

FDTD法を用いたフォトニック結晶導波路における 周波数分離特性に関する数値的検討

永田 玲矢¹⁾・ 横田 光広²⁾

Numerical Examination on Frequency Division Characteristics of Photonic Crystal Waveguide by FDTD Method

Reya NAGATA, Mitsuhiro YOKOTA

Abstract

In the past few years, there have been tremendous activities in the fabrication and testing of crystals from both the theoretical and experimental points of view. It is important for designing optical functional devices to clarify fundamental properties of basic crystal waveguides, such as the straight waveguide, direction coupler, microcavity and so on. Two-dimensional photonic crystal (PC) waveguide with the microcavity is examined numerically by FDTD method. We use an absorbing boundary condition (ABC) at the edge of the window called Mur's ABC. The structure of the PC is the triangular array and the microcavity is made by removing the several crystals in parallel with the PC waveguide. The effects of the number of removed pillars and the radius of the surrounding pillars on the resonance are examined. From the numerical results, we show that resonance frequency can be determined by adjusting the number of removed pillars and the radius of the surrounding pillars. Also, the structure which takes out the light is examined from the practical point of view.

Keywords: Photonic crystal, FDTD method, WDM

1. まえがき

近年、光通信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。将来のより高速・高度化した光通信を実現するためには、より小型で大規模な集積化が可能とする光回路が必要になる。しかし、従来の屈折率差による全反射を用いる光回路では、閉じ込めサイズが光の波長に比べて遥かに大きくなり、光導波路を急激に曲げることが難しいという理由から小型集積化が困難になっている。このような問題を解決し得る可能性をもつのが、近年のナノテクノロジーの進歩に伴い注目を集められるようになったフォトニック結晶である^{1)~3)}。フォトニック結晶とは、人工的に周期的な屈折率分布をもたせた光ナノ結晶で、このような構造中では、ある特定の周波数をもつ光の存在が禁止されるフォトニックバンドギャップが形成されることが知られている。また屈折率分布の周期は波長オーダーなのでフォトニック結晶による光制御が完璧に可能となれば超小型の光回路を作ることができる⁴⁾。

本研究では、計算機シミュレーションにより周波数分離に適したフォトニック結晶構造を検討するのが目的である。フォトニック結晶は2次元ピラー型としている。また、解析手法としてFDTD法(時間領域差分法)を用いている。なお、吸収境界条件としてMurの2次吸収境界条件を適用している。

2. 2次元 TM-FDTD 法

本研究では、 z 軸方向に変化のない2次元として問題を扱う。ここでは、 H_x, H_y, E_z 成分のみを持つTMモードにおいて定式化を行う。マクスウェル方程式からYeeのアルゴリズムを使い、差分化を行う。電界、磁界に関して次式を得る⁶⁾。

$$E_z^n(i, j) = C_{EZ}(i, j) E_z^{n-1}(i, j) + C_{EZLX}(i, j) \left\{ H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) - H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i - \frac{1}{2}, j \right) \right\} - C_{EZLY}(i, j) \left\{ H_x^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) - H_x^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j - \frac{1}{2} \right) \right\} \quad (1)$$

$$H_x^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) = H_x^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) - C_{HXLX} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) \left\{ E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j) \right\} \quad (2)$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) = H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) - C_{HLYX} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \left\{ E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j) \right\} \quad (3)$$

i, j は格子点の座標を、 n は時間ステップを表している。 $C_{EZ}, C_{EZLX}, C_{EZLY}$ は比誘電率、損失にかかわる係数で、 C_{HXLX}, C_{HLYX} は比透磁率にかかわる係数である。

