

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420196

研究課題名(和文) 圧電素子の積層化による振動発電装置の高出力化に関する研究

研究課題名(英文) Study on improvement of electric output of vibration power generator by laminating piezoelectric element

研究代表者

藤本 滋 (Fujimoto, Shigeru)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：80386888

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：PZT素子の振動発電特性を大幅に向上させるためにPZT素子の積層化を提案すると共に積層PZT素子の発電理論を構築した。この理論から最適積層数は11層であることを見出した。また、1, 3, 5, 7, 11層の積層PZT素子を試作すると共にこれらの発電特性を明らかにするために振動発電実験が行われた。その結果、積層PZT素子の発電特性は発電理論と良く一致しており、発電理論の妥当性が検証された。さらに高出力11層PZT素子を電源として温度センサーと無線送信モジュールの組み合わせた電子デバイスや加速度センサモジュールを駆動させる実験が行われた。その結果、これらの電子デバイスは正常に作動することが実証された。

研究成果の概要(英文)：In this study, it is proposed to laminate a piezoelectric lead zirconate titanate (PZT) element in order to greatly improve power generation characteristics of the PZT element, and the power generation theory of the laminated PZT element is derived. Optimal layer number deduced from the theoretical formula is 11 layers. In order to clarify the power generation characteristics of the laminated PZT elements using 1, 3, 5, 7 and 11 layers PZT elements, vibration power generation experiments are conducted. The experimental results are in good agreement with the theoretical values and the validity of the theory to vibration force of the laminated PZT elements was confirmed. Furthermore, experiments to drive the acceleration sensor module and the electronic device combining the temperature sensor and the radio transmission module using the 11-layer PZT element as a power source are performed. As a result of these experiments, it is confirmed that these electronic devices are normally driven.

研究分野：機械力学

キーワード：振動エネルギー変換 圧電素子 積層圧電素子 振動発電理論 エネルギーハーベスト 高出力発電素子 振動実験 PZT素子

### 1. 研究開始当初の背景

近年のエネルギー政策は、原子力発電の代わりに太陽光発電や風力発電の割合を高めているが、これらの発電方式は天候に大きく影響を受け、高コストであり環境破壊リスクが大きい。このため電源の分散化や省電力化の必要性が高まっている。このような大規模発電方式に対して、建物の照明、小電力電子機器、センサなどの独立電源として回生エネルギーを利用する自家発電方式が注目されつつある。回生エネルギーは、構造物の振動、車両振動、車両のブレーキ時などのこれまで無駄に消散されていた運動エネルギーを有効利用するもので、本来使用されるエネルギーの利用効率を高めることに繋がる。その中で、構造物や車両の振動など、本来有害な振動エネルギーを電気エネルギーに変換する振動発電の試みが多く行われるようになって来た。この振動発電のための手段として機械的エネルギー損失がなく発電効率の高いPZT素子(チタン酸ジルコン酸鉛)などの圧電素子が注目されている。しかしながら、市販の圧電素子のエネルギー変換効率は低く、発生電力自体も数十 $\mu$ W程度と非常に低いため、小電力電子機器への応用は困難であった。このため、前回の研究(課題番号22560232)では、PZT素子にNb(ニオブ)を1.0mol%添加することで、これまでの素子に比べ発電能力大幅に向上させたPZT素子を開発した。しかしながら、このNb添加のPZT素子でも一般的な機械設備の動荷重を作用させた範囲では、1mW弱の電力しか得られず、小電力電子機器の駆動には十分ではない。このため、振動発電のためのPZT素子のさらなる発電能力の向上が望まれていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、Nbを1.0mol%添加して発電出力特性を最適化したPZT素子を積層化することで発電能力を最大化し、これまでにない高いエネルギー変換効率を有する振動発電用素子を開発すると共にこの積層化PZT素子を電源として用いてセンサや送信モジュールなどの電子デバイスを駆動させることで、積層化PZT素子の有用性を実証することである。

