

## 強震動生成メカニズムの解明に向けた動的震源インバージョン手法の構築 Dynamic Source Inversion to Investigate Mechanisms for Generation of Strong Ground Motion

○宮本 英・浅野公之・岩田知孝

○Takeshi MIYAMOTO, Kimiyuki ASANO, Tomotaka IWATA

Dynamic source inversion is developed to estimate a dynamic source model which reproduces waveforms observed around the source fault for investigation of mechanisms generating strong ground motion, referring to a similar method proposed by Gallovič *et al.* (2019). This technique is mainly composed of two parts, generating synthetic waveforms and updating dynamic parameter distributions. Synthetic waveforms generated by convolutions of slip time functions and Green's functions were compared with time series of velocity obtained by a dynamic rupture simulation at five surface stations for validation. The former waveforms were almost the same as the latter ones. This approach which calculates waveforms through convolutions used in this study would reduce computer costs and enable us to introduce more complex velocity structure models for real applications. Validation test of our dynamic source inversion is also conducted by using a simple dynamic source model.

### 1. はじめに

これまで、比較的規模の大きな地震に対しては運動学的震源インバージョンなどにより、観測波形をデータとして震源過程が推定され、観測強震動との関係も議論されてきた。また、それらの運動学的震源モデルを満足する、あるいは断層近傍における観測波形の特徴を再現するような動力学の震源モデルが、主に様々なモデルに対してフォワード計算を繰り返すことで推定されている。動的破壊シミュレーションを用いた解析は、強震動生成メカニズムの背景物理を明らかにし、その理解を進める上で強力な手段である。そこで、本研究では先行研究 (Gallovič *et al.*, 2019) を参照しながら、断層近傍に加えて震源断層長程度の範囲よりも遠くに位置する観測記録もデータとして動力学の震源モデルを推定する動的震源インバージョン手法の構築を試みた。本稿においては、動的震源インバージョンのスキームを示し、波形合成法の検証を行った上で、モデルケースに対する動的震源インバージョンの結果を示す。

### 2. 動的震源インバージョン

動的震源インバージョンの流れを以下に示す。

1) および 2) は解析開始時に一度だけ行い、3) ~ 5) を繰り返すことで震源モデルを推定する。本手法では Gallovič *et al.* (2019) と同様に、震源断層と観測点間のグリーン関数を事前に求めてお

き、動的破壊シミュレーションにより得られるすべり時間関数とのたたみ込みを計算して波形を合成する方法を採用した。これには、計算負荷を軽減できることと、震源断層と観測点間の詳細な地下構造を反映した波形を合成できるという利点がある。

#### 1) 震源モデルの設定

既知の震源パラメータとして、破壊開始点の位置 (緯度・経度・深さ)、断層のサイズ (長さ・幅) と走向および傾斜、垂直応力分布、すべり弱摩擦構成則における動摩擦係数を設定する。次に、インバージョンにより推定するパラメータである、すべり弱摩擦構成則における初期応力とピーク摩擦係数、臨界すべり量の空間分布を設定する (初期モデル)。なお、これら 3 種の動的パラメータを定義するグリッド間隔は動的計算のものよりも大きく、双線形補間により動的計算のグリッド上での値を設定する。また、摩擦構成則と動的パラメータの関係を図 1 に示した。

#### 2) 初期モデルを用いた波形合成

まず、初期モデルを用いて動的破壊シミュレーションを行う。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たたみ込みを計算して各観測点での速度波形を合成する。

#### 3) 新たな動的パラメータ分布の提案

マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC 法) により、初期モデルにおける動的パラメータの値を変

化させる（提案モデル）。

#### 4) 提案モデルを用いた波形合成

2)と同様にして、提案モデルを用いて各観測点での速度波形を合成する。

#### 5) Metropolis test および新たな初期モデルの設定

初期・提案モデルから合成された波形データを用いて、提案モデルを新たな初期モデルとして採用するかを決定する (Metropolis test)。また、採用された場合は提案モデルによる波形データを、されなかった場合は初期モデルによる波形データを保存しておくことで、動的計算の回数を減らすことができる。

