Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00124

Received date : 6 April, 2021

Accepted date : 8 September, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 24 September, 2021

鉄道車両用車軸軸受の自律型損傷検知システム

間々田 祥吾^{*1}, 太田 達哉^{*1}, 宮本 修吏^{*2}, 岡村 吉晃^{*1}

Autonomous damage detection system for railway axle journal bearings

Shogo MAMADA^{*1}, Tatsuya OHTA^{*1}, Masashi MIYAMOTO^{*2}, Yoshiaki OKAMURA^{*1}

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

Abstract

Since axle journal roller bearings of the bogie of rolling stock are important components for the running of the vehicles, early detection of damage to axle bearings is required. Therefore, we developed an autonomous damage detection system "ADDS" as one of the detection devices. The ADDS uses energy harvesting technology that utilizes the power generation function of the piezoelectric element "PZT". The ADDS can detect axle bearing damage and transmit obtained data to receiver that will be installed under floor of the vehicle without a power supply and cable connection from the vehicle body. In the ADDS, the anti-vibration rubber for axle springs, which is installed on the axle box is replaced by an autonomous damage detection anti-vibration rubber "ADDAR". The ADDAR contains the PZT as a power generation module "PGM" and a transmitter that transmits the detected data to receiver. The transmitter in the ADDAR can be driven by electric power from the PGM. The rotational test to evaluate the performance of the ADDAR was carried out using an axle journal bearing performance rig. The test results show that the power generation performance of the PGM of the ADDAR installed on the damaged axle bearing is higher than that of the ADDAR installed on the normal axle bearing. It is confirmed that the transmitter in the ADDAR installed on the damaged axle bearing can transmit the obtained data to the receiver. Additionally, the power generation performance of the ADDAR is improved when the PGM is installed directly above the damaged location of the axle bearing. In this case, the ADDAR can secure the power to drive the transmitter even at low rotational speeds.

Keywords : Axle bearing, Autonomous damage detection system, Energy harvesting, Piezoelectric elements, Anti-vibration rubber, Power generation module, Transmitter, Rotation test

1. 緒 言

鉄道車両の台車の車軸軸受は、車体重量を支持しながら車軸の円滑な回転を保持する重要な部品であり、車軸軸受が故障すると、軸受が焼き付いて自走が困難になる可能性がある。そのため、車軸軸受に発生した損傷は故障に至る前の早い段階で検知されることが求められる(岡, 2013, 辺見, 2016)。軸受の損傷は振動や温度によって検知されることが多いが、車軸軸受は温度によって監視されることが一般的であり、在来線の一部では特定の温度で色が変わる不可逆性示温シール(千葉他, 2009)、新幹線では高温時に内部のケーブルが切断する軸温検知センサ(上村他, 2013)が車軸軸受を収納する軸箱に取り付けられている。しかしながら、異常が検知される程度まで軸箱の温度が上昇した場合、車軸軸受の損傷は相当に進行していることが想定される。

筆者らはこれまで、図1に示す軸箱上に設置される軸ばね防振ゴムに、振動に伴う荷重が加わった場合に電気信号を発生させる圧電素子(塩寄, 2002)を内蔵させ、車軸軸受の損傷に起因する異常振動を検知する手法を検討してきた。その結果、圧電素子から発生する電気信号を解析することにより、軸箱の温度が上昇する前に軸受の損傷を検知できることがわかった(野木村他, 2017)。しかしながら、この手法では軸ばね防振ゴム内の圧電素子か

ら車上までケーブルを配線した上で、得られた信号を解析するため、配線および解析といった作業が煩雑であり、課題であった。この課題の解決策の一つとして、無線装置を活用してケーブルによる配線を必要とせずに損傷の検知状況を通知する手法が想定されるが、軸箱上では無線の送信機を駆動させる電源の確保が困難である。

そこで、無線の送信機を駆動させる電力を確保する技術(梅田他, 2003, 吉田他, 2014)としてエネルギーハーベスティングの活用を検討した。エネルギーハーベスティングは、圧電素子のように電気信号を発生させる材料から生じる電力を蓄えて活用する技術である。この技術を活用し、車軸軸受の損傷による異常振動が発生した際の軸ばね防振ゴム内の圧電素子から発生する電力によって無線の送信機を駆動できれば、自律して損傷を検知し、さらに通知するシステム（以下、自律型損傷検知システム）が実現できると想定された。本論文では、本想定に基づいて作製した自律型損傷検知システムの概要を示すとともに、基本性能および損傷検知性能の評価結果を示す。

Fig. 1 Schematic illustration of a bogie for a rolling stock. The anti-vibration rubber for axle spring is mounted on the axle box.

2. 自律型損傷検知システムの概要

自律型損傷検知システムは、同システム用の軸ばね防振ゴム（以下、自律型損傷検知防振ゴム）および外部の無線装置の受信機で構成される。これらの詳細を以下に示す。

2・1 自律型損傷検知防振ゴムの寸法および構造

自律型損傷検知防振ゴムは圧電素子や無線装置の送信機などを内蔵させるため、図2に示す形状で作製した。

Fig. 2 Schematic illustration of the autonomous damage detection anti-vibration rubber “ADDAR” used for the autonomous damage detection system “ADDS”.

