

S2-1-4

軌道の状態推定に関する基礎的研究

○小島 崇 (日大院) [機] 綱島 均 (日大) [機][電] 松本 陽 (交通研)

Fundamental Study on State Estimation of Railway Track

Takashi Kojima (Graduate School of Nihon University)
Hitoshi Tsunashima (College of Industrial Technology, Nihon University)
Akira Matsumoto (National Traffic Safety and Environment Laboratory)

This paper describes rail corrugation detection from vertical acceleration of a vehicle body and the running noise by time-frequency analysis. An actual vehicle running tests on a commercial line was conducted, in which vertical acceleration of axle boxes and a vehicle body, and exterior noise were measured. In this paper we show first, the rail corrugation can be detected from the vertical acceleration of vehicle body by multi-resolution analysis (MRA) using wavelet transform. Second, it is shown that the incipient corrugation can be detected effectively from the exterior noise measured in actual vehicle.

キーワード: 波状摩耗、異常検知、ウェーブレット、多重解像度解析
Keywords: Corrugation, Fault detection, Wavelet, Multi-resolution analysis

1. はじめに

現在の鉄道の軌道等の保全是、保守員の巡回や、新幹線や一部の幹線では、専用の軌道検測車により軌道の状態を定期的に検測することによって行われている。軌道の保全の一つの方法として、既存の営業車両に簡易なセンサなどを取り付け、高度な計測・情報処理を行うことによりある程度の状態検測が行える車両（「ブローブ車両」と呼ぶ）によって軌道検測を行っていく方法が考えられる¹⁾。ブローブ車両では、データの収集や配信を自動で行うので、検測員の随行なしに常時観測が可能となる。さらに、複数のブローブ車両によって得られた走行データを統計に処理することによって、より正確な軌道検測も可能となる。また営業車両を用いて行うので亜幹線区や地方交通線でも高頻度の軌道検測が可能になり、安全性の向上や軌道保全の低コスト化、効率化にもつながる。

ブローブ車両の実用化には観測信号から有意な信号を取り出す必要がある。すなわち、比較的簡易な測定器から得られる情報は、軌道の様でない不規則な入力による影響や、センサ自身の観測ノイズに埋もれているので、有意な信号とノイズを分離して軌道の状態を推定する必要がある。



図1 波状摩耗の例

そこで、本研究では、軌道の状態を推定する方法として、ウェーブレット変換を用いた多重解像度解析により、車両の振動加速度や騒音からレール波状摩耗を検出する方法について提案する。

2. 実車走行試験

2.1 レール波状摩耗

本研究では、軌道異常の一例としてレール波状摩耗を検討対象とする。波状摩耗は、レールの頭頂部が数 cm から十数 cm の周期で摩耗する現象で、特に急曲線部に発生するものが問題となっている²⁾。これが成長すると、著しい騒音や振動を引き起こしたり、軌道材料を損傷させたりする原因となるため、レールの研削や交換が必要となり、都市鉄道では軌道保守の重要な課題のひとつとなっている。図1に成長の進んだ波状摩耗の例を示す。

2.2 測定試験

実車走行試験は、都市鉄道事業者の協力を得て、実路線において実際の車両にセンサを取り付けて実施した。センサは、図2に示すように、第1軸の左右の軸箱と、台車中心上の客室床面に取り付け、それぞれ上下および左右の振動加速度を測定した。また、マイクロホンを手車体床下に取り付け、床下騒音を測定した。

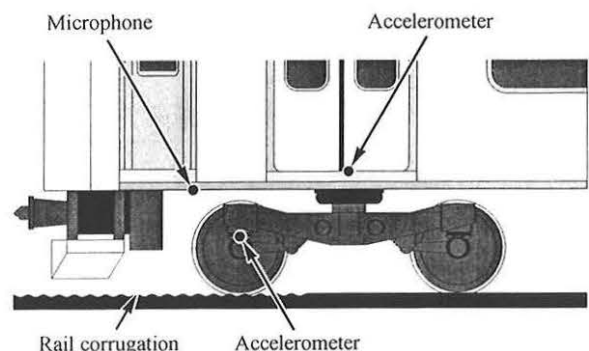


図2 測定試験にて取り付けしたセンサの位置

2.3 試験結果

図3は、波状摩耗の顕著な曲線区間の測定結果である。これは、半径202mの曲線を38km/hの一定速度で走行した場合の測定結果である。図3(a)から内軌側軸箱の上下振動加速度が著しく振動していることがわかり、波状摩耗が内軌に発生していることが確認できる。図3(c)の床下騒音については、激しい軸箱の振動が生じる際に騒音も大きくなり、床下騒音は、波状摩耗によって生じる振動加速度と相関が高いことがわかる。

