

最先端の光ファイバ技術 ～超長距離から住宅内まで～

光電子技術研究所 藤 巻 宗 久¹

Leading-edge Optical Fiber Technologies : from ultra long distance to indoor

M. Fujimaki

10,000 km以上伝送する海底用光ケーブルから、住居内配線用途での1 m以下にいたる非常に広い範囲で光ファイバは使用されています。さまざまな用途に適した光ファイバの開発・実用化は重要性を増しています。

小さい径に曲げた際の損失増加が従来のステップ型のシングルモードファイバに比べ1桁以上低いことを特長とする、低曲げ損失光ファイバを開発しました。低曲げ損失ファイバは、住宅内FTTHで使用されるだけでなく、施工時の光ファイバの急峻な曲げによる通信トラブル回避の目的で用途が拡大しています。

当社は1本のファイバ中に複数のコアを持つマルチコアファイバの開発をリードしています。マルチコアファイバは伝送容量の飛躍的拡大が可能であり長距離向けファイバとして注目されています。

Various optical fibers are used for a wide range of applications from submarine cable transmission over 10,000 km to indoor wiring less than 1 m. It is therefore important to develop and commercialize novel fibers dedicated to each of these applications.

We have developed bend-insensitive fibers which have low bending losses. At a small bending radius, the bending loss of bend-insensitive fibers is more than one order of magnitude smaller than that of a conventional single-mode fiber with a step-index profile. The application areas of bend-insensitive fibers are expanding, because they can avoid communication failure due to fiber bending during fiber installation.

Fujikura leads the development of multi-core fiber, in which multiple cores are embedded in the cladding. The multi-core fiber can make a breakthrough in the transmission capacity and thus has attracted much attention as a novel optical fiber for long haul optical communication.

1. ま え が き

低損失で大容量伝送に適する光ファイバは、目覚しく普及が進んでいます。大陸間通信は衛星通信から海底用光ケーブルに置き換わり、家庭あるいはオフィス、工場まで光ファイバで結ぶFTTHあるいはFTTxは世界各国で導入が始まりました。世界の光ファイバメーカーの中でトップグループに位置する当社は、用途に応じた光ファイバの開発を行っています。

一般に光ファイバを曲げるとコアを通過している光が漏れ、損失が増加します。これを曲げ損失といい、曲げ径が小さく、曲げ回数が多いほど損失は増加します。低曲げ損失光ファイバとは、曲げ損失を小さく抑えた光ファイバのことです。FTTH以外の用途にも使われはじめた低曲げ損失光ファイバの特徴と性能を紹介します。

無線通信速度の上昇やインターネットトラフィックの増大はとどまるところを知らません。それを支える光ファイバ通信網に対して、伝送容量上昇の要求が加速して

います。光ファイバ一本あたりの伝送容量を飛躍的に向上できるマルチコアファイバは次世代の伝送線路として注目を集めており、その開発について紹介します。

2. 低曲げ損失光ファイバ

2.1 低曲げ損失光ファイバの規格

FTTHシステムを実際に施工する際には、光ファイバケーブルをコンパクトに収納したいという要求が出てき

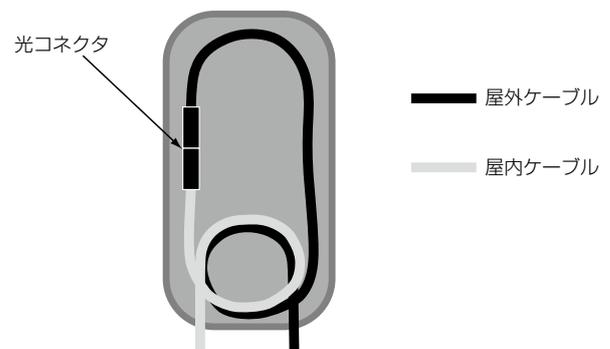


図1 光成端箱内の光ケーブル
Fig. 1. Optical cables arrangement in a closure.

