883-8.
- Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, D. Roberts, P. Piper, T. Clements, A.K. Ward, Y. Yabe, H. Yilmaz, and R. J. Durrheim, 2014, BX CCBO in-situ stress measurements at earthquake prone areas in South African gold mines - a summary of mini-workshop on 13 Feb 2014, *Proc. ARMA2014*, Minneapolis, on CD-ROM, paper no. 14-7438.
- 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.
- Ogata, Y., K Katsura, H Tsuruoka and N Hirata, 2018, Exploring Magnitude Forecasting of the Next Earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, 89, 4, 1298-1304, doi: 10.1785/0220180034.
- Okada, S., D. Ishimura, Y. Niwa, and S. Toda, 2015, The first surface-rupturing earthquake in 20 years on a HERP active fault is not 'characteristic:' The 2014 Mw=6.2 Nagano event along the northern Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, *Seismol. Res. Lett.*, 86, 1287-1300, doi: 10.1785/0220150052.
- Okuda, T., and Ide, S., 2018a, Streak and hierarchical structures of the Tohoku-Hokkaido subduction zone plate boundary. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 132.
- Okuda, T., and Ide, S., 2018b, Hierarchical rupture growth evidenced by the initial seismic waveforms. *Nature communications*, 9(1), 3714.
- Omi, T., Ogata, Y., Shiomi, K., Enescu, B., Sawazaki, K., and K. Aihara, 2016, Automatic aftershock forecasting: A test using real-time seismicity data in Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 10.1785/0120160100.
- Omi, T., Y. Ogata, K. Shiomi, B. Enescu, K. Sawazaki, and K. Aihara, 2019, Implementation of a real-time system for automatic aftershock forecasting in Japan, *Seismol. Res. Lett.* 90, 242-250.
- Omori, Y. and Nagahama, H., 2016, Radon as an indicator of nocturnal atmospheric stability: A simplified theoretical approach. *Boundary-Layer Meteorology*, 158,

351-359.

- 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.
- Orihara, Y., M. Kamogawa, and T. Nagao, 2014, Preseismic Changes of the Level and Temperature of Confined Groundwater related to the 2011 Tohoku Earthquake, *Scientific Reports*, doi:10.1038/srep06907.
- 織原義明・鴨川仁・野田洋一, 2014, 東北地方太平洋沖地震前 の漁獲異常に関する調査- 『三陸海岸大津波』との比較-, *地震2輯*, 67(2), 81-85.
- 織原義明・野田洋一, 2015, 2011年東北地方太平洋沖地震前に発生したマス・ストランディング-鹿島灘における鯨類のストランディングと日本周辺の地震との関係-, *東海大学海洋研究所研究報告*, 36, 39-46.
- 織原義明・長尾年恭, 2015, 『地震前兆現象を科学する』, 祥伝社新書, 226pp.
- 織原義明・鴨川 仁, 2016, 三陸地方における東北地方太平洋沖地震前の井戸水異常の調査 - 岩手県山田町から宮城県石巻市にかけて -, *地震2輯*, 69, 31-34.
- 織原義明・鴨川 仁・長尾年恭, 2016, 熊本市が公開する地下水位データにみる2016年熊本地震の先行現象に 関する考察, *日本地震学会講演予稿集2016年度秋季大会*, S14-11.
- Orihara, Y., M. Kamogawa, Y. Noda, and T. Nagao, 2018, Are deep-fish appearances an earthquake precursor?, *EMSEV (Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes) 2018 International Workshop Abstracts*, 203.
- Reverso, T., Marsan, D., Helmstetter, A., and B. Enescu, 2016, Background seismicity in Boso Peninsula, Japan: Long-term acceleration, and relationship with slow slip events, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5671-5679, doi:10.1002/2016GL0685.
- Roy, S. and T. Hatano, 2018, Creep-like behavior in athermal threshold dynamics: Effects of disorder and stress. *Phys. Rev. E* 97, 062149.
- Sarlis, N. V., E. S. Skordas, P. A. Varotsos, T. Nagao, M. Kamogawa, and S. Uyeda, 2015, Spatiotemporal variation of seismicity before major earthquakes in the Japanese area and their relation with the epicentral locations, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 112, 4, 986-989.
- Schorlemmer, D., N. Hirata, Y. Ishigaki, K. Doi, K. Z. Nanjo, H. Tsuruoka, T. Beutin, and F. Euchner, 2018a, Earthquake Detection Probabilities in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 108(2), 702-717, doi: <https://doi.org/10.1785/0120170-217>.
- Schorlemmer, D., M. J. Werner, W. Marzocchi, T. H. Jordan, Y. Ogata, D. D. Jackson, S. Mak, D., A. Rhoades, M. C. Gerstenberger, N. Hirata, M. Liukis, P. J. M., A. Strader, M. Taroni, S. Wiemer, J. D. Zechar, and J. Zhuang, 2018b, The Collaboratory for the Study of Earthquake, Predictability: Achievements and Priorities, *Seism. Res. Letters*, 89, 4, 1305-1313.
- Shimojo, K., B. Enescu, Y. Yagi, and T. Takeda, 2014, Fluid-driven seismicity activation in northern Nagano region after the 2011 M9.0 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL061763.

- Shinoda, A., S. Fujiwara, H. Niiya, and H. Katsuragi, 2018, Void structure stability in wet granular matter and its application to crab burrows and cometary pits, *Sci. Rep.* 8, 15784.
- Sugan, M., A. Kato, H. Miyake, S. Nakagawa and A. Vuan, 2014, The preparatory phase of the 2009 Mw 6.3 L' Aquila earthquake by improving the detection capability of low-magnitude foreshocks, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL061199.
- Suyehiro, K., S. Sacks, T. Takanami, D. Smith, P. Rydelek, 2014, Magnitude Dependent Seismic Quiescence of 2008 Wenchuan Earthquake, AGU fall meeting, S53D-4555, December, 2014.
- Suyehiro, K., S. Sacks, T. Takanami, D. Smith, P. Rydelek, and T. Hatano, 2015, Magnitude dependent seismic quiescence and following short-term precursors as dilatancy strengthening and breakdown before large earthquakes and their detection, IUGG General Assembly, Prague.
- Takizawa, S., H. Niiya, T. Tanabe, H. Nishimori, and H. Katsuragi, 2019, Impact-induced collapse of an inclined wet granular layer, *Physica D* 386-387, 8-13.
- Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018, Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog, *Earth, Planets and Space*, 70, 90.
- 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, 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-volume radon monitor. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 177, 324-330, DOI: 10.1093/rpd/ncx050.
- 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.
- Toda, S., and R. S. Stein, 2018, Why aftershock duration matters for probabilistic seismic hazard assessment, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 108, 1414-1426.
- 遠田晋次, 2018, 2018年大阪府北部地震の周辺活断層と地震活動への影響, *地震ジャーナル*, 66, 9-21.
- 遠田晋次・石村大輔, 2019, 熊本地震など内陸大地震で見いだされた誘発性地表地震断層と短い活断層の評価, 第四紀研究, 印刷中.
- Togo S. and M. Kamogawa, 2016, Ionospheric earthquake precursors on satellite measurement: physical features and predictability, In Proceedings of the International Workshop Earthquake Precursor, Taiwan, 16 May 2016.
- 東京大学地震研究所, 2019, CSEP参加グループによる予測手法: 予測と実際の活動の比較検証(3), 第221回地震予知連絡会, 2018年11月30日.
- Tormann, T., B. Enescu, J. Woessner and S. Wiemer, 2015, Randomness of megathrust earthquakes implied by rapid stress recovery after the Japan earthquake, *Nature*

- Geoscience, 8, doi:10.1038/ngeo2343.
- Toyomoto, Y., Hironori Kawakata, Shiro Hirano, Issei Doi, 2016, Foreshock search over a long duration using a method of setting appropriate criteria, AGU Fall Meeting 2016, MR41B-2702.
- Tsuji, D. and H. Katsuragi, 2015, Temporal analysis of acoustic emission from a plunged granular bed, Phys. Rev. E, Vol. 92, 042201:1-10., DOI:10.1103/PhysRevE.92.042201.
- 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. and Y. Ogata, 2015, Development of Seismicity Analysis software: TSEIS - ETAS module implementation -, Abstract of the 9th International Workshop on Statistical Seismology (StatSei9) in Potsdam.
- 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.
- 堤 浩之・遠田晋次・後藤秀昭・熊原康博・石村大輔・高橋直也・谷口 薫・小俣雅志・郡谷順英・五味雅宏・浅野公之・岩田知孝, 2018, 熊本県益城町寺中における2016年熊本地震断層のトレンチ調査, 活断層研究, 49, 31-39.
- Ueda, Y., S. Morimoto, S. Kakui, T. Yamamoto, and H. Kawamura, 2015, Dynamics of earthquake nucleation process represented by the Burridge-Knopoff model, European Physical Journal B., 88:235, 1-24.
- 梅田康弘・板場智史, 2018, 1944年東南海地震及び1946年南海地震時の海水位変化を利用した紀伊半島沿岸部における上下変動時系列の推定, 地質調査研究報告, 69, 81-89.
- Vuan, A., M. Sukan, 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.
- Wakabayashi, A., Yasuoka, Y., Janik, M., Nagahama, H., Fukuhori, N., Mori, Y., Arai, Y., Fujii, S., and Mukai, T., 2019, Derivation and validity evaluation of calibration factors for activated-charcoal radon collectors, Radioisotopes, in press.
- Wang, Y., T. Wang, and J. Zhuang, 2018a, Modelling continuous time series with many zeros and an application to earthquakes, Environmetrics, 29, 4, <https://doi.org/10.1002/env.2500>.
- Wang, T., Zhuang, J., Buckby, J., Obara, K. and Tsuruoka, H., 2018b, Identifying the recurrence patterns of non-volcanic tremors using a 2D hidden Markov model with extra zeros, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol.123, Issue8, pp.6802-6825, doi:10.1029/2017JB015360.

- Yabe, Y., M. Nakatani, M. Naoi, J. Philipp, C. Janssen, T. Watanabe, T. Katsura, H. Kawakata, D. Georg, and H. Ogasawara, 2015, Nucleation process of an M2 earthquake in a deep gold mine in South Africa inferred from on-fault foreshock activity, *J. Geophys. Res.*, 120, 5574-5594, doi:10.1002/2014JB011680.
- Yabe, S., and S. Ide, 2017, Slip-behavior transitions of a heterogeneous linear fault, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, doi:10.1002/2016JB013132.
- Yabe, S., and Ide, S., 2018, Variations in precursory slip behavior resulting from frictional heterogeneity. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(1), 43.
- 山形直毅, 直井誠, 中谷正生, 森谷祐一, 大槻憲四郎, Thabang Kgarume, Joachim Philipp, 村上理, Thabang Masakale, Luiz Ribeiro, 矢部康男, 川方裕則, Anthony Ward, 石田毅, Ray Durrheim, 小笠原宏, 2016, 南アフリカ Cooke 4 金鉱山地下 1km の切羽沿いに密集する微小破壊の空間分布詳細構造, 日本地震学会秋季大会, 名古屋国際会議場, 2016年10月6日.
- Yamaguchi, J., M. Naoi, M. Nakatani, H. Moriya, T. Igarashi, O. Murakami, Y. Yabe, R. Durrheim, and H. Ogasawara, 2018, Emergence and disappearance of very small repeating earthquakes on a geological fault in a gold mine in South Africa, *Tectonophysics*, 747-748, 318-326. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.014>.
- Yamaguchi, T., Y. Himeno and Y. Sawae, 2015a, Collective behavior of multiple asperities in sliding friction between polymer gels, *Proceedings of International Tribology Conference Tokyo*.
- Yamaguchi, T., Y. Himeno, Y. Sawae, 2015b, Stick-slip motions of polymer gels having multiple artificial asperities, *Proceedings of Malaysian International Tribology Conference 2015*, 78-79.
- Yamaguchi, T., Y. Sawae, S. M. Rubinstein, 2016, Effects of loading angles on stick-slip dynamics of soft sliders, *Extreme Mechanics Letters*, 9, 331-335.
- 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.
- 吉川澄夫, 2015, 地震活動静穏化に基づく予測能力評価, *地震予知連絡会会報*, 93, 410-412.
- Yoshimitsu, N., H. Kawakata, N. Takahashi, 2014, Magnitude -7 level earthquakes: A new lower limit of self-similarity in seismic scaling relationships, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 10.1002/2014GL060306.
- 庄建倉, 尾形良彦, 2015, 地震予測の評価法について, *統計数理*, 63, 29-44.
- Zhuang, J., 2015, Weighted likelihood estimators for point processes, *Spatial Statistics*, 14, 166-178, doi: 10.1016/j.spasta.2015.07.009.
- Zhuang, J., D. Wang, and M. Matsu'ura, 2016, Features of the earthquake source process simulated by Vere-Jones' branching crack model. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Volume 106. doi:10.1785/0120150337.
- Zhuang, J., Y. Ogata, and T. Wang, 2017, Data completeness of the Kumamoto earthquake sequence in the JMA catalog and its influence on the estimation of the ETAS

parameters. Accepted by Earth, Planets and Space.

Zhuang, J., M. Murru, G. Falcone, and Y. Guo, 2018, An extensive study of clustering features of seismicity in Italy from 2005 to 2016, *Geophysical Journal International*, 216, 302-318, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy428>.

Zhuang, J., T. Wang, and K. Kiyosugi, 2019, Detection and replenishment of missing data in marked point processes. *Statistica Sinica*. In press. doi:10.5705/ss.202017.0403.

## 2. 平成 30 年度の成果

### 大項目 2. 地震・火山現象の予測のための研究

#### 中項目 (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、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」、Iwata (2018)）の開発を引き続き実施した。この手法は「断層面の向きは一様ランダム」という仮定のもとに、断層面の向き自体を求めることなしに、直接応力場の推定を行うものである。今年度は、昨年度開発した応力空間パターン推定手法を拡張し、推定した応力空間パターンにP波初動データを組み合わせることでメカニズム解推定も行えるようにした（図1）。人工データを用いた検証では、P波初動データのみ用いる場合に比べ、応力場の情報も取り入れた本手法の方が、より真のメカニズム解に近くかつ推定精度も高い（推定のバラツキが小さい）という結果が得られた（図2）。応力場の情報が起こりえるメカニズム解に制約をかけるため、より尤もらしい解を選びやすくなるためである（東北大学 [課題番号：1206]）。

大深度での採掘が行われている南アフリカの鉱山では、実際に地震を起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る。採掘域前方に、微小破壊の巨視的な面上クラスタが形成されることが見いだされた(直井, 2018)Cooke4鉱山では、微小破壊データ・採掘の亀裂マッピング・岩石力学的室内実験・岩石鉱物学的観察を統合した解析によって、クラスタと採掘空洞の関係の非対称性等を解釈することができた(Mngadi et al., 2019, 東北大学[課題番号:1206], 立命館大学[課題番号:2401])。また、ICDPのDSeis計画(Ogasawara et al., 2019, 立命館大学 [課題番号：2401])においては、平成26年8月に発生したM5.5震源断層(地下3.5-7 km, 図3)の上端を貫通する掘削(Hole B, C)によって断層物質を回収し、滑り強化性を持つTalcやBiotiteが確認され、また、活動が新しいことを示唆する非晶質も確認された(金木・他, 2018)。また、前年度に掘削が完了したHole Aでは、天水とは起源が異なる、塩分がほとんど飽和した10MPaの水や、非生物起源の岩石と水の反応を起源とするガスが検出され、(Rusley et al., 2018; Wiersberg et al., 2019),またコア試料の力学解析によって余震域上端にいたる応力場の空間変化の特徴をいくつか見出すことに成功した(図4, 東北大学流体研究所 [課題番号：2948])。

地域の応力载荷速度と余震継続時間が反比例するべきことが理論的に指摘されている(Dieterich, 1994)。この指摘を検証するために、東北地方太平洋沖地震による広域余震活動と東北地方での本震—余震活動8ケースを大森—宇津則（一部ETASモデル）によって解

