

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656069

研究課題名(和文) ゴム材料の力学的誘電率変化を利用した高機能電磁場デバイスのトポロジー最適化

研究課題名(英文) Topology optimization of high performance electromagnetic devices that use the change permittivity change of elastomers due to the structural deformations

研究代表者

西脇 眞二 (Nishiwaki, Shinji)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10346041

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高誘電性エラストマーの誘電率の変化を利用した高機能な電磁波デバイスの構造創成設計の開発を目的に、力学的な変形による電磁波特性の変化を考慮可能な新しいトポロジー最適化の方法論の構築を行った。すなわち、まずエラストマーの力学的な変形を評価可能とするため、粒子法に基づき幾何学的非線形性を考慮可能なレベルセット法によるトポロジー最適化の方法を構築した。他方、エラストマーの電磁波特性の解析方法については、有限要素法により開発し、そして、大変形を評価可能なトポロジー最適化の方法を、構造問題と電磁波伝搬問題における連成関係を考慮可能なように拡張を試みた。

研究成果の概要(英文)：This research constructed a new topology optimization that considers the change of electromagnetic properties due to the mechanical deformations for the structural designs of the high performance electromagnetic devices that use the change of permittivity of higher dielectric elastomers. That is, we, first, constructed the level set-based topology optimization method considering the geometrically nonlinearity based on the particle method that can evaluate the structural deformations of the elastomers. Next, the numerical method for analyzing the electromagnetic properties of the elastomers was developed using the finite element method. Finally, we tried to construct the topology optimization for the designs of electromagnetic devices that use the change of permittivity due to the structural deformations by combining the above two methods to take into account the coupled effects between the structural problems and electromagnetic wave propagation problems.

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：構造最適化 トポロジー最適化 電磁波デバイス エラストマー 有限要素法 粒子法

1. 研究開始当初の背景

ゴム材料に誘電性セラミックを混合し成形した高誘電性エラストマーは、荷重を負荷したときに誘電率を大きく変化させる。このようなゴム材料の性質は、学術的には大変興味深いものであったが、その興味範囲に留まり、電磁波デバイスへの適用については、検討されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、このような学術的な観点を超えて、高誘電エラストマーの工学的な利用を探索するため、高誘電性エラストマーの誘電率の変化を利用した高機能な電磁波デバイスの構造創成設計法の開発を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、上述のように、高誘電性エラストマーの変化を利用した機能な電磁波デバイスの構造創成設計法の開発を目的とし、その目的を達成するために、以下の方法論の構築を行った。

(1) エラストマーの力学的な変形を評価可能とするための幾何学的非線形性を考慮可能なトポロジー最適化の方法の構築

通常、構造最適化に利用される構造解析法には、解析の簡便性および設計の導出が容易なことから、一般に有限要素法が用いられる。しかしながら、大変形を考慮したトポロジー最適化に適用した場合、有限要素のつぶれや数値不安定性の問題を生じ、最適化が進められない問題が多く、研究者より報告されてきた。そこで本研究では、この問題を本質的に解決するため、粒子法に基づくトポロジー最適化の方法を構築した。

粒子法は、連続体を粒子の集合として離散化し、その粒子間の相互作用に基づき連続体の挙動を粒子の運動によって計算する手法である。図1に示すように、連続体を有限個の粒子の集合と考え、影響半径  $r_e$  の内部の粒子との相互作用により、運動方程式を次式のように記述する。

$$m_i \ddot{\mathbf{q}}_i = \sum_{j=1}^N w_{ij} \mathbf{f}_j$$

ここで、 $m_i$ 、 $\mathbf{q}_i$ 、 $\mathbf{f}_i$  は、それぞれ  $i$  番目の粒子の質量、位置ベクトル、荷重ベクトルで、 $w_{ij}$  は相互作用を示す重み係数で、次式で表される。

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 - \left( \frac{|\mathbf{r}_{ij}^0|}{r_e} \right)^2 & \text{if } |\mathbf{r}_{ij}^0| \leq r_e \\ 0 & \text{if } |\mathbf{r}_{ij}^0| > r_e \end{cases}$$

本研究では、幾何学的非線形性や、エラストマーの材料特性である非圧縮性を考慮するため、最小近似に基づく粒子法を用いて方法論の構築を行った。

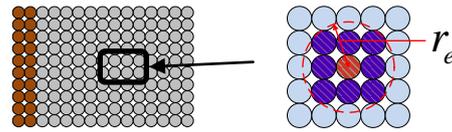


図1 粒子法の考え方

また、トポロジー最適化の方法には、研究者代表者のグループが開発してきた、レベルセット法による形状表現と、フェーズフィールド法に基づく方法を用いた。この方法では、固定設計領域を  $D$ 、求めたい最適構造を  $\Omega$  とし、次式に示すレベルセット関数により形状表現する

$$\begin{cases} 0 \leq \phi(\mathbf{x}) \leq 1 & \text{if } \mathbf{x} \in \Omega \setminus \partial\Omega \\ \phi(\mathbf{x}) = 0 & \text{if } \mathbf{x} \in \partial\Omega \\ -1 \leq \phi(\mathbf{x}) < 0 & \text{if } \mathbf{x} \in D \setminus \Omega \end{cases}$$

