

共振器付きフォトニック結晶導波路における 共振特性の数値的検討

長尾 和樹¹⁾・横田 光広²⁾

Numerical Examination on Resonance Characteristics in Photonic Crystal Structure with Micro Cavity

Kazuki Nagao, Mitsuhiro YOKOTA

Abstract

Currently, the researches for photonic crystal structure have been conducted, and the resonance characteristics of various types of the photonic crystal structure such as WDM (Wavelength Division Multiplexing) communication system are examined numerically. A wavelength demultiplexer used in WDM communication system is an element that divides a plurality of the signals as originally. By using a resonator called a width change type resonator, it is possible to extract eight signals. In this way, it is very important to numerically investigate the photonic crystal structure.

In this research, the pillar type two-dimensional photonic crystal structure is investigated by FDTD (Finite Difference Time Domain) method. A photonic crystal waveguide with a resonator is modeled and its propagation and separation properties are examined using the FDTD method, and the resonator characteristics and the frequency separation performance are examined. We use the 2nd order Mur's Absorbing Boundary Condition (ABC) at the analytical boundary.

Keywords: Numerical techniques, FDTD method, Photonic crystal, Frequency separation

1. まえがき

近年、光の高速性と広帯域性を利用した光通信技術は情報化社会の一翼を担うに至っている。現在では情報を 10Tbit/s を超える速度で 100km 以上もの距離伝送が可能である。しかし、光通信が *point-to-point* から高度なネットワークへと発展するに従い、ノードの処理速度と消費電力がネットワークの性能を左右するようになってきたが、全光信号処理が実現できればさらなる高速化と低消費電力化に結び付くとされている。それでは、光の信号処理に用いる場合の難しさはどこにあるのか。それは光同士の相互作用は物質の双極子を介するが、光と物質の相互作用が弱いため、実用的なパワーで全光信号処理を実現させることが困難であることである。光を伝送に用いる場合には、弱い相互作用が透明な媒質を可

能とし伝送距離の大幅な延伸を可能としてきたが、光を信号処理に用いた場合にはそれが逆に欠点となっていた。それを解決する手法として、小さな空間に光を強く閉じ込めることによって実効的に光物質相互作用を局所的に強めるフォトニック結晶共振器が挙げられる¹⁾。

現在でも、多くのフォトニック結晶を用いた共振器の研究が行われ、シミュレーションにより様々な構造の共振器特性を解析が解析されている。例えば、導波路を挟む穴の間隔を狭めるモードギャップ閉込型、単一点欠陥共振器の周囲の穴の大きさを調整する 6 重極モード、多点欠陥をベースに両端の穴をシフトさせたものなどがある²⁾。また、WDM (波長分割多重方式) 通信で用いる波長分波器は、WDM 通信において統合された信号を元通りに分割する素子である。幅変化型共振器と呼ばれる共振器を用いることによって、全部で 8 つの信号を分波することが可能となっている³⁾。これらのように、シミュレーションを用いてフォトニック結晶構造を数値的に検

¹⁾ 工学専攻大学院生

²⁾ 工学教育研究部教授

討することは非常に重要である。

本論文では、共振器付きピラー型 2 次元フォトニック結晶導波路における共振特性及び周波数分離特性について、FDTD 法⁴⁾を用いて数値的に検討を行う。取り除く誘電体円柱の本数によって、共振器内における共振特性の変化を検討している。また、誘電体円柱を 2 本取り除いた時の共振器内における共振特性及び複数の周波数をもつ連続波を入射した場合の周波数分離特性を検討する。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. 共振器における共振特性の検討

2.1 数値解析の設定

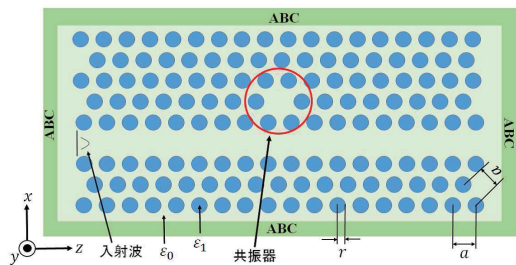


図 1: 導波路と共振器を構成したモデル図

図 1 に解析モデルを示す。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、光導波路と共振器を設置し、共振器の共振特性の解析を行う。

