

## 油性剤の境界潤滑作用を利用したゴムの摩擦の成分分離

Separating rubber friction components utilizing the boundary lubrication effect of oiliness agents

横国大(学)※小川 陽平, ブリヂストン(正) 畠中 慎太郎, (非) 半澤 健太郎, (正) 梶木 亮, (正) 山口 健,  
横国大(正) 大久保 光, (正) 中野 健

Yohei Ogawa<sup>1</sup>, Shintaro Hatanaka<sup>2</sup>, Kentaro Hanzawa<sup>2</sup>, Ryo Kajiki<sup>2</sup>, Ken Yamaguchi<sup>2</sup>, Hikaru Okubo<sup>1</sup>, Ken Nakano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yokohama National University, <sup>2</sup>Bridgestone Corporation

### 1. 緒言

自動車用タイヤには、安全性とサステナビリティの観点より、高い摩擦力を発揮しながら耐摩耗性に優れる特性が求められている。しかし、一般にタイヤの摩耗量は摩擦仕事に比例するため、高摩擦性と低摩耗性を兼備したゴム材料の実現は困難な課題となっている[1]。著者らは、ゴムの乾燥摩擦を構成する二つの摩擦成分(凝着摩擦とヒステリシス摩擦)の発生機構の相違[2]に着目したアプローチでこの課題に取り組んでいる。先行研究では、ストライベック曲線の不連続性に着目した「摩擦の成分分離」に基づき、ゴムのアブレイブ摩耗の発生は、凝着摩擦の大きさに依存し、ヒステリシス摩擦には依存しないことを示した[3]。さらに、凝着摩擦とヒステリシス摩擦を独立に制御することで、高摩擦性と低摩耗性を兼備したゴム材料の開発に向けた粘弾性の設計指針を獲得した[4]。ただし、上記の摩擦の成分分離法は、①極低速時のヒステリシス摩擦は微小である、及び、②ヒステリシス摩擦は速度強化特性を示す、という二つの仮定に基づいており、抽出した摩擦成分の定量性にいくつかの課題を残した。そこで、本研究では、油性剤の境界潤滑作用を利用して、①と②の仮定を置かない定量的な摩擦の成分分離法を提案する。さらに、「粘弾性ファンデーション理論」[5]に基づき、抽出したヒステリシス摩擦係数の荷重及び速度依存性について、妥当性を検証する。

### 2. 方法

実験装置は Bruker 社製の UMT TriboLab を使用した。図 1 に接触部の概念図を示す。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、三本の鉄鋼円柱圧子(材料: S45C, 曲率半径:  $R = 4$  mm, 表面粗さ:  $R_a$  0.1  $\mu\text{m}$ , 長さ: 24 mm)を潤滑下で接触させ、線接触滑り摩擦試験を実施した。潤滑剤には、粘度の異なる四種のシリコンオイル(粘度:  $\eta = 10, 100, 1000, 10000$  cSt@25°C)を用い、シリコンオイル単体(SO)とオレイン酸(1 wt%)を添加したもの(SO+OA)を使用した。摩擦試験中は、垂直荷重が一定(12, 36, 120 N)となるように、ゴムリングに対する圧子の貫入量を PID 制御した。回転速度  $\Omega = 100$  rpm で荷重を印加し、100 s 保持後 0.2 rpm/s で 0 rpm までスリープダウンした。摩擦係数  $\mu$  は、計測したトルクと垂直荷重から算出した。以上の手順で、縦軸を摩擦係数、横軸を粘度と回転速度の積( $\eta\Omega$ )とする準ストライベック曲線を取得した。また、ゴム材料の動的粘弾性の計測には TA Instruments 社製の ARES-G2 を使用した。周波数( $f = 0.1, 0.3, 1, 3, 10$  Hz)と歪( $\epsilon = 10^{-4}$  から 1)及び温度( $T = 30^\circ\text{C}$ )を指定し、周波数ごとにゴム試料の動的粘弾性の歪依存性を計測した。

