

## 1 (2) 地震 (長期予測)

「地震 (長期予測)」計画推進部会長 西村卓也  
(京都大学防災研究所)  
副部会長 宍倉正展  
(産業技術総合研究所)

大地震の長期予測は、日本国内では地震調査研究推進本部による長期評価という形で実施され、その評価結果は全国地震動予測地図などの形で社会に公表されている。大地震の長期予測は、災害軽減や防災対策の立案に役立てられることが期待されるが、大地震の発生は極めて低頻度な現象であるため、おもに過去の地震の発生履歴に基づいて行われてきた長期予測には大きな不確定性が伴っている。本部会では、地質データや史料・考古データを活用して地震の発生履歴をより詳細に解明する手法開発を行うとともに、実際に得られた発生履歴データを蓄積して予測精度の改善につなげる観測研究を行う。さらに、これまでは十分に活用されていなかった地殻変動や地震活動などの観測データや地震発生の物理モデルの利用により、長期予測手法の高度化を目指した観測研究を行う。以下では、本部会に属する各課題について令和元(2019)年度の成果の概略と今後の展望について述べる。

### 1. 地震・火山現象の解明のための研究

#### (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

##### イ. 考古データの収集・集成と分析

近代以前の日本列島において大地震の前後に発生した中・小規模の地震や地震活動の実態などを解明するために、江戸時代前期の京都で記された2つの日記史料にある有感記録について調査した。下鴨神社での日記史料である『豊光日次』には、寛文二年五月一日(グレゴリオ暦:1662年6月16日)に発生した寛文近江・若狭地震の直後から有感記録が多くなっている。有感記録が減少し始めるのは十一月になってからであり、日数の経過と共に有感記録は減少していくものの、寛文三年十二月と寛文五年五月には有感記録が多くなっている。吉田神社で記された日記史料である『御広間雑記』についても寛文近江・若狭地震の直後から有感記録が多くなっているが、両者の有感地震の記録数について比較したところ、有感記録は前者の方が多ことがわかった。有感記録数の違いには記主の主観や経験がある程度影響していると考えられるが、両者の日記が書かれた場所における地震時の揺れ方に違いがあり、それによって記主が感じた地震数に差異が生じた可能性が示唆される(東京大学地震火山史料連携研究機構 [課題番号:HMEV02])。

##### ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

海溝型地震の発生履歴に関する調査としては、沿岸での津波堆積物や巨礫群を用いた古津波、海岸段丘地形の評価が行われた。北海道の太平洋岸において再調査、再検討された津波堆積物から、17世紀前半の年代を示すイベントは場所によって波源が異なり、胆振地方西部においては1640年北海道駒ヶ岳噴火津波起源であること、胆振地方東部においては1611年慶長地震津波起源の可能性が高いことがわかった。また十勝地方の複数の地点における津波堆積物は、1611年より新しい時代のものと推測された。これらの結果は、いわゆる17世

紀の巨大地震の地震像を再検討する必要があることを示唆する（北海道大学〔課題番号：HKD\_01〕）。南海トラフ沿いでは、紀伊半島東部（南伊勢）、紀伊半島南部（那智勝浦・串本）、宮崎平野で津波堆積物調査、喜界島で隆起サンゴ調査をそれぞれ実施し、串本の橋杭岩の漂礫の調査及び津波シミュレーションでは、宝永地震クラスの津波で計算上動かない重さの漂礫が、実際には動いていることから、過去に宝永地震時よりも大きな津波があったことが示唆された（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。琉球列島南部において津波堆積物中に含まれるサンゴ・貝類の放射性炭素年代測定を多数行い、測定結果がある年代値に収束する傾向が見られた。これにより、1771年明和大津波より一つ前の津波の発生年代を高確度で決定できる可能性が高いことが明らかになった（東京大学理学系研究科〔課題番号：UTS\_01〕）。古地震履歴の推定手法の高度化のために、海岸段丘地形の高解像度な数値標高モデル（DEM）を対象としたクラスタリング手法に基づいた定量的かつ客観的な数値解析手法の開発を行った。海岸段丘地形は、過去の地震性隆起の痕跡として認識されており過去の地震発生回数や発生年代の推定に広く用いられているが、房総半島南部にある海岸段丘地形のDEMデータに上記の手法を適用したところ、これまで空中写真判読で認識されていた四段の段丘面を客観的に抽出し、段丘面間の比高の空間分布を定量的に求めることに初めて成功した（図1）。得られた比高は、どの段丘面間の場合でも南部に行くほど大きくなり、これまで知られていた1703年元禄関東地震（M8.2）での隆起沈降分布に類似していることがわかった（東京大学理学系研究科〔課題番号：UTS\_02〕、産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。

