

# 地上 PQ 測定による営業線データの解析結果報告

齋藤 拓也\*, 中島 正貴, 中里 祐一, 清水 忠, 鹿田 敬司 (東京地下鉄)

佐藤 與志, 下川 嘉之 (住友金属)

谷本 益久 (住友金属テクノロジー)

Report of the commercial train running data measured by strain-gauges attached to the rail

Takuya Saito\*, Masayoshi Nakajima, Yuichi Nakasato,

Makoto Shimizu, Keiji Shikata, (Tokyo Metro Co.,LTD.)

Yoshi Sato, Yoshiyuki Shimokawa, (Sumitomo Metal Industries,LTD.)

Masuhisa Tanimoto, (Sumitomo Metal Technology,INC.)

It is very important to measure lateral and vertical contact forces between wheel and rail for evaluating curving performance and safety against derailment. In this paper, we introduce the newly developed real-time monitoring system of these wheel-rail contact forces of all commercial service vehicles. These forces are measured by strain-gauges attached to the rail. The results of monitored derailment coefficients in certain curve indicate very important wheel/rail interaction problems that curving performance of vehicles depend heavily upon interactions between wheel tread profiles and oil lubrication from track side.

キーワード：鉄道 脱線係数 車輪/レール接触 接触力 測定

(railway, derailment coefficient, wheel/rail contact, contact force, measurement)

## 1. はじめに

鉄道において、車輪とレール間に発生する力を観察することは、車両性能や脱線に対する安全性を評価する上で大変重用である。台車やバネ系、またそれらを制御するシステムに関係する装置の整備不良や故障は、脱線を伴う重大な事故につながってしまうが、営業線にて車両走行状態の異常を検知することができれば、未然に事故を防ぐことが可能となる。

そこで著者らは、営業線レールに歪みゲージ (Fig. 1) を貼り付け、そこを通過するすべての営業列車の車輪とレールに発生する力を測定し、総合指令所・本社・検車区へ伝送することで、脱線係数 (車輪とレールに発生す

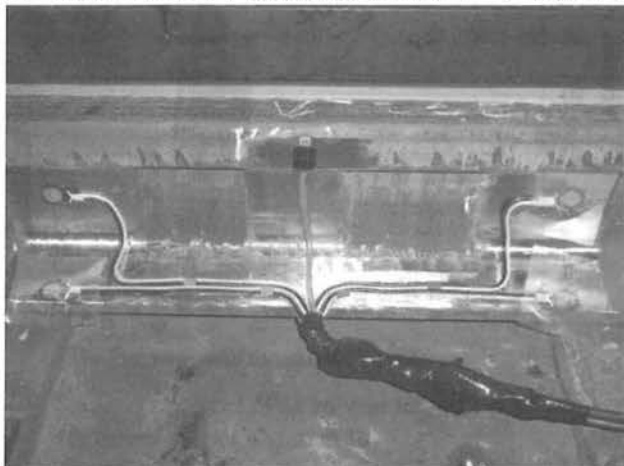


Fig.1 strain-gauges attached to the rail

る横圧と輪重の比)を常時監視することが可能なシステムを開発した。現在、システムを仮稼働している段階であり、今後のシステムの本稼働に向けて、状態監視装置設置点毎のデータの傾向等を解析している。

## 2. 車両走行状態監視装置の概要

**(2・1) 地上 PQ 測定点** 地上から車両を監視するにあたっては、高い外軌 Q/P の値を繰り返し観測できる急曲線に設置することとし、また、安定した値を観測できるようにするため、出口緩和曲線中にするか、円曲線中に設置するかを検討を行った。円曲部では、左右の輪重がおおむね安定して同程度に観測されるのに対して、緩和部では、同一編成であるが、平均値から 30% 近く変動する軸位があった。このことから設置箇所別の条件整理をした結果、特定曲線における Q/P 最大値を測定するよりは、安定した Q/P を測定して車両の故障モードを推定することに主眼を置き、円曲線部に設置することにした。

また鉄道車両の脱線係数は台車の先頭軸で大きくなる。このため、車両全軸の走行安全性を評価するためには、A 線 (上り線) と B 線 (下り線) の両進行方向で測定する必要がある。また、曲線の外軌側で脱線係数が評価されるため、右カーブ、左カーブの両側の曲線で測定する必要がある。その結果、一つの営業路線で少なくとも 4 箇所の曲線に本装置を設置する必要がある。また、測定にあたってはできるだけ半径が小さい曲線で、しかも安定した輪重や横圧が発生する曲線中央部の測定が望ましい。この仕様を満足する地上 PQ 測定点の検討を行い、東京メトロ全路線に地上 PQ 測定を行う車両走行状態監視装置が設置された。

**〈2・2〉全体システム概要** 本システムは Fig.2 に示す軌道脇に設置した測定装置と伝送を行う通信網、及び中央でデータ処理と保存を行う中央装置から構成される。測定装置では、列車通過時に、内外軌の輪重 P、横圧 Q、および内軌レール振動を測定し、編成番号情報を付加して、中央装置に送信する機能を持っている (Fig.3)。中央装置では、測定されたデータから、速度、ピーク抽出を行い、車軸ごとのデータとし、路線・型式・次車 (車両製造ロット)・号車で一意となる PQ 分類 ID ごとに、軸位別に群として統計処理される。現在は試験運用中で、計算機の性能も勘案し、概ね過去 10 日間程度のデータを統計対象としている。

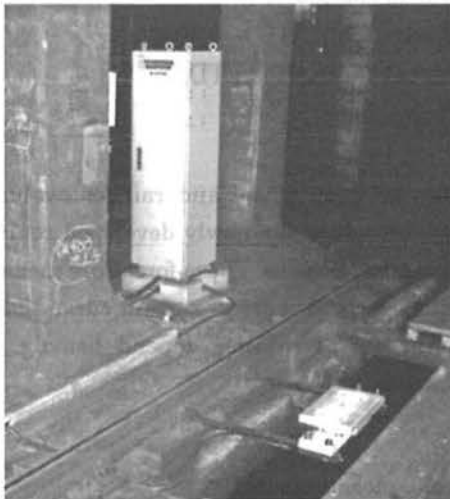


Fig.2 Monitoring Device

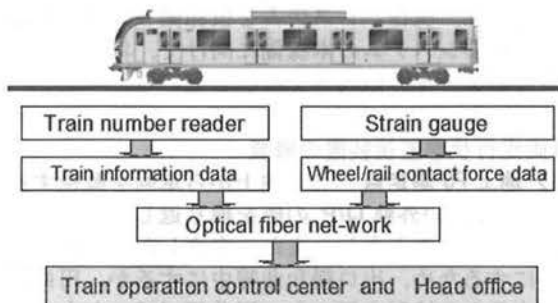


Fig.3 Monitoring system

**〈2・3〉異常値判定** 最もベーシックな異常値判定方法は車輪のフランジ角度より求められるナダルの式にて算出された目安値と測定値を比較することである。まずは測定された脱線係数が目安値を超過していないかを確認し、超過していれば脱線防止ガードを設置するなどの対処を行う。次に目安値以下の値において、車両の故障を検知するための方法であるが、測定地点毎のデータを統計処理することにより、測定されたデータと統計データを比較して、正常であるか否かを判定する方法を検討した。本システムでは正規分布の考え方 (Fig. 4) に従い、測定地点毎に脱線係数の平均と標準偏差  $\sigma$  を求め、異常値判定の閾値を「平均値 +  $n\sigma$ 」で設定することができる。

