

Circular Texture Meter (CTM) とDFテストによる 国際摩擦指標 (IFI) の算出

安部裕也¹・亀山修一²・玉井昭典³・笠原 篤⁴・斎藤和夫⁵

¹ 正会員 日邦産業 (株) (〒 185-0002 国分寺市東戸倉 2-12-26)

² 正会員 博士(工学) 北海道工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒 006-8585 札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4-1)

³ 正会員 金亀建設 (株) 技術試験室 (〒 791-3131 愛媛県伊予郡松前町北川原 79-1)

⁴ フェロー会員 工博 北海道工業大学教授 工学部土木工学科 (〒 006-8585 札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4-1)

⁵ フェロー会員 工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

舗装のマクロテクスチャを測定する装置として Circular Texture Meter (CTM) を開発した。CTM は半径 142mm の円上を回転するアームに CCD レーザ変位センサを取り付けたものであり、DF テスタが摩擦係数を測定する円と同一円周上のテクスチャを約 0.9mm ピッチで測定することが可能である。

本研究では、アスファルト舗装 21 種類、コンクリート舗装 14 種類のマクロテクスチャを CTM で測定し、サンドパッチ試験、砂拡大器試験の測定値との比較をおこなった。その結果、CTM から得られる平均プロファイル深さ (MPD) とサンドパッチ試験から得られる平均テクスチャ深さ (MTD) には高い相関があることが分かった。また、CTM 測定から得られる MPD と DFT のスリップ速度 20km/h における摩擦係数から国際摩擦指標 (IFI) を算出できることを示した。

Key words: Circular Texture Meter, Sand Patch Test, Macrotexture, MPD, MTD, Dynamic Friction Tester, IFI

1. はじめに

道路や滑走路の摩擦性能は、その上を走行する車両、航空機の安全性にとって重要な役割を果たす。舗装の摩擦および舗装路面のテクスチャを測定するため、世界各国において様々な装置や方法が開発されてきた¹⁾。これらの試験装置から得られる測定値を比較し、基準化することを目的として、1992 年 9～10 月、スペインおよびベルギーにおいて PIARC による国際共同実験がおこなわれた²⁾。その成果として国際摩擦指標 IFI (International Friction Index) が開発された³⁾。IFI は摩擦ナンバ $F60$ (Friction Number) と速度ナンバ Sp (Speed Number) で構成され、IFI ($F60$, Sp) と表記される。一旦、IFI が得られると、任意のスリップ速度 S における摩擦係数 $F(S)$ を算出することが可能となる。

IFI を構成する摩擦ナンバ $F60$ はスリップ速度 60km/h における摩擦を表している。摩擦の測定方法には、タイヤと路面の摩擦係数を直接測定する方法⁴⁾や DF テスタ (DFT)⁵⁾や英国式振り子試験機 (BPT)⁶⁾のようにゴム片と路面との摩擦係数を測定する方法などがある。

一方、速度ナンバ Sp は摩擦の速度依存性を表しており、舗装のマクロテクスチャを基に算出される。マクロテクス

チャとは波長が 0.5～50mm の路面波形であり⁷⁾、その測定装置はプロフィロメータ法、容積法、アウトフロー法に分類される。舗装のマクロテクスチャは摩擦係数の速度依存性に影響を与える重要な因子であるにも関わらず、従来の測定装置では、摩擦係数を測定した箇所と同一箇所のマクロテクスチャを測定することは不可能であった。

今回開発した Circular Texture Meter (CTM) はプロフィロメータ法的一种であり、CCD レーザ変位センサによって半径 142mm の円周上のマクロテクスチャを測定する装置である。CTM は軽量かつポータブルな試験装置であり、短時間でマクロテクスチャを測定できることに加え、DFT が摩擦係数を測定する円と同一円のマクロテクスチャを測定できるという特徴を有する。

本研究では、様々な種類のアスファルト舗装およびコンクリート舗装において得られた CTM の測定値と、従来用いられているサンドパッチ試験の測定結果との比較をおこなうとともに、CTM と DFT の測定値から IFI ($F60$, Sp) を算出することを目的としている。さらに、DFT の測定値から得られる摩擦の速度依存性と CTM から得られる速度ナンバ Sp との関係についても解析した。

2. 国際摩擦指標 (IFI)

PIARC は図-1 に示すような摩擦－スリップ速度曲線 (PIARC モデル) を開発し、国際共同実験の結果を基に速度ナンバのゴールデン値 (GS) および摩擦ナンバのゴールデン値 (GF60) を決定した。国際共同実験に参加したマクロテクスチャおよび摩擦測定装置から GS の推定値である Sp と GF60 の推定値である $F60$ を算出するには以下のような手順をとる。

