

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360041

研究課題名(和文)電磁波デバイスを対象としたマルチスケルトポロジー最適化

研究課題名(英文)Multi-scale topology optimization for electromagnetic devices.

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) 15,600,000円、(間接経費) 4,680,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、新しい機能をもつ、あるいは高機能をもつ革新的な電磁波デバイスの構造創成を目的に、デバイスを構成する材料構造であるマイクロ構造と、デバイス自身の構造であるマクロ構造の構造設計を同時に、かつ有機的に実施することが可能な、両スケールの構造創成設計を統合化したマルチスケールにおける構造創成設計法を、トポロジー最適化に基づき構築した。すなわち、所望の有効透磁率あるいは有効誘電率を示す電磁材料のマイクロ構造を設計する手法、およびマクロ構造の最適設計として、電磁クロッキング、導波管等の最適設計手法を開発し、してそれらの方法論の統合化を図った。

研究成果の概要(英文)：In this research, we constructed the structural optimization method for the microstructure design of artificial materials that consist of electromagnetic devices, and exhibit desirable properties such as electric permittivity or magnetic permeability, and the macrostructure design of electromagnetic devices such as cloaks and waveguides, based on the topology optimization method. We also developed the integrated design method for micro- and macro- level designs, aiming to achieve the creative design of electromagnetic devices that have new functionality or improved performance.

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 マルチスケール解析 メタマテリアル 電磁波デバイス 有限要素法

### 1. 研究開始当初の背景

構造の形状だけではなく穴の数の増減などの形態の変更も可能な最も自由度の高い構造最適化としてトポロジー最適化がある。トポロジー最適化の基本的な考え方は、構造最適化問題の材料分布問題への置き換えにある。すなわち、設定した設計領域内の必要な箇所に材料を配置し、不必要な箇所からは削除することにより最適構造を得る。これにより、あらかじめ特定の初期構造を与えることなく最適な構造を得ることができる。トポロジー最適化は所望の設計要件を満足する構造を創成する方法としても利用できる。

トポロジー最適化は、現在までに自動車産業などの機械産業などに広く利用されている。しかしながら現在までの応用は、主に構造力学の分野における剛性や固有振動数最大化などの構造の安定性を目的とした設計への適用に限られている。一方、海外では、トポロジー最適化の他の設計対象や、熱、流体、電磁気の領域などの構造力学の分野を超えた新しい物理領域への適用が積極的に進められている。

さらにトポロジー最適化は、上述のいわゆるマクロな構造の設計だけに留まらず、新しい付加価値をもつ材料の設計を目的としたマイクロ構造の創成設計にも利用されている。代表的な例として、負のポアソン比や負の熱膨張率を示す材料、さらには高性能圧電材料のマイクロ構造など創成設計が行われている。さらに、近年では、先端的研究グループを中心に、負の誘電率と透磁率、すなわち負の屈折をもつ電磁波材料などのメタマテリアルの構造設計に適用される世界的傾向にあり、実用化の設計案を得るには至っていないものの、徐々に研究成果は得られつつある。

### 2. 研究の目的

本研究では、新しい機能をもつ、あるいは高機能をもつ革新的な電磁波デバイスの構造創成設計を目的に、マイクロ・マクロ構造の設計を統合的に行えるマルチスケールのトポロジー最適化の方法論を構築する。すなわち、電磁波デバイスなどのマクロ構造の性能のトポロジー最適化による最適設計と、それを達成可能な新しい人工電磁材料の設計として、マイクロ構造の性能を電磁波伝搬解析手法により同時に評価を行いながら、トポロジー最適化により所望の特性を示すマイクロ構造の創成設計を行う方法を開発する。

### 3. 研究の方法

新しい機能をもつ、あるいは高機能をもつ革新的な電磁波デバイスの構造創成設計のため、以下の、構造最適化手法の方法論および最適化アルゴリズムを開発した。すなわち電磁デバイスの抜本的な性能改善のための新しい性能を示す電磁材料のマイクロ構造の設手法および新しい機能をもつデバイスの設計として、電磁クローキングおよび導波管

