

## 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 3 報 空気ばね系のフェール検知について)

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

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

[機] 下川 嘉之 水野 将明 (住友金属工業)

[機] 谷本 益久 [機] 小村 吉史 (住友金属テクノロジー)

Study on Fault Detection of Railway Vehicles Using On-Track Monitoring Systems  
(The 3rd Report: Fault Detection of Air Springs)

○Koichi Ohtani, Hiroyuki Sugiyama, (Tokyo University of Science),

Yoshihiro Suda, Masahiko Aki, (The University of Tokyo)

Keiji Shikata, Jun Kurihara, Atsushi Iwamoto, Takuya Saito, Hiroshi Ohbayashi (Tokyo Metro),

Yoshiyuki Shimokawa, Masaaki Mizuno, (Sumitomo Metal Industries)

Masuhisa Tanimoto, Yoshifumi Komura, (Sumitomo Metal Technology)

In this investigation, a fault detection algorithm for an air spring system of railway vehicles is proposed using the on-track monitoring system. Numerical simulations and experimental tests are performed to discuss the dynamics of vehicles in failure modes of air spring systems, and it is shown that variations of wheel loads resulting from the failure can be used for detecting the failure of leveling valves.

キーワード：車両走行監視装置，状態監視，フェール検知，空気ばね

Key Words : On-track monitoring systems, Condition monitoring, Fault detection, Air springs, Leveling valves.

## 1. 緒言

鉄道車両の走行安全性の更なる向上のため，営業車両の運動状態を常時監視することにより，異常が発生した場合には，それを早期に発見し，脱線を伴う重大な事故を未然に防ぐことが可能となる．そこで，営業線のレールへひずみゲージを貼付することで輪重および横圧を常時監視する車両走行状態監視装置が東京地下鉄により開発され，営業線での脱線係数の異常値判定を含む車両の状態監視に用いられている<sup>1)</sup>．一方，本装置を用いることで，これまで定期検査でしか発見できなかった走り装置の異常を，オンタイムかつリアルタイムに検知するための研究も進められ，車両走行状態監視装置を用いたフェール検知のコンセプトが第 1 報で提案された<sup>2)</sup>．第 2 報では，1 次ばね系のフェールに対して，車両走行状態監視装置から得られる輪重および横圧データからその異常箇所を特定する方法の提案がなされた<sup>3)</sup>．

そこで本報では，図 1 に示す空気ばね系（2 次ばね系）

のフェール検知について報告する．空気ばね系のフェールとして，レベルングバルブ（以下 LV とする）のレバーの折損および逸脱に伴い，空気ばねへ空気が給気（給気フェール）または空気ばねから空気が排気（排気フェール）され続ける状態となるフェールを対象とする．その他に，空気ばねパンクや差圧弁の開閉不良に伴うフェールが考えられるが，今回は検討の対象外とした．

## 2. 空気ばね系のフェール

## 2.1 LV 給排気フェール

図 1 に示すように，LV は台車に接続されるリンク，高さ調節弁本体および両者を接続するレバーにより構成され，リンク機構により高さ変化を検出し，空気を給排気させることで空気ばねの高さを一定に保つ．LV は車両の外周部に装着されているため，外からの衝撃や疲労によるリンクやレバーの折損，変形，および締結部の損傷が起きることで故障することが考えられる．また，弁本体の故障では，内部の状況は外部から目視で確認することは困難である．こ

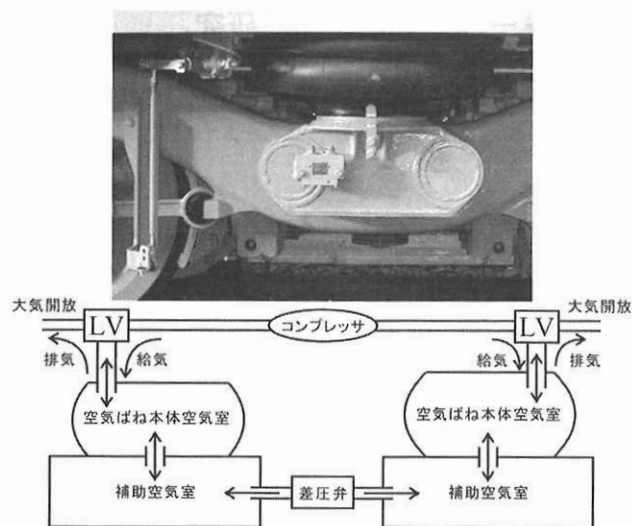


図1 空気ばね系の構成

表1 空気ばね内圧

|                  | 空気ばね内圧 (kPa) |     |     |     | 内圧<br>ねじれ<br>成分 |
|------------------|--------------|-----|-----|-----|-----------------|
|                  | 前台車          |     | 後台車 |     |                 |
|                  | 内軌           | 外軌  | 内軌  | 外軌  |                 |
| 通常走行             | 175          | 177 | 187 | 186 | -3              |
| 前台車 LV<br>排気フェール | <u>87</u>    | 231 | 245 | 127 | -262            |
| 前台車 LV<br>給気フェール | <u>551</u>   | 388 | 134 | 238 | 267             |

