台車の加速度による故障検知

城取　岳夫
車両構造技術研究部
（車両運動　主任研究員）

安永　年広
同
（同　研究員）

しろとり　たけお　やすなが　としひろ

はじめに

鉄道車両は，安全性や乗り心地を維持するため定期的に工場で分解検査が行われます。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，安全性や乗り心地が向上できます。鉄道車両の常時状態監視（以下，状態監視）の研究開発は，日本では1980年代から始まり[1)]，最近でも盛んに行われています。しかしながら，営業車の走り装置に状態監視装置が付いた例は少ないのが現実です。これは，多くのセンサや複雑な機構を使うシステムでは，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そのものにメンテナンスコストがかかるため，鉄道事業者が採用し難いことが原因であると考えられます。そこで本研究では，例えば1台車に1個か2個程度の少ないセンサで走り装置の状態を監視するシステムの構築を検討することにしました。調べていくと少ないセンサでいろいろな異常の検知ができそうなことがわかってきました。ここでは台車枠の加速度を頼りに，各種ダンパや空気ばねの減衰機能の不良，空気ばねのパンクを検知する方法について述べます。また，脱線検知についても紹介します。

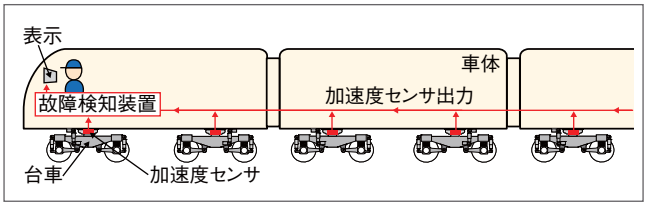

図１　状態監視システムの構成図

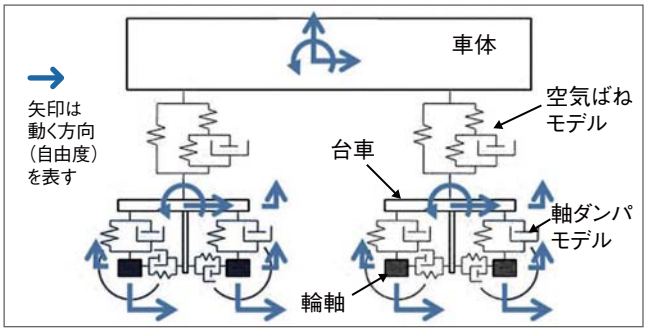

図２　数値シミュレーションで想定する車両モデル

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構成を図１に示します。前述のように本システムは，各台車枠に加速度センサを備えています。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ことも，検討しています。

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挙げます。軸ダンパについてはオイル漏れ，オリフィス（オイルの流量を調整するための小孔）詰まりを検討します。オイルダンパに比べ頻度が低いですが，空気ばねについては，オリフィスの欠損（または組み付け忘れ），異物による詰まりを検討します。これらが生じれば，乗り心地や走行安全性に影響を与えることが考えられます。

軸ダンパや空気ばねの不具合は，減衰機能以外にも考えられますが，ここでは減衰機能の不具合に限って述べます。数値シミュレーションで想定する車両モデルは，図２に示す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ました。

検知の方法は2種類を検討しました。1つ目は，軸箱の上下加速度と台車枠の上下加速度を周波数毎に比べる方法です。以下，応答倍率による方法と呼ぶことにします。車軸の軸受に加速度計が付いている場合は，これらの加速度計を利用することも考えられます。2つ目は，軸箱に上下方向の加速度計が無い場合に，新製時あるいはメンテナンス直後の台車枠の上下加速度と，現在の台車枠の上下加速度を周波数毎に比べる方法です。以下，振幅比による方法

