

1 (4) 地震先行現象・地震活動評価

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

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

2. 地震・火山現象の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

活断層周辺の応力状態を推定するために、断層面解を経由せず、観測されたP波初動極性の分布から直接に応力の空間分布を求める、新たな応力インバージョン手法を開発した。空間的に変化する応力場を仮定して生成したシミュレーションデータに対する解析(図1, Iwata, 2016, AGU)では良好な結果を得た(東北大学 [課題番号: 1206])。いっぽう、南アフリカ大深度鉱山では、震源付近での絶対応力場を実測する試みが進んでいる。今年度は、M3.5地震の震源付近でオーバーコアリングを行うとともに、別に行われた震源貫通掘削コアの楕円度から面内差応力を推定するDCDA解析(Funato and Ito, 2017)を行った。さらに、複数の鉱山で起こったM2.8, 3.5, 5.5の震源断層付近で多数のボーリングによる応力測定を行うDseis計画(e.g., Ogasawara et al., 2017, Schatzlap Workshop on Induced Seismicity)が2016年8月31日に国際陸上科学掘削計画(ICDP)に採択された(立命館大学 [課題番号: 2401])。

活断層周辺の断層強度や応力状態を誘発作用の観点から検討することもできる。2016年4月16日の熊本地震では、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(Enescu et al., 2016)。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。今回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震が誘発されやすい環境になっていたことが考えられる(東北大学 [課題番号: 1206])。

地殻変動のモニタリングデータは、断層滑りの時空間履歴を計算・予測する物理モデルとあわせて地震発生の予測に使うことが原理的に可能であり、ゆっくりすべりイベント(SSE)などの非地震性すべりのモニターを高度化する努力が行なわれている(産業技術総合研究所 [課題番号: 5007], 気象庁 [課題番号: 7006])。産総研・防災科研・気象庁の3機関のひずみ・地下水・傾斜データをリアルタイムで共有して南海トラフ周辺地域の短期的SSEを解析するシステムの運用を継続し、2015年11月-2016年10月の短期的SSE39個の断層モデルを決定した(落ら, 2016, 2017)。

パッカーを用いて、産総研北勢観測点の井戸を2016年5月に密閉したところ、地下水圧に対する地殻歪感度が著しく向上し(北川・松本, 2016, 地震学会), 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。また, GNSSデータから推定した固着・すべり分布の時間変化(Ochi, 2015)と産総研の微動カタログを比較(図2, Ochi and Takeda, 2016, AGU)したところ, スロースリップと微動活動が同期する場所や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が良く相関することがわかった(産業技術総合研究所[課題番号: 5007])。

いっぽう, 気象庁では, GNSS日値を用いた解析から, 2014年半ばから紀伊水道において長期的SSEが発生していること, 時間とともにすべりの中心が東に移動していることを明らかにした。また, 2013年から継続している東海地域の長期的SSEについては, ひずみ計データのスタッキング解析からモーメント解放の時間変化を求めた。さらに, 新たな長期的SSEのモニタリング手法として, 中国地方を領域固定したGEONETのF3解座標値を用い, フィリピン海プレートの沈み込み逆方向の成分について, 南海トラフのプレート等深線25km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年の傾斜期間を持つランプ関数との相関を取ることで, 南海トラフ沿いの長期的SSEの客観的な時空間分布(図3)を得る手法を開発した。さらに, 干渉SAR時系列解析により, 室戸岬周辺の面的な定常的地殻変動を解析し, GNSS観測と整合したより詳細な結果が得られることを確認した。また, 東北地方太平洋沖地震の余効変動について, GNSS日値を再調査し, 新たなパラメータで余効変動を除去したデータを作成した(気象庁[課題番号: 7006])。

プレート境界におけるSSEは, 少なくとも近接する固着域への剪断応力を増加させることによって大地震の発生を促進する効果があると期待される。これは固着域の内部もしくは隣接域で発生した地震でも同じことであり, 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, 固着域の応力が高まっているサイクル後期においては, このような地震から短い期間で大地震が誘発されるとの結果を得た(気象庁[課題番号: 7006], 弘瀬ら, 2016)。また, 南海トラフの数値モデルについては, 海域におけるGPSから推定されたすべり欠損や重力異常分布等を考慮した摩擦パラメータを与えたり, プレート収束速度を見直したりして試行錯誤的に改良を進めている(気象庁[課題番号: 7006])。一方, 大域的な強度の不均質を与えた透明なゲルシートを用いた室内実験(Yamaguchi et al., 2016)で, マーカー粒子の変位分布を追うことによって, 固着滑りのサイクルに伴う応力分布の発展を追うことに成功し(図4), 巨大イベント発生に向う応力蓄積の途上で, 小地震の活動が大域的な応力を再配分する様子などが観察された(東京大学地震研究所[課題番号: 1512])。

非地震性滑りをより高い分解能で推定するために, 小繰り返し地震の活動度が用いられる。南アフリカCooke4鉱山内の地質断層上で多数発見されたM-4級のきわめて小さな繰り返し相似地震(Naoi et al., 2015)を14ヵ月間観測したところ, 繰り返し地震活動群32群のうち12群についてMwが時間とともに減少する傾向が認められた(図5, 山口ら, 2016, JpGU)。アスペリティの摩耗を捉えている可能性がある(東北大学[課題番号: 1206])。一方, 大型試料の二軸せん断試験においては, 断層全面がすべる大規模な動的すべりイベント(本震)が何度も繰り返したが, 本震に先行した前震には, 繰り返し似た位置で発

生するものがあり、それらの波形は互いに酷似していた（図6, Tsujimura et al., 2016, AGU）。これらは、断層全面がすべる大規模な動的すべりイベントをはさんで発生しており、前震を発生させるパッチは、そのような大規模イベントによっても損なわれずに持続し続けたことになる（立命館大学 [課題番号：2402]）。

Matched filter法による連続波形からの類似イベントの検出によって、大地震前後のゆっくり滑りを推定する研究は近年めざましい成果をあげている。今年度は、2016年熊本地震シーケンスにおいて、4月14日の前震(Mj6.5)発生以降、地震発生域が時間の経過とともに徐々に拡大する様子を捉えた(図7, Kato et al., 2016)。前震域の拡大は、断層の走向方向に加えて傾斜方向(浅い・深い)にも起きており、4月16日に発生した本震(Mj7.3)の破壊開始点へ向かう動きも見られた。前震域の拡大は、14日の前震を発端としたゆっくりすべり(余効すべり)の伝播によるものと解釈できる。実際、前震発生域の近傍の地殻変動観測点(電子基準点)のデータを分析することで、前震時と同じ方向に地表変位が非定常的に進んだことが確認できた。前震による静的な応力载荷に加えて、ゆっくりすべりによる本震の震源域への応力载荷も進行することで本震の発生が促進されたと考えられる(図8, Kato et al., 2016)。また、昨年度から継続して、2014年長野県北部地震の稠密余震観測網(約150点)のデータ解析を実施し、震源域の北部が南部に比べて地震活動の継続時間が長いことを明瞭に示した。さらに、2016年10月に発生した鳥取県中部の地震の前震活動や2016年4月の三重県南東沖地震にともなう地震活動の時空間変化も明らかにした(東北大学 [課題番号：1206])。

初期の余震活動中の地震欠測を埋めるために、上記の波形を用いた方法だけではなく統計学的手法も検討されてきた。今年度は、GR則を仮定せずに欠測を埋めるためにバイスケール変換を用いた新手法を提案し、熊本地震の余震系列に適用した(図9, Zhuang et al., 2017)。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する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確認された、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, 2016)とも対応しており、前述のゆっくり滑り(Kato et al., 2016)による応力変化を捉えていた可能性がある。

地震の確率予測を実現する基本的な戦略は、ベースとなる地震活動(定常的な地域性、余震活動のような広く認められる時間変化など)を統計モデルで表現し、それに先行現象で得られるゲインを組み込むことである(e.g., 尾形, 2015)。CSEPはベースとなる統計モデルを確立することを主要な目的としており、CSEP-Japanでは本年度も3テストクラス、4テスト領域の合計12のカテゴリーの地震活動予測検証実験を進め(Hirata and Tsuruoka, 2016, StatSei10)、2016年10月には東大地震研において国際研究集会を開催した。All Japanテスト領域について25ラウンドを超える検証実験でのモデルの比較を行い、HISTETAS7PA1205がベストの成績を収めた。また、熊本地震について、HISTETASおよび改良版のRI(図10)を使用して1日予測テストクラスの検証実験を実施した。なお、領域内の地震総数については、大森宇津則を適用して予測に用いることにより、CSEPのN-, S-, M-, L-テストをパスすることを確認した(東京大学地震研究所 [課題番号：1511])。一

方で、大地震発生ベースレートの推定に関して、断層調査・古地震等の資料から推定した地震の繰り返し時間間隔とそのばらつきに基づく方法もよく使われている。1系列3個以上ある中規模の相似地震の系列を対象に、ベイズ統計対数正規分布モデルを用いた事前予測の実験において、2016年2月1日からの1年予測(田中・岡田, 2016)は、拡張ブライスコア0.028と良好な成績を示した(気象庁 [課題番号: 7006])。

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

代表的な短期的先行現象である前震について、その群発活動としての特徴から「より大きな地震がおきそうな」可能性を、本震がおこる前にある程度推察できることが明らかになってきた(e.g., Ogata and Katsura, 2012, 前田・弘瀬, 2016)。本年度は、2016年熊本地震が発生した地域(九州中部)について、この地域の過去の前震活動の統計的解析から、本震発生予測に効率的な前震候補抽出のパラメータを求めた。その結果、そのパラメータの条件を満たす地震が発生した場合、前震候補のどれよりも大きくかつM5よりも大きい地震が周辺で12日以内に発生する確率は約7% (=3/43)、本震前に前震が現れる割合は約31% (=4/13)であることなどを明らかにした(気象庁 [課題番号: 7006])。このパラメータを熊本地震の系列に適用すると、4月15日0時3分のMj6.4の地震の発生によってフラグがあがったことになる。また、Lippiello et al. (2012)では、実際の地震カタログにみられる前震活動は、ETAS効果によるみかけの前震(Helmstetter et al., 2003)では説明しきれないことを示し、そのことを利用した新たな事前識別法とETASを組み合わせる。そこで、2016年熊本地震を含む日本の内陸地震について予備的な調査を行い、本震以前の地震活動の空間密度は、カリフォルニアの場合と同様に将来の本震の震源を中心として高まっており、その空間範囲の大きさが本震のサイズと相関する傾向を確認した(図11, Nanjo et al., 2016)。熊本地震の場合についていえば、このような活動の集中は、一連の活動の始まりである4月14日のMj6.5前震より前の段階で既に現れていた(公募研究 [課題番号: 2931])。また、茨城沖を対象として、連続データからの自動イベント検出により群発地震と繰り返し地震を検出したところ、大地震の前にはこれらの活動は増加し、地震直前には空間的に広がる前震活動として捉えられた(東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。

南アフリカ大深度金鉱山でのMw-5までの微小破壊(AE)の観測では、既存断層の厚さ1m以内に密集する面状クラスター(Naoi et al., 2015)と掘削前線前方の岩盤内に出現する厚さ2, 3mの板状クラスター(Moriya et al., 2015)が見いだされている。どちらも20m程度の大きさをもつが、これらについて波形の類似性による検討(図12, 山形ら, 2016, 地震学会)を行い、前者はクラスタ全体にわたっての活動が一つの大きな類似波形グループを形成し、後者は1メートル程度の小さなクラスタが多数並んだものであることが見い出された。これは、前者が既存地質断層面上の微小破壊活動、後者は岩盤中の微小破壊が相互作用で集中化したものであるという解釈(Naoi et al., 2016)と整合的である(東北大学 [課題番号: 1206])。

近年、普通のカタログにはのらないような小さな繰り返し地震からなる直前前震活動(e.g., Bouchon et al, 2011, Doi and Kawakata, 2013)が発見され、本震に直接つなが

る震源核によるもの(e. g., Tape et al., 2013)である可能性が指摘されている。ごく微小な繰返し地震を自動検出するための客観的な基準の設定方法を模索していたが、本年度は、各観測点・成分ごとに誤検出率を目安に波形相関値の閾値を定め、複数の観測点・成分で同時に閾値を超えることを判定基準とすることによって、2011年長野県中部の地震(M5.4)前の2年間(微小繰返し前震は直前14時間に集中)の周囲10km以内の4観測点におけるHi-Net連続データから正しい判定が行えることが確かめられた(Toyomoto et al., 2016, AGU)。そこで、2016年熊本地震に続発した愛媛県北東部の地震(33.946N, 133.691E, 深さ7.7km, M3.1, 2016/04/18 23:19 LT)に関し、これが大地震の前震である可能性を想定し、この地震の波形記録をテンプレートとして、準リアルタイムのモニタリングを1週間ほど実施したが、気象庁一元化震源カタログに記載された2つのM0クラスの地震以外には前震は検出されなかった(立命館大学[課題番号:2402])。

