

地震学における摩擦の研究

地質調査所 佐藤 隆司¹

1 はじめに

地殻内で発生する地震は、火山地域などで発生する特殊なメカニズムのものを除くと、断層上での急激なすべり現象であると考えられている。一方、San Andreas 断層などでは安定すべり（クリープ）が発生している地域の存在が知られている。岩石試料を用いた摩擦実験においても、同様に、実験条件により安定すべり（stable sliding）や不安定すべり（unstable sliding）が間欠的に発生する固着－すべり（stick-slip）などの現象が見られる。地震と岩石の摩擦実験で見られる不安定すべりの類似性が指摘されて以来 [1]、地震現象解明のための岩石の摩擦実験が数多く行われてきた。ここでは地震現象解明のために行われてきた摩擦現象の研究について、不安定すべり発生に関する研究および準静的なすべりから不安定すべりに至る遷移過程に関する研究に焦点を絞って簡単なレビューを行う。

2 不安定すべりの発生条件に関する研究

地震が岩石の摩擦実験で見られる不安定すべりの一種であるとする、不安定すべりの発生条件を明らかにすることは、地震現象解明のための非常に重要な課題となる。この研究の進展には摩擦の時間依存性およびすべり量依存性の発見が大きな役割を果たした。岩石の静摩擦強度の時間依存性が調べられ、静摩擦強度がすべり面の固着時間とともに増大することが示された [2, 3]。また、岩石の動摩擦力がすべり速度に依存することが見いだされた [4]。さらに、すべり速度をステップ状に変化させたとき、動摩擦力はステップ状の変化をした後、すべり量の増大とともに新たな定常状態に近づくこと、新たな定常状態に到達するまでにほぼ一定のすべり量が必要なことが示された [5]。

これらの実験結果を説明するため、すべり速度とすべり面の状態に依存する摩擦法則（rate- and state-dependent friction law）が提唱された [5, 6]。これらのうちもっとも広く利用されているものは以下の式により与えられる [6]。

$$\mu = \mu_0 + a \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) + b \ln\left(\frac{V_0 \theta}{D_c}\right) \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{V\theta}{D_c} \ln\left(\frac{V\theta}{D_c}\right) \quad (2)$$

¹E-mail: satoh@gsj.go.jp

ここで、 μ は摩擦係数、 V はすべり速度、 θ はすべり面の状態を表す変数、 a , b , D_c は実験的に決定される定数を表す。また、 μ_0 はすべり速度 V_0 における定常状態 ($\dot{\theta} = 0$) での摩擦係数を表す。すべり速度 V_1 の定常状態にある面のすべり速度がステップ的に V_2 に増加したときの摩擦係数の変化を図 1 に示す。摩擦係数はすべり速度の増加と同時に a に比例して増加した後、すべりの進行による状態変数の変化にともない指数関数的に新たな定常状態に漸近する。変化量は b に比例し、 D_c は新たな定常状態に漸近するときの特徴的なすべり量に対応する。定常状態における摩擦係数の変化 $\Delta\mu_{ss}$ は

$$\Delta\mu_{ss} = (a - b) \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (3)$$

で表される。 $a - b$ が正の場合をすべり速度強化 (velocity strengthening), 負の場合をすべり速度弱化 (velocity weakening) とよぶ。

