

# ゴム-粗面の摩擦予測に向けた単突起摩擦モデルの検討

## Development of single-asperity friction model for prediction of rubber-rough surface friction

名工大（学）\*伊藤 一志 名工大（学）高井 証輝 名工大（正）劉 曉旭 名工大（正）笹井 遥

名工大（正）前川 寛 名工大（正）糸魚川 文広

横浜ゴム（株）（正）渡辺 幸 横浜ゴム（株）（非）網野 直也

Kazushi Ito\*, Masaki Takai\*, Liu Xiaoxu\*, Haruka Sasai\*, Satoru Maegawa\*, Fumihiro Itoigawa\*,

Yuki Watanabe\*\*, Naoya Amino\*\*

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

### 1. 緒言

水潤滑下でのゴム材料と粗面の間の摩擦モデルとして、これまで多くの理論式が提案されている。最も一般的な凝着摩擦モデルによれば、境界潤滑領域（低速度もしくは低荷重）では摩擦力はゴムと相手面との間のせん断強度  $\tau$  と真実接触面積  $A_{\text{real}}$  の積で表される。せん断強度  $\tau$  を事前に見積もることは難しいが、真実接触面積  $A_{\text{real}}$  は GW モデルや Persson の接触理論モデル<sup>1)</sup>を用いることである程度定量予測が可能である。したがって、 $\tau$  がわかる既知の組み合わせにおいては、粗さの変化にともなう摩擦係数変化を事前に予測することが可能となる。一方で、流体潤滑域では soft-EHL 解析に基づいた摩擦係数の回帰式などが与えられている<sup>2)</sup>。あくまでも数値シミュレーションによるものであり、任意の形状において摩擦係数を定式化されているわけではない。しかし、流体潤滑下での解析手法は既に実用レベルであり、接触部形状に加えて材料の剛性や潤滑油の粘度がわかれば高い精度で摩擦係数を予測することが可能となる。また、境界潤滑域および流体潤滑域においてゴムの粘弾性特性に起因するヒステリシス摩擦力が発現する場合もある。ヒステリシス摩擦においても表面の粗さ情報および粘弾性特性がわかればある程度数値予測が可能となってきた。

一方で、混合潤滑領域においてその摩擦係数を予測するモデルについては、現状決定版がない状況である。混合域においては、ゴムと相手面の直接接点がある一方で、流体負荷容量により真実接触点の一部が浮いた状態（水膜が侵入した状態）となっている。真実接触点スケールでのマイクロ soft-EHL に対する研究は一部進められているが、境界域から混合域への遷移における真実接触点のリフトアップ挙動を正確にモデリングすることは現状難しい。同じすべり速度においても貫入量が小さい接触点は流体潤滑、貫入量大きい接触点では固体接触が生じていると予想される。ただし、Martin らの報告にもあるように<sup>3)</sup>、ゴムの接触点における水膜の侵入過程は、材料同士の濡れ性などに強く影響し、速度依存性に加えて接触面圧依存性を整理できるモデルは現状報告されていない。そこで本研究では、単一突起点での境界潤滑域から混合潤滑域への遷移過程を実験により実測し、その挙動について検討した。最終的には、その結果をもとにマクロな摩擦係数変化（ストライバック線図）を予測する手法について検討している。本報ではその取り組みについて紹介する。

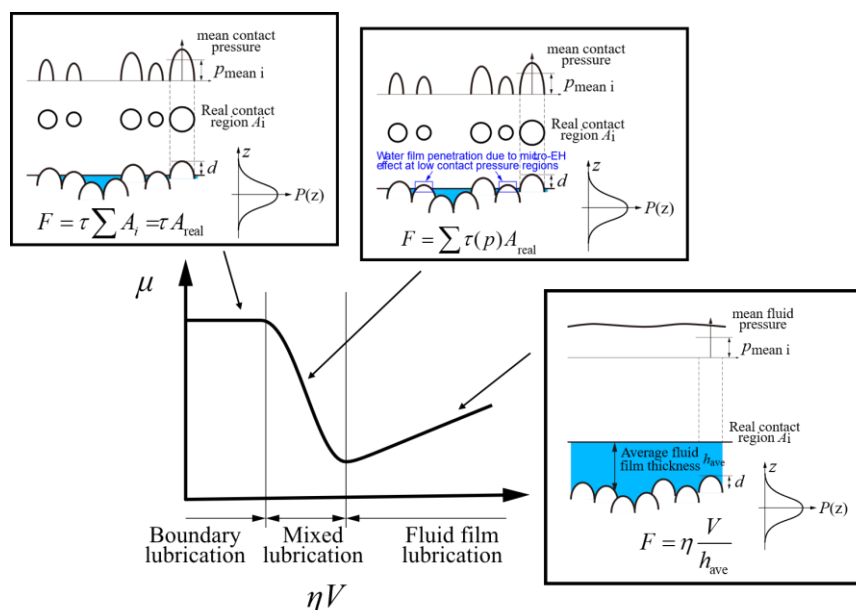


Figure 1 Schematic of the friction coefficient model between rubber and a rough surface

