

## 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・地形データや史料・考古データを活用して地震の発生や地殻変動の履歴を解明する手法の高度化を進めるとともに、各地域での調査から過去の履歴データを蓄積して、大地震の予測精度の向上を目指した観測研究を行う。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地球物理学的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2(2021)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

1707年の宝永南海地震前後の京都における有感地震の推移について、京都の2か所で記された日記史料に基づき調査した。どちらの日記史料にも地震直後の約1ヶ月間は有感地震が頻繁に記されているが、地震から1～数年後には、地震前と同じ年1回程度に減少し、減少後の数年間で見ると、宝永地震前後で顕著な差は見られないことがわかった。また、日記史料有感地震データベースと気象庁の震度データベースを比較して、地震の震央候補を推定する手法の改良に取り組み、19世紀中頃に発生した地震の震央推定に向けた研究を実施した。1855年の安政遠江・駿河の地震と安政米子の地震について震央の推定を試みた結果、前者の地震は現在の静岡県焼津市域の近傍で発生した内陸地震であった可能性がある。また後者の地震は、米子城での被害が前年(1854年)の嘉永(安政)南海地震による被害であったと考えられ、京都近傍で発生した内陸地震であった可能性がある(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、引き続き沿岸での津波堆積物や巨礫群を用いた古津波と、海岸段丘地形や生物痕跡に基づく地震性隆起の評価が行われた。北海道太平洋岸の津波堆積物について年代測定の追加により、17世紀のイベントだけでなく12世紀のイベントについても、十勝地域と釧路根室地域とで年代が異なることが示唆された。また、十勝の当縁川河口域において、珪藻分析から10世紀から18世紀までの地殻変動史を構築し、14-15世紀頃に地震間地殻変動が隆起から沈降に転じたことと17世紀のイベントの変動量が12世紀と比べて2倍程度大きかったことがわかった(北

海道大学〔課題番号：HKD\_01〕）。さらに北海道東部において、無人航空機測量や地中レーダー探査により津波浸水計算の基礎となる古地形の復元が行われた（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。

南海トラフ沿いでは、高知県、愛媛県、宮崎県で津波堆積物調査が実施された（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。南西諸島海溝沿いでは、喜界島で隆起サンゴ調査、宮古島で巨礫の分布調査がそれぞれ行われた（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。琉球列島中部では、台風の高波起源の巨礫が存在しており、過去に津波が発生していたとしてもこれらの巨礫のサイズ・空間分布は大幅に変わらなかったと考えられることから、現在の巨礫分布を制約条件とする津波数値計算により、既往の津波および地震の規模の上限値を推定した（東京大学大学院理学系研究科〔課題番号：UTS\_01〕）。

相模トラフ沿いで発生する関東地震に関連する房総半島南部の沼段丘面に対して、数値標高モデル（DEM）に基づく海岸段丘面の標高分布をK-meansクラスタリング法を用いて区分する地形解析アルゴリズムを構築し、従来の目視ベースの地形判読による段丘区分を見直す結果を得た（Komori et al., 2020）。また、段丘面形成年代の推定手法の高度化を行い、再堆積効果を定量的に考慮したベイズ推定を用いて、多くの年代値データから信頼度を含めて年代推定できる手法を開発した（東京大学大学院理学系研究科〔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、中央構造線断層帯の讃岐山脈南縁区間鳴門南断層において三次元的トレンチ調査を実施した。古地震イベントは不確かなものを含めて3回が検出され、最新イベントは12世紀ないし鎌倉時代以降に生じたと推定される。この結果は、最新活動が16世紀以降であるとする多くの先行研究と矛盾しないものである（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、御船町高木においてトレンチ調査を行い、2251-1561 calBPと3977-2768 calBPの少なくとも2回のイベントと、トレンチ壁面には明瞭な痕跡を残していない2016年熊本地震の計3回の断層運動があったことが明らかになった。2016年熊本地震はほぼ純粋な右横ずれで、それ以前のイベントはそれぞれ右横ずれと東側が低下する変位が主体であった。このような活動毎に異なる変形様式が見られることは、布田川断層帯と日奈久断層帯の活動セグメントが重複する地点であることが原因である可能性があり、1900 calBP頃のイベントは布田川断層帯の活動、3400 calBP頃のイベントは日奈久断層帯の活動であった可能性がある（図1）（名古屋大学〔課題番号：NGY\_03〕）。糸魚川-静岡構造線活断層系南部周辺では航空レーザ測量(LiDAR)に基づく数値標高モデルから変動地形の再判読と地表踏査を行い、詳細な活断層の分布が明らかとなった。これにより明らかになった白州断層においてトレンチ調査を行ったところ、最近2回の断層運動が確認された。最新活動の上下変位量は1回前のイベントより2倍以上大きい可能性があり、この違いは、2回の活動が異なる区間で発生し、最新活動ではより長い区間で変位が生じたためである可能性がある（名古屋大学〔課題番号：NGY\_03〕）。また、日本海沿岸域の島根県西部では、1872年浜田地震に関する史料および地形・地質調査を実施した。生物痕跡から地震時に1 m程度の隆起が推定されたが、隆起量にはかなりの地域差があることがわかった（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕、宍倉・他、2020）。

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は、引き続き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、「活断層データベース」では活断層の断層線や調査地の位置精度の向上が行われた（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST01、AIST04〕）。

### (3) 地震発生過程の解明とモデル化

#### ア. 地震断層滑りのモデル化

変斑レイ岩の摩擦特性のスケール依存性を確認するため、E-ディフェンス施設における大型振動台を利用して低速～中速域のすべり速度でメートルスケールのガウジ摩擦実験を実施した。そこで得られた実験データを解析し、速度-状態依存摩擦構成則のパラメータが過去の研究成果と調和的であることを確認した。また4 m長岩石試料を用いた摩擦実験を実施し、増強した測定網により詳細な弾性波データを収録した(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02])。

