

圧電素子を内蔵した軸ばね防振ゴムによる車軸軸受の自律型損傷検知システム

○ [機] 間々田 祥吾 太田 達哉 宮本 修吏 [機] 岡村 吉晃 (鉄道総研)

竹中 宏行 (株式会社フコク)

Autonomous Damage Detection System for Axle Journal Bearings Using Vibration Isolation Rubber with Built-in Piezoelectric Element

○Shogo Mamada, Tastuya Ohta, Masashi Miyamoto,
Yoshiaki Okamura, (Railway Technical Research Institute), Hiroyuki Takenaka (FUKOKU Co., Ltd)

An axle bearing which is installed in a bogie of rolling stock is important component for running. It is desired to quickly detect the damage of axle bearing. Therefore, an autonomous damage detection system called as “ADDS” is produced. The piezoelectric elements “PZT” are built into the ADDS. The ADDS can be installed in a bogie instead of the ordinary vibration isolation rubber for the axle spring. The evaluation test for ADDS is carried out by using axle bearing rotation testing machine. As the result of the test, it was confirmed that the power generation efficiency of the power generation module in ASSR installing on damaged axle bearing was higher than that in ADDS installing on normal axle bearing. The ASSR can detect the damage of axle bearing by the difference of the power generation efficiency.

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

Key Words : Axle bearing, Vibration isolation rubber, Piezoelectric element, Autonomous damage detection system

1. はじめに

鉄道車両の台車の車軸軸受は、車軸の回転を保持しながら車体重量を支持する重要な部品である。車軸軸受に損傷が発生した場合、軸受の焼付き、さらには車軸の折損などに発展する可能性がある。そのため、車軸軸受は一般的に温度によって監視され、在来線では不可逆性の示温シール¹⁾、新幹線では軸温検知センサ²⁾が軸受を保持する軸箱に取り付けられている。しかしながら、温度による監視では、温度異常が検知された段階で自走困難な状態まで損傷が進行している可能性がある。

鉄道総研ではこれまで、振動によって発電する圧電素子を利用したセンサを図1に示す軸箱上に設置される軸ばね防振ゴムに内蔵し、車軸軸受の損傷に起因する異常振動によって圧電素子が発電する電力で無線を送信して損傷を通知する自律型損傷検知システムを作製した³⁾。しかし、作製した自律型損傷検知システムは、圧電素子以外の無線装置などを防振ゴムの外側に設置するものであったため、実車両に設置する際の設置箇所や設置手法が課題であった。

そこで、この課題を解決するため、圧電素子、無線装置などの部材を全て軸ばね防振ゴムに内蔵した新たな自律型損傷検知システムを作製した。ここでは、作製した自律型損傷検知システムの基本性能の評価試験結果および軸受耐久試験機を用いた損傷検知性能の評価試験結果を示す。

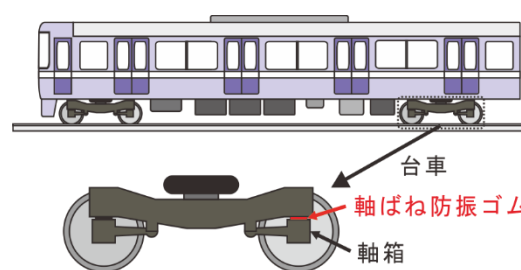


図1 軸ばね防振ゴムの設置箇所

2. 自律型損傷検知システム

2. 1 自律型損傷検知システムの軸ばね防振ゴムの形状

自律型損傷検知システムでは、軸ばね防振ゴムに無線装置の受信機以外の全ての部材を内蔵させる必要があるが、通常の軸ばね防振ゴムの形状ではそれらを内蔵することが困難である。そこで、全ての部材を内蔵できる新たな形状の軸ばね防振ゴムを作製した。作製した自律型損傷検知システムの軸ばね防振ゴム（以下、自律型損傷検知防振ゴム）の形状を図2に示す。

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した積層構造である。自律型損傷検知防振ゴムの外径や厚さなどは、一般的な車両に使用されている通常の軸ばね防振ゴムと同じ寸法であるが、自律型損傷検知防振ゴムは、以下に示す特徴がある。

