トライボロジー（摩擦・摩耗・潤滑の学問）の 基礎から応用，最近の進歩 第5回 摩耗のメカニズム（1）

内 山 吉 隆

Tribology (The Science and Technology of Friction, Wear and Lubrication) -The Elementary Knowledge to Application, and the Latest Progress- 5. Wear Mechanisms(1)

Yoshitaka UCHIYAMA (Professor Emeritus, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan)
yoshu@tam.ne.jp

To extend the wear lives of tribomaterials, the proper control of wear rate is desired. The description of wear rates is shown at the first portion. The fundamental wear mechanisms for rubbers and polymeric materials, such as abrasive wear and adhesive wear, are explained in this paper.

(Received on June 8, 2017)

Key Words : Wear, Description of Wear Rates, Rubber, Polymeric Materials, Wear Mechanisms

1. は じ め に

ゴムや高分子材料は，摩擦に伴い，ついには摩耗を生じる。摩耗の形態は，その摺動条件によって幾つかに分類できる。それらを摩擦条件や摩耗粉の生成機構に注目して，以下に分類してみた。

(1) 鋭い突起によって起きるアブレシブ摩耗 (abrasive wear)，(2) 接触部の凝着が強く，その凝着部の破壊によって起こる凝着摩耗 (adhesive wear)，(3) 相手面の鈍い突起によって弾性接触し，変形を繰り返す結果として起こる疲労摩耗 (fatigue wear)，(4) ゴムが摩耗するとき，すべり方向に直角にアブレーションパターンを生成するパターン摩耗 (pattern abrasion)，(5) 延性的で比較的強度の弱い材料が高摩擦にさらされた場合に起こるころ状摩耗粉生成による摩耗 (wear by roll-formation)，(6) 比較的軽荷重などおだやかな条件で，ゴムの摩擦面が酸化によ

て粘ちようなフィルムでおおわれ，摩耗が著しく低くなる粘着摩耗 (oily wear)，(7) 高分子材料や熱可塑性エラストマーで摩擦表面が溶融または流動を起こし，大きな摩耗を示す溶融摩耗 (melting wear)，(8) 摩擦面の化学的な腐食に伴って摩耗する腐食摩耗 (corrosive wear) や，硬い粒子の衝突によって摩耗する浸食 (erosion または erosive wear) がある。以上，8つに大別したが，(1) のアブレシブ摩耗においても (3) の疲労摩耗や (4) のパターン摩耗，(5) のころ状摩耗粉の生成による摩耗を生じること

内山 吉隆：金沢大学（〒920-1192 石川県金沢市角間町）名誉教授，工学博士。昭和39年，金沢大学工学部精密工学科卒業。昭和40年，同大学助手。平成元年から同8年まで，日本ゴム協会技術部会（現研究部会）トライボロジー研究分科会主査。平成5年5月から同7年4月まで，日本トライボロジー学会理事。平成10年5月から同13年5月まで，日本ゴム協会理事・同東海支部長。平成13年から同15年まで，日本ゴム協会副会長・理事。平成19年，金沢大学大学院自然科学研究科教授を定年退職，同年金沢大学名誉教授（現在に至る）。

があり, いくつかの摩耗現象が複合して起こる場合もある。本稿では, (1) のアブレシブ摩耗と (2) の凝着摩耗について, 特徴的な摩耗形態とそれらに影響を与える諸因子について概説を行っている。ゴムの摩耗に関しては従来より幾つかの解説がなされ, 様々な観点から解析が行われている¹⁻⁶⁾。さらに, 摩耗率の表示法をまとめて本稿に示してある。摩耗は, タイヤ, シール, ロール, ベルト, 靴底, 軸受, プレーキ, クラッチなどの寿命を決めるものである。各製品の摩擦と同様, 摩耗は製品性能を決める重要な因子と考えられる。

