

講演 2. 地方鉄道における営業車両を活用した軌道状態の監視に関する取組

交通システム研究部 ※森 裕貴 緒方 正剛 大野 寛之 山口 大助

1. はじめに

鉄道の優れた特徴である定時性、大量輸送、省エネルギー性等を実現する一つの要素として、鉄車輪が専用軌道で支持案内されていることが挙げられる。一方、軌道で案内されているが故に、軌道異常が発生した場合は、運転士による事故回避は困難であり、脱線や転覆といった大事故へ繋がる可能性がある。そのため、小さな軌道異常を早期に発見し、軌道整備を実施することが安全上非常に重要となる。

そのような中、地方鉄道ではメンテナンス費用の確保や技術力の維持が大きな課題となっており、軌道検測車など幹線鉄道で活用されている軌道検査方法が導入できない事業者も少なくない。これに対し、営業車両を活用した軌道状態の監視が可能となれば、高頻度かつ動的な軌道評価が可能となり、安全性向上に寄与すると考えられる。また、その手法は、営業車両を活用しつつ、車両に大幅な改修を必要としない、専門の測定員が必要ない等、簡便なものが望ましい。

本報告では、地方鉄道における導入・運用を前提とした軌道状態の監視手法について提案すると共に、車両に大幅な改修を必要とせずに車体動揺等を測定する装置を用いて、鉄道事業者の協力のもと、営業車両により軌道状態の監視を実施した事例を紹介する。

1. 1. 営業車両による軌道状態の監視

営業車両を活用して軌道状態の監視を行うメリットの一つは、高頻度測定が可能となることである。営業車両を活用した過去の研究では、軌道検測車と同等程度の診断精度を維持したまま、いかに測定頻度を高めていくかといったアプローチが中心であり、JR東日本にて導入された軌道変位モニタリング装置¹⁾など、既に実用化へ至った例も確認される。しかしながら、そのようなアプローチにおいて、測定センサの設置位置は台車や輪軸等、測定環境が苛烈であるケースが殆どであり、革新的なコスト削減には繋がらないため、軌道状態の監視の必要性が高まる地方鉄道におい

て普及は困難である。従って、地方鉄道への普及を念頭に置くのであれば、高頻度で監視可能かつ低コストであることを前提に、いかに診断精度を向上させるかといった新たなアプローチが必要であると考えられる。

1. 2. 動的軌道評価の必要性

営業車両を活用することのもう一つのメリットとしては、軌道に鉄道車両の重量が負荷されている状況での評価、すなわち、動的な軌道評価が可能となる点である。地方鉄道における軌道検測は、測定用ゲージまたは手押し式の測定器による静的な測定によることが多く、車両の重量を軌道に負荷しない状態で測定を行うため、車両が通過した際にレールが大きく沈下するなどの不良については検出されず、目視による確認が別途必要となっている。そのため、そのような不良箇所が見過ごされる可能性がある。

本報告で提案するアプローチでは営業車両の重量が負荷されるため、図1や図2に示すような軌道状態の箇所ではレールが沈下することによって、軌道の不良箇所として検出が可能となる。



図1 木まくらぎ及び締結装置（犬釘）の不良



a) 線路中 b) レール継ぎ目

図2 噴泥を起因とした軌道異常

2. 軌道状態の評価方法

地方鉄道で策定される軌道整備計画において、軌道整備の優先順位を決定する主な評価指標としては軌道変位の測定値が一般的である。しかし、軌道変位の測定回数が年に数回以下である事業者も多い。また、軌道変位測定周期間における整備計画の修正や、整備による改善結果の評価については、保守員の主観や熟練度によって評価結果が左右されることが懸念されるため、センサ等を活用した客観的な軌道状態の監視に基づく評価を併せて実施することが望まれる。

2. 1. 軌道変位量による評価

客観的な軌道評価を実現する軌道状態の監視手法については、軌道変位量を直接推定する手法が主流である。軌道変位量の測定値は、地方鉄道を含む全ての鉄道事業者が軌道の評価指標としているため、軌道整備に直接活用できる利点がある。

一方で、1. 1. 項でも述べたように、営業車両で軌道変位量を測定する装置については、初期コストやメンテナンスコスト等、地方鉄道事業者への導入が困難な面があると考えられる。

2. 2. 車体動揺による評価

地方鉄道を含めて動的な軌道評価を広く普及するためには、コストの課題を解決することが必須である。そこで、筆者らは直接軌道変位量を測定するのではなく、軌道が正常な状態（例えば軌道整備直後）を維持するといった観点で、車体動揺（3軸の車体加速度及び車体角速度を指す）を測定し、軌道の評価指標とすることを提案している²⁾。

