

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06258

研究課題名(和文)ねじりフレクソエレクトリック効果の特性解明と新しい角加速度センサの開発

研究課題名(英文) Investigation of flexoelectric effect for torsional deformation and new rotational acceleration sensor

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：PZT角柱のねじりによるフレクソエレクトリック効果について調査した。試験片両端を把持するチャッキング間のアライメント誤差を30 $\mu$ m以下に抑えた実験装置を製作し、ねじりにより角柱側面に4つ設けた各電極間に発生する電気分極量を詳細に計測した。FEMによりねじり角に対するひずみ勾配量を算出し、それによりフレクソエレクトリック係数を評価した。一連の実験を通じた偶然的発見により曲げとねじりとの複合変形によって単一変形状態よりも大きな分極が得られることが明らかになった。また角加速度センサに応用する場合にはバイアスを設ける方が良いという実用的性質を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体材料のフレクソエレクトリック効果については、日本ではほとんど研究されていなかったが、近年の研究により大きな分極量が得られる可能性がわかってきた。本研究の成果もせん断ひずみ勾配に対するフレクソエレクトリック係数の定量的結果を得ており、この学術分野に新しいデータ事例として貢献することができた。特に、ねじりと曲げの複合により大きな分極が得られることを発見し、新しい振動センサとしての応用が期待される。従来は角加速度を直接計測できるセンサがなかったので、本成果により自動車や航空宇宙システムのような回転振動を計測・制御する分野での応用展開の可能性を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：The flexoelectric effect due to the torsion of PZT prism was investigated. An experimental device was manufactured in which the alignment error between chucking gripping both ends of the test piece was suppressed to 0.03mm or less, and the amount of electrical polarization generated between each of the four electrodes provided on the side surface of the prism by twisting was examined. The flexoelectric coefficient was evaluated by calculating the amount of strain gradient for the torsion angle by FEM. An accidental discovery through a series of experiments revealed that the combined deformation of bending and torsion yields a larger polarization than the single deformation state. It was also found that a torque bias should be applied for the application of an angular acceleration sensor.

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 ねじりせん断ひずみ 角加速度センサ PZT

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

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があるが、その圧電効率を上げ、より小型少数で感度やパワーを高めることは、性能や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外力に対する圧電材料の分極効率の向上を考える上で、圧電効果とともに利用できる可能性がある。PZT やチタン酸バリウムをナノメートルレベルまで微小な構造にすると、その寸法効果によって圧電効果に加えてフレクソエレクトリック効果の影響が増大し、電荷の発生効率が格段に上がる可能性がある。通常の固体圧電材料では大きなひずみ勾配が現れる変形形態が少ないことと、圧電効果による分極の方が一般には大きいため、固体材料に関してはこれまではあまり着目されてこなかった。しかし何名かの研究者らの努力によって、現象の発見当初に予想されていたよりもはるかに大きな電気分極が得られる可能性があることが、ごく最近になって分かってきた。これまでに分極処理を施した PZT の方が分極処理しない PZT よりも 5~20 倍程度になることを明らかにした。さらに四角柱形状の PZT をねじった際に、大きな電気分極を発生することが追加実験により分かってきた。このことは、ねじり負荷を利用したトルクセンサあるいは角加速度センサなどに応用し実用化できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

本研究の最終的な目標はフレクソエレクトリック効果を用いた新しい角加速度センサの実用化である。その目標に向けた本課題の申請時における当初の研究目的は、大別すると2点ある。(a)ねじりによるフレクソエレクトリック現象の実験的解明と、(b)角加速度センサの実用化に向けた課題の明確化の2点である。

### 3. 研究の方法

ねじりによるフレクソエレクトリック現象の実験的解明については、まずねじりにより PZT 材料内部に発生するひずみ量とひずみ勾配は、曲げにより発生するひずみおよびひずみ勾配と異なり、厳密解が得られるわけではない。そのため FEM 解析などの近似的な計算手法によりその値を見積もるしかない。計算精度を高めるため電極面間全域に渡ったひずみ勾配分布を FEM 解析した。予備実験で製作したねじり実験装置は試験片のねじり回転を支持する軸受のクリアランスがやや大きく、また試験片保持チャック間のアライメント誤差が大きい。そこで高精度な実験装置を設計、製作した。試験片 PZT へ塗布する電極の位置には8つの候補を考え、どの位置に電極を設けるのが、センサ素子として効率的かつ実用的かを検討した。角加速度センサの試作による実用に向けた課題の明確化については、実験により新たな事実が判明したため、装置の改造、改良を進め、学術的に新しい事実を調査しつつ、さらに角加速度センサの実用化を念頭に置いて、センサ構成方法に関する重要事項について調査し、実用化に向けた課題と問題点を明らかにするための実験的検討を実施した。

### 4. 研究成果

#### (1)角柱のねじり変形時のせん断ひずみ勾配に対するフレクソエレクトリック効果

まず最初に角柱のねじった際の側面間に生じるひずみ勾配によって発生するフレクソエレクトリック効果による電気分極量が計測された事例が世界的にはほとんど発表された例がないため、その現象について詳細に調査した。