1. マクロテクスチャの測定結果から、式 (1) によって Sp を算出する。

$$Sp = a + b \times TX \quad (1)$$

ここで、

a, b : マクロテクスチャ測定装置に固有の定数

TX : マクロテクスチャ測定から得られる指標

2. スリップ速度 S における摩擦測定値 FRS を式 (2) によってスリップ速度 60km/h の摩擦係数 $FR60$ に変換する。

$$FR60 = FRS e^{\frac{S-60}{Sp}} \quad (2)$$

ここで、

S : スリップ速度

FRS : スリップ速度 S における摩擦測定値

3. 式 (3) によって摩擦ナンバ $F60$ を求める。

$$F60 = A + B \times FR60 \quad (3)$$

ここで、

A, B : 摩擦測定装置に固有の定数

IFI が求まると、任意のスリップ速度 S' におけるゴールデン摩擦値 $GF(S')$ の推定値 $F(S')$ を式 (4) によって計算することができる。

$$F(S') = F60 e^{\frac{S'-60}{Sp}} \quad (4)$$

3. 試験の概要

(1) 試験の対象とした舗装

本研究において、マクロテクスチャおよび摩擦係数の測定をおこなった舗装はアスファルト舗装 21 種類、コンクリート舗装 14 種類である。

アスファルト舗装には密粒度アスファルト混合物、密粒ギャップアスファルト混合物、細粒度アスファルト混合物、

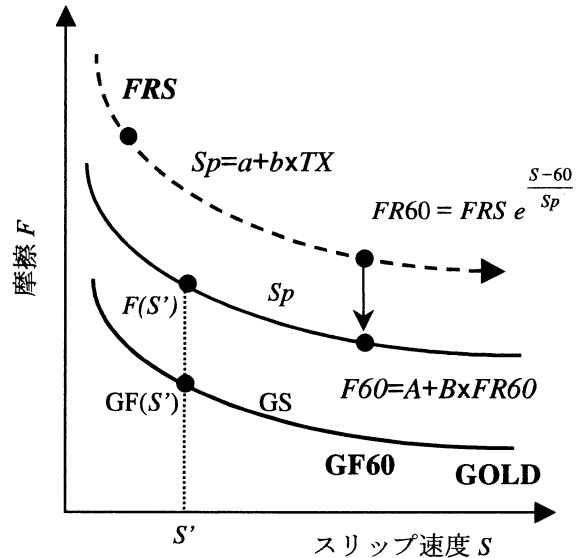


図-1 PIARC モデル

粗粒度アスファルト混合物、排水性舗装およびマイクロサーフェーシング、グルーピング処理された舗装が含まれる。

一方、コンクリート舗装にはグルーピングやショットブラスト処理をおこなった PCC 舗装や表面処理をおこなっていない PCC 舗装が含まれる。

(2) マクロテクスチャの測定

本研究では、サンドパッチ、砂拡大器および CTM を用いて舗装のマクロテクスチャを測定した。

サンドパッチ試験は既知の容積の砂を路面上に円形に広げ、その直径を測定する方法であり、砂の容積を円形に広げられた砂の面積で除することにより、砂層の平均深さ (MTD : Mean Texture Depth) が得られる⁸⁾。

砂拡大器試験は、わが国独自の測定方法であり、スプレッド (砂拡大器) を用いて砂を幅 5cm の長方形に広げ、その面積から砂層の平均深さ (きめ深さ) を測定する方法である⁹⁾。

今回開発した CTM (写真-1) は 40cm×40cm×27cm の箱型であり、重量は約 13kg である。写真-2 に示すように、CCD レーザ変位センサが半径 142mm の円上を回転するアームに取り付けられており、DFT が摩擦を測定する円と同一円上のマクロテクスチャを測定することができる。

CTM の測定スイッチを入れると、CCD レーザ変位センサが回転し、測定を開始する。CCD レーザ変位センサが 1 回転した後、測定値は RS232C ケーブルを通してパソコンに読み込まれる。測定およびデータの読み込みに要する時間はわずか 40 秒程度であり、非常に短い時間で舗装のマクロテクスチャを測定することができる。また、CTM の設定、測定、測定プロファイルの表示、および後述する