¹ 光ファイバ技術研究部部長

略語・専門用語リスト		説明
略語・専門用語	正式表記	
FTTH	Fiber to the home	光ファイバを一般個人宅まで引き込む光通信網形式
FTTx	Fiber to the x	xにHome（住宅）やCurb（道路脇）、Node（分配ノード）などが入るアクセス系の光通信網形式の総称
多値変調		信号一つに0,1ではなく0,1,2,3など多数の値を乗せる方式
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output	送信機と受信機を複数使用して、通信容量を増やす方式

ます。屋外ケーブルと屋内ケーブルをつなぐ光成端箱のイメージを図1に示します。光ファイバは信頼性を確保するため、図1のように余長を巻いて収納するのが標準的な施工方法です。光ファイバの曲げ損失を小さくできるならば、巻き径を小さくすることができ、ひいてはコンパクトに収納できます。図2に曲げ半径のイメージ図を示しますように、半径が小さくなることは、コンパクト収納に直結します。

国際電気通信連合・電気通信標準化部門（international telecommunication union telecommunication standardization sector, ITU-T）の勧告G.652で規定される汎用SM型光ファイバは最小曲げ半径が30mmであり、60mmφのスペースを最低限必要としています。表1に低曲げ損失光ファイバの勧告G.657を示します。Aタイプは、G.652 汎用SM型ファイバに準拠しており、Bタイプは準拠の必要がありません。また最小曲げ半径15mm、7.5mmと5mmに対応して、1, 2, 3のカテゴリが規定されています。

表1 ITU-T G.657のサブカテゴリ
Table 1. Sub-category of ITU-T G.657.

最小曲げ半径	15 mm	7.5 mm	5 mm
G.652 Dに準拠	A 1	A 2	定義なし
G.652 Dへの準拠は必要でない	定義なし	B 2	B 3

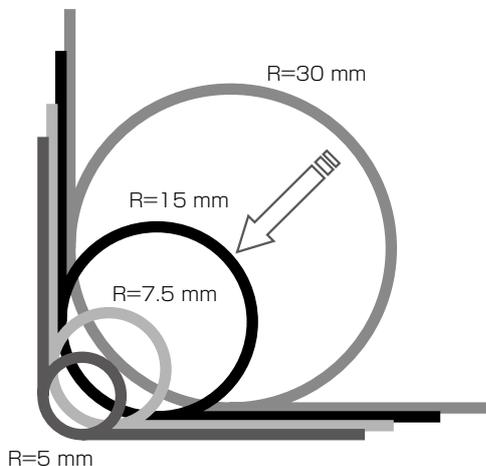


図2 曲げ半径イメージ図
Fig. 2. Schematic of bending radii.

タイプは準拠の必要がありません。また最小曲げ半径15mm、7.5mmと5mmに対応して、1, 2, 3のカテゴリが規定されています。

2.2 FutureGuide®-BIS-Bの性能と用途

開発したFutureGuide®-BIS-B（BIS-B）の直径方向の屈折率分布を汎用のシングルモード光ファイバと並べて図3に示します。コアの近傍に設けた屈折率の低い部分を溝になぞらえてトレンチ部と称します。トレンチ部の効果により光の電界分布の外側への広がりが抑圧され、良好な曲げ損失特性を持ちます。図4に最小曲げ半径

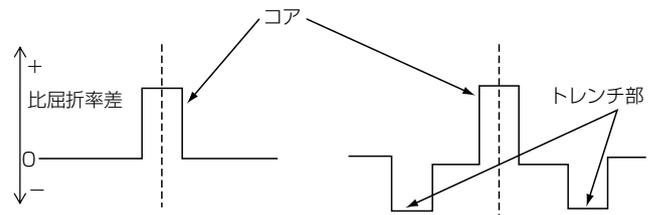


図3 a) 汎用シングルモードファイバの屈折率分布
b) トレンチ付BIS-Bの屈折率分布
Fig. 3. a) Refractive index profile of conventional single-mode fiber.
b) Refractive index profile of trench type BIS-B.