## 2. 提案する摩擦係数モデルの概要

Fig. 1 に水潤滑下におけるゴムと粗面の間のストライバック線図の模式図を示す。境界潤滑域（速度が十分低い条件）では水膜の影響を無視できるため、摩擦力は図中の左上の挿図のとおり、 $F = \tau A_{\text{real}}$  としてもとめることができる。冒頭で述べた通り、 $\tau$  を実測し  $A_{\text{real}}$  を理論により予測することで摩擦力を見積もることができる。流体潤滑域（速度が十分高い条件）では数値解析により実効水膜厚さ  $h_{\text{ave}}$  をもとめて、ニュートンの粘性法則より摩擦力（流体のせん断抵抗）を見積もることができる。本報のポイントは混合潤滑域である。混合潤滑下では Fig. 1 の真ん中上部の挿図にあるように、突起貫入量の違いにより水膜の流入に差があるものと考えられる。突起貫入量が大きい場合、水膜が破断される一方で、突起貫入量が小さい（接触面圧が低い）場合、水膜が侵入する可能性がある。ここで、真実接触面積（ここでは荷重を支える領域という意味であり薄い水膜を介した場合でも真実接触領域とする）とすると、せん断強度は水膜の侵入の程度により変化すると予想されるので、混合域での  $\tau$  は接触面圧  $p$  に依存する。したがって、混合域での摩擦係数を予測するためには、接触モデルにより  $A_{\text{real}}$  を計算することに加えて、 $\tau(p)$  をいかにしてモデル化することが重要である。本研究では、そのファーストステップとして、単一突起スケールの摩擦試験機を開発し、 $\tau(p)$  を実測することとした。

## 3. 実験概要

Fig. 2 に実験に用いた装置を示す。試験装置は上部の微小力センサと、下部の移動ステージから構成される。上部微小力センサは測定部分に先端半径  $250\ \mu\text{m}$  のルビー製触針が取り付けられている。板バネに取り付けられたひずみゲージにより、触針に加わる水平方向及び垂直方向の力を測定できる。この測定方向に揃うように、下部の2軸移動ステージ上部にゴム試験片が取り付けられており、微小力センサ測定方向に揃うようにゴム試験片を移動ステージで駆動することで、滑り中の摩擦力と垂直荷重を計測した。ゴム試験片の材質は PDMS (Polydimethylsiloxane) である。測定時の室温は  $25^\circ\text{C}$  であった。

実験手順は次のとおりである。まず、ルビー製触針を PDMS 表面に押し付けて垂直荷重を与えた。その時の貫入量はステージ移動量とばねのたわみ量から求めることができ、垂直荷重は Hertz の接触理論により計算した。次に、接線方向に駆動（滑り速度は  $100, 1000, 10000\ \mu\text{m/s}$  の3条件とした）して、摩擦力を計測した。なお、貫入量が異なる複数条件で実験を行い、摩擦係数（せん断強度）に対する垂直荷重（接触面圧）の影響を計測した。

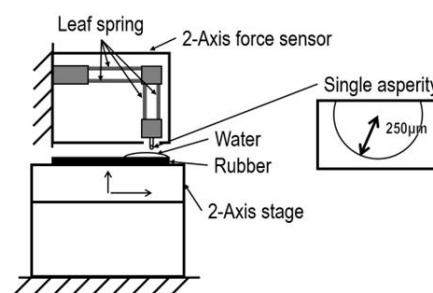


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

## 4. 実験結果

Fig. 3 に実験結果を示す。同図の縦軸はせん断強度（Hertz の接触理論により垂直荷重と接触面積を計算して算出した）、横軸は平均接触面圧  $p_{\text{mean}}$  である。Fig. 1 でのモデルで予想の通り、せん断強度は接触面圧の減少とともに徐々に低下していることがわかる。すべり速度が高いほど、この減少は強くなっている。これは、低面圧下では水膜が部分的に接触点内に侵入し、実効的なせん断強度を低下させていることを意味する。すなわち、粗面とゴムの間の摩擦力を各突起で生じる摩擦力の和として計算する際には、各突起の面圧  $p$  に依存する  $\tau$ （例えば Fig. 3 に示す実測値）を事前に見積もる必要がある。

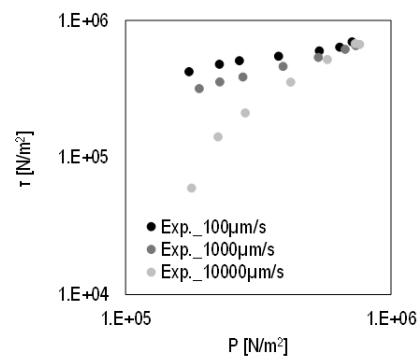


Fig. 3 Relationship between  $\tau$  and  $p_{\text{mean}}$

## 5. 結 言

ゴムなどの比較的容易に変形する材料においては、単一突起下での変形特性が個々の真実接触点の摩擦挙動に強く影響する。その場合、本研究で得られた単一突起スケールでの  $\tau(p)$  の計測結果は、水潤滑下における混合潤滑域での摩擦挙動を理解する上で基礎的データとなる。特に、低面圧条件において水膜が部分的に接触点に侵入する現象は、マクロな摩擦特性に大きな影響を与えるため、既存モデルにおいてもこの効果を組み込むことが有効であると考えられる。今後は、本測定手法を用いて接触形状・材質・潤滑条件を系統的に変化させ、 $\tau(p)$  の一般化モデルを構築するとともに、実機スケールのストライバック線図予測への適用性を検証していく予定である。

**謝 辞** 本研究は JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2112 の支援を受けたものである。

## 文 献

- 1) Persson, B. N. (2001). Theory of rubber friction and contact mechanics. *The Journal of Chemical Physics*, 115(8), 3840-3861.
- 2) De Vicente, J., J. R. Stokes, and H. A. Spikes : The frictional properties of Newtonian fluids in rolling-sliding soft-EHL contact, *Tribology Letters* 20 (2005) 273-286.
- 3) Martin, A., Clain, J., Buguin, A., & Brochard-Wyart, F.: Wetting transitions at soft, sliding interfaces. *Physical Review E*, 65(3), (2002), 031605.