

## エラストマーの凝着摩擦における力学モデル Mechanical Model for Elastomer Adhesion Friction

東工大・日本精工（正）\*桃園 聡

Satoshi Momozono\*,\*\*

\*Tokyo Institute of Technology, \*\*NSK Ltd.

### 1. はじめに

ゴム・ゲルのようなエラストマー(Elastomer)は、低い弾性率と広い弾性域（ひずみ 100%超）をもち、非圧縮性（ポアソン比が 0.5）で、主にエンタルピー弾性で変形するなど、変形特性に大きな特徴のある材料である。また広い分子量分布をもつ非晶性高分子固体（またはゲル）であることも大きな特徴である。これらの特性が原因で非常に高い摩擦係数を示すことがあるなど、トライボロジーの観点からも非常に興味深い材料である。そのエラストマーの摩擦には、主に変形ヒステリシスを起源とするヒステリシス摩擦と、接触に伴う凝着を起因する凝着摩擦などがある。このうち凝着摩擦は、エラストマーの凝着現象そのものの複雑さからいまだに不明な点も多い。本稿では筆者のモデルを中心に、凝着摩擦の様々な力学的メカニズムについて概観する。

### 2. エラストマーの凝着摩擦の起源と関連する因子

エラストマーの凝着摩擦とは、第一義的にはエラストマーと相手面の固体間凝着現象であり、有名な Johnson らのモデル<sup>1)</sup>にあるように凝着力によって付加的な荷重を受け、さらに真実接触面積が大きくなるためそれに応じて凝着力も増えるので、ほかの材料に比べて高い摩擦係数を示す。エラストマーの凝着部は、相手面との分子間相互作用で凝着するが、分子が比較的動きやすいため、分子鎖の変形により相手面へ物理吸着する数が増える、つまりエラストマーは平衡状態に達するまで凝着力が少しずつ変化する（微視的：分子セグメントスケールの効果）。一方、エラストマーは変形が非常に大きいため、接触状態に対するマクロな形状の影響が無視できないことも指摘されている。このことは接触部の形状により摩擦状態を制御できる可能性があるということを示唆している（巨視的：連続体力学上の効果）。

ところで、工業的な架橋ゴムのような材料の場合、未架橋の低分子成分や可塑剤のような添加剤が液体として材料中に残存し浸透している場合があり、接触によって染み出すこともしばしば見受けられる。また、周囲環境の水分が接触部近傍で凝集する。これらの接触部近傍の液体が液架橋を形成し、液架橋内の圧力（ラプラス圧力）による付加的な荷重となるので、見かけ上の凝着力に影響する。一方、周囲が液体によって十分満たされている場合には液架橋力はほとんど無視できるようになるが、界面の「濡れ」の影響を受ける混合潤滑の問題となる。このように一口に凝着摩擦といっても様々な現象が広いスケールでかかわっているのがエラストマーの凝着摩擦の特徴である。

