

路面プロファイルデータ処理に適した ウェーブレット基底関数の選定について

白川龍生¹・川村 彰²・中辻 隆³・上浦正樹⁴

¹正会員 北見工業大学 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail:shirakawa@vortex.civil.kitami-it.ac.jp

²正会員 工博 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

³正会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西4丁目)

⁴正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒063-0926 札幌市中央区南26条西11丁目)

路面性状評価において、路面プロファイルデータ処理は重要なプロセスであるが、近年、データを小波状の基底関数の操作により複数の周波数帯域に分割・ダウンサンプリングする離散ウェーブレット変換が注目されるようになった。しかし、この方法は基底関数の種類により出力結果が異なるため、入力データに適した基底関数の選定が課題である。本研究は、PIARC EVEN試験結果の一部を用いて、代表的な基底関数の出力特性をデジタルフィルタ演算 (DF演算) 結果との振幅比によって比較し、路面プロファイルデータ処理に適した基底関数の選定方法について考察した。その結果、位相の線形性が考慮された基底関数は、離散データの近似及び帯域分解後の出力特性が安定しており、DF演算と同程度の結果が期待できることがわかった。

Key Words : road profile, waveband analysis, digital filter, discrete wavelet transform

1. はじめに

路面プロファイルは、テクスチャ、平坦性、幾何形状など様々な要素から構成されているが、特に平坦性は道路利用者の快適性、安全性と密接に関係するばかりでなく、車の走行費用や沿道住民の振動、騒音環境にも影響を与える重要な路面特性である^{1), 2)}。

世界道路協会 (以下「PIARC」という) の路面性状に関する技術委員会C1による報告では、平坦性は波数 (Wave Number, 以下、「WN」という) $=0.02\sim20\text{m}^{-1}$ の周波数帯域 (以下、「帯域」という) に分類されている³⁾。この帯域は、一般的な速度における乗用車のバネ下固有振動数 (10~17Hz) からバネ上固有振動数 (1.2~1.5Hz) に対応しており、乗用車の走行安全性及び乗り心地を重視する場合に着目すべき帯域である^{2), 4)}。この例をはじめ、近年国の内外を問わず、路面プロファイルデータを複数の帯域に分割し、各帯域成分を分析するウェーブバンド分析 (以下、「WB分析」という) が着目されており、演算手法としては主としてデジタルフィルタ演算 (以下、「DF演算」という) が用

いられている^{2), 5)}。

DF演算は、時系列 (または空間列) データの平滑化、測定データに含まれるノイズ成分の除去などの目的で用いられており、入力データとフィルタとのたたみ込み積分によって計算される^{6)~8)}。DF演算の最大の特長としては、入力データが通過する帯域 (以下、「通過域」という) 及びデータを遮断する帯域 (以下、「遮断域」という) は、フィルタの安定性を損なわない限り任意に設定できることである。しかし、フィルタ性能が高まることにより、データ端部に過渡応答部が生じるなど、少なからず演算上の問題が生じる。このため、周波数成分を複数回分解する場合は、効率的で高速演算が可能なデータ処理手法を必要としてきたが、これを実現する方法として、帯域分割とダウンサンプリング演算を同時に行う離散ウェーブレット変換 (以下、「WT変換」) が注目されるようになった^{9), 10)}。

WT変換は、小波状の基底関数の操作により入力データを近似し、分解数列 (フィルタ) とのたたみ込み積分により分割及びダウンサンプリング演算を行う方法である。この方法は、基底関数の選定によって分解数列及び分解アルゴリズムが全て決定されることから、DF演算

に比べ帯域設定の自由度は少ないが、演算効率に優れているため様々な分野で着目されるようになった^{11), 12)}。

路面プロファイルデータへのWT変換の適用例は、国内を中心に数年前から報告されているが、WT変換は基底関数の種類により出力結果が異なるため、いずれの報告も種類の選定が課題であった^{9), 10), 13)-16)}。

そこで本研究は、代表的な基底関数の出力特性をデジタルフィルタ演算 (DF演算) 結果との振幅比によって比較し、路面プロファイルデータ処理に適した基底関数を選定する方法について考察した。特に、WT変換では初期段階で離散データの補間が行われるが、基底関数の種類により補間の精度及び以後の出力結果が異なるため、路面プロファイルデータ処理へ適用する場合に留意すべき点を述べる^{9), 11)}。

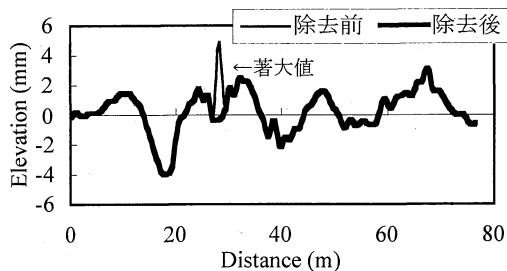
なお路面プロファイルデータは、1998年にPIARCにより実施された国際共同試験 (以下、「EVEN」という) 結果の一部を用いた^{17), 18)}。また、データの処理は主としてWolfram Research社のMathematicaを用いた^{11), 19)}。

2. 従来の研究と本研究の目的

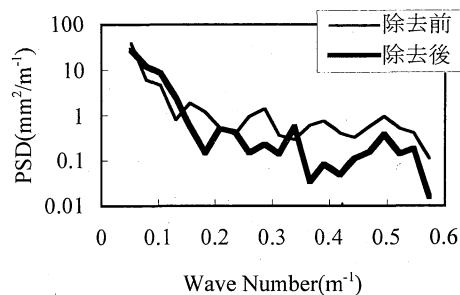
路面プロファイルは、一般的に不規則であり周期性はないとされているが、このような変動量は、フーリエ変換によって得られるスペクトルの考え方に基づいたパワースペクトル密度 (以下、「PSD」という) を用いて表される。路面の評価にPSDを採用する方法は、1954年に米国のHoulbaltが空港の滑走路の評価に適用して以来、今日まで数多く用いられている²⁰⁾。

PSDはラフネス特性の傾向を分析する場合に有効な方法であるが、周波数領域への変換によって時系列 (または空間列) の情報が失われるため、路面上に存在するポットホール、段差などの損傷の発生位置を把握することはできない。図-1は著大値の影響による路面プロファイル特性の歪みの一例であるが、この図から明らかなように、局所的な損傷を含む路面のPSDは、一部の著大値によって平均的な路面プロファイル特性が歪められることがある。このことから、路面プロファイルデータ処理では空間領域 (位置情報) 及び周波数領域の両面からのアプローチが不可欠であり、効率的な分析方法が求められている。このような理由から、近年、DF演算及びWT変換によるWB分析が試行され始めている^{9), 10), 13), 14)}。

DF演算によるWB分析は、入力の時系列 (空間列) データに含まれる周波数成分を複数の帯域に分割して表現する方法であり、帯域幅を可能な限り小さくすることによって、空間及び周波数の情報を同時に表現することができる。WB分析による路面プロファイルの帯域分割の