の最適設計手法を開発した。

- ① 負の透磁率を示す電磁材料設計のため、レベルセット法に基づくトポロジー最適化を用いて構造最適設計手法を開発した。有効透磁率は動的応答に対して負の特性を示すため、有限要素法を用いて周波数特性の解析を行う。有効的な電磁特性を計算する方法として動的な応答に対して適用可能な S パラメータに基づく方法とレベルセット法に基づくトポロジー最適化との統合を行いことにより、構造最適設計手法を開発した。
- ② さらに所望の誘電率テンソルを示す電磁材料の設計のため、密度法に基づくトポロジー最適化を用いて、誘電体マイクロ構造の最適設計手法を開発した。ここでは、マクロな特性を求める方法としてよく用いられている均質化法と統合し、所望の有効的な誘電率を設計する最適設計手法を構築した。
- ③ 新しい機能をもつ電磁デバイスの設計として、フェライトを用いた電磁波デバイスの構造最適設計手法を開発した。フェライトは外部磁場に大きさにより周波数に依存した透磁率を示すため、外部印加磁場による動作周波数の可変性などの新しい機能を持つことが期待される。ここでは、Landau-Lifshitz モデルを用いた透磁率の表現方法と、レベルセット法に基づくトポロジー最適化を統合し最適設計手法を構築した。
- ④ 上記方法に基づき、マイクロレベルの構造設計と、マクロレベルの構造設計の統合化を試みた。

### 4. 研究成果

上述の開発手法を数値設計例に適用し、有効性を示した。

- ① 図 1 に、負の透磁率を示すマイクロ構造最適設計手法を適用した代表的な最適設計問題のモデルを示す。電磁波が左側から入射し、鉛直方向に周期条件を与えている。中央の部分に固定設計領域とし、最適な誘電体の配置を、レベルセット法に基づくトポロジー最適化を用いて求める。図 2 に、初期構造と最適化計算で得られた最適構造、およびそれらの構造の有効透磁率を示す。また、図 3 に最適構造の有効透磁率の周波数応答を示す。図 3 に示すように、有効透磁率の負のピークが目標周波数に一致し、負の有効透磁率を示していることが確認できた。

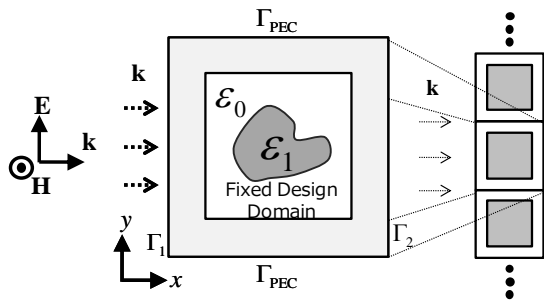


図 1. 設計領域

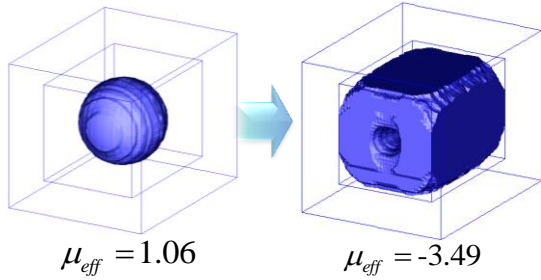


図 2. 初期構造と最適構造

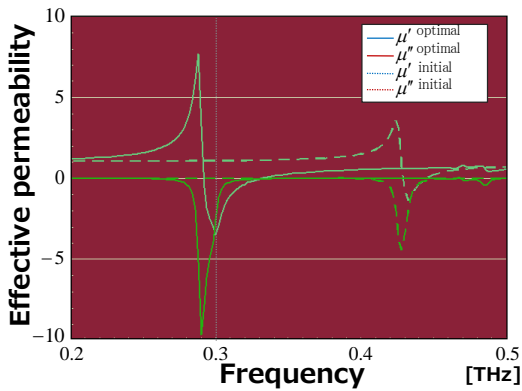


図 3. 有効透磁率の周波数応答

② 図 4 に、所望の誘電率テンソルを示す電磁材料の最適設計手法を用いて設計した誘電体マイクロ構造のユニットセル構造を示す。密度法に基づく方法論を用いて最適化手法を開発し、ここでは体積制約 75%のもと、有効透磁率が最大となる等方性材料および異方性材料の設計の結果を示している。図では、得られた構造と有効誘電率テンソルおよび理論境界との比較を行っている。図に示すように、理論境界と整合性が高い最適構造が得られており、開発手法で望ましい誘電体のユニットセル構造を設計できることを確認できた。

③ 図 5 に電磁クローキング設計問題の設計領域を示す。また、図 6 にトポロジー最適化の結果として、最適構造および電場分布を示す。結果より開発した手法により、クローキングを実現するフェライトの最適構造が得られていることが確認できる。図 7 に導波管設計問題の設計領域

を示す。上側の入力境界から電磁波が入射し、左右の出力境界から出力される電力の最大化を行っている。図 8 に最適化計算で得られた構造を示す。結果より開発した手法により、出力電力を最大化する導波管の設計が行えることが確認できた。

