

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

川村 彰¹, 姫野賢治², 藤原 隆³, 秋本 隆⁴

¹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 北見市公園町 165)

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 東京都文京区春日 1-13-27)

³正会員 函館工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒042 函館市戸倉町 14-1)

⁴正会員 ニチレキ株式会社北海道支店 (〒061-14 北海道恵庭市北柏木町 3-34)

路面の性状評価は、車と路面の相互作用に関わる諸問題と密接に関わるとともに、舗装のマネジメントシステムを構築するうえで、極めて重要なファクターとなる。本研究は、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ためのデータ処理手法として、近年、信号処理分野で着目されているウェーブレット理論を初めて路面評価問題に適用し、空間周波数分析、多重解像度解析により、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を明らかにした。同時に、連続ウェーブレット変換により、路面プロファイルの自己相似性に関する考察も行った。

Key Words: road profile, road surface evaluation, wavelet analysis, multi-resolution, self-similarity, space-frequency analysis

1. はじめに

路面プロファイル測定に関しては、近年、超音波やレーザー波を利用した非接触式プロファイルメータの開発により、高速で精度の良いデータの取得が可能となっており、これらのデータは、舗装工学の分野では主として、舗装のマネジメントに利用されている。この場合、データから路面の波状特性を解析する際には、従来、フーリエ関数や、パワースペクトル密度関数 (PSD) の利用により周波数分析される方法が一般的であり、PSD による路面凹凸の区分は ISO (国際標準化機構) や VDI (ドイツ技術者協会) で標準化が試みられている。

しかしながら、これらの規準は、縦断プロファイルの統計的性質が定常確率過程に基づくガウス分布であると判断できる場合には有効であるが、路面上にポットホール、わだち掘れ、段差などの局所的損失が存在する場合、空間領域のデータをフーリエ変換により周波数領域へ移動させると、これらある特定の現象の発生位置に関する情報は、位相項の中に隠れて、距離ごとに変化する路面水準の状態が明確

に表現されなくなる。また、このような路面の PSD は局在する路面損失のために、平均的路面プロファイル特性が歪められて表現されることになる。

本研究で扱うウェーブレット (以下 WT と呼ぶ) 理論は、数学的理論の体系化に伴い、工学的分野でも地震動解析、音響・画像信号処理、非破壊探査等に適用されるなど、近年様々な分野でその活用が期待されており、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て、変動の時間的 (空間的) 推移も同時に把握できるという特徴があることから、これまで困難であった時間 (空間) 特性及び周波数特性の同時解析 (空間周波数分析) を可能にする優れた性質を有している。

本報告では、WT 理論の概要を説明すると共に、局在する路面損失を含む各種路面プロファイルの実測データに対して、WT 解析を行い、路面プロファイルのデータ処理、評価問題への WT 理論の適用性について検討を行った。

本研究において行った路面プロファイル特性の検討項目は、以下の3点である。

1) 空間周波数分析によるプロファイル上の異常値

の検出

- 2) プロファイルに起因する車両振動データのノイズ除去
- 3) 路面プロファイルの自己相似特性の検討

1), 2) では, WT 関数による空間周波数分析により, 路面の縦断プロファイル上に局在する損失箇所の特定を行うと同時に, 多重解像度分析を用いて, 路面走行時の車両振動加速度データに含まれるノイズ成分の除去を行っている。また, 一般的な舗装路面のプロファイルは, 自己相似性を有することが知られており¹⁾, これまでフラクタル次元により解析がなされてきている。3) では, 連続 WT 変換が, 解析したい関数の自己相似性検出にこれまで利用されていることから, 各種路面プロファイルごとに自己相似性の検討を行った。なお, 本研究では解析に用いるアナライジング WT には Daubechies の WT を用いている。本研究の WT 解析に当たっては, ワークステーション上で動作する数値計算用ソフトウェアの MATLAB²⁾と数式処理ソフトウェアの Mathematica³⁾を一部使用した。

