

氏名	野村 壮史
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	論工博第 3994 号
学位授与の日付	平成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	電磁波問題を対象としたマルチフィジックストポロジー最適化

論文調査委員 (主査) 教授 吉村 允孝 教授 吉田 英生 教授 田畑 修

論文内容の要旨

電磁波利用デバイス設計において、車載などの実用上の使用環境を考慮した場合、電磁界特性のみならず、機械部品としての基本特性を満足するように設計しなければならない。本論文は、このような課題を解決しながら、より高性能なデバイスを設計するため、電磁波伝搬問題と、構造問題などの機械特性に関連する複数の物理現象に関する性能評価を同時に考慮可能な新しいトポロジー最適化の方法について論じている。本論文は7章からなっている。

第1章は序論であり、研究の背景と目的について述べている。近年、自動車における電磁波利用デバイスが急増しているという現状に対し、課題としてそれらの小型化、統合化が求められていること、また、他方で、電磁波利用デバイスの抜本的性能向上のために、周期構造を持つ人工媒質の利用が検討されてきていることを述べ、電磁波利用デバイスおよび、電磁波を対象とした人工媒質の設計方法として、力学的根拠に基づいて所望の特性値をもつ構造を設計する構造最適化技術の利用が有望であるとしている。また、電磁波問題の最適設計の発展について簡単に概観したのち、研究の目的を、電磁波問題を中心としたマルチフィジックス設計手法の構築を目指すこととしている。

第2章では、本研究で用いるトポロジー最適化について、設計領域および設計変数の設定方法の観点から述べている。トポロジー最適化とは、構造の形状と形態の変化を表現できるように設計領域、設計変数を設定して構造最適化問題を解くことにより、最適なトポロジーを持つ設計解を得る手法であり、その基本的な考え方は、設計対象物を包括する拡張された固定設計領域と、その領域内を設計構造物とそれ以外に区別する特性関数の導入にある。本研究では、従来のトポロジー最適化研究にて二次元問題で提案されてきた等方性マイクロストラクチャと、材料分布の連続性を仮定した設計空間緩和法を三次元問題に拡張して用いている。さらに、基本的には構造問題を対象に構築されてきた従来の方法を、電磁波問題へ拡張する方法を提案している。

第3章では、トポロジー最適化の実装方法を述べている。まず、トポロジー最適化で用いられる最適化アルゴリズムについて現状の到達点を述べ、その中で、本研究で用いる逐次線形計画法を説明している。また、トポロジー最適化における数値不安定性問題である、チェッカーボード問題とグレースケール問題について説明し、前者は材料分布の連続性を仮定した設計空間緩和法を用いて根本的にチェッカーボードが発生しない手法を用いることとし、後者については、その解決策として、空間占有体積制約条件を用いることを提案している。そして、電磁界解析のための数値解析手法として、本研究で用いている周波数領域スカラー定式化による二次元有限要素法と、ベクトル定式化による時間領域有限差分法について説明し、また、両者について効率のよい設計感度解析手法である、随伴変数法の適用方法について述べている。

第4章では、電磁波伝搬問題に関する二次元スカラー定式化に基づく周波数領域有限要素法を用いた、電磁波を遮蔽する電磁材料のマイクロストラクチャ設計を行うためのトポロジー最適化手法を構築している。この方法では、斜入射を扱える一次的周期性を持つ解析領域を設定し、基本格子の制約のない最適化方法を提案している。また、周期構造内での減衰の少ない二次元の波動問題で明確な周期構造を得るため、設計領域全体を含む評価領域を設定し、評価領域全体の透過エネルギー

ギーに基づいた新しい目的関数を提案している。そして、提案した目的関数を単一の斜入射条件で最小化することにより、入射角に応じた多層構造という物理的に妥当な解が得られ、提案した目的関数の有用性を示している。さらに、複数の入射角について最小化し、バンドギャップ周波数より大きい透過波について最大化し、体積も同時に最大化することで三角格子を基本格子とする空孔型二次元構造を創出している。

