

# 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

Study on Detecting Method of Rail Corrugation by Using Wavelet Analysis

須 田 義 大\*・奥 村 幹 夫\*・銭 倍 麗\*\*  
小 峰 久 直\*・岩 佐 崇 史\*・曄 道 佳 明\*

Yoshihiro SUDA, Mikio OKUMURA, Beili QIAN, Hisanao KOMINE, Yoshiaki TERUMICHI, Takashi IWASA

## 1. 緒 言

鉄道レール頭頂面に発生するコルゲーション（以下波状摩耗）は、列車の騒音・振動を発生させ、軌道破壊を引き起こす原因となるため、問題となっている<sup>1)</sup> (Fig.1 a). 摩耗が大きく進行しないうちに削正するなど迅速な処置ができるように、これらの波状摩耗の発生状況を的確に把握する方法が望まれている。しかし、従来は、保線係員の線路巡回時における目視検査や添乗時の異音調査に依存しており、効率のかつ客観的に波状摩耗を検出するシステムはまだ開発されていない。

本研究は、軸箱上下振動加速度データを利用した波状摩耗の検出手法を開発することを目的とする。そのため、従来の軌道管理に用いられる高速軌道検測車 (Fig.1 b) に装備されている加速度計を用い、営業車両と同程度の速度で走行しながら、軸箱上下振動加速度データを記録する試験を行った。さらに、解析結果を地上側凹凸と検証し、軸箱上下加速度振幅から波状摩耗の波高を推定するために、波状摩耗の地上側凹凸測定を行った。測定した軸箱上下振動加速度データから、波状摩耗の発生位置および周波数を検出する手法と、波状摩耗の摩耗量を定量的に把握できる解析ツールを開発した。解析の際、波状摩耗は一定の周波数範囲で、長期にわたりレール長手方向に発生するものである事から、時間一周波数領域の非定常情報を同時に取り扱えるウェーブレット解析を適用した。

## 2. 山手線測定試験

### 2.1 軌道検測車による軸箱上下加速度測定試験

現在軌道検測車に取り付けている軸箱加速度計を利用

\*東京大学生産技術研究所 第2部

\*\*東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻

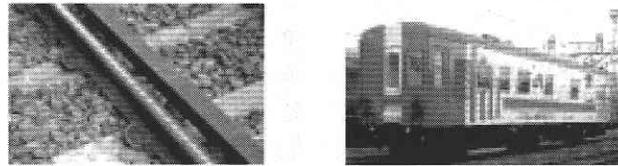


Fig. 1 a) 鉄道レールに発生した波状摩耗  
b) 高速軌道検測車 (マヤ車)

し、DATレコーダに左右レールの軸箱上下振動加速度、軌間、水準、車両走行速度、ATS情報パルス、1 Kmパルス、100 mパルスの8チャンネルのデータを収録した。

### 2.2 レール頭頂面凹凸測定試験

軌道検測車に記録された軸箱上下振動加速度データの解析の際に、各種地上側条件を考慮したり、解析結果と地上側凹凸の検証に使うことを目的に、デジタル式レール頭頂面凹凸測定器を用いて、波状摩耗凹凸の測定を行った。測定区間は新大久保～渋谷間の曲線内軌側5箇所である。そのうちの3箇所には波状摩耗が発生した。

## 3. 波状摩耗を検出する方法の検討

軌道検測車軸箱加速度から波状摩耗を検出するアルゴリズムを検討した。今回は、品川～田端間 9010 m～9050 m 区間の加速度データ (Fig. 2) の解析を例とした。

### 3.1 ウェーブレット解析

ウェーブレット解析の基底関数は時間領域にも周波数領域にも局在性を持つ小さな波である。ウェーブレット解析は、信号を時間軸と周波数軸の張る2次元平面に写像し、時間一周波数域の非定常情報を同時に表現することができる。信号の強さはウェーブレット係数の値の大きさで表し、