### (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

100 kmスケールの地下構造の不確かさを考慮するために、多数の地下構造モデルの候補をアンサンブルの形で取り込むことができる断層すべり推定手法を開発し、数値実験により有効性を確かめた(海洋研究開発機構 [課題番号: JAMS01]、Agata et al., 2021)。日本海溝と南海トラフ沿いのプレート境界での単位すべりに対する地表での弾性応答のグリーン関数ライブラリを構築した。ライブラリでは、世界測地系で用いられる準拠楕円体や全球でのジオイドモデルと日本列島の地下構造として全国一次地下構造モデルを取り入れており、ユーザが容易に地下構造不均質の影響を考慮して地殻変動をモデル化できる環境が整備された(海洋研究開発機構 [課題番号: JAMS01]、Hori et al., 2021)。

基盤的地震観測網で観測された遠地地震波形データの解析から、四国西部下に沈み込むフィリピン海プレートからの脱水が、その上部のマントルウェッジの蛇紋岩化や深部低周波微動の発生に寄与していることを示した(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02]、Shiomi et al., 2021)。

#### イ. 内陸地震

令和元年度に実施された東北日本を横断する日本海溝から大和堆までの海陸合同構造探査のデータを用いて、陸域部における波線追跡法を用いたモデル構築を行った。上部地殻基盤層(いわゆる6 km/s層)より浅部の構造は、4層の堆積層でモデル化された。各々の速度は、1.6-2.0、1.8-3.5、3.5-4.5及び4.5-5.5 km/sと推定される。堆積層全体の厚さは、測線東端部を除いて3.5-5 kmで、著しい変形を示す(図2)(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI\_11])。様々な観測データや得られた地震カタログ等を用いて、将来的に大地震の震源域となりうる領域を把握するための研究開発を進めた。東北地方太平洋沖地震によって東北日本・中部日本の内陸域にもたらされた剪断ひずみエネルギー変化と地震活動の変化を比較したところ、剪断ひずみエネルギーが増加した地域と東北地方太平洋沖地震後に地震活動が活発化した地域が良く対応することを明らかにした(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02])。陸域地殻内地震の地震発生層の下限について、三次元地震波速度構造を使って再決定した震源に基づくD90(当該地域で発生する地震数の90%がこれより浅部に存在するという深さ)とD300℃(地下の温度が300℃となる深さ)の分布は基本的に同傾向にあることを示した。この結果は、地震活動が少ない地域における地震発生層下限の評価においては、D300℃が一つの指標となり得ることを意味する(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02])。

## オ. 構造共通モデルの構築

東北日本弧（青森平野・庄内平野・新庄盆地等）、富士川河口断層帯、中央構造線活断層系、琵琶湖西岸断層帯などで近年取得された反射法地震探査断面について、地質構造解釈・変動地形との整合性の考察を行い、断層モデルを推定した。また、日本海とその沿岸海域について、反射法地震探査などの資料をとりまとめて震源断層モデルを作成した（図3）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI\_11〕）。

## 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

南西諸島海溝沿いでは、沖縄本島南東沖と波照間島沖でそれぞれGNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測を実施した。過去の観測データと合わせて地殻変動速度を推定すると、沖縄本島南東沖では沖縄本島（沖縄ブロック）に対して北に $17.0 \pm 0.95$  mm/yr、西に $4.7 \pm 0.96$  mm/yrの変位速度が得られた。この結果は、海溝付近のプレート間固着を示唆するものである。一方、波照間島南方沖の速度は、揚子江プレートに対して南に $64.2 \pm 11.2$  mm/yr、東に $25.8 \pm 9.8$  mm/yrであり、沖縄トラフにおける伸張を示す。この伸張の速度は、西表島、波照間島と同程度かそれ以上である。また、約25 mm/yrの非常に速い沈降も併せて観測され、高速の海溝後退による前弧プリズムの薄化を示唆するものであるが、このデータのみで海溝軸付近の固着状態を拘束することは難しい（名古屋大学〔課題番号：NGY\_02〕）。

南海トラフ沿いの海溝型巨大地震を引き起こす応力蓄積の状況を明らかにするために作成した応力分布モデルをもとに、今後起こりうる大地震発生シナリオを作成した。さらに、作成した破壊シナリオの中から実現性の高いシナリオを選択することを目的に、経験的摩擦則とエネルギーバランスを利用する基本手法の開発を開始した（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED02〕）。

#### イ. 内陸地震の長期予測

構造探査が行われた庄内-新庄測線周辺の精密数値標高モデルや既存の層序データに基づき、庄内平野・新庄平野の伏在活断層における平均変位速度などのこの地域の活褶曲や伏在断層による長期間地殻変動を推定した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI\_11〕）。

西南日本における沈み込み帯でのプレート間固着と上盤プレート内部の地震活動の関連性を明らかにするために、日本列島域の粘弾性を考慮した有限要素モデルを作成し、地殻変動データのインバージョンにより、南西諸島海溝-南海トラフ沿いのすべり欠損速度分布を求めた。得られたすべり欠損速度分布を用いて、有限要素モデルにより西南日本の震源断層におけるクーロン応力変化（ $\Delta CFF$ ）を求めた。九州では $\Delta CFF$ が正の震源断層が多く、近年発生した3つのM7級地震の震源断層も正であった。これらの断層では、プレート境界での力学的作用により、破壊を促進する方向に応力がかかっていることを意味している（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI\_11〕）。

物理モデルと観測データの統合による地震規模を含む動的破壊過程予測手法の開発と検証のために、2018年北海道胆振東部地震を対象として解析を行った。本地震を選択したのは、余震分布と発震機構の観測から示唆される震源の複雑性の効果を調べることを重視したためである。断層形状を余震分布から広域応力場を事前の地震活動から拘束して、動力学的破壊シミュレーションを行った（図4）。運動学的滑りインバージョン結果で推定された動的破壊過程と滑りの空間分布の主たる特徴が、シミ

ュレーションにより再現されることが確認された。これは、それら動的パラメタが非平面的な断層形状を反映した初期応力分布に強く依存したためと解釈される（東京大学大学院理学系研究科〔課題番号：UTS\_02〕、Hisakawa et al., 2020）。

