

## 速度・状態依存摩擦則を用いた地震サイクル計算における dip angle および動的応力伝播の効果

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学地球科学教室 公開日: 2014-07-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 三井, 雄太 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.14945/00007893">https://doi.org/10.14945/00007893</a>

# 速度・状態依存摩擦則を用いた地震サイクル計算における dip angle および動的応力伝播の効果

三井雄太<sup>1</sup>

## Effects of dip angle and dynamic stress transfer in long-term fault slip simulation using the rate and state friction

Yuta MITSUI<sup>1</sup>

**Abstract** Numerical model of long-term fault slip (earthquake cycle) simulation had been initially developed with a 90-degree dip angle to the free surface, neglecting dynamic stress transfer. At present we can implement either effect of lower dip angle or the dynamic stress transfer into the model, but mounting both effects is still difficult. Here we perform numerical experiments of the earthquake cycle model to compare the dip-angle effect with the dynamic effect. Qualitatively, both prolong earthquake recurrence interval by enlarging event magnitude. We find that the effect of the low dip angle can be greater than the dynamic stress transfer when the dip angle is as small as actual subduction plate interface. This tendency is stronger as seismic area is shallower.

**Keywords:** rate and state friction, earthquake cycle, dynamic stress transfer, dip angle, free surface

### はじめに

岩石実験 (Dieterich, 1979; Ruina, 1980) に基づく速度・状態依存摩擦則 (rate- and state-dependent friction law) は、断層上の境界条件として、多くの数値弾性体力学の研究において用いられてきた。とりわけ、Tse & Rice (1986) を嚆矢とする、スティック-スリップ領域・定常すべり領域・遷移領域が同一断層上で共存するようないわゆる地震サイクルモデルの数値計算において、その威力を発揮してきた。まず、以下にその概要をまとめる。

速度・状態依存摩擦則では、面上の摩擦係数  $\mu$  がすべり速度  $v$  および面の状態を表す変数  $\theta$  に依存するとされ、通常は以下の構成式で表現される。

$$\mu = \mu_0 + a \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) + b \ln\left(\frac{v_0\theta}{L}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\mu_0$  は  $v=v_0$  のときの摩擦係数であり、また  $a$ ,

$b$ ,  $L$  は摩擦係数の発展を支配するパラメータである。さらに、 $\theta$  は時間の次元を持ち、状態発展則に従って変化する。状態発展則としては aging law と呼ばれる下記の形式がもっとも標準的である。

$$\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{v\theta}{L} \quad (2)$$

これにより、 $v \cong 0$  のとき摩擦係数が経過時間  $t$  の対数に比例して増加すること、および、速度  $v$  の急変後に摩擦係数がすべり弱化的に減少することが表される (例えば Ampuero & Rubin, 2008)。さらに、 $d\theta/dt=0$  のときを定常摩擦状態と呼び、このときの摩擦係数  $\mu_{ss}$  は  $\mu_{ss} = \mu_0 + (a-b) \ln(v/v_0)$  と書ける。ここで、摩擦パラメータ  $(a-b)$  が正のときは、すべり速度  $v$  が增大するに伴って定常摩擦係数が增大する速度強化、負のときは、すべり速度  $v$  が增大するに伴って定常摩擦係数が減少する速度弱化的特性となる。前者の速度強化の性質を持つ断層領域単独では、スティック-スリップ挙動は生じない (逆は真ではない)。

<sup>1</sup> 静岡大学理学研究科地球科学教室, 〒422-8529 静岡市駿河区大谷 836

<sup>1</sup> Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan  
E-mail: symitsu@ipc.shizuoka.ac.jp (Y. M.)

