

京都大学	博士 (工学)	氏名	乙 守 正 樹
論文題目	Topology optimization for the micro- and macrostructure designs in electromagnetic wave problems (電磁波問題におけるマイクロおよびマクロ構造のトポロジー最適化)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文では、トポロジー最適化手法に基づき、製造性や設計制約を考慮可能な構造最適設計手法の構築、および電磁メタマテリアルの設計のためのマイクロ構造最適設計手法、さらに電磁デバイス自身の構造であるマクロ構造の最適設計手法に関する研究について論じている。本学位論文は8章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究の背景と目的および論文の構成について述べている。</p> <p>第2章は、構造最適化の分類、およびトポロジー最適化手法の歴史、電磁気分野におけるトポロジー最適化手法の従来研究について概観している。さらに、密度法に基づくトポロジー最適化およびレベルセット法に基づくトポロジー最適化の定式化について説明している。</p> <p>第3章では、製造性を考慮した最適設計を行うため、得られる構造の複雑さを制御可能なトポロジー最適化手法について述べている。最適構造の複雑さを制御するため構造の物体領域および空洞領域の最小寸法に制約を付加することができるマルチプルフェイズプロジェクション法において、従来法では、物体領域および空洞領域に対応する設計変数をそれぞれ設定するため、設計変数の数が増え、計算時間が増大することが問題であった。提案手法では、この問題を解決するため設計変数の数を低減化可能な新しいプロジェクション関数を提案し、最適化アルゴリズムを構築している。数値例として、剛性最大化問題およびコンプライアントメカニズム設計問題に適用し、計算時間を短縮化できていることを確認している。さらに、与える最小寸法制約の大きさにより、得られる最適構造の複雑さを制御できることを確認している。</p> <p>第4章では、デバイスの設計において応力制約や動作部品の干渉防止など様々な設計制約を考慮するために数理計画法を用いてレベルセット関数を更新するトポロジー最適化の方法論について述べている。様々な設計制約を考慮するためには、最適設計問題において複数の制約関数を取り扱うことが必要となる。しかしながら従来のレベルセット法に基づくトポロジー最適化手法では、複数の制約関数を取り扱うことが困難であった。そのためここでは、複数の制約条件を簡易に取り扱えるように、数理計画法の一手法であるMMA (Method of Moving Asymptotes)を用いてレベルセット関数を更新可能な最適化アルゴリズムとその実装法を提案している。構築した手法を基に、負荷荷重の向きが既定の向きとずれた場合にも十分な剛性が得られるように平均コンプライアンス制約を与える問題や、許容応力に対する要求を満たすために応力制約を与える問題、およびコンプライアントメカニズムにおいて出力方向を所望の方向に設計するために、相互平均コンプライアンス制約を与える問題の最適化問題の定式化を行っている。数値例にて、それぞれの最適化問題において与えた制約条件を満たす適切な最適構造が得られていることを確認し、提案手法の有効性を示している。</p> <p>第5章では、電磁デバイスの抜本的な性能改善のための電磁メタマテリアルの構造最適設計手法について述べている。近年、誘電体の共振現象を利用し、負の透磁率を実現する電磁メタマテリアルに関する研究が報告されている。しかしながらこれまでに、所望の特性を持つ電磁メタマテリアルの構造を力学的および数学的根拠に基づき</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	乙 守 正 樹
<p>統一のおよび効率的に設計する手法は報告されていない。そこで本研究では、レベルセット法に基づくトポロジー最適化を用いて電磁メタマテリアルの構造最適設計を行う手法を提案している。電磁メタマテリアルの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で有効透磁率を求め、有効透磁率の虚部の最小化を行った後に実部の最適化を行う二段階の最適化手法を用いて誘電体メタマテリアル最適設計問題の最適化アルゴリズムを提案した。数値例とし、2次元および3次元設計問題に適用し、提案手法の有効性を検証している。最適化の結果より、いずれの場合も、対象とする周波数において負の有効透磁率を示す最適構造が得られており、提案手法の有効性を示している。</p> <p>第6章では、所望の誘電率テンソルを示す電磁材料の設計のための誘電体マイクロ構造の最適設計手法を提案している。提案手法では、エネルギーに基づく均質化法を用いて有効誘電率を計算し、所望の誘電率の値と有効誘電率の値の差の2乗和を最小化する最適化問題を定式化し、密度法に基づくトポロジー最適化を用いて所望の有効誘電率を示す電磁材料のマイクロ構造を求めている。数値例として、2次元および3次元の設計問題に適用し、等方性および異方性材料の最適設計を行い、所望の有効誘電率を示す最適構造を得ている。さらに、2次元および3次元問題において、1つまたは2つの主方向の誘電率の値が既知の場合の残りの主方向の誘電率の値が取り得る理論境界を導出し、導出した理論境界と最適化計算で得られた最適構造を比較し、得られた最適解が妥当であることを確認している。</p> <p>第7章では、電磁デバイスのマクロ構造の最適設計手法として、フェライトを用いた電磁デバイスの構造最適設計手法について述べている。フェライトは外部磁場を印加した場合、磁気共鳴現象によって周波数に依存した透磁率を示す。そのため、フェライトを用いたデバイスでは、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、フェライトの透磁率を Landau-Lifshitz モデルを用いて表現し、レベルセット法に基づくトポロジー最適化を用いて最適設計手法を構築している。そしてその方法論を、まず、フェライトを用いて電磁クローキングを実現するデバイスの構造最適設計問題に適用している。クローキング領域外部の観測領域において、散乱体により散乱される電磁波を最小化するため、散乱電場の2乗和を最小化する最適化問題の定式化を行い、数値例にて所望の周波数において電磁クローキングを実現する最適構造を得ている。その結果、外部磁場の大きさによるクローキング機能の ON-OFF が可能な構造が得られることを確認している。次に、構築した手法を導波管内部にフェライトを装荷した導波管フィルタの最適設計問題に適用している。この設計問題では、所望の周波数において透過電力を最大化するため、S パラメータを用いて透過電力最大化問題を定式化し、数値例にて、導波管内部のフェライト材料の最適構造を得ている。また外部磁場に大きさよる導波管フィルタの動作周波数を可変できる最適構造が得られることを確認している。</p> <p>第8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。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、電磁デバイスの抜本的な性能向上あるいは新しい機能を持つデバイスの設計を目的とし、トポロジー最適化手法に基づき、製造性や設計制約を考慮可能な方法論の構築、および電磁メタ材料のマイクロ構造の最適設計手法、さらにデバイス自身の構造であるマクロ構造の最適設計手法に関する研究についてまとめたものである。得られた主な結果は次のとおりである。