大地震が連発したり、大地震により周辺の地震活動度が変化した事例は多く、布田川―日奈久断層帯での2016年熊本地震や米国東カリフォルニア剪断帯の2019年リッジレスト地震はその一例である。このような活動を予測するために速度および状態依存型クーロンモデルを改良し（図5a）、リッジレスト地震の地震活動に適用した。その結果、同地震の推移と周辺の地震活動を的確に説明することができた（図5b）。特に、近傍の主要活断層帯であるガーロック断層やサンアンドレアス断層モハベ区間で、地質学的長期評価と組み合わせることにより、より現実的な予測確率と確率利得を提示することができた（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI05〕、Toda and Stein, 2020）。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、今年度は東日本を対象にSavage and Simpson(1997)の手法を用いてGNSS測地ひずみ速度をモーメント速度に換算し、内陸地震の発生確率の試算を行った。ポアソン過程を仮定した場合の30年間に各0.2度グリッドでM6.8以上の内陸地震が発生する確率は、日本海東縁～新潟―神戸ひずみ集中帯、南関東・伊豆地方、奥羽脊梁山地沿いで1%を超え、高くなった（図6）（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI05〕）。

## （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データと時間依存のブロック断層解析手法を用いて、Loveless and Meade(2010)の断層形状に基づいた全国の断層すべりの解析を行った。その結果、日向灘、豊後水道、四国中部、紀伊水道、志摩半島でSSEを検出した。志摩半島では、SSE が2017年3月頃から2018年3月頃までと、2019年1月頃から2020年4月頃まで発生した。四国中部では、2019年1月頃からSSEが始まり、2020年末に終息している。紀伊水道でのSSEは、2019年4月頃から始まり、2020年末に終息している。2018年6月頃から始まった日向灘北部SSEは2019年初めまでに豊後水道に移動し、2019年中頃に終息したが、2020年7月頃から日向灘北部と南部で再び発生している事がわかった（国土地理院〔課題番号：GSI\_02〕）。

防災科学技術研究所では、MOWLAS等の観測データを用いた地殻活動モニタリングを継続するとともに、その高度化に努めた。東北地方太平洋沖地震のような大規模な地震の発生を念頭に、即時震源パラメタ解析システムAQUAの改良を行った。具体的には、一定規模以上の地震が発生したと判断された場合、広帯域地震計に代えて速度型強震計のデータを解析対象とするとともに、断層破壊の継続時間を考慮した解析パラメタに切り替える等の仕組みを導入した。その結果、東北地方太平洋沖地震の再現では約7分後に低角逆断層型Mw8.6の解が得られたほか、リアルタイム処理でM7以上の4地震を適切に処理することに成功した（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED02〕、Kimura et al., 2020）。S-netデータを用いた高精度震源決定のため、S-net観測点周辺で実施されたマルチチャンネル反射法地震データから観測点補正値を求めた。さらに、一次元速度構造と補正値に基づく震源位置を、稠密な臨時海底地震観測により求められた震源位置と比較し、処理のルーティン化に向けた課題を抽出、検討した（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED02〕）。南海トラフ周辺地域を対象に、三次元地震波速度構造を用いたセントロイドモーメントテンソル（CMT）解析を自動的に実施するためのシステム開発を行った。スロー地震に関しては、S-netデータを用いた日本海溝沿いの低周波微動検知の自動処理に着手した。大地震発生後数時間程度の連続波形記録から、揺れの最大振幅の超過確率を用いる

ことにより、その後の余震活動の推移を予測する手法を開発した。この手法は震源カタログを必要とせず、単点の地震波形のみを用いることが大きな特徴である(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02])。

### 3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

#### (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

##### イ. 津波の事前評価手法

南海トラフでのプレート境界巨大地震における津波シナリオを策定するために、震源域での滑り分布の長期間の平均と考えられるプレート境界での滑り遅れ速度に比例する確率分布にもとづき、シナリオ地震の震源断層上の滑り分布をランダムに生成する手法を構築した(海洋研究開発機構 [課題番号: JAMS01]、Nakano et al., 2020)。

### 5. 計画を推進するための体制の整備

#### (3) 研究基盤の開発・整備

##### イ. 観測・解析技術の開発

ノイズ変化に影響されないアクロス信号の振幅時間変化の評価手法の開発を行い、野島断層近傍におけるアクロスの観測に適用した。その結果、2000年鳥取県西部地震と2001年芸予地震の際に振幅が小さくなったことが明らかになった。これらの地震時には地盤の地震波速度が減少し、S波の速度変化に異方性があることが明らかになっていた(Ikuta et al., 2002)が、S波の振幅変化にも異方性があり、鳥取県西部地震では速度と振幅の減少の大きな方向が一致していることがわかった。これらの現象は、震動によってクラックが開き、地盤の減衰が増大したことで統一的に説明できる。以上のことから、アクロス信号の振幅を用いて地震時の地盤による減衰や異方性の変化のモニタリングが可能であることが示された(名古屋大学 [課題番号: NGY\_04])。

海域に拡充された地震観測網によって取得した地震波形データの評価を行った。日本海溝海底地震津波観測網(S-net)等のインライン型の海底観測網では、約3 Hz以上の周波数帯域において、観測波形に筐体の固有振動が含まれることを確認するとともに、この事象の特徴精査、原因の考察を行った(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02]、Sawazaki et al., 2020)。海底圧力計記録に関しては、2010年チリ地震時の地震計データとの比較検討を通じ、海底圧力計が地震による表面波(レイリー波)およびその分散性を明瞭に観測する能力があることを示した(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02]、Kubota et al., 2020)。

### これまでの課題と今後の展望

2年目を迎える本計画において「地震(長期予測)」計画推進部会に所属する各課題では、最終的なアウトプットが地震調査研究推進本部の長期評価の高度化に貢献することを目標として、個々の研究が実施された。今年度はコロナ禍のため、特にフィールドでの調査が大きく制限され、計画通りに研究を進められなかった課題もあるが、その分、室内での分析や考察、定常観測網のデータや過去に取得されたデータを用いた解析、数値実験に基づく解析などが進められ、予定以上の成果も挙がっている。その中でも、地質痕跡から過去に発生した大地震を明らかにするだけでなく、過去に発生した津波・地震の規模の上限値を制約する研究が、琉球諸島中部における沿岸巨礫を用いた解析や日向灘

沿岸地域における津波堆積物の調査に基づいて行われていることは、該当地域での長期予測において重要な知見を提供するものである。また、海底地殻変動観測により南西諸島域におけるデータの蓄積により、島嶼部とは速度場が異なっていることがほぼ確実にようになってきており、この地域の地震発生ポテンシャルを示す重要なデータである。

GNSSデータを用いたプレート間の固着、SSEなどのすべりのモニタリングについても着実に高度化が進められている。地下の断層すべりによって生じる地表での地殻変動については、均質半無限弾性体を仮定した研究が広く行われてきたが、観測精度の向上や海域などの断層近傍での観測が増えるにつれ、地下構造の不均質や地形の影響は無視できなくなりつつある。今年度の成果として、地下構造の不確定性を考慮したインバージョン手法が提案されたり、南海トラフや日本海溝域での地下構造を考慮した地表地殻変動の数値ライブラリーが公開され、各研究者が比較的簡便に不均質の影響を考慮した解析ができるような環境が整備されつつあることは、モニタリングの高度化においても大きく貢献する研究である。

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は、前年度から引き続き、GNSS等によって観測された地殻変動データから試算された内陸地震の発生確率が、歴史地震や最近100年間の背景地震活動度と比較され、統合的な地域とそうでない地域があることがわかってきた。地殻変動データなどを用いた新たな長期予測の実用化には、まだ多くの課題が残されているが、少なくとも定量的な試算と過去の地震活動との比較が本部会も協力して組織的に実施されていることは特筆すべきであろう。また、地震等による応力変化を地震活動予測に組み入れた予測手法は、実際の地震活動に合わせてパラメータを調整することにより、実際の地震活動が良く説明できることが示されており、今後さらに実用化に向けた研究が進められるべきである。物理モデルと観測データに基づいた応力分布などを用いて、実際に発生した地震の震源過程を説明する研究やエネルギーバランスから巨大地震の発生シナリオを制約する研究も確実な成果を挙げており、来年度以降も研究を継続することにより、長期予測手法の高度化に貢献することが期待できる。

## 成果リスト

- Agata, R., A. Kasahara and Y. Yagi, 2021, A Bayesian inference framework for fault slip distributions based on ensemble modeling of the uncertainty of underground structure - With a focus on uncertain fault dip, *Geophys. J. Int.*, 225, 1392-1411, doi:10.1093/gji/ggab033.
- Fujita, R., K. Goto, Y. Iryu, and T. Abe, 2020, Millennial paleotsunami history at Minna Island, southern Ryukyu Islands, Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.* 7:53, doi:10.1186/s40645-020-00365-9.
- Hisakawa, T., R. Ando, T. E. Yano, M. Matsubara, 2020, Dynamic rupture simulation of 2018, Hokkaido Eastern Iburi earthquake: Role of non-planar geometry, *Earth Planet. Space*, 72:36, doi:10.1186/s40623-020-01160-y.
- Hashima, A., Sato, H., and Sato, T., 2020, Stress loading and the occurrence of normal-type earthquakes under Boso Peninsula, Japan, *Earth Planet. Space*, doi:10.1186/s40623-020-01201-6
- Hori, T., R. Agata, T. Ichimura, K. Fujita, T. Yamaguchi and T. Iinuma, 2021, High Fidelity Elastic Green's Functions for Subduction Zone Models Consistent With the Global Standard Geodetic Reference System, *Earth Planet. Space*, 73:41, doi:10.1186/s40623-021-01370-y.

- 岩田貴樹・尾形良彦, 2020, Gutenberg-Richter則におけるa値の最尤推定, 地震2, 73, 93-96, doi: 10.4294/zisin.2020-1.
- Kimura, H., T. Kimura, Y. Asano, T. Kunugi, and S. Aoi, 2020, An improved rapid-source parameter determination system (AQUA) for giant earthquakes, IEEE Syst. J., 14, 3, 3451-3462, doi:10.1109/JSYST.2020.2983430.
- Kubo, H. and T. Nishikawa, 2020, Relationship of preseismic, coseismic, and postseismic fault ruptures of two large interplate aftershocks of the 2011 Tohoku earthquake with slow-earthquake activity, Sci. Rep., 10, 12044, doi:10.1038/s41598-020-68692-x.
- Kubota, T., T. Saito, N. Y. Chikasada and W. Suzuki, 2020, Ultra-broadband seismic and tsunami wave observation of high-sampling ocean-bottom pressure gauge covering periods from seconds to hours, Earth Space Sci., 7, e2020EA011972, doi:10.1029/2020EA001197.
- Kumazawa, T., Ogata, Y. and Toda, S., 2020, Wide-area seismicity anomalies before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Geophys. J. Int., 223, 1304-1312, doi:10.1093/gji/ggaa356.
- 熊澤貴雄・尾形良彦, 2020, 群発地震活動の非定常ETASモデルによる検出と測地学データに基づく予測可能性について, 地震予知連絡会会報, 103, 378-384.
- Ogata, Y., Katsura, K., Tanemura, M., Harte D., and Zhuang J., 2021, Bayesian Seismicity Analysis based on Delaunay Triangle Nets: Hierarchical Space-Time Point Process Models (HIST-PPM; including HIST-ETAS model) Computer Science Monograph No. 35.
- Ogata, Y. and Omi, T., 2020, Statistical Monitoring and Early Forecasting of the Earthquake Sequence: Case Studies after the 2019 M 6.4 Searles Valley Earthquake, California, Bull. Seismol. Soc. Am., 110(4), 1781-1798, doi:10.1785/0120200023.
- 尾形良彦, 2020, 階層的時空間ETASモデルによる短期・中期予測, 地震予知連絡会会報, 103, 385-387.
- Ozawa S, Kawabata, R, Kokado K, Yarai, H., 2020, Long-term slow slip events along the Nankai trough delayed by the 2016 Kumamoto earthquake, Japan, Earth Planet. Space, 72:61, doi:10.1186/s40623-020-01189-z.
- 小沢慎三郎, 2020, 広域地殻変動データに基づくプレート境界の固着とすべりの時間変化に関する研究, 国土地理院調査研究年報 (令和2年度) .
- Nakano, M., S. Murphy, R. Agata, Y. Igarashi, M. Okada and T. Hori, 2020, Self-similar stochastic slip distributions on a non-planar fault for tsunami scenarios for megathrust earthquakes, Prog. Earth Planet. Sci., 7:45, doi:10.1186/s40645-020-00360-0.
- Sawai, Y., 2020, Subduction zone paleoseismology along the Pacific coast of northeast Japan -progress and remaining problems-, Earth-Sci. Rev., 208, 103261, doi:10.1016/j.earscirev.2020.103261.
- Sawazaki, K. and T. Nakamura, 2020, "N"-shaped Y/X coda spectral ratio observed for in-line-type OBS networks; S-net and ETMC: interpretation based on natural vibration of pressure vessel, Earth Planet. Space, 72:130, doi:10.1186/s40623-020-01255-6.
- Shiomi, K., T. Takeda, and T. Ueno, 2021, Seismological evidence of a dehydration reaction in the subducting oceanic crust beneath western Shikoku in southwest Japan, Geophys. J. Int., 224, 1, 151-168, doi:10.1093/gji/ggaa423.

