

圧電ゴムの発生電圧に関する理論的解析

Analysis of voltage generated in piezoelectric rubber

精密工学専攻 18号 川島 聖貴
Masataka Kawashima

1. 緒言

エネルギーハーベスティング (Energy harvesting, Energy scavenging または Ambient power と呼ばれる) とは、光や熱、振動、電波、風力、塩分勾配などのエネルギーを使用可能な電気エネルギーに変換して、多くの場合バッテリーに大きく依存するポータブル電気デバイスに電力を供給することである。エネルギーハーベストのために利用可能なエネルギー源には、電磁放射、熱エネルギー、および機械的エネルギーが含まれる。エネルギー源を使用可能な電気エネルギーに変換するために使用される技術には、光起電 (PV)、熱電、圧電、および電磁気が含まれる。環境発電技術とも呼ばれる。

本研究では小型で設置コストの低い圧電素子に着目した。圧電素子とは、ある特定の方向から結晶にむけて力を加えることで、電気分極が誘起され正負の電荷が発生する圧電効果を利用した素子であり、センサ⁽¹⁾やアクチュエータ⁽²⁾として広く用いられている。圧電素子を電源として使用するメリットは、電池などとは異なり交換不要で、壊れなければ半永久的に電圧を出力し続けられるという点である。圧電材料は大きく分けて無機材料の圧電セラミックスおよび有機材料の圧電フィルムに分けられる。代表的なものとしてそれぞれ PZT (チタン酸ジルコン酸鉛)、PVDF (ポリフッ化ビニリデン) がある。圧電セラミックスである PZT は圧電定数が非常に高く、鉛を含んでいるため環境負荷が高いにもかかわらずその有用性から現在も広く利用されている。しかし延性が低く脆いという欠点がある。一方圧電フィルムである PVDF は PZT より圧電定数が低い鉛を含まず形状特性が高いという利点があげられるが、分極や厚い材料を作製することが困難である問題点がある。

PZT 及び PVDF の欠点である脆さや厚さの問題を解決するため圧電材料と高分子材料を複合した複合圧電材料がある。圧電素子を発電装置として利用する場合、床発電⁽³⁾のような日常的に荷重の発生する箇所への適用が有効であり、柔軟で厚みのある材料である複合圧電材料であれば衝撃荷重の発生する箇所での運用が可能である。本研究では複合圧電材料を作成し、物性値の評価を行う。また衝撃試験による発生電圧の測定を行う。

2. 基礎理論

2.1 圧電素子

圧電体に加えられたひずみにより電位分極が発生し、正負の電荷が発生することを正圧電効果という、逆に電界を印加すると圧電体自体が変形することを逆圧電効果という。これらの効果を生じる素子が圧電素子である。圧電体では、応力及びひずみ (機械的パラメータ) と電界および電気変位 (電氣的パラメータ) とが圧電効果を介して互いに結び合っている。

2.2 複合圧電材料の接続性とその種類

Fig.1 に接続性の概略を示す。複合圧電材料における圧電材料と母材の接続性は、圧電材料が接続していないことを示す 0 から、3次元 (方向) に接続していることを示す 3 までの 4 種類の接続性、および母材についても、0 から 3 までの 4 種類の接続性の組み合わせであり、これを使い圧電材料の接続性を最初に母材の接続性を後に表記することで 0-0 から 3-3 までの 10 種類に分類することが出来る。この中でも 0-3 及び 1-3 のものが開発、研究されている⁽⁴⁾。

0-3 複合体は作成が比較的容易であり高分子材の成型性、柔軟性を持った圧電体を得ることが出来る。それに対し 1-3 複合体は圧電セラミックスが一方に接続しているため 0-3 複合体よりも高い圧電性を示すが、圧電セラミックスの接続が単一の柱で形成されるためセラミックスのヤング率が支配的となり柔軟性が失われてしまう。本研究ではより柔軟性に優れた 0-3 複合体を作成する。

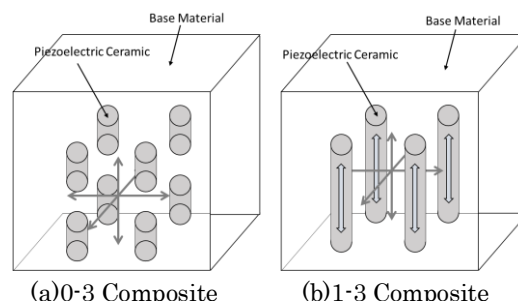


Fig.1 Images of piezoelectric composite according to connectivity and alignment of piezoelectric materials.