図2に示すように、自律型損傷検知防振ゴムはゴムの下面に鉄板を加硫接着させた積層構造である。形状は鉄道車両に使用されている現用の軸ばね防振ゴムとほぼ同じ外径約 220mm、厚さ約 25mm の円盤形状である。また、中央には現用の軸ばね防振ゴムと同様に、取付けの際に用いる直径約 50mm の穴が開けられている。自律型損傷検知防振ゴムの構造上の特徴を以下に示す。

- ・ ゴム下面の鉄板に穴を空けてゴム内部を加工し、圧電素子を利用した発電モジュールで構成される部材、圧電素子から発生した電力を蓄電するキャパシタで構成される部材、無線装置の送信機で構成される部材を内蔵する3つの部位（図2中の2箇所の発電部位、各1箇所の蓄電部位および送信部位）を設けた。

- ・ 発電部位の形状は直径 55mm×深さ 13.5mm とし、蓄電部位および送信部位の形状は 45mm×40mm×深さ 11mm とした。また、各部位の厚さとして、発電部位は発電モジュールに荷重を直接加えるため約 25mm とし、蓄電部位および送信部位は部材に荷重を直接加えないため約 17mm とした。

2・2 発電部位

発電部位は 2 箇所であり、1 箇所につき圧電素子を利用した発電モジュールが 1 体ずつ内蔵される。圧電素子には、現在最も一般的に利用されるチタン酸ジルコン酸鉛（株）フコク製、以下、PZT）を用いた。PZT の形状は、直径 50mm、厚さ 2mm の円盤であり、発電モジュールとした場合の全体としての厚さは 12mm とした。発電モジュールの詳細な構造については後述する。

2・3 蓄電部位

蓄電部位にはキャパシタおよび整流回路が内蔵される。発電モジュールから発生する電気信号は振動によって発生する交流であるため、電気信号をキャパシタに直接入力しても充放電を繰り返し、蓄電が困難である。そこで、ダイオードを組み合わせた整流回路(吉岡, 2003)を用いて交流を疑似的な直流に変換した後にキャパシタに蓄電した。なお、整流回路は 2 体の発電モジュールから発生する電力に個別に対応するため 2 系統用意し、個々の発電モジュールから発生した電力を足し合わせてキャパシタに蓄電できるとした。キャパシタの静電容量は、寸法上の制約および送信機を稼働させるために必要な電力を考慮して 220 μ F とした。

2・4 送信部位および受信部位

送信部位には無線装置の送信機が内蔵される。送信機は周波数 315MHz 帯、送信出力 0.3mW の特定小電力無線局を利用する無線モジュール（インタープラン株式会社製、IM315TRX）を使用した。使用した無線装置の選定理由は、送信機が自律型損傷検知防振ゴムに内蔵するための寸法上の条件を満たしていることに加え、消費電力が小さく、安価なためである。送信機には発電モジュールで発生し、キャパシタに蓄電された電力が供給されるが、その際、スイッチングレギュレータ回路（アナログ・デバイス株式会社製、LTC3588）を使用し、キャパシタの端子間の電圧（以下、端子間電圧）が約 5V 以上となった場合に電力が供給される。また、無線装置の受信機は、送信機と同じ無線モジュール（インタープラン株式会社製、IM315TRX）を使用し、送信機からの電波を受信した場合、LED が約 1 秒点灯すると自動的に消灯し、次の電波が受信されるまで待機状態となる仕様にした。なお、使用した送信機から送信される電波の周波数帯域は回折しやすい(大脇他, 2013)。そのため、受信機の設置位置として、図 3 に示すような車体中央を想定した場合、周辺の装置を回折して進み、遮蔽されにくいと考えられる。

Fig. 3 Schematic illustration of the assumed installation location of the transmitters and the receiver.

3. 自律型損傷検知システムの基本性能

3・1 発電モジュールの構造

自律型損傷検知防振ゴムに使用する発電モジュールの構造を選定するため、発電モジュールの発電性能を評価した。発電性能を評価した発電モジュールの構造は、図 4 に示すように、PZT を 1 枚使用して電極と直接接触させたタイプ（以下、1P-DC）、PZT を 1 枚使用して PZT と電極の間に導電ゴムを介在させたタイプ（以下、1P-RC）、PZT を 2 枚使用して電極と直接接触させたタイプ（以下、2P-DC）および PZT を 2 枚使用して PZT と電極の間に導電ゴムを介在させたタイプ（以下、2P-RC）の 4 種類である。PZT と電極の間に導電ゴムを介在させたのは、

過去の検討において、導電ゴムを介在させて組み合わせた場合、介在させずに組み合わせた場合と比較して発電性能の向上が確認されたためである(間々田他, 2020)。発電モジュールの大きさは、直径 50mm、厚さ 12mm とした。発電モジュールの厚さを 12mm とした理由は、2-1 節で述べたように自律型損傷検知防振ゴムの発電部位の深さが 13.5mm であるため、厚さ 2mm の隙間調整用のゴム材を含めて 13.5mm 以上になるようにし、確実に発電モジュールに荷重が加わるようにするためである。なお、PZT および導電ゴムの厚さはそれぞれ 2mm および 0.5mm としたため、鋼製の電極の厚さを調整することによって発電モジュール全体の厚さを 12mm とした。

Fig. 4 Schematic illustration of the power generation module “PGM”. (a) 1P-DC; both sides of one PZT plate are in direct contact with the electrodes. (b) 1P-RC; both sides of one PZT plate are in contact with the electrodes via conductive rubber. (c) 2P-DC; each side of two PZT plates is in direct contact with the electrodes. (d) 2P-RC; each side of two PZT plates is in contact with the electrodes via conductive rubber.

発電モジュールの発電性能は、発電モジュールの厚さ方向に正弦波の荷重を加える加振試験によって評価した。加振試験の条件は平均荷重を 10kN、振幅荷重を 1.0kN、加振周波数を 10Hz とした。加振試験の際は発電モジュールと自律型損傷検知防振ゴムの蓄電部位に使用した整流回路およびキャパシタを接続し、キャパシタの端子間電圧を測定した。ただし、自律型損傷検知防振ゴムの蓄電部位に使用したキャパシタの静電容量は送信機の稼働に必要な電力を考慮して 220 μ F としたが、本試験では 6.8mF の静電容量のキャパシタを使用した。6.8mF の静電容量のキャパシタを使用した理由は、本試験の目的が発電モジュールの発電性能の把握であり、静電容量が大きいキャパシタを使用することで蓄電に要する時間を長くし、発電性能の傾向を把握しやすくするためである。また、発電モジュールの発電性能は、式(1)を用いてキャパシタにおいて蓄電された電力量を算出して評価した。

$$P = CV^2/2 \quad (1)$$

ここで、 P は電力量、 C はキャパシタの静電容量、 V は端子間電圧である。

加振時間と電力量の関係を図 5 に示す。図において同じ加振時間における電力量が大きいほど発電性能が高いことを示す。

Fig. 5 Relationship between the electric energy of the capacitor and vibration time. The electric energy is large in the order of 2P-RC > 1P-RC > 2P-DC > 1P-DC at same vibration time. This result indicates that the generation performance of the PGM is increased by installing conductive rubber.

