

I-22 ウェーブレットパケット変換を用いた路面プロファイルデータ処理

STUDY ON THE DATA PROCESSING OF ROAD PROFILE USING THE WAVELET PACKET TRANSFORM

白川 龍生¹川村 彰¹中辻 隆²上浦 正樹³

Tatsuo SHIRAKAWA

Akira KAWAMURA

Takashi NAKATSUJI

Masaki KAMIURA

【抄録】 ウェーブレット変換 (WT) はデータを空間及び周波数領域で同時識別する解析法であり、近年、路面性状評価の新たなツールとして用いられている。しかし、WTは周波数分解性能が高周波領域で劣化するため、特定の周波数帯域の検出は困難である。ウェーブレットパケット変換 (WPT) はこの点を改良したものであり、周波数帯域を一定の精度で分解することができる。本研究はWPTを路面プロファイルデータに対して適用し、舗装マネジメントにおけるWPTの有効性について考察した。PIARC EVENデータを用いて分析した結果、WPTは路面平坦性など解析対象周波数帯が広範囲かつ高次の分解を要する場合、特に有効であることがわかった。

【Abstract】 Wavelet transform (WT) is a signal processing method to distinguish of the data at space and frequency domains simultaneously, and it is being used as a new tool for road profile evaluation. However, WT has the problem that the resolution of frequency deteriorates quickly in high frequency domain. Therefore a part of frequency ingredient is too difficult to detect spatial transition of change. In recent years, wavelet packet transform (WPT) has attracted attention in various fields as a method, which improved WT. This study applied WPT about road roughness, and compared and considered the analysis result of WT and WPT. As a result of analyzing by use of the PIARC EVEN data, WPT is considered to be the effective analysis method when multi-level decomposition is required such as road roughness.

【キーワード】 ウェーブレットパケット変換, 路面プロファイル, PIARC EVENデータ

【Keywords】 Wavelet Packet Transform, Wavelet Transform, Road Profile, PIARC EVEN data

1. はじめに

道路の路面性状は、車の操縦性、乗り心地など道路利用者の安全性及び快適性に関わる諸問題と密接に関わっており、路面性状評価の基礎となる路面縦断プロファイル（以下、「路面プロファイル」という）データ処理方法の確立は重要な課題である^{1), 2)}。

路面プロファイルの波状特性解析は、フーリエ解析及びパワースペクトル密度（以下、「PSD」という）等を利用した周波数分析が一般的であり、PSDによる路面凹凸の区分は、ISOなどで基準化が試みられている。しかしながら、空間領域のデータを周波

数領域へ変換することにより、路面上に生ずる凹凸の発生位置に関する情報は不明確となる。また、このような路面のPSDは局在する路面凹凸の影響により、平均的な路面プロファイル特性が歪められて表現される場合がある^{1), 3), 4)}。

このため、路面プロファイル上に局在する凹凸について、発生位置及び周波数情報を同時識別する方法が求められてきたが、近年これを効率的に実現する分析方法としてウェーブレット変換（以下、「WT」という）が注目されるようになった^{1), 3-6)}。

WTは周波数領域で信号を表現するフーリエ変換

1: 北見工業大学工学部土木開発工学科 〒090-8507 北見市公園町165, Tel: 0157-26-9429

2: 北海道大学大学院工学研究科 〒060-8628 札幌市北区北13条西4丁目

3: 北海学園大学工学部土木工学科 〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目

の性質に加え,変動の空間的推移も同時に把握できるため,現在,音響・画像信号処理をはじめ,数多くの工学的分野で用いられている^{1),7),17)}.

路面性状評価へのWTの適用に関する研究としては,川村らの研究が代表的である.この研究では,路面プロファイルの測定データから特定のラフネスデータ情報を高精度で抽出することを目的にWTによる空間周波数解析及び多重解像度解析が行われており,従来困難であった路面プロファイル上に局在する損失データの処理,評価に有効であることが示された¹⁾.