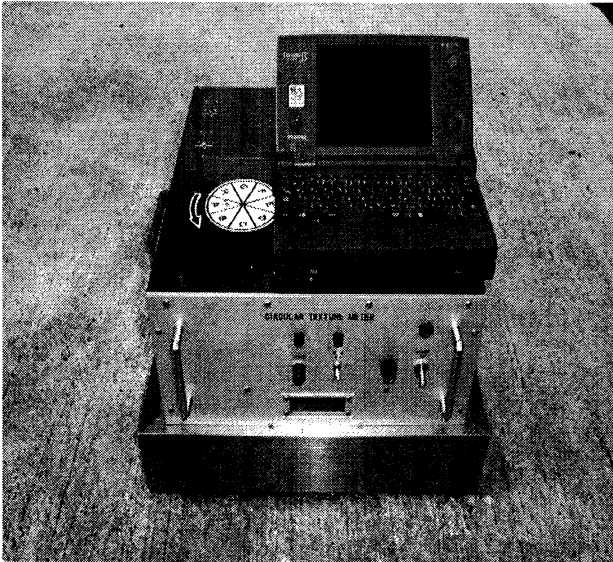


写真-1 Circular Texture Meter (CTM) の概観

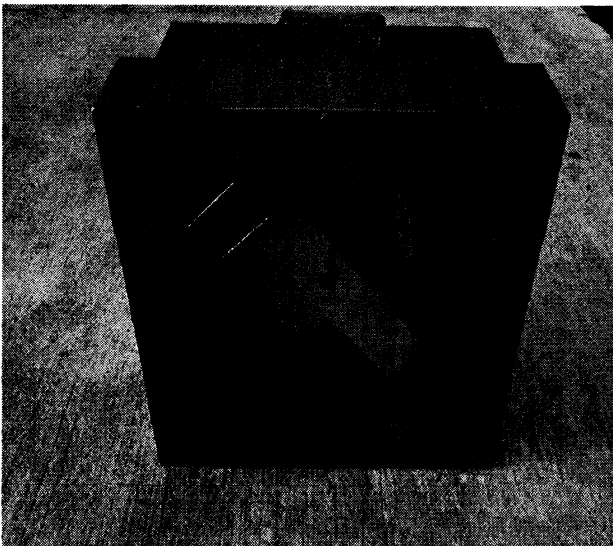


写真-2 CTM の CCD レーザ変位センサ

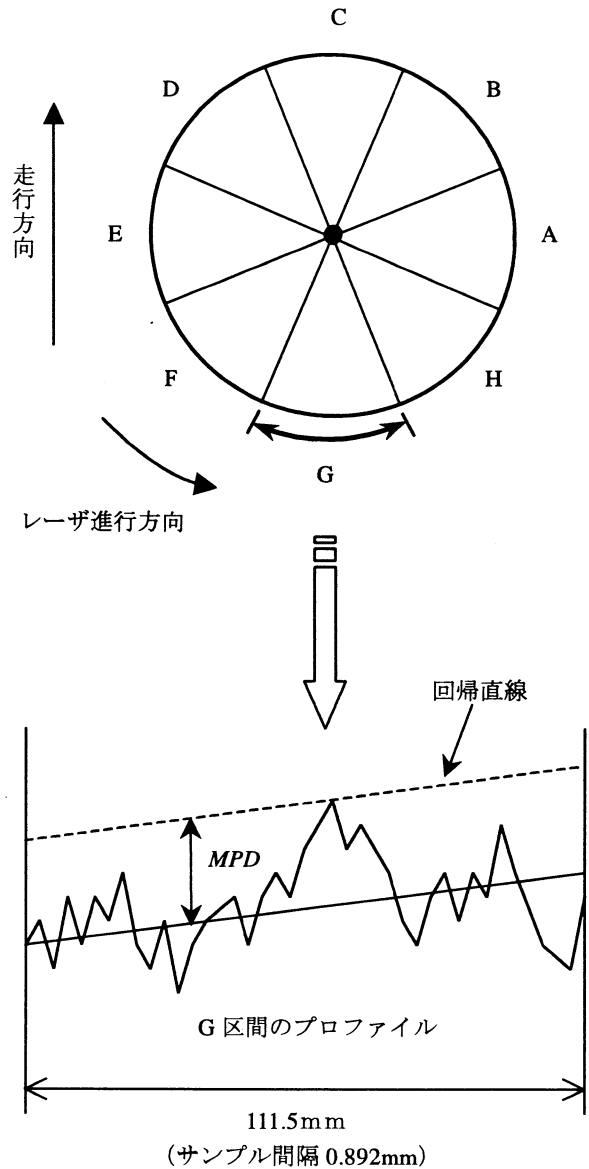


図-2 CTM の測定軌跡と MPD の算出方法

MPDの算出などはWindows上で稼動する専用ソフトウェアによって容易におこなうことができる。

CTM が測定するプロファイルの長さ（円周）は892mmであり、サンプリング間隔はプロファイル長さの1000分の1である0.892mmに設定している。測定されたプロファイルを図-2に示すように、長さ111.5mmのA～H区間に8分割し、それぞれのプロファイルにおける平均プロファイル深さ（MPD：Mean Profile Depth）を算出する。MPDは図-2に示すようにプロファイルの回帰直線とピーク高さとの差で表される。CTMによって測定されるプロファイルは円形であることから、A、E区間から算出されるMPDは車両走行方向のマクロテクスチャを、CおよびG区間のMPDはこれと直角方向のマクロテクスチャを表す。

本研究では、DFTによって測定される摩擦係数とCTMによって測定されるマクロテクスチャの関係を解析することに主眼をおいていることから、車両走行方向におけるマクロテクスチャ（A、E区間）のみを解析に用いるのではなく、すべての区間（A～H区間）におけるMPDを算出し、その平均値を解析に用いることとした。

(3) 摩擦係数の測定

CTM測定をおこなった地点と同一地点においてDFT⁹⁾による摩擦係数の測定をおこなった。この際、DFTは、ゴムスライダがCTMによって測定されたプロファイルの真上にくるように設置した。本研究では、スリップ速度20～80km/hにおいて測定される摩擦係数を解析に用いた。