このレベルセット関数を次式に示す反応拡散方程式により更新することにより形状変更を行い、最終的に最適構造を得る。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -K(\phi) (\bar{f}(\mathbf{x}) H(\phi) - \tau \nabla^2 \phi)$$

次に、図2に示したようにレベルセット関数による形状表現結果に基づき、粒子の配置を行い、解析を行う。

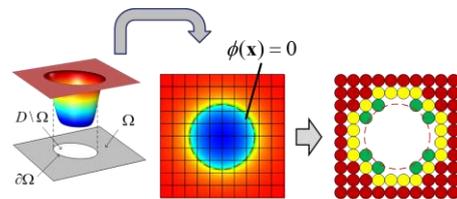


図2 レベルセット関数による形状表現結果による粒子の配置

(2) 電磁波伝搬問題を対象としたトポロジー最適化の方法

トポロジー最適化は、従来まで主に構造問題に適用されてきたが、近年、電磁波伝搬問題への適用が報告されてきている。本研究では、赤外線コリメートレンズの構造設計を目的に、研究者代表者のグループが開発してきたレベルセット法による形状表現と、フェーズフィールド法に基づくトポロジー最適化に基づき電磁波伝搬問題を対象とした方法論を構築した。

コリメートレンズとは、点波源から生じる電場を、参照電場である平面波に変換するレンズである。ここでは、このレンズを誘電体の適切な配置により実現する。今、電場を  $E_c$ 、参照電場である平面波の電場を  $E_r^i$ 、評価領域である近傍界を  $\Omega_R$  とする。ここでは、次式に示す目的関数  $F(E_c)$  の最小化により、コリメートレンズの最適構造を求めた。

$$\inf_{\varphi} F(E_z) = \int_{\Omega_R} (E_z - E_z^r)(E_z - E_z^r)^* d\Omega$$

(3) 上の二つの方法の統合化による構造問題と電磁波伝搬問題における連成関係を考慮可能なトポロジー最適化の方法の構築の検討

#### 4. 研究成果

ここでは、以下の二つの成果について示す。  
(1) 粒子法による幾何学的非線形性を考慮可能なトポロジー最適化

最初に、剛性最大化の場合の結果を示す。図3に設計領域を示す。図に示したように、固定設計領域  $D$  の両端を完全固定し、上面の中心部に分布荷重を作用させた場合の最適構造を求めた。図4に、材料には線形材料を想定し、体積制約を固定設計領域の40%に設定した場合の最適構造を示す。図より分布荷重の大きさにより最適構造が異なり、分布荷重の大きい場合は、大変形を生じない構造になっていることがわかる。



図3 設計領域(剛性最大化の場合)

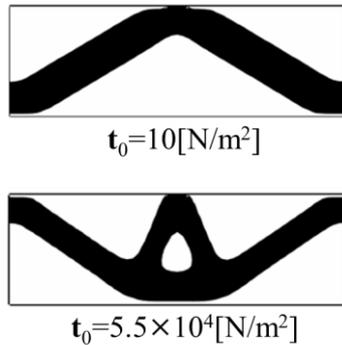


図4 最適構造(剛性最大化の場合)

次に、コンプライアントメカニズムの設計に適用した結果を示す。図5に設計領域を示す。図に示したように、分布荷重  $t_{in}$  を作用させた場合に、 $t_{out}$  の方向に変形するコンプライアントメカニズムの最適構造を求めた。

図6に、材料には Mooney-Rivlin 材料を想定し、体積制約を固定設計領域の40%に設定した場合の最適構造を示す。図に示したように、コンプライアントメカニズムの設計の場合でも、分布荷重の大きさにより最適構造が異なり、大変形の影響が考慮できてくること

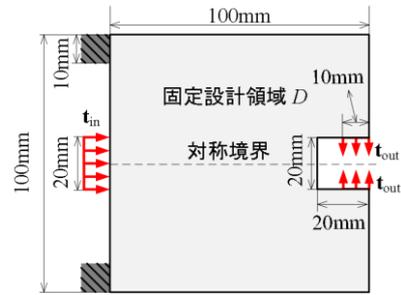


図5 設計領域(コンプライアントメカニズム設計の場合)