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、パラメータは、比誘電率 $\epsilon_a=1.0$ (空気中) に、ロッド半径 $r=0.175a$ 、比誘電率 $\epsilon_b=11.56$ (誘電体円柱:シリコン) としている。また、格子定数 $a=0.62[\mu\text{m}]$ 、 $\Delta x=\Delta z=a/20$ である。吸収境界条件として、Mur の 2 次吸収境界条件を用いている。

また、入射波として、式 (1) の連続波と式 (2) のガウスパルス波を用いる。

$$E_y = e^{-(x/\omega_0)^2} \sin \omega t \quad (1)$$

$$E_y = e^{-(x-x_0/\omega_0)^2} e^{-\alpha(t-t_0)^2} \cos [\omega(t-t_0)] \quad (2)$$

ただし、 $\alpha = (2/t_0)^2$ 、 $t_0 = 2.3 \times 10^{-14}[\text{s}]$ 、 $w_0 = 7\Delta x$ としている。

この 2 次元フォトニック結晶では、およそ規格化周波数 a/λ が、 $0.303 \leq \omega a/2\pi c \leq 0.494$ の周波数帯にバンドギャップが形成されていることが知られている。

2.2 誘電体円柱の本数の変化に伴う共振特性

図 1 において、共振器部において内部の誘電体を 1 本から 4 本取り除いた (以後、1,2,3,4defect と呼ぶ) 場合の共振特性について検討する。そのためには、共振器における共振周波数を求めることが非常に重要である。そこで、式 (2) で与えられるガウスパルス波を導波路の $5a$ の位置から入射させ、共振器の共振点における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) することによって求める。

図 2 は 1 ~ 4defect の共振器の共振周波数の変化を示す。この結果から、誘電体円柱の本数によって、共振周波数も変化することが確認できる。これは、共振器内の面積が影響していると考えられる。また、1 ~ 4defect の場合の共振周波数は、それぞれ $\omega a/2\pi c = 0.414, 0.389, 0.413, 0.431$ である。その共振周波数を持つ連続波式 (1) を入射した場合の界分布を図 3 に示す。図 3(a), (b) は、共振点が 1 つのみであり、3(c), (d) はそれぞれ共振点 2 つ、3 つと確認することができる。この結果から、共振点が 1 つの場合は基本 (0 次) モードで励起され、共振点が 2

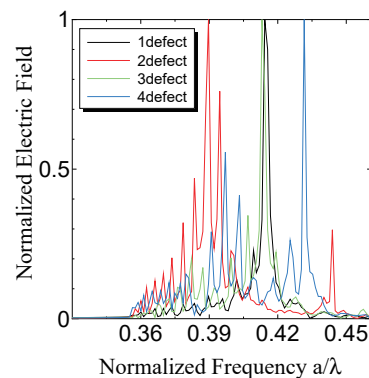


図 2: 共振周波数の変化

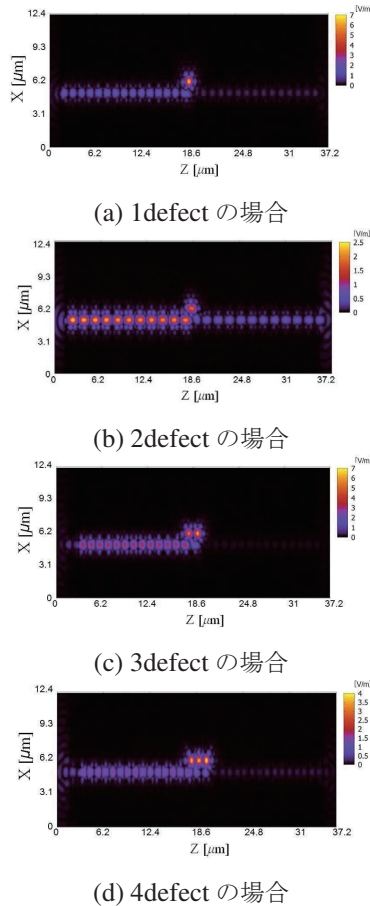


図 3: 共振周波数を入射した場合の界分布

つ・3つの場合は1・2次モードで励起されていることが考えられる。また、1次モード、2次モードは共振点が複数存在するためモード分散による影響が大きくなり、必要な信号を取り出せなくなることから、今回提案する構造では1defect, 2defectが適正であると考えられる。

