

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5708015号
(P5708015)

(45) 発行日 平成27年4月30日(2015. 4. 30)

(24) 登録日 平成27年3月13日(2015. 3. 13)

(51) Int. Cl. F I
G O 2 B 6/44 (2006.01) G O 2 B 6/44 3 6 6
G O 2 B 6/02 (2006.01) G O 2 B 6/02 4 6 1

請求項の数 14 (全 38 頁)

(21) 出願番号	特願2011-37198 (P2011-37198)	(73) 特許権者	000002130
(22) 出願日	平成23年2月23日(2011. 2. 23)		住友電気工業株式会社
(65) 公開番号	特開2011-197661 (P2011-197661A)		大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
(43) 公開日	平成23年10月6日(2011. 10. 6)	(74) 代理人	100088155
審査請求日	平成25年12月19日(2013. 12. 19)		弁理士 長谷川 芳樹
(31) 優先権主張番号	特願2010-42290 (P2010-42290)	(74) 代理人	100113435
(32) 優先日	平成22年2月26日(2010. 2. 26)		弁理士 黒木 義樹
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(74) 代理人	100108257
			弁理士 近藤 伊知良
		(72) 発明者	林 哲也
			神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電
			気工業株式会社横浜製作所内
		(72) 発明者	笹岡 英資
			神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電
			気工業株式会社横浜製作所内
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバケーブル

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

所定軸に沿ってそれぞれ伸びた複数のコアと、前記複数のコアを一体的に取り囲んだクラッド領域とを備えたマルチコアファイバを内蔵する光ファイバケーブルであって、

前記マルチコアファイバにおけるコアnとコアmの中心間距離を D_{nm} 、当該光ファイバケーブルが敷設される際の中継再生器間の長さに相当する前記マルチコアファイバのファイバ長を L_F 、第1波長における各コアの伝搬定数を β 、前記第1波長における隣接コア間の結合係数を κ 、前記第1波長の光がファイバ長 L_F だけ伝搬した後のクロストークの分布の平均値として許容される最大値を XT_S とするとき、

ファイバ長 $L_F = 100\text{ km}$ 以上での前記最大値 XT_S は、 0.001 であり、

【数1】

$$R_{th} = \frac{1}{2} \frac{\beta}{\kappa^2} D_{nm} \frac{XT_S}{L_F}$$

なる式で与えられる曲率半径 R_{th} のうち最も小さな値の曲げを前記マルチコアファイバに付加する曲げ付与構造を備えた光ファイバケーブル。

【請求項2】

前記曲げ付与構造は、前記マルチコアファイバを当該光ファイバケーブルに螺旋状に内蔵することにより、前記マルチコアファイバに一定の曲率半径以下の曲げを付与し、

前記螺旋の半径を r_h 、前記螺旋のピッチを L_p 、前記マルチコアファイバにおける最

10

20

も小さな r_h を r_{hmin} とするとき、

【数 2】

$$L_p \leq 2\pi \sqrt{\left| \frac{1}{2} \frac{\beta}{\kappa^2} D_{nm} \frac{XT_S}{L_F} r_{hmin} - r_{hmin}^2 \right|}$$

なる式を満たしていることを特徴とする請求項 1 記載の光ファイバケーブル。

【請求項 3】

所定軸に沿ってそれぞれ伸びた複数のコアと、前記複数のコアを一体的に取り囲んだクラッド領域とを備えたマルチコアファイバを内蔵する光ファイバケーブルであって、

10

前記マルチコアファイバにおける隣接コア同士の中心間距離を Λ 、当該光ファイバケーブルが敷設される際の中継再生器間の長さに相当する前記マルチコアファイバのファイバ長を L_F 、第 1 波長における各コアの伝搬定数を β 、前記第 1 波長における隣接コア間の結合係数を κ 、前記第 1 波長の光がファイバ長 L_F だけ伝搬した後のクロストークの分布の平均値として許容される最大値を XT_S とするとき、

ファイバ長 $L_F = 100 \text{ km}$ 以上での前記最大値 XT_S は、 0.001 であり、

【数 3】

$$R \leq \frac{1}{12} \frac{\beta}{\kappa^2} \Lambda \frac{XT_S}{L_F}$$

20

なる式で与えられる曲率半径 R の曲げを前記マルチコアファイバに付加する曲げ付与構造を備えた光ファイバケーブル。

【請求項 4】

前記曲げ付与構造は、前記マルチコアファイバを当該光ファイバケーブルに螺旋状に内蔵することにより、前記マルチコアファイバに一定の曲率半径以下の曲げを付与し、

前記螺旋の半径を r_h 、前記螺旋のピッチを L_p 、前記マルチコアファイバにおける最も小さな r_h を r_{hmin} とするとき、

【数 4】

$$L_p \leq 2\pi \sqrt{\left| \frac{1}{12} \frac{\beta}{\kappa^2} \Lambda \frac{XT_S}{L_F} r_{hmin} - r_{hmin}^2 \right|}$$

30

なる式を満たしていることを特徴とする請求項 3 記載の光ファイバケーブル。

【請求項 5】

前記曲げ付与構造は、前記マルチコアファイバを当該光ファイバケーブル中に螺旋状に内蔵することにより、前記マルチコアファイバに一定の曲率半径以下の曲げを付与し、

前記螺旋の半径を r_h 、前記螺旋のピッチを L_p 、前記マルチコアファイバにおける最も大きな r_h を r_{hmax} 、スパン長を L_{span} (km)、第 2 波長における前記マルチコアファイバの各コアの伝送ロスの最大値を α_{km} (dB/km)、前記マルチコアファイバを前記光ファイバケーブル内に螺旋状に内蔵することに起因するロス増であって 1

40

スパン当たりで許容可能な値を α_s (dB/span) とするとき、

【数 5】

$$L_p \geq \frac{2\pi\alpha_{km}L_{span}}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2\alpha_{km}L_{span})}} r_{hmax}$$

なる式を満たすことを特徴とする請求項 2 又は 4 記載の光ファイバケーブル。

【請求項 6】

前記マルチコアファイバを前記光ファイバケーブル内に螺旋状に内蔵することに起因する

50

ロス増であって1スパン当たりで許容可能な値 α_s は、0.5 dB / s p a n以下であることを特徴とする請求項5記載の光ファイバケーブル。

【請求項7】

波長1550 nmにおいて、前記マルチコアファイバを前記光ファイバケーブル内に螺旋状に内蔵することに起因するロス増であって1スパン当たりで許容可能な値 α_s が、0.3 dB / s p a n以下であることを特徴とする請求項5記載の光ファイバケーブル。

【請求項8】

波長1550 nmにおいて、前記マルチコアファイバを前記光ファイバケーブル内に螺旋状に内蔵することに起因するロス増であって1スパン当たりで許容可能な値 α_s は、0.1 dB / s p a n以下であることを特徴とする請求項5記載の光ファイバケーブル。

10

【請求項9】

波長1550 nmにおいて、前記マルチコアファイバの各コアの伝送ロスの最大値を α_{km} と前記スパン長 L_{span} の積($\alpha_{km} \cdot L_{span}$ km)の値は、15.2以下であることを特徴とする請求項5～8のいずれか一項記載の光ファイバケーブル。

【請求項10】

所定軸に沿ってそれぞれ伸びた複数のコアと、前記複数のコアを一体的に取り囲んだクラッド領域とを備えたマルチコアファイバを内蔵する光ファイバケーブルであって、

前記マルチコアファイバにおけるコアnとコアmの中心間距離を $D_{n,m}$ 、所定波長におけるコアmの伝搬定数を β_m 、コアnからコアmへの結合係数を κ_{nm} 、当該光ファイバケーブルが敷設される長さに相当する前記マルチコアファイバのファイバ長を L_F 、前記所定波長の光がファイバ長 L_F だけ伝搬した後のクロストークの分布の平均値として許容される最大値を XT_s としたとき、

20

ファイバ長 $L_F = 100$ km以上での前記最大値 XT_s は、0.001であり、

前記マルチコアファイバの前記複数のコアから選択される2つのコアの全組み合わせについて、前記ファイバ長 L_F を伝搬した後の前記クロストークが-30 dB以下になる確率が99.9%になる曲率半径として、

【数6】

$$R_{th} = \frac{1}{\{\text{erf}^{-1}(0.9999)\}^2} \left(\frac{2\pi}{\kappa_{nm}} \right)^2 \frac{\pi D_{nm} \beta_m 0.001}{19.09373 L_F}$$

30

なる式で与えられる曲率半径 R_{th} のうち最も小さな値の曲げを前記マルチコアファイバに付加する構造を備えた光ファイバケーブル。

【請求項11】

前記所定軸に直交する断面上において、前記マルチコアファイバにおける前記複数のコアそれぞれは、同一構造の屈折率プロファイルを有することを特徴とする請求項10記載の光ファイバケーブル。

【請求項12】

前記所定軸に直交する断面上において、前記マルチコアファイバにおけるコアの中心間距離が40 μ m以上であり、前記クラッド領域に対する各コアの比屈折率差 Δ は0.37%以上であることを特徴とする請求項11記載の光ファイバケーブル。

40

【請求項13】

前記マルチコアファイバにおける前記複数のコアの各配置は、弾性的な捻回あるいは塑性的な捻回が付与されることで、前記マルチコアファイバに付与された曲げの曲げ径方向を基準としてその長手方向に沿って変化していることを特徴とする請求項10～12の何れか一項記載の光ファイバケーブル。

【請求項14】

前記マルチコアファイバには、 2π (rad / m) 以上の捻れが付与されていることを特徴とする請求項13記載の光ファイバケーブル。

【発明の詳細な説明】

50

【技術分野】

【0001】

本発明は、所定軸に沿ってそれぞれ伸びた複数のコアを有するマルチコアファイバが内臓された光ファイバケーブルに関するものである。

【背景技術】

【0002】

光伝送における大容量化を実現するため、複数のコアをクラッド領域により一体的に取り囲むよう構成されたマルチコアファイバが知られている。

【0003】

例えば非特許文献1に記載されたマルチコアファイバでは、コアの中心間間隔が $30\mu\text{m}$ の場合、隣接するコア間の電力移行率は、クラッドに対するコアの比屈折率差 Δ （以下、コア Δ という）の隣接コア間での差をごく僅かに（例えば 0.005% ）変えれば、十分低くなるので、低いクロストークを実現できる。これにより、クラッド径が $125\mu\text{m}$ であり、コア Δ が異なる3種類のコアを有するマルチコアファイバが実現可能であるとしている。ただし、ファイバの曲げについての考慮はない。

10

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【非特許文献1】Masanori KOSHIBA, et al., "Heterogeneous Multi-core fibers: proposal and design principle", IEICE Electronics Express, Vol.6, No.2, pp98-103, 2009

20

【非特許文献2】藪哲郎「光導波路解析入門」、pp.58-63, 森北出版、2007

【非特許文献3】森口繁一、他「岩波数学公式III」、p.154, 岩波書店（1987）

【非特許文献4】森口繁一、他「岩波数学公式II」、p.72, 岩波書店（1987）

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

発明者は、従来のマルチコアファイバについて検討した結果、以下のような課題を発見した。すなわち、上記非特許文献1では、上述のようにマルチコアファイバを曲げた状態が想定されていない。そのため、隣接コア間のコア Δ の差が 0.005% 程度では、当該マルチコアファイバの曲げ状態次第で大きなクロストークが起こってしまう。

30

【0006】

この発明は、上述のような課題を解決するためになされたものであり、内臓されるマルチコアファイバにおけるコア間クロストークを低く抑えるための構造を備えた光ファイバケーブルを提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0007】

上述の課題を解決するため、本発明に係る光ファイバケーブルは、マルチコアファイバと、マルチコアファイバを所定の曲率半径以下に曲げた状態に維持する曲げ付与構造を備える。マルチコアファイバは、所定軸に沿ってそれぞれ伸びた複数のコアと、これら複数のコアを一体的に取り囲んだクラッド領域とを備える。

40

【0008】

具体的に曲げ付与構造は、マルチコアファイバにおけるコア n とコア m の中心間距離を D_{nm} 、当該光ファイバケーブルが敷設される際の中継再生器間の長さに相当するマルチコアファイバのファイバ長を L_F 、第1波長における各コアの伝搬定数を β 、第1波長における隣接コア間の結合係数を κ 、第1波長の光がファイバ長 L_F だけ伝搬した後のクロストークの分布の平均値として許容される最大値を X_{TS} とすると、以下の式(1a)与えられる曲率半径 R_{th} のうち最も小さな値の曲げをマルチコアファイバに付加する。又は、曲げ付与構造は、マルチコアファイバにおける隣接コア同士の中心間距離を Λ 、当該光ファイバケーブルが敷設される際の中継再生器間の長さに相当するマルチコアファイ

50

バのファイバ長を L_F 、第 1 波長における各コアの伝搬定数を β 、第 1 波長における隣接コア間の結合係数を κ 、第 1 波長の光がファイバ長 L_F だけ伝搬した後のクロストークの分布の平均値として許容される最大値を XT_S とするとき、以下の式 (1b) で与えられる曲率半径 R の曲げをマルチコアファイバに付加してもよい。

【数 1】

$$R_{th} = \frac{1}{2} \frac{\beta}{\kappa^2} D_{nm} \frac{XT_S}{L_F} \quad \dots (1a)$$

$$R \leq \frac{1}{12} \frac{\beta}{\kappa^2} \Lambda \frac{XT_S}{L_F} \quad \dots (1b)$$

10

【0009】

また、曲げ付与構造は、マルチコアファイバを当該光ファイバケーブルに螺旋状に内蔵することにより、該マルチコアファイバに一定の曲率半径以下の曲げを付与する。このような曲げ付与状態において、螺旋の半径を r_h 、前記螺旋のピッチを L_p 、前記マルチコアファイバにおける最も小さな r_h を r_{hmin} とするとき、以下の式 (2a) が満たされるのが好ましい。又は、螺旋の半径を r_h 、螺旋のピッチを L_p 、マルチコアファイバにおける最も小さな r_h を r_{hmin} とするとき、以下の式 (2b) が満たされるのが好ましい。

【数 2】

20

$$L_p \leq 2\pi \sqrt{\left| \frac{1}{2} \frac{\beta}{\kappa^2} D_{nm} \frac{XT_S}{L_F} r_{hmin} - r_{hmin}^2 \right|} \quad \dots (2a)$$

$$L_p \leq 2\pi \sqrt{\left| \frac{1}{12} \frac{\beta}{\kappa^2} \Lambda \frac{XT_S}{L_F} r_{hmin} - r_{hmin}^2 \right|} \quad \dots (2b)$$

【0010】

本発明に係る光ファイバケーブルにおいて、第 1 波長の光がファイバ長 $L_F = 100 \text{ km}$ 以上伝搬した後のクロストークの分布の平均値として許容される最大値 XT_S は、0.001 であるのが好ましい。なお、使用波長において最大値 XT_S が 0.001 であればよいが、波長多重伝送を考慮すれば、第 1 波長 (使用波長) として、少なくとも 1565 nm、1625 nm を想定しておくのが好ましい。また、伝送距離についても、ファイバ長 $L_F = 100 \text{ km}$ には限られず、例えば 1000 km、10000 km でもよい。

