

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）繰り返し地震を用いた地殻活動と地震再来特性の研究

（英文）Research on crustal deformation and earthquake recurrence characteristics using repeating earthquakes

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地震発生確率の時間更新予測

ア. 地震発生の物理モデルに基づく予測と検証

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

(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

イ. 内陸地震

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（重点研究）

ア. プレート境界巨大地震の長期予測

(2) 地震発生確率の時間更新予測

イ. 観測データに基づく経験的な予測と検証

5 分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究

(1) 南海トラフ沿いの巨大地震

(2) 首都直下地震

(3) 千島海溝沿いの巨大地震

(4) 内陸で発生する被害地震

6 観測基盤と研究推進体制の整備

(1) 観測研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) 国際共同研究・国際協力

(5) 本課題の5か年の到達目標：

繰り返し地震を用いて断層面の固着状態の時空間変化をモニタリングする手法を高度化し、短期・局所的な変動から長期・広域にわたる変化までを明らかにする。また、震源断層における地震性および非地震性すべりの階層的構造や非地震性すべりの力学的モデルの理解を深め、大地震発生確率との関係を調べる。さらに、繰り返し地震の再来特性を理解し、統計的アプローチにより繰り返し地震の発生予測手法の改良および予測を試行する。これらの研究を基に、将来発生する大地震の発生ポテンシャルの推定、さらには発生予測に役立てることを目指す。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

1. 繰り返し地震カタログの作成・公開

世界全域を対象に繰り返し地震カタログを作成し、研究に活用できるようにする。本課題では、前計画までに実施してきた繰り返し地震のカタログ生成だけではなく、任意の場所の繰り返し地震活動を迅速に把握して地震発生をモニタリングできるようなシステムを構築し、公開する体制を整える

(R8-10)。また、日本列島周辺の沈み込み境界で発生した繰り返し地震のみならず、世界全域、内陸地域等で発生した地震についても活用を進める。島嶼部地震観測空白域である伊豆鳥島での地震観測を前期計画から継続して行い、地震カタログを作成する。深層学習等を利用した新たな繰り返し地震探索手法を検討し、蓄積された観測データへの適用を行う。

2. 断層面固着状態のモニタリング

繰り返し地震カタログを用いて、沈み込むプレートの境界および内陸活断層における固着状態の時空間変化をモニタリングする。地震活動や地殻変動等の観測データとの比較検討や確率過程モデルを用いた推定手法の改良を行い、断層面におけるすべり推定をさらに高度化する。また、各地域の地震発生の特徴に応じた地域分けを行うことにより、ゆっくりすべりに伴う短期・局所的な変動から、巨大地震の発生サイクルのステージに応じた長期・広域にわたる変化までを明らかにする。さらに、繰り返し地震から推定されるプレート間非地震性すべりとスラブ内地震、上盤側プレート内地震との相互作用について検討を行う。

3. 震源階層構造および繰り返し地震発生過程の解明

繰り返し地震群の震源過程を調査し、震源断層における破壊すべりの階層的構造を調査する。特に、破壊の伝播方向と破壊の複雑性に注目した解析を行い、M5以上の中規模地震については破壊過程の細部まで解像することを目指す。また、内陸などプレート境界以外の場所も含めた様々な場所で発生する繰り返し地震について、その繰り返しの条件や、震源の特徴、地震発生サイクルの特徴を明らかにすることを目指す。

4. 地震の再来特性の解明

繰り返し地震に見られる地震の再来特性の特徴や原因を、統計的手法および数値シミュレーションにより明らかにする。統計的手法については、繰り返し地震活動の時空間変化の将来推移を予測する手法を改良して将来発生確率を評価し、発生実績との比較検証を行う。数値シミュレーションについては、観測された地震の再来特性を速度状態依存摩擦構成則に基づき再現し、想定される摩擦特性の推定することを目指す。

(7) 令和7年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1. 繰り返し地震カタログの作成・公開

日本全国の定常観測網で観測された地震波形データを蓄積し、日本列島周辺で発生した繰り返し地震活動の検出を行った。島嶼部地震観測空白域である伊豆鳥島での地震観測を継続して行った。

