

3407 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

(蛇行動と左右動ダンパ不具合の診断)

正 [機] ○城取 岳夫 (財) 鉄道総研 安永 年広 (財) 鉄道総研

A Fundamental Study on Condition Monitoring and Diagnostics Method

to Maintain Safety and to Detect Malfunctions of Railway Vehicles

(Diagnostics for Hunting and Malfunctions of Damper)

Takeo SHIROTORI, Railway Technical Research Inst. 2-8-34, Hikari-cho, Kokubunji-shi

Toshihiro YASUNAGA, Railway Technical Research Inst. 2-8-34, Hikari-cho, Kokubunji-shi

A sound monitoring of railway vehicles is essential for securing ride comfort and safety. 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 method to evaluate the sound conditions of railway vehicles with fewer sensors. At the first step of the study, we examined which place will be the best location of a bogie to install an accelerometer for the sound monitoring, if only one place is allowable for installation. We demonstrated experimentally that our method is effective in monitoring various lateral damper faults and generation of hunting of a bogie. We also confirmed that Support Vector Machine as information processing technology is capable to classify the lateral damper sound conditions.

Keywords: Railway Vehicle dynamics, lateral damper faults, Support Vector Machine, test stand

1. はじめに

鉄道車両は、安全性や乗り心地の維持のために定期的に営業運用から外され工場での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常時行えば安全性や乗り心地の質が向上することが考えられる。鉄道車両の状態監視は、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る^{2),3)}。

一方、機能を落とさず出来る限り簡素な状態監視システムを開発すれば営業車両に使用され易いと考えられる。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、将来にわたりメンテナンスコストがかかることが問題である。

さらに、得られたデータにより故障診断する方法について、運動方程式によるモデルベースの推定法は、車両が健全な時の諸元同定や状態量推定⁴⁾などには適するが、部品が故障後も想定可能な線形システムであることを前提とした故障診断は適用範囲が狭い。

そこで、上記2つの問題に留意した、例えば1台車に1個といった少ないセンサで異常振動により状態監視するシステムの構築を検討した。本報では、例として1台車に1個のセンサで何が検知できるのかと、そのセンサを取り付ける位置について実験的に調査した結果について報告する。さらに、健全であるか否かの閾値の決定をコンピュータのソフトウェアが健全な状態と健全でない状態の事例を基に、学習により決定する方法について触れる。

2. 状態監視システムの概要

2.1 状態監視システムの構成

本報で想定する状態監視システムを図1に示す。前述のように本システムは、各台車上の車体床面に加速度センサを備える。これ以外に、先頭軸にのみ軸箱に加速度

センサを備える。この先頭軸のセンサが診断を確実にし、かつ診断できる項目を増やすことができる。詳細は、3.3節で触れる。

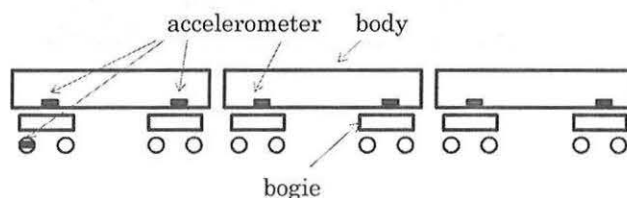


Fig.1 Sound monitoring system

2.2 状態監視のながれ

本システムの状態監視と診断の流れを図2に示す。統計的に稀とされる著大な加速度が測定された場合には、何らかの重大な非常事態が起こっていることが考えられる。特に高速車両は毎秒70m以上走行してしまうために、原因を特定する以前にまず車両を停止することが重要と考えられる。

3. 状態監視

3.1 左右動ダンパ不具合検知実験

3.1.1 実験概要

走り装置部品の不具合時における異常振動加速度を測定するために、図3に示す鉄道総研の車両試験台で1両での実軌道波加振を行った。模擬的に不具合とする走り装置部品として今回は、新幹線車両、在来線車両ともに装備している左右動ダンパを選定した。本報では、後位台車の左右動ダンパのみを模擬不具合させた結果を示す。左右振動加速度は、後位台車の台車枠先端（ばね帽上）と後位台車中心上車体床面で測定した。

