ウェーブレット解析を用いたレール波状摩耗検出手法に関する研究*

須田 義大^{*1}, 奥村 幹夫^{*2}, 小峰 久直^{*1}
岩佐 崇史^{*3}, 銭 蓓 麗^{*4}, 曄 道 佳 明^{*5}Study on Detecting Method of Railway Corrugation
Using Wavelet AnalysisYoshihiro SUDA^{*6}, Mikio OKUMURA, Hisanao KOMINE,
Takashi IWASA, Beili QIAN, Yoshiaki TERUMICHI^{*6} Institute of Industrial Science, University, of Tokyo
22-1, Roppongi 7 chome, Minato-ku, Tokyo, 106-8558 Japan

This paper proposes a new method for detecting rail corrugation using wavelet analysis of acceleration of axle box. Here a track inspector is used to record the data of vertical acceleration value of the axle box. According to the wavelet analysis of the vertical acceleration data, the exact position and frequency range of corrugation can be detected. Modeling is also discussed to find out the relationship between amplitude of acceleration value and height of corrugation. The detecting results were compared to the actual measurement of corrugation profiles to prove the validity of the proposed detecting method as well.

Key Words: Railway, Dynamics of Machinery, Diagnostics, Corrugation, Wavelet Analysis, Track Dynamics

1. 緒言

1・1 はじめに 鉄道軌道の急曲線区間には、波状摩耗と呼ばれる周期的な摩耗(凹凸)が発生する。この波状摩耗が発生すると、騒音や振動を引き起こし、問題となる(図1)。このため、波状摩耗の発生状況を的確に把握し、削正するなどの迅速な処置をとることが必要となる。しかし、従来の波状摩耗の管理では、保線係員の線路巡回による目視検査や添乗時の異音調査に依存しているため、人手と時間を要し、十分な管理を行うことができないのが実状である。そこで、効率的かつ客観的に波状摩耗を検出するシステムが望まれている。これまでに、マイクロホンによる騒音測定や、リニアセンサによって直接形状を測定する方法が研究されている^[1]。しかし、外的要因が大きい、新し

い装備が必要となるなどの問題点も残されている。

本研究では、従来から高速軌道検測車(図2)の軸箱に装備されている加速度計を用い、より簡便に波状摩耗の発生位置、波長、波高を検出する手法を提案する。

研究としては、実際の高速軌道検測車で山手線一周分の軸箱振動加速度を収録する試験を行い、それと並行して地上側でも発生状況、レール頭頂面の凹凸測定などの調査を行う。これらのデータを解析し、軸箱上下振動加速度から波状摩耗の発生位置・波長を検出する手法と、波状摩耗の波高を定量的に把握する手法を検討する。

Fig.1 Corrugation developed on rail

* 原稿受付 1999年2月16日。

*1 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)。

*2 東日本旅客鉄道(株) (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2)。

*3 准員, 東京大学生産技術研究所。

*4 東京大学生産技術研究所。

*5 正員, 上智大学 (〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町7-1)。

E-mail: suda@iis.u-tokyo.ac.jp

Fig.2 Track Inspector

また、波状摩耗の計測データのように発生分布を持つ信号の場合、フーリエ解析のように定常を仮定した解析では、その発生分布の情報が欠落してしまう。そこで、本研究では、検出手法に時間一周波数解析が可能なウェーブレット解析を適用した。これにより、効率的で精度の良い波状摩耗検出が可能となったので報告する。

1・2 高速軌道検測車 高速軌道検測車は、列車が走行している状態で線路の狂いを診断することができる検測車である(図 2)。測定できる項目は、軌道狂いについて、軌間、水準、高低など9項目、列車動揺、軸箱加速度など4項目、その他、キロ程、列車速度などである。通常、検測は営業速度に準じた速度で行われている。

2. 山手線測定試験

2・1 高速軌道検測車の軸箱加速度測定試験

軸箱加速度測定試験は、山手線内回り外回りを対象として行った。測定項目は、左右の軸箱上下振動加速度、軌道状況を把握する為の軌間と水準、車両の状況、走行位置を把握する為の車両走行速度、ATS パルス(自動列車停止装置)、1km パルス、100m パルスの8チャンネルとした。