しかし,WTは空間領域の分解性能は高い一方,周波数領域の分解性能は高周波数領域で急速に劣化するため,特定の周波数成分における変動の空間的推移の検出は困難である.路面の平坦性のように,解析対象となる周波数帯域(以下,「WN」とする)が広範囲(WN=0.02~20m⁻¹)かつ高次の分解を要する場合,この問題が顕著となる^{7),18),19)}.

そこで本研究では,高周波成分の分解性能を高めたWTとして考案されたウェーブレット packets 変換(以下,「WPT」という)を路面プロファイルデータ処理に適用し,舗装マネジメントにおける有効性について考察した^{8),12),18),20)}.

本研究は主として以下の2点に着目した.

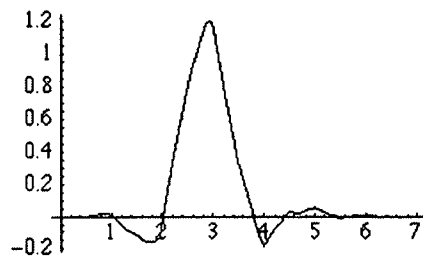
- (1) 路面プロファイルデータ処理に適した分解ツリーの構成について
- (2) 分解レベルが高次の場合の周波数分解性能について

なお路面プロファイルデータは,1998年に世界道路協会(以下,「PIARC」という)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^{21),22)}.データの処理は主としてWolfram Research社のMathematicaを用いた^{7),23)}.

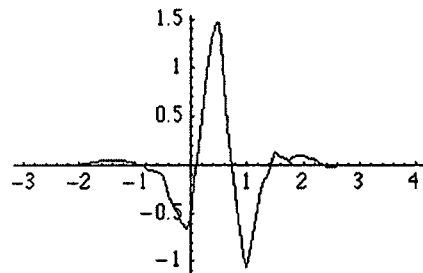
2. ウェーブレット packets 変換の概要

WTは,入力データの周波数帯域(角周波数0~ π の範囲)を低域及び高域通過フィルタによって2等分し,低域通過成分についてダウンサンプリング(解像度を1/2倍にする)演算を同時に展開する⁷⁾⁹⁾.演算式を式(1)に示す.

$$\phi_f^{(m)}(t) = \sum_k c_{m-1,k} \phi_{m-1,k}(t) + \sum_k d_{m-1,k} \varphi_{m-1,k}(t) \quad (1)$$



(a) スケーリング基底関数
(横軸:t, 縦軸: $\phi_{m-1,k}(t)$)



(b) ウェーブレット基底関数
(横軸:t, 縦軸: $\varphi_{m-1,k}(t)$)

図-1 スケーリング及びウェーブレット基底関数 (Symlet N=4の例)

$\phi_f^{(m)}(t)$ は m 次における入力データの近似関数であり,フィルタ係数(信号を観測する際の基準となる重み係数)と基底関数(信号を抽出する場合の単位)とのたたみ込み積分の和によって表される.ここで, c_{m-1} は低域通過フィルタ係数, $\phi_{m-1,k}(t)$ はスケーリング基底関数を示し, $\phi_f^{(m)}(t)$ の低域通過成分を構成する.また, d_{m-1} は高域通過フィルタ係数, $\varphi_{m-1,k}(t)$ はウェーブレット基底関数を示し, $\phi_f^{(m)}(t)$ の高域通過成分を構成する.ウェーブレット基底関数は $\phi_f^{(m)}(t)$ と $\varphi_{m-1,k}(t)$ の補空間であり,スケーリング基底関数に対し,式(2)の直交条件が課される.

$$\langle \phi | \psi(\cdot - n) \rangle = 0 \quad (2)$$

スケーリング及びウェーブレット基底関数の例 (Symlet N=4) を図-1に示す.

