

ゴムの摩擦と摩耗に及ぼす接触剛性と接触減衰の影響

Effects of stiffness and damping in sliding contact on rubber friction and wear

横国大(院)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
Shintaro Hatanaka¹, Kentaro Hanzawa², Ryo Kajiki², Ken Yamaguchi², Hikaru Okubo¹, Ken Nakano¹

¹Yokohama National University, ²Bridgestone Corporation

1. 緒言

優れたグリップ力と長寿命性を兼備した自動車用タイヤは、安全性と持続可能性の観点で高い社会的価値を有する。しかし、ゴムの摩擦と摩耗のメカニズムは完全には解明されておらず、両性能の自在な制御には至っていない。ゴムの摩擦係数には、ベル型の速度依存性を示す特徴があり、レオロジー特性(材料応答)及び対向面の浮上(機械的応答)の二つの視点で説明されている[1]。ゴムの摩耗には、規則的なアブレージョンパターン(AP)を形成する特徴があり、そのパターン間隔は弾性率と摩擦力に依存することが示されている[2]。このように、ゴムの摩擦と摩耗(ライボロジー特性)に対して、レオロジー特性は重要な役割を担う。本研究では、滑り接触における摩擦力とゴムの動的応答を同時計測する独自の装置[3]を開発し、開発装置を用いて、ゴムのライボロジー特性に及ぼすレオロジー特性の影響を明らかにすることを目的とした。本報では、ゴムと粗面の滑り接触における「接触剛性」と「接触減衰」の実測結果に基づき、ゴムの摩擦と摩耗の特性、とりわけ、APの形成に関して検討した内容を報告する。

2. 方法

実験装置は、モータで回転するゴムローラ(スチレンブタジエンゴム製、カーボンブラック部数:30 phr、ヤング率:7.3 MPa、半径:25 mm)と剛曲面(SUS303 製、曲率半径:20 mm、#2000 の研磨紙を貼付)の線接触滑り摩擦を利用している。本実験系の力学モデルを図 1 に示す。ゴムローラの回転軸は、滑り軸受により水平面内の回転自由度を有し、引張ばねを介して接続したロードセルにより垂直荷重 W を設定した。剛曲面の回転軸に接続したトルクメータにより、捩れ角 θ とトルク T を計測した。回転中心と加振点及び接触点までの距離はそれぞれ $a = 30$ mm, $b = 60$ mm とした。ゴムローラと剛曲面の間の摩擦力は $F = T/b$ で求めた。圧縮ばねを介して剛曲面の回転軸に接続した PZT アクチュエータにより、接線方向に正弦波加振(振幅: $u_0 = 2.5$ μm)を与えた。加振振動数 f (= $\omega/2\pi$) を 50 Hz から 100 Hz まで掃引し、捩れ角 θ を出力とする共振曲線(振幅応答曲線と位相応答曲線)を取得した。運動方程式の定常応答解を $\theta = \alpha \cos(\omega t + \varphi)$ とおくと、その振幅 α と位相 φ はそれぞれ式(1)と(2)で表される。

$$\alpha = \frac{au_0\sqrt{k_0^2 + c_0^2\omega^2}}{(K_0 + 2a^2k_0 + b^2k_c)\sqrt{\left(1 - \frac{J\omega^2}{K_0 + 2a^2k_0 + b^2k_c}\right)^2 + \left(\frac{\omega(C_0 + 2a^2c_0 + b^2c_c)}{K_0 + 2a^2k_0 + b^2k_c}\right)^2}} \quad (1)$$

$$\varphi = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega(C_0 + 2a^2c_0 + b^2c_c)}{K_0 + 2a^2k_0 + b^2k_c - J\omega^2}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{c_0\omega}{k_0}\right) \quad (2)$$

