

論文 高頻度列車動揺の線路メンテナンスへの活用に向けた基礎的検討

原田 祐樹¹・松村 隆範²・沢田 悠³・小林 祐介⁴

¹正会員 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 施設部 (〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田2-4-24)

E-mail: yuuki-harada@westjr.co.jp

²非会員 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 技術企画部

E-mail: takanori-matsumura@westjr.co.jp

³非会員 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 車両部

E-mail: yuu-sawada@westjr.co.jp

⁴非会員 西日本旅客鉄道株式会社 近畿統括本部 施設課 (〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原4-3-39)

E-mail: yuusuke-kobayashi02@westjr.co.jp

当社では、列車走行の安全性向上を目的として、列車動揺から脱線などの異常を検知するシステムが順次営業列車に設置されている。このシステムで高頻度に測定できる列車動揺を線路メンテナンスへ活用することを検討した。

まず活用にあたり課題となる事柄についての基礎的検討を行った。高頻度列車動揺は正確な位置情報が付与されていない等の課題があるため、そのデータ処理方法について検討を行い、さらにシステムを開発した。また、可搬式動揺計の測定値と比較を行うとともに、速度による影響を確認した。

次に動揺値の予測手法について検討し、一部の外れ値を除去することにより実用的な精度で1ヶ月先の予測が可能であることを確認した。また実測値が予測値を大きく上回る箇所を把握することにより、軌道狂いの急進を検知できる可能性を確認した。

Key Words : track maintenance, car body acceleration, high frequency measurement, prediction method, rapid deterioration of track irregularity

1. はじめに

少子高齢化が進むわが国では、生産年齢人口が加速度的に減少することにより労働力確保が困難となることが予測されており、当社においても労働力不足への対応は緊急かつ最重要課題である。その対応策の一つとして「地上検査の車上化」を目指しており、線路メンテナンスの省力化・省人化に取り組んでいる。

一方、列車の走行安全性向上を目的として、列車の加速度から脱線などの異常を検知し、列車防護を行う車両異常挙動検知システムを順次営業列車に設置している。本装置は列車動揺の測定装置そのものであり、営業列車の運用に伴って高頻度な列車動揺データ（以下、「高頻度列車動揺」という）が取得可能である。高頻度列車動揺を活用し、線路の状態をタイムリーに把握することができれば、現在人により実施している線路メンテナンス

を低コストに省力化できる可能性がある。

近年、国内の他鉄道事業者において営業列車への軌道検測装置等の搭載が進んでおり²⁾、これらの装置から取得されるデータを基に高頻度検測の特性を生かした分析が行われている³⁾⁴⁾が、その主眼は軌道検測データである。それに対して列車動揺は、速度依存性や車両の振動特性の影響を受けるため、その影響度合いを把握し、これらを考慮した活用方法を検討する必要がある。またこれらの要因により、これまでの測定頻度では精度に限界があった列車動揺の将来予測についても、測定頻度の飛躍的な向上が期待できるため、実用的な精度を得られる可能性がある。

そこで高頻度列車動揺を線路メンテナンスへ活用するために、速度依存性や車両特性の影響を把握するとともに、予測手法の検討を行うこととした。

2. 測定装置

(1) 車両異常挙動検知システム

車両異常挙動検知システムとは、**図-1**に示すように列車の加速度をもとに、列車の脱線や衝突といった異常な挙動を検知し、緊急列車防護装置を自動的に動作させるシステムである¹⁾。当該列車を緊急停止させて被害を低減させるとともに、周囲の列車に防護無線を発信して併発事故を防止することができる。今後新製される車両への搭載に加え、既存車両へも順次整備を進めることとしている。

このシステムには列車の振動加速度を測定・判定する機構として、車両挙動監視装置が各車両の両端床下に設置されている。この装置には3軸の加速度センサが設置されており、設置位置は**図-2**に示すように車両の台車中心から2.4m前方の位置を中心として、1.2m四方のエリアの中に設置することとなっている。車両挙動監視装置で閾値以上の加速度を検知した場合は脱線・転覆・衝突が発生したと判定し、例えば脱線の閾値は上下加速度で±6.9m/s²（片振幅）である。

