

## 層状の屈折率分布を持つ光ファイバの伝送特性

## Transmission Characteristics for Optical Fibers with Layered Refractive Index Profiles

○鈴木祐介<sup>1</sup>, 古川慎一<sup>2</sup>\*Yusuke Suzuki<sup>1</sup>, Shin-ichi Furukawa<sup>2</sup>

Abstract: This study gives a design method to realize zero total dispersion at wavelength of  $1.55\mu\text{m}$  for optical fibers with a layered refractive index profile. The intention of design is to simplify decision of many structure parameters producing a layered refractive index profile. Therefore, it is assumed that each layers have refractive index given as a function of radial direction. As a result, it is found that a design of dispersion flattened fiber with zero total dispersion at wavelength of  $1.55\mu\text{m}$  is available. These designed fibers are also calculated about effective area ( $A_{\text{eff}}$ ), mode field diameter (MFD), and bending loss.

## 1. まえがき

光通信システムの伝送媒体として、層状の屈折率分布を持つ光ファイバが種々提案され、その研究成果が報告されている<sup>[1]-[3]</sup>。層状の屈折率分布を利用したファイバの代表的な構造として、マルチクラッド型ファイバがある<sup>[1][2]</sup> (図 1 参照)。このファイバは、用途に応じて全分散、モードフィールド径 (MFD)、非線形光学効果の指標となる実行断面積 ( $A_{\text{eff}}$ )、曲げ損失などの特性を考慮しながら構造設計を行う。しかしながら、最適な構造設計を目指して層数を多くすると、構造パラメータも増えるため、その決定方法が複雑となる。

本研究では、マルチクラッド型ファイバの各層の幅を一定とし、構造パラメータの簡素化を図って設計した場合の全分散特性について検討した。具体的には、理想的な 4 層と 5 層構造について、波長  $1.55\mu\text{m}$  で全分散を零とするファイバをそれぞれ設計し、得られたファイバの全分散特性、MFD、 $A_{\text{eff}}$ 、曲げ損失の比較検討を行った。全分散の解析については、均質な層状屈折率分布を持つファイバにおいて厳密に全分散解析が行えるベクトル多層分割法 (VMD: vector multilayer division) に行列式の微分公式 (DFD: differential formula of determinant) を組み合わせた手法 (VMD-DFD 法)<sup>[4]</sup>を適用した。

## 2. 数値解析

マルチクラッド型ファイバの屈折率分布は、外部クラッドまでの各層の幅を全て同じにし、屈折率の高さを交互に変化させるものとする (図 2 参照)。具体的な屈折率分布は次式で表す。

$0 < \rho \leq 1$ : マルチクラッド層

$n_{u(i)}(\lambda) > n_c(\lambda)$  の場合:

$$n_{u(i)}(\rho_{u(i)}, \lambda) = n_c(\lambda)[1 + \Delta_1(\lambda) g_1(\rho_{u(i)})] \quad (1)$$

$n_{w(i)}(\lambda) < n_c(\lambda)$  の場合:

$$n_{w(i)}(\rho_{w(i)}, \lambda) = n_c(\lambda)[1 + \Delta_2(\lambda) g_2(\rho_{w(i)})] \quad (2)$$

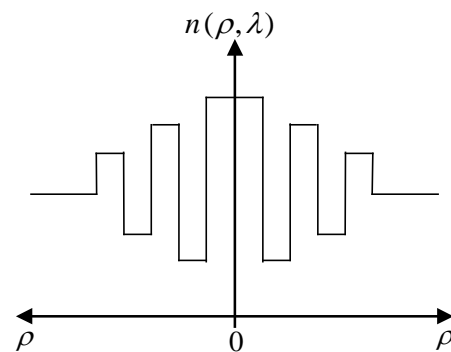


Fig. 1. Multi-clad fiber

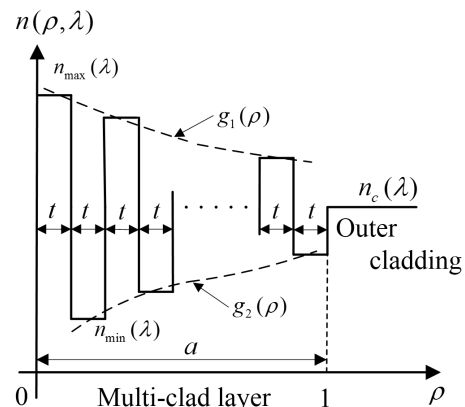


Fig. 2. Multi-clad type refractive index profile.

