タイヤの摩擦と転がり抵抗

網 野 直 也

Friction and Rolling Resistance of Tires

Naoya AMINO (Yokohama Rubber Co., Ltd., 2-1 Oiwake, Hiratsuka, Kanagawa 254-8601, Japan) amino@hpt.yrc.co.jp

Rolling resistance of tires is a highly important property for tire development as well as tire traction. The rolling resistance is mainly generated by energy loss of tire components during tire deformation, because tires transform their shape from round to flat at their contact patch. It is known that to reduce the rolling resistance, $\tan \delta$ of rubber around 10 Hz should be decreased. In general, silica filled rubber shows lower $\tan \delta$ around 10 Hz compared to carbon black filled rubber. On the other hand, frictional force of rubber consists of two main terms. One is hysteresis term and the other is adhesion term. It is reported that silica filled rubber shows higher frictional force in comparison with carbon black filled rubber, because of higher adhesion component of friction. Therefore, silica filled rubber can improve not only rolling resistance but also traction of tires.

X-ray and Neutron scattering results show that dispersed structure of silica agglomerates in rubber is different from that of carbon black agglomerates. It is considered that the good performance of silica filled rubber in rolling resistance and traction correlates to the silica dispersed structure in rubber.

(Received on November 25, 2014)

Key Words : Friction, Tribology, Rolling Resistance, X-ray Scattering, Neutron Scattering, Hysteresis Term of Friction, Adhesion Term of Friction.

1. は じ め に

昨年、中国で開催されたIRC2014 (Beijing) に参加した。そこでは、環境に関わる発表が非常に多いことに驚かされた。本号は、トライボロジーの特集号とのことだが、環境に関わる側面を無視して通ることはできないように感じる。タイヤの開発において、摩擦力の高いゴムを製造することは大きな命題の一つであるが、摩擦力を向上させるとつれてタイヤの転がり抵抗が増大する傾向にある。タイヤは丸いのでスムーズに転がっているように見えるが、実際はそうではない。手で転がしたタイヤがやがて止まってしまうのは、回転を妨げる抵抗力が生じているからである。これが転がり抵抗である。すなわち、自動車は、タイヤの転がり抵抗のために余計にガソリンを消費している。タイヤの転がり抵抗を低減させれば、ガソリン消費量が減るので石油資源の枯渇防止に貢献できるし、ガソリンの燃焼によって発生する温室効果ガス (GHG: Greenhouse Gas) の排出量削減にもつながる。タイヤのライフタイムにおける

GHG排出量の85%以上が転がり抵抗に起因¹⁾するものであり、転がり抵抗の低減はタイヤの開発において最も重要な環境対策である。

ここでは、タイヤが転がり抵抗を生じるメカニズムについて述べた後に、転がり抵抗の低減と摩擦力の向上を両立する手法について紹介する。

2. タイヤの転がり抵抗発現機構

タイヤが転がり抵抗を生じる要因は、主として以下の3つがある。

(1) 変形にともなうタイヤ構成部材のエネルギー損失

網野 直也；横浜ゴム(株)タイヤ材料開発本部 (〒254-8601 神奈川県平塚市追分2-1)。研究室長，工学博士。2001年，金沢大学大学院自然科学研究科 博士課程卒業。1993年，横浜ゴム(株)入社，現在に至る。専門は，ゴムのトライボロジー。日本ゴム協会 関東支部 副支部長。

Figure 1 Schematic model of resistance to a rotating tire²⁾.

(2) タイヤ-路面間の摩擦による抵抗

(3) タイヤの空気抵抗

タイヤは円筒状であるが、Figure 1²⁾ に示すように路面と接地する部分は平らに変形する。平らなものを転がすには、それなりのエネルギーが必要である。ただし、タイヤには弾性回復力があり、平らな状態から元の円筒状に戻ろうとする力が生じる。この回復力が大きければ転がり抵抗は小さくなる。逆に弾性回復できずにエネルギーを損失すれば、転がり抵抗が大きくなる。このエネルギー損失は、タイヤ構成部材のヒステリシスロスに依存している。(1)の変形にともなうタイヤ構成部材のエネルギー損失に起因する抵抗は、タイヤの全転がり抵抗の90%程度を占める²⁾。

