

地方鉄道線区を対象としたデータ駆動型 軌道管理手法の開発

日大生産工(院) ○中野 拓哉 日大生産工 綱島 均 日大生産工 栗谷川 幸代

1. 緒言

鉄道の軌道は車輪がレールによって案内されることから、列車を運行する安全性に大きく影響を与える。鉄道事業者は軌道を適切に管理するため、保線係員による検査や専用の軌道検測車による計測を行い、状況に基づいた保守作業を実施している。しかし、これらの方法は、人的、経済的な負担が大きく、地方鉄道では十分な軌道管理を行うことが困難になってきている。

このような問題に対して、営業車両に車体動揺計測装置を搭載し、運行中に計測される車体動揺データを用いて軌道の状態をモニタリングする軌道状態診断システムが開発されている¹⁾。従来の研究では、計測された振動加速度に対し、軌道変位の解析結果を可視化する「軌道状態図」が提案されている²⁾。また、振動加速度の時間的な変化を可視化し、軌道状態の劣化傾向を把握することが可能となった³⁾。これらの研究では、振動加速度の大きさから軌道の劣化具合に関する評価が行われてきたが、軌道管理を行う際には閾値が必要である。しかし、振動加速度は、軌道状態以外に車両特性、走行速度による影響を受けるため、一律の閾値を設定することができない。そのため、これまでは軌道の保守作業を行うための補助的な指標としてしか用いられてこなかった。

本研究では、長期間で計測した車体動揺データに対して χ^2 分布を適用した異常値検出を行い、軌道管理を行うための閾値を自動的に算出する方法を考案し、有用性の検証を行った。

2. 軌道状態診断システム

2.1 軌道状態診断システムの概要

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分析する解析部に分けられる。計測部では3軸加速度センサ、レートジャイロ、GNSS受信機などのセンサ類で構成されている。運行と共に車両から電源を供給することで常時、車体の振動

加速度を計測することが可能になる。計測したデータは、携帯回線を通じてサーバーへと伝送される。解析部では、サーバーへ送られてきた振動加速度の情報を基に診断が行われる。本システムにより軌道の状態を定期的に監視することで軌道異常などを発見でき、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。

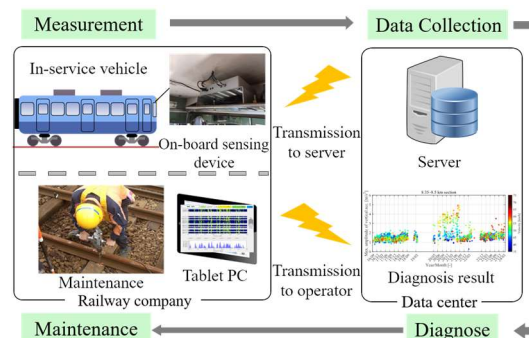


Fig. 1 Track condition monitoring system.

2.2 軌道状態診断システムで用いる評価値

車体動揺と軌道不整には高い相関がある。そのため、軌道状態の評価をする上で車体動揺により計測される振動加速度の大きさは、軌道の劣化傾向を把握するには有効である。走行速度が比較的低い地方鉄道においては、10m弦正矢法を用いた軌道管理が行われている。そこで、計測した車体の振動加速度から10[m]区間の片側最大振幅値を算出し、評価値とした。ここで、特徴量として使用した片側最大振幅値とは、当該区間における最も大きい振動加速度の半振幅の絶対値である。また、本研究では、上下振動加速度を用いて軌道状態の評価を行う。

図2は2016年9月から2024年3月までに上下振動加速度を計測した地点を示す。路線を青線、駅を水色の四角で示しており、計測した振動加速度を黄色、オレンジ、赤で示している。特に、EF, FG, KL, LM, NO区間ではこれまで大きな上下振動加速度が計測されていることを確認している。

図3は、2016年9月から2024年3月までのEF区間（8.35km～8.50km）で大きな車体の上下振動加速度が計測された地点の時間変化を示している。縦軸は片側最大振幅値、横軸は測定日を表す。軌道の長期的な変化を評価するため、当該区間における振動加速度の中で最大となる値を各走行データより1日あたり、1点抽出し、プロットした。図3より時間の経過とともに振動加速度が徐々に増加し、軌道状態が劣化していることがわかる。また、車両の総点検や車体動揺計測装置のソフトウェア更新のため、データが得られない期間もあった。2021年8月28日の振動加速度が急激に低下しているのは、保守作業による影響を示している。車体の振動加速度を継続的に計測することで、軌道状態の長期的な劣化傾向を把握することが可能となる。振動加速度を利用した軌道管理には、計測された振動加速度が正常かどうかの判断基準が必要である。しかし、振動加速度は車両特性、走行速度の影響を大きく受けるため、閾値を設定することは非常に困難である。そこで、図3に示す車体動揺データを用いて、軌道の保守作業を行うべき時期を判断する方法を提案する。

