

静止摩擦力の履歴依存性に着目した非定常接触現象のモデリングと考察

Nonstationary Contact Phenomena Based on the History Dependence of Static Friction

名工大・工（正）*前川 覚

Satoru Maegawa*

*Nagoya Institute of Technology

1. はじめに

ゴムやゲルなどのソフトマテリアルは、高い柔軟性と粘弾性を有し、接触面が時間とともに変形・回復・再構成を繰り返す「動く接触面 (moving interface)」を形成する。その摩擦挙動は、滑り速度や荷重といったその瞬間での外部条件だけでなく、それまでに受けた負荷や変形の履歴にも強く依存する。特に、負荷・除荷や滑りの起動・停止などの非定常過程においては、接触界面や材料内部に残留応力や構造変化が蓄積され、次の動作における摩擦応答を大きく変化させることがある。

例えば、一度滑った方向に再び滑らせると静摩擦力が増加する「順履歴効果」や、逆方向では摩擦力が低下する「逆履歴効果」が知られている。これら履歴効果の発現には、粘弾性緩和、接着・剥離の動的競合、部分剥離や再付着による接触状態の再構成といった異なる時間スケールをもつ複数のメカニズムが複合的に関与している。そのため、単純な「摩擦係数＝定数」という定常的記述だけでは不十分であり、非定常な界面進化を考慮した現象のモデリングが不可欠である。

このような静止摩擦力の負荷履歴依存性は、単に学術的な興味にとどまらず、機械要素やシステムの設計・運用に直接的な影響を及ぼす。例えば、方向依存のグリップ力を活かしたロボットハンドの把持制御、起動トルク特性の最適化によるクラッチ・ブレーキの性能向上、あるいは摩擦振動や異音の抑制などが挙げられる。したがって、履歴効果は非定常摩擦の予測や制御を考える上で重要な工学的知見となる。本報告では、その一例として、ソフトマテリアルの摩擦における履歴効果の計測事例とその力学的背景について紹介する。

2. 静止摩擦力の履歴依存性のメカニズム

静止摩擦力が接触履歴によって変化する要因の一つは、材料内部に形成される残留応力場である。一度の滑りや負荷の後、接触界面やその近傍には不均一なひずみ分布が残る、それが次の滑り開始時の摩擦応答を変化させる。この残留応力の効果を端的かつ解析的に評価するためには、幾何形状や応力分布を単純化した 1 次元弾性スラブモデルが有効である。

本節で紹介する Maegawa ら¹⁾の研究では、接触界面上のせん断応力分布や、すべり開始の位置・進展の様子を解析解として導出し、接線荷重履歴が静止摩擦に与える影響を理論的に予測している。このモデルでは、接触界面に作用する摩擦せん断応力 τ は、局所的な変位 u に依存して τ_s (静止摩擦せん断応力) から τ_k (動摩擦せん断応力) へと低下し、その変化は特性距離 D で規定される。 D は界面の緩和プロセス (分子鎖の拡散や塑性クリープなど) に対応し、nm から mm の範囲をとる (Figure 1 参照)。

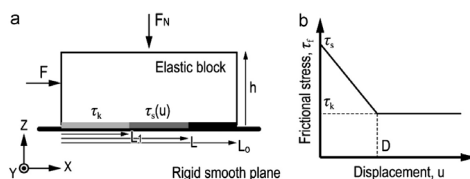


Figure 1 Analytical model

【出典：文献 1）】

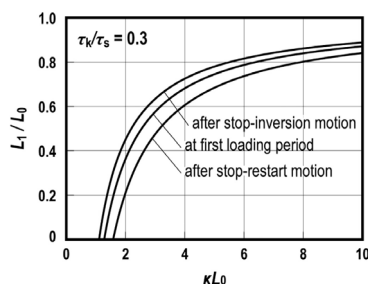


Figure 2 Theoretical results

【出典：文献 12）】

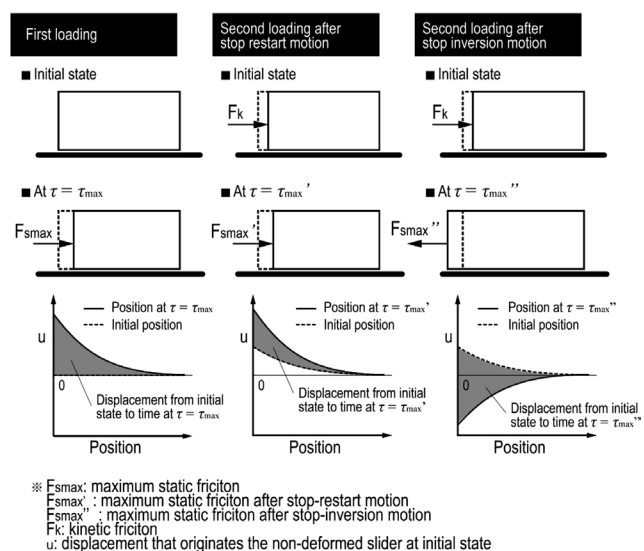


Figure 3 Effect of loading history on the sliding displacement u .