変形にともなうタイヤ構成部材のエネルギー損失を低減するには、タイヤの接地に伴う変形量を小さくすることや、変形する部材の体積を小さくすること、エネルギー損失の少ない材料を使用すること、などの方法がある。例えば、タイヤの空気圧を上げれば、タイヤの変形が小さくなって転がり抵抗が減少する。また、タイヤの路面（トレッド）のゴムを薄くすれば、変形するゴムの体積が小さくなって転がり抵抗が低減する。ただし、空気圧を上げると、タイ

ヤの路面からの衝撃吸収力が低下するために、車両の乗り心地が硬く感じられるようになる。トレッドのゴムを薄くすれば、トレッドに刻まれる溝の深さを浅くせざるを得ないため、摩耗寿命に影響を与える。そこで、エネルギー損失の少ない材料、特にゴム材料の開発が精力的に行われている。このエネルギー損失は、ゴムの損失正接 $\tan \delta$ と関連することが報告³⁾ されている。タイヤの変形速度は、タイヤの回転周波数と同程度であり、例えば周長2 mのタイヤが80 km/hの速度で走行した場合には約11 Hzとなる。ただし厳密にいうと、この変形の波形は、タイヤが接地している間のみに生じるパルス波と考えられる。そこで近年では、ゴム試験片にパルス波の変形を与えてその応答を測定する手法も提案されており、従来のサイン波による測定よりも実際のタイヤの転がり抵抗との相関が高いことが報告⁴⁾ されている。

3. ゴムの摩擦機構

タイヤが走行するアスファルトやコンクリートの路面は、無数の突起を持っている。ゴムは、これらの突起に比べるとはるかに軟らかいため、路面に押付けられると突起を包み込むように変形する。この状態でゴムをすべらせるには、進行方向前方の突起を押し退ける力が必要となる。ゴムが完全な弾性体であれば、突起を通過する時に速やかに弾性回復して突起をあと押しするので、突起を押し退ける抵抗力は生じないと考えられる。しかし、ゴムは粘弾性体であるから、速やかに弾性回復できずにエネルギーを損失し抵抗力が発生する。これを、摩擦のヒステリシスの項と呼んでいる。ゴムが突起によって周期的に変形する際のエネルギー損失は、粘弾性の理論から計算することが可能である。例えばMoore⁵⁾ によれば、Figure 2⁵⁾ に示すように、ゴムの変形にVoigtモデルを仮定し、等間隔に並ん

Figure 2 Schematic model of rubber deformation; (a) a continuous array of equally-spaced cylinders rolling at forward velocity V while periodically indenting an elastomeric layer, (b) the array of rollers can be approximated by a lubricated sinusoidal track, (c) the elastomeric material is represented as a complex Voigt element⁵⁾.

だ円柱がゴム上を転がる時の摩擦のヒステリシスの項 F_H は式 (1) で表される。

$$F_H = c\delta_0^2 E' \tan \delta \quad (1)$$

ここで、 c は定数、 δ_0 は変形の振幅、 E' は貯蔵弾性率である。さらに、式 (1) の変形の振幅 δ_0 に Hertz の接触理論⁶⁾ を適用した場合は、以下のように書ける⁷⁾。

$$F_H = kE' \frac{1}{3} \tan \delta \quad (2)$$

ここで、 k は定数である。式 (1) あるいは (2) によれば、摩擦のヒステリシスの項は、ゴムの $\tan \delta$ 増大に伴って増加する。路面上をタイヤがすべる時に、路面の突起によってゴムが変形する周波数は、 $10^3 \sim 10^6$ Hz と言われている⁸⁾。したがって、摩擦のヒステリシスの項を向上させるには $10^3 \sim 10^6$ Hz の $\tan \delta$ を増加させればよい。転がり抵抗に影響を与えるのは、前述の通り 10 Hz 近辺の $\tan \delta$ であるから、10 Hz 近辺の $\tan \delta$ を維持しながら、 $10^3 \sim 10^6$ Hz の $\tan \delta$ を増加させれば、転がり抵抗と摩擦力のある程度両立することが可能である。

