Ⅳ－28　Wavelet関数を用いた路面特性の把握方法について

函館工業高等専門学校　正 員 川村　彰
伊藤アスファルト建設（株）　正 員 後藤典次

1．はじめに

路面と車の相互作用を研究する上で、路面のプロファイル測定およびその上を走行する車両に及ぼされる振動データを処理することがしばしば要求される。その際、路面及び振動データの解析に必要な成分を取り出すための一般的処理手法としては、Fourier 変換による周波数応答解析やスペクトル解析が知られている。しかしながら、これらの解析では通常のデータと異なる過度的データが加わった場合に、一般的な特性が歪められて解析される危険性がある。本研究においては、近年、時間 - 周波数解析（time-frequency analysis）に効果的とされるWavelet関数（以下WT関数と称す）に着目し、その基本理論を紹介すると共に、路面上を走行する際の車の振動データ特性解析に WT 関数を応用し、その有用性について検討を行った。

2．ウェーブレット理論

2．1 基本原理

WT理論は、近年、数学者、工学者の双方から信号処理の新手法として注目されている理論であり［1］、周波数領域で信号を表現する Fourier 解析の性質に加えて、変動の時間的または空間的推移も同時に把握できるという、従来では困難であった時間特性および周波数特性の同時解析が可能となる。またこの性質を利用した解析を時間周波数解析と称す。WTは、古くは1930年頃にあった概念であるが、実用化は多重解像度解析の概念が確立され、1988年にDaubechiesによる連続な直交WTが発表されてからである［2］。WT は、信号データを生成する小波を表す様々な関数の使われかたに関連した呼び名であり、座標xの関数 $f(x)$からある特定成分を取り出す時の最少単位として用いられる。

このような目的の関数 $\phi(x)$を b だけ平行移動し、a だけ伸縮した $\phi((x-b)/a)$により WT 変換は、次のように定義される。

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

離散表現では、２進移動と２進ダイレーションを施した $\phi(2^j x\text{-}k)$ （j,kは整数）を用いて、

$$(W_\phi f)(2^{-j},2^{j})=2^{j}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{|a|}}\overline{\psi(2^{j}x-k)}f(x)dx \tag{1.1}$$

上式における、bを横軸、$1/a$を縦軸とする信号平面にプロットすれば時間周波数分析が可能となる。この場合、基の $\phi(x)$をマザーウェーブレットと呼んでいる。また、逆にWTから次式により基の信号に逆変換できる。

$$f(x)=\frac{1}{C_\phi}\iint_{R^2}(w_\psi f)(b,a)\frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)\frac{dadb}{a^2} \tag{2}$$

Study on the Estimating Method of Road Surface Characteristics by Use of Wavelet Function
by　Akira KAWAMURA and Noritsugu GOTOH

$$f(x)=\frac{1}{C_\phi}\iint_{R^2}(w_\psi f)(b,a)\frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)\frac{dadb}{a^2} \tag{2}$$

離散表現では、

$$f(x)\sim\sum_j\sum_k d_k^{(j)}\psi(2^j x-k)$$

ここで、 $d_k^{(j)}=2^j\int_{-\infty}^{\infty}\psi(2^j-k)f(x)dx$ (2.1)

2．2 多重解像度解析

(2.1)式において、 $g_j(x)=\Sigma\, dk^{(j)}\phi(2^j x\text{-}k)$として$f_j(x)=g_{j-1}(x)+g_{j-2}(x)+\ldots$とすると信号$f$は、WT成分$g_j$により分解できると共に、$f_j(x)=g_{j-1}(x)+f_{j-1}(x)$として再帰的表現ができる。したがって、各$j$（レベルと称す）の値に関する$k$と$d_k^{(j)}$よりなる信号平面を作成することにより、信号の解像度の段階的解析が可能になる。

このためには、マザーウェーブレットϕが基底（basis）関数となるものでなければならず、スケーリング関数ϕにより、次式で定義される。

$$\psi(x)=\Sigma q_x\phi(2x-k) \tag{3}$$

ここで、$\{q_k\}$は与えられた数列。

また、スケーリング関数ϕは、次式で示される。

$$\phi(x)=\Sigma p_x\phi(2x-k) \tag{4}$$

ここで、$\{p_k\}$は与えられた数列であり上式を満たす関係を、スケーリング関数ϕについてのトゥースケール関係（two-scale relation）という。このスケーリング関数により、生成される関数空間 V_jの定義がなされ、対応する WT の空間が作成されて分析がおこなわれる。このことを多重解像度解析（Multiresolution analysis, MRA）という。

