

## 輪重バランスの異常状態を検知する装置の開発



松橋 克幸\*1



畑 弘敏\*2



斉藤 憲司\*3



飯島 仁\*4



土井 賢一\*3



安田 陽一\*5

### Development of devices to detect an abnormal state of wheel load balance

Katsuyuki MATSUHASHI\*1, Hirotooshi HATA\*2, Kenji SAITO\*3, Hitoshi IJIMA\*4, Kenichi DOI\*3 and Yoichi YASUDA\*5

\*1 Assistant Chief Researcher, Safety Research Laboratory, Research and Development Center of JR EAST Group

\*2 Senior Researcher, Safety Research Laboratory, Research and Development Center of JR EAST Group

\*3 Japan Transport Engineering Company \*4 Japan Railway Track Consultants Co., Ltd. \*5 JR East Rail Car Technology & Maintenance Co., LTD

#### Abstract

The derailment accident at Sagami Station on the Chuo Line in September 2013 was mainly due to the widening wheel load unbalance due to the damaged air spring device pushing up the vehicle. As a countermeasure against this accident, on the vehicle side, we have developed an "air spring pressure abnormality detection system". This detects an abnormality by using diagonal unbalance calculated from the air spring pressure to be monitored. On the ground side, we have developed a "wheel load unbalance abnormality detection device". This device detects abnormal wheel load balance by traveling on rails with strain cages attached.

●**Keywords:** Derailment, Wheel load unbalance, Air spring pressure, Abnormality detection, Measuring

\*JR東日本研究開発センター 安全研究所 副主幹研究員 \*JR東日本研究開発センター 安全研究所 上席研究員

\*株式会社総合車両製作所 (元 安全研究所) \*株式会社日本線路技術 (元 安全研究所) \*JR東日本テクノロジー株式会社 (元 安全研究所)

## 1. 緒言

2013年9月に発生した中央本線相模湖駅構内での脱線事故は、1両に4ヶ所搭載されている空気ばねの自動高さ調整装置(以下、空気ばね装置)のうち1ヶ所が人身事故により破損し、破損した空気ばね装置が車両を押し上げたために左右の車輪の輪重不均衡(以下、輪重アンバランス)が拡大したことが主な原因であった<sup>1)</sup>。

この事故対策として、車両側では、モニタリングする空気ばね圧力から演算する対角アンバランスおよび左右アンバランスを用いて空気ばね装置の異常を検知し、モニタ表示により乗務員に通知する「空気ばね圧力異常検知システム」を開発した。

また、地上設備側では、「輪重アンバランス異常検知装置」を開発した。従来からレールにひずみゲージを貼り付けて静止輪重を測定する方法が実施されているが、本開発ではこれを応用し、各車輪が装置上を走行する際の輪重を測定し、車両単位でバランス状態の計算を行うこととした。

## 2. 輪重バランスについて

### 2・1 空気ばね装置と輪重

空気ばね装置による高さ調整の概要を図1に示す。通常、お客さまの乗車などに伴い荷重が増加し、空気ばねが圧縮され車体が下降すると、高さ調整機構の作用により圧縮空気が空気ばねに供給され、車体が上昇する。

1両の車体は4ヶ所の空気ばね装置で支えられているが、いずれかの部位で高さ調整機構が正常に動作せず、台車に対して車体が傾いた状態になると、各車輪にかかる車体荷重が変化し、輪重アンバランスが生じる。

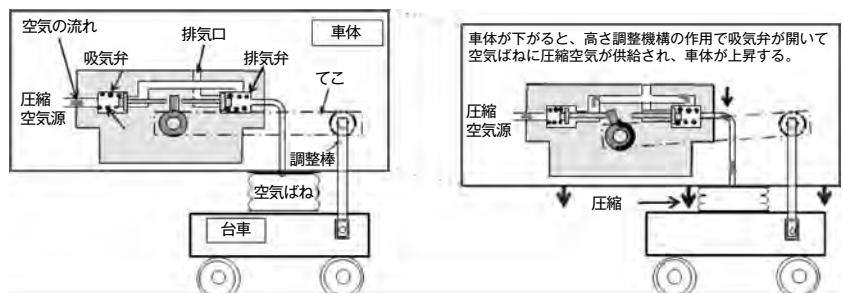


図1 自動高さ調整機構の動作図

車輪とレールの接触点に働く力の関係を図2に示すが、従来から走行安全性の評価の指標として、脱線係数(横圧 $Q$ /輪重 $P$ )が使用されている。空気ばね装置の動作は、輪重変動による脱線係数の変化につながることから、走行安全性に関して重要な役割を果たしている。

