

タイトル	軌道狂いと列車動揺の波形に対するウェーブレット解析の適用
著者	上浦, 正樹
引用	北海学園大学工学部研究報告, 33: 37-48
発行日	2006-02-20

軌道狂いと列車動揺の波形に対するウェーブレット解析の適用

上 浦 正 樹*

Application for Track and Vehicle Movement Waves with Wavelet Analysis

Masaki KAMIURA*

要 旨

ウェーブレット解析は非定常波形の周波数特性を平均的な値ではなく位置ごとに個別に得られることから、近年、数学、物理学、医学などの分野でよく用いられている。鉄道保線分野においても軌道狂い波形と車両動揺の位置ごとの波長や振幅を推定するためにウェーブレット解析の適用が望まれるが、その基礎的な段階として、本研究は通り狂い波形と左右車両動揺の加速度波形に対する各位置での卓越した波形の波長や振幅を推定するうえでウェーブレット解析が有効な手法であることを明らかにした。

1. はじめに

軌道整備は走行の安全性を確保し乗り心地を良くするために行われる。特に軌道整備が一定水準にある線区では、全線にわたって軌道狂いの振幅そのものを小さくすることよりも、異常動揺などの乗り心地に悪影響を与える車両動揺に対応した軌道狂いの位置を確定し、必要な範囲の軌道狂いを除去する方が効率的な軌道整備といえる。車両動揺は上下、左右、前後の3次元に分類されるが、乗り心地に与える影響は主に左右動揺と上下動揺であることが確認されている¹⁾。車両振動を解明するにあたり、車体や台車、車輪の各質量で発生する振動が重なり合って車両全体の振動系を形成しているので、車両の周波数解析では、この振動系の実測で得られる振動波形からこれを構成する各波長成分を抽出し、卓越する周波数成分から振動箇所を推定する方法を採用している²⁾。この結果に基づき各成分の発生原因を究明し対策を立てるなど周波数解析は振動解析に対して有効な方法である。

* 北海学園大学工学部社会環境工学科

* Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

しかし、台車と車体間には各種の振動緩衝装置が取り付けられており、減衰振動を考慮する必要がある。また車両動揺に影響を与えるのは高低狂い、通り狂いや水準狂いなどであるが、乗り心地の悪影響を与える軌道狂いの多くは非定常波形を有していて、車両動揺と軌道狂いの相関関係を見出すことを難しくしている。そのため乗り心地を改善するうえで車両動揺の記録と軌道狂い検測記録に基づいて軌道補修作業の位置と作業範囲や作業内容を定める方法がまだ確立されていない。その結果、異常動揺などに必要な軌道補修では、これらの記録を参考に、現場に出向いて対処しているのが現状である。本研究ではこれらの記録を活用して左右方向の車両動揺に影響する通り狂いの振幅の大きさ、その発生位置と波長を理論的に確定することとした。

周波数解析で一般的に用いられている手法の一つに高速フーリエ変換（FFT）がある。これは振動加速度のパワースペクトル密度（PSD）を求め、一定区間のなかで卓越した周波数帯域を見出す手法であり、車両の走行時における台車と車体間の振動特性を調べるために有効である^{3),4)}。しかしデータ数が少ないと解析結果の信頼性が低下することから、非定常波形である異常動揺の処理には不向きである⁵⁾。近年、この過渡応答現象に対して軌道狂いの非定常波形を入力とし、左右動揺波形を出力する周波数特性モデルを構築し、このモデルを現場へ適用するための研究が進んでいる。瀧上ら⁶⁾は「過去の入力と出力を用いてモデルを作成し、これによって現在の出力を推定する」ことを基本にして、車両データを主体に線形予測モデルを作成し、これによって振動特性を解析する方法を開発し、FFTを用いることなく新たな入力に対する周波数応答を求めることができるシステムを検討している。この線形予測モデルの精度を高めていけば少ないデータであっても周波数特性を推定することは可能であるが、実用にあたり使用するデータの普遍性を検討する必要がある。

一方、軌道に関する研究において、古川ら⁷⁾はシステム同定法を用いて高低狂いと車両上下振動の関係による予測モデル（ARXモデル）を作成し、このモデルで予測されるデータと実際のデータの比較を行い非定常な波形処理に良好な結果を得ている。