### 3. 研究の方法

(1) 積層PZT素子の発電特性の定式化  
積層化されたPZT素子の発電特性を評価できる理論を構築するとともに、積層数の最適化の検討を行う。

(2) 積層PZT素子の試作及び発電特性把握  
1、3、5、7層の積層PZT素子を試作すると共に発電理論から導かれる最適積層数を持つ積層PZT素子を試作する。振動発電実験によりこれら素子の動荷重に対する発電特性を明らかにすると共に発電理論の検証を行う。

(3) 温度センサ・送信モジュール駆動実験

温度センサ、加速度センサモジュールなどを駆動するための電力制御回路の設計・試作を行うと共に動作確認を行う。さらに、積層PZT素子に動荷重を与え、発生させた電力を用いて、この電力制御回路を装着した温度センサと無線送信モジュールを駆動して温度データ送信が行えることを確認する。本研究では、動荷重として、振動台および小型コンプレッサの振動を利用した場合の2ケースについて実験を行う。

#### (4) 加速度センサ駆動実験

積層PZT素子に動荷重を与え、発生させた電力を用いて、電力制御回路を装着した加速度センサモジュールを駆動して、振動する機械の加速度が計測できることを確認する。

(5) アンプフリー型加速度センサへの応用  
本研究において最も高出力である11層積層型PZT素子を用いた加速度センサを試作し、振動計測実験を行う。これにより外部電源およびアンプが不要の加速度センサとしての適用性を評価する。

### 4. 研究成果

(1) 積層PZT素子の発電特性の定式化  
積層PZT素子の発電特性を電圧計で計測する場合の等価回路を用いて、周期荷重が作用する場合の積層PZT素子に発生する電圧および電力の評価式を導いた。これらの式より、積層PZT素子の発生電力はPZT素子の圧電定数、動荷重、積層数、振動数に比例し、積層PZT素子の静電容量と振動数の積にほぼ反比例することが明らかにされた。さらにこの式を用いて、本研究で試作したPZT素子を用いた場合の最大電力を得る積層数を試算すると、その積層数は11層であった。

(2) 積層PZT素子の試作及び発電特性把握  
積層PZT素子の発電特性を把握するため、1、3、5、7層の積層PZT素子および発電理論から導かれた本研究で用いられるPZT素子により最大電力を得る11層PZT素子を試作すると共に、振動発電実験を行った。図1に試作した積層PZT素子の構造を示す。積層PZT素子は各PZT素子が向かい合う面が同極となるように銅板の電極を挟んで積み重ねられており、各PZT素子は電気的に並列となる。積層PZT素子に軸方向に動荷重が作用すると、各層のPZT素子はこの動荷重に応じた電荷を放出するので、積層PZT素子は単層PZT素子の積層数倍の電荷を放出する効率の良い発電素子である。

これらの積層PZT素子の発電特性を把握するため、振動発電実験を行い、それぞれの素子の発生電圧を計測すると共に電力を算出した。実験結果として、図2に荷重400Nの場合の各積層PZT素子の発生電力と振動数との関係を示す。この結果より、PZT素子の発生電力は積層数が増えると増加すること、また、

11層 PZT 素子は単層 PZT 素子に比べ約 25 倍となることが確認された。11 層 PZT 素子は、動荷重 400N、振動数 30Hz の場合、発生電力は約 5mW 程度と大幅な発電性能向上が確認され、センサなどの小電力電子機器を作動させる能力を十分に持つことがわかった。発電理論の検証として、図 3 に 11 層 PZT 素子の発生電圧に関して振動発電実験結果と理論式による解析値との比較を示す。解析値は実験値に対して良く一致しており、発電理論の妥当性が確認された。

