

# 台車振動加速度による状態監視手法

城取 岳夫\* 安永 年広\*

## A Method of Sound Monitoring for Railway Vehicles with Acceleration on a Bogie

Takeo SHIROTORI Toshihiro YASUNAGA

Sound monitoring of railway vehicles is essential for securing ride comfort and safety for passengers. However, the sound monitoring system equipped with many sensors may not only be expensive, but also require much expense for maintenances of the sensors. Therefore, we have developed a system to evaluate the sound conditions of railway vehicles with fewer sensors. In this paper, we demonstrated the system under development detected damping malfunctions of an axle damper or an air spring, a puncture of air springs and a derailment that caused singular vertical acceleration with only one accelerometer on a bogie.

キーワード：台車，振動加速度，軸ダンパ，空気ばね，脱線，状態監視

### 1. はじめに

鉄道車両は、安全性や乗心地を維持するため定期的に工場で分解検査が行われる。これらの検査に加え、走り装置の状態監視を運用時に常時行えば安全性や乗心地の向上が期待できる。鉄道車両の常時状態監視（以下、状態監視）の研究は、日本では1980年代から始まり<sup>1)</sup>、最近でも盛んに研究が行われている<sup>2)~4)</sup>。しかしながら、営業車の走り装置に状態監視装置が実装された例は少ない。これは、多くのセンサや複雑な機構を使うシステムは、初期費用がかかるばかりでなく、将来にわたり状態監視装置のメンテナンスも問題となるため鉄道事業者が採用し難いことが原因であると考えられる。

そこで本研究では、例えば1台車に1個もしくは2個程度の少ないセンサで、安全性や乗心地につながる車両運動に関する部品の不具合や走行状態を監視するシステムを検討した。少ないセンサで検知可能な異常はいくつか考えられる<sup>5)~8)</sup>が、これらのうち本報では、台車枠横ばり中央の上下振動加速度をもとに軸ダンパや空気ばねの減衰機能の不良、空気ばねのパンクに関する故障診断、さらに脱線検知について、検討した手法を報告する。

### 2. 状態監視システムの構成

ここで紹介する状態監視システムの基本構成を図1に示す。本システムは、各台車枠に加速度センサを備えていることを想定し、さらに、診断の確実性向上と監視項目の増加のため、特定の軸に軸箱加速度センサを備える形態も検討した。

\* 車両構造技術研究部 車両運動研究室

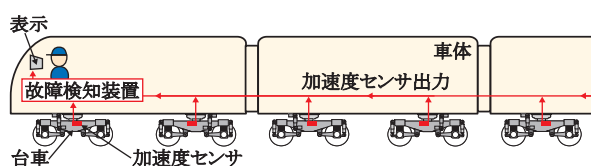


図1 状態監視システムの基本構成

### 3. 軸ダンパや空気ばねの減衰異常検知

以下では、軸ダンパや空気ばねの減衰機能の不具合を検知する方法を数値シミュレーションにより検討した例を示す。軸ダンパや空気ばねに不具合が生じれば、乗心地や安全性に影響を与えることが考えられる。

数値シミュレーションは、図2に示すような車体を剛体と仮定した17自由度の1車両モデルを使用した。走行速度は275km/hとし、入力は、車両の振動モードに留意し白色雑音を周波数80Hzまでで帯域制限をした波形を高低不整として使用した。

検知の方法は、新製時あるいはメンテナンス直後の台車枠の上下振動加速度と走行時の台車枠の上下振動加速度を周波数毎に比べる。この方法を以下、振幅比による方法と呼ぶことにする。なお、軸受監視などのために軸箱の上下振動加速度センサを持つ車両に対しては、軸箱の上下振動加速度と台車枠の上下振動加速度を周波数毎に比較することで検知も可能で、この方法を以下では、応答倍率による方法と呼ぶことにする。

