Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00139

Received date : 15 April, 2021

Accepted date : 28 September, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 8 October, 2021

定置カメラを使用した軸はりゴムの異常診断

城取 岳夫^{*1}

Diagnosis of axle beam rubber crack by using a wayside camera

Takeo SHIROTORI^{*1}

^{*1} Railway Technical Research Institute
2-8-38 Hikaricho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan

Abstract

In Japan, the working-age population will roughly halve by 2060 from its peak in the late 1990s. Therefore, significant labor saving is required to maintain quality in the railway business at its current level. One such approach is the trend toward introducing vehicle monitoring devices which can automatically monitor the condition of the vehicle and facilitate efficient maintenance. However, there is no equipment for conducting a non-dismantling functional inspection on the stiffness of critical bogie rubber components subjected to forces of several kilonewtons or more, so we decided to develop such equipment. The equipment monitors the status of the bogie by using a wayside high-speed camera to measure the vibration of the bogie when it passes over iron plates approximately 5 mm thick placed on the track. This report outlines the diagnostic method, demonstrates the accuracy of vibration measurement from camera images, and presents the results of a rubber stiffness evaluation test, where axle beams with different rubber stiffness values due to the status of cracks were attached to an actual vehicle. The axle beam, which has a rubber portion at the end, supports the axle box mainly in the longitudinal direction. In addition, by creating a numerical model for quantitative evaluation and assigning a suitable stiffness value to the replacement component, we show that the model gives the same results as the test and that the longitudinal stiffness of the axle beam can be evaluated quantitatively by a wayside camera.

Keywords : Wayside monitoring, High-speed camera, Axle box suspension, Rubber stiffness, Railway vehicles

1. 緒 言

1・1 研究の背景と目的

日本では 2060 年に生産年齢人口がピーク時の 1990 年代後半に比べ、約半分に減る時代を迎える（総務省，2020）。従って、鉄道事業の品質を今と同程度のレベルに維持するためには大幅な省力化が必要となる。この 1 つの答えとして効率的なメンテナンスのために、鉄道車両を自動的に状態監視できる「車両状態監視装置」を導入する動きが近年盛んになってきている。

車上に取り付ける車両状態監視装置は脱線など緊急に車両を停止させる必要がある異常に対応が可能であるが、各車両に様々なセンサを取り付けると鉄道事業者が保有するセンサの数が膨大になり、初期コストばかりか保守コストも大きな負担となる。一方、定置型の車両状態監視装置は脱線など即時性が求められる異常には対応できないことがあるが、深刻な事態に至るまでに時間がある異常を少ないセンサで診断することができる。

定置型の車両状態監視装置は 1970 年代には既に存在し、車輪の摩耗を検知する装置（糸永，八野，2009），（森他，1999），（Poudel and Witte, 2017），（杉田他，2016）の他にも様々な装置（IEM, 2020），（Latchaw and Gage, 2016），（LBFoster, 2020），（Schlake et al., 2010），（Wayside Inspection Devices Inc, 2020），（Witte and Chaparro, 2015）が開発

された。しかし、数キロニュートン以上の力が加わる重要部品である台車部品の締結部を非分解で機能診断するものは存在しなかった。そこでこの課題を解決するために、レールの継目やレール上に置かれた加振治具（鉄板）を通過する際の振動を定置カメラにより観測し、台車の状態を監視する手法を検討した。

図1に示すように例えば営業後の回送を利用して構内線で簡易に台車の機能診断が可能になれば、発見した異常に再出庫するまでに対応でき、営業車両の信頼性を向上できる。また部品の機能状態を日々容易に取得できるので、部品の余寿命情報があればこれと組み合わせ、部品を交換すべき時期の予測が立ち、部品手配、メンテナンス工場のスケジューリング等がより適正化され、効率的なメンテナンスが期待できる。また、提案する手法は営業車両の停車駅での状態監視にも使用できる。

前報(Shirotori, 2020)ではモノリンク式の軸箱支持装置で、人為的に剛性を調整し劣化（硬化）を模擬したゴムによる試験を行い、定置カメラによる軸箱支持装置の状態監視の可能性を示した。

しかし以下の3点について不明であった。まず人為的に模擬した異常ばかりでなく、使用により自然発生的に生じた異常に対しても本手法が有効であるか不明であった。また軸箱支持装置に関して、前報のモノリンク式ばかりでなく国内で多く使われている軸はり式にも適用できるのか不明であった。さらに、加振治具による加振力より小さな加振力で診断できるのかが不明であった。

