

鉄道における圧電ゴムを用いたセンシング技術

間々田 祥吾* 野木村 龍* 矢口 直幸*
朝比奈 峰之** 岡村 吉晃***

Sensing Technology Using Piezoelectric Rubber for Railways

Shogo MAMADA Ryo NOGIMURA Naoyuki YAGUCHI
Mineyuki ASAHINA Yoshiaki OKAMURA

Piezoelectric materials are used for sensors because they generate electric voltage and electric current when the load applied to them. However, piezoelectric ceramics in which ordinary piezoelectric materials are restricted the application because of its hardness and brittleness. Therefore, piezoelectric rubber which piezoelectric ceramics particles are mixed in rubber are studied in RTRI. Piezoelectric rubber are expected to use for various application in railway fields, because the piezoelectric rubber have piezoelectricity and flexibility. In this paper, we introduce the useful application of sensor using piezoelectric rubber for railways.

キーワード：圧電ゴム，センシング技術，圧電性能，柔軟性

1. はじめに

圧電材料は、材料に加えられた力や変形といった機械エネルギーの一部を電荷や電圧といった電気エネルギーに変換できる材料である。また、その逆に電気エネルギーが入力された場合は、その一部を機械エネルギーに変換することもできる。圧電材料は、このような機械エネルギーと電気エネルギーの相互変換機能を活かして、力の入力や変形を検知するセンサや、微振動を発生させるアクチュエータ等として利用されている。さらに、近年では、発生した電気エネルギーを利用する発電デバイスとしての利用や、発生した電気エネルギーを再度、機械的なエネルギーに変換して圧電材料の振動等を制御する振動騒音低減デバイスとしての利用も期待されている¹⁾。一方、現在一般的に利用されている圧電セラミックスは、圧電性能が高い一方で、大面積や複雑な形状での成形が困難であるほか、硬くて脆いという性質があるため、大変形や衝撃的な力が加わる箇所への適用が困難であるなど、センサとして適用できる箇所が限定される点が課題である。

それに対して、鉄道総研では圧電セラミックスの粒子をゴム材中に混合した圧電ゴムの作製に取り組んできた²⁾。その結果、圧電ゴムは、圧電セラミックスの圧電性能とゴム材の優れた柔軟性、成形性を併せ持つ材料となることがわかった。

* 材料技術研究部 防振材料研究室
** 車両構造技術研究部 車両振動研究室
*** 材料技術研究部 潤滑材料研究室

ここでは、圧電ゴムの特性を活かし、鉄道の様々な分野において異常検知センサ等への適用を検討した結果について報告する。

2. 車両側引戸における異物の挟み込み検知

2.1 既存の異物挟み込み検知システム

鉄道車両の側引戸では、乗降時に乗客の荷物等の異物が挟み込まれることがあるため、異物の挟み込みを検知するシステムが搭載されている。一般的な鉄道車両の異物挟み込み検知システムを図1に示す。

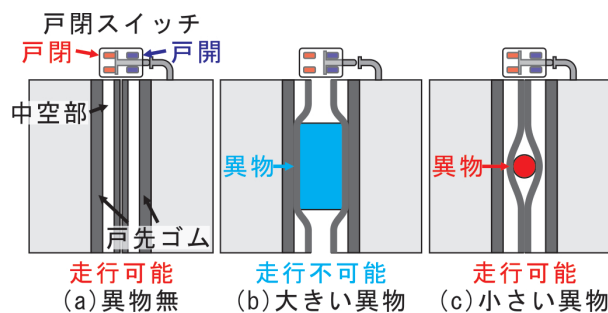


図1 既存の異物挟み込み検知システムの例

異物が無い場合（図1(a)）は、戸閉スイッチが押されて走行できるが、大きい異物を挟み込んだ場合（図1(b)）は、戸閉スイッチが押されず走行できない。一方で、側引戸戸先には、挟み込みの際の力を緩衝する目的で中空の戸先ゴム（以下、現用戸先ゴム）が設置されている。このため幅が約15mm以下の小さい異物を挟み込んだ場合（図1(c)）には、異物の形状に合わせて戸先ゴムが変