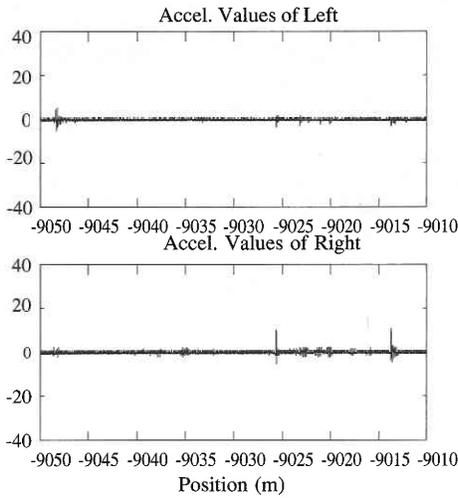


Fig. 2 軸箱加速度データ (上:外軌, 下:内軌)

グラフ上で色の濃さで示す. しかし, 不確定性の原理から, 時間分解能を上げると, 周波数分解能が悪くなる. それは基底関数のマザーウェーブレットの性質によって決まる.

本研究において, 時間分解能の良いメキシカン・ハットと, 周波数分解能の良いガボールという2つのマザーウェーブレットを使い分けた. Fig. 3 a, Fig. 3 bはそれぞれ, その2つのマザーウェーブレットでの軸箱加速度の解析結果である.

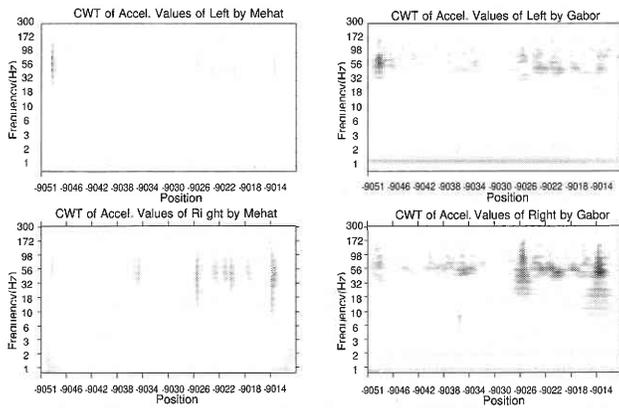


Fig. 3 ウェーブレット解析結果 a) メキシカン・ハット b) ガボール

3.2 溶接継目と周波数範囲の検出

ウェーブレット解析の結果を見ると, ウェーブレット係数に波状摩耗情報の他, レールの溶接継目等も現れている. そこから波状摩耗の情報だけを取り出すには, 溶接継目の検出を考る必要がある.

溶接継目は, 特定の位置で局所的に現れるものである.

ウェーブレット解析すれば, ある位置に周波数方向に広範囲に広がる形になる. このような特徴から, 位置毎に全周波数のウェーブレット係数の値をの値を足し合わせれば, 溶接継目のあるところはその足し合わせた値の一番大きい所になると考えられる (Fig. 4 a).

一方, 波状摩耗はある特定の周波数範囲でレール長手方向に発生する現象である. したがって, 波状摩耗はどの周波数で顕著に発生したかを, 周波数毎に全位置のウェーブレット係数を足し合わせれば確認できる (Fig. 4 b). これらの検出にはメキシカン・ハットを用いた.

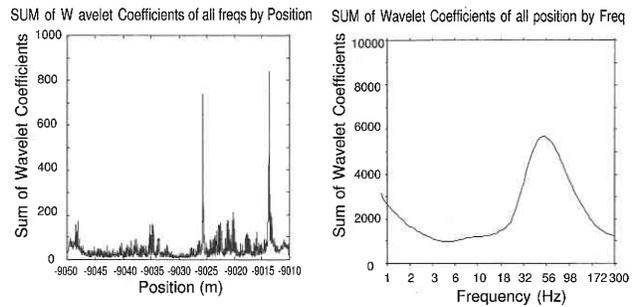


Fig. 4 a) 溶接継目の検出 (メキシカン・ハット) b) 周波数の検出 (メキシカン・ハット)

3.3 波状摩耗の検出

ウェーブレット解析結果から, 検出した周波数範囲をピックアップする (Fig.5 a). また, ウェーブレット係数の値で, 適当な閾値を決めて, グラフを描き直した (Fig.5 b). 黒くなっている個所のうちに, 溶接継目を除いた部分が波状摩耗の発生位置であると考えられる. この検出にはガボールを用いた.

