

# 高速度カメラを用いた車両部品の取付状態診断手法

風戸 昭人\* 城取 岳夫\*\* 高橋 悠\* 野本 武志\*

## A Method for Diagnosing Mounting Condition of Vehicle Parts Using a High-speed Camera

Akihito KAZATO Takeo SHIOTORI Haruka TAKAHASHI Takeshi NOMOTO

In order to improve the efficiency of railway vehicle maintenance in the future, we have developed a method for diagnosing mounting condition of vehicle parts using a high-speed camera. A system using the developed method consists of a video recording device, a program to extract acceleration of a target part from moving image, and a vibration analysis / diagnosis program. To confirm its validity of the proposed system, several tests to shoot videos of a running vehicle were conducted to understand vibration characteristics of parts mounted under floor of vehicle in the fixed and loosened conditions. The test result showed that the system, which uses a statistical method for condition diagnosis, can diagnose the condition of vehicle parts.

キーワード：高速度カメラ，振動解析，周波数解析，統計解析，状態監視

### 1. はじめに

鉄道車両のメンテナンスは将来の人口減少による労働力不足を見据えた効率化が求められており，その手段として車両状態を監視する方法が多くの鉄道事業者で検討されている。画像処理技術の応用がその1つの方法として考えられ，例えば作業検査を効率化するためにラインセンサカメラを用いた静止画像による自動検査手法<sup>1)</sup>の開発が行われている。この方法は，部品の有無や形状の相違など静的な差異の評価に適しているが，部品のガタつきなど動的な異常の検出には向いていないと考えられる。また，部品の取付部が他の部品に隠され，カメラで直接視認することが難しい場合が想定される。

著者らはこれまでに，高速度カメラで撮影した台車部品の動画から，その振動加速度を抽出し，ゴム部品の異常診断に取り組んだ実績<sup>2)3)</sup>があり，この手法を適用，発展させることを考えた。具体的には，地上に設置した高速度カメラにより診断対象部品の一部を動画撮影し，抽出した振動加速度データにより振動特性の変化を捉え，取付状態の不具合を診断する手法を検討した。

本稿では手法の基礎を確立することを目的とし，状態診断システムの提案と，これを用いた所内撮影試験による診断結果について報告する。

### 2. 状態診断システムの概要

#### 2.1 システムの基本構成と処理の流れ

提案する状態診断システムの基本構成と処理の流れを

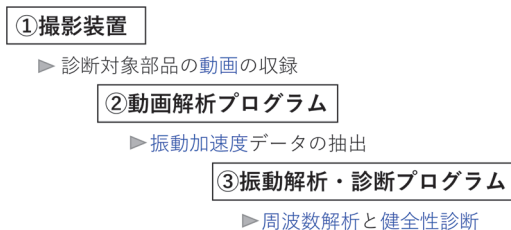


図1 手法の基本構成と処理の流れ

図1に示す。本システムは，診断対象の動画を得るための撮影装置，動画に記録された診断対象部品の追尾点（白色のマーカー）から振動加速度データを抽出する動画解析プログラム，そして得られた加速度データの周波数解析結果をもとに診断を行う振動解析・診断プログラムで構成される。

#### 2.2 撮影装置

図2に撮影装置の構成を示す。撮影装置はレール継ぎ目の近傍に設置する。車両が継ぎ目を通過する際の振動を利用して診断対象部品を加振するためである。車両の走行速度は15km/h程度を想定した。

鉄道車両の台車部品，車体床下部品の固有振動数は概ね50Hz以下であると考えられる。このような振動を動画で捉えるには，1秒あたり100枚（100fps）以上の撮影能力が必要である。本手法ではさらに余裕を見積もり，200fpsでの撮影が可能な産業用の高速度カメラを選定した。レンズの焦点距離は建築限界を考慮し，2mとした。図3にカメラとレンズの外観を，表1にカメラの仕様を示す。撮影データはUSB3.0を介してパソコンに収録される。