内陸地震の発生履歴に関する調査としては、糸魚川-静岡構造線断層帯（糸静線）の中北部区間において、三次元的なトレンチ掘削調査、群列ボーリング調査、S波反射法地震探査が実施され、西暦762年もしくは841年の歴史地震に対比できる最新イベントが確認された。従来からの知見と合わせて解釈すると、このイベントでは糸静線の北部区間と中北部区間に至る区間が連動したと推定される（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST02〕）。2016年熊本地震の震源断層である布田川-日奈久断層帯については、益城町平田でのトレンチ調査及び断層変位地形の屈曲量から水平変位速度はそれぞれ0.29-0.86mm/yr及び約1mm/yrと見積もられた。西原村小森でのトレンチ調査では2016年熊本地震を含めて4回の断層運動があり、その平均活動間隔は2400-3500年、2016年熊本地震の1つ前の活動が2086-2287calBPにあったことが明らかになった。これらの結果から布田川-日奈久断層帯が2000-3000年程度の間隔で活動してきた可能性が高い（図2）。また、阿蘇カルデラ東部と出ノ口断層沿いに出現した地表地震断層は、過去においても布田川断層の活動と同期していた可能性があることがわかった（名古屋大学〔課題番号：NGY\_03〕）。

これらの地質データを簡単に検索、表示できるデータベースについても、前計画から引き続いて充実が図られている。産業技術総合研究所では、活断層及び津波浸水履歴情報を「活断層データベース」「津波堆積物データベース」として整備しており、産総研の調査情報の追加、調査地の位置精度の向上、データ入力インターフェイスの作成およびシステム改修が行われた（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST01, AIST04〕）。

## （5）地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

### ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

銭洲海嶺西端およびその延長部における海底地形詳細調査と浅層地質構造探査が行われた。その予備的な解析によると、銭洲海嶺と西方の檜野埼海丘の間に地殻変動に起因すると考え

られる海底面の起伏が確認され、サブボトムプロファイラを用いた浅層地質構造探査からも変位・変形構造がイメージングされた。それらの中には海底面まで変位させるものも含まれる（名古屋大学 [課題番号：NGY\_04]）。

時間遅れを伴う地震活動が大地震の余効すべりによって誘発される場合を考察するため、余効すべり伝播速度と摩擦特性との定量的な関係式の導出を行った。速度状態依存摩擦則に基づき余効すべり域で均質な摩擦特性を持つ多数の試行モデルの数値シミュレーション結果から、余効すべりの発生過程について近似条件を導き出し、摩擦特性パラメータ値 $a$ 、有効法線応力 $\sigma$ 、せん断応力変化量 $\Delta \tau$ を用いた $\exp(\Delta \tau / a \sigma)$ が余効すべり伝播速度に比例することを導出した。この関係式は、 $a \sigma$ が小さいほど指数関数的に伝播速度が増大することを意味する。一方、余効すべり伝播速度は摩擦特性が時空間的に均質であっても、経過時間に比例することが確かめられた（Ariyoshi et al., 2019）（海洋研究開発機構 [課題番号：JAMS01]）。

## オ. 構造共通モデルの構築

防災科研Hi-netやF-netのデータにS-netのデータも活用することにより、海域を含む日本列島域の3次元地震波速度構造の高精度な推定を行い、結果を防災科研Hi-netのweb サイトから公開した（Matsubara et al., 2019）（防災科学技術研究所 [課題番号：NIED02]）。

