

単一突起摩擦試験に基づいたゴム材料の摩擦メカニズムの考察

Consideration of friction mechanism of rubber material

based on friction experiment with single asperity

名工大（学）*伊藤 一志 名工大（正）劉 曉旭 名工大（正）前川 寛 名工大（正）糸魚川 文広

Kazushi Ito, Satoru Maegawa, Liu Xiaoxu, Fumihito Itoigawa

Nagoya Institute of Technology

1. 緒言

ゴム材料は粗面に対して安定して高い摩擦を発揮することから、タイヤなどの機械部品のしゅう動面に利用されており、凝着摩擦とヒステリシス摩擦が生じることが、その要因とされている。このようなゴム粗面の摩擦を定量的に議論する際、GW モデルなどの粗面接触理論を適用することが考えられる。一方で、可撓性の高いゴムと粗面上の各接触点では、突起がゴム表面に深く貫入し接触面の大変形を無視できないこと、単一接触点での凝着摩擦とヒステリシス摩擦の相互作用が未解明であることから、既存の接触モデルの適用が難しい。そこで、ゴムの摩擦メカニズム理解を目的として、それを単純化した単一突起とゴム表面の摩擦特性を実験により調査した。実際の粗面との単一接触点スケールに近い、先端半径数百 μm の球状圧子と微小力センサを用いて単一突起に作用する力を測定し、摩擦係数の貫入量依存性を調査した。また、凝着摩擦とヒステリシス摩擦の相互作用理解のため、油潤滑下での摩擦計測結果をソフト EHL モデルにより予測される理論値と比較することで考察した。

2. 実験概要

実験装置を Fig. 1 に示す。実験装置は下部の移動ステージ、ゴム試験片と上部の微小力センサと触針からなる。2 軸移動ステージ上面には、ゴム試験片（厚み 4.8 mm, 30×40 mm）が取り付けられている。ゴム試験片の材質は PDMS（Polydimethylsiloxane）である。上部の微小力センサは内部の板ばねに取り付けられたひずみゲージによって先端に取り付けられた触針に作用する 2 軸方向の力を計測する。触針には、図右側に示す半径 500 μm のルビー製球状圧子を用いた。微小力センサの測定方向に揃うようにゴム試験片を移動ステージで駆動することで、すべり中の摩擦力と垂直荷重を計測した。ゴム表面には潤滑油として PAO（Poly- α -Olefin）を塗布した。

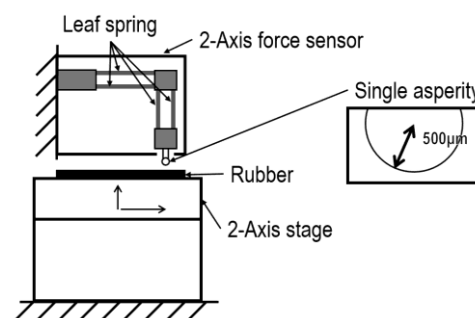


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

実験手順は次の通りである。まず、ゴム試験片表面に潤滑油を滴下する。ステージを鉛直方向に上昇させゴムに接触した位置を基準として任意の貫入量に達した点で停止させたのち、移動ステージを駆動して水平方向に貫入量の 10 倍以上の距離を往復させ、接線力と垂直力を計測した。複数の滑り速度および貫入量の条件で一連の計測を行った後、ゴム試験片表面をエタノールで拭き、粘度の異なる潤滑油を塗布して再度同様の手順を繰り返した。実験を行った範囲は次のとおりである。ステージの押し込み量は、10, 50, 100, 300 μm 、滑り速度は 0.01, 0.1, 1, 10 mm/s、潤滑油の動粘度は 3, 10, 100, 1000, 100000 cSt とした。定常状態における流体摩擦を計測し、ゴム表面の傾斜による滑り中の貫入量変動の影響を小さくするため、復路におけるしゅう動終了直前での、しゅう動距離の 1/10 の区間での時間平均値を計算した。また、表層の弾性率を測定するため、潤滑油を塗布しない状態でステージを押し込み、突起貫入量と垂直荷重を計測した結果に Hertz 接触理論を用いてヤング率を算出した。

