

積雪路面など変形性路面における スノータイヤの粘着特性*

下田 茂**, 石橋 達弥**
Shigeru SHIMODA, Tatsuya ISHIBASHI
野中 敏***, 田村 隆****
Satoshi NONAKA, Takashi TAMURA

Key Words: Automobile, Adhesion of Tire, Slip Characteristics of Tread Pattern, Specifics of Road Materials

1. 緒 言

積雪地域において冬期間のスムーズでしかも安全な自動車交通を確保するためには、積雪路面や氷結路面など、一般の舗装路面に比較してきわめて悪条件下にある路面上でのタイヤの粘着力特性は重要な意義を有する。特に新潟県、北陸諸県などを中心とする裏日本積雪地帯においては、冬期積雪期間を通じて気温が0°Cの付近を上下する状況が多く、このため北海道などの寒冷地域では効果の期待できるスノータイヤ、スノースパイクタイヤなどの粘着性能が著しく低下する危険な圧雪面状態を発生しやすく、防滑チェーンの着用に頼らざるを得ないケースもしばしばである。したがって、路面損傷や騒音の発生⁽¹⁾が少なく、しかも変化の多い種々の雪路面、氷結路面条件に対応できるような、より効果的なスノータイヤや防滑チェーンの開発が望まれるものであり、またそのためには、これらの悪条件路面における粘着力特性を定性的、定量的にはあくする方法を確立することが必要である。

このような路面条件におけるタイヤや履帯の粘着力に関するこれまでの研究としては、土質路面などにおける履帯、タイヤの滑り特性を路面材料のせん断現象との関連で考察⁽²⁾したものの、タイヤトレッド山部の弾性変形および対路面滑り摩擦の現象より解析⁽³⁾したものの、また実験的には実車による制動あるいはけん引試験により粘着係数を求めたもの⁽³⁾⁽⁴⁾などがある。

本研究ではタイヤトレッドの滑りに伴うこれらの諸現象を総合的に考慮した、積雪または氷結路面、さらには比較のための砂質路面など、比較的広範囲の変形

性路面に適用できる滑りモデルを設定して、スノータイヤのトレッドパターンの滑り特性よりタイヤ～路面間の粘着力発生メカニズムを考察し、タイヤの滑り比との関連において発生する粘着力の解析を行った。一方、これらの積雪、氷結路面などの実験に適する台上型のタイヤ粘着力試験機を製作し、トレッドパターンサンプル(タイヤ踏面切断試料片)に関する滑り特性および実物タイヤに関する粘着力測定などの実験を行い、各種の路面条件に関し理論計算結果と比較検討した。得られたこれらの結果について以下に述べる。

2. トレッドパターンサンプルの対路面 滑り特性に関するモデル式の設定

積雪路面のように、タイヤ接地面付近での路面材の変形を伴うような変形性路面においては、滑り特性すなわちある接地圧の作用下において、接地面の局部に発生する滑り抵抗力とタイヤトレッドベースの対路面変位量との間に存在する関係は、転がり運動を行いつつあるタイヤ全体に関する粘着力の発生メカニズムに関連して重要な意義を有するものであるが、路面材の物理的性質や、タイヤのトレッドパターン、スパイクピンなどの踏面条件によって著しい影響を受けるために多様性を有しており、従来これらの2量間の関係の表現方法についても研究者により異なった取扱いがなされている。よってここでは路面とタイヤ踏面間の接触状況などを考慮して、これらの2量間の関係を表し、かつ関連した物理的現象を説明するのに適当と考えられるモデル式の導入についてまず検討しよう。

(1) いま図1に示すように防滑突起(spud)付の履帯板の一部よりなるトレッドプレートサンプルが砂、土じょう、積雪層などの軟質路面上に置かれ、防滑突起の路面材中への食い込みによってそのせん断抵抗効果が期待できるような接地状況下にあつては、ト

* 昭和56年3月17日 中国四国支部第19期総会講演会において講演、原稿受付 昭和57年11月25日。

** 正員、新潟大学工学部(☎950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

*** 正員、新潟県工業技術センター(☎950 新潟市鏡西1)。

**** 新潟大学工学部。

レッドプレートサンプル（接地面積 A ）に均一の接地圧 w （全荷重 W ）を加えた状態で S 方向へのけん引力試験を実施した場合、計測されたけん引力 S より算出される単位面積当たり滑り抵抗力 s と、これに対応するレッドプレートサンプルの対路面変位量 d との関係について、Bekker らは次式による表現方法が適用できることを提案している⁽²⁾。

$$s = (c + w \tan \phi) \frac{1}{y_{\max}} \left\{ e^{(-k_2 + \sqrt{k_2^2 - 1})k_1 d} - e^{(-k_2 - \sqrt{k_2^2 - 1})k_1 d} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに k_1, k_2 は土じょう、積雪などの路面材の性質により定まると考えられるスリップパラメータであり、また y_{\max} は $d = d_0$ において生ずる $\{ \}$ 内の関数の最大値を表し、 c および $\tan \phi$ は路面材のせん断破壊に伴って現れる、その材料に固有の粘結力および内部摩擦係数であるとしている。

