

鉄道車両における圧電ゴムセンサの適用

間々田 祥吾* 矢口 直幸* 山中 翔*
朝比奈 峰之** 岡村 吉晃***

Application of Piezoelectric Rubber Sensor to the Rolling Stock

Shogo MAMADA Naoyuki YAGUCHI Sho YAMANAKA
Mineyuki ASAHINA Yoshiaki OKAMURA

Piezoelectric materials are used as a sensor because they convert the mechanical energy to the electrical energy. Though the conventional piezoelectric materials are piezoelectric ceramic, they are very brittle. Instead of brittle ceramics, flexible piezoelectric rubber is preferable for engineering use. Therefore, we investigated a pinching sensor of foreign matter at the slide door of the rolling stock, and a damage detection sensor at the axle bearing of the rolling stock. The pinching sensor is aimed at detecting foreign matter which cannot be detected by the existing system. And the damage detection sensor is aimed at detecting the damage of axle bearings with simplified system. In this paper, the outline of the systems and the results of these examinations are reported.

キーワード：圧電ゴム，粒子配向，側引戸先，車軸軸受，センサ

1. はじめに

圧電材料は、材料に加えられた振動や衝撃などの機械エネルギーの一部を電圧や電流などの電気エネルギーに変換できる材料である。また、その逆に、加えられた電気エネルギーの一部を機械エネルギーにも変換できる。このような機械-電気エネルギー変換性能を利用して、加わった荷重等を検知するセンサや入力された電気信号に合わせて振動するアクチュエータとして利用されている。さらに、最近では、振動騒音低減デバイス¹⁾や発電デバイス²⁾などへの応用も期待されている。

現在、最も一般的な圧電材料は、圧電セラミックスである。圧電セラミックスは、圧電性能を示す機械-電気エネルギーの変換効率が高いため、センサ、アクチュエータ、モータなどで利用されており、振動低減デバイスや発電デバイスとしても期待されている。一方、圧電セラミックスの材質は、陶器などと同様に、非常に硬くて脆いため、衝撃力が加わる箇所や大きく変形する箇所では、破損する可能性が高く、大面積化や複雑な形状の成形が困難である。そのため、圧電セラミックスには、適用箇所が限定されるという課題がある。

このような圧電セラミックスの課題を克服する材料として筆者らが注目した圧電材料が、圧電ゴムである。本報告では、圧電ゴムの作製および圧電性能向上に向けた

取り組みについて述べるとともに、鉄道車両におけるセンサとしての適用に向けた取り組みについて報告する。

2. 圧電ゴム

2.1 通常の圧電ゴム

2.1.1 通常の圧電ゴムの作製

圧電ゴムは、ゴム材中に圧電セラミックスの粒子を混合した後に高電場を印加して圧電性能を付加させた材料である。

通常の圧電ゴムは、ロール機等を用いてゴム材中に圧電セラミックス粒子を混練して作製される。筆者らは、通常の圧電ゴムとして、エチレンプロピレンゴム（以下、EPDM）中に代表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（粒子径約1 μ m）を約50Vol%混合した圧電ゴム（150mm×150mm×厚さ1mm）を作製した。作製した圧電ゴムは図1に示す



図1 作製した圧電ゴムの外観

* 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

特集：車両技術

ように柔軟性があり、割れや欠けなどの欠陥は見られなかった。

2.1.2 通常の圧電ゴムの圧電性能

圧電ゴムの圧電性能は、圧電ひずみ定数 d_{33} によって評価した。 d_{33} は、圧電材料の圧電性能を示す指標の一つであり、圧電材料に力を印加した際に発生する単位力当りの電荷量である。

ここで、添え字の3は1ケタ目が圧電ゴムを作製する際に印加した電場の方向、2ケタ目が測定する際に印加した力の方向を示す。筆者らの作製した圧電ゴムは、電場および力の印加方向が共に厚さ方向（鉛直方向）であるため、鉛直方向を示す3と記述する。圧電ゴムを水平方向に引っ張った場合の圧電ひずみ定数は、 d_{31} となる。