これらの要因により LV が正常に機能できない状態に陥ると、コンプレッサから空気を給気し続ける状態である LV 給気フェール、空気ばねから空気を排気し続ける状態である LV 排気フェールおよび給排気ともに行わない LV 中立フェールが発生する。

## 2.2 LV フェールの特徴

前台車の片側の LV レバーを強制的に変位させ、給気および排気フェールを模擬した際の空気ばね内圧の試験結果を正常時と比較して表 1 に示す。排気フェールでは、フェールした前台車の空気ばね内圧が正常時より低下し（表中に下線で示す）、それと同時に、その逆側の後台車の空気ばね内圧も低下していることが確認できる。つまり、対角に位置する空気ばねの内圧が上昇または低下していることが分かる。一方、給気フェールでは、その逆となり、フェール側の空気ばねおよび、その対角に位置する空気ばねの内圧が上昇していることが確認できる。

このような空気ばね内圧変化のメカニズムは次の通りである。排気フェールでは、空気ばねの内圧は時間とともに低下し、車体が下方に変位する。その後、空気ばね内圧差が設定値を超えると、差圧弁が開き、反対側の空気ばねの内圧も低下する。この空気ばね変位が設定値を超えると正常側の LV が作動して給気が始まる。つまり、正常な LV 側の空気ばねは常にコンプレッサで給気され、フェール側の空気ばねは常に排気される。その結果、フェール

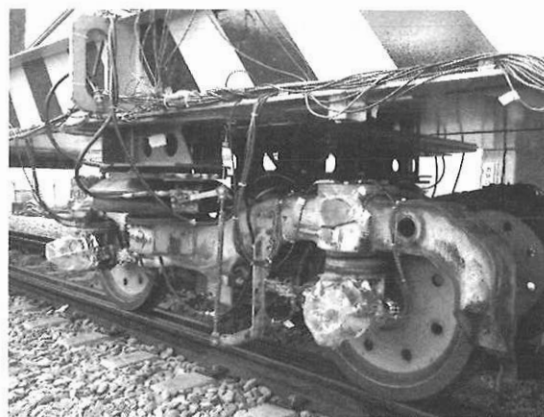


図2 フェール試験

した側の空気ばねはつぶれ、荷重を空気ばねの積層ゴムが支えることになる。一方、正常な LV 側の空気ばねは、差圧弁が開いているためフェール側の空気ばねに排気される一方、LV の動作により常に給気もされ、本試験の場合、空気ばね内圧により車体が支持される状態となる。そのため、表 1 示すような対角状に車体を支持する形態となる。図 2 に排気フェール試験の様子を示す。また、給気フェールの場合は、排気フェールの逆となり、フェール側の空気ばねは常にコンプレッサで給気され、正常な LV 側の空気ばねは常に排気される。そのため、フェールした空気ばねとその対角に位置する後台車の空気ばねで車体を支持することになる。

## 3. 走行試験とシミュレーションモデルの概要

### 3.1 試験線概要

住友金属工業製鋼所内に設置された半径 120m、カント 44.6mm、スラック 18mm の小曲線試験線にて、空車の車体重量相当の模擬車体に台車を装着した試験車を軌陸車で牽引し、速度 10km で走行させる。試験は通常走行および台車部品をフェールさせた車両について行い、輪重および横圧について、前台車の前後軸に装着した PQ 輪軸によって輪重、横圧データを取得する。

### 3.2 空気ばねおよび LV のモデル化

LV がフェール状態における車両運動の特徴を抽出するため、車両運動シミュレーションも実施する。さらに、本特徴抽出に基づき、監視装置設置位置における輪重および横圧により LV 給排気フェールを検知する方法について検討する。本研究では、SIMPACT™ の非線形空気ばねモデルを使用した。本モデルでは、空気ばね本体および補助空気室内のポリトロプ変化から内圧を決定する非線形モデルであり、LV および差圧弁も別途モデル化した。また、LV は不感帯を含め、現車の給排気流量特性をモデル化している。