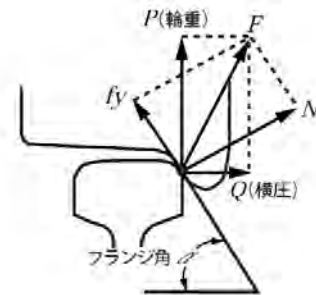


図2 車輪とレールの接触点に働く力

## 2・2 当社の輪重管理

2000年3月の日比谷線脱線事故の原因の一つとして、脱線した車両が輪重の大きなアンバランスを有していた可能性があげられる。当社ではその対策として、静止輪重を直接測定し、左右の平均輪重との差(静止輪重比)を算出し管理している。具体的には、静止輪重比は10%以内を目標とし、15%以内で管理することとしており、総合車両センター出場時は静止輪重比を15%以内に調整している。

## 2・3 相模湖駅脱線事故について

相模湖駅脱線事故の当該車両は、事故のおよそ10日前に発生した人身事故により、後台車左側(1位)の空気ばね装置が破損し、その影響で車両の後方左側の高さが異常に高くなった。その結果、後台車の左側およびこれと対角の前台車右側の輪重が増加、その一方で後台車右側と前台車左側の輪重は減少し、前台車左側の車輪が右曲線でレールに乗り上がることで脱線した。この状態を図3に示す。

また、本事故後に空気ばね装置が破損した状態で静止輪重を測定し静止輪重比を算出した結果と、後述する対角アンバランスを表1に示す<sup>2)</sup>が、輪重バランスの状態を示す各数値が大幅に増加していた。

このため、本事故の対策として、輪重バランスの状態をより高頻度に把握し、いち早く異常を検知することを目的として、各装置を開発した。

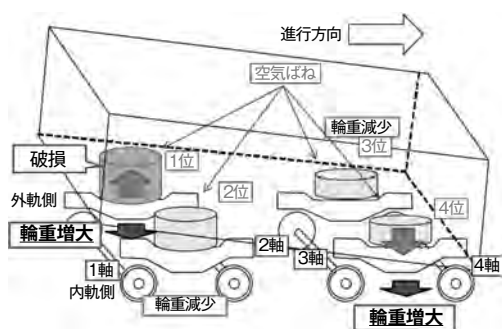


図3 事故時の輪重の状態

表1 事故時の静止輪重比および対角アンバランス

部位	No1(後)台車		No2(前)台車	
	1軸 (後軸)	2軸 (前軸)	3軸 (後軸)	4軸 (前軸)
静止輪重比(%)	26.7	33.4	36.6	44.5
対角アンバランス(%)	35			

## 3. 空気ばね圧力異常検知システムの開発(車両側で検知)

### 3・1 システム概要

当社の新系列車両では、ブレーキ制御装置で空気ばね圧力値(以下、AS圧)を取得することにより車体荷重を把握し、必要なブレーキ力を演算している。一般的に、輪重をモニタリングすることは困難であることから、本開発では、このブレーキ制御装置にて1両4ヶ所の空気ばね圧力(AS1~AS4)の演算を行い、異常を検知した際はモニタ装置の画面に表示することとした。図4に、その画面表示(INTEROSおよびTIMS搭載車両)を示す。

### 3・2 基本的な異常検知の考え方

脱線事故後の調査および再現試験の結果から、空気ばね装置が破損した際は、輪重およびAS圧に大きな対角アンバランスが生じることが分かった。そのため、指標として式(1)と図5で示す対角アンバランス(DU)を考案し、DUが設定した閾値を超えた場合、異常と判定することを基本の考えとした。

$$DU = \frac{|(AS1+AS4) - (AS2+AS3)|}{AS1+AS2+AS3+AS4} \quad (1)$$

ただし、本事故時のような空気ばね装置の異常が発生した場合、AS1が高くなることで各空気ばね圧力の状態は図6のようになりDUが大きくなるが、この異常がなくても、進行左側外軌の出口側緩和曲線では図7のようにAS4が高くなるため、各空気ばね圧力の状態(すなわちDU)は事故時と同様の傾向となる。さらに、緩和曲線を通過した後も空気ばねの不感帯などの影響によりDUが大きい状態が比較的長く継続する場合がある。



