

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：24506

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20433

研究課題名（和文）光デバイスの完全自動最適設計システム構築に向けた導波路解析ソフトウェア技術の開発

研究課題名（英文）Waveguide Analysis Technology for Automatic Design System

研究代表者

森本 佳太（Morimoto, Keita）

兵庫県立大学・工学研究科・助教

研究者番号：00966872

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：計算機シミュレーションを活用した光デバイス設計の高効率のため、汎用性の高い有限要素法に基づく光導波路解析法の高効率化に関する検討を行った。まず、行列演算子を活用した数値計算法を有限要素法に適用し、解析領域を任意の区間で分割することによって、ブロック構造ごとの並列計算を可能とし、また大規模な連立一次方程式の計算を省略できることを示した。また、行列演算子の構築に緩慢変化包絡線近似を適用し、必要とされるメッシュ分割数を削減することにより計算効率化が可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光デバイスに求められる設計仕様は、従来と比べ飛躍的に高度化しており、計算機シミュレーションによるデバイスの最適設計が必須となりつつある。設計の要求レベルが高まる中、デバイス構造の複雑化や解探索範囲の拡大に伴う膨大な解析・設計時間が問題となっている。本研究成果は、広く用いられている汎用性の高い有限要素法解析技術を改良し、大規模な数値計算を行列演算子による小規模な計算に帰着させることで、汎用性を損なうことなく光デバイスの最適設計を効率化できるため有用性が高い。

研究成果の概要（英文）：To improve the efficiency of optical device design using computer simulations, we studied high-speed mechanisms of optical waveguide analysis based on the finite element method, which is a highly versatile scheme. First, we newly applied a numerical method utilizing matrix operators to the finite element method. By dividing the analysis domain into arbitrary sections, it is possible to perform parallel computations for each block structure. As a result, the computation of large-scale simultaneous linear equations can be omitted. We also applied the slowly varying envelope approximation to the construction process of matrix operators and demonstrated that it is possible to reduce the number of mesh divisions and improve calculation efficiency.

研究分野：電気電子工学

キーワード：光デバイス 光導波路 電磁界解析 有限要素法 領域分割法

1. 研究開始当初の背景

情報通信技術 (ICT) の発達と通信需要の増加に伴い、光通信の高速大容量化、省電力化を目指す高性能な光デバイスが求められている。近年では光デバイスの低消費電力化、低コスト化、小型化などを実現するため、従来の導波路理論に基づいた設計法に代わって、計算機に所望の特性を有する構造を考えさせる自動最適設計法が必須となりつつある。この場合、設計上の計算コストは飛躍的に増大するため、しらみ潰し的に全ての構造の特性を評価することは現実的ではなく、勾配法、進化的アルゴリズム、機械学習などの様々な解探索手法を活用し、効率的に構造最適設計を進める方法が検討されてきた。一方、デバイス特性を評価するために必須の電磁界シミュレーションについては、汎用性の高い有限差分時間領域 (FDTD) 法や有限要素法 (FEM) が広く用いられているが、最適設計の効率化という側面での議論はあまりなされていない。特に、光回路素子の小型化に有効なトポロジー最適設計においては、複雑で微細な構造を精度よく解析することが求められ、FDTD 法や FEM では構造を直接離散化するため、膨大な計算機メモリと計算時間を要することが問題となっている。そのため最適設計に導入することを想定した電磁界解析の効率化が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、形状への適合性と汎用性が高い FEM の高速計算処理を行うための新しい数値計算法の開発を目的とする。光デバイスの構造最適設計では、異なる光導波路構造に対して光波の伝搬特性を解析し、その後、構造を更新して特性の改善度を評価するというプロセスを繰り返す必要がある。このとき電磁界シミュレーションでは、任意の構造に対する高い数値モデリング性能と大規模問題に対する並列分散処理システムを構築できることが望ましい。現状は高性能コンピュータを用いることで、ある程度計算負荷の大きい構造のモデリングは可能であるが、計算機性能への依存度が高く、また複雑な数値モデルに対して効率的に領域分割およびデータ統合をすることは難しい課題がある。そこで本研究では、申請者がこれまでに独自に開発している伝搬演算子を用いた解析法を利用し、光デバイスを任意のブロック構造に分解して散乱演算子を構築することで、従来の FEM で必要な大規模な連立一次方程式の計算を省略し、行列演算子の接続計算で解析できる方法を提案する。特に行列演算子の任意方向への接続性と演算子構築のための効率的な計算方法の 2 点についての検討を行う。これにより、局所的な構造変化に対する回路全体の特性解析は、小規模なブロック構造に対する行列演算子の更新のみで実行可能になるため、最適設計の飛躍的効率化が期待できる。