PZT の角柱試験片をねじりながら分極量を計測するための装置は設計と改良を重ねながら、最終的には図1のような構成とした。図は装置構成全体を上から見た図であり、左側が試験片であり、試験片の両端をチャックで把持して、一方のチャックが二つの軸受で支持された軸に固定されていて、その軸をモータでねじる構成になっている。可動チャックから回転軸の半径方向に飛び出させた棒の先端の動きを二つのレーザー変位計で計測してねじり角を測っている。

本研究で使用する試験片は断面  $5 \times 5 \text{mm}$ 、長さ  $120 \text{mm}$  の角柱形状の PZT 棒である。材料は株式会社富士セラミックス製汎用ソフト(C-6)材である。試験片には長さ  $2 \times 60 \text{mm}$  の電極がそれぞれの側面に2ヶ所、計8ヶ所塗布されている。図2は試験片の断面を示しており、青い矢印が分極処理方向で、電極 A から D の4ヶ所の間で、分極処理方向に沿った方向の発生分極を主に調査し

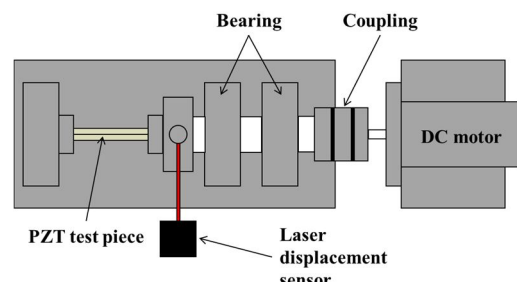


図1 実験装置全景

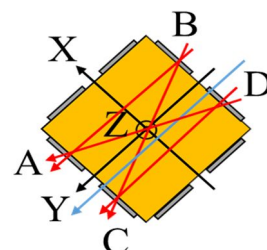


図2 PZT 試験片断面の分極処理方向と電極の位置

た。

図3は電極BC間に発生したフレクソエレクトリック分極電圧の一例である。振幅 1mrad のねじりに対して、約 1V の振幅で電圧が発生している。ねじり角を変化させ、電極間に発生するひずみ勾配に対して、対応する電極間に発生する電気分極量を調査し取りまとめたのが図4の結果である。このグラフの傾きがフレクソエレクトリック係数となる。このことから PZT のねじりによるフレクソエレクトリック係数は、電極間の違いによらず約 300mC/m となった。さらにねじり正弦波の周波数を変化させ、フレクソエレクトリック効果の周波数特性についても調査した。装置の固有振動数が 40Hz 程度であったため、それ以下の振動数での調査であったが、最終的に周波数依存性はないことが確認できた。この結果は角加速度センサに応用した場合に望ましいものとなった。

### (2)ねじりと曲げのコンビネーションによる高出力特性

ねじり試験装置を製作した前半段階では非常に大きな分極量が得られていた。さらにねじり駆動周波数を挙げていくと非線形的に分極量が増大するといった強い周波数依存性が観察されていた。検討項目を増やし、装置の改造を繰り返すうちに、回転側のチャックの位置決めピンと固定壁との間に設計値にはなかった接触が発生し、ねじりとともに曲げトルクが加わりながら変形していることがわかった。この設計外の接触は意図しないものであったが、このことから、ねじりと曲げの両方の作用が加わることにより非常に大きな電気分極が得られるという事実が偶然に明らかになった。図5はねじりと曲げが同時に加わる状態で変形させたときの電極 AB 間に発生した電気分極出力電圧の結果の一例である。図3の結果と比較すると、入力ねじり角振幅が 0.04mrad 程度であるにもかかわらず、出力電圧が 0.25V 程度ある。電極の組み合わせの全パターンを比較した結果、ねじりのみの変形によるフレクソエレクトリック分極に比較して、ねじりと曲げのコンビネーションを利用すると、10倍から20倍程度の分極量が得られることが分かる。これにより、フレクソエレクトリック効果を利用したセンサ応用の際には、利用する変形形態をねじりせん断と曲げとねじりの複合変形にするほうが高感度化できることが明らかになった。このねじりと曲げのコンビネーションは、前者がフレクソエレクトリック効果による電気分極を誘起し、後者が圧電効果を誘起したものと考えられ、それぞれ単一の効果で誘起するよりも高い電気分極量が得られており、学術的に新しい現象である可能性が高い。今後さらに詳細に調査する予定である。

### (3)ねじり角 0 付近の特性とセンサ応用におけるバイアス角の必要性

モータを利用した正負のねじり角を入力として与えられる装置を製作し、ねじり方向による出力特性とねじり角 0 付近の分極特性を詳細に調査した。図6はねじり角 0 付近で正負の回転角に素子を正弦波状にねじり変形させた際のフレクソエレクトリック分極による出力電圧である。この図の結果より、圧電効果と異なり、ねじり角の正負によらず絶対値に依存した大きさの出力が得られることがわかる。この点は学術的に興味深い事実である。さらにねじり角 0 付近で出力変化の傾斜が 0 になっており、ねじり角の絶対値が大きいほど出力電圧の傾斜が大きくなる。このことは角加速度センサなどに応用した際には、ねじりバイア