そこで本報告では、使用により自然発生的に生じた異常（亀裂）のあるゴムを軸はり式の軸箱支持装置に取り付け、10 mmの板厚の加振治具から5 mmの板厚の鉄板に変え、これら不明な点を調べた。

第2章以降では、まず軸箱支持装置のゴム部品である軸はりゴムを説明する。次に診断手法の概要を説明した後カメラによる振動計測の正確度を示す。さらにゴム単体の剛性試験を行った後に、亀裂により剛性が低下した軸はりゴムを実車に取り付け行ったゴム剛性評価試験の結果を示す。そして、定量的な評価のための数値モデルを作成し、交換した部品の剛性として適切な値を与えると、作成したモデルで試験と同様の結果が得られること及び軸箱前後剛性の定量的評価が行えることを示す。加え、ゴム剛性の識別性能についても触れる。

Fig. 1 An example of using the proposed method.

1・2 定置カメラによる状態監視手法の意義

以下では、本手法の産業的な意義と学術的な意義を述べる。

1・2・1 産業的な意義

定置カメラの動画から異常を診断する手法は、既製車両か新製車両かを問わず比較的低コストで、多くの車両の状態監視が可能である。加え、自動で状態監視をするので人手をかけない。このため、比較的簡易に低コストで多くのフィールドデータが集められ、この利点により以下の貢献が期待できる。

(1) 部品の余寿命予測

疲労破壊試験などの試験機による試験ではフィールドの条件を十分に再現できない場合もあるので、日々の帰着検査データと检修の分解時にみつける部品の摩耗や破損の情報から成るフィールドデータにより、試験機データを補強できることが期待できる。

(2) 故障予知の研究

帰着検査で日々集めた情報と亀裂を診断した情報を組み合わせれば、亀裂に至るまでに出現する予兆を捉えられる可能性があり、故障予知の研究に貢献すると考えられる。

(3) 新たな検査体系構築のためのデータ収集

より安全でより効率の良い車両保守のために、鉄道業界では検査体系を継続的に見直している。例えば、時間計画保全ではなく負荷実績に応じた保全方法も今後考えられる。もし先頭台車の負荷が大きいとすれば、先頭車両と最後尾車両の2両を残りの車両より頻度高く保守するのが合理的と言える。負荷実績保全のためには、どの部位が他の部位と比較して劣化が速いかを知る必要がある。すべての号車の着目部位を毎日計測すれば、各部位の劣化の差を捉えられる可能性が期待できる。

(4) 極低頻度の異常の診断

数多くの台車部品に対し、極低頻度で発生する異常事象のために多くのセンサを鉄道車両に取り付けることはできない。これゆえ異常診断センサがない部品は一度車両が車庫から出ると、次に車庫に帰着するまで監視する手段がない。もし、途中の停車駅などでも定置カメラが台車の状態監視を行えば、部品の監視頻度が上がり、より安全で安定した輸送が期待できる。

1・2・2 学術的な意義

これまでに定置で車両を傾けるなど大掛かりな試験により鉄道車両の1次ばね系や2次ばね系の上下や左右の剛性や減衰の諸元値を検証する方法が紹介されている (Evans and Berg, 2009)。一方で、くさび型の鉄片をレール上に置き車両を通過させ上下動加振させ固有振動数が設計通りになっているか検証する試験 (くさび試験) が従来から海外では行われている。このくさび試験により1次ばね系や2次ばね系の上下並進、ピッチング、ローリングの周波数と減衰率を推定できることが示され (Rosenberger et al., 2013)、客車と貨物車の車体剛性の違いがくさび試験により明らかになることが述べられた (Zacher and Kratochville, 2015)。また Shi らは、Rosenberger らの解析方法より簡易な時刻歴波形の振幅減衰比を読み取る解析方法で1次ばね系や2次ばね系の上下並進、ピッチング、ローリング、左右に関する減衰諸元値の推定法を提案している (Shi et al., 2016)。しかしながらこれらの研究は、車体や台車の上下並進、ピッチング、ローリングに関する試験方法を示したが、前後の軸箱剛性を推定する試験方法は一般的になっていなかった。

