

車両走行状態監視装置を用いた車両フェール検知に関する研究

(第1報：走り装置のフェール検知コンセプト)

○大林 弘史 鹿田 敬司 栗原 純 岩本 厚 [機]齋藤 拓也 (東京地下鉄)

[機]須田 義大 [機]安藝 雅彦 (東京大学) [機]杉山 博之 大谷 光一 (東京理科大学)

[機]下川 嘉之 水野 将明 (住友金属) [機]谷本 益久 [機]小村 吉史 (住友金属テクノロジー)

Study on the Fault Detection of Railway Vehicles Using On-Track Monitoring System
(The 1st Report: Concept of Fault Detection at Running Gear)○Hiroshi Ohbayashi, Keiji Shikata, Jun Kurihara, Atsushi Iwamoto, Takuya Saito, (Tokyo Metro)
Yoshihiro Suda, Masahiko Aki, (The University of Tokyo)
Hiroyuki Sugiyama, Koichi Ohtani, (Tokyo University of Science)
Yoshiyuki Shimokawa, Masaaki Mizuno, (Sumitomo Metal Industries)
Masuhisa Tanimoto, Yoshifumi Komura, (Sumitomo Metal Technology)

Failure of running gear for railway vehicles causes the terrible incidents as derailment or turn over and so on. So equipments depending on car dynamic behavior have to be maintained carefully. In this study the authors are intending to develop the new system of detecting failure of running gear and finding the factor of it. With developing this system, field tests of non-failure running gear and tests in depot with failure of it are performed. And simulation models are confirmed by these test data.

キーワード：車両走行状態監視装置，状態監視，フェール検知，走り装置

Key Words：On-Track monitoring system, Condition monitoring, Fault detection, Running gear.

1. 緒言

鉄道車両の運動性能評価や車両の走り装置の異常に伴う車両性能に関する研究が現在まで数多く行われている。しかしながら、営業車両の走行安全性や運動性能のオンライン・リアルタイム監視は、ようやくその一部が実用化されるようになってきた段階である。この背景として、異常状態検知には多くのセンサや複雑なシステムを必要とすることや、異常状態判断手法が確立されていないことが挙げられる。さらに車両自体に検出装置を取り付ける場合、車両の数だけ状態監視装置を用意する必要があり、膨大なインシヤルコストと、それらを保守するためのメンテナンスコストがかかり、装置導入が難しいことなどが挙げられる。

そこで、東京地下鉄では、低コストで車両の運動性能を状態監視ができる、車両走行状態監視装置を開発した^[1]。具体的には、図1に示すように営業線レールへ歪ゲージを貼り付けた、車輪とレールに発生する力を測定し、取得したデータから脱線係数の異常値判定にとどまらず、走り装

置の異常を検知できるように研究を進めている。台車やばね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る危険性があるが、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、未然に防ぐことが可能となる。

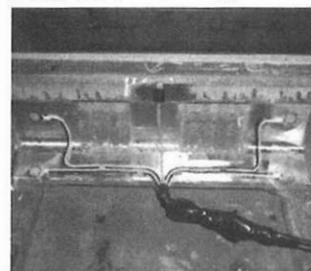


図1 営業線に貼り付けられた歪ゲージ

さらに、これまでは全般・重要部検査でしか確認できなかった装置の異常についても、常時状態監視することで、早期に発見することができ、即時に対応することができる(図2)。これらの監視体制によって、走行安全性をさらに高め

られるといえる。

本研究は、地上側から車両の脱線係数を測定したデータ（以下、地上 PQ データとする）を用いて、走り装置の異常を検知するものである。以下、今回の研究対象とされる、車両フェールとフェール検知のコンセプトについて述べる。

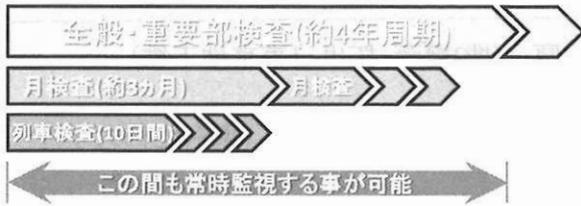


図2 検査周期イメージ

2. フェール検知のコンセプト

2.1 フェールモードとは

ここで車両のフェールモードとは、車両の運動性能に関係した、特に走り装置に異常を引き起こす故障状態と本研究では定義する。具体的には、空気ばね、軸ばね、レベリングバルブ（以下 LV とする）の各装置が異常及び故障状態になった事を指す。図3にそれぞれの装置と異常状態を記す。

