



スタッドレスタイヤのトレッド摩耗状態とタイヤ特性に関する研究

Effect of wear of tread on tire characteristics

三觜康弘¹、山根旭裕²、松井 隆³、二瓶光弥⁴
Yasuhiro MITSUHASHI¹、Akihiro YAMANE²、Takashi MATSUI³、Mitsuya NIHEI⁴

¹ 芝浦工業大学

¹ Shibaura Institute of Technology

² 東京電機大学大学院

² Tokyo Denki University (Graduate School)

³ (有)エー・アイ・エス

³ A・I・S Ltd.

⁴ (独)産業技術総合研究所

⁴ Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

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もなっており、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¹⁾²⁾。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³⁾。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。

また、スタッドレスタイヤは一般にゴム硬度が柔らかくできており、トレッドゴムの摩耗の進行が夏タイヤに較べて早い。そして、過酷な使用状況下では、鋸刃状の摩耗(ヒール・アンド・トゥ摩耗)を生じやすい。この鋸刃状の摩耗は、一般的には「段減り」と呼ばれている。ここでも以後、「段減り」と呼ぶことにする。段減りの一例を図 1 に示す。段減りしてしまうと騒音が大きくなると共に、燃費も悪くなり、氷上性能も低下するといわれ、運送業界やタクシー会社等では、摩耗したタイヤと共に破棄される場合も少なくない。これは大きな経済的損失や地球環境への影響に繋がる。この段減りしたタイヤを研磨してトレッドを平滑に再生するという方法が考えられている⁴⁾。研磨することでタイヤの性能が許容できる範囲に保つことが出来れば、この方法は問題を解決するひとつの手段となり得る。しかし、



図 1 段減りしたタイヤの一例

このようなタイヤトレッドの摩耗状態と燃費に影響する走行抵抗(転がり抵抗)や氷上性能などのタイヤ特性との関係については、系統的な解析例が少なく充分には判っていない。

ここでは、摩耗したタイヤや段減りしたタイヤおよびそれらを研磨したタイヤの種々の摩耗状態のタイヤを用いて、そのタイヤの走行抵抗性能や氷上性能との関係について実験的に調査を実施したので、これらの結果について述べる。

2. 対象としたタイヤおよび試験方法

対象としたタイヤは、摩耗状態が種々のタイヤを用いた。まず、氷上性能試験用としては、通常の摩耗状態のタイヤで、トレッド溝深さが約 3 mm から 8 mm の中古の市販スタッドレスタイヤ 7 種 28 本、新品の市販スタッドレスタイヤ 5 種 10 本を用いた。そして、走行抵抗試験と氷上性能試験用

に、段減りした市販スタッドレスタイヤ 4 本と一度段減りした市販スタッドレスタイヤを研磨して再生したタイヤ 4 本を用いた。

走行抵抗試験は、試験車両(プリウス)を用いて、惰行試験法 (TRIAS 24-3-1985)⁵⁾により求めた。これは試験車両を各試験速度の ±5km/h の速度域の減速時間を計測し、この減速度と試験車両の総重量などとの積から走行抵抗が求められる。ここでは比較のために夏用タイヤについても同様の試験を実施した。

氷上性能試験は図 2 に示す室内タイヤ試験機を使用してタイヤの μ (制動力係数)-S (スリップ比) 特性を求めた。

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。

μ - S 特性試験は、ドラム速度を一定でタイヤ速度を一定速度から 0km/h(制動時)、ついで、摩擦熱による水膜の影響を見るため、0km/h から一定速度まで(制動解除時)と変化させてその時の制動力係数 μ (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。 μ - S 特性の概念図を図 3 に示す。一般に氷上でのタイヤの μ - S 特性は、低スリップ比で μ は最大値をとり、タイヤがロック (S = 1 のとき)

