

IV-11

路面のすべり抵抗とテクスチャーの関係に関する研究

室蘭工業大学大学院 学生員 山本 賢二
 日邦産業株式会社 正員 安部 裕也
 室蘭工業大学工学部 フェロー 斉藤 和夫
 北見工業大学工学部 正員 川村 彰
 ペンシルベニア州立大学 J. J. Henry

1. はじめに

道路および空港滑走路で車両が安全に走行するためには、十分なすべり抵抗 (skid resistance) が必要であるが、このすべり抵抗は路面のテクスチャー (texture) に影響される。従って、路面を維持管理する場合に、十分なすべり抵抗を発揮するためのテクスチャーを確保することが重要になる。

同じ路面においてもすべり抵抗は速度によって変化するが、このすべり抵抗の速度依存性とテクスチャーの関係が定量的に明らかにされて以来、路面のすべり抵抗管理におけるテクスチャーの役割が注目されるようになってきた。斉藤とHenry^{1) 2)}はすべり抵抗の速度依存性をテクスチャーの関係をモデル化した Penn State Model を開発した。このモデルはPIARCの第1技術委員会が1992年に実施した国際共同実験結果に基づいて開発された「国際摩擦指標 (International Friction Index:IFI)^{3) 4)}の基本モデルとして採用された。すなわち、世界各国で開発・使用されている異なるすべり抵抗測定装置により得られる異なる値を、テクスチャーを媒介として共通のスケール上の値に換算するというグローバル・スタンダードの開発を可能としたものである。

このPIARCの実験において、IFIを求めるポータブルなすべり抵抗測定装置として安部 (1996)が開発し、著者ら^{5) 6)}が実際への適用性を検討してきたDFテスターの有用性が実証されたが、この装置は1997年に日本で開発された装置としては初めてASTM Standardとして採択されて話題を集めたところである。

一方、路面のIFIを求めるためにはテクスチャーの測定が必要になるが、このテクスチャーを簡単に測定できるポータブルな測定装置、特にDFテスターとセットで測定できるテクスチャーが開発されると非常に便利である。そこで、著者らはDFテスターですべり抵抗を測定する同一軌跡のテクスチャーを測定する装置 (Circular Texture Meter:CTメータ)の開発を試み、その実用性について検討してきた。

このような経緯を背景として、本研究ではすべり抵抗とテクスチャーの関係を整理するとともに、DFテスターのすべり抵抗測定値とCTメータ測定値によるIFI推定方法について検討し

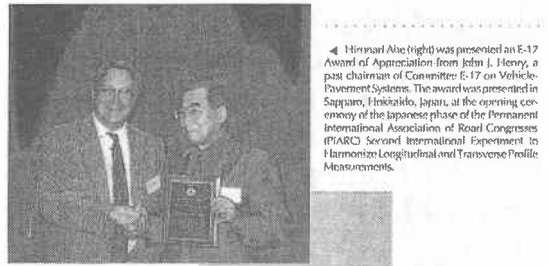


写真-1 ASTMから認定証を受ける安部裕也⁷⁾

The Relations Between the Skid Resistance and Texture,
 by K. YAMAMOTO, H. ABE, K. SAITO, A. KAWAMURA and J. J. HENRY

た結果を示している。なお、CT メータ測定値は1998年6月にアメリカの舗装路面実験施設で測定されたデータを用いている。

2. すべり抵抗と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、湿潤路面では大きく変化する。図-1は各種路面のすべり抵抗の範囲を示すが、湿潤路面におけるすべり抵抗値は速度が高くなるにつれて低下してくることを表している。このすべり抵抗値の速度による低下度合（速度依存性）は路面により異なることが知られている。

この相違はタイヤの性質と路面の性質に関係してくる。タイヤの側から見ると、タイヤゴムのもつ2つの性質—粘着性（adhesion）とヒステリシス（hysteresis）—に関係する。粘着性は路面の凹凸によるゴムの局所的な高圧で生じる分子結合から、ヒステリシスは路面の突起によるゴムの変形から生じる。この結果、すべり抵抗は路面の2つの性質—マイクロテクスチャー（microtexture）とマクロテクスチャー（macrotexture）—に関係してくることになる。

