

エラストマーの接触と摩擦についての研究動向

A Review of Recent Advances in Elastomer Contact and Friction

Science Tokyo (正) *桃園 聡

Satoshi Momozono

Institute of Science Tokyo

1. はじめに

エラストマーはその名が示す通り、大きな弾性変形が可能な材料である。エラストマーの接触・摩擦は、粘弾性をはじめとする機械特性、粗さやうねりなどの表面幾何形状、そして表面の物理・化学的性質の影響を受ける。材料側に着目すると、理想ゴムとは異なり、主鎖を構成するポリマーは、末架橋の液状低分子成分を含む分子量分布をもち、充填剤をはじめとする多種の添加剤も含み、機能面から層構造を有したものも多く、材料として非常に複雑である。表面形状（粗さやテクスチャ）等多くの因子があり、現実には即した形で幅広く説明するのは難しく、接触から摩擦に至る過程をミクロからマクロに至るまで、より精緻にとらえる必要がある。本稿では、エラストマーの接触と摩擦に関するモデルを中心に、国内外の最新の研究動向について、著者なりの視点でまとめた。

2. エラストマーの接触モデル

2.1 単一突起の接触モデル

エラストマー自体がほかの材料と比較して極端に弾性率が低いため、完全接触しやすく、接触において凝着力が無視できないことが知られている。凝着力を考慮した単一突起の接触モデルとしては、Hertz 接触に接触部に凝着力が作用する Johnson らの JKR モデル¹⁾が最も有名である。これに対して、接触は Hertz 変形のまま、分子間力が作用することで付加的な荷重が増えるとした Derjaguin らの DMT モデル²⁾も有名である。Tabor はある無次元量 (Tabor パラメータと呼ばれる) を導入し、突起の半径が小さく弾性率が大きい極限が DMT モデル、突起が大きく弾性率の低い極限が JKR モデルであるとして両者の違いを説明した³⁾。エラストマーは弾性率が低いので JKR モデルに近いと考えることが多い。両者の遷移モデルとして Maugis は接触域外側の分子間力も考慮して JKR モデルを拡張した MD モデル⁴⁾を提唱している。Greenwood らも、MD モデルを改良し、接触域の外側の分子間力分布を楕円形に置き換えたモデルを提唱している⁵⁾。エラストマーは粘弾性をもつので、その影響については Greenwood ら⁶⁾をはじめ、多くのモデルが提唱されている。特に接触部に限らず分子間力を受ける外縁部でも粘弾性の影響を受けるとした Barthel らのモデル⁷⁾は、式の取り扱いが容易で、解析的な検討に適している。

2.2 粗面の接触モデル

粗面を有するエラストマーの接触において、完全接触しやすいため、各突起が独立しているも多くの接触モデルでは取り扱えないことが容易に想像できる。代表的なものとして、Persson が提唱した接触モデル⁸⁾を紹介する。表面の粗さはフラクタル性をもち、低波数（粗さの波長が長い）では比較的大きな振幅をしており、波数が大きくなる（粗さの波長が短くなる）ほど振幅が小さくなる。これは低波数でマクロな接触範囲や平均的な接触圧力分布がきまり、波数を大きな系でみるとその圧力分布の上により細かな圧力分布が重畳されていくことを示している。これがあたかも低波数から高波数へ圧力分布が拡散し広がってゆく様子に対応していると考え、その拡散方程式を導いた。このモデルは多くの論議を呼んだが、現在では定着し、多くの拡張モデル（例えば粘弾性の影響を考慮⁹⁾）が存在する。

