

## (1) 実施機関名：

立命館大学

## (2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）大規模地震に先行する微小繰り返し地震と大規模地震をともなわない微小繰り返し地震の特徴抽出

（英文）Characteristics of micro-earthquakes followed and not followed by large 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

イ. 観測データに基づく経験的な予測と検証

## (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

イ. 内陸地震

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

## (5) 本課題の5か年の到達目標：

自然地震における前震活動の存在は、地震計によるリモート・センシングが可能な現象であり、地下深部における地震発生の準備過程の様子をうかがい知ることができ、短期的な地震発生予測のための情報として期待されている。10年ほど前から、大規模地震に先行する微小繰り返し前震の例が国内外で多く報告されるようになった。これらの研究では、大規模地震に先行して発生したことが分かっているカタログ掲載済みの小地震の波形記録をテンプレートとしてよく似た波形を連続波形記録から探索することによって検出されてきた。この手法の場合、大規模地震とは無関係の微小繰り返し地震の探索は、テンプレートの設定が難しく、時間的にも空間的にも網羅的に調べられている例はほぼない。微小繰り返し前震を地震発生予測に活かすためには、微小繰り返し前震の発生頻度、発生様式、波形から得られるイベントの特徴（見かけ応力、応力降下量といったイベントに付随するパラメタの特徴）などを明らかにするだけでなく、大規模地震をともなわない微小繰り返し地震に対しても同様の特徴を明らかにする必要がある。

大規模地震の先行現象としての繰り返し微小前震を模擬試験で実現するにあたり、断層面上、断層端、断層延長でどのような微小破壊活動がみられるかを明らかにすることは重要である。しかし、岩石破壊試験を実施する際に試料全体が破壊してしまうと、断層（破壊面）端の情報を得ることは困難であるため、断層端を再現できる試料作製技術の開発が必要となる。

本課題では、室内実験と自然地震波形記録の解析を通じて、この問題に取り組む。また、これを再現できるようにするために、テンプレートを置く場合、置かない場合それぞれに適用可能な類似波形探索の高速アルゴリズムの開発、実装をおこなう。

## (6) 本課題の5か年計画の概要：

【類似波形探索アルゴリズムの開発】類似波形探索については、テンプレートを設定せず、あらゆる

組み合わせから探索する場合には、飛躍的な高速化が必須となる。そこで、現行計画時に改善を重ねたHashingによる探索技術を更に発展させ、深層学習を用いたHashing手法を中心とした高速類似波形探索技術の開発（R6-R7年度）、及び地震波・弾性波記録への適用をおこなう（R7-R9年度）。この手法は、従来の相互相関を用いた手法に比して、1000倍以上の時間短縮につながり、数年間レベルでの総当たり探索が現実的な時間で実施できるようになる。また、このアルゴリズムによる波形探索能力と従来の相互相関関数を利用した波形探索能力を比較する（R6-R8年度）。

【自然地震の波形記録の解析】第二期期間中に開発された既知の微小地震記録との類似波形を探索する高速アルゴリズムを適用し、ある地域（能登地域、京滋地区、阪神地区など）の数年間の定常観測点の連続記録を使って時空間的にクラスタ化している微小地震活動を検出し、それがどれくらいの頻度で存在するかを調査する（R6-R8年度）。これに加え、上記の本計画で開発するアルゴリズムを適用し（R7-R9年度）、両結果の比較をおこなう。検出された活動について、その発生頻度、発生様式、波形から得られるイベントの特徴（見かけ応力、応力降下量といったイベントに付随するパラメタの特徴）などを調べる（R8-R10年度）。すでに知られている、あるいは新たに探索する大地震に先行する微小繰り返し前震の活動と比較し、発生頻度、発生様式、波形から得られるイベントの特徴や、イベントの時空間的距離の分布を調査する（R9-R10年度）。比較を通じて、（分類が可能であればタイプごとの）クラスタ的な微小繰り返し地震活動と大規模地震発生との関係を明らかにする（R10年度）。