大地震に先行する中期的な変化としてよくとりあげられるものに、地震活動の静穏化がある。この現象を系統的に評価するために、北海道からカムチャツカ半島までの千島列島沿いを対象として、長期静穏化(Katsumata, 2016)にもとづく予測マップを客観的に作成する方法を考案し試行した。Z値解析による長期静穏化が10年以上続いたらその周辺の警報を1年間だけONにするという方法で予測マップを作成した(図13)。1993年から2012年までの間で警報分率(ONの領域が予測対象時空間に占める割合)が約15%に対して、期間中におきたMw8.3以上の地震3個すべてが警報ON領域で発生した。これは、確率利得6.7倍、p値は0.3%という好成績になるが、検証対象の地震が3つしかなく予測手法の事後的最適化が容易な例である点を割り引いてみるべきである(東海大学[課題番号:2501])。また、1990年から2014年までに発生した世界のMw8.0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。その結果、バックグラウンドの地震活動が極めて低いため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。ただし、これが前兆として統計的に有意であるかの評価はまだ行われていない(東北大学[課題番号:1206])。また、2016年熊本地震に関しても、Z値解析とRTM解析を実施し(Nanjo et al., 2016)、いずれの解析でも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事が判明した(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ことに注意が必要である。

b値の低下(e. g., Nanjo, 2012)も中期的な先行現象としてとり上げられることが多いものである。熊本地震に関して調査を行った(図14, Nanjo et al., 2016)ところ、時間的な低下傾向はみえなかったが、前震・本震は非常にb値の低い場所から始まったことがわかった(東海大学[課題番号:2501])。一般に、地震の破壊過程が階層的に進展すると考えた場合、b値が低いことは一旦始まった破壊が止まりにくいことに対応するという解釈が可能である。世界および東北沖の地震活動と、朔望周期程度で変化する潮汐応力の振幅を比較したところ、振幅が大きいときにはb値が小さくなることがわかった(Ide et al., 2016)。また、階層性のある場を適切にモデル化するために、複数の繰返し地震グループについて震源再決定を行った。さらに、摩擦法則の不均質性と地震の階層性との対応について二次元シミュレーション(Yabe and Ide, 2016)を行い、コントロール集合的な階層的な不均質性によって破壊エネルギーが増大することを示した(東京大学理学系

研究科 [課題番号 : 1402])。

先行時間の短さと、その強度の本震規模への依存性、出現率の高さから、本震破壊の開始への密接な関与が推察される現象のひとつに、M8クラス巨大地震に一時間程度先行する電離層全電子数(GNSS-TEC)の変化がある。この異常の強度は背景TECと地震規模に依存 (Heki and Enomoto, 2015) し、 $M_w > 8.2$ の地震では、相応した強度の異常がみられている。今年度は、32個の $M_w 7.0-8.0$ の地震前後のGNSS-TECを解析(He and Heki, 査読中)し、この程度の M_w では観測可能な大きさのTEC異常は生じないのが普通だが、例外的に背景TECが大きい場合(低緯度地域の昼間等)には、直前の異常が観測される場合があった。また、メカニズム解明の手掛かりとして、GNSS局の配置が良かったチリの2010年Maule ($M_w 8.8$), 2014 Iquique ($M_w 8.2$), 2015 Illapel ($M_w 8.3$)地震において、直前に生じた電離圏の異常の空間分布を調べた(図15, He and Heki, 2016)。それぞれ M_w に応じた空間的広がりを持つ異常が、 M_w に応じた先行時間をもって、 M_w に応じた強さであらわれることを確認した。特にGNSS局の分布が良い2015年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造を見出した。地表に生じた正電荷への応答として電離圏で生じる電子の再配置によりTEC異常が生じるという解釈(e.g., Kuo et al., 2014)も可能であろう(東海大学 [課題番号 : 2501])。

また、これとは別の現象として、GIM-TECのデータベースを用いた解析で、M6やM7の地震の1-5日の前に電子密度の正の異常が現われやすい傾向が統計的に有意であることが世界各地で示されている(e.g., Le et al., 2011, Kon et al., 2011, Hattori et al., 2016, EMSEV)が、東北地方太平洋沖地震の3日前のケースを含むいくつかの事例の三次元トモグラフィー(廣岡ら, 2016)では、高度250km程度に電子密度の減少領域が、さらに上空に増加の領域がみられた(東海大学 [課題番号 : 2501])。

DEMETER衛星で観測されたVLF電磁波強度の減少が $M > 4.8$ 地震の直前4時間に現われやすい傾向が統計的に有意だと報告されている(Nemec et al., 2008, 2009, Pista et al., 2013)。本年度は、統計処理の変更を含む独立な検証を行い(新田ら, 2016, 地震予知学会)、この傾向がやはり有意であるとの結論を得た。さらに、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(図16, 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90-200km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(公募研究[課題番号:2943])。

北海道大学は九州大学と共同して島原市礪石原におけるVHF帯電波伝播異常の観測を行っている。2016年の熊本地震シーケンスは、4月14日21時26分の $M_j 6.5$ の地震から始まったが、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観測されていた。そこで、異常伝播と地震発生の関連の統計的有意性を検討するために、2015年1月1日から2016年11月30日までの島原-宮崎間のデータを網羅的に調査したが、統計的有意といえるような相関はみつけられなかった(東海大学[課題番号:2501], Morita et al., 2016, AGU)。いっぽう、本計画で新規開発したVLF帯パルス電磁波観測

装置が、熊本地震発生当時、静岡(東海大)、国分寺(学芸大)、金沢(金沢大)の三点で稼働しており、静岡および国分寺では、熊本地震シーケンスの開始(2016年4月14日21時26分のMj6.5)以前の数日間において、空電の発生していない時間に震央方向から到来する電磁波が何度も観測された(図17, Nagao et al., 2016, EMSEV)。網羅的な解析ができるように、信号到来時刻の自動読み取りアルゴリズムの実装を開始している(東海大学[課題番号:2501])。

三陸地方では、1933年の大地震時に数ヶ月ほど先行して多くの井戸で水位低下と混濁がみとめられている(吉村, 2004)。三陸地方の研究目的でない井戸に2011年東北地方太平洋沖地震前後の変動がなかったかを調査しており(公募研究[課題番号:2930]), 昨年度までに調査した宮城県石巻市から岩手県山田町までの65カ所のうち4カ所に先行変化があった(織原・鴨川, 2016)。今年度は岩手県の北部の5カ所での聞きとり調査をしたが、変化はなかった。また、青森県八戸市の所収する8本の井戸の月次データにも異常はみつからなかった。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(公募研究[課題番号:2930], 織原ら, 2016, 地震学会)。また、産総研は台湾・国立成功大学との共同研究の一環として、水文学的・地球化学的手法による地震予知研究についての日台国際ワークショップを開催した(産業技術総合研究所[課題番号:5007], Matsumoto and Shieh eds., 2016)。

大気中ラドン濃度には、1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震に短期的に先行した例を含め、地殻活動と関連した変化が指摘されている。大気中ラドン濃度は、一般に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おり、日本全国の医薬系の施設を中心にデータ収集のネットワークを構築し、そのデータを解析している(東北大学[課題番号:1207])。本年度は、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臨界現象モデルで知られる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(図18)。同地震では、地震活動の積算ベニオフ歪に関しても同様の傾向(Xue et al., 2012)が報告されている。また、昨年度から試行を始めた部分空間法による異常検出(岩田ら, 2016, JpGU)を札幌医科大学・福島県立医科大学のデータに適用し、周辺の地震活動と比較した(図19, Iwata et al., 2016, 5th International Geo-Hazard Research Symposium)。従来の残差法で大きな異常のあった時期以外にも異常が検出され、こういった異常も周辺地域の地震活動と関連している可能性がある。

これまでの課題と今後の展望

本年度までに、電磁気現象や地震活動のデータから、統計的に有意なゲインをもって地震発生の確率が上昇していると判断できるような現象がいくつも確認された。近年は、本計画以外の研究からも、先行時間が数時間から数年以上まで様々な先行現象の統計的有意性が確認されている(中谷, 2017, 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」)。ある程度の事前識別が可能になってきた短期的な前震活動を除けば、多くの先行現象の確率ゲインは低い(2-20倍)が、個々の現象の現われ方について、定量的な経験則を作っておけば、多項目の事象の重ねあわせによるゲインの掛け算(宇津,

1979)に用いることによって、生活の参考になりかねないほど高い地震発生確率が予測されること(Ogata, 2016, AGU)もある。また、短期的な前震活動では、それだけでもかなりの高い確率がでる場合があり、社会への情報発信について考え始める必要があるかもしれない。

いっぽうで、経験則として予測能力を示す先行現象があったということは、それが可能なような準備過程(あるいはトリガとなる事象)が地震に先行したということである。空振り警報が多くゲインの低い先行現象でも、地震の前にその現象が生じる割合(≒予知率-警報分率)としては、数割を超えるものが珍しくなく、特殊なおこり方をした地震に伴う例外的な現象だと片付けられるものでもない。逆に、先行現象をてがかりに地震の準備過程をよりよく理解することができれば、準備過程をもっと上手に捉えるための戦略もうまれるだろう。大きな前震に誘起されたゆっくり滑りが本震をトリガした、と考えて様々な先行現象が説明できるような「わけのわかった気になれる」ケースもあるが、統計的な有意性が示された先行現象の多くはメカニズムがほとんどわかっておらず、これは、地震の準備過程に対して我々が知っていることが、まだほんの一部であるということの意味する。先行現象について、観測エンドからソースへ一歩ずつ近付いていくようなアプローチは、巨大地震の地震直前(1時間以内)にほぼ100%おこり、振幅が地震サイズを予見するTEC変動などの最近発見された重要現象についても成果が得られはじめたが、十中八九地下のプロセスであるに違いない地震発生の準備過程(あるいはトリガ要因)との結びつきとなると、有力な仮説すらないというのが現状だろう。異常のソースに近い地表での観測が、今後大きな進歩の手掛かりになる可能性はあるが、こんなに明瞭な相関をもつものがいまごろまで見つからなかった理由は、巨大地震で統計的有意性が議論できる程度の検証例数を地震カタログの存在する程度の時間で稼げるグローバルで高密度な電磁気観測がGNSS以前にはなかったからだと考えられる。つまり、問題は、グローバルに敷き詰めた地表(あるいは地下)での電磁気観測のコストが、期待される地震発生予測能力の改善に見合うものであるかということに帰結する。まあ、しかし、本計画のような予算的には小規模な研究計画の範疇でものを考えるのであれば、例えばM5級の地震でも、地表でみれば観測可能な振幅の異常が現われるかもしれないと期待して、とりあえず予算の許す範囲で実現できる地表観測を試みるというくらいが唯一可能な取り組みかもしれない。

他方、物理的にあってもよさそうだと定性的には思えるタイプの先行現象候補には、統計的有意性が確認されていないものが多い。プレート境界のSSEや定常的滑り遅れの空間分布などのモニタリング能力の向上には目を見はるものがあるが、今後は、それらの現象が、経験則として統計的に有意な予測能力があるかを検討できるような事例の集め方を目指す必要があるだろう。三陸沖のゆっくり滑り(Uchida et al., 2016)などは、既に十分な事例が集まった例である。また、経験の事例数が集められない事象については、今年度、南海トラフでの中規模地震による巨大地震誘発効果を検討したような数値シミュレーションを用いることも方策であろう。このような状況で、新たに統計的有意性が示されたb値の潮汐応力に対する依存性が、破壊サイズの予見性に本質的な役割を果たすと思われる地震破壊の階層間の確率的進展仮説(Ide and Aochi, 2005)と結びつけられそうなことなどは、今後の画期的な進展の端緒を開きそうである。

成果リスト

- Chu, A., and J. Zhuang, 2016, Multiple Linear Regression Analyses on the Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. In *Rock Anisotropy, Fracture and Earthquake Assessment*, edited by Y.-G. Li., 219-237.
- 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.
- 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.
- Goto, M., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Muto, J., Omori, Y., Ihara, H., Mukai, T., 2017 in press, Anomalous changes in atmospheric radon concentration before and the after 2011 northern Wakayama Earthquake (Mj 5.5). *Radiation Protection Dosimetry*. DOI:10.1093/rpd/ncw142.
- Han, P., K. Hattori, J. Zhuang, C.-H. Chen, J. -Y. Liu, and S. Yoshida, 2016, 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.
- Hattori, K., Han, P., Hirooka, S., Liu, J.-Y., 2016, Assessment of Ionospheric precursory signatures before large earthquakes over Japan area, Int' l 2016 EMSEV Workshop, Aug. 25-29, Lanzhou, China.
- 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.
- Heidarzadeh, M., T. Harada, K. Satake, T. Ishibe, A.R. Gusman, 2016, Comparative study of two tsunamigenic earthquakes in the Solomon Islands: 2015 Mw 7.0 normal-fault and 2013 Santa Cruz Mw 8.0 megathrust earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL068601.
- Hirata, N. and H. Tsuruoka, 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/ieeefms.136.265.
- 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.
- Huang, Y. L., S.Y. Zhou, and J.C. Zhuang, 2016, Numerical tests on catalog-based methods to estimate magnitude of completeness (in Chinese with English abstract). *Chinese Journal of Geophysics*. 59:1350-1358. doi:10.6038/cjg20160416.
- Ide, S., S. Yabe, and Y. Tanaka, 2016, Earthquake potential revealed by tidal influence

on earthquake size-frequency statistics, *Nature Geoscience*, 9, 834–837.

