

舗装路面の絶対プロファイルデータ 収集システムの開発

秋本 隆¹・姫野賢治²・川村 彰³・福原敏彦⁴

¹正会員 ニチレキ株式会社北海道支店(〒061-1433 北海道恵庭市北柏木町3-34)

²フェロー会員 工博 中央大学教授 理工学部 土木工学科(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 工博 北見工業大学助教授 工学部 土木開発工学科(〒090-0015 北海道北見市公園町165)

⁴コマツエンジニアリング株式会社(〒254-0014 神奈川県平塚市四之宮1144-1)

舗装のサービス性能を評価する上で、路面の形状特性を把握することは乗り心地の評価につながるだけでなく、形状特性に起因するすべり問題、騒音問題、振動問題、燃費問題、タイヤの摩耗問題などの解析評価に有効であり、道路管理者にとって重要な課題である。しかし、縦断方向のプロファイルを水準測量することは通行車両の妨げとなるばかりでなく、多くの人手と時間、費用を要する。本研究では、レーザ光線を用いた非接触型でかつ通常の車両走行速度での測定が可能な縦断プロフィロメータを開発し、大量データの迅速処理を計った。また、「逐次2点真直度測定法」の採用により、縦断プロファイルの測定間隔は、路面のテクスチャの解析に利用できるような1mmピッチで±1.2mmの精度の計測とし、縦断プロファイルの真値に限りなく近づくことができた。

KeyWords: absolute profile of pavement surface, IRI, ride number, PSD, roughness evaluation

1. はじめに

先進諸国は、舗装のサービス性能を評価するために、種々の測定装置を用いて道路舗装の(1)路面特性、(2)幾何学特性、(3)構造特性データを収集している^{1),2)}。路面の形状特性を把握することは、乗り心地の評価につながるだけでなく、これに起因するすべり、騒音、振動問題などの解析評価に有効であり、道路管理者にとって重要な課題である³⁾。舗装の縦断方向の凹凸の変化(以下ラフネスという)は車両の乗り心地に多大な影響を及ぼすことから、この測定手法が多くの機関により開発されている。各々の装置に特有な評価指標も数多くあり、これら多くの指標を共通化するための努力が世界銀行が中心になって行われ、その結果としてIRIが提案された。このIRIを算出するためには、縦断プロファイルの測定が不可欠である。しかし、縦断方向のプロファイルを水準測量することは通行車両の妨げとなるばかりでなく、多くの人手と時間、費用を要する。そのために、効率よくかつ高精度で縦断プロファイルを測定する装置の開発が望まれていた。

レスポンス式のラフネス測定システムには、測定車の車種などによって測定値が影響されるといった多くの問題があるが、新プロフィロメータは相対的に廉価で、通常の車両走行速度で測定可能であり、多量のデータを迅速に処理できる非接触型プロフィロメータである。この装置の使用法は単純であり、なおかつ比較的精度がよいものである。

本測定装置の開発は、(1)測定時の問題解決、(2)多量データの迅速処理、を目標に全自動化を計った。また、縦断プロファイルの測定間隔はマクロテクスチャレベルの解析にも利用できるように1mm間隔の計測を可能とした。

開発した装置は、「逐次2点真直度測定法」の使用により、間隔が1mmで精度が±1.2mmの測定値を得ることができる。したがって、これは路面のマクロテクスチャーを分析するために使われることができるばかりか、非常に正確な縦断プロファイルを得ることができる。この装置により取得されたデータは、舗装の幾何学的特性を評価することのための基礎的な素材として使うことができ、種々の問題を解決するための広範囲にわたる取り組みが可能となった。

ここに、新しい測定装置の概要と測定結果、およびデータ利用の例を報告する。

2. 高性能非接触プロフィロメータの開発

(1) 測定原理

本研究でのラフネス測定は、NC(Numerical Control)工作機械の案内板と被削面の真直度の測定用に開発された逐次2点真直度測定法の原理を採用した⁴⁾。以下に、この測定原理について説明する。

