講演６．営業車両を用いた軌道状態常時モニタリング技術の開発とその活用

交通システム研究部　※大野 寛之　緒方 正剛　森 裕貴
鉄道認証室　佐藤 安弘　松本 陽（名誉研究員）
茨城大学　道辻 洋平　東京地下鉄(株)　谷本 益久
新日鐵住金(株)　品川 大輔　日鉄住金レールウェイテクノス(株)　長澤 研介

１．はじめに

鉄道車両の走行安全性に関わる指標として、脱線係数（台車先頭軸外軌車輪に加わる輪重 P と横圧 Q の比 Q／P）が用いられている。脱線係数は軌道変位やレールの支持状態、車輪／レール間の接触状態によって大きく変化することが知られている。これらの状態変化を適時適切に把握するため、営業線における脱線係数の常時観測が望まれていた。交通安全環境研究所では、台車メーカや鉄道事業者らとともに、従来とは異なる新たな測定手法を開発し、営業車両に搭載可能な軌道状態常時モニタリング技術の開発を進めてきた[1)]。実用システムとして開発された「PQ モニタリング台車」（Fig. 1）により、脱線係数の常時観測が実現し、継続的･長期的なデータ取得が可能になった。

PQ 輪軸を用いる従来の測定方法では、路線開業時や新型車両導入時などの極めて限られた機会にしか取得できなかったデータが、常時モニタリング技術により継続的に収集できるようになった。その結果得られた膨大なデータをいかに活用するかは今後の課題ではあるが、データ解析を行った一つの成果として、軌道変位や車輪／レール間の潤滑条件の時間変化を捉えることができた。これらのデータの解析手法の一例と、安全運行への活用方策について紹介する。

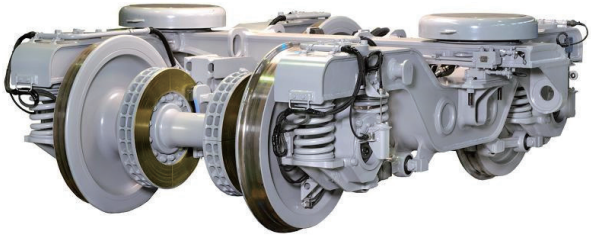

Fig.1 External view of the monitoring bogie

２．PQ モニタリング台車の概要

PQ モニタリング台車による輪重・横圧の測定方法は、従来の測定方法である PQ 輪軸を用いないことを大きな特徴とする。PQ 輪軸はセンサにひずみゲージを用いるため、PQ 輪軸にブレーキを作用させた場合には、摩擦熱により測定値が影響を受けてしまう。営業車両ではすべての輪軸にブレーキを作用させる必要があるため、営業車両を用いての脱線係数のモニタリングはできず、これまでは特別に仕立てた試運転列車でしか輪重・横圧の測定はなされなかった。

著者らはPQ輪軸を用いて車輪のひずみを測定するのではない、新たな輪重･横圧の測定方法として、台車側に設置したセンサを用いる手法を開発した[2)]。輪重の測定には台車軸ばねのたわみ量を計測する手法を用いる(Fig.2 左)。また、横圧の測定は車輪板部の微少な変形を非接触変位計(Fig.2 右)で捕らえ、誤差の原因となる軸受部のガタによる変位等を補正し、横圧によるひずみ量を測定する方法を開発した。さらにブレーキ時の熱の影響を受けないようディスクブレーキを採用することで、PQ 輪軸を用いた場合と同等の精度で、輪重･横圧の測定が可能となった。

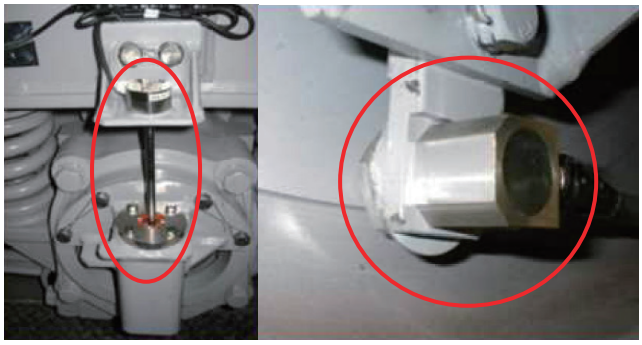

Fig.2 Sensors of PQ monitoring bogie

3．PQ モニタリング台車による測定結果

PQ モニタリング台車を装着した営業列車を導入することで、導入路線における輪重・横圧の測定は 1 日の内でも複数回行うことができるようになり、月単位、年単位ではこれまでの測定方法とは比較にならない膨大なデータを取得できることとなった。

