

# PIARC路面性状国際共通試験における 舗装の縦断プロファイルと支持力の関係

亀山修一<sup>1</sup>・川村 彰<sup>2</sup>・早坂保則<sup>3</sup>・高橋守人<sup>4</sup>・笠原 篤<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士 (工学) 北海道工業大学助教授 工学部社会基盤工学科  
(〒006-8585 札幌市手稲区前田7条15丁目4-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 北見工業大学助教授 土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

<sup>3</sup>正会員 独立行政法人 北海道開発土木研究所 維持管理研究室 主任研究員  
(〒062-0931 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

<sup>4</sup>正会員 独立行政法人 北海道開発土木研究所 維持管理研究室 室長  
(〒062-0931 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

<sup>5</sup>フェロー会員 工博 北海道工業大学教授 工学部社会基盤工学科  
(〒006-8585 札幌市手稲区前田7条15丁目4-1)

世界各国において用いられている様々なラフネス測定装置から得られる舗装路面の縦断プロファイルと真のプロファイルの関係を得ることを目的とし、1998年7月、PIARC (世界道路協会) による路面性状国際共通試験がおこなわれた。本研究では、国際共通試験から得られた縦断プロファイルにウェーブレットによる多重解像度解析を適用し、その波状特性を分析するとともに、同一路線において測定された舗装構造およびFWDデータから舗装の支持力を推定し、両者の関係について解析した。その結果、縦断プロファイルに含まれる0.8~1.6mの波長成分と路盤上面に生じる圧縮応力の間に相関が見られた。

**Key Words :** roughness, longitudinal profile, FWD, IRI, wavelet, multiresolution analysis

## 1. はじめに

舗装とその上を走行する車両は路面を介して接していることから、路面が有する特性は、道路利用者や沿道住民の安全性、快適性、経済性などに影響を及ぼす。PIARC (世界道路協会) は路面特性を路面が有する波状特性、すなわち路面波長によって分類している (図-1)<sup>1)</sup>。

路面のラフネスは、路面の波長が0.5~50mの範囲で表され、ころがり抵抗、車両の損傷、乗り心地など道路利用者に大きな影響を与える。路面のラフネス評価方法は多岐に渡っており、路面のプロファイル測定によるもの、路面凹凸からのレスポンス測定によるもの<sup>2)</sup>、被験者の乗り心地に基づいた主観評価によるものなどがある<sup>3)</sup>。

路面のラフネスを測定するために世界各国において様々な測定装置が開発されてきた。これらのラフ

ネス測定装置の比較をおこなうために、1982年、ブラジルにおいて国際ラフネス試験がおこなわれ<sup>4), 5)</sup>、その結果を基に国際ラフネス指数 (IRI) が開発された<sup>6)</sup>。しかしながら、1982年以降、ラフネス測定装置の主流は路面の縦断プロファイルを測定する方法となり、新たな測定装置が開発されていることから、再び国際共通試験をおこなう必要性が生じた。そこで、PIARCは、世界各国で用いられている縦断プロファイル測定装置を比較するとともに、測定された縦断プロファイルと真の縦断プロファイル (True Profile: 以後TPと称する) の関係を明らかにすることを目的とし、1998年、米国、欧州、日本において国際共通試験を実施した。国際共通試験は、同一区間の縦断プロファイルを様々な測定装置によって測定するコアと呼ばれる共通試験と各地域独自

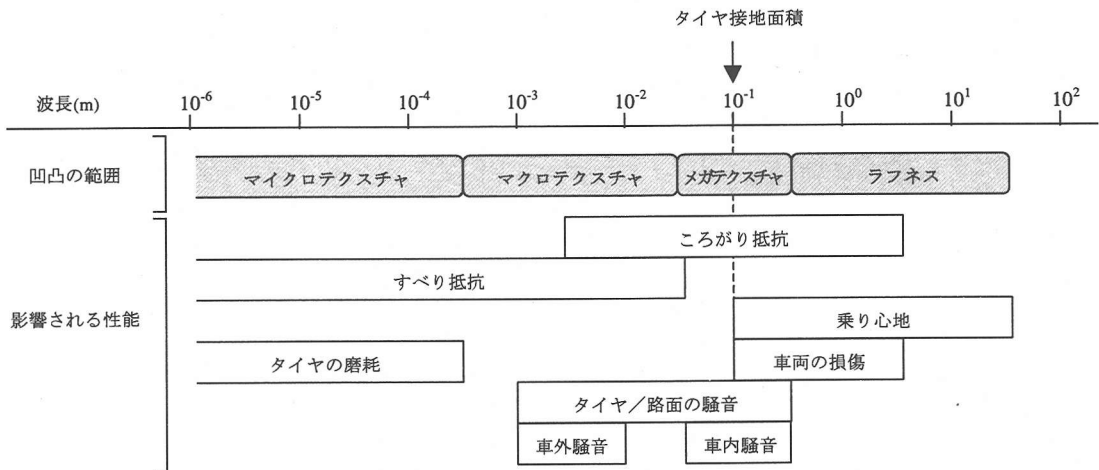


図-1 PIARCによる舗装路面の分類<sup>1)</sup>

表-1 解析路線の概要

路線 No.	路線	始点	終点	表層の種類	平均表層厚 (cm)	平均路盤厚 (cm)	施工年	交通量 (台/日)	大型車混入率 (%)
2	R276	82.4	82.9	排水性	15.8	55.1	1992	3,230	39.2
8	R275	72.7	73.2	細粒ギャップ	26.8	38.1	1994	9,519	43.7
9	R234	33.8	34.3	細粒ギャップ	26.0	57.8	1995	8,139	53.9
10	R234	34.7	35.2	細粒ギャップ	28.9	52.8	1995	8,139	53.9
14	R234	47.5	48.0	細粒ギャップ	30.3	48.4	1997	9,649	47.0