逐次2点真直度測定法の原理を模型的に図-1に示す。

A, B2本の相対変位計(以下変位計という)を設置し

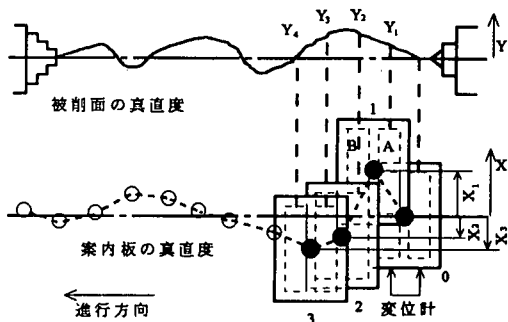


図-1 逐次2点真直度測定方法の原理

た工作台をA, B2本の変位計の設け間隔で送ることを繰り返して、被削面と工作機械との相対変位を測定する。この時、 $X_k, Y_k, D_{k,A}, D_{k,B}$ の間には、次の関係式が成立する。

$$X_k = X_{k-1} + D_{k-1,A} - D_{k,B} \quad (1)$$

$$Y_k = X_k - D_{k,A} + D_{0,A} \quad (2)$$

ここに、

k : X と Y の間に関連している差異を測定する工作機械の位置

X_k : k における工作機械の直進運動による上下方向の変動

Y_k : k における被削面の凹凸量

$D_{k,A}$: k におけるAの変位計で測定される相対変位

$D_{k,B}$: k におけるBの変位計で測定される相対変位

これらの式から工作機械と被削材の直進精度を分離して、かつ同時に求めることができる。この基本原理を車載型に置き換えると、 X_k が車両の上下の量、 Y_k が路面の凹凸量となり、結果的に路面の凹凸量のみを分離して、プロファイルを計測することができる。

さらに、この基本原理では、変位計A, Bの設置間隔ずつでの測定しかできないが、変位計の設置間隔より細かい間隔で変位データを読みとり、これを補間法により1mm間隔で測定できるようにした。この基本原理が成り立つためには、2個の変位計を上下に移動させてもよいが常に平行に移動しなければならない。このために車両の運動によらずに常に2個の変位計が鉛直方向を向くようなジャイロ機構を設置した。

(2) 測定装置システムの概要

開発した非接触型プロフィロメータの外観を図-2に示す。

変位計はレーザ式で、進行方向に100mm間隔に

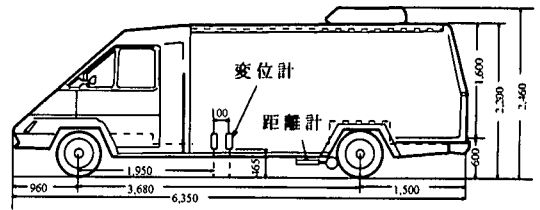


図-2 非接触型プロフィロメータの外観 (単位: [mm])

2個、車両の横方向に2セット取り付けられており、OWP(Outer Wheel Pass)とIWP(Inner Wheel Pass)の測定が可能となっている。また、車両のピッチングによる誤差を取り除くために、ジャイロ機構により変位計のレーザ光は常に鉛直方向を向くように制御されている。各々1セットの変位計から制御装置を経由して、プロファイル制御システムにデータが送られ、路面間の相対距離が測定される。また、進行方向の距離信号を得るために、ローラ式距離計をタイヤに押し当て、タイヤの空気圧などによる誤差を係数補正しながら、1mm当たり1パルスの信号をプロファイルプロセッサに取り込むようになっている。この結果、 $\pm 0.1\%$ の精度で距離を測定することが可能となった。

この相対距離と進行距離の2つの信号により、プロフィロプロセッサで1mmごとの相対距離データ10点から、すなわち10mm間隔で平均化した相対距離データを求め、基本原理の算出式に基づいて、路面の凹凸量と車両の上下運動の量を逐次計算しながら、デジタルレコーダに書き込む。このデジタルレコーダを2台設置しており、データ量が多くなると自動的に切り替わり、データを欠落なく収録するようになっている。ここで収録されたデータはオフラインにより、パソコンなどにより、データを表示、出力し、段差量およびプロファイルを算出するようになっている。

