

潤滑下でのゴムブロックの摩擦特性（形状変形と動摩擦力の関係について）

Friction Characteristics of Rubber Blocks under Lubrication (Relationship between shape deformation and dynamic friction force)

名工大・工（学）*高木 祐輔 名工大（正）糸魚川 文広 名工大（正）前川 寛 名工大（正）劉 曉旭

Yusuke Takagi*, Fumihiro Itoigawa*, Satoru Maegawa *, Xiaoxu LIU*

*Nagoya Institute of Technology

1. 緒言

ゴム材料は弾性率が金属材料と比べて非常に小さく容易に変形するため、相手面の粗さやうねりに対して追従性が必要なシールや、高い摩擦係数と衝撃吸収性を利用するタイヤや靴底など、様々な機械要素で使用されている。ゴムはこの変形の容易さゆえ摩擦力によって接線方向に変形し、それにともない接触面積も変化する。著者らの研究グループではこれまでに、滑らかな平面上を摺動する場合のゴムブロックを対象として、摩擦力の形状依存性について調査した¹⁾。異なる形状のゴムブロックは接線力に対する剛性が異なり、形状の違いにより真実接触面積に差が生じて摩擦係数が変化する。このゴムブロックの摩擦力の形状依存性は、Persson の接触理論²⁾をベースとした粗面接触モデル³⁾を有限要素シミュレーションに実装することで定量的に予測可能である⁴⁾。

Dry 環境から Wet 環境に状態が変わると、現象はより複雑となる。摩擦力に起因するバルクの変形に加えて、油膜の引き込みによる接触面の変形（ソフト EHL）を考慮する必要がある。そこで本研究では、潤滑環境下におけるゴムブロックの変形特性と摩擦力の関係を調べるためのモデル試験として、既知の傾斜をつけたゴムブロックの摩擦特性を調査するとともに、同現象のメカニズム考察を行った。以下、その詳細について報告する。

2. 実験方法

本研究で使用した実験装置の概略図を Fig.1 に示す。試験片には PDMS ブロックを、すべり面側にはアクリル板をそれぞれ使用した。アクリル板の断面は台形になっており、側方から接触面を観察できるようになっている。PDMS ブロックは変形能の違いが摩擦力に及ぼす影響を調査するために 2 種類のもの（高さ H は 9 mm と 18 mm）を準備した。長さ L は 30 mm、幅 W は 18 mm である。また、粗さの有無は油膜の導入及び流体潤滑状態に大きく影響することから、粗さが無い滑らかな PDMS ブロックと研磨紙で滑らかな PDMS に粗さを付けたものをそれぞれ準備した。PDMS ブロックは傾斜ステージを用いてすべり方向からの傾斜角 α （-2.25 deg から 4.5 deg）が与えられる。Figure 1 からわかるように、負の傾斜角がついている場合は、PDMS ブロックはアクリル板に対してつんのめる様に摺動する。垂直荷重と摩擦力を傾斜ステージ上方に取り付けた力覚センサにより測定し摩擦係数を算出した。

実験条件を Table 1 に示す。2 種類の試験片高さと粗さの有無を組み合わせた計 4 種類の条件で実験した。なお、Table 1 の #120 と #80 は粗さ付与に用いたエメリー紙の番手である。傾斜角は -2.25 deg から 4.5 deg までの 25 条件とした。また、潤滑環境下（Wet 条件）では摺動面に潤滑油として PAO4 を滴下した。

3. 実験結果および考察

実験結果を Fig.2 から Fig.5 に示す。なお、図中にエラーバーがある場合はスティックスリップ発生を意味し、エラーバーの高さと中心値は振動振幅と平均値（動摩擦係数）を意味する。

まず、Fig. 2（Test 1）の Dry に着目する。傾斜角度（横軸）が負（つんのめる場合）から正（接触部前縁が浮いている）に変化するにつれて摩擦係数が大きく増加していることがわかる、なお、傾斜角度が負の場合では摩擦係数は傾斜角度によらずほぼ一定であり、摩擦力の形状変形依存性は小さい。一方、傾斜角度が正の場合は、バルク変形によって摩擦係数は大きく増大するこ

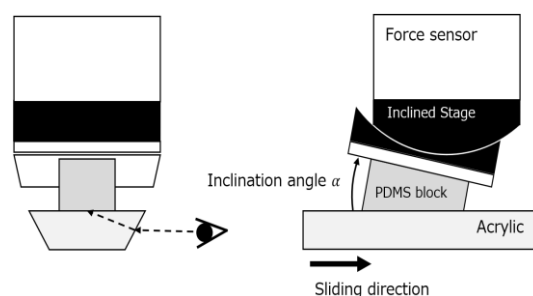


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Experimental condition

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Load type	Dead load			
Roughening of sliding surfaces	-	#120	-	#80
Normal load, N	6	9		
Specimen height H , mm	18	9		
Inclination angle α , deg	-2.25, ..., 0, ..., 4.5			
Sliding velocity, mm/s	1			
Lubrication conditions	Dry, Wet(PAO4)			

