

15. 営業車両による走行安全性モニタリング技術の研究開発

—脱線係数常時観測の実用化—

交通システム研究領域 ※ 佐藤 安弘 大野 寛之 足立 雅和

東京地下鉄 清水 忠 齋藤 拓也

住友金属工業 佐藤 興志 住友金属テクノロジー 谷本 益久

1. はじめに

脱線係数は、脱線事故を防止するためだけでなく、車輪とレール間の状態を知る上で重要なパラメータである。特に急曲線における乗り上がり脱線については、平成12年に発生した地下鉄日比谷線中目黒事故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大きく依存すること、摩擦係数は状況により大きく変化することなどが指摘された¹⁾。

従来から、鉄道車両の走行安全性の確認のため、輪重・横圧測定により脱線係数が求められてきた。しかしながら、脱線係数を求めるためには、測定用の特別な輪軸を要するため、これまで新線開業や新形式車両導入時等、特定の場合にしか測定されてこなかったのが実情であった。

こうした状況を受け、筆者らは、営業車両による脱線係数の常時観測を目的として新しい測定法の研究開発を進めてきた。前報²⁾では、提案する測定法の原理と台上試験及び実車走行試験による検証等について報告した。このほど、提案する測定法が実用化され、営業車両による運用が開始されたので、その取組みを報告する。

2. 従来の脱線係数測定法²⁾

脱線係数は、図1に示すとおり、レール・車輪間に

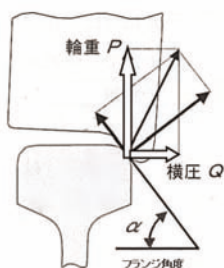


図1 レール・車輪間の力と脱線限界

働く力のうち、垂直方向の力である「輪重」Pと横方向力である「横圧」Qの比である Q/P により求められる。

急曲線通過中の台車では、図2に示すように、横圧は、レール・車輪間に発生するクリープ力の反力として発生するので、この間の摩擦係数に大きく依存する。一方、レール・車輪間の摩擦状態は時々刻々変化しているから、脱線係数も大きく変化しているものと思われる、外軌側脱線係数や内軌側摩擦係数を営業車などにより常時モニタできるようにになれば、安全上の効果は非常に大きい。

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。測定したい輪軸の数だけ特別な加工を施した輪軸を準備し、回転する輪軸から電気信号を取り出すためにスリップリング等を使用する必要があるため、特定の列車のしかも数ある輪軸のうち、代表する1～2軸程度の輪重・横圧のみを測定するのが通例である。摺動部のあるスリップリングなど、測定システム自身の耐久性に劣るため、営業車による常時観測には適用できなかった。

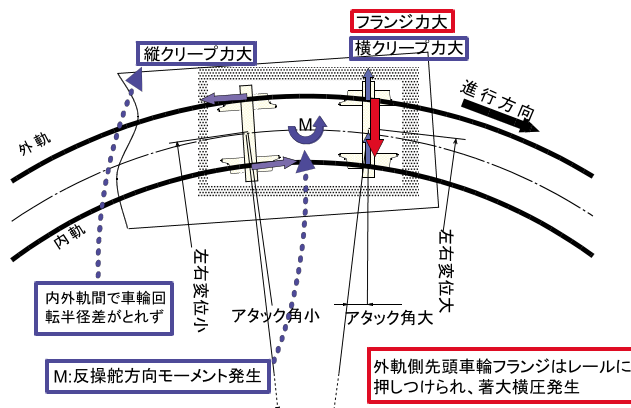


図2 急曲線通過中の台車の姿勢と作用力

3. 常時観測に用いる脱線係数測定法²⁾

3. 1. 輪重

輪重は、軸ばねたわみ量を測定し、軸ばねたわみ量と輪重との直線関係に基づき換算して求める。

3. 2. 横圧³⁾

台車側の軸箱に取り付けた渦電流式の非接触変位計により、横圧による車輪の曲げ変形量を直接検出する。具体的には、図3に示すように、車輪板部の曲げ変形量を板部の最外周部で測定する($\delta 3$)。

しかしながら、軸箱と輪軸にはガタがあり、軸箱～車輪間にも相対変位が発生する可能性があるため、式(1)によりこれを補正する。式(1)の第1項は車軸スラスト移動量(輪軸が軸箱に対してスラスト方向に移動すること)の補正であり、第2項は軸箱傾き量(軸箱が輪軸に対して傾くこと)の補正である。