前者は、軸箱に上下方向の加速度センサを必要としない利点があるが、同程度の軌道不整と比較することが必要となる。後者は、軸箱の上下振動加速度と台車枠の上

特集：車両技術

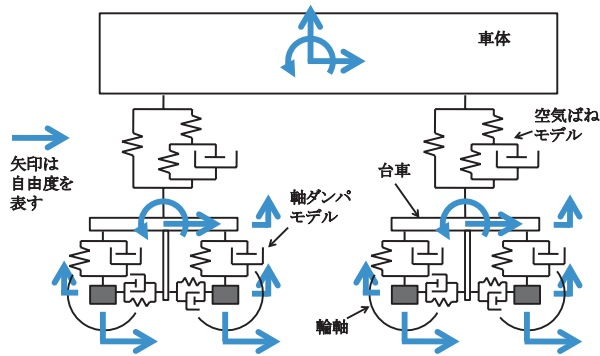


図2 数値シミュレーション用上下系一車両モデル

下振動加速度の比をとっているので、軌道不整の大小に影響を受けない利点がある。

3.1 軸ダンパの減衰異常検知の検討

軸ダンパ異常時の台車上下振動加速度の傾向を調査するために、数値シミュレーションを行った。ここでは、軸ダンパの減衰係数を、オイルの不足条件では1車両8本の軸ダンパのうち1本が0、オリフィスの目詰まり条件では1車両8本の軸ダンパのうち1本が健全時の2倍として計算した。軸ダンパの異常を振幅比による方法で検知する例を図3に示す。この図では、健全状態が各周波数で1になる。軸ダンパの減衰特性の違いは、7.5Hzより高い周波数帯域で差が顕著になる。従って、振幅比によりこの周波数帯域を比較することで軸ダンパの不具合を判定できると考えられる。

次に、軸ダンパの異常を応答倍率による方法で検知する例を図4に示す。5Hzから8Hzにも違いがあるが、特に違いが顕著なのは8Hz以上の周波数帯域である。よって、この周波数帯域での応答倍率の違いにより判別するのが良いといえる。

3.2 空気ばねの減衰異常検知の検討

空気ばね異常時の台車上下振動加速度の傾向を調査するために、空気ばねの減衰係数を、オリフィスの欠損条件では1車両4個のうち空気ばね1個が0、オリフィスの目詰まり条件では1車両4個のうち空気ばね1個が健全時の2倍として数値シミュレーションを行った。空気ばねの減衰異常を振幅比による方法で検知する例を図5に示す。空気ばねの不具合の場合、1Hzから15Hz付近の広い周波数帯で差があることがわかる。

同様の異常を応答倍率による方法で検知する例を図6に示す。1.4Hz付近の車体の共振と連成する台車枠の共振周波数帯においても違いはあるが、特に顕著なのは、3Hzから8Hzの周波数帯域である。よって、この周波数帯域で判別するのが良いといえる。