波状摩耗のない場合の特性と比較するため、図4に直線区間の測定結果を示す。走行速度は、曲線区間同様に38km/h一定である。軸箱の上下振動加速度は、図3の曲線区間と比較して左右ともに非常に小さいことがわかる。軸箱、特に内軌側では、波状摩耗の有無による加速度の違いが顕著であり、この例では、しきい値処理などによって比較的容易に波状摩耗を検出できる可能性がある。

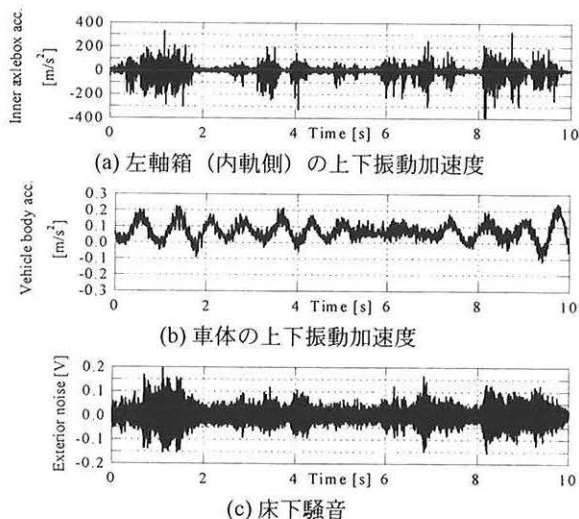


図3 波状摩耗のある曲線区間の測定結果

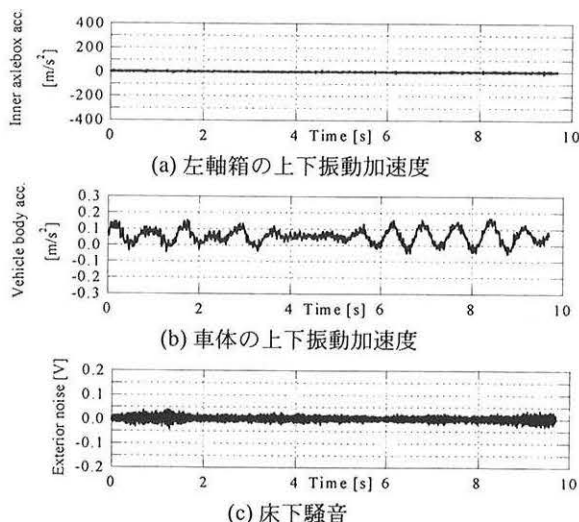


図4 波状摩耗のない直線区間の測定結果

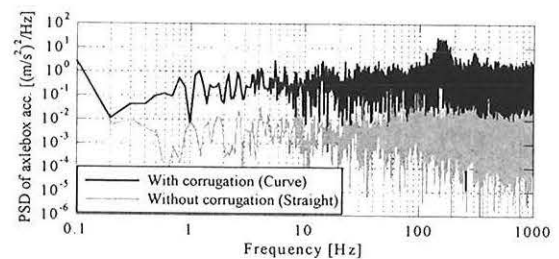
しかし、営業車両にセンサを取り付けてプローブ車両とする場合、できる限り容易な箇所にセンサを取り付ける方が導入しやすい。すなわち、車内に設置した加速度計から軌道異常の検出を行うことができれば、車両の改造なしに導入できると考えられる。

客室床面で測定した車体の上下振動加速度は、図3(b)の曲線区間、図4(b)の直線区間の結果から、低周波数の車体の動揺の影響が強く、波状摩耗の有無による違いがほとんど見られない。このことから、車体振動加速度から波状摩耗を検出するためには、別途、信号処理を行う必要があると考えられる。