本研究では、アクチュエータなどを使わず軸箱前後剛性をレール上で推定する簡易な試験手法を提案する。軸箱前後剛性は、高速走行時の台車の走行安定性能と曲線通過性能を両立する鉄道車両にとって重要な諸元である。本提案が状態監視分野に留まらず、新製時の台車仕様の確認などにも利用することができ、鉄道車両用台車の研究開発分野で有益な試験手法として今後貢献していくと考えられる。

2. 軸はりゴム

鉄道車両の台車の軸箱支持装置にはいくつかの方式があるが、なかでも図2に示す軸はり式軸箱支持装置は国内で広く使われている方式のうちの1つである。この軸箱支持装置は、軸ばねにより台車枠を上下に支持し、軸はりと呼ばれる部分の支点部に図3に示す軸はりゴムを擁する。軸はりゴムは比較的低い回転剛性とこれより高い前後剛性を持ち、輪軸 (2枚の車輪と1つの車軸を組み立てた部品) の軸受けを内包する軸箱と台車の上下相対変位を許容しつつ、前後相対変位を制御する。これより乗心地を維持しつつ、高速走行時の台車の走行安定性能と曲線通過性能を両立することができる。これゆえ軸はりゴムの健全性は鉄道車両にとって重要である。

3. 診断手法の概要

図4に提案する診断の流れを示す。本手法では、加振治具上を走行する台車を2 m程離れた位置に設置した高速度カメラで動画撮影する (図5)。この動画中に写る台車の一部、例えば軸箱の1点を着目点として定めて、この点が次の時刻にどこに移動したかをソフトウェアにより動体追尾してゆく。動体追尾の結

Fig. 2 Axle beam type suspension.

Fig. 3 Axle beam rubber.

果は、着目点の変位データとなる。この変位データを2階の時間差分により振動加速度に変換し、周波数解析することで台車の固有振動数を明らかにする。ここでは、振動加速度 PSD (Power Spectrum Density) のピーク周波数を固有振動数とみなす。次にこの結果を数値モデルに当てはめ、定量的に対象となる部品の剛性を推定し、台車部品の劣化度合いを診断する。

変位ではなく加速度を使う理由は、変位 PSD には車両の移動といった大変位のピーク周波数が低周波数域に存在し、対象部品の固有振動数の識別を妨げるためである。

加振治具の角部を通過する際に車輪にかかる力は図6に示される通りと考えられる。車輪には上下方向に力が発生するが、同時に前後方向にも力が発生し、この前後の力が輪軸を前後振動させると考えられる。

Fig. 4 Proposed flow of diagnosis.

Fig. 5 Outline of excitation method and video shooting.

Fig. 6 Forces acting on the wheel. Longitudinal forces act on the wheel at corners of the iron plate.

4. 予備試験

車両を使った軸はりゴム剛性評価試験に先立ち、カメラ動画による振動計測の正確度と軸はりゴム単体の剛性を明らかにする。

4・1 動画による振動計測の正確度 (Shirotori, 2020)

ゴム剛性変化の比較試験では、安全の確保のため車両から 2 m 程離れた位置から撮影する。表 1 に示す用意した撮影機材を使用すると、1 ピクセルは 1 mm 程の大きさに相当する。しかし、動体追尾後の変位推定結果の解像度は 1 ピクセルの 1/2 から 1/100 程度 (上瀧, 井尻, 2015) になり、この推定はサブピクセル推定と呼ばれる。文献に掲載されている解像度に幅があるため、カメラ動画による振動計測がゴム剛性変化の比較試験に適用可能であるか予備試験を行い調査した。

小型振動試験機を用いて白地に直径 10 mm 程の黒丸を描いたマーカを上下振動させ、加速度計による振動加速度と、カメラ動画のマーカ変位を時間差分により算出した振動加速度を比較した。試験装置の模式図を図 7 に、加速度波形の比較結果を図 8 に示す。後述する実車両での試験を念頭に、カメラとマーカとの距離を約 2 m、振動試験機の振動周波数を輪軸の前後振動モード付近の周波数である 16 Hz とした。またサンプリング周波数は、使用したカメラの最大サンプリング周波数である 1000 Hz (1000 fps) とした。図 8 に示すように、加速度計による振動加速度とカメラ動画から算出した振動加速度の周期は一致していた。振幅は、加速度計のそれに比べ 16 % 程小さくなったが、後述する実台車試験はゴム剛性変化に対する固有振動数の比較試験であるため、加速度振幅の大きさに着目する必要が無く、周期が正確に計測できればよい。よって、約 2 m 離れた所からのカメラ動画による振動加速度測定は、以下に述べるゴム剛性変化の比較試験に適用可能であると判断した。

Table 1 Video shooting conditions.