の試験によって構成される<sup>7)</sup>。

日本における国際共通試験は、1998年7月、北海道において実施された。この試験では、TPの測定、7つの非接触型プロフィロメータによる縦断プロファイルの測定に加え、日本独自の試験として、すべり抵抗、マクロテクスチャ、舗装構造調査、およびFWDによるたわみ測定がおこなわれた<sup>8)</sup>。

本研究では、国際共通試験において測定された縦断プロファイルから算出したIRIと、舗装構造調査およびFWD試験を基に得られた舗装構成層の層弾性係数、層厚、表面たわみ、舗装内部に生じる応力の関係について解析した。さらに、ウェーブレットによる多重解像度解析を適用して得られた縦断プロファイルの波状特性と舗装構造および支持力との関係についても検討した。

## 2. 調査の概要

PIARC路面性状国際共通試験は、1998年7月6日～17日、北海道内の国道10路線、高速道路2路線、自動車専用道路2路線、道道1路線、計15路線（区間長

500m）において実施された。各路線では、0～300mのTPを測定するとともに、非接触型プロフィロメータによる縦断プロファイルの測定、FWDによるたわみ測定、地中レーダおよび小口径ボーリング調査による舗装構造調査をおこなった。

本研究では、TPおよびFWDデータの両方が得られた5路線を解析の対象とした。各解析路線の概要を表-1に示す。また、解析に用いたデータの詳細を以下に示す。

### (1) Ture Profileの測定

国際共通試験では、0～300mにおける外側車輪通過位置（OWP）の縦断プロファイルを水準測量、Dipstick およびRolling Dipstickによって測定した。水準測量、Dipstick、Rolling Dipstickのサンプリング間隔は、それぞれ30m、30cm、25mmである。Dipstick およびRolling Dipstickによる縦断プロファイルの測定状況をそれぞれ写真-1、写真-2に示す。

水準測量の測定結果にDipstickの測定結果を内挿し、さらにその結果にRolling Dipstickの測定結果を内挿することによりサンプリング間隔25mmのTPが得られる。

図-1に示したように波長が50m以上の長波長成分はラフネスの範囲外であることから、TPにハイパスフィルタを作用させ、波長50m以上の長波長成分を除去した。本研究では、上記の方法によって得られた縦断プロファイルを解析に用いた。

### (2) FWDによる舗装の表面たわみの測定

表-1に示した路線では、縦断プロファイルを測定した0~300mの範囲において、FWD（単重錘式、リニアゲージ式たわみセンサ使用）による舗装の表面たわみ測定を20m間隔で実施した。たわみセンサを載荷版中心から0, 20, 30, 60, 90, 200cm離れた位置に設置し、1地点につき5回の測定をおこなった。

測定されたたわみを50kN換算たわみに補正した後、平均値を求め、その地点における表面たわみとした。なお、アスファルト舗装では、FWDによって測定される表面たわみが温度によって影響を受けることから、路面温度も同時に測定した。

### (3) 舗装構造調査

解析路線の舗装構造と層厚を求めるために車載型地中レーダおよび小口径ボーリング調査をおこなった<sup>9)</sup>。まず、地中レーダ（GPR）を用いて連続的な電磁波の反射記録を取得し、同一舗装構造の範囲と小口径ボーリング調査の削孔位置を決定した。次に、小口径ボーリング調査から得られたデータとGPRの結果を照合し、FWD試験をおこなった地点の舗装構造と層厚を決定した。

## 3. 縦断プロファイルおよび舗装構造の解析

以下に示すような手順により縦断プロファイルと舗装構造の解析をおこなった。

### (1) 解析区間の設定

各路線における解析区間の単位長さを100mとし、図-2に示すように、一つの路線内に区間1~11の計11区間を設定した。例えば、区間1における舗装構造および支持力は、0, 20, 40, 60, 80, 100m地点における層厚およびFWDデータに基づいて評価される。一方、区間1における縦断プロファイルの解析には、0~100mの縦断プロファイルを用いる。

### (2) IRIの算出

解析区間の縦断プロファイルからIRIを算出した。IRIは2軸4輪の乗用車の1輪だけを取り出したクォー

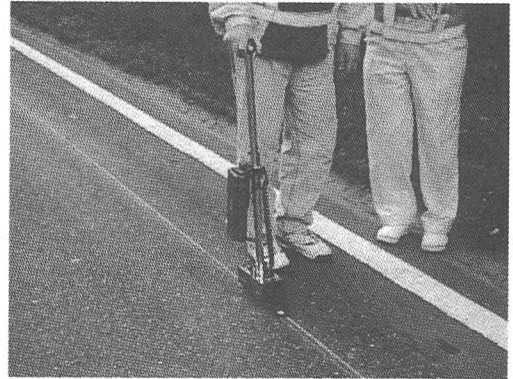


写真-1 Dipstickによる縦断プロファイルの測定



写真-2 Rolling Dipstickによる縦断プロファイルの測定

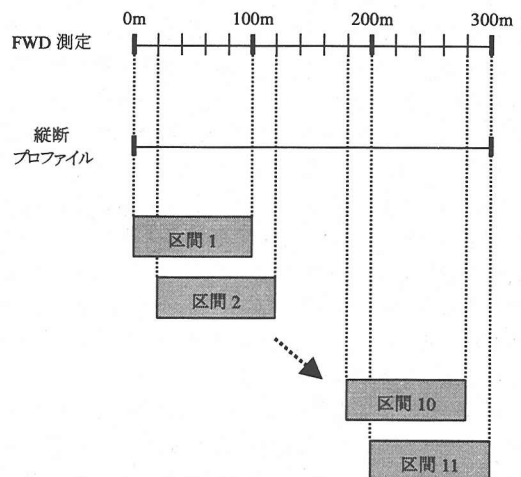


図-2 解析区間の設定

ターカー (Quarter Car) を80km/hで路面上を走行させたときに車両が受ける上下方向の運動変位の累積値と走行距離の比によって表される。

路面からの入力波に対するクォーターカーの応答を図-3に示す<sup>10)</sup>。クォーターカーは、0.02cycle/ft (波長15.2m) および0.13cycle/ft (波長2.3m) の入力波に対して最も敏感に応答するが、0.23cycle/ft以上 (波長1.3m以下) の短波長成分および0.01cycle/ft以下 (波長30.5m以上) の長波長成分にはほとんど応答しないという特性を有している。

