

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01191

研究課題名（和文）稠密地震観測データ解析と地震活動モデル構築による前震の意義の理解

研究課題名（英文）Understanding the physics of foreshocks based on dense seismic observation and seismicity model

研究代表者

直井 誠（Naoi, Makoto）

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：10734618

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、大地震発生前の前震活動解析の高度化を目的とし、解析手法の開発・改善とそれらを適用した解析を実施した。特に地震カタログ作成については、深層学習を利用した従来型の処理パイプラインの改善を行うとともに、画像検索問題において活用されている深層学習を用いた類似要素探索技術を地震波形に応用することに成功した。実データ解析においては、主に室内水圧破碎実験において得られた微小破壊データの解析で顕著な成果が達成され、破壊の準備がどのように進むかを詳細に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地震に先行して生じる特定の地震活動パターンが確認できるかは、微小な地震の検出能力で結果が変わっていることが先行研究のメタ分析で示されており、効率よく地震カタログを作成する技術は非常に重要である。本課題で達成した深層学習を用いた従来型処理プロセスの改善や、効率的類似波形探索の実現は、従来手法が抱えていた処理速度や精度などの課題を解決するものであり、大きな学術的・社会的意義を持つとともに、今後の研究を促進させると期待できる。

研究成果の概要（英文）：We have achieved the development and improvement of analysis methods to investigate preseismic activity before a major earthquake. In particular, for the earthquake cataloging procedure, we improved the conventional processing pipeline by using deep learning and developed an efficient similar component search technique based on deep learning, which is utilized in image recognition problems, to seismic waveforms. In the actual data analysis, remarkable results were achieved mainly in the analysis of acoustic emission data obtained in laboratory hydraulic fracturing experiments, revealing detailed patterns of acoustic emissions in the preparation process of the macroscopic fracture.

研究分野：地震学

キーワード：深層学習 震源カタログ構築 前震活動

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大地震の予測は防災上重要な課題であり、本震に先立って発生する前震がこれに活用できると期待されている。しかし近年、前震は大地震の破壊のはじまりを表す本質的な前兆ではなく、前震が本震をある確率で誘発しているだけ、という可能性が地震活動の統計解析によって示された。前震が余震誘発効果のみによる現象か、あるいは本震の本質的な前兆なのかで、前震による本震の統計的予測能力が数百倍変化するのでこの検証は重要である。

2. 研究の目的

本研究では、「背景」で記述した問題の検証に必要な解析手法の開発、特に長期間・多点のデータに適用可能な手法を開発し、並びに従来手法でさえ非常に小さな地震を検出できる独自の稠密観測データに対し、開発手法を適用して徹底的に微小な地震を検出し、超高分解能で地震活動を調べられるカタログを作成すること、ならびに、大地震や巨視的破壊に先行する微小イベントの活動様式を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

地震観測記録からより高品質な地震カタログを作成する手法を開発するため、イベント検出・走時検出・Phase Association・震源決定、という従来型処理プロセスを、深層学習を用いて改善した。また、従来、カタログの品質向上に大きく寄与するが計算コストが大きく、大規模データの解析が難しい類似波形探索を、深層学習を利用して高速化する手法を開発した。また、室内実験や地表地震観測のデータを用いて巨視的破壊、あるいは大地震に先行する破壊活動の特徴を調べた。

4. 研究成果

(1) 地震カタログ作成プロセスの改善

通常地震カタログ作成プロセスでは、イベント検出・走時検出・Phase Association・震源決定というように多段階のプロセスを踏む。それぞれのプロセスに深層学習を適用し、その性能を改善させた。さらに、深層学習のポテンシャルを最大限に活かすため、深層学習による走時確率、トレースの評価結果から、直接的に震源決定を行う手法を検討した。震源決定を回帰問題として扱う深層学習ネットワークでは精度のよい震源決定を行うことが難しいことを明らかにし、進化アルゴリズムやMCMCを採用し、走時値の確率分布から直接走時値のスカラー値を求めるとなく、高速に震源を求める手法の開発に成功した。

(2) 類似波形探索の効率化

連続波形の中から地震による類似波形を自動検出する手法の改良も試み、波形相関法を大幅に高速化することに成功した。同手法により1ヶ月程度の連続波形であれば相関係数を計算可能であることを示した。

このような波形相関に基づく探索手法は従来研究で活発に用いられており、本研究でも高速化に成功しているものの、本質的には計算コストが大きく大規模データへの適用が困難である。この問題を解決するため、波形間の類似性を反映した距離を学習し、64ビットのバイナリコードに波形情報を圧縮する深層学習ネットワークを開発し(図1)、それを基に類似波形探索を行う技術を開発した。

