

マクロ系の摩擦則の包括的な解明

岩下 航

大阪大学 大学院基礎工学研究科

1. はじめに

摩擦は最も身近な物理現象の 1 つである。靴底と地面の接触面、機械のブレーキや軸受、地震が発生する大陸プレートなど、様々な場面で摩擦が発生する。そのため、摩擦現象の解明は科学技術の発展のために重要である。近年の計算機性能の著しい向上により、従来ではできなかった数値計算でのアプローチの研究が可能になってきた。

固体間摩擦についてはアモンソン-クーロン則と呼ばれる摩擦係数が圧力や系の形状、速度によらないことを意味する法則が経験的に古くから知られている。しかしながら、これは準静的な外力のかかったミクロな系で成立する空間一様性を暗に仮定しており、応力場などの非一様性が顕著となるマクロな系ではアモンソン-クーロン則が破れることもある[1-5]。

これまでの我々の研究では、基板に接する直方体ブロックにおいて、圧力、系のサイズ・アスペクト比に対する静止摩擦の依存性が示されてきた[3]。しかしながら、現実的には、圧力、系のサイズ・アスペクト比が固定しながら摩擦を制御する必要がある状況も想定されるが、その方法は示されていない。さらには、有限速度下での摩擦、摩擦がある多体系のふるまいについても未解明である。したがって、本研究では、物体の溝の設計による静止摩擦の制御、粘弾性体の有限速度の接触で生じるヒステリシス摩擦、摩擦のある多体系の典型例である粉体のふるまいを、大規模な数値解析によって調べた。

2. 溝付き物体の静止摩擦

2.1 手法

有限要素法を用いた数値シミュレーションに

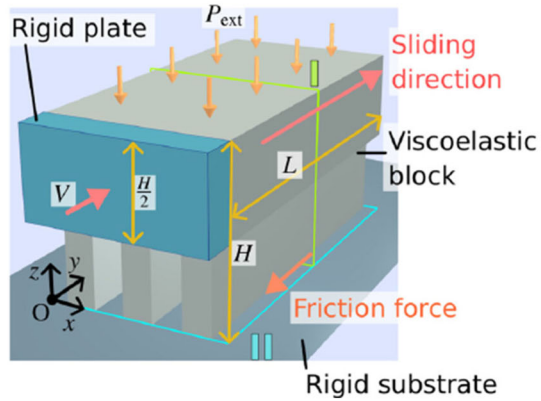


図 1：基板上の溝付きブロック [6]

よって、図 1 に示すような剛体基板上の溝付き粘弾性ブロックの滑り運動を調べた [6]。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 モデルを用いた。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。これには、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て、1,700MPI プロセスを用いた空間分割による並列計算で、50 時間程度かかる。

摩擦力は局所でアモンソン-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、局所滑り速度が v_c 以下で、局所滑り速度の増加によって μ_s から μ_k に減少し、滑り速度が v_c 以上で、 μ_k となる。

粘弾性体は側面または上面を準静的に駆動さ

せる。このとき、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。溝の深さ d と溝の幅に比例する摩擦面の面積減少率 ϕ の2つの溝のパラメータを変化させたときの静摩擦係数 μ_M の挙動を調べた。

2.2 側面を駆動する系

本節では、図1のような、物体の側面を剛体プレートによって押したときの結果 [5]を示す。図2に、様々な摩擦面の減少率 ϕ での溝の深さ d に対する静摩擦係数 μ_M の結果を示す。 μ_M は、 ϕ と d の減少関数であることが明らかになった。

また、図3に示すように、系全体が滑る前に発生する準静的に伝搬する局所滑りが確認された。局所滑りは臨界長さに達すると、急速に伝搬し系全体の滑りが発生する。この臨界長さが静摩擦係数 μ_M と正の相関があることが示された。

我々は、これらのシミュレーション結果から、

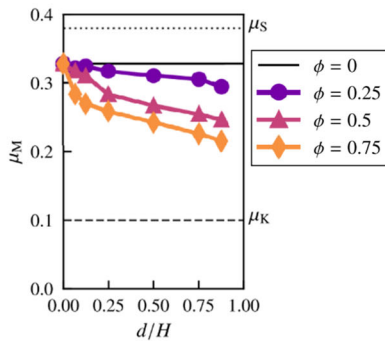


図2：様々な摩擦面の減少率 ϕ での溝の深さ d に対する静摩擦係数 μ_M [6]

