

## 第 22 回寒地技術シンポジウム

### タイヤの氷上性能へのトレッド表面粗さの影響

#### Effect of Surface Roughness of Tread in Tire Characteristics on Ice

二瓶光弥(産業技術総合研究所)

松井 隆(有エー・アイ・エス)

加藤義隆(芝浦工業大学大学院)

#### 1. はじめに

冬用タイヤとしてのスタッドレスタイヤは、積雪寒冷地域の生活になくてはならないものとしてしっかりと定着している。すでに多くのユーザーが認識しているように、現在のスタッドレスタイヤは、かならずしも、すべての雪氷路面にたいして万能とはなっていない。特に 0 付近の氷上での性能は極端に低下し、スリップ事故件数増加の要因となっており、タイヤの氷上性能の向上が大きな課題となっている。

氷表面では水膜が潤滑の役割をはたして摩擦係数の低下を示すことが知られている<sup>1)2)</sup>。しかし、タイヤ(ゴム)と氷の境界潤滑状態や混合潤滑状態および流体潤滑状態での摩擦は複雑な挙動や現象を示す<sup>3)</sup>。タイヤの氷上性能向上のためには、これらの現象の系統的な調査や詳細な解析が必要であるが、充分にはなされていないのが現状となっている。

既報<sup>4)5)</sup>で、特殊な実験用タイヤを用いた解析結果から、トレッド表面粗さがある値のときにタイヤの氷上性能(制動性能)が最大になるという現象について報告した。そしてさらに、氷中の不純物の影響による氷表面の水膜の量や摩擦熱によって発生する水膜の影響などとの関係が考察された。本報では、このトレッド表面粗さがある値のときにタイヤの氷上性能が最大になるという現象が市販のタイヤの場合にも生じるのか、あるいは適用できるのかどうかについて調査した結果について述べる。

#### 2. 特殊な実験用タイヤを用いた解析結果<sup>4)</sup>

ここでは、まず、トレッドパターンの無い特殊な実験用タイヤ(タイヤトレッドの表面粗さが異なる数種のタイヤ、以後、スムーズタイヤと呼ぶ)を用いて、**図 1** に示す室内タイヤ試験機<sup>6)</sup>の二種の氷上で制動力係数( $\mu$ ) - スリップ比(S)特性を調査した結果について述べる。

##### 2.1 試験に使用したタイヤ

試験に用いたタイヤのトレッド表面粗さ(十点平均粗さ

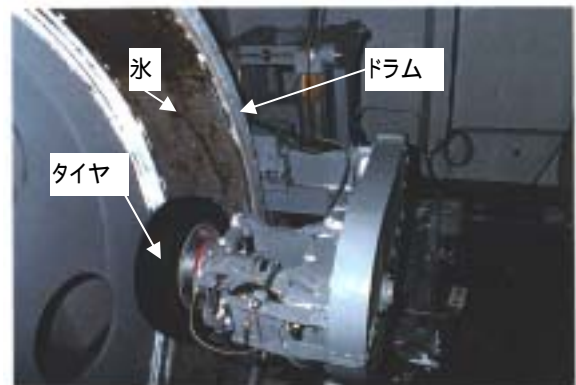


図1 室内タイヤ試験機

Rz(JIS1994))の値を表 1 に示す。タイヤのサイズは、185 / 70R14 であり、トレッドパターンは無い。タイヤトレッド表面への粗さの施工は、タイヤ製作のモールド時に耐水研磨紙の粗さを転写する方法を用いた。タイヤ A1 の研磨紙の粒度は 80、A2,3,は 240、A4 は 800 とした。A5,A6 は耐水研磨紙を使用しない通常のスムーズタイヤである。A7 はスムーズタイヤであるが、アスファルト路面上を 60km 走行したタイヤであり、トレッド表面はマイルド摩耗による構造変化を伴っている<sup>7)</sup>。

表1の Rz は、半径 2  $\mu\text{m}$  の触針(測定力:0.07gf)をもつ万能表面形状測定器(SE-3C 小坂)を用いて測定した。ここで、各タイヤトレッドの表面粗さの測定値は、検出器のスキッドを使用する方法で、タイヤトレッドの周方向に、12 箇所測定し、その平均値を示したものである。これより、Rz が約 6  $\mu\text{m}$  から約 170  $\mu\text{m}$  までの表面粗さをもつタイヤとなっている。

表 1 試験に使用したタイヤ

スムーズタイヤ(ゴム硬度:54 (JIS A))

種類	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
粗さ (Rz)	157.5 $\mu\text{m}$	67.0 $\mu\text{m}$	64.8 $\mu\text{m}$	44.4 $\mu\text{m}$	6.0 $\mu\text{m}$	7.0 $\mu\text{m}$	13.0 $\mu\text{m}$