2.3 1, 2defect の場合の周波数特性

誘電体円柱を取り除く本数によって、共振器内の面積が変化し共振器の共振周波数が変化することがわかった。そこで、1, 2defect共振器構造に注目し、その周波数特性を図4、図5に示す。この時の1, 2defect共振器の共振周波数は、それぞれ $\omega a/2\pi c = 0.414$ 、 $\omega a/2\pi c = 0.389$ でピークをとつ

た。しかし、1defectは1ピークのみであるのに対して、2defectは規格化周波数 $\omega a/2\pi c = 0.383, 0.394$ のときに規格化振幅の50%以上の閉じ込めを確認することができた。この結果から、2defectの場合複数の周波数帯の閉じ込め機能をもつ共振器である可能性が考えられるため、次節で検討を行う。

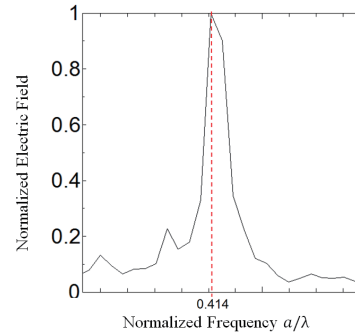


図 4: 1defect 共振器の周波数特性

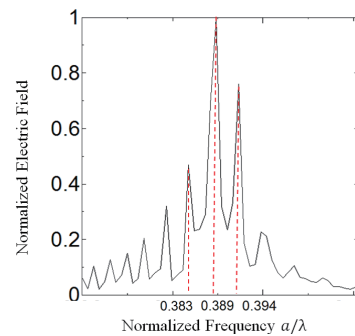


図 5: 2defect 共振器の周波数特性

3. 2defect 共振器における共振特性の検討

3.1 共振周波数と非共振周波数の周波数特性

前節では、共振器の面積を変化させることにより共振器の持つ共振特性の変化について検討してきた。次は図6に示すような構造に複数の周波数を持つ連続波入射し、各Portで周波数を取り出すことが可能であるか検討した。パラメーターは、2.1と同じものを使用する。

共振周波数は $\omega a/2\pi c = 0.383, 0.389, 0.394$ 、共振周波数から比較的離れた周波数帯である非共振周波

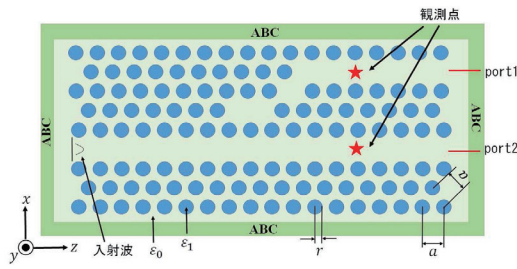
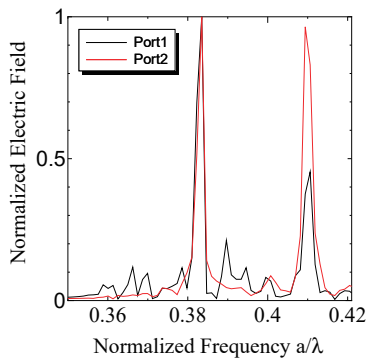
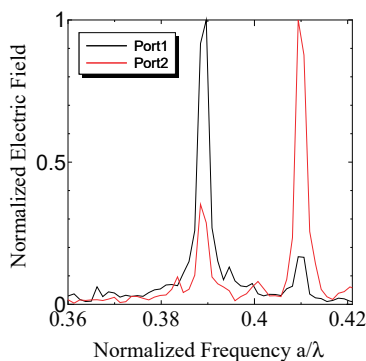