【室内実験】断層端部が完全に固着している（インタクト試料の内部に弱面が存在）模擬試料を作成し（R6-R7年度）、この試料を用いた圧縮破壊試験を実施し、AE（アコースティック・エミッション；微小破壊によって放射される弾性波）の連続計測をおこなう（R6-R8年度）。収録されたAEの波形記録について上記と同様の解析をおこない、弱面延長や弱面でのクラスタ的なAE活動（最終破壊に先行するものは大規模地震の繰り返し前震に相当）、弱面と関係ないクラスタ的なAE活動（定常的なクラスタ的地震活動に相当）を検出し、それらの活動的、波形的な特徴を抽出する（R7-R9年度）。すでに取得されている二軸せん断試験や無垢な岩石試料の圧縮破壊試験、水圧破碎試験時に得られたAEの波形記録についても改めて精査し（R6-R7年度）、同様の解析から、それぞれの条件下での結果を比較する（R9-R10年度）。微小繰り返し前震がどのような領域でどのようなタイミングで発生しているかを明らかにする（R10年度）。

## (7) 令和7年度の成果の概要：

### ・今年度の成果の概要

#### 【近傍探索技術の導入に向けた地震波形処理技術の開発】

類似地震波形の検知は、大量のベクトルデータ（=過去の地震波形群）を保持した上で、所与のベクトル（新たに得た地震計記録）がデータセット内に類似物を有するかどうか判定することで実現できる。日本列島における過去20年間の記録によれば、地震波到達時刻を10万回以上検知した観測点が、160以上存在する。これはすなわち、日本列島で未発見の微小地震を網羅的に検知するためには、20年分の連続波形を断片化したデータ（以下、クエリと称する）と、10万個以上の発見済み地震波形データ（以下、ノードと称する）を照合し、類似度を計算する作業を要することを意味する。このようなデータセットとの高速比較技術は、インターネット上のデータ流通量に駆動され、画像や文章の検索分野において急速に発展しつつある。特に Facebook 社が開発し広く使われている近傍探索ライブラリ Faiss (<https://faiss.ai/>) は、豊富なアルゴリズムへの対応や並列化などにより、優れた速度と精度を実現しており、本年度はその地震学への適用に着手した。まず、地震波検知の際に問題となりうる規模のデータセットの場合には、総当たりよりもデータ構造を事前に調整した高度な近傍探索技術のほうが高速であり、概ねノード数が1万を超えると、それ以上はノード数を増やしても検索時間が増加しないことが確認できた。そのようなアルゴリズムにおいては、速度のために精度が犠牲になるが、類似波形探索の場合は特定の波形にマッチする必要はなく、多数のノードのうちいずれかひとつでも、クエリと十分に似たデータにマッチすれば良い。その意味で、実際に False negative の割合が1%を下回ることを確かめた。

しかし本来、類似地震波形探索の場合は、ベクトルデータそのもの同士の距離が近いとは限らず、相互相関関数の値によって類似度を判定する。相互相関関数の最大値で定まる近傍を探索するアルゴリズムは Faiss に無いため、最も素朴な連続波形データの入力方法は、データの切り出し開始点を1サンプルずつずらして、全ての時刻から始まる膨大なクエリデータを用いることである。しかしこれには明らかに時間がかかりすぎるため、例えば300サンプルごと（典型的な地震計データならば3秒ごと）

に切り出し開始点を持つクエリデータを生成すれば、素朴な方法に比べクエリ総数が1/300に削減される。そのためには、相互相関関数が最大値を取る位置の候補を予見しておき、それに応じて適当にクエリデータの配列を巡回置換しておく前処理が有効と見込まれる。そこで、波形を断片化したデータから3成分エンヴェロープを生成し、そのエンヴェロープにローパスフィルタ処理などを施した上で、極大値をとる時刻(図1赤点線)がゼロにくるよう巡回置換したベクトルを生成する。この処理をノード波形にもクエリ波形にも施すことで、似た波形が含まれる場合は、時間ずれ無しでほぼ同じ波形に変換されるため、相互相関ではなく内積を取るだけで高い類似度が算出される。極大値の上位何位までを取るかによって、速度と精度のトレードオフが発生するが、波形長さにはあまり依存せず、およそ20-30点(つまり地震波形が100Hz×20-30秒であれば、サンプル数の1%程度)あれば、実用に耐えらる期待できる精度を確認した。図2は、様々なS/N比を持つクエリ波形と、ノードである既知の地震波形との相互相関係数、および本手法に基づく内積の値である。クエリ波形は、単一のHinet観測点で記録された約160の地震波形3成分を規格化したものに、別の時間帯から切り出した同観測点の規格化済みノイズ波形を、0.1倍から10倍までの比で足し合わせて生成した。ノード波形とクエリ波形の切り出し位置を意図的に256サンプルずらしてあるが、S/N比が0.5倍以上あればその影響はほぼ除去され、75%以上のクエリが、理論的に予想される相互相関係数に近い値を示している。これにより、大量の波形データを断片化して、近傍探索ライブラリに入力することが現実的となった。