打撃試験ならびに非接触時の共振曲線より、試験機の動特性(計測軸の慣性モーメント J 、捩り剛性 K_0 、捩り減衰係数 C_0 、圧縮ばねの剛性 k_0 、減衰係数 c_0)を同定した。静的接触時ならびに滑り接触時の共振曲線から、接触部のレオロジー特性(接触剛性 k_c と接触減衰 c_c)を同定した。また、特性時間を $t_c = c_c/k_c$ で定義した。静的接触は、四水準の垂直荷重($W = 5, 10, 20, 30$ N)で計測した。滑り接触は、垂直荷重 $W = 5$ N で固定し、七水準の回転速度($V = 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80$ mm/s)で計測した。また、摩耗の評価を目的として、回転回数 $N = 0, 100, 200, 500, 1000, 2000$ の時点で、ゴム表面の光学観察像と 100 断面の断面形状を取得した。FFT 解析により得られた振幅スペクトルにおいて、最大値を取る波数 v を検出し、その逆数から AP の平均間隔 λ (= v^{-1}) を求めた。

3. 結果および考察

取得した共振曲線を図 2 に示す。黒色は非接触($W = 0$ N, $V = 0$ mm/s)、青色は静的接触($W = 5$ N, $V = 0$ mm/s)、赤色は滑り接触($W = 5$ N, $V = 10$ mm/s)を示し、プロットは実験結果、実線は式(1)と(2)を用いたフィッティング結果である。良好なフィッティングが得られており、図 1 の力学モデルの妥当性が認められる。静的接触時の t_c に及ぼす接触面積の影響を図 3(a)に示す。接触面積によらず t_c は一定であり、材料固有の特性時間と捉えられる。滑り接触時の k_c , c_c 及び t_c に及ぼす回転速度の影響を図 3(b)に示す。青い破線は静的接触時の値を示す。滑り接触時のレオロジー特性は、静的接触時と異なる値を示す。 $V > 10$ mm/s の範

囲では、 k_c と c_c は速度の増加に従って共に減少した。静的接触時の t_c を考慮すると、粗面の突起との接触部に生じるゴムの剥離[1]に伴う接触面積の低下が要因と推定できる。また、 k_c と c_c の速度依存性の近似曲線の幕乗則が異なるため、結果的に t_c は速度に従って減少する傾向を示した。摩耗試験後のゴム表面の光学観察像を図4に示す。 $V \geq 20$ mm/sの範囲で明瞭なAPが観察された。回転回数の増加に伴うAPの成長が観察された。 $N = 2000$ で摩耗は定常状態に達しており、その時点のAPの間隔を λ_s とする。 $N = 2000$ におけるAP間隔(= λ_s)と回転速度と特性時間の積(= Vt_c)の関係を図5に示す。両者の間には良好な相関が確認され、オーダーも一致する。ゴムと粗面の滑り接触部のレオロジー特性から求められる特性時間 t_c は、APの間隔を決める支配因子であることが示唆される。

4. 結言

- 共振曲線の取得により、ゴムと粗面の滑り接触部におけるレオロジー特性(接触剛性: k_c と接触減衰: c_c)を同定できる。
- 滑り接触時の k_c と c_c は、静的接触時と異なる値を示し、その速度依存性は粗面との接触部の剥離現象で説明できる。
- 滑り接触時の k_c と c_c の比である特性時間 t_c は、アブレージョンパターンの間隔を決める支配因子であることが示唆される。

文献

- Watanabe T, Nakano K, Two origins for bell-shaped velocity-dependent friction coefficient: Kelvin-Voigt or standard linear solid viscoelasticity., *Tribology Online*, 19, 167-177 (2023).
- Schallamach A, Friction and abrasion of rubber., *Wear*, 1, 384-417 (1958).
- Nakano K, Kawaguchi K, Takeshima K, Shiraishi Y, Forsbach F, Benad J, Popov M, Popov V L, Investigation on dynamic response of rubber in frictional contact., *Front. Mech. Eng.*, 5, 1-9 (2019).

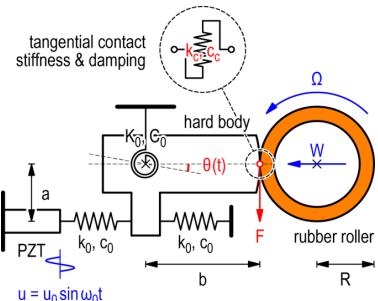


図1 試験系の力学モデル

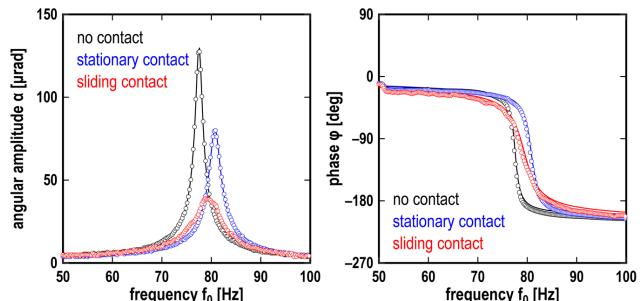


図2 共振曲線(左図:振幅応答曲線, 右図:位相応答曲線)

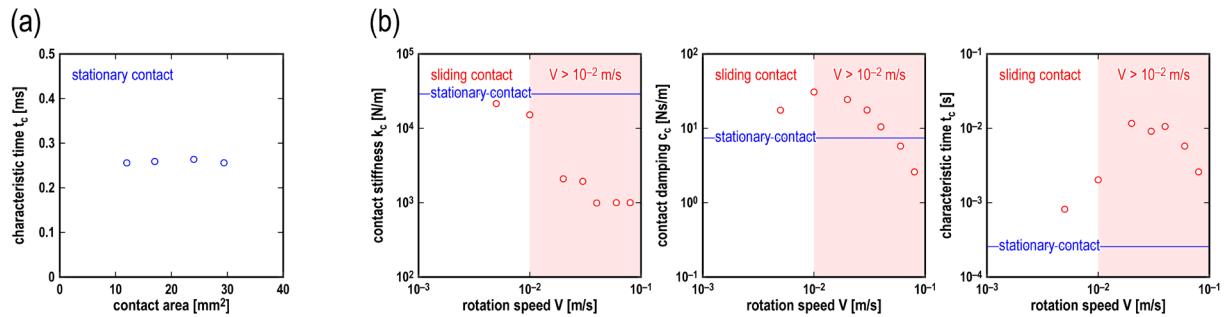


図3 (a) 静的接触時の t_c に及ぼす接触面積の影響, (b) 滑り接触時の k_c と c_c 及び t_c に及ぼす回転速度の影響

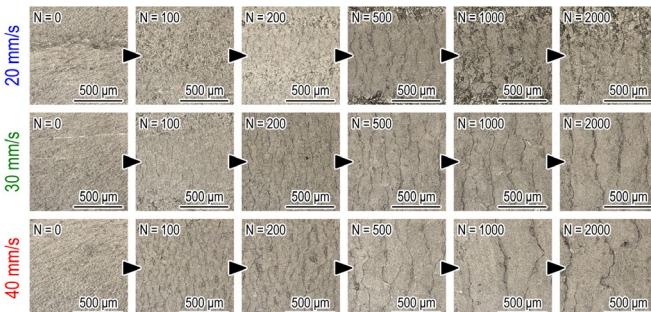


図4 摩耗後のゴム表面の光学観察像($V = 20, 30, 40$ mm/sを抜粋)

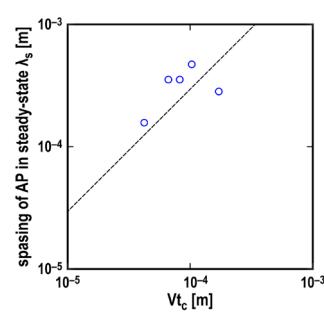


図5 APの間隔に及ぼす速度と特性時間の影響