(a) 波形例



(b) パワースペクトルによる比較

図-1 著大値の影響による路面プロファイル特性の歪みの例

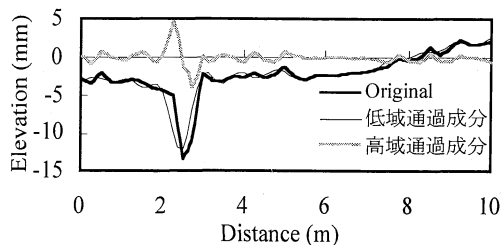


図-2 路面プロファイルの帯域分割例

例を図-2に示す。帯域を複数に分割することにより、局所的な路面損傷の発生位置及び周波数情報を判別することができる。しかし、分割数の増加に伴い、これに対応したフィルタの設計数も増加するため、計算効率は低下する^{6), 9)}。

この点、WT変換は基底関数の操作のみで複数の帯域に分割することができ、同時にダウンサンプリングによってデータ圧縮及び計算時間の短縮が可能であり、計算効率がよい^{11), 21)}。しかし、図-3に示すように、出力結果は基底関数の種類によって異なるため、現段階では大半の場合、路面損傷の可視化が主目的であると思われる^{9), 10), 13)-16)}。

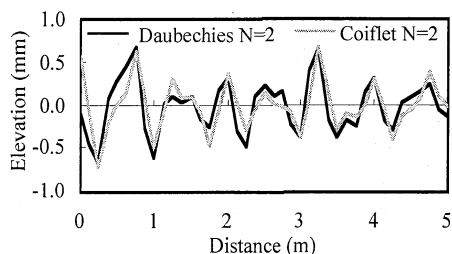


図-3 基底関数の種類による出力結果の相違

平坦性に関する測定データは、IRI（国際ラフネス指数）の算定に対応したサンプリング間隔である $\Delta t=0.25\text{m}$ の場合が多いが、このデータの最大周波数（以下、「ナイキスト周波数」という）である $WN=2.0\text{m}^{-1}$ 付近に主な路面損傷の周波数が含まれる。このため、ナイキスト周波数近傍の周波数成分が高精度で抽出されるよう、出力特性（振幅特性）が安定した基底関数が用いられるべきである^{2), 3), 21), 22)}。

そこで本研究は、DF演算と同等の出力特性を有しつつ、計算効率に優れた基底関数を選定し、路面プロファイルデータ処理への適用方法について考察することを研究目的とした。

3. ウェーブバンド分析の概要

本章では、DF演算及びWT変換によるWB分析について概説する。

(1) デジタルフィルタ演算による方法

a) デジタルフィルタの設計

K 次のフィルタを用いたDF演算式は、一般的に式(1)のように表される⁸⁾。

$$y(t) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k)x(t-k) \quad (1)$$

ここに $x(t)$: 入力時系列データ

$h(k)$: フィルタのインパルス応答

$y(t)$: 出力時系列データ

インパルス応答 $h(k)$ をZ変換することにより、システムの伝達関数 $H(z)$ が求まる。

フィルタ設計上の主な留意点を以下に記す^{2), 8), 23)}。

・フィルタの次数

一般にフィルタ次数 K が大きい場合、以下の特徴が

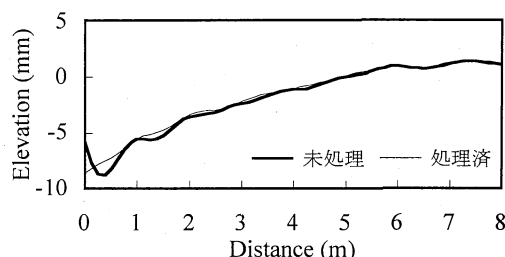


図-4 デジタルフィルタ演算による過渡応答の例

ある。

- i) 計算上の精度が向上する。
- ii) 周波数の分解能が小さくなる。
- iii) 計算時間を要する。
- iv) 計算上の誤差を含む区間が長くなる。

多重解像度解析では計算上の精度が要求されることから、 K は大きい方が望ましい。

・過渡応答部の処理

出力データの始終点に生ずる計算上の誤差範囲（以下、「 Ne 」とする）は、 $Ne = (K-1)/2$ 点の区間であり、例えば $K=1000$ の場合、 $Ne=500$ 点の範囲で過渡的な誤差が生じる（図-4）。このため、事前に過渡応答部を処理する区間を入力データに連結し、フィルタリング演算後に分離する処理を要する。

・位相条件

出力データは入力データと比較し、位相に α 点分の遅れが生じる。フィルタの位相が線形の場合、出力データは時系列（空間列）で $\alpha = (K-1)\Delta t/2$ 点後方へ平行移動した結果として現れるが、線形性を持たない場合、各周波数成分が時間的に同じ遅れを持たないため、出力側で合成される際に歪みを受ける。このため、位相特性には線形性が求められる。

b) デジタルフィルタ演算によるウェーブバンド分析

デジタルフィルタ演算によるウェーブバンド分析の概念図を図-5に示す。この方法は、入力データをローパスフィルタへ通過させ、入力データとフィルタ通過成分の差をハイパスフィルタ成分とみなし分解するものである²⁴⁾。以下、必要に応じこの手順を繰り返す。この方法は、分解成分から入力データを再構成することが可能であるほか、フィルタの安定性を損なわない限り、通過域、遷移域の周波数帯を任意に設定できる。また通過域の振幅比は1であり、入力データの成分を歪めず出力することができる⁹⁾。

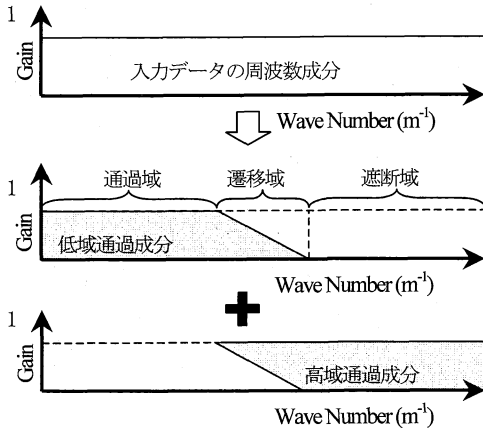


図-5 フィルタ特性及びデータ処理の概念図

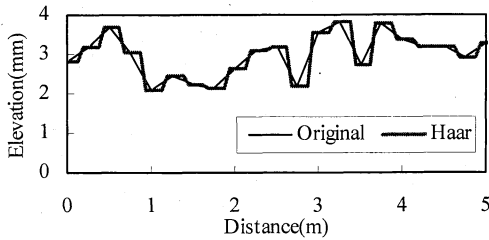


図-6 Haarによる離散データの近似例

(2) 離散ウェーブレット変換による方法

a) 近似関数と分解アルゴリズム

WT 変換では、第 1 段階として入力データ $f_j(t)$ を基底関数 $\phi(t)$ (以下、「スケーリング関数」という) により近似する^{11), 12)}。計算式を次式に示す。

$$f(t) \approx f_j(t) = \sum_k c_k^{(j)} \phi(2^j t - k) \quad (2)$$

ここに $f_j(t)$: WT 近似関数

$c_k^{(j)}$: j 次のスケーリング展開係数

$\phi(t)$: スケーリング関数

式(2)において、スケーリング展開係数は信号を観測する際の基準となる係数である(初期値 $c_k^{(j)}$ の算出方法は次項で述べる)。またパラメータ j は近似の精度(以下、「解像度」という)を表す。スケーリング関数 $\phi(t)$ はこれまでに様々な種類が提案されており、Haar, Daubechies などが広く知られている。図-6 に Haar による近似の例を示す。式(2)では $1/2^j$ 倍に伸縮、 k 点の平行移動の演算が施されている。

