

論文紹介

Yoshida, S. and N. Kato,
Episodic aseismic slip in a two-degree-of-freedom block-spring model,
GRL, 30 (13), doi: 10.1029/2003GL017439, 2003

概要

速度状態依存摩擦則 で記述される摩擦力を2質点系の力学モデルに作用させ、そのうち一方をアスペリティ、もう一方をそれに隣接する領域と見立てると、地震・スロースリップ・アフタースリップのような様々なすべり挙動が再現できる

様々なすべり挙動 (slip modes)

観測事例

- 東海スロースリップ
- 三陸沖アスペリティ (繰り返し破壊)
- 1994年三陸はるか沖地震, アフターズリップ

示唆

- 不均質な摩擦性質の分布
- アスペリティと隣接領域との相互作用

2質点系の力学モデル (ブロック-バネモデル)

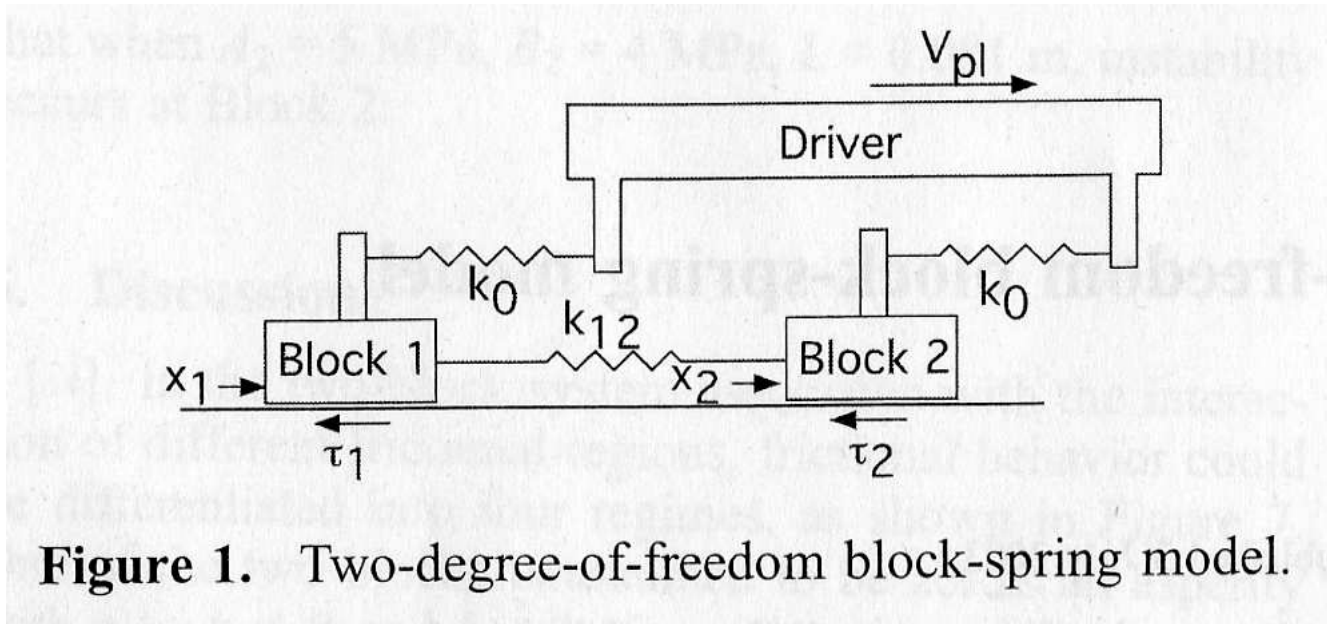


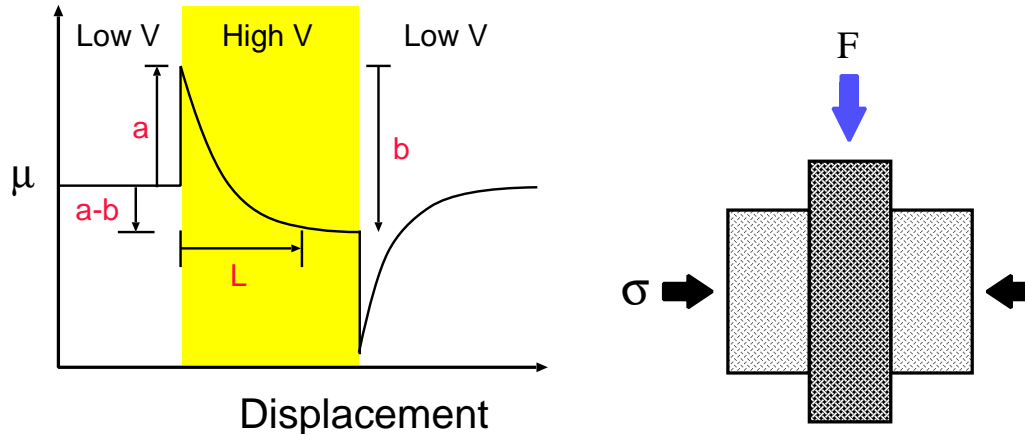
Figure 1. Two-degree-of-freedom block-spring model.

Block 1: アスペリティ

Block 2: 隣接領域

速度・状態依存摩擦則

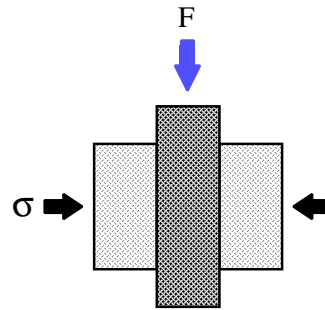
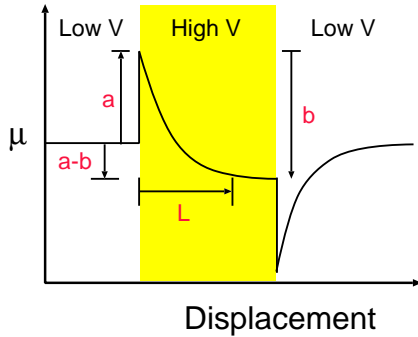
Rock sliding experiment



