

溝付き粘弾性体の滑り摩擦の連続体解析

岩下 航

大阪大学 大学院基礎工学研究科

1. はじめに

表面が接触する 2 つの固体に相対運動を生じさせようとする、それを妨げようとする力が働く。この現象は摩擦と呼ばれる。靴やタイヤと地面の間、機械のしゅう動部など、様々な身近な場面で摩擦が発生するため、摩擦の制御は工学的に重要な課題である。

従来の摩擦制御には、潤滑剤の添加や表面のコーティングなどによって摩擦界面の特性を変える手法が主に用いられてきた。しかし、これらの手法は潤滑剤を供給できる環境に限られ、摩擦による影響を受けるため、環境条件や持続性に制約がある。一方で、潤滑や材料の変更を伴わずに、物体の形状設計による摩擦制御も試みられてきたが、体系的な指針が確立されておらず、試行錯誤に依存していた。したがって、省エネルギーの設計開発において適応性と持続性の高い摩擦制御を実現するためには、物体形状の設計戦略の確立が不可欠である。

一般に摩擦の法則として知られるアモントン則では、摩擦抵抗は物体形状に依存しないとされている。しかし、この法則の現象論的な説明では応力の一様性を仮定しており、その仮定が適用できない場合にはアモントン則が破れる可能性がある。

実際に、これまでの我々の研究では、3 次元有限要素法 (FEM) シミュレーションと理論解析によって、アモントン則の破れと滑りの核形成の関係を調査してきた [1, 2]。そこでは、図 1 のように物体側面を駆動し、応力の非一様性を生じさせることで、アモントン則の破れが生じることを確認した。駆動側の摩擦面から局所的な滑り (核形成) が発生し、そのサイズが臨界値に達したとき

に、核形成が不安定化し、系全体の滑りをもたらす。核形成の臨界サイズは物体形状や外部圧力に依存して変化し、摩擦抵抗にも影響を与えることが分かった。また、摩擦面の 2 次元的なパターンに加え、溝の深さも摩擦抵抗に影響を与えることが明らかになり、3 次元の大規模計算の重要性が示された。

これらの結果から、物体のアスペクト比やサイズ、溝の設置によって摩擦抵抗を制御できる可能性が示唆される。しかし、これまでの結果は側面駆動系に限定されており、一様せん断を受ける系への適用可能性は不明であった。例えば、図 2 に示すようなディスク状のシステムで摩擦面が平坦な場合には、系全体で一様にせん断応力が変化する。そのような場合には、核形成が発生する余地がなく、アモントン則が成り立つことが予想される。したがって、このような系における摩擦制御のための形状設計の指針は明確ではない。

よって、本研究では、一様せん断の系においても、摩擦面の形状設計による摩擦抵抗の制御方法を検討した。結果として、摩擦面にうねりの形状を加えることで核形成を生じさせ、溝の形状と組み合わせ、効果的に摩擦抵抗を制御できることが明らかになった [3]。この成果は、形状設計を活用した摩擦制御の適用範囲を拡大する上で重要な意味を持つ。

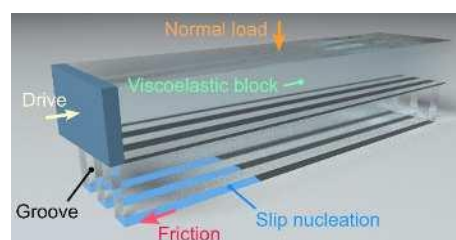


図 1：側面駆動の系



図 2：摩擦滑りを伴うディスク状のシステム

2. 設定と手法

FEM を用いた数値シミュレーションによって、図 3 に示す剛体基板上の溝付き粘弾性ブロックの滑り運動を解析した。ブロックの上面は上部の平坦な剛板に固定されている。上板はブロックを x 方向に十分に遅い速度 V で基板に平行に駆動する。時間 t における上板の移動距離は $U_x = Vt$ と表される。また、空間平均 P_{ext} を持つ外部圧力を上板に加える。 x, z 方向にそれぞれ周期 L, W の周期境界を設定した。ここで、粘弾性モデルは、一般に固体の計算で用いられる、弾性要素と粘性要素が並列に接続された Kelvin-Voigt モデルを採用した。本解析は、50 万節点、数十億タイムステップの大規模な計算を要する。計算は、In-house の Fortran プログラムコードを Intel コンパイラでコンパイルし、2,000MPI プロセスを用いた空間分割による並列計算により実行され、約 30 時間を要する。