Fig.3 に、ある路線の曲線部（R=160m，カント 125mm，スラック 13mm）で 1 ヶ月間に測定された脱線係数の抜粋を示す。各測定結果のグラフの形状はおおむね相似形だが、脱線係数の値は測定ごとに異なっていることが分かる。当該曲線部は塗油装置を用いた潤滑が行われており、また、塗油は間欠的に行われていることから、車輪／レール間の潤滑条件の違いにより脱線係数が変化したものと考えられる。

潤滑条件による脱線係数の変化とは別に、長期的な軌道条件の変化（レール摩耗による踏頂面の形状変化や軌道変位の発生等）による脱線係数の変化も考えられる。こうした変化を捉えるためには、日単位あるいは週単位の測定データを平均化し、長期的な変化のトレンドを追跡する必要がある。

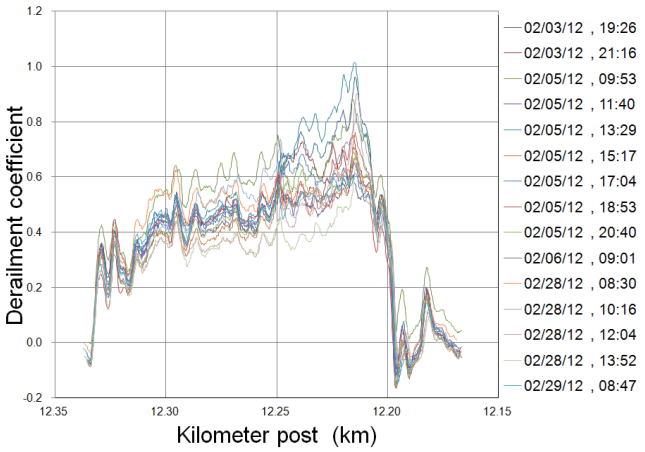

Fig.3 Measured data for derailment coefficients through a sharp curve (R=160 m)

4．測定結果の活用方策 [3]

4．1．PQ モニタリング台車の収集データ

PQ モニタリング台車は、時刻や走行位置・速度、輪重 P（全軸：左右）、横圧 Q（車端側軸：左右）等を取得できる。先頭軸外軌の脱線係数 Q／P と同時に内軌側の横圧・輪重比 κ を営業運転中に収集できる点が大きな特徴である。κ は急曲線の場合、車輪・レール間の摩擦係数にほぼ等しくなる [4]。

また、台車各輪の軸箱に設置した変位センサの測定値からは、軸距 1.9m の平面性変位を推定できる。 ここではこれを台車平面性変位と呼ぶ。

急曲線における脱線係数の傾向や時間変化について分析するためには、曲線ごとにデータを管理することが望ましい。そこで収集データについては、事業者の持つ曲線位置や曲線半径などの情報をまとめた路線のデータベースをもとに、曲線区間ごとに切り出すこととした。データ整理の方法として、曲線入口から出口までの連続データを「波形データ」、その曲線中で脱線係数が最大となるときの瞬間値を「帳票データ」として保存し、それらを Fig.4 のように曲線ごとのフォルダに分けて管理してすることとした [4]。