2・2 地上側一波状摩耗発生状況調査 波状摩耗の発生状況調査は、山手線内回りを対象として行った。調査項目は、波状摩耗発生位置(区間)、波高、曲線半径、軌道・車両走行条件などとした。また、波状摩耗が発生している区間から5箇所を選び、デジタル式頭頂面凹凸測定器を用いて、レール頭頂面のレール長手方向の形状測定を行った。この計測は非常に手間がかかるため通常行われないが、今回は本研究で開発した検出アルゴリズムを検証するため行われた。

2・3 試験結果 波状摩耗の発生状況調査結果と軸箱加速度データを比較すると、波状摩耗の発生区間では軸箱振動加速度にも波状摩耗と同周波数の振動成分が見られ、両者に相関があることが確認された。

(a) Mexican Hat Function

(b) Gabor Function

Fig.3 Mother Wavelet

しかし、軸箱加速度には波状摩耗の振動成分以外にも、多くの振動が含まれているため、このままでは、精度の良い波状摩耗の検出ができない。以下では、軸箱加速度データから波状摩耗の情報のみを抽出し、精度良く波状摩耗を検出するアルゴリズムを説明する。

3 連続ウェーブレット解析

本研究で用いた連続ウェーブレット解析について簡単に紹介する。連続ウェーブレット変換は、マザーウェーブレットと呼ばれる基底関数が時間と周波数領域の両方で局在性を持つため、時間領域と周波数領域の解析を同時に行うことができる。又、このマザーウェーブレットは選択の自由度が大きいので、この関数を変えることにより、解析目的に合わせ時間分解能と周波数分解能を調整することができる。このとき不確定性の原理から時間分解能と周波数分解能にはトレード・オフの関係がある。本研究では、時間分解能の良い Mexican hat と、周波数分解能の良い Gabor という2つの基底関数を使い分けた。図3に本解析で用いたマザーウェーブレットを示す。

4. 波状摩耗の検出手法

ここでは、レール頭頂面の形状測定を行った山手線のある40m区間を解析例として、検測車の軸箱上下振動加速度から波状摩耗を検出するアルゴリズムを検討する。

4・1 データ解析 図4(a)は、上記した区間の軸箱上下振動加速度の波形を示す。軸箱加速度には、波状摩耗の情報(図中 A)以外にレールの継目の情報(図

中 B), その他の振動, ノイズが含まれていることが分かる. 継目による振動成分は比較的判別しやすいが, 波状摩耗による振動成分は振幅が小さく, その他の振動成分やノイズとの判別が難しいことが分かる.

図 4(b)は, 加速度波形を周波数解析した結果である. 50~80Hz 程度にピークが観察されるが, フーリエ解析では, 位置情報が欠落しているため, その周波数が波状摩耗のものか継目によるものなのかを判断すること

Fig.4 Analysis of Acceleration Values of Axle Box

はできない. 図 4(c)は, Gabor によるウェーブレット解析結果である. 横軸は位置, 縦軸は周波数を示す. 色の濃さは振動の強さを示す. このグラフから, 波状摩耗の発生位置と周波数, 継目の位置と周波数を同時に把握することができる. さらに, 継目は, グラフ上で縦長に広がり(図中 B), 波状摩耗は横長に広がる(図中 A)という特徴を示すことが分かる. 継目の情報が縦長に広がる理由は, その振動応答がインパルス的であるため, 周波数局在性が悪く位置局在性が良くなるためである. 一方, 波状摩耗の情報が横長に広がる理由は, その振動応答が周期的な波形で空間的に広がるため, 周波数局在性が良く空間局在性が悪くなるためである. つまり, ウェーブレット解析を用いれば, 波状摩耗の発生位置と周波数を捉えるだけでなく, 波状摩耗と継目の特徴を捉え識別することが可能である.

図 4(d)は, Mexican Hat によるウェーブレット解析結果である. この解析結果を Gabor による解析結果と比較すると Mexican Hat では, 周波数分解能を犠牲にしながら位置分解能を上げていることが分かる.