(3) 測定機械の精度

縦断プロファイルの検出性能を確認するために、図-3のように道路上に長さ w 、高さ t を変化させた寸法が既知の木片を設置し、これらの寸法を計測車で測定した結果を図-4(a)~(c)に示す。

図-4(a)に、種々の木片の高さを車速20km/hで測定した結果を示す。これにより車速20km/hでは、高さは $\pm 1\text{mm}$ 以内の精度であることが確認された。また、図-4(b)は、種々の木片の長さを測定した結果であり、延長方向の測定距離はほとんど誤差がないことが確認された。図-4(c)は速度依存性を確認したもので、車速0~50km/hで木片の高さが31.7mmの検出結果である。これにより車速の違いによる高さの精度が $\pm 1.2\text{mm}$ 以内であることが確認された。以上のことから、このプロ

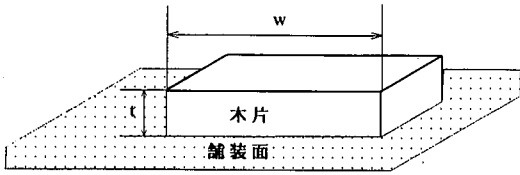


図-3 木片の設置状況

フィロメータによる高さの精度は $\pm 1.2\text{mm}$ 以内で、延長方向の距離誤差は実用上無視し得るといえる。

3. フィールド試験の概要

実際の道路におけるフィールド試験を、1991年11月13～14日に栃木県小山市内の県道にて実施した。

(1) ラフネスの測定

a) 縦断プロファイル

縦断プロファイル測定前に事前に視察により路線選定を行い、表-1に示すように、路面の平坦性、段差およびパッチング、わだちぼれ量に着目して、7つの試験工区を選定した。この調査区間の概要を図-5に示す。

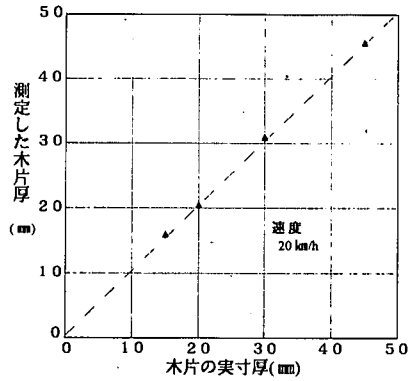
表-1 調査区間の概要

	著しく悪い	悪い	良好
平坦性	A-1	A-2	
段差/パッチング	A-3	A-4	A-7
交差点のわだちぼれ	A-5	A-6	

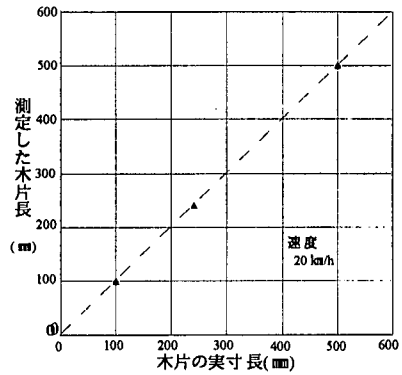
IWPとOWPの間隔を1.5mとして2測線上のプロファイルをそれぞれ3回測定した。また、この測定精度をより高いものにするため、各区間の測線の起終点上において水準測量を行い、非接触型プロフィロメータから得られるデータを補正を行った。

b) 2次元プロファイル

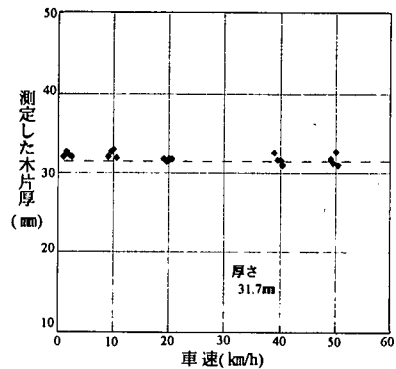
IWPとOWPの2測線間の横断方向の相対的なプロファイルをわだち掘れ測定装置によって測定し、先に測定した非接触型プロフィロメータによる絶対縦断プロファイルと組み合わせることによって、縦断方向と横断方向の絶対的なプロファイルを求めることを試みた。ここで使用したわだち掘れ記録装置は、路面に真上から投影されたレーザによる条線を横にセットされたビデオカメラで撮影するものであり⁵⁾、わだち掘れがあるとその条線が屈曲され曲線となり、わだち掘れの形状が計測できるものである。撮影速度は100km/h程度まで可能であるが、今回の調査では測定速度を10km/h以下とし、路面の3次元的な凹凸を50mm間隔という短い間隔で表現することを試みた。