WTによる分解過程の概念図(分解ツリー)を図-2に示す.WTは粗い全体像を分析する場合には有効であるが,全域の周波数に関して詳細な分析が必

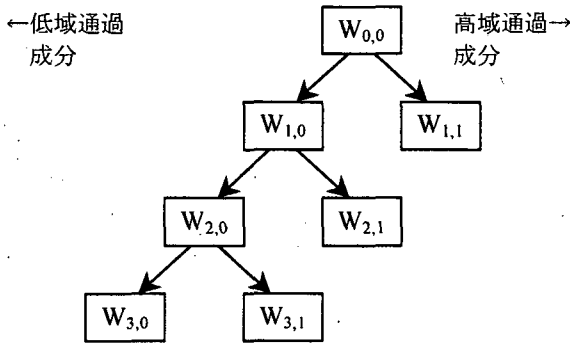


図-2 ウェーブレット変換の分解ツリー

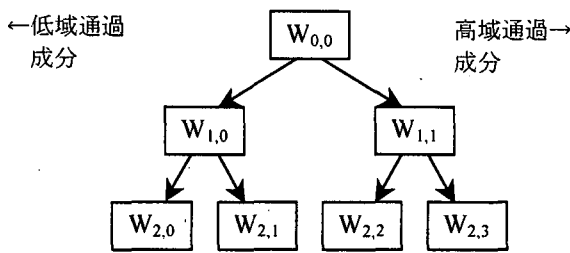


図-3 ウェーブレットパケット変換の分解ツリー

要な場合は、高域通過成分に対しても分解演算を施した方がよい。WPTはこの点を考慮したものであり、図-3に概念図を示す^{8),12),20)}。低域及び高域通過成分について式(1)を展開し、階層構造を形成することによって、周波数帯域を一定の精度で細分化できる²⁰⁾。

3. 路面プロファイルデータ処理に適した分解ツリーの構成

周波数帯域をWPTによって分解する場合、構成要素数は図-3のように分解レベルの 2^n で増加するため、WTに比べ演算は複雑である。このことから、周波数帯域分解後の用途に応じたツリーを構成することが望ましい^{8),20)}。

ここで、路面の基礎的な特性としては、幾何形状、平坦性、テクスチャなどが挙げられるが、道路利用者の安全性及び快適性に最も関係のある特性としては、 $WN=0.02\sim 20\text{m}^{-1}$ の帯域に属する「平坦性」と考えられている。PIARCの路面性状に関する技術委員会C1により提案された波状特性分類によると、この周波数帯域は乗り心地、騒音、燃費、車のダメージなどVOC (Vehicle Operating Costs) と称される車両の走行費用に関係している。このような背景から、平坦性測定の重要性を認識し、現存する路面の縦横断プロ

ファイル測定手順を比較し、相互に関連づけるためにEVEN試験が実施された^{2),21),24)}。

本研究では、道路利用者に最も影響を与える平坦性を研究対象に設定し、入力データとしてEVEN試験の評価基準となる真のプロファイル（以下、「True Profile」という）を用いた。

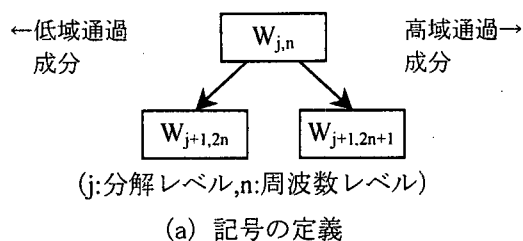
True Profileとは水準測量結果及び低速測定装置による測定結果から構成されたデータであり、サンプリング間隔は $\Delta t=0.025\text{m}$ である。したがって、最大で $WN=20\text{m}^{-1}$ （ナイキスト周波数）まで分析が可能である^{2),21),24)}。

平坦性として定義される周波数帯域は、 $WN=0.02\sim 20\text{m}^{-1}$ と幅広いことから、構造物付近に生ずる段差から波長50m程度の縦断凹凸に至るまで、数多くの路面損傷が含まれる。このため、評価対象の周波数帯域をさらに特定することとした^{2),25),26)}。