特集：材料技術

形して戸閉スイッチが押され、異物を挟み込んだ状態で車両の走行が可能となり、引きずり事故につながる恐れがある。

このような事故を防止するため、小さな異物の挟み込み等を検知する様々な手法が検討されている^{3) 4)}。しかし、それぞれの手法において、利点とともに課題があり、現在も検討が進められている。それに対して、鉄道総研では、圧電ゴムを用いた異物挟み込み検知システムを検討した⁵⁾。

2.2 圧電ゴムを用いた異物挟み込み検知システム

2.2.1 圧電ゴムを内蔵した戸先ゴム

圧電ゴムを用いた異物挟み込み検知システムでは、図2に示すように、圧電ゴムを内蔵した戸先ゴム（以下、センサ戸先ゴム）を用いて挟み込みの際の力を検知する手法を検討した。戸先ゴムは細長く、中空部も狭い⁵⁾。さらに、車体中央部よりも下部の幅が狭い拡幅車両では、側引戸の側面形状が湾曲しており、その形状に合わせて変形できる材料が必要である。圧電セラミックスではこれらの要求性能を満たせないため、圧電ゴムを適用した。

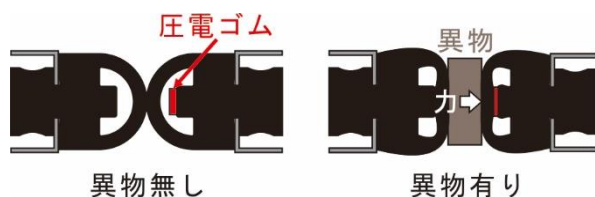


図2 センサ戸先ゴムによる挟み込み検知の概要

センサ戸先ゴムには、エチレンプロピレンゴム中に、一般的な圧電セラミックスであるチタン酸ジルコン酸鉛（以下、PZT）の粒子（直径約0.5mm）を約50vol%混合した圧電ゴムを用いた。圧電ゴムは、戸先ゴム内に設置する必要があるが、現用戸先ゴムの中空部に圧電ゴムを挿入し、接着することは困難である。そこで、図3に示すように外ゴムと中ゴムに分割できる戸先ゴムを作製し、中ゴムに圧電ゴムを接着した後、外ゴム内に挿入した。なお、圧電ゴムの長さは1500mmとし、センサ戸先ゴムの高さ方向200~1700mmの位置に設置した。



図3 分割した戸先ゴムの断面

2.2.2 伝送装置

伝送装置は、挟み込みを判定する装置（以下、制御装置）にセンサ戸先ゴムで発生した電荷を伝送する装置で

ある。図4に示すように、側引戸上部に設置してセンサ戸先ゴムと接続する側引戸部位と、車体に設置して制御装置と接続する車体部位で構成される。ここで、側引戸部位の接点は伸縮する構造とし、側引戸が開いた場合は接点が接触せず、側引戸が閉じた場合のみ接触して電気回路を形成する構造とした。

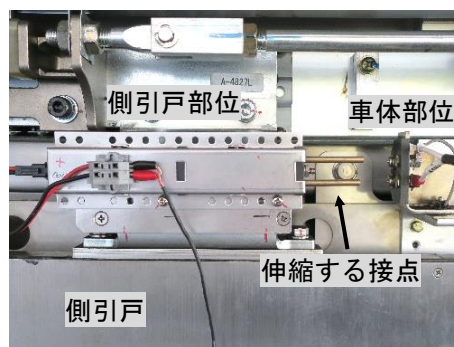


図4 伝送装置の外観

2.2.3 制御装置

制御装置は、異物を挟み込んだ際にセンサ戸先ゴムから発生する電荷を電圧に変換するチャージアンプを内蔵し、電圧値によって挟み込みを判定する装置である。

制御装置の形状は、側引戸上部のかもし内部への設置を想定して縦約100mm×横約150mm×厚さ100mmとした。制御装置の基本性能を以下に示す。

- ・既存の挟み込み検知システムに支障しないように、戸閉スイッチが押された後に挟み込みを判定する。
- ・挟み込みと判定された場合、側引戸を再開閉させる。
- ・車両の戸閉め保安装置と連動し、車両が5km/h以上で走行した場合には判定しない。