縦断プロファイルからIRIを算出するにあたり、Sayersらは縦断プロファイルのサンプリング間隔が16.7cm以下の場合には高周波数成分を除去すべきであると指摘していることから<sup>10)</sup>、本研究では、TPに25cm移動平均フィルタを作用させた後、IRIを算出した。各路線におけるIRIの変動を図-4に示す。

全ての路線において、IRIは0.9~2.0m/kmに分布している。ASTMの基準<sup>11)</sup>に照らし合わせた場合、これらは路面損傷や波長の長い凹凸などが存在しない高品質のアスファルト舗装に分類される。一方、路線内におけるIRIの変動に着目した場合、路線2と路線9ではIRIの変動が小さいが、路線8および路線10ではIRIが0.5m/km程度変動していることが分かる。

### (3) ウェーブレットによる縦断プロファイルの解析

近年、信号解析の新しい手法としてウェーブレット (以後WTと称する) 解析が注目を浴びおり、地震動解析、音響・画像信号処理、非破壊探査など様々な分野で適用されている。WT解析は、周波数領域で信号を表現するフーリエ解析の性質に加え、周波数の空間的推移も同時に把握できるという特徴を有することから、これまで路面の波状特性解析に広く用いられてきたパワースペクトル解析では不可能であった空間特性および周波数特性の同時解析 (空間一周波数解析) が可能となる。著者らは、WTを縦断プロファイル解析に適用することにより路面損傷を検出できることを示すとともに、車両の振動加速度のノイズ除去にも有用であることを示した<sup>12)</sup>。また、滑走路の縦断プロファイル解析および航空機の振動解析<sup>13)</sup>、路面のマイクロテクスチャ解析にも用いられている<sup>14)</sup>。

WT解析の重要な性質の一つとして多重解像度解析がある。これは、離散WT変換を用いて信号を多重レベルに分解し、信号の局所的性質と大域的性質を同時に解析する方法である。本研究では、多重解像度解析を適用し、縦断プロファイルの波状特性の分析をおこなった。

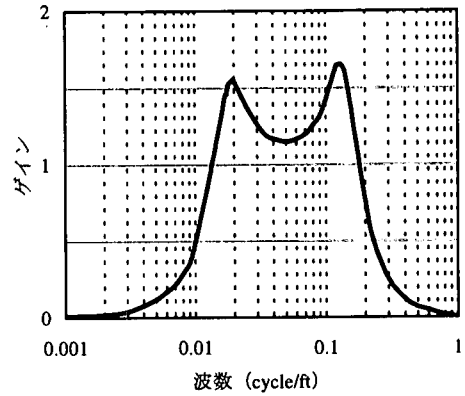


図-3 入力波に対するクォーターカーの応答<sup>10)</sup>

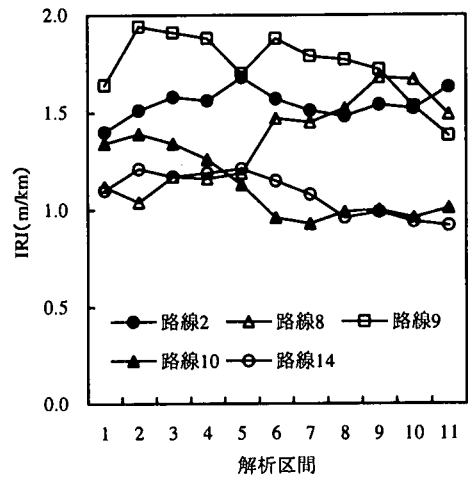


図-4 各路線におけるIRIの変動

#### a) 離散WT変換

2乗可積分である基本関数 $\psi(x)$ を $x$ 軸に $a$ だけ伸縮 (スケール) し、かつ $x$ 軸に沿って $b$ だけシフト (トランスレート) した関数は式 (1) で表される。

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (1)$$

基本関数 $\psi(x)$ をアナライジングWTと呼び、WT変換は、式 (2) のように $\psi_{a,b}(x)$ と信号 $f(x)$ の内積で表される。

$$(W_{\psi} f)(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi_{a,b}(x)} f(x) dx \quad (2)$$

ここで、 $\overline{\psi_{a,b}(x)}$  は  $\psi_{a,b}(x)$  の複素共役を示す。

WT変換された信号は  $a, b$  をパラメータとする平面上に分布し、これから信号  $f(x)$  の空間一周波数解析をおこなうことができる。しかしながら、式

(2) は無限積分を含んでおり、計算機による数値計算には適さないことから、通常、離散WT変換が用いられる。離散化は2進分割表現をとり、式(1)の  $a$  を  $2^j$  に、 $b$  を  $2^j k$  ( $j, k$  は整数) に置き換えて、次式のような離散WTを生成させる。

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}x - k) \quad (3)$$

$k$  は  $x$  軸に関するシフトを表す。また、 $j$  はレベルと呼ばれ、値が小さいほど高周波数になる。 $\psi$  を適当に選択すると  $\psi_{j,k}$  を直交系にすることができ、そのとき信号  $f(x)$  はWTを用いて次式の級数に展開される。

$$f(x) = \sum_j \sum_k w_k^{(j)} \psi_{j,k}(x) \quad (4)$$

$w_k^{(j)}$  はウェーブレット係数と呼ばれ、式(5)のように信号  $f$  と離散WT  $\psi_{j,k}$  の内積で与えられる。

$$w_k^{(j)} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\psi_{j,k}(x)} dx = \langle f, \psi_{j,k} \rangle \quad (5)$$