30

【0011】

すなわち、波長 1565 nm の光がファイバ長 $L_F = 1000 \text{ km}$ 伝搬した後のクロストークの分布の平均値として許容される最大値 XT_S は、0.001 であるのが好ましい。また、波長 1565 nm の光がファイバ長 $L_F = 10000 \text{ km}$ 伝搬した後のクロストークの分布の平均値として許容される最大値 XT_S は、0.001 であるのが好ましい。波長 1625 nm の光がファイバ長 $L_F = 100 \text{ km}$ 伝搬した後のクロストークの分布の平均値として許容される最大値 XT_S は、0.001 であるのが好ましい。波長 1625 nm の光がファイバ長 $L_F = 1000 \text{ km}$ 伝搬した後のクロストークの分布の平均値として許容される最大値 XT_S は、0.001 であるのが好ましい。波長 1625 nm の光がファイバ長 $L_F = 10000 \text{ km}$ 伝搬した後のクロストークの分布の平均値として許容される最大値 XT_S は、0.001 であるのが好ましい。

40

【0012】

また、曲げ付与構造がマルチコアファイバを当該光ファイバケーブル中に螺旋状に内蔵することにより、該マルチコアファイバに一定の曲率半径以下の曲げを付与する状況において、螺旋の半径を r_h 、螺旋のピッチを L_p 、マルチコアファイバにおける最も大きな r_h を r_{hmax} 、スパン長を L_{span} (km)、また、第 2 波長におけるマルチコアファイバの各コアの伝送ロス の最大値を α_{km} (dB/km)、マルチコアファイバを当

50

該光ファイバケーブル内に螺旋状に内蔵することに起因するロス増であって1スパン当たりで許容可能な値を α_s (dB / span) とするとき、以下の式(3)が満たされるのが好ましい。

【数3】

$$L_p \geq \frac{2\pi\alpha_{km}L_{span}}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2\alpha_{km}L_{span})}} r_{hmax} \quad \dots (3)$$

【0013】

なお、本明細書では送信器、受信器、又は光増幅器で挟まれたケーブルの1区間をスパンと呼び、その一区間の長さをスパン長 L_{span} (km) と定義する。また、上記第1波長と上記第2波長は必ずしも一致している必要はない。第1波長はコア間クロストークを規定するための基準波長を意味し、第2波長は伝送ロスを規定するための基準波長を意味するからである。

【0014】

また、本発明に係る光ファイバケーブルにおいて、マルチコアファイバを当該光ファイバケーブル内に螺旋状に内蔵することに起因するロス増であって1スパン当たりで許容可能な値 α_s は、0.5 dB / span 以下であるのが好ましい。また、波長1550 nm において、マルチコアファイバを当該光ファイバケーブル内に螺旋状に内蔵することに起因するロス増であって1スパン当たりで許容可能な値 α_s は、0.3 dB / span 以下であるのが好ましい。波長1550 nm において、マルチコアファイバを当該光ファイバケーブル内に螺旋状に内蔵することに起因するロス増であって1スパン当たりで許容可能な値 α_s は、0.1 dB / span 以下であるのが好ましい。

【0015】

さらに、波長1550 nm において、マルチコアファイバの各コアの伝送ロスの最大値を α_{km} とスパン長 L_{span} の積($\alpha_{km} \cdot L_{span}$) の値は、15.2 以下であるのが好ましく、より詳細には、積($\alpha_{km} \cdot L_{span}$) の値は、14.4 以下、13.6 以下、12.8 以下、さらには12.0 以下であってもよく、必要に応じて適宜設定されればよい。具体的には、上記式(3)は波長1550 nm の条件下で以下の式(4) ~ (8) ように規定される。

【0016】

すなわち、積($\alpha_{km} \cdot L_{span}$) の値が15.2 以下の場合、当該光ファイバケーブルは、波長1550 nm において以下の式(4) を満たすことになる。

【数4】

$$L_p \geq \frac{2\pi \cdot 15.2}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 15.2)}} r_{hmax} \quad \dots (4)$$

【0017】

積($\alpha_{km} \cdot L_{span}$) の値が14.4 以下の場合、当該光ファイバケーブルは、波長1550 nm において以下の式(5) を満たす。

【数5】

$$L_p \geq \frac{2\pi \cdot 14.4}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 14.4)}} r_{hmax} \quad \dots (5)$$

【0018】

積($\alpha_{km} \cdot L_{span}$) の値が13.6 以下の場合、当該光ファイバケーブルは、波長1550 nm において以下の式(6) を満たす。

【数6】

$$L_p \geq \frac{2\pi \cdot 13.6}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 13.6)}} r_{hmax} \quad \dots (6)$$

10

20

30

40

50

【 0 0 1 9 】

積 $(\alpha_{km} \cdot L_{span})$ の値が 12.8 以下の場合、当該光ファイバケーブルは、波長 1550 nm において以下の式 (7) を満たす。

【 数 7 】

$$L_p \geq \frac{2\pi \cdot 12.8}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 12.8)}} r_{hmax} \quad \dots (7)$$

【 0 0 2 0 】

積 $(\alpha_{km} \cdot L_{span})$ の値が 12.0 以下の場合、当該光ファイバケーブルは、波長 1550 nm において以下の式 (8) を満たす。

【 数 8 】

$$L_p \geq \frac{2\pi \cdot 12.0}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 12.0)}} r_{hmax} \quad \dots (8)$$

【 0 0 2 1 】

より具体的には、本発明に係る光ファイバケーブルにおいて、曲げ付与構造は、マルチコアファイバにおけるコア n とコア m の中心間距離 (以下、コア間隔という) を D_{nm} 、コア m の伝搬定数を β_m 、コア n からコア m への結合係数を κ_{nm} 、当該光ファイバケーブルが敷設される長さに相当する前記マルチコアファイバのファイバ長を L_F としたとき、マルチコアファイバの複数のコアから選択される 2 つのコアの全組み合わせについて、ファイバ長 L_F を伝搬した後のクロストークが -30 dB 以下になる確率が 99.99% になる曲率半径として、式 (9) で与えられる曲率半径 R_{th} のうち最も小さな値の曲げをマルチコアファイバに付加してもよい。

【 数 9 】

$$R_{th} = \frac{1}{\{\text{erf}^{-1}(0.9999)\}^2} \left(\frac{2\pi}{\kappa_{nm}} \right)^2 \frac{\pi D_{nm} \beta_m 0.001}{19.09373 L_F} \quad \dots (9)$$

【 0 0 2 2 】

また、本発明に係る光ファイバケーブルにおいて、マルチコアファイバにおける複数のコアそれぞれは、所定軸に直交する断面上において、同一構造の屈折率プロファイルを有するのが好ましい。

【 0 0 2 3 】

さらに、上記半径以下の曲げでも低い曲げ損失を実現するため、所定軸に直交する断面上において、マルチコアファイバにおけるコア間隔が 40 μm 以上であり、クラッド領域に対する各コアの比屈折率差 Δ は 0.37% 以上であるのが好ましい。

【 0 0 2 4 】

マルチコアファイバにおける複数のコアの各配置は、弾性的な捻回 (光ファイバのガラス部分が固化した状態で光ファイバに付与された捻回) あるいは塑性的な捻回 (光ファイバのガラス部分が軟化している状態で光ファイバに付与された捻回) により、マルチコアファイバに付与された曲げの曲げ径方向を基準としてその長手方向に沿って変化してもよい。この構成は、低クロストーク実現に有効な捻れを意図的に付与する構成を意味する。具体的な捻れ量としては、長手方向に沿って 2π (rad/m) 以上の捻れがマルチコアファイバに付与されればよい。

【 発明の効果 】

【 0 0 2 5 】

本発明によれば、複数のコアを有するマルチコアファイバに適切な曲率半径の曲げを付与した状態を、マルチコアファイバを覆う外被等により保持させる構造を有するので、当該光ファイバケーブルが敷設される中継器間、局間、あるいは端末 - 局間を信号光が伝搬した場合でも、コア間のクロストークを低く抑えることが可能になる。

【 図面の簡単な説明 】

10

20

30

40

50

【 0 0 2 6 】

【図 1】本発明に係る光ファイバケーブルの一実施形態の構成を示す断面図及び斜視図である。

【図 2】本実施形態に係る光ファイバケーブルに適用可能なマルチコアファイバの一構造例を示す斜視図である。

【図 3】図 2 に示されたマルチコアファイバの I - I 線に沿った断面構造を示す図及び各コア近傍の屈折率プロファイルである。

【図 4】曲げに関するパラメータ r 、 R が変化したときの、実際の屈折率と等価屈折率との比屈折率差である等価比屈折率差 Δ_{eq} を示す表である。

【図 5】図 4 (b) に示された表におけるパラメータ r と比屈折率差 Δ_{eq} との関係、及びパラメータ $(1/R)$ と等価比屈折率差 Δ_{eq} との関係を示す図である。

【図 6】曲げが加えられたときのマルチコアファイバにおける各コアの実効屈折率と実効屈折率の等価屈折率を示す図である。

【図 7】2 つのコアを有するマルチコアファイバの長手方向に沿った、コア間クロストークの変動を示すグラフである。

【図 8】クロストーク量 χ と最初の零点でのクロストーク変動量との関係を示すグラフである。

【図 9】7 つのコアを有するマルチコアファイバの断面構造を示す図である。

【図 10】螺旋半径 r_h 及び螺旋ピッチ L_p を説明するための図である。

【図 11】螺旋半径 r_h の異なる複数種類のサンプルについて、曲率半径 R と螺旋ピッチ L_p との関係を示すグラフである。

【図 12】図 2 のマルチコアファイバに付与される捻れを説明するための図である。

【図 13】コア Δ に対する k 、 R_{th} 、曲げ損失、コア径それぞれの関係を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 7 】

以下、本発明に係る光ファイバケーブルの各実施形態を、図 1 ~ 図 13 を参照しながら詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一符号を付して重複する説明を省略する。

【 0 0 2 8 】

まず、図 1 は、本発明に係る光ファイバケーブルの一実施形態の構成を示し、特に、図 1 (a) は当該光ファイバケーブルの断面図、図 1 (b) は当該光ファイバケーブルの斜視図である。図 2 は、本実施形態に係る光ファイバケーブル (図 1 (a) 及び図 1 (b) 参照) に適用可能なマルチコアファイバの一構造例を示す斜視図であり、図 3 は、図 2 に示されたマルチコアファイバの I - I 線に沿った断面構造を示す図及び各コア近傍の屈折率プロファイルである。

【 0 0 2 9 】

図 1 (a) 及び図 1 (b) に示すように、本実施形態に係る光ファイバケーブル 300 は、中心部材 310 と、中心部材 310 に所定ピッチで巻きつけられた複数の光ファイバ 100 と、その巻きつけられた状態を保持するように複数の光ファイバ上に巻きつけられた押え巻き 250 と、押え巻き 250 の周りを覆う外被 200 を備える。光ファイバ 100 は、マルチコアファイバ 100 A と、マルチコアファイバ 100 A を全体的に覆った樹脂被覆 130 からなる。複数の光ファイバ 100 それぞれは、その長手方向に沿って所定のピッチで中心部材 310 に巻きつけられることにより、一定の曲率半径の曲げが付与される。外被 200 は、光ファイバ 100 を外力から保護するように、押え巻き 250 の全体を覆っている。中心部材 310 は、抗張力線のような金属材料であっても、外被 200 の収縮に抵抗する抗収縮材であってもよい。なお、図 1 (b) において、光ファイバ 100 は、記載簡略のため、1 芯のみ記載しているが、実際には当該光ファイバケーブル 300 に含まれる全光ファイバ 100 が中心部材 310 に巻かれている。なお、本発明の光ファイバケーブルは上記構造に限定されるものではなく、例えば、円柱状の部材表面に螺旋

10

20

30

40

50

状にスロット（溝）を形成し、そのスロットにマルチコアファイバを内蔵したテープ心線を這わせ、スロットにテープ心線を内蔵した円柱状の部材表面を更に押え巻きや外被で覆うスロットケーブルでも、また、スロットの螺旋のピッチを調整することでもファイバに一定以下の曲率半径の曲げを付与することができる。

【 0 0 3 0 】

光ファイバケーブル 3 0 0 に適用可能なマルチコアファイバ 1 0 0 A は、図 2 及び図 3（a）に示すように、所定軸 A X に沿ってそれぞれ伸びた複数のコア 1 1 0 A 1、1 0 0 B 1 ~ 1 1 0 B 3、1 1 0 C 1 ~ 1 1 0 C 3（図 2 及び図 3（a）に示す例では 7 本のコア）と、これら 7 本のコアを一体的に取り囲んだクラッド領域 1 2 0 を備える。図 2 及び図 3（a）に示すマルチコアファイバ 1 0 0 A において、コア配置は、断面（所定軸 A X に直交する面）の中心にコア 1 1 0 A 1 が配置され、このコア 1 1 0 A 1 を中心にして、コア 1 1 0 B 1 ~ 1 1 0 B 3 とコア 1 1 0 C 1 ~ 1 1 0 C 3 が、中心間距離（コア間隔）が D になるように配置されている。

10

【 0 0 3 1 】

なお、コア 1 1 0 A 1、1 1 0 B 1 ~ 1 1 0 B 3、1 1 0 C 1 ~ 1 1 0 C 3 それぞれは、同一構造の屈折率プロファイルを有するのが好ましい。具体的には、図 3（a）中の各コアの屈折率プロファイルの概略の一例を図 3（b）に示す。図 3（b）に示す例では、コア 1 1 0 A 1、1 1 0 B 1 ~ 1 1 0 B 3、1 1 0 C 1 ~ 1 1 0 C 3 それぞれの近傍における屈折率プロファイルは、ステップインデックス型の屈折率プロファイル（クラッド領域 1 2 0 に対する各コアの比屈折率差 Δ ）である。

20

【 0 0 3 2 】

次に、マルチコアファイバ 1 0 0 A における各コアの実効屈折率の設定方法について説明する。

【 0 0 3 3 】

2 つのコア間の電力移行率 F は、以下の式（10）で表される。

【数 1 0】

$$F = \frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{\kappa} \right)^2} \quad \cdots (10)$$

$$\psi = (\beta_1 - \beta_2) / 2$$

30

ただし、 κ はコア間の結合係数で、 β_n はコア n の伝搬定数である。

【 0 0 3 4 】

また、結合長 L（1 つのコア n に入射したときに他方のコア m のパワーが最大になる距離）は、以下の式（11）で表される。

【数 1 1】

$$L = \frac{\pi}{2\sqrt{\kappa^2 + \psi^2}} \quad \cdots (11)$$

40

【 0 0 3 5 】

ここで、上記非特許文献 1 によれば、F を小さくする、又は、L を大きくすることでクロストークが小さくできるが、クラッド径を $125 \mu\text{m}$ とし、コア Δ が 0.4 % である一般的なコアが採用されたマルチコアファイバでは、F を大きいままに L だけを十分長くし、多数のコアをクラッド内に納めることは難しい。

【 0 0 3 6 】

そこで、F を小さくする必要がある。F を小さくするためには ψ を大きくすること、つまりコア間の伝搬定数差、言い換えればコア間の実効屈折率の差を大きくすることが必要となる。上記非特許文献 1 では、これについてシミュレーションを交えて考察している。それによれば、隣接するコア同士のコア間隔 D が $30 \mu\text{m}$ 以上であり、かつ、この隣接するコ

50

ア間においてコアΔが0.005%違っていれば十分クロストーク低減できるとしている。そのため、上記非特許文献1は、コアΔが、それぞれ0.38%、0.39%、0.40%の3種類のいずれかに属し、かつ、隣接するコア同士のコア間隔Dが40μmになるよう配置された7本のマルチコアファイバを提案している。

【0037】

しかしながら、上記非特許文献1の考察は、マルチコアファイバの曲げを考慮していない。そのため、マルチコアファイバの曲げ状態によって実際にはクロストークが非常に大きくなってしまう場合もかなり含まれている。

【0038】

マルチコアファイバを曲げると、当該マルチコアファイバ内の位置によって各コアの曲げ径が極僅かに異なる。そのため、各コアの光路差も異なってくる。このように曲げられたマルチコアファイバを直線導波路として扱う場合、光路長差に基づく屈折率として、等価屈折率を用いる必要がある。等価屈折率は、上記非特許文献2に記載されたように、実際の屈折率に、 $(1 + r/R)$ を掛けることで求められる。ただし、Rは基準とするコア（基準コア）の曲率半径、rは曲げ径方向の基準コアからのずれ量である（図4（a）参照）。どのコアを基準としてもよい。曲がったマルチコアファイバの実際の屈折率を $n_0(r)$ 、直線導波路換算の等価屈折率を $n_1(r)$ とすると、実際の屈折率と等価屈折率との比屈折率差である等価比屈折率差 Δ_{eq} は、パラメータrとパラメータRを用いて、以下の式（12）で表される。

【数12】

$$\Delta_{eq} = \frac{n_1^2(r) - n_0^2(r)}{2n_1^2(r)} = \frac{n_0^2(r) \left(1 + \frac{r}{R}\right)^2 - n_0^2(r)}{2n_0^2(r) \left(1 + \frac{r}{R}\right)^2} = \frac{\left(1 + \frac{r}{R}\right)^2 - 1}{2 \left(1 + \frac{r}{R}\right)^2} = \frac{2 \frac{r}{R} + \left(\frac{r}{R}\right)^2}{2 \left(1 + \frac{r}{R}\right)^2} \quad \dots (12)$$

【0039】

図4（b）は、曲げに関するパラメータr、パラメータRを変更したときに上記式（12）から導かれる等価比屈折率差 Δ_{eq} を示す表である。なお、以下の説明では、特に言及がない場合、図1及び図2に示す中心コア110A1を基準コアとして考える。また、図5（a）は、図4（b）の表におけるパラメータrと等価比屈折率差 Δ_{eq} との関係を示し、図5（b）は、パラメータ $(1/R)$ と等価比屈折率差 Δ_{eq} との関係を示す。

【0040】

なお、図5（a）において、グラフG511は $R = 140\text{ mm}$ におけるパラメータrと Δ_{eq} との関係、グラフG512は $R = 60\text{ mm}$ におけるパラメータrと Δ_{eq} との関係、グラフG513は $R = 30\text{ mm}$ におけるパラメータrと Δ_{eq} との関係、グラフG514は $R = 10\text{ mm}$ におけるパラメータrと Δ_{eq} との関係を示す。また、図5（b）において、グラフG521はパラメータ $r = 40\text{ }\mu\text{m}$ におけるパラメータ $(1/R)$ と Δ_{eq} との関係、グラフG522はパラメータ $r = 30\text{ }\mu\text{m}$ におけるパラメータ $(1/R)$ と Δ_{eq} との関係、グラフG523はパラメータ $r = 20\text{ }\mu\text{m}$ におけるパラメータ $(1/R)$ と Δ_{eq} との関係、グラフG524はパラメータ $r = 10\text{ }\mu\text{m}$ におけるパラメータ $(1/R)$ と Δ_{eq} との関係、グラフG525はパラメータ $r = 0\text{ }\mu\text{m}$ におけるパラメータ $(1/R)$ と Δ_{eq} との関係、グラフG526はパラメータ $r = -10\text{ }\mu\text{m}$ におけるパラメータ $(1/R)$ と Δ_{eq} との関係、グラフG527はパラメータ $r = -20\text{ }\mu\text{m}$ におけるパラメータ $(1/R)$ と Δ_{eq} との関係、グラフG528はパラメータ $r = -30\text{ }\mu\text{m}$ におけるパラメータ $(1/R)$ と Δ_{eq} との関係、グラフG529はパラメータ $r = -40\text{ }\mu\text{m}$ におけるパラメータ $(1/R)$ と Δ_{eq} との関係を示す。

【0041】

ここで、パラメータ $r = 40\text{ }\mu\text{m}$ だと、パラメータ $R = 140\text{ mm}$ でも、 Δ_{eq} は、±0.02%を超える。なお、上記非特許文献1で提案されている比屈折率差Δが0.38%、0.39%、0.40%の3種類のコアで構成され、隣接するコア同士のコア間隔D

10

20

30

40

50

が $40\ \mu\text{m}$ になるよう配置された 7 本のコアを含むマルチコアファイバでは、異なる種類のコア同士におけるコア Δ の差は 0.01% であるから、実効屈折率同士の比屈折率差 Δ_{eff} は、 0.01% 以下である。このことから、上記非特許文献 1 のマルチコアファイバでは、パラメータ $R = 140\text{ mm}$ の曲げを加えただけで、 Δ_{eq} が、 Δ_{eff} と逆転してしまうことが分かる。すなわち、上記非特許文献 1 のマルチコアファイバでは、僅かな曲げでも、異なる種類のコア同士における実効屈折率の等価屈折率間の比屈折率差の絶対値が非常に小さくなるが生じるため、各コア間のクロストークが大きくなり得ることが分かる。

【0042】

マルチコアファイバをボビンに巻きつける場合を考えても、当該マルチコアファイバは製造時のバラツキや巻き取り時のバラツキによってどうしても回転してしまうので、長手にコア配置が回転してしまう。このとき基準コアから各コアへのコア間隔 D は長手方向に一定でも当該マルチコアファイバの長手方向に沿った位置によって上記パラメータ r がコア間隔 D の範囲で変動し、異なる種類のコア同士における実効屈折率間の等価比屈折率の差が小さくなる箇所が当該マルチコアファイバの長手方向に沿って分布してしまう。このような状態を図 6 に示す。ただし、図 6 (b) は、長手方向に一樣に曲げられた状態で、かつ、光ファイバ内でコアの位置が光ファイバ断面内で円周方向に等間隔に配列された状態で、円周方向のコア位置が長手方向に一定周期で回転している設定での等価屈折率の変動を示している。

【0043】

図 6 は、曲げが加えられたときのマルチコアファイバにおける各コアの実効屈折率と実効屈折率の等価屈折率を示す図であり、ボビンに巻かれた状態と同じようにマルチコアファイバが曲げられている場合の等価屈折率換算した実効屈折率の一例である。特に、図 6 では、図 1 及び図 2 に示すマルチコアファイバ 100 A における各コアの実効屈折率と実効屈折率の等価屈折率を示す。図 6 (a) は、マルチコアファイバの長手位置と各コアの実効屈折率の関係を示し、グラフ G 6 1 1 は、当該マルチコアファイバ 100 A の光軸 $A-X$ 上に位置する中心コア (基準コア) 110 A 1 の実効屈折率、グラフ G 6 1 2 は、基準コア 110 A 1 の周辺に位置するコア 110 B 1 ~ 110 B 3 の実効屈折率、グラフ G 6 1 3 は、基準コア 110 A 1 の周辺に位置するコア 110 C 1 ~ 110 C 3 の実効屈折率を、それぞれ示す。また、図 6 (b) は、マルチコアファイバの長手位置と各コアにおける実効屈折率の等価屈折率を示し、グラフ G 6 2 1 は、基準コア 110 A 1 の実効屈折率の等価屈折率、グラフ G 6 2 2 は、基準コア 110 A 1 の周辺に位置するコア 110 B 1 の実効屈折率の等価屈折率、グラフ G 6 2 3 は、基準コア 110 A 1 の周辺に位置するコア 110 B 2 の実効屈折率の等価屈折率、グラフ G 6 2 4 は、基準コア 110 A 1 の周辺に位置するコア 110 B 3 の実効屈折率の等価屈折率、グラフ G 6 2 5 は、基準コア 110 A 1 の周辺に位置するコア 110 C 1 の実効屈折率の等価屈折率、グラフ G 6 2 6 は、基準コア 110 A 1 の周辺に位置するコア 110 C 2 の実効屈折率の等価屈折率、グラフ G 6 2 7 は、基準コア 110 A 1 の周辺に位置するコア 110 C 3 の実効屈折率の等価屈折率を、それぞれ示す。

【0044】

上述の考察に基づいて、曲げに起因した基準コアからのずれ量 r を、中心コアを基準コアとし、中心コアから各コアへのずれ量 r と考えていたものを、異なる種類のコア間に置き換えて考える。この場合、マルチコアファイバの断面において異なる種類のコア同士のコア間隔を D 、クロストーク上の許容される曲率半径を R とするとき、異なる種類のコア同士の全ての対について、一の種類のコアにおける実際の実効屈折率 (等価屈折率換算していない実際の実効屈折率) と別の種類のコアにおける実際の実効屈折率との比屈折率差 Δ_{eff} が、少なくとも以下の式 (13) の条件を満たす必要がある。

【数 1 3】

$$\Delta_{eff} \geq \Delta_{eq} + \alpha = \frac{2\frac{D}{R} + \left(\frac{D}{R}\right)^2}{2\left(1 + \frac{D}{R}\right)^2} + \alpha \quad \cdots (13)$$

ただし、上記式(13)中の α は、曲げを考慮せずに設計された当該マルチコアファイバにより十分低いクロストークが実現できる場合の、異なる種類のコア(屈折率が異なる)同士における実効屈折率間の比屈折率差である。また、上記式(13)は、 $\Delta_{eff} > 0$ となるように低い実効屈折率に対する高い実効屈折率の比屈折率差を取っており、 $\Delta_{eq} > 0$ となるように基準コアをとっている。

10

【0045】

なお、上記非特許文献1によれば、隣接するコア同士のコア間隔 $D = 30 \mu m$ であればコア Δ の差は0.005%で十分であることから、上記パラメータ α も、0.005%で十分であり、比屈折率差 Δ_{eff} は、百分率表示で、以下の式(14)を満たせばよい。これにより、曲率半径 R 以上の曲げが加えられてもコア間のクロストークを低く抑えることができる。

【数 1 4】

$$\Delta_{eff} \geq \frac{2\frac{D}{R} + \left(\frac{D}{R}\right)^2}{2\left(1 + \frac{D}{R}\right)^2} \cdot 100 + 0.005 \quad \cdots (14)$$

20

【0046】

また、複数のコアで構成されるマルチコアファイバでは、異なる種類のコアが複数本ずつ存在する場合がある。このようなマルチコアファイバでは、同じ種類のコア同士は、クロストークが低くなるように十分なコア間隔 D が確保された状態で配置されている。したがって、同じ種類のコア同士の最短コア間隔を D_{min} とすると、異なる種類のコア同士のコア間隔 D が D_{min} を超えているとき、これらコア同士における実効屈折率間の比屈折率差は考慮する必要がない(実効屈折率の等しい同じ種類コアでもクロストーク十分低いため)。ただし、コア間隔 D が D_{min} 未満となる異なる種類のコア同士の全組み合わせについては、少なくとも、以下の式(15)を満たす必要がある。これは、コア間隔 D が D_{min} より短い異なる種類のコア同士の組み合わせにおいて、実効屈折率の等価屈折率換算が等しくならないためである。これにより、曲率半径 R 以上の曲げが加えられてもコア間のクロストークを低く抑えることができる。

30

【数 1 5】

$$\Delta_{eff} > \frac{2\frac{D}{R} + \left(\frac{D}{R}\right)^2}{2\left(1 + \frac{D}{R}\right)^2} \cdot 100 \quad \cdots (15)$$

40

【0047】

ところが、上述のような式(14)や式(15)を満たすマルチコアファイバがパラメータ $R = 30 mm$ を許容する場合、コア間隔 $D = 30 \mu m$ とすると比屈折率差 Δ_{eff} は0.105%以上でなければならない($\Delta_{eff} = 0.0105\%$)。これを実現するのは簡単ではない。すなわち、当該マルチコアファイバ100Aにおけるコア間でコア Δ やコア径に大きな差を付けるか、異なる種類のコア間で周囲のクラッドの屈折率に差を持たせるなどの工夫が必要となるからである。

【0048】

50

コア間クロストークが大きくなるのは、コア間においてコアの実効屈折率の等価屈折率の差が非常に小さくなるからである。しかしながら、その差が一定以下に小さくなる箇所が、当該マルチコアファイバ100Aの長手方向に沿ってごく僅かであれば、コア間クロストークも小さくなると考えられる。そこで、以下、第1及び第2実施形態について順に説明する。

【0049】

(第1実施形態)

まず、第1実施形態では、当該マルチコアファイバ100Aにおける複数のコアのうち、コアmの実効屈折率を n_{eff-m} 、コアmを基準としたコアnの実効屈折率の等価屈折率を n_{eq-nm} 、コアnとコアmのコア間隔(中心間距離) D_{nm} 、直線mnと当該マルチコアファイバ100Aの曲げ径方向に一致する直線とのなす角度 θ_{nm} (rad)とすると、以下の式(16)の関係が成り立つ。なお、直線mnは、所定軸AXに直交する当該マルチコアファイバ100Aの断面上において、コアmの中心とコアnの中心を結ぶ線を意味する。

10

【数16】

$$n_{eq-nm} = n_{eff-n} \left\{ 1 + \frac{D_{nm} \cos \theta_{nm}}{R} \right\} \quad \cdots (16)$$

【0050】

上記式(16)を伝搬定数に置き換えて考えると、 $\beta = (2\pi/\lambda) n_{eff}$ (λ は波長、 n_{eff} は実効屈折率)なので、以下の式(17)が得られる。

20

【数17】

$$\beta_{eq-nm} = \beta_n \left\{ 1 + \frac{D_{nm} \cos \theta_{nm}}{R} \right\} \quad \cdots (17)$$

ただし、 β_n はコアnの伝搬定数、 β_{eq-nm} はコアmを基準に等価屈折率を考慮したコアnの伝搬定数である。

【0051】

このとき、 β_{eq-nm} と β_{eq-mm} との差 $\Delta\beta_{nm}$ (比屈折率差ではない)は、以下の式(18)となる。

30

【数18】

$$\Delta\beta_{nm} = \beta_{eq-nm} - \beta_{eq-mm} = \beta_n \left\{ 1 + \frac{D_{nm} \cos \theta_{nm}}{R} \right\} - \beta_m = \beta_n \frac{D_{nm} \cos \theta_{nm}}{R} + (\beta_n - \beta_m) \quad \cdots (18)$$

【0052】

マルチコアファイバの長手方向に沿って $\Delta\beta_{nm}$ が0に近い値になる割合が少ないほど、コア間クロストークは小さくなると考えられる。ここで、パラメータ $R = 30\text{mm}$ を許容する場合、コアnとコアmのコア間隔 $D_{nm} = 30\mu\text{m}$ で、差 $\Delta\beta_{nm}$ が常に0にならないようにするのは簡単ではない。すなわち、図3(b)に示すように、実効屈折率同士の比屈折率差 Δ_{eff} が0.1%を超えるような伝搬定数 β_n と伝搬定数 β_m の差が必要となるからである。

40

【0053】

そこで、マルチコアファイバの長手方向に沿って $\Delta\beta_{nm}$ の零点は存在するが、各零点での $\Delta\beta_{nm}$ の傾きが急峻で、零点の出現頻度が低いことが望ましいと考えられる。特に、各零点での $\Delta\beta_{nm}$ の傾きが急峻であることが重要である。

【0054】

図7は、2つのコアを有するマルチコアファイバ(以下、2コアファイバという)の長手方向に沿った、コア間クロストーク(図7では単に「クロストーク」と表記)の変動を示すグラフであり、具体的には、2つのコアの一方に光強度 $I_1 = 1$ の光を入射した際の

