

# 空間多重用マルチコア光ファイバーの開発

武笠 和則・今村 勝徳・杉崎 隆一

## Developments of Multi-Core Fibers for Space Division Multiplexing Transmission

Kazunori MUKASA, Katsunori IMAMURA and Ryuichi SUGIZAKI

Multi-core fibers are transmission fibers, which have a large potential to become a breakthrough for next-generation high-capacity transmissions. Two types of multi-core fibers, namely holey multi-core fibers and solid multi-core fibers, have been proposed. We compared the performances of them, and found out the holey types have better performances in terms of low non-linearity and higher density space division multiplexing (SDM). Solid multi-core fibers, on the other hand, have an advantage for the aspect of matured fabrication technologies. In addition, solid types have an interesting property worth to note: A cross-talk is not degraded by enlarