

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 10 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420026

研究課題名(和文) マルチフェロイクスからなるマイクロ・ナノスケール構造体設計のための数理熱弾性解析

研究課題名(英文) Mathematical thermoelastic analysis for a design of micro/nano structures composed of multiferroic material

研究代表者

大多尾 義弘 (OOTAO, Yoshihiro)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10275274

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)：圧電材料と磁歪材料からなるマルチフェロイクス材料を取り上げ、圧電材料と磁歪材料を線形圧電熱弾性として統一的に定式化する。熱弾性場、電場、磁場の連成を考慮し、非フーリエの法則を用いた熱伝導解析と非局所弾性理論を導入した。ボクセル有限要素法を用いて、マルチフェロイクス材料からなる平板状のナノスケール構造体におけるスケール効果を調べた。また、均質等方性の中空円筒のモデルにおいて、非フーリエの法則を用いた温度解の厳密解を導出し、数値計算により非フーリエ効果が温度分布や熱応力分布に及ぼす影響を調べた。

研究成果の概要(英文)：The multiferroic materials composed of the piezoelectric and magnetostrictive materials are treated. As the purpose of this research project, the piezoelectric and magnetostrictive materials are formulated as an anisotropic and linear magneto-electro-thermoelastic materials. Considering the coupling between the thermoelastic field, the electric field and the magnetic field, the non-Fourier heat conduction and the non-local elasticity are introduced. The scale effect of a plate composed of the multiferroic materials is investigated using a three-dimensional finite element method. The exact solutions of the non-Fourier heat conduction for a homogeneous isotropic hollow cylinder are obtained and the non-Fourier effect on the temperature and thermal stress distributions is investigated by the numerical calculation.

研究分野：工学

キーワード：材料力学 連続体力学 マルチフェロイクス マイクロ・ナノスケール 熱弾性解析

1. 研究開始当初の背景

(1) マルチフェロイクス材料とは、圧電、磁歪等の固体変態型フェロイクスをベースにして、複合化プロセス(複合バルク化や薄膜積層化)により多機能化させた材料である。特に圧電材料と磁歪材料からなる複合構造では、磁場と電場が連成する磁気電気効果(ME効果)が現れる。ME効果とは固体中で磁場が電気分極を誘起、もしくは電場が磁化を誘起する現象である。

(2)たとえば、マルチフェロイクス材料のME効果により外部から磁場を加えずに電場だけで磁性を反転することが可能であり、電場で磁気情報の書き換えが可能で省エネルギー化を脱んだ超省電力メモリデバイスが可能となり期待されている。また、マルチフェロイクス材料のME効果により零消費電力で力を保持する磁気アクチュエータが期待されている。

(3)さらに、マルチフェロイクス材料のME効果により磁歪により応力を受け自発的に電圧を発生することで電源不要の磁気センサーが可能となる。マルチフェロイクス材料のマイクロ・ナノスケール構造体としての利用は省エネおよび高機能化の観点から国内外で最近特に注目されている。

(4)本研究は具体的にマルチフェロイクス材料を用いてマイクロ・ナノスケール構造体を設計・製作する場合に必要な力学的设计手法に注目したものである。

2. 研究の目的

(1) 圧電材料と磁歪材料からなるマルチフェロイクス材料を取り上げ、このマルチフェロイクス材料単体や構造材料とマルチフェロイクス材料からなるマイクロ・ナノスケール構造体の設計・使用に際し、機能性評価と強度評価のための高精度な熱弾性数理解析の手法を確立することが目的である。

(2) 具体的には、熱弾性場、電場、磁場の連成を考慮し、非フーリエの法則を用いた熱伝導解析とスケール効果を含む理論を導入して熱弾性問題を定式化し、スケール効果や熱的環境が力学的・電磁氣的挙動に与える影響を検討する。

