

地方鉄道を対象とした軌道状態診断システムの 開発と運用に関する研究

日大生産工(院) ○鈴木 湧也 日大生産工 綱島 均

1. 緒言

鉄道は車輪が軌道によって案内されていることから、軌道の状態が鉄道そのものの安全性に大きく影響を与える。よって鉄道事業者は軌道を管理する必要がある、保線係員の巡回や軌道検測車による計測を行うことで安全性を保っている。しかしこれらの方法は人員と費用が掛かり、地方鉄道ではこれらを満足に確保することが難しいといった現状がある。

このような問題に対して、営業車両に各種センサ類からなる車体動揺計測装置を設置することで車体の振動加速度を計測し、加速度から軌道の状態をモニタリングするシステム¹⁾²⁾の開発が行われている。

しかし、従来のモニタリング手法では振動加速度のみで評価をしていたが、車体の振動は走行速度の影響を大きく受ける為、車体の揺れが速度の影響か軌道異常の影響か判別しにくいという問題点がある。

本研究では、過去に得られた大規模なデータに基づいて、速度の影響を考慮した新しい軌道状態診断手法を提案する。

2. 軌道状態診断システム

軌道状態診断システムの概要を図1に示す。本システムでは営業車両の振動加速度を計測する計測部と取得した振動加速度データを解析する解析部に分けられる。計測部では3軸センサ、ジャイロレート、GPS受信機などからなる車体動揺計測装置を営業車両に搭載する。運行と共に車両から電源を供給することで常時、車体振動加速度を計測することが可能である。取得した振動加速度を、携帯回線を通じてサーバーへと伝送する。解析部では、サーバーへ送られてきた振動加速度情報をもとに診断が行われる。本システムにより軌道の状態を逐次監視することで軌道異常などの発見を行うことができ、鉄道事業者へとフィードバックを行うことで保守計画に活用することが可能となる。

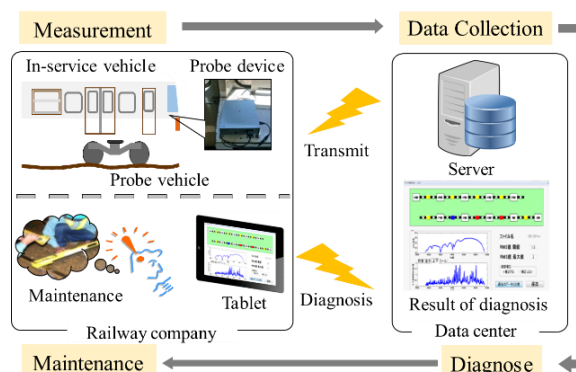


Fig.1 Track condition monitoring system

3. 診断手法

3.1 車体動揺の計測

地方鉄道において、2016年9月から2021年6月まで車体動揺計測装置を設置し、常時計測を行う実車走行実験を実地した。サンプリング周波数は82 [Hz] である。ただし、全般検査の理由により2018年10月から2018年12月と2020年4月から2020年5月のデータは計測されていない。

本研究ではこの試験で得た車体上下加速度を用いて軌道状態の評価を行った。なお、車体動揺計測装置の計測データから通り不整、水準不整を評価できるが本稿では、上下不整のみを評価対象とする。

3.2 軌道状態診断システムで用いる評価値

軌道の不整は、一般に10m弦正矢法により計測、管理されている。そこで本システムでは軌道10m毎に振動加速度の半振幅の最大値を取得し、評価値として用いて診断する。

3.3 ガウス過程回帰を用いた診断

車体振動加速度は走行速度による影響を強く受けるため、速度の影響を考慮して軌道状態診断を行う必要がある。そこで、走行速度と最大半振幅の関係より回帰方法の一種であるガウス過程回帰を用いて診断を行う。

ガウス過程回帰とはあらゆる入力 x に対しての出力 y がガウス分布に従うものであり、非線形の関数関係でも線形関係のモデル化も可能であるといった利点がある³⁾。またデータの信

頼性を予測分布で表すことができ、データの多い部分では予測分布は狭くなり正確に、データの少ない部分では領域が広がることで曖昧さを表現することが可能である。ガウス過程の定義を式(1)以下に記す。

$$f \sim GP(\mu(\mathbf{x}), k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}$ は入力データ、 f は入力に対応する出力、 μ は平均、 $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ は入力データ全てのペア $\mathbf{x}, \mathbf{x}'$ に対してカーネル関数を求めたものである。

予測分布は次式で計算できる。

$$p(y^*|\mathbf{x}^*, \mathcal{D}) = \mathcal{N}(\mathbf{k}_*^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{y}, \mathbf{k}_*^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{k}_*) \quad (2)$$

