

## IV-22

## 鉄道車両の車両特性に関する研究

## -Wavelet理論を活用して-

北海道旅客鉄道(株) 正員 白川龍生

函館工業高等専門学校 正員 川村 彰

## 1. はじめに

線路を一定基準に従って合理的に保守していくためには、高低・通りなどの軌道状態を常に把握していなければならない。しかし、軌道は日々の列車荷重や自然条件変化等で損傷を生じることから、様々な検査を行いながら保守計画を作成し、弱点箇所の整備を行っている。

各種検査業務の中で、近年の列車速度向上に伴い、列車動揺加速度試験が重要度を増すようになった。これは、軌道狂い(静的な軌道の変化量)が少ないほど動揺値が下がるとは限らないからで、一定の乗心地を確保する上でも実際に走行する車両に上下・左右方向へ負荷する動揺加速度を測定しなければならないからである。上述からも推測できる様に、軌道狂いと車両の動揺は極めて複雑な関係を持っており、その解析に際し、これまでは経験工学に大部分を依存していた。

そこで、信号処理の分野で近年特に注目を集めているWavelet理論を活用すれば時間周波数解析が可能となり、軌道の特徴を周波数領域と地点毎に個々で分析できる点に着目した。本研究においては、最初にWaveletの基本理論と解析方法を紹介し、次に、Wavelet理論を用いた鉄道における振動乗心地解析への応用性について検討を行った。

## 2. Wavelet関数

## 2.1 FourierとWavelet

信号波形を解析する際、頻繁に用いられる手法としてFourier解析がある。このFourier解析は波形の高周波含有率を求めるのに極めて有力な手段で、フィルターを装着し高周波成分(ノイズ)を減衰させるという方法を取っており、各分野で広範囲に活用されている。

しかしながらFourier解析はスペクトルのピークが1つの場合は良いが、一般的には沢山のピークを有することから、データの周期的な構造を把握するのは極めて困難であった。したがって、フィルター効果の評価方法に主目的が限定されざるを得なかった。

Fourier解析の問題点は大きく2つに分けられる。一つは、データのもとになっている現象(信号)が複雑な場合である。もう一つは、問題をすべて周波数領域に変換して議論するため、時間領域の情報が失われてしまうところにある。

そこで時間的な分解能を持つ周波数解析法を得るため、基底関数を三角関数ではなく局所化された関数から作られる相似関数系を用いて展開する、というWavelet解析の発想が生まれた。

このような局在関数は周波数空間ではデルタ関数とならず幅を持っているので(不確定性関係)、周波数分解能はFourier解析ほどは良くない。しかしその分時間分解能が向上するために、周波数精度をそれほど要求しない場合には十分使用できる。

Waveletは1930年頃からあった概念であるが、実用化されるようになったのは後述する多重解像度解析の概念が確率され1988年にDaubechiesによる連続的な直交Waveletが発表されてからであり、様々な分野への適用が試みられてきたのは比較的最近のことである。

Study on the Dynamic Property of Rolling Stock by Use of Wavelet Function

By Tatsuo SHIRAKAWA and Akira KAWAMURA

## 2.2 Wavelet概要

Waveletは測定データに含まれる異常性の検出、その位置の同定、あるいはデータの標準化など、その応用範囲は理論から実際まで実に多岐にわたっており、現在最も注目を集めている分野の一つである。

Waveletとは、信号を形成する細波を表現する様々な関数をどう使うかに関連した言葉であり、関数 $f(x)$ から局所的成分をその形に合わせて取り出すときの最小単位として用いられる。

Wavelet変換を定義した(1)式を以下に記す。

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

この時、Waveletはそのままの形で、横に $a$ 倍スケール変換され、 $b$ だけトランスレートされて信号の部分に近似する。信号は位置 $b$ 付近で局所的に周波数 $1/a$ を有しており、これを周波数の大きさ別に信号平面へプロットすることで、「信号のどの部分が、局所的にどんな周波数を持っているのか」と、時間周波数解析が可能となる訳である。