3. 研究の方法

(1) 圧電材料と磁歪材料からなるマルチフェロイクス材料を線形圧電磁熱弾性体(Linear Magneto-electro-thermoelastic Material)として統一的に定式化し、スケール依存性を有する非局所弾性理論を拡張して圧電磁熱弾性問題を定式化する。

(2) これらの解析に先立ち、スケール依存性を考量せずに、電場および磁場の効果のない

純粋な熱弾性解析、電場の効果のみを考慮した圧電熱弾性解析、熱弾性場、電場および磁場の連成を考慮した解析を行い、スケール依存性を考量した解析の見通しを立てる。

(3) 熱衝撃的な負荷が作用する場合を想定し、圧電材料と磁歪材料からなるマルチフェロイクス材料の非フーリエ熱伝導則による熱伝導問題の解析解を導出する。

4. 研究成果

(1) スケール依存性を考量しない熱弾性解析

傾斜機能材料

厚さ方向に区分的指数関数の不均質特性を有する傾斜機能長方形板が全周単純支持され、表面が非一様に加熱された非定常熱弾性問題を三次元問題として理論解析し、厳密解を導出したのち、数値計算を行った。

半径方向に区分的冪関数の不均質特性を有する中空円筒と中空円板が非軸対称加熱される場合の非定常熱弾性問題および同様の不均質特性を有する中空球が軸対称加熱される場合の非定常熱弾性問題を理論解析し、厳密解を導出したのち、数値計算を行った。なお中空円筒の解析では、平面ひずみ状態と一般化平面ひずみ状態の場合を取り扱った。

半径方向に区分的冪関数の不均質特性を有する円筒パネルが表面から非一様に加熱される場合の非定常熱弾性問題を理論解析し、厳密解を導出したのち、数値計算を行った。

任意の材料組成の不均質特性および板厚変化をもたせるため、半径方向に区分的冪関数で表された特性を有する傾斜機能変厚回転円板を考え、内外圧、遠心力および円板表面の加熱を受ける場合の定常熱弾性問題を平面応力問題として厳密に解析し、数値計算を行った。

熱応力緩和のための材料組成最適化問題

区分的指数関数の不均質特性を有する傾斜機能長方形板が全周単純支持され、表面が非一様に加熱された定常熱弾性問題を古典板理論を用いて解析し、応力比(=応力/強度)が最小になる傾斜組成分布を求める最適化問題を取り扱った。

任意の材料組成の不均質特性および板厚変化をもたせるため、半径方向に区分的冪関数で表された特性を有する傾斜機能変厚回転円板に生じる応力比(=応力/強度)を最小にする材料組成および板厚の最適化問題を平面応力問題として取り扱った。

以上の最適化手法として、準ニュートン法を用いた。

物性値の温度依存性を考慮した熱弾性解析

厚さ方向に区分的指数関数の不均質特性

を有する傾斜機能平板を考え、表面が一様温度の媒体により熱伝達を伴い加熱される場合の非定常熱弾性問題を物性値の温度依存性を考量して解析した。解析手法は時間に関して差分法を、厚さ方向の領域に関しては厳密解を用いた。

(2) スケール依存性を考量しない圧電材料の弾性・熱弾性解析

静的有限要素法解析

圧電材料の圧電弾性解析のために、ボクセル有限要素法によるプログラムを作成した。作成したプログラムを用いて、片持ちはり型平板の形状制御を目的とした圧電材料の配置の設計問題に適用した。

動的有限要素法解析

慣性項を考慮した動的問題の解析ができるように、圧電材料の圧電弾性解析におけるボクセル有限要素法のプログラムを作成し、性能向上を目的とした振動発電デバイスの構造解析を行った。

圧電熱弾性解析

圧電材料からなる中空円筒モデルの内外表面から熱伝達を伴い一様に加熱された場合を想定し、フーリエ熱伝導則を用いて導出した非定常圧電熱弾性問題を軸対称平面ひずみ問題として厳密に数理解析し、温度解に含まれるベッセル関数をそのままの形で表現できる積分型の特解を導出した。これに伴い、従来よりも加熱初期の非常に短い時間における熱応力挙動の計算が可能となる。