3. 研究の方法

(1) これまでに申請者が提案している散乱演算子法は、(a) 光回路を光が伝搬する方向に対して任意の数で分割する、(b) 各ブロック構造を散乱演算子化する、(c) それぞれの演算子行列を縦続接続して入出力特性を計算するという 3 つの手順で解析を行う。(b) については伝搬演算子による境界条件を課すことで散乱演算子の構築を実現しており、解析領域内は有限要素メッシュにより離散化することで任意構造への適合性を高めている。ただしこれまでの方法では、入出力ポートがセットになったブロック構造を縦続接続することのみ可能であったが、本研究では任意方向への領域分割を可能とするため、図 1 に示すように長方形に分割した解析領域の 4 面に接続インターフェースを設ける。開放系領域を扱うため吸収境界条件と伝搬演算子による境界条件を併用する方法と、4 方向への構造接続のための演算子行列の計算方法について検討する。その後、本手法の数値解析の実装により、従来の FEM と比較した手法の有用性について明らかにする。

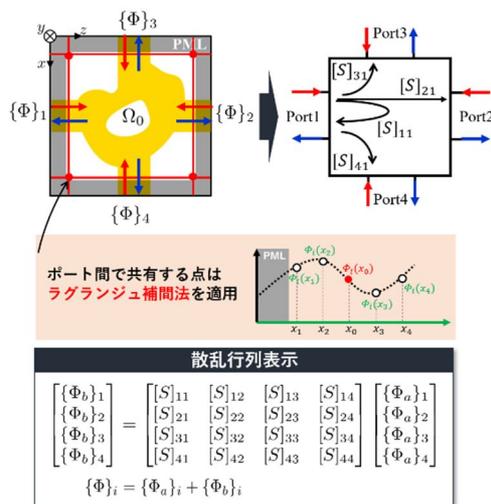


図 1 解析領域の散乱演算子モデル

(2) 有限要素メッシュを利用した散乱演算子法は、任意構造への汎用性は高いが、複雑な構造等のモデリングには FEM と同じく多くの計算機メモリを必要とするため、ここでは緩慢変化包絡線近似 (SVEA) を適用した FEM (SVEA-FEM) を用いて散乱演算子を構築する方法を検討する。SVEA-FEM は、伝搬方向に緩慢に変化する電磁界のみを未知変数とすることで、従来の FEM と比較して伝搬方向の離散化を大幅に低減することが可能である。ただし、SVEA-FEM は後進波を無視した近似解法であるため、反射波が十分小さい場合であるなど適用範囲が限られている。そこで後進波を含めて双方向伝搬解析を行う方法を検討し、散乱演算子化することで計算効率を向上できるかについて明らかにする。