昨年度までに行ってきた能登半島群発地震震源域における繰り返し地震検出について、より厳しい条件を用いて再検出を試みた。波形の類似性と震源の重複度から繰り返し地震の同定を行うが、使用する観測点数や条件により検出数が大きく異なることが問題であった。本研究での系統的調査により、波形の類似性については2観測点以上でコヒーレンス値0.98以上という条件を設けることで、安定した検出ができることが明らかになった（その条件に合う地震は、90%近い割合で震源の重複度も高い）。検出された繰り返し地震（40系列）のうち38系列はdoubletであった（図1）。発生間隔は数ヶ月から1年以上のペアが多い。興味深いことに、同じ系列でもマグニチュードが0.5以上異なる繰り返し地震が発生している事例も複数明らかになった。M7.6直前には繰り返し地震は発生していないという特徴がある。

日本の地震基盤観測網のデータを用いた震源決定の効率化・高精度化を目的として、気象庁が過去に読み取った地震波到達時刻を用いて深層学習走時検出器を訓練した。Naoi et al. (2024) では、8年分610万波形を用いたPhaseNetモデルの訓練を実施したが、本年度はモデルアーキテクチャの改良と20年分2500万波形のデータを用いて訓練を行い、新モデルPhaseNeXtを開発した。作成したモデルを、1994年1月1日から1999年1月14日に九州大学、鹿児島大学、京都大学、気象庁等が収集した日向灘周辺の未公開データに適用した。1996年のデータに対しては当時気象庁カタログの約3倍の数

の震源を決めることに成功した。得られた結果からは、2024年8月に発生したM7.1の地震のすべり域に対応する領域が空白域として明瞭に見られるなど、日向灘地域の地震活動を従来より詳細に描き出すことができた。

2. 断層面固着状態のモニタリング

作成した繰り返し地震カタログを用いて、日本列島周辺の沈み込むプレートの境界および内陸活断層におけるすべりの空間分布・時間変化の特徴を調べた。

能登半島群発地震震源域で検出された繰り返し地震の多くはNクラスター内の1枚の断層面上に多く分布する。それらから推定した断層面上での平均的な非地震性すべりは3年間で約20cmであった。このすべり量から期待される地表変位は0.5cm以下であり、GNSSでは検出できない小さなすべりがあったと考えられる。

Igarashi and Kato (2021)で検出した、1989年9月から2016年2月までの間に発生した中規模相似地震カタログを使用して、千島-カムチャツカ地域におけるプレート間固着を調査した。2025年7月30日に発生したロシア、カムチャツカ半島東方沖地震(Mw8.8)のすべり分布と比較したところ、その震源地点を含むすべり域北部および最南部ではやや強い固着、南部では強く固着していた領域と一致した。一方、すべり域の南方は、平均すべり速度がプレート収束速度に近い領域となっていた。

S-netおよび深層学習を用いて、東北日本海域の震源決定を行い、精度が良い震源カタログを得た(Suzuki et al., 2025)。震源決定により、プレート境界深度35-75kmに繰り返し地震の集中域を見出した。さらにその下方のスラブ地殻内および上方の上盤でも地震活動が活発であり、沈み込むプレートからの鉛直に伸びる流体の移動経路を示していると考えられる。プレート境界においては、繰り返し地震の多発帯に相当する”前弧地震帯”では、非地震性すべりが卓越して、大地震の滑り域の拡大を規制する領域となっていると考えられる(Suzuki et al., 2025; 図2)。このような沈み込むプレートからの流体の分離と移動は、地震発生ポテンシャルの地域変化の見積もりの上で重要である。

