

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14213

研究課題名(和文) 誘電エラストマーを用いた振動センサ機能付き発電デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of dielectric elastomer generator with vibration detecting function

研究代表者

栗本 宗明 (Kurimoto, Muneaki)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：70580546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、振動エネルギーを電気エネルギーに変換するエネルギーハーベスト技術として誘電エラストマーの応用を検討し、誘電エラストマーを用いた振動センサ機能付き発電デバイスを創出するために必要な発電回路および振動検出回路を構築した。さらに代表者がこれまでに構築してきた静電容量測定装置を組み合わせ、誘電エラストマーが伸張変形した時の静電容量変化を測定する装置を構築し、誘電エラストマーのコンポジット化による発電出力向上の指針を得た。

研究成果の概要(英文)：A dielectric elastomer generator (DEG) has attracted considerable interest as energy harvesting devices that convert mechanical energy into electrical energy. Moreover, the DEG is expected to be used as vibration-powered generators for sensor power sources since the stretchable deformation of dielectric elastomer (DE) brings high energy density and wide vibration frequency range. However, the vibration-powered generator requires an external sensor for detecting the vibration phase. Thus, we have developed a power generation circuit and a vibration detection circuit necessary for making a DEG with vibration sensor function. We also developed a device that measured the change in electrostatic capacity of the stretched DE, and obtained a guideline for improving a DEG output.

研究分野：工学

キーワード：誘電エラストマー 電気有効利用 エネルギーハーベスト

### 1. 研究開始当初の背景

さらなる高度情報化社会で膨大な数になるセンサに電池交換など行わず電気エネルギーを供給する方法として、振動エネルギーを電気エネルギーに変換するなどのエネルギーハーベスト技術が強く求められている。様々な振動位相からエネルギーを取り出す方法として、誘電エラストマーを用いた発電デバイスが有望である。しかしながら、この誘電エラストマーを用いて振動エネルギーを電気エネルギーに変換する場合には、振動位相を検出するための外付けセンサが必要となってしまう。これは誘電エラストマーデバイスの本来の軽量性・小型の特長を損なわせる原因となっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、振動エネルギーを電気エネルギーに変換するエネルギーハーベスト技術として誘電エラストマーの応用を検討し、誘電エラストマーを用いた振動センサ機能付き発電デバイスを創出するために必要な発電回路および振動検出回路を構築する。さらに代表者がこれまでに構築してきた静電容量測定装置を組み合わせ、誘電エラストマーが伸張変形した時の静電容量変化を測定する装置を構築し、発電出力向上の指針を得る。高度情報化社会で膨大な数になるセンサに電池交換など行わず電気エネルギーを供給する電源技術の開発を最終目標とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 発電回路の構築

これまでに代表者は、誘電エラストマーを用いて電気エネルギーを振動エネルギーに変換するアクチュエータ動作を実証した。誘電エラストマーを用いて振動エネルギーを電気エネルギーに変換する発電動作は、振動によって伸縮変形する誘電エラストマーの静電容量の変化から静電エネルギーを取り出すことであり、原理的に可能である。一方、伸縮変形時に誘電エラストマーの持つ電荷を逃がさないようにするため、振動位相に応じて適切に誘電エラストマーの充放電を切り替える必要がある。そこで本研究では、誘電エラストマーを用いて振動エネルギーを電気エネルギーに変換する発電回路を構築した。これにより、誘電エラストマーの発電出力を評価した。

#### (2) 振動検出回路の構築

誘電エラストマーを用いた発電デバイスを電源として用いる場合、外付けセンサを用いずに振動位相を検出し、誘電エラストマーの伸縮変形に合わせて自動で回路のスイッチングを行い、充放電を切り替える必要がある。そこで、発電動作中の誘電エラストマーの伸縮変形を検出するために誘電エラストマーの電圧を計測し、基準電圧を超えたときに所定の電圧まで誘電エラストマーが放電

する回路を構築した。これにより、誘電エラストマーの振動検出性能を評価した。

#### (3) 伸張変形時の静電容量測定装置の構築

代表者がこれまでに構築してきた静電容量測定装置に、振動によって伸張変形する誘電エラストマーの静電容量を測定する電極系を組み合わせ装置を構築した。静電容量の測定結果を解析し、数値的に計算される結果との比較を通して発電出力向上の指針を検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 発電回路と出力特性