舗装路面は平滑ではなく凹凸があるが、あるサイズ以下の凹凸をテクスチャーと呼んでいる。図-3に示すPIARCの定義による0.5mm以下のサイズのマイクロテクスチャーは骨材表面の凹凸により形成され、タイヤの粘着性に関係する。一方、0.5mm～50mmのサイズのマクロテクスチャーは路面の骨材の配置、形状等による凹凸により形成され、タイヤのヒステリシスに関係してくる。湿潤路面ではタイヤと路面間に水が介在する。マクロテクスチャーは路面に溝を形成してすべり抵抗の速度依存性に関係し、高い速度範囲におけるすべり抵抗の確保に重要な役目を果たす。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、両者を接触させるので、低い速度でのすべり抵抗に重要な関係をもつ。

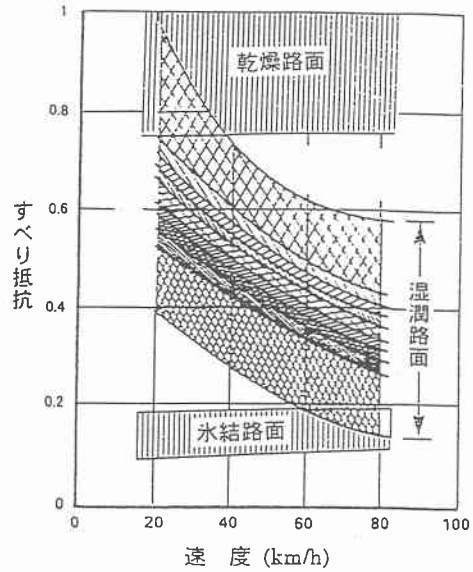


図-1 すべり抵抗と速度の関係⁸⁾

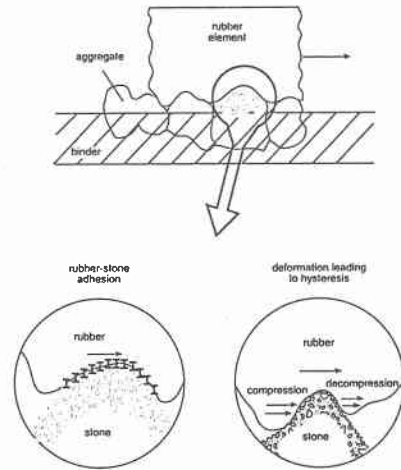


図-2 adhesion と hysteresis の機構

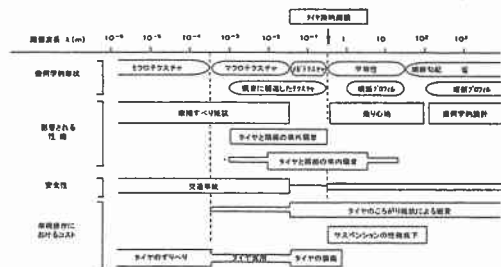


図-3 PIARCによるテクスチャーの定義

3. すべり抵抗とテクスチャー関係のモデル化

3.1 Penn State Model

齊藤と Henry はすべり抵抗が速度により変化する状態を、テクスチャーをパラメータとして図-4 に示すようにモデル化した¹⁾。

$$F(S) = F_0 * e^{-\frac{S}{S_0}} \quad (1)$$

ここで、F(S)はスリップ速度 S における摩擦モデルにおける F₀ は無次元の定数で、マイクロテクスチャーの関数であり、S₀ は速度定数で、マクロテクスチャーの関数である。

3.2 PIARC の国際共同実験

すべり抵抗とテクスチャーを測定する方法や装置は国により異なっているのが現状である。PIARC の路面特性に関する技術委員会 (TC-1) では世界各国の異なる方式による測定値を比較し、基準化 (harmonization) する目的で 1992 年 10 月にベルギーとスペインで国際共同実験を開催した。測定装置は 15 か国から 37 種類のすべり測定装置、17 種類のテクスチャー測定装置が参加した。なお、この共同実験には日本から民間の DF テスターと Komatsu Skid Tester の 2 種類のすべり抵抗測定装置が参加した。すべり抵抗の測定は 30、60、90km/h の 3 種類の速度で行い、すべり抵抗の速度依存性の分析を行えるようにした。

