

## IV-30 路面のすべり抵抗と速度依存性を測定するポータブルテスターの開発

室蘭工業大学 正員 齊藤 和夫  
 日邦産業(株) 安部 裕也  
 北海道工業大学 正員 笠原 篤  
 北海道工業大学 正員 堀口 敬

## 1. はじめに

路面のすべり抵抗は車両の安全走行にとって重要な要因であることから、道路の幾何構造の設計における基本的な要素の一つであり、また交通安全管理上においても配慮すべき重要な要素である。このため、各国ではすべり抵抗測定装置の開発が行われる一方で、路面の維持管理のためのルーチンワークとして、路面のすべり抵抗の測定チェックが行われている。

すべり抵抗の測定方法としては、ASTM E-274に規定されている試験法に代表される車輪ロック方式(locked-wheel braking mode)、サイドフォース方式(side force or cornering mode)およびスリップ方式(slip mode)がある。車輪ロック方式はアメリカを中心に使用されて<sup>1)</sup>が、固定した速度ですべり抵抗を測定し、連続測定が出来ない。サイドフォース方式はヨーロッパを中心に使用されているが、曲線部などのコーナリング状態におけるすべり抵抗(横すべり)を測定することを目的としている。スリップ方式は連続測定が可能であるが、一般には固定スリップ率による測定で、測定速度を変化させることが出来ない。このように、それぞれの測定方法にはいくつかの問題があるが、共通している問題は測定装置(測定車)が大型で、初期費用と維持費用が高いことから、より簡便な小型化した測定装置の開発が世界的な課題である。

一方、路面のすべり抵抗は自動車の走行速度

により変化する速度依存性(speed-dependency)がある。この速度依存性は路面のテクスチャー(キメ)による排水性が関係する。したがって、すべり抵抗を測定する場合には、速度の変化によるすべり抵抗の変化を同時に測定できることが望ましいが、それを可能とするのはスリップ率変動方式のみであり、実用的な測定装置はほとんどないのが現状である。

本論文は、すべり抵抗測定における世界的な課題である測定装置の小型化および速度依存性の測定を可能とする新しい測定装置として開発されたポータブルテスター(Dynamic Friction Tester:DFテスター)の特性とすべり抵抗とテクスチャーに関する国際共同実験に参加した結果について報告するものである。

## 2. DFテスターの測定原理と装置

すべり抵抗(摩擦係数)の測定は原理的には簡単であり、DFテスターの測定もこの原理に基づいている。すなわち、図-1に示すように一定荷重 $W$ で路面に接地しているタイヤを速度 $V$ で引っばると、タイヤは $F$ なる摩擦力を受ける。この力 $F$ を測定することにより、次式から摩擦係数 $\mu$ を測定することができる。

$$\mu = F/W \quad (1)$$

ここで、 $W$ を一定とすると、

$$\mu = F \cdot K \quad (2)$$

となり、 $\mu$ と $F$ は正比例する( $K$ は比例定数)。

### Development of Portable Tester for Measuring Skid Resistance and Its Speed Dependency on Pavement Surfaces

by Kazuo SAITO, Hironari ABE, Atsushi KASAHARA and Takashi HORIGUCHI

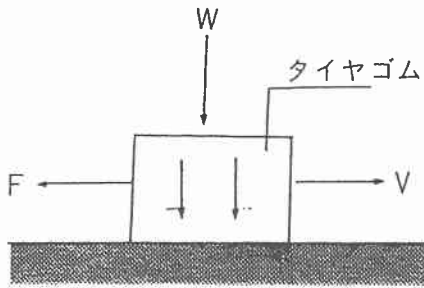


図-1 摩擦力の測定原理

DFテスターではこの原理に基づき、水平に回転する円盤にタイヤゴムのチップを3個取り付け、これを一定の荷重Wを加えて回転させ、この時にタイヤゴムに加わる摩擦力Fと、タイヤゴムの線速度V（円盤の回転速度）を測定するものである。

