三橋 健八・広木 栄三・池田 俊之・原田 昌明

**COMPARISON OF THE FRICTIONAL PROPERTY BETWEEN
STUDLESS-TIRES ON ICY ROAD AND INCLINED ANGLE OF
SMALL BLOCK**

Kenhachi MITSUHASHI(Tire Materials Development Department, The Yokohama Rubber Co. Ltd, 2-1 Oiwake, Hiratsuka, Kanagawa 254, JAPAN), Eizou HIROKI(Material Division, Hokkaido National Industrial Research Institute, 2-17 Tsukisamu-higasi, Toyohira-ku, Sapporo-shi, Hokkaido 004, JAPAN), Toshiyuki IKEDA(Advanced Tire Development Department, The Yokohama Rubber Co. Ltd, 2-1 Oiwake, Hiratsuka, Kanagawa 254, JAPAN), and Masaaki HARADA(Tire Materials Development Lab. Tire Technical Division, The Yokohama Rubber Co. Ltd, 2-1 Oiwake, Hiratsuka, Kanagawa 254, JAPAN)

In order to evaluate the frictional property of studless tires on icy road, we have studied the mechanism of friction.

In a tire having wide type pattern with sipe, the maximum friction appeared at specific rubber hardness. The friction coefficient was found to be a function of Θ :

$$\mu = A_0 + A_1\Theta + A_2\Theta^2 + A_3\Theta^3$$

$$\Theta = C_0 + C_1 \cdot \text{Log}(4/E \cdot a)(h/b)^3$$

μ : friction coefficient Θ : incline angle of small block

E : elastic modulus a : width of small block

b : thickness between sipes h : depth of small block

Using the above formula, a parameter analysis on how the changes in dimensions of a small tire block affects the value of the friction coefficient was conducted with a computer. The value of the friction coefficient peaked at about the rubber hardness 47 in a small block (similar to an actual tire) having wide type pattern toward circumference but no peak appeared in a small block having long type pattern toward circumference. This result is nearly equal to that of the tire field test and verifies the effectiveness of the formula obtained.

Using the values such as field test conditions and data obtained by field test, a two dimensional non-linear contact analysis by finite element method was conducted and, as its result, we could calculate an inclined angle of a small block. The calculation results is consistent with those obtained by the formula.

(Received on July 18, 1997)

Key Word : studless tire, friction coefficient, sipe, block pattern, inclined angle,

†本報を「スタッドレスタイヤの氷路摩擦特性に関する研究
(第2報)」とする。

1. 緒 言

この研究はスタッドレスタイヤの氷路走行時の摩擦現象メカニズム解明を目的としている。前報ではサイプを施さないブロックパターンのみを有するタイヤおよびゴム試験片の氷路摩擦特性に関する結果を報告した¹⁾。本報では、通常使用されているタイヤに合わせてブロックパターンのなかに細かいサイプが施されたタイヤおよびゴム試験片を使用して氷路摩擦特性を評価した。一般に、サイプが施されるとブロックの曲げ剛性に変化が生じ、摩擦係数に複雑な影響を与える²⁾。そこで、サイプ間の小ブロックの倒れ込み角度と実接地面積と摩擦係数の三者の関係より、摩擦係数が最大になる小ブロックの倒れ込み角度を見出し、小ブロックの倒れ込み角度と摩擦係数の関係を記述した式を用いて摩擦係数の最適値に対する因子解析を行った。また、有限要素法を用いて屋外テストコースで走行中の小ブロックの倒れ込み角度を計算し、計算結果が妥当な値であることを確認したので報告する。

2. 実 験

2.1 試 料

実験に使用した試料および加硫条件は前報¹⁾と同じである。

2.2 供試タイヤ

実験に使用した供試タイヤのパターン形状をFig. 1に示す。パターンは縦長、横長の形状を有するブロックにサイプを彫った2種類(サイプ付縦長パターン、サイプ付横長パターン)で、185/65 R 14のタイヤを用い、3種類のゴム配合内容の計6種類で実験を行った。

