

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月16日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20560082

研究課題名（和文） 熱的環境下でのマルチフェロイクス材料からなる知的複合材料の解析的手法の構築

研究課題名（英文） Construction of analytical treatment for smart composite materials composed of multiferroic material under thermal environment

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

研究成果の概要（和文）：圧電材料と磁歪材料をベースとしたマルチフェロイクス材料を用いることにより、熱的環境下で使用できる高機能な知的複合材料のシステムを作ることが可能となる。圧電材料と磁歪材料を張り合わせた積層材料または傾斜機能を有する圧電材料・磁歪材料を線形圧電磁熱弾性体として統一的に定式化し、非定常圧電磁熱弾性問題の解析解を導出する。数値計算を行い、熱変形・熱応力の非定常挙動および弾性場と電場と磁場の連成効果について調べた。

研究成果の概要（英文）：It is possible to develop a new smart composite material system which are practicable in the thermal environment using the multiferroic material composed of the piezoelectric and magnetostrictive materials. As the purpose of this research project, the analytical solutions for the transient magneto-electro-thermoelastic problems of the multilayered or functionally graded multiferroic material constructed of the anisotropic and linear magneto-electro-thermoelastic materials are derived. The numerical calculations are carried out, the transient behaviors of displacement and thermal stresses, and the coupling effect among magnetic, electric and elastic fields are investigated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料、材料力学

キーワード：連続体力学、熱弾性解析

1. 研究開始当初の背景

(1) マルチフェロイク効果を利用した新機能材料・デバイスや、知的複合システムが近年注目されている。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。この効果により新たな機能を含んだ材料として注目

されているが、その理論的な解析は比較的新しい。

(2) 最近、圧電材料と磁歪材料が接着された積層構造体の磁気電気効果のみに注目した電磁場解析、等温場における圧電材料と磁歪材料が接着された積層平板の圧電磁弾性問

題が解析されている程度である。圧電材料と磁歪材料からなるマルチフェロイクス材料が温度環境下で使用される場合の研究はほとんどみられない。

(3) 耐熱構造材料に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張り合わせた知的複合材料の概念は新しく、このようなマルチフェロイクス材料、およびマルチフェロイクス材料からなる知的複合材料の電場、磁場および熱弾性場が連成する問題に関する非定常解析については、その数理解析的手法は確立されていない。

2. 研究の目的

マルチフェロイクス材料とは、圧電、磁歪、形状記憶、超弾性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。本研究ではそのうち特に圧電材料と磁歪材料をベースにした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知的複合材料が熱的環境下で使用される場合の、機能性の発現と強度評価のための数理解析的手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

(1) 圧電材料および磁歪材料とともに、統一的に線形圧電磁熱弾性体と考え、熱弾性場、電場および磁場の連成を考慮して、直角座標系、円筒座標系および球座標系について定式化を行う。

(2) なお、これらの解析に先立ち、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を行い、熱弾性場、電場および磁場の連成を考慮した解析の見通しを立てる。また、純粋な熱弾性解析の解は、知的複合材料としての解析に使用する。

(3) そして温度の厳密解を用いて、圧電磁熱弾性場における解析を準静的問題として解析し、厳密解を導出する。解析は周辺境界条件を満足する変位、電位および磁位に関する連立偏微分方程式を解く手法を用いる。なお、厳密解の導出は極めて複雑で煩雑となるため、数式処理ソフトを一部利用する。

(4) さらに、得られた厳密解を用いて数値計算を行い、定性的な挙動について考察する。

4. 研究成果

(1) 熱弾性解析

① 傾斜機能材料

1層の傾斜機能材料モデルとして、傾斜機能平板・帯板、傾斜機能層を有する帯板・中空球、傾斜機能中空円筒の非定常熱弾性問題

の厳密解を導出し、数値計算を行った。

次に、解析モデルとして、区分的べき乗関数の不均質特性を有する傾斜機能中空円筒、傾斜機能層を有する中空球の非定常熱弾性問題の厳密解を導出し、数値計算を行った。

さらに、区分的べき乗関数の不均質特性を有する傾斜機能中空円板および傾斜機能中空円板の内外表面から一様な温度を有する媒体により加熱され、さらに上下両表面から熱伝達によって冷却される場合の非定常熱弾性問題を平面応力問題として解析した。得られた厳密解を用いて、数値計算を行った。以上の解析により、区分的に不均質特性を有する傾斜機能モデルの方が1層の傾斜機能材料モデルに比べて、熱応力の緩和効果を大きいことがわかった。

② 熱応力緩和のための材料組成最適化問題

解析モデルとして、区分的指数関数の不均質特性を有する傾斜機能帯板の上下両表面が幅方向に非一様に加熱される場合の非定常熱弾性問題を想定した。両端面が単純支持された傾斜機能帯板を平面応力問題として解析した。得られた厳密解を用い、熱応力と強度の比を最小にする最適な組成分布を遺伝的アルゴリズムにより求めた。多変数の最適化問題には、遺伝的アルゴリズムが有効であることがわかった。