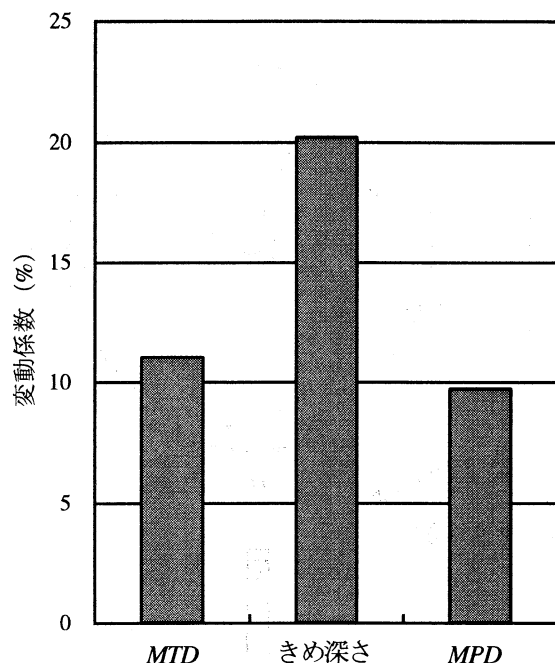


図-3 変動係数の比較

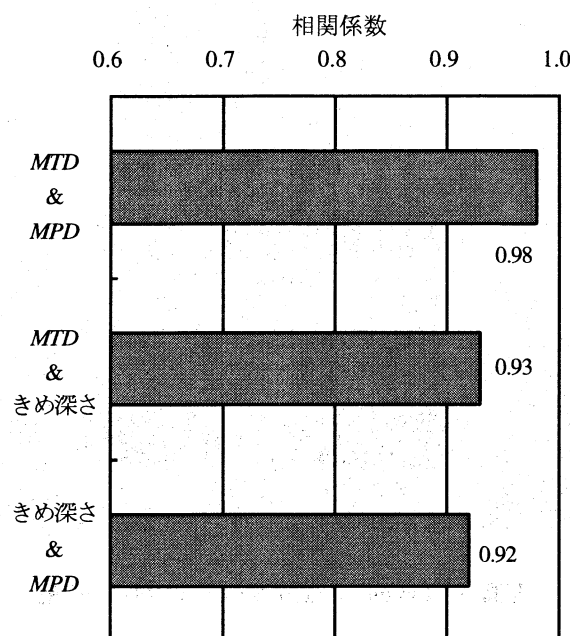


図-4 相関係数の比較

4. CTM とサンドパッチ、砂拡大器との比較

サンドパッチ、砂拡大器およびCTM から得られたMTD、きめ深さ、MPDの変動係数を図-3に示す。

最も変動係数が大きい測定装置は砂拡大器であり、サンドパッチとCTMの変動係数は砂拡大器の約1/2であった。これは、路面が粗い舗装において砂拡大器による測定をおこなう場合、砂がスプレッドの幅(5cm)よりも広く拡散し、測定誤差が大きくなるためと考えられる。一方、MTDとMPDの変動係数はほとんど同じであることから、両者の測定精度は同程度と言える。

MTDとMPD、MTDときめ深さ、きめ深さとMPDの相関係数を図-4に示す。すべてのケースにおいて相関係数は0.9以上となった。特に、サンドパッチ試験から得られるMTDとCTMから得られるMPDの相関係数は0.98となり、非常に高い相関を示した。

MPDの変動係数がMTDとほぼ同じことに加え、両者の相関係数も非常に高いことから、CTMを用いることによって、容易かつ短時間でマクロテクスチャを測定することができると言える。

5. CTM と DFT 測定値からの IFI の算出

国際摩擦指標 IFI は摩擦ナンバ $F60$ と速度ナンバ Sp から構成される。国際共同実験に参加した摩擦測定装置およびマクロテクスチャ測定装置には IFI を算出するための補正係数が与えられている³⁾。

しかしながら、国際共同実験に参加していない装置によって IFI を算出するには、国際共同実験に参加した装置の測定値を用いて補正係数を求めなければならない。DFT は国際共同実験に参加しており、 $F60$ を算出するための係数を有しているが、CTM は国際共通試験に参加しておらず、IFI のもう一つの指数である Sp を得るために必要な補正係数を有していない。したがって、DFT と CTM の測定値から IFI ($F60$, Sp) を求めるには、国際共同実験に参加したサンドパッチ試験から得られる MTD と、CTM から得られる MPD の関係を求め、CTM の補正係数を決定する必要がある。

