

# 自律型損傷検知システムによる車軸軸受の損傷検知

間々田 祥吾\* 太田 達哉\* 宮本 修吏\*\* 岡村 吉晃\*\*\*

Autonomous Damage Detection System for Damage of Axle Bearings of Railway Car Bogies

Shogo MAMADA Tatsuya OHTA Masashi MIYAMOTO Yoshiaki OKAMURA

Axle bearings of railway car bogies are important parts that support the running of the cars. It is desirable to detect damage to axle bearings at an early state. Therefore, an autonomous damage detection system (ADDS) was developed that does not require a power supply nor wiring and notifies axle bearing damage to the vehicle after detecting. The ADDS utilized an anti-vibration rubber with a built-in piezoelectric element and wireless transmitter; which was installed on the axle box. The damage detection performance of the ADDS was evaluated using a test machine. In the case of a damaged bearing, the power generated by the piezoelectric element built-in the rubber could drive the radio transmitter, and the damage could be notified.

キーワード：車軸軸受，自律型損傷検知システム，軸ばね防振ゴム，圧電素子，無線送信機

## 1. はじめに

鉄道車両の台車の車軸軸受は、車体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る。車軸軸受に損傷が発生して進展した場合、軸受が焼付き、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早期に検知されることが求められる<sup>1)2)</sup>。

現在、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<sup>1)</sup>、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<sup>2)</sup>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、これらによって検知される程度にまで軸箱の温度が上昇した場合、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圧電素子を内蔵させ、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。圧電素子は加わった振動に応じて、電気信号を発生させる特性がある。その結果、圧電素子から発生した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<sup>3)</sup>。一方、本手法では軸ばね防振ゴムに内蔵した圧電素子から車上までケーブルで配線した上で、得られた電気信号を解析する必要がある。実車両においてこれらの作業をすることは煩雑であり、本手法における課題であった。このような課題を解決する手法の一つとして、無線装置を用いて損傷の検知を通知する手法が想定されるが、軸箱上では無線装置

の送信機を駆動させる電源の確保が困難である。

そこで、送信機を駆動させる電力を確保する技術として、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微小な電力を蓄えて活用するエナジーハーベスティングの活用を検討した<sup>4)</sup>。この技術を活用し、車軸軸受の損傷に起因して発生する異常振動によって軸ばね防振ゴムに内蔵した圧電素子から発生する電力を送信機の駆動に活用できれば、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）となることが想定された。本論文では本想定に基づき、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を評価した結果について示す。

## 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、損傷検知用防振ゴム）および無線装置の受信機で構成される。以下にシステムの概要を示す。

### 2.1 損傷検知用防振ゴム

損傷検知用防振ゴムの概略図を図2に示す。図2に

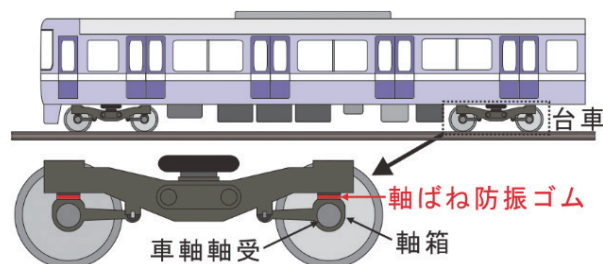


図1 軸ばね防振ゴムの設置箇所

\* 材料技術研究部 防振材料研究室  
 \*\* 材料技術研究部 防振材料研究室(現 株式会社フコク)  
 \*\*\* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