撮影装置は車両基地や停車駅など，屋外への設置が想定され，太陽光が振動加速度の抽出に影響を与える場合

\* 車両技術研究部 車両運動研究室  
\*\* 元 車両技術研究部 車両運動研究室

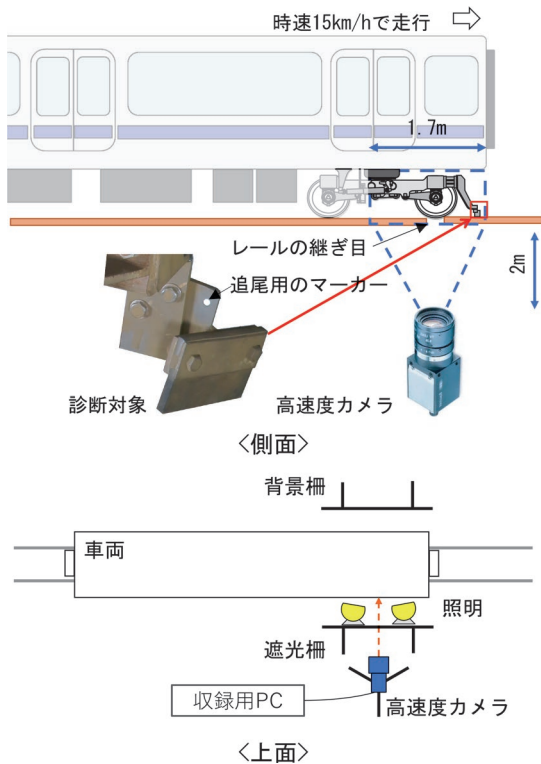


図2 撮影装置の構成

がある。そこで直射日光を避けるため、撮影装置と車両の間に遮光柵を設ける。また、車両床下機器の隙間を通して記録される背景の画像にマーカーが埋もれてしまう場合がある。そこで、背景の映り込みを遮断する背景柵を設ける。

また、夜間や曇天時には自然光の光量が不足するため照明を設置する。今回の撮影試験では、全光束 7400lm の LED 照明を 8 基使用した。

### 2.3 動画解析プログラム

動画から診断対象の加速度データを抽出するには市販の動画解析ソフトウェアを使用した。図4に撮影画像の例を示す。対象部品に貼り付けられたマーカーが画角に入ってきた際に手動で指定する必要があるが、これをソフトウェアが自動追尾して、マーカーの画像上の座標値が出力される。これの2回差分を計算して加速度データを得る。

### 2.4 振動解析・診断プログラム

動画から抽出した加速度データを入力とし、対象部品の取付状態の診断結果を出力するプログラムである。

プログラムの処理の流れを図5に示す。プログラムは判別直線の算出プロセスと状態診断プロセスから構成される。判別直線の算出プロセスでは、事前の撮影試験から得られた健全状態とガタつき状態の加速度データを教師データとして、これの周波数解析によるパワースペク

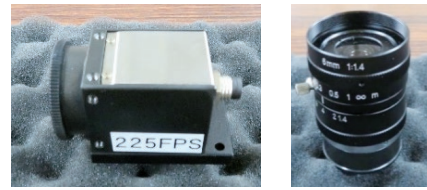


図3 高速度カメラとレンズ外観

表1 高速度カメラの仕様

カメラ種類	Baumer社 VCXU-15
撮影速度	225fps
画素数	1440×1080
撮影素子	CMOS Sony:IMX273(Exmor/Pregius)
階調	8,10,12bit
レンズマウント	Cマウント
シャッタースピード	1~60μs
本体サイズ	29mm×29mm×38mm

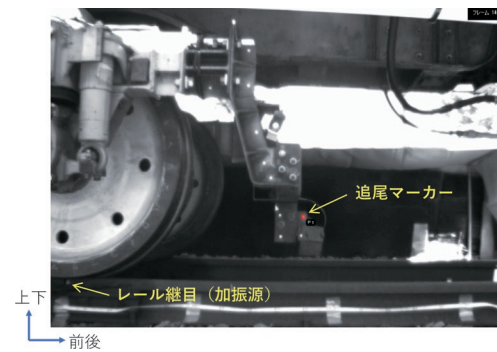


図4 撮影画像の例

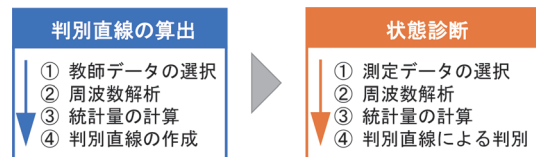


図5 振動解析・診断プログラムの処理の流れ

トル密度 (PSD) の標準偏差など、特徴量として2つの統計量を計算する。これらの特徴量をもとに健全、ガタつきを判別する基準 (判別直線) が自動的に作成される。次に状態診断プロセスを測定データに適用し、取付状態が健全であるかを診断する。診断方法の詳細については4章で説明する。