析した(Toda and Stein, 2018, 東北大学 [課題番号: 1206])。その結果, 余震継続時間がマグニチュードに依存しないこと, 余震継続時間と活断層(一部プレート境界)の変位速度に負の相関があること, 余震継続時間と常時地震活動に負の相関があることを見いだした(図5)。

余震活動など活発な地震活動中には, 大量の地震が同時に発生する。そのため, 複数の地震の波形が同時刻に重なって観測点に到達し, 地震の欠測が顕著となる。この問題を解決するには, 再決定されたテンプレート地震の波形を用いて連続波形記録から類似のイベントを検出する手法(Matched filter technique)が有効である。今年度も, 2013年栃木県北部地震の前震活動, 2018年大阪府北部地震, 2019年熊本地方の地震の余震活動に関して, 相対走時差データに基づく震源再決定・テンプレートマッチング解析等を実施した(東北大学 [課題番号: 1206])。例えば, 大阪府北部地震の結果(図6, Kato and Ueda, 2019)からは, 北北西-南南東走向の東側傾斜(約45度)の逆断層が最初にずれ, 約0.3秒後に東北東-西南西走向の高角傾斜の横ずれ断層に破壊が伝播し, その後は同時に断層運動が起きていたことが示された。これらの断層面と上町断層帯の深部延長との詳細な関係は不明ではあるが, 大阪府北部地震が上町断層帯などの東側傾斜の逆断層に与える応力変化を計算したところ, 断層運動を促進する方向に約0.1MPaの応力変化が生じたことがわかった(遠田, 2018; Kato and Ueda, 2019, 東北大学 [課題番号: 1206])。また, 震源域の北部延長では, 地震活動が遅れて活発化し, その領域の背景地震活動度は時間とともに徐々に増加する傾向を示した。このことは, 本震によって震源域の北部延長(地殻内)で非地震的な変形が引き起こされた結果と解釈される。本研究により, 水平圧縮応力場が卓越する近畿圏においては, 逆断層と横ずれ断層が同時に活動することで1つの地震になる場合があることが明示された。つまり, 逆断層と横ずれ断層の活断層が共存する近畿圏では, 地震ハザード評価において両断層の連鎖的破壊を考慮することが重要である。地震本部が実施している現状の長期評価においてこの点は含まれておらず, 少なくとも近畿圏においては逆断層と横ずれ断層の活断層の連鎖的破壊を考慮することが今後必要である(東北大学 [課題番号: 1206])。

地震活動の新たなリアルタイムモニタリングと手法として, 自動震源決定手法(PF法)によって得られた結果を活用し, b値のリアルタイム推定手法を開発した。これを平成28年(2016年)熊本地震や2016年10月21日の鳥取県中部の地震に適用し(廣田・溜瀧, 2018), b値の時空間分布を推定した。その結果, 熊本地震においては, 4月14日M6.5の地震発生後にb値が低下したことを明らかにした(気象庁 [課題番号: 7006])。

全国規模での放射線管理施設のモニタリングネットワークの構築により推進している大気中ラドン濃度について, 活用できるデータを拡充する観点から, 様々なタイプの測定器の感度とデータ補正法を検討した(Higuchi et al., 2019; Wakabayashi et al., 2019; Ishihara et al., 2018, 東北大学 [課題番号: 1207])。

水文学的手法による断層モニタリングにおいて, 透水係数のスケール依存性は重要な課題である。南海トラフ地震発生帯掘削計画の一環として熊野灘沖合に設置された長期孔内観測システム(LTBMS)の水圧計が周辺の掘削作業時に伴って大きく変化していることを受け, クロスホール透水試験に見立て, 原位置透水係数の推定を行い, 先行研究の室内実験や数値シミュレーションの結果と比較することで, スケールが大きくなるほど断層やク

ラックの数が増え、それらが連結することでより水が流れやすくなることを示唆する結果を得た(図7, Kinoshita and Saffer, 2018, 産業技術総合研究所 [課題番号: 5007])。

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。長期的な地殻変動モニタリングの新技术として、SAR衛星ALOS-1のデータを用いた時系列解析から、準東西と準上下方向の変位成分を分解して得る2.5次元解析を開発した(図8, 気象庁 [課題番号: 7006])。固着率の正確な時空間分布をモニタする助けになる。

リアルタイムで南海トラフ周辺地域の短期的ゆっくりすべり(SSE)を解析するため、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自動解析するシステムの運用を継続した。2017年11月-2018年10月の間には、35の短期的SSEの断層モデルを決定した(落・他, 2018, 2019, 産業技術総合研究所 [課題番号: 5007])。四国地方でプレート間の固着速度と深部低周波微動の発生レートとの間に時間的相関のある場所が見つかり、相関のよい場所では、微動発生レートがゼロになるときは固着速度がプレート収束速度に近くなることが期待されることがわかった(Ochi and Takeda, 2018, 産業技術総合研究所 [課題番号: 5007])。また、ボアホールひずみ計を用いて巨大地震のモーメントマグニチュードを即時推定する手法を開発した。水平ひずみ4成分以上があれば、M9クラスの東北地方太平洋沖地震本震のほか、同地震の最大余震、近年発生した内陸地震でもMwを推定可能であることを示した(図9, Itaba, 2018, 産業技術総合研究所 [課題番号: 5007])。また、GNSSによる長期的スロースリップの客観検知法を用いて、2017年から2018年にかけて発生した志摩半島付近の小規模な長期的スロースリップを検出し、すべり分布(Mw6.5相当)を推定した(気象庁 [課題番号: 7006])。また、GNSS日値を用いた全国基線長変化について、日本海側の観測点を領域固定して、太平洋側の観測点のプレート沈み込み方向の位置変化を見るように改良した(気象研究所, 2018a, 2019a, 気象庁 [課題番号: 7006])。一方で、DONET2データの解析では、2018年3月から8月にかけて、断続的に四国地方南東沖から紀伊半島南方沖で浅部低周波微動活動が活発なことを示した(気象庁 [課題番号: 7006])。

ゆっくり滑り・微動・高速破壊の関係を考察するために、透明なゲルシートを使った摩擦実験において、画像相関法を用いて、ゆっくりすべりから高速破壊に至るプロセスを詳細に調べ、ゆっくりすべりと微動が同期して発生することで、すべりが共振して加速する様子が捉えられ(図10)、また、ゆっくりすべりの継続時間が系の駆動速度とべき的な関係をもつことが見いだされた(東京大学地震研究所 [課題番号: 1512])。

真にプロスペクティブな地震の確率予測検証実験を進めているCSEP(Schorlemmer et al., 2018a)においては、今年度も多くのモデルの検証実験を行った。予測と検証の繰り返し経験が蓄積したので、Relative Intensityモデルを例にとって、学習期間と予測パフォーマンスの関係を事後的に調べ、12ヶ月程度でパフォーマンスが頭打ちになることが明らかとなった(図11)。また予測のターゲット期間が長くなるほどそのパフォーマンスが落ちることもわかった(東京大学地震研究所 [課題番号: 1511])。

現在の長期予測の基本となっている、地震の繰り返し性による可予測性の検証として、繰り返し中規模地震の予測実験を継続している。相関係数とコヒーレンスを用いて2018年

2月から2019年1月までに10個の繰り返し地震の発生を確認し、2018年2月1日にベイズ統計対数正規分布モデルを用いて発生確率を予測し、指数分布モデルを用いる予測よりも良い成績であることが確認された(田中・他, 2018)。これは、2017年までの79系列の相似地震で見い出された傾向と同じである(気象庁 [課題番号: 7006])。

### 中項目(3) 先行現象に基づく地震活動予測

地震活動の客観的な特徴抽出を高度化するため、自動処理の改良によって地震数が増加した2016年4月以降の一元化カタログ、及び1997年10月以降の一元化震源カタログに対して最近傍法による客観的かつ自動的なクラスタリング処理を行い、前震、本震、余震の分類を行った。その結果、前震のb値がわずかに小さいこと、前震の発生率が広いM範囲で概ね30~40%程度であること、最大前震と本震の関係はM、時間、空間においてべき乗則に従うこと、といった特徴を明らかにした(Tamaribuchi et al., 2018, 気象庁 [課題番号: 7006], 東北大学 [課題番号: 1206])。

このように、前震活動という短期的先行現象の存在は統計的に非常に明らかで、高い予測ゲインをもたらす(中谷, 2018, 東海大学 [課題番号: 2501])が、必ずしも直前の準静的な準備過程から派生したものではなく、前震活動自体が本震を余震的に誘発することによって前兆として作用したと見ることも可能である(e.g., Helmstetter et al., 2013)。イタリアの地震活動をETASモデルで解析し(Zhuang et al., 2018, 東北大学 [課題番号: 1206]), M2.9以上の地震で約61%がトリガー型地震であり、そのうち1/4が5つの大地震によって直接誘発された地震であることがわかった。また、2005年~2016年に発生した6つの大地震のなかでも、5つは誘発性であり、イタリアでは前震現象が顕著である。統計的徐群法を用いてイタリア全土を16区域に分けて解析したところ、常時地震活動自体がこれらの主要地震に影響を受けており、それぞれ地震活動のフェーズが異なっていることがわかった。6つの大地震の震源断層上では、直接的な余震はアスペリティ周辺に発生し、余震域と本震破壊域が相補的である(Zhuang et al., 2018, 東北大学 [課題番号: 1206])。

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。釧路沖、那珂沖のM5程度の繰り返し地震グループについて詳細な震源すべり分布を求め、これらの地域ではM5, M4, M3程度の階層的な構造の存在が示唆された(Okuda and Ide, 2018a, 東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。さらに、この研究に異なる規模の地震でも地震の始まりが同じ例を発見した(Okuda and Ide, 2018b, 東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。これは階層性を強く示唆する事象である。一方で、茨城沖の群発地震活動の統計的モデルを用いた分析を進め、茨城沖では群発地震活動がM7級の地震になる場合(前震的活動)とならない場合があるが、前震的な活動は、それ以外の群発地震活動より活動度が高い傾向にあり、予測能力を持つ(Nishikawa and Ide, 2018, 東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])ことが示唆された。

一方で、カリフォルニア内陸地震、日本の内陸・海域、台湾の地震カタログで前震活動空間密度を調べ、Lippiello et al. (2012)の指摘した通り、前震活動空間分布のピークを示す領域(これは地震準備過程の領域および余震活動領域を示す)は、余震活動のそれと等しく、本震マグニチュード依存性があることがわかった(図12)。これは、地震は発生する前に最終的な破壊領域、つまりマグニチュードは事前におおよそ決定しているという解

積を支持する結果である(東京大学地震研究所[課題番号:2901])。

前震の中でも、本震の破壊開始点ごく近傍で起きるリピーター的な極微小前震(Bouchon et al., 2011)は、破壊の直接的な準備過程の顕れであると期待されている。このような前震活動が確認された2011年長野県中部の地殻内地震(Mj5.4)の前震活動を例にとり、客観的な指標に基づくイベント検出方法を開発した。長期に渡る連続波形とプレートとの相互相関の分布を分析し、AICによる恣意性のない検出基準の設定法を提案することができた。気象庁カタログに記載済みの前震は本震13時間前からに限られていたが、以上の新手法を基に、本震から遡ること2年間の地震活動を評価してみても、新たに見つかった地震は、本震の2ヶ月前に1つと、3~4日前にまとめて3つのみであった。このことは、前震活動が定常的な微小地震の巨大化・頻発化と呼べるものではなく、過去2年間に殆ど例のなかったイベント群の発露であったことを示している(Hirano et al., 2018a,b, 立命館大学[課題番号:2402])。また、前震発生プロセスのモデル化となる不均質摩擦すべりモデルを提案した(Yabe and Ide, 2018, 東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。

地震活動の複雑さの背後にある物理メカニズムを考察するために、岩石破壊の離散モデル(ファイバーバンドルモデル)の解析と数値実験を行った(Roy and Hatano, 2018, 東京大学地震研究所[課題番号:1512])。このモデルはレオロジー的仮定を一切含まないが、構成要素の微小破壊に伴う応力再配分によりクリープ破壊的挙動が再現されることを示し、そのメカニズムがサドルノード分岐であることを示した。応力をステップ関数的に載荷した際の緩和挙動は大森則に従い、系が完全に破壊される直前には逆大森則に従って破壊が加速することを発見した。さらに、大森則におけるc値の決まり方に注目して解析を行い、c値が応力について弱い正の依存性をもつこと、および、系の不均質性が増すとc値は減少することを示した。特に後者は「複雑な断層形状ほど小さいc値をもつ」ことを示唆する。

また、粉体層の複雑な挙動についても理解が進んだ(東京大学地震研究所[課題番号:1512])。粉体層に埋められた棒を引き抜く実験で(図13)は、引き抜き時のせん断変形に伴って粉体層が固化することで急激に摩擦抵抗が増大することを明らかにし(Furuta et al., 2019)、この挙動を実験と数値計算の双方で確認した。次に、凝着力を持つ湿った粉体層の傾斜地に固体弾を衝突させ(Takizawa et al., 2019)、流動化による雪崩の発生条件、および粉体層内圧力の異方的に伝播・減衰過程を解明した。同様に、固液混合サスペンションに固体弾を衝突させた際の過渡レオロジー特性の計測手法を開発し、固体の衝突とともにサスペンションが瞬時に固化する様子を測定・解析した。その他、凝着粉体層内の空隙構造の強度(Shinoda et al., 2018)や、粉体流と障害物形状の関係(Katsuragi et al., 2018)についても実験的關係が得られた。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。

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見つかることが報告されている(e.g., Katsumata, 2016)。しかし、静穏化しても大地震が起きないことも多いため、確率ゲインとp値の算出によって、先行性の有意性の検証を進めてきた。特に本年度は、予測アルゴリズムをチューニングする学習期間と、予測の成績を評価する評価期間を別々にする試みを行った(図14, 勝俣・中谷, 2018b, 東北大学[課題番号:1206], 東海大学[課題番号:2501])。1985年から2015年までの千島から

伊豆小笠原にいたる海溝沿いのMw7.5以上、80km以浅の9個を予測対象として実験したところ、全期間のデータでチューニングした場合は、確率ゲイン=4.1, p値=0.24%であったのに対して、前半を学習期間、後半を評価期間とすると確率ゲイン=2.1, p値=12%, 逆にした場合は、確率ゲイン=2.8, p値=25%, となった。クロスバリデーションにおいてはp値が10%を超えてしまい、統計的有意性は強くないが、それでも、ゲインは1を超えており、また、予測に用いるパラメタの最適値は、学習期間にかかわらず似通ったものが得られたので、検証例数が増えて検定力が増せば、有意性が示される可能性は高いだろう。

また、新たな静穏化事例として、気象庁一元化震源カタログを用い、2011年東北地方太平洋沖地震後に日本海東縁部（秋田県沖～新潟県沖）において、顕著な地震活動静穏化が発生していることを見いだした(石辺・他, 2019)。地震発生率がある時刻（地震）を境にして変化したとするモデルと、解析期間中に一定としたモデルの赤池情報基準（AIC）を比較すると、そのAIC差は数十に及び、統計的に有意であることが示された。この静穏化は解析に用いる下限マグニチュードに依存せず、検出率の一時的な低下によるみかけ静穏化ではないと考えられる。静穏化領域では、東北地方太平洋沖地震前には東西圧縮場にあり、逆断層型地震が卓越していたが、本震ならびにその余効変動（余効すべり・粘弾性緩和による応力再分配）によって東西引張の応力変化を受けており、応力変化と地震活動度の変化とは調和的である（東北大学 [課題番号：1206]）。