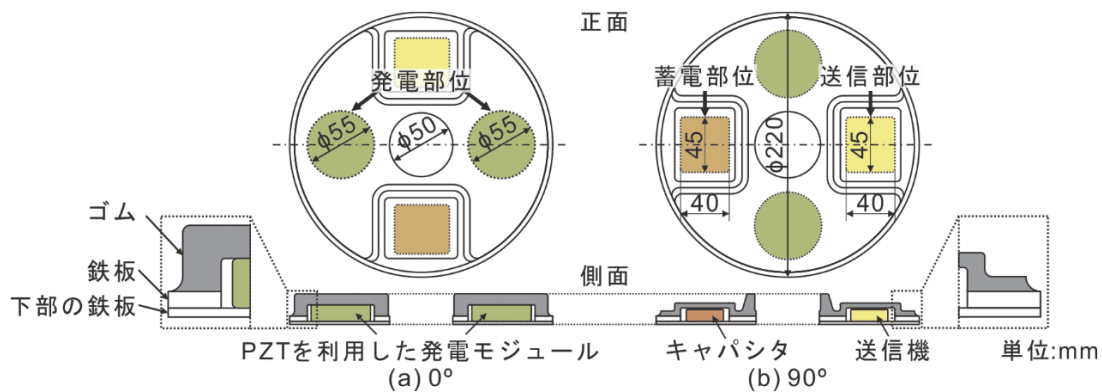


図2 損傷検知軸ばね防振ゴムの概略図

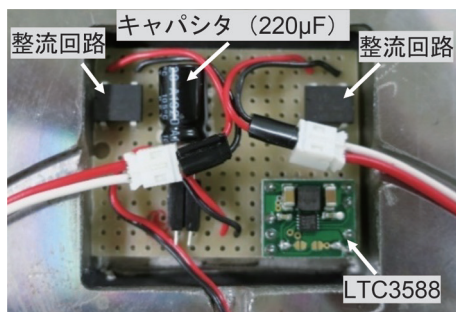


図3 蓄電部位の状況

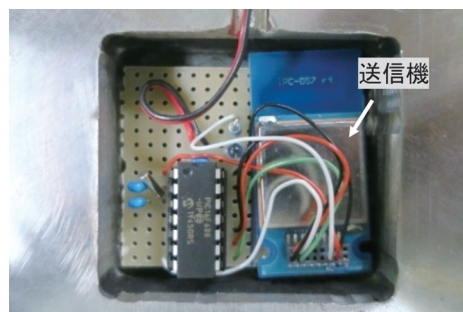


図4 送信部位の状況

示すように、損傷検知用防振ゴムには、発電部位、蓄電部位および送信部位の3つの部位を設けた。各部位はゴムに溝を設けることによって各部位を構成する部材を収納できる。以下に、各部位の概要を示す。

### 2.1.1 発電部位

発電部位には、圧電素子としてチタン酸ジルコン酸鉛（以下、PZT）を利用した発電モジュールを収納した。発電部位は2箇所あり、それぞれに発電モジュールが1体ずつ収納される。発電モジュールは直径50mm、厚さ2mmの円盤状のPZTを2枚積層したものを利用した。なお、積層する際にはPZTと電極の間に直径50mm、厚さ0.5mmの導電ゴムを介在させた。これは、過去の知見において、導電ゴムを介在させた場合に発電モジュールの発電性能が向上することが見出されたためである<sup>5)</sup>。また、図2に示すように、発電部位の厚さは、蓄電部位および送信部位よりも厚くした。これは、収納した発電モジュールに確実に荷重を加えるためである。

### 2.1.2 蓄電部位

蓄電部位には、発電モジュールから発生する電力を整流するダイオードを利用した整流回路、整流された電力を蓄電するキャパシタ、キャパシタの端子間電圧が5Vに達した場合にキャパシタから送信機に電力を供給するスイッチングレギュレータ回路LTC3588（アナログ・デバイセズ株式会社製）を収納した（図3）。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系統とし、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。また、キャパシタの静電容量は、送信機を駆動させるために最低限必要な電力を考慮して220μFとした。

### 2.1.3 送信部位

送信部位には、無線装置の送信機を収納した（図4）。送信機には、大きさや消費電力を考慮し、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IM-315TRX（インタープラン株式会社製）を選定した。なお、蓄電部位および送信部位の厚さを発電部位よりも薄くしたのは、同部位に直接荷重が加わることによって、収納した部材が損傷するのを防止するためである。

## 2.2 無線装置の受信機

無線装置の受信機は送信機と同じIM315TRX（インタープラン株式会社製）とした。受信機は送信機からの無線を受信した場合、LEDが約1秒点灯した後に自動的に消灯し、次の電波が受信されるまで待機状態となる。