図 5 より、同じ加振時間で比較した場合の電力量は $2P\text{-}RC > 1P\text{-}RC > 2P\text{-}DC > 1P\text{-}DC$ の順に大きく、発電モジュールの PZT と電極の間に導電ゴムを介在させることで発電性能が高まることがわかった。これは、導電ゴムを介在させることにより、PZT 表面と電極が全面で均一に接触でき、PZT で発生した電荷が電極に伝達しやすくなったためと考えられる。本試験結果に基づき、自律型損傷検知防振ゴムに使用する発電モジュールは発電性能が最も高い $2P\text{-}RC$ とした。

3・2 自律型損傷検知防振ゴムの静的ばね定数

自律型損傷検知防振ゴムは現用の軸ばね防振ゴムの代替として使用することを想定している。そのため、現用の軸ばね防振ゴムと同等の静的ばね定数とする必要がある。

そこで、使用するゴム材料の硬度などを調整して作製した自律型損傷検知防振ゴムに発電モジュール 2 体を内蔵した状態で静的载荷試験を実施し、ばね定数を測定した。その結果、自律型損傷検知防振ゴムのばね定数は現用の軸ばね防振ゴムのばね定数に対して $\pm 10\%$ の範囲内に収まることがわかった。また、台車に設置した場合に想定される最大荷重を负荷した場合でも、蓄電部位および送電部位には荷重が直接加わらないことがわかった。さらに、式(2)を用いて発電モジュールに加わる荷重の割合を算出したところ、発電モジュール 1 体には、全体の約 13% の荷重が加わることがわかった。これは、発電モジュールを自律型損傷検知防振ゴムに内蔵した場合、発電モジュールを直接加振する場合と比較して、発電性能が $1/8$ 程度であることを意味する。

$$(K_{ADDAR} - K_R)/K_{ADDAR} = F_{PGM} \quad (2)$$

ここで、 K_{ADDAR} は発電モジュールを内蔵した自律型損傷検知防振ゴムの静的ばね定数、 K_R は発電モジュールを内蔵していない中空の自律型損傷検知防振ゴムの静的ばね定数、 F_{PGM} は発電モジュールに加わる荷重の割合である。

3・3 自律型損傷検知防振ゴムの発電性能

自律型損傷検知防振ゴムの発電性能を評価するため、3・1 節で選定した発電モジュール $2P\text{-}RC$ の 2 体を自律型損傷検知防振ゴムの 2 箇所の発電部位に 1 体ずつ設置し、厚さ方向に正弦波の荷重を加える加振試験を実施した。

加振試験の条件は、台車に設置した際に加わる荷重を想定し、平均荷重を 50kN、振幅荷重を 1kN、5kN および 10kN、加振周波数を 0.1Hz、1Hz および 10Hz とした。加振試験では 2 体の発電モジュールを蓄電部位の整流回路に接続してキャパシタの端子間電圧を測定し、式(1)を用いてキャパシタの電力量を算出した。加振試験の状況を図 6 に示す。なお、自律型損傷検知防振ゴムを実際に使用する際には、ケーブルを外部に配線させないが、加振試験では図 6 に示すようにキャパシタの端子間に接続したケーブルを外部に取り出して端子間電圧を測定した。

Fig. 6 Appearance of the vibration test. The ADDAR is excited vertically.

自律型損傷検知防振ゴムの加振試験における加振時間とキャパシタの電力量の関係の結果例として、振幅荷重 1kN における加振周波数 0.1Hz、1Hz および 10Hz の結果を図 7(a)に示し、加振周波数 1Hz における振幅荷重 1kN、5kN および 10kN の結果を図 7(b)に示す。

図 7(a)より、同じ振幅荷重の場合、同じ加振時間における電力量は $10\text{Hz} > 1\text{Hz} > 0.1\text{Hz}$ の順に大きく、加振周波数が 0.1Hz の場合の電力量を 1 とすると、1Hz の場合は約 100、10Hz の場合は 10000 であった。また、図 7(b)より、同じ加振周波数の場合、同じ加振時間における電力量は $10\text{kN} > 5\text{kN} > 1\text{kN}$ の順に大きく、振幅荷重が 1kN の場

合の電力量を 1 とすると、5kN の場合は約 25、10kN の場合は約 100 であった。このように、同じ加振時間における電力量は加振周波数および振幅荷重の 2 乗に比例して増加した。この結果は、式(1)を考慮すると、端子間電圧が加振周波数および振幅荷重に比例して増加することを示している。次に、図 7(b) より、加振周波数 1Hz において、振幅荷重 5kN では加振開始約 3.5 分後、振幅荷重 10kN では加振開始約 1 分後にキャパシタの電力量が約 2.7mJ（端子間電圧が 5V）に達した後、約 1.4mJ まで急激に低下している。これは、キャパシタの端子間電圧が 5V に達したことによって送信部位のスイッチングレギュレータが駆動し、送信機に電力が供給されたためである。この際、受信機において電波が送信されたことを確認した。電力量が約 1.4mJ に減少した後は、再び 2.7mJ になるまで増加し、再度送信機に電力が供給されて電波が送信された。

Fig. 7 Relationship between the electric energy of the capacitor in the ADDAR and vibration time. (a) The change of the electric energy with time when the ADDAR is excited at the load of 1 kN and with difference frequencies (10 Hz, 1 Hz, 0.1 Hz). (b) The change of the electric energy with time when the ADDAR is excited at the frequency of 1 Hz and with the different loads (1 kN, 5 kN, 10 kN). The electric energy at same vibration time increase with increasing the load and the frequency.

