

学位論文題名

Bi-Isotropic/Bi-Anisotropic 光・マイクロ波導波路解析ツールの開発に関する研究

学位論文内容の要旨

最近の情報通信デバイスの高性能化, 多機能化, 小型・集積化といった流れのなかで, 特に, 光・マイクロ波デバイスの構成に不可欠な導波路の最適設計法の確立が強く望まれている。また, 導波路の構成材料も様々なものが用いられるようになってきているが, なかでも最近, エキゾチックマテリアルと呼ばれる特異な材料に大きな関心が寄せられている。エキゾチックマテリアルには, キラル媒質を含む bi-isotropic 媒質, Ω 媒質を含む bi-anisotropic 媒質, さらに, 非線形媒質, 超電導媒質, プラズマなどといったものが含まれ, このような材料を用いて, これまでにない機能をもった新しい導波型デバイスを構成するための研究が様々な分野で盛んに行われている。

さて, 光・マイクロ波導波路の導波モードは一般にハイブリッドモードになっているため, その伝送特性を厳密に評価するにはベクトル波解析が必須である。しかしながら, 光・マイクロ波導波路のベクトル波解析は一般に困難であり, 計算機のメモリ容量, 計算時間の点で実用的でないものが多く, 実際の解析・設計にはスカラ波近似に基づく方法が数多く用いられているのが現状である。ところが, 最近の導波路の高度利用や, 前述したような様々な機能性材料の使用に伴い, 従来のスカラ波近似解析では設計指針さえ立てられないことも起こり始めており, 光・マイクロ波導波路の信頼性の高い汎用的なベクトル波解析法の確立が急務となっている。

ところで, 有限要素法はこうしたベクトル波解析のための有力な手法の一つであり, 実際, 光・マイクロ波導波路解析のためのベクトル有限要素法の開発が既に進められている。なかでも, 最近開発されたエッジ/ノードルハイブリッド要素を用いたベクトル有限要素法は, 従来から問題になっていたスプリアス解を除去できることや, 伝搬定数を直接算出できることなど, 計算効率の点から有効であるばかりでなく, これまで困難とされてきた導体エッジにおける電磁界の特異性も考慮できることから, 光・マイクロ波導波路の汎用解析法として期待されている。しかしながら, これまでは最低次の要素が用いられてきたために, 解の収束が一般に遅く, 高速高信頼度のベクトル波解析法として普及させるためには, より高次のハイブリッド要素の開発が必要と考えられる。

本論文では, こうした状況のもとで, 高次エッジ/ノードルハイブリッド要素を用いたベクトル有限要素法ならびにこれに基づく bi-isotropic/bi-anisotropic 光・マイクロ波導波路解析ツールの開発に関する研究についてまとめたものである。具体的には, 横電磁界に1次エッジ要素, 縦電磁界に2次ノードル要素を用いたベクトル波解析用の有限要素法を新たに開発している。また, ここで開発した解析法を用いて, キラル媒質, Ω 媒質, フェライトキラル媒質などからなる様々な光・マイクロ波導波路の伝送特性を解析, 評価し, こうした導波路の特異な振舞いについて調査, 検討を行っている。以下に本論文の概要を示す。

第2章ではまず, bi-isotropic 媒質および bi-anisotropic 媒質の紹介を行っている。これらの媒質はキラル性と非相反性をあわせもつ媒質として定義される。bi-isotropic 媒質, bi-anisotropic 媒質の性質について具体的に説明し, それぞれの構成方程式の表記法について述べている。また, 最近話題になっている非相反性の bi-isotropic 媒質の存在の有無について検討を加えてい

