

7. 営業車両による脱線係数観測データの活用について

交通システム研究領域 ※ 佐藤 安弘 大野 寛之 森 裕貴
東京地下鉄 栗原 純 茨城大学 道辻 洋平
新日鐵住金 水野 将明 住友金属テクノロジー 谷本 益久

1. はじめに

鉄道車両の走行安全性の確認のため、従来からレール・車輪間の力の測定を行い脱線係数が求められてきたが、その機会は、新線開業や新形式車両導入時等、特定の場合に限られていた。

脱線係数は、外軌側を示す図1のとおり、レール・車輪間に働く力のうち、横方向力である「横圧」 Q と垂直方向力である「輪重」 P との比 Q/P により求められる。

特に急曲線における乗り上がり脱線については、中目黒事故(平成12年)の原因調査を通じて、脱線係数がレール・車輪間の摩擦係数に依存して大きく変化することなどが指摘され、脱線係数を頻繁に観測することの重要性が増してきた。

そこで、高性能化が進んでいるセンサ類を活用した状態監視技術として、営業車両による常時観測を可能とする新たな脱線係数測定法の研究を進め、その測定法が実用化された¹⁾。さらに、営業車両で取得されたデータを分析し、特定曲線における脱線係数の変化や全線の各曲線における脱線係数のばらつきを明かにした²⁾。

これらの成果を基に、脱線係数の常時観測を前提とする安全性管理方法の確立等が求められるようになってきた。そこで、営業車両で日々取得されたデータを軌道の保守などへ活用することを目標に、データの分析を進め、軌道の保守との関係や新たなデータ分析手法について考察したので報告する。

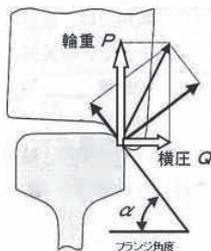


図1 レール・車輪間の力と脱線係数 Q/P

2. 脱線係数の測定法

2. 1. 従来の脱線係数測定法

従来の測定法では、車輪にひずみゲージを貼付し、車輪板部の垂直ひずみで輪重を、曲げひずみで横圧を測定する。ひずみゲージの信号線を通すため輪軸の穴開け加工が必要で、回転する輪軸から電気信号を取り出すために摺動部のあるスリッピングを使用する必要があり、測定システム自身の耐久性に劣るため、営業車両による常時観測には適用できなかった。

2. 2. 常時観測に用いる脱線係数測定法³⁾

本脱線係数測定法は、輪軸には直接センサを取付けず、非接触センサを用いることが特徴である。輪重は、軸ばねたわみ量を検出することで求める。横圧は、車輪の曲げ変形量を検出することで求める。しかしながら、曲げ変形量は0.1mm程度以下の微量であり、軸箱に取り付けた3箇所の非接触変位計により、軸受のガタによる影響を補正し、横圧による変形量のみを捉えるようにしている。さらに、軸受のガタを極力小さいものとするなど、台車全体として測定精度を高める設計となっている。輪重測定用の磁歪式変位計および横圧測定用の渦電流式変位計の設置位置を図2に示す。

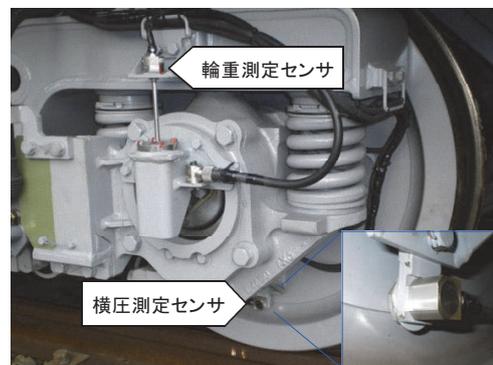


図2 脱線係数常時観測用台車及びセンサ

3. 脱線係数の常時観測により得られる情報

3. 1. 特定曲線における脱線係数の変化

半径 160m の曲線区間(カント 125mm、スラック 13mm)において、3 日間にわたり、異なる時間帯に測定された台車前軸外軌側脱線係数の波形を図 3 に示す。各回の測定値を青線で重ね書き(10 回以上)し、それらの平均的な値を赤線で示している。