ゴムの摩擦には、摩擦のヒステリシスの項の他に、凝着の項も寄与していることが報告されている^{7, 9, 10)}。摩擦の凝着の項は、摩擦する固体同士の実接触部に生じる凝着力に起因した摩擦力である。Bowden と Tabor によって提唱

された凝着理論¹¹⁾ によると、摩擦面同士が滑る場合には、固体同士の実接触によって生じた凝着部分をせん断することが必要であり、このせん断力 F_A が摩擦力となる。したがって、摩擦の凝着の項 F_A は、真実接触面積 A と弱い方の材料の降伏応力 s によって式 (3) で表される。

$$F_A = A \cdot s \quad (3)$$

濡れた路面上では、摩擦の凝着の項の寄与が大きく低下するが、自動車に装着される ABS がタイヤと路面のすべり速度を適切に制御するために、ある程度の凝着の項の寄与があると考えられている¹²⁾。既報⁷⁾ によれば、カーボンブラックを配合したゴムよりも、シリカを配合したゴムの方が摩擦の凝着の項が大きく、高い摩擦力を示すことが報告されている。この関係は、濡れ面での摩擦においても、特に滑り速度が低い領域で観測される¹³⁾。Figure 3¹³⁾ に、シリカあるいはカーボンブラックを配合したスチレンブタジエンゴム (SBR) と #250 のステンレス鋼線製綾織金網とを摩擦させたときの摩擦の凝着の項と滑り速度の関係を示した。ここでは、測定された摩擦力から式 (2) によって算出された摩擦のヒステリシスの項を差し引いた値を摩擦の凝着の項としている。Figure 3 上図は乾燥面で測定した結果であり、Figure 3 下図は金網を動粘度が $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイルで濡らした状態で測定した結果である。乾燥面、濡れ面のどちらの結果も同じ SBR においては、シリカ配合 SBR の方がカーボン配合 SBR よりも高い摩擦の凝着の項を示している。また、乾燥面と濡れ面では、摩擦の凝着の項の滑り速度依存性に違いがみられる。濡れ面で摩擦させた場合には、滑り速度が大きくなるとシリカ配合 SBR の優位性が低下している。すなわち、濡れ面においても摩擦の凝着の項が観測されるものの、滑り速度が大きくなるとその寄与は減少することを示している。

また、一般的にシリカを配合したゴムは、カーボンブラックを配合したゴムよりも 10 Hz 近辺の $\tan \delta$ が低くなる。Figure 4 に、カーボンブラック配合 SBR とシリカ配合 SBR の $\tan \delta$ の周波数依存性の一例を示した。したがって、

Figure 3 top: The adhesion components of friction F_{Adry} rubbed against the dry surface as a function of frequency or sliding speed. bottom: The adhesion component of friction rubbed against a wet surface¹³⁾.

Figure 4 Comparison of frequency dependence of $\tan \delta$ between carbon black filled SBR and silica filled SBR.

シリカ配合ゴムは、摩擦力を向上しつつ転がり抵抗を低減することが可能であり、現在の多くの低燃費タイヤにシリカを配合したトレッドゴムが利用されている。

4. カーボンブラック配合ゴムとシリカ配合ゴムの内部構造

こうしたカーボンブラック配合ゴムとシリカ配合ゴムの特性の違いは、カーボンブラックあるいはシリカのゴム中での配置の違いに依存していると考えられる。ここでは、小角X線散乱法 (SAXS)、超小角X線散乱法 (USAXS)、超小角中性子散乱法 (USANS) を用いて、ゴム中に分散したカーボンブラックおよびシリカの散乱強度を測定した結果を紹介する¹⁴⁻¹⁷⁾。

4.1 SAXS, USAXS, USANSの測定方法

SAXS, USAXS, USANSを組合せることによって、波数 q の範囲で 0.0003 から 1.5 nm^{-1} 、すなわち、 $4 \text{ nm} \sim 20 \mu\text{m}$ の非常に広範囲なスケールの散乱が得られており、カーボンブラックあるいはシリカの表面から凝集構造の情報までを得ることができる。ここで、波数 q は、X線の波長 λ 、散乱角 θ によって式 (4) で表される。

$$q = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \sin \left[\frac{\theta}{2} \right] \quad (4)$$

