

共振器を伴ったフォトニック結晶導波路の周波数特性

横田 光広¹⁾・ 大塚 直輝²⁾

Frequency Properties of Photonic Crystal Waveguides with Microcavity

Mitsuhiro YOKOTA, Naoki OHTSUKA

Abstract

We examine the frequency properties of a photonic crystal waveguide with microcavity that was an important technology in an optical circuit. The analysis method is Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method. It has an absorbing boundary condition (ABC) at the edge of the window called Mur's ABC. Two kind effect of the structures of microcavity in the waveguide are considered. One is the size of the microcavity. Another is the effect of the number of crystals between the waveguide and the microcavity is changed. It is shown that the resonance frequency can be controlled by changing the structure of the microcavity, this structure is useful for the wavelength division multiplex .

Key Words :

Photonic Crystal Waveguide, Microcavity, FDTD method, Wavelength Division Multiplex

1. まえがき

光技術は、情報通信のブロードバンド化を支える最も重要な技術となっているが、将来のより高度化した光サービス実現するには、高速、大容量通信のために光による小型大規模集積回路が必要となると予想される。しかし、光回路の集積化は電子回路に比べて、さまざまな困難がある。なぜなら従来の光回路では屈折率差による全反射により光閉じ込めを行っていたが、この方法では閉じ込めサイズは波長に比べてはるかに大きくなる。このような限界を打破すると期待されているのが、フォトニック結晶である¹⁾。複数の誘電体で誘電率(屈折率)周期構造を作製することにより電磁波が存在できない周波数領域、すなわちフォトニックバンドギャップ (photonic bandgap) を実現でき、屈折率や周期を制御することによりフォトニックバンドギャップを設計することができる²⁾。

フォトニック結晶の規則的な構造に意図的に乱れ(構造欠陥)を導入することにより、光を様々にコントロールすることが可能となることが知られている。線状の欠陥を設けると微小な光導波路として動作し、欠陥を点状に設けると光の共振器となる⁴⁾。レーザー発振装置では、共振器は発生する光を閉じ込めて多重反射させるための向かい合う2枚の鏡(ファブリ・ペロー共振器)のことであるが⁵⁾、フォトニック結晶では、導

波路を伝搬する光のうち、特定の波長の光を欠陥部に局在させて閉じ込めるという機能を持つ。

本研究で計算手法として用いる FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法⁶⁾は、マクスウェル方程式を時間軸および空間軸に対して中心差分を用いて離散化する手法である。この手法は領域分割形解法であり、空間格子に直方体格子を用いる。このように FDTD 法は三次元時間域解析手法であるので非常に汎用性に優れており、近年盛んにマイクロ波シミュレーション、アンテナ解析、導波路解析などに用いられている⁷⁾。

本研究では、ピラー型2次元フォトニック結晶において線欠陥を用いて導波路を形成し、光の伝搬特性と周波数特性を計算機シミュレーションを用いて解析した。また、境界条件として Mur の2次の吸収境界条件を用いた。

2. 問題の設定

図1に示すように、誘電体円柱を三角格子状に配置したピラー型2次元フォトニック結晶において線欠陥を用いた導波路を設計し、導波路内に点欠陥を用いた共振器を設置した⁸⁾。誘電体円柱は解析領域内にz方向に100本、x方向に17本設置した。パラメータとして、空気中($\epsilon_0 = 1.0$)にロッド半径 $r = 0.175a$ 、比誘電率 $\epsilon_1 = 11.56$ 、 $\Delta x = \Delta z = a/20$ としている。また、入射波は以下のような連続波を用いた。

$$E_y = e^{-(x/\alpha_0)^2} \sin \omega t \quad : \text{ガウス分布} \quad (1)$$

¹⁾電気電子工学科教授²⁾電気電子工学科学部生

この2次元フォトニック結晶では、およそ $0.35 \leq \omega a/2\pi c \leq 0.45$ の周波数帯にバンドギャップが形成されることが知られている。