### b) 多重解像度解析

信号  $f(x)$  をスケーリング関数  $\varphi(x)$  の一次結合で近似すると、レベル  $j$  の近似関数  $f_j(x)$  は次式で表される。

$$f_j(x) = \sum_k s_k^{(j)} \varphi_{j,k}(x) \quad (6)$$

ここに、

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \varphi(2^{-j}t - k) \quad (7)$$

$s_k^{(j)}$  はスケーリング係数と呼ばれる。また、レベル  $j$  は近似の精度(解像度)を表しており、レベルが1つ上がると精度は1/2倍になる。 $\varphi_{j,k}(x)$  はシフトについて正規直交であるから、次式のように  $s_k^{(j)}$  はレベル  $j$  の近似関数  $f_j$  とスケーリング関数  $\varphi_{j,k}$  との内積で求められる。

$$s_k^{(j)} = \int_{-\infty}^{\infty} f_j(t) \overline{\varphi_{j,k}(t)} dt \quad (8)$$

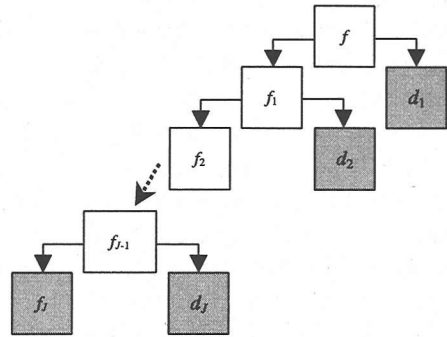


図-5 多重解像度解析

レベル  $j$  の近似関数  $f_j$  は、1つ精度の低いレベル  $j+1$  の近似関数  $f_{j+1}$  を用いて式(9)のように表される。

$$f_j(x) = f_{j+1}(x) + d_{j+1}(x) \quad (9)$$

$d_{j+1}(x)$  はDetailと呼ばれ、式(10)のように  $\psi_{j,k}$  の一次結合で表わすことができる。

$$d_{j+1}(x) = \sum_k w_k^{(j+1)} \psi_{j+1,k}(x) \quad (10)$$

この操作をレベル  $J$  まで再帰的に繰り返すことにより、信号  $f(x)$  の最も精度の高い近似関数  $f_0(x)$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} f_0(x) &= d_1(x) + d_2(x) + \dots + d_J(x) + f_J(x) \\ &= \sum_{j=1}^J d_j(x) + f_J(x) \end{aligned} \quad (11)$$

$f_0(x)$  の精度が十分高い場合、信号  $f(x)$  は、図-5に示すようにレベル  $J$  の近似関数  $f_J$  とレベル1から  $J$  までの多重の解像度をもつDetail ( $d_j$ ) に分解できる。

### c) Ture Profileの分解

WT解析における空間および周波数分解能はアナライジングWTの性質に大きく依存しており、その選択は重要である。本研究では、アナライジングWTにDaubechies ( $N=7$ ) を用いた。DaubechiesのWTはコンパクトサポートの正規直交WTであり、 $N$  を変化させることにより正則性(滑らかさ)の調整ができるという利点を持つ。また、WT変換後の

WT係数のエネルギー的解釈が容易とされている<sup>15)</sup>。

各路線の縦断プロファイルに多重解像度解析を適用し、レベル1～9のDetail ( $d_1 \sim d_9$ ) を求めた。本研究では、得られた $d_1 \sim d_9$ の内、図-1に示したラフネスの波長範囲 (0.5～50m) に相当するレベル5～9のDetailを解析に用いた。 $d_5, d_6, d_7, d_8, d_9$ は縦断プロファイルに含まれる0.8～1.6m, 1.6～3.2m, 3.2～6.4m, 6.4～12.8m, 12.8～25.6mの波長成分に相当する。路線8の縦断プロファイル、 $d_5, d_7, d_9$ を図-6に示す。この図から、レベルの増加とともにDetailの波長が大きくなるのが分かる。また、各レベルにおけるDetailの局所的な変化も把握することができることから、縦断プロファイルの空間一周波数解析が可能となる。

縦断プロファイルの波状特性を定量化するため、本研究では、レベル5～9におけるDetailのRMS値を算出した。レベル $j$ のRMS値 $R_j$ は式 (12) によって計算される。

$$R_j = \sqrt{\frac{1}{Ni} \int_0^{Ni} d_j(x)^2 dx} \quad (12)$$

ここで、

$d_j$ : レベル $j$ のDetail ( $j=5 \sim 9$ )

$Ni$ : 区間距離

一例として、レベル5のRMS値 ( $R_5$ ) を図-7に示す。路線8, 10, 14では $R_5$ に大きな変化は見られないが、路線2, 9では $R_5$ の変動が大きい。したがって、路線2, 9では、縦断プロファイルに含まれる0.8～1.6mの波長成分が変動していると考えられる。

#### (4) 舗装構造の解析

図-8に示すように、舗装構造をアスファルト混合物層、路盤、路床で構成される3層構造と仮定した。

GPRおよび小口径ボーリング調査から得られたアスファルト混合物層の層厚 ( $h_1$ ) および路盤の層厚 ( $h_2$ ) を解析区間内で平均した結果を図-9に示す。路線内における $h_1$ の変動係数は全ての路線で3%以下であり、ばらつきはほとんど見られない。一方、 $h_2$ の変動係数は路線8, 10において3%以下であったが、路線2, 9, 14では、120～300m (解析区間7～11) で増加する傾向を示した。