(2) 収録装置

線路メンテナンスで実施する列車動揺測定では、脱線等の検知を目的としている車両異常挙動検知システムの閾値と比較して非常に低い値から管理を行っている。また、軌道状態を把握するうえでは、閾値超過箇所の情報だけではなく、測定した全線のデータを確認できることが望ましい。そこで、線路メンテナンスでこれらの動

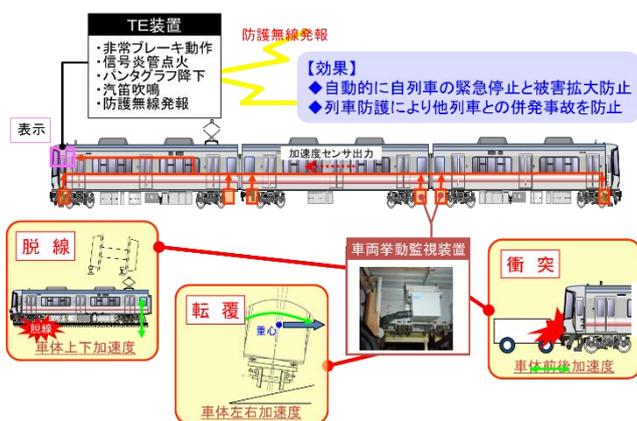


図-1 車両異常挙動検知システムの概要

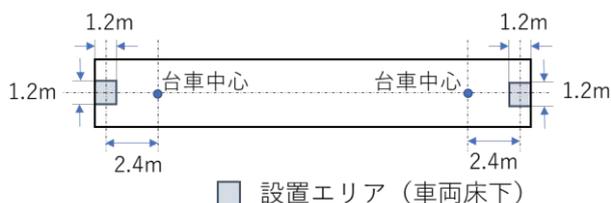


図-2 車両挙動監視装置の設置位置

揺データを活用するにあたり、新たな収録装置を設置した。

収録装置の設置は、中下級線を含む特定の区間を定期的に走行する特急形電車（くろしお）の287系2編成に行った。それぞれの進行方向に対して、先頭車両前側の台車位置での測定を行うために、1編成あたり両端2箇所の車両挙動監視装置に対して収録装置を設置した。

収録装置の主な収録項目を**表-1**に示す。サンプリング周波数は200Hz、加速度センサ出力は50Hzローパスフィルタ（以下、「LPF」という）処理を行っており、CSVファイルとして収録している。

3. 高頻度列車動揺データ

(1) データ処理

高頻度列車動揺を活用するにあたり、鉄道総合技術研究所が開発した軌道保守管理データベースシステム「LABOCS」をベースとした処理システムを開発した。このシステムのデータ処理の流れを**図-3**に示す。収録装置には1分間ごとに1つのCSVファイルとして分割してデータが格納されているため、まずは1行路分のデータを結合する。次に高周波成分を取り除くため測定データに対してLPF処理を行う。現在の線路メンテナンスで活用している可搬式動揺計を使用した列車動揺測定と同じ8HzLPFを使用している。その後、速度情報を使用して時間サンプリングデータから25cm間隔データへと変換する。最後に線名ごとに分割を行い位置合わせ処理を行う。

表-1 収録装置収録項目

	記録内容	単位		記録内容	単位
①	前後加速度	g	⑤	速度	km/h
②	左右加速度	g	⑥	緯度	度
③	上下加速度	g	⑦	経度	度
④	記録日時	年月日時分秒			

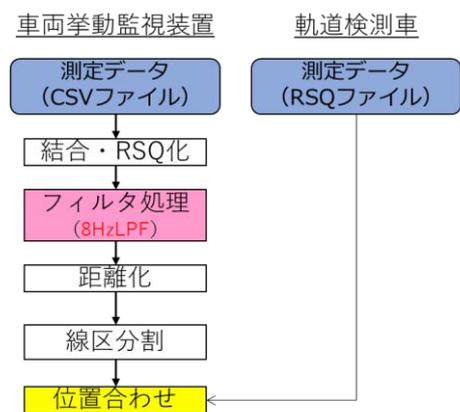


図-3 列車動揺データ処理の流れ

(2) 位置合わせ処理

測定データには、車両に設置したGPSにより測位した緯度・経度情報はあるものの、その測定精度には限界があり、正確な位置情報を得ることは困難であった。そこで、軌道検測車で測定した上下動揺を基準データとして、LABOCSコマンドの相互相関法⁹⁾を活用した位置合わせを行い、精度の高い位置情報を得ることとした。なお、低速時には上下動揺の値が小さく、一定の精度で位置合わせを行うことが困難であることから、今回は速度30km/h以下の区間を位置合わせ処理の対象外とした。