## 2.2 試験方法

図1に示した室内タイヤ試験機は、直径3mのドラムの内面(幅60cm)に氷を作製し、その上をタイヤが走行する形式となっている。ドラム側は、速度制御が可能であり、タイヤ側は、速度およびトルク制御が可能となっている。また、タイヤに発生する力は、ハブダイナモメーター(6分力計)で測定できる。試験機の主要部分は、冷凍庫内に設置され、庫内温度は、常温から-30まで任意に設定可能となっている。

$\mu$ - $S$ 特性試験は、ドラム速度を20km/h一定でタイヤ速度を20km/hから0km/h(制動モード)、ついで、摩擦熱による水膜の影響を見るため、0km/hから20km/h(制動解除モード)と変化させてその時の制動力係数 $\mu$ (制動力/接地荷重)を測定した。なお、スリップ比 $S$ は、 $S = (\text{ドラム速度} - \text{タイヤ速度}) / (\text{ドラム速度})$ で表される。 $\mu$ - $S$ 特性の概念図を図2に示す。

使用した氷は、氷A(導電率100 $\mu$ S/cm, Rz:4.2 $\mu$ m)、氷B(導電率1000 $\mu$ S/cm, Rz:11.2 $\mu$ m)の二種を用いた。氷Bは、氷Aよりも気泡や不純物を多く取り込んだ氷で、肉眼では真っ白の状態では表面粗さの大きい氷となっている。この二種の氷は、融解水の導電率で見ると比較的事路面の氷に近いものとなっている<sup>9)</sup>。

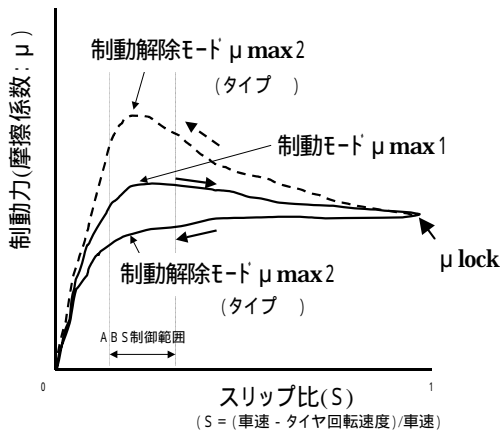


図2  $\mu$ - $S$ 特性の概念図

## 2.3 試験結果

今回の試験では、制動モードと制動解除モードで特性が異なる結果となった。そこで、図2に示した $\mu$ - $S$ 特性の概念図において、制動モードの $\mu$ の最大値を $\mu_{max1}$ (制動モード)、タイヤロック時の $\mu$ を $\mu_{lock}$ 、 $\mu_{max1}$ を発生するスリップ比付近における制動解除モードの $\mu$ の値(或いは最大値)を $\mu_{max2}$ (制動解除モード)と呼び、これらの値とトレッド表面粗さとの関係を求めた。

図3にスムーズタイヤの $\mu_{max1}$ 、 $\mu_{max2}$ 、 $\mu_{lock}$ とトレッド表面粗さとの関係を示す。これらより、次のことが明らかになった。

- (1)摩擦係数が最大となるトレッド表面粗さが存在する(約10 $\mu$ m~50 $\mu$ m)。これは、真実接触面積や排水性の影響が現れているものと考えられる。
- (2)氷Aよりも氷Bの方が、不純物による初期水膜が多くなって