2. ウェーブレット変換とその特徴

ウェーブレット (WT) は, 語源からも推察されるように信号データを生成するさざ波 (wavelet) を表す様々な関数の使われ方に関連した呼称であり, 1930 年代頃にあった概念であるが, Morlet により石油探索をするときの人口地震波の解析道具として, 最初に導入された⁴⁾。WT 変換とは, ある基本関数を基に, これをスケール変換ならびにシフト変換して求められる関数の組を基底とした積分変換である。このため, 基底関数は互いに相似の関係にあり, 解析したい関数の自己相似性が WT 変換係数のスケール依存性を見ることにより, 解析が容易になると共に, 空間的にも周波数的にも局在した関数を用いているので, 空間と周波数の両方の情報がある範囲内 (これをアドミッシブル条件という) で分析できる。これまでの研究では, 時系列データの処理が多いため, 時間周波数分析の名前が用いられているが, 本研究では路面プロファイルを扱うため, 空間周波数表現で示すことにする。WT 変換には, 大きく分けて 2 種類あり, それぞれ「連続 WT 変換」及び「離散 WT 変換」と呼ばれる。

(1) 連続 WT 変換

連続 WT 変換は, 次式で表され, 解析データにおける特定パターンの発生個所, 発生頻度あるいは他

のパターンの発生との相関関係について分析することが可能である。

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx \quad (1)$$

ここで, $\psi(x)$ は, 基本粗波であり, パラメータ a, b はそれぞれ単位長さ当たりの波形振動の周波数と, その存在位置を示している。

上式より, 空間関数 $f(x)$ の WT 変換された信号は, 実数 a, b をパラメータとする平面上の分布となり, a はスケールパラメータ, b は位置パラメータである。 a は, 周波数に関連し, 空間解像度の分析が可能となるため, b を操作することで解析のための ψ (これをアナライジング WT と称す) を空間的に移動させ, 信号の局所的な変動を把握できることから, 路面プロファイルの異常値検出を空間・周波数分布特性から行うことができると期待される。

(2) 離散 WT 変換

連続 WT 変換が, 信号の特性を導出するのに対して, 離散 WT 変換は計算機利用に適し, 数量的把握が可能となうえ, 連続 WT 変換と異なり, アナライジング WT が完全直交基底関数であるため, 信号のノイズ除去や異なる性質を持つ信号の分離・比較に適するため, Daubechies⁵⁾, Vetterli⁶⁾ らによって多重解像度解析でも利用されている。

離散 WT 変換は, パラメータ a, b と $\Psi(x)$ を離散化し, 信号を WT 級数に展開することにより達成される。すなわち, 離散化した $\psi((x-b)/a)$ は, 整数 j, k により,

$$\psi_{j,k}(x) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{x-2^j k}{2^j}\right) \quad (2)$$

で表される基底であり, これを用いて信号 $f(x)$ は次式により級数表現できる。

$$f(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k} \psi_{j,k}(x) \quad (3)$$

$$c_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\psi_{j,k}(x)} dx \quad (4)$$

ここで, $c_{j,k}$ は WT 係数と呼ばれる展開係数, “*” は, 複素共役を示し, j はスケールパラメータで解像度を表現し, k は $k/2^j$ により位置を表す。また, $c_{j,k}$ は, $f(x)$ と $\psi_{j,k}(x)$ との相関係数に相当し, その値は,

位置bにおいて信号f(x)に含まれる $\psi(x/a)$ の成分を示していることから、後述の多重解像度解析を用いて、周波数ごとに特定成分の検出が可能となる。

(3) 多重解像度解析

多重解像度解析は、フィルタ係数 $h(k)$ を用いた計算アルゴリズムとして定義され、直交 WT を用いて行われるが、Mallet ら⁷⁾ によって一般的枠組みが整備された解析手法であり、複数のスケールで信号の局所的平滑化を行って得られる階層的構造を持つデータを用いて、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。