本評価手法は初期コストやメンテナンスコストを大幅に削減する可能性があるが、測定位置が車室内であるため車両の2次バネ系の影響を受けやすく、十分な診断精度を確保するためには一定の調査期間を必要とすることや、全ての軌道異常に相関があるわけではないことに留意する必要がある。

2. 2. 1. RMS 値による評価

軌道の上下変位と車体の上下振動加速度には強い相関があり、また、通り変位は左右加速度に、水準変位と平面性変位等は左右加速度とロール角速度などに影響を与えるといわれている³⁾。加速度等の大きさを評価する際は振幅の p-p (peak to peak) 値を用いることが多く、在来線の速度向上を実施する際の「在来鉄道運転速度向上試験マニュアル」⁴⁾では、速度向上後の車体上下加速度 p-p 値を 0.40G 以内、車体左

右加速度 p-p 値は 0.30G 以内に収めるよう、軌道整備を行うことが推奨されている。しかし、加速度データより直接 p-p 値を読み取ることは困難であり、信号処理を要する。

そこで、全区間中の p-p 値が特に高い地点を即時に特定するために RMS (Root Mean Square) 値を活用する。著大な振幅を強調し、かつ移動平均による高周波ノイズ除去を目的として車体動揺の RMS 値を算出し、その後、路線全体の RMS 値に基づき適切な閾値を設定することで、優先的に軌道補修を行うべき p-p 値の著大箇所を特定することが可能となる。図3に RMS 値が著大となるキロ程を特定した例を示す。

このように軌道異常を捉えた区間を「要注意区間」又は「要警戒区間」として設定し RMS 値を監視することは、軌道検測の実施、あるいは直接保守員が現地調査に向かうための判断材料として有用である。

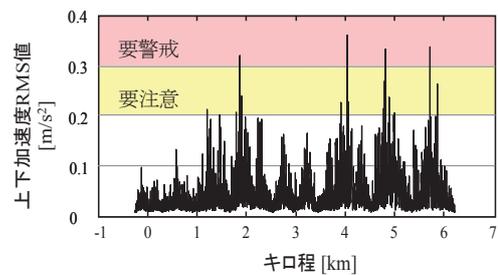


図3 RMS 値による評価例

また、同一路線で高頻度に車体動揺を測定することで、日々の RMS 値の増減量から軌道に何らかの変動があったことを捉え、軌道検査周期間における急変や軌道不整の進展を予測することで、軌道異常の評価が可能になると考える。ただし、図3のような折れ線グラフでは1走行内での比較は容易であるものの、年間を通して測定される膨大なデータを比較する際には、時系列情報が確認しづらいといった欠点があった。そのため、図4に示すように評価を行うキロ程を 10m 単位で区切り、RMS 値を閾値毎にカラーで表現することで、推移を分かり易く表現することとした。

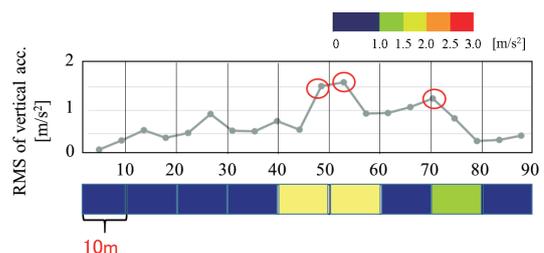


図4 RMS 値のカラーマップ化

2. 2. 2. ウェーブレット変換による評価

RMS 値を用いた評価においては、軌道の変化を捉える面で有用である一方、軌道異常の種別を判別することは保守員の現地調査に任せることとしている。しかしながら、軌道整備を実施するにあたっては、軌道異常の種別を把握する必要があるため、測定データから軌道異常の種別が判別されることが望ましい。

軌道異常の種別を判断する手法としては周波数解析が挙げられるが、フーリエ変換に代表される周波数解析では時間情報が失われるため、軌道異常の発生位置を特定することが困難となる。そのため、軌道異常の種別を判別し発生位置を特定するには、時間一周波数解析が有効である。

一般的に、時間一周波数解析においてもフーリエ変換を応用した高速フーリエ変換が多く用いられる。理由の一つとして、高速フーリエ変換を用いることにより、短時間で解析できるといった長所も有しているためである。しかし、周波数の窓幅が一定のため、広い周波数域を一度に解析することは難しい。そこで、本報告においては、計算効率では劣るものの広い周波数を解析可能で、出力信号の効率的な分解、再構成が可能である離散ウェーブレット変換にて評価を行う。

