

IV-13

多重解像度解析を用いた鉄道線路の軌道狂い管理

北海道旅客鉄道(株) ○ 正 員 白川 龍生
北見工業大学工学部 正 員 川村 彰

1. はじめに

鉄道線路は、その上を走行する列車を支持し、円滑な誘導を行う役割を果たしている。しかし列車から伝播してくる繰り返し荷重・自然条件変化等を受け次第に変形し、車両走行面の不整を生ずる。これは「軌道狂い」と呼ばれており、車両走行安定性・乗り心地に大きく影響する重要な管理項目となっている。また、軌道狂いについての全体的な保守管理には、ある区間の軌道状態の良否を表わす指標として、一般的に「軌道狂い指数 P」(以下、「P 値」と呼ぶ)と、度数分布から算出する標準偏差を用いて把握を行っている。

本研究では、はじめに信号処理の分野で近年特に注目を集めている Wavelet 理論を用いた「空間周波数解析」に着目し、軌道狂いの特徴について位置と周波数の2変数で把握を行った。その上で、異常値を除去し軌道狂い波形を再現する目的で「多重解像度解析」を行った。また、除去後の軌道狂いデータが P 値と標準偏差に及ぼす影響について考察し、軌道狂い管理への Wavelet 理論の適用性について検討を行った。

2. P 値による現在の保守管理手法

軌道狂い指数は一般に P 値と呼ばれ、軌道の整備状態の良否を把握する指数として広く用いられている。狂い階級 $X_i(\text{mm})$ の頻度を f_i とすると、数値群の平均値 m と標準偏差 σ は、

$$m = \frac{\sum f_i x_i}{\sum f_i} \tag{2-1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum f_i (x_i - m)^2}{\sum f_i}} = \sqrt{\frac{\sum f_i x_i^2}{\sum f_i} - m^2} = \sqrt{\sigma_0^2 - m^2} \tag{2-2}$$

であり、また数値群の分布は次式により表される。

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \tag{2-3}$$

以上の様に、ある区間の軌道狂いの状態は、2つの指数 m, σ により表すことができる。しかし、この2つの指数を結びつけ、1つの指数で表すことができればより有用である。その方法として、Fig.1 に示す様に、軌道狂いの分布曲線に一定の限界線 $\pm a$ mm を引き、これを超過する狂いの割合を求める。この割合のことを軌道狂い指数 P と呼ぶ。

$$P_1 = \int_{+a}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx \times 100 \tag{2-4}$$

$$P_2 = \int_{-\infty}^{-a} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx \times 100 \tag{2-5}$$

$$P = P_1 + P_2 \tag{2-6}$$

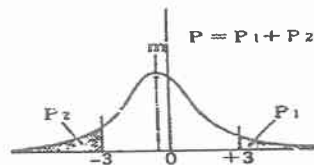


Fig.2-1 軌道狂い分布曲線

限界値 a は現在 3mm を採用している。また測点数は、100m 当たり 200 点 (0.5m 間隔) としている。

Study on the Track Maintenance Method by use of Multiresolution Analysis
By Tatsuo SHIRAKAWA and Akira KAWAMURA

3. 多重解像度解析

Fig.3-1 に示す様に、解析に用いる基本関数 $\psi(x)$ について、 a 倍スケール変換し、 b だけトランスレートすると $\psi((x-b)/a)$ を形成する。これより Wavelet 変換は、離散表現では、2 進移動と 2 進ダイレーションを施した $\psi(2^j x - k)$ (j, k は整数)を用いて、式(3-1)で定義される。

$$(W_\psi f)(2^j, 2^k) = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \overline{\psi(2^j x - k)} f(x) dx \quad (3-1)$$