多重解像度解析の数学的定義は、 $L^2(\mathbb{R})$ の閉部分空間列 V_j ($n \in \mathbb{Z}$) で以下の5条件を満足するものをいう。

$$1. \quad V_j \subset V_{j+1} \quad (5)$$

$$2. \quad \bigcap_{n=-\infty}^{\infty} V_j = \{0\}, \quad \bigcup_{n=-\infty}^{\infty} V_j \quad \text{は } L^2(\mathbb{R}) \text{ で稠密} \quad (6)$$

$$3. \quad f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2x) \in V_{j+1} \quad (7)$$

$$4. \quad f(x) \in V_0, \quad k \in \mathbb{Z} \Rightarrow f(x-k) \in V_0 \quad (8)$$

$$5. \quad \exists \phi(x) \in V_0 \quad \text{s. t.} \quad \{\phi(x-k); k \in \mathbb{Z}\} \quad (9)$$

は V_0 の正規直交基底

いま、適当なアナライジング WT を選択して、(2)式の離散 WT が正規直交系になったと仮定すると、(3), (4)式において、 j は2倍ごとの拡大・縮小のパラメータであるため、この展開の j に関する和は、倍々に解像度を上げながら関数 $f(x)$ を観察するプロセスに対応する。多重解像度解析では、この条件を満たすアナライジング WT を構成するためにスケールリングと称する基底関数 $\phi(x)$ を用いる。このとき、元信号 $f(x)$ の離散化表現は、次式のようになる。

$$d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \phi_{j,k}^*(x) dx \quad (10)$$

ここで、

$$\phi_{j,k}(x) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \phi\left(\frac{x-2^j k}{2^j}\right) \quad (11)$$

(10)式の $d_{j,k}$ は、スケールリング係数と呼ばれ、元信号の j 次の解像度の離散化表現である。 j 次以下の解像度のスケールリング係数、WT 係数は $d_{j,k}$ を用いて、

次式で表される。

$$d_{j+1,k} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(i-2k) d_{j,i} \quad (12)$$

$$c_{j+1,k} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} g(i-2k) d_{j,i} \quad (13)$$

上式に示されるように、繰り返し計算で求めることができる。上式の h と g は、それぞれスペクトルを高周波数帯域と低周波数帯域に分割する一連の帯域2分割フィルタであることから、データの分解が可能であると同時に次式により、再構成が可能となる。

$$d_{j,k} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(k-2i) d_{j+1,i} + \sum_{i=-\infty}^{\infty} g(k-2i) c_{j+1,i} \quad (14)$$

これらの性質を利用して、信号の階層的平滑化による検討が可能である。

3. 路面プロファイルの空間周波数分析による 路面上の損傷箇所の検出

WT 変換の路面プロファイル評価への応用への有効性を検討する際に、その第一の機能は不連続信号の検出である。WT変換は、信号の不連続を検知する能力があると推察されたためここでは、各種路面の空間周波数分析により、これらの異常値（路面プロファイルにおける局所的損失）の検出を試みる。解析に用いた路面は、北海道で一般的に見受けられる密粒度アスファルト舗装の縦断プロファイルである。測定データから、路面のラフネス性状、波状特性を検討する際には、従来は、路面高の標準偏差、IRI（国際ラフネス指数）、パワースペクトル分析等を用いて行われてきた。測定データに対して、(3)式により WT 変換した結果を **Fig. 1** に示す。空間的な分解能を有する周波数解析法を得るために、空間軸上で局在化した関数であるアナライジング WT を基本関数に選んで WT 変換を行うため、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、その選択は極めて重要である。本研究では、解析に用いたアナライジング WT は Daubechies WT⁸⁾ であり、信号を WT 変換した後の WT 係数のエネルギー的解釈が容易とされている。図のように、距離と周波数毎の平面から判断されるように、原波形では不明瞭な凹部の位置（図における○で囲った箇所）が、特定の周波数成分上で検知できる。