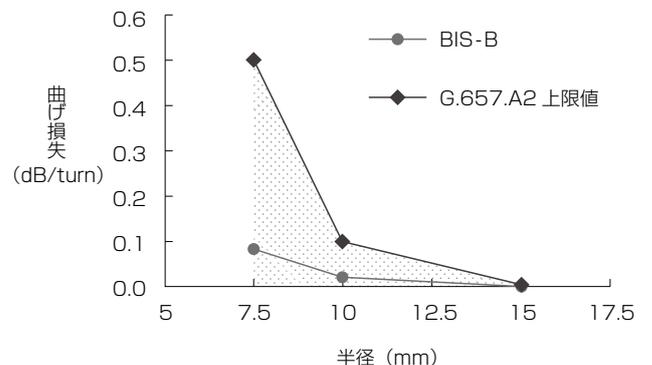


図4 BIS-Bの曲げ損失特性
Fig. 4. Bending losses of BIS-B.

7.5 mmのG.657.A2 規格と並べてBIS-Bの波長 1.55 μm における曲げ損失特性を示します。非常に曲げ損失が低いことがわかります。トレンチ部を設けた屈折率分布で光ファイバの曲げ損失改善する技術を、トレンチ技術と呼んでいます。

BIS-Bは、曲げ損失以外の波長分散やモードフィールド径、水酸基による損失等のパラメータにおいてG.652汎用SM型ファイバに準拠している¹⁾ので様々な用途に適用できます。たとえば光交換機や光伝送装置が並ぶ局内では光配線が輻輳していますので、メンテナンスや施工時に誤って光ファイバコードを曲げてしまい、通信が瞬断する障害が発生しやすいと言われています。BIS-Bを使ったコネクタ付の光ファイバコードを使うことによって、障害の発生確率を桁違いに低くできるのです。

2. 3 Hole Assisted Fiberの特性と応用例

Hole Assisted Fiber (HAF) はBIS-Bよりもさらに曲げ損失の小さい低曲げ損失光ファイバです²⁾。その断面図と直径方向の屈折率分布を図5に示しますが、空孔が開いていることが特徴です。空孔は空気で満たされており、屈折率はほぼ1であるためガラスに比べて非常に屈折率が低くなります。また空孔の横のガラス部分は光か

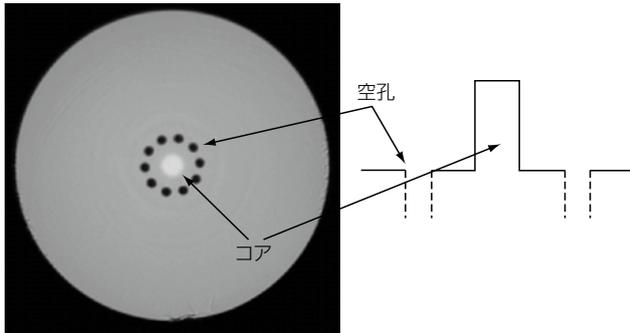


図5 a) HAF断面写真 b) HAFの屈折率分布
Fig. 5. a) Cross section of HAF.
b) Refractive index profile of HAF.

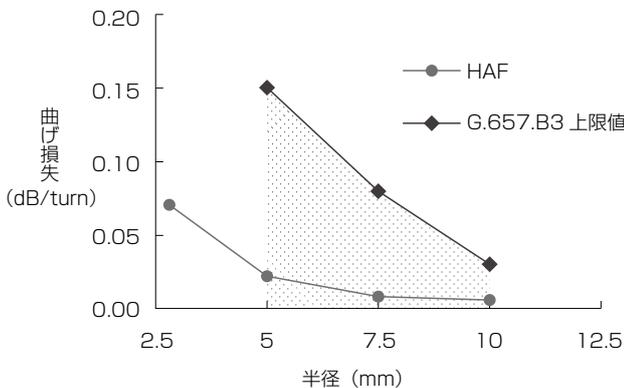


図6 HAFの曲げ損失特性
Fig. 6. Bending losses of HAF.

