

ゴムブロックの氷上摩擦特性予測技術（第3報） —サイプ密度と実接地面積の両立による氷上摩擦特性向上—

Prediction methodology which represents friction properties of rubber block on ice (Part 3)

—Improvement of friction properties by sipe density and actual contact area—

ブリヂストン（正）*松本 浩幸 （正）野村 洸

Hiroyuki Matsumoto, Hiroshi Nomura

Bridgestone Corporation

1. はじめに

自動車用冬タイヤの主力であるスタッドレスタイヤの一層の氷上性能向上に向け、サイプ（細溝）を設けたゴムブロックの氷上摩擦特性予測技術の検討を行った。氷上摩擦面におけるトライボロジー現象の直感的理解とメカニズムの解明、さらには氷上性能向上に向けた新たな着眼探索に活かせるよう、ゴムブロックの基本的な氷上摩擦機構を模式的に表す2次元簡易モデルと熱力学・材料力学的解析手法を適用した。

氷の摩擦機構については諸説ある¹⁾が、タイヤ接地面の形状や接地圧分布、ゴムブロックやサイプの形状・寸法・配置、ブロック剛性など、タイヤの各種設計因子の寄与・効果を分析して改良方向を検討するには、氷上摩擦を構成する凝着摩擦、流体潤滑（水膜の粘性抵抗）に加え、サイプエッジによる氷表面の掘起しの影響やブロック変形による接地面の部分的浮き上がりの影響など、各種要因を包含した予測手法の構築が必要となる。

そこで、第一報²⁾では単一ブロックモデルを用い、氷上摩擦特性予測の基本的な考え方と基礎的な特性の予測結果を提示した。また、第二報³⁾ではサイプで区切られた連成ブロックモデルを適用し、摩擦特性に対するサイプエッジによる氷表面掘起しの影響、ブロック変形による実接地面積低下や接地圧変化の影響に関する検討を加えた。

本報では、サイプの高密度化と実接地面積の低下抑制による摩擦特性向上効果の予測と、予測結果に基づいて考案した新たなサイプ構造体の効果、そのメカニズムについて報告する。

2. 氷上摩擦特性予測解析の基本概念

氷上摩擦の構成要因を、①タイヤ接地面と氷の直接接触による凝着摩擦、②氷路面上の水膜を介した流体潤滑摩擦（水膜の粘性抵抗）、③ブロックやサイプのエッジによる氷の掘起し、の3つと考え、ゴムブロックの氷上摩擦力をこれらの複合として Fig. 1 に示す2次元モデルで表す。

初期温度 T_0 の氷表面には初期状態では水膜が存在せず、摩擦熱は氷内部への熱伝導と氷表面の温度上昇をもたらす。氷表面温度 T_s が 0°C に達した後は氷の融解熱になる。氷表面温度 T_s が摩擦熱により 0°C に達するまでは凝着摩擦、その後は流体潤滑摩擦となる。

第二報³⁾の検討結果より、上記③「エッジによる氷の掘起し」については、掘起し抵抗としての効果は僅少で、先行ブロックの摩擦熱により軟化した氷表層を除去することにより後続ブロックの凝着 μ を回復する効果、さらに摩擦面の水膜除去により流体潤滑 μ （流体粘性抵抗）を増大する効果が主体と考える。

この、軟化表層と水膜の除去による μ 増大効果をエッジによる「表層除去効果」、或は単に「エッジ効果」と呼ぶ。

ゴムブロックは Fig. 2 に示すようにサイプで区切られた小ブロックが連なる連成ブロックモデルとする。上記の、サイプエッジによる氷路面の表層除去効果や、摩擦力によるブロック弾性変形により生じる接地面の部分的な浮き上がりに伴う実接地面積や接地圧の変化を考慮することで、タイヤ設計因子としてのサイプ密度やブロック剛性の影響を検討できるようにした。

3. 実接地面積の低下抑制による μ - v 特性向上効果

ブロック変形による接地面の浮き上がりに伴う実接地面積の低下を生じる弾性ブロックモデルの場合と、理想状態として接地面全面が接地して実接地面積の低下を生じない剛体ブロックモデル

