

小曲げ径用 PANDA ファイバ

光事業部 林 和 幸¹・井 添 克 昭²・愛 川 和 彦³・工 藤 学⁴

Bend Insensitive PANDA Fiber

K. Hayashi, K. Izoe, K. Aikawa, and M. Kudo

近年の通信容量の増大に伴い光送受信モジュールの小型化が進んでいる。モジュール内で使用される偏波保持光ファイバのとりまわしについても許容されるスペースは狭い。そこで、より小さな曲げ径で使用した場合でも、偏波クロストークなどの特性が劣化しないPANDA型偏波保持光ファイバを開発した。半径 7.5 mm で 10 回巻いた場合、1550 nm での損失の増加が 0.1 dB 以下であり、偏波クロストークも -40 dB 以下を維持していることを確認した。

As optical networks expand, there are increasing demands of smaller modules for optical communication systems. PANDA (Polarization-maintaining and absorption-reducing) fibers are used for connecting optical devices employed in modules for optical communication systems. In order to reduce size of modules, bend insensitive PANDA fibers for much smaller bending radius are required. The developed ultra bend-insensitive PANDA fibers have less than 0.1 dB of bending loss and less than -40 dB of polarization crosstalk at 1550 nm with a winding condition of 7.5 mm-bending radius and 10 turns.

1. ま え が き

PANDA型偏波保持光ファイバ（以下PANDAファイバ）は、コア両側方に応力付与部があり、この部分がコアへ応力を与えることで複屈折が誘起され偏波を保持している¹⁾。応力付与部がコアの両側方にある軸をSlow軸、その垂直方向をFast軸として2つの偏波モードの伝送が可能となる。

偏波保持光ファイバの使用例としては、偏波依存性のある光デバイスのピグテールや、ひずみや温度を計測するためのセンサなどがある。

近年、光通信で使用される変調器やLaser Diode (LD)を使用した光送受信モジュールなどでは小型化が進み、使用される偏波保持光ファイバも、従来特性を維持したまま小さく曲げる必要がある。我々は、すでに曲げ半径15 mm対応のPANDAファイバをラインナップしていたが、さらにその半分の曲げ半径である、7.5 mm対応の小曲げ径用PANDAファイバ（BISM15-PX-U25D-H）を開発したので報告する。

2. 設 計

PANDAファイバ用母材は、SMファイバ用母材のコアを中心とした対称の位置に穴を開け、別に製造した応力付

与部を挿入することで製作される。線引き工程では、この母材を一体化させながら125 μm まで細径化する。この応力付与部は B_2O_3 をドーブした SiO_2 であり、 SiO_2 クラッド部に比べ大きな熱膨張係数を持っている。線引き工程の冷却過程において、この応力付与部はクラッド部よりも大きく収縮するため、周囲のクラッド領域およびコア領域に異方性ひずみを印加する。このひずみによる光弾性効果によりコア部分に複屈折が生じ、モード複屈折率が誘起される。このモード複屈折率は偏波保持能力の指標となり、この値が高いほど偏波保持能力が高いことを意味する。モード複屈折率 B は式(1)で表される²⁾。図1は式(1)の

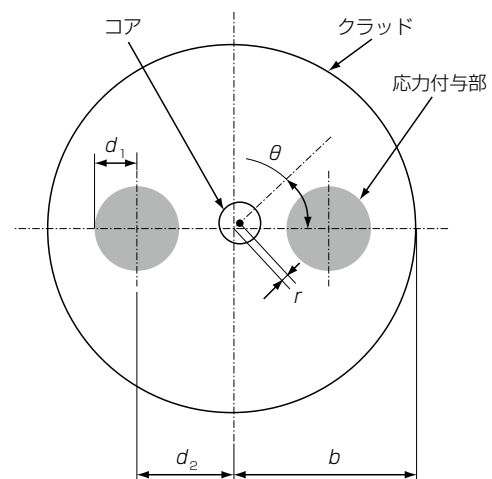


図1 式(1)パラメータ解説

Fig. 1. Parameter description of formula (1).