(1) CTM 測定値からの速度ナンバ Sp の算出

式(1)を用いて、サンドパッチ試験によって得られる MTD から Sp を算出する。式(1)における a, b はマクロテクスチャ測定装置に固有の値であり、国際共同実験の結果を基に、ASTM によって定められている³⁾。これによると、サンドパッチ試験における a, b はそれぞれ -11.6, 113.6 であることから、式(1)は式(5)のように表される。

$$Sp = -11.6 + 113.6 \times MTD \quad (5)$$

式(5)によって算出された Sp と CTM 測定から得られた MPD との関係を図-5に示す。両者の相関係数は 0.92 となり、非常に高い値を示した。

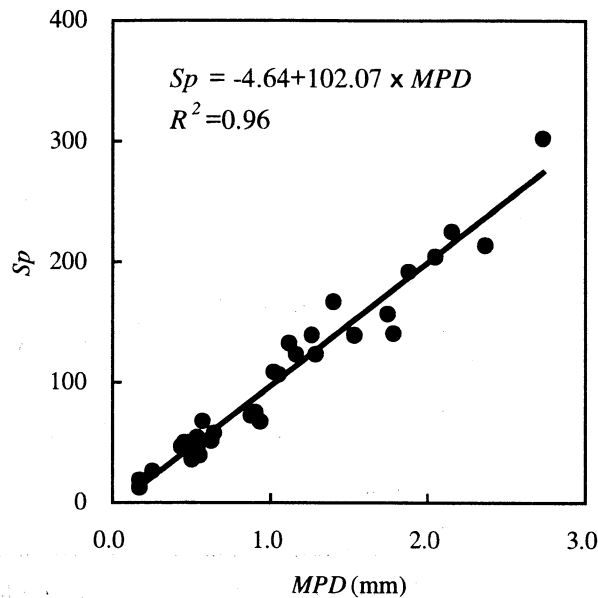


図-5 MPD と S_p の関係

また、 S_p と MPD の回帰直線は式 (6) となり、この回帰式を用いることによって MPD から速度ナンバ S_p を算出することができる。

$$S_p = -4.64 + 102.07 \times MPD, \quad R^2 = 0.96 \quad (6)$$

(2) CTM, DFT 測定値からの摩擦ナンバ F_{60} の算出

DFT によって測定されるスリップ速度 0~80km/h における摩擦係数のうち、摩擦ナンバのゴールデン値 GF60 との相関が最も高いのはスリップ速度 20km/h における摩擦係数 (DFT20) であることが国際共同実験によって明らかにされていることから²⁾、ここでは DFT20 を用いて解析をおこなった。

MTD から算出される S_p を式 (2) に代入し、DFT20 をスリップ速度 60km/h における摩擦係数 $DFT60_{20}(MTD)$ に変換した後、国際共同実験から得られた回帰式 (7)¹⁰⁾ を用いて摩擦ナンバ F_{60} を算出する。

$$F_{60} = 0.10 + 0.68 \times DFT60_{20}(MTD) \quad (7)$$

MPD から算出される S_p および DFT20 を式 (2) に代入して得られる $DFT60_{20}(MPD)$ と、式 (7) から得られる F_{60} の関係を図-6 に示す。また、両者の回帰直線は式 (8) で与えられる。