- 宍倉正展・行谷佑一・前杢英明・越後智雄, 2020, 1872年浜田地震による石見畳ヶ浦の隆起—離水生物遺骸群集と地形データによる検証—, 地震 2, 73, 159-177, doi:10.4294/zisin.2020-4.
- 宍倉正展・越後智雄・行谷佑一, 2020, 能登半島北部沿岸の低位段丘および離水生物遺骸群集の高度分布からみた海域活断層の活動性, 活断層研究, 53, 33-49.
- 高橋浩晃, 2020, 北海道胆振東部地震などの地表に痕跡を残さない地震の特徴, 地震予知連絡会会報, 104, 467-469.
- Takahashi, N., and S. Toda, 2021, Evaluating variability in coseismic slips of paleoearthquakes from an incomplete slip history: an example from displaced terrace flights across the Kamishiro fault, central Japan, Prog. Earth Planet. Sci., 8:15, doi:10.1186/s40645-021-00407-w.
- 高橋直也・内田嗣人・池田倫治・遠田晋次, 2020, 2019年カリフォルニア州リッジレスト地震の概要と最近の地震断層調査の動向, 活断層研究, 53, 51-65.
- Toda, S. and R. S. Stein, 2020, Long- and Short-term stress interaction of the 2019 Ridgecrest sequence and Coulomb-based earthquake forecasts, Bull. Seismol. Soc. Am., 110, 1765-1780, doi:10.1785/0120200169.
- Ueda, T., A. Kato, Y. Ogata, and L. Yamaya, 2021, Spatial Variations in Seismicity Characteristics in and Around the Source Region of the 2019 Yamagata-Oki Earthquake, Japan, Earth Planet. Space, 73, 40, doi:10.1186/s40623-020-01325-9.
- Wallis, S. R., F. Maeno, and S. Toda, 2020, Encyclopedia of Geology 2nd Edition Tectonics and Structural Geology: Japan and Korean Peninsula, 526-543, ISBN:978-0-08-102909-1, Academic Press Elsevier Ltd..