## 3. 自律型損傷検知システムの基本性能

### 3.1 損傷検知用防振ゴムの静的ばね定数

損傷検知用防振ゴムは現用の軸ばね防振ゴムと交換し

て使用することを想定している。そのため、防振ゴムとしての防振性能を示すばね定数は、現用の軸ばね防振ゴムと同等とする必要がある。

そこで、作製した損傷検知用防振ゴムに、2体の発電モジュールを収納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、損傷検知用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の $\pm 10\%$ 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かった。

### 3.2 損傷検知用防振ゴムの発電性能

損傷検知用防振ゴムの発電性能を評価するため、損傷検知用防振ゴムを動的加振試験機に設置し、厚さ方向に正弦波の荷重を加える加振試験を実施した。加振試験の状況を図5に示す。

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、損傷検知用防振ゴムの発電性能を評価するため、キャパシタの端子間電圧を測定した。

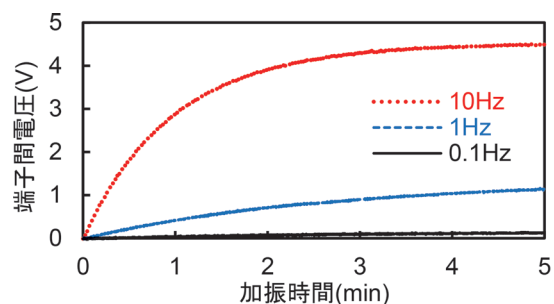
加振試験における加振時間とキャパシタの端子間電圧の関係の結果例を図6に示す。図6(a)は振幅荷重1kNにおける加振周波数0.1Hz、1Hzおよび10Hzの結果を示し、図6(b)は加振周波数1Hzにおける振幅荷重1kN、5kNおよび10kNの結果を示す。

図6(a)より、同じ振幅荷重の場合、同じ加振時間における端子間電圧は10Hzが最も大きく、次いで、1Hz、0.1Hz順であった。また、図6(b)より、同じ加振周波数の場合、同じ加振時間における端子間電圧は10kNが最も大きく、次いで、5kN、1kN順であった。これらの結果より、損傷検知用防振ゴムの発電性能は加振周波数および振幅荷重の増加に伴って向上することがわかった。また、図6(b)に示すように、振幅荷重5kNおよび10kNの場合、キャパシタの端子間電圧が5Vに達した後、約3.5Vまで急激に低下している。これは、キャパシタの

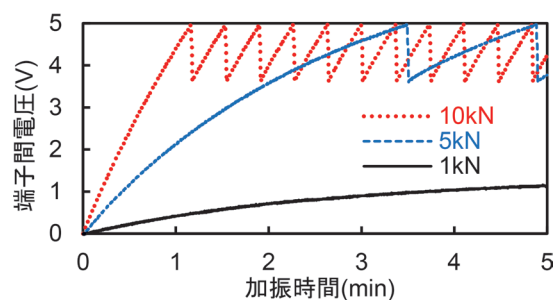
端子間電圧が5Vに達したことによって蓄電部位のスイッチングレギュレータが動作し、送信機に電力が供給されたためである。この際、受信機において電波が送信されたことを確認した。また、電力量が約3.5Vに減少した後は、再び5Vになるまで増加し、再度送信機に電力が供給されて電波が送信された。

次に、送信機を駆動させるための条件を検討した。圧電素子を用い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蓄電されやすい<sup>6)</sup>。そこで、加振試験において発電モジュールから発生する電圧を測定し、最大値と最小値の差を発生電圧として求めた。振幅荷重と発生電圧の関係を図7に示す。発生電圧は2体の発電モジュールのうち、小さい方の値である。また、図中の網掛けは送信機が駆動し、無線が送信した条件である。

図7より、発生電圧は振幅荷重に比例して増加し、加振周波数の増加に伴って増加している。これは、キャパシタの端子間電圧と同様の傾向である。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