特に図3と図5を比較すると、車体と台車の連成に起

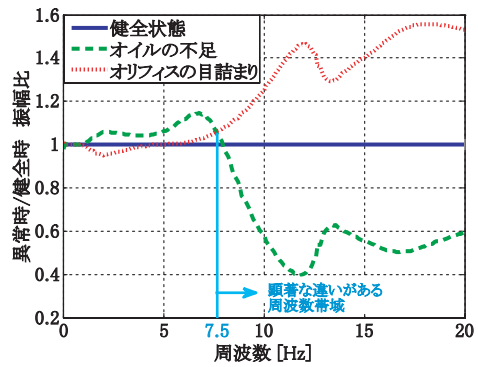


図3 振幅比による軸ダンパの減衰異常検知

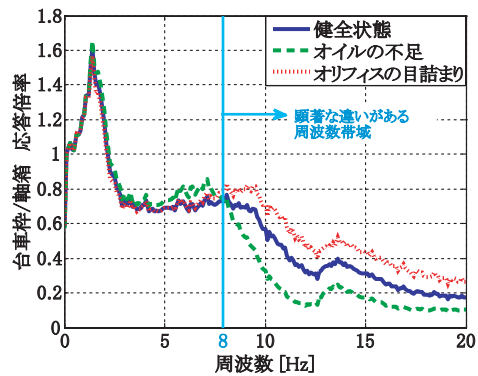


図4 応答倍率による軸ダンパの減衰異常検知

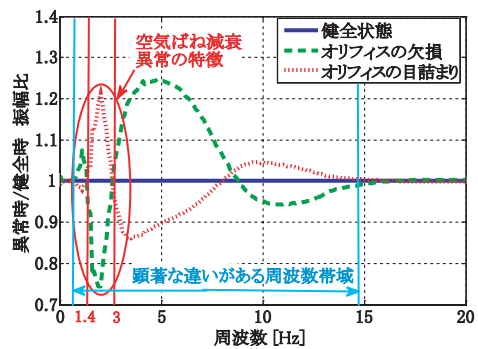


図5 振幅比による空気ばねの減衰異常検知

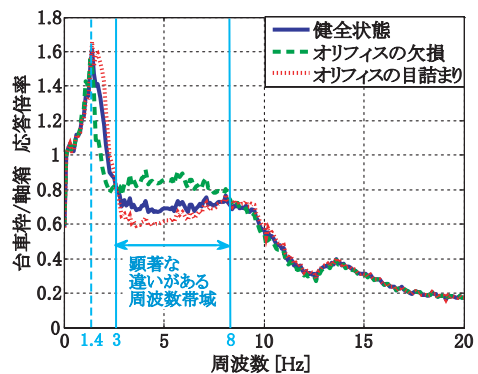


図6 応答倍率による空気ばねの減衰異常検知

因する周波数である1.4Hz付近の特性が大きく異なることが分かる。したがって、台車枠に1つの加速度センサであっても軸ダンパの不具合と空気ばねの不具合を区別できることが明らかになった。

#### 4. 空気ばねパンク検知

空気ばねがベローズの破損や配管の漏気によりパンクすると、乗心地を損なうだけでなく、出口緩和曲線部での軌道のカントでい減に対する車輪の追従性が悪くなり脱線のリスクが増す方向となる。そこで台車の振動加速度から空気ばねパンク検知が可能か検討した。

まず、加振波形を制御できる試験台試験により振動加速度の特徴を明らかにした上で、鉄道総研構内において走行試験を行い、検知方法を検討した。

##### 4.1 試験台における空気ばねパンク走行試験

空気ばねが健全な状態とパンクした状態の振動加速度の差異を調べるために、図7の写真のように在来線試験車両を使用し試験台試験を行った。パンク条件では、1両に2台ある台車のうちの1台車の空気ばね2個をパンクさせ、走行速度は100km/hで実軌道波により上下方向と左右方向に加振した。

両条件での台車の上下振動加速度をパワースペクトル密度 (PSD) により比較したものを図8に示す。空気ばねが健全な条件では、台車の上下振動加速度PSDのピーク周波数が14Hz付近であるのに対し、空気ばねがパンクした条件では、4.4Hzに変化した。この変化が顕著であるため、状態監視用の加速度センサを台車枠に取り付ければ、振動の大きさではなく周波数の変化で、空気ばねパンクを検知できることがわかった。

軸箱上下支持剛性の設計値と台車、車体の質量を用いて固有振動数を計算すると、4.2Hz程度になる。空気ばねがパンクした条件で観察された4.4Hzのピークはこれにほぼ一致した。

さらに、両条件における台車直上の車体上下振動加速度PSDを比較したものを図9に示す。空気ばねが健全な条件では、車体の上下振動加速度PSDのピーク周波数が2Hz付近であるのに対し、空気ばねがパンクした条件では、4.4Hzに変化している。この変化も顕著であり、図1に示した構成と異なるが状態監視装置の加速度センサを車体の台車直上に取り付けた場合も、空気ばねパンクを検知できる。

