室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

伝搬演算子を用いた効率的な光導波路デバイスの有限要素法解析に関する研究

メタデータ	言語: Japanese
	出版者:
	公開日: 2021-06-23
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 森本, 佳太
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00010402

氏　　名	森本　佳太
学位論文題目	伝搬演算子を用いた効率的な光導波路デバイスの有限要素法解析に関する研究
論文審査委員	主査　教　授　　辻　寧英 教　授　　長谷川　弘治 教　授　　渡邊　浩太

論文内容の要旨

通信需要を支える基盤として機能する光通信システムは，基幹通信路として利用される光ファイバと，光信号を処理するための光回路素子で構成されている．インターネットやモバイル端末などの普及に伴う通信のさらなる高速・大容量化の要求に応えるためには，機能的役割を担う光回路素子の高性能化が不可欠である．

光回路は光が伝搬する道(光導波路)を適切に設計することで，所望の特性を有する回路素子を実現することができる．とりわけ最近では，電磁界シミュレーション技術が発達し，問題に応じて効率的な数値解析手法・自動最適設計法が多岐にわたって開発され，これらは光導波路設計を進める上で欠かせないツールとなっている．しかしながら，設計時の所要時間やメモリ容量の制約のために，自由度の高い複雑な構造や 3 次元大規模回路の設計が困難となることが問題となり，実用レベルの設計法として確立するためには，設計に適したより効率的な光導波路の解析手法が求められる．

従来の光導波路解析で広く利用されている有限要素法(FEM)は，柔軟性と適合性の高いメッシュ分割により解析領域全体を直接離散化するため，高精度解析が可能であるが，計算コストが高いことが問題点である．そこで本研究では伝搬演算子法(POM)と有限要素法を組み合わせた新しい解析法を提案する．POM は導波路断面の光波の伝搬特性を演算子化することで，固有モード計算を行わずに任意の電磁界を効率的に解析することができる手法である．とりわけこれまでの POM に関する研究では，伝搬演算子の計算精度や安定性についての検討が近年に至るまで間断なく推し進められているが，導波路設計などの多くの実用的な問題の解析を行うためには,自由度の高い構造の解析に対応した，効率的な伝搬解析手法を構築する必要がある．

本研究では，まず，有限要素メッシュを使用した POM を定式化し，Denman-Beavers Iteration (DBI)による伝搬演算子の算出法を導入することで，導波路不連続問題の効率的な解析法を開発し，その妥当性を示す．次に，効率的な伝搬解析手法であるビーム伝搬法(BPM)と本手法を組み合わせることで，不連続構造のみならず，伝搬方向への連続的な構造変化を伴う回路全体の効率的な解析法へと拡張し，その解析精度の評価を行う．最後に POM

を従来の FEM 伝搬解析の境界条件に適用し，任意構造に対して領域分割を行い効率的に解析を行うための散乱演算子法を提案し，その妥当性と有用性を示す.

本解析手法は，扱える導波路構造の自由度が高いこと，任意の大規模回路を分割してブロック構造ごとに計算を行うことが可能であること，並列計算による解析の高速化が期待できることから，光導波路の最適設計法に応用した場合にその有用性が高く，光回路の高性能化を目指した高次元設計のための実用的な解析ツールになりうると考える.

ABSTRACT

Optical communication systems that supports large communication demands, consists of optical fibers and optical circuit elements. In order to meet the demand for higher speed and larger capacity of communication due to the spread of the Internet and mobile terminals, it is indispensable to improve the performance of optical circuit elements that have a functional role in optical communication systems.

An optical circuit element with desired characteristics can be realized by appropriately designing optical waveguides. Recently, with the development of electromagnetic simulation technology, a number of efficient numerical analysis methods and optimum design methods have been developed for wide variety of waveguide problems. However, there is a problem that it is difficult to design a complicated structure with a high degree of freedom and a large-scale 3D circuit due to the limitation of required time and memory capacity. Therefore, a more efficient and practical design method has been highly required.