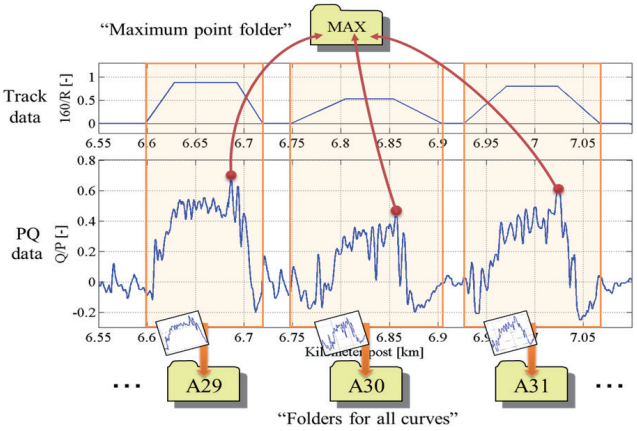

Fig.4 Image of data sorting and allocation

4．2．ツールによるデータ分析

PQ モニタリング台車を装備した営業列車を運用すると、日々大量のデータが蓄積される。これらのデータをいかに効率よく分析・表示するかが、実務面での課題となってくる。そこで著者らは数値解析ソフト MATLAB の GUI(Graphical User Interface)を用いた分析ツールを開発し、大量のデータを効率的に解決する手法の開発に取り組んだ。

分析ツールは誰にでも扱えるよう、GUI ベースのソフトウェアとして、MATLAB R2015 および MATLAB Compiler を使用して作成した。Fig.5 に分析ツールの基本画面を示す。画面はデータ入力部とデータ表示に分かれ，データ表示部は主に以下の 4 つのグラフを表示する。