開放領域の問題を扱う場合には、解析領域を仮想的な境界で閉じておく必要がある。本研究では、吸収境界条件としてMurの2次吸収境界条件を使用している。

1) 電気電子工学専攻大学院生

2) 電気電子工学科教授

3. 数値計算結果

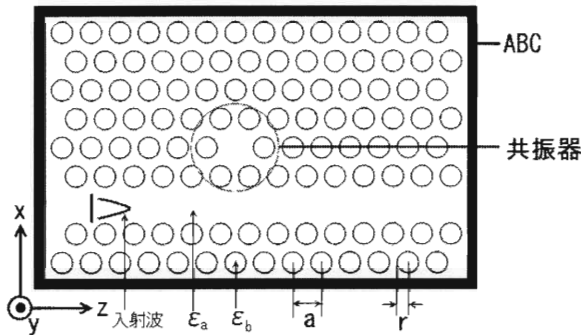


図1. モデル図

図1は本研究での解析モデルである。パラメータとして、解析領域は z 方向に $37.2[\mu\text{m}]$ 、 x 方向に $11.8[\mu\text{m}]$ 、 $\epsilon_a=1.0$ (空気中)、 $\epsilon_b=11.56$ (誘電体円柱)、格子定数 $a=0.62[\mu\text{m}]$ 、ロッド半径 $r=0.175a$ 、としている。この2次元フォトニック結晶では、規格化周波数 $\omega a/2\pi c$ が、 $0.304 \leq \omega a/2\pi c \leq 0.495$ の周波数帯にバンドギャップが形成されることがわかっている⁵⁾。

3.1 直線導波路と共振器を組み合わせた構造

まず、図2のような直線の導波路と共振器を組み合わせた構造における周波数分離特性を調べる。

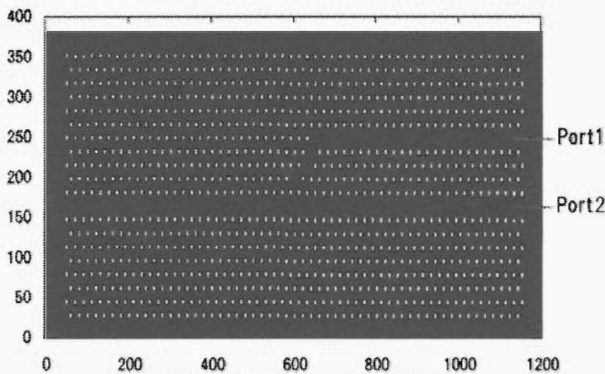


図2. フォトニック結晶構造

共振器の共振周波数は、ガウスパルスを入射させ、共振器の中心点で各時間ステップにおいて電界を観測し、そのデータを高速フーリエ変換(FFT)することにより求めることができる。図2の場合の共振器の共振周波数は $\omega a/2\pi c = 0.419$ となった。

左側から連続波を入射させ、右側のPort1、Port2で各時間ステップにおいて電界を観測しFFTを行うことにより周波数特性を求め、入射した波が分離されているかを調べる。共振周波数は共振器をとおりPort1に、非共振周波数はそのまま直進してPort2へ出力され周波数が分離されるのが理想である。

図2において共振周波数 $\omega a/2\pi c = 0.419$ と、非共振周波数 $\omega a/2\pi c = 0.400$ の二つの周波数を持つ連続波を入射させ

た場合の周波数特性を図3、4に示す。なお、各図の縦軸は、それぞれのPortにおいて標準化を行っている。

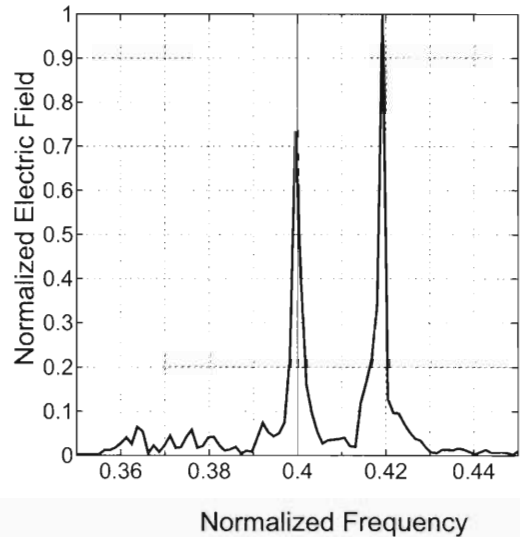


図3. Port1における周波数特性

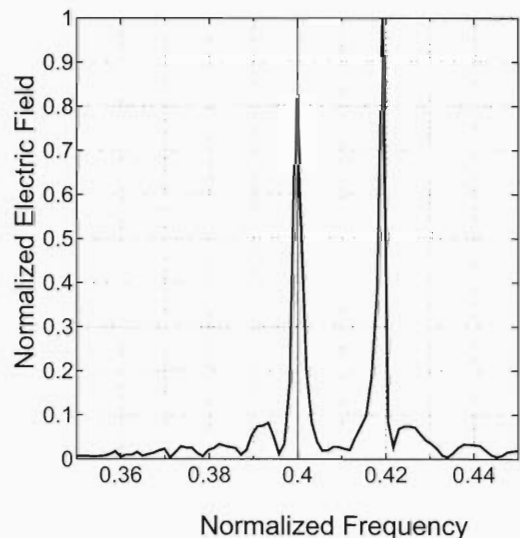


図4. Port2における周波数特性

図3、図4から、Port1、2ともに二つの周波数が大きく出力されていることがわかる。Port1、Port2ともに共振周波数 $\omega a/2\pi c = 0.419$ を10割とすると $\omega a/2\pi c = 0.400$ は約7~8割、が出力されており、分離できていないことがわかる。

3.2 Y字型分岐構造

先ほどの構造では周波数の分離が行えなかったので、図5に示すようなフォトニック結晶の構造を提案する。

二つの周波数をそれぞれ一つずつの共振器により分離する手法である。共振器は、共振器を成す誘電体円柱の半径を変えることにより共振周波数を変えることができる。共振器C1は図2と同じロッド半径、共振器C2はロッド半径 $r=0.200a$ としている。この場合のC1、C2のそれぞれの共振周波数は $\omega a/2\pi c = 0.421, 0.399$ となった。C1の共振周波

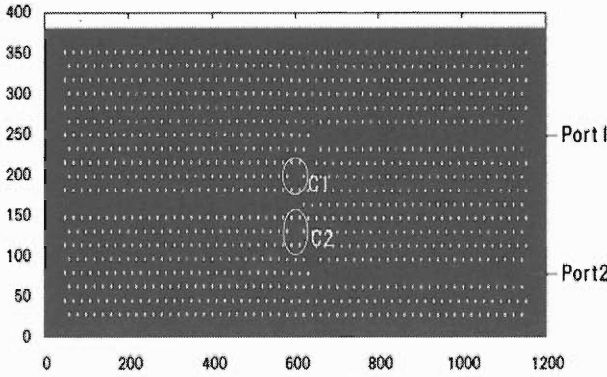


図 5. Y 字分岐構造

数が先ほどとかわっているのは構造が先ほどとかわったためだと考えられる。この二つの周波数を持つ連続波を入射させた場合の各 Port での周波数特性を図 6、7 に示す。

