自動車用タイヤのトライボロジー

山 崎 俊 一*

1. ま え が き

自動車に関するトライボロジーとして、エンジン、クラッチ、ベルト、シール、ベアリング、タイヤなどがある。これらには、滑らせたものや逆に滑らせたくないものの両方があり、滑らせたくないものにタイヤがある。タイヤは、丸い形状であるが、自動車に装着して、荷重が負荷されると接地部は平らな形に変形する。丸いものが部分的に平らにされ、回転すると接地面内ですべりが生じる。すべりが生じることによって、トレッドが摩耗する。更に、タイヤは、摩擦して制動・駆動力や旋回するための横力を路面に伝達している。このように、タイヤにとって摩擦や摩耗は、重要な課題である。

本稿では、自動車用タイヤのトライボロジーとして様々な路面状態におけるタイヤと路面間で

発生する制動力について述べることにする。

2. 制動時のタイヤの力学¹⁾

最初に、タイヤの摩擦力の発生を理解するために簡単なタイヤの力学について述べる。はじめに、タイヤの接地圧力 p は、図1に示すように、放物線と仮定する²⁾。

$$p = 4 p_m \frac{\xi}{l} \left(1 - \frac{\xi}{l}\right) \quad (1)$$

ただし、 l は接地長さを示し、 p_m は最大接地圧力である。また、荷重 F_z は、次式で表される。

$$F_z = \frac{2}{3} p_m w l \quad (2)$$

制動力とスリップ比の関係から摩擦係数を推定する理論について述べる。制動時のスリップ比 S_B は、一般的に次式で定義されている。

$$S_B = \frac{V_x - V_c}{V_x} \quad (3)$$

ただし、 V_x は自動車の速度(試験機上では、路面速度)で、 V_c はタイヤのトレッドベースの速度で

図1 接地圧力分布のモデル²⁾

*1) 財団法人自動車研究所ダイナミクス研究部(〒305-0822 茨城県つくば市刈間2530)プロジェクトディレクター、工博。昭和51年、中央大学理工学部大学院修士課程修了。同年、財団法人自動車研究所入所、現在に至る。専門は、タイヤの力学、タイヤのトライボロジー、スリップ痕と交通事故分析。日本ゴム協会トライボロジー研究分科