$\rho > 1$ : 外部クラッド

$$n(\rho, \lambda) = n_c(\lambda) \quad (3)$$

$u(i)$  と  $w(i)$  は、 $u(i) = 2i$  のとき  $w(i) = 2i - 1$ ,  $u(i) = 2i - 1$  のとき  $w(i) = 2i$  とする。 $g_1(\rho)$  と  $g_2(\rho)$  は分布の形状を決める関数であり、本研究では  $g_1(\rho) = 1 - \rho$ ,  $g_2(\rho) = 1$  として解析を行った。 $\Delta_1(\lambda)$  は  $n_{u(i)}(\rho_i, \lambda) > n_c(\lambda)$  における  $n_{\text{max}}(\lambda)$  ( $\hat{=} \max[n_{u(i)}(\lambda)]$ ) と外部クラッドとの比屈折率差、 $\Delta_2(\lambda)$  は  $n_{w(i)}(\rho_i, \lambda) < n_c(\lambda)$  における  $n_{\text{min}}(\lambda)$  ( $\hat{=} \min[n_{w(i)}(\lambda)]$ ) と外部クラッドとの比屈折率

差であり,  $\Delta_1(\lambda) \triangleq [n_{\max}(\lambda) - n_c(\lambda)] / n_c(\lambda)$ ,  $\Delta_2(\lambda) \triangleq [n_{\min}(\lambda) - n_c(\lambda)] / n_c(\lambda)$  とした. 各層の幅  $t$  は全て等しいと仮定したので, コア半径  $a$  と層数  $M$  から  $t = a / M$  より一意に決まる.

### 3. 解析結果

図 3 は, 4 層 ( $M=4$ ) と 5 層 ( $M=5$ ) のマルチクラッド型ファイバについて,  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  で全分散を零 ( $S = 0 \text{ ps/nm/km}$ ) にする構造を  $\Delta_1 = 0.5\%, 0.6\%, 0.7\%$  と変化させながら設計した場合の全分散特性 ( $S$  を示した図である.  $\Delta_2$  は  $\Delta_2 = -0.5\%$  で一定 ( $g_2(\rho) = 1$ ) とした. 図 3 から,  $M=4$  と  $M=5$  のいずれの場合も  $\Delta_1 = 0.6\%$  と  $0.7\%$  のとき, C+L band ( $1.530 \leq \lambda \leq 1.625 \mu\text{m}$ ) で低分散 ( $|S| \leq 0.5 \text{ ps/nm/km}$ ) にできることが分かる.

図 3 の全分散特性を持つ構造について, 図 4 は  $\lambda$  に対するモードフィールド径 (MFD) を, 図 5 は  $\lambda$  に対する実効断面積 ( $A_{\text{eff}}$ ) をそれぞれ求めた結果を示す. 図 4 と図 5 より, C+L band において,  $M=5$  の MFD と  $A_{\text{eff}}$  は  $M=4$  の場合に比べて大きくできることが分かる.

図 6 は,  $M=4$  と  $M=5$  の場合について, 零分散波長  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  における曲げ損失を曲げ半径に対して示した図である. この図から次のことが言える.

- (1) 曲げ損失を一定としたとき,  $M=5$  の曲げ半径は  $M=4$  の場合に比べて小さくすることができる.
- (2) 曲げ損失が  $10^{-7} \text{ dB/m}$  から  $1 \text{ dB/m}$  の範囲において,  $M=5$  で  $\Delta_1 = 0.7\%$  のとき, 曲げ半径 ( $\triangleq R$ ) の変化は  $10.7 \geq R \geq 27.1 \text{ mm}$  となり最も小さくできる.

### 4. まとめ

本研究では, マルチクラッド型ファイバの構造パラメータを簡素にした設計法により, 全分散特性の解析を行った. 具体的には, 4 層と 5 層のマルチクラッド型について, 波長  $1.55 \mu\text{m}$  で全分散を零とするファイバを設計し, 得られたファイバの全分散特性, モードフィールド径 (MFD), 実効断面積 ( $A_{\text{eff}}$ ), 曲げ損失を検討した. その結果, 4 層から 5 層へ層を増やすことにより, 低分散特性を保ちながら MFD と  $A_{\text{eff}}$  は大きく, 曲げ半径 (曲げ損失を一定) は小さくできることが分かった.

