

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 ^{*)}

APPLICATION AND POSSIBILITY OF WAVELET THEORY TO TRACK MAINTENANCE ^{*)}

白川 龍生ⁱ⁾・川村 彰ⁱⁱ⁾・上浦 正樹ⁱⁱⁱ⁾・中辻 隆^{iv)}

By Tatsuo SHIRAKAWAⁱ⁾・Akira KAWAMURAⁱⁱ⁾・Masaki KAMIURAⁱⁱⁱ⁾・Takashi NAKATSUJI^{iv)}

1. はじめに

鉄道軌道は、近年の高速化や輸送量の増大による軌道破壊量の増加、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によって整備レベルを一定水準に維持することは困難になりつつあり、効果的なメンテナンス方法の確立がこれまで以上に求められている。

軌道狂いの波状特性を把握するには、フーリエ関数やパワースペクトル密度（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、局所的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、ある特定現象の発生位置に関する情報は明確に表現されず、また局所的な変化のため平均的な波状特性が歪んで表される。このように、これまで困難であった空間特性及び周波数特性の同時識別を可能とする方法として、近年、音響・画像信号処理など工学系分野で適用されているウェーブレット（以下、WTという）理論が注目されている¹⁾。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て、変動の空間的推移も同時に把握できる。

本研究は、軌道狂いの周波数応答特性を補正した復元原波形に対して、離散WT変換による多重解像

度解析を行った。さらに今後の波状特性、作業効果の評価手法として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WT変換を用いたモニタリングを行っている。

2. 離散WT変換を用いた多重解像度解析によるメンテナンス作業効果の考察及び可能性

(1) メンテナンス作業前後の多重解像度解析

軌道メンテナンス作業のうち、高低狂い整正作業には一般的にマルチプルタイタンパ（以下、MTTという）が使用され、道床をつき固めつつ軌きょうを移動する方法で行われる。作業における計画線形は、近年、復元原波形（10m弦正矢検測システムの周波数応答特性を補正する特殊なバンドパスフィルタ（復元逆フィルタ）処理によって得られる波形）を用いられる場合が多い²⁾。

本章では、軌道狂いを定常分（基本線形）に生じた一種のノイズと仮定し、離散WT変換が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性質を利用して、離散WT変換を用いた多重解像度解析を行い、作業効果について考察した。アナライジングWTは、レール継目部など軌道狂い波形の形状等を考慮し、直交基底であるDaubechiesを用いた。

多重解像度解析の適用例を図-1に示す。また同区間のPSD解析結果を図-2に示す。

図-1は、 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。

メンテナンス作業前後を比較すると、ノイズ除去の過程で得られた各周波数帯のノイズ成分（ d_{j+1} ：軌道狂いと考えられる）は、作業前に比べて作業後のノイズ成分が少なくなっており、一定の作業効果

