



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



随伴変数法による感度解析に基づくプラズモニック 導波路デバイスの自動最適設計に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 電子情報通信学会 公開日: 2019-07-09 キーワード (Ja): プラズモニックデバイス, トポロジー最適化, 随伴変数法, 関数展開法 キーワード (En): 作成者: 幸田, 秋乃, 田中, 智大, 辻, 寧英 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009948

随伴変数法による感度解析に基づくプラズモニック導波路デバイスの自動最適設計に関する研究

幸田 秋乃^{†a)} 田中 智大^{†b)} 辻 寧英^{†c)}

A Study on Topology Optimization of Plasmonic Waveguide Device
Based on Sensitivity Analysis by Adjoint Variable Method

Akino KODA^{†a)}, Tomohiro TANAKA^{†b)}, and Yasuhide TSUJI^{†c)}

あらまし 近年、シミュレーション技術の発展により、計算機シミュレーションを用いたデバイス構造の自動最適設計が盛んに検討されている。特に、トポロジー最適化は高性能で独自のデバイス構造を見出す可能性があるため、誘電体光デバイスの最適設計へ適用され、様々な光デバイスが提案されている。一方で、回折限界を超えて光デバイスを小型化できる可能性があるプラズモニックデバイスが大いに注目を集めているが、プラズモニックデバイスに有効なトポロジー自動最適設計法についての検討はまだ十分になされていない。本論文では、設計領域内の構造表現に関数展開法を用い、随伴変数法による感度解析に基づくプラズモニックデバイスのトポロジー自動最適設計法について検討を行っている。

キーワード プラズモニックデバイス、トポロジー最適化、随伴変数法、関数展開法

1. ま え が き

近年、スマートフォンやIoT等の普及により通信トラフィックが爆発的に増大し、光通信システムの高容量化が求められている。それに伴い光デバイスや光集積回路の小型化も求められ、ナノオーダーの光導波路デバイスの設計が重要となっている。近年の光デバイスの設計においては、計算機の大容量化やシミュレーション技術の発展によって、計算機シミュレーションによる最適設計についての研究が盛んに行われている。最適設計手法には寸法最適化、形状最適化など幾つかのレベルが存在するが、特に我々は、構造のトポロジーまで含めて任意の構造を発現可能なトポロジー最適設計についての検討を行っている。トポロジー最適化は設計の自由度が高く、今までに考えられてこなかった独自のデバイス構造を見出す可能性があるため、

これまでに様々な誘電体光デバイスの最適設計において用いられてきた[1]~[4]。しかしながら、誘電体光デバイスは回折限界の制約を受けるために、光デバイスを波長オーダー以下に小型化することは難しい。一方、プラズモニック光デバイスは、表面プラズモンポラリトンを金属と誘電体の界面に沿って伝搬させることによって、回折限界を超えて光の波長以下にデバイスを小型化することができる。そのため、この特性を利用した様々なプラズモニックデバイスが研究・提案されている[5]~[8]。しかしながら、プラズモニック導波路デバイスに対する感度解析に基づくトポロジー最適設計の検討はまだ十分にはなされていない。本研究では、関数展開法と随伴変数法に基づくトポロジー最適設計法[2]をプラズモニック導波路デバイスに適用するための検討を行っている。

2. プラズモニック導波路デバイスと従来の関数展開法に基づく最適設計の問題

プラズモニック導波路は金属の大きな負の比誘電率を利用することで回折限界を超えて光を波長オーダー以下に閉じ込めることができる。誘電体導波路(Air/Si/Air)とプラズモニック導波路(MIM)の導波