(3) 可搬式動揺計との比較

車両挙動監視装置は台車中心より前方に設置されている。一方、可搬式動揺計による列車動揺の測定位置は、列車の最前部前車または最後部後台車の床上⁶⁾とされている。そのため、装置設置位置による測定値への影響が予想される。そこで、車両挙動監視装置の収録装置を搭載した車両で可搬式動揺計による測定を行い、両者の上下動揺測定値の比較を行った。比較は現状の測定で使用している指標に準じて全振幅値で行うこととし、以降の上下動揺の測定値は全て全振幅としている。

結果を図-4に示す。車両挙動監視装置の測定値の方が、可搬式動揺計と比較して1~2割程度大きくなった。また編成により、多少測定値に差異が生じていることがわかった。これは、同一の車両形式であっても振動特性に多少の個体差が生じており、その影響を受けているものと考えられる。

(4) 速度による影響

列車動揺は一般的に速度依存性を有していることが知られているため、速度の影響を確認した。軌道の劣化の影響を極力取り除くため、1週間以内で測定した9回分の測定データを用いて、各測定で速度差の大きい3つのロット（25m区間）における速度と上下動揺の関係を確認した。結果を図-5に示す。ロット①、②は速度の上昇により上下動揺の値が大きくなっているが、その増加割合

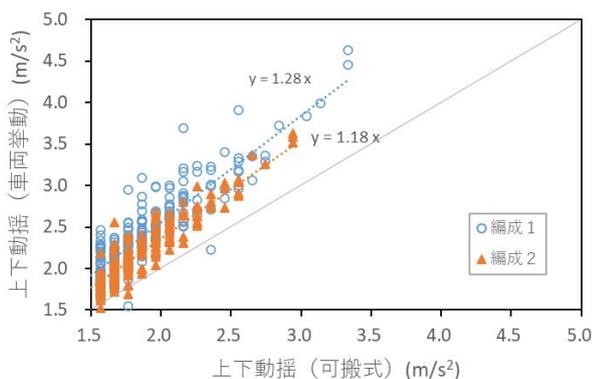


図-4 可搬式動揺計と高頻度列車動揺の比較

は異なる。また、ロット③は速度による影響があまり見られない。この3つのロットの軌道構造は全て有道床・定尺レール・木まくらぎであり、概ね同一の条件である。図-5より、10m弦高低 σ 値が大きいロットほど速度上昇による上下動揺の増加割合が大きい。全体の傾向として明確な関係性を確認できておらず、現時点では一様に補正値を定めることは困難である。

4. 高頻度列車動揺予測手法の検討

列車動揺について将来予測を行うことは、計画的な整備を実施するうえで有益であるが、これまでその測定頻度は最大でも1か月に1回程度であり、また速度等によるばらつきも大きいことから、予測精度については課題があった。

今回、高頻度での列車動揺測定が可能なることにより、その特性を生かしてより高精度な将来予測ができる可能性がある。そこで高頻度列車動揺の上下動揺について予測手法を検討した。

(1) 予測手順

上下動揺予測の流れを図-6に示す。まず、10mロット最大値を計算する。これはデータ処理の過程で位置合わせ処理を行うものの、1~2m程度の位置ずれは残存することが多いため、位置ずれを考慮して推移を算出できるようにするためである。

10mロット最大値は、全振幅の値としている。図-7に示すように、全振幅の発生キロ程は測定開始点側のピーク位置を基準とし、同一ロット内に複数のピークが存在する場合は、最大値を採用する。