本研究では、以下のように共振器の構造を変化させた時の数値解析を行い、特性を調べている。

1. 共振器内部の円柱を抜く本数。
2. 共振器と導波路との間の円柱の本数（間隔）。

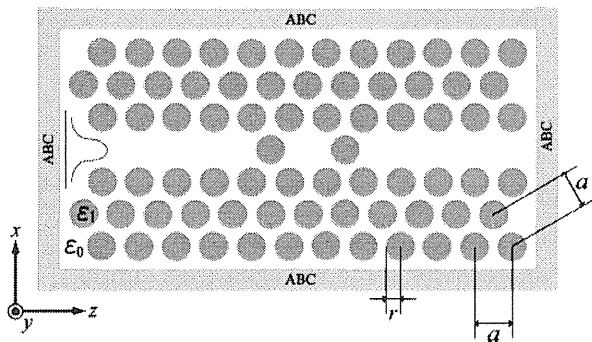


図 1: 導波路内に共振器を構成したフォトニック結晶導波路

3. 数値計算

共振器内部の誘電体円柱を抜く本数を変えて、導波路に光を入射して伝搬させる。まず、図 1 のように内部の誘電体円柱を 1 本抜いた構造の共振器 (1defect) を設置した導波路に $\omega a/2\pi c = 0.412$ の入射波が入射した時の電界強度分布を図 2 に示している。この図より、共振器の部分に界がほぼ集中しており、励振していることが確認できる。

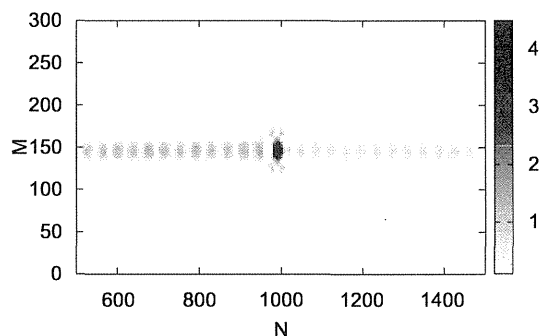


図 2: 1defect の場合の電界分布 ($a/\lambda = 0.412$)

次に、内部の円柱を 2 本抜いた共振器 (2defects) について、2つの周波数 $\omega a/2\pi c = 0.381$ と $\omega a/2\pi c = 0.442$ が入射した場合の電界強度分布を図 3, 4 に示

している。共振器内において、図 3 は基本モード、図 4 は 1 次モードが励振されていることが分かる。これは、規格化周波数が低い時には最低次 (基本) モードが現れ、規格化周波数が高くなるにつれて高次のモードが現れることに対応している。

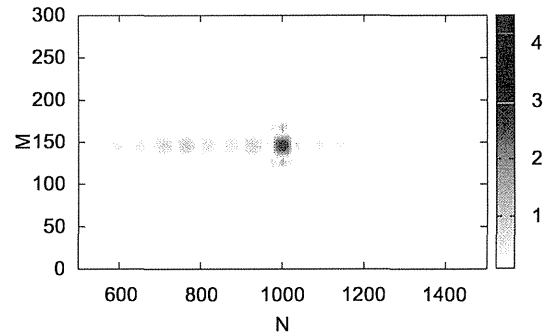


図 3: 2defects の場合の電界分布 ($a/\lambda = 0.381$)

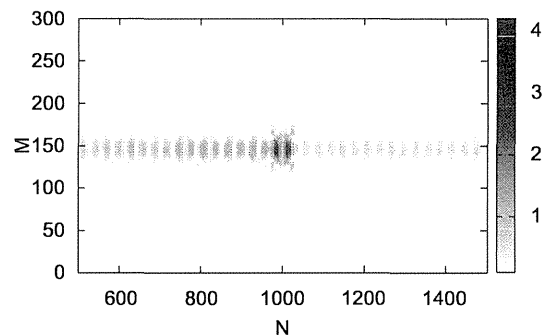


図 4: 2defects の場合の電界分布 ($a/\lambda = 0.442$)

また、内部の円柱を 3 本抜いた共振器 (3defects) を設置した導波路においては $\omega a/2\pi c = 0.369$ の場合と、 $\omega a/2\pi c = 0.411$ の場合に共振をしており、電界強度分布を図 5, 6 に示す。 $\omega a/2\pi c = 0.381$ の場合は 0 次モードが、 $\omega a/2\pi c = 0.411$ の場合には 1 次モードが励起されている。

4. 周波数特性

前節で調べたように、共振器の構造が変化すると励振の状態も変わることが分かった。図 7 は、規格化周波数を $0.35 \leq \omega a/2\pi c \leq 0.45$ で変化させた時の周波数特性を示している。この図において、1defect の周波数特性で $\omega a/2\pi c = 0.412$ の時の電界分布が図 2 で

