

固着時に現れる極低速滑りと動的固着モードについて

On the slow slip appearing in stick phases and the dynamic stiction

横国大(正)中野 健

Ken Nakano

Yokohama National University

1. 静摩擦に関する常識

フランスの物理学者 Charles-Augustin de Coulomb (1736～1806 年) が実験的に得た固体摩擦に関する法則は、二百年以上を経た現在もなお、「Coulomb の摩擦則」として知られている。そのひとつとして、静摩擦に関する有名な記述、すなわち「静摩擦力は動摩擦力よりも大きい」という法則が知られている。つまり、Coulomb の摩擦則は、「固体摩擦には静摩擦と動摩擦の二種類が存在する」ことが前提となっている。確かに、テーブルの上に物体を置き、テーブルを静かに傾けると、物体はしばらく静止しているが、テーブルの傾きがある角度に達すると、突然すべり始める。大学入試の頻出問題としても知られるこの現象は、動摩擦とは異なる静摩擦の存在を、我々に強く印象づける。

トライボロジー計測で利用される典型的な摩擦試験にも、静摩擦は少し異なる形で現れる。例えば、ピン・オン・プレート試験(図 1 左)では、ばねの先端にピンを取り付けて、垂直荷重 W でプレートに押し付け、駆動速度 V でプレートを動かすと、摩擦力を受けたばねが変形する。ばねの剛性 k を既知として、ばねの変形量の時間変化 $x(t)$ を計測し、力の釣り合いを仮定すれば、摩擦力の時間変化を $F(t) = kx(t)$ より得る。この手法で摩擦力を計測すると、一般にプレートの起動後しばらくは、 $F(t) = kVt$ の関係に従い、摩擦力が線形的に時間変化する。この関係は、ピンとプレートが一体となり運動すること、すなわち両者の「固着」を示唆することから、そこに作用する摩擦力は、動摩擦とは異なる静摩擦であると解釈されている。

2. 固着時に現れる極低速滑り

しかし、静摩擦の前提となる前記の仮説(すなわち「固着状態では(二面が完全に固着して)力の釣り合いが成立する」)の反例となる実験結果が報告されている。例えば、Heslot ら[1]は、二枚の厚紙の面接触系を対象とした滑り摩擦試験において、静摩擦から動摩擦への瞬間的な遷移の前(すなわち「見掛け上の固着状態」)に、マイクロメートルオーダの微小な滑りが現れることを見出している(文献[1]の図 6)。また、Popov ら[2]は、V 字型の鉄鋼ブロックと両端に錨を設けた鉄鋼円柱との四点接触系を対象とした滑り摩擦試験において、Heslot らと同様な結果を得ている(文献[2]の図 3)。特に、Popov らの実験では、レーザドップラ振動計を用いた鉄鋼円柱の滑り速度を直接計測することにより、固着時の極低速状態(10 $\mu\text{m/s}$)から徐々に加速して、滑り時の最大速度(40 mm/s)に至るまで、三桁を超える速度の滑らかな時間変化を得ている(文献[2]の図 6)。つまり、見掛け上は固着している接触面であっても、実際には滑りながら加速するということは、ばねの復元力と摩擦力とが静的に釣り合うのではなく、慣性力を含む動的な状態にあることを意味する。以後、見掛け上の固着時に現れるこの現象を「極低速滑り」と呼ぶ。(次節に述べる物理的な解釈の違いから、「低速クリープ」と呼ばれることもある。)

3. 動的固着モードの発見

では、以上の観測結果の全てを受け入れるならば、一見矛盾するかのように思える「極低速滑りを伴う固着状態」をどのように解釈したら良いのだろうか。これに類する議論は、岩石の摩擦を巡る地震学の分野にて、長年積み重ねられてきた[3]。特に、1979 年の Dieterich の研究[4]を起点とする「速度状態依存型摩擦則(rate- and state-dependent friction law)」と呼ばれる形式を中心に、摩擦現象の数学的な表記法の改良と、それらの物理的な解釈に関する研究が数多くなされてきた。仮想的に導入した状態変数に関する微分方程式を連立した数学的な表記法は、摩擦の多様な時間変化を巧みに表現することが示されている[3]。しかし、極低速滑りを伴う固着状態の物理的な解釈については、接触面の物性や表面性状に着目した解釈の道筋が探索され続けているものの、未だに決着していないように思われる。

以上のような状況の中、著者らの研究グループは、従来の学説とは異なり、トライボロジーシステムの潜在的な非対称構造に着目した力学的な立場から、極低速滑りを伴う固着状態を無理なく解釈可能な道筋を見出した[5]。この描像の核をなすのは、図 1 右に青色で示した微小な偏角である。これは、ピンを支える異方的なばねの剛性主軸(緑色の破線)とプレートの駆動方向(青色の破線)がなす角で、現実の系では避けることができない非零の「面内ミスアライメント」を表す。剛性の異方性が十分に大きいことを仮定して、このシステムの時間発展を解くと、動摩擦力ベクトルの回転が自発的に生じ、あたかも静摩擦力が作用しているかのようにシステムが振る舞う。さらに、見掛け上の固着状態では、過去に観測されてきた極低速滑りの性質を忠実に再現する。以後、動摩擦力ベクトルの回転が生み出す見掛け上の固着現象を「動的固着(dynamic stiction)」と呼ぶ[5]。