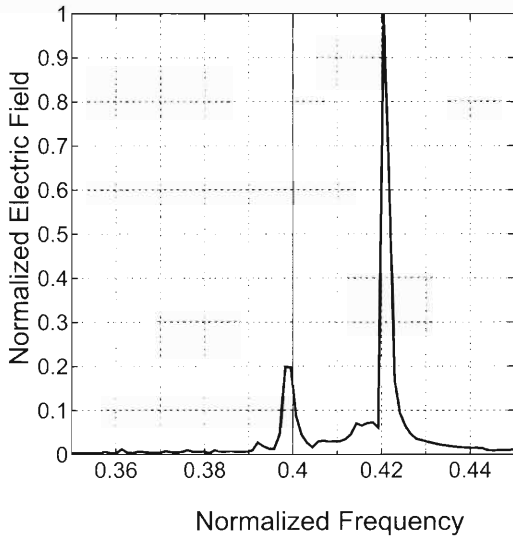


図 6. Port1 における周波数特性

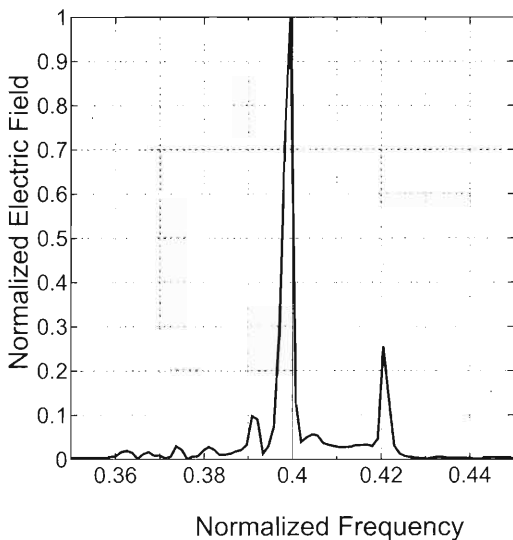


図 7. Port2 における周波数特性

この結果から、各 Port において、取り出したい周波数と比較して他の周波数は 2 割程度になっており、周波数の分

離に成功しているといえる。

3.3 Y 字型分岐構造における 3 波長分離

二つの周波数の分離に成功したので、次は三つの周波数の場合のシミュレーションを行う。フォトニック結晶構造を図 8 に示す。

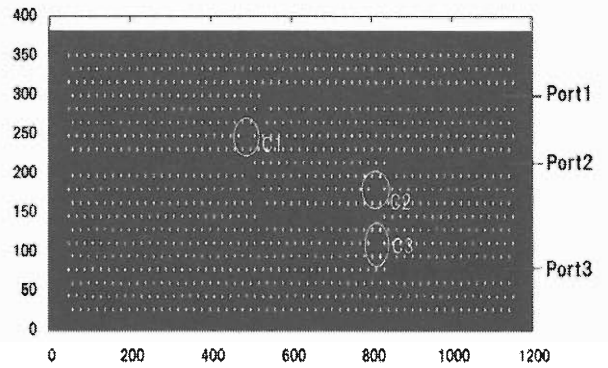


図 8. Y 字 3 波長分離構造

共振器 C1、C2 のロッド半径は図 5 と同じ、C3 のロッド半径は $r=0.225a$ としている。この場合の C1、C2、C3 のそれぞれの共振周波数は $\omega a/2\pi c = 0.419, 0.403, 0.390$ となった。この三つの周波数を持つ連続波を入射させた場合の各 Port での周波数特性を図 9~11 に示す。

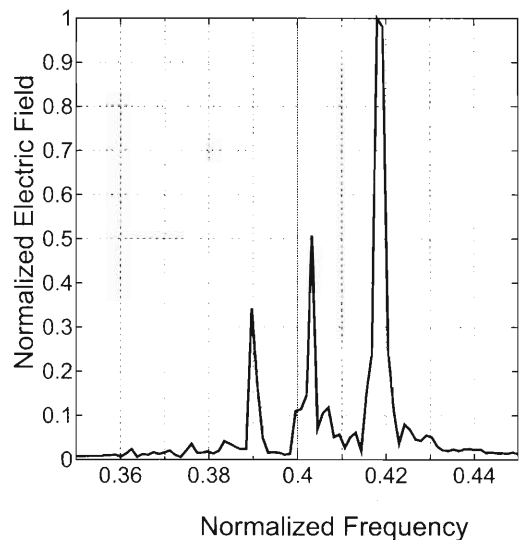


図 9. Port1 における周波数特性

図 9、図 11 より、取り出したい周波数と比較して他の二つの周波数は 5 割程度に抑えられているが、図 10 においては他の一つの周波数が 7 割程度取り出されていることがわかる。したがって、Port2 においては分離できているとは言えない。

