

## PQ モニタリング台車の連続記録データを活用した脱線係数データ分析手法

○ [機] 道辻 洋平 長澤 研介 松井 諒 (茨城大)

[機, 電] 松本 陽 (元交通安全環境研究所) [土] 佐藤 安弘 [機] 大野 寛之 (交通安全環境研究所)  
清水 忠, 栗原 純 (東京地下鉄) [機] 谷本 益久 (住友金属テクノロジー) 水野 将明 (住友金属)

## Data analysis method for derailment coefficient utilizing continuous recorded data with new monitoring bogie

○Yohei MICHITSUJI, Kensuke NAGASAWA, Ryo MATSUI, (Ibaraki University)

Akira MATSUMOTO, Yasuhiro SATO, Hiroyuki OHNO, (National Traffic Safety &amp; Environment Laboratory)

Makoto SHIMIZU, Jun KURIHARA, (Tokyo Metro)

Masuhisa TANIMOTO, (Sumitomo Metal Technology)

Masaaki MIZUNO, (Sumitomo Metal)

The new monitoring system is possible to measure time series data of derailment coefficient on every curve during commercial operation. Therefore, statistic tendency for the variation of derailment coefficients could be observed. In general, the wave shape of derailment coefficient even in a certain curve is difficult to fully understand because the shape is affected by many factors. In this paper, a method to decompose the measured data by a few signals is proposed. The potential effectiveness of the proposed method is also examined by data analysis examples.

**Key words :** Rolling stock, Condition monitoring, Derailment coefficient, Signal processing, Curving

## 1. 緒 言

大都市地下鉄のような急曲線の多数ある路線において、走行安全性を確保するためには脱線係数などの常時モニタリングが望まれていた。そのような背景にあって、近年開発された PQ モニタリング台車によって、世界に先駆け営業線実測 PQ データを効率よく収集する技術が開発された<sup>[1][2]</sup>。今後は、得られたデータを効率よく処理し、軌道メンテナンスや車両開発へフィードバックする具体的手法が望まれている。

本報告では、まず急曲線区間における先頭軸脱線係数に着目し、その変動に支配的な要因を整理する。そして、走行ごとに変動の大きい脱線係数連続波形を、より実態が把握しやすい複数の波形へ信号処理し、脱線係数が増大する要因を視覚的にとらえる脱線係数データ分析手法を提案する。

## 2. PQ モニタリングデータの概要

営業線における鉄道車両走行安全性を評価するために、PQ モニタリング台車 (図 1) が開発された。これは (独) 交通安全環境研究所、東京地下鉄、住友金属、住友金属テクノロジーが共同で研究開発した台車である。この台車は地下鉄丸ノ内線の営業車両の一部に装着され、走行区間における輪重、横圧を連続測定することができ、時間的な脱線係数の変動や、レール潤滑効果の定量的な評価などへ応用できる。実際に収集されたデータを図 2 に示す。図示される通り、曲線区間中の内・外軌 Q/P (図中  $QP_{in}$ ・ $QP_{out}$ ) を連続測定できている。また、ここでは曲線半径 160m の曲線であるが、入口・出口緩和曲線において特徴的な波形のひずみが確認できる。このように、営業線において実測されるデータは、複雑な波形が観測されしかも、時々刻々と変化していくため、脱線係数が卓越する要因をわかり易く把握する手法が望まれる。

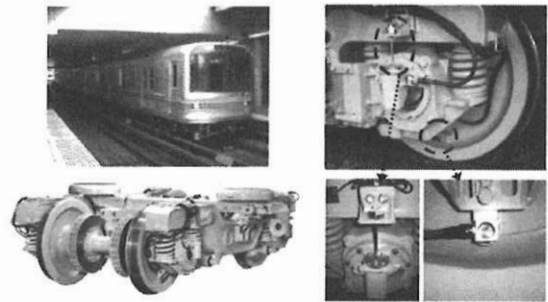


Fig.1. Outline of developed monitoring bogie and vehicle

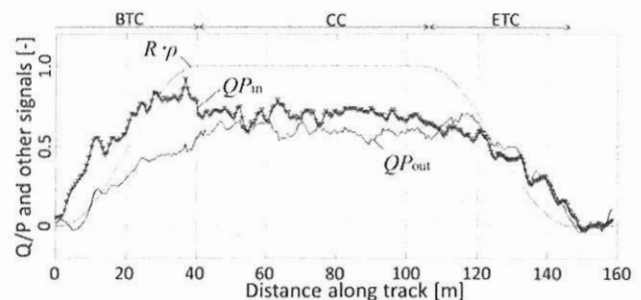


Fig.2. An example of obtained data (Curve No.1, R160)