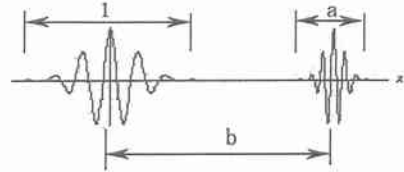


Fig.3-1 スケールとトランスレートの関係

ここで、 $f(x)$ を元の関数、 $\psi(x)$ を Mother-Wavelet、

$(W_\psi f)(2^j, 2^k)$ を Wavelet 係数とする。この Wavelet

係数を用いて、式(3-1)における b を横軸、 $1/a$ を縦軸とする平面へプロットすることで空間周波数解析を行うことができる。

$$f(x) = \sum_j \sum_k d_k^{(j)} \psi(2^j x - k) \quad (3-2)$$

$$d_k^{(j)} = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi(2^j x - k)} f(x) dx \quad (3-3)$$

なお、Mother-Wavelet とは信号成分を抽出するための基本 Wavelet である。本研究で行う離散 Wavelet 変換では、Mother-Wavelet は基底関数となるものでなければならず、しかも応用上はコンパクトなサポートを持つ(関数値が 0 でない区間が有限である)関数が望ましい。これらの条件を満たす Mother-Wavelet はかなり限定される。著者らは、様々な試行の結果、周波数分解性能に優れ、かつ軌道狂い形状を抽出しやすい Spline $m=4$ を使用した(Fig.3-2)。

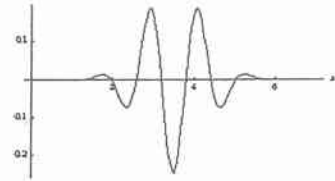


Fig.3-2 Mother-Wavelet(Spline $m=4$)

4. 本研究で用いた測定データ

本研究の対象区間は、当社営業線、根室本線 庶路・東庶路間である。同区間において、平成10年度第 2 四半期、及び第 4 四半期に、それぞれ高速軌道検測車にて高低凹凸狂いデータを測定した。

当該区間は、平成9年度ロングレール化を実施した区間で、その施工延長は約 4.9km である。このロングレールは通常のロングレール化と異なり、古 24m レール(既に他の線区で使用された中古レールのレール端部を 0.5m ずつ切断加工したもの)を使用したという特徴を有する。

ロングレール敷設後1年が経過したが、その間、大きな列車動揺や微振動が度々発生していた。また軌道状態も高低狂いが進行しており、P 値は通常新品レールを使った場合、 $P=0\sim5$ であるのに対し、平均 $P=6\sim11$ を有していた。そこで、軌道状態を詳細に測定し必要な保守を行う意味から、通常のマヤ車データサンプリング 0.5m を 0.25m で多重解像度解析を実施した。

5. 空間周波数解析結果

本研究対象区間のうち、特に P 値の悪化が著しい区間(620m)について抽出し、空間周波数解析を行った。解析結果を Fig.5-1 に示す。一番上の枠内は原波形で、測点の周波数は(4.000c/m)である。以下順次波長を2倍、周波数(解像度)を 1/2 倍し、5段階まで分解を行った ($j = -1\sim-5$)。

解析結果より、2.000~0.500c/m まで、非常にノイズが強く確認できる。原因としては、レール頭頂面凹凸のほか、ロングレール化に伴うガス圧接部の段差、以前使用していた際のレールくせ、旧継目部の道床噴泥などが考えられる。

そこでこの影響を除去し原波形を再合成すると、P 値とその標準偏差がどの程度変化するか、引き続いて多重解像度解析を行った。

6. 多重解像度解析

Fig.6-1(a)・(b)は、原波形の高低凹凸狂いデータと、その度数分布である。原波形の P 値は $P=14.7$ 、標準偏差は $\sigma=1.61$ である。図中、点線で囲まれた部分が P 値に影響を与えない箇所であり、枠外は P 値としてカウントされる量となる。

Fig.6-2(a)・(b)は、 $j=-1\sim-2$ の要素を除去した場合である。度数分布より、平均値 m の個数が約 100 個増え、データの均衡化が図られてきている。ここで、 $j=-1\sim-2$ の要素を除去する方法としては、主にレール踏面凸部の削正、凹部への溶射肉盛等が考えられる。

