

ゴムと粗面の摩擦と摩耗の因果関係

The relation between friction and wear of rubber on rough surfaces

横国大(院)畠中 慎太郎, ブリヂストン(非)半澤 健太郎, (非)堀 健太郎, (正)山口 健, (非)梶木 亮, 横国大(正)中野 健
Shintaro Hatanaka¹, Kentaro Hanzawa², Kentaro Hori², Ken Yamaguchi², Ryo Kajiki², Ken Nakano¹

¹Yokohama National University, ²Bridgestone Corporation

1. 緒言

自動車用タイヤには、乾燥、湿潤、凍結などの種々の路面上で高い制駆動力を得るために、高い摩擦力が要求される。また、天然ゴムの生産地での森林伐採や、合成ゴムによる海洋プラスチック汚染の環境問題を背景に、高い耐摩耗性が求められる。従って、ゴムの高摩擦と高耐摩耗性の両立は重要な課題である。先行研究では、ゴムの摩耗速度は、摩擦係数や摩擦仕事に従い増大すると述べられている[1]。一方、ゴムの摩擦因子には、引力由来の凝着摩擦と斥力由来のヒステリシス摩擦があり、両者が共存する。ヒステリシス摩擦の速度特性については、円柱圧子と粘弹性ファンデーションの滑り接触モデルにより、適切な無次元量を用いたマスターカーブとして整理されている[2]。本研究では、斥力由来のヒステリシス摩擦は、接触点における力と滑りの方向が直交するため、摩擦仕事に寄与せず、理想的にはゴムの摩耗が発生しないと仮説を立てている。本報告では、この仮説の妥当性を検証し、摩擦因子の制御による、高摩擦と低摩耗を両立する改良方向を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

実験装置は Bruker 社製 UMT Tribolab を使用した。上部に固定した SBR ゴムリング(外径:30 mm, 内径:20 mm, 厚さ:5 mm, カーボンブラック部数:30 phr)と、六本の鉄鋼圧子(材料:SUS316, 形状:円柱または三角柱、長さ:24 mm)の接触部をシリコーンオイル(粘度: $\eta = 10, 100, 1000 \text{ cSt}@25^\circ\text{C}$)で潤滑し、線接触滑り摩擦試験を実施した。垂直荷重一定の条件下で、ゴムリングに対する圧子の貫入量を PID 制御した。つまり、本試験は、既往の研究の「可動圧子モデル」に相当する[2]。垂直荷重は、事前に取得した接触試験の結果より、静的貫入量が同等となるように、円柱圧子では $W = 24 \text{ N}$ (円柱一本あたり 4 N), 三角柱圧子では $W = 12 \text{ N}$ (円柱一本あたり 2 N)とした。本実験系を用いて、摩擦試験と摩耗評価の二種の試験を行った。摩擦試験では、設定した垂直荷重で接触させた後、円柱圧子を回転駆動した。最初の 500 秒間は $\Omega = 0$ から 100 rpm まで 0.2 rpm/s でスイープアップし、次の 100 秒間は $\Omega = 100 \text{ rpm}$ でホールドし、次の 100 秒間は $\Omega = 100$ から 0 rpm まで -1 rpm/s で減速した。摩擦係数は、計測したトルクと垂直荷重から算出した。圧子は、なめらかな円柱(曲率半径:4 mm, 表面粗さ:Ra 0.8 μm), 粗い円柱(曲率半径:4 mm, 表面粗さ:Ra 10 μm), なめらかな三角柱(傾斜角:75°, 表面粗さ:Ra 0.8 μm)の三種で比較した。摩耗評価では、摺動速度を 10 rpm で一定とし、同様の摩擦試験を実施した。摺動距離:0.6, 1.3, 2.6, 6.5, 13.1 m で試験を中断し、レーザ顕微鏡の対物レンズを 5 倍、50 倍の二種の倍率で、ゴム表面を逐次観察した。潤滑油は、シリコーンオイル(粘度:10 cSt(@25°C))のみを使用した。

