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2回 摩擦現象

内 山 吉 隆

Tribology (The Science and Technology of Friction, Wear and Lubrication) -The Elementary Knowledge to Application, and the Latest Progress- 2. Friction Phenomena

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

The sliding friction of materials, such as metals and elastomers, are affected by the contact area, shear strength, sliding speed, temperature, etc. Especially elastomers are affected by their viscoelastic properties. The friction mechanisms of metals and elastomers are explained in this article.

(Received on September 15, 2016)

Key Words : Tribology, Friction, Contact Area, Sliding Friction, Metal, Elastomer

1. は じ め に

最近の工学における目覚ましい進歩発展に伴い，各分野に高分子材料，とりわけプラスチック，ゴム，熱可塑性エラストマーなどが多く使用されている．ゴムの利用では，自動車用タイヤ，ベルト，シール，ロール，履物など，その特性を活かした製品として独自の地位を築いている．これら材料の摩擦現象を知ることは，それら製品の開発および製造に携わる技術者や研究者，また，その分野を勉強しようとする向学の士にとって興味ある問題と思われる．

2. ゴム，プラスチックの特徴と金属との比較

ゴムやプラスチックなどの高分子材料は，金属に比べて一般に熱伝導が悪く，耐熱性は金属材料よりもはるかに低い．Figure 1は金属表面層を示したものである．ベイルビー層（Beilby layer），酸化膜（oxide film），加工に伴う変形層（deformed layer）からなっている．最上層のベイル

Figure 1 The metal surface after surface finish.

内山 吉隆：金沢大学（〒920-1192 金沢市角間町）名誉教授．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4月から平成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）．

Figure 2 The steel oxidized layer.

Figure 3 The polymer surface of spherulite after rubbing.

ビー層は非晶質や微細結晶からなっている。この表面層は摩擦や摩耗において重要な役割をしている。ペイルビー層から母材までの酸化層を模式的に表すと Figure 2 のようになる。これらの層は、大気中での加工や摩耗で除去されてもすぐに生成する。これら酸化膜は比較的柔らかく、鉄同士の摩擦において、大きな損傷を防ぐ役割をしている。ゴムは配合剤が表面に移行し、被覆、結晶（花模様）などがあらわれる場合がある。Figure 3 はプラスチックの一例として球晶構造をもつ材料の断面を示したものである。最表面層は摩擦によって溶融または流動層を作り、摩擦方向に配向する。その下には変形層を生じる。表面での空気との反応は金属と比べて不活発である。

このように金属とゴムやプラスチックでは摩擦に対する注目点はおのずと異なっている。金属に対しては酸化膜の影響に注目し、プラスチックでは、その熱的な流動に注目して従来から研究されてきた。ゴム材料については、粘弾性的性質と補強材に注目したトライボロジーの研究が盛んであった。

3. 固体表面間の接触

3.1 塑性接触と弾性接触

摩擦を考えるにあたり、まず固体が接触する様子について考えてみることにする。いかに滑らかな表面といえども、それらの固体表面は顕微鏡で見ると粗さをもっている。固体面間の接触は Figure 4 に示す凹凸を持った固体同士が接触するようなものである。最初は突起の先端同士が接触し、荷重の増大とともに接触面積を増していく。軽

Figure 4 The contact between solid surfaces.

荷重のときは弾性的接触であるが、荷重の増大とともに塑性接触する箇所があらわれる。その時の平均圧力 p_m は、銅では単純引張り試験から実測した弾性限度 Y の約 3 倍であり、次式で表される¹⁾。

$$p_m = 3Y \quad (1)$$

実際の種々の凹凸の大部分は、見掛けの接触面積に比べ、真実接触面積 A は小さく、そして、荷重 W に比例し、凹凸部の平均降伏圧力 p_m に反比例すると考えてもよく、次のように表される。

$$A = W/p_m \quad (2)$$

次に Figure 5 の球と平面とが接触する場合について考えてみる。荷重 W で押し付けた場合、Hertz の古典式によれば接触域は半径 a の円となり、次式で与えられる²⁾。