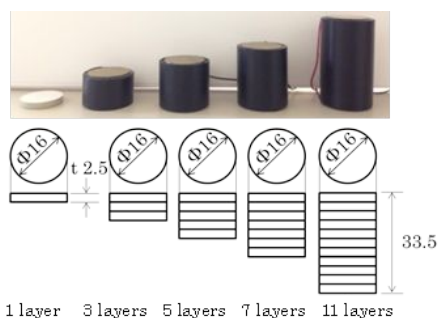


図 1 試作した積層 PZT 素子

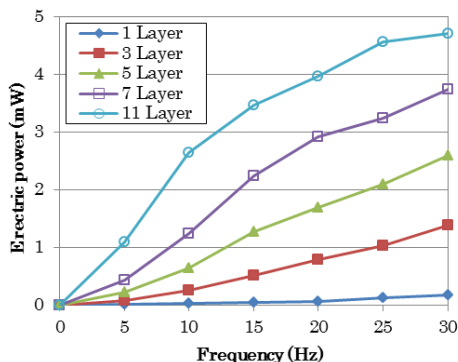


図 2 積層 PZT 素子の動荷重振動数と発生電力の関係 (動荷重 400N)

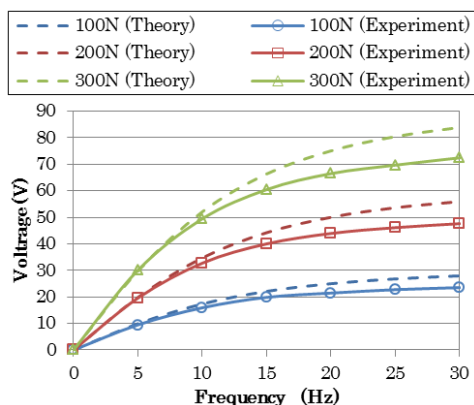


図 3 11 層 PZT 素子の発生電圧の実験結果と解析値の比較

(3) 温度センサ・送信モジュール駆動実験  
11 積層 PZT 素子に動荷重を与え、発生させた電力を用いて、この電力制御回路を接続した温度センサと無線送信モジュールを駆動して温度データ送信を行う実験を行った。電力制御回路は 11 層 PZT 素子で発生した動荷重による交流電圧を整流・定電圧回路で一定電

圧の直流に変換し、コンデンサで蓄電後にスイッチング回路により電子デバイスの駆動電圧以上で電源 ON にすることで温度センサ・送信モジュールを駆動するものである。次に、図 4 に小型コンプレッサ動作時の振動を 11 層 PZT 素子に与え、PZT 素子で発生した電気を利用して温度・送信モジュールを駆動する実験装置を示す。11 層 PZT 素子は、コンプレッサの脚部と床の間に挟み込まれている。この素子から発生した電気を電圧制御回路に接続し、温度センサにより計測された温度と蓄電用のコンデンサの電圧を送信モジュールにより 3 秒周期で無線送信した。このデータは約 2~20m 離れた場所にある受信装置により受信され、パソコンによりデータが表示された。図 5 に受信された温度、コンデンサ電圧の時刻歴を示す。コンプレッサ始動後、約 30 秒で温度データの送信を開始し、3 秒周期でこれらデータが正確に受信されていることがわかる。