3. 結果および考察

摩擦係数 μ を粘度と回転速度の積 $\eta\Omega$ に対して整理した結果を図 1 に示す。なめらかな円柱では、境界潤滑から流体潤滑に応するストライベック曲線のように整理できる。一方、粗い円柱となめらかな三角柱では、摩擦係数に及ぼす $\eta\Omega$ の影響は小さく、境界潤滑から混合潤滑の領域と推定できる。いずれも粘度の異なる曲線間にヒステリシス摩擦に起因する不連続性を確認できる。これを活用し、既往の研究の手法を用いて、摩擦係数の内訳を分析した[3]。抽出したヒステリシス摩擦の速度特性を図 2 に示す。いずれの場合も、ヒステリシス摩擦係数は速度強化型であることが認められる。抽出したヒステリシス摩擦を合計の摩擦係数から差し引き、凝着摩擦係数を見積もる。凝着摩擦係数は、速度弱化特性を示す。凝着摩擦の寄与率は、なめらかな円柱よりも、粗い円柱と三角柱の方が大きい。次に、摩耗後の表面の顕微鏡観察結果を図 3 に示す。比較画像は、摺動距離を 6.5 m で合わせたものである。なめらかな円柱では顕著な摩耗が見られなかったが、粗い円柱と三角柱では摩耗が生じた。両者に共通して、巨視的には摺動方向に平行なアプレシブ摩耗が、微視的にはアブレージョンパターンが観察された。これらの結果は、ゴムと粗面の摩擦現象と、摩耗形態の分析において、単一の三角柱圧子を用いた実験系が有効であることを示唆する。また、ゴムの摩耗に対し、斥力由来のヒステリシス摩擦の寄与が小さく、引力由来の凝着摩擦の寄与が大きいことが定性的に示され、仮説の妥当性を支持する結果が得られた。次に、摩擦因子の制御による耐摩耗性の改良方向を考察するために、既往の研究における円柱圧子のファンデーション理論を三角柱圧子に拡張し、摩擦係数および圧子の貫入量の速度依存性と、各パラメータの関係を、適切な無次元量を用いて検討した。ヒステリシス摩擦係数は、式(1)の無次元速度 ξ により記述できる。ただし、 V : 滑り速度, K : 接触剛性, C : 接触減衰係数, W : 垂直荷重, L : 線接触長さ, θ : 圧子勾配である。式(2)の臨界速度 V^* を境に速度依存性が変化し、低速では摩擦係数が ξ に比例して増加し、高速では一定値 $\tan \theta$ に漸近する。従って、ヒステリシス摩擦を増加させるには、 ξ を大きくする、あるいは、

V^* を小さくすれば良い。一方、潤滑下の凝着摩擦は二面間の距離に依存するため、摩擦係数の低減には、圧子の貫入量 δ の低減が有効と考えられる。静止時の初期貫入量 δ_0 は、 K, W, θ に依存し、式(3)で表される。臨界速度 V^* 以上では速度弱化特性を示し、 ξ^{-1} に比例して減少する。従って、凝着摩擦を小さくするには、 ξ を大きくする、あるいは、 δ_0 を小さくすれば良い。以上より、速度および荷重条件、材料、圧子形状に關係するパラメータ群として改良方向を推定することができる。最も簡単な例として、各パラメータの組合せが臨界速度 V^* 以下の範囲内においては、速度に応じて、ヒステリシス摩擦は増加し、凝着摩擦は減少するため、耐摩耗性が向上すると考えられる。検証実験として、圧子の回転速度 10, 100 rpm の二条件で摩耗評価を行った。勾配 75°の三角柱圧子を用いて、摺動距離を 6.5 m で合わせて実施した。摩耗後表面の顕微鏡観察像を図 4 に示す。予想通り、低速条件と比較して、高速条件で摩耗の進行が緩やかになった。

$$\xi = V \sqrt{\frac{LC^2 \tan \theta}{KW}} \quad (1)$$

$$V^* = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{WK}{LC^2 \tan \theta}} \quad (2)$$

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{W \tan \theta}{LK}} \quad (3)$$

4. 結言

本研究では、粗面の突起群を单一の三角柱で模擬することで、摩擦係数の速度依存性、および、摩耗形態の傾向を再現可能なシンプルな理論と実験系を構築した。凝着摩擦が小さく、ヒステリシス摩擦が大きい場合に、ゴムの高摩擦と低摩耗を両立する可能性を示した。円柱から三角柱圧子に拡張したファンデーション理論に基づき、各摩擦因子の制御パラメータ群を整理し、耐摩耗性の改良方向の一例を提案し、その妥当性を確認した。