$$F_{60} = 0.11 + 0.66 \times DFT60_{20}(MPD), \quad R^2 = 0.97 \quad (8)$$

R^2 値も非常に高いことから、式 (8) を用いることにより、CTM と DFT の測定値から十分な精度で F_{60} を算出することが可能である。

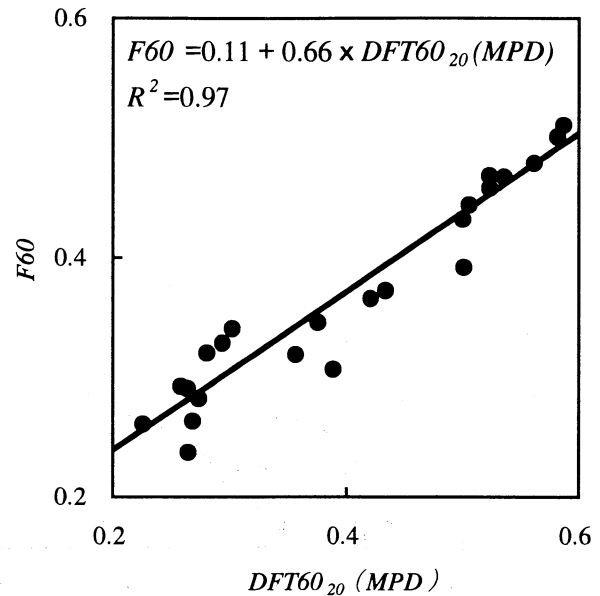


図-6 $DFT60_{20}(MPD)$ と F_{60} の関係

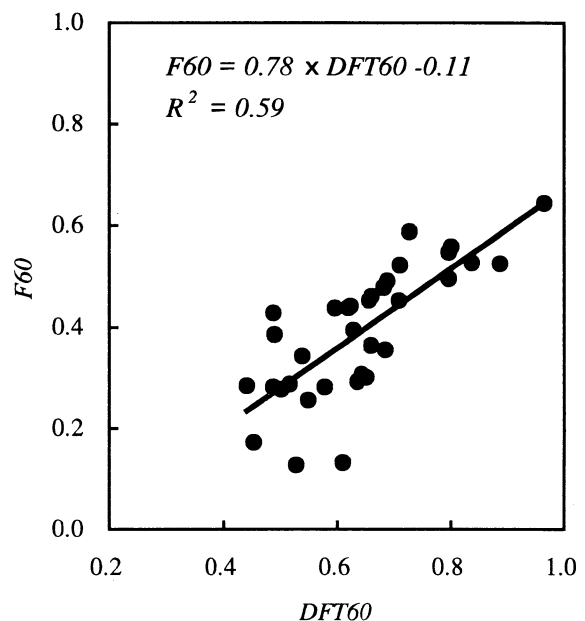


図-7 $DFT60$ と F_{60} の関係

(3) F_{60} と $DFT60$ の比較

式 (8) によって得られた F_{60} とスリップ速度 60km/h における DFT の測定値 $DFT60$ の関係を図-7 に示す。また、両者の回帰式を式 (9) に示す。

$$F_{60} = 0.78 \times DFT60 - 0.11, \quad R^2 = 0.59 \quad (9)$$

$DFT60$ が 0.7 以上の舗装では、回帰式 (9) は比較的一致しているものの、 $DFT60$ が 0.6 以下の舗装では、回帰直線からのばらつきが大きくなる。

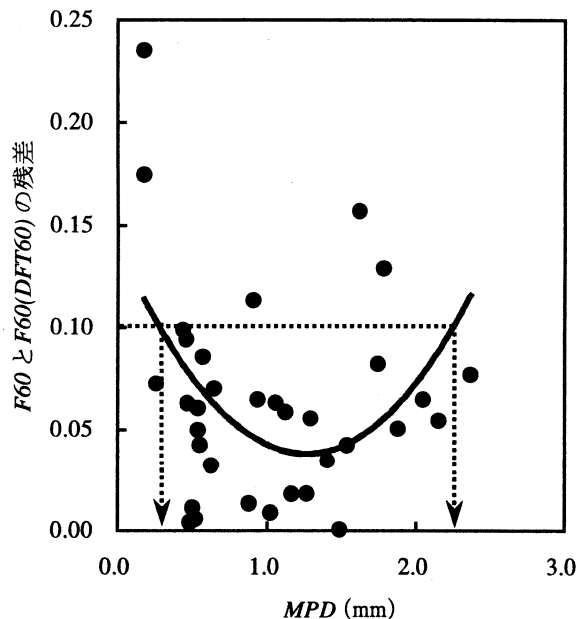


図-8 $F60$ と $F60(DFT60)$ の残差と MPD の関係

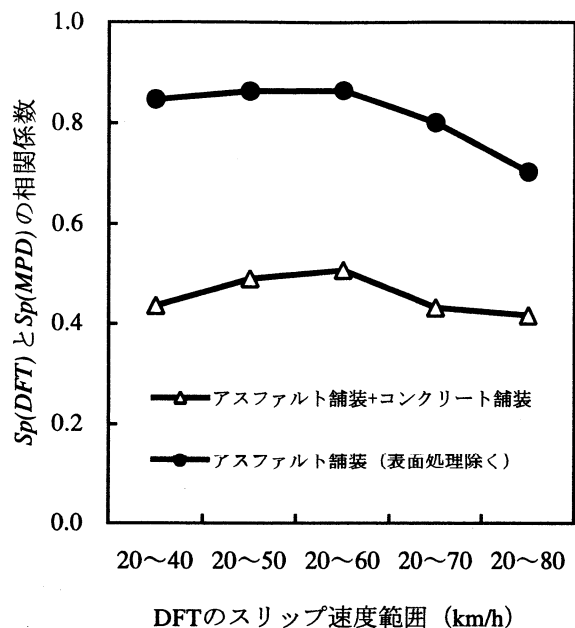


図-9 $Sp(DFT)$ と $Sp(MPD)$ の相関係数

そこで、式 (9) を用いて、 $DFT60$ から摩擦ナンバ $F60$ の推定値 $F60(DFT60)$ を算出し、 $DFT20$ と MPD から得られる摩擦ナンバ $F60$ との残差を計算した。算出された残差と MPD の関係を図-8 に示す。

MPD が $0.2 \sim 2.2 \text{ mm}$ の範囲では、 $F60(DFT60)$ と、 $DFT20$ と MPD から得られる摩擦ナンバ $F60$ の残差は 0.1 以下となる。しかしながら、 $MPD < 0.2 \text{ mm}$ および $MPD > 2.2 \text{ mm}$ の範囲では残差が大きくなる傾向がある。

これは、 $MPD < 0.2 \text{ mm}$ および $MPD > 2.2 \text{ mm}$ となる舗装では、 DFT 測定から得られる摩擦係数の速度依存性と MPD から算出される摩擦係数の速度依存性、すなわち速度ナンバ Sp が一致しないことによると考えられる。