ここでは、SAXS, USAXSのX線発生装置として、マックスサイエンス社製のM18XHF-SRA (ターゲット: Cu) を使用した。USANSは、日本原子力研究所のPNO¹⁸⁾において実施した。USAXS, USANSの測定には、Bonse-Hartカメラ^{19, 20)}を利用した。Bonse-Hartカメラでは、まずX線をゲルマニウムやシリコンなどの完全単結晶に入射させ、X線を結晶面で何度か反射させることによって高い単色性と平行性をもったX線束とし、これを試料に入射する。さらに試料で散乱されたX線を再びアナライザー単結晶に入射し、厳密に結晶面内の散乱条件を満たす散乱X線だけを検出する。このアナライザー単結晶を順次回転させながら散乱X線を分光して観測する。これによって、ダイレクトビーム近傍の微小角の散乱X線ある

いは中性子線の検出を可能としている。SAXSでは、グラフィートモノクロメーターを使用し、試料から検出器までの距離が 2.0 m のカメラを用いた。散乱曲線は、空気散乱、吸収およびスリットの幅による影響を補正して示した。

ゴム試料としては、ポリイソプレンゴム (IR) に、N339カーボンブラック (一次粒子の半径 13 nm) を体積分率で 20% となるように配合し、パーオキサイド架橋したカーボンブラック配合IRと、同じくIRに、シリカ (Nipsil AQ, 東ソーシリカ製、一次粒子の半径 8 nm) を体積分率で 20% となるように配合し、パーオキサイド架橋したシリカ配合IRを用いた。このシリカ配合IRには、シランカップリング剤としてBis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfideをシリカ配合量の $8 \text{ wt}\%$ 配合してある。

4.2 SAXS, USAXS, USANSの散乱曲線

Figure 5 (a), (b) にSAXS, USAXS, USANSの測定結果を合わせてプロットした。また、それぞれのゴム試料の透過型電子顕微鏡 (TEM) 写真をFigure 6 (a), (b) に示した。カーボンブラック配合IRでは、 $q = 0.2 \text{ nm}^{-1}$ よりも広角側にカーボンブラックの表面凹凸を反映した直線領域が観測され、その勾配が -3.4 であることから、カーボンブラック表面には、表面フラクタル次元が 2.6 の凹凸が存在すると考えられる。この直線領域の小角側には、カーボンブラックの形状に起因すると考えられるショルダー (Figure 5 (a) 中の矢印a) が見られるが、このショルダーの位置は、カーボンブラックの一次粒子が一様に分布している時の散乱曲線よりも小角側にあった。Figure 6のTEM写真においてカーボンブラックの粒子が連なって存在していることから、このショルダー部は複数の一次粒子の集合体を反映していると考えられる。その小角側には勾配が -2.3 の直線領域が見られるので、カーボンブラック粒子の集合体が基本単位となってフラクタル的な構造を形成していると考えられ、そのマスフラクタル次元は -2.3 である。Figure 5 (a) では、このマスフラクタルの上限が見られないので、アグロメレートはこの実験の観測範囲

Figure 5 Combined USANS, USAXS, and SAXS profiles for (a) carbon black filled IR and (b) silica filled IR.

Figure 6 TEM photographs for (a) carbon black filled IR and (b) silica filled IR.

よりも大きい, すなわち $20 \mu\text{m}$ 以上の大きさであると考えられる. さらに, マスフラクタルの基本単位であるカーボンブラック集合体の形状を回転楕円体と仮定し, マスフラクタルの指数則と基本単位の形状因子 $F'(q)$ を表した式 (5), (6) によってフィッティングしたところ, 実測の散乱曲線と良く一致した.

$$I(q) \cong A \exp\left(-R_g^2 q^2 / 3\right) q^{-D_m} + B F'(q) \quad (5)$$

$$F'(q) = \int_0^\pi \left(4\pi w R_d^3 / 3\right)^2 \Phi^2(U) \sin \beta d\beta \quad (6)$$

ここで, A , B は定数, R_g はカーボンブラック集合体の回転半径, D_m はマスフラクタル次元, R_d は回転楕円体の短軸の長さ, $w R_d$ は長軸の長さであり, $\Phi(U)$ および U は以下の式で表される.

$$\Phi(U) = \frac{3}{U^3} (\sin U - U \cos U) \quad (7)$$

$$U = q R_d [\sin^2 \beta + w^2 \cos^2 \beta]^{1/2} \quad (8)$$

ここで, β は基準軸と回転軸のなす角度である. この回転楕円体の体積は, カーボンブラックの1次粒子37個分に相当し, 長軸は短軸の4倍程度であった¹⁴⁾.