文献

- [1] A. Schallamach, The role of hysteresis in tire wear and laboratory abrasion, *Rubber Chemistry and Technology*, **85**, 33 (1960).
- [2] K. Nakano, M. Kono, Transient and steady sliding friction of elastomers: impact of vertical lift, *Frontiers in Mechanical Engineering*, **6**, 38 (2020).
- [3] 谷口、畠中、半澤、山口、梶木、中野、ストライベック曲線の不連続性に着目したヒステリシス摩擦の抽出法、トライボロジー会議 2022 秋 福井 予稿集(2022) E26

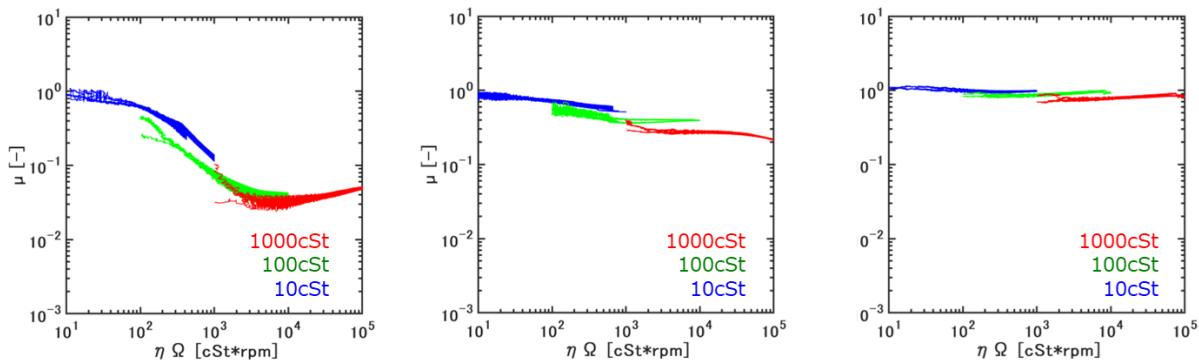


図 1 ゴムリングと鉄鋼圧子の摩擦係数(青:10 cSt, 緑:100 cSt, 赤:1000 cSt, 左図:なめらかな円柱, 中図:粗い円柱, 右図:なめらかな三角柱)

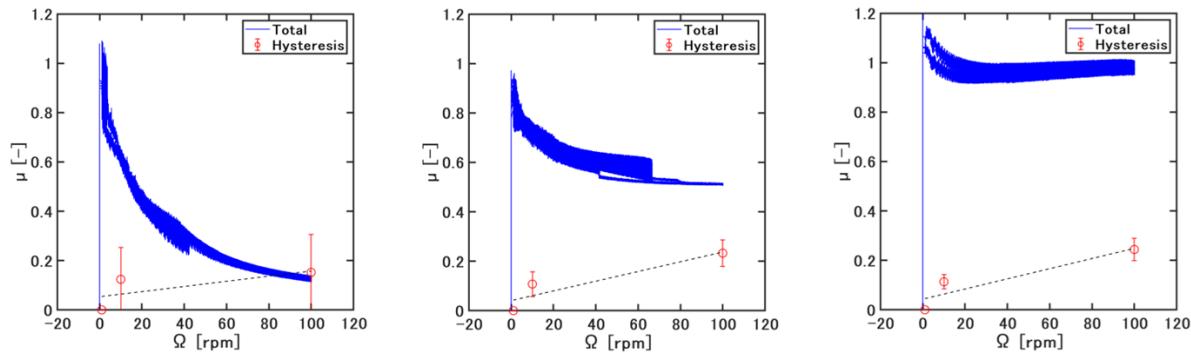


図2 ゴムリングと鉄鋼圧子の各摩擦因子の速度特性(左図:なめらかな円柱, 中図:粗い円柱, 右図:なめらかな三角柱)(青線:合計の摩擦係数, 赤丸:0, 10, 100 rpmにおけるヒステリシス摩擦係数, 両者の差:凝着摩擦係数)