すると μ は低下する(ここでは、この最大値を制動時の場合を $\mu_{\max 1}$ 、制動解除時の場合を $\mu_{\max 2}$ ($\mu_{\max 2}$ は、 $\mu_{\max 1}$ よりも大きくなる場合と小さくなる場合がある⁶⁾)と呼び、また、ロック時を μ_{lock} と呼ぶ。試験温度は -5、-1、試験速度は 20km/h、40km/h、接地荷重は 4kN とした。

これらの試験結果より、トレッドの摩耗状態とタイヤ特性について考察した。

3. 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耗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摩耗状態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)が必要かについて述べる。

表 1 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 μ - S 特性を調査した。表 1 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(この砂は、道路上に防滑剤として散布されている砂(7 号砕石)。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、研磨装置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(鬚状突起)が付いたままの状態となっている。

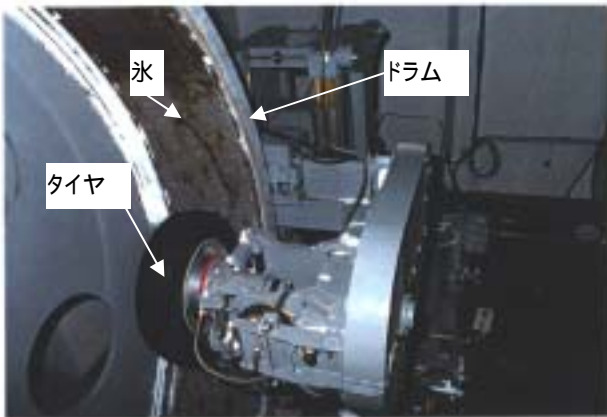


図-2 室内タイヤ試験機

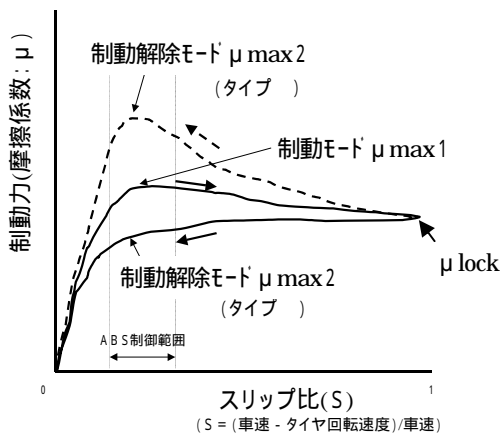


図-3 μ - S 特性の概念図

表-1 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 (JIS A)
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

この 4 本のタイヤの -1 における氷上での μ -S 特性を測定した結果を図 5 に示す。これより、砂が入ったままのタイヤ A が最も μ が高くなり、新品タイヤ D が最も低い μ となっており、トレッドの表面状態によって大幅に μ が異なる。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 300 km 実車走行させ、トレッド表面をマイルド摩耗⁷⁾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、 μ -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 共にあまり差が無くなった。したがって、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、タイヤの氷上実験や走行抵抗試験では、砂や泥を取り除き、十分な洗浄を施して実施した。

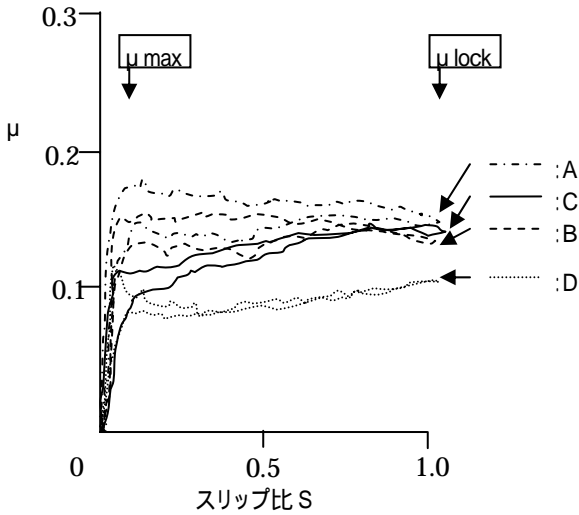


図-5 トレッド表面処理無しでの μ -S 特性
(Fz:350kgf, Pt: 2kgf/cm², -1)