測定波形の形状は毎回ほぼ同様の傾向を示しており、同じ地点の脱線係数が変動する主な要因としては、塗油やレール表面の乾燥状態等により、レール・車輪間の摩擦係数が変化することが挙げられる。急曲線部における内軌側横圧輪重比(内軌 Q/P)が摩擦係数に近似することから、内軌 Q/P を調べたところ、図 4 のとおり 0.2 から 0.6 程度までの範囲で変動していることが確認できる。摩擦係数の変化による脱線係数の変動量については、前報²⁾において、マルチボディ・ダイナミクス・ソフトウェアを用いて検証した。

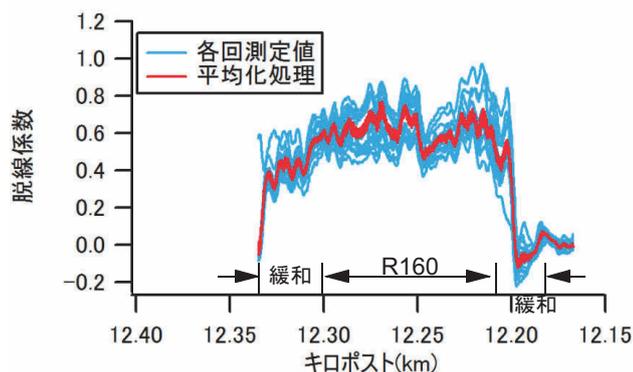


図 3 特定曲線における外軌脱線係数の時間変化

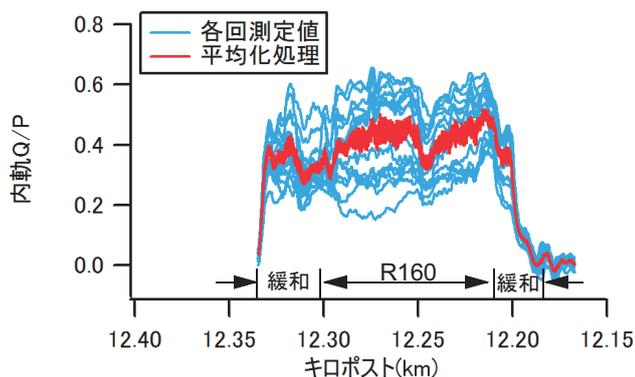


図 4 特定曲線における内軌 Q/P の時間変化

3. 2. レール研削による影響

軌道の保守として、レール研削を実施する場合がある。その影響が同じ曲線部のデータに現れた例として、図 3 から約 1 ヶ月経過した 2 日間にわたる外軌側脱線係数データを同様に重ね書きしたものを

図 5 に示す。この間に当該曲線部でレールの研削が実施したことが確認されている。図 5 は図 3 に比べ、全体的に脱線係数がわずかに低い傾向が見られる。

一方、レール研削後の内軌 Q/P は図 6 のとおりであり、研削前の図 4 と比較すると、顕著に波形が変化していることがわかる。レール研削によって、内軌側のレール頭頂面形状が変化するため、曲線通過中の車輪踏面との接触点が左右車輪回転半径差が大きくなる方向、すなわち操舵性がよくなる方向に変化することに伴って、内軌 Q/P 及び外軌側脱線係数が低下することが考えられる。