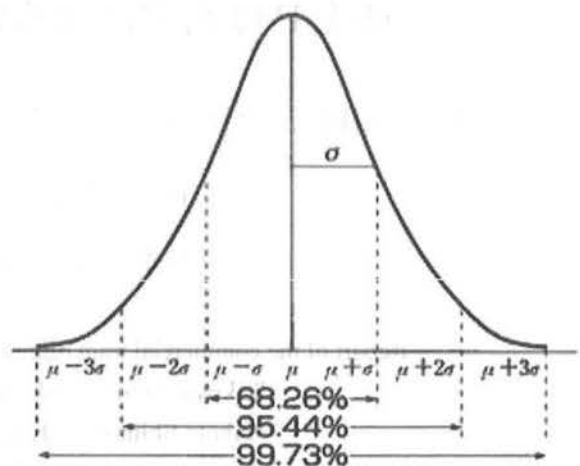


Fig.4 Normal distribution

### 3. 地上 PQ 測定データ

**〈3・1〉脱線係数のヒストグラムの比較** Fig. 5 に車種 A の脱線係数ヒストグラムを、Fig. 6 に車種 B の脱線係数ヒストグラムを示す。どちらのヒストグラムも同じ測定点のものであり、各車両の前台車・前軸の 1 日分のデータである。

Fig. 5 のヒストグラムは概ね正規分布に準拠するような傾向にあるため、上記の異常値判定方法が適用できる可能性がある。車種 A の脱線係数の平均値が 0.65、標準偏差  $\sigma$  が 0.085 であるため、閾値を仮に平均値 +  $3\sigma$  とすると、0.90 が閾値となり、ナダル の式より求められる目安値 1.14 よりも厳しい評価となるが、実運用上適切な閾値であるか検討を進める必要がある。

一方 Fig. 6 の車種 B のヒストグラムを確認すると正規分布とはかけ離れた形状をしているため、正規分布の異常値判定方法を適用することができない。同じ地点で測定しているにも関わらず、車種が違うことによって分布が異なる理由について考察と調査を行った。

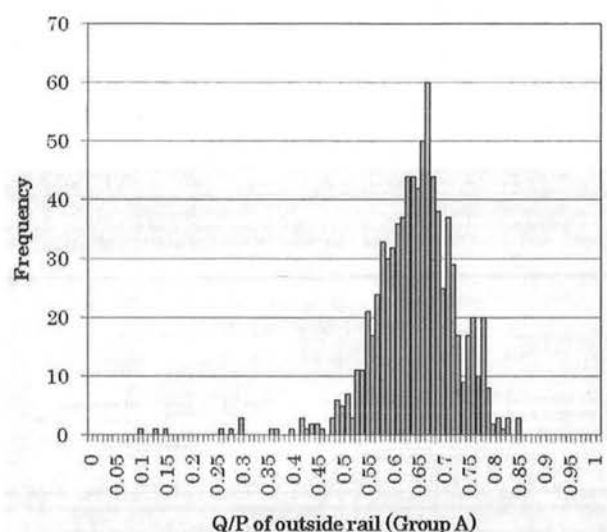


Fig.5 Frequency of Q/P of outside rail (Group A)

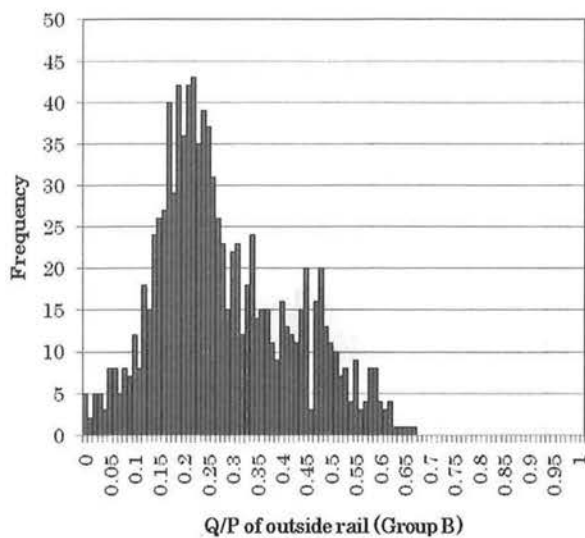


Fig.6 Frequency of Q/P  
of outside rail (Group B)