次に、自律型損傷検知防振ゴム内の送信機から電波が送信される条件を検討した。圧電素子に正弦波の荷重を加えてキャパシタに蓄電する場合、入力される電圧が高いほどキャパシタの電力量は増加する(藤本他, 2017)。そこで、加振試験の際に、整流回路に入力される前の 2 体の発電モジュールから発生する電圧の振幅値（以下、発生電圧）を測定した。振幅荷重と発生電圧の関係を図 8 に示す。図中の網掛けの箇所は電波を送信できた条件である。なお、整流回路によって整流された電圧は正電圧のみの疑似的な直流成分となるため、図に示した結果は発生電圧の片振幅値とした。また、発電モジュールは 2 体内蔵されており、発電モジュールから発生した電圧は整流後に足し合わされるため、図は 2 体の発電モジュールの発生電圧の合計値を示す。

Fig. 8 Relationship between the voltage generated by the PGM in the ADDAR and the load. The voltage is increased with increasing of load. Additionally, the voltage is large in the order of 10 Hz > 1 Hz > 0.1 Hz regardless of the load. The gray shaded area in the Figure indicates the conditions that the transmitter in the ADDAR can transmit to the receiver. As shown in Figure, the transmitter can transmit to receiver when the voltage exceeds approximately 13 V.

図 8 より、発生電圧は振幅荷重および加振周波数に比例して増加している。これは、前述したキャパシタの端子間電圧と同様の傾向であり、端子間電圧が発生電圧に比例して増加し、それに伴って電力量が増加することを

示している。発電モジュールの発生電圧が振幅荷重および加振周波数の増加に伴って増加した要因としては、過去の検討において PZT の発生電圧が同様の傾向を示す結果が得られている(間々田他, 2020)ことから、PZT の性質によるものと考えられる。また、本加振試験では、発電モジュールからの発生電圧の合計が約 13V 以上の場合にキャパシタの電力量が 2.7mJ 以上となり、送信機から電波を送信できることがわかった。

以上、自律型損傷検知防振ゴムに対する加振試験の結果、自律型損傷検知防振ゴムに加わる振動に伴う荷重振幅が大きく、周波数が高いほどキャパシタの電力量が増加すること、および送信機を駆動させるための電力量を確保するためには発電モジュールからの発生電圧が重要となることがわかった。また、自律型損傷検知システムの基本性能として、変動する荷重が自律型損傷検知防振ゴムに継続的に加わり、発電モジュールから電力が継続して発生する場合、自律型損傷検知防振ゴムはキャパシタへの蓄電と送信機への供給を繰り返すことがわかった。

4. 自律型損傷検知システムの損傷検知性能

4・1 損傷検知性能の評価方法

4・1・1 評価に用いる車軸軸受の損傷状態

自律型損傷検知システムの損傷検知性能は、車軸軸受に荷重を負荷させながら車軸を模擬した主軸を回転させることができる鉄道総合技術研究所が所有する車軸軸受耐久試験装置に、外輪に人工的にはく離を発生させた車軸軸受（以下、損傷軸受）を設置して評価した。使用した車軸軸受は図 9 に示す実車両で使用されているグリース密封形複列円すいころ軸受である(岡村他, 2016)。

Fig. 9 Schematic illustration of a railway axle journal tapered roller bearing. The axle journal bearing attached to the axle is composed of an outer ring, two sets of non-separable inner ring, cage and roller assemblies, etc.

損傷軸受に発生させたはく離は、軸受に発生する一般的な損傷であり、はく離が進展した場合、発生した金属摩擦粉がグリース中に混入して潤滑不良などを引き起こし、焼付きに至る可能性がある。軸受のはく離には非金属介在物等を起点とする内部起点はく離と圧こん等を起点とする表面起点はく離の 2 種類があるが、人工的に内部起点はく離を作製することは困難であるため、本検討では圧こんを付与した表面起点はく離を作製した。なお、表面起点はく離と内部起点はく離が進展した場合、どちらも同じような形状となる。以下に、損傷軸受におけるはく離の発生方法および進展状況を示す。

損傷軸受は外輪表面にロックウェル硬さ試験用のダイヤモンド圧子を用いて図 10(a)に示す一列の圧こんを付与した後、図 10(b)に示すように圧こんの位置が外輪に最も荷重が加わる負荷圏の中央(高橋他, 2016)となるように試験装置に設置した。ここで、本検討では、表面起点はく離を発生、進展させるため、図 10(b)に示す状態で、走行中に負荷される可能性がある条件として、鉛直方向にラジアル荷重 50kN を負荷させたまま水平方向にアキシアル荷重 14.7kN を 5 秒おきに 5 秒間繰り返し負荷させながら、主軸を 300km/h 相当で回転させた。その際、走行距離が 5 万 km 相当に達する毎に試験装置を停止させてはく離の状況を目視観察した。なお、走行距離は鉄道車両の一般的な定期検査の間隔である 60 万 km の 1/3 である 20 万 km 相当までに損傷を検知することを目標とした。はく離の進展状況を図 11 に示す。

Fig. 10 The flaking occurrence and growth of outer ring. (a) Appearance of the indentations of outer ring of axle bearing. (b) The position of indentations in rotational test.

Fig. 11 Appearance of the flaking of outer ring. The flaking area increases with increasing running distance. The flaking area is approximately 100 mm² at 100000 km, 300 mm² at 150000 km and 320 mm² at 200000 km.