地震サイクルモデルの数値計算では、ほとんどの場合、境界要素法と呼ばれる手法を用いて弾性体力学の問題を解く。境界要素法では、差分法や有限要素法といった領域法とは異なり、弾性体全体ではなく断層上だけに数値グリッドを設定する。断層上のグリッド  $i$  におけるせん断応力変化  $\Delta\tau_i$  を、別のグリッド  $j$  での変位量  $\Delta u_j$  に対する弾性応答  $G_{ij} \Delta u_j$  の重ね合わせとして表現する。ここで、 $G_{ij}$  は弾性体の媒質定数や境界条件に依存するグリーン関数である。境界要素法のメリットとして、小さい計算負荷で精度の良い数値計算が可能となる。一方で、グリーン関数が既知でなければならない、つまり、均質弾性体かそれに準ずる単純な構造の弾性体中の問題しか解けない、というデメリットがある。

弾性体の運動方程式を境界要素法の流儀(例えばCochard & Madariaga, 1994)に従って変形すると、断層上の各グリッドにおいて

$$\tau - \tau_f = F_1 + F_2 \quad (3)$$

という形の式を解けば良いことになる。ここで  $\tau$  は外部からロードされるせん断応力で、Tse & Rice (1986) 以来の地震サイクル計算では、後述のようなモデル化を別個に行う。 $\tau_f$  は摩擦応力で、摩擦係数  $\mu$  と有効法線応力  $\bar{\sigma}$  の掛け算となる。有効法線応力は、断層面上の間隙流体圧の変動により大きく変わり、地震サイクルに影響を与え得ると考えられているが(例えばMitsui & Hirahara, 2009)、本稿では簡単のために不変と仮定する。

式(3)の右辺は、元々の運動方程式の慣性項に相当し、動的な応力伝播の効果を表す。この右辺を0とするのが準静的仮定である。この仮定は、断層が高速で滑っているときには破綻する。右辺  $F_1 + F_2$  の具体形は、媒質が均質弾性体の場合には3次元問題まで既に式が導出されており(Fukuyama & Madariaga, 1998)、時間・空間方向の多重積分を含む形式となる。これを数値計算すれば、動的な応力伝播まで考慮した完全な解となる。しかし、地震サイクルモデルに関しては、計算コストの問題から、このような研究は今までなされていない。代わりにRice (1993) は、式(3)の右辺のうち、積分を含まない項である  $F_1 = vG/(2c_s)$  のみを地震サイクル計算で評価することを提案した。ここで  $G$  は媒質の剛性率、 $c_s$  はS波速度であり、 $F_1$  はS波の放射に伴う応力降下量を表す項である。この仮定は準動的近似と呼ばれ、多くの研究がこれに従った。

最後に、外部からロードされるせん断応力  $\tau$  は、プレートの定常的な変位量  $v_{pl} t$  と各グリッドにおけるすべり量  $u$  との差に対する静的弾性応答の総和として与えられる。グリッド  $i$  におけるロード応力  $\tau_i$  は

$$\tau_i = \tau_{0,i} + \sum_j K_{ij}(v_{pl} t - u_j) \quad (4)$$

のような形で与えられる。 $\tau_{0,i}$  は断層が定常すべりしているときのグリッド  $i$  における基準せん断応力で、 $K_{ij}$  は弾性体のグリーン関数を表す。

以上のように、地震サイクル計算の枠組みというもののはほぼ完成している。しかし、細部については多くの課

題が残されている。一例として、自由表面に対して任意のdip angleを持つような断層上の地震サイクルを、動的応力伝播を完全に考慮して計算することは未だに難題である。沈み込み帯のプレート境界断層を研究対象とする場合に、この点は大きなネックとなる。

本稿では、上記の難題に直接挑むことはしない。その代わりに予備的アプローチとして、既に確立されている「任意のdip angleで計算できる準動的な手法」と「(近似的に)dip angle 90°固定の動的な手法」とを同じ摩擦パラメータで比較し、自由表面に対するdip angleの効果および動的応力伝播の効果の程度を議論する。特に、固着と高速すべりを繰り返すスティックスリップが自発的に発生する領域(以後seismic areaと呼ぶ)が自由表面の近くにある場合と、地下深くにある場合とで、結果に違いがあると予想される。この点を数値実験によって調べる。