以上の2種類の手法はデータ数が少ない場合でも周波数特性を調べることができるが、モデルの作成によってはじめて出力可能であるとの制約条件を有している。

このように車両関係と軌道関係におけるこれらの研究は非定常波形の周波数特性を把握する上で有効であるが、ウェーブレット解析の事例を除けば、これらを含む他の研究でも非定常波形の各発生地点での周波数特性を推定することを対象としているケースはほとんどないと思われる。

以上から、本研究はウェーブレット解析を用いて卓越した車両の左右動揺と通り狂いの地点と波長を抽出し、左右動揺を遮減するうえで必要な通り狂い除去の地点と作業範囲を定めるため、適切なマザーウェーブレットを選定し、この適応性を検証することとした。なお、本研究で使用した計算用ソフトはMat Lab6.5である。

2. ウェーブレット解析を用いた研究

ウェーブレットによる波形解析の歴史は浅く、1980年代にMorletが石油探査で各地層の特性を推定する方法に導入したのが最初である⁸⁾。その後、数学、物理学、医学等における数値解析や画像解析などで過渡応答を含む時刻歴データに対する周波数特性の解明に利用されている⁹⁾。また、道路工学分野では川村によって路面を走行する車の過渡的振動に対する検討に活用されている¹⁰⁾。

ウェーブレットを用いる波形解析には連続ウェーブレットによる方法と離散ウェーブレットによる方法がある。一般的に画像処理などの二次元空間における光波の波形処理では、連続ウェーブレットによる方法は演算処理に多くの時間を費やすことから、速い処理を行うアルゴリズムが作りやすい離散ウェーブレットの研究が多くなされている¹¹⁾。また離散ウェーブレットを用いた車両や軌道に関する研究では、白川らによる軌道の劣化・補修のモニタリングに関する研究¹²⁾や成毛らによる離散ウェーブレットを用いた研究¹³⁾がある。この成毛の研究では各地点の上下方向の軸箱加速度波形を用いて各波長に対する地点ごとの振幅を求めている。離散ウェーブレットの離散間隔はバンドパスフィルターの設定で決まるが、直交性を満足するためにバンドパスの幅は最初のバンド幅をdとするとn番目のバンド幅は $2^n \cdot d$ とする必要がある。この場合に波長のレベルとして1mを基準とすると、帯域は1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 124...mとなり、この間隔内にある波長の特性はその前後の帯域に振り分けられる。児玉ら¹⁴⁾は、離散ウェーブレットを用いて基準となる波長のレベルを1mとし、左右動揺の波長が32m~64mの帯域を対象に周波数特性を検討している。この研究において車両の平均速度は116km/hで波長が32m~64mの帯域は1.0Hz~2.0Hzに相当するが、車両の共振周波数がこの1帯域で包括されるため車両動揺と軌道の関係について更に細部の検討するには限界があった。

軌道分野で連続ウェーブレットを用いた例として、児玉ら¹⁴⁾や植木ら¹⁵⁾、kamiuraら¹⁶⁾による

表-1 軸対称のマザーウェーブレット

マザーウェーブレット	関数式
Mexican Hat	$(1-2x^2) \cdot e^{-x^2}$
Morlet	$e^{\frac{x^2}{2}} \cos 5x$
Spline	$\frac{e^{-\frac{x^2}{4a}}}{2\sqrt{\pi} \cdot a} \cos 2\pi x$

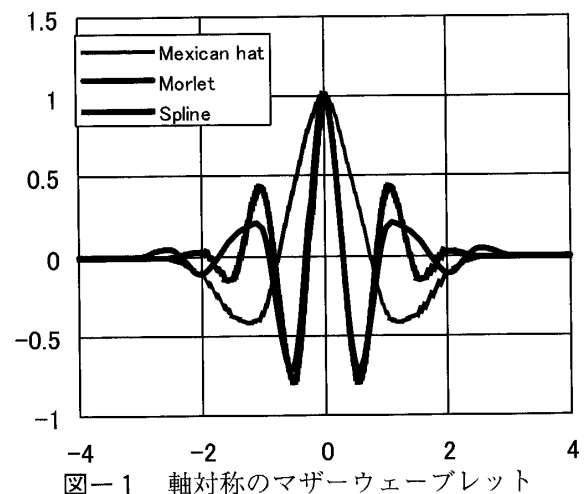


図-1 軸対称のマザーウェーブレット

軌道狂いの評価に関する研究や上浦らによる新幹線の動揺と軌道狂いに関する研究¹⁷⁾などがある。この新幹線の動揺と軌道狂いに関する研究では、トンネルの出口付近で230km/hでは見られない異常動揺が300km/hでは発生していることに関するもので、車両の左右動揺加速度データと通り狂いデータを連続ウェーブレットを用いて解析し、左右動揺の発生位置付近での軌道狂いの波長と車両の共振周波数の関係を明らかにし、軌道狂いの影響を見出せないケースについて空力的な影響が生じる可能性を論じている。

