

## 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

Basic Research on Monitor of Deterioration and Effect of Repair of Track

(財) 鉄道総合技術研究所 ○ 正 員 白川龍生 (Tatsuo Shirakawa)  
 北見工業大学土木開発工学科 正 員 川村 彰 (Akira Kawamura)

## 1. はじめに

線路の疲労現象の一つである「軌道狂い」は、その原因が多岐に及ぶため、メカニズムの把握が容易ではない。

特に都市間鉄道の高速化に伴い、軌道破壊がこれまでになく短い周期で進行しており、これまで主に用いられてきた区間評価であるP値及び標準偏差 ( $\sigma$ )、また軌道狂いの最大値に対応した保守だけでは、対応が困難となっている。

従って、適切な軌道整正を行い健全な状態を常に維持するには、軌道検測車により定期的な検測を行い、測定結果を信号処理手法によって分析して、線路に蓄積された損傷の程度を把握し健全度判定を行う必要がある。この(1)センシング、(2)信号処理、(3)健全度判定の3要素を有機的に結合したシステムは一般にヘルスマニタリングと言われており、発祥地はアメリカ合衆国と言われている<sup>1)</sup>。

本研究では、水準測量によって計画された線形に基づき、マルチプルタイタンバによるつき固め作業を行った施工前後の比較と、施工後の軌道狂いの変化について2年間の測定結果に基づき、パワースペクトル密度解析、及び連続ウェーブレット解析により軌道狂いについて基礎的なモニタリングを行い、軌道狂い進みのメカニズム解明へ向けた一知見として報告する。

## 2. 連続ウェーブレット変換

ウェーブレット変換とは、信号データを生成する「小波」もしくは「さざなみ」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<sup>2)</sup>。ウェーブレット変換とは、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 (self-similarity) 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。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がある範囲内 (アドミッシブル条件: admissible condition) を満足する範囲内で分析することが可能である。

ウェーブレット変換は大別すると、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「連続ウェーブレット変換」と、信号のノイズ除去や異なる性質を持つ信号の分離・比較等を可能とする「離散ウェーブレット変換」の2種類が存在する。このうち、本研究では「連続ウェーブレット変換」を適用する。

## 2.1 連続ウェーブレット変換

基底となるウェーブレットは次式で定義される。

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

ここで、 $\Psi(t)$ は核関数であり、ウェーブレット変換では一般にアナライジングウェーブレット(analyzing-wavelet)という。 $a$ 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り、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、

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

から作成される。 $\mathbb{R}$ は実数からなる集合を表す。

また(1)式において、 $\Psi(t)$ を空間(時間)軸方向に $a$ 倍するのと同時に、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。

$\Psi(t)$ と信号 $x(t)$ との内積が連続WT変換であり、(3)式に示す。

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

(3)式により、空間関数 $f(x)$ 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。

## 3. 測定概要

解析に用いるデータは、在来線1級線 (累積通トン3,000万t/年)について、軌道検測車により測定したデータを用いる。

ここで検測は10m弦正矢法であるため、波長6~60m (軌道狂い成分) について、検測特性の逆フィルタ演算処理を行い、絶対線形にバンドパスフィルタ処理を行った波形とほぼ同等の形状を再現する。これは一般に復元原波形と呼ばれ、軌道保守管理データベースシステム「MicroLABOCS」により処理した。

軌道狂い波形を時系列順に整理したものを図-1に示す。ここで、98年4月の波形は道床つき固め作業 (作業範囲: 324K000M ~ 324K200M) 実施前のものであり、

98年6月の波形はつき固め作業直後の結果である。99年10月に再度道床つき固め作業を行っている。また、99年5月～10月に323K850M～324K000Mにかけ踏切工事に伴う軌道整備が施工され、波形に変化が見られる。