第 2 段階として、関数 $f_j(t)$ をローパスフィルタ通過

成分 $f_{j-1}(t)$ とハイパスフィルタ成分 ($f_j(t)$ と $f_{j-1}(t)$ の差) に分解する(式(3))。

$$f_j(t) = [f_{j-1}(t)] + [f_j(t) - f_{j-1}(t)] \quad (3)$$

ここで $f_j(t) - f_{j-1}(t)$ を $g_j(t)$ とすると、式(3)は

$$f_j(t) = f_{j-1}(t) + g_j(t) \quad (4)$$

と表すことができる。

式(4)に対応し、構成要素であるスケーリング展開係数 $c_k^{(j)}$ に対して以下の演算補正を行う。

$c_k^{(j)}$ の帯域は角周波数で $0 \sim \pi$ の区間(データ点の 2 区間で 1 周期 2π であることから周波数は π となる)であるが、この帯域を 2 等分するフィルタを用いて出力データを成分分解する。このうち、ローパスフィルタ $\{h_k\}$ を通過する成分 ($c_k^{(j-1)}$) は式(5)によって求められる。

$$c_k^{(j-1)} = \frac{1}{2} \sum_l h_{2k-l} c_l^{(j)} \quad (5)$$

同様に、ハイパスフィルタ $\{w_k\}$ を通過する成分 $d_k^{(j-1)}$ は式(6)で求められる。

$$d_k^{(j-1)} = \frac{1}{2} \sum_l w_{2k-l} c_l^{(j)} \quad (6)$$

ここで、 $d_k^{(j-1)}$ をウェーブレット展開係数という。

以上より、解像度レベルが $j-1$ 次における低域通過成分 $f_{j-1}(t)$ は、式(2)、(5)より次式となる。

$$f_{j-1}(t) = \sum_k c_k^{(j-1)} \phi(2^{j-1} t - k) \quad (7)$$

高域通過成分 $g_j(t)$ を構成する基底関数は、式(3)より j 次のスケーリング関数が属する空間 (V_j) と $j-1$ 次のスケーリング関数が属する空間 (V_{j-1}) との補空間に属するため、ウェーブレット関数 $\psi(t)$ と呼ばれる基底関数を用いてこれを表現する。

ここで、スケーリング関数とウェーブレット関数は式(8)の直交条件が課される。

$$\langle \phi | \psi(\cdot - n) \rangle = 0 \quad (8)$$

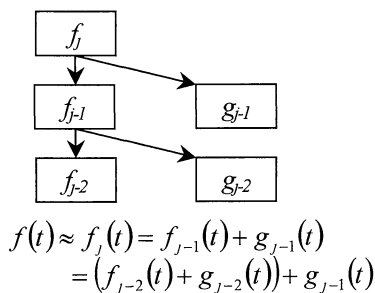


図-7 ピラミッドアルゴリズム

高域通過成分 $g_{j-1}(t)$ は次式で表される。

$$g_{j-1}(t) = \sum_k d_k^{(j-1)} \psi(2^{j-1}t - k) \quad (9)$$

式(4)において、レベル j の関数 f_j の解像度は 2^j であるが、分解によって f_j のレベルが下がると、解像度は $1/2$ となる。この演算を低域通過成分について繰り返すことにより、図-7 のピラミッドアルゴリズムを構成することができる^{3), 9), 11)}。

b) 高速フーリエ変換を用いた離散データの補間法

離散ウェーブレット変換による方法では、式(2)より入力データを近似するが、構成要素であるスケーリング係数 $c_k^{(j)}$ の初期値は式(10)より求められる¹¹⁾。

$$c_k^{(j)} = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \phi(2^j t - k) f(t) dt \quad (10)$$

しかし、離散データの場合、式(10)の計算は困難であり、実用的には高速フーリエ変換を応用した以下の方法を用いた方がよい⁷⁾。

データ列 $\{\theta_n\}_{n \in [1, N]}$ が与えられた場合、周期的境界条件 $\theta_{N+n} = \theta_n$ を満たすことにより、離散データを補間することができる¹¹⁾。

$c_k = c_k^{(0)}$ とすると、

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \hat{c}_m e^{2\pi i(k-1)(m-1)/N} \quad (11)$$

$$\hat{c}_m = \frac{\hat{f}_0(m)}{\hat{\phi}_{(1,1)}(m)} \quad (12)$$

ここに、 \hat{c}_m : c_k のフーリエ変換
 $\hat{f}_0(m)$: $f_0(t)$ のフーリエ変換
 $\hat{\phi}_{(1,1)}(m)$: $\phi(t-1)$ のフーリエ変換

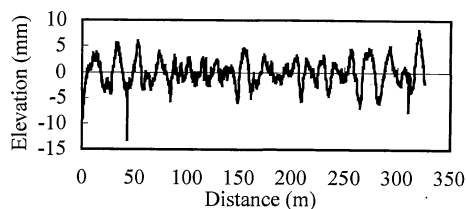


図-8 解析対象データ（事前処理した波形）

4. 離散ウェーブレット変換結果の出力特性

(1) 研究に用いたデータ

EVEN試験は、各国で開発された各種プロファイラから得られた結果の調和を目的とした試験であり、従来の測定・評価方法から得られた様々な平坦性に関する情報を相互に関連させることに主眼点が置かれている。このため、試験結果を比較するための基準となるプロファイル（以下、「True Profile」という）が測定されている。True ProfileはPIARCのCORE Guidelineに基づき、Static Dipstick、Rolling Dipstickおよび水準測量により構成されたデータである^{2), 17), 18)}。