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

ここで、 E_1 と E_2 は球と平面の弾性率、 R は球の半径である。よって、接触面積 $A = \pi a^2$ は $W^{2/3}$ に比例し、次式のようになる。

$$A = k_1 W^{2/3} \quad (4)$$

塑性変形するとき、接触面積は荷重 W に正比例するが、球と平面の弾性変形では荷重 W の $2/3$ 乗に比例するという違いがある。弾性接触でも Figure 5 の 1 個の球が接触する単一接触モデルの他に、Figure 6 のように半径 R の球が高さ方向に $x = 0, h, 2h, 3h \dots$ の位置に一様に分布する場合を考える。この時の接触面積 A と荷重 W の関係は次のようになり、 W の $4/5$ 乗に比例する³⁾。

$$A = k_2 W^{4/5} \quad (5)$$

Figure 5 The single contact model.

Figure 6 The multiple contact model.

Figure 7 The contact between a plane and a sphere of radius R_1 having small hemispherical asperities of radius R_2 . Figure 8 The contact between a plane and a sphere of radius R_1 . The sphere surface is covered with hemispheres of radius R_2 . On the hemisphere of radius R_2 , the smaller hemispheres of radius R_3 are seen in the figure.

今度は別のモデルについて考えてみる。Figure 7に示すように、半径 R_1 の球面上に更に半径 R_2 の球面突起を持つものが平面と接触するとき、接触面積 A と荷重 W の関係は次式のように表わせる。

$$A = k_3 W^{8/9} \quad (6)$$

Figure 8に示すように、Figure 7の半径 R_2 の突起のうえに更に半径 R_3 の球面突起をもつ物体と平面との接触では、接触面積は次のように表せる。

$$A = k_4 W^{26/27} \quad (7)$$

このように荷重 W の指数はさらに1に近づく。複雑な多数点接触では、接触面積 A は荷重 W にほぼ正比例すると考えてもよい。

3.2 滑らかなゴムで起こる吸引力と接触

ゴムで主として起こる弾性接触では、荷重 W で押し付けた半径 R_1 と R_2 の2つの球では、接触円の半径 a はHertzによれば次のように示される。

$$a^3 = \frac{3}{4} \pi (k_1 + k_2) \{R_1 R_2 / (R_1 + R_2)\} W \quad (8)$$

ここで、 k_1 と k_2 は各球の弾性に関する定数であり、次の関係がある。

$$k_1 = (1 - \nu_1^2) / (\pi E_1), \quad k_2 = (1 - \nu_2^2) / (\pi E_2)$$

ここで、 ν_1 と ν_2 はそれぞれの材料のポアソン比、 E_1 と E_2 は各材料のヤング率である。接触面積 $A = \pi a^2$ であり、 W の2/3乗に比例する。しかし、低荷重の接触では、接触面積はHertzによって予想されたものより大きく、荷重を0（ゼロ）にしても一定の面積の接触が観察された。高荷重ではこの吸引力によって付加される接触面間の応力は考慮しなくてよいが、低荷重では重要になることを示している⁴⁾。

Johnsonら⁴⁾によれば、表面エネルギー $\gamma (= \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12})$ なる2物体間に作用する見掛けの応力 W_1 は、負荷された応力 W より大きく、次式で示される。ここで、 γ_1 と γ_2 は、接触するそれぞれの材料1と2の空气中における表面エネルギーであり、 γ_{12} は材料1と2の接触界面における表面エネルギーとする。

$$W_1 = W + 3\gamma\pi R + \sqrt{[6\gamma\pi R W + (3\gamma\pi R)^2]} \quad (9)$$

ここで、 $R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ である。

表面エネルギー効果を考慮したときのHertzの式は次のように示される。

$$a_1^3 = (R/K) [W + 3\gamma\pi R + \{6\gamma\pi R W + (3\gamma\pi R)^2\}^{1/2}] \quad (10)$$

ここで、 $K = 4 / \{3\pi (k_1 + k_2)\}$ である。

$\gamma = 0$ とすると、単純なHertzの式 $a_1^3 = RW/K$ となる。

荷重が0（ゼロ）でもある接触面が作られ、接触円の半径 a_1 は次式で与えられる。

$$a_1^3 = R(6\gamma\pi R)/K \quad (11)$$

Figure 9 The sliding friction of a hard ball on the soft metal plate: $F = F_{adh} + F_{grooving}$