東北地方太平洋沖地震の前に観測されたGNSS-TECの異常がどの程度小さな地震まで検出できるかについては、昨年度にM7クラスでも条件によっては検出できるとの報告がある（He and Heki, 2017, JGR）。今年度はこの現象がはたしてより小さな地震を用いて統計的にも確認できるか一つの検証作業を実施した。この研究のモチベーションは、フランスが2004年に打ち上げたDEMETER衛星のデータ解析で唯一強い統計的有意性が得られた地震発生直前のVLF帯電磁波の吸収という現象が、下部電離層の電子密度が増加していたという事で説明する事ができる（Kamogawa et al., 2018a, b, 東海大学 [課題番号：2501]）ことにある。今回は、GEONETのデータについて、Nemec et al. (2008)がDEMETER衛星の解析のために用いた手法と類似した手法を用いて1997年以降、東北地方太平洋沖地震までに陸域近傍で発生したM5以上の地震（279個）を対象として（1つの地震に対して地震発生時刻に震央に近い6個のSIP（Sub-Ionospheric Point）を追跡したところ、地震発生の数時間前にTECがわずかに増加する傾向がある可能性が示された（図15, 東海大学 [課題番号：2501]）。一方で、Nemec et al. (2008)が重ね合わせ解析で示していた地震直前DEMETER衛星のVLF帯電磁波の強度減少（Nemec et al. 2008）について、高度なデータ処理手法を導入して個別軌道での解析を試み（図16）、関数主成分分析の第3主成分のスコアが有効であることを見出した。この解析では、電磁波強度が減少を示す事例は、先行現象の条件を満たす全軌道に対してほぼ1割であった（Kamogawa et al., 2018c, 東京学芸大学 [課題番号：2501]）。また、DEMETERと同様以上の精度でのVLF帯電磁波強度の観測を、大規模かつ圧倒的に安価に行うため、10kg程度の6U-CubeSAT（図17）にのせられる計測器の実現性を確認するためのブレッッドボードモデルの製作を行った（児玉, 2018; 菊地・他, 2018; 鴨川・他, 2018, JAXA [課題番号：2901]）。

VLF帯電磁波見通し外伝播異常に関しては、これまで異常を検出する閾値を、全観測期間にわたるデータに対して同じにしていた。しかしその場合、長い期間にわたるデータでは

強度や変動が大きい期間や小さい期間があり、異常を判定したい時点での傾向を上手く反映できず、その結果、全体と比較して強度が小さい期間のデータの場合に、本来異常であるべきデータを検出できなかつたり、またその逆に変動が大きいときは余分に異常を検出していたりという問題が発生して、そのことが結果に影響を与えていたことが考えられる。そこで、短周期のトレンドを上手に反映できるよう、またリアルタイムでの即時検出に応用できるようにその時点での異常検出基準を、その時点から過去30日のデータを使って算出し、異常判定を実施した。また、その地点から過去 $x$ 時間を振り返り、データ中 $y\%$ 以上異常が検出されている場合に $L$ 日間継続して警報を出すことにした。 $x, y, L$ をチューニングすることによって、予測性能が向上し、確率ゲイン9.6、 $p$ 値1.8%となった(図18、東海大学[課題番号:2501])。

VLF帯パルス電磁波は、中日本5点で観測点を続けている。今年度は観測期間中かつ観測ネットワーク内で発生した最大の内陸地震であった2017年6月25日の長野県西部の地震(M5.6)の2日前に観測された電磁パルスについて詳細な解析を実施した。今年度はARとICAを用いた電磁波の到達時間決定手法をルーチンで適用できる所まで開発を行った。今回はこのシステムを用いて波形を詳しくチェックしてみると、7個のうちの2個は極めて波源が良く求まり(図19)震源から10kmの地点であった。さらに観測された波形も極めてよく似ていた。図20は6月23日の3時33分42.022秒に観測された波形である。この時は、4つの観測点(学芸大、信州大、東海大、群馬大)が稼働していた(長尾・他, 2018, 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、信州大学医学部のデータ(図21a)から2014年11月22日に発生した長野県神城断層地震前、鳥取大学医学部のデータ(図21b)から2016年10月21日に発生した鳥取県中部地震前、大阪薬科大学のデータ(図22)から2018年(平成30年)6月18日に発生した大阪府北部地震前後に、異常な変動を見い出した。また、顕著な地震と関連して、定常的な変動が変化した例を見い出した。神戸薬科大学のデータの潮汐分潮解析では、1984-1988年では認められなかったK1分潮に対する変化が兵庫県南部地震前の1990年-1994年の期間では認められた。また、札幌医科大学データの季節変動の振幅が東北地方太平洋沖地震を境に大きくなった(図23)ことが見い出された(東北大学[課題番号:1207])。

東北地方太平洋沖では、過去3回の巨大地震前に、漁獲量の異常が報告されている。漁獲量異常が地震に先行する傾向があるかを調べるためにデータ収集を行い、1973年1月から35年分の宮城県内の漁港別・魚種別・月別漁獲量のデジタル化作業がほぼ完了した。また、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、前年度作成した深海魚出現カタログから新聞等で地震との関連性が指摘されているリュウグウノツカイやサケガシラなど8種を抜き出して地震との関連を調べた。1928年11月26日から2011年3月11日までで、深海魚出現数は計336件あるが、深海魚出現日から30日後までに出現地点から半径100km以内で発生したマグニチュード(M)6.0以上、深さ100km以浅の地震が起きたのは、2007年6月19日新潟県柏崎市のサケガシラと7月16日新潟中越沖地震(M6.8)のみであった(Orihara et al., 2018)。さらに、鯨類ストランディングと地震との関係について、日本鯨類研究所が公開するストランディングレコードを用いて全国規模

で検証を行った(織原ら, 2018)。日本の海岸で発生するストランディングの数は, 全国から報告が集まるようになった近年では年間200~250件になる。一方, マス・ストランディング(集団座礁: 同時に2頭以上が座礁)は年間数回程度で1923年まで遡ることができる。東北地方太平洋沖地震前にもみられたマス・ストランディングに絞って検証した。対象となるマス・ストランディングは1923年から東北地方太平洋沖地震前まで48事例あり, 半径200km以内で30日後までにM6.0以上(深さ100km以浅)の地震が発生したのは, 2002年5月21日沖縄県石垣港ユメゴンドウ2頭と5月29日石垣島西方沖の地震(M6.1), 2005年7月23日静岡県沼津市コブハクジラ2頭と千葉県北西部の地震(M6.0)の2事例だけであった。なお, 2011年東北地方太平洋沖地震前にみられた茨城県でのカズハゴンドウ54頭のマス・ストランディングは, 本震と前震いずれの震央からも300km以上離れていたのが対象外となる。また, 茨城県と千葉県では, 2011年3月4日以前にもカズハゴンドウのマス・ストランディングが6回発生しており, しかも, 2011年3月4日より群頭数が多い事例が4回あるが, その後に東北地方太平洋沖地震よりも大きな地震は発生していない。また, 他の10頭以上のマス・ストランディングについても, その後にM6.0以上の地震を伴っていない(東海大学[課題番号: 2901])。

#### 成果リスト(平成30年度用)

- Chen, S., J. Zhuang, X. Li, H. Lu, and W. Xu, 2018, Bayesian approach for network adjustment for gravity survey campaign: methodology and model test, *J. Geodesy*, doi:10.1007/s00190-018-1190-7.
- Fukushima, Y., S. Toda, S. Miura, D. Ishimura, J. Fukuda, T. Demachi, and K. Tachibana, 2018, Extremely early recurrence of intraplate fault rupture following the Tohoku-Oki earthquake, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/s41561-018-0201-x.
- Furuta, T., S. Kumar, K. Anki Reddy, H. Niiya, and H. Katsuragi, 2019, Packing-dependent granular friction exerted on a rod withdrawn from a granular layer: the role of shear jamming, *New J. Phys.* accepted.
- Gulia, L., A. P. Rinaldi, T. Tormann, G. Vannucci, B. Enescu, and S. Wiemer, 2018, The effect of a mainshock on the size distribution of the aftershocks, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2018GL080619.
- Guo, Y., J. Zhuang, and N. Hirata, 2018, Modeling and forecasting 3D-hypocenter seismicity in the Kanto region, *Geophys. J. Int.*, 214, 520-530, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy154>.
- Han, P., K. Hattori, and J. Zhuang, 2018, On the precursory information in ULF seismo-electromagnetic phenomena, *International Symposium on Earthquake Forecast / 5th International Workshop on Earthquake Preparation Process - Observation, Validation, Modeling, Forecasting - (ISEF-IWEP5)*, Chiba University, Chiba, Japan, May 2018, (invited).
- 韓鵬, 服部克巳, 周媛媛, 常, 2018, Principle component analysis of geomagnetic data associated with the 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0), *日本地球惑星科学連合2018*

- 年大会, MIS03-05, 幕張メッセ, 千葉県千葉市, 2018年5月 (招待講演) .
- Hattori, K. and P. Han, 2018, Statistical Analysis and Assessment of Ultralow Frequency Magnetic Signals in Japan As Potential Earthquake Precursors, in *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, edited by Ouzounov et al., 229-240, DOI: 10.1002/9781119156949.ch13, Wiley.
- Hattori, K. and P. Han, 2018, Statistical Analysis and Assessment of ULF Magnetic Signals in Japan as Potential Earthquake Precursors, *Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes 2018 (EMSEV2018)*, Potenza, Italy, September 2018.
- Hattori, K., P. Han, and J. Zhuang, 2018, Assessment of ULF geomagnetic precursor for short-term earthquake forecast, *European Geosciences Union General Assembly 2018*, EGU2018-17007, Vienna, Austria, April 2018.
- Hattori, K., S. Hirooka, M. Yagmur, S. Saito, C. Yoshino, and J. Y. Liu, 2018, Spatial and Temporal Characteristics of the Pre-Seismic Ionospheric Anomaly over Japan: Case study for the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) and statistical study, *International Conference for the Decade Memory of the Wenchuan Earthquake with The 4th International Conference on Continental Earthquakes and The 12th General Assembly of the Asian Seismological commission*, Chengdu, Sichuan, China, May 2018.
- Hattori, K., S. Hirooka, M. Yagmur, S. Saito, C. Yoshino, And J. Y. Liu, 2018, Spatial and Temporal Characteristics of the Pre-Seismic Ionospheric Anomaly over Japan: Case Study for the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) and Statistical Study, *15th Annual Meeting for Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2018)*, Hawaii Convention Centre, Honolulu, Hawaii, US, oral, IG22-D2-AM2-322B-001 (IG22-A009), June 2018.
- Hattori, K., C. Yoshino, W. Xie, S. Saito, P. Han, T. Mogi, T. Goto, I. Takumi, T. Takano, M. Mouri, M. Kamogawa, C. Yamanaka, Y. Ando, J. Izutsu, D. Ouzounov, V. Tramutoli, J. Y. Liu, 2018, Multi-sensor network for monitoring earthquake precursors and preparation processes near subduction zone at Boso, Japan, *2018 AGU Fall Meeting*, Walter E. Washington Convention Center, Washington, D.C., USA, NH11A-06, December 2018.
- Heidarzadeh, M., T. Ishibe, and T. Harada, 2018, Constraining the source of the Mw 8.1 Chiapas, Mexico earthquake of 8 September 2017 using teleseismic and tsunami observations, *Pure and Applied Geophysics*, doi:10.1007/s00024-018-1837-6.
- Heki, K., 2019, Chapter 5-3: Ionospheric disturbances related to earthquakes in *Advances in ionospheric research: Current understanding and challenges*, Wiley/AGU Book, edited by C. Huang, in press.
- Higuchi, S., Kamishiro, Y., Ishihara, M., Yasuoka, Y., Mori, Y., Hosoda, M., Iwaoka, K., Tokonami, S., Janik, M., Muto, J., Nagahama, H., Mukai, T., 2018, Evaluation of a radon air monitor as a measurement of radon concentration in water in

- comparison with a liquid scintillation counter. 9th International Conference on High Level Environmental Radiation Areas - For Understanding Chronic Low-Dose-Rate Radiation Exposure Health Effects and Social Impacts (ICHLERA 2018), 27 Sep., 2018.
- Higuchi, S., Kamishiro, Y., Ishihara, M., Yasuoka, Y., Mori, Y., Hosoda, M., Iwaoka, K., Tokonami, S., Takahashi, R., Janik, M., Muto, J., Nagahama, H., Mukai, T., 2019, Evaluation of a radon air monitor in the measurement of radon concentration in water in comparison with a liquid scintillation counter. *Radiation Protection Dosimetry*, in press.
- Hirano, S., 2018, Aftershocks and the GR law due to a heterogeneous slip model, American Geophysical Union 2018 Fall Meeting, Washington D.C., U.S.
- Hirano, S., Y. Toyomoto, H. Kawakata, and I. Doi, 2018a, Application of Extreme Value Theory to a Matched-Filter Analysis, 10th ACES International Workshop -Toward Comprehensive Understanding of Earthquake Physics-.
- Hirano, S., Y. Toyomoto, H. Kawakata, and I. Doi, 2018b, Objective matched-filter analysis for detecting small events, International Symposium on Earthquake Forecast / 5th International Workshop on Earthquake Preparation Process, ~Observation, Validation, Modeling, Forecasting~, Chiba, Japan.
- 廣田伸之, 溜瀨功史, 2018, 即時的な解説資料における自動震源の活用, 平成28年(2016年)熊本地震調査報告, 135, 67-72.
- 石辺岳男・橋間昭徳・松浦律子・津村建四朗, 2019, 東北地方太平洋沖地震の背弧側における地震活動度の変化について, CSEP-Japan(日本における地震活動に基づく地震発生予測検証実験)研究集会, 2019年1月28-29日, 東京大学地震研究所, 東京都文京区.
- Ishihara, M., Yoshii, M. Minami, N., Yasuoka Y., Tokonami, S., Nagahama, H., Mukai, T., 2018, Airborne radon concentration measurements using gas-flow Ionization chambers and the effects of temperature changes. *Proceeding of the 19th Workshop on Environmental Radioactivity*, Bessho, K., Matsumura, H., Miura, T, Tagami, K., Takamiya, K., (Eds). (2018, May). Tsukuba, p. 288-293.
- Ishimura, D., S. Toda, S. Mukoyama, S. Homma, K. Yamaguchi, and N. Takahashi, 2019, Three-dimensional surface displacement and surface ruptures associated with the 2014 Mw6.2 Nagano earthquake using differential LiDAR, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, in press.
- Itaba, S., 2018, Rapid estimation of the moment magnitude of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0) from static strain changes, *Earth, Planets and Space*, 70, doi:10.1186/s40623-018-0894-5.
- Itoh, R. and T. Hatano, 2018, Geological implication of grain-size segregation in dense granular matter. *Philosophical Transactions A* 377, 20170390.
- Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y., 2018, Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. *Scientific Reports*, 8(1), 13028, Aug., 2018.

- Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y., 2018, Statistical analysis of the correlation between earthquakes and atmospheric radon concentration. International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop on Earthquake Preparation Process - Observation, Validation, Modelings, Forecasting - (ISEF-IWEP5) Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y., 2018, Quantitative Analysis of Anomalies of Atmospheric Radon Concentration and Earthquakes. Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) , The 15th Annual Meeting, Hawaii, 3 Jun, 2018.
- Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y., 2018, Estimation of anomalous variation in atmospheric radon concentration related to earthquakes by Kalman Filter, American Geophysical Union fall meeting 2018, Washington, USA, December 2018.
- Iwata, T., 2018, A Bayesian approach to estimating a spatial stress pattern from P wave first-motions, *J. Geophys. Res.*, 123, 4841-4858, doi:10.1002/2017JB015359.
- 岩田大地・長濱裕幸・武藤 潤・安岡由美, 2018, 地震に先行する大気中ラドン濃度変動: 特異スペクトル変換法による異常検知法 (招待講演), 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 2018年12月25日.
- 井筒潤, 楠城一嘉, 鴨川仁, 2018, 地震災害予測のための地球観測データのデジタルアースへの適用, 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集, 11-12, 2018年12月.
- Jia, K., S. Zhou, J. Zhuang, C. Jiang, Y. Guo, Z. Gao, and S. Gao, 2018, Did the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake trigger the occurrence of the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou earthquake in Sichuan, China?, *J. Geophys. Res.*, 123, 2965-2983, <https://doi.org/10.1002/2017JB015165>.
- Kamogawa, M., T. Nagao, Y. Orihara, 2018a, J.J. Berthelier, Origin of Pre-seismic whistler wave intensity attenuation observed by DEMETER satellite, EMSEV-2018 International Workshop on Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes, 17-21 September, Potenza, Italy.
- Kamogawa, M., T. Nagao, Y. Orihara, J.J. Berthelier, 2018, D-region ionospheric precursors and its earthquake predictability, EMSEV-2018 International Workshop on Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes, 17-21 September, Potenza, Italy.
- Kamogawa et al., 2018c, Evaluation of the pre-seismic DEMETER's VLF intensity decrease identified by the functional principal component analysis, The 3rd International Workshop of CSES Mission, 16-18 Nov. 2018, Beijing, China.
- 鴨川仁, 山崎政彦, 日置幸介, 長尾年恭, 八木橋 宏之, 児玉哲哉, 2018, 超小型衛星群とグローバル地上局ネットワークによる地震発生予測, 宇宙ビジネスアイデアコンテスト (S-Booster) ファイナリスト.
- 金木俊也・横山友輝・廣野哲朗・矢部康男・小笠原宏, 2018, M5.5 Orkney 地震の余震発生帯から回収された断層岩の鉱物学的特徴 (ICDP DSeis project), 日本地震学会,

- S08-06, 郡山, 2018年10月10日.
- 加藤愛太郎, 2018, 間欠的な固着のはがれと大地震の発生, *パリテイ*, 33, 06, 48-51.
- Kato, A, 2019, The evolution of fault slip rate prior to earthquake: The role of slow and fast slip modes, *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, in press.
- Kato, A. and T. Ueda, 2019, Source fault model of the 2018 Mw 5.6 northern Osaka earthquake, Japan, inferred from the aftershock sequence, *Earth Planets Space*, 77, 11, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-0>.
- Katsuragi, H., K. Anki Reddy, and K. Endo, 2018, Shape dependence of resistance force exerted on an obstacle placed in a gravity-driven granular silo flow, *AIChE J.* 64, 3849-3856.
- Katsumata K. and M. Nakatani, 2018, Long-term earthquake forecast based on the seismic quiescence: trials in the Kurile, the Tohoku, and the Izu-Bonin subduction zones, *International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process*, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- 勝俣 啓・中谷 正生, 2018a, 静穏化による地震の長期予測の試行~千島・東北・伊豆小笠原沈み込み帯の場合, 地球惑星連合大会, SSS13-04, 幕張, May 24, 2018.
- 勝俣啓・中谷正生, 2018b, 静穏化による長期予測の試行~予測と検証, 日本地震学会秋季大会, 2018年10月10日, 郡山, S23-01, 2018.
- Kawamura, H., Maho Yamamoto and Yushi Ueda, 2018, Slow-slip phenomena represented by the one-dimensional Burridge-Knopoff model of earthquakes. *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 053001-(1-4).
- Kawamura, H., K. Yoshimura, and S. Kakui, 2018, Nature of the high-speed rupture of the two-dimensional Burridge-Knopoff model of earthquakes. *Phil. Trans. R. Soc. A* 377 20170391.
- 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11月~2018年4月)(57), 地震予知連絡会会報, 100, 183-189.
- 木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努, 2019, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果 (2018年5月~2018年10月)(58), 地震予知連絡会会報, 101, 印刷中
- 菊池秀乙, 山崎政彦, 鴨川仁, 宮崎康行, 2018, 地震先行現象検証衛星 PRELUDEの自動運用システムの研究開発, 第62回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3M14, 1-6.
- 木村一洋, 2018, 体積ひずみ計データの降水補正に用いる降水量データについて, 気象研究所研究報告, 67, 35-44.
- Kinoshita, C., and D. M. Saffer, 2018, In Situ Permeability and Scale Dependence of an Active Accretionary Prism Determined From Cross-Borehole Experiments, *Geophysical Research Letters*, 45, 6935-6943, doi:10.1029/2018gl078304.
- 気象研究所, 2018a, 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, 99, 24-27.

- 気象研究所, 2018, 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, 99, 302-305.
- 気象研究所, 2019a, 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, 100, 印刷中.
- 気象研究所, 2019, 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, 100, 印刷中.
- 気象研究所, 2018, 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率(2019), 地震予知連絡会会報, 100, 印刷中.
- 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～四国のひずみ・傾斜・地下水観測結果(2017年11月～2018年4月), 地震予知連絡会会報, 100, 264-275.
- 北川有一・板場智史・武田直人・松本則夫・落唯史・木口努, 2019, 紀伊半島～四国のひずみ・傾斜・地下水観測結果(2018年5月～2018年10月), 地震予知連絡会会報, 101, 印刷中.
- 児玉哲哉, 2018, 01新世紀地震フロンティア研究: 地上-衛星連携による地震先行現象の確立, パリティ Vol. 33(5).
- 小林昭夫, 弘瀬冬樹, 堀川晴央, 平田賢治, 中西一郎, 2018, 1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する一史料——飯作家「大地震富士山焼之事覚書」の調査と翻刻——, 地震, 70, 221-231.
- 小林孝央・本島邦行, 2018, GPS波観測データを用いた地震発生時における電離層電子密度観測”, 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集, 35-38, 2018年12月.
- Linzer, L., M. Manzi, and ICDP DSeis team, 2018, Interpretation of the merged 3D seismic volume covering the seismogenic zone of M5.5 Orkney earthquake, South Africa, 日本地震学会, S08-05, 郡山, 2018年10月10日.
- Liu, J. E., K. Hattori, and Y. I. Chen, 2018, Application of Total Electron Content Derived from the Global Navigation Satellite System for Detecting Earthquake Precursors, Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies, edited by Ouzounov et al., 305-317, DOI: 10.1002/9781119156949.ch17, Wiley.
- Manzi, M., A. Malehmir, R. Durrheim, H.Y. Ogasawara, H. Ogasawara, and ICDP DSeis team, 2018, Reflection seismic imaging of the causative geological structure of the M5.5 earthquake (2014) in South Africa, 日本地震学会, S08-04, 郡山, 2018年10月10日.
- Matcharashvili, T., T. Hatano, T. Chelidze, and N. Zhukova, 2018, Simple statistics for complex Earthquake time distributions. Nonlin. Processes Geophys. 25, 497-510.
- Mngadi, S. B., R. J. Durrheim, M. S. D. Manzi, H. Ogasawara, Y. Yabe, H. Yilmaz, N. Wechsler, G. Van aswegen, D. Roberts, A. A. K. Ward, M. Naoi, H. Moriya, M. Nakatani, A. Ishida, SATREPS Team, and ICDP Dseis Team, 2019, Integration of underground

- mapping, petrology, and high-resolution microseismicity analysis to characterise weak geotechnical zones in deep South African gold mines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 114, 79-91, doi: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.003.
- Mori, J.J., Y. Yasutomi, and H. Ogasawara, 2018, Close observations of the rupture for the M5.5 Orkney, South Africa earthquake. Tuesday, 11 December 2018. Abstracts AGU Fall Meeting. S21C-0438.
- Morita, S., K. Heki, M. Nakatani, K. Matsushima and T. Mogi, 2018, Statistical evaluation of anomalous propagation of VHF-band radio wave and reliability of the anomaly that immediately preceded the 2016 Kumamoto Earthquake, International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27.
- 森田 笙・中谷 正生・日置 幸介・茂木 透, 2018, 島原におけるFM電波伝播異常の観測と2016年熊本地震前の異常について, 地球惑星連合大会, MIS09-03, 幕張, May 22, 2018.
- Motojima, K., Y. Shiono and Y. Ogura, 2018, Detection of anomalous VHF radio wave propagation associated with earthquake by artificial intelligence, International Symposium on Earthquake Forecast / 5th International Workshop on Earthquake Preparation Process - Observation, Validation, Modeling, Forecasting - (ISEF-IWEP5), pp.94, Chiba, May 25-27, 2018.
- Nagao, T., J. Izutsu, M. Kamogawa, Y. Orihara, S. Sugiura, H. Kondo, 2018, Electromagnetic observation addressed to the short-term earthquake prediction research in VLF band, Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes 2018 (EMSEV2018), Potenza, Italy, September 2018.
- 長尾年恭, 齋藤愛理, 井筒 潤, 鴨川 仁, 織原義明, 杉浦繁貴, 近藤 斎, 2018, VLF帯パルス電磁波観測による短期・直前予測の研究 -震央から観測されたと考えられる電磁波の予察的解析-, 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集, 62, 2018年12月.
- Nakatani, M., 2018, Statistical Evaluation of Precursory Phenomena - A Review (invited), Proceedings of the 17th Japan-Taiwan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, 19-23.
- Nakatani, M., 2018, Short-Term Precursors, Why do I care? (invited), International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- Nakatani, M., 2018, A revised seismogenesis scenario implied by the discovery of a too consistent, immediate precursor - I think I' ve figured it out! (invited), International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- 中谷正生, 2018, 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, 地震予知連学会会報, 99, 465-469.
- 中谷正生, 2019, 地震のメカニズム解明一本当に地震予知はナンセンス? あんた, 地震の

- 何なのさ？—短期前兆のメタ理論, パリティ, Vol.34, No.2, 84-88.
- 楠城一嘉, 2018, b値に基づく全地球規模の大地震発生予測のモデル, 地震予知連会会報, 99, 459-462.
- 楠城一嘉, 2018, 地震のナウキャストニングの研究, 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集, 5, 2018年12月.
- 直井誠, 2018, 南アフリカ大深度金鉱山での微小破壊観測による震源の物理の研究, 地震2, 71, 43-62, doi:10.4294/zisin.2017-13 (2016年地震学会若手学術奨励賞受賞記念論文)
- Nishikawa, T., and Ide, S., 2018, Recurring slow slip events and earthquake nucleation in the source region of the M 7 Ibaraki - Oki earthquakes revealed by earthquake swarm and foreshock activity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(9), 7950-7968.
- Ochi, T., and N. Takeda, 2018, Relation between the coupling and tremor rates in the transition zone around the Shikoku region, *Earth, Planets and Space*, 70, doi:10.1186/s40623-018-0883-8.
- 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, 2018, 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 (2017年11月~2018年4月), 地震予知連絡会会報, 100, 165-182.
- 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, 2019, 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント (2018年5月~2018年10月), 地震予知連絡会会報, 101, 印刷中.
- Ogasawara, H., A. Ishida, K. Sugimura, Y. Yabe, S. Abe, T. Ito, A. Funato, H. Kato, B. Liebenberg, G. Hofmann, L. Scheepers, R. J. Durrheim, and the SATREPS and DSeis teams, 2019, Spatial variation in stress in seismogenic zones in South African gold mines, *Proceedings of the 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa, 7-11 May 2019, Okinawa*, accepted.
- 小笠原宏・石田亮壮・小笠原宏幸・杉村幸祐・野田拓・阿部周二・矢部康男・加藤春實・伊藤高敏・船戸明雄, 2018a, 大深度南アフリカ金鉱山の地震発生場での岩盤応力測定, 第53回地盤工学研究発表会, 2018年7月26日(木), サポートホール高松, 高松, DS-2-7, pp. 2.
- 小笠原宏・矢部康男・伊藤高敏・DSeisチーム, 2018b, ICDP 南アフリカ金鉱山 地震発生場掘削の完了, 日本地震学会, S08-03, 郡山, 2018年10月10日.
- Ogata, Y., K Katsura, H Tsuruoka and N Hirata, 2018, Exploring Magnitude Forecasting of the Next Earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, 89, 4, 1298-1304, doi: 10.1785/0220180034.
- 小倉佑哉・本島邦行, 2018, 気象現象による影響を考慮した見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震の関連性解析, 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集, 39-42, 2018年12月.
- Okuda, T., & Ide, S., 2018a, Streak and hierarchical structures of the Tohoku-Hokkaido subduction zone plate boundary. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 132.

- Okuda, T., & Ide, S., 2018b, Hierarchical rupture growth evidenced by the initial seismic waveforms. *Nature communications*, 9(1), 3714.
- Omi, T., Y. Ogata, K. Shiomi, B. Enescu, K. Sawazaki, and K. Aihara, 2019, Implementation of a real-time system for automatic aftershock forecasting in Japan, *Seismol. Res. Lett.* 90, 242-250.
- Ootani, Y., J. Xu, T. Hatano, and M. Kubo, 2018, Contrasting Roles of Water at Sliding Interfaces between Silicon-Based Materials: First-Principles Molecular Dynamics Sliding Simulations. *J. Phys. Chem. C* 122, 10459.
- 織原義明, 2018, 地震予知学が未科学として認められるには, 日本地震予知学会第5回学術講演会アブストラクト集, 13-16.
- 織原義明, 2018, 2011年東北地方太平洋沖地震前の地下水異常調査, 日本地震予知学会第5回学術講演会アブストラクト集, 67-69.
- Orihara, Y., M. Kamogawa, Y. Noda, and T. Nagao, 2018, Are deep-fish appearances an earthquake precursor?, EMSEV (Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes) 2018 International Workshop Abstracts, 203.
- 織原義明・鴨川仁・野田洋一・長尾年恭, 2018, 日本周辺における鯨類のマス・ストランディングと地震との関係に関する考察, 日本地震学会講演予稿集2018年度秋季大会, S13-05.
- Ouzounov, D., S. Pulinets, J. Y. Liu, K. Hattori, and P. Han, 2018, Multiparameter Assessment of Pre-Earthquake Atmospheric Signals, in *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, edited by Ouzounov et al., 339-359, DOI: 10.1002/9781119156949.ch20, Wiley.
- Ouzounov, D., S. Pulinets, K. Hattori, P. Taylor (eds.), 2018, *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, pp. 414, Wiley.
- Roy, S. and T. Hatano, 2018, Creep-like behavior in athermal threshold dynamics: Effects of disorder and stress. *Phys. Rev. E* 97, 062149.
- Rusley, C., T.C. Onstott, R.X. Liang, J.A. Higgins, N.W. Slater, H. Ogasawara, E.D. Cason, B.S. Lollar, T. Wiersberg, M. Zimmer, E. van Heerden, T.L. Kieft, B. Freese, B. Leibenberg, and V.H. Esterhuizen, 2018, Exploring the Limits of Life in a South African Deep Subsurface Brine, 11 December 2018. AGU Fall Meeting. B23E-2552.
- Schorlemmer, D., M. J. Werner, W. Marzocchi, T. H. Jordan, Y. Ogata, D. D. Jackson, S. Mak, D., A. Rhoades, M. C. Gerstenberger, N. Hirata, M. Liukis, P. J. M., A. Strader, M. Taroni, S. Wiemer, J. D. Zechar, and J. Zhuang, 2018a, The Collaboratory for the Study of Earthquake, Predictability: Achievements and Priorities, *Seismol. Res. Letters*, 89, 4, 1305-1313, doi:10.1785/0220180053.
- Schorlemmer, D., N. Hirata, Y. Ishigaki, K. Doi, K. Z. Nanjo, H. Tsuruoka, T. Beutin, F. Euchner, 2018b, Earthquake Detection Probabilities in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 108(2), 702-717 doi: <https://doi.org/10.1785/0120170-217>.
- Shinoda, A., S. Fujiwara, H. Niiya, and H. Katsuragi, 2018, Void structure stability