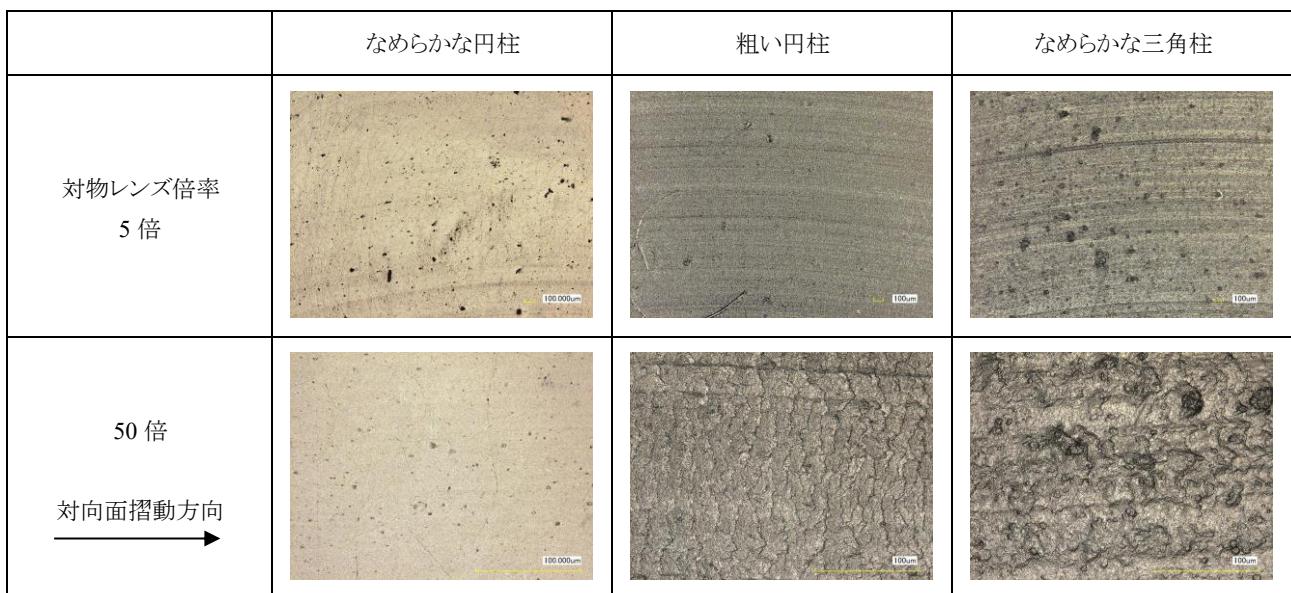


図3 圧子形状および粗さの異なる条件での摩耗後表面の顕微鏡観察画像(左図:なめらかな円柱, 中図:粗い円柱, 右図:なめらかな三角柱)

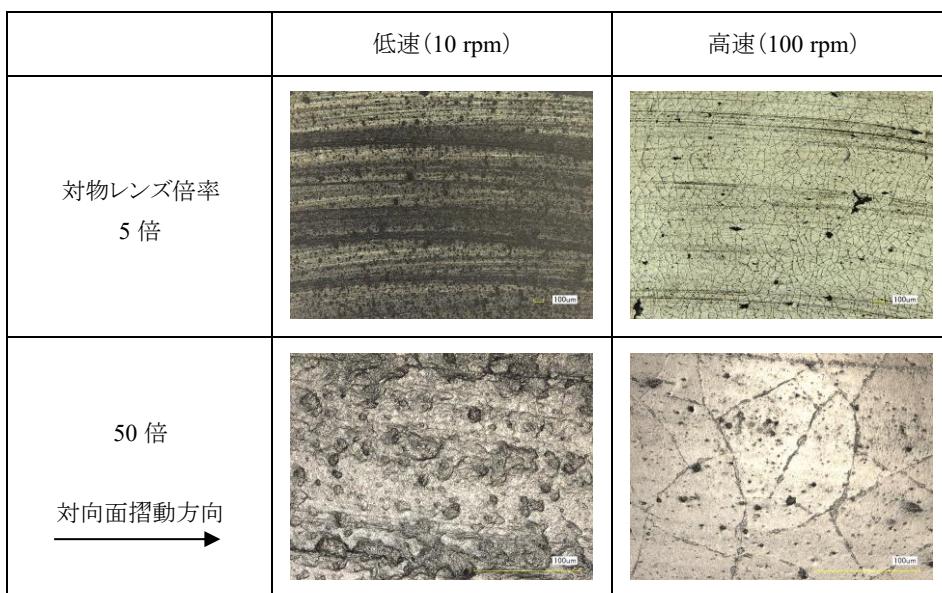


図4 摺動速度の異なる条件での摩耗後表面の顕微鏡観察画像(左図:低速(10 rpm)条件, 右図:高速(100 rpm)条件)