

キラル媒質で構成された フォトニック結晶光導波路の基本特性

安藤 崇¹⁾ · 稲葉 峻宜²⁾ · 横田 光広³⁾

Fundamental Properties of Photonic Crystal Waveguide Consisting of Chiral Medium

Takashi ANDOU, Takenobu INABA, Mitsuhiro YOKOTA

Abstract

The fundamental properties of photonic crystal waveguide consisting of chiral medium are examined numerically by the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method. The waveguide structure in this report is the two-dimensional air-hole type waveguide. It is shown that the incident linear polarized lightwave is converted to the circular polarized lightwave. We also examine the photonic band gap for the chiral photonic crystal waveguide numerically. The band gaps of the right-circularly-polarized (RCP) and the left-circularly-polarized (LCP) waves depend on the chirality, and it is found that the band width of RCP is narrower than that of LCP.

Key Words :

Chiral medium, Rotation of polarization, 2-D Photonic Crystal Waveguide, FDTD method

1. まえがき

近年、フォトニック結晶構造を利用した超微細構造デバイスの実現が期待されており、その工学的応用のための研究が盛んに行われている。フォトニック結晶¹⁾は誘電率を周期的に変化させた人工結晶で、フォトニック結晶構造は一定の周波数の光を結晶内から排除する能力を持つ。フォトニック結晶の構造を任意に設計することで結晶内から排除する周波数の領域を自在に設定することができる。この周波数領域をPBG(Photonic Band Gap)と呼ぶ。この特徴を利用することで閉じ込め効率の高い光導波路の構成が可能となる。

キラル媒質²⁾の概念が19世紀初頭に登場し、それ以降、光学や科学、電磁気学など多くの分野で重要な役割を担ってきた。キラル媒質には光学活性(Optical Activity)が特徴の一つとして挙げられる。この光学活性には媒質中を通過する直線偏光の偏光面を回転させる旋光性がある。この特徴を生かして、機能素子として応用するための研究が数多く行われている³⁾。マイクロ波領域のキラル媒質は、誘電体に螺旋状導体をランダムに埋め込むことにより実現される。また、光波領域では、水晶、テレピン油などが自然界に存在するが、人工的に作成するための研究も盛んに行われている。ここ数年、ナノテクノロジーが発展し、 μm オー

ダーの螺旋状コイルを作成できるようになった。この技術を利用することで光波領域においてもキラル媒質を実現する期待が持たれている⁴⁾。

本稿ではキラル媒質で構成された2次元エアホール型フォトニック結晶光導波路をFDTD法で解析し、その基本特性について調べる。FDTD法においては等価的な比誘電率 ϵ_{\pm} や比透磁率 μ_{\pm} を導入し、従来の定式化を崩すことなく解析する方法を紹介する。その際、吸収境界条件にはMurの2次を適用した。

2. キラル媒質中の光波伝搬

キラル媒質²⁾とは、直線偏波の光が入射したときに、その偏波面を回転させる媒質をいう。マイクロ波領域におけるキラル媒質は、螺旋状導体を誘電体にランダムな密度でランダムな方向に埋め込むことにより実現される。さらに光波領域のキラル媒質としては、水晶、テレピン油などが挙げられ、これらの媒質は螺旋状の分子構造を持っている。また、近年のナノテクノロジーの発展からカーボンマイクロコイル(CMC)⁴⁾を利用することでキラル媒質が実現できることも期待されている。

¹⁾電気電子工学専攻大学院生

²⁾電気電子工学科学部生

³⁾電気電子工学科助教授

光波が次式の様に右旋偏波と左旋偏波との合成で与えられるとする

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_- \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_+ + \mathbf{H}_- \quad (2)$$

ここで+と-はそれぞれの右旋偏波と左旋偏波を表している。本稿では等方性キラル媒質を次式の構成方程式で定義する²⁾。

$$\mathbf{D}_\pm = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}_\pm - j\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \mathbf{H}_\pm \equiv \varepsilon_0 \varepsilon_\pm \mathbf{E}_\pm \quad (3)$$

$$\mathbf{B}_\pm = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}_\pm + j\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \mathbf{E}_\pm \equiv \mu_0 \mu_\pm \mathbf{H}_\pm \quad (4)$$