図1に伸縮変形時の誘電エラストマーと構築した発電回路を示す。実験に用いた誘電エラストマーは、直径70mmの伸縮性電極を両面に塗布した厚さ0.50mmのアクリルエラストマーシートである。これを密閉容器に同図のように取り付け、容器に接続されたシリンジを用いて容器内部の圧力を変化させることでエラストマーを伸縮変形させた。発電回路は、抵抗と2つのスイッチング素子(SW1、SW2)、初期電荷を充電する電源から構成されており、表1のようにスイッチを切り替えて充放電タイミングを制御することにより発電を可能にした。

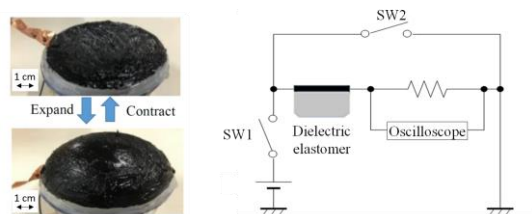


図1: 誘電エラストマー (左) と発電回路 (右)

表1: 充放電タイミング

|                    | Step0    | Step1  | Step2  | Step3  | Step4    | Step5    |
|--------------------|----------|--------|--------|--------|----------|----------|
| SW1                | OFF      | OFF    | ON     | OFF    | OFF      | OFF      |
| SW2                | OFF      | OFF    | OFF    | OFF    | OFF      | ON       |
| State of elastomer | Contract | Expand | Expand | Expand | Contract | Contract |

SW1、SW2 が開放されている状態(Step0)からシリンジで600mlの空気を容器内に注入することで加圧し、エラストマーを伸張させた(Step1)。次に、SW1のみ閉じ、エラストマーを充電した(Step2)。このとき、エラストマーと直列に接続された抵抗の電圧波形をオシロスコープで測定した。充電後、SW1を開放し(Step3)、容器内を減圧させエラストマーを縮めた(Step4)。減圧後、SW2を閉じ、放電時の抵抗の電圧波形を測定した(Step5)。

図2(左)にStep2とStep5における充放電の電圧波形を示す。充電波形の波高値14.4Vと比べて、放電波形の波高値は70.2Vに増加

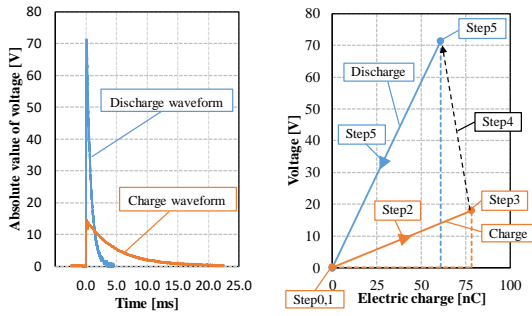


図 2: 電圧波形 (左) と電圧値と電荷量の関係 (右)

した。これは、Step4 でエラストマーが充電電荷を保持した状態で縮むことで、静電容量が低下し、電圧が増加したためである。

図 2(右)に充放電電圧と電荷量の関係を示す。充放電過程である Step2、Step5 ではエラストマーの静電容量は一定であるため、エラストマーの電圧と電荷量は比例の関係にある。Step2 で充電、Step5 で放電される全電荷量は図 2(左)の電圧波形の積分値を抵抗値で除すことで求められる。図 2(右)の実線と点線で囲まれた三角形の面積がエラストマーの持つ静電エネルギーである。赤線内の面積がエラストマーに入力した静電エネルギー、青線内の面積がエラストマーから出力する静電エネルギーであり、出力は入力  $3$  倍に増加した。このエネルギーの差が力学的エネルギーから変換した電気エネルギーであり、今回の実験では  $1.5 \mu\text{J}$  であった。

## (2) 振動検出回路の動作

図 3 に構築した振動検出回路を示す。本回路は、誘電エラストマーに初期電荷を充電する電源、放電出力用の抵抗、放電スイッチング用のトランジスタ、トランジスタスイッチング用のヒステリシスコンパレータ、から構成される。同図に示す抵抗の組み合わせにより、ヒステリシスコンパレータの Low から High への閾値を  $7 \text{ V}$ 、High から Low への閾値を  $2 \text{ V}$  に設定した。