4・2 波状摩耗検出アルゴリズム 4.1 節では, 加速度波形をウェーブレット解析することで波状摩耗と継目の情報を識別できることを明らかにした. 本節では, この特徴を用い加速度データから波状摩耗の情報のみを抽出し, その発生位置と周波数を検出するアルゴリズムの概要を説明する. アルゴリズムのフローチャートを図 5 に示す. まず, 軸箱加速度をウェーブレット解析し, 次にウェーブレット解析で得られる継目の特徴から継目位置を検出する. その次に波状摩耗の周波数を特定し, その周波数帯からウェーブレット係数の値の大きい位置を抽出する. この状態では継目位置も含まれているため最後に継目位置を取り除いて,

Fig.5 Algorithm of Corrugation Detecting

波状摩耗の発生位置とする．ここで継目位置は，空間局在性の良い Mexican Hat 関数によって検出し，波状摩耗発生位置は周波数局在性の良い Gabor 関数によって検出する．これにより軸箱加速度データの中から継目と波状摩耗の情報を識別し，波状摩耗発生位置と周波数(波長)を検出することができる．また，この継目位置の情報は走行位置の細かな補正にも有効である．

4・3 継目位置の検出と波状摩耗の周波数の特定
本節では，図5に示したフローチャートの継目位置の検出法と波状摩耗の周波数の検出法について説明する．両検出とも，ウェーブレット解析上での継目と波状摩耗の特徴を利用して行う．

ウェーブレット解析のグラフが，行が周波数，列が

Fig.6 Sum of All Wavelet Coefficient every single Line or Column (Mexican Hat)

(a) Joint Detecting

(b) Frequency Range Detecting

Fig. 7 Detecting Process

位置を示す行列であることを考慮に入れると，ウェーブレット解析上で縦長(列方向)に広がる継目は，列ごとにウェーブレット係数の総和を計算したときに(図6)その値が大きくなる位置として検出できる．計算した結果を図7(a)に示す．2つの大きなピークの位置が継目位置を示す．また同様に，横長(行方向)に広がる波状摩耗の周波数帯は，行(周波数)ごとにウェーブレット係数の総和を計算したときに(図6)その値が大きくなる周波数として検出できる．計算した結果を図7(b)に示す．56Hz程度に波状摩耗の周波数帯があることが分かる．ここで，ピーク値の9割で波状摩耗の周波数帯を定義すると波状摩耗の周波数帯は，表1のように決定できる．

4・4 波状摩耗の検出 先ほど4.3節で検出した継目位置と波状摩耗の周波数範囲(表1)を Gabor 関数でウェーブレット解析した結果に重ねると図8(a)のようになる．さらに波状摩耗の周波数範囲だけを抽出し閾値を設定してやれば，振動の大きい部分を図8(b)のように①～⑥と決定できる．ここで，継目検出結果(表1)より③と⑥は継目と判断できるので波状摩耗発生箇所は①②④⑤であると検出できる．また，波状摩耗の中心周波数が 54Hz 程度であることと

Table 1 The result of detecting Joint Position and Frequency Range of Corrugation

Joint Position	-9025.6m, -9013.7m
Frequency Range of Corrugation	43Hz ~ 67Hz

(a) Wavelet Transform of Acceleration Values by Gabor

(b) Setting the threshold

Fig.8 Detecting the Corrugation Position

検測車の走行速度が 34km/h であることからその波長は 17.5cm と決定できる。波状摩耗の検出結果を表 2 に示す。

4・5 波状摩耗検出結果と実際の発生状況の比較

図 9 の 1 段目のグラフは、これまで解析してきた軸箱加速度データに対応する地点の、レール頭頂面長手方向の形状データである。図 9 の 2 段目以降は、1 段目を 4 等分して拡大した波形である。楕円①～⑥で囲んだ範囲は、上記したアルゴリズムで軸箱振動加速度から検出した波状摩耗と継目位置を示す。このグラフから、軸箱加速度より検出した波状摩耗の発生位置と実際の発生位置が非常に良く一致していることが分かる。

5. 加速度振幅と波状摩耗の波高の関係

加速度振幅と波状摩耗の波高の関係は、検測車の走

Table 2 Results of Detecting Corrugation

No.	Wavelength [cm]	Position [m]
①	17.5	-9048.6 ~ -9048.0
②	17.5	-9035.6 ~ -9034.0
④	17.5	-9023.0 ~ -9019.0
⑤	17.5	-9018.1 ~ -9017.3

Fig.9 Verification with Rail Surface Data

行速度や軌道状態・構造に影響を受ける。そこで、数学モデルを同定し、加速度振幅から波状摩耗波高を推定することが必要となる。しかし、実際の営業軌道では、軌道状態・構造は場所によって様々であり、軌道ばね係数などを一意に決定することは不可能に近い。そのため、図 10 のような従来から用いられている軌框モデル^[2]を用い、加速度振幅と波高の関係が軌道状態や走行速度の違いによって受ける影響を調べた。

