

液中におけるトレッドゴムの高摩擦化に及ぼす流体圧力の影響

Effect of fluid pressure on enhancement of friction of tread rubber in lubricant

東北大（正）*石塔 新太 （正）西 駿明 （正）山口 健

Arata Ishizako, Toshiaki Nishi, Takeshi Yamaguchi

Tohoku University

1. 緒言

労働死傷災害の4割を占めるすべり転倒は水や油で濡れた床面で発生することが多く¹⁾、濡れた環境における靴底の高摩擦化が望まれている。これまでに液中における靴底トレッドゴムの耐滑性に関する研究が行われており、トレッドゴムの溝の大きさや向き、硬度、粗さ、端面角部半径等の様々な要素が摩擦に影響することが明らかにされてきた。しかし、それぞれの要素が摩擦に及ぼす影響は個別に研究されており、体系的なメカニズムの解明には至っていないのが現状である。

我々は、液中におけるトレッドゴムの摩擦メカニズム解明のため、トレッドゴムとガラスの接触面を、光干渉法を用いて観察する実験を行った²⁾。その結果、Fig. 1に示すように一部の条件でトレッドゴムの接触界面にキャビテーションとみられる空隙が発生し、空隙が発生する条件で高摩擦化することを発見した。これは、Fig. 2の模式図に示す通り、トレッドゴムの変形により接触界面に拡大流路が形成され、くさび膜効果により負の流体圧力が発生したことを示唆する。この発見を基に、これまで個別に研究されてきたトレッドゴムの溝の向きや硬度等の要素が液中の摩擦に影響するメカニズムを流体圧力の観点から体系的に議論することでさらなる高摩擦化が期待できると考えた。

本報では、液中において高摩擦を発現する好適なトレッドゴムの条件及びその原因を流体圧力の観点から検証した事例を取り上げ、流体圧力によって高摩擦が発現するメカニズムとそれを応用した将来展望について述べる。

2. 高摩擦発現の好適条件

液中において高摩擦を発現する好適なトレッドゴムの溝の向き、端面角部半径、ゴムの硬度等の条件を解明するため、Fig. 3に示すようなシリコンゴム製の矩形トレッドゴム試験片を3段階の硬度（HS(A/15)=40, 59, 74）で作製し、グリセリン中で摩擦させる試験を行った。トレッドゴム端部の角部半径は $r = 0.10$ mmとした。試験片のすべり方向をトレッドゴム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条件とすることで溝の向きの影響を調査した。またHS(A/15)=40の条件において、トレッドゴム端部を研磨した $r = 1.37$ mmの条件を追加して端面角部半径の影響を調査した。実験にはFig. 4に示す直動摩擦試験を用いて、グリセリンを浸したガラスに試験片を接触させ、一定速度でx軸方向に摺動させた時の摩擦係数を取得した。またガラスに圧力センサと変位センサを取り付けることで接触界面の流体圧力・断面形状を測定した。

Figure 5に各すべり方向における試験片の断面形状と流体圧力の分布の一例を示す。流体圧力はゲージ圧を0 kPa、大気圧以下の圧力を負とし、z軸はガラス表面の位置を0 mmとした。同図より、すべり方向によらず、トレッドゴム後端が変形により剥離し、接触界面に負圧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。測定された流体圧力がy軸方向に一樣と仮定して流体圧力を積分してトレッドゴムに負荷される吸着力 F_{fluid} を算出し、 F_{fluid} を考慮したトレッドゴムに負荷される推定の垂直荷重 $F_{\text{est}} (= W - F_{\text{fluid}})$ を