3.4 Y 字 3 波長分岐構造 (改善)

図 8 の構造では分離度が低いことがわかった。そこで、より分離度を上げるため、図 12 に示すような構造を考える。

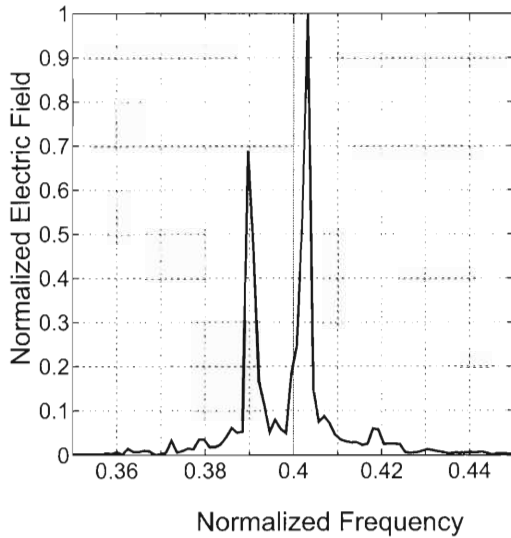


図 10. Port2 における周波数特性

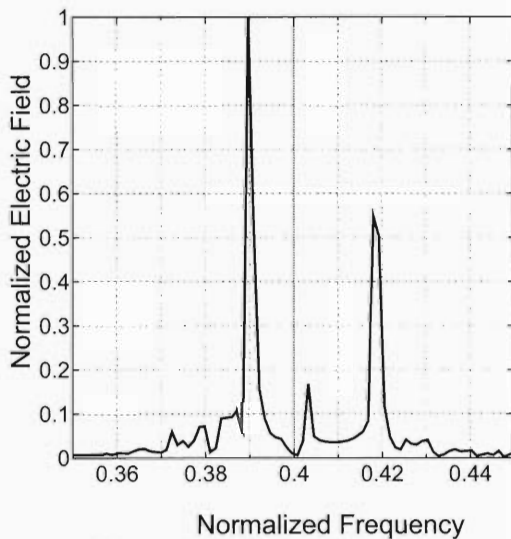


図 11. Port3 における周波数特性

これは、共振器 2つを用いて共振周波数を取り出す構造である。

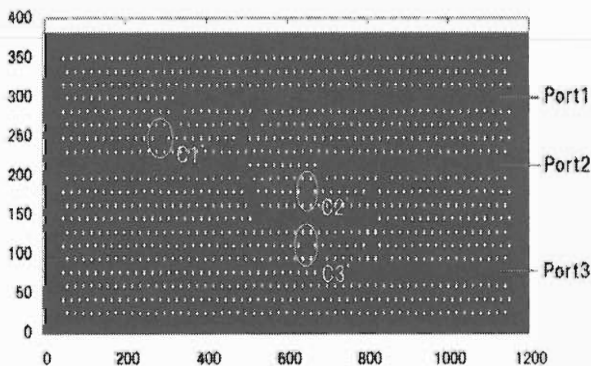


図 12. Y 字 3 波長分離構造 (改善)

新しく設置した共振器 C1'、C2'、C3' のロッド半径はそれぞれ C1、C2、C3 と同じである。三つの周波数 $\omega a/2\pi c = 0.419, 0.403, 0.390$ を持つ連続波を入射させた場合の各 Port

での周波数特性を、図 8 の結果と比較したものを図 13~15 に示す。実線が図 12、点線が図 8 の結果である。Port1, 2 では、共振器を 2 つにしたことにより 20% 程度の改善は見られるが、Port3 では共振器が 1 つの場合とほぼ同じ特性を示しており、改善されていない。構造のさらなる工夫が必要である。