## 3. 脱線係数の変動要因の整理

先頭軸外軌 Q/P (以下、脱線係数) が変動する要因は様々なものが考えられる。そこでモニタリング台車で直接観測可能な要因を主体に、脱線係数へ寄与する項目を整理する。

要因 1 (曲率,  $\rho$ ): 曲率が大きいほどアタック角が増大し横クリープ力が增大することで脱線係数が大きくなる。

要因 2 (速度,  $v$ ): 曲線区間走行速度に応じた超過遠心力が作用するが、これは脱線係数に何らかの影響を与える。

要因 3 (輪重差,  $\Delta P$ ): 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。  
要因 4 (内軌 Q/P,  $QP_{out}$ ): 内軌塗油などにより摩擦係数が低下すると、内軌 Q/P とともに脱線係数も小さくなる。

#### 4. 脱線係数に対する信号分解手法

**4.1 信号分解の基本式** 脱線係数は車両・軌道の様々な要因により決定し、同一車両で同一曲線を走行しても変動する。この変動を決定づける要因は無数にあるが、もし数種類の、特徴が既知の信号により精度よく分解できれば、脱線係数の変動をより深く理解し、要因に応じた適切な対策を立てられる。この考えに基づいて、脱線係数を以下の信号の和

$$QP_{out}(d) = \sum_{i=1}^N f_i(d) + I(d) \quad (1)$$

と考える。ここで  $d$  は軌道上の走行位置を示している。この式において右辺の  $f_i(d)$  は分解に用いる既知の信号波形を表し、 $I(d)$  は摂動を表す項である。

**4.2 信号の選択と分解** 具体的に分解に用いる信号として、表 1 に示す 2 種類の構成例 (Type1,2) を提案する。3 章の要因整理を踏まえ Type1 は軌道曲率、超過遠心力、輪重差の影響を見るための信号構成としている。ここでパラメータ  $k_2$  の項は、定常曲線中の脱線係数のなだらかな増減を反映している。信号  $f_1$  については、曲率が大きくなり、かつ輪重差が大きい場合に脱線係数への影響が大きくなるため  $\rho$  は  $\Delta P$  に対する重み付けを意味している。

Type2 については、基本的に Type1 における曲率を、内軌 Q/P 値におきかえたものである。この場合、信号  $f_1$  は、輪重差が大きく、かつ内軌 Q/P が大きいときに、脱線係数へ及ぼす影響が大きいことを仮定している。

Type1, Type2 について各信号にかかる係数  $k_i$  は、パラメータ線形となっている。そのため、これらパラメータを導出する場合、例えば Type1 の場合は

$$y = p \cdot x' + I(d) \quad (2)$$

$$\text{where } y = QP_{out}(d) \in \mathbb{R}^{1 \times n}, \quad p = [k_1, k_2, k_3, k_4] \in \mathbb{R}^{1 \times 4}$$

$$x = [\rho(d), d\rho(d), v^2(d) \cdot \rho(d), \rho(d) \cdot \Delta P(d)] \in \mathbb{R}^{n \times 4}$$