- in wet granular matter and its application to crab burrows and cometary pits, *Sci. Rep.* 8, 15784.
- Shiono, Y. and K. Motojima, 2018, Detection of anomalous VHF radio wave propagation associated with earthquake by Artificial Intelligence, Japan Geoscience Union Meeting 2018, MIS09-06, Chiba, May, 22, 2018.
- Sugan M., A. Vuan, A. Kato, M. Massa, and G. Amati, 2019, Seismic evidence of an early afterslip during the 2012 sequence in Emilia (Italy), *Geophys. Res. Lett.*, 46, doi: 10.1029/2018GL079617.
- Takizawa, S., H. Niiya, T. Tanabe, H. Nishimori, and H. Katsuragi, 2019, Impact-induced collapse of an inclined wet granular layer, *Physica D* 386-387, 8-13.
- Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018, Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog, *Earth, Planets and Space*, 70, 90.
- 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.
- 遠田晋次, 2018, 2018年大阪府北部地震の周辺活断層と地震活動への影響, *地震ジャーナル*, 66, 9-21.
- Toda, S., and R. S. Stein, 2018, Why aftershock duration matters for probabilistic seismic hazard assessment, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 108, 1414-1426.
- 遠田晋次・石村大輔, 2019, 熊本地震など内陸大地震で見いだされた誘発性地表地震断層と短い活断層の評価, 第四紀研究, 印刷中.
- 堤 浩之・遠田晋次・後藤秀昭・熊原康博・石村大輔・高橋直也・谷口 薫・小俣雅志・郡谷順英・五味雅宏・浅野公之・岩田知孝, 2018, 熊本県益城町寺中における2016年熊本地震断層のトレンチ調査, *活断層研究*, 49, 31-39.
- 梅田康弘・板場智史, 2018, 1944年東南海地震及び1946年南海地震時の海水位変化を利用した紀伊半島沿岸部における上下変動時系列の推定, *地質調査研究報告*, 69, 81-89.
- Uyeda, S. and T. Nagao, 2018, International Cooperation in Pre - Earthquake Studies: History and New Directions, *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, edited by Ouzounov et al., AGU Geophysical Monograph 234, 3-6, Wiley.
- Vuan, A., M. Sugan, 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.
- Wakabayashi, A., Yasuoka, Y., Janik, M., Nagahama, H., Fukuhori, N., Mori, Y., Arai, Y., Fujii, S., Mukai, T., 2019, Derivation and validity evaluation of calibration factors for activated-charcoal radon collectors. *Radioisotopes*. in press.
- Wang, T., Zhuang, J., Buckby, J., Obara, K. and Tsuruoka, H., 2018, Identifying the recurrence patterns of non-volcanic tremors using a 2D hidden Markov model with

- extra zeros, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.123, Issue8, pp.6802-6825, doi:10.1029/2017JB015360.
- Wang, Y., T. Wang, and J. Zhuang, 2018, Modelling continuous time series with many zeros and an application to earthquakes, *Environmetrics*, 29, 4, <https://doi.org/10.1002/env.2500>.
- Wiersberg, T., M. Zimmer, C. Kujawa, B. Liebenberg, H. Ogasawara, T.C. Onstott, E. Cason, Jan-G Vermeulen, E. van Heerden, 2019, Investigations on fault zone gases in South African gold mines, Abstract EGU2019-5670, SSP1.2/CL1.32/EMRP3.11/GD2.9/GMPV1.7/NH5.12/TS1.4, 7-12 April 2019, Vienna.
- Yabe, S., and Ide, S., 2018, Variations in precursory slip behavior resulting from frictional heterogeneity. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(1), 43.
- Yamaguchi, J., M. Naoi, M. Nakatani, H. Moriya, T. Igarashi, O. Murakami, Y. Yabe, R. Durrheim, and H. Ogasawara, 2018, Emergence and disappearance of very small repeating earthquakes on a geological fault in a gold mine in South Africa, *Tectonophysics*, 747-748, 318-326. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.014>.
- Yamaguchi, T., R. Sato, Y. Sawae, 2018, Propagation of Fatigue Cracks in Friction of Brittle Hydrogels, *Gels* 4, 53.
- Yamaguchi, T., C. Creton, M. Doi, 2018, Simple model on debonding of soft adhesives, *Soft Matter* 14, 6206-6213.
- Yamaguchi, Y., S. Takada, and T. Hatano, 2018, Rheology of Cohesive Granular Particles under Constant Pressure, *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 094802.
- Yasuoka, Y., Nagahama, H., Muto, J., Mukai, T., 2018, The Anomaly in Atmospheric Radon Concentrations Prior to the 2011 Tohoku-Oki Earthquake in Japan. *Radiation Environment and Medicine*, 7(2), 86-94, Aug., 2018.
- 安富達成, 2019, Rupture process of the M5.5 Orkney earthquake using the dense network of a South African gold mine, 京都大学修士論文.
- Zhuang, J., M. Murru, G. Falcone, and Y. Guo, 2018, An extensive study of clustering features of seismicity in Italy from 2005 to 2016, *Geophysical Journal International*, 216, 302-318, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy428>.
- Zhuang, J., T. Wang, and K. Kiyosugi, 2019, Detection and replenishment of missing data in marked point processes. *Statistica Sinica*. In press. doi:10.5705/ss.202017.0403.
- Ziegler, M., M. Rickenbacher, N. Berset, B. Liebenberg, A. Ishida, K. Sugimura, T. Noda, H. Ogasawara, S. Mngadi, R. Durrheim, T. Ito, A. Funato, and the ICDP DSeis team, 2018, Core and borehole logging and stress measurements of a 817 m long borehole drilled from 2.9 km depth toward the Moab Khotsong 2014 M5.5 aftershock zone (ICDP DSeis project in South Africa), EGU2018-10377, Vienna, 12 April 2018.

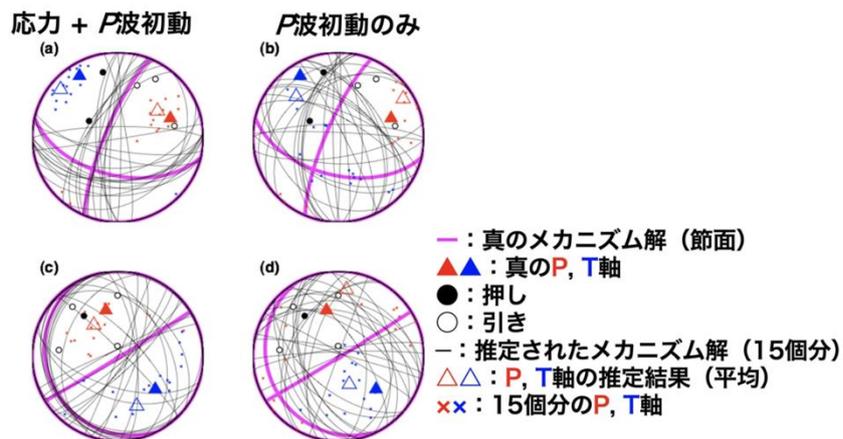


図1. P波初動極性から直接推定した応力場情報を参考にした個々の地震のメカニズム推定法の検証例 (東北大学 [課題番号: 1206])

左列(a, c)はIwata (2018)による応力空間パターンとP波初動の組み合わせ, 右列(b, d)はP波初動のみによる推定結果を示す. 100個のメカニズム解をサンプリングし, P軸・T軸の平均方向を計算. ここでは可視化の都合上, そのうち15個分についてのみのメカニズム解およびP軸・T軸を図示している. 推定結果平均のP・T軸の向き(白抜き赤・青三角)は真のそれ(塗りつぶした赤・青三角)に(a)(b)ともそれなりに合致するが, サンプリング各々のP・T軸(赤・青の×印)は, (b)の場合にかなりバラついている. c), d)はP波初動を「誤って記録」したデータ(「引き」(白丸)に囲まれた「押し」(黒丸)は, 本当は「引き」である)を含む例.

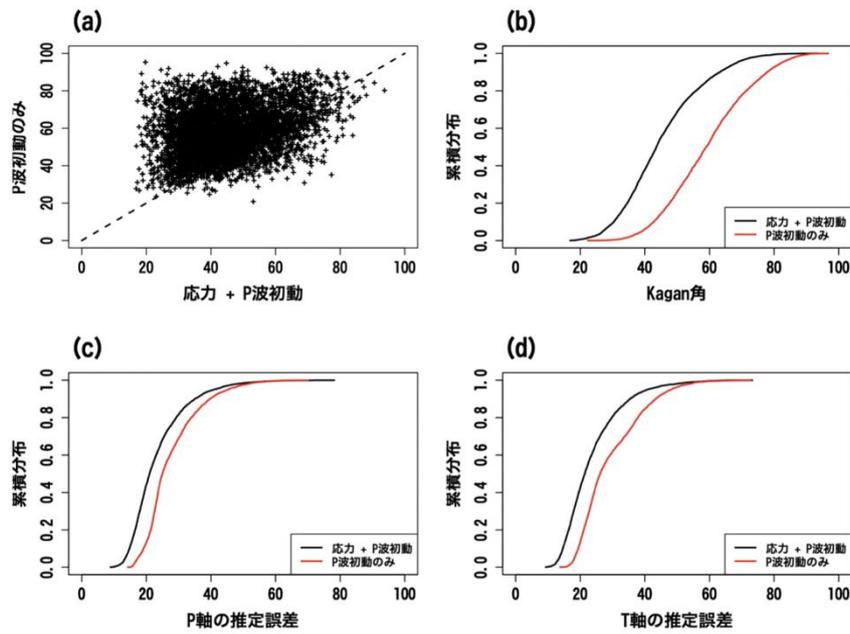


図2. 人工データを用いた2つのメカニズム解推定法の比較 (東北大学 [課題番号: 1206])  
 a) 両手法による結果を比較した散布図. 各々の地震に対する「応力情報あり」(応力+P波初動)と「応力情報なし」(P波初動のみ)の推定結果と真のメカニズム解からのズレを Kagan 角で表したもの. 値が大きいほどズレが大きい. 「なし」の推定結果のズレが「あり」のそれより大きい. b) Kagan 角の累積分布. この図でも全体として「なし」の Kagan 角の方が「あり」のそれより大きい. c) d) P 軸, T 軸の推定誤差. 「なし」の方が「あり」の場合より推定精度が低い.

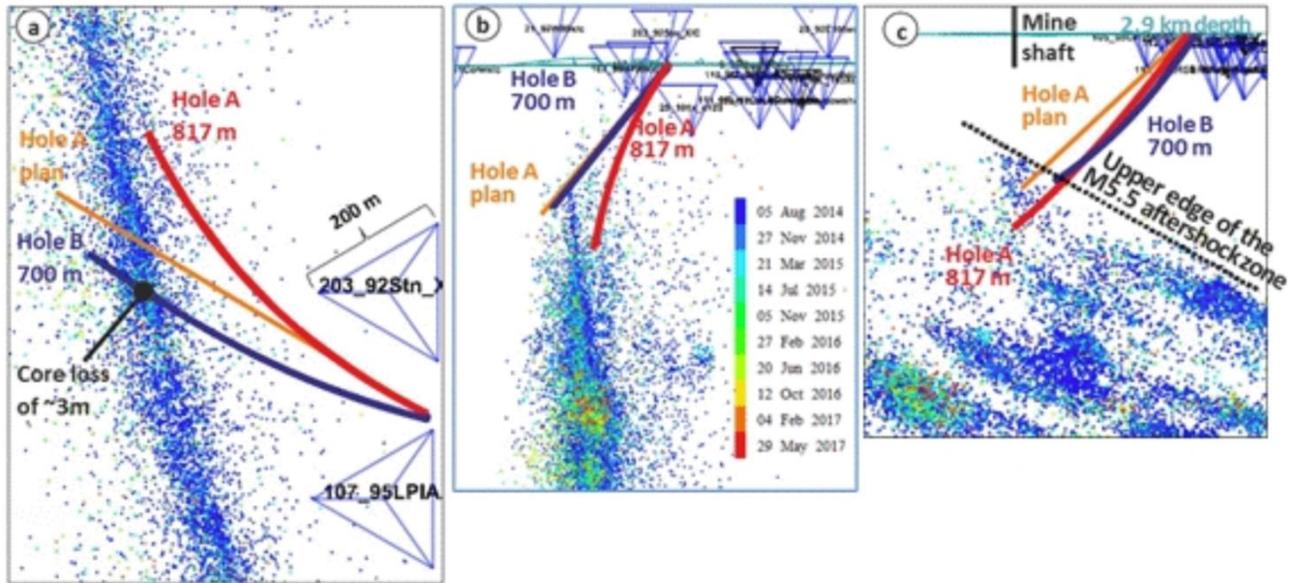


図3. M5.5余震発生帯，および，その上縁部と周囲を調査するための地下2.9kmからの掘削の位置関係（立命館大学〔課題番号：2401〕）

HoleAは，当初計画(橙色)から右にそれたが，HoleBは余震発生帯の上縁部を貫通した．HoleBの544mの地点から約2度異なる方向に分岐孔(HoleC)が掘削され，より多くの断層物質を回収することができた．

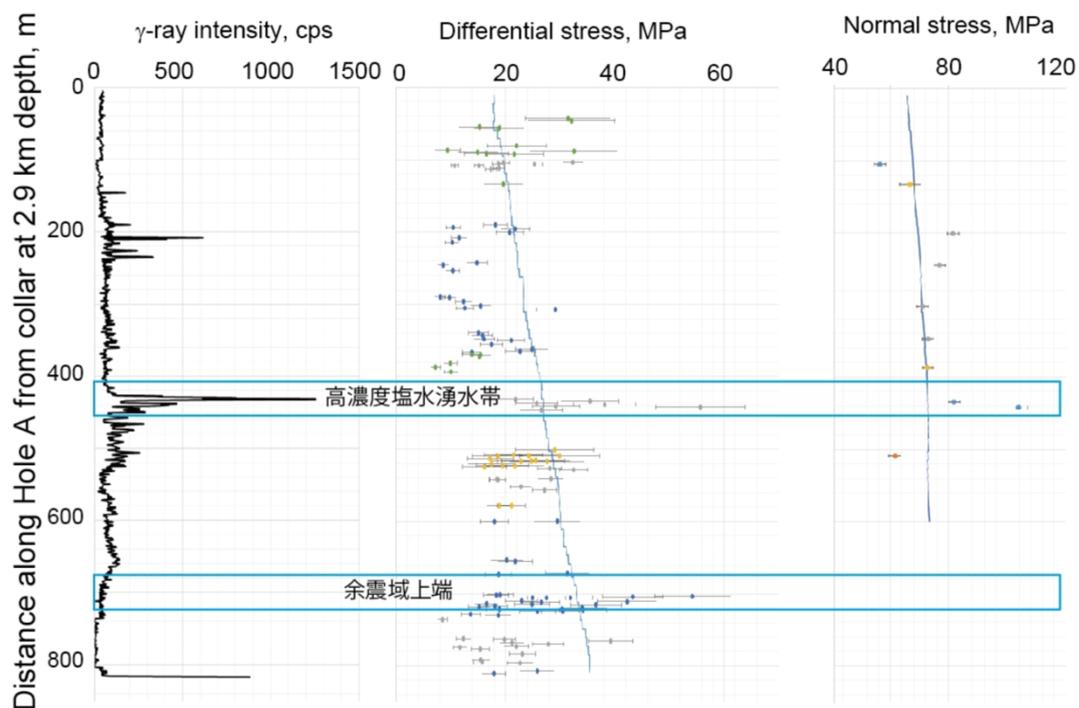


図4. ICDP-DSeisで掘削されたHoleAの解析結果（東北大学流体研究所〔課題番号：2948〕）  
 左から順に、孔内検層による自然ガンマ線強度、DCDAにより測定された孔井直交面内の差  
 応力、DRAにより測定された孔軸方向の法線応力の深さ分布応力分布に記された青実線は、  
 弾性数値モデルから期待される応力値. 400m地点では、高濃度塩水の湧出がみられた. Hole  
 Aは余震域に交差していないが、700m地点で余震発生深度に達している.