## 2. 地震・火山噴火の予測のための研究

### （1）地震発生の新たな長期予測

#### ア. 海溝型巨大地震の長期予測

スロー地震活動について、S-netの観測記録に基づき、十勝沖・三陸沖の日本海溝近傍で発生する低周波微動を捉えた（Tanaka et al., 2019）。低周波微動は、当該地域で発生した巨大地震の震源域浅部側に隣接して分布すること、プレートの走向に沿う帯状の領域内で2つのクラスタを形成すること、このクラスタ間は巨大地震の破壊開始域や余震活動が分布することを明らかにした。3次元構造を用いて、南海トラフ海域における浅部超低周波地震のCMT解を求め、その多くは低角逆断層型であること、フィリピン海プレート上面のすべり欠損速度が大きい領域の周囲、かつ地震波速度が遅い領域で活発に発生していることが明らかとなった（Takemura et al., 2019）（防災科学技術研究所 [課題番号：NIED02]）。

#### イ. 内陸地震の長期予測

内陸における地震発生層の下限（D90）を求めるため、3次元地震波速度構造を用いて再決定した震源カタログを構築するとともに、このデータ等に基づいて日本海沿岸や中央構造線沿い等のD90の分布を調査した。また、地震波走時トモグラフィによる速度構造から推定された温度構造・岩種とD90の分布の関連性を議論した（防災科学技術研究所 [課題番号：NIED02]）。

内陸域などに存在する地殻内震源断層の応力蓄積過程を明らかにし、長期予測を行うため、日本列島域の三次元有限要素モデルを構築した。このモデルとGNSSデータを用いて千島海溝の固着を推定し、固着の進行にともなう北海道地域の震源断層の応力蓄積速度を求めた（図3）（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_11]）。

測地データから内陸地震の発生ポテンシャルを評価するために、ひずみ速度を用いて西日

本の内陸地震の発生確率を試算した。この試算の中で、測地データによって観測されるひずみ速度は弾性ひずみと非弾性ひずみの両方を含むため、両者の割合を測地モーメント速度と歴史地震で解放されたモーメント速度の比から推定した。最近433年間の歴史地震及び気象庁一元化カタログを用いると、測地モーメント速度に対する歴史地震のモーメント速度の比は西日本全域では14%、中部・近畿・中国地方を中心とする領域では、24%であった。これらの結果は、測地学的ひずみ速度が地震学的ひずみ速度よりも1桁大きいという先行研究の結果を支持するものであるが、両者の割合は地域性があることも示唆された。GNSSデータとして南海トラフ沿いのカップリングによる弾性変形を除去したひずみ速度から測地モーメント速度を計算し、その14%が地震として解放されるとし地震の発生時刻はポアソン過程を仮定すると、 $0.2^\circ$  グリッド毎の30年間にM6.0以上の内陸地震が発生する確率は、最大4.3%という結果を得た（図4）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI05]）。

地殻内のせん断歪みエネルギーの蓄積が地震発生に深く関与するという考えのもと、2016年熊本地震による地殻内のせん断歪みエネルギーの変化を3次元的に推定した。この結果と熊本地震発生後1週間の余震分布を比較し、せん断歪みエネルギーが増加した場所で余震が顕著に活発化したことを明らかにした。更に、せん断歪みエネルギーの変化量は、背景応力の大きさに強く依存することが分かった。この事実を利用して、エネルギー保存という新たな観点から地殻応力の下限值（深さ10kmで14MPa以上）を推定することに成功した（Noda et al., 2020）（防災科学技術研究所 [課題番号：NIED03]）。

## （2）地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

### ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

GNSS連続観測データから、南海トラフ域のスロースリップイベント（SSE）を調べ、2019年初め頃の豊後水道、四国南西部、日向灘北部におけるSSEの時空間変化を推定した。その結果、日向灘北部のSSEが2018年6月と2019年初めの合わせて2回発生したことがわかった（図5）（国土地理院 [課題番号：GSI\_02]）。