3. 試験片の作製

試験片の作成手順を Fig.2 に、作製する試験片の寸法を Fig.3 に示す、正方形の試験片および引張試験のためのダンベル型試験片 (JIS K 6251 ダンベル状 3 号形) を作成する。作成手順は以下のとおりである。

- 材料に PZT 粉末として圧電振動版 (7BB-20-6L0 村田製作所) を粉砕したもの、高分子材料としてシリコンポッティング材 (SYLGARD184 東レ・ダウコーニング) を使用する。それぞれを PZT 粉末が高分子材料の 10%/Vol となるようにビーカーに入れ混合する。
- 混合した材料を真空装置 (アズワン株式会社) に入れ約 1 時間脱泡を行う。その後材料を成型用の方に流し込み再度脱泡する。
- 高分子材料を硬化させるため送風高温乾燥機 (ヤマト科学 (株), DK601) にて焼鈍を行う。最初に 40 分で 80°C まで温度を上げ 2 時間保持する, その後 1 時間かけて 30°C に冷却する。
- 成型した複合圧電材料に圧電性を持たせるため分極を行う。試験片に銅テープで 25mm×25mm の電極を作成し, その後コロナ分極を 10kV で 1 時間行う。

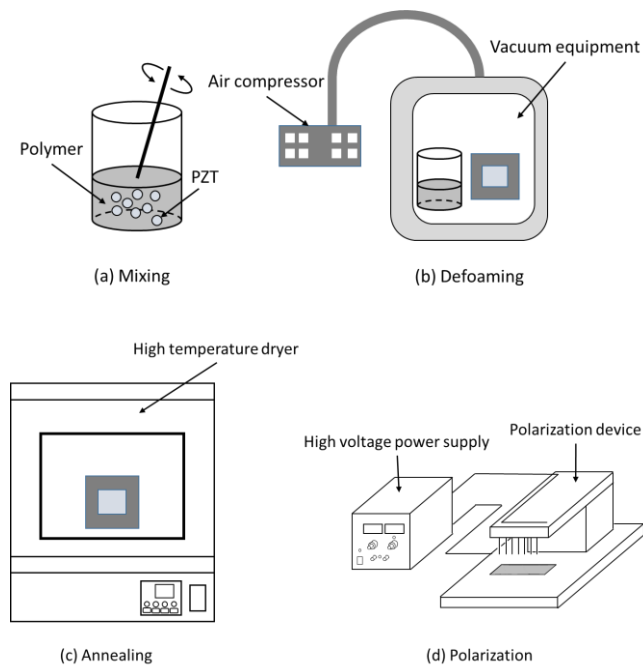


Fig.2 Procedure for making piezoelectric composite

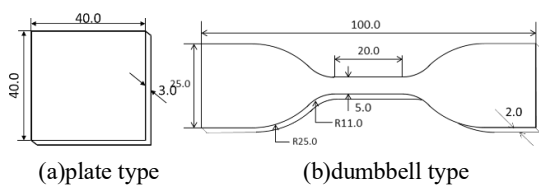


Fig.3 Size of test pieces

4. 作成した複合圧電材料の評価

作製した複合圧電材料の評価項目として材料のヤング率, 比誘電率, 圧電係数を測定する。

4.1 ヤング率

引張試験機 (SHIMADZU, AGS-J) によりダンベル型試験片を 5mm 引っ張った。またデジタル画像関連法 (DIC) による縦ひずみ, 横ひずみの測定も同時に行った。結果を Fig.4, Fig.5 に示す。DIC の結果からポアソン比 $\nu = -\epsilon_{xx}/\epsilon_{yy} \approx 0.5$ であるので, 非圧縮性の性質を持つことがわかる。そのためヤング率は微小変形 ($\epsilon < 0.05$) の範囲において引張試験の結果から求めた。その結果作成した複合圧電体のヤング率 E はおよそ 0.2MPa であった。

4.2 比誘電率

比誘電率は真空の誘電率に対する物体の誘電率の比であり誘電分極のしやすさを示す。LCR メータ (エヌエフ回路設計ブロック, ZM2372) を用いて試験片に 1V, 1KHz の交流電場を印加した際の静電容量 C を測定した。

$$\epsilon_r = \frac{Cd}{\epsilon_0 S} \quad (1)$$

式(1)より試験片の比誘電率 ϵ_r を求める。ここで測定した静電容量 $C=7.56\text{pF}$, 厚さ $d=3\text{mm}$, 真空の誘電率 $\epsilon_0=8.85\text{F/m}$, 電極の面積 $S=625\text{mm}^2$ より比誘電率 $\epsilon_r=4.10$ であった。