[†] 室蘭工業大学大学院情報電子工学系専攻、室蘭市

Division of Information and Electronic Engineering, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto, Muroran-shi, 050-8585 Japan

a) E-mail: 18043016@mmm.muroran-it.ac.jp

b) E-mail: 17043041@mmm.muroran-it.ac.jp

c) E-mail: y-tsuji@mmm.muroran-it.ac.jp

路幅 w に対する基本モードの光閉じ込めの比較を図 1 に示す. 波長 $1.55 \mu\text{m}$ を考え, 誘電体導波路はコアを Si, クラッドを空気とし, 屈折率をそれぞれ $n_{\text{Si}} = 3.4$, $n_{\text{air}} = 1$, プラズモニック導波路ではクラッドを Ag, コアを空気とし, Ag の比誘電率を $\epsilon_{r,\text{Ag}} = -103.33 - j8.1302$ としている. 図 1 (a) は, 誘電体導波路の TE 基本モードとプラズモニック導波路の TM 基本モードの $1/e^2$ 幅 w_{eff} を示し, 図 1 (b) には $w = 200 \text{ nm}$, 50 nm とときの光の閉込めの様子を示している. プラズモニック導波路ではコア・クラッド境界の光強度が大きいことがわかる.

密度法や従来の関数展開法に基づく誘電体デバイスに対する最適設計手法をプラズモニックデバイスに適用した場合, 金属が大きな負の誘電率をもつために, デバイス構造の尖った部分に電磁界が集中し局所的に感度が高くなることもある. これは従来の方法において, 有限要素境界と材料境界の取り扱いが厳密ではなく, デバイス構造に尖った部分が多く現れやすいことにも起因している. その結果, 伝搬解析が精度良く行えなかったり, 構造の更新が特定の部分のみに集中したりする問題を引き起こす. 図 2 に従来の関数展開法で設計領域内の構造を表現した対称 2 分岐プラズモ

ニック導波路の例を示す. コア・クラッド境界付近に不自然な光の局在が見られることがわかる. そのため, 本論文ではデバイス構造の表現に本質的に滑らかな構造表現が可能な関数展開法を用い, 正確に金属境界を取り扱えるようにするとともに, 随伴変数法による感度解析に改良を加えることにより, 上記の問題を改善する.

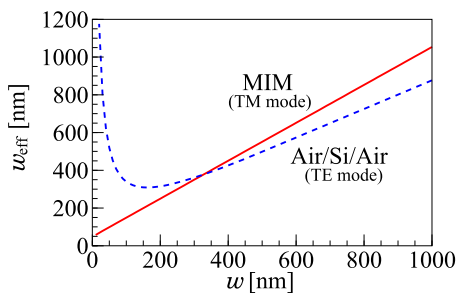
3. プラズモニック導波路デバイスのトポロジー最適化

3.1 トポロジー最適化の流れ

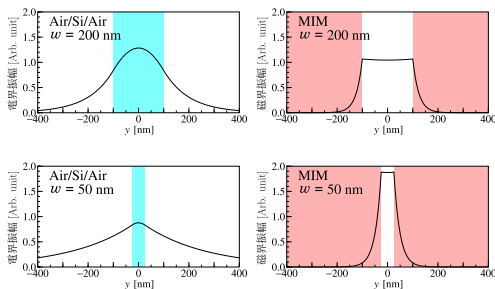
図 3 に示すような 1 入力多出力の光導波路デバイスを考える. トポロジー最適化では, まず設計領域を定義し, 設計領域内の初期構造を幾つかの数値パラメータ (設計パラメータ) を用いて表す. 次に, 有限要素法による伝搬解析を行い入出力特性を評価する. その後, 設計パラメータの微小変化に対する特性変化を調べるための感度解析を行い, 感度に基づき特性が改善するように設計パラメータの更新を行う. この手順を繰り返すことで目的の特性を有する最適化構造を得る.

3.2 関数展開法

光デバイスのトポロジー最適化では, 設計領域内の構造をいかに数値表現するかが重要である. この数値



(a) 実効導波路幅 ($1/e^2$ 幅)