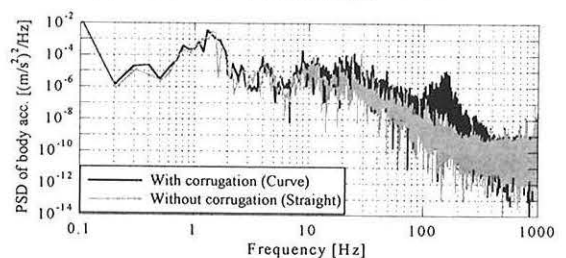
3. 軌道異常の検出

3.1 周波数解析による比較

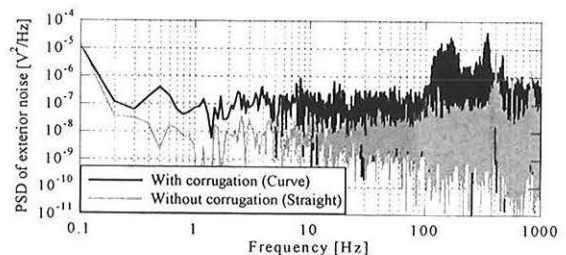
波状摩耗は、レール頭頂面の周期的な凹凸であるため、周波数解析を行うことにより、その特徴を抽出できると考えられる。図3の波状摩耗ありと図4の波状摩耗なしのデータについて、それぞれパワースペクトル密度(PSD)を求めた。結果を図6に示す。図6(a)は、内軌側の軸箱上下振動加速度のPSDである。波状摩耗のある曲線は、直線に比べて周波数帯全域にわたってレベルが高く、さらに160Hz付近にピークが見られる。走行速度が38km/hであるので、ピークの周波数から波長6.9cmが求まる。これは、波状摩



(a) 左軸箱の上下振動加速度のPSD



(b) 車体の上下振動加速度のPSD



(c) 床下騒音のPSD

図5 波状摩耗あり・なしのPSDの比較

耗の一般的な波長域と一致し、このピークは波状摩耗によって生じたものと考えられる。図 6(b)は、車体の上下振動加速度の PSD である。波状摩耗のある曲線区間では、軸箱同様に 160 Hz 付近にピークが見られ、波状摩耗による振動が車体にも含まれることを示している。しかし、波状摩耗の具体的な発生位置を特定するには、時間・周波数解析を行う必要がある。

3.2 ウェーブレット変換を用いた時間・周波数解析

(1) ウェーブレット変換

ウェーブレット変換³⁾は、小さな波 $\psi(t)$ を平行移動、伸縮させて波形 $f(t)$ を解析していくものである。

$$(W_{\psi}f)(b,a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (1)$$

$\psi((t-b)/a)$ は、 b だけ時間 (位相) をずらし周波数を $1/a$ にしている。この連続ウェーブレット変換は、情報が重複し、多くの計算量を必要とする。そこで、 a と b を離散化する。

$$(W_{\psi}f)(2^{-j}k, 2^{-j}) = 2^{j/2} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(2^j t - k) f(t) dt \quad (2)$$

この離散ウェーブレット解析は、連続ウェーブレット変換よりも情報が少ないが、信号をより効率的に変換できる特徴がある。また、逐次計算が可能になるため、プローブ車両においては、車両が走行しながら解析が行えるという利点がある。

(2) 多重解像度解析

多重解像度解析は、離散ウェーブレット変換を用いて信号を階層構造に分解するものである。対象の波形 S をいくつかの近似成分 (低周波数成分) と詳細成分 (高周波数成分) に分解する。

$$S = \sum_{j=1}^n d_j + a_n \quad (3)$$

ここで、 d_j は詳細成分、 a_n 近似成分である。

ウェーブレット変換では、マザーウェーブレット $\psi(t)$ の選択が重要となる。本検討では、コンパクトサポートであり、正規直交基底となる Daubechies⁴⁾を用いる。直交基底を用いることにより、信号の効率的な分解・再構成が可能であり、また、生成指数 N を高くするほど、より高次の異常信号を検出可能になる。今回は、未知の信号を検出するために、まず比較的高次の生成指数を用いることとし、 $N=7$ とした (図 6)。

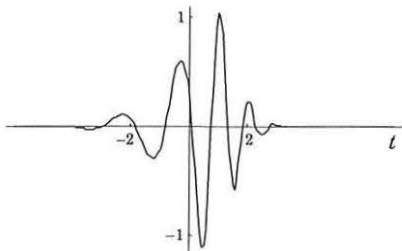


図 6 Daubechies のウェーブレット ($N=7$)

多重解像度解析の分解レベルは、サンプリング周波数 2 kHz の信号から 100~200 Hz 程度の波状摩耗を検出するため、分解するレベルを 4 段階とした。すなわち、原信号 S は、 $S = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + a_4$ に分解されることになる。

(3) 多重解像度解析による波状摩耗検出

高速軌道検測車の軸箱上下加速度から、連続ウェーブレット変換を用いることにより波状摩耗を検出する手法⁵⁾が提案されている。本研究では、既存の営業車両に導入するために、多重解像度解析を用いて車体の上下振動加速度からリアルタイムで検出する方法を提案する。