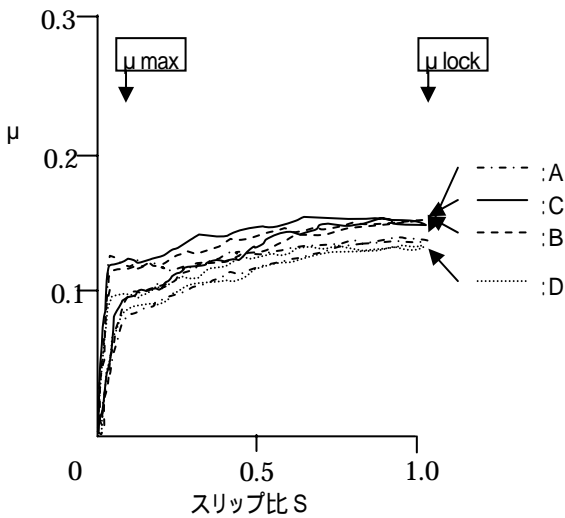


図-6 トレッド表面処理後の μ -S 特性
(Fz:350kgf, Pt: 2kgf/cm², -1)

4. 通常摩耗状態および研磨したタイヤの μ -S 特性

試験に使用したタイヤの概要を表 2 に示す。前述のようにトレッド溝深さが約 3 mm から 8 mm の中古の市販スタッドレスタイヤ 7 種 28 本、新品の市販スタッドレスタイヤ 5 種 10 本を用いた。

図 7 に -1 における中古スタッドレスタイヤおよび新品スタッドレスタイヤの μ_{max1} と溝深さ及び表面粗さ(十

表-2 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

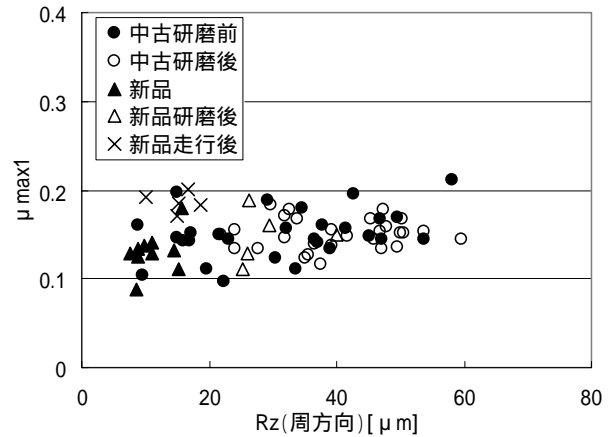
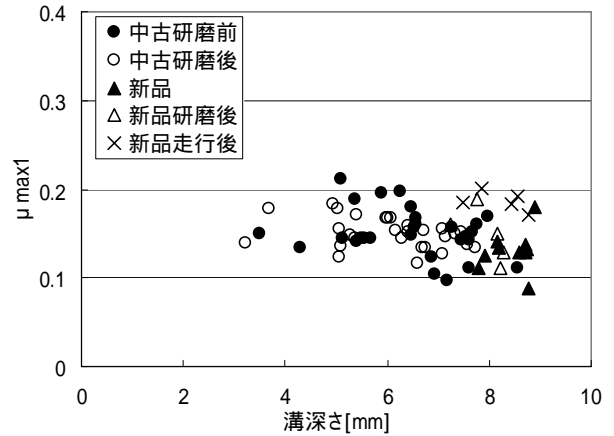


図-7 種々のタイヤの μ_{max1} とトレッドの溝深さおよび表面粗さ(Rz)との関係(-1, 20km/h)

点平均粗さ R_z) との関係の例を示す。ここで、研磨処理をする前と後の μ_{max1} を同時に示した。また、新品タイヤについてはアスファルト上を 300km 走行後(「新品走行後」: \times) の μ_{max1} も示した。