- 今西和俊・小笠原宏・矢部康男・堀内茂木・大久保慎人・村上 理, 2016, 南アフリカ金鉱山の地震観測網による2014年オークニー地震の余震分布と発震機構解, 日本地球惑星科学連合2016大会, SSS27-17, 千葉, 2016年5月26日.
- Ishida, A, Ogasawara, H snr, Ogasawara, H jnr, Uchiura, T, Durrheim, R, Milev, A, Okubo, M, Yamaguchi, T, and SATREPS, 2016, Searching for the significant displacement zone of the 2014 Orkney earthquake fault with strain data and Map3Di for targeting scientific drilling, 35th Ing. Geol. Congr., T8.P1, Paper No.3772, 29 Aug 2016, Cape Town.
- Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y., 2016, Anomalous atmospheric radon concentration related to earthquakes :Anomaly detection by singular spectrum transformation”, 5th International Geo-Hazard Research Symposium, Taipei, Taiwan, October, 2016; Prof. Tsanyao Frank Yang Young Scientist Award (Poster presentation).
- 岩田大地・長濱裕幸・武藤 潤・安岡由美, 2016, 特異スペクトル変換法を利用した大気中ラドン濃度異常変動解析, 日本地球惑星科学連合連合大会2016年大会, 2016年5月22日.
- 岩田大地・長濱裕幸・武藤 潤・安岡由美, 2016, 特異スペクトル変換法を利用した大気中ラドン濃度異常の検出, データ駆動科学イノベーション共創ワークショップ, 東京大学地震研究所, 2016年9月.
- 岩田大地・長濱裕幸・武藤 潤・安岡由美, 2016, 特異スペクトル 変換法を利用した大気中ラドン濃度異常検知と地震活動, 日本地質学会第123年学術大会, 東京都世田谷区桜上水, 日本大学文理学部キャンパス, 2016年9月.
- Iwata, T., 2016, A Bayesian approach to estimate a spatial stress pattern from P-wave first motion polarities, AGU fall meeting 2016 abstract, San Francisco, USA.
- Ishibe, T., Y. Ogata, H. Tsuruoka, and K. Satake, 2016, Correlation between static Coulomb stress changes imparted by three megathrust earthquakes and post-seismicity revealed from abundant focal mechanism solutions, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2016, July 31- August 5, China National Convention Centre, Beijing, China.
- 石原万己・南 のどか・新井友里愛・安岡由美・長濱裕幸・武藤 潤・飯本武志・大森康孝・床次眞司・向高 弘, 2016, 連続測定におけるラドン濃度測定器の比較, 日本保健物理学会第49回研究発表会発表, 2016年6月30日.
- Kasahara, A., Yagi, Y., and B. Enescu, 2016, etas_solve: A robust program to estimate the ETAS model parameters, *Seismol. Res. Lett.*, 87(5), 1143–1149, doi: 10.1785/0220150240.
- Kato, A., J. Fukuda, T. Kumazawa and S. Nakagawa, 2016, 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, 2016, Foreshock migration preceding the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1002/2016GL070079.
- Kato, A., K. Nakamura, and Y. Hiyama, 2016, The 2016 Kumamoto earthquake sequence, *Proc. Jpn. Acad. Ser. B*, doi:10.2183/pjab.92.359.
- 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.

Kawakata, H., Hidehiro Inaba, 2016, Development of a New Piezoelectric Transducer Usable as a Seismograph, *Progress in Acoustic Emission*, XVIII, 355-358.

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, 2016, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2015年11月～2016年4月)(53), 地震予知連絡会会報, 96, 271-277.

木口 努・松本則夫・北川有一・板場智史・落 唯史・佐藤 努・武田直人, 2017, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2016年5月～2016年10月)(54), 地震予知連絡会会報, 97, 印刷中.

気象庁・気象研究所, 2016, 平成28年(2016年)熊本地震, 地震予知連絡会会報, 96, 492-556.

気象研究所, 2016, 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, 96, 30-36.

気象研究所, 2016, 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, 96, 333-336.

Kitagawa., Y and Y. Kano, 2016, Changes in permeability of the Nojima fault damage zone inferred from repeated water injection experiments, *Earth, Planets Space*, 68:185

北川有一・板場智史・武田直人・松本則夫・落 唯史・木口 努, 2016, 紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2015年11月～2016年4月), 地震予知連絡会会報, 96, 345-358.

北川有一・板場智史・武田直人・松本則夫・落 唯史・木口 努, 2017, 紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2016年5月～2016年10月), 地震予知連絡会会報, 97, 印刷中.

北川有一・松本則夫, 2016, 井戸密閉化による地下水位の地殻歪応答の改善-北勢観測点の場合-, 日本地震学会2016年秋季大会, S13-01.

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.

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, 2016, 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, 地震予知連絡会会報, 96, 476-480.

松本則夫, 2016, 南海トラフ地震の中短期予測をめざして, *地震ジャーナル*, 62, 8-12.

Matsumoto N. and C.-L. Shieh eds., 2016, *Proceedings of the 15th Taiwan-Japan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction*, <https://unit.aist.go.jp/ievg/tectonohydr-rg/topics/workshop/2016/15thProceeding.pdf>

Mildon, Z., S. Toda, J. P. Faure Walker, and G. P. Roberts, 2016, Reassessing all models of Coulomb stress transfer - is variable fault geometry important? Accepted by *Geophys. Res. Lett.*

南 隆太郎・直井 誠・石田 毅・中谷正生・五十嵐俊博, 矢部康男・南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験国際共同研究グループ, 2016, 南アフリカMponeng金鉱山地表下3.3kmで発生したMw 2地震の余震中のRepeating Earthquake, 資源・素材学会 第13回若手研究者・学生のための研究発表会, キャンパスプラザ京都, 2016年12月9日.

- 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.
- Morita, S., M. Nakatani, T. Mogi, 2016, Correlation between earthquake occurrence and the anomalous propagation of VHF radio waves indicated by the gain and the p-value of prediction maps produced by a simple objective algorithm at the Shimabara area, Kyushu, Japan, AGU fall meeting, San Francisco, 2016年12月.
- Nagao, T., J. Izutsu and M. Kamogawa, 2016, High-sampling electromagnetic waveform detection system in VLF range, Int' l 2016 EMSEV Workshop, Aug. 25-29, Lanzhou, China.
- 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.
- Naoui, 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., 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.
- 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.
- 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・鴨川 仁・児玉哲哉・長尾年恭, 2016, DEMETER衛星のVLF帯電場データによる地震先行電離圏擾乱の統計的研究, 地震予知学会 第3回学術講演会, 2016年12月22日.
- 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.
- Ochi, T. and N. Takeda, 2016, Coupling and tremor rate in the transition zone around the Shikoku region, southwestern Japan, 2016 AGU Fall Meeting, S33A-2822.
- 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, 2016, 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(2015年11月~2016年4月), 地震予知連絡会会報, 96, 255-270.
- 落 唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・武田直人・木口 努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦, 2017, 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント(2016年5月~2016年10月), 地震予知連絡会会報, 97, 印刷中.
- Ogasawara, H., R. Durrheim, Y. Yabe, T. Ito, G. van Aswegen, A. Cichowicz, T. Onstott, T. Kieft, M. Boettcher, S. Wiemer, M. Ziegler, C. Janssen, S. Shapiro, H. Gupta, P. Dight, and the ICDP DSeis Team, 2016, Drilling into seismogenic zones of M2.0 - M5.5 earthquakes in deep South African gold mines (DSeis), EGU Geophysical Research Abstracts, vol. 18, EGU2016-2057-4.

- Ogasawara, H., Y. Yabe, T. Ito, G. van Aswegen, A. Cichowicz, R. Durrheim, T.C. Onstott, T. Kieft, A. Ishida, HY. Ogasawara, T. Yasutomi, A. Funato, K. Imanishi, M. Okubo, M. Boettcher, P. Moyer, W. Ellsworth, M. Ziegler, S. Wiemer, C. Janssen, S. Shapiro, H. Gupta, P. Dight, N. Wechsler, A.K. Ward, B. Liebenberg, Y. Mukuhira, S.N. Somala, J.P. Hunt, S. Bucibo, N. Berset, R. Harris, E.D. Cason, 2017, Drilling to probe quasi-static and dynamic seismic ruptures in deep South African gold mines, Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, 14-17 March 2017, Switzerland.
- Ogasawara, HY., H. Ogasawara, M. Okubo, A. Cichowicz, D. Birch, S. Horiuchi, T. Utiura, A. Ishida, SATREPS, 2016, The 2014 Orkney M5.5: location of initial and main rupture origins and high energy sources, 35th Int. Geol. Congr., T8.P1, Paper No.3937, 29 Aug 2016, Cape Town.
- 小笠原宏・矢部康男・伊藤高敏・ワークショップ参加者, 2016, 南アフリカ金鉱山M2-5.5地震発生場掘削ICDPワークショップ報告, J-DESCニュースレター, No.9, 14.
- Okubo, M., A. Cichowicz, D. Birch, H. Ogasawara, O. Murakami, S. Horiuchi, 2016, Source Process of the 2014 ML5.5 Orkney earthquake, South Africa, Asian Seismological Commission General Assembly, Friday, 25 November 2016, Paper 20, Melbourne.
- 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.
- 大澤祐輝・本島邦行・羽賀 望, 2016, 複数の観測点における見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震の関連解析, 日本地震予知学会, 第3回学術講演会予稿集, 49-52, 調布市, 2016年12月.
- 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.
- 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:10.1002/2016GL068524., 43, 11,5671.
- 田中昌之・岡田正実, 2016, 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率(2016), 地震予知連絡会会報, 96, 456-461.
- 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 (in press), DOI: 10.1093/rpd/ncx050.
- 谷川廣祐・本島邦行・羽賀 望, 2016, 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, 日本地震予知学会, 第3回学術講演会予稿集, 45-48, 調布市, 2016年12月.
- 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.
- Tormann, T., Wiemer, S., Enescu, B., and J. Woessner, 2016, Normalized rupture potential for small and large earthquakes along the Pacific Plate off Japan, Geophys. Res. Lett.,

43, 7468-7477, doi:10.1002/2016GL069309.