2. 摩耗率の表示法

摩耗率は, 一般には定常摩耗状態の摩耗率を示すことが多い。摩擦はその瞬間の力として検知されるが, 摩耗は検知可能な一定の時間, 摩擦距離, 回転数などを必要とする。摩擦開始時に見られる初期摩耗と, 定常状態でみられる定常摩耗に大別できる。摩耗率の表示には以下のものがよく使用される。

- (1) 線摩耗率 (linear wear rate). $K_L = \alpha = \Delta h / \Delta L$, ここで, L は摩擦距離, h は摩耗寸法とする。
- (2) 体積摩耗率 (volumetric wear rate). $K_v = \Delta V / \Delta L$, ここで, V は摩耗体積とする。
- (3) エネルギー摩耗率 (energetic wear rate). $K_E = \Delta V / F \Delta L$, ここで, F は摩擦力とする。
- (4) 摩耗特性値 (abradability). $\gamma = \Delta V / F \Delta L = \Delta V / \mu W \Delta L = K_v / \mu W$, ここで, W は荷重, μ は摩擦係数である。エネルギー摩耗率 K_E と等しい ($K_E = \gamma$)。
- (5) 摩耗抵抗係数 (coefficient of abrasion resistance). $\beta = F \Delta L / \Delta V = 1 / \gamma = \mu W / K_v = 1 / K_E$ 。
- (6) 比摩耗量 (specific wear rate). $K = w_s = \Delta V / \Delta L \cdot W = \alpha / p$. ただし, $p (= W / A)$ は接触圧力, A は接触面積とする。単位としては, 一般に摩耗体積を, 荷重と摩擦距離で割って, mm^3 / Nm で表わされる。なお, 比摩耗量 K と摩耗特性値 γ との関係は μ を摩擦係数とすると, $K = \mu \gamma$ の関係がある。
- (7) 1回転当たりの摩耗寸法 (linear rate of wear). $A_n = \Delta h / \Delta N$. ここで, h は摩耗寸法, N は回転数である。

3. 摩 耗 機 構

3.1 アブレシブ摩耗

この摩耗が生じるのは, 鋭い突起によって軟らかな表面を掘り起こし, 条痕を作る場合である。Figure 1 は, 硬い円錐圧子が柔らかい表面をすべる様子を示している。単位摩擦距離を引掻くときに, 突起は rh なる体積を摩耗させる。ここで, $h = r \cot \theta$ であるため, 単位摩擦距離あたりの摩耗した体積は $r^2 \cot \theta$ となる。材料が垂直荷重 W によって降伏点に達し, $\pi r^2 p_m / 2$ の荷重を支えている。ここで,

Figure 1 Grooving of soft material by a hard cone.

p_m は軟らかい材料の降伏圧力である。摩擦距離 L だけ移動したときの摩耗体積 V は次のようになる。

$$V = (2W \cot \theta L) / (\pi p_m) \quad (1)$$

一般には p_m を軟らかい材料の硬さ H とみなしてよく, k_a をアブレシブ摩耗の定数とすると, 次式が広範囲のアブレシブ摩耗で成立する。

$$V = (k_a W L) / H \quad (2)$$

式 (1), (2) は金属ではよくあてはまると考えられる。

一方, 硬い半頂角 θ の円錐圧子が弾性体をすべるとき, 摩擦力は次のようになる⁷⁾。

$$F = \frac{W}{\pi} \cot \theta \quad (3)$$

いま, 単位摩擦距離当たりの仕事を ϕ とし, これを摩擦係数と関係づけると次のようになる。

$$\mu = (\alpha_0 \phi) / W = (\alpha_0 / \pi) \cot \theta \quad (4)$$

ここで, α_0 は係数である。平均圧力を p_a とすると次式が得られる。

$$\mu = \{2(1 - \nu^2) / \pi E\} \alpha_0 p_a \quad (5)$$

ゴムの場合, ポアソン比 $\nu = 0.5$, 弾性率 $E = 5.8 \times 10^5 \text{ kgf} / \text{m}^2$, $\alpha_0 = 0.8$ とすれば, 次のようになる。