4. 現代における摩擦の理解

4.1 金属の摩擦

いま，硬い球のスライダーが，柔らかい金属の上におかれ，表面と平行な方向に動かすときに要する力を F とする（Figure 9）．この力 F は2つの項からなると考える．第1項は凝着部をせん断するために要する力 F_{adh} であり，2つの金属間の緊密な接触点に形成された金属結合部をせん断するのに要する力であり，次のように表せる．

$$F_{adh} = A_1 s \quad (12)$$

ただし， s は界面の接線方向に働く金属結合部の単位面積あたりのせん断力である．

第2項 $F_{grooving}$ はスライダーの全面で柔らかい金属を押しつけるのに要する力であり，溝状のこん跡の断面積 A_2 に表面で金属を押しつけるのに要する平均圧力 p' を乗じた積に等しく，次のように書ける．

$$F_{grooving} = A_2 p' \quad (13)$$

ここで， p' は柔らかい金属の降伏圧力 p と同程度と思われる⁵⁾． D を摩擦痕の幅， R をスライダーの曲率半径とすれば， A_2 はほぼ $d^3/12R$ に等しくなる．従って次式のようになる．

$$F_{grooving} = (d^3/12R)p' \quad (14)$$

そして，全摩擦力 F は，次のように表わせる．

$$F = F_{adh} + F_{grooving} \quad (15)$$

いまの場合，次のようになる．

$$F = A_1 s + d^3 p' / 12R \quad (16)$$

BowdenとTaborら⁶⁾は次のように述べている．摩擦測定から計算したせん断強さ s は，純金属のせん断強さと同程度であるが，若干大きめである．また，金属結合が形成され，それがついにせん断されるときには，硬いスライダーの上に柔らかな金属が強固に付いており，金属結合が形成されるとともに，せん断は柔らかい金属の母材内部で起こっていると結論づけている．また，実験は遅い速度で行ったため，摩擦熱による温度上昇は数度以内にすぎず，結合部は「冷間溶着」過程によって形成されたに違いないと結論づけている．しかし，すべり速度が速くなると相当の摩擦熱が生じ，温度上昇により金属結合部の流動および溶着が容易に起こり，重要な役割を果たすと考えている⁶⁾．

Amontonsは，摩擦力は物体の見掛けのすべり面積に無関係で，荷重に正比例することを見出した．2金属間の真実接触面積は $A = W/p$ で与えられ，金属結合部は接触領域で形成される．いま， s をせん断強さとすれば，この結

合部をせん断するための全体の力は， As で与えられる．掘り起こしの力を無視すれば，摩擦力 F は次のようになる．

$$F = As \quad (17)$$

真実接触面積 A は W および p のみによって決まるので，2つの接触する見かけの面積によらない．真実接触部のみで決まることになる．これがAmontonsの「第1法則」である．いま A をおきかえると摩擦力 F は荷重に正比例し，摩擦係数は次のようになる．

$$\mu = s/p \quad (18)$$

摩擦係数は荷重に関係しないことになる．これがAmontonsの「第2法則」で，非常に広い範囲の実験条件のもとで成立する⁶⁾．これらは，銅がアルミニウムの上をすべる場合，10万倍も変化する荷重範囲で，摩擦係数は荷重に無関係であるというWhitehead⁷⁾の実験によって確かめられている．

ただ，Amontonsの法則は，接触面積が荷重に比例するときのみ成立する．式（18）を書き換えて，次のように書ける．

$$\mu = \frac{s}{p} = \frac{\text{結合部のせん断強さ}}{\text{柔らかい方の金属の降伏圧力}} \quad (19)$$

せん断は，常に柔らかい方の金属の内部でおこるので， s は柔らかい方の金属のせん断強さにほぼ等しい．その結果，次のように書ける．

$$\mu = \frac{\text{柔らかい方の金属のせん断強さ}}{\text{柔らかい方の金属の降伏圧力}} \quad (20)$$

式（20）から，次のことがわかる．第1に，それぞれの金属の s と p はともに変化するが，一般的には μ は0.6と1.2の間にある．第2には，温度が変わっても， s と p が同時に変化するので，摩擦係数に及ぼす温度の影響は，あまり大きくないと考えてもよい．しかし，氷のように融点に近い温度でその硬さが変化しないような固体では，非常に大きな摩擦の低下となつてあらわれる⁸⁾．