(a) 木片の厚みの実寸と測定値の比較



(b) 木片の長さの実寸と測定値の比較



(c) 木片の厚みの測定値と車速の関係

図-4 測定装置の精度

(2) テクスチャの測定

本研究で開発した非接触型プロフィロメータは、通常は10mmピッチで路面のプロファイルを出力するが、内部では1mmピッチの測定を行って平均化処理を行っ

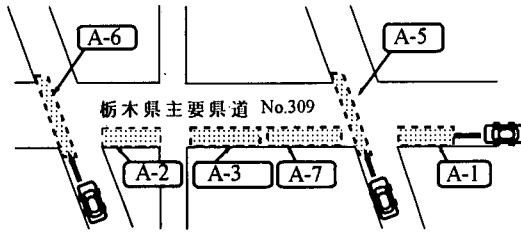


図-5 試験工区の位置図

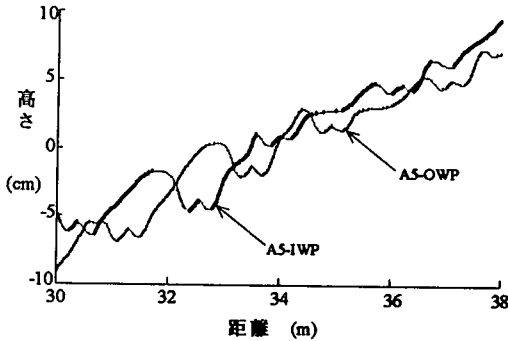


図-6 路面の絶対縦断プロファイル

ている。ここでは、内部処理を実施する前のこの1mmピッチの原始データを直接出力して、路面の短波長成分を調べ、すべり抵抗性との関係を調べた。選定した試験工区は、表層が密粒度アスファルト混合物と開粒度アスファルト混合物である4工区である。この工区におけるOWP位置でのプロファイルの測定と、DFテスト(Dynamic Friction Tester)⁶⁾によるすべり抵抗性試験を実施した。

4. 路面のプロファイルの測定結果と考察

(1) ラフネスの評価

a) 縦断プロファイルの測定結果

各工区において、開発した非接触型プロフィロメータにより縦断凹凸を測定した後、水準測量によって補正した路面の絶対縦断プロファイルの例を図-6に示す。

図-6(a)より、繰り返し3回のプロファイルの測定結果は、後述のIRIの変動が±4%以内であり、再現性が極めて高いことがわかる。IWP, OWPには大きな差は見られないが、この区間は幹線道路を横切る交差点であるため、幹線道路の排水勾配および交差点内で大型車のデュアルタイヤによって生じたわだち掘れがはっきりと認められる。一方、試験を実施した道路は、幹線とは左向き斜めに交差しているため、まずIWP側(右タイヤ側)が路面の凹凸を検知しており、図-6(b)より