(2) 圧電熱弾性解析

① 傾斜機能圧電材料

傾斜機能圧電中空円筒の一次元非定常圧電熱弾性問題を、(1) 不均質特性が半径方向にべき乗関数で与えられた場合、(2) 均質な圧電材料が段階的に積層された場合について、厳密解を導出し、数値計算により不均質パラメータが温度、変位、熱応力、電位に及ぼす影響を調べた。

解析モデルとして、傾斜機能圧電円筒パネルの非定常圧電熱弾性問題の厳密解を導出し、数値計算を行った。

② 圧電材料からなる知的複合材料

解析モデルとして、非一様加熱を受ける等方性構造材料と圧電材料からなる三層積層片持はりの非定常圧電熱弾性問題をビーム理論を用いて解析解を導出し、数値計算を行った。

次に、解析モデルとして、構造材料と傾斜機能圧電材料からなる知的複合中空円筒の非定常圧電熱弾性問題の厳密解を導出し、数値計算を行った。

(3) 圧電磁熱弾性解析

① マルチフェロイクス材料

圧電材料および磁歪材料とともに、統一的に線形圧電磁熱弾性体と考え、熱弾性場、電

場および磁場の連成を考慮して、円筒座標系および球座標系について定式化を行った。

解析モデルとして、積層中空円筒および積層中空球が内外表面から一様温度により加熱される場合を想定し、厳密解を導出した。数値計算により温度、変位、熱応力、電位および磁位の非定常挙動を調べた。

②傾斜機能マルチフェロイクス材料

圧電材料と磁歪材料をベースにしたマルチフェロイクス材料からなり、厚さ方向に不均質特性を有する線形圧電磁熱弾性体からなる帯板が単純支持され、幅方向に非一様に加熱される場合の非定常圧電磁熱弾性問題を多層積層モデルを用いて解析した。数値計算を行い、不均質特性の影響を調べた。図1および図2は、圧電材料のチタン酸バリウムと磁歪材料のコバルトフェライトからなる傾斜機能マルチフェロイクス帯板を想定し、下面が圧電材料100%、上面が磁歪材料100%で、上面から幅方向にサイン状に加熱される場合の、無次元化された電位および磁位の帯板中央における板厚方向の定常状態での分布を示す。なお、厚さ方向に圧電材料の体積分率が線形的に変化する場合を想定し、 n は積層数を示す。総数の増加とともに、発生する表面での電位および磁位が増大することが分かった。

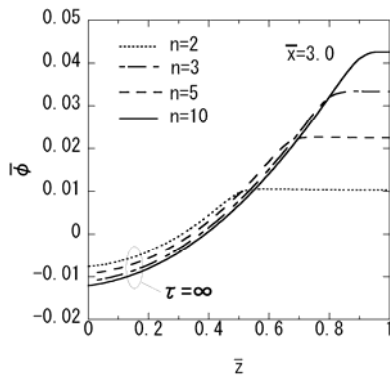


図1 電位の厚さ方向分布 (積層数の影響)

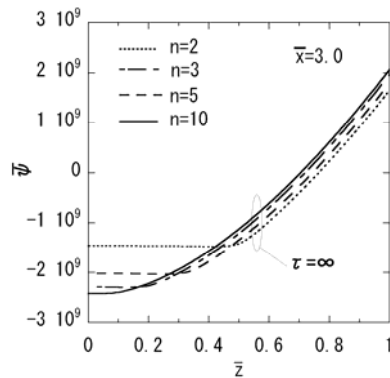


図2 磁位の厚さ方向分布 (積層数の影響)

また、圧電材料と磁歪材料をベースにしたマルチフェロイクス材料からなり、半径方向に不均質特性を有する線形圧電磁熱弾性体からなる中空円筒が一様に表面加熱される場合の非定常圧電磁熱弾性問題を積層モデルを用いて解析した。数値計算を行い、不均質特性の影響を調べた。また、圧電材料表面での印加電位による熱応力緩和効果を調べた。図3はチタン酸バリウムとコバルトフェライトからなる傾斜機能マルチフェロイクス中空円筒を想定し、内表面が圧電材料100%、外表面が磁歪材料100%で、外表面から加熱される場合の、円周方向熱応力の半径方向の定常状態での分布を示す。

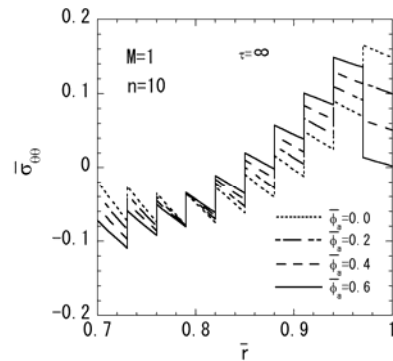


図3 熱応力の分布 (印加電位の影響)

さらに、圧電材料と磁歪材料をベースにしたマルチフェロイクス材料からなり、半径方向に不均質特性を有する傾斜機能中空球を考え、内外表面から一様な温度を有する媒体により加熱された場合の非定常圧電磁熱弾性問題を積層モデルにより解析した。得られた解析解を用いて数値計算を行い、不均質特性の影響を調べた。