^{*)}キーワード：鉄道計画，土木施設維持管理，情報処理

ⁱ⁾正員，北見工業大学工学部土木開発工学科

（北海道北見市公園町165番地，
TEL0157-26-9520，FAX0157-23-9408）

ⁱⁱ⁾正員，工博，北見工業大学工学部土木開発工学科

（北海道北見市公園町165番地，TEL0157-26-9510）

ⁱⁱⁱ⁾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，TEL011-841-1161）

^{iv)}正員，工博，北海道大学工学部土木工学科

（札幌市北区北13条西4丁目，TEL011-706-6215）

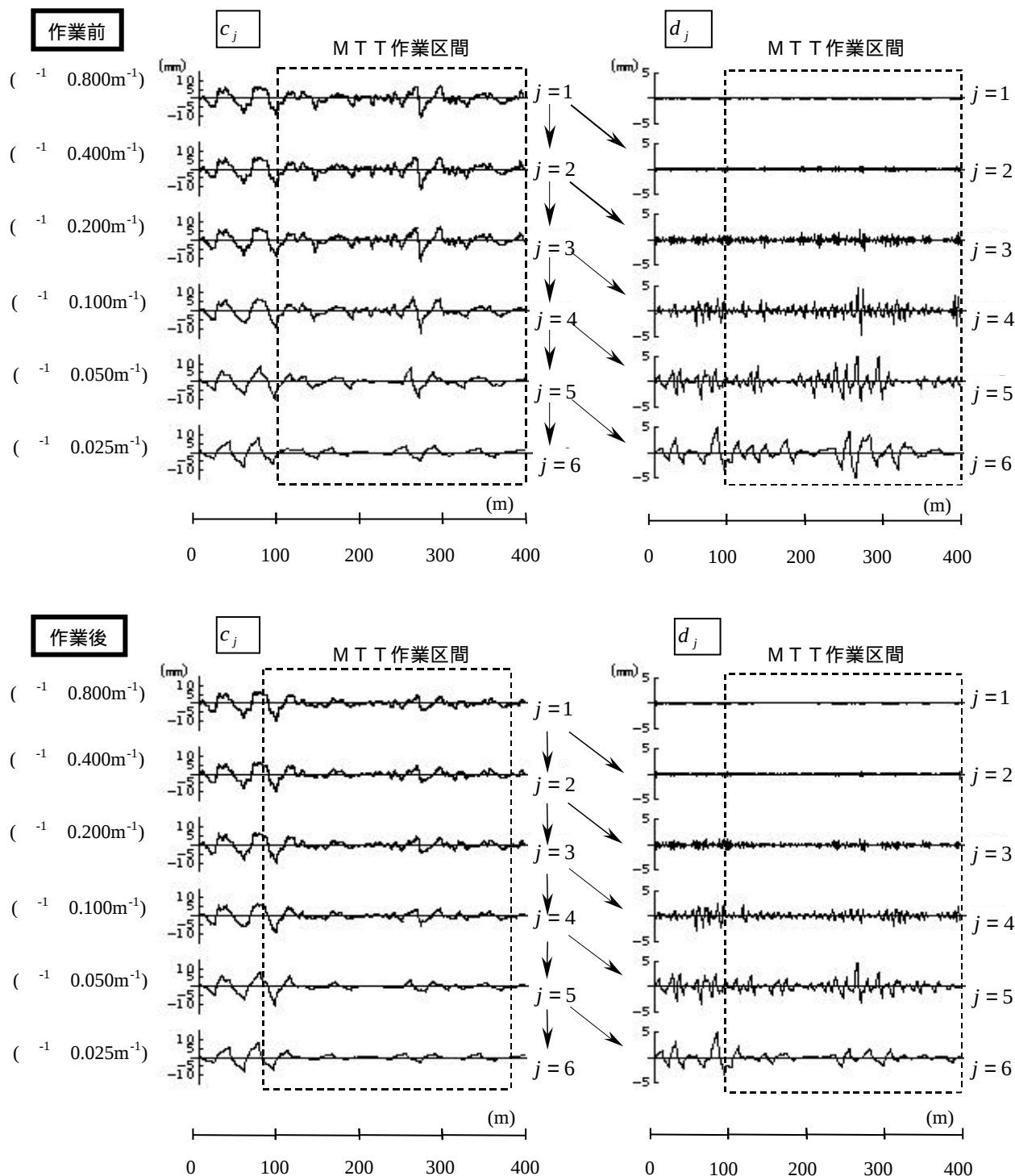


図-1 多重解像度解析結果（MTT 作業前後）

が見られる。一方、5段階のノイズ除去を行った波形（ C_6 ：基本線形成分、もしくはMTT作業区間の対象外の成分）は、ほぼ同等の形状が得られた。このことは図-2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明らかではあるが、PSD解析は空間位置情報を有さない区間評価であるため、局所的な周波数成分の比較は不可能である。

これに対し、図-1では位置情報と周波数情報を同時に表現しており、作業効果が明確な箇所、残留成分

が多い箇所などを判別することができる。この点で、多重解像度解析は単にデータに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、維持修繕前後の比較を可能とするなど、従来の評価ツールの短所を補完しており、軌道メンテナンスの定量化手法として今後実務面への応用が期待できる。