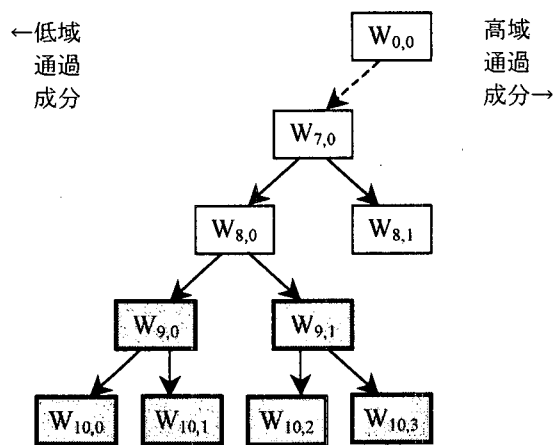
WT及びWPTは、分解過程がツリー状に構成され、全ての分解レベルで分解・再構成のアルゴリズムが共通のため、計算の効率がよく、このような解析に適している^{7),8)}。一方、一般的なデジタルフィルタによる帯域分割は、通過域、遮断域などを各分解レベルで逐次設定しなければならないほか、幾何形状など長波長データを抽出するためのローパスフィルタを設計する場合、オーバーサンプリングの影響により通過域の振幅特性が不安定となる場合があるなど、WT及びWPTに比べ計算効率は低い²⁷⁻³²⁾。

WTにおける帯域分割の問題点としては、高域通過成分の波長帯が 2^n で拡大する点である。例えば分解レベルを7段階と仮定すると、 $\Delta t=0.025\text{m}$ の場合、境界周波数は $f_7=20/2^7=0.156\text{m}^{-1}$ となり、帯域は低域通過成分が $WN=0\sim 0.156\text{m}^{-1}$ ($\lambda=6.4\text{m}$ 以上)、高域通過成分が $WN=0.156\sim 0.312\text{m}^{-1}$ ($\lambda=3.2\sim 6.4\text{m}$)に2分割される。分解を1段階進めると、 $f_8=20/2^8=0.078\text{m}^{-1}$ となり、帯域は低域通過成分が $WN=0\sim 0.078\text{m}^{-1}$ ($\lambda=12.8\text{m}$ 以上)、高域通過成分が $WN=0.078\sim 0.156\text{m}^{-1}$ ($\lambda=6.4\sim 12.8\text{m}$)となるが、高域通過成分の波長帯が分解レベル7段階に比べ対象範囲が2倍に増加する^{7),19),20)}。

このことは、初期の分解レベルであれば影響は小さいが、分解の深度化に伴い十分な考慮を要する。特に路面プロファイルデータ処理においては、自動車の乗り心地に影響する波長（自動車のバネ上固有振



(a) 記号の定義



(b) 分解ツリーの構成

図-4 高分解レベルにおける分解ツリーの構成例

動数 1.2 ~ 1.5Hz に相当) が $\lambda = 18.5 \sim 23.1\text{m}$ ($V=100\text{km/h}$ の場合) と比較的長い波長を扱うため, WT では路面と車両の相互に生ずる力学的作用を詳細に分析できない場合が想定される³³⁻³⁵⁾.

この問題に対し, WPT は高域通過成分に対しても分解演算を施し必要な周波数帯域 (または波長帯) の抽出が可能であるため, 平坦性のように対象周波数帯が幅広い場合に効果が期待できる。

本研究では, 分解レベルが高段階 (9~10段階) に達した場合を例に WPT の適用性について評価する。構成した分解ツリーを図-4 に示す。図中, 太枠で示す要素が対象周波数帯域である。

4. 路面プロファイルデータに対する

ウェーブレット packets 変換の適用性

本章では, 3章で構成した分解ツリー (図-4) に基づき, WT 及び WPT を路面プロファイルデータに対して適用し, データ処理手法としての WPT の有効性について考察する。

解析に用いたデータは, EVEN 試験のうち日本 (北海道) における試験結果の一部 (区間 No.12) を用いた (図-5, 高速道路の路面プロファイル)。この区

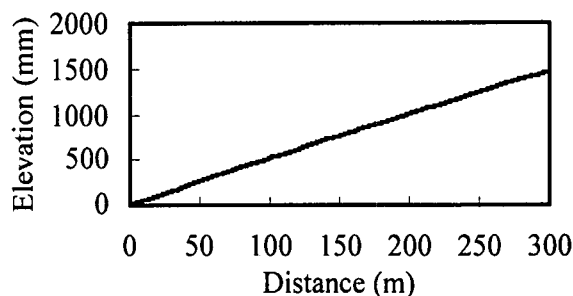


図-5 解析対象データ (True Profile)