3. 震源階層構造および繰り返し地震発生過程の解明

繰り返し地震と特定された地震群のマグニチュード変化が、破壊域および破壊過程の有意な変動を表していることを明らかにした(Yoshida & Ide, 2025; 図3)。東北地方太平洋沖地震の直後には、破壊域の拡大とすべり量の増加が顕著に見られ、その後徐々に回復する傾向が確認された。一方で、破壊開始直後の挙動には有意な違いが見られなかった。このことは、本震後の余効すべりに伴う載荷速度の変化が、破壊の開始点ではなく、開始した破壊の停止条件に影響を与えたことを示唆している。また、スラブ内地震に関して、繰り返し地震の欠如からプレート境界との発生場の相違を示した(Yoshida, 2025)。

4. 地震の再来特性の解明

階層時空間ETAS (HIST-ETAS) モデルを用いて全日本の地震活動に対する背景強度を算出し、その空間分布がM7クラス地震の震央位置と良く対応することを明らかにした。さらに、内陸部(図4)および東北日本沈み込み帯(図5)では、背景強度と繰り返し地震の活動度との間に顕著な相関が認められた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題は、繰り返し地震の解析研究を通して、将来発生する大地震の発生ポテンシャルの推定、さらには発生予測に役立て、災害の軽減に貢献することを目指している。

今年度は、基礎となる繰り返し地震カタログの作成も着実に実施し、プレート境界および内陸活断層における断層面固着状態の解析を進めた。また、沈み込むプレートからの流体移動経路を示すと考えられる地震活動を、高精度震源カタログを基に見だし、地震発生ポテンシャルの地域変化を評価する上で重要な情報を得た。繰り返し地震の震源過程の調査は、「地震発生の物理モデルに基づく予測と検証」のモデル構築への貢献に資する。海域における地震発生の予測強度(空間確率)およびGutenberg-Richter則に基づくシミュレーションは、各地の長期的な津波リスクなどの定量的評価に結びつく。

来年度以降も、繰り返し地震の再来特性の理解をさらに深め、繰り返し地震の発生予測へとつなげる予定である。

(8) 令和7年度の成果に関連の深いもので、令和7年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Hirano, S. and M. Naoi, 2025, DiallelX: a modern Fortran code for Network Cross-correlation, *Progress in Earth and Planetary Science*, 12, 31, doi:10.1186/s40645-025-00701-x, 査読有, 謝辞有

熊澤 貴雄・尾形 良彦, 2025, 日向灘沖南部の余震活動について, *地震予知連絡会会報*, 114 (9-4) 429-439, 査読無, 謝辞無

Naoi, M., K. Shimojo, and K. Tamaribuchi, 2025, PhaseNeXt: Neural phase picker trained on 20-year records to process the JMA-unified data set, submitted to *Earth, Planets and Space*, doi:10.21203/rs.3.rs-8174647/v1 (preprint), 査読有, 謝辞有

尾形良彦, 2025, 地震予測の統計地震学の進歩と課題：阪神・淡路大震災から30年, *地震予知連絡会会報*, 113 (11-9) 480-489, 査読無, 謝辞無

Ogata, Y, 2026, Seismicity insights and forecasting with Delaunay-based hierarchical models, *Earth Planet Space*, in press, doi:10.1186/s40623-025-02351-1, 査読有, 謝辞無

Suzuki, R., N. Uchida, W. Zhu, G. C. Beroza, T. Nakayama, K. Yoshida, G. Toyokuni, R. Takagi, R. Azuma and A. Hasegawa, 2025, The forearc seismic belt: A fluid pathway constraining down-dip megathrust earthquake rupture, *Science*, 389, 190-194, doi:10.1126/science.adt6389, 査読有, 謝辞有

Yoshida, K., 2025, Different Seismogenic Environments of Interplate and Intraslab Earthquakes: Re-Examination of Apparent Repeating Earthquakes, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130, 8, e2025JB031433, doi:10.1029/2025JB031433, 査読有, 謝辞無

Yoshida, K., and S. Ide, 2025, Highly Systematic Response of Seismic Rupture Patterns to Background Loading Rate: Insights From Repeating Earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 52, doi:10.1029/2025GL115207, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

平野史朗・直井誠, 2025, マッチドフィルター解析のためのオープンソースソフトウェアの性能評価, *日本地球惑星科学連合2025年大会*, SSS12-01.