(a) 振幅荷重 1kN



(b) 加振周波数 1Hz

図6 加振時間とキャパシタの端子間電圧の関係

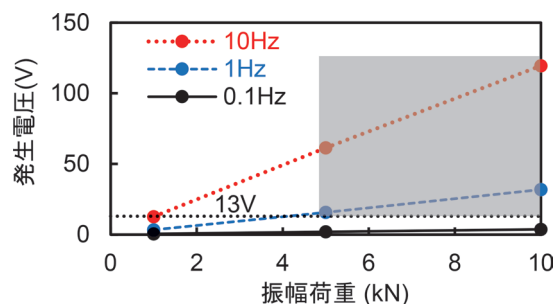


図7 加振試験における発生電圧

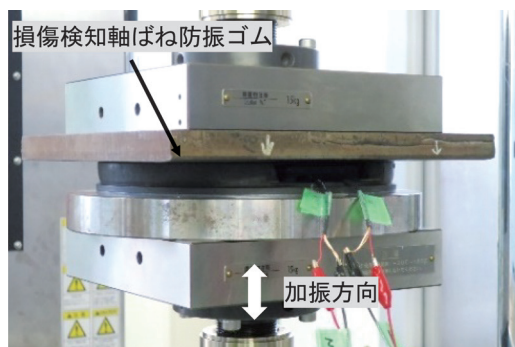


図5 加振試験の状況



増加した要因としては、過去の検討において PZT 自体の発生電圧が同様の傾向を示す結果が得られている<sup>6)</sup>ことから、PZT の特性によるものと考えられる。また、本加振試験では、どちらか一方の発電モジュールからの発生電圧が約 13V 以上の場合に端子間電圧が 5V 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、加振試験の結果、損傷検知用防振ゴムに加わる振動に伴う荷重振幅が大きく、周波数が高いほど発電性能が向上することがわかった。また、送信機を駆動させるための電力を確保するためには、一定以上の発電モジュールからの発生電圧が必要であることがわかった。

#### 4. 自律型損傷検知システムの損傷検知性能

自律型損傷検知システムの損傷検知性能は、鉄道総研が所有する車軸軸受耐久試験装置に人工的な損傷を付与した軸受（以下、損傷軸受）を取付けて実施した試験（以下、損傷検知性能評価試験）によって評価した。試験状況を図 8 に示す。

##### 4.1 損傷軸受

試験に用いた損傷軸受は、外輪軌道面に人工的に圧こんを付与した後、圧こんを起点としたはく離を発生させたものである。外輪のはく離は軸受に発生する損傷の一つであり、はく離が進展した場合、はく離片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。

損傷軸受のはく離は、圧こんの付与後に試験装置に取付け、鉛直方向に約 50kN の荷重を荷重させたまま主軸を速度 300km/h 相当で回転させ、水平方向に 14.7kN の荷重を 5 秒おきに 5 秒間繰り返して負荷させることによって発生、進展させた。はく離の発生、進展状況を図 9 に示す。図 9 に示すように、100,000km 走行相当の回転以降に明確なはく離が発生し、走行距離の増加に伴って進展している。なお、200,000km 走行相当の回転後のはく離の大きさでは軸箱の温度での検知は困難である。

##### 4.2 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、損傷検知用防振ゴム内のキャパシタの端子間電圧および発電モジュールからの発生電圧を測定して評価した。測定は圧こんの付与前（0km）、および圧こんの付与後 50,000km 走行相当毎に実施した。測定の際は、鉛直方向に約 50kN の荷重を荷重させた状態で主軸を 30km/h～300km/h の速度に相当する回転数で回転させた。はく離の位置は、図 8 に示すように荷重が最も加わる負荷圏中央とした。また、損傷検知用防振ゴムの配置は、図 10 に示すように、発電部位がはく離の直上になる配置（以下、配置 A）および蓄電部位および送信部位がはく離の直上になる配置（以下、配置 B）の 2 種類の配置とした。