間の IRI (国際ラフネス指数) は 2.40mm/m である。IRI とは路面プロファイル上を走行した際の車の振動応答に関連する指標であり, この区間の場合は「空港滑走路及び高速道路」または「新しい舗装」のレベルに分類される^{2),21),24),33)}。

解析対象データは道路勾配など長波長成分の影響が大きく, 局所的な路面凹凸を識別することは困難である。このため, フィルタリングによってこれらの影響を数学的に除去する。この場合, $\Delta t=0.025\text{m}$ ($WN=20\text{m}^{-1}$) であるため, WT によって波長 $\lambda=50\text{m}$ 程度以上の長波長を識別するためには, 少なくとも分解レベルは 10 段階まで必要である^{21),33)}。

分解レベルが 8 段階以上 ($WN=0 \sim 0.078\text{m}^{-1}$, $\lambda=12.8\text{m} \sim \infty$) の解析結果を図-6 に示す。なおスケール及びウェーブレット基底関数は, 直交基底を有し, 位相がほぼ直線で非対称性を最小限となるように設計された Symlet $N=4$ を用いた⁷⁻⁹⁾。

$W_{8,0}$ は, WT によって低域及び高域に分解すると, $W_{9,0}$ ($WN=0 \sim 0.039\text{m}^{-1}$, $\lambda=25.6\text{m} \sim \infty$), $W_{9,1}$ ($WN=0.039 \sim 0.078\text{m}^{-1}$, $\lambda=12.8 \sim 25.6\text{m}$) となる。前述のように, 分解レベルが高次になるに伴い高域通過成分の波長帯が 2^n で拡大するため, $W_{9,1}$ は $\lambda=12.8 \sim 25.6\text{m}$ と広範囲の成分が含まれる。自動車のバネ上共振領域は, $V=100\text{km/h}$ の場合 $\lambda=18.5 \sim 23.1\text{m}$ であるため, $W_{9,1}$ の成分をさらに分解し, 対象範囲を特定することが望ましい。この演算を WPT によって実施した (図中, 太い矢印で表示)。

$W_{9,1}$ を分解すると, $W_{10,2}$ ($WN=0.039 \sim 0.059\text{m}^{-1}$, $\lambda=17.1 \sim 25.6\text{m}$), $W_{10,3}$ ($WN=0.059 \sim 0.078\text{m}^{-1}$, $\lambda=12.8 \sim 17.1\text{m}$) と求められる。

このうち, 自動車のバネ上の振動に関係するものは $W_{10,2}$ であるが, 図-6 に示すように, この周波数帯域の成分は他に比べ小さく, フラットであることが認

