

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*

APPLICABILITY AND POTENTIALITY OF WAVELET THEORY TO TRACK MAINTENANCE *

白川龍生**・川村彰***・上浦 正樹****・中辻隆*****

By Tatsuo SHIRAKAWA**・Akira KAWAMURA***・Masaki KAMIURA**** and Takashi NAKATSUJI*****

1. はじめに

軌道は列車を支持し、円滑に誘導する役割を果たしているが、列車の通過によって微小な永久変位が蓄積されることから次第に変形し、車両走行面の不整が生ずる。これは「軌道狂い」と呼ばれ、列車の走行安全性や乗り心地に直結する重要な管理項目であることから、従来、基準値及び維持補修に対する目標値を定め一定の管理水準以内に保持されてきた。しかし近年の高速化や輸送量の増大による軌道破壊量の増加、少子・高齢化等に伴う保守管理体制の変化、さらに企業の低コスト体質への変化などの理由から、従来の方法では軌道状態を一定水準に維持することは困難になりつつある。

軌道狂いの波状特性を把握するには、従来、フーリエ関数及びパワースペクトル密度関数(以下、「PSD」という)の利用が一般的であった。しかしこれらの方法は、分岐器や構造物などの不動区間、レール継目付近の凹凸など、局所の変化を生じている箇所が存在する場合、空間領域のデータをフーリエ解析により周波数領域へ変換すると、これらある特定現象の発生位置に関する情報は平均化操作によって明確に表現されず、一方では局所的な変化のために、平均的な波状特性が歪んで表される¹⁾。P値や σ 値などの区間統計値も同様に局所の変化の影響を受けやすい。このため、鉄道事業者によっては分岐器などの区間を除外した統計処理を行うことがあるが、このような処理はライフサイクルコスト分析など定常的な

成分について長期的に分析する場合はよいが、列車運転の安全確保の観点からは当該区間を除外すべきではない。

以上のように、従来から軌道狂い管理で用いられてきた統計・信号処理手法では、局所的な変動を含むデータの解析が困難であったため、このようなデータに適した解析手法が求められていた。そこで、上述の軌道メンテナンスにおける問題解決のために、地震動解析、音響・画像信号処理など工学系分野で注目されているウェーブレット(以下、「WT」という)理論を適用できないかと考えた^{2,3)}。

WT理論は、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、変動の空間的推移も同時に把握可能とする性質を有しており、近年様々な分野で適用例が報告されている。

そこで本研究では、軌道狂いの検出システムの周波数応答特性を補正して絶対形状に近似させた復元原波形⁴⁾に対して、離散WT変換による空間周波数解析および多重解像度解析を適用し、軌道狂いの波状特性及び保守作業効果の評価手法としてのWT理論の可能性を考察した。また軌道の自己相似性、及び軌道の時刻歴データに基づく劣化・復元過程について、連続WT変換を用いたモニタリングを行った¹⁾。WT変換は、数式処理ソフトウェアであるMathematicaを使用した^{2,5)}。

2. WT変換とその特徴

WTは1930年代頃に考えられた概念であるが、Morletにより石油探索をする際の人工地震波の解析道具として最初に導入された³⁾。WT変換とは、ある基本関数(以下、「基底関数」という)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、解析対象関数の自己相似性について、WT係数のスケール依存性を見ることで解析が容易となる。また、空間的にも周波数的にも局在した関数を用いているため、空間と周波数の両方の情報について、アドミッシブル条件を満足する範囲内で分析することが可能である。

WT変換は、解析データにおける特定パターンの発生箇所及び発生頻度、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を目的とした「連続WT変換」と、信号のノイズ除去や異なる性質を持つ信号の分離・

*キーワード：施工計画・管理、土木施設維持管理、情報処理

**正員、北見工業大学工学部土木開発工学科
(北見市公園町165,

TEL 0157-26-9520, FAX 0157-23-9408)

***正員、工博、北見工業大学工学部土木開発工学科
(北見市公園町165,

TEL 0157-26-9510, FAX 0157-26-9510)

****正員、工博、北海学園大学工学部土木工学科
(札幌市中央区南26条西11丁目,

TEL 011-841-1161, FAX 011-551-2951)

*****正員、工博、北海道大学大学院工学研究科
(札幌市北区北13条西4丁目,

TEL 011-706-6215, FAX 011-726-2296)

比較等を可能とする「離散WT変換」の2種類に大別される。概説を以下に記す^{2,3)}。

(1) 連続WT変換

基底となるWTは次式で定義される。

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (1)$$

ここで $\psi(x)$ は基底関数であり、WT変換では一般にアナライジングWTと称す。 a は単位長さ当たりの波数を表すパラメータであり、 b はその存在位置を示すパラメータである。すなわち、 a の値が微小であれば、高周波数成分を分析することになるため、解像度の向上につながり、 b を変化させることにより信号の局所的な変動を把握することができる。