これらの上浦らによる連続ウェーブレットに関する一連の研究は、ウェーブレット解析による現象面からの検討を行っているが、その理論的な検証は十分になされていない。

3. ウェーブレット変換方法の検討

(1) マザーウェーブレットの選定条件

ウェーブレット変換は対象波形にマザーウェーブレットを掛け合わせることでこの波形の特定部分を強調し他の部分を抑制する変換方法である。このようにマザーウェーブレットは広義のフィルターの働きをするものである。ウェーブレット変換には大別して連続ウェーブレット変換と離散ウェーブレット変換の2つ変換方法がある。

連続ウェーブレット変換は式(1)で定義され、変換する範囲を限定せずに行う変換方法であるが、軌道狂い波形のように全ての点の情報を偏ることなく使用する必要である場合に適している。本研究では計算量を考慮してサンプリング間隔を1mとした。

$$W_{\phi, f(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(x) \cdot g \left[\frac{x-b}{a} \right] dx \quad (1)$$

ここで、 W ：内積（振幅に相当する）、 $f(x)$ ：通り狂いまたは車両動揺の波形、 g ：マザーウェーブレット、 a ：スケール、 b ：シフト量とする。なお、スケール(a)は波長に関係し、シフト量(b)は位置の関係する変数である。

ウェーブレット解析ではマザーウェーブレットによって解析結果が異なるという欠点を有している。従ってマザーウェーブレットの選定が非常に重要である。

連続ウェーブレットのマザーウェーブレットはアドミッシブル条件を満たす関数であればどんな関数でも用いることができる¹⁸⁾。よって、マザーウェーブレットの選定では、離散ウェーブレット変換に使用されるウェーブレットも加えることとし、Mat Lab6.5で主に使用されているマザーウェーブレットのうちアドミッシブル条件を満たす8種類のウェーブレット（Harr, Daubechies, Symlet, Coiflets, Meyer, Mexican Hat, Morlet, Spline）を対象とし、このなかで、以下の《条件》に適合するものを選定することとした。

《条件》

- ①位置の確定：容易で精度が高いこと

- ②擬像 : 存在しないこと
- ③内積値の最大値と最小値の符号 : 同じ符号であること
- ④帯域幅 : 小さいこと

ここで①は精度を確保するための要件であり、②はウェーブレット解析に必須の要件である。また③はウェーブレット変換後の各波形と変換前の各波形と対比する場合に同じ符号であると対比が容易であることから付けられた条件である。④はウェーブレット変換の精度に影響し、帯域幅が小さい場合はそれだけ精度を確保できることによって定めた条件である。

(2) マザーウェーブレットの選定

一般的に軌道狂い波形は正弦波や数種類の正弦波の組み合わせに近い形状をしていて、振幅のピークに関して軸対称とみなすことができる。ウェーブレット変換は振幅のピークを強調し、他の部分を抑制することが必要であるので、マザーウェーブレットはピークに関して軸対称の形状が望ましい。ここで、軸対称でないマザーウェーブレットを用いて変換を行うと各波長のピークの位置が対称軸から外れ、更に別の処理によってピークの位置を対称軸に合わせることが必要となる。このような精度を低下させる処理に加え、非対称なマザーウェーブレットを用いた変換では擬像が発生したので軸対称でないマザーウェーブレットは用いないこととした。一方、軸対称の3種類のマザーウェーブレット (Mexican Hat, Morlet, Spline) ではピークの位置や擬像に関して問題となる現象は認められなかった。

表-2 マザーウェーブレットの選定

マザーウェーブレット	最大値	最小値	帯域幅
Mexican Hat	4.42	-0.06	4.0
Morlet	0.11	0.02	1.8
Spline $\alpha=0.29$	0.03	0.002	2.0