筆者らは、動的加振機を用いて圧電ゴムの厚さ方向に周波数 100Hz、荷重 2kN ± 1kN の正弦波を加えた際に発生する電荷量から d_{33} を求めた。

測定の結果、圧電ゴムの d_{33} は 1 ~ 5pC/N であった³⁾。これは、一般的な PZT の d_{33} である 80 ~ 600pC/N と比較すると小さい。圧電材料をセンサとして利用する場合、チャージアンプを用いて電荷を増幅できるため、 d_{33} が小さくても利用することは可能である。一方、アンプが利用できない場合や感度を高めるためには、 d_{33} を高める必要がある。

そこで、通常の圧電ゴムの d_{33} に影響を与える因子を検討した結果、ゴム材中における PZT 粒子の状態が大きく影響することがわかった。同じ 50Vol% の粒子濃度で、 d_{33} の異なる圧電ゴム (A)、(B) の断面を図2に示す。

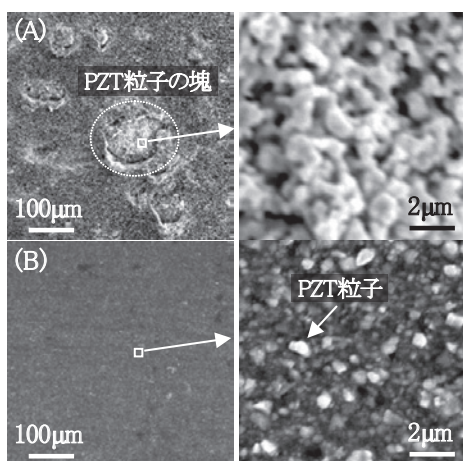


図2 通常の圧電ゴムの断面（EPDM 中に PZT 粒子を約 50Vol% 混合した圧電ゴム）

(A) と (B) の d_{33} を比較すると、(A) の d_{33} は約 5pC/N と高く、(B) は約 1pC/N と低い。ここで、(A) と (B) の違いは、(A) の PZT 粒子は、ゴム材中で凝集して直径数百 µm の大きな塊となり、さらに、塊同士が互いに接触しているのに対して、(B) では、直径約 1µm の PZT 粒子が分散して存在している。したがって、(A)

の d_{33} が大きい要因としては、PZT 粒子同士が接触することにより、PZT 粒子に力が加わり易く PZT 粒子から発生する電荷が取り出し易いことが考えられる。

以上に示した通常の圧電ゴムにおける d_{33} の測定結果およびゴム材中での PZT 粒子の状態から、圧電ゴムの圧電性能を向上させるためには、粒子径の大きな PZT 粒子をゴム材中で互いに接触、接続させることが重要であることがわかった。そこで、圧電セラミックス粒子が1方向に接続される圧電ゴム（以下、配向型圧電ゴムとする）の作製を検討した。

2.2 配向型圧電ゴム

2.2.1 配向型圧電ゴムの作製

ゴム材中で圧電セラミックス粒子を配向させる方法としては、PZT を含む強誘電体の粒子を電気絶縁流体中で電場によって配向させる方法を利用した⁴⁾。この方法は、強誘電体粒子内で不規則な方向を向いているミクロな双極子を静電場によって配向させ、粒子全体として大きな双極子モーメントを誘起させることにより、この双極子モーメントの相互作用によって電場方向に粒子を配向させるものである。この粒子の配向方法を利用して配向型圧電ゴムの作製方法を検討した。

その結果、ゴム材に熱硬化型のシリコンゴム、圧電セラミックスに PZT 粒子を用い、未硬化の液体状のシリコンゴムと PZT 粒子とを混合した後、静電場を印加させながら加熱してシリコンゴムを硬化させることで配向型圧電ゴムを作製できることがわかった⁵⁾。図3に粒子径約 0.6mm の PZT 粒子を約 10Vol% 混合した粒子配向型圧電ゴムの断面観察結果を示し、図4に配向型圧電ゴムの外観を示す。配向型圧電ゴムの大きさは直径約 50mm 厚さ 2mm である。