図 7 において、表面粗さ R_z が大きくなるほど μ_{max} も大きくなる傾向が見られる。この表面粗さに関する影響については既報⁸⁾で報告したのでここでは省略する。溝深さの影響については、まず、溝深さが 5 mm 以上では溝深さが大きくなるほど徐々に μ_{max1} が減少していることが判る。これは、トレッドゴムの粘弾性的性質にも左右されるが、溝が深いほどトレッドゴムが変形(倒れ込み)し、氷結路面との接触面積が小さくなっているものと考えられる。また、後述する段減りタイヤの特性とも共通する現象となっている。これについては、6. の考察で言及する。

5. 段減りタイヤおよび段減りを研磨したタイヤの特性

5.1 試験に使用したタイヤ

試験に使用したタイヤの概要を表 3 に示す。段減りタイヤはタクシー会社で使用されていたタイヤで段減りと共に破棄されたものである。研磨タイヤは段減りタイヤと同じタクシー会社で使用され段減りしたタイヤを研磨装置で研磨したタイヤである。これは段減りタイヤと比較して摩耗の程度が大きくなっていると共に、ゴム硬度も硬くなっている状態となっている。

表-3 試験に使用したタイヤのパラメータ
(サイズ: 175/80R14)

		溝深さ(mm)	ゴム硬度	製造年・週
段減り タイヤ	1	10.0	53.6	2006 年 18 週
	2	10.0	59.2	"
	3	9.4	54.1	"
	4	9.8	55.5	"
研磨 タイヤ	1	5.4	65.6	2004 年 36 週
	2	4.7	66.1	" 35 週
	3	5.3	65.7	" 35 週
	4	5.8	63.3	" 34 週

5.2 段減りおよび研磨タイヤの走行抵抗特性

走行抵抗試験は、前述のように試験車両にプリウスを用いた惰行試験法により求めた。試験方法は JIS で定められており、試験速度の $\pm 5\text{km/h}$ の速度域の減速時間を計測し、減速度を導出することで求められる。ここでは比較のために夏用タイヤ(175/80R14)についても同様の試験を行った。図 8 に惰行試験から得られた走行抵抗の結果を示す。走行抵抗は速度の 2 乗に比例して増加するが、速度ゼロのときの走行抵抗が転がり抵抗を表している。

図中の段減り(順目)、段減り(逆目)は、それぞれ段減りの順目、逆目の設置状態であることを示している。順目とはタイヤが段減りを起こしたそのままの向きで走行した場合であり、逆目は逆向きに装着させて走行した場合である。これより、段減りの順目と逆目は走行抵抗が比較的大きいものに対して、研磨したタイヤは夏用タイヤと同程度の値となっていることが判る。したがって、段減りしたタイヤを研磨することで燃費が向上することが判る。今回使用した

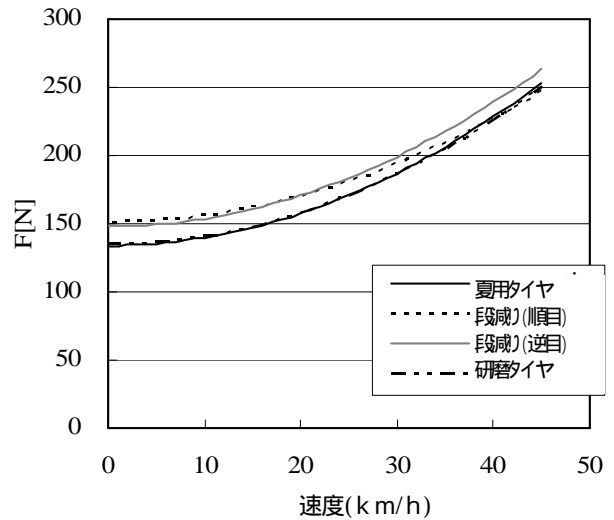


図-8 走行抵抗 F の測定結果

研磨用の段減りタイヤは研磨した状態で溝深さが約 5 mm と摩耗が進んだ状態のものであったが、今後の課題としては、溝深さが新品に近い段減りタイヤを用いて研磨の効果を調査する必要もある。いずれにしても、段減りタイヤを研磨処理することで走行抵抗が小さくなることが明らかになった。