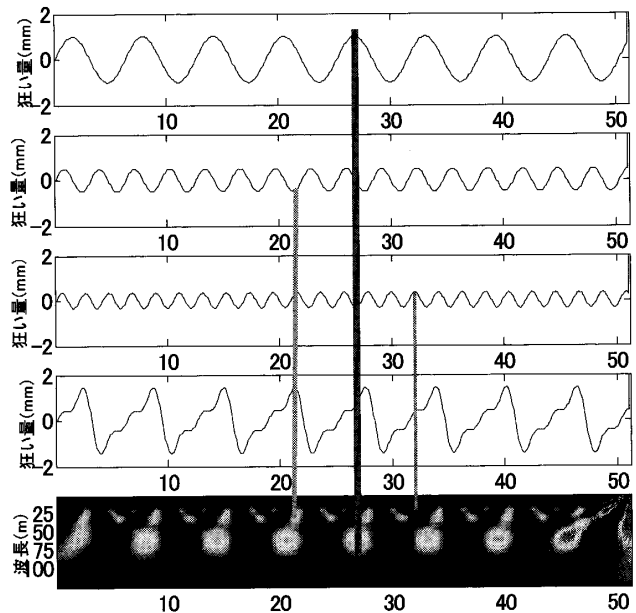


図-2 合成波形のピークとウェーブレット解析結果の比較

以上から、本研究では軸対称のマザーウェーブレット (表-1, 図-1) を候補とし、モデ

ル波形を正弦曲線としてウェーブレット変換から、内積値の最大値と最小値を算出し、加えて各ウェーブレットの周波数分析によって帯域幅を求めた（表-2）。この表からMorletが最大値と最小値において同じ符号であり、最も帯域幅が狭いことから本研究に用いるマザーウェーブレットとして以下の検討を行うこととした。

ここで通り狂い波形や車両動揺の加速度波形を式（2）に示す非対称モデル波形で表すこととした。

$$y = \sin x - \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{2} \quad (2)$$

この波形に対してMorletを用いたウェーブレット変換の結果を図-2に示す。この図の最上段から3段目までは式（2）の右辺の各正弦波を示している。第4段目は以上の各波形の和である式（2）の左辺 y を表している。第5段目（最下端）はMorletによるウェーブレット変換結果で、縦軸が波長、横軸が位置を表し図中の円形の濃い部分は波形のピークを示している。この図は第1段目～第3段目の波形におけるピークの位置と第5段目の波形のピークの位置を比較したものである。この結果から各正弦波のピーク位置とウェーブレット変換でのピークを示す中心の位置とでは実用上は同じと見なせる差（最大誤差0.25m）であった。

また、Morlet以外の2種類のウェーブレットについて同様の研究を行った。これらの波形は図-2に示すように軸対称で中央にピークを有する波形であることからMorletと同じ傾向が得られたが、帯域幅がMorletよりも広いことからMorletよりも精度が低い傾向にあった。

以上からマザーウェーブレットとしてMorletがウェーブレット解析に適用できることが明らかとなった。

（3）内積値の一般式と応用

a) 内積値の一般式

通り狂いや車両の動揺加速度に対し空間周波数 ω （rad/m）とし、入力波を式（3）で示すように基本的な波形形状を満たす正弦波とする。Morletを用いたWavelet解析ではスケール a とシフト量 b により内積値 W は式（1）を用いて式（4）となる。

$$f(x) = A \cos(\omega \cdot x) \quad (3)$$

$$W = \frac{A}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-b}{a}\right)^2} \cos\left(5\frac{x-b}{a}\right) \cos(\omega \cdot x) dx \quad (4)$$

この式を積分すると式（5）となる。

$$W = A \sqrt{\frac{\pi a}{2}} e^{-\left(\frac{\omega \cdot b}{5 + \omega \cdot a}\right)} R (E \times \operatorname{erfc}(\alpha) + F \times \operatorname{erfc}(\beta)) \quad (5)$$

ここで式（5）で用いた記号の内容を次に示す。

R ：実数部

$$E = e^{-\frac{1}{2}\left(5+a\omega-i\frac{\omega\cdot b}{5+\omega\cdot a}\right)^2}$$

$$F = e^{-\frac{1}{2}\left(5-a\omega+i\frac{\omega\cdot b}{5-\omega\cdot a}\right)^2}$$