1 光ファイバ開発部
2 光ファイバ開発部グループ長
3 光ファイバ開発部部長 (博士(工学))
4 佐倉第2光製造部部長

略語・専門用語リスト 略語・専門用語	正式表記	説明
PANDAファイバ	PANDA (Polarization-maintaining AND Absorption-reducing) 型偏波保持光ファイバ	コアの両側方に円形の応力付与部を持つ偏波保持光ファイバ。
MFD	Mode Field Diameter	光ファイバ中を伝搬するモードの電界分布の広がり直径として表現したもの。
SMファイバ	Single-mode optical fiber	伝播するモードが単一の光ファイバ。
光ファイバの融着接続		光ファイバの端面の軸合わせを行った後に、高電圧アーク放電により光ファイバの端面を溶かして接続を行う接続方法。
偏波クロストーク		偏波保持光ファイバにおける、直交する二つのモード間での結合度合い。例えば、入力端で一方のモードに励振された光パワーが、出力端で他方のモードに漏れ出している光パワー。

パラメータ解説である。

$$B \cong \frac{2EC}{1-\nu} (a_2 - a_3) T \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \cdot \left[1 - 3 \left(1 - 2 \left(\frac{r}{b} \right)^2 \right) \left(\frac{d_2}{b} \right)^4 + 3 \left(\frac{r}{d_2} \right)^2 \cos 2\theta \right] \dots (1)$$

- B : モード複屈折率
- E : 石英のヤング率
- C : 光弾性係数
- ν : ポアソン比
- a₂ : クラッドの熱膨張係数
- a₃ : 応力付与部の熱膨張係数
- T : 応力付与部の融点と実使用環境温度との差
- d₁ : 応力付与部の半径
- d₂ : 応力付与部の中心とコアの中心との距離
- b : クラッドの半径
- r : コア偏心量
- θ : 両応力付与部を結ぶ線を基準としたときのコア角度位置

偏波クロストーク特性を向上させるには、モード複屈折率を大きくする必要がある。式(1)でシミュレーションすると、モード複屈折率を大きくするためには、応力付与部とクラッドの熱膨張係数差を大きくすることや、応力付与部径の最適化、および応力付与部間隔を狭くする必要があることがわかる。応力付与部とクラッドの熱膨張係数差を大きくするためには、応力付与部へのB₂O₃ドープ量を増やせばよいが、B₂O₃をドープしたガラスは潮解性があるため、高温熱環境下に曝すと応力付与部が吸湿し膨張する。そのため、今回の設計では応力付与部のB₂O₃ドープ量は従来と同等とし、間隔を狭くすることで小曲げ径時の良好な偏波クロストークを実現することにした。

一方、光ファイバの曲げ損失を低減するには、コア/クラッド間の比屈折率差(Δ)を高くすることが必要となる。しかし、Δを上げるとMFDの縮小を招き、既存の

光ファイバと接続した場合の損失増加は避けられない。そこで、コアの近傍に屈折率を下げた層を有するトレンチ型プロファイルを用いると、コア/クラッド間の実効的な屈折率差を大きくすることが可能となるため、MFDの縮小を抑制し、かつ曲げ損失が低減される³⁾⁴⁾。このトレンチ型プロファイル構造に加え応力付与部の間隔を狭くして配置することにより、小曲げ径での損失増加を抑え、偏波クロストーク特性を向上させたファイバを実現することができる。図2に目標とする屈折率分布を示す。

表1に当社製PANDAファイバSM15-PS-U25D-Hと曲げ半径15mm対応SRSM15-PX-U25D-Hの特性、および今回開発したBISM15-PX-U25D-Hの目標特性を示す。従来の半径15mm対応ファイバでは、低曲げ損失とするためコア/クラッド間の比屈折率差を大きくしていた。また、曲げ偏波クロストーク特性を良くするために応力付与部間隔を狭くしている。曲げ偏波クロストーク

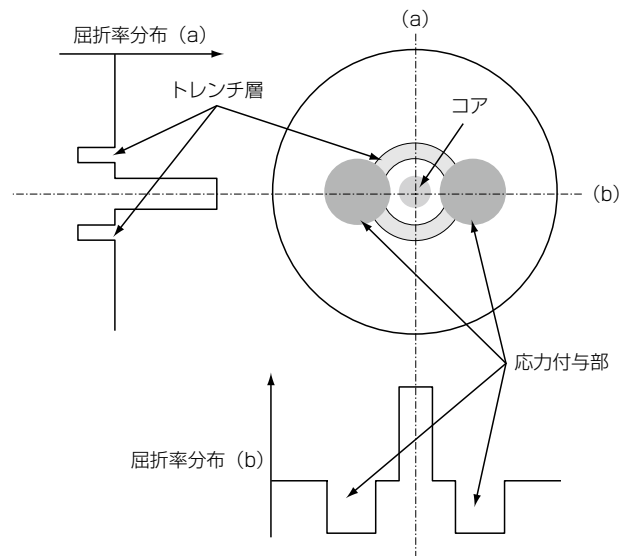


図2 目標屈折率分布
Fig. 2. Target refractive-index profile.

表1 標準 PANDA ファイバと曲げ半径 15 mm PANDA ファイバの典型値と BISM15-PX-U25D-H の目標値.
Table 1. Typical characteristics of standard PANDA fibers and target value of the BISM15-PX-U25D-H.

波長：1550 nm			
項目	SM15-PS-U25D-H (標準品)	SRSM15-PX-U25D-H (標準品)	BISM15-PX-U25D-H 目標値
許容最小曲げ半径 (mm)	20	15	7.5
曲げ損失 (dB)	0.1 (曲げ半径 20 mm×10 巻)	0.05 (曲げ半径 15 mm×10 巻)	≤ 0.1 (曲げ半径 7.5 mm×10 巻)
曲げ偏波クロストーク (dB)	-38 (曲げ半径 20 mm×10 巻)	-41 (曲げ半径 15 mm×10 巻)	≤ -30 (曲げ半径 7.5 mm×10 巻)
モード複屈折率 (×10 ⁻⁴)	3.9	4.5	≥ 4.0
伝送損失 (dB/km)	0.25	0.28	≤ 3.0
カットオフ波長 (μm)	1.32	1.34	≤ 1.44
MFD (μm)	10.5	9.5	9.0
ファイバ外径 (μm)	125	125	125
コア/クラッド比屈折率差 (%)	0.35	0.40	0.40
屈折率分布トレンチ構造	無	無	有
被覆外径 (μm)	245	245	245

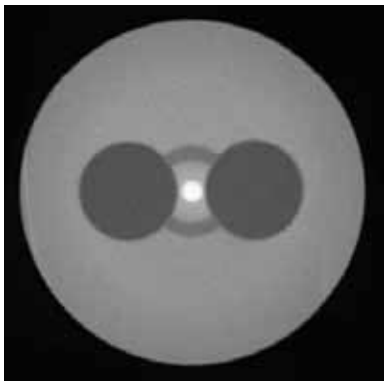


図3 BISM15-PX-U25D-H 断面写真
Fig. 3. Cross-section of BISM15-PX-U25D-H.

ク特性向上は応力付与部間隔を狭くすると可能であるが、コアに近づけすぎると伝搬モードの電磁界が応力付与部にかかるため伝送損失が増加する。しかしこの PANDA ファイバの一般的な使用方法では、数 m での使用頻度が高いことから、従来の PANDA ファイバより伝送損失が高くなることは大きな問題にならないと判断した。

3. ファイバの特性

試作した PANDA ファイバの断面写真を図 3 に示す。

応力付与部はトレンチ部より内側に外縁が突き出しており、トレンチ部より応力付与部のほうが屈折率は低くなっている。

表 2 に試作したファイバの特性を示す。半径 7.5 mm で 10 回巻いた場合の、曲げ損失と偏波クロストークは目標特性を満たしており良好な結果が得られた。偏波クロストーク特性向上のため、応力付与部の間隔は標準 PANDA ファイバより狭くしており、B₂O₃ の影響で損失が増加しているが数 m での使用では無視できる程小さい。

表2 BISM15-PX-U25D-H 特性
Table 2. Characteristics of BISM15-PX-U25D-H.

波長：1550 nm		
項目	目標値	開発品
曲げ損失 (dB) (曲げ半径 7.5 mm×10 巻)	≤ 0.1	0.01
曲げ偏波クロストーク (dB) (曲げ半径 7.5 mm×10 巻)	≤ -30	-40
モード複屈折率 (×10 ⁻⁴)	≥ 4.0	6.9
伝送損失 (dB/km)	≤ 3.0	1.6
カットオフ波長 (μm)	≤ 1.44	1.42
MFD (μm)	9.0	8.9
ファイバ外径 (μm)	125	125
被覆外径 (μm)	245	245

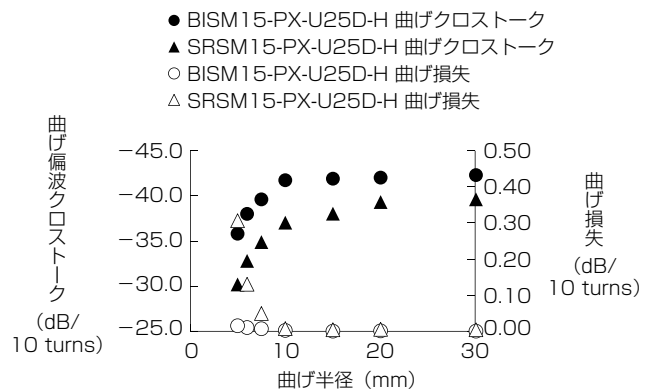


図4 曲げ損失と曲げ偏波クロストーク
Fig. 4. Bending polarization crosstalk and bending loss at 1550 nm.

