

(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し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、大規模地震をともし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、これを実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6年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

微小地震を発見するために、膨大な連続地震波形データの中から、既知の地震波形（テンプレートと称する）と類似する波形を探索する方法がある。波形相関法と呼ばれるこの方法は、しかしながら計算コストが高く、これまで多くの研究では探索対象となる連続地震波形の期間が数週間程度に留まる。唯一、米国カリフォルニア州において10年分の連続波形に対し波形相関法の適用事例があるが、これには大規模なGPUクラスタが利用されており、コストの高さゆえに多数の研究者が容易に真似できるものではない。そこで今回、市販のワークステーション程度でも数年分以上の連続データに波形相関法を適用可能なアルゴリズムを開発した。

このアルゴリズムに基づき DiallelX と称するプログラムを開発後、ソースコードを公開した上で論文文化し、現在は国際学術誌において査読中である。64コアCPUを用いたベンチマークにおいてDiallelXは、100 Hz サンプリングの24時間連続波形データと1,000個のテンプレートイベントを用いる解析の場合、15チャンネルの波形（地震計データ3成分×5観測点に相当）であっても、計算の主要部については3秒程度で実行を終了する（図1）。これは1年間の連続データについても20分程度しかかからない速度である。

より小さな微小地震・破壊を検出することに加え、それらの震源を決定し、破壊現象解析の時空間分解能を向上させることで、より多くの知見を得られることが繰り返し確認されている。室内水圧破碎実験で得られた弾性波連続記録を対象として、近年活発に研究されている深層学習による走時検測をおこない、それを元に検出された微小破壊（AE）の波形をテンプレートとしてDiallelXを活用したMatched Filter解析をおこない、古典的なSTA/LTA法やAR-AIC法で作成したカタログよりも10倍多くの震源を含むカタログを作成することに成功した。上記の深層学習検測器は古典的手法による自動処理結果を元に訓練することで、手動によるラベル付けを必要としない解析ルーチンを構築している。非常に多くの震源決定をおこなうため、検出走時をイベントに関連付けるPhase Associationのプロセスでは、従来使われていたグリッドサーチによる手法を差分進化アルゴリズムで解くことによ

て高速化し、現実的な処理時間で震源カタログを作成することができた。得られたカタログでは、水圧破碎の主亀裂造成過程を従来に比べてより明瞭に示すとともに、破碎後に現れる低周波微動のようなシグナルの中に、ほぼ同位置に震源が求まるイベントが多数存在することを明らかにした。

また、よりコア数の少ないCPUを用いた解析ではあるが、能登半島北部沿岸域断層帯の10年超の長期のデータにも適用し、2007年能登半島地震の余震活動から2024年能登半島地震の発生に至る過程の微小地震活動について、DiallelXを利用したMatched Filter解析をおこなった。地震波形記録を使用した観測点は、防災科学技術研究所Hi-netの4観測点（輪島門前、富来、柳田、珠洲）と気象庁の1観測点（珠洲）である。対象地域が広いため、解析は能登半島北岸断層帯の4セグメント（門前沖、猿山沖、輪島沖、珠洲沖）に分けて実施し、各セグメントの近傍の3つの観測点の地震波形記録を使用した。なお、観測点によって解析期間中に地震計の更新および設置方位の修正がなされているものがあり、地震計設置方位の補正をおこなった3成分波形を使用した。特に、2024年能登半島地震の際に大すべりが推定された猿山沖セグメントの西側において、互いに相似な波形を示す特徴的なイベント群が見つかった。一つ目は2007年能登半島地震の余震活動期から2024年能登半島地震に発生に至るまで継続的に活動が見られるもの、二つ目は震源分布域をオーバーラップさせるが2018年ごろを境にして異なるイベント群に分かれるもの、三つ目は2007年能登半島地震余震活動期に遅れる形で2009年ごろからやや定常的な活動を見せたのちに2023年から活発化を見せるもの（図2）である。なお、三つ目の再活動に関連する $M_j \geq 2.5$ の地震の発生は確認されていない。

・「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

現時点では、微小地震・破壊活動の検出とその時空間分布の把握の実施という段階ではあるが、ケーススタディを増やしていくことにより、大地震に先行する現象特有の特徴の有無を検討できるようになる。開発されたソフトウェアであるDiallelXは、大規模データすなわち長期間の波形データに適用することができるため、ケーススタディを増やす鍵となる成果と言える。

(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

Makoto Naoi, Koji Tamaribuchi, Kengo Shimojo, Shinya Katoh, Shukei 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

・学会・シンポジウム等での発表

平野史朗・直井 誠, 2024, DiallelX: ネットワーク相関法のための fortran コード, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SSS04-P05

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器の再学習, 日本地球惑星連合2024年大会, SCG50-02

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年度秋季大会, S08-31

佐々木萌香・川方裕則・平野史朗, 2024, 能登半島地域の地震活動の時空間発展を理解するための長期連続波形解析 —10年超の連続波形と数万のテンプレート波形を用いて—, 日本地震学会2024年度秋季大会, S09P-07

Moka Sasaki, Hironori Kawakata, Shiro Hirano, 2024, Spatio-temporal variation of seismicity in the Noto Peninsula region using long-term continuous seismograms of nearby stations, 2024 AGU Fall Meeting, NH31G-2176