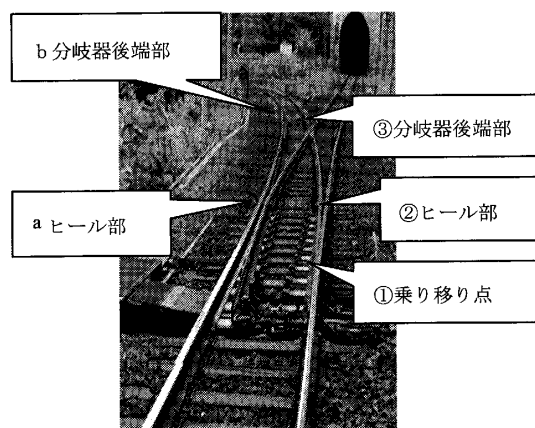


図-3 分岐器と主な名称

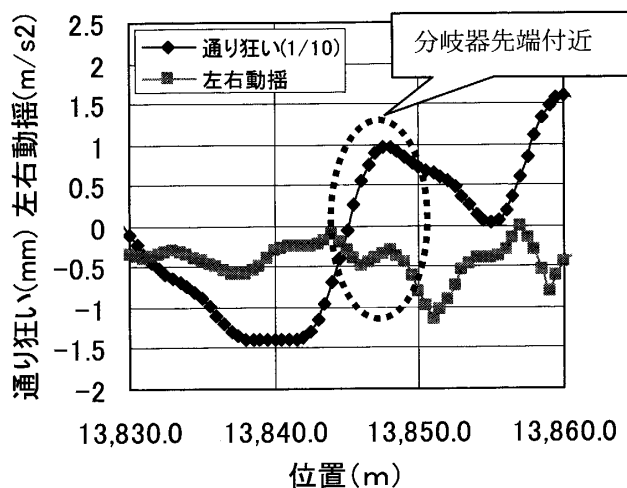


図-4 通り狂い波形と車両動揺加速度波形

erfc (α), erfc (β):余誤差関数

$$\alpha = \frac{b}{2a} \left(5 + \omega \cdot a + i \left(\frac{2\omega \cdot b}{5 + \omega \cdot a} \right) \right)$$

$$\beta = \frac{b}{2a} \left(5 - \omega \cdot a + i \left(\frac{2\omega \cdot b}{5 + \omega \cdot a} \right) \right)$$

以上から式 (5) よりシフト b を変化させて各地点でのスケール a に対する内積値を求めることができる。

b) 波長とスケール (a) の関係

スケール (a) と波長 λ の関係はマザーウェーブレットによって異なるのでMorletのマザーウェーブレットについて検討する。式 (5) のシフト量 $b = 0$ での内積値を求めると式 (6) が得られる。

$$W_1 = A \sqrt{\frac{\pi a}{2}} \cdot \left(e^{-\frac{1}{2}(5+a\omega)^2} + e^{-\frac{1}{2}(5-a\omega)^2} \right) \tag{6}$$

式 (6) は、式 (4) にワイエルシュトラスの判定法¹⁹⁾を適用しても同じ結果を得ることができる。式 (6) において () の中の第1項を無視した場合に W_1 の最大値は第2項から式 (7) の条件によって生ずる。

$$a\omega = 5 \tag{7}$$

この場合の W_1 の真の最大値と上記の最大値の比は1.007より小さいので、実用上1として問

題ないと考えられる。

また周波数と波長の関係から式 (8) を導くことができる。

$$\omega = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{8}$$

よって式 (7), (8) から $\lambda = 1.26a$ の関係が得られた。

c) 振幅と内積値の関係

実務上では内積値よりも振幅が必要であるので、通り狂いと車両の動揺加速度における振幅と内積値の関係を求める。

式 (3) と (8) から通り狂いなどの波形は式 (9) と示すことができる。

$$f(x) = A \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \tag{9}$$

式 (6) から内積 W_1 の最大値は (10) 式が得られる。

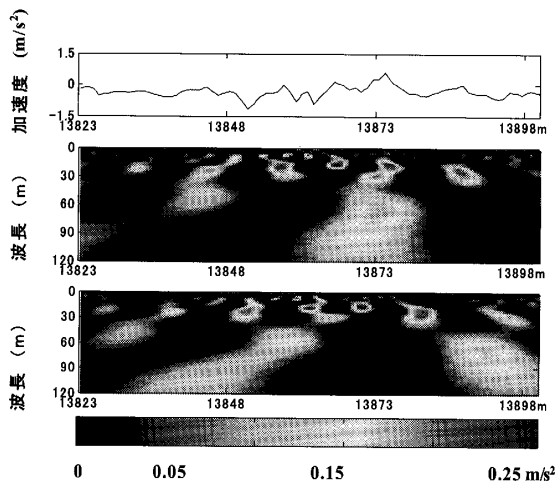


図-5 ウェーブレット解析(左右加速度-1)