- 一定のすべり速度に対応した定常レベル
- 速度ステップに対する瞬間的応答 (a)
- 速度変化後、距離 L する間の長期的応答 (b)

速度・状態依存摩擦則

Rock sliding experiment



- $a - b < 0$ (速度弱化) : 不安定すべり
- $a - b > 0$ (速度強化) : 安定すべり

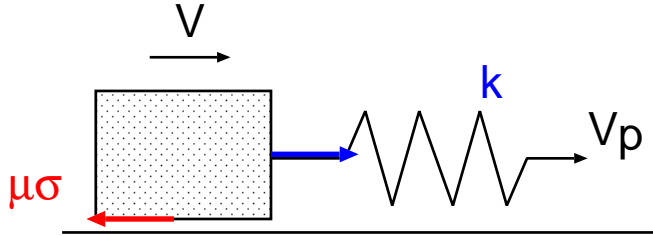
$$\mu = \mu_0 + a \ln \left(\frac{V}{V_*} \right) + b \ln \left(\frac{\theta V_*}{L} \right)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\theta V}{L} \ln \left(\frac{\theta V}{L} \right)$$

Dieterich (1979), Ruina (1983)

- μ 摩擦係数
- μ_0 基準摩擦係数
- V すべり速度
- V_* 基準すべり速度
- θ 状態変数

速度・状態依存摩擦則：質点-バネ系



すべり実験と等価な力学系

- μ 摩擦係数
- σ 法線応力
- k バネ定数
- V_p 駆動速度
- V すべり速度

臨界バネ定数

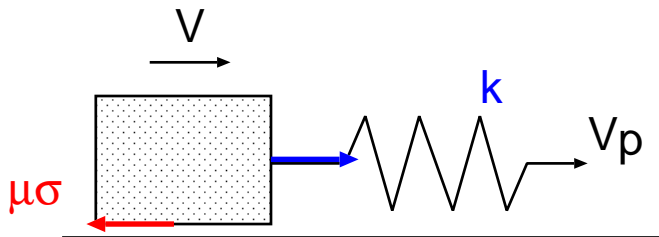
$$k_c = \frac{(b - a)\sigma}{L} = \frac{B - A}{L}$$