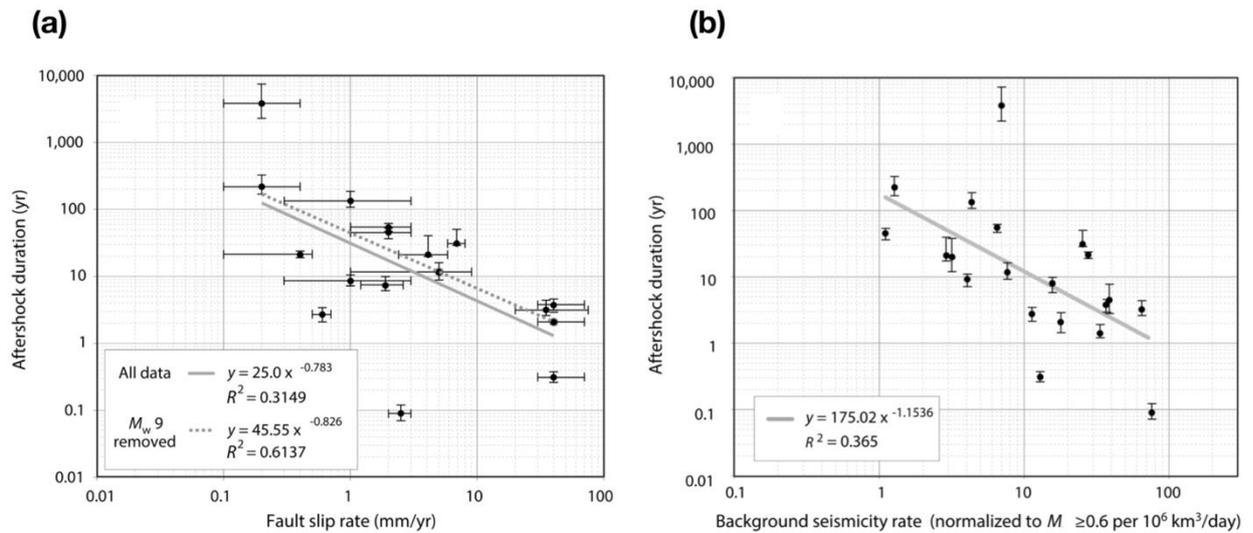


図5. 東北地方太平洋沖地震の12箇所の広域余震活動域および東北地方で発生した最近の8個の大地震の余震活動継続時間と領域内の活断層・プレート境界の変位速度(a)および常時地震活動(b)との関係(Toda and Stein, 2018, 東北大学[課題番号: 1206])

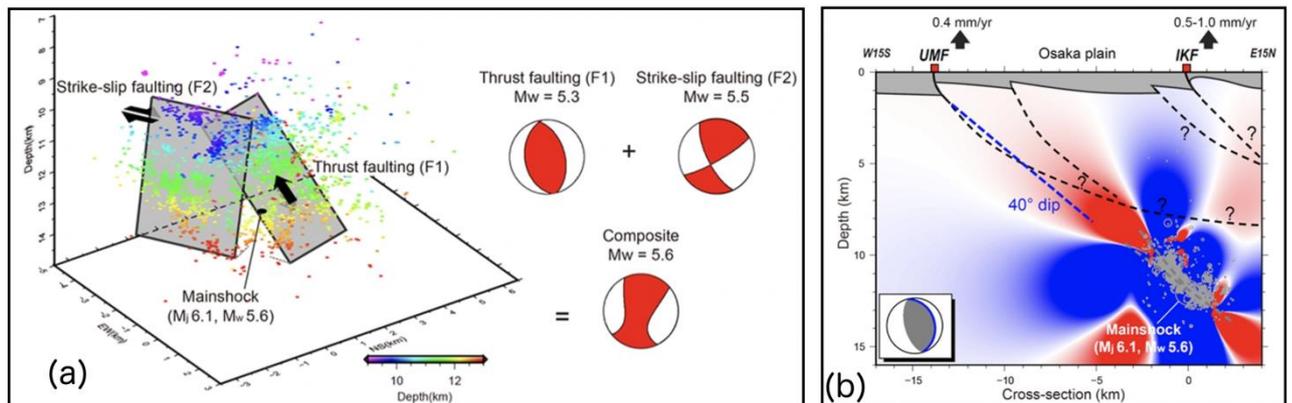


図6. 震源再決定に基づく2018年大阪府北部の地震(Mw5.6)の震源断層モデル(Kato and Ueda, 2019, 東北大学[課題番号: 1206])

a)再決定された余震と2枚の震源断層の透視図. 震源断層は北北西走向・東傾斜の逆断層(F1)と急傾斜の東北東走向の右横ずれ断層からなる. F1, F2断層による2つのダブルカップルモーメントテンソルを足し合わせることで観測された本震のCMT解が説明可能. b)東傾斜の逆断層(走向345°, 傾斜30°, すべり角90°, 図中のメカニズム解)に対して解いたクーロン応力変化と余震分布(灰色丸)の東北東-西南西の断面図. 破線はSato et al. (2009)による活断層の推定位置. UMF, IKFはそれぞれ上町断層帯, 生駒断層帯を示す. 0.4mm/yr, 0.5-1.0mm/yはそれぞれの上変位速度.

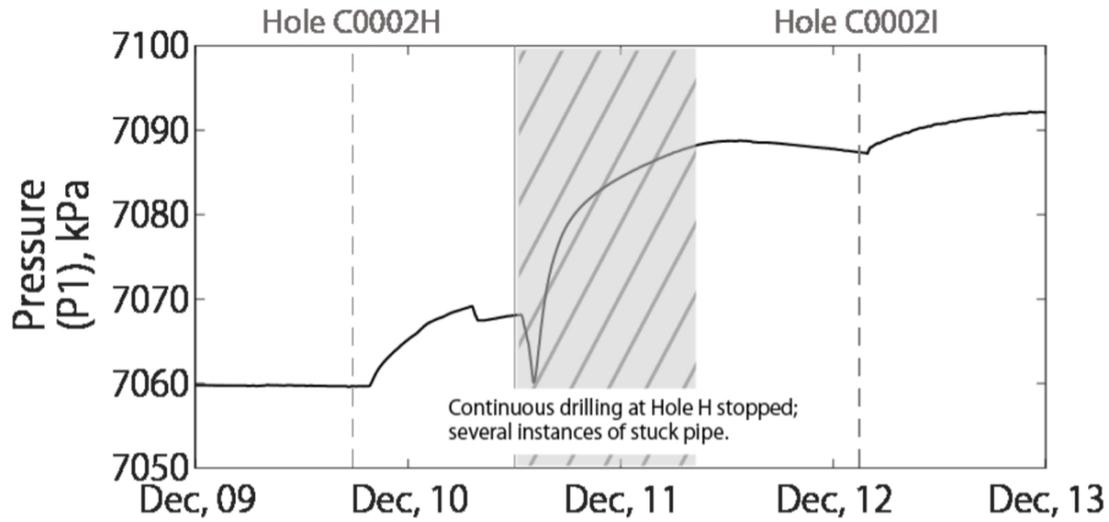


図 7. 熊野灘沖合に建設されたホール C0002G において近傍の掘削作業時に記録された水圧変化

(Kihosnita and Saffer, 2018, 産業技術総合研究所 [課題番号: 5007])

掘削作業はおよそ 100m 離れた C0002H および C0002I で行われた。灰色点線は掘削中のドリルビットが C0002H に設置されている水圧計と同じ深度に達した時の時間を示す。灰色斜線部はオペレーションに不具合が生じたため、解析では使用していない。

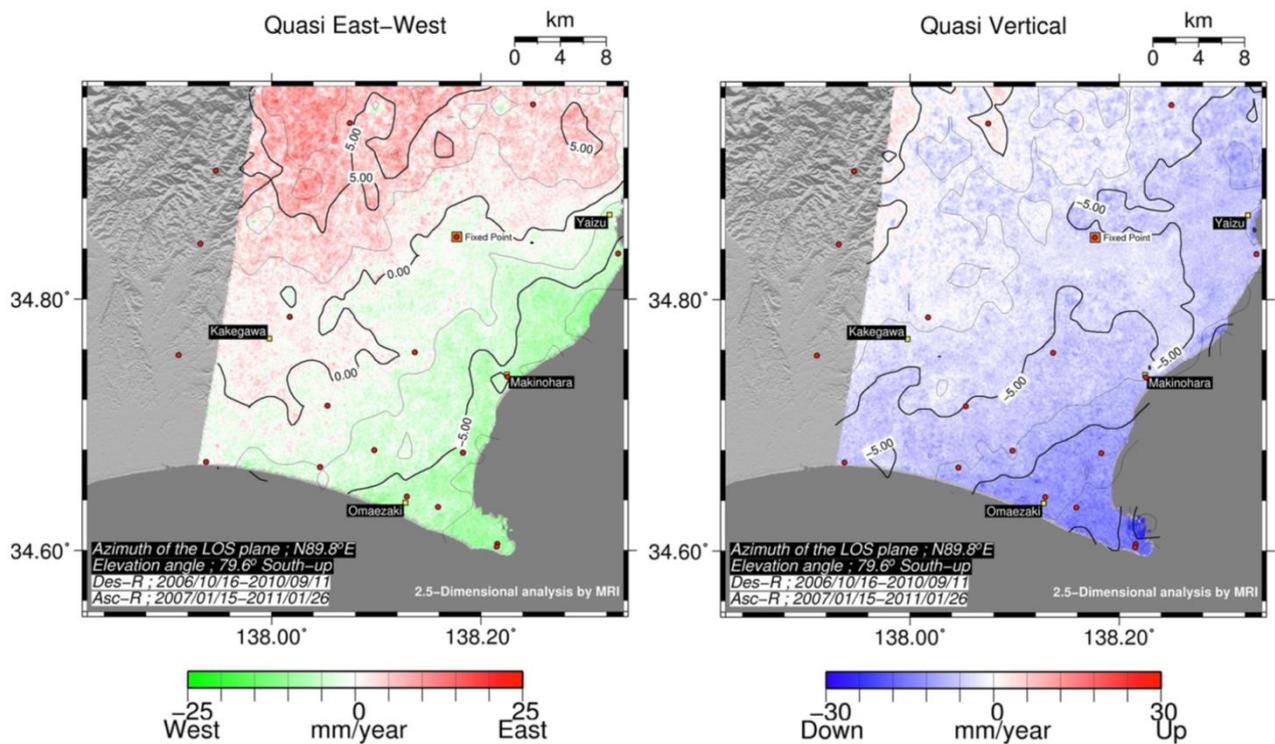


図 8. SAR衛星ALOS-1のデータを用いた時系列解析結果を2.5次元解析した，御前崎付近の準東西(左)と準上下(右)方向の変位速度（気象庁 [課題番号: 7006]）

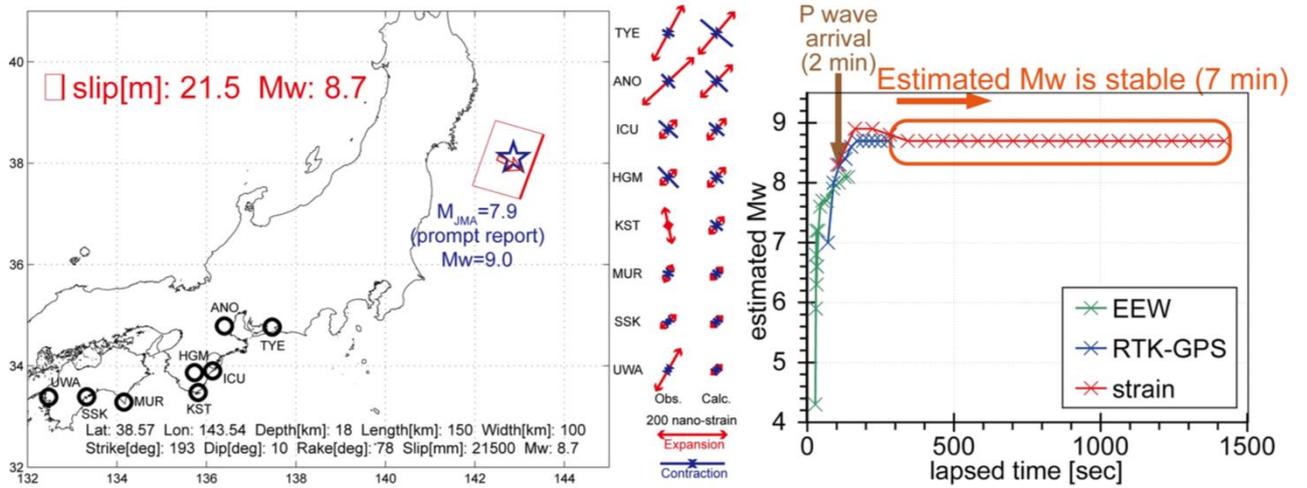


図9. ボアホールひずみ計による巨大地震のモーメントマグニチュードの即時推定 (Itaba, 2018, 産業技術総合研究所 [課題番号: 5007])

(左) ボアホールひずみ計を用いて推定した東北地方太平洋沖地震本震の断層モデル. (中) 各観測点における主ひずみの観測値および計算値. (右) 推定されたMwの時間変化.

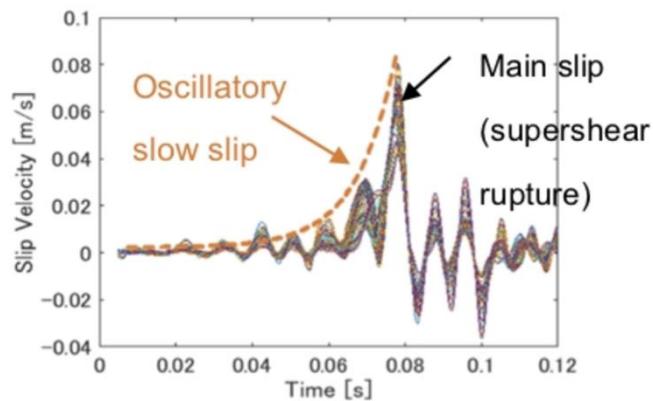


図10. ゲル摩擦実験において、本震的な大きい滑り(時刻0.08秒付近)へ向けて、ゆっくりした滑りが振動しながら加速していく様子 (東京大学地震研究所 [課題番号: 1512])

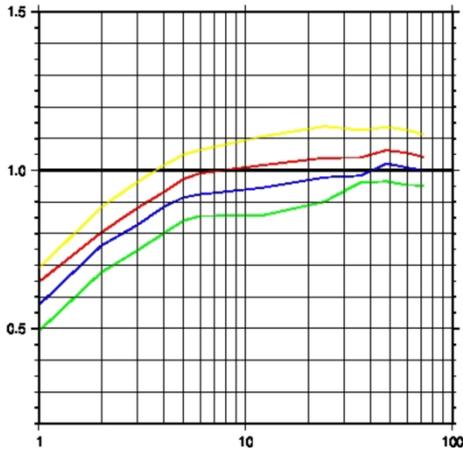


図11. Relative Intensityモデルの学習曲線(東京大学地震研究所 [課題番号: 1511])  
 横軸:学習期間(月). 縦軸: 情報利得. 黄:1ヶ月予測. 赤:3ヶ月予測. 青:半年予測. 緑:  
 1年予測.