##### 4.2 構内における空気ばねパンク走行試験

試験台試験により、上下振動加速度の注意すべきピーク周波数が明らかになった。そこで、鉄道総研の構内試験線を走行し、空気ばねが健全な条件と空気ばねがパン



図7 試験台試験の様子

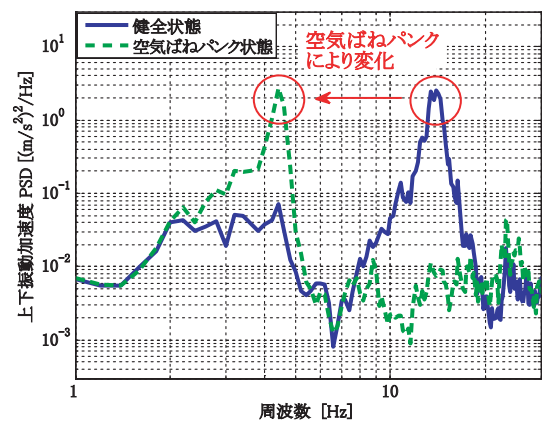


図8 試験台試験における空気ばねパンク時の台車の振動加速度 PSD の比較

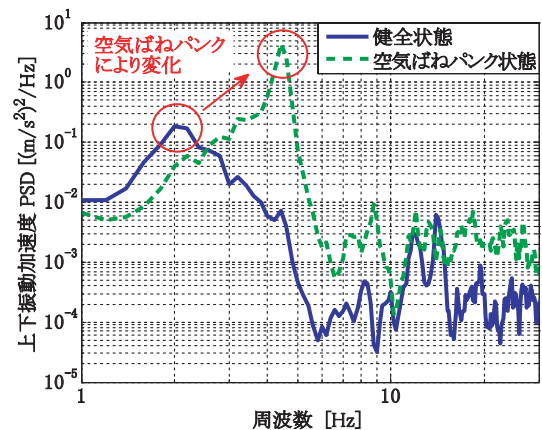


図9 試験台試験における空気ばねパンク時の車体の振動加速度 PSD の比較

クした条件の振動加速度の差異を調べた。試験は、140m程の直線区間で最高速度25km/hで行った。車両は試験台試験に用いた車両で、パンクした条件では試験台試験と同様に、1台車の空気ばね2個をパンクさせた。

両条件での台車の上下振動加速度PSDを比較したものを図10に示す。試験台試験と同様に空気ばねが健全な条件では、台車の上下振動加速度PSDのピーク周波数が

特集：車両技術

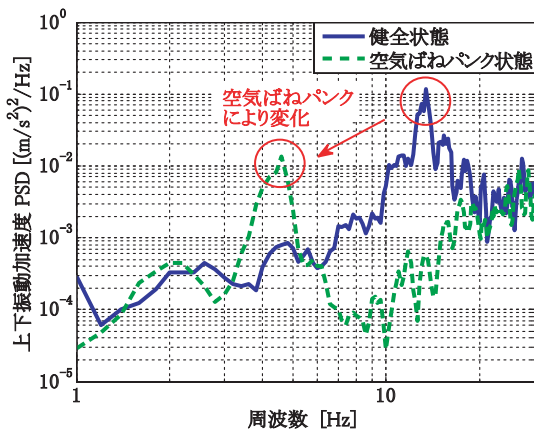


図10 構内走行試験における空気ばねパンク時の台車の振動加速度 PSD の比較

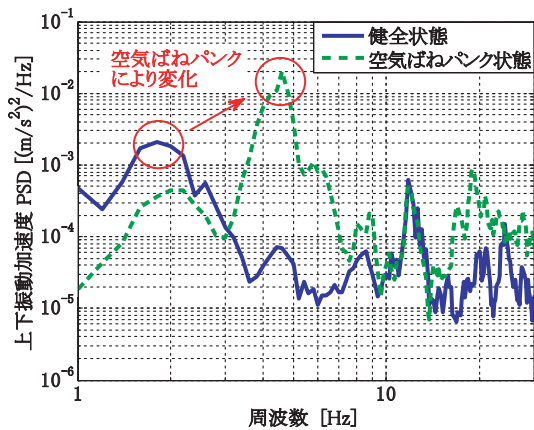


図11 構内走行試験における空気ばねパンク時の車体の振動加速度 PSD の比較

13.4Hzであるのに対し、空気ばねがパンクした条件では、4.6Hzに変化した。

さらに図11に示す車体の上下振動加速度 PSDにおいても、試験台試験と同様に、空気ばねが健全な条件では2Hz付近であるピーク周波数が、空気ばねがパンクした条件では、4.6Hzに変化した。

以上のことから、台車や車体の上下振動加速度のピーク周波数が、空気ばねを含まない台車・車体の質量と軸ばねで構成されるばねマス系の固有振動数（例えば4.2Hz）付近に遷移したか否かを監視すれば、空気ばねのパンクを検知できることが確認できた。

## 5. 脱線検知

### 5.1 基本的な考え方

従来の研究<sup>9)~11)</sup>では、しきい値を超えた加速度の頻度や現在と直前の加速度積算値を比較する方法などが提案されている。これらの方法に対し、本研究では脱線の検知精度を高めるために、車両の特定の部位のピーク