### 2.5 動画による振動計測の正確度<sup>3)</sup>

小型振動試験機を用いて白地に直径 10mm 程の黒丸を描いたマーカーを上下振動させ、加速度センサによる振動加速度と、動画から算出した振動加速度を比較した。カメラとマーカーの距離は 2m、振動試験機の加振周波数は 16Hz であり、本手法の実使用条件に合致する。試

験の結果、動画から算出した加速度の振幅は、加速度センサに比べて約16%小さかったが周期は一致した。提案する手法は振幅の絶対値を評価するものではなく、診断の基準となるデータに対する相対的な大小と周波数分布の違いを評価して診断するものである。よって、動画による振動加速度測定は、本手法に適用可能であると判断する。

### 3. 診断対象の振動特性把握

#### 3.1 選定した診断対象

図6に診断対象として選定した排障器、補助排障器及びATS車上子を示す。排障器と補助排障器は、線路上の障害物を排除する目的の部品である。排障器はその上部が台車枠にボルト締結される。補助排障器は排障器の下端部にボルト締結される小型の部品である。また、ATS車上子はステーを介して車体下面にボルト締結される。

これらを鉄道総研の試験車両に取り付け、健全ならびにガタつきを模擬した撮影試験を実施した。ガタつき条件は、各部品の固定ボルトを図6に示すように部品間に数mmの隙間ができるように緩めた状態とした。また、各診断対象には歪み式の加速度センサも取り付けた。ここでは、加速度センサから得られる加速度データを「セ

ンサデータ」、動画から得られる加速度データを「カメラデータ」と呼ぶこととする。

#### 3.2 所内撮影試験の概要

図7に鉄道総研所内撮影試験の状況を示す。撮影装置一式を線路脇に設置し、この位置より100m程度手前から走行を開始、カメラ前を時速15kmで通過させた。健全条件とガタつき条件を合わせて約350回試験を実施した。各診断対象は図7に示すように試験車両の進行方向前側（機関車側）の位置に取り付けた。

#### 3.3 排障器の振動特性

測定したセンサデータを用いて、排障器の振動特性を確認する。図8に車両の第1軸がレール継ぎ目を通じた際の、排障器の前後振動加速度の時刻歴波形を示す。ガタつき条件の最大振幅は、健全条件に比べ1/2程度であった。また、これらの振動加速度PSDを図9に示す。同図には比較のため台車枠の振動加速度PSDも示した。

健全条件の排障器は20Hz付近にピーク周波数を持ち、このピーク周波数は台車枠の前後、ピッチいずれのピーク周波数とも一致しない。一方ガタつき条件では、排障器前後のピーク周波数が14Hzに低下し、台車枠の前後とピッチのピーク周波数に一致した。これは、健全条件では台車枠に片持ち支持された排障器が、自身の固

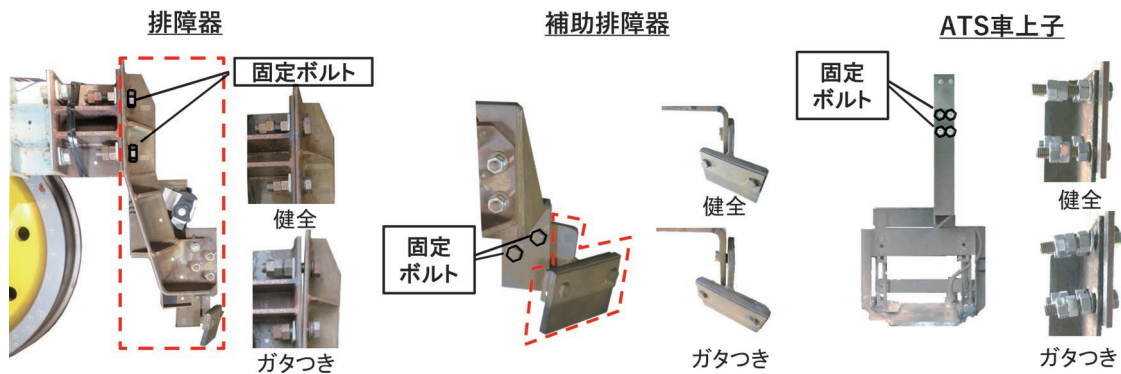


図6 選定した診断対象

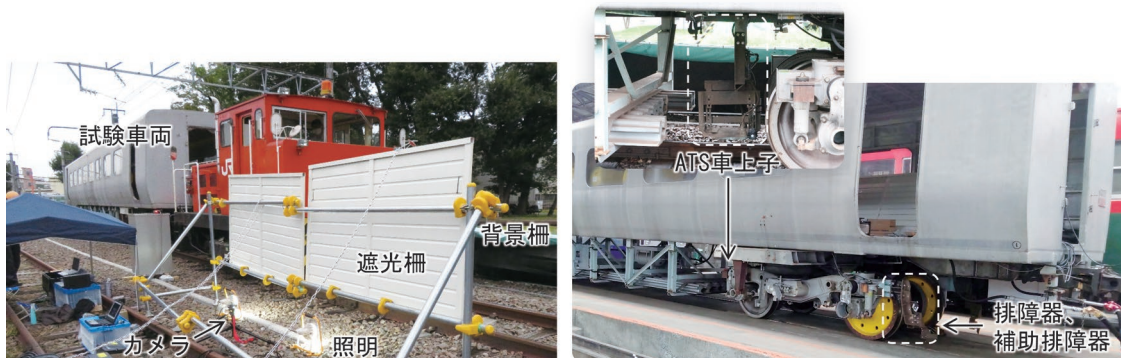


図7 鉄道総研所内撮影試験の状況

有振動数で振動するのに対し、ガタつき条件では排障器取り付け部がボルトにより固定されないために、上記の固有振動は発現せず、台車枠とともに振動したことが原因であると考えられる。

図 10 に、排障器の健全条件 24 試番とガタつき条件 23 試番の、カメラデータによる前後振動加速度 PSD を示す。健全条件とガタつき条件で、7~10Hz 付近の PSD 値に比較的大きな差が見られる。

### 3.4 補助排障器の振動特性

図 11 に補助排障器の前後振動加速度の時刻歴波形を示す。排障器の場合ほど健全条件とガタつき条件の振幅に顕著な違いは見られない。周波数解析の結果、ピーク周波数は健全条件の 20Hz から、ガタつき条件では 22Hz にわずかに上昇した。補助排障器が取り付けられている排障器の前後振動加速度を調べたところ、補助排障器が健全の場合はピーク周波数 20Hz であったのに対し、補助排障器がガタつき条件ではピーク周波数が 22Hz に上昇した。このことから、ガタつき条件の補助排障器の振動は、排障器の固有振動の影響を受けていると考えられる。

補助排障器の健全条件 24 試番とガタつき条件 25 試番のカメラデータによる前後振動加速度 PSD を確認したところ、振幅や周波数の変化は排障器ほど顕著ではなく、この情報によるガタつきの診断は困難であると見られた。そこで他の指標を検討したところ、排障器から補

助排障器への上下振動の伝達が、健全時と比較してガタつき時には遅れる性質を把握した。図 12 に排障器に対する補助排障器の上下振動加速度の位相差を示す。健全条件とガタつき条件で、7~30Hz 付近に比較的大きな差異が見られる。

### 3.5 ATS 車上子の振動特性

図 13 に ATS 車上子の前後振動加速度の時刻歴波形を示す。ATS 車上子がカメラの画角に入ってから約 0.2 秒後に第 1 軸がレール継ぎ目を通過し加振を受けるが、健全条件、ガタつき条件ともに加振による波形の変化は見られない。これは、車上子が車体に取り付けられているためにレール継ぎ目による加振の影響を受け難いためと考えられる。健全条件の振動は周波数が約 16Hz で一定であり、振幅の増減を繰り返す。また、健全条件とガタつき条件の振幅を比較すると、健全条件の振幅が顕著に大きい。これは、健全条件では ATS 車上子の質量と支持剛性による固有振動数で振動するのに対し、ガタつき条件では取付部がボルトにより固定されないために ATS 車上子がばねマス系として振動しないことが原因であると考えられる。さらに、車体と車上子の接続にガタつきがあると車体の振動が伝わり難いことと、ガタついたボルト付近の取付部材同士の摩擦による減衰により ATS 車上子の加速度振幅が小さくなることも原因であると考えられる。