ただし κ はキラル係数である。式(3),式(4)より

$$(\mu_r - \mu_+)(\varepsilon_r - \varepsilon_+) - \kappa^2 = 0 \quad (5)$$

$$(\mu_r - \mu_-)(\varepsilon_r - \varepsilon_-) - \kappa^2 = 0 \quad (6)$$

となる。式(3)の右旋偏波成分に着目して \mathbf{E}_+ を求めると

$$\mathbf{E}_+ = \frac{j\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}{\varepsilon_0(\varepsilon_r - \varepsilon_+)} \mathbf{H}_+ = -j \left\{ \frac{-\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}{\varepsilon_0(\varepsilon_r - \varepsilon_+)} \right\} \mathbf{H}_+ \quad (7)$$

同様に式(4)の右旋偏波成分に着目すると

$$\mathbf{E}_+ = \frac{\mu_0(\mu_r - \mu_+)}{-j\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \mathbf{H}_+ = -j \left\{ \frac{\mu_0(\mu_r - \mu_+)}{-\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \right\} \mathbf{H}_+ \quad (8)$$

ここで, \mathbf{E}_\pm は、磁界に対して次の関係式を満足すると仮定する。

$$\mathbf{E}_\pm = \mp j\eta_\pm \mathbf{H}_\pm \quad (9)$$

ただし, η_\pm は、波動インピーダンスを表す。式(7)~式(9)より η_+ は

$$\eta_+ = \frac{-\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}{\varepsilon_0(\varepsilon_r - \varepsilon_+)} = \frac{\mu_0(\mu_r - \mu_+)}{-\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (10)$$

同様に η_- は

$$\eta_- = \frac{-\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}{\varepsilon_0(\varepsilon_r - \varepsilon_-)} = \frac{\mu_0(\mu_r - \mu_-)}{-\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (11)$$

また、波動インピーダンス η_\pm を、次式で定義する。

$$\eta_\pm = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_\pm}{\varepsilon_0 \varepsilon_\pm}} \quad (12)$$

式(10)と式(12)を比較し、式(5)を用いて整理すると μ_+ が求まる。同様の手順で μ_- , ε_\pm も求まる。よって等価的な比誘電率 ε_\pm や比透磁率 μ_\pm は次式となる。

$$\mu_\pm = \mu_r \left(1 \pm \frac{\kappa}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \right) \quad (13)$$

$$\varepsilon_\pm = \varepsilon_r \left(1 \pm \frac{\kappa}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \right) \quad (14)$$

式(3),(4),(13),(14)をMaxwellの方程式に代入すると、

$$\nabla \times \mathbf{E}_\pm = -\mu_0 \mu_\pm \frac{\partial \mathbf{H}_\pm}{\partial t} \quad (15)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}_\pm = \varepsilon_0 \varepsilon_\pm \frac{\partial \mathbf{E}_\pm}{\partial t} \quad (16)$$

が得られる。式(15),式(16)より等方性媒質に適用しているFDTD法のプログラムコードで数値解析を行えることがわかる。

3. 数値解析

3.1 本手法の検証

解析に使用した光導波路の構造を図1に示す。まず伝搬方向をz軸に取り、y軸方向に一樣な比誘電率 $\varepsilon_r = 11.56$ の誘電体に格子定数 a で半径 r のエアホール($\varepsilon_a = 1.0$)が空いているフォトニック結晶光導波路を考える。

