

Simulation of dynamic earthquake sequence in a linear poroelastic medium

*Hiroyuki NODA¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Rice and Ben-Zion (1996) により提案されたスペクトル境界積分方程式法 (SBIEM) による線形弾性体中の動的地震サイクルシミュレーションは、Lapusta et al. (2000) による効率化を経て、断層構成則と地震を繰り返す断層の挙動の関係の研究に大いに活用されている。動的地震サイクルシミュレーションでは、地震時に重要となる慣性項を無視せず、加えて地震間のゆっくりとした準静的過程も単一のフレームワークで (人為的に支配方程式を切り替えることなく) 計算する。過去及び現在の断層変位とグリーン関数の時空間畳み込み積分を用いて断層面上でのトラクション変化を表現することができるが、これを静的なトラクション変化_{st}と残り $\dot{u}_{dy} = -\dot{u}_{st}$ にわけると、 $\dot{u}_{st}$ は「もし即時に断層を接着してこれ以上の変位を禁じた場合、弾性波が過ぎ去った後に残るトラクション変化」であり、弾性体の場合には現在の変位量と静的なグリーン関数の空間畳み込みで表現される。一方 $\dot{u}_{dy}$ に関しては、十分過去の滑り速度による影響を無視することができるため、時間に関する畳み込みを打ち切る事で、無限に続く地震サイクルを有限のメモリーで計算することができる。近年、Miyake and Noda (2019) により本手法が Maxwell 線形粘弾性体における地震間の応力緩和にも拡張され、弾性体に限らない線形媒質に対する適用の可能性が広がった。

本発表では、SBIEM を用いた地震サイクルシミュレーションを、線形多孔質弾性体に適用した手法の報告と、予察的なシミュレーション結果を紹介する。In-plane 問題や3次元問題では、断層滑りに伴って圧縮・伸長の体積歪が生じる領域が存在し、流体圧の増加・減少が引き起こされ、その勾配に駆動されて流体移動が発生する。この流体の再分配により媒質の変形が時間発展的に発生し、断層面上での応力変化や余効変動を引き起こし得る。Detournay and Cheng (1991) は線形多孔質弾性体中の開口亀裂を解析し、亀裂の導入後に時間発展的に追加の開きが生じることを示した。また Yamashita (2007) は断層を挟んで異なる物性を持つ線形多孔質弾性体を考え、断層面の摩擦強度が一定の場合に、地震後の流体移動に伴って本震滑り域内で余効滑りが発生する可能性を指摘している。このような効果を動的地震サイクルシミュレーションに取り入れることにより、余効滑りや余震の発生過程を調べたい。

流体移動を駆動する体積歪は anti-plane 問題では発生しないため、本研究では2次元の in-plane 問題を扱う。ある時刻に発生した局在化した滑りに対するグリーン関数は Detournay and Cheng (1987) により導出された。これを直接適用すると、 $\dot{u}_{st}$ の計算に時空間畳み込み積分が発生してしまう。スペクトル法では空間畳み込みは掛け算になるため問題にはならないが、時間畳み込みを実行する必要は残り、SBIEM の地震サイクルシミュレーションの問題サイズを決定する必要メモリ量を圧迫してしまう。そこで本研究では、Miyake and Noda (2019) と同様に、波数空間に分布するメモリー変数を導入し、メモリー関数の常微分方程式を毎タイムステップ逐次時間積分する事により、簡便に精度よく流体移動の影響を計算する手法を開発した。各波数におけるメモリー変数は、それぞれ固有の無次元緩和時間と $\dot{u}_{st}$ への寄与を持つとしたが、これらのパラメータはグリーン関数に対する最小二乗法フィッティングを行って決定した。各波数に対して18個のメモリー変数を使えば、相対誤差 10^{-6} 以下の精度での計算が可能である。Noda and Lapusta (2010) では摩擦発熱による間隙水圧の上昇を地震サイクルシミュレーションに取り入れるために、断層面上の各点に対して120個程度のメモリー (状態) 変数を持ちいた。今回使用した18個のメモリー関数はそれほど多い数ではなく、シミュレーションの計算速度に対しては微々たる影響しかない。

予察的に、速度・状態依存摩擦構成則 (Aging law) を用いた地震性パッチの地震サイクルシミュレーションを行った。現在計算した限り、地震発生後に地震性パッチは速やかに固着し、内部での余効滑りの顕著な増加は確認できていない。上述の既往研究では、イベント後の亀裂や断層では強度が回復しないと仮定してい

た。Aging law では地震後の流体移動による剪断応力の上昇よりも断層強度の回復が勝るため、余効滑りが発生しにくい可能性がある。多孔質弾性体内の断層の地震直後の挙動を考える上で、強度回復の時間スケールを考える重要性が示唆される。