制御装置による挟み込みの判定は、以下のように行った。すなわち、戸閉スイッチが押された後の0.5秒間を判定区間とし、判定区間に発生した規定の電圧（以下、規定電圧）以上の電圧が規定の時間（以下、規定時間）以上継続した場合に挟み込みと判定した。規定電圧と規定時間を組合せて挟み込みを判定することにより、瞬間的に発生する電気的なノイズなどによる誤検知を抑制できる。なお、判定基準となる規定電圧および規定時間は、設置時または定期的なメンテナンス時に適正な値に設定可能である。

以上、圧電ゴムを用いた異物挟み込み検知システムは、電気信号のみで挟み込みを判定でき、伝送装置によって配線も簡略化できるため、現車への設置に比較的容易に対応できる。

2.3 側引戸開閉試験装置による試験

鉄道総研所有の側引戸開閉試験装置を用いて、挟み込みの際に発生する力を測定する挟み込み力試験、挟み

込み検知感度試験および耐久性試験を実施した。なお、側引戸開閉試験装置の側引戸は、拡幅車両と同じ形状である。

2.3.1 挟み込み力試験

挟み込み力試験の状況を図5に示す。



図5 挟み込み力を測定するセンサ

挟み込み力は、幅20mm×厚さ約10mmの板の測定部に20mm×20mm×厚さ約1mmの圧電ゴムを設置したセンサで測定した。試験では、校正試験によってセンサ部に入力された力に対する発生電荷の関係を求めておき、挟み込みの際の発生電荷から挟み込み力を算出した。試験では、現用戸先ゴム同士および現用戸先ゴムとセンサ戸先ゴムの組合せとし、挟み込む高さを変え、同じ高さで3回挟み込ませた。各回の挟み込み力の最大値を3回の計測で平均した値と挟み込み高さとの関係を図6に示す。

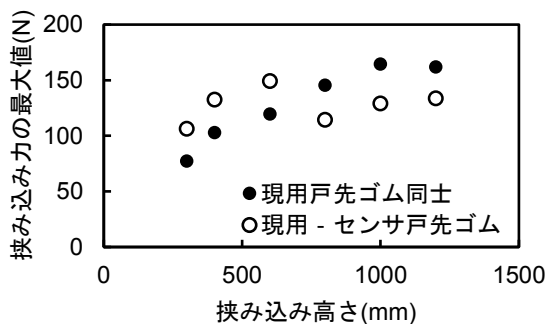


図6 挟み込み力の比較

現用戸先ゴム同士の場合は、挟み込み高さが高いほど挟み込み力が増加しているのに対して、現用戸先ゴムとセンサ戸先ゴムの組合せの場合は、高さによらずほぼ同じ挟み込み力を示した。これは、戸先ゴムの種類によって、ゴム同士の接触の仕方が異なるためと考えられる。一方、全ての高さの平均挟み込み力は両者で同等であり、センサ戸先ゴムにおいて、圧電ゴムの設置で中空部が狭くなったことによる挟み込み力への影響は小さいと考えられる。