一方, シリカ配合IRでは, $q = 0.5 \text{ nm}^{-1}$ 付近 (Figure 5 (b) 中の矢印b) にシリカの基本粒子に由来すると考えられるピークがみられ, このピークの広角側には, 傾きがほぼ-4の直線領域が観測されている. この直線領域はシリカの表面性状に由来するものと考えられ, その傾きが-4であることから, シリカ粒子は, ほぼ平滑な表面を持った球体であることが示唆される. また, q が 0.04 から 0.2 nm^{-1} の領域に, 傾き-2.2の直線領域が観測された. これは, シリカ粒子の集合体すなわちシリカ凝集体がフラクタル的な自己相似構造を形成していることを示す. しかし, このフラクタル領域は q が 0.01 の辺りに上限があるため, シリカのアグロメレートは数百nmの大きさしかないと考えられる. さらに小角側には再び勾配-4の直線が観測されている. これは, IRマトリックスとの間に明確な界面

をもった大きな構造が存在しているものと推察される. いずれにせよ, シリカの場合は, カーボンブラックほどの大きな凝集体の発達がなく, 数百nmの凝集体が分布した構造をとっていると考えられる.

4.3 カーボンブラック配合ゴムとシリカ配合ゴムの内部構造モデル

上述の散乱曲線から, IRに配合されたカーボンブラック粒子の集合体は回転楕円体形状であり, これを基本単位として少なくとも $20 \mu\text{m}$ 以上の大きさのフラクタル的な構造を形成していると考えられる. カーボンブラックはネットワーク構造を形成するとの報告²¹⁾もあることから, ゴム中のカーボンブラックはFigure 7 (a) のような構造を形成していると考えられる. 一方, シリカ配合IRにおいても, シリカ粒子は集合体を形成し, その集合体がフラクタル的な構造を形成するものの, そのフラクタル的な構造は, 高々数百 nm 程度の大きさである. したがって, シリカ配合IRはFigure 7 (b) のような構造をしているものと考えられる. Figure 7 (a) (b) と類似の構造をモデルとして有限要素法を用いて微小変形時のモジュラスを算出すると, シリカ配合ゴムモデルの方が低モジュラスとなった²²⁾. すなわち, ゴム中での配置が異なることにより, シリカ配合ゴムの方が変形に対して追従しやすく, 特に接地面積が増加することによって摩擦の凝着の項が増加するものと考えられる. また, 変形中にシリカ集合体同士の摩擦などが生じにくいためにヒステリシスロスが低減するものと推察される.

5. お わ り に

これからのタイヤ開発においては, 転がり抵抗の更なる低減が求められている. 一方で, 摩擦力を維持あるいは向上させる必要があり, その一つの打ち手としてシリカ配合ゴムがある. これまでの研究の結果から, シリカのゴム中での配置は, カーボンブラックとは異なっており, それによって, ヒステリシスロス低減と摩擦力向上を両立できているものと推察された.

トライボロジーにおいては, 接地の状態や表面, 界面の状態を調べながら摩擦力と対比されることはよく行われているが, ゴムのようには摩擦中に大きく変形する材料の場合には, 内部構造の調査, 解析も重要になってくると考えられる.

References

- 1) "Tyre no LCCO₂ santei Guideline", Japan Automobile Tyre Manufacturers Association, <http://www.jatma.or.jp/environment/pdf/lcco2guideline.pdf>
- 2) <http://www.jatma.or.jp/labeling/faq01.html>
- 3) Fujimaki, T.; Ogawa, M.; Yamaguchi, S.; Tomita, S.; Okuyama, M.: Proceedings of the International Rubber Conference, Kyoto

Figure 7 Schematic models for dispersed structure of (a) carbon black and (b) silica in rubber.