2.3 屋外テストコースでの測定

氷路での実車テストは屋外テストコースで下記の条件で行った。

- 1) 使用した車：1800 cc FF 乗用車
- 2) 使用したリム：14×5.5 JJ
- 3) 負荷荷重：3.43 kN
- 4) 空気圧：200 kPa
- 5) 測定：速度 40 km/h より停止するまでの制動距離

(摩擦係数は制動距離から計算)

- 6) 測定温度：氷の温度(約 -3°C)

2.4 タイヤによる室内氷上用内面ドラム試験

前報¹⁾で報告した試験機を使用し、氷路面摩擦試験を下記の条件で行った。

- 1) 試験速度：40 km/h
- 2) 試験温度： -3°C
- 3) 負荷荷重：1.96, 2.70, 3.43 kN
- 4) スリップ率：100 %
- 5) タイヤサイズ：185/65 R 14
- 6) ドラム寸法：内径 3 m, 800 mm

Fig. 1 Dimensions of block pattern

- 7) ドラム内面：前報¹⁾と同じ方法で得られた氷平面
- 8) タイヤ表面：バフされた表面にサイプ有するブロックパターンを彫った面
- 9) 空気圧：200 kPa

2.5 ゴム試験片による室内氷上用平板試験

直進形の室内氷上用平板試験機を用いて、下記の条件で行った。

- 1) 試験速度：0.11 km/h
- 2) 試験温度：-3℃
- 3) 負荷荷重：0.59, 0.88 kN
- 4) スリップ率：100%
- 5) 接地面積：20 mm×30 mm のブロック 5 個
(面積 30 cm² 一定で、表面にサイプを有する)
- 6) 試験片寸法：ブロックにおける
サイプ間の間隔, b : 4, 6, 8 mm
サイプの深さ, h : 4, 6, 12 mm
奥行き, a : 30 mm

上記装置を用いて、氷路面摩擦力を測定した。また、ビデオカメラを用いて側面より撮影し、画像解析によりサイプ間の小ブロックの倒れ込み角度を求めた。同時に下部カメラからの画像より実接地面積を求めた。

3. 結果および考察

ゴムの摩擦力には、1) 凝着摩擦力、2) ヒステリシス摩擦力、3) 掘り起こし摩擦力があり、更に、4) 排水・親水による摩擦力がある³⁾。路面の凹凸が少ない氷路面上では、2) の摩擦力は無視できるほど小さい。また、本実験では常に新しい氷路面で計測しているので、4) の摩擦力の影響は小さい。したがって、本実験での摩擦力は主として1) と 3) の因子により発生していると考えられる。3) の因子は、ブロックパターン中のサイプのエッジにより、路面を引っかくことによる摩擦力であり、サイプの数を増やしてエッジの数を増すと摩擦係数は増加するが、サイプで切られた小ブロックの剛性は低下し、小ブロックの倒れ込みが生じ、実接地面積が減少し摩擦係数は低下する。すなわち、ゴムの硬さとブロック剛性との組み合わせで、摩擦係数に最適値がある^{2,3,4)}。

3.1 タイヤによる室内氷上用内面ドラム試験

Fig. 2 と 3 にサイプを有する縦長および横長パターンタイヤの摩擦係数とゴム硬さの関係を示

す。いずれの図においても摩擦係数は接地圧の増加とともに低下している。この傾向は前報¹⁾と同じであるが、摩擦係数とゴム硬さの関係は前報と異なる。すなわち、サイプのないタイヤでは摩擦係数が硬さとともに低下しているのに対し、サイプを有する縦長パターンタイヤ(Fig. 2)では、硬さの影響は少なく、硬さとともに摩擦係数は僅かに増加した。更に、横長パターンタイヤ(Fig. 3)では硬さにより摩擦係数に最大値が認められた。これは、サイプを有するパターンでは摩擦係数が凝着摩擦力のみで決まるものではないことを示唆している。