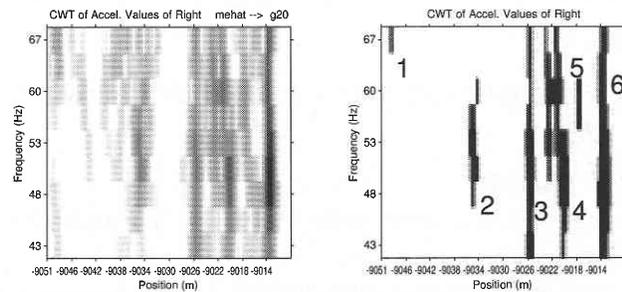


Fig. 5 波状摩耗の検出 (ガボール)

3.4 レール頭頂面凹凸測定データを用いた検証

Fig. 5 bで検出できた6個所の加速度データと, 同じ位置のレール頭頂面凹凸測定データの比較を Fig. 6に示す. 3.2節から, 3と6は溶接継目であることが分かった. それはレール頭頂面データから見ても明らかである. また,

研究 速 報

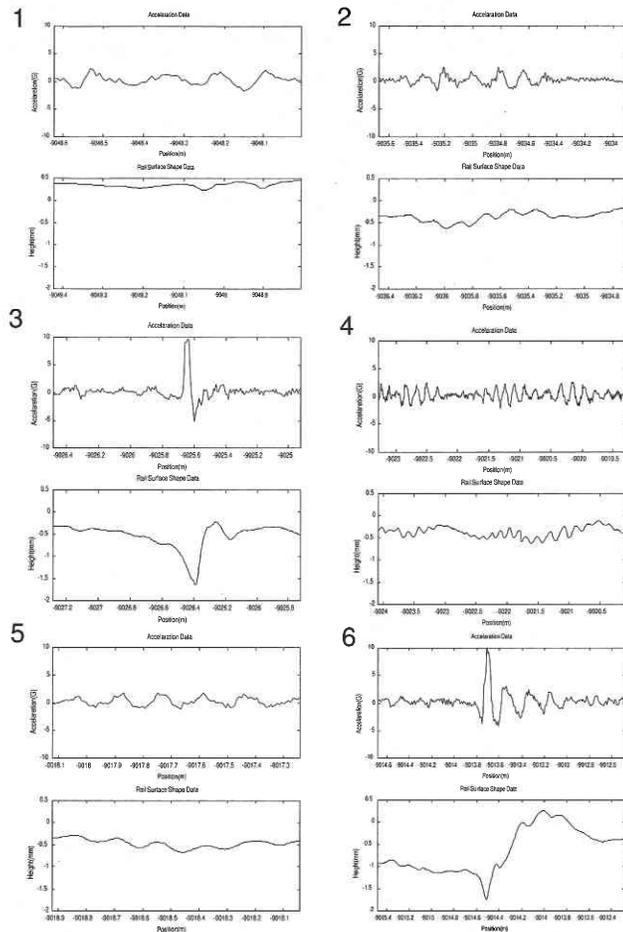


Fig. 6 レール頭頂面凹凸データとの検証

1, 2, 4, 5 は波状摩耗の発生したところであることが確認でき、以上の方法でレール波状摩耗を検出できることが検証された。

4. 加速度振幅から波状摩耗の波高を推知するシステムの検討

4.1 試験結果

試験で得られた加速度振幅と波状摩耗波高の関係結果を Table.1 に示す。

加速度振幅は高速軌道検測車で測定した軸箱加速度から計算し、波状摩耗の波高はレール頭頂面凹凸データから計算した。測定時の走行速度が違うと、測定した周波数も上下加速度の値も異なり、加速度振幅と波状摩耗波高の比も違ってくる。それらの関係を調べるため、簡単なモデルで周波数応答を計算した。

Table. 1 試験結果

軌道	平均走行速度 (km/h)	平均周波数 (Hz)	加速度振幅/波状摩耗波高 ( $/s^2$ )
省力化	34	60	$1.5 \times 10^5$
一般	39	90	$3.8 \times 10^5$