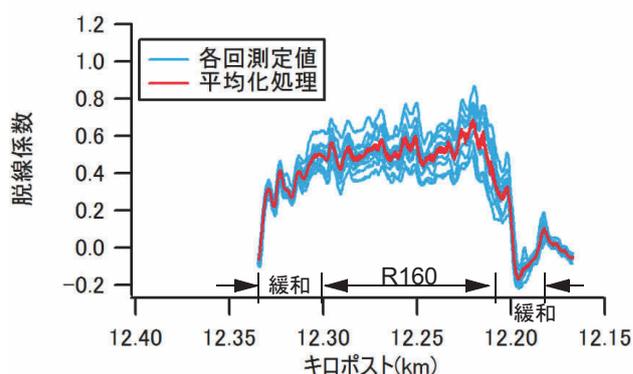


図 5 レール研削後の外軌脱線係数の時間変化

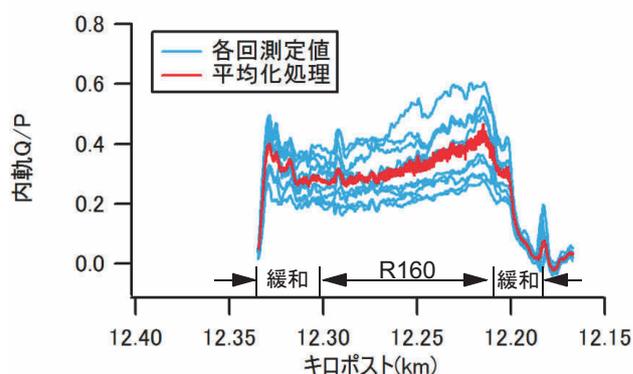


図 6 レール研削後の内軌 Q/P の時間変化

3. 3. レール交換による影響

レール交換前後でデータに変化が現れた例として、レール交換前の台車前軸外軌側輪重を図 7 に、レール交換後の輪重を図 8 にそれぞれ示す。各図において、同じ地点の輪重が変動する主な要因としては、乗車率の変動、速度の影響等が考えられる。

両図を比較すると、図 8 では、12.25km 付近で輪重が減少する方向に波形が変化していることがわかる。この付近のレール継目から、キロポストの数字が小さくなる方向でレール交換を実施したことが確認されており、継目位置で新旧レール高さを合わせるためのレール高さ調整による影響が考えられる。

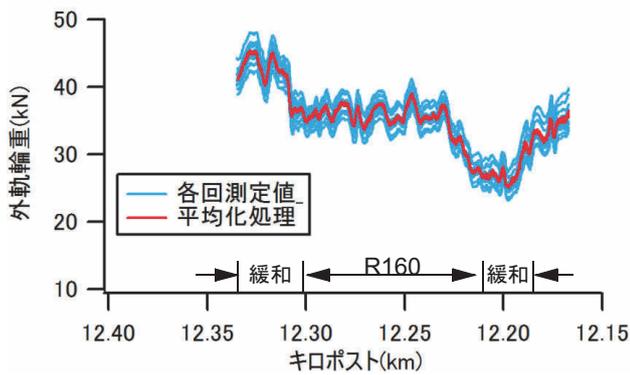


図7 レール交換前の外軌輪重

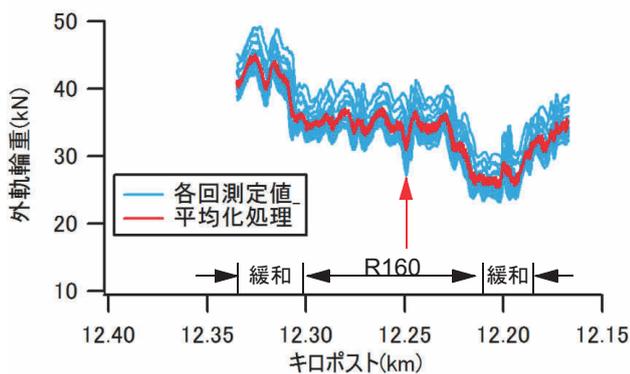


図8 レール交換後の外軌輪重

3. 4. 軌道の保守管理への活用可能性

列車が脱線することなく通常安全に運行しているのは、軌道・車両の設計・保守等の両面にわたり、良好な管理がなされているためといえる。

保守面では、軌道は、車両の通過に伴い、繰り返し荷重を受け、変形を繰り返すことから、軌道状態検査等を行い、軌道の変位が許容範囲内にあるかを定期的にチェックするとともに、必要な修正を行っている。一方、車両においても、定期検査を行い、車輪やばねの寸法・形状等に異常が無いかな等の管理がなされてきている。

