

営業車両による鉄道の状態診断

日大生産工（院） ○小島 崇
日大生産工 綱島 均
交通研 松本 陽 水間 賀

1 緒 言

現在の鉄道の軌道等の保全は、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。また、専用の軌道検測車や特別の試験車を用いる場合、目的とする信号を直接計測することを意図し、加速度計や歪みゲージなどのセンサを車輪近傍などの環境が悪く、信号の伝送しにくい位置に配置する場合が一般的であり、取り扱いや維持管理が煩雑で、常時観測は困難な状況にある。

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を行える車両（「プローブ車両」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⁾。

プローブ車両の実用化には、車室内などの比較的取り付けが容易で環境の良好な位置に、振動加速度計やマイクロホンなどの汎用の簡易なセンサを取り付け、それらで測定した信号から有意な信号を取り出す必要がある。これらの位置は観測対象である軌道からある程度離れており、比較的簡易な測定器を用いているので、得られる情報は、測定対象でない不規則なノイズや、センサ自身の観測ノイズに埋もれている可能性が高いので、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出てくる。

本論文では、こうした方法により軌道の異常を推定する方法として、車室内などで測定される振動加速度や騒音から軌道異常を検出する方法について提案する。また、車両に簡便に設置可能なプローブシステムの開発を行う。

2 車内騒音からの波状摩耗の検出²⁾

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。もし車内騒音から軌道異常を検出できれば、非接触の測定となり、既存の車両への導入が容易になると考えられる。そこで、走行する車両の車内騒音からの波状摩耗の検出について検討する。

2.1 レール波状摩耗

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³⁾⁴⁾。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、都市鉄道では軌道保守の重要な課題の一つとなっている。図 1 に波状摩耗の例を示す。



Fig. 1 Example of rail corrugation

2.2 検出方法

波状摩耗は、レールの周期的な凹凸であることから、周波数情報から波状摩耗を検出する方法を提案する。車内騒音データの窓フーリエ変換を行い、スペクトルからの波状摩耗のピークを探査し、その時間変化を評価する。120~240 Hz の周波数帯域の最大値を波状摩耗のピークとした。

2.3 実車走行試験

(1) 騒音およびレール頭頂面の測定

乗務員室内に無指向性のマイクロホンを取り付け、車内騒音を測定した。また、試験走行区間のうち、波状摩耗のある 2 つの急曲線について、地上にてレール頭頂面の凹凸を測定した。