3. 実験結果

本研究の目的の一つは接触面の接線方向に働く凝着力または流体摩擦力とゴムの変形にともない発生するヒステリシス摩擦力を切り分けて考え、それぞれの影響度を定量化することである。まず、流体潤滑領域において単一突起に作用する流体摩擦を理論的に推定することにより、単突起に作用する流体摩擦とヒステリシス摩擦を定量的に解析する。流体潤滑領域で、突起貫入量より十分に小さいスケールでの流体膜が生じている状況では、凝着摩擦を流体摩擦と等価であるすることで、乾燥摩擦における凝着摩擦とヒステリシス摩擦の相互作用を議論できると考えられる。ソフト EHL における流体膜厚の回帰式は提案されているが、摩擦係数に関しては研究途上である。ここでは、弾性変形によって一定の膜厚のヘルツ接触領域が生じ、摩擦はこの接触面内のクエット流れにより生じると仮定して、流体摩擦を推定する。Hamrock-Dowson による無次元パラメータ $\bar{U} = U\eta/E'R'$, $\bar{W} = W/E'R'^2$ を利用して計算する[1]。 E' は接触する 2 物体の等価弾性率、 R' は等価半径であり、 $2/E' = (1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2$, $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$ である。

片方の面が静止している状態での摩擦係数 μ は次の式を用いて計算できる[2]。

$$\mu = 0.83 \bar{U}^{0.36} \bar{W}^{-0.11} \quad (1)$$

(1)式では、ヘルツ接触面内に接触部中央の膜厚と同じ様の膜厚が生じていると仮定して摩擦係数を計算している。

点接触における流体膜厚の推定には、Hamrock と Dowson による、圧力による粘度増加を無視し、表面の変形を考慮した、等粘度-弾性領域における接触部中央の膜厚野計算式を用いた[1]。

$$\frac{h_c}{R} = 3.3\bar{U}^{0.64}\bar{W}^{-0.22} \quad (2)$$

単一突起との摩擦実験結果と、(1)式による流体摩擦の計算結果を、Fig 2 に示す。横軸は、それぞれの実験条件における潤滑油の粘度 η としゅう動速度 U の積 ηU であり、スティックスリップが生じた場合の結果は除外して示している。(a)~(d)は突起貫入量が異なる場合を示している。結果はストライベック曲線に従う結果を示し、全体として ηU が0.01を超えると対数軸上で直線的に摩擦係数が増大し、完全な流体潤滑に移行していると考えられる。厳密には、流体潤滑に移行する際の ηU は貫入量によって異なると考えられる。この実験結果と(1)式で計算した摩擦係数は概ね一致することから、(1)式で用いた仮定は本実験条件において妥当であると言える。また、(a)の貫入量 $9.5\mu\text{m}$ における ηU が最も大きな2つの結果では値が一致しない、この実験条件における膜厚を計算すると、 $2.4, 8.9\mu\text{m}$ であり、貫入量と同じオーダーの厚みの流体膜が生じている。そのため接触面積は Hertz 接触理論に従わず、計測した摩擦係数は大きいと考えられる。

以降では、単突起に作用する摩擦係数の貫入量依存性を議論する。Fig 3 は粘度 $826 \text{ m}^2/\text{s}$ 、滑り速度 1 mm/s における、突起貫入量と摩擦係数の関係をしめす。流体摩擦とヒステリシス摩擦を定量的に議論するため、先述した通り流体潤滑領域にあってかつ貫入量より膜厚が十分薄い状態の結果を用いる。流体潤滑領域として $\eta U > 0.01$ 、膜厚が十分薄い状態として、貫入量の15%以下である実験結果を、Fig 3 に示す。