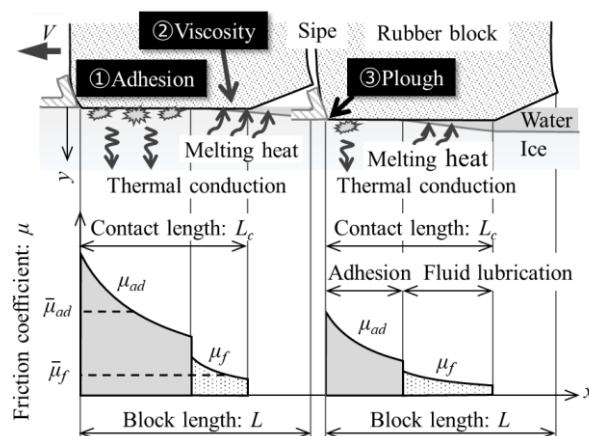


Fig. 1 Conceptual diagram of friction surface

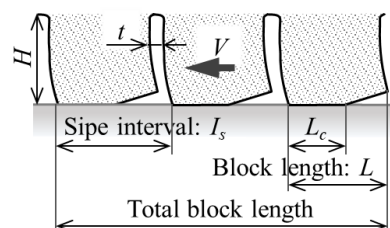


Fig. 2 Definition of block dimensions with sipes

の場合の μ - V 特性を予測計算した。

摩擦特性予測に関連する主要な式として「式(1)」～「式(8)」を第二報³⁾より引用する。

摩擦面を凝着域と流体潤滑域に分け、ブロック全体の摩擦係数 μ を凝着域の摩擦係数 μ_{ad} と流体潤滑域の摩擦係数 μ_f の複合として「式(1)」で表す。また、接地面における凝着域の面積割合を凝着率 α として「式(2)」で定義する。

ここで、 L : 小ブロック長、 L_c : 小ブロックの弾性変形を考慮した実接地長さ、 L_{ad} : 凝着域長さ。

$$\mu = \alpha \bar{\mu}_{ad} + (1 - \alpha) \bar{\mu}_{fc} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{L_{ad}}{L} \quad (2)$$

摩擦面における氷表面温度 T_s の変化を Fig. 3 に示すように考える。先頭ブロックは、 T_s が初期温度 T_0 の状態から摩擦を開始し、凝着域 L_{ad} はブロック先端エッジ $x = 0$ から $T_s = 0^\circ\text{C}$ となる $x = x_c$ まで、流体潤滑域 L_f は $x = x_c$ から接地部終端 $x = L_c$ までとなる。

これに対して、後続ブロックは、サイプエッジが掘起した直後の氷表面温度を T_e として、 $T_s = T_e$ の状態から摩擦を開始する。この状態は、 T_s の x 方向温度分布を表す「式(3)」において、 $T_s = T_e$ となる $x = x_e$ から後続ブロックの摩擦が開始した状態と考えることができるので、凝着域 L_{ad} は $x = x_e$ から $x = x_c$ まで、流体潤滑域 L_f は $x = x_c$ から $x = x_e + L_c$ までとなる。

ここで、 T_0 : 氷の初期温度、 μ_{ad0} : 氷の表面温度 $T_s = 0^\circ\text{C}$ での μ_{ad} 、 E : μ_{ad} の温度勾配、 J : 熱の仕事当量、 c : 氷の比熱、 ρ : 氷の密度、 λ : 氷の熱伝導率、 η : 水の粘性係数、 P_c : ブロック変形による実接地面積の低下を考慮した実接地圧、 h_c : 氷表面の水膜がブロック側方への排水等により一定割合で減少すると仮定した修正水膜厚さ。

$$T_s = \frac{x^{-\frac{1}{2}}}{K_c E} \left(T_0 + \frac{\mu_{ad0}}{E} \right) \left(e^{K_c E x^{\frac{1}{2}}} - 1 \right) - \frac{\mu_{ad0}}{E} \quad (3)$$