2．2 データの分解と平滑化

関数$f_j(x)$をスケーリング関数$\phi(x)$により次式で表す。

$$f_j(x)=\Sigma c_l^{(j)}\phi(2^j x-k) \tag{5}$$

このとき前節の再帰的関係により、分解数列$\{g_k\}$、$\{h_k\}$を用いて

$$c_k^{(j-1)}=\frac{1}{2}\sum_{l\in Z}g_{2k-l}c_l^{(j)} \tag{6}$$

$$d_k^{(j-1)}=\frac{1}{2}\sum_{l\in Z}h_{2k-l}c_l^{(j)} \tag{7}$$

は、分解アルゴリズムにより求められる。したがって、この分解アルゴリズムにより、WT 成分のノイズ成分を除去することにより平滑化されたデータを得ることができる。

3． ＷＴ理論の車の振動特性解析への応用

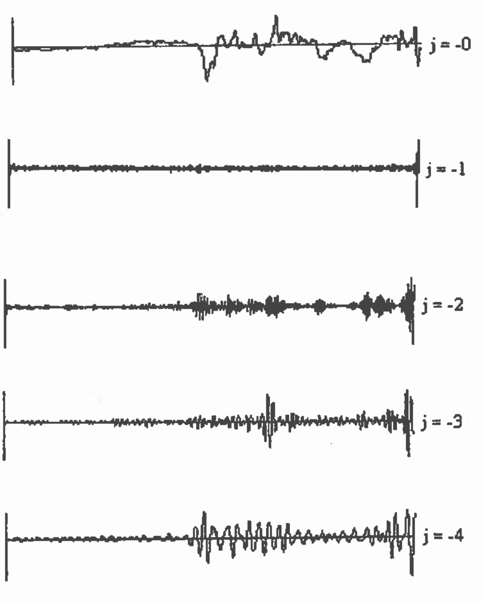
車が道路を走行する際に、路面から種々の外力を受け振動を生じる。その場合、路面を波長特性から把握するならば、これまでに

1）ミクロテクスチャ（Microtexture）：およそ 10^{-1} mm 以下の路面波長
2）マクロテクスチュア（Macrotexture）：およそ 10^{-1} ～ 10^{2} mm の路面波長
3）アンイーブンネス（unevenness）：およそ 10^{2} ～ 10^{4} mm の路面波長
4）縦断プロファイル（longitudinal Profile）：およそ 10^{4} mm 以上の路面波長

などの分類がなされており[3]、車の快適性（乗り心地）や走行性には、3）、4）が関係し、騒音やタイヤと路面間のすべりには、1）、2）が主として関係あるとされている。特に3）のアンイーブンネスは、ラフネス（roughness）とも呼ばれ、これにより生じる車の振動は、乗り心地や走行性の他に、車体の耐久性や走行費用にも関係するため、路面の維持管理面からその実態把握が定期的になされている。 ラフネスが車の乗り心地に及ぼす影響の把握は、車に及ぼされる振動加速度を測定することによりなされるが、その際に外乱（disturbance）と称される路面のポットホール、パッチング、マンホール箇所や橋のジョイントにより生ずる過渡的振動と通常の振動とは性質の異なるものであるから、それぞれ別個に把握・評価できることが望ましい。路面の乗り心地評価には、ISO（国際標準化機構）で用いられる振動評価規準がよく用いられる。この場合振動加速度のスペクトルで評価されるが、同じ路面を走行していても一般走行振動時と過渡的応答を生じている時とでは、スペクトルの形状が変化することから、測定データからそれぞれの影響を分離して取り出せるようなデータ処理が必要とされる。