各路線において20m間隔で測定されたFWDデータを逆解析プログラムBALM<sup>16)</sup>によって逆解析し、舗装構成層の層弾性係数を推定した。この際、各層のポアソン比には図-8に示した値を、層厚にはGPRお

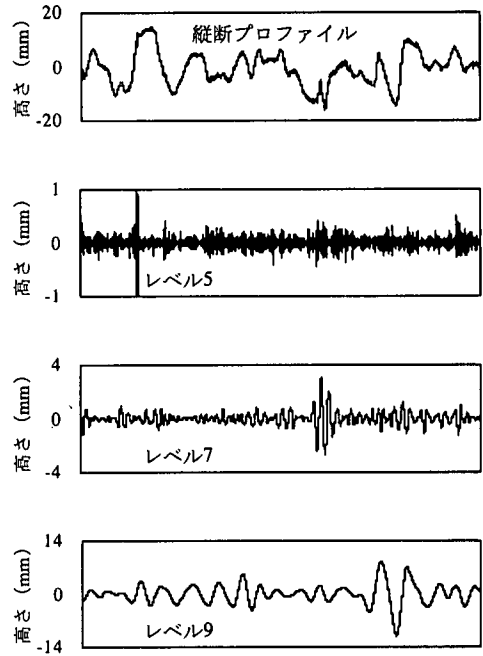


図-6 縦断プロファイルと  $d_5, d_7, d_9$  (路線8)

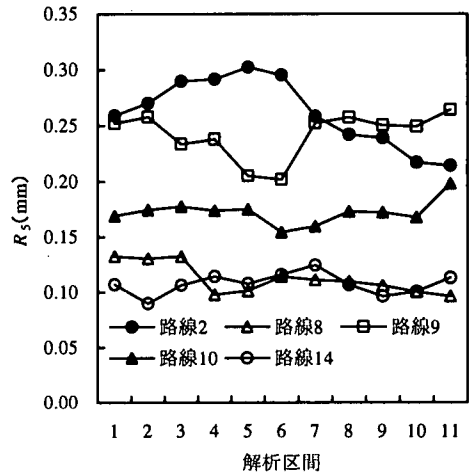


図-7 各路線における  $R_5$  の変動

および小口径ボーリング調査から得られた値を用いた。アスファルト混合物の弾性係数は温度によって影響を受けることから、FWD測定時に計測した路面温度 $T$  (°C) を式 (13) に代入し、アスファルト混合物層の逆解析弾性係数を補正した<sup>17)</sup>。

$$E_{as(20)} = \frac{1}{5.994} e^{-0.087T} E_{as(T)} \quad (13)$$

ここで、

$E_{as(20)}$  : 20℃におけるアスファルト混合物層の層弾性係数 (MPa)

$E_{as(T)}$  :  $T$ ℃におけるアスファルト混合物層の層弾性係数 (MPa)

$T$  : 路面温度 (℃)

各測点における温度補正後のアスファルト混合物層の層弾性係数および路盤、路床の逆解析弾性係数を解析区間内で平均し、それを各区間におけるアスファルト混合物層、路盤、路床の層弾性係数 ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ) とした。

各路線における路床の層弾性係数の変動を図-10に示す。路線2, 8, 14では $E_3$ に大きな変化は見られないが、路線9, 10では、路線内において $E_3$ が大きく変動することが分かる。

#### 4. 層弾性係数および層厚と縦断プロファイルの関係

解析区間内における層弾性係数 ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ) の平均値とIRIおよびRMS値 ( $R_5 \sim R_9$ ) の相関係数を求めた。結果を図-11に示す。

アスファルト混合物層の層弾性係数 ( $E_1$ )、路盤の層弾性係数 ( $E_2$ ) とIRIの間にはほとんど相関が見られなかった。路床の層弾性係数 ( $E_3$ ) とIRIの間には $E_1$ ,  $E_2$ よりも強い相関が見られたが、相関係数は-0.48であり、両者の相関は強いとは言えない。

層弾性係数とRMS値の関係では、 $E_1$ ,  $E_2$ と $R_5 \sim R_9$ の間にはほとんど相関が見られなかったが、 $E_3$ と $R_5$ および $R_6$ の相関係数は-0.6程度となり、レベルの増加にともなって相関が低下する傾向が見られた。また、 $R_5$ ,  $R_6$ とIRIを比較した場合、 $R_5$ ,  $R_6$ と層弾性係数の相関が強くなった。これは、主に1.3~30.5mの波長成分にตอบสนองするというクォーターカーの周波数応答特性によるものと考えられる (図-3)。したがって、計算されるIRIは $E_3$ との相関が強いレベル5, 6 (波長0.8~3.2m) の他に、 $E_3$ との相関がほとんど見られないレベル7以上 (波長3.2m以上) によっても影響を受けるため、IRIと層弾性係数の相関が $R_5$ ,  $R_6$ よりも弱くなると考えられる。

解析区間内におけるアスファルト混合物層の層厚 ( $h_1$ )、路盤の層厚 ( $h_2$ ) の平均値とIRI, RMS値の相関係数を図-12に示す。 $h_1$ とIRI,  $h_2$ とIRIの相関係数はそれぞれ-0.48, 0.24であり、層厚とIRIの間には明確な相関が見られなかった。

