

鉄道用プローブ車両の研究（第1報）

- 床上振動、車内騒音からレール波状摩耗を検出する方法 -

交通システム研究領域
日本大学

松本 陽、緒方正剛、佐藤安弘、大野寛之
網島 均、小島 崇

1. まえがき

鉄道車両や軌道は、列車の走行などにより性状変化し、劣化していくので、その状況を監視し、補修していくことによって、安全性や環境性を維持していくことが不可欠である。しかしながら、専用検測車による定期的観測を行う路線が増えて来てはいるものの、費用、要員、手間、技術的制約などの点から、すべての路線において、定期監視、常時監視を行うという理想的状態からは、まだまだ遠い状態にある。

筆者らは、このような状況を考慮して、より簡便な耐久性のある軌道や車両状態の測定・解析システムを研究開発して、営業車に設備して常時監視を行ったり、簡便な可搬型計測システムを実現して随時計測を容易にすることにより、安全性や保守性の向上を実現するために、鉄道・運輸機構の基礎的研究推進制度による「プローブ車両技術の導入に関する研究」を平成16年度より開始した。

本報では、これまでの研究内容と得られた成果について報告する。

2. プローブ車両とは？

本研究の目的とするプローブ車両とは、電気や軌道に関する専用の検測車を用いずに、既存の営業車などに、比較的簡易で耐久性が高く、一般の運行に支障しないような計測システムを設備して、軌道などの設備や車両の状態を計測し、列車運行の安全を阻害する事象や補修を必要とする箇所を検出しようとするものである。

当然、測定精度や測定できる特性値は専用の検測車に比して限定されるが、データ解析技術や複数車両による常時繰り返し測定によりカバーしてやろうというものである。複数のプローブ車両との通信によりセンターでは常時路線の状態をある程度監視することもできる。

また、各種のセンサを持つ、可搬型で、配線などの特別な準備をせずに、客室内などに置くだけで計測できる簡易型計測装置の実現についても研究している。

3. 実車走行試験によるデータ収集

プローブ車両で使用するのに適したセンサとその設置方法、得られたデータの解析方法について検討するため、車両の走行装置（台車）の近傍や客室内に各種のセンサを設置し、営業線において走行試験を行った。

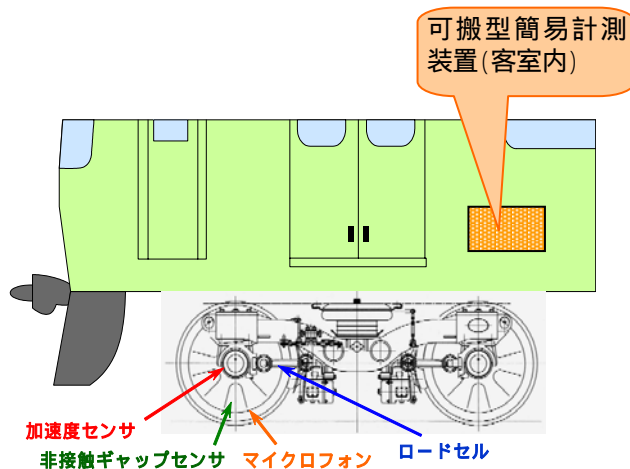
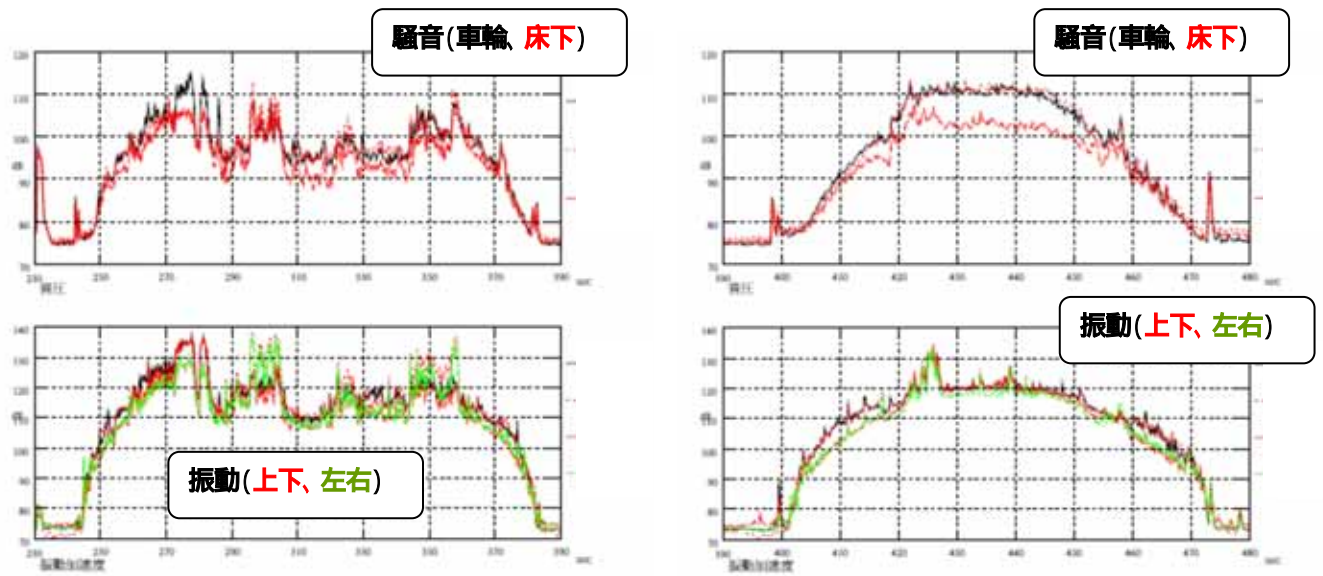


図1 プローブ車両のイメージ



図2 センサの取り付け例(車輪近傍騒音用マイクロホン)



(a) 駅間 - 曲線多数、波状摩耗発生

(b) 駅間 - ほぼ直線

図3 振動加速度(軸箱)及び騒音の測定波形の例(1駅間)

図2に車輪近傍騒音の測定状況を示す。

今回、実施したのは、比較的列車本数の多い都市鉄道路線である。図3に、駅間を通常の営業運転速度で走行した場合の振動加速度や騒音などの測定例を示す。(b)の区間の方が(a)の区間に比して、測定値のレベルが全般的に高いが、これは走行速度が(b)区間の方が高いためであり、レール波状摩耗が顕著に発生するなど保守の必要性があるのは、むしろ(a)区間である。

波状摩耗はレール上に発生する波高が0.1~1mm程度、波長が数cmから数十cm程度の周期的な摩耗で、軌道材料の損傷や騒音を引き起こす原因となる。特に、都市鉄道路線では、曲線部に多発する波状摩耗の除去が軌道保守管理の課題のひとつとなっている。

図3に示すように、単に振動加速度や騒音のレベルの大小のみでは、軌道状態を診断することはできないが、FFTなどの波形解析をしていくことにより、軌道状態の判定を行うことができる可能性がある。例えば図4は車輪近傍騒音の測定値のFFT解析結果の一例であるが、ごく初期の波状摩耗(波高0.1mm以下)の発生状況をよく捉えている。

本研究では、測定値をウェーブレット変換や各種のフーリエ変換などを組み合わせることによって、車室内振動や車室内騒音などの、より容易な測定方法で軌道の状況を診断する方法を試みている。次章に成果の一例を述べる。

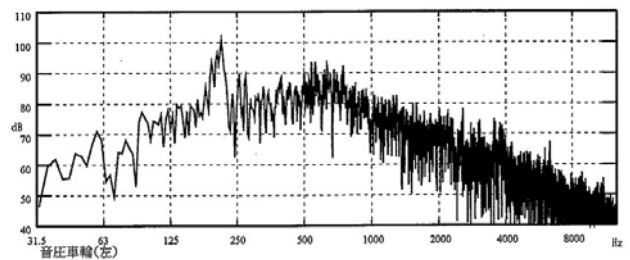


図4 車輪近傍騒音のFFT解析結果(波状摩耗区間)