ら見ると等価的に屈折率が下がっています。最小曲げ半径 5 mmのG.657.B3 の規格と並べてHAFの波長 1.55 μm における曲げ損失特性を図6に示しますが、曲げ損失が非常に小さいことが良くわかります。B3のサブカテゴリはG.652への準拠を必須条件としていませんが、我々は設計と製造条件の工夫により準拠した製品の開発に成功しました。

HAFは宅内配線コード用の光ファイバとして実用化され、今後、局内の配線等への展開が期待できます。最近、ドアや窓サッシの隙間を利用して住宅内に光ファイバケーブルを引き込む“隙間配線インドアケーブル”が実用化されました。詳しいケーブル構造や用途は光ケーブルの項に譲りますが、曲げ半径は3 mm程度と極小でHAFの低曲げ損失特性を生かしたアプリケーションです。

3. マルチコアファイバ

3. 1 伝送容量の限界とマルチコアファイバ

学会報告における光ファイバ一本の伝送容量とインターネットトラフィックの増加トレンドを図7に重ねて示します。トラフィックの増加に対し、伝送容量は光ファイバおよび伝送方式の改良によって、ほぼ同じ傾きで増加してきました。近年、多値変調技術やMIMO技術、デジタル信号処理等を用いたデジタルコヒーレント受信技術の導入により伝送容量の拡大が図られ、光ファイバ1本あたり100 Tb/sの伝送実験結果が報告されるに至っています。

しかし、これらの技術をもってしても、直近では光ファイバ1本あたりの伝送容量拡大のペースは減速してきています。既存のシングルモード光ファイバをベースにした伝送システムでは実用ベースで100 Tb/s程度が限界と言われ³⁾、さらなる伝送容量の拡大には革新的な新技術が必要であるという認識が広がっています。我々は、革新的技術の候補である空間多重伝送用マルチコアファイバに注目し、開発を進めています^{4)~9)}。

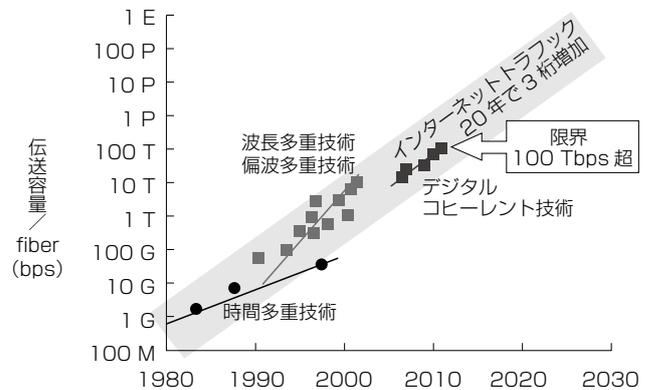


図7 光ファイバ一本あたりの伝送容量の推移
Fig. 7. Trend of transmission capacity per fiber.

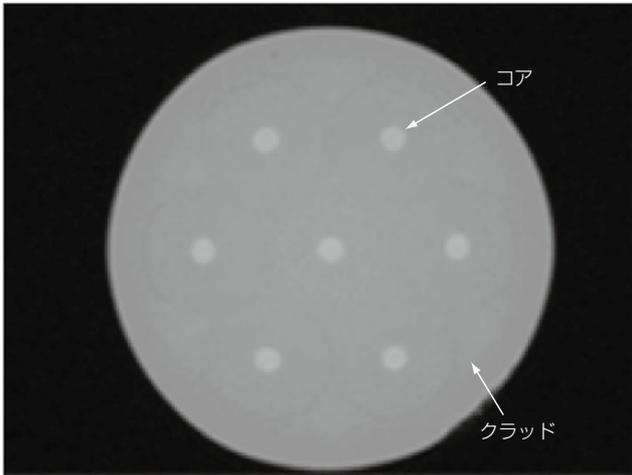


図8 マルチコアファイバの断面写真
Fig. 8. Cross sectional view of a multi core fiber.

