

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

繰り返し地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング

(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

(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

ア. 地震発生機構の解明

イ. 地震断層滑りのモデル化

(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

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 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間・空間的变化をモニタリングする手法を高精度化し、地殻活動の理解を進め、地震発生予測の高度化に資する。そのため、プレート境界および内陸地域で発生する繰り返し地震のカタログを整備する。さらに、繰り返し地震の再来特性を理解し、大地震の発生モデルの構築に寄与することで、将来発生する大地震の地震像およびその変動範囲の推定に役立てることを目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1. 繰り返し地震カタログの更新

前計画で作成した日本の小～中規模の繰り返し地震カタログをアップデートし繰り返し地震活動のモニタリングを行う(2019-2023)。地震の震源再決定、発震機構解の推定および地震波速度構造の時間変化の推定を行い、同一場所での地震の再来を検証する(2020-2023)。また、日本のHi-net以前の大学観測データやS-netやDONET等の新規データの活用も検討し、より長期間および小規模の繰り返し地震の活動を把握する(2020-2023)。また、世界の繰り返し地震活動についても調べ、テクトニクスの違いによる繰り返し地震の特徴の共通点・相違点についての知見を新たに得る(2020-2022)。

2. 断層面固着状態の推定

沈み込むプレート境界および内陸活断層における固着状態の時間・空間的变化をモニタリングする手法を高精度化する。特に、すべりレートの推定に用いるスケーリング則の検討を行う(2019-2023)。震源過程解析や地震波形のシミュレーション、繰り返し地震以外の地震等を用い、すべり推定手法の検討を行う(2019-2023)。さらに、繰り返し地震と通常地震やスロー地震の関係を調査する(2019-2020)。

また、南アフリカ大深度金鉱山において見つかっている、破壊サイズ数十mmという超微小繰り返し地震についても解析を行う(2019-2023)。同観測では14ヶ月の期間に最大50回もの繰り返しを確認されており、活動パターンや震源特性の時間変化を短い時間で検出できると期待される。

3. 地震再来特性の解明

繰り返し地震に見られる再来間隔・規模の揺らぎの特徴や原因を、地震の震源過程解析、統計解析および数値シミュレーションにより明らかにする(2019-2023)。また、中小の繰り返し地震の特性を解明することが大地震の地震像の推定に役立つかどうか調べるために、規模の異なる繰り返し地震の性質を比較検討する(2022-2023)。

4. 重点地域における地震観測

島嶼部地震観測空白域での地震カタログの構築および沿岸・内陸地域において小規模繰り返し地震群発生の特徴を詳細に調べるため、小笠原諸島伊豆鳥島・房総半島・釜石地域など重要な既存の臨時観測点を維持するとともに内陸の地震活動をターゲットとした調査観測も行う(2019-2023)。伊豆鳥島の観測では、この地域の繰り返し地震は、数年程度という比較的長い発生間隔を持つと期待されるため、今期の観測の継続・定期的な保守によりこの地域の繰り返し地震の有無が調査できる。釜石地域においては、計画期間中にM5程度の地震の発生が予測される。この地震の近傍に構築したオフライン観測の継続により、微小地震活動を通じM5程度繰り返し地震の1サイクルにおける準備過程を調べる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

[繰り返し地震カタログの更新]

・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。その結果、スラブ内地震の余震中にも繰り返し地震活動が確認された。そこで、スラブ内地震の影響を避けるよう繰り返し地震とその周辺で発生する地震活動を選択使用し、プレート間非地震性すべりの時空間変化の推定を試みた。その結果、2021年以降に宮城県沖・福島県沖で発生したいずれのスラブ内大地震発生後においてもプレート間非地震性すべりの加速が見られた。スラブ内大地震の発生によりプレート間の応力が増加してプレート間非地震性すべりが生じ、また、プレート間のすべりによる応力増加がスラブ内のダウンディップコンプレッション型地震の発生を促した可能性を示唆している。

・東北沖において、ケーブル式の海底地震観測網であるS-netの活用し、小さな地震まで繰り返し地震の解析に用いるため、深層学習モデル(PhaseNet)による地震の検出を行い、気象庁によるカタログの1.6-6倍程度の地震を同定することができた(Uchida et al. AGU, 2023)。

[断層面固着状態の推定]