- Tormann, T., Enescu, B., Woessner, J., and S. Wiemer, 2016, Reply to 'Tohoku rupture reloaded?', *Nature Geoscience*, 9, 183-185, doi:10.1038/ngeo2650.
- Toyomoto, Y., H. Kawakata, S. Hirano, I. Doi, 2016, Foreshock search over a long duration using a method of setting appropriate criteria, AGU Fall Meeting 2016, MR41B-2702.
- 豊本 大・川方裕則・平野史朗・土井一生, 2016, 相互相関を用いた地震波形解析の検出基準の設定, 日本地球惑星科学連合連合大会 2016 年大会, SSS30-P08.
- 豊本 大・川方裕則・平野史朗・土井一生, 2016, 前震検出のための適切な基準の設定方法 ~ 2011年6月30日長野県中部M5.4の地震を例に, 日本地震学会2016年度秋季大会, S09-P14.
- Tsujimura, Y., H. Kawakata, E. Fukuyama, F. Yamashita, S. Xu, K. Mizoguchi, S. Takizawa, 2016, Spatio-temporal foreshock activity during stick-slip experiments of large rock samples, AGU Fall Meeting 2016, S21B-2697.
- 辻村優志・川方裕則・福山英一・山下 太・徐世慶・溝口一生・滝沢 茂・平野史朗, 2016, 大型岩石試料のスティックスリップ試験中に発生した前震活動, 日本地球惑星科学連合連合大会 2016年大会, SSS27-P22.
- Wang, T., Zhuang, J., Obara, K. and Tsuruoka, H., 2016, Hidden Markov modelling of sparse time series from non-volcanic tremor observations. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C*. doi:10.1111/rssc.12194.
- Yabe, S., and S. Ide, 2016, Slip-behavior transitions of a heterogeneous linear fault, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, doi:10.1002/2016JB013132.
- Yagi, Y., Okuwaki, R., Enescu, B., Kasahara, A., Miyakawa, A., and M. Otsubo, 2016, Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in relation to the thermal structure around Aso volcano, *Earth Planets Space*, 68:118, doi:10.1186/s40623-016-0492-3.
- 山形直毅・直井 誠・中谷正生・森谷祐一・大槻憲四郎, T. Kgarume, J. Philipp, 村上理, T. Masakale, L. Ribeiro, 矢部康男・川方裕則, A. 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.
- 山口純弥・直井 誠・石田 毅・中谷正生・五十嵐俊博・村上 理・森谷祐一・矢部康男・大槻憲四郎, Thabang Kgarume, Ray Durrheim, Thabang Masakale, Anthony Ward, 川方裕則・小笠原宏, 南アフリカ金鉱山半制御地震発生実験国際共同研究グループ, 2016, 南アフリカ大深度金鉱山の地質断層上で観測されたRepeating Earthquakeの活動の時空間変化, 資源・素材学会 第13回若手研究者・学生のための研究発表会, キャンパスプラザ京都, 2016年12月9日.
- 山口純弥・直井 誠・中谷正生・森谷祐一・五十嵐俊博, T. Kgarume, 村上 理, T. Masakale, 矢部康男・大槻憲四郎・川方裕則・石田 毅, A. Ward, R. Durrheim, 小笠原宏・南アフリカ金鉱山半制御地震発生実験国際共同研究グループ, 2016, 南アフリカ大深度金鉱山の地質断層上で観測されたRepeating Earthquakeの出現と消失, 地球惑星連合大会, SSS27-03, 幕張メッセ, 2016年5月25日.
- 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, S. Takizawa, 2016, Influence of fault surface conditions on foreshock activity in large-scale biaxial friction experiment, AGU Fall Meeting 2016, S21B-2698.
- 山下 太・福山英一・徐 世慶・川方裕則・溝口一生・滝沢 茂, 2016, 大型二軸摩擦実験において観察された前震の特徴, 日本地震学会2016年度秋季大会, S08-P17.
- 安岡由美, 2016, ラドン濃度変動と地震 -地震先行現象の痕跡を排気モニターに求めて-, 立命館大学放射線教育訓練, 招待特別講演, 2016年4月16日.
- 安岡由美・長濱裕幸・武藤 潤・大森康孝・鈴木俊幸・本間 好・山本文彦・高橋克彦・向 高弘, 2017, アイソトープ実験施設の排気モニタによる東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)に先行する大気中ラドン濃度変動の検討, 日本薬学会, 2017年3月26日.
- Zakharova, O., Hainzl, S., Lange, D., and B. Enescu, 2017, Spatial variations of aftershock parameters and their relation to geodetic slip models for the 2010 Mw8.8 Maule and the 2011 Mw9.0 Tohoku-oki earthquakes, 174(1), 77-102, doi:10.1007/s00024-016-1408-7, Pure Appl. Geophys.
- 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 in press, Data completeness of the Kumamoto earthquake sequence in the JMA catalog and its influence on the estimation of the ETAS parameters, Earth, Planets and Space.

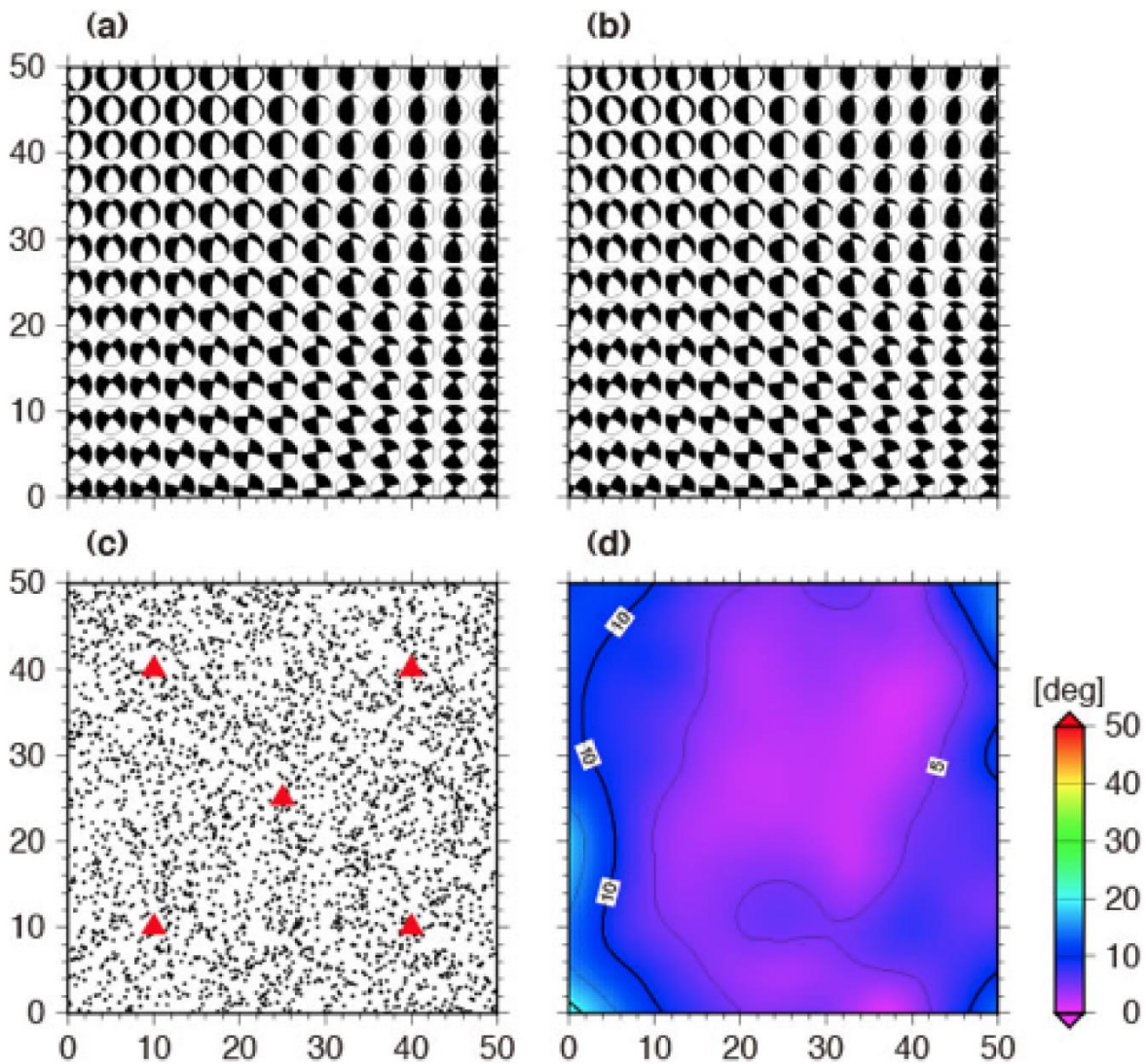


図1. 断層面解を介さずに行うP波初動極性からの応力場インバージョン：シミュレーションデータによる検証（東北大学 [課題番号：1206]）

a) データ生成時に仮定した応力場. 実際に与えた応力テンソルから主応力軸の向きを求め、震源球で表現した. b) 今回開発した手法から推定された応力場. これもa) 同様に、推定された応力テンソルから求めた主応力軸の向きを示してある. c) シミュレーションデータを生成した際の地震3000個の震央分布(黒点、解析領域内に一様とした)と観測点5点(赤三角)の位置. d) a) とb) の主応力軸の向きの違いを角度 (Kagan角) で表したもの. ほぼ 5° ~ 10° 以内におさまっており、元の応力場を再現できていることがわかる.

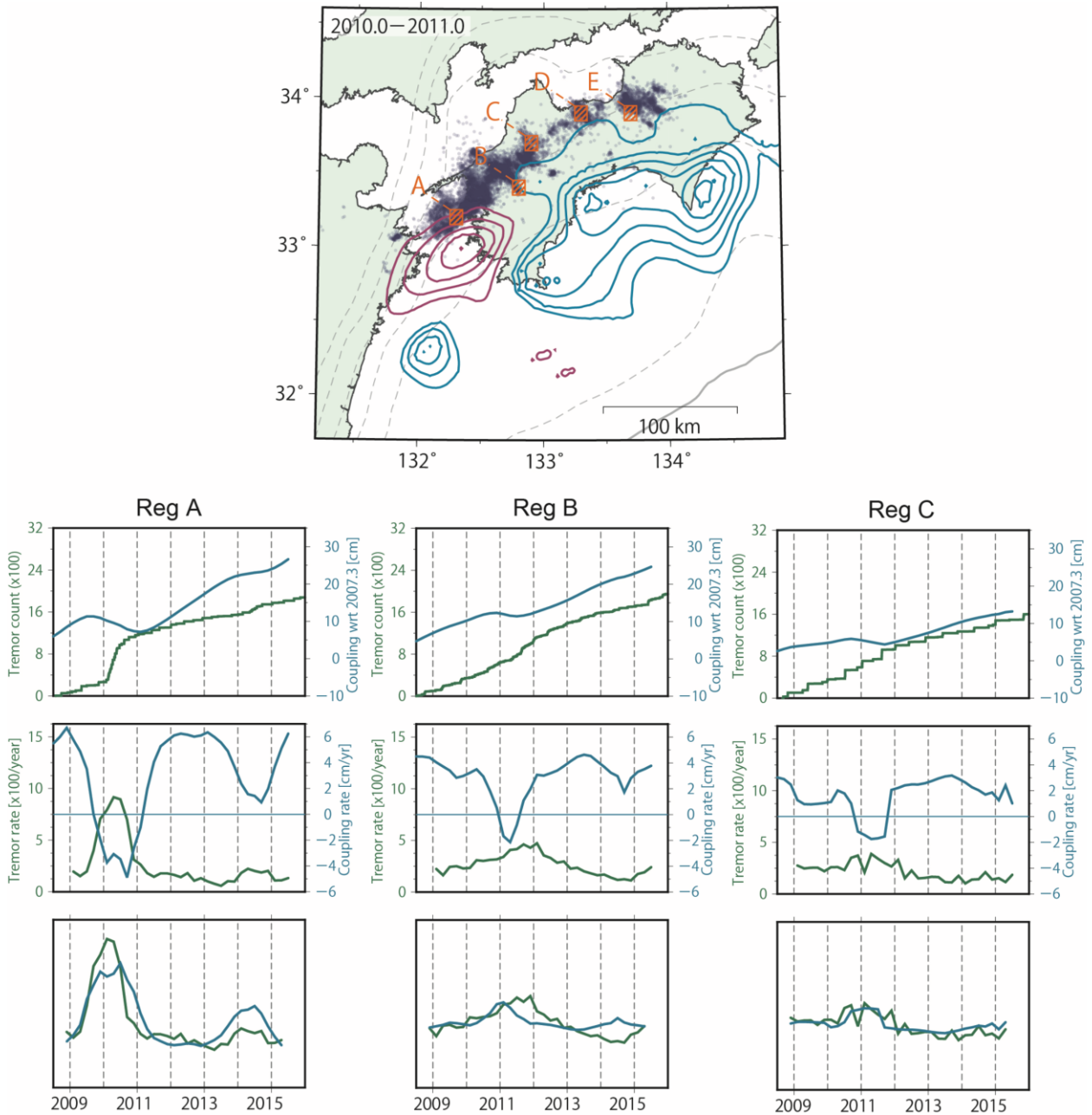


図2. 固着と微動活動のゆらぎ（産業技術総合研究所 [課題番号：5007]）

上：2010年1月から12月の平均のプレート間固着(青色)およびスロースリップ(赤色)．紺のドットは同じ期間の産総研カタログによる深部低周波微動の震央を示す．

下：上図に示すA-Cの領域における固着・すべり(青色，正が固着・負がすべり)と微動の個数(緑色)の関係．上段が積算量，中段が年平均のレート，下段が中段の2つの線をスケージングと上下反転によって合わせたもの．いずれの領域でも双方の増減に対応関係があるように見える．