測定装置は図-2に示す本体とコントロールユニットおよびX-Yレコーダーからなる。すべり抵抗測定部分の機構を図-3に示す。この図で、円盤はモーターにより回転される。回転盤の下に円盤の軸の周りを自由に回転する小円盤がセットされている。この小円盤に3個のゴムチップが取り付けられており、それらが測定路面に荷重Fで押しつけられている。回転円盤と自由回転の小円盤はスプリングバランスで接続されており、円盤が回転している時に路面とゴムとの間に発生する摩擦力によりスプリングバランスに変形が生じるが、この変形を電氣的に変換する。また、ゴムチップの回転速度は円盤の回転速度として取り出す。これらの出力はX-Yレコーダーにより記録され、またコンピュータに記録されて変動をスムージングし、モニター画面に出力することもできる。

### 3. DFテスターの測定手順と特徴

DFテスターの測定手順を簡単に示すと次のようになる。最初に、路面にゴムチップを接触させないで円盤を回転させる。回転が所定の速度（最大約90km/h）に達した時点で回転円盤を下降させてゴムチップを測定路面に接触させ

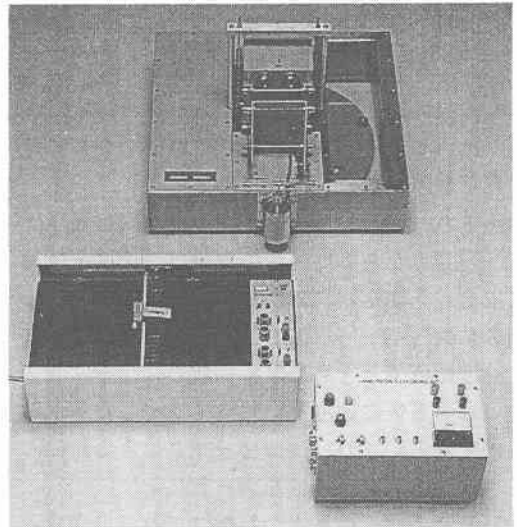


図-2 DFテスター測定装置

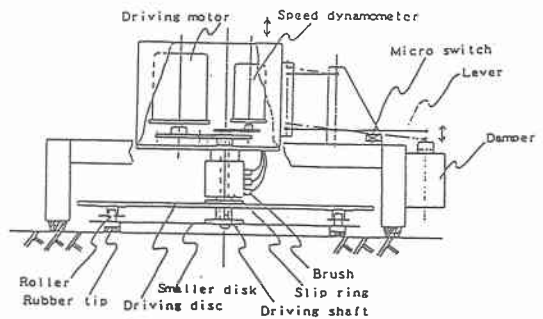
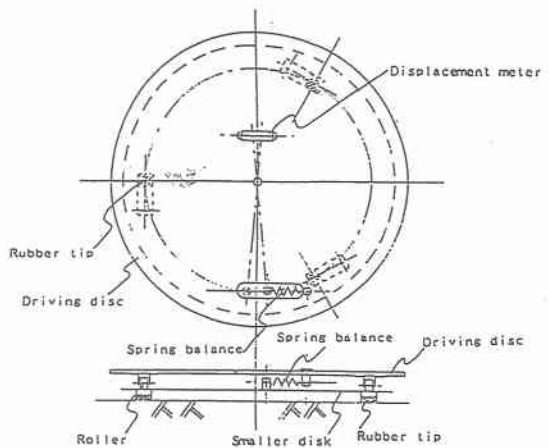


図-3 DFテスターの機構

ると、円盤の回転速度は路面とゴムチップの間の摩擦によるエネルギー損失により低下していき、最後に回転が停止する。

摩擦力の変化はスプリングバランスの変位を電気エネルギーとして検出した摩擦力から計算された摩擦係数と、速度ダイナモメーターから検出された速度をX-Yレコーダーに記録させる。記録された摩擦係数を縦軸に、速度を横軸に出力した測定結果の例を図-4に示す。この図の特徴はチャートの右側から記録が開始されて速度の低下とともに摩擦係数の変化を左側へ記録し、最後に速度ゼロ時点で測定が終了するものである。また、コンピュータによる記録のモニター画面出力の例を図-5に示す。

DFテスターの最大の特徴はこれらの図に示されるように、1回の測定で摩擦係数を連続的に測定できることである。この結果、摩擦係数と速度の変化を同時に測定することにより、すべり抵抗と速度の関係（速度依存性）を容易に把握することができることである。