3．1 WTによる多重解像度解析

本研究では、そのための基礎解析として、大型車両の座席シート部に加速度計を設置し、突起乗り越し実験を行った結果を基に、WT 関数による時間周波数解析を行った。図 - 1は、大型車が時速30 km で、高さ80mm、幅600mm、長さ400mmの蒲鉾形上のハンプを乗り越した時に運転席で測定された上下方向加速度に多重解像度解析を行った結果である。この場合、マザーウェーブレット関数には、4階のカーディナルBスプラインを用い他。また、図におけるjはレベルの階位を示す。図は、解析データに対して、補間する関数を求め、これをスケーリング関数と WT の部分に分解し、これを数段繰り返して得られたものである。解析用のプログラムは、Mathematicaを用いた［4］。図より、下に示されるに従って長波成分が抽出され、時間的に関与している部分が判別される。



図－1　車の振動加速度の WT 解析（突起乗越）

３．２ WT解析後のスペクトル特性

前節の解析に基づき、図ー1に示すレベル －1の成分を分離させたデータと未処理の基のデータについてスペクトル解析を行ない、両者の比較検討を行った。図ー２に示す基のデータでは、6Hz、40Hz、65Hz 付近にピーク値を有しているが、分離したもの（図ー３）では、これらの影響が除去され滑らかな曲線となっていることがわかる。このことは、ある周波数に顕著と見られる振動成分の取り出しに WT 解析が極めて有効であることを示すものである。

４．さいごに

これまで、WT 理論の簡単な紹介と車と路面の振動解析の基礎的な考察を行ったが、他の外乱（突風）の影響や橋と車の相互作用の解析など数多くの問題処理にもその適用が期待されることから、今後本研究を継続して行っていきたい。

本研究を行うのに際して、いすゞ自動車北海道試験場の関係各位に多大な協力を頂いた。また、データ解析に関しては、本校の油谷 敏、鈴木誉久両君の努力に負うところが大きい。ここに記して感謝の意を表したい。

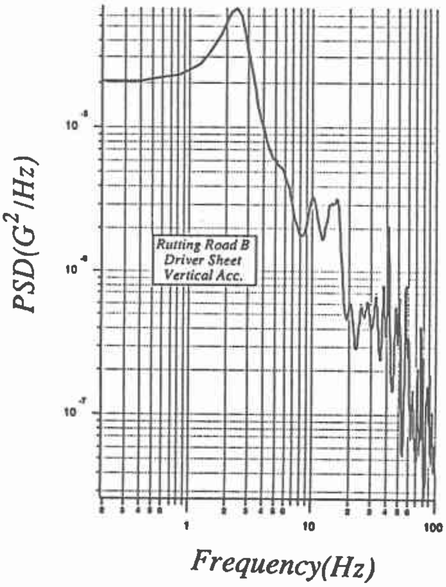
参考文献

[1] Chui, C. K., An Introduction to Wavelets, (1992), Academic Press. 桜井・新井訳、ウェーブレット入門、(1993), 電気大学出版

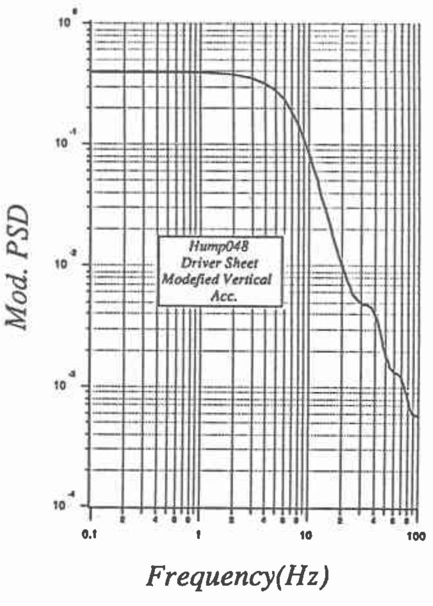
[2] Daubechies, I., Ten Lectures on Wavelets, (1992), SIAM.

[3] ASTM, E867-87 Standard Definition of Terms Relating to Traveled Surface Characteristics, ASTM, Philadelphia, PA, 1987(1).

[4] S. Wolfram, Mathematica, A System for Doing Mathematics by Computer, Addison Wesley Publishing Company, Redwood City, 2nd edition, 1991.



図ー２　車の振動加速度スペクトル（オリジナル）



図ー３　車の振動加速度スペクトル（修正）