五十嵐俊博, 2025, 相互相関係数の中央値から抽出した日本列島周辺の相似地震活動の特徴, *日本地震学会2025年度秋季大会*, P09-01.

五十嵐俊博・加藤愛太郎, 2025, 千島・カムチャツカ地域における相似地震活動とプレート間固着, *日本地震学会2025年度秋季大会*, P25-08.

小松真喜・中島淳一, 2025, 能登半島群発地震における繰り返し地震の時空間分布（その2）, *日本地球惑星科学連合2025年大会*, SSS12-09.

小松真喜・中島淳一, 2025, 地殻内にも繰り返し地震は存在するのか？ — 能登半島群発地震における検出, *日本地震学会2025年度秋季大会*, P08-06.

Komatsu, M., and J. Nakajima, 2025, Detection of repeating earthquakes in the Noto Peninsula swarm and their spatiotemporal characteristics, *International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes*, P1-70.

Komatsu, M., and J. Nakajima, 2025, Repeating Earthquakes in the Earthquake Swarm of the Noto Peninsula, Japan: Implications for Aseismic Slip on Crustal Faults, *AGU25*, S11C-0180.

直井誠, 2025, 気象庁一元化カタログに最適化された深層学習検測器のためのモデル改善, *日本地球惑*

星科学連合2025年大会, SCG60-P01.

直井誠・下條賢梧・溜淵功史, 2025, 日本の地震基盤観測網に最適化した深層学習走時検測器の開発, 地震のリアルタイムモニタリングと即時予測情報の活用, 地震研究所共同利用研究集会.

Naoui, M., S. Hirano, and Y. Chen, 2025, High-resolution monitoring of AE activities induced by hydraulic fracturing experiments using neural phase picking and matched filter analysis, P1-17, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2025.

尾形 良彦, 2025, 地震予測における異常現象の確率評価と実用化への課題, 日本地震学会2025年度秋季大会, S22-12.

尾形 良彦, 2025, 大地震の確率予測の展望 — 多項目予測法の活用 —, 2025年度統計関連学会連合大会, 4FPM2-01.

尾形 良彦, 2025, 階層型時空間ETAS (HIST-ETAS) モデルを用いた広域地震予測および診断解析, 日本地球惑星科学連合2025年大会, SSS12-06.

Uchida, N., R. Burgmann, 2025, 世界の繰り返し地震活動: プレート境界すべりと地震準備過程の多様性への示唆, 地震学会2025年秋季大会, S08-14.

吉田 圭佑, 2025, スラブ内とプレート境界における地震発生パターンの異なりと、繰り返し地震誤検出の可能性, 日本地球惑星科学連合2025年大会, SSS10-06.

吉田 圭佑・Huang Yihe・井出 哲, 2025, 2021年宮城沖Mw7.0地震: Mw3.7繰り返し地震からの破壊拡大, 日本地震学会2025年度秋季大会, S08-15.

Yoshida, K., and S. Ide, 2025, Systematic Seismic Rupture Responses to Background Loading: Insights from Repeating Earthquakes, IAGA/IASPEI 2025 Joint Scientific Meeting.

(9) 令和7年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

項目: ソフトウェア開発 (解析)

概要: 開発した深層学習走時検測器と、気象庁一元化震源カタログを用いて学習した重みパラメータ。

既存データベースとの関係:

調査・観測地域:

調査・観測期間:

公開状況: 公開中 (データベース・データリポジトリ・Web)

<https://github.com/mktnaoui/JMAuniPicker>

(10) 令和8年度実施計画の概要:

