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4回 ゴムの摩擦

内 山 吉 隆

Tribology (The Science and Technology of Friction, Wear and Lubrication) -The Elementary Knowledge to Application, and the Latest Progress- 4. Rubber Friction

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

The frictional properties of rubber when rubbed against the dry glass surface, water lubricated surface, and ice are shown. Especially the mechanisms of friction for natural rubber (NR), butadiene rubber (BR), and NR-BR blends are discussed when they are rubbed against ice under various temperatures and contact pressures.

(Received on March 3, 2017)

Key Words : Rubber Friction, Rubber Friction on Ice, Natural Rubber (NR), Butadiene Rubber (BR), NR/BR Blends.

1. は じ め に

摩擦は高摩擦が求められるときと，低摩擦が求められるときがある。ゴムの製品について考えてみると，タイヤでは転がり摩擦が小さく，すべり摩擦や静止摩擦係数は大きいことが求められる。ベルトやロールにおいて安定した摩擦係数を示すことが，また，シールでは漏れを防止するとともに，摩擦の小さいことが望まれる。そして，ワイパー，靴底などは安定した摩擦係数が必要である。その摩擦係数は，相手面のあらさや，それが乾燥しているか流体によって濡れているかによって，大きく変化する。例えば，タイヤの相手路面としては，アスファルト，コンクリート，砂利などの舗装面がある。そして，乾燥路面から水濡れ面，雪水面と環境条件は様々に変化する。路面状況が変わってもタイヤは安定した摩擦を得ることが求められる。複写機やスキャナーの紙送りロールについても，相手の紙には上質紙や再生紙があり，また，摩擦中のゴムロールへ

の紙繊維の移着やロール自身の摩耗によって，摩擦係数は変化しがちである。現金預け払い機のように絶対的な信頼が要求されるものでは，ゴムロールの紙幣搬送時の安定したトライボロジー特性が求められる。

摩擦の原因は，摩擦の界面で生じるもの（凝着の項）と，内部摩擦から生じるもの（変形の項）の二つに大別される。そして，摩擦は相手面の粗さ，摩擦面間に存在する気体，流体や汚れなどによって影響される。さらに摩擦条件である荷重（または接触圧力），摩擦速度，温度などは重要な因子である。もちろん摩擦する材料の機械的性質お

内山 吉隆：金沢大学（〒920-1192 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）。

よび化学的性質も重要である。このように数多くの因子によって支配されるため、相手面の違いや摩擦条件が異なった場合、摩擦を簡単に予測することは容易ではない。しかし、ゴムの摩擦を利用した製品が身近に数多くみられる。例えば自動車や事務機器、電器製品、紡績機械、生産機械などである。

ここでは、ゴムの表面あらし、接触圧力、摩擦速度、温度などの摩擦条件の違い、また、乾燥面、水濡れ面、氷面など相手面がそれぞれ異なるときの天然ゴム (NR)、ブタジエンゴム (BR)、天然ゴムとブタジエンゴムの各種ブレンドゴム (NR/BR Blends) の摩擦特性について述べる。

2. ゴムと各種相手面との摩擦

2.1 ゴムと乾燥ガラスとの摩擦

ゴムは乾燥状態では高い摩擦係数を示す。ここで用いたゴムピン試料は、 $\square 10$ mmの天然ゴム (NR) 60部とブタジエンゴム (BR) 40部のブレンドゴム (NR60/BR40ブレンド、カーボン ISAF 60部、老化防止剤2部、酸化亜鉛3部、ステアリン酸 2部、WAX 1部、オイル 3部、加硫促進剤 1部、硫黄 1.5部) を用いた。ピン試料表面は、4種類の耐水研磨紙 #CC-80, #CC-180, #CC-500, #CC-1500でそれぞれ当たりだしを行い、粗いゴム表面から細かい表面まで4種類を作製した。Figure 1は乾燥ガラスディスクと各種耐水研磨紙で仕上げたゴムピン試料とを接触圧力を変えて、室温 (24°C) で1 cm/sの摩擦速度で摩擦係数を求めたものである¹⁾。仕上げあらしの細かい #CC-1500仕上げ面では、もっとも摩擦係数は大きく、最もあらい #CC-80仕上げ面は最低の摩擦係数を示した。そして、いずれの仕上げ面も接触圧力の増大とともに摩擦係数は低下を示している。

Figure 1 The coefficients of friction for the different four rubber pin specimens are plotted against contact pressure when rubbed against a dry glass disk. The surfaces of the rubber pins are finished using four different abrasive papers of #CC-80, #CC-180, #CC-500 and #CC-1500 respectively: rubber pin, $\square 10$ mm; rubber, NR60/BR40 blend; $\nu = 1.0$ cm/s; $T =$ room temperature.

