高分子材料の摩擦 Tribology 入門

松原 清

Kiyoshi Matsubara, 東海大学工学部

人間関節(a)と軸受(b)との相関(Walker ら¹⁷⁾)

1. ま え が き

トライボロジー (tribology) という言葉が生まれて 17 年経過¹⁾し、一般に知られるようになった。これは摩擦・摩耗・潤滑に関する科学と技術に関するもので、物理・化学・工学など非常に幅広い学門分野にまたがるまさに学際的内容をもつ。

ゴムが発見され、今日では船舶用の軸受にも利用されている。それ以前から、消ゴムとして、字を消す機構など検討もしないで、一般に用いられている。タイヤにおけるゴム利用の重要さはいうまでもない。いずれもゴムのトライボロジーと密接な関連がある。

フェノール樹脂は水潤滑用軸受や歯車に利用されてきた。また、フェノール樹脂は乾燥状態で耐摩耗性が良いので、自動車などのブレーキ材やクラッチのフェース材に利用されている。最近では電車のブレーキ材にも利用されるようになった。以前はホームで電車を待っていると、火花を出しながらブレーキをかけてきたものであるが、これはブレーキ材に金属を用いていたからで、フェノール樹脂系では火花は出ない。火花のかわりに悪臭を出しているが、これは今後の研究課題であろう。ここでもトライボロジーが顔を見せる。

2. 接 触 機 構

トライボロジーは、相対的移動すなわちすべること、あるいはころがることが前提である。それらの挙動を吟味するために、あらかじめ静的に接触している状態を考える必要がある。

2-1. 塑性変形と弾性変形

簡単にするため平面と球の接触を考え、球は剛体とする。降伏応力 (かたさ) H と荷重 W の間には次式が成り立つ。

$$H\pi r^2 = W \quad (1)$$

ここで r は接触円の半径である。一方の弾性変形では、ヘルツの式より r は次のようになる¹⁴⁾。

$$r = 1.1 \left\{ \frac{WR}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right\}^{1/3} \quad (2)$$

ここで R は球の半径、 E_1 , E_2 はそれぞれ球および平面の弾性係数を示す。

これらの関係から、面積 A と荷重 W の関係をみると、 $A \propto W^\alpha$ となり、塑性変形、弾性変形では α はそれぞれ $\alpha=1$, $\alpha=2/3$ となる。この値はあとで述べる摩擦の荷重特性を支配する尺度となる。

2-2. 中間的接触

上で述べた α の値は理想的な純塑性変形、純弾性変形の場合であるが、Pascoe, Tabor²⁾ は高分子がその中間の性質を示すことを明らかにした。いま圧こん (接触面積) と圧子 (押しつける球) の直径を d および D とすると、次の関係が一般に成り立つ。

$$W = kd^m/D^{m-2} \quad (3)$$

ここで m をマイヤー指数と呼び、 $m=3$ のときは弾性変形、 $m=2$ のときは塑性変形であることがわかっている。未知材料の変形の様子 m を測定することにより判定される。

ところで、この場合面積 A は $A = \pi d^2/4$ であるから、(3) 式より、

$$A = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{k} \right)^{2/m} D^{(2m-4)/m} \quad (4)$$

となる。次に摩擦係数 μ は $\mu = F/W = sA/W$ となるから、 μ は次のようになる。

$$\mu = 1.1 s \left(\frac{1}{k} \right)^{2/m} W^{-(m-2)/m} D^{(2m-4)/m} \quad (5)$$

松原 清 東海大学工学部生産機械工学科 (259-12 平塚市北金目 1117) 教授・工博
昭和 27 年早稲田大学理工学部機械工学科卒。27 年～50 年工技院機械技研、50 年より現職。専門は熱力学、材料力学、トライボロジー。著書に「トライボロジー」産業図書 (1981) <趣味> ゴルフ (HC 18)

表1 ぬれやすさと摩擦の関係

ポリマー	構造	静摩擦	表面張力 (dyn·cm ⁻¹)
塩化ビニリデン	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array}_n$	0.90	40
塩化ビニル	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array}_n$	0.50	39
ポリエチレン	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}_n$	0.33	31
フッ化ビニル	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{F} \end{array}_n$	0.30	28
フッ化ビニリデン	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array}_n$	0.30	25
三フッ化エチレン	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{F} \end{array}_n$	0.30	22
四フッ化エチレン	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array}_n$	0.04	18

ここで s は材料のせん断応力である。(5)式において、接触面の塑性変形と弾性変形の $m=2$ と $m=3$ を代入すると、それぞれ、 $\mu \propto W^0 D^0$ で荷重と形状に無関係になり、 $\mu \propto W^{-1/3} D^{2/3}$ の形の依存性を示す。高分子材料では $m=2.5 \sim 2.7$ となり、ナイロンの $m=2.7$ を代入すると $\mu \propto W^{-0.26}$ となる。