(2) 次に舗装路面あるいは低温下の固い氷結路面などの非変形性路面に対してスノータイヤの踏面が接触して、路面材へのトレッドパターン山部の食い込みが見られない図 2 に示すような状態に関して、酒井は滑り特性を表す次のような式を提案⁽³⁾している。すなわち、図 2 (b) に見られるようなトレッドゴム山部の弾性変形領域においては、弾性変形による対路面変位 d_1 のみが発生していると考えれば、踏面に発生する単位面積当たり滑り抵抗力 s とタイヤトレッドベースの対路面変位量 $d (d = d_1)$ との関係は

$$d \leq d_0, \quad s = kd \dots \dots \dots (2)$$

となり、ここに k はタイヤゴムの弾性係数、また d_0 はトレッド山接触部が対路面滑りを生ずる臨界点であって、ゴム材と路面間の最大静止摩擦係数を μ_s 、踏面に作用する平均接地圧を w とすれば

$$d_0 = (\mu_s/k)w \dots \dots \dots (3)$$

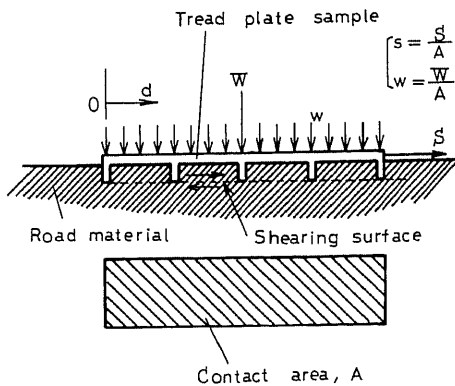


図 1 軟質路面における履帯粘着力の発生モデル

によって与えられるとしている。

また $d > d_0$ となって対路面滑り d_2 を発生している滑り域 [図 2 (c)] においては、全対路面変位量は $d = d_1 + d_2$ により構成されることになるが、この領域内で静止摩擦より動摩擦に移行する過渡的現象を次のような指数関数で近似した。

$$s = \{ (\mu_s - \mu_d) e^{-\alpha(d-d_0)} + \mu_d \} w \dots \dots \dots (4)$$

ここに α は主としてトレッドパターンおよび路面の性質によって決まる定数であり、また μ_d は両者間の動摩擦係数である。

(3) 可変形性と考えられるやや軟質の圧雪路面や melting ice 状の水路面にスノータイヤが接する場合、

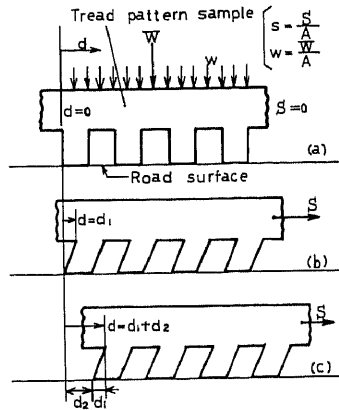


図 2 非変形性路面におけるタイヤ粘着力の発生モデル

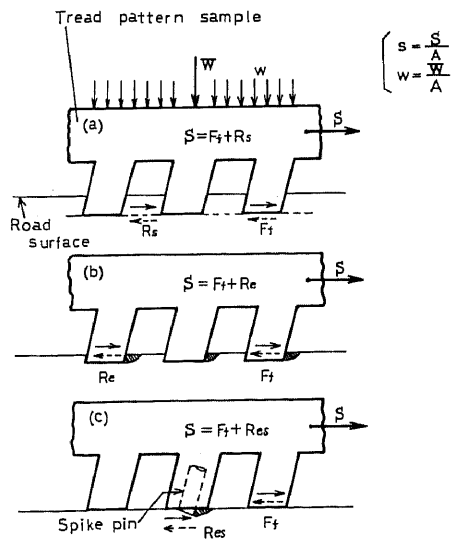


図 3 変形性路面におけるタイヤ粘着力の発生モデル

あるいは低温下の固い氷結路面上などでスノータイヤトレッドにスパイクピンや防滑チェーンが装着される場合においては、タイヤ踏面における滑り抵抗力発生現象はより複雑な形となることが考えられる。すなわち図3に示すように、トレッド山部はいく分路面に食い込む状態でタイヤ踏面は路面上に支持され、積雪層などの路面材に関するせん断抵抗力 R_s 、およびタイヤトレッド山部のゴム材と路面間の摩擦抵抗力 F_f が複合して粘着効果が現れる(a)の場合、またトレッドパターン山部やスパイクピンのエッジ効果による引っかき抵抗力 R_e 、 R_{es} が F_f と複合される(b)、(c)の状態などが存在し得るので、著者らはこれらの粘着力発生にかかわる物理的現象を考慮し、しかも滑り特性を定性的、定量的に表すのに都合のよいモデル式として、次のような形を導入することとした。すなわち、踏面に対して均一な接地圧 w が作用する場合、踏面面積 A に関する単位面積当たり滑り抵抗力は

$$0 < d \leq d_0 \quad s = s_0 \frac{d}{d_0} e^{\alpha(1-d_0/d)} \dots\dots\dots (5)$$