ここで $\mathbf{K}$ は入力データ全てのカーネル行列であり、 $\mathbf{k}_*$ は入力 $\mathbf{x}^*$ と各学習データ $\mathcal{D}: \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \dots \mathbf{x}_N$ との内積を並べたベクトルであり、 $\mathbf{k}_{**}$ は入力 $\mathbf{x}^*$ の自身との内積である。

4. 軌道状態診断結果

4.1 著大な振動が観測される駅間の診断

ここでは実データを用いて軌道の状態診断を行う。まず、軌道状態が悪化している箇所を特定するために、各駅間において著大な振動が観測された駅間の特定を行う。各駅間において最大半振幅の値で $1.0[\text{m/s}^2]$ を超えた数を計算した。始発駅をAとして終点まで順にアルファベットで示し、各駅間毎に検出数を集計し、正規化した結果を図2に示す。図2より、最も頻繁に揺れが観測された駅間はNO駅間であることがわかる。そこで、NO駅間の軌道診断を行った。

4.2 振動の頻度が高い駅間の診断

軌道の状態を評価するために、1か月間の計測データに対して最大半振幅値に基づきカラーマップの作成を行った。示した軌道状態図の結果を図3に示す。この時、営業車両が走行しなかった日は欠損データとして表示していない。また、1日に複数回の走行した場合は要注意駅間内にて最も高い最大半振幅値が観測されたデータを代表データとして軌道状態図の作成を行った。

次に特定した駅間の中で10mごとに異常な振動加速度として $1.0[\text{m/s}^2]$ を超えた検出頻度を、ヒストグラムを用いて異常発生個所の推定を行なった。図3より26.0~26.5[km]と27.2~27.7[km]において、著大な振動が観測され

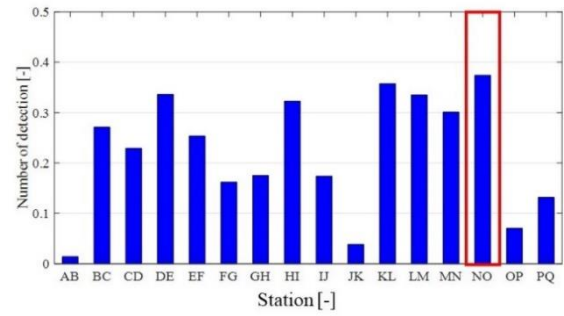


Fig.2 Number of detections for sections (Apr.2021)

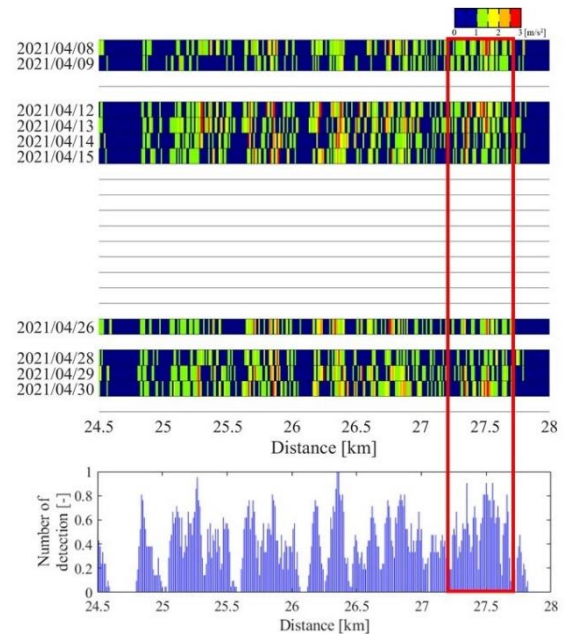


Fig.3 Track condition in section NO (2021/04)

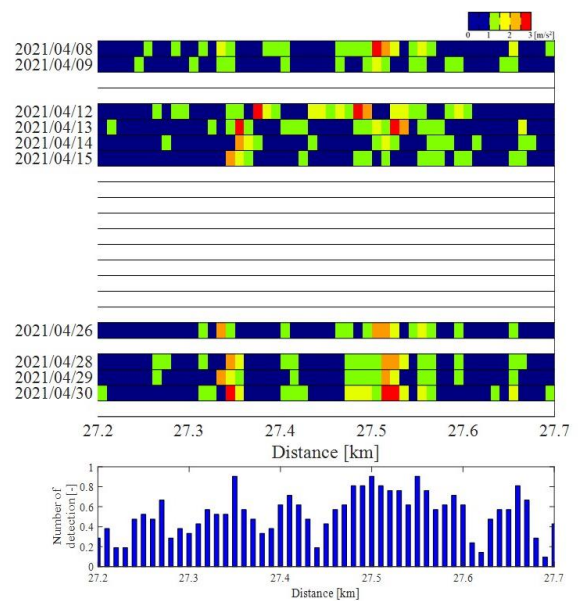


Fig.4 Track condition in 27.2-27.7[km] (2021/04)