第5章では、誘電体共振器アンテナ設計問題を対象に、電磁波伝搬問題に関する三次元ベクトル定式化に基づく時間領域有限差分法（FDTD法）を用いた、トポロジー最適化手法を構築している。すなわち、誘電体材料の正規化密度を設計変数としたトポロジー最適化と、時間領域における電磁波問題の数値解析手法であるFDTD法を統合化した新しい最適化設計手法を提案している。この方法では、広帯域設計のための目的関数を、反射パルスの電力の時間積分で表現される広帯域パルスにおける反射エネルギーの最小化として定式化している。また、誘電体共振器アンテナ設計において、グレースケールを効率よく抑制する手法として低周波数成分を持つ混合パルスを用いた手法を考案し、数値例によりその有用性を示している。そして、この手法をアンテナの反射特性の広帯域化設計に適用し、最適構造を得ている。さらに、最適構造に基づき、実際に誘電体共振器アンテナを試作し、その性能を実験により評価している。その結果、設計要件を満足する高性能な最適構造が得られることがわかり、提案手法の有用性を検証している。

第6章では、誘電体共振器アンテナの構造設計を対象に、電磁波問題と構造力学問題の複合領域に関連する電磁波特性と機械特性の向上を目的とした新しい多目的トポロジー最適設計法を構築している。まず、電磁波問題と構造力学問題を統一的に扱える設計空間の緩和法を提案するとともに、FDTD法と有限要素法（FEM）の二つの数値解析手法との整合性を確保した材料分布の離散化法を開発している。また、三次元等方性マイクロストラクチャを用いた均質化設計法を用い、共通の設計変数から算出される弾性テンソルと誘電率テンソルの整合性を維持した手法を構築している。そして、電磁波問題と構造力学問題の設計要件を明確化するとともに、電磁波問題では反射電力量の最小化を、構造力学問題では平均コンプライアンス最小化を目的関数として定式化し、多峰性である電磁波問題を制約条件とし、凸性の強い剛性最大化問題を主の目的関数とし、 ϵ 制約法を用いて、多目的最適化問題を定式化している。さらに、実際の製造要件を満足しない設計解を、提案する制約条件設定法を用いて排除し、実用的な設計のための最適化問題を定式化している。この方法では、大量生産を前提とした射出成型を可能とするための設計解を得る制約条件として、外観に対する制約条件と、離形可能性を保証する制約条件を定式化している。また、マルチフィジックス問題において効率よくグレースケールを抑制する手法として、空間占有率制約条件を提案し、定式化している。そして、提案した手法により電磁波特性、構造力学特性、外観上の制約、製造上の制約の全てを満足した設計が可能であることを数値例で示している。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、車載などの実用上の使用環境を前提とした電磁波利用デバイスの高性能化を目的に、電磁波特性に加えて、構造力学特性などの他の物理問題に渡る特性を同時に考慮可能な新しいマルチフィジックストポロジー最適化の方法について論じている。本論文は7章からなり、得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 電磁材料の周期構造設計問題を対象に、電磁波伝搬問題に関する二次元スカラー定式化に基づく周波数領域有限要素法を用いた、トポロジー最適設計手法を構築した。本手法では、電磁材料構造の設計問題を、従来の固有値問題ではなく斜入射特性を考慮した電磁波伝搬応答問題として定式化することにより、より自由度の高い設計が可能であることを示した。
- 2) 誘電体共振器アンテナ設計問題を対象に、電磁波伝搬問題に関する三次元ベクトル定式化に基づく時間領域有限差分法を用いた、トポロジー最適設計手法を構築した。さらに、それにより、幅広い周波数帯域において、高い性能をもつ電磁波デバイスの三次元構造を創出可能であることを示した。また、入射パルスに、低周波数成分を含んだパルスを混合することにより、より明確な設計形状が得られることも示した。
- 3) 前述の2の方法と構造力学的特性の評価法を統合化するとともに、製造上の設計要件を同時に考慮可能な、マルチフィジックストポロジー最適設計法を構築した。これにより、数値的不安定性に起因する問題を克服しながら、電磁波問題と構造力学問題に関する特性、設計部品の幾何学的形状の特性を同時に考慮可能で、かつ実際の製造要件をも満足した電磁波デ

バースの実用的設計案が創出可能であることを示した。

本研究で構築された方法論を用いることで、従来の手法では設計が極めて困難な高性能なデバイスを物理・数学的な根拠をもとに合理的に自動設計可能であることが示され、今後のマルチフィジックス最適設計の研究に大きく貢献するものと期待される。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年2月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。