Figure 2は、#CC-1500の研磨紙で仕上げた $\square 10$ mmピン試料と乾燥ガラスディスクとの摩擦係数と温度との関係を、各接触圧力で示したものである。−10 °Cから24 °Cまでの温度の間で摩擦係数は大きく変化しないことがわかる。

ここで、高分子材料の摩擦係数と、荷重または接触圧力との関係について考えてみることにする。一般に、粗さを持った表面同士が接触する場合、接触面積 A と荷重 W は次のように表される。

$$A = k_1 W^n \quad (1)$$

一般に、 n は単一接触モデルの場合2/3であり、多数点接触モデル²⁾や粗い表面では n は1に近づく。また、摩擦力 F が凝着の項のみを考えればよい場合、次のように示される³⁾。

$$F = As \quad (2)$$

ここで、 A は接触面積であり、 s はせん断強さとする。式 (2) のせん断強さ s は、界面におけるせん断強さである。多くの材料ではこのせん断強さ s は接触圧力 p に比例することが知られている。これは最初、Bridgman⁴⁾によって見出されたが、それ以来、多くの研究者によって確認されている⁵⁾。第一次近似として次のように書ける。

$$s = s_0 + \alpha p \quad (3)$$

ここで、 s_0 、 α はそれぞれの材料固有の値である。したがって凝着の項のみを考えた摩擦係数 μ は、 $W = Ap$ なので次のようになる。

$$\mu = F/W = (s_0 + \alpha p)A/W = s_0/p + \alpha \quad (4)$$

式 (4) は高接触圧力で摩擦係数が低下する一つの説明となる。

高接触圧力での摩擦係数の低下についての別の説明をすることができる。式 (1)、式 (2) より、摩擦係数 μ は式

Figure 2 The relationship between the coefficients of friction μ and temperature T for the rubber pin when rubbed against dry glass disk under various contact pressures: rubber pin, $\square 10$ mm, NR60/BR40 blend; the surface of rubber pin is finished by #CC-1500 abrasive paper; $\nu = 1.0$ cm/s.

(5) のように表せる。

$$\mu = F/W = k_1 s W^n / W = k_1 s W^{n-1} \quad (5)$$

一般には，式 (1) の n は $2/3$ から 1 の間をとるので，摩擦係数 μ は $-1/3$ 乗から 0 乗の間をとる。

2.2 ゴムと水濡れガラスとの摩擦

Figure 3は，水濡れガラスディスク面と研磨紙#CC-1500で仕上げた□10 mmのゴムピン試料とを，1 cm/sから30 cm/sまでの速度範囲で，室温で摩擦したときの，摩擦係数 μ と摩擦速度 v との関係を示したものである。なお，ガラス面上の水の深さは約2 mmであった。接触圧力を3段階に変えて摩擦係数を調べている。いずれの接触圧力においても，摩擦係数は摩擦速度が速くなるのに従い最初はゆるく低下し，その後，急激に低下したのち，より高速ではややゆるい勾配になる傾向を示している。1 cm/s付近の境界潤滑条件から，5 cm/s付近では混合潤滑条件にな

Figure 3 The relationship between the coefficients of friction μ and sliding speed v for the rubber pin when rubbed against water lubricated glass disk under various contact pressures: rubber pin, □ 10 mm, NR60/BR40 blend; $v = 1.0$ cm/s; $T = \text{room temperature}$.

Figure 4 Variation of the coefficients of friction with sliding speed are shown for the rubber pin specimens. Then the rubber specimens are finished using three different abrasive papers, such as #CC-80, #CC-180 and #CC-1500 respectively: the mating surface, water lubricated glass disk; rubber pin, □ 10 mm, NR60/BR40 blend; $p = 0.196$ MPa; $T = \text{room temperature}$.