3. 表面エネルギー

摩擦は表面エネルギーによって発生するという考え方があ。これはあたかも金属の場合には、両接触面がハンダ付けしたように一体となるということで、凝着説の具体的内容の一つといえよう。

3-1. プラスチック

表面エネルギーの尺度として表面張力を選び、静摩擦係数もあわせてまとめると表1³⁾ のようになる¹⁶⁾。これからわかるように、両者の間には順序関係がある。しかし、表面張力 (dyn·cm⁻¹) は全体としておよそ1/2の変化であるが、摩擦係数の差は1/20もあり、比例とはいえない。凝着以外の要因のあることを示唆している。

3-2. ゴム

弾性接触における接触円の半径 r と荷重 W の関係は(2)式に示したが、この式によれば W を0とすれば $r=0$ となるはずである。ところが r を注意

図1 接触半径と荷重 (A: 研究結果, B: ヘルツ接触)

深く測定すると図1に示すように、 $W=0$ で $r=0$ とならない。そして γ をゴムの表面エネルギーとすると、 r との関係は次式で示される⁴⁾。

$$r^3 = \frac{27 \pi R^2 \gamma}{8 E} \quad (6)$$

4. 粘弾性と摩擦

摩擦の現象は見かけの接触面積ではなく、真実の接触面積で支配され、摩擦力はその接触面のせん断によるものと考えられる。そしてせん断は接触の界面下にあるものとする。ところで、ゴムなど粘弾性体には、せん断が生じないで、もとの状態の回復することを仮定し、かつその変形過程がフックの法則に従わず、非弾性を示すとすれば、そこに摩擦損失が発生する。すなわち、せん断の挙動を破壊の場合と非破壊の場合に分類すれば、この後者が粘弾性と摩擦の範ちゅうに入るのである。

4-1. ゴム

粘弾性の挙動を支配する重要因子は、温度 T とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ (すべり速度) であるが、これらの現象が一つの基準温度 ($T_g + 50^\circ\text{C}$, T_g : ガラス転移温度) において、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ (ここではすべり速度 v) が対象物理量に対してどのようになるかを検討するために、実際の温度を基準温度へ換算するためのシフト量 aT (いわゆる WLF 式) は実験的に次式が見いだされている。

$$\log aT = \frac{-8.86(T - T_g)}{101.5 + (T - T_g)} \quad (7)$$

対象物理量として摩擦係数を選ぶと、その T と速度 v の実験結果は図2のようになる⁵⁾。これは生データを整理したものであるが、(7)式によって aT を計算した結果も図2に示してある。これらの aT を用いて得たマスターカーブが図3である。

図2 各温度における μ の速度特性 ($W=50$ gf)

図3 (a) WLF 式による結果を用いた摩擦係数と
(b) Grosch の結果

このような現象(グラフの傾向)に対し、Tabor ら⁵⁾ は面積 A とせん断応力 s の相乗効果、すなわち $F=As$ の変化として定性的に説明している。すべり摩擦はたいそう複雑な現象のように考えられるが、粘弾性的挙動からみると他の物理量(たとえば弾性係数、クリープ)と同じように取り扱えることがわかる。

4-2. プラスチック

筆者らの実験によると、鋼とナイロンをすべらせて μ を測定すると、図4⁶⁾ のような結果が得られた。すなわち、荷重 P に対して一つのピークがそれぞれ見られ、このピークは速度 v の増加にともなって低荷重側に移行する。このようなピークが発生する条件より、はるかに小さい $Pv=12.5$ において温度を上げて μ を測定すると、図5に示すような現象が示された。

このような現象の現われた理由についてはあまり明白ではないが、ある荷重すなわちある温度までは結晶性高分子の状態を保つが、それ以上の条件では、結晶が融解し、ポリアミドの分子構造によるゴム状構造となり、これによって大きい μ を示す。そしてその点に達したあとは、ゴムの挙動によって μ が減少する¹⁵⁾。

4-3. ころがり摩擦と粘弾性

ある形の試験片に応力を与え、それに対応するひずみ ϵ を測定し、 σ - ϵ の関係を検討することは、粘弾性

図4 荷重特性(鋼-ナイロン-6)

図5 温度特性 ($p=2.5$ kgf/cm², $V=5$ cm/s)

体の挙動を検討するためによく行なわれる手法である。平面試料を粘弾性体とし、回転体を剛体として実際にころがしたときは、やや複雑であるが、粘弾性挙動が現われ、それがころがり抵抗の原因であると考えられる。

剛体の形状は球および円筒とし、変形の扱い方は一次元、二次元および三次元があり、これらの関係は野中¹⁸⁾によって検討されている。粘弾性体の解析については、弾性ヒステリシス損失、 $\tan \delta$ 、Maxwell 模型と Voigt 模型に分けられていくつかの報告がある。ここでは、球を用いて Voigt 模型による解析を例に、ころがり粘弾性について述べてみよう。