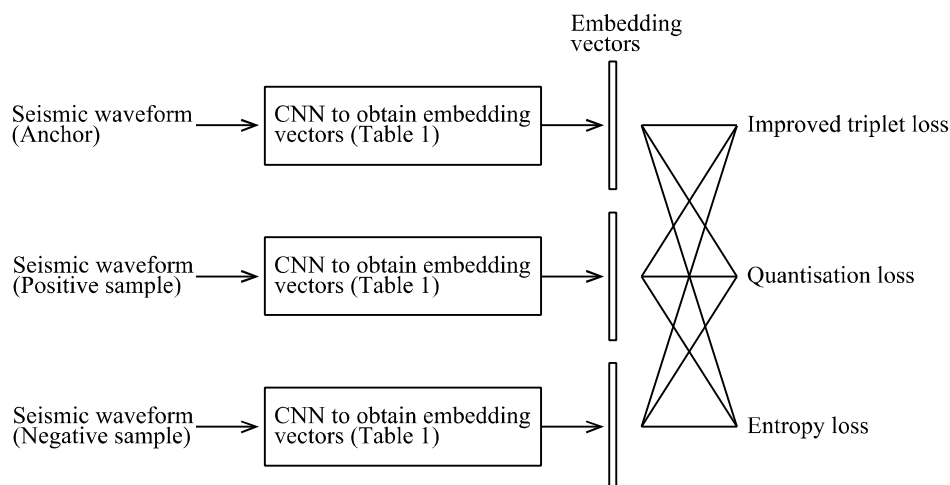


図1. 波形の情報を64bitバイナリ値に圧縮するための深層学習ネットワーク。

この手法により、オリジナルの波形に比べて情報を大幅に圧縮でき、多チャンネル長期間のデータを容易にメモリに載せ、従来手法では不可能だった規模の波形データ間の類似波形探索を実現できるようになった。実際、地震観測で典型的な 100Hz サンプリングのデータに換算して 5.8 年分の AE 波形 16 チャンネルのデータ間の総当り類似度判定をテストしたところ、わずか半日で処理できることがわかった。実データにおける破壊準備過程の解析については、主に室内実験で得られた微小破壊データの解析を行い、巨視的破壊に先行する微小破壊活動の時間変化や震源メカニズム解の時間推移を明らかにした。また、日本の定常地震観測データに最適化された深層学習検出モデルを作成し、現在モデルの公表に向けて準備を進めている。

(3)実データ解析

長野県西部・山陰・近畿地方に展開している稠密地震観測網および周辺の定常観測点のデータを統合処理して、真のエキスパートによる精度の高い教師データを作成し、(1)で構築した手法を利用し、広域にわたる多点のイベント波形データセットおよび自動震源・読み取りデータセットを構築した。

中規模の地震活動が ETAS による予想に比べ明瞭に静穏化した事例が 1970 年代から多く報告されている。この傾向が有意なものを検証するため、客観的ルールを設定して成績を評価したところ、ルールのパラメタを調節すると偶然では説明しがたい良い成績が得られた。ただし、パラメタの調整において過学習が起きている可能性を考慮し、学習と成績評価に使うデータ期間を別期間にするクロスバリデーションを試みたところ、サンプル数が少なく、明瞭な結論は得られなかった。しかしながら、本手続きは一般性があり、静穏化に限らず前震等さまざまな現象の先行性評価に用いることができる。

室内水圧破碎実験で得られた AE データに深層学習による P 波初動極性読み取りを深層学習で実施し、10 供試体の実験、5 万個ほどの AE イベントのモーメントテンソル解を評価して結果を出版した。また、同手法をさらに改善し、P 波初動極性ではなく、P 波初動振幅をより直接的に読み取る手法を開発し、同手法を用いて改善したモーメントテンソル解を利用して、個々の AE イベントの絶対規模（モーメント・マグニチュード）の推定、及びコーナー周波数の推定を成功させ、水圧破碎実験中において通常の地震に比べて低周波が卓越するイベントが多発することを示した。