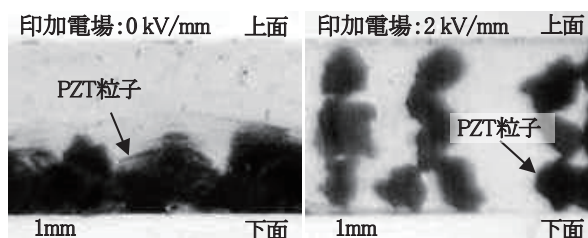


図3 粒子配向型圧電ゴムの断面



図4 配向型圧電ゴムの外観

電場を印加せずに作製した場合は、PZT 粒子が沈殿しているのに対して、2kV/mm の電場を印加して作製した配向型圧電ゴムは、PZT 粒子が電場方向と同じ厚さ方向に配向している。また、図 4 より配向型圧電ゴムはシリコンゴムの柔軟性を保持していることもわかる。

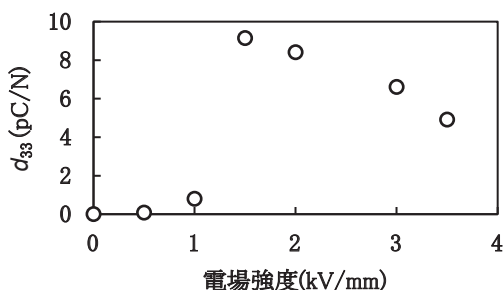


図5 電場強度と d_{33} の関係

2.2.2 配向型圧電ゴムの圧電性能

配向型圧電ゴム（シリコンゴム中に粒子径約 0.6mm の PZT 粒子を約 10Vol% 混合）の作製時に印加した電場と d_{33} の関係を図 5 に示す。

電場の増加に伴って d_{33} は増加するが、極大値となった後に低下する傾向がみられた。この結果より、粒子配向型圧電ゴムを作製する際には、 d_{33} が最大となる最適な電場が存在することがわかった。一方、極大値における配向型圧電ゴムの d_{33} は、PZT 粒子濃度が約 10Vol% と低いにも関わらず、前述した通常の圧電ゴムの d_{33} （最大値）の約 2 倍である約 10pC/N の d_{33} を示し、粒子配向が圧電ゴムの圧電性能の向上に有効であることがわかった。

さらに、配向型圧電ゴムの d_{33} を向上させる方法を検討した結果、PZT 粒子およびゴム材に求められる条件として、以下の 2 つの条件が有効であることを見出した。

- ・ PZT 粒子に求められる条件：大きい粒子径
- ・ ゴム材に求められる条件：低いヤング率

以上の条件では、配向型圧電ゴムにおいて配向した PZT 粒子の配列に加わる力が大きくなるため d_{33} が向上する。PZT 粒子の粒子径が d_{33} に与える影響として、PZT 粒子径と d_{33} の関係を図 6 に示す。作製条件は、印加電場約 2kV/mm、PZT 粒子濃度約 10Vol% とした。

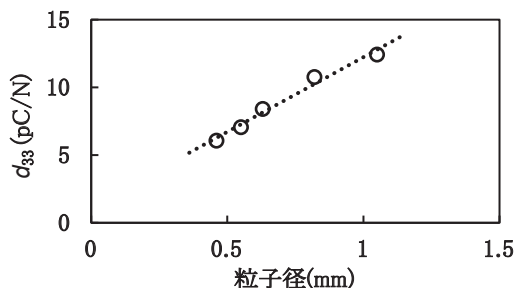


図6 粒子径と d_{33} の関係

粒子径の増加に伴って d_{33} は増加し、直径約 1mm の粒子を用いた場合の d_{33} は約 13pC/N である。次に、ゴム材のヤング率の影響として、シリコンゴム（ヤング

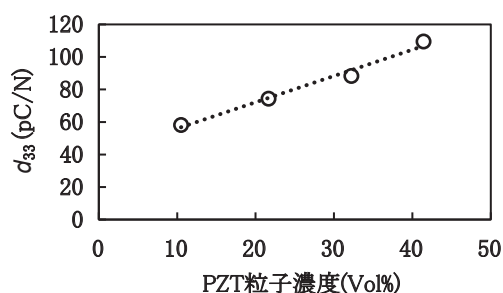


図7 PZT 粒子濃度と d_{33} の関係

率約 70MPa) の代わりにシリコンゲル（ヤング率約 4MPa) を用いて作製した配向型圧電ゴムの PZT 粒子濃度と d_{33} の関係を図 7 に示す。作製条件は、印加電場約 2kV/mm、PZT 粒子径約 1mm とした。

