

IV-29

路面のすべり抵抗値と国際フリクション・インデックス (IFI) の関係  
—DF テスター、Komatsu テスター、ASTM トレーラー、SCRIM の比較—

日邦産業(株)	正員	安部 裕也
室蘭工業大学	フェロー	斉藤 和夫
北海道工業大学	フェロー	笠原 篤
北見工業大学	正員	川村 彰
ペンシルベニア州立大		J. J. HENRY

1. はじめに

道路および空港で車両が安全に走行するためには、十分なすべり抵抗が確保されていることが必要である。路面のすべり抵抗およびテクスチャーを測定する方法や装置は国によって大きく異なっている。このため、各国で測定された値を直接比較することが出来ないことから、研究成果の有効な活用や国際的に統一した舗装マネジメント手法の確立を困難にしているのが現状である。

そこで、世界道路協会(PIARC)の路面特性に関する技術委員会(TC-1)では、世界中の国々で測定された結果を比較する手段を開発する国際実験を企画した。この実験は過去に行われた実験と異なり、単に測定値を比較するだけでなく、基準化(Harmonization)を目的としていることに特徴がある。基準化とはそれぞれの装置が測定した値を共通のスケール上の値(common scale)に換算する方法を開発することである。

路面のすべり測定装置間でデータを相関させる試みはこれまでいくつか行われてきた。しかし、それらは試験路面が類似したタイプの場合に単に結果を相関させただけであり、多様な路面での相関は得られていないのが現状であ

る。この理由としては、すべり抵抗測定値は路面の性状に影響されるが、それを考慮していないことである。異なる性状を持つ路面で異なるすべり抵抗測定方法により測定されたデータを相関させるためには路面の表面特性であるテクスチャー(texture)の情報が必要である。

今回の国際共同実験の最大の成果は、路面のテクスチャー特性を組み込んだモデルを利用してすべり抵抗測定データを分析し、実験に参加した各機種が任意の速度で測定したすべり抵抗値を共通の尺度に変換する国際摩擦指標IFI(International Friction Index)を開発したことである。

すべり抵抗測定方法は大きく分けて、①車輪ロック(loched-wheel)方式、②スリップ(slip)方式、③サイドフォース(side force)方式、および④ポータブルテスター(slides)に分けられる。本論文は国際共同実験に参加したこれらの測定方法を用いた代表的な装置について、それぞれの装置で測定したすべり抵抗値と国際摩擦指標の関係を分析した結果を示す。また、これらの結果を舗装路面のマネジメントに応用する方法についても示す。なお、本研究は文部省科学研究費(B(2))「路面のすべり抵抗測定方法および測定値の国際基準化に関する研究(1997-98)」によるものである。

## 2. すべり抵抗と速度、テクスチャーの関係

一般に、乾燥あるいは氷結路面のすべり抵抗は速度によりあまり変化しないが、湿潤路面ではいくつかの要因により大きく変化する。図-1は各種路面のすべり抵抗値の範囲を示すが、湿潤路面におすすべり抵抗値が速度が高くなるにつれて低下してくることがわかる。このため、速度は湿潤路面の安全性に影響する主要な要因となる。一方、すべり抵抗値の速度による低下度合（速度依存性）は路面により異なっている。この相違はタイヤと路面の接地面における排水能力、路面の側から見るとテクスチャーに依存する。舗装路面は平滑ではなく凹凸があるが、すべり抵抗に関係（排水性）する凹凸のサイズは図-2に示すPIARCの定義によると5cm以下の範囲で0.5mmを境にマイクロテクスチャーとマクロテクスチャーに分けられる。

湿潤路面ではタイヤと路面の間に水が介在する。マクロテクスチャーは迅速に排水する溝を形成し、すべり抵抗の速度依存性を低下させるので、高い速度におけるすべり抵抗の確保に重要な役割を果たす。一方、マイクロテクスチャーはタイヤと路面間の水膜を破り、両者を直接接触させるので、低い速度におけるすべり抵抗の確保に重要な役割を果たす。このすべり抵抗の速度依存性とテクスチャーの関係を組み込んだモデルがPenn State Modelであり、IFIの開発はこのモデルを基本としている。