次に外れ値の除去を行う。今回、①低速度データ、②特殊速度データ、③位置合わせ不良データの3種類の外

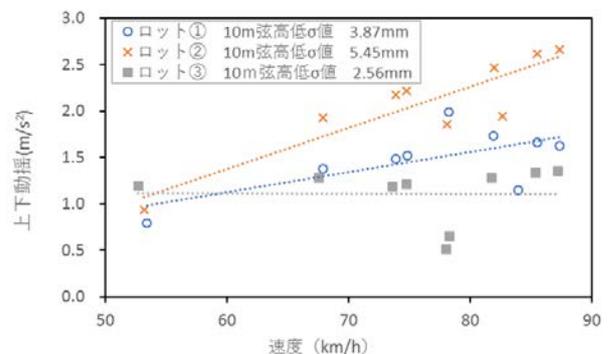


図-5 速度と上下動揺全振幅の関係

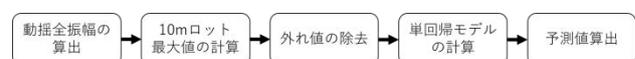


図-6 上下動揺の予測の流れ

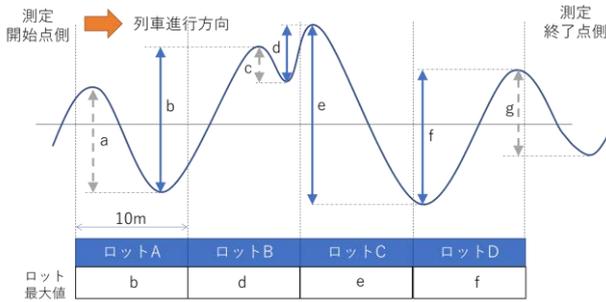


図-7 10m ロット最大値

れ値について考慮することとした。

①の低速データは、速度30km/h以下で測定したデータである。30km/h以下では高速時と比較して相対的に上下動揺の値が小さく、誤差の影響を受けやすくなる。また、相互相関法による位置合わせにおいても速度30km/h以下の区間を対象外としており、波形の位置合わせが正しく行われていないことから外れ値として除外することとした。

②の特殊速度データは、各ロットにおける平均的な速度から大きく外れる速度で測定されたデータである。速度の影響を受け、平均的な速度で測定した場合と比較して測定値が乖離する可能性が高く、予測精度に影響を及ぼす。また、速度による補正が困難であることと、高頻度測定により、特殊速度データを間引いた場合でも一定のデータ数を確保できることを勘案し、除去にて対応することとした。除去するデータは、ロット毎に平均速度及び標準偏差を計算し、平均速度 $\pm 3 \times$ 標準偏差から外れる速度で測定したデータとすることとした。この処理により多くのロットにおいて、最高速度と最低速度の差が20km/h以内となった。

③の位置合わせ不良データについては、位置合わせ処理後のデータにおいても、部分的に位置合わせが失敗する区間は存在する。位置ずれが残存している場合、本来他のロットに存在するはずの測定値を10mロット代表値としている可能性があるため、このデータを除去する。ロ

ット毎に平均上下動揺及び標準偏差を計算し、平均上下動揺 $-1.5 \times$ 標準偏差以下の値のデータを位置合わせ不良のデータとみなし、除去することとした。

これら外れ値除去の方法は、①、②、③の順に行うこととした。

上下動揺予測モデルは、単回帰モデルを使用することとした。これは、モデルがシンプルであり、傾きを比較することにより、動揺の進みの大小がわかるため理解しやすいことからである。

(2) 予測結果

2019年3月から5月の3ヶ月間の紀勢線上り約200km分の測定データを用いて、1ヶ月後の上下動揺を予測した。前章で述べた通り編成による測定値の差異は確認されているが、今回は測定頻度を重視し、2編成のデータを区別せずに用いている。測定頻度は区間により異なるが、最も頻度の少ない区間において、この3ヶ月間に27回の測定データが得られている。

予測結果の一例を図-8に示す。各データは10mロットの値である。縦軸の単位は、現場での使用性を考慮して、線路メンテナンスで日常的に使用している単位である「g」としている。各ロットの予測値と実測値の関係を図-9に、予測誤差（予測値と実測値の差の絶対値）の分布を図-10に示す。予測誤差は 0.15m/s^2 以内に78%のロットが入っている。上下動揺の整備基準値（4級線を除く）が 3.68m/s^2 （0.375g）であることを考慮すると、これらのロットの予測精度は概ね問題がないと考えられる。