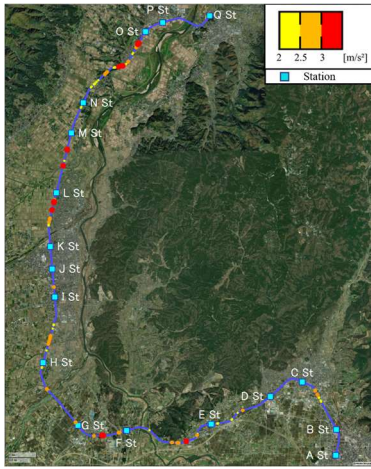


Fig. 2 Locations where high accelerations were observed (2016/09–2024/03).

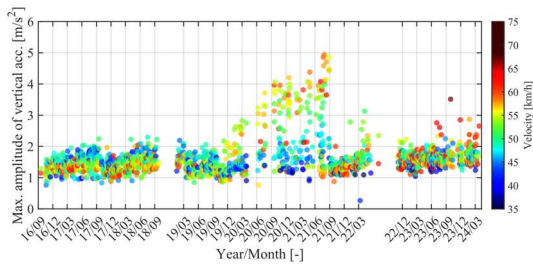


Fig. 3 Measured acceleration between EF station (8.35 km to 8.50 km) from October 2016 to March 2024.

3. 軌道状態の評価方法

3.1 χ^2 分布

本研究では、 χ^2 分布を用いて軌道状態を評価する方法を提案する。 χ^2 分布は異常検出に広く用いられている。

$$\chi_k^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{x_i - u_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 i はデータ数、 x_i は観測変数、 u_i は期待値、 σ_i は標準偏差、 k は自由度の数である。 χ^2 分布は、図4に示すように、分布の形と広がりによって影響する1つのパラメータ、自由度 k を持つ。

3.2 軌道状態の異常検出

χ^2 分布を用いて異常値を判定するため、計測された振動加速度から軌道状態を評価する指標として、下記の自由度1の χ^2 分布を用いる。

$$a(x_i) = \left(\frac{x_i - u}{\sigma} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 x_i は計測された振動加速度、 u はデータセットの期待値、 σ はデータセットの標準偏差である。有意水準を0.05, 0.01, 0.005とすると、自由度1の確率分布における閾値はそれぞれ3.84, 6.63, 7.88となる。

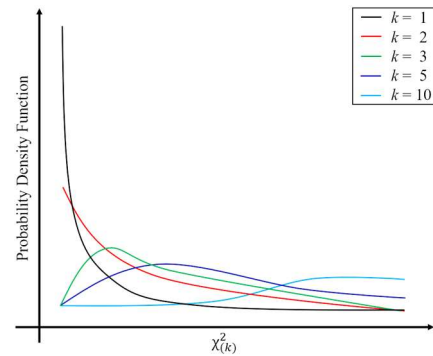


Fig. 4 Chi-square distribution.

4. χ^2 分布を用いた異常検出結果

4.1 χ^2 分布を用いた異常検出の実例1

2016年9月から2024年3月までのEF区間（8.35km～8.50km）において、車体の上下振

動加速度を計測し、提案手法を検証した。図5に示す学習データセットでは、時間の経過とともに振動加速度が徐々に大きくなっており、軌道状態が劣化していることがわかる。特に、2021年8月28日以降、振動加速度が急激に低下しており、保守作業の効果が明らかである。車体の振動加速度から、軌道の異常を検出して保守作業を行う時期を推定するためには、学習データセットを設定する必要がある。

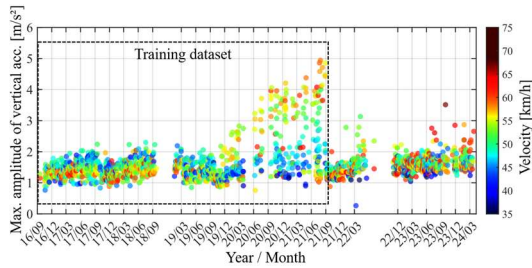


Fig. 5 Measured acceleration between EF station (8.35 km to 8.50 km) from October 2016 to March 2024.