$$\mu = 0.66 \times 10^{-6} p_a \quad (6)$$

摩擦係数 μ の測定値と式 (6) を比較したのが Figure 2 である⁷⁾。円錐の半頂角が 50° 付近まで理論式 (5) に従うが, 円錐がより鋭くなると理論式からはずれてくる。別の実験では, 頂角 2θ をもつ円錐ダイヤモンドで繰り返し引掻いたときのカーボン充てん SBR の体積摩耗率の変化を調べた。鋭い円錐で引掻くほど摩耗率は大きい。いったん引掻き痕ができると接触部の応力が低下し, 定常状態の摩耗率に低下していく⁸⁾。ゴムの摩耗はその機械的性質とどのような関係があるかに興味を持たれる。ゴムの摩耗特性値 γ は, 前章の (6) 比摩耗量の項からわかるように, 比摩耗量 K を摩擦係数 μ で割った値 K / μ に等しい。この K / μ は, 摩擦速度によって変化する。そして, 各温度で得られた摩耗曲線は, 高温度で高速度側に移動する⁹⁾。各温度の摩耗曲線のある基準温度の曲線まで $\log a_T$ だけ移動させて重ね

Figure 2 Relationship between the coefficients of friction and mean pressure when a cone is rubbed against elastomer (rubber)⁷⁾.

合わせると、それぞれのゴム特有のマスターカーブが得られる。そのときの移動係数 a_T は、ほぼ次のWLF式に従う。

$$\log a_T = -8.86(T - T_s)/(101.5 + T - T_s) \quad (7)$$

ここで、 T_s はガラス転移温度 T_g より50℃高く、次の関係がある。

$$T_s = T_g + 50$$

一般にWLF式は非結晶性の高分子材料において、 $T_g < T < T_g + 120$ ℃の範囲で適応されると考えられている。そして、各種ゴムの温度によって変化する K/μ の曲線と8,900%で得た破壊エネルギー密度の逆数 $1/U$ の温度によって変化する曲線は、よく似た形をしている。このことより、摩耗特性値は破壊靱性の逆数に比例して、また、温度によって変化する傾向がみられ⁹⁾、次式で表わされる。

$$K/\mu = k_1 f(a_T v) \quad (8)$$

$$f(a_T v) = f(1/U) \quad (9)$$

ここで、 k_1 は定数である。

高分子材料のアブレシブ摩耗体積 V は次式で表わされ、摩擦係数 μ と荷重 W に比例し、硬さ H 、引張強さ σ 、破壊伸び ε に逆比例する関係がRatnerら¹⁰⁾によって提案されている。

$$V = k_2 \frac{\mu WL}{H \sigma \varepsilon} \quad (10)$$

ここで、 k_2 は定数であり、 L は摩擦距離である。単位荷重および単位摩擦距離あたりの摩耗量の温度による変化は、非結晶性高分子材料についてはFigure 3 (a)¹⁰⁾に、結晶性材料についてはFigure 3 (b)¹¹⁾に、それぞれ示されている。温度による摩耗率の変化の曲線と速度による摩耗率の変化の曲線は、一般には鏡像関係にある。摩耗を機械的性質と結び付けて考える場合、そのひずみ速度が問題となる。摩擦面での材料のひずみ速度は速く、従って衝撃試験

(a) Amorphous polymer

(b) Crystalline polymer

Figure 3 Relationships between wear volume V and temperature for amorphous polymer (a) and crystalline polymer (b). The hardness H , tensile strength σ , elongation at break ε , and the coefficient of friction μ are also shown in this figure: T_b , brittleness point; T_g , glass transition temperature; T_f , flow point; T_m , melting temperature.

