

# 1802 PQ 輪軸を用いない車輪／レール接触力の測定方法 (第4報)

## (PQ モニタリング台車の営業線使用)

[機] 田口 弘史, 清水 忠, ○齋藤 拓也 (東京地下鉄)

佐藤 興志, 大木 康孝, 小坂田 潤 (住友金属)

[機] 谷本 益久 (住友金属テクノロジー)

### Assumption of Lateral/vertical/rail-interaction-force by simplified method

(4<sup>th</sup> report ; Advanced research in new measuring method of derailment coefficient)

Hiroshi TAGUCHI, Makoto SHIMIZU, Takuya SAITO (Tokyo Metro)

Yoshi SATO, Yasutaka OHKI, Osakada Jun(Sumitomo Metal Industries)

Masuhisa TANIMOTO (Sumitomo Metal Technology)

A new measuring method introduced in this paper can measure contact forces between wheel and rail without special wheelsets with slip rings or telemeters. In this method the lateral contact force is measured from the lateral distortion of wheel measured by several non-contact gap sensors. The measured values are small, but accurate value of lateral force can be calculated by the compensation of axial movement and inclination of wheelset. Normal and longitudinal contact forces are also measured from the strain of parts of the truck except wheelsets. According to the results of full-size truck stand tests and train running tests, we have verified that the new method has sufficient accuracy of measuring compared with conventional methods.

*Keywords:* Railway, Derailment coefficient, Wheel/rail contact, Contact force, Measurement

## 1. はじめに

車両の走行安全性は、新線開業や路線延伸、新形式車両導入時等の節目に終車後の脱線係数測定によって評価することが一般的である。しかしながら、更なる安全性の向上のためには、脱線係数測定の実施頻度を増やし現状の車両および軌道状態での走行安全性評価を行うことや、理想的には営業時間中に常時脱線係数測定を行い、状態の変化や異常値の早期発見等リアルタイムで走行安全性を確認・管理できるシステムを構築することが有効であると考える。

このような考えにありながら、車輪に貼り付けた歪ゲージにより車輪の歪量を計測し、輪重・横圧を推定するPQ輪軸を用いた従来の測定方法では、その耐久性から営業線での常時測定は難しい状況にあった。具体的には、歪ゲージの測定用配線を車軸の中央に貫通させる必要があり、長期的には車軸の強度が問題となることや、車輪のひずみ信号を回転系である輪軸から静止系である車上の測定器に伝達するために使用する、スリップリングの接点部分の摩耗が問題であった。

そこで東京メトロでは、交通安全環境研究所、住友金属、住友金属テクノロジーと共同で、脱線係数の常時監視を目的に、台車枠等の静止系から簡易的に脱線係数を測定する方法を検討した。そして、輪重は軸バネのたわみ量を磁歪式変位計により測定し、横圧は渦電流式の非接触変位計により車輪板部の変位を測定することで、強度・耐久性の問題を解決し、脱線係数を測定する新手法を確立した。<sup>1)</sup>

著者らが開発した測定方法の妥当性を検証するために実施した、交通安全環境研究所の台上試験機による曲線通過実験および本線路での走行試験の結果から、本測定手法の有用性並びに技術的な実現性が確認されたことから、実際の営業車両で使用できる量産仕様台車を製作し、平成21年1月より丸ノ内線車両第3車両(T車)へ2台車装着し、営業使用を開始している。<sup>2)</sup>

本報告では量産使用PQモニタリング台車のシステム概要と営業線におけるPQデータについて報告する。

## 2. 新しい輪重・横圧推定方法

### 2.1 輪重推定方法

台車枠等の静止系にひずみゲージや各種センサを貼り付けて輪重を推定するためには、その計測値が、種々の外力(横圧、力行・制動力等)に対して影響を受けないことを考慮する必要がある。これらの外力の影響を除外するために、可能な限り車輪に近い位置で輪重相当信号を検出することを検討した結果、①軸ばねに発生するひずみ・たわみを計測する方法②台車枠側梁に発生する上下ひずみを計測する方法について検証を行った。いずれも静的には良好な直線性があり問題はないが、歪ゲージの耐久性が課題となることから、耐久性・測定精度の高い磁歪式センサを用いて台車軸バネのたわみ量を計測する方法を採用することとした。<sup>1)</sup>