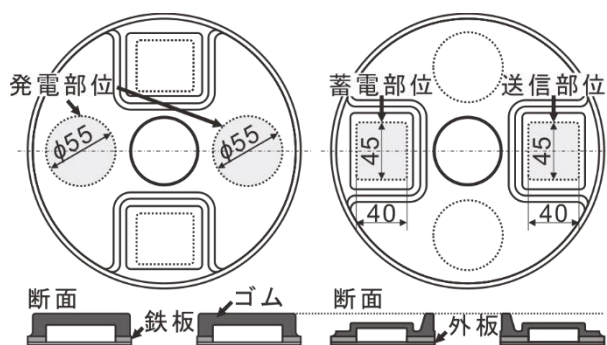


図2 自律型損傷検知防振ゴムの構造

- ・ ゴム下面の鉄板に穴を開けてゴム内部を加工し、圧電素子を収納する発電部位、圧電素子からの電気信号を蓄電するコンデンサを収納する蓄電部位および無線装置の送信機を収納する送信部位を設けた。
- ・ 蓄電部位および送信部位の外側の高さは、部材に直接力を加えないように発電部位よりも低くした。
- ・ 内蔵した後の各部材を固定するため、厚さ2mmの鉄製の外板で下面全体を覆った後、ゴム下面の鉄板にネジ止めできる構造とした。
- ・ 圧電素子を内蔵した状態の自律型損傷検知のばね定数は、通常の軸ばね防振ゴムのばね定数と同等とした。

2. 2 自律型損傷検知システムの各部位の役割

自律型損傷検知システムは、自律型損傷検知防振ゴムと外部の無線装置の受信機（以下、受信部位）で構成されている。自律型損傷検知防振ゴム内の発電部位、蓄電部位、送信部位および外部の受信部位の役割を以下に示す。

（1）発電部位

発電部位は、圧電素子を利用した発電モジュールで構成される。圧電素子には、現在、最も一般的に利用されているチタン酸ジルコン鉛（以下、PZT）を用いた。PZTの形状は、直径50mm、厚さ1mmの円盤状である。発電モジュールは図3に示すように、PZTを2枚使用した複層タイプおよび1枚使用した単層タイプの2種類とし、評価試験では2種類を同一の自律型損傷検知防振ゴム内に設置した。

発電モジュールにおいて、PZTから発生した電力は、鋼製の電極から取り出される。ここで、図3に示すように、PZTと電極の間に導電ゴムを介したのは、過去の知見より、導電ゴムが介在することにより、PZTから取り出せる電力が向上するためである³⁾。

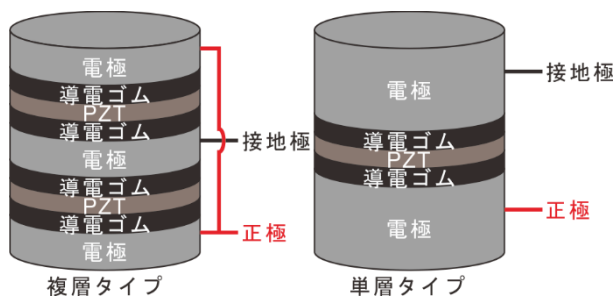


図3 PZTを利用した発電モジュールの構造

（2）蓄電部位

自律型損傷検知防振ゴムでは、発電モジュールから発生した電力を一度コンデンサに蓄電した上で使用した。また、発電モジュールから発生した電力はダイオードを組み合わせた整流回路によって直流成分に変換した後にコンデンサに蓄電した。蓄電部位の外観を図4に示す。

図4に示すように、蓄電部位は、整流回路およびコンデンサで構成される。コンデンサは、寸法上の制約および送信機を稼働させる電力を蓄電できる静電容量を考慮して、静電容量が6.8mFのスーパーキャパシタBZ05FB682ZSB（AVX Corp.製）とした。また、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整流した後、足し合わせてコンデンサに蓄電できる。