曲線区間と直線区間の車体の上下振動加速度 (図 3(b)、図 4(b)) の多重解像度解析の結果をそれぞれ図 7、8 に示す。サンプリング周波数が 2 kHz であるので、 d_1 は 500~1 kHz、 d_2 は 250~500 Hz、 d_3 は 125~250 Hz、 d_4 は 62.5~125 Hz、 a_4 は 62.5 Hz 以下の周波数に対応している。波状摩耗の周波数 160 Hz を含む d_3 成分の振幅は、波状摩耗あり (図 7) の方が顕著に大きく、図 3(a)の軸箱上下振動加速度に近い波形である。この結果、多重解像度解析を用いることにより、車体の上下振動加速度から波状摩耗の振動成分を抽出できることがわかる。

ここでは、Daubechies の生成指数 $N=7$ による解析結果を示したが、 N を変化させて解析を行った結果、波状摩耗に関しては、 $N \geq 4$ で良好な検出性が得られることがわかった。

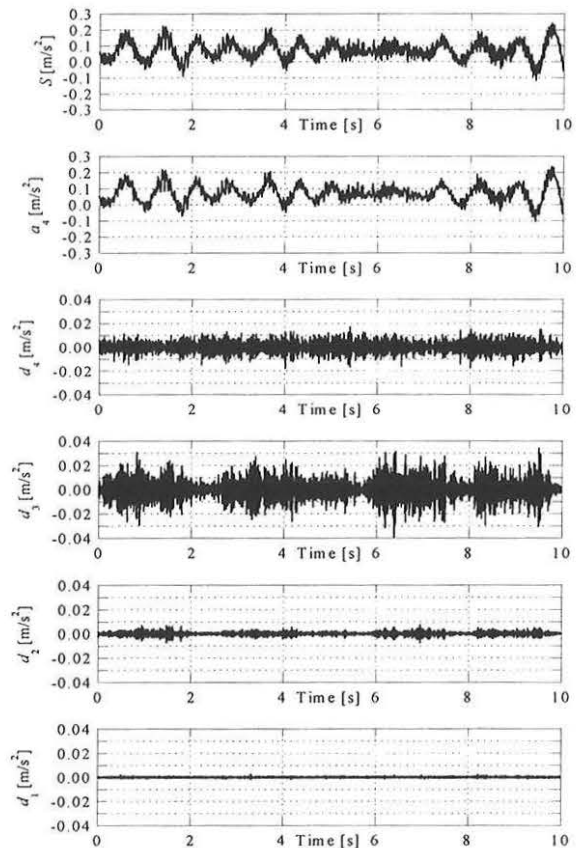


図 7 車体振動加速度の多重解像度解析 (波状摩耗あり)

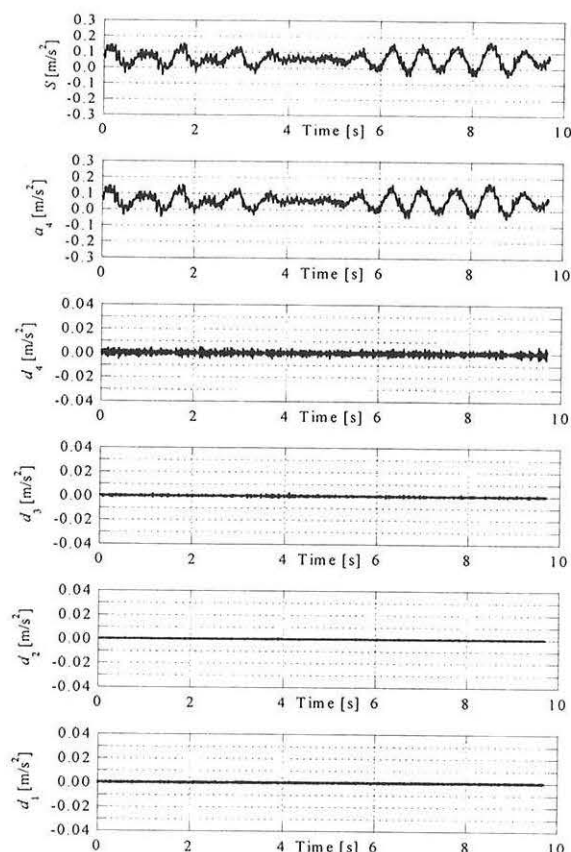


図8 車体振動加速度の多重解像度解析（波状摩耗なし）

3.3 騒音からの波状摩耗検出

(1) 検出方法

車両が波状摩耗上を走行する際、独特の騒音が発生することから、騒音からの波状摩耗検出の可能性が考えられる。図5(c)のPSDから明らかなように、床下騒音は、1 kHz以下ではスペクトルがほぼ一定であって、波状摩耗がある場合は、これにピークが伴う性質がある。そこで、スペクトルのピークを検出し、その高さを評価することにより、波状摩耗の大小を検出し得ると考えられる。