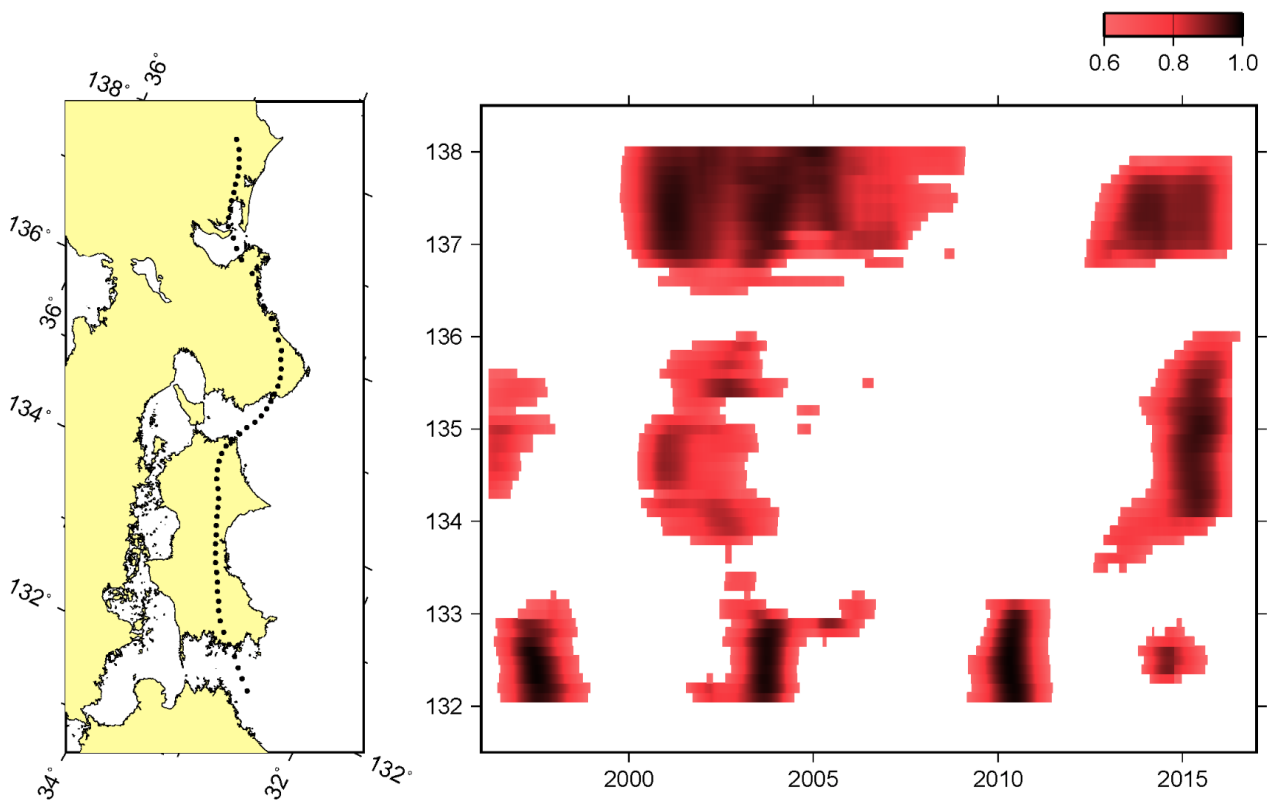


図3. 南海トラフ沿い長期的SSEの客観的検出(気象庁 [課題番号 : 7006])
 相関値の時空間分布 (期間1年, 相関係数0.6以上, 変化+2mm以上)

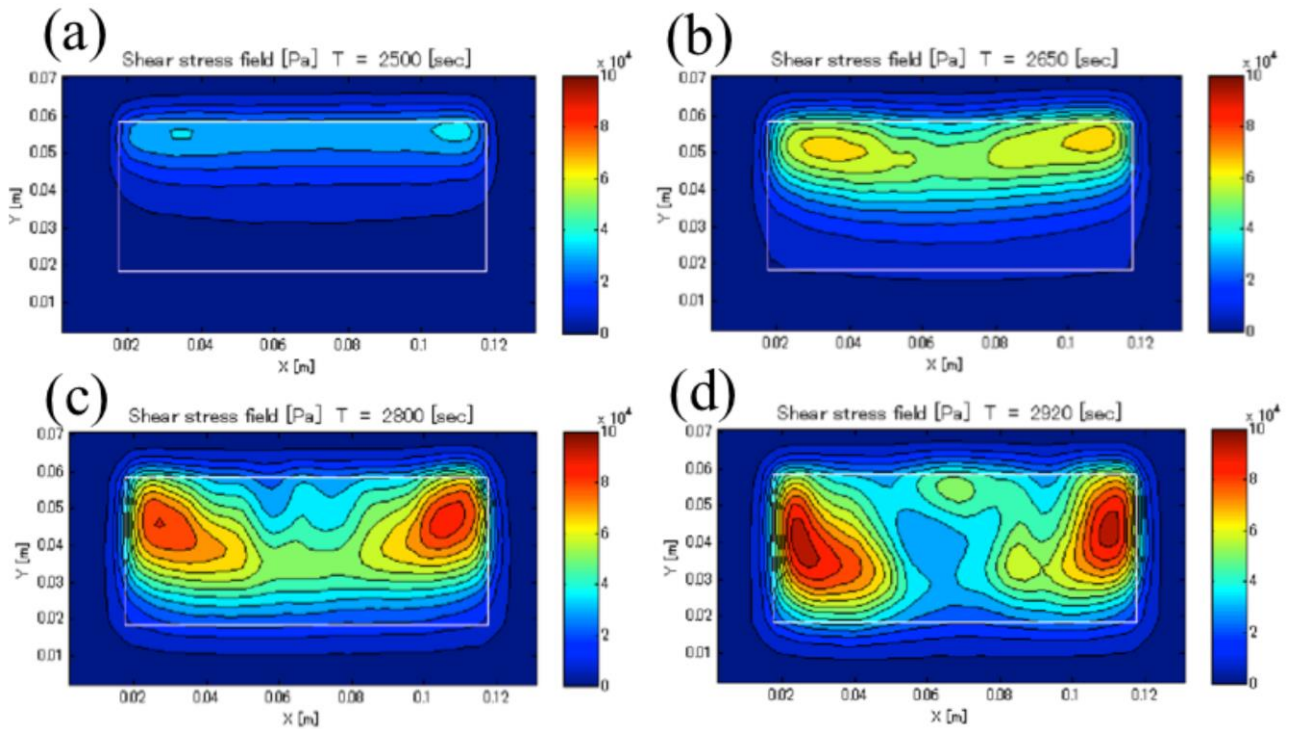


図4. ゲルシート摩擦実験における各時刻でのせん断応力分布(東京大学地震研究所 [課題番号: 1512])

$t =$ (a) 2500 (巨大イベント発生直後), (b) 2650, (c) 2800, (d) 2920 sec (巨大イベント発生直前). 白い枠は接触面の境界を示している. この系では周期的 (約 500 秒ごと) に巨大イベントが発生する. イベント発生直後の (a) では, せん断応力は, 法線応力の大きな領域 (図において白い枠内で上側の領域) のみに蓄積していたが, 次第に法線応力の小さな領域に拡大していった. また, 接触面の中央部付近では微小イベントが多数発生した結果, せん断応力が大きな領域が 2 つに分裂する様子が観察された ((b)-(c)). 最終的 (d) には, 2 つの“アスペリティ”がほぼ同時にすべることによって巨大イベントが発生した.

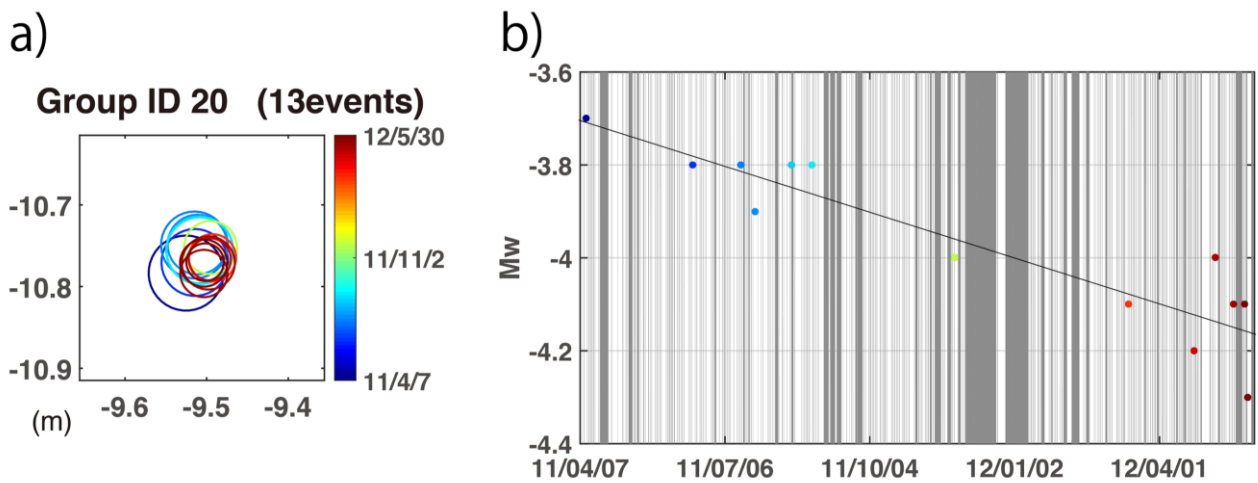


図5. M_w が低下する繰り返し極微小地震群の例（東北大学 [課題番号：1206]）

a) 震源分布図. 円の半径の大きさは円形クラックモデルを仮定してEshelby (1957)から求めた破壊サイズに対応する. b) M-T図. 直線は時間と M_w の関係に対する回帰直線. 灰色は欠測期間.

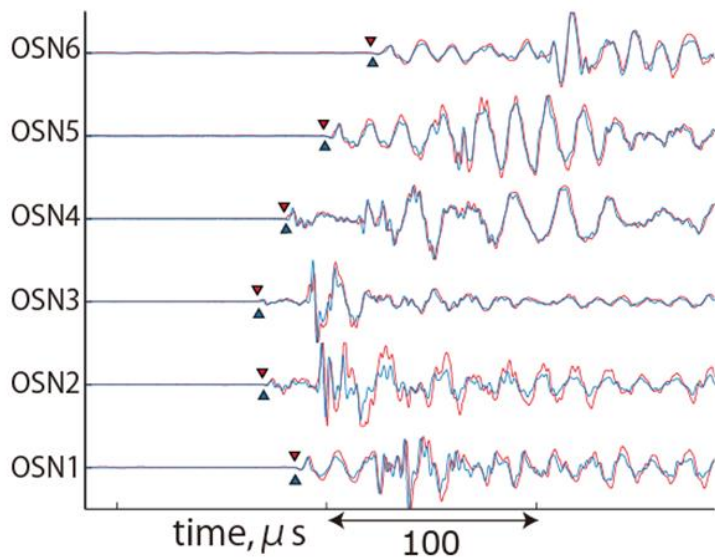


図6. 大型二軸せん断試験時に得られた微小繰り返しイベントの波形記録の例(立命館大学 [課題番号：2402])

下側ブロックの側面に分布するAEセンサーで集録された波形. 赤は4回目の大規模な動的すべりイベントの前震記録, 青は54回目の大規模な動的すべりイベントの前震記録である.

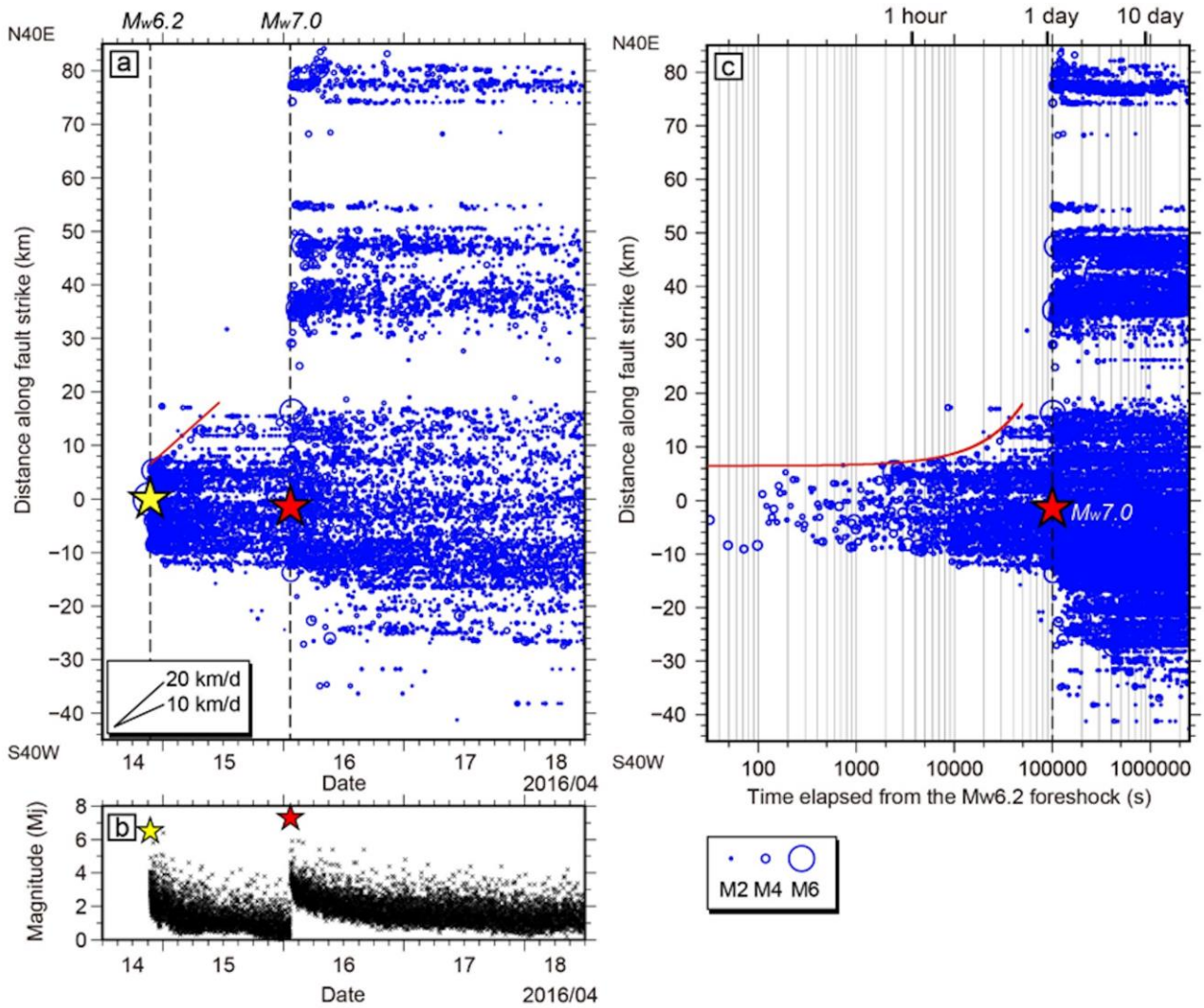


図7. Matched filter法によって抽出された地震による熊本地震シーケンスの時空間発展（東北大学 [課題番号：1206]）

a) 震源断層走向沿いの地震活動の時空間発展．黄星印は前震 ($M_w6.2$, $M_j6.5$), 赤星印は本震 ($M_w7.0$, $M_j7.3$)を示す．b) M-T図 c) 常用対数軸における前震からの地震活動の時空間発展．地震活動の拡大フロントを赤線で示す．(Kato et al., 2016を改変)