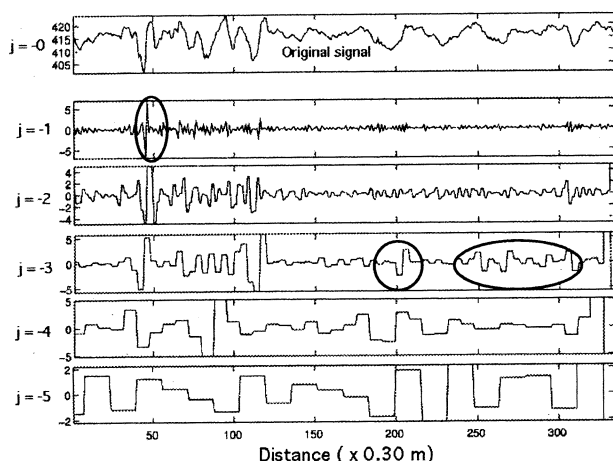


Fig.1 S-F domain representation of road profile

4. 多重解像度解析を用いたノイズの除去

路面プロファイルが、車の振動乗り心地、騒音、タイヤとの摩擦問題等に及ぼす影響を把握する場合、それぞれの問題に関係する路面周波数上で分析することが、問題の影響範囲や因果関係を明確にする上で有利である。その際、データによっては各周波数帯に含まれるノイズ成分を除去する必要がある場合がある。前述したように、多重解像度解析では信号のフィルタリングが可能であるため、ここでは悪路を走行した際の車体に作用する振動加速度に含まれるノイズ成分の除去について考察を行った。

解析に用いた路面プロファイルは、砂利路であり、測定に用いた車両は市場で使用されている 10t ダンプトラックとした。悪路を走行する場合、大型車のような多振動要素からなる車両では、路面入力が CAB やシート部などのパネ上振動系に伝わるまでに幾つかのノイズ成分が含まれることが予想される。本研究では、悪路の代表として砂利路に対して、多重解像度解析を行い、分解アルゴリズムにより (12), (13) 式からスケーリング係数, WT 係数を求め、乗り心地解析への応用を考慮し、解析対象周波数の低い範囲を処理する目的から、(14)式における WT 成分中の g 成分をノイズとして除去した。大型車のシート部に作用する上下方向加速度に対して解析した結果を Fig.2, Fig.3 に示す。

図より、原データから高周波成分が除去され、平滑化されているのが分かる。同一のデータに対して周波数成分上における除去箇所を解像度と共に示したのが、Fig.4 である。図における濃淡は明るくなるにつれて WT 係数の値が増加していることを示すが、空間一スケール解像度平面で見るとノイズ除去前後で係数が解像度に応じて変化しているのが明確

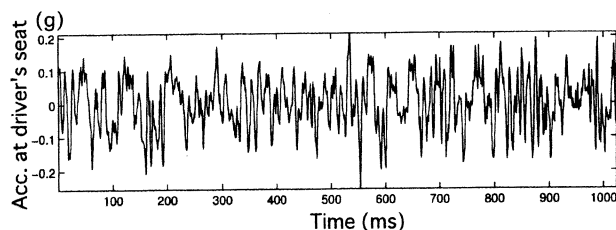


Fig.2 Vertical acceleration at driver's seat (original signal)

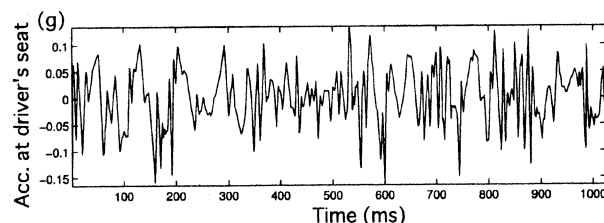


Fig.3 Vertical acceleration at driver's seat (denoised signal)

