

学 位 論 文 題 名

Development of Electrodynamic Theories for the
Optical Characterization of Photonic Crystal Fibers
and Photonic Crystal Integrated Circuits

（フォトニック結晶ファイバとフォトニック結晶集積回路の
特性解析のための電磁界理論の開発）

学位論文内容の要旨

ネットワークの光化に伴って、幹線系、アクセス系を問わず、各種光伝送網を構成するための光ファイバや光ノードを構成するための光集積回路のなご一層の高性能化、高機能化、高信頼化、そして低コスト化が強く求められている。こうした要求に応えるために、従来の光技術のブラッシュアップを含めた高度化研究に拍車がかかっているが、同時に、全く新しい光の導波原理を巧みに利用して、従来技術の延長では実現し得ない特性を兼ね備えた光ファイバや光波回路の実現を目指した研究が、ここ数年、急速な勢いで進展している。特に、最近では、フォトニック結晶と呼ばれる新しい光技術が長足の進歩を遂げていることもあって、ナノ技術を駆使して、いわゆるフォトニック結晶ファイバやフォトニック結晶光波回路を構成しようとする試みが活発化しており、空孔付加型ファイバのように、既に実用化の域に達しているものも少なくない。

ところで、こうしたフォトニック結晶ファイバやフォトニック結晶光波回路は、その構造が微細で複雑であることから、従来型の光ファイバや光波回路に比べて、その解析、設計は格段に難しく、一般に、有限要素法、時間領域差分法などに基づく数値シミュレーションに頼らざるを得ないことが多い。これらの数値解法は、汎用性が高く、高精度計算が可能であるが、計算コストが高くなることは否めない。また、フォトニック結晶の特異な性質の発現メカニズムを、数値解法のみによって解明しようとすることには、おのずから限界がある。さらに、これまでのフォトニック結晶の技術分野では、散乱体として、円柱状物体が広く用いられており、構成材料には、通常、誘電体が使用されてきた。今後、フォトニック結晶ファイバやフォトニック結晶光波回路に新しい機能を付加していくには、形状、材料ともに、これまでとは異なるナノ構造についての検討が不可欠である。

このような状況のもとで、本研究では、計算機への負荷をできるだけ軽減するとともに、フォトニック結晶に特有な性質の発現メカニズムを解明する手がかりを得る一助として、フォトニック結晶の技術分野に従来の伝統的な解析的手法を積極的に導入し、変数分離法や関数展開法を基盤とした新たな電磁界解析理論の開発を行っている。具体的には、フォトニック結晶ファイバに対して、楕円空孔に適合した変数分離モデルに基づく簡易解析法を開発している。こ

の手法を仮想境界法と呼び、その妥当性を検証するとともに、数値解法も援用して、単一コア型のみならず、二重コア型の楕円空孔フォトニック結晶ファイバの偏波特性を明らかにしている。一方、フォトニック結晶光波回路に対しては、円柱ならびに楕円柱散乱体に適合した関数系を導入した散乱行列法を開発している。また、誘電体ナノ構造のみならず、金属ナノ構造も導入して、新たなフォトニック結晶光波回路の構成法を提案するとともに、構造変化や温度変化に対する感度解析を行い、誘電体ナノ構造ならびに金属ナノ構造フォトニック結晶導波路の伝送特性に与える構造変化や温度変化の影響を明らかにしている。

以下に、本論文の概要を示す。

第1章では、本研究の背景、目的、および本論文の構成について述べている。

第2章では、楕円空孔フォトニック結晶ファイバに対して、楕円空孔に適合した変数分離モデルを考案し、仮想境界法と呼ばれる簡易解析法を開発を行っている。空孔を楕円化することによって、いわゆる単一偏波フォトニック結晶ファイバを実現できるが、その特性解析には、もっぱら数値解法が利用されてきた。ここで開発された手法は、楕円空孔フォトニック結晶ファイバに対する唯一の解析的手法であり、この手法を用いて、楕円率とモード複屈折率ならびにウォークオフパラメータとの関係を明らかにしている。

第3章では、楕円空孔フォトニック結晶ファイバの特異な偏波特性を利用して、偏波無依存の光分波器を構成する方法を提案している。まず、単一コア型楕円空孔フォトニック結晶ファイバに仮想境界法を適用し、その偏波特性を把握した上で、次に、コアを二重化する。二つのコア間の結合特性解析については、現状では仮想境界法の適用が困難であることから、数値解法を導入して、偏波無依存動作に必要なファイバ長を算出している。

第4章では、フォトニック結晶光波回路に対して、関数展開法に基づく散乱行列法の定式化を行っている。この手法は、既に種々のフォトニック結晶光波回路の解析に利用されているが、ここでは、従来、ほとんど議論されていなかった解の安定性と収束性について詳細に調査し、打ち切り項数の解に与える影響を明らかにしている。

第5章では、楕円柱散乱体に適合した関数系を導入した散乱行列法を新たに定式化するとともに、これを、欠陥のない楕円ピラー型フォトニック結晶ならびに楕円ピラー型フォトニック結晶マイクロ共振器の透過特性解析に適用し、格子形状、励振方向、さらには楕円率の影響を明らかにしている。