り，30 cm/s付近では流体潤滑条件または弾性流体潤滑条件になっているものと思われる。

Figure 4は，水濡れガラスディスクと表面仕上げあらしが3種類違うゴムピン試料とを摩擦したときの，摩擦係数 μ と摩擦速度 v の関係を示したものである。1 cm/sの速度ではゴム試料の仕上げ粗さが最も小さな#CC-1500仕上げのものが摩擦係数は最も大きく，最も粗い#CC-80仕上げのゴム試料では最も低い摩擦係数を示した。1 cm/sの低速では境界潤滑条件と考えられ，水膜があってもゴム表面粗さが小さな#CC-1500仕上げのものほど固体接触する面積が大きく，高摩擦係数を生じたと考えられる。10 cm/sから30 cm/sの高速域では混合潤滑条件となり，急激に摩擦係数は低下し，30 cm/sの速度では表面あらしの違う3種類のゴム試料のうち#CC-1500仕上げのものは最も低い摩擦係数を示した。最もゴム試料面の粗い#CC-80仕上げの面の摩擦係数は20 cm/sまで境界潤滑条件を維持し，30 cm/sで摩擦係数はやや低下し，混合潤滑条件に移行しようとしている。Figure 4に示したゴム試料の中では中間の粗さを示す#CC-180仕上げのゴム面では，#CC-1500と#CC-80の中間的な摩擦特性を示した。

水があるときのゴムの摩擦は，摩擦速度の増大とともに高い動圧が発生するが，Figure 4に示すように粗い表面ほど水膜を破り固体接触を維持でき，そのためにより高速でも高摩擦係数を示したと考えられる。

2.3 ゴムと氷との摩擦

Figure 5は，研磨紙#CC-1500で仕上げた□10 mmゴムピンと氷表面とを接触圧力を変化させて， -5°C で摩擦したときの摩擦係数 μ と摩擦速度 v との関係を示したものである。1 cm/sから10 cm/sに摩擦速度が増大すると，いずれの接触圧力においても，わずかに摩擦係数が減少するだけであった。10 cm/sから20 cm/sに摩擦速度が速くな

Figure 5 The variation of the coefficients of friction μ for the rubber pin specimen with sliding speed v , when rubbed against ice under various contact pressures: rubber pin specimen, □ 10 mm, NR60/BR40 blend; the surface of rubber pin specimen is finished by abrasive paper #CC-1500; $T = -5^\circ\text{C}$.

ると、0.196 MPaの低接触圧力の場合を除き、摩擦係数は急激に低下し、25 cm/sから30 cm/sの摩擦速度ではそれぞれ一定値を示す傾向がある。10 cm/sから20 cm/sにかけての急激な摩擦係数の低下は、摩擦熱によって氷表面が融け、水膜による潤滑のためと考えられる。接触圧力0.196 MPaの場合、1 cm/sから30 cm/sにかけ、わずかに摩擦係数が低下するだけであったのは、摩擦によって作られる水膜がごくわずかであったためと考えられる。

面積一定のゴムピンに荷重を低荷重から高荷重に変化させて相手面と摩擦する場合、低接触圧力から高接触圧力になると摩擦係数が低下する傾向を示す。そのため、一定の荷重で大きな摩擦力を得るのに、ゴムピンの断面積を増やし、見かけの接触圧力を低下させることは有効である。

3. 天然ゴム、ブタジエンゴムおよびそれらのブレンドゴムと氷との摩擦

3.1 ゴムと氷との摩擦現象

冬用タイヤは、雪や氷で覆われた路面とのすべり摩擦係数の高い方が望ましい。スタッドレスタイヤにおいて、ピンによる摩擦の掘り起しの項は利用できず、摩擦の原因はもっぱら凝着の項に頼らざるを得ない。氷の上に存在すると考えられる擬似水膜の影響を少なくし、ゴムと氷が固体

接触して境界潤滑状態で摩擦を高めるため、タイヤ表面にすべり方向と直角に作られた溝によるエッチ効果によって水を排出する工夫が行なわれている。ゴムと氷との基礎的摩擦挙動として、摩擦に及ぼす氷の温度およびゴム材質の影響について明らかにする必要があると思われる。