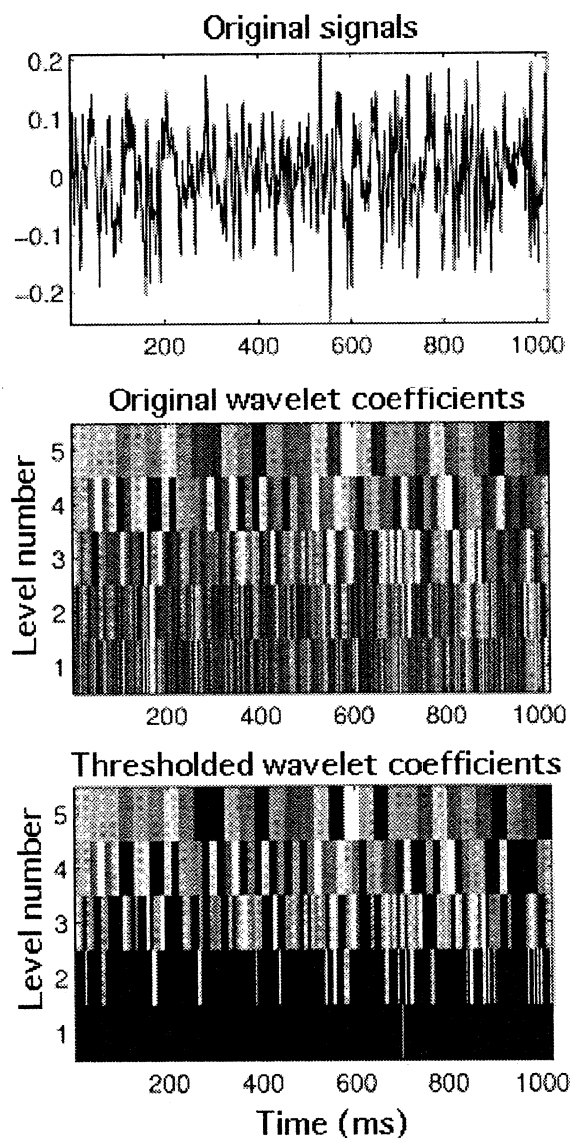


Fig. 4 Multiresolution signal decomposition

であり、高周波成分の除去されている様子が分かる。

5. 連続 WT 変換による路面プロファイルの自己相似性の検討

路面プロファイルは、ランダム信号ではあるが、従来、局所的損失の無い場合、定常不規則過程として統計的に処理されるとともに、自己相似集合（全体の形を相似凝縮した幾つかの部分から成り立っているような集合）を持つ特性面に着目し、フラクタル次元からも解析がなされてきている。しかしながら、従来の路面プロファイルに関するフラクタル解析は、ハウスドルフ次元⁹⁾ や相関次元¹⁰⁾を用いており、大域的な把握には向いているが、局在するデータの自己相似性解析には不向きである。WT は、WT 基底の各基底関数が、互いに相似かつ局在するために、局所的に自己相似性を呈するデータの抽出に適することが分かっている。路面プロファイルには空間的に眺めると、ある区間では激しい変動が生じている場合があり、そこでは、高い空間周波数の励起が期待される。この様なとき連続 WT 変換による「空間スケール」図を利用することにより、その位置、大きさ、範囲の特徴を表す特定のパターン検出が有効と思われる。

フラクタル図形 (Koch 曲線) に関して、連続 WT 変換により「空間スケール」表示したものが、Fig. 5 である。

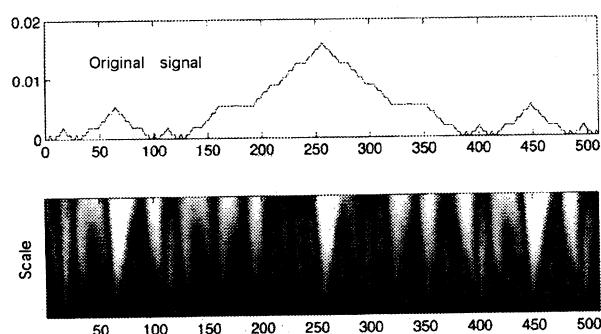


Fig. 5 Detecting self-similarity by use of fractal signal

図において、スケールごとに連続 WT 変換した値 ((1)式における $W(a, b)$) を位置に関して表示したものであり、値の大きさと位相をそれぞれ明暗と色相によって描いており、明るいほど値の大きい、すなわち、振幅の大きいことを示している。同じ明るさから形成されている等高線により輪が出現している中に、また同様の輪が出現するというように、自己相似性を有しているパターンが見受けられる。舗装路面と非舗装プロファイルに対して、連続 WT 変換したものを Fig. 6, Fig.7 に示す。