図 11 に示すように、5 万 km 相当では明確なはく離の発生が見られないが、10 万 km 相当でははく離が明確に発生し、はく離面積は約 100mm²であった。その後、15 万 km 相当でははく離が軸方向に進展し、はく離面積が約 300mm²に達した。ただし、20 万 km 相当でははく離面積が約 320mm²であり、15 万 km 相当からの大きな進展は見られなかった。なお、図 11 に示した程度のはく離は車両の走行に影響せず、通常の走行において既存の軸温検知センサなどによって検知が困難な大きさである。以下、圧こんを付与する前の軸受を正常軸受、5 万 km 相当の損傷軸受を損傷軸受(5 万 km)、10 万 km 相当の損傷軸受を損傷軸受(10 万 km)、15 万 km 相当の損傷軸受を損傷軸受(15 万 km)、20 万 km 相当の損傷軸受を損傷軸受(20 万 km)とする。

4・1・2 自律型損傷検知防振ゴムによる損傷検知性能の評価方法

自律型損傷検知システムの損傷検知性能は、正常軸受および走行距離が 5 万 km 相当毎の損傷軸受の状態において軸箱上に自律型損傷検知防振ゴムを設置し、主軸を回転させる試験（以下、性能評価試験）を実施して評価した。性能評価試験の状況を図 12 に示す。

Fig. 12 Appearance of the performance evaluation test. Radial load of 50 kN is applied to the ADDAR in the vertical direction.

性能評価試験では負荷するラジアル荷重を実際の台車に設置した場合を想定して 50kN とし、主軸の回転速度は 30km/h, 70km/h, 110km/h, 150km/h, 200km/h, 250km/h および 300km/h の 7 条件とした。試験における測定項目は、キャパシタの端子間電圧および発電モジュール 2P-RC からの発生電圧とし、発生電圧を測定する際は自律型損傷検知防振ゴムに加わる振動状態を把握するため、軸箱上に設置した振動加速度ピックアップによって軸箱の振動加速度を合わせて測定した。測定周波数は端子間電圧を測定する場合には測定時間が長くなるため 10Hz とし、発生電圧を測定する場合には 1kHz までの周波数解析を実施するため、振動加速度も含めて 2kHz とした。また、性能評価試験では、図 13 に示すように、自律型損傷検知防振ゴムの 2 体の発電モジュールを主軸に対して垂直方向に設置した配置 A、平行方向に設置した配置 B の 2 通りを実施した。損傷軸受の場合、配置 B では外輪のはく離の直上に 1 体の発電モジュールが配置される。

Fig. 13 The position of ADDAR in the performance evaluation test. (a) The position of A at which the PGMs in the ADDAR are installed vertically to the axle. (b) The position of B at which the PGMs in the ADDAR are installed parallel to the axle.

4・2 損傷検知性能の評価結果と考察

4・2・1 キャパシタの端子間電圧

キャパシタの端子間電圧を 5 分間測定した際の電圧の最大値から、式(1)を用いてキャパシタの電力量を算出した結果を表 1 に示す。表の網掛けの箇所は、電力量が 2.7mJ 以上となり、電波が送信されたことを示している。また、同箇所には電波が送信されるまでに要した時間を示す。なお、5 分間の計測において端子間電圧が 5V に達しなかった条件では、その後測定を継続しても 5V には達しなかった。

Table 1 The maximum electric energy of the capacitor in the ADDAR. The gray shaded area in the Table indicates the conditions that the transmitter in the ADDAR can transmit the data to receiver. The electric energy increases with increasing the rotation speed and running distance. The electric energy by the damaged axle bearing is larger than that by the normal axle bearing. In addition, the electric energy of the position B is larger than that of the position A.

Position	Rotation speed [km/h]	Normal		Damaged 50000 km		Damaged 100000 km		Damaged 150000 km		Damaged 200000 km	
		Electric energy [mJ]	Time [s]	Electric energy [mJ]	Time [s]	Electric energy [mJ]	Time [s]	Electric energy [mJ]	Time [s]	Electric energy [mJ]	Time [s]
A	30	0.0	-	0.0	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-
	70	0.1	-	0.2	-	0.3	-	0.3	-	0.2	-
	110	0.1	-	0.3	-	0.6	-	0.8	-	0.5	-
	150	0.3	-	0.4	-	0.6	-	0.8	-	0.5	-
	200	0.4	-	0.4	-	1.5	-	1.4	-	0.9	-
	250	0.5	-	0.7	-	1.8	-	2.2	-	1.8	-
	300	0.6	-	1.0	-	2.6	-	2.7	63	2.7	51
B	30	0.1	-	0.2	-	0.9	-	1.2	-	0.5	-
	70	0.2	-	0.5	-	2.2	-	2.8	36.9	2.7	70
	110	0.2	-	0.8	-	2.7	10.2	2.7	12	2.7	7
	150	0.4	-	1.1	-	2.7	11.9	2.8	2.9	2.7	8.3
	200	0.5	-	1.1	-	2.8	6.4	2.8	2.9	2.7	4.6
	250	0.8	-	1.3	-	2.8	3.4	2.8	2.7	2.8	1.4
	300	1.2	-	2.4	-	2.8	3.2	2.8	1.1	2.7	1.5

表 1 より、電力量は配置 A、B とともに回転速度の増加に伴って増加している。また、同じ回転速度で比較した場合、損傷軸受の電力量は正常軸受よりも大きく、走行距離の増加に伴って増大する傾向がある。配置 A と B で比較すると、同じ走行距離および回転速度における電力量は配置 B の方が大きく、電波が送信された条件も多い。また、配置 B の場合の電波が送信されるまでの時間は速度の増加に伴って短縮され、配置 A と比較すると同じ条件（損傷軸受(15 万 km)および損傷軸受(20 万 km)、速度 300km/h）において 1/30 以下である。これらの結果が得られた要因については、後述する発電モジュールからの発生電圧の測定結果を用いて考察する。