## これまでの課題と今後の展望

今年度から開始された観測研究計画において「地震（長期予測）」計画推進部会では、最終的なアウトプットが地震調査研究推進本部で行う長期評価の高度化に貢献することを目標として、個々の課題が実施された。計画の初年度ということで、特に新規に開始された課題においては研究開始から間もない時期ではあるが、多くの重要な成果が挙げられている。過去の地震の発生履歴を知ることが、長期予測において最も基礎的で重要であるが、今年度の成果の中でも過去の津波堆積物の年代測定の高精度化や多点での比較から、過去の津波の発生時期の絞り込みや複数の堆積物が異なる起源であることが示され、過去に発生した大地震の地震像が絞り込まれつつある。また、活断層で発生する内陸地震においては、2014年長野県北部の地震や2016年熊本地震を契機として、断層セグメントの一部を破壊する地震や断層セグメント間の連動及び活断層として事前に認識されていない場所での破壊などをどのように長期予測に取り入れて行くかの研究が始まっている。また従来、研究者の経験や地道な作業に依存しがちであった地質・地形データの解釈において、DEMとクラスタリング手法を用いた海岸段丘の客観的抽出手法が開発され、房総半島南部の海岸段丘面とその比高が高精度で検出できることが示された。高精度かつ高空間分解能のDEMデータは全国で整備されつつあり、こ

のような客観的抽出手法は、膨大なデータを効率的に処理していくという観点からも重要であると考えられる。

本計画の重点的な観測研究と位置づけられている新たな長期予測手法についても、着実な研究の進展があった。GNSS等によって観測された地殻変動データから内陸地震の発生確率が試算され、実際の地震活動を概ね説明することが示されたことは重要で、今後更に手法やデータの高度化が進められることが期待される。また、物理モデルを用いて近年実際発生した地震の震源過程を説明する研究や物理モデルへの入力パラメータとなる応力場を観測データから推定する試み、従来データがほとんどなかった地域における新たな観測の開始など今後結実することが期待できる多くの研究が開始されており、現在の研究を継続することによって、次年度以降はさらなる成果が期待できる。

## 成果リスト

- Ariyoshi, K., J. Ampuero, R. Burgmann, T. Matsuzawa, A. Hasegawa, R. Hino, T. Hori (2019), Quantitative relationship between aseismic slip propagation speed and frictional properties, *Tectonophysics*, 767, 128-151, doi:10.1016/j.tecto.2019.06.021
- Carvajal-Soto, L. A., T. Ito, M. Protti, H. Kimura (2020), Earthquake potential in Costa Rica using three scenarios for the Central Costa Rica Deformed Belt as western boundary of the Panama Microplate, *J. South Am. Earth Sci.*, 97, doi:10.1016/j.jsames.2019.102375
- Ioki, K., Y. Tanioka, G. Kawakami, Y. Kase, K. Nishina, W. Hirose, K. Hayashi, R. Takahashi (2019), Fault model of the 12th century southwestern Hokkaido earthquake estimated from tsunami deposit, distributions. *Earth Planets Space*, 71:54, doi:10.1186/s40623-019-1034-6
- 石村大輔 (2019), 熊本県西原村布田における布田川断層の2016年熊本地震(Mw7.0)時上下変位と活動性, *活断層研究*, 50, 33-44, doi:10.11462/afr.2019.50\_33
- 岩佐佳哉, 熊原康博, 後藤秀昭, 中田高 (2020), 熊本県益城町堂園地区における2016年熊本地震の地表地震断層の詳細な分布と共役断層の活動履歴, *活断層研究*, 52 (印刷中)
- Iwasaki, T., N. Tsumura, T. Ito, K. Arita, M. Makoto, H. Sato, E. Kurashimo, N. Hirata, S. Abe, K. Noda, A. Fujiwara, S. Kikuchi, K. Suzuki (2019), Structural heterogeneity in and around the fold-and-thrust belt of the Hidaka Collision zone, Hokkaido, Japan and its relationship to the aftershock activity of the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, *Earth Planets Space*, 71:103, doi:10.1186/s40623-019-1081-z
- Kubota, T., R. Hino, D. Inazu, S. Suzuki (2019), Fault model of the 2012 doublet earthquake, near the up-dip end of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, based on a near-field tsunami: implications for intraplate stress state, *Prog. Earth Planet Sci.*, 6:67, doi: 10.1186/s40645-019-0313-y
- Kubota, T., T. Saito, W. Suzuki (2020), Millimeter-scale tsunami detected by a wide and dense observation array in the deep ocean: fault modeling of an Mw 6.0 interplate earthquake off Sanriku, NE Japan, *Geophys. Res. Lett.*,

e2019GL085842, doi:10.1029/2019GL085842

- Matsubara, M., H. Sato, K. Uehira, M. Mochizuki, T. Kanazawa, N. Takahashi, K. Suzuki, S. Kamiya (2019), Seismic velocity structure in and around the Japanese Island arc derived from seismic tomography including NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, *Seismic Waves - Probing Earth System*, M. Kanao and G. Toyokuni eds., 1-19, doi:10.5772/intechopen.86936
- Nakano, M, S. Yabe, H. Sugioka, M. Shinohara, S. Ide (2019), Event size distribution of shallow tectonic tremor in the Nankai trough, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 5828-5836. doi:10.1029/2019GL083029
- Noda, A., T. Saito, E. Fukuyama, T. Terakawa, S. Tanaka, M. Matsu'ura (2020), 3-D Spatial distribution of shear strain energy changes associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, e2019GL086369. doi:10.1029/2019GL086369
- Ogata, Y., K. Katsura, H. Tsuruoka, N. Hirata (2019), High-resolution 3D earthquake forecasting beneath the greater Tokyo area, *Earth Planets Space*, 71:113, doi:10.1186/s40623-019-1086-7
- Ozawa, S., H. Yarai, T. Kobayashi (2019), Recovery of the recurrence interval of Boso slow slip events in Japan, *Earth Planets Space*, 71:78, doi:10.1186/s40623-019-1058-y
- Saito, T., T. Baba, D. Inazu, S. Takemura, E. Fukuyama (2019), Synthesizing sea surface height change including seismic waves and tsunami using a dynamic rupture scenario of anticipated Nankai trough earthquakes, *Tectonophysics*, 769, 228166, doi:10.1016/j.tecto.2019.228166
- Saito, T., A. Noda (2020), Strain energy released by earthquake faulting with random slip components, *Geophys. J. Int.*, 220(3), 2009-2020, doi:10.1093/gji/ggz561
- Saito, T., T. Kubota (2020), Tsunami modeling for the deep sea and inside focal areas, *Annual Rev. Earth Planet. Sci.*, 48, doi:10.1146/annurev-earth-071719-054845
- Shimada, Y., S. Fujino, Y. Sawai, K. Tanigawa, D. Matsumoto, A. Momohara, M. Saito-Kato, M. Yamada, E. Hirayama, T. Suzuki, C. Chagu (2019), Geological record of prehistoric tsunamis in Mugi Town, facing the Nankai Trough, western Japan, *Prog. Earth Planet Sci.*, 6, 33, doi:10.1186/s40645-019-0279-9
- 宍倉正展 (2019), 房総半島南西岸の関東地震における隆起生物遺骸群集の露頭データ, *歴史地震*, 34, 91-102
- Takemura, S., T. Matsuzawa, A. Noda, T. Tonegawa, Y. Asano, T. Kimura, K. Shiomi (2019), Structural characteristics of the Nankai Trough shallow plate boundary inferred from shallow very low frequency earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 4192-4201, doi: 10.1029/2019GL082448
- Tanaka, S., T. Matsuzawa, Y. Asano, (2019), Shallow low-frequency tremor in the northern Japan Trench subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 5217-5224,

doi: 10.1029/2019GL082817

Tomita, F., M. Kido, C. Honsho, R. Matsui (2019), Development of a kinematic GNSS-Acoustic positioning method based on a state-space model, *Earth Planets Space*, 71:102, doi:10.1186/s40623-019-1082-y