会主査、編集委員、出版企画委員、自動車技術会タイヤ運動特性専門委員会委員長、車両運動企画部長。

図2 トレッドのせん断力発生モデル²⁾ 図3 接地面の粘着域とすべり域²⁾

ある。

図2を参照すると²⁾，自動車とタイヤトレッドベースの速度差 ΔV_{ξ} は，次式で表される。

$$\Delta V_{\xi} = V_x - V_c \quad (4)$$

したがって，トレッドゴムの前後方向のせん断変形量 $\Delta \xi$ は，次式で表せる。

$$\Delta \xi = S_B \xi \quad (5)$$

図3に示すように²⁾，タイヤに制動力(前後力)が作用したとき，タイヤの接地面内に粘着域とすべり域が発生する。ここで， a は粘着長さである。

(1) 粘着域

接地面内の粘着域で発生する前後方向応力

$\sigma_{\xi}^{(a)}$ は，次式となる。

$$\sigma_{\xi}^{(a)} = k_x \Delta \xi = k_x S_B \xi \quad (6)$$

ただし， k_x はトレッドゴムの単位面積あたりの前後ばね定数である。

(2) すべり域

すべり域の前後方向応力 $\sigma_{\xi}^{(s)}$ は，摩擦係数を μ_x とすると次式で与えられる。

$$\sigma_{\xi}^{(s)} = \mu_x p \quad (7)$$

(3) 粘着域とすべり域の境界

粘着域とすべり域の境界点から，すべり出す点を見いだす。境界点では， $\xi = a$ において粘着とすべりによる前後方向応力は等しいから，

$$\sigma_{\xi}^{(a)} = \sigma_{\xi}^{(s)} \quad (8)$$

と表せる。ここで，接地面において粘着率を n とすると，接地面のすべり率は

$$S_n = 1 - n = 1 - \frac{a}{l} \quad (9)$$

とかける。式(9)を考慮し， $\xi = a$ において式(8)を整理すると次式が求められる。

$$S_n = \frac{C_s S_B}{3 \mu_x F_z} \quad (10)$$

ここで， C_s はスリップ比が小さいときの，単位スリップ比あたりの制動力でブレーキングステイフネスと呼ばれ，次式で与えられる。

$$C_s = \frac{1}{2} w k_x l^2 \quad (11)$$

よって，スリップ比 S_B は次式となる。

$$S_B = \frac{3 \mu_x F_z S_n}{C_s} \quad (12)$$

接地面が全部すべり状態となる限界では $a = 0$ であり，式(9)から $S_n = 1$ となるので，式(12)からその限界スリップ比 S_{BC} は次式で与えられる。

$$S_{BC} = \frac{3 \mu_x F_z}{C_s} \quad (13)$$

(4) 制動力(前後力)

(i) $S_B \leq S_{BC}$ のとき(粘着があるとき)

制動力は次式で与えられる。ただし， $l_n = a/l$ とおく。

$$F_x = \int_0^l \sigma_{\xi} w d\xi = C_s S_B l_n^2 + \mu_x F_z (1 - 3 l_n^2 + 2 l_n^3) \quad (14)$$

ここで， $C_s S_B = S_n \cdot 3 \mu_x F_z$ であるから， $\mu_x F_z = C_s S_B / 3 S_n$ である。よって，

$$F_x = 3 \mu_x F_z S_n \left(1 - S_n + \frac{S_n^2}{3} \right) \quad (15)$$

(ii) $S_B \geq S_{BC}$ のとき

接地面がちょうど全部すべり状態となるときは $a = 0$ で，式(9)から $S_n = 1$ となる。よって，式(15)から制動力は次式で与えられる。

$$F_x = \mu_x F_z \quad (16)$$

以上のように，本解析によれば最大制動力を発生するスリップ比では，タイヤの接地面は全すべり状態となり，トレッドゴムのすべり速度は，式(4)

で与えられるものである。

3. タイヤのスリップ比と制動力係数の関係

はじめに、タイヤのスリップ比と制動力係数の関係について整理する。図4は、制動力係数とスリップ比の一般的関係を示したものである。これは、自動車(試験機のドラム)の走行速度を一定にし、タイヤの速度を徐々に低下させて、タイヤが発生する制動力とそのスリップ比を測定したものである。この両者の関係を、一般的にタイヤの μ -s特性と呼ぶが、このときの μ は、制動力係数であり、摩擦係数ではないことに注意を要する。制動力係数とは、スリップ比が0~1.0まで変化するとき、タイヤが発生する制動力 F_x を荷重 F_z で除した値であり、摩擦係数ではない。制動力係数の立ち上がり部分では、タイヤの接地面が粘着域をもっているからである。スリップ比が1.0のときの制動力を荷重で除して、ロック制動力係数と呼ぶ。スリップ比が1.0のとき、タイヤの回転が停止し、ロック状態を意味する。したがって、スリップ比が1.0のときのロック制動力係数は、すべり摩擦係数と同義である。また、原点からの立ち上がり勾配は、前述のブレーキングステイフネスである。この図から、タイヤを制動させるとき、ロックしないで、回転していても大きな制動力を発生することがわかる。この最大制動力を利用したのが、自動車のアンチロックブレーキシステム(ABS装置)である。タイヤが完全にロックしてしまうと、曲がるためのコーナリングフォースが発生できない。最大制動力を発生するように

図4 制動力係数とスリップ比の関係

タイヤの回転を制御すれば、制動しながらコーナリングフォースが発生でき、事故回避することができる。

ABS装置が開発されたことによって、タイヤ単体の制動特性の評価項目として、ロック制動力係数の他に最大制動力係数も考慮するようになっている。しかしながら、測定する速度によって、最大制動力係数は異なる。したがって、どの速度における最大制動力係数でタイヤを評価するかが問題となる。