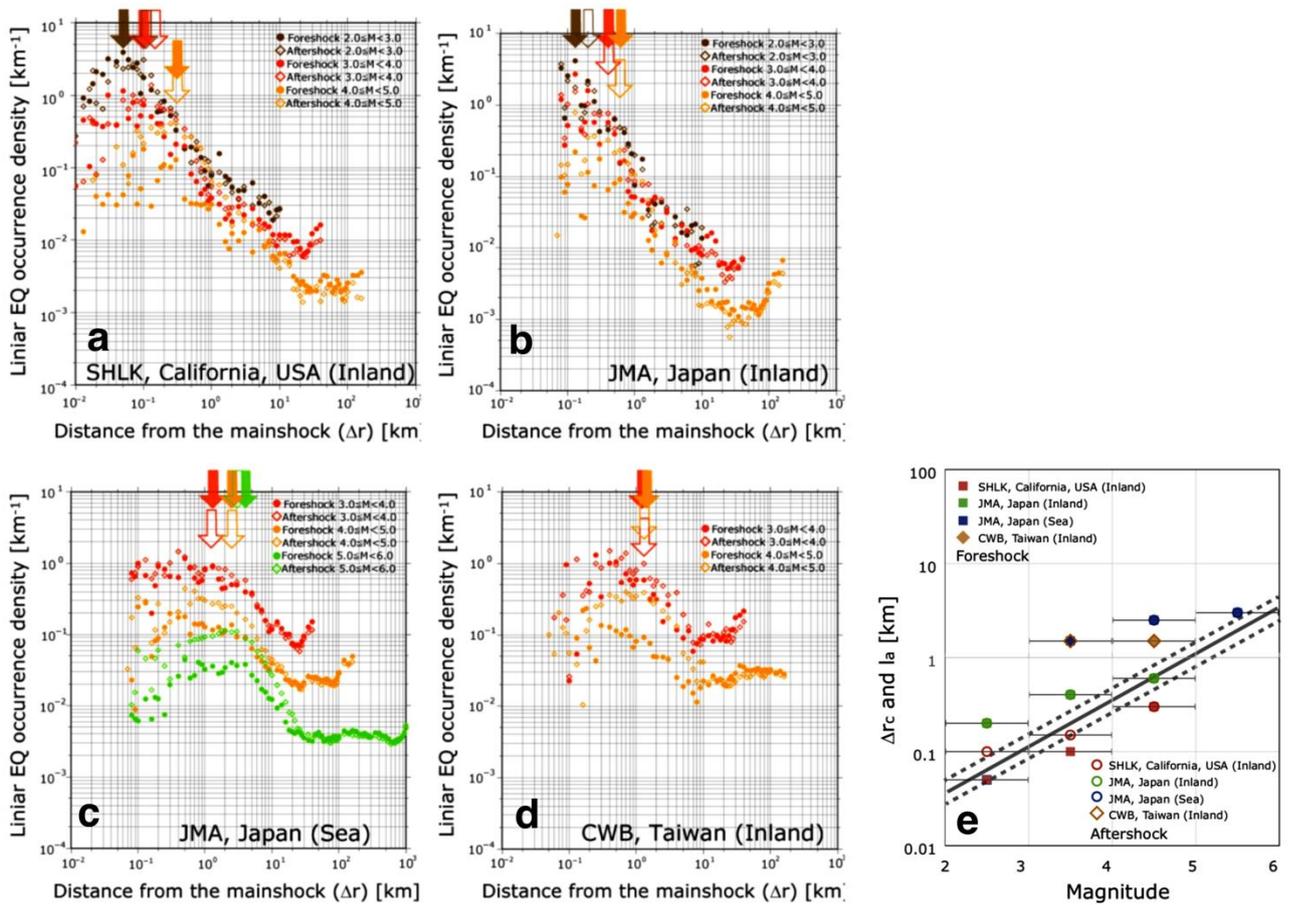


図12. 前震と余震の線密度解析(東京大学地震研究所 [課題番号: 2902])  
 a)カリフォルニア, (b)日本の内陸地震, (c)日本の海域地震, (d)台湾. 前震(Solid circle)  
 と余震(open diamond). Solid arrowとOpen arrowは, それぞれ, 前震と余震のグラフの  
 折れ曲がりの距離(特性距離)を表す. (e) 解析対象地域ごとの本震のマグニチュードごと  
 の前震と余震の特性距離. カリフォルニアは赤, 日本の内陸地震は緑, 海域の地震は青,  
 台湾はオレンジとなっている. 太実線は Skarlatoudis et al. (Bull. Seismol. Soc. Am. 106,

1652-1662, 2016) によるアスペリティーサイズ(半径)を示す. 点線は1シグマの標準偏差を示す.

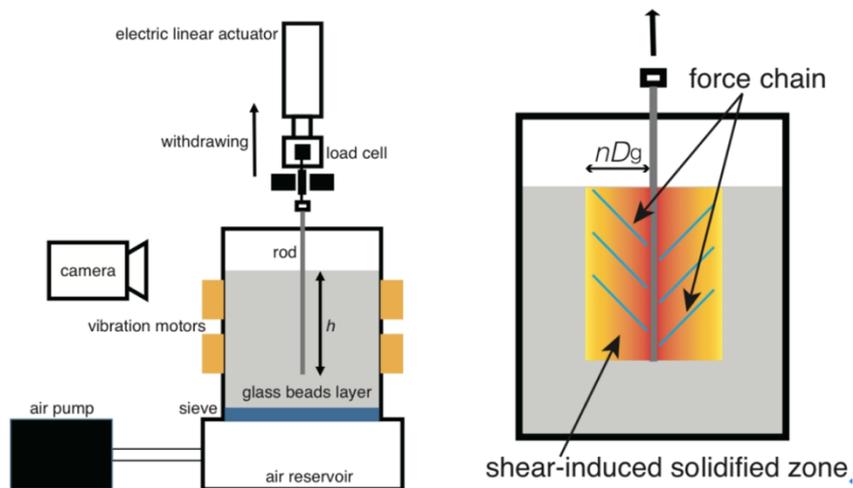


図13. 粉体層からの棒引き抜き実験の概念図(東京大学地震研究所 [課題番号: 1512]) (左)実験スキーマ. (右)粉体層からの棒引き抜きにより形成された実効的固化領域の概念図.

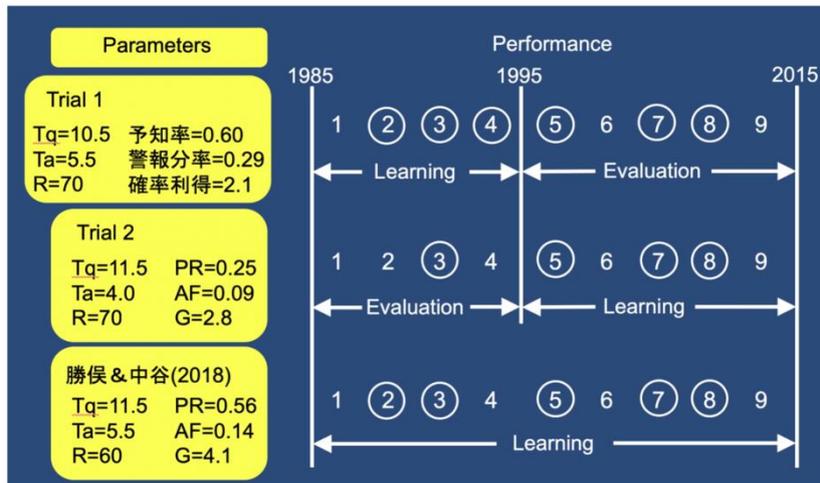


図14. カムチャツカ半島から千島列島, 北海道沖, 東北沖, 房総沖, 伊豆小笠原諸島で発生した Mw7.5以上の地震の静穏化モデルによるレトロスペクティブテスト (勝俣・中谷 (2018b), 東北大学 [課題番号: 1206], 東海大学 [課題番号: 2501]) 番号は Mw7.5 以上の 9 個の地震を示し, ○囲みが的中した地震である. Learning は学習期間, Evaluation は評価期間を意味する. Trial1, 2, 勝俣・中谷(2018a)の3つのパラメータセットを用いて予測を実施. Td は静穏化 設定期間, Ta は警報期間, R は警報範囲半径を示す.

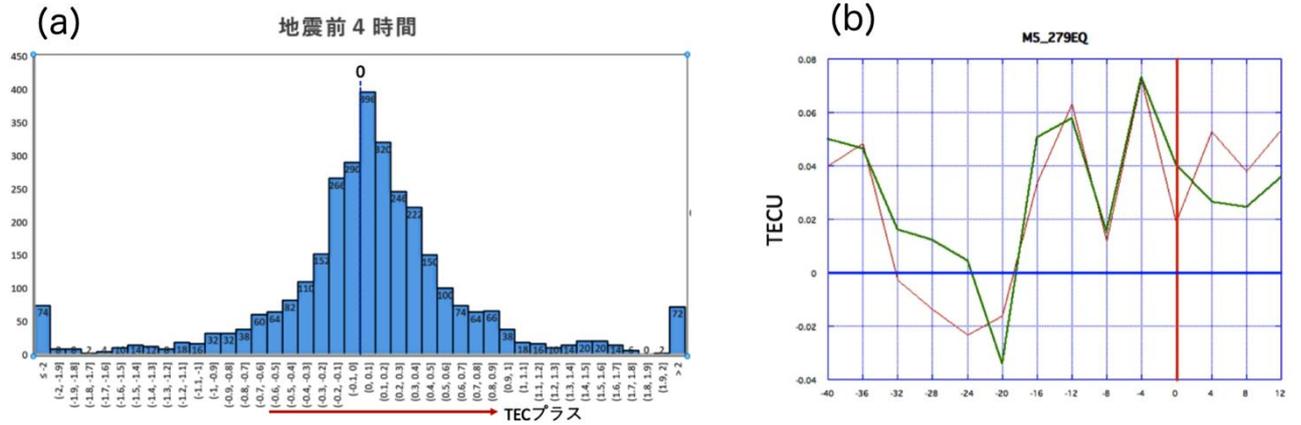


図 15. M>5 の地震 (279 個) 直前の TEC 異常の探索 (東海大学 [課題番号: 2501])

(a) 地震 4 時間前の TEC 強度残差のヒストグラム. 若干正の値がピークとなっている. (b) 4 時間ごとに計算した TEC 残差. 地震 4 時間前に最も大きな正の値になっている. 赤線は全てのデータを用いた場合. 緑線はヒストグラムの上下 5% の値を削除して求めたもの.

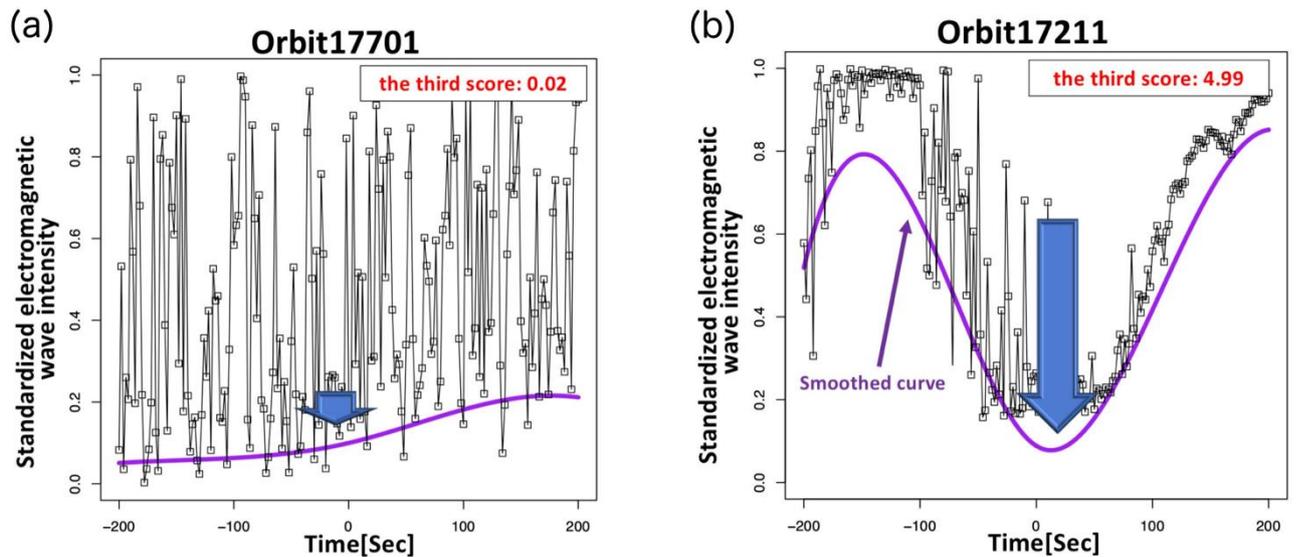


図 16. 直下で地震が起きたときの DEMETER 衛星の VLF 滞電磁波強度の解析例 (東京学芸大学 [課題番号: 2943])

時刻ゼロは, 衛星が最も震源に近付いたとき. 青線がノイズ処理後に平滑化した強度の時系列. 第 3 成分スコアは, 図中, 右上部に赤字で表示. (a) 2005 年 3 月 28 日 M8.6 (97.108E, 2.085N, 深さ 30 km). 電磁波強度の減少はみられない. (b) 2010 年 10 月 7 日 M4.8 (27.574E, 43.065N, 深さ 10 km). 顕著な減少が見られる.