Anomaly Diagnosis of Railway by Service Train

Takashi Kojima, Hitoshi Tsunashima, Akira Matsumoto, Takeshi Mizuma

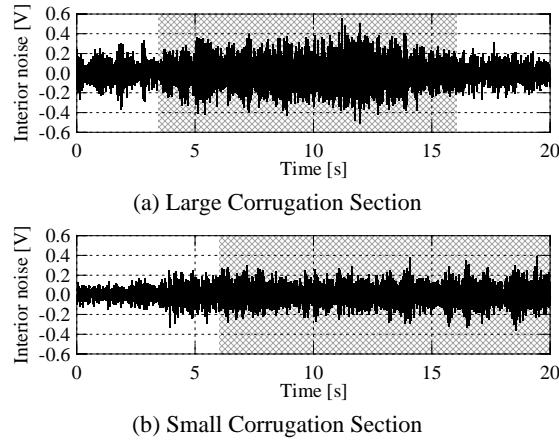


Fig. 2 Internal Noise

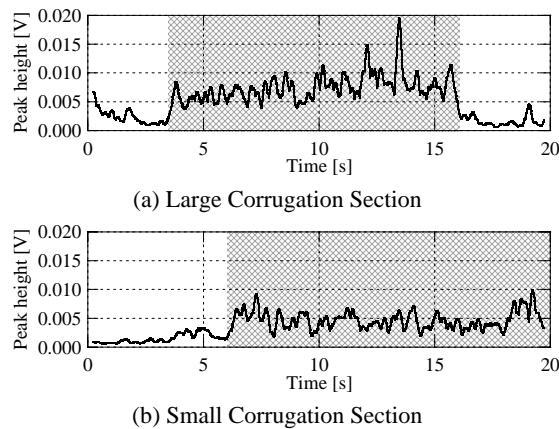


Fig. 3 Spectral Peak of Internal Noise

(2) 試験結果

地上測定した曲線における車内騒音の測定結果を図 2 に示す。それぞれ 10 秒付近が地上測定した地点で、図 2(a)では、波高 0.2~0.3 mm 程度の大きな波状摩耗、図 2(b)では、波高 0.1~0.2 mm 程度の比較的小さな波状摩耗が測定された。

図 2(a)において、波状摩耗が発生していると思われる曲線部分 3~16 秒の間（図の網掛け部分）で車内騒音に顕著な振幅の変化が見られない。図 2(b)も同様である。

図 2 の車内騒音のスペクトルピークの変化を図 3 に示す。スペクトルピークが網掛け部分で高い値をとり、波状摩耗を検出していることがわかる。この結果から、車内騒音（図 2）の大きさからでは判別できなかった波状摩耗を、スペクトルピークを求めることによって明瞭に確認できることがわかる。

また、波状摩耗の小さい場合（図 3(a)）よりも、大きい場合（図 3(b)）の方が、ピークは高い値を示している。この結果から、車内騒音から波状摩耗の大小をある程度推定することが可能であることが示された。

3 振動加速度からの軌道変位の検出

軌道変位管理の指標を目的として、軌道変位から車体動揺を予測する手法が考案されている^{5) 6)}。これは、走行試験などから車体の応答特性を求めるこことにより、車体動揺を模擬して乗り心地を予測し、より効率的な軌道状態の評価を行うものである。

応答特性を把握できれば、逆に車体動揺から軌道変位の予測が可能になると考えられる。ここでは、車体加速度からの軌道変位検出について検討する。

3.1 検出方法

軌道変位に対する車両の応答特性は、車両固有の諸元、走行速度や荷重などの条件により変化する。そこで本検討では簡易的に、加速度の 2 乗平均平方根（RMS）を評価することとし、軌道変位との比較を行う。

3.2 実車走行試験

乗務員室内に 3 軸加速度計を取り付け、営業路線を走行し、車体加速度の測定を行った。

図 4 に、直線区間を 70~80 km/h 程度で走行した際の車体加速度の測定結果を示す。いずれも 10~15 秒の間に振幅の増大が見られる。

上下加速度（図 4(a)）の RMS と高低狂いの測定値を図 5 に示す。図 5(b)は、10 m 弦正矢法による 5 m ごとの測定値である。横軸は、車両の走行位置から時間に換算したものである。

高低狂い（図 5(b)）が大きい箇所で、上下加速度 RMS（図 5(a)）は高い値を示している。特に 12 s, 14 s にある 2 つピークは、一致していることが確認でき、上下加速度 RMS により高低狂いの大きさを評価できる可能性が示された。