また、装置はコンパクトで操作が容易であることがもう1つの特徴である。このため、バンタイプの車両で運搬でき、電力は12V DCなので車両バッテリーを使用できる。一方、室内ではADコンバーターにより100V ACを使用できる。

さらに、DFテスターは各種の舗装路面や建物の床面などのすべり抵抗の測定に利用でき、測定速度の範囲はほぼ0~80 km/hである。図-6はアルミニウム面の比較的低いすべり抵抗の測定例である。

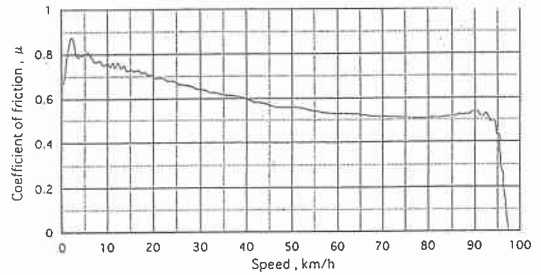


図-4 DFテスターの出力結果（アスファルト路面）

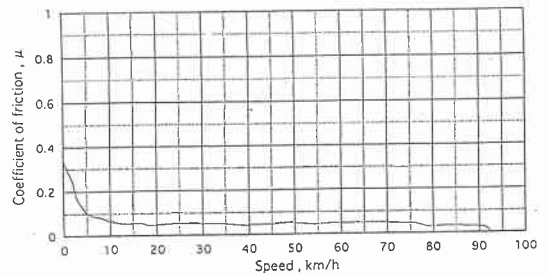


図-6 アルミニウム面測定の出力結果

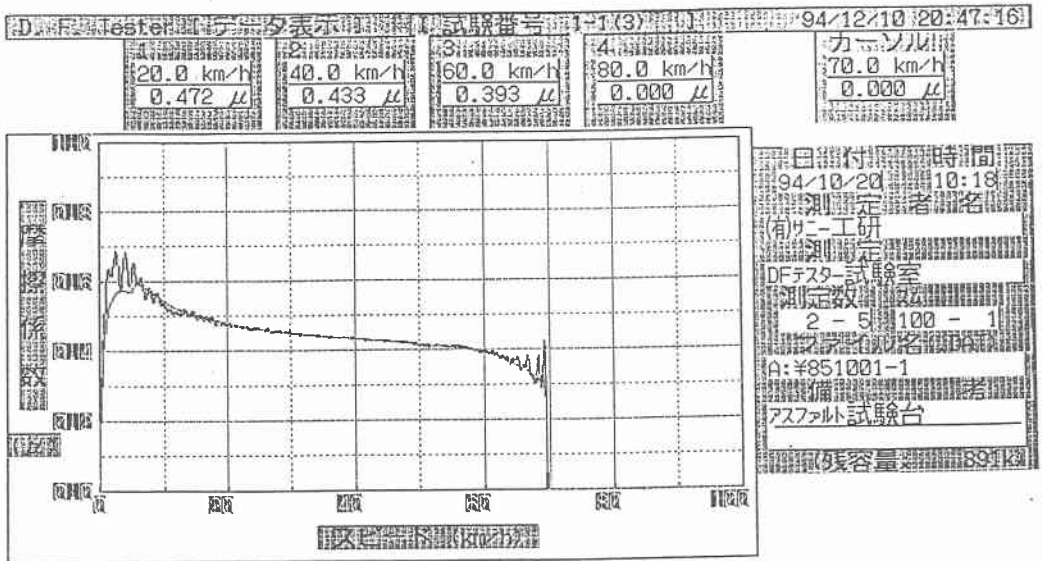


図-5 コンピュータの出力結果

#### 4. 速度依存性と凹路面の影響の評価

DFテスターの速度依存性を評価するために北海道工業大学構内に設置された試験道路（アスファルト舗装）について、連続80回の摩擦抵抗を速度20～80km/hの範囲について測定した。その測定結果をまとめて表-1に示す。この結果から、各測定速度における摩擦係数の変動係数(coefficient of variation)は5.2%～5.5%と小さく、測定値は安定していることがわかる。また、図-7にはこの結果を示しているが、この図からも摩擦係数が速度の増加とともに減少する様子が視覚的にも理解でき、DFテスターはすべり抵抗の速度依存性を測定できることが示されている。