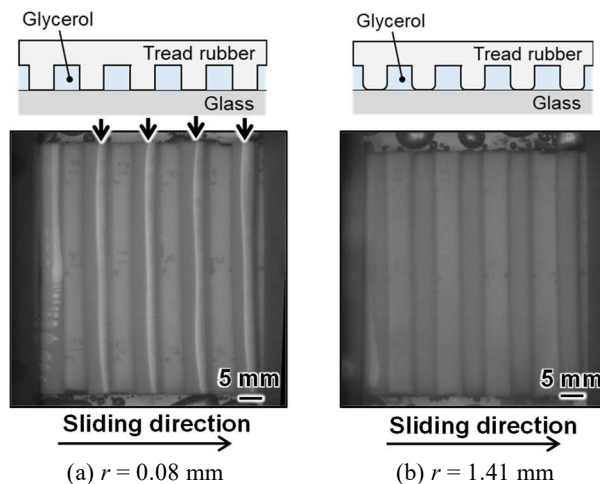


Fig. 1 Contact surface observation of tread rubber under glycerol lubrication²⁾

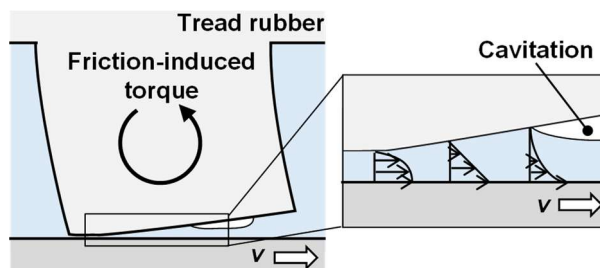


Fig. 2 Schematic of tread rubber deformation

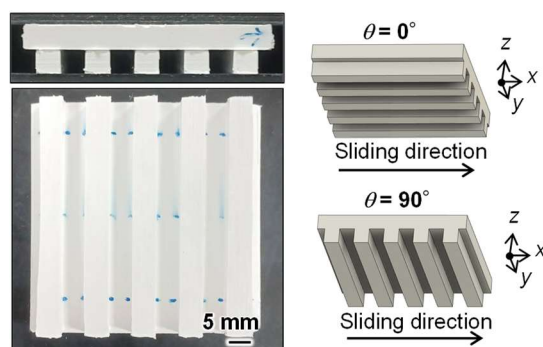


Fig. 3 Photograph of rubber block specimen and orientation of rubber block relative to sliding direction³⁾

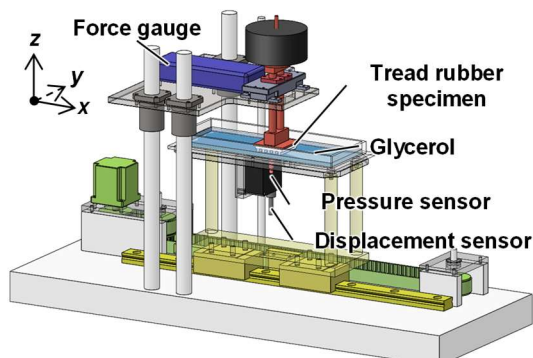


Fig. 4 Experimental apparatus³⁾

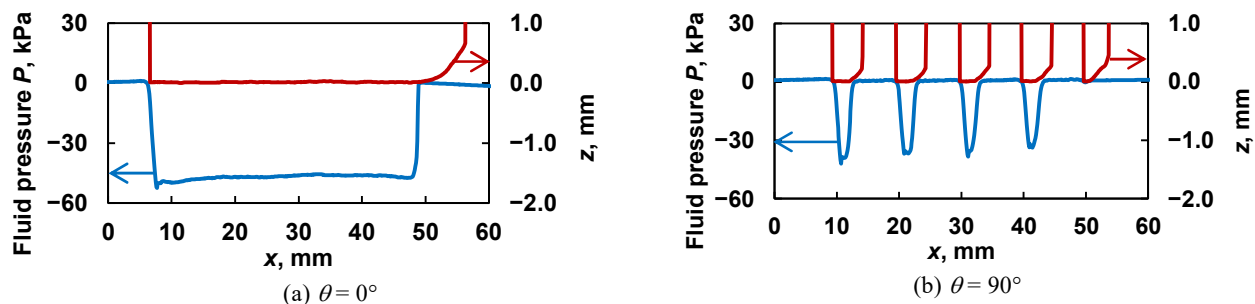


Fig. 5 Fluid pressure distribution and tread shape for each sliding direction (HS = 40, $v = 0.10$ m/s)³⁾

算出した。Figure 6に F_{est} と摩擦係数の関係を示す。同図より、溝の向き、硬度、端面角部半径によらず F_{est} の増加に伴い摩擦係数が増加する傾向を示した。条件間を比較すると、 $\theta = 0^\circ$ の条件は $\theta = 90^\circ$ の条件より F_{est} と摩擦係数が大きい傾向を示した。また、試験片の硬度、向きが同じHS40、 $\theta = 90^\circ$ の条件において、 $r = 0.10$ mmの試験片が $r = 1.37$ mmの試験片より F_{est} と摩擦係数が大きい傾向を示した。また硬度の減少に伴い F_{est} が増加する傾向を示したが、硬度と摩擦係数に相関関係は見られなかった。

以上より、グリセリン中における高摩擦発現には接触界面に大きい負圧が発生することが重要であり、端面角部半径が小さく、すべり方向に対して溝の長手方向が平行な条件が高摩擦化に好適である。