Xu, S., E. Fukuyama, F. Yamashita, S. Takizawa (2019), Evolution of Fault-Interface Rayleigh Wave speed over simulated earthquake cycles in the lab: Observations, interpretations, and implications, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 524, doi:10.1016/j.epsl.2019.115720

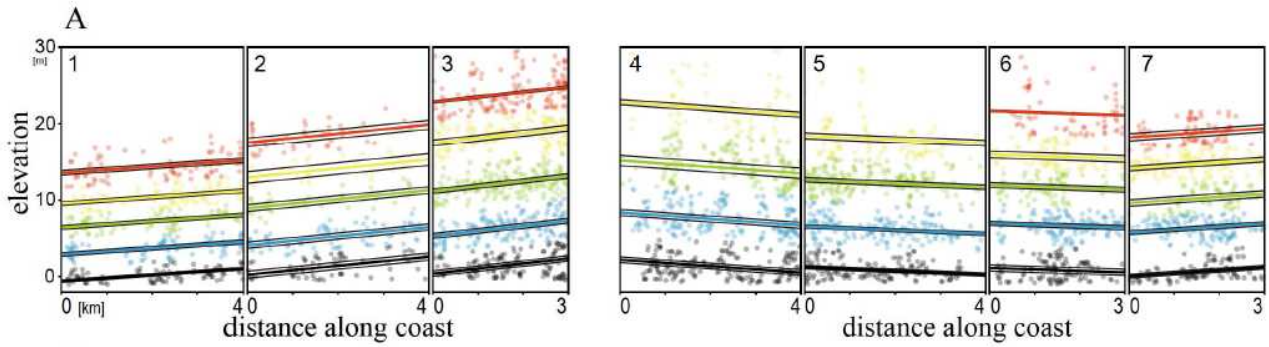


図1. 房総半島南部の沼段丘面の標高分布。デジタル標高モデル(DEM)に曲率に基づく特徴量抽出と k-means クラスタリングによる分類を行った結果。4段もしくは5段の段丘面が客観的に抽出できている(東京大学理学系研究科 [課題番号: UTS\_05])。