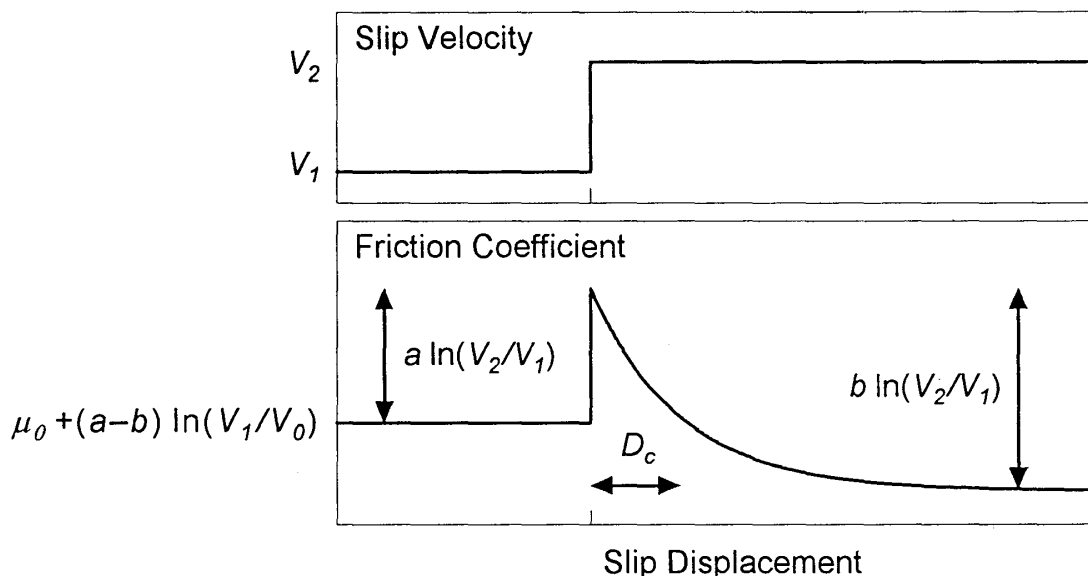


図 1: すべり速度のステップ変化にともなう摩擦係数の変化。

底面にすべり速度と状態に依存する摩擦法則に従う摩擦力がはたらくブロックをバネで引くモデル (バネ-ブロックモデル) を用いて不安定すべりの発生の条件が理論的に調べられている [6, 7]. 定常状態にあるモデルのバネを引く速度に小さな正の擾乱を与えたとき、すべり速度強化 ($a - b > 0$) の条件下では新たな定常状態に安定的に漸近する。一方、すべり速度弱化 ($a - b < 0$) の場合は、図 2 に模式的に示したように、バネ定数 k が臨界値

$$k_c = \frac{(b - a)\sigma_n}{D_c} \quad (4)$$

よりも小さければ不安定すべりが発生する。ここで、 σ_n はすべり面にはたらく法線応力をあらわす。 k が k_c より大きい場合でも、バネを引く速度の擾乱が大きい場合には不安定すべりが発生する場合がある。さらに、状態変数が 2 個以上の場合には、安定領域と不安定領域の間に、ブロックが振動を起こす中間的な領域が存在することが示された。

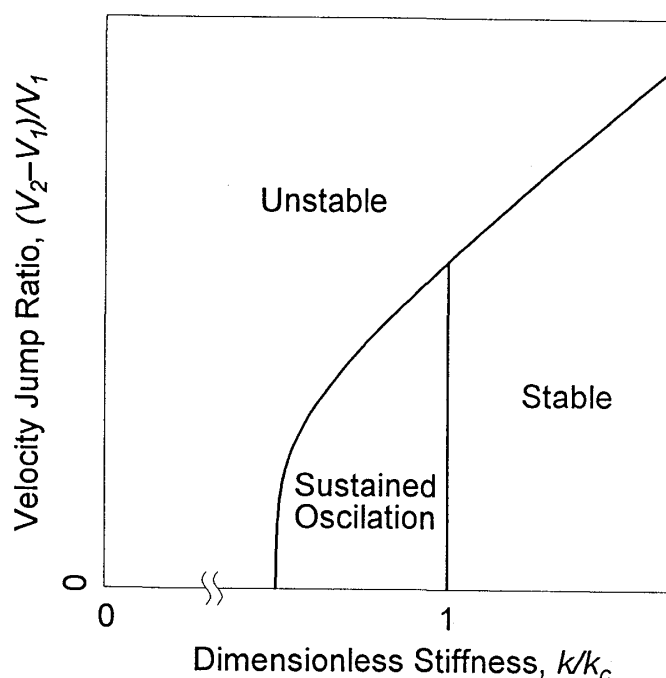


図 2: バネーブロックモデルの安定性.