### 参考文献

- [1] H.Etzkorn and W.E.Heinlein: "Low-dispersion single-mode silica fiber with undoped core and three F-doped claddings," Electron. Lett., vol. 20, No.10, pp.423-424, (1984).
- [2] P.L.Francois, J.F.Bayon, and F.Alard: "Design of monomode quadruple-clad fibers", Electronics Letter, Vol.20, No.17, pp.688-689 (1984).
- [3] J.Sakai: "Analytical expression of core and cladding material losses effect in Bragg fibers using the perturbation theory", J. Opt. Soc. Am. B, Vol.28, No.11 pp.2755-2764 (2011)
- [4] 鈴木祐介・古川慎一: 「任意屈折率分布を持つ光ファイバの分散特性解析」, 電気学会電磁界理論研究, EMT-13-65, pp.83-92 (2013)

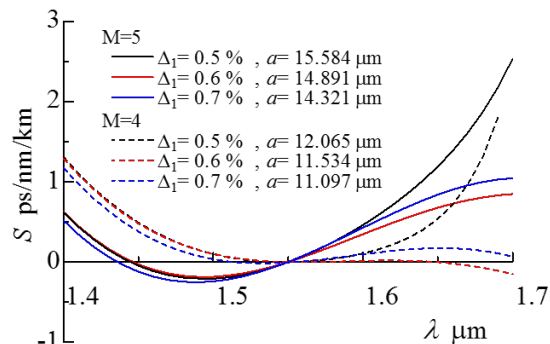


Fig. 3. Total dispersion  $S$  versus wavelength  $\lambda$

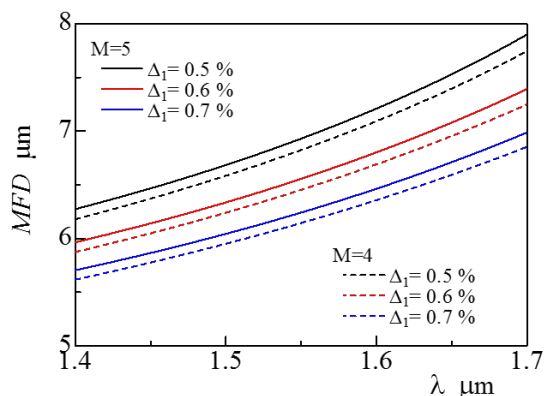


Fig. 4. Mode field diameter versus wavelength  $\lambda$ .

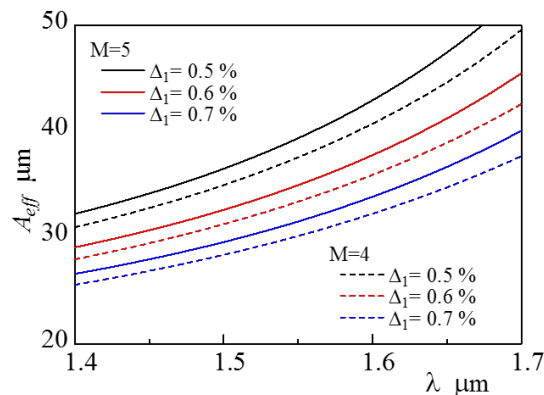


Fig. 5. Effective area  $A_{\text{eff}}$  versus Wavelength  $\lambda$ .

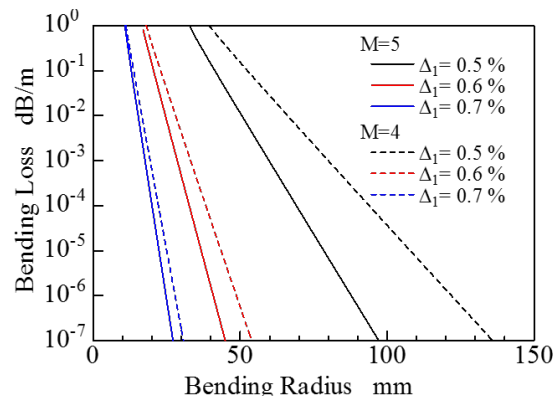


Fig. 6. Bending loss versus bending radius.