

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03945

研究課題名（和文）フレクソエレクトリック効果を用いた新しい複合振動発電素子の研究

研究課題名（英文）A novel energy harvester using combination vibration using flexoelectric effect

研究代表者

辺見 信彦（Henmi, Nobuhiko）

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：80256669

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、圧電効果とフレクソエレクトリック効果を併用して、PZTの角柱素子を発電素子として用い、ねじりと曲げの複合変形による特性を詳細に調査した。ねじりによる発電素子内部のひずみ分布を求めるための厳密解はないため、FEMシミュレーションにより評価した。また複合変形を実現するための装置を製作し実験により基礎特性を調査した。その結果、高効率な振動発電のための発電素子を開発するための知見を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、固体材料のフレクソエレクトリック効果に対する基礎的な研究はあるものの実用レベルでの利用が難しかったが、本研究の成果により、曲げとねじりの複合変形を使用して、圧電効果とフレクソエレクトリック効果を組み合わせることで、高効率な発電素子を実現できる可能性が示され、振動を利用した環境発電の分野に貢献する知見が得られた。IoT分野の発展にもつながるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a quadrangular prism PZT element is used as an energy harvester. The combination of the flexoelectric effect and piezoelectric effect are used. Single and combination of bending and/or torsion deformation are applied to the element. Fundamental characteristics are investigated and knowledge for designing efficient energy harvester element are clarified.

研究分野：精密工学

キーワード：フレクソエレクトリック効果 圧電効果 振動発電 複合変形

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

振動発電は環境振動を利用するため、もともとの入力加振力が小さいことに加え、設置や応用の状況に応じて並進と回転で構成される複数の態様に振動する。振動素子の発電量が大きな素子が求められているだけでなく、複数態様の振動に対応できる機能を有する素子が強く望まれている。IoT化が進む中で、状態監視のための観測センサの電源として様々な原理によるエネルギーハーベスタ素子が利用されているが、いずれの場合も発電量はまだまだ小さく、短時間の環境振動で多様な計測と多くの情報を信号送信するには、高性能な発電素子が求められている。

PZT セラミクスは圧電材料として工業的に様々な分野で応用されている。圧電効果を利用した応用としてはセンサや発電素子があるが、その電気分極発生効率を上げ、より小型少数で感度やパワーを高めることは、高性能化のみならず材料の節約等による環境配慮の観点からも重要なことである。圧電効果がひずみに比例して現れる電気分極現象であるのに対して、フレクソエレクトリック効果はひずみ勾配に比例して発生する電気分極現象である。フレクソエレクトリック効果はひずみ勾配によって発生する電気分極であるため、ひずみ勾配を形成しやすい液晶を対象にした研究が主体であり、国際的にも日本国内でも比較的盛んに研究がなされている。しかしながら固体材料の場合にはひずみ勾配の形成が液晶ほど容易ではないため、国際的にはロシアやアメリカを中心に比較的多くの研究や調査が行われているものの、日本国内では研究例が極めて少ない状況にある。環境発電素子開発の研究の中では、圧電効果を利用した素子は研究例と実用例はあるが、フレクソエレクトリック効果を利用した研究例は少ない。特に発電素子に関しては、実用レベルのものがなく、本研究で挑戦するような高効率の発電素子の開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ねじりと曲げの同時変形による圧電分極とフレクソエレクトリック分極の組み合わせにより、総合的電気分極量が単一変形に対する分極の総和よりもかなり大きくなることの実を検証し、PZT セラミクスを用いて変形態様に応じた電気分極発生の特徴的な特性を明らかにし、複合変形を利用して従来にない高効率のエネルギーハーベスタ素子を設計・実現するための知見を明らかにすることである。

3. 研究の方法

ねじりと微小曲げの複合変形による PZT 材料内部に発生するひずみ量とひずみ勾配は、厳密解が得られるわけではない。そのためまずは FEM による近似的な計算シミュレーションにより、ねじりなどにより発電素子内部に発生するひずみ量およびひずみ勾配量を評価する。次に単純な素子構造に対して曲げとねじりそれぞれを独立に駆動できる実験装置を製作し、まずは単一変形状態での発生分極量を個別に調査する。次にそれらの複合変形に対する基礎特性を評価し、各変形様態の割合によってどのように特性が変化するかを調査する。また加振周波数の違いによる発電特性も調査する。また軸方向荷重の効果について検討するため、ねじりと曲げに加えて新たに圧縮方向の変形を加えることができるように装置を改良し、軸方向圧縮荷重に対する発電感度への影響を調査する。その上で複合振動に対する応答を詳細に調査し、実用化に向けた課題を明らかにする。