50

他方のコアの光強度 I_2 の、当該 2 コアファイバの長手方向に沿った変動である。また、コア間クロストークを（ある非入射コアの強度）／（全コアの強度の合計）と定義した場合、図 7 のグラフは、当該 2 コアファイバの長手方向に沿ったクロストークの変動のグラフと言える。この 2 コアファイバにおいて、全長に亘って一定の曲げが加えられている。また、当該 2 コアファイバの長手方向に沿って捻れ（当該 2 コアファイバの軸廻りの一方向回転）が付与されている。なお、この捻れは、当該 2 コアファイバを 10 m で 1 回転させる。つまり、当該 2 コアファイバの長手方向の位置を z とするとき、10 m につき $\Delta\beta_{nm}(z)$ の零点が 2 つ存在する。なお、図 7 において、等間隔で 10 m に 2 つの割合で存在するクロストークの急峻な変化は、 $\Delta\beta_{nm}(z)$ の零点である。

【 0 0 5 5 】

10

なお、上述のシミュレーションでは、コア間クロストークの変動を計算したが、より簡単にクロストークの挙動を表す数式を以下に組み立てていく。

【 0 0 5 6 】

$\Delta\beta_{nm}(z)$ の任意零点 z における、以下の式 (19a) で与えられる傾きの逆数は、その零点 z を通過する際に、どれだけの長さで $\Delta\beta_{nm}(z)$ が 0 近傍にあったかを表す指標とすることができる。そこで、上記任意零点でのコア間のクロストーク量 χ は、以下の式 (19b) を指標として表され、このパラメータ l (エル) の値が小さいほどコア間のクロストーク量 χ が小さくなると考えられる。

【数 19】

$$\frac{d}{dz}\Delta\beta_{nm}(z) \quad (19a)$$

20

$$l = \left| \frac{1}{\frac{d}{dz}\Delta\beta_{nm}(z) \Big|_{\Delta\beta_{nm}(z)=0}} \right| \quad (19b)$$

【 0 0 5 7 】

また、零点 z の極近傍でのみ有意なコア間クロストークが発生していると考え。ここで、上記式 (10) 及び式 (11) を考えた場合、以下の式 (20a) の関係から、 $F = 1$ 、 $L = (\pi/2) \cdot (1/\kappa)$ となる。2 つコア同士の結合を考えた場合、 $F = 1$ 、 $L = (\pi/2) \cdot (1/\kappa)$ の場合、一方のコア 1 に強度 $I_1 = 1$ の光が入射した場合、他方のコア 2 の当該 2 コアファイバの長手方向の位置 z における強度 I_2 は、以下の式 (20b) となる。

30

【数 20】

$$\psi = \Delta\beta_{21}/2 = 0 \quad \cdots (20a)$$

$$I_2 = \sin^2\left(\frac{\kappa}{2\pi}z\right) \quad \cdots (20b)$$

【 0 0 5 8 】

40

ここで、更に $I_1 \gg I_2$ とした場合、 $\Delta\beta_{nm}(z)$ の各零点近傍では、上記式 (20b) 中の z を 0 近傍と見なすことができる。そこで、強度 I_2 は、以下の式 (21) とすることができる。

【数 21】

$$I_2 \approx \left(\frac{\kappa}{2\pi}\right)^2 z^2 \quad \cdots (21)$$

【 0 0 5 9 】

さらに、 $\Delta\beta_{nm}(z)$ の零点からずれると、 F 及び L それぞれの値も徐々に変化することを含めて考えると、最終的に $I_1 \gg I_2$ の場合、 $\Delta\beta_{nm}(z)$ の任意零点近傍でのコ

50

ア間のクロストーク量 χ は、以下の式 (2 2) で表せるものと考えられる。

【数 2 2】

$$\chi = \left(\frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \right)^2 \alpha \left| \frac{1}{\frac{d}{dz} \Delta \beta_{nm}(z) \Big|_{\Delta \beta_{nm}(z)=0}} \right| \cdots (22)$$

ただし、 α は上記式 (1 9 b) と上記式 (2 1) を結び付ける係数である。

【 0 0 6 0】

以下、幾つかのケースについて、コア間のクロストーク量 χ を求める。

10

【 0 0 6 1】

上記式 (1 8) 中のパラメータのうち z の関数となるのは、 θ_{nm} であり、以下の式 (2 3) に関係が成り立つ場合 (ただし、 $\gamma_c \neq 0$ とする) について考える。

【数 2 3】

$$\theta_{nm}(z) = \gamma_c z \cdots (23)$$

【 0 0 6 2】

このとき、2 コアファイバの長手方向の位置 z が以下の式 (2 4 a) で与えられる場合、 $\Delta \beta_{nm}(z) = 0$ となり、どの点でも以下の式 (2 4 b) で表される関係が成り立ち、また、どの点でもコア間のクロストーク量 χ は、以下の式 (2 4 c) のようになる。

20

【数 2 4】

$$z = \pm \frac{1}{\gamma_c} \left\{ a \cos \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_m - \beta_n}{\beta_n} \right) + 2\pi k \right\} \cdots (24a)$$

(k は整数。 $\arccos(x)$ の値域は $[0, \pi]$ とする)

$$\left| \frac{d}{dz} \Delta \beta_{nm}(z) \right| = \beta_n \gamma_c \sqrt{\left(\frac{D_{nm}}{R} \right)^2 - \left(\frac{\beta_m - \beta_n}{\beta_n} \right)^2} \cdots (24b)$$

$$\chi = \alpha \left(\frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{\beta_n} \frac{1}{\gamma_c} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{D_{nm}}{R} \right)^2 - \left(\frac{\beta_m - \beta_n}{\beta_n} \right)^2}} \cdots (24c)$$

30

【 0 0 6 3】

また、以下の式 (2 5 a) で表される関係の場合 (ただし、 $\gamma_a = \pi$ 、 $\gamma_f > 0$ とする)、 $\Delta \beta_{nm}(z) = 0$ となる、2 コアファイバの長手方向の位置 z (以下の式 (2 5 b)) では、以下の式 (2 5 c) で表された関係が成り立ち、2 コア間のクロストーク量 χ は、以下の式 (2 5 d) となる。

【数 2 5】

$$\theta_{nm}(z) = \gamma_a \cos(\gamma_f z) \quad \cdots (25a)$$

$$z = \frac{1}{\gamma_f} \left\{ \pm a \cos \left(\frac{1}{\gamma_a} \left\{ \pm a \cos \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_m - \beta_n}{\beta_n} \right) + 2\pi k_1 \right\} \right) + 2\pi k_3 \right\} \quad \cdots (25b)$$

(ただし、複合任意で、 k_1, k_2 は式中の逆余弦関数の定義域を満たす範囲の整数)

$$\left| \frac{d}{dz} \Delta \beta_{nm}(z) \right| = \beta_n \gamma_f \sqrt{\left(\frac{D_{nm}}{R} \right)^2 - \left(\frac{\beta_m - \beta_n}{\beta_n} \right)^2} \sqrt{\gamma_a^2 - \left\{ \pm a \cos \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_m - \beta_n}{\beta_n} \right) + 2\pi k_1 \right\}^2} \quad \cdots (25c)$$

$$\chi = \alpha \left(\frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{\beta_n} \frac{1}{\gamma_f} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{D_{nm}}{R} \right)^2 - \left(\frac{\beta_m - \beta_n}{\beta_n} \right)^2}} \frac{1}{\sqrt{\gamma_a^2 - \left\{ \pm a \cos \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_m - \beta_n}{\beta_n} \right) + 2\pi k_1 \right\}^2}} \quad \cdots (25d)$$

(ただし、 k_1, k_2 は式中の逆余弦関数の定義域を満たす範囲の整数)

【0064】

上記の考察から、2コアファイバにおけるコア間のクロストーク量 χ を小さくするには、2つのコア n とコア m のコア間隔 D_{nm} を大きくする、パラメータ R (2コアファイバへの曲率半径) を小さくする、又は、コア n の伝搬定数 β_n とコア m の伝搬定数 β_m の差を小さくする(すなわち、 n_{eff-n} と n_{eff-m} の差を小さくする)必要がある。特に、コア n とコア m のコア間隔 D_{nm} を大きくすると、コア間の結合係数 κ も小さくできるので、コア間のクロストーク低減の効果が大きい。また、パラメータ γ_c や γ_f を大きくすることでも、コア間のクロストーク量 χ を小さくすることができる。

【0065】

以上の説明からも分かるように、コア間のクロストーク量の観点からも $n_{eff-n} = n_{eff-m}$ であることが望ましく、また、製造上も同一コア構造で製造できることから当該マルチコアファイバ100Aは容易に実現可能である。そこで、以後の説明では、 $n_{eff-n} = n_{eff-m}$ の場合について論ずる。

【0066】

$n_{eff-n} = n_{eff-m}$ のときの上記式(24c)は、以下の式(26a)のように表せ、また、上記式(24d)は、以下の式(26b)のように表せる。

【数 2 6】

$$\chi = \alpha \left(\frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{\beta_n} \frac{1}{\gamma_c} \frac{R}{D_{nm}} \quad \cdots (26a)$$

$$\chi = \alpha \left(\frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{\beta_n} \frac{1}{\gamma_f} \frac{R}{D_{nm}} \frac{1}{\sqrt{\gamma_a^2 - (\pi k)^2}} \quad \cdots (26b)$$

(ただし、 k は $-\frac{\gamma_a}{\pi} \leq k \leq \frac{\gamma_a}{\pi}$ の整数)

【0067】

ここで、2コアファイバにおけるコア間のクロストーク量 χ について別の方法で考えてみる。簡単の為に、上記式(26a)の場合について考える。

【0068】

緩慢変化包絡線近似による複素電界振幅を A とおくと、コア m からコア n へのモード結

10

20

30

40

50

合方程式は、以下の式 (2 7) で示される。

【数 2 7】

$$\frac{\partial A_n}{\partial z} = -j\kappa_{nm} \exp(-j\{\phi_m(z) - \phi_n(z)\}) A_m \quad \cdots (27)$$

【0069】

さらに、光ファイバの捩れを γ_c (rad/m) とすると、モード結合方程式は以下の式 (2 8) で示される。

【数 2 8】

$$\begin{cases} \phi_m(z) = \beta_m z \\ \phi_n(z) = \int_0^z \beta_n \left\{ 1 + \frac{D_{nm}}{R} \cos \theta_n(z') \right\} dz' \end{cases} \quad \cdots (28)$$

10

$$\theta_n(z) = \gamma_c z$$

【0070】

上記式 (2 8) において、 β_m 、 β_n 、 D_{nm} 及び R は、コア n とコア m の等価実行屈折率が z の位置によっては等しくなり得る関係にあることとする。通常は、コア n からコア m への結合もあるためにコア m の複素電界振幅 A_m が長手に変動する。そのため、コア n の複素電界振幅 A_n の解析解を求めることは難しいが、クロストークが十分小さい場合を考えると、 A_m は 1 に近似することができる。この時、以下の式 (2 9) に示す積分が成立する。

20

【数 2 9】

$$A_n(z) = -j\kappa_{nm} \int_0^z \exp(-j\{\phi_m(z') - \phi_n(z')\}) dz' \quad \cdots (29)$$

【0071】

なお、上記式 (2 8) 及びこの式 (2 8) に含まれる各変数についての付帯条件から考えると、 z が 0 から π / γ_c に変化する間に、コア n 及びコア m の等価実行屈折率が等しくなる点が必ず 1 点は存在することになる。そこで、クロストーク量 χ は以下の式 (3 0) で示すことができる。

【数 3 0】

$$\chi = \left| A_n \left(\frac{\pi}{\gamma_c} \right) \right|^2 \quad \cdots (30)$$

30

【0072】

上記式 (3 0) を $A_n (\pi / \gamma_c)$ について解いた結果を以下の式 (3 1) に示す。

【数 3 1】

$$\begin{aligned} A_n \left(\frac{\pi}{\gamma_c} \right) &= -j\kappa_{nm} \int_0^{\pi/\gamma_c} \exp(-j\{\phi_m(z') - \phi_n(z')\}) dz' \\ &= -j\kappa_{nm} \int_0^{\pi/\gamma_c} \exp \left(-j \left\{ \beta_m z' - \left(\beta_n z' + \beta_n \frac{D_{nm}}{\gamma_c R} \sin(\gamma_c z') \right) \right\} \right) dz' \\ &= -j\kappa_{nm} \int_0^{\pi/\gamma_c} \exp[-j(\beta_m - \beta_n)z'] \exp \left\{ j \frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R} \sin(\gamma_c z') \right\} dz' \\ &= -j\kappa_{nm} \int_0^{\pi/\gamma_c} \exp[-j(\beta_m - \beta_n)z'] \sum_v J_v \left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R} \right) \exp(jv\gamma_c z') dz' \quad \cdots (31) \\ &= -j\kappa_{nm} \sum_v \int_0^{\pi/\gamma_c} J_v \left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R} \right) \exp[-j(\beta_m - \beta_n - v\gamma_c)z'] dz' \\ &= -j\kappa_{nm} \left\{ \frac{\pi}{\gamma_c} J_v \left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R} \right) \right\}_{\beta_m - \beta_n - v\gamma_c = 0} + \sum_{\beta_m - \beta_n - v\gamma_c \neq 0} \left[J_v \left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R} \right) \frac{\exp[-j(\beta_m - \beta_n - v\gamma_c)z']}{-j(\beta_m - \beta_n - v\gamma_c)} \right]_0^{\pi/\gamma_c} \end{aligned}$$

40

50

【 0 0 7 3 】

$\beta_m = \beta_n$ の関係が成り立つとすると、上記式 (3 1) は以下の式 (3 2) のように書き換えることができる。

【 数 3 2 】

$$A_n\left(\frac{\pi}{\gamma_c}\right) = -j \frac{\kappa_{nm}}{\gamma_c} \left\{ J_0\left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R}\right) \pi + j \sum_{\nu \neq 0} \frac{(-1)^\nu - 1}{\nu} J_\nu\left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R}\right) \right\} \quad \cdots (32)$$

【 0 0 7 4 】

さらに、上記非特許文献 3 に記載された以下の式 (3 3) の関係を用いると、上記式 (3 2) は以下の式 (3 4) に記載のように変形することができる。

10

【 数 3 3 】

$$J_\nu(x) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos\left(x - \frac{2\nu+1}{4}\pi\right) \quad [x \gg 1] \quad \cdots (33)$$

【 数 3 4 】

$$\begin{aligned} A_n\left(\frac{\pi}{\gamma_c}\right) &= -j \frac{\kappa_{nm}}{\gamma_c} \left\{ \sqrt{2\pi \frac{\gamma_c R}{\beta_n D_{nm}}} \cos\left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R} - \frac{\pi}{4}\right) + j \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{\gamma_c R}{\beta_n D_{nm}}} \sum_{\nu \neq 0} \frac{(-1)^\nu - 1}{\nu} \cos\left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R} - \frac{2\nu+1}{4}\pi\right) \right\} \quad \cdots (34) \\ &= -j \frac{\kappa_{nm}}{\gamma_c} \sqrt{2\pi \frac{\gamma_c R}{\beta_n D_{nm}}} \left\{ \cos\left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R} - \frac{\pi}{4}\right) + \frac{j}{\pi} \sum_{\nu \neq 0} \frac{(-1)^\nu - 1}{\nu} \cos\left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R} - \frac{2\nu+1}{4}\pi\right) \right\} \end{aligned}$$

20

【 0 0 7 5 】

ここで、上記式 (3 4) の右辺括弧内の虚数項(総和の項)について考えてみる。まず、上記式 (3 4) の虚数項は以下の式 (3 5) の関係を利用して変形することができる。