4. 多重解像度解析による軌道異常の検出例

4.1. ウェーブレット変換と多重解析度解析

波形解析によく用いられる方法としてフーリエ解析があるが、フーリエ解析は、時間領域の情報をフーリエ変換し周波数領域の情報に置き換えるものであるため、時間情報が欠落してしまう欠点がある。この欠点を補うために導入された短時間フーリエ変換(窓フーリエ変換)は、時間軸と周波数軸の情報を与える時間周波数解析が可能である。しかし、この情報はウィンドウの大きさに依存する、よって、時間ウィンドウに対して一度大きさを決めると、ウィンドウはすべての周波数に対して同じように適用され、固定されてしまう。そこで、ウィンドウの大きさを可変にできるウェーブレット変換が考えられる。ウェーブレット変換は時間の幅、周波数の幅を変化させ、時間幅が大きいと周波数幅を小さくし、時間幅が小さいと周波数幅が大きくなる信号の特性を自動的に補ってくれる。

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小さな波 $\psi(x)$ を平行移動、伸縮させて解析したい波形 $f(x)$ の局所的な様子を表し、これを元に波形を解析していくもので、式(1)で与えられる¹⁾。

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

$\psi((x-b)/a)$ は、 b だけ時間（位相）をずらし周波数を $1/a$ にしている。これらの演算を施したのが連続ウェーブレット変換と呼ばれ、元の信号にウェーブレットがどのくらい含まれているかを表す。また、ウィンドウを変化させ、低周波数情報を詳細に得る場合は時間を長く取り、高周波数情報を詳細に得る場合は時間を短く取ることができる。

しかし、連続ウェーブレット変換は全てのスケールで計算するため、かなりの計算を必要とし情報が重複する。そこで $(b, 1/a)$ を離散化し $(2^{-j}k, 2^j)$ と置き、これを離散ウェーブレット変換という。

$$(W_{\psi}f)(2^{-j}k, 2^j) = 2^{j/2} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi(2^j x - k)} f(x) dx \quad \dots (2)$$

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、信号がより効率的で、より精度が高いものになる。

次に、ウェーブレット解析を用いた多重解像度解析について述べる。解像対象の波形を S としたとき、この波形を図5に示すように6つの階層構造に分解するとしたとき、式(3)のようになる。

$$S = a_3 + d_3 + d_2 + d_1 \quad \dots (3)$$

このように波形 S をいくつかの a (Approximation: 低周波成分) と d (Detail: 高周波成分) に分解する。

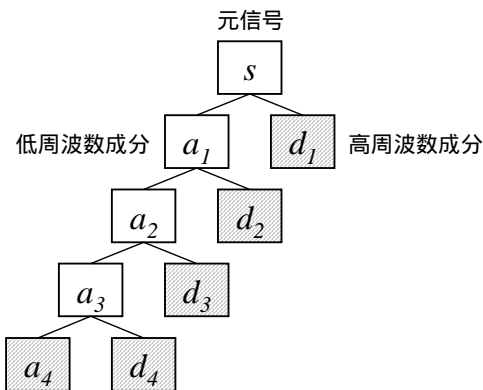
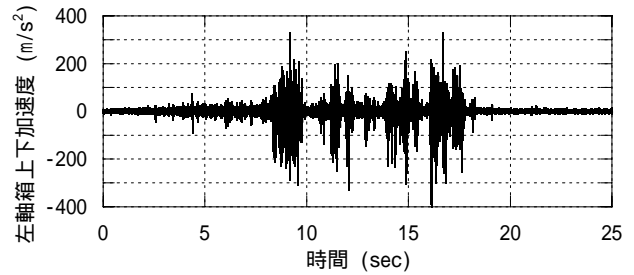