## 3. 国際摩擦指標(IFI)の開発

国際摩擦指標はF60とSpの2つの指標を用いてIFI(F60, Sp)と表される。前者は任意の測定装置と速度で測定されたすべり抵抗値を速度60 km/hにおけるすべり抵抗の基準値に変換した摩擦定数(Friction Number)、後者はすべり抵抗の速度依存性を左右する路面のマクロテクスチャーから求められる速度定数(Speed Constant)である。この2つの指標を組み込んだ

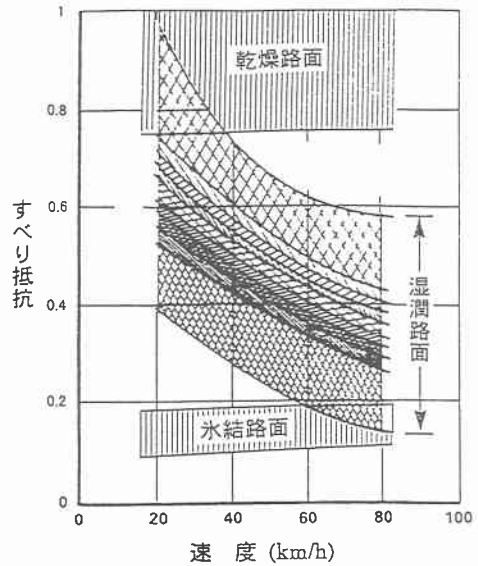


図-1 各種路面のすべり抵抗

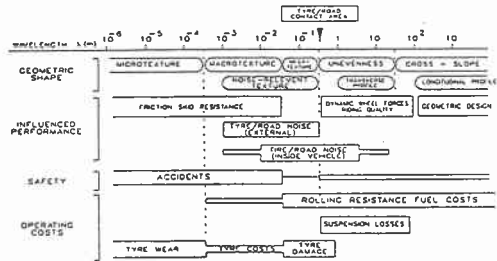


図-2 路面の凹凸（波長）と問題の関係

Penn State Model は次式で表される。

$$F(S) = F60 e^{\frac{60 - S}{S_p}} \quad (1)$$

ここで、F(S)=スリップ速度Sにおける基準化したすべり抵抗値

S = スリップ速度

この式で、スリップ速度は測定方法に対応して次のように計算する。

車輪ロック方式：S = V（試験車の速度）

スリップ方式：S = V ×（スリップ率）

サイドフォース方式：S = V × (sin α)

このモデルは任意の速度Sにおける普遍化されたすべり抵抗値（ゴールド曲線）の推定値を表す。個々のすべり抵抗測定装置について、このF60とSpが与えられればこの式から基準化した値を求めることができる。