第6章では、フォトニック結晶に金属ナノ構造を導入することを提案するとともに、金属の誘電率を、温度依存性も考慮できるドルードモデルで表現し、金属フォトニック結晶光波回路解析に散乱行列法を適用することを可能としている。また、金属ナノワイヤーを利用した可視域の光パワー分配器や3色の光分波器の構成法を考案し、これらの動作特性を明らかにしている。

第7章では、散乱行列法に感度解析の機能を新たに付加している。具体的に、誘電体ピラー型ならびに金属ピラー型フォトニック結晶光波回路の構造変化や温度変化に対する感度解析を行い、誘電体ピラー型の場合よりも構造変化に敏感で、温度変化にロバストな金属ピラー型フォトニック結晶光波回路の構成法を見出している。

第8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

Development of Electrodynamic Theories for the Optical Characterization of Photonic Crystal Fibers and Photonic Crystal Integrated Circuits

(フォトニック結晶ファイバとフォトニック結晶集積回路の
特性解析のための電磁界理論の開発)

最近、フォトニック結晶と呼ばれる新しい光技術が長足の進歩を遂げていることもあって、ナノ技術を駆使して、いわゆるフォトニック結晶ファイバやフォトニック結晶光波回路を構成しようとする試みが活発化しており、空孔付加型ファイバのように、既に実用化の域に達しているものも少なくない。ところで、こうしたフォトニック結晶ファイバやフォトニック結晶光波回路は、その構造が微細で複雑であることから、従来型の光ファイバや光波回路に比べて、その解析、設計は格段に難しく、一般に、有限要素法、時間領域差分法などに基づく数値シミュレーションに頼らざるを得ないことが多い。これらの数値解法は、汎用性が高く、高精度計算が可能であるが、計算コストが高くなることは否めない。また、これまでのフォトニック結晶の技術分野では、散乱体として、円柱状物体が広く用いられており、構成材料には、通常、誘電体が使用されてきた。今後、フォトニック結晶ファイバやフォトニック結晶光波回路に新しい機能を付加していくには、形状、材料ともに、これまでとは異なるナノ構造についての検討が不可欠である。

このような状況のもとで、本研究では、計算機への負荷をできるだけ軽減するとともに、フォトニック結晶に特有な性質の発現メカニズムを解明する手がかりを得る一助として、フォトニック結晶の技術分野に従来の伝統的な解析的手法を積極的に導入し、変数分離法や関数展開法を基盤とした新たな電磁界解析理論の開発を行っている。以下に、本論文の概要を示す。

第1章では、本研究の背景、目的、および本論文の構成について述べている。

第2章では、楕円空孔フォトニック結晶ファイバに対して、楕円空孔に適合した変数分離モデルを考案し、仮想境界法と呼ばれる簡易解析法の開発を行っている。空孔を楕円化することによって、いわゆる単一偏波フォトニック結晶ファイバを実現できるが、その特性解析には、

もっぱら数値解法が利用されてきた。ここで開発された手法は、楕円空孔フォトニック結晶ファイバに対する唯一の解析的手法であり、この手法を用いて、楕円率とモード複屈折率ならびにウォークオフパラメータとの関係を明らかにしている。

第3章では、楕円空孔フォトニック結晶ファイバの特異な偏波特性を利用して、偏波無依存の光分波器を構成する方法を提案している。まず、単一コア型楕円空孔フォトニック結晶ファイバに仮想境界法を適用し、その偏波特性を把握した上で、次に、コアを二重化する。二つのコア間の結合特性解析については、現状では仮想境界法の適用が困難であることから、数値解法を導入して、偏波無依存動作に必要なファイバ長を算出している。

第4章では、フォトニック結晶光波回路に対して、関数展開法に基づく散乱行列法の定式化を行っている。この手法は、既に種々のフォトニック結晶光波回路の解析に利用されているが、ここでは、従来、ほとんど議論されていなかった解の安定性と収束性について詳細に調査し、打ち切り項数の解に与える影響を明らかにしている。

第5章では、楕円柱散乱体に適合した関数系を導入した散乱行列法を新たに定式化するとともに、これを、欠陥のない楕円ピラー型フォトニック結晶ならびに楕円ピラー型フォトニック結晶マイクロ共振器の透過特性解析に適用し、格子形状、励振方向、さらには楕円率の影響を明らかにしている。

第6章では、フォトニック結晶に金属ナノ構造を導入することを提案するとともに、金属の誘電率を、温度依存性も考慮できるドルードモデルで表現し、金属フォトニック結晶光波回路解析に散乱行列法を適用することを可能としている。また、金属ナノワイヤーを利用した可視域の光パワー分配器や3色の光分波器の構成法を考案し、これらの動作特性を明らかにしている。

第7章では、散乱行列法に感度解析の機能を新たに付加している。具体的に、誘電体ピラー型ならびに金属ピラー型フォトニック結晶光波回路の構造変化や温度変化に対する感度解析を行い、誘電体ピラー型の場合よりも構造変化に敏感で、温度変化にロバストな金属ピラー型フォトニック結晶光波回路の構成法を見出している。

第8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、著者はフォトニック結晶の技術分野に従来の伝統的な解析的手法を積極的に導入し、散乱体の形状や材料によらず適用可能で、また、感度解析の機能をも兼ね備えた電磁界理論を新たに開発するとともに、フォトニック結晶ファイバや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、光ファイバ通信、ナノフォトニクス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。