

9. 鉄道用プローブ車両の研究プロジェクトの成果概要

交通システム研究領域 ※大野 寛之、水間 毅、佐藤安弘、吉永 純
名誉研究員 松本 陽
企画室 緒方 正剛
日本大学生産工学部 綱島 均 日本大学理工学部 中村英夫

1. はじめに

鉄道の安全な運行を維持するためには、車両の定期的なメンテナンスのみならず、軌道設備や信号システム等のインフラ部分のメンテナンスも欠かすことはできない。インフラ部のメンテナンスに当たっては、軌道不整や信号強度などに関するデータを現場巡回による実測や検測車による測定などによって取得し、必要に応じて補修を行うなどの管理を行ってきた。保守員による作業は多くの人件費と手間、技術的スキルを要し、専用の検測車による作業は高価な設備費を要し、いずれもその頻度に限界がある。

本研究で開発している「プローブ車両」は、営業車両などに簡易で耐久性の高い測定センサを取り付けて、データの取得方法や処理・解析方法に工夫を凝らすことによって、軌道状態、運転状況、信号システムの動作環境等を実用上十分な精度で検知できるようにし、常時または頻繁にこれらの状態を監視することを目的としている (Fig. 1)。

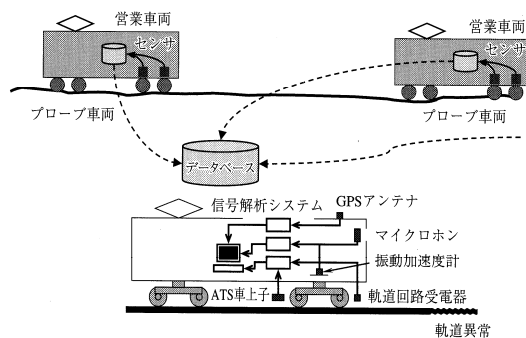


Fig.1 プローブ車両の概念図

2. 車両・軌道系のオンボード・センシング

2. 1. レール波状摩耗の検出⁽¹⁾

(1) 車体振動加速度からの波状摩耗の検出

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機会が多い。これが成長すると、著しい騒音や振動を引き起こしたり、車両部品や軌道材料を損傷させたりする原因となる。そこで、波状摩耗に伴う振動を車体に設置したセンサにより観測し、観測信号を解析する事により波状摩耗の発生を検知するシステムの開発を行った。

センサは、軌道に近い部分、たとえば、軸箱などのバネ下に取り付ける方が、軌道に関する多くの情報を得られる可能性が大きい。反面、振動が大きく、環境も悪いため、センサの耐久性に問題があり、営業車による常時監視には不向きである。したがってプローブ車両用のセンサは、できるだけ客室内などの環境の良い箇所に設置し、異常に関係した情報を探り出すという考え方が重要となる。

客室床面で測定した車体の上下振動加速度は、低周波数の車体の動揺の影響が強く、原信号そのままでは波状摩耗の有無による違いがほとんど見られない。そこで信号処理を用いた波状摩耗検出方法の確立が求められることになる。

波形解析によく用いられるフーリエ解析は、時間領域の情報を周波数領域に置き換えるもので、周波数に関する特徴が明確にできるが、時間情報を失ってしまう。すなわち、波状摩耗のような特定周波数を持つ現象を抽出するには便利であるが、どこに発生しているかがわからない。また、短時間フーリエ変換 (窓フーリエ変換) は、信号の時間周波数解析法であるが、窓の大きさに依存して結果が異なる。特に異常検知においては、窓の設定によって異常を検出できない場合があり、解析対象に対する知識、予測が必要となる。

これに対して、ウェーブレット変換は、窓の大きさを周波数によって自動的に変化させるため、未知の信

号に対して有効であると考えられる。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を平行移動、伸縮させて解析したい波形の局所的な様子を顕在化し、これを元に波形を解析していくものである。このウェーブレット変換に多重解像度解析を組み合わせると、時間情報を維持しつつ、周波数情報も得られるので、どのような波状摩耗が、どの部分発生しているかを検知することができる。

離散ウェーブレット変換は次式で与えられる。

$$D_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi_{m,n}(t) dt \quad \dots (1)$$