**〈3・2〉 潤滑による影響** 脱線係数は軌道の潤滑状態に大きく依存することから、車種AおよびBに対して潤滑状態と脱線係数の関係を調べた。また、曲線部において内軌側の車輪フランジはレールと接触しないことから、内軌 Q/P を潤滑の指標として利用した。Fig. 7 に車種A, Fig. 8 に車種Bの内軌 Q/P と外軌 Q/P の関係を示す。なおこのデータは Fig. 5 および 6 にて使用したものと同一である。

Fig. 7 を見ると、内軌 Q/P が 0.6~0.8 までの範囲で集中的に分布していることが認められる。一方 Fig. 8 の車種Bでは内軌 Q/P が 0.15 から 0.8 までの間で広く分布していることが確認できる。後述するように車種Aは軌道側から潤滑の影響をほとんど受けていないため、脱線係数のヒストグラムは比較的正規分布に近くなるが、車種Bについては軌道側から潤滑の影響を多分に受けているため、脱線係数のヒストグラムが正規分布から大きく外れたと考えられる。

**〈3・3〉 踏面形状の差異による影響** それでは何故車種Aと車種Bでここまで内軌 Q/P の分布が異なるのか。もちろん車種が異なるため、台車形式や軸ばね剛性などのパラメータは異なるが、レールからの力の伝達はずっと最初に車輪で行われるため、車輪踏面形状は非常に重要な要素である。車種Aはフランジ角度70度の「円錐踏面」を使用しており、一方の車種Bはフランジ角度70度の「円弧踏面」を使用している。踏面形状の差異による内軌 Q/P への影響を把握するため、現地調査を行った。

曲線中の車輪/レール接触位置を調べるため、レール踏面にカラーチェックを塗布し、車両が通過後にその跡を確認した。Fig. 9 に円錐踏面と円弧踏面の走り位置を示す。Fig. 9 より車種Aの円錐踏面はレールのゲージコーナー側で接触しており、車種Bの円弧踏面はフィールドコーナー側で接触していることが確認できる。この曲線の入り口には塗油器が設置されており、内軌側の塗油器はレールのフィールドコーナー側に設置されたトングからグリスを吐き出す仕組みになっている。このため、フィールドコーナー側を走行する車種Bは塗油の影響を受けやすく、車種Aはゲージコーナー側を走行するため、塗油の影響を受けづらいということが推定される。

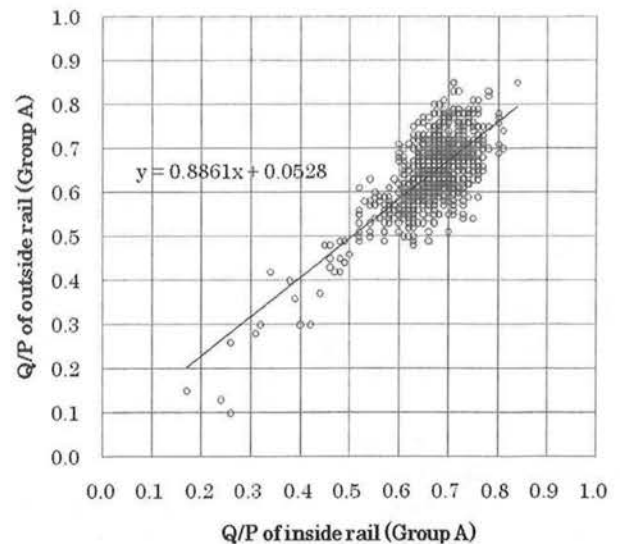


Fig.7 Relation between Q/P of inside rail  
and that of outside rail (Group A)