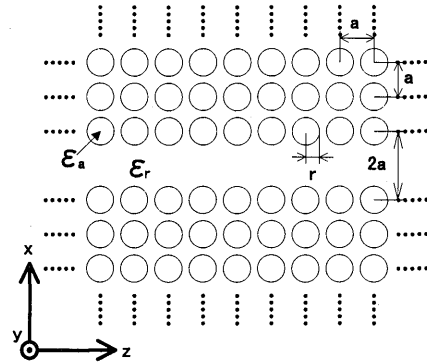
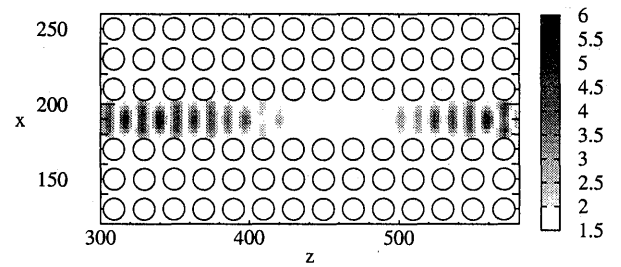
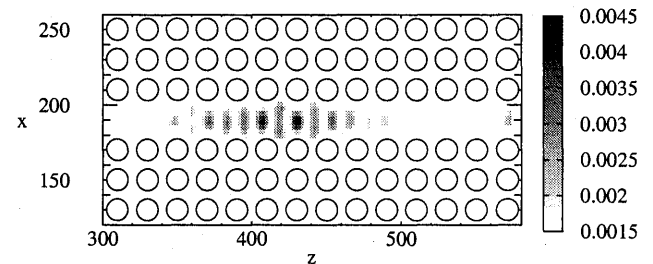


図1: フォトニック結晶光導波路



(a) $|E_y|$ 成分



(b) $|H_y|$ 成分

図2: 偏波面回転

エアホールの半径と格子定数は $r/a = 0.385$, $a/\lambda = 0.268$ としている⁵⁾。ただし入射波の波長を $\lambda = 1.55[\mu\text{m}]$ とする。また、キラル係数 $\kappa = 0.15$ である。 y 軸方向に偏波する直線偏波を右旋円偏波と左旋円偏波に分解して式 (15) および式 (16) の入射波としている。図 2(a) と図 2(b) はそれぞれ $|E_y|$ と $|H_y|$ の界分布を示している。偏波面が回転しながら伝搬している様子が確認され、これは文献⁵⁾の結果と概ね一致している。

次に y 軸方向に一樣な比誘電率 $\epsilon_r = 12.96$ の誘電体に格子定数 a で半径 r のエアホール ($\epsilon_a = 1.0$) が空いているフォトニック結晶光導波路を考える。エアホールの半径はフォトニックバンドギャップ (PBG) の幅を考慮し $r/a = 0.45$ とした。このとき PBG は $0.216 \leq a/\lambda \leq 0.248$ に形成されるが、本稿では $a/\lambda = 0.224$ を用いた⁶⁾。また、入射波の波長 $\lambda = 1.55[\mu\text{m}]$ 、キラル係数 $\kappa = 0.15$ としている。図 3(a) は合成電界 $|E_y|$ 、図 3(b) は右旋円偏波 $|E_y^+|$ 、図 3(c) は左旋円偏波 $|E_y^-|$ の界分布を示している。このパラメータにおいては左旋円偏波が主要な成分となっていることがわかる。