## 手法と数値実験概要

まず、「任意のdip angleで計算できる準動的な手法」については、Kato & Hirasawa (1997) が、2次元面内問題の範囲で一般的に利用可能な手法を提示した。彼らは、式(4)の  $K_{ij}$  に半無限均質弾性体のグリーン関数(Rani & Singh, 1992)を適用し、自動可変ステップ型のルンゲークッタ法(Press et al., 1992)によって(1)-(4)の連立方程式を解いた。準動的仮定のため、式(3)の  $F_2$  は0となる。また、応力を評価するグリッドとすべりを評価するグリッドを互い違いに置くスタaggerドグリッド法を採用し、数値安定性を向上させている。この手法は、グリーン関数をOkada (1992)に入れ替えるだけで容易に3次元問題へ拡張可能であり、非平面断層も取り扱い可能である。これを利用して、多くの応用研究が行われてきた。本稿では、以後こちらの手法をKH法と呼称する。

次に、「(近似的に)dip angle 90°固定の動的な手法」について述べる。この手法はRice & Ben-Zion (1996)に端を発し、高速フーリエ変換(FFT)を利用して高速計算を行うというものである。具体的には、式(3)の  $\tau$  と  $F_2$  が波数領域で定式化されている(導出はGeubelle & Rice, 1995)。FFTによりそれらの項を空間領域の値へ変換するというプロセスが、式(1)-(4)を連立させてルンゲークッタ法で解く過程の中に組み込まれる。動的応力伝播を表す項  $F_2$  は、波数領域においては時間方向のみの積分になり、結果として数値計算のコストが大きく減少する。 $F_2$  を0とすれば、準動的な仮定下での計算も可能である。この手法はフーリエ変換を利用しているので、[1] 原則として全無限弾性体中の平面断層しか解けない [2] 計算領域の端が周期境界条件のため天然とは明らかに異なる、といった問題が生じる。しかし、動的応力伝播を地震サイクル計算で評価するには長らく唯一の方法であり続け、Lapusta & Liu (2009)によって3次元問題への拡張もなされた。本研究では、Lapusta & Liu (2009)などに従い、2次のルンゲークッタ法を用いて連立方程式を解く。(ただし、本研究の準備段階において、2次のルンゲークッタ法を用いた場合と4次のルンゲークッタ法を用

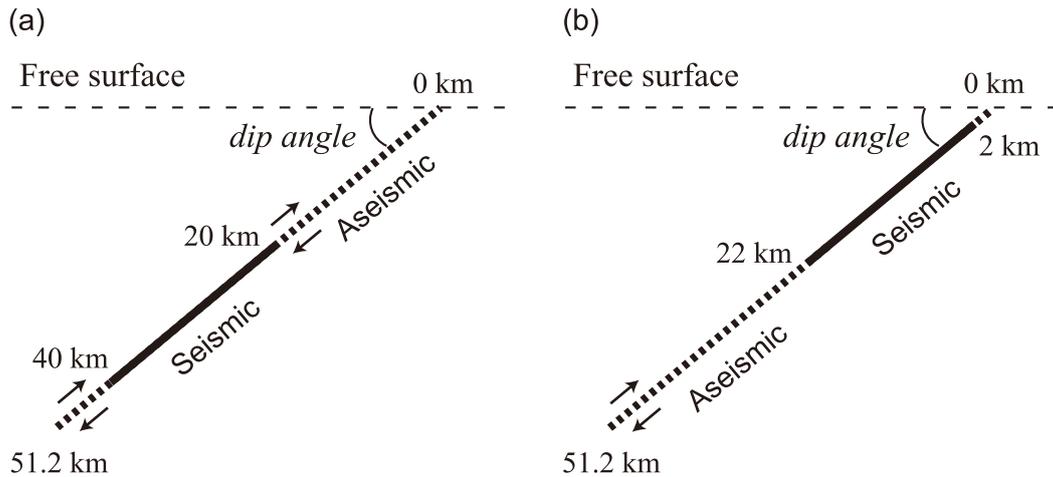


Fig. 1 2種類の断層モデル。Seismic area (実線) では自発的な震源核生成過程を伴うスティックスリップ挙動が生じ, aseismic area (太い破線) は速度  $v_{pl}$  で定常すべりし続ける。すべりは逆断層方向とする。(a) Seismic areaが自由表面から離れた, 深い地震モデル。(b) Seismic areaが自由表面に近い, 浅い地震モデル。

Fig. 1 Two fault models in this study. In seismic area (solid line), stick-slip events with spontaneous nucleation occur. In aseismic area (bold broken line), steady slips occur at a velocity of  $v_{pl}$ . Fault slips in a reverse fault direction. (a) Deeper earthquake model, with the seismic area far from the free surface. (b) Shallower earthquake model, with the seismic area near the free surface.