図 11 は軌道状態、つまり、軌道ばね係数の違いが軸箱加速度の周波数応答に与える影響を調べたものである。ここでは、4 通りの軌道ばね係数について計算した。軌道ばね係数 $k_t=1.1 \times 10^8 \text{ N/m}$ は、通常、一般軌道で妥当と考えられている値である。また、列車通過トン数の増加による軌道の硬化を考慮にいれ、軌道ばね係数を大きめ評価した 3 通りを計算した。図中▲印は、今回の試験結果であり、 $k_t=1.4 \times 10^8 \text{ N/m}$ の計算結果と一致している。計算結果を見ると、軌道ばね係数の増加と共に、1 次共振周波数が大きくなることが分かる。また、共振点以上の範囲（図中 B）では、軌道ばね係数の値によって周波数応答が大きく変化していることが分かる。一方、共振点以下（図中 A）では、周波数応答は軌道ばね係数の値に依存せず、ほぼ一致していることが分かる。このことから、低速域を用いれば、多少の軌道構造の違いによらず、加速度振幅から、波状摩耗波高を精度よく推定することができる。

6. 考 察

6・1 発生位置の検出誤差 本検出手法で検出した波状摩耗発生位置の検出誤差は数メートル程度である。これは高速軌道検測車が ATS 地上子と走行速度から計算した走行位置の計測誤差によるものである。この誤差は継目位置の検出によって走行位置の補正を行えばさらに小さくすることが可能となる。また、波状摩耗発生延長が 1m 未満の波状摩耗も検出できることから、波状摩耗の発生を兆候段階で検出することができると考えられる。以上から、検測車軸箱加速度を用いた波状摩耗検出手法は、簡便で、効率が良く、且つ精度も高い検出法と考えられる。また、波状摩耗の周波数の検出精度に関しては、本研究の目的が波状摩耗管理のための発生位置検出であることから省略する。

6・2 波高の検出精度 軌框モデルによる考察から、波状摩耗波高を精度よく推定するには共振点以下の低速域での計測が優れていることが分かった。しかし、測定時の走行速度が遅くなると、測定した加速度の精度が悪くなる。加速度振幅から波状摩耗波高を精度よく推定す

るには、適当な走行速度条件を決めればよい。それについては、今後、異なる走行速度での加速度測定試験が必要と考えられる。また、さらに精度の良い推定をするには、簡単な質点系モデルではなく、詳細な弾性梁モデルを検討する必要がある。

6・3 列車速度の変化による影響 高速軌道検測車の列車速度は営業速度に準じているため、常に一定ではなく、加速区間や減速区間も存在する。このため、同じ波長の波状摩耗でも、列車走行速度の変化に伴い、周波数が変化する。ここでは、減速区間を例にとりその影響を検討する。図 12(a)は、ある減速区間の速度変化である。図 12(b)は、同区間の軸箱加速度をウェーブレット解析した結果である。同グラフに書き加えた等高線は、列車速度の変化による周波数と波長の関係を示している。波長が一定であるため、周波数が低下していく様子が観察される。

このように、列車走行速度が急激に変化する区間においては、周波数表示より波長表示の方が妥当であると考えられる。これは検測車の計測システムを時間サンプリ

ングから位置サンプリングに変更することで改善することができる。

6. 結 言

以下に本研究の結論を記す。

- ・ 高速軌道検測車の軸箱振動加速度をレール波状摩耗の検出に用いることを提案した。
- ・ 軸箱上下振動加速度にウェーブレット解析を適用して、波状摩耗の発生位置と波長を検出する方法を開発した。
- ・ 本検出アルゴリズムの有効性を確認した。
- ・ 車輪・レール系の上下振動モデルを用いることにより、軸箱上下振動加速度の振幅から波状摩耗の波高を推定するには、共振点以下の低速域での計測が優れていることを明らかにした。

計測や実験にご協力を賜った財団法人鉄道総合技術研究所に感謝の意を表す。

文 献

- [1] 仲尾 浩・菊田哲夫等, “レール波状摩耗測定システムの開発”, 近鉄技法, Vol.17, pp.51-56 (1994)
- [2] 佐藤吉彦・奥田多津雄, “軌道高周波振動の理論解析”, 鉄道技術研究報告, No.1013(1976.8), P.89-92

Fig.10 Model for Calculation

Fig.11 Frequency Response

(a) Velocity of Track Inspector

(b) Wavelet Transform of Acceleration Values

Fig.12 Effect of reduce speed of Track Inspector