誘電エラストマーを伸張して静電容量を  $4$  倍程度まで大きくした後に充電し、スイッチ開放後に誘電エラストマーを収縮させた際の誘電エラストマーの電圧 (A 点) とコンパレータ出力電圧 (B 点) を計測した。動作結果を図 4 に示す。最初 A 点の電圧は誘電エラストマーの充電電圧である  $2 \text{ V}$ 、B 点の電圧は Low である。誘電エラストマーが収縮し、静電容量が減少し始めると A 点の電圧が上昇していくことが確かめられる。A 点の電圧が  $7 \text{ V}$  を超えたことにより、コンパレータが切り替わり、B 点の電圧が上昇してトランジスタスイッチが ON となった。これにより、誘電エラストマーが放電して、A 点の電圧が低下した。その後、A 点の電圧が  $2 \text{ V}$  付近まで低下すると、コンパレータが再度切り替わり、B 点の電圧が低下してトランジスタスイッチが OFF となった。これにより、誘電エラストマーは開放状態に戻ったため A 点での

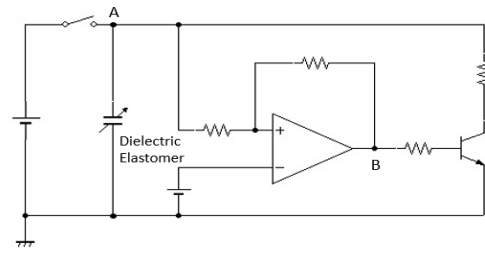
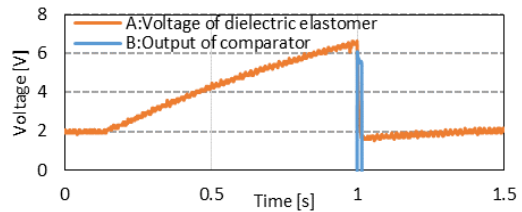
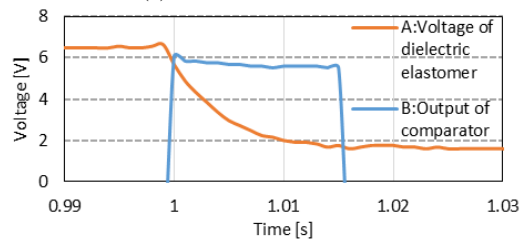


図 3: 振動検出回路



(a) A 点と B 点の電圧波形



(b) A 点と B 点の電圧波形 (コンパレータ出力拡大)

図 4: 誘電エラストマー電圧 (A) とコンパレータ出力 (B)

電圧低下が止まった。このように、オペアンプを用いた回路によって、誘電エラストマーの電荷を逃がすことなく、誘電エラストマーの変形を検出可能である。

## (3) 変形時の静電容量測定装置と発電出力向上の指針検討

図 5 に伸張変形したときの誘電エラストマーの静電容量変化を測定する装置を示す。これにより、伸張変形した誘電エラストマーの静電容量の変化を測定可能である。

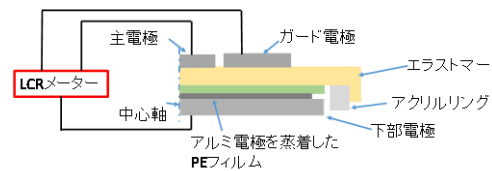


図 5: 誘電エラストマーの静電容量変化の測定装置

図 6(左)に測定結果である静電容量と試料厚さとの関係を示す。電極面積一定の静電容量は厚さに反比例し、測定値の変化率は厚さが  $0.5 \text{ mm}$  から  $0.1 \text{ mm}$  になる伸張変形において  $340 \%$  であった。また、厚さが変化しても比誘電率一定として計算した静電容量に比べて測定値は低い。この測定値から求めた比誘電率を図 6(右)に示す。比誘電率は厚さの減少とともに低くなるのがわかった。この原