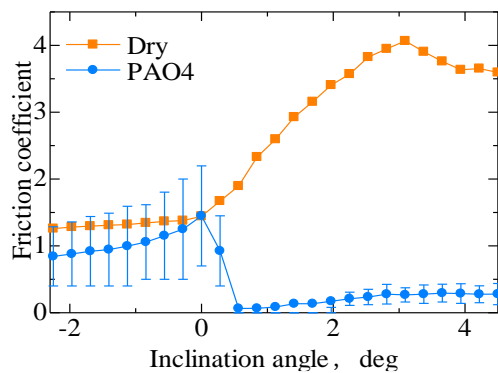


Fig. 2 Experimental results of Test 1

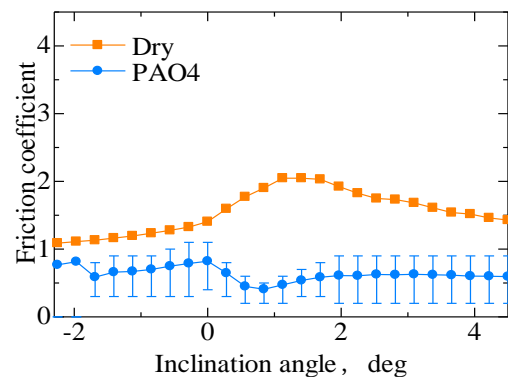


Fig. 3 Experimental results of Test 2

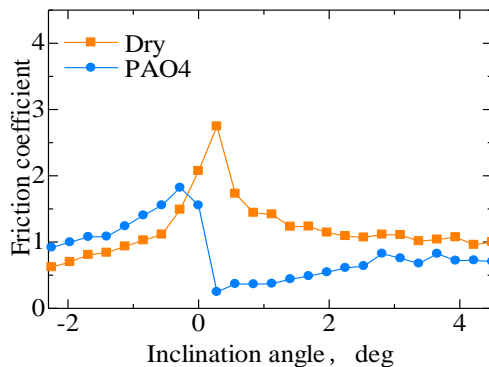


Fig. 4 Experimental results of Test 3

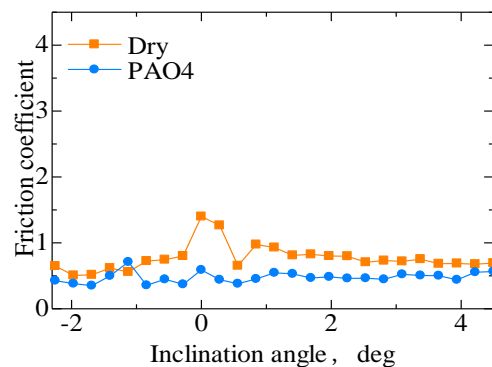


Fig. 5 Experimental results of Test 4

とがわかる．水平に接触している状態（0 deg）で摩擦力が最大でないのは、接線力によって曲げ変形が生じ摺動時は実効的に傾斜角度が負の状態（つんのめっている）になることによる．傾斜角度が 3 deg の場合で摩擦係数が最大を示すのは、摩擦によるバルク曲げ変形が事前に与えた傾斜角度と一致して、摺動中は水平で接触面積が最大になったことに起因する．次に Fig. 2 の Wet に着目すると 0.5 deg 付近で最小値をとっていることがわかる．これは、正の傾斜角度では、接触面前縁は持ち上げられ傾斜軸受ようになっており、特に 0.5 deg では見かけの接触面積が小さく、かつ油膜厚さが厚いという摩擦を小さくするうえでベストな条件（最適なソフト EHL 条件）になっている．

次に、高さの違いによる変形能の差（Fig. 2 と Fig. 4）に着目する．Dry 条件では、傾斜角度が正の状態においても摩擦係数の増大は抑制され、0.2 deg 程度の限られた範囲でしか摩擦係数が増加していない．Wet 条件に着目すると、スティックスリップは抑制され、0.5 deg 付近での摩擦係数はわずかに大きくなっている．高さが小さくなりバルク剛性が高まったことで、バルク変形と摩擦の連成環境が変化してソフト EHL 条件が変わったものと考えられる．

最後に、粗さの有無（Fig. 2 と 3 および Fig. 4 と 5）を比較すると、すべての条件において、粗さを付与することで、摩擦係数の傾斜角度依存性が小さくなっていることがわかる．これは、わずかな油膜厚さ変化に対して鈍感な混合潤滑域に遷移したことや、粗さの変形がバルク変形を吸収するように働いたためであると考えられる．いずれにしても、摺動面設計の観点から言えば、粗さの付与は、例えば形状公差や取り付け誤差により摺動面に傾斜ができた場合の摩擦係数変化を緩和するように働いていると言える．

4. おわりに

バルク変形およびソフト EHL による接触面変形が摩擦係数に影響する場合のモデル試験として、潤滑下における傾斜付きゴムブロックの摩擦特性を調査した．本実験で示したように、バルク変形能は Dry と Wet の条件下ともに摩擦係数に大きく影響する．例えば、ゴムブロックの摩擦において、mm オーダの形状公差や取り付け誤差は摩擦係数を決定する重要な因子となることがわかる．また、表面の粗さは形状依存性や姿勢依存性を緩和させる方向に働き、摺動面のロバスト性向上に寄与するものと考えられる．

文献

- 1) S. Maegawa, F. Itoigawa, T. Nakamura: A role of friction-induced torque in sliding friction of rubber materials. *Tribology International*, 93, (2016) 182.
- 2) P.N.J. Persson: Theory of rubber friction and contact mechanics, *The Journal of Chemical Physics*, 115 (2001), 3840.
- 3) S. Maegawa, F. Itoigawa, T. Nakamura: Effect of normal load on friction coefficient for sliding contact between rough rubber surface and rigid smooth plane. *Tribology International*, 92, (2015) 335.
- 4) S. Ozaki, K. Mieda, T. Matsuura, S. Maegawa, Simple Prediction Method for Rubber Adhesive Friction by the Combining Friction Test and FE Analysis, *Lubricants*, 6, (2018) 38.