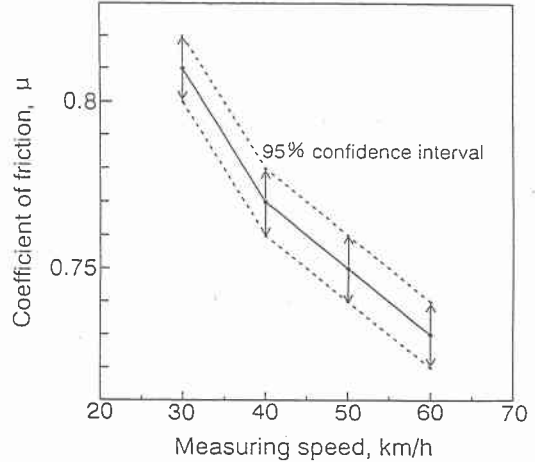


図-7 すべり抵抗の速度依存性

表-1 すべり抵抗の速度依存性の測定結果

Measuring Speed (km/h)	30	40	50	60
Average value of coefficient of friction	0.81	0.77	0.75	0.73
Standard deviation	0.0438	0.0421	0.0392	0.0380
Variance	0.00191	0.00177	0.00153	0.00145
Coefficient of variation (%)	5.4	5.5	5.2	5.2
95% confidence interval	0.82-0.80	0.78-0.76	0.76-0.74	0.74-0.72

一方、DFテスターは回転円盤によりすべり抵抗を測定するという機構上の特徴から、測定路面は平坦であることが望ましい。しかし、実際の路面では論荷重などによりラッティング（わだち）が生じている場合が多い。そこで、わだちの深さが測定結果に及ぼす影響を評価するために、図-8に示すような断面のレジンコンクリート製のわだち深さ0、3、6、9mmの試験路面を作成し、すべり抵抗を測定した。その結果の一部を表-2に示す。各わだち深さの測定値の変動係数は6～12%で、9mmで最高で

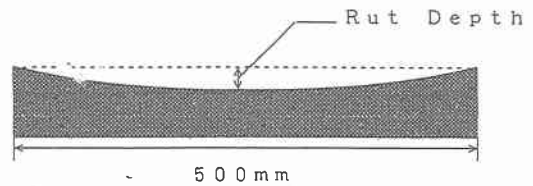


図-8 わだち路面の実験断面模式図

あった。各わだち深さ間の平均値の差の検定により、0mmと9mmの間で有意な差が認められたことから、DFテスターはわだち深さ6mm程度の範囲までは測定に大きく影響しないといえる。

表-2 わだち（凹路面）の影響に関する実験結果（一部）

VELOCITY	50 km/h				60 km/h				
	RUT DEPTH	0 mm	3 mm	6 mm	9 mm	0 mm	3 mm	6 mm	9 mm
AVERAGE		0.43	0.45	0.43	0.38	0.44	0.44	0.42	0.38
STANDARD DEVIATION		0.03557	0.0433	0.02952	0.04299	0.03969	0.04684	0.02657	0.0433
COEFFICIENT OF VARIATION (%)		8.2	9.6	6.9	11.3	9.1	10.6	6.3	11.4
VARIANCE		0.00127	0.00188	0.00087	0.00185	0.00158	0.00219	0.00071	0.00188
SUM OF SQUARES		0.02024	0.03	0.01394	0.02958	0.0252	0.0351	0.01129	0.03
UNBIASED VARIANCE		0.00135	0.002	0.00093	0.00197	0.00168	0.00234	0.00075	0.002

## 5. 国際共同実験におけるDFテスターの結果

常設国際道路会議(PIARC)の技術委員会の1つである路面性状委員会(TC-1)では多くの国際機関の協力のもとに、1992年にベルギーとスペインで2ヵ月間にわたり、実際の道路と空港を利用した大規模な「路面のすべり抵抗とテクスチャーの測定に関する国際共同実験」を実施した。実験に参加した測定機種は日本の2機種を含めて17ヵ国から42機種である。日本からの参加は筆者らが民間と共同開発したすべり抵抗測定装置(DFテスターとKOMATSU SKID TESTER)で国際共同実験に、また齋藤はTC-1の専門委員(Expert Member)として実験の企画、実施にも参画した。