$$K_c = \frac{P_c}{J} \sqrt{\frac{\pi V}{c \rho \lambda}} \quad (4)$$

従い、摩擦係数を算出する「式(1)」の右辺第1項の凝着域、第2項の流体潤滑域の夫々における摩擦係数の積分値は、先頭ブロックでは次式となる。

$$\alpha \bar{\mu}_{ad} = \frac{1}{L} \int_0^{x_c} \mu_{ad} dx = \frac{1}{L} \int_0^{x_c} (\mu_{ad0} + E \cdot T_s) dx \quad (5)$$

$$(1 - \alpha) \bar{\mu}_{fc} = \frac{1}{L} \int_{x_c}^{L_c} \mu_{fc} dx = \frac{1}{L} \eta V \int_{x_c}^{L_c} \frac{1}{P_c \cdot h_c} dx \quad (6)$$

また、後続ブロックでは次式となる。

$$\alpha \bar{\mu}_{ad} = \frac{1}{L} \int_{x_e}^{x_c} \mu_{ad} dx = \frac{1}{L} \int_{x_e}^{x_c} (\mu_{ad0} + E \cdot T_s) dx \quad (7)$$

$$(1 - \alpha) \bar{\mu}_{fc} = \frac{1}{L} \int_{x_c}^{x_e + L_c} \mu_{fc} dx = \frac{1}{L} \eta V \int_{x_c}^{x_e + L_c} \frac{1}{P_c \cdot h_c} dx \quad (8)$$

「式(6)」, 「式(8)」において, 「弾性ブロック」ではブロック変形による実接地面積低下を考慮した実接地長さ L_c を適用する。一方, 「剛体ブロック」では接地面全面が均等に接地すると考えて, $L_c = L$ として摩擦係数を算出する。

以上より予測した弾性ブロックと剛体ブロックの μ - V 特性を Fig.4, Fig.5 に示す。

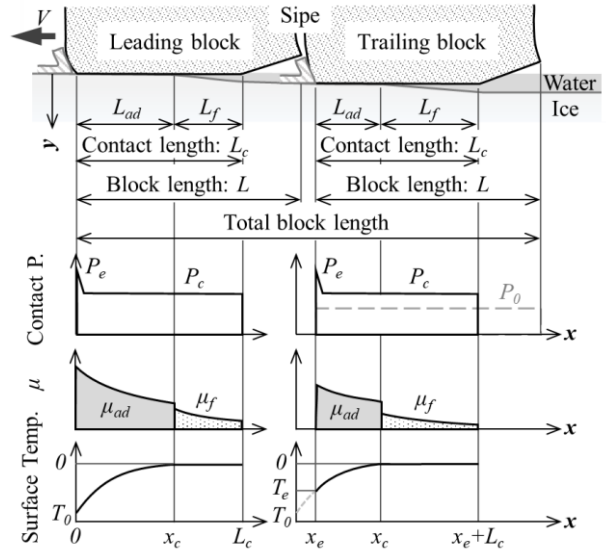


Fig. 3 Contact area diagram of coupled block model

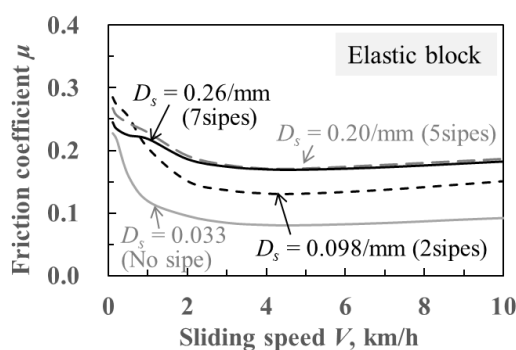


Fig. 4 Predicted μ - V characteristics of elastic block model ($T_0 = -2^\circ\text{C}$, $P_0 = 250\text{kPa}$, Total BL = 30mm)