振動加速度が通常時と異なることに加え、脱線時に固有の振動加速度波形が正負で非対称であることに着目した。ここでピーク振動加速度とは、一定時間内の振動加速度の最大値を指す。本検知方法はつまり、「走行速度と軌道状態が特定されれば、台車枠や車体の正や負のピーク振動加速度の大きさは概ね特定される」と考え、走行速度段（例えば10km/h刻み）と軌道状態グループ（例えば線区等級）毎にピーク振動加速度の統計的な平均値と標準偏差値のデータベースを予め作成しておき、これと走行した際のピーク振動加速度を逐次比較することにより異常を検知し、さらに振動加速度波形の正負が非対称であることなどにより、脱線と特定することとした。

以下では、統計手法の第一段階である標本分布（通常時振動加速度の分布）の確認とこれに照らし合わせた脱線時振動加速度の通常時からの乖離の定量化を行い、最後に提案する脱線検知方法の考え方について述べる。

### 5.2 検知方法の検討

本稿の検討対象は旅客車の脱線検知であるが、継続して脱線走行している試験結果としては、貨車を使用した試験結果が入手可能であったため、これを参考にした。台車構造等の違いはあるが、通常時と脱線時のピーク振動加速度の比較で判定をするので問題はないと考えた。

なお、ピーク振動加速度は、走行速度に応じた一定時間毎に算出する。ここでは、後に示す脱線時の振動加速度波形（図15）を参考に、走行速度60km/h程度までで、0.25秒毎とした。

#### 5.2.1 通常走行

はじめに通常走行におけるピーク振動加速度の統計的な分布を確認する。2軸ボギー貨車の通常走行時の車体上下振動加速度波形<sup>12)</sup>を図12に示す。この波形のピーク振動加速度を一定時間毎に算出し、度数分布に表した結果をそれぞれ図13と図14に示す。サンプル数が100程度と十分とは言えないが、図13に示す正のピーク振動加速度は正規分布やF分布に近い分布形状となった。いずれも平均値周辺で度数が高く、平均値から乖離するほど、度数が低下する分布となっている。このことから、平均値から乖離するほど異常の可能性が高いという手法が採用できることが確認された。通常走行時の平均値と標準偏差を表1に示す。

なお、脱線時の試験データの走行速度が9km/hであったので、同速度の通常走行時の車体上下振動加速度と比較するのが好ましいが、脱線試験で使用した貨車の走行速度9km/hのデータを入手することができなかった。そこで通常走行時のデータとして同様な2軸ボギー貨車の走行速度60km/hのデータを使用した。車体の振動加速度は速度とともに大きくなるので、以下に示す脱線の検