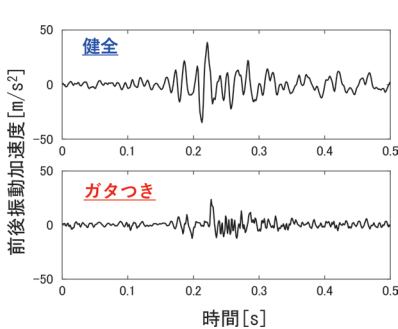


図 8 排障器の前後振動加速度波形

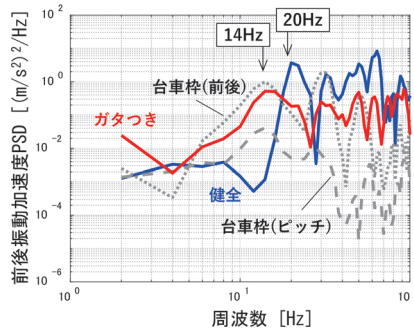


図 9 排障器の健全条件とガタつき条件の前後振動加速度 PSD

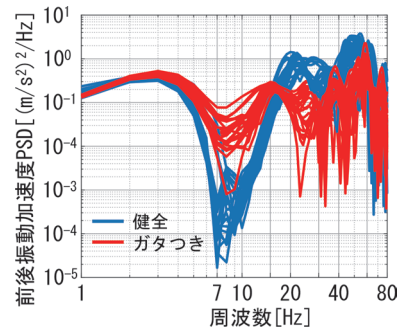


図 10 排障器の前後振動加速度 PSD

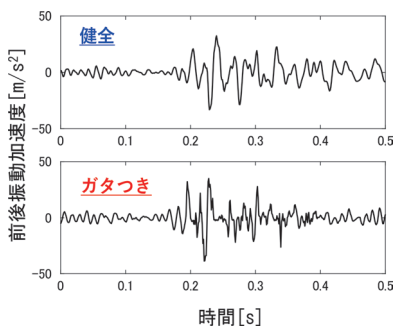


図 11 補助排障器の前後振動加速度

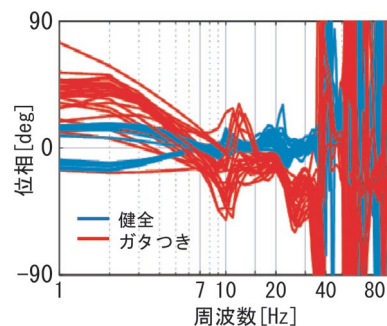


図 12 補助排障器の位相

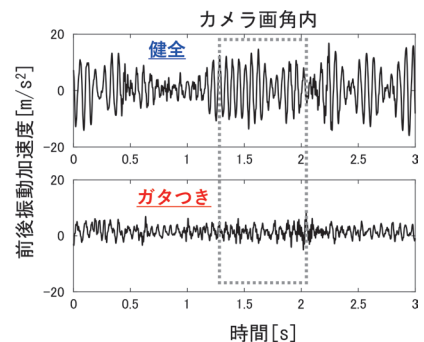


図 13 ATS 車上子の前後振動

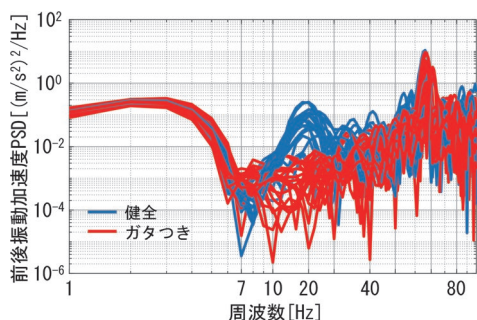


図 14 ATS 車上子の前後振動加速度 PSD

図 14 に ATS 車上子の健全条件 20 試番とガタつき条件 20 試番の、カメラデータによる前後振動加速度 PSD を示す。10～30Hz 付近の PSD 値に差違を認めることができる。

#### 4. 統計的手法を用いた状態診断

##### 4.1 補助排障器の健全性診断

3 章にて診断対象の健全条件とガタつき条件の振動を把握し、両者に比較的大きな差違が認められる条件を把握した。これらの最も単純な診断方法は、特定の周波数に着目し、そのときの PSD や位相の値の大小をもって識別することだと考えられる。しかし、一意に定めた閾値では識別が難しい試番も散見された。