### 2.2 横圧推定方法

PQ輪軸を用いた従来の横圧測定方法は、横圧により変

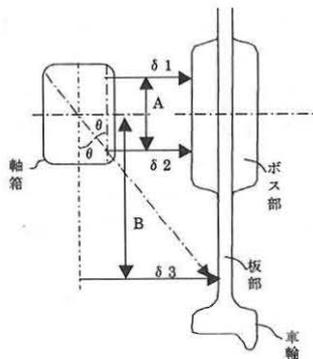
形する車輪板部の変形量を、板部に貼り付けたひずみゲージにより検出するものであるが、著者が採用した方法は、その変形量を軸箱側から非接触式変位計により検出するものである。測定原理は単純であるが、検出される変位量は最低 $5\mu\text{m}$ 程度の精度を必要とする。これは変位計の分解能 $2\mu\text{m}$ に対しては可能な値であるが、センサ取付等に起因する誤差やノイズには十分注意する必要がある。そこで横圧推定値は測定精度向上のために、軸箱-車輪間の相対変位を考慮し、補正を行っている。補正量は2つに大別される。1つ目は、車軸を支持するベアリングのスラスト隙間などによって輪軸が軸箱に対してスラスト方向に移動する量 $\delta 4$ 、2つ目は、台車枠にかかる横方向力などにより、軸箱が輪軸に対して傾く量 $\delta 5$ である。車輪と軸箱の相対的な位置関係を示したものが図1であり、補正後の板部変形量 $\delta$ は次式で表される。<sup>1)</sup>

$$\delta 4 = (\delta 1 + \delta 2) / 2 \dots\dots\dots(1)$$

$$\delta 5 = B \cdot \tan \theta = (B/A) (\delta 2 - \delta 1) \dots\dots\dots(2)$$

$$\delta = \delta 3 - (\delta 4 + \delta 5) \dots\dots\dots(3)$$

$$= \delta 3 - (\delta 1 + \delta 2) / 2 - (B/A) (\delta 2 - \delta 1) \dots\dots\dots(3)$$



$\delta 1$  : 車輪ボス部上部変位                       $\delta 2$  : 車輪ボス部下部変位  
 $\delta 3$  : 車輪板部変位                              A : ボス部設置上下センサ間距離  
B : 車軸中心~車輪板部設置センサ間距離  
 $\theta$  : 軸箱~車輪間の相対傾き角

Fig.1 横圧測定法の原理

### 3. PQモニタリング台車概要

#### 3.1 量産仕様PQモニタリング台車 (FS574 台車)

PQモニタリング台車の外観を図2に示す。東京メトロの他の台車形式との大きな違いとして、横圧検知のために、C種車輪(板部ストレート)およびディスクブレーキ(軸マウント式)を採用していることが挙げられる。車輪板部の横圧測定面は表面粗さやうねりによる測定誤差を小さくするため精密平面加工を施す、ディスクブレーキの採用により車輪部の熱変形を防ぐ、上述の軸箱-車輪間のスラスト方向移動量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。<sup>2)</sup>

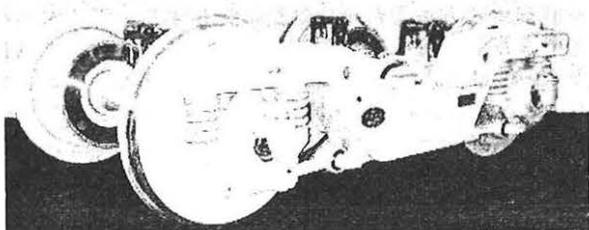


Fig.2 量産使用PQモニタリング台車

### 3.2 システム概要

図3にシステム概略を示す。台車に設置した各センサ(図4)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、記録メディアへの記録を行う。