(1)式は実験結果によく従っており、ヒステリシス摩擦が極めて小さな条件では Hertz 接触理論と Hamrock-Dowson による膜厚の計算値を用いて計算することで、摩擦係数の突起貫入量依存性を表現できることが分かる。最も貫入量の小さな条件では、流体膜厚が貫入量の10%と厚い状態であり、流体膜の存在により計算値より大きな値が計測されていると考えられる。また、最も貫入量の大きな $264\mu\text{m}$ の条件ではわずかに計算値より小さな値が算出された。貫入量が増えるほど、実際の接触面積は Herz 接触理論から離れていくため、より貫入量の大きな条件ではこの傾向が強くなる可能性がある。本試験によりさらに貫入量の大きな場合の凝着摩擦特性を計測することで、接触面の大変形を考慮したゴム粗面の摩擦理論に応用できると考えられる。また、PDMS は粘性が低く、今回の実験結果ではヒステリシス摩擦の影響は見られなかった。より粘性の大きな材料および速度を変えた条件での試験によって、単一突起に作用する流体摩擦とヒステリシス摩擦が推定できると考えられる。

4. 結言

本研究では、実接触点スケールでの単突起とゴムの摩擦実験を行い、凝着摩擦とヒステリシス摩擦の貫入量依存性を調査した。計測した摩擦係数の絶対値及び貫入量依存性は、ヘルツ接触理論及びソフト EHL 理論から計算した値とよく一致する結果が得られた。本試験によって摩擦係数の貫入量依存性を計測し、粗面接触理論に適用することで、より一般的なゴム粗面の摩擦特性の理解につながると考えられる。

文献

- 1) B.J. Hamrock, D.Dowson : Elastohydrodynamic lubrication of elliptical contacts for materials of low elastic modulus I—fully flooded conjunction, Trans.ASMEJ.Lubr.Tschnol. 100 (1978) 236.
- 2) De Vicente, J., J. R. Stokes, and H. A. Spikes : The frictional properties of Newtonian fluids in rolling–sliding soft-EHL contact, Tribology Letters 20 (2005) 273-286.

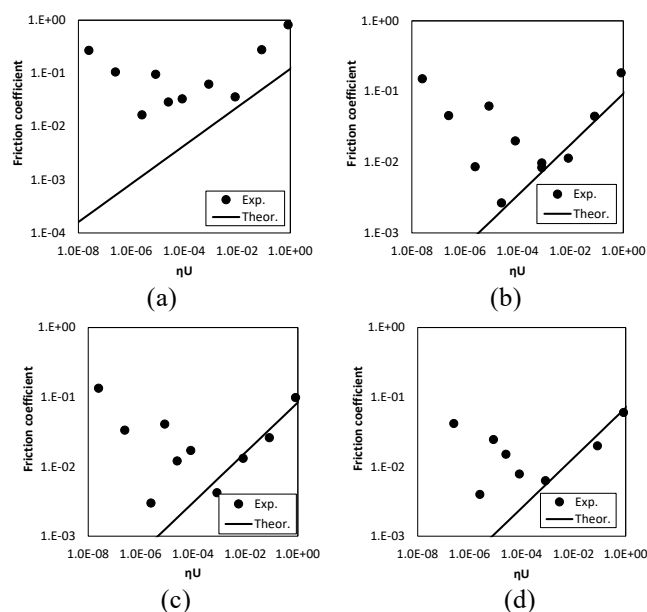


Fig. 2 Comparison of calculated fluid friction based on Hertzian contact and experimental values. for conditions without stick-slip.(a) $9.5 \mu\text{m}$, (b) $47 \mu\text{m}$, (c) $92 \mu\text{m}$, (d) $264 \mu\text{m}$ indentation depth.

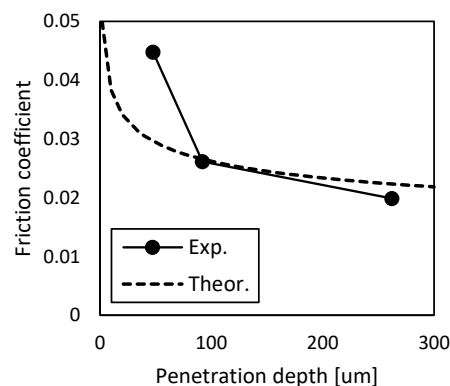


Fig. 3 Penetration depth vs. friction coefficient at a sliding velocity of 1 mm/s and a lubricant viscosity of $826 \text{ m}^2/\text{s}$, comparing the experimental results with the calculated values.