

圧電ゴムの開発と鉄道への応用

材料技術研究部 防振材料研究室

副主任研究員 間々田 祥吾

1. はじめに

現在、注目されている機能性材料の一つに圧電材料がある。圧電材料は、振動などの機械エネルギーが加わった場合に、その一部を電圧や電流の電気エネルギーに変換でき、逆に電気エネルギーが加わった場合に、その一部を振動などの機械エネルギーに変換できる材料である。このような性能を利用して、センサやアクチュエータとして多く利用されており、最近では、振動騒音の低減デバイスや振動等を利用した発電デバイスなどへの応用も期待されている。

圧電材料として、現在、一般的に利用されているのは、圧電セラミックスである。圧電セラミックスは圧電性能が高い一方で、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の適用が困難であり、適用箇所が限定される。また、大面積や複雑な形状の成形も困難である。これらの課題を克服する材料として、筆者らが開発を進めている材料が圧電ゴムである。本発表では、圧電ゴムの性能向上および鉄道分野への応用に向けた取組みについて報告する。

2. 性能の高い圧電ゴムの開発

2.1 通常の圧電ゴム

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合して作製される。筆者らは、エチレンプロピレンゴム（以下、EPDM とする）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 とする）の粒子（粒子径約 $1\mu\text{m}$ ）を約 50Vol%混合した圧電ゴムを作製した。作製した圧電ゴムは柔軟性があり、割れや欠けなどは見られなかった（図 1）。



図 1 圧電ゴムの外観

圧電ゴムの圧電性能は、圧電ひずみ定数 d によって評価した。 d は、圧電材料に力を加えた際に発生する単位力当りの電荷量であり、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 $2\text{kN}\pm 1\text{kN}$ の正弦波を加えた際に発生する電荷量から求めた。

評価の結果、圧電ゴムの d は高い場合でも約 5pC/N であり、一般的な PZT の d ($80\sim 600\text{pC/N}$) と比較すると小さいことがわかった。センサとして圧電材料を利用する場合、チャージアンプによって電荷を増幅できるため、 d が小さくても有効であるが、アンプが利用できない場合などを考えると d を高める必要がある。一方、 d には、ゴム材中での PZT 粒子の状態が大きく影響することがわかった。同じ PZT 粒子濃度（約 50Vol%）で、 d の異なる圧電ゴムの断面を図 2 に示す。

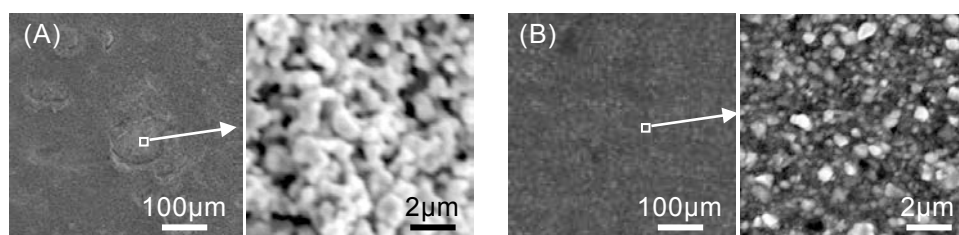


図 2 通常の圧電ゴムの断面（EPDM 中に PZT 粒子を約 50Vol%混合）

(A)の d は約 5 pC/N であり, (B)の d が約 1 pC/N であるのに対して約 5 倍の高い d を示す。(A)では, ゴム材中で PZT 粒子が凝集して大きな塊となり, 塊同士が互いに接触しているのに対して, (B)では, PZT 粒子が分散して孤立して存在している。この結果より, 圧電ゴムの圧電性能を向上させるためには, ゴム材中で粒子径の大きな PZT 粒子を互いに接触, 接続させることが重要であることがわかった。そこで, ゴム材中で圧電セラミックス粒子が 1 方向に接続した圧電ゴム (以下, 粒子配向型圧電ゴムとする) を検討した。

2.2 粒子配向型圧電ゴム

粒子配向型圧電ゴムの作製方法を検討した結果, 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 の粒子を用い, 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, 直流電場を印加しながらシリコンゴムを硬化させることによって, 作製できることがわかった。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す。

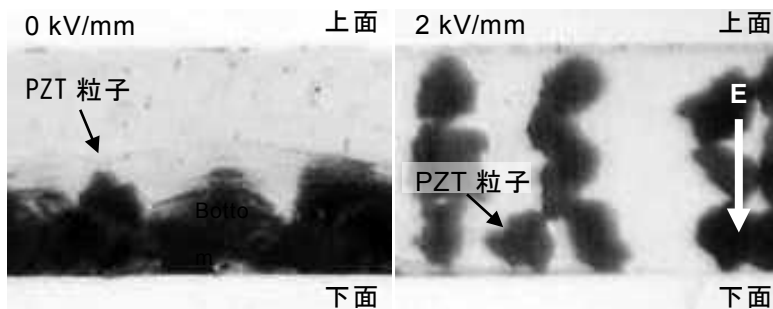


図 3 粒子配向型圧電ゴムの断面

電場を印加していない場合, PZT 粒子が沈殿しているのに対して, 2 kV/mm の電場を印加した場合, 電場方向と同じ厚さ方向に配向している。

次に, 作製時に印加する電場と d の関係を図 4 に示す。電場の増加に伴って d は増加するが, 極大値の後に低下する。これは, d が最大となる最適な電場が存在することを示している。一方, 極大値における粒子配向型圧電ゴムの d は, PZT 粒子濃度が約 10Vol%であるにも関わらず, 高い d を示す通常の圧電ゴムよりも約 2 倍の値を示し, 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。