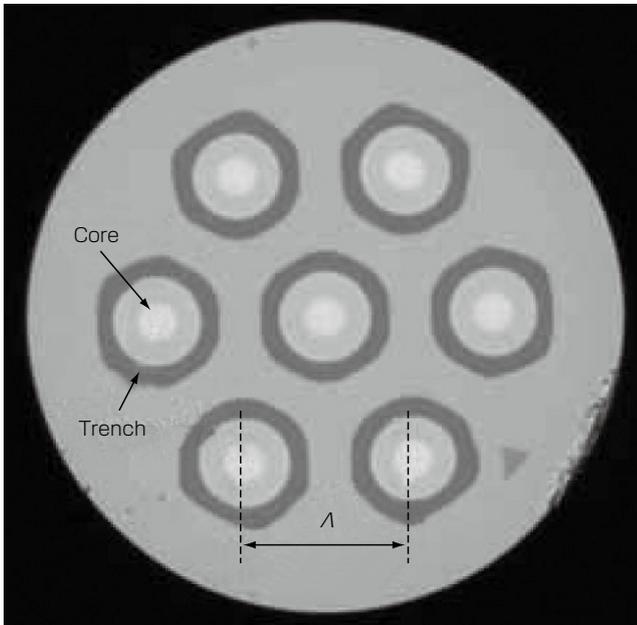


図9 トレンチ型マルチコアファイバの断面写真
Fig. 9. Cross section of the trench-assisted multi-core fiber.

3.2 マルチコアファイバの構造と要求特性

図8に空間多重伝送用マルチコアファイバの断面写真を示します。空間多重伝送用マルチコアファイバは、1本のファイバ中に、各々独立した信号を送信できるコアを複数個(図8は7コア)配置したファイバです。

空間多重伝送用マルチコアファイバでは、各コアは独立した信号(情報)を送信しますので、各コアの伝送容量を高めるためには、各コア間の信号の干渉や漏話(クロストーク)はできる限り低減する必要があります。一方、光ファイバあたりの伝送容量を高めるためには、ひとつひとつのコアの伝送容量を高めるとともに、コアの

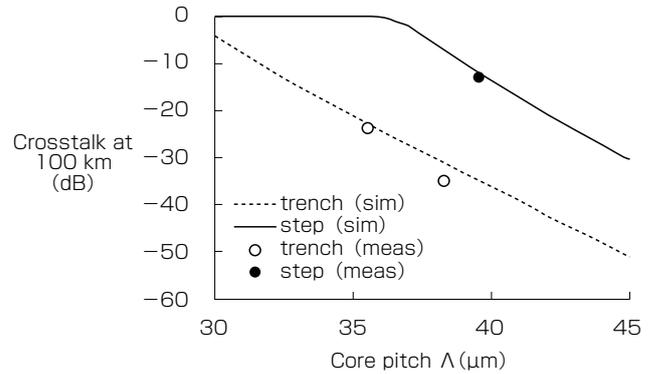


図10 コア間距離とクロストークの関係
Fig. 10. Relationship between core pitch and crosstalk.

密度(コア多重度)を高めることも効果的です。ほかにも、相互接続性や敷設容易性の観点から各コアのMFDや波長分散等の光学特性が概ね均質であることや、非線形現象による伝送品質劣化の回避の観点から各コアの実効コア断面積が大きいことも空間多重伝送用マルチコアファイバに望まれる特性です。

3.3 高密度コア配置

低クロストーク特性と高密度コア配置はマルチコアファイバ特有で、互いに相反する要求特性です。そのトレードオフを克服するためトレンチ構造を利用したマルチコアファイバを提案しました⁵⁾。各々のコアは図3と同様のトレンチ構造を持ち、隣接するコアの電界分布の重なりを抑えています。図9に試作したトレンチ型マルチコアファイバの断面写真を示します。コア配置密度の指標であるコアピッチに対して試作した各種光ファイバの1.55 μm における100 kmクロストークの測定結果を図10に示しました。トレンチ型はトレンチのないステップ型に比べ同一コアピッチでは20 dBクロストークが改善し、同じクロストークではコアピッチは16%低減できています。

また我々はトレンチ構造の採用によって、各コアの実効コア断面積を110 μm^2 まで拡大し、かつクロストークを低減することに成功しました⁷⁾。

3.4 コア数の向上

コア数の増加を最密構造配置で考えると、7コアの次は19コアとなります。クロストークを低いレベルに維持するため、コアピッチはあまり変えられず、直径は160 μm から240 μm に太くなり、光ファイバの機械的信頼性はかなり低下します。我々は直径200 μm 前後という条件下で、実効コア断面積×コア数の最大化をめざし、独自の設計を行いました。