4. 研究成果

(1) 全方向的に領域接続可能な有限要素法に基づく散乱行列法に関する検討

有限要素法の境界処理方法として、伝搬演算子を使った境界条件を適用し、解析領域を囲うように設置された4つの接続インターフェースにおける電磁界応答を計算する散乱演算子を導出した。開放系領域を扱うためには、隣接ポート間の不整合に起因する解析領域端からの非物理的な反射波の出現が問題となるため、完全整合層(PML)を境界条件に併用し、散乱演算子を生成する過程でPMLを除去することでその問題を解消した。隣接する入出力ポート間で共有する点の電磁界はラグランジュ補間補により自動計算されるように散乱演算子を修正することで、ポート間の電磁界が不連続となる問題を解消した。図2に誘電体導波路の端面放射における数値解析結果を示す。構造領域を2分割し、2つの散乱演算子を接続することで解析を行っている。各入出力ポートの電界振幅の解析結果は従来のFEM解析の結果とよく一致しており、放射波を含めた光波の解析が可能であることを確認した。また、図3に示すような金属-空気-金属で構成されるプラズモニック導波路の解析を行い、エバネッセント波を含めた伝搬解析への有効性も確認した。解析の安定性については、並列にポートが接続される境界において、結合系の全モードを考慮した伝搬演算子を取得しておくことで安定的に精度よく解析できることがわかった。

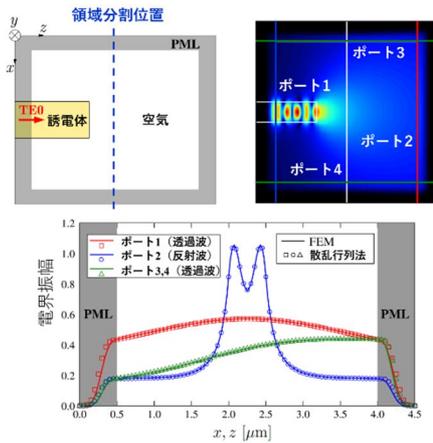


図2 誘電体導波路端面放射の解析

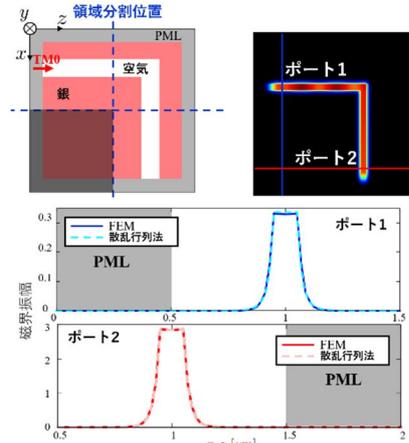


図3 プラズモニックL字導波路の解析

(2) SVEA-FEMによる効率的な光導波路の双方向伝搬解析に関する検討

SVEA-FEMと伝搬演算子を組み合わせた散乱演算子の構築について検討を行った。通常のSVEA-FEMは後進波を扱うことができないため、散乱演算子を構築するためには双方向伝搬解析を可能にする必要があり、2つの異なる提案手法について検討を行った。1つ目(提案手法1)は、求める電磁界を前進波包絡線成分と後進波包絡線成分に分け、FEMで用いられる形状関数について、新たに後進波に対応する形状関数を追加する方法である。この場合、未知変数の数が通常の2倍となり計算量は増えるが、従来のFEMと比較して伝搬方向の離散化を大幅に緩和することができる。図4に示すような1次元フォトニック結晶導波路の解析では、通常のFEMと比較して波長あたりの構造分割数を4分の1以下まで低減できることを確認した。2つ目(提案手法2)では、解析領域を構造不連続断面で分割し、伝搬方向に緩やかに構造変化する領域に対して通常のSVEA-FEMを双方向に適用し、散乱行列を構築する。この方法では反射波は不連続断面のみで生じるという仮定が必要であるが、形状関数の修正が不要で簡便な計算で入出力特性を評価することができる。図5に示すような任意の導波路構造を与えた場合、提案手法ではFEMと比較して6分の1以下の計算時間の短縮が可能であることを確認した。これらの結果より、本提案手法は構造内部で反射や共振が生じる構造に対してもSVEA-FEMを活用して効率的に解析が可能であることを示した。

