

## 粘弾性媒質中の断層における地震サイクルシミュレーション手法の開発 Earthquake sequence simulations of a fault in Viscoelastic Materials with a SBIEM

三宅 雄紀、○野田 博之

Yuki MIYAKE, ○Hiroyuki NODA

A seismogenic zone exists at a shallower part of a fault, above a zone where SSEs and tremors are observed, and seismicity disappears in the deeper part. The transition between seismogenic and aseismic behavior can be caused by changes in frictional properties of a fault or changes in viscoelasticity in a material. Previous studies reproduced the transition associated with SSEs by changing the frictional properties, but the behavior of a fault around the transition in a viscoelastic material has not studied yet. In the present study, we implemented viscoelastic stress relaxation to dynamic earthquake sequence simulations using a SBIEM. Our parameter study reveals that viscoelasticity does not necessarily cause SSEs in the transition and makes a range of frictional property for SSE smaller. This indicates that the changes of frictional parameters are primarily important in the transition.

### 1. 地震活動が無くなるのはなぜ？

地殻浅部には巨大地震を起こす領域があり、地殻深部では SSE や微動が起こることが知られている。さらに深部では、地震活動が無くなる非地震性領域が存在する。この地震性の変化を説明するためには、深さに伴って変化する物性のもとでの断層の運動を詳細に調べる必要がある。そのような物性として考えられるのが、弾性エネルギーを蓄える媒質の粘弾性と、断層面での強度を決める摩擦特性である。摩擦特性を変化させた場合、地震性の脆性（速度弱化）から、非地震性の塑性（速度強化）へと遷移する際、SSE が起こることが地震サイクルシミュレーションからわかっている [Liu and Rice, 2007]。一方、粘弾性を変化させた場合に断層挙動がどのように変化するかを詳細に調べた研究はあまりなかった。その要因の一つとして、粘弾性による応力緩和を計算する際に行う過去の滑り速度と畳込み積分 [e. g., Kato, 2002] に計算量を要するため、多くのシミュレーションを行うパラメータスタディには困難があったことが挙げられるかもしれない。粘弾性の変化による地震性非地震性遷移における断層挙動を詳細に調べることで、実際の遷移では、断層面の摩擦特性と媒質の粘弾性のどちらの変化が原因であるかを突き止めることが出来る可能性がある。

本研究では、粘弾性媒質 (Maxwell 物体) 中の動的な地震サイクルシミュレーションを、スペクトル境界積分方程式法を用いた弾性体媒質中の動的な

地震サイクルシミュレーション [Lapusta et al, 2000] に、粘弾性媒質による地震間における応力緩和の効果を加える形で実装した。これは、実際の断層面の滑りとは異なる、「実効滑り」を通して粘弾性媒質による影響を計算し、弾性体媒質における滑りから応力を求める静的グリーン関数と、その「実効滑り」で畳込み積分を行うことで実現されている。

これにより、粘弾性媒質中の Antiplane 断層における地震サイクルシミュレーションを、省メモリかつ、短時間で実行することが出来るようになった。

### 2. 地震性と非地震性の遷移の様子

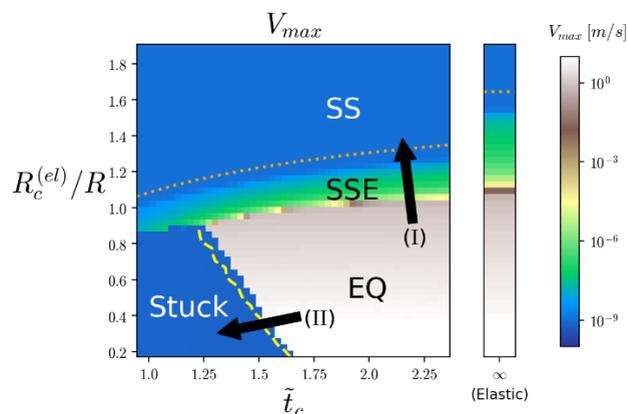


図 1 粘弾性を表す緩和時間(横軸)、摩擦特性を表す弾性体での核サイズ(縦軸)を変化させるパラメータスタディで得られた、粘弾性媒質中の断層の最大滑り速度のカラーマップ。地震(EQ)、SSE(SSE)、定常滑り(SS)、永久固着(Stuck)の4領域に分けた。

本研究で行った2変数パラメータスタディにより得られた、各シミュレーションの最大滑り速度のカラーマップを図1に示す。速度・状態依存摩擦則[Ruina, 1983]の特徴的滑り量と、粘弾性の緩和時間であるを変化させた。図1では粘弾性緩和を無視した場合の震源核サイズ(縦軸)と緩和時間(横軸)を、それぞれパッチサイズとパッチへの载荷の時間スケールで無次元した量を用いている。物性の変化によって最大滑り速度はオーダーで変化し、いくつかの異なる滑り現象を示す領域に明瞭に分類されることがわかった。それらの領域とは、地震(EQ)、地震波を出さない振動現象(SSE)、定常滑り(SS)、そして断層中心の滑り速度が時間のべき乗で減速し続ける永久固着(Stuck)の4つである。この内、地震性非地震性遷移として、地震(EQ)から定常滑り(SS)への遷移(I)と、地震(EQ)から永久固着(Stuck)への遷移(II)との2種類があることもわかった(図1)。EQ-SS遷移(I)を見ると、必ずSSE領域を通ることがわかる。一方、EQ-Stuck遷移(II)の場合は、緩和時間の減少に伴って地震の再来間隔が伸びていき、ある臨界緩和時間でべき乗則的に発散する。より短い緩和時間では地震活動が見られなくなったが、その際、SSEのような現象は確認されなかった。

粘弾性の変化によって生じる地震性非地震性遷移(II)でSSEを伴わないことは、実際のSSEが存在する地震発生下限では、粘弾性の変化(遷移(II))ではなく、摩擦特性の変化(遷移(I))が重要であることを示唆している。

### 3. なぜ、このような遷移が起こるのか？

それぞれの遷移境界について考察してみよう。理論的に導きやすいのは、SSE-SS遷移であり、バネとダッシュポットを繋いだ1自由度系の線形安定性解析を行なうと、図1のオレンジの点線のよう求められる。つまり、その下側のEQ、SSE、

Stuck領域は定常解周りで線形不安定であり、振動が成長していく。EQ-SSE遷移はより複雑な条件が絡んでいるが、最もこの遷移を支配すると考えられるパラメータとして震源核サイズが挙げられる。弾性体の場合、震源核サイズが、パッチサイズより十分小さいときは震源核形成が起きて地震が起き、パッチサイズ程度の大きさだと地震が起きず、SSEのような非地震性の振動現象が観測される。図1を見ると、緩和時間の変化に伴って、EQ-SSE境界が曲線を描いていることがわかる。これが意味することは、震源核サイズが緩和時間に依存し、弾性体の場合の核サイズを適用できないということである。ただ、緩和時間への核サイズの鋭敏性は、摩擦特性に比べて小さくなく(境界が緩やか)、緩和時間の変化がSSEの発生に及ぼす寄与は、摩擦特性に比べて小さいと考えられる。

### 4. まとめ

- ・スペクトル境界積分方程式法を用いた、粘弾性媒質中の断層における動的地震サイクルシミュレーション手法を開発した。
- ・粘弾性を表す緩和時間と、摩擦特性を表す震源核サイズに関してパラメータスタディを行い、それぞれのシミュレーション結果の最大滑り速度を2次元カラーマップで表現すると、地震(EQ)、SSE、定常滑り(SS)、永久固着(Stuck)の4つの領域に明瞭に分類されることがわかった。
- ・地震性非地震性遷移には、摩擦特性に強く依存するEQ-SS遷移と粘弾性に依存するEQ-Stuck遷移の2種類があったが、SSEを伴うのはEQ-SS遷移のみであったため、実際のSSEを伴う地震性非地震性遷移を支配しているのは、EQ-SS遷移を生じさせる摩擦特性の変化である。
- ・EQ-SSE遷移境界は、緩和時間の依存性があることがわかったが、その依存性は摩擦特性に比べて小さかった。