Item	Description
Lens used	Focal length: 6 mm f 1:1.4
Sampling frequency	1000 Hz (1000 fps)
Pixels	Height 640 × Width 480

Fig. 7 Schematic of test equipment.

Fig. 8 Results of acceleration waveform comparison.

4・2 ゴム単体剛性試験

4・2・1 試験内容

車両を使った試験に先立ち、まず軸はりゴム単体の剛性を明らかにする。軸はりゴムは営業線で使用后、保存しているものから 5 個を用意した。試験の概要を表 2 に示す。

Table2 Outline of the rubber stiffness test.

Item	Description
Test apparatus	Shimadzu Autograph AG-IS 300 kN
Test condition	Static compression Compression speed 0.08 mm/s.
Items measured	Displacement: Strain-gage type displacement sensor Force: Load-cell type force sensor

4・2・2 試験結果

試験を行った結果、1個の軸はりのゴム剛性が他の4個と比べ特に低いことが判った。そこで以下ではこの1個を軟化品と呼び、他の4個を通常品と呼ぶこととする。図9に試験装置と図10に通常品1個と軟化品1個の試験結果を示す。軟化品の外観は、通常品の外観に比べ、ゴム部と金属部の境界部に傷が発生しており、ゴム部と金属部の剥離が進行しているように伺えた。

Fig. 9 Test apparatus.

Fig. 10 Test result of the relation between displacement and load. One of the five rubbers has low stiffness (Soft); the others have nearly the same stiffness (Normal).

5. 軸はりゴム剛性評価試験

5・1 試験用軸はり

台車に取り付けてある軸はりゴムの特性を変えた試験を行うには、通常車体から台車を外し、さらに台車から輪軸を分解した上で、軸はりゴムの交換作業を行い、その後台車組み立て作業と、台車と車体の組み立て作業が必要である。ゴム1条件で1回この作業を行う必要があるので試験効率が非常に悪い。そこで試験用軸はりを作製し、モノリンク台車である試作台車に取り付け、軸はりゴムの交換を容易にし、試験の効率を向上した。この試験用軸はり4個を1両の後ろ側1台車の軸箱4カ所に取り付けた。図11に試験用軸はりを、図12に台車に取り付けた試験用軸はりを示す。

Fig. 11 Test axle beam.

Fig. 12 Test axle beam attached to prototype bogie.

5・2 試験概要

車両を使った軸はりゴム剛性評価試験の概要を表3に示す。撮影条件は、前述4・1節の表1と同様である。また、使用した試験車両の主な諸元を表4に示す。

Table 3 Outline of the test.

Item	Description
Test bogie	Prototype bogie for conventional lines
Test speed	Around 1 to 2 km/h
Excitation method	By running on the iron plate
Height of the iron plate on which the wheel rides	5 mm
Items measured	Longitudinal and vertical vibration displacement of the axle box and bogie frame by video image of the section near the axle box suspension on the right side in the running direction of the fourth axle

Table 4 Main specifications of prototype vehicle.

Item	Specification		
Mass of body	22.10 t	Traction link rubber longitudinal stiffness	3.18 MN/m
Mass of bogie	1.46 t	Traction link rubber longitudinal damping	31.76 Ns/m
Mass of wheelset	1.61 t	Air spring vertical stiffness	1.33 MN/m
Axle spring longitudinal stiffness	1.00 MN/m/axle-box	Air spring vertical damping	48.00 kNs/m
Axle spring vertical stiffness	1.37 MN/m/axle-box	Axle vertical damping	20.00 kNs/m/axle-box
Axle beam rubber longitudinal stiffness	Normal stiffness 13.48 MN/m/axle-box Soft stiffness 1.51 MN/m/axle-box	Axle beam rubber longitudinal damping	Normal stiffness 13.48 kNs/m/axle-box Soft stiffness 1.51 kNs/m/axle-box

5・3 加振方法と試験条件

所内走行で車両を加振するために加振治具（鉄製板、長さ 167 mm、幅 73 mm、厚さ 5 mm）を図 13 に示すようにレール上に置き、この板を車輪が乗り上げる時と板からレールに車輪が落下する時の軸箱の動画を収録した。板の厚さは、振動波形の観察を容易にしつつ、脱線を回避するため車輪の上下動がフランジ高さ（概ね 30 mm）を超えないよう一例として 5 mm とした。板による加振は第 4 軸の左右車輪に同時に行った。

1 台車の 4 つの軸はりゴムをすべて通常品とした条件と、第 4 軸の右側車輪の軸はりゴムのみ軟化品に交換した条件の 2 条件で試験を行った。試験では、通常品条件、軟化品条件でそれぞれ 3 回走行した（合計 6 試番）。

Fig. 13 Setup of the iron plate for vibration. The bogie vibration is generated when the vehicles pass over this iron plate.