5.3 段減りおよび研磨タイヤの氷上性能特性

図 9、図 10 に室内タイヤ試験機による $\mu - S$ 特性の試験結果の - 1 における μ とトレッド表面粗さおよび溝深さとの関係を示す。図 9 が 20km/h、図 10 が 40km/h のときの結果である。これより、次のことが明らかになった。

- (1) 表面粗さ R_z が大きくなるほど μ も大きくなる。これは 4. で述べた傾向と一致する。
- (2) 溝深さが大きくなるほど μ が減少している。これは、前述と同様に、4. で述べた傾向と一致する。
- (3) 段減りタイヤよりも研磨タイヤの方が大幅に μ は大きくなっている。

研磨タイヤは、段減りタイヤと比較して、ゴム硬度が硬く、しかも溝深さが小さく摩耗が大きいものとなっているにもかかわらず、研磨することで μ は大幅に向上していることが判る。これらの傾向は - 5 の試験条件でも同様であった。ただし、- 5 の場合の μ は - 1 よりも全体的に大きくなり、より安全な方向になる。したがって、実質的には氷の融点に近い - 1 におけるタイヤ特性がより重要となる。

6. 考察

制動力係数 μ へのトレッド表面粗さの影響に関しては既報⁸⁾で考察しているため、ここでは、溝深さの影響および研磨による影響について考察する。

まず、 μ と車両の制動距離との関係について述べる。いま初期速度 V で走行していた質量 m の車両がブレーキをかけて、一定の制動力 F を発生しながら制動距離 L で停止した場合を考える。簡単のために、制動力による仕事 ($F \cdot L$) は車両がはじめに持っていた運動エネルギー ($1/2 \cdot m \cdot V^2$) に等しいと仮定すると、制動力係数(摩擦係

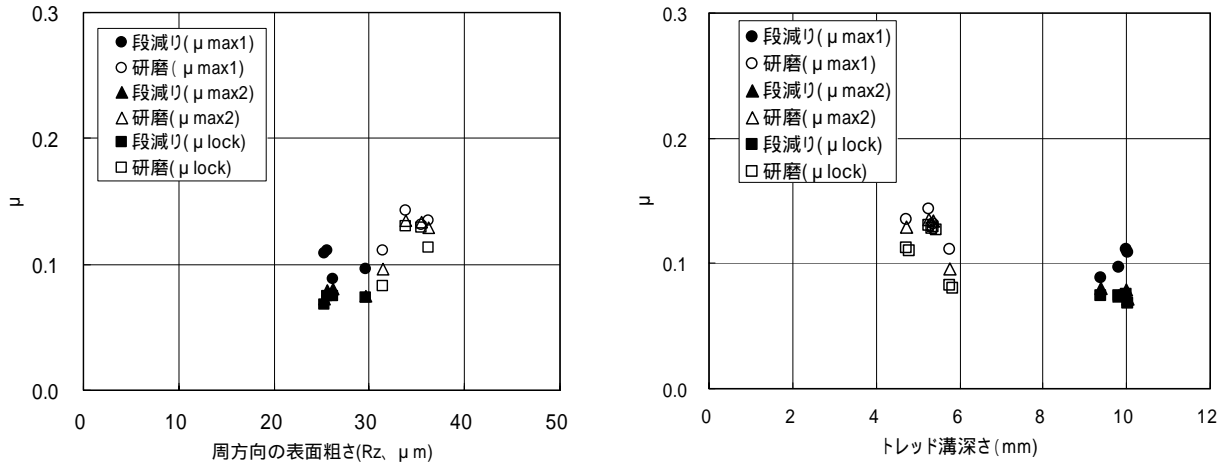


図-9 氷上での μ - S 特性とトレッド表面粗さおよび溝深さとの関係 (- 1、20km/h)