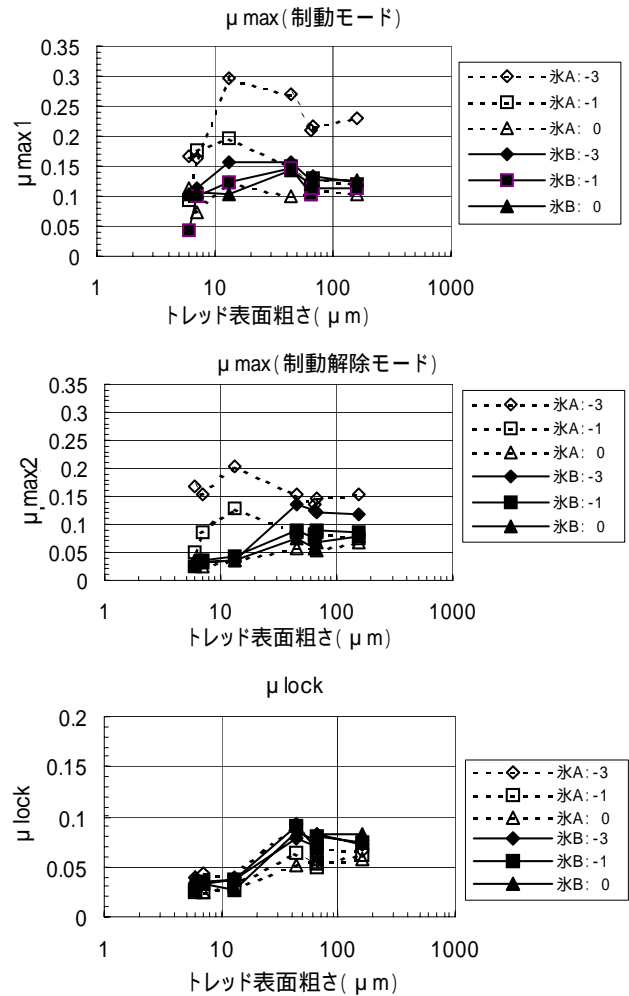


図3 スムーズタイヤの $\mu$ - $S$ 特性の結果とトレッド表面粗さとの関係

いるため、氷の種類によって $\mu_{max}$ に大きな差がある。また、摩擦熱による水膜の影響でピーク値が粗さの大きい方にシフトしている(特に $\mu_{max2}$ や $\mu_{lock}$ )ものと考えられる。

以上の結果より、タイヤと氷の摩擦において、最大制動力(摩擦係数)を生じるトレッド表面粗さが存在することを明らかにした。また、氷の性状によって、最大制動力を発生するトレッド表面粗さが異なることも示した。これらの現象は、氷中の不純物や摩擦熱による水膜の影響が現れているものと考えられるが、その詳細なメカニズムの解析は今後の課題となっている。

## 3. 市販スタッドレスタイヤのトレッド表面性状と氷上性能(予備試験)

実路で使用される市販タイヤの場合、トレッド表面は、道路上の砂や泥等を取り込み、あるいは路面より摩擦され種々の状態となる。そこで、ここでは、市販タイヤのトレッド表面粗さの影響を調査する前に、どのような前処理(初期状態の統一)が必要かについて明らかにする。

まず、表2および図4に示すような表面状態の異なる市販タイヤ4本(同一銘柄、同一製造年)を用意し、このタイヤの $\mu$ - $S$ 特性を調査した。表2において、タイヤAは、旭川市内で1000km以上実路(アスファルト等)の上を走行したタイヤで、トレッド溝には砂等が取り込まれている状態となっている(この砂

表2 予備試験に使用した市販スタッドレスタイヤ  
(175/70R13)

記号	特徴	ゴム硬度
A	1000km以上走行。旭川の滑り止め剤7号砂が入った状態。	48-52
B	1000km以上走行。砂を取り除いた状態。	48-52
C	1000km以上走行。砂を取り除き、トレッド表面を研磨。	49-52
D	新品	48-50



図4 予備試験に使用したタイヤの外観

は、道路上に防滑剤として散布されている砂(7号碎石)。試験終了後、砂を取り除いたところ数百個以上取り込まれていた)。タイヤBは、タイヤAの状態から砂のみを取り除いたタイヤであり、タイヤCは、タイヤBの状態から、後述する研磨装置と同様の方法でトレッド表面を研磨した状態のものである。タイヤDは、新品状態のもので、タイヤモールド時の空気抜き突起が付いたままの状態となっている。

この4本のタイヤの-1における氷上での $\mu$ -S特性を測

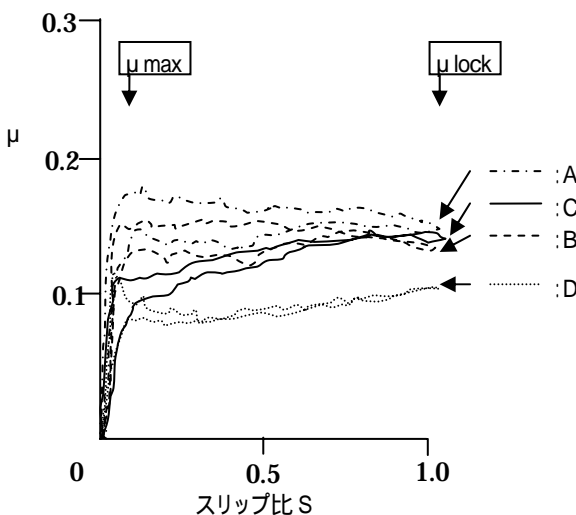


図5 表2図4に示したタイヤの $\mu$ -S特性  
( $F_z$ : 350kgf,  $P_t$ : 2kgf/cm<sup>2</sup>, -1)

定した結果を図5に示す。これより、砂が入ったままのタイヤAが最も $\mu$ が高くなり、次いでタイヤB、研磨したタイヤC、新品タイヤDの順となっている。タイヤAは、砂による掘り起こし抵抗や凝着力の増加などでスリップ比全体に亘って $\mu$ が向上している。新品タイヤは、鬚状の突起の存在や初期のゴム特性から $\mu$ は大幅に低くなっている。