5・4 輪軸と台車枠の振動モード

台車枠を持つ鉄道車両の輪軸と台車枠の前後振動モードには図 14 に示すモードが存在する。モード 1 は輪軸と台車枠が一体（同相）となり、これらと車体が逆相になるモードである。モード 2 は 1 台車内の 2 輪軸が互いに逆相となるモードである。車体と台車を結合する牽引リンク（鋼製のリンクの両端がゴムブッシュとなっている部品）の前後剛性は、軸はりゴム剛性より小さく、なおかつ 2 輪軸と台車枠の質量は、1 輪軸の質量より大きいので、モード 1 の周波数はモード 2 の周波数より低くなる。

Fig. 14 Possible longitudinal vibration modes caused by bogie frame and wheelsets. The total mass of the bogie frame and wheelsets causes lower frequency model1, and the lighter mass of the wheelsets causes higher frequency mode2.

5・5 試験結果と軟化品の識別

図 15 に、通常品条件と軟化品条件の軸箱の前後振動加速度 PSD を示す。図中の 4.4 Hz 付近のピークは、各試験で振動加速度 PSD の高さに差があるものの、周波数においては差がない。これは図 14a) に示す輪軸と台車枠が一体になり車体に対し前後に振動するモードと考えられ、牽引リンクの前後剛性はいずれの試験条件でも変わっていないので、4.4 Hz 付近のピーク周波数には差が表れなかったものと考えられる。

一方で、20 Hz 付近に注目すると、軟化品のピーク周波数は 17.8 Hz にあり、通常品のピーク周波数は 20.0 Hz から 22.2 Hz 付近であることがわかった。このことは同一条件の 3 試験すべてに見られ、再現性が高かった。これは軟化品による軸箱の前後支持剛性の低下により軸箱支持装置の前後系の固有振動数が低下したため図 14b) に示す輪軸が逆位相で前後するモードの周波数が変化したと考えられる。よって、20 Hz 付近の軸箱前後振動加速度 PSD のピーク周波数低下により軟化品の識別が可能であると考えられる。

Fig. 15 Frequency analysis results of axle box longitudinal vibration by camera images. The peak near 4.4 Hz did not change even if the axle beam rubber longitudinal stiffness changed, and the decrease in the axle beam rubber longitudinal stiffness changed the peak frequency from 20.0 Hz~22.2 Hz to 17.8 Hz.

6. 軸はりゴム剛性評価試験の数値モデル

本試験の現象を理論的に確認するために、軸はりゴム剛性評価試験を数値モデルで再現することを試みる。軸はりゴム剛性の影響が分かり易いよう見通しの良い単純化した数値モデルを構築した。

6・1 仮定した数値モデル

試験では第 4 軸左右車輪に加振治具を取り付けて加振しているので、台車ヨーイングの影響は小さいとし、1 両の右半分モデルを仮定した。右半分モデルの後側のみを図 16 に示す。車体、台車、軸箱を質点と仮定し、自由度は前後と上下、ピッチングを仮定した。空気ばね、軸ばね、軸はりゴムはばね要素と減衰要素を仮定した。

また、車輪とレール間にはクリープ力と呼ばれる作用力が働く。このクリープ力は、車輪とレール間のすべり率により大きくなる。しかし本試験では、直線区間を走行し接触点における左右輪の半径差が無く、かつ駆動力も制動力も無いので、すべり率は極めて低いと考え、本数値モデルにはクリープ力を仮定しなかった。

軸箱前後剛性は軸はりゴムの前後剛性と軸ばねの前後剛性の並列和である。軸ばねの前後剛性は在来線特急車に使われる軸ばねの諸元を基に理論式（水野，1979）により算出した値を用いた。

軸はりゴムの前後剛性は前述 4・2・2 項の図 10 の変位－荷重線図より読み取った。軟化品軸はりゴムの前後剛性は、通常品の前後剛性に比べ 1/10 程度であった。そこで、第 4 軸右側に軟化品、左側に通常品を取り付けた試験における右半分モデルの第 4 軸の前後剛性は、通常品条件の前後剛性に対し $(1+1/10)/2$ 倍であると仮定した。数値モデルに使用した主要諸元は、表 4 の通りである。

数値シミュレーションでは、車輪とレール間、車輪と加振治具間で接触判定を行いながら速度 2 km/h で車両を走行させ加振治具通過試験を模擬した。

Fig. 16 Quarter numerical model of vehicle.