ていることがわかる。より詳細に診断を行うために、一例として27.2~27.7[km]において解析を行った。

4.3 特定区間の軌道状態図

27.2~27.7[km]における軌道状態図を図4に示す。ヒストグラムより27.5[km]付近において1.0[m/s²]を超えた振動が観測された頻度が特に高いことがわかる。また軌道状態図を見ると多くの日で著大な振動である赤色が表示されていることから、特に軌道異常がある可能性が高いと推察される。

4.4 軌道の時間経過による振動の変化

図4の軌道状態図より特に頻度の高かった27.5[km]を含む27.45~27.55[km]の100[m]の長期間の推移を図5に示す。軌道の長期的変化を把握するために要注意区間の半振幅の中で最大となる半振幅値を用いて時系列の推移を示した。

図5より2016年から2018年にかけては最大半振幅値が1~2[m/s²]程度で推移していたが2019年以降は最大半振幅値が3.0[m/s²]を超えていることがわかる。よってこの区間においては軌道状態が悪化していると考えられる。また2020年9月から振動が低下しているが、同月において、この区間で補修が行われており、保線の効果が確認できる。

4.5 営業車両の走行速度による影響

車体が大きく揺れる原因として考えられるものは、軌道不整や軌道異常を通過したことによる揺れが考えられる。さらに走行速度が速い場合には大きな揺れとなることがある。そこで、走行速度が振動加速度に与える影響を評価する必要がある。

図6に27.45~27.55[km]において速度と最大半振幅値との散布図を示す。図6において赤丸で囲まれた点群は外れ値として速度の影響以外によるものであると考えられる。そこで、これらの計測値の異常程度を定量的に評価する必要がある。

4.6 ガウス過程回帰を用いた軌道診断

走行速度と最大半振幅値においてガウス過程回帰を行い、新たに速度の影響を考慮した軌道状態図を作成する。27.45~27.55[km]におけるガウス過程回帰による結果を図7に示す。

図7では予測分布を用いてある規定に基づいて背景の色付けを行った。ガウス過程回帰において平均値を予測する応答曲面を青と緑の境

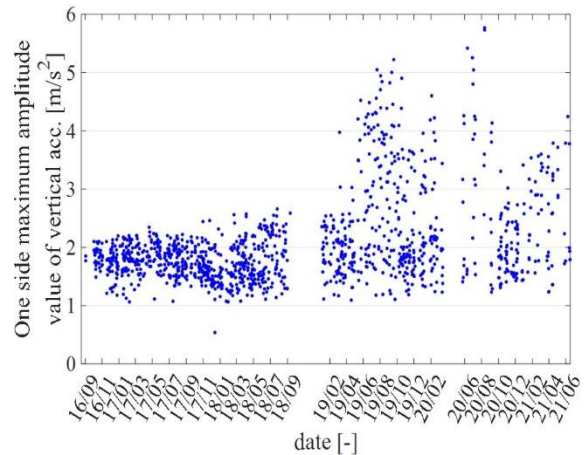


Fig.5 Changes in the value of max amplitude for 27.45-27.55[km]

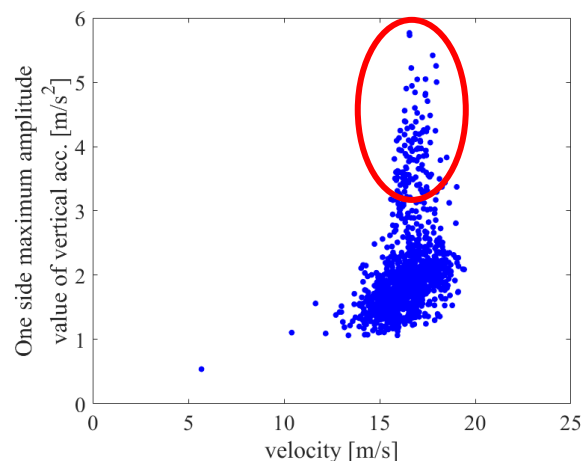


Fig.6 Correlation diagram of velocity and max amplitude for 27.45-27.55[km]