製作した世界初の10コアファイバの断面図を図11に示します。実効コア断面積は116-125 μm^2 となっています。隣接する外側コア間のクロストークは-26 dB程度で、中央コアと外側コアのクロストークは-56 dBと安定に通信可能な非常に低い値を得ました⁸⁾。

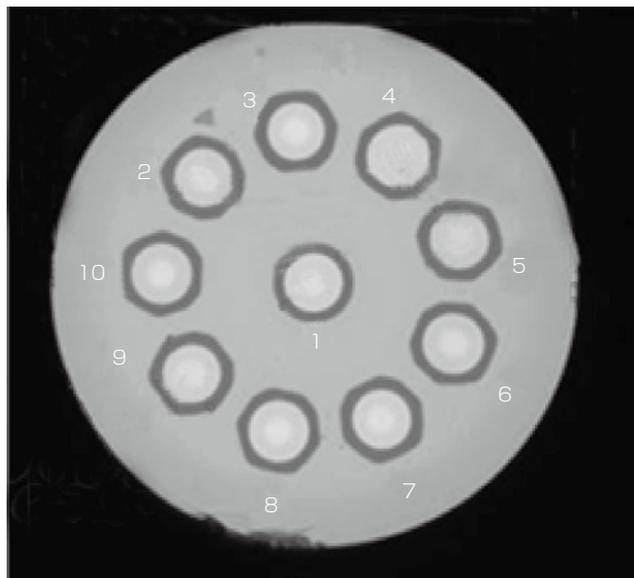


図11 10コアファイバ断面図
Fig. 11. Cross section of a 10-core fiber.

4. む す び

情報伝送に使われる光ファイバの中でも、最近注目を集めている低曲げ損失ファイバとマルチコアファイバについて紹介しました。

マルチコアファイバは将来の長距離伝送線路の一つとして有力です。当社では、伝播モードを数個利用するフェューモードファイバの研究開発も行っています。いずれも光の入出力や増幅器などの開発が課題であり、実用化には10年程度かかると言われています。アンテナを高くかかげ次世代光通信方式に有力な光ファイバの研究開発を続けてまいります。

2012年9月16日から20日まで、アムステルダムで開催されたECOC2012 (38th European Conference and Exhibition on Optical Communication) にて、フジクラ製のマルチコアファイバを使った伝送実験報告が、先端論

文(筆頭者はNTT、フジクラは共著)として採択¹⁰⁾されました。伝送容量は1.01 Pb/sと発表時点で世界最高記録でした。

参 考 文 献

- 1) 布目ほか:「低曲げ損失光ファイバ」, フジクラ技報No. 117, 2010
- 2) Kazuhide Nakajima, et al.: "Single-Mode Hole-Assisted Fiber with low bending loss characteristics," Proceedings 58 th IWCS, pp. 264-269, 2009
- 3) T. Morioka: "New generation optical infrastructure technologies: "EXAT initiative" towards 2020 and beyond," OECC 2009, FT4, 2009
- 4) K. Takenaga et al.: "An investigation on crosstalk in multi-core fibres by introducing random fluctuation along longitudinal direction," IEICE Trans. Commun. Vol. E94-B, No. 2, pp. 409-416 (2011).
- 5) K. Takenaga et al.: "Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fibre," OFC/NFOEC 2011, OWJ4 (2011).
- 6) M. Koshiha et al.: "Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle," IEICE Electronics Express, Vol. 6, No. 2, pp. 98-103 (2009).
- 7) K. Takenaga et al.: "A large effective area multi-core fibre with an optimized cladding thickness," ECOC2011, Mo.1. LeCervin.2 (2011).
- 8) Y. Sasaki et al.: "Large-Effective-Area Uncoupled 10-Core Fiber with Two-Pitch Layout" OFC/NFOEC 2012. OM2D. 4.
- 9) K. Saitoh et al.: "Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: application to photonics crystal fibers," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 38, No. 7, pp. 927-933 (2002).
- 10) H. Takara et al.: "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency," ECOC2012, Th3.C.1 (2012).