より高い識別性能を期待して、統計的な手法を用いた診断手法の適用を検討した。ここでは補助排障器を例に説明する。図 12 より、7～30Hz の周波数域において、ガタつき条件では位相が明らかに遅れる傾向があり、また健全条件の位相が概ね 0 度であるのに対してガタつき条件では周波数ごとのばらつきが大きいことがわかる。この特徴を表現する方法として、7～30Hz の周波数域における 1Hz ごとの位相を入力データとする、以下の統計量を計算した。

- ・最大値：最も位相が進んだ時の位相
- ・最小値：最も位相が遅れた時の位相
- ・位相の幅：最も進んだ位相と最も遅れた位相の差
- ・標準偏差：位相データの標準偏差
- ・第一四分位数：位相データを昇順に並べたときの、小さい方から数えて全データの 25% の位置にあるデータ
- ・第二四分位数：位相データを昇順に並べた場合の、小さい方から数えて全データの 50% の位置にあるデータ（中央値）

これらのうち 2 つの統計量を軸とした平面上に計算結果をプロットした。結果の一部を図 15 に示す。複数の統計量の組み合わせにおいて、補助排障器取り付け状態の識別が可能であることが確認できた。特に、位相の第一四分位数と標準偏差を用いた図 15 左下のグラフで

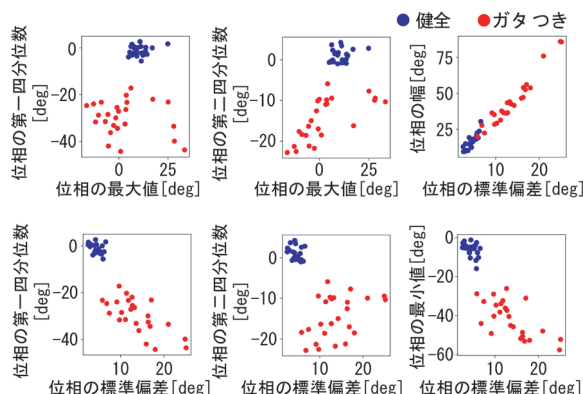


図 15 位相をもとにした統計量による補助排障器取付状態識別

は、ガタつき条件における 7～30Hz の位相の標準偏差が大きくなること、および位相遅れが生じるという特徴を最もよく表すことができた。

次に、取り付け状態識別のための閾値に相当する、判別直線について検討する。これは統計学における 2 クラス分類問題であり、ここではフィッシャーの線形判別<sup>4)</sup>による手法を用いる。フィッシャーの判別直線は、入力を  $x_n$ 、線形変換された 1 次元データを  $y_n$  とした場合に  $y_n = wx_n$  となる 1 次元への射影ベクトル  $w$  を、ある制約条件下で求める方法であり、得られた射影ベクトル  $w$  に直交する直線が判別直線となる。図 16 にこの方法により求めた判別直線を示す。なお判別直線は、健全とガタつきの 2 クラス間の、最も近いサンプル同士の中点を通ることとした。判別直線のどちら側に計測結果がプロットされるかによって、補助排障器の健全性が診断可能となる。

##### 4.2 排障器の健全性診断

図 10 に示した排障器の 7～30Hz の前後振動加速度 PSD データから標準偏差と第一四分位数を計算した結果と、それらから算出したフィッシャーの判別直線を図 17 に示す。判別直線が健全条件の結果とガタつき条件の結果を明確に分離しており、本手法が排障器のガタつき診断に有効であることがわかった。

##### 4.3 ATS 車上子への適用

図 14 に示した ATS 車上子の 7～30Hz の前後振動加速度 PSD データから、標準偏差と第一四分位数を計算した結果と判別直線を図 18 に示す。判別直線は健全とガタつきを概ねよく識別することができた。一方で、健全の 1 試番がガタつきと診断される偽陽性が発生した。