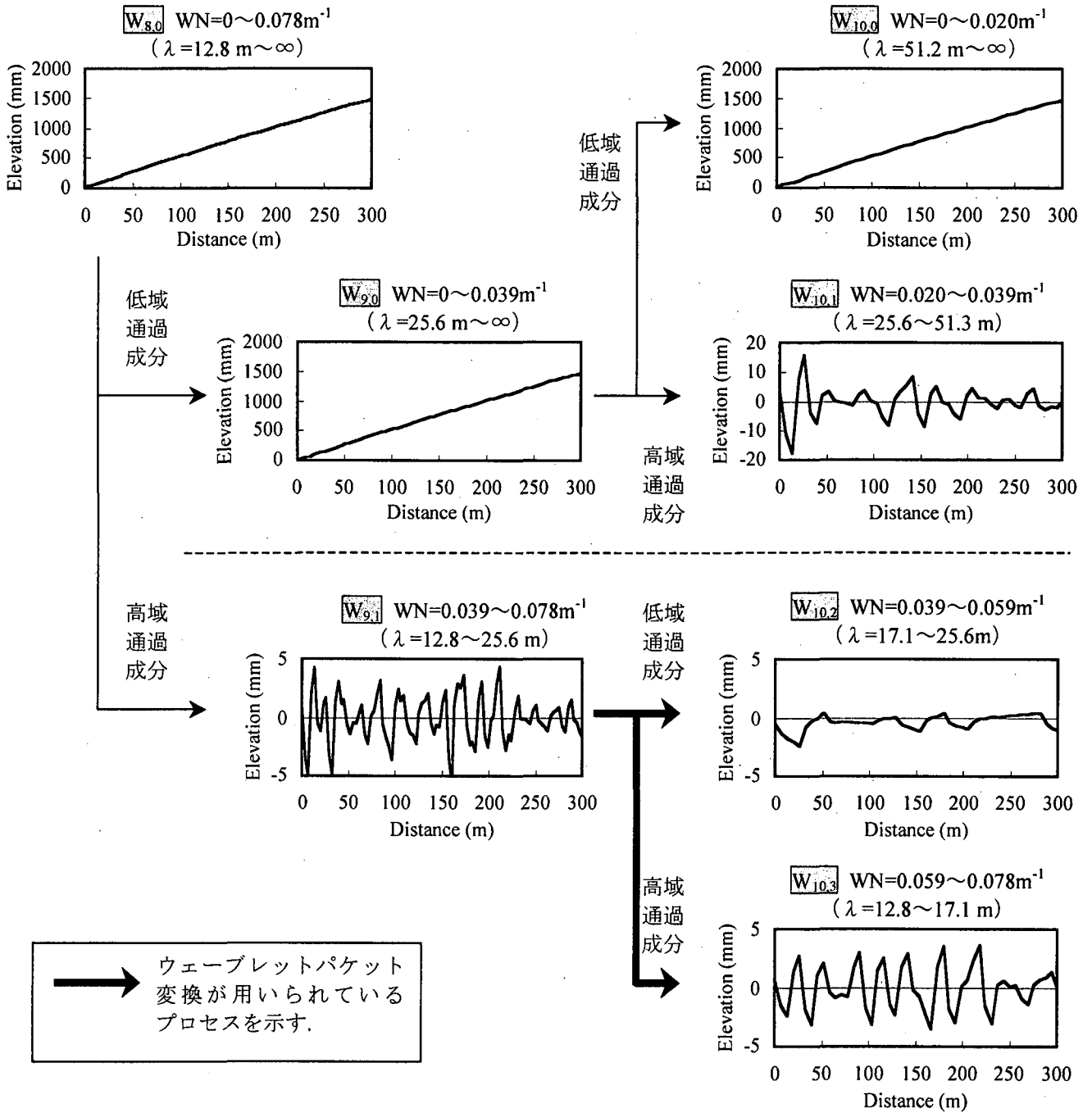


図-6 ウェーブレット packets 変換を用いた路面プロファイルデータ処理 (分解レベル8~10段階について)

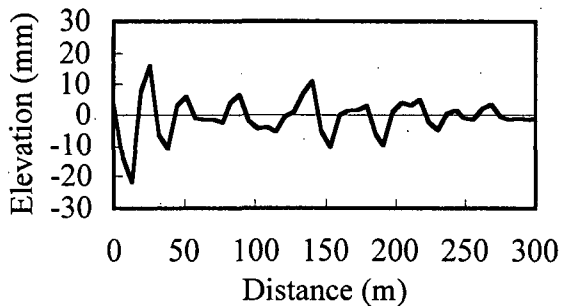


図-7 分解成分の再構成例 (WN=0.020~0.079m⁻¹)

められる.したがって,この高速道路上を走行する自動車の乗り心地は良好なレベルが期待できる^{33),34)}.

従来のWTでは, W_{9,1}をW_{10,2}及びW_{10,3}に分解する処理は行わないため, W_{9,1}の平坦性が悪い場合,当該区間は修繕を要する区間として分類された可能性があるが, W_{10,2}及びW_{10,3}を算出することによって,少なくとも自動車の乗り心地に影響する周波数帯域 (W_{10,2}) については修繕を要しないと判断するこ