①曲線半径ごとの最大脱線係数プロット
②外軌 Q／P，内軌 Q／P 波形（距離程ベース）
③その他の波形（距離程ベース）
④台車平面性変位と内軌 Q／P の関係

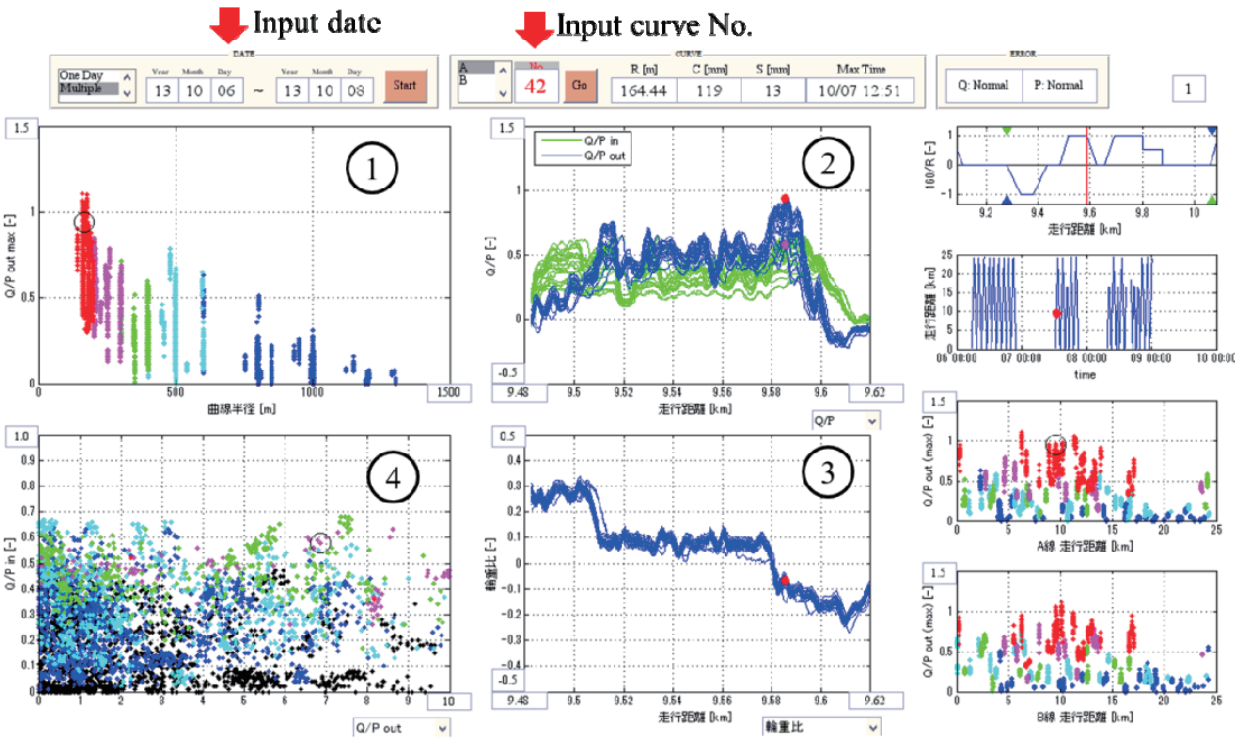

Fig.5 Display image of developed data analysis tool

①は曲線半径で整理された最大脱線係数を示している。このグラフから、脱線係数が高いデータを絞り込み、②と③のグラフで詳細を分析する。また、④のグラフから、高い Q／P の主要要因になると考えられる、内軌 Q／P と台車平面性変位のうち、どちらの影響が大きいかを大まかに把握することができる。

さらに、一つの曲線に注目し、当該曲線における最大脱線係数を日割りでプロットした結果を示すこともできる（Fig.6）。このグラフを見ると、この曲線では最大脱線係数が±0.2 程度変化していることや、月の前半に比べ後半の方が脱線係数の値が低下していることが分かる。こうした変化の原因をさらに調査するには、Fig.6 のデータを別な切り口で分析する必要がある。一例として、横軸を内軌 Q／P 最大値、縦軸を外軌 Q／P 最大値としてプロットしたグラフを Fig.7 に示す。脱線係数の高い時期を○、低い時期を●で示す。このグラフから、内軌 Q／P と外軌 Q／P は強い相関関係があることが分かる。このことから、この曲線における外軌 Q／P の変化は、内軌 Q／P の変化が原因となった可能性が考えられる。

5．測定結果の理論解析への取組

以上に示したとおり、脱線係数の変化には車輪／レール間の摩擦条件が大きく影響するものと考えられる。そこで摩擦条件の違いが脱線係数にどのような影響を与えるかを導き出すため、台上試験とシミュレーションを用いて理論的な解析 [5]を行った。

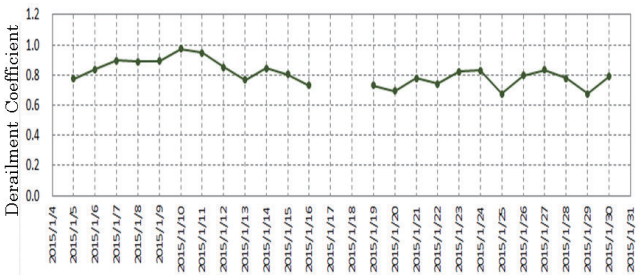

Fig.6 Daily changing of maximum Q/P in one curve

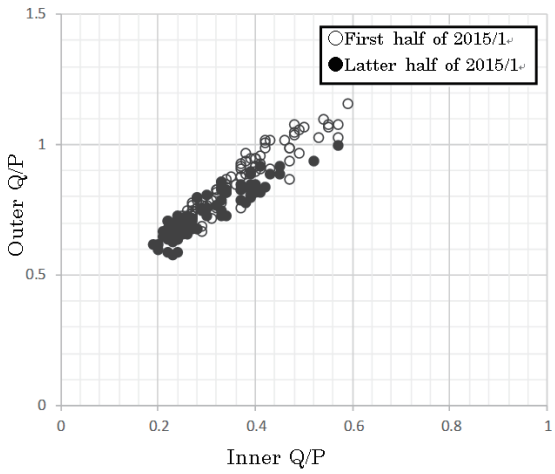

Fig.7 Inside Q/P vs outside Q/P

台上試験は交通安全環境研究所が持つ台車試験設備を用いて実施した。それぞれの車輪が乗る軌条輪円周にグリスを塗布することで車輪／レール間の摩擦係数を変化させる。それぞれの潤滑域は、先頭軸外軌フランジのど元を対象とした潤滑域、先頭軸内軌頭頂面の潤滑域、後軸内軌頭頂面を潤滑域とした。また、Table 1 に示すとおり、4 輪が乾燥状態（条件 No.1）、先頭軸外軌輪フランジ潤滑（条件 No.2；後軸はフランジ接触しないので潤滑されない）、両軸内軌輪および先頭軸外軌輪フランジ潤滑（条件 No.3；同前）、両軸内軌輪のみ潤滑（条件 No.4）の 4 条件で実験を行った。潤滑には一般的に使用されているレール塗布用のグリスを用いた。