$k > k_c$: すべりは安定

$k < k_c$: すべりは不安定

Ruina (1983)

速度・状態依存摩擦則：質点-バネ系



すべり実験と等価な力学系

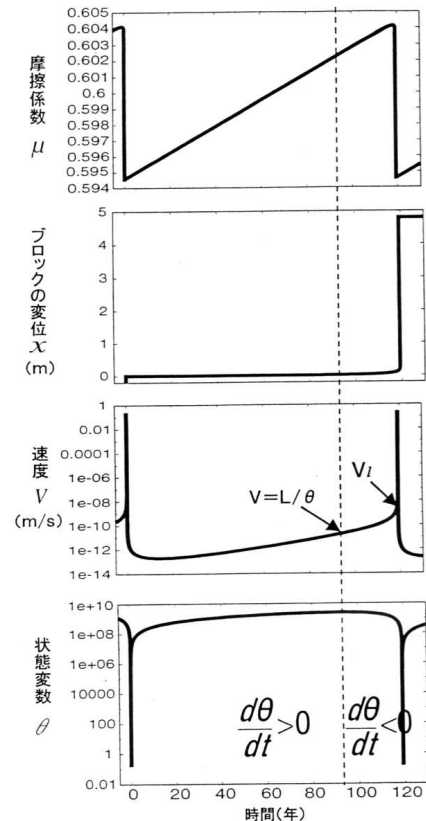
臨界バネ定数

$$k_c = \frac{(b - a)\sigma}{L} = \frac{B - A}{L}$$

$k > k_c$: すべりは安定

$k < k_c$: すべりは不安定

Ruina (1983)



光井 (2000)

方法: 2質点ブロックバネモデル

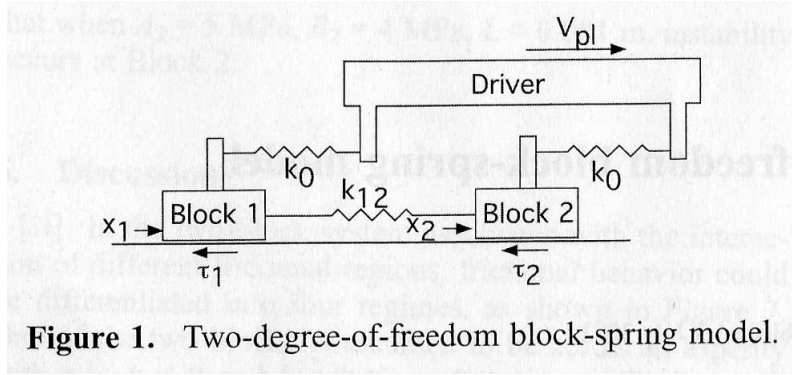


Figure 1. Two-degree-of-freedom block-spring model.

$$m \frac{d^2 x_1}{dt^2} = k_0 (V_{pl} t - x_1) + k_{12} (x_2 - x_1) - \tau_1 \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} = k_0 (V_{pl} t - x_2) - k_{12} (x_2 - x_1) - \tau_2 \quad (2)$$

$$\tau_i = \sigma_n \{ \mu_i^* + a_i \ln(V_i/V^*) + b_i \ln(\theta_i/\theta^*) \} \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = -\frac{\theta_i V_i}{L_i} \ln \left(\frac{\theta_i V_i}{L_i} \right) \quad (4)$$

方法: Block 1 がほぼ静止しているとき

$x_1 \sim 0$ とすると

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} = (k_0 + k_{12}) \left(\frac{k_0 V_{pl}}{k_0 + k_{12}} t - x_2 \right) - \tau_2 + \text{const.} \quad (5)$$