3. エラストマーの摩擦モデル

3.1 凝着摩擦におけるヒステリシスの寄与

エラストマーの古典的な摩擦モデルは、Grosch¹⁰⁾による摩擦の速度依存性に関する実験や、そのメカニズムを説明した Ludema-Tabor¹¹⁾によって確立され、それらをベースにまとめた Moore のモデル¹²⁾が長く用いられてきた。エラストマーの摩擦 F_f は、凝着摩擦 F_{adh} とヒステリシス摩擦 F_{def} に大別され、それらの和で与えられる。

$$F = F_{adh} + F_{def} \quad (1)$$

$$\mu_{adh} = F_{adh}/W = K_a(E/P^r) \tan \delta \quad (2)$$

$$\mu_{def} = F_{def}/W = K_d(P/E)^n \tan \delta \quad (3)$$

ここで μ_{adh} は凝着摩擦の摩擦係数、 μ_{def} はヒステリシス損失の摩擦係数、 K_a, K_d は係数、 E, δ はそれぞれエラストマーの弾性係数、損失正接、 W, P はそれぞれ荷重、接触圧力である。また指数 r, n には $0 \leq r \leq 1$, $n \leq 1$ である。このとき温度時間換算則から $\tan \delta$ の温度特性がすべり速度依存性に対応づけられ、摩擦の速度特性は釣鐘状のピークをもつとされた。しかし、Barquin ら実験結果¹³⁾のように、必ずしもピークが観察されない例も報告されており、Moore のモデルの後にも、様々なモデルが提案されている。凝着成分については、分子鎖の付着特性の速度依存性に着目した Chernyak-Leonov のモデル¹⁴⁾、平滑面の凝着でみられる不安定性に着目した Persson らのモデル¹⁵⁾、凝着界面破壊の粘弾性依存性に着目した Gal らのモデル¹⁶⁾、Momozono らのモデル¹⁷⁾などが提案されている。粘弾性については、表面粗さのフラクタル性に着目したモデルとして、Heinrich らのモデル¹⁸⁾や、Emami らのモデル¹⁹⁾などが提案されている。最近提唱され興味深いモデルとして、凝着項がゴムに含まれる低分子成分液体のメニスカス力が凝着摩擦の大部分を占めて

いると仮定した上で、摩擦係数の推定式を Fukabori らが提案している²⁰⁾。

$$\mu_f = \mu_{adh} + \mu_{def} + \mu_{crac} \cong K_1 \eta V \left[1 + K_2 \left(\frac{\tan \delta}{\sqrt{2}} + \sqrt{2} K_\epsilon c \right) E^{-7/6} W^{1/6} \right] \quad (4)$$

ここで μ_{crac} はき裂の生成・成長する際に生じる損失の摩擦係数、 K_1 , K_2 , は係数、 K_ϵ は2から3の間をとる定数、 η は低分子成分の粘度、 V は速度である。

Lorenz らは、摩擦力が相手面と直接接触する部分(接触面積 A)で発生する成分と、接触がなくても発生する成分 F_{vis} に分けられるとして、式(1)を次のように置き換え、それぞれの成分について検討している。

$$F_f = \tau_f A + F_{vis} \quad (5)$$

ここで、 τ_f は相手面と接触する部分で発生するせん断応力である。また、彼らは実験で、Barquins らと同様に、Moore のモデルとは合わない場合があることを指摘している²¹⁾。接触部分の損失には、ゴム分子接着・変型・剥離によるものだけではなく、接触部の開口き裂の進展、相手面への付着膜のせん断抵抗、凝着摩耗に伴う損失や硬質粒子などによる掘り起こしなども含まれるとしている²²⁾。

一方、Popov らは、凝着の影響を受けるマクロな面同士の摩擦には、接触境界で発生するものと、接触面内で発生するものに大別されることを実験による観察と数値解析結果から示した²³⁾。接触境界で発生する摩擦は、押し込みやせん断に伴う境界の不安定性による散逸によるものであり、粗さや化学的・物性的不均一性による微視的な不安定性と、界面波のようなマクロな不安定性に大別されると考察している。