(1)式は、様々な a, b を有する関数の集合、

$$\{\psi_{a,b}(x)\}_{a(\neq 0), b \in \mathbf{R}} \quad (2)$$

から作成される。 $\mathbf{R}$ は実数からなる集合を表す。

また(1)式において、 $\psi(x)$ を空間(時間)軸方向に a 倍すると同時に、振幅方向に $1/\sqrt{|a|}$ 倍しているが、これは正規化を行うための操作である。

$\psi(x)$ と解析したい信号 $f(x)$ との内積が連続WT変換であり、(3)式に示す。

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{a,b}(x) f(x) dx \quad (3)$$

(3)式により、信号 $f(x)$ は、変換後に実数 a, b をパラメータとする平面上分布表現が可能となる。従って変換結果の利用により、元信号である軌道狂いの空間-周波数解析が可能となる。

(2) 離散WT変換

連続WT変換が視覚による信号の類似性を検出する目的で行われるのに対し、離散WT変換は数量的把握に適しており、計算機による解析も容易である。またアナライジングWTが完全直交基底であるため、信号の分離・比較分析に優れている点が挙げられる。これにより後述の多重解像度解析にも利用されている。離散化は2進分割表現を取り、(4)式に示す離散WT(基底)を生成させる。

$$\psi_{j,k}(x) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{x-2^j k}{2^j}\right) \quad (4)$$

ここでパラメータは(1)式における a を離散表現したもので、解像度レベルを表し、値が小さくなるほど高周波数となる。同様に b を離散表現したパラメータ k は、空間(時間)のシフト量を示す。上記パラメータを用いて信号 $f(x)$ は次式により級数表現できる。

$$f(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k} \psi_{j,k}(x) \quad (5)$$

$c_{j,k}$ はWT係数と呼ばれ、信号 $f(x)$ と $\psi_{j,k}(x)$ との相関係数に相当する。また $\psi_{j,k}(x)$ は直交基底であることから、信号 $f(x)$ より相似関数の検出を可能とする。離散WT変換を用いて、周波数毎に特定成分の検出を行う多重解像度解析が可能となる。

(3) 多重解像度解析

多重解像度解析は、後述するフィルタ係数 $h(k)$ を用いた計算アルゴリズムとして定義されており、アナライジングWTとして直交WTを用いる。これにより、複数のスケールで信号の局所的平滑化により得られる階層的構造を持つデータについて、信号の局所的性質と大域的性質を同時に解析することが可能となる。多重解像度解析の数学的定義は $L^2(\mathbf{R})$ の閉部分空間列 $V_j (n \in \mathbf{Z})$ で、以下の6条件を満たすものをいう。

$$1. \quad V_j \subset V_{j+1} \quad (6)$$

$$2. \quad \bigcap_{n=-\infty}^{\infty} V_j = \{0\} \quad (7)$$

$$3. \quad \bigcup_{n=-\infty}^{\infty} V_j = L^2(\mathbf{R}) \quad (8)$$

$$4. \quad f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2x) \in V_{j+1} \quad (9)$$

$$5. \quad f(x) \in V_0, k \in \mathbf{Z} \Rightarrow f(x-k) \in V_0 \quad (10)$$

$$6. \quad \exists \phi(x) \in V_0 \text{ s.t. } \{\phi(x-k); k \in \mathbf{Z}\} \quad (11)$$

は V_0 の正規直交基底

適切なアナライジングWTを選択し、(4)式の離散WTが正規直交系であれば、(5)式、(6)式において j が拡大・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、解像度を変化させながら信号 $f(x)$ を観察するプロセスに対応する。多重解像度解析は、上記条件を満たすアナライジングWTを構成するため、スケーリングと称する基底関数 $\phi(x)$ を用いる。元信号 $f(x)$ の離散化表現を次式に表す。

$$d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \phi_{j,k}(x) dx \quad (12)$$

ここで、

$$\phi_{j,k}(x) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \phi\left(\frac{x-2^j k}{2^j}\right) \quad (13)$$

(12)式の $d_{j,k}$ は、スケーリング係数と呼ばれ、元信号の j 次の解像度における離散化表現である。 j 次以下の解像度のスケーリング係数及びWT係数は次式で表される。

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

$$c_{j+1,k} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} g(i-2k) d_{j,i} \quad (15)$$

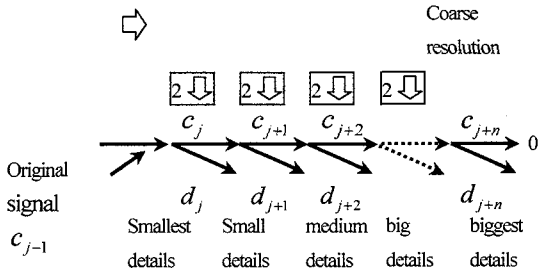


図-1 多重解像度解析概念図

ここに、 h と g はそれぞれスペクトルを低周波数帯域と高周波数帯域に分割する一連の帯域2分割フィルタであり、 h をローパスフィルタ、 g をハイパスフィルタという。 h と g は $\phi(x)$ 及び $\psi(x)$ から導かれる関数である。また $j+1$ 次のスケーリング係数 d_{j+1} は、 j 次より1段階下の低解像度表現であり、解析周波数及び空間(時間)解像度が j 次と比較し1/2となる。