る。さらに、bi-isotropic 媒質、bi-anisotropic 媒質の応用についても言及している。

第3章では、スプリアス解が発生せず、また、光・マイクロ波導波路の伝搬定数を直接算出することが可能なエッジ/ノードルハイブリッド三角形要素を用いたベクトル有限要素法の定式化を新たに行っている。0次エッジ要素と1次ノードル要素で構成される基本ハイブリッド要素を用いた有限要素法の定式化は既に行われているが、ここでは、高速高信頼化のために、1次エッジ要素と2次ノードル要素で構成される高次ハイブリッド要素を新たに開発している。具体的に、ベンチマークテスト用の誘電体装荷方形導波管の解析を行い、厳密解と比較して、高次ハイブリッド要素を用いた有限要素法の優位性を確認している。さらに、光導波路の標準的なベンチマークテストの実施結果についてもあわせて示している。また、本手法が損失媒質を含む光導波路の解析にも有効であることを、二、三の適用事例を通して実証している。

第4章では、2次元 bi-isotropic 導波路のひとつである2次元キラル導波路解析のための有限要素法の定式化を行っている。通常の導波路に対しては、解析精度は劣化するものの、3次元導波路解析用の有限要素法を流用することが可能であるが、キラル性を有する場合には、3次元キラル導波路解析用の有限要素法を2次元キラル導波路に適用することはできない。具体的に、2次元均質キラル導波路に本手法を適用し、厳密解と比較して本手法の妥当性、有効性を示すとともに、2次元不均質キラル導波路の解析を行い、キラルアドミタンスの分布の違いが伝送特性に与える影響について調査している。

第5章では、3次元 bi-isotropic 導波路のひとつである3次元キラル導波路にハイブリッド三角形要素を用いた有限要素法を適用することを提案するとともに、その定式化を行っている。3次元のキラル導波路解析に対しては、既に三角形ノードル要素のみを用いた電磁界の6成分による有限要素法の定式化が行われているが、この手法では媒質境界の境界条件を要素ごとに考慮する必要があり、また、無損失のキラル導波路であっても、最終的な行列方程式の係数行列が複素行列になってしまう。しかし、ハイブリッド要素を用いると、境界条件が自動的に満足されるだけでなく、無損失導波路の場合には、最終的な行列方程式の係数行列が実行列になる。具体的に、キラル媒質を装荷した円形導波管、埋め込み型構造のキラル導波路の解析を行い、厳密解、および他の解析法による結果との比較から、本手法の妥当性、有効性を示している。また、円形損失キラル導波路の伝送特性に与えるキラル性の影響について詳細な調査を行っている。

第6章では、 Ω 導波路、フェライトキラル導波路などを含む一般的な bi-anisotropic 導波路に対するエッジ/ノードルハイブリッド要素を用いた有限要素法の定式化を行っている。3次元キラル導波路の場合と同様に、ハイブリッド要素を用いているため、媒質境界での電磁界の連続性は自動的に満たされ、伝搬定数を固有値として直接算出することが可能である。具体的に、フェライトキラル媒質を装荷した金属円形導波管、および埋め込み型円形フェライトキラル導波路の解析を行い、本手法の有効性を示すとともに、フェライトキラル導波路の伝送特性に与えるキラル性の影響について詳細な調査を行っている。

第7章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 柴 正 則
副 査 教 授 伊 藤 精 彦
副 査 教 授 小 川 恭 孝

学 位 論 文 題 名

Bi-Isotropic/Bi-Anisotropic 光・マイクロ波導波路解析ツールの開発に関する研究

最近の情報通信デバイスの高性能化，多機能化，小型・集積化といった流れのなかで，特に，光・マイクロ波デバイスの構成に不可欠な導波路の最適設計法の確立が強く望まれている。また，導波路の構成材料も様々なものが用いられるようになってきているが，なかでも最近，エキゾチック材料と呼ばれる特異な材料に大きな関心が寄せられている。エキゾチック材料には，キラル媒質を含む bi-isotropic 媒質， Ω 媒質を含む bi-anisotropic 媒質，さらには，非線形媒質，超電導媒質，プラズマなどといったものが含まれ，このような材料を用いて，これまでにない機能をもった新しい導波型デバイスを構成するための研究が様々な分野で盛んに行われている。