摩擦力は局所的にアモン-クーロン則が成り立つと仮定して与える。そこでは、局所の摩擦応力と局所の圧力の比を局所摩擦係数と定義し、局所摩擦係数を局所滑り速度 v の関数として与える。ここで、局所の静摩擦係数と動摩擦係数をそれぞれ μ_S と μ_K 、特性速度を v_c とする。静止状態の場合、局所摩擦係数は μ_S 以下で静止状態を保つように与えられる。滑り状態の場合、局所摩擦係数は、 v が v_c 以下で、 v の増加によって μ_S から μ_K に減少し、 v が v_c 以上で、 μ_K に固定される。

図 3d に示すようなうねりを導入し、局所的な核形成を引き起こす不均一な圧力と摩擦強度を作り出す。変形がないときの摩擦面の高さ $y^{(\text{bott})}(x)$ は、小さな最大振幅 A を用いて $y^{(\text{bott})}(x) = A[1 - \cos(2\pi x/L)]/2$ で表される。ここでは、外部圧力がかかると、摩擦面が基板と全接触する。

粘弾性体は静止状態と勢いよく滑る状態を交互に繰り返す周期的なスティックスリップ運動をする。勢いよく滑る状態の直前に系全体の摩擦力は最大値を取り、その値と垂直抗力の比をマクロな静摩擦係数 μ_M と定義する。溝の幅に比例する摩擦面の面積減少率 ϕ と溝の深さ d 、うねりの最大振幅 A を変化させた際の静止摩擦係数 μ_M の挙動を解析した。

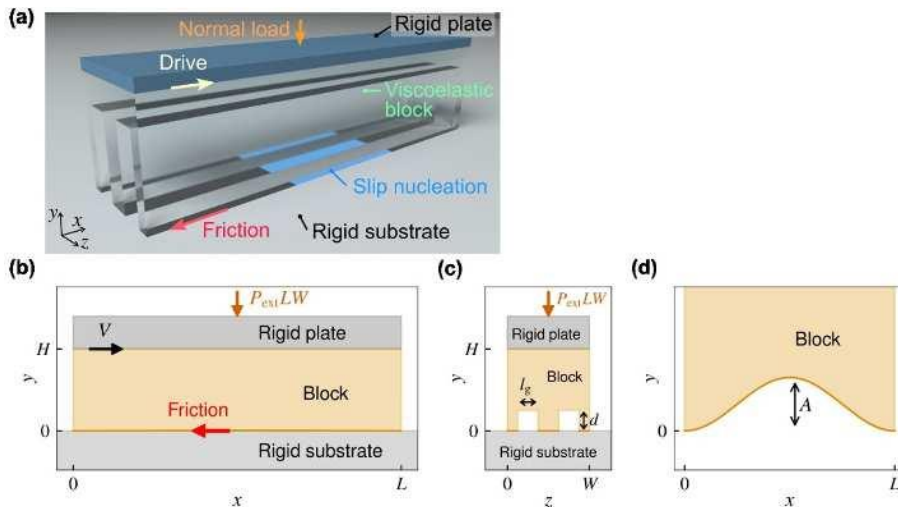


図 3：a うねりと溝のある 3 次元溝付きブロック。b, d $z = 0$ での z 方向と垂直な断面。c x 方向と垂直な断面。d y 方向に拡大した摩擦面。