$$d_0 < d \quad s = (s_0 - s_f) e^{\beta(1-d_0/d)} + s_f \dots\dots\dots (6)$$

ここに s_0 は $d = d_0$ の臨界点における s の値、 s_f は滑り域における s の最終値である。

これらの式による $s \sim d$ 間関係を無次元表示をすると図4のようになり、式(5)および(6)はそれぞれ粘着域および滑り域における滑り抵抗力が、対路面変位によって変化する状態を表すことになる。このようなモデル式を用いると、粘着域にあつてはこの領域内でいく分発生する路面変形に関係すると推定される曲線形状の変化を、また滑り域にあつては s_0 より s_f への移行過程において現れる曲線形状の変化を、それぞれパラメータ α および β により表現することができ、したがってこれらの α, β は路面材の機械的強度、表面状態、タイヤパターンならびにスパイクピンの物理

的性質および形状などに関係した定数となることが考えられる。

また、式(5)、(6)のモデル式を用いると、砂質路面や低温下での粉雪状雪路面のような dry powder type の路面材において観察されることのある、 $s_f/s_0 > 1$ の場合(図4の破線で示す曲線)をも併せて表現できるという利点も存在する。

次に式(5)、(6)における s_0 および s_f は踏面に作用する接地圧 w により変化する値であつて、次のように表すことができる。

$$s_0 = c + w \cdot \tan \phi, \quad s_f = w \cdot \tan \phi' \dots\dots\dots (7)$$

ここに c は粘着域においてのみ観察される、接地圧には無関係な路面抵抗力すなわち路面材の粘結力による滑り抵抗力成分であり、また $\tan \phi$ はこの粘着域において w に関して発生する総合的な最大摩擦抵抗力の係数であつて、路面材内部のせん断に関係した内部摩擦および路面材とタイヤトレッド材間の境界摩擦現象が総合されて関与するものと考えられる。一方 $\tan \phi'$ は滑り域における動摩擦抵抗力に関する係数であり、やはり路面材の内部摩擦および路面とタイヤ材表面間の境界摩擦が総合的に関係するものと考えられる。

以上の式(7)による表示法は従来よく知られている材料のせん断破壊に関する Coulomb の式概念と一致するものであり、土じょうのみでなく積雪などに対しても、車両の運動に伴って発生する路面材の最大せん断応力と接地圧間の関係の近似的表示法としては、十分実用性のあることが知られている⁽²⁾⁽⁵⁾。

3. 転動タイヤの粘着力に関する理論式

前章においては、接触面全面にわたり均一の接地圧を有するタイヤ踏面試験片において発生する滑り抵抗力について考察し、その特性を数式化して表すモデル式を設定したが、実物の空気入りタイヤの場合にはその前後方向の接触長に沿って接地圧が変化する点を考慮し、前出のモデル式(5)、(6)、(7)を用い、転動する実物タイヤにおいて発生する全粘着力を算出するための理論式を導入した。

いま図5に示すように、タイヤの接地圧分布は長方形形状の接地面の幅 B の方向には変化しないが、その接地長 L の方向には放物線状の二次式で与えられるものとするれば、接地部先端を x 軸の原点にとつて、次式により表すことができる。

$$w(x) = \frac{6W_t}{L^3 B} x(L-x) \dots\dots\dots (8)$$

ここに W_t は接地面全荷重である。したがって先に考

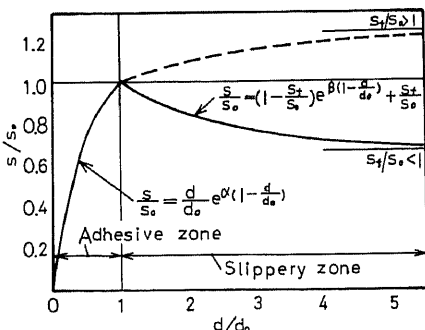


図4 変形性路面におけるトレッドパターン滑り特性の数式化

察した粘着域における滑り抵抗力の最大値 s_0 、および滑り域における最終値 s_f [式(7)] の値は、実物タイヤにおいては踏面接地長に沿った位置すなわち x の値により局部的に異なった値となり

$$s_0 = c + \tan \phi w(x), \quad s_f = \tan \phi' w(x) \quad \dots\dots\dots (9)$$

によって与えられることになる。

次にタイヤ回転中心の進行速度を v 、回転角速度を ω 、タイヤの転がり半径を R とすれば、駆動時および制動時のタイヤの滑り比 i はそれぞれ次式によって定義される。

$$\left. \begin{aligned} \text{駆動時} \quad i &= (R\omega - v)/R\omega \\ \text{制動時} \quad i &= (v - R\omega)/v \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