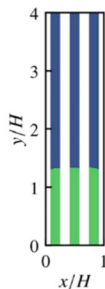


図3：摩擦面における滑りの空間分布 [6]。青が静止状態、黄緑が滑り状態を表す。

理論モデルを構築して解析を行った。その結果、局所滑りの臨界長さが粘性の増加関数となることが示された。溝を形成することによって、系の剛性が減少し、実効的な粘性も減少するため、臨界長さが減少する。さらに、静摩擦係数 μ_M が臨界長さの増加関数となるため、図3のように、 μ_M が溝のサイズの減少関数となる。

2.3 上面を駆動する系

2.2節では、側面駆動によって、せん断応力の非一様性が発生するため、局所滑りが発生していた。そのため、その結果が、一般的な上面駆動させた一様せん断の系に適応できるかは不明である。そこで、図4aのような、 x, y 方向に周期境界条件を持つ物体について上面を駆動させたときの摩擦を調べた [7]。ここでは、2.2節と同様の溝に加えて、一様せん断系で局所滑りを発生させるために、図4bのように、摩擦面のうねりを取り入れ、その最大振幅 A を物体形状のパラメータの1つとした。

図5a, bにそれぞれ、 $\phi = 0.5$ での様々な A に対する規格化した圧力分布と静摩擦係数 μ_M の結果を示す。圧力分布の最小値と μ_M は A の減少関数となる。圧力分布の最小値が小さいほど、局所滑りの開始と成長が早く、臨界値に早く到達するため、 μ_M が減少する。

図5dに、異なる摩擦面の減少率 ϕ で、規格化した圧力の空間分布が同じになるように A を設定した場合の静摩擦係数 μ_M を示す。 μ_M は ϕ の減少関数となっており、これは2.2節の結果と同様である。溝のサイズが大きいほど、局所滑りの臨界面積が減少するため、 μ_M も減少する。

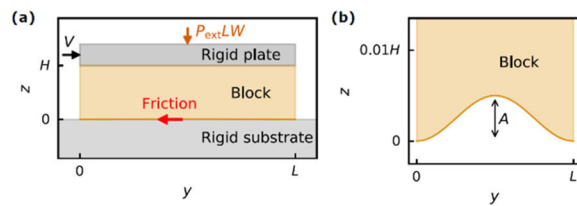


図4：上面駆動の系の設定 [7]。(a) 剛体基板上の移動するプレートによって駆動される粘弾性ブロック。(b) z 方向に拡大した摩擦界面。

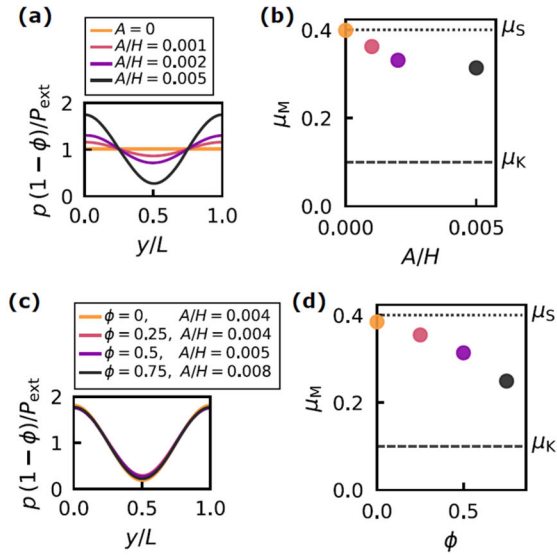


図 5 : 規格化した圧力の空間分布と静止摩擦係数 μ_M [7]。 $\phi = 0.5$ での様々なうねりの振幅 A に対する (a) 規格化した圧力の空間分布と (b) 静止摩擦係数 μ_M 。異なる ϕ で、(c) 規格化した圧力の空間分布が同じになるように A を設定した場合の (d) 静止摩擦係数 μ_M 。