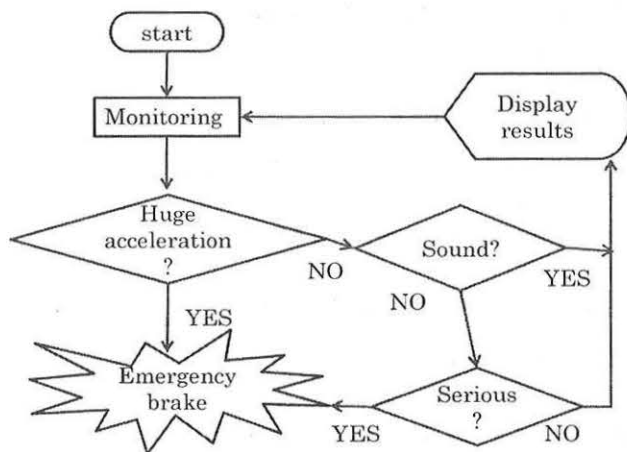


Fig.2 Monitoring and diagnosis flow

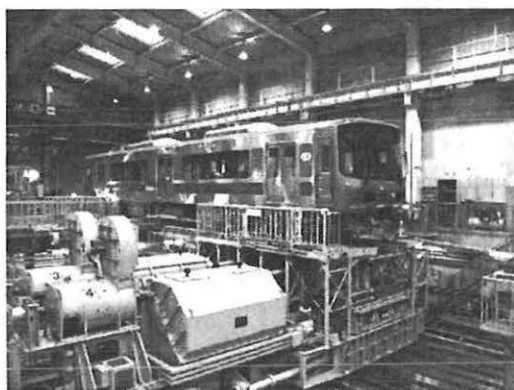


Fig.3 Test stand of railway vehicle

3.1.2 模擬不具合

今回想定した不具合を表1に示す。

実験では営業線で不具合が発生したダンパではなく、未使用のダンパに、表1に示す不具合を模擬するための加工を行った。これは不具合が発生したダンパの入手が困難であったことに加え、模擬する不具合以外の機能を同一にすることを目的としたためである。

Table 1 Artificial malfunctions of lateral damper

State title	Kind of state	Artificial malfunction method
Stuffed orifice	Fault	Remove of orifice
Malfunction of valve	Fault	Valve tightening
Upside down installation	Error of installation	Modification of installation

3.1.3 試験結果

図4と図5に先頭軸箱加振振動加速度に対する台車枠先端と台車中心上車体床面での左右振動加速度の応答倍率を示す。

台車枠先端の左右振動加速度は、同じ10Hzの周波数に応答倍率の大きさが違うピークがある。また、10Hz

から12Hzの間に、周波数も応答倍率の大きさも異なる反共振の谷が存在する。

一方、台車中心上車体床面の左右振動加速度は、健全状態で1.3Hzに応答倍率2倍程度のピークがある。不具合のあるダンパを装備した場合は、この周波数付近のピークが周波数も応答倍率の大きさも異なる。

状態監視の観点から、台車枠先端と台車中心上車体床面の左右振動加速度を比較すると、台車枠先端の10Hz付近の応答倍率の大きさの差は、台車中心上車体床面の差に比べ小さく、また台車枠先端の反共振の利用はノイズ等により判別が難しいため、状態監視には台車中心上車体床面の左右振動加速度が適すると考えられる。

