

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

Extracting hysteresis friction focusing on the discontinuities of Stribeck curves

横国大(学)※谷口 諄, (正) 畠中 慎太郎, ブリヂストン(非) 半澤 健太郎, (正) 山口 健, (非) 梶木 亮, 横国大(正) 中野 健

Yoshimi Taniguchi¹, Shintaro Hatanaka^{1,2}, Kentaro Hanzawa², Ken Yamaguchi², Ryo Kajiki², Ken Nakano¹

¹Yokohama National University, ²Bridgestone Corporation

1. 緒言

自動車の走行は、ゴムタイヤと路面の間の摩擦によって実現している。乗り心地、燃費、ブレーキ性能など、自動車用タイヤの性能向上のために、基本設計指針の獲得を目指して、ゴムの摩擦形態のひとつ「ヒステリシス摩擦」の力学的な理解に向けた取組を進めている。本研究では、潤滑下のゴムの滑り摩擦に現れるストライベック曲線の不連続性に着目して、摩擦係数の計測値に含まれるヒステリシス摩擦の寄与を抽出する手法を検討した。

2. 方法

実験装置の概要を図 1 に示す。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、六本の鉄鋼円柱(材料:SUS316, 曲率半径:4 mm, 長さ:24 mm, 表面粗さ:Ra 0.8 μm)の線接触部をシリコンオイル(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。全体の垂直荷重が $W = 24 \text{ N}$ (円柱一本あたり 4 N)になるように接触させた後、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。以上の試験では、常に $W = 24 \text{ N}$ の条件を保つように、ゴムリングに対する鉄鋼円柱の貫入量を 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[1]。

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 2 に示す。同図では、加速期間($\Omega = 0$ から 100 rpm)、定速期間($\Omega = 100 \text{ rpm}$)、減速期間($\Omega = 100$ から 0 rpm)に得られた結果のうち、回転が安定しない 1 rpm 未満の結果を除いた全てを線で連結して示している。粘度が異なる条件の結果は、それぞれ一本の滑らかな曲線(青線, 緑線, 赤線)を描いており、本実験が良好な状況で実施されたことを示している。これら三本の曲線は、全体としてストライベック曲線に似たマスターカーブを描いているように見えるが、青線よりも緑線、さらに、緑線よりも赤線が僅かに下回っている。以後、これら三本の曲線の乖離に着目して、摩擦係数の内訳を分析する。

ここでは、簡単化のために、計測した摩擦係数を「流体摩擦成分 μ_{fluid} 」と「凝着摩擦成分 μ_{adh} 」と「ヒステリシス摩擦成分 μ_{hys} 」の三成分の和で表せると仮定する。まず、流体摩擦は、ソフト EHL 理論の潤滑膜厚とクエット流れの仮定を組み合わせ、 $\eta\Omega$ の関数($\eta\Omega$ の 0.4 乗に比例)と考える。凝着摩擦は、真実接触面積が膜厚で決まるとの仮定から、 $\eta\Omega$ の関数と考える。しかし、ヒステリシス摩擦は、潤滑膜厚よりも貫入量が十分大きいとき、回転速度 Ω には依存するが、 η には依存しないと考えられる[1]。以上より、横軸を $\eta\Omega$ として摩擦係数を整理するとき、マスターカーブに生じる乖離は、主にヒステリシス摩擦に由来すると考えられる。例えば、横軸 $\eta\Omega = 10^3 \text{ cSt}\cdot\text{rpm}$ における $\eta = 10 \text{ cSt}$ (青)と 100 cSt (緑)の不連続性は、回転速度の差(青:100 rpm, 緑:10 rpm)により生じたと考えられる。この差分を低粘度 10 cSt の 100 rpm でのヒステリシス摩擦成分 μ_{hys} とすると、 $\mu_{\text{hys}} = 0.025$ と推定できる。

以上に示したヒステリシス摩擦の推定法を定性的に検証する。粘弾性ファンデーションを対象としたヒステリシス摩擦に関する理論(以後「ファンデーション理論」と呼ぶ)では、ヒステリシス摩擦と貫入量がいずれも速度の関数として与えられている[1]。そこで、貫入量に着目すると、今回の実験では、 $\Omega = 100 \text{ rpm}$ における貫入量 δ と回転前の初期貫入量 δ_0 との比 δ/δ_0 の実測値は 0.1 程度であった。ファンデーション理論では、 $\delta/\delta_0 \leq 0.1$ となる速度域においては、摩擦係数は速度強化特性(速度が高いほど摩擦係数が高い)となることが示されている[1]。このことは、本研究の実験結果(図 2)における三本の曲線の大小関係(青線よりも緑線、さらに、緑線よりも赤線が下回る関係)と定性的に一致する。