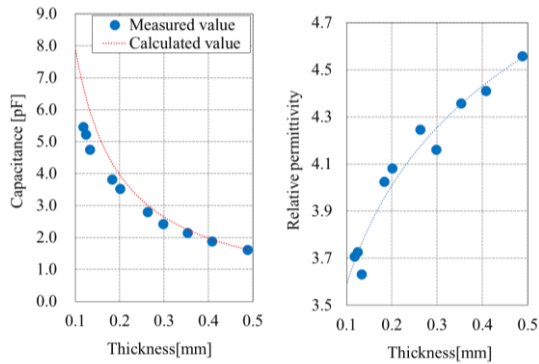


図 6: 変形時の静電容量(左)と比誘電率(右)

因として、伸張による電極直下のエラストマー試料の密度の低下や、エラストマー試料の分子の動きが制限されることなどが考えられる。

誘電エラストマーにおける発電出力  $U$  は以下の式で表される。

$$U = 1/2 C_2 V_1^2 (C_2/C_1 - 1)$$

$$C_n = \epsilon_0 \epsilon_r S_n / d_n \quad (n=1, 2)$$

$\epsilon_r$  はエラストマーの比誘電率、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $V_1$  は充電時の電圧、 $C_1$  は伸長前のエラストマーの静電容量、 $C_2$  は伸長後の静電容量である。同式からわかるように、誘電エラストマーの発電出力を決める要素の一つは、エラストマーの比誘電率である。しかし、前述のように伸張変形によるエラストマー分子の配向等がエラストマーの誘電率を変化させ、出力に影響を及ぼす可能性がある。伸張変形されてもエラストマーの比誘電率をより高く保つことが出力向上において有用であると考えられる。この実現可能性を検証するために、シリコンエラストマーに高誘電率ガラス粒子を 10 vol% 充填したエラストマーコンポジットを作製し、伸張変形時のエラストマーコンポジットの誘電率を実験的に評価した。

図 7 に、作製試料を 1 軸方向に伸張した時の誘電率と厚さの関係を示す。厚さを 0.50 mm から 0.30 mm の間で変化させた場合に

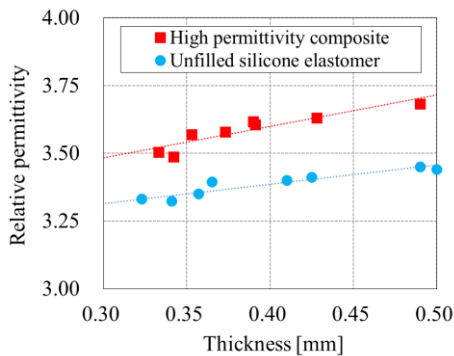


図 7 変形時におけるエラストマーコンポジットの誘電率

において、エラストマーコンポジットの比誘電率は無充填エラストマーより高いことがわかった。これは、ガラス粒子充填による高誘電率効果であると考えられる。また、エラストマーコンポジットの比誘電率は、伸張変形に伴う厚さの減少とともに低下するものの、無充填エラストマーよりも高く保たれることが確かめられた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件) \*全て査読有

- ① 栗本宗明, 尾崎裕哉, 澤田亨, 舟橋俊久, 加藤丈佳, 鈴置保雄: 誘導率傾斜材料の積層界面近傍における局所電界強調の有限要素解析, 電気学会論文誌 A, Vol.138, pp.104-112(2018)
- ② Muneaki Kurimoto, Yuu Yamashita, Takuma Yoshida, Takeyoshi Kato, Toshihisa Funabashi, Yasuo Suzuoki: Influence of Nanopore Diameter on Dielectric Permittivity of Epoxy/Open Nanoporous Silica Microcomposites, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, to be printed (2018)
- ③ Muneaki Kurimoto, Hiroya Ozaki, Tooru Sawada, Takeyoshi Kato, Toshihisa Funabashi, Yasuo Suzuoki: Filling Ratio Control of TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> in Epoxy Composites for Permittivity-Graded Insulator with Low Coefficient of Thermal Expansion Microcomposites, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, to be printed (2018)
- ④ Muneaki Kurimoto, Hiroya Ozaki, Tooru Sawada, Takeyoshi Kato, Toshihisa Funabashi, Yasuo Suzuoki: FEM Simulation of Local Field Enhancement Close to Lamination Interface of Permittivity-graded Material, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, to be printed (2018)