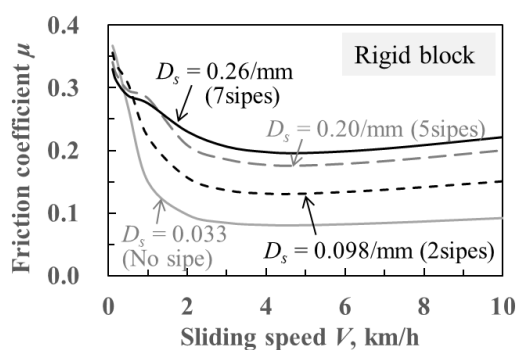


Fig. 5 Predicted μ - V characteristics of rigid block model ($T_0 = -2^\circ\text{C}$, $P_0 = 250\text{kPa}$, Total BL = 30mm)

尚、サイプは厚さ 0.5mm、深さ 6.7mm とした。

Figure 4 の弾性ブロックの予測結果では、サイプ密度 D_s (Fig. 2 に示すサイプ間隔 I_s の逆数) を増しても低速域の μ は向上しない。また、速度域のほぼ全域に亘り D_s の最適値は 0.20/mm (サイプ間隔 $I_s = 5.1\text{mm}$) 前後にとどまる。

一方、Fig. 5 に示すように、剛体ブロックとして実接地面積低下を抑制することで低速域から中高速域まで広範な速度域でサイプ密度 D_s を増す効果が得られる。 D_s の最適値も 0.26/mm (サイプ間隔 $I_s = 3.8\text{mm}$) 前後となり、サイプ密度 D_s の限界向上が図れる。

また、摩擦係数 μ 予測値の構成要因を分析すると、サイプの高密度化により低速域では凝着率 α が増大、高速域では流体潤滑 μ が増大しており、サイプの高密度化による μ 向上がサイプエッジによる「表層除去効果」としての μ 向上であることが示唆される。

4. 新サイプ構造の検討

以上より、サイプ密度と実接地面積の増大が、サイプエッジによる氷摩擦面の「表層除去効果」として氷上 μ の大幅向上に有効と考え、これらの両立を目指した新サイプ構造の検討を行った。

Figure 6 にサイプ構造体を備えたブロックの接地面正面図を示す。ブロック形状は幅方向に対する前後縁傾斜角 30° の菱形で、滑り方向の側縁長さ 30mm×幅 27mm、サイプは幅方向に対する傾斜角がブロック前後縁と同方向に 30° 、或は逆方向に 30° で、厚さ 0.5mm、深さ 6.7mm とした。

Figure 6 左図は従来サイプを備えたブロック接地面で、直線状サイプに細かい波状の折れ曲りを有する。この波状の折れ曲りはサイプ壁面同士の接触・凹凸噛合いによる変形抑制・ブロック剛性増大を狙ったものである⁴⁾。

Figure 6 右図は新サイプを備えたブロック接地面で、ブロック内に両端が閉じた短いサイプ（ブロック幅方向のサイプ長さがブロック幅の概ね 1/3 以下）を傾斜角が交互になるよう複数配置する。

サイプで区切られるブロック壁面はサイプ端部で連結されることで互いに拘束し合い、ブロック変形を抑制する「連結点」として作用する。新サイプはブロック内に多数の連結点を分散配置することでブロックに連続性を持たせる。これによりブロック変形を抑制し、また、接地面の段差を低減してブロック剛性と実接地面積を増大する「陸部連結効果」を発現する。

以降、この新サイプ構造を「高密度短サイプ構造」と呼ぶ。

これらのブロックのせん断変形時の接地圧分布を FEM で求めた。Fig. 7 は平均接地圧 230kPa、摩擦係数 $\mu = 0.3$ に相当するせん断力を図の矢印方向に入力したときの接地圧分布である。図より、①従来サイプは特にサイプ開放端において接地面の浮上りが大きい。一方、「高密度短サイプ構造」は、②開放端を閉じることで当該部の浮上りを抑制する。また、③サイプ端部で接地面の浮き上がり抑制と接地圧段差の緩和が見られ、④従来サイプ対比、狭いサイプ間隔でも実接地面積の低下を抑制する。