さらに、ヒステリシス摩擦の推定値 $\mu_{\text{hys}} = 0.025$ を定量的に検証する。ファンデーション理論(可動圧子モデル)では、ヒステリシス摩擦の摩擦係数の理論値が、無次元表記のマスターカーブで与えられている[1]。このマスターカーブは二本の漸近線の交点付近で最大値をもつ上に凸の曲線である。マスターカーブの縦軸に含まれる弾性係数 K が決まれば、 μ_{hys} の理論値の上限値 μ_{hys}^* が得られる。そこで、上記と同じ試験系で接触試験を別途実施して、フォースカーブから弾性係数 K を同定した。その値を用いて μ_{hys}^* を求めると、 $\mu_{\text{hys}}^* = 0.033$ となった。つまり、本研究で実験的に求めた推定値 μ_{hys} と比較すると、 $\mu_{\text{hys}} < \mu_{\text{hys}}^*$ の関係となり、両者のオーダーが一致することがわかった。

4. 結言

本研究では、潤滑下のゴムの滑り摩擦に現れるストライベック曲線の不連続性に着目して、ヒステリシス摩擦の寄与を抽出した。さらに、接触試験を通してゴムの弾性係数を同定した上で、抽出したヒステリシス摩擦の値の妥当性をファンデーション理論で検証したところ、オーダが一致することがわかった。なお、紙面の都合により割愛した接触試験の方法と結果、さらに粘弾性パラメータの同定方法については、講演で報告する。

文献

- [1] K. Nakano, M. Kono, Transient and steady sliding friction of elastomers: impact of vertical lift, *Frontiers in Mechanical Engineering*, **6**, 38 (2020).

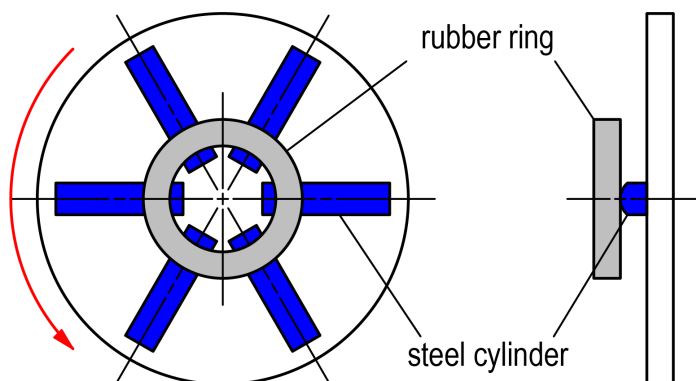


図1 実験装置の概念図(左:上面図, 右:側面図)

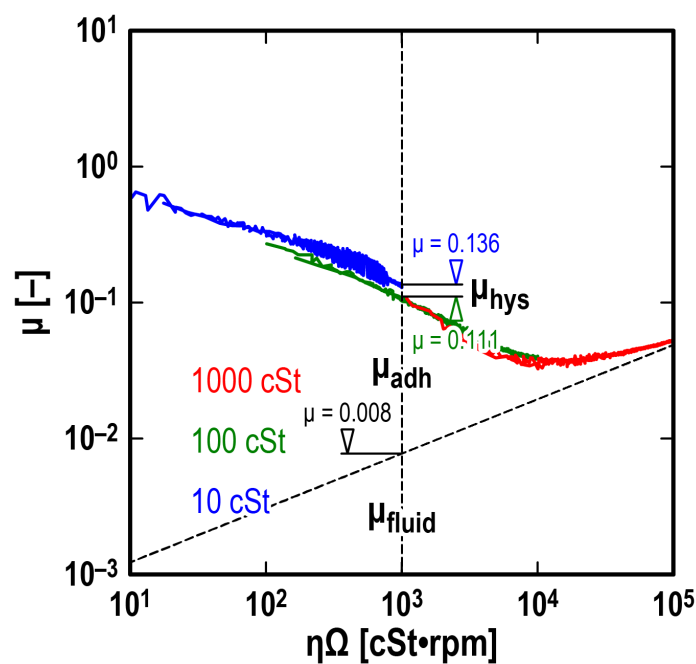


図2 ゴムリングと鉄鋼円柱の摩擦係数(青:10 cSt, 緑:100 cSt, 赤:1000 cSt) (例えば, 横軸 $\eta\Omega = 10^3$ cSt·rpm では, 流体潤滑下の摩擦係数に基づき作図した勾配 0.4 の直線の外挿により, $\mu_{\text{fluid}} = 0.008$ と定まる。さらに, 青と緑の差分をヒステリシス摩擦とすると, $\mu_{\text{hys}} = 0.025$ と定まる。残りは凝着摩擦とすると, $\mu_{\text{adh}} = 0.103$ と定まる。)