

圧電ゴムを鉄道に应用する

間々田 祥吾

材料技術研究部
(防振材料研究室 副主任研究員)

佐藤 大悟

同
(同 研究員)

半坂 征則

同
(同 室長)

矢口 直幸

同
(同 主任研究員)



ままだ しょうご



はんさか まさのり



さとう だいご



やぐち なおゆき

はじめに

材料の中には、力を加えて材料を変形させる（ひずませる）と電気（電圧や電流）が発生し、逆に電気（電圧や電流）を加えると変形する（ひずむ）という特殊な性質を持っているものがあります。このような性能を持つ材料を“圧電材料”といいます。圧電材料の性能を利用すると、発生する電気量を測定することによって、現在材料に力がかかっているか、いないか（力の検知）、または、どのくらいの大きさの力がかかっているか（力の測定）を知るセンサとして使えます。また逆に、交流の電気を加えて材料を周期的に変形させることによって、振動を発生させるアクチュエータとして使うこともできます（図1）。さらに、材料の振動により発生した電気を電気抵抗で消費することによって、振動や騒音を低減する材料として利用することもできるため、圧電材料の研究は盛んに行われています。

既存の圧電材料

現在、一般に最も多く使われている圧電材料は、チタン酸バリウムやチタン酸鉛などの圧電セラミックスです。セラミックスは陶器の茶碗のような材料で、圧電セラミックスは圧電材料として優れた性能を持っているのですが、そ

の反面、非常にもろく、少しの衝撃が加わっただけでも割れてしまいます（図2）。また、大きくすることや複雑な形に成型することが難しい材料でもあります。そのため便利な性質がありますが、圧電セラミックスは使える場所が限られるという課題があります。

圧電ゴム

もろい、自由な形状に成型できないといった圧電セラミックスの課題を克服する材料として、圧電セラミックスとゴム材料を複合させた圧電ゴムを研究しています。

圧電ゴムは、ゴム材料の持つ柔軟性や自由に成型できる性質とゴム材料の中に分散された圧電セラミックス粒子による圧電性能とを兼ね備えた材料として期待されています（図3）。

圧電ゴムの圧電性能の評価

圧電ゴムの圧電性能をどのように評価しているか紹介します。圧電材料の圧電性能を評価する指標の1つに圧電ひずみ定数 d [C/N]（Cは電荷の単位：クーロン）があります。圧電ひずみ定数 d は圧電材料に力を加えた時に発生する電荷量（その単位時間当たりの量が電流値）の加えた力に対

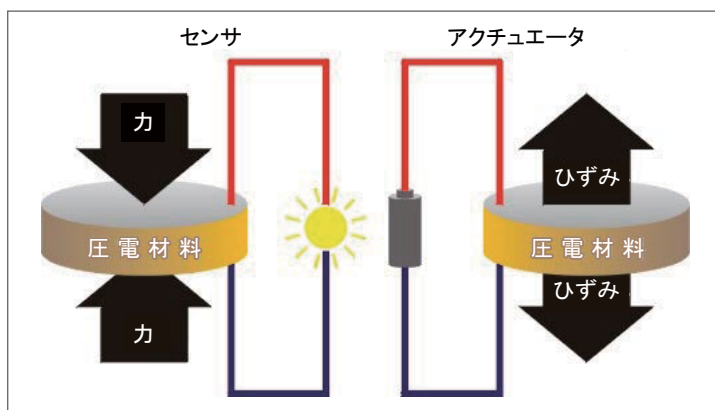


図1 圧電材料の利用



図2 割れた圧電セラミックス



図3 圧電ゴムの外観

する比率，あるいは電圧を加えた時に発生するひずみ量の加えた電圧に対する比率を表わす数値で，次の式で表わされます。

$$d = \frac{Q}{F} = \frac{\gamma}{E} \quad (1)$$

ここで， F は圧電材料に加えた応力 [N/m^2]， Q は発生した電荷密度 [C/m^2]（電荷量を材料の電極面積で割った値）， E は加えた電場 [V/m]（電圧を材料の厚さで割った値）， γ は生じたひずみです。 d の値が大きいほど，圧電性能は高いと言えます。

(1) 評価方法

圧電ゴムは，ゴムと圧電セラミックスの複合材料であるため，その圧電性能を測る方法が確立されていませんでした。そこで，圧電ゴムの d を測定する方法としてゴム材料の動的性能を評価する試験を参考に，次のような方法を考案しました。具体的な手順は以下のとおりです。