### 5.1 DFテスターと他の装置との相関

DFテスターと他のすべり抵抗測定装置による測定値の相関を比較した。これは測定方式および装置間での測定結果の整合性を図ること、およびある装置の測定結果から他の装置の測定結果を推定することを目的としたものである。DFテスターと他の装置との相関はおおむね $R=0.8$ 前後である。図-9a、b、cはそれぞれロック方式、サイドフォース方式、スリップ方式の代表的な装置との比較を示す。参加した全てのすべり抵抗測定との関係が得られたので、DFテスターの国際的な使用が可能となった。

### 5.2 速度依存性を表現するPIARCモデル

すべり抵抗の速度依存性をモデル化したものにPenn State Modelがある。このモデルは著者の齋藤がペンシルベニア州立大学のJ. J. Henryと共同で開発したもので、次式で表される。

$$F(S) = F_0 \exp[-S/S_0] \quad (3)$$

ここで、 $F(S)$ は速度 $S$ におけるすべり抵抗であり、 $F_0$ は路面のマイクロなテクスチャー、 $S_0$ はマクロなテクスチャーに依存する係数である。図-10にこのモデルの関係を示し、また実験に参加した装置のすべり速度の範囲も示している。国際共同実験結果の解析において、Penn

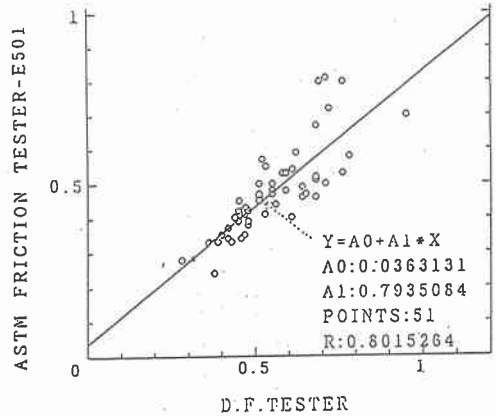


図-9a ASTMトレーラー(USA)との相関

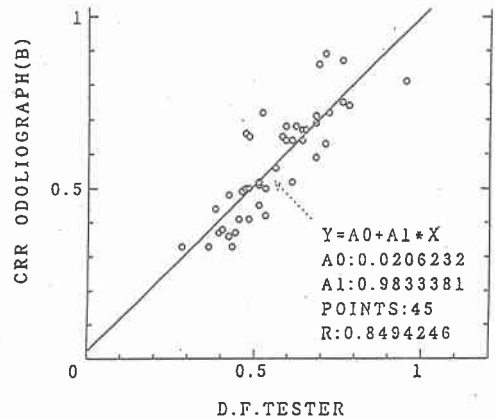


図-9b トリオグラフ(ベルギー)との相関

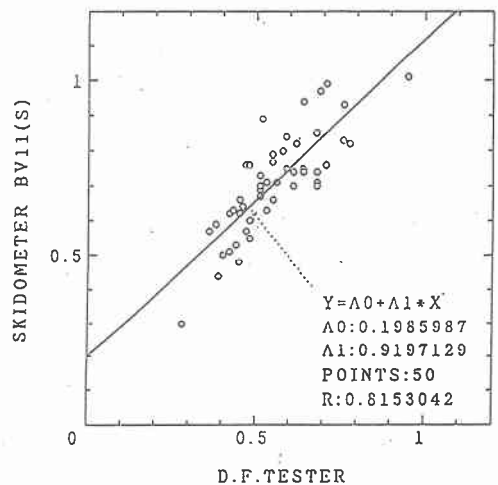


図-9c スキッドメータBV11(スウェーデン)との相関

State Modelを修正し, 任意の速度におけるすべり抵抗測定値を速度60km/hにおけるすべり抵抗値に換算する次式の PIARCモデルを開発した。

$$FR_{60} = FR_S \exp \left[ -\left( \frac{S-60}{S_p} \right) \right] \quad (4)$$