（3）送信部位

コンデンサに蓄電された電力が無線装置の送信機に供給される際は、スイッチングレギュレータ回路LTC3588（リニアテクノロジー㈱製）を利用し、コンデンサの端子間の電圧が4.0Vとなった場合に送信機に電力が供給されるように設定した。送信機は、使用にあたり免許を必要としない、周波数2.4GHz帯、送信出力1mWの特定小電力無線局を利用したTWE-L-WX（モノワイヤレス㈱製）を使用した。送信部位の外観を図5に示す。



図4 蓄電部位



図5 送信部位

（4）受信部位

受信部位の無線装置の受信機は、送信機と同じTWE-L-WX（モノワイヤレス㈱製）とした。受信部位を実車両に設置する場合は、車両の電源で駆動させるが、試験では可搬性を考慮して電池で駆動させた。また、無線を受信した場合は図6に示すLEDが点灯して通知されるものとした。

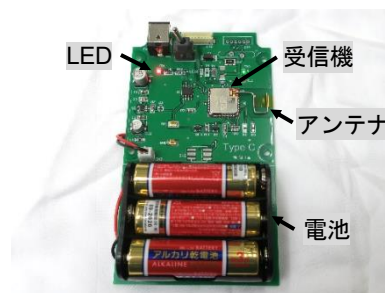


図6 受信部位

3. 自律型損傷検知システムの基本性能の評価試験

3. 1 試験方法

自律型損傷検知システムにおける自律型損傷検知防振ゴムの基本性能として、動特性試験機 KC-V-2 (鷺宮製作所 株製) を用いて自律型損傷検知防振ゴムに動的荷重を加えた際の発電モジュールの発電性能を評価した。

動的加振試験における载荷波形は正弦波とした。加振条件は、自律型損傷検知防振ゴムを台車に設置した際に加わることが想定される平均荷重 50kN、荷重振幅 10kN、加振周波数 10Hz とした。また、実車両で自律型損傷検知防振ゴムを使用する場合には、外部からケーブルを接続しないが、評価試験では、自律型損傷検知防振ゴムの発電性能を評価するため、内部のコンデンサの端子間の電圧（以下、端子間電圧）を測定するケーブルを接続した。動的加振試験の状況を図 7 に示す。

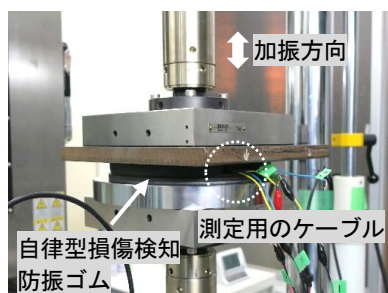


図 7 動的加振試験の状況

3. 2 試験結果

動的加振試験において、蓄電部位のコンデンサに複層タイプのみを接続した場合、単層タイプのみを接続した場合、単層および複層タイプを両方接続した場合（以下、両タイプ）のコンデンサの端子間電圧の測定結果を図 8 に示す。

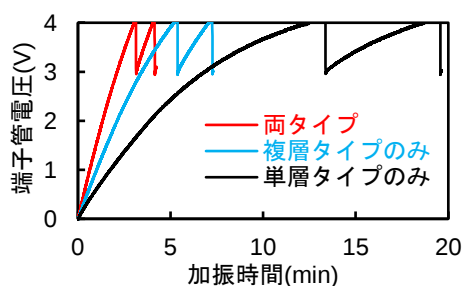


図 8 動的加振試験における端子間電圧

図 8 より、加振時間の増加に伴って全ての発電モジュールで端子間電圧が増加している。これは、発電モジュールに継続的に振動が入力された場合に、コンデンサに電力が蓄電されることを示している。また、端子間電圧が 4.0V になるまでに必要な加振時間は、単層タイプの場合が約 13 分、複層タイプの場合が約 5.5 分、両タイプの場合が約 3 分の順に短く、単層タイプ、複層タイプ、両タイプの順に発電効率が低いことがわかった。両タイプの発電効