2.3.2 挟み込み検知感度試験

挟み込みの検知感度は、直径の異なる金属棒を挟み込ませた場合に発生する電圧値によって求めた。高さ1000mmの位置で挟み込ませた結果を図7に示す。

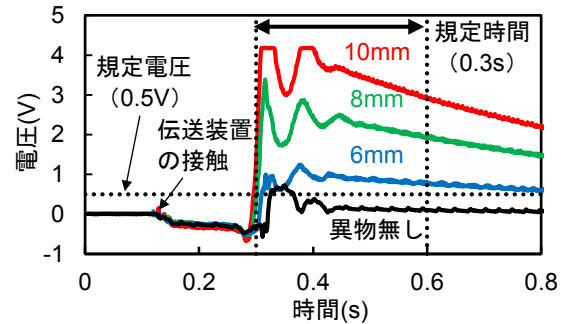


図7 検知感度試験結果の例

図より、伝送装置の接触による電圧の変化はわずかであり、伝送装置による影響は小さいことがわかった。一方、異物を挟み込んだ場合は、異物が無い場合と比較して発生電圧が大きく、金属棒の径の増加に伴う挟み込み力の増加によって発生電圧も増加している。この結果より、高さ1000mmの位置では、規定電圧を0.5V、規定時間を0.3sと設定すると、最小で直径6mmの異物の挟み込みが検知できることがわかった。これまで発生した引きずり事故において、挟み込みの発生し易い指先や白杖等は直径10mm以上であり、実用性を考慮すると、少なくとも直径10mmの検知が必要と考えられる。1000mmの位置以外の高さで試験した結果、直径10mmの異物は高さ方向の大部分で検知できた。一方、直径10mmより細い異物では、一部の高さで検知感度が低かった。この理由として、車体側面形状の湾曲による圧電ゴムの変形等の影響が考えられる。

2.3.3 耐久性試験

現車での約10年間の使用に相当する繰り返し開閉試験を実施した結果、センサ戸先ゴム内部の圧電ゴムの接着状況や圧電性能の変化は小さく、伝送装置も正常に動作していた。一方、異物が無い場合に発生する電圧はバラつきがあり、規定電圧を0.5Vとすると誤検知の確率が高まることがわかった。このバラつきは、戸先ゴムのヘタリ等による戸先同士の接触状態の変化等が原因と考えられる。ただし、直径10mm以上の異物は、規定電圧を0.8Vに設定することで常に検知できることがわかった。

2.4 現車における耐久性試験

作製した検知システムは、現在、営業車両の1つの側引戸に設置し、制御装置による側引戸の再開閉をせずに耐久性試験を実施している。これまで半年以上の試験を実施した結果、直径10mm以上の異物の挟み込みにつ

特集：材料技術

いては約 1000 回の戸閉めに対して 1 回程度発生している可能性のあることが示されている。

2.5 今後の課題

本システムについては、今後、実導入に向けてコストの低減等に取り組む予定である。また、その他の課題として、センサ戸先ゴムは、表面を衣服等で擦った場合に静電気が発生し、誤検知につながる可能性があることがわかった。この原因の一つとして、戸先ゴムは電気絶縁体であるため、静電気を帯電し易く、帯電した電荷が圧電ゴムの電極を通して制御装置に流れることが考えられた。一般的に、ゴムの帯電防止のためには、ゴム表面の電気抵抗を下げる対策が実施される。そこで、センサ戸先ゴムの表面に導電塗料を塗布することによって電気抵抗を下げる対策を実施した。衣服で擦った際の発生電圧の導電塗料の塗布前後の結果を図 8 に示す。

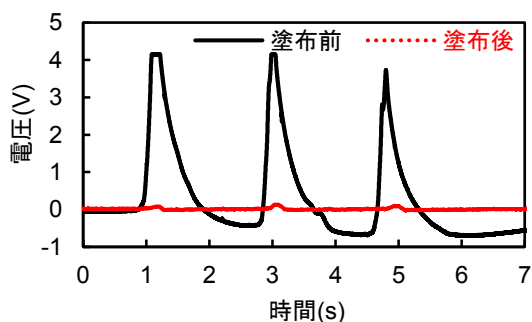


図 8 導電塗料の塗布前後における衣服で表面を擦った場合のセンサ戸先ゴム発生電圧の比較

導電塗料の塗布後は、センサ戸先ゴムからほとんど電圧が発生しておらず、対策が有効であることがわかった。一方、戸先ゴムは、長期間使用されることから、導電塗料に耐久性が求められる。そこで、導電塗料を塗布した戸先ゴムに対して、促進耐候性試験を実施した。促進耐候性試験は、屋外での暴露試験を促進して実施する試験である。試験時間と表面抵抗の関係を図 9 に示す。