次に、この4本のタイヤの初期状態を同一として評価することを試みた。すなわち、タイヤトレッドに入り込んでいる砂や泥を取り除き、さらに、すべてのタイヤをアスファルト上で300km実車走行させ、トレッド表面をマイルド摩耗<sup>7)</sup>させる。そして、最後に良く洗浄して細かい砂やほこりを取り除いた。その後、再度、 $\mu$ -S特性を測定した。その結果を図6に示す。これより、統一された前処理でトレッド表面の初期状態を同一とした場合、タイヤA、B、C、D共にあまり差がなくなった。ただし、スリップ比の全体的な範囲で、トレッド表面を研磨したタイヤCが、わずかであるが、 $\mu$ は高くなっていることが判る。これは、研磨した効果が少なくとも300km以上の走行後でも発揮されていることを示している。いずれにしても、タイヤトレッドの表面状態は、目的のパラメータ以外の要因は常に一定の初期状態にして評価する必要があることが判る。

以後の、市販タイヤの実験では、砂や泥を取り除き、十分な洗浄を施して実験を実施した。

#### 4. 市販スタッドレスタイヤの氷上性能へのトレッド表面粗さの影響

次に、トレッドパターンやコンパウンドの異なる種々の市販タイヤ(新品および中古品)を対象として、表3に示すA~Lの12種、計38本を用意した。そして、まずその表面粗さなどの表面性状を把握し、その状態での氷上での $\mu$ -S特性をスムーズタイヤの場合と同様に室内タイヤ試験機で調査した。ついで、図7に示したタイヤトレッド表面研磨装置<sup>10)</sup>でトレッド表面に種々の粗さ、広範な表面粗さを施工することとした。この研

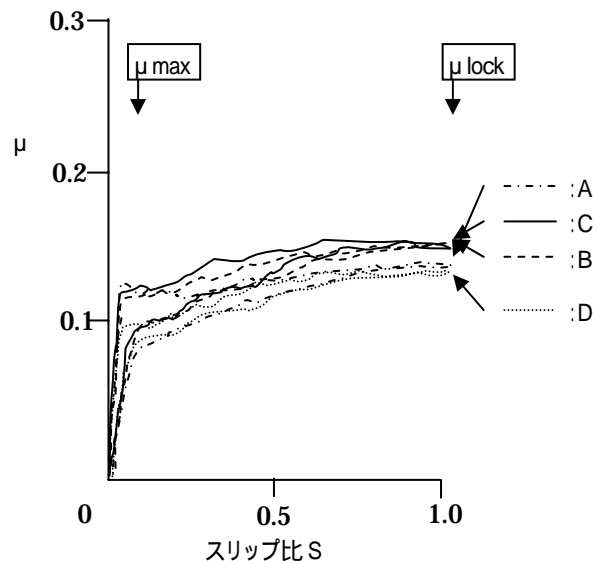
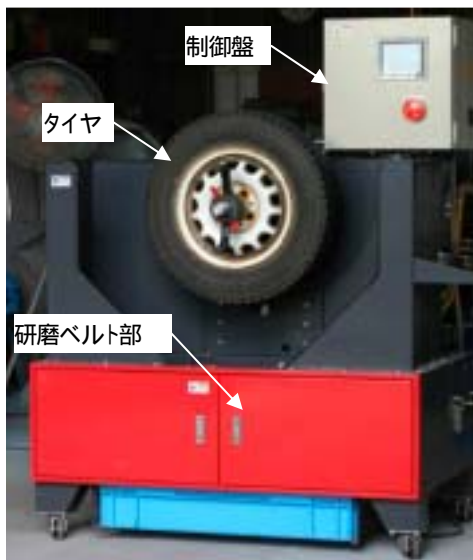


図6 同一初期条件での $\mu$ -S特性

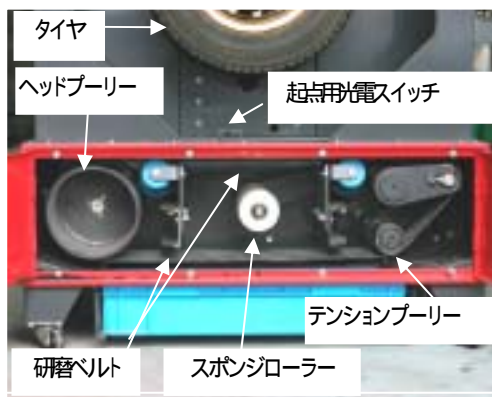
表2のタイヤからさらに300km以上アスファルト上を走行後、砂や泥を取り除き、洗浄後、乾燥。試験条件は、図5と同様。