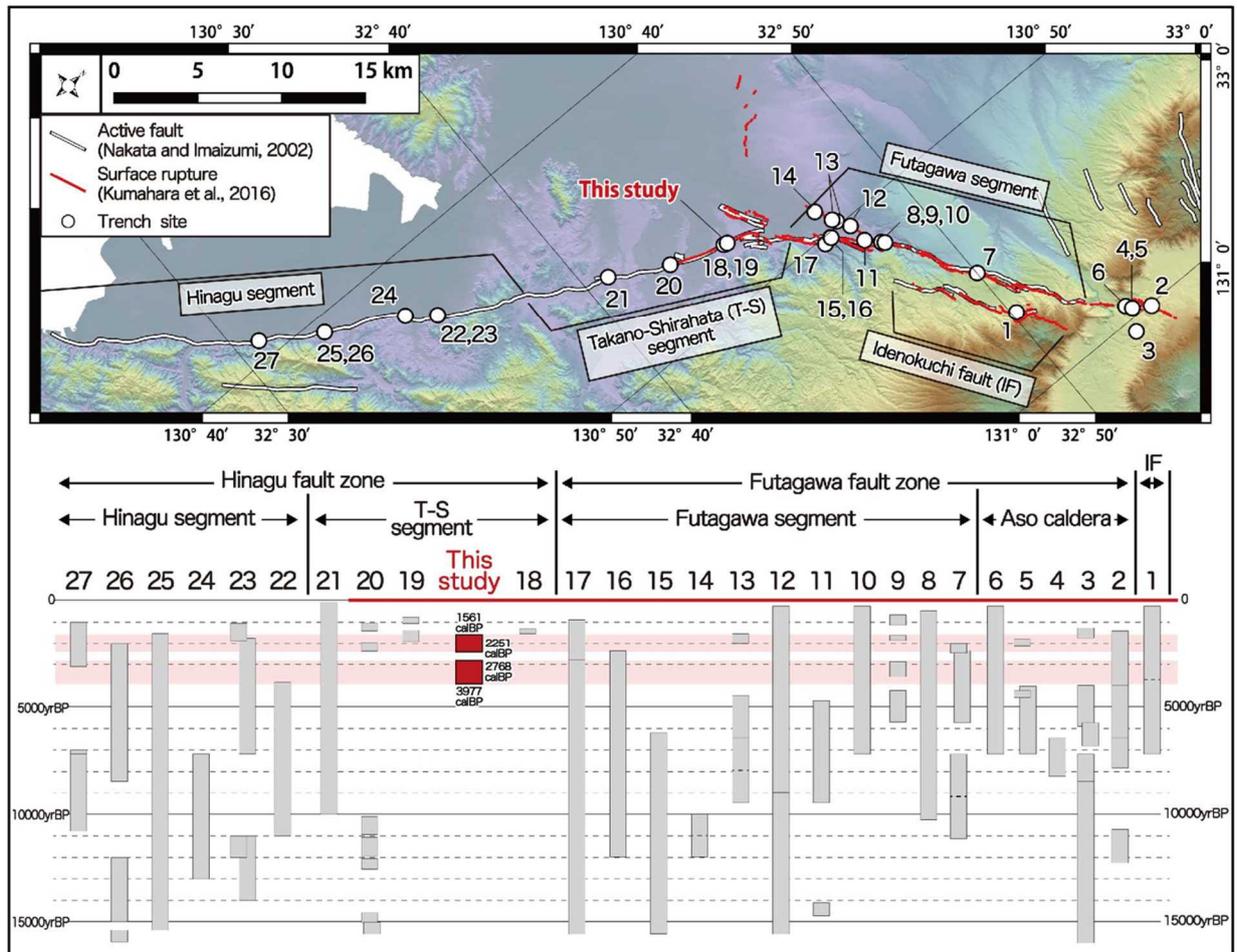
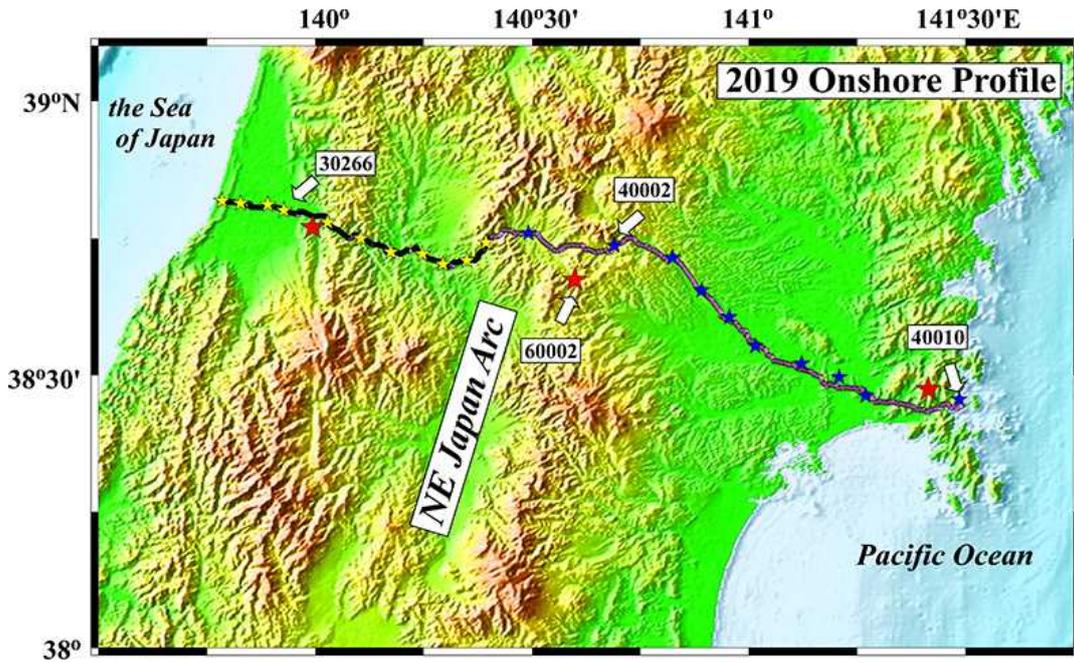


図1. 2016年熊本地震で地表地震断層が現れた御舟町高木トレンチにおける布田川・日奈久断層帯との連動性(予察) (名古屋大学 [課題番号: NGY\_03])

(a)



(b)

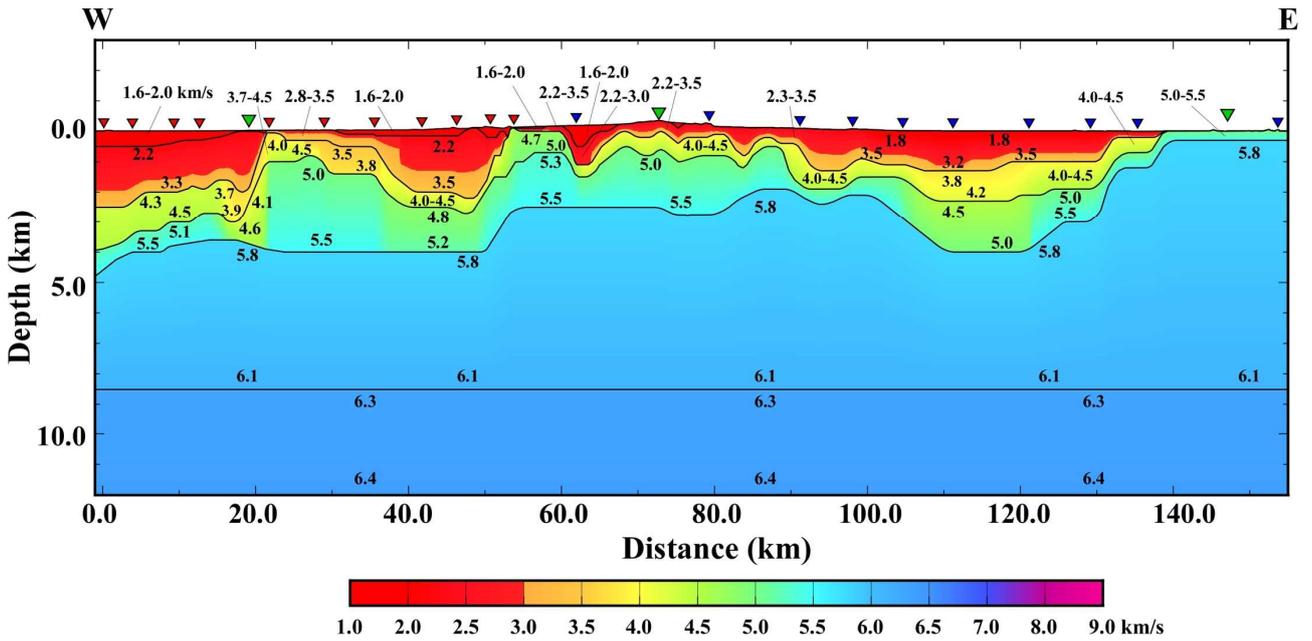


図2. 東北日本を横断する構造探査(令和元年度実施)の陸域部の測線と地殻浅部の暫定速度構造モデル(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_11])

