

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25年 5月 1日現在

機関番号：13071

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560063

研究課題名（和文）示量性状態量に着目した

機能性材料デバイスに対する有限要素解析手法の開発

研究課題名（英文）Development of Finite Element Procedure for Smart Material Devices
Focused on Extensive Variables

研究代表者

永井 学志 (NAGAI GAKUJI)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：90334359

研究成果の概要（和文）：センサやアクチュエータに代表される機能性材料デバイス — 電気・磁気と変形が相互連成する材料 — の物理挙動を再現するとともに、設計時の予測に活用することを目標として、数値シミュレーション法を開発した。開発においては、電気・磁気を物体の変形と同一視する数理モデリングを心掛けつつ、より効率的で数理的に理に適ったものとなるようにした。このような視点から、(1) 非線形圧電問題に対する弾塑性型構成則の検討と、(2) 磁歪アクチュエータの構造最適化法の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：For sensor or actuator devices using functional materials, which exhibit elect-mechanical or magneto-mechanical coupling, we have developed a numerical simulation procedure not only to predict their physical behaviors but also to utilize the present numerical procedure for their designs in industry. In the development we have unified electromagnetics within the framework of conventional elasticity in terms of thermo mechanics, and have also made it mathematically consistent and rational. Our main topics are (1) numerical study on elasto-plastic-type constitutive laws for nonlinear piezoelectricity and (2) development of a structural optimization procedure for magneto-strictive actuators.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：弾塑性型構成則，電気-機械連成，磁気-機械連成，構造最適化

1. 研究開始当初の背景

電磁気と変形が連成する機能性材料の研究では、複数の学問分野を横断することとなる。各分野の常套手法を単純に組み合わせる場合、熱力学と数学の両視点から性質が悪くなるため、材料非線形性の数理モデリングを

する際に本質的な限界が露呈してしまうという旨の議論があった。

2. 研究の目的

機能性材料デバイスの電気機械的あるいは磁気機械的な連成挙動を再現するととも

に、その設計開発に資することができる、非線形数値シミュレーション法を開発する。具体的には、次の2つを主に実施した。

- (1) 非線形圧電問題に対する弾塑性型構成則の検討
- (2) 磁歪アクチュエータ問題に対する位相最適化法の開発

3. 研究の方法

本研究では、熱力学における基本的な考え方である、示量性状態量に注目する。この状態量を独立変数に選ぶと、系のエネルギー密度が下に凸となる。示量性状態量とエネルギー共役となるのが示強性状態量であり、弾性力学の基本的な枠組みを拡張するならば、前者は一般化ひずみ・一般化変位、後者は一般化応力・一般化力と解釈できる。したがって、電気機械、磁気機械の連成問題においても、統一的な取り扱いが可能となる。理想としては、弾性問題に対する有限要素定式化のみで「何も新しいことはない」のが好ましい。しかし、離散化手続きや導入すべき物理パラメータなど、注意しておく点がある。

まず、(1)の非線形圧電問題に対する弾塑性型構成則について述べる。有限要素解析への組み込みを目指して、ヘルムホルツの自由エネルギー密度 Ψ は、任意の瞬間でひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}$ 、電気変位 \boldsymbol{D} 、塑性ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ 、残留分極 \boldsymbol{P}^r の関数

$$\Psi = \Psi(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{D}, \boldsymbol{\varepsilon}^p, \boldsymbol{P}^r)$$

と仮定する。次に弾性ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ と可逆的な電気変位 \boldsymbol{D}^e を導入して、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ と \boldsymbol{D} を

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p$$

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{D}^e + \boldsymbol{P}^r$$

のように加算分解できると仮定する。この手続きは通常金属などに対する弾塑性型構成則の導入と同一であり、違いは移動硬化則と降伏関数の具体式である。本研究では、複雑ではあるが、いくつか提案されているものがあるので、これを用いて、その性能確認を行う。

つぎに、(2)の磁歪アクチュエータ問題に対する位相最適化について述べる。幾何形状を陰的に表現するために、レベルセット法を導入し、またその形状更新と形状の複雑度の制御にはフェーズフィールド法の考え方をを用いる。磁歪問題（磁気機械の連成問題）の定式化は電気機械に対するものとはほぼ同一であるが、境界条件の考え方が異なる。この辺りの取り扱いを整理しつつ、最適化問題を構成する。本研究における目的関数は相互平均コンプライアンス — ある程度の剛性を確保しつつ、指定領域での出力変位を最大化する — とした。なお、3次元計算では計算に数週間の時間を要するため、並列化コードを作成した。