6・2 数値シミュレーション結果

図 17 に数値シミュレーションにより得られた第 4 軸における軸箱前後振動の周波数解析結果を示す。

5・5 節の軸はりゴム剛性評価試験の結果と同様に、軸はりゴムが通常条件から軟化条件に変わると 21 Hz～22 Hz のピーク周波数が 18 Hz に変化し、4 Hz～5 Hz のピークは変化しない。これより、試験時に見られた 22 Hz のピーク周波数が 18 Hz に変化したことは、軸はりゴムの剛性変化の影響であったことが理論的に裏付けられた。

Fig. 17 Results of simulation of the longitudinal vibration of the fourth axle. Similar to the test results in Figure 15, the peak near 4 Hz~5 Hz did not change even when the axle beam rubber longitudinal stiffness changed, and the decrease in the axle beam rubber longitudinal stiffness changed the peak frequency from 21 Hz~22 Hz to 18 Hz.

6・3 軸はりゴムの前後剛性の識別性能

図 18 に軸はりゴム剛性評価試験時の軸箱上下変位を示す。車輪が加振治具（鉄板）を通過する時間は 1 秒程度であった。仮に 1 秒間の周波数解析を行うと、解析時間と周波数分解能が逆数となる周波数解析の数学的關係から、1 Hz の周波数分解能となる。このことからこの試験手法は 1 Hz 程度の周波数分解能を持つことになる。

試みに前述 6・1 節の数値モデルを用いて計算してみると、軸はりゴムの前後剛性を 15 % 変えると 20 Hz 付近のピークが 1 Hz 程度変化した(図 19)。よってこの試験手法が識別できる軸はりゴムの前後剛性は、15 % 程度であるということが考えられる。

Fig. 18 Test results of vertical axle-box displacement by camera images. It takes about 1 second when the vehicle passes over this iron plate.

Fig. 19 Results of simulation of the fourth axle longitudinal vibration PSD figure (enlarged view of the 18 Hz- 25 Hz portion). The 15 % decrease in the axle beam rubber longitudinal stiffness changed the peak frequency from 21 Hz~22 Hz to 20 Hz~21 Hz.

7. 結 言

レール上に置かれた加振治具を通過する際の台車の振動を定置カメラにより観測し、台車の状態監視をする手法を検討し、以下の点を明らかにした。

- ・約 2 m 離れた所からカメラ動画により取得した振動加速度波形の周期は、加速度計による周期と一致しており、固有振動数の比較試験にカメラ動画が適用可能である。
- ・速度 2 km/h 程度の低速で 5 mm 程度の鉄板上を通過することで、軸箱支持装置の前後剛性が評価できる加振が可能である。
- ・軸はりゴムの劣化を診断には、軸箱支持装置の前後振動が重要である。
- ・軸はりゴムの劣化により前後剛性が低下すると、軸箱支持装置の 20 Hz 付近の前後固有振動数が低下する。この変化は、数値モデルにより理論的にも説明ができる。

これらにより、軸はりゴムの非分解定量的評価が本手法により可能であることが結論付けられた。

システム同定では入出力関係からシステムの諸元を同定する手法があるが、本診断手法はステップ入力後の輪軸の自由振動の固有振動数を使うことになるので、入力を計測するためのセンサが必要ない。また輪軸の自由振動波形の振幅を本診断手法が利用しないので、加振入力の大さに依存しない。このため加振入力の大さの差に繋がる加振治具の摩耗の影響も受け難い。このことは、本診断手法を使った監視装置のメンテナンス上のメリットとなる。

また、軸はりゴムのゴム部と金属部が剥離すると剛性が通常品に比べ部品単体で 1/10 程度まで前後剛性が低下する場合があるということも明らかになった。

さらに、5・5 節に述べたように 4.4 Hz 付近のピークは、図 14a)に示す輪軸と台車枠が一体になり車体に対し前後に振動するモードと考えられ、ここを観察することにより牽引リンクゴムも監視ができると考えられる。また、撮影された動画には、他に台車の各部が写っており、台車のこの他の部品の監視も同時にできると考えられ今後検討してゆく。