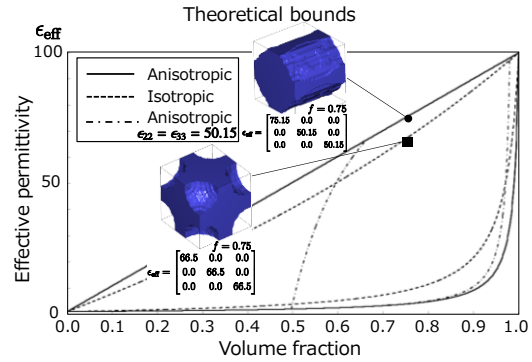


図 4. 最適構造とその有効誘電率、および理論境界との比較。

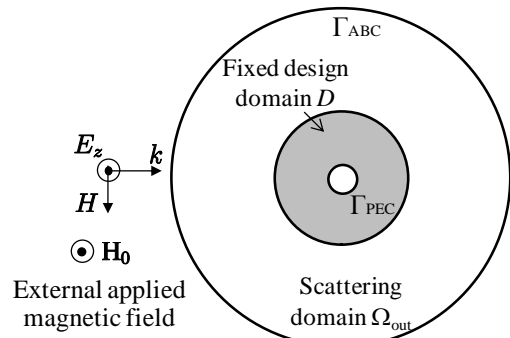


図 5. 設計領域

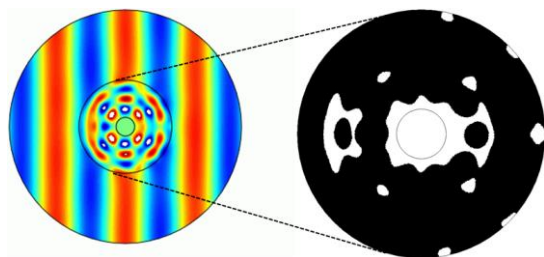


図 6. 最適構造と電場分布

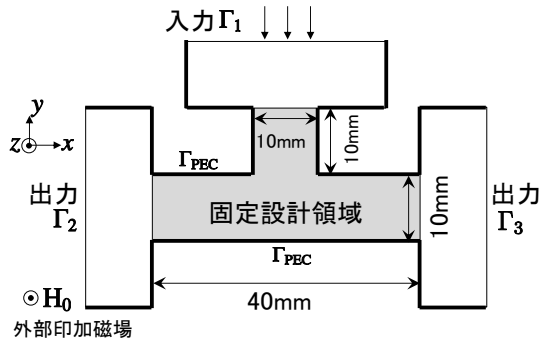


図 7. 設計領域



図 8. 最適構造

#### 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 10 件)

- ① 乙守正樹, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 小木曾望, フェライトを装荷した金属導波管のトポロジー最適化, 日本計算工学会論文集, Vol.2013, (2013), No.20130014, DOI: <http://dx.doi.org/10.11421/jscs.2013.20130014>, 査読有.
- ② Masaki Otomori, Takayuki Yamada, Jacob Andkjær, Kazuhiro Izui, Shinji Nishiwaki, Nozomu Kogiso, Level set-based topology optimization for the design of an electromagnetic cloak with ferrite material, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.49, No.5 (2013), pp.2081-2084, DOI: 10.1109/TMAG.2013.2239965, 査読有.
- ③ Masaki Otomori, Takayuki Yamada, Kazuhiro Izui, Shinji Nishiwaki, Jacob Andkjær, A topology optimization method based on the level set method for the design of negative permeability dielectric metamaterials, Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 237-240 (2012), pp.192-211, DOI:10.1016/j.cma.2012.04.022, 査読有.
- ④ Masaki Otomori, Takayuki Yamada, Kazuhiro Izui, Shinji Nishiwaki, Jacob Andkjær, Level set-based topology optimization for the design of a

ferromagnetic waveguide, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, No. 11 (2012), Vol. 48, No. 11 (2012), pp.3072-3075,

DOI:10.1109/TMAG.2012.219626, 査読有.

- ⑤ 乙守正樹, 泉井一浩, 西脇眞二, マルチプルフェイズプロジェクション法によるトポロジー最適化 (設計変数の低減のための新しいプロジェクション関数の定式化), 日本機械学会論文集(C編), 77 巻 775 号 (2011), pp.269-279, DOI: 10.1299/kikaic.77.836, 査読有.
- ⑥ Masaki Otomori, Takayuki Yamada, Kazuhiro Izui and Nishiwaki Shinji, Level set-based topology optimisation of a compliant mechanism design using mathematical programming, Mechanical Science, Vol.2 (2011), pp.91-98, DOI: 10.5194/ms-2-91-2011, 査読有.
- ⑦ 乙守正樹, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 数理計画法を用いたレベルセット法に基づくトポロジー最適化, 日本機械学会論文集 (C 編), 77 巻 783 号(2011), pp.41-54, DOI: 10.1299/kikaic.77.4001, 査読有.
- ⑧ 乙守正樹, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, Jacob Andkjær, Ole Sigmund, レベルセット法に基づく誘電体メタマテリアルのトポロジー最適化, 日本計算工学会論文集, Vol.2011, (2011), No.20110012, URL:[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscs/2011/0/2011\\_0\\_20110012/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscs/2011/0/2011_0_20110012/_article/-char/ja/), 査読有.
- ⑨ Masaki Otomori, Jacob Andkjær, Ole Sigmund, Kazuhiro Izui, Shinji Nishiwaki, Inverse design of dielectric materials by topology optimization, Progress in electromagnetic research, Vol.127 (2012), pp.93-120, DOI: .2528/PIER12020501, 査読有.
- ⑩ 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 京谷孝史, X-FEM による非均質材料の波動伝搬解析に関する基礎的研究", 土木学会論文集 A2(応用力学) 67(2011), pp.69-81, DOI: <http://dx.doi.org/10.2208/jscejam.67.69>, 査読有.