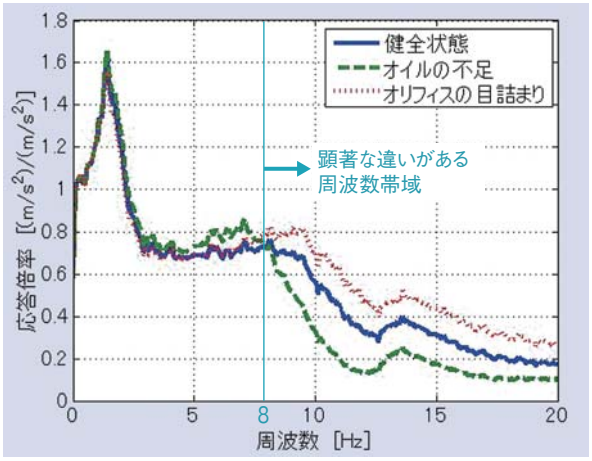

図３　応答倍率による軸ダンパの減衰異常検知

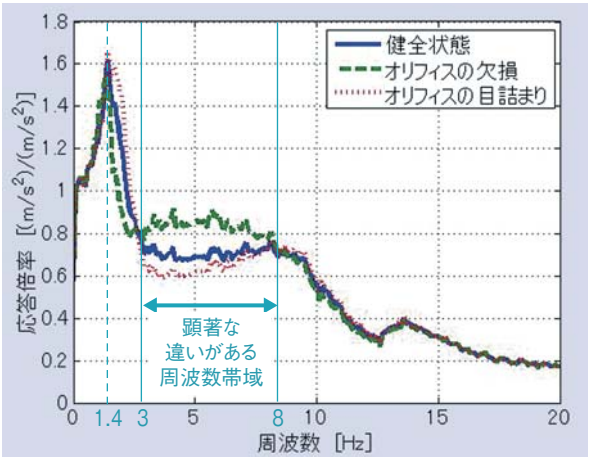

図５　応答倍率による空気ばねの減衰異常検知

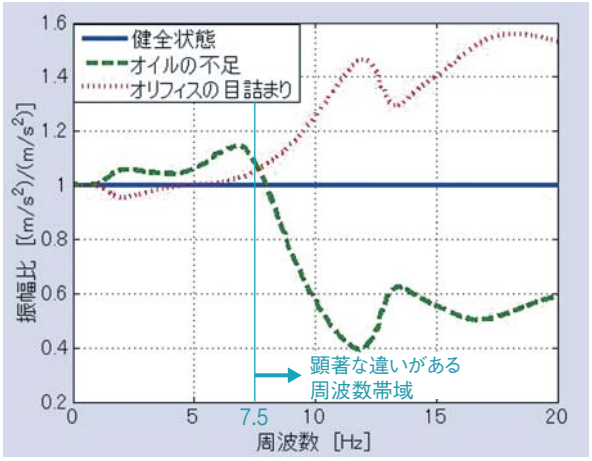

図４　振幅比による軸ダンパの減衰異常検知

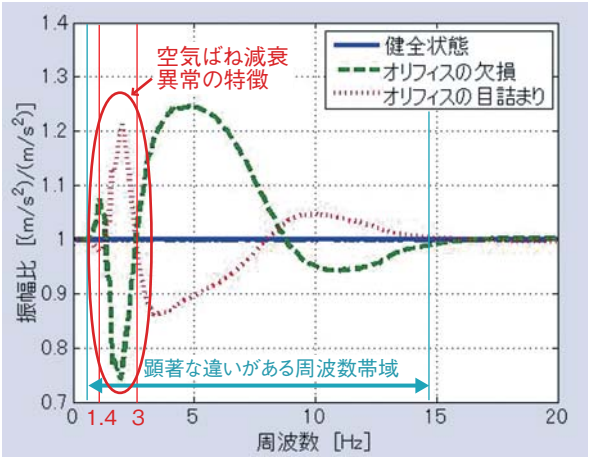

図６　振幅比による空気ばねの減衰異常検知

と呼ぶことにします。前者は，軌道不整が大きい場合に台車枠の上下加速度が大きくなりますが，その分軸箱の上下加速度も大きくなるので，軸箱の上下加速度と台車枠の上下加速度の比は，軌道不整の大小に影響を受けないメリットがあります。後者は，軸箱に上下の加速度計を必要としませんが，同程度の軌道不整で比較する注意が必要となります。

(1) 軸ダンパの減衰異常検知の検討

軸ダンパ (図2) の異常を応答倍率による方法で検知する例を図３に示します。5Hzから8Hzの周波数帯に違いがありますが，より高い8Hz以上の周波数帯域で，より顕著な違いがあります。従って，この周波数帯域で判別するのが良いと言えます。

次に，軸ダンパの異常を振幅比による方法で検知する例を図４に示します。この図では，健全状態の振幅比は，各周波数で1になります。軸ダンパに異常がある場合の振幅比は，1にならず，特に7.5Hzより高い周波数帯域で顕著になります。よってこの周波数帯域を比較することで軸ダンパ不具合の原因を判定できる可能性が高いことがわかりました。

(2) 空気ばねの減衰異常検知の検討

一方，空気ばねの減衰異常を応答倍率による方法で検知する例を図５に示します。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りますが，特に顕著なのは，3Hzから8Hzの周波数帯域です。よって，この周波数帯域で判別するのが良いことがわかります。

同様の異常を振幅比による方法で検知する例を図６に示します。空気ばねの不具合の場合，1Hzから10Hz付近の広い周波数帯で差があることがわかります。さらに図４と図６を比較すると，車体と台車の連成に起因する1.4Hzから3Hz付近が大きく異なるので，台車枠に1つのセンサでも軸ダンパの問題と空気ばねの問題を区別できそうです。

