

ベイズ推定を用いた動的震源インバージョン手法のモデル計算に基づく推定精度評価 Evaluating Accuracy of Dynamic Source Parameter Estimation by Bayesian Dynamic Source Inversion through Its Synthetic Test

○宮本 英・浅野公之・岩田知孝・Miroslav HALLO

○Takeshi MIYAMOTO, Kimiyuki ASANO, Tomotaka IWATA, Miroslav HALLO

A Bayesian dynamic earthquake source inversion is developed following Gallovič *et al.* (2019). The dynamic source parameters, i.e., initial shear stress, peak friction, and slip-weakening distance, on the source fault plane are estimated as probability distributions from observed waveform data, using the Markov chain Monte Carlo method. A performance test was conducted using synthetic waveform data generated from a simple dynamic source model in frequency range of 0.05–0.5 Hz. A representative dynamic source model was obtained by averaging values of the dynamic source parameters, reproducing well the kinematic characteristics of the target model. Estimated values of initial shear stress and peak friction were ranged in 0.5 to 2 times of the target ones within the slip area of the target model. Another synthetic test using 0.05–1 Hz waveform data is also conducted. Results of these synthetic tests are compared to evaluate the accuracy of the dynamic source parameter estimation.

1. はじめに

これまで、規模の大きな地震の強震記録を用いた運動学的震源インバージョン手法により推定された震源破壊過程や、それと強震動の生成に関する議論から、すべり速度や応力降下量の大きな領域（強震動生成域）が近地強震動を主に支配していること (Miyake *et al.*, 2003) やすべりの特に大きかった領域 (アスペリティ; Somerville *et al.*, 1999) が強震動生成域と空間的に重なること (Miyake *et al.*, 2003) などが報告されてきた。また、断層破壊を支配する動的震源パラメータを変えながら動的破壊シミュレーションを繰り返し行うことで、断層近傍の観測記録を再現するような動力的震源モデルを推定する研究も行われてきた（例えば、Kaneko and Goto, 2022）。

近年、観測記録からベイズ推定により動力的震源モデルを推定する動的震源インバージョン手法 (Gallovič *et al.*, 2019) が開発された。本研究では、強震動生成メカニズムの背景物理の解明に向けて、Gallovič *et al.* (2019) を参考にしつつ動的震源インバージョン手法を構築した。また、2016 年熊本地震最大前震への適用を想定した単純な震源モデルに対してモデル計算を行い、動的震源パラメータの推定精度を評価した。

2. 動的震源インバージョン

動的震源インバージョンは、マルコフ連鎖モン

テカルロ法 (MCMC 法) による動的震源パラメータ（初期せん断応力・ピーク摩擦係数・すべり弱化解距離）の新たな値の提案とそれに基づく波形合成を繰り返し、メトロポリス・ヘイスティングス法 (MH algorithm) により提案されたパラメータの採用・却下を判断することで様々な動力的震源モデルをサンプリングして震源断層上の各点における動的震源パラメータの値の確率分布を得る手法である。

波形合成に関しては、宮本・他 (2024) と同様に、動的破壊シミュレーションにより得られたすべり時間関数と事前に計算しておいたグリーン関数との畳み込みにより目的の点における波形を合成した。動的破壊シミュレーションには差分法によるコード (fd3d_TSN; Premus *et al.*, 2020) を使用し、グリーン関数は離散化波数法 (Bouchon, 1981) と透過反射係数行列 (Kennett and Kerry, 1979) により計算した。また、速度構造モデルは「平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査」により作成された三次元地下速度構造モデル (浅野・他, 2019) と全国 1 次地下構造モデル (Koketsu *et al.*, 2012) を用いた。

動的震源パラメータの提案・更新に関しては、宮本・他 (2024) を一部改良した。パラメータの提案に関する部分として、震源モデルの採用率を高めるため、ランダムに選んだ 2 種類の動的震源パラメータの値を提案し、残る 1 種のパラメータの

値は現状の値のままとした。提案分布は、初期せん断応力とピーク摩擦係数については正規分布、すべり弱化解距離については対数正規分布とした。また、パラメータの更新に関連して、事前分布は、解析開始時点において各パラメータの値に関する事前情報を持たないのですべて一様分布とし、尤度関数は波形データおよびモーメントマグニチュードの一致度から構成した (Kostka *et al.*, 2022)。

また、解析開始時の動力学的震源モデル（初期モデル）は一般には実際の震源モデルと大きく離れた値を持つことが想定されるので、解析開始直後は多くの震源モデルを探索できるように、各動的震源パラメータの提案分布の標準偏差を大きくした。その後、波形の一致度を示す Variance Reduction (VR) が正の値を示す震源モデルがサンプリングされた段階で、そのモデルを改めて初期モデルとし、より小さな標準偏差を与えた提案分布を用いてインバージョン解析を進めた。

3. 模擬震源モデルを用いたモデル計算

2016 年熊本地震の最大前震を想定した模擬震源モデル（以下、Target model）を設定した。破壊開始点の位置と震源断層の走向はそれぞれ Mitsuoka *et al.* (2020) と Asano and Iwata (2016) によるものを用いた。震源断層を囲うように選定した 14 点の実際の強震観測点配置を模して Target model による速度波形を出力し、それらに 0.05–0.5 Hz のバンドパスフィルタを適用して P 波到達の 1 秒前から 20 秒分を疑似観測波形データとして動的震源インバージョン手法を適用した。MCMC 法により得られた計 80,000 モデルについて、VR と地震モーメントの値の推移を参考にして最初の 20,000 モデルを除いた 60,000 モデルを解析対象とした。さらに、強い自己相関を避けるために 30 モデルごとにリサンプリングし、得られた 2,000 モデルによる各動的震源パラメータの値を平均して

一つの動力学的震源モデルを構成した（以下、Estimated model）。Estimated model による破壊過程は Target model によるものの主たる特徴を再現しており、合成波形も疑似観測波形とよく一致した (VR=92%)。また、Target model のすべり域内部における初期せん断応力とピーク摩擦係数は、Target model の値の 0.5–2 倍程度に推定された一方で、すべり弱化解距離は 0.5–4.5 倍程度の値となった。

上記と同様のモデル計算を、データに用いる速度波形の周波数帯を 0.05–1 Hz に変更して行い、得られた動的震源パラメータの推定精度を比較する予定である。

参考文献

- Asano and Iwata (2016). *Earth Planet Space*, **68**, 147.
浅野・他 (2019). 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, SSS13-09.
Bouchon (1981). *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **71**, 959–971.
Galović *et al.* (2019). *J. Geophys. Res.*, **124**, 6949–6969.
Kaneko and Goto (2022). *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098029.
Kennett and Kerry (1979). *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **57**, 557–583.
Kostka *et al.* (2022). *Geophys. J. Int.*, **228**, 711–727.
Mitsuoka *et al.* (2020). *J. Geophys. Res.*, **125**, e2019JB018515.
Miyake *et al.* (2003). *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **93**, 2531–2545.
宮本・他 (2024). 令和 5 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, A105.
Premus *et al.* (2020). *Seismol. Res. Lett.*, **91**, 2881–2889.
Somerville *et al.* (1999). *Seismol. Res. Lett.*, **70**, 59–80.