3. 測定装置の構成

測定装置については、地方鉄道での運用を想定するならば、測定の手順を簡略化し、測定及びデータの回収を可能な限り自動化することが望ましい。また、営業車両での測定を実施することから、旅客への影響を与えないよう、小型であることが必須である。

図5に今回使用した測定装置の構成図を示す。小型化のため、軌道異常を検出するための加速度センサ及びレートジャイロは、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術による一体型の慣性センサを採用している。また、列車位置を検出するためのGPS 受信機、測定用及び解析用ソフトウェアがインストールされたソリッドステートドライブ (SSD) で構成される。オプション機能として波状摩耗を検出するための騒音計、軌道異常箇所の状況を撮影するための Web カメラの接続も可能である。測定データについては SSD 及び micro SD カードに記録される。

また、自動で測定データを送信し、遠隔地における軌道状態の監視を目的としたデータ転送モジュールを内蔵している。データの送信手法は将来的な普及を

鑑み、車両からの給電をトリガーとして測定を開始し、携帯電話回線を通じてサーバへ測定データを送信する構成としている。なお、評価に必要な測定データが欠落なく送信できていることを試験 (図6) にて確認した。

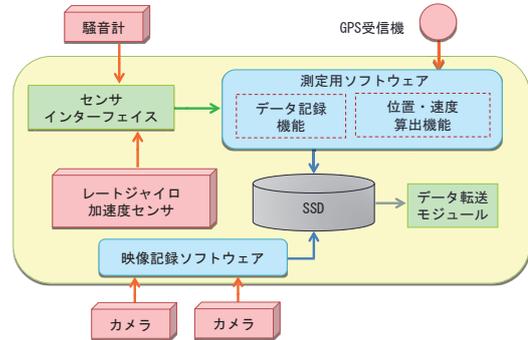


図5 測定装置の構成

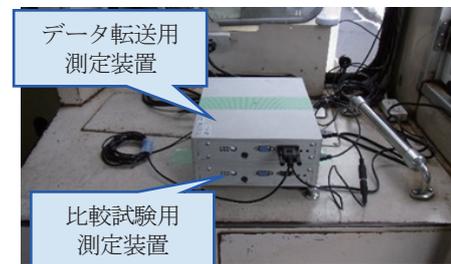


図6 データ転送確認試験

4. 地方鉄道における軌道状態の監視例

これまでの調査では、ある事業者で軌道変位が自社基準を越えた箇所内、全体の 86.3%が高低変位で占められていたことが判明している⁵⁾。そのため、本報告でも車体上下加速度に着目して軌道の評価を実施した。

4. 1. RMS 値による評価事例

鉄道事業者の協力のもと、軌道状態の監視を実施した例について紹介する。軌道異常が確認されている区間を RMS 値ごとにカラーマップ化し、一ヶ月の測定結果を時系列的に並べたものを図7に示す。なお、本路線における要注意区間の閾値は 1.5m/s^2 、要警戒区間の閾値は 2.0m/s^2 に設定している。

最も高い RMS 値が確認されたのは 25.1km 付近 (12月6日) であるが、 1.0m/s^2 の閾値越え (緑色) を最も多く確認されたのは 25.3km 付近であった。現地調査の結果、両区間においては軽微な噴泥が確認されており、直ちに軌道補修を行う必要は無いものの、注意が必要であることが分かった。

これまでの監視の例から、軌道変位等の軌道異常の進展は数週間から数ヶ月単位で進むことが知られている。一方で日々の RMS 値は運転速度や旅客重量等

の影響により多少値がばらつくことが想定される。そのため、軌道補修を行う目安としては、要注意の閾値越え (1.5m/s^2 , 黄色) が頻出し始めた頃が望ましい。また、要警戒の閾値越え (2.0m/s^2 , 橙色) を確認した際は、軌道補修計画の検討を開始するとともに、現地における目視点検等を推奨している。