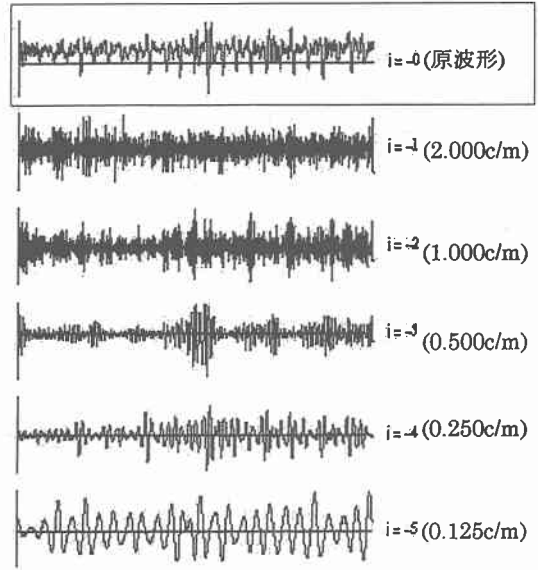


Fig.5-1 空間周波数解析結果(Spline $m=4$)

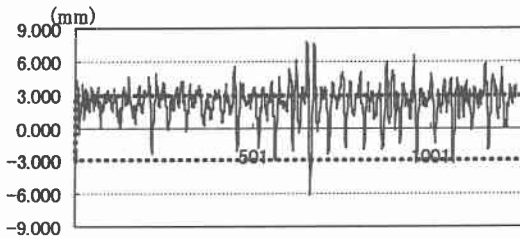


Fig.6-1(a) 高低凹凸狂いデータ (原波形)

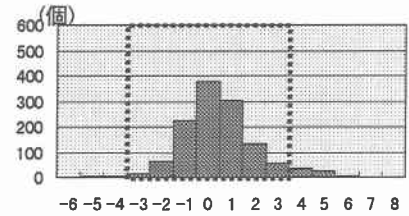


Fig.6-1(b) 度数分布状況 (原波形) (mm)

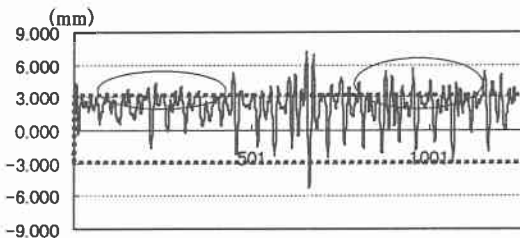


Fig.6-2(a) 高低凹凸狂いデータ ($j=-1,2$ 除去)

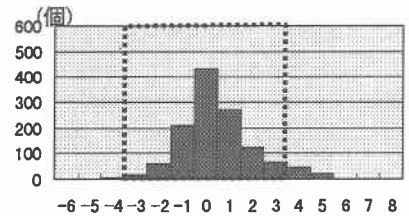


Fig.6-2(b) 度数分布状況 ($j=-1,2$ 除去)

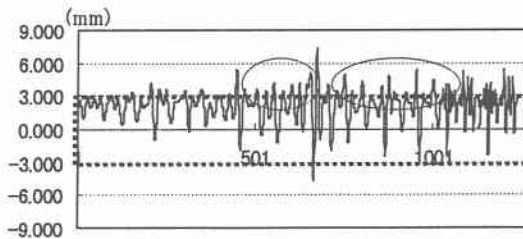


Fig.6-3(a) 高低凹凸狂いデータ ($j=-1\sim3$ 除去)

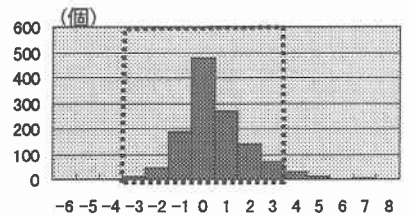


Fig.6-3(b) 度数分布状況 ($j=-1\sim3$ 除去)

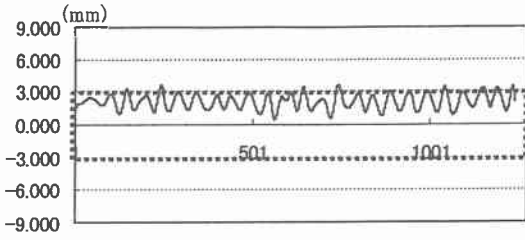


Fig.6-4(a) 高低凹凸狂いデータ (j=-1~4 除去)