(b) 導波路幅に対する固有モードフィールドの変化

図 1 誘電体導波路とプラズモニック導波路の光閉込めの比較

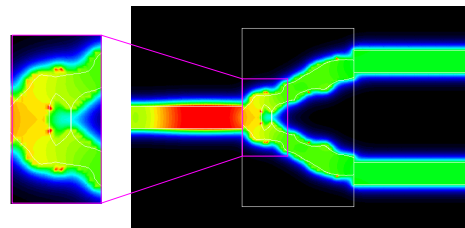


図 2 従来の関数展開法を用いた対称 2 分岐プラズモニック導波路の設計例

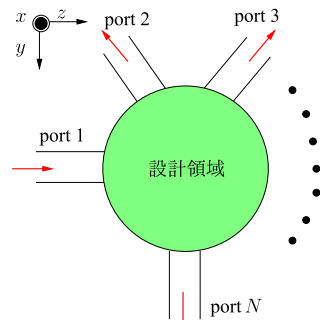


図 3 2次元光導波路デバイスの設計問題

表現の方法には様々な方法があるが、本検討では少ない設計パラメータで滑らかな境界形状の表現が可能なる関数展開法を採用する．通常の2媒質問題では、比誘電率分布 $\varepsilon_r(y, z)$ を以下のように表す [2].

$$\varepsilon_r(y, z) = \varepsilon_{ra} + (\varepsilon_{rb} - \varepsilon_{ra})H(w(y, z)) \quad (1)$$

ここに ε_{ra} , ε_{rb} はそれぞれ設計に用いる材料の比誘電率, $H(w(y, z))$ はヘビサイド関数であり, $w(y, z) < 0$ のときは 0, $w(y, z) > 0$ のときは 1 の値をとり, $w(y, z)$ の値により, $\varepsilon_r(y, z)$ は設計領域内で ε_{ra} あるいは ε_{rb} のどちらかの比誘電率となる．しかしながら, 実際には ε_r は感度解析のためには微分可能である必要があるため, これまでの検討ではヘビサイド関数 $H(w(y, z))$ を以下のように定義している.

$$H(w) = \begin{cases} 0 & (w \leq -h) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{w+h}{h} \right)^2 & (-h < w < 0) \\ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w-h}{h} \right)^2 & (0 \leq w < h) \\ 1 & (h \leq w) \end{cases} \quad (2)$$

ここに h は中間的な値を取り扱うために導入した量であり, グレイ領域の面積と関係する．最適化の進行とともに h の値を徐々に小さくし, 最終的に 0 とすることによりグレイ領域を除去することができる．

関数展開法では構造定義関数 $w(y, z)$ は通常以下のように表される．

$$w(y, z) = \sum_{i=1}^N c_i f_i(y, z) \quad (3)$$

$w(y, z)$ は基底関数 $f_i(y, z)$ の重ねあわせによって表現されており, 基底関数をどう選ぶかによって最適解の探索経路が異なる．本検討では, 基底関数に四角錐関数 [3] を用いており, 構造定義関数 $w(y, z)$ は以下のように表される．

$$w(y, z) = \sum_{i=0}^{N_y} \sum_{j=0}^{N_z} c_{ij} f\left(\frac{y-y_i}{\Delta y}\right) f\left(\frac{z-z_j}{\Delta z}\right) \quad (4)$$

$$f(\xi) = \begin{cases} 1 - |\xi| & (|\xi| \leq 1) \\ 0 & (|\xi| > 1) \end{cases}$$

ここに $\Delta y = W_y/N_y$, $\Delta z = W_z/N_z$, $y_i = i\Delta y$, $z_j = j\Delta z$ である．四角錐関数は各基底関数の構造へ

の影響が局所的になるため, 不要な構造が現れづらいが, 一方で, 大きなトポロジーの変化が起こりづらいうという面もある．

ところで, 関数展開法で表現された構造に対し, これまでの誘電体導波路に対する有限要素法解析においては, 要素内に媒質境界が存在する場合でも媒質境界と要素境界を適合させず, 要素内の材料を平均屈折率で近似していた．媒質境界は結果的にぼやけてしまい構造を正確に表現することができないが, このことは誘電体導波路では大きな問題とはなっていなかった．しかしながら, プラズモニックデバイスにおいては, 金属が負の大きな屈折率を有するために金属と誘電体の境界における電磁界の変化が急であり, 媒質境界を正確にモデリングしなければならない．本検討では, 図 4 に示すように媒質境界を含む要素のみを再分割し, 要素境界と媒質境界を一致させるように設計手法の改良を行っている．

3.3 有限要素法解析

光導波路デバイスの最適設計においては構造の特性解析が必要となるため, 本節では, 有限要素法を用いた光伝搬解析について説明する．有限要素法は, 反射波が存在する場合にも特性解析が可能で, 光導波路が不連続な場合に有効な解析法である．