Wavelet変換は連続Wavelet変換と離散Wavelet変換と大きく2つに大別され、(1)式を後者で表現すると以下の(2)式になる。

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

Waveletが特に優れている事項として次の2点が挙げられる。

- 1) 高周波成分については時間分解能が高くなり、低周波成分については周波数分解能が高くなる。これは多重解像度解析の特徴である。この解析は解析手法としてのWaveletの合理性を与える。
- 2) 逆変換が定義できる。つまり、Waveletによれば単なる時間一周波数解析だけではなく、それを利用して信号のフィルタリングや分解・合成が実現できる。

これらの点は、振動データのノイズ除去、分解能向上、データ圧縮、波形合成など多くの問題への適用の可能性を示している。

## 2.3 マザー・ウェーブレットの選定

さて、前述のようにWavelet変換は連続変換と離散変換に大別される。連続Wavelet変換では、許容条件(admissibility condition)を満たす関数ならば、どんな関数でも基本Wavelet(Mother-Wavelet)として使うことができる(実際の応用には、時間周波数解析に都合の良いMorlet関数などが多く用いられる)。

離散Wavelet変換では、Waveletは基底関数となるものでなければならない。加えて、応用上はコンパクトなサポートを持つ関数が望ましい。これらの条件を満たすWaveletはかなり限定される。

本研究は列車の動揺加速度を扱うので、離散Wavelet変換を行う。そのため応用上、上記の条件を満たす関数としてDaubechies関数(図-1)を用いた。

Daubechies関数は1988年に発表された直交Waveletで、直交基底を作る連続かつサポート・コンパクトなWaveletとして初めて登場したものである。自然数 $N$ によって番号づけられた一連のスケリング関数 $N_\phi$ と、対応するWavelet関数 $N_\psi$ があり、 $N$ (段階)とともに滑らかさが増大する。試行の結果、Daubechies $N=4$ が最も適しており、本研究ではこれをマザー・ウェーブレットとして使用することとした。

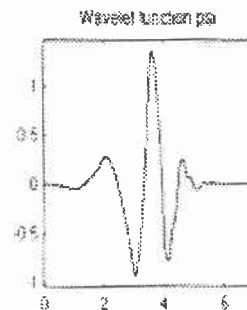


図-1 Daubechies関数 (N=4)

### 3. 車両の振動特性解析へのWavelet理論の応用

#### 3.1 速度向上と軌道管理

現在、北海道における鉄道の輸送計画として主要幹線の高速化整備が進行中であり、最高速度130km/hで札幌～旭川・函館の営業運転を行っている。また、1997年春には札幌～釧路間の速度向上が計画されている。こうした高速化時代を迎え、従来の軌道管理手法では対応できない様々な問題が生じてきた。

現在、高速線区では月1～2回定期的に列車動揺試験を行っている。これは上下・左右方向の振動加速度を測定し、基準値以上の箇所について補修を行うという目的で実施されている。しかし、様々な波長が合わさった形でチャートが出力されるため、「どの地点が、どのように悪いのか」という補修箇所の判断は経験工学的な分野に依存する所が多かった。

軌道管理の分野では現在、波長を a)短波長(数cm～数m)、b)中波長(数m～20m)、c)長波長(20m～80m)、の3種類に分けて管理を行っている。高速化以前は b)中波長を主対象としていたが、130km/hを超える速度で走行すると、a)短波長やc)長波長が大きく関与するために、これらと動揺の関係を理論的に確立することが急務となってきた。この場合、a)短波長は騒音・振動、走行安定性、衝撃荷重に大きく関与し、またc)長波長は乗心地に大きな影響を与える。

そこで本研究は、Wavelet理論が多重解像度解析を可能としており、波長の切り出し・分類を行うには最適であると判断し、動揺試験データ処理に活用することとした。

#### 3.2 解析方法

現在列車の動揺測定は、年4回実施されるマヤ車(高速軌道検測車:図-2)によるものと、工務所・保線所などの現業機関が各保守担当区域毎に月1～2回の間隔で実施されている可搬式の動揺測定装置(図-3)によるものと、2通りの方法で行われている。前者は列車動揺と同時に高低狂い(上下凹凸)や通り狂い(左右凹凸)など、動的な軌道狂い量を同時に検出可能で、マヤチャートと呼ばれる測定結果を表示した図表が軌道管理のための基礎データとして現在使用されてきた。また後者は、年4回のマヤ車による測定を補間するデータとして使われる他に、マヤ車測定の欠点である高速走行時の測定が可能という点で、近年特にその重要性を増してきている。