いた場合とで, 計算結果に少し違いが見られた。この点については, 別の機会に報告する。) )

上記 [1] に関して, この手法では, 近似的に dip angle  $90^\circ$  の半無限弾性体中斷層を設定することも可能である。これは, 全無限弾性体中の斷層変位をあるところで鏡像法により折り返し, その箇所に擬似的な自由表面を作り出すという手順により行う。この方法では, 本来の自由表面の条件である法線・せん断応力共に 0 という状態は作れないが, 一部を満たすことは可能である。Rice & Ben-Zion (1996) などでは, 2次元の面外問題でこれを行っている。本稿では, KH法による低 dip angle のプレート境界斷層との比較のため, 面内問題でこの手順を適用する。以後, KH法と比較する形で, こちらの手法をRB法と呼ぶ。

上記2つの手法を用いて, 自由表面に対する dip angle の影響と動的応力伝播の影響の程度を調べる数値実験を行う。本研究では, KH法・RB法ともに, いくつかの変数変換により高速化処理を行った自作のFortran90プログラムを使う(KH法に関しては, Mitsui & Hirahara (2008), Mitsui et al. (2012) など既往の研究の過程で構築したものである)。Fig. 1に, 本研究の数値実験で用いる2種類の断層モデルの概要を示す。自由表面から地下に伸びた断層上の数値グリッドに速度・状態依存摩擦則のパラメータを与え, seismic areaおよびそれ以外の領域(aseismic area)に分ける。本研究では, aseismic areaで常に速度  $v_{pl}$  の定常すべりが起こるように仮定する。余分な要素を減らすため, seismic areaと aseismic areaの遷移域は設定しない。Fig. 1aは, seismic areaが自由表面から離れた深いプレート境界地震のモデルを表す。Seismic areaの上端から自由表面までの距離と, seismic areaの幅とを同じ20kmとしている。対照的に, Fig. 1bは浅いプレート境界地震のモデルである。自由表面からプレート境界地震

上端の距離を2kmとした。この両モデルの違いは自由表面の位置だけであり, その他のパラメータはすべて同一とする。その上で, dip angleを変えつつKH法で数値計算を行う。さらにRB法で動的応力伝播を考慮した数値計算を行い, すべての結果を比較する。

パラメータを以下に列挙する。媒質は均質弾性体で, S波速度が3464 m/s, 剛性率は32 GPa, ポアソン比が0.25とした。有効法線応力  $\bar{\sigma}$  を50 MPaとし, 基準となる摩擦係数  $\mu_0$  は0.6とした。プレートの定常変位速度  $v_{pl}$  を0.1 m/yearとし,  $v_0$  も同じ値にした。速度・状態依存摩擦則のパラメータ  $a$  を0.015,  $L$  を0.03 mとした。Seismic areaに速度弱化特性を与えるため,  $b = 0.02$  と置いた。

数値グリッドの間隔は50 mとした。これは, 与えられたパラメータから計算可能な, 断層を連続体として扱えるクリティカルグリッドサイズ(例えばRice, 1993)に対して2桁小さい値であり, 数値的に十分安定である。数値計算の初期条件として, 速度・状態依存摩擦則の状態変数に若干の擾乱を与えている。また, 計算領域の端が必ず周期境界条件となるRB法では, 周期境界条件による人工的な断層間相互作用の影響を減らすために, 断層部を遥かに上回る数の数値グリッドを全体に置く必要がある。試行錯誤の結果, 実際にすべりの計算を行う断層部(長さ51.2 km)の8倍の数値グリッドを計算上設定することとした。

