

令和元年6月19日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05685

研究課題名(和文) 名医の手先を持つ知的構造物を安心して使うためのD<sub>∞</sub>圧電体の電気弾性場研究研究課題名(英文) Study on electroelasticity in piezoelectric materials with D<sub>∞</sub> symmetry for safe operation of smart structures as skilled physicians

研究代表者

石原 正行 (Ishihara, Masayuki)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60283339

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：特異な異方性(D<sub>∞</sub>対称性)を持つ圧電材料に対して、異方性を考慮した電気弾性基礎理論を構築した。具体的には、D<sub>∞</sub>対称性を考慮した構成方程式を提案し、ポテンシャル関数法を用いた電気弾性場の解析手法を開発するとともに、知的構造物設計のための基礎データとして、種々の形状・負荷条件に対する具体的な3次元電気弾性場を明らかにした。特に、同材料をセンサ・アクチュエータとして使用する際の機能性発現・安全性確保のための有用な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は屈曲・ねじれ動作を兼ね備える知的構造物の合理的な設計手法の確立を最終的に目指したものである。得られた理論解析手法は、実験解析や設計支援ツールによる設計の妥当性を担保するための主要な手段であるという学術的意義を有する。本研究の成果は、高機能医療器具設計への展開とともに、社会基盤に対する健全性検査機器や精密加工機器、ヒューマン・マシンインターフェイス機器への展開も可能であることから波及効果が甚だ大きいという社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：The fundamental theory on electroelasticity in the piezoelectric materials with D<sub>∞</sub> symmetry was constructed. To be concrete, the constitutive equations to describe D<sub>∞</sub> symmetry were proposed, the theoretical method to analyze the electroelastic field was developed with the aid of the potential function method, and thereby the precise profiles of three-dimensional electroelastic field for various boundary value problems were elucidated. Specifically, the significant findings to achieve the required functions and safety of sensors/actuators composed of the abovementioned piezoelectric materials were found.

研究分野：固体力学

キーワード：D<sub>∞</sub>対称性 電気弾性理論 生分解性ポリマー ポリ乳酸

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 国内外の研究動向及び位置づけ

世界的に高齢化が進み、特に日本では社会保障制度(医療費・年金)維持が喫緊の課題となっている。このような状況では、特に高齢者の健康増進・経済的自立が重要になってくるが、それらを阻害する要因として、四大疾病(がん・心疾患・肺炎・脳血管疾患)への罹患が挙げられる。日本人の死因の6割強がこれらによることから推測されるように、四大疾病は疾病のボリュームゾーンを占めており、これらに対する治療の質を上げることが、医療費の抑制・健康寿命の延伸・高齢者の経済的自立促進につながり、結果として社会保障制度の維持に貢献する。

これらのことから、四大疾病に関する研究は社会保障制度維持にとって重要なものと位置づけられ、医学・薬学・看護学・工学の観点からの研究が国内外で精力的に行われている。そのなかでも本研究は、治療に不可欠な医療機器の力学的設計に注目したものである。

### (2) 着想に至った経緯

四大疾病に対する治療の質を上げるためには、高機能かつ安心して使える医療機器の力学的設計手法の確立が不可欠である。四大疾病の治療においては、血栓除去・薬剤注入・血管拡張・血管閉塞・体液排出の目的でカテーテルが頻繁に用いられる。従来は、医師が手技により管路にガイドワイヤーを先行挿入後、カテーテル本体を挿入してきたが、特に脳血管のように複雑な管路を経て患部に到達することは非常に困難であり、実際に穿孔やカテーテル損傷の事例が年間十数件報告されている。そこで、形状記憶合金(SMA)を用いた能動カテーテルが開発されているが、SMAは通電加熱で駆動するため反応が遅く、かつ熱的外乱の影響を受けやすい欠点がある。また、複雑な機構により屈曲動作を実現しているので小径化には限界がある。さらに、狭隘管路を通過する際あるいは患部での処置をする際に必要となるねじれ運動が実現できない。

ここで、特異な異方性(D対称性)を持つ圧電材料としてポリ乳酸(PLLA)が近年注目されている。PLLAは電場ベクトルに垂直な平面内でのせん断変形を示す。この性質を利用したカテーテルが考案されているが、屈曲動作の実現に留まっている。

