

令和 4 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14812

研究課題名（和文）大容量データ時代の応力降下量推定研究

研究課題名（英文）Stress Drop Estimation Study Using Large Volume Data

研究代表者

吉光 奈奈（Yoshimitsu, Nana）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：20724735

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：地震の震源特性を表す震源パラメータは、地震波形のスペクトル比と理論スペクトル比の比較を通して推定される。本研究では、従来使われてきたグリッドサーチ法とは異なるマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた手法を導入した。推定時に用いる確率密度関数について検討をおこない、一般的に用いられる正規分布ではなく比の形を持つデータに適したF分布を採用した。シミュレーションスペクトルと、米国オクラホマ州で発生した誘発地震に対して本手法を適用したところ、推定は良好に行われた。さらにサンプリング密度から尤度を計算することにより、確率分布を視覚化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震の震源断層近傍でどのように応力変化が進行しているかを直接計測することは困難であるが、断層周辺で発生した小地震と地殻内の応力状態の関係が明らかになれば、間接的に地殻の状態を推定することが可能かもしれない。これまで応力降下量と呼ばれる小地震の震源特性の推定値には大きな誤差があったが、本研究では新しい推定手法を用いることで値の確からしさについて評価し、より正確な推定に向けて一歩前進した。本研究は実用的な目的のみならず、地震発生の物理的理解にとっても重要となる。

研究成果の概要（英文）：Source parameters, which represent the source characteristics of earthquakes, are estimated by comparing the spectral ratio of seismic waveforms with the theoretical spectral ratio. In this study, we introduced a Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method instead of the grid search method which is the general method in the previous studies. The probability density function used in the MCMC estimation was examined, and the F-distribution was adopted instead of the commonly used normal distribution. We considered F-distribution is more suitable for data with a ratio form. The method was applied to simulated spectra and induced earthquakes in Oklahoma, United States. The probability distribution was visualized by calculating the likelihood from the sampling density.

研究分野：地震学

キーワード：応力降下量 地震パラメータ MCMC

1. 研究開始当初の背景

内陸地殻内で、いつ、どこで、どんな変化が進行しているかを知ることは、地殻モニタリング、地震発生物理の理解、防災等の観点から意義深い。地下数 km 以深の震源断層近傍の様子を推定するには、周辺で発生した小規模な地震の波形記録を利用する。小さい地震が解放した応力の大きさは応力降下量と呼ばれ、地震波スペクトルから得られる震源パラメタと併せてその値は内陸地殻の応力状態を反映しているのではないかと期待されてきたが、これまではっきりとした断層や大地震との関係性はわかっていなかった。応募者はその原因が推定手法の不安定性やデータの選別手法にあると考え、統計学的手法による解析や解析値の評価をおこなうことで、応力降下量や震源パラメタの推定精度の向上をはかり、媒質変化のモニタリングとその解釈につなげられないかと考えた。

2. 研究の目的

震源パラメタの推定解析が不安定である原因の一つは、理論スペクトルとの不一致が大きい観測波形が解析データに含まれているためである。これまでも応力降下量の推定精度を向上させようという試みはさまざまな研究でおこなわれてきたが、理論波形と一致しない観測記録は、多数の地震群を解析すると一定数含まれているようであった。推定の精度を上げるためには絶対値を求めるだけでなく、推定値の確からしさを評価して選定をおこなう必要がある。本研究では、従来の推定手法とは異なる統計学的手法を導入することによって、推定の確からしさを評価が可能にならないかと考えた。

3. 研究の方法

解析には地盤が固く地下構造が比較的シンプルな場所で得られたデータとして、アメリカ合衆国オクラホマ州の波形記録（マグニチュード1から4程度）を利用した。オクラホマ州では資源掘削に関連した注水の影響で、数年間に渡って大小さまざまな規模の地震が発生している。応力降下量は、震源が近接した大小の地震のスペクトル比を用いて解析するため、まず震源位置に近い地震同士を一群のクラスタとして分類した。地震の波形の変位スペクトルの形状は、平坦な低周波部分とスペクトルの折れ曲がり部分で規定される。これらは地震の規模と震源サイズやすべり速度を反映しており、それぞれ地震モーメント (M_0)、コーナー周波数 (f_c) と呼ばれる。波形のスペクトルを既存の理論スペクトルと比較することで、地震モーメント比、大小地震それぞれのコーナー周波数の3つの未知変数を推定した。推定された震源パラメタであるコーナー周波数と地震モーメントを用いて、応力降下量を推定した。伝統的にはグリッドサーチを使って観測スペクトルと理論スペクトルの比較を行う手法が主流であるが、本研究ではマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC 法) を応用した統計学的手法を用いた。さらに、一般的な MCMC 解析で解析過程の尤度計算に正規分布を利用するが、本解析では比の形式のデータには F 分布が適しているのではないかと考え、導入した。