5. 新サイプ構造体の実接地面積増大効果

以上より、「高密度短サイプ構造」はサイプの高密度化と実接地面積の低下抑制を両立して氷上 μ を効果的に増大す

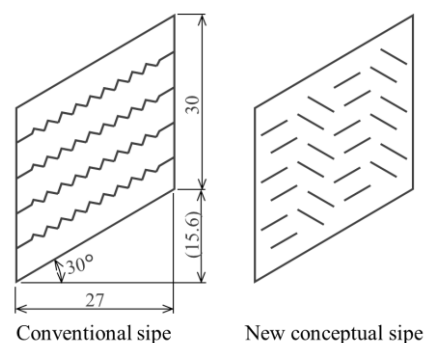


Fig. 6 Figure of block specimens

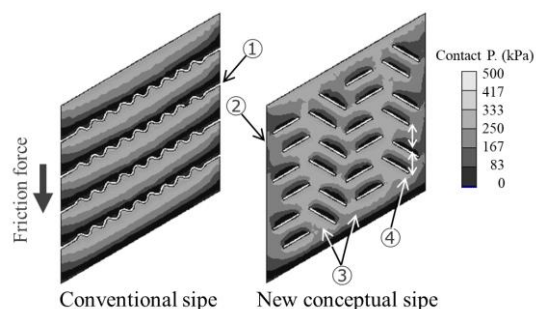


Fig. 7 Contact pressure distribution of block specimens

ることが期待できる．そこで，実接地面積に対するサイプ密度の影響がサイプ構造によりどのように変わるか FEM で調べた．

検討したブロックの接地面を Table.1 に示す．ブロックの種類は従来サイプの C1～C3、新サイプの N1, N2 の全 5 種．添字 1～3 はサイプ密度の低，中，高密度を表す．

表中のサイプ指標は，「式(9)」～「式(12)」を用いて Fig. 2 に示す 2 次元ブロックモデルに換算した指標である．ここで， L_b ：ブロック側縁長さ，或は矩形ブロックの全長， W_b ：ブロック幅， w_s ：短サイプのブロック幅方向長さ， tw_s ：1 ブロック内の w_s の総和， t ：サイプ厚さとする．

相当サイプ本数 N_{eq} は，1 ブロック内のブロック幅方向のサイプ総延長 tw_s をブロック幅 W_b に対する比率で換算した本数．

$$N_{eq} = tw_s / W_b \quad (9)$$

また，相当小ブロック長 L_{eq} は，ブロック全長 L_b からサイプ本数分のサイプ厚さ t を除いた正味ブロック長さを小ブロック個数（サイプ本数より 1 つ多い）で除した値．

$$L_{eq} = \frac{L_b - N_{eq} \times t}{N_{eq} + 1} \quad (10)$$

平均サイプ間隔 I_{ave} ，サイプ密度 D_s は，次式となる．

$$I_{ave} = L_{eq} + t \quad (11)$$

$$D_s = 1 / I_{ave} \quad (12)$$

これらのブロックのせん断変形時の実接地面積を FEM で求めた．平均接地圧 230kPa，摩擦係数 $\mu = 0.3$ に相当するせん断力を摩擦方向（Table. 1 ブロック図の上下方向）に入力したときの実接地面積を A_r ，変位 1mm 時のせん断力をブロック剛性 K_x として Fig. 8 に示す．横軸の K_x ，縦軸の A_r は基準ブロック C1 の値を 100 として指数化した．

図より，新サイプ N1, N2 は K_x に対する A_r の位置付けが従来サイプ C1～C3 より高いことが分かる．従来サイプは C1 → C2 → C3 とサイプ密度 D_s を増すに従い K_x ， A_r とともに低下する．一方，N2 は D_s が C2 と同等に高いが K_x が増大し， A_r は K_x による増分以上に増大する．C1 と N2 の C2 対比の K_x と A_r の変化率を比較すると，C1 は D_s を 17% 減少して K_x を 11% 増大， A_r を 16% 増大するのにに対し，N2 は D_s を C2 同等に維持しながら K_x を 11%， A_r を 22% 増大する．

6. エッジ密度－実接地面積の μ マップ

以上より，実接地面積 A_r はブロック剛性 K_x だけでは表すことができず，摩擦の発生機構から考えてもより本質的な指標と考える．そこで，氷上 μ 増大に対するタイヤ設計上の主要指標をサイプ密度 D_s と実接地面積 A_r として， D_s と A_r の二軸の μ マップを作成した．