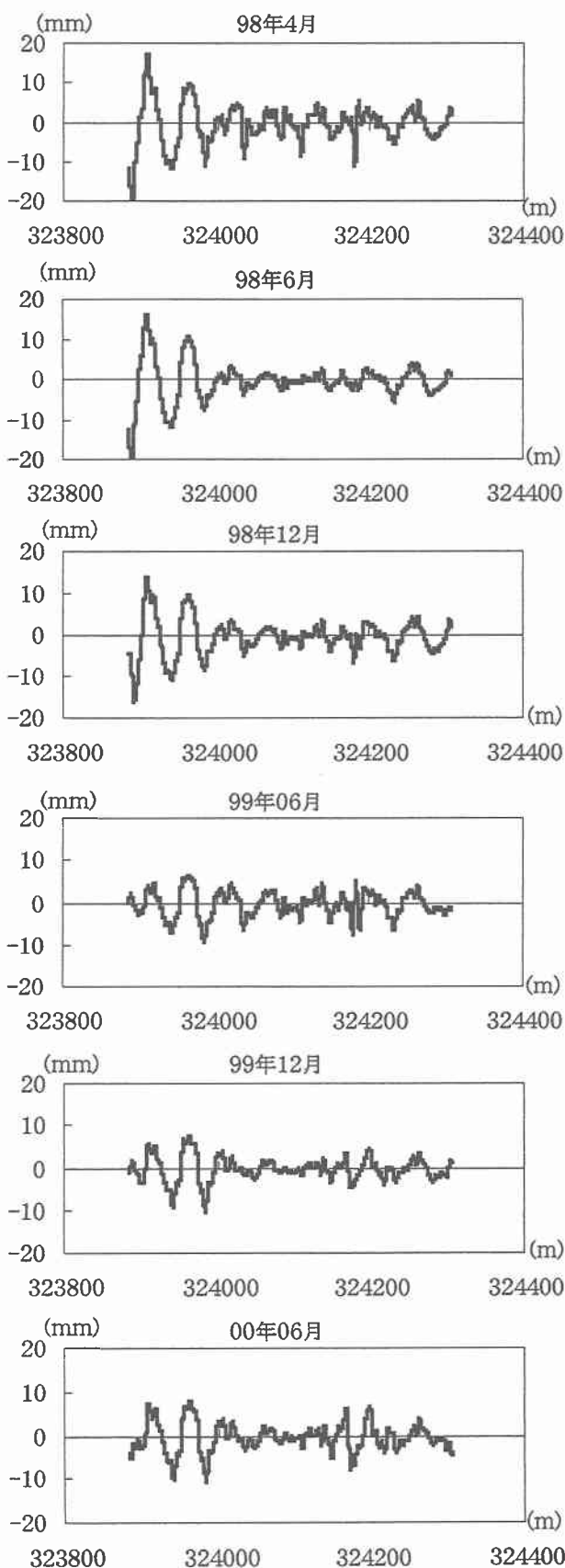


図-1 解析区間の軌道狂い波形（1級線：復元原波形）

一般的に、有道床軌道は乗り心地目標範囲を目標として、保守下限から保守上限までの範囲内で整備を実施する。劣化レベル（保守上限）から初期状態に近いレベル（保守下限）まで機能回復してから次の保守までの期間が保守周期である。この概念図を図-2に示す。

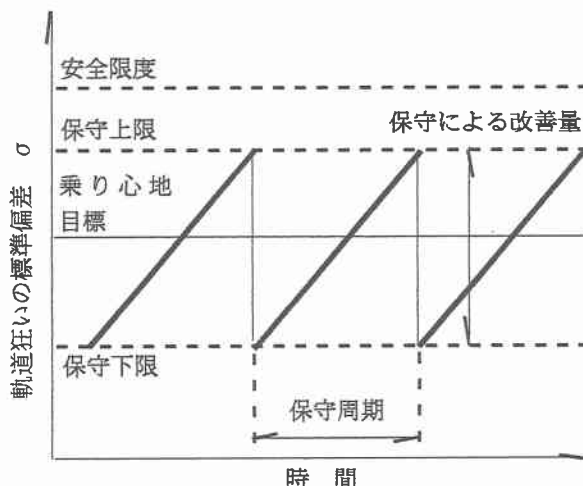


図-2 軌道状態の劣化・復元サイクル

解析区間のうち、324K000M～324K200mについて、劣化・復元サイクルを求めたのが図-3である。長年にわたる劣化・復元サイクルのごく一部であるが、この場合（絶対基準による道床つき固め）は概ね20ヶ月前後と推定される。