Finite element method (FEM), which is widely used in conventional optical waveguide analysis, directly discretizes the entire analysis region by mesh division with high flexibility and adaptability. Although FEM has high accuracy, the calculation cost usually becomes expensive due to necessity of using fine meshes. Therefore, in this study, we propose a new analysis method that combines the propagation operator method (POM) and the FEM. POM is a method that can efficiently analyze an arbitrary electromagnetic field at the cross-sectional waveguide by calculating propagation operators without eigenmode expansion. In the researches on POM so far, the calculation precision and stability of the propagation operator have been particularly studied until recent years. However, in order to analyze many practical problems including waveguide designs, it is necessary to construct an efficient propagation analysis scheme for arbitrary waveguide structures with high degree of freedom.

In this study, first, we develop a POM using finite element meshes and introducing a calculation method of the propagation operator by Denman-Beavers Iteration (DBI) to efficiently analyze the waveguide discontinuity problem, and show its validity. Next, we extend this method to be

applicable to not only discontinuous structure but also entire circuit elements with continuous structural changes, by combining with beam propagation method (BPM), and then evaluate its analysis accuracy. Finally, we apply POM to the boundary conditions of conventional FEM, and propose a scattering operator method for efficient analysis dividing the entire analysis region into arbitrary local structures, and we show its validity and usefulness.

The proposed method can treat high degree of freedom in the waveguide structure, and it is also expected that the analysis efficiency will be increased by parallel computation. Thus, it can be a practical analysis tool for high-dimensional waveguide design aiming at high performance of optical circuits.

論文審査結果の要旨

近年の情報通信社会の発展により，高速大容量通信への要求がますます高まり，基盤となる光通信の大容量化を目指して高性能光デバイスの開発が盛んに行われている．また，近年の資源問題，エネルギー問題の観点からより小型で消費電力の低い光デバイスが求められている．光デバイスの開発はこれまで様々なアプローチにより行われてきたが，特に最近では，世界的な技術革新の速さに対応しながら，これまでの常識を打ち破るような全く新しい光デバイスの開発が求められ，計算機シミュレーションを用いた自動最適設計法への期待が高く，最適設計の効率化の観点から複雑なデバイス構造に対しても高速・高精度で解析可能な計算機シミュレーション技術の開発・改良が求められている．

こうした背景の下，本論文では，伝搬演算子法を活用した効率的な光導波路解析手法の提案と定式化を行っている．まず，一様導波路の突合せ接続問題に対して，導波路断面の離散化に有限要素法を用いた定式化を初めて行い，２次元導波路に対するスカラ波解析から３次元導波路に対するベクトル波解析まで，導波路断面の離散化のみで高精度な解析が行えることを実証している．提案法は，これまでの重なり積分を用いた方法や伝搬演算子をパデ近似する方法に比べて放射波やエバネッセント波を含む全てのモードを考慮できるため高精度であり，断面の離散化に有限要素法を用いているため任意形状への適用性が非常に高く，最適設計における多様な構造変化に対しても高精度な解析が可能である．次に，複数の不連続が存在し，不連続間で導波路が緩やかに変化する場合の効率的な解析法として，伝搬演算子法とビーム伝搬法を組み合わせた解析法を新たに提案し，定式化を行い，誘電体導波路のみならずプラズモニック導波路まで含めて高速高精度な解析が可能であることを実証している．最後に，完全に任意なデバイス構造の解析に対応するため，伝搬演算子法を有限要素法解析の境界条件として用いることで完全整合層を不要にした新しい有限要素法を提案している．さらに，この手法を用いて，解析領域内の

未知変数を消去して入出力境界の電磁界分布に対する散乱演算子を導出することで，任意の入力に対する出力を効率的に解析できるようにしている．この散乱演算子を結合していくことで，大規模な問題を小規模な問題の組み合わせとして解くことが可能であり，特に周期構造に対しては散乱演算子の再利用が可能なため飛躍的に計算効率を高められることを実証している．従来のモードベースの散乱行列に対して，任意の入射界を扱えることがこの提案手法の優位性の一つである．また，この解析法を最適設計に用いる際には，特性改善のために更新された領域の散乱演算子のみを再計算するだけで全体構造の特性解析が行えるため，最適設計との親和性の高い数値解析法である．

本論文で得られた知見は，光通信の発展に大きく寄与するものであり，博士(工学)の学位を授与するに値するものと認められる．