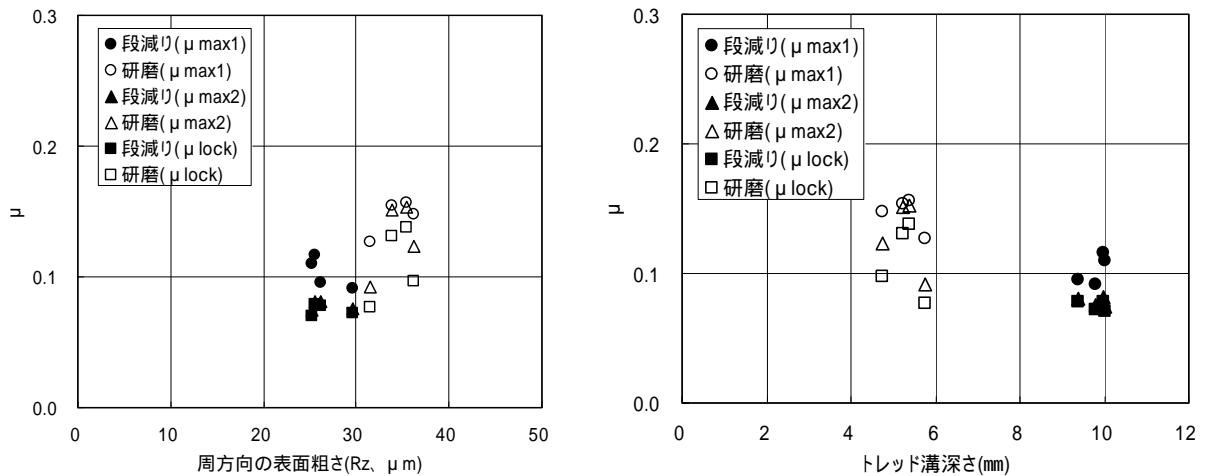


図-10 氷上での μ - S 特性とトレッド表面粗さおよび溝深さとの関係 (- 1、40km/h)

数) μ と車両の制動距離 L の関係は次式で表される。

$$L = V^2 / (2 \cdot \mu \cdot g) \quad \dots(1)$$

ここで、 $\mu = F / (m \cdot g)$ であり、 g は重力加速度である。したがって、制動距離は μ の増加と共に反比例して短くなる。 μ が 0.1 から 0.2 になったとすると制動距離は 1/2 と短くなる。図 10 の $\mu_{\max 1}$ は、段減りタイヤの約 0.1 から研磨タイヤの 0.15 と大幅な μ の向上となっており、ABS 付きの車両ならば制動距離の大幅な短縮となる。

このように段減りタイヤと研磨タイヤは氷上での μ の値が異なり、特にスリップ比の小さい範囲での μ である $\mu_{\max 1}$ や $\mu_{\max 2}$ の値が大幅に異なっていることが判る。また、走行抵抗は前述のように段減りタイヤよりも研磨タイヤの方が小さく、夏用タイヤとほぼ同等となっている。これらのメカニズムについて考察する。

図 11 に段減りタイヤ 4 と研磨タイヤ 2 の接地面の面圧や接地(加圧)面積を調べた結果を示す。これは、富士フィルム社製のプレスケールで測定したもので、接地荷重は氷上での試験と同様に 4 kN とした。これより、次のことが明らかになった。

(1) 見かけの接地長さ L_0 は研磨タイヤよりも段減りタイヤの方が長い。これは、溝深さの差(タイヤ有効半径の差)