引き続き繰り返し地震カタログを作成し、様々な研究への活用をはかる。伊豆鳥島での地震観測を継続する。日向灘地方の観測データ整理とデータ解析を進め、より完全な地震カタログを作成する。波形相関に基づく相対震源決定を行うと共に、繰り返し地震の探索、および日向灘地方で発生した大地震と微小地震活動・繰り返し地震活動の関連性の議論を行う。繰り返し地震解析システムの公開に向け開発を進める。三陸沖など、様々な地域で発生する繰り返し地震活動を調査し、地震発生の特徴や断層面固着状態の時空間変化を調査する。Mw>7の大地震の破壊開始と、繰り返し地震の関係を調べる。繰り返し地震などに基づく、大地震の中期予測モデルを組み込み、時空間的な確率利得を定量的に評価できる統計モデルを構築する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

五十嵐 俊博 (東京大学地震研究所), 内田 直希 (東京大学地震研究所), 加藤 愛太郎 (東京大学地震研究所), 加藤 尚之 (東京大学地震研究所)

他機関との共同研究の有無: 有

吉田 圭佑 (東北大学), 山下 裕亮 (宮崎公立大学), 松島 健 (九州大学), 直井 誠 (北海道大学), 中島 淳一 (東京科学大学), 木村 尚紀 (防災科学技術研究所), 松原 誠 (防災科学技術研究

所), 有吉 慶介 (海洋研究開発機構), 八木原 寛 (鹿児島大学), 平松 良浩 (金沢大学), 大久保 寛 (東京都立大学), 金 亜伊 (横浜市立大学), 野村 俊一 (早稲田大学), 尾形 良彦 (統計数理研究所), 田中 昌之 (気象研究所), Roland Bürgmann (UC Berkeley)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等: 東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部
電話: 03-5841-5787
e-mail: yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
URL: <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名: 五十嵐俊博
所属: 東京大学地震研究所