【 数 3 5 】

$$\begin{aligned} \sum_{\nu \neq 0} \frac{(-1)^\nu - 1}{\nu} \cos\left(x - \frac{2\nu+1}{4}\pi\right) &= \sum_{\nu \neq 0} \frac{(-1)^\nu - 1}{\nu} \left\{ \cos\left(x - \frac{\pi}{4}\right) \cos\left(\frac{\nu}{2}\pi\right) + \sin\left(x - \frac{\pi}{4}\right) \sin\left(\frac{\nu}{2}\pi\right) \right\} \quad \cdots (35) \\ &= \cos\left(x - \frac{\pi}{4}\right) \sum_{\nu \neq 0} \frac{(-1)^\nu - 1}{\nu} \cos\left(\frac{\nu}{2}\pi\right) + \sin\left(x - \frac{\pi}{4}\right) \sum_{\nu \neq 0} \frac{(-1)^\nu - 1}{\nu} \sin\left(\frac{\nu}{2}\pi\right) \end{aligned}$$

30

【 0 0 7 6 】

このとき、右辺の第 1 項は ν に関して奇関数なので 0 となる。また、右辺第 2 項は ν に関して偶関数なので、上記非特許文献 4 に記載された以下の式 (3 6) を利用して整理していくと、以下の式 (3 7) と示すことができる。

【 数 3 6 】

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\{(2n-1)x\}}{2n-1} = \begin{cases} \pi/4 & [0 < x < \pi] \\ 0 & [x = \pi] \\ -\pi/4 & [\pi < x < 2\pi] \end{cases} \quad \cdots (36)$$

40

【 数 3 7 】

$$\begin{aligned} \sin\left(x - \frac{\pi}{4}\right) \sum_{\nu \neq 0} \frac{(-1)^\nu - 1}{\nu} \sin\left(\frac{\nu}{2}\pi\right) &= 2 \sin\left(x - \frac{\pi}{4}\right) \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{(-1)^\nu - 1}{\nu} \sin\left\{\frac{\nu}{2}\pi\right\} \\ &= 2 \sin\left(x - \frac{\pi}{4}\right) \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{-2}{2\nu'-1} \sin\left\{(2\nu'-1)\frac{\pi}{2}\right\} \quad \cdots (37) \\ &= -2 \cdot 2 \sin\left(x - \frac{\pi}{4}\right) \sum_{\nu'=1}^{\infty} \frac{\sin\{(2\nu'-1)\pi/2\}}{2\nu'-1} \\ &= -\pi \sin\left(x - \frac{\pi}{4}\right) \end{aligned}$$

50

【 0 0 7 7 】

上述のように得られた式 (3 5) 及び式 (3 7) を利用すると、上記式 (3 4) は、以下の式 (3 8) のように整理することができる。

【 数 3 8 】

$$\begin{aligned} A_n \left(\frac{\pi}{\gamma_c} \right) &= -j \frac{\kappa_{nm}}{\gamma_c} \sqrt{2\pi \frac{\gamma_c R}{\beta_n D_{nm}}} \left\{ \cos \left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R} - \frac{\pi}{4} \right) - j \sin \left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R} - \frac{\pi}{4} \right) \right\} \quad \dots (38) \\ &= \frac{\kappa_{nm}}{\gamma_c} \sqrt{2\pi \frac{\gamma_c R}{\beta_n D_{nm}}} \exp \left[-j \left(\frac{\beta_n D_{nm}}{\gamma_c R} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \end{aligned}$$

【 0 0 7 8 】

10

よって、上記式 (3 0) からクロストーク量 χ は以下の式 (3 9) のように求めることができる。

【 数 3 9 】

$$\chi = \frac{\kappa_{nm}^2}{\beta_n} \frac{R}{D_{nm}} \frac{2\pi}{\gamma_c} \quad \dots (39)$$

【 0 0 7 9 】

上記式 (3 9) は、上記式 (2 6 a) に等しい。そのため、以下の式 (4 0) の結果を導くことができる。

【 数 4 0 】

20

$$\alpha = (2\pi)^3 \quad \dots (40)$$

【 0 0 8 0 】

ここで、クロストーク量 χ について、上記式 (3 9) の解析解と、モード結合方程式に基づくシミュレーションで求めた値の関係を図 8 に示す。

【 0 0 8 1 】

波長は 1 . 5 5 μm であり、コア Δ は 0 . 3 4 % 及び 0 . 4 %、 R は 6 0 mm、1 2 0 mm、1 8 0 mm、2 4 0 mm 及び 3 0 0 mm、 D_{nm} は 3 5 μm 及び 4 0 μm の全ての組み合わせについて計算した結果を示している。解析解とシミュレーション結果とは良く整合しており、解析解の正しさとシミュレーションの正しさが相互に確認できた。

30

【 0 0 8 2 】

ところで、クロストーク量 χ はコア間の等価伝搬定数差の零点におけるクロストーク変動量であるので、複素電界振幅の変化で考えると、低クロストークという仮定の下では、以下の式 (4 1) の関係が成り立つことが分かる。この式 (4 1) における $A_n (n_{zero})$ は、等価伝搬定数差の零点を n_{zero} 個通過した後の A_n である。 ϕ_{random} は各零点に於ける $\arg(j A_n / A_n)$ だが、実際上は γ_c や R などのバラツキによって各零点でランダムな値をとるので以下のように表記している。

【 数 4 1 】

$$A_n (n_{zero} + 1) = A_n (n_{zero}) + \sqrt{\chi} \exp(j\phi_{random}) \quad \dots (41)$$

40

【 0 0 8 3 】

ここで、以下の式 (4 2 a) に示す 2 つの値は、 $\sigma^2 = \chi / 2$ の確率分布に従うので、中心極限定理により、 n_{zero} が十分大きければ、以下の式 (4 2 b) の 2 つの値は確率論的に独立で、かつ、等しい分散 $\sigma^2 = (\chi / 2) \times n_{zero}$ を持つ正規分布を確率分布として分布する。 n_{zero} は本来整数ではあるが、上記式 (2 5 c) が成り立つ場合には、以下の式 (4 2 c) のように置き換えることができる。

【数 4 2】

$$\Re\{\sqrt{\chi} \exp(j\phi_{\text{random}})\}, \quad \Im\{\sqrt{\chi} \exp(j\phi_{\text{random}})\} \quad \cdots (42a)$$

$$\Re\{A_n(n_{\text{zero}})\}, \quad \Im\{A_n(n_{\text{zero}})\} \quad \cdots (42b)$$

$$n_{\text{zero}} = \frac{\gamma_c}{\pi} L_F \quad \cdots (42c)$$

【0 0 8 4】

この場合、 σ^2 は以下の式 (43) を満たす。なお、 L_F はファイバ長である。

【数 4 3】

$$\sigma^2 = \frac{\kappa_{nm}^2}{\beta_n} \frac{R}{D_{nm}} L_F \quad \cdots (43)$$

10

【0 0 8 5】

なお、実際には 2 つの偏波モードを考慮しなければならないので、2 つの偏波モードそれぞれの式 (42b) の値が、以下の式 (44) を満たす。

【数 4 4】

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} \frac{\kappa_{nm}^2}{\beta_n} \frac{R}{D_{nm}} L_F \quad \cdots (44)$$

20

【0 0 8 6】

以下の式 (45a) に示す値は、自由度 4 のカイ二乗分布である以下の式 (45b) に従って分布し、更にその累積分布関数は、以下の式 (45c) となり、分布の平均値 XT_μ は、以下の式 (45d) となる。

【数 4 5】

$$\frac{|A_n(n_{\text{zero}})|^2}{\sigma^2} \quad \cdots (45a)$$

$$f(x) = \frac{1}{4} x \exp\left(-\frac{x}{2}\right) \quad \cdots (45b)$$

30

$$F(x) = 1 - \left(1 + \frac{x}{2}\right) \exp\left(-\frac{x}{2}\right) \quad \cdots (45c)$$

$$XT_\mu = 4\sigma^2 = 2 \frac{\kappa^2}{\beta} \frac{R}{D_{nm}} L_F \quad \cdots (45d)$$

【0 0 8 7】

また、クロストーク分布の平均値 XT_μ が許容値 XT_S 以下になるようにするためには、以下の式 (46a) の関係から、以下の式 (46b) ~ (46d) の関係が得られる。

40

【数 4 6】

$$XT_{\mu} = 2 \frac{\kappa^2}{\beta} \frac{R}{D_{nm}} L_F \leq XT_S \quad \cdots (46a)$$

$$\kappa \leq \sqrt{\frac{1}{2} \beta \frac{D_{nm}}{R} \frac{XT_S}{L_F}} = \kappa_{th} \quad \cdots (46b)$$

$$D_{nm} \geq 2 \frac{\kappa^2}{\beta} R \frac{L_F}{XT_S} = D_{nm-th} \quad \cdots (46c)$$

$$R \leq \frac{1}{2} \frac{\beta}{\kappa^2} D_{nm} \frac{XT_S}{L_F} = R_{th} \quad \cdots (46d)$$

【0088】

ここで、 XT_S 、 L_F を与えることで、各パラメータが満たすべき関係式が明らかになる。同一構造コアが複数設けられたマルチコア光ファイバで、結合係数が κ_{nm-th} 以下で、コア間距離が D_{nm-th} 以上になる様にファイバを設計し、ファイバを R_{th} 以下の径で曲げれば、クロストークを XT_S 以下に抑えることができる。

【0089】

続いて、図9のような7つのコア#1～#7を有する光ファイバ（以下、「7コア光ファイバ」という）を考える。各コア間の結合係数はコア間隔に対して指数関数的に減少していくので、クロストークを考慮すべきなのは隣接コアだけと考えて良い。この場合、隣接コアの数が最も多いコア1は、周囲に設けられた6つのコアからのクロストークの影響を受ける。このときコアピッチを Λ とすると、上記式（46a）～（46d）は、それぞれ以下の式（47a）～（47d）に書き換えることができる。なお、コア数が7以上の場合であっても六方格子状にコアが配置されている場合は、考慮すべき式は以下の式（47a）～（47d）となる。

【数 4 7】

$$XT_{\mu} = 6 \cdot 2 \frac{\kappa^2}{\beta} \frac{R}{\Lambda} L_F \leq XT_S \quad \cdots (47a)$$

$$\kappa \leq \sqrt{\frac{1}{12} \beta \frac{\Lambda}{R} \frac{XT_S}{L_F}} = \kappa_{th} \quad \cdots (47b)$$

$$\Lambda \geq 12 \frac{\kappa^2}{\beta} R \frac{L_F}{XT_S} = \Lambda_{th} \quad \cdots (47c)$$

$$R \leq \frac{1}{12} \frac{\beta}{\kappa^2} \Lambda \frac{XT_S}{L_F} = R_{th} \quad \cdots (47d)$$

【0090】

また、 XT_{μ} は一般に、上記式（24c）、上記式（40）、 $\sigma^2 = (\chi/2) \times n_{e_r o}$ の関係、上記式（42c）、及び、2つの偏波モードを考慮する必要から、コア n へのクロストークの分布の平均値 $XT_{\mu, n}$ は、以下の式（48）で表すことができる。

【数 4 8】

$$XT_{\mu, n} = \sum_{m \neq n} 2 \frac{\kappa_{nm}^2}{\beta_m} \frac{R}{D_{nm}} L_F \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right)^2}} \quad \cdots (48)$$

【0091】

10

20

30

40

50

ここで、光ファイバの曲率半径 R が小さいほど、コアピッチ Λ も小さくでき、ファイバ断面の単位面積当たりのコア密度を高められる。光ファイバは通常ケーブル化された状態で使用されるので、例えば、光ファイバをケーブル断面上でケーブル中心から一定の距離になるようにケーブル内に収容し、且つ、ケーブル長手位置が変わるにつれて当該光ファイバのケーブル中心からの向きが変わる様に収容する。これにより、ケーブルが直線状態でも光ファイバは螺旋状になりほぼ一定の曲率半径を維持することができる。

【 0 0 9 2 】

上述のように光ファイバが螺旋状にケーブル内に収容されることにより、ケーブル長に対してファイバ長が増加する。このとき、図 10 に示すように、螺旋の半径を r_h 、ピッチを L_p とすると、螺旋の曲率半径 R は、以下の式 (49) で表せる。なお、図 10 は、螺旋半径 r_h 及び螺旋ピッチ L_p を説明するための図である。

10

【数 4 9】

$$R = \frac{r_h^2 + \left(\frac{L_p}{2\pi}\right)^2}{r_h} \quad \cdots (49)$$

【 0 0 9 3 】

また、ケーブル長に対するファイバ長の増加率 L_D は、以下の式 (50) で表せる。

【数 5 0】

$$L_D = \sqrt{\left(r_h \frac{2\pi}{L_p}\right)^2 + 1} - 1 \quad \cdots (50)$$

20

【 0 0 9 4 】

したがって、 L_D と R の関係は、以下の式 (51) で表せる。

【数 5 1】

$$L_D = \sqrt{\frac{R}{R - r_h}} - 1 \quad \cdots (51)$$

【 0 0 9 5 】

よって、 L_D に起因する 1 スパン当たりのロス増加 α_D は、スパン長を L_{span} (km)、1 km 当たりの減衰係数を α_{km} (dB / km) とすると、以下の式 (52) 及び式 (53) と表せる。

30

【数 5 2】

$$\alpha_D = \left\{ \sqrt{\left(r_h \frac{2\pi}{L_p}\right)^2 + 1} - 1 \right\} \cdot \alpha_{km} L_{span} \quad \cdots (52)$$

【数 5 3】

$$\alpha_D = \left[\sqrt{\frac{R}{R - r_h}} - 1 \right] \cdot \alpha_{km} L_{span} \quad \cdots (53)$$

40

【 0 0 9 6 】

現在存在する一般的なケーブルでは、 r_h は 12 mm 以下であり、 L_p は 300 mm 以上である。このような状況下で、 L_{span} を 80 km とし、 α_{km} を 0.185 dB / km とすると、 α_D は最大でも 0.305 dB / span である。

【 0 0 9 7 】

伝送時の OSNR の劣化を考えると α_D は許容値 α_s 以下であることが望ましい。よって、 L_p と R が満たすべき条件は、上記式 (52)、(53)、及び、 α_D 、 α_s の関係より、以下の式 (54) 及び式 (55) のように求められる。なお、式 (54) 及び式 (

50

55) 中の r_h のうち最も大きな値については r_{hmax} と表記するものとする。

【数54】

$$L_p \geq \frac{2\pi r_h}{\sqrt{\frac{\alpha_s}{\alpha_{km} L_{span}} \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{km} L_{span}} + 2 \right)}} = \frac{2\pi \alpha_{km} L_{span}}{\sqrt{\alpha_s (\alpha_s + 2\alpha_{km} L_{span})}} r_h \quad \dots (54)$$

【数55】

$$R \geq \frac{\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{km} L_{span}} + 1 \right)^2}{\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{km} L_{span}} + 1 \right)^2 - 1} r_h = \frac{(\alpha_s + \alpha_{km} L_{span})^2}{\alpha_s (\alpha_s + 2\alpha_{km} L_{span})} r_h \quad \dots (55)$$

10

【0098】

上記式(54)及び式(55)の右辺は、 r_h と α_{km} に対して単調増加である。そのため、 r_h と α_{km} については、ケーブル内での最大値を考慮すべきである。また、これにより、 α_{km} が小さい方が、光ファイバの曲率半径Rの採り得る最小値も小さくすることができる。加えて、上記式(46a)～(47d)などから、クロストークをより小さくなり、または、クロストークに関連する k や Λ などのパラメータに対する制限を緩和することができる。

20

【0099】

したがって、 α_{km} は少なくとも0.19dB/km以下であることが望ましく、0.18dB/km以下であることが更に望ましく、0.17dB/km以下であることが更に望ましく、0.16dB/km以下であることが更に望ましく、0.15dB/km以下であることが更に望ましい。