表3 試験に使用した市販スタッドレスタイヤの概要

No.	サイズ	ゴム硬度 (平均値)	新品 中古	溝深さ (平均値)
A1~4	155/80 R13	51.5	中古	7.3
B1~4	165/65 R13	50.5	中古	7.6
C1~4	175/70 R13	50.7	中古	5.3
D1~4	185/65 R14	48.2	中古	5.7
E1~4	185/65 R14	45.4	中古	6.0
F1~4	185/70 R14	45.4	中古	5.7
G1~4	175/70 R13	50.2	中古	7.6
H1~2	175/70 R13	44.1	新品	8.8
I1~2	175/70 R13	48.5	新品	8.7
J1~2	175/70 R13	45.6	新品	8.7
K1~2	175/70 R13	44.3	新品	8.2
L1~2	175/70 R13	59.8	新品	7.9



(a)外観



(b)研磨ベルト部の拡大図

図7 タイヤトレッド表面研磨装置<sup>10)</sup>

磨装置は種々の粗さを有する複数の研磨ベルトが用意されており、目的に応じて研磨ベルトの種類を選択できるようになっている。そして再度、その表面粗さなどの表面性状を把握し、室内タイヤ試験機上で $\mu - S$ 特性を測定した。これらの結果よ

り、前述のトレッド表面粗さがある値のときにタイヤの氷上性能が最大になるという現象について、市販のタイヤの場合にも生じるのか、あるいは適用できるのかどうかについて考察した。

#### 4.1 研磨方法

図7のタイヤトレッド表面研磨装置は、供試タイヤを低速で回転させる部分と、研磨ベルトを高速で回転させる部分から構成されている。タイヤはタイヤ駆動モータを上下の昇降ガイドと一体化することで研磨時の押付け圧力や位置および速度を任意に設定できるようにしている。一方の研磨ベルト部は、二対の駆動用プーリーの外周に帯状の研磨ベルトを配置し、研磨ベルトにはエアシリンダーで作動するスポンジ状ローラーとテンションプーリーで張力を与える構成となっている。この研磨ベルトの下部に設けられたスポンジ状ローラーはその形状が工夫されており、研磨ベルトをタイヤトレッドに密着させ、トレッドの幅方向に湾曲したタイヤトレッドの表面を均一にむらなく研磨することを可能とした装置である。今回の研磨条件としては、ヘッドプーリー回転数を10Hz、スポンジローラー作動圧力を $1.5\text{kg/cm}^2$ 、テンションプーリー作動圧力を $2\text{kg/cm}^2$ 、タイヤ回転速度を $15/60\text{m/s}$ 、研磨時タイヤ位置を起点用光電スイッチから96mm下方の位置とし、それぞれ一定で実施した。研磨ベルトの種類は、粗さが60、80、100、120の4種類を用意した。

#### 4.2 試験手順

まず、表3に示したすべてのタイヤについて、初期状態(中古品は、水で洗浄後乾燥した状態(以後、「中古研磨前」と呼ぶ)、新品は購入時のままの状態(以後、「新品」と呼ぶ))での $\mu - S$ 特性を前述と同様の方法で測定した。使用した氷は、前述の氷Aに近い、導電率で約 $70 \sim 100\ \mu\text{S/cm}$ の氷で実路の雪氷に最も多い、かつ、市販タイヤに対して最も滑りやすい氷結路面である<sup>8)</sup>。氷温は、 $-5$ と $-1$ の2種類とした。

ついで、中古タイヤのA~Gについては、各4本づつ用意しているので、その各4本のタイヤに、前述の研磨装置を用いて、60、80、100、120の研磨ベルトで研磨し、4種類の粗さを施工した(以後、「中古研磨後」と呼ぶ)。その後、研磨前と同様の条件で $\mu - S$ 特性を測定した。

タイヤH~Lの新品タイヤについては、まず、後述の中古研磨後での最も摩擦係数 $\mu$ が増加した100の研磨ベルトを用いて、各2本のタイヤの中の本、合計5本を研磨した(以後、「新品研磨後」と呼ぶ)。残りの各一本、合計5本は、実車に装着してアスファルト上を300km走行させた状態とした(以後、「新品走行後」と呼ぶ)。そして、前述と同様な条件で $\mu - S$ 特性を測定した。

各 $\mu - S$ 特性の試験前には、 $R_z$ の測定やマイクロ스코プによる表面状態の観察などを実施した。図8に研磨前とタイヤトレッド研磨装置による研磨後の $R_z$ のタイヤトレッドの横(幅)方向と周方向の差について示す。これより、研磨前は、横(幅)方向と周方向の $R_z$ には若干ばらつきが見られるが、研磨後はばらつきが少なくなり、周方向も横(幅)方向も同様な粗さに施工されていることが判る。また、「新品」と「新品走行後」の $R_z$ は大きな変化がない状態となった。