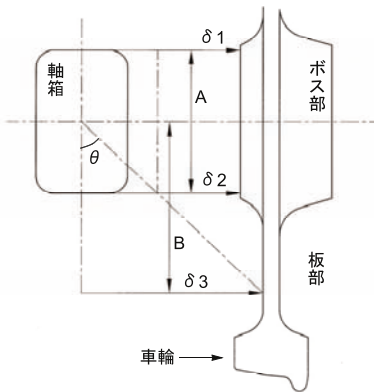


図3 新しい横圧測定法の原理

$$Q(\delta) = \delta 3 - \frac{\delta 1 + \delta 2}{2} + \frac{B}{A} \times (\delta 1 - \delta 2) \quad (1)$$

ここに、 $\delta 3$: 板部変位、 $\delta 2$: ボス下部変位、 $\delta 1$: ボス上部変位、 $Q(\delta)$: 横圧を推定するための軸箱/車輪間変位

4. これまでの取組み

4. 1. 常時観測用台車開発までの概要

開発のおおまかな流れは、以下の通りである。
 (1) 軸バネひずみや台車枠のひずみにより輪重を推定する方法について、既存の台車にセンサを取付け、実験的に検討した⁴⁾。(2) 車輪の曲げ変形量により横圧を推定する方法について、既存の台車軸箱を円すいころ軸受にするとともに車輪変位測定治具を取付ける改造を行い(図4参照)、台車試験機による曲線通過実験を実施した⁵⁾。(3) センサ支持金具の剛性強化のうえ、当該台車を用いた実車走行試験を行っ

たほか、従来測定法との違いを調査するため車輪の面外変形に関する有限要素法解析を実施した⁶⁾。

(4) 実際の営業車両に使用する目的で量産仕様台車(PQ モニタリング台車)が製作された⁷⁾。

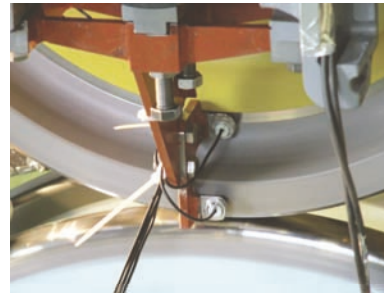


図4 横圧測定用センサの取付状況(台上試験)

4. 2. PQ モニタリング台車の概要

製作された PQ モニタリング台車を図5に示す。C種車輪(板部ストレート)を採用しているほか、ディスクブレーキの採用により車輪部の熱変形を防ぐ、車輪板部の横圧測定面は精密平面加工を施す、軸箱-車輪間のガタを極力小さくするために円錐ころ軸受を採用する等の、測定精度向上を図った設計となっている。

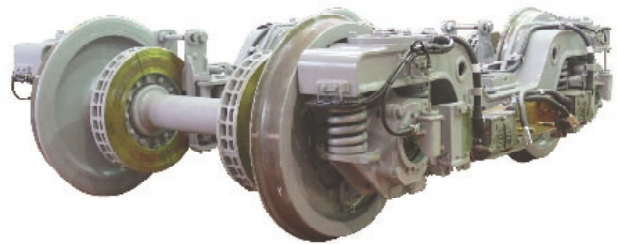


図5 PQ モニタリング台車

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6に示す。

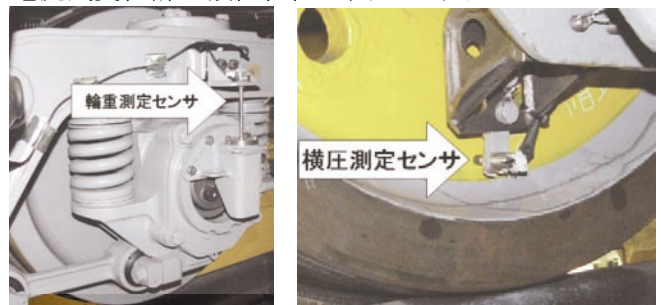


図6 輪重・横圧測定用センサ

5. 実用化までの取組み

5. 1. 実車走行試験

営業車両としての走行性能及び PQ モニタリング台車としての機能を確認するための走行試験を丸ノ

内線全線において実施した²⁾。なお、当該台車に従来の輪重・横圧測定用 PQ 輪軸を備え、従来法との比較ができるようにした。この試験結果から、営業車両による常時観測の実現性の見通しがほぼ得られたが、細かく見ると、横圧測定用変位センサが雰囲気温度変化の影響を受けていることがわかった。

5. 2. 台上試験

そこで、変位センサのほかに温度センサを併設することにより、温度変化の影響(約 0.2kN/deg)をソフトウェアにて補正することとし、台車試験機による PQ モニタリング台車の曲線通過実験を実施した。冷暖送風装置を使用して、0℃～40℃程度の範囲で横圧に対する温度補正の効果を確認した。

5. 3. 再走行試験

実車走行による検証試験を丸ノ内線全線において再度実施した。その結果、PQ 輪軸との横圧の差異は±2kN、脱線係数の差異は±0.1であり、雰囲気温度が変化した場合を含め、常時モニタリングの実用上必要な精度が得られたと考えられる。また、波状摩耗区間の横圧測定波形例を図7に示す。