ここで、 $S(t)$ は解析対象の信号、 $\psi_{m,n}(t)$ はマザーウェーブレットである。

多重解像度解析 (MRA : multi-resolution analysis) (Fig. 2) 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。対象の波形を近似成分 (低周波数成分) と詳細成分 (高周波数成分) に分解する⁽⁴⁾。レベル m における信号の詳細成分は

$$d_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad \dots (2)$$

となるので、原信号 $S(t)$ は、次のように表現できる。

$$S(t) = a_j(t) + \sum_{m=1}^j d_m(t) \quad \dots (3)$$

ここで、 d_m は詳細成分、 a_j は近似成分である。

(2) 車内騒音からの波状摩耗の検出

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。車内騒音から軌道異常を検出できれば、非接触の測定が可能となり、既存の車両への導入がさらに容易になると考えられる。

車内で測定される騒音の大きさにあまり変化が生じない小さな波状摩耗であっても、周波数解析を行うことによって、波状摩耗の発生を確認できる。しかし、周波数解析は時間情報を失うため、どの位置にどの程度の波状摩耗が発生しているか特定するためには、時間周波数解析を行う必要がある。前節ではウェーブレット変換を用いた異常検出を紹介したが、波状摩耗のように信号の周波数領域が限定されるような場合には、窓フーリエ変換も有効である。ここでは、車内騒音データの窓フーリエ変換を行い、スペクトル中の顕

著な周波数のピーク高さを計算し、その時間変化を評価する方法を考案した (Fig. 3)。

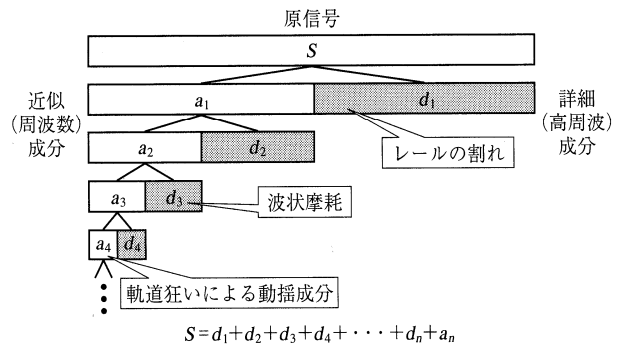


Fig.2 多重解像度解析による軌道異常検出の概念

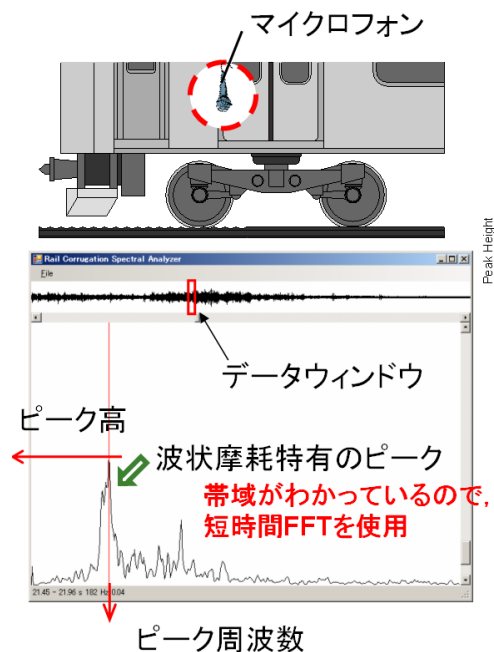


Fig. 3 車内騒音からの波状摩耗検出の概念

(3) 実車走行試験による波状摩耗の検出例

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営業に使われている車両を用いて、台車や車体にセンサを取り付けて実施した。測定区間としては、レール波状摩耗が顕著に発生しているなど、軌道保守が必要と考えられる区間を中心に測定を行った。

センサ取り付け状況を Fig. 4 に示す。加速度センサは実用を想定して台車中心上の客室床面に取り付けるとともに、第1軸の左右の軸箱にも取り付け、それぞれ上下および左右の振動加速度を測定した。また、マイクロホンについても車内および車体床下に取り付け騒音の測定を行った。

客室床面の上下振動加速度の原信号と多重解像度解析の結果を Fig. 5 に示す。多重解像度解析の分解レベルについては、サンプリング周波数 2kHz の信号から 100~200Hz 程度の波状摩耗を検出するため、レベル 4 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。 d_1 は 500~1,000Hz 程度、 d_2 は 250~500Hz 程度、 d_3 は 125~250Hz 程度、 d_4 は 62.5~125Hz 程度、 a_4 は 62.5Hz 以下の周波数に対応している。