4. 研究成果

(1)非線形圧電問題に対する弾塑性型構成則

開発した構成則の解析結果のバタフライカーブを Fig. 1, 応力-ひずみ関係を Fig. 2 に示す。また、本構成則による材料挙動の妥当性確認として、一軸圧縮のもとでの電場の正負交番負荷解析を行った。解析結果のヒステリシスループを Fig. 3 に示す。圧力の増加とともにヒステリシスループ内の面積が減少する挙動を再現できている。

有限要素解析に組み込むことは確認したが、一方で課題として、材料挙動を再現するための具体式の複雑さや、それに対応して決めるべき材料パラメータの多さへの対応が残った。

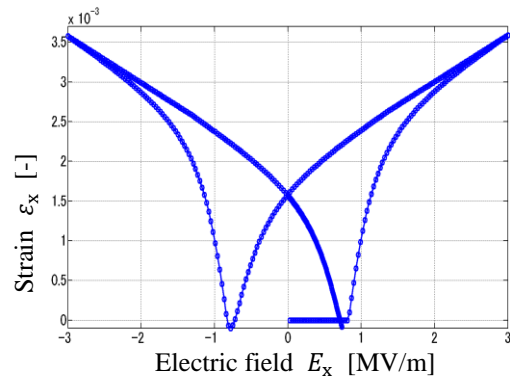


Fig. 1 ε - E butterfly curve

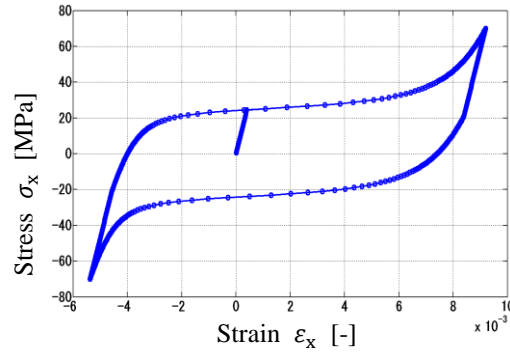


Fig. 2 Stress-strain relationship

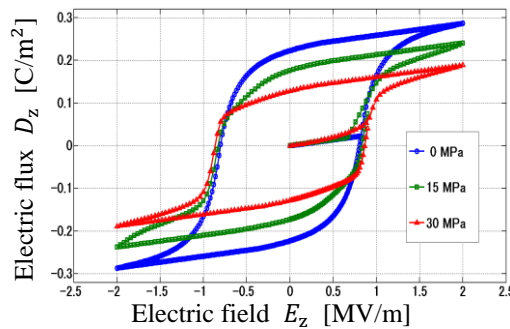


Fig. 3 D - E hysteresis loops

(2) 磁歪アクチュエータ問題に対する位相最適化

Fig. 4 に 2 次元および 3 次元最適化問題の一例を示す. 図中の領域 N が磁歪部 (最適化対象でない) であり, 領域 D が弾性ロッド部 (最適化対象, 体積制約 50%) である. 側面からの磁束漏れはないとして, 上下に磁束が貫いたとき, 領域上部の \bar{t}_d の変位出力を剛性を保ちつつ最大化する弾性ロッド部の形状を求める問題である. Fig. 5 に最適化の結果を示す. 解析領域の対称性から 2 次元問題では左半分を, 3 次元問題では左手前 1/4 領域のみを解いている.

なお, 最適化問題と数値計算手法の開発としては完結をみたが, 本研究では, 現実の非線形な磁歪特性を無視しているため, 数値モデリングの高度化は今後の課題となる.