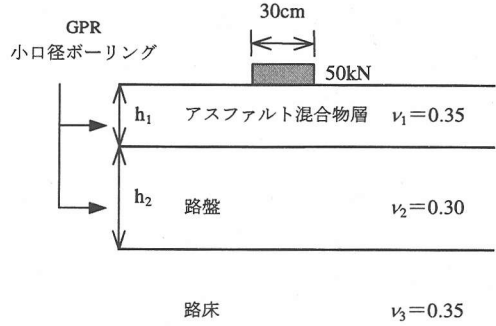


図-8 舗装構造

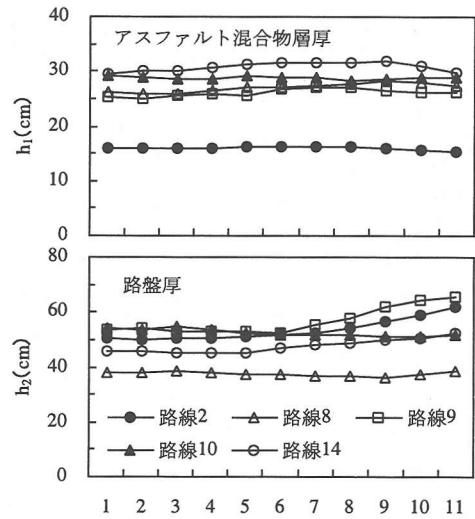


図-9 各路線における  $h_1$ ,  $h_2$  の変動

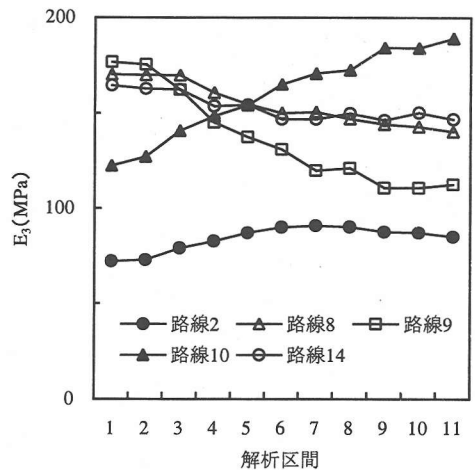


図-10 路床の層弾性係数 ( $E_3$ ) の変動

層厚とRMS値の関係では、 $h_1$ 、 $h_2$ ともに $R_5$ との相関が強く、レベルの増加にともなって相関が低下した。 $h_1$ と $R_5$ の間には負の相関（相関係数-0.73）があり、 $h_1$ が厚くなるのにしたがって $R_5$ が減少する。これとは逆に、 $h_2$ と $R_5$ の間には正の相関（相関係数は0.68）があり、 $h_2$ が厚くなるのにともなって $R_5$ が増加する。 $h_1$ 、 $h_2$ と $R_5$ の相関は、 $E_3$ と $R_5$ の相関よりも強くなることから、 $R_5$ は舗装構成層の層弾性係数よりもアスファルト混合物層や路盤の層厚による影響を受けやすいと考えられる。また、図-12からアスファルト混合物層の層厚と路盤の層厚を合計した舗装厚（ $h_1+h_2$ ）とRMS値の相関は、 $h_1$ 、 $h_2$ とRMS値の相関よりも弱い。したがって、 $R_5$ 、すなわち縦断プロフィールに含まれる0.8~1.6mの波長成分は、舗装全体の厚さよりも、アスファルト混合物層や路盤の層厚による影響を受けやすいと考えられる。

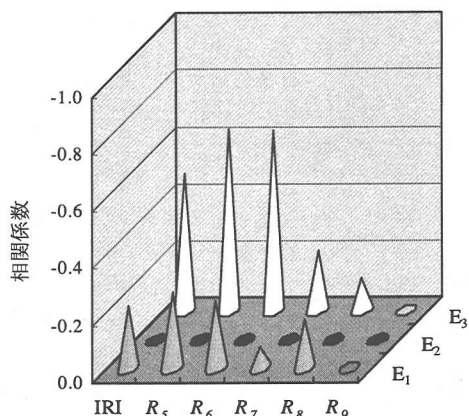


図-11 層弾性係数とIRI, RMS値の相関係数

### 5. 舗装の表面たわみ、内部応力と縦断プロフィールの関係

全ての路線における舗装構造を図-13のような3層構造と仮定し、舗装表面に50kNの荷重を載荷させたときに生じる載荷版中心および載荷版から200cm離れた位置の表面たわみ（ $D_0$ 、 $D_{200}$ ）、路盤および路床上面の圧縮応力（ $\sigma_{z1}$ 、 $\sigma_{z2}$ ）を多層弾性論解析プログラムELSA<sup>18)</sup>によって算出した。なお、舗装構成層の層厚と層弾性係数には、GPRおよび小口径ボーリング調査から得られた層厚データ、および20℃補正後の逆解析弾性係数を解析区間内において平均した値を用いた。

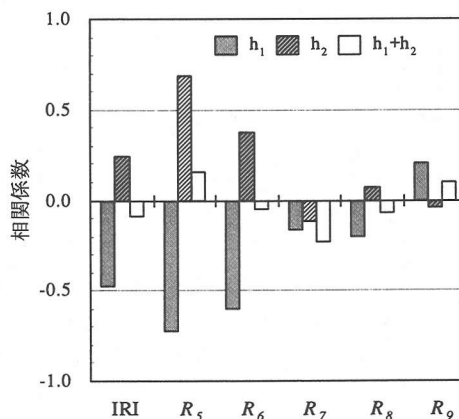


図-12 層厚とIRI, RMS値の相関係数

算出された表面たわみ $D_0$ 、 $D_{200}$ と縦断プロフィールから得られたIRIおよびRMS値の相関係数を図-14に示す。 $D_0$ とIRIの相関係数は0.28、 $D_{200}$ とIRIの相関係数は0.38と低く、舗装の表面たわみとIRIの間に相関があるとは言えない。 $D_0$ 、 $D_{200}$ とRMS値の相関係数は、 $R_5$ 、 $R_6$ で大きく、レベルの増加にともなって相関係数が低下する傾向が見られた。しかしながら、表面たわみとRMS値の相関係数は0.5~0.6程度であり、両者の間には強い相関があるとは言えない。