3. 物体形状と摩擦抵抗の関係性

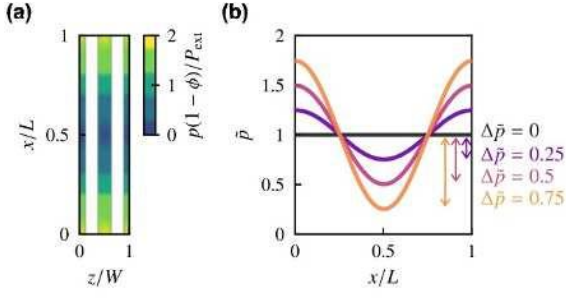


図 4 : **a** $\phi = 0.5$ 、 $d/H = 0.75$ 、 $A/H = 0.0099$ ($\Delta \tilde{p} = 0.75$) での $U_x/L = 7.5 \times 10^{-3}$ における p の空間分布。白い部分が溝部である。**b** $\phi = 0.5$ 、 $d/H = 0.75$ での $U_x/L = 7.5 \times 10^{-3}$ における A を変えたときの $\tilde{p}$ の空間分布。

図 4a は摩擦面の圧力 $p(x, z)$ の空間分布を示す。うねりの形状により、圧力は $x/L = 0.5$ で最小値をとり、 $x = 0$ または L で最大値をとる。圧力は z 方向にほぼ一様であり、その空間分布 $p(x, z, t)$ は時間に依らずほぼ定常である。ここで、 z 方向に平均し規格化した圧力 $\tilde{p}(x)$ を導入する。図 4b に示すように、 $\tilde{p}(x)$ は余弦型のプロファイルを持つ。 $\tilde{p}(x)$ の振幅 $\Delta \tilde{p}$ は、圧力分布の不均一性を表している。本節では、規格化した圧力 $\tilde{p}(x)$ の同じプロファイルでの結果で比較するために、 ϕ 、 d 、および $\Delta \tilde{p}$ を指定して、それを実現する A の値を採用する。

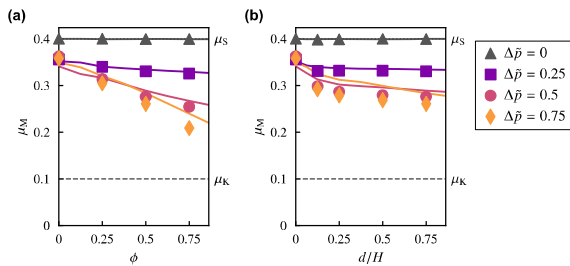


図 5 : **a** $d/H = 0.75$ での ϕ に対する μ_M の依存性。**b** $\phi = 0.5$ での d に対する μ_M の依存性。点線は μ_S 、破線は μ_K を表す。シンボルと実線はそれぞれ 3 次元 FEM と 1 次元モデルの結果を表す。

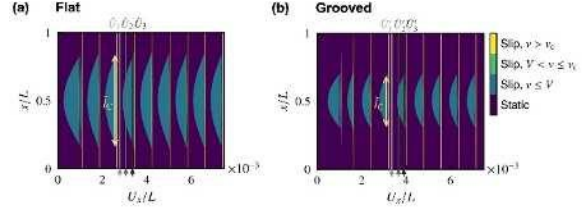


図 6 : **a** $\phi = 0$ 、**b** $\phi = 0.5$ 、 $d/H = 0.75$ 、 $\Delta \tilde{p} = 0.75$ での $z = 0$ における U_x に対する v の空間分布の依存性。紫色は静止領域を表す。青、黄緑、黄色の領域はそれぞれ $v \leq V$ 、 $V < v \leq v_c$ 、 $v > v_c$ での滑り領域を表す。