さて，光・マイクロ波導波路の導波モードは一般にハイブリッドモードになっているため，その伝送特性を厳密に評価するにはベクトル波解析が必須である。しかしながら，光・マイクロ波導波路のベクトル波解析は一般に困難であり，計算機のメモリ容量，計算時間の点で実用的でないものが多く，実際の解析・設計にはスカラ波近似に基づく方法が数多く用いられているのが現状である。ところが，最近の導波路の高度利用や，前述したような様々な機能性材料の使用に伴い，従来のスカラ波近似解析では設計指針さえ立てられないことも起こり始めており，光・マイクロ波導波路の信頼性の高い汎用的なベクトル波解析法の確立が急務となっている。

本論文は，こうした状況のもとで，高次エッジ/ノーダルハイブリッド要素を用いたベクトル有限要素法ならびにこれに基づく bi-isotropic/bi-anisotropic 光・マイクロ波導波路解析ツールの開発に関する研究の成果をまとめたものである。以下に，本論文の研究成果を各章ごとにとりまとめる。

第 2 章ではまず，bi-isotropic 媒質および bi-anisotropic 媒質の紹介を行っている。bi-isotropic 媒質，bi-anisotropic 媒質の性質について具体的に説明し，それぞれの構成方程式の表記法について述べている。また，最近話題になっている非相反性の bi-isotropic 媒質の存在の有無について検討を加えている。さらに，bi-isotropic 媒質，bi-anisotropic 媒質の応用についても言及している。

第 3 章では，エッジ/ノーダルハイブリッド要素を用いたベクトル有限要素法の高高速高信頼化のために，1 次エッジ要素と 2 次ノーダル要素で構成される高次ハイブリッド要素を新たに開発している。具体的に，ベンチマークテスト用の誘電体装荷方形導波管の解析を行い，厳密解と比較して，高次ハイブリッド要素を用いた有限要素法の優位性を確認している。さらに，光導波路の標準的なベンチマークテストの実施結果についてもあわせて示している。また，本手法が損失媒質を含む光導波路の解析にも有効であることを，二，三の適用事例を通して実証

している。

第4章では、2次元キラル導波路解析のための有限要素法の定式化を行っている。通常の導波路に対しては、解析精度は劣化するものの、3次元導波路解析用の有限要素法を流用することが可能であるが、キラル性を有する場合には、3次元キラル導波路解析用の有限要素法を2次元キラル導波路に適用することはできない。具体的に、2次元均質キラル導波路に本手法を適用し、厳密解と比較して本手法の妥当性、有効性を示すとともに、2次元不均質キラル導波路の解析を行い、キラルアドミタンスの分布の違いが伝送特性に与える影響について調査している。

第5章では、3次元キラル導波路にハイブリッド三角形要素を用いた有限要素法を適用することを提案するとともに、その定式化を行っている。ハイブリッド要素を用いると、境界条件が自動的に満足されるだけでなく、無損失導波路の場合には、最終的な行列方程式の係数行列が実行列になる。具体的に、キラル媒質を装荷した円形導波管、埋め込み型構造のキラル導波路の解析を行い、厳密解、および他の解析法による結果との比較から、本手法の妥当性、有効性を示している。また、円形損失キラル導波路の伝送特性に与えるキラル性の影響について詳細な調査を行っている。

第6章では、一般的な bi-anisotropic 導波路に対するハイブリッド要素を用いた有限要素法の定式化を行っている。具体的に、フェライトキラル媒質を装荷した金属円形導波管、および埋め込み型円形フェライトキラル導波路の解析を行い、本手法の有効性を示すとともに、フェライトキラル導波路の伝送特性に与えるキラル性の影響について詳細な調査を行っている。

第7章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

これを要するに、著者は、bi-isotropic 媒質や bi-anisotropic 媒質のような新しい材料から構成される光・マイクロ波導波路のフルウェーブ解析に必須のベクトル FEM を新たに開発し、bi-isotropic/bi-anisotropic 光・マイクロ波導波路の伝送特性に関して有益な新知見を得たものであり、光・波動エレクトロニクスに対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。