以上要約すると、多重解像度解析では解像度ごとに信号の性質を分析することができる。なお信号を低周波数成分と高周波数成分に分解し、低周波数成分をさらに低周波数成分と高周波数成分へ分解を繰り返す手順のことをピラミッドアルゴリズム⁸⁾という(図-1)。

スケーリング係数 $c_{j+1,k}$ は $d_{j,k}$ をハイパスフィルタへ通すことによって得られ、 $d_{j+1,k}$ は $d_{j,k}$ に含まれる低周波数成分を表す。 $c_{j+1,k}$ 及び $d_{j+1,k}$ は、元の $d_{j,k}$ の情報を全て有しているため、次式で逆変換でき、完全に再構成することが可能である。

$$d_{j,k} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} h(i-2k) d_{j+1,l} + \sum_{l=-\infty}^{\infty} g(i-2k) d_{j+1,l} \quad (16)$$

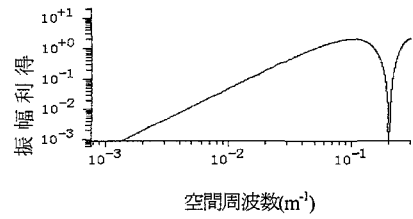
これらの性質を利用することにより、信号の各段階における平滑性の検討を実施することができる。

3. 離散WT変換による波状特性の考察

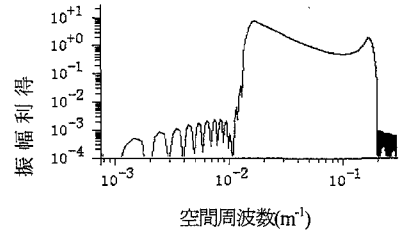
本章では、局所的な軌道狂いを含むデータに対して離散WT変換による空間周波数解析及び多重解像度解析を適用し、当該箇所を空間軸及び周波数軸で可視化する方法について考察した。

(1) 復元原波形の作成

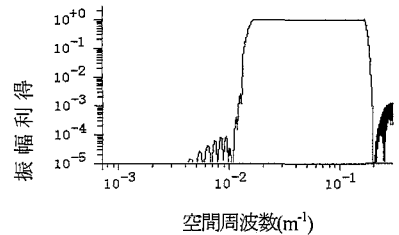
解析に用いたデータは、軌道検測車(10m弦正矢法)により得られた在来線区間の高低狂いである。この検測方法は差分法であることから、軌道狂いの波長により振幅利得が異なる。検測車の検測特性を図-2(a)に示す。このた



(a) 検測車の検測特性



(b) 復元逆フィルタ特性



(c) 復元原波形の総合周波数特性

図-2 復元逆フィルタのフィルタリング演算

め、必要な空間周波数帯(通過域)の振幅利得を1とする特殊なバンドパスフィルタ(以下、「復元逆フィルタ」という)を設計し(図-2(b))、フィルタリング演算によって得られた波形(以下、「復元原波形」という)を解析に用いた(図-2(c))。解析ソフトウェアはMicroLABOCSを用いた⁴⁾。

ここで入力となる軌道検測データのサンプリング間隔は $\Delta t = 0.3125\text{m}$ であり、出力となる復元原波形の通過域(以下、「復元帯域」という)は $\lambda = 6\text{m} \sim 50\text{m}$ 、その他の周波数帯(阻止域)の振幅利得は1/100以下となるように復元逆フィルタを設計した。

復元逆フィルタを用いたフィルタリング演算の結果得られた波形(復元原波形)は、水準測量(絶対基準によるもの)データをバンドパスフィルタ演算したものと同等の結果が得られる⁴⁾。

(2) MTT作業前後の空間周波数解析

軌道狂いの整正は、有道床軌道の場合、一般的にマルチプルタイタンバ(以下、「MTT」という)と呼ばれる大型機械が使用され、道床をつき固めつつ軌きようを移動する方法で行われる⁴⁾。

