

## 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 a Viscoelastic Material with a SBIEM

○三宅 雄紀、野田 博之

○Yuki MIYAKE, Hiroyuki NODA

A seismogenic zone exists in the upper crust, underlain by a zone where slow slip events (SSEs) and tremors are observed, and seismicity disappears in the deeper crust. The transition between seismogenic and aseismic behavior may be caused by changes in frictional properties of the fault or changes in viscoelasticity of the surrounding medium. Although SSEs were numerically generated in previous studies by changing the frictional properties, the effect of viscoelasticity on the transition remains to be studied. In this study, we implemented interseismic viscoelastic stress relaxation to an elasto-dynamic earthquake sequence simulation code using a spectral boundary integral method. Parameter studies on the relaxation time for a fault with a rate-weakening patch, which would be seismogenic in an elastic limit, have revealed that the seismic-aseismic transition is not associated with SSEs. This indicates that the change in the frictional property is primarily important in the transition.

### 1. 地震活動が無くなるのはなぜ？

上部地殻には巨大地震を起こす領域があり、その深部ではスロースリップイベント (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。この断層挙動の変化を説明するためには、深さによって変化する物性を考慮して断層の運動を詳細に調べる必要がある。ここでは、深さによって変化する物性として、弾性エネルギーを蓄える媒質の粘弾性と、断層面の摩擦特性の2つを考える。温度上昇による摩擦特性（特に、摩擦強度の滑り速度依存性[e.g., Blanpied et al., 1991]）の変化を考えた場合、地震性から非地震性の塑性へと遷移する際、SSE が起こることが地震サイクルシミュレーションから明らかとなっている[Liu and Rice, 2009]。一方、粘弾性の変化の場合、弾性から粘性の遷移の中で、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これまでになかった。これは、パラメータスタディに必要な数多くの計算の為には、粘弾性の効く長い時間スケールと慣性項の効く地震時の短い時間スケールを単一の枠組みで効率的に解く手法が必要だったからである。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主な原因であるかを突き止めることが出来る可能性がある。

したがって本研究では、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、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、地震間の粘弾性媒質による応力緩和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」を導入、逐次時間積分し、これを弾性体媒質の静的グリーン関数と畳み込む事で粘弾性媒質中の応力を計算する形で実現されている。これによって、面外問題に対して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を、省メモリかつ、短時間で行うことが出来るようになった。

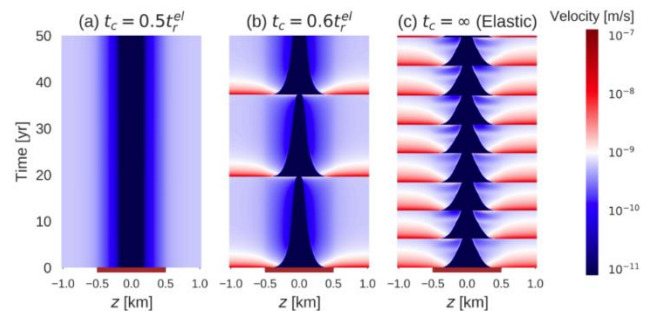


図 1 様々な緩和時間の粘弾性媒質中の断層の滑り速度分布の時間変化の様子。左側がより粘性、右側が弾性に対応する。

## 2. 地震性と非地震性の遷移の様子

図1に、本研究で行った粘弾性媒質中の地震サイクルシミュレーションの結果の例を示した。左の方が粘弾性の緩和時間が小さい深部での挙動に対応し、一番右のものは弾性体極限に対応する。無限大の緩和時間に対応する弾性体から緩和時間を小さくすると、地震の再来間隔が増加し、ある臨界緩和時間より小さくなると地震が発生しなくなることがわかった。図1の(a)は非地震性、(b)と(c)は地震性の挙動をしている。地震性から非地震性の遷移は(a)と(b)の間で起こっているが、この遷移の中で、摩擦特性の変化で見られるようなパッチ全体が（プレート運動速度程度の）小さな滑り速度で振動するSSEは確認されなかった。

粘弾性の変化による地震性と非地震性の遷移でSSEが起こらないことは、実際のSSEが存在する地震発生下限では、粘弾性の変化ではなく、摩擦特性の変化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？

まず、地震が起こるための条件を考えてみる。速度弱化領域内の固着域は、地震間のローディングによって、少しずつ小さくなり、それに伴い固着していない領域が大きくなる。固着していない領域が、摩擦特性によって決まる臨界波長程度の大きさに達すると、線形不安定となり、振動しながら摂動が大きくなる。固着がはがれた領域が、Griffith基準のエネルギー収支から決まる破壊核サイズより大きい場合には、破壊核の形成が可能となる。

摩擦特性の変化によって、臨界波長がパッチサイズ（速度弱化領域のサイズ）程度になり、核サイズがパッチサイズより大きくなるならば、高速

破壊は起きずに、小さい滑り速度で振動するSSEを生み出すようになる。

続いて、粘弾性の変化による地震性と非地震性の遷移で起こるメカニズムについて考えてみる。粘弾性体は短い時間スケールでは弾性体の様に振る舞うため、破壊核のサイズはほとんど変化しない。地震が無くなるためには、例えば摩擦特性の変化を考えた場合と同様に、線形安定性の臨界波長が大きくなる可能性が挙げられる。そのような遷移が起こる緩和時間を計算したところ、数値計算で得られた緩和時間よりもオーダーで小さな値が得られた。さらに、このような遷移において特徴的にみられるSSEが数値シミュレーションでは起こっていない。したがって、粘弾性の場合の遷移は、臨界波長、つまり線形安定性の変化によって起こる遷移ではなく、全く別のメカニズムで起こっていることがわかった。

## 3. まとめ

- ・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地震サイクルシミュレーション手法を開発した。
- ・緩和時間を小さくすると地震の再来間隔が大きくなり、臨界緩和時間よりも小さな緩和時間では地震が起きなくなった。
- ・この地震性と非地震性の遷移の中でSSEは起きなかったため、実際の遷移は、摩擦特性の変化によるものということが示唆される。
- ・摩擦特性の場合と異なり、粘弾性の遷移は、線形安定性の遷移では説明できない別のメカニズムによって生み出されている。