各曲げ径での損失、偏波クロストーク特性を図 4 に示す。偏波クロストークは半径 10 mm 以下になると劣化が見られるが半径 5 mm でも -35 dB を維持している。損失については半径 10 mm から増加が見られるが半径

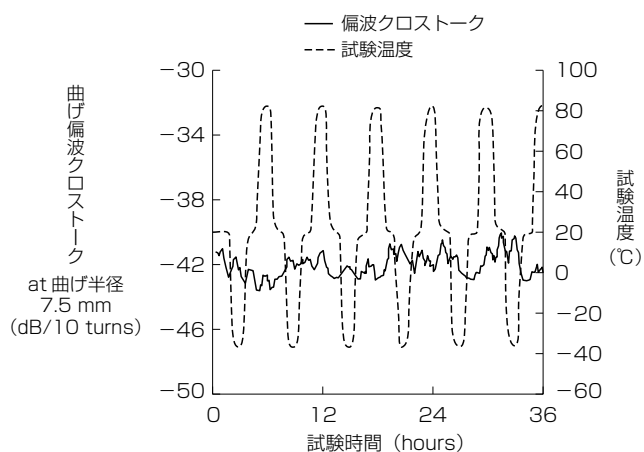


図5 曲げ偏波クロストークの温度特性
Fig. 5. Temperature characteristic of bending polarization crosstalk.

5 mmであっても 0.01 dBである。許容最小曲げ半径 15 mm用ファイバであるSRSM 15-PX-U25D-Hと比較すると特性は大きく向上している。

図5に曲げ偏波クロストークの温度特性確認結果を示す。半径 7.5 mmで 10 回巻いた状態で -40°C ~ $+85^{\circ}\text{C}$ のヒートサイクル試験を実施し、偏波クロストークの測定を行った。7 日間経過したが劣化は見られなかった。

図6に一般的な通信用SMファイバとの融着接続損失を示す。SMファイバのMFDは $10.3\ \mu\text{m}$ (1550 nm) である。BISM15-PX-U25D-HのMFDは、曲げ半径 15 mm用 (MFD: $9.5\ \mu\text{m}$) より小さいため接続損失は高くなっているが、許容できるとレベルと考える。

4. む す び

BISM15-PX-U25D-Hを開発した。このファイバは、曲げ半径 7.5 mmで使用することができる。母材はトレンチ型屈折率分布を持ったSM母材を使用し、応力付与部間隔

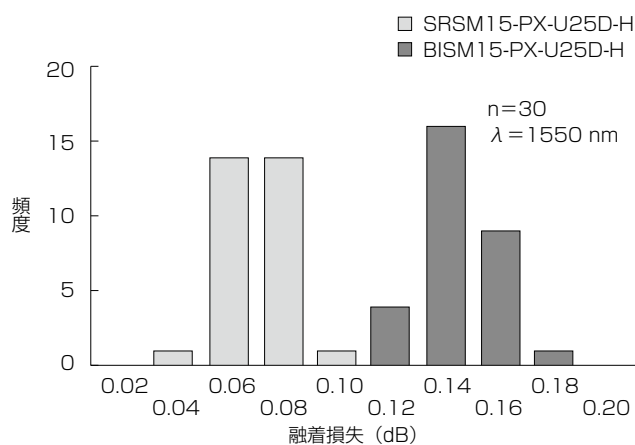


図6 SMファイバとの融着損失
Fig. 6. Fusion splicing loss between SM fiber.

を狭くした設計を用いた。曲げ半径 7.5 mmで 10 回ファイバを巻いた状態でも損失の増加が 0.01 dBであり偏波クロストークは -40 dBであることを確認した。以上の結果から、今回開発したBISM15-PX-U25D-Hを用いることで、小スペースでの引き回しが可能となり小型化された光送受信モジュールや、その他部品等への適用が期待される。

参 考 文 献

- 1) 姫野ほか:「偏波保持光ファイバ」, フジクラ技報, 第85号 pp.1-9, 1993
- 2) Pak L.Chu, et al.: "Analytical Method for Calculation of Stresses and Material Birefringence in Polarization-Maintaining Optical fiber", Journal of Lightwave Technology, Vol.LT-2, No.5, pp.650-662, Oct. 1984
- 3) 池田ほか:「接続損失を低減した低曲げ損失光ファイバ」, フジクラ技報, 第105号 pp.6-10, 2003
- 4) 布目ほか:「低曲げ損失光ファイバFutureGuide®-BIS-B」, フジクラ技報, 第117号 pp.5-10, 2009