### 3. 波形合成手法の検証

本研究で用いる手法によって正しく波形を合成できることを確認するため、地表に設定した5つの観測点において、すべり時間関数とグリーン関数とのたたみ込みにより得られる速度波形と動的計算により得られる速度波形とを比較した。動的破壊シミュレーションとグリーン関数の計算には同一の1次元地下構造モデルを用いたが、本インバージョン手法を熊本地震の最大前震に適用することを念頭に、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 (Asano *et al.*, 2019) と全国1次地下構造モデル (Koketsu *et al.*, 2012) からそれぞれ1次元地下構造モデルを抽出して構成した。動的計算には差分法によるオープンソースコード (fd3d\_TSN; Premus *et al.*, 2020) を用いた。

熊本地震最大前震に対する先行研究を参考に、各種震源パラメータを設定した。走向  $212^\circ$  (Asano and Iwata, 2016), 傾斜  $90^\circ$ , 長さ $\times$ 幅がともに 18 km の断層を設定し、動的パラメータは走向、傾斜方向ともに 3 km ごとに定義した。破壊開始点について、震央は  $32.7417^\circ\text{N}$ ,  $130.8087^\circ\text{E}$  (最大前震の震央, 気象庁一元化震源カタログ) とし、震源深さは動的パラメータの定義間隔の関係から 9 km とした。動的計算の空間刻み幅は 0.1 km, 時間刻み幅は 0.002 s で 5000 ステップ計算した。グリーン関数は、離散化波数法 (Bouchon, 1981) および透過反射係数行列 (Kennett and Kerry, 1979) を用いて、動的計算に用いた全グリッドに対して求めた。それぞれの方法で得られた波形 (0.05–0.5 Hz

のバンドパスフィルターを適用) は全観測点でよく一致した。全波形データから計算された Variance Reduction は 99% であり、本研究で採用した手法で正しく波形を合成できることが定量的にも確認された。

### 4. インバージョン手法の精度検証

仮想的な震源モデルを設定し、主に熊本県内から震源断層を囲うように選定した観測点に対して合成した波形をデータとして、本インバージョン手法を適用し、その性能を評価する予定である。

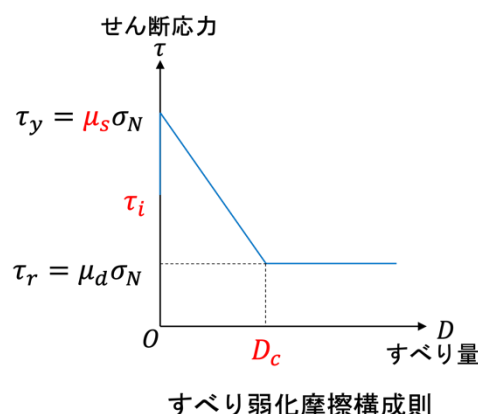


図1 すべり弱摩擦構成則と動的パラメータの関係。初期せん断応力  $\tau_i$ , ピーク摩擦係数  $\mu_s$ , 臨界すべり量  $D_c$  はインバージョンにより推定される。本モデル計算において、動摩擦係数  $\mu_d$  の値は空間一様に仮定した。 $\sigma_N$  は垂直応力を表す。

### 謝辞

モデル計算における震央の設定には、気象庁一元化震源カタログの値を用いた。記して感謝する。

### 参考文献

- Asano and Iwata, 2016, *Earth Planet Sp*, **68**, 147.
- Asano *et al.*, 2019, JpGU Meeting, S-SS13.
- Bouchon, 1981, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **71**, 959–971.
- Gallovič *et al.*, 2019, *J. Geophys. Res.* **124**, 6949–6969.
- Kennett and Kerry, 1979, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **57**, 557–583.
- Koketsu *et al.*, 2012, *Proc. World Conf. Earthq. Eng.*, Paper No. 1773.
- Premus *et al.*, 2020, *Seismol. Res. Lett.* **91**, 2881–2889.