IFIを構成するSpとF60は個々のすべり抵抗測定値に対して図-3に示す手順で求められるが、この手順を数学的に示すと次のようになる。

1) 最初に、テクスチャー測定値から次式により速度定数Spを計算する。

$$S_p = a + b * TX \quad (2)$$

ここで、aとbは使用したテクスチャー測定装置に固有の定数で、実験データから定められる。TXはテクスチャー測定値である。

2) スリップ速度Sにおけるすべり抵抗測定値FRSを速度60 km/hにおける測定値(FR60)に、次式を用いて変換する。

$$FR60 = FRS * e^{\frac{S-60}{S_p}} \quad (3)$$

3) 速度60 km/hにおける基準化された値(F60)を次式から計算する。

$$F60 = A + B * FR60 \quad (4)$$

ここで、AとBは該当するすべり測定装置に固有な定数で、実験結果から定められる。

以上の(2)と(3)式を(4)に代入すると次式が得られ、個々のすべり抵抗測定装置で速度Sで測定されたすべり抵抗値から基準値F60が計算される。

$$F60 = A + B * FRS * e^{\frac{S-60}{a+b*TX}} \quad (5)$$

(5)式の定数a、b、A、Bは国際共同実験に参加した装置にしか与えられないので、参加していない装置からIFIを求めるためには参加した

装置とのキャリブレーションにより定数を定める方法を検討することが必要である。

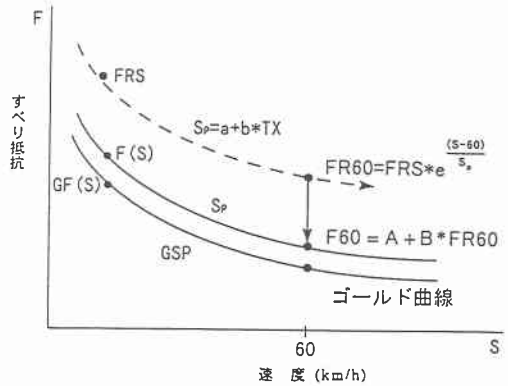


図-3 IFIを求める手順

#### 4. 測定方法別の測定値とIFIの関係

##### 4-1 テクスチャーデータとSpの関係

IFIを決定するためには、まずSpを決定しなければならない。その決定方法は(2)式によるが、この場合にTXをどんなテクスチャー指標で測定するかを決める必要がある。本論文では2つの指標によるテクスチャーデータを用いる決定方法について検討した。

##### ① 平均テクスチャー深(MTD)

テクスチャー測定値としてサンドパッチ法による平均テクスチャー深(mean texture depth: MTD)を用いる。この方法は一定の体積の砂を路面に円形に挽き均してその半径から面積を計算し、この面積で体積を割って平均深さを計算する。

共同実験で得られたMTDとSpの関係を回帰分析で求めて、次式が得られた。

$$S_p = 17.2 + 87.7 * MTD \quad R=0.83 \quad (6)$$

この関係式の相関係数はR=0.83であり高くはないが、良好な関係であるといえる。

##### ② 平均プロファイル深(MPD)

この指標は路面のプロファイル測定により、その平均深さを求めるものである。スウェーデンのプロファイル測定装置(VTI Mobile Profilometer)により測定されたMPDとSpの回帰分析により次式が得られた。

$$Sp = 14.0 + 90.0 * MPD \quad R=0.94 \quad (7)$$

この関係式の相関係数はR=0.94で非常に良好な関係が得られた。

以上の回帰分析で、Spと相関性が高いテクスチャー指標はMPDであり、Spの推定には(7)式を使用することが推奨される。ただし、MPDの測定値が得られない場合には、簡便で費用が安いサンドパッチ法によるMTDで代用することが可能である。

#### 4-2 DF テスターによる F60 の決定

DF テスターによるすべり抵抗の測定は20~80km/hの速度で行われたが、低速度の方が良い結果が得られると考えられるので、FRSとして20 km/hにおける測定値であるFRS<sub>20</sub>と(7)式を用いて求めたSpを(3)式に代入して60 km/hにおける値FR60<sub>20</sub>に変換して、F60を求める回帰分析を行い、次式を得た。

$$F60 = 0.09 + 0.72 * FR60_{20} \quad R=0.96 \quad (8)$$

この関係式における相関係数はR=0.96と非常に高い結果である。

なお、DF テスターについて、(6)式のMTDを用いてSpを推定した場合の結果として

$$F60 = 0.09 + 0.70 * FR60 \quad R=0.94 \quad (10)$$

が得られた。この場合の相関係数はR=0.94と高く、定数AとBもほぼ同じ値であるので、DF テスターの場合はMPDの代わりにMTDを用いてもほぼ同じ程度の精度でF60を求めることができるといえる。

4-3 Komatsu テスターによる F60 の決定  
Komatsu Skid Testerはスリップ率10%で30、50と60 km/hの速度ですべり抵抗を測定した。本研究ではSpの推定にMPDを用いて、各速度別にF60を推定する回帰式を検討し、次のような良好な結果を得た。

$$F60 = 0.06 + 0.80 * FR60_{30} \quad R=0.91 \quad (11)$$

$$F60 = 0.06 + 0.83 * FR60_{50} \quad R=0.93 \quad (12)$$

$$F60 = 0.06 + 0.84 * FR60_{60} \quad R=0.93 \quad (13)$$

また、すべての速度に対するデータを用いた回帰分析の結果として次式を得た。

$$F60 = 0.06 + 0.82 * FR60_{30,50,60} \quad R=0.92 \quad (14)$$

この関係式の相関係数はR=0.92であり、非常に良い結果である。以上の回帰式は定数および相関係数がほぼ同じであるので、どの式を用いても良い。しかし、30~60km/hの速度範囲のデータを用いた(12)式の使用を推奨する。