数値解析は台上試験と同等の条件として、軌条輪回転試験装置と半車両からなる解析モデルを汎用マルチボディ・ダイナミクス解析ソフト SIMPACK RAIL Ver.9.9 を用いて構築した。数値解析においては、グリスを塗布した状態の摩擦係数を 0.1 とし、乾燥状態を 0.4 と設定している。Fig.8 に曲率（定常曲線における曲線半径の逆数）と脱線係数の関係を潤滑条件別に整理した結果を示す。図に見られるように、数値解析と実験結果は各条件においてよく一致している。

摩擦係数の値は限界脱線係数に影響することから、車輪／レール間の摩擦条件の正確な把握は極めて重要である。PQ モニタリング台車による取得データの解析を基に、車輪／レール間の適切な摩擦条件の管理を可能とするツールの開発に結びつけたい。

6．終わりに

PQ モニタリング台車を用いた軌道状態の常時モニタリングにより、これまでの測定では分からなかった軌道状態の時間変化が観測可能となった。また、常時モニタリングにより収集されたビッグデータの詳細を解析することで、新たな知見に結びつくことが期待される。今後の課題としては、常時モニタリングの対象とする路線の拡大に向け、監視・分析手法の標準化が考えられる。そのために、収集される大量のデータの中から注視すべき点を提示することや、高い脱線係数の原因推定などを表示する等、分析業務を補助するシステムを開発し実用化を図っていきたい。

参考文献

1) 大野寛之，“脱線係数の常時モニタリング・システム”，平成 18 年度交通安全環境研究所講演会講演概要集，pp.15-24（2006）
2) 大野寛之，“脱線係数常時測定可能台車の開発”，JREA，第 54 巻 11 号，pp.52-55 (2011)
3) 岩本厚 他，“PQ モニタリング台車による営業線データの報告とその活用方法について（第 4 報）”，鉄道技術連合シンポジウム（J-Rail）講演論文集，p3105（2015）
4) 松本陽，“急曲線における諸問題とその解決技術”，鉄道車両と技術，No. 173，pp. 22-32 (2011)
5) 石井翔 他，“台上試験と数値解析を活用した台車４輪の摩擦係数差が脱線係数に及ぼす影響の分析”，日本機械学会 2016 年度年次大会 DVD 講演論文集，G1800102 (2016)

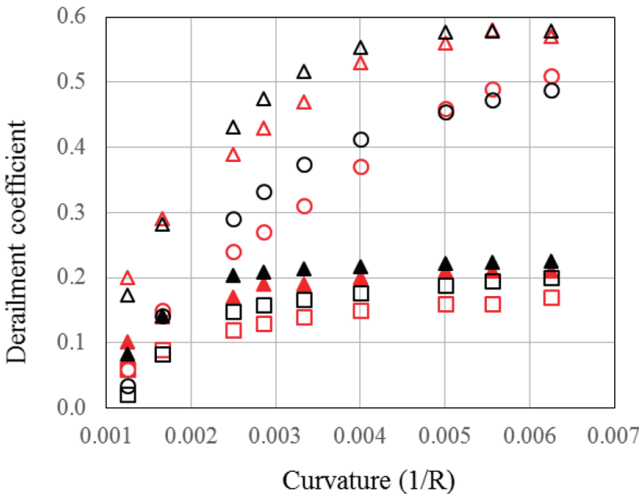

Fig.8 Comparison of derailment coefficients

Table1 Lubrication conditions and assumed value of friction coefficients

Condition	Markers (simulation)	Markers (experiment)	Leading axle		Trailing axle	
			Outside rail	Inside rail	Outside rail	Inside rail
No.1	○	○	0.4	0.4	0.4	0.4
No.2	△	△	0.1	0.4	0.4	0.4
No.3	▲	▲	0.1	0.1	0.4	0.1
No.4	□	□	0.4	0.1	0.4	0.1