Table.1 に作製した複合圧電体と, PZT, PVDF のヤング率, 比誘電率の比較を示した。ヤング率に関しては PZT, PVDF に比べ非常に柔軟な材料を作製することが出来た。一方比誘電率に関しては, PZT に対しては大きく劣るものの PVDF と近い値を得ることが出来た。

Table.1 Comparison of physical properties between PZT, PVDF and piezoelectric composite

	Piezoelectric composite	PZT	PVDF
Young's modulus [MPa]	0.2	114000	832
Relative permittivity	4.1	1300	7.7

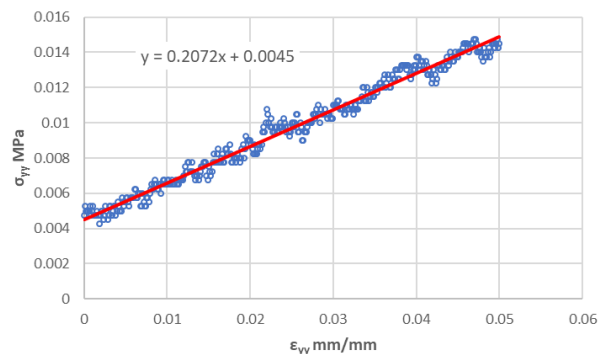
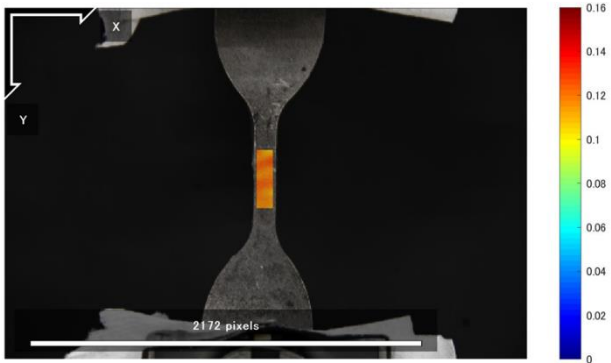
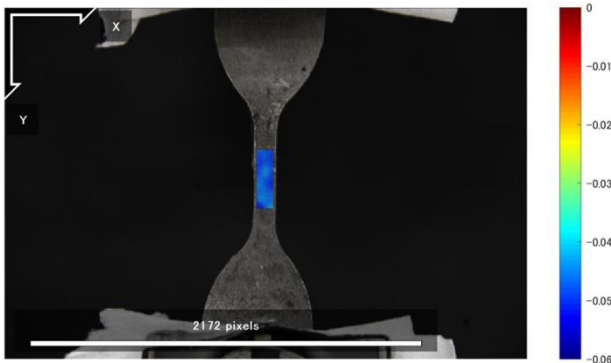


Fig.4 Result of tensile test of composite piezoelectric material



(a) Longitudinal strain ϵ_{yy}



(b) Lateral strain ϵ_{xx}

Fig.5 Strain measurement of dumbbell test piece by DIC(F=0.00106kN)

5. 衝撃試験

5.1 実験方法

衝撃力によって作成した試験片から発生する電圧を測定するため衝撃試験機を用いた実験を行った。Fig.6 に実験装置の外観を示す。衝撃体として 1000g のアルミニウム丸棒 ($\phi 30 \times 300\text{mm}$) をロボットアームによって把持し高さ 10mm まで持ち上げアルミニウム丸棒を落下させることで試験片に一定の衝撃力を発生させている。この時に発生した電圧をオシロスコープによって測定する。また同時に発生した荷重をアルミ棒に取り付けたひずみゲージによって測定した。今回複合圧電材料には $10\text{M}\Omega$ の抵抗を取り付け抵抗に発生した電圧を測定している。

5.2 測定結果

測定した発生電圧と荷重の時間変化を Fig.7 に示す、また比較のため PZT, PVDF に対して同様の実験を行った結果を Fig.8, Fig.9 に示している、なおこの時の接続抵抗は $10\text{k}\Omega$, $10\text{M}\Omega$ である。まず測定荷重の時間変化が発生電圧よりも遅れて発生しているがこれは衝撃力が接触の瞬間からひずみゲージまで反射してくるまでの遅れであると考えられる。また発生電圧が振動しているのは、試験片の振動により正負の電圧が発生しているためと考える。PZT, PVDF との比較では発生電圧の最大値は複合圧電材料が約 2.5V に対して PZT は約 5V であったがそれぞれの接続抵抗、測定電圧の波形が異な