3.3 PIARC モデルによる IFI の開発

国際共同実験の最大の成果は、路面のテクスチャーを組み込んだモデルを利用して、任意のすべり抵抗測定装置で任意の速度で測定した値を共通の尺度に変換する PIARC モデルを開発し、モデルの 2 つのパラメータ、F60 と Sp を用いて国際摩擦指標 IFI (F60, Sp) とした。

PIARC Model は Penn State Model を変形して次のように表した。

$$F(S) = F60 * e^{-\frac{60-S}{Sp}} \quad (2)$$

ここで、F(S)はスリップ速度 S における基準化したすべり抵抗値、S はスリップ速度である。

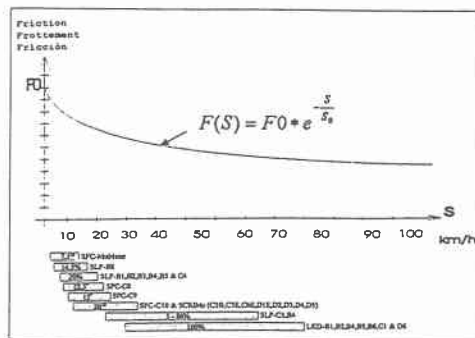


図-4 Penn State Model の概要

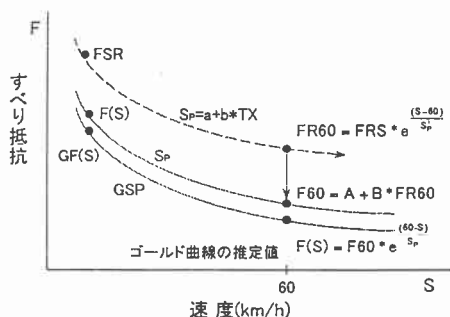


図-5 PIARC Model による IFI の推定手順⁴⁾

3.4 IFI を推定する手順

IFI を推定する手順を図-5 に示すが、最初にすべり抵抗の速度依存性を表す速度定数 (speed constant) Sp を推定することが必要になる。国際共同実験ではこのパラメータはテクスチャー測定値 TX から次式で推定するものとした。

$$Sp = a + b * TX \quad (3)$$

ここで、a と b は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ものである。

著者らはこの速度定数を国際共同実験データを用いて次の 2 種類のテクスチャー測定装置から推定することを提案した⁹⁾。

1) 平均プロファイル深 (MPD)

MPD (mean profile depth: ASTM E1845-96) は非接触タイプの装置による路面のテクスチャー指標であり、スウェーデンのプロファイル装置の測定値と Sp の回帰から次式を得た。

$$Sp = 14.0 + 90.0 * MPD \quad R = 0.94 \quad (4)$$

スエーデンのプロファイル測定装置によるMPDからSpを推定する回帰式はR=0.94という高い相関で得られた。しかし、この装置は大型であり、世界の任意の場所へ移動して測定することは困難である。

2) 平均テクスチャー深 (MTD)

そこで、従来から現場で使用されてきた非常に簡便なテクスチャー測定装置であるサンドパッチ法 (ASTM E965-96) で得られた MTD (Mean Texture Depth) を用いて Sp との回帰式を求めた結果、次式が得られた。

$$Sp = 17.2 + 87.7 * MTD \quad R = 0.83 \quad (5)$$

この式の相関係数は R=0.83 とあまり高くないが、良好な関係であるといえる。

次に、IFI のもう1つの指標である F60 の推定は、Sp が定まれば次式から得られる。

$$F60 = A + B * FRS * e^{\frac{S-60}{a+b*TX}} \quad (6)$$

ここで、A と B は国際共同実験で得られたすべり測定装置に固有の値である。DF テスターによる速度 20km/h でのすべり抵抗測定値を用いた場合、国際共同実験の解析で (6) 式の F60 の推定式は次のように得られている。

$$F60 = 0.09 + 0.72 * FR60_{20} \quad R = 0.96 \quad (7)$$

ここで、FR60₂₀ は速度 20 km/h におけるすべり抵抗値の速度 60km/h への変換値である。

DF テスターはポータブルタイプの測定装置で移動が容易である。また、上式が示すように高い相関で F60 を推定することができることから、国際共同実験で高く評価された。さらに、その測定原理のユニークさ、性能などをトータルに評価され、1997年12月の ASTM E-17 委員会の全会一致で ASTM Standard (E1911-98: Standard Test Method for Measuring Paved Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester) として採用された。