一方、予測精度の悪いロットの例として、図-9においてロットIと示した箇所の上動揺実測値の推移を図-11に示す。ここでは上下動揺予測に使用した期間に加えて、1ヶ月の予測期間も含めた2019年6月末までの実測値の推移を示している。予測精度の悪いロットは、このような二極化した推移を示す箇所が多く見られた。これは図-12に示すようにロットの境界近辺に上下動揺のピークが発生しており、わずかな位置ずれであってもピー

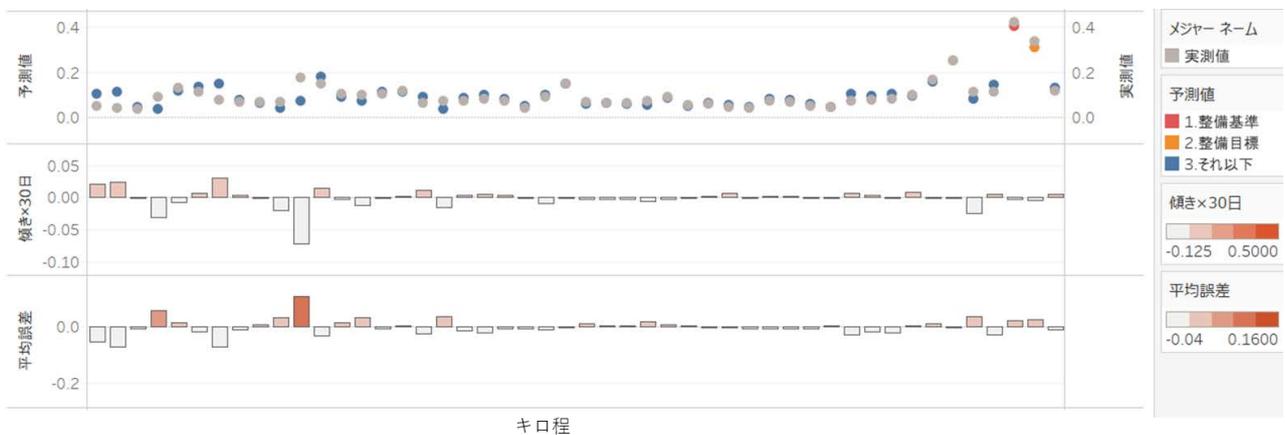


図-8 上下動揺予測の例

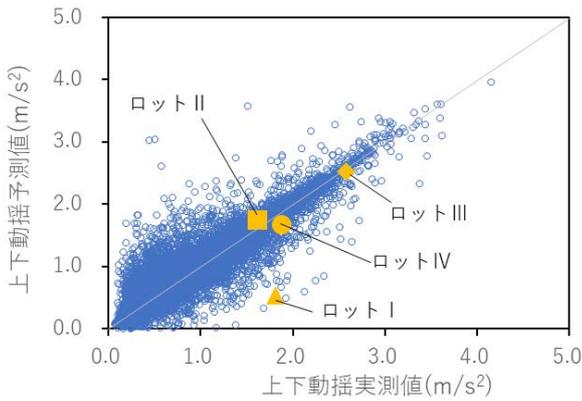


図-9 実測値と予測値の比較

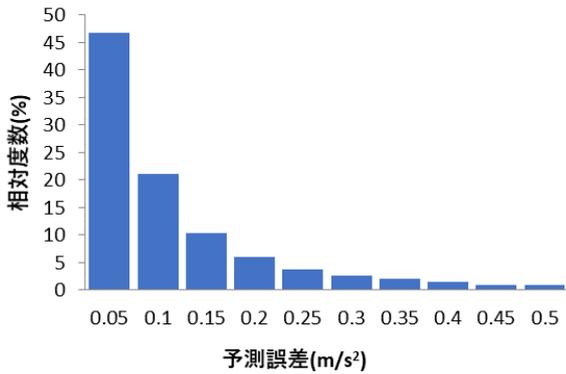


図-10 予測誤差の分布

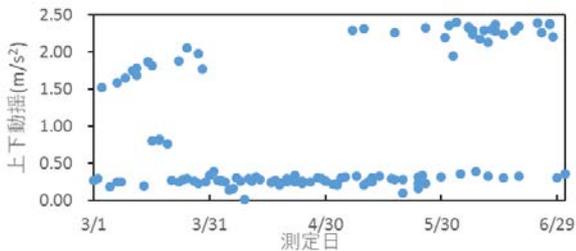


図-11 ロットI (予測精度が悪い箇所) の上下動揺実測値の推移

クの所属するロットが変わってしまうことによるものと考えられる。

次に、図-9に示した代表的なロットII～IVについてその上下動揺実測値の推移を図-13に示す。図-11と同様に4ヶ月間の推移を示している。ロットIIは上下動揺の進みが大きい箇所である。一方ロットIIIは初期の値は大きいものの、その進みは小さいロットである。このように推移を把握し正しく予測を行うことにより、整備の優先すべき箇所を絞り込むことができ、より効率的な保守を行うことができると考えられる。