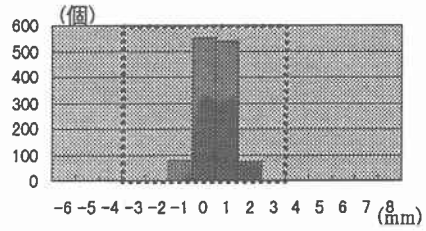


Fig.6-4(b) 度数分布状況 (j=-1~4 除去)

P 値の推移は、 $P=14.7 \rightarrow 14.4(\Delta 0.3)$ 、標準偏差は $\sigma=1.61 \rightarrow 1.57(\Delta 0.04)$ と改善された。図の丸印は補修効果が見られたが、大幅な改善は見られなかった(一般的に、この線区目標 P 値は $P=10$ 未満であり、特にロングレール区間の場合は $P=7$ 未満が目標である)。

Fig.6-3(a)・(b)は、 $j=-1 \sim -3$ の要素を除去した場合である。度数分布に大きな変化は確認されなかったが、全体的には均一化が図られ、P 値は、 $P=14.7 \rightarrow 9.7(\Delta 5.0)$ 、標準偏差は $\sigma=1.61 \rightarrow 1.43(\Delta 0.18)$ と改善された。ここで、 $j=-1 \sim -3$ の要素を除去する方法としては、レール凹部の落込部へガスバーナーで加熱し、冷却の際の歪む力で凸に加工する「熟間矯正」、及び TT(タイタンパー)によるむら直しが効果的と考えられる。

Fig.6-4(a)・(b)は、 $j=-1 \sim -4$ までの要素を除去した場合である。度数分布はほぼ平均値 ± 1 mm の範囲で収束した。また高低凹凸狂いの振幅も非常に小さくなった。 $j=-4(0.250\text{c/m})$ 周辺の成分の影響が、原波形凹凸に大きく関与していたことが分かる。ここで、 $j=-1 \sim -2$ の要素を除去する方法としては、主にスポット的な床交換、MTT 総つき固めが考えられる。P 値の推移は、 $P=14.7 \rightarrow 0.0(\Delta 14.7)$ 、標準偏差は $\sigma=1.61 \rightarrow 0.67(\Delta 0.94)$ と大きく改善された。

以上、3パターンについて異常値の除去の効果をシュミレートしてきたが、影響の強い波を除去した結果、それが P 値及び標準偏差へ改善効果として現れることが確認された。また、このデータ測定後、「熟間矯正」を部分的に実施した結果、P 値が $P=14.7 \rightarrow 10.2(\Delta 4.5)$ 、標準偏差は $\sigma=1.61 \rightarrow 1.38(\Delta 0.23)$ と改善され、その効果が Fig.6-3(a)・(b)と類似しており、軌道狂い管理への Wavelet 理論の有用性を確認することができた。

7. おわりに

本研究では、従来現場単位で保守に利用されている P 値、標準偏差が異常成分を除去することによってどう変化するのかについてシュミレートし、その有用性について確認する事ができた。今後は、部分的な軌道補修の他にも、全体的な保守計画にも Wavelet 理論を活用してゆきたいと考えている。また、最適な Mother-Wavelet の構成について、今後一層検討を図りたい。

本研究を行うにあたり、北海道旅客鉄道(株)工務部保線課 橋場孝幸氏、井川圭太郎氏に多大なる協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表したい。

<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) 佐藤 吉彦、梅原 利之:線路工学(1987)、(社)日本鉄道施設協会
- 3) 須田 征男、長門 彰、徳岡 研三、三浦 重:新しい線路(1997)、(社)日本鉄道施設協会
- 4) 白川 龍生、川村 彰、鉄道車両の車両特性に関する研究 -Wavelet 理論を活用して- (1997)、土木学会北海道支部論文報告集 第53号 (B)、pp.412 - 417
- 5) 白川 龍生、川村 彰、Wavelet 解析を用いた列車動揺管理手法の検討 (1998)、土木学会北海道支部論文報告集 第54号 (B)、pp.518 - 523