## 結果

本研究で与えている断層モデル(Fig. 1)のパラメータ分布は極めて単純であり, 数値計算の結果は seismic areaを中心とした周期的なスティックスリップ運動となる。結果の一例として, Fig. 2に, 深い地震モデル(Fig. 1a)の seismic area 中心点における, すべり速度  $v$  の時

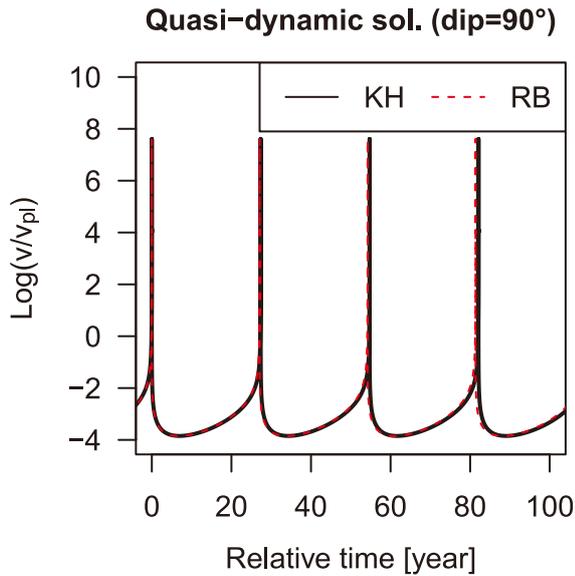


Fig. 2 数値計算結果の一例. 深い地震モデル (Fig. 1a) の seismic area 中心点における, すべり速度  $v$  (をプレート運動速度  $v_{pl}$  で規格化したもの) の時間発展を示す. Dip angle を  $90^\circ$  とし, 動的応力伝播を無視した準動的仮定の下での結果である. KH 法 (黒の実線) と RB 法 (赤の破線) の双方で計算をし, 結果がほぼ一致していることを確認した. 縦軸のすべり速度は常用対数で表している. 横軸は, 数値計算上の初期値の影響がなくなった後の, ある1回のスリップイベントからの相対的な時間とした.

Fig. 2 An example of the numerical calculation results. We show the temporal evolution of the slip velocity  $v$  (normalized by the loading rate  $v_{pl}$ ) at the center of the seismic area in the deeper earthquake model (Fig. 1a). The dip angle is a  $90^\circ$ , and the dynamic transfer is neglected (quasi-dynamic approximation). We confirm that the numerical result by the KH method (black solid line) is in good agreement with that by the RB method. “Log” in the vertical axis is the common logarithm. The horizontal axis represents the relative time from one slip event after disappearing of the initial value effects.

間発展を示した. まず KH 法と RB 法の計算プログラムの正しさの確認を行うため, 双方とも計算可能な, dip angle  $90^\circ$  かつ準動的仮定の下での結果である. 結果はほぼ一致しており, プログラムに大きな問題はないことが確認された.

次に, 本題の数値実験の結果を示す. Fig. 3 は, 深い地震モデル (Fig. 1a) における, スティックスリップイベントの繰り返し間隔の計算結果を示す. モデルがシンプルなため, 繰り返し間隔はそのまますべりイベント (地震) の規模を表すものと考えて良い. まず, dip angle  $90^\circ$  同士の, 動的応力伝播を考慮した結果 (黒い四角) と, それを無視した準動的仮定の下での結果 (白い丸) を比べると, 動的な応力伝播の効果により 10% 以上繰り返し間隔が延びたことがわかる. 一方, 準動的仮定の下で dip angle が変わっていく白い丸系列の結果を見ると, やはり dip angle が小さくなるほど繰り返し間隔が延びていく. これは, dip angle が小さくなるにつれて断層全体が自由表面に近づいていくことに起因すると考えられる. 自由

