

(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関しても活用を進める。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6年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

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(図1)。能登半島北東部では、2020年1月から2024年1月1日のM7.6までの間に発生したM2-4の地震を対象としてDouble-Difference法を用いて震源再決定を行った上で、波形相似性と震源域の重複度の評価により繰り返し地震を同定した。その結果、解析した地震の12.8%にあたる236個の地震を含む、102系列の繰り返し地震が見つかった。繰り返し地震は2021年5月以降に発生しており、群発地震の4つのクラスターの内、北西部に位置するクラスター(Nクラスター)で最も多かった。解析した地震数に占める繰り返し地震の割合は、日本列島直下の地殻内地震における平均と比較して高く、期間やクラスターごとに大きく差があった。

一方、2003年 Mw7.0宮城沖スラブ内地震震源域で繰り返し地震を探索した結果、明らかな繰り返し地震は見つからなかった。ただし、その直上プレート境界で多数の繰り返し地震が検出された。

島嶼部地震観測空白域である伊豆鳥島での地震観測を前期計画から継続して行った。

繰り返し地震、相似地震の検出をする上では通常、テンプレートとなる別の手法で作成された地震カタログが必要となる。そのようなカタログ作成の効率性、および品質向上のため、室内水圧破碎実験データおよび日本の定常地震観測データに対して地震波検出および走時読み取りに深層学習を用いる試みを進めた。また、デジタル波形記録を効率的に処理する機械学習モデルの訓練やアナログ画像記録解析を効率化することを目的として、生成AIを用いた波形記録作成にも取り組んだ。

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。

繰り返し地震発生域で発生する地震活動の情報を用いて、小規模な非地震性すべりが発生した可能性がある場所や期間を、カタログが入手でき次第短時間で調査可能な手法を開発した。その結果、プレート境界で発生するM5地震発生に伴うすべり速度の増加が示唆された。

能登半島北東部で発生する繰り返し地震は、幅広い繰り返し間隔を示した。また、繰り返し地震系列内の1つ目の地震に着目すると、他のいくつかの系列と近いタイミングで連続して発生する様子が見られた。各クラスターの震源断層面においてSSEが発生していた時期と対応することが示唆された。Nクラスター深部の繰り返し地震は、浅部と比べて繰り返し間隔が長い傾向があった。深部では非常に高い間隙流体圧により地震パッチ上でも非地震性すべりが発生し、繰り返し間隔が長くなった可能性がある。

宮城県北部のプレート境界で発生する規模変化がみられる繰り返し地震グループを調査し、その破壊過程やすべり域が東北沖地震発生からの時刻に従い系統的に変化していたことを明らかにした。また、2011年と2016年に茨城県北部で発生し非常によく似た地表変位を生じさせた2つのMw5.9の地震を調査し、浅部では破壊域を共有するものの深部では異なる破壊域を持つことを示した(図2)。

能登半島北東部の繰り返し地震では、気象庁マグニチュード差が1以上の繰り返し地震ペアが存在していたが、スペクトル振幅から計算されたモーメントマグニチュード差は最大でも0.9であった。一定の断層サイズを仮定した場合、この差は応力降下量が20倍程度異なることに対応する。Nクラスター内の繰り返し地震の空間的な特性を評価した結果、繰り返し地震の震源域は他の繰り返し地震を含む周囲の地震と重なっていることが多く、繰り返し地震パッチは従来解釈されてきたように孤立してはいないことがわかった。

熊野灘の孔内観測点に設置された間隙水圧計で捉えられた繰り返し浅部SSEの多様性は、断層間セグメントの相互作用のみならず、黒潮蛇行などの海洋擾乱によっても影響を受ける可能性を示した(図3)。

・「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、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、また、繰り返し地震の震源過程の調査も進展した。その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た。来年度以降、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6年度の成果に関連の深いもので、令和6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

Ariyoshi, K., A. Nagano, T. Hasegawa, T. Iinuma, M. Nakano, D. M. Saffer, H. Matsumoto, S. Yada, E. Araki, N. Takahashi, T. Hori, and S. Kodaira, 2024, A physical explanation for an unusually long-duration slow slip event in the Nankai Trough, *Tectonophys.*, 887, 230439, doi:10.1016/j.tecto.2024.230439.,査読有,謝辞無

Naoi, M. and S. Hirano, 2024, Efficient similar waveform search using short binary code obtained by deep hashing technique, *Geophys. J. Int.*, 237, 604–621, doi:10.1093/gji/ggae061 (preprint ver.: arXiv:2310.02653).,査読有,謝辞有