氷の摩擦は温度に大きく依存することが対馬^{6,7)}によって知られている。ゴムと氷の摩擦については、Robertsら^{8,9,10)}、SchallamachとGroschら¹¹⁾によって報告されている。0℃付近の氷の摩擦係数は低く、より低温になるほど摩擦係数は大きくなる。0℃付近での摩擦係数の低下は、氷表面に作られる擬似水膜によるものと思われ、摩擦発熱する高摩擦速度ではその低下は著しいものと思われる。

ここでは、発熱が比較的少ない低速度において、天然ゴム (NR) とブタジエンゴム (BR) を各割合でブレンドした各種ゴムと氷との摩擦特性を各温度で調べた。天然ゴム (NR) にさらにガラス転移点の低いブタジエンゴム (BR) をブレンドしたとき、より低温においても弾性を失わず、摩擦係数を維持することが期待される。これらNRにBRを各割合でブレンドしたゴム試料を用い、氷とすべらせたときの、摩擦係数に及ぼす接触圧力の影響についても調べた。摩擦の凝着の項は接触面積と界面でのせん断強さとの積によるものと考えられる。これらの各種NR-BRブレ

Figure 6 (a) (b) (c) (d) The relationship of the coefficients of friction μ and temperature T for the $\phi 12$ mm rubber pin specimens of NR/BR blends at various applied loads W , when rubbed against ice disk: rubber specimen, (a) NR100/BR0, (b) NR80/BR20, (c) NR60/BR40, (d) NR0/BR100; $v = 1.0$ cm/s.

ドゴムの氷と摩擦したときの接触面におけるせん断強さを求め、また、それらの接触圧力との関係についても検討を行った。

3.2 各種NR/BRブレンドゴムの摩擦係数と温度との関係

実験はピン—ディスク型の摩擦試験機を用い、接触部分の直径が12 mmの円形ゴムピンと、ガラスディスク上にはった厚さ約5 mmの氷とを摩擦する形式である。なお、このときNR、BRおよび各種NR/BRブレンドゴム試料について氷との摩擦を調べたものである。NRだけのNR100/BR0とBRを20部ずつ増したNR80/BR20、NR60/BR40、NR40/BR60、NR20/BR80およびBRだけのNR0/BR100までを調べた。氷は純水より作製し、なるべく気泡のないようにした。実験装置の氷を張ったガラスディスク板下部より接触面の観察が可能であり、シネカメラで撮影できる。また、氷表面は実験前に#CC-1500で研磨を行なったものである。摩擦装置は保温箱に入れてあり、冷却空気により−20℃まで冷やすことができた。なお、摩擦実験は1 cm/sで−20℃から0℃の温度、また、荷重24.5から112.7 Nの間で行なっている。

氷との摩擦を摩擦速度1 cm/sで−20℃から0℃の温度

で、また、荷重24.5 Nから112.7 N（接触圧力 0.217 MPaから0.996 MPa）の間で行なった。NR100/BR0、NR80/BR20、NR60/BR40、NR40/BR60、NR20/BR80の各ゴム試料を各荷重 W で摩擦したときの温度 T と摩擦係数 μ の関係をFigure 6 (a) (b) (c) (d) にまとめて示す¹²⁾。

−15℃以下では摩擦係数は高くほぼ一定であるが、それより高い−10℃の温度では急激な低下を示し、調べた0℃では最も低い値を示している。NRだけのときは最も摩擦係数が高く、NRにBRをブレンドする割合が増すとともに低下し、BRだけでは最低であった。また、高荷重ほど摩擦係数は低下する傾向を示した。

3.3 天然ゴムとブタジエンゴムのブレンド割合と摩擦係数の関係

Figure 7 (a) (b) は、−20℃と−5℃におけるNRとBRのブレンド量と摩擦係数の関係に書きなおしたものである。そして、BRのブレンド量が多いほど摩擦係数が低下することがわかる。しかし、−10℃以上ではBRのブレンド量が増加してもあまり摩擦係数が変化せず、比較的に低い。その特徴的な例として−5℃の結果をFigure 7 (b) に示す。ここでわかることは、氷上に作られる擬似水膜による潤滑膜によってゴム表面が覆われて摩擦係数が下がり、ブレンドゴム量の差がみられなかったものと考えられる。

3.4 摩擦界面でのせん断強さと接触圧力の関係

摩擦力を直接観察から求めた接触面積で除した値、すなわち、接触部におけるせん断強さ s が求められる。Figure 8は、−20℃におけるせん断強さ s と接触圧力 p との関係を示したものである。せん断強さは接触圧力 p に比例し、 $s = s_0 + \alpha p$ の関係式で表わされる（ s_0 と α は定数であり、

Figure 7 (a) (b) The coefficients of friction μ are plotted against the composition of NR/BR blends under various applied loads. The $\phi 12$ mm rubber pin is rubbed against ice disk under 1.0 cm/s: (a) $T = -20^\circ\text{C}$, (b) $T = -5^\circ\text{C}$.

