

学 位 論 文 題 名

A Study on Numerical Analysis Methods for Nonlinear
Optical Waveguides and Their Applications
to Nonlinear Photonic Crystal Circuits

(非線形光導波路のための数値解析法の開発とその非線形フォトニック結
晶光波回路への応用に関する研究)

学位論文内容の要旨

1970 年代初頭に始まった光ファイバの低損失化、広帯域化に関する研究の急速な発展に伴い、光通信システムは長距離幹線系を中心に導入された。その後、インターネットの爆発的な普及によるトラフィック需要の急激な増加に応えるため、波長分割多重 (WDM) 技術が実用化され、本格的な大容量光通信時代を迎えつつある。こうした通信ネットワークの光化を、幹線系のみならず、加入者系にも適用、拡大していくためには、光信号の多重化や光合分波、光路変換といった機能をもつ集積光デバイスや光波回路の一層の小型化、高性能化が必要となる。しかしながら、現在の光通信システムにおいては、こうした信号処理は光信号を一度電気信号に変換してから行われている。このため、電気回路の時定数によって動作速度の上限が決まってしまう、光波の高速性を十分に活かしているとは言い難く、また、小型化にも限界がある。そこで、光信号をそのまま処理する、あるいは光によって光を制御する全光学信号処理技術の早期確立が望まれており、光ファイバや導波路型の非線形光デバイスに対する関心が高まっている。特に、光による光制御の基本原則として、とりわけ、屈折率が光強度に比例して変化する光カー効果は、その高速応答性から、全光学信号処理デバイスへの応用に大きな期待が寄せられている。

ところで最近、フォトニック結晶 (PC) 技術を光通信システムに導入するための研究が世界的に活発化している。例えば、多数の空孔をクラッド部に設けた、いわゆるフォトニック結晶ファイバ (PCF) は、従来の光ファイバでは実現し得ない様々な性質を兼ね備えている。とりわけ、実効コア断面積を自在に制御できるため、非線形 PCF として広範な応用が期待されており、スーパーコンティニウム光の発生や空間ソリトン伝送など、基礎的な実験が積み重ねられている。しかし、その理論的研究は立ち遅れており、PCF 中における非線形性の増強現象の解明が待たれている。また、フォトニックバンドギャップをもつ PC では、外部への放射は全く起こらないはずであり、真の意味での超小型光波回路の実現が期待されている。既に、従来の光導波路では実現不可能な急峻な曲がり導波路を駆使した WDM 通信用波長合分波回路や光ルータなどの試作も行われている。最近では、非線形 PC を積極的に用いた全光学信号処理デバイスも提案され、いわゆる時間領域差分法 (FDTD) による動作解析が試みられている。しかし、FDTD 法では、線形の場合に比べて、はるかに大規模な計算機資源を必要とし、非線形 PC 光波回路の解析設計を自在に行えるには至っていない。

本論文はこうした状況のもとで、非線形光波伝搬アルゴリズムを新規に開発し、その非線形 PCF、非線形 PC 光波回路への応用に関する研究結果をまとめたものである。以下に本論文

の概要を示す。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2, 3章では、それぞれ非線形光導波路解析のためのフルベクトル有限要素法 (FEM), フルベクトルビーム伝搬法 (BPM) を新規開発している。非線形光導波路の伝送特性を評価するには、定常解析 (導波モード解析) と非定常解析 (ビーム伝搬解析) とが必要であり、特に、非線形光導波路では弱導波近似が成り立たず、厳密なフルベクトル解析が必要となる。ここでは、エッジ/ノーダルハイブリッド要素と呼ばれるベクトル型要素を非線形光導波路の定常ならびに非定常解析に初めて導入し、FEM, BPM の高精度化、高性能化を図っている。これら、FEM, BPM のいずれにおいても、従来から問題になっていた非物理的な解、いわゆるスプリアス解は全く発生することなく、また、非線形屈折率の評価に必要な電界を直接算出することができ、高精度な解析が可能になっている。特に BPM では、非線形屈折率の評価に反復法を導入し、従来長時間の計算を要した空間ソリトン放出現象などの高速シミュレーションを可能としている。

第4章では、第2, 3章で開発された解析法を用いて、非線形 PCF の伝送特性を詳細に調査している。具体的に、高光強度下では、非線形 PCF のモード複屈折率、波長分散が、特に短波長側で大きく変化することを見出ししている。また、新たな非線形ファイバ型スイッチングデバイスとして、非線形 PCF カブラを提案し、その結合特性を明らかにしている。

第5章では、反射波を伴う非線形光導波路解析のための数値計算法を新規開発している。光導波路中のビーム伝搬解析には BPM が広く用いられているが、一般に BPM では、一方向のビーム伝搬を取り扱うため、反射波が存在する光導波路への適用は困難である。反射波を自動的に考慮できる解析法として、FDTD が広く用いられており、最近では非線形光導波路解析にも応用され始めている。しかし、一般に FDTD では、安定な解析を保証するために、時間及び空間の刻み幅を十分に小さくする必要があり、莫大な計算時間、計算機メモリを必要とする。そのため最近では、信号周波数がキャリア周波数に比べて十分小さいと仮定し、緩慢変化包絡線近似を導入して、時間の刻み幅に対する制約を大幅に緩和した時間領域ビーム伝搬法 (TD-BPM) が考案されている。ここでは、この TD-BPM を非線形光導波路解析に初めて導入するとともに、あわせて周期構造非線形光導波路の導波モード解析が可能な FEM の開発にも成功している。

