



Title	弾性波速度付近の高速滑り速度での摩擦則
Author(s)	岩下, 航
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2026, 16, p. 114-117
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/106250
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

弾性波速度付近の高速滑り速度での摩擦則

岩下 航

産業技術総合研究所 製造基盤技術研究部門

1. はじめに

摩擦は、靴と地面に代表される日常生活から、機械システム、さらには地震現象に至るまで幅広く関係する基礎的物理現象であり、その予測・制御は工学および自然科学において重要な課題である。特にゴムやゲルなどの柔らかい粘弾性材料における摩擦は、タイヤや靴、人工関節などの性能に直結するため、その力学的理解と設計指針の確立が求められている。

固体摩擦の基本法則として、摩擦係数が荷重や接触面積、速度に依存しないとするアモンテンクーロン則が知られている。しかし、これは応力場が一樣であるという仮定のもとで成り立つ経験則であり、粘弾性体のように変形を伴う系では必ずしも成立しない [1]。特に有限滑り速度下では、粘弾性変形に起因するヒステリシス摩擦が支配的となり、摩擦係数は速度に顕著に依存することが知られている [2]。

近年、柔らかい材料において滑り速度が弾性波速度（材料中を変形が伝播する速度）に近づく領域で、摩擦抵抗が急激に変化する現象が報告されている [3]。このような高速滑り条件は、航空機の着陸時のタイヤと地面の接触など実際の工学系においても出現し得るが、その力学的機構は十分に解明されていない。

本研究では、大規模並列数値計算を用いて、弾性波速度付近の高速滑りにおける粘弾性体の摩擦挙動を解析し、非一樣変形と摩擦抵抗の関係を定量的に明らかにすることを目的とする。圧子と粘弾性基板の接触系を対象とし、粘性係数および滑り速度を系統的に変化させ、その結果として生じる摩擦抵抗および変形状態の変化を評価した。

2. 設定と手法

本研究では有限要素法（FEM）による直接数値計算を用いて、粘弾性体の高速滑り問題を解析した。図 1a に示すように、対象系は剛体圧子と粘弾性基板からなる接触問題であり、基板は 2 次元のケルビン-フォークト型粘弾性体（弾性応答と粘性応答を並列に有するモデル）としてモデル化した。

計算領域は周期境界条件を課した連続体とし、周期境界の影響が無視できるよう領域長 L を十分に大きく設定する ($L = 1,000D$)。基板の厚さは H とし、接触幅よりも大きく設定する ($H = 0.5D$)。基板の底面は一定速度 V で並進駆動する。直径 D の圧子には一定荷重 W を与え、基板との接触面で

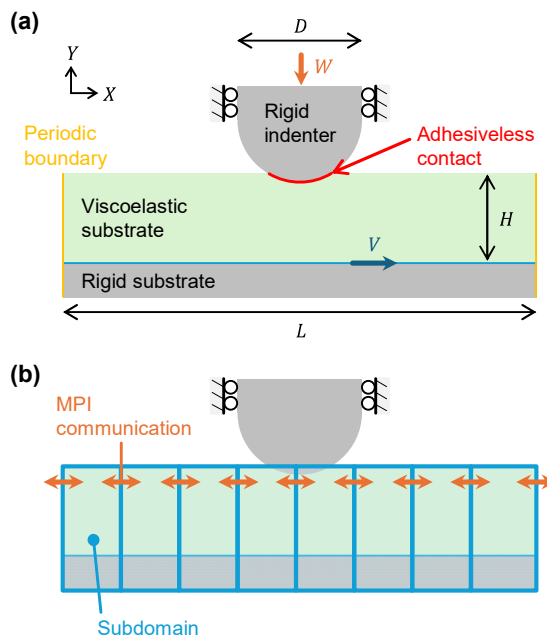


図 1 : (a)速度 V で移動する粘弾性基板と剛体圧子の概略図。(b) MPI 並列における空間分割およびサブドメイン間通信の概略図。

は、圧子表面に対して法線方向の力のみが作用するものとし、界面の凝着摩擦は考慮しない。したがって、本研究で現れる摩擦力はヒステリシス摩擦に起因するものである。摩擦係数 μ は圧子に作用する X 方向の力と荷重 W の比として定義する。

弾性波速度は基板の材料定数（ヤング率 E 、ポアソン比 ν 、密度 ρ ）により決定される。本研究では、基板の粘性係数 η および滑り速度 $\tilde{V}$ を系統的に変化させ、弾性波速度付近の領域を重点的に解析した。以下では、チルダ（ $\sim$ ）付きの物理量は D 、 E 、 ρ を基準として無次元化された量を表す。

計算規模は最大で約 1,300 万節点、約 10 億タイムステップに及び、時間発展は陽解法により解いた。このような大規模問題を扱うため、MPI 並列化を実装し、図 1b に示すように空間を分割して計算を実施した。In-house の Fortran コードを Intel コンパイラでコンパイルし、並列数約 8,000 で計算を行い、実行時間は約 70 時間であった。

また、計算効率向上のため、1 つのシミュレーション内で複数の速度条件を取得するアルゴリズムを導入し、加速過程を共有することで計算資源の有効利用を図った。

3. 結果と考察

図 2a に各粘性係数 $\tilde{\eta}$ での摩擦係数 μ の滑り速度 $\tilde{V}$ 依存性を示す。いずれの条件においてもある速度で μ がピークを持つが、その挙動は粘性係数 $\tilde{\eta}$ によって大きく異なっていることが分かる。高粘性領域（ $\tilde{\eta} \geq 1$ ）では、滑り速度 $\tilde{V}$ に対して摩擦係数 μ は滑らかに増減し、 μ のピーク値はほぼ一定であるが、ピーク位置は $\tilde{\eta}$ の低下とともに高速側にシフトする。一方、低粘性領域（ $\tilde{\eta} \leq 0.1$ ）では、横波速度付近の滑り速度（ $\tilde{V} \approx \tilde{c}_S$ ）で摩擦係数 μ が急激に増加し、縦波速度手前の滑り速度（ $\tilde{V} \approx \tilde{c}_L$ ）で急激に減少する。ピーク位置は $\tilde{V} \approx \tilde{c}_L$ でほぼ一定となるが、ピーク値は $\tilde{\eta}$ の低下とともに増加する。

図 2b に各粘性係数 $\tilde{\eta}$ での圧子の貫入量 δ の $\tilde{V}$ 依存性を示す。ここで貫入量とは、圧子の基板への

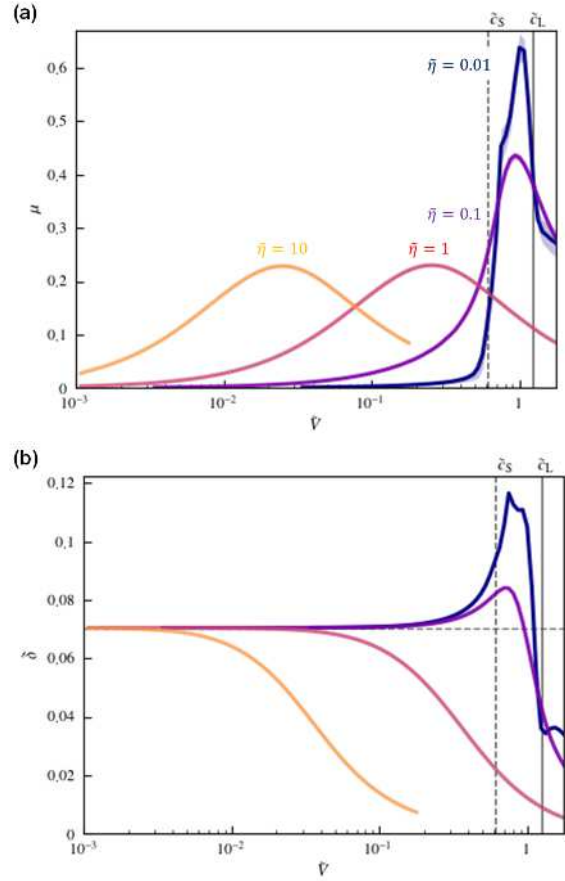


図 2: 各粘性係数 $\tilde{\eta}$ における(a)摩擦係数 μ および(b)貫入量 δ の滑り速度 $\tilde{V}$ 依存性。縦の点線と実線はそれぞれ横波速度 $\tilde{c}_S$ と縦波速度 $\tilde{c}_L$ を表す。(b)横の点線は静止時の貫入量を表す。

押し込み深さを表し、その値が大きいほど圧子は下方、小さいほど上方に位置する。貫入量 δ の挙動も粘性係数 $\tilde{\eta}$ によって大きく依存する。高粘性領域（ $\tilde{\eta} \geq 1$ ）では、ある速度以上で δ が滑らかに減少しており、その減少が開始する位置は $\tilde{\eta}$ の低下に伴い高速側にシフトする。一方、低粘性領域（ $\tilde{\eta} \leq 0.1$ ）では、横波速度付近の滑り速度（ $\tilde{V} \approx \tilde{c}_S$ ）で δ が増加し、横波速度と縦波速度の間の滑り速度（ $\tilde{c}_S < \tilde{V} < \tilde{c}_L$ ）で急激に減少する。

これらの摩擦係数 μ と貫入量 δ の挙動は、変形状態の解析により理解できる。図 3 に変形状態のスナップショットを示す。図 3a に示すように、準静的な滑り速度の場合、圧子前後で対称な応力分布となるため、摩擦係数 μ は小さい。高粘性条件（ $\tilde{\eta} \geq 1$ ）では、滑り速度 $\tilde{V}$ の増加に伴い粘性応

