

すべり方向に対する矩形ゴムブロックの向きがグリセリン潤滑下における摩擦と流体圧力に及ぼす影響

Effect of orientation of rectangular rubber block relative to sliding direction on friction and fluid pressure under glycerol lubrication

東北大（学）*石塙 新太（正）西 駿明（正）山口 健
Arata Ishizako, Toshiaki Nishi, Takeshi Yamaguchi
Tohoku University

1. 緒言

労働死傷災害における転倒の4割を靴底と床面間のすべりが占めることが報告されている。このすべり転倒の防止のために、水や油で濡れた床面に対する靴底の高摩擦化が望まれている。これまでに、潤滑下における摩擦に及ぼす靴底意匠の影響に関する研究が行われてきている。Yamaguchi ら¹⁾は、グリセリン潤滑下において、矩形ゴムブロックの長手方向がすべり方向に対して直交する場合に比べて、平行な場合のほうが高い摩擦係数が示すことを明らかにしている。しかし、そのメカニズムは不明であり、耐滑靴底意匠の開発に向け解明が求められている。

Ishizako ら²⁾は、グリセリン中におけるすべり摩擦において、端面角部半径が小さいゴムブロック試験片では接触界面に負の流体圧力が発生し、高摩擦を示すことを明らかにしている。上述の、すべり方向に対する矩形ゴムブロックの向きによる摩擦係数の違いは、この流体圧力の違いが影響している可能性が考えられる。

そこで本研究では、すべり方向に対する矩形ゴムブロックの向きが、摩擦係数、接触界面で発生する流体圧力およびゴムブロックの断面形状に及ぼす影響を明らかにし、矩形ゴムブロックの長手方向がすべり方向に対して平行な場合に高摩擦を示すメカニズムを明らかにする。

2. 実験方法

本研究で用いたゴムブロック試験片の外観および試験片のすべり方向を Fig. 1 に示す。試験片はシリコンゴム (Sylgard 184, Dow Inc.) を原料とし、高さ 5 mm、幅 5 mm、奥行 50 mm の矩形ゴムブロックが 5 列並行に並んだ構造を有している。また試験片に添加する硬化剤とシリカ粒子の量を調整することで硬度の異なる 3 種類の試験片 ($\text{HS(A/15)} = 40, 59, 74$) を作製した。試験片の表面粗さはそれぞれ $S_q = 4.2 \mu\text{m}, 2.9 \mu\text{m}, 2.6 \mu\text{m}$ である。試験片のすべり方向は、トレッドブロックの長手方向と平行な方向 ($\theta = 0^\circ$) と直交する方向 ($\theta = 90^\circ$) の 2 条件とした。

実験に用いた摩擦試験機の概略図を Fig. 2 に示す。本研究では、ガラス板 ($R_a < 0.01 \mu\text{m}$, Tempax Float, OOKABE GLASS) を取り付けたステージにゴムブロック試験片を一定荷重 W (87.2 N) で接触させ、深さ 7.0 mm のグリセリンに浸した条件ですべり摩擦試験を行った。ステージには圧電型圧力センサ (113B28, 東陽テクニカ) とレーザ変位センサ (LK-H020, キーエンス) を取り付けた。圧力センサの直上には $\phi 3 \text{ mm}$ の穴が空いており、穴の直上をゴムブロックが通過した時の圧力変化を測定した。またレーザ変位センサは圧力センサと y 軸が一直線上に配置し、ゴムブロックの $x-z$ 面内の断面形状を測定した。すべり速度は $v = 0.01, 0.05, 0.10, 0.20 \text{ m/s}$ の 4 条件とした。各試行は 5 回ずつを行い、圧力センサ上を試験片が通過している間の摩擦係数の平均値を動摩擦係数 μ_k とした。

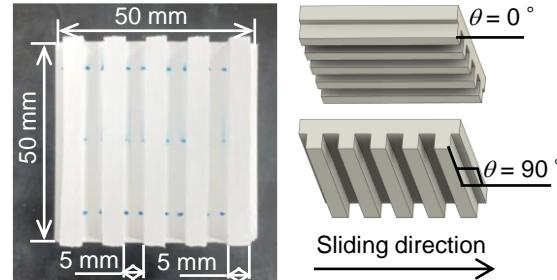


Fig. 1 Photograph of rubber block specimen and orientation of rubber block relative to sliding direction