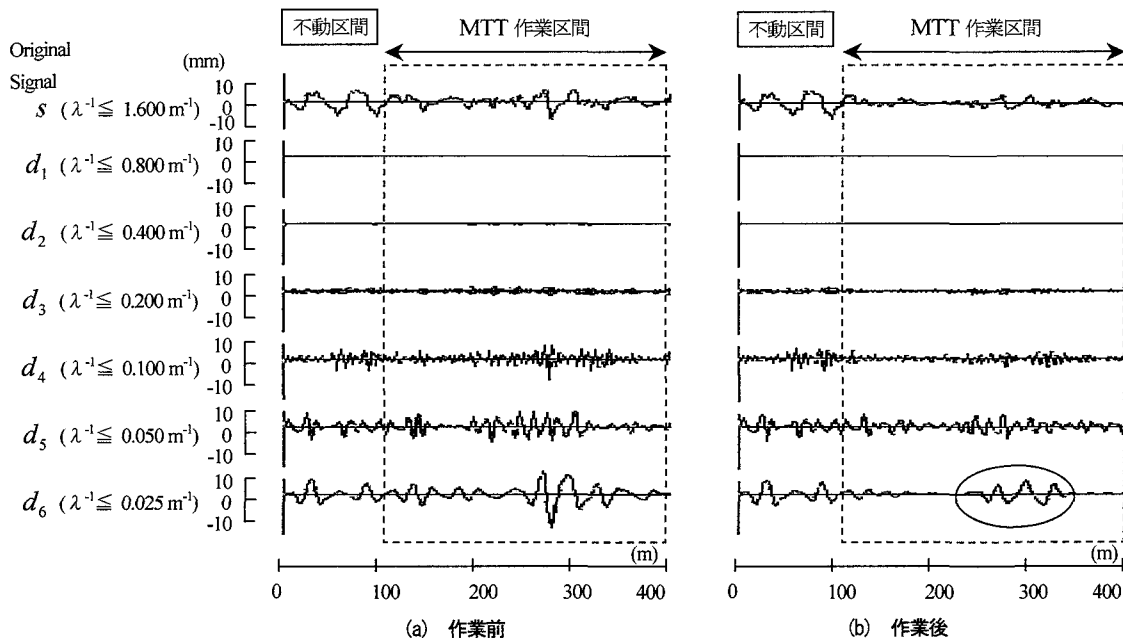


図-3 空間周波数解析結果(MTT作業の作業前後)

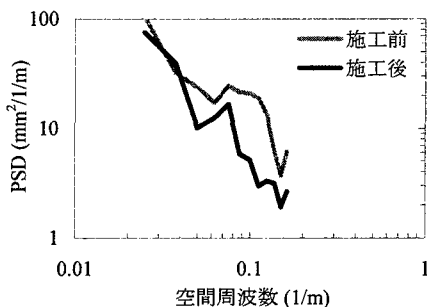


図-4 PSD解析結果(MTT作業前後)

本節では計画線形を復元原波形によって与え、MTT作業前後の波状特性を把握する目的で空間周波数解析を行った。MTT作業前後の空間周波数解析結果を図-3、PSD解析結果を図-4に示す。空間周波数解析に用いたアナライジングWTは、直交基底を有し非対称性を最小限としたSymletとした。

図-3において、WT係数 d_j は次数が1次増加すると波長が2倍となり、解像度は0.5倍となる。復元原波形は一種のバンドパスフィルタ演算処理結果であるため、フィルタの阻止域に相当する $d_1 \sim d_3$ については振幅が極めて小さい。 d_3 については、復元逆フィルタの過渡域に含まれるため、微量のノイズを含んでいる。

MTT作業前後の波形を図-3より比較すると、作業後の波形は各周波数帯とも振幅が小さくなり、計画線形に基づいた作業効果が表れている。

これは図-4に示すPSD解析結果において各空間周波数帯

でパワーが減衰していることから確認できるが、PSD解析は空間の情報を有さない区間評価値であるため、局所的な周波数成分の比較は不可能である。

離散WT変換による空間周波数解析では、図-3のように周波数情報と変動の空間的推移を同時に表現しており、作業効果が明確な箇所、残留成分が多い箇所(例えば、図-3(b)中、○の箇所)などを判別することができる。この点で、空間周波数解析は従来の評価ツールの短所を補完しており、有効な解析ツールであると思われる。

(3) MTT作業前後の多重解像度解析

軌道狂いは、定常分(基本線形)に生じた一種のノイズと考えることができる。本節では、離散WT変換の特徴のうち、分解された信号を逆変換することにより再構成が可能となる点に着目し、MTT作業効果を多重解像度解析によって考察した。ここで解析に用いたデータは前節と同様であるが、アナライジングWTは、代表的な軌道狂い波形(レール継目部)に形状が類似しているDaubechies(直交基底)を用いた。

適用例を図-5に示す。 c_j を c_{j+1} と d_{j+1} に分解し、後者を除去成分として図の右列に示した。一方、信号からノイズを除去した成分(左列)については、さらに低周波成分のノイズ成分を検出し、これを除去した。図-3の空間周波数解析ではノイズ成分のみを示したが、図-5では除去後の成分(c_j)についても表示した。