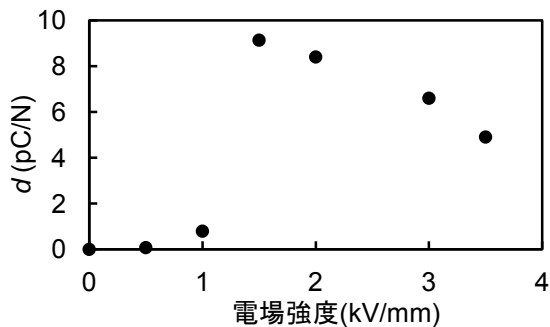


図 4 電場強度と d の関係

さらに, 検討の結果, 粒子配列に加わる力の増加によって配向型圧電ゴムの d が向上することを見出した。その手法の一つが, 粒子径の増加である。図 5 に示すように, 粒子径の増加に伴って d が増加している。 d を向上させるためのその他の手法としては, 低いヤング率のゴム材の選択が挙げられる。

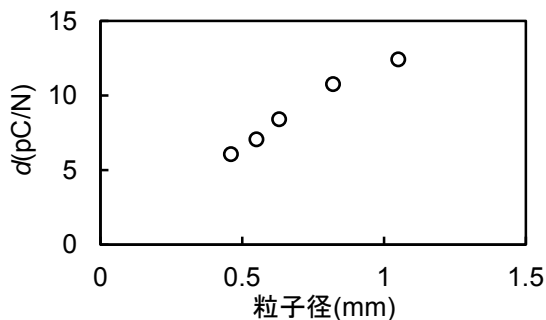


図 5 粒子径と d の関係

これらの向上条件を組合せた結果, 平均粒子径約 1mm の PZT 粒子およびヤング率約 3MPa のシリコンゲルを用いて作製した粒子配向型圧電ゴムは, PZT 粒子が約 40 Vol%の場合に d が約 110 pC/N, ヤング率が約 40 MPa であった。この d は, PZT に近い値であり, ヤング率は 1/100 以下である。ただし, シリコンゲルは極端にヤング率が低いため, 大きな荷重が加わった場合に, 配列が崩れ, 圧電性能が損なわれる。そのため, 荷重の影響を考慮した利用が必要である。

3. 圧電ゴムの鉄道への応用の検討

3.1 車両側引戸先における異物の挟み込み検知センサ

鉄道車両の側引戸先では、乗客の乗降時に荷物などの異物を挟み込むことがある。その際、通常であれば車両に搭載してある異物検知システムが異物の挟み込みを検知するため、車両は走行できない。一方、異物が小さい場合、側引戸先に緩衝材として使用されている中空の戸先ゴムの変形による不感帯があることなどにより、挟み込みの検知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んだ場合、挟み込んだまま車両が走行してしまう可能性がある。

そこで、図 6 に示すように、圧電ゴムを内部に設置した戸先ゴム（以下、センサ戸先ゴムとする）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。センサ戸先ゴムに用いた圧電ゴムは、EPDM 中に直径約 1mm の PZT 粒子を約 50Vol%混合した「通常の圧電ゴム」であり、 d は約 2.5pC/N である。また、圧電ゴムの寸法は、戸先ゴム内部の隙間の大きさや異物を挟み込む高さが特定できないことを考慮し、長さ約 1500mm、幅約 5mm、厚さ約 1mm とした。圧電ゴムは、このような形状でも比較的容易に作製できる利点がある。

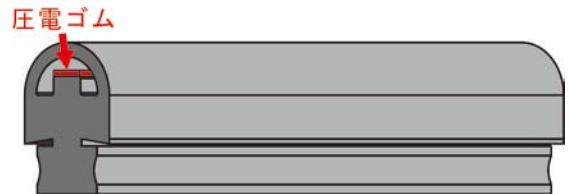


図 6 センサ戸先ゴムの内部

作製したセンサ戸先ゴムの異物検知性能評価試験およびセンサ戸先ゴムから異物の挟み込み信号が発生した場合に側引戸を再開させる制御装置の動作確認試験を鉄道総研所有の試験車体において実施した。図 7 に、異物が無い場合と直径 5mm の異物を挟み込んだ場合におけるチャージアンプを介して圧電ゴムから発生する電荷を電圧値に変換した値の比較を示す。ここで、チャージアンプの変換値は 100pC/V とし、異物を挟み込んだ高さは側引戸下端部から約 1500mm である。