【0100】

なお、 L_{span} を一般的な80kmとした場合、 L_p 及びRは、少なくとも、以下の式(56a)及び(56b)の関係を満たすのが望ましい。

【数56】

$$L_p \geq \frac{2\pi \cdot 0.19 \cdot 80}{\sqrt{\alpha_s (\alpha_s + 2 \cdot 0.19 \cdot 80)}} r_h = \frac{2\pi \cdot 15.2}{\sqrt{\alpha_s (\alpha_s + 2 \cdot 15.2)}} r_h \quad \dots (56a)$$

30

$$R \geq \frac{(\alpha_s + 0.19 \cdot 80)^2}{\alpha_s (\alpha_s + 2 \cdot 0.19 \cdot 80)} r_h = \frac{(\alpha_s + 15.2)^2}{\alpha_s (\alpha_s + 2 \cdot 15.2)} r_h \quad \dots (56b)$$

【0101】

$L_{span} = 80$ kmの条件下で、 L_p 及びRは、以下の式(57a)及び(57b)の関係を満たすのが更に望ましい。

【数57】

$$L_p \geq \frac{2\pi \cdot 0.18 \cdot 80}{\sqrt{\alpha_s (\alpha_s + 2 \cdot 0.18 \cdot 80)}} r_h = \frac{2\pi \cdot 14.4}{\sqrt{\alpha_s (\alpha_s + 2 \cdot 14.4)}} r_h \quad \dots (57a)$$

40

$$R \geq \frac{(\alpha_s + 0.18 \cdot 80)^2}{\alpha_s (\alpha_s + 2 \cdot 0.18 \cdot 80)} r_h = \frac{(\alpha_s + 14.4)^2}{\alpha_s (\alpha_s + 2 \cdot 14.4)} r_h \quad \dots (57b)$$

【0102】

$L_{span} = 80$ kmの条件下で、 L_p 及びRは、以下の式(58a)及び(58b)の関係を満たすのが更に望ましい。

【数 5 8】

$$L_p \geq \frac{2\pi \cdot 0.17 \cdot 80}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 0.17 \cdot 80)}} r_h = \frac{2\pi \cdot 13.6}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 13.6)}} r_h \quad \cdots (58a)$$

$$R \geq \frac{(\alpha_s + 0.17 \cdot 80)^2}{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 0.17 \cdot 80)} r_h = \frac{(\alpha_s + 13.6)^2}{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 13.6)} r_h \quad \cdots (58b)$$

【0 1 0 3】

$L_{span} = 80 \text{ km}$ の条件下で、 L_p 及び R は、以下の式(59a)及び(59b)の関係を満たすのが更に望ましい。

10

【数 5 9】

$$L_p \geq \frac{2\pi \cdot 0.16 \cdot 80}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 0.16 \cdot 80)}} r_h = \frac{2\pi \cdot 12.8}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 12.8)}} r_h \quad \cdots (59a)$$

$$R \geq \frac{(\alpha_s + 0.16 \cdot 80)^2}{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 0.16 \cdot 80)} r_h = \frac{(\alpha_s + 12.8)^2}{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 12.8)} r_h \quad \cdots (59b)$$

【0 1 0 4】

$L_{span} = 80 \text{ km}$ の条件下で、 L_p 及び R は、以下の式(60a)及び(60b)の関係を満たすのが更に望ましい。

20

【数 6 0】

$$L_p \geq \frac{2\pi \cdot 0.15 \cdot 80}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 0.15 \cdot 80)}} r_h = \frac{2\pi \cdot 12.0}{\sqrt{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 12.0)}} r_h \quad \cdots (60a)$$

$$R \geq \frac{(\alpha_s + 0.15 \cdot 80)^2}{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 0.15 \cdot 80)} r_h = \frac{(\alpha_s + 12.0)^2}{\alpha_s(\alpha_s + 2 \cdot 12.0)} r_h \quad \cdots (60b)$$

【0 1 0 5】

ここで、 α_s は、大きくても 0.5 dB/span 以下であることが望ましく、 0.3 dB/span 以下であることが更に望ましく、 0.1 dB/span 以下であることが更に望ましい。

30

【0 1 0 6】

また、上記式(49)から、螺旋のピッチ L_p と曲率半径 R の関係を図11に示す。細いケーブルでは、ケーブル断面上でのケーブル中心から光ファイバまでの距離が 2 mm ほどまで、短くなることもある。また、ケーブルの製造性から、ケーブル内に光ファイバを螺旋状に収容する際の螺旋のピッチ L_p は、少なくとも 200 mm 以上であることが望ましく、 300 mm 以上であることが更に望ましい。なお、図11において、グラフG1101は螺旋半径が 2 mm に設定されたときの L_p と R の関係、グラフG1102は螺旋半径が 3 mm に設定されたときの L_p と R の関係、グラフG1103は螺旋半径が 4 mm に設定されたときの L_p と R の関係、グラフG1104は螺旋半径が 5 mm に設定されたときの L_p と R の関係、グラフG1105は螺旋半径が 6 mm に設定されたときの L_p と R の関係、グラフG1106は螺旋半径が 7 mm に設定されたときの L_p と R の関係、グラフG1107は螺旋半径が 8 mm に設定されたときの L_p と R の関係、グラフG1108は螺旋半径が 9 mm に設定されたときの L_p と R の関係、グラフG1109は螺旋半径が 10 mm に設定されたときの L_p と R の関係、グラフG1110は螺旋半径が 11 mm に設定されたときの L_p と R の関係、グラフG1111は螺旋半径が 12 mm に設定されたときの L_p と R の関係を、それぞれ示している。

40

【0 1 0 7】

これらのことから、 R と r_h の単位をミリメートルとしたとき、ファイバの曲率半径 R と r_h の関係は、少なくとも以下の式(61)を満たすのが望ましい。

50

【数 6 1】

$$R \geq \frac{r_h^2 + \left(\frac{200}{2\pi}\right)^2}{r_h} \quad \cdots (61)$$

【0 1 0 8】

また、ファイバの曲率半径 R と r_h の関係は、少なくとも以下の式 (62) を満たすのが更に望ましい。

【数 6 2】

$$R \geq \frac{r_h^2 + \left(\frac{300}{2\pi}\right)^2}{r_h} \quad \cdots (62)$$

10

【0 1 0 9】

また、クロストークの観点から、ファイバの曲率半径 R は上記式 (47d) を満たす必要がある。そのため、上記式 (46d) 及び式 (49) から、螺旋ピッチ L_p は、以下の式 (63a) を満たす必要がある。又は、上記式 (47d) 及び式 (49) から、螺旋ピッチ L_p は、以下の式 (63b) を満たす必要がある。なお、式 (63a) 及び式 (63b) 中の r_h のうち最も小さな値については $r_{h \min}$ と表記するものとする。

【数 6 3】

$$L_p \leq 2\pi \sqrt{\left| \frac{1}{2} \frac{\beta}{\kappa^2} D_{nm} \frac{XT_S}{L_F} r_h - r_h^2 \right|} \quad \cdots (63a)$$

20

$$L_p \leq 2\pi \sqrt{\left| \frac{1}{12} \frac{\beta}{\kappa^2} \Lambda \frac{XT_S}{L_F} r_h - r_h^2 \right|} \quad \cdots (63b)$$

【0 1 1 0】

なお、ここまで、ファイバをケーブル中に螺旋状に内蔵する場合の、螺旋の回転の中心軸をケーブル断面の中心として説明してきたが、螺旋の回転の中心軸は、必ずしもケーブル断面の中心である必要はなく、また、1つのケーブル中に複数の異なる螺旋の回転の中心軸があっても良い。

30

【0 1 1 1】

(第2実施形態)

続いて、第2実施形態においても、当該マルチコアファイバ100Aにおける複数のコアのうち、コアmの実効屈折率を n_{eff-m} 、コアnを基準としたコアmの実効屈折率の等価屈折率を $n_{eq-eff-n,m}$ 、コアnとコアmのコア間隔(中心間距離) D_{nm} 、直線nmと当該マルチコアファイバ100Aの曲げ径方向に一致する直線とのなす角度 φ_{nm} (rad) とすると、以下の式(64)の関係が成り立つ。なお、直線nmは、所定軸AXに直交する当該マルチコアファイバ100Aの断面上において、コアnの中心とコアmの中心を結ぶ線を意味する。

40

【数 6 4】

$$n_{eq-eff-nm} = n_{eff-m} \left\{ 1 + \frac{D_{nm} \sin(\varphi_{nm})}{R} \right\} \quad \cdots (64)$$

【0 1 1 2】

上記式(64)を伝搬定数に置き換えて考えると、 $\beta = (2\pi/\lambda) n_{eff}$ (λ は波長、 n_{eff} は実効屈折率)なので、以下の式(65)が得られる。

【数 6 5】

$$\beta_{eq-nm} = \beta_m \left\{ 1 + \frac{D_{nm} \sin(\varphi_{nm})}{R} \right\} \cdots (65)$$

ただし、 β_m はコア m の伝搬定数、 β_{eq-nm} はコア n を基準に等価屈折率を考慮したコア m の伝搬定数である。

【0 1 1 3】

このとき、 β_{eq-nm} と β_{eq-nn} との差 $\Delta\beta_{nm}$ (比屈折率差ではない) は、以下の式 (66) となる。

10

【数 6 6】

$$\Delta\beta_{nm} = \beta_{eq-nm} - \beta_{eq-nn} = \beta_m \left\{ 1 + \frac{D_{nm} \sin(\varphi_{nm})}{R} \right\} - \beta_n = \beta_m \frac{D_{nm} \sin(\varphi_{nm})}{R} + (\beta_m - \beta_n) \cdots (66)$$

【0 1 1 4】

マルチコアファイバの長手方向に沿って $\Delta\beta_{nm}$ が 0 に近い値になる割合が少ないほど、コア間クロストークは小さくなると考えられる。ここで、パラメータ $R = 30 \text{ mm}$ を許容する場合、コア n とコア m のコア間隔 $D_{nm} = 30 \text{ } \mu\text{m}$ で、差 $\Delta\beta_{nm}$ が常に 0 にならないようにするのは簡単ではない。すなわち、図 4 (b) に示すように、実効屈折率同士の比屈折率差 $\Delta\epsilon_{eff}$ が 0.1% を超えるような伝搬定数 β_n と伝搬定数 β_m の差が必要となるからである。

20

【0 1 1 5】

そこで、マルチコアファイバの長手方向に沿って $\Delta\beta_{nm}$ の零点は存在するが、各零点での $\Delta\beta_{nm}$ の傾きが急峻で、零点の出現頻度が低いことが望ましいと考えられる。特に、各零点での $\Delta\beta_{nm}$ の傾きが急峻であることが重要である。

【0 1 1 6】

各零点での $\Delta\beta_{nm}$ の傾きと零点の出現頻度を制御するため、光ファイバに適切に管理した弾性的な捻回あるいは塑性的な捻回を付与することが望ましい。ただし、意図して捻回を付与しなくとも、光ファイバは長手方向にランダムに弾性的あるいは塑性的に捻回している。

30

【0 1 1 7】

上述の考察に関連したシミュレーション結果を以下に示す。

【0 1 1 8】

図 7 は、2 つのコアを有するマルチコアファイバ (以下、2 コアファイバという) の長手方向に沿った、コア間クロストーク (図 7 では単に「クロストーク」と表記) の変動を示すグラフであり、具体的には、2 つのコアの一方に光強度 $I_1 = 1$ の光を入射した際の他方のコアの光強度 I_2 の、当該 2 コアファイバの長手方向に沿った変動である。また、コア間クロストークを (ある非入射コアの強度) / (全コアの強度の合計) と定義した場合、図 7 のグラフは、当該 2 コアファイバの長手方向に沿ったクロストークの変動のグラフと言える。この 2 コアファイバにおいて、2 つのコアは同一構造の屈折率プロファイル

を有するとともに、クラッド領域に対する各コア Δ は 0.34%、各コア径は $9 \text{ } \mu\text{m}$ 、コア間隔 D は $40 \text{ } \mu\text{m}$ である。当該 2 コアファイバは、全長に亘って半径 300 mm の曲げが加えられている。また、当該 2 コアファイバの長手方向に沿って捻れ (当該 2 コアファイバの軸廻りの一方向回転) が付与されている。なお、この捻れは、当該 2 コアファイバを 10 m で 1 回転させる。つまり、当該 2 コアファイバの長手方向の位置を z とするとき、 10 m につき $\Delta\beta_{nm}(z)$ の零点が 2 つ存在する。なお、図 7 において、等間隔で 10 m に 2 つの割合で存在するクロストークの急峻な変化は、 $\Delta\beta_{nm}(z)$ の零点である。

40

【0 1 1 9】

なお、上述のシミュレーションでは、コア間クロストークの変動を計算したが、より簡単にクロストークの挙動を表す数式を以下に組み立てていく。

50

【 0 1 2 0 】

$\Delta \beta_{nm}(z)$ の任意零点 z における、以下の式(67a)で与えられる傾きの逆数は、その零点 z を通過する際に、どれだけの長さで $\Delta \beta_{nm}(z)$ が0近傍にあったかを表す指標とすることができる。そこで、上記任意零点でのコア間のクロストーク量 χ は、以下の式(67b)を指標として表され、このパラメータ l の値が小さいほどコア間のクロストーク量 χ が小さくなると考えられる。

【数67】

$$\frac{d}{dz}\Delta \beta_{nm}(z) \quad \cdots (67a)$$

$$l = \left| \frac{1}{\frac{d}{dz}\Delta \beta_{nm}(z) \Big|_{\Delta \beta_{nm}(z)=0}} \right| \quad \cdots (67b)$$

10

【 0 1 2 1 】

また、零点 z の極近傍でのみ有意なコア間クロストークが発生していると考え。ここで、上記式(10)及び式(11)を考えた場合、以下の式(68a)の関係から、 $F = 1$ 、 $L = (\pi/2) \cdot (1/\kappa)$ となる。2つコア同士の結合を考えた場合、 $F = 1$ 、 $L = (\pi/2) \cdot (1/\kappa)$ の場合、一方のコア1に強度 $I_1 = 1$ の光が入射した場合、他方のコア2の当該2コアファイバの長手方向の位置 z における強度 I_2 は、以下の式(68b)となる。

20

【数68】

$$\psi = \Delta \beta_{1,2}/2 = 0 \quad \cdots (68a)$$

$$I_2 = \sin^2\left(\frac{\kappa}{2\pi}z\right) \quad \cdots (68b)$$

【 0 1 2 2 】

ここで、更に $I_1 \gg I_2$ とした場合、 $\Delta \beta_{nm}(z)$ の各零点近傍では、上記式(68b) z を0近傍と見なすことができる。そこで、強度 I_2 は、以下の式(69)とすることができる。

30

【数69】

$$I_2 \approx \left(\frac{\kappa}{2\pi}\right)^2 z^2 \quad \cdots (69)$$

【 0 1 2 3 】

さらに、 $\Delta \beta_{nm}(z)$ の零点からずれると、 F 及び L それぞれの値も徐々に変化することも含めて考えると、最終的に $I_1 \gg I_2$ の場合、 $\Delta \beta_{nm}(z)$ の任意零点近傍でのコア間のクロストーク量 χ は、以下の式(70)で表せるものと考えられる。

40

【数70】

$$\chi = \left(\frac{\kappa_{nm}}{2\pi}\right)^2 \alpha \left| \frac{1}{\frac{d}{dz}\Delta \beta_{nm}(z) \Big|_{\Delta \beta_{nm}(z)=0}} \right| \quad \cdots (70)$$