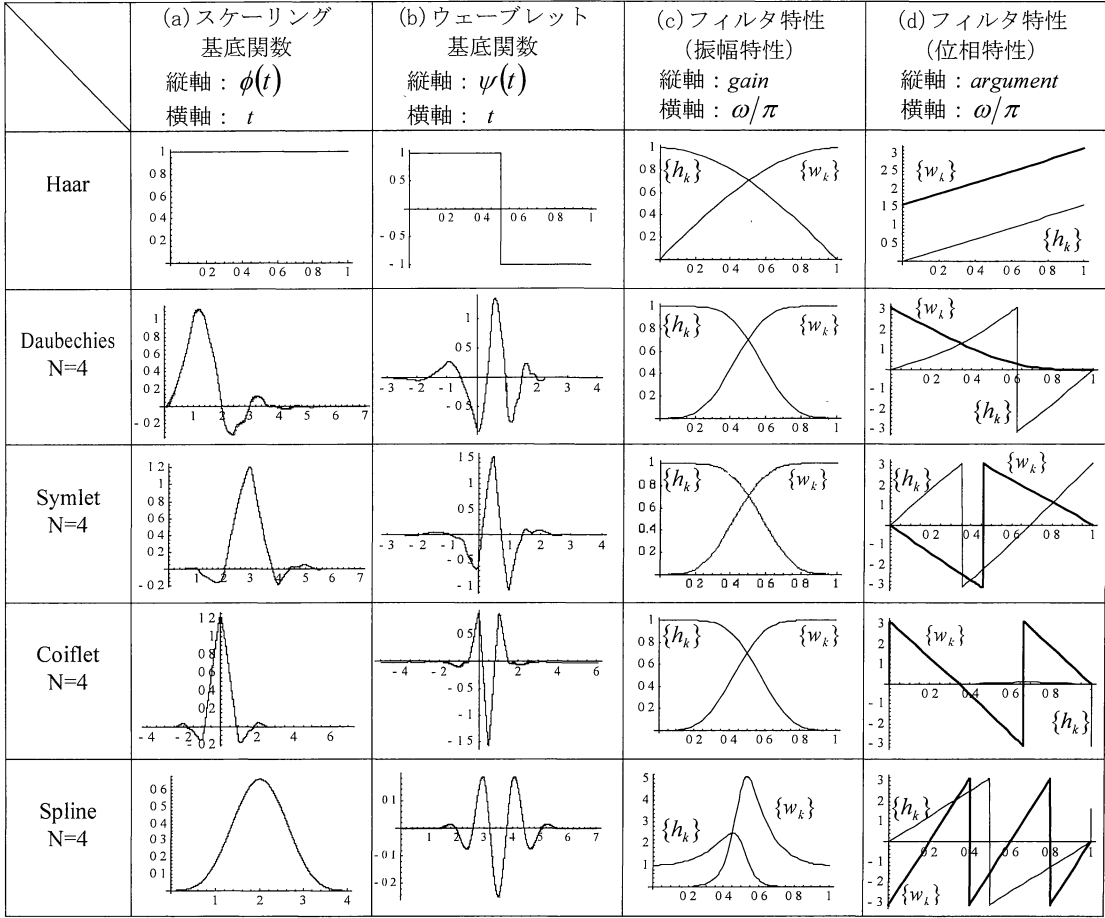
試験区間はIRI（国際ラフネス指数）の程度に応じて5レベル、計15区間が選定されているが、本研究では最も大きいレベルに属するNo.2（国道276号線）のTrue Profileを用いた。この区間のIRIは4.02mm/mであり、これは「供用後の道路（表面損傷）」に分類される平坦性レベルである。

(2) データの事前処理

True Profileは、サンプリング間隔 $\Delta t = 0.025\text{m}$ 、データ数 $N=13161$ 点（延長 $L=329\text{m}$ ）であり、道路勾配など長波長成分も含まれる²²⁾。

この区間の平坦性は局所的な表面損傷が含まれるレベルであるが、長波長成分の影響から容易には識別できない²²⁾。WT変換による識別は、式(4)及び図-7の分解演算を10回以上繰返すことにより可能であるが、演算が複雑になるほか、計算過程での誤差の累積が考えられる²⁵⁾。このことから、本研究では平坦性に影響する周波数帯を主たる解析対象とし、サンプリング間隔を $\Delta t = 0.25\text{m}$ へ間引き処理した。また、この区間は一般国道であり、走行速度は $V=60\text{km/h}$ 程度であるため、長波長成分は車両の上下振動に対して大きな影響を及ぼさないと思われる²⁾。したがって、通過域の波長を 20m 以下とするハイパスフィルタによってデータの事前処理を行った（図-8）。

表-1 代表的な基底関数の形状と分解数列のフィルタ特性



(3) 研究対象のデジタルフィルタと離散ウェーブレットの種類

a) デジタルフィルタ

フィルタはローパスフィルタを用いる。 $\Delta t=0.25$ m のデータを用いるため、サンプリング定理により、最大周波数は $WN=2.0m^{-1}$ である。フィルタの帯域は任意に設定可能であるが、 WN 変換との比較のため、最大周波数の $2/3$ を遮断域の下限として設定した。

b) 離散ウェーブレット

基底関数は、代表的な直交基底である Haar, Daubechies, Symlet, Coiflet の各関数、及び位相を線形とするために 2 種類の基底関数によって対称性を与えた Spline 関数（双直交ウェーブレットと称される）を用いた。生成次数を N で示す。 N の増加とともに平滑度は向上するが、基底関数の 0 ではない有限の区間（以下、「サポート」という）が長くなる。基底関数の一例を表-1 に示す^{26), 27)}。 Haar 以

外の関数は $N=4$ とした。

(4) 離散ウェーブレット変換結果の振幅特性

a) 補間データの近似

本項では、WT変換過程の第一段階である離散データの近似について、DF演算結果との振幅比を用いて補間精度を考察する。

図-9 に各基底関数による離散データの補間精度を示す。図-9 は、式(2)によって求められた WT 近似関数及び DF 演算結果から次式により PSD の比を求め、平方根を算出することにより求めた。

$$|H_f| = \sqrt{P_y(f)/P_x(f)} \quad (13)$$

ここに H_f : DF演算に対する近似関数の振幅比
 $P_x(f)$: DF演算結果のPSD
 $P_y(f)$: WT 近似関数の PSD

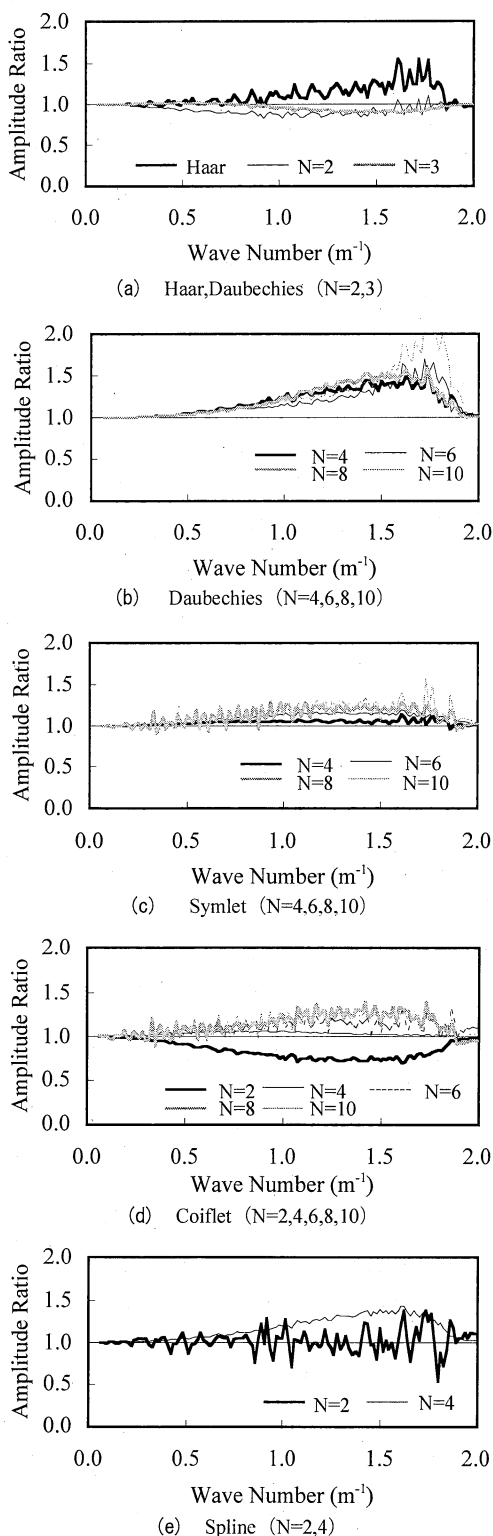


図-9 基底関数による離散データの補間精度

表-2 デジタルフィルタ演算結果に対するウェーブレット近似関数の振幅比

基底関数の種類	$WN \leq 1.0m^{-1}$ 低域通過成分	$WN > 1.0m^{-1}$ 高域通過成分
Haar	1.0-1.2 倍	1.0-1.6 倍
Daubechies (N=2, 3)	0.8-1.0 倍	0.8-1.1 倍
Daubechies (N=4以上)	1.0-1.3 倍	1.3-2.5 倍
Symlet	1.0-1.3 倍	1.0-1.6 倍
Coiflet (N=2)	0.8-1.0 倍	0.7-1.0 倍
Coiflet (N=4以上)	1.0-1.2 倍	1.0-1.4 倍
Spline (N=2)	1.0-1.2 倍	1.0-1.5 倍
Spline (N=4)	0.7-1.3 倍	0.5-1.4 倍

また、DF演算に対する近似関数の振幅比を表-2のように整理する。詳細は以下の通りである。

・ Haar

WT変換を要約すると、データと基底関数の相似相関を検出する方法であるが、Haarの基本形状は正方形であるため、図-6のように補間精度には限界がある。この誤差が図-9(a)に生じたと思われる¹¹⁾。

・ Daubechies

Daubechies は結果が大別される。N=2, 3 の場合 (図-9(a))、 $WN=1.0m^{-1}$ 付近の帯域における振幅は入力信号よりやや小さいが、入力データの近似精度としては概ね良好である。

しかし上記の帯域は、構造物前後の凹凸、ポットホール、はく離など、自動車の走行安全性に直接影響を及ぼす局所的な損傷が含まれている可能性がある。フェール・セーフ設計の観点から、この周波数帯では、近似の段階における振幅比が1以上であり、WNに依存しないことが望ましい^{3), 28), 29)}。したがって、入力データの特徴について十分な検討が求められる。

N=4次以上の場合 (図-9(b)) は、上記と対照的に高周波帯域で振幅比が大きい、この要因としては、サポート延長がNとともに拡大している点が考えられる^{11), 12), 21), 30)}。局所的な変動を基底関数の伸縮演算によって捉えるためには、基底関数のサポート長が短い (コンパクトである) ことが望ましいが、生成次数Nが高い場合は演算上不利である。このため、コンパクトなサポートを持つ基底関数の重要性が報告されている^{11), 21), 25), 30)}。さらに、表-1のように、フィルタ $\{h_k\}$ 、 $\{w_k\}$ の位相特性が

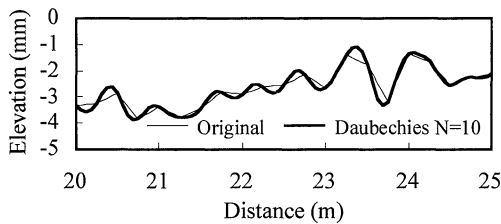


図-10 位相の影響と考えられる誤差
(Daubechies N=10の例)

非線形であるため、図-10に示されるように出力結果に歪みが生じている¹¹⁾。

・ Symlet

Symletは、Daubechiesに一定の対称性を与えるため、N=4以上について別解法により作られた基底関数である。Daubechiesに比べ、基底関数形状の対称性が増しており（表-1）、図-9(c)に示されるように位相の影響による誤差が減少している¹¹⁾。

・ Coiflet

Daubechies Nの直交ウェーブレットは、ウェーブレット基底関数 ψ のN-1次のモーメントまでが0となる。Coifletはこの条件をスケール基底関数に対しても適用した関数であるため、対称性に優れているが、完全に対称ではない（表-1）^{11), 21)}。

図-9(d)において、N=2はDaubechiesの場合と同様に局所的損傷箇所を検出できない可能性があるため、解析に用いる場合は注意を要する。その他の関数は振幅比1～1.5倍の範囲内であった。

・ Spline

直交ウェーブレットはフィルタの位相特性が非線形であるため、時間遅れが一定とならず、出力結果に歪みを生じる。Splineは、スプライン関数を基本に、必要に応じてこれに直交する双対基底を用いるもので、双直交ウェーブレットと称される。Splineは対称性と滑らかさを兼ね備えており、画像のエッジ検出、画像圧縮に応用例が多い。この関数の境界条件は自由境界であり、基本関数がスプラインであることから、3(2)節の補間法は不要である¹¹⁾。

図-9(e)において、N=2はスケール関数が三角波であることから、振幅比はこれを反映した結果が現れている。N=4の場合、基底関数の平滑性は高いが、高周波帯域において振幅比にばらつきが生じ

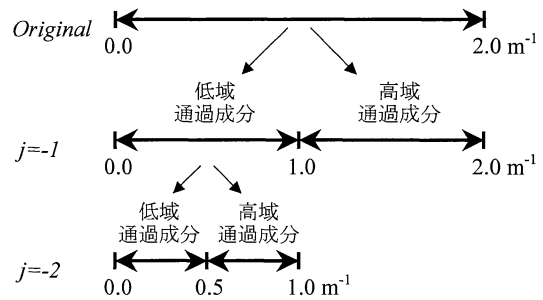


図-11 $WN = 0 \sim 0.5 \text{ m}^{-1}$ の成分抽出（分解:2回）

ており、解析に用いる場合は注意が必要である。

b) ピラミッドアルゴリズムの性能比較

本項では、DF演算及びWT変換によるピラミッドアルゴリズムの性能を比較する。分解回数は2回（ $j = -2$ ）とし、振幅比は式(13)に準じて求めた。

基準データを入力するためのデジタルフィルタについては帯域等を任意に設定することが可能であるが、ここではサンプリング間隔及び通過域はWT変換の条件を準用する。遷移域については、帯域を2分割するもので勾配は急峻とし、遮断性能を高めた設計とした^{23), 24)}。WT変換のフィルタは、各基底関数に対応した $\{h_k\}$ 、 $\{w_k\}$ が用いられるが、本項では基底関数とのたたみ込み演算後の総合周波数特性について比較する。