MTT作業区間における各周波数帯のノイズ成分(d_{j+1} : 軌道狂いと考えられる)を比較すると図-6のように

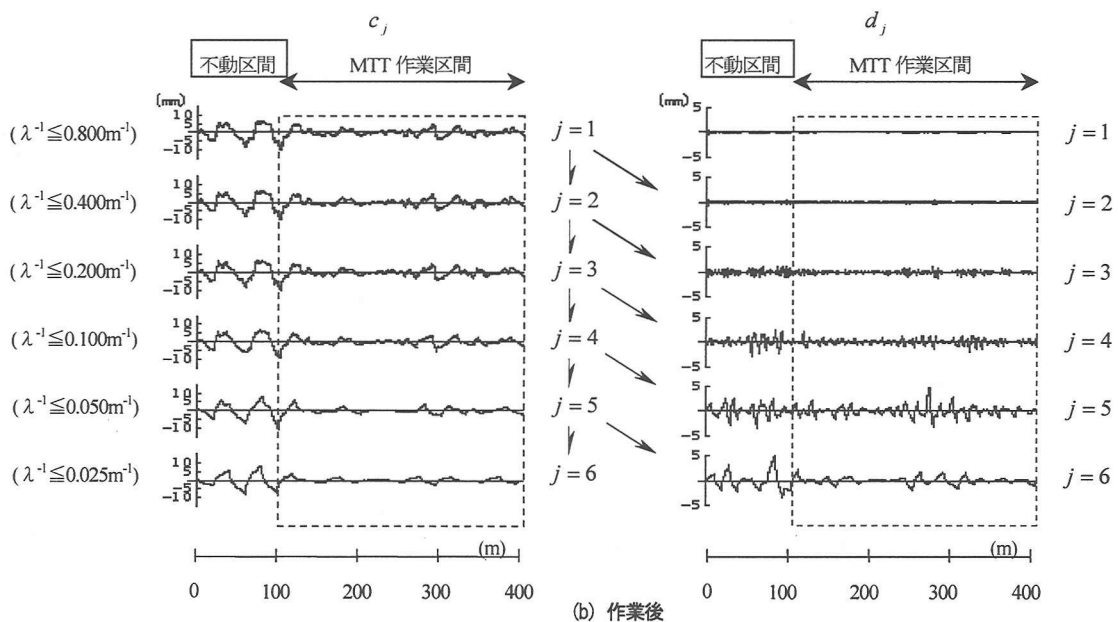
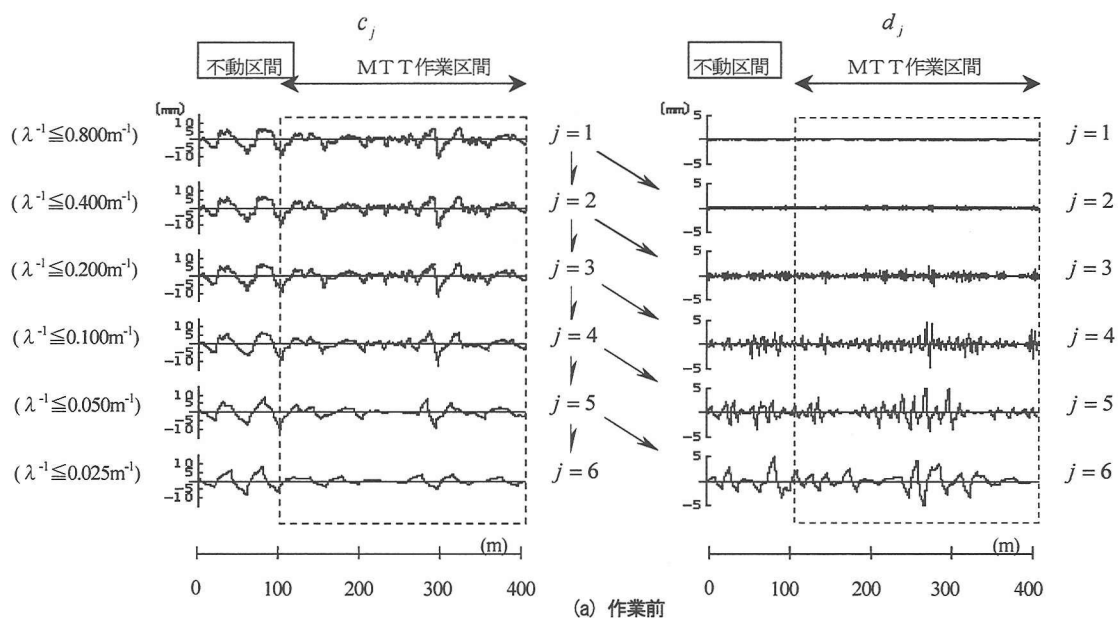


図-5 多重解像度解析結果(MTT作業前後)

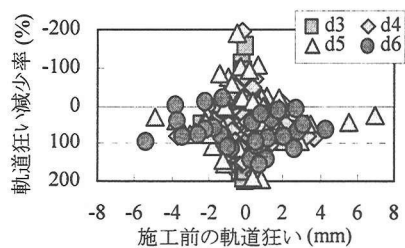


図-6 d_j 成分の軌道狂い減少率
(不動区間を除く)