以上の解析では、簡単化のため物性の複合則は線形則を用いたが、各層が均質である今回使用した多層積層モデルによる解析では、実際の物性の複合則を容易に取り入れることができる有効なモデルであることがわかった。

③熱応力緩和のための材料組成最適化問題

圧電材料と磁歪材料をベースにしたマルチフェロイクス材料からなり、厚さ方向に不均質特性を有する傾斜機能帯板の表面から幅方向に不均一な加熱を受ける場合の非定常圧電磁熱弾性問題を多層積層モデルにより解析する。得られた解析解を用いて数値計算を行い、熱応力と強度の比を最小にする最適な組成分布を非線形計画法により求めた。

④マルチフェロイクス材料からなる知的複合材料

表面一様加熱を受ける等方性構造材料に圧電材料・磁歪材料を張り合わせた三層積層中空円筒の非定常圧電磁熱弾性問題を平面ひずみ問題として厳密に解析し、数値計算を行った。

また、表面一様加熱を受ける等方性構造材料に圧電材料・磁歪材料からなる傾斜機能マルチフェロイクス材料が積層された積層中空円筒の非定常圧電磁熱弾性問題を平面ひずみ問題として厳密に解析し、数値計算を行った。なお、傾斜機能マルチフェロイクス材料は多層積層モデルを使用した。

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 2 4 件)

- ① Yoshihiro Ootao and Masayuki Ishihara, Transient Thermal Stress Problem of a Functionally Graded Magneto-Electro-Thermoelastic Hollow Cylinder Due to a Uniform Surface Heating, Journal of Thermal Stresses, 査読有, 35, 2012, 掲載確定
- ② Yoshihiro Ootao and Masayuki Ishihara, Exact Solution of Transient Thermal Stress Problem of a Multilayered Magneto-Electro-Thermoelastic Hollow Sphere, Applied Mathematical Modelling, 査読有, 36, 2011, 1431-1443
- ③ Yoshihiro Ootao and Masayuki Ishihara, Transient Thermal Stress Problem of a Functionally Graded Magneto-Electro-Thermoelastic Hollow Sphere, Materials, 査読有, 4, 2011, 2136-2150
- ④ Yoshihiro Ootao, Masayuki Ishihara and Kei Noda, Transient Thermal Stress Analysis of a Functionally Graded Magneto-Electro-Thermoelastic Strip Due to Nonuniform Surface Heating, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 査読有, 55, 2011, 206-212
- ⑤ Yoshihiro Ootao, Masayuki Ishihara, Exact Solution of Transient Thermal Stress Problem of a Multilayered Magneto-Electro-Thermoelastic Hollow Cylinder, 査読有, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 5, 2011, 90-103
- ⑥ Yoshihiro Ootao, Transient Thermoelastic and Piezothermoelastic Problems of Functionally Graded Materials, Journal of Thermal Stresses, 査読有, 32, 2009, 656-697

[学会発表] (計 2 1 件)

- ① 大多尾義弘、石原正行、傾斜機能マルチフェロイクス材料からなる中空球の非定常熱弾性解析、日本機械学会第 2 4 回計算力学講演会、2011 年 10 月 9 日、岡山大学 (岡山県)
- ② 大多尾義弘、石原正行、等方性構造材料と傾斜機能マルチフェロイクス材料からなる積層中空円筒の非定常熱弾性解析、日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会、2011 年 3 月 19 日、京都工芸繊維大学 (京都府)
- ③ Yoshihiro Ootao, Masayuki Ishihara, Transient Thermal Stress Problem of a Functionally Graded Magneto-Electro-Thermoelastic Hollow Cylinder due to a Uniform Surface Heating, the Second Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, 2010 年 10 月 24 日, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (China)
- ④ 大多尾義弘、等方性構造材料とマルチフェロイクス材料からなる積層中空円筒の非定常熱弾性解析、日本機械学会 2010 年度年次大会講演会、2010 年 9 月 6 日、名古屋工業大学 (愛知県)
- ⑤ Yoshihiro Ootao, Masayuki Ishihara, Exact Solution for Transient Thermal Stress Problem of a Multilayered Magneto-Electro-Thermoelastic Hollow Cylinder, Joint-Symposium on Mechanics of Advanced Materials & Structures, 2010 年 8 月 12 日, Harbin Institute of Technology (China)
- ⑥ Yoshihiro Ootao, Masayuki Ishihara, Kei Noda, Transient Thermal Stress Analysis of a Functionally Graded Magneto-Electro-Thermoelastic Strip due to Nonuniform Surface Heating, the 12th International Congress on Mesomechanics, 2010 年 6 月 22 日, National Taiwan University of Science and Technology (Taiwan)

[図書] (計 1 件)

- ① Yoshihiro Ootao, Springer Wien New York, Mechanics and Model-Based Control of Smart Materials and Structures, 2009, 125-134

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：1 0 2 7 5 2 7 4

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし