

粘弾性媒質中の固着域の挙動におけるホモクリニック分岐と摩擦強度差の影響 Homoclinic Bifurcation in Behavior of an Asperity in a Viscoelastic Medium and Effect of Strength Contrast

○山本誠・野田博之

○Makoto YAMAMOTO, Hiroyuki NODA

Using the seismic cycle simulation in a viscoelastic medium developed by Miyake and Noda (2019), we investigated the mechanism of the transition between seismic cycle (EQ) and permanent stuck (ST) of a rate-weakening patch discovered by them. Efficient viscoelastic relaxation causes ST. In their study, the frictional strength was assumed to be uniform, but in this study, the difference in frictional strength between the inside and outside of the patch was also considered. A weaker surrounding region of the patch helps its stress relaxation and promote permanent stuck by more than one order of magnitude in terms of the relaxation time. Comparison with a simplified system with 2 degrees of freedom indicates that the EQ–ST transition is a homoclinic bifurcation.

1. はじめに

Miyake and Noda (2019) は、マクスウェル線形粘弾性媒質中の2次元の動的地震サイクルシミュレーション手法を開発し、その断層挙動を調べた。彼らは速度弱化パッチの挙動について、地震性 (EQ) - 定常滑り (SS) 遷移と地震性 (EQ) - 永久固着 (ST) 遷移が存在することを発見した。永久固着とは、粘弾性緩和の影響でパッチに荷重が効かなくなり、地震が起こらなくなる現象である。EQ-SS 遷移に関しては既往研究が多くあり、ホップ分岐として理解されている。一方、EQ-ST 遷移についての理解はほぼなされていない。また、Miyake and Noda (2019) では簡単のため摩擦強度を空間的に一様としているが、Ikari et al. (2011) によると、パッチ内外で強度差が存在する可能性がある。本研究では摩擦強度差を考慮して地震サイクルシミュレーションを行い、EQ-ST 遷移の物理的理解を試みた。

2. 手法

Miyake and Noda (2019) が開発したシミュレーションを利用し、緩和時間と摩擦強度差の2次元でパラメータスタディを行った。速度弱化パッチを速度強化域内に配置し、系の両端に周期境界条件を設定した断層モデルの2次元面外問題を扱った。断層面には速度状態依存摩擦則 (aging law) を適用した。基準摩擦係数 f_0 について、パッチ内 (速度強化域) は $f_0^{(rs)} = 0.6$ 、パッチ外 (速度

強化域) は $0.3 \leq f_0^{(rs)} \leq 0.6$ とし、与えることで摩擦強度差 $\Delta f_0 = f_0^{(rs)} - f_0^{(rw)}$ を表現した。また、緩和時間 t_c については、荷重の時定数 t_{load} を用いて無次元化 ($\tilde{t}_c = t_c/t_{load}$) して $40 \leq \tilde{t}_c \leq 610$ とし、与えた。数値計算の初期値としては定常解に十分近い値を用いた。

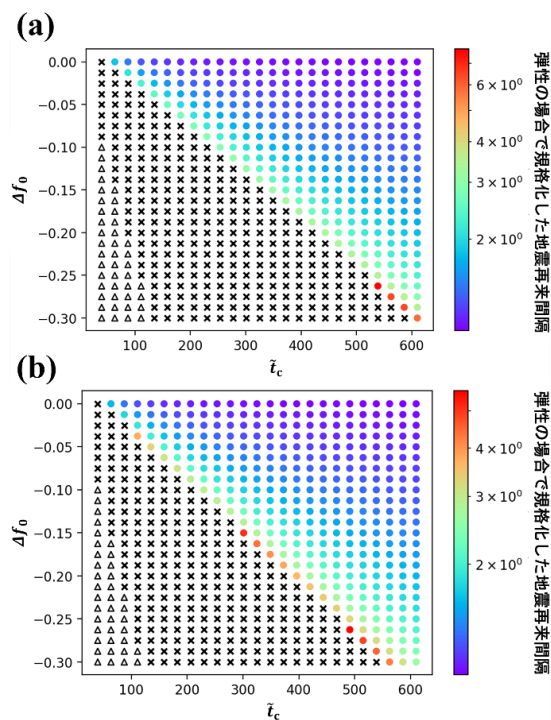


図1. パラメータスタディ結果。(a) は連続体モデル、(b) はバネ-ブロックモデル。色は地震再来間隔を表し、×印は永久固着、△印は定常解が得られなかったことを示す。