バネ定数: $k_0 + k_{12}$, 駆動速度: $\frac{k_0}{k_0 + k_{12}} V_{pl}$ の1質点と等価

$$k_c = \frac{B_i - A_i}{L_i} > k_0 + k_{12} \quad \text{不安定} \quad (6)$$

$$< k_0 + k_{12} \quad \text{安定} \quad (7)$$

方法: 設定

Block 1 のパラメタは固定:

$$A_1 = 1 \text{ MPa}, B_1 = 2 \text{ MPa},$$

$$L_1 = 0.081 \text{ m}$$

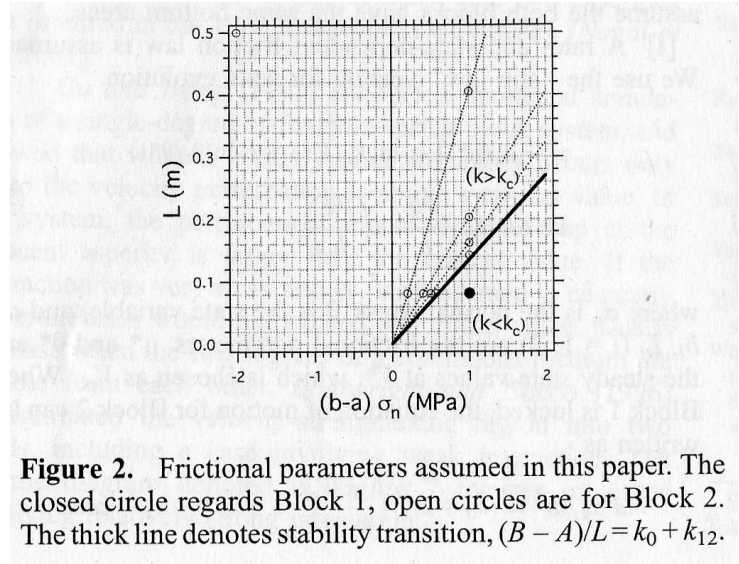
バネ定数も固定:

$$k_0 = 0.2 (B_1 - A_1)/L_1,$$

$$k_{12} = 0.4 (B_1 - A_1)/L_1$$

安定性の遷移境界:

$$\frac{B - A}{L} = k_0 + k_{12} = 0.6 \frac{B_1 - A_1}{L_1} \quad (8)$$



結果: エピソディックな非地震性すべり (EAS)

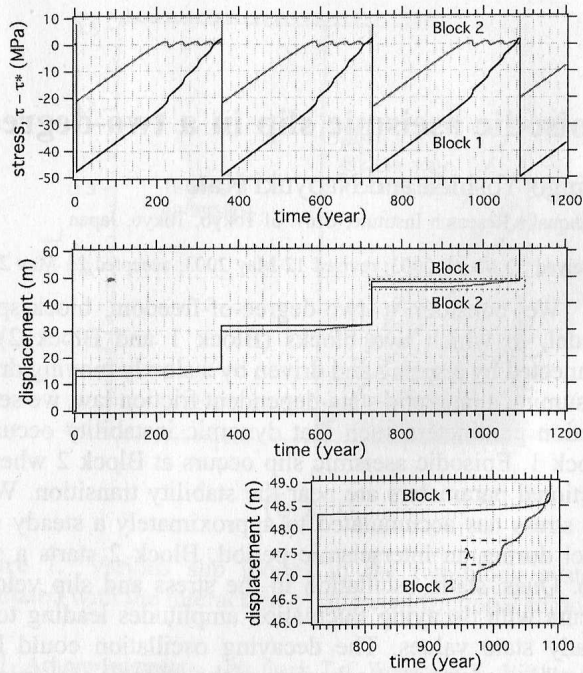


Figure 3. Time histories in stresses (top) and displacements (middle) of Block 1 and Block 2. Block 1 with $A_1 = 1$ MPa, $B_1 = 2$ MPa and $L_1 = 0.081$ m acts as an asperity, which causes cyclic instability in the system. Block 2 with $A_2 = 0.57$ MPa, $B_2 = 1.14$ MPa, and $L_2 = 0.081$ m is close to stability transition. The enlarged figure (bottom) shows that episodic aseismic slip occurs at Block 2.