Naoi, M., K. Tamaribuchi, K. Shimojo, S. Katoh, and S. Ohyanagi, 2024, Neural phase picker trained on the Japan Meteorological Agency unified earthquake catalog, *Earth Planet Space*, 76, 150, doi:10.1186/s40623-024-02091-8.,査読有,謝辞有

Yoshida, K., Y. Fukushima, and Y. Kaneko, 2025, Near-Field Imaging of Near-Identical Mw5.9 Earthquakes in the Crust of Ibaraki, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, accepted.,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

- 有吉慶介・永野 憲・長谷川拓也・飯沼卓史・中野 優・Saffer Demian・松本浩幸・矢田修一郎・荒木英一郎・高橋成実・堀 高峰・小平秀一, 2024, 南海トラフで観測された異常に継続時間の長いスロースリップイベントの物理的解釈、日本地震学会2024年秋季大会, S08-16.
- Igarashi, T., 2024, Characteristics of b-values in Areas with Similar Earthquakes in Japan, American Geophysical Union Fall Meeting, T21F-3394.
- 五十嵐俊博, 2024, 小繰り返し地震発生域における潜在的小規模非地震性すべりの検出, 日本地震学会2024年秋季大会, S09P-17.
- 小松真喜・中島淳一, 2024, 能登半島群発地震における繰り返し地震の時空間分布, 日本地球惑星科学連合2024年大会, U15-P16.
- 小松真喜・中島淳一, 2024, 能登半島群発地震における繰り返し地震分布の時空間的特徴, 日本地震学会2024年度秋季大会, S08-14.
- 直井 誠・平野史朗・陳 友晴, 2024, 深層学習とMatched Filter analysisによる水圧破碎に伴う微小破壊活動の解析, 日本地震学会2024年秋季大会, S08-31.
- 直井 誠・溜渕功史・大柳修慧・加藤慎也, 2024, 一元化震源データによる深層学習検出器の再学習, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SCG50-02.
- 直井 誠・溜渕功史・下條賢悟・大柳修慧・加藤慎也, 2024, 気象庁一元化震源カタログを元にしたPhaseNetの再学習, 2024年度第2回北海道大学地震火山センター談話会.
- Uchida, N., R. Suzuki, W. Zhu, G. Beroza, T. Nakayama, G. Toyokuni, R. Takagi, R. Azuma, K. Yoshida, A. Hasegawa, 2024, A clearer view of seismicity offshore NE Japan through deep-learning-based analysis of S-net data: evidence for the role of forearc fluids in interplate coupling, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SCG40-03.
- 吉田圭佑, 2024, Intersource-Distance Dependence of Seismic Waveform Similarity and Validity of Repeating Earthquake Detection, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SCG40-P23.
- 吉田圭佑, 2024, 繰り返し地震の震源過程の解像, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SSS05-04.
- Yoshida, K. and S. Ide, 2024, Initial Rupture Momentum Diversify Final Size in Earthquake Cycles, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024.
- Yoshida, K. and S. Ide, 2024, Relationship between Final Size Diversity and Initial Rupture Process in Earthquake Cycles, EARTHQUAKES: nucleation, triggering, rupture, and relationships to aseismic processes – 4th edition.

(9) 令和6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：

(10) 令和7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。生成AIによるデジタル・アナログ記録作成や、地震波検出・検出技術を改良し、類似波形探索のもととなる地震カタログ作成技術の向上に取り組む。繰り返し地震カタログを用いて、沈み込むプレートおよび内陸活断層における固着状態の時空間変化を調査する。様々な地域で発生する群発地震に対して繰り返し地震の解析を行い、アスペリティ分布や繰り返し間隔、割合に関する特徴等を詳細に調べる。地域ごとに比較を行い、流体が繰り返し地震の発生に与える影響について理解を深めることを目指す。繰り返し地震の破壊域サイズと規模の関係を系統的に推定する。また、繰り返し地震の規模変化の要因を明らかにする。これらの解析過程において、内陸断層における繰り返し地震の発生の真偽を明らかにする。

(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）,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

内田 直希（東北大学）,吉田 圭佑（東北大学）,山下 裕亮（京都大学防災研究所）,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