3.4 IFI を利用した舗装マネジメント

IFI (F60, Sp) を求める関係式が得られると、これを舗装路面のマネジメントに利用することができる。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、対象路面のすべり抵抗測定値とテクスチャー測定値を用いて確保すべき最小のすべり抵抗値 FRSmin とテクスチャー最小値 Txmin は次式で求められる。

$$FRS_{min} = \frac{(F60^* - A)}{B} * e^{\frac{60-S}{a+b*TX}} \quad (8)$$

$$TX_{min} = \frac{(S_p^* - a)}{b} \quad (9)$$

上式で a、b、A、B は既に決定されている。例えば IFI の水準を F60=0.30、Sp=100km/h とすると、図-6 の関係が得られる。対象とする路面の2つの測定値を図中にプロットすることにより、路面の性状を改善する指針が得られる。

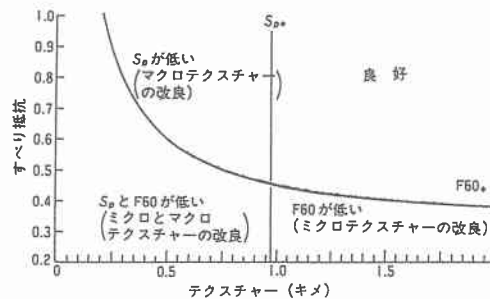


図-6 IFI を使用した舗装マネジメント

4. 新しいテクスチャー測定装置の開発

以上、これまでの研究成果を踏まえてすべり抵抗とテクスチャーの関係を、主として IFI の開発とその推定方法を示した。この場合、テクスチャーの測定が重要であるが、現在使用されている測定装置の多くは車両走行タイプの大型装置であり、ポータブルなテクスチャー測定装置の開発が課題となっている。

そこで、安部と道工大の笠原教授は DF テスターとセットで使用できるような最新技術を導入

した新しいテクスチャー測定装置の開発を試みた。ここでは、開発されたテクスチャー測定装置を用いた IFI の推定方法について検討する。

1) Circular Texture Meter の開発

CT メータは DF テスターですべり抵抗を測定した路面上の軌跡のテクスチャーを厳密に測定することにより、IFI を容易に算定を目的として開発された。その測定装置の概要は写真-2 に示すように、DF テスターと同様の外形である。測定原理は DF テスターのスライダーと同じ位置に取り付けたレーザヘッドを円形に回転させて、DF テスターのスライダーと同じ軌跡のテクスチャーを非接触で測定するものである。

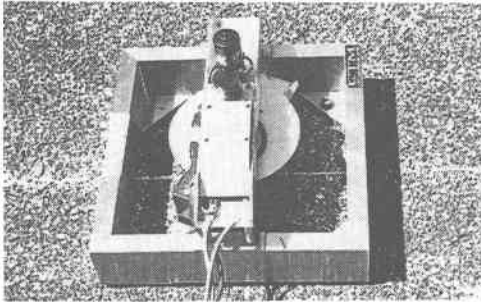


写真-2 CTメータの概観

測定軌跡長は 892mm であり、1 回転のサンプリングは 1,000 である。図-7 に示すように 1 回転の軌跡を 8 区間 (A~H) に等分して各区間毎の MPD を算出する。A と E 区間の MPD は車両の走行方向のテクスチャー、C と G 区間の MPD は進行方向に直角方向のテクスチャー測定値を与える。また、8 区間全体の平均した MPD を測定することもできる。