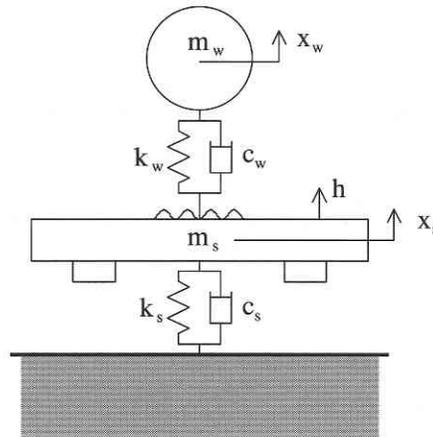


Fig. 7 解析モデル

4.2 モデル

今回の計算で用いたモデルは、車輪、レールと枕木が一体になっている軌框から構成される上下系のものである。モデルの緒元値は輪重落下試験<sup>2)</sup>から与えられる。輪重落下試験は一般軌道についてしか行われなかったため、今回の計算は一般軌道についてのみ行った。Fig.7は解析モデルを示している。

4.3 計算結果

周波数応答の計算結果は Fig. 8 に示す。点線は試験結果の周波数 90 Hz、加速度振幅と波状摩耗波高の比の  $3.8 \times 10^5/s^2$  を示している。

計算結果を見ると、軌道ばね係数を輪重落下試験値の  $1.1 \times 10^8 N/m$  にすると、周波数 90 Hz の時に、加速度振幅と波状摩耗波高の比は  $1.8 \times 10^5/s^2$  となり、試験結果から若干ずれた。試験結果に合わせるように、軌道ばね係数を変えると、軌道ばね係数が  $1.4 \times 10^8 N/m$  の時に、90 Hz の加速度振幅と波状摩耗波高の比が  $3.8 \times 10^5/s^2$  となり、試験結果と一致した。

軌道ばね係数をもう 2 通りを計算した結果、応答曲線は軌道ばね係数によって変化し、加速度振幅と波状摩耗波高の比が推定しにくくなることがわかった。ところが、共振点より低い周波数部分の結果を見ると、軌道ばね係数に依存せず、加速度振幅と波状摩耗波高の比がほぼ等しい関係になっている。このことから、共振点以下の低速域を用い

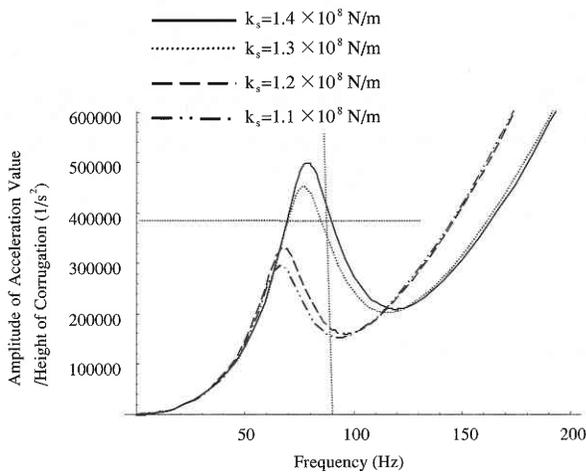


Fig. 8 周波数応答の計算結果

れば、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と考えられる。

### 5. 考 察

検証のため、本検出手法での検出した結果と実際の波状摩耗発生状況とを比較し、非常に良好な結果を得た。よって、本検出手法は非常に有効であることが検証された。

一方、4 節のシステムで、共振点以下の低速域での加速度振幅から波状摩耗波高を精度よく推定できることが分かった。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より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。それは、異なる走行速度での加速度測定データが必要だと考えられる。また、簡単な上下系モデルではなく、詳細な弾性梁モデルとして検討する必要があると考えられる。

### 6. 結 言

以下に本研究の結論を記す。

- ・ 鉄道レールに発生する波状摩耗の検出に、軸箱加速度のウェーブレット解析等を適用し、波状摩耗の発生位置・波長を詳細に捉えた。
- ・ 高速軌道検測車で測定した軸箱上下振動加速度の値から、波状摩耗の発生位置を検出する方法を開発した。
- ・ 車輪・レール系の上下振動モデルを用いることにより、測定時の走行速度が低いときに、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システムを開発した。

計測や実験にご協力を賜った東日本旅客鉄道株式会社・鉄道総合技術研究所に感謝の意を表す。

(1998年9月30日受理)

### 参 考 文 献

- 1) 須田・井口・今泉・谷口, “コルゲーションの成長・減衰機構の研究”, 日本機軸学会論文集 C 編, Vol. 54, No. 499, P. 537-560.
- 2) 佐藤吉彦, “落重試験による軌道各部特性係数の算出”, 鉄道技術研究所速報, No. 74-153 (1974).