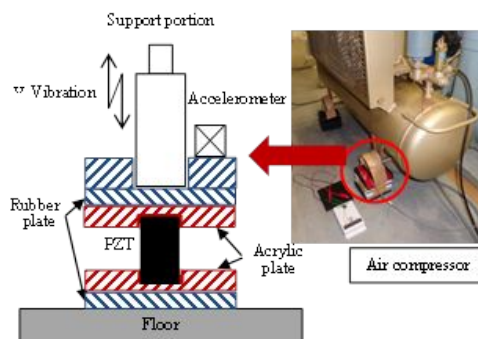


図 4 小型コンプレッサ振動を利用した積層 PZT 素子の発電による温度送信モジュール駆動

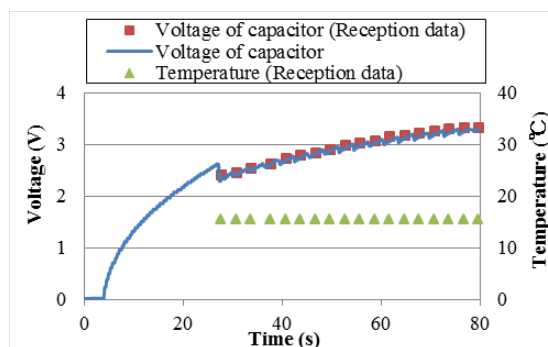


図 5 温度送信モジュールによる温度・コンデンサ電圧の送信結果

#### (4) 加速度センサモジュール駆動実験

振動発電実験装置を用いて 11 層 PZT 素子に加振動数 30 Hz、振動荷重 200 N の正弦波振動荷重を与え、加速度センサモジュールを駆動させる実験を行った。このセンサを駆動する電力制御回路は上記(3)で説明した回路を使用した。この実験では、正弦波振動させた起振器を計測対象として加速度センサモジュールによる加速度計測を行った。さらに、起振機には加速度センサ動作確認のためにひずみ型加速度計を設置・計測した。図 6 に

起振器の振動数を 20 Hz, 電力制御回路の蓄電用コンデンサ  $C$  を 10000  $\mu\text{F}$  とした時の加速度センサモジュールの出力電圧とコンデンサ  $C$  の電圧の時刻歴を示す。また、図 7 に図 6 の結果から得られる加速度センサモジュールの加速度とひずみ型加速度計の加速度の時刻歴を示す。本実験の場合、11 層 PZT 素子から得られた電力で 216 秒間の充電後に、加速度センサモジュールを 11.1 秒周期で 2.58 秒間駆動させることができた。図 7 から加速度センサとひずみ型加速度計の加速度波形はほぼ一致しており、加速度センサモジュールが正常に駆動し正確な計測ができていることが確認された。

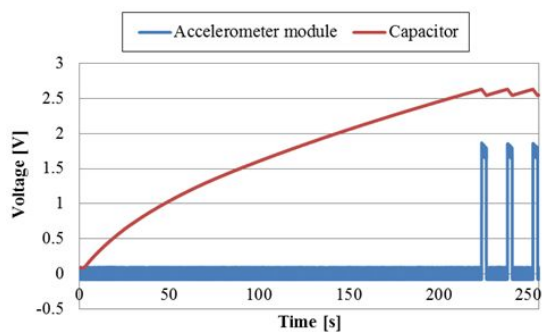


図 6 加速度センサモジュールの出力電圧およびコンデンサ電圧時刻歴

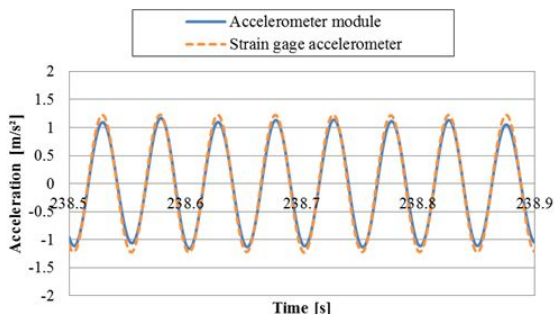


図 7 加速度センサモジュールおよびひずみ型加速度計による計測加速度時刻歴の比較

(5) アンプフリー型加速度センサへの応用  
本研究において最も高出力である 11 層積層型 PZT 素子を用いて、センサアンプ(計測電圧増幅装置)不要の加速度センサを試作し、振動実験を行うことにより、その加速度計測感度について市販のひずみ型加速度計および圧電型加速度計との比較を行った。