図 5 に示すような 2 次元光導波路デバイスの光波の振る舞いは以下の波動方程式で表される．

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(p \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(p \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + k_0^2 q \Phi = 0 \quad (5)$$

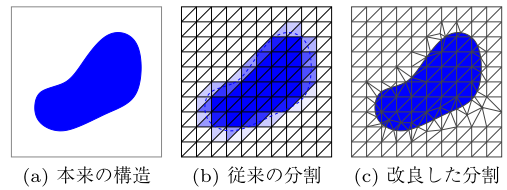


図 4 関数展開法における有限要素法による離散化

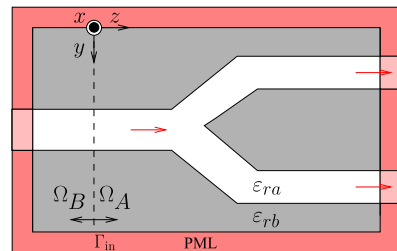


図 5 2次元光導波路不連続

ここに, k_0 は自由空間波数であり, p, q, Φ は TE 波, TM 波かによって以下のように表される.

$$\begin{cases} p = 1, & q = n^2, & \Phi = E_x & \text{for TE mode} \\ p = 1/n^2, & q = 1, & \Phi = H_x & \text{for TM mode} \end{cases}$$

図 5 に示すように解析領域を完全整合層 (PML) で取り囲み, 入射境界を設定した後, 解析領域全体を三角形 2 次接点要素を用いて分割し, ガラーキン法に基づく有限要素法を適用し部分積分を行うと, 最終的に以下の行列形式の線形方程式が得られる.

$$[P]\{\phi\} = \{u_{in}\} \quad (6)$$

$$[P] = [K] - k_0^2[M] \quad (7)$$

$$\{u_{in}\} = [Q]\{\Phi_{in}\} \quad (8)$$

$$[K] = \sum_e \int_e p \left(\frac{\partial\{N\}}{\partial y} \frac{\partial\{N\}^T}{\partial y} + \frac{\partial\{N\}}{\partial z} \frac{\partial\{N\}^T}{\partial z} \right) dydz \quad (9)$$

$$[M] = \sum_e \int_e q \{N\}\{N\}^T dydz \quad (10)$$

$$[Q] = -j2\beta_{in} \sum_{\Gamma} \int_{\Gamma} \{N\}_{\Gamma} \{N\}_{\Gamma}^T dy \quad (11)$$

ここに $\{\Phi\}$ は各節点における Φ の値からなるベクトル, $\{N\}$ は三角形 2 次節点要素の形状関数, \sum_e, \sum_{Γ} は全ての節点要素及び入射境界上の要素の和, $\int_e dydz, \int_{\Gamma} dy$ はそれぞれ要素内での面積分及び入射境界上での線積分を表し, $\{u_{in}\}$ は入射条件を与えるベクトルである.

3.4 随伴変数法による感度解析

光導波路デバイスの特性が改善する方向に構造を更新するためには, 構造が変化したときにどのように特性が変化するかを調べる必要がある. 本検討では構造の変化に対する特性の変化を効率的に調べる方法として, 随伴変数法 (Adjoint Variable Method: AVM) を用いている. 光導波路デバイスの伝送特性は式 (6) を解くことで求まる. いま導波路 1 から光を入射して伝搬界分布が求まると, n 番目の導波路への固有モードの振幅透過係数 S_{n1} は, 次のように表される.

$$S_{n1} = \{\Phi\}\{g_n\}^T \quad (12)$$

このとき, 設計パラメータ c_i の変化に伴う電磁界の変化を用いて, S_{n1} の感度 $\partial S_{n1}/\partial c_i$ は

$$\frac{\partial S_{n1}}{\partial c_i} = \sum_j \frac{\partial S_{n1}}{\partial \Phi_j} \frac{\partial \Phi_j}{\partial c_i} = \left\{ \frac{\partial S_{n1}}{\partial \Phi} \right\}^T \frac{\partial \{\Phi\}}{\partial c_i} \quad (13)$$

と表すことができる.