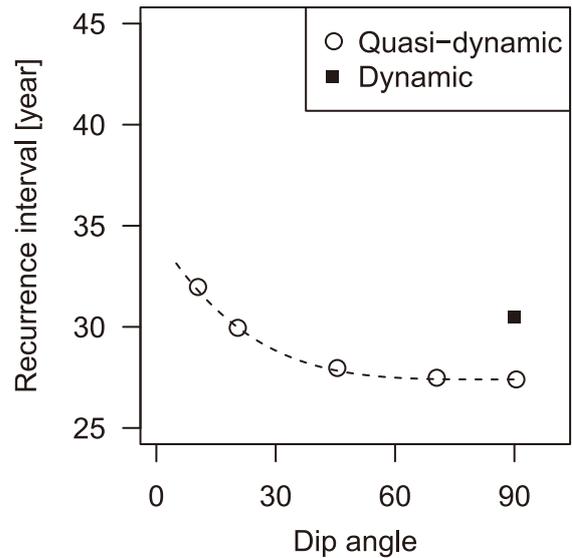


Fig. 3 深い地震モデル (Fig. 1a) における, スティックスリップイベントの繰り返し間隔. RB 法による動的応力伝播を考慮した計算結果を黒い四角, KH 法により dip angle を変化させたときの結果を白い丸で表している. 点線は後者の系列を最小二乗法により多項式フィッティングしたもので,  $y = 1.1 \times 10^{-7} (x - 90)^4 + 27.4$  という関数形になった.

Fig. 3 Recurrence interval of the stick-slip events in the deeper earthquake model (Fig. 1a). The solid square represents the calculation result with the dynamic stress transfer by the RB method. The blank circles represent the calculation results varying the dip angle by the KH method. The dotted line fits the latter sequence by the least square method, with a formula of  $y = 1.1 \times 10^{-7} (x - 90)^4 + 27.4$ .

表面上では応力各成分が強制的に 0 になり, 自由表面がなければ支えられなかったはずの応力を支えられない. 結果として自由表面近傍では, 力の釣り合いのため, 自由表面がない場合よりも大きな変位・歪みが生じる. 実際の沈み込み帯のプレート境界に近い dip angle  $10^\circ$  のときは,  $90^\circ$  のときと比べて 15% 以上繰り返し間隔が延びた.

さらに, 同様の実験を浅い地震モデル (Fig. 1b) で行った結果が, Fig. 4 である. まず, 深い地震モデルのときと比べると全体に繰り返し間隔が長くなっている. 両モデルの差は seismic area の場所であることから, seismic area が自由表面に近いことですべりイベントの規模が大きくなる効果が生じた, と解釈できる. とりわけ dip angle が小さいときに, この効果が顕著となっている. 具体的には, 準動的仮定の下で dip angle が  $10^\circ$  のときは,  $90^\circ$  のときと比べ, 繰り返し間隔が 30% 以上延びた.

## 議論

上記の数値実験の結果, 特にすべりイベントの繰り返し間隔 (毎回の地震規模) に関しては, 小 dip angle の効果が動的応力伝播の効果を上回るほどになることがわかった. しかし, 他の要素についても同様であるわけではない.

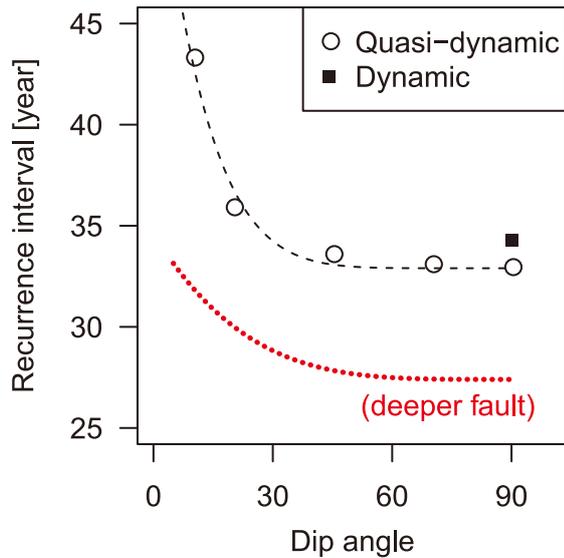


Fig. 4 浅い地震モデル (Fig. 1b) における, スティックスリップイベントの繰り返し間隔. RB法による動的応力伝播を考慮した計算結果を黒い四角, KH法により dip angle を変化させたときの結果を白い丸で表している. 黒い点線は, 後者の系列を最小二乗法により多項式フィッティングしたもので,  $y = -4.8 \times 10^{-13} (x - 90)^7 + 32.9$  という関数形になった. 参照のため, Fig. 5 の深い地震モデルでのフィッティングラインを赤い点線で示した.