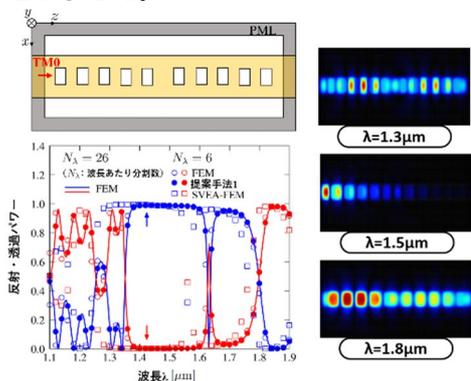


図4 1次元フォトニック結晶導波路の解析

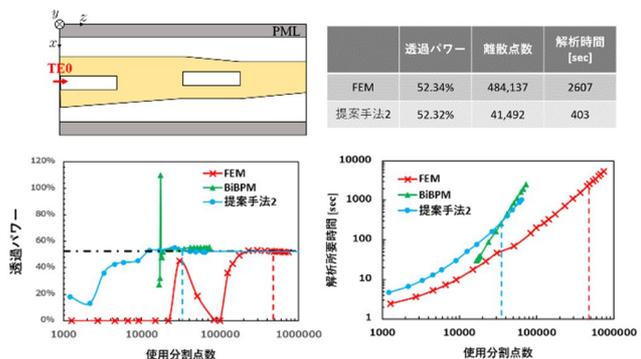


図5 傾斜と不連続を含む導波路構造の解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Bashir Tahir, Morimoto Keita, Iguchi Akito, Tsuji Yasuhide, Kashiwa Tatsuya, Nishiwaki Shinji	4. 巻 35
2. 論文標題 Optimal design of broadband non radiative dielectric guide devices using binary <scp>genetic algorithm</scp> and <scp>2D FVFEM</scp>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/jnm.2984	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 HIEDA Naoya, MORIMOTO Keita, IGUCHI Akito, TSUJI Yasuhide, KASHIWA Tatsuya	4. 巻 E105.C
2. 論文標題 Topology Optimal Design of NRD Guide Devices Using Function Expansion Method and Evolutionary Approaches	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 652 ~ 659
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.2021ESP0005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Bashir Tahir, Morimoto Keita, Iguchi Akito, Tsuji Yasuhide, Kashiwa Tatsuya	4. 巻 65
2. 論文標題 Analysis of NRD guide devices using rigorous two dimensional full vectorial FDTD method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Microwave and Optical Technology Letters	6. 最初と最後の頁 447 ~ 453
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/mop.33510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hieda Naoya, Iguchi Akito, Tsuji Yasuhide, Morimoto Keita, Kashiwa Tatsuya	4. 巻 20
2. 論文標題 Function expansion based topology optimization of NRD guide device using hybrid method of harmony search and gradient method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/elex.20.20230012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ahn Hyunuk, Iguchi Akito, Morimoto Keita, Tsuji Yasuhide	4. 巻 11
2. 論文標題 Full-Vectorial Bidirectional Beam Propagation Method for Nonradiative Dielectric Waveguides	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 80115 ~ 80122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3299168	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 森本 佳太、井口 亜希人、辻 寧英	4. 巻 J106-C
2. 論文標題 伝搬演算子を活用した有限要素法による光導波路解析の効率化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 291 ~ 298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transelej.2022JC10021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yasumori Shotaro, Sato Takanori, Morimoto Keita, Kawai Tadashi, Enokihara Akira, Nakajima Shinya, Kanno Atsushi	4. 巻 41
2. 論文標題 Electro-Optic Modulator With Tunable Multimode Interference Couplers Based on LiNbO ₃ Waveguides and Optical Single-Sideband Modulation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 7059 ~ 7066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2023.3324838	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 T. Bashir, A. Iguchi, Y. Tsuji, K. Morimoto, T. Kashiwa
2. 発表標題 Optimal design of NRD non-reciprocal guide device for millimeter-wave applications
3. 学会等名 Chitose International Forum on Science & Technology (CIF22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 N. Hieda, A. Iguchi, Y. Tsuji, K. Morimoto, T. Kashiwa