これらの滑り比を有するタイヤの踏面において、その接地長に沿った局部的な位置 x により、その微小面積部分の対路面変位量 d も変化するものであり

$$d = ix \quad \dots\dots\dots (11)$$

なる関係が存在する。

以上の接地圧分布、踏面各局部における滑り抵抗力の变化ならびに対路面変位量の変化などを考慮して、接地面全域にわたり滑り抵抗力を積分することにより、駆動力あるいは制動力などタイヤに関する全粘着力が求められるが、タイヤ踏面の一局部が路面と接触を始めてから終るまでの間に、粘着域のみの滑り現象に止どまるかあるいは滑り域にまで移行するのにかよって、異なる積分区間を適用する必要がある。すなわち図6に示すように接地長 L と臨界変位量 d_0 との間において、比較的滑り比が大きく $L > d_0/i$ なる条件が成立する場合には、実線で示すように接地部の全長 L の範囲内に粘着域と滑り域が同時に発生していると考えられるのに対して、タイヤ滑り比が小さく $L \leq d_0/i$ の場合には接地長 L の範囲内では滑り域は発生せず、粘着域のみが存在することになるからである。

(1) $i \leq d_0/L$ の場合

この場合には粘着域に関するモデル式(5)を適用

し、接地幅 B 、接地長 L の長方形状接地面について積分すれば、転動タイヤに発生する全粘着力 F は

$$F = B \int_0^L s_0 \frac{d}{d_0} e^{\alpha(1-d/d_0)} dx$$

となり、これに前出式(8)、(9)、(10)の関係を代入すれば

$$\begin{aligned} F &= B \int_0^L \left\{ c + \tan \phi \frac{6W_t}{L^3 B} x(L-x) \right\} \\ &\times \frac{c}{d_0} x e^{\alpha(1-ix/d_0)} dx \\ &= \frac{Bci}{d_0} e^\alpha \int_0^L x e^{-(ia/d_0)x} dx \\ &+ \tan \phi \frac{6W_t i}{L^3 d_0} e^\alpha \int_0^L (Lx^2 - x^3) e^{-(ia/d_0)x} dx \quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

この式(12)を積分して整理し、タイヤの粘着力を無次元化した粘着係数 μ_a で表すと次式のような結果となる。

$$\begin{aligned} \mu_a = \frac{F}{W_t} &= \frac{BcL}{W_t x} \left(\frac{e^\alpha}{\alpha} \right) \{ 1 - (1+x)e^{-x} \} \\ &+ \frac{6 \tan \phi}{x^3} \left(\frac{e^\alpha}{\alpha} \right) [x^3 e^{-x} + (3-x) \\ &\times \{ x^2 + 2x + 2 \} e^{-x} - 2] \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

ここに $x = iaL/d_0$

(2) $i > d_0/L$ の場合

この条件下では粘着域および滑り域に関するモデル式(5)および(6)を適用し、接地長 L を粘着域区間と滑り域区間に分割して積分すればよい。すなわちタイヤに発生する全粘着力は

$$\begin{aligned} F &= B \int_0^{d_0/i} s_0 \frac{d}{d_0} e^{\alpha(1-d/d_0)} dx \\ &+ B \int_{d_0/i}^L \{ (s_0 - s_f) e^{\beta(1-d/d_0)} + s_f \} dx \end{aligned}$$

この式に前出式(8)、(9)、(11)の関係を代入して

$$\begin{aligned} F &= B \int_0^{d_0/i} \left\{ c + \tan \phi \frac{6W_t}{L^3 B} x(L-x) \right\} \frac{i}{d_0} x \\ &\times e^{\alpha(1-ix/d_0)} dx + B \int_{d_0/i}^L \left\{ c e^{\beta(1-ix/d_0)} \right. \end{aligned}$$

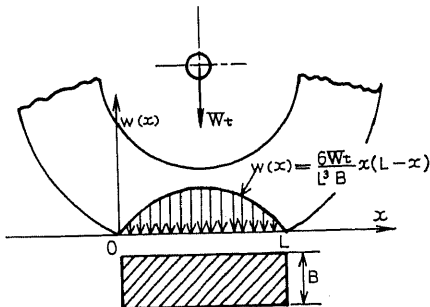


図5 タイヤの接地圧分布

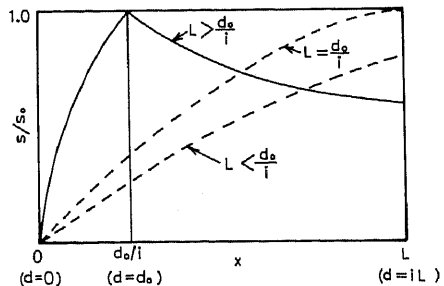


図6 積分区間の判別図

$$\begin{aligned}
 & + (\tan \phi - \tan \phi') e^{\beta(1-i'd_0-x)} \\
 & \times \left. \frac{6W_t}{L^3 B} x(L-x) + \tan \phi' \frac{6W_t}{L^3 B} x(L-x) \right\} dx \\
 & = \frac{Bci}{d_0} e^\alpha \int_0^{d_0/i} x e^{-(i\alpha/d_0)x} dx \\
 & + \tan \phi \frac{6W_t i}{L^3 d_0} e^\alpha \int_0^{d_0/i} (Lx^2 - x^3) e^{-(i\alpha/d_0)x} dx \\
 & + Bce^\beta \int_{d_0/i}^L e^{-(i\beta/d_0)x} dx \\
 & + (\tan \phi - \tan \phi') \frac{6W_t}{L^3} \\
 & \times e^\beta \int_{d_0/i}^L (Lx - x^2) e^{-(i\beta/d_0)x} dx \\
 & + \tan \phi' \frac{6W_t}{L^3} \int_{d_0/i}^L (Lx - x^2) dx \dots\dots\dots (14)
 \end{aligned}$$