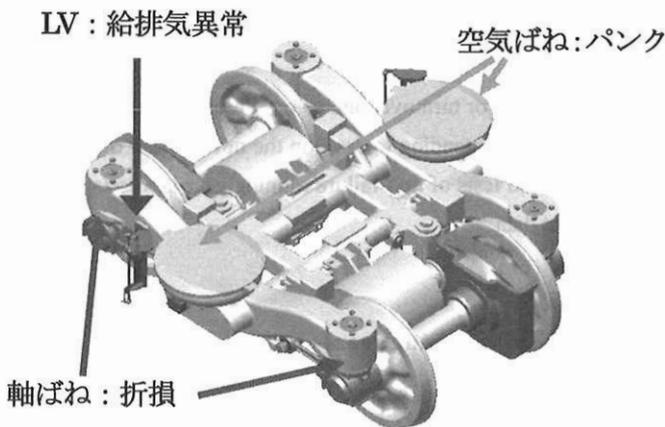


図3 フェールモードが対象とする部品及び故障状態

2.2 フェール検知の手法

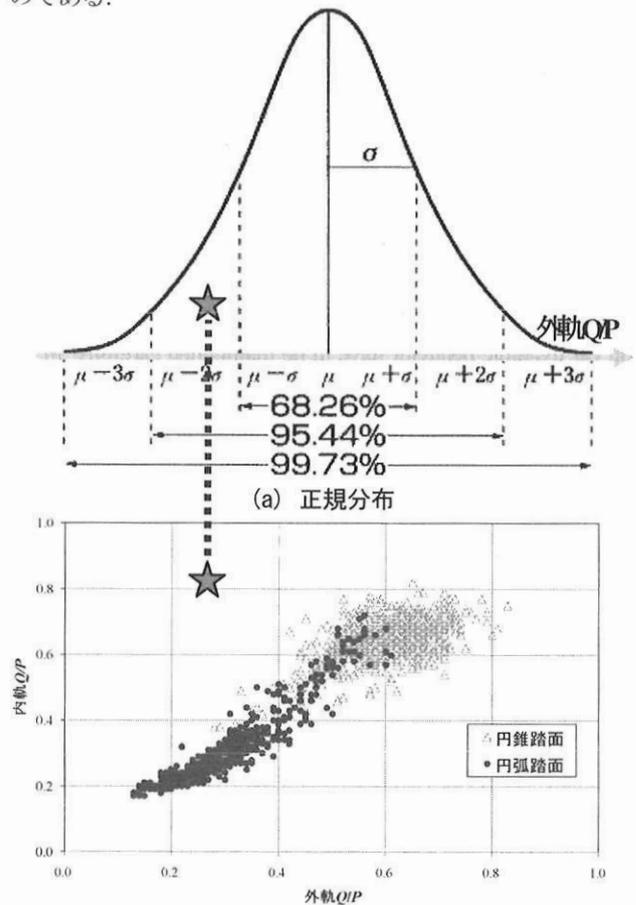
(1) 車両走行監視装置の概要

フェール検知をするためには、安定した輪重(P)と横圧(Q)で評価する必要があるため、急曲線の円曲線部に歪ゲージを設置している。また、脱線係数(以下、外軌 Q/P とする)は台車の先頭軸で大きくなるため、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。さらに、曲線の外軌側で脱線係数が評価されるため、左右カーブの両側の曲線で測定する必要がある。その結果、1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。この仕様を満足する地上 PQ 測定点を検討し、東京地下鉄全9路線に車両走行状態監視装置が設置されている。営業線レールに貼り付ける事で、検車区構内とは異なり、営業走行する車両の状態をリアルタイムで監視する事ができる。

(2) 異常値の判定方法

取得データの最も一般的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 Nadal の式にて算出された脱線係数の目安値と比較することである。すなわち、測定された外軌 Q/P が目安値を超過していないか否かが、第一の判定基準となる。目安値を超えている車両については、すみやかにその原因を特定し、対処する必要がある。これに対して、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としては、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手法を提案した。