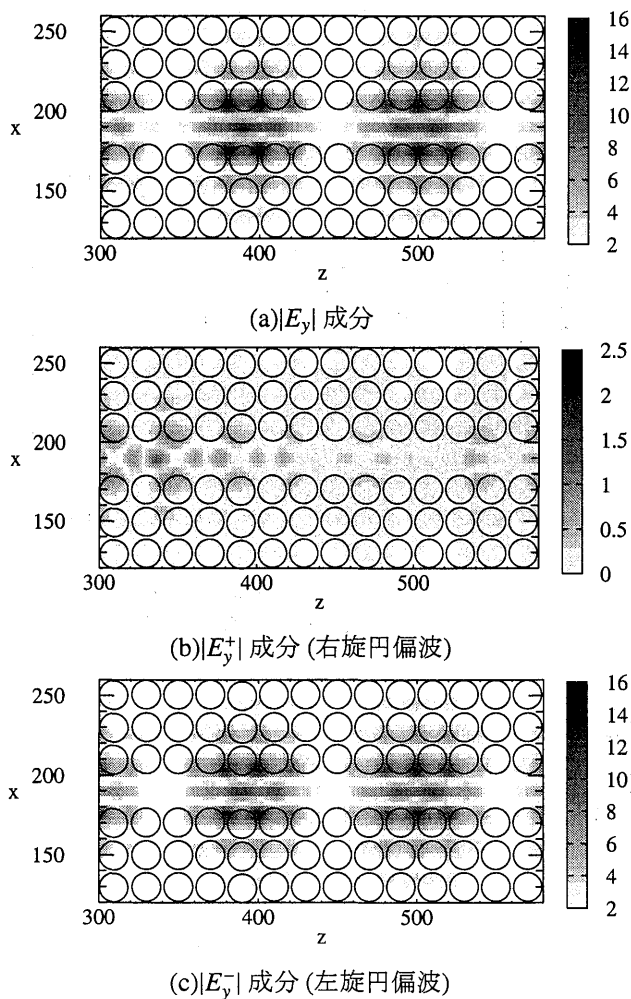


図 3: 電界 $|E_y|$ の成分分解

3.2 PBG 解析

本節では、キラル媒質を有するフォトニック結晶構造のバンド解析を行う。図 4 が解析に使用した構造である。欠陥列は存在せず $x-z$ 平面に 17×17 個の空孔を配置したエアホール型を考える。構造の中心に線波源を置き、 a/λ に対して伝搬する電力の変化について数値的に検討する。波源から R だけ離れた円周上における電力の空間的、時間的な平均値で評価を行った。エアホールの半径は PBG の幅を考慮し $r/a = 0.45$ とした。誘電体 ($\kappa = 0$) における PBG は $0.216 \leq a/\lambda \leq 0.248$ に形成される⁶⁾ことが知られている。キラル媒質の影響によってどのように PBG が変化するかを調べる。PBG に配慮して規格化周波数 a/λ は $0.150 \sim 0.310$ へと変化させた。また前節同様、入射波の波長は $\lambda = 1.55[\mu\text{m}]$ とし、 x, z 方向のセルサイズは $\Delta x = \Delta z = a/20$ として求めた。

図 5 は、 κ の値を $0.00 \sim 0.20$ まで 0.05 ずつ変化させたときの平均電力を示している。図 5(a) は右旋円偏波の成分、図 5(b) は左旋円偏波の成分をそれぞれ示したものである。図 5(c) は $\kappa = 0.10$ のときの右旋円偏波と左旋円偏波に対する電力を示している。また、挿入図はバンドギャップ付近の規格化周波数に対する平均電力の詳細図である。

また、表 1 は κ の値を $0.00 \sim 0.20$ まで 0.05 ずつ変化させた際の右旋偏波成分と左旋偏波成分の PBG の幅を定量的に表したものである。PBG の幅は $\kappa = 0$ における $a/\lambda = 0.216, 0.248$ での電力値を基準とする。 κ が変化した際にこの電力値にもっとも近づく規格化周波数をバンド幅の上下限として定義している。右旋偏波成分では κ の値が大きくなるにつれてバンド幅が狭くなり、逆に左旋偏波成分では κ の値が大きくなるにつれてバンド幅が広がっているのがわかる。右旋偏波成分と左旋偏波成分それぞれの等価屈折率が κ に依存するためバンド幅が変化していると考えられる。