式 (1)(2) に含まれるパラメータのうち、 D_c は距離の次元を持ち、現象のスケールに依存すると考えられる。従って、地震発生の際における D_c の値を推定する上において、 D_c の物理的意味を明らかにすることが重要である。

ガラスなどの透明な物質を用いて面の接触の状態を光学的手法を利用して観察しながら行われた摩擦実験によると、静摩擦強度の固着時間依存性は真の接触面積が固着時間の経過とともに増加することに対応する。また、図 1 のようにすべり速度にステップ状の変化を与える実験では、ステップ変化を与えた時点での真の接触部分がすべりの進行とともに失われていく割合が、動摩擦強度の変化と非常によく似た挙動を示すことから、 D_c は真に接触する部分が置き換わるのに必要なすべり量と解釈された [8]。

断層にはしばしば断層運動による摩耗生成物（断層ガウジ）が存在する。断層ガウジの摩擦特性を調べる目的で、すべり面の間に岩石や鉱物の粉末（ガウジ）をはさんだ摩擦実験が数多く行われてきた。ガウジをはさんだ実験では、変位の蓄積とともに $a-b$ および D_c が減少する傾向が認められる [9, 10]。一方、実験後に回収された試料を用いたガウジ層の内部構造の観察から、変位の蓄積とともにガウジ層の変形様式がガウジ層全体の均一な歪みからガウジ層内に形成された剪断面における局在化されたすべりへと変化することが明らかにされている [11]。このことから、 D_c は実際にすべりが発生している剪断面の厚さに関係すると考えられ、簡単な解析から D_c は剪断面の厚さの 0.01 倍程度と推定された [9]。

3 準静的すべりから不安定すべりに至る遷移過程の研究

動的な不安定すべりが何の準備過程もなく発生することは物理的に考えにくく、準静的なすべりが不安定すべりに先行することが期待される。この前駆的なすべりは地震の前兆現象発生メカニズムの有力な候補のひとつであり、準静的なすべりから不安定すべりに遷移するプロセスの性質を明らかにすることは、地震発生予測の実現のためにも重要である。

不安定すべりに前駆する準静的なすべり過程の存在は、数 10cm から 2m 程度の長さのすべり面を持つ大型岩石試料を用い、面に沿った多数の点で相対すべりを測定することにより実験的に確認された [12, 13]。準静的すべりの発生域がある臨界長に達すると破壊伝播速度は急激に大きくなり不安定すべりに遷移することも明らかになった。

剪断クラック先端で応力が無限大に発散することを回避する目的で、摩擦力がすべり開始と同時に動摩擦力に低下するのではなく、すべり量の関数として減少するモデル、すべり弱化モデル (slip weakening model)，が提唱されている [14]。大型岩石試料を用いた摩擦実験において、局所的なすべり量と剪断応力を同時に測定することにより、摩擦力がすべりとともに低下し、動摩擦力に低下するのにある一定のすべり量 d_c を要することが明らかにされた [13, 15]。これによりすべり弱化の関係が実験的に確認された。

岩石の表面形状のパワースペクトルは広い波長範囲で λ^α であらわされるフラクタル的性質を持つ [16]。ここで λ は波長をあらわし、 α は 2 と 3 の間の値をとる。摩擦実験に使用される試料は、その表面を研磨粉を使って研磨し、所定の粗さに調整されたものを用いることが多い。この場合、試料の表面形状は研磨粉の粒径に相当するコーナー波長 λ_c を持ち、 λ_c 以上の波長ではフラクタル的性質を失う [17]。 λ_c はすべり破壊伝播過程を規定する非常に重要な量であり、 d_c が λ_c の 1/5 程度であることや、不安定すべりが発生するためにはすべり量が λ_c より大きい必要があることが実験的に明らかにされた [18]。さらに、すべり域先端の進展距離を λ_c で規格化することにより、表面の粗さの異なる実験におけるすべり域の拡大過程が統一的に表現できることが示された [19]。

