

誘発地震を用いた前震波形の時空間変化の評価

Evaluation of the spatiotemporal waveform changes in foreshock with induced earthquake records

所属機関： 京都大学

代表研究者氏名： 吉光 奈奈

研究期間： 2023年9月2日～2023年10月9日

区分： 個人 A

滞在研究機関： Los Alamos National Laboratory
New Mexico 87545, United States

共同研究者等： Dr. Michael Fehler

If foreshock seismic wave records show the crustal stress or heterogeneity change preceding a major earthquake, dense foreshock monitoring will help to issue the warning. In the conventional approaches, we estimate seismic characteristics through comparing theoretical and observed waveforms but could not detect clear spatiotemporal changes. In this study, we use statistical and machine learning methods to detect changes in waveform characteristics to explore the spatiotemporal characteristics. The research was conducted with induced earthquake records that allow observation of foreshocks, mainshocks, and aftershocks within a short time span than natural events.

海外研究活動概要

地熱開発サイトにおいて発生した誘発地震は、短い期間での前震-本震-余震という地震の1サイクルの観察を可能とする。本研究では、多数の前震活動が地殻の時空間変化を反映した波形変化を示しているか検証するために、米国 Fenton Hill 地熱サイトで取得された誘発地震波形の解析を実施する。解析では、伝統的な地震波形のパラメタライズ手法を試みるとともに、人間の主観なしで波形を分類することで新しい視点からデータを眺めようと試みた。

成果

地震発生環境について知るうえで、地下深くの岩盤の状態を直接計測で観測することはできない。そこで、地中を伝播してきた小地震の波を使って、間接的に地下環境の状態を推定することが一般的におこなわれてきた。もし前震活動の波形から大地震発生に先行した地殻の応力・不均質状態の変化を捉えられれば、前震の監視を通じた大地震の切迫度評価が期待される。従来のアプローチでは、理論地震波形と観測波形の比較を通して、波形の特性をパラメタライズする解析が伝統的におこなわれてきたが、必ずしも明瞭な変化は検出されていない。本研究で

は、まず伝統的手法を踏襲して波形のパラメタライズをおこなうとともに、統計学的手法や機械学習を用いた波形の分類に取り組む。

自然地震はいつ・どこで発生するか予測が立たず、震源断層近傍での観測や、前震-本震-余震という一連の地震をすべて観測することは困難である。米国の Los Alamos National Laboratory は、1970年代から熱水のない場でも可能な地熱発電システムの開発を目指して、Fenton Hill 実験場において注水実験をおこなってきた。この注水の影響で微小地震が大量に発生する様子が観測された (e.g., House, 1987; Fehler et al., 1987)。このような人間の活動の影響で発生する地震は誘発地震と呼ばれ、前震-本震-余震というひとつながりの地震活動を数カ月～1年という短い期間で観測できるため、本研究のような時間変化解析をするうえで最適なデータである。Fenton Hill では1983年から1984年にかけて高圧注水が実施され、3587イベントの微小地震が観測された。本研究では、注水孔周辺にある4つのボアホール地震計 EE1、EE3、GT1、PC1 を解析に利用した。収録サンプリングは2000 Hz である。

まず、地震の震源の特徴をパラメタとして求める解析を実施した。震源特性は、記録された地震波形

を変位スペクトルに変換し、理論モデルのスペクトルと比較することで推定する (e.g., Aberchrombie, 1995)。スペクトルの低周波側のフラットな振幅の大きさは地震モーメントという地震の規模に比例したパラメータを表す。スペクトルの高周波側には震源断層の大きさとすべり特性を反映した折れ曲がりがあり、コーナー周波数と呼ばれる。断層のすべり方の違いを反映して、震源断層からの角度により波形振幅に差が出るため、通常は多数の観測点の情報を重ね合わせることで情報の平滑化をおこなう。しかし、本研究では観測サイトの特性上、数点しか利用できる観測点がないことから、1 観測点の波形をそのまま観察した。複数の観測点で推定値を比較した結果、地震モーメントに関しては観測点間で大きな推定値の違いはなかった。いっぽう、コーナー周波数に関しては、観測点により推定値に系統的な差が見られた。この違いは、前述の震源からの放射特性の影響の可能性が高い。最終的に推定された地震モーメントから得られたマグニチュードは、 $-1 < M_w < 1.5$ となった。得られたパラメータ群から明瞭な時間変化は見られなかった。

次に、伝統的手法とは逆に、データの特徴を抽出・分類した後に、得られた特徴から物理的モデルを考える逆方向のアプローチを試みる。解析に利用した 3587 イベントを、解析者の主観を抜きにして自動的に分類し、どのような波形同士が仲間となるのか検証した。まず、波形全体の類似度を調べることができ相互相関を用いて、全波形がお互いにどれほど似ているかを調べ、似た波形同士を仲間として番号付けしてクラスタ化した。解析においては 100-200、200-400 の 4 次のバターワースフィルタをかけた。クラスタリングの結果、多くのイベントが同じクラスタに分類された。これは各イベントの波形同士がよく似ていることを意味する。周波数の違いはあまり大きくなかった。

次に、注水初期に発生したあるイベントを基準とし、基準イベントに対して他のイベントがどのような相関値を持つか調べた。得られた相関値は 0.2 から 0.7 の間で大きくばらついたものの、注水開始直後は 0.6-0.7 程度の高相関のイベントが多くみられ、その後相関値は 0.2-0.6 程度にまんべんなく分布し、低下した。さらにその後、相関が再び回復する時期が見られた。この相関の変化と注水の関係は現時点では不明であるが、今後注水フェーズとの対応など

を見て、地殻内の応力不均質状況との対応検証していく予定である。

次に、k-means 法と呼ばれる教師なし学習分類法をデータに適用した。k-means 法はデータ群の重心を計算しながらクラスタ分類をおこなう手法であり、地球科学分野でも Chamarczuk et al. (2019) などにより波形分類に利用された実績がある。全イベントを 4~8 つのクラスタに分けるように指定して k-means 法を適用したところ、いずれの場合もイベント発生時刻とクラスタには相関は見られなかった。受け入れ研究者 Fehler 氏のアドバイスを受け、後続波部分の振幅で波形全体を規格化し、比較しやすいデータ形状にしたが、結果に大きな違いは出なかった。

さらに解析を発展させて、地震波スペクトルをスペクトログラムという 2 次元画像にすることで、線形データの学習よりより多くの情報を一度に学習できる可能性があるのではないかと考えた。Duan et al. (2022) は U-net と呼ばれる分類手法をスペクトログラムに適用し、波形の特性を反映した分類がおこなわれる可能性を示唆した。今回は、スペクトログラムの作成方法について、どのようなタイムウィンドウをどの程度ずらしながらスペクトログラムを描くと最も実波形の特徴を表すかという検討をおこなっている途中で滞在が終わったが、今後最適と判断したスペクトログラムを利用して U-net などの異なる機械学習的手法の適用を目指していく。

今後の展望

滞在中は受け入れ研究者の Fehler 氏と対面で毎日議論をすることができたため、現在どのような手法が米国で用いられているのか、様々な情報を得ることができた。また、受け入れ研究者の方のみならず、研究所において機械学習を利用している方などと議論することにより、どの手法がどのような解析に向いているか感覚をつかむとともに、新たな人脈を築くこともできた。今後は本滞在中で途中まで進めたスペクトログラムを用いたより高度な機械学習手法について、さらに解析をすすめていく。また今回はクラスタリング結果と時間との対応は確認したものの、空間との対応は未確認であるため、こちらについても今後追加解析を実施する。

研究の発表

未発表