ロットIVは実測値が予測値と比較して 0.20m/s^2 大きく計測された箇所である。このロットでは、期間の後半で徐々に上下動揺の進みが大きくなっており、このモデルでは値を小さく予測してしまっている。このように実測

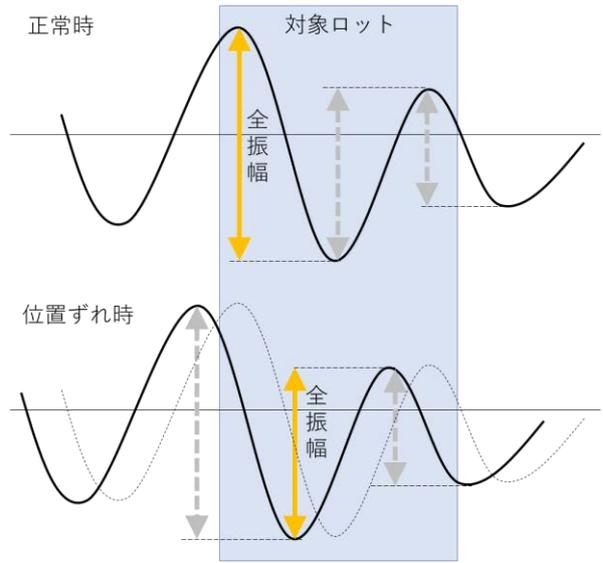
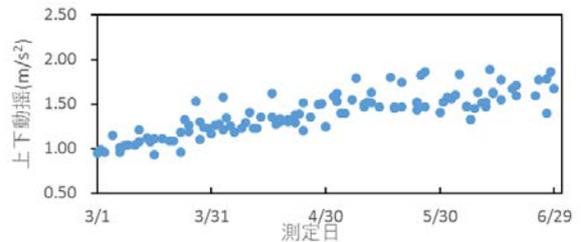
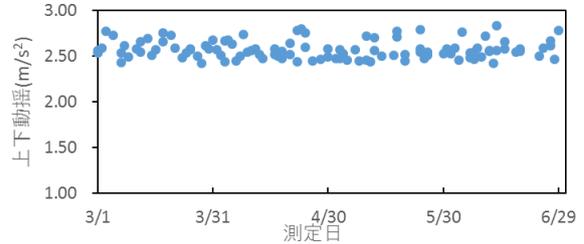


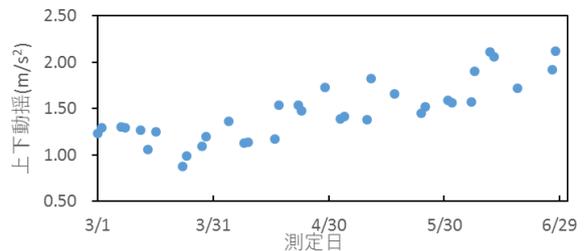
図-12 上下動揺推移二極化の原因



(a) ロットII (進みの大きい箇所)



(b) ロットIII (高止まり箇所)



(c) ロットIV (予測値乖離箇所)

図-13 代表的なロットの上下動揺実測値の推移

値が予測値を大きく上回る箇所については、軌道の劣化の急進が懸念される。このロット付近の軌道検測車により測定した10m弦高低狂いの波形を図-14に、10m弦高低狂いの経時変化を図-15に示す。図-15の枠線内が高頻度列車動揺の推移を確認した期間であり、この間に進みが