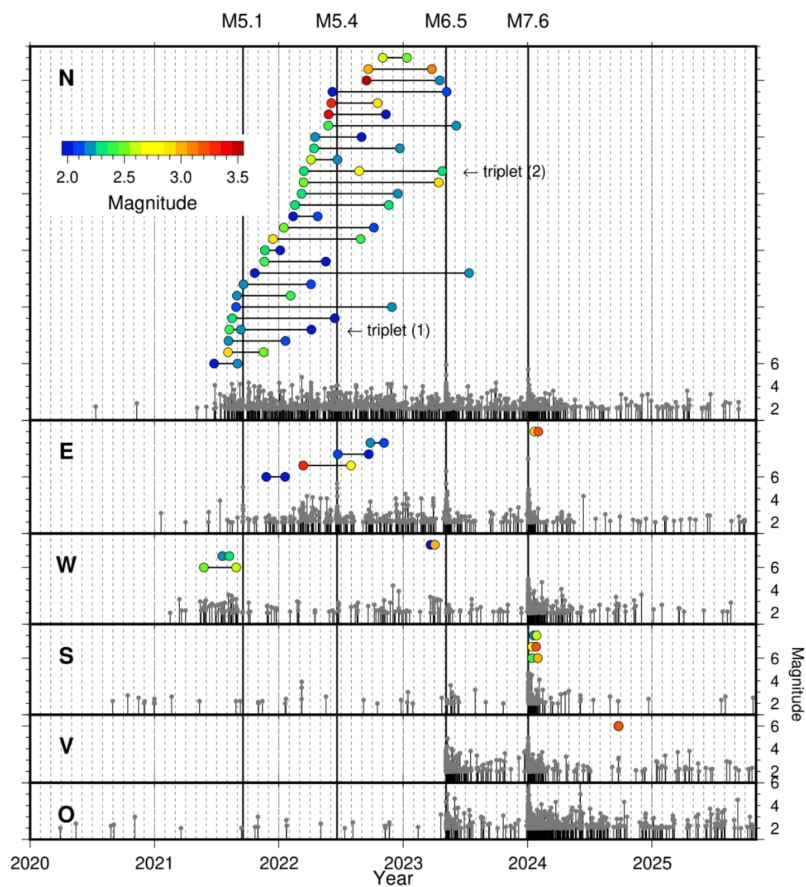


図1. 能登半島群発地震震源域の各クラスター毎の繰り返し地震の間隔とマグニチュード。線で繋がっているのが繰り返し地震であり、丸の色はマグニチュードを表す。

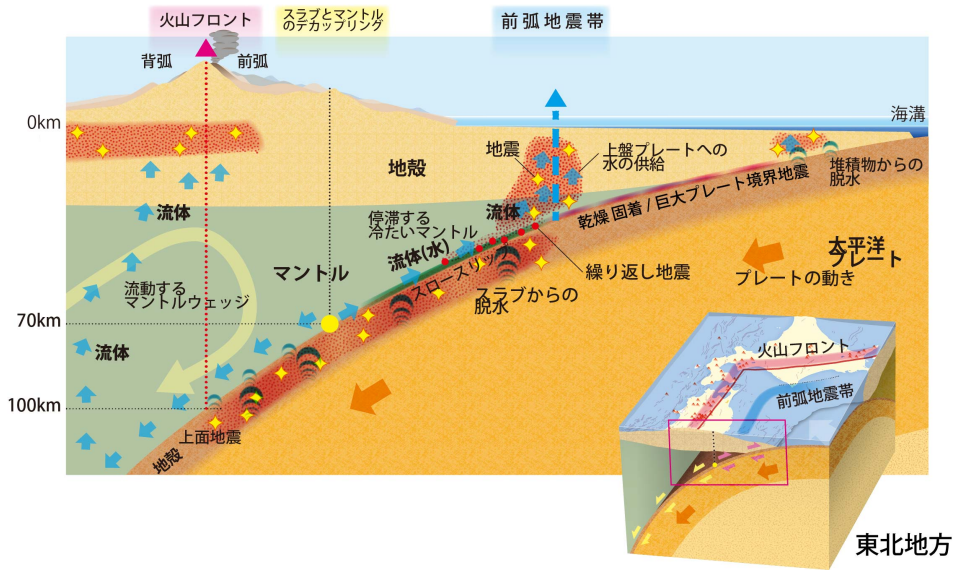


図2. 東北地方での、スラブからの水の分離と移動、地震活動の励起の模式図。

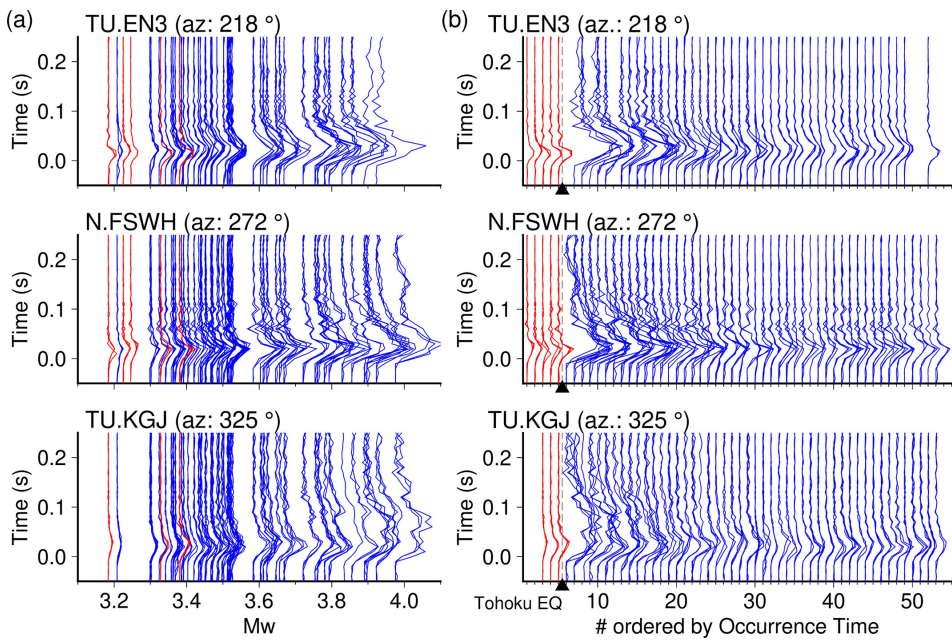


図3. 3つの異なる観測点における同一系列繰り返し地震の震源時間関数の変化。
 (a) モーメントマグニチュード (Mw) との関係。(b) 発生時刻との関係 (経時変化)。