3.2 微視的なスケールにおける凝着と摩擦

微視的なスケールに着目すると、Onozuka ら²⁴⁾はAFM フォースカンプに、粘弾性を考慮した凝着接触モデルであるBathel らのモデル⁷⁾を適用した結果、接触領域内部だけではなく、接触域外側で表面間力の作用を受ける範囲(interactive zone)においても粘弾性特性の影響が無視できないことを示した。このことは、粗さ突起スケールの摩擦において、粘弾性の影響が接触境界より広い領域に及ぶことを示唆しており、今後の進展がまたれる。また、微視的なスケールでの、界面の不安定性やしわの形成による散逸に着目した例²⁵⁾も報告されている。

4. おわりに

エラストマーの接触や摩擦に関する最近の研究動向を、著者の視点で簡単にまとめてみた。湿度の影響や潤滑時の挙動など、紙面の都合や著者の力量から紹介しきれなかった研究が数多くあるが、この分野の研究を進めていく上で参考になれば幸いである。

文献

- 1) K.L. Johnson, K. Kendall, A.D. Roberts, Proc.R. Soc. Lond. A, 324 (1971) 301.
- 2) B.V. Derjaguin, V.M. Muller & Y.P. Toporov, J. Colloid Interface Sci., 53 (1975) 314.
- 3) D. Tabor, J. Colloid Interface Sci., 58 (1977) 2.
- 4) D. Maugis, D. J. Colloid Interface Sci., 150 (1977) 243.
- 5) J. A. Greenwood & K.L. Johnson, J. Phys. D: Appl. Phys., 31 (1998) 3279.
- 6) J. A. Greenwood & K.L. Johnson, Philos. Mag. A, 43 (1981) 697; J.A. Greenwood, J. Phys. D: Appl. Phys., 37 (2004), 255; J. A. Greenwood J.Phys. D: Appl. Phys., 40 (2007) 1769-
- 7) E. Barthel, G. Haiat, Langmuir, 18, 24 (2002) 9362; G. Haiat, M.C.P Huy & E. Barthel, J. Mech. Phys. Solids, 51, 1 (2003) 69; E. Barthel & C. Fretigny, J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 19 (2009) 195302.
- 8) B.N.J. Persson, J. Chem. Phys. 115 (2001), 3840.
- 9) B.N.J. Persson, O. Albohr, C. Creton & V. Peveri, Journal of Chemical Physics, 120((2004), 8779..
- 10) K.A. Grosch, Proc. Roy. Soc. A274 (1963) 21.
- 11) L.C. Ludema & D. Tabor, Wear, 9 (1966) 329.
- 12) D.F. Moore: The Friction and Lubrication of Elastomers, Pergamon Pres (1972).
- 13) M. Barquins & A.D. Roberts, J. Phys. D:Appl. Phys. 19 (1986) 547.
- 14) Y.B. Chernyal & A.I. Leonov, Wear 108 (1986) 105.
- 15) B.N.J. Persson & A.I. Volokitin, Euro. Phys. J. E, 21 (2006) 69.
- 16) A.L. Gal & M. Klüppel, J. Phys. Condens. Matter 20 (2008) 015007.
- 17) S Momozono, K. Nakamura & K. Kyogoku, 132, 11 (2010) 114105.
- 18) G. Heinrich, Rubber Chem. Technology, 70, 1 (1997) 1.
- 19) A. Emami, S. Khaleghian & S. Taheri, Friction 9 (2021) 1707.
- 20) Y. Fukahori, P. Gabriel, H. Liang & J.J.C. Busfield, Wear, 446-447 (2020) 203166,
- 21) B. Lorenz, B.N.J. Persson, S. Diehlweit, & T. Tada, Eur. Phys. J. E 34 (2011) 129.
- 22) A. Tiwar, N. Miyashita, N. Espallargas & B.N.J. Persson, J. Chem. Phys. 148 (2018), 224701.
- 23) V. Popov, Q. Li, I. A. Lyashenko & R. Pohrt, Friction 9, 6 (2021) 1688.
- 24) N. Onozuka & K. Nakajima: Langmuir, 40, 46 (2024), 24565.
- 25) J.D. Glover, X. Yang, R. Long & J.T. Pham: Nature Communications 14 (2023) 2362.