3.2 屋外テストコースでの測定

Fig. 4 にサイプを有する縦長パターンおよび横長パターンタイヤの摩擦係数とゴム硬さの関係

Fig. 2 Relationship between friction coefficient and hardness by indoor test for the tire having long type block pattern with sipe

Fig. 3 Relationship between friction coefficient and hardness by indoor test for the tire having wide type block pattern with sipe

Fig. 4 Relationship between friction coefficient and hardness by outdoor test for the tires having long and wide type block pattern with sipe

Fig. 5 Inclination phenomenon of small block

を示す。縦長パターンタイヤでは、硬さの影響は少ない。また、横長パターンタイヤでは、硬さにより摩擦係数に最大値を示し、Fig. 2 および 3 と同様の傾向を示した。このことは、屋外テスト結果と室内ドラム試験結果がよい相関をもっていることを示している。

3.3 ゴム試験片による室内氷上用平板試験

Fig. 5 に小さいブロックの倒れ込み状態を示す画像解析結果の一例を示す。

Fig. 6 に摩擦係数とサイプ間の小さいブロックの倒れ込み角度と画像解析による実接地面積の関係を示す。図中にはゴム硬さ、小ブロックの寸法、接地圧、等のパラメータが混ざってプロットされている。しかしながら、この関係には、温度、速度等のパラメータは含まれていない。

倒れ込み角度 0 度では実接地面積のみによる凝着摩擦に起因する摩擦係数であると考えられる。Fig. 6 では摩擦係数と倒れ込み角度の関係が後述する 3 次式で回帰でき、その相関係数が高いところから角度 0 度での摩擦係数を外挿すると $\mu = 0.1$ と推定される。

倒れ込み角度 0 度付近から 10 度にかけて、角度の増加に伴い摩擦係数は増加する。これは小ブロックに倒れ込みが生じ、サイプのエッジによる掘り起こし摩擦力によるものと考え。更に、凝着摩擦力に起因する効果と掘り起こし摩擦力による効果が現れ、摩擦係数は増加し、倒れ込み角度約 15 度で摩擦係数の最大値が得られる。その後、

Fig. 6 Relationships between friction coefficient and inclined angle and between percentage of actual contact area and inclined angle

倒れ込み角度の増加に伴い摩擦係数は低下する。これは、図中に示す実接地面積の低下と相関し、倒れ込み角度の増加に伴い実接地面積は減少し（凝着摩擦力に起因する効果が低下し）摩擦係数が低下したと考える。倒れ込み角度約 50 度で摩擦係数の最小値が得られる。ここでは、サイプのエッジによる掘り起こし摩擦力に起因する効果が主となり、掘り起こし効果とエッジ部の僅かな凝着効果による摩擦係数であると考え。その後の摩擦係数の増加傾向は倒れ込み過ぎて、小ブロックの側壁(腹)の一部が接地した結果と考える。

Fig. 6 で得られた摩擦係数(μ)と倒れ込み角度(θ)の関係を 3 次式で回帰すると、下記の式が得られる。

$$\mu = A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2 + A_3\theta^3 \dots (1)$$

ここに、 A_0, A_1, A_2, A_3 は定数であり、それぞれ次の値で表される。

$$A_0 = 0.100, A_2 = -0.327 \times 10^{-3},$$

$$A_1 = 0.759 \times 10^{-2}, A_3 = 0.330 \times 10^{-5},$$

Fig. 7 Relationship between inclined angle and deformation

得られた実験式と測定結果との相関係数は 0.89 である。

なお、Fig. 6 に示した、倒れ込み角度(Θ)と実接地面積となる有効面積率($S\%$)はほぼ直線関係にあり、下記の式で回帰できる。

$$\Theta = D_1 + D_2 \cdot S \dots \dots (2)$$

ここに, D_1, D_2 は定数であり, それぞれ次の値で表される.