また測定項目は4項目あり、①輪重を推定するための軸ばね上下変位、②横圧を推定するための車輪板部変位、③車輪/レール間の潤滑状態を推定するためのモノリンク荷重、④レール波状摩耗の有無を検知するための軸箱上下振動を測定している。なお脱線係数は進行方向先頭台車の前軸にて測定をしている(図5)。

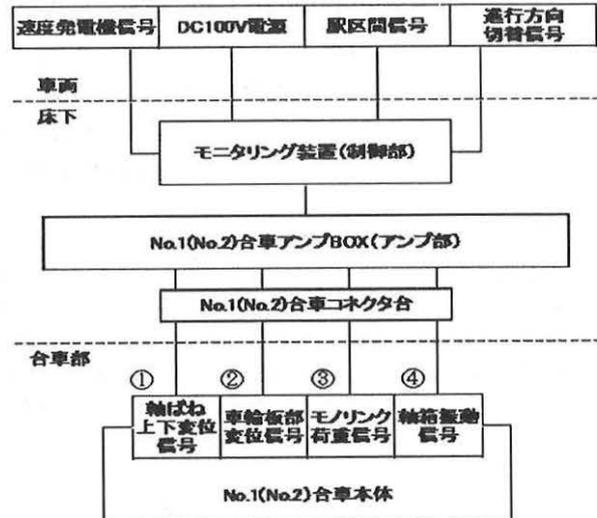


Fig.3 システム概要

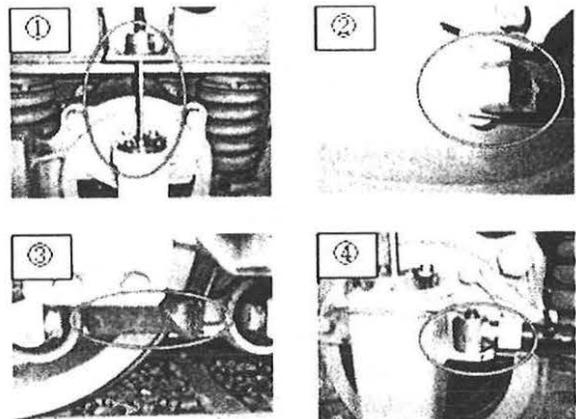


Fig.4 各種センサー

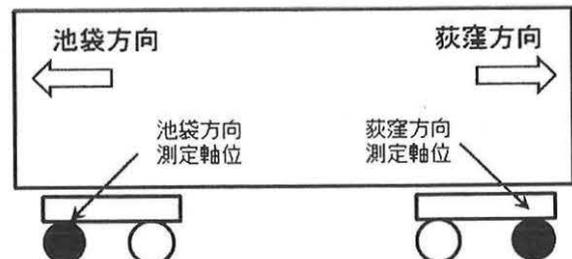


Fig.5 脱線係数測定軸位

#### 4. PQ モニタリング台車の測定精度について

##### 4.1 横圧の較正方法と0点調整方法

ピットにて軸箱をジャッキアップした状態で、車輪内側より油圧ジャッキにて負荷した時の荷重と車輪変位量を測定し、横圧較正係数を求める。

PQ 輪軸本体の横圧較正を実施した部位8ヶ所にてPQ モニタリング装置の横圧較正を実施した。測定上の誤差を最小限にするため、下記方法で実施した。

- (a)10kN 毎に 50kN まで測定を行い、各部 2 回測定を実施
- (b)測定した各部位の平均値に対し、中間 12 点のデータを有効値として平均したものを横圧較正係数とした (表 1)