図6は、学習データセット $a(x_i)$ のヒストグラムと自由度1の χ^2 分布（赤実線）を示す。縦軸は確率密度関数、横軸は車体の上下振動加速度から算出された指標 $a(x_i)$ を表す。図6より、2016年9月から2020年3月までは、 $a(x_i)$ の分布は小さな値に集中しており、大きな値の発生確率は低いことがわかる。また、 χ^2 曲線とヒストグラムがよく一致していることも確認できる。有意水準は一般的な基準とされる0.05とした場合、閾値は3.84となる。

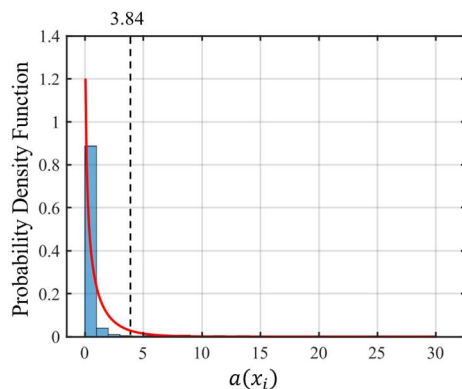


Fig. 6 Distribution of $a(x_i)$ on training dataset.

図7は、計測された車体の上下振動加速度から算出された指標 $a(x_i)$ の時間変化を示しており、2020年3月1日以降、閾値3.84を超える異常値が検出された。その後、異常値は急激に増

加し、軌道状態の急速な劣化が示唆された。本来であればできるだけ早く軌道の保守作業を行うべきであったが、2021年8月28日まで延期された。その結果、大きな車体の上下振動加速が発生した期間が1年近く続いた。

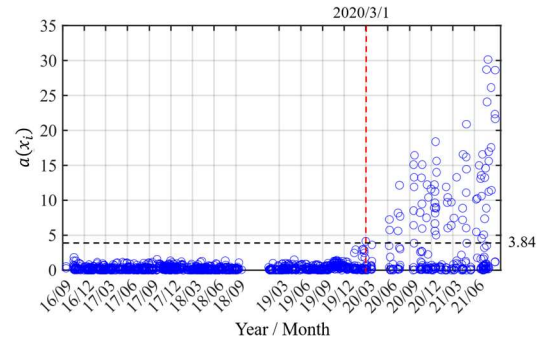


Fig. 7 Outlier detection on training dataset.

図8は、学習データセットで計測された大きな車体上下加速度の時間変化を示している。2020年3月1日には、 $2.82[\text{m/s}^2]$ の上下振動加速度が計測されている。したがって、この区間については、軌道管理の閾値を $2.82[\text{m/s}^2]$ とした保守作業の計画を策定することが推奨される。

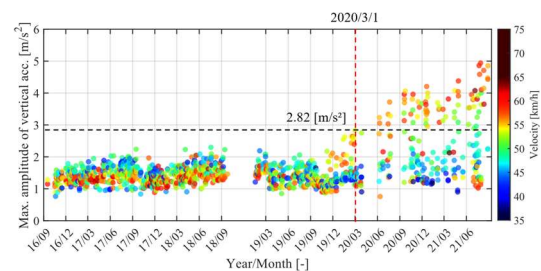


Fig. 8 Determination of threshold value for maintenance.

4.2 χ^2 分布を用いた異常検出の実例2

図9は、2016年9月から2024年3月までのNO区間（26.3km～26.45km）において、大きな車体の上下振動加速度が計測された地点の時間変化を示している。学習データセットでは、時間の経過とともに上下振動加速度が増加しており、軌道状態が劣化していることがわかる。特に、2019年3月3日の保守作業の後には、振動加速度が急激に低下しており、保守作業の効果が表れている。2019年3月3日の保守作業後、振動加速度は再び上昇しているのは、軌道状態が劣化したことを示している。そこで、軌道状態を評価し、保守作業を行うべき時期を判断するために、学習データセットを用いた。

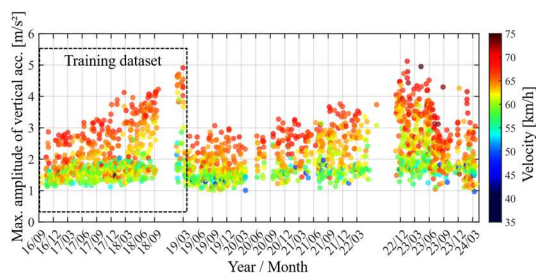


Fig. 9 Measured acceleration between NO stations (26.3 km to 26.45 km) from October 2016 to March 2024.