本論文で述べた手法では、車両の走行速度が 2 km/h 程度の極低速であり、構内走行速度(たとえば速度 15 km/h)程度まで診断できる必要があるので、現在この課題に取り組んでいる。20 ton 以上ある車体を持ち上げ、輪軸を含め 4 ton 以上ある台車を取り出し、この台車を分解しないと確認できない軸はりゴムの健全性を非分解で確認できるメリットは大きい。また、部品の余寿命の研究も進めこれと組み合わせれば、検修する車両の順番付けもでき、本診断手法が鉄道の検修や運用をより効率化するツールとなると考えられる。

文 献

- Evans, J. and Berg, M., Challenges in simulation of rail vehicle dynamics, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 47, No. 8 (2009), pp.1023–1048.
- IEM, Truck Performance Detector (TPD), available from <[<http://www.iem.net/products?id=\(265\)>](http://www.iem.net/products?id=(265))>, (参照日 2020 年 6 月 8 日) .
- 糸永宣昭, 八野英美, 新幹線車輪状態把握システムの開発, *R&m*, Vol. 17, No. 6 (2009), pp.12-15.
- 上瀧 剛, 井尻 善久, サブピクセル物体検出とベンチマーク, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. J98–D, No.8 (2015), pp.1126–1141.
- Latchaw, A. and Gage, S., Listening out for trouble, *Railway Gazette International*, August (2016), pp.67-68.
- LBFoster, Hunting Truck Detector (HTD), available from <<https://www.lbfoster.com/perch/resources/salienthtd2018.pdf>>, (参照日 2020 年 6 月 8 日) .
- 水野正夫, ばねの設計・製造と信頼性 (1979), pp.51-56, 養賢堂.
- 森信昭, 山田勝也, 織田和則, 車輪踏面管理装置の開発, *R&m*, Vol.7, No. 11 (1999), pp.18-21.
- Poudel, A. and Witte, M., Tycho ACWDS detection performance summary, *Technology Digest*, TD-17-003 (2017), pp.1-4.
- Rosenberger, M., Payer, J., Fuchs, J., Muller, G., Lubner, B., Fullerkrug, U., Rackl, H. and Magerl, F., Limits and potentials of wedge tests for the validation of railway vehicle dynamics models, the 23rd International Association for Vehicle System Dynamics Symposium, Qingdao, People's Republic of China (2013).
- Schlake, B. W., Todorovic, S., Edwards, J. R., Hart, J. M., Ahuja, N. and Barkan, C. P. L., Machine vision condition monitoring of heavy-axle load railcar structural underframe components, *Proceedings Institution Mechanical Engineers Part F: Journal Rail and Rapid Transit*, Vol.224, No.5 (2010), pp.499-511, DOI: 10.1243/09544097JRRT376.
- Shi, H., Wu, P., Luo, R. and Zeng, J., Estimation of the damping effects of suspension systems on railway vehicles using wedge tests, *Proceedings Institution Mechanical Engineers Part F: Journal Rail and Rapid Transit*, Vol. 230, No.2 (2016), pp.392–406
- Shirotori, T., A method for wayside bogie monitoring based on internal yard running vibration, *Proceedings Institution Mechanical Engineers Part F: Journal Rail and Rapid Transit*, online (2020), DOI: 10.1177/0954409720942350.
- 城取岳夫, 深澤香敏, 構内走行を利用した台車状態監視のための 台車振動定置計測手法, 第 24 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2017), S2-7-1 (2017).
- 総務省, 平成 26 年版 情報通信白書, available from <<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/html/nc141210.html>>, (参照日 2020 年 6 月 8 日) .
- 杉田裕伸, 森智彦, 八野英美, 新幹線車輪の摩耗度合い判定システムの開発, *R&m*, Vol.24, No.2 (2016), pp.50-53.
- Wayside Inspection Devices Inc., TBOGI, available from <http://www.wid.ca/sites/default/files/brochures/TBOGI/WID_TBOGI_Brochure_US.pdf>, (参照日 2020 年 6 月 8 日) .
- Witte, M. and Chaparro, R., Fully automated train scan: Automatic truck component scanning system evaluation, *Technology Digest*, TD-15-025 (2015), pp.1-4, Transportation Technology Center, Inc..
- Zacher, M. and Kratochville, R., Stationary and on-track tests using various vehicles, *Proceedings Institution Mechanical Engineers Part F: Journal Rail and Rapid Transit*, Vol. 229, No.6 (2015), pp.668–690.