#### 4-4 SCRIM による F60 の決定

国際共同実験には8種類のSCRIMが参加したが、その内の1台は装置に欠陥が発見された。結局7台のSCRIMについて60 km/hのすべり抵抗測定値とMPDを用いた回帰分析の結果を表一に示す。この結果は非常に高い相関係数を示しており、いずれのSCRIMでもF60の推定が可能であるが、ここではこれらの定数の

表一 7台のSCRIMの回帰分析結果

DEVICE NAME	A	B	N	R
FLEMISH SCRIM (Belgium only)	0.049	0.967	35	0.955
MOPT SCRIM (Spain only)	0.032	0.873	29	0.959
SCRIM (Spain only)	0.017	0.850	31	0.967
GEOCISA SCRIM	0.021	0.928	68	0.879
SCRIM	-0.006	0.962	69	0.948
SUMMS	0.002	0.987	69	0.930
SCRIMTEX	0.033	0.872	69	0.933

平均値を取った次式を SCRIM 装置に対して提案することとした。

$$F60 = 0.02 + 0.91 * FR60 \quad R=0.95 \quad (15)$$

#### 4-5 ASTMトレーラーによるF60の決定

国際共同実験に参加した ASTM 仕様の装置は1台で、この測定方法は100%スリップ、すなわち車輪ロックにより測定するものである。Spの推定にMPDを使用し、30~90km/hのすべての速度におけるすべり抵抗値について回帰分析を行い、次式を得た。

$$F60 = 0.04 + 0.93 * FR60 \quad R=0.95 \quad (16)$$

#### 5. IFIの舗装マネジメントへの応用

舗装管理者がIFIのある水準、IFI\*(F60\*, Sp\*)を確立しようとする場合、ある路面の最小のテクスチャーと最小のすべり抵抗水準を確保する条件を個々のすべり抵抗測定装置の測定結果から得ることができる。

すなわち、(5)式にF60\*とSp\*を代入して解くと、求める必要な最小すべり抵抗値FRS<sub>min</sub>とテクスチャー最小値Tx<sub>min</sub>は次式で求められる。

$$FRS_{min} = \frac{(F60^* - A)}{B} * e^{\frac{60-S}{a \cdot b \cdot TX}} \quad (17)$$

$$TX_{min} = \frac{(S_p^* - a)}{b} \quad (18)$$

上式でa、b、A、Bは既に決定されているので、(17)式はFRS<sub>min</sub>とTXの関係、(18)式はTx<sub>min</sub>を定めるものである。

例えば、IFIの水準をF60 = 0.30、Sp = 100 km/hと設定すると、両者の関係は図-4のようになり、あるすべり抵抗測定装置で測定された当該路面のすべり抵抗およびテクスチャーの改善すべき管理指針を与えることができる。

図-5~図-7はF60 = 0.3、Sp = 100 km/h

とした場合として、DFテスター、Komatsu テスター、SCRIMについて、本論で得られたSpとF60の関係式を用いた舗装管理水準の設定例を示す。なお、ASTMトレーラーは60 km/hの速度ですべり抵抗を測定するので、すべり抵抗の最小値はFRS(60)<sub>min</sub> = 0.26となる。

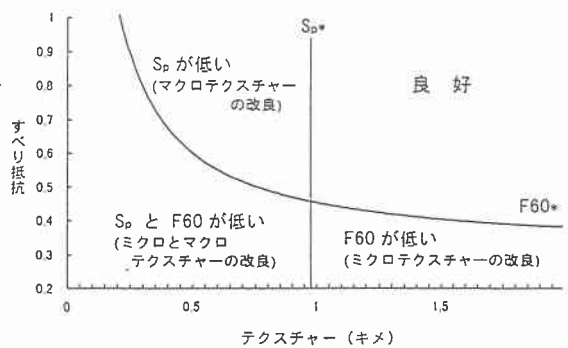


図-4 IFIの舗装マネジメントへの応用

#### 6. まとめ

本論文は、PIARCにより実施された路面のすべり抵抗とテクスチャーの測定値の比較と基準化に関する国際共同実験のデータを用いて、4種類のすべり抵抗測定方法の代表的な装置のすべり抵抗測定値とIFIの関係を分析した結果を示した。これらの結果を用いて、いずれかの装置ですべり抵抗値を測定した場合、テクスチャー測定値としてMPDかMTDが測定されていれば、その装置についての国際摩擦指標IFI(F60, Sp)を求めることができる。