PZT 粒子濃度が約 40 Vol% の場合に、 d_{33} が約 110 pC/N まで増加することがわかった。これは PZT の d_{33} に近い値である。さらに、この配向型圧電ゴムのヤング率は約 40 MPa であり、PZT の 1/100 以下である。

以上、圧電ゴムの圧電性能向上の条件を検討した結果、粒子配向、粒子径の増加および低いヤング率のゴム材の選択が有効であることを見出した。ただし、シリコンゲルを用いた配向型圧電ゴムの場合、シリコンゲルの耐荷重性が極端に劣るため、大きな荷重が加わった場合に、配列が崩れ、圧電性能が消失してしまう。そのため、耐荷重を考慮した使用が必要である。

3. 圧電ゴムの鉄道車両へのセンサとしての応用

3.1 車両側引戸における異物の挟み込みセンサへの適用

3.1.1 圧電ゴムを内蔵した側引戸先ゴム

鉄道車両の側引戸では、乗客の乗降時に荷物などの異物が戸先に挟み込まれることがある。その際、通常であれば車両に搭載されている異物検知システムが、異物の挟み込みを検知して車両の走行を抑制する。一方、側引戸戸先には、緩衝材として中空の戸先ゴムが使用されており、異物が小さい場合（幅約 15mm 以下）、戸先ゴムの変形などによって挟み込みを検知することが困難な場合がある。そのため、指先や杖等の細いものを挟み込むと、そのまま車両が走行してしまう可能性がある。

そこで、図 8 に示すように、圧電ゴムを内部に設置した戸先ゴム（以下、センサ戸先ゴム）によって、戸先における異物の挟み込みを検知する手法を検討した。使用する圧電ゴムの寸法は、戸先ゴム内部の隙間が狭いことや異物

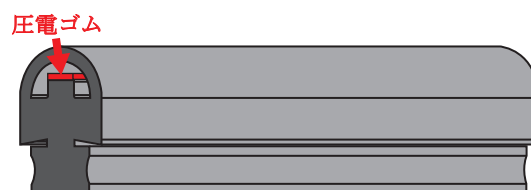


図8 センサ戸先ゴムの内部



図9 戸先ゴム内部の圧電ゴムの外観

を挟み込む高さ方向の位置が特定できないことを考慮し、図9に示すように、長さ約1500mm、幅約5mm、厚さ約1mmとした。圧電ゴムは圧電セラミックスと異なり、このような形状でも比較的容易に作製できるという利点がある。一方、配向型圧電ゴムでは、このような形状での成形が困難であったため、センサ戸先ゴムに用いた圧電ゴムは、EPDM中に粒子径約1mmのPZT粒子を約50Vol%混合した通常の圧電ゴム (d_{33} =約2.5pC/N) とした。

3.1.2 定置試験

異物の挟み込みによってセンサ戸先ゴムから発生する電荷を測定するため、定置試験を実施した。試験状況を図10に示す。

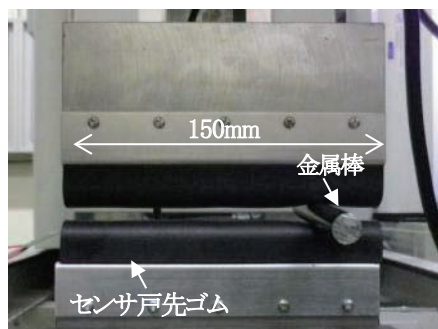


図10 定置試験の状況

試験では、材料試験機に側引戸先を模擬したジグを設置し、下部のジグにセンサ戸先ゴム、上部のジグに通常の戸先ゴムを取付けた。センサ戸先ゴムおよび通常の戸先ゴムともに長さを約150mmとした。取付けた後、上下の戸先ゴムの隙間を20mmとしておき、隙間が無くなるまで上側の戸先ゴムを移動させた。その際、異物を模擬した金属棒を挟み込ませた。