図 6: 2defect 共振器と直線導波路モデル

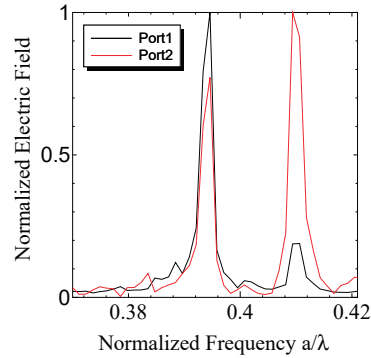
数を $\omega a/2\pi c = 0.410$ と設定した。2つの周波数を持つ連続波を入射し、Port1、Port2 でFFTを行うことにより入射した波が分離されているかを調べる。観測点はそれぞれz方向に1000の位置に設定した共振周波数と非共振周波数の2つの周波数をもつ連続波を入射させた場合の周波数特性を図7に示す。



(a) $\omega a/2\pi c = 0.383, 0.410$



(b) $\omega a/2\pi c = 0.389, 0.410$



(c) $\omega a/2\pi c = 0.494, 0.410$

図 7: 周波数分離特性

図 7(a), (c) においては、Port1 では効率良く分離できているが Port2 では効率よく分離することができていない。それに対して、図 7(b) においては共振周波数と非共振周波数を効率良く分離することができている。この結果から、非共振周波数 $\omega a/2\pi c = 0.410$ は共振器に入らず、そのまま直進して Port2 に出力されているため、図 7(a), (b), (c) いずれも Port2 で規格化電界が強い結果となっている。また、 $\omega a/2\pi c = 0.383, 0.394$ の場合、ともに Port2 で分離されていない。これは、共振器内に入った光が共振器によって電界が強くなり、Port1 だけでなく Port2 にも出力され、非共振周波数よりも規格化電界が大きくなってしまったと考えられる。

3.2 共振周波数近辺の周波数帯を入射したときの周波数特性

3.1 では、共振周波数と比較的離れた非共振周波数を入射させて分離を行った。次に図 6 に示す構造に共振周波数と共振周波数から比較的近い周波数を持つ連続波を入射し、各 Port で周波数を取り出すことが可能であるか検討した。共振周波数は $\omega a/2\pi c = 0.389$ 、周波数は $\omega a/2\pi c = 0.383, 0.394$ と設定した。2つの周波数を入射した場合の各 Port での周波数特性を図 8 に示す。図 8(a) は、Port1, Port2 でそれぞれ $\omega a/2\pi c = 0.389, 0.383$ の周波数が分離されている。それに対して、図 8(b), (c) では、片方の Port で2つの周波数ともに強く取り出されており分離ができていないことがわかる。

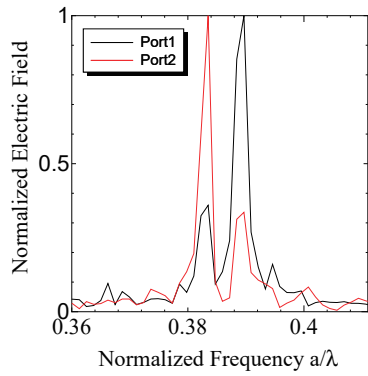
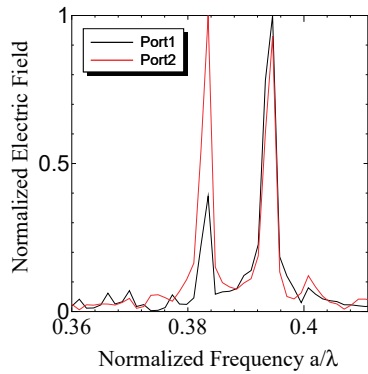
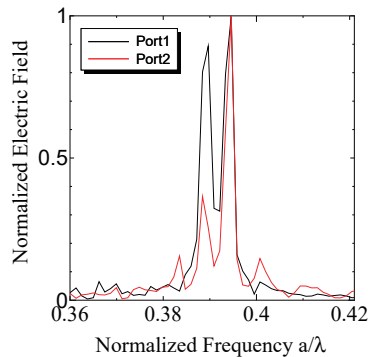
(a) $\omega a/2\pi c = 0.383, 0.389$ の場合(b) $\omega a/2\pi c = 0.383, 0.394$ の場合(c) $\omega a/2\pi c = 0.389, 0.394$ の場合