その方法とは、正規分布の考え方(図4(a))に従い、測定地点毎に脱線係数の平均と標準偏差σを求め、異常値判定の閾値を「平均値+nσ」で設定することと併せて^[2]軌道の潤滑状態や、車輪踏面形状の差異によって、内軌 Q/P の分布を考慮して、外軌 Q/P と内軌 Q/P から異常判定するものである。



(b) 踏面形状の違いによる内外軌 Q/P の比較

図4 内外軌 Q/P の分布

(3) 車両フェール検知に関する新しい着想

走り装置に異常をきたした場合、外軌 Q/P といった1つの指標で分類すると、図4(a)内に示す、星印のような値では、正規分布の中に埋もれてしまう。しかし、内軌 Q/P との関係性が見えると図4(b)中の星印のように、他の数値傾向とは異なり、異常状態である事が分かる。これまで述べてきたとおり、外軌 Q/P で走行安全性は判断できても、ど

の部品のこういった不具合や故障によるものか、その原因を明らかにすることはできない。そこで、新たな指標を導入し、地上 PQ データを整理する事で研究を進めた。

2.3 測定データの分散要因

取得した地上 PQ データから車両のフェール検知をするにあたり、分散したデータを車両フェールによる異常データと区別する必要がある。前項のように測定データが分散する要因は、主として①輪重の変化、②車輪/レール間の潤滑状態、③軌道状態の変化の3点が挙げられる。以下に、それぞれの変化要因について述べる。まず、①は車両が走行する時間帯によって運転速度や乗車率が異なり、輪重が変化する。②については、車両が走行した時の軌道塗油状況によって車輪/レール間の潤滑状態が異なり、横圧が大きく変化する。最後に③については、敷設当初は新品形状だったレールが、徐々に摩耗することで車輪当面とレールの接触点に変化し、輪重や横圧に影響を与えたと考えられる。そこで、これらの要因を勘案しながら、本研究を進めていった。

2.4 輪重による台車・車体ねじれ成分

(1) 台車・車体ねじれ成分の定義

前項でも述べたとおり、外軌 Q/P のみでは故障状態を検知する事は難しい。そこで走り装置に異常が起こった場合、輪重値にアンバランスが発生すると推定した。これは、2.1 項で述べた部品と異常状態が、直接輪重に影響を与えるためである。そこで、輪重アンバランスの評価方法として用いられている台車ねじれ成分と車体ねじれ成分の2つの指標に着目した。図5に台車と車体、並びに空気ばねの位置関係を示し、以下の式(1)~(3)に各ねじれ成分を定義する。

$$\text{前車台ねじれ成分} = (P_1 + P_4) - (P_2 + P_3) \dots (1)$$

$$\text{後車台ねじれ成分} = (P_5 + P_8) - (P_6 + P_7) \dots (2)$$

車体ねじれ成分=

$$\{(P_1 + P_3) + (P_6 + P_8)\} - \{(P_2 + P_4) - (P_5 + P_7)\} \dots (3)$$

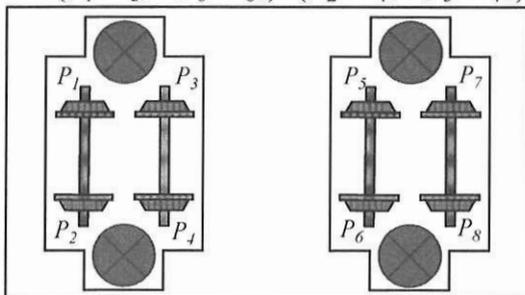


図5 各ねじれ成分の定義

(2) 1次ばね系からフェール検知を行うメカニズムについて

図6に示すようなある車両の1台車中(ここでは前車台を例に挙げる)で、1つの軸ばねが折損した場合、折損部位は輪重を受け持つ事ができないので、それ以外の輪重についても、バランスが崩れる。この場合には特に折損している台車内のバランスが最も崩れる事になる。また、この時は P_1 と P_4 の輪重が低くなり、 P_2 と P_3 の輪重が高くなるの