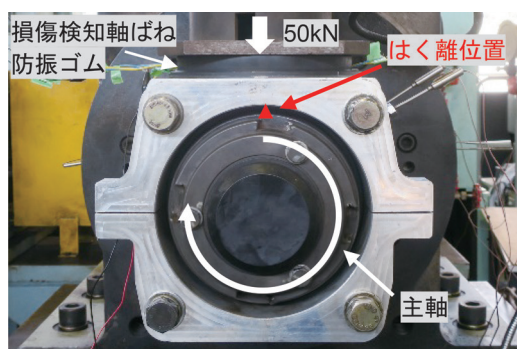


図 8 損傷検知性能評価試験の状況

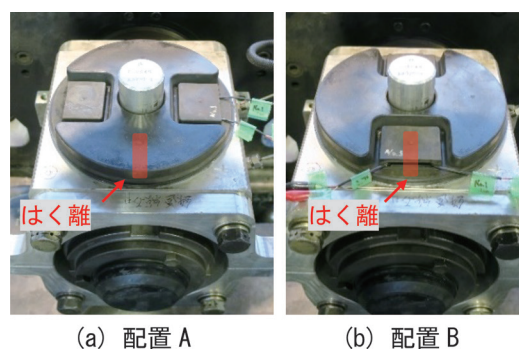


図 10 試験における損傷検知用防振ゴムの配置

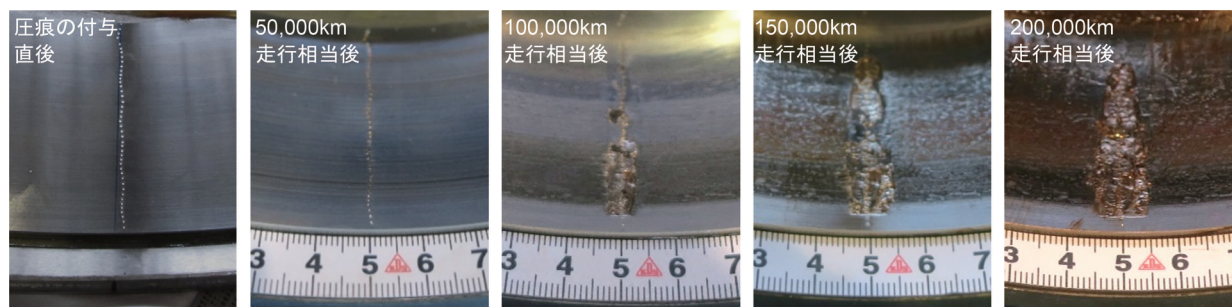


図 9 損傷検知性能評価試験で用いた損傷軸受のはく離の発生および進展の状況

#### 4.3 自律型損傷検知システムによる損傷検知性能

測定後5分間での端子間電圧の最大値を図11に示す。同図(a)は配置A、(b)は配置Bの結果である。なお、5分間で端子間電圧が5Vに達しない場合、端子間電圧はその後もほとんど増加せず、送信機も駆動しなかった。

図11に示すように、配置A、Bともに走行距離の増加に伴って端子間電圧が増加している。これは、走行距離の増加に伴ってはく離が進展し、はく離の進展に伴って軸箱の振動が増加することにより、損傷検知用防振ゴム内の発電モジュールに加わる荷重が増加するためと考えられる。なお、本試験において別途測定した軸箱の振動加速度は、走行距離の増加に伴って増加していた。一方、同じ試験条件における端子間電圧の最大値を配置AとBで比較した場合、配置Aの方が大きく、発電性能が高いことがわかった。なお、配置Aでは、はく離が発生した後、50,000km～100,000km 走行相当の回転後に70km/h以上相当で回転した場合に検知できる可能性がある。

#### 4.4 無線送信機を駆動させるための条件

図11に示したように、端子間電圧の最大値は配置AとBで異なる結果となった。この要因を把握するため、加振試験と同様に、端子間電圧および発生電圧の測定結果を用いて、端子間電圧が5Vに達し、送信機を駆動させるための条件を検討した。

配置A、Bにおける測定開始直後の端子間電圧、発生電圧の結果の例として、100,000km 走行相当の回転後における回転速度が110km/hの場合の結果を図12に示す。同図(a)は端子間電圧、(b)は発生電圧である。