第6章では、第5章で開発された解析法を用いて、非線形 PC 光波回路の伝送特性を詳細に調査している。非線形 PC 導波路の非線形性を増強する構造を探索し、得られた知見を基にして、非線形 PC 導波路を用いた新規光波回路、具体的には、光方向性結合器、マッハ・ツェンダー干渉計、光グレーティングなどを提案し、これらの光波回路の伝送特性を明らかにしている。

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 宮 永 喜 一

副 査 教 授 野 島 俊 雄

副 査 教 授 小 川 恭 孝

学 位 論 文 題 名

A Study on Numerical Analysis Methods for Nonlinear Optical Waveguides and Their Applications to Nonlinear Photonic Crystal Circuits

(非線形光導波路のための数値解析法の開発とその非線形フォトニック結晶光波回路への応用に関する研究)

最近、フォトニック結晶(PC)技術を光通信システムに導入するための研究が世界的に活発化している。例えば、多数の空孔をクラッド部に設けた、いわゆるフォトニック結晶ファイバ(PCF)は、従来の光ファイバでは実現し得ない様々な性質を兼ね備えている。とりわけ、実効コア断面積を自在に制御できるため、非線形PCFとして広範な応用が期待されており、スーパーコンティニューム光の発生や空間ソリトン伝送など、基礎的な実験が積み重ねられている。しかし、その理論的研究は立ち遅れており、PCF中における非線形性の増強現象の解明が待たれている。また、フォトニックバンドギャップをもつPCでは、外部への放射は全く起こらないはずであり、真の意味での超小型光波回路の実現が期待されている。既に、従来の光導波路では実現不可能な急峻な曲がり導波路を駆使した波長分割多重(WDM)通信用波長合分波回路や光ルータなどの試作も行われている。最近では、非線形PCを積極的に用いた全光学信号処理デバイスも提案され、いわゆる時間領域差分法(FDTD)による動作解析が試みられている。しかし、FDTD法では、線形の場合に比べて、はるかに大規模な計算機資源を必要とし、非線形PC光波回路の解析設計を自在に行えるには至っていない。

本論文はこうした状況のもとで、非線形光波伝搬解析アルゴリズムを新規に開発し、その非線形PCF、非線形PC光波回路への応用に関する研究結果をまとめたものである。以下に本論文の概要を示す。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2、3章では、それぞれ非線形光導波路解析のためのフルベクトル有限要素法(FEM)、フルベクトルビーム伝搬法(BPM)を新規開発している。非線形光導波路の伝送特性を評価するには、定常解析(導波モード解析)と非定常解析(ビーム伝搬解析)とが必要であり、特に、非線形光導波路では弱導波近似が成り立たず、厳密なフルベクトル解析が必要となる。ここでは、エッジ/ノードルハイブリッド要素と呼ばれるベクトル型要素を非線形光導波路の定常ならびに非定常解析に初めて導入し、FEM、BPMの高精度化、高性能化を図っている。これ

ら、FEM, BPM のいずれにおいても、従来から問題になっていた非物理的な解、いわゆるスプリアス解は全く発生することなく、また、非線形屈折率の評価に必要な電界を直接算出することができ、高精度な解析が可能になっている。特に BPM では、非線形屈折率の評価に反復法を導入し、従来長時間の計算を要した空間ソリトン放出現象などの高速シミュレーションを可能としている。

第4章では、第2, 3章で開発された解析法を用いて、非線形 PCF の伝送特性を詳細に調査している。具体的に、高光強度下では、非線形 PCF のモード複屈折率、波長分散が、特に短波長側で大きく変化することを見い出している。また、新たな非線形ファイバ型スイッチングデバイスとして、非線形 PCF カプラを提案し、その結合特性を明らかにしている。

第5章では、反射波を伴う非線形光導波路解析のための数値計算法を新規開発している。光導波路中のビーム伝搬解析には BPM が広く用いられているが、一般に BPM では、一方向のビーム伝搬を取り扱うため、反射波が存在する光導波路への適用は困難である。反射波を自動的に考慮できる解析法として、FDTD が広く用いられており、最近では非線形光導波路解析にも応用され始めている。しかし、一般に FDTD では、安定な解析を保証するために、時間及び空間の刻み幅を十分に小さくする必要があり、莫大な計算時間、計算機メモリを必要とする。そのため最近では、信号周波数がキャリア周波数に比べて十分小さいと仮定し、緩慢変化包絡線近似を導入して、時間の刻み幅に対する制約を大幅に緩和した時間領域ビーム伝搬法 (TD-BPM) が考案されている。ここでは、この TD-BPM を非線形光導波路解析に初めて導入するとともに、あわせて周期構造非線形光導波路の導波モード解析が可能な FEM の開発にも成功している。

第6章では、第5章で開発された解析法を用いて、非線形 PC 光波回路の伝送特性を詳細に調査している。非線形 PC 導波路の非線形性を増強する構造を探索し、得られた知見を基にして、非線形 PC 導波路を用いた新規光波回路、具体的には、光方向性結合器、マッハ・ツェンダー干渉計、光グレーティングなどを提案し、これらの光波回路の伝送特性を明らかにしている。

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、非線形光導波路の定常解析、非定常解析のいずれにも対応可能な数値計算法を新たに開発し、非線形フォトニック結晶ファイバや非線形フォトニック結晶光波回路の高性能化、多機能化に関する有益な知見を得ており、光通信工学の分野に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。