図4 異常検知時の画面

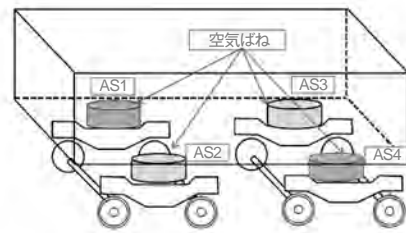


図5 空気ばねの位置関係

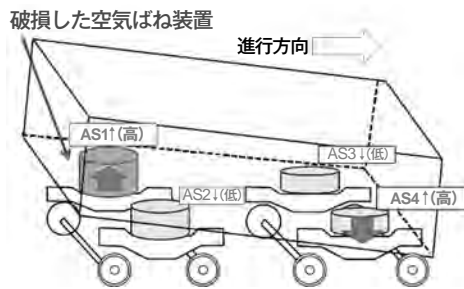


図6 事故(再現試験)時の空気ばね圧力状態

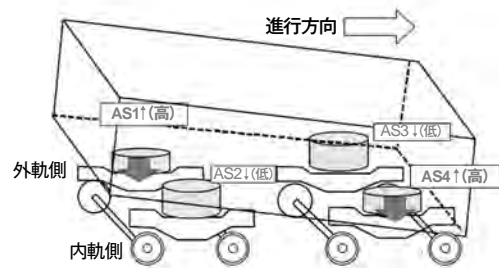


図7 出口側緩和曲線(進行左側外軌)での空気ばね圧力状態

これを異常判定から除外する必要がある。緩和曲線を通過する時間は短時間であり、空気ばね装置が破損した場合はDUが高い状態が長時間継続すると想定できることから、正常の場合のDUの推移を把握することで、異常判定が可能となると考えた。

### 3・3 判定手法の検討

式(1)から、再現試験時のDUを求めると、正常時:0.06、事故再現時:0.24となった。この結果から、空気ばね装置が破損すると、DUが大きく変化することが確認できた。また、事故車両に記録されていたAS圧からDUを計算すると、0.3を超える値であった。これらの値を異常と検知できるように「0.2」を仮の閾値として設定し、営業車両のAS圧を測定することとした。

その結果、緩和曲線上に停車した場合のほか、走行中においてもDU>0.2が長時間継続する場合があった。その中で最も長くDU>0.2が継続した測定例を図8に示す。この例は緩和曲線①(TC①)~直線(SS)~緩和曲線②(TC②)の反向曲線を低速走行した際の結果であり、約60秒間継続してDU>0.2となった。その他、反向曲線を走行した際はDU>0.2が比較的長く継続していた。

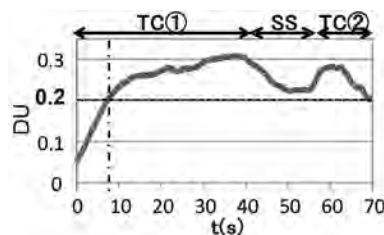


図8 最も長くDU>0.2が継続した例

本結果から緩和曲線の影響によるAS圧の変化は、緩和曲線通過後も継続する可能性があることが分かった。このままでは、 $DU > 0.2$ が60秒以上継続しないと異常判定ができないことになり、特に山手線のように駅間が短い線区に対しては適用することが困難である。したがって、緩和曲線および緩和曲線の影響が残る区間をDUによる異常判定から除外する方法として、左右アンバランスによる方法を考案した。