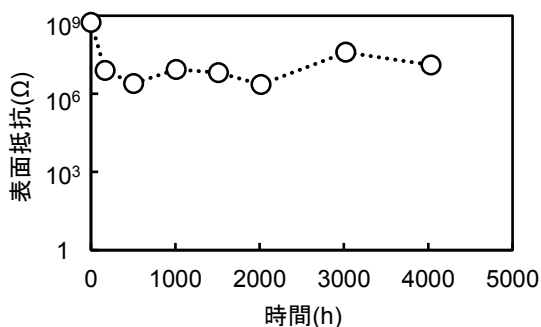


図 9 促進耐候性試験の試験時間と表面抵抗の関係

約 4000h の試験後も表面抵抗の変化は小さいことがわかる。促進耐候性試験の試験時間と換算年数の関係を求めた例によると⁶⁾、1 年間に換算した照射時間は約 450h/年であり、車内の戸先ゴムの日当たりを考慮すると、導電塗料は、耐候性に対して 10 年以上の耐久性があるものと考えられる。ただし、実際の車両では摩擦などの影響もあり、実際の車両での耐久性を評価する必要がある。

3. 車軸軸受における軸受の損傷検知

車軸軸受は、車体を支持しながら車軸の回転を保持する重要な部品であり、軸受に損傷が発生すると、重大な事故につながる恐れがある。そのため、軸受の状態は、軸受を保持する軸箱の温度で常時監視されている。しかし、異常を検知する温度まで軸箱が高温となった場合は、既に大きな損傷に進展している可能性があり、より早期に異常を検出する手法が求められている。軸箱に加速度センサを設置し、損傷に伴う異常振動等を検知する手法も検討されているが、軸箱の外にセンサを設置するため、飛来物による損傷や、センサの落失が懸念される。

そこで、従来よりも簡易にかつ早期に損傷を検知でき、さらに落失等の危険性の低い検知手法として、圧電ゴムを用いた損傷検知手法を検討した⁵⁾。本手法では、図 10 に示すように、軸箱上に設置する軸ばね防振ゴム内に圧電ゴムを内蔵したセンサ防振ゴムを用いた。



図 10 センサ防振ゴムによる軸受の損傷検知

3.1 センサ防振ゴム

センサ防振ゴム内の圧電ゴムには、センサ防振ゴムに加わる荷重の 10% 程度しか負荷されないため、異常検出のためには高い圧電性能が求められる。そこで、センサ防振ゴムには、ゴム材中で PZT 粒子が配向した配向型圧電ゴムを適用した²⁾。

配向型圧電ゴムの単位力当たりの発生電荷量 (圧電ひずみ定数 d) は、同じ PZT 粒子濃度の通常の圧電ゴムと比較すると、最大で 10 倍程度高い値を示している²⁾。センサ防振ゴムに用いた配向型圧電ゴムは、シリコーンゴム中に粒子径約 0.7mm の PZT 粒子を約 30vol% 混合したものであり、通常の圧電ゴムの d が $1 \sim 5\text{pC/N}$ であるのに対して、約 20pC/N である。その一方で、配向

型圧電ゴムは、大面積品の作製が困難であり、センサ防振ゴムに用いた配向型圧電ゴムは、直径が50mm、厚さが2mmの円形のものとした。センサ防振ゴムとして用いる場合は、さらに性能を高めるため、配向型圧電ゴムを4枚積層した構成とした。

3.2 軸受回転試験による損傷検知

鉄道総研が所有する軸受回転試験機を用いて、正常な軸受（以下、正常軸受とする）と人工的に損傷を付与した軸受（以下、損傷軸受とする）に対して軸受回転試験を実施した。損傷軸受の試験の際は、人工傷が上部に位置するように設置した。損傷軸受到付与した損傷を図11に示す。幅約1mmの損傷であり、温度による監視では異常の検知が困難なレベルの損傷である。

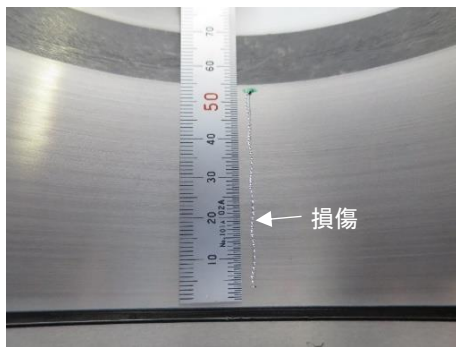


図11 損傷軸受の人工的に付与した損傷

試験結果の例として、速度約110km/h相当で軸受を回転させた際のセンサ防振ゴムからの発生電圧を周波数解析した結果を図12に示す。なお、図中の約200Hzにおける発生電圧は、回転試験機の油圧動作に起因するものである。