Figure 8 The shear strengths at contact area are plotted against contact pressure p of the pin of various NR/BR blends. The shear strengths are shown as the equation, $s = s_0 + \alpha p$. The values of α and s_0 are also indicated in the figure.

各値はFigure 8中に示してある). -20°C の低温では, せん断強さは接触圧力の増大とともに大きくなり, また, NRへのBRのブレンド量が増すと, せん断強さは低下する.

しかし, 別の実験で求めた -5°C の結果では, 接触圧力の増大による摩擦係数の増加はわずかであり, また, ブレンドの影響も小さくなる. これは, 氷上の擬似水膜による潤滑効果によるものと考えられる.

4. お わ り に

以上, 天然ゴム, ブタジエンゴム, 天然ゴムとブタジエンゴムのブレンドゴムについて, それらの摩擦係数に及ぼす表面あらさの影響, そして, 摩擦相手面が乾燥面, 水潤滑面および氷面の場合などについて述べた. また, 摩擦条件である接触圧力, 温度, 摩擦速度との関係について, 説明を行った. ゴムの摩擦は, 相手面や摩擦条件によって摩擦係数は複雑に変化するが, 少しでも筋道を立てて摩擦機構を理解することが必要と思われる.

トライボロジーの分野は, それぞれ広い分野の物理, 化学の知識を必要とし, また, 複雑な現象を含んでいる. 実用上は, 実験的にその摩擦特性を調べ, 再現することができるが, その理論的解明は困難を伴うことが多い. それは, 影響する因子が多く, それらが複雑に影響しあうからである. そこで, 何が主因子かを見極め, それに着目して

解析することが求められる.

References

- 1) Uchiyama, Y.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **65**, 312 (1992)
- 2) Archard, J. F.: *J. Appl. Phys.*, **24**, 981 (1953)
- 3) Bowden, F. P.; Tabor, D.; Soda, N., Trans: "Kotai no Masatsu to Junkatsu", Maruzen, Tokyo, p.88 (1962)
- 4) Bridgman, P. W.: *Rev. Mod. Phys.*, **18**, 1 (1946)
- 5) Tabor, D.: *J. Lubric. Techn.-T. ASME*, **103**, 169 (1981)
- 6) Tsushima, K.: *Junkatsu*, **21**, 287 (1976)
- 7) Tsushima, K.: *Junkatsu*, **25**, 450 (1980)
- 8) Roberts, A. D.; Richardson, J. C.: *Wear*, **67**, 55 (1981)
- 9) Roberts, A. D.; Lane, J. D.: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **16**, 275 (1983)
- 10) Muhr, A. H.; Roberts, A. D.: "Natural Rubber Science and Technology" (Roberts, A. D., Ed.), Oxford University Press, Oxford, p.773 (1988)
- 11) Schallamach, A.; Grosch, K.: "Tire Friction and Wear, Mechanics of Pneumatic Tires" (Clark, S. K., Ed.), U. S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D. C., p.365 (1981)
- 12) Uchiyama, Y.; Kanai, T.: *Seppyau*, **57**, 384 (1995)
- 13) Uchiyama, Y.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **61**, 315 (1988)

日本語表記参考文献

- 1) 内山吉隆: 日本ゴム協会誌, **65**, 312 (1992)
- 3) 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)
- 6) 対馬勝年: 潤滑, **21**, 287 (1976)
- 7) 対馬勝年: 潤滑, **25**, 450 (1980)
- 12) 内山吉隆, 金井隆男: 雪氷, **57**, 384 (1995)
- 13) 内山吉隆: 日本ゴム協会誌, **61**, 315 (1988)

*

*

*

*

*