図5は、異なる速度における制動力係数とスリップ比の関係を示したものである。この図から、走行速度によって、最大制動力係数が異なることがわかる。

つぎに、最大制動力係数について整理する。最大制動力係数は、前述のように、トレッドの接地面が粘着部のない全すべり状態になる点である。このときのすべり速度は、式(4)で与えられることに注意が必要である。制動力の最大値は、接地面内で粘着域のなくなる限界点で、その点を少しでも越えれば、接地面は全すべり状態である。したがって、制動力の最大値を超えた後の制動力を荷重で除した値は、すべり摩擦係数と考えることができる。制動力の最大値を少し超えたときの最大

図5 異なる速度の制動力係数とスリップ比の関係³⁾

制動力係数は、低いすべり速度でのすべり摩擦係数である。

図6は、図5の最大制動力係数を越えたスリップ比において、スリップ比ではなくすべり速度で整理したものである。したがって、 F_x/F_z は、すべり摩擦係数と呼べる。この図から、すべり速度で整理すれば、若干の差異は見られるが各すべり速度でほぼ同じすべり摩擦係数になることがわかる。この考え方は、力学的な考察からマクロ的に

図6 すべり摩擦係数とすべり速度の関係 (室内試験：乾燥)³⁾

捉えたものであることに注意を要する。

自動車のABS装置は、低いすべり速度で発生する大きなすべり摩擦係数を利用しているのである。したがって、ABS装置を有効に活用するためには、トレッドゴムのごく低速でのすべり摩擦係数が重要であることがわかる。

4. タイヤの制動特性(実路面)³⁾

図7および図8は、乾燥および湿潤アスファルト路面におけるすべり摩擦係数とすべり速度の関係を示している。実線は、制動力係数とスリップ比の関係から求めたものであり、○印は、タイヤをロックさせて求めたものである。この図から、乾燥路面の場合は、温度が異なるため、両者に若干の差異が見られる。湿潤路面の場合、水温によってトレッド表面の温度が一定になるので両者に差異はみられない。

このように、力学的な考察によって、複雑にみえたタイヤの μ -s特性が、単純なすべり速度とすべり摩擦係数の関係として表すことができる。

5. タイヤの制動特性(雪氷路面)³⁾

つぎに、雪氷路面におけるタイヤの制動特性について述べる。試験タイヤは、タイヤ構造が同じものでトレッドパターンのサイプ数が異なる5種類のタイヤを用いた。トレッドのサイプ数を図9に示す。また、試験路面は、氷盤路面とし、氷盤温度は -1° 、 -3° および -6°C の3条件とし

図7 すべり摩擦係数とすべり速度の関係(実路試験：乾燥)³⁾

図8 すべり摩擦係数とすべり速度の関係(実路試験：湿潤)^{a)}

図9 タイヤトレッドのサイプ数

た。試験条件を表1に示す。

図10, 11および12は試験結果の一例として、氷盤温度が -1°C 、 -3°C および -6°C でタイヤ(サイプ4本)の制動力係数とスリップ比の関係を示したものである。これらの図から、それぞれの温度で走行速度が高くなると最大制動力係数が小さくなることわかる。ロック制動力係数は、およそスリップ比の増加に伴って制動力係数が大きくなる傾向をもつことがわかる。

これまでの、上述のデータから、最大制動力係数と速度やサイプ数の関係あるいはロック制動力係数と速度やサイプ数の関係として整理していた。本論では、前述の解析に基づいてすべり速度とすべり摩擦係数の関係について整理する。

図13, 14および15は、試験結果の一例として、氷盤温度が -1°C 、 -3°C および -6°C でタイヤ(サイプ4本)のすべり摩擦係数とすべり速度の関係を示したものである。これらの図から、速度10~40 km/hの制動力係数とスリップ比の関

係は、すべり摩擦係数とすべり速度の一つの関係で表されることがわかる。また、タイヤの特性で重要な静止摩擦係数も外挿することによって近似的に求めることができるものとする。