1. 製造性を考慮した最適設計手法として、最適構造の最小寸法に制約を付加することで、得られる構造の複雑さを制御可能なマルチプルフェイズプロジェクション法において、従来手法より設計変数の数を低減化可能な新しい定式化を提案し、数値例にて計算時間が短縮できていることを示した。また、設計における様々な設計制約を考慮するために、複数の制約関数を容易に考慮可能な最適設計手法として、レベルセット法に基づくトポロジー最適化において数理計画法を用いてレベルセット関数を更新可能な最適化アルゴリズムとその実装法を提案した。数値例として、平均コンプライアンス制約、相互平均コンプライアンス制約、応力制約を含む最適設計問題に適用し、設計制約を満たす最適構造を得ており、提案手法の有効性を示している。

2. 電磁デバイスの抜本的な性能改善のために、電磁メタ材料のマイクロ構造最適設計手法を構築した。負の有効透磁率を持つ電磁メタ材料の設計を目的とし、トポロジー最適化手法を用いて誘電体メタ材料の最適設計手法を提案した。また所望の有効誘電率テンソルを持つ電磁材料の設計のための誘電体マイクロ構造の最適設計手法を構築した。さらに有効誘電率の取り得る理論境界を導出し、得られた最適解の妥当性を示した。

3. 電磁デバイス自身の構造であるマクロ構造の最適設計手法として、フェライトを用いた電磁デバイスの最適設計手法を構築した。電磁クローキング装置の最適設計問題および導波管内部にフェライトを装荷した導波管フィルタの最適設計問題を定式化した。数値例にて、電磁クローキングを実現するフェライトの構造を求め、外部磁場の大きさにより電磁クローキング機能の ON-OFF が可能であることを示した。また透過電力を最大化させる導波管内部のフェライト構造を求め、外部磁場の大きさにより導波管フィルタの動作周波数を変えられることを示した。

以上のように本論文は、電磁デバイスの抜本的な性能向上のためのマイクロ構造およびマクロ構造最適化手法を提案しており、学術上、実際上寄与するところが少なくない。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25年1月29日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。