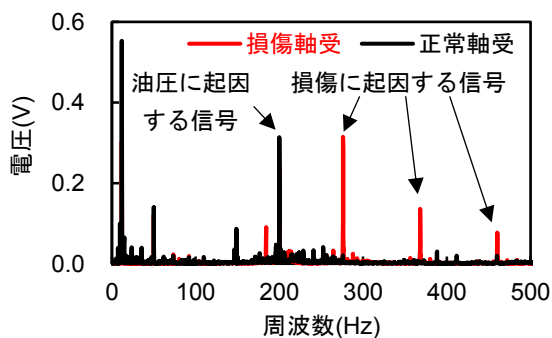


図12 軸受回転試験による信号の比較

損傷軸受の場合は、200～300Hzの周波数帯域において、正常軸受では確認されない周波数で電圧の発生がみられた。損傷軸受のみで発生していた電圧の周波数を解析した結果、軸受の損傷に伴って発生する振動の基本周波数の高調波成分と一致していた。また、他の回転

速度の試験においても、同様の結果が得られ、軸受到幅1mm程度の小さい損傷が発生した場合でも、センサ防振ゴムにより、その検知が可能であることがわかった。

3.3 試験線における車両走行中の損傷検知

軸受回転試験機での試験で使用した軸受を鉄道総研が所有する台車に組み込み、正常軸受および損傷軸受の上にはほぼ同じ性能のセンサ防振ゴムを設置して鉄道総研の所内試験線を走行させた。センサ防振ゴムの設置状況を図13に示す。損傷軸受の上に設置したセンサ防振ゴムは、軸受回転試験機で使用したものである。ただし、損傷軸受の損傷は、軸受回転試験機によって30万km走行相当の回転試験を実施し、図14に示すように、損傷幅を約40mmに進展させたものである。



図13 センサ防振ゴムの設置状況

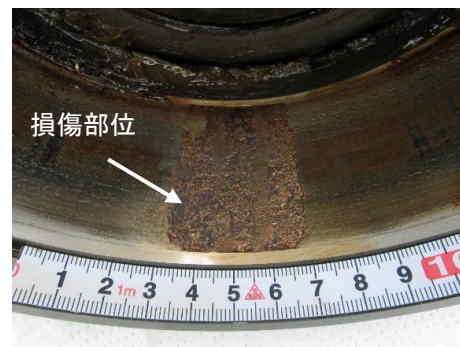


図14 損傷軸受の損傷

速度約30km/hで走行した際の正常軸受上および損傷軸受上のセンサ防振ゴムから発生した電圧の時間波形および周波数解析結果を図15に示す。

センサ防振ゴムからの電圧の時間波形を正常軸受と損傷軸受の場合で比較すると、損傷軸受の電圧が正常軸受と比較して、明確に大きいことがわかる。また、周波数解析の結果では、軸受回転試験の結果と同様に、損傷軸受のみで電圧が発生する周波数が確認され、その周波数は、損傷に起因して発生する振動の周波数の高調波成分と一致していた。