### 3・4 異常検知アルゴリズム

車両が曲線を走行する際、カントに対して均衡速度で走行していれば、空気ばね圧力の左右バランスは保たれる。しかし、低速で走行すればカント超過となり、空気ばね圧力に左右アンバランスが発生する。したがって、緩和曲線においても円曲線に近い側を低速で走行した場合、左右アンバランスが大きくなる。つまり、DUが大きくなっても左右アンバランスが大きければ、この影響であると考えられるため、異常判定から除くことができる。左右アンバランスを表す指標として式(2)で示すLUを考案し、LUが大きい場合は異常検知から除くこととした。

$$LU = \frac{|(AS1 + AS3) - (AS2 + AS4)|}{AS1 + AS2 + AS3 + AS4} \quad (2)$$

最終的な異常検知アルゴリズムとしては、停車中を除き、 $DU >$  閾値および $LU <$  閾値を同時に満たす時間(異常状態継続時間)が設定した限度値を超えた場合に、異常と判定することとした。ここで、 $DU \cdot LU$ の閾値は、脱線事故後の調査および再現試験の結果を参考に決定し、異常状態継続時間の限度値はE235系での測定結果などを踏まえて決定した。

## 4. 輪重アンバランス異常検知装置の開発(地上設備側で検知)

### 4・1 輪重測定装置

静止輪重を測定する方法としては、可搬式の測定器を使用するほか、固定式の輪重測定装置を地上に設置する方法がある。輪重測定装置は、車両がレール上を極めて低速で走行または停止した状態で各車輪の輪重値を測定するものであり、当社では総合車両センターなどに導入されている。なお、同種の装置には各種測定方式があるが、レール側面に直接ひずみゲージを貼り付け、輪重によるレールのせん断ひずみから輪重値を求める方式が最も一般的である。

本開発の目的は、従来よりも高頻度で各軸の輪重値を取得し、即座に異常の有無を判定することであるから、上記のような測定装置をベースとしながら、さまざまな機能を盛り込む開発を実施した。

### 4・2 設置箇所

設置箇所は、万が一異常を検知した際に直ちに対処できる車両センターの入区線とすることが望ましく、また測定装置の設置場所として望ましい条件(①測定器上で車両が長く停車しない。②平面性変位(カント通減を含む)が小さい。③直線の軌道である。④継目から離れている。)を考慮し、豊田車両センターにおいて①②④を満たす入区線(通路1番線)とし、二重系とするため位置A・Bの2ヶ所にひずみゲージを貼付し、測定することとした。

### 4・3 機器構成

本装置は、図9で示すように①ひずみゲージ、②列車ID読取装置、③装置本体、④表示装置(監視用PC)を標準構成とした。なお、③の装置本体内には、データロガー(動ひずみ測定器i-Logger)・収録装置(PC)・無停電電源装置・耐雷トランスが収納されており、また装置の上部には時刻校正用にGPSを設置している。

ここで、②はフラット検知用の装置と同一のものを使用し、④は車両センターの事務所に設置することを想定している。また、データロガーは、ひずみゲージ用の動ひずみ測定器により車輪通過時のレールのひずみを測定し元波形を記録、各軸のピーク値を輪重として収録装置に出力している。その収録装置ではデータロガーで測定



図9 機器構成

した各ゲージの測定値から車両ごとに必要な値を計算(4・4参照)、判定プログラムにより異常判定を行い、結果を表示装置に送信しており、この際、装置を通過する軸ごとに測定された値を各車両単位で計算するため、②の読取装置から得られた列車IDデータを使用している。なお、本開発における収録装置と表示装置との通信にはWiMAX2+(インターネット回線)を使用し、MaaS・Suica推進本部の閉域接続サービスを利用している。

#### 4・4 異常判定アルゴリズム

静止輪重比は15%以内で調整されていることから、本測定装置においても、測定した輪重から輪重バランスを演算し概ね±15%以上を異常と判定することがまず考えられるが、入区線にて本装置により測定した走行時の輪重値は、測定のために特別に整備された場所ではなく通常の軌道上を走行中に測定するため、軌道変位やカントといった軌道条件、動揺や空気ばね装置の不感帯といった車両条件の影響を受け、静止輪重とは異なる値となる。豊田車両センター所属のE233系全車両の総合車両センター出場時の静止輪重比(2018年6月14日時点)の分布を図10に示すが、すべての静止輪重比が15%以内であり、平均値もほぼ0%(-0.2%)となっている。これに対して、2018年6月1日～8月31日までの測定値から演算したE233系輪重バランスの分布を図11に示す。