で得られた材料の性質と対応させる必要があるが、実際には多くの困難を伴う。しかし、多くのゴムでは、Figure 4に示すように通常の引張試験で得られる弾性率 E と破壊強さ σ の積の逆数 $1/E\sigma$ に線摩耗率 α （単位摩擦距離 ΔL あたりの摩耗寸法 Δh ）が比例する結果が得られ、次のように表わせる¹²⁾。

$$\alpha = \Delta h / \Delta L \propto 1/E\sigma$$

アブレシブ摩耗においては、窒素やアルゴンガスなどの不活性ガス中よりも酸素中では摩耗はやや多いが、酸化防止剤の配合は耐摩耗性の改善にあまり効果がみられない¹³⁾。

3.2 凝着摩耗とその摩耗過程

比較的滑らかな面同士で起きる摩耗を凝着摩耗と呼んでいる。いま、硬い鋼球と軟らかな相手平面とが接触し、相手平面が塑性的に変形するものと仮定する。このときの接触円の半径を a 、相手平面の接触時の平均圧力を p_m とする。接触面積は πa^2 であり、支える荷重 W は $p_m \pi a^2$ に等しいと

Figure 4 Relationship between the linear wear rates α and $1/E\sigma$ for various vulcanized rubber specimens: E , modulus; σ , strength at break; $W=3.92$ N ($p=0.108$ MPa); $v=11.8$ cm/s; mating abrasive cloth, #AA-240.

考えられる。接触円直径 $2a$ の距離を移動する間に、 $2/3 \pi a^3$ の半球状の摩耗粉がとられたと仮定すれば、体積摩耗率は次のようになる。

$$Kv = \Delta V / \Delta L = \frac{2}{3} \pi a^3 \times \frac{1}{2a} = \frac{\pi}{3} a^2 \quad (11)$$

ここで、 V は摩耗体積、 L は摩擦距離とする。

$W = p_m \pi a^2$ であるから、次式のようにになる。

$$Kv = W / 3p_m \quad (12)$$

実際には摩耗確率 k_{adh} を考えに入れて、次式のように表わせる。

$$Kv = k_{adh} W / 3p_m \quad (13)$$

以上は硬い金属が軟らかい金属上を摩擦し、軟らかい金属が摩耗する場合について述べたものである。

プラスチック材料である四フッ化エチレン樹脂 (PTFE) ピンの摩耗においても、相手面のガラス平板と摩擦した場合、凝着摩耗条件で摩耗する現象がみられており、その摩耗過程を Figure 5 に示す¹⁴⁾。

最初は Figure 5 (a) に示すように、PTFE ピンから相手ディスクへ小さな摩耗粉およびフィルムが移着する。移着した摩耗粉はプラスチックピンを切削するか、または、移着摩耗粉の集積によって Figure 5 (b) に示すように成長する。移着した摩耗粉は必ずしも相手ディスクに強力についているのではなく、ディスク上をすべるものもある。そのため接触面間での異動に速度差を生じる。小さな摩耗粉は Figure 5 (c) に示すように合併し、巨大化する。あまりにも大きくなりすぎると分裂するものも出てくる。しかし、合併による巨大化がほとんどである。このように成長した摩耗粉は Figure 5 (d) に示すように、ピン前部で

Figure 5 Schematic model of PTFE wear processes (the sliding direction of the glass disk is from left to right): (a) transfer of small fragments or films; (b) growth of the transferred fragments by the cutting action of a PTFE pin; (c) addition to or disruption of the fragments; (d) detachment of transferred fragments; (e) back transfer of fragments or films.

再度摩擦面に入れずに排除されるか、または、ピン後部では排除される。一部分はピン前部や後部に付着する。Figure 5 (e) に示すように、ディスク上に移着した摩耗粉やフィルムがピンへ再移着したり、ピン前部に付着した摩耗粉が再度摩擦面に入り込む現象も見られる。このような Figure 5 における (a) から (e) までの現象は、定常摩耗状態で同時に起こっている。