$$D_1 = 58.8, \quad D_2 = -0.55$$

得られた実験式と測定結果との相関係数は 0.95 である。

そこで、氷路面上を滑っている小ブロック先端たわみを、梁の先端たわみに置き換え、材料力学における梁のたわみ解析法を用いて検討した⁶⁾。

梁の先端の最大たわみ量(δ)は材料力学の計算より下記の式で表される.

$$\delta = \{ 4 / (E \cdot a) \} \cdot (h/b)^3 \cdot F \dots \dots (3)$$

ここに、

E：彈性率

a : 梁の奥行き寸法

h : 梁の高さの寸法

b : 梁の幅寸法

F: 梁の先端に加わる力

(3)式を用い小ブロック先端の最大曲げ量(δ)と倒れ込み角度(Θ)の関係は次式で表されることが分かった。

$$\Theta = C_0 + C_1 \cdot \log \{ 4 / (E \cdot a) \} \cdot (h/b)^3 \dots \dots (4)$$

ここに、

E : 弾性率, C_0 : 定数=30, C_1 : 定数=27,

a : 小ブロックの奥行き寸法

b: サイプ間隔の幅寸法

h : 小ブロックの高さ寸法

得られた実験式と測定結果との相関係数は 0.89 である. Fig. 7 に測定結果を示す.

3.4 実験式による因子の検討

(1)式に(4)式を代入し、代入した実験式の因子 E, a, b, h, を変化させて、最大摩擦係数が得られる小ブロックの寸法とゴムの弾性率(ゴム硬さ)の関係を明らかにした。

Fig. 8 -(1)に、因子h (小ブロックの高さ=溝深さ)を4, 8, 12 mmと変化させた場合を示す。

$h = 4 \text{ mm}$ で $E = 0.5 \text{ MPa}$ に摩擦係数の最大値,

Fig. 8 Effects of parameters a , b and h on the inclined angle and friction coefficient

Fig. 9 Predictions of inclined angle by finite element method

$h = 8 \text{ mm}$ で $E = 4 \text{ MPa}$ に摩擦係数の最大値,
 $h = 12 \text{ mm}$ で $E = 10 \text{ MPa}$ 以上に摩擦係数の最大値,
 が得られる。このことは、摩擦係数を最大にする最適ゴム硬さは一定ではなく、溝深さにより影響を受けることを示している。

Fig. 8-(2)に、因子 b (サイブ間隔の幅) を 2, 4, 6 mm と変化させた場合を示す。

$b = 2 \text{ mm}$ で $E = 10 \text{ MPa}$ 以上に摩擦係数の最大値,

$b = 4 \text{ mm}$ で $E = 3.8 \text{ MPa}$ に摩擦係数の最大値,

$b = 6 \text{ mm}$ で $E = 1.2 \text{ MPa}$ に摩擦係数の最大値,
 が得られる。

Fig. 8-(3)に、因子 a (小ブロックの奥行き) を 14.5, 29.0, 43.5 mm と変化させた場合を示す。

$a = 14.5 \text{ mm}$ で $E = 7 \text{ MPa}$ 以上に摩擦係数の最大値,

$a = 29.0 \text{ mm}$ で $E = 3.8 \text{ MPa}$ に摩擦係数の最大値,

$a = 43.5 \text{ mm}$ で $E = 2.5 \text{ MPa}$ に摩擦係数の最大値,
 が得られる。

このように、サイブ間隔の幅や小ブロックの奥行き寸法によっても、摩擦係数を最大にする最適ゴム硬さが異なることが分かる。例えば、実際タイヤの寸法で検討すると、 $a = 29.0 \text{ mm}$, $b = 4 \text{ mm}$, $h = 8 \text{ mm}$ であるから、 $E = 4 \text{ MPa}$ 付近に摩擦係数の最大値が得られ、ゴム硬さで 47 程度が最も摩擦係数が高いことになる。このことは、Fig. 2 ~ Fig. 4 にみられる横長パターンタ

イヤの摩擦係数の最大値がゴム硬さで 49 付近で得られているのとは一致する。同様に、縦長パターンタイヤに摩擦係数の最大値がみられないのは、 $a = 14.5 \text{ mm}$ では E との関係で摩擦係数に明確な最大値が得られなかったのとは一致する。