ることから一度の試験によって発生した電力量を式(2)によって計算し、比較する。

$$W = \sum_0^t \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

複合圧電材料では $W=0.916 \times 10^{-3}\text{J}$, PZT では $W=0.934\text{J}$, PVDF では $W=0.117\text{J}$ となり、発電量では複合圧電材料は大きく劣る結果となった。

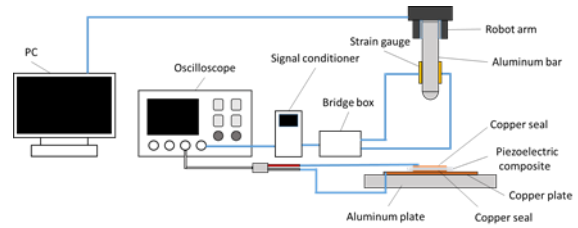


Fig.6 Outline of experimental equipment

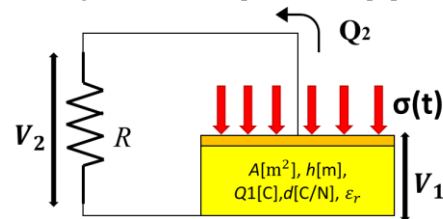


Fig.7 Model of electric circuit

6. 理論値との比較

Fig.7 のような回路において抵抗に発生した電圧を求めることのできる理論式を導出した。理論式を式(3)に示す。式(3)は入力の荷重を複数のステップの重ね合わせと考え、それぞれのステップ荷重に対する発生電圧を重ね合わせることで任意の荷重に対する発生電圧の時間変化を表すことが出来る。

$$V(t_n) = \sum_{i=1}^n \frac{d_{33}h}{\epsilon_r \epsilon_0} \frac{F(t_i) - F(t_{i-1})}{A} e^{-\frac{h}{\epsilon_r \epsilon_0 AR} t_n - t_i} \quad (3)$$

Fig.7 のモデル図の回路は衝撃試験における回路と同様ののものであり、式(3)を今回行った PZT の衝撃試験に適用した際の結果を Fig.10 に示す。Fig.10 より式(3)によって導いた発生電圧の理論値は測定値に対しておおよそ一致する値をとっていることが確認できる。作製した複合圧電材料に対して式(3)を適用した場合の測定電圧の時間変化(左軸)と理論値の時間変化(右軸)を Fig.11 に示している。複合圧電材料では波形、発生電圧の大きさともに測定値とは異なる結果を示した。これは発生電圧の理論値はアルミ棒に発生した荷重をもとに導出しており、PZT においては硬い材料であるため PZT, アルミ棒に反射した荷重がともに同等程度であったと考えられるが、複合圧電材料では発電において支配的である材料中の PZT 粒子に発生した荷重がアルミ棒に反射した荷重とは大きく異なっていることが原因であると考えられる。そのため式(3)を複合圧電材料に対して適用するためには材料中の PZT 粒子に対してどのような応力が発生しているかを検討する必要がある。

7. 結言

PZT 粉末と高分子材料から複合圧電体を作成し物性値の評価実験および衝撃試験を行った。物性値においては比誘電率は PZT に大きく劣ったもののヤング率は PZT, PVDF に対して非常に小さいものであった。衝撃試験では衝撃試験機により一定の荷重を入力し発生電圧の評価を行った。得られた電力量は PZT, PVDF に対してかなり小さい結果となった。これより作製した複合圧電材料は電気的特性に関しては他の材料に劣るもののヤング率, 成型性といった機械的性質に関しては有用性の高いものを得ることが出来た。電気特性を向上させる方法として材料中の PZT 粉末の割合を増加させることがあげられるが, 割合の増加に伴い機械的性質に関しても PZT が支配的となり柔軟性が失われていますため用途に応じた混合比を検討することが必要である。理論式の適用に関しては PZT では理論値は測定値に近いものを得ることができたが, 複合圧電材料では材料中の PZT 粒子に対してどのような応力が発生しているかを測定もしくは計算する必要があることがわかった。