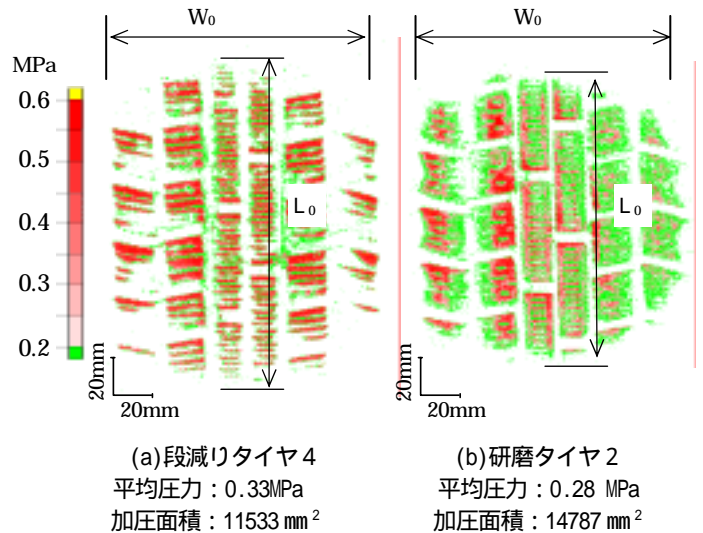


図-11 試験タイヤの接地面圧と接地(加圧)面積の測定例

が現われているものと言える。

(2) 見かけの接地幅 W_0 は、段減りタイヤも研磨タイヤもほぼ同じである。

(3) 接地(加圧)面積は、段減りタイヤよりも研磨タイヤの方が大きい(約 1.3 倍)。これは、研磨によるトレッド面の平滑化が効果を現していると言える。

(4) 平均面圧は、段減りタイヤの方が研磨タイヤよりも約

1.3 倍大きい。これは、ゴムブロックやサイブ部分が鋸刃状に摩耗しているため、接触面積が小さく、面圧は高くなっているものと考えられる。

以上の結果より、研磨タイヤは段減りタイヤよりも真実接触面積が大きく、面圧が小さくなるため、 μ が大きくなっているものと言える⁹⁾。また、研磨タイヤは段減りタイヤよりもゴムブロックやサイブ部分が平滑になっていることやトレッド溝深さが小さく、ゴム硬度も硬くなっているため、ゴムの変形によるヒステリシス損失も小さくなり走行抵抗(転がり抵抗)が小さくなっているものと考えられる。

図 12 に段減りタイヤ 4 と研磨タイヤ 2 のトレッド面のマイクロSCOPEによる拡大写真およびトレッド周方向の表面粗さのプロフィールと Rz の値を示す。これより、次のことが明らかになった。

(1)段減りタイヤは、トレッド表面に、ある一定間隔の波模様状のアブレーションパターンを発生している。これは、ゴムのシビア摩耗⁷⁾に相当し、通常のアスファルト路面の走行によっても生じる。また、サイブのエッジは丸みを帯びている。

(2)研磨タイヤのトレッド面は、研磨痕が見られるが全体的に平滑となっていると共に、サイブのエッジが鋭くなっていることが判る。

これらの結果から、ミクロな観点からも、段減りタイヤよりも研磨タイヤの方が真実接触面積は大きくなって、 μ に大きく影響しているものと考えられること、また、サイブのエッジ効果は、研磨タイヤの方が大きいことも予想されることが判る。この段減りタイヤの μ が小さいというメカニズムは前述の中古タイヤの μ が溝深さの大きいほど小さくなる現象と良く似ており、中古タイヤにおいてもわずかながら“段減り”が生じているものと考えられる。