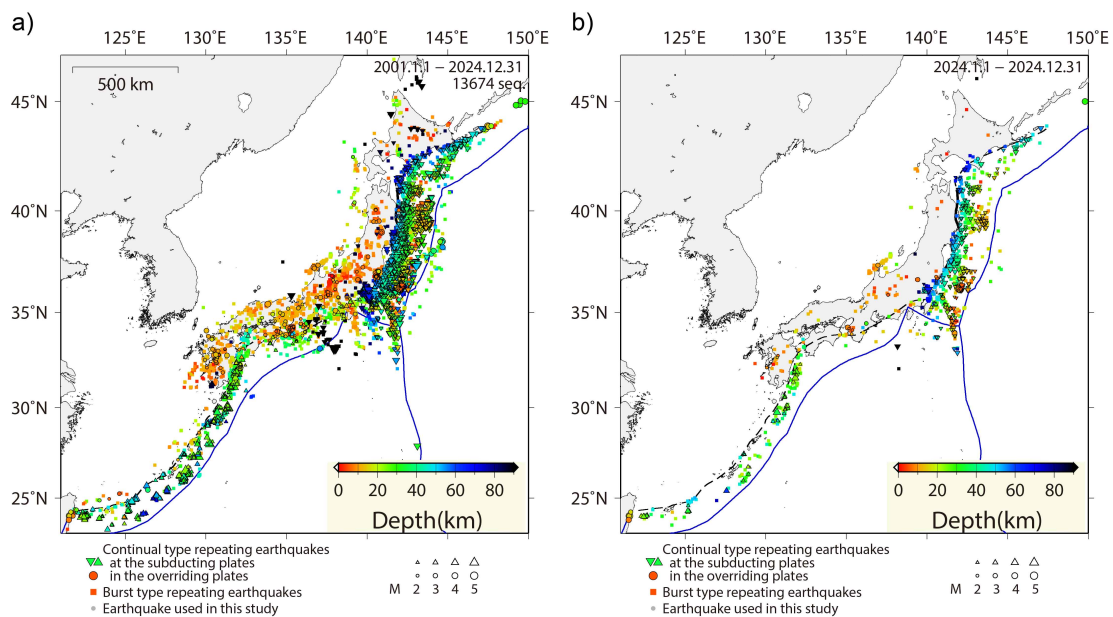


図1. 日本列島周辺で発生した小繰り返し地震の空間分布。

(a) 2001年1月～2024年12月。(b) 2024年1月～2024年12月。

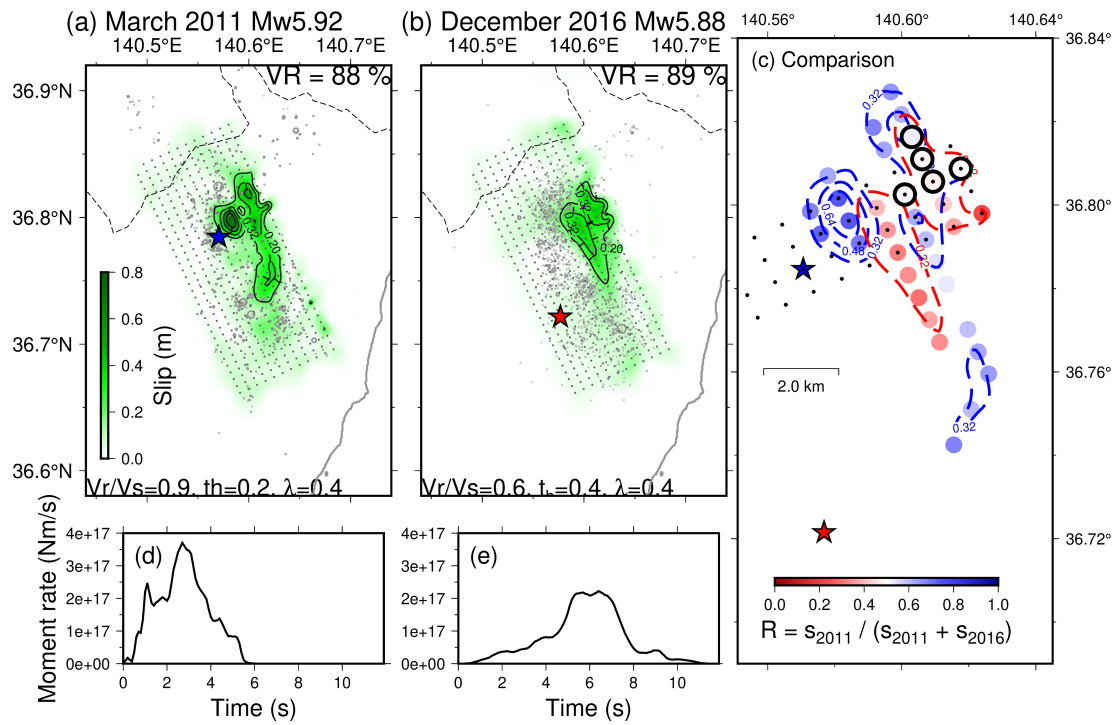


図2. 近地震波形とInSARデータのジョイント・インバージョンにより得られた茨城県北部で発生した地震の地震時すべり分布 (Yoshida et al., 2025)。