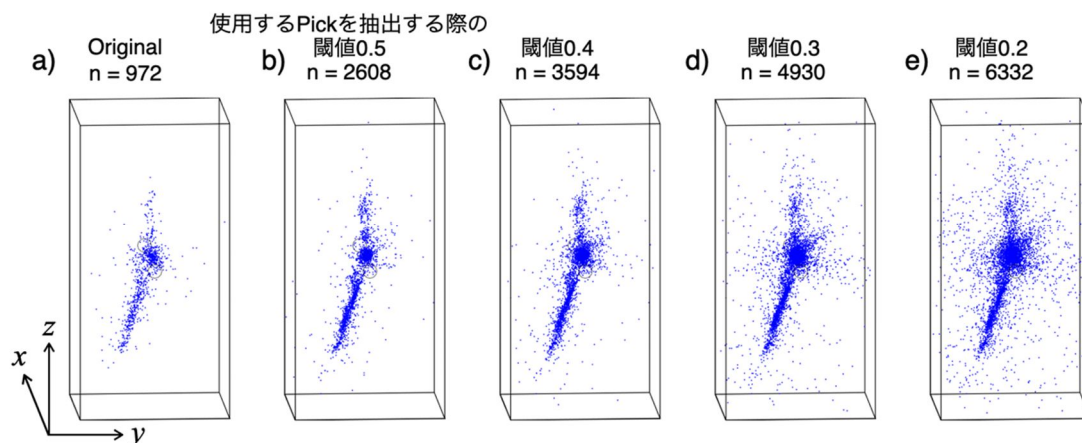


図 2 . 改良した手法による震源決定結果 . a) 従来手法で決定した結果 . b) - e) 深層学習を利用して決定した結果 . 走時検出における Pick 候補抽出時の閾値を変えて Association・震源決定を行い、従来手法と同じ走時誤差の選別基準で抽出 (P 波走時 ≥ 8 , 最大誤差 ≤ 10 mm) した結果を示している .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hisahiko Kubo, Makoto Naoi, Masayuki Kano	4. 巻 76
2. 論文標題 Recent Advances in Earthquake Seismology using Machine Learning	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Earth Planet Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-024-01982-0.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Makoto Naoi, Shiro Hirano	4. 巻 237
2. 論文標題 Efficient similar waveform search using short binary code obtained by deep hashing technique	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Geophys. J. Int	6. 最初と最後の頁 604-621
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggae061	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Makoto Naoi, Keiichi Imakita, Youqing Chen, Kazune Yamamoto, Rui Tanaka, Hironori Kawakata, Tsuyoshi Ishida, Eiichi Fukuyama, Yutaro Arima	4. 巻 231
2. 論文標題 Source parameter estimation of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in the laboratory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 408-425
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggac202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Rui Tanaka, Makoto Naoi, Youqing Chen, Kazune Yamamoto, Keiichi Imakita, Naofumi Tsutsumi, Akihiro Shimoda, Daiki Hiramatsu, Hironori Kawakata, Tsuyoshi Ishida, Eiichi Fukuyama, Hiroyuki Tanaka, Yutaro Arima, Shigehiro Kitamura, Daisuke Hyodo	4. 巻 226
2. 論文標題 Preparatory AE activity of hydraulic fracture in granite with various viscous fluids revealed by deep learning technique	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophys. J. Int.	6. 最初と最後の頁 493-510
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggab096	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩田貴樹	4. 巻 69
2. 論文標題 地震学における非線形Hawkes過程：摩擦構成則に基づく地震活動モデル	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 統計数理	6. 最初と最後の頁 209-222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 直井誠, 平野史朗
2. 発表標題 室内水圧破碎実験で生じる微小破壊活動
3. 学会等名 研究会「地震活動の統計モデルと物理的意味」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 直井誠・平野史朗
2. 発表標題 深層Hashingによる効率的な類似波形探索
3. 学会等名 機械学習時代の地震研究研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 直井誠・平野史朗
2. 発表標題 深層Hashingによる類似波形をもつ地震性イベントの超省メモリ・高速探索
3. 学会等名 京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 直井誠, 陳友晴, 有馬雄太郎
2. 発表標題 深層学習を利用した室内水圧破碎誘発AEのイベントカタログ作成
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 直井誠
2. 発表標題 走時の確率トレースを利用した深層学習による震源決定
3. 学会等名 地球惑星連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 俊雄・飯尾 能久・片尾 浩・澤田 麻沙代・富阪 和秀
2. 発表標題 稠密地震観測によって推定された近畿地方中北部の活断層近傍における応力場
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 俊雄・飯尾 能久・片尾 浩・澤田 麻沙代・富阪 和秀
2. 発表標題 稠密地震観測によって推定された近畿地方中北部の応力場
3. 学会等名 京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤 慎也・飯尾 能久・片尾 浩・澤田 麻沙代・富阪 和秀・水島 理恵
2. 発表標題 Arrival time picking and Polarity detection using Deep learning for automatically creating a seismic catalog
3. 学会等名 地球惑星連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 直井誠，今北啓一，陳友晴，山本和猷，田中壘，川方裕則，石田毅，福山英一，有馬雄太郎
2. 発表標題 室内水圧破壊実験によって誘発された微小破壊の地震モーメント・コーナー周波数推定
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中壘，直井誠，陳友晴，山本和猷，今北啓一，堤直史，下田晃嘉，平松大樹，川方裕則，石田毅，福山英一，田中浩之，有馬雄太郎，北村重浩，兵藤大祐
2. 発表標題 室内水圧破壊実験中に生じる大量のAEのモーメントテンソル解析
3. 学会等名 地球惑星連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯尾能久
2. 発表標題 満点計画の15年 地震計の開発からデータ解析まで
3. 学会等名 日本地震工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野田 雄貴, 片尾 浩, 飯尾 能久
2. 発表標題 長野県西部地域で発生したM3.7の地震の前震活動とその発生要因について
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岩田 貴樹 (Iwata Takaki) (30418991)	県立広島大学・公私立大学の部局等(庄原キャンパス)・准教授 (25406)	
研究分担者	飯尾 能久 (Iio Yoshihisa) (50159547)	京都大学・防災研究所・教授 (14301)	
研究分担者	平野 史朗 (Hirano Shiro) (60726199)	立命館大学・理工学部・助教 (34315)	
研究分担者	中谷 正生 (Nakatani Masao) (90345174)	東京大学・地震研究所・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------