図７　試験台試験の様子

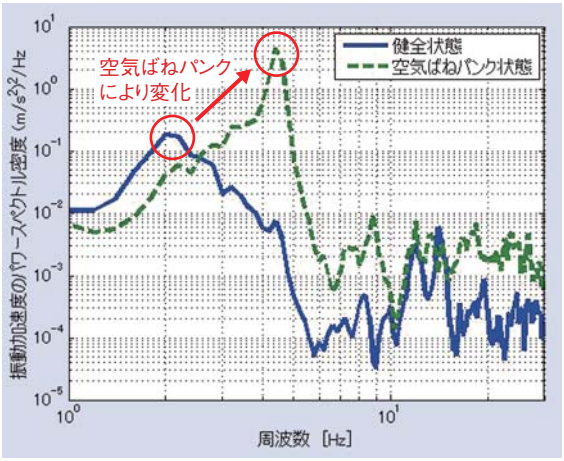

図９　試験台試験における空気ばねパンク時の
車体の振動加速度PSDの比較

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

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，乗り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変化に対する車輪の追従性が悪くなり脱線のリスクが増すため，安全性も損います。空気ばねのパンクが起きた事例は少ないですが，安全に関することなので検知方法を検討しておくことが必要です。

まず，加振波形を制御できる試験台試験を行い，振動加速度の特徴を明らかにした上で，レール上の走行試験を行うこととしました。

(1) 試験台における空気ばねパンク走行試験

空気ばねが健全な条件と，空気ばねがパンクした条件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，試験台試験を行いました。試験台とは，定置で車両を軌道不整の模擬波形により加振できる大型設備です。パンクした条件では，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で実軌道波により加振しました。

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に示します。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に変化しています。この変化が顕著であるため，状態監視装置の加速度センサを台車枠に取り付ければ，空気ばねパンクも検知できる可能性があります。

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程度になります。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

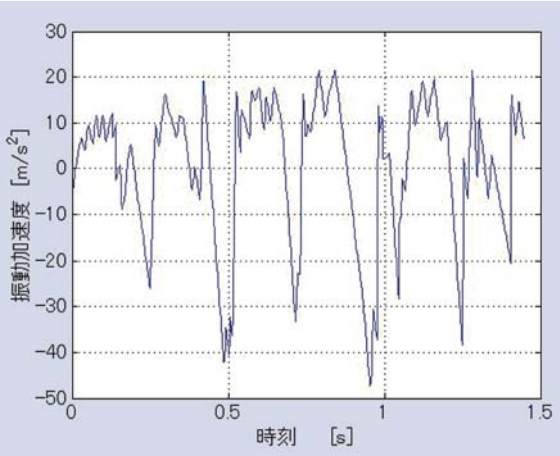

図11　脱線時の車体の振動加速度

にほぼ一致することがわかりました。

さらに，両条件における台車直上の車体の上下振動加速度PSDを比較したものを図9に示します。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に変化しています。この変化も顕著であり，図1に示した構成と異なりますが状態監視装置の加速度センサを車体の台車上に取り付けても，空気ばねパンクを検知できる可能性が示されました。

(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りました。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クした条件の振動加速度の差異を調べました。試験は，140m程の直線区間で最高速度25km/hで行いました。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個をパンクさせました。

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に示します。走行速度が低いので軌道の不整よりレールの継ぎ目によるインパルス加振の影響が大きいと思われますが，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に変化しています。

さらに図は省略しますが，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に変化しました。

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4.6Hz）に遷移したか否かを監視すれば，走行速度によらず空気ばねのパンクを検知できそうなことがわかります。

表1　脱線時の車体上下振動加速度の標準偏差

正の振動加速度ピーク	30 σ <
負の振動加速度ピーク	-50 σ >

σ：通常走行時の振動加速度ピークの標準偏差

脱線検知

本稿は故障診断の記事ですが，一方で脱線検知が鉄道車両では重要な問題ですので，ここまで述べてきた台車枠の上下振動加速度を用いた脱線検知の可能性について紹介します。文献2）を参考に，脱線走行時の車体上下振動加速度を模擬した波形を図11に示します。同図の加速度軸は下向きが正方向としています。この波形のピーク加速度を一定時間毎に算出し，通常走行時と比較すると表1のようになりました。標準偏差σは統計学的に散らばりを表した数値で，統計学的に絶対値が3σより大きな値はめったに起こらないことになります。表1より，脱線走行時のピーク加速度は，通常走行時のピーク加速度の3σを大きく外れることがわかります。このデータは車体の上下振動加速度ですが，台車枠は脱線している車輪から車体へ振動が伝わる経路にあるので台車の振動加速度でも同様に脱線検知ができそうです。

まとめ

1台車に1個か2個程度の少ないセンサで車両状態を監視するシステムの構築のために，検知できる事象を検討しました。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1個の上下加速度センサで検知できそうなことがわかりました。

今後，さらに実験を行い検討の信頼性を上げてゆくと共に，検知できる事象を広げてゆきたいと考えています。

RRR

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）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