で、(1)式を導入すれば、よりその変化を捉えられ、軸ばね折損した故障状態を検知する事ができる。

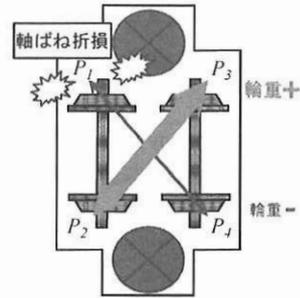


図6 台車フェール検知の例

(2) 2次ばね系からフェール検知を行うメカニズムについて

同様に、図7に示すある車両の中で空気ばねパンクなどの故障が起きた場合、軸ばねの場合と同じく車体ねじれ成分の値が大きくなり車体内のバランスが崩れ、異常が検出できる可能性がある。この場合は(3)式を用いて、異常状態を判断する。これらの式による整理によって、通常の傾向と異なる車両を検知する事によって、異常個所の早期発見ができ、走行安全性のさらなる向上が見込まれる。

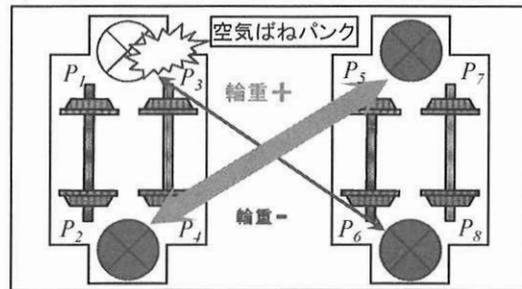


図7 車体フェール検知の例

3. 研究の進め方

3.1 研究体制について

車両フェール検知の実用化に向けて、3段階に分けて著者らは研究を進めた。研究を進める上で、フェールした車両状態の走行データが必要になるが、営業線走行試験は安全上実施できない。そこで、基本的にはシミュレーションによる検討を行った。また、シミュレーションモデルの検証を行う必要上、後述の試験線においてフェールした車両状態の試験も行った。以下に研究の進め方について述べる。

まず、第1段階として曲線通過時の車両走行状態のモデル化を試みた。モデル化にあたって、営業線内のある曲線での車上 PQ 測定を行い、測定データと比較することによってシミュレーションで再現したモデルが妥当か検証した。この試運転については東京地下鉄が担当し、シミュレーションについては東京大学と東京理科大学が行った。

次に第2段階として、フェール状態での曲線走行状態がモデル化可能か試みた。こちらについては、試験線内で台車を故障状態にし、模擬車両を使用して走行試験を行った。この試験については、住友金属と住友金属テクノロジーが担当し、シミュレーションは東京大学と東京理科大学が担

当した。

最後の第3段階として、第1段階と第2段階で構築したモデルを元に、営業線でのフェール状態走行を再現し、地上 PQ データからフェール状態が検出可能か検討を行った。加えて営業線地上 PQ データとの比較を行った。一連の研究分担を模式図にしたものを、図8に示す。以下、それぞれの取り組み内容について、概要を述べる。

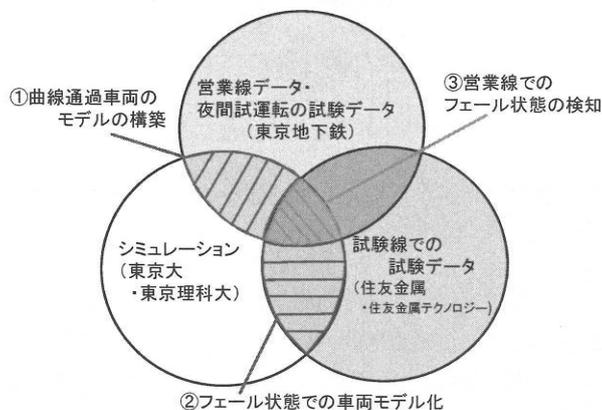


図8 研究分担

3.1 営業線夜間試運転データの概要

地上 PQ データからフェール検知をするためには、健全な車両についてもシミュレーションモデルを現車のデータによって検証する必要がある。また、データの分散要因について調査する必要があり、同様に検証が必要である。このため特定曲線において、主として走行条件を変えて現車試験を行い、シミュレーション結果と比較した。実施した営業線夜間試運転の概要を以下に述べる。試験に使用した台車の図9に示す。試験は曲線半径 205m, カント 87mm, スラック 9mm の曲線で行った。10 両編成電車の先頭車第 4 軸に PQ 輪軸を装着し、空車条件で時速 5~30km/h で上記曲線を何往復か走行させた。