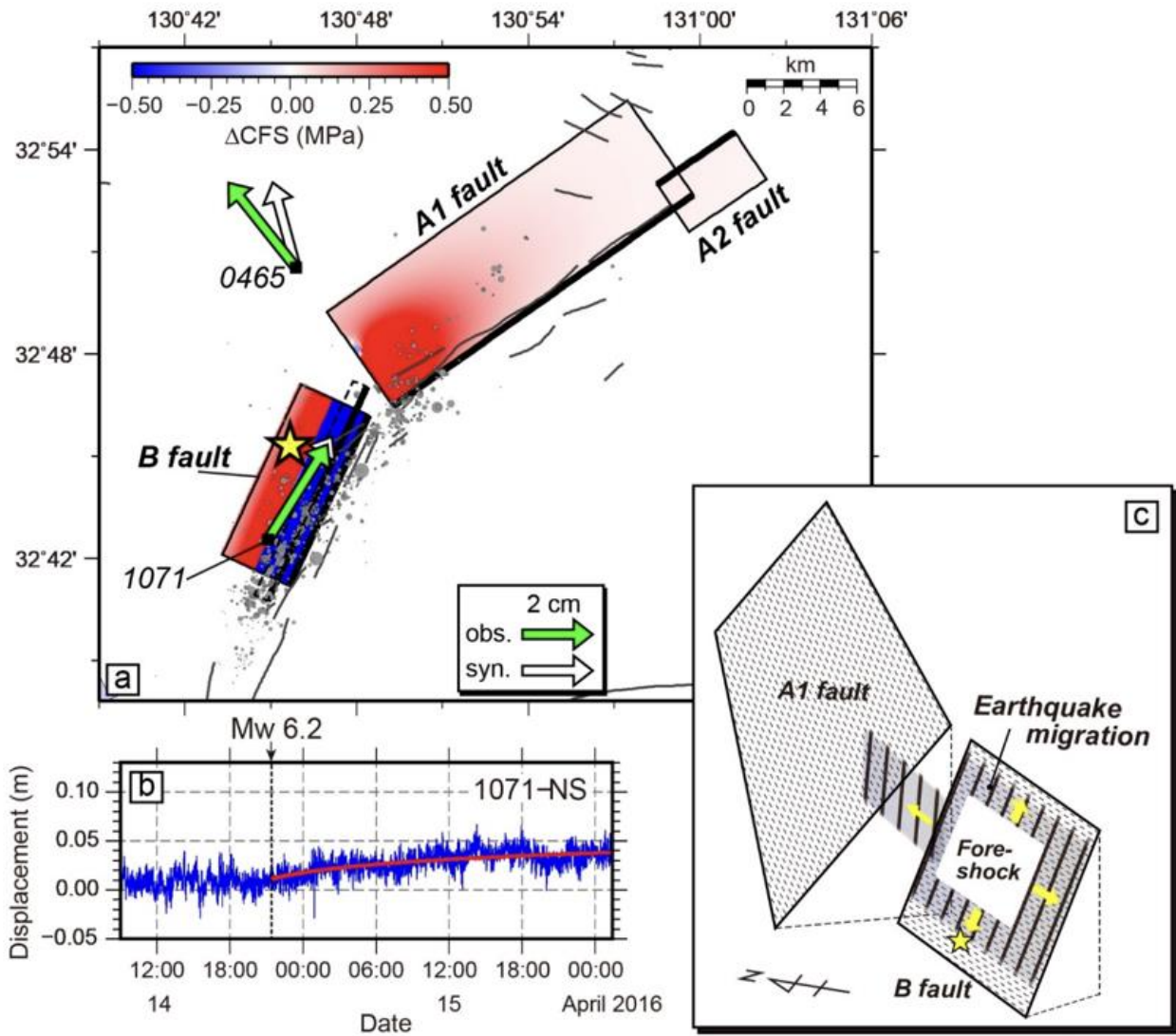


図8. 2016年熊本地震シーケンスにおける前震とそれに続いた非地震性すべりによる本震震源断層への影響(東北大学 [課題番号: 1206])

a) 4月14日21時26分の前震(Mw6.2, Mj6.5)と4月15日0時3分のMw6.0地震による, 本震(4月16日1時25分, Mw7.0, Mj7.3)震源断層(A1, A2, B)へのクーロン応力変化(ΔCFS). 摩擦係数は0.4と仮定. 本震の震央は黄星印, 前震-本震間に発生した地震は灰色ドットで, 同期間のGPS水平変動は緑矢印(観測)と白矢印(モデル)で示す. b) GNSS観測点1071南北成分の変位量時系列, c) 前震とその後の非地震性すべりの進展を示す透視概念図. (Kato et al., 2016)

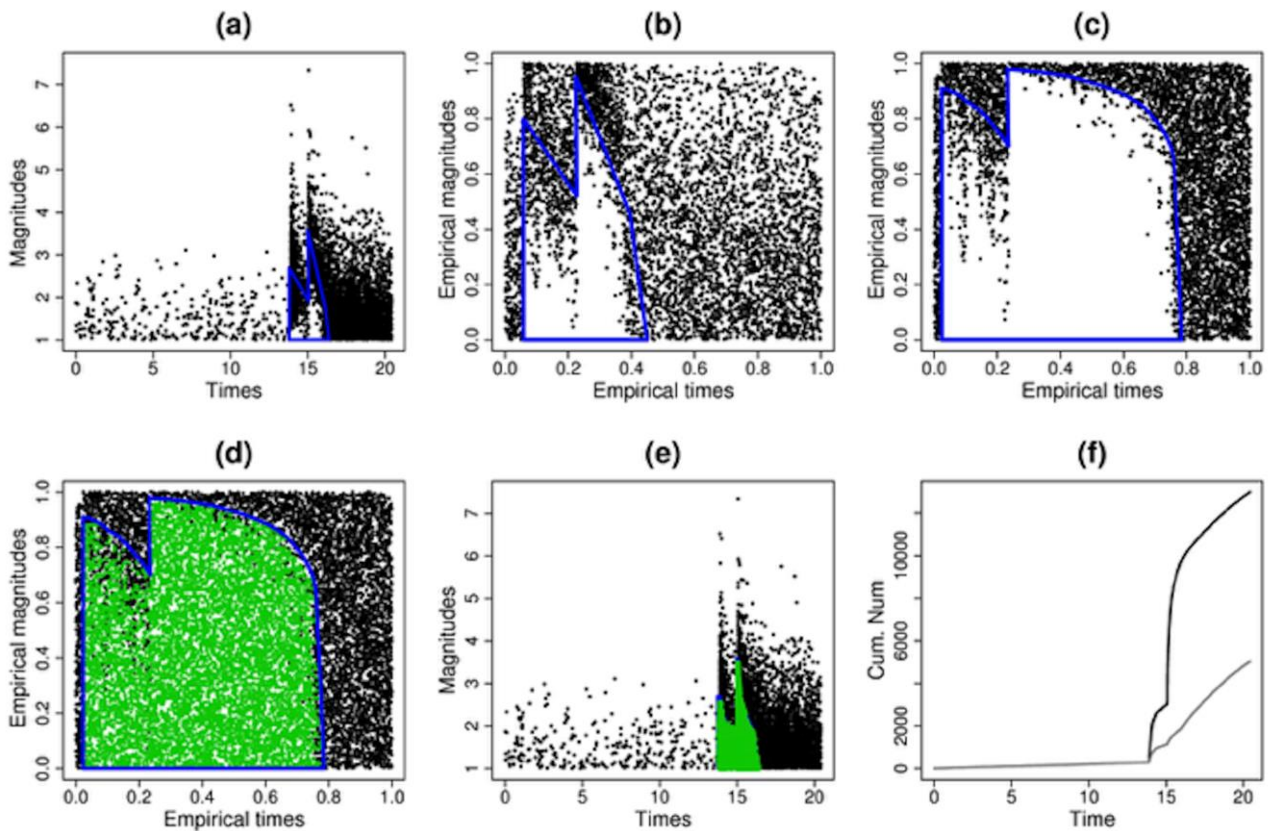


図9. バイスケール変換を用いた地震補充アルゴリズムを熊本地震余震域に適用した結果(東北大学 [課題番号: 1206])

a) 余震のM-T図, b) バイスケール変換後のM-T図, c) バイスケール変換後のM-T図 (bとは異なった領域を検討), d-e) カタログ欠損領域を補充した結果, f) 地震累積曲線 (灰色: オリジナルデータ, 黒: 補充されたデータセット). (Zhuang et al., 2017を改変)

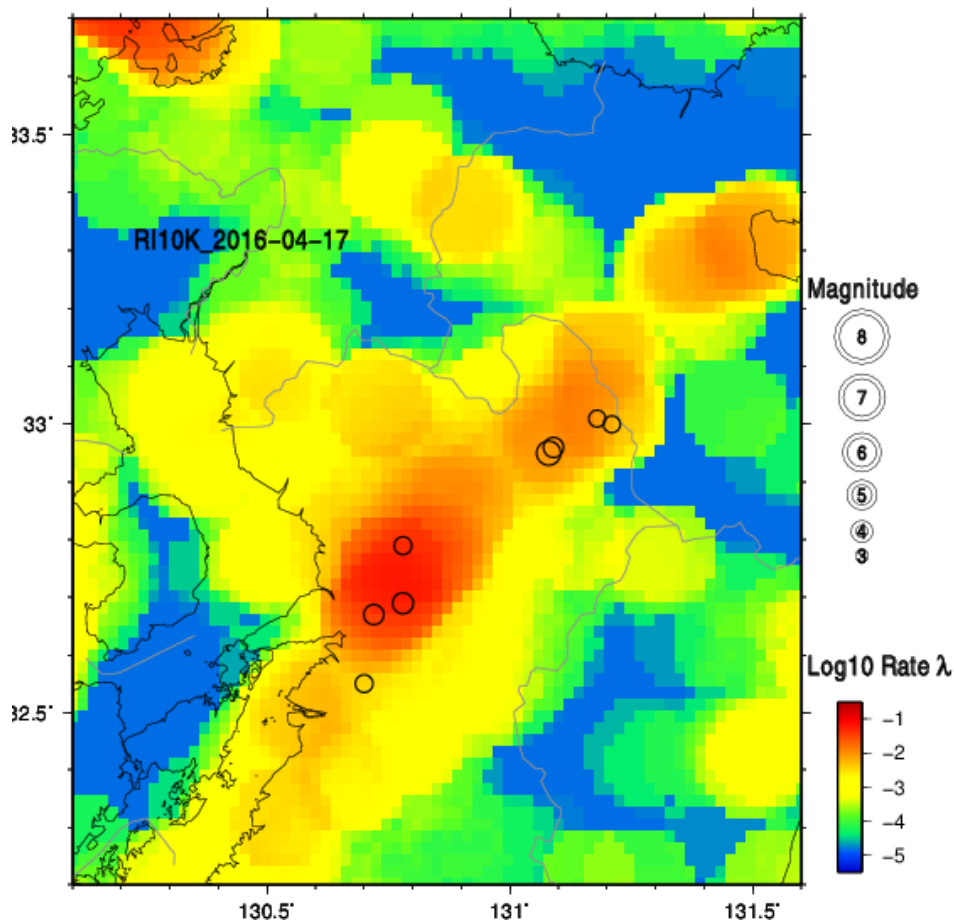


図10. 改良RIモデルによる一日予測（東京大学地震研究所〔課題番号：1511〕）
 熊本地域で2016年4月17日に予測された地震発生率(0.1° x 0.1° あたりのM>4地震の数)と実際におきた地震の比較. 多くの地震(M>=4)が, 前日までの活動から発生率が高いと予測された場所で発生した.