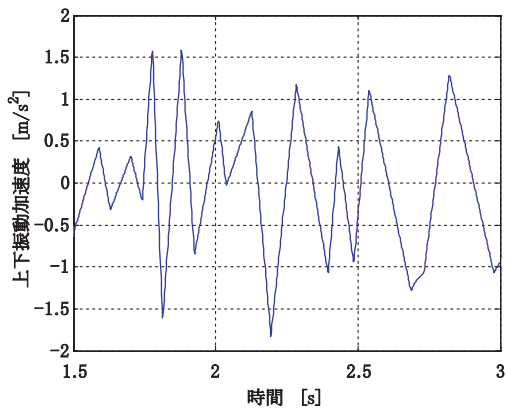


図12 通常走行時の車体上下振動加速度波形<sup>12)</sup>

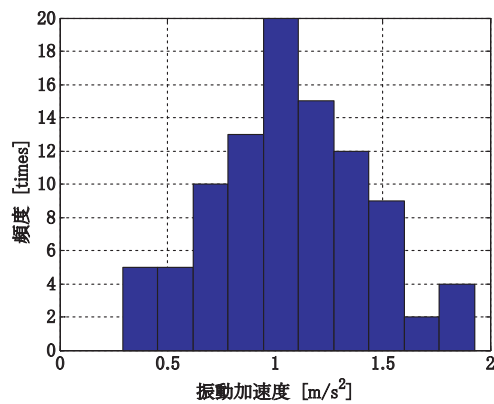


図13 正のピーク振動加速度の度数分布

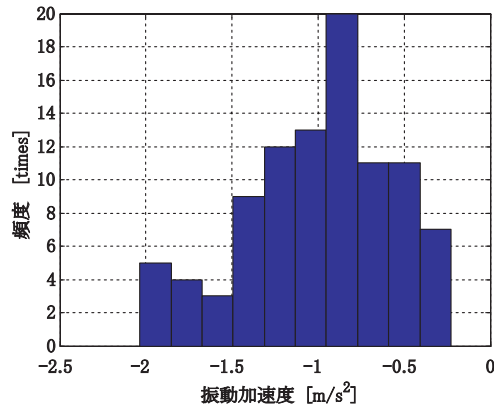


図14 負のピーク振動加速度の度数分布

表1 通常走行時の車体上下振動加速度の平均値と標準偏差

	平均値	標準偏差
正のピーク振動加速度 [m/s <sup>2</sup> ]	1.07	0.36
負のピーク振動加速度 [m/s <sup>2</sup> ]	-1.00	0.43

知が安全側の判定となり、走行速度 60km/h の振動加速度との比較が問題ないと考えた。

### 5.2.2 脱線走行

貨車の脱線走行時の車体上下加速度波形<sup>13)</sup> を図15に示す。ただしこの節での加速度軸は下向きが正方向である。この波形を通常走行時と同様に処理し、ピーク振動加速度を通常走行時の標準偏差と比較した(式(1),(2))。

$$\alpha_p > 30\sigma_p \quad (1)$$

$$\alpha_n < -50\sigma_n \quad (2)$$

ここで、

通常走行時の正のピーク振動加速度の

標準偏差： $\sigma_p$  [m/s<sup>2</sup>]

通常走行時の負のピーク振動加速度の

標準偏差： $\sigma_n$  [m/s<sup>2</sup>]

脱線時の正のピーク振動加速度： $\alpha_p$  [m/s<sup>2</sup>]

脱線時の負のピーク振動加速度： $\alpha_n$  [m/s<sup>2</sup>]

また、図15では、正のピーク振動加速度より負のピーク振動加速度の絶対値が大きい波形が持続する。これは、道床バラストやまくらぎにより車輪が上方向に衝撃

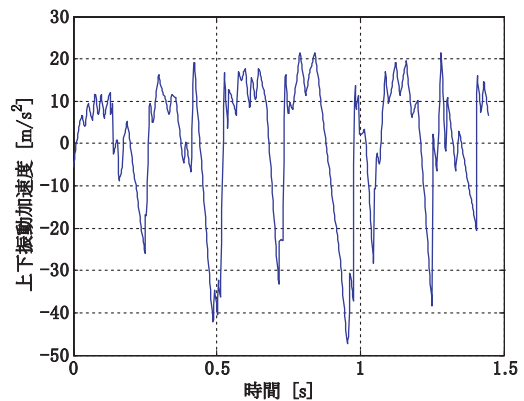


図15 脱線時の車体の振動加速度<sup>13)</sup>

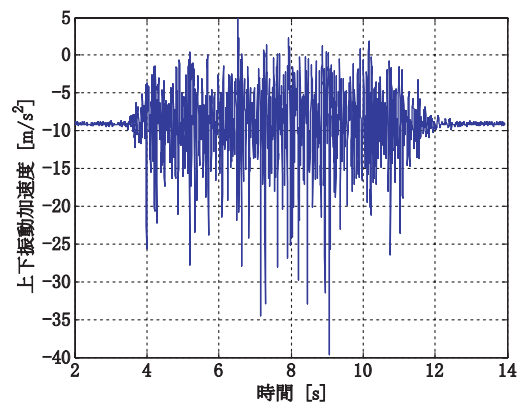


図16 荷役台車の砂利路走行時の振動加速度

## 特集：車両技術

的な力を受けることによると考えられる。このことを確認するために、荷役台車に加速度センサを取付け、砂利路面を走行した。図16に示す上下振動加速度は、図15と同様に正のピーク振動加速度より負のピーク振動加速度の絶対値が大きい波形が持続した。このことから、正のピーク振動加速度より負のピーク振動加速度の絶対値が大きい波形は、鉄道車両の台車構造によるものではなく、車両が脱線した際にバラストやまくらぎにより車輪が上方方向に衝撃的な力を受けている脱線時の特徴的な波形であることが確認できた。