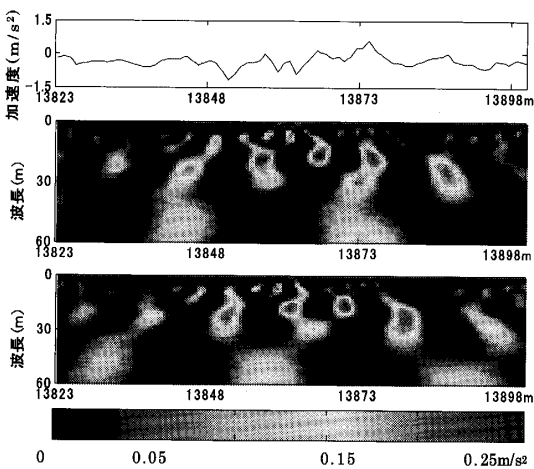


図-6 ウェーブレット解析(左右加速度-2)

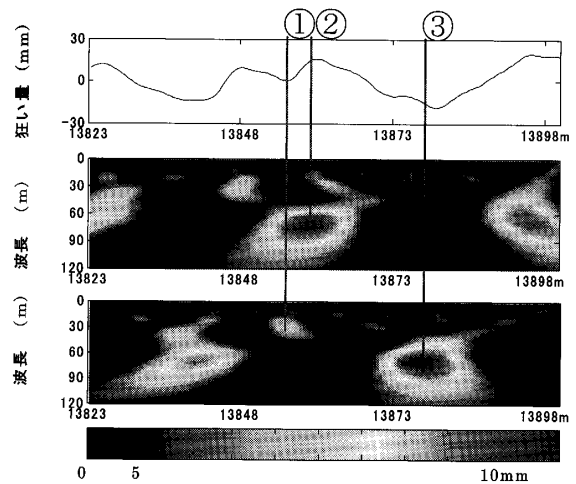


図-7 ウェーブレット解析(通り狂い-右)

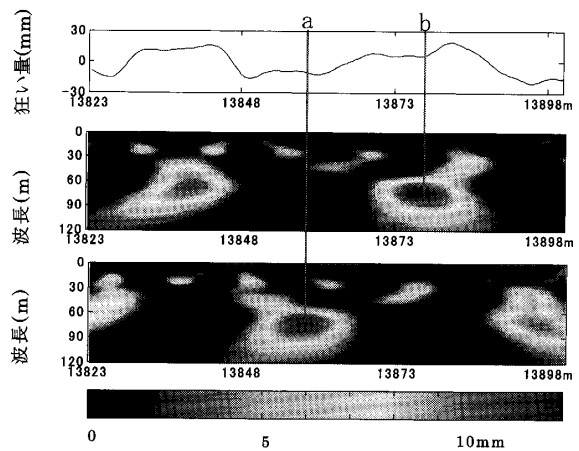


図-8 ウェーブレット解析(通り狂い-左)

$$W_1 = A \sqrt{\frac{\pi a}{2}} = A \sqrt{\frac{\lambda \pi}{2 \times 1.26}} \quad (10)$$

以上から内積 W_1 と波長 λ を用いると振幅 A は式(11)から推定できる。

$$A = W_1(\lambda) \times \sqrt{\frac{2.52}{\lambda \pi}} \quad (11)$$

4 現場波形の解析

(1) 解析の概要

現場測定で得られた軌道狂いと車両の動揺加速度の波形から、Morletをマザーウェーブレットとするウェーブレット解析により推定される各地点の波長と振幅の妥当性を検討した。