この式を積分して整理すれば、この場合におけるタイヤの粘着係数は次式によって表されることになる。

$$\begin{aligned}
 \mu_a = \frac{F}{W_t} = \frac{BcL}{W_t x} \left(\frac{e^\alpha}{\alpha} \right) & \{ 1 - (1+x)e^{-x} \} \\
 + \frac{6 \tan \phi}{x^3} \left(\frac{e^\alpha}{\alpha} \right) & [x^3 e^{-x} + (3-x) \\
 \times \{ (x^2 + 2x + 2)e^{-x} - 2 \}] & + \frac{BcL}{W_t \lambda} (1 - e^{\beta-\lambda}) \\
 + \frac{6(\tan \phi - \tan \phi')}{\lambda^3} & [(\beta+1)(\lambda-2) - \beta^2 \\
 - \{ (\lambda-2)(\lambda+1) - \lambda^2 \} e^{\beta-\lambda}] & \\
 - \tan \phi' \left[1 - \frac{1}{(\lambda/\beta)^3} \right. & \left. \left(3 \frac{\lambda}{\beta} - 2 \right) \right]
 \end{aligned}$$

ここに、 $x = i\alpha L/d_0$, $\lambda = i\beta L/d_0$ …………… (15)

4. 実験装置および方法

以上に導いた式(13), (15)により駆動または制動状態にあるタイヤに関し、任意の滑り比およびタイヤ荷重における粘着力が理論的に計算できるが、これに対応した転動タイヤの実験値を求め、また理論計算に必要なモデル式(5), (6), (7)における諸定数を決定するために台上型試験装置を製作した。

図7はその概要図であって、(a)に示すように転輪①に案内されて滑らかに前後方向に運動できるスライドテーブル②上に、圧雪路面、氷路面などの各種試験路面を形成する試料枠③が取付けられ、この試験路面④上にコイルばね式の荷重装置⑤により所要荷重を負荷されたタイヤ車輪⑥が接触している。これらのスライドテーブルおよび車輪は2個の可変速モータ⑦、⑧により駆動され、選定されたテーブルの移動速度*v*および車輪周速度*Rω*の組合せにより、駆動および制動時における任意の滑り比*i*を設定することが可能である。

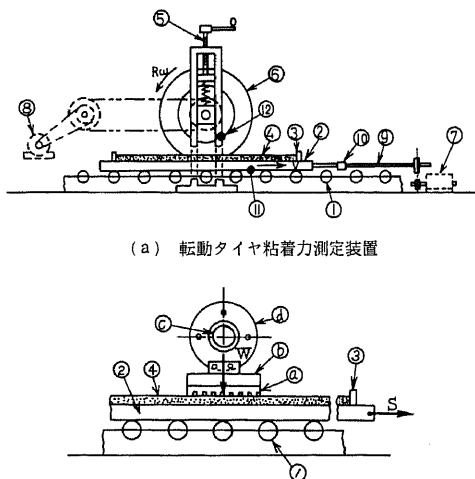
なおスライドテーブルの移動用送りねじ軸⑨には粘着力測定のための引張力検出ヘッド⑩を有し、またテーブルおよび車輪回転軸に対しては速度測定のための光電式検出ヘッド⑪、⑫がセットされている。

この測定装置により種々の異なった路面条件およびタイヤの種類組合せに対して、実車に近いタイヤ荷重を負荷し、滑り比*i*を零~1の間に任意に設定して、駆動および制動状態時のタイヤの粘着力の測定を行った。

また図7(b)は同じ台上型試験装置を用い、モデル式における諸定数を定めるための実験要領を示すもので、タイヤの一部を切取ったトレッドパターンサンプル④を取付ベース⑤にはり付け、これを非回転状態にした固定軸⑥に支えられた車輪ハブ⑦の下端に固定する。固定軸を介し鉛直荷重*W*を与えることにより、パターンサンプル接触面(面積*A*)と路面材表面の間に均一接地圧*w*を発生させ、この条件下でのパターンサンプル滑り試験を行って、滑り量の変化に伴って生ずる滑り抵抗力*S*を測定し、得られた対路面変位量*d*、単位接地面積当たり滑り抵抗力*s*(=*S/A*)および接地圧*w*(=*W/A*)の関係より、式(5)~(7)における定数*α*, *β*, *d*₀, *c*, $\tan \phi$, $\tan \phi'$ などを決定した。