6. DFT 測定データと速度ナンバ Sp の関係

DFT はスリップ速度 $0 \sim 80 \text{ km/h}$ における摩擦係数を連続的に測定することから、 DFT の測定値から摩擦係数の速度依存性を直接求めることができる。そこで、スリップ速度が $20 \sim 40 \text{ km/h}$ 、 $20 \sim 50 \text{ km/h}$ 、 $20 \sim 60 \text{ km/h}$ 、 $20 \sim 70 \text{ km/h}$ 、 $20 \sim 80 \text{ km/h}$ の範囲における DFT 測定値から摩擦係数の速度依存性 $Sp(DFT)$ を算出した。ただし、測定した舗装のうち、測定速度の増加にともない摩擦係数が増加した箇所、あるいは測定速度が増加しても摩擦係数が変化しない箇所は解析から除外した。

$Sp(DFT)$ の算出に用いる DFT のスリップ速度範囲を $20 \sim 40 \text{ km/h}$ 、 $20 \sim 50 \text{ km/h}$ 、 $20 \sim 60 \text{ km/h}$ 、 $20 \sim 70 \text{ km/h}$ および $20 \sim 80 \text{ km/h}$ に変化させたときの $Sp(DFT)$ と、 MPD から算

出される $Sp(MPD)$ の相関係数を図-9 に示す。

本研究で測定した舗装 (アスファルト舗装 + コンクリート舗装) における $Sp(DFT)$ と $Sp(MPD)$ の相関係数は $0.4 \sim 0.5$ であり、高い相関が見られなかった。そこで、解析の対象を、グルーピングやマイクロサーフェイシングなどの表面処理をおこなっていないアスファルト舗装に限定し、 $Sp(DFT)$ と $Sp(MPD)$ の相関係数を求めたところ、相関係数は $0.7 \sim 0.8$ に増加した (図-9)。表面処理をおこなっていないアスファルト舗装では、 DFT 測定値から得られる $Sp(DFT)$ と CTM 測定値から得られる $Sp(MPD)$ には比較的高い相関が見られるが、コンクリート舗装や表面処理をおこなっている舗装では、 $Sp(DFT)$ と $Sp(MPD)$ の相関は低い。したがって、このような舗装では、 DFT 測定から得られる摩擦係数の速度依存性とマクロテクスチャの関係を説明するには、 MPD だけでは十分と言えず、路面の波状特性 (路面波長など) の影響についても考慮する必要がある。

また、表面処理をおこなっていないアスファルト舗装では、スリップ速度 $20 \sim 40 \text{ km/h}$ 、 $20 \sim 50 \text{ km/h}$ 、 $20 \sim 60 \text{ km/h}$ における摩擦係数から得られる $Sp(DFT)$ と、 $Sp(MPD)$ の相関係数はほぼ一定値を示すが、スリップ速度 70 km/h 以上の高速領域における DFT の測定値を用いることにより、相関係数は低下する傾向を示す。したがって、 DFT の測定値から摩擦の速度依存性を求める場合、スリップ速度 70 km/h 以上の高速領域における摩擦係数を用いず、スリップ速度 $20 \sim 60 \text{ km/h}$ の摩擦係数を用いる方が良いと考えられる。

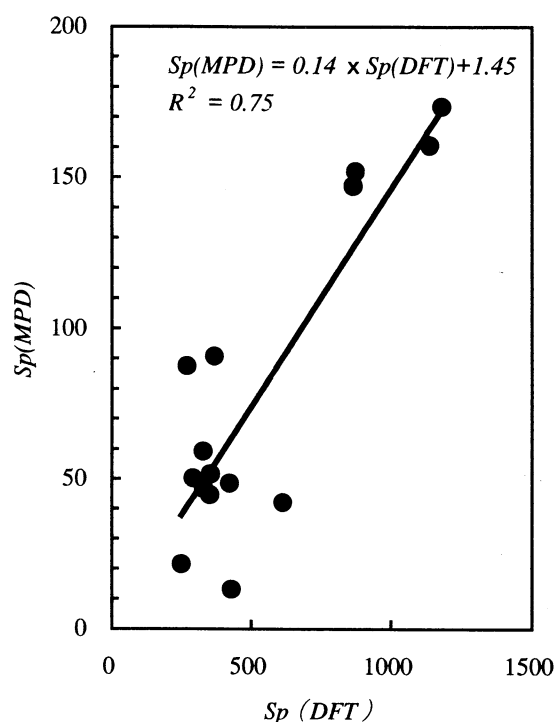


図-10 $Sp(DFT)$ と Sp の関係

(アスファルト舗装, 表面処理なし, スリップ速度20~60km/h)

図-9において, $Sp(DFT)$ と $Sp(MPD)$ の相関係数が最も高くなったケース(アスファルト舗装, 表面処理なし, DFTのスリップ速度範囲 20~60km/h)における $Sp(DFT)$ と $Sp(MPD)$ の関係を図-10に示す。DFTの測定値から得られる $Sp(DFT)$ はCTMの測定値から得られる $Sp(MPD)$ と比べ大きな値となった。これは, DFT測定から得られる摩擦係数がPIARCモデルにおけるゴールデン摩擦値よりもスリップ速度の影響を受けにくいことを意味している。