### 4.3 試験結果

試験結果を図9に示す。これは、38種類のタイヤの試験結果で、コンパウンドの違い、トレッドパターンの違い、研磨方法の違いによる差をすべて包含したデータである。これらより、次のことが明らかになった。

(1)  $\mu_{max}$  の-5 の場合は、ばらつきが大きいのが、約 20~30  $\mu m$  の粗さで摩擦係数が最大になるという傾向が現われている。これは前述での結果(図3上、氷 A のデータ)よりも 5~10  $\mu m$  右ヘシフトしているが、傾向はほぼ一致する。

(2)  $\mu_{max}$  の-1 の場合と  $\mu_{lock}$  の場合は、「新品走行後」のデータを除くと全体に右肩上がりの傾向となっているのが判る。特に  $\mu_{lock}$  はその傾向が強いが、約 50  $\mu m$  以上での摩擦係数は低下する傾向にある。これも前述の傾向(図3の下)に

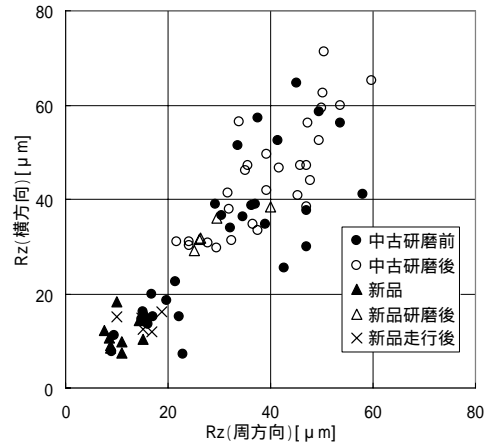
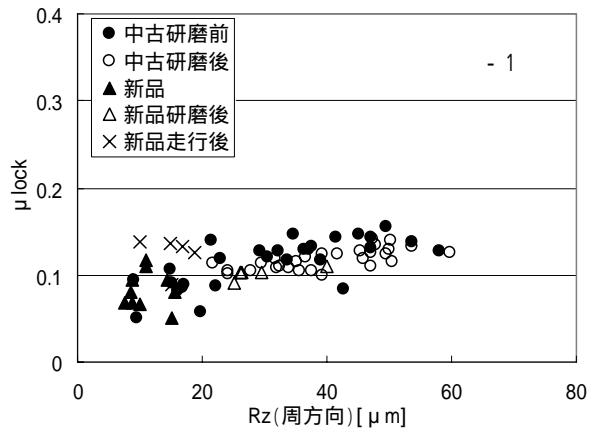
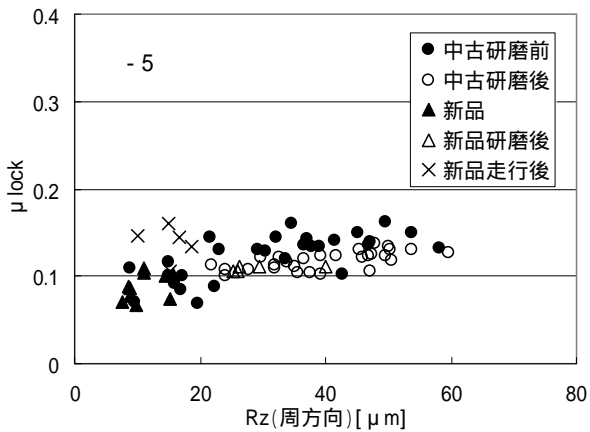
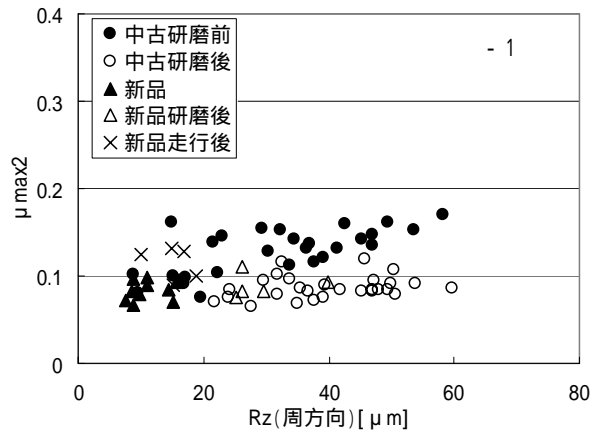
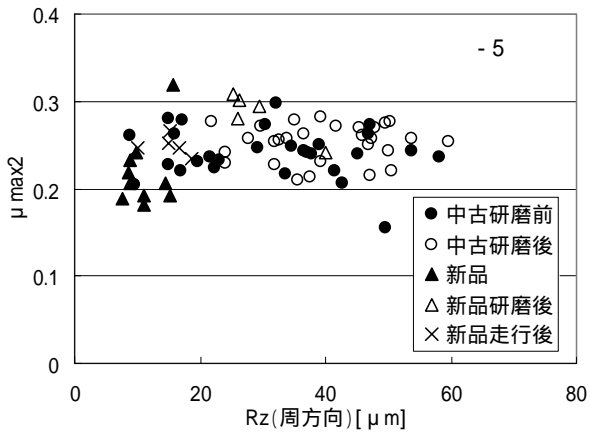
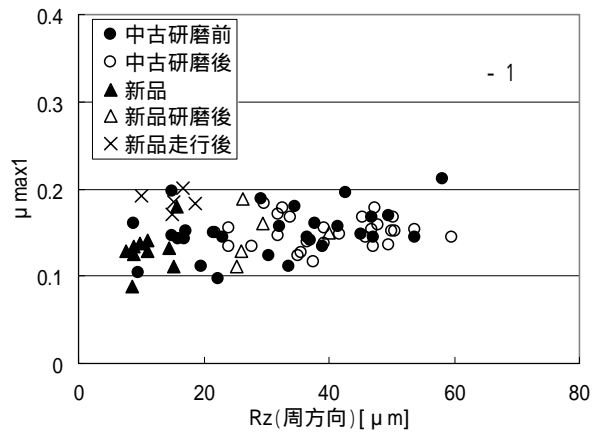
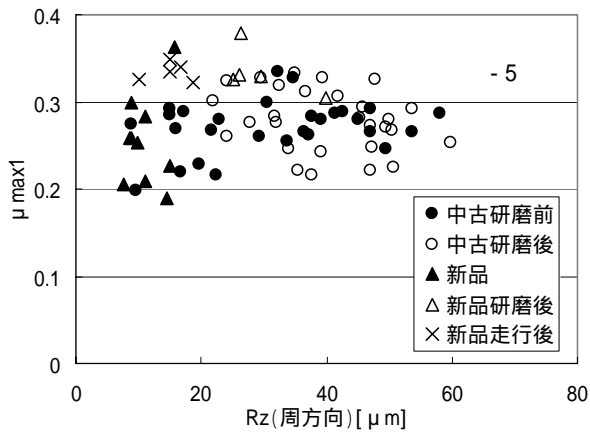