(a) 測線図。ダイナマイト発震点と震源車による多重発震点をそれぞれ赤と黄・青の星印で示した。  
(b) 波線追跡法で求めた暫定P波速度構造モデル。図上部の逆三角印は発震点位置を示す。緑:ダイナマイト発震点。赤及び青:震源車多重発震。

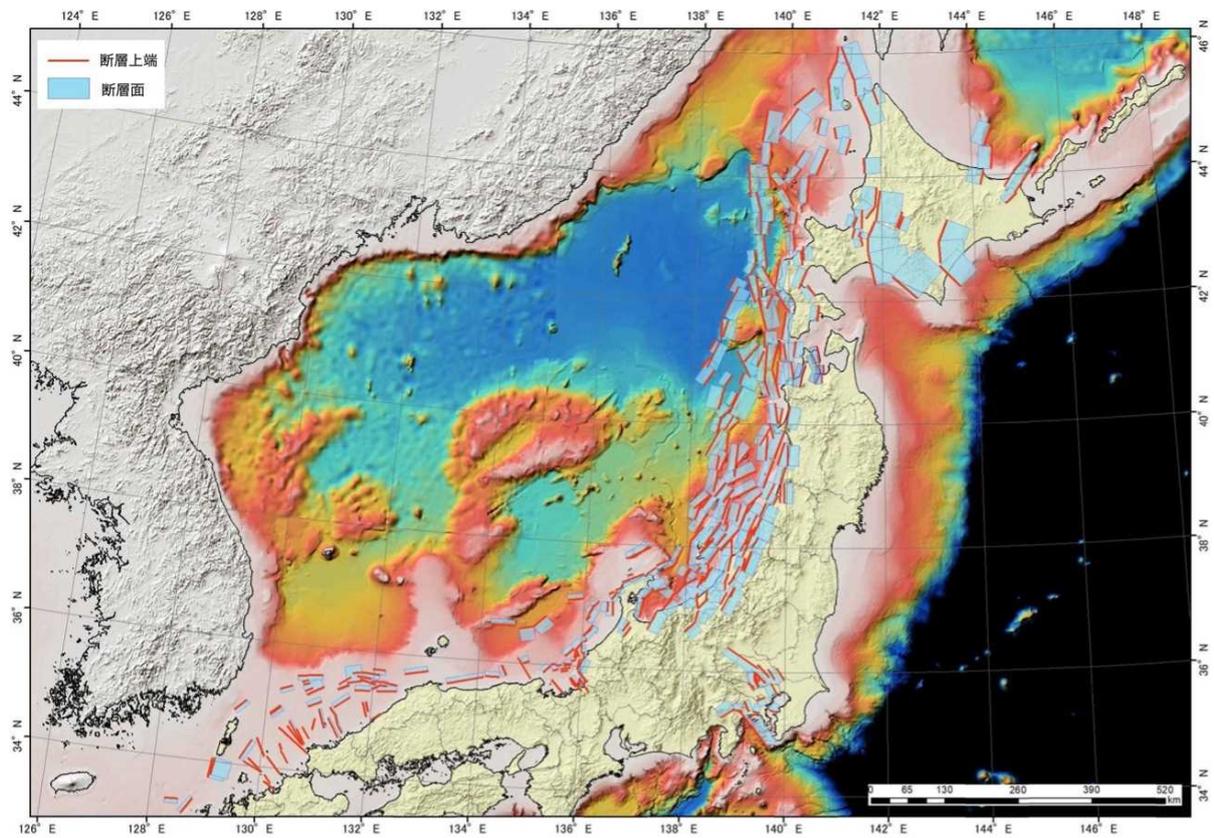


図3. 日本海及び沿岸地域における震源断層の矩形モデル(東京大学地震研究所[課題番号:ERI\_11]、佐藤・他, 2020)