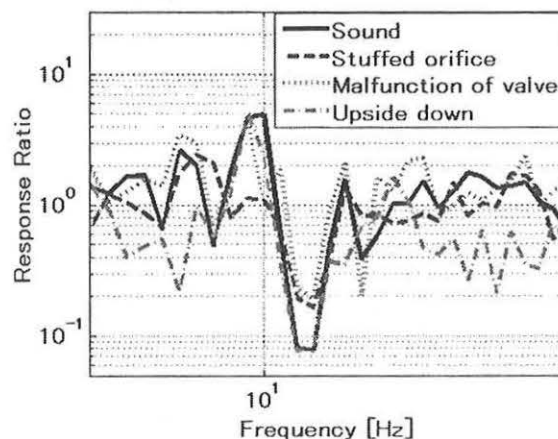


Fig.4 Frequency response of bogie

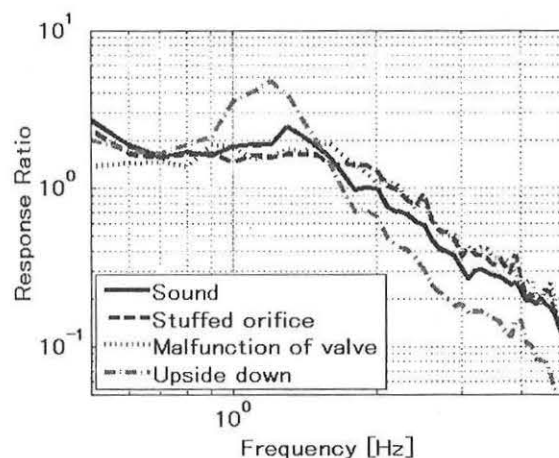


Fig.5 Frequency response of body

3.2 蛇行動検知実験

3.2.1 実験概要

蛇行動発生時の異常振動加速度を測定するために車両試験台で実軌道波加振を行った。同速度で蛇行動の発生した状態と発生していない状態を作り出すために、蛇行動が発生する状態では左右動ダンパを取り外し、走り装置の減衰性能を下げた。試験は、模擬半車体フレームを使用し、在来線台車を使用した1台車試験を行った。左右振動加速度は、台車の台車枠先端（ばね帽上）と台車中心上模擬車体床面で測定した。

3.2.2 試験結果

供試台車は、230km/hより高い速度で実軌道波加振を

行ったところ蛇行動が発生した。台車枠先端と車体床面の左右振動加速度のパワースペクトル密度 (PSD) を、左右動ダンパを装備し蛇行動を発生しない条件と合わせて図 6 に示す。

蛇行動が発生した場合、台車枠ばかりでなく車体床面においても、4.5Hz の左右振動加速度 PSD が顕著に大きくなる。蛇行動が発生すると車体床面の 4.5Hz の左右振動が突然大きくなることは、図 7 に示す蛇行動が発生する速度より 10km/h 低い際の結果と見比べてみても明らかである。

以上のことから、台車枠ばかりでなく車体床面の左右振動加速度も蛇行動検知に利用できると考えられる。

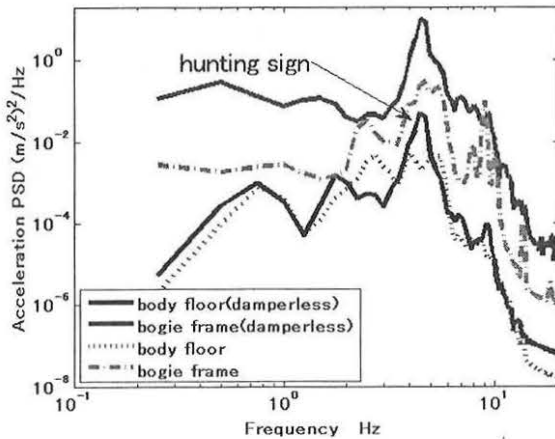


Fig.6 Lateral acceleration PSD ($v > 230 \text{ km/h}$)

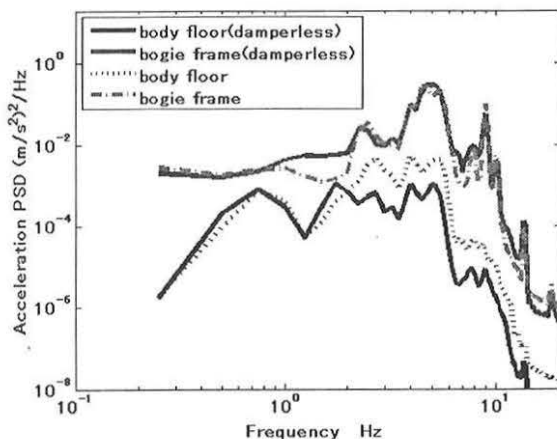


Fig.7 Lateral acceleration PSD ($v < 230 \text{ km/h}$)

3.3 軌道不整監視実験

3.3.1 実験概要

図 1 に示す本状態監視システムは、先頭軸の軸箱と各台車上の車体床面に加速度センサを備える。これらを使い、軌道不整を監視することが可能か調査した。

左右動ダンパ検知実験と同様に車両試験台において、1 車両の実軌道波加振試験を行った。1 つの実軌道波形を使い、波長はそのままに、振幅を変えて良好な軌道、標準的な軌道、不整が進んだ軌道を再現した。走行速度は、100km/h とした。

3.3.2 試験結果

図 8、図 9 にそれぞれ軸箱と車体床面の左右振動加速度 PSD を示す。

すべての周波数領域において、軸箱と車体床面ともに、

振動加速度 PSD は高い方から不整が進んだ軌道、標準的な軌道、良好な軌道の順となった。

図 8 の 10.3Hz に、振動加速度 PSD のピークが存在する。これは、直径 860mm の車輪が 1 回転する周期に一致している。このことより、10.3Hz のピークは、車輪のアンバランスか振れが左右を感度方向とする加速度計に測定されたためと考えられる。

図 10 に標準的な軌道での軸箱と車体床面の振動加速度 PSD を比較した。この図より、2Hz より低い周波数では車体の振動加速度 PSD が大きく、2Hz より高い周波数では軸箱の振動加速度 PSD が大きいことがわかる。これは、車体の応答特性が 2Hz より低い周波数では 1 倍を超えるためである。つまり、車体の実効諸元が明らかな場合、2Hz より低い周波数となる波長の軌道不整は軸箱ではなく車体での計測が精度面で有利なことが期待できる。

以上のことにより、軌道不整を監視するためには、軸箱振動加速度と車体振動加速度の双方を使うなら 2Hz で分けるのがよく、1 つのみの振動加速度を使うなら、10Hz 以上まで監視できる軸箱の振動加速度を使用するのがよい。

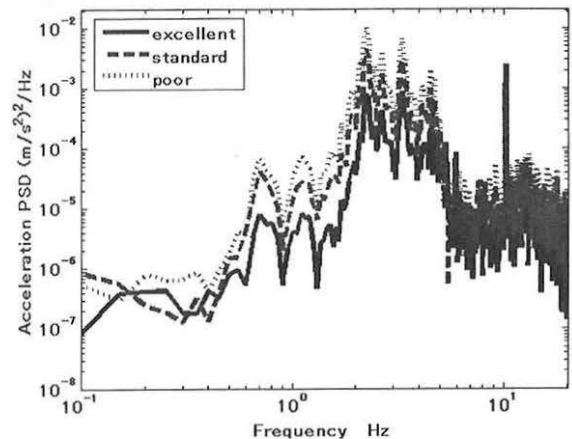


Fig.8 Lateral acceleration PSD (Axis-box)

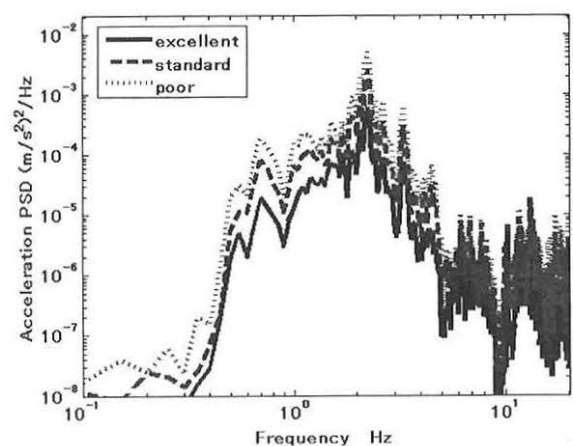


Fig.9 Lateral acceleration PSD (Body floor)

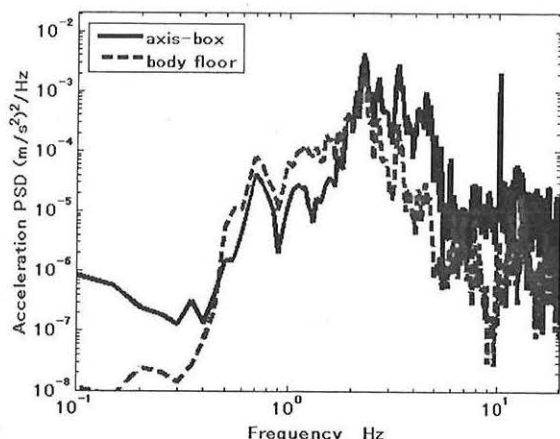


Fig.10 Comparison of lateral acceleration PSD

4. サポートベクターマシンによる健全性診断

この章では、台車中心上車体床面の左右振動加速度により健全か否かを判定する方法について考察する。通常は、健全な状態の左右振動加速度と健全でない状態の左右振動加速度について、高速フーリエ変換など信号処理を施した上で、特徴となる周波数での振動の大きさを比較し、健全であるか否かの閾値を人が決定する。

本研究では、健全であるか否かの閾値の決定をマシン（コンピュータのソフトウェア）が健全な状態と健全でない状態の事例を基に学習により決定する方法を試行した。

4.1 サポートベクターマシン

サポートベクターマシン(Support Vector Machine, 以下 SVM)⁵⁾は、パターン認識手法の一つで、多入力に対し1か-1を演算する線形素子により文字認識や遺伝子解析を行う。非線形な問題に対しても、高次元空間への写像機能を SVM が持つために対応が可能である。

4.2 健全性判定実験

本実験では車両試験台において、左右動ダンパが健全な状態と健全でない状態(オリフィス詰まり状態、調圧弁不具合状態あるいは天地逆取り付け状態のいずれか)の車両を、軌道不整の振幅を車両試験台加振機の倍率指令(track irregularity gain)により変えて、実軌道波で加振した。次に、この倍率指令値と車体床面での左右振動加速度のピーク周波数の応答倍率を、左右動ダンパが健全か否かの情報と共に SVM に入力し学習させた。その結果、図 11 に示すように SVM が健全か否かのクラス分け(領域形状と閾値決定)に成功した。学習後に判定器として使用する際には、まず当該車両の先頭軸での左右振動加速度と本加振データを比較することで軌道不整の振幅を見積もる。次に、車体床面での左右振動加速度のピーク周波数の応答倍率をこのクラス分けで判別する。これにより、左右動ダンパが健全な状態か否かが判定できる可能性がある。

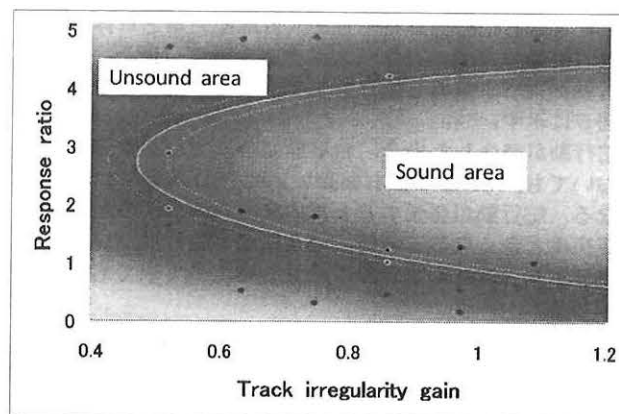


Fig. 11 Result of classification for lateral damper health with Support Vector Machine

5. まとめ

少ないセンサによる状態監視システム構築のために、例として1台車に1個のセンサで何が検知できるのかと、そのセンサを取り付ける位置について実験的に調査した。その結果、1台車に1個のセンサで状態監視するには、台車中心上車体床面の左右振動加速度が適することがわかった。また、左右動ダンパの不具合、蛇行動と軌道不整の検知が可能であることがわかった。

また、左右動ダンパの健全な状態と健全でない状態を判定する方法として SVM を試行した。その結果、両者のクラス分けに SVM が利用できる可能性があることがわかった。

今後、左右動ダンパ以外の部品についても、不具合時の異常振動を調査する。付け加え、脱線時には上下方向ばかりでなく、左右方向についても高い加速度が観測されることが容易に想像されるため、本システムでの脱線検知の可能性も調べる。

さらに、SVM についても適用範囲を広げることを検討する。

最後に、本研究にご協力いただいた KYB 株式会社 石井 大輔氏と小川 貴之氏に謝意を表す。

- (1) Nakae S. et al., Dassen kenchi souchi no shiken (in Japanese), *Railway Technical Research Pre-Report*, (1982).
- (2) Hayashi Y. et al., Condition Monitoring and Fault Detection of Railway Vehicle (in Japanese), *Translog2007 symposium* (2007), pp.331-334.
- (3) Morikawa M. et al., Study on Detection of Signs of Wheelclimb Derailment (in Japanese), *J-Rail2008 symposium*, (2008).
- (4) 例えば, Fukutani T., Shirotori T., and Nozue N., Development of Visualization System for Car Dynamics (in Japanese), *RTRI REPORT*, Vol.9, No.5 (1995).
- (5) S. R. Gunn, Support Vector Machines for Classification and Regression, *Technical Report, Image Speech and Intelligent Systems Research Group*, University of Southampton, 1997.