図 8: 共振周波数とその近辺の周波数を入射したときの周波数特性

ここで、分離できる場合とできない場合で共振器内部における電界が影響している可能性について考

えた。図 9 に共振周波数を入射したときの共振器内部の電界を示す。図 9 より共振周波数が $\omega a/2\pi c = 0.383, 0.389$ のとき電界がマイナスの値をとり下に凸のグラフになっている。それに対して、 $\omega a/2\pi c = 0.394$ のとき電界がプラスの値をとり上に凸のグラフになっていることがわかる。図 8(a) の場合、2 つの周波数ともに電界の値がマイナスであるため同相モードとなり、図 8(b), (c) の場合片方の周波数の電界の値がマイナス、もう片方の周波数の電界の値がプラスであるため逆相モードとなっていると考えられる。

これらの結果から、同相モードの場合 2 つの共振周波数を分離することが可能であり、逆相モードの場合 2 つの共振周波数の分離ができないことがわかった。デバイスを作製する場合には、共振器内部のモードに注意が必要だとわかった。

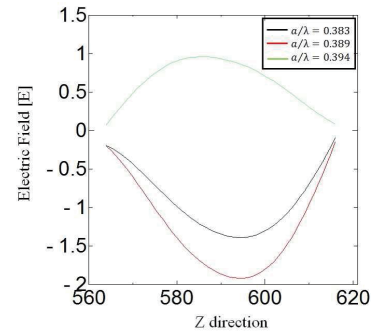


図 9: 共振器内部の電界

4. まとめ

本研究では、共振器付きピラー型 2 次元フォトニック結晶導波路における共振特性及び周波数分離特性について、FDTD 法を用いて数値的に検討を行った。

まず、直線導波路と共振器を用いたフォトニック結晶構造において、誘電体円柱を取り除く本数を変化させた場合の共振特性の変化について検討を行った。誘電体円柱を 1 本から 4 本取り除いた場合、周波数特性が変化していることがわかる。これは、共振器内の面積の変化によるものだと考えられる。また、それぞれの共振周波数をもつ連続波を入射した

ときの界分布から、1本、2本取り除いたときは共振点が1つ、3本の時は2つ、4本の時は3つ確認することができる。高次モードの場合、共振点が複数存在するためモード分散による影響が大きくなり必要な信号を取り出せなくなることから、誘電体円柱を1本、2本取り除いた構造が最適であると考えられる。

次に、2defect 共振器の場合、規格化電力が50%以上の規格化周波数が3箇所確認できたことから、2defect 共振器に注目して共振特性を解析した。まず、共振周波数と非共振周波数をもつ連続波を入射した場合には、 $\omega a/2\pi c = 0.389$ の規格化電界がピークの共振周波数のみ分離することができることがわかった。一方で、共振周波数と共振周波数近辺の周波数を入射した場合には、共振器内の電界の値がプラスであるかマイナスであるかにより分離度に差が出てくることがわかった。 $\omega a/2\pi c = 0.383, 0.389$ の場合ともにマイナスの電界の値であることより共振器が同相モードであり、同相モードの場合、各 Port での周波数の分離が可能であるとわかった。

今後の課題として、分離させる周波数を増やすこと、また共振周波数に近い周波数(今回は、 $\omega a/2\pi c = 0.394$) など分離できなかったため、共振周波数近辺の周波数を分離することができる構造を作製することなどが挙げられる。

参考文献

- 1) 田辺: “高 Q 値フォトニック結晶微小光共振器における光学非線形”, レーザー研究, 37 巻, 1 号, 2009.
- 2) 倉持, 新家, 納富: “フォトニック結晶導波路・共振器の高性能化”, NTT 技術ジャーナル, 2006
- 3) Y. Ooka, T. Tanabe: “Ultrasmall in-plane photonic crystal demultiplexers fabricated with photolithography”, Optics Express, vol.25, 2017.
- 4) 宇野: “FDTD 法による電磁界及びアンテナ解析”, コロナ社, 1998.