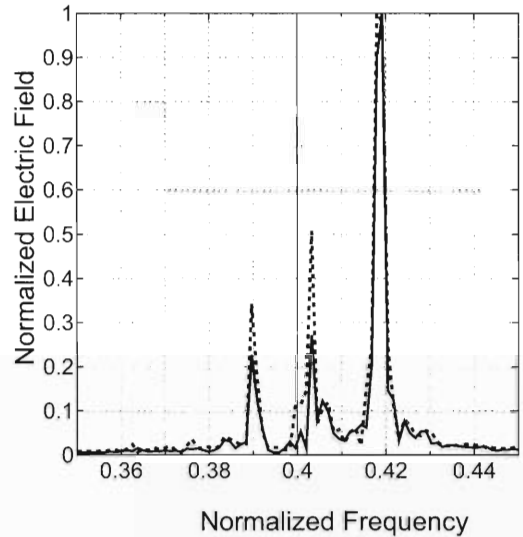


図 13. Port1 における周波数特性

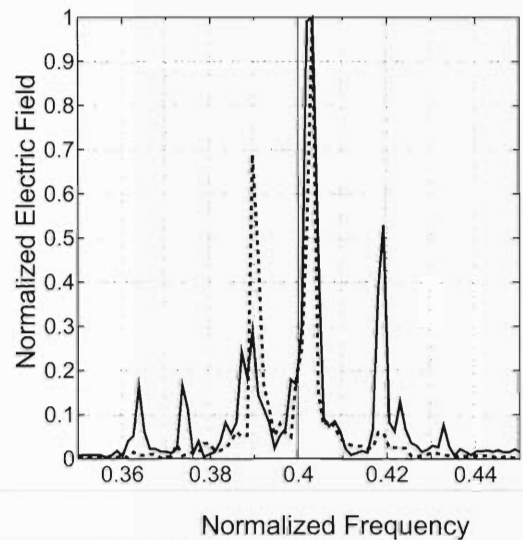


図 14. Port2 における周波数特性

4. まとめ

本報告では、FDTD 法を用いた計算機シミュレーションにより、2次元ピラー型フォトニック結晶の周波数分離特性を数値的に検討した。まず初めに直線導波路と共振器を組み合わせた場合の周波数分離特性を示した。次に、Y 字型の導波路と共振器を組み合わせた構造における周波数分離特性を示した。直線導波路の場合には周波数の分離ができていなかったが、Y 字型の導波路にし、それぞれの周波数を共振器から取り出す構造にすることにより周波数の分離が可能になることを示した。

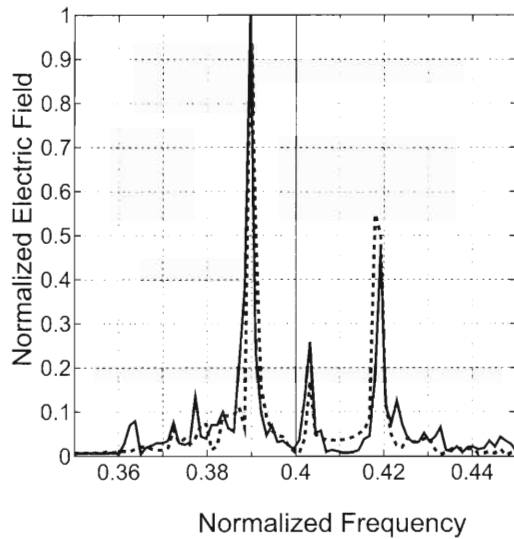


図 15. Port3 における周波数特性

今後の課題として、正方格子の場合、エアホール型の場合にも本研究の構造は適用できるのかの検討、また、より周波数分離に適した構造の検討等があげられる。

参考文献

- 1) 迫田 和彰：フォトニック結晶入門, 森北出版, 2004.
- 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) John D. Joannopoulos, Robert D. Meade, Joshua N. Winn: Photonic Crystals Molding the Flow of Light, Princeton Univ Press, 1995.
- 4) 野田 進：フォトニック結晶工学の進展, 2008.
http://d01-404.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/57935/1/cue19_02.pdf.
- 5) K.Yasumoto, ed.: Electromagnetic Theory and Applications for Photonic Crystal, Ch.8, Taylor&Francis, 2006.
- 6) 宇野 亨：FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998.