動的固着現象を表現するミニマルモデルとして、大きさが一定の動摩擦力を伴う不減衰一自由度システムを考えると、支配方程式の無次元化を通して、同モデルに含まれる六個のパラメータ(φ : 面内ミスアライメント、 m : 質量、 k : 剛性、 μ_0 : 動摩擦係数、 W : 垂直荷重、 V : 駆動速度)の全てが、次の動的固着パラメータ A_{DS} に集約される:

$$A_{DS} \equiv \frac{\mu_0 W}{2V \sin \varphi \sqrt{mk}} \quad \text{or} \quad A_{DS} \equiv \frac{c_{DS}}{2\sqrt{mk}} \quad \text{where} \quad c_{DS} \equiv \frac{\mu_0 W}{V \sin \varphi} \quad (1)$$

ただし、 A_{DS} は無次元で、 $A_{DS} > 1$ のとき動的固着が現れ、 $A_{DS} < 1$ のとき動的固着は現れない。また、 A_{DS} が大きいほど、動的固着は完全固着に近づき、極低速滑りが微小な動的固着が現れる。特筆すべきは、面内ミスアライメントが $\sin \varphi$ の形で A_{DS} の分母に収まる点である。つまり、 A_{DS} に及ぼす φ の影響は φ が微小なほど強く現れるので、僅かな面内ミスアライメントが顕著な固着状態を生む関係にあることを強調しておく。

要約すると、動的固着現象の本質は、非線形な力学系のダイナミクスが生む仮想的な減衰 c_{DS} である。極論すれば、我々がしばしば目にする「固着から滑りへの遷移」または「静摩擦から動摩擦への遷移」は、表面の物性にその理由を求めなくとも、純粋に力学的な言葉だけを用い、「過減衰から不足減衰への状態遷移」と説明することができる。振動系の減衰比が質量に依存することと同様に、固着滑り遷移の有無や規模や時間など、動的固着の性質が質量(すなわち「慣性力」)に依存することを特徴とする。従来の静摩擦の描像とは大きく異なるこの理論の守備範囲を明確にするために、今後も様々な視点で本研究を深化させたい。

謝辞

本研究は科研費(21H01236)の助成を受けて実施した。

文献

- [1] F. Heslot, T. Baumberger, B. Perrin, B. Caroli, C. Caroli: “Creep, stick-slip, and dry-friction dynamics: Experiments and a heuristic model”, *Physical Review E*, **49**, 4973 (1994).
- [2] V. L. Popov, B. Grzempa, J. Starcevic, M. Popov: “Rate and state dependent friction laws and the prediction of earthquakes: What can we learn from laboratory models?”, *Tectonophysics*, **532-535**, 291 (2012).
- [3] C. H. Scholz: “Earthquakes and friction laws”, *Nature*, **391**, 37 (1998).
- [4] J. H. Dieterich, “Modeling of rock friction: 1: Experimental results and constitutive equations”, *Journal of Geophysical Research*, **84**, 2161 (1979).
- [5] K. Nakano, V. L. Popov: “Dynamic stiction without static friction: The role of friction vector rotation”, *Physical Review E*, **102**, 063001 (2020).

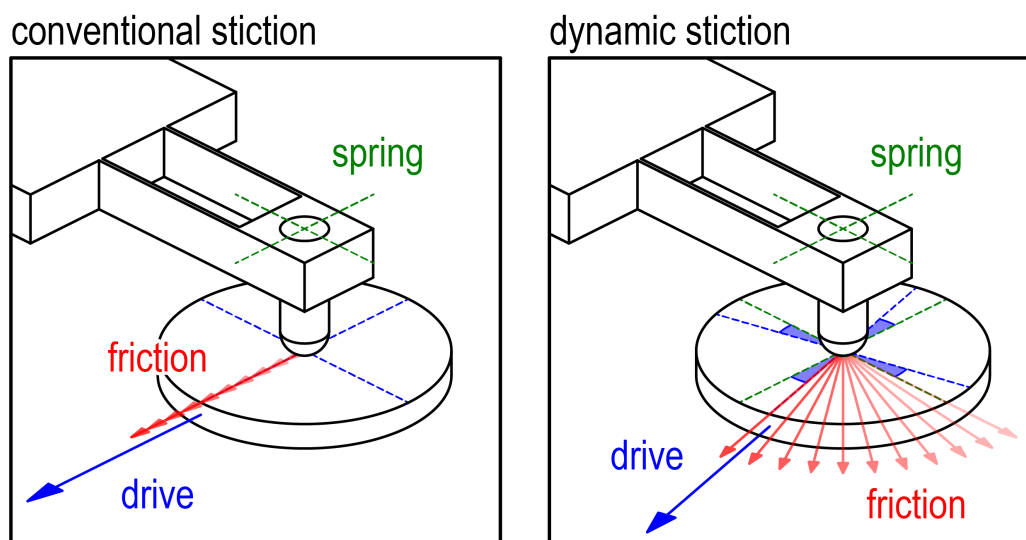


図 1 典型的な滑り摩擦試験に現れる固着の概念図。左図：従来の固着の概念図(ピンとプレートは完全に固着して、ばねの復元力と静的に釣り合う静摩擦力(赤色の矢印)が作用する)。右図：動的固着の概念図(ピンを支える異方的なばねの剛性主軸(緑色の破線)とプレートの駆動方向(青色の破線)の微小な面内ミスアライメント(青色の偏角)により、動摩擦力ベクトルの回転(赤色の矢印)が生じ、極低速滑りを伴う見掛け上の固着が現れる)。