#### 【別府地熱地帯における微小地震検出と地震活動評価】

別府地熱地帯において、気象庁の地震観測記録を用いて、Matched Filter法による類似波形探索をおこない、従来の気象庁一元化震源カタログでは取りこぼされていた微小地震による波形記録を検出し、その地震活動の特徴を明らかにした。 $M_j = 1-3$ 程度の比較的規模の大きい地震をテンプレートとして用い、相互相関係数を計算しながら類似波形記録を探索したところ、気象庁一元化震源カタログの数倍のイベントが検出された。

さらに、別府地熱地帯の地震活動には、地域ごとに明確な特徴が見つかった。朝見川断層周辺においては、複雑な断層構造に沿って地震が分布しており、地下深部からの流体供給に伴う間隙水圧の上昇が地震を誘発しているという、構造支配的な活動特性を示した。一方、鶴見岳周辺では火山活動に起因する群発的な地震活動が顕著であり、平野部とは異なる流体供給経路の存在を反映した活動パターンを示した。

地域によって地震の発生要因や分布が異なることが明らかになり、微小地震の活動特性を詳細に把握することが、地下の熱水供給系や地熱貯留層の挙動を可視化する上で極めて有効な手法であることが示された。

・「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

類似地震波形の検知による地震カタログの拡充は、地震発生の観測データに基づく経験的な予測と検証のみならず、地震現象の理解、地震発生モデルの精緻化においても重要な役割を果たすものである。手法開発にあわせて、ケーススタディー、模擬実験による検討を実施することで、地震発生予測の確率評価に結び付けることを目指す。

#### (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 calculating network crosscorrelation, Prog. Earth Planet. Sci., 12:31, doi:10.1186/s40645-025-00701-x., 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Makoto Naoi, Shiro Hirano, Youqing Chen, 2025, High-resolution monitoring of AE activities induced by hydraulic fracturing experiments using neural phase picking and matched filter analysis, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2025, P1-17

直井誠・下條賢梧・溜淵功史, 2026, 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), 東京大学地震研究所

久保久彦・Wu Stephen・加納将行・加藤慎也・小穴温子・岡崎智久・岡田望海・亀伸樹・小寺祐貴・佐藤大祐・椎名高裕・下條賢梧・溜淵功史・直井誠・西山竜一・平原和朗・宮本崇・山田真澄, 2025, 地震研究における大規模言語モデル活用の挑戦, 2025年度地球惑星連合大会, SCG60-01

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, 日本地球惑星連合2025年大会, SSS12-01

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, 日本地球惑星連合2025年大会, SCG60-P01

吉村舜人・吉光奈奈, 2025, 別府地熱地帯の地下環境理解を目指した微小地震検出の試み, 2025年度第22回「若手研究者・学生のための研究発表会」, 22 (Oral)

(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: PhaseNeXt: 気象庁統合データセットを処理するために20年間の記録で訓練されたニューラル位相ピッカー

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/mktnaoi/JMAuniPicker>

(10) 令和8年度実施計画の概要:

【類似波形探索アルゴリズムの開発】引き続き、近傍探索技術の導入に向けた地震波形処理技術の開発を進める。

【自然地震の波形記録の解析】第二期期間中に開発された既知の微小地震記録との類似波形を探索する高速アルゴリズムを適用し、能登地域などの数年間の定常観測点の連続記録を使って時空間的にクラスタ化している微小地震活動を検出し、それがどれくらいの頻度で存在するかを調査する。検出された活動について、その発生頻度、発生様式、波形から得られるイベントの特徴 (見かけ応力、応力降下量といったイベントに付随するパラメタの特徴) などの把握を開始する。