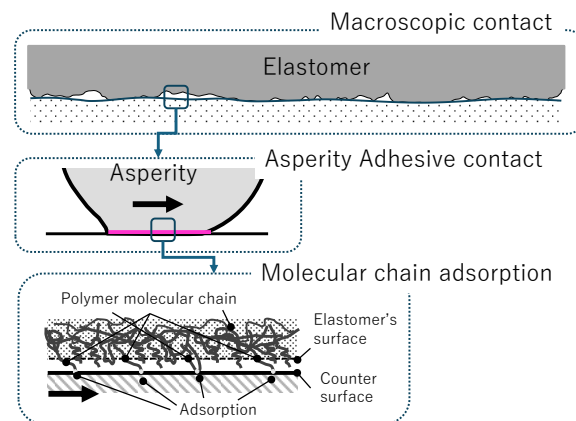
### 3. 凝着摩擦の力学モデル

#### 3.1 乾燥条件での凝着摩擦

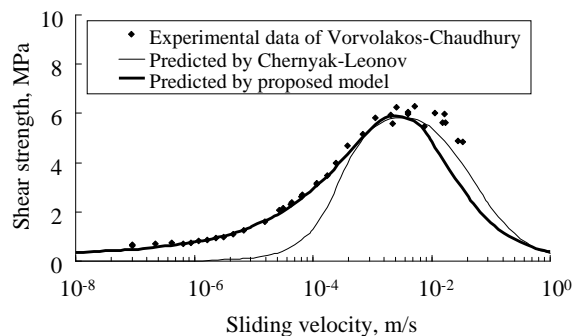
凝着摩擦の基本形として、筆者のモデルを紹介する<sup>2)</sup>。凝着力の根源である凝着仕事は、静的平衡での値であるので、静的平衡状態を基準として、しゅう動による吸着数の変化に応じて凝着仕事も変化するものとした（微視的な効果）。静的平衡時の凝着仕事を $\Delta\gamma_0$ 、その時の吸着数を $N_0$ 、しゅう動時の有効な凝着仕事を $\Delta\gamma_{eff}$ 、吸着数を $N$ 、平衡条件を決める特性速度を $v_s$ とすると、反応の平衡条件から $\Delta\gamma_{eff}$ は次のようにあらわされる。

$$\Delta\gamma_{eff} = \Delta\gamma_0 \frac{N}{N_0} = \frac{\Delta\gamma_0 v_s}{v_s + V} = \frac{\Delta\gamma_0}{1 + u} \quad (1)$$

ただし  $u$  は $v_s$ で正規化したしゅう動速度である。凝着摩擦は凝着部の界面を破壊する現象なのですべり状態でのひずみエネルギー解放率は有効な凝着仕事とエラストマーの粘弾性に



a) Schematic of elastomer adhesion friction model



b) Sliding velocity dependence of adhesive shear strength: (comparison between experiments and analytical models)

Fig. 1 An adhesion Friction Model<sup>2)</sup>

起因する散逸項の和となる．散逸項を速度のべき乗則に従うとすると次のような形となる．

$$G = \Delta\gamma_{\text{eff}}(1 + (E_{\infty}/E_0)(V/v_e)^n) = \Delta\gamma_{\text{eff}} \frac{(1 + (E_{\infty}/E_0)(v_s/v_e)^{-n}u^n)}{1+u} \quad (2)$$

但し $E_0$ は常温での弾性率， $E_{\infty}$ はガラス転移点での弾性率， $v_e$ は界面破壊の基準速度である．これが突起1つにおける凝着部境界の単位長さあたりの破壊に必要なエネルギーである (Fig/1. 粗さの接触理論と組み合わせると突起1つの接触部の破壊に必要な力を求めることができる．

### 3.2 わずかな液体が存在する場合

凝着部の周りにわずかな液体が存在する場合，接触部近傍に液架橋が生じラプラス圧力が発生する．液架橋は接触部を含む薄い円盤状になり，接触平面に平行な断面の曲率半径とその面に直交する断面の外周部境界の曲率半径の2つをもつ (Fig. 2a) ため，次のようにあらわされる．曲率半径の符号は曲率半径の中心の位置によって決まり、液架橋内部側にあれば正，外部にあれば負となる．

$$\Delta p = \gamma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

通常は濡れやすい場合 (接触角が  $90^\circ$  未満) であればラプラス圧力が負になり接触力の増加，濡れにくい場合 ( $90^\circ$  超) は接触面間に反発力が発生する．また接触のヒステリシスの影響もみられる (Fig. 2b)<sup>3)</sup>．

### 3.3 液中の凝着摩擦

液体の量が増え，接触部の周りに潤沢に液体がある場合には液架橋の影響はほとんど無視されるようになる．その一方で，両面と液体の界面自由エネルギーのバランスにより固体接触部が広がりやすくなる場合<sup>4)</sup>や，逆に液体が固体表面間に浸透しようとする場合などが観察されるようになる．前者は自発的撥水 (液) と呼ばれ，凝着によって液体を排除しようとするときの固体の変形と，それに抵抗する液体の粘性抵抗の兼ね合いで摩擦力や潤滑状態が変化する (Fig. 3)．後者の場合，拡張係数で示される液体が広がろうとするエネルギーとしゅう動に伴う粘性効果によってキャピラリーを形成しようとするエネルギーで潤滑状態が変化する (Fig. 4)<sup>5)</sup>．