試験結果の例として、試験速度約1000mm/minで直径8mmの金属棒を挟み込んだ場合の荷重およびセンサ戸先ゴムから発生する電荷の時間波形を図11に示す。

異物の挟み込みによって、荷重は増加し、最大値となった後に減少している。また、電荷も荷重の増加に伴って増加し、最大値となった後に減少している。電荷の減少は、圧電ゴムから発生した電荷が放電されるためである。荷重の最大値約35Nに対して、電荷の最大値は約150pCであり、単位力当りの発生電荷量は、約4pC/N

である。これは、圧電ゴムの d_{33} の約2.5pC/N よりも僅かに大きい。これは、圧電ゴムと戸先ゴムの接触状態や速度によるものと考えられる。一方、この結果より、圧電ゴムによって異物の挟み込みを検知する場合は、発生する電荷の最大値を利用する方法が有効であることがわかった。

次に、異物の金属棒の直径が8mmの場合の試験速度と最大荷重および発生電荷の最大値との関係を図12に示し、試験速度が約1000mm/minの場合の異物の直径と最大荷重および発生電荷の最大値（試験速度：1000mm/min）との関係を図13に示す。

試験速度に対する荷重の変化は小さいのに対して、電荷は、速度の増加に伴って増加している。これは、測定に用いた計測器の性能によるものである。一方、異物の直径に対しては、直径の増加に伴って荷重が増加しており、電荷も荷重の増加に伴って増加している。

実車両における両側引戸の接触速度は、1000mm/min以上であり、定置試験よりも大きな電荷が発生すると考えられるが、定置試験の結果より、直径5mm以下の異物は、速度が速い場合でも発生する電荷がわずかである

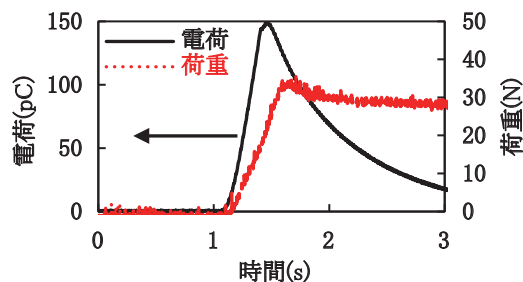


図11 挟み込みによって発生する荷重およびセンサ戸先ゴムから発生する電荷の時間波形

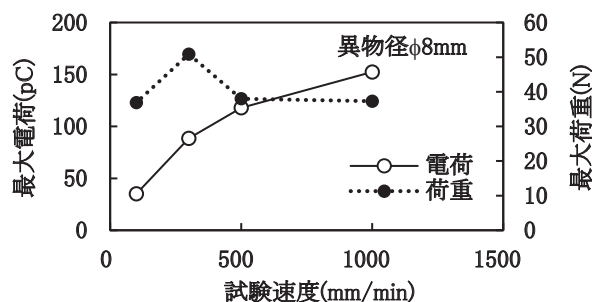


図12 試験速度と最大荷重および電荷の最大値との関係

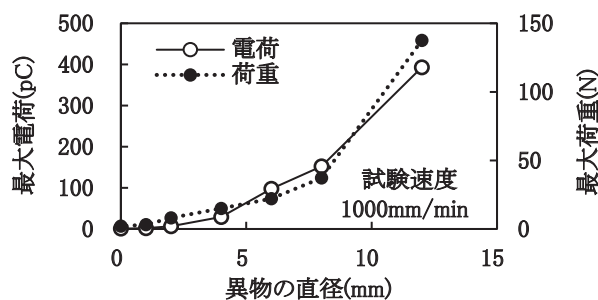


図13 異物の直径と最大荷重および電荷の最大値との関係

ことを考慮すると、検知対象とする異物の大きさは直径 5mm 以上とした。

3.1.3 実車両での検証試験

鉄道総研所有の試験車両において、長さ約 1800mm のセンサ戸先ゴム（圧電ゴムの長さは約 1500mm）による異物の挟み込み検知性能を評価した。試験状況を図 14 に示す。



図 14 実車両における試験状況

試験では、センサ戸先ゴムに加えて新たに製作した制御装置の動作も確認した。この制御装置は、センサ戸先ゴムから設定値以上の信号を受信した際に側引戸を再開させるものである。ただし、制御装置には、圧電ゴムから発生した電荷をチャージアンプによって増幅した電圧が入力される。