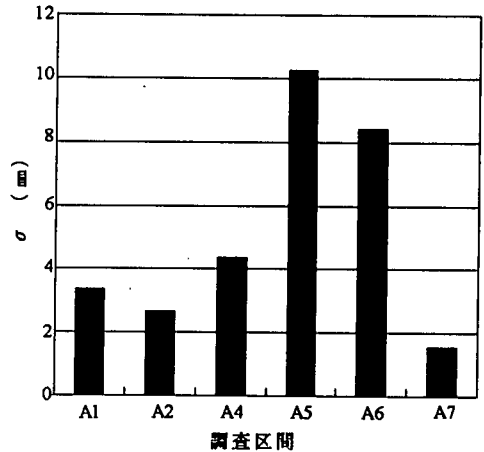


図-7 各区間の平坦性

OWP側との両者の波形の間には約1mの位相の遅れのあることがわかる。

b) ラフネスの一般的評価

プロファイルの測定結果に基づき、ラフネスの定量的把握を行った。今回測定した縦断プロファイルをもとに3mプロフィロメータの縦断凹凸量データになるように変換して、この標準偏差値 σ (以下 σ という)を求めたものを図-7に示す。なお、一般的には3mプロフィロメータの解析は、1.5m間隔の縦断凹凸量データから σ (mm)を求めているが、この解析では σ が変動することから、 σ は0.25m間隔の縦断凹凸量データから算出した。

この図より、区間A-5およびA-6については、交差点部におけるわだち掘れの影響により、他の箇所比べて値の卓越している状況が読みとれる。

諸外国においては、乗り心地の評価として国際ラフネス指数(IRI: International Roughness Index)を採用している例が多い。これは各国や機関によって異なるラフネスを共通化する目的で、1986年に世界銀行から提案されたラフネスの評価基準である。2軸4輪の乗用車の1輪だけを取り出したクォーターカーを一定の測定で路面上を走行させたときの車が受ける上下方向の運動変異の累積値と走行距離との比を、その路面のIRIとしている⁷⁾。よって、このIRIの大きい方が、路面の凹凸が大きく、悪い状態であるといえる。

絶対縦断プロファイルから、各工区のIRIを求めたものの例を図-8に示す。また、各工区のIRIと σ の関係を図-9に示す。

IRIによるラフネス尺度の現実路面との対応について示した例を図-10に示す。これには、空港の滑走路・高速道路から荒れた未舗装道路までの範囲が示されている。

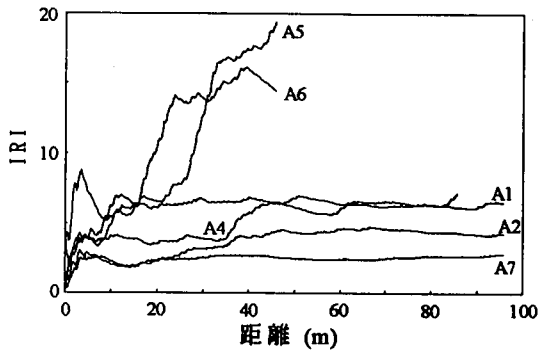


図-8 各工区のIRI

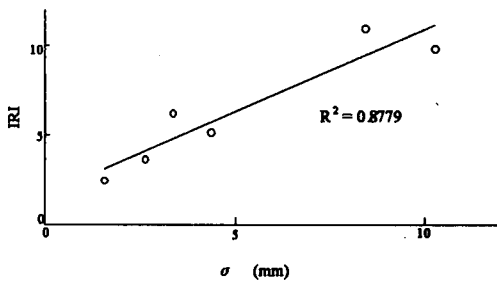


図-9 IRIとσの関係

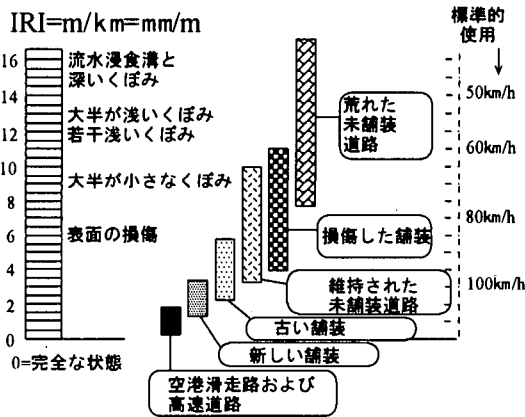


図-10 IRIによるラフネス尺度と現実路面

区間A-7のような平坦路でIRIが約2m/km程度であることから、「新設舗装」の区分に、またA-5, 6のような悪路では、IRIが10m/kmを超えるものもあり、「粗い非舗装路」の区分に相当する状況が示された。図-9に示されるように各工区のIRIとσは、ほぼ同じ傾向となっていることがわかる。