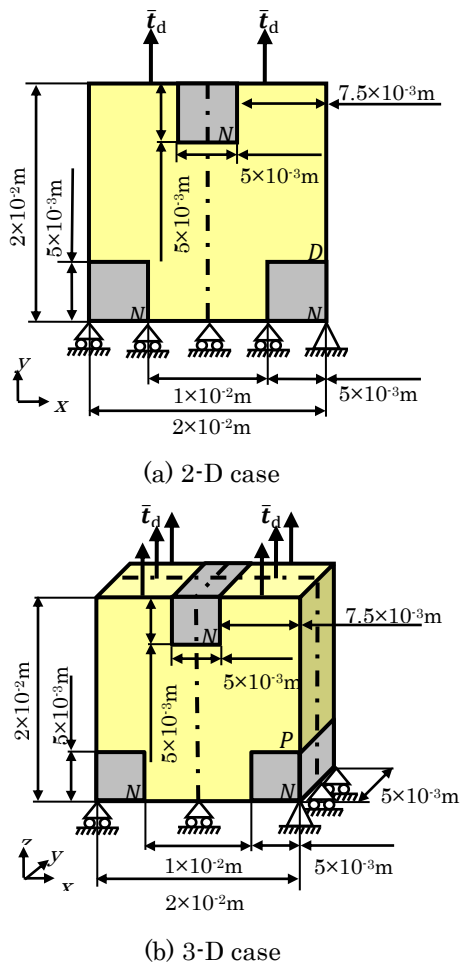
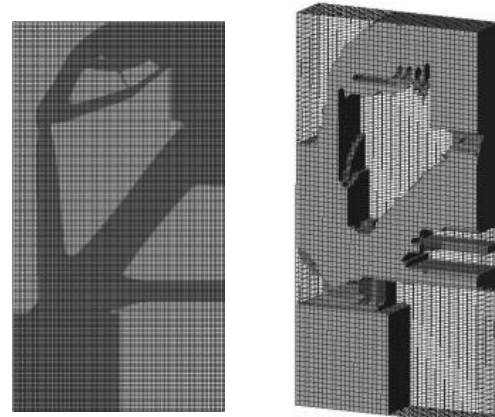


Fig. 4 Elastic rod design problem



(a) 2-D case

(b) 3-D case

Fig. 5 Optimal shapes

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 6 件)

- ① 三品雅宏, 加藤峰教, 永井学志, 山田崇恭, 西脇眞二, レベルセット法とフェーズフィールド法の考え方に基づく磁歪アクチュエータ問題のトポロジー最適化, 日本機械学会論文集 (A編), 査読有, Vol. 79, No. 798, pp. 164-176 (2013)
- ② 片桐良樹, 福手達雄, 永井学志, 圧電問題に対する弾塑性型構成則の検討, 計算工学講演会論文集, 査読無, Vol. 18, pp.1-4 (2013)
- ③ 岩田明大, 片桐良樹, 永井学志, 非線形圧電問題に対する弾塑性型構成則の検討, 計算工学講演会論文集, 査読無, Vol. 17, pp.1-4 (2012)
- ④ 山下真悟, 永井学志, 強誘電体の非線形挙動に対するランダウ型構成則の適用性, 計算工学講演会論文集, 査読無, Vol. 16, pp.1-4 (2011).
- ⑤ H. Tamagawa, K. Kikuchi, G. Nagai, Mechanical characteristics of a thermo-responsive two-way shape change polymeric laminate, Sensors and Actuators A: Physical, 査読有, Vol, 163, pp. 356-362 (2010)
- ⑥ 永井学志, 梅村公博, 佐藤司, “3 次元圧電問題に対するベクトル電気ポテンシャル型の有限要素解析手法”, 日本機械学会論文集(A編), 査読有, Vol. 76, No. 761, pp. 34-43 (2010)

〔学会発表〕（計4件）

- ① 片桐良樹, 永井学志, 非線形圧電問題に対する弾塑性型構成則の検討, 第62回理論応用力学講演会(2013)(東京)
- ② 永井学志, 岩田明大, 片桐良樹, 非線形圧電問題に対する弾塑性型構成則の基本的検討, 日本機械学会 M&M2012 カンファレンス(2012)(愛媛)
- ③ Gakuji NAGAI, Vector Potential Finite Element Procedure for Three-Dimensional Piezoelectric and Magnetostrictive Problems, The Second Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures(2010)(南京, 中国)
- ④ Gakuji NAGAI, Electronic electromagnetic Vector Potential Finite Element Procedure for Three-Dimensional Piezoelectric and Magnetostrictive Problems, WCCM - 9th World Congress on Computational Mechanics(2010)(シドニー, オーストラリア)

〔図書〕（計1件）

- ① Richard B. (Ed.), Gakuji NAGAI et al., Encyclopedia of Thermal Stresses, Hetnarski, Springer(2013)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永井 学志 (NAGAI GAKUJI)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：90334359