結果の例として、異物を挟み込んでいない場合と下端から約 1000mm の位置で直径 10mm の異物を挟み込んだ場合のセンサ戸先ゴムからの検知信号を図 15 に示す。ここで、チャージアンプのレンジは、0.01V/pC とし、制御装置の設定値は 8V とした。

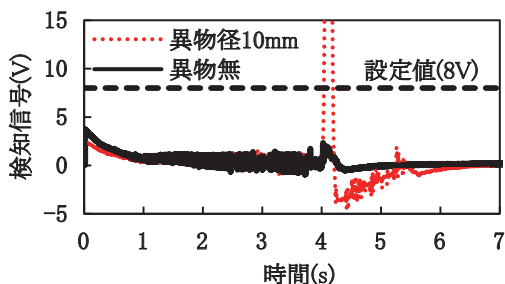


図 15 実車両における挟み込み試験結果例

異物が無い場合、センサ戸先ゴムからの電気信号が設定値に達していないため側引戸は再開しなかったが、従来では検知困難であった 10mm の異物を挟み込んだ場合には、10V 以上の電圧が発生し、制御装置によって側引戸が自動的に再開した。また、本試験では、新たな制御装置が既存の異物検知システムに支障しないことおよび下端部から 500mm 以上の部位であれば、直径 10mm の異物や指先は、圧電ゴムの設置箇所全てで検知できることがわかった。一方で、直径 5mm の異物は検知できない場合があった。また、下端部においては検知が困難

な場合があることがわかり、今後の改良に向けた課題も抽出された。

3.2 車軸軸受における損傷検知センサへの適用

3.2.1 圧電ゴムを内蔵した軸受防振ゴム

台車の車軸軸受は、車両の走行を支える重要な部品であり、この軸受に損傷が発生した場合、重大な事故につながる恐れがある。そこで、圧電ゴムを利用して簡易に軸受の損傷を検知する手法を検討した。

車軸軸受が取り付けられた軸箱上には、軸受の保護および振動伝達の防止のために軸受防振ゴム（以下、防振ゴム）が設置されている。そこで、図 16 に示すように圧電ゴムを内蔵した防振ゴム（以下、センサ防振ゴム）によって軸受の損傷に伴う異常振動の検知が可能か検討した。ここで、センサ防振ゴム内の圧電ゴムに加わる荷重は、防振ゴムに加わる荷重の一部（約 1/10）となるため、 d_{33} が高い方が検知に有利と考えられ、圧電ゴムには、粒子径約 0.7mm の PZT 粒子を約 30Vol% 混合した配向型圧電ゴムを選択した。 d_{33} は約 20pC/N である。



図 16 防振ゴム内部の圧電ゴム

3.2.2 センサ防振ゴムによる損傷検知評価試験

センサ防振ゴムによる損傷検知性能を評価するため、鉄道総研所有の車軸軸受耐久試験装置を用いて回転試験を実施した。試験では、軸受内部に人工傷を付与した損傷軸受および正常な軸受の回転試験を実施し、防振ゴム内の圧電ゴムから発生する電気信号を測定した。

車軸軸受は、複列円すいころ軸受とし、軸端側を A 列、車輪側を B 列とした。センサ防振ゴム内に設置する圧電ゴムは、2 枚（A 列直上の圧電ゴムを P-A、B 列直上の圧電ゴムを P-B とする）とし、各列の直上に設置し



図 17 損傷検知性能評価試験状況

特集：車両技術

た。なお、損傷軸受は、外輪軌道面の A 列側に円周方向 35mm の人工傷を付与し、人工傷が真上になるように軸受けを設置した。図 17 に試験状況を示す。

試験結果の例として、速度 70km/h 相当の回転試験を実施した際にセンサ防振ゴムから発生した電圧の測定結果を図 18 に示す。図は、チャージアンプを介さずに直接測定した電圧を周波数解析した結果を示したものであり、正常軸受および損傷軸受の回転試験で比較したものである。