3. 結果・考察

緩和時間と摩擦強度差の2次元でパラメータスタディを行った結果 (図1(a)), 摩擦強度差は緩和を助けるセンスに働き、永久固着を起りやすくする効果があることが分かった。調べた中で強度差が最大となる $\Delta f_0 = -0.3$ では緩和時間にして一桁以上の影響を及ぼしていた。次に、低自由度の簡略化したモデル、バネ-ブロックモデルにおいてもパラメータスタディを行ったところ、よく似た結果 (図1(b)) が得られた。また、解軌道の比較も行った (図2) が、こちらも非常に良い一致が確認された。このことから、解析がしやすいバネ-ブロックモデルを用いて EQ-ST 遷移のメカニズムを調べるのが有効だと考えた。本研究で用いたバネ-ブロックモデルは独立変数が2つのみであるため、2次元の変数空間で解を理解できる。バネ-ブロックモデルの解の挙動を詳しく調べた結果 (図3)、EQ-ST 遷移はホモクリニック分岐であることが分かった。定常解が2つ存在し、初期値として用いたのはオレンジ色の点で示した不安定固定点である。もう一つは赤色の点で示した鞍点で、これがリミットサイクルにぶつかることで分岐が起こっている。また、方程式系を解析することで、遷移を決定するのは、応力が最大となるタイミングにおける、载荷による応力の変化速度と、応力の緩和速度の大小関係であることを見出した。強度差が大きいと緩和速度が大きくな

るため、永久固着がより起りやすくなると理解することができる。

4. まとめ

Miyake and Noda (2019) が開発した粘弾性媒質中の地震サイクルシミュレーションを用いて、彼らが報告していた地震性 (EQ)-永久固着 (ST) 遷移のメカニズムを調べた。緩和時間と摩擦強度差の2次元でパラメータスタディを行い、断層挙動の変化を調べた。断層強度差の存在は緩和を助けるセンスに働き、本研究の設定で最大の強度差では緩和時間にして一桁以上の影響を及ぼしていた。連続体モデルを簡略化したバネ-ブロックモデルにおいても同様にパラメータスタディを行ったところ、両モデルの結果がよく似ていた。よって、より解析がしやすいバネ-ブロックモデルの解の挙動を詳しく調べた。その結果、EQ-ST 遷移はホモクリニック分岐であること、遷移を決定するのは応力が最大となるタイミングにおける、载荷による応力の変化速度と強度差を含めた摩擦による応力の緩和速度の大小関係で決まることを見出した。

引用文献

- Ikari, M. J. et al. (2011). *Geology*
Miyake, Y & Noda, H. (2019). *EPS*.

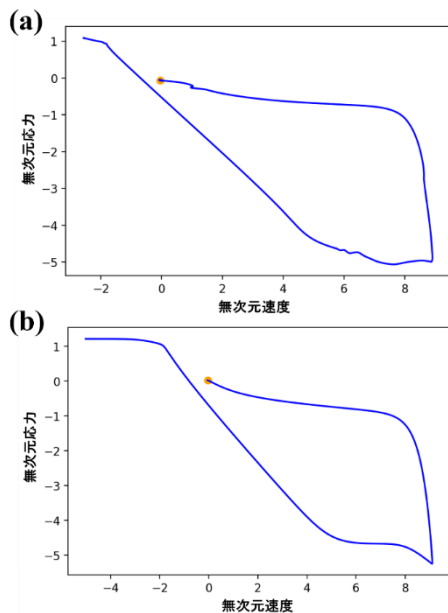


図2. 解軌道(永久固着の場合)の比較。(a) は連続体モデルのパッチ内平均、(b) はバネ-ブロックモデル。

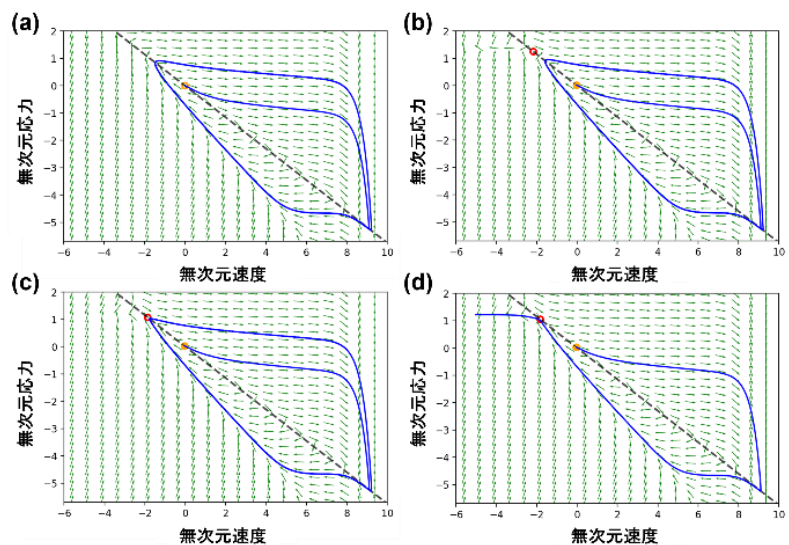


図3. 速度と応力の相空間におけるベクトル場と解軌道。(a) は弾性、(b)~(c) は粘弾性の場合である。オレンジの点(鞍点)と赤の点(不安定固定点)は定常解である。