- ①圧電ゴムの上下に電極を付けた後に，動的加振試験機に設置する。
- ② $3 \pm 2\text{kN}$ ， 100Hz ，正弦波の条件で動的に加振して加振力と発生電荷を測定する。この際，発生電荷はチャージアンプを用いて測定する。
- ③発生電荷の振幅値を加振力の振幅値で割って d を求める。試験の状況を図4に示します。

(2) 評価結果

圧電ゴムの評価結果の例を図5に示します。この圧電ゴムはゴム材料としてエチレンプロピレンゴム，圧電セラミックス粒子としてチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) を使用

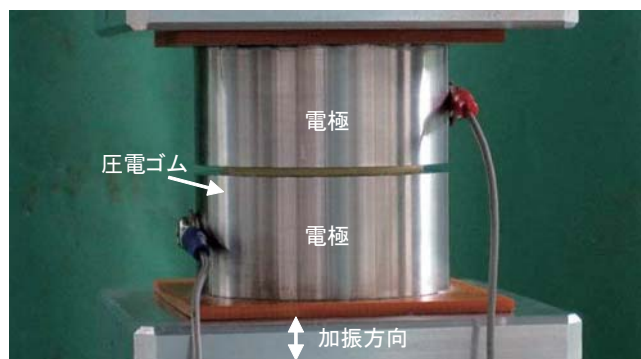


図4 動的加振試験の状況

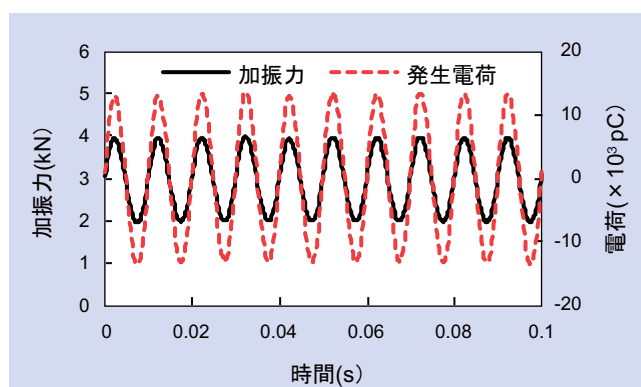


図5 圧電ゴムの荷重と電荷の関係

し，PZTを濃度62.5vol%で混合したものです。加振力の変動に伴い電荷が発生しています。測定結果からこの圧電ゴムの圧電ひずみ定数 d は $13.5 \times 10^{-12} \text{C}/\text{N} = 13.5 \text{pC}/\text{N}$ と求められました。

圧電性能を高める工夫

図5の圧電ゴムの d の値 $13.5 \text{pC}/\text{N}$ は圧電セラミックスの d の値と比較して非常に低い値です。一般にアクチュエータや振動・騒音の低減材料として使われる圧電セラミックスの d の値は， $100 \sim 600 \text{pC}/\text{N}$ です。そのため，圧電ゴムはセンサとして使うことはできますが，アクチュエータや振動・騒音の低減材料として使うには性能が不足します。

そこで，圧電性能向上のために圧電ゴムの作り方を工夫しました。以下に作り方を説明します。

(1) 圧電ゴムの作り方

圧電ゴムの作り方には大きく分けて2種類の方法があります。これまで通りの通常のゴムと同様の方法（通常の方法）と，性能向上のために新たに我々が開発した方法（開発した方法）です。

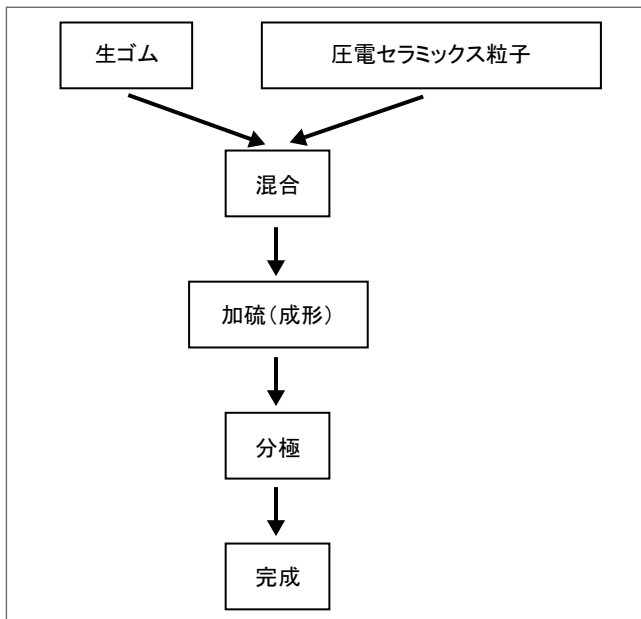


図6 通常の方法の工程

通常の方法

通常の方法の工程を図6に示します。図中の加硫(成型)は、未完成の生ゴムに熱と圧力を加えてゴム材料として完成させる工程です。分極は圧電材料にとって最も重要な工程で、材料に高電圧を加える工程です。圧電材料に高電圧を加えると、もともと材料内で色々な方向に向いていた電気成分が電圧と同じ方向に1つに揃えられ、その結果として圧電性能が発生します。