図 5a は、異なる値の $\Delta \tilde{p}$ での静止摩擦係数 μ_M の ϕ 依存性を示す。 μ_M は、 $\Delta \tilde{p} = 0$ では ϕ に依存せず μ_S で一定を保つものに対して、 $\Delta \tilde{p} > 0$ では ϕ の減少関数であることが分かる。図 5b は、異なる値の $\Delta \tilde{p}$ での μ_M の d 依存性を示す。 μ_M は、 $\Delta \tilde{p} = 0$ では d に依存せず μ_S で一定を保つものに対し、 $\Delta \tilde{p} > 0$ では d の減少関数である。

図 6a は、 $\phi = 0$ 、 $\Delta \tilde{p} = 0.75$ での $z = 0$ における U_x に対する滑り速度 v の空間分布の依存性を示す。摩擦面での滑り速度 $v(x, z)$ は z 方向にほぼ一様で、 x 方向の成分が支配的である。滑りの核形成は、圧力 $\tilde{p}(x)$ が最も弱い中心から始まる。滑り領域は、臨界長 $\tilde{l}_c$ に達すると急激に加速し、界面全体に伝播する。滑りによって内部応力が緩和されると、領域全体が再び静止状態となる。図 6b は、 $\phi = 0.5$ 、 $d/H = 0.75$ での $z = 0$ における U_x に対する v の空間分布の依存性を示している。滑りの核形成は中心から起こり、臨界長 $\tilde{l}_c$ を持ち、図 6a と同じ挙動を示している。図 6a と比較すると、臨界長 $\tilde{l}_c$ は溝が形成されることにより減少していることが分かる。

さらに、シミュレーションから得られた知見を基に 1 次元モデルを構築した。このモデルは図 5 に示すようにシミュレーションの結果を定量的に再現する。このモデルの解析の結果、摩擦面の形状と摩擦抵抗や核形成の臨界長の関係についての次のような考察が得られた。うねりによる不均一な圧力プロファイルは核形成の開始と成長

を決定し、溝のサイズは系の剛性を低下させることで核形成の臨界長を減少させる。このように核形成のプロセスが物体形状によって変化することで静止摩擦係数も変化する。

本研究で扱った一様せん断系の摩擦制御における形状設計の指針は次のようにまとめられる。

- ・ 高静止摩擦を得るためには、溝の有無にかかわらずうねりを小さくすることが必要である。
- ・ 低静止摩擦を得るためには、圧力の不均一性を生じさせる程度のうねりと大きな溝を導入することが有効である。

4. おわりに

本研究の大規模計算と理論解析によって、一様せん断系の摩擦の制御には、溝やうねりを含む摩擦面の形状設計が重要であることが明らかになった。これらの結果は、試行錯誤に依らない摩擦製品の設計に寄与することが期待される。

また、動摩擦についても大規模計算を実施し、粘弾性体の極めて速い滑りにおいて特異な摩擦現象が観測された [4]。今後、この動摩擦の摩擦面形状に対する依存性を調べていくことで、高速滑りが発生し得るタイヤなどの形状設計の指針の確立を目指す。

謝辞

課題全般について、大槻道夫教授にご指導いただいた。課題参加者として、織田晃登氏、佐伯宏大氏、井上隆介氏、田中健太郎氏、寺井歳三氏にご協力いただいた。本内容は、ETH Zurich の D.S. Kammer 助教との共同研究によって得られた成果である。可視化結果は、同研究室の N. Lilittrakul 氏が開発したソフトウェアを用いて、SQUID 上で作成した。本研究は、JSPS 特別研究員奨励費 JP22KJ2190 の助成を受けた。

参考文献

- (1) W. Iwashita, H. Matsukawa & M. Otsuki, Sci.

Rep., **13**, 2511, (2023).

- (2) W. Iwashita, H. Matsukawa & M. Otsuki, Tribol. Lett., **72**, 25, (2024).
- (3) W. Iwashita, M. Castellano & D.S. Kammer, The 26th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, (2024).
- (4) W. Iwashita & M. Otsuki, The 4th Malaysian International Tribology Conference, (2024).