・ 低域通過成分

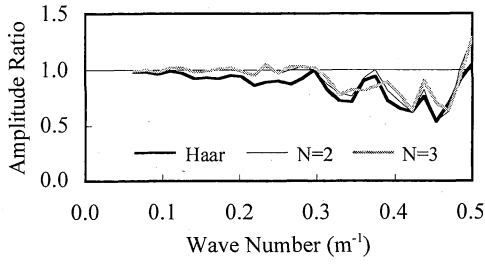
$j = -2$ の解像度は近似関数 $f_0(t)$ の1/4であり、低域通過成分は主として $WN = 0 \sim 0.5 \text{ m}^{-1}$ の成分が抽出される（図-11）。

図-12にDF演算との振幅比を示す。図-12(a)のHaar、Daubechies N=2, 3では、 $WN = 0 \sim 0.3 \text{ m}^{-1}$ の振幅比が1前後であるが、 $WN = 0.3 \sim 0.5 \text{ m}^{-1}$ の検出感度は低い。この帯域に属する損傷は、構造物前後の凹凸、パッチング処理痕などが含まれる²⁸⁾。図-12(a)の基底関数を用いた場合、これらの凹凸に関する情報が想定外の帯域に分類される可能性がある。

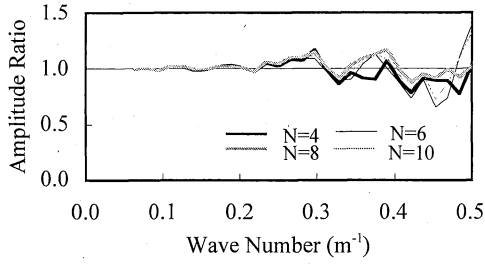
図-12(b)～(e)については、次数が低い場合、図-12(a)と同様の傾向を示すが、次数が高くなるに伴い、振幅比は1に近づく。

・ 高域通過成分

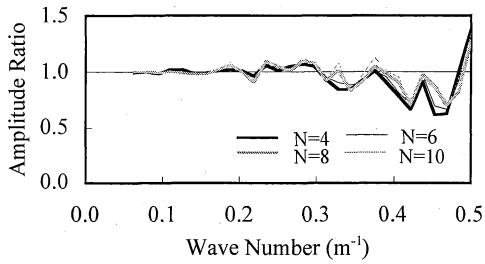
高域通過成分は、主として $WN = 0.5 \sim 1.0 \text{ m}^{-1}$ の成分が抽出される。この帯域には、構造物前後の凹凸、



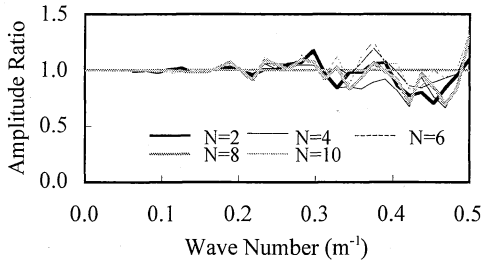
(a) Haar, Daubechies (N=2,3)



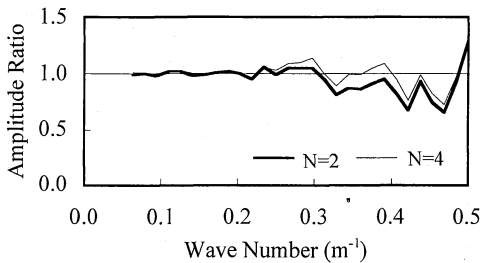
(b) Daubechies (N=4,6,8,10)



(c) Symlet (N=4,6,8,10)

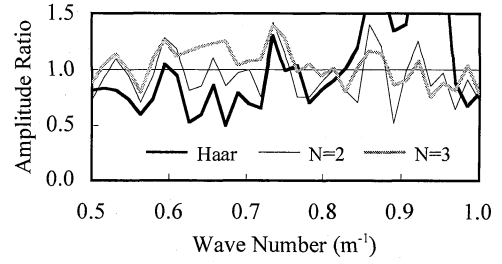


(d) Coiflet (N=2,4,6,8,10)

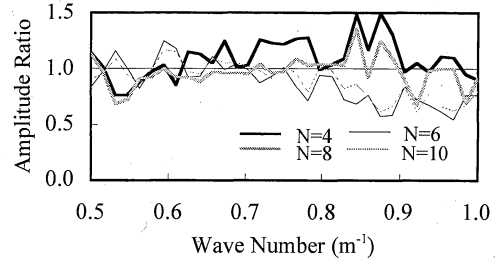


(e) Spline (N=2,4)

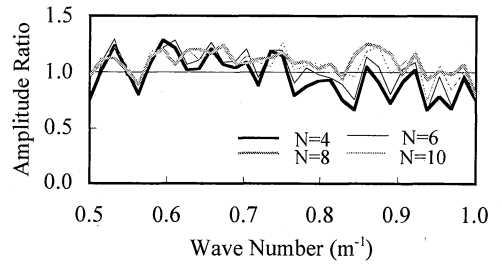
図-12 $j=-2$ におけるウェーブレット変換結果の振幅比
(低域通過成分)



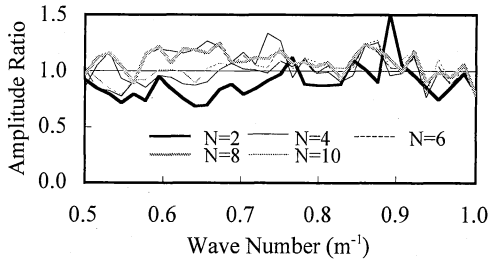
(a) Haar, Daubechies (N=2,3)



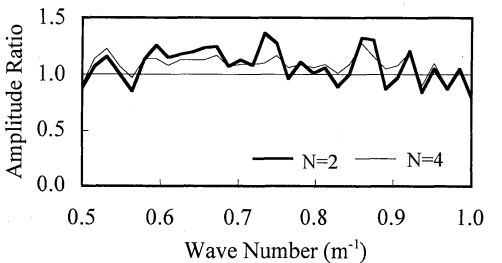
(b) Daubechies (N=4,6,8,10)



(c) Symlet (N=4,6,8,10)



(d) Coiflet (N=2,4,6,8,10)



(e) Spline (N=2,4)

図-13 $j=-2$ におけるウェーブレット変換結果の振幅比
(高域通過成分)

