

空孔アシスト光ファイバの伝搬特性

Propagation Characteristics of a Hole-Assisted Optical Fiber

古川慎一¹, ○宮澤拓海², 飯島悦裕²

Shinichi Furukawa¹, *Takumi Miyazawa², Yoshihiro Iijima²

Abstract: We propose a novel hole-assisted optical fiber with sector holes around a raised index core. Propagation characteristics and the power in the core of this fiber are analyzed numerically. CFEM (Circular Fourier Expansion Method), which can be applied to a fiber with two-dimensional inhomogeneous refractive index profile, is used as a method of numerical computation. In the single-mode region, it is found that propagation characteristics do not depend on the number of hole and a fiber with sector holes can be achieved a larger power concentration into the core than a single core fiber without holes.

1. まえがき

空孔アシストファイバは、高屈折率コアの周囲に空孔を配置した構造を持つファイバ^[1]と規則的に配置した多数の空孔の一部に欠陥（コアに相当）を設けて光を閉じこめる構造を持つファイバ^[2]に分類される。高屈折率コアの周囲に空孔を配置した空孔アシストファイバは、空孔の効果によって、コアとクラッドの間に等価的に大きな屈折率差を生じるため、従来の光ファイバに比べて曲げ損失の改善が期待できる^[3]。

本研究では、高屈折率コアの周囲に扇形空孔を配置した構造（扇形空孔ファイバ：図1参照）を提案し、空孔数およびコアと空孔との間隔を変化させた場合の伝搬特性について検討した。扇形空孔ファイバの解析には、二次元不均質屈折率分布へ適用可能な CFEM (Circular Fourier Expansion Method)^{[4][5]}を用いた。

2. 数値解析

解析した扇形空孔ファイバの構造（図1参照）は、円形均質コア、中間クラッド層、空孔を有する領域（不均質領域）、外部クラッドで構成される。コア半径を a 、中間クラッド層の幅を d_1 、空孔を有する領域の幅を d_2 、空孔数を p とする。以下で解析する扇形空孔は開き角が全て等しく、 x 軸と y 軸に対称に配置するものとする。屈折率分布は次式で表される。

コア ($0 \leq r \leq a$) :

$$n(r, \theta) = n_1 \tag{1}$$

中間クラッド層 ($a \leq r \leq a + d_1$) :

$$n(r, \theta) = n_2 \tag{2}$$

空孔を有する層 ($a + d_1 \leq r \leq a + d_1 + d_2$) :

$$n(r, \theta) = [n_2 + n_3 + (n_2 - n_3) \cos(p\theta)] / 2 \tag{3}$$

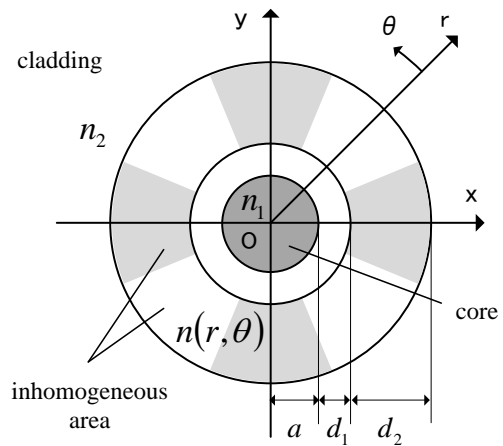


Figure 1. Coordinate system

外部クラッド ($d_2 \leq r$) :

$$n(r, \theta) = n_2 \tag{4}$$

ここで、 n_1 はコア部の屈折率、 n_2 は外部領域の屈折率、 n_3 は空孔の屈折率である。コアと外部領域間の比屈折率差を $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2$ とした。今回検討した形状では $n_2 = 1.50$ 、 $n_3 = 1.00$ 、 $\Delta = 1.00[\%]$ 、空孔を有する領域の幅は $d_2 / a = 1.0$ とし、伝搬定数 β は次式で規格化した。

$$b := [(\beta/k)^2 - n_2^2] / (n_1^2 - n_2^2) \tag{5}$$

但し、 k は真空中の波数。

CFEM を用いて計算した規格化伝搬定数 b の精度は、4 次の Runge-Kutta 法の分割数 M と Fourier 級数の打ち切り項数 N によって決まる^{[4][5]}。以下の CFEM による数値解析では、 b の相対誤差が 0.05% 以下となる N と M を用いた。

1 : 日大理工・教員・電気 2 : 日大理工・学部・電気

図2は $d_1/a=0.0$ のとき、 p を0, 4, 6, 8と変化した場合の規格化周波数 $V(=ka\sqrt{n_1^2-n_2^2})$ に対する b の特性である。 $p=0$ は空孔の無いステップ分布である。図2から次のことが言える。

- (1)空孔数 p が $p=4, 6, 8$ の場合、 HE_{11} の b は、空孔数に関係なくほぼ一致する。
- (2)単一モード領域における HE_{11} の b は、空孔の無い場合($p=0$)に比べて空孔がある場合の方が V に対して急激に変化する。
- (3)空孔が無い場合と空孔がある場合では実効的な単一モード領域の範囲が異なる。