[学会発表] (計 10 件)

- ① Masaki Otomori, Lirong Lu, Shinji Nishiwaki, Takayuki Yamada, Kazuhiro Izui, Takashi Yamamoto, Level set-based topology optimization of acoustic metamaterials, Proceedings of 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-10), May 19-24, 2013, Orland, USA, No.5142.
- ② 乙守正樹, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞

- 二, 小木曾望, トポロジー最適化手法を用いたフェライト導波管の最適設計, 2012 年電子情報通信学会総合大会, 2012 年 3 月 20 日 - 23 日, 岡山, C-15-17.
- ③ Masaki Otomori, Takayuki Yamada, Kazuhiro Izui, Shinji Nishiwaki, Nozomu Kogiso, Level set-based topology optimization for the design of a ferromagnetic waveguide, IEEE International Magnetics Conference (Intermag 2012), May 7-11, 2012, Vancouver, Canada, BE-08.
- ④ 乙守正樹, Jacob Andkjær, Ole Sigmund, 泉井一浩, 西脇眞二, 有効誘電率の設計を目的とした誘電体マイクロ構造のトポロジー最適化, 第 17 回計算工学講演会, 日本計算工学会, 2012 年 5 月 29 日 - 31 日, 京都, G10-1.
- ⑤ Masaki Otomori, Jacob Andkjær, Ole Sigmund, Kazuhiro Izui, Shinji Nishiwaki, Topology optimization for the microstructure design of dielectric materials, Proceedings of 7th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems (CJK-OSM7), June 18-21, 2012, Huangshan, China, J-39.
- ⑥ 乙守正樹, 山田崇恭, Jacob Andkjær, 泉井一浩, 西脇眞二, 小木曾望, トポロジー最適化手法によるフェライトを用いたクローキング装置の構造最適設計に関する一考察, 2012 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2012 年 9 月 11 日 - 14 日, 富山, C-15-19.
- ⑦ Masaki Otomori, Jacob Andkjær, Ole Sigmund, Kazuhiro Izui, Shinji Nishiwaki, Design of dielectric materials with prescribed effective permittivity by topology optimization, JSME-CMD International Computational Mechanics Symposium 2012 (JSME-CMD ICMS2012), October 9-11, 2012, Kobe, Japan.
- ⑧ Masaki Otomori, Takayuki Yamada, Jacob Andkjær, Kazuhiro Izui, Shinji Nishiwaki, Nozomu Kogiso, Level set-based topology optimization for the design of an electromagnetic cloak with ferrite material, The 15th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2012), November 11-14, 2012, Oita, Japan, WC2-4.
- ⑨ Masaki Otomori, Takayuki Yamada, Kazuhiro Izui, Shinji Nishiwaki, Level set-based topology optimization of negative permeability metamaterials, Proceedings of 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-9), June 13-17, 2011, Shizuoka, Japan, No.111.
- ⑩ 乙守正樹, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, Jacob Andkjær, Ole Sigmund, トポロジー最適化手法を用いた誘電体メタマテ

リアルの最適設計, 2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2011 年 9 月 13 日 - 16 日, 札幌, 北海道, C-1-19.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

西脇 眞二 (SHINJI NISHIWAKI)  
京都大学・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・工学研究科・准教授  
研究者番号: 80394823  
寺田 賢二郎 (TERADA KENJIRO)  
東北大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 40282678  
野村 壮史 (NOMURA TSUYOSHI)  
株式会社豊田中央研究所・電磁波応用研究室・研究員  
研究者番号: 80394823  
大門 真 (OHKADO MAKOTO)  
株式会社豊田中央研究所・電磁波応用研究室・研究員  
研究者番号: 70443819

### (3)連携研究者

平山 浩一 (HIRAYAMA KOHICHI)  
北見工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 30218820  
Alejandro Diaz  
ミシガン州立大学・機械工学科・教授