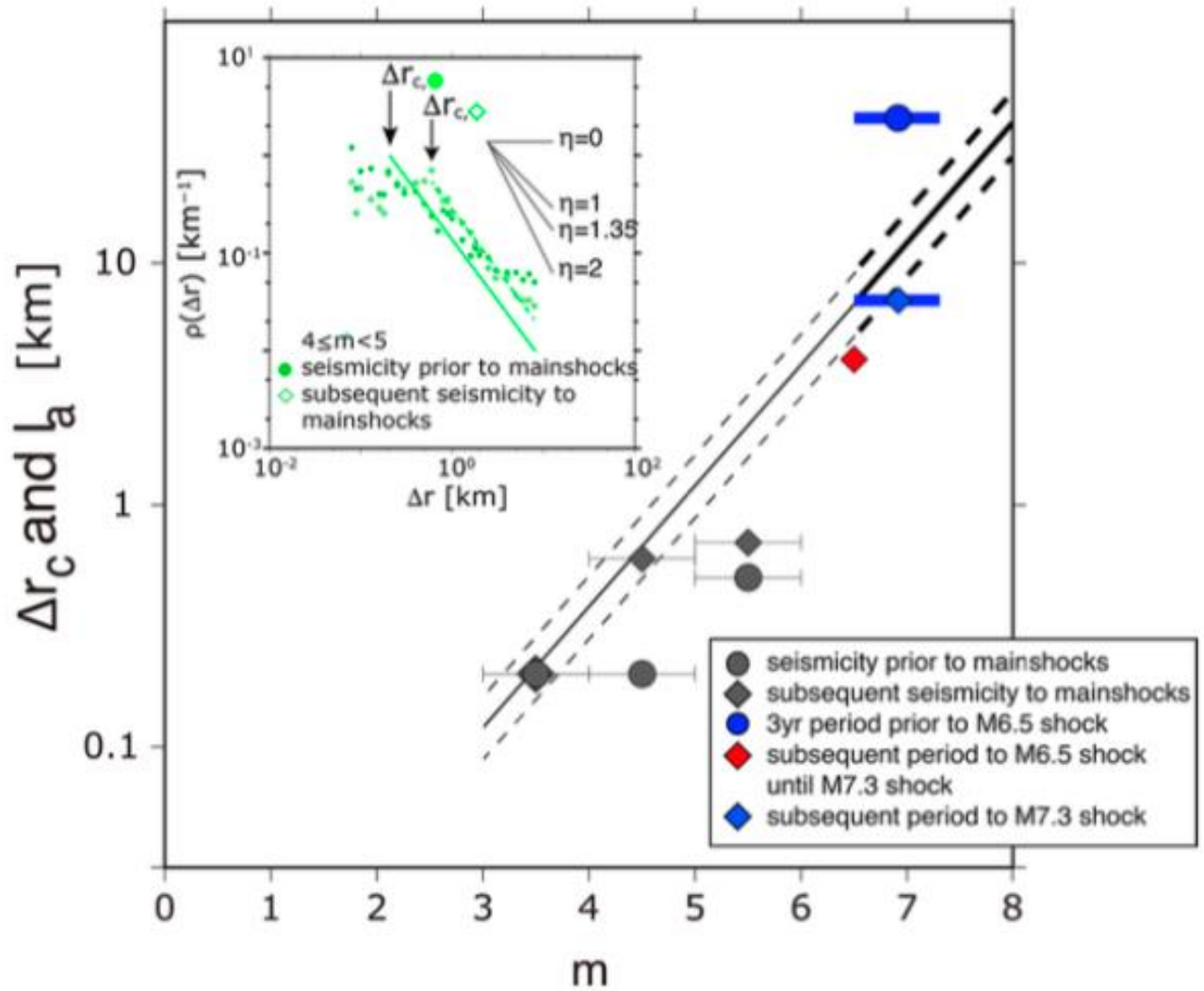


図11. 本震前後での周辺地震活動の密度分布の特徴的距離 Δr_c と本震のマグニチュード m の関係 (公募研究 [課題番号: 2931])

丸印は本震より前の地震活動，菱形印は本震に引き続く地震活動．熊本地震は青色のデータで示す．青色の丸印はMj6.5の前震より前の地震活動，青色の菱形印はMj7.3の本震より後の地震活動．参考として，Mj6.5からMj7.3までの間の地震活動のデータも赤色の菱形印で示した．直線はアスペリティの半径と地震の m の関係 (Somerville et al. (2015))．挿入図は，本震 ($4 < m < 5$) からの距離 Δr と地震活動密度 ρ の関係．緑色の丸印は本震に先行する地震活動，緑色の菱形印は本震に引き続く地震活動．冪乗関係 $\rho(\Delta r) \sim \Delta r^{-\eta}$ をデータにフィッティングさせている ($\eta=1.35$)．フィッティングから逸脱する距離を特徴的な距離 Δr_c として矢印で示す (Nanjo et al., 2016)．

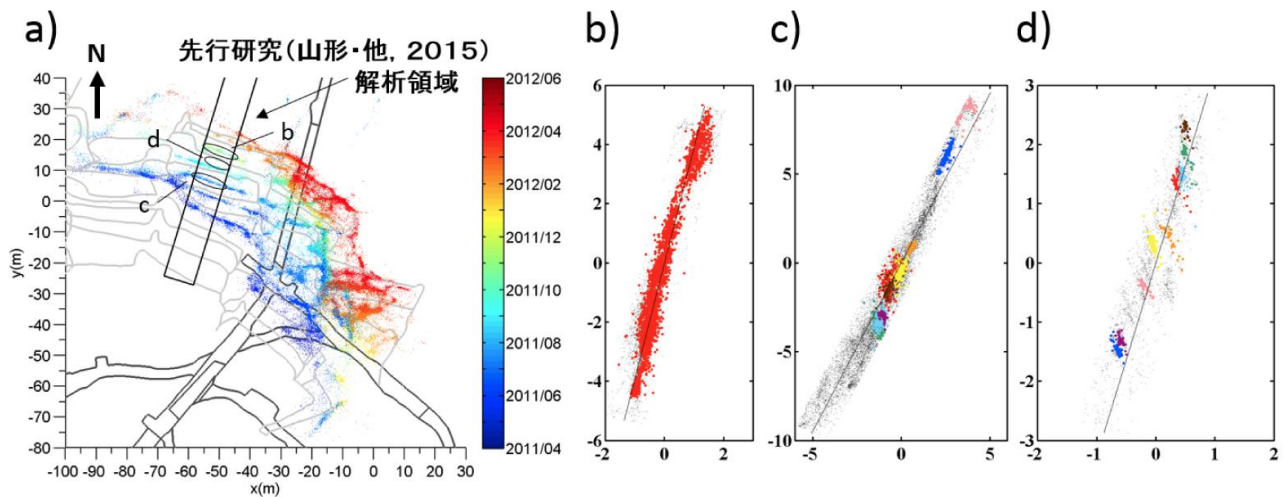


図 12. 南アフリカ Cooke4 鉱山における微小破壊クラスタ (東北大学 [課題番号 : 1206])

a) Collapsing 法によってクラスタリングを強調表示した微小破壊の震源分布. 採掘域沿い厚み 1 m の領域に震源が求まったものを, 発生時期ごとに色分けして示す. 採掘は南から北へ向けて進行しており, 薄い灰色の線が切羽を表す. b) 面状クラスタの類似波形グルーピングの例 (図 a 中の b のクラスタの断面図). c, d) 板状クラスタの類似波形グルーピングの例 (図 a 中の c, d のクラスタの断面図). ドットは微小破壊震源を表し, 類似波形グループを構成するイベントは同じ色で示している. b) では類似波形グループを構成するイベント数が最も多いものを, c), d) ではイベント数が多いもの 9 つを示している. 灰色はそれ以外の微小破壊震源を表す. 図中の灰色の線は, 面状, 板状クラスタの巨視的方位を示す. b), c), d) における軸の数値の単位はメートル.

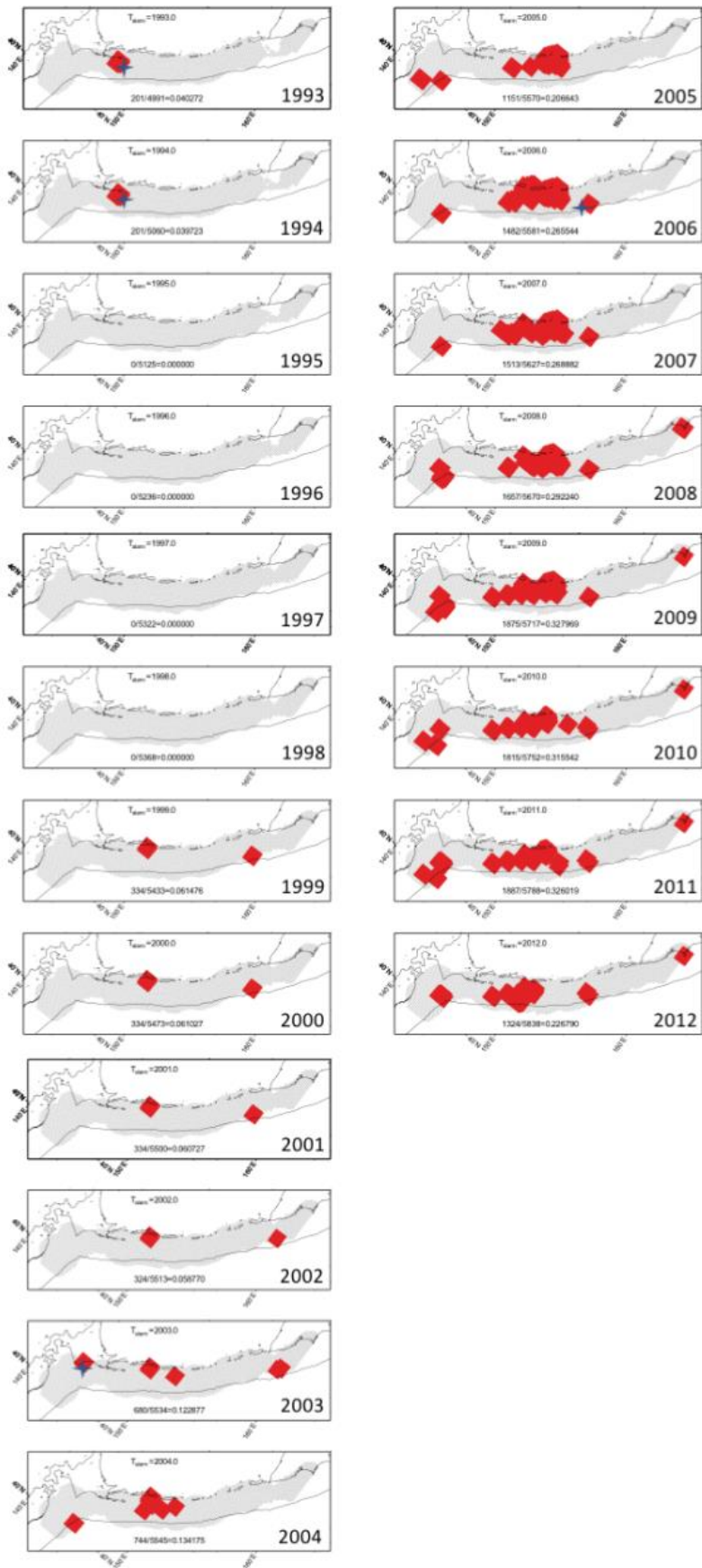


図 13. 長期静穏化にもとづく予測マップ(東海大 [課題番号 : 2501])

1年以内にMw8.3以上の地震が起きそうだと判断した領域を赤く塗った。青星は実際におきた地

震.