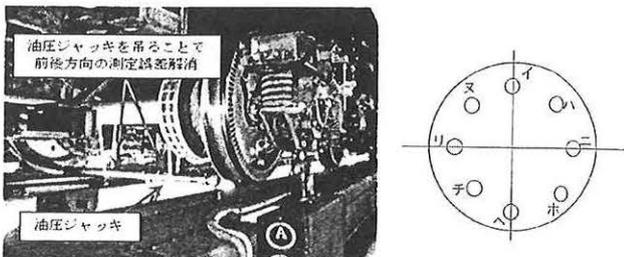


Fig.6 横圧較正方法と車輪の較正点

Table1 横圧較正結果

No	測定箇所	部位 ( $\mu\text{m}/\text{kN}$ )		平均との相違 (%)	
		7 位	8 位	7 位	8 位
1	イ	6.059	5.530	1.1	-2.6
		6.011	5.520	0.3	-2.8
2	ハ	5.979	5.704	-0.2	0.4
		6.002	5.696	0.2	0.3
3	ニ	6.025	5.739	0.5	1.0
		5.980	5.728	-0.2	0.9
4	ホ	5.946	5.674	-0.8	-0.1
		5.977	5.686	-0.3	0.1
5	ヘ	5.932	5.699	-1.0	0.3
		5.949	5.698	-0.7	0.3
6	チ	6.019	5.701	0.4	0.4
		5.998	5.696	0.1	0.3
7	リ	6.010	5.690	0.3	0.2
		6.109	5.703	1.9	0.4
8	ヌ	5.922	5.699	-1.2	0.3
		5.962	5.708	-0.5	0.5
平均		5.993	5.679	5.988	5.696

横圧 0 点調整方法についてはピット線 (直線) にて、出庫側および入庫側にそれぞれ走行し、後軸側となる車輪 3 回転の横圧の値を平均し、それをゼロ点として採用している。この 3 回転は直線部における蛇行動作を考慮したものである。

##### 4.2 静的較正結果について

上記の横圧較正方法によって較正値を求めたところ、車輪全周 (代表点 8 箇所) において、平均値との誤差は 1% 以下のばらつきであった (数箇所の 1% を超える値は荷重付加点のばらつきと考えられる)。

また荷重と変位量の線形性についてであるが、最大値 (50kN) 時の出力が約  $300\mu\text{m}$  であるので、およそ 1%RO (Rated Output) である  $3\mu\text{m}$  以内に入ることを確認した。

なお輪重変化量については台車の軸ばね上下変位を測定して、その値にばね定数をかけて輪重の変化分を出力している。このため、較正値は軸ばねの設計ばね定数としており、横圧のように静的な較正は行っていない。

##### 4.3 動的較正結果について

PQ モニタリング台車の輪軸を PQ 輪軸化することで、営業線、車庫線全線において動的に PQ モニタリングによる測定値と PQ 輪軸による測定値を比較することができる。

図 7 は PQ 輪軸との比較のために用いた波形である。波形中の台に示す区間を比較した。PQ 輪軸で測定された横圧が実際車輪に作用している横圧と考えてその線形性を評価すると、測定値の最大値 (定格) を 50kN とした場合、およそ 2%RO 値内に測定データのほとんどが入ることを確認した (図 8)。

輪重についても、PQ 輪軸で測定された輪重の変化分がそのまま PQ モニタリング台車に負荷されると考え線形性を評価すると、定格を 80kN とした場合、およそ 4%RO 値内にデータが分散していることを確認できる (図 9)。PQ 輪軸による測定と精度・確度とも遜色ないことが確認できた。