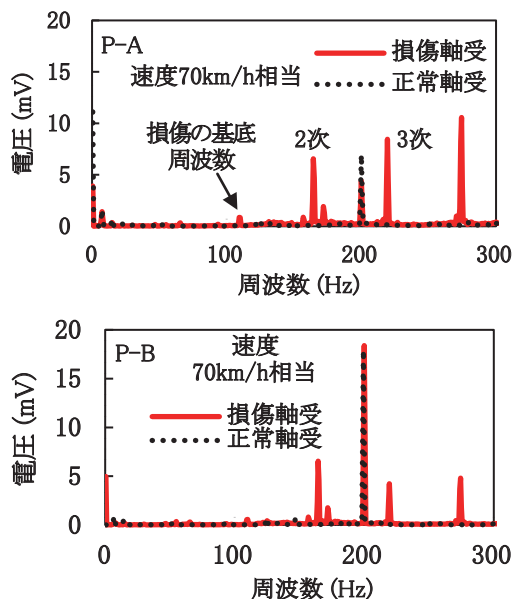


図 18 センサ防振ゴムによる軸受損傷検知評価試験結果の例

正常軸受と損傷軸受を比較した場合、その他の正常軸受の場合には発生していない周波数に電圧が発生している。これらの周波数は、式 (1) により算出される、軸受外輪に損傷が発生した場合の周波数（欠陥周波数）およびその 2 次、3 次の高調波の周波数と一致していた。

$$f_0 = \frac{Zn}{60 \cdot \left(1 - \frac{Dw}{Dpw} \cdot \cos \alpha\right) \cdot \frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここで、 f_0 は外輪欠陥周波数、 Z は転動体数、 n は回転数、 Dw は平均ころ直径、 Dpw は平均ころピッチ径、 α は接触角を示す。

本試験結果より、センサ防振ゴムから発生する電圧を直接測定し、周波数解析することによって軸受の損傷を検知できることがわかった。また、損傷に起因した周波数の発生電圧量を P-A と P-B とで比較すると、人工傷直上に設置した P-A から発生している電圧は、2 次以降の高調波の周波数において明確に大きく、発生電圧の差を求めることにより、損傷の発生部位も特定できる可能性が示された。

電圧を直接測定することにより、チャージアンプを省

略できるため、簡易な損傷検知センサとなることが期待される。

4. まとめ

既存の圧電材料である圧電セラミックスは、硬くて脆い性質に加え、成形性能が低いという課題からセンサなどに適用できる箇所が限定されてしまう。

そこで、圧電セラミックスの課題を克服する材料として圧電ゴムに着目し、圧電ゴムの製作および圧電性能を向上させる手法を検討した。さらに、圧電ゴムの鉄道車両におけるセンサとしての適用可能性についても検討した。これらの検討結果より、以下の知見を得た。

- 1) ゴム材と圧電セラミックス粒子を混練して作製する通常の圧電ゴムは、柔軟性は高いが圧電性能が低いことがわかった。一方、ゴム材中で圧電セラミックス粒子同士が接触することで圧電性能が向上することがわかった。
- 2) ゴム材中で圧電セラミックス粒子を配向させた配向型圧電ゴムは、通常の圧電ゴムと比較して柔軟性を保ったまま、圧電性能が向上することがわかった。また、配向型圧電ゴムの圧電性能向上のためには、粒子径の増加およびヤング率の低い母材の選択が有効であることを見出した。
- 3) 通常の圧電ゴムを車両側引戸先における異物の挟み込み検知センサへ適用した結果、従来のシステムでは検知困難であった小さい異物を検知できることがわかった。
- 4) 配向型圧電ゴムを車軸軸受の損傷検知センサへ適用した結果、直接電圧を測定することによって損傷が検出できる低コスト化したセンサを構成できる可能性が示された。

今後、側引戸先における異物の挟み込み検知センサおよび車軸軸受の損傷検知センサの実用化に向けた取り組みを進める予定である。

文献

- 1) N. W. Hagood et al., *Journal of sound and vibration*, Vol.146, pp.243-268, 1991.
- 2) Kazuhiro Adachi et al., *Dynamics and Design Conference*, 124, 2009.
- 3) 間々田祥吾他, 高分子論文集, Vol. 65, No.9, pp.579-586, 2008
- 4) 森下信他, 日本機械学会 機械力学・計測制御講演論文集, No.98-8 242
- 5) Shogo Mamada et al., *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.131, 39862, 2014.