(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：

項目：ソフトウェア開発（解析）

概要：地震波形記録に対するネットワーク相関法のための fortran コードを開発した
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/ShiroHirano/DiallelX/>

項目：ソフトウェア開発（解析）

概要：深層学習走時検測器PhaseNet (Zhu and Beroza, 2019)を1 ch波形用のアーキテクチャに修正したモデルを、室内水圧破碎実験中のAE記録で訓練した重みパラメータと共に公開した。
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/PhaseNet-AE>

(10) 令和7年度実施計画の概要：

令和7年度は、主に機械学習処理に基づくカタログ作成技術の向上、及び類似波形探索高速化技術の開発に取り組むと共に、これらの手法の自然地震観測記録に対する適用を進める予定である。

(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B K C 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/

(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

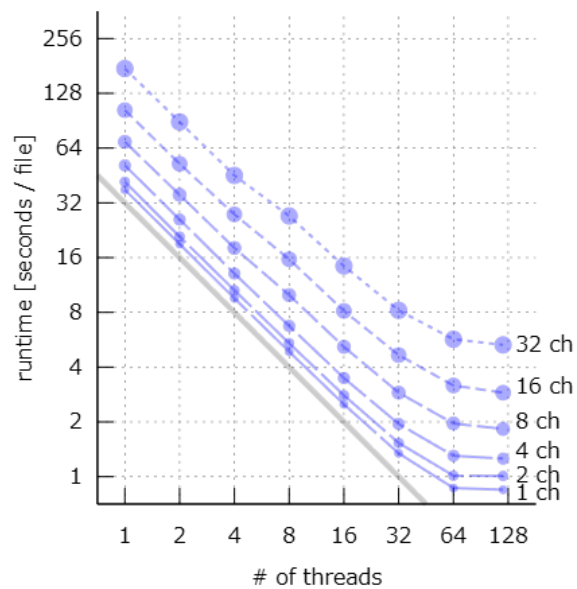


図1．64コア搭載 CPU を用いた DiallelX のベンチマーク結果。
 連続波形は24時間の100 Hz サンプリングに相当するデータで，テンプレート・イベント数は1,000．チャ
 ンネル数 (ch) は解析に用いる波形の独立成分の数．

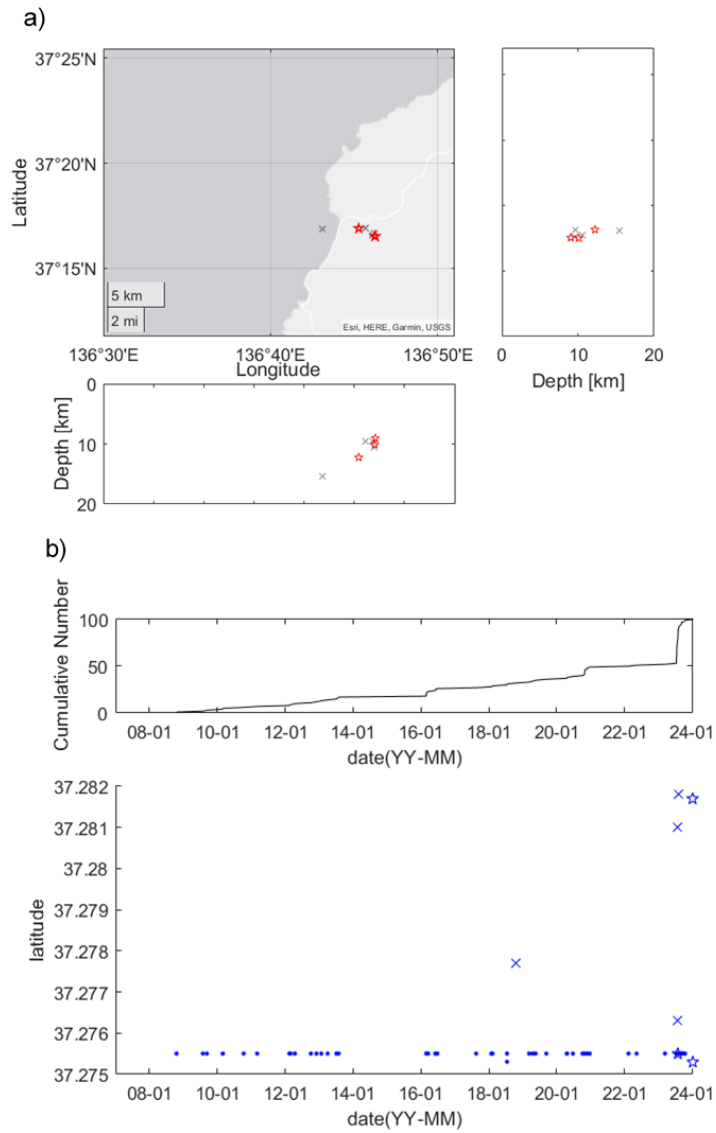


図2．能登半島北部沿岸域断層帯の猿山沖セグメントにおける相似波形を持つクラスターの時空間分布の例．2007年能登半島地震の後に活動域を拡大させた余震的な活動の後，段階的な再活動をともない，2023年以降に再活発化が見られたもの．a) 震央分布．b) N-T図とイベントの時間分布．☆はテンプレートとして使用したイベント，×はカタログ記載のイベント，・は波形が検出されたイベントをそれぞれ表す．