関東地域は Ishiyama et al. (2013)による。

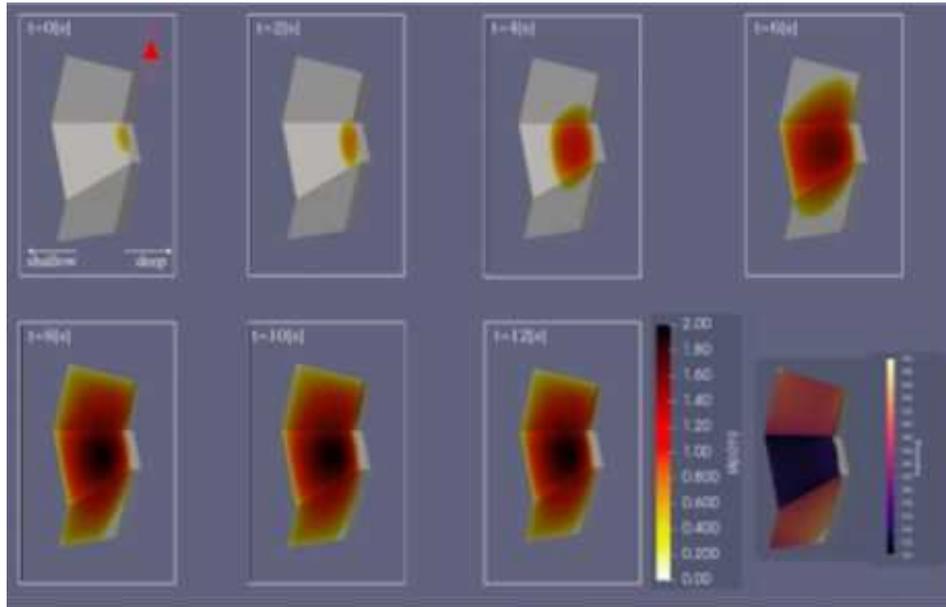
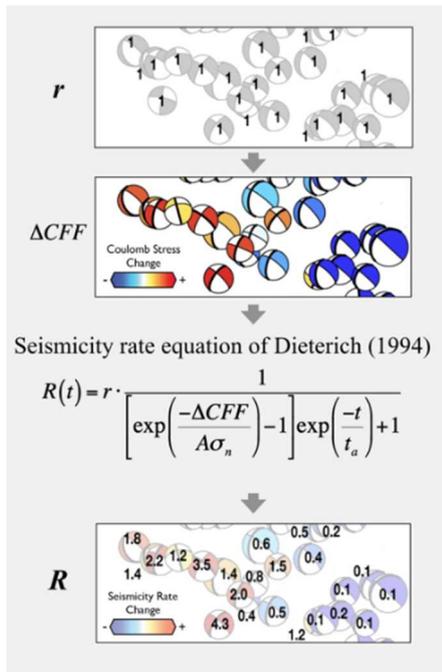


図4. 2018年胆振東部地震の動的破壊シミュレーション(東京大学理学系研究科[課題番号:UTS\_05]、Hisakawa et al., 2020)

滑り量の2秒ごとのスナップショットと滑り角の空間分布(右下)。断層傾斜が高角となっている断層深部の滑りが抑制され、断層走向が変化している中部の滑り角が変化しているが、運動学的な滑りインバージョン結果と調和的である。

(a)



(b)

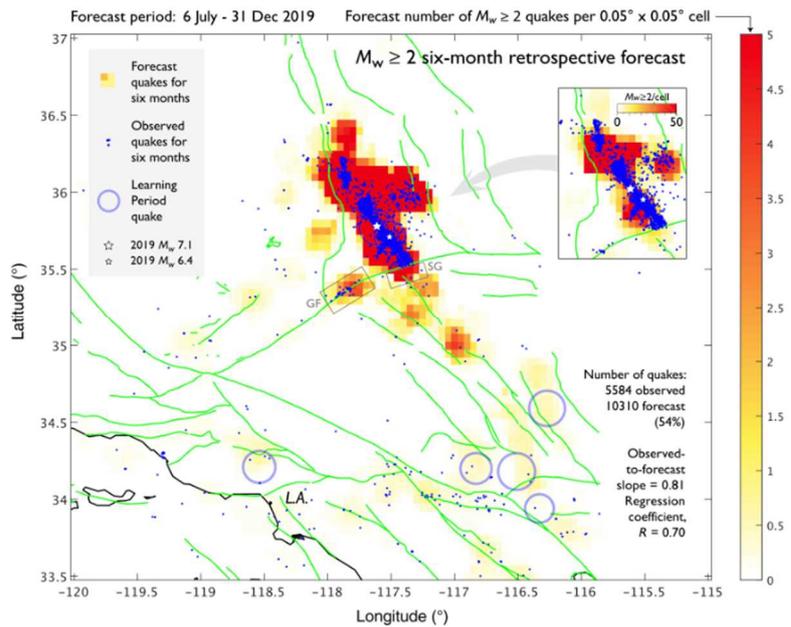


図5. 2019年リッジレスト地震に適用した応力変化—地震応答予測手法と予測結果（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI05]、Toda and Stein, 2020）

(a) 予測手法の概念図。常時活動時の個々の地震レートを基準として（1段目の  $r$ ）それぞれのメカニズム解節面へのクーロン応力変化を計算し（2段目）、Dieterich(1994)の速度および状態依存則から個々に直接レート変化 ( $R$ ) を求め、空間スムージングによって地震活動変化をマッピングする（4段目）。

(b) リッジレスト地震後6ヵ月間の予測（カラスケール）と観測された地震（青点）。予測と観測された地震の分布は概ね整合する。GFはガーロック断層帯のうち、地震活動が活発化した区間。

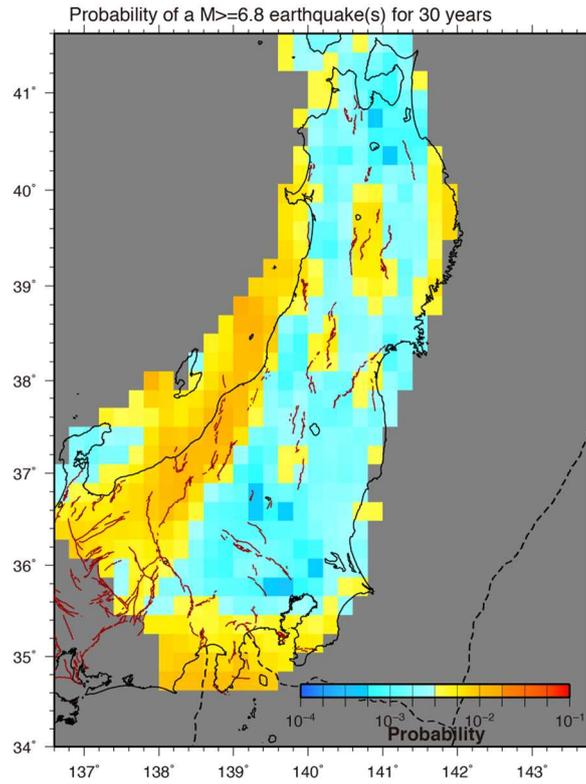


図6. 東日本のGNSSデータに基づく30年間にM6.8以上の内陸地震が発生する確率の試算例（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI05〕）

カラスケールは、 $0.2^\circ$  毎のグリッドにおける発生確率を表す。用いたGNSSデータの期間は、2005年5月-2008年4月。