3.5 有限要素法によるブロックの変形解析

FEM 計算に屋外テストコースでの測定条件および測定結果を入力し、タイヤと同じブロックパターンで、サイブ間の小ブロックの倒れ込み角度を計算した。計算は有限要素法プログラム ABAQUS を用いて 2 次元非線型接触解析を行った。

- 1) 計算モデル：タイヤと同じパターン寸法で横長、縦長ブロック
- 2) 横長ブロック：節点数 737, 要素数 614
- 3) 縦長ブロック：節点数 1485, 要素数 1246
- 4) 使用要素：2 次元平面ひずみ要素
- 5) 倒れ込み角度：側面要素の角度
- 6) 接地圧：0.25 MPa

解析結果を Fig. 9 に示す。右上断面図は横長ブロックタイヤ走行中の小ブロックの変形状態を表し、右下断面図は縦長ブロックタイヤ走行中の小ブロックの変形状態を表す。断面図の倒れ込み角度の平均値とゴム硬さの関係を左側に示す。左図より、縦長ブロックタイヤの倒れ込み角度はゴム硬さとともに小さくなり、横長ブロックタイヤの倒れ込み角度はゴム硬さ 49 で最大値を示す。この計算角度および摩擦係数は式(1)で示した曲線より僅かに低い値を示すが、同じ傾向を示してい

る。これは、室内氷上用平板試験とテストコースでの走行条件の差、例えば、速度の差であると考ええる。

4. 結 論

スタッドレスタイヤの氷路走行時の摩擦メカニズム解明を目的に、サイプを有するゴム試験片やスタッドレスタイヤを使用して、主に、サイプ間的小ブロックの変形解析を行い、次のような結論を得た。

1) 小ブロックの倒れ込み角度と摩擦係数の関係を、ゴム硬さ、小ブロックの寸法、負荷荷重を包括して整理すると下記の実験式で回帰されることが分かった。

$$\mu = A_0 + A_1 \Theta + A_2 \Theta^2 + A_3 \Theta^3 \cdots \cdots (1)$$

$$\Theta = C_0 + C_1 \cdot \log \{ 4 / (E \cdot a) \} (h/b)^3 \cdots \cdots (4)$$

$A_0, A_1, A_2, A_3, C_0, C_1$ は定数である。

ここに、

μ : 摩擦係数, Θ : 倒れ込み角度, E : 弾性率

a : 小ブロックの奥行き寸法

b : サイプ間隔の幅寸法

h : 小ブロックの高さ寸法

2) 上式を用いて、小ブロックの寸法を変化さ

せ、摩擦係数がどのように変化するのか、実験式による因子分析を行った。その結果、実際のタイヤ寸法に近い小ブロックの寸法の横長パターンにおいてゴム硬さで 47 程度に摩擦係数に最大値が得られ、また、縦長パターンには明確な最大値が得られず、実際走行タイヤに近い計算結果が得られ、式の有効性が確かめられた。

3) テストコースでの走行条件および測定結果 (μ 値) を代入し、FEM による 2 次元非線形接触解析を行った結果、実際走行タイヤの倒れ込み角度を計算することができた。計算結果は実験式(1)の結果と一致した。

引 用 文 献

- 1) 三橋健八, 広木栄三, 緑川真吾, 篠田 茂: 日ゴム協誌 **70**, 140 (1997)
- 2) 橋本佳昌: 月間タイヤ 9 月号, 58 (1996)
- 3) Moore, D.F.: The Friction and Lubrication of Elastomers, Pergamon Press, New York (1972)
- 4) 坂本孝雄, 平田 靖: 日ゴム協誌 **65**, 713 (1992)
- 5) 友田 一, 石川泰弘: 日ゴム協誌 **65**, 721 (1992)
- 6) 加部和幸: 第 21 回ゴム技術シンポジウム (1991.3) 日本ゴム協会

*

*

*

*

*