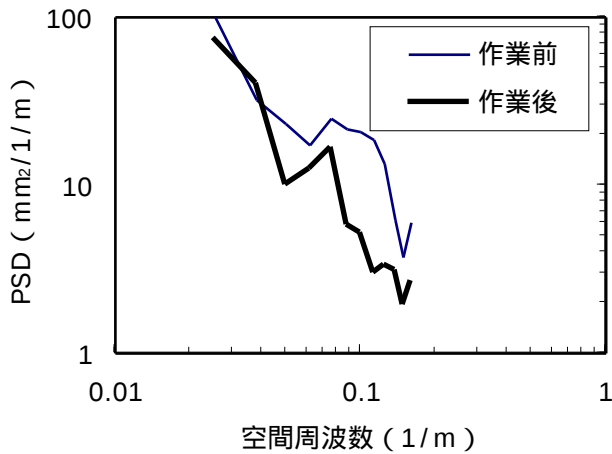


図-2 PSD解析結果 (MTT作業前後)

(2) 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

空間及び周波数特性の同時識別を可能とし、ノイズ成分の分解、再構成が保証されている離散WT変換は、今後、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。

今後の課題として、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、原波形の復元帯域外（本研究で用いた復元逆フィルタは、 $\approx 6 \sim 60\text{m}$ を通過域とし、これ以外の波長帯は遷移域または阻止域とした）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。今後、短波長の検出に有効とされる軸箱加速度波形などのデータの蓄積が必要と思われる³⁾。

3. 連続WT変換による軌道狂いの自己相似性の検出とモニタリング

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（図-3）を繰り返すことを前提に設計された構造物である。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と思われる。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。そこで本章では、連続WT変換により局所的な自己相似性、及び時刻順に整理し、劣化・復元のモニタリングについて考察した⁴⁾。

(1) 局所的な自己相似性の検出

図-3は、軌道の整備状態について標準偏差を用い

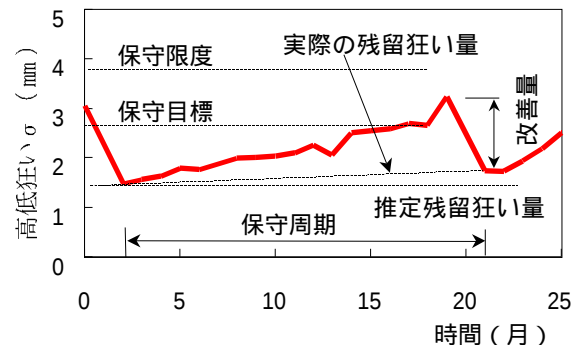


図-3 軌道状態の劣化・復元過程の例

た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メンテナンス作業を行っており、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）。この区間について、連続WT変換により劣化・復元状態を示したものを図-4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とし、復元帯域は $\approx 6 \sim 50\text{m}$ である。図-4中、列車の固有振動数（ $1 \sim 1.5\text{Hz}$ ）へ影響を与える周波数帯を含めた $\approx 10 \sim 50\text{m}$ の範囲を1点鎖線枠で示した。また、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 であり、値が小さいほど高周波数を意味する。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。また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。

(2) 劣化・復元のモニタリング

図-4では、MTT作業後の波状特性の経時変化を時刻順に示している（作業区間を点枠で示す）。復元原波形を比較すると、(a)作業前に対し、(b)作業後2ヶ月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)に至ると(a)の波形に類似する。