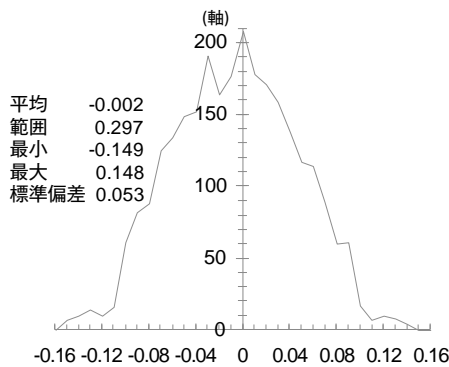


図10 E233系静止輪重比の分布

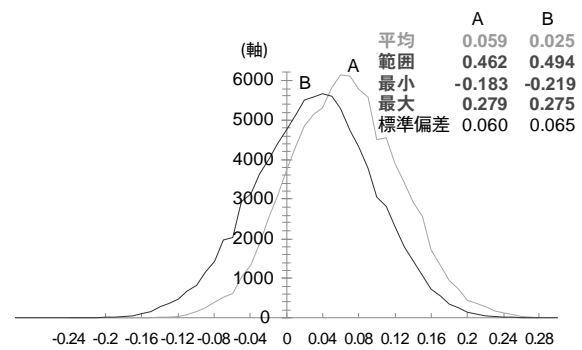


図11 本測定によるE233系輪重バランスの分布

図11において、測定箇所A・Bの平均値は、図10に示した静止輪重比の平均値(-0.2%)から、A:6.1%、B:2.7%もずれ、また最小から最大までの範囲もA・B共に、静止輪重比の30%弱から50%弱まで拡大した。

したがって、本装置による走行時の輪重値のみでは輪重バランスの異常検知を行うことはできないため、以下の2つの異常検知手法を考案し、それぞれで異常判定を行うこととした。

##### (1) 対角アンバランスによる手法

本手法は式(3)と図12で示す輪重の前后台車間の対角アンバランスにより異常検知する手法である<sup>3)</sup>。なお、式(3)は既存の他社特許<sup>4)</sup>であり、閾値は安全研究所で脱線事故時の記録などを分析し決定した。

$$\text{対角アンバランス} = \frac{|(P1+P3+P6+P8) - (P2+P4+P5+P7)|}{P1+P2+P3+P4+P5+P6+P7+P8} > \text{閾値} \quad (3)$$

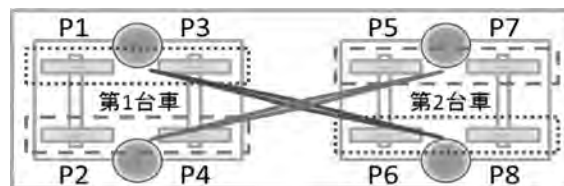


図12 輪重の対角アンバランス

(2) 輪重バランスの変動による手法

本手法は、式 (4) で異常検知する手法である。

$$|(\text{過去の同一諸元車両輪重バランスの平均値}) - (\text{輪重バランスの測定値})| > \text{閾値} \quad (4)$$

本装置での測定値(輪重)は、静止輪重とは異なるため「静止輪重比の管理値」を輪重バランスの閾値とすることはできないが、車両条件による変動幅は同一諸元の車両であれば平均値を中心に一定の範囲内であると推定できるという考えに基づいている。なお、閾値は測定データの分析により決定した。

## 5. 結言

相模湖駅構内脱線事故を契機に、輪重バランスの管理レベルを高めるため、各種検知装置の開発を実施した。第3章で述べたシステムは、「安研型空気ばね圧力異常検知システム」として、すでに当社における在来線新型車両へ標準的に搭載し運用している。また、第4章で述べた装置は、「安研型輪重アンバランス異常検知装置」として、豊田車両センターに設置したものを実用化しており、今後も必要に応じて各車両センターなどへ展開することを可能とした。今後も引き続き、鉄道車両の更なる安全性向上に向けた研究開発を進めていく。

### 参考文献

- 1) 運輸安全委員会、東日本旅客鉄道株式会社 中央線 相模湖駅構内 列車脱線事故、鉄道事故調査報告書 (2015)
- 2) 飯島仁、今井直人、空気ばね異常検知システム、鉄道車両、および空気ばね異常検知手法、特許第6444215号
- 3) 飯島仁他、地上輪重測定による空気ばね装置の異常検知方法の開発、第23回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2016)、S2-7-4 (2016)
- 4) 下川嘉之他、車両の異常検出方法、特許第5887651号