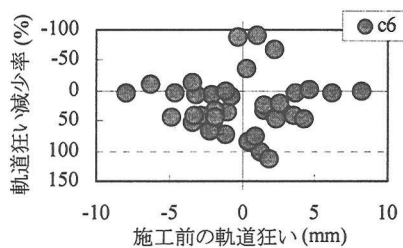


図-7 c_6 成分の軌道狂い減少率
(不動区間を含む解析区間全体)

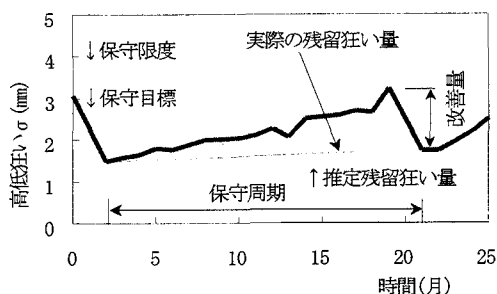


図-8 軌道状態の劣化・復元過程の例

なる。ここで、軌道狂い減少率は作業効果を表すものであり、減少率が100%の場合は軌道狂いが0mmである。施工前の軌道狂い量が0mm程度の場合は減少率の変動が大きい、軌道狂いの絶対値が大きい場合は0～100%の範囲内であり、残留成分はあるものの作業効果が見られた。一方、5段階のノイズ除去を行った波形(C_6)は、図-7のように減少率にはばらつきがあるものの、施工前の軌道狂い量が0mm付近を除き0～50%程度であり、波形の変化は小さい。この例のように、多重解像度解析は単にデータへ含まれるノイズ除去のみならず、周波数(解像度)ごとに軌道狂い状況を判断し、維持修繕を行った場合における作業前後の比較を行うことができるなど、新しい分析ツールとして今後の応用が期待できる。

(4) 波状特性・作業効果の評価手法としての 離散WT変換の可能性について

軌道狂いの波状特性及び作業効果を評価する手法として、離散WT変換は周波数特性及び変位の空間的推移を同時識別でき、ノイズ成分の分解、再構成が保証されるなどの長所があり、検査の自動化や保守計画の策定支援、軌道狂い進みの予測などの分野で有用と考えられる。一例として、これまでの作業実績に基づき、各周波数帯に影響を与える作業種別を特定することが可能であるほか、作業箇所を選定及び作業後の波形を予測するなど、様々な応用が期待できる。

今後の課題としては、(5)式に示すようにWT係数が入力信号とアナライジングWTとの相関係数であることから対象とする周波数成分等を考慮し、適切なアナライジングWTの設計、あるいは選択を行う必要がある。また、騒音、振動、走行安全性、衝撃荷重等の観点から、復元原波形の復元帯域外である波長数 m 以下の波状特性について定量化指標が求められている⁷⁾。現段階では解析例が限られていることから、解析データの蓄積が必要である。

4. 連続WT変換による軌道狂いの自己相似性の検出と 保守作業効果の検討

有道床軌道は、敷設の段階から徐々に劣化し、保守上

限に達すると復元する過程を繰り返すことを前提に設計された構造物である⁸⁾。したがって保守周期を長くするためには、入力信号に含まれる空間-周波数領域での特定パターンの発生傾向を検出することが有効である。

道路の路面プロファイル等の場合は、局所的な損失が生じない場合、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いる。しかしながら、ここで適用されてきたフラクタル解析は、ハウスドルフ次元や相関次元を用いており、大域的な把握には適するが、局所的な自己相似性の解析には不向きである¹⁾。

WT変換は、入力信号とアナライジングWTの相関について各周波数帯で適合したものを検出することができるため、局所的な自己相似性の検出に適するとされている。本章では、連続WT変換により軌道狂いの局所的な自己相似性及び劣化・復元のモニタリングについて考察した⁹⁾¹⁰⁾。

(1) 局所的な自己相似性の検出

図-8は、在来線の軌道状態について、標準偏差を用いて区間統計量として示している。この例に示す区間では復元原波形に基づいた計画線形によりMTT作業を行っており、保守周期は概ね19ヶ月である。また軌道構造に対して輸送量が多いため、軌道は徐々に劣化している(図中、「実際の残留狂い量」)。

図-8の区間について、連続WT変換により劣化・復元状態を把握したものを図-9に示す。この図は空間-スケール図と呼ばれ、アナライジングWTと相似相関が見られる位置、大きさ、範囲の特徴を表す。ここでアナライジングWTは計算が容易とされるMexican hatを用いた。入力信号は復元原波形、復元帯域は $\lambda=6\sim 50\text{m}$ である。

図-9中、列車の固有振動数($1\sim 1.5\text{Hz}$)⁴⁾へ影響を与える周波数帯を含めた $\lambda=10\sim 50\text{m}$ の範囲を1点鎖線枠で示した。横軸はアナライジングWTの位置パラメータ b とした。これは空間-スケール図の上に示した入力信号と対応している。一方、縦軸はスケールパラメータ a である。値が小さいほど高周波数である。復元原波形はバンドパスフィルタであるため、復元帯域外では明らかに検出精度が低下する。