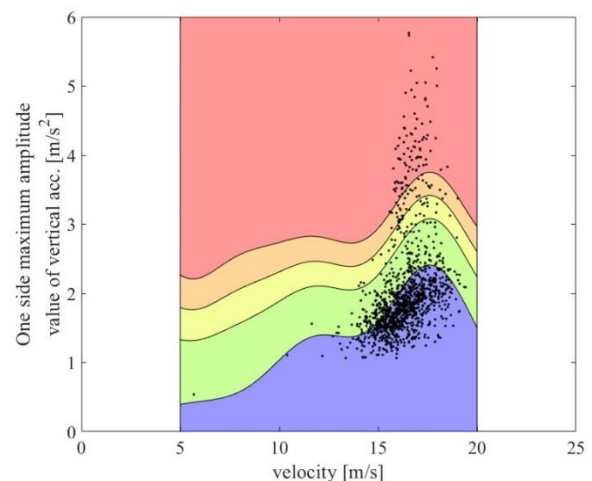


Fig.7 Results of Gaussian process regression of velocity and maximum amplitude for 27.45-27.55[km]

界線で示し、その境界線を下回ったデータは軌道異常がないものと診断した。応答曲面を超過

した領域については $+1\sigma$ の範囲を緑で、 $+1\sigma \sim +1.5\sigma$ の領域では黄色、 $+1.5\sigma \sim +2\sigma$ を橙色、 $+2\sigma$ 以上の領域を全て赤で表示を行った。このようにして、ガウス過程回帰による診断では、データ点がこの領域のどこに存在するかで軌道状態図の作成を行なった。

振動加速度による軌道状態図とガウス過程回帰を用いた軌道状態図の比較を図8に示す。図8(a)には27.45~27.55[km]の上下振動加速度の軌道状態図を示し、図8(b)ではガウス過程回帰による診断結果を示す。

図8(a)ではこの100[m]区間のほとんどの位置で高い振動加速度を検出しているが、図8(b)においては一部分のみに赤などの判定が行われていることがわかる。このことから走行速度による揺れの影響を考慮した正確な軌道診断が行える可能性を示した。

5. 結言

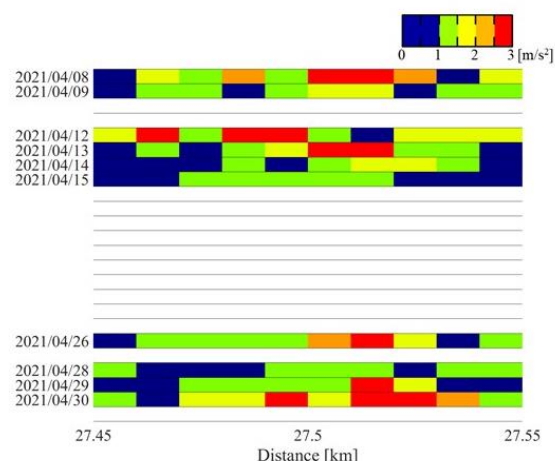
本研究では従来の診断システムでは考慮されていなかった車両速度の影響を考慮した軌道診断手法の検討を行なった。走行速度と振動加速度の関係よりガウス過程回帰を用いて軌道状態の診断を行なった。

地方鉄道の動揺を計測した長期間のデータに適用した結果、軌道異常が発生している箇所と異常程度を明確化すること可能になった。

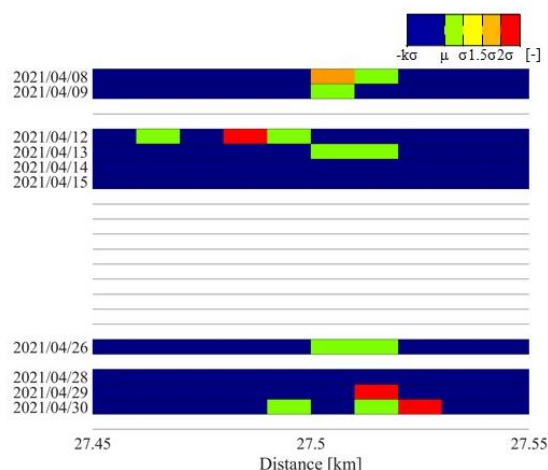
今後は他の診断区間においても同様の解析を行い、検討をしていく予定である。また高低不整や継ぎ目落ちの上下振動の異常だけでなく通り不整や水準不整など左右振動の診断を行っていく必要があると考える。

参考文献

- 1) Tsunashima H., Mori H., Ogino M. and Asano A. Development of Track Condition Monitoring System Using Onboard Sensing Device. In: Zboinski, K. (ed.). Railway Research; IntechOpen; doi:10.5772/61077; 2015.
- 2) Tsunashima H. Condition Monitoring of Railway Tracks from Car-Body Vibration Using a Machine Learning Technique. Appl. Sci. 2019, 9, 2734.
- 3) 持橋 大地・大羽 成征, ガウス過程と機械学習, 講談社(2020)



(a) Track condition diagram by car-body vertical acceleration only



(b) Track condition diagram by the proposed method

(c) Fig.8 Track condition diagram