図5 多重解析度解析

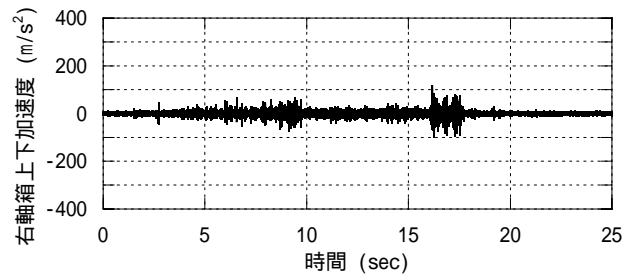
4.2. 多重解像度解析によるレール波状摩耗検出

前章で述べた営業路線における列車走行試験により計測した加速度データを、ウェーブレット変換を用いて解析し、その中から有意な情報を取り出すための解析例について述べる。

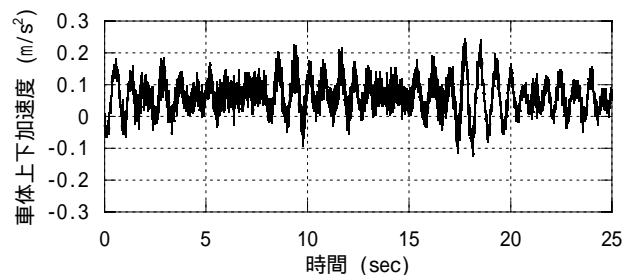
加速度データは、前述したように台車の軸箱と客室内床面において計測した。軸箱振動加速度のように車輪・レール接触点に近い測定点で得られたデータの方が、より多くの情報を含んでいる可能性は高いが、そ



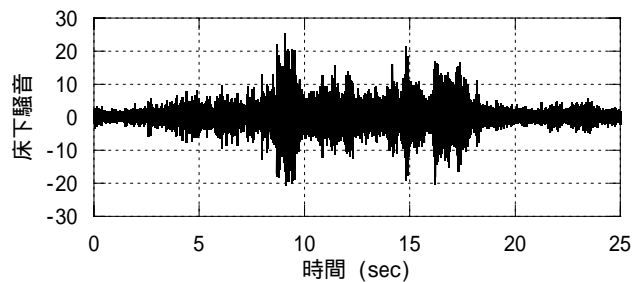
(a) 軸箱上下振動加速度(内軌 - 波状摩耗側)



(b) 軸箱上下振動加速度(外軌側)



(c) 客室床面上下振動加速度



(d) 床下騒音

図6 曲線部(波状摩耗箇所)における測定原波形

の反面、大きな加速度を受けたり、環境が悪かったりして、センサや計測システムには高い耐久性が要求され、簡便な常時計測は難しい。反面、客室内での計測は、車両への計測センサの特別な取り付け作業は不要で、この部分で測定したデータが有効な情報が得られれば、先に述べたような「プローブ車両」や「簡易・可搬型測定器」の実現に大きく貢献する。

そこで、客室内で測定した上下加速度などを解析し、その中からレール波状摩耗を検出することを試みた。

図6は、波状摩耗が内軌側に発生している半径約200mの曲線を、通常営業速度で走行した場合の軸箱と客室床面における上下振動加速度及び床下騒音の測定波形である。レール波状摩耗の発生している内軌側の軸箱は激しく振動している(図(a))が、外軌側はあまり振動していない(b)。内軌側の軸箱上下加速度のパワースペクトル密度(PSD)を図7に示す。曲線区間は、直線区間よりすべての周波数において増加傾向にあるが、さらに160Hz付近の周波数成分を多く含むことがわかる。車両の走行速度が約40km/hであるので、この周波数は波長に換算すると7.9cmになり、現場に発生している波状摩耗の波長と一致している。

これに対して当該区間走行中の客室床面で測定した上下加速度を見ると(図6(c))、特に波状摩耗による変化を確認することができない。しかし、客室内上下加速度のパワースペクトル密度を示す図8を見ると、軸箱同様に、曲線では160Hz付近の周波数が増加しており、波状摩耗に伴う振動が客室内振動にも含まれていることを示している。よって、波形解析により場所が特定できれば、客室内振動からも波状摩耗の発生箇所を検出できることになる。