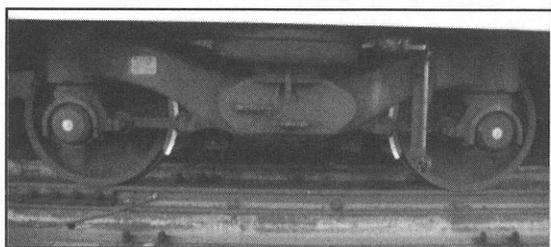


図9 試験に使用した台車

3.2 住友金属製鋼所内小曲線走行試験データ概要

住友金属製鋼所内小曲線での試験概要を以下に述べる。試験は、曲線半径 120m, カント 44.6mm, スラック 18mm の曲線で行った。空車車体重量相当の模擬車体へ台車を装着した試験車を、軌陸車で牽引し、10km/h 前後で走行させた。前台車の 1, 2 軸へ PQ 輪軸を装着し、地上側へ歪ゲージを貼付、評価を行った。試験は、LV, 空気ばね, 軸ばねをそれぞれフェールさせて行った。図10へ試験に使用した台車及びフェールさせた部品, 図11に試験に使用した模擬車両を示す。

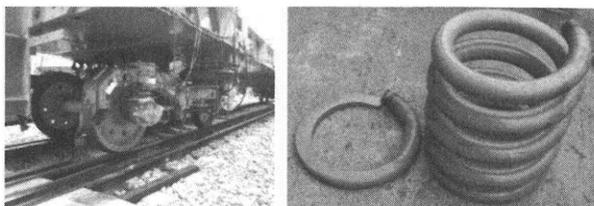


図10 試験台車及びフェール部品(軸ばね)の一部



図11 模擬車両(点線枠部)

3.3 実験データとシミュレーションモデルの整合性の確認

車両フェール検知のためのシミュレーションモデルの検証のために、上述の営業線試運転データや試験線でのデータを用いた。実験のモデル化にあたって、空気ばねの挙動及び、LV の挙動を再現し検討を行った。シミュレーションは、市販されている SIMPACK™ を使用した。図12に各研究段階でのシミュレーションの位置付けを示す。

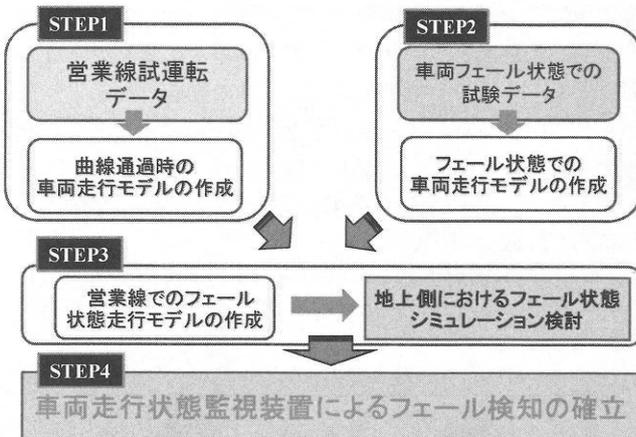


図12 各研究段階におけるシミュレーションの位置付け

4. 結言

本報では、車両の走り装置におけるフェール状態の検知可能性について述べた。上述のコンセプトに基づき、研究を進めた。続報では、1次ばね系のフェール(第2報)と2次ばね系のフェール(第3報)に分けて紹介する。

参考文献

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, pp.15-23,2010
 2)齋藤, 中島, 中里, 清水, 鹿田, 佐藤, 下川, 谷本: 地上 PQ 測定による営業線データの解析結果報告, 第17回鉄道技術シンポジウム 講演論文集, pp.333-336, 2010
 3)M,Tanimoto, M,Tomeoka. et al : Monitoring System of Derailment Coefficient with Sensor-equipped Rail in Service Line, Bogie10,2010