前報³⁾で，サイプ間隔 I_s に対する実接地長さ L_c の割合を実接地率 L_c / I_s と定義した．縦軸の A_r は Fig. 2 に示す 2 次元モデルで考えると実接地率 L_c / I_s と対応する．そこで，横軸 D_s の値から「式(13)」 「式(14)」を用いて求めた小ブロック長 L と，縦軸 A_r に対応する L_c / I_s の値から算出した実接地長さ L_c を「式(6)」，「式(8)」に代入して，横軸 D_s と縦軸 A_r の水準を変えたときの摩擦係数 μ の予測計算を行い，マップを作成した．

$$I_s = 1 / D_s \quad (13)$$

$$L = I_s - t \quad (14)$$

サイプ密度と実接地面積による μ 改良効果の滑り速度による違いを Fig. 9 に示す．横軸のサイプ密度 D_s ，縦軸の実接地面積 A_r と氷上 μ は従来サイプ C1 の値を基準 100 として指数化した．

一方で，新サイプ構造の効果を確認するため，上記 5 種のブロック形状について実験用ブロックサンプルを試作して氷上摩擦試験を行った．実験用ブロックサンプルは低硬度シリコンゴム（KEYENCE AR-GIL）を用いて 3D プリンターで試作した．予測計算に用いた基礎データは当社現行スタッドレスタイヤのトレッドゴムに相当する試作ゴムの

	C1	C2	C3	N1	N2
Figure of specimen					
Ave. sipe interval	6.1mm	5.1mm	4.4mm	6.1mm	5.1mm
Sipe density	0.16/mm	0.2/mm	0.23/mm	0.16/mm	0.2/mm
Equiv. No. of sipes	4	5	6	4	5

Table 1 Specifications of block specimens

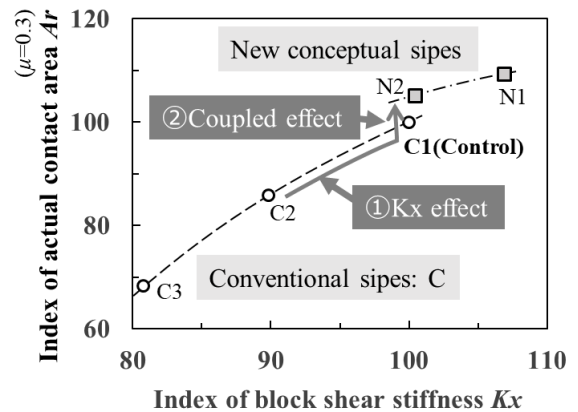


Fig. 8 Effects of block stiffness and coupling on A_r

ブロックサンプルで計測した値²⁾を用いている。これに対し、このシリコンゴムは当然ながらスタッドレスタイヤのゴムと物性や摩擦特性が異なる。このため、 μ 計測値はあくまで参考値として、基準ブロック C1 の μ 計測値を 100 とする指数で Fig. 9 のマップ上に載せた。

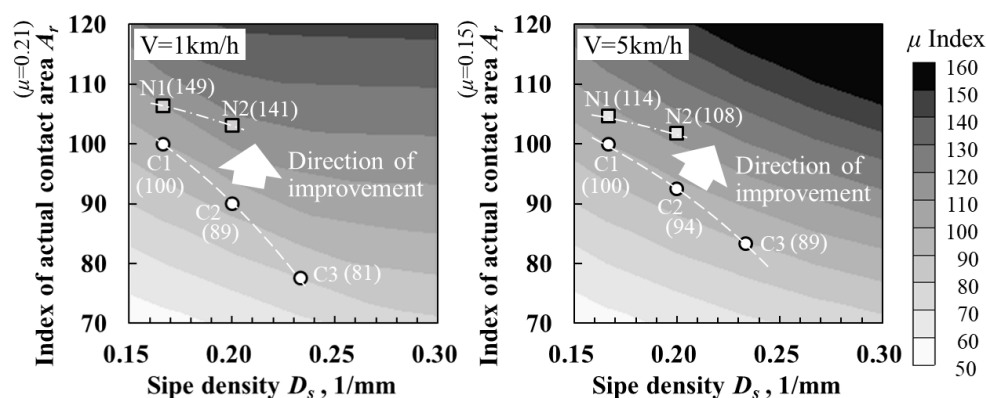


Fig. 9 Predicted direction of ice μ improvement ($T_0 = -2^\circ\text{C}$, $P_0 = 250\text{kPa}$, Total BL = 30mm, $H = 6.8\text{mm}$, $t = 0.5\text{mm}$)