この解析の対象とした区間は、駅中間にある信号所付近で、構造上波長の異なる軌道狂い波形が混在する可能性が高く、またカント不足によって車両の左右動揺が発生しやすい曲線分岐器を含む曲線区間とした。ここを通過する列車の速度がほぼ60km/hで一定である。分岐器の種類は外方分岐器($T_{50N外}12-101$)で、分岐側の曲線区間(曲線半径600m)を対象とする。この区間では最大カント不足30mmにより車輪のフランジの接する確率が高いのは外軌側の右レールである²⁰⁾。図-3は今回対象とした分岐器であり、測定は手前から後方に向かって行っている。この分岐器で通り狂いの発生頻度の高い箇所は乗り移り点(右レール)、ヒール部(右、左レール)、分岐器後端部(右、左レール)であり図中にこれらの位置を明示した。通り狂いデータは曲線や分岐器の理論線形の中心線からの差として出力されたものを採用した。図-4は分岐器先端付近の通り狂いと車両の動揺加速度を示したもので、通り狂い(右)を1/10(mm)で表し、車両の左右動揺を加速度(m/s^2)で表している。ここで通り狂いは延長80m以下ではほぼ絶対線形に近い波形の出力が可能な演算システムであるマイクロLABOCS(LABO-ratory's Conversational System)²¹⁾によって演算処理されている。また車両動揺の加速度データは同区間の軌道検測車によって測定されたものを採用した。

(2) 車両左右動揺のピークの位置

測定された出力データ波形を用いてウェーブレット解析を行い、地点(x)ごとに波長(y)と振幅(z)を求めた。この3項目(x,y,z)の結果を図示する方法として地点(x)と波長(y)によって平面座標系を構成し、振幅(z)は色の種類で示すこととし、コンターで全体を表現することとした。

図5は波長0~120m間における車両の左右動揺のコンター図である。最上部のグラフは左右動揺の測定結果、上から2番目はウェーブレット変換を行った結果から進行方向の左側で曲線中心へ向かう動揺を表している。上から3番目は同様に曲線の外側に向かう動揺に関するものである。最下段は上から2番目と3番目の振幅について色分けの基準を示したものである。

なお、分岐器は13848m～13878m間に敷設されている。

図5のコンターから分岐器内で卓越した振幅の箇所が多く見られる。特に速度が60km/hでは0.3Hzに相当する波長60m付近に卓越した振幅の箇所が見出せる。また、分岐器内では波長が30m(0.6Hz)付近に卓越した振幅のコンターがある。これは、周波数を考慮すると車両の共振現象ではなく軌道狂いによるものを示している。よってこれらの波長成分を除去するための作業延長や作業内容は検討を要するが、車両の左右動揺を抑制するためにはこの波長60m付近と波長30m付近の個所で通り狂いの整正作業を行う必要がある。

図-6は図-5のうち波長が0～60mの部分拡大したものである。一般車両の共振周波数1Hz～2Hzは速度60km/hでは8.3m～16.7mの波長に相当するが、特に分岐器区間とその前後でこの傾向が確認できる。

(3) 通り狂いのピークの位置

図-7は右レールのウェーブレット変換による解析結果であり、図-8は左レールの同様の解析結果である。表示方法は左右動揺と同じであり、上から2番目は理論曲線から内側へ向かう通り狂い、3番目は理論曲線から外側に向かう通り狂いを示している。図-7の①～③は図-3で示した①乗り移り点、②ヒール部、③分岐器後端部を示し、図-8のa,bは図-3のaヒール部、b分岐器後端部を示している。ここでそれぞれのコンター図において振幅がピークの点で位置と波長を求めたところ、現場のキロ程と解析結果のピークの位置との差は0～1.5m程度であった。実際には、この程度の差は軌道整備などの実務作業に重大な影響を与えないと考えられる。

(4) 車両動揺と通り狂いの関係

走行する車輪が軌道狂いの影響を受けてから車両動揺の発生に至るまでに遅れが発生する。この遅れがあることを前提に通り狂いの振幅の大きな波長成分と左右動揺の振幅の大きな波長成分を比較した。

その結果、通り狂いと左右動揺の比較では、乗り移り点(①)において、位置の差14m、波長の差0mであり、ヒール部(②とa)では位置の差15m、波長の差2mであった。また、分岐器後端部(③とb)では位置の差15m、波長の差0mであった。

以上の結果から、ウェーブレット解析を用いることで車両動揺の遅れが15m程度(0.9sec)と推定できることが明らかになった。また通り狂いと左右動揺の相対的に大きな振幅の箇所で比較すると波長の差が0～2mであることから通り狂いを構成する波長があまり変化せずに車両の左右動揺に伝わる可能性のあることが認められた。このことは通り狂いを構成する各波長成分により車両の左右動揺の卓越する波長成分を推定できる可能性が見出されたことになる。

5. おわりに

本研究ではウェーブレット解析を用い、通り狂いや車両動揺の加速度の波形を構成する各成分の波長や振幅の推定とその妥当性の検討を試みた。これらの研究の成果は次の通りである。