参考文献

- (1) 間所 洋和, 下井 信浩, 佐藤 和人, 圧電素子を用いた非拘束センサシステムによる離床行動予測, 日本機械学会論文集 (C 編), **79**-800 (2013-4) pp1024-1035.
- (2) Zeng Xiangli, Wu Yue, Yang Zhigang, Shen Yanhu, Ma Lei, Research on high-frequency small-load fatigue testing device driven by piezoelectric actuator, Review of Scientific Instruments, **90**-7 (2019) pp076102-076102-3.
- (3) 武藤 佳恭, 小林 三昭, 林 寛子, “床発電システム開発の取り組み” 静電気学会誌, **35**-5(2011)pp203-207
- (4) 間々田 祥吾, 圧電ゴムの圧電性向上に関する研究, 2015, pp15-18
- (5) 吉田 昇, ゴム状物質の実用弾性率について, 日本ゴム協会誌, **56**-6 (1983) pp358-368

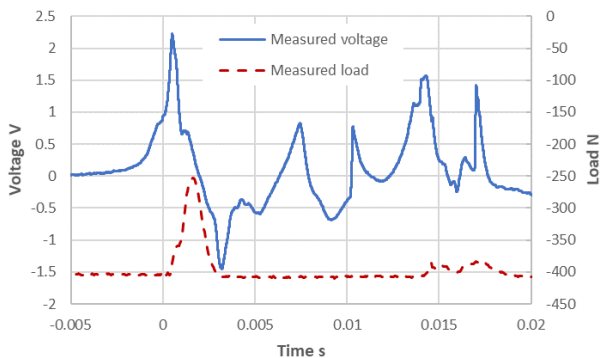


Fig.7 Time dependence of measured voltage and load of piezoelectric composite

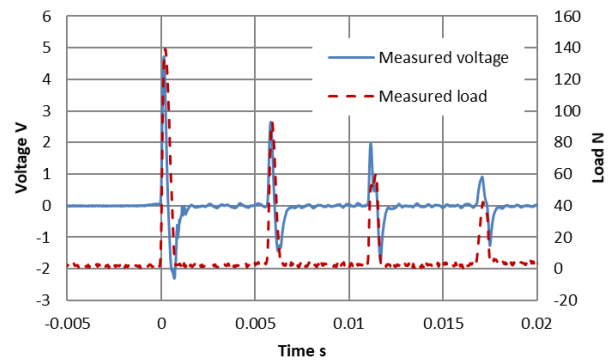


Fig.8 Time dependence of measured voltage and load of PZT

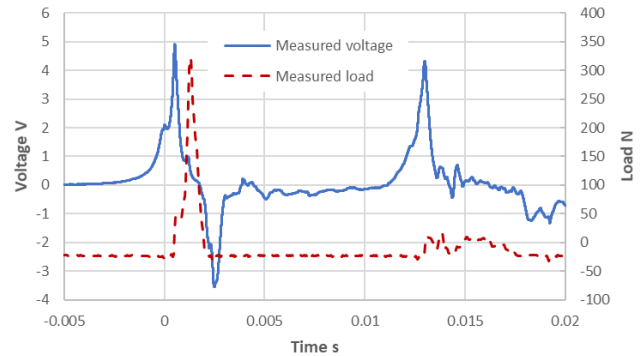


Fig.9 Time dependence of measured voltage and load of PVDF

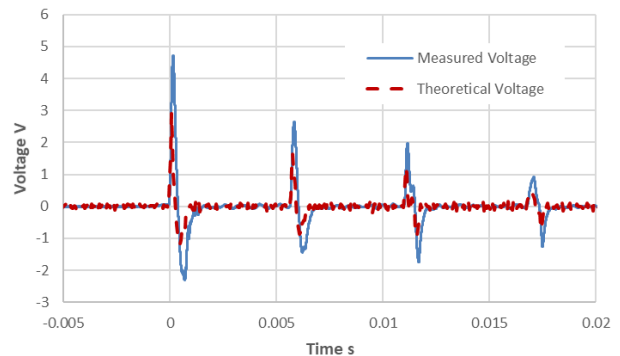


Fig.10 Comparison between experiment and theory on PZT

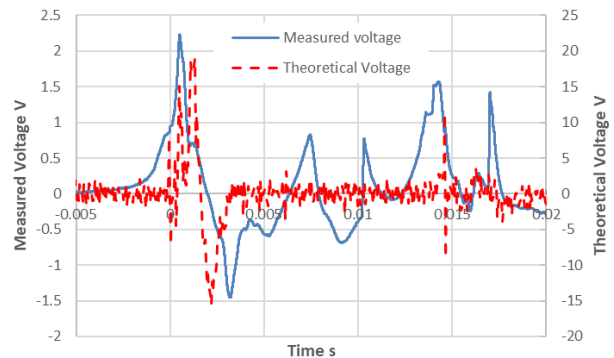


Fig.11 Comparison between experiment and theory on piezoelectric composite