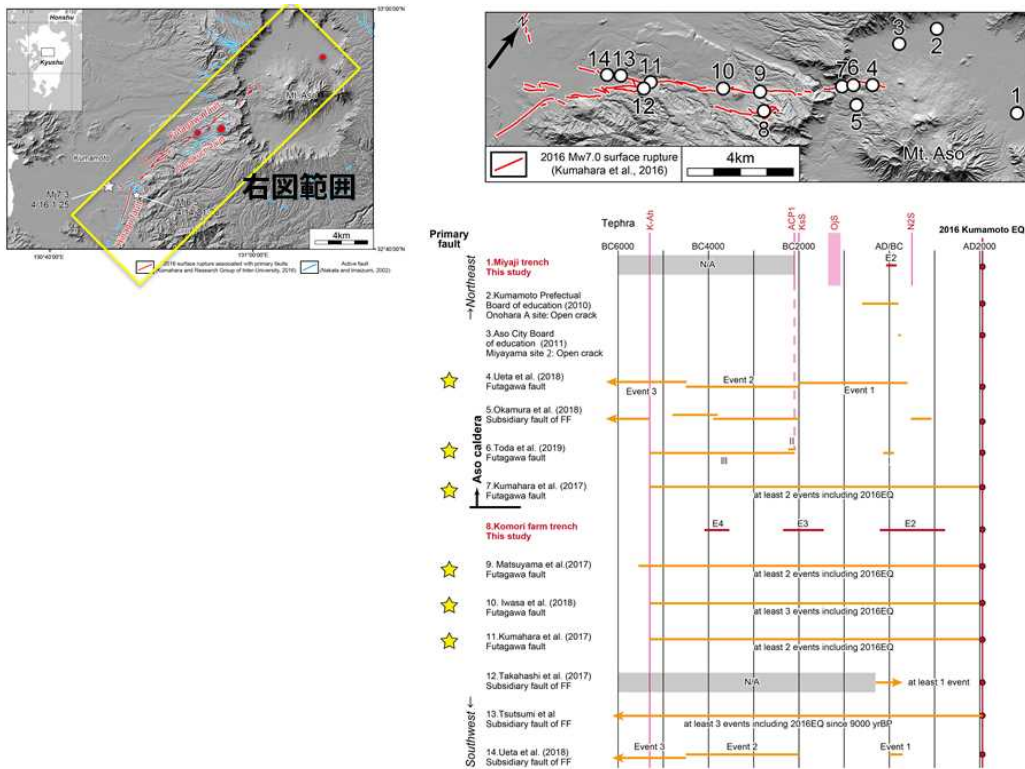


図2. 2016年熊本地震の地表地震断層の活動履歴。布田川一日奈久断層帯が2000-3000年程度の間隔で活動してきた可能性が高いことが示された(名古屋大学 [課題番号: NGY\_03])。



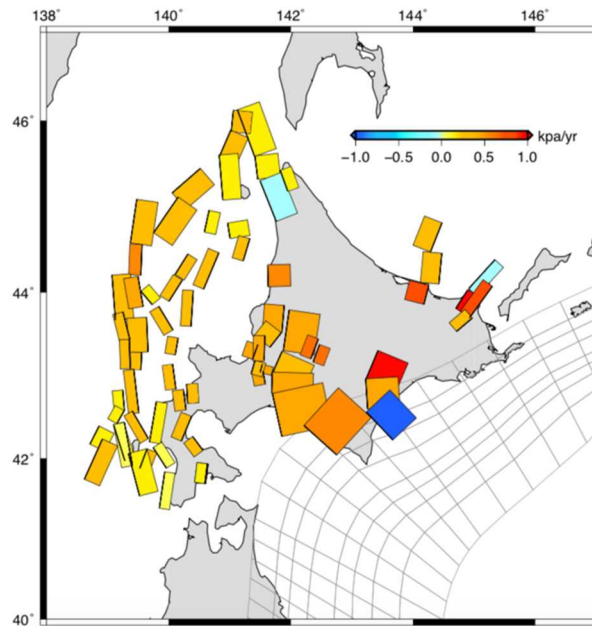


図 3. 北海道周辺の震源断層モデルにおけるクーロン応力の蓄積速度。日本列島の基本構造 FEM モデルに対して、1998-2003 年までの GNSS の変位速度場から推定されたプレート境界の固着分布から震源断層面でのクーロン応力を計算した（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI\_11]）。

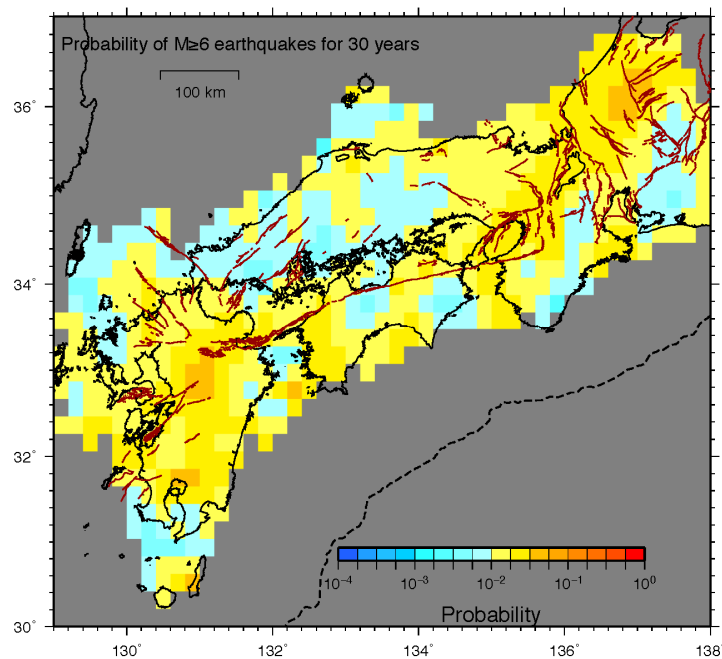


図 4. 2005年4月-2009年12月のGNSSデータに基づく30年間にM6以上の内陸地震が発生する確率の試算例。地震の発生時刻はポアソン過程に基づくと仮定した。地震発生層の厚さ，剛性率，GR則のb値，ひずみ速度を求める際の距離減衰定数，測地観測によるひずみ速度に対する弾性ひずみ速度の割合は，それぞれ12km，30GPa，0.9，25km，0.14とした（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI05]）。