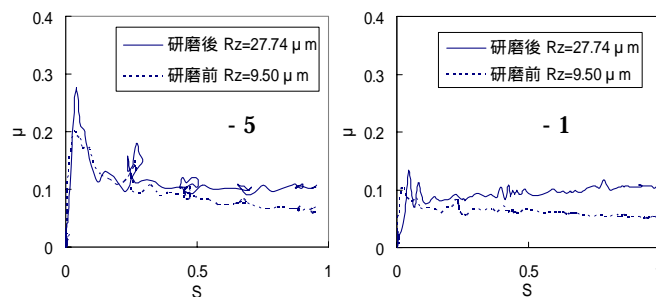
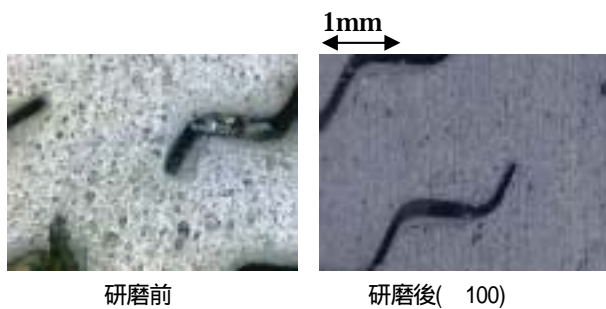
図8 研磨前と研磨後の十点平均粗さ Rz のタイヤトレッドの横(幅)方向と周方向の違い



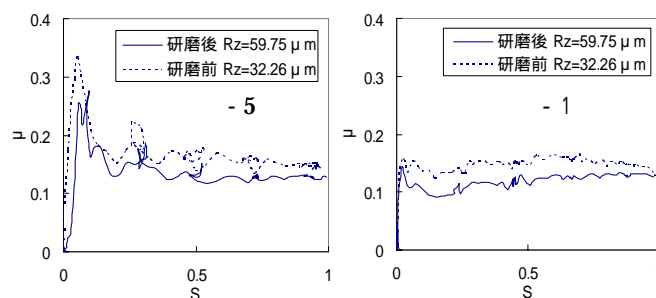
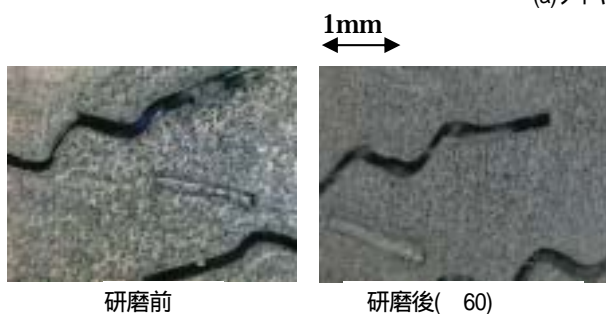
(a) - 5