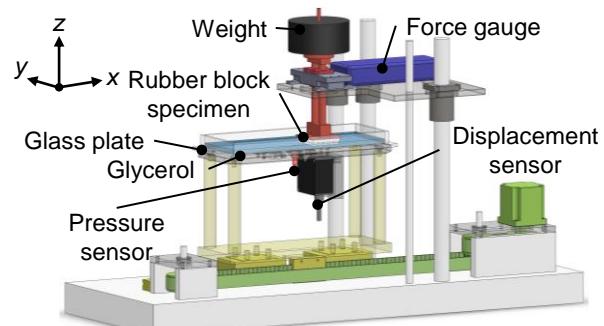
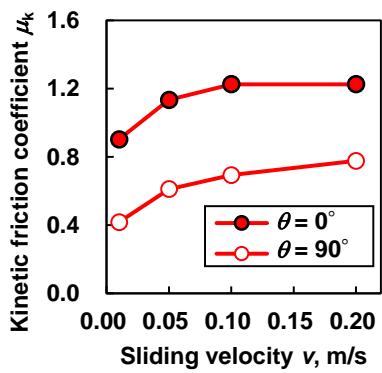
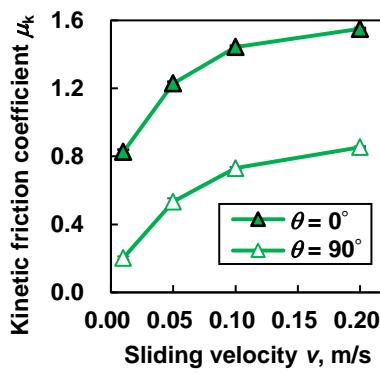


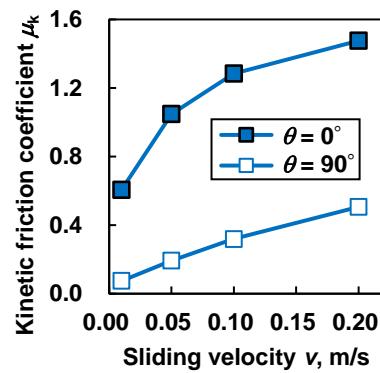
Fig. 2 Experimental equipment



(a) HS = 40



(b) HS = 59



(c) HS = 74

Fig. 3 Effect of sliding velocity on kinetic friction coefficient

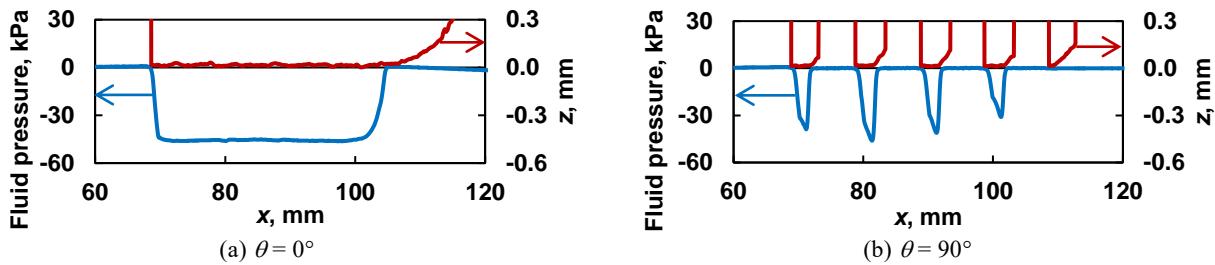


Fig. 4 Fluid pressure distribution and rubber block shape for each sliding direction ($HS = 59, v = 0.10 \text{ m/s}$)

3. 実験結果

すべり速度と μ_k の関係をFig. 3に示す。ゴムの硬度によらず $\theta = 0^\circ$ の条件の方が $\theta = 90^\circ$ よりも摩擦係数が高く、 $v = 0.20 \text{ m/s}$ において1.6–2.9倍高い摩擦係数を示した。異硬度間で比較すると、 $\theta = 90^\circ$ の条件では速度によらず $HS = 40$ の試験片の方が高摩擦を示した一方、 $\theta = 0^\circ$ の時は特に $v = 0.20 \text{ m/s}$ の時に $HS = 59, 74$ で高摩擦になる傾向を示した。

Figure 4に、 $HS = 59, v = 0.10 \text{ m/s}$ の条件におけるゴムブロックの断面形状と流体圧力の分布を示す。ここで流体圧力はゲージ圧を0 kPa、z軸はガラス表面の位置を0 mmとした。同図より、ゴムブロックの向きによらず、ゴムブロックの後端が剥離し、接触界面に負の流体圧力が発生することが確認された。特に $\theta = 0^\circ$ の条件は $\theta = 90^\circ$ の条件より広範囲に負圧が発生する傾向を示した。また流体圧力を積分してゴムブロックに負荷される吸着力を算出すると、 $\theta = 0^\circ$ の条件における吸着力は $\theta = 90^\circ$ の条件より2.9倍高い値を示した。この傾向は硬さによらず同様であった。