### 3. 結果および考察

摩擦試験により得られた準ストライベック線図の一例( $W = 120$  N)を図 2 に示す。オレイン酸の境界潤滑作用により、 $\eta\Omega < 10^3$  cSt $\cdot$ rpm の範囲では二本の曲線(SO: 赤線, SO+OA: 青線)に差が生じた。ここで、計測された摩擦係数  $\mu$  は凝着摩擦  $\mu_{adh}$ 、ヒステリシス摩擦  $\mu_{hys}$ 、流体摩擦  $\mu_{fluid}$  の三成分の和となることに加え、二本の曲線が一致する範囲( $\eta\Omega > 10^3$  cSt $\cdot$ rpm)では、ゴムと圧子の接触界面に十分な流体膜が存在し、凝着摩擦は生じていないことを仮定する。すると、凝着摩擦の生じていない範囲( $\eta\Omega > 10^3$  cSt $\cdot$ rpm)では、計測された合計の摩擦係数  $\mu$  と弾性流体潤滑理論より導出した流体摩擦  $\mu_{fluid}$  の差からヒステリシス摩擦  $\mu_{hys}$  が抽出できる。さらに、ヒステリシス摩擦は潤滑剤の粘度に依らないとすると、凝着摩擦が生じている範囲( $\eta\Omega < 10^3$  cSt $\cdot$ rpm)も含めたすべての領域において、摩擦力を三つの成分に分離できる。潤滑剤の粘度ごとに摩擦の成分分離を行った結果の一例( $W = 120$  N, 潤滑材: SO)を図 3 に示す。赤の領域が凝着摩擦、青の領域がヒステリシス摩擦、緑の領域が流体摩擦を表す。

動的粘弾性の測定結果の一例( $f = 0.1$  Hz)を図 4 に示す。ここで、周波数と速度の関係及び歪と貫入量の間を仮定し、粘弾性ファンデーション理論[5]を用いると、動的粘弾性の計測結果からヒステリシス摩擦係数を理論的に求めることができる。ヒステリシス摩擦係数の実験値と理論値を比較した結果を図 5 に示す。いずれの荷重、速度においても、実験値と理論値は定量的に一致した。このことから、今回新たに提案した摩擦の成分分離法の妥当性が確認され、定量的な摩擦の成分分離が実験的に可能であることが示唆される。

### 4. 結言

本研究では、実験的な摩擦の成分分離を定量的に行う手法の考案及び分離結果の妥当性の評価を行った。油性剤の境界潤

滑作用に着目し、ヒステリシス摩擦を抽出することで定量的な摩擦の成分分離が可能であることを示した。さらに、粘弾性ファンデーション理論に基づいてヒステリシス摩擦の理論値を導出し実験値と比較した結果、定量的な一致を確認した。このことから、本研究の摩擦の成分分離法が妥当であることが示唆される。

## 文献

- [1] 中島, タイヤの摩耗力学研究の現状, 日本ゴム協会誌, 88, 31-36 (2015).
- [2] D. F. Moore, W. Geyer, A review of hysteresis theories for elastomers, Wear, 30, 1-34 (1974).
- [3] S. Hatanaka, Y. Ogawa, H. Okubo, K. Hanzawa, R. Kajiki, K. Yamaguchi, K. Nakano, Correlation between friction and wear of rubber: An experimental approach based on the disconnections of Stribeck curves, Wear, 562-563, 205623 (2025).
- [4] 小川ら, 摩擦の成分分離に基づく低摩耗ゴム設計指針, トライボロジー会議 2024 春 東京 予稿集 C11 (2024).
- [5] T. Watanabe, S. Hatanaka, K. Nakano, Dimensionless numbers and master curves for sliding friction from the Kelvin-Voigt viscoelasticity of solids, Tribology Online, 18, 406-416 (2023).

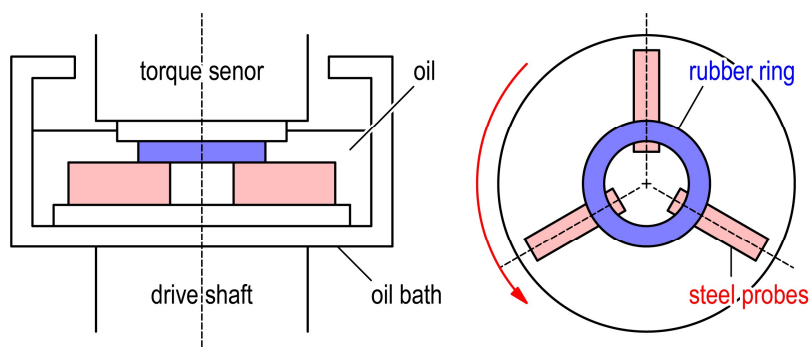


図1 接触部概念図(左:側面図, 右:上面図)

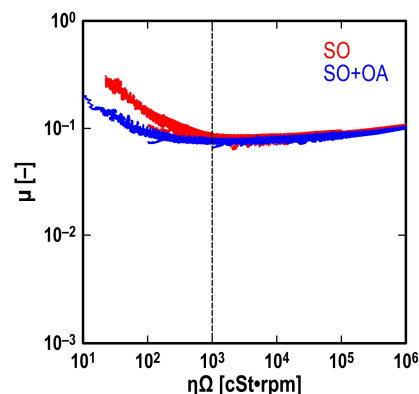


図2 準ストライベック線図 ( $W = 120 \text{ N}$ )

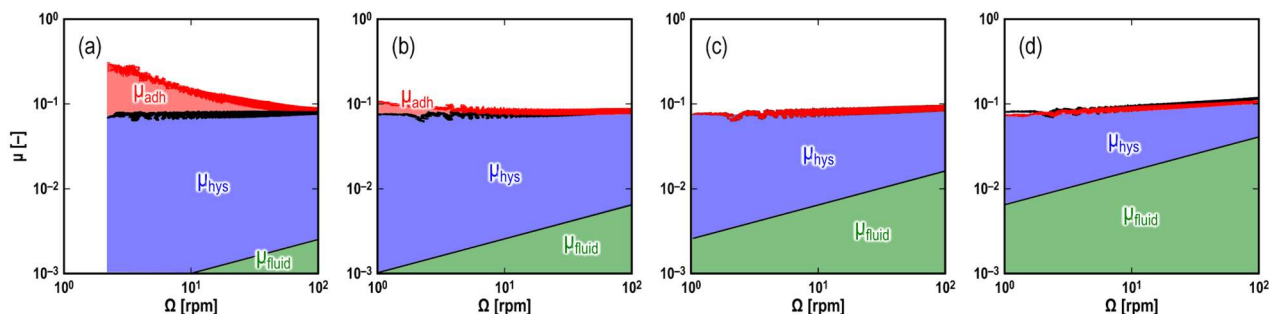


図3 摩擦の成分分離結果(シリコンオイル単体,  $W = 120 \text{ N}$ ): (a)10 cSt, (b)100 cSt, (c)1000 cSt, (d)10000 cSt

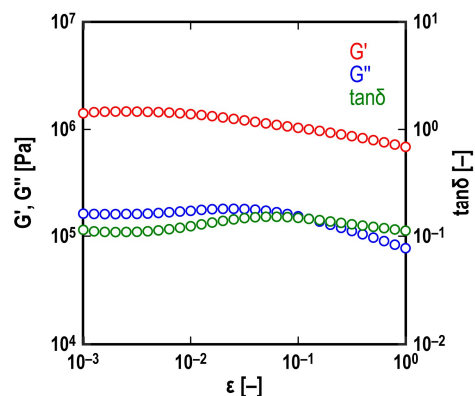


図4 ゴムの動的粘弾性 ( $f = 0.1 \text{ Hz}$ )

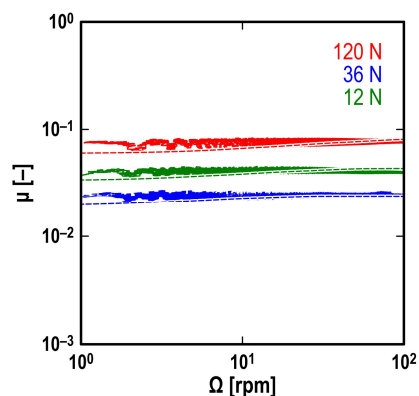


図5 ヒステリシス摩擦の速度依存性  
(実線:実験値, 破線:理論値)