高速軌道検測車は、図-2に示す様に機関車で測定車両を牽引しているため、最高速度が95km/hに制限されている。しかし、最近の速度向上によって130km/hで走行する旅客列車も存在することから、この速度の検出では解明できない動揺については図-3の可搬式動揺測定装置を実際の旅客車両に設置することで代替している。

本研究で解析した動揺データはこの可搬式動揺測定装置による結果である。



図-2 高速軌道検測車

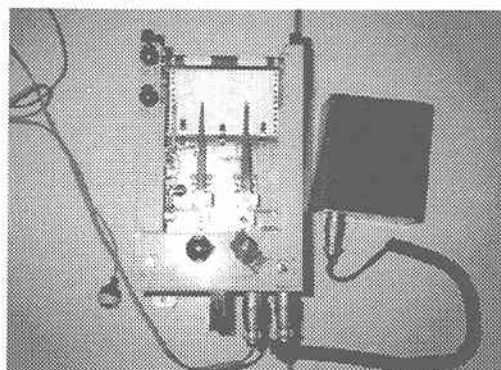


図-3 可搬式動揺測定装置

### 3.3 時間周波数解析

図-4及び図-5は、同一の線路条件で車速を変化させ上下振動を時間周波数解析した結果である。図-4は速度を75 km/hに、図-5は90km/hに設定した。

この場合のマザー・ウェーブレットは Daubechies N=4を用いた。また、解析用のプログラムはMATLABである。

図における縦軸に表示された記号は、最上段のsがオリジナルの信号(列車動揺)である。このsを長波成分a1と短波成分d1に分け、縦軸最下段にd1を示した。表示されていない長波成分a1であるが、これを再度長波成分a2と短波成分d2に分け、縦軸下段から2番目にd2を示した。以下これを繰り返し、長波成分a5と短波成分d5に分けたところで演算を止めている。

これを簡単な流れ図にまとめたのが図-6である。

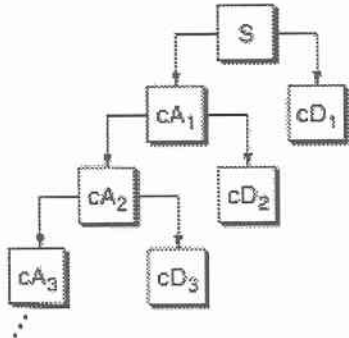


図-6 Multiple-Level Decomposition

ここで、d1はオリジナルの周波数の半分の値で、以下d5まで同様である。つまり、縦軸の最下段から上に向かうにつれて長波長になっていくことを表わしている。

ここで、sは次の式で表わされる。

$$s = a5 + d5 + d4 + d3 + d2 + d1 \quad (3)$$

図-4と図-5を比較すると、以下の事項に気付く。

- 1) d5の波形が類似している点
- 2) 図-4ではd3の波が大きく関与しているが、車速が増すとd4へと影響範囲が移行した点

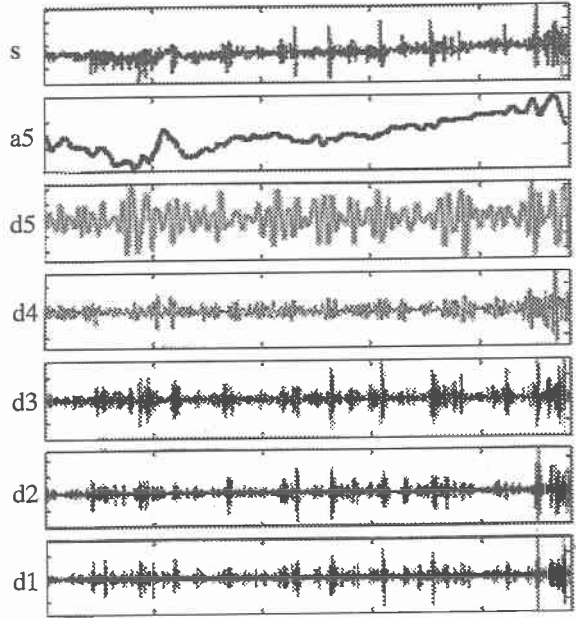


図-4 時間周波数解析 (75km/h)

