

单一突起摩擦試験に基づくゴム材料のヒステリシス摩擦発現機構の考察

Study on Mechanism of Hysteresis Friction of Rubber Materials
based on Single Asperity Friction Test

名工大（学）*伊藤 一志 名工大（正）劉 晓旭 名工大（正）前川 覚 名工大（正）糸魚川 文広

横浜ゴム（正）綱野 直也 横浜ゴム（非）渡辺 幸

Kazushi Ito*, Satoru Maegawa*, Xiaoxu LIU*, Fumihiro Itoigawa*, Naoya Amino**, Yuki Watanabe**

*Nagoya Institute of Technology ** The Yokohama Rubber Co., Ltd.

1. はじめに

ヒステリシス摩擦とは粗面上を摺動するゴムの内部変形により生じるエネルギー散逸機構である。ヒステリシス摩擦の発現機構を定量的に論ずるための道筋として、個々の真実接触点での摩擦モデルを構築したのちに、それらをGWモデルなどの多点接触理論の助けを借りて見かけの接触面全体での摩擦挙動に拡張させることができると考える。そこで本研究では、真実接触点でのヒステリシス摩擦挙動の定量化を目的とした单一突起摩擦試験を実施した。対象とする試験片として、タイヤ用ゴムの母材として利用されるスチレンブタジエンゴム、および前報¹⁾にて報告した微粒子充填ゴム（相手粗面とのかみ合い性向上によるヒステリシス摩擦増大効果が見込まれる）の2種類を用いた。以下、その詳細について報告する。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概略図をFig.1に示す。装置は2軸自動ステージ（Fig.1下部）と力センサ（Fig.1上部）からなる。2軸移動ステージの上面には、厚み2mmのシート状ゴム試験片が取り付けられている。力センサの先端には単一突起を模擬したダイヤモンド触針（形状はFig.1の挿図参照）、触針に加わる鉛直力および水平力は板ばねに取り付けられたひずみゲージにより計測される。なお、板ばねの剛性は鉛直方向 $5.86 \times 10^{-3} \text{ N}/\mu\text{m}$ 、水平方向 $5.63 \times 10^{-3} \text{ N}/\mu\text{m}$ である。

実験は次の手順で実施した。まず、ステージを鉛直方向に移動させゴム試験片を触針に押し当てる。なお、力センサが力を検知した位置を原点として押し込み量を設定した。次に速度100μm/sでゴム試験片を水平方向に移動させ、触針に作用する水平力（摩擦力）と鉛直力（垂直荷重）を計測した。同様の手順で、異なる押し込み量での計8回の摩擦試験を行った。

実験には以下の2種類の試験片を用いた。試験片No.1はタイヤ用ゴムの母材として利用されるスチレンブタジエンゴム、試験片No.2にはNo.1の母材に平均粒子径45μmのシリカゲルが充填されている。測定においては、ゴムと触針の凝着力の影響を除外するため鉛油（動粘度32mm²/s@40°C）を塗布した。

3. 実験結果

Fig.2は摩擦力と垂直荷重の時間変化の計測結果の一例を示す。試験片No.1では一定の摩擦力が発生しているのに對して、微小粒子を含むNo.2では触針が粒子を乗り越える際に生じる力の変動が観察される。ヒステリシス摩擦の定量評価のために触針をFig.3のような円錐状の単純モデルで表現した。ゴムに円錐圧子を押し付けて摺動させる場合のヒステリシス摩擦を表現するモデルとして、Popovらの研究グループ²⁾により導入されたファンデーションモデル²⁾が有用である。同モデルに基づけば、摩擦係数μは下記のように定式化される。

$$\mu = \begin{cases} c[2^{3/2}\psi\sqrt{1-\psi^2} - \psi^2], & \psi^2 < 1/3 \\ c, & \psi^2 > 1/3 \end{cases} \quad \psi^2 = \frac{2cv^2\eta^2}{G}F_N \quad (1)$$

ここで、 F_N は垂直荷重、 G と η はゴムをファンデーションモデルに置き換えた場合の等価横弾性係数および等価粘性係数である。また、 v は駆動速度、 c は円錐の傾斜を1次元モデルで表現した等価傾斜であり、 $c = (\pi/2)\tan\theta$ で表される。なお、 θ をFig.3に図示したモデル触針の図に示す。

Fig.4に実験結果およびモデルから予測される理論値の比較を示す。Fig.4の○プロットおよび△プロットはFig.2で示した垂直荷重と摩擦力の時間変化から求めたそれぞれの平均値を用いて計算した摩擦係数であり、初期押し込み量が異なる8回の実験分の結果がプロットされている。また、Fig.4の実線は式(1)から求めたヒステリシス摩擦の摩擦