5. 実験結果および考察

5.1 設定モデル式の適合性と、関係諸定数の決定
均一接地圧状態におけるトレッドパターンサンプル試験によって得られた、各種の路面材に対する滑り特性



(b) 均一接地圧状態におけるタイヤパターンサンプル滑り試験

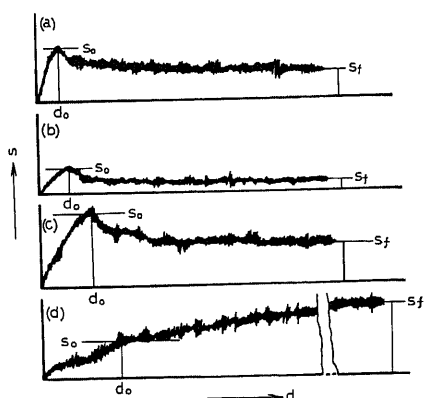
図7 台上型試験装置

を現す実験曲線の例を図8に示す、実験路面条件としては固い圧雪面(木下式換算硬さ $H=4.0\text{ MPa}$ { 41 kgf/cm^2 }), 氷路面(melting ice), 砂質路面およびコンクリート路面の4種類を選び、また実験に使用したパターンサンプルはスノータイヤおよびこれにスパイクピンを打ち込んだスパイクタイヤの2種類とした。やや不規則性はあるが、どの路面条件に対しても対路面変位が粘着域の限界点 d_0 にいたるまでの立ち上がり曲線部と、それ以後の滑り域における漸減(または漸増)曲線部とが認められ、この二つの曲線部を式(5), (6)のような指数関数により近似できることがわかる。すなわち、これらの実験曲線を図4に示すようなモデル式線図と比較し、類似の曲線形よりパラメータ α および β を定めることができる。

なお比較のために実験したコンクリート路面の場合も、粘着域における滑り特性を示す実験曲線は他の圧雪面や氷路面における曲線と類似した形を示しており、したがってこれらの変形性路面と同様に式(5)による表示法を適用することとした。

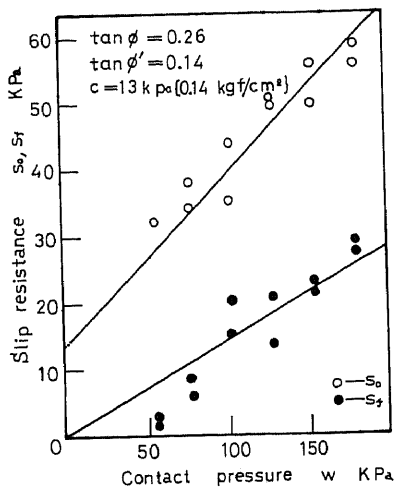
次に図8に例示したような実験曲線における s_0, s_f の値を続取り、接地圧 w との関係を図示すると図9のような結果となり、粘着域における滑り抵抗力の最大値 s_0 および滑り域における最終値 s_f はいずれも接地圧 w によって直線的に増加する傾向が見られ、したがって式(7)の形の表現が適用できることを示している。よってまた、同図によって式(7)における $c, \tan \phi, \tan \phi'$ の諸定数が決定されることになる。

次に前出図8に例示したような滑り特性に関する実

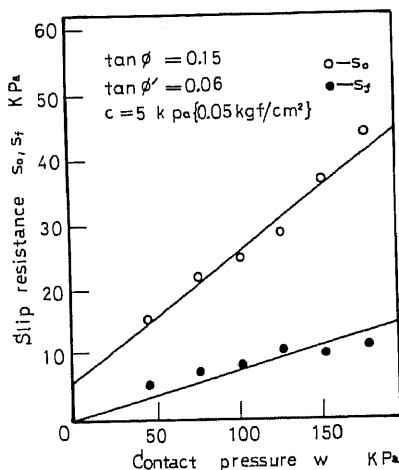


(a) 圧雪路面, スノータイヤ
(b) 氷路面, スノータイヤ
(c) 氷路面, スパイクタイヤ
(d) 砂質路面, スノータイヤ

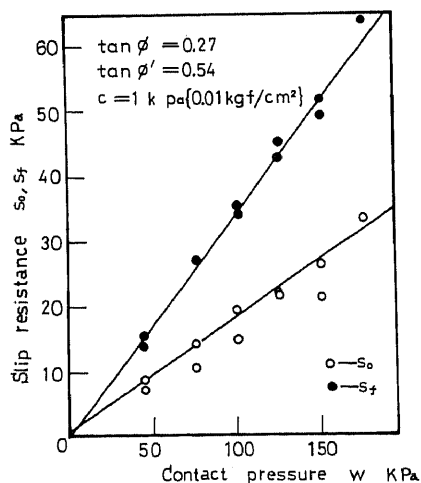
図8 トレッドパターンサンプルによる滑り特性の実験例



(a) 圧雪路面



(b) 氷路面



(c) 砂質路面

図9 異なった路面条件における s_0-w, s_f-w 線図の例(スノータイヤ)

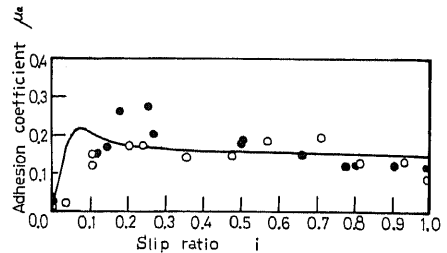
験曲線より、滑り抵抗力が s_0 となる場合の対路面変位 d_0 の値を求めると、圧雪面、氷路面、砂質路面などの変形性路面では、ややばらつきはあるが接地圧 w とは無関係に同一路面条件ではほぼ一定と見なせるので、これらの平均値をとってその路面条件における d_0 の値を定めた。なお従来の各種土じょうに関する実験結果においても、 d_0 は w とは無関係にほぼ一定となっている報告例⁽⁶⁾がある。一方非変形性路面と考えられるコンクリート路面では、 w の増加により d_0 も漸増して行く傾向が認められたが、ここではタイヤ実験時の条件に合わせて試験タイヤの平均接地圧 $\bar{w} = 130 \text{ kPa}$ $\{1.3 \text{ kgf/cm}^2\}$ に対する d_0 の値を讀取って、この路面条件に関する平均 d_0 値を定めることとした。以上の方法で求めた、モデル式(5)、(6)、(7)に関する諸定数をまとめた結果を表1に示す。

