

## 摩擦の成分分離に基づく低摩耗ゴムの設計指針

Improvement direction for low-wear rubbers based on the friction component separation

横国大(学)※小川 陽平, (正)畠中 慎太郎, ブリヂストン(非)半澤 健太郎, (非)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>1</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

タイヤ用ゴム材料の開発では、架橋剤や添加剤の調合によって機械的特性(とりわけ粘弾性)を制御することで、所望の性能を実現している。従って、ゴムの粘弾性パラメータと所望の特性との結び付きを明確にすることは、ゴム材料の開発に際して極めて重要である。一方、タイヤ用ゴムの中でも、路面と接するトレッドゴムは、高摩擦性と低摩耗性を兼備したゴム材料の適用が求められる。しかし、一般にゴムの摩耗量は摩擦仕事に従って増大し、高摩擦と低摩耗の両性能は背反することから、そのようなゴム材料の開発は一般に容易ではない[1]。先行研究において筆者らは、ストライベック曲線の不連続性から二つの摩擦成分(凝着摩擦とヒステリシス摩擦)を実験的に分離可能な手法「摩擦成分分離法[2]」と粘弾性体の摩擦モデルである「粘弾性ファンデーション理論[3]」を用いて、高摩擦性と低摩耗性の両立に向けたゴムの開発指針の確立を試みた[2]。その結果、アプレシブ摩耗とアブレージョンパターンの発生は、ヒステリシス摩擦に依らず凝着摩擦の大きさに依存することを確認し、ヒステリシス摩擦成分と凝着摩擦成分の適切な制御により、高摩擦性と低摩耗性を兼備したゴムの開発が実現可能であることが示唆された[2]。上述の背景から、ゴムの粘弾性パラメータを通してその摩擦摩耗特性を独立に制御することが可能となれば、より明瞭なゴムの開発指針となり得ると考えた。本研究では、粘弾性の異なるゴム材料の各摩擦成分と摩耗特性を実験的に把握し、高摩擦性と低摩耗性を兼備するゴム開発に向けた粘弾性パラメータの設計指針の提案を目的とする。

### 2. 方法

実験装置は Bruker 社製 UMT TribоЛab 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)と、六本の鉄鋼円柱圧子(材料:SUS316, 半径:R = 4 mm, 表面粗さ:R<sub>a</sub> 10 μm, 長さ:24 mm)の接触部をシリコーンオイル(粘度:η = 10, 100, 1000 cSt@25°C)で潤滑し、線接触滑り摩擦試験を実施した。ゴム試料は、架橋剤及びカーボンブラックの含有量の異なる四種(A, B, C, D)を用いた。ゴム試料の諸元を表 1 に示す。架橋剤とカーボンブラックの含有量は、其々 2 水準ずつ用意した。貯蔵弾性率 E', 損失弾性率 E'', 損失正接 tan δ (= E'' / E') はレオメータを用いて測定した。垂直荷重一定(24 N(円柱一本あたり 4 N))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。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。本実験系を用いて、摩耗試験と摩擦試験の二種の試験を行った。摩耗試験では、摺動速度を Ω = 10 rpm で一定とし、摺動距離:65, 131, 262, 655 m で摺動を中断し、ゴム試料の重量を計測した。試験前に測定した重量との差より、摩耗重量を算出した。潤滑油は、同上のシリコーンオイル(粘度:η = 10 cSt@25°C)を使用した。摩擦試験では、回転速度を、Ω = 0 から 100 rpm の間で、0.2 rpm/s でスイープアップ及びスイープダウンさせた。摩擦係数は、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(ηΩ)とする準ストライベック曲線を取得した。

### 3. 結果および考察

摺動距離 655m 時点の摩耗重量を図 1 に示す。摩耗重量は、A > B > C > D の順に大きい結果となった。次に、摩擦試験により取得した準ストライベック曲線の不連続性に着目し、凝着摩擦とヒステリシス摩擦の成分分離を行った。抽出した各摩擦成分と摩耗重量の関係を図 2 に示す。摩耗重量は、凝着摩擦と強い正相関を示し、ヒステリシス摩擦と明確な相関を示さなかった。先行研究[2]と同様に、ゴムの摩耗は、ヒステリシス摩擦によらず、凝着摩擦の大きさに伴い増加するといえる。次に、粘弾性ファンデーション理論に基づき、凝着摩擦とヒステリシス摩擦に及ぼす粘弾性の影響を、それぞれ次の式(1)と式(2)で推定した[3]。

$$\mu_{\text{adh}} = \frac{\sigma A}{W} \propto \sigma \left[ \frac{L^2 R}{K W^2} \right]^{1/3} = \sigma \left[ \frac{a L^2 R}{W^2 E'} \right]^{1/3} \quad (1)$$

$$\mu_{\text{hys}} = \frac{C V}{R K} = \frac{a E''}{R E'} = \frac{a}{R} \tan \delta \quad (2)$$

各パラメータは、 $\sigma$ : 界面の剪断強度、 $A$ : 接触面積、 $W/L$ : 単位幅当たりの垂直荷重、 $K$ : 剛性、 $C$ : 粘性、 $R$ : 圧子の曲率半径、 $V$ : 駆動速度、 $a$ : 接触半長である。式(1)より凝着摩擦は  $E'^{1/3}$  に反比例、式(2)よりヒステリシス摩擦は  $\tan \delta$  に比例すると推定される。これらは、古典摩擦論の記述と定性的に一致する[4]。各摩擦成分と粘弾性( $E'^{1/3}$ ,  $\tan \delta$ )の関係を図3に示す。凝着摩擦は予想通り  $E'^{1/3}$  と負相關を示したが、ヒステリシス摩擦は有意な差を示さず、 $\tan \delta$  との相関は確認できなかった。摩擦成分の抽出精度に課題はあるが、粘弾性ファンデーション理論を媒介することで、粘弾性による摩擦成分の制御が可能となる。以上より、凝着摩擦を小さく、ヒステリシス摩擦を大きくすることで高摩擦性と低摩耗性を両立でき、 $E'^{1/3}$  及び  $\tan \delta (= E''/E')$  を大きくするという、粘弾性の設計指針が得られる。貯蔵弾性率と摩耗重量の関係を図4に示す。予想通り、 $E'^{1/3}$  の増加に従い低摩耗となることから、今回の粘弾性の設計指針は妥当といえる。なお、 $E'^{1/3}$  と  $\tan \delta (= E''/E')$  の増加は、 $E'$  に対して定性的には背反するが、各摩擦成分に及ぼす粘弾性の影響を、幕乗則として定量的に記述することにより、 $E'$  と  $E''$  の適正值の探索が可能となる。

#### 4. 結言

- 摩擦の成分分離に基づき、ゴムの摩耗重量は、ヒステリシス摩擦によらず、凝着摩擦に従って増加することがわかる。
- 粘弾性ファンデーション理論を媒介することで、高摩擦と低摩耗を両立するための、粘弾性の設計指針を獲得できる。
- 粘弾性の具体的な設計指針は、 $E'^{1/3}$  及び  $\tan \delta$  を大きくすることである。

#### 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、32 (2015)。
- [2] 畠中ら、ゴムと粗面の摩擦と摩耗の因果関係、トライボロジー会議 2023 春 東京 予稿集 (2023)。
- [3] Watanabe T, Hatanaka S, Nakano K, Dimensionless Numbers and Master Curves for Sliding Friction from the Kelvin-Voigt Viscoelasticity of Solids, Tribology Online, 18, 6, 406-416 (2023)
- [4] Moore D F., The Friction and Lubrication of Elastomers, Oxford, Pergamon Press (1972)

表1 ゴム試料の諸元

サンプル名	A	B	C	D
架橋率* [-] * A, B を 1 とした相対値	1	1	1.67	1.67
カーボンブラック部数 [phr]	30	50	30	50
貯蔵弾性率 $E'$ [MPa]	2.0	3.0	2.3	4.2
損失正接 $\tan \delta$ [-]	0.19	0.26	0.15	0.24

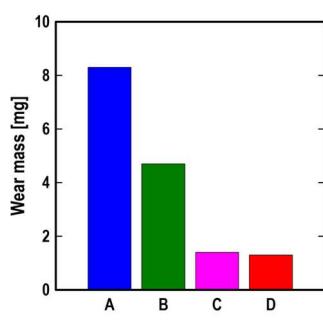


図1 655m 摺動後の摩耗重量

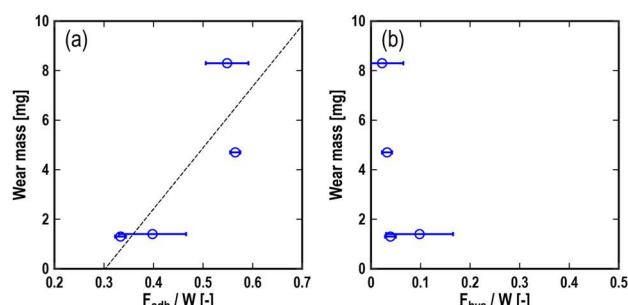


図2 摽重量と摩擦成分の関係:(a) 凝着摩擦, (b) ヒステリシス摩擦

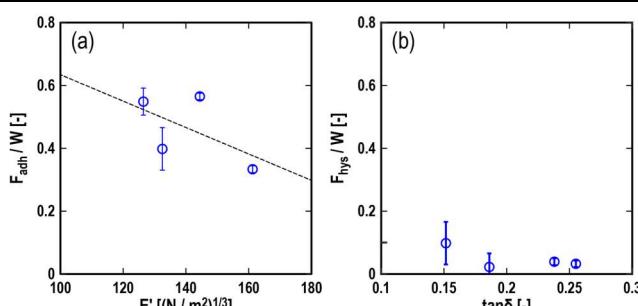


図3 摆成分と粘弾性の関係:(a) 凝着摩擦, (b) ヒステリシス摩擦

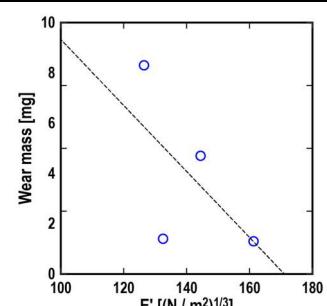


図4 摆重量と粘弾性の関係