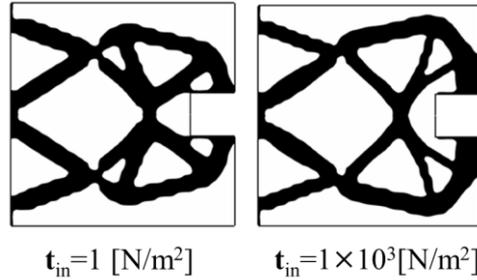


図6 最適構造(コンプライアントメカニズム設計の場合)

(2) 電磁波伝搬問題を対象としたトポロジー最適化の方法

次に、構築したトポロジー最適化の方法を、赤外線コリメートレンズの構造設計に適用した結果を示す。図7に設計領域と参照電場を示す。設計領域に示したように、点波源から生じた電磁波が、近傍界において参照電場である平面波の電場となるように、固定設計領域  $D$  にレンズを設計した。図8に、電磁波の波長を  $2\mu\text{m}$  に設定した場合の最適構造を示す。また、図9に、得られた最適構造を用いた場合の電場を示す。図より、本法で得られたレンズの最適構造は、点波源からの電場を、参照電場である平面波の電場に変換していることがわかる。

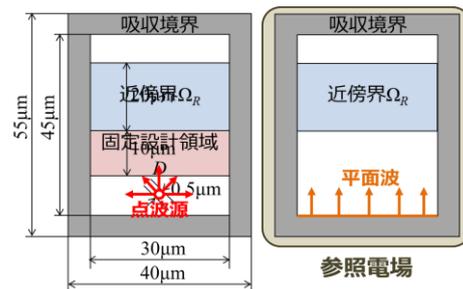


図7 設計領域(赤外線コリメートレンズ設計の場合)



図8 最適構造(赤外線コリメートレンズ設計の場合、波長=2um)

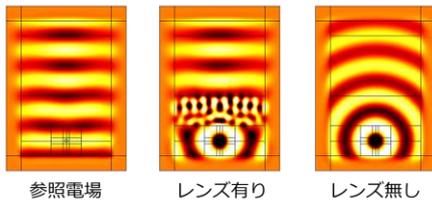


図9 電場の比較(赤外線コリメート  
レンズ設計の場合, 波長=2 $\mu$ m)

## 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1件)

- ① 真鍋匡利, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 粒子法を用いたレベルセット法による形状表現に基づくトポロジー最適化, 日本機械学会論文集(A編), 査読有, 77巻784号2011, 2054-2066, No. 2011-JAR-0018, DOI: <http://dx.doi.org/10.1299/kikaia.77.2054>

[学会発表] (計7件)

- ① Akatsuchi Y., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Ohkado, M., and Nomura, T., Design of a far-infrared lens based on topology optimization, Proceedings of the 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO10), 19-24 May 2013, Orlando, Florida, USA, No.5326.
- ② 北川晃祥, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 柴田和也, 最小二乗近似に基づく粒子法を用いたトポロジー最適化に関する考察, 第26回計算力学講演会, 日本機械学会, 2013年11月2-4日, 佐賀市, 日本, No. 1902.
- ③ 赤土侑也, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 大門真, 野村壮史, 乙守正樹, レベルセット法に基づくレンズ設計問題のトポロジー最適化, 第26回計算力学講演会, 日本機械学会, 2013年11月2-4日, 佐賀市, 日本, No. 2205.
- ④ Manabe, M., Yamada, T., Izui, K., and Nishiwaki, S., Geometrically Nonlinear Structural Design Using Level Set-based Topology Optimization and Particle Method, 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, June 13-17, 2011, Shizuoka, Japan, 193\_1.
- ⑤ Kotani, T., Yamada, T., Manabe, M., Izui, K., and Nishiwaki, S., Level Set-based Topology Optimization of Large Displacement Compliant Mechanisms, 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, June

13-17, 2011, Shizuoka, Japan, 038\_1

- ⑥ Nishiwaki, S., Manabe, M., Yamada, T., and Izui, K., Structural Optimization of Geometrically Nonlinear Problems Using Level Set-Based Topology Optimization and a Particle Method, 11th US National Congress on Computational Mechanics, July 25-28, 2011, Minneapolis, Minnesota, USA, No. 211662.
- ⑦ Kotani, T., Yamada, T., Manabe, M., Izui, K., and Nishiwaki, S., Level Set-Based Topology Optimization of Compliant Mechanisms Considering Large Displacement Effects, 11th US National Congress on Computational Mechanics, July 25-28, 2011, Minneapolis, Minnesota, USA, No. 211299.

[図書] (計1件)

- ① 西脇眞二, 泉井一浩, 菊池昇, トポロジー最適化, 計算力学レクチャーコース, 丸善出版, 総ページ数: 181 ページ, 2013.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

無し

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

西脇眞二 (NISHIWAKI, Shinji)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 10346041

(2)研究分担者

泉井一浩 (IZUI, Kazuhiro)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 90314228

山田崇恭(YAMADA, Takayuki)

京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 30598222

(3)連携研究者

無し