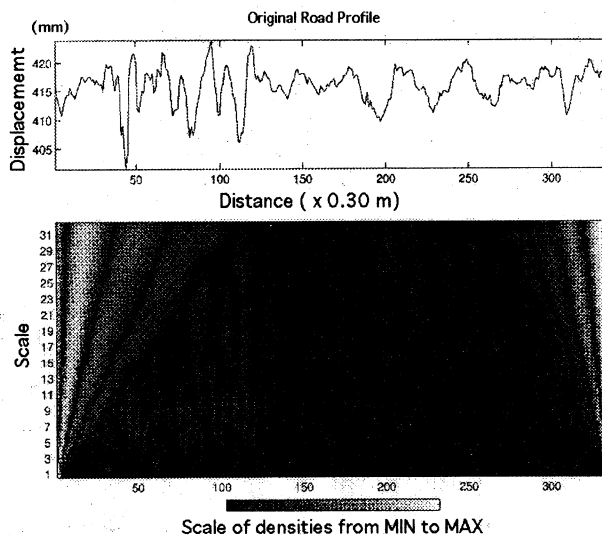


Fig. 6 Continuous wavelet analysis for general pavement surface (N=2)

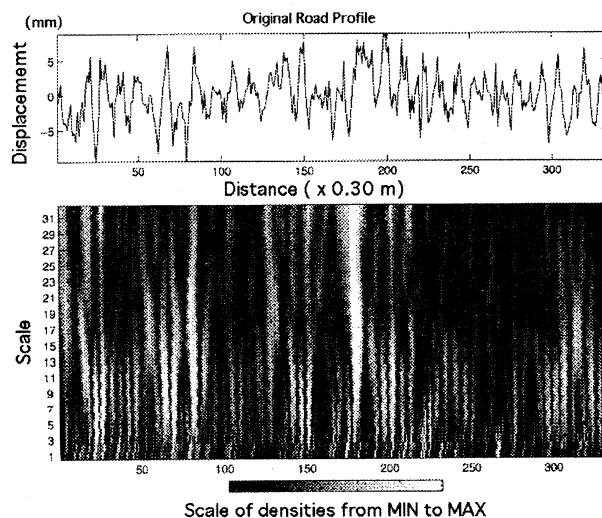


Fig. 7 Continuous wavelet analysis for gravel road surface (N=2)

Fig. 6 の舗装路では自己相似性が明瞭な箇所とそうでない箇所が、低空間周波数成分（長波成分）になるにつれて見受けられるのが分かる。これに対し、砂利路は、自己相似性を示している箇所の発見はこの程度の解像度では困難であるため、解像度を増加させて表示したのが Fig. 8 である。幾つかの類似パターンの出現が見受けられる。さらに、スケールは変えずに、アナライジング WT の生成次数を 1 上げたのが Fig. 9 である。このことは、解析する路面プロファイルに応じて、用いるアナライジング WT やスケールの設定が重要であることを意味しており、解析信号特性に応じた WT 選択のルーチン化について、今後の報告が期待される。

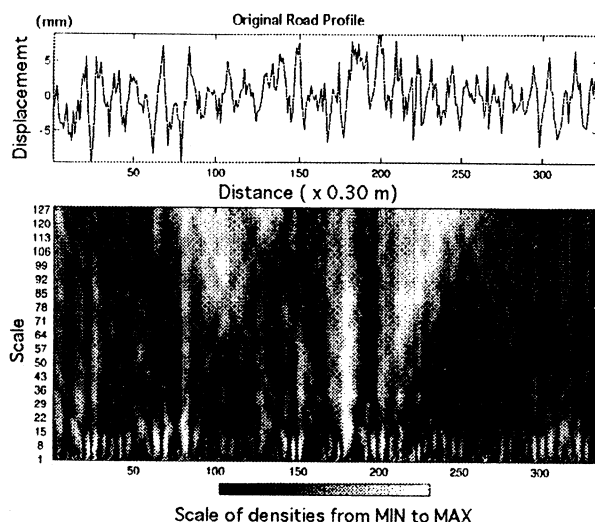


Fig. 8 Continuous wavelet analysis for gravel road surface (scale = 128)