一方, 式 (6) を c_i で微分し, 式 (13) に代入すると以下の式が得られる.

$$\frac{\partial S_{n1}}{\partial c_i} = -\{\lambda_n\}^T \frac{\partial [P]}{\partial c_i} \Phi \quad (14)$$

ここで, 随伴変数ベクトル $\{\lambda_n\}$ は

$$[P]^T \{\lambda_n\} = \{g_n\} \quad (15)$$

を解くことで求めることができ [1], $\{\lambda_n\}$ はどの設計パラメータに着目しているかによらないため. 一度 $\{\lambda_n\}$ を求めておくと, 全ての c_i に対する感度を効率良く計算することができる.

式 (14) からわかるように, 随伴変数法による感度解析においては, 有限要素行列 $[P]$ の各設計パラメータに関する微分が必要になるため, 通常の誘電体デバイスの最適化の場合には, 比誘電率が異種媒質間で連続的に変化するグレイ領域を設ける. しかしながら, 金属材料にグレイ領域を設けた場合, 金属としての性質が強くなるため, コア部に広いグレイ領域が存在する場合に光が伝搬できない. そのため本検討では, 式 (2) において $h = 0$ としてグレイ領域を用いずに導波路解析を行うようにし, グレイ領域がなくても感度解析を行えるように, 有限要素行列 $[P]$ の微分を以下のように差分近似する.

$$\frac{\partial [P(c)]}{\partial c_i} = \frac{[P(c + e_i \Delta c_i)] - [P(c)]}{\Delta c_i} \quad (16)$$

ここに c は設計変数ベクトル, e_i ($i = 1, 2, \dots, N$) は各設計変数に対する基底ベクトルである.

3.5 設計パラメータの更新方法

本検討では設計パラメータの更新には最大勾配法を用い, 以下の式により設計パラメータを更新し, 目的関数を最小化する.

$$c_{post} = c_{pre} + \alpha \times (-\nabla_c C) \quad (17)$$

ここに c_{post}, c_{pre} はそれぞれ更新後, 更新前の設計パラメータからなるベクトルであり, $\nabla_c C$ は設計パラメータに対する目的関数 C の勾配である. ここでは α は以下のように設定する.

$$\alpha = \delta \times \frac{|C - C_{opt}|}{|\nabla_c C|} \quad (18)$$

ここに δ は更新の大きさを決めるために任意に与えられる定数, C_{opt} は目的関数の目標値である, C と C_{opt} の差が大きい場合は移動度が大きく, 特性の改善が進むと移動度が小さくなり, パラメータの微調整を行う。

4. プラズモニック導波路デバイスの最適設計例

4.1 非対称分岐

図 6 に示すような非対称 2 分岐プラズモニック光導波路の最適設計問題を例に, 改良した手法がプラズモニックデバイスに適用可能であるかについて検討を行う。port 1 に入射した波長 $1.55 \mu\text{m}$ の TM 基本モードの光を 1 : 4 に分岐するようなデバイスの最適設計を行う。構造パラメータは $w = 0.1 \mu\text{m}$, $s = 0.2 \mu\text{m}$, $l = 0.5 \mu\text{m}$, $W_z = W_y = 0.5 \mu\text{m}$ とする。材料は銀 (Ag) と空気 (Air) とし, 銀の比誘電率はドルーデ・ローレンツモデル [10] から $\epsilon_{\text{Ag}} = -103.33 - j8.1302$, 空気の比誘電率は $\epsilon_{\text{air}} = 1$ とする。目的関数は上記で述べた特性を得るために以下のように設定する。

$$\text{Minimize } C = (4|S_{21}|^2 - |S_{31}|^2)^2 + (1 - |S_{31}|^2 - |S_{21}|^2)^2 \quad (19)$$

式 (19) の第 1 項は, 出力を 4 : 1 に分岐させるための項であり, 第 2 項は出力を最大にするための項である。関数展開法の基底関数は四角錐関数とし, 展開項数は $N_y = N_z = 16$ と設定する。最適化の反復回数は 100 回としている。