ここで,  $FR_{60}$ は速度  $S$  で測定されたすべり抵抗値  $FR_S$  を60km/hの測定値に換算した値である。また, 速度定数  $S_p$  は路面のテクスチャーの測定値から各テクスチャー測定装置に対して与えられる。

$$S_p = a + b T_x \quad (5)$$

ここで,  $a$  と  $b$  はテクスチャー測定装置に対する定数,  $T_x$  はテクスチャーの測定値である。 $S_p$  と最も高い相関をもつテクスチャー測定データとしてMPD(Mean Profile Depth)を用いて式(5)を求めると, 次式が得られた。

$$S_p = 14.2 + 89.7 \text{ MPD} \quad (R=0.956) \quad (6)$$

式(6)を式(4)に代入し, DFテスターの速度20km/hにおけるすべり抵抗測定値  $FR_{20}$  を用いて  $FR_{60}$  を推定し, 60km/hにおける値と比較すると図-11のようになり, 非常に良く推定できることがわかる。

## 6. まとめ

以上, 本論文ではすべり抵抗測定における世界的な課題である測定装置の小型化および速度依存性を測定できる新しい測定装置として開発されたポータブルテスター (DFテスター) の特性, 特に速度依存性について検討した。また各種のすべり抵抗測定装置による測定結果の統一化を目指した国際共同実験の測定結果から, DFテスターと他の機種との関係, およびすべり抵抗の速度依存性を考慮して国際共同実験結果の解析において提案された PIARCモデルへの適合についても検討した。

この結果, DFテスターはすべり抵抗測定において優れた特性を有し, またPIARCモデルへの適合性も優れていることが示された。これらの結果を基にして, 現在DFテスターをASTMに規格化することを検討しており, 1996年中にはドラフトを作成する予定である。

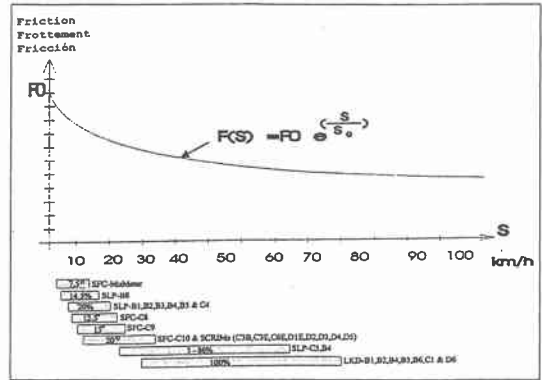


図-10 Penn State Modelの速度依存関係

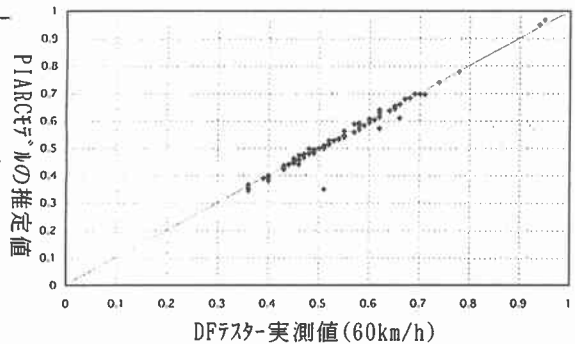


図-11 PIARCモデルによる推定値DFテスター-実測値の比較

## 参考文献

- 1) K. Ichihara, H. Abe and T. Sawa: Dynamic Friction Tester (DF Tester), Proc. of 2nd International Symposium on Road Surface Characteristics, pp.252-260, Berlin, 1992.
- 2) 斎藤・堀口・笠原・福田: 舗装路面のすべり抵抗およびテクスチャー測定の国際共同実験報告, 土木学会支部論報告文集, 第50号, pp.766-771, 1994.
- 3) PIARC: International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements, 1995.
- 4) K. Saito, T. Horiguchi, A. Kasahara, H. Abe and J. J. Henry: Development of Portable Tester for Measuring Skid Resistance and Its Speed Dependency on Pavement Surfaces, Transportation Research Record (to be published).