率が最も高い理由は、単層タイプおよび複層タイプの両方の電力が足しあわされるためである。また、図 9 より、端子間電圧は全ての発電モジュールの場合において、4.0V になった後に約 3.0V まで急激に減少している。これは、コンデンサに蓄電された電力が、送信部位の送信機に供給されたためであり、端子間電圧の減少と同時に受信部位の LED が点灯し、送信機から無線が送信されたことを確認した。また、端子間電圧が約 3V に減少した後は、再び 4.0V になるまで電圧が増加し、再度送信機に電力が供給されて無線が送信された。

以上、自律型損傷検知防振ゴムの基本性能を評価した結果、発電モジュールの発電効率は、単層タイプ、複層タイプ、両タイプの順に高く、継続的な加振によって発電モジュールから継続的に電力が発生した場合、コンデンサ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の評価試験

4. 1 損傷検知性能の評価試験の概要

車軸軸受に損傷が発生した場合に、自律型損傷検知システムによる損傷性能を評価するため、軸受耐久試験装置を用いた損傷検知性能の評価試験を実施した。

評価試験では軸受耐久試験装置の軸箱上に自律型損傷検知防振ゴムを設置し、動的加振試験の場合と同様の 50kN を载荷した状態で車軸を模擬した主軸を回転させた。その際、損傷を人工的に付与した軸受（以下、損傷軸受）または損傷を付与していない通常の軸受（以下、正常軸受）を試験装置に取り付けて主軸を回転させ、自律型損傷検知防振ゴム内のコンデンサの端子間電圧を測定した。試験状況を図 9 に示し、人工損傷の状態を図 10 に示す。

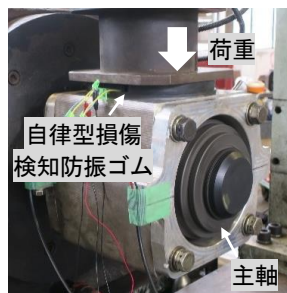


図 9 評価試験の状況

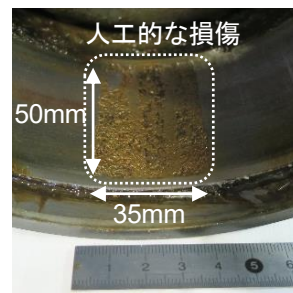


図 10 人工損傷の状況

損傷軸受の人工損傷は、外輪軌道面に付与した幅約 35mm、長さ約 50mm、深さ約 0.1mm のはく離である。外輪のはく離は、軸受に発生する一般的な損傷の一種である。

本試験で損傷軸受に付与させたはく離は、ただちに車両の走行安全性に影響する大きさでなく、通常の走行状態において、既存の温度センサによる検知は困難である。ただし、はく離が進展した場合、軸受内部に金属摩擦粉が発生して、グリースの潤滑不良などを引き起こし、焼付きに至る可能性がある。そのため、軸受のはく離は、早期に見発されることを望ましい⁴⁾。

4. 2 試験条件

評価試験では、図 11 に示すように、はく離位置が発電効率の高い複層タイプの直下になるように自律型損傷検知防振ゴムを設置した。主軸の回転速度は正常および損傷軸受ともに 30km/h, 70km/h, 110km/h, 150km/h, 200km/h, 250km/h および 300km/h の 7 条件とした。端子間電圧は、動的加振試験において最も発電効率の高かった両タイプのみを測定し、測定時間は発生電圧がほぼ一定となる 5 分間とした。