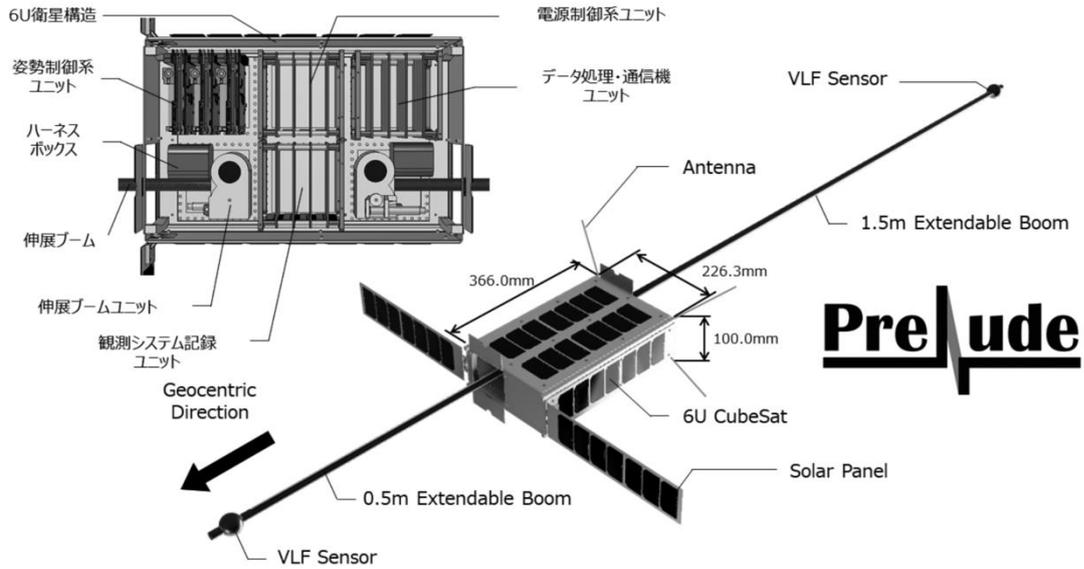


図17. 地震先行現象検証衛星PRELUDEの外見と衛星内のコンポーネント（JAXA [課題番号：2901]）

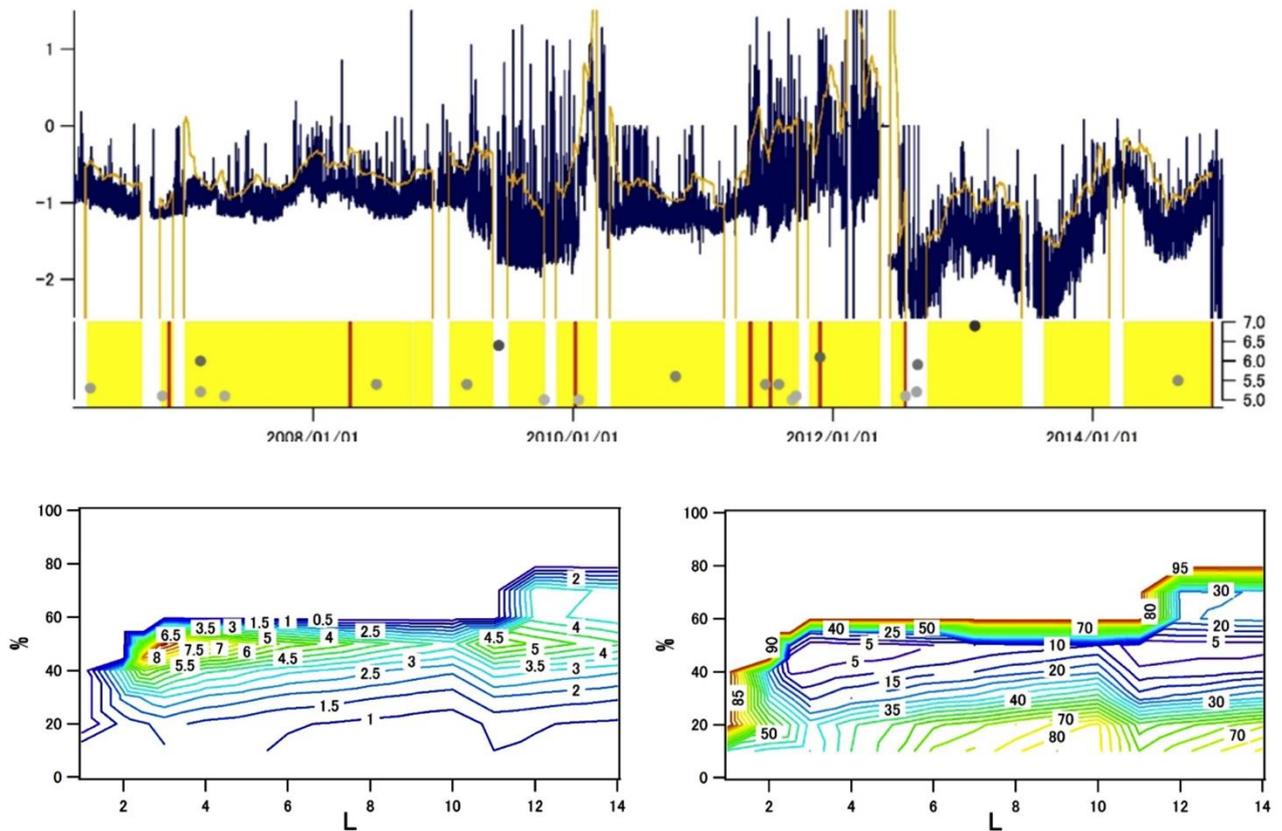


図18. VHF電波異常に基づく地震予測の検証（東海大学 [課題番号：2501]）  
 (上)えりもでの広尾放送局の電波受信強度(紺)と、アダプティブに決めた閾値(オレンジ)の時系列。下の帯グラフが、黄色が警報OFF、赤色が警報ON期間をあらわす。帯グラフ上の丸が地震の発生した期間とそのときのマグニチュード(右軸)を示す。(左下)確率ゲインの等高線図。異常と判断するための検出時間割合の閾値(縦軸)と警報持続時間をチューニングパラメタとした。(右下)p値(%)の等高線図。縦軸、横軸は左下と同じ。

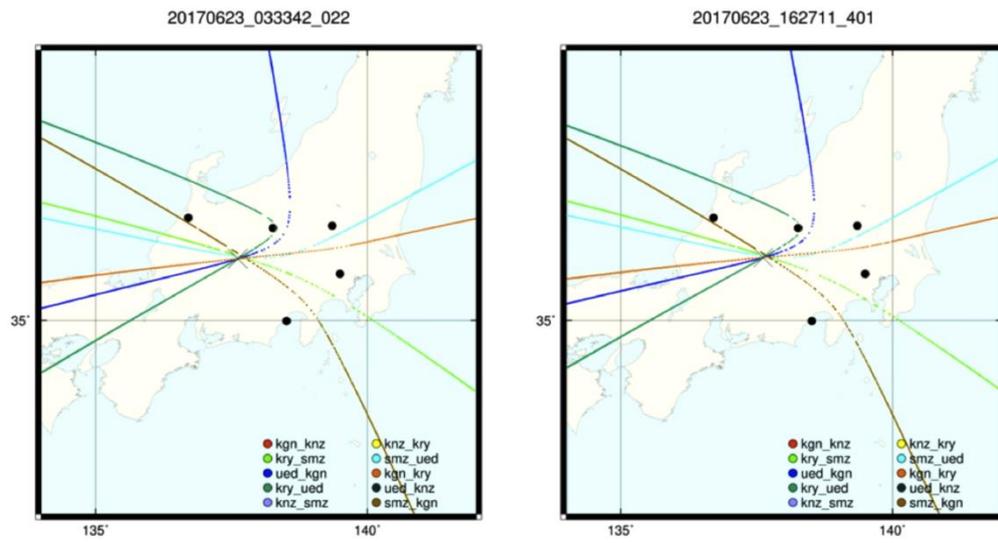


図19. 電磁波の到達時間差による波源位置標定の例（東海大学 [課題番号：2501]）  
 2つのパルスとも、2日後に発生した2017年6月25日長野県西部の地震(M5.6)の震央から10kmの同一地点で発生した。

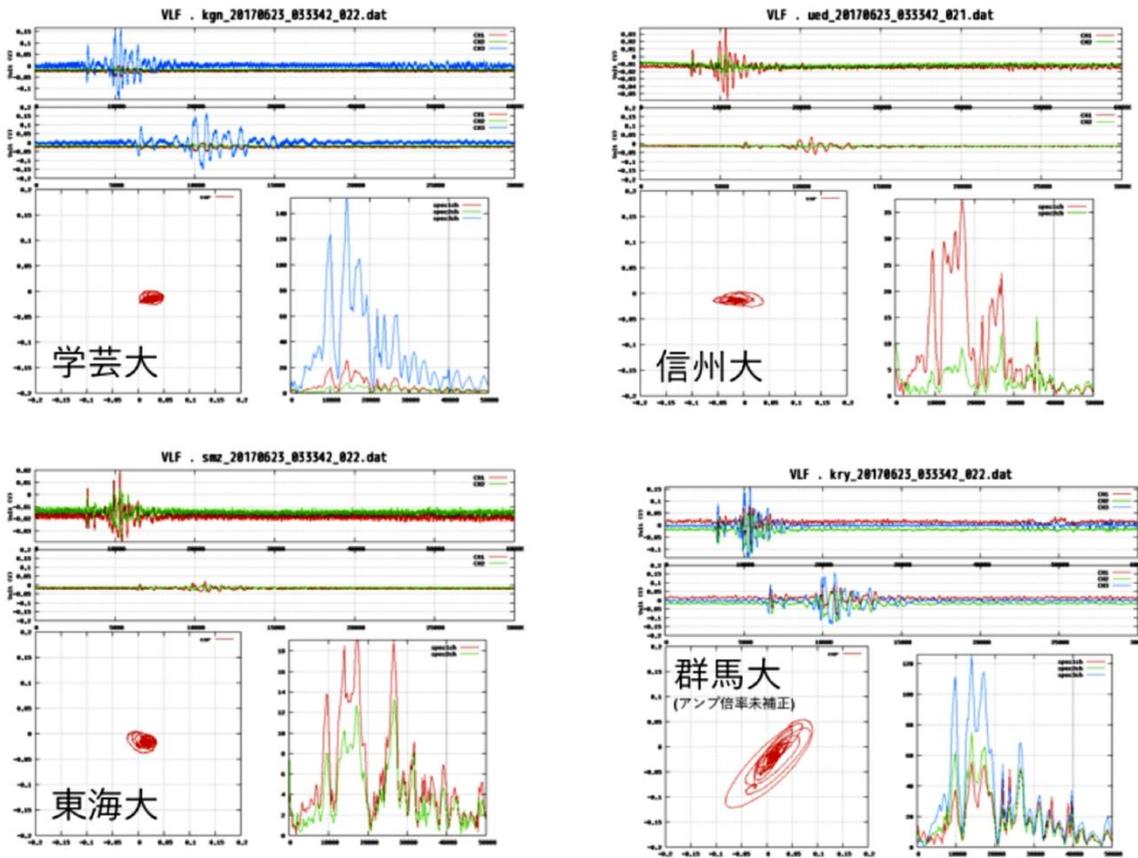


図20. 2017年6月23日の3時33分42.022秒に観測された波形(東海大学[課題番号:2501])  
 いずれの観測点でも観測された波形は時系列でもスペクトルでも良く似ていることから、  
 同じ事象を観測している事が確認できる。また午前3時台には中部地方では落雷は発生して  
 いない事がフランクリンジャパンのウェブ上の落雷データから確認できた。

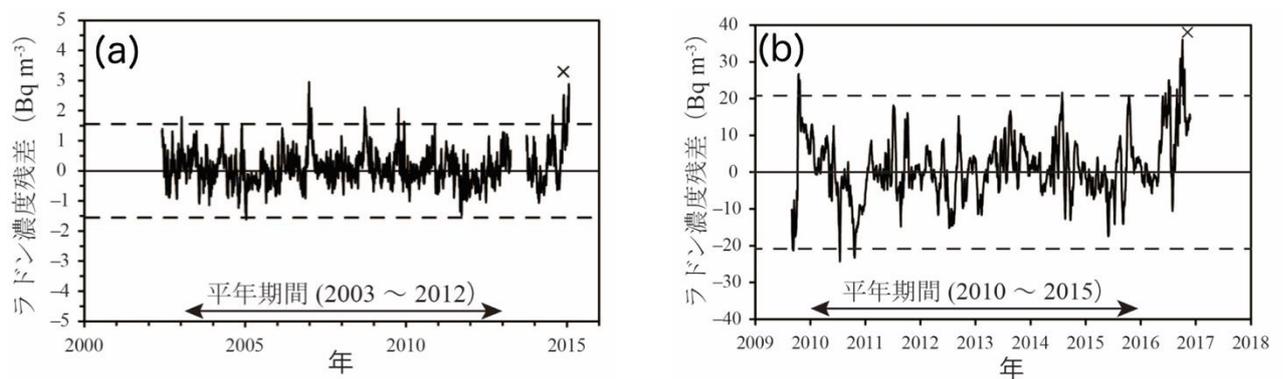


図21. (a)信州大学医学部(b)鳥取大学医学部における大気中ラドン濃度データ (東北大学  
 [課題番号:1207])

(a)の×印は、2014年11月22日に発生 of 長野県神城断層地震、(b)の×印は、2016年10月21日に発生 of 鳥取県中部地震。

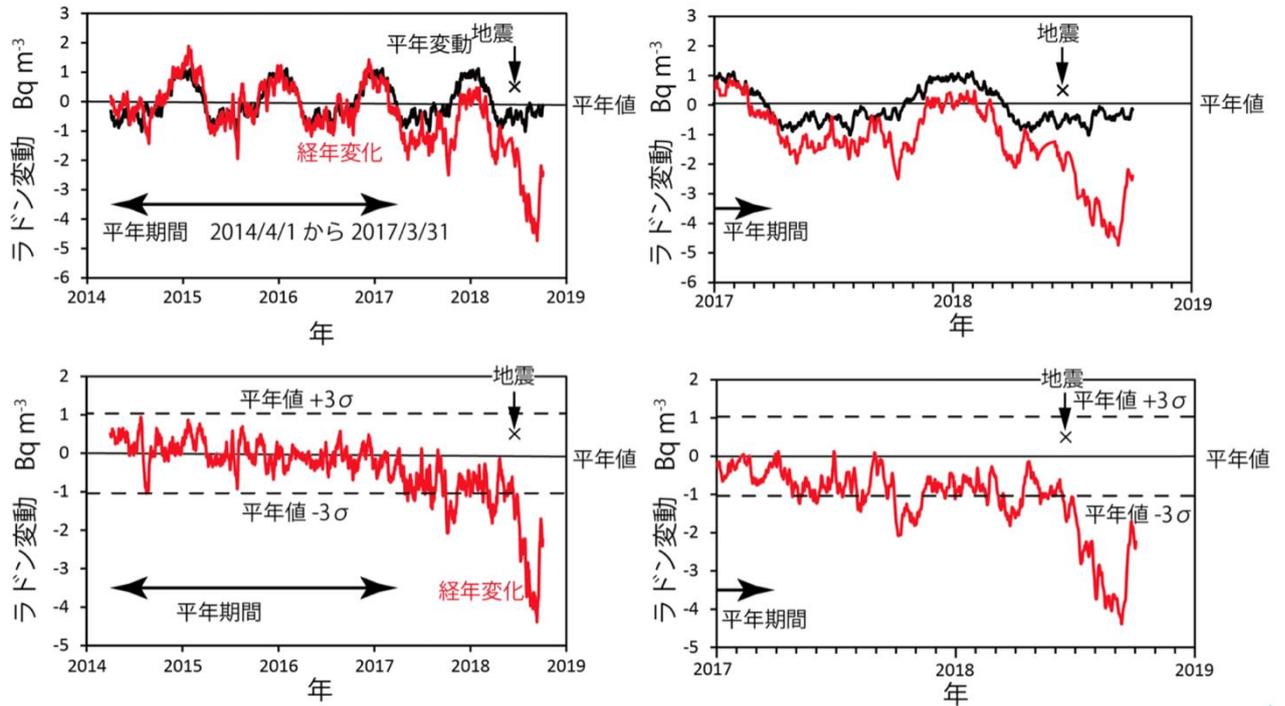


図22. 大阪薬科大学における大気中ラドン濃度データ（東北大学 [課題番号：1207]）  
 経年変動と平均変動(上図)と平均変動からの残差(下図). ×印は2018年6月18日に発生した大阪府北部地震.

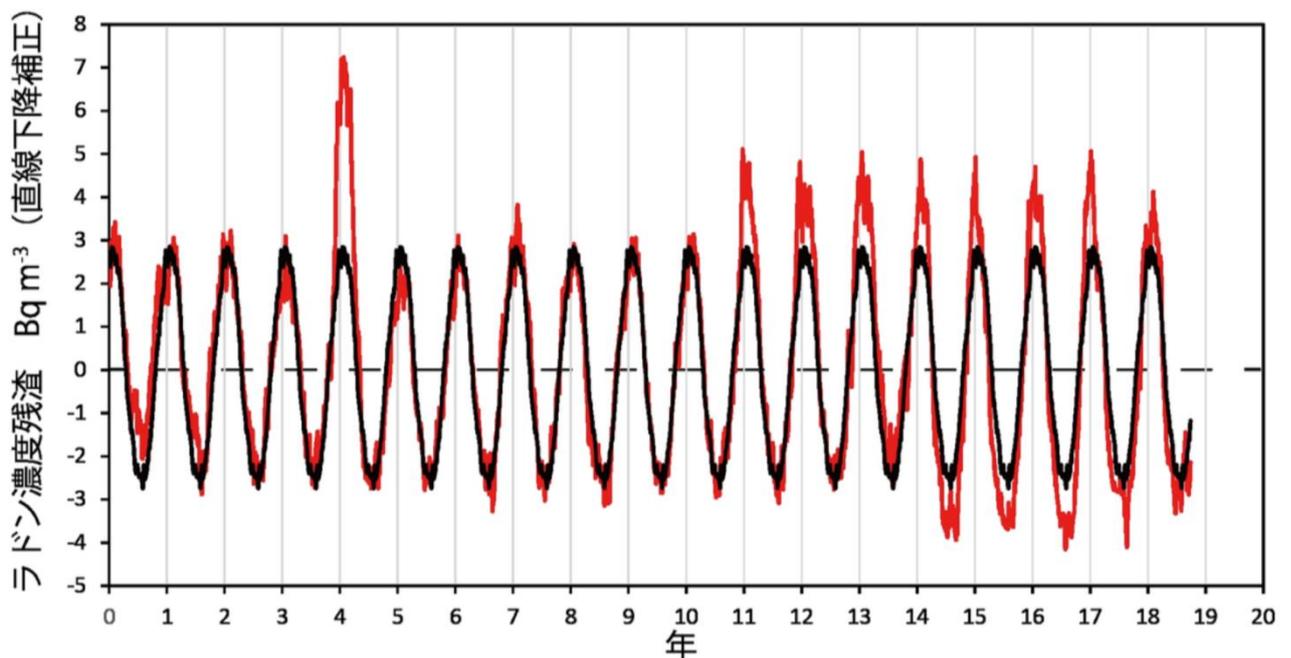


図23. 札幌医科大学における大気中ラドン濃度の長期データ（東北大学 [課題番号：1207]）  
 赤線がデータ. 黒線は、2010年以前の平均変動パターン. 2011年3月の東北地方太平洋沖地震以降は、年周変動の振幅が大きくなった.