4. 研究成果

(1)シミュレーションによるひずみ量とひずみ勾配の評価

フレクソエレクトリック効果を検討するためには、素子の変形に対するひずみ勾配を知る必要がある。図1は使用した角柱形状の発電素子の断面を表しており、図中の青い矢印で示した分極処理方向に対して、素子の表面に図の様に ABCD の電極を設けてある。図2と図3はねじり変形に対するそれぞれ BC 方向と DC 方向のせん断ひずみ分布の FEM 解析結果である。両図とも電極のちょうど中央部を結んだ直線に沿った方向のひずみの大きさを表している。BC 方向と DC 方向ともせん断ひずみ ϵ_{xz} が主体的なひずみ勾配を有することがわかる。DC 間には ϵ_{yz} がバイアスを持つことがわかるが、この方向のせん断変形は理論上圧電効果が発生しない方向であり、かつひずみ勾配としては電極間方向に沿

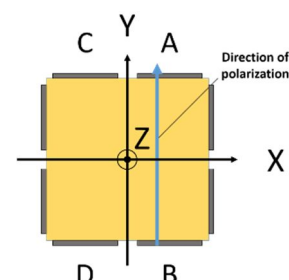


図1 発電素子の断面

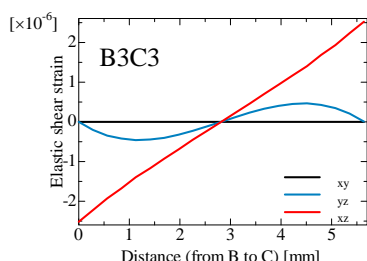


図2 BC電極間のせん断ひずみ

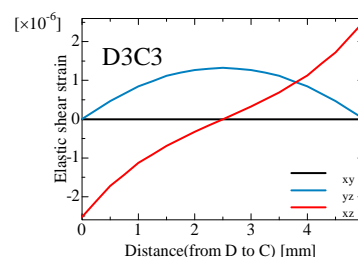


図3 DC電極間のせん断ひずみ

て中央で正負に対照的に変化しているため y_z に対するフレクソエレクトリック効果も結果的に相殺される。そのため x_z のひずみ勾配のみを考えればよいことが明らかになった。一方、曲げによる変形は、平行面間に一定勾配となるようなひずみ分布となるため、ねじりも曲げも単一の変形に対してはフレクソエレクトリック効果のみが主体的に現れるが、ねじりと曲げが同時に加わる複合変形の場合は中立面での相殺作用がなくなり、圧電効果とフレクソエレクトリック効果の両方が現れることになり、各単一で変形した時に比較してより大きな電気分極が得られることになることがわかった。

(2) 実験による発電特性の調査

図 4 は発電素子に曲げとねじりを独立して与えるために設計製作した実験装置の概略である。図の黄色い部分が発電素子であり、緑色の部分が変形を与えるための積層型圧電アクチュエータである。2本のアクチュエータで曲げとねじりの変形を発電素子に与えることができる。発電素子の角柱の上端を固定し、下端に設置した可動チャックを積層型アクチュエータで押す構造となっている。可動チャックに設置した測定板の変位をレーザ変位センサで計測し、曲げとねじりの変形をフィードバック制御している。図 5 から図 7 は、それぞれねじり単一、曲げ単一およびねじりと曲げの複合で正弦波状に発電素子を変形した場合の応答特性の一例である。グラフの赤がねじ角、青が曲げ変位、黒が発電素子出力電圧を示している。このような結果の素子出力全振幅値を単一変形と複合変形と比較してまとめたグラフが図 8 である。複合変形に対する出力振幅が平均 5.4V 程度で、単一変形に対する出力振幅が平均 0.6V 程度であり、複合変形の方が格段に発電出力は大きいことが明らかとなった。

図 9 と図 10 は正弦駆動の周波数を変えた場合の曲げとねじりの変化に対する出力のである。これらの結果から発電出力の周波数依存性が非常に低いことがわかる。この結果、発電素子の設計は環境振動の主たる加振振動がわかっている場合は、発電素子の曲げとねじりの両者の振動モードに対する固有振動数を主たる加振振動数にできるだけ一致させるように設計すればよいことが明らかとなった。

さらに図 4 の実験装置を、発電素子の下方から別途積層型圧電アクチュエータで上方向に荷重を加えられるように改良し、ねじりと圧縮の複合変形に対する発電特性を調査した。その結果、圧縮荷重を変化させても発電特性にはあまり影響を与えないことがわかり、発電の効率化にはねじりと曲げの複合が重要であることを明らかにした。