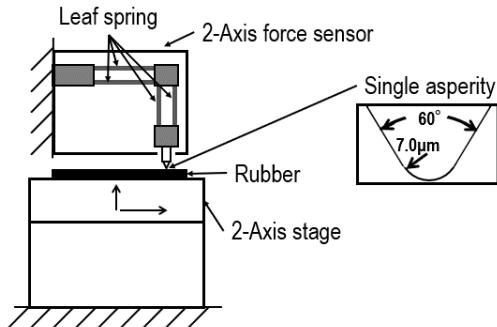


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

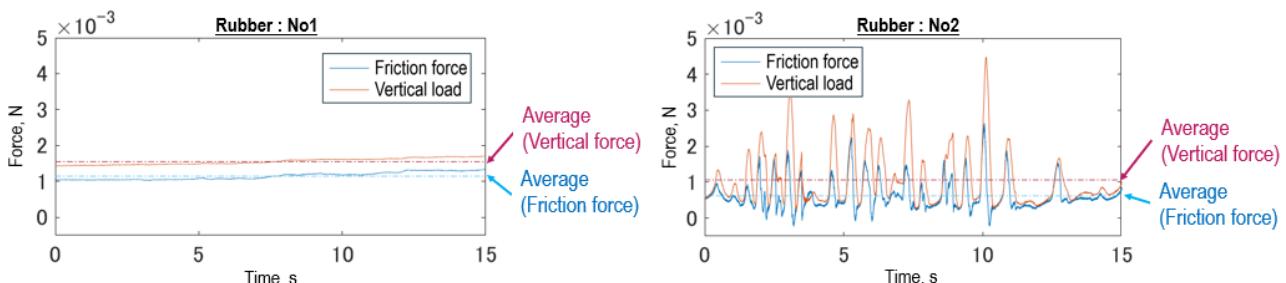


Fig. 2 Typical results of friction test

係数の理論値であり、それぞれのパラメータは $G = 4.7 \times 10^5 \text{ Pa}$, $\eta = 1.7 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ とした。

まず、Fig. 4 の青色プロットと実線の関係に注目する。垂直荷重が 3 mN 以上の場合において、理論予測値と実験結果はよく一致している一方で、垂直荷重が小さい領域においては両者の間の差は大きい。これは、理論予測では突起先端の丸みを無視しているが、荷重が小さい場合ではこの違いの影響が顕著に出たためであると考えられる。押し込み量を大きくすると先端丸みの影響が相対的に小さくなり、実験値と理論予測値の値が近づいたものと考えられる。

次に、Fig. 4 の赤色プロット（微粒子充填ゴム No.2）に着目する。押し込み量が小さい場合は、粒子無しのゴムと摩擦係数の値に明確な差異は見られないが、垂直荷重が大きくなるとその差は大きくなっている。押し込み荷重が増加することで食い込み量が増加して、ヒステリシス摩擦増大効果¹⁾が顕著化したものと考えられる。この結果より、改めて微粒子充填によるヒステリシス摩擦増大効果を検証することができた。

Fig. 5 に、同様にファンデーションモデル²⁾から求めた円錐突起の押し込み量と垂直荷重の関係を示す。微粒子充填による摩擦増大効果は押し込み量がおよそ 60 μm 以上の場合に大きく現れている。ヒステリシス摩擦増大効果の発現条件として、微粒子の大きさ程度の突起押し込みが必要であるということが、一つの目安になると思われる。

4. 結言

本報で得られた結果を以下にまとめると。従来より個々の真実接觸点での摩擦挙動のモデリングとしてファンデーションモデルの有用性が着目されているが、本実験を通してファンデーションモデルの妥当性を改めて検証することができた。また、ファンデーションモデルでの計算を行う際には、表面の等価弾性率や粘性係数の物性値取得に課題があるが、本研究で開発した単一突起摩擦試験により、それらを簡便に定量化可能であると思われる。

また、突起頂点のわずかな丸みが摩擦係数を決定する重要な因子であることが明らかとなった。また、突起半径やゴムの粘弹性特性をパラメータとして実験データを蓄積することで、摩擦係数の値を簡便に定式化できる円錐突起モデルの適用範囲を明示することが可能であると考えられる。同様に、ゴム表面の粗さや剛性分布（本報では微粒子充填により剛性分布を表現）がヒステリシス摩擦増大に及ぼす影響のモデル化においても、単一突起モデルを用いた評価が有用であると思われる。本報の実験条件範囲では、摩擦増大効果の発現条件が押し込み量 60 μm 以上であることが明らかになったが、この値は相手面粗さ突起頂部の曲率半径や剛性分布のピッチや剛性変化量などに依存することは間違いない。現象の一般化には今後の実験継続によるデータの積み重ねが必要である。

文 献

- 1) 伊藤・劉・前川・糸魚川：硬質粒子配合ゴムのヒステリシス摩擦に関する研究、トライボロジー会議 2023 年 春 東京 予稿集, (2023) B9
- 2) A.V.Dimaki, & V.L.Popov: Coefficient of Friction between a Rigid Conical Indenter and a Model Elastomer: Influence of Local Frictional Heating, Physical Mesomechanics, Vol.18 (2015) 75-80.

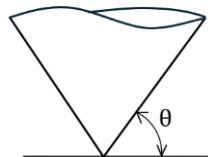


Fig. 3 Shape of conical indenter

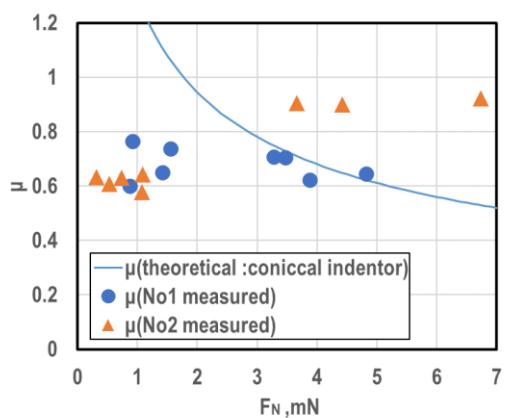


Fig. 4 Vertical load: F_N vs friction coefficient

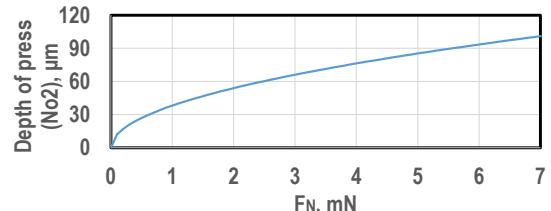


Fig. 5 Vertical load: F_N vs Depth of press (conical indenter)