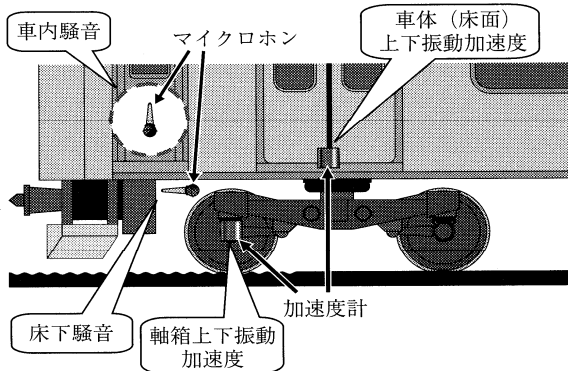


Fig. 4 実車走行試験時のセンサの取付位置

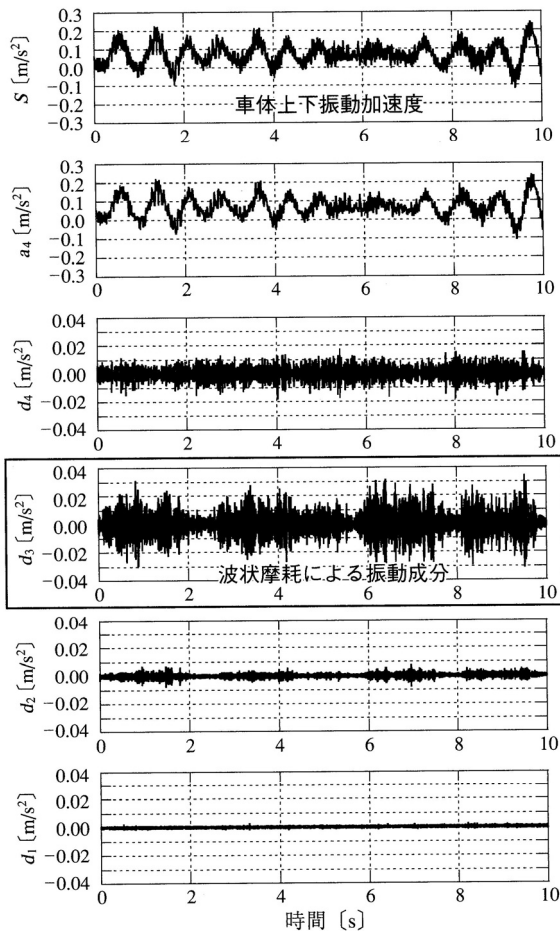


Fig. 5 多重解像度解析による波状摩耗の検出

原波形 S では波状摩耗の存在は全く検出できないが、 d_3 成分では波状摩耗による振動成分（周波数 160Hz 程度）をよく検出していることがわかる。

波状摩耗の存在する区間を通過した際の車内騒音のスペクトルのピーク高さおよびピーク周波数の時間変化を Fig. 6 に示す。ここで、波状摩耗のピーク高さは、120~240Hz の周波数帯域の最大値とした。また、ウィンドウの大きさは、波状摩耗のピークが明瞭に確認できる周波数分解能となるように設定し、0.512 秒 (1,024 点/2,000Hz) とした。

波状摩耗発生区間では、スペクトルのピークが増大し、ピーク周波数が変化しなくなることがわかる。車内騒音レベルを前記の方法により信号処理を行うことにより、スペクトルピーク高さによって波状摩耗の程度を識別することも可能となる。

3. 信号システムの状態監視⁽²⁾

ATS に関しては、現在の検測車で問題になっている「車両の上下動に伴う計測誤差」を救済できる「地上子と車上子間の距離変動に強い計測手法」として、営業車による地上子の品質 (Q 値) 計測技術を開発した。これは複数の周波数成分の発振波を照査する方式で、地上子の共振周波数の偏差についても計測可能となる。

軌道回路計測技術については、軌道回路定数の自動計測技術確立の可能性が明らかとなった。また、地上での計測データをプローブ車両に伝達することを目的とした「レール利用多情報伝送システム」についてフィールド試験を実施した。

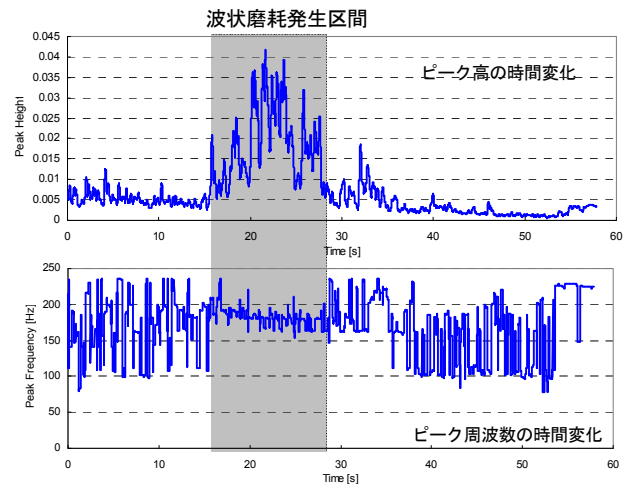


Fig. 6 車内騒音からの波状摩耗検出

4. 試作プローブ車両システムの走行実験

車上のオンボード・センシング・システムとして、Fig. 7に示すようなプローブシステムを構成した。システムは軌道異常検知用 PC、信号異常検知用 PC、運転状況監視装置、異常位置表示装置から構成されている。