ただし、 α は上記式(67b)と上記式(69)を結び付ける係数である。

【 0 1 2 4 】

以下、幾つかのケースについて、コア間のクロストーク量 χ を求める。

【 0 1 2 5 】

50

上記式(66)中のパラメータのうち z の関数となるのは、 φ_{nm} であり、以下の式(71)に関係が成り立つ場合(ただし、 $\gamma_c \neq 0$ とする)について考える。

【数71】

$$\varphi_{n,m}(z) = \gamma_c z \quad \cdots (71)$$

【0126】

このとき、2コアファイバの長手方向の位置 z が以下の式(72a)で与えられる場合、 $\Delta\beta_{nm}(z) = 0$ となり、どの点でも以下の式(72b)で表される関係が成り立ち、また、どの点でもコア間のクロストーク量 χ は、以下の式(72c)のようになる。

【数72】

10

$$z = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_c} \left\{ \text{asin} \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right) + 2\pi k \right\} \\ \frac{1}{\gamma_c} \left\{ \pi - \text{asin} \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right) + 2\pi k \right\} \end{cases} \quad \cdots (72a)$$

(k は整数; $\text{asin}(x)$ の値域は $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ とする)

$$\left| \frac{d}{dz} \Delta\beta_{nm}(z) \right| = \beta_m |\gamma_c| \sqrt{\left(\frac{D_{nm}}{R} \right)^2 - \left(\frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right)^2} \quad \cdots (72b)$$

20

$$\chi = \alpha \left(\frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{\beta_m} \frac{1}{\gamma_c} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{D_{nm}}{R} \right)^2 - \left(\frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right)^2}} \quad \cdots (72c)$$

【0127】

また、以下の式(73a)で表される関係の場合(ただし、 $\gamma_a = \pi$ 、 $\gamma_f > 0$ とする)、 $\Delta\beta_{nm}(z) = 0$ となる、2コアファイバの長手方向の位置 z (以下の式(73b))では、以下の式(73c)で表された関係が成り立ち、2コア間のクロストーク量 χ は、以下の式(73d)となる。

30

【数 7 3】

$$\varphi_{n,m}(z) = \gamma_a \sin(\gamma_f z) \quad \dots (73a)$$

$$z = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_f} \left\{ \operatorname{asin} \left(\frac{1}{\gamma_a} \left\{ \operatorname{asin} \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right) + 2\pi k_1 \right\} \right) + 2\pi k_3 \right\} \\ \frac{1}{\gamma_f} \left\{ \operatorname{asin} \left(\frac{1}{\gamma_a} \left\{ \pi - \operatorname{asin} \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right) + 2\pi k_2 \right\} \right) + 2\pi k_3 \right\} \\ \frac{1}{\gamma_f} \left\{ \pi - \operatorname{asin} \left(\frac{1}{\gamma_a} \left\{ \operatorname{asin} \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right) + 2\pi k_1 \right\} \right) + 2\pi k_3 \right\} \\ \frac{1}{\gamma_f} \left\{ \pi - \operatorname{asin} \left(\frac{1}{\gamma_a} \left\{ \pi - \operatorname{asin} \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right) + 2\pi k_2 \right\} \right) + 2\pi k_3 \right\} \end{cases} \quad \dots (73b)$$

10

(ただし、 k_1, k_2 は式中の逆正弦関数の定義域を満たす範囲の整数)

$$\left| \frac{d}{dz} \Delta \beta_{nm}(z) \right| = \begin{cases} \beta_m \gamma_f \sqrt{\left(\frac{D_{nm}}{R} \right)^2 - \left(\frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right)^2} \sqrt{\gamma_a^2 - \left\{ \operatorname{asin} \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right) + 2\pi k_1 \right\}^2} \\ \beta_m \gamma_f \sqrt{\left(\frac{D_{nm}}{R} \right)^2 - \left(\frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right)^2} \sqrt{\gamma_a^2 - \left\{ \pi - \operatorname{asin} \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right) + 2\pi k_2 \right\}^2} \end{cases} \quad \dots$$

20

(73c)

$$\chi = \begin{cases} \alpha \left(\frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{\beta_m} \frac{1}{\gamma_f} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{D_{nm}}{R} \right)^2 - \left(\frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right)^2}} \frac{1}{\sqrt{\gamma_a^2 - \left\{ \operatorname{asin} \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right) + 2\pi k_1 \right\}^2}} \\ \alpha \left(\frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{\beta_m} \frac{1}{\gamma_f} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{D_{nm}}{R} \right)^2 - \left(\frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right)^2}} \frac{1}{\sqrt{\gamma_a^2 - \left\{ \pi - \operatorname{asin} \left(\frac{R}{D_{nm}} \frac{\beta_n - \beta_m}{\beta_m} \right) + 2\pi k_2 \right\}^2}} \end{cases} \quad \dots$$

30

(73d)

(ただし、 k_1, k_2 は式中の逆正弦関数の定義域を満たす範囲の整数)

【0 1 2 8】

上記の考察から、2コアファイバにおけるコア間のクロストーク量 χ を小さくするには、2つのコア n とコア m のコア間隔 D_{nm} を大きくする、パラメータ R (2コアファイバへの曲率半径) を小さくする、又は、コア n の伝搬定数 β_n とコア m の伝搬定数 β_m の差を小さくする (すなわち、 n_{eff-n} と n_{eff-m} の差を小さくする) 必要がある。特に、コア n とコア m のコア間隔 D_{nm} を大きくすると、コア間の結合係数 κ も小さくできるので、コア間のクロストーク低減の効果が大きい。また、パラメータ γ_c や γ_f を大きくすることでも、コア間のクロストーク量 χ を小さくすることができる。

40

【0 1 2 9】

以上の説明からも分かるように、コア間のクロストーク量の観点からも $n_{eff-n} = n_{eff-m}$ であることが望ましく、また、製造上も同一コア構造で製造できることから当該マルチコアファイバ 100A は容易に実現可能である。そこで、以後の説明では、 $n_{eff-n} = n_{eff-m}$ の場合について論ずる。

【0 1 3 0】

$n_{eff-n} = n_{eff-m}$ のときの上記式 (72c) は、以下の式 (74a) のように表せ、また、上記式 (73d) は、以下の式 (74b) のように表せる。

50

【数 7 4】

$$\chi = \alpha \left(\frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{\beta_m} \frac{1}{\gamma_c} \frac{R}{D_{nm}} \quad \cdots (74a)$$

$$\chi = \alpha \left(\frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{\beta_m} \frac{1}{\gamma_f} \frac{R}{D_{nm}} \frac{1}{\sqrt{\gamma_a^2 - (\pi k)^2}} \quad \cdots (74b)$$

（ただし、 k は $-\frac{\gamma_a}{\pi} \leq k \leq \frac{\gamma_a}{\pi}$ の整数）

10

【0 1 3 1】

ここで、簡単のため、上記式（7 1）で表される関係が成り立つ場合、つまり、上記式（7 4 a）の場合について考える。

【0 1 3 2】

図 7 の結果を得たシミュレーションと同様のシミュレーションを行い、同一構造のコア 1 とコア 2 をもつ 2 コアファイバについて、 $\alpha=1$ としたときのコア間のクロストーク量 χ と $\Delta \beta_{12}(z)$ の 1 番目の零点と 2 番目の零点の間のクロストークの平均値の関係、すなわち、クロストーク量 χ と $\Delta \beta_{12}(z)$ の最初の零点でのクロストーク変動量との関係を求めた。このとき、波長は $1.55 \mu\text{m}$ で、コア Δ は 0.34% と 0.4% 、パラメータ R は 60 mm 、 120 mm 、 180 mm 、 240 mm 、 300 mm 、コア 1 とコア 2 の

20

【0 1 3 3】

ところで、最初の零点でのクロストーク変動量は、上述のように綺麗な法則性がある。しかしながら、2 番目以降の零点でのクロストーク変動量は図 7 を見ると、あまり法則性があるようには見えない。これは、2 コアファイバにおけるコア 1 からコア 2 へ、任意零点でクロストークした光の位相が、次の零点でのコア 1 からコア 2 へクロストークしてくる光の位相と合っていないためである。その結果、2 番目の零点以降のクロストークはある一定の範囲で確率的に変動する。

30

【0 1 3 4】

具体的には、強度ではなく電界の変動で考えると、2 番目以降の零点において、 θ をコア 1 からコア 2 へクロストークした光とコア 2 の光の位相ずれとすると、該当する零点以前のコア 1 やコア 2 の振幅にもよるが、およそ以下の式（7 5 a）で与えられる電界の変動が起こると考えられる。そのため、この 2 コアファイバの出射端における電界の振幅は、中心極限定理により、以下の式（7 5 b）で与えられるパラメータを平均値 μ とし、一定の分散 σ^2 をもつ正規分布を確率分布とした、確率論的な値となると考えられる。位相ずれ θ が一様にランダムだとすると式（7 5 a）の分散は $\chi/2$ なので、ファイバ全長の零点を n_{zero} とすると、上記分散 σ^2 は $(\chi/2) n_{zero}$ となり、以下の式（7 5 c）が得られる。コア 1 とコア 2 が上記式（7 1）の関係を満たしている場合（式（7 1）中、 $n=1$ 、 $m=2$ ）、 $n_{zero} = \gamma_c L_F / \pi$ となるので、 σ は以下の式（7 5 d）となる。

40

【数 7 5】

$$\sqrt{\chi} \cos \theta \quad \cdots (75a)$$

$$\sqrt{\chi} \quad \cdots (75b)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\chi}{2} n_{zero}} \quad \cdots (75c)$$

$$\sigma = \frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi} \frac{1}{\beta_m} \frac{R}{D_{nm}}} \sqrt{L_F} \quad \cdots (75d)$$

10

【0 1 3 5】

つまり、コア 1 及びコア 2 が上記式 (7 1) の関係を満たしている場合 (式 (7 1) 中、 $n = 1$ 、 $m = 2$)、2 コアファイバの入射端において $I_1 = 1$ 、 $I_2 = 0$ とすると、この 2 コアファイバの出射端でのコア 2 の電解の振幅は、以下の式 (7 6 a) のようになり、以下の式 (7 6 b) で表される正規分布を確率分布とした確率論的な値となる。

【数 7 6】

$$\mu = \frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \sqrt{\alpha \frac{1}{\beta_m} \frac{R}{D_{nm}}} \sqrt{\frac{1}{\gamma_c}} \quad \cdots (76a)$$

20

$$\sigma = \frac{\kappa_{nm}}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi} \frac{1}{\beta_m} \frac{R}{D_{nm}}} \sqrt{L_F} \quad \cdots (76b)$$

【0 1 3 6】

ここで、上記 2 コアファイバの出射端におけるコア間クロストークが X_T 以下である確率を P_{X_T} とすると、確率 P_{X_T} は以下の式 (7 7) となる。

【数 7 7】

$$\begin{aligned} P_{X_T} &= \int_0^{\sqrt{X_T}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x+\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \right\} dx \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{X_T}-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{X_T}+\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right\} \quad \cdots (77) \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{2\pi\sqrt{\pi\beta_m D_{nm}}}{\kappa_{nm}\sqrt{\alpha R L_F}} \sqrt{X_T} - \sqrt{\frac{\pi}{\gamma_c L_F}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{2\pi\sqrt{\pi\beta_m D_{nm}}}{\kappa_{nm}\sqrt{\alpha R L_F}} \sqrt{X_T} + \sqrt{\frac{\pi}{\gamma_c L_F}}\right) \right\} \end{aligned}$$

30

(ただし、 $\operatorname{erf}(x)$ は誤差関数)

【0 1 3 7】

また、通常での使用を考えれば L_F は少なくとも数 ~ 数十 km 以上であるので、以下の式 (7 8 a) で表される条件を満たしていると考えられる。また、 L_F が比較的短い場合に式 (7 8 a) 又は以下の式 (7 8 b) が成り立つためには、以下の式 (7 8 c) が成り立つ必要がある。 L_F が小さいほど γ_c は大きい必要があるが、 $L_F = 5000 \text{ m}$ では $\gamma_c = 2\pi \text{ (rad/m)}$ 、 $L_F = 1000 \text{ m}$ では $\gamma_c = 10\pi \text{ (rad/m)}$ であり、容易に実現可能である。

40

【数 7 8】

$$\sqrt{\frac{\pi}{\gamma_c L_F}} \ll 1 \quad \cdots (78a)$$

$$\sqrt{\frac{\pi}{\gamma_c L_F}} \leq 0.01 \quad \cdots (78b)$$

$$\gamma_c \geq \pi \frac{10^4}{L_F} \quad \cdots (78c)$$

10

【0 1 3 8】

なお、所望の捻れ量 γ_c を当該マルチコアファイバ 1 0 0 A に付与するためには、図 1 2 (a) に示すように、軸 A X を中心に矢印 S (軸廻りの方向) に沿ってマルチコアファイバ 1 0 0 A を回転させる。この場合、当該マルチコアファイバ 1 0 0 A に付与される捻れは弾性的あるいは塑性的な捻れでよく、また、この捻れは、当該マルチコアファイバ 1 0 0 A に付与される曲率半径方向を基準としてその長手方向に沿って変化する。具体的には、当該マルチコアファイバ 1 0 0 A の断面を規定する $S_x - S_y$ 座標は、図 1 2 (b) に示すように、マルチコアファイバ 1 0 0 A の長手方向に沿って回転することとなり、これにより、マルチコアファイバ 1 0 0 A に所定ピッチの捻れが付与される。

【0 1 3 9】

20

上記式 (7 8 a) が成り立つとき、確率 P_{XT} は以下の式 (7 9) の関係が成り立つと考えることができ、一定のクロストーク以下になる確率が大きくなる。

【数 7 9】

$$P_{XT} \approx \text{erf} \left(\frac{2\pi}{\kappa_{nm}} \sqrt{\frac{\pi\beta_m D_{nm}}{\alpha R L_F}} \sqrt{XT} \right) \quad \cdots (79)$$

【0 1 4 0】

ここで、関数 $\text{erf}(x)$ は、単調増加の関数なので、 $P_{XT} = 0.9999$ のとき、以下の式 (8 0 a) で表される関係を満たす必要がある。なお、式 (8 0 b) は、式 (8 0 a) 中のパラメータ R の満たすべき条件式になるよう、式 (8 0 a) を展開した式である。

30

【数 8 0】

$$\frac{2\pi}{\kappa_{nm}} \sqrt{\frac{\pi\beta_m D_{nm}}{\alpha R L_F}} \sqrt{XT} \geq \text{erf}^{-1}(0.9999) \quad \cdots (80a)$$

$$R \leq \frac{1}{\{\text{erf}^{-1}(0.9999)\}^2} \left(\frac{2\pi}{\kappa_{nm}} \right)^2 \frac{\pi D_{nm} \beta_m XT}{\alpha L_F} \quad \cdots (80b)$$

【0 1 4 1】

上記式 (8 0 b) を以下の式 (8 1) のようにパラメータ R_{th} (曲率半径) を規定すると、たとえば、コア Δ が 0 . 4 %、コア径が 9 μm 、コア間隔が 4 0 μm を有するとともに、 $L_F = 1 0 0 \text{ km}$ 、 $XT = 0 . 0 0 1$ の 2 コアファイバの場合、 R_{th} は以下の式 (8 1) で表せ、波長 1 . 5 5 μm の光に対して R_{th} は 1 4 . 1 mm となる。この時 1 0 0 km 伝搬後でも 9 9 . 9 9 % 以上の確率でクロストークは - 3 0 dB 以下になる。しかし、シミュレーションによると、1 0 dB / km 以上の曲げ損失が生じてしまうので、長距離伝送は実現不可能であることが分かる。