3. 高摩擦発現メカニズム

前章で示した通り、負圧によりトレッドゴムに負荷される垂直荷重が増加するため、荷重増加に伴う接触状態の変化が摩擦メカニズムを議論する上で重要と考えられる。そこで、測定された試験片の断面形状からトレッドゴムとガラス間の距離の度数分布を算出し、度数分布の平均値 h_{mean} と標準偏差 σ を用いて最小膜厚 $h_{min} (= h_{mean} - 3\sigma)$ を算出した。Figure 7に算出した h_{min} と摩擦係数の関係を示す。同図より、硬度や向きによらず膜厚の減少に伴い摩擦係数が増加する傾向が確認された。これは膜厚の減少が摩擦係数の増加に影響することを示唆している。つまり、Fig. 8に示す模式図のように、負圧による吸着力によって膜厚が減少し、凝着摩擦と流体の粘性抵抗の増加により高摩擦が発現することが、負圧発生による高摩擦発現のメカニズムであると考えられる。このメカニズムを応用し、テクスチャの付与等によりトレッドゴム界面の流体圧力を制御することができれば潤滑下の摩擦係数を任意に調整できると考えられる。また将来的には流体圧力を利用して動的に摩擦を変化させることも可能であると考えられ、摩擦発現メカニズムを応用したゴムの新たな利用方法の開拓が期待される。

4. 結言

- (1) 溝の向き、硬度、端面角部半径によらず F_{est} が大きいほど高い摩擦係数を示す。
- (2) 負圧による吸着力によって膜厚が減少し、凝着摩擦と流体の粘性抵抗の増加により高摩擦が発現することが、負圧発生による高摩擦発現のメカニズムである。

参考文献

- 1) 柴田・大西, 労働安全衛生研究, 16, 1 (2023) 11–27.
- 2) A. Ishizako et al., Tribology International, 184(2023)108473.
- 3) A. Ishizako et al., Tribology International, 198(2024)109904.

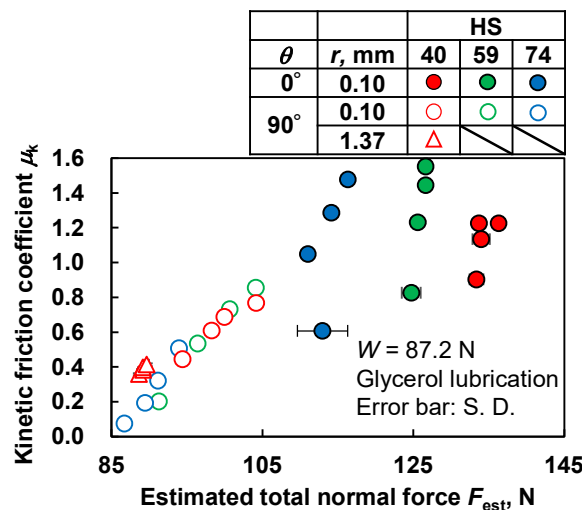


Fig. 6 Effect of estimated total normal force on friction coefficient³⁾

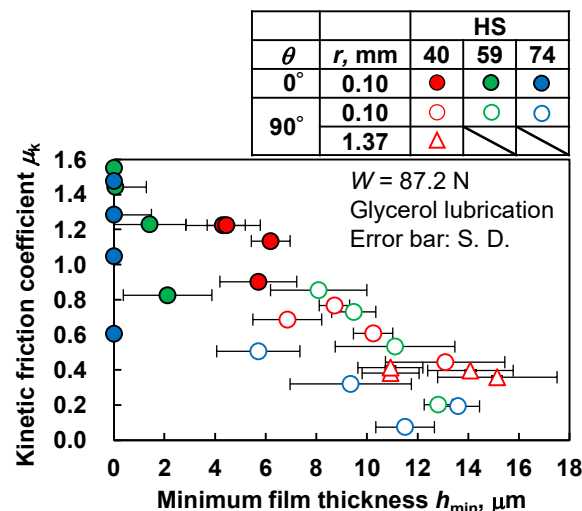


Fig. 7 Effect of minimum film thickness on friction coefficient³⁾

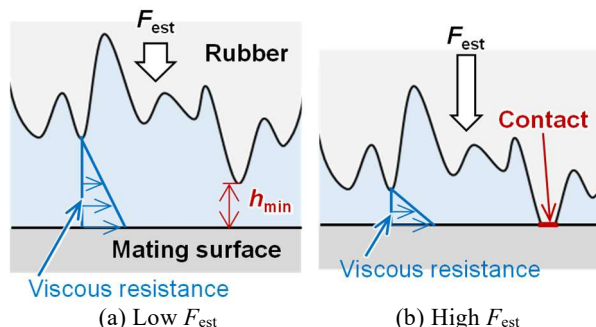


Fig. 8 Schematic of the relationship between F_{est} and fluid-film thickness