## 4. 空気ばねフェールのフェール検知

### 4.1 空気ばねフェール時の車両運動

はじめに、通常走行時における第 1 軸の内外軌輪重およ

び横圧の実験と計算結果の比較を図 3 に示す。実験では試験の制約から緩和曲線内の 215m の位置から減速を始め、230m の位置で停止している。そのため、速度一定を仮定したシミュレーション結果と出口緩和曲線内での輪重に差異が見られるが、円曲線内の輪重および横圧に概ね良い一致が見られる。また、同図中の破線で示した箇所が、車両走行状態監視装置の設置を想定した位置である。

次に、前台車内軌側の LV を排気フェールさせた場合における第 1 軸の内外軌輪重および横圧の実験および計算結果を図 4 に示す。本図より LV フェールの車両運動について、実験結果と計算結果に良い一致が見られる。また、外軌輪重が増加し、内軌輪重が減少していることが分かる。これは、表 1 でも示したように、排気フェールにより前台車内軌側の空気ばね内圧が低下しているため、前台車外軌側の空気ばねと後台車内軌側の空気ばねで対角状に車体を支持しているためである。つまり、LV フェールの特徴として、左右空気ばねに内圧差が生じ、車体を対角状に支持することになるため、輪重のアンバランスが対角状に発生する。

#### 4.2 フェール検知

空気ばねフェールでは、輪重のアンバランスが対角状に発生するため、輪重のねじれ成分を用いたフェール検知法に

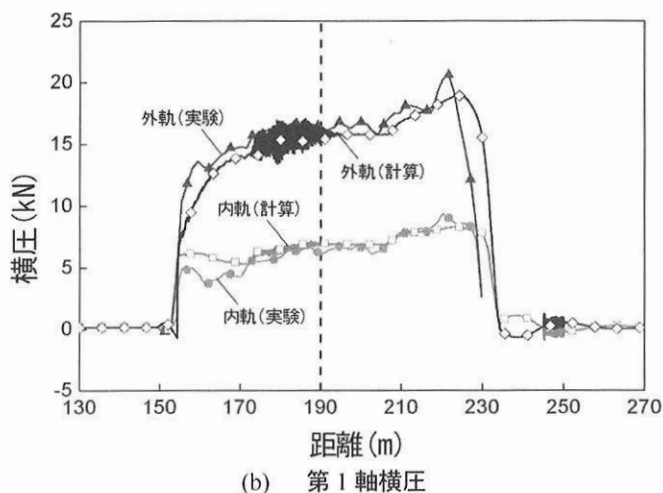
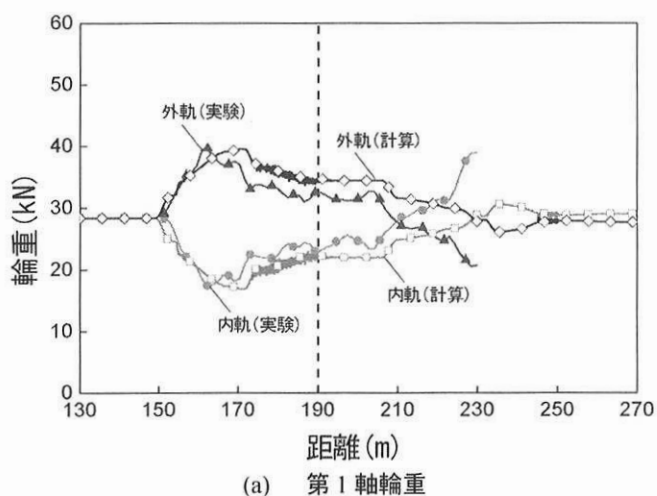


図 3 通常走行 (フェールなし) の結果

について提案する。そこで、車体の輪重ねじれ成分を図 5 に示す関係から次式のように定義する。

$$\text{車体ねじれ成分} = (P_1 + P_3) + (P_6 + P_8) - (P_2 + P_4) - (P_5 + P_7) \quad (1)$$

表 1 に示すように、内圧の車体ねじれ成分は正常時にはほぼゼロであるが、LV の給排気フェール時には、その絶対値が大きな値となることが分かる。さらに、輪重による異常値判定を行うため、フェール時の輪重の車体ねじれ成分と通常走行時の基準となる輪重の車体ねじれ成分の差の絶対