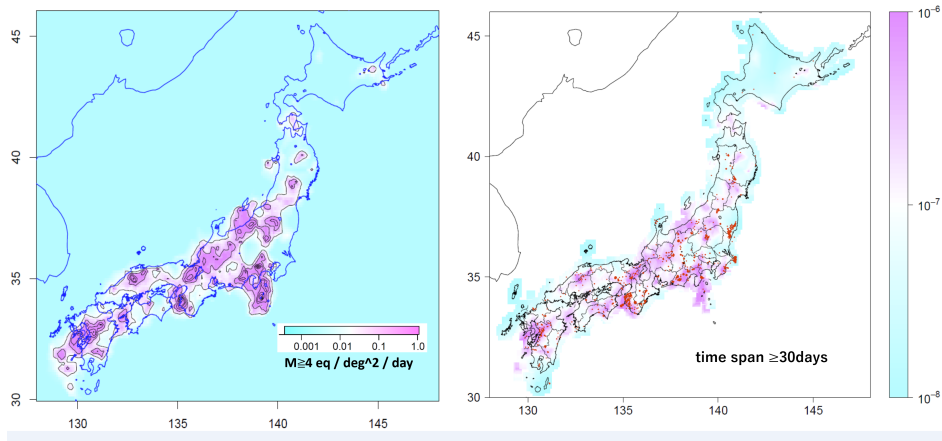


図4. 内陸地殻地震から推定した背景地震活動 (μ 値) の分布。
 ピンクはドロネー補間による μ 値、右図の赤点は：余震や群発地震などのBurst型を除く、再来間隔1か月超の繰り返し地震の震央。

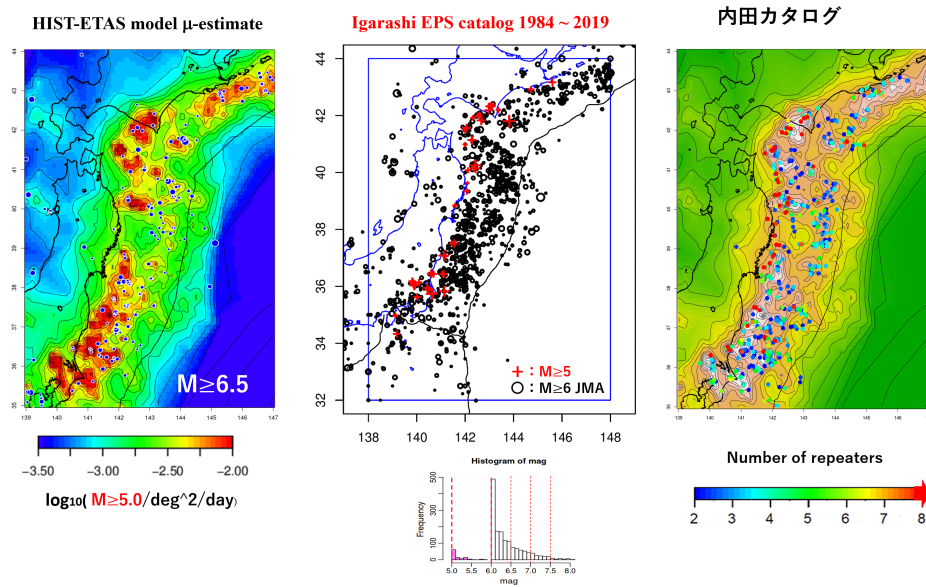


図5. 東北日本沈み込み帯における背景地震活動 (μ 値) の分布。
 左：HIST ETAS による M5 以上の背景活動率 (μ 値) と1923-2018 年の M7 以上の大地震 (青円) を μ 値上に重ね合わせ。中：中規模繰り返し地震(M \geq 5)の位置 (赤+) 右：小繰り返し地震の位置と再来回数 (円盤の色)。