References

- Evans, J. and Berg, M., Challenges in simulation of rail vehicle dynamics, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 47, No. 8 (2009), pp.1023–1048.
- IEM, Truck Performance Detector (TPD), available from <[http://www.iem.net/products?id=\(265\)](http://www.iem.net/products?id=(265))> (accessed on 8 June, 2020).
- Itonaga, N. and Yano, H., Shinkansen syarinjyoutaihaaku shisutemu no kaihatsu, *R&m*, Vol.17, No. 6 (2009), pp.12-15 (in Japanese).
- Koutaki, G. and Ijiri, Y., Sub-pixel object detection and benchmark, *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Trans D*, Vol. J98–D, No.8 (2015), pp.1126–1141 (in Japanese).
- Latchaw, A. and Gage, S., Listening out for trouble, *Railway Gazette International*, August (2016), pp.67-68.
- LBFoster, Hunting Truck Detector (HTD), available from <<https://www.lbfoster.com/perch/resources/salienthtd2018.pdf>>, (accessed on 8 June, 2020).
- Mizuno, M., Bane no sekkei seizou to shinraisei (1979), pp.51-56, Yokendo (in Japanese).
- Mori, N., Yamada, K. and Oda, K., Sharintoumenkanrisouchi no kaihatsu, *R&m*, Vol.7, No. 11 (1999), pp.18-21 (in Japanese).
- Poudel, A. and Witte, M., Tycho ACWDS detection performance summary, *Technology Digest*, TD-17-003 (2017), pp.1-4.
- Rosenberger, M., Payer, J., Fuchs, J., Muller, G., Lubner, B., Fullerkrug, U., Rackl, H. and Magerl, F., Limits and potentials of wedge tests for the validation of railway vehicle dynamics models, the 23rd International Association for Vehicle System Dynamics Symposium, Qingdao, People's Republic of China (2013).
- Schlake, B. W. Todorovic, S. Edwards, J. R. Hart, J. M. Ahuja, N. and Barkan, C. P. L., Machine vision condition monitoring of heavy-axle load railcar structural underframe components, *Proceedings Institution Mechanical Engineers, Part F: J Rail and Rapid Transit*, Vol.224, No.5 (2010), pp.499-511, DOI: 10.1243/09544097JRRT376.
- Shi, H., Wu, P., Luo, R. and Zeng, J., Estimation of the damping effects of suspension systems on railway vehicles using wedge tests, *Proceedings Institution Mechanical Engineers Part F: Journal Rail and Rapid Transit*, Vol. 230, No.2 (2016), pp.392–406
- Shirotori, T., A method for wayside bogie monitoring based on internal yard running vibration, *Proceedings Institution Mechanical Engineers Part F: Journal Rail and Rapid Transit*, online (2020), DOI: 10.1177/0954409720942350.
- Shirotori, T. and Fukazawa, K., A method of the wayside bogie monitoring based on the internal yard running vibration, In: *The 24th Jointed Railway Technol. Symposium. 2017 J-RAIL* (2017), paper no. S2-7-1 (in Japanese).
- Soumshou (Ministry of Internal Affairs and Communications), Heisei 26nendo ban jouhoutuusin hakusho (online), available from <<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/html/nc141210.html>>, (accessed on 8 June, 2020), (in Japanese).
- Sugita, H., Mori, T. and Yano, H., Sinkansensharin no mamoudoaihanteishisutemu no kaihatsu, *R&m*, Vol.24, No.2 (2016), pp.50-53 (in Japanese).
- Wayside Inspection Devices Inc., TBOGI, available from <http://www.wid.ca/sites/default/files/brochures/TBOGI/WID_TBOGI_Brochure_US.pdf>, (accessed on 8 June, 2020).
- Witte, M. and Chaparro, R., Fully automated train scan: Automatic truck component scanning system evaluation, *Technology Digest*, TD-15-025 (2015), pp.1-4, Transportation Technology Center, Inc..
- Zacher, M. and Kratochville, R., Stationary and on-track tests using various vehicles, *Proceedings Institution Mechanical Engineers Part F: Journal Rail and Rapid Transit*, Vol. 229, No.6 (2015), pp.668–690.