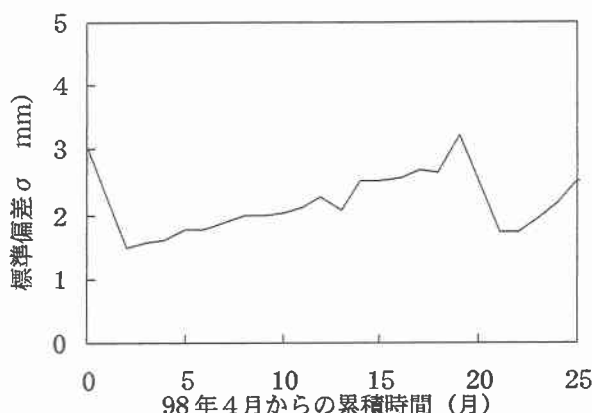
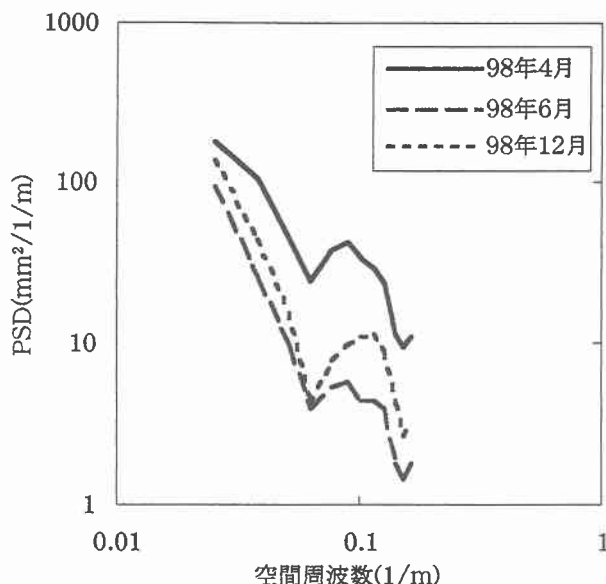


図-3 解析区間の劣化・復元サイクル

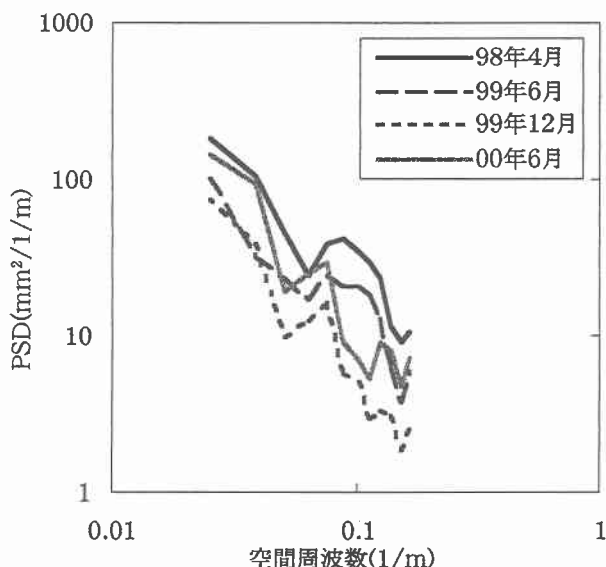
#### 4. 軌道狂いの劣化・補修効果の評価

解析区間の軌道狂いについて、波長特性の分析に有効であるパワースペクトル密度解析（以下PSDとする）により劣化・補修の程度を評価したものを図-4に示す。ここでデータは復元原波形であり、その復元領域は波長6～60mであることから、復元領域外の周波数成分については、その値が極めて0に近い値となる。

98年4月から98年12月までは、空間周波数0.1（1/m）付近で卓越成分があるが、これは、図-2に示す軌道狂いのうち、323K850M～324K000Mまでの軌道狂い（踏切前後）によるものである。また99年6月については、道床つき固め作業による補修を行った箇所が再び劣化した影響と考えられる。



(1) 98年4月～98年12月の推移



(2) 99年6月～00年6月の推移

図-4 高低狂いの PSD 解析結果と推移

PSD 解析結果を考察すると、両対数グラフにおける分布の指数  $\beta$  が直線的であり、数式で表現すると関数型がべき乗となる傾向が見られる<sup>3)</sup>。

軌道狂いの場合、概ね波長25m付近を境に分布形状が異なり、低周波域（波長60～25m）と高周波域（25m～6m）に分類して整理することができる。本解析区間における時系列毎の解析結果を数式化し、表-1に整理する。なお、数式は式(4)で表現し、パラメータを表中に記した。

$$G(f) = Af^{-\beta} \quad (4)$$

ここで、パラメータ  $A$  は軌道狂いの振幅の大きさに関係しており、パラメータ  $\beta$  と組み合わせて検討し、PSD 解析の囲む面積が小さいほど、良好な線路状態にある。