軌道保守の目的は、輪重変動などを抑制し、走行安全性を高めることにあるが、走行安全性は、軌道変位の他にも、以下のような直接測定管理しがたい要素によっても影響を受けると考えられる。

- ・塗油やレール表面の乾燥状態等による摩擦係数の変動
 - ・レール・車輪摩耗や研削等によるレール・車輪接触状況の変化に伴う曲線旋回性能等の変化
 - ・その他、レール交換等部材変更に伴う影響
- もちろん、これらの諸要素は、安全上のマージンとして、軌道変位の保守基準等に含まれるものと考

えられるが、安全上の余裕がどこまであるかを都度確認することは困難であった。

営業車両による脱線係数等の常時観測を行えば、速度や乗車率等による変動のほか、従来、直接管理できなかったレール・車輪の摩擦係数や接触状況等を含めた管理が可能となる。

また、線路方向の測定分解能についても、本脱線係数測定法によれば、車輪1回転につき10データ(0.25m程度毎に1データ)が得られるため、きめ細かい軌道の情報が得られるものと考えられる。上述のようなレール継目の情報は、軌道検測データとして通常管理される10m弦正矢の5mおきの情報には一般に現れにくい。

このように、軌道保守状態の時間的な変化を脱線係数等の変化として把握できるほか、軌道に手を加える前後を含めて、走行安全性を都度、脱線係数によりチェックすることができるため、営業車両による観測は、安全を管理していく上で非常に有益と考えられる。

4. 新たなデータ分析手法の提案

4. 1. 信号分解の式

上述のように、車上で走行中に得られた脱線係数等の常時観測データによって、さまざまな現象を確認することができるものの、脱線係数が大きくなる箇所でのどのような対策を施すべきか、専門家の分析に頼ることなく、わかりやすい形で提示できれば保守上有意義である。そこで、脱線係数低減の指針を得るためのデータ分析手法を提案する。

具体的には、脱線係数の連続データを以下の4つの要因に関連する信号成分に分解する。

要因1 (内軌 Q/P : κ) 内軌塗油などにより摩擦係数が低下すると、 κ とともに脱線係数も小さくなる。

要因2 (曲率 : ρ) 曲率が大きいほどアタック角が増大し、横クリープ力が増大することで脱線係数が大きくなる。

要因3 (速度 : v) 曲線区間走行速度に応じた超過遠心力による影響を考慮する。

要因4 (左右輪重差 : ΔP) 外軌輪重が抜け、内軌輪重が増大すると、内軌横クリープ力が増大し脱線係数が大きくなる。

信号分解の式は次のように表される。

$$Q/P = \sum_1^N f_i + I \quad (1)$$

ここで、 Q/P ：脱線係数、 f_i ：信号成分、 I ：摂動成分
 信号成分については、さまざまな設定が考えられるが、ここでは、上記要因を考慮し、以下のように設定する。

$$\begin{aligned} f_1 &= k_1 \cdot \kappa \\ f_2 &= k_2 \cdot \rho \cdot v^2 \\ f_3 &= k_3 \cdot \kappa \cdot \Delta P \end{aligned}$$

ここで、 k_1, k_2, k_3 ：パラメータ

パラメータ及び摂動成分以外は、常時観測によって得られる既知のデータで、走行位置の関数である。(1)式において、摂動成分の自乗和を最小化する解として、パラメータを一意に求めることができる。

4. 2. 信号分解の一例

曲線近傍の内外軌にレール塗油器が設置された半径 160m(カント 150mm、スラック 8mm)の曲線区間における脱線係数の連続データより、レール潤滑前と思われる比較的脱線係数が大きくなるデータ及びレール潤滑後と思われるデータを抽出して、信号分解処理を行った。その結果を図9及び図10に示す。

