

(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ま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) 令和5年度までの関連する研究成果（または観測実績）の概要：

類似波形探索には、相互相関関数が広く使用されてきた。しかしながら類似波形検出のための閾値の設定は主観に依存するケースが多くみられたため、客観的に閾値を設定するための手法を開発した。また、カタログ記載済みの地震波形をテンプレートとして使用することなく、連続波形記録に対して総当たりに逐次相互相関関数を計算する際には、長い計算時間が大きな障壁となっていたが、計算時間短縮のための技術開発をおこなった。この技術は、後述のHashingを利用した類似波形検出技術との検出能力比較のために有用である。

短時間波形の特徴を抽出するための関数であるLocality Sensitive Hashing(LSH)として新たなものを提案、Hi-net連続波形記録に適用し、類似波形ペアの検出能力の評価をおこなった。本手法は、カタログ記載済みの地震波形をテンプレートとして使用することなく適用可能であるが、相互相関関数を利用して検出されるペアとは必ずしも一致せず、「類似性」を評価する必要があることが分かった。

既知の微小地震の波形記録をテンプレートとして相互相関を計算することで類似波形を抽出するアルゴリズムについても高速化され、実装試験がおこなわれた。

室内実験中に生じるAEの震源カタログ作成のため、イベント検出・走時検出・初動極性判定タスクを深層学習で解くことにより、従来の自動化手法より高精度の震源およびメカニズム解を多数得ることに成功した。

天然の岩石試料を利用すると、断層端を試料内部に含むものを準備することは困難である。そこで、セメントモルタルを用いた模擬試料の作成することで、断層端を内部に含む試料の作成技術の開発を実施した。設定した断層面およびその延長面を境にしてセメントモルタルの打ち継ぎを実施すると、あらかじめ設定した弱面（打ち継ぎ面上にグリース等を塗布する）の周囲も無垢な部分よりも弱くなってしまう。この問題を解決するために、試料作製技術の検討を開始し、強度測定を実施した。

室内実験においてAEの発生位置と断層面の空間的な関係を調べるためには、AE震源の相対的な分布だけでなく、絶対位置精度の評価が重要である。沈み込むスラブ内浅部の温度圧力条件下での実験が

可能な超高压変形装置を想定し、AEの震源位置の推定精度の評価をおこなった。評価は、仮想震源をコンピュータ内で再現してその計算走時を利用して実施した。AE計測の際に、試料を取り囲む圧媒体の外側のアンビルにセンサを配置するが、構造を単純化させ一様構造を仮定し、トランスデューサの大きさを経路長に反映させた場合においても、読み取り誤差がなければ震源位置のずれはほとんど認められないことが明らかにされた。

(6) 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、大規模地震をとま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。

(7) 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

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）。

(8) 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）、佐脇 泰典（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）

(9) 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

e-mail：ml-b-kanri@ml.ritsumei.ac.jp

URL：http://www.ritsumei.ac.jp/research/center/sci/

(10) 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