まず, グレイ領域を設けた従来の随伴変数法により最適化が可能であるかを確認する。ここでは従来の誘電体に対する設計に対してグレイ領域を狭くし, 設計領域内の構造変化に合わせて, 反復すごとに境界適合メッシュを作成している。このときの初期構造と最適化構造における伝搬界分布をそれぞれ図 7, 図 8 に示す。最適化構造において port 2 及び port 3 への出力はそれぞれ 0.196, 0.702, 分岐比は 3.58 であり, 特性の改善は行われているが, まだ十分な特性が得られ

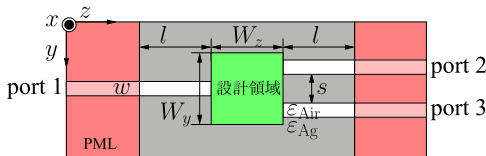


図 6 非対称 2 分岐導波路の設計モデル

ていない。

次に, 感度に基づく構造の最適化が本質的に可能かどうかを確認するために, 以下のように S_{n1} の感度を直接差分近似する場合を考える。

$$\frac{\partial S_{n1}(\mathbf{c})}{\partial c_i} = \frac{S_{n1}(\mathbf{c} + \mathbf{e}_i \Delta c_i) - S_{n1}(\mathbf{c})}{\Delta c_i} \quad (20)$$

この差分近似により感度を求めたときの最適化構造と伝搬波形を図 9 に示す。このときの port 2 及び port 3 への出力はそれぞれ 0.173, 0.732, 分岐比は 4.23 であり, 従来の方法に比べて特性が改善していることがわかる。

最後に, 式 (16) を用いた最適化結果を図 10 に示す。式 (16) 中の Δc_i は 0.1 と設定した。このときの port 2 及び port 3 への出力はそれぞれ 0.181, 0.716, 分岐比は 3.96 であり, 最も良い特性が得られた。最適化における目的関数の変化を他の手法と比較して図 11

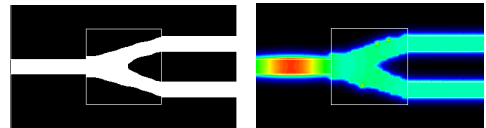


図 7 非対称 2 分岐の最適化の初期構造と伝搬界分布

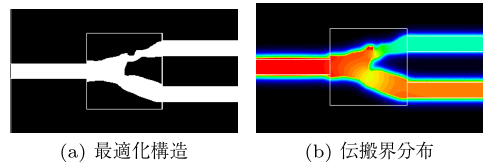


図 8 非対称 2 分岐の最適化結果 (従来の AVM による設計)

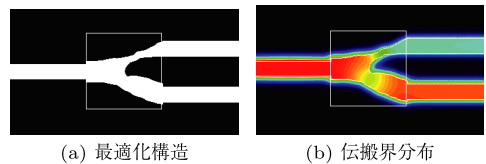


図 9 非対称 2 分岐の最適化結果 (式 (20) に基づく設計)

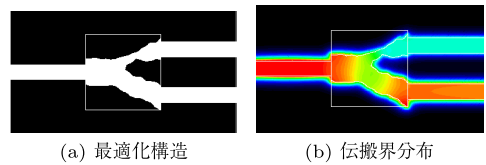


図 10 非対称 2 分岐の最適化結果 (式 (16) に基づく設計)

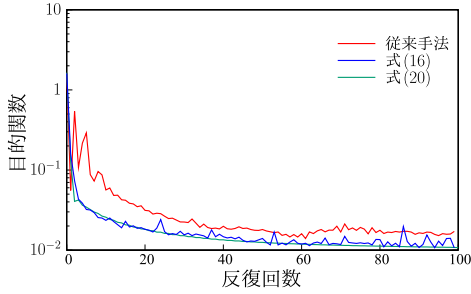


図 11 各最適化手法における目的関数の変化

に示す。式 (16) に基づく最適化では、反復に伴い振動しながらも緩やかに特性が改善しており、式 (20) に近い目的関数の改善が見られている。この結果から、本論文の提案手法が実際にプラズモニック光導波路デバイスの最適設計に有効であることが確認できる。式 (16) を用いた際に見られる目的関数の振動は、有限要素行列の作成にハンマーらの数値積分公式 [9] を用いているため、境界変動に対する行列の変化を十分に精度良く見積もることができていないことが考えられる。