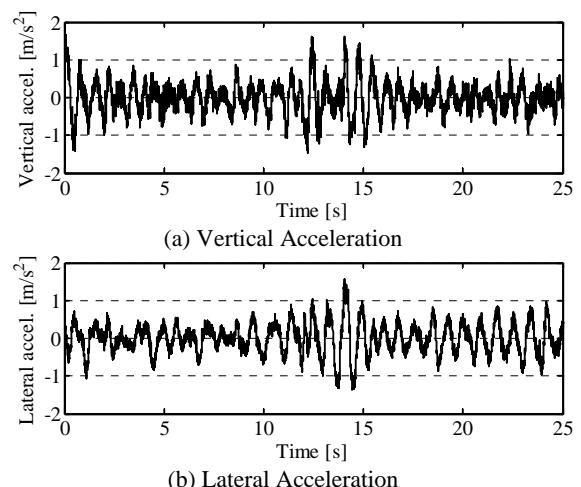


Fig. 4 Acceleration of Vehicle Body

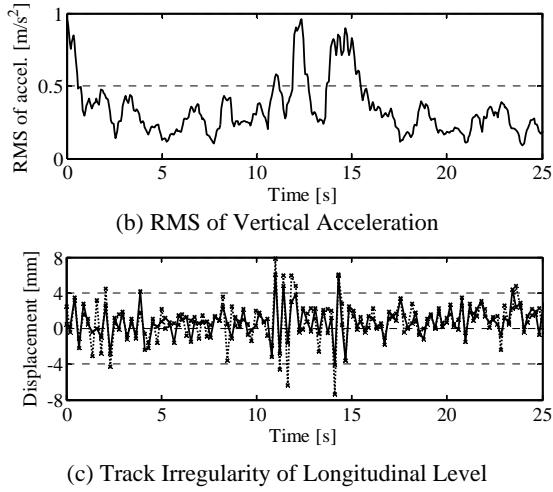


Fig. 5 Comparison of Vertical Acceleration RMS and Track Irregularity

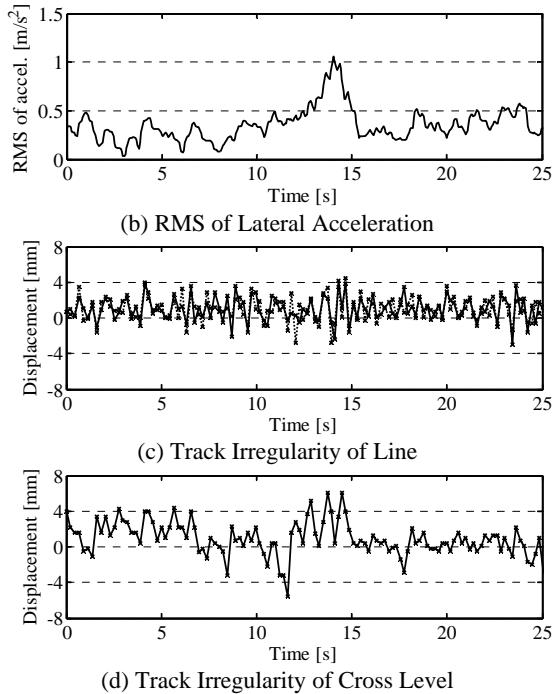


Fig. 6 Comparison of Lateral Acceleration RMS and Track Irregularity

次に、左右加速度（図 4(b)）の RMS と通り狂い、水準狂いを図 6 に示す。水準狂いは、左方向への変位を正で表している。左右加速度 RMS（図 6(a)）は、14 s 付近で高い値を示しているが、レールの左右変位である通り狂い（図 6(b)）は、振幅に大きな変化は見られない。一方、左右レールの高低差である水準狂い（図 6(c)）は、12~15 s で大きく、左右加速度 RMS（図 6(a)）のピークと近い位置である。この左右加速度の増大は、水準狂いによって生じたものであると推測できる。

左右振動は、レールの左右変位のみでなく軌道のねじれによっても生じるため、上下振動に比べ複雑

であり、これらを分離するためには詳細な検討が必要であるが、軌道の異常箇所の特定には有効であると考えられる。

4 営業列車による軌道状態の診断

4.1 可搬型プローブシステムの開発

営業列車を用いて簡便に軌道の状態診断を可能にするために、既存の車両に簡単に設置可能な可搬型プローブシステムを開発した。

図 7 に開発したプローブシステムの構成図を示す。波状摩耗を検出するための騒音計、軌道変位を検出するための加速度センサおよびレートジャイロ、位置を検出するための GPS 受信機、解析用のコンピュータ、各センサの信号をコンピュータに入力するためのアナログ入力ターミナルで構成される。

各センサから出力される信号は、アナログ入力ターミナルによりデジタル信号に変換され、コンピュータに入力される。また、GPS 受信機により求められる位置情報がコンピュータに入力される。コンピュータは、GPS 受信機による位置情報および加速度計による加速度信号にもとづいて、現在位置と速度を推定するとともに、各センサからの信号を信号処理することにより軌道状態を推定し、画面の地図上の現在位置に逐次軌道状態を表示する。信号処理されたデータは、オフラインにより解析できるようするために、ハードディスクドライブに記録する。