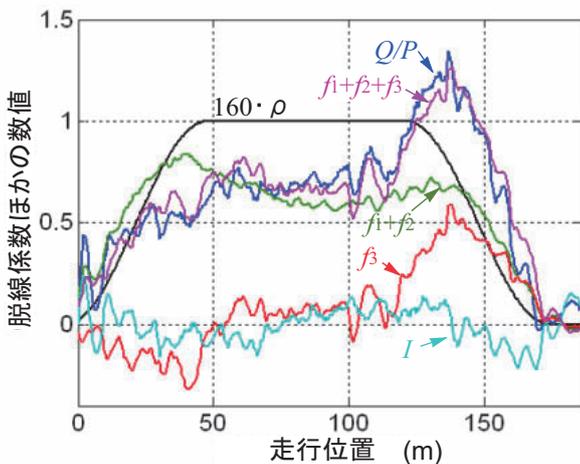


図9 脱線係数の信号分解例(潤滑前)

両図より、分解した信号 f_1 、 f_2 、 f_3 の和は、元の脱線係数の時系列波形にほぼ近い波形となっていることが確認できる。また、図9では、脱線係数が出口側緩和曲線で大きくなる傾向があるが、その原因は左右輪重差等を要因とする f_3 の影響が大きいことを視覚的に把握することができる。すなわち、出口側緩和曲線の構造的平面性変位の影響が考えられる。一方、図10では出口側緩和曲線部で、特に f_3

が低減しており、脱線係数も全体に低減している。すなわち、レール潤滑によって脱線係数に対する平面性変位の影響が目立たなくなることがわかる。

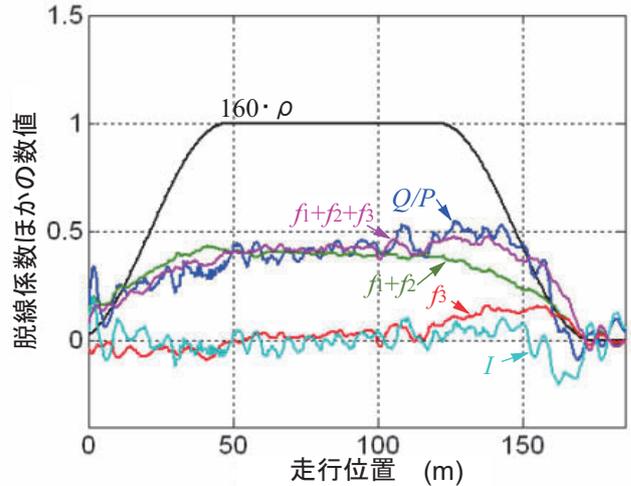


図10 脱線係数の信号分解例(潤滑後)

5. まとめ

営業車両による脱線係数常時観測データを軌道の保守などへ活用することを目標に、分析を進めた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 脱線係数の常時観測によって、レール研削やレール交換等の保守作業結果が、データの変化となって現れることが確認できた。
- (2) 軌道変位等による従来の走行安全性の管理を補足するものとして、レール・車輪の摩擦係数や接触状況等を含めた保守管理に活用できる可能性を示した。
- (3) 常時観測データを活用して、脱線係数低減の指針を得るためのデータ分析手法を提案した。提案する信号分解手法を活用することで、緩和曲線などの局所的な脱線係数増大要因を特定できる。

今後の課題としては、常時観測データと軌道変位管理指標との相関を定量化すること、軌道の局所的な異常を警報するシステムへの発展等があげられる。

さらなる安全性の向上に貢献する取り組みとして、脱線係数の常時観測可能という強力なツールの活用を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 佐藤ほか; 交通研フォーラム 2009 講演概要, pp85-88
- 2) 佐藤ほか; 交通研フォーラム 2011 講演概要, pp107-108