Fig. 4 Recurrence interval of the stick-slip events in the shallower earthquake model (Fig.1b). The solid square represents the calculation result with the dynamic stress transfer by the RB method. The blank circles represent the calculation results varying the dip angle by the KH method. The dotted black line fits the latter sequence by the least square method, with a formula of  $y = -4.8 \times 10^{-13} (x - 90)^7 + 32.9$ . For reference, the fitting line in Fig. 3 (deeper earthquake model) is shown by the dotted red line.

例として Fig.5 に, 深い地震モデル (Fig. 1a) の seismic area 中心点における, すべりイベント中の最大すべり速度  $v$  の値を示す. 準動的仮定の下で dip angle の値を変えても変化がほとんど見られないのに対し, 動的応力伝播を考慮することで, 最大すべり速度は倍程度に増大した. このことは, 高速すべり時の断層挙動については, 動的応力伝播項  $F_2$  の寄与が決して無視できないことを意味する. 一方で, 毎回のすべりイベントの規模については, 主として断層上の静的な応力降下量で決まるため, 動的応力伝播の寄与が比較的小さくなると考えられる.

本研究では, 境界要素法に基づく半無限弾性体中の地震サイクル計算について議論してきた. この枠組みでは, 現状, dip angle の効果と動的応力伝播の効果を二者択一的に選ばなければならない. しかし, 地震サイクルを統一的に解くのではなく, 準静的な問題 (ゆっくりすべりの場合) の解法と動的な問題 (高速すべりの場合) の解法とをスイッチして計算するような手法 (例えば Fukuyama et al., 2002) を取ることで, この問題を乗り越え得るかもしれない. Kaneko et al. (2011) は, 有限要素法の一

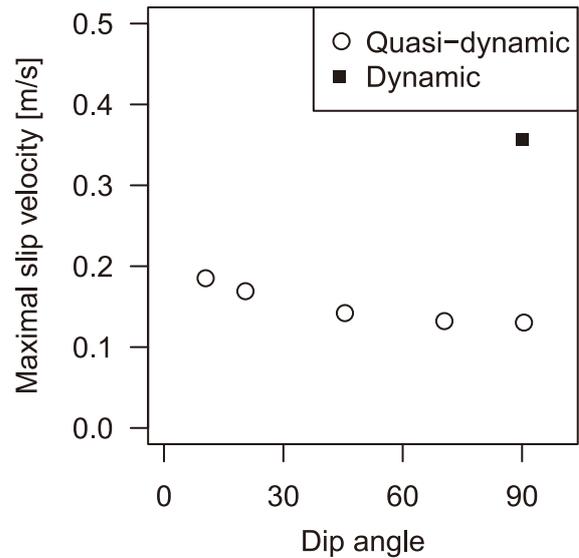


Fig. 5 深い地震モデル (Fig. 1a) の seismic area 中心点における, すべりイベント中の最大すべり速度. RB法による動的応力伝播を考慮した計算結果を黒い四角, KH法により dip angle を変化させたときの結果を白い丸で表している.

Fig. 5 Maximal slip velocity during the stick-slip events at the center of the seismic area in the deeper earthquake model (Fig. 1a). The solid square represents the calculation result with the dynamic stress transfer by the RB method. The blank circles represent the calculation results varying the dip angle by the KH method.

種であるスペクトル要素法を用いて, 上記の準静的-動的スイッチ型の数値計算を行った. 彼らは dip angle  $90^\circ$  の横ズレ断層の問題のみを解いているが, この手法は, 計算精度やコストの問題を抜きにすれば, 原理的には小 dip angle の問題にも適用可能と考えられる.