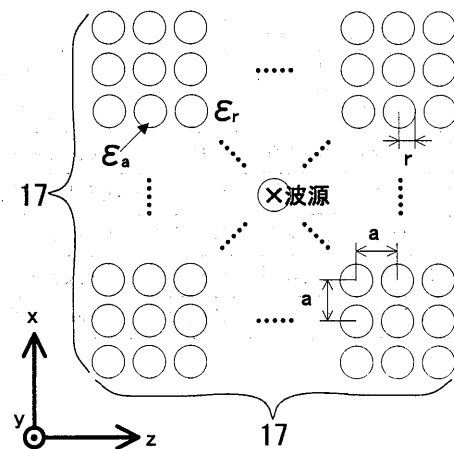


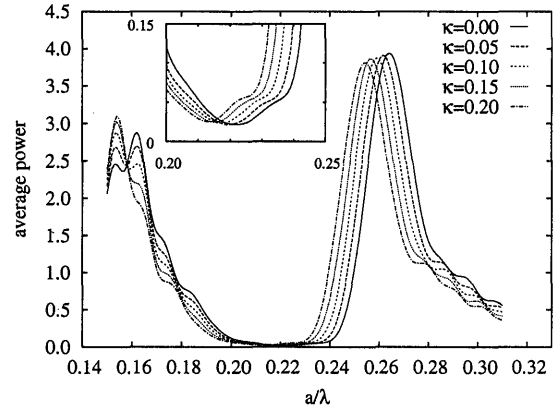
図 4: フォトニック結晶構造

4. まとめ

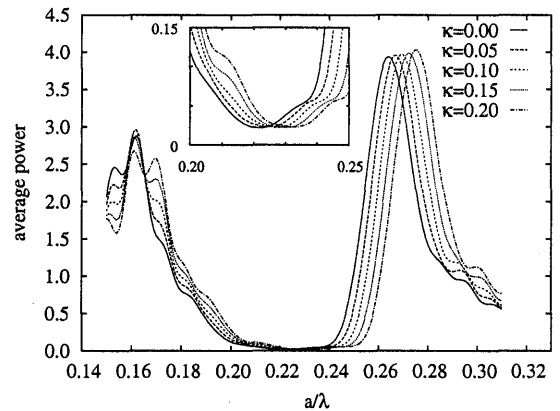
本研究ではキラル媒質で構成された2次元エアホール型フォトニック結晶光導波路の基本特性をFDTD法を用いて解析した。数値解析の結果は本手法が等方性キラル媒質に対して有効であることを示している。また、 κ の値が変化することで右旋偏波成分と左旋偏波成分それぞれのバンド幅に差異が生じることもわかった。今後はより詳細な解析としてモード解析などについて検討していく予定である。

参考文献

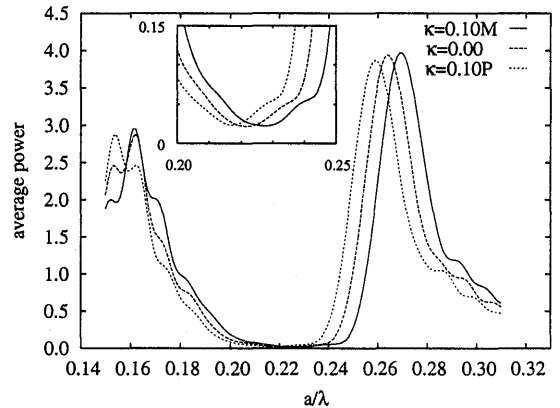
- 1) E.Yablonovitch: "Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett*, Vol.58, No.20, pp. 2059-2062 (1987).
- 2) I.V.Lindell *et al.*: "Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media", Artech House (1994).
- 3) 藪, 沢: "ベクトル形差分ビーム伝搬法による等方性キラルスラブ導波路の解析", 信学論 (C-1), Vol.J80-C-1, No.9, pp. 397-406 (1997).
- 4) 元島: "新規のGHz帯用電磁波吸収材「カーボンマイクロコイル(CMC)」", 電学電磁界理論研資, EMP-03-83, pp. 65-68 (2003).
- 5) 佐藤, 吉田, 宮永: "種々の異方性媒質を含むフォトニック結晶光導波路の基本特性解析とその応用", 電学電磁界理論研資, EMP-02-89, pp. 75-80 (2002).
- 6) A. Adibi *et al.*: "Properties of the Slab Modes in Photonic Crystal Optical Waveguides", *J.Lightwave Technol.*, Vol.18, No.11, pp. 1554-1564 (2000).



(a) 右旋成分



(b) 左旋成分



(c) $\kappa = 1.0$ における両成分

図5: PBGの遷移

表1 キラル媒質におけるフォトニックバンドギャップ幅

κ	右旋円偏波		左旋円偏波	
	範囲	幅	範囲	幅
0.00	0.2160 ~ 0.2480	0.0320	0.2160 ~ 0.2480	0.0320
0.05	0.2144 ~ 0.2453	0.0310	0.2185 ~ 0.2507	0.0322
0.10	0.2132 ~ 0.2429	0.0297	0.2207 ~ 0.2534	0.0326
0.15	0.2117 ~ 0.2402	0.0285	0.2225 ~ 0.2562	0.0337
0.20	0.2100 ~ 0.2377	0.0277	0.2246 ~ 0.2590	0.0345