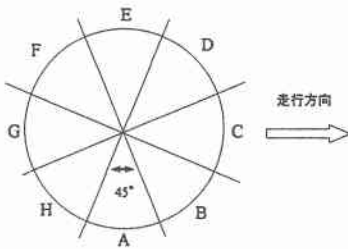


図-7 CTメータの測定方法

2) 路面試験施設における実証実験

開発した CT メータの測定値を用いて IFI 算定における Sp 推定方法を検討するために、アメリカの路面試験施設の 2 3 箇所の試験路面でサンドパッチ法と比較実験を行った。その結果の関係部分を表-1 に示す。

表-1 路面試験施設における CTメータ測定値

| surface | MTD | CTM(A-E) | CTM(B-F) | CTM(C-G) | CTM(D-H) | CTM(ave) | BPN |
|-----------|------|----------|----------|----------|----------|----------|------|
| A | 0.47 | 0.47 | 0.55 | 0.43 | 0.55 | 0.50 | 53.2 |
| B | 1.82 | 1.99 | 2.10 | 1.17 | 2.02 | 1.82 | 65.0 |
| C | 1.95 | 2.40 | 2.52 | 0.95 | 2.60 | 2.11 | 65.8 |
| D | 0.56 | 0.64 | 0.58 | 0.69 | 0.80 | 0.68 | 51.1 |
| E | 1.01 | 1.10 | 1.04 | 1.15 | 1.14 | 1.11 | 53.9 |
| F | 1.76 | 2.46 | 1.83 | 1.75 | 2.01 | 2.01 | 65.3 |
| G | 2.21 | 2.81 | 2.76 | 2.74 | 2.50 | 2.70 | 66.4 |
| K | 0.48 | 0.69 | 0.61 | 0.83 | 0.69 | 0.65 | 43.1 |
| K0 | 0.72 | 1.09 | 0.71 | 0.88 | 0.87 | 0.82 | 56.2 |
| S0 | 0.50 | 0.46 | 0.51 | 0.49 | 0.46 | 0.48 | 54.0 |
| S1 | 0.73 | 0.57 | 0.63 | 0.67 | 0.73 | 0.65 | 65.0 |
| S2 | 0.70 | 0.81 | 0.73 | 0.73 | 1.00 | 0.82 | 63.7 |
| S3 | 1.03 | 1.02 | 1.21 | 1.13 | 1.40 | 1.19 | 63.3 |
| S4 | 2.29 | 2.56 | 2.23 | 2.60 | 2.36 | 2.43 | 66.3 |
| S5 | 1.31 | 1.22 | 1.46 | 1.14 | 1.33 | 1.29 | 67.3 |
| S6 | 1.04 | 1.44 | 1.19 | 1.08 | 0.92 | 1.15 | 70.1 |
| R1 | 0.47 | 0.57 | 0.64 | 0.58 | 0.49 | 0.57 | 61.9 |
| R2 | 0.52 | 0.64 | 0.63 | 0.71 | 0.81 | 0.69 | 63.3 |
| R3 | 0.50 | 0.68 | 0.61 | 0.59 | 0.61 | 0.62 | 49.5 |
| R4 | 1.55 | 1.52 | 1.44 | 1.45 | 1.34 | 1.44 | 73.8 |
| white pan | 0.27 | 0.41 | 0.32 | 0.27 | 0.25 | 0.31 | 31.8 |
| red pan | 0.44 | 0.75 | 0.57 | 0.53 | 0.50 | 0.58 | 44.6 |
| blue pan | 0.64 | 0.51 | 0.55 | 0.48 | 0.45 | 0.50 | 67.4 |

この表で、CT メータ測定値は図-7 の 8 区間の対面する区間の平均値と全体の平均値を示す。この測定結果のうち、サンドパッチ法による MTD と CT メータの全区間平均の MPD の関係を図-8 に示す。両者の回帰式として次式が得られた。