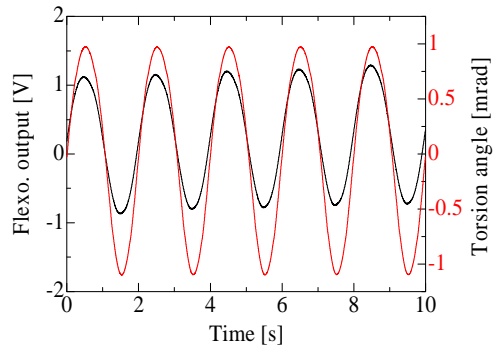


図3 フレクソエレクトリック分極出力の例

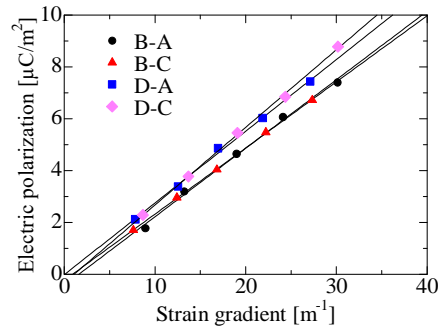


図4 ひずみ勾配に対するフレクソエレクトリック分極出力の例

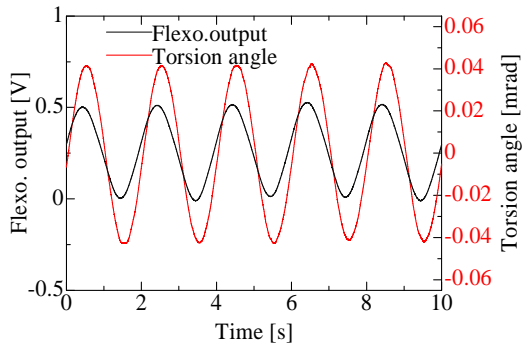


図5 ねじりと曲げによる電気分極出力

10倍から20倍程度の分極量が得られることが分かる。これにより、フレクソエレクトリック効果を利用したセンサ応用の際には、利用する変形形態をねじりせん断と曲げとねじりの複合変形にするほうが高感度化できることが明らかになった。このねじりと曲げのコンビネーションは、前者がフレクソエレクトリック効果による電気分極を誘起し、後者が圧電効果を誘起したものと考えられ、それぞれ単一の効果で誘起するよりも高い電気分極量が得られており、学術的に新しい現象である可能性が高い。今後さらに詳細に調査する予定である。

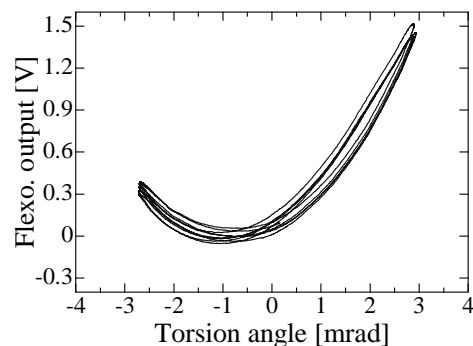


図6 ねじり角 0 付近での正負ねじり変形に対するフレクソエレクトリック分極出力

スを与えた方がより高感度なセンサ素子となることを示している。また、出力曲線は多少のヒステリシス特性を示している。圧電現象におけるヒステリシス特性は逆圧電効果に対して見られる現象であるが、フレクソエレクトリック効果におけるヒステリシス特性について示している研究例は見られないので、学術的に今後詳しく調査する必要がある。

<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

辺見信彦, 松下明広, 日下部榮志:ねじりせん断ひずみ勾配に対する PZT のフレクソエレクトリック効果, 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2016, 565

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Nobuhiko Henmi, Takahiko Iwase, Hiroyuki Shima
2. 発表標題 Flexoelectric effect for share strain gradient in PZT prism under torsion
3. 学会等名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辺見信彦
2. 発表標題 固体材料のフレクソエレクトリック効果とその応用の可能性について
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩瀬貴彦, 島 啓之, 辺見信彦
2. 発表標題 角柱型PZTのねじり変形に対するフレクソエレクトリック効果の研究
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩瀬貴彦, 日下部栞志, 辺見信彦
2. 発表標題 PZT角柱のねじり変形に対するフレクソエレクトリック効果の研究
3. 学会等名 精密工学会2018年度北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Norifumi Tanaka, Hong Quang Nguyen, Nobuhiko Henmi
2. 発表標題 Characteristics of The Piezoelectric Jerk Sensor
3. 学会等名 8th International Conference on Positioning Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日下部菜志, 辺見信彦
2. 発表標題 PZT角柱のねじり変形に対するフレクソエレクトリック効果の研究
3. 学会等名 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuhiko Henmi, Kanji Kusakabe
2. 発表標題 Flexoelectric Effect of Lead Zirconate Titanate by Torsional Deformation
3. 学会等名 The 7th International Conference on Manufacturing , Design and Tribology (国際学会)
4. 発表年 2017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