【室内実験】断層端部が完全に固着している (インタクト試料の内部に弱面が存在) 模擬試料の作成を継続し、この試料を用いた圧縮破壊試験を実施し、AE (アコースティック・エミッション; 微小破壊によって放射される弾性波) の連続計測をおこなう。収録されたAEの波形記録について上記と同様の解析をおこない、弱面延長や弱面でのクラスタ的なAE活動 (最終破壊に先行するものは大規模地震の繰り返し前震に相当)、弱面と関係ないクラスタ的なAE活動 (定常的なクラスタ的地震活動に相当) の検出に着手する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

川方 裕則 (立命館大学総合科学技術研究機構)

他機関との共同研究の有無: 有

平野 史朗 (弘前大学大学院理工学研究科), 直井 誠 (北海道大学大学院理学研究院), 吉光 奈奈 (京都大学大学院工学研究科), 土井 一生 (京都大学防災研究所)

(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: 立命館大学研究部BKCリサーチオフィス

電話: 077-561-2815

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名 : 川方 裕則  
所属 : 立命館大学総合科学技術研究機構

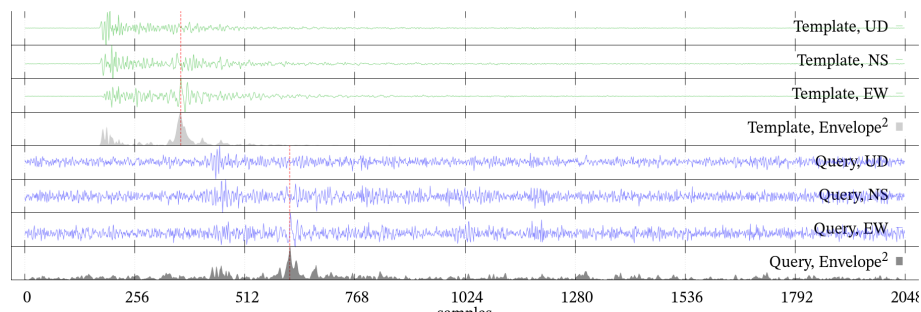


図1. 既知の地震波形 (緑)とS/N比0.5の合成波形 (青)、およびそれらの3成分2乗エンヴェロープをローパスフィルタ処理などしたもの (薄灰、濃灰)。両者は256サンプルずれた位置から切り出された波形に基づく。これほどS/N比の低い波形であっても、エンヴェロープの極大位置の相対位置はほぼ256サンプルに保たれており、従って両波形ともその位置が時刻0に来るよう巡回置換すれば、よく重なる。

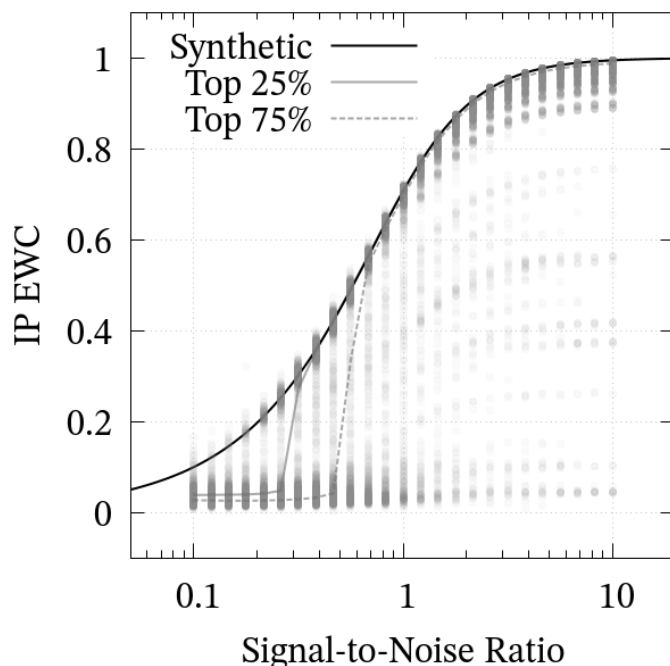


図2. S/N比を0.1から10まで変化させながら合成し巡回置換したクエリ波形と、地震波形との内積。いずれも事前に正規化済み。S/N比が0.5以下となると適切な巡回置換を見誤る割合が増え、内積と相関係数最大値が乖離するが、0.5以上であれば大部分が相関係数に一致する内積の値を示す。