解析結果を検討すると、施工が行われた直後（98年6

表-1 PSD 解析結果の数式化（パラメータ）

|          | 低周波域   |         | 高周波域   |         |
|----------|--------|---------|--------|---------|
|          | A      | $\beta$ | A      | $\beta$ |
| 1998年4月  | 0.1349 | 1.98    | 1.5071 | 1.19    |
| 1998年6月  | 0.0012 | 3.17    | 0.1799 | 1.31    |
| 1998年12月 | 0.0012 | 3.17    | 0.9479 | 0.86    |
| 1999年6月  | 0.0055 | 2.84    | 2.0025 | 0.88    |
| 1999年12月 | 0.0027 | 2.81    | 0.1071 | 1.67    |
| 2000年6月  | 0.0065 | 2.77    | 0.487  | 1.32    |

月、99年6月及び99年12月には値に大きな変化が見られる。また、劣化については、PSD 解析の面積が大きくなることに加え、 $\beta$  の値が小さくなっている。

ここで、自然現象等で数多く報告されているフラクタル次元の考え方を導入すると、劣化が進むことにより分布の複雑さについて定量化できる。

フラクタル（fractal）とは、特徴的な大きさを持たない複雑な図形の場合、その一部を拡大すると元の図形と近似しているという性質を有しており、この図形について非整数次元を用いて定量的に扱う幾何学をいう<sup>4)</sup>。

フラクタル次元は  $D$  で表示され、PSD 解析における指数  $\beta$  と次の関係にある。

$$\beta = -2D + 5 \quad (5)$$

高低狂いの場合、 $\beta$  の値が1～3の範囲である場合、分布に自己相似性があり、フラクタル次元を算出することができる。本解析では、低周波域では線路状態が良好な場合  $D=1.08$  程度であり、劣化した場合  $D=1.51$  程度となる。また高周波域では良好な状態で  $D=1.67$ 、劣化した状態で  $D=1.91$  であった。

フラクタル次元の有する情報として、軌道狂いの場合、 $D=1$  の場合直線と解釈でき、1次元から2次元の間で変動することが考えられる。ゆえに  $D=1$  に近い値が良好な線路状態であり、 $D=1.51$  は  $D=1.11$  に比べ不良ということができる。高周波域は低周波域に比べ軌道状態は複雑であり、保守頻度が高いという実態がフラクタル次元により定量的に把握することができる。

またフラクタル次元が計算できない領域にある場合、その分布には自己相似性が見られないと考えられる。

軌道狂いの PSD については、池守らによって P 値25～35程度の線路について報告されているが<sup>3)</sup>、近年の保守作業の近代化等により現実と相違することが考えられるため、改めて多くの線区でデータ解析を行う必要があると思われる。

## 5. 局所的な軌道の劣化・補修効果の評価

PSD 解析は、比較的大域な範囲のフラクタル性を評価するものであるため、局所的な自己相似性については、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関連関係について有用である連続ウェーブレット解析を適用した。解析結果の空間-スケール図を図-5に示す。なお解析には MATHEMATICA を用いた。