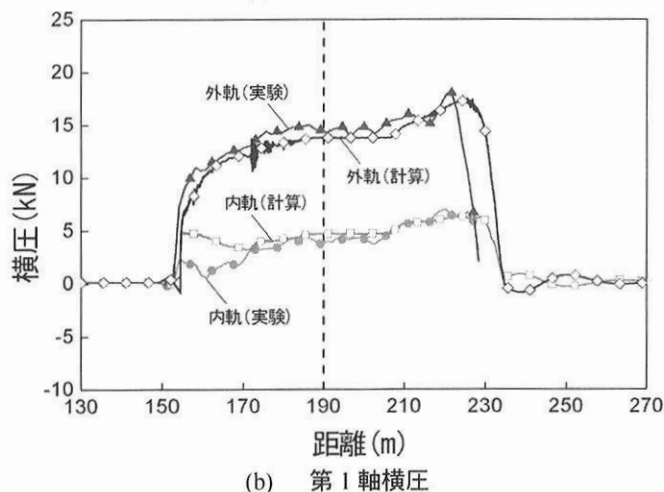
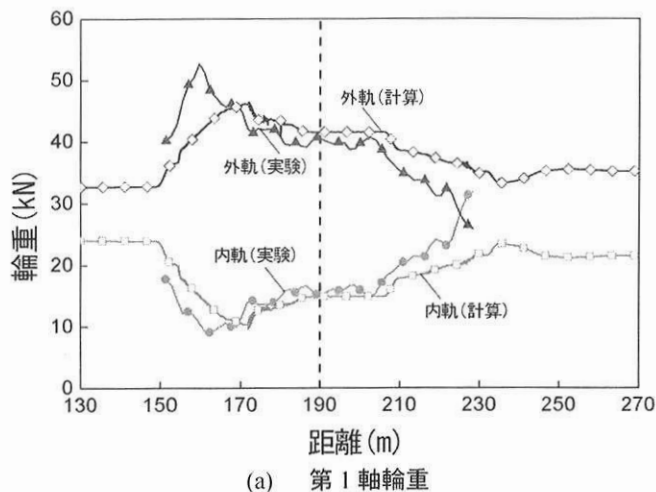


図 4 LV フェールの結果

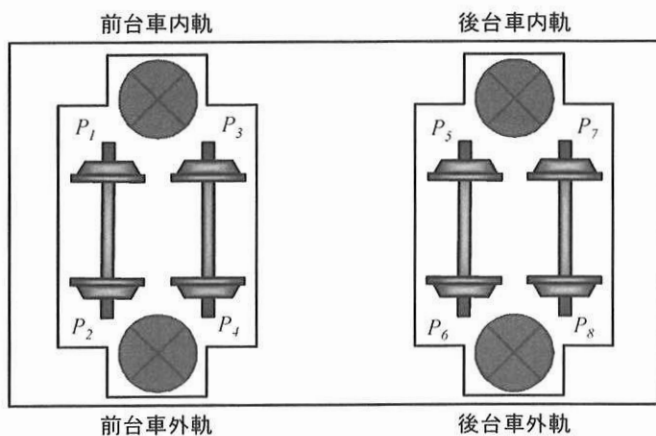


図 5 輪重のねじれ成分の定義

値を、空車全輪重合計で除した値を次式のように空気ばね系異常指標と定義する。

空気ばね系異常指標

$$= \frac{|\text{各状態の車体ねじれ成分} - \text{基準の車体ねじれ成分}|}{\text{基準車両重量}} \quad (2)$$

円曲線内 190m の位置における状態監視装置上 (図 3 および図 4 に破線で示す) の通常走行および LV 給排気フェール時での空気ばね系異常指標の計算結果を図 6 に示す。通常走行時のねじれ成分は小さいため、異常指標値はほぼゼロであるのに対し、LV 排気および給気フェールでは通常走行時と比較して有意な差が確認できる。つまり、輪重の車体ねじれ成分に着目することで LV フェールを検知することが可能であると考えられる。

### 5. 速度および乗車率の影響

次に、車両走行状態監視装置による空気ばね系のフェール検知法の検証のため、東京地下鉄東西線内の車両走行状態監視装置設置区間において、走行速度および乗車率がフェール検知に及ぼす影響についてシミュレーションにより検討を行う。走行速度は低速の 10km/h および均衡速度近傍の 40km/h の 2 ケースを想定した。また、乗車率は空車、定員および 250%満車の 3 ケースを想定した。このとき、通常走行およびフェール時の異常指標値を図 7 にまとめる。ここで、本異常指標は均衡速度近傍の 40km/h 空車の通常走行状態を基準にして、異常指標を算出した。本結果