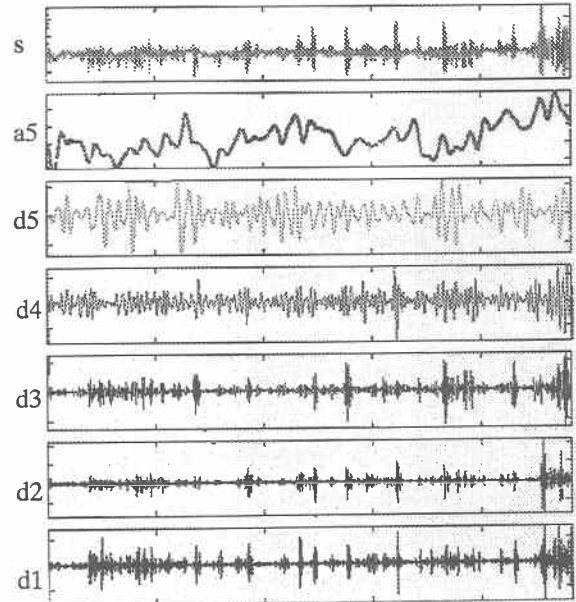


図-5 時間周波数解析 (90km/h)

3) 長波のみならずa1にも影響が現れ始めた点

等が推測できる。しかしながら、この解析にはノイズ成分が含まれており影響範囲が鮮明には把握されていない。ノイズを除去し、「どの地点が、どのように悪いのか」を判断しなければならない。

### 3.4 ノイズ除去と動揺解析

図-4における各周波数成分の影響力を表わしたものが図-7である。黒色に向かうに従って強い影響力を有している。この図からもわかるように、ノイズを大量に含んでいることから、影響地点が鮮明に把握できない状態であった。

ここで図-7からノイズを除去したのが図-8である。図-7と比較すると軌道の弱点箇所が明確となり、横軸の時間と照合することで、個々に周波数領域及び地点毎の軌道特徴を明確に把握することが可能となった。

図-9は、ノイズ除去後の車速90km/hの影響力図である。ここで図-8及び図-9から、前節3.3で推測した事項について検討を加える事にする。

1) d5の波形が類似している点

比較すると分かる様に、両者とも影響が大きく現れている。ピークの位置に若干のずれが見られるが、これは図-9が15km/h速いために生じた誤差である。

2) 図-8ではd3の波が大きく関与しているが、車速が増すと図-9の様にd4へと影響範囲が移行した点

これは、3.1で前述した様に、速度向上に伴って長波や短波の影響が増すという事を如実に表わしている。

3) 長波のみならずa1にも影響が現れ始めた点

2)と同様、速度が向上することで短波成分が車両へ与える衝撃荷重が増加した事を表わしている。

ここで各周波数を記すと、a1は0.208c/mで測点間隔は約2.4m、a2以下はその2倍の波長を持ち、a2=0.104c/m、a3=0.052c/m、a4=0.026c/m、a5=0.013c/mである。

1Hzは75km/hの場合a3の波長に相当し、90km/hの場合はa3とa4の間に有する。列車の固有振動数は1～1.5Hzの区間で推移していることから、動揺加速度が速度に依存していることが明確となった。

人間の上下方向の共振域は4～8Hzであり、75km/hの場合a1の波長に相当し、90km/hの場合はa1とa2の間に有する。

こちらも、速度が向上することで影響が出始めており、動揺加速度が速度に依存していることを示している。

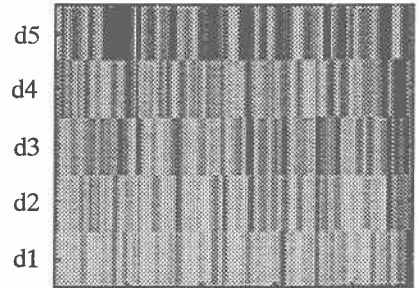


図-7 周波数領域毎の影響 (75km/h:除去前)