キャパシタの端子間電圧の測定結果より、自律型損傷検知防振ゴムを配置 B で設置した場合、車軸軸受の外輪にはく離が発生した後、走行距離が 10 万 km 以内に速度 110km/h 以上で走行した場合に損傷を検知できる可能性が明らかとなった。さらに走行距離が 5 万 km 進むと、速度 70km/h でも損傷を検知できる可能性が示された。その一方で、配置 A の場合は損傷の検知までに要する走行距離が配置 B の場合よりも長くなることがわかった。ただし、配置 A の場合もはく離が発生した後、走行距離が 15 万 km 以内に速度 300km/h で走行した場合に損傷を検知できる可能性がある。これらの結果は、配置 A、B とともに、既存の温度センサを用いた検知手法よりも損傷早期に検知できることを示している。一方、自律型損傷検知防振ゴムを実際の台車に設置した場合、自律型損傷検知防振ゴムには車両走行に伴う様々な振動が加わることが想定され、正常軸受の場合でも電波が送信される可能性がある。そのような場合でも、本システムは変動する荷重が自律型損傷検知防振ゴムに継続的に加わる場合、図 7(b)に示すようにキャパシタへの蓄電と送信機への電力の供給を繰り返す仕様となっており、その際の送信機に電力が供給される時間間隔は表 1 に示した電波が送信されるまでに要した時間よりも短くなる。そのため、軸受に損傷が発生した場合には、電波が送信される間隔が短くなると想定され、通常走行時に電波の送信間隔を記録しておくことにより、電波の送信間隔から損傷を検知できると考えられる。ただし、実際の台車に設置した場合の電波の送信状況については、今後の検討課題である。

4・2・2 発電モジュールからの発生電圧

キャパシタの端子間電圧の測定結果において、前項で述べた結果が得られた要因を発電モジュールからの発生電圧および軸箱の振動加速度の測定結果に基づいて以下に考察する。

性能評価試験における発電モジュールからの発生電圧および軸箱の振動加速度の測定結果例として、回転速度 110km/h における正常軸受および損傷軸受(15 万 km)の時間波形を図 14 に示し、周波数解析結果を図 15 に示す。周波数解析は、軸受の損傷診断に一般的に用いられるエンベロープ処理をした時間波形に対して実施した。なお、配置 A の場合は 2 体の発電モジュールからの発生電圧がほぼ同等の波形であったため、図 13(a)に示す左側の発電モジュールの波形を示し、配置 B の場合は発生電圧の大きかった図 13(b)に示す下側のはく離の直上の発電モジュールの波形を示す。また、軸箱の振動加速度は配置 A と B でほぼ同等の波形であったため、配置 A の場合の波形を示す。

Fig. 14 The voltage change generated from the PGM with time and the change of acceleration of the axle box with time, at the rotational speed of 110km/h. (a) The voltage generated by the PGM on the left in Fig. 12(a). (b) The voltage generated by the lower PGM in Fig. 12(b). (c) The acceleration of the axle box of position A. The generated voltage and the acceleration by the damaged axle bearing which are indicated by red line is larger than that by the normal axle bearing which was indicated by black line.

Fig. 15 Frequency analysis results of the voltage generated by the PGM and the acceleration of the axle box, at the rotational speed of 110km/h. (a) The voltage generated by the PGM on the left in Fig. 12(a). (b) The voltage generated by the lower PGM in Fig. 12(b). (c) The acceleration of the axle box of position A. In case of the damaged bearing, the peak frequency of the voltage generated by the PGM and that of the acceleration of the axle box are same. The peak value of the voltage at the position B is larger than that at the position A.

図 14(a), (b)より, 正常軸受と損傷軸受(15 万 km)の発生電圧を比較すると, 配置 A, B とともに損傷軸受(15 万 km)の方が大きい. これは, 図 14(c)に示すように, 損傷軸受(15 万 km)の場合, はく離によって正常軸受よりも顕著に大きい軸箱の振動が発生するとともに, 図 15(c)に示すように, 広い周波数帯域で振動が増加しており, 振動の増加に伴って自律型損傷検知防振ゴムに加わる荷重が増加したためと考えられる. また, 図 15 より, 損傷軸受(15 万 km)の場合, 発電モジュールからの発生電圧および軸箱の振動加速度には図中の矢印で示したはく離に起因し, 主軸の回転に同期して発生する振動の周波数(以下, 欠陥周波数)およびその高調波の周波数にピークがある. これは, 発電モジュールからの発生電圧が軸箱の振動に起因していることを示している. 一方, 損傷軸受(15 万 km)の発生電圧を配置 A, B で比較すると, 配置 B の方が時間波形における振幅値が大きく, 欠陥周波数における発生電圧も顕著に発生している. これは, 配置 B の場合, はく離の直上に発電モジュールがあり, 発電モジュールに荷重が伝わりやすいためと考えられる.

次に, 全ての性能評価試験において得られた発電モジュールからの発生電圧および軸箱の振動加速度の時間波形における振幅の最大値を図 16 に示す. なお, 発生電圧は 3・3 節に示した基本性能における加振試験の場合と同様に, 2 体の発電モジュールから得られた発生電圧の片振幅値の合計値である. また, 図 16(a), (b)中の網掛けの箇所は電波を送信できた条件である.