4.2 波長分離素子

図 6 に示すプラズモニック光導波路の最適設計問題を考え、波長 $\lambda_1 = 1.31 \mu\text{m}$ と $\lambda_2 = 1.55 \mu\text{m}$ の光を分離する波長分離素子の設計例を示す。ここで、構造パラメータは $s = 0.4 \mu\text{m}$, $W_y = 0.8 \mu\text{m}$, $W_z = 1.0 \mu\text{m}$, $N_y = N_z = 33$ とする以外は前節の設計例と同じとする。なお、銀の比誘電率は波長分散性を有するためドルーデ・ローレンツモデル [10] より求める。目的関数は波長分離を実現するために以下のように設定する。

$$\text{Minimize } C = C_{\lambda_1} + C_{\lambda_2} \quad (21)$$

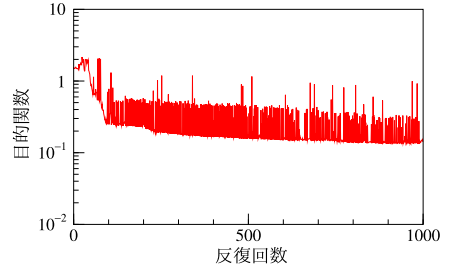
$$C_{\lambda_1} = (1 - |S_{21}|)^2 + W (0 - |S_{31}|)^2$$

$$C_{\lambda_2} = (1 - |S_{31}|)^2 + W (1 - |S_{21}|)^2$$

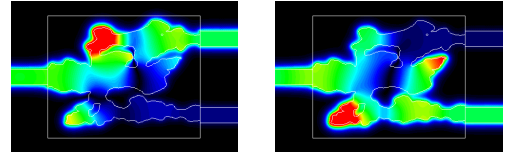
ここではクロストークをより抑圧するために $W = 3$ としている。なお、前節と同様な単純な最大勾配法を用いた場合には十分な解探索が進まなかったため、ここでは探索にランダム性を導入するため式 (18) の δ を以下のように修正している。

$$\delta = \{(\delta_2 - \delta_1)r + \delta_1\} \exp\left(-\frac{\gamma i}{2N_{\text{iter}}}\right) \quad (22)$$

ここで、最適化の反復回数を $N_{\text{iter}} = 1000$, i を反復回数, r を乱数 ($r \in [0, 1]$) とし, $\delta_1 = -2$, $\delta_2 = 5$, $\gamma = \ln 10$ として探索幅に乱雑さをもたせながら反復



(a) 目的関数の変化

 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

(b) 最適化構造における伝搬波形

図 12 波長分離素子の最適化結果

とともに探索幅を縮小している。 δ_1 を負の値にしているのも局所解から抜け出しやすくすることを意図している。なお、探索幅が大きいつきに構造が大きく変化し過ぎる場合があるため、目的関数の値が過去の最適値の 1.5 倍を超えるときには過去の最適値の近傍に探索点を戻して再スタートするようにしている。図 12 に最適化結果を示す。最適化の反復に伴う目的関数の変動が大きいのは、局所解を避けるために構造の更新幅を大きめに選んでいるためである。波長 $1.31 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ に対して透過率はそれぞれ 0.737, 0.743, クロストークはそれぞれ 0.029, 0.019 である。ここで、解探索に用いたパラメータ δ_1 , δ_2 , γ は経験的に選んだ値であり、 δ_1 を 0 以上に選ぶと更新幅にランダム性をもたせた勾配降下法である。 δ_1 , δ_2 が小さい場合には収束が遅く解探索に多くの反復を要したり局所解に陥りやすかったりする。一方、この値を大きく選ぶと局所解を抜け出しやすく初期収束が早い解探索の後半で最適解近傍で探索が振動することになる。 γ は大域探索から局所探索への連続的な移行のための変数であり、探索後半で目標とする局所探索の移動量になるように決めている。この例では、反復回数 100 回以下の初期収束は比較的早いのにに対し、その後は大きく振動しながら緩やかに改善が進んでいるが、プラズモニックデバイスの最適設計では解探索の方法に更なる工夫が必要と考えられる。