図9に、曲線走行時の客室内上下加速度の測定値のウェーブレット変換を用いた多重解像度解析結果を示す。サンプリング周波数が2kHzであるので、d1は500~1kHz程度、d2は250~500Hz程度、d3は125~250Hz程度、d4は62.5~125Hz程度、a4は62.5Hz以下の周波数に対応している。

d1は時間に対してほぼ一定の値を示しているが、d2からd4には変化が見られ、特にd3は、図6(a)の軸箱の振動に近い波形となっていることがわかる。この帯域は波状摩耗の周波数帯とも一致しており、この

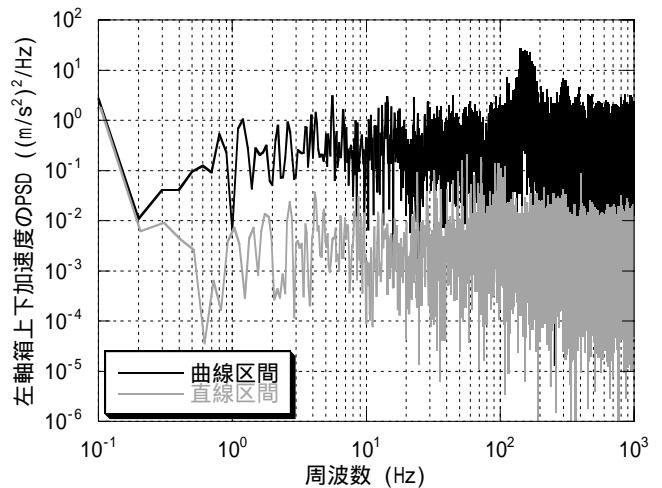


図7 軸箱振動加速度(上下)のPSD

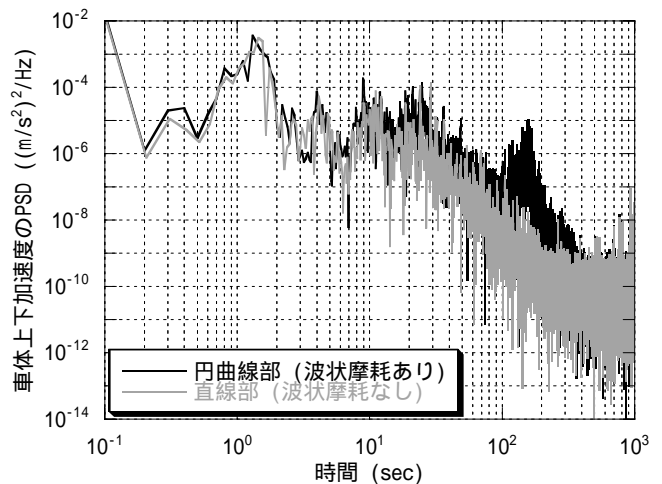
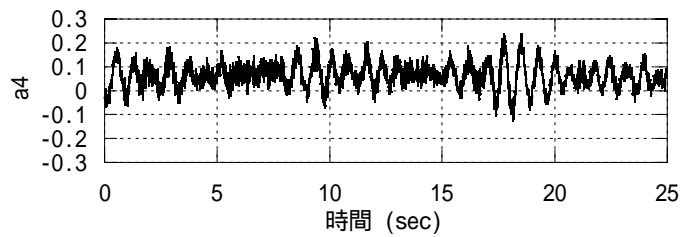


図8 客室床面加速度(上下)のPSD

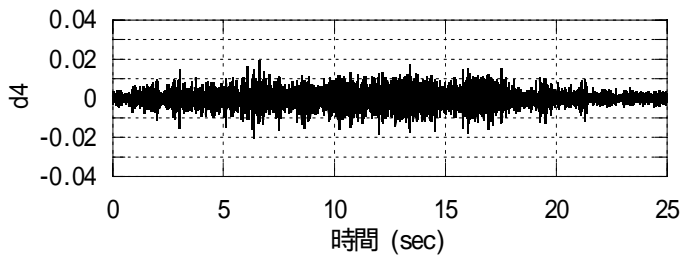
振動が波状摩耗による振動であり、この例では高周波成分 d3 に注目することで、客室床面振動から波状摩耗検知が可能であり、速度とこの時間情報を用いて波状摩耗の位置を特定できる可能性があることを示している。