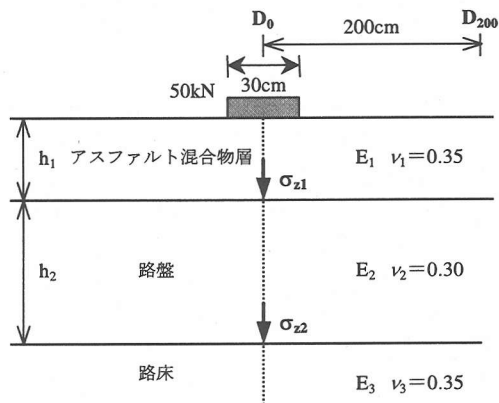


図-13 応力計算に用いた舗装構造

多層弾性論によって算出された路盤上面の圧縮応力（ $\sigma_{z1}$ ）、路床上面の圧縮応力（ $\sigma_{z2}$ ）とIRIおよびRMS値の相関係数を図-15に示す。IRI、RMS値のいずれの場合においても、 $\sigma_{z1}$ の相関係数が $\sigma_{z2}$ よりも大きくなった。 $\sigma_{z1}$ とIRIの相関係数は0.61となり、層弾性係数、層厚、表面たわみとIRIよりも強い相関を示した。



$\sigma_{z1}$ とRMS値の関係では、 $\sigma_{z1}$ と $R_5$ の相関係数が最も高く、レベルの増加にともない相関係数が低下する傾向が見られた。最も高い相関係数を示した $\sigma_{z1}$ と $R_5$ の関係を図-16に示す。 $\sigma_{z1}$ と $R_5$ の相関係数は0.84であり、 $\sigma_{z1}$ とIRI、および層弾性係数、層厚、表面たわみと $R_5$ よりも強い相関を示した。

本研究で解析した路線の路盤は粒状材料であることから、粒状路盤上面に作用する圧縮応力 $\sigma_{z1}$ が大きくなるほど $R_5$ 、すなわち縦断プロファイルに含まれる0.8~1.6mの波長成分が増加すると考えられる。

## 6. 結論

本研究では、1998年7月におこなわれたPIARC路面性状国際共通試験で得られた縦断プロファイル、舗装構造、およびFWDデータを解析し、舗装の縦断プロファイルと支持力の関係について検討した。

得られた結論は以下の通りである。

- 縦断プロファイルにウェーブレットによる多重解像度解析を適用し、レベル5~9のDetail ( $d_5 \sim d_9$ ) およびRMS値 ( $R_5 \sim R_9$ ) を算出した。 $R_5 \sim R_9$  を用いることによって縦断プロファイルの波状特性を分析することができる。
- FWDデータを逆解析して得られる舗装構成層の層弾性係数とIRIおよびRMS値との相関係数を求めた。路床の層弾性係数 ( $E_3$ ) とIRIおよびRMS値の相関は、アスファルト混合物層および路盤の層弾性係数 ( $E_1, E_2$ ) とIRI, RMS値の相関よりも強くなった。しかしながら、 $E_3$ とIRIの相関係数は-0.48、 $E_3$ と $R_5$ の相関係数は-0.64であることから、層弾性係数とIRIおよびRMS値の間に強い相関があるとは言えない。
- アスファルト混合物層の層厚 ( $h_1$ ) および路盤の層厚 ( $h_2$ ) とIRIには相関が見られなかったが、 $h_1$ と $R_5$ の相関係数は-0.73となり、 $h_1$ が厚くなるのにしたがって $R_5$ が減少する傾向が見られた。また、 $h_2$ と $R_5$ の相関係数は0.68であり、 $h_2$ の増加とともに $R_5$ が増加する傾向が見られた。
- 多層弾性論によって算出される舗装の表面たわみ ( $D_0, D_{200}$ ) とIRIの間にはほとんど相関が見られなかった。また、 $D_0, D_{200}$ とRMS値の相関係数は0.6以下であり、表面たわみとRMS値の間にも強い相関は見られなかった。
- 多層弾性論によって算出された舗装内部の応力とIRI, RMS値の相関を求めたところ、路盤上面の圧縮応力 ( $\sigma_{z1}$ ) と $R_5$ の間に相関が見られた (相