一方、本申請者は、ポリフッ化ビニリデン(PVDF)に代表される一般的な異方性(C<sub>6v</sub>対称性)を持つ汎用圧電材料からなる積層構造物の電気弾性解析に取り組み、適切な積層設計により効率的な屈曲動作を実現できることを見出してきた。そこで、上述の2種の圧電材料(D圧電体・C<sub>6v</sub>圧電体)を適切に配置することで、屈曲・ねじれ動作を兼ね備える能動カテーテルが実現できると考え、その安全運用を保障するために、材料の異方性(D対称性)を考慮した電気弾性基礎理論構築を着想した。

## 2. 研究の目的

特異な異方性を持つ圧電材料(PLLA)からなる単純な構造で屈曲・ねじれ動作を兼ね備える知的構造物に対して、その合理的な設計手法の確立を目指して、材料の異方性(D対称性)を考慮した電気弾性基礎理論を構築することが本研究の目的である。具体的には、D対称性を考慮した構成方程式を提案し、ポテンシャル関数法を用いた電気弾性場の解析手法を開発するとともに、知的構造物設計のための基礎データとして、種々の形状・負荷条件に対する具体的な3次元電気弾性場を明らかにする。この目的を達成すると、実験解析では不明であった内部電気弾性場が明らかになり、合理的な設計手法を確立できる。その結果、四大疾病の治療のための高機能な医療器具が実現可能となり、究極的には、健康寿命を引き上げ、社会保障制度の維持に貢献することとなる。

## 3. 研究の方法

以下の取り組みを通して、単純な構造で屈曲・ねじれ動作を兼ね備える知的構造物の合理的設計に活用できる電気弾性基礎理論を構築することが本研究の目的である。

### (1) D対称性を有する圧電体の構成方程式および3次元電気弾性場解析手法の構築:

D対称性を記述する構成方程式を構築するとともに、汎用圧電材料に対するポテンシャル関数法を拡張することにより3次元電気弾性場の理論解析手法を構築する。

### (2) D対称性を有する圧電体からなる円柱構造物の電気弾性場の解明:

能動カテーテル構成要素のモデルとして中空円柱を考え、アクチュエータを想定し電場を印加したとき、あるいはセンサを想定して力学的負荷を与えたときの電気弾性場を理論解析(上記1の手法)および数値計算により定性的・定量的に解明する。

### (3) D対称性を有する圧電体と汎用圧電体からなる複合円柱の電気弾性場の解明:

能動カテーテル全体のモデルとしてD圧電体と汎用圧電体からなる複合円柱を考え、上記(2)と同様に、アクチュエータ・センサを想定した電気弾性場を、理論解析および数値計算により定性的・定量的に解明する。

## 4. 研究成果

### (1) 電気弾性場解析手法の構築：

材料の異方性(D 対称性)を考慮した3次元電気弾性場の理論解析手法を確立した。具体的には、変位・電位をそれぞれ変位ポテンシャル関数・電気ポテンシャル関数で表現し、電気弾性場の基礎原理に基いて変位ポテンシャル関数の基礎方程式が調和方程式であることを明らかにするとともに、電気弾性場諸量(変位・ひずみ・応力・電位・電場・電気変位)がポテンシャル関数から容易に導出可能であることを明らかにした。これにより、歴史的に確立された調和関数論の理論体系を、本研究の解析対象に対して活用することが可能となる。このことは、本手法が、必然的に誤差を含む実験解析・数値解析結果の妥当性検証のための基礎資料構築の手段を確立したことを意味している。

### (2) アクチュエータ機能の解明：

電氣的負荷を受ける解析モデルの電気弾性的挙動を解明した。まず、幾何学的複雑さを排除するために半無限体モデルを取り上げ、表面の電位分布が物体内部の電気弾性場諸量に与える影響を調査した。続いて、カテーテルを想定した円筒状モデルを取り上げ、円筒軸を横断する軸対称電場負荷が円筒構造のねじり動作に与える影響を調査するとともに、非軸対称電場負荷が円筒構造の屈曲変形に与える影響を調査した。これらの調査により、効率的にねじり・屈曲変形を発生させるための電氣的負荷の具体的な形態を明らかにした。

### (3) センサ機能の解明：

力学的負荷を受ける解析モデルの電気弾性的挙動を解明した。まず、上述(2)と同様の意図で半無限体モデルを取り上げ、表面のねじり負荷が電気弾性場諸量に与える影響を調査した。続いて、カテーテルを想定した円筒状モデルを取り上げ、ねじり負荷あるいは屈曲負荷が円筒構造の電氣的応答に与える影響を調査した。これらの調査により、力学的負荷に対するセンサ応答信号の出力水準を明らかにするとともに、高感度な信号を得るための構造を明らかにした。

