

# 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<sup>a)</sup> · 横田 光広<sup>b)</sup>

## 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 resting 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 dimension photonic crystal (PC) structure with micro cavity is examined by using the FDTD method. In this thesis, two-dimensional structure is considered and the case of an  $E$ -polarized wave is examined. The structure to be combined Y shaped waveguide with the maicro cavity is proposed as the structure of the PC. We use an absorbing boundary condition (ABC) at the edge of the window called Mur's ABC. The electric field at the waveguide port is observed, and the spectral distribution is calculated by using Fast Fourier Transform (FFT). Moreover, when the number of micro cavities increases, some numerical examination is performed.

**Keywords:** Numerical technique , FDTD method , Photonic crystal , WDM

### 1. まえがき

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、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<sup>1)-3)</sup>。このような周期的な構造中では、ある一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光の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<sup>4)</sup>。

本稿では、周波数分離に適したフォトニック結晶構造を数値的に検討することを目的とし、2次元ピラー型フォトニック結晶導波路における光波の分離特性について、数値的に検討している。解析手法として FDTD 法を用い、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. Y 字型分岐構造における周波数分離特性

共振器を伴ったフォトニック結晶導波路モデルを図 1 を示す。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  $11.8[\mu\text{m}]$ 、として、空気中 ( $\epsilon_a=1.0$ ) に比誘電  $\epsilon_b=11.56$  を持つ誘電体円柱 (ロッド) が配置されている。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

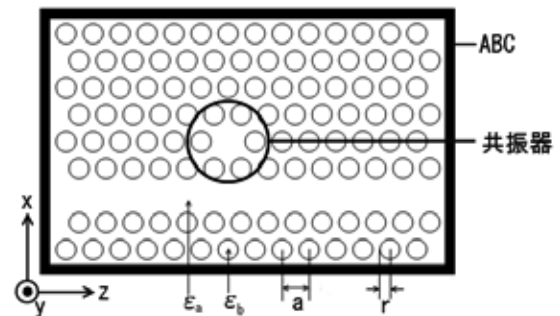


図 1. 共振器を伴ったフォトニック結晶導波路

る<sup>5)</sup>。

本稿では、周波数分離の構造として、図 2 に示すような Y 字型の構造を提案した。2 つの共振周波数を持つ連続波を入射させ、共振器を介して取り出すことにより分波を行う。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。また、共振器を成す誘電体のロッド半径を変化させることで共振器の共振周波数を変化させることができる。共振器 C1、C2 のロッド半径はそれぞれ、 $r=0.175a, 0.200a$  としている。図 2 の場合の共振器の規格化共振周波数は共振器 C1、C2 がそれぞれ  $\omega a/2\pi c = 0.421, 0.399$  となった。この 2 つの共振周波数をもつ連続波を図 2 の左側から入射し、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。

<sup>a)</sup>電気電子工学専攻大学院生

<sup>b)</sup>電気電子工学科教授

図3にその結果を示す。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20%程度になっており、効率よく周波数の分離ができていると考える。なお、図3の縦軸は、それぞれのPortにおいて規格化を行っている。

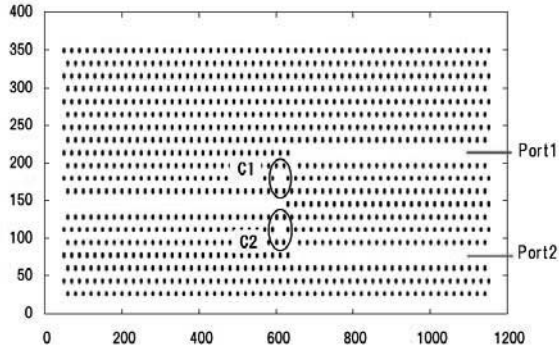


図2. フォトニック結晶 Y 字型分岐構造

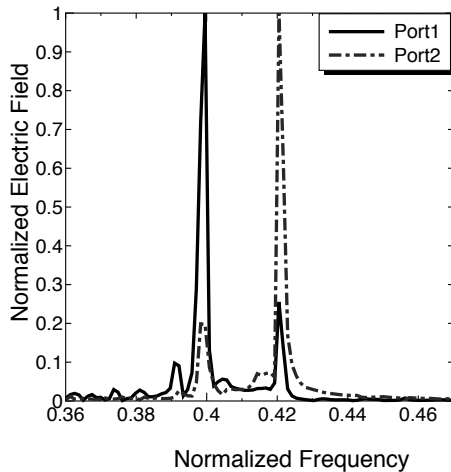


図3. 図2の構造に対する各ポートの周波数特性

### 3. Y字型分岐構造における3周波数分離

2つの周波数を分離することができたので、次に3つの周波数の場合に分離できるかの検討を行う。フォトニック結晶構造を図4に示す。共振器C1、C2のロッド半径は図2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のそれぞれの規格化共振周波数は $\omega a/2\pi c = 0.419, 0.403, 0.390$ である。この3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5に示す。