図 8 に開発したプローブシステムの外観を示す。

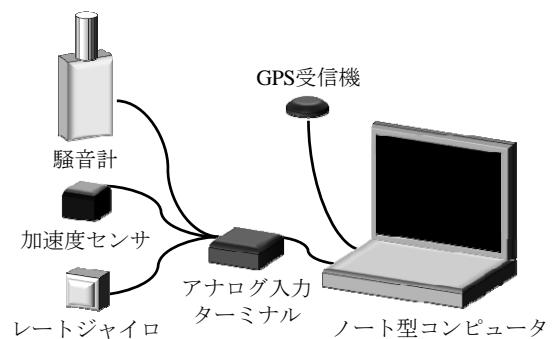


Fig. 7 Configuration of Probe System



Fig. 8 Appearance of Probe System

4.2 実車走行試験

(1) 試験方法

開発したプローブシステムを乗務員室内の運転台の近くに設置、GPS受信機を車内窓枠に固定し、営業路線を走行した。図9に実験の様子を示す。



Fig. 9 Filed Test with Real Vehicle

(2) 試験結果

図10は、測定した騒音、加速度、ロール角速度の原信号と、それを信号処理して求めた騒音スペクトルピーク、加速度とロール各速度のRMSをリアルタイムで表示した結果である。提案した軌道異常検出処理を逐次計算し、表示、記録することができた。

また、図11は、検出された軌道異常と、現在位置を地図上にリアルタイムで表示した結果である。軌道異常検出処理による評価値にしきい値を設定し、注意（黄）、警告（赤）の表示を行い、軌道異常を検出できることができた。

5 結 言

営業車両に簡易なセンサを備えて軌道検測を行う「プローブ車両」に向けて、車内で測定されるデータから軌道異常を検出する方法について検討し、以下の結論を得た。

(1) 騒音のスペクトルピークを評価することによりレール波状摩耗を検出する方法を提案した。車内騒音から波状摩耗を検出し、その大小をある程度推定できることが示唆された。

(2) 車体加速度から軌道変位を検出する方法を提案した。上下加速度のRMSから、高低狂いを評価できる可能性を示した。左右加速度のRMSは、水準狂いの大きさと傾向が一致した。今後、通り狂いとの関係を検討する必要がある。

(3) 提案した検出法を組み込んだプローブシステムを開発した。リアルタイムで軌道異常を検出できることができた。

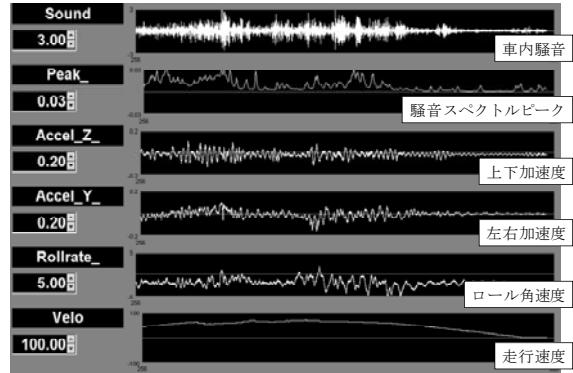


Fig. 10 Display of Waveform



Fig. 11 Display of Fault and Position on a Map

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) 紺島均ほか、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、(2004), pp. 241-242
- 2) 公開特許公報(A), 特開2007-145270
- 3) 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, (1998), pp. 2625-2632
- 4) A. Matsumoto et al., Formation mechanism and countermeasures of rail corrugation on curved track, Wear, Vol. 253, No. 1, (2002), pp. 178-184
- 5) 小野重亮、走行試験から求めた車体振動特性に基づく軌道管理、第10回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集、(2003), pp. 133-136
- 6) 古川敦、吉村彰芳、軌道狂い管理のための車両左右動特性の同定、鉄道総研報告、Vol. 18, No. 3, (2004)