### (4) 熱的外乱の解明：

熱的負荷を受ける解析モデルの電気弾性的挙動を解明した。上述(2)、(3)と同様に半無限体モデルおよび円筒状モデルを取り上げ、表面に非一様温度分布が与えられた場合の電気弾性場諸量の分布を明らかにした。特に、熱的外乱に対するモデル表面での出力電気信号に注目し、上述(3)で検討した力学的負荷に対する電気信号と比較することにより、通常の使用環境を想定すると、熱的外乱による誤差が、正常な電気信号に対して数十パーセントという無視できない水準で発生することが明らかになった。

以上の(1)~(4)により、D 圧電体を用いた機器の合理的な設計手法の基盤となる力学体系が確立された。この成果は、将来的に四大疾病の治療に活用できる高機能な医療器具の設計手法へと展開が可能であり、究極的には、健康寿命を引き上げ、社会保障制度の維持に貢献することとなる。また、そのような機器は、その電気弾性的性質により、土木建築物・発電施設といった社会基盤に対する健全性検査機器や精密加工機器に応用できる他、ヒューマン・マシンインターフェイス機器への展開も図れることから、波及効果が甚だ大きい。

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文](計13件)

Ishihara, M., Uesugi, Y., Ootao, Y., Kameo, Y.: Electroelastic field in sheared piezoelectric bodies with D symmetry disturbed by transient thermal field. Journal of Thermal Stresses 41 (2018) pp. 1346-1363. DOI: 10.1080/01495739.2018.1487269. (査読有)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: General Solution Technique for Electroelastic Problems in Green Materials. Anonymous: Advanced Mechanical Science and Technology for the Industrial Revolution 4.0, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018 pp. 251-262. DOI: 10.1007/978-981-10-4109-9\_26. (査読有)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Analytical technique for thermoelectroelastic field in piezoelectric bodies with D symmetry in cylindrical coordinates. Journal of Thermal Stresses 41 (2018) pp. 17-36. DOI: 10.1080/01495739.2017.1368052. (査読有)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Electroelastic field in a piezoelectric solid cylinder with D symmetry subjected to transverse mechanical load. Mechanical Engineering Journal 4 (2017) pp. 17-00210. DOI: 10.1299/mej.17-00210. (査読有)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y., Saito, T.: Thermoelectroelastic response of a piezoelectric cylinder with D symmetry under axisymmetric mechanical and thermal loading. Mechanical Engineering Journal 4 (2017) pp. 16-00609. DOI: 10.1299/mej.16-00609. (査読有)

Ishihara, M., Ogasawara, K., Ootao, Y., Kameo, Y.: One-dimensional transient hygrothermoelastic

field in a porous strip considering nonlinear coupling between heat and binary moisture. Journal of Thermal Science and Technology 11 (2016) pp. 16-00375. DOI: 10.1299/jtst.2016jtst0035. (査読有)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Analytical technique for thermoelectroelastic field in piezoelectric bodies with  $D$  symmetry. Journal of Thermal Stresses 39 (2016) pp. 1283-1300. DOI: 10.1080/01495739.2016.1215740. (査読有)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Electroelastic response of cylindrical fiber with  $D$  symmetry exposed to local electric field through opposed electrode pair. Polymer-Plastics Technology and Engineering 55 (2016) pp. 900-910. DOI:10.1080/03602559.2015.1103268. (査読有)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Electroelastic response of a piezoelectric cylinder with  $D$  symmetry under axisymmetric mechanical loading. Mechanics Research Communications 74 (2016) pp. 1-7. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2016.03.004. (査読有)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: A general solution technique for electroelastic fields in piezoelectric bodies with  $D$  symmetry in cylindrical coordinates. Journal of Wood Science 62 (2016) pp. 29-41. DOI: 10.1007/s10086-015-1524-5. (査読有)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: An Electroelastic Problem of Green Materials Subjected to Surface Friction. International Journal of Civil and Structural Engineering 2 (2015) pp. 49-52. <http://journals.theired.org/journals/paper/details/6575.html>. (査読有)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Electroelastic Response of a Piezoelectric Semi-infinite Body with  $D$  Symmetry to Surface Friction. International Journal of Engineering Research and Applications 5 (2015) pp. 26-32.