表-3 各基底関数による成分分解結果（振幅比）の特徴及び適用性

基底関数の種類	$WN \leq 0.5m^{-1}$ 低域通過成分	$WN > 0.5m^{-1}$ 高域通過成分	特 徴	適用性
Haar	0.5－1.0 倍	0.5－2.8 倍	高域通過成分の変動が大きい.	△
Daubechies (N=2, 3)	0.6－1.2 倍	0.5－1.4 倍	高域通過成分の変動が大きい.	△
Daubechies (N=4以上)	0.6－1.4 倍	0.6－1.5 倍	高域通過成分の変動が大きい.	△
Symlet	0.6－1.4 倍	0.7－1.3 倍	次数が大きいものは、高域通過成分のほとんどの帯域で振幅比 1.0－1.3 倍であり、検出感度及び精度がよい.	○
Coiflet (N=2)	0.7－1.2 倍	0.7－1.5 倍	高域通過成分の変動が大きい.	△
Coiflet (N=4以上)	0.7－1.3 倍	0.8－1.3 倍	低域及び高域通過成分ともばらつきが小さく精度がよい.	◎
Spline (N=2)	0.7－1.3 倍	0.9－1.3 倍	低域及び高域通過成分ともばらつきが小さく精度がよい.	◎.
Spline (N=4)	0.6－1.3 倍	0.8－1.4 倍	Spline N=2 と比較すると、ややばらつきが大きい.	○

ポットホール、はく離などが含まれ、特に自動車の走行安全性に影響を及ぼす領域である^{10), 28)}。

図-13 に DF 演算との振幅比を示す。図-13(a)のうち、Haar については $WN=0.8\sim1.0m^{-1}$ 近傍の振幅が非常に大きい。前節と同様に、基底関数の形状の影響を受けたノイズ成分などが含まれていると考えられる。Daubechies N=2, 3 は、変動は大きい。振幅比は 1 程度である。これは図-13(b)～(e)についても同様であり、Symlet 及び Spline は周波数による振幅比のばらつきが比較的小さい結果が得られた。

(5) 路面プロファイルデータ処理に適した基底関数の選定及び適用方法

a) 成分分解結果（振幅比）の特徴及び適用性

前節の結果より、各基底関数による成分分解結果（振幅比）の特徴及び適用性について要約したものを表-3に示す。

位相が線形（あるいは線形に近似）となるように考慮された基底関数については、概ね周波数の程度に依存せず、ばらつきが小さい結果となった。 $\Delta t = 0.25m$ 程度（IRI 算出を指向したサンプリング間隔）の路面プロファイルデータを用いる場合、分解の初期数段階は舗装の破損に関係する帯域のデータを扱うため注意を要するが、位相の線形性が考慮された基底関数の場合、振幅比は DF 演算結果に対して $\pm 30\%$ 程度の範囲に収束した。例えば、振幅が 3mm であれば、誤差は $\pm 1mm$ 以内に収まる。このことから、Coiflet (N=2 を除く)、Spline N=2 及び

Symlet の各基底関数を用いる場合、路面プロファイルデータ処理において DF 演算と同程度の結果が期待できる²⁾。

本研究は EVEN 試験データのうち、IRI が最も大きいレベルの区間について分析しており、デジタルフィルタ及び基底関数のフィルタ特性が平坦性の程度に依存せず理論的に一定であるとすれば、他の区間についても同様の結果が得られると思われる。しかし、上記の基底関数を最適解として特定するためには、平坦性が良好な路面も含め、今後さらに数多くの路面プロファイルについて解析を行ない、路面損傷の検知能力の違いについての考察を行なう必要があると思われる。

b) 空間領域におけるデータの相関性

WT変換結果のうち低域通過成分について、空間領域における離散入力データとの相関分析例を図-14に、また各基底関数について整理したものを表-4に示す。いずれの関数も誤差 2%以内であり、WT 変換を日常の維持管理に用いる場合、波高及び位置情報の検知、路面特性評価値の算出などへの影響は少ないと考えられる²⁾。しかし、図-3 のように位相による波形の歪みが生じるため、波形の形状から路面損傷の分類などを行う場合、位相の線形性を考慮した Coiflet (N=2 を除く)、Spline 及び Symlet を用いると、DF 演算と同等の結果が期待できると思われる^{2), 11)}。

なお高域通過成分については、低域通過成分と比較すると、帯域による変動が大きい（図-13）。

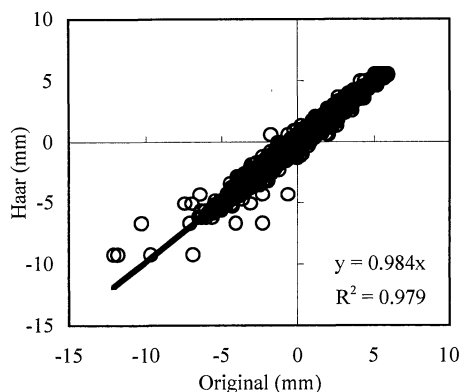


図-14 離散入力データと離散ウェーブレット変換による分解結果（低域通過成分）との相関分析例（Haar 関数）

これは $WN=0.5 \sim 1.0m^{-1}$ の帯域に含まれる成分が少ないためであり、DF 演算結果との差がわずかであっても、相対誤差が大きくなることがある。

c) 今後の路面性状評価及び維持管理におけるWT変換の展開について

路面性状評価において、評価対象の帯域があらかじめ一定範囲に特定されている場合、DF 演算による WB 分析は効果的である。これは前述のようにフィルタの安定性、特にフィルタ通過成分における振幅利得が 1 であり、位相が線形であるため、データに歪みが生じにくいためである^{23), 24)}。

しかし、多くの場合、路面上には様々なパターンの損傷が点在しており、データの一部に著大値が含まれている場合（図-1）、道路勾配など長波長成分が多く含まれている場合など、容易には帯域が特定できないケースが想定される。このような場合、DF 演算は計算効率の点で不利になる場合が考えられる。

この点、WT 変換は周波数領域での変化をスケールファクターである j の操作のみで検知できるため、DF 演算に比べ操作は容易であり、帯域を特定できない場合、分析対象の帯域が広範囲に及ぶ場合などに適した方法であると思われる^{11), 21)}。

今後の路面性状評価及び維持管理分野への WT 変換の展開として、局所的な異常値の発生箇所の特定など、日常の維持管理は主として WT 変換を用い（DF 演算と同等の結果が期待できる基底関数を使用）、異常値の波形についてさらに詳細な情報を必要とする場合は DF 演算を行うなど、両者を

表-4 離散入力データと離散ウェーブレット変換による変換による分解結果（低域通過成分）との相関性

基底関数の種類		回帰直線の傾き (原点回帰)	決定係数 R
Haar		0.984	0.989
Daubechies	N=2	0.986	0.992
	N=3	0.992	0.993
	N=4	0.994	0.990
	N=6	0.991	0.992
	N=8	0.995	0.992
	N=10	0.991	0.992
Symlet	N=4	0.992	0.994
	N=6	0.993	0.993
	N=8	0.994	0.994
	N=10	0.995	0.993
Coiflet	N=2	0.986	0.992
	N=4	0.994	0.993
	N=6	0.995	0.994
	N=8	0.995	0.993
	N=10	0.995	0.993
Spline	N=2	0.992	0.992
	N=4	0.995	0.993

ハイブリッドで用いることを提案したい^{9), 11)}。

5. 結論

本研究は、代表的な基底関数の出力特性を DF 演算結果との振幅比によって比較し、路面プロファイルデータ処理に適した基底関数の選定方法について考察したが、特に離散データの補間方法とその精度について分析したものとしては最初の報告になると思われる。得られた知見を以下に記す。

(1) WT 変換は入力データをスケーリング関数によって近似し、これを以後の演算に用いるが、近似精度はスケーリング関数の種類により異なるため、入力データに含まれる必要な情報が初期段階で失われる場合がある。Daubechies N=2, 3 及び Coiflet N=2 はデジタルフィルタに比べ検出感度が低いため、使用するデータの特性を十分に考慮することが望ましい。

(2) ピラミッドアルゴリズムによる数段階の分解の結果得られた総合的な周波数特性を考察すると、

低域通過成分については多くの基底関数が DF 演算結果と同等の値を示した。しかし高域通過成分については、離散データを近似した際の誤差の影響によって、低域通過成分に比べ、帯域による振幅比の変動は大きな値を示した。

- (3) 位相の線形性が考慮された基底関数 (Coiflet (N=2 を除く), Spline N=2 及び Symlet) の場合, 出力結果の振幅比は DF 演算結果に対して $\pm 30\%$ 程度の範囲に収束した。これらの基底関数は, 路面プロファイルデータ処理において DF 演算と同程度の結果が期待できる。今後, さらに数多くの路面プロファイルについて解析を行ない, 路面損傷の検知能力の違いについての考察を行なう必要があると思われる。

参考文献

- 1) 川村彰, 姫野賢治, 笠原篤: 高精度プロファイルデータに基づいた路面ラフネスの評価, 土木学会年次学術講演概要集第5部, Vol.47, pp.104-105, 1992.
- 2) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 中辻隆: ウェーブバンドを考慮した路面プロファイリングデータ処理手法について - EVENデータを用いて -, 舗装工学論文集, Vol.8, pp.15.1-15.12, 2002.
- 3) 川村彰: 路面の評価(1)-平坦性に着目して -, 舗装, Vol.36, No.8, pp.31-35, 建設図書, 2001.
- 4) 景山克三, 景山一郎: 自動車力学, 理工図書, 1984.
- 5) Delanne, Y. and Pereira, P.A.A.: Advantages and limits of different road roughness profile signal-processing procedures applied in Europe, Transportation Research Record, No.1764, pp.254-259, 2001.
- 6) Taylor, F.J.: Digital Filter Design Handbook, Marcel Dekker, 1983.
- 7) 足立修一: MATLABによるデジタル信号とシステム, 東京電機大学出版局, 2002.
- 8) 中村尚五: ビギナーズデジタルフィルタ, 東京電機大学出版局, 1989.
- 9) 白川龍生, 松原正人, 川村彰: デジタルフィルタを用いた路面プロファイルデータ処理について - ウェーブレットの概念を導入したデジタル信号処理, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.59, pp.724-727, 2003.
- 10) 川村彰, 姫野賢治, 藤原隆, 秋本隆: 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, Vol.2, pp.23-28, 1997.
- 11) 榊原進: ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, 1995.
- 12) Sayood, K.: Introduction to Data Compression, Morgan Kaufmann Publishers, 2000.
- 13) Kawamura, A., Shimeno, S., Himeno, K., Komatsubara, A. and Hagiwara, T.: Study on Application of the Multiresolution Analysis to Road Profile Evaluation, Proceedings of the 3rd International Symposium on the Environmental Impact of Road Unevenness, pp.121-132, 1999.
- 14) Oguri, N., Himeno, K., Kawamura, A. and Nakamura, R.: Application of Wavelet Analysis on Evaluation of Roughness of Pavement Surfaces, Proceedings of the 4th International Symposium on Pavement Surface Characteristics of Roads and Airfields, pp.57-66, 2000.
- 15) 川村彰: ウェーブレット解析と路面性状評価, 舗装, Vol.35, No.3, pp.25-28, 建設図書, 2000.
- 16) 福田晃一, 川村彰: 多重解像度解析を用いた路面プロファイル評価について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.54, pp.364-365, 1999.
- 17) Kawamura, A., Takahashi, M. and Inoue, T.: Basic Analysis of measurement Data from Japan in PIARC EVEN Project, Transportation Research Record, No.1764, pp.232-242, 2001.
- 18) 川村彰: PIARC路面性状国際共通試験報告, 北の交差点, Vol.4, pp.34-35, 北海道道路管理技術センター, 1998.
- 19) Wolfram, S.: The Mathematica Book Fourth Edition, 東京書籍, 2000.
- 20) Walls, J.H., Houbolt J.C. and Press H.: Some measurements and power spectra of runway roughness, NACA Langley Technical Note, No.3305, 1954.
- 21) 芦野隆一, 山本鎮男: ウェーブレット解析 誕生・発展・応用, 共立出版, 1997.
- 22) Sayers, M.W. and Karamihas, S.M.: The Little Book of Profiling - Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles -, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1997.
- 23) 三上直樹: デジタル信号処理の基礎 はじめて学ぶデジタルフィルタとFFT, CQ出版社, 1998.
- 24) 辻井重男, 鎌田一雄: デジタル信号処理, 昭晃堂, 1990.
- 25) 石川康宏: 臨床医学のためのウェーブレット解析, 医学出版, 2000.
- 26) Chui, C.K.: Introduction to wavelets, Academic Press, New York, 1992.
- 27) Daubechies, I.: Ten Lectures on Wavelets, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.
- 28) 多田宏行編: 大学土木 道路工学, オーム社, 1998.
- 29) 谷村富男: ヒューマンエラーの分析と防止 不安全行動・作業ミスはなぜ起こるか, 日科技連出版社, 1995.
- 30) Daubechies, I.: Orthogonal Bases of Compactly Supported Wavelets, Communications On Pure & Applied Mathematics, Vol.41, pp.909-996, 1988.

(2003. 4. 24 受付)

STUDY ON THE SELECTION METHOD OF WAVELET BASIS FUNCTION FOR THE DATA PROCESSING OF ROAD PROFILE

Tatsuo SHIRAKAWA, Akira KAWAMURA, Takashi NAKATSUJI
and Masaki KAMIURA

As to the data processing of road profile, discrete wavelet transform (DWT), which enables the data to be divided and downsampled by operating a localized basis function, has drawn unprecedented attention. However, the DWT has a disadvantage that its output results depend on the basis function. In this paper, we study influence of the basis functions on output characteristics of the profile data obtained by the PIARC Evenness Experiment. As findings of this study, it is cleared that the basis function which has linear phase characteristics is optimum for stabilizing the outputs after decomposition of the data.