ここで，金属の降伏圧力 p と金属のせん断強さ s の関係について考えてみる．いま，柔らかい金属ブロックの1つの平面が硬い金属平面に垂直圧力 σ で押し付けられているとする．いまブロックをせん断応力 s に等しい接線力で金属ブロック上を引張るものとする．ブロック界面の全面は，硬い方の金属平面と結合を形成し，金属ブロック内の薄片でせん断が起こる値に達していると仮定する．von Misesの条件式から，薄片内に塑性降伏が起こるためには，次式が成立する．

$$\sigma^2 + 3s^2 = Y^2 \quad (21)$$

ここで， Y は柔らかい金属ブロックの引張り，あるいは摩

Figure 10 (a) The sliding friction of a hard sphere on an elastomer: F , frictional force; F_{adh} , adhesion term of friction; F_{def} , deformation term of friction. (b) The rolling friction of a hard sphere on a lubricated elastomer. The rolling friction consists of the deformation term¹⁰⁾.

Figure 11 The acrylonitrile-butadiene rubber sheet was rubbed against a glass hemisphere (normal load is 50 gf). The coefficients of friction were plotted against sliding speed at various temperatures¹¹⁾.

擦のないときの圧縮降伏圧力である。

一般には、 σ , s および Y の間の関係は大変複雑であり、次の形になると考えられている⁹⁾。

$$\alpha\sigma^2 + \beta s^2 = \gamma Y^2 \quad (22)$$

ここで、 α , β , γ は係数である。

2面が、垂直圧力のもとに真実接触する各点において塑性流動を生じるとき、極めて小さな接線力でせん断が始まることを示している。しかし、少しでも動くと、柔らかい方の金属は変形し、接触面積は増加する。これは垂直応力を減少させ、それによって接線力の増加を生じる。巨大な滑りが始まる前のこの摩擦力の発生は、McFarlaneとTaborら⁹⁾によって観察されている。

4.2 弾性体上のすべり摩擦

弾性体上を硬い球がFigure 10 (a) のようにすべる場合、接触部は弾性接触であり、摩擦力 F は凝着の項 F_{adh} とすべりや転がり中のヒステリシス損失に基づく変形の項 F_{def} の和として表され、次式のように書ける¹⁰⁾。

$$F = F_{adh} + F_{def} \quad (23)$$

ここで、 F_{def} はFigure 10 (b) に示した潤滑下の純粋な転

Figure 12 (a) A master curve was obtained after the curves of different temperatures were shifted to fit the reference curve using the WLF equation¹¹⁾. (b) The master curve obtained by Grosch¹²⁾.

がり摩擦のときと等しく、変形した材料の損失正接 ($\tan \delta$) に比例する。LudemaとTaborら¹¹⁾の研究で、広範囲の温度、速度で各種ゴムの摩擦が調べられ、摩擦係数 μ と速度 V との関係を表わす μ - V 曲線はFigure 11に示すように高温において高速度側に移動するのが観察された。これらの μ - V 曲線がある基準の曲線に合うように、横軸 V の速度軸に沿って移動させ、重ね合わせるとFigure 12に示すように1本のマスターカーブが得られた。

WLF式を適用して移動係数 a_T は次のように表される。

Figure 13 Variations of the contact area A , shear strength s and friction F with sliding speed V ¹¹⁾.