遷移境界に近い条件

$$A_2 = 0.57 \text{ MPa,}$$

$$B_2 = 1.14 \text{ MPa,}$$

$$L_2 = 0.081 \text{ m} = L_1$$

$$\frac{A_2 - B_2 < 0}{L_2} < k_0 + k_{12}$$

- Block 2 は 1 が動的にすべる (地震) とき地震性すべり
- 2 の応力が定常応力状態に近づいたとき EAS
- 応力・速度が準静的に振動、定常状態の値に近づく

結果: $B_2 - A_2$, L_2 を変化させる

B - A を変化

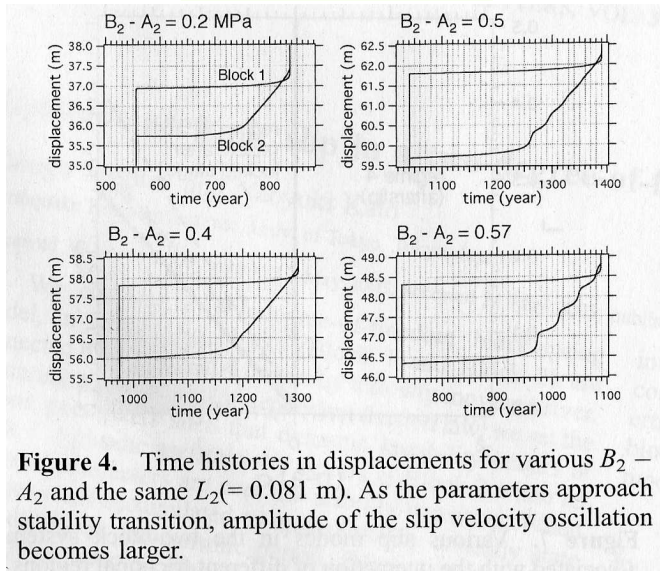


Figure 4. Time histories in displacements for various $B_2 - A_2$ and the same $L_2 (= 0.081 \text{ m})$. As the parameters approach stability transition, amplitude of the slip velocity oscillation becomes larger.

L を変化

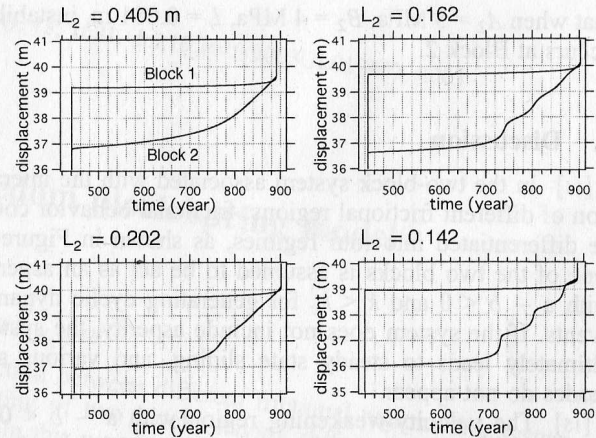
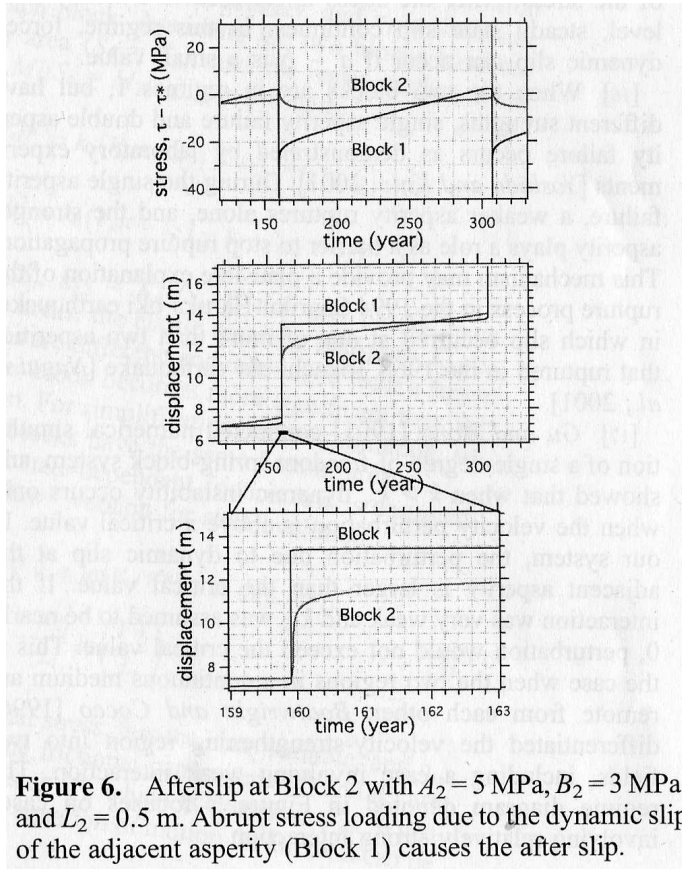