- Japan, p.184 (1985)
- 4) Wrana, C.; Eisele, U.; Kelbch, S.: *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, **53**, 126 (2000)
- 5) Moore, D. F.: "Viscoelastic Machine Elements", Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, p.124 (1993)
- 6) Okamoto, J.; Nakayama, K.; Sato, M.: "Tribology Nyumon - Masatsu, Mamou, Junkatsu no kiso", Saiwaishobo, Tokyo, p.138 (1990)
- 7) Amino, N.; Uchiyama, Y.; Iwai, T.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **74**, 110 (2001)
- 8) Rahalkar, R. R.: *Rubber Chem. Technol.*, **62**, 246 (1989)
- 9) Grosch, K. A.: *Rubber Chem. Technol.*, **37**, 386 (1964)
- 10) Ludema, K. C.; Tabor, D.: *Wear*, **9**, 329 (1966)
- 11) Yamamoto, Y.; Kamata, S.: "Tribology", Rikougakusha, Tokyo, p.41 (1998)
- 12) Amino, N.: *Gekkan Tribology*, No.230, p.41 (2006)
- 13) Amino, N.; Uchiyama, Y.; Iwai, T.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **74**, 443 (2001)
- 14) Koga, T.; Takenaka, M.; Aizawa, K.; Nakamura, M.; Hashimoto, T.: *Langmuir*, **21**, 11409 (2005)
- 15) Koga, T.; Hashimoto, T.; Takenaka, M.; Aizawa, K.; Amino, N.; Nakamura, M.; Yamaguchi, D.; Koizumi, S.: *Macromolecules*, **41**, 453 (2008)
- 16) Amino, N.: "Saishin Filler Gijyutsu Zenshu", Technical Information Institute Co., Ltd, Tokyo, Chapter 4, Section 2 (2008)
- 17) Asaba, H.; Amino, N.; Mori, T.: *Chemical Engineering*, **59**, 556 (2014)
- 18) Aizawa, K.; Tomimitsu, H.: *Physica B*, **213**, 884 (1995)
- 19) Bonse, U.; Hart, M.: *M. Appl. Phys. Lett.*, **7**, 238 (1965)

- 20) Koga, T.; Hart, M.; Hashimoto, T.: *J. Appl. Cryst.*, **29**, 318 (1996)
- 21) Ishikawa, Y.; Yamaguchi, Y.; Amino, N.; Ahagon, A.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **69**, 716 (1996)
- 22) Kabe, K.; Suzuki, N.; Miyashita, N.: *Nippon Gomu Kyokai 2002nen Nenjitaikai Youshishu*, p.79 (2002)

日本語標記参考文献

- 1) "タイヤのLLCO₂算出ガイドライン", 一般社団法人 日本自動車タイヤ協会, <http://www.jatma.or.jp/environment/pdf/lcco2guideline.pdf>
- 6) 岡本純三, 中山景次, 佐藤昌夫: トライボロジー入門 - 摩擦, 摩耗, 潤滑の基礎, 幸書房, 東京 p.138 (1990)
- 7) 網野直也, 内山吉隆, 岩井智昭: 日本ゴム協会誌, **74**, 110 (2001)
- 11) 山本雄二, 兼田楨宏: トライボロジー, 理工学社, 東京, p.41 (1998)
- 12) 網野直也: 月刊トライボロジー 2006年10月号, No. 230, p.41 (2006)
- 13) 網野直也, 内山吉隆, 岩井智昭: 日本ゴム協会誌, **74**, 443 (2001)
- 16) 網野直也: "最新フィラー技術全集", 技術情報協会, 東京, 第4章 第2節 (2008)
- 17) 浅羽英樹, 網野直也, 森智郎: ケミカルエンジニアリング, **59**, 556 (2014)
- 21) 石川泰弘, 山口洋一, 網野直也, 阿波根朝浩: 日本ゴム協会誌, **69**, 716 (1996)
- 22) 加部和幸, 鈴木亘男, 宮下直士: 日本ゴム協会2002年年次大会要旨集, p.79 (2002)

*

*

*

*

*