・地震波形の相関データを用いて東北日本沖合で発生した2003年から2023年の地震の震源を再決定し、繰り返し地震の検出を行った。断層サイズ相当離れた距離で繰り返し地震が集中する繰り返し地震の集中域が多く存在することが明らかになった。それら繰り返し地震の震源時間関数を推定し、東

北沖地震後の規模変化の際には継続時間と振幅の双方が変化していたことを示した。

・2023年3月に熊野灘で浅部SSEが発生したことを海底のボアホール観測から明らかにした。海洋研究開発機構では、間隙圧変化から海底地殻変動による体積歪変化をナノスケールで抽出する手法を確立し、今回のSSEは発生から1日後に検出することが可能となった。

[地震再来特性の解明]

・茨城県北部地域で2011年と2016年に発生し、地殻変動データ等から繰り返し地震と考えられていたMw5.8地震が、実際には異なる領域を破壊した地震であったことを波形インバージョンから示した(吉田・福島, JpGU, 2023)。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

[繰り返し地震カタログの更新]

・計画期間全体を通して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、日本列島周辺及び世界で発生した繰り返し地震活動の検出を行った。得られた繰り返し地震のうち、長期的に活動が継続する地震群の多くは、沈み込むプレートの境界で発生している一方、地殻浅部で発生している地震群の多くは、バースト的な活動を示していた。また、日本の内陸域においても繰り返し地震の抽出を行い、繰り返し地震の可能性のある複数の地殻内地震群を発見した。

・波形相関を用いた類似波形探索は、ノイズに埋もれた微小なイベントの抽出を可能とし、地震活動解析において重要な役割を果たしているが、計算コストが大きく大規模なデータセットへの適用は簡単ではない。そこで、深層学習に基づくカタログ作成手法、及び近似近傍探索技術を応用した高速類似波形探索手法の検討を行った。類似波形探索手法においては、既存手法であるFAST(Yoon et al. 2015)のテストを行うとともに、深層Hashing技術を利用することで、波形の情報をよりコンパクトなバイナリコードに圧縮し、FAST法が抱えていたメモリ消費が大きいという問題を解決することができた。

[断層面固着状態の推定]

・作成した繰り返し地震カタログを用いて、日本列島周辺及び世界の沈み込み帯におけるすべりの空間分布・時間変化の特徴を調べた。その結果、プレート境界型巨大地震発生サイクルにおいてプレート間すべり速度が長期的に変化する傾向を明らかにできた。すべり速度は地震発生直後に急激に増加し、その後10年程度かけて徐々に減少する一方、地震発生から30年以上経過すると徐々に増加していく傾向が見られる。これらは余効すべりの発生及び応力レベルの上昇と関連していると示唆される。さらに、東北地方太平洋沖地震発生後のすべり状況変化について調査を進めたところ、宮城県北部では現在も余効すべりが継続している一方、その他の地域では地震発生後数年の間にほぼ収束したこと、2021年以降に発生した大地震発生に伴い小規模なプレート間非地震性すべりが発生したことを確認した。

・Brownian Passage Time (BPT) 分布更新過程から拡張した繰り返し地震群に対する時空間点過程モデルを用いて、1993年7月から2016年8月までの東日本太平洋プレート沈み込み帯におけるプレート境界上の準静的滑りの時空間的变化をスプライン関数により推定した。特に、2011年東北地方太平洋沖地震後の滑り速度の時空間変化から、2016年までに東北沖の滑り速度がほぼ2010年以前の水準に戻っていく様子や、2012年と2015年の二度にわたり三陸沖の同じ領域においてM6台の地震を伴う滑り加速が発生した様子が捉えられた。

・S-net観測データを用いて、東日本太平洋プレート境界地震の破壊伝播方向を網羅的に推定した。その結果updip方向に破壊が進展するケースが多いことを明らかにした。また、2021年3月に宮城沖で発生したMw7.0地震について、Mw5-6の準繰り返し地震から破壊が開始したことを示した。このことは、地震性滑りの階層性および規模の大きな地震の開始の仕方について重要な知見である。さらに、2015年に宮城沖で発生したMw6.8地震が、それまでMw6.0-6.3の地震を生じさせていた地震パッチと隣接する領域による連動破壊であったことを示した。