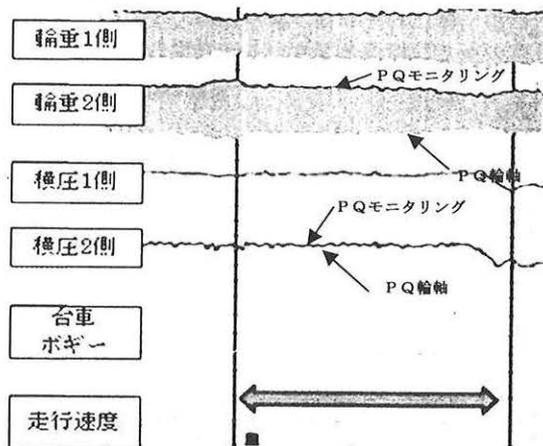


Fig.7 PQ モニタリング台車 PQ 軸の比較波形

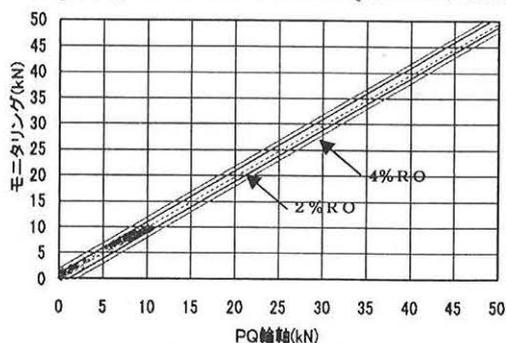


Fig.8 PQ モニタリング台車 PQ 軸の比較(横圧・1側)

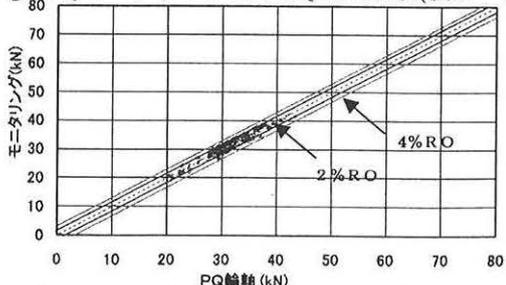


Fig.9 PQ モニタリング台車 PQ 軸の比較(輪重・1側)

## 5. 営業線PQデータ

### 5.1 データ出力-帳票データ

出力データは、曲線中における進行方向先頭台車先頭軸の外軌脱線係数の最大値を曲線ごとの代表値とした帳票データの形で出力される(表2)。路線全体の走行安全性を確認する時は、まず最初にこの帳票データを確認することにより、各曲線の最大値が目安値を超過していないかを確認することとなる。

Table.2 帳票データ

時刻	運行方向	基準駅	曲線番号	曲線半径[m]	曲線方向	外軌側			内軌側			新輪種	BTG- [m]	速度 [km/h]	記録
						P[N]	Q[N]	Q/P	P[N]	Q[N]	Q/P				
1:00:47	上り	新宿	17.2	160	2								43	外軌最大脱線	
1:00:50	上り	新宿	17.2	160	2								41	内軌最大脱線	
1:07:45	上り	新宿三丁目	18.1	850	2								37	外軌最大脱線	
1:07:48	上り	新宿三丁目	18.1	850	2								37	内軌最大脱線	

### 5.2 データ出力-グラフデータ

上記帳票データのように各曲線の代表値を出す一方、曲線全体の値を保持しているため、図10のようなグラフ出力を得ることが可能となっている。

これにより曲線中のある地点において脱線係数が最大になるのかを確認することができ、また曲線中の最大脱線係数発生要因分析を外軌輪重の減少によるものか、外軌横圧の増加によるものかをグラフィカルに判断することができる。

また曲線全体にわたり横圧値を測定していることから、軌道管理の新たな指標となり得る可能性を秘めている。

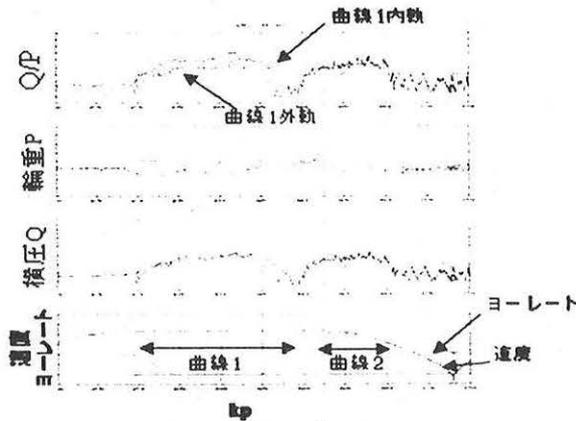


Fig.10 グラフデータ

### 5.3 PQデータ解析例

PQ モニタリング台車データの解析例を紹介する。図11はある曲線中の外軌脱線係数最大値、またその時の内軌脱線係数値の約2カ月分の走行データを時刻を基準にまとめたものである。