[http://www.ijera.com/papers/Vol5\\_issue6/Part%20-%202/G56022632.pdf](http://www.ijera.com/papers/Vol5_issue6/Part%20-%202/G56022632.pdf). (査読有)

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Analytical technique for electroelastic field in piezoelectric bodies belonging to point group  $D$ . Journal of Wood Science 61 (2015) pp. 270-284. DOI: 10.1007/s10086-015-1468-9. (査読有)

[学会発表](計19件)

石原, 正行, 木原, 彬, 大多尾, 義弘, 亀尾, 佳貴:  $D$  圧電半無限体の非定常熱電気弾性場理論解析. 第 69 回日本木材学会大会 (2019).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: An electroelastic problem of green materials subjected to surface torque. IV International conference on engineering and natural sciences (ICENS) (2018).

Muramatsu, N., Ishihara, M., Ootao, Y.: Theoretical analysis for electroelastic field of piezoelectric hollow cylinder with  $D$  symmetry subjected to axisymmetric pressure and shear stress. Fifth Joint-Symposium on Mechanics of Advanced Materials and Structures (2017).

石原正行, 大多尾義弘, 亀尾佳貴:  $D$  圧電体の熱電気弾性場理論解析. M&M2017 材料力学カンファレンス (2017).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Thermoelastic analysis of a piezoelectric cylinder with  $D$  symmetry subjected to heat convection. International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment (2017).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Numerical Approach to Thermoelastic Analysis of a Piezoelectric Semi-infinite Body with  $D$  Symmetry. Congress on Numerical Methods in Engineering (2017).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Thermoelastic Response of a Piezoelectric Semi-infinite Body with  $D$  Symmetry to a Combined thermal and mechanical loading. Asian Conference on Thermal Sciences 2017 (2017).

Ishihara, M.: General Solution Technique for Electroelastic Problems in Green Materials. First Joint Symposium on Advanced Mechanical Science & Technology for Industrial Revolution 4.0 (2016).

Sakamoto, K., Ishihara, M., Ootao, Y.: Electroelastic Field in a Semi-infinite Piezoelectric Bodies with  $D$  Symmetry Subjected to Surface Shear Stress. 5th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures (2016).

Saito, T., Ishihara, M., Ootao, Y.: Theoretical analysis for electroelastic field of hollow infinite cylinder with  $D$  symmetry subjected to axisymmetric electric loading. 5th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures (2016).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: An electroelastic problem of a piezoelectric solid cylinder with  $D$  symmetry subjected to a transverse electric field. 5th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures (2016).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Electroelastic Field in a Piezoelectric Cylinder with  $D$  Symmetry Subjected to Mechanical Torsion. 10th Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 16 (2016).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: Thermoelastic response of a piezoelectric semi-infinite body with  $D$  symmetry to a surface heating. In: Ciarletta, M., Tibullo, V., Passarella, F. (eds.) Proceedings of the 11th International Congress on Thermal Stresses 2016 (2016).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: General Solution Technique for Electroelastic Problems in Piezoelectric Bodies with D Symmetry. JSMAMS2015 (2015).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: An Electroelastic Problem of Green Materials Subjected to Surface Friction. Fourth International Conference on Advances in Civil and Structural Engineering - CSE 2015 (2015).

石原正行., 大多尾義弘., 亀尾佳貴.: D 圧電体の電気弾性場理論解析. 日本機械学会 2015 年度年次大会講演会 (2015).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: An Electroelastic Problem of a Semi-infinite Body with D Symmetry Subjected to Distributed Surface Loading. VI International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems 2015 (2015).

Ishihara, M., Ootao, Y., Kameo, Y.: An Electroelastic Problem of a Semi-infinite Body with D Symmetry Subjected to Distributed Surface Loading. VI International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems 2015 (2015).

Ishihara, M., Yoshida, T., Ootao, Y., Kameo, Y.: Electroelastic Response of a Piezoelectric Fiber of Poly-L-lactic Acid under Axisymmetric Mechanical Load. VI International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems 2015 (2015).

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：大多尾 義弘

ローマ字氏名：(OOTAO, Yoshihiro)

所属研究機関名：大阪府立大学

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号 ( 8 桁 ): 10275274

研究分担者氏名：亀尾 佳貴

ローマ字氏名：(KAMEO, Yoshitaka)

所属研究機関名：京都大学

部局名：再生医科学研究所

職名：助教

研究者番号 ( 8 桁 ): 60611431