7. まとめ

通常の摩耗状態のタイヤと過酷な使用状態での段減りタイヤおよびそれらを研磨装置で研磨したタイヤの走行抵抗および氷上性能について実験的に解析した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1)表面粗さ Rz が大きくなるほど μ も大きくなる。
- (2)溝深さが 5 mm 以上では溝深さが大きくなるほど徐々に μ が減少する。溝が深いほどトレッドゴムが変形(倒れ込み)し、氷結路面との接触面積が小さくなっているものと考えられる。
- (3) 段減りタイヤを研磨処理することで走行抵抗が小さくなる。研磨タイヤは段減りタイヤよりもゴムブロックやサイブ部分が平滑になっていることやトレッド溝深さが小さく、ゴム硬度も硬くなっているため、ゴムの変形によるヒステリシス損失が小さくなり走行抵抗(転がり抵抗)が小さくなるものと考えられる。
- (4) 研磨タイヤは段減りタイヤより、マクロ的にもミクロ的にも真実接触面積が大きく、面圧が小さくなっていること、およびサイブのエッジ効果の向上から、研磨タイヤの方が段減りタイヤよりも大幅に氷上での μ は大きくなる。

これらの結果より、通常の摩耗状態である中古タイヤから過酷な使用状況で発生した段減りタイヤまでの摩耗状態

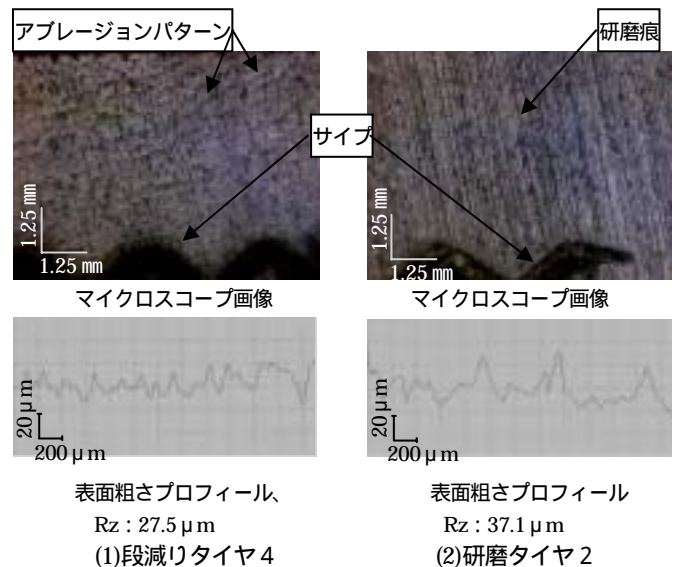


図-12 トレッド面のマイクロSCOPE画像および周方向表面粗さの測定例

というのは基本的には同一の性状であり、通常の摩耗状態といっても若干の段減り状態を伴っているものと考えられ、目に見えて大きくなった状態を特に段減りタイヤと呼んでいるものと考えられる。

以上の結果は、スタッドレスタイヤの摩耗状態と走行抵抗性能および氷上性能についてのみ考察したものであり、実際のタイヤの特性はドライな状態やウエットな状態、圧雪路面での性能などトータルな性能評価が求められることに注意願いたい。

最後に、本論文で使用した実験データの一部は歴代の芝浦工業大学卒業研究生や大学院生により実施されたものであり、ここにあらためて感謝の意を表する。

【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)有AIS、HP：タイヤ研磨装置「けんま君」 <http://ais1.jp/>
- (5)「新型自動車の試験方法について」(TRIAS Traffic safety nuisance Research Institute's Automobile type approval test Standard) TRIAS 24-3-1985
- (6)清水他：雪氷路面タイヤの室内試験 - 第 4 報 制動時の μ - S 特性のヒステリシス -、自動車技術会論文集、Vol.22、No.2(1991)
- (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)二瓶光弥、松井隆、加藤義隆：タイヤの氷上性能へのトレッド表面粗さの影響、寒地技術論文報告集、Vol.22、p147-152(2006)
- (9)二瓶他：氷路面上のタイヤの制動力係数とトレッドゴム硬度との関係、自動車技術会学術講演会前刷集、101-02 (20025564) (2002)