これは From ら⁷⁾ によって行なわれたものであるが、半径 R で、原点 $x=0$, $y=0$, $z=-z$ の球をおくとき、この球の方程式と x - y 平面の方程式より、次のような z 方向の式を得ている。

$$z=(R^2-x^2-y^2)^{1/2}-(R^2-r^2)^{1/2} \quad (8)$$

一方、 z 軸方向の圧力 p は Voigt 模型によると、

$$p=kEz+k\eta \frac{dz}{dt} \quad (9)$$

となるから、これに次の τ の式、

$$\tau=\eta/G \quad (10)$$

を用いて整理すると次のようになる。

図6 ころがり速度と接触面積

$$p = kG[(R^2 - x^2 - y^2)^{1/2} - (R^2 - r^2)^{1/2} + \tau vx(R^2 - x^2 - y^2)^{-1/2}] \quad (11)$$

ここで k は各要素の変位, $v = dx/dt$ である.

次に (11) 式において, $\beta = \tau v/R$, $\varphi = r/R$ として整理する. ところで, ころがり接触部の後半部において接触が離脱するときの x の値を $R\xi$ とし, その式の $p(x)$ を 0 とする条件は次のようになる.

$$R\xi = R\beta - R[\beta^2 + \varphi^2 - (y^2/R^2)]^{1/2} \quad (12)$$

$x = R\xi$ の関係を図6に示す. この図は, $x = R\xi$ に対して半径 R の球をころがしたとき $\xi_2 > \xi_1 > \xi_0$ (速度 v のみを考えると $v_2 > v_1 > v_0$) のとき生ずる面積は添字が大きくなるにつれて縮小されることを示す.

そこで, 荷重 W , 摩擦モーメント M および F を計算する. 図7は $R=1$, $W=10^2$ のときのころがり摩擦係数 ρ の β 依存性を示している.

このような計算はやや煩雑であるが, $\beta \ll \varphi$, $\beta \gg \varphi$ および ρ が最大となる $\beta = \varphi$ について次のようになる.

$$\beta \ll \varphi \quad \rho = \beta = \tau v/R \quad (13)$$

$$\beta \gg \varphi \quad \rho = \frac{0.327}{R} \left(\frac{W}{G\beta} \right)^{1/2} \quad (14)$$

$$\beta = \varphi \quad \rho = 0.243 \left(\frac{W}{G\beta} \right)^{1/2} \quad (15)$$

$R=1$, $W=100$ の結果も含めて, W を変えた結果を図8に示す. すなわち, 粘弾性体固有の緩和時間 τ を用い, 力学的損失で得られた温度特性のピークがころがり摩擦において生ずることがわかった.

なお, Flom⁹⁾ は $\tan \delta$ 以外に Voigt 模型でころがり摩擦の実験結果を整理しており, このほか竹村⁸⁾, 湊¹⁰⁾, 野中¹¹⁾ の研究がある.

5. む す び

なお, 全体として詳しくは文献¹²⁾を参考にしていたければ幸いである.

図7 無次元ころがり速度 β と ρ の関係

図8 β と ρ の関係

文 献

- 1) 曾田範宗: 日本機械学会誌, **74**, 12 (1971)
- 2) M. W. Pascoe, D. Tabor: *Proc. Roy. Soc.*, **66**, B, 728 (1953)
- 3) W. A. Zisman: *Ind. Engg. Chem.*, **55**, 18 (1963)
- 4) K. L. Johnson, K. Kendall, A. D. Roberts: *Proc. Roy. Soc.*, **324** A, 301 (1971)
- 5) K. C. Ludema, D. Tabor: *Wear*, **9**, 329 (1966)
- 6) 渡辺 真, 松原 清, 唐沢 誠: *Wear*, **12**, 158 (1968)
- 7) D. G. Flom, A. M. Bueche: *J. Appl. Phys.*, **30**, 1725 (1959)
- 8) D. G. Flom: *ibid.*, **31**, 306 (1960)
- 9) 竹村哲男, 湊喜久雄: 九大工学集報, **38**, 165 (1965)
- 10) 湊喜久雄ほか: 九大工学集報, **38**, 171 (1965)
- 11) 野中保雄: *Rep. Prog. Poly. Phys.*, **8**, 223 (1965)
- 12) 松原 清: トライボロジ, 産業図書 (1981)
- 13) 野中保雄: 高分子, **15**, 561 (1966)
- 14) F. P. Bowden, D. Tabor: *The Friction and Lubrication of Solids*, Oxford, Clarendon Press (1954) p. 10
- 15) 松原 清: 潤滑, **22**, 545 (1977)
- 16) W. A. Zisman: *Ind. Engg. Chem.*, **55**, 18 (1963)
- 17) P. S. Walker, et al: *Nature*, **225**, 956 (1970)