と表現でき、この時のパラメータベクトル  $p$  は以下の式

$$p = y \cdot x \cdot (x' \cdot x)^{-1} \quad (3)$$

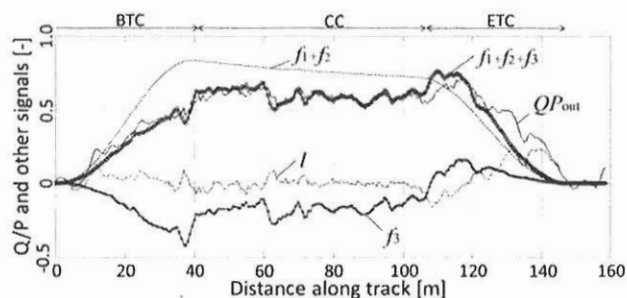
により摂動の二乗和を最小化する解として一意に求まる。

**4.3 脱線係数の信号分解の一例** 前節の二種類の手法について、実際に脱線係数を信号分解した例を図 3 に示す。図示されるとおり両手法とも分解した信号によって、元の脱線係数の時系列の特徴をよく再現している。特に Type2 の手法は、緩和曲線部も含め脱線係数の波形によく適合している。

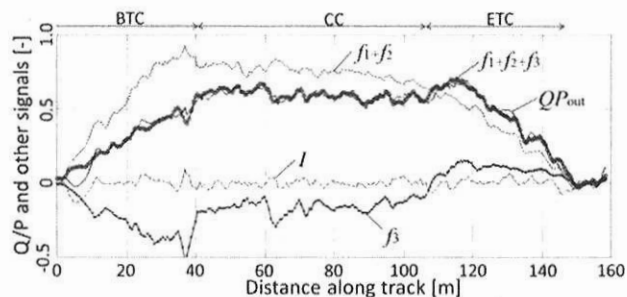
図 4 は別の R160 の急曲線において、脱線係数が最大 1.3 程度となるデータを信号分解した例である。この例では脱線係数が出口緩和曲線に大きくなる傾向があるが、その原因は内軌 Q/P のみでなく、輪重変動に起因した信号成分  $f_3$  の影響が大きいことを視覚的に把握することができる。

Table 1 Candidate of decomposition signals (Case of N=3)

|       | $f_1(d)$                      | $f_2(d)$                         | $f_3(d)$                              |
|-------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Type1 | $(k_1 + k_2 d) \cdot \rho(d)$ | $k_3 \cdot v^2(d) \cdot \rho(d)$ | $k_4 \cdot \rho(d) \cdot \Delta P(d)$ |
| Type2 | $k_1 \cdot QP_m(d)$           | $k_2 \cdot v^2(d) \cdot \rho(d)$ | $k_3 \cdot QP_m(d) \cdot \Delta P(d)$ |



(a) Type1 decomposition result



(b) Type2 decomposition result

Fig.3. Comparison between two different types of signal decomposition method at same curve (Curve No.1, R160)

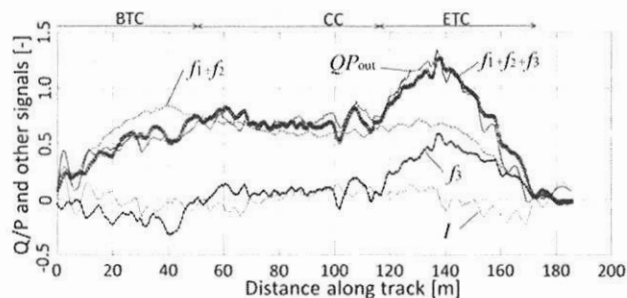


Fig.4. Type2 decomposition result (Curve No.2, R160)

#### 5. 結 論

本報告では、モニタリング台車で観測可能な信号から脱線係数が著大となる箇所の要因を、簡易に把握するデータ解析手法を提案した。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。

今後は、データ数を増やした解析を行いつつ、さらに精度の高い信号分解手法を考えつつ、既存の輪重横圧推定式<sup>[3]</sup>との関連性を検討する予定である。また、摂動項には軌道不整の影響が入っていることも予想され、軌道の管理にも本手法の応用可能性がある。同時に、MBD 解析を併用し、信号分解の妥当性と理論的根拠を明らかにしていく。

#### 文 献

- [1] 松本, 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, 2011.
- [2] 大野ほか, PQ 輪軸を用いない車輪/レール接触力の測定方法, 機論 (C) 77 巻 774 号, 2011.
- [3] 中川ほか, 走行試験による輪重横圧推定式の精度確認, 鉄道技術連合シンポジウム (JRail) 講演論文集, pp473-476, 2003.