40

【数 8 1】

$$R_{th} = \frac{1}{\{\text{erf}^{-1}(0.9999)\}^2} \left(\frac{2\pi}{\kappa_{nm}} \right)^2 \frac{\pi D_{nm} \beta_m XT}{\alpha L_F} \quad \cdots (81)$$

50

【 0 1 4 2 】

そこで、図 1 3 に、コア間隔を $40\ \mu\text{m}$ 、ケーブルカットオフ波長が $1.53\ \mu\text{m}$ になる場合のコア径に調整し、 $L_F = 100\ \text{km}$ 、 $XT = 0.001$ 、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ の光を伝搬する条件下で、各コア Δ に対する κ 、 R_{th} (mm)、曲率半径 R_{th} での曲げ損失 (dB/km)、コア径 (μm) を示す。なお、図 1 3 において、グラフ G 1 1 1 0 は κ を示し、グラフ G 1 1 2 0 は曲率半径 R_{th} (mm) を示し、グラフ G 1 1 3 0 は曲率半径 R_{th} での曲げ損失 (dB/km) を示し、グラフ G 1 1 4 0 はコア径 (μm) を示す。なお、図 1 3 において、コア Δ が 0.38% より大きい範囲の曲げ損失については、その値が非常に小さくなってしまっているのでプロットしていない。

【 0 1 4 3 】

10

この図 1 3 から分かるように、 $100\ \text{km}$ 伝搬後の曲げによる損失増分を $1\ \text{dB}$ に抑えるためには、曲げ損失が $0.01\ \text{dB/km}$ 以下になるコア Δ を 0.373% 以上にする必要があり、また、 $100\ \text{km}$ 伝搬後の曲げによる損失増分を $0.1\ \text{dB}$ 以下に抑えるためには、曲げ損失が $0.001\ \text{dB/km}$ 以下になるコア Δ を 0.378% 以上にする必要がある。ケーブルカットオフ波長を $1530\ \text{nm}$ より短くする場合は、更にコア Δ を高くする必要がある。

【 0 1 4 4 】

以上のように、ケーブルカットオフ波長が $1530\ \text{nm}$ の場合、上記半径 R_{th} 以下の曲げでも低い曲げ損失を実現するため、所定軸に直交する断面上において、当該マルチコアファイバ 1 0 0 A におけるコア間隔 D が $40\ \mu\text{m}$ 以上であり、クラッド領域 1 2 0 に対するコア 1 1 0 A 1、1 1 0 B 1 ~ B 3、1 1 0 C 1 ~ 1 1 0 C 3 それぞれの比屈折率差 Δ は 0.373% 以上であるのが好ましい。

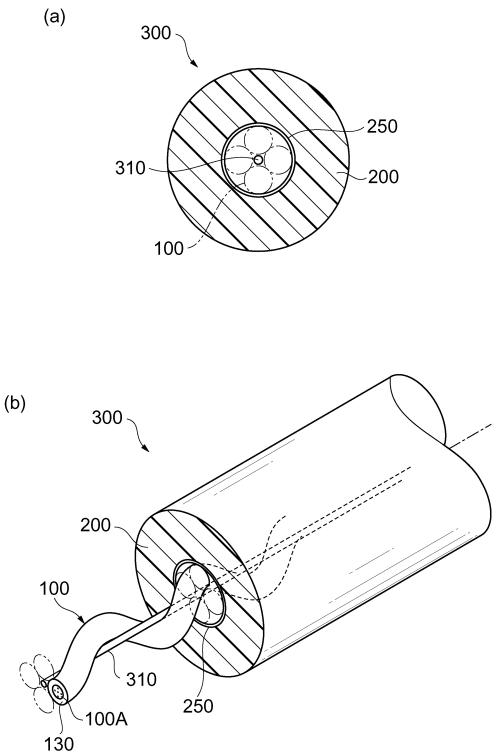
20

【符号の説明】

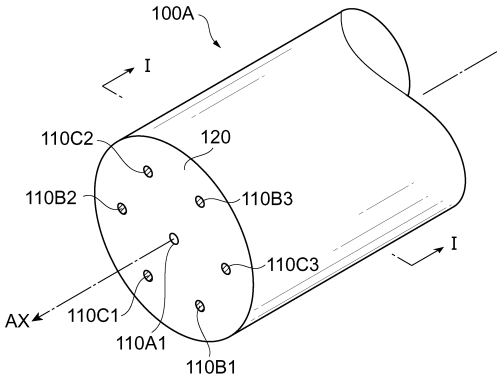
【 0 1 4 5 】

1 0 0 ... 光ファイバ、1 0 0 A ... マルチコアファイバ、1 1 0 A 1、1 1 0 B 1 ~ 1 1 0 B 3、1 1 0 C 1 ~ 1 1 0 C 3 ... コア、1 2 0 ... クラッド領域、1 3 0 ... 樹脂被覆、2 0 0 ... 外被、2 5 0 ... 押え巻き、3 0 0 ... 光ファイバケーブル、3 1 0 ... 中心部材。

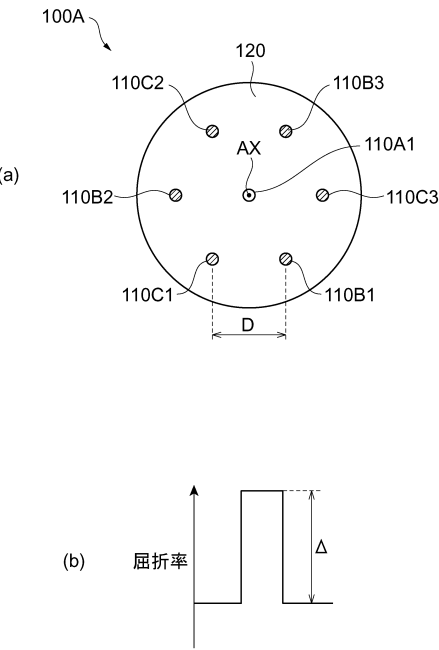
【図 1】



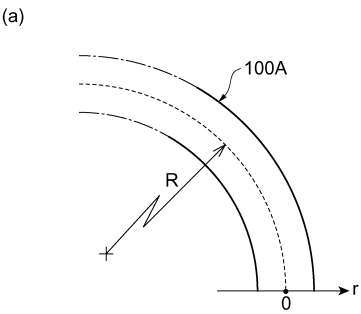
【図 2】



【図 3】

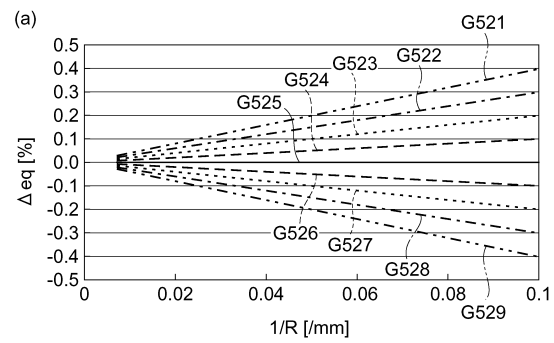
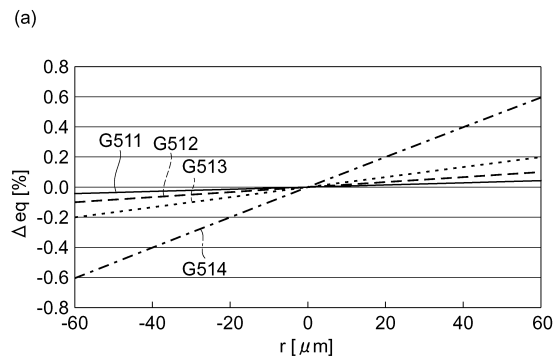


【図 4】

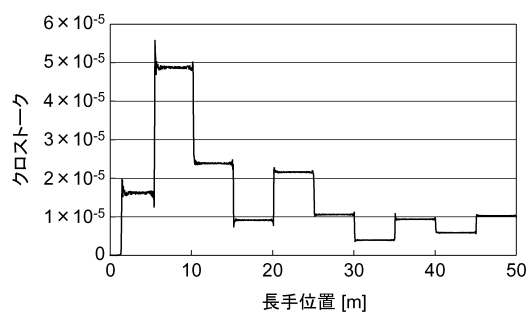


$r [\mu\text{m}] \backslash R [\text{mm}]$	140	60	30	10
-60	-0.043	-0.100	-0.201	-0.605
-50	-0.036	-0.083	-0.167	-0.504
-40	-0.029	-0.067	-0.134	-0.402
-30	-0.021	-0.050	-0.100	-0.301
-20	-0.014	-0.033	-0.067	-0.201
-10	-0.007	-0.017	-0.033	-0.100
0	0	0	0	0
10	0.007	0.017	0.033	0.100
20	0.014	0.033	0.067	0.199
30	0.021	0.050	0.100	0.299
40	0.029	0.067	0.133	0.398
50	0.036	0.083	0.166	0.496
60	0.043	0.100	0.199	0.595

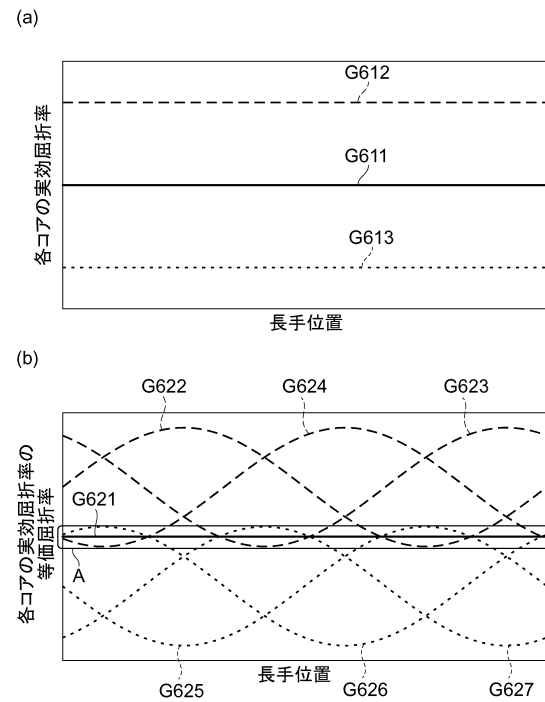
【図 5】



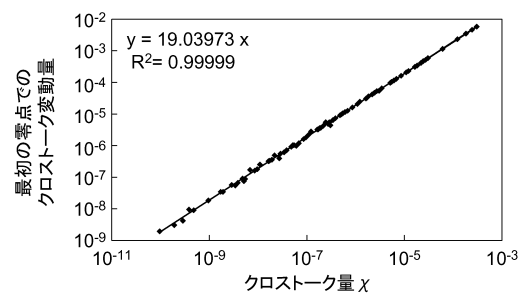
【図 7】



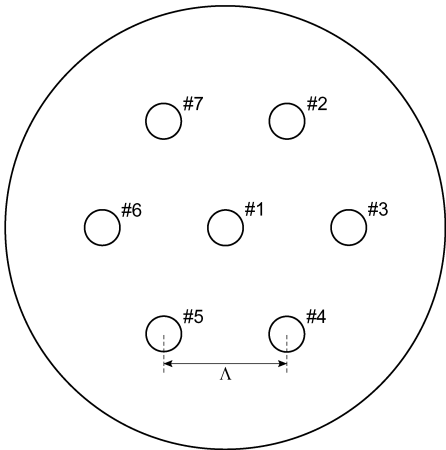
【図 6】



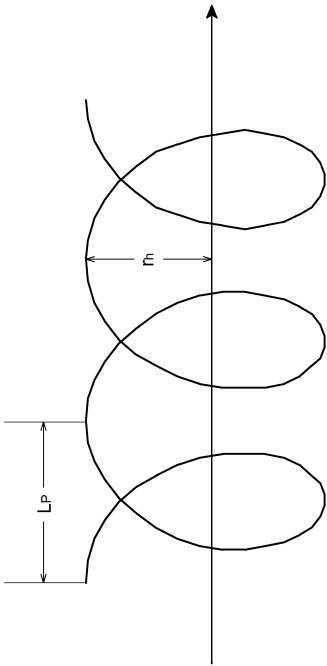
【図 8】



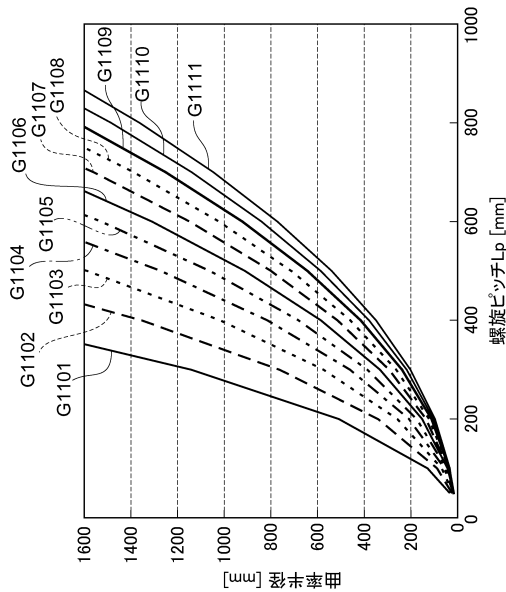
【図 9】



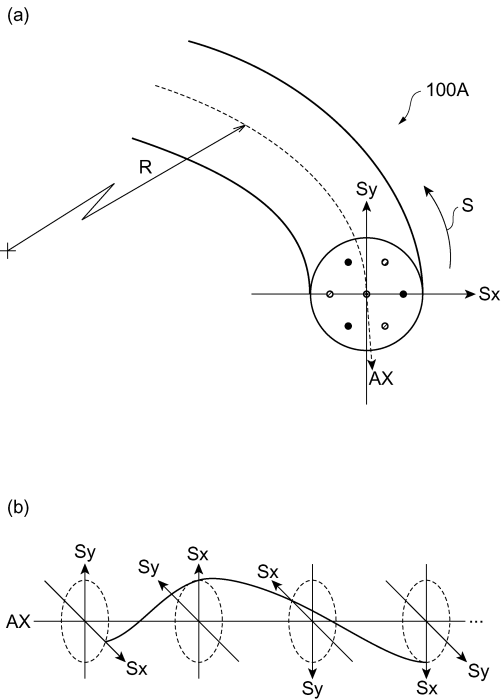
【図 10】



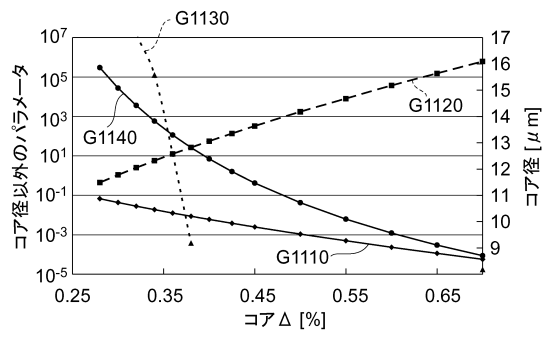
【図 11】



【図 12】



【図 13】



フロントページの続き

審査官 奥村 政人

(56)参考文献 特開平 0 4 - 0 4 2 8 3 2 (J P , A)

特表 2 0 1 3 - 5 1 3 1 3 1 (J P , A)

國分泰雄、小柴正則、空間多重・モード多重伝送へ向けた異種非結合および同種結合マルチコア
ファイバの提案、電子情報通信学会技術研究報告、日本、社団法人電子情報通信学会、2 0 0 9
年 7 月 2 3 日、Vol. 109, No. 159, pp. 165 - 170

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G 0 2 B 6 / 0 0 - 6 / 5 4