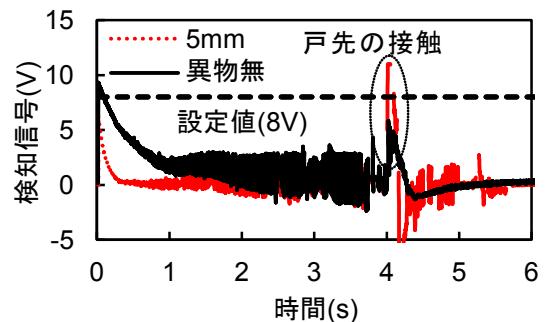


図 7 圧電ゴムからの信号の比較

戸先の接触時に発生する電圧は、異物が無い場合が約 4V であるのに対して、5mm の異物を挟み込んだ場合は 10V 以上である。また、制御装置は、設定値を超えた電圧が発生した場合に側引戸を再開させるシステムとしたが、設定値を 8V に設定することにより、異物を挟み込んだ場合に側引戸が再開した。表 1 に、同制御条件での異物の種類および下端部からの高さとの関係を示す。

この結果から、既存のシステムでは検知できなかった大きさの異物を検知できることがわかる。一方、下端部から 100mm の箇所では、検知感度が低い。これは、側引戸の隙間の影響もあり、センサ戸先ゴムを使用する際は調整が必要と考えられる。また、直径 5mm の異物の場合も検知が困難な場合があるが、検知感度を上げると誤検知の可能性も高まることから、検知する異物の大きさは、選定が必要と考えられる。

表 1 試験結果のまとめ

異物の種類	下端部からの高さ	既存のシステム	開発したシステム
無	-	×	×
直径 10mm の金属棒	100	×	×
	300	×	○
	1500	×	○
直径 5mm の金属棒	100	×	×
	300	×	△
	1500	×	△
指先	1500	×	○

○: 検知, ×: 検知せず, △: 一部, 検知せず

3.2 車軸軸受の損傷検知センサ

鉄道車両の台車に使用されている車軸軸受は、車両走行を支える重要な部品であり、この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。そこで、圧電ゴムを利用して軸受の損傷を検知する手法を検討した。

車軸軸受を封入する軸箱の上には、軸受の保護および振動伝達の防止を目的として軸受防振ゴムが設置されている。そこで、図8に示すように、防振ゴム内に圧電ゴムを設置したセンサ防振ゴムを用いて軸受の損傷に伴う異常振動の検知が可能か検討した。防振ゴム内に設置した圧電ゴムは、直径20mm、厚さ2mmのシリコンゴム内に粒子径約0.7mmのPZT粒子を約30Vol%混合した粒子配向型圧電ゴムであり、 d は約20pC/Nである。

図9に示すように、鉄道総研所有の車軸軸受耐久試験装置を用いて損傷検知性能を評価した。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。

図10に、速度150km/h相当の回転試験を実施した際の圧電ゴムからの発生電圧を正常軸受と損傷軸受とで比較した結果を示す。結果は、圧電ゴムから発生した電圧を直接測定し、その結果を周波数解析したものである。

人工傷を付与した軸受の場合、正常軸受の場合にはない周波数帯域にセンサ防振ゴムから信号が発生しており、センサ防振ゴムによって軸受の損傷を検知できることがわかる。この周波数は、軸受に損傷が発生した場合に生じる振動の周波数の2次、3次の高調波のものである。また、センサ防振ゴムの場合、チャージアンプを省略できるため、省力化したセンサとしても期待される。



図8 センサ防振ゴムの内部



図9 車軸軸受損傷検知の評価試験状況

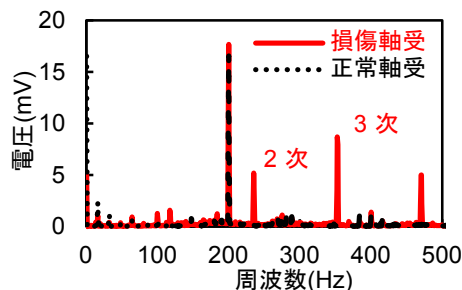


図10 車軸軸受損傷検知の試験結果

4. まとめ

従来の圧電材料の課題である、割れ易さや成型性能の低さ等を克服する材料として圧電ゴムに着目し、圧電ゴムの圧電性能および圧電性能を向上させる手法を検討した。その結果、通常の圧電ゴムは、従来の圧電材料と比較して圧電性能が低いことがわかった。一方、ゴム材中での圧電セラミックス粒子の配向、粒子径の増加および低いヤング率の母材の選択により、圧電性能が向上し、従来の圧電材料と同等の圧電性能を示す圧電ゴムが作製できた。

圧電ゴムの鉄道分野への応用として、車両側引戸先における異物挟み込みセンサおよび軸受損傷検知センサへの適用を検討した。その結果、戸先におけるセンサでは、従来検知が困難であった小さい異物の挟み込みが検知できることがわかった。また、軸受におけるセンサでは、省電力化した損傷検知センサとなる可能性が示された。