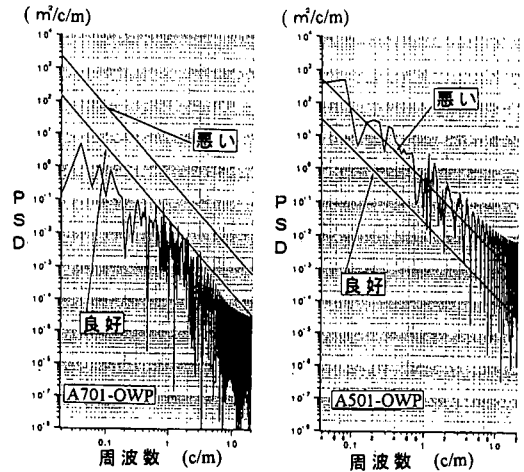


図-11 路面の縦断プロファイルのパワースペクトル

c) プロファイルのパワースペクトル

前述のプロフィロメータで測定した縦断プロファイルのパワースペクトル密度⁷⁾(PSD: Power Spectrum Density)を求め、路面性状の評価を試みた。

路面の凹凸は一般的には不規則であり、周期性がないといえる。このような変動量はフーリエ変換によって得られるスペクトルの考えに基づいたPSDを用いて表すことができる。路面の評価にPSDを採用する方法は、1954年に米国のHoulboltが空港の滑走路の路面に適用して以来、今日まで数多く用いられ、また標準化もされている。

非接触型プロフィロメータで測定した縦断プロファイルのPSDの例をドイツ技術家協会(VDI: Verein Deutscher Ingenieure)の評価基準⁹⁾とともに、図-11(a)および(b)に示す。

図-11(a)の区間A-7では、IWP, OWPとも周波数全域のわたってPSDの値は評価基準値の「良好」よりも小さな値となっており、良好な路面であることがわかる。一方、図-10(b)の区間A-5では、IWP, OWPとも周波数全域において評価基準値の「悪い」を超えており、路面性状はかなり悪いといえる。

d) 2次元プロファイルの表示

図-12は、A-1区間の路面を3次元で立体的に表現したものである。

この道路を走行する大型車のデュアルタイヤで形成されたわだち掘れをはっきりと確認することができる。これは、路面の管理のみならずオーバーレイなどの補修の際にも、レベリング、切削などの有効な資料となるものである。

今後は、このような路面を本来の姿である3次元的に表現する必要がある。またこのデータを解析し、評価

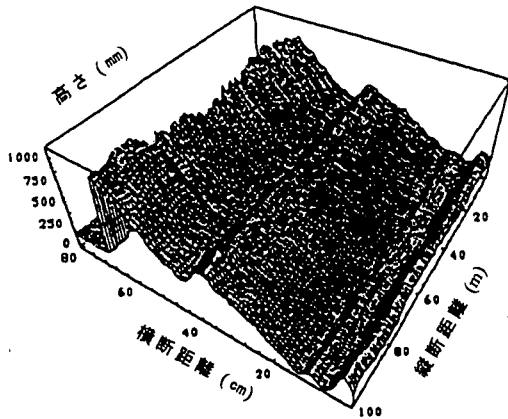


図-12 2次元プロファイル

するための新しい方法が試され、基準化される必要があると考えられる。同時に路面を縦断プロファイルという直線的に解析するだけでは得られなかった、車両の振動、操縦安定性、挙動など、より広い範囲に適用することができるであろうといえる。

(2) テクスチャの評価

表層が密粒度アスファルト混合物の舗装と開粒度アスファルト混合物の舗装の区間長0.6mについて、1mmピッチで得られた縦断プロファイルの例を図-13(a)および(b)に示す。