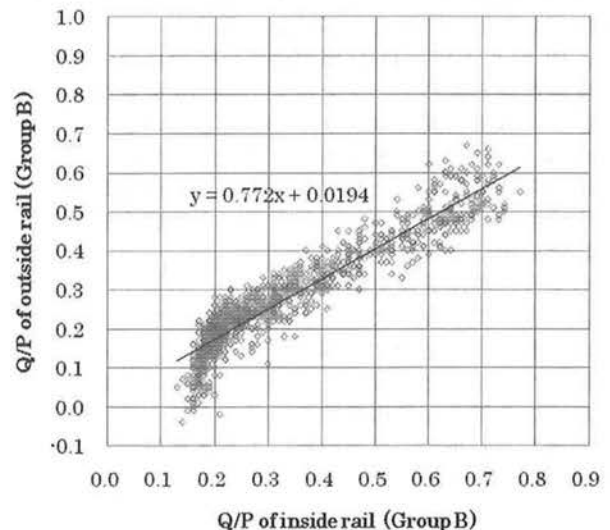


Fig.8 Relation between Q/P of inside rail  
and that of outside rail (Group B)

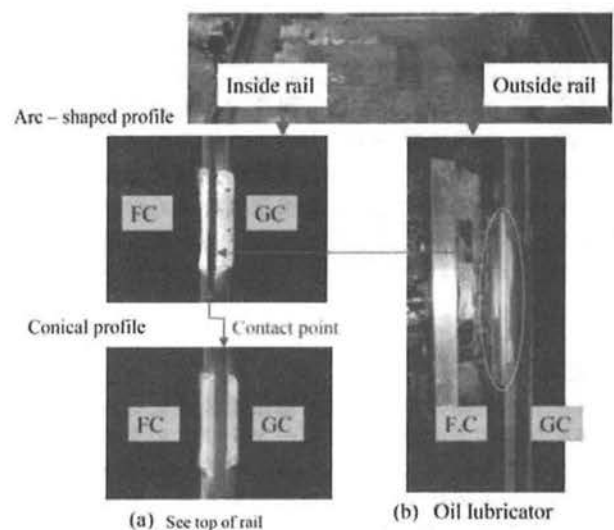


Fig.9 Contact Point of Arc-shaped profile  
and Conical Profile Wheel

### 〈3・4〉 摩擦調整材使用曲線におけるヒストグラム

上記のように、脱線係数は内軌レールの潤滑状態に大きく依存するため、潤滑状態によって脱線係数のヒストグラムは正規分布に近いものや正規分布から解離するものが発生する。

ほとんど無潤滑であればヒストグラムは正規分布に近づくが、内軌 Q/P が高ければ高いほど脱線係数も高くなるため、走行安全性的には良い状況ではない。しかしながら、内軌レールに取り付けられた塗油器はレール波状摩耗の抑制やキシリ音対策を目的に作られた装置であるため、車輪/レール間の潤滑状況を理想的な状態に管理することは系統的に難しい。また異種踏面が走行するような路線においては、塗油器のトングの設置方法の制約があるため、円錐踏面の接触位置まで油を伸ばすことは機械的に困難である。

これらの問題を解決するツールとして摩擦調整材が考えられる。車上に搭載された噴射装置からレール頭頂面全体に摩擦調整材を噴射するシステムであるため、曲線全体を一樣に管理することができ、なおかつレール頭頂面を狙って噴射するため、円錐・円弧踏面の両方の接触位置に対して対処することが可能である。

Fig. 10 および Fig. 11 に摩擦調整材噴射曲線に設置された状態監視装置のデータを示す。Fig. 10 を見ると内軌 Q/P を 0.3~0.5 の間でコントロールできていることが確認できる。これにより脱線係数の値も曲率半径 130m でありながら低く保つことができており、脱線係数のばらつきも小さい。Fig. 11 のヒストグラムを確認すると正規分布に近い形になっている。

このように潤滑管理を確実にを行うか、もしくは潤滑がほとんどされていないような状況下においては、軌道側からの影響がないため、脱線係数のヒストグラムは正規分布に近づくと考えられる。しかしながら、塗油の影響を受けている場合は脱線係数のヒストグラムは正規分布から乖離してしまい、正規分布による異常値判定が使用できないことが分かった。