(b) - 1

図9 市販スタッドレスタイヤの  $\mu$  - S 特性とトレッド表面粗さ(Rz)との関係



(a)タイヤA4



(b)タイヤE1

図10 タイヤA4、E1の研磨前後のトレッド表面画像と $\mu$ -S特性(-5、-1)

ほぼ一致する。

(3)「新品」と「新品研磨後」を比較すると、「新品」では、 $R_z$ が $10 \sim 15 \mu\text{m}$ であったものが、「新品研磨後」には、最適な約 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ となり、 $\mu$ も向上していることが判る。

(4)「新品走行後」のデータは、特に $\mu_{\text{max}}$ や $\mu_{\text{lock}}$ においては、 $R_z$ が $10 \mu\text{m}$ から $20 \mu\text{m}$ と小さいにも関わらず $\mu$ が比較的大きくなっていることが判る。これは、走行後に表面粗さ以外の要因が変化して $\mu$ が向上しているものと考えられるが、その詳細については今後の課題である。

いずれにしても、これらの現象は、スムーズタイヤの結果と同様に、タイヤトレッドと氷間(接地面)に発生する水膜の影響や真実接触面積の影響が大きいと考えられる。

図10は、タイヤトレッドの研磨前後の摩擦特性の例を示したものである。タイヤA4の場合、研磨前は $9.5 \mu\text{m}$ の粗さであったものが、研磨後には約 $28 \mu\text{m}$ となり、研磨後の方が $\mu_{\text{max}}$ 、 $\mu_{\text{lock}}$ 共に向上している。これに対して、タイヤE1は、研磨前には約 $32 \mu\text{m}$ であったものが研磨後は約 $60 \mu\text{m}$ となり、研磨後の方が $\mu_{\text{max}}$ 、 $\mu_{\text{lock}}$ は共に減少している。これらは、ある表面粗さで摩擦係数が最大になることを示唆している。

## 5. まとめ

以上の結果より、タイヤの氷上性能がある表面粗さで最大になるという現象は、市販スタッドレスタイヤの場合にも生じ、適用できるということが判った。すなわち、トレッドパターンやゴムコンパウンドなどが種々に異なる市販のタイヤを用いた実験でもある表面粗さで摩擦係数が最大になる傾向が見出された。したがって、今後のスタッドレスタイヤの開発では、あらためて、このトレッド表面粗さの重要性を考慮すべきものと考えられる。

また、タイヤの氷上性能を向上させる目的でタイヤ研磨装置でタイヤのトレッド表面を研磨する場合には、研磨後の表面粗さが $R_z$ で約 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ の範囲に収まるような研磨ベルトの種類(粒度、研磨材など)や研磨方法を適正に選択する必要があるといえる。

最後に、供試タイヤの前処理等の大変な作業をはじめ、長期間を必要とした本実験に参加された芝浦工大の研修生諸君に感謝の意を表する。

## 【参考文献】

- (1) A D Roberts, J D Lane: Friction of rubber on ice in the presence of salt, J.Phys.D:Appl.Phys.,16(1983)
- (2) 二瓶他: タイヤの氷上性能への摩擦熱の影響, 自動車技術会論文 文集 Vol.28, No.1 (1997)
- (3) 内山: 摩擦と表面 日本ゴム協会誌 第65巻 5号 (1992)
- (4) 二瓶他: タイヤトレッドの表面粗さが氷上性能に与える影響, トライポロジー会議予稿集 名古屋1998-11, p411-413
- (5) 二瓶他: タイヤトレッドの表面粗さが氷上性能に与える影響(第2報) - ある表面粗さで最大摩擦力を発生するメカニズムについて -, トライポロジー会議予稿集 高松1999-11, p121-122
- (6) 清水他: 雪氷路用タイヤの室内試験法に関する研究, 機軸支研 研究所報告 第157号 (1992)
- (7) 例えば, 宇田川他: 摩耗時のゴム表面構造変化, 日本ゴム協会 年次大会講演要旨集 (1998)
- (8) 二瓶他: 氷中の電解質不純物濃度とタイヤの氷上性能, 自動車技術会論文 文集 Vol.25, No.2 (1994)
- (9) 二瓶他: タイヤの氷上性能における氷の性状の影響 - 氷中のイオン濃度と摩擦の成分について -, 寒地技術シンポジウム'95 論文報告集
- (10) (有)エー・アイ・エスホームページ: タイヤ研磨装置「けんま君」 <http://ais1.jp/>