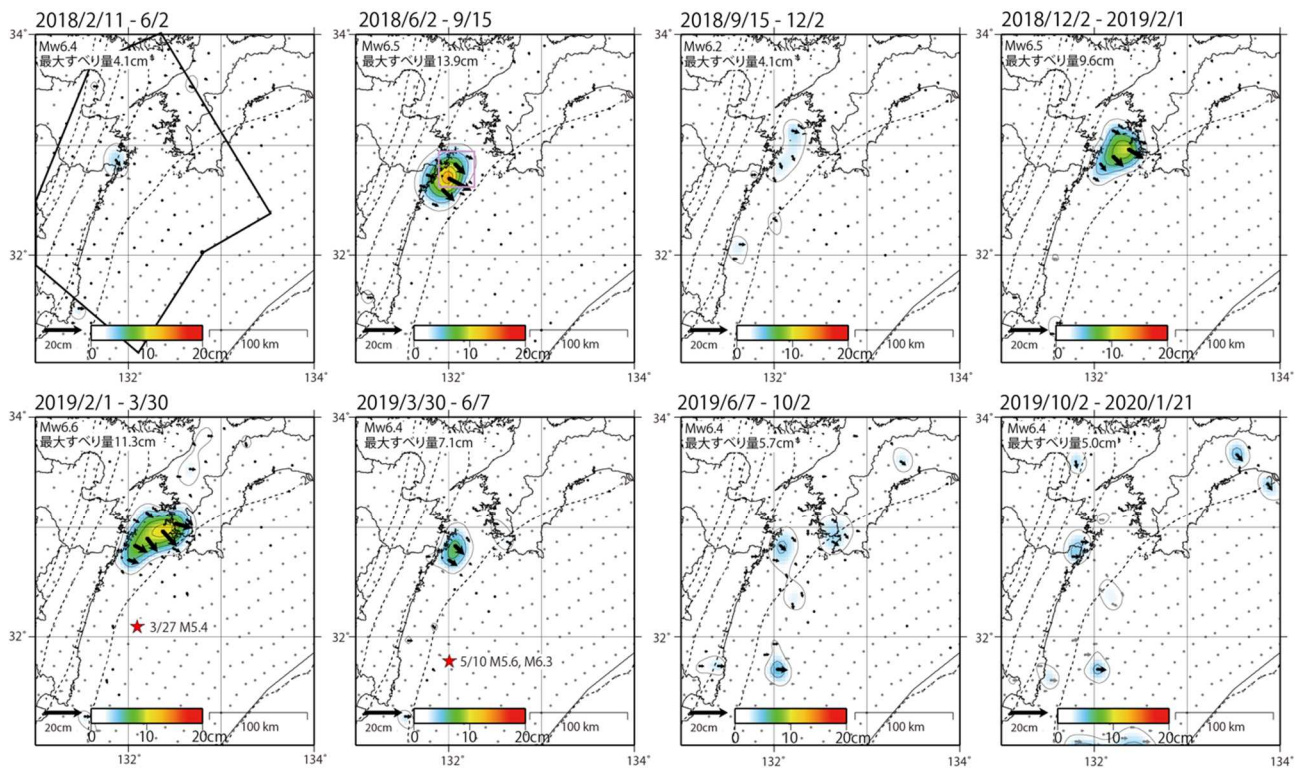


図5. 西南日本のプレート境界滑りの時空間変化。矢印とカラースケールは、2018年2月から2020年1月までのGNSSデータに基づく非定常地殻変動から推定された滑りを表す（国土地理院 [課題番号：GSI\_02]）。