図3は $p=0, 4, 6, 8$ の各構造について d_1/a を0.0, 0.1, 0.5と変化した場合の単一モード領域($d_1/a=0.5$ の時 $1.6 \leq V < 2.8$)における V に対する規格化電力 P を示す。 P はコア($0 \leq r \leq a$)に集中する電力であり次式から求めた。

$$P = \iint_{\text{core}} \bar{S}_z dx dy / \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{S}_z dx dy \quad (6)$$

\bar{S}_z はPoyntingベクトル

$$\bar{S}_z = 1/2 \cdot \text{Re}[\mathbf{E}_t \times \mathbf{H}_t] \quad (7)$$

で、電磁界のベクトル $\mathbf{E}_t, \mathbf{H}_t$ は $\mathbf{E}_t = \mathbf{a}_r E_r + \mathbf{a}_\theta E_\theta$, $\mathbf{H}_t = \mathbf{a}_r H_r + \mathbf{a}_\theta H_\theta$ ($\mathbf{a}_r, \mathbf{a}_\theta$ は r, θ 方向の単位ベクトル)である。空孔がある場合、 V を一定とした時、 d_1/a を小さくすると P は大きくできる。空孔があると $V=1.6$ の時でも $P=0.84$ ($d_1/a=0.5$)となり、 $p=0$ の場合に比べて約1.4倍大きくコアに集中できる。これはコア部の近くに屈折率の小さい空孔が配置されたためである。この場合について、ステップ分布型ファイバの解析結果から推定すると、曲げ損失が 0.01dB/km となる半径は 4.2cm となり許容曲げ半径 5cm 以下となる。

3. まとめ

本研究では、新しいタイプの空孔アシストファイバを提案し、空孔数($p=0, 4, 6, 8$)と、中間クラッド層の幅($d_1/a=0.0, 0.1, 0.5$)を変化させた場合の伝搬特性について検討した。得られた結果は次のとおりである。

- (1)空孔数を4個, 6個, 8個としても規格化伝搬定数 b はほぼ一致する。
- (2)単一モード領域において、中間クラッド層の幅を $d_1/a \leq 0.5$ とすれば、コア内の電力は空孔の効果によって0.84以上に集中できる。

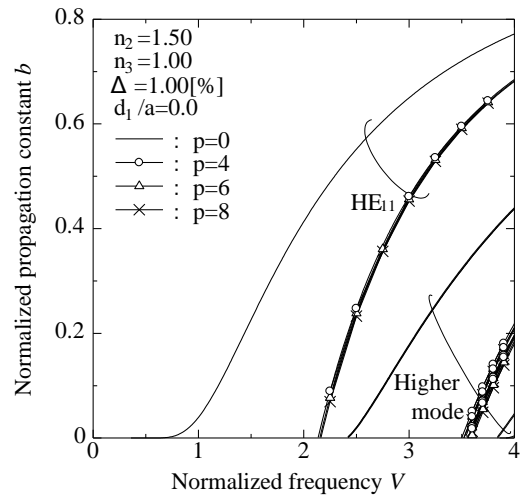


Figure 2. Propagation characteristics

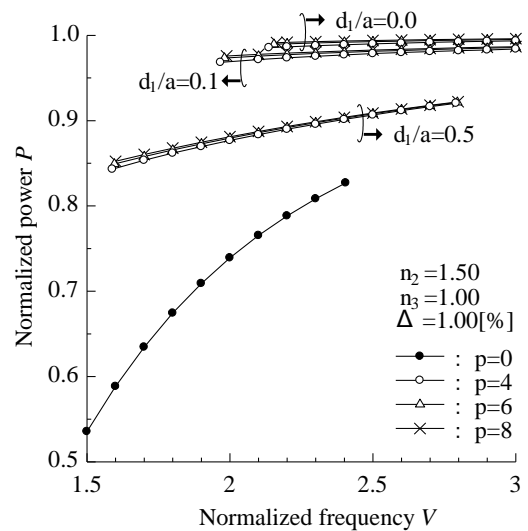


Figure 3. Normalized power P versus V in the single-mode region

4. 参考文献

- [1]T.Hasegawa, E.Sasaoka, M.Onishi, M.Nishimura, Y.Tsuiji, and M.Koshiba: "Hole-assisted Lightguide fiber for large anomalous dispersion and low optical loss", Opt. Express, Vol.9, No.13, pp.681-686,2001.
- [2]K.Saitoh, M.Koshiba T.Hasegawa and E.Sasaoka: "Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion", Opt. Express, Vol.11, No.8, pp.843-852,2003.
- [3]K.Nakajima, K.Hogari, J.Zhou, K.Tajima, and I.Sankawa: "Hole-assisted fiber design for small bending and splice losses", IEEE Photonics Technology letters, Vol.15, No.12, pp.1737-1739, 2003.
- [4]C.Vassallo: "Circular Fourier analysis of full Maxwell equations for arbitrary shaped dielectric waveguides - application to gain factors of semiconductor laser waveguides -", J.Lightwave Technol., Vol.1, No.8, pp.1723-1729, 1990.
- [5]S.Furukawa, W.Satou, T.Hinata and N.Shimizu: "An analysis of an optical fiber with two inhomogeneous sector holes by circular Fourier expansion method", IEICE Trans.Electron., Vol.E91-C, No.1, pp.41-47,2008.