次に空間-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

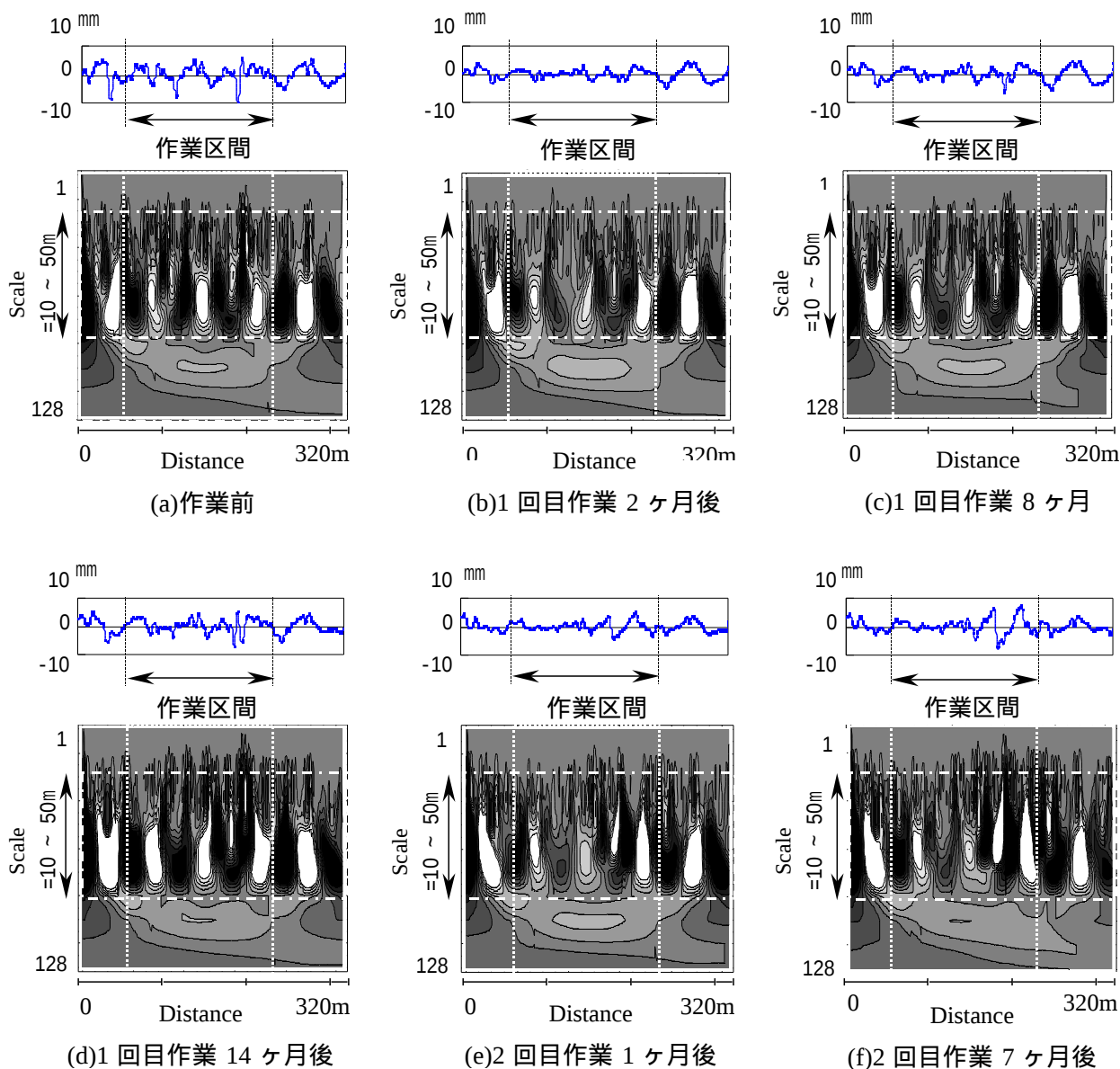


図-4 劣化・復元過程のモニタリング（高低狂い進み）

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。

以上のように、空間 - スケール図により、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できる。

(3)連続WT変換を適用する際の課題

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、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り、さらに議論が必要と考えられる³⁾⁴⁾。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 白川龍生,川村彰,上浦正樹,高井秀之：軌道の劣化・復元のモニタリングに関する基礎的研究,土木学会第56回年次学術講演概要集,pp.580-581,2001.