Figure 6 は摩擦面の平均温度を制御可能な定温型摩耗試験機を用いて、29 °C における PTFE ピンとクロムメッキした黄銅ディスク面とを繰り返し摩擦したときの線摩耗率 (単位摩擦距離あたりの摩耗寸法) と摩擦速度の関係を示したものである。ここでは、各接触圧力 p (kgf/cm²) において、その摩耗曲線は摩擦速度とともに類似の変化を示し、高接触圧力ほど高摩耗率側に移動を示している。各接触圧力の摩耗曲線を 14.1 kgf/cm² の摩耗曲線に一致させるように線摩耗率軸に沿って移動させて、Figure 6 に示す合成摩耗曲線が得られる。このとき摩耗曲線を移動させた量と接触圧力 p との関係 Figure 6 の図中に示したが、それ

Figure 6 The master curve of wear for PTFE obtained from the experimental results under various contact pressures: reference contact pressure $p = 14.1 \text{ kgf/cm}^2$; $T = 29^\circ\text{C}$. The relation between the vertical translation and the contact pressure is also shown.

らの関係は次のように表せる。

$$\alpha = k p^{1.26} \quad (14)$$

なお、 k は定数であり、 $p = 1 \text{ kgf/cm}^2$ のときの値である。Figure 6の右の縦軸は k で目盛ってある。

また、接触圧力 28.3 kgf/cm^2 において、摩擦面温度を 29°C 、 50°C 、 80°C 、 100°C 、 150°C に変化させた場合、線摩耗率と摩擦速度を示す摩耗曲線は温度上昇とともに高速度および高摩耗率側へ移動する結果が得られた。50℃から150℃までの摩耗曲線を縦軸および横軸に沿って移動させ、29℃の摩耗曲線に重ね合わせるとFigure 7に示すような合成摩耗曲線が得られた。そのときの横軸の移動量 $\log a_T$ と縦軸の移動量 $\log b_s$ をFigure 7の中に示してある¹⁵⁾。Figure 7の合成摩耗曲線は、Figure 6で得られたものとはほぼ等しい摩耗曲線である。Figure 7の結果から、横軸の移動係数 a_T と縦軸の移動係数 b_s の温度による変化は、 $\log a_T$ と絶対温度 T の逆数 $1/T$ との関係は29℃から150℃の範囲で直線関係が得られる。この結果は次のArrheniusの式に従う。

$$\log a_T = \frac{\Delta Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (15)$$

ここで、 ΔQ は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T_0 は基準温度である。式(15)より活性化エネルギーは4.7 kcal/molの値が求められた。 $\log b_s$ と T との関係も29℃から150℃において直線関係が得られた。この関係は、永松ら¹⁶⁾がポリエチレンの応力緩和曲線の合成の場合に結晶から起因する縦軸方向への移動量 $\log b_s$ と温度 T との関係を求めたのと同様、次式で表わすことができる。

$$\log b_s = K_s (T - T_0) \quad (16)$$

ここで、 K_s は比例定数である。なお、29℃から150℃までの領域において、温度 T_0 、接触圧力 p_0 時の線摩耗率 α が、

Figure 7 The master curve of wear for PTFE obtained from the experimental results at various temperatures. The vertical translation $\log a_T$ and horizontal translation $\log b_s$ are also shown: $p = 28.3 \text{ kgf/cm}^2$; $\phi 3$ PTFE pin.

摩擦速度 v の関数として次式で表わされるものとする。

$$\alpha = k_0(v) \quad (17)$$

温度 T 、接触圧力 p のときの線摩耗率 α は、次式のように表わされる。

$$\alpha = k_0(a_T v) (p/p_0)^n / b_s \quad (18)$$

29℃から150℃における $\log a_T$ 、 $\log b_s$ 、 p_0 および n は次の通りである。

$$\log a_T = \frac{1}{2.3} \left\{ \frac{4.7}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\} \quad (19)$$

$$\log b_s = -0.05 (T - T_0) \quad (20)$$

ここで、 $p_0 = 28.3 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $n = 1.26$ 、 $T_0 = 302 \text{ K}$ 、 R は気体定数である。