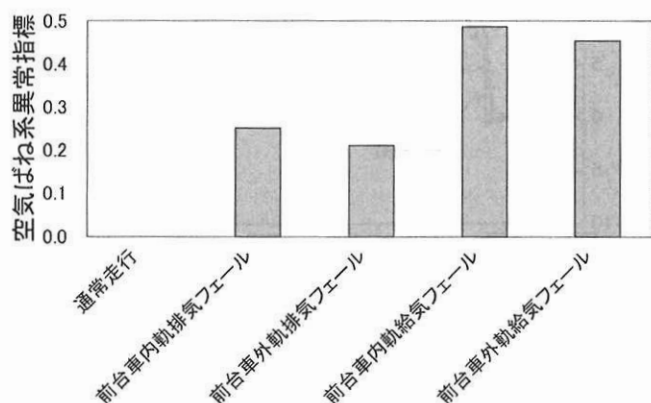


図 6 空気ばね系異常指標結果 (試験線)

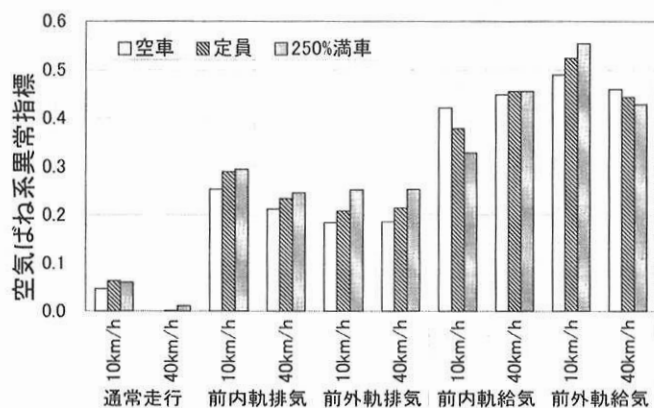


図 7 空気ばね系異常指標の速度、乗車率の影響 (本線)

より、走行速度および乗車率によらず、LV フェール時の輪重のねじれ成分を用いた異常指標値は、通常走行時の異常指標値と比較して有意な差が生じていることが分かる。また、均衡速度での通常走行であれば、輪重のねじれ成分はほぼゼロになる一方、カント超過となる低速域では緩和曲線内で LV が動作し、レバーが不感帯内で止まるため、円曲線内でもその分の輪重のアンバランスが残り、輪重のねじれ成分に起因した異常指標値が僅かに出ているが、その値は LV フェールによる輪重アンバランスと比較して十分小さく、誤検知を誘発するレベルではないことが確認できる。また、輪重の対角成分差で与えられる車体ねじれ成分を用いてフェール判定を行うため、乗車率が異常指標値へ及ぼす影響は軽微であることが分かる。このことは、営業線でのフェール検知において望ましいと傾向と言える。つまり、今回想定した速度および乗車率の変動内であれば、輪重の車体ねじれ成分より定義される異常指標値から LV 給排気フェールが検知可能であると言える。

### 6. 結言

本研究では、円曲線内に設置された車両走行状態監視装置を用いた空気ばね系の車両フェール検知法を提案した。曲線試験線におけるフェール試験およびシミュレーションにより、輪重の車体ねじれ成分から LV の給気および排気フェールの検知が可能であることを示した。また、本線の車両走行状態監視装置設置区間において、走行速度および乗車率の影響を考慮した解析を実施し、走行速度および乗車率によらず、提案した異常指標に基づくフェール検知法により LV の給排気フェールの検知が可能であることを示した。

今後、空気ばねパンク、差圧弁フェールについても検討を行う予定である。また、本報告では、定常な輪重値となる円曲線内に車両走行状態監視装置を設置した場合を想定したが、軌道ねじれによる輪重アンバランスが発生する緩和曲線内へ車両走行状態監視装置を設置した場合やその取得データに基づくフェール検知の可能性についても検討を進めている。

### 参考文献

- 1) 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 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp. 333-336, 2010.
- 2) 大林, 鹿田, 栗原, 岩本, 齋藤, 須田, 安藝, 杉山, 大谷, 下川, 水野, 谷本, 小村: 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), 第 18 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 2011.
- 3) 下川, 水野, 谷本, 小村, 須田, 安藝, 杉山, 大谷, 鹿田, 栗原, 岩本, 齋藤, 大林: 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 2 報: 軸ばね系フェール検知について), 第 18 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 2011.