この図より、開粒度アスファルト混合物の方が密粒度アスファルト混合物より、細かい間隔で凹凸が変化していることがわかる。

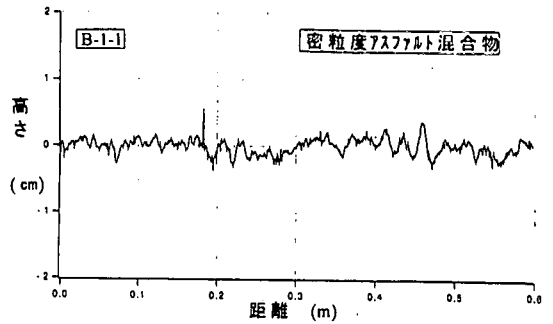
また、この1mmピッチで得られた短波長縦断プロファイルのFFT解析を行いPSDを求め、路面性状の周波数分析を実施した。これによる結果を図-14(a)および(b)に示す。

この図より、100c/m以下の周波数帯域においては両者の間に差がほとんどないのに対し、これ以上の高周波数帯域になると開粒度アスファルト混合物のPSDの方が大きな値を示すことがわかる。

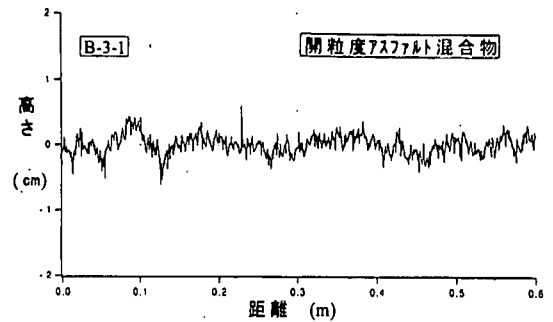
非接触型プロフィロメータでは最小1mmまでの波長のものを扱うことができるため、メガテクスチャあるいはマクロテクスチャの領域のデータを得ることができる。同じ区間においてDFテストによって測定したすべり抵抗値を表-2に示す。

この結果より、すべり抵抗値はいずれの速度においても開粒度アスファルト混合物の方が高いことがわかる。以上のことより、すべり抵抗には周波数で100c/m以上、波長で10 mm以下の帯の影響が大きいのではないかと推定することができる。

今回使用したプロフィロメータは本来、道路の乗り



(a) 密粒度アスファルト混合物の縦断プロファイル



(b) 開粒度アスファルト混合物の縦断プロファイル

図-13 1mmピッチの縦断プロファイルの測定結果例

表-2 DFTテスターによって測定したすべり抵抗値

車両速度 (km/h)	40	50	60
密粒度アスファルト混合物	0.60	0.57	0.55
開粒度アスファルト混合物	0.73	0.71	0.70

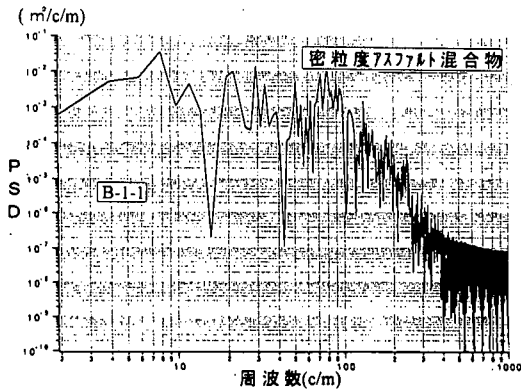
心地や線形性の評価のためのデータを得るために開発されたものであり、データの最小間隔の設定よりもできるだけ長い区間の測定に重点をおいて開発されているが、このようなすべりに関わる短波長の領域のデータ測定することも可能であるといえよう。

5. 結論

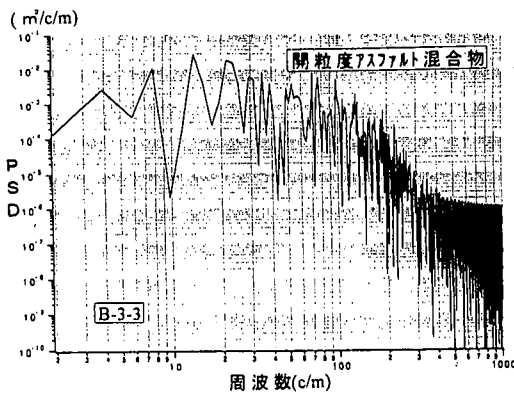
「逐次2点真直度測定法」を取り入れて開発したラフネス測定装置は非接触型であり、1mm間隔で±1.2mmの精度の路面プロファイルの絶対測定を可能とし、繰り返し精度も測定結果が非常によく一致しており、再現性が極めて高いことがいえる。