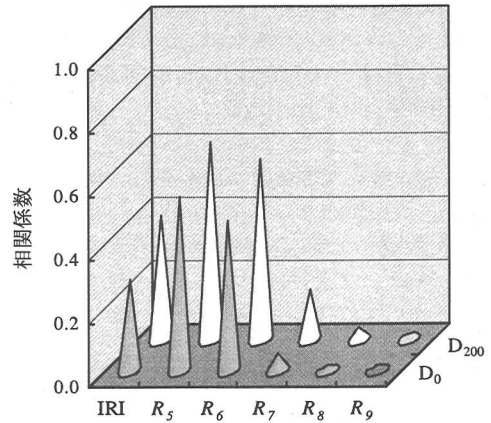


図-14  $D_0, D_{200}$ とIRI, RMS値の相関係数

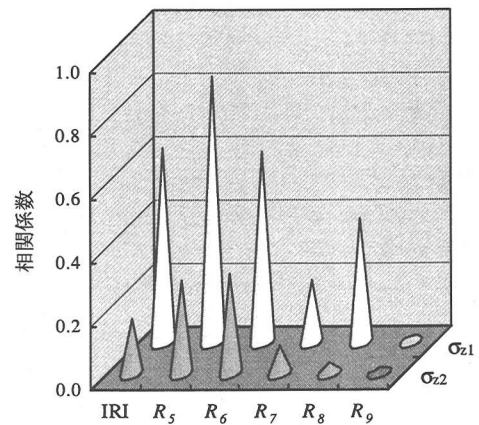


図-15  $\sigma_{z1}, \sigma_{z2}$ とIRI, RMS値の相関係数

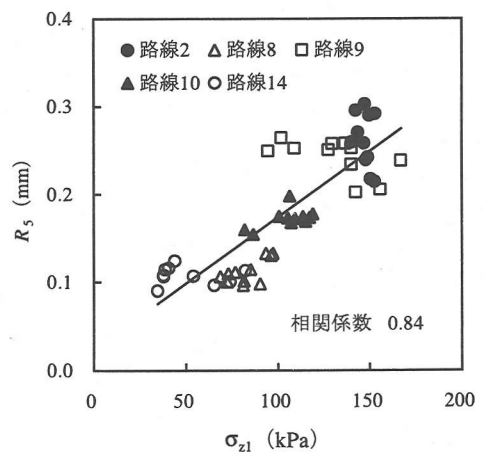


図-16  $\sigma_{z1}$ と $R_5$ の関係

関係数0.84) . したがって、粒状路盤上面に作用する圧縮応力 $\sigma_{z1}$ が大きくなるほど $R_s$ , すなわち縦断プロファイルに含まれる0.8~1.6mの波長成分が増加すると考えられる.

本研究において解析した路線は、IRIが0.9~2.0m/kmの範囲であり、ラフネスが良好と評価される舗装である. 今後、IRIが2.0m/km以上となる舗装においてもデータを蓄積し、舗装の支持力と縦断プロファイルの関係について検討する必要がある.

**謝辞:** 本研究をおこなうにあたり、日本道路協会、PIARC/C1データ解析ワーキンググループ、ペンシルバニア州立大学のJ. J. Henry教授、J. C. Wambold教授に甚大なるご協力を頂いた。また、データ処理、解析に際しては当時、北海道工業大学に在学中であった浅川直子さん（現在、株式会社ティアンドワイ設計事務所）のご協力を得た。ここに記して深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) PIARC: *Technical Committee Report on Surface Characteristics*, 1978.
- 2) ASTM: Standard Guide for Classification of Automated Pavement Condition Survey Equipment, *Standard No. E1656-94*.
- 3) ASTM: Standard Guide for Conducting Subjective Pavement Ride Quality Ratings, *Standard No. E1927-98*.
- 4) Sayers, M. W. and T. D. Gillespie: The International Road Roughness Experiment: A Basis for Establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurements, *Transportation Research Record*, No.1084, TRB, pp. 76-85, 1986.
- 5) Sayers, M. W. and Gillespie, T. D.: The International Road Roughness Experiment, Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements, *No. HS-039-586*, International Bank for Reconstruction and Development, 1986.
- 6) Sayers, M. W.: On the Calibration of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile, *Transportation Research Record*, No.1501, TRB, pp. 1-12, 1995.
- 7) PIARC: International Experiment to Harmonize Longitudinal and Transverse Profile Measurement and Reporting Procedure, *CORE*, Committee 1 on Surface Characteristics, World Road Association, 1997.
- 8) 上田恒三, 川村彰, 伊藤富雄: 路面プロファイルの平坦性評価について-第2回PIARC国際共通試験指針に基づく考察-, 第54回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 362-363, 1999.
- 9) 関口幹夫, 富田洋, 稲垣正晴: 舗装構造調査システムの開発, 第19回日本道路会議, 一般論文集, pp. 318-319, 1991.
- 10) Sayers, M. W. and Karamihas, S. M.: The Little book of Profiling, Basic Information about Measureing and Interpreting Road Profiles, *The University of Michigan Research Institute (UMTRI)*, 1997.
- 11) ASTM: Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements, *Standard No. E1926-98*.
- 12) 川村彰, 姫野賢治, 藤原隆. 秋本陸: ウェーブレット解析の路面評価問題への適用性について, 舗装工学論文集, 第2巻, pp. 23-28, 1997.
- 13) 中村佳大, 姫野賢治, 小栗直幸, 大谷智夫: アスファルト舗装表面のマクロテクスチャとすべり摩擦抵抗との関係, 第54回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 360-361, 1999.
- 14) Oguri, N., Himeno, K., Kawamura, A. and Nakamura, R.: Application of Wavelet Analysis on Evaluation of Roughness of Pavement Surface, *SURF 2000, IV<sup>th</sup> International Symposium on Pavement Surface Characteristics of Road and Airfields*, PIARC Technical Committee on Surface Characteristics, pp. 57-66, 2000.
- 15) Daubechies, I.: Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets, *Commun. Pure Appl. Math.*, XLI 909, 1988.
- 16) 松井邦人, 井上武美, 三瓶辰之: 舗装各層の弾性係数を表面たわみから推定する一手法, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.107-114, 1990.
- 17) 山本富業, 松尾憲政: 舗装構造調査システムの開発, 第20回日本道路会議, 一般論文集, pp. 368-369, 1992.
- 18) 姫野賢治: パソコンによる舗装の多層弾性構造解析, アスファルト, Vol.32, No.161, pp.65-72, 1989.

(2000. 10. 16 受付)

## THE RELATIONSHIP BETWEEN LONGITUDINAL PROFILE AND BEARING CAPACITY OF THE PAVEMENT IN THE PIARC EVENNESS EXPERIMENT

Shuichi KAMEYAMA, Akira KAWAMURA, Yasunori HAYASAKA,  
Morito TAKAHASHI and Atsushi KASAHARA

In 1998, The World Road Association, PIARC conducted an international experiment to harmonize longitudinal and transverse profile measurement and reporting procedure. The experiment was carried out in three regional experiments with test section in U.S.A., Europe and Japan.

In this study, wave characteristics of the longitudinal profile was evaluated by multiresolution analysis using wavelet. Also, we analysed the relationship between the longitudinal profile and bearing capacity which was estimated from backcalculation of FWD data. It was found that there is a high correlation between decomposed profile whose wavelength was 0.8-1.6m and the compressive stress at the top of the subbase.