(3) スケール依存性を考量しないマルチフェロイクス材料の弾性・熱弾性解析

圧電磁熱弾性問題の数理解析

解析モデルとして、等方性構造材料と圧電材料・磁歪材料からなるマルチフェロイクス材料層からなる積層中空円筒の表面から一様に加熱された軸対称圧電磁熱弾性問題を平面ひずみ問題として理論解析、厳密解を導出した。

また、圧電材料・磁歪材料からなるマルチフェロイクス材料層からなる積層中空円筒が内外表面から熱伝達を伴い加熱される軸対称圧電磁熱弾性問題を一般化平面ひずみ問題として理論解析、厳密解を導出した。導出した厳密解を用いて数値計算を行い、平面ひずみ問題による結果と比較した。

圧電磁弾性問題の有限要素解析

圧電材料・磁歪材料からなるマルチフェロイクス材料の圧電磁弾性解析のために、ボクセル有限要素法によるプログラムを作成した。片持ちはり型平板に荷重が作用した場合の数値計算を行った。

圧電材料・磁歪材料からなる傾斜機能マルチフェロイクス材料の圧電磁弾性問題をボクセル有限要素法を用いて解析した。片持ち

はり型平板に厚さ方向に磁界が作用した場合を想定して数値計算を行った。圧電材料と磁歪材料からなる2層のマルチフェロイクス材料の数値計算結果と比較し、傾斜機能化の有効性を検証した。

(4) スケール依存性を考量したマルチフェロイクス材料の有限要素解析

圧電材料・磁歪材料からなるマルチフェロイクス材料の圧電磁弾性問題に非局所弾性理論を拡張してボクセル有限要素解析を行うため、定式化を行った後、プログラムを作成した。圧電材料と磁歪材料を混合した材料を想定して表面から電気的入力を与えた場合について数値計算を行った。数値計算例では、圧電材料としてチタン酸バリウムと磁歪材料としてコバルトフェライトを想定し、1対1に混合された均質体の平板を想定した。大きさは $L_x \times L_y \times h = 80[\text{nm}] \times 80[\text{nm}] \times 40[\text{nm}]$ とし、ボクセル要素の分割数を $16 \times 16 \times 8$ とした。電場の境界条件として上面の電位 $0.01[\text{V}]$ 、下面の電位は $0[\text{V}]$ 、磁場の境界条件として上面は磁束密度 $0[\text{Wb}/\text{m}^2]$ 、下面の磁位は $0[\text{A}]$ とした。スケール依存性を表す Internal length scale l を変化させて数値計算を行い、応力場、電場および磁場に及ぼす影響を定量的に評価した。

(5) 非フーリエ則による温度解析および熱弾性解析

均質等方性の中空円筒における非フーリエ則を考量した熱伝導問題を考え、内外表面が温度してされた場合の厳密解を有限ハンケル変換を用いて導出した。また、内外表面が一様温度の媒体により熱伝達を伴い加熱される場合の厳密解を変数分離法を用いて導出した。さらに、加熱・冷却過程を想定した場合についても、厳密解を導出した。以上の温度解を用いて、熱弾性問題をエアリーの熱応力関数を用いて一般化平面ひずみ問題として数理解析を行い、厳密解を導出した。数値計算を行い、熱緩和時間が非定常状態における温度分布および熱応力分布に及ぼす影響を調べた。

上述で求めた非フーリエ則による温度解を用いて、圧電材料からなる中空円筒の軸対称非定常圧電熱弾性問題の数理解析が可能となる。同様に、圧電材料・磁歪材料からなるマルチフェロイクス材料からなる中空円筒の軸対称非定常圧電熱弾性問題の数理解析についても、可能であると考えられる。

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5件)

Yoshihiro Ootao and Masayuki Ishihira,
Transient Thermoelastic Analysis for a
Multilayered Hollow Cylinder with