Figure 14 The friction of rubber and the viscoelastic property¹³⁾.

$$\log a_T = \frac{-8.86 (T - T_s)}{(101.5 + T - T_s)} \quad (24)$$

ここで， T_s はガラス転移点 T_g より 50℃ 高く，次のような関係がある．

$$T_s = T_g + 50 \quad (25)$$

これは，その先に Grosch¹²⁾ によって報告されているマスターカーブと似た傾向を示した．

摩擦係数のピークができることのもっとも単純な説明は，Figure 13に示すように接触面積 A とせん断強さ s とが速度 V によって変化し，摩擦力 F は A と s の積によって摩擦のピークができるというものである¹¹⁾．ここでは，せん断強さ s は引張り強さに等しいと仮定し，接触面積 A は $E^{-2/3}$ に比例すると仮定している．そして， $F = As$ として示している．しかし，あらい表面との摩擦では，Figure 14に示すように低速度での凝着部の摩擦による損失のピークと，より高速度での変形に伴うヒステリシスの損失によるピークの2つが生じると考えられている¹³⁾．そして，より高温では，摩擦係数の曲線は高速度側に移動する．

5. お わ り に

摩擦は，接触面におけるせん断で起こる．金属では接触は主に塑性接触である．接触界面におけるせん断強さを，摩擦界面に垂直な降伏応力で割ることによって摩擦係数が求められることを明らかにした．一方，プラスチックやゴムでは主に弾性接触であり，それらの摩擦は，接触界面のせん断とともに，界面の変形に伴うヒステリシスの損失を考慮する必要がある．

References

- 1) Bowden, F. P.; Tabor, D.; Soda, N., Trans.: "The Friction and Lubrication of Solids", Maruzen, Tokyo, p.11 (1962)
- 2) Bowden, F. P.; Tabor, D.; Soda, N., Trans.: "The Friction and Lubrication of Solids", Maruzen, Tokyo, p.9 (1962)
- 3) Archard, J. F.: *J. Appl. Phys.*, **24**, 981 (1953)
- 4) Johnson, K. L.; Kendall, K.; Roberts, A. D.: *Proc. Roy. Soc., London*, **A324**, 301 (1971)
- 5) Bowden, F. P.; Tabor, D.; Soda, N., Trans.: "The Friction and Lubrication of Solids", Maruzen, Tokyo, p.82 (1962)
- 6) Bowden, F. P.; Tabor, D.; Soda, N., Trans.: "The Friction and Lubrication of Solids", Maruzen, Tokyo, p.88 (1962)
- 7) Whitehead, J. R.: *Proc. Roy. Soc.*, **A201**, 109 (1950)
- 8) Bowden, F. P.; Tabor, D.; Soda, N., Trans.: "The Friction and Lubrication of Solids", Maruzen, Tokyo, p.91 (1962)
- 9) Bowden, F. P.; Tabor, D.; Soda, N., Trans.: "The Friction and Lubrication of Solids", Maruzen, Tokyo, p.93 (1962)
- 10) Bowden, F. P.; Tabor, D.: "The Friction and Lubrication of Solids, Part II", Oxford, p.243 (1964)
- 11) Ludema, K. C.; Tabor, D.: *Wear*, **9**, 329 (1966)
- 12) Grosch, K. A.: *Proc. Roy. Soc.*, **A274**, 21 (1963)
- 13) Moore, D. F.: *Wear*, **61**, 273 (1980)

日本語表記参考文献

- 1) Bowden, F. P., Tabor, D.: 曾田範宗 訳：固体の摩擦と潤滑，丸善，東京，p.11 (1962)
- 2) Bowden, F. P., Tabor, D.: 曾田範宗 訳：固体の摩擦と潤滑，丸善，東京，p.9 (1962)
- 5) Bowden, F. P., Tabor, D.: 曾田範宗 訳：固体の摩擦と潤滑，丸善，東京，p.82 (1962)
- 6) Bowden, F. P., Tabor, D.: 曾田範宗 訳：固体の摩擦と潤滑，丸善，東京，p.88 (1962)
- 8) Bowden, F. P., Tabor, D.: 曾田範宗 訳：固体の摩擦と潤滑，丸善，東京，p.91 (1962)
- 9) Bowden, F. P., Tabor, D.: 曾田範宗 訳：固体の摩擦と潤滑，丸善，東京，p.93 (1962)

*

*

*

*

*