図のように外軌脱線係数、内軌脱線係数共に同じ時間であっても測定日によって異なることが確認される。外軌脱線係数の変動の要因としてレール/車輪間の潤滑状態が挙げられる。図12は内軌脱線係数と外軌脱線係数の関係を示したものである。図より内軌脱線係数の増加と共に外軌脱線係数の増加が確認される。

従来より問題視されていたことではあるが、外軌脱線係数の値は内軌レールの潤滑状態に多分に影響される。PQ軸を用いた脱線係数測定は終業後の夜間試運転にて実施することとなるが、その時の内軌レールの潤滑状態は測定するまでわからないのが実情である。

しかしながら、PQモニタリング台車によって営業線における繰り返し測定が可能になり、レール/車輪間が適度に潤滑されている状態の脱線係数から、ドライの状態の脱線係数までを把握できるようになった。

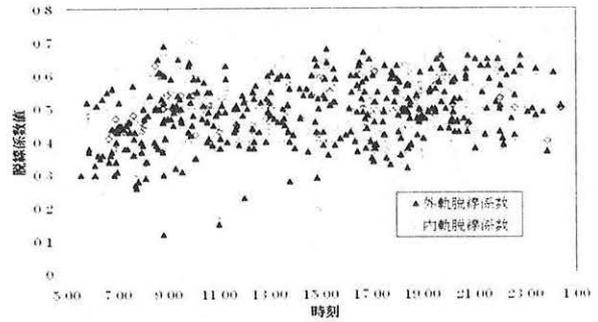


Fig.11 外軌・内軌脱線係数の時刻歴

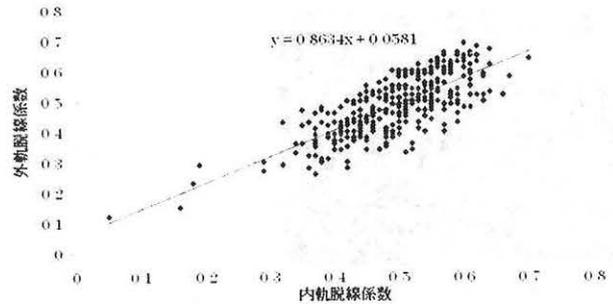


Fig.12 内軌脱線係数と外軌脱線係数の関係

## 6. まとめと今後の課題

PQモニタリング台車を営業線投入することで、営業線走行時の脱線係数を常時測定することが可能となった。従来は限られた時間の中で限られた条件(潤滑状態・車両重量)の中でしか、車両走行安全性のデータを取得することができなかったが、今回開発された台車を営業線投入することで、従来では分からなかった様々なデータを取得することが可能となった。

また軌道側についても、従来は軌道検測車を用いて夜間に測定を実施していたが、今回の台車では特に軌道の走行安全性に関わる指標が直接的に出てくるため、今後の軌道管理の手段として使用できる可能性を秘めている。

一方で課題となるのが得られたデータの整理方法とデータのリアルタイム性向上の2つである。

平成21年1月より営業線にて測定を開始し現在までに膨大なデータを収集している、これは従来のPQ軸を用いたPQ測定のデータ数と比較にならない数である。この膨大かつ有用なデータを曲線ごとにデータベース化し、その曲線の統計値を求め、走行安全性の判断基準を示すシステムの構築が必要である。

次にデータのリアルタイム性であるが、現在は検車区に入庫した時に、モニタリング制御器内の記録メディアを抜き出し、その後データ解析を行っている。しかしながら脱線係数という走行安全性を示す重要な指標であることから、判断基準を超える値を記録した時は早期の対応が求められる。考えられる理想形は各駅に停車した際にPQデータを何らかの形で総合指令所へ送信し、判断および何らかの対応をすることである。

これらの課題を一つ一つクリアすることで、より安全な鉄道システムを構築出来ると考えている。

### 参考文献

- 1) 佐藤, 留岡他, PQ輪軸を用いない車輪/レール接触力の測定方法 第3報, J-Rail2007,P639-642(2007)
- 2) 清水, 岩本, 営業線走行用PQモニタリング台車の開発, R&M 2008-2, P13-16(2008)