5. む す び

プラズモニックデバイスの最適設計を目的として、デバイス構造の表現に関数展開法を用いたトポロジー最適設計法の改良を行った。構造の変化に合わせて境界適合メッシュの更新を行うことで形状を正確に表現できるようにし、随伴変数法による感度解析にも改良を行った。非対称2分岐、波長分離素子の設計例を通して本手法の妥当性を確認したが、プラズモニックデバイスでは目的関数の変化が激しく局所解に陥りやすいため、解探索の手法に更なる改良が必要である。今後はより大域的な解探索が可能な進化的手法と組み合わせた最適設計法について検討する予定である。

謝辞 本研究はJSPS科研費18K04276の助成を受けたものであり、ここに謝意を表します。

文 献

- [1] Y. Tsuji, K. Hirayama, T. Nomura, K. Sato, and S. Nishiwaki, "Design of optical circuit devices based on topology optimization," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.18, no.7, pp.850–852, April 2006.
- [2] Y. Tsuji and K. Hirayama, "Design of optical circuit devices using topology optimization method with function-expansion-based refractive index distribution," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.20, no.12, pp.982–984, June 2008.
- [3] Z. Zhang, Y. Tsuji, T. Yasui, and K. Hirayama, "Design of ultra-compact triplexer with function-expansion based topology optimization," *Opt. Express*, vol.23, no.4, pp.3936–3950, Feb. 2015.
- [4] A. Iguchi, Y. Tsuji, T. Yasui, and K. Hirayama, "Topology optimization of optical waveguide devices based on beam propagation method with sensitivity analysis," *J. Lightwave Technol.*, vol.34, no.18, pp.4214–4220, Sept. 2016.
- [5] C. Wu, C. Huang, and Y. Lee, "Plasmonic wavelength demultiplexer with a ring resonator using high-order resonant modes," *Appl. Opt.*, vol.56, no.14, pp.4039–4044, May 2017.
- [6] J. Li, H. Ye, Z. Yu, and Y. Liu, "Design of a broadband reciprocal optical diode in a silicon waveguide assisted by silver surface plasmonic splitter," *Opt. Express*, vol.25, no.16, pp.19129–19136, Aug. 2017.
- [7] K. Wen, Y. Hu, L. Chen, J. Zhou, L. Lei, and Z. Guo, "Theoretical analysis of plasmonic unidirectional propagation at visible frequency based on subwavelength waveguide," *Opt. Commun.*, vol.336, pp.243–247, Oct. 2015.
- [8] A. Koda, K. Morimoto, and Y. Tsuji, "A study on topology optimization of plasmonic waveguide devices using function expansion method and evolutionary approach," *J. Lightwave Technol.*, vol.37, no.3,

pp.981–988, Feb. 2019.

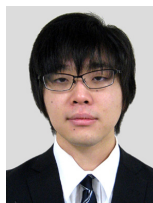
- [9] M. Koshiba, *Optical Waveguide Theory by the Finite Element Method*, KTK Scientific Publishers/Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [10] A.D. Rakic, A.B. Djuricic, J.M. Elazar, and M.L. Majewski, "Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices," *Appl. Opt.*, vol.37, no.22, pp.5271–5283, Aug. 1998.

(2018年8月31日受付, 12月22日再受付,
2019年4月15日公開)



幸田 秋乃 (学生会員)

平30室蘭工大・情報電子卒。同年同大学院博士前期課程入学, 現在に至る。光導波路の最適設計に関する研究に従事。



田中 智大 (学生会員)

平29室蘭工大・情報電子卒。同年同大学院博士前期課程入学, 現在に至る。光導波路の最適設計に関する研究に従事。



辻 寧英 (正員)

平3北大・工・電子卒。平5同大学院修士課程了。平8同博士課程了。同年北海道工大・応用電子助手, 同年同講師。平9北大大学院工学研究科助教授, 平16北見工業大学電気電子工学科准教授, 平23室蘭工業大学大学院工学研究科教授, 現在に至る。光・波動エレクトロニクスに関する研究に従事。博士(工学)。平8年度, 平10年度本会論文賞, 平10年度本会学術奨励賞受賞。平12年IEEE Third Millennium Medal 受賞。応用物理学会, IEEE, OSA 各会員。