以上の結果より、上面駆動の系での摩擦制御のための指針が得られた。溝の有無に依らず、うねりの振幅を小さくすることで、大きい静止摩擦係数が得られ、大きなサイズの溝とある程度の大きさの振幅のうねりを設定することで、小さい静止摩擦係数が得られる。

3. 有限速度下での摩擦

3.1 手法

有限要素法を用いた数値シミュレーションによって、図 6a に示すように、移動する 2 次元の

Kelvin-Voigt モデルの粘弾性体（密度 ρ 、ヤング率 E 、粘性係数 η 、高さ H ）と接触する剛体圧子にかかる抵抗力を調べた。粘弾性体は周期境界を持ち、境界の影響がない程度に十分に大きな周期の長さを設定した。本解析は、50 万節点、数億タイムステップの大規模な計算を要する。これには、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て、1,000MPI プロセスを用いた空間分割による並列計算で、10 時間程度かかる。

粘弾性体と剛体圧子の間には、凝着摩擦を入れずに、圧力のみがかかる設定とした。物体間に相対速度を与えて滑りを発生させると、物体の局所的な粘弾性緩和の影響で接触面の前後に圧力差が生じ、それが一種の摩擦抵抗力として働く。この粘弾性による由来する摩擦力はヒステリシス摩擦と呼ばれている。本研究では、特にヒステリシス摩擦の駆動速度 V に対する依存性を調べた [8]。

3.2 ヒステリシス摩擦の速度と粘性に対する依存性

圧子にかかる水平方向の力と鉛直方向の力の比で表される摩擦係数 μ が、図 6b のように、ある速度でピークを持ち、そのピークの位置が粘性係数 η によって変化することを確認した。この結果は、駆動速度 V と粘性係数 η に応じた粘弾性体の変形が摩擦係数 μ を変化させたと解釈できる。

ピークの位置の粘性係数 η による変化は、同様の系での低次元のモデルを用いた先行研究と一致している [5]。一方で、 V が弾性波速度を超えた

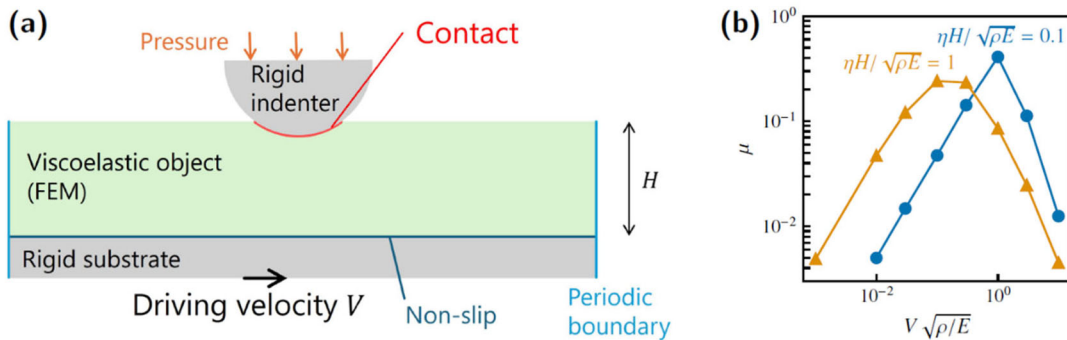


図 6 : (a) 移動する粘弾性体に接触する剛体圧子と (b) 摩擦係数 μ の駆動速度 V に対する依存性 [8]

領域で、粘性係数 η が異なる摩擦係数 μ の結果と近づく現象は、弾性波の影響が考慮されない先行研究のモデルでは確認されておらず、連続体特有の現象であることが示唆される。

また、同様の系でのゲルを用いた実験とは摩擦係数 μ や変形状態の駆動速度 V に対する依存性が異なる [4]ため、今後は異なる粘弾性モデルの採用も検討する。

4. 多体系（粉体）の摩擦

4.1 粉体を移動する物体の抵抗則

離散要素法を用いた数値シミュレーションによって、図 7 に示すような粒子間に摩擦のある粉体中を移動する物体の抵抗を調べた [9]。本解析は、4 万粒子の大規模な計算を、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て、MPI 空間分割による並列計算で行った。