参考値ではあるものの、改良方向に対する μ 計測値の傾向はマップ全体の傾向と略一致した。特に従来サイプ C1～C3 の μ 計測値は予測値と良い対応を示す。

Fig. 9 左図に示すタイヤの滑り速度としては比較的低速の 1km/h (0.28m/s) では、凝着摩擦が支配的²⁾で μ 向上に対するサイプのエッジ効果は小さい。このため、このマップにおける改良方向は概ね上方向で、サイプ密度が低く実接地面積が大きいブロックが有利となる。一方、Fig. 9 右図に示す滑り速度 5km/h (1.4m/s) では、流体潤滑の寄与が大きくなる²⁾ためサイプのエッジ効果が大きくなる。このため、このマップにおける改良方向は右上方向となり、サイプ密度と実接地面積の両立が不可欠となる。いずれにおいても、高密度短サイプ N1, N2 は従来サイプ C1～C3 の背反ラインより右上の有利な位置付けとなっている。また、N1, N2 の μ 計測値は滑り速度 5km/h では予測値と略一致する。但し、滑り速度 1km/h の μ 計測値は予測値より高く、高密度短サイプには本予測手法にまだ織り込んでいない新たな μ 向上要因が潜在する可能性を示唆する。

7. おわりに

スタッドレスタイヤの氷上摩擦におけるトライボロジー現象の直感的理解・メカニズムの解明と、摩擦特性の改良検討に有用な評価解析法を提示すべく、ゴムブロックと氷の基本的な摩擦特性を模式的に表す 2 次元簡易モデルによる摩擦特性予測手法を検討した。

第一報で提示した氷上摩擦特性予測の基本的な考え方、第二報で検討したサイプのエッジ効果と、ブロック変形に起因する実接地面積・接地圧の変化の影響をもとに、本報では摩擦特性に対するサイプ密度と実接地面積の影響を予測し、この二つの主要指標の両立が氷上 μ 増大に有効であることを示した。

さらに、この二つの指標を両立するサイプ構造の検討を行った。ブロック内でサイプを閉じることで形成されるサイプ端部が連結点として作用しブロック剛性を増大する「陸部連結効果」が発現すること、この「陸部連結効果」はブロック剛性増大による効果以上の実接地面積低下抑制をもたらすことを見出した。この結果をもとに、ブロック接地面内に多くの短サイプ・連結点を分散配置する新たな「高密度短サイプ構造」を提案した。

これまでのスタッドレスタイヤの開発においても、サイプ高密度化とブロック剛性確保の両立を目的に折れ曲りサイプ形状などの検討⁵⁾が進められてきたが、具体的な改良指標、そのメカニズムと効果予測を示すことで、タイヤ性能向上技術の今後の一層の進化が期待される。

文献

- 1) 対馬勝年：氷の摩擦機構について、潤滑, 21, 5 (1976) 287-294
- 2) 松本浩幸・畠中慎太郎・野村洸・神藏貴久：ゴムブロックの氷上摩擦特性予測技術（第 1 報），トライボロジスト, 67, 5 (2022) 373-380
- 3) 松本浩幸・畠中慎太郎・野村洸・神藏貴久：ゴムブロックの氷上摩擦特性予測技術（第 2 報），トライボロジスト, 68, 2 (2023) 128-138
- 4) 皆木浩幸：冬用タイヤ開発を支える予測技術、日本ゴム協会誌, 94, 8 (2021) 276-281
- 5) 株式会社ブリヂストン：自動車用タイヤの基礎と実際、東京電機大学出版局、2008