$Sp(DFT)$ と $Sp(MPD)$ の回帰直線は式(10)で与えられる。

$$Sp(MPD) = 0.14 \times Sp(DFT) + 1.45, \quad R^2 = 0.75 \quad (10)$$

$Sp(MPD)$ が大きい, すなわち MPD が大きい舗装においては回帰直線に比較的一致するが, MPD が小さい舗装では, 回帰直線からのばらつきが大きい。また, 本研究で解析対象とした舗装の MPD には偏りが見られることから, 式(10)が精度の良い回帰式であるとは言い難い。

今後, 様々な舗装におけるデータを蓄積し, より精度の高い回帰式を構築する必要がある。

7. 結論

本研究では, 様々な種類のアスファルト舗装およびコンクリート舗装において, サンドパッチ, 砂拡大器, CTMによるマクロテクスチャ測定, およびDFTによる摩擦測定をおこない, その結果について解析した。得られた結論を以下に示す。

- CTMから得られる MPD の変動係数は約10%程度であり, サンドパッチから得られる MTD の変動係数と同程度であった。また, MPD と MTD の相関係数は0.98となり, 非常に高い値を示した。したがって, CTMを用いることにより, 容易に, かつ短時間でサンドパッチ試験と同精度のマクロテクスチャ測定をおこなうことができる。
- CTM測定から得られる MPD とスリップ速度20km/hにおけるDFTの測定値 DFT_{20} を用いることによってIFI(F_{60} , Sp)を算出することができる。
- MPD と DFT_{20} から算出した摩擦ナンバ F_{60} とスリップ速度60km/hにおけるDFTの測定値 DFT_{60} との回帰式を求めた。得られた回帰式は MPD が0.2~2.2の舗装では比較的一致するが, MPD が0.2以下および2.2以上の舗装では回帰式の残差が大きくなる傾向がある。
- DFTによる測定値から得られる摩擦係数の速度依存性 $Sp(DFT)$ と MPD から算出される速度ナンバ $Sp(MPD)$ の相関係数を求めた。その結果, 表面処理をおこなっていないアスファルト舗装における $Sp(DFT)$ と $Sp(MPD)$ の相関係数は高い値を示した。また, スリップ速度20~60km/hにおけるDFTの測定値を用いた場合, $Sp(DFT)$ と $Sp(MPD)$ の相関係数が最も高くなることが分かった。
- $Sp(DFT)$ と $Sp(MPD)$ の相関係数が最も高くなったケース(アスファルト舗装, 表面処理なし, DFTのスリップ速度範囲20~60km/h)における $Sp(DFT)$ と $Sp(MPD)$ の回帰式を求めた。

参考文献

- 1) 市原薫, 小野田光之: 路面のすべりとその対策, 技術書院, 1997.
- 2) PIARC Final Report: *International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance*, PIARC Paris 1995.
- 3) ASTM: *Calculating International Friction Index of a Pavement Surface*, Standard No.E1960-98, ASTM 1998.
- 4) ASTM: *Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire*, Standard No.E274-97, ASTM 1997.
- 5) ASTM: *Measuring Paved Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester*, Standard No.E1911-98, ASTM 1998.

- 6) ASTM: *Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*, Standard No. E303-93 (1998), ASTM 1998.
- 7) ISO/CD 13473: *Characterization of Pavement Texture Utilizing Surface Profiles: Estimation of Mean Profile Depth*, Committee Draft from ISO/TC 43/SC 1/WC 39, ISO 1994.
- 8) ASTM: *Measuring Pavement Macrottexture Depth Using a Volumetric Technique*, Standard No.E965-96, ASTM 1996.
- 9) 舗装試験法便覧：舗装路面の粗さの測定方法，日本道路協会，pp.971-975，1993.
- 10) Saito, K., Henry, J.J., Kasahara, A., Horiguchi, T., Abe, H. and Fukuhara, T.: *Skid Resistance Measurements by Two Japanese Testers and, Their Relations to Texture and the International Index*, Proceedings of the 3rd International Symposium on Pavement Surface Characteristics, PIARC, Christchurch, New Zealand, pp.41-56, 1996.

(1999. 8. 23 受付)

CALCULATION OF INTERNATIONAL FRICTION INDEX USING CIRCULAR TEXTURE METER AND DYNAMIC FRICTION TESTER

Hironari Abe, Shuichi KAMEYAMA, Akinori TAMAI,
Atsushi KASAHARA, and Kazuo SAITO

The Circular Texture Meter (CTM) recently developed is a device which has a CCD Laser Displacement Sensor mounted on an arm designed to rotate on a circumference of 142 mm radius. The CTM can measure the texture with about 0.9 mm pitch on the same circumference of that coefficient of friction is measured with a D.F. Tester.

In this study, we have analyzed the relationship between MPD by CTM and MTD by Sand Patch Test. Also, we have measured the coefficient of friction with D.F. Tester at the same spots as that the texture was measured by the CTM.

We have observed a good correlation between the MPD by CTM and the MTD by the Sand Patch Test. And it is found that International Friction Index can be computed from the CTM measurements and the D.F. Tester measurements.