この作り方は、通常の方法と同じ方法なので、作業が簡単で機械化も進んでいます。その一方で、混合する際に圧電セラミックス粒子に大きなせん断力が加わり粒子が粉碎されてしまいます。そのため圧電性能を持たないゴム材料の中で粒子がそれぞればらばらに離れてしまい、圧電性能が向上し難いという欠点があります。

開発した方法

通常の方法では、ゴム材料の中で個々の圧電セラミックス粒子が離れてしまうため、圧電性能が向上し難いという問題がありました。そこで、粒子が離れるのを防ぐために、ゴム材料の中で粒子を配向(粒子を一直線に並べる)する方法を考案しました。これは、圧電セラミック粒子が電場内で電圧方向と同じ方向に配向するという性質を利用したものです。この粒子の配向を取り入れた開発した方法の工程を図7に示します。

開発した方法が通常の方法と大きく異なる点は次の2点です。

- ①ゴム材料に通常は液状で、加熱(加硫)すると固化して弾力性に富む材料になるシリコンゴムを用いる。

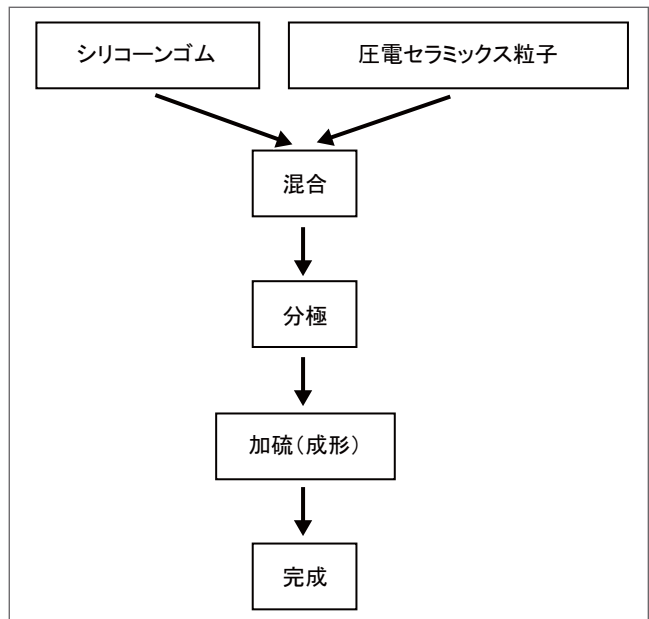


図7 開発した方法の工程

- ②分極後に加硫する。

この方法では、液状の中で混合した圧電セラミックス粒子が、分極の時の電圧によって配向することができ、さらに、その後加熱することで、圧電セラミックス粒子が配向した状態を保ったまま成型することができます。このような方法によってゴム材料の中で圧電セラミックス粒子が離れずに配向した圧電ゴムを作ることができました。