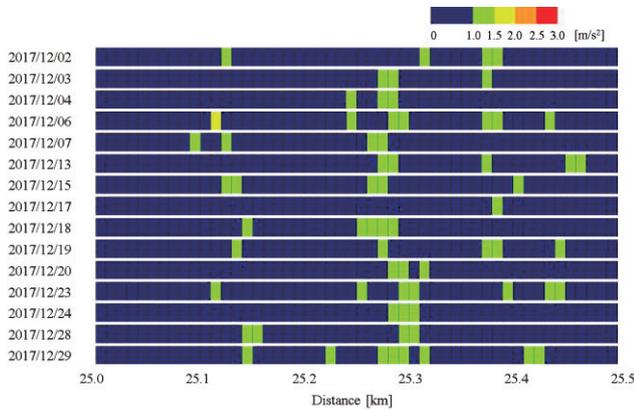


図7 軌道状態の推移のカラーマップによる表示

4. 2. 離散ウェーブレット変換による評価事例

図8に踏切 (9.4km 直後) 及びレール継ぎ目付近における軌道異常 (9.5km 手前) が連続して確認されている区間における、RMS 値の測定結果を示す。踏切については、自動車の通過による荷重に耐えるため、一般線路中とは軌道の剛性が異なること等から、比較的高い RMS 値が観測される。そのため、RMS 値における評価のみでは、正常な状態である踏切についても要注意箇所として判断されてしまう懸念や、評価の際に軌道異常と誤認される恐れがある。

そこで、加速度の測定データに離散ウェーブレット変換を行い、信号の分解を実施した。図9に加速度の測定データおよび分解信号 ($d_1 \sim d_4$) を示す。これまでの検討²⁾により、継ぎ目における軌道異常は高い周波数帯 (d_1) で、高低変位による軌道異常は 1Hz 付近 (d_4) にて監視が可能であることが判明している。

踏切地点では、主に d_2, d_3 の周波数帯の値が大きいことが確認できる。一方、軌道異常を確認している地点では、 $d_1 \sim d_4$ の広い周波数帯で値が大きく、特に d_1 での値が踏切とは明確に異なっている。

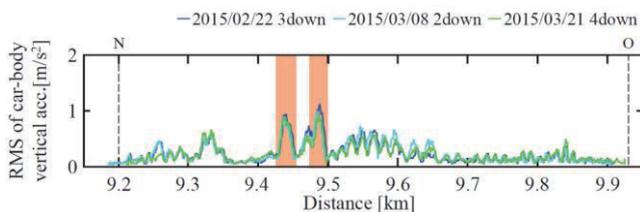


図8 踏切及び軌道異常が確認された駅間の RMS 値

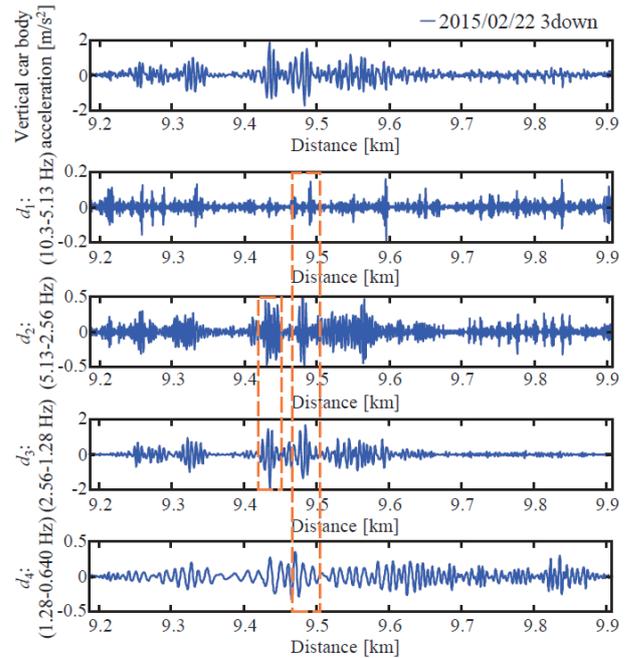


図9 離散ウェーブレット変換における分解信号

5. まとめ

本報告では、営業車両における車体動揺を活用した軌道状態の監視手法を提案し、鉄道事業者の協力のもと軌道状態の評価を実施した。RMS 値から軌道の状態を監視できること、また、離散ウェーブレットにより軌道異常の種別を特定できる可能性が示された。特に、RMS 値をカラーマップにより評価する手法については、地方鉄道路線にて軌道補修計画に活用可能であり、今後、解析の自動化などを進めて行く予定である。

参考文献

- 1) JR 東日本ニュース, “線路設備モニタリング装置の本格導入について”, <https://www.jreast.co.jp/press/2018/20180704.pdf>
- 2) 荻野誠之, 綱島均, 柳澤一機, 森裕貴, 浅野晃, 若井翔平, “小型レール診断装置を用いた軌道状態診断システムの開発”, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.134, No.1, pp.1-6 (2014)
- 3) 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)
- 4) 鉄道総合技術研究所 編著, “在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説”, 研友社 (1993)
- 5) 森裕貴 他, “営業車両を活用した軌道監視事例と遠隔自動収録に向けた取組”, 交通安全環境研究所フォーラム 2016 講演概要, pp101-102 (2016)