・トルコアナトリア断層での繰り返し地震分布を推定し、過去の大地震の破壊域の端に分布していること、繰り返し地震の積算すべりから一部では、プレートの相対運動速度に近い速度で非地震的に変位していることを明らかにした(図2、Uchida et al., 2019)。

[地震再来特性の解明]

・階層ベイズ型時空間ETAS モデルによる東北沖地域の常時地震活動度 (1926-1995: $M \geq 5$) のpatternは選定期間 (1926-2012: $M \geq 5$) でも不変で、推定期間外の大地震の震央(centroid epicenter) や「繰り返し地震」の震央との良好な対応を示した。また日本内陸部の常時地震活動度と内陸部地殻 (上盤側プレート) 内の「繰り返し地震」 (五十嵐2019 地震学会) で大きめの地震直後のもの (バースト型) を除いた非バースト型の震央分布と階層ベイズ時空間ETAS モデルによる日本内陸部の常時地震活動度 (1926 1995: $M \geq 4$) との良好な対応を見出した。

・これまでに開発した小～中規模の繰り返し地震活動に対する非定常更新過程モデルを拡張し、相対的な応力蓄積率の時空間変化を時間域の自然3次スプライン関数と空間域の薄板スプライン関数とのテンソル積表現により推定した上で、その将来推移を短期的に予測して繰り返し地震の将来発生確率を評価する手法を開発した。提案手法を東北地方太平洋沖に存在する小～中規模の繰り返し地震群の2014～2020年の発生データへと適用し、2020年中の四半期毎の繰り返し地震発生確率を評価した上で発生実績との比較検証を行った結果、ポアソン過程に比べて十分に高い予測性能が示された。

・大地震後の余震誘発により発生間隔が急激に変化する中小規模の繰り返し地震に対する非定常更新過程を提案した(野村・田中, 2021)。提案モデルでは、上に述べた非定常更新過程の相対的な蓄積率の推移を、定数と大地震後の余震誘発効果の和で表現しており、将来の蓄積率の推移を予測することで、大地震後の余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の将来予測が可能となる。提案手法を東北地方太平洋沖に存在する中規模の繰り返し地震群の2019年までの発生データへと適用し、2011年東北地方太平洋沖地震以降の余震発生頻度の時間推移を大森・宇津の法則に従って推定および予測した上で、将来の繰り返し地震の発生確率の評価を与えた

・相似地震の揺らぎの要因の一つである余効すべりの伝播現象について、伝播速度と摩擦特性との関係式を導出することに成功した。これにより、大規模な地震が起きてから非相似地震が発生するまでの時間差から摩擦特性を絞り込むことが期待される

[重点地域における地震観測]

2002年から継続している伊豆鳥島における地震観測 (2Hz 上下1成分) を継続した。2015年からは、新衛星携帯電話による3成分 (1Hz 上下動 + 2成分傾斜計) の地震観測システムを増設し、必要日時のデータをリモートで回収可能となっている。令和元年度は、新システムの連続地震波形データを現地回収するとともに、旧システムの2Hz地震計が故障したため交換作業を行った。山階島研職員に依頼して連続データが含まれているCFカードの回収を複数回行った。電源としているソーラーパネルの枠の腐食が激しく、近い将来本格的な補修が必要になっている。鳥島近海では、2023年10月に特異な津波を発生させたイベントが起きたが、トリガ形式の旧システムにおいて、この地震波形を捉えることができた。ソースに近い貴重なデータとして活用できる可能性がある。

・釜石市周辺では2018年より岩手県釜石市周辺に13点の臨時観測点を設置し、小さな地震まで含めた地震活動を調査してきた (図3)。地震計は主に固有周期2Hzの地震計を用い、バッテリー (一部ソーラーパネル併用) による電源を用い低消費電力型のデータロガーでCFカードに収録した (図3)。データの回収およびバッテリーの交換は、東北大学遠野地震観測所から3ヶ月に1回程度の頻度で行った (図3)。この観測網に関して東北沖地震から10年が経ち十分なデータが得られたことから撤収を行なった。観測網の効果を調べるために、2018年8月1日から10日の10日間について、臨時観測点のデータ使用前後の釜石沖地震周辺の地震の震源分布を比較した。鈴木(2022)が東北地方の地震波形データを用いて作成した深層学習モデルを用い、P波・S波の到着時刻を自動で読み取った。この深層学習モデルは、Zhan and Beroza (2019)により開発されたPhaseNetというプログラムについて、東北地方の地震データ約90万個を学習させたものである。その後REAL (Zhang et al., 2019)と呼ばれるプログラ