[学会発表] (計 12 件)

- ① Muneaki Kurimoto, Kento Naya, Takeyoshi Kato, Yasuo Suzuoki: Influence of Elastomer Material and Stretch Direction on Relative Permittivity of Stretched Dielectric Elastomer, IEEE International Conference on Dielectrics 2018, to be presented (2018.7)
- ② 納谷健斗, 栗本宗明, 舟橋俊久, 加藤丈佳, 鈴置保雄: TiO<sub>2</sub>/シリコンエラストマーコンポジットの一軸伸張時の誘電率特性, 平成 30 年電気学会全国大会, No.2-035, pp.40 (2018)
- ③ 澤田亨, 納谷健斗, 栗本宗明, 舟橋俊久, 加藤丈佳, 鈴置保雄: 発電動作中の誘電エラストマーの伸張変形検出回路の構築, 平成 30 年電気学会全国大会, Vol.2-016,

pp.17 (2018)

- ④ 納谷健斗, 栗本宗明, 舟橋俊久, 加藤丈佳, 鈴置保雄: 誘電エラストマーの伸長変形が比誘電率に与える影響, 誘電・絶縁材料研究会, DEI-18-050, pp.13-17 (2018)
- ⑤ Kento Naya, Muneaki Kurimoto, Toshihisa Funabashi, Takeyoshi Kato, Yasuo Suzuoki: Influence of Decrease in Thickness on Permittivity of Stretched Acrylic Elastomer, International Workshop on Green Energy System and Devices 2017, P-39 (2017)
- ⑥ Hiroya Ozaki, Muneaki Kurimoto, Tooru Sawada, Toshihisa Funabashi, Takeyoshi Kato, Yasuo Suzuoki: Evaluation of Relative Permittivity and Coefficient of Thermal Expansion of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Epoxy Composites for Permittivity graded Insulator, 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomenon, No.6B-12, pp.568-571 (2017)
- ⑦ Kento Naya, Muneaki Kurimoto, Toshihisa Funabashi, Takeyoshi Kato, Yasuo Suzuoki: Permittivity Characteristics of Dielectric Elastomer Materials Used for Energy Harvesting, International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017, No.1105 (2017)
- ⑧ 納谷健斗, 栗本宗明, 舟橋俊久, 加藤丈佳, 鈴置保雄: 高誘電率粒子を充填したシリコンエラストマーの伸張変形時の誘電率, 平成 29 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, No.19-A-a2-5, pp.20 (2017)
- ⑨ Kento Naya, Muneaki Kurimoto, Toshihisa Funabashi, Takeyoshi Kato, Yasuo Suzuoki: Influence of Decrease in Thickness on Permittivity of Stretched Acrylic Elastomer, 8th International Symposium on Electrical Insulating Materials, No.V2-05, pp.501-503 (2017)
- ⑩ 納谷健斗, 栗本宗明, 舟橋俊久, 加藤丈佳, 鈴置保雄: 誘電エラストマーによる力学的—電気エネルギー変換の出力評価に関する基礎的検討, 平成 29 年電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, No.L3-5 (2017)
- ⑪ 納谷健斗, 栗本宗明, 真鍋勇介, 舟橋俊久, 加藤丈佳, 鈴置保雄: 誘電エラストマーの伸張変形による厚さの減少が比誘電率に与える影響, 平成 29 年電気学会全国大会, No.2-048, pp.53 (2017)
- ⑫ 栗本宗明, 納谷健斗, 真鍋勇介, 舟橋俊久, 加藤丈佳, 鈴置保雄: 誘電エラストマーを用いたエネルギー変換に関する基礎的検討, 平成 28 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, No.5-A-a1-5 (2016)

[その他]

ホームページ等

[http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100006971\\_ja.html](http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100006971_ja.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

栗本 宗明 (Muneaki Kurimoto)

名古屋大学・工学研究科・

助教

研究者番号：70580546

### (4) 研究協力者

鈴置 保雄 (Yasuo Suzuoki)

愛知工業大学・工学部電気学科・

教授

研究者番号：10115587

加藤 丈佳 (Takeyoshi Kato)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・

教授

研究者番号：90283465