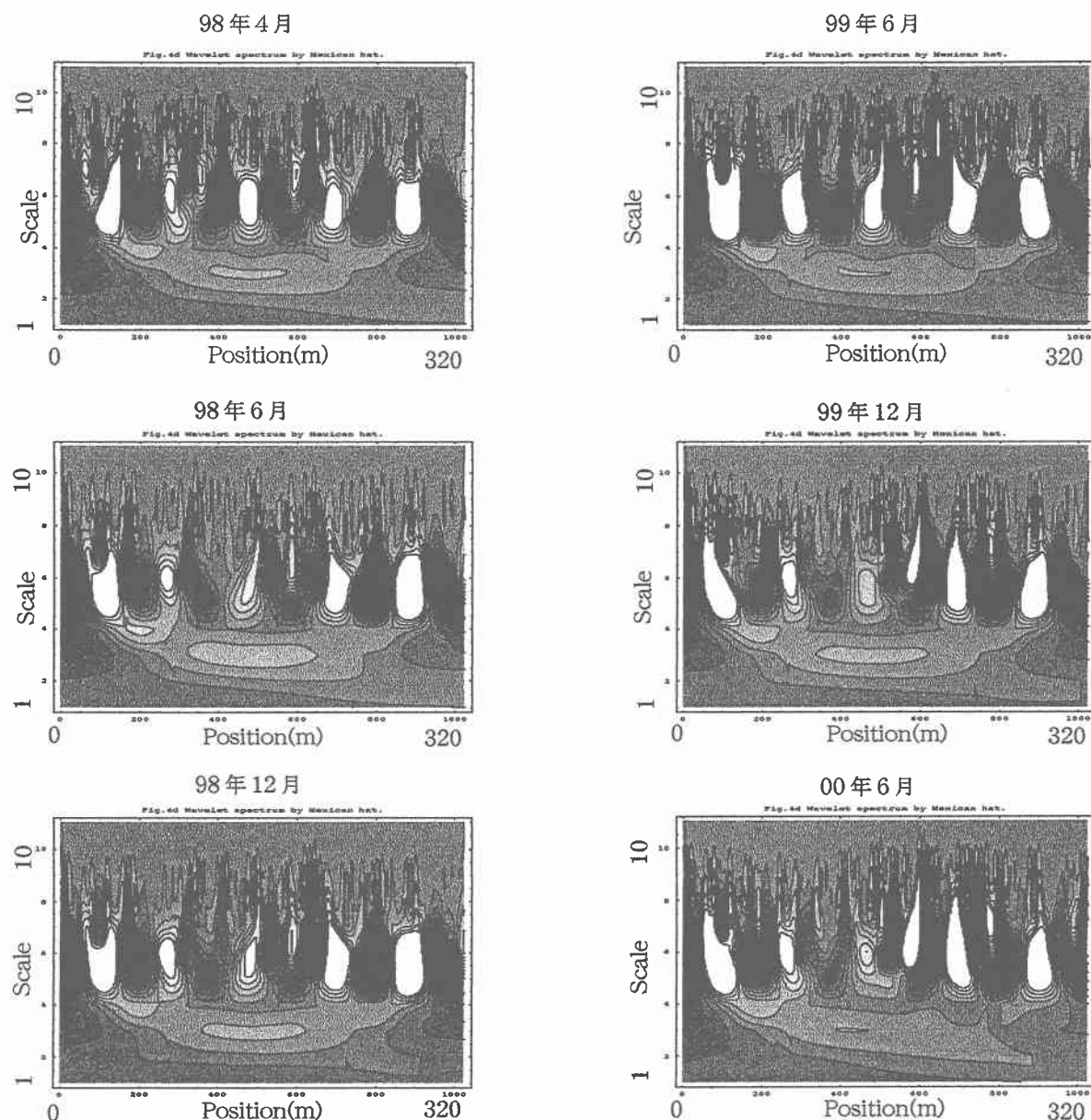


図-5 高低狂いの空間-スケール図 (アナライジングウェーブレット: メキシカンハット)

図-5において、振幅の大きさを位相を各々明暗と色相により表示する。ここで横軸は時間方向へのシフト軸 $b$ であり、縦軸は区間 $a$ の逆数(周波数に対応)を対数で示す。下部に向かうほど低周波数である。白の部分は正の値、黒の値は負の値を表す。同じ明るさから形成される等位相線内に、また同様の輪郭が出現しており、局所的な自己相似性を確認することができる。

図-5を考察すると、道床つき固め直後の98年6月及び99年12月の場合は、施工を行った約200m区間の等位相線の形状に変化が認められ、振幅の大きさが小さくなり、軌道の平坦性が向上している。半年後の98年12月及び00年6月の図と比較すると、スケールの大きな領域(高周波数)の振幅が、半年(施工後の累積通トン1,500~2,000万トン)を経過すると大きくなり、1年後の99年6月の場合は98年4月の空間-スケール図と大差がない結果となった。

## 6. おわりに

これまで、軌道の劣化・補修効果のモニタリングに関する検討を行ってきたが、単に施工前と施工後の補修効果を比較するのみならず、劣化状況も含めて信号処理による中長期的なモニタリングを行うことにより、基礎的な段階ではあるが、軌道狂い進みのメカニズムを解明するための有効な方法であることを示した。現段階ではまだ適用例が少ないことから、今後様々なレベルの軌道狂い、補修方法の違いによる劣化状況の比較等について検討を行いたい。

## 参考文献

- 1) 山本鎮男: ヘルスマニタリング、共立出版、1999
- 2) 芦野隆一、山本鎮男: ウェーブレット解析、共立出版、1997
- 3) 池守昌幸: 軌道狂いのパワースペクトル密度、鉄道線路、Vol.29, No.9, pp.35-38、1981