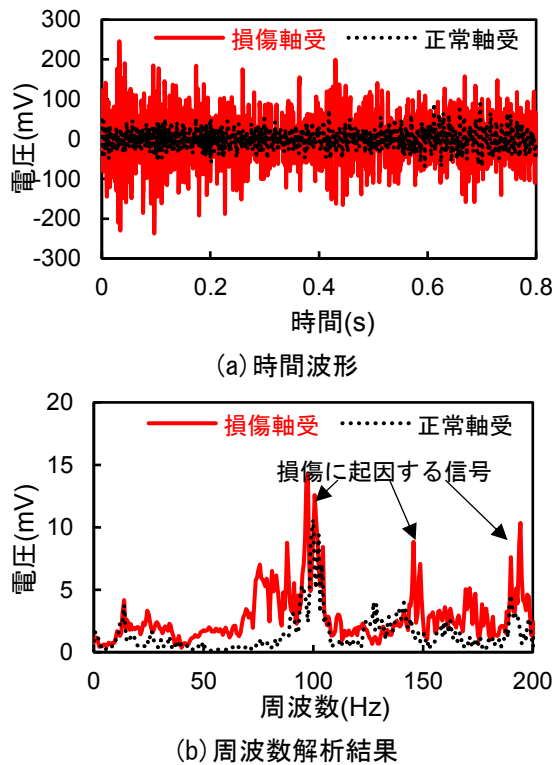


図 15 走行試験による信号の比較

本試験結果より、センサ防振ゴムによって軸受の損傷を走行中に検知できる可能性が示された。センサ防振ゴムは、発生電圧を直接測定できるため、信号の取り扱いが容易であるうえ、センサが露出しないため、飛来物などの影響や落下の危険性が低いなどの利点がある。

3.4 今後の課題

実際の走行中において損傷の初期段階で検知が可能か検証する必要があるが、その際、発生する信号は小さくなると想定される。本報告で示した周波数解析結果は、電圧波形をそのまま解析したものである。そのため、損傷に起因する振動以外の様々な振動の影響が含まれ、損傷が小さい場合には、車輪フラットやレール継目などの影響によって損傷の検知精度が低下する可能性がある。そこで、今後は、さらに検知精度を向上させるため、損傷によって発生する振動の周波数帯域のみを抽出するフィルター処理（エンベロープ処理）等を導入することによって損傷検知の信頼性を向上させる。

4. おわりに

圧電ゴムは、力の入力や変形によって電気信号が発生する圧電材料であり、柔軟性があり、成形性も高いという利点がある。このような圧電ゴムの特性を活かして、これまで鉄道分野で異常の検知が困難であった箇所や検

知のための課題がある箇所へセンサとしての適用を検証した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 圧電ゴムを内蔵した戸先ゴムであるセンサ戸先ゴムによる異物の挟み込み検知において、従来の挟み込み検知システムでは検知が困難であった直径 10mm ~ 15mm の異物の挟み込みを側引戸の大部分の高さで検知できることがわかった。
- (2) センサ戸先ゴムとともに作製した制御装置、伝送装置によって、大規模な工事をせずに既存の車両に搭載できる挟み込み検知システムとなることがわかった。作製した検知システムを用いて営業車両で約半年間の耐久性試験を実施した結果、動作状態に問題がないことを確認した。
- (3) 圧電ゴムを内蔵した軸ばね防振ゴムであるセンサ防振ゴムによる車軸軸受の損傷検知では、軸受回転試験において、幅約 1mm の損傷を検知できることがわかった。
- (4) 試験線での走行試験では、台車に設置したセンサ防振ゴムから発生する電圧を解析することで損傷を検知できることがわかった。センサ防振ゴムは、発生電圧を直接測定することで付帯設備を簡略化できる。

以上、圧電ゴムの適用先として鉄道車両の 2 種類の用途に対して検討した。今後は、各適用先において、耐久性や検知精度の向上等に取り組む予定である。

文献

- 1) 朝比奈峰之, 山本克也, 山本大輔, 間々田祥吾, 佐藤大悟: 圧電材料を用いた騒音低減システムの実車両への適用, 鉄道総研報告, Vol.26, No.10, pp.23-28, 2012
- 2) Shogo Mamada., Naoyuki Yaguchi., Masanori Hansaka., Masafumi Yamato., Hirohisa Yoshida., “Performance improvement of piezoelectric-rubber by particle formation of linear aggregates” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.131, 39862, 2014.
- 3) 中里祐一, 阿部勝, 奥村将也, 村上英駿: 戸開支援装置の開発と運用, *J-Rail*2012, 1713, 2012
- 4) 村木克行, 和田智樹, 松本重夫: 引きずり事故防止機能強化型・戸挟み検知装置の開発, *JR EAST Technical Review*, No.29, pp.39-42, 2009
- 5) 間々田祥吾, 矢口直幸, 山中翔, 朝比奈峰之, 岡村吉晃: 鉄道車両における圧電ゴムセンサの適用, 鉄道総研報告, Vol.30, No.4, pp.17-22, 2016
- 6) 奥野倫太郎, 森充広, 渡嘉敷勝, 石黒覚: 促進耐候性試験時間と実暴露期間との比較方法に関する研究, 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.738-739, 2017