5.2 タイヤの粘着力測定結果および理論計算結果による検討 積雪路面用のスノータイヤ(呼び寸法 5.60-13, 4 PR)およびこれに防滑用スパイクピンを打ち込んだスパイクタイヤを台上型試験装置に取付け、一方表1に示した各種路面条件をスライドテーブル上の試料枠の中に設定して、実用的タイヤ荷重に近い値として $W_f = 2.3 \text{ kN}$ $\{230 \text{ kgf}\}$ 、平均接地圧 $\bar{w} = 130 \text{ kPa}$ $\{1.3 \text{ kgf/cm}^2\}$ の荷重条件下で粘着力実験を行った。これらの路面材の内、固く圧縮された圧雪面は、最大滑り抵抗力を表す式(7)の中で接地圧には無関係な粘結力成分 c が比較的大きく現れる cohesive type の典型的な場合であり、一方砂質路面はこの c の値がほとんど零となる dry powder type の典型的な一例で、ごく低温下の粉雪などもこれによく似た傾向を示す場合がある。なおこれらの dry powder type 路面材は前出図8(d)でもわかるように、滑り域における滑り抵抗力の最終値 s_f が初期値 s_0 よりも大きくなり、漸増曲線傾向が認められる場合である。なお比較のために試験したコンクリート路面は、路面の変形がタイヤの変形に対して無視し得る場合で、 c は零に近く滑り特性が主としてタイヤ材と路面材間の最大静止摩擦力および動摩擦力によって支配される frictional type

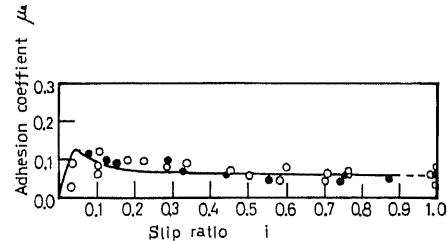
表 1 滑り特性に関する諸定数

路面条件	タイヤ条件	$\tan\phi$	$\tan\phi^0$	c kPa {kgf/cm ² }	d_0 cm	α	β
圧雪路面	スノータイヤ	0.26	0.14	13 {0.14}	0.62	0.4	2.7
氷路面	スノータイヤ	0.15	0.06	5 {0.05}	0.52	0.3	3.2
氷路面	スパイクタイヤ	0.25	0.25	28 {0.29}	1.05	0.2	2.8
砂質路面	スノータイヤ	0.27	0.54	1 {0.01}	1.30	0.5	0.3
コンクリート路面	スノータイヤ	0.96	0.69	0 {0.00}	1.14	0.7	0.6

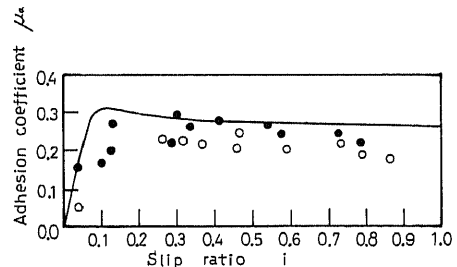
となる。これらの各路面条件下において、 $v < R\omega$ すなわちタイヤの周速をスライドテーブルの送り速度より大きく設定した駆動状態、および $v > R\omega$ すなわち速度の大小関係を逆に設定した制動状態の二つの場合に関し、滑り比を $i = 0. \sim 1.0$ の範囲に変化して粘着係数を実験的に求めた結果を図10に示す。図中、黒丸点は駆動時、白丸点は制動時の計測結果である。



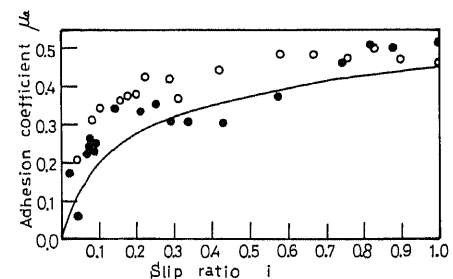
(a) 圧雪路面 (スノータイヤ)



(b) 氷路面 (スノータイヤ)



(c) 氷路面 (スパイクタイヤ)



(d) 砂質路面 (スノータイヤ)

○: 制動, ●: 駆動

図 10 各路面条件におけるタイヤの粘着係数と滑り比の関係

一方これと対比して、実線による線図はタイヤの粘着係数を与える理論式(13), (15)に、荷重などの実験条件およびパターンサンプル滑り実験によって得られた路面条件などに関する諸定数を代入して求めた理論計算結果を表すものである。