図 16(a), (b)に示すように, 発電モジュールからの発生電圧の振幅値は回転速度の増加に伴って増大している. これは, 図 16(c)に示すように, 軸箱の振動加速度の振幅値が回転速度の増加に伴って増大しており, 軸箱の振動振幅の増加に伴って自律型損傷検知軸ばね防振ゴムに加わる荷重が増加したものと考えられる. また, 図 16(a), (b)より, 発生電圧は損傷軸受の場合に正常軸受よりも全体的に増加するが, 配置 B の場合の方が配置 A の場合よりも振幅値が大きい. これは, 前述したように, 配置 B の場合, はく離の直上に発電モジュールがあり, はく離に起因する振動に伴う荷重が加わりやすいためと考えられる. 送信機から電波が送信される条件については, 図 16(a), (b)に示すように, 2 体の発電モジュールからの発生電圧の合計が約 16V 以上の場合であることがわかった. この電圧値は基本性能における加振試験において約 13V 以上の場合に電波が送信されたことと比較するとわずかに高い. これは, 性能評価試験の場合, 図 14(a), (b)に示すように, 電圧波形の一部が突出して大きくなる傾向があることから, 整流回路によって疑似的な直流成分に変換する際の変換効率が低下するためと考えられる.

次に, 発生電圧と走行距離との関係について, 正常軸受の場合と比較すると, 配置 A, B とともに発生電圧の増加量は損傷軸受(5 万 km)の場合が最も小さく, 損傷軸受(15 万 km)の場合が最も大きい傾向がある. これは, 図 16(c)に示した軸箱の振動加速度の傾向と概ね一致しており, 軸箱の振動が発生電圧に影響したものと考えられる. 傾向が一致しない条件については, 振動加速度の振幅値に加えて周波数が影響していると考えられる. ここで, 軸箱の振動加速度と図 10 に示した損傷軸受のはく離面積の関係について以下に考察する.

損傷軸受(5 万 km)の軸箱の振動加速度は, 正常軸受の場合とほぼ同等である. これは, 転動体(ころ)が圧こん上を繰返し通過したことによって, 圧こんの縁の盛り上がりが低くなったことに加え, 圧こん自体のサイズが

小さく、軸箱の振動に与える影響が小さかったためと考えられる。一方、損傷軸受(10 万 km)、損傷軸受(15 万 km)および損傷軸受(20 万 km)の軸箱の振動加速度は、正常軸受の場合よりも顕著に増大している。これは、表面起点はく離が発生した後、はく離の進展とともにはく離面積が約 100mm^2 、約 300mm^2 および約 320mm^2 と増加したことにより、転動体とはく離部との接触面積が増大し、転動体とはく離部の接触によって発生する軸箱の振動加速度が増加したものと考えられる。しかしながら、損傷軸受(20 万 km)の振動加速度は、正常軸受よりも明確に大きいものの、損傷軸受(15 万 km)の場合よりも小さい。これは、損傷軸受(20 万 km)のはく離面積が約 320mm^2 であり、損傷軸受(15 万 km)のはく離面積の約 300mm^2 からほとんど進展していないことから、はく離部が転動体と接触を繰返したことにより、はく離の端部の段差が平滑化し、転動体との接触による振動が発生しにくい状態になったものと考えられる。

Fig. 16 Maximum voltage generated by the PGM and maximum acceleration of the axle box. (a) Maximum voltage at the position A. (b) Maximum voltage at the position B. (c) Maximum acceleration of the axle box. Both the generated voltage and the acceleration of the axle box are increased with increasing in the rotation speed and the running distance. In case of the damaged axle bearing, both the generated voltage and the acceleration of the axle box are larger than that of normal axle bearing. The maximum voltage at the position B is larger than that at the position A. The gray shaded area in the Figure 15 (a) and (b) indicates the conditions that the transmitter in the ADDAR can transmit the data to the receiver. As shown in Figure, the transmitter can transmit to the receiver when the voltage exceeds approximately 16 V.

以上、発電モジュールからの発生電圧の測定結果より、発生電圧は車軸軸受の外輪のはく離に起因する軸箱の振動振幅の増加によって増大する傾向があることがわかった。また、前項で示したキャパシタの電力量との関係では、電力量は発生電圧の増加によって増大し、2体の発電モジュールからの発生電圧の合計が一定の値以上となった場合に電波が送信できるなど、発生電圧の違いを利用してはく離を検知できることがわかった。さらに、自律型損傷検知防振ゴムの設置条件として、はく離の直上に発電モジュールが配置されることによって発生電圧が増加し、検知が容易になることが示された。なお、本試験では、はく離位置を外輪軌道面の負荷圏中央としたが、はく離が負荷圏中央に発生しない場合もはく離による振動は外輪軌道面を介して防振ゴムに伝わるため、発電モジュールは外輪軌道面の上に配置することが最適であると考えられる。また、本試験では外輪にはく離を発生させたが、はく離が内輪や転動体に発生した場合も、軸受の振動は負荷圏中央で発生しやすいため、外輪以外のはく離についても本システムによる検知が可能であると考えられる。

5. 結 言

鉄道車両の台車の車軸軸受は車両の走行において重要な部品であり、損傷が発生した場合には早期に検知されることが望まれる。そこで、本論文では簡易な方法で従来の検知方法よりも早期に車軸軸受の損傷を検知することを目的として、車体からの配線や電源を必要とせずに車軸軸受の損傷を検知できる自律型損傷検知システムを検討した。検討した自律型損傷検知システムでは、圧電素子であるPZTを利用した発電モジュール、損傷を通知する無線送信機などを軸ばね防振ゴムに内蔵させた自律型損傷検知防振ゴムを作製した。作製した自律型損傷検知防振ゴムの基本性能および損傷検知性能を評価した結果、以下の知見を得た。

基本性能について、自律型損傷検知防振ゴムは現用の軸ばね防振ゴムと交換して使用でき、荷重振幅が大きく、周波数の高い振動が加わった場合に、発電モジュールの発電性能が向上し、送信機の駆動、電波の送信が容易になることがわかった。損傷検知性能について、発電モジュールの発電性能は正常軸受の場合よりも損傷軸受の場合の方が高く、この特性の違いを利用した軸受の損傷検知が可能であることがわかった。さらに、自律型損傷検知システムとしては、温度による監視では検知が困難な大きさのはく離が発生した場合でも、送信機からの電波の送信の有無によって走行距離10万km以内に損傷を検知できる可能性があることがわかった。今後は、本論文で作製した自律型損傷検知システムを実際の車両に搭載した場合に損傷の検知が可能か検証する予定である。