2 . 発表標題 Topology optimization of millimeter-wave band devices using hybrid scheme of gradient method and evolutionary algorithm
3 . 学会等名 Chitose International Forum on Science & Technology (CIF22) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 H. Maruyama, A. Iguchi, Y. Tsuji, K. Morimoto, T. Kashiwa
2 . 発表標題 Topology optimization of optical devices using CMA-ES
3 . 学会等名 Chitose International Forum on Science & Technology (CIF22) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 H. Ahn, A. Iguchi, K. Morimoto, Y. Tsuji
2 . 発表標題 Bidirectional beam propagation method based on full-vectorial finite element method for non-radiative dielectric guide
3 . 学会等名 Chitose International Forum on Science & Technology (CIF22) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 S. Yasumori, A. Hirai, T. Sato, K. Morimoto, T. Kawai, A. Enokihara, S. Nakajima, A. Kanno
2 . 発表標題 Mach-Zehnder Electro-optic Modulator with Multimode Interference Couplers of LiNbO3 Waveguides for Single Sideband Modulation
3 . 学会等名 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Bashir, K. Morimoto, A. Iguchi, Y. Tsuji, T. Kashiwa
2. 発表標題 Optimal design of NRD isolator using Ni-Zn ferrite post for millimeter-wave integrated circuit applications
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Tsuji, A. Iguchi, K. Morimoto, T. Kashiwa
2. 発表標題 Function expansion based topology optimization of optical and millimeter-wave circuit devices
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Hieda, A. Iguchi, Y. Tsuji, K. Morimoto, T. Kashiwa
2. 発表標題 Topology optimization of NRD guide devices using covariance matrix adaptation evolution strategy
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安 賢旭, 井口 亜希人, 森本 佳太, 辻 寧英
2. 発表標題 散乱行列に基づく双方向ビーム伝搬法を用いたNRDガイドの解析
3. 学会等名 IEICE北海道支部学生会インターネットシンポジウム 2023年2月
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 稗田 直哉, 森本 佳太, 井口 亜希人, 辻 寧英, 柏 達也
2. 発表標題 共分散行列適応進化戦略を用いたNRDガイド素子の構造とサイズの設計に関する検討
3. 学会等名 IEICE北海道支部学生会インターネットシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安森 昌太郎, 真野 紗耶加, 森本 佳太, 河合 正, 榎原 晃, 中島慎也, 赤羽浩一
2. 発表標題 LiNbO3による1×3MMI光カップラと3並列干渉光変調器の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 風間 啓佑, 井口 亜希人, 辻 寧英, 森本 佳太, 柏 達也
2. 発表標題 ベイズ最適化を用いたNRDガイドスタブ型フィルタの設計
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安 賢旭, 井口 亜希人, 森本 佳太, 辻 寧英
2. 発表標題 NRD ガイド解析のための 3 次元フルベクトル双方向ビーム伝搬法
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安森 昌太郎, 真野 紗耶加, 森本 佳太, 河合 正, 榎原 晃, 中島慎也, 赤羽浩一
2. 発表標題 3並列干渉構造による波長分散補償が可能な光変調器
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安 賢旭, 井口 亜希人, 森本 佳太, 辻 寧英
2. 発表標題 3次元フルベクトル双方向ビーム伝搬法を用いた誘電損失を考慮したNRDガイドの解析
3. 学会等名 電気・情報関係学会北海道支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安 賢旭, 井口 亜希人, 森本 佳太, 辻 寧英
2. 発表標題 3次元双方向ビーム伝搬法によるNRDガイド導波路の非対称性に起因するモード結合の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高満 裕己, 森本 佳太, 榎原 晃, 井口 亜希人, 辻 寧英
2. 発表標題 緩慢変化包絡線近似有限要素法による効率的な光導波路の双方向伝搬解析に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 森本 佳太, 榎原 晃, 井口 亜希人, 辻 寧英
2. 発表標題 光デバイス解析のための全方向的に領域接続可能な有限要素法に基づく散乱行列法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------