ムで、地震ごとに読み取り値をまとめ、さらにWINと呼ばれるプログラム (Hirata and Matsu'ura, 1987)で震源の決定を行った。2018年8月時点で収録を開始していた6点の観測点を使用した場合とそうでない場合を比較すると、およそ1.7倍の個数の地震が検知できるようになった

・「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

・繰り返し地震のモニタリングを通して、地震の発生サイクルにおける断層面のすべり・固着状態の短期・局所的な変動から長期・広域にわたる変化を明らかにできた。地震の再来特性の調査および断層面固着状態の推定のさらなる高精度化により、将来発生する大地震の発生ポテンシャルや発生予測につながる事が期待できる。

・高精度震源再決定に基づき、大量の繰り返し地震を検出することが可能なことを示し、プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測のための基礎データ構築に貢献した。宮城県気仙沼沖において、今後も Mw6.3規模の地震が頻発する可能性が高いことを示した。

・本課題の中で開発した深層Hash法に基づく類似波形探索技術は、日本の定常観測データやDASなどの大規模データセットからより良い地震カタログを作成することに貢献すると期待できる。計算コストの優位性は明確に示せたものの、生成可能なカタログは、波形相関を用いる手法に及ばないことも明らかになっており、訓練データや損失関数を修正することで、この課題の解決に取り組みたい。また、アナログ波形記録から類似波形を探索することにも応用できる可能性があり、それらからの繰り返し地震探索等を通じて、プレート境界挙動の解明に貢献できると期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5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

Makoto Naoi and Shiro Hirano, Efficient similar waveform search using short binary code obtained by deep hashing technique, Geophys. J. Int., 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

直井誠, 平野史朗, 2023, 深層Hashingによる効率的な類似波形探索, 2023年度 人工知能学会全国大会, 1L3-OS-17-02

直井誠, 平野史朗, 2023, 深層Hashingによる類似波形を持つイベントの効率的探索, 地球惑星連合大会, SCG55-05

Nomura, S., M. Tanaka, 2023, Forecasting repeating earthquakes with a nonstationary renewal process, 27th APRIA 2023 Annual Conference

吉田 圭佑, 2023, Moment-rate functions of repeating earthquakes of varying magnitude and surrounding earthquake distribution, 日本地球惑星科学連合2023年大会

吉田 圭佑, 福島 洋, 2023, Possibility of shallow repeating aseismic slip associated with the 2011 Mw5.8 and 2016 Mw5.9 crustal earthquakes in northern Ibaraki Prefecture, Japan, 日本地球惑星科学連合2023年大会

吉田 圭佑, 松本 圭晶, 織茂 雅希, 2023, Double-difference法による大量地震の効率的な震源再決定と高精度震源分布のリアルタイム・モニタリング, 日本地球惑星科学連合2023年大会

Naoki Uchida, Rintaro Suzuki, Weiqiang Zhu, Gregory C Beroza, Takashi Nakayama, Genti Toyokuni, Ryota Takagi, Ryosuke Azuma, Keisuke Yoshida, Akira Hasegawa, 2023, Offshore microseismicity in NE Japan constrained by S-net and PhaseNet: insights on the forearc circulation of fluids and interplate coupling, 2023 AGU Fall Meeting, S43A-03

(10) 令和5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：地震：地震：短周期地震観測

概要：テスト

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：宮城県仙台市八木山

調査・観測期間：2021// - 2024//

公開状況：

(11) 次期計画における課題名：

繰り返し地震を用いた地殻活動と地震再来特性の研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

内田直希（東北大学）,松澤暢（東北大学）,吉田圭佑（東北大学）

他機関との共同研究の有無：有

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）,前田拓人（弘前大学）,直井誠（京都大学防災研究所）,山下裕亮（京都大学防災研究所）,松島健（九州大学）,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）,鹿児島大学,金沢大学,横浜市立大学,首都大学東京,統計数理研究所,気象研究所,UC Berkeley,早稲田大学の研究者とも連携して実施

(13) 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：東北大学大学院理学研究科

電話：022-225-1950

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：内田直希

所属：東北大学理学研究科・東京大学地震研究所