いずれの場合も、実験結果を表す各プロット点には、路面材やタイヤ表面の局部的条件変化によると見られるかなりのばらつきはあるが、理論計算曲線とほぼ一致した結果となっており、滑り比 i により粘着係数の変化する状況を明らかに示している。

またこれらの変形性路面では、前出図8の実験曲線に見られるような滑り特性に対応して、粘結性の高い cohesive type では滑り比 i の増加により、粘着係数 μ_a は最大値より最小値(完全滑り時)への漸減傾向が強まり、逆に粘結性の乏しい dry powder type では i の増加とともに μ_a は漸増傾向を現すことがわかる。

次に図10において、始めの立ち上がり部分を除いたフラット部分における粘着係数レベルを各路面条件別に比較すると、当然予想されることではあるが、コンクリート路面レベル平均値 $\mu_a=0.7$ に比較して固い圧雪路面や氷路面などの悪路面条件下ではスノータイヤの粘着係数は著しい低下を示しており、スノータイヤの効果を過信することの危険性を示しているが、このような場合に例えば最も滑りやすく危険な melting ice 状の氷路面においても、スノータイヤにスパイクピンを打ち込むことにより、粘着係数レベルは0.1以下の低い値から、0.2~0.3程度の範囲までには引き上げられる結果となっており、粘着力増加のためにはかなり効果のあることを示している。

6. 結 論

まず、以上のタイヤの粘着力特性に関する研究結果を要約すれば

(1) 積雪路面などの変形性路面に関して、スノータイヤのトレッドパターンの対路面滑り特性を数式化して表すに適すると考えられるモデル式を設定し、このモデル式を基礎として転動タイヤにおける粘着力発生メカニズムを考察し、粘着係数と滑り比の関係を与える理論式を導入した。

(2) トレッドパターンサンプルを用いた均一接地圧下における滑り特性実験の結果によれば、路面材の

有する性質により、変形性路面では圧雪面、氷路面に見られる cohesive type、砂質路面に見られる dry powder type、また非変形性路面ではコンクリート路面に見られる frictional type などの各タイプに分類されるが、いずれの場合もその滑り特性は同一モデル式による数式化が可能である。

(3) これらのトレッドパターンサンプルの対路面滑り特性に対応して、転動状態にある空気入りタイヤにおいても、各路面条件下で特長な粘着係数~滑り比($\mu_a \sim i$)線図が得られた。

(4) 実験を行った固い圧雪面(木下式換算硬さで約4.0 MPa(41 kgf/cm²))では、スノータイヤのトレッドパターンの効果は多くは期待できず、 μ_a の値はコンクリート路面の場合の20~30%程度に低下する結果を示した。

(5) melting ice 状の氷路面では、コンクリート路面に比較して μ_a の値は10%程度までに低下してきわめて危険な状況下にあることがわかるが、このようなスノータイヤにスパイクピンを打ち込むことにより引っかけ抵抗効果が現れて、駆動時および制動時とも粘着性はかなり向上することが認められた。

なお以上の結果において、導入した理論式による $\mu_a \sim i$ 線図に関する計算値は、台上型試験装置による実験値と概略的に一致しており、さらにまた従来得られている実車走行実験の結果⁽⁷⁾ともほぼ一致することから、これらの理論計算法および台上試験法をタイヤ接地圧分布、タイヤ荷重、路面状態、タイヤトレッド面などの各条件変化に対応した、タイヤの粘着特性のはあくに用いることは実用上十分有用であると考えられる。

文 献

- (1) 下田・ほか2名, 雪氷誌, 43-3 (昭56), 163.
- (2) Bekker, M. G., *Off-The-Road-Locomotion*, (1960), 25, Univ. of Michigan Press.
- (3) 酒井, 自動車技術誌, 20-8 (昭41), 753.
- (4) 下田, 自動車工学, (昭54), 137, 共立出版社.
- (5) Bekker, M. G., *Theory of Land Locomotion*, (1956), 162, Univ. of Michigan Press.
- (6) Bekker, M. G., *Introduction to Terrain-Vehicle Systems*, (1969), 133, Univ. of Michigan Press.
- (7) 文献(4)の30および137ページ.

討 論

〔質問〕 酒井秀男〔(財)日本自動車研究所〕

図4に示すトレッドパターンの滑り特性は、すべり速度によって多少変わるものと思われる。すべり速度によって変わるとした場合には、もう少し精度が上がるものと思うがいかがか。

〔回答〕 ご指摘のとおり、今回実験の対象として取上げた変形性路面においても、トレッドパターンの滑り特性に関し幾分の速度依存性が存在することが考えられているが、これらの圧雪面、氷結路面などの路

面条件をつねに一定に設定することは困難であり、局部的な硬度、表面凹凸状態の不均一性に原因すると思われる、ある程度の実験値のばらつきは避けられず、今回得られた結果ではこの幅の中に埋没する形で滑り速度の影響は認められなかった。

しかし、近時高速道路などにおいて、圧雪、氷結路面に起因する高速走行時のスリップ事故が漸増しつつある状況よりしても、滑り特性の速度依存性の問題は、今後の検討課題として重要であると考えている。