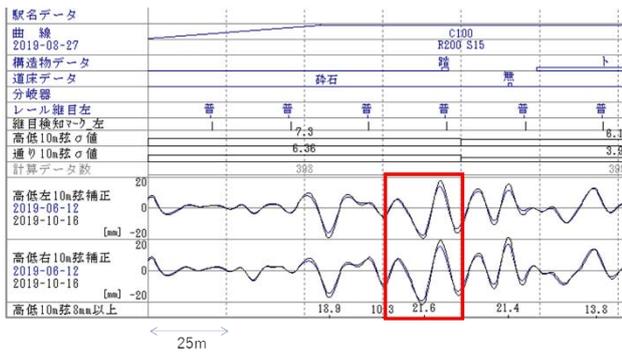


図-14 急進が疑われる箇所の10m弦高低狂い波形

早くなっていることが分かる。このような軌道狂いの急進を早期に認知できることにより、計画的な軌道整備の実施や、運転規制を伴う著大な軌道狂いの発生防止に役立てることができるものと考えられる。

5. まとめ

営業列車測定により高頻度に得られる列車動揺データの線路メンテナンスへの活用について検討した。その結果、可搬式動揺計の測定値と比較して1割から2割程度大きく測定されることが確認できた。また、列車の編成や速度による影響を考慮する必要性も確認された。

一方、高頻度に測定できるメリットを生かし、同一速度帯域のもののみを使用することや、傾向値を把握することにより、実用性を有する精度での将来予測が可能なのことも確認でき、線路メンテナンスへの活用の可能性が確認できた。

今後は、予測精度の向上や左右動揺への適用範囲拡大を検討するとともに、高頻度列車動揺の線路メンテナンスへの活用を進めていきたい。

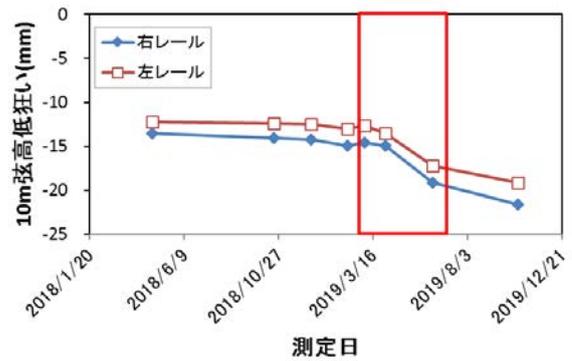


図-15 急進が疑われる箇所の10m弦高低狂いの推移

参考文献

- 1) 古賀進一郎, 島田直人, 宮川清明, 影山真佐富: 車両異常挙動検知システムの開発, 第22回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.1610, 2015.
- 2) 葛西亮平, 西藤安隆, 小松佳弘, 小木曾清高, 矢作秀之, 小西俊之: 線路設備モニタリング装置の概況と今後の方向性, JR EAST Technical Review, No.55, pp.21-24, 2016.
- 3) 山本修平, 三和雅史, 田中博文, 嘉嶋崇志: 高頻度検測データの特性を考慮した軌道変位予測モデルの構築, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.21, pp9-16, 2017.
- 4) 葛西亮平, 元好茂, 小西俊之: モニタリングデータを活用した施工前後における軌道状態の分析, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.21, pp17-24, 2017.
- 5) 田中博文, 山本修平, 森忠夫, 西藤安隆: 相互相関法を用いた波形レベルでの軌道変位進み算定手法の開発, 第23回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.95-98, 2016.
- 6) 公益財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物維持管理標準(軌道偏)の手引き, p.103, 2007.

(2020.4.3 受付)

BASIC STUDY ON UTILIZATION OF HIGH FREQUENCY CAR BODY ACCELERATION FOR TRACK MAINTENANCE

Yuki HARADA, Takanori MATSUMURA, Yu SAWADA and Yusuke KOBAYASHI

Our trains are equipped with systems that detect abnormalities such as derailment by car body acceleration in order to improve the running safety. We studied the use of car body acceleration frequently measured with the systems for track maintenance.

First, we did a basic study of its use. Since they have problems such as not knowing the exact location information, we examined how to handle them and developed a system to execute them. In addition, we compared the measured values of the systems and portable accelerometer, and confirmed the effect of velocity on car body acceleration.

Next, we examined the prediction method and confirmed that it was possible to predict one month ahead with practical accuracy by removing some outliers. Furthermore, it was confirmed that if a location where the measured value greatly exceeded the predicted value was found, it was possible to detect rapid deterioration of track irregularity.