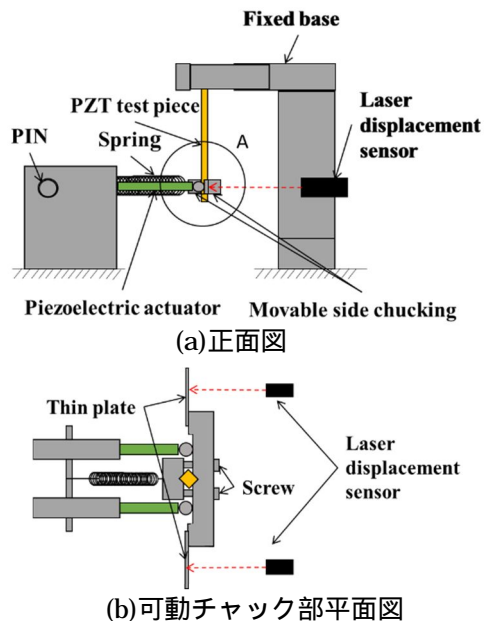


図 4 実験装置概

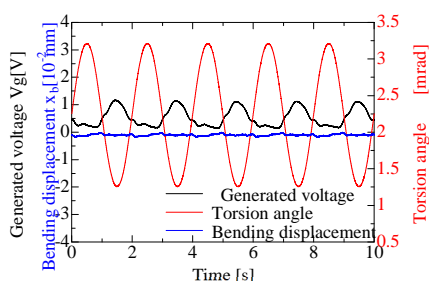


図 5 ねじり単一変形時の出力

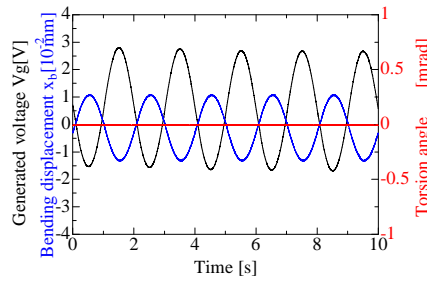


図 6 曲げ単一変形時の出力

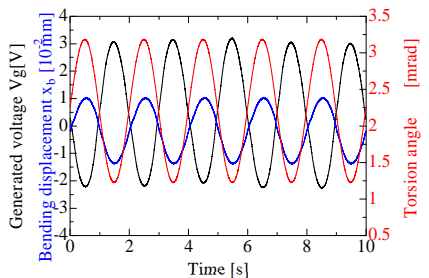


図 7 複合変形時の出力

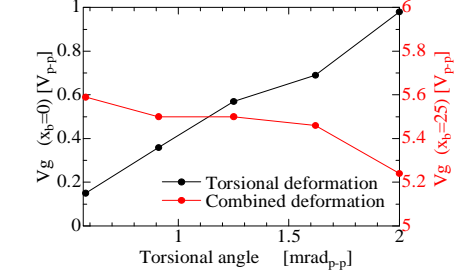


図 8 単一と複合の出力の比較

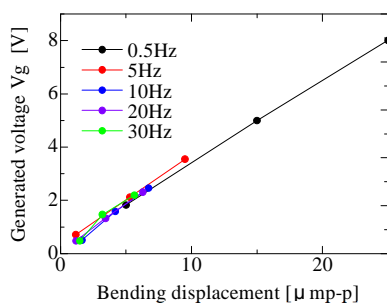


図 9 曲げに対する周波数特性

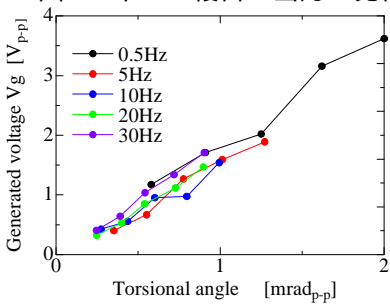


図 10 ねじりに対する周波数特性

<引用文献>

M.S.Majdoub, P.Sharma and T.Cagin:Dramatic enhancement in energy harvesting for a narrow range of dimensions in piezoelectric nanostructures, Physical Review B78, 2008,121407(R)

R.B.Meyer:Piezoelectric Effects in liquid crystals, Physical Review Letters, 22, 18, 1969, 918-921

P.V.Yudin and A.K.Tagantsev:Fundamentals of flexoelectricity in solids, Nanotechnology, 24, 2013, 432001

N.Henmi and M.Tohyama:Measurement of Flexoelectric Effect in Lead Zirconate Titanate Ceramics, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing,5,1, 2011, 1-6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岩本有由, 塚原愛稀, 辺見信彦
2. 発表標題 PZTの曲げとねじりの単一・複合変形に対する圧電及びフレクソエレクトリック効果の研究
3. 学会等名 2023年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------