とができる。

この考え方は、路面性状調査の自動化などにより、測定データに基づいた維持修繕の判断を自動的に行なわなければならない場合、特に有効と考えられる。

10段階の分解によって、波長約50m以上の長波長は $W_{10,0}$ において識別される。WPTは、式(1)の逆演算によって再構成が可能であるため、 $W_{10,0}$ を除く $W_{10,1} \sim W_{10,3}$ を再構成すると、図-7のような波形が得られる。この波形は $WN=0.020 \sim 0.079m^{-1}$ ($\lambda=12.8 \sim 51.3m$)の周波数情報を有し、 $W_{8,0}$ と $W_{10,0}$ の差に等しい。すなわち、 $W_{8,0}$ にハイパスフィルタ処理を施し、 $WN=0.020m^{-1}$ 以上 ($\lambda=51.2m$ 以下)の成分を抽出した値と同等の結果が得られる。これはデジタルフィルタなどの方法でも実現可能ではあるが、WPTはフィルタリングと同時にダウンサンプリング(データの間引き)を行なうことができるため、従来法に比べ、データの圧縮性に優れている^{7),8)}。

道路勾配など、長い波長成分のサンプリング間隔は、ナイキスト周波数以上の情報量を有しているとすれば、実用上は数m単位であっても十分な精度を示すと思われる。ナイキスト周波数近傍における振幅と位相の変化を防止するため、情報として必要な最短波長の1/10でサンプリングをする場合、 $W_{10,0}$ の周波数帯域では $\Delta t=5m$ でよい。したがって、データ量は約1/200となり、WPTは情報量の圧縮の観点からも有利である。さらにデータとして不要な周波数帯域(ノイズなど)を除去するとさらに圧縮性が向上する^{32),36)}。

5. まとめ

本研究は、舗装マネジメントの観点から、路面プロファイルデータ処理へのWPTの適用性について考察したものであるが、特にデータ分解結果の波長域拡大を抑制する目的でWPTを適用した例としては最初の報告になると思われる。

本研究を要約すると以下ようになる。

- (1) WPTは、データを空間(時間)及び周波数領域で同時識別し、高周波成分の分解性能が高い方法である。このことから、WPTはWTより細かい周波数の解析に適しているが、一方でこれを低周波成分の高次分解過程で応用すると、分解結果の対象波長域の拡大を抑制する効果もあることがわか

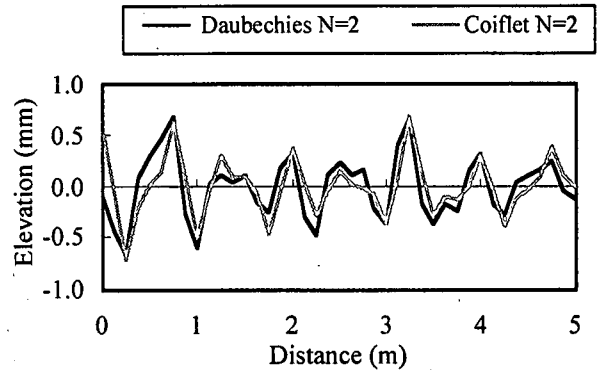


図-8 基底関数の種類による出力波形の相違

った。特に路面の平坦性など、対象周波数帯域の範囲が広い現象を解析する場合に効果的である。

- (2) WPTは、分解過程でフィルタリングと同時にダウンサンプリングが行われるため、サンプリング間隔の変更処理を要さない。このため、道路の勾配など、長波長データを扱う場合は合理的である。
- (3) WPTは、アルゴリズムは全ての分解レベルで一定であり、スケール及びウェーブレット基底関数を選定した時点でフィルタ係数など演算に必要な数値が決定する。このことから演算が高速であり、応用において有利である(ただし分解ツリーの構成が複雑なものは除く)。フィルタリングなど、従来の信号処理方法では、各分解レベルで逐次フィルタの設計を行う必要があり、周波数によってはオーバーサンプリングの影響によって通過域の特性が安定しない場合がある。
- (4) 分解ツリーを構成する場合の注意点としては、構成要素数が分解レベルの 2^n で増加するため、WTに比べて演算が複雑となる点である。このため、事前に周波数帯域分解後の用途を明確に示し、目的の周波数帯域に特化した分解ツリーを構成することが望ましい。