Piecewise Power Law due to Asymmetric Surface Heating, 査読有, Acta Mechanica, 225, 2014, pp.2903-2922
DOI: 10.1007/s00707-014-1204-3

Yoshihiro Ootao and Masayuki Ishihira, Transient Thermoelastic Analysis of a Laminated Hollow Cylinder Constructed of Isotropic Elastic and Magneto-Electro-Thermoelastic Materials, Advances in Materials Science and Applications, 査読有, 2, 2013, pp.48-59

DOI:10.5963/AMSA0202003

Yoshihiro Ootao and Masayuki Ishihira, Three-Dimensional Solution for Transient Thermoelastic Problem of a Functionally Graded Rectangular Plate with Piecewise Exponential Law, Composite Structures, 査読有, 106, 2013, pp.672-680

<http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.019>

Yoshihiro Ootao and Masayuki Ishihira, Asymmetric Transient Thermal Stress of a Functionally Graded Hollow Cylinder with Piecewise Power Law, Structure Engineering and Mechanics, 査読有, 47, 2013, pp.421-442

DOI : 10.12989/sem.2013.47.3.421

大多尾義弘, 川端亮平, 亀尾佳貴, 石原正行, 平板の形状制御を目的とした圧電配置の設計, 日本機械学会論文集 A 編, 査読有, 79(802), 2013, pp.813-826

<http://doi.org/10.1299/kikaia.79.813>

〔学会発表〕(計8件)

Yoshihiro Ootao, Chengyuan Luo and Masayuki Ishihira, Exact solution of transient thermal stress problem of a multilayered magneto-electro-thermoelastic hollow cylinder in the generalized plane strain state, The Fifth Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, 2016年10月15日, Shanghai(China)

Yoshihiro Ootao, Tomoya Usuki, Yoshitaka Kameo, and Masayuki Ishihira, Optimization of Functionally Graded Rectangular Plate with Piecewise Exponential Nonhomogeneity for Thermal Stress Relaxation, Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures 2014, 2014年10月12日, Nara Prefectural New Public Hall (奈良県・奈良市)

Yoshihiro Ootao and Masayuki Ishihira, Transient Thermoelastic Problem for a Functionally Graded Cylindrical Panel

with Piecewise Power Law, Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures 2014, 2014年10月12日, Nara Prefectural New Public Hall (奈良県・奈良市)

Yoshihiro Ootao, Eiji Aida, Yoshitaka Kameo, and Masayuki Ishihira, Designing Layout of Piezoelectric Materials for Shape Control of Plates, Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures 2014, 2014年10月11日, Nara Prefectural New Public Hall (奈良県・奈良市)

Yoshihiro Ootao and Masayuki Ishihira, Transient Thermoelastic Analysis of a Functionally Graded Hollow Sphere with Piecewise Power Law, 11th World Congress on Computational Mechanics, 2014年7月22日, Barcelona (Spain)

中野淳, 大多尾義弘, 亀尾佳貴, 石原正行, マルチフェロイクス材料からなる構造体のボクセル有限要素解析, 日本機械学会関西支部第89期定時総会講演会, 2014年3月19日, 大阪府立大学(大阪府・堺市)

Yoshihiro Ootao, Akihiro Kakiuchi, Yoshitaka Kameo and Masayuki Ishihira, Optimization of Material Composition to Minimize Thermal Stresses in a Functionally Graded Hollow Sphere with Piecewise Power Law, 10th International Congress on Thermal Stresses, 2013年6月2日, Nanjing (China)

Yoshihiro Ootao and Masayuki Ishihira, Transient Thermoelastic Analysis for a Functionally Graded Hollow Circular Disk with Piecewise Power Law due to Asymmetric Heating, 10th International Congress on Thermal Stresses, 2013年6月1日, Nanjing (China)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大多尾 義弘 (OOTAO Yoshihiro)
大阪府立大学・工学研究科・教授

研究者番号：10275274

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし

(4)研究協力者
なし