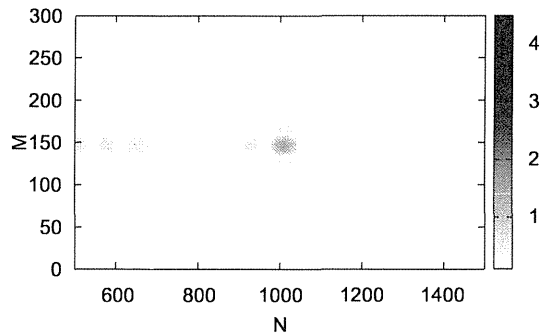


図 5: 3defects の場合の電界分布 ($a/\lambda = 0.369$)

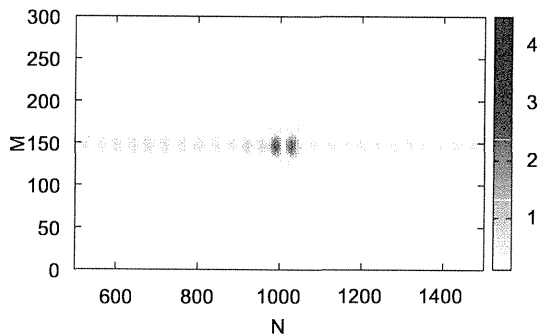


図 6: 3defects の場合の電界分布 ($a/\lambda = 0.411$)

ある。また、2defects の周波数特性で $\omega a/2\pi c = 0.381$ の時の電界分布が図 3、 $\omega a/2\pi c = 0.442$ の時の電界分布が図 4 である。さらに、3defects の周波数特性では、 $\omega a/2\pi c = 0.369$ の時の電界分布が図 5 であり、 $\omega a/2\pi c = 0.411$ の時の電界分布が図 6 である。

図 7 より、共振器の大きさを変えることにより、共振周波数が変化していることが分かる。これは、共振器の反射面の間隔が大きくなると共振周波数が小さくなるためと考えられる。また、基本モードがバンドギャップの端に近づくと、周期構造中への光の漏れが大きくなって電界強度が小さくなったと考えられる。

次に、共振器と導波路の間隔を変えた時について調べる。1defect の共振器で、導波路との間の誘電体円柱を 1 本にした (1row) 場合と 2 本にした (2rows) 場合の周波数特性を図 8 に示す。この場合は、どちらの構造でも規格化周波数 $\omega a/2\pi c = 0.41$ 付近の比較的近い周波数帯で周波数特性が現れていることが分かる。

さらに、これと同じようにして共振器が 2defects, 3defects の場合の周波数特性を図 9, 10 に示す。これ

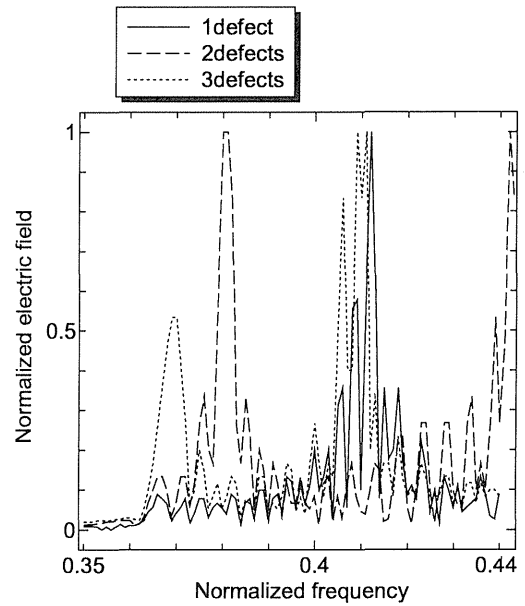


図 7: 共振器の構造を変化させた時の周波数特性の比較

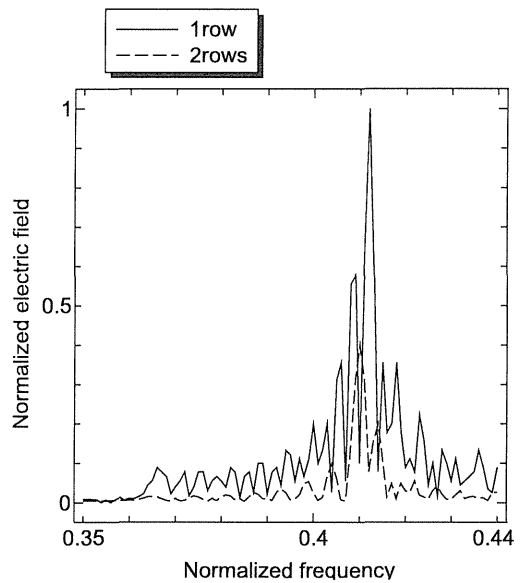


図 8: 1defect の共振器で間隔を変化させた場合の周波数特性の比較

らの図より、共振器と導波路の間隔が広がると、電界強度が相対的に小さくなっているが、共振周波数は変化が見られないことが分かる。これは、共振器と導波路の間にある誘電体円柱の数が増えたことで共振器内部へ伝搬する光波が小さくなるためと考えられる。