Figure 5. Time histories in displacements for various L_2 and the same $B_2 - A_2 (= 1 \text{ MPa})$. Remarkable episodic slip occurs at Block 2 near the stability transition.

- 安定性遷移境界から離れているとき (左上)、振動無しで定常状態の速度に近づく
- 境界に近づくと振動 (EAS)

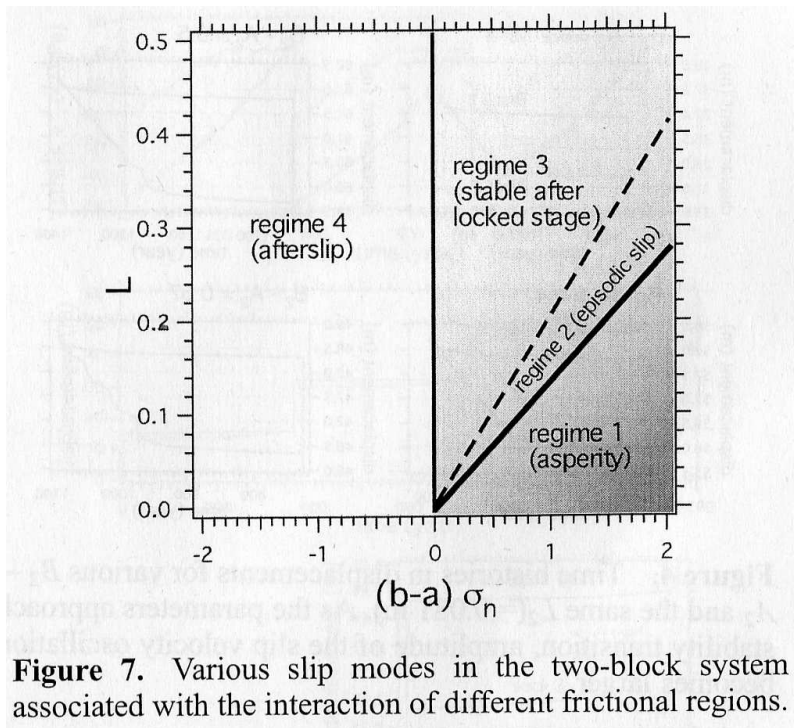
結果: アフタースリップ



$$A_2 - B_2 > 0$$

- 1 で地震 → 2 でアフター
スリップ (徐々に応力解放)
- 2 は固着状態無し

議論：摩擦パラメタ空間



- 領域 1: $k < k_c, a - b < 0$: アスペリティ (地震)
- 領域 2: k が k_c より少しだけ大きい, $a - b < 0$: 固着期間後に EAS
- 領域 3: k が k_c より十分大きい, $a - b < 0$: 固着期間後に定常すべり
- 領域 4: $a - b > 0$: 固着無し, アフタースリップ

議論: その他の問題

- EAS の時定数: 数年程度の長いものしか再現できない
- 2つとも「アスペリティ」条件のとき、単発 / 連動

感想など

- このモデルで現れた挙動は、基本的には1質点系に擾乱を加えたもので説明可能と思われる
- アスペリティ同士だとさらに複雑になる可能性