今回のPIARCの国際共同実験は舗装路面のすべり抵抗測定値を基準化するという極めて挑戦的な試みであり、この実験に基づいて開発されたIFIはすでにASTMやISOなどの機関で国際的な指標にする検討が開始されている。

IFIは国際共同実験に参加した装置だけに与えられているが、今後は実験に参加していない装置について、IFIを計算する方法を検討することが課題である。

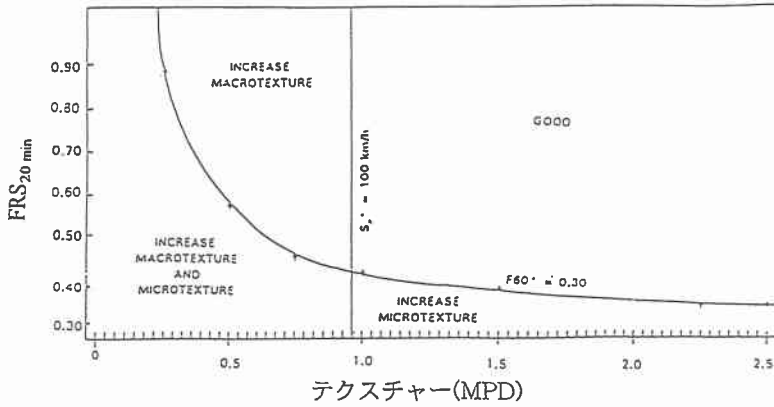


図-5 速度 20km/h における DF テスターの最小すべり抵抗値と最小テクスチャー(MPD)

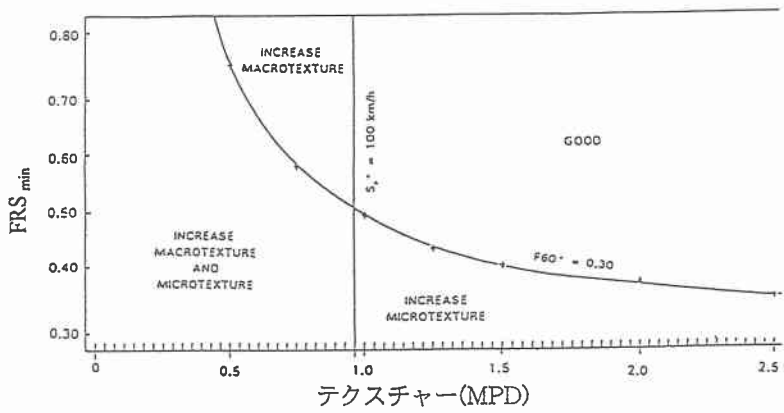


図-6 Komatsu テスターの最小すべり抵抗値と最小テクスチャー(MPD)

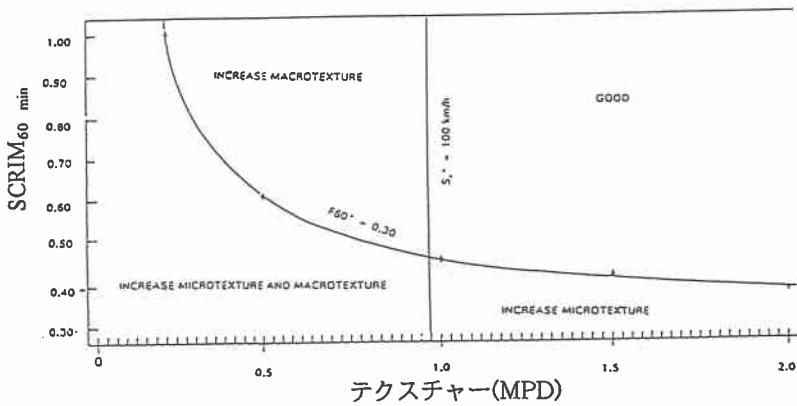


図-7 速度 60km/h における SCRIM の最小すべり抵抗値と最小テクスチャー(MPD)