WPTにおける今後の課題としては、解析に用いるスケーリング及びウェーブレット基底関数の種類の選定が挙げられる。図-8のように、基底関数の種類により出力波形に相違点が生じるため、解析対象データの特徴を十分に考慮したほうがよい。基底関数の種類による影響については、今後の報告が期待される^{6),19)}。

今後の展望として、WPTはWTに比べ計算がやや複雑となることから、日常の維持管理（局所的な異常値の発生箇所の特定など）では主としてWT変換を用い、特定周波数帯域の分析が必要な場合にWTPを併用する方法が比較的合理的な方法であり、本研究のまとめにあたって提案したい。

参考文献

- 1) 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, 第2巻, pp.23-28, 1997.
- 2) 川村彰 : 路面の評価(1)-平坦性に着目して-, 舗装, 36-8, pp.31-35, 建設図書, 2001.
- 3) Akira Kawamura et al : Study on Application of the Multiresolution Analysis to Road Profile Evaluation, 3rd International Symposium on the Environmental Impact of Road Unevenness, pp.121-132, 1999.
- 4) 川村彰 : ウェーブレット解析と路面性状評価, 舗装, 35-3, pp.25-28, 建設図書, 2000.
- 5) 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, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, pp.364-365, 1999.
- 6) 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, 第59号, pp.724-727, 2003.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Khalid Sayood : Introduction to Data Compression, Morgan Kaufmann Publishers, 2000.
- 10) Gilbert G. Walter (榊原進, 萬代武史, 芦野隆一訳) : ウェーブレットと直交関数系, 東京電機大学出版局, 2001.
- 11) 新島耕一 : ウェーブレット画像解析, 科学技術出版, 2000.
- 12) 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.
- 13) 前田肇, 佐野昭, 貴家仁志, 原晋介 : ウェーブレット変換とその応用, 朝倉書店, 2001.
- 14) R.K. ヤング (袋谷賢吉訳) : ウェーブレット信号処理とシステム推定への応用, トッパン, 1997.
- 15) 新井康平 : ウェーブレット解析の基礎理論, 森北出版, 2000.
- 16) JJ. Benedetto, M.W. Frazier (山口昌哉, 山田道夫訳) : ウェーブレット 理論と応用, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1995.
- 17) 斎藤兆古 : Mathematicaによるウェーブレット変換, 朝倉書店, 1996.
- 18) 野末尚次 : 最近のデータ処理技術, RRR, vol.54, no.11, pp.10-11, 1997.
- 19) 白川龍生, 川村彰, 上浦正樹, 中辻隆 : 軌道メンテナンスへのウェーブレット理論の適用と可能性について, 土木計画学研究・講演集, 第26巻, No.194, 2002.
- 20) Y.T. Chan : WAVELET BASICS, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- 21) 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, 第8巻, pp.15.1-12, 2002.
- 22) 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.
- 23) Stephen Wolfram : The Mathematica Book Fourth Edition, 東京書籍, 2000.
- 24) Akira Kawamura et al : Basic Analysis of measurement Data from Japan in PIARC EVEN Project, TRB 80th Annual Meeting, 2001.
- 25) 多田宏行編 : 大学土木 道路工学, オーム社, 1998.
- 26) 土木学会土構造物および基礎委員会「舗装工学」編集委員会編 : 舗装工学, 土木学会, 1995.
- 27) Fred J. Taylor : Digital Filter Design Handbook, Maecel Dekker, inc., 1983.
- 28) 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.
- 29) 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.
- 30) 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.
- 31) 辻井重男, 鎌田一雄 : デジタル信号処理, 昭晃堂, 1990.

- 32) 尾知博：デジタル・フィルタ設計入門 -各種フィルタの原理とDSPによる実現-,CQ出版社,1990.
- 33) 景山克三,景山一郎：自動車力学,理工図書,1984.
- 34) 社団法人自動車技術会編：自動車技術ハンドブック 試験・評価編,自動車技術会,1991.
- 35) Michael W.Sayers and Steven M.Karamihas : The

Little Book of Profiling -Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles-,The University of Michigan Transportation Research Institute,1997.

- 36) 日野幹雄：スペクトル解析,朝倉書店,1977.