また、ここでは示さないが、客室内で測定した騒音波形からも波状摩耗発生箇所の検出ができる可能性を示すこともできた。

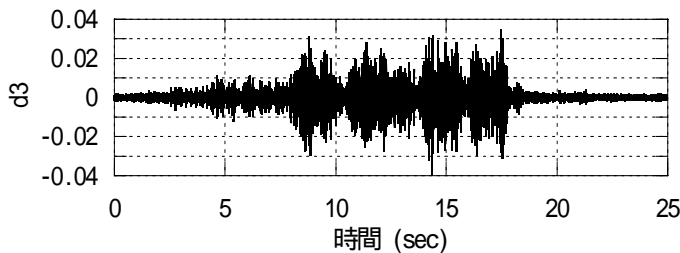
図10に、当該地点に発生しているレール波状摩耗を参考として示す。



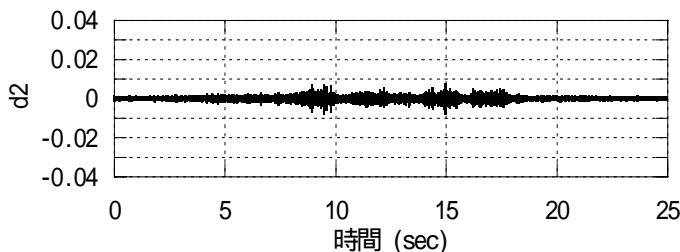
a4 (低周波成分)



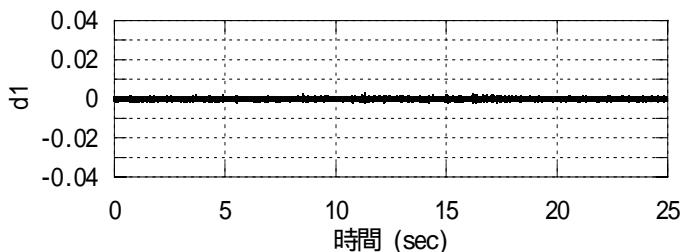
d4 (62.5 - 125Hz)



d3 (125 - 250Hz)



d2 (250 - 500Hz)



d1 (500 - 1kHz)

図9 多重解析度解析による波状摩耗箇所の検出
(客室床面上下振動より)



図10 現場付近に発生していた
レール波状摩耗の状況

5. まとめ

都市鉄道において、営業速度における振動加速度や騒音などを車輪近傍、台車周辺、客室内などにセンサを配置して測定した。

振動加速度や騒音レベルの測定結果を波形解析し、簡易測定が可能な客室内で測定したデータから軌道側異常を検出する方法について検討した。その結果、床面上で測定したデータ振動加速度データは、そのままでは判断が難しいが、ウェーブレット変換を用いた多重解像度解析を行うことにより、波状摩耗発生箇所の検出の可能性を見いだした。また、同様のことが、客室内で測定した騒音からも可能なことがわかった。

一方、車輪近傍騒音の測定値からは、FFT 解析を行うことにより、かなり初期の段階の波状摩耗でも検出可能な傾向が見られた。

6. むすび

今後、各部位での測定結果の相互関係の解析を深化したり、軌道状態の厳しい地方鉄道線での測定を行

うなど、プローブ車両実現のために研究を進めていきたい。

謝 辞

研究資金の提供などで支援をしてくださった独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構、列車走行試験の実施に協力いただいた鉄道事業者、測定実施関係者の諸兄に謝意を表す。

参考文献

- 1) 榊原 進：ウェーブレットビギナーズガイド，東京電機大学出版局（1995）