### 4. さらなる異常値判定方法の検討

脱線係数のヒストグラムが正規分布から解離するものに対しては、別の異常値判定方法を検討する必要がある。脱線係数のばらつきは Fig. 7 のように内軌 Q/P の変化により、ある程度の線形性を持って変化しているため、異常値判定の評価指標の中に内軌 Q/P を含めることも考えられる。しかしながら、この場合でも車両に故障が発生した際に、脱線係数の値がどのように変化するかを把握する必要があり、現在東京大学殿や東京理科大学殿のご協力を得て、理論検討や実験検証等を進めながら、地上 PQ データから車両の故障モード（自動高さ調整弁、差圧弁などの故障）の推定を行う仕組みの検証を行っている。

### 5. まとめ

東京メトロ全線に車両走行状態監視装置を導入することで様々な条件下の地上 PQ データをリアルタイムで取得することが可能となった。このデータより、車輪/レール間の潤滑が脱線係数に大きな影響を与え、車両の異常値を判定するためには不可避な要素であることが分かった。車両の走行安全性向上のため、高精度の異常値判定方法が求められる。異常値判定方法の確立に向けて、関係各位のご協力のもと、調査を鋭意進めて行く。

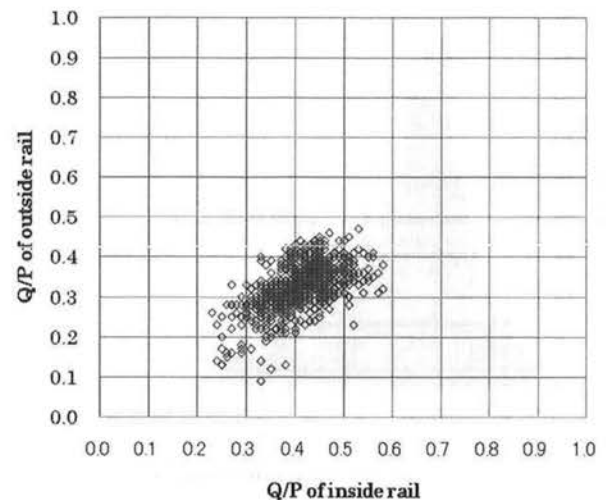


Fig.10 Relation between Q/P of inside rail and that of outside rail

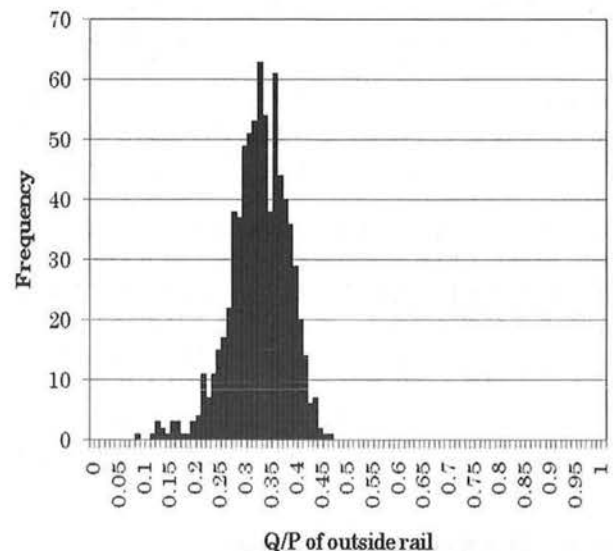


Fig.11 Frequency of outside rail

### 文 献

- (1) 清水, 中島, 齋藤: “東京メトロ営業線車両の脱線係数常時モニタリング”, 鉄道車両と技術 No. 167, P15-23(2010)
- (2) M.TANIMOTO et al.: “Monitoring System of Derailment Coefficient with Sensor-equipped Rail in Service Line”, Bogie 10, (2010)