このように、 $k_0(v)$ を知ることによって、温度 T と接触圧力 p における線摩耗率 α を予測することができる。PTFEのほかに、ポリカーボネート (PC)、高密度ポリエチレン (HDPE)、ポリプロピレン (PP)の線摩耗率 α も、式(18)で表わせることがわかっている。また、各種高分子材料の摩擦係数 μ は接触圧力 p とともに変化し、実験範囲では次のように表わせる。

$$\mu \propto p^m \quad (21)$$

m は、PTFEでは -0.15 、HDPEでは -0.43 、PPとPCではほぼ0である¹⁷⁾。

4. お わ り に

摩耗は摩擦面で起こる現象であるが、非常に複雑である。材料の組み合わせ、荷重または接触圧力、摩擦速度、温度、環境または雰囲気などによって摩耗は支配される。摩擦組み合わせの材料と摩擦条件とを聞いて、摩擦する材料の摩耗を正確に予測できればよいのであるが、現在の知識では、十分に答えることはできない。しかし、実用面で

は限定された摺動条件で使用されているため，経済的な実用寿命まで使用可能なまでに製品は作られている．それには，基礎研究，ベンチテスト，実用試験と，順にスケールアップし，製品開発が行われている．

実験すれば何らかのデータは出るが，その解釈，論理的，可能ならば理論的裏付けができれば，その摩耗現象をより正確に理解したことになると思われる．摩耗を支配する因子は数多いので，まずは主要な因子，2ないし3に着目して摩耗現象を解析し，摩擦材料や摺動部品を実用化することが必要と思われる．

References

- 1) Uchiyama, Y.: *Tribologist*, **34**, 344 (1989)
- 2) Veith, A. G.: *Rubber Chem. Technol.*, **65**, 601 (1992)
- 3) Uchiyama, Y.: *Jidoushakenkyu*, **10**, 466 (1988)
- 4) Fukahori, Y.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **68**, 156 (1995)
- 5) Uchiyama, Y.; Ishino, Y.: *Wear*, **158**, 141 (1992)
- 6) Fukahori, Y.; Yamazaki, H.: *Wear*, **178**, 109 (1994)
- 7) Tabor, D.: *Engineering*, **186**, 838 (1958)
- 8) Uchiyama, Y.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **61**, 315 (1988)
- 9) Grosch, K. A.; Schallamach, A.: *Trans. Inst. Rubber Ind.*, **41**, T80 (1965)

- 10) Ratner, S. B.; Faberova, I. I.; Radyukevich, O. V.; Lur'e, E. G.: "Abrasion of Rubber", James D. I., Ed.: MacLaren and Sons Ltd., London/Palmerston Publishing, Co. Inc., New York, p. 145 (1967)
- 11) Lancaster, J. K.: "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering (2nd ed.)", Vol. 1", John Wiley & Sons, New York, p. 14 (1985)
- 12) Uchiyama, Y.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **57**, 93 (1984)
- 13) Uchiyama, Y.: Proc. JSLE Int. Tribology Conf., Tokyo, 479 (1985)
- 14) Uchiyama, Y.: *Wear*, **74**, 247 (1981/82)
- 15) Uchiyama, Y.; Tanaka, K.: *Wear*, **58**, 223 (1980)
- 16) Nagamatsu, K.; Yoshitomi, T.; Takegi, T.: *Kyudai Kogaku Shuho*, **30**, 259 (1958)
- 17) Uchiyama, Y.: *Plastics Age*, **31**, 143 (1985)

日本語表記参考文献

- 1) 内山吉隆：トライボロジスト，**34**，344 (1989)
- 3) 内山吉隆：自動車研究，**10**，466 (1988)
- 4) 深堀美英：日本ゴム協会誌，**68**，156 (1995)
- 8) 内山吉隆：日本ゴム協会誌，**61**，315 (1988)
- 12) 内山吉隆：日本ゴム協会誌，**57**，93 (1984)
- 16) 永松一夫，吉富達也，竹木達朗：九大工学集報，**30**，259 (1958)
- 17) 内山吉隆：プラスチック エージ，**31**，143 (1985)

*

*

*

*

*