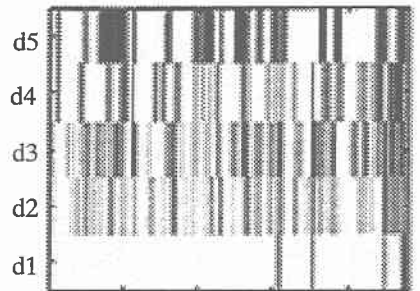


図-8 周波数領域毎の影響 (75km/h:除去後)

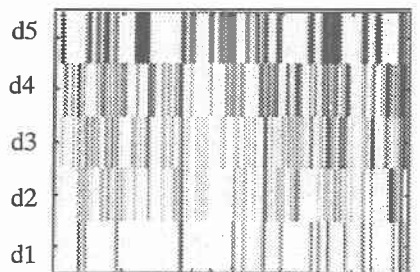


図-9 周波数領域毎の影響 (90km/h:除去後)

### 3.5 今後の応用範囲と課題

Wavelet関数を用いて時間的に周波数が関与している部分を判別可能なことが理論的に解明してきた。全般に $\omega$ の長波成分が関与していたが、この箇所は噴泥が著しく軌道材料の一つである道床の支持力が欠乏していた箇所であった。この区間は測定後道床交換を行っており、慢性的な長波長を逡減している。

a2～a3から判明した箇所では、踏切付近そして曲線部に軌道狂いが生じていた。継ぎ目や曲線、そして分岐器は保守を行う上での弱点箇所であり、この点について今後周波数領域毎に解析できる利点を生かし効率的な保守の体制整備を進めたい。

今回75Km/hと90km/hで試験した区間は、97年3月に120～130km/h運転が開始される箇所であり、15km/hの速度の違いで現れた振動特性が今後どのように変化するか大変興味深い所であり、引き続き研究を行っていく必要がある。

なお、可搬式動揺測定装置を用いていたが、既に自動列車動揺測定装置が札幌～旭川・函館間において利用されており、精度面で吟味した上で今後の積極的な活用を検討していきたい。

また、マヤ車は軌道検測を同時に行っていることもあり、今後さらに動揺と凹凸の関係について研究し、効率的な軌道狂いの保守体系の確立を目指していきたい。

### 4.さいごに

これまで、Wavelet理論の簡単な紹介と、列車の振動解析について基礎的な考察について論じてきたが、Wavelet理論が土木工学の分野で応用された例は極めて少なく、特に鉄道の振動解析にWavelet理論を用いたのは本研究が初めてではないかと推測される。そのため今回の研究範囲では解明されていない点が多く存在しており、今後この分野の発展を願うと共に引き続き研究を継続したい。

鉄道にとって乗心地は商品価値として重要な位置を占めており、この解析を単純に軌道保守のみを目的とするのではなく、乗心地対策を保守業務内容に加味して今後業務面に応用できれば幸いである。

### 参考文献

- [1] 榊原 進：ウェーブレットビギナーズガイド(1995)、東電大出版局
- [2] 齊藤兆古：Mathematicaによるウェーブレット変換(1996)、朝倉書店
- [3] 山田道夫：ウェーブレット解析とその応用(1993)、電子情報通信学会誌1993年5月号
- [4] J.J.Benedetto・M.W.Frazier編、山口昌哉・山田道夫監訳：ウェーブレット理論と応用(1995)シュプリンガー・フェアラーク東京
- [5] 井上裕嗣：ウェーブレットの振動・波動解析への応用(1995)日本機械学会第72回通常総会講演会資料集
- [6] 吉村彰芳：軌道狂いの効率的な保守管理のための理論と方法(1996)鉄道総合技術研究所
- [7] 埴 光雄、穴見徹広、奥村陽一：MIT自動ライニングシステムの開発(1996)日本鉄道施設協会誌1996年5月号
- [8] 吉村彰芳、穴見徹広、奥村陽一：軌道狂いの波形を用いた軌道整備(1996)日本鉄道施設協会誌1996年5月号