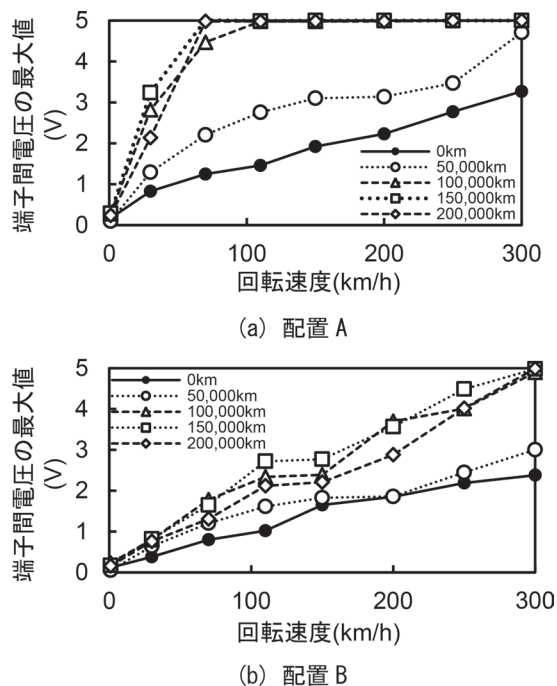


図11 端子間電圧の最大値

図12より、配置Aは配置Bよりも端子間電圧、発生電圧ともに大きい。そこで、配置Aと配置Bにおける発電性能の違いを評価するため、測定開始1秒後の端子間電圧の結果から、以下の式を用いて電力量を算出した。

$$W = \frac{1}{2} C V_{1s}^2 \quad (1)$$

ここで、 $W$ は電力量 (J)、 $C$ は静電容量 (C/V)、 $V_{1s}$ は測定開始1秒後の端子間電圧 (V) である。

図12(a)の結果から算出した電力量 $W$ は配置Aが0.21mJ、配置Bが0.02mJであった。この結果より、電力量が大きいほど端子間電圧が向上することが想定された。そこで、全ての試験条件における電力量と端子間電圧の最大値の関係を求めた結果を図13に示す。

図13より、配置A、Bともに、電力量の増加に伴って端子間電圧の最大値が増加する傾向がある。その一方

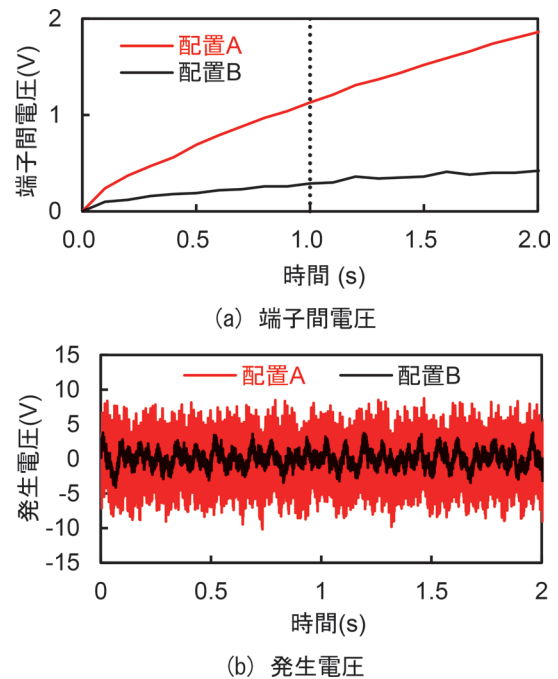


図12 端子間電圧および発生電圧の測定結果例 (100,000km 走行相当回転後、回転速度 110km/h)