軌道の状態診断の実証実験については、レール上に波状摩耗に相当する異常を作成し、車両が走行した際に、車上の検知システムにより異常内容と発生位置をリアルタイム表示するようにした。車体上下振動加速度の多重解像度解析と車内騒音の信号処理により、波状摩耗作成部で軌道異常を検出することができた。

信号異常については、異常を発生させる軌道回路区間にプローブ車両が進入したところで、信号電流を遮断する方法と、信号電流の周波数を変更する方法とで試験を行った。いずれの場合においても信号異常を検出することができた。

これらの異常の発生位置は GPS から取得した位置情報にもとづいて路線図上に表示される (Fig. 8)。

5. おわりに

営業車両を用いて軌道の状態を常時監視するプローブシステムについて、実用につながる基礎的な成果を得ることができた。鉄道の安全な運行に影響を及ぼす要素としては軌道や信号等の異常の他に、運転士のヒューマンファクタの重要性が指摘されている。鉄道システムのトータルでの安全性を確保するためには、運転士と車両との関連にも着目する必要がある。そこで、プローブ車両の新たな機能として、運転状態監視技術についての検討を開始した。

運転操作の状態を監視する方法としては、予め車内に設置した監視装置で、標準運転パターン、標準ノッチ操作を記憶しておいて、実際の運転速度、ノッチ操作と比較を行って、標準パターンからのずれが顕著となるか、ずれの蓄積がある程度以上になった場合に、運転士に異常を警告するシステムが考えられる。

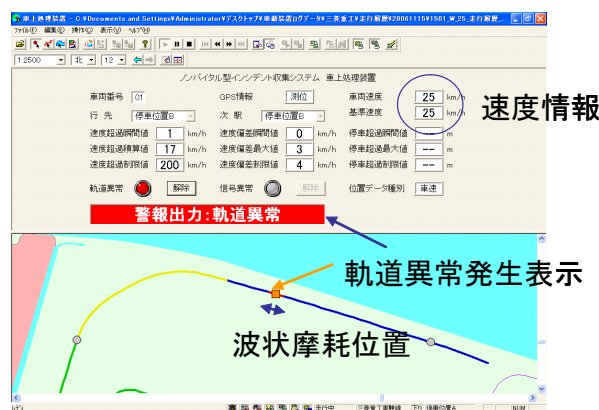
本研究は、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」、「プローブ車両技術の導入による軌道交通システムの再生に関する基礎的研究」(独)交通安全環境研究所、日本大学生産工学部、日本大学理工学部、三菱重工(株)により実施された。

参考文献

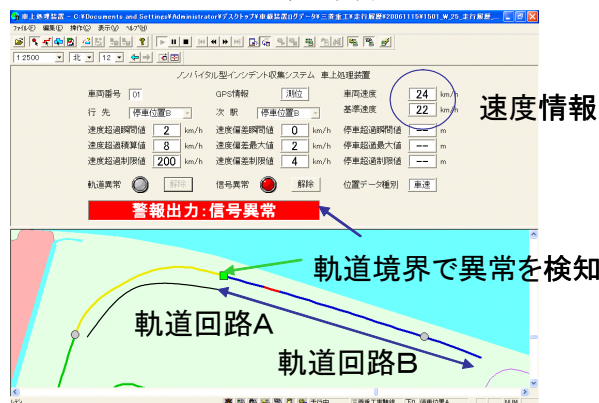
- (1) 小鳥崇・綱島均・松本陽・緒方正剛：“車上計測データによる軌道の異常検出 (第 1 報、レール波状摩耗の検出)” 日本機械学会論文集 C 編、Vol.72、No.720 (2006)、pp.2447-2454
- (2) 中村英夫：プローブ車両用信号設備計測技術の開発、JREA、Vol. 50、No. 9、pp.32734-32740 (2007)



Fig.7 試作したプローブ車両システム



(a) 軌道異常



(b) 信号システム異常

Fig.8 異常の検出結果 (モニタ画面)