- (1) Morletをマザーウェーブレットとするウェーブレット変換においてスケール a と波長 λ の関係および内積値と振幅の関係を理論的に導いた。
- (2) 運転速度60km/hの分岐器を含む曲線区間で通り狂い波形と左右車両動揺の加速度波形を用いてMorletによるウェーブレット変換を行い、その結果をコンター図で表示する方法を検討した。
- (3) 車両の左右振動に対するウェーブレット変換から、左右振動に影響を与えるものとして軌道狂いによるものと車両の共振によるものに分離できた。
- (4) 分岐器内の5箇所において本研究の手法により求められた通り狂いの大きい成分の推定位置と現場で確認されている通り狂いの発生位置との差は0～1.5m程度であり、推定方法には実用上問題がないことが明らかになった。
- (5) 通り狂いと左右動揺の相対的に大きな振幅の箇所を比較すると通り狂いを構成する波長があまり変化せずに車両の左右動揺に伝わる可能性があることが認められた。

以上から通り狂い波形と左右車両動揺の加速度波形を構成する波形成分について位置ごとの波長や振幅を推定するうえでMorletによるウェーブレット変換は有効な手法であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 佐藤吉彦：新軌道力学，鉄道現業社，pp173-178，1997
- 2) 長松昭男：モード解析入門，pp115-117，1993
- 3) 植木健司，石原鋼，原文雄：トンネル内高速走行時における中間車両の左右振動，日本機械学会第75期通常総会講演会，pp412-413，1998
- 4) 中出孝次，藤本裕，植木健司，石田弘明：管内で振動する細長物体まわりの流れの数値シミュレーション，日本機械学会流体工学部門講演会講演要集，pp509-512，2009
- 5) I. ドブシー，山田道夫，佐々木文夫訳：ウェーブレット10講，シュプリンガー・フェアラーク東京，pp2-8，2003，11
- 6) 瀧上唯夫，富岡隆弘：線形予測モデルを用いた車両の振動解析，鉄道総研報告，pp35-40，vol. 15，No 5，2001
- 7) 古川敦，吉村彰芳：軌道狂い管理のための車両左右動特性の同定，鉄道総研報告，pp29-33，vol. 18，No 3，2004
- 8) 榎原進：ウェーブレットビギナーズガイド，東京電気大学出版局，pp1-2，1995
- 9) 斎藤兆吉：ウェーブレット変換の基礎と応用，朝倉書店，pp51-80，1998

- 10) 川村彰：Wavelet関数による路面凹凸特性の把握方法について，土木学会第51回年次学術講演会，V-33，pp66-67，1996
- 11) 白川龍生，川村彰，上浦正樹，中辻隆：軌道メンテナンスのウェーブレット理論の適用と可能性について，土木計画学研究・論文集，Vol.20 no.1，pp580-581，2001
- 12) 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回年次学術講演会講演概要集，pp265-266，2002
- 13) 成毛将利，須永陽一：マザーウェーブレットによる軸箱加速度の解析に関する一考察，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，pp580-581，2001
- 14) 児玉健太郎，上浦正樹，川村彰：ウェーブレットによる左右車両動揺と軌道狂いの評価に関する一考察，土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，pp540-541，2000
- 15) 植木基晴，上浦正樹，川村彰，児玉健太郎：ウェーブレットを用いた鉄道の車両動揺に関する基礎的研究，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，pp267-268，2001
- 16) Masaki Kamiura, Motoharu Ueki：An effective method for the turnout maintenance using wavelet analysis, The world congress on railway research, pp 9-15, 2003
- 17) 大熊佑治，上浦正樹，矢澤英治：ウェーブレット解析を用いた車両動揺と軌道狂いに関する研究，土木学会第60回年次学術講演会講演概要集，pp550-551，2005
- 18) B.B.ハバード：ウェーブレット入門，朝倉書店，pp59-63，2003
- 19) Murray R. Spiegel, 水町浩訳：マグロウヒル大学演習 微積分（下），オーム社，pp349-pp350，1995
- 20) 竹澤晋一・三上和哉：R400外方分岐器の損耗対策，新線路，pp 8-12，2002
- 21) 神山雅子：パソコンによる軌道狂いデータ処理—マイクロLABOCSを例にして—その1—，日本鉄道施設協会誌，pp46-49，1999