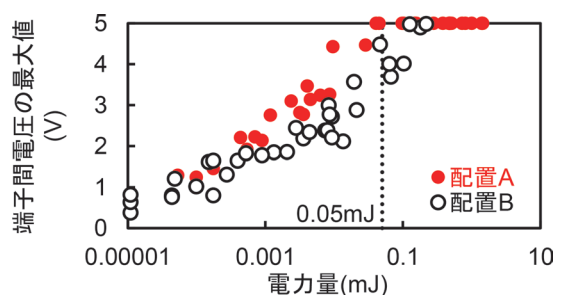


図13 端子間電圧と電力量の関係

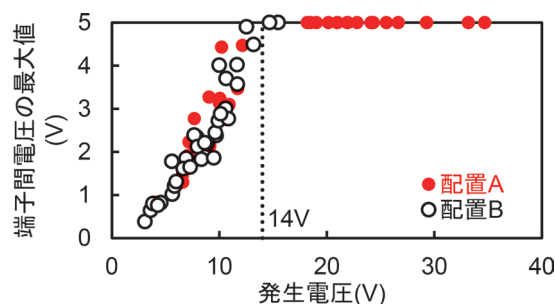


図 14 発生電圧と端子間電圧の関係

で、同じ電力量における配置 A と配置 B の端子間電圧を比較すると、配置 B の端子間電圧が全体的に低い。また、端子間電圧が 5V に達する電力量の条件として、配置 A の場合は 0.05mJ 以下の場合もあるが、配置 B の場合は 0.05mJ 以上でも達しない場合がある。この結果より、電力量の大きさは配置によって違いがみられ、端子間電圧が 5V に達する条件としては、電力量以外の要因が影響する可能性があることがわかった。

そこで、加振試験の場合と同様の方法で発生電圧の影響について検討した。例として、図 12(b) に示した結果の場合、配置 A では約 18.9V、配置 B では約 7.9V である。発生電圧と端子間電圧の最大値の関係を図 14 に示す。ただし、図には加振試験の場合と同様に、2 体の発電モジュールのうち、小さい方の発生電圧を示す。

図 14 より、配置 A、B ともに発生電圧の増加に伴って端子間電圧は増加し、発生電圧が約 14V 以上の場合に端子間電圧が 5V に達している。この値は、加振試験で得られた結果（約 13V）とほぼ同等である。

以上の結果より、送信機を駆動させるには、発電モジュールからの発生電圧の大きさの影響が大きいことがわかった。また、配置 B と比較して配置 A の発生電圧が高く、送信機を駆動しやすい要因としては、配置 A の場合、損傷検知用防振ゴムの発電部位がはく離の直上である負荷圏中央に位置しており、発電モジュールに荷重が加わりやすいことが考えられる。

## 5. 実際の走行における損傷検知手法の提案

損傷検知用防振ゴムを実際の台車に設置した場合は、走行時に発生する様々な振動が防振ゴムに加わるため、通常の走行時でも無線が送信される可能性がある。その一方で、車軸軸受に損傷が発生した場合は、無線の送信頻度が高くなると考えられる。そのため、図 15 に示すように、通常の走行と損傷発生時の走行における無線の送信間隔の違いによって損傷を検知できると考えられる。

さらに、実際の車両に自律型損傷検知システムを設置する場合、受信機は車体に設置することを想定しているため、受信感度などによる設置位置の選定が必要となる。

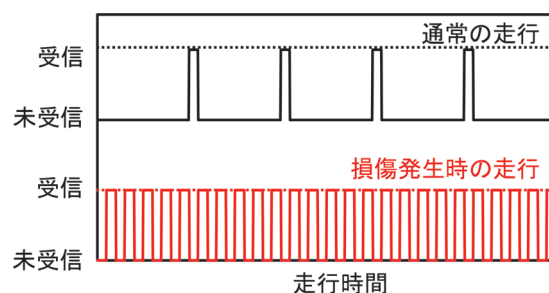


図 15 実際の走行における損傷検知のイメージ

## 6. まとめ

自律型損傷検知システムとして、圧電素子および無線装置の送信機を内蔵した損傷検知用防振ゴムを作製し、基本性能および損傷検知性能を評価した。

その結果、基本性能として、損傷検知用防振ゴムに加わる荷重の振幅が大きく、周波数が高いほど圧電効率が増大することがわかった。また、損傷検知性能として、軸受に損傷が発生した場合、50,000km～100,000km 走行相当の回転後に 70km/h 以上相当で回転することにより、損傷検知用防振ゴム内の圧電素子が発生する電力によって無線装置の送信機を駆動させ、損傷の発生を通知できることがわかった。さらに、送信機を駆動させるには、損傷検知用防振ゴムに収納した圧電素子を利用した発電モジュールから 13V～14V 以上の電圧を発生させる必要があることがわかった。

## 文 献

- 1) 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, pp.31-34, 2009
- 2) 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, pp.37714-37717, 2013
- 3) 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, S2-7-5, 2017
- 4) 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, pp.282-294, 2014
- 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), 日本機械学会論文集, Vol.86, No.890, 2020
- 6) 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, 設計工学, Vol.52, No.9, pp.567-582, 2017