B22

超音速滑りでのヒステリシス摩擦

Hysteresis friction in supersonic sliding

阪大・基礎工（学）*岩下　航　　阪大・基礎工（非）大槻　道夫

Wataru Iwashita*, Michio Otsuki*

*Osaka University

1.　はじめに

凝着以外のマクロ系の摩擦の原因の一つであるヒステリシス摩擦は，低弾性かつ高粘性のゴムのような材料で顕著に現れるが，いかなる固体材料にも粘性が存在するため，全ての材料で発生し得る普遍的な摩擦である．ヒステリシス摩擦は速度や接触面の形状に大きく依存する．音速よりも十分小さい滑り速度の領域を扱うことのできる，1 次元ファンデーションモデルを用いた解析では，ヒステリシス摩擦の速度依存性，接触面の形状や拘束条件による依存性を示すスケーリング則も示されている [1, 2].

一方で，粘弾性体の音速付近の滑り速度での摩擦については不明な点が多く残っている．ゴムやゲルといった低弾性の材料において，音速を超える滑り速度での摩擦は，現実的に発生し得る問題であり，例えば，着陸時の飛行機のタイヤの摩擦にも関係するように，工学的にも重要な課題である．しかし，超音速の滑り速度での摩擦は，従来，実験的にも数値的にも扱うことが困難であったため，その研究例はまだ少ない．最近になり，ゲルを用いた実験が行われ，そこでは，ゲルの音速付近で変形が遷移し，摩擦係数が大きく変化することが報告されている [3]．しかし，実験では，潤滑，凝着，境界条件など摩擦を変化させる要因がいくつか考えられ，音速付近の滑り速度がヒステリシス摩擦への影響は明らかではない．

そこで，本研究では，有限要素法を用いた大規模数値計算によって，超音速の滑り速度の領域を含めたヒステリシス摩擦を調べた．

2.　有限要素法による数値計算

Figure 1 に示すような，移動する粘弾性基板にシリンダ状の剛体圧子を押し付ける系を考える．粘弾性基板は，ケルビン-フォークト粘弾性体であり，密度をρ，ヤング率をE，ポアソン比をν，粘性係数をη，高さをHとする．粘弾性体の底面は剛体基板に固定されており，剛体基板は一定速度VでX方向に移動する．X方向に周期Lの周期境界を考え，境界の影響を無視できる程度にLを十分大きく設定する．剛体圧子は，直径をDとし，X方向の位置を固定する．剛体圧子は，上部から一定荷重を受け，下部から粘弾性体との凝着なしの接触によって圧力を受けるため，Y方向の力がつりあうようにY方向に移動する．

圧子にかかるX方向の力とY方向の力の比を摩擦係数μと定義する．Figure 2a に，μの$V\sqrt{(\rho/E)}$に対する依存性を示す．μは，低速域ではVの増加関数となるが，ある臨界速度でピークを持ち，それ以上の速度域で減少する．低速域では，粘性抵抗によりμが速度の増加関数となるが，ある速度以上では，粘性力のY方向成分が荷重と競合し，圧子を押し上げ，それに伴ってμが減少する．粘性が$\eta D/\sqrt{\rho E} \geq 0.1$ の結果では，μがピークを持つ臨界速度がηの減少関数となっている．しかし，粘性が$\eta D/\sqrt{\rho E} \leq 0.1$の結果では，臨界速度が$V\sqrt{(\rho/E)} > 1$の値を取ることができずに1付近の値に留まっている．

1 次元ファンデーションモデルを用いた解析では，μが$V\eta$でスケーリングできることが示されている [1, 2]．Figure 2b に，μの$V\eta$に対する依存性を示す．粘性が$\eta D/\sqrt{\rho E} \geq 1$の結果では，大域的に$V\eta$でのスケーリングが成り立つ．しかし，粘性が$\eta D/\sqrt{\rho E} \leq 0.1$の結果では，音速の手前で$\mu$が急に増加を始め，$V\sqrt{(\rho/E)} = 1$で$\mu$がピークをとるように，$V\eta$でのスケーリングが破れる．

特に低粘性で摩擦係数が音速よりも十分小さな速度でピークをとることができない場合には，音速付近の滑り速度で，接触前端の特異的な変形と後端の剥離位置の急激な変化に伴って，摩擦係数が大幅に増加し，ピークをとることが明らかになった．

文献

1)　K. Nakano & M. Kono: Transient and steady sliding friction of elastomers: impact of vertical lift, Front. Mech. Eng., 6, (2020) 38.

2)　T. Watanabe, S. Hatanaka & K. Nakano: Dimensionless numbers and master curves for sliding friction from the Kelvin-Voigt viscoelasticity of solids, Tribol. Online, 18 (2023) 406.

3)　T. Yashiki, T. Morita, Y. Sawae & T. Yamaguchi: Subsonic to intersonic transition in sliding friction for soft solids, Phys. Rev. Lett., 124 (2020) 238001.

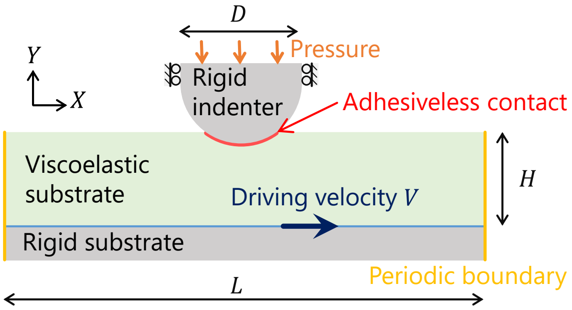

Fig. 1 Schematic of a rigid indenter in contact with moving viscoelastic substrate.

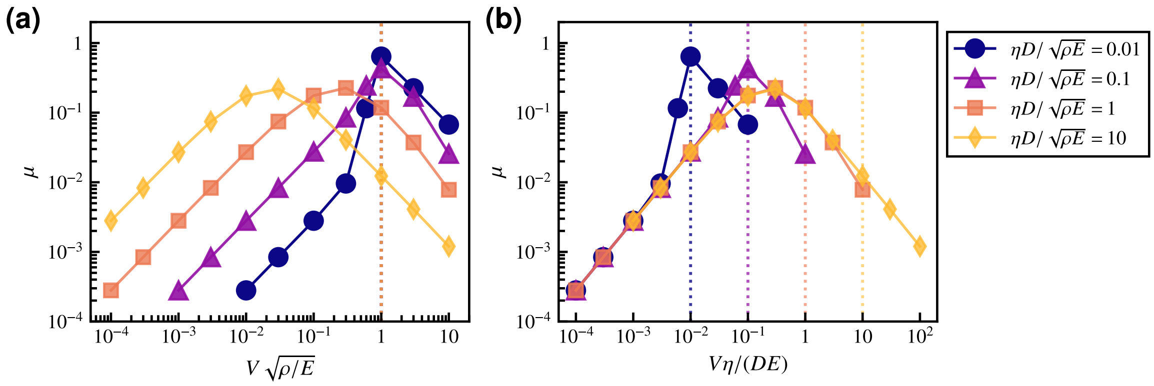

Fig. 2 Friction coefficient μ against **a** $V\sqrt{(\rho/E)}$ and **b** $V\eta/(DE)$. Vertical dotted lines represent $V\sqrt{(\rho/E)} = 1$.