文 献

- 千葉智, 石井圭介, TC 型軸箱温度検知システムの信頼性の向上および実用化, JR EAST Technical Review, No.29 (2009), p.31
- 藤本滋, 今井健嗣, 一木正聡, 圧電素子を用いた振動発電手法に関する研究(第3報, 積層圧電素子の最適積層数の検討), 設計工学, Vol.52, No.9 (2017), p.567-582
- 辺見信彦, 転がり軸受の異常診断, 計測と制御, Vol.55, No.3 (2016), pp.221-227
- 野木村龍, 間々田祥吾, 岡村吉晃, 山中翔, 鈴木康大, センサ防振ゴムを用いた軸受の損傷検知手法の開発, 第24回鉄道技術連合シンポジウム 講演論文集, (2017), S2-7-5
- 間々田祥吾, 竹中宏行, 太田達哉, 高橋研, 鈴木大輔, 圧電素子を内蔵した鉄道車両用歯車箱吊り用ゴムによる歯車箱軸受の損傷検知(定置試験における損傷検知性能の評価), 機械学会論文集, Vol.86, No.890 (2020), DOI:10.1299/transjsme.20-00012.
- 岡竜太郎, 鉄道車両車軸軸受の高速化と長寿命化への対応, トライボロジスト, Vol. 58, No.7 (2013), pp.479-484
- 岡村吉晃, 深貝晋也, 鈴木大輔, 高橋研, 梅原大樹, 永友貴史, 鉄道車両用車軸軸受のフレッチングに及ぼす接触面圧の影響, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 834 (2016), DOI:10.1299/transjsme.15-00523.
- 大脇遼, 三武裕典, 長谷川晶一, スキーのための荷重中心的音響フィードバック, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, (2013), 323
- 塩寄忠監修, 圧電材料とその応用(2002), p.76, シーエムシー出版.
- 高橋研, 鈴木大輔, 永友貴史, 複列円すいころ軸受の転動体荷重に与える内部すきまの影響, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.840 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.16-00205
- 上村裕二, 仲田圭吾, 大庭拓也, 平野正敏, 新幹線台車軸箱温度検知装置の開発, JREA, Vol.56, No.5 (2013),

pp.377714-377717

- 梅田幹雄, 坂井康弘, 中村健太郎, 圧電素子を用いた衝撃・振動による自己発電型ドアアラームシステム, 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌), Vol.123, No.12 (2003), pp.534-540
- 吉田善紀, 小林祐介, 内村太郎, 鋼鉄道橋の振動発電を利用したモニタリングシステムの開発, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.70, No.2 (2014), pp.282-294
- 吉岡均, パワー回路とキャパシタの世界, トランジスタ技術, 2003 年 10 月号 (2003)

References

- Chiba, S., Ishi, K., Application and improvement of reliability of the TC type of the temperature detector system, JR EAST Technical Review, No.29 (2009), p.31
- Fujimoto, S., Imai, T., Ichiki, M., Study on method of vibration power generation using piezoelectric element (3rd report, examination of optimal layer number of laminated piezoelectric elements), journal of Japan Society for Design Engineering, Vol.52, No.9 (2017), pp.567-582
- Henmi, N., Abnormality diagnosis of the rolling bearings, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.55, No.3 (2016), pp.221-227
- Mamada, S., Takenaka, H., Ohta, T., Takahashi, K., Suzuki, D., Damage detection of bearing in gear case by using piezoelectric element incorporated in hanging rubber for gear case of rolling stock (Evaluation of defection performance by bench test), Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 86, No. 890 (2019), DOI:10.1299/transjsme.20-00012
- Nogimura, R., Shogo, M., Yoshiaki, O., Sho, Y., Yasuhiro, S., Development on detection technique of bearing damages by sensor rubber isolator, J-Rail2017 Proceeding, (2017), S2-7-5 (in Japanese).
- Oka, R., High speed and long life technology for railway axle journal rolling bearings, Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol.58, No.7 (2013), pp.479-484
- Okamura, Y., Fukagai, S., Suzuki, D., Takahashi, K., Umehara, H. and Nagatomo, T., Effect of the contact pressure on the fretting of railway axle journal bearings, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 82, No. 834 (2016), DOI:10.1299/transjsme.15-00523
- Owaki, R., Mitake, H., Hasegawa S., Extrinsic sound feedback of pressure center for skiing, Sports engineering and human dynamics 2013 Proceeding, (2013), 323, (in Japanese)
- Shiosaki, T., Piezoelectric materials and applications, (2002), p.76
- Takahashi, K., Suzuki, D., Nagatomo, T., Effect of internal clearance on rolling element load of double row papered roller bearings, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 82, No. 840 (2016), DOI:10.1299/transjsme.16-00205
- Uemura, Y., Nkata, K., Oba, T., Hirano, M., Development of the temperature detector of the axle box of bogie of the shinkansen, JREA, Vol.56, No.5 (2013), pp.377714-377717
- Umeda, M., Sakai, Y., Nakamura, K., Self-generation door alarm system using impact induced piezoelectric vibration, IEEE Transactions on Sensors and Micromachines, Vol.123, No.12 (2003), pp.534-540
- Yoshida, Y., Kobayashi, Y., Uchida, T., Development of the monitoring system that operates with the power generated from the bridge vibration, Journal of Japan Society of Civil Engineers, SER. AI Structural Engineering & Earthquake Engineering, Vol.70, No.2 (2014), pp.282-294
- Yoshioka, H., The world of the power circuit and the capacitor, Transistor Technology, No. October 2003 (2003)