【出典：文献 1）】

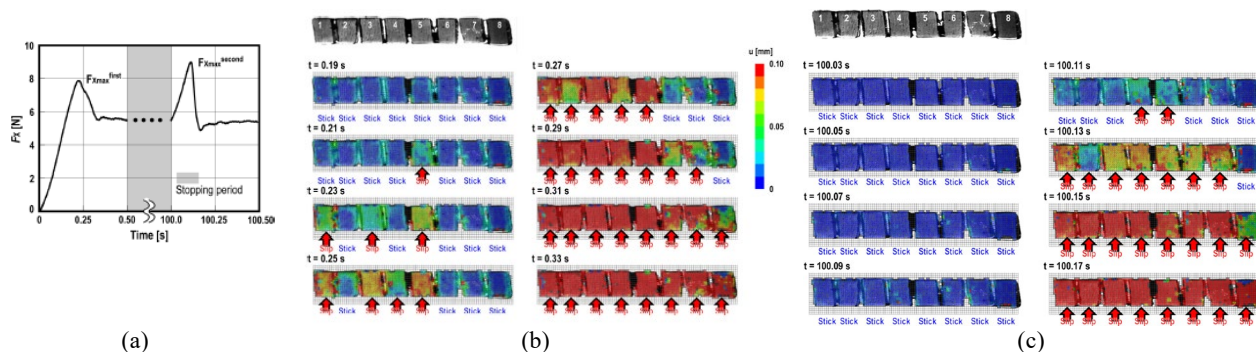


Figure 4 Time changes in Friction force F_x (a), time changes in the displacement of each contact region for the first loading period (b), and second loading period (c); the upward arrows indicate that the contact region is in the slip state.

【出典：文献 2）】

この枠組みのもとで、著者らは二種類の履歴条件「順履歴効果」と「逆履歴効果」を解析した。いずれの場合も停止時に接線荷重が維持されるため、次の荷重開始時には内部に非ゼロの初期応力分布が存在する。この初期応力が、界面の局所すべり開始位置や進展過程を変化させ、結果としてマクロな静止摩擦力を増減させる。解析の結果、「順履歴効果」では静止摩擦力が増加し、「逆履歴効果」では減少することが理論的に示された (Figure 2 と 3 参照)。

このように、1 次元モデルは複雑な 3 次元接触問題を単純化しつつも、履歴効果の本質である初期応力場の違いとその静止摩擦力への影響を明確に表現できる。これにより、履歴効果を含む摩擦設計のための指針が得られる。

3. 多点接触系で生じる静止摩擦力の履歴効果

多点接触系（それぞれの接触点が独立してすべり出す場合）でもやはり初期応力分布の非一様性が静止摩擦力の履歴依存性を発現する。すなわち、接触剛性や臨界せん断強度が不均一な場合や接触点ごとの初期応力状態が均一ではない場合では、負荷履歴の違いによって巨視的な静止摩擦力が大きく変化する。

Maegawa ら^{2,3)}は、複数の独立した接触ブロックからなる分割接触界面 (split contact interface) を試験片として用い、接線荷重の履歴条件が静止摩擦力に与える影響を実験的に調べた。試験では、停止後に同方向へ再負荷する「順履歴効果」条件では静止摩擦力が初回よりも増加し (Figure 4(a)参照)、逆方向へ再負荷する「逆履歴効果」条件では低下することが明確に示された。この履歴依存性の原因は、停止時に接触各部に残留するせん断応力の分布にある。同方向再負荷では、この残留応力がすべりに必要な限界せん断応力に加算され、初期すべりの発生が遅れることで静止摩擦力が増加する。一方、逆方向再負荷では、残留応力が逆向きに作用して限界応力を減少させるため、すべりが早期に始まり、静止摩擦力が低下する (Figure 4(b),(c)参照)。このように、多点接触系においても静止摩擦力は材料や表面状態だけでなく、初期応力分布の非一様性とその履歴に強く依存する。例えば、接触剛性の分布や荷重印加の順序を制御することで、残留応力の符号や大きさを任意に設定し、目的に応じて静止摩擦力を高めたり低減させたりできるなど、非定常摩擦制御の新たな設計指針となり得る。

4. おわりに

本報告では、静止摩擦力の履歴依存性に着目し、その力学的背景を単純化した 1 次元モデルおよび多点接触系の研究事例を紹介した。特に、接触面に形成される初期応力分布の非一様性が、負荷・除荷や滑り方向の反転といった履歴条件によって顕著に変化し、それが静止摩擦力の増減を決定することを示した。これらの知見は、材料や表面状態のみならず、接触界面の内部状態の発展を含めて摩擦を理解する必要性を示している。すなわち、静止摩擦力は瞬間的な外部条件だけでなく、「動く接触面 (moving interface)」としての時間依存的な界面変化に強く支配される。本報告では、この知見を「動く接触面」の概念と結び付けることで、非定常摩擦現象の理解に向けた一つの側面を提示した。

文 献

- 1) Maegawa, S., Itoigawa, F., & Nakamura, T. (2016). New insight into the mechanism of static friction: A theoretical prediction of the effect of loading history on static friction force based on the static friction model proposed by Lorenz and Persson. *Tribology International*, 102, 532-539.
- 2) Maegawa, S., Itoigawa, F., & Nakamura, T. (2016). Effects of stress distribution at the contact interface on static friction force: numerical simulation and model experiment. *Tribology Letters*, 62(2), 15.
- 3) Maegawa, S., Itoigawa, F., Nakamura, T., Matsuoka, H., & Fukui, S. (2017). Effect of tangential loading history on static friction force of elastic slider with split contact surface: model calculation. *Tribology Letters*, 65(2), 37.