図 8 に 11 層 PZT 素子、錘(3.31kg)、これらを挟み固定する固定装置からなる加速度センサを示す。この加速度センサを振動台に設置し、振動実験を行った。この実験では、11 層 PZT 素子が錘の慣性力により発生する電圧および市販のアンプを組み込んだ 20G ひずみ型加速度計、アンプ無し of 圧電型加速度計の出力電圧を計測した。図 9 に 11 層 PZT 素子、20G ひずみ型加速度計、圧電型加速度計の出力電圧を加速度で除した加速度電圧感度の周波数特性を示す。

この実験の結果、11 層 PZT 素子の加速度電圧感度は、アンプを組み込んだ 20G 歪み型加速度計とはほぼ同等であること、および圧電型加速度計の出力電圧より遙かに高い加速度電圧感度を有していることが確認された。この結果は、11 層 PZT 素子と錘を組み合わせた加速度センサは、加速度に対して高出力の電圧を発生させることができ、外部電源やアンプを用いずとも高感度で加速度を計測できることを示している。

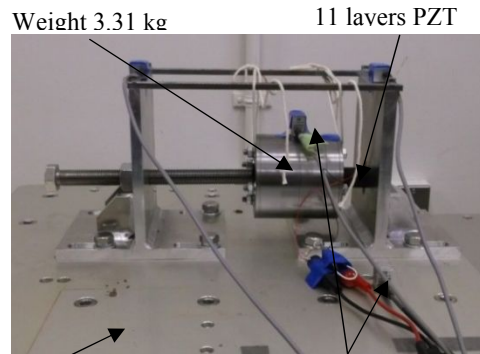


図 8 試作した 11 層 PZT 素子を用いた加速度センサの構造

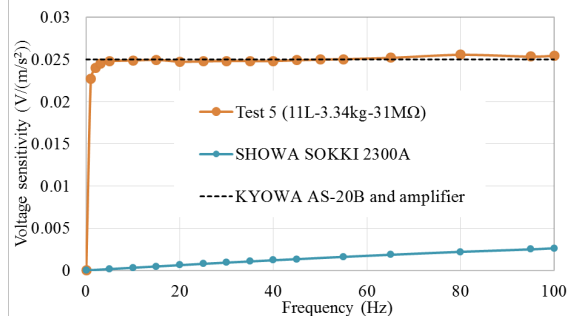


図 9 試作した加速度センサ、ひずみ型加速度計、市販圧電型加速度計の周波数特性

## (6) 結論

以下に研究成果を述べる。

積層化された PZT 素子の発電特性を評価できる理論を構築すると共に、この理論より本研究で試作した PZT 素子を用いた場合には最大出力を得る積層数は 11 層であることを見出した。

1 層、3、5、7 層及び発電理論から算出された最適積層数を持つ 11 層の積層 PZT 素子を試作すると共に振動発電実験により積層 PZT 素子の動荷重に対する発電特性を明らかにした。また、理論より導かれた最適積層数である 11 層 PZT 素子の発電特性は試作された作成 PZT 素子の中で最大の電力を発生し、小電力電子機器の駆動には十分な電力を得ることが確認された。さらに、各積層 PZT 素子から得られる電力について理論値と実験結果は良く一致し、発電理論の妥当性が検証された。

最も高出力の 11 層 PZT 素子を電源として



温度センサ・送信モジュールを駆動する実験を行った。この実験では、11層 PZT 素子に電力を発生させる動荷重として小型コンプレッサの振動を利用した。実験の結果、計測された温度および 11 層 PZT 素子から供給された電荷を蓄電するコンデンサの電圧を 3 秒毎に最大約 20m の距離まで送受信できることを確認した。

11 層 PZT 素子を電源としてより消費電力の大きい加速度センサモジュールを駆動する実験を行った。11 層 PZT 素子は、11 秒周期で約 3 秒間の加速度を計測する電力を供給できることが確認された。

11 層 PZT 素子と錘を組み合わせた加速度センサを試作し、振動台振動時の加速度計測実験を行った。この結果、加速度に対する電圧感度は市販のアンプを用いた加速度計の電圧感度とほぼ同等であることが確認され、試作した加速度センサは外部電源やアンプが不要のセンサとして適用が可能であることが実証された。