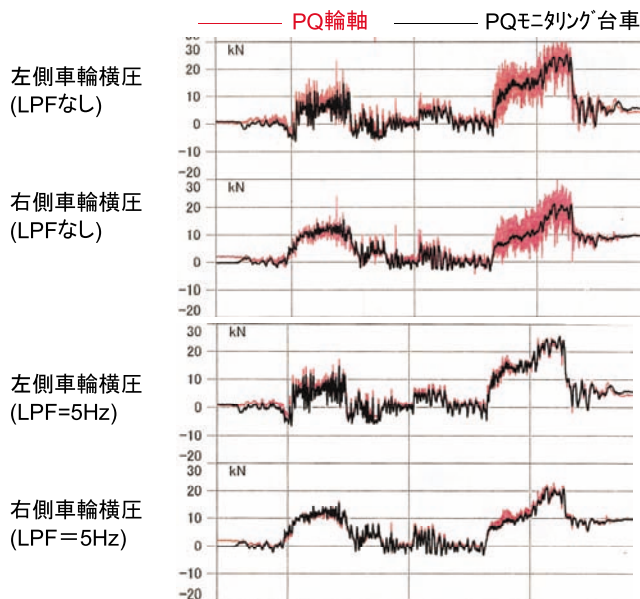


図7 波状摩耗区間における PQ 輪軸との比較

PQ 輪軸による測定値(赤線)は、上2本が LPF(ローパスフィルタ)なし、下2本が LPF=5Hz で処理を行った結果である。PQ モニタリング台車の測定値(黒線)は、PQ 輪軸の LPF=5Hz とほぼ一致し、輪重についても同様な現象が確認されたことから、PQ モニタリング台車では、輪重・横圧の高周波成分を除いた値が出力され、波状摩耗の影響を受けにくいことがわかる。

6. 営業線での運用⁸⁾

6. 1. 実システムの概略

PQ モニタリング台車は、平成20年7月末から営業線へ投入された。システムの概略を図8に示す。台車に設置したセンサからの信号は、コネクタ台を経由し、アンプ BOX ～モニタリング装置へ送られる。アンプ BOX において信号増幅等の処理を行った後、モニタリング装置において演算処理を行い、出力データが作成されるとともに、記憶メディアへの記録を行う。

6. 2. 横圧の較正及び0点調整方法

ピット線にて、軸箱をジャッキアップし車輪をわずかにレールから浮かせた状態で、車輪内側より油圧ジャッキにて荷重をかける。このとき、油圧ジャッキに取付けたロードセルにより荷重を測定するとともに、システムにより車輪変位量を測定し、荷重-変位関係から、横圧較正係数を求める。

ピット線(直線)にて、出庫側及び入庫側にそれぞれ走行し、後軸側となる車輪の横圧をそれぞれ0とする。なお、輪重については、別途静止輪重を測定し、その値をシステムの初期値として与えている。

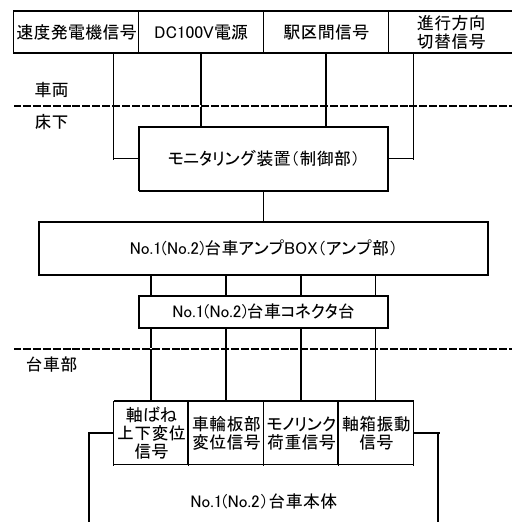


図8 PQ モニタリング台車システム概略

6. 3. 出力データの例

出力データは、進行方向先頭台車前軸の外軌脱線係数(Q/P)の最大値を曲線ごとに表示した一覧表(表1)の形で出力される。また、曲線全体に渡り測定値を記録しているため、図9のような波形での出力も可能である。なお、ヨーレートは、モニタリング装置内に設置したジャイロセンサの出力である。

表1 PQモニタリング台車出力結果例

時刻	進行方向	基準駅	曲線番号	曲線半径[m]	曲線方向	外軌側			内軌側			距離程 [km]	BTC~ [m]	速度 [km/h]	記事
						P[kN]	Q[kN]	Q/P	P[kN]	Q[kN]	Q/P				
1:06:47	B線	新宿	17.2	160	2									43	外軌最大地点
1:06:50														41	内軌最大地点
1:07:45	B線	新宿三丁目	16.1	850	2									37	外軌最大地点
1:07:45														37	内軌最大地点