図10は、2019年3月3日以降のデータにおいて、 $a(x_i)$ のヒストグラムと自由度1の χ^2 分布（赤実線）を示している。平均値と標準偏差は学習データセットから算出した。図10より χ^2 曲線とヒストグラムがほぼ一致していることがわかる。実例1と同様、異常値を判定する有意水準は0.05とした。そのため、確率分布の5%未満の閾値3.84を用いて異常値を検出した。

図11は $a(x_i)$ の時間変化を示しており、2021年9月8日に閾値3.84を超える異常値が検出された。以降、保守作業は実施されておらず、データからも明確な保守の効果は確認できない。

図12は、2019年3月3日の保守作業後に計測された車体の上下振動加速度の時間変化を示している。2021年9月8日には $3.67[\text{m/s}^2]$ の振動加速度が計測された。このことから、この区間の軌道管理には $3.67[\text{m/s}^2]$ の閾値に基づいた保守作業を検討することが適切であると考えられる。

5. 結言

本研究では、地方鉄道を対象として長期間で計測された車体の上下振動加速度に基づく軌道管理手法を提案した。計測した車体上下振動加速度に χ^2 分布を適用し、有意水準を設定することで、軌道管理に必要な閾値を自動的に算出することが可能となった。これにより、振動加速度を指標とした保守管理が実施できるようになり、地方鉄道の安全性向上に寄与できると考えられる。

今後は、分析結果を鉄道事業者へ定期的にフィードバックし、軌道の保守管理に関する具体的な提案を行う予定である。

参考文献

- 1) Tsunashima, H. and Hirose, R., Condition monitoring of railway track from car-body vibration using time frequency analysis, Vehicle System

Dynamics,

DOI:10.1080/00423114.2020.1050808, (2020)

- 2) Tsunashima, H., Odashima, M., Hayashida, Y., Mori, H. and Asano, A., Feature extraction and classification of track condition from car-body vibration, IAVSD2017, (2017).
- 3) H. Tsunashima, H. Ono, T. Takata, and S. Ogata: Development and Operation of Track Condition Monitoring System Using In-Service Train, Applied Sciences, vol. 13, p. 3835, Mar. 2023.

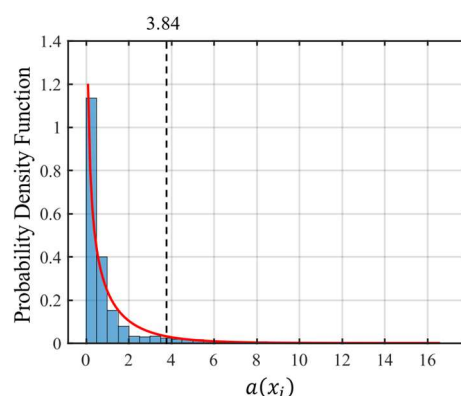


Fig. 10 Distribution of $a(x_i)$ for the acceleration data after 3 March 2019.

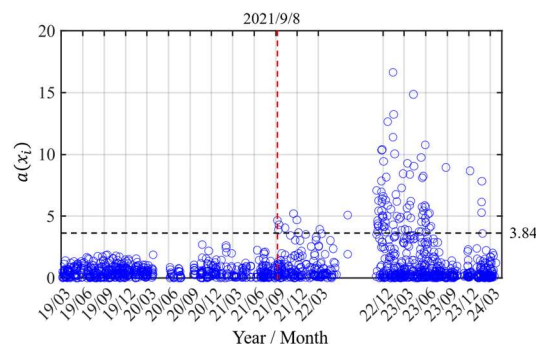


Fig. 11 Outlier detection for the acceleration data after 3 March 2019.

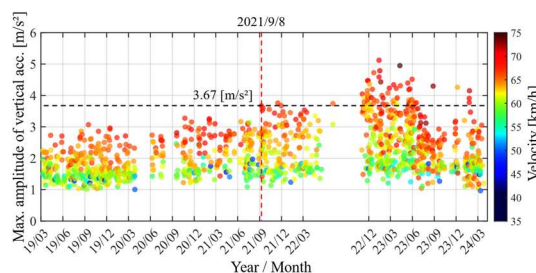


Fig. 12 Determination of threshold value for maintenance.