4. 考察

Figure 4における試験片の断面形状からゴムブロックとガラス板間の距離を算出し、介在するグリセリンの膜厚とした。Figure 5に $HS = 59, v = 0.10 \text{ m/s}$ の条件におけるグリセリンの膜厚の度数分布を示す。ここで度数は5回の試行の合計値である。同図より、 $HS = 59$ の試験片の場合、 $\theta = 90^\circ$ の条件では $h > 10 \mu\text{m}$ であるのに対して、 $\theta = 0^\circ$ の条件では $h \geq 1 \mu\text{m}$ であることが分かる。これは、 $\theta = 0^\circ$ の条件では $\theta = 90^\circ$ より大きな吸着力が発生し、グリセリンの膜が薄くなつたことを示唆している。

Figure 6に、各条件においてゴムブロックとガラスが最も接近した点の高さから算出した膜厚の最小値 h_{\min} と、流体圧力による吸着力を考慮した推定垂直荷重 F_e の関係を示す。同図より、硬度によらずいずれも $\theta = 0^\circ$ の条件の方が $\theta = 90^\circ$ の条件より F_e が大きく h_{\min} が小さくなる傾向を示した。また $\theta = 90^\circ$ の条件では硬度間で比較しても F_e の増加に伴い h_{\min} が単調に減少する傾向を示した。

Figure 7に、 h_{\min} と μ_k の関係を示す。 h_{\min} と μ_k には負の相関が見られるが、特に $h_{\min} > 3 \mu\text{m}$ において高い負の相関($r = -0.92$)を示した。これは、膜厚の増加に伴うグリセリンの粘性抵抗の減少によるものと考えられる。 $h_{\min} < 3 \mu\text{m}$ の領域は h_{\min} と μ_k に相関が見られないが、これは膜厚が薄くゴムブロックとガラスが直接接触したためと考えられる。以上よりグリセリン潤滑下において、矩形ゴムブロックの長手方向がすべり方向に対して平行な場合に高摩擦を示すのは、負の流体圧による吸着力が大きく、グリセリンの膜厚が薄くなるため、粘性抵抗が増大すること、およびガラスとの直接接觸部が増加するためと考えられる。

5. 結言

- (1) グリセリン中では試験片の硬度によらず $\theta = 0^\circ$ の条件の方が $\theta = 90^\circ$ よりも高い摩擦係数を示した。
- (2) 試験片の硬度によらず $\theta = 0^\circ$ の条件の方が $\theta = 90^\circ$ の条件より F_e が大きく h_{\min} が小さい傾向を示した。
- (3) h_{\min} と μ_k には負の相関が見られ、特に $h_{\min} > 3 \mu\text{m}$ において高い負の相関($r = -0.92$)を示した。
- (4) $\theta = 0^\circ$ の条件では、吸着力が大きいことで膜厚が薄くなり、粘性抵抗の増大およびガラスとの直接接觸部の増加によって高摩擦になったと考えられる。

参考文献

- 1) T. Yamaguchi et al., Tribology International, 110(2017)96-102.
- 2) A. Ishizako et al., Tribology International, 192(2024)109213

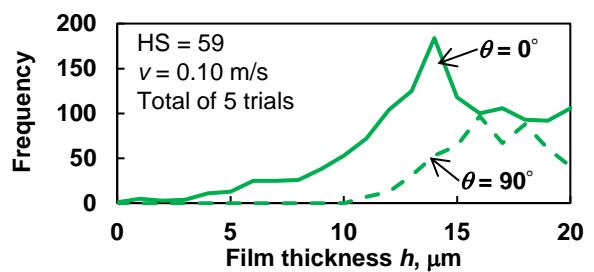


Fig. 5 Frequency distribution of film thickness

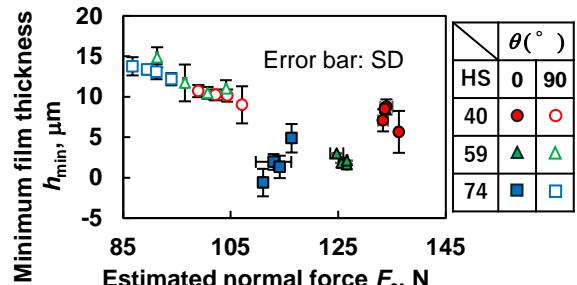


Fig. 6 Effect of the estimated normal force on the minimum film thickness

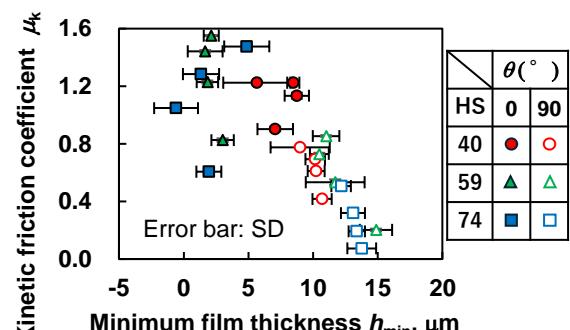


Fig. 7 Effect of the minimum film thickness on the kinetic friction coefficient