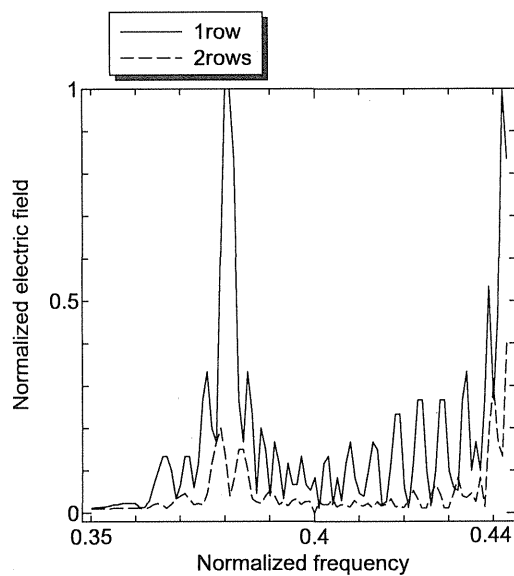


図9: 2defects の共振器で間隔を変化させた場合の周波数特性の比較

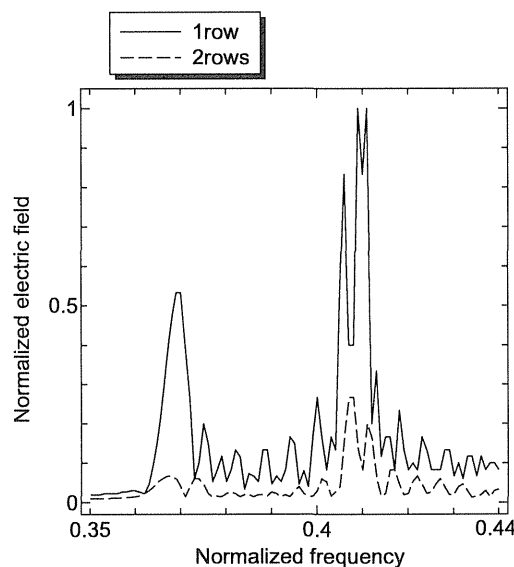


図10: 3defects の共振器で間隔を変化させた場合の周波数特性の比較

5. まとめ

本研究では、共振器を併用した三角格子型フォトニック結晶導波路の周波数特性を FDTD 法を用いて解析した。ここでは誘電体円柱を1列抜いて導波路を構成し、さらに導波路内に共振器を構成した。まず、共振器内部の誘電体円柱を抜く本数を変えることにより、共振周波数が変化することを確認した。次に、共振器と導波路との間の円柱の本数を変えて解析を行った。共振器と導波路との間が広がると、相対的な電界強度

は小さくなるが、共振周波数は変化がないことを確認した。

本研究の結果では、波長分割多重 (WDM) 伝送に用いるような多重化には不十分である。そこで、誘電体円柱の半径を変化させるなどしてさらに周波数特性を検討することが今後の課題である。

参考文献

- 1) Yablonovitch, E.:「Phys. Rev. Lett.」vol58,pp.2059-2062,1987
- 2) 吉野 勝美, 武田 寛之:「フォトニック結晶の基礎と応用」コロナ社 (2004)
- 3) 迫田 和彰:「フォトニック結晶入門」森北出版 (2004)
- 4) 野田 進, 森本 茂雄:「面内ヘテロ・フォトニック結晶による光ナノデバイスの実現」科学技術振興事業団報 第323号 (2003)
- 5) 大津 元一:「入門 レーザー」裳華房 (1997)
- 6) 宇野 享:「FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析」コロナ社 (1998)
- 7) 山下 榮吉:「マイクロ波シミュレータの基礎」(社) 電子情報通信学会 (2004)
- 8) 中 良弘, 生野 浩正:「共振器を有する2次元フォトニック結晶光回路素子の特性解析」EMT-03-86,pp.13-18,2003