4. 研究成果

MCMC を使った震源パラメタ推定解析では、地震波形の変位スペクトル比を計算したのちに理論スペクトルと観測スペクトルを比較し、確率の高い部分を重点的にサンプリングしながら、尤度の評価を通して震源パラメタを推定する。サンプリングにはメトロポリス法を採用した。尤度の

計算過程に確率密度関数が必要となり、一般的には正規分布が確率密度関数として利用されるが、本研究ではF分布の導入を試みた。F分布は比のデータ形式に適した確率密度関数であることから、こちらを採用するほうがスペクトルの比を扱う本解析において理論的根拠のある計算になるのではないかと考えたためである。手法のテストのために、まずは数値計算を実施した。シミュレーション波形としてMwが3と4の地震に相当するランダムノイズの乗ったスペクトル比を100個発生させ、2種類の確率密度関数を使った震源パラメタの推定結果を比較した。応力降下量だけではなく、応力降下量に焼き直す前の地震モーメント比とコーナー周波数について2種類の計算の比較をおこなった。その結果、F分布、正規分布から得られた地震パラメタの推定値はどちらも与えた値と良い一致を見せた。その一方で、分散はF分布を用いた場合の方が正規分布よりも小さかった。

次に、手法を実データに対して適用した。米国オクラホマ州で発生した誘発地震（マグニチュード1から4程度）に対して本手法を適用したところ、シミュレーションよりもサンプリングのばらつきはあるものの、推定は良好に行われた。さらに、3つの未知変数に対するサンプリングの3次元形状から、計算時に各地震パラメタがどのようなトレードオフを持つかが明らかになった。サンプリング分布のトレードオフ関係が他のデータを解析した場合と違う場合や、サンプリングの分布にばらつきがある、つまり収束が悪い計算は、利用しているデータの質が悪かった。

さらに、サンプリング分布を用いてヒートマップを作り、周辺分布を表現した。ヒートマップから、分布の中央部分が高いサンプリング密度を示すことがわかった。さらに、サンプリング密度には複数のピークがある様子も見られた。尤度が高い点はサンプリング密度の高い領域と必ずしも一致していなかった。これは、2次元のサンプリング分布と3次元のサンプリング分布の違いがあるためではないかと考えられる。

本研究手法は、従来の研究とは異なるパラメタ推定手法を提案するだけでなく、パラメタやデータのクオリティがサンプリング分布から推定できる可能性を示唆した。本研究手法の発展は実用的な目的のみならず、地震発生の物理の理解にも寄与すると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Yoshimitsu, N., W. L. Ellsworth, G. C. Beroza | 4. 巻 124 |
| 2. 論文標題 Robust Stress Drop Estimates of Potentially Induced Earthquakes in Oklahoma: Evaluation of Empirical Green's Function | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth | 6. 最初と最後の頁 5854-5866 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019JB017483 | 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 該当する |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 吉光奈奈, 前田拓人, 清智也 |
| 2. 発表標題 マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた地震の震源パラメタ推定と確率密度関数の選択 |
| 3. 学会等名 2020年度統計関連学会連合大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉光奈奈 |
| 2. 発表標題 室内岩石実験から自然地震までの架け橋を目指した地震発生環境に関する研究 |
| 3. 学会等名 日本地震学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yoshimitsu, N., T. Maeda, T. Sei |
| 2. 発表標題 Estimation of source parameters in the Bayesian framework by Markov Chain Monte Carlo method |
| 3. 学会等名 American Geophysical Union 2019 Fall Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yoshimitsu, N., T. Maeda, T. Sei, W. L. Ellsworth |
| 2. 発表標題 Uncertainty Evaluation of Source Parameter Estimates by MCMC in Oklahoma |
| 3. 学会等名 StatSei11 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yoshimitsu, N., T. Maeda, T. Sei |
| 2. 発表標題 Evaluation of source parameters in the Bayesian framework by Markov Chain Monte Carlo method |
| 3. 学会等名 日本地震学会秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yoshimitsu, N., T. Maeda, W. Ellsworth |
| 2. 発表標題 Uncertainty evaluation of source parameter estimates by MCMC in Oklahoma |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 |
| 4. 発表年 2019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 |
|-------|-----------------------------|------------------------|----|
| 研究協力者 | 前田 拓人 (Maeda Takuto) | 弘前大学・教授 (11101) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 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 |
|-------|----------------------------|------------------------------------|----|
| 研究協力者 | 清 智也 (Sei Tomonari) | 東京大学・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 |
|---------|---------|
| | |