図8に開発した方法で作った圧電ゴムの断面を示します。図の(A)は分極後に加硫した試料、(B)は加硫後に分極した試料です。

加硫後に分極した試料は圧電セラミックス粒子が離れ、試料下部に沈殿していますが、分極後に加硫した試料は粒

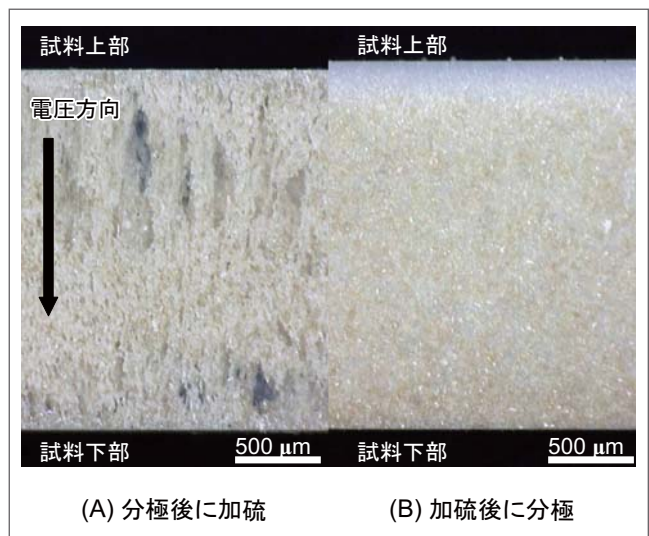


図8 開発した方法で作製した圧電ゴムの断面

表1 圧電ゴムのdの比較

圧電材料	作り方	PZTの粒子濃度 (Vol%)	d (pC/N)
圧電ゴム	通常	75	17
	開発	60	85
圧電セラミックス		-	100~600

子が離れず、電圧方向に連なって配向しています。

(2) 圧電性能の比較

通常の方法と開発した方法で作製した圧電ゴムの圧電ひずみ定数dの最大値で比較した結果を表1に示します。どちらの方法でも混合する圧電セラミック粒子としてはPZTの粒子を使っています。また、比較のために一般的な圧電セラミックス(PZT)のdの値も併せて示します。

通常の方法の圧電ゴムのdの値は最大でも17pC/Nであるのに対し、開発した方法では85pC/Nまで増加することがわかります。この値は圧電セラミックスの性能範囲内の100pC/Nに近く、もう少し性能を高めれば圧電セラミックスなみの圧電材料とすることができると考えられます。

圧電ゴムの鉄道への応用

圧電ゴムの使い道として、まずセンサへの応用が考えられます。圧電セラミックスもセンサとして使われていますが、圧電セラミックスでは使いにくい、あるいは使えないような、狭くて複雑な形状の場所や衝撃荷重が加わる場所などに圧電ゴムを使うことができればセンサの使用範囲が大きく広がります。

一例として、狭くて、列車が通過する時に大きな衝撃荷重が発生する場所の鉄橋のまくらぎ下で、力感知センサとしての適用可能性を調査しました。調査方法は図9のように鉄橋とまくらぎの間隙間に圧電ゴムを設置し、車両通過時に発生する電圧を測定するものです。

設置した圧電ゴムは直径が約50mm、厚さが約1mm、dの値が約20pC/Nです。また、この調査では、比較として同じ場所に圧電セラミックスも設置しました。

図10に3両編成の列車がまくらぎの上を通過した時に圧電ゴムから発生した電圧の測定結果を示します。

列車の車輪通過時には最大で約80Vの電圧が発生しています。列車の通過後に圧電ゴムを回収し、状態を観察しましたが、割れなどの異常はありませんでした。一方、同時に設置した圧電セラミックスは一回の車両通過で壊れてしまい、電圧の測定はできませんでした。

この実験から、圧電ゴムは衝撃荷重が加わる場所でも力



図9 圧電ゴムの設置状況

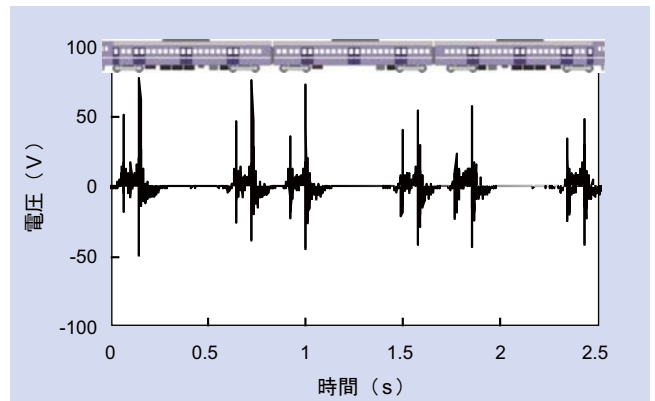


図10 列車通過時の発生電圧

感知センサとして使用できることがわかります。今後、車両の位置を検知するための材料としての応用が期待できます。また、圧電ゴムに加わる力と発生電圧(電荷)との関係を詳しく調べることによって、車両の走行荷重測定用のセンサなどに用いて構造物のメンテナンスに役立てることも期待されます。

おわりに

柔軟性や自由に成型できる性質と圧電性能を併せ持ち、従来の圧電セラミックスは使えない狭くて複雑な形状の箇所や衝撃荷重が加えられる箇所でも使える圧電ゴムを研究しています。研究の中で作り方の工夫により圧電特性が向上し、圧電セラミックスの性能に近付けることがわかりました。今後、さらに圧電ゴムの性能を高める検討を行い、物体の駆動装置や振動・騒音を低減する材料としての利用を目指します。また、今後圧電ゴムにおける荷重と発生する電気量との関係を詳しく調べることにより、列車荷重の測定用センサとしての応用などの検討を進めます。RRR