さらに、まくらぎの間隔が一般的に25mあたり34本から44本であることと脱線時の走行速度が9km/hであったことを考慮すると、実験車両の車輪は、0.30秒から0.23秒毎にまくらぎ上を通過したと考えられる。図15中の負のピーク振動加速度の時間間隔は0.25秒程度で、車輪のまくらぎ通過時間と一致する。よってまくらぎと車輪の衝突により負のピーク振動加速度が生じたと考えられる。このことから車輪のまくらぎ通過時間を考慮することで脱線検知の精度を上げることができると考えられる。またスラブ軌道などにおいても、軌道情報をもとに脱線検知の精度を上げることができると考えられる。

## 5.2.3 脱線検知の方法

以上の検討結果より、脱線検知方法の考え方を提案する。

1)速度、軌道状態毎のピーク振動加速度と走行時のピーク振動加速度を正負でそれぞれ比較し、通常状態を外れる際には車両に脱線を含む何らかの異常があるとして警告を発生し、標準偏差の数十倍外れる場合には緊急事態と判定する。

2)特に、正のピーク振動加速度の絶対値より負のピーク振動加速度の絶対値が大きく、発生間隔が走行速度でのまくらぎやスラブ盤等の通過時間と一致すると脱線の可能性が高いと判定する。

以上は車体の振動加速度についての議論であったが、台車枠の前後方向中心付近は、軸箱から車体へ振動加速度が伝達する経路にあるため、台車枠でも同様の観測ができ、台車枠の前後方向中心付近での検知も可能であると考えられる。

## 6. まとめ

安全性や乗心地に直結した台車部品の不具合や走行状態を監視するシステムについて、1台車に1個ないしは2個程度の少ないセンサで状態を監視する手法について検討した。その結果、軸ダンパや空気ばねの減衰特性異常、空気ばねのパンク、さらに脱線について1台車枠に

取り付けた1個の上下振動加速度センサによりこれらを検知するための手法を提案した。

今後、さらに実験を行い異常判定しきい値の検討などを進めてゆくと共に、検知できる事象を広げてゆきたいと考えている。

## 文献

- 1) 中栄周三, 伏屋一雄, 石原知明, 脱線検知装置の試験, 鉄道技術研究所速報, No.82-1002, 1982
- 2) 日置潤一, 山下高賢ら, 低速乗り上がり脱線予兆検知システムの実証実験, J-Rail2010, pp.491-494, 2010
- 3) Ward, C P., Weston, P E., et al., Condition monitoring opportunities using vehicle-based sensors, Proc. IMechE, Vol.225 Part F, pp.202-218.
- 4) 森裕貴, 網島均, 多重モデル法を用いた鉄道車両の状態診断, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.76, No.770, pp.2364-2371, 2010
- 5) 城取岳夫, 安永年広, 省センサによる鉄道車両の状態監視の可能性について, 日本機械学会 2009 年度年次大会, pp.407-408, 2009
- 6) 城取岳夫, 安永年広, 鉄道車両の多様な安全性や不具合の検知が可能な監視診断法の基礎検討, J-Rail2009, pp.607-610, 2009
- 7) 城取岳夫, 安永年広, 簡潔なシステムによる鉄道車両の状態監視の可能性について (脱線検知の基礎検討), Dynamics and Design Conf. 2010 講演論文アブストラクト集, p.245, 2010
- 8) 城取岳夫, 安永年広, 簡潔なシステムによる鉄道車両の状態監視の可能性について (上下系部品の異常検知), J-Rail2010, pp.481-482, 2010
- 9) 金子健一, 三須弥生, 斎藤憲司, 平林健一, 河田直樹, 脱線検知装置の開発 (車体振動による検知法とその検証), J-Rail2002, pp.131-134, 2002
- 10) 金子健一, 三須弥生, 斎藤憲司, 平林健一, 河田直樹, 脱線検知装置の開発 (軌条からの落下検知法とその検証), J-Rail2002, pp.135-138, 2002
- 11) 森川真人, 山下高賢, 川鍋哲也, 国見敬, 須田義大, 洪介仁, 王文軍, 乗り上がり脱線の予知検知に関する研究, J-Rail2008, 2008
- 12) 脱線事故技術調査委員会, 事故原因調査試験 (9A-3-2), 脱線事故技術調査委員会報告付属資料, No.16, pp.71-85, 1972
- 13) 脱線事故技術調査委員会, 事故原因調査試験 (4A-6-2), 脱線事故技術調査委員会報告付属資料, No.17, pp.182-196, 1972