L-27

# 複数の円形コアを持つ光導波路の伝送特性

# Transmission Characteristics of Optical Waveguides with Multiple Circular Cores

○金井 稜<sup>1</sup>, 須田翔大<sup>1</sup>, 古川慎一<sup>2</sup> \*Ryo Kanai<sup>1</sup>, Shota Suda<sup>1</sup>, Shinichi Furukawa<sup>2</sup>

Abstract: Transmission characteristics of waveguides with multiple circular cores are studied. The cases of (1) 8-cores located at rectangle and (2) 3-cores with 4-pits are dealt with as the cross section of waveguide. Type (1) and Type (2) are numerically analyzed for propagation characteristics and modal birefringence characteristics, respectively. As a calculation method, we take multipole method which is suitable for an analysis of waveguides with multi circular regions such as circular cores and hollow pits.

1. まえがき

複数の円形コアを配置した光導波路は,伝送容量の 拡大に対応する非結合型や結合型の構造を持つマルチ コア光ファイバとして提案され,その特性に関する検 討が報告されている<sup>[1][2]</sup>.この構造は,複数の円形 コアを配置することが実用面においても比較的容易で あるため,空間多重による大容量伝送路<sup>[3]</sup>や大 Aeff (実効断面積)<sup>[4]</sup>を実現する伝送路として活発に研究 されている.

本研究では,複数の円形コアを用いた非軸対称な導 波路として,

 Type1:8本の円形コアを矩形状に配置 (図1(a),全て同径のコアで構成)
 Type2:3本の円形コアと4個のピットを配置

(図1(b), 異径のコアで構成) の伝送特性を解析した.

#### 2. 数值解析

解析法は,複数の円形領域を組み合わせた構造の計 算に適した多重極法<sup>[5]</sup>を用いた.数値結果で用いる 規格化伝搬定数は構造が非軸対称であるため直交する 2つの偏波(x偏波(伝搬定数:β<sub>0</sub>),y偏波(伝搬定 数:β<sub>0</sub>))に対して次式で定義した.

$$b_x \triangleq [(\beta_x/k)^2 - n_c^2] / (n_1^2 - n_c^2)$$
(1)

$$b_{y} \triangleq [(\beta_{y}/k)^{2} - n_{c}^{2}]/(n_{1}^{2} - n_{c}^{2})$$
(2)

但し, k は真空中の波数を表す. コア (屈折率 $n_1$ ) と クラッド (屈折率 $n_c$ )の比屈折率差は,  $\Delta \triangleq (n_1 - n_c)/n_c$ とした.

#### 2.1 精度の検討

図3は、Typel の場合のモード数 N (多重極法のモードを有限で打切ったモード数) に対する x 偏波の規格化伝搬定数 bx と y 偏波の規格化伝搬定数 by (いず

1:日大理工・院(前期)・電気 2:日大理工・教員・電気



(b) Type2 Figure 1. Structure parameters of waveguides.

れも基本モード)の収束である.図から外挿で求めた 真値との相対誤差を 0.1%以下とするためには、 $N \ge 7$ とすればよいことがわかる.図4はType2の場合のNに対するモード複屈折率 $B(\triangleq |\beta_x - \beta_y|/k)$ の収束を示 す. $N \ge 9$ を用いて計算することにより、Bを4桁以 上の精度で求めることができる.以下では、 $b_x \ge b_y$ の 相対誤差を 0.1%以下とし、Bを4桁以上の精度で得ら れるNを用いて計算している.

## 2.2 解析結果

図5は、円形コアを矩形状に配置した場合の伝搬特 性を求めた図である. 規格化周波数は $V_a \triangleq kd$  $\sqrt{n_1^2 - n_c^2}$ とした. 図中の実線が円形コアを8本配置し た場合(Typel: 8-core)の結果で、破線が円形コアを 2本配置した場合 (2-core) の結果を表している. 8-core と 2-core の配置は、矩形導波路の構造<sup>[6]</sup> ( $n_1$ =1.5,  $n_c$ =1.0,長辺wと短辺dの比w/d=2.0,図5参照)に 内接するように円形コアを配置した.この構造では 2-core と 8-core のコアの断面積が等しくなっている. 図には文献[6]の伝搬特性 ( $\circ: b_x, \Delta: b_y$ )も併せて示し てある.図からx偏波とy偏波のみ伝搬する $V_d$ の範囲 で $V_d$ を一定としたとき, $b_x$ と $b_y$ は矩形導波路, 2-core, 8-core の順に小さくなることがわかる.これは、矩形 に内接する円形コアの周辺に隙間が生じるためである.

図6は、Type2 について偏波面保存ファイバの特性 として重要なモード複屈折率 *B* を規格化周波数 *V*  $\triangleq ka_1\sqrt{n_1^2 - n_c^2}$  に対して、コアが 3 つの場合(一,  $n_2 = n_1$ )とコアが 1 つの場合(一,  $n_2 = n_c$ )の結果を 示す. 図中の縦棒は、高次モードの遮断波長を表す. いずれの場合も 2 つの直交偏波のうち x 偏波が遮断に 近づくとき *B* が最大となる. *B* の最大値は、コアを 3 っとした場合の方が僅かに大きくできる.

### 3. まとめ

本研究では、複数の円形コアを用いた導波路として、 Typel の構造と Type2 の構造について伝送特性を検討 した. 今後は、複数の円形コアで構成した種々の導波 路の実行断面積についても検討する予定である.

### 4. 参考文献

[1] M.Koshiba, K.Saitoh, and Y.Kokubun, "Heterogeneous multi-core fibers proposal and design principle", IEICE Electronics Express, vol.6, no.2, pp.98-103, 2009.

[2] Y.Kokubun and M.Koshiba, "Novel multi-core fibers for mode division multiplexing proposal and design principle", IEICE Electronics Express, vol.6, no.8, pp.522-528, 2009.

[3] Y.Sasaki, K.Takenaga, N.Guan, S.Matsuo, K.Saitoh and M. Koshiba, "Large-effective-area uncoupled few-mode multicore fiber", Optics Express, vol.20, no.26, pp.B77-B84, 2012.

[4] 村井亮太, 齊藤晋聖, 小柴正則, 「テーパー屈折率 分布結合型マルチコアファイバの大コア径ファイバへ の応用」, 電子情報通信学会総合大会, B-13-41, pp.545, 2012.

[5] Z.Zhu and T,G.Brown, : "Multipole analysis of holeassisted optical fibers, optics communication, vol.206, pp.333-339, 2002.

[6] 須田,古川,亀田:「多重極法による光導波路の解 析 -精度の検討-」,平成27年度(第59回)日本大学 理工学部学術講演会,2015

[7] C.Vassalo, "circular Fourier Analysis of Full Maxwell Equations for Arbitrarily Shaped Dielectric Waveguides", J.Lightwave technol., vol.8, no.11, pp.1723-1729, Nov.1990.



**Figure 3**. Convergence of propagation constants  $b_x$  and  $b_y$ .



Figure 4. Convergence of modal birefringence B.



Figure 5. Propagation characteristics for the case of circular cores located at a rectangle [type1].



Figure 6. Modal birefringence *B* as a function of *V* for polarization- maintaining fiber with three cores and four pits [type2].