物体のサイズ、移動速度・方向、粉体の圧力に対する物体にかかる抵抗力の依存性を調べた。物体の移動に伴う粒子の移動や応力場の解析によって、抵抗則の理論を示した。

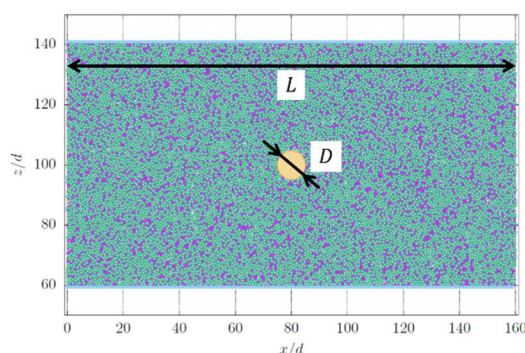


図 7：粉体中を移動する直径 D の物体 [9]

4.2 平板間の粉体の流れ

離散要素法を用いた数値シミュレーションによって、図 8 に示すような平板間の粒子間に摩擦のある粉体の流れを調べた [10]。本解析は、2 千程度の粒子数の計算を、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て行った。シミュレーションと理論解析によって、外力に対する流れ場や流量の依存性を解明した。

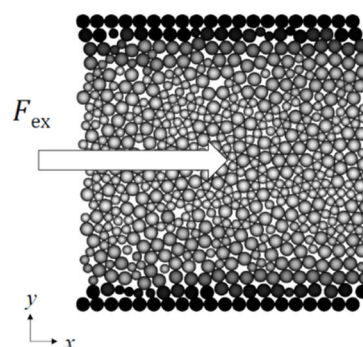


図 8：平板間の粉体の流れ [10]

5. おわりに

2 節では、静止摩擦係数の界面の溝形状やうねり形状に対する依存性が、大規模シミュレーションと理論解析によって示された。この結果は、摩擦制御のための物体形状設計の指針となり、工学的な応用も期待される。3 節では、ヒステリシス摩擦の速度と粘性に対する依存性が示された。特に弾性波速度付近の高速で滑る物体間の摩擦の解析の例は少なく、その新たな知見を得るためにも、本研究の発展が期待される。4 節では、粉体内を移動する物体の抵抗則と平板間の粉体の流れを調べた。この他にも、粉体の偏析現象や粉体の圧縮時の抵抗力の解析用のシミュレーションも開発した。このような摩擦を持つ物体が多体になったときに見られる数多くの興味深い現象の理論も今後の研究で明らかにしていく。

謝辞

課題全般について、大阪大学大学院基礎工学研究科の大槻道夫准教授にご指導いただいた。4 節の多体系の摩擦の内容は、谷岡寛也氏、林健太氏、織田晃登氏、佐伯宏大氏が、プログラムの開発・実行・解析を担当した。2.2 節の内容は、青山学院大学の松川宏教授との共同研究である。2.3 節の内容は、Young Researchers Exchange Programme between Japan and Switzerland で行った、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。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) M. Otsuki and H. Matsukawa, Sci. Rep., **3**, 1586, (2013).
- (2) Y. Katano, et al., Sci. Rep., **4**, 6324, (2014).
- (3) W. Iwashita, et al., Sci. Rep., **13**, 2511, (2023).
- (4) T Yashiki, et al., Phys. Rev. Lett. **124**, 238001 (2020).
- (5) T. Watanabe, et al., Tribol. Online **18**, 406 (2023).
- (6) W. Iwashita, et al., Tribol. Lett., **72**, 25, (2024).
- (7) W. Iwashita, et al., The 26th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, (2024) accepted.
- (8) 岩下航, 大槻道夫, 日本物理学会 2024 年春季大会, 19aL3-2, (2024).
- (9) 谷岡寛也, 大槻道夫, 日本物理学会 2024 年春季大会, 19aL3-4, (2024).
- (10) 林健太, 大槻道夫, 日本物理学会 2024 年春季大会, 19aL3-5, (2024).