本検討では、騒音データにデータウィンドウを設定して高速フーリエ変換（FFT）を行い、スペクトルのピークを検出する。すなわち、ウィンドウをシフトしながらFFTを行い、一般的に波状摩耗がとり得る周波数域からピークを探し、ピーク高の時間変化を評価する。

(2) 解析結果

波状摩耗のある曲線区間（図3）について解析を行った結果を図9に示す。図9(a)の軸箱に著しい振動が生じる部分で、図9(d)のスペクトルピーク高も高い値を示している。この区間は、波状摩耗が顕著であるので、図9(c)の騒音が大きくなれば図9(d)のピーク高も高くなるのがわかる。さらに、初期の波状摩耗についても同様の解析を行った結果、良好に波状摩耗を検出することができた。この結果から、騒音のスペクトルピーク高を評価することにより、より明瞭に波状摩耗を検出できることがわかった。

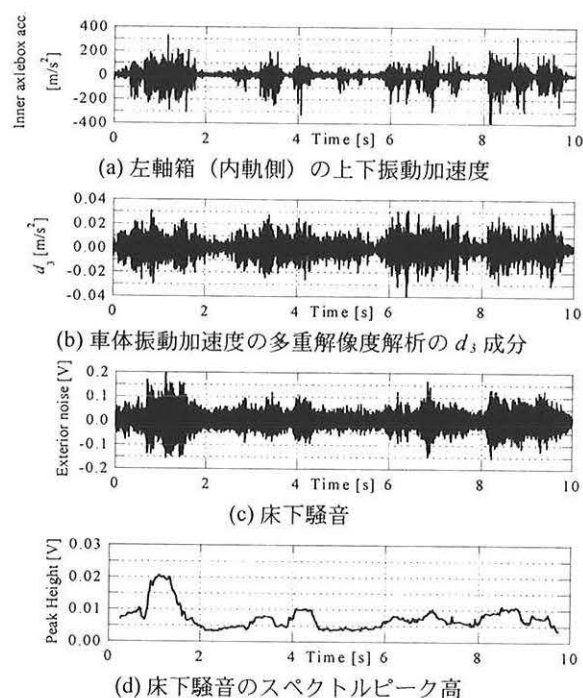


図9 波状摩耗のある曲線区間の解析結果

4. まとめ

車両で測定したデータからレール波状摩耗を検出する方法について検討した。車体の上下振動加速度に対して、ウェーブレット変換を用いた多重解像度解析を行い、波状摩耗の周波数を含む詳細成分（ d_3 ）に、波状摩耗の振動成分が抽出され、波状摩耗を検出できることを実証した。また、騒音の解析処理を併用することによって、より信頼性の高い波状摩耗検出が可能になることを示した。

今回は、軌道異常として波状摩耗を検討対象としたが、ウェーブレット変換は、不連続性を検出できることが大きな特徴の一つであるため、今後の展開として、レール継目の異常などの検出が期待できる。

なお、本研究は独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」の補助を受けた。

参考文献

- 1) 網島均ほか、プローブ車両技術の導入による軌道交通システムの再生に関する基礎的研究、第13回交通・物流部門大会講演論文集、No. 04-53、pp. 241-242、2004
- 2) 松本陽ほか、曲線部に発生するレール波状摩耗の発生メカニズムに関する研究、日本機械学会論文集（C編）、Vol. 64、No. 623、pp. 2625-2632、1998-7
- 3) I. Daubechies, Ten Lectures on Wavelets, CBMS-NSF Regional Conference Series In Applied Mathematics, Society for Industrial and Applied Mathematics, No. 61, 1992
- 4) I. Daubechies, Orthonormal bases of compactly supported wavelets, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 41, No. 7, pp. 909-996, 1988
- 5) 須田義大ほか、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、日本機械学会論文集（C編）、Vol. 66、No. 642、pp. 615-620、2000-2