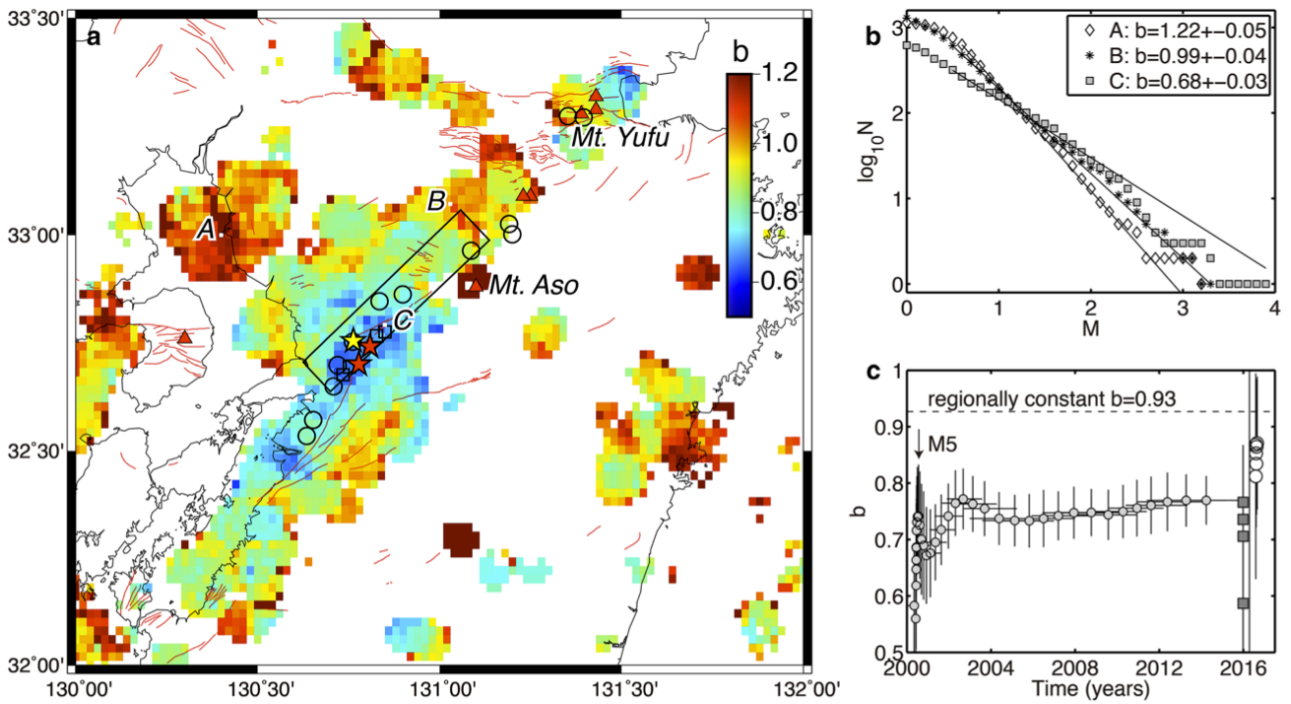


図14. 2000年1月から2016年熊本地震シーケンス開始(2016年4月14日21時26分, Mj6.5前震)直前までの九州中部におけるのb値解析(東海大[課題番号:2501])
 (a)空間分布. (b)(a)図のA,B,C地点における規模別頻度分布. (c)本震から半径10km以内のb値の時間変化.

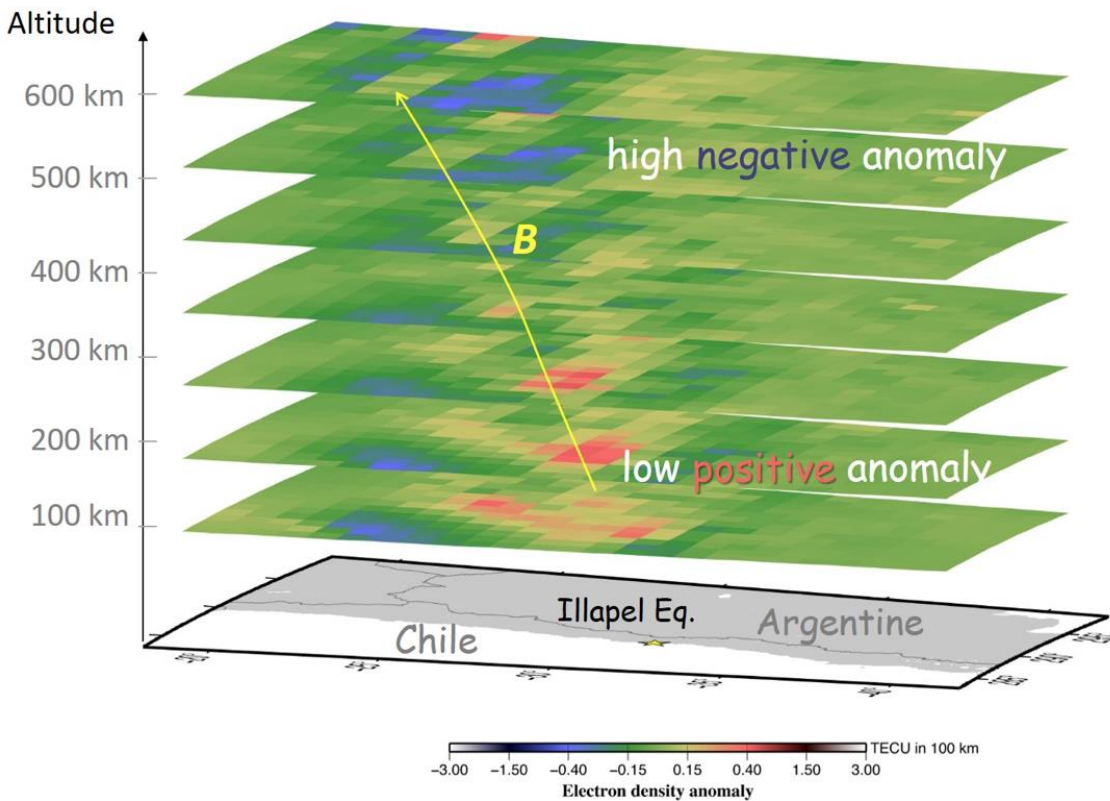


図15. 2015年Illape地震(Mw8.3)直前のTEC異常(東海大学 [課題番号: 2501])

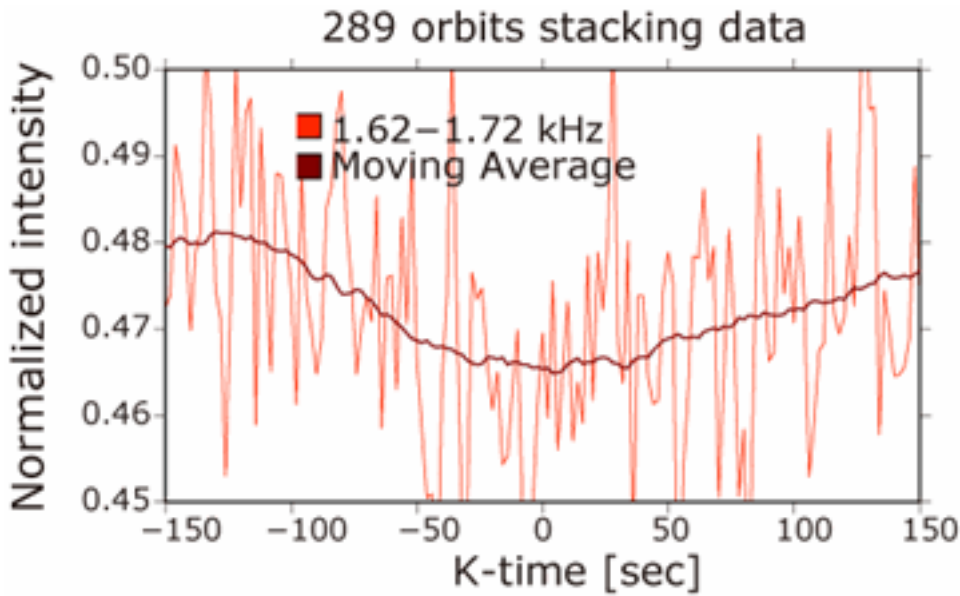


図16. 地震先行的変動がみられた289軌道の軌道上VLF電場データの平均値(公募研究 [課題番号: 2943])

太実線は±50秒の移動平均. 横軸は震央最接近時間を0とした軌道上時刻.



図17. 九州方向から到来したVLF帯パルス電磁波の例(東海大学 [課題番号: 2501])

2016年4月12日, 及び4月14日のMj6.5前震(21時26分)以前の時刻に, 熊本地震の震央方向から, 当該方面に空電がなかったにもかかわらず, VLF帯パルス電磁波が到来した. 例は2016年4月12日15

時9分57秒のものである。偏波からは到来方向に180°の不確実性が残るが、着波時刻が1msずれているので西から来たと判断できる。

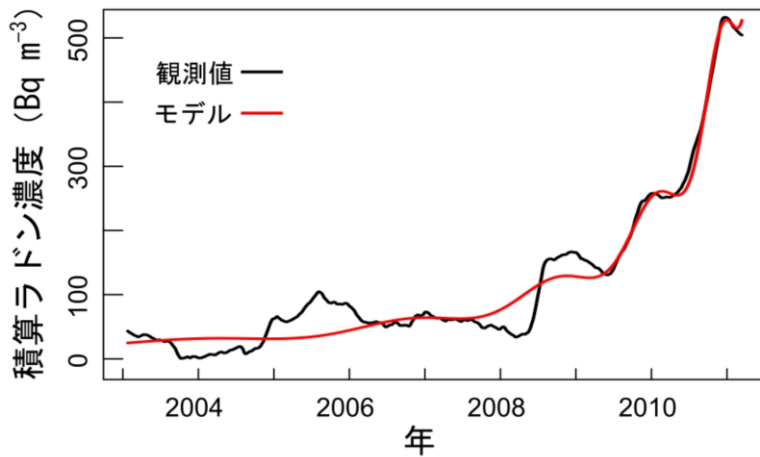


図18. 福島県立医科大学で観測された大気中ラドン濃度の残差の積算値(東北大学 [課題番号: 1207])

赤線は、対数周期振動を含む臨界現象のモデルによる回帰曲線を表す。

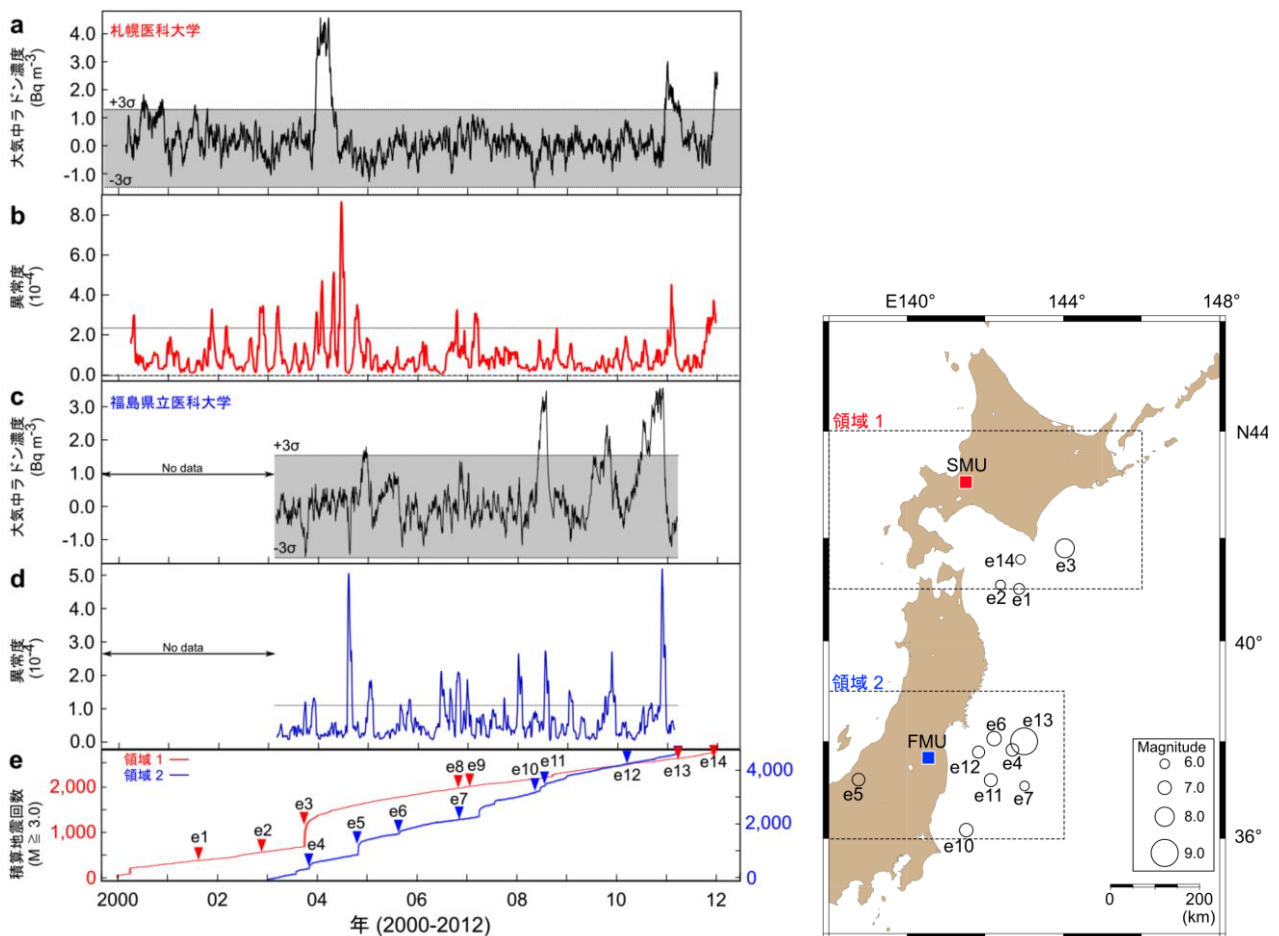


図19. 部分空間法による大気中ラドン濃度の異常変化検知(東北大学 [課題番号: 1207])

左パネル：(a)ラドン濃度の残差(札幌)，(b)異常度(札幌)，(c)ラドン濃度の残差(福島)，(d)異常度(福島)，(e)積算地震回数(e1-e14は、右パネルの地震に対応する)。右パネル：比較対象の地震。地震活動は気象庁データによる。