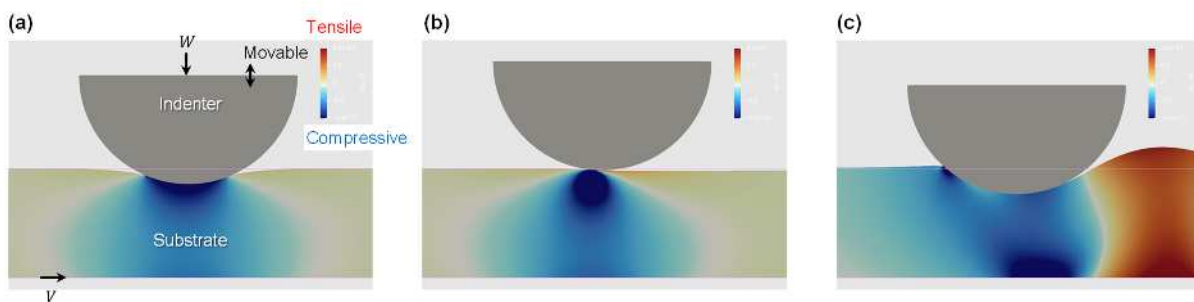


図 3 : (a)準静的な滑り速度、(b) $\tilde{\eta} = 10$ 、 $\tilde{V} = 0.18$ 、(c) $\tilde{\eta} = 0.01$ 、 $\tilde{V} = 0.75$ における変形状態のスナップショット。色は応力テンソルのトレースを表し、赤が引張、青が圧縮を示す。

力の非対称性が顕著になることで摩擦係数 μ が増加する。さらに滑り速度 $\tilde{V}$ が増加し粘性力が増大すると、図 3b に示すように、圧子が押し上げられ、変形が減少するため摩擦係数 μ は減少する。

低粘性条件 ($\tilde{\eta} \leq 0.1$) では、圧子を押し上げるだけの粘性力に達する前に、滑り速度 $\tilde{V}$ が弾性波速度付近に到達する。弾性波速度に近づくと、図 3c に示すように、接触後端付近では弾性回復が追いつかず、接触面での弾性応力が低下するため、圧子を支持する力が弱まり、圧子の貫入量 δ は増加する。さらに、変形の波が前方へ伝播する前に圧子と粘弾性基板が接触するため、接触前端は前進する。これらの効果によって、弾性波速度付近で摩擦係数 μ が急激に増加する。さらに滑り速度 $\tilde{V}$ が増加すると、接触前端付近で表面の変形が尖鋭化する特異な変形が生じ、応力集中によって圧子が急激に押し上げられる。その結果、貫入量 δ が急減し、摩擦係数 μ も急激に低下する。

以上より、弾性波速度の影響が顕著に現れる条件とその発現機構は、次のように整理できる。弾性波速度の影響が顕著に現れる条件は、粘性力によって圧子が押し上げられるより先に滑り速度が弾性波速度に到達する低粘性条件である。低粘性条件で弾性波速度に到達したとき、接触後端での弾性応力の低下により圧子の貫入量が増加するとともに、接触前端の前進により、応力分布の非対称性が顕著となり、摩擦係数が急激に増加する。さらに滑り速度が増加すると、接触前端付近の応力集中により圧子が急激に押し上げられ、貫

入量が急減し、これに伴って摩擦係数も急激に低下する。一方、弾性波速度に到達する前に圧子が押し上げられる高粘性条件では、弾性波速度付近において既に貫入量がゼロに近く、接触状態の変化が限定されるため、上述のような弾性波速度の影響は限定的となる。

4. おわりに

本研究では、大規模並列 FEM 計算により、弾性波速度付近の高速滑りにおける粘弾性体の摩擦挙動を解析した。高粘性条件では、滑り速度に対して摩擦係数が滑らかに変化する一方、低粘性条件では、弾性波速度付近で特異な変形が生じ、摩擦係数が急激に変化することを示した。特に低粘性条件においては、圧子の貫入量の増加、接触後端での応力低下、および接触前端での応力集中といった現象が同時に生じ、これらが組み合わさることで弾性波速度付近における摩擦係数の急激な変化が生じることが明らかとなった。

本成果は、高速摩擦現象の理解に新たな視点を与えるとともに、タイヤなどの設計指針の構築に寄与する可能性を持つ。今後は、3 次元形状効果や張力場の影響を考慮した解析への拡張、および実験との定量比較を通じて、より実用的な摩擦制御指針の確立を目指す。

謝辞

本内容は島根大学の大槻道夫教授との共同研究によって得られた成果である。

参考文献

- (1) W. Iwashita, H. Matsukawa & M. Otsuki, Sci. Rep., **13**, 2511, (2023).
- (2) K. Nakano & M. Kono, Front. Mech. Eng., **6**, 38, (2020).
- (3) T. Yashiki, et al., Phys. Rev. Lett., **124**, 238001, (2020).
- (4) 岩下航, 大槻道夫, トライボロジー会議 2026 春 東京, F12, (2026).