## まとめ

本研究では, 自発的なスティックスリップを起こす seismic area とそれ以外とが同一断層上で共存するような地震サイクルモデル計算において, 自由表面に対する dip angle の効果と動的応力伝播の効果とを比較した. Dip angle が小さいとき, すべりイベントの繰り返し間隔・イベント規模は増大する. Dip angle を  $90^\circ$  に固定したまま動的応力伝播を考慮した場合も, 定性的には同様である. 数値実験の結果, 特に dip angle が沈み込み帯のプレート境界並に小さいとき, その効果は動的応力伝播の効果を凌ぐほどになることがわかった. 特に seismic area が自由表面に近い場合, この傾向は強くなる.

## 謝辞

静岡大学理学研究科地球科学専攻の生田領野講師と防災総合センターの安藤雅孝特任教授には, 原稿を改善するために有益なコメントをいただきました. 感謝いたします.

## 引用文献

- Ampuero J. P. & Rubin A. M. (2008), Earthquake nucleation on rate and state faults – Aging and slip laws. *Journal of Geophysical Research*, **113**, B01302.
- Cochard A. & Madariaga R. (1994), Dynamic faulting under rate-dependent friction. *Pure and Applied Geophysics*, **142**, 419–445.
- Dieterich J. H. (1979), Modeling of rock friction 1. Experimental results and constitutive equations. *Journal of Geophysical Research*, **84**, 2161–2168.
- Fukuyama E. & Madariaga R. (1998), Rupture dynamics of a planar fault in a 3D elastic medium: Rate- and slip-weakening friction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88**, 1–17.
- Fukuyama E., Hashimoto C. & Matsu'ura M. (2002), Simulation of the transition of earthquake rupture from quasi-static growth to dynamic propagation. *Pure and Applied Geophysics*, **159**, 2057–2066.
- Geubelle P. H. & Rice J. R. (1995), A Spectral method for three-dimensional elastodynamic fracture problems. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **43**, 1791–1824.
- Kaneko Y., Ampuero J.-P. & Lapusta N. (2011), Spectral-element simulations of long-term fault slip: Effect of low-rigidity layers on earthquake-cycle dynamics. *Journal of Geophysical Research*, **116**, B10313.
- Kato N. & Hirasawa T. (1997), A numerical study on seismic coupling along subduction zones using a laboratory-derived friction law. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **102**, 51–68.
- Lapusta N. & Liu K. (2009), Three-dimensional boundary integral modeling of spontaneous earthquake sequences and aseismic slip. *Journal of Geophysical Research*, **114**, B09303.
- Mitsui Y. & Hirahara K. (2008), Long-term slow slip events are not necessarily caused by high pore fluid pressure at the plate interface: an implication from two-dimensional model calculations. *Geophysical Journal International*, **174**, 331–335.
- Mitsui Y. & Hirahara K. (2009), Coseismic thermal pressurization can notably prolong earthquake recurrence intervals on weak rate and state friction faults: Numerical experiments using different constitutive equations. *Journal of Geophysical Research*, **114**, B09304.
- Mitsui Y., Kato N., Fukahata Y. & Hirahara K. (2012), Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface. *Earth and Planetary Science Letters*, **325–326**, 21–26.
- Okada Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **82**, 1018–1040.
- Press, W. H., Teukolsky, B. P., & Vetterling W. T. (1992), Numerical recipes, 2nd ed., Cambridge University Press, New York.
- Rani N. & Singh S. (1992), Static deformation of a uniform half-space due to a long dip-slip fault. *Geophysical Journal International*, **109**, 469–476.
- Rice J. R. (1993), Spatio-temporal complexity of slip on a fault. *Journal of Geophysical Research*, **98**, 9885–9907.
- Rice J. R. & Ben-Zion Y. (1996), Slip complexity in earthquake fault models. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **93**, 3811–3818.
- Ruina A. (1980), Friction laws and instabilities: A quasistatic analysis of some dry frictional behavior. *Ph.D. thesis*, Cornell University.
- Tse S. T. & Rice J. R. (1986), Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties. *Journal of Geophysical Research*, **91**, 9452–9472.