(a) 2011年のMw5.9地震の地震時すべり分布。(b) 2016年 Mw5.9地震の地震時すべり分布。等高線はすべり量を、星印は震源位置を示す。灰色の円は1週間以内の余震。(c) 2つのMw5.9地震のすべり域の比較。青と赤はそれぞれ2011年と2016年の地震を表す。カラーの円は、 $s_{2011}/(s_{2011}+s_{2016})$ の比を表す。 s_{2011} と s_{2016} は、それぞれ2011年と2016年の地震時すべり量を示す(カラスケール参照)。(d) 2011年、(e) 2016年の地震のモーメントレート関数。

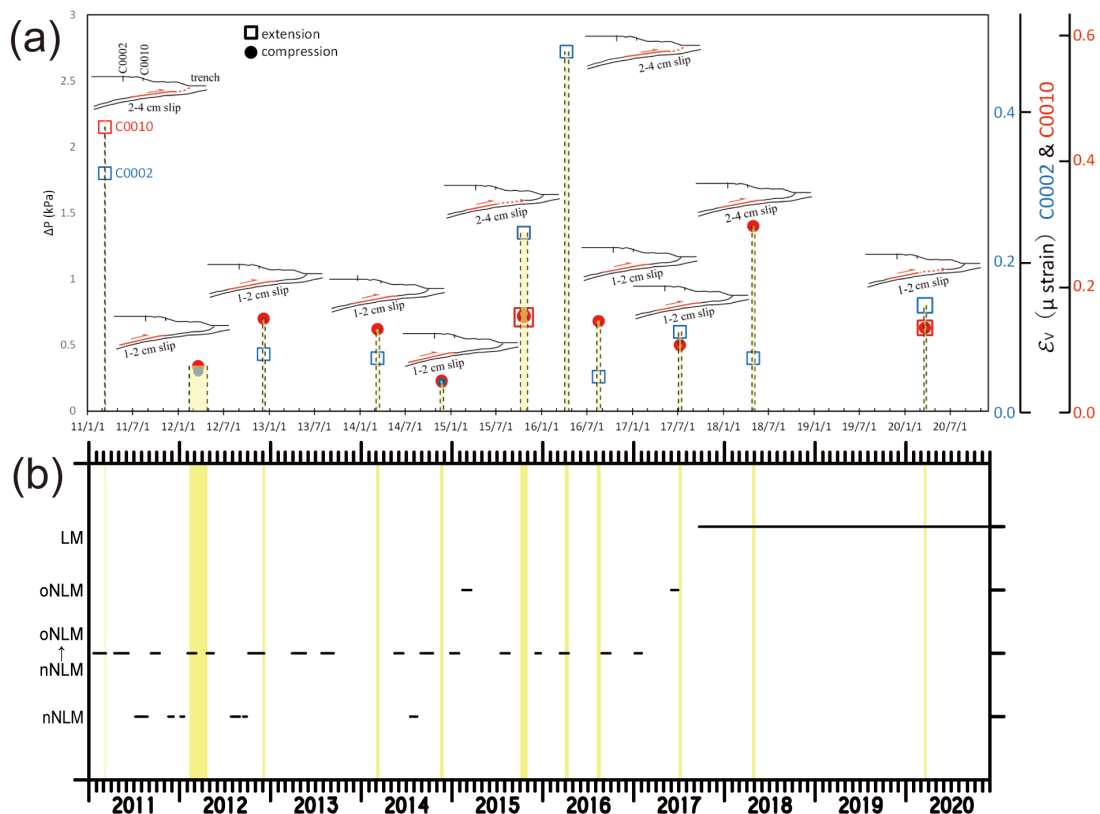


図3. 熊野灘の孔内観測点において観測された繰り返し浅部SSEと熊野灘における黒潮蛇行の発生履歴の概要 (Ariyoshi et al., 2024)。

(a) 熊野灘の孔内に設置された間隙圧で捉えられたSSE発生時の間隙水圧変化。(b) 熊野灘における黒潮蛇行の発生履歴とSSE継続期間（黄色）との関係。