$$MTD = 0.019 + 0.889 * MPD \quad R = 0.985 \quad (10)$$

この式の相関係数は $R=0.985$ となり、CT メータの測定値 MPD はサンドパッチ法の測定値 MTD と

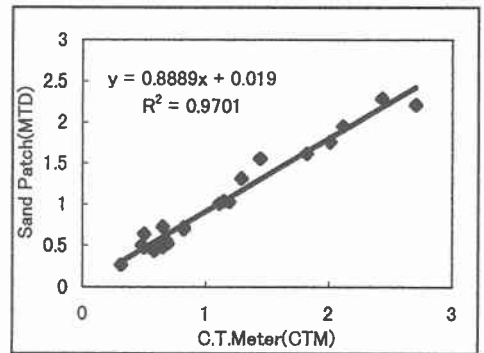


図-8 CTメータの平均MPDとMTDの関係

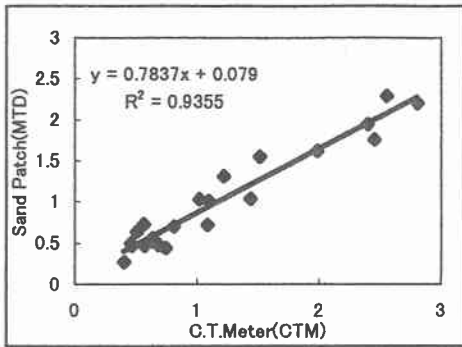


図-9 MTDとA-E区間のMPDとの関係

ほぼ一致することが実証された。図-9は車両の走行方向に平行するAとE区間のMPDとMTDの関係を示すが、全区間の平均値の場合と同様の高い相関係数(R=0.967)が得られている。

3) IFI算定におけるSpの推定への利用

以上のアメリカにおける実証実験の結果から開発されたCTメータの測定値MPDはサンドパッチ法によるMTDと一致する非常に良い回帰式が得られた。そこで、PIARC国際共同実験で提案された国際摩擦指標IFI(F60, Sp)の算定にCTメータの測定値を利用することが可能となる。すなわち、(5)式のサンドパッチ法によるMTDの代わりに(9)式のCTメータによるMPDを代入して、次のSp推定式が得られる。

$$Sp = 18.4 + 78.1 * MPD \quad (11)$$

DFテスターによる速度20km/hにおけるすべり測定値からF60を算定する場合、同じ路面個所でのCTメータ測定値MPDを上式に代入して求めたSpを(6)式に代入し、得られたFR60₂₀を(7)式に代入して算出できることになる。

5. まとめ

本論文では著者らがこれまで研究を行ってきた舗装路面のすべり抵抗とテクスチャーの関係について、PIARC国際共同実験およびデータ解析に参加して得た成果をまとめた。また、新し

く開発したポータブルなテクスチャー測定装置のアメリカにおける実証実験の結果と国際摩擦指標IFIの算定に利用する方法を提案した。これらの成果は国際共同研究の中から生まれたものであり、グローバル・スタンダードを確立する上で有用になるものと考えられる。

参考文献

- 1) Kazuo SAITO and J. J. HENRY: Development of Models for Relating Pavement Texture to Skid Resistance and Their Use for Pavement Management Systems, Proc. The International Conference on Roads and Road Transport Problems, 1988, pp. 36-43.
- 2) 齊藤和夫・J. J. HENRY: 舗装路面の粗さとすべり抵抗に関する研究、交通工学、Vol. 23, No. 4, 1988, pp. 19-27.
- 3) PIARC: Report of International Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements, 1995.
- 4) 齊藤和夫: 国際摩擦指標 (IFI) の開発—すべり抵抗測定値の標準化への挑戦—、土木学会誌、Vol. 83, March, 1998, pp. 27-28.
- 5) 齊藤和夫・安部裕也・笠原 篤・堀口 敬: 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、土木学会北海道支部論文報告集、第52号(B)、1996、pp. 530-535.
- 6) K. SAITO, A. KASAHARA, H. ABE and J. J. HENRY: Development of Portable Tester for Measuring Skid Resistance and Its Speed Dependency on Pavement Surfaces, TRR 1536, 1996, pp. 45-51.
- 7) ASTM STANDARDIZATION NEWS, Society News, Dec. 1998, pp. 58.
- 8) R. R. HEGMON: Tire-Pavement Interaction, PUBLIC ROADS, Vol. 51, No. 1, 1987, pp. 5-11.
- 9) 安部・齊藤・笠原・川村・Henry: 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、土木学会北海道支部論文報告集(第II、第IV部門)、第54号(B)、1998、pp. 512-517.