4 おわりに

すべり速度と状態に依存する摩擦法則が実験事実をよく説明することやすべりの安定性を議論する上で有用であることが認識されると、地震発生域での摩擦パラメータを推定する目的で様々な実験条件での摩擦実験が数多く行われるようになった (例えば [20])。また、実験結果にもとづき、地震発生域の摩擦パラメータの分布を仮定し、大地震発生の数値シミュレーションを行うことも可能になり [21]、客観的な地震発生予測を行うための重要な方法のひとつとして認識されつつある [22]。大型試料を用いた摩擦実験では、すべりに伴う短周期地震波の励起 [23] やすべり伝播過程に及ぼす断層の折れ曲がりの影響 [24] などが調べられている。

断層帯には、断層運動によって変形、破壊、変質された断層帯特有の物質が存在する。数値シミュレーションによる地震発生予測の可能性を高めるためには、断層帯特有の物質を実験試料として用いるなど、地震発生域における環境を考慮した実験を行うことにより、摩擦パラメータ推

定の信頼性を高める必要がある。また、スケールに依存するパラメータである D_c の地震発生域での値を推定するための実験および観測両面からのアプローチが必要である。

参考文献

- [1] W. F. Brace and J. D. Byerlee, *Science* **153** (1966), 990.
- [2] J. H. Dieterich, *J. Geophys. Res.* **77** (1972), 369.
- [3] C. Scholz, P. Molnar and A. Johnson, *J. Geophys. Res.* **77** (1972), 6392.
- [4] J. H. Dieterich, *Pure Appl. Geophys.* **116** (1978), 790.
- [5] J. H. Dieterich, *J. Geophys. Res.* **84** (1979), 2161.
- [6] A. Ruina, *J. Geophys. Res.* **88** (1983), 10359.
- [7] J. R. Rice and A. L. Ruina, *J. Appl. Phys.* **50** (1983), 343.
J. C. Gu, J. R. Rice, A. L. Ruina and S. T. Tse, *J. Mech. Phys. Solids* **32** (1984), 167.
- [8] J. H. Dieterich and B. Kilgore, *Pure Appl. Geophys.* **143** (1994), 283.
- [9] C. Marone and B. Kilgore, *Nature* **362** (1993), 618.
- [10] N. M. Beeler, T. E. Tullis, M. L. Blampied and J. D. Weeks, *J. Geophys. Res.* **101** (1996), 8697.
- [11] J. M. Logan, C. A. Dengo, N. G. Higgs and Z. Z. Wang, *Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks* (eds. B. Evans and T.-f. Wong) (1992), 33.
- [12] P. G. Okubo and J. H. Dieterich, *J. Geophys. Res.* **89** (1984), 5817.
- [13] M. Ohnaka, Y. Kuwahara, K. Yamamoto and T. Hirasawa, *Earthquake Source Mechanism* (eds. S. Das, J. Boatwright and C. H. Scholz) (1986), 13.
- [14] D. J. Andrews, *J. Geophys. Res.* **81** (1976), 5679.
- [15] P. G. Okubo and J. H. Dieterich, *Geophys. Res. Lett.* **8** (1981), 887.
- [16] S. R. Brown and C. H. Scholz, *J. Geophys. Res.* **90** (1985), 12575.
- [17] 桑原 保人, 大中 康譽, 山本 清彦, 平澤 朋郎, 地震学会講演予稿集, No.1 (1985), 110.
S. R. Brown and C. H. Scholz, *J. Geophys. Res.* **90** (1985), 5531.
- [18] 桑原 保人, 大中 康譽, 山本 清彦, 平澤 朋郎, 数理地震学 (II) (斉藤正徳編) (1987), 36.
- [19] 桑原 保人, 大中 康譽, 山本 清彦, 平澤 朋郎, 地震学会講演予稿集, No.2 (1986), 233.
- [20] M. L. Blampied, D. A. Lockner and J. D. Byerlee, *J. Geophys. Res.* **100** (1995), 13045.
- [21] W. D. Stuart, *Pure Appl. Geophys.* **126** (1988), 619.
- [22] 松浦 充宏, 地震 第2輯 **50** (1998), 213.
- [23] N. Kato, K. Yamamoto and T. Hirasawa, *Pure Appl. Geophys.* **142** (1994), 713.
- [24] N. Kato, T. Satoh, X. Lei, K. Yamamoto and T. Hirasawa, *Tectonophys.* **310** (1999), 81.