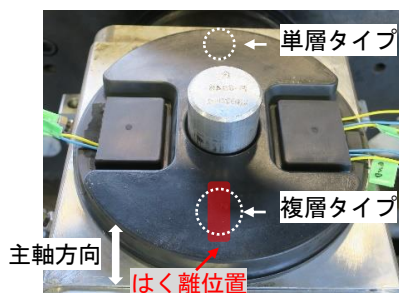


図 11 自律型損傷検知防振ゴムの設置状態

4. 3 試験結果

端子間電圧の結果例として、主軸の回転速度が 150km/h の場合の試験時間と端子間電圧の関係を図 12 に示す。

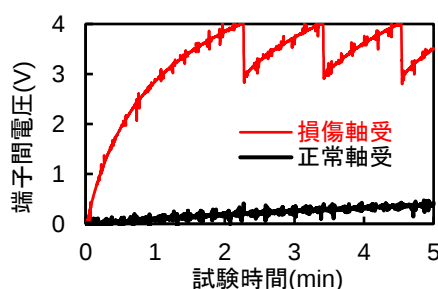


図 12 回転速度 150km/h における端子間電圧

図 12 より、端子間電圧は、正常軸受の場合よりも損傷軸受の場合の方が高く、損傷軸受の場合の発電効率が正常軸受の場合よりも高いことがわかる。また、損傷軸受の場合、主軸を約 2 分間回転させた際に端子間電圧が 4.0V となり、無線が送信された。

次に、車軸の回転速度に対する 5 分間の測定における発生電圧の最大値の関係を図 13 に示す。

図 13 に示すように、正常軸受の場合の発生電圧の最大値は回転速度の増加によってわずかに増加するものの、速度 300km/h の場合でも 0.5V 以下である。一方、損傷軸受の場合の発生電圧の最大値は、速度 30km/h の場合でも約 2V であり、主軸の回転速度の増加に伴って増加し、速度 150km/h 以上の場合に無線が送信される 4V に達した。

以上、損傷検知性能の評価試験の結果、自律型損傷検知防振ゴムの発電効率は正常軸受の場合よりも損傷軸受の場合の方が高く、速度 150km/h 以上では自律型損傷検知システムによる損傷の検知が可能であることがわかった。

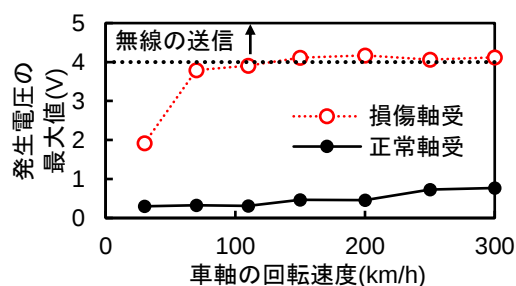


図 13 車軸の回転速度と発生電圧の最大値の関係

5. まとめ

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早期の検知が望まれる。そこで、車体からの配線や電源を必要とせずに損傷を検知する自律型損傷検知システムを作製した。自律型損傷検知システムには、軸ばね防振ゴムに圧電素子である 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内蔵させた自律型損傷検知防振ゴムを使用した。

自律型損傷検知防振ゴムに対して、動的加振試験によって基本性能を評価し、軸受耐久試験機を用いて損傷検知性能を評価した結果、以下の知見を得た。

- 1) 動的加振試験による基本性能の評価の結果、発電モジュールの発電効率は、PZT を 1 枚使用した単層タイプよりも 2 枚使用した複層タイプの方が高く、両タイプを接続することによりさらに高まることがわかった。
- 2) 損傷検知性能の評価試験の結果、損傷軸受の場合の自律型損傷検知防振ゴムの発電効率は正常軸受の場合よりも高く、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。

以上、作製した自律型損傷検知システムは、無線の送信の有無によって車軸軸受の損傷を早期に、簡易に検知できることがわかった。一方、実車両に設置した場合、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と考えられ、正常軸受の場合でも無線が送信される可能性がある。そのような場合は、無線が送信される時間間隔から、損傷と判断するシステムなどを構築する必要がある。

参 考 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, p.31, 2009
- 2) 日本鉄道車両機械技術協会編: 検知器センサーのはなし, 日本鉄道車両機械技術協会, p.63, 2010
- 3) 竹中宏行, 間々田祥吾, 岡村吉晃, 太田達哉, 伊藤浩史: 自律型センサによる軸受の損傷検知システム, 第26回鉄道技術連合シンポジウム 講演論文集, S4-2-1, 2019
- 4) 辺見信彦: 転がり軸受の異常診断, 第55巻, 第3号, pp.221-227, 2016