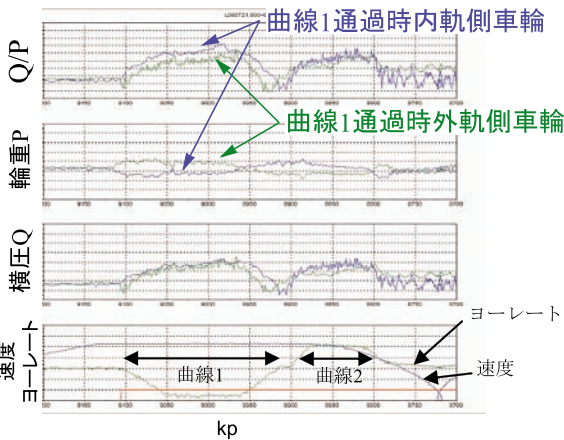


図9 出力結果例

営業線における測定データの一例として半径300mの曲線を対象に、曲線ごとに外軌Q/Pのデータ(1曲線につき約50データ)の頻度分布を求めた。その結果、図10に示す曲線Aのように、正規分布に近い傾向を示す曲線もあれば、図11のように脱線係数が低い値にばらついている曲線も見られる。曲線半径が同じであっても、曲線毎にレール塗油等の潤滑条件が異なるため、頻度分布が異なることが考えられる。したがって、モニタリングにおいては、脱線係数の最大値を監視するとともに、曲線毎に平均値等の推移をモニタすることが考えられる。

7. まとめ

営業車両による常時観測を可能とする新たな測定法の研究を進め、実用化の取り組みを報告した。

前報からの進捗をまとめると次の通りである。

- (1) 温度変化の影響をキャンセルする方法を検討し、検証を行った。
- (2) 実運用時の横圧の較正方法及び横圧の0点調整方法を見いだした。
- (3) これらの結果、常時モニタリングの実用上必要な精度が得られ、営業線での運用が開始された。
- (4) 営業時のデータの分析により、曲線毎にレール・車輪間の潤滑状況等が異なることが確認された。

今後の課題としては、日々取得される膨大なデータの解析の自動化が挙げられる。また、現在は記憶メディアの定期的な交換が必要であるが、将来的に

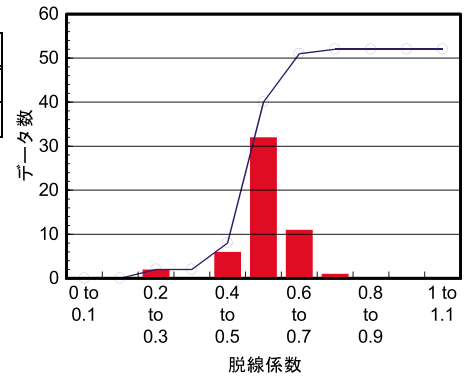


図10 曲線Aにおける脱線係数の頻度分析

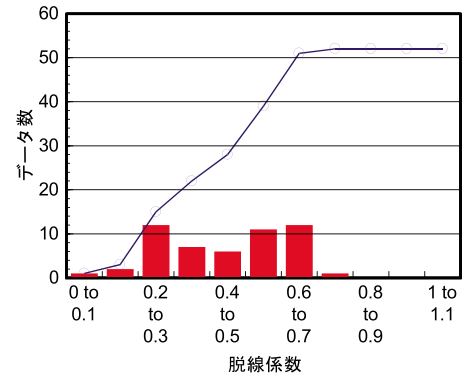


図11 曲線Bにおける脱線係数の頻度分析は無線通信を利用したデータの受け渡しを考えている。

本測定法の実用化により、これまでわからなかった脱線係数の統計的データが容易に得られるようになり、1日の脱線係数の時間帯による変動、年間を通じた季節的な変動といったことが、全ての曲線において把握可能である。脱線係数を常時監視できることから、安全性確保に有用であるほか、これらの統計的データは、レール・車輪間の潤滑の状況等を示すデータとして軌道の保守面での活用が期待される。

参考文献

- 1) 運輸省事故調査検討会、「帝都高速度交通営団日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書」、平成12年10月
- 2) 佐藤ほか；平成19年度交通研発表会講演概要，pp45-48, 2007.
- 3) 公開特許公報 特開2006-88967, 2006.
- 4) 松本ほか；J-Rail2003, pp195-196, 2003.
- 5) 松本ほか；J-Rail2004, pp347-348, 2004.
- 6) 松本ほか；J-Rail2005, pp153-156, 2005.
- 7) 佐藤ほか；J-Rail2007, pp639-642, 2007.
- 8) 清水、岩本；運転協会誌, No.595, pp18-22, 2009.