図5から、Port1、Port3においては取り出したい周波数と比較して他の2つの周波数は約50%に抑えられているが、Port2においては他の1つの周波数が約70%取り出されていることがわかる。従って、図4の構造においては3周波数の分離が効率よくできているとはいえない。

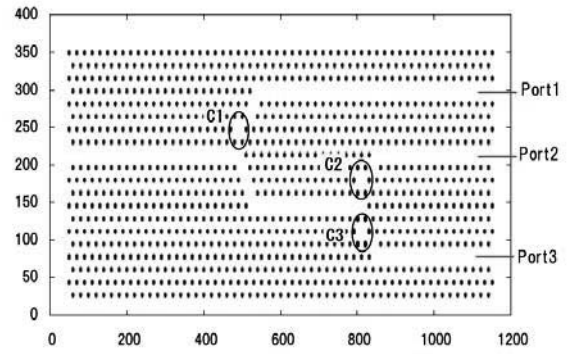


図4. Y字型3周波数分離構造

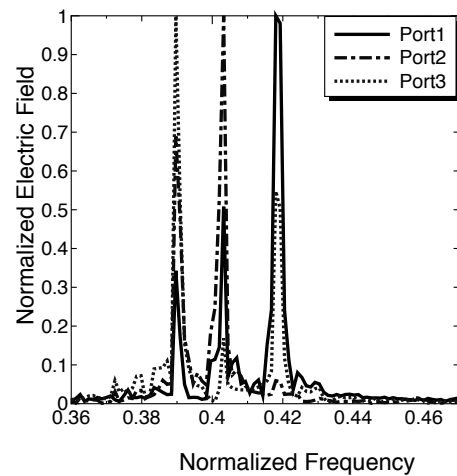


図5. 図4の構造に対する各ポートの周波数特性

### 4. 改良型 Y 字型分岐構造

図4の構造においては周波数の分離ができているとはいえなかった。そこで、さらに分離度を上げるため、図6に示すように取り出しに用いる共振器を1つから2つに増やすことにより分離度を向上させる構造を考える。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。それぞれの共振器の規格化共振周波数 $\omega a/2\pi c = 0.419, 0.403, 0.390$ 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7に示す。

この結果、全てにおいて改善がみられたわけではないが全体的には、共振器1つのとときと比較して分離度が向上していることがわかる。

### 5. 共振器間距離、分岐路からの距離の影響

#### 5.1 共振器間距離の影響

図6のように、2つの共振器を配置する際に2つの共振器間距離、分岐路から共振器の距離が及ぼす周波数分離への影響について検討を行った。ここで、計算の都合上x方向の解析領域を $12.3[\mu\text{m}]$ とした。図8に示すように、共振器間距離

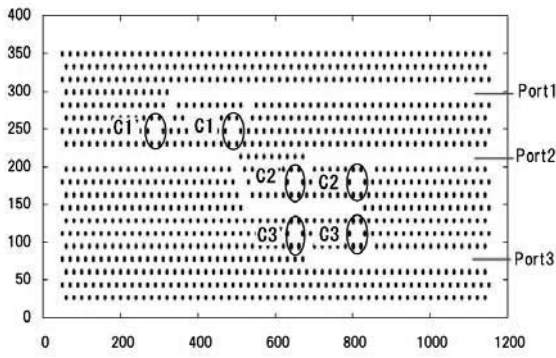


図 6. 改良 Y 字型 3 周波数分離構造

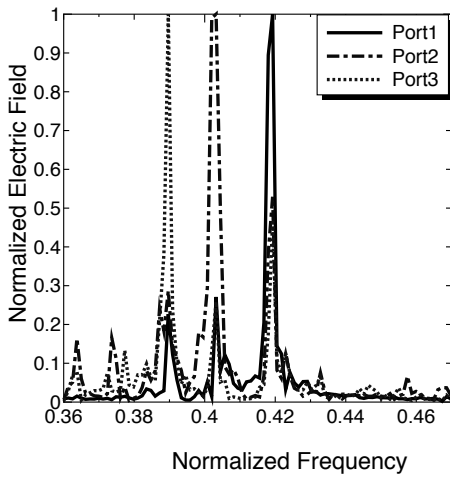


図 7. 図 6 の構造に対する各ポートの周波数特性

を  $Z_c$ 、分岐路からの距離を  $Z_{c2}$  としている。共振器間距離を  $Z_c = 6a \sim 8a$ 、と変化させた。なお、 $Z_c$  を変化させるときには  $Z_{c2} = 7a$  で固定している。そのときの周波数特性を図 9～11 に示す。この計算結果から、共振器間距離は周波数の分離に影響を与えることがわかり、今回の構造においての最適値は  $Z_c = 7a$  であり、このとき、各 Port において取り出すべき周波数と比較して他の周波数は約 50%以下となった。

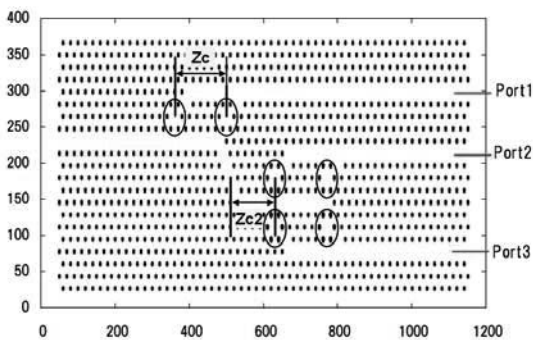


図 8. フォトニック結晶構造

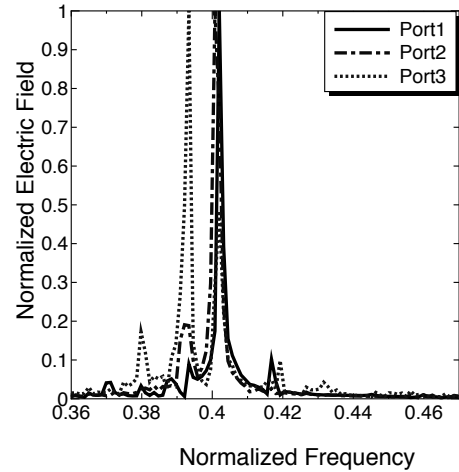


図 9. 図 8 の構造に対する各ポートの周波数特性 ( $Z_c=6a$ )

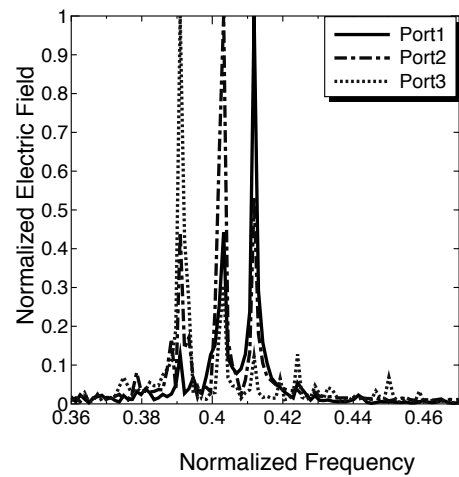


図 10. 図 8 の構造に対する各ポートの周波数特性 ( $Z_c=7a$ )

### 5.2 分岐路からの距離の影響

分岐路からの距離  $Z_{c2} = 3a \sim 9a$  と変化させた場合に周波数特性に影響が現れるのか計算を行った。なお  $Z_{c2}$  を変化させるときには  $Z_c = 7a$  で固定している。そのときの周波数特性を図 12～14 に示す。なお、 $Z_{c2} = 7a$  のときは、図 10 のときと同じ構造になるため省略している。この結果から、共振器間距離は周波数の分離に影響を与えることがわかり、今回の構造においての最適値は  $Z_{c2} = 6a$  であり、このとき各 Port において取り出すべき周波数と比較して他の周波数は約 40%以下となった。

## 6. まとめ

本稿では、ピラー型 2 次元三角格子状フォトニック結晶において、周波数分離に適した構造を FDTD 法を用いて数値的検討を行った。

3 つの周波数の分離を行うための構造として、Y 字分岐導波路と、共振器を用いた構造を提案した。計算の結果は、取

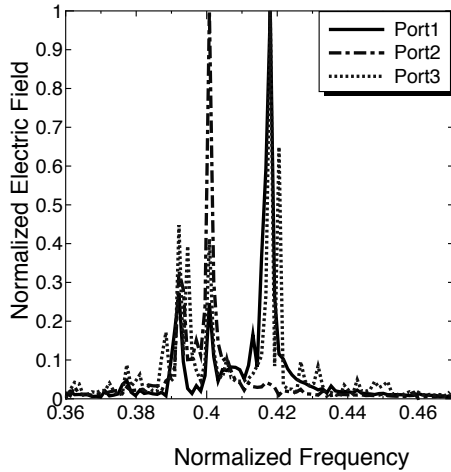


図 11. 図 8 の構造に対する各ポートの周波数特性 ( $Z_c=8a$ )

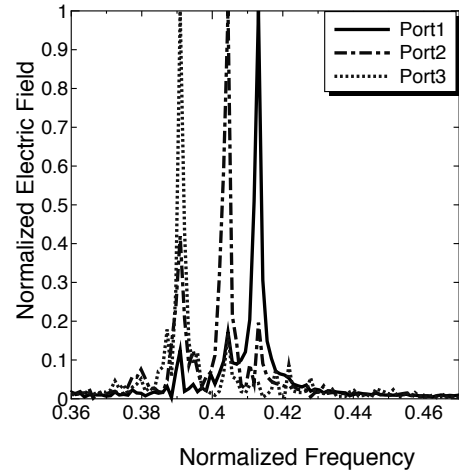


図 13. 図 8 の構造に対する各ポートの周波数特性 ( $Z_c=6a$ )

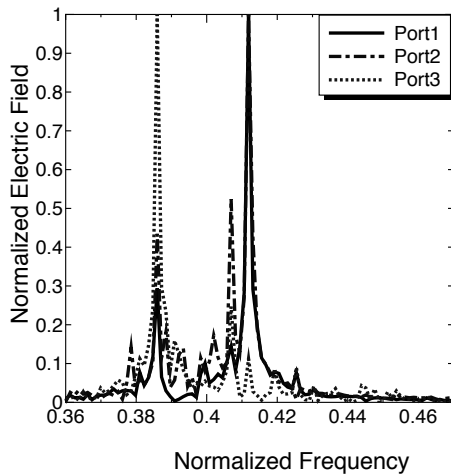


図 12. 図 8 の構造に対する各ポートの周波数特性 ( $Z_c=5a$ )

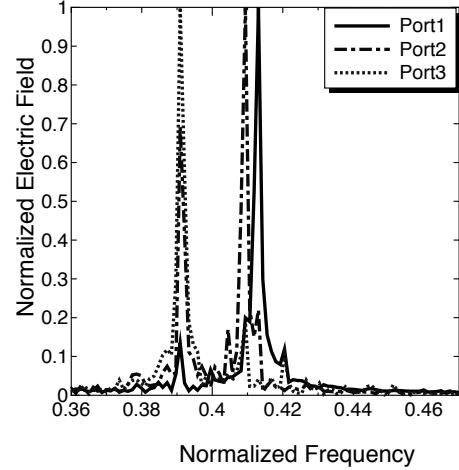


図 14. 図 8 の構造に対する各ポートの周波数特性 ( $Z_c=8a$ )

り出すべき周波数と比較し、他の周波数は約 50%以下になり、3つの異なる周波数を持つ光波を分離できることを示した。次に、共振器を配置するうえで、共振器間距離と分岐路からの距離の影響について計算を行った。共振器間距離、分岐路からの距離を変化させると、周波数分離の結果にも影響が出ることがわかった。このとき、共振器間距離、分岐路から共振器の距離には最適値があることを考えられる。今後の課題として、さらに分離度を上げるために共振器間距離、分岐路からの距離の最適な組み合わせを求める、また、より実際のデバイスに適用するために、損失の評価を行うことがあげられる。

#### 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) K.Yasumoto, Ed.: "Electromagnetic Theory and Applications for Photonic Crystal Ch.8", Taylor & Francis, 2006.

- 4) 野田 進: "フォトニック結晶工学の進展", <http://d01-404.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/57935/1/cue19.02.pdf>, 2008.
- 5) John D. Joannopoulos, Robert D. Meade, Joshua N. Winn: "Photonic Crystals Molding the Flow of Light", Princeton University Press, 1995.