以上の研究より、PZT 素子を積層することで発電能力を大幅に向上できること、また、提案の発電理論から積層数を最適化した高出力 PZT 素子を設計できることが実証された。さらに、開発した発電素子を用いることにより外部電源や信号ケーブルを不要とする温度、加速度などを計測できる構造物モニタリングシステムの構築が可能であることを実証することができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

藤本滋, 今井健嗣, 一木正聡; 圧電素子を用いた振動発電手法に関する研究(第 2 報, 圧電素子の積層化による発電特性の向上), 日本設計工学会誌, 査読有, Vol.51, No.7, 2016-7, p497-p508. DOI : 10.1493/jjsde.2015.2663.

〔学会発表〕(計 9 件)

梅崎俊吾, 藤本滋; エアコンプレッサの振動を利用した振動発電による温度モニタリングシステムの駆動試験, 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2016, USB 講演論文集 (No.16-15), 2016-8, p1-p6, 山口大学 (山口県・宇部市)。

今井健嗣, 藤本滋; 積層圧電素子の振動発電による加速度センサの駆動, 電気学会 (センサマイクロマシン部門), 第 32 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, Web 講演論文集, 2015-10, p1-p6, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市)。

坂倉宏治, 藤本滋; 積層 piezo 素子を用いた加速度センサに関する研究 (ランダム波の再現性の評価), 電気学会 (センサマイクロマシン部門), 第 32 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, Web 講演論文集, 2015-10, p1-p6, 朱鷺メッセ (新

潟県・新潟市)。

今井健嗣, 藤本滋; 振動発電素子を用いた温度送信装置の駆動, 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2015, USB 講演論文集 (No.15-7), 2015-8, p1-p6, 弘前大学 (青森県・弘前市)。

坂倉宏治, 藤本滋; 積層 piezo 素子を用いた加速度センサの開発に関する研究 (計測電圧の高出力化) 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2015, USB 講演論文集 (No.15-7), 2015-8, p1-p6, 弘前大学 (青森県・弘前市)。

T. Imai, S. Fujimoto, M. Ichiki; Self power generating piezoelectric elements applied to swiching Circuits, The 14th International conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications /PowerMEMS2014, J. Phys.: Conf. Ser. 557 (2014) 012100, 2014-11, p1-p5, 淡路夢舞台国際会議場 (兵庫県・淡路市)。

今井健嗣, 藤本滋, 一木正聡, 北原時雄; 積層圧電素子による発電特性の高出力化, 電気学会 (センサマイクロマシン部門), 第 31 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, Web 講演論文集, 2014-10, p1-p6, くにびきメッセ (島根県・松江市)。

坂倉宏治, 藤本滋, 一木正聡, 北原時雄; 積層 piezo 素子を用いた加速度センサの特性評価, 電気学会 (センサマイクロマシン部門), 第 31 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, Web 講演論文集, 2014-10, p1-p6, くにびきメッセ (島根県・松江市)。

藤本滋, 山岸昇平, 一木正聡, 北原時雄; 構造物振動を利用した発電手法に関する研究 (積層圧電素子の等価回路モデルを用いた発電特性評価), 日本機械学会 第 13 回「運動と振動の制御シンポジウム」MOVIC2013, USB 講演論文集 (No.13-18), 2013-8, p1-p6, 九州産業大学 (福岡県・福岡市)。

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 滋 (FUJIMOTO, Shigeru)  
神奈川大学・工学部・教授  
研究者番号: 8 0 3 8 6 8 8 8

(2) 研究分担者

一木 正聡 (ICHKI, Masaaki)  
独立行政法人産業技術総合研究所・集積マイクロマシン研究センター・研究チーム長  
研究者番号: 0 0 2 6 7 3 9 5