偽陽性が発生したときの加速度の時刻歴波形を確認すると、健全条件にも関わらず振幅が小さい状況であった。3.5 節で触れたように、健全条件の ATS 車上子にはレー

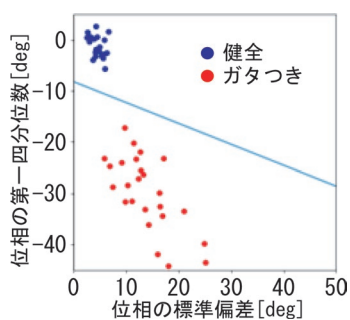


図 16 補助排障器のガタつき

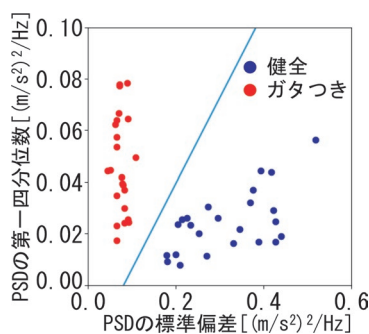


図 17 排障器のガタつき

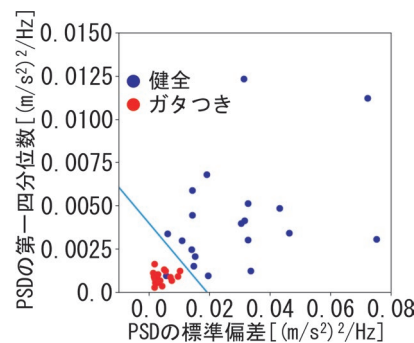


図 18 ATS 車上子のガタつき

ル継ぎ目と関係なく振幅の増減を繰り返す固有振動が発生する特徴があり、振幅が小さいタイミングでカメラ前を通過したため誤診断に至ったと考えられる。

#### 4.4 状態診断のまとめ

排障器や補助排障器のように、レール継ぎ目による加振が直接的に作用しやすい台車取り付け部品については、提案する診断手法を適用することで、取付状態の診断が可能であることを確認できた。車体取り付け部品についても同様の手法で診断可能であるが、車体を支持するばねの緩衝作用により、加振の影響を受けにくくなっているため、偽陽性の発生リスクが台車取り付け部品よりも高くなることが示唆された。

車体取り付け部品に限らず、他の部品についても誤診断を完全に排除することは難しいと思われる。自動化の利点を活かし、現状の人手による検査よりも監視頻度を増やすことで、誤診断のリスクを低下させることも考える必要がある。

### 5. まとめ

将来の鉄道車両メンテナンスの効率化を見据え、高速度カメラを用いた車両部品の取付状態診断手法を検討した。得られた知見は以下の通りである。

#### (1) 状態診断システムの基本構成

提案する手法は、撮影装置、動画解析プログラム、振動解析・診断プログラムで構成される。撮影装置は、屋外での高速度カメラ撮影を可能とする照明、遮光柵、背景柵を有する。

#### (2) 診断対象の振動特性把握

鉄道総研所内での撮影試験を実施し、車両がレール継ぎ目を通過する際の振動を利用して診断対象を加振することで、健全状態とガタつき状態の振動の違いを把握した。排障器とATS車上子については前後振動加速度の周波数分布に比較的大きな差異が現れることがわかった。補助排障器については、固定される側の排障器と、補助排障器の上下振動加速度の位相差に差異が現れるこ

とがわかった。

#### (3) 統計的手法を用いた状態診断

診断対象の振動加速度パワースペクトル密度や位相差に関する2つの統計量を用いた状態診断手法を提案した。標準偏差と第一四分位数を特徴量とすることで、排障器、補助排障器、ATS車上子の取付状態の診断が可能であることを示した。ただしATS車上子のような車体取付部品の場合には、レール継ぎ目による加振が期待できず、偽陽性となる場合があった。

以上のように、高速度カメラを用いた車両部品の取付状態診断手法の基礎を確立できた。本手法の実用化に向けては、マーカーに依存しない追尾手法の構築、完全なガタつき状態に至る前の状態診断への対応などが求められる。これらへの対応を進め、鉄道車両のメンテナンス効率化に貢献していきたい。

### 謝 辞

本研究の実施にあたり、九州旅客鉄道株式会社の関係者には、診断対象の選定や供試体の提供など多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

### 文 献

- 1) Kohei Miyahara et al., "Development of anomaly detection method using the railway vehicle side images," The 9<sup>th</sup> International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems, 2021.
- 2) Takeo Shirotori, "A method for wayside bogie monitoring based on internal yard running vibration," Proc. IMech E Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.235, No.4, pp.440-449, 2020.
- 3) 城取岳夫：定置カメラを使用した軸はりゴムの異常診断，日本機械学会論文集，Vol.87，No.902，2021
- 4) Fisher, R.A., "The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems," Annals of Eugenics, Vol. 7, pp. 179-188, 1936.