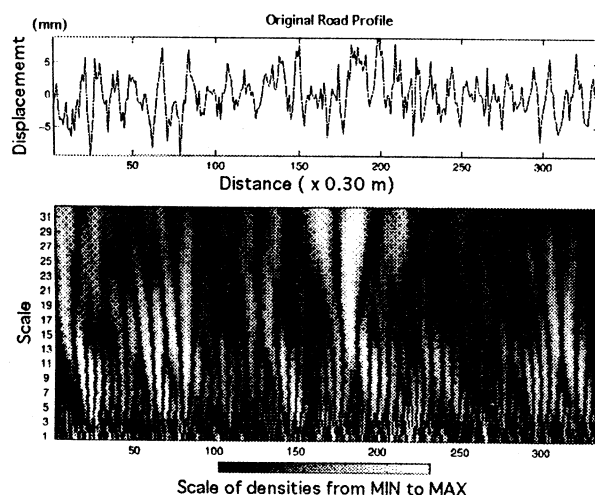


Fig. 9 Continuous wavelet analysis for gravel road surface (scale = 3)

6. おわりに

WT 解析が、空間的に局在する異なった空間スケール現象を統一的に処理することが可能である性質

を路面評価問題に利用することで、路面プロファイルの空間周波数分析、ノイズ除去、自己相似性の検出に有効であることがわかった。本研究は、WT 理論を路面特性評価に応用した例では、国の内外を問わず最初の報告と思われる。WT 理論は、現在理学における理論的整備段階から工学分野の応用段階へと研究対象が移行しつつあり、舗装工学における路面特性把握および評価への WT 理論の適用性について継続的研究が今後期待される。

参考文献

- 1) 阿部, 小川: 縦断凹凸のフラクタル解析, 土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, 1992, pp. 108-109.
- 2) MATLAB User's Guide for UNIX Workstations, The MathWorks Inc., Natick, MA 01760, 1996.
- 3) Wolfram, S., MathematicaTM, A System from Doing Mathematics by Computer 2nd ED., Addison-Wesley Publishing Company Inc. 1991.
- 4) Morlet, J., Arens, G., Fourgeau I. and Giard, D., Wave propagations and sampling theory, Geophysics 47, pp. 203-236, 1982.
- 5) Daubechies, I., Ten Lectures on Wavelets, CBMS/NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics, (1992), 1, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- 6) Vetterli, M. and Herley, C., Wavelets and Filter Banks: Theory and Design, IEEE Trans. Signal Processing, 40-9(1992), 2207.
- 7) Mallat, S., Trans of the American Mathematical Society, 315, pp. 69-87, 1989.
- 8) Daubechies, I., Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets, Commun. Pure Appl. Math., XLI(1988), 909.
- 9) Mandelbrot, B., The Fractal Geometry of Nature, Freeman, New York, 1983.
- 10) Schuster, H.G. Deterministic Chaos, VCH, Weinheim, 1988.

(1997. 9. 1 受付)

APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS TO ROAD SURFACE EVALUATION

Akira KAWAMURA, Kenji HIMENO, Takashi FUJIWARA and Takashi AKIMOTO

We introduced wavelet analysis as a useful and powerful data processing method to detect specified information for road roughness especially for defects on road profile. It is clarified that space-frequency analysis is a very potent method to find the location of defects such as pothole, fault and rutting with a space frequency domain.

Furthermore, Multi-resolution analysis is applied for denoising from acceleration data at a vehicle body induced from road irregularity and a continuous wavelet transform is used to detect a self-similarity of road profile. By use of wavelet analysis, several new findings on road surface evaluation are reported in this paper.