ここで得られたデータより他に、従来の装置では求めることが困難であったIRI, PSD, マイクロテクスチャを得ることができ、さらに横断プロファイルとの組み合わせにより2次元プロファイルを求めることが可能である。

フィールドの試験の平坦性, IRI, PSDの結果から、



(a) 密粒度アスファルト混合物のパワースペクトル



(b) 開粒度アスファルト混合物のパワースペクトル

図-14 1mmピッチで測定された縦断プロファイルのパワースペクトル

これらと路面を観察した実感との対応もよく一致していることがいえる。また、2次元プロファイルにより、路面を縦断プロファイルという直線的に解析するだけでは得られなかった、車両の振動、操縦安定性、挙動など、より広い範囲に適用すること可能になったと考えられる。マイクロテクスチャより、すべりに関わる短波長の領域のデータ測定することも可能になった。

このように、この測定装置を用いることにより、道路利用者への安全性を確保など、路面と車両の相互作用問題への取り組みが可能となった。

6. おわりに

本研究において紹介した測定装置は通常の走行速度での測定が可能であり、測定の精度および迅速性さらに既存のラフネスの評価指標への換算面などにおいて、従来の測定装置に比べて多くの利点を有する。本装置を用いたフィールド試験結果から、これらの利点を確認すると共に、2次元プロファイルを含めた各種路面の実態を明らかにすることができた。

さらに、測定によって得られたデータは、マイクロテクスチャレベルも可能となることより、今日の路面に要求される性質のうち、すべり問題、騒音問題、燃費問題、タイヤの摩耗問題などを解決するための基礎資料となる。これらの意味からも本測定装置によりこれらの問題解決を含めた広範囲からの路面と車両の相互作用問題の取り組みが、今後期待される。

参考文献

- 1) Hveem, F.N.: Devices for recording and evaluating pavement roughness, HRB Bulletin 264, 1960.
- 2) Wambold, J.C., Detrain, L.E., Hegmon, R.R., McGhee, K., Reichert, J., and Spangler, E.B.: State of the art of measurement and analysis of road roughness, TRB Record 836, 1981.
- 3) Haas, R. and Hudson, W.R.: Pavement Management Systems, McGraw-Hill Book, New York, 1978.
- 4) Tozawa, K., Sato, H. and O-hori, M.: A new method for the measurement of the straightness of machine tools and machined work, 1981.
- 5) 深澤淳志: 路面性状の自動測定, 舗装, 8月号, 1985.
- 6) Sayers, M., Gillespie, T.D., and Queiroz, C.: International experiment to establish correlations and standard calibration methods for road roughness measurements, World Bank Technical Paper No.45, The world Bank, Washington D.C., 1986.
- 7) Sayers, M., Gillespie, T.D., and Paterson, W.D.O.: Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements, Technical Paper 46, World Bank, Washington D.C., Jan. 1986.
- 8) Prgss, H., Houlbolt, J.C., and Walls, J.C.: Some measurements and power spectra of runway roughness, N.A.C.A., TN3305, 1954.
- 9) Beurteilung der Entwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, VDI-Richtlinie 2057, Blatt 1, 1983.

(1997. 4. 14 受付)

DEVELOPMENT OF A NEW DATA ACQUISITION SYSTEM FOR MEASURING ABSOLUTE PAVEMENT SURFACE PROFILES

Takashi AKIMOTO, Kenji HIMENO, Akira KAWAMURA and Toshihiko FUKUHARA

Development of a new non-contact profilometer using a laser interferometer has made measurement possible at the normal speed of vehicles and enabled a huge volume of data to be processed rapidly. Employment of the "sequential two point method (STP method)" has made measurement of the profile at intervals of 1 mm and with accuracy of ± 1.2 mm. The new profilometer can be used to analyze even the macrottexture and obtain the profile quite accurately. The acquired data can be used as basic materials for evaluating the geometrical characteristics of pavement and a wide range of approach is now possible to solve various problems.