### 3.4 マクロな弾性変形の影響

サンプソンの原理よりミクロな変形はマクロな変形にあまり影響を及ぼさないが，マクロな変形はミクロな変形に大きな影響を及ぼす．例えばしゅう動するブロックのアスペクト比を変えると接触面の面圧分布が異なるので接触に起因する凝着摩擦の大きさも変化し摩擦特性が変わること<sup>6)</sup>が指摘されている．

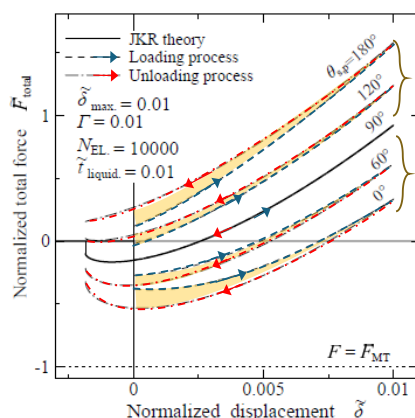
## 4. おわりに

様々な状況下におけるエラストマーの凝着摩擦の力学モデルについて，簡単に紹介した．エラストマーの凝着摩擦は固体間凝着現象に起因するのは間違いないが，様々な影響因子があり，それに見合った力学モデルが必要である．発表では紙面の関係で述べられなかった個々の影響についての詳細についても論じる．

## 文献

- 1) K. L. Johnson, K. Kemdal & A. D. Roberts : Surface Energy and the Contact of Elastic Solids, Proc. Roy. Soc. London A., 324, 1558 (1971) 301.
- 2) S. Momozono, K. Kyogoku & K. Nakamura: Theoretical model for adhesive friction between elastomers and rough solid surfaces, J Phys. Chem. 132, 11 (2010) 114105.
- 3) Iguchi et al: Adhesion Contact between Rigid Sphere and Elastic Plane Covered with Thin Liquid Film Considering Contact-Angle Hysteresis, Tribology Online, 15, 1 (2020) 1.
- 4) P. Martin and F. Brochard-Wyart: Dewetting at Soft Interfaces, Phys. Rev. Lett. 80, 15 (1998) 3296.
- 5) 井口洋二:東京工業大学修士論文 (2013).
- 6) S. Maegawa, F. Itoigawa, & Nakamura: Effect of surface grooves on kinetic friction of a rubber slider, Trib. Int. 102 (2016) 326.

a) Schematic Diagram of Laplace Pressure Generated at the Contact Area



b) Effect of the Contact Angle of the Bridging Liquid on the Contact Process<sup>3)</sup>

Fig.2 Contact Process with a Very Thin Liquid Bridge

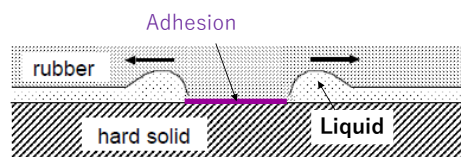


Fig.3 Schematic diagram of dewetting at soft interfaces

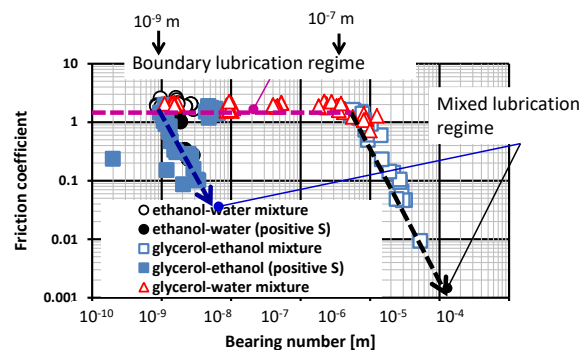


Fig.4 Effects of spreading coefficient on mixed lubrication characteristics<sup>5)</sup>