図16, 17および18は、氷盤温度が -1°C 、 -3°C および -6°C におけるすべり摩擦係数とすべり速度の関係をサイプ数の変化で示したものである。 -1°C では、すべり速度が小さいときには、サイプ数の影響が小さくほとんど同じ程度のすべり摩擦係数である。このとき、水の発生量が多いため、すべり速度が小さいときのすべり摩擦係数が低く、サイプの効果小さくなったものと考えられる。すべり速度が大きくなると、水が発生する前に新しい氷に接触するため、摩擦力も大きくなり、サイプ数の効果も現れるものと考えられる。

-3°C では、 -1°C よりも少ない水が発生するため、すべり速度が小さいときもサイプ数に影響があり、サイプ数が多いほどすべり摩擦係数が大

表1 試験条件³⁾

Tire Size	195/65R15
Vertical Force	3.82kN
Inflation pressure	190kPa
Tread Pattern	4 grooves and 5 brocks
Brock Size	26mm×24mm
The Number of sipes	2,3,4,5,6
Ice Temperatures	-1, -3, -6(°C)
Test Speeds	10,20,30,40 (km/h)

図10 制動力係数とスリップ比の関係
(サイプ数4 : -1°C)³⁾

きい。すべり速度が大きくなるときのすべり摩擦係数の増加は-1°Cのときと同じである。

-6°Cでは、すべり速度が小さいときには、サイプ数が少ないもののほうがすべり摩擦係数が大きいことがみられる。これは、水の発生が少なく、接地面積が大きいものがすべり摩擦係数を大きくしているものと考えられる。すべり速度が大きくなると、サイプ数の多いもののすべり摩擦係

図13 すべり摩擦係数とすべり速度の関係
(サイプ数4 : -1°C)³⁾ 図11 制動力係数とスリップ比の関係
(サイプ数4 : -3°C)³⁾ 図14 すべり摩擦係数とすべり速度の関係
(サイプ数4 : -3°C)³⁾ 図12 制動力係数とスリップ比の関係
(サイプ数4 : -6°C)³⁾ 図15 すべり摩擦係数とすべり速度の関係
(サイプ数4 : -6°C)³⁾

図16 サイプ数がすべり摩擦係数に及ぼす影響(−1℃)³⁾ 図18 サイプ数がすべり摩擦係数に及ぼす影響(−6℃)³⁾ 図17 サイプ数がすべり摩擦係数に及ぼす影響(−3℃)³⁾

数が大きくなることがみられる。これらのことから、すべり速度が大きいときのすべり摩擦係数は、サイプ数が多いほうが大きくなることがわかる。また、すべり速度が小さいときは、氷盤温度に影響を受け、水の発生が多い場合は、サイプ数の多いもののすべり摩擦係数が大きい。更に、すべり速度が大きくなると路面温度に関係なく、ほぼ同じ程度のすべり摩擦係数になることがみられた。

6. ま と め

本研究では、タイヤの制動特性を力学的に取り

扱って、種々の路面におけるタイヤのスリップ比と制動力係数の関係について整理した。その結果、複雑にみえたタイヤの μ -s特性が、単純なすべり摩擦係数とすべり速度の関係として表すことができることがわかった。

今後は、路面とタイヤの接触状態およびすべり状態を詳しく観察し、タイヤと路面間の摩擦係数予測やハイドロプレーニング現象の危険予測などについて研究を進める予定である。

参 考 文 献

- 1) Gim, G. : An Analytical Model Of Pneumatic Tyres For Vehicle Dynamic Simulations, Part 2 : Comprehensive Slip, International Journal of Vehicle Design, Vol.12, No.1, (1991) pp.19-39.
- 2) Yamazaki, S., Furukawa, T., Suzuki, T. : Study on Real Time Estimation of Tire to Road Friction, Proceedings of the 2nd International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamic Analysis (1996), pp.225-233.
- 3) Yamazaki, S., Suzuki, T., Yamaguchi, M. and Hiroki, E. : Effects of the Number of Siping Edge of Tire Tread Block on Friction Property and the State of Tire Contact with Ice Load, The Tire Society, Eighteenth Annual Meeting and Conference, 1999(投稿中).

*

*

*

*

*