WT係数の振幅の大きさについては明暗で示した。明暗のコントラストが大きいほど振幅が大きい。スケールについては色相で示した。同じ明るさから形成される等スケール線が輪状となっているが、さらに同様の形状が出現しており、局所的に自己相似性を有していると考えられる¹³⁾¹⁰⁾。

(2) 劣化・復元のモニタリング

図-9ではMTT作業後の波状特性の経時変化を時刻順に示す(作業区間を点枠で示す)。

波形を考察すると、(a)作業前に対し、(b)作業後2ヶ月

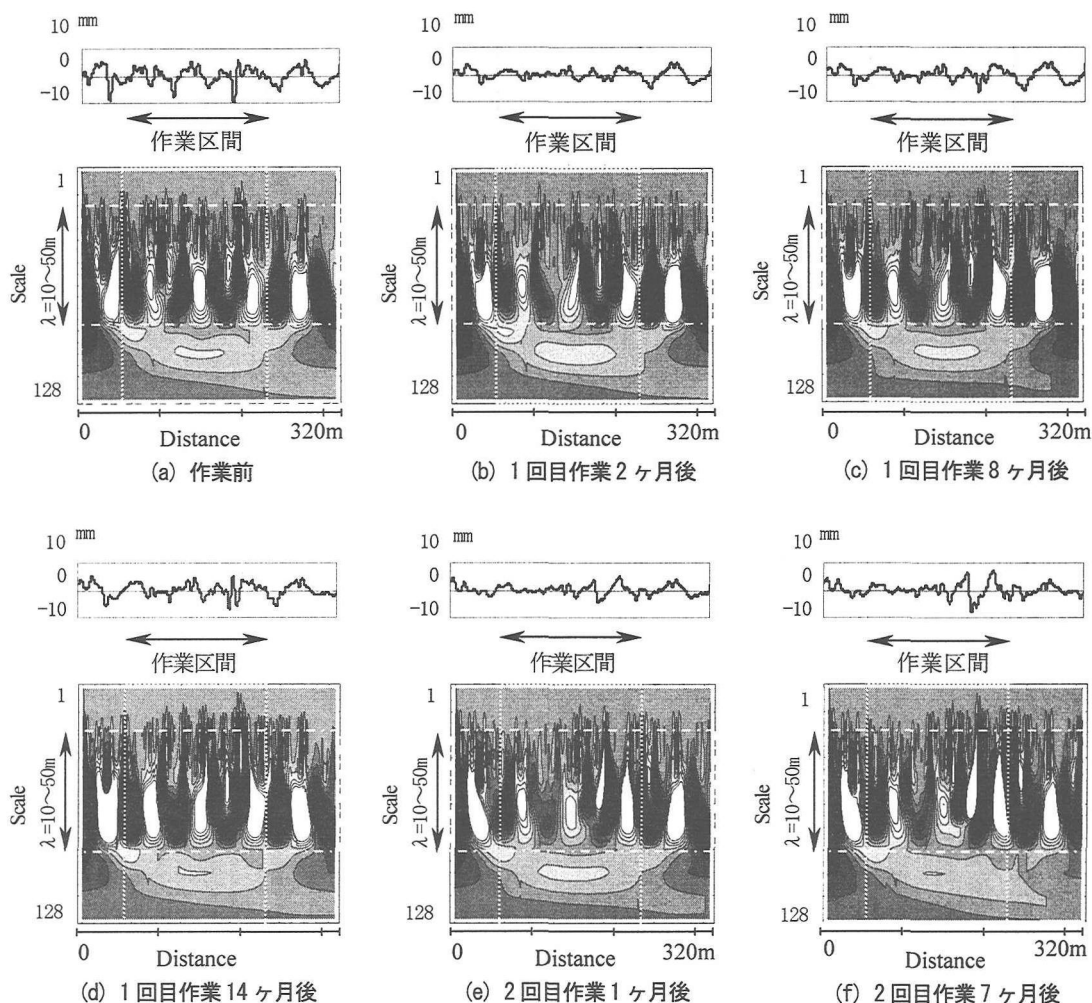


図-9 劣化・復元過程のモニタリング(高低狂い進み)

経過したものは平坦性が向上している。しかし軌道状態は徐々に劣化し、(d)の波形に至ると(a)の軌道状態に類似する。空間一スケール図を比較すると、WT係数の振幅の変化量に局所的な差が見受けられる。施工を行った復元帯域($\lambda=6\sim50\text{m}$)のうち、長波長領域(スケールが大きい領域)では、軌道狂いが完全に除去されていない場合があり、局所的に残留成分が見受けられる。その結果、当該箇所では残留成分の小さい波長帯域に比べて軌道狂いの進行速度が増加していると考えられる。このように、連続WT変換はMTT作業効果が持続する周波数帯及び劣化進行の早い周波数帯などを局所的にモニタリングすることができ、健全性監視ツールとして有効と思われる¹⁰⁾。

今後の課題として、離散WT変換の場合と同様に、解析結果がアナライジングWTの特性に依存していることから、入力信号の特徴を考慮したものを設計あるいは選択する必要がある。また、離散WT変換に比べ解析時間を要するなどの課題もあり、今後実務面への応用を考えるにあた

っては、さらに議論を要する^{2),3),9)}。

5. まとめ

本研究は軌道メンテナンスへのWT理論の適用性及び可能性について述べたものであるが、軌道狂いの復元原波形を用いた考察としては最初の報告になると思われる。本研究で得られた知見を整理すると以下ようになる。

- (1) フーリエ関数を基礎とした解析方法は、定常的あるいはこれに近いデータを分析する場合に適しており、解析対象区間の平均的な周波数成分を把握することが可能であるが、局所的な周波数成分を可視化することはできない。一方、WT変換は周波数情報と変動の空間的推移を同時に表現することができるため、不動区間など局所的な軌道狂いの波状特性分析に適している。
- (2) 在来線の高低狂いデータに対して離散WT変換を適用した結果、保守作業効果が見られる箇所と残留成分が

多い箇所を必要な周波数帯域ごとに判別することができた。このことを利用すると、これまでの作業実績を基に各周波数帯域に影響を与える作業種別を特定し、作業箇所の選定及び作業後の軌道狂い波形の予測を行うことができる。したがって、離散WT変換は保守作業効果の評価手法として有効なツールであると考えられる。

- (3) 連続WT変換を適用した結果、軌道狂いに生じた局所的な自己相似性を可視化することができた。また軌道狂いの経時変化に着目したモニタリングを行うことにより、作業効果の持続に関する局所的な差異を捉えることができた。このことから、連続WT変換は健全性監視ツールとして有効なツールであると思われる。
- (4) 今後の課題としては、軌道狂い解析に適したアナライジングWTの設計または選択、解析データの蓄積などが挙げられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、データ処理に関してご協力いただいた財団法人鉄道総合技術研究所の関係各位に謝意を表します。

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) 榊原進: ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電気大学出版局, 1995.
- 3) 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.
- 4) 吉村彰芳: 軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の確立とその応用, 鉄道技術研究報告, 施設編 586号 No.1336, 1987.
- 5) Stephen Wolfram: The Mathematica Book Fourth Edition, 東京書籍, 2000.
- 6) 吉村彰芳, 吉田康夫, 細川岳洋, 菊地勝浩: 軌道保守管理データベースシステム: マイクロLABOCS-II+の開発, 鉄道総研報告, 第6巻, No.11, pp. 69-78, 1992.
- 7) 須永陽一, 佐野功, 井手寅三郎: 高速新幹線における短波長軌道狂いの検出法, 鉄道総研報告, 第13巻, No.5, pp.11-26, 1999.
- 8) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造[有道床軌道](案), 鉄道総合技術研究所, 1997.
- 9) 山本鎮男編: ヘルスモニタリング—機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視, 共立出版, 1999.
- 10) 白川龍生, 川村彰: 軌道の劣化・補修効果のモニタリングに関する基礎的研究, 土木学会北海道支部論文報告集, pp.752-755, 2001.

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*

白川龍生**・川村彰***・上浦 正樹****・中辻隆*****

効果的な軌道メンテナンス方法の確立は、列車の走行安全性や乗り心地の確保、運営コスト低減などの点で極めて重要な課題である。本研究では軌道の測定結果から特定の凹凸情報を正確に把握するための解析手法として、多くの工学分野で近年注目されているウェーブレット理論について検討し、中、長波長領域の軌道狂いデータを用いて空間周波数解析および多重解像度解析を行った。さらに波状特性・保守作業効果の評価手法としての同理論の今後の可能性を考察した。また、軌道の自己相似性及び軌道時刻歴データに基づく軌道の劣化・復元過程について、連続ウェーブレット変換を用いたモニタリングを行っている。

APPLICABILITY AND POTENTIALITY OF WAVELET THEORY TO TRACK MAINTENANCE *

By Tatsuo SHIRAKAWA**・Akira KAWAMURA***・Masaki KAMIURA**** and Takashi NAKATSUJI*****

The establishment of an effective track maintenance method is a very important issue for the stability, of train riding comfort, cost reduction management, and so on. This paper examines the "Wavelet theory" as an analyzing tool for detecting specified information of the track such as evenness-irregularity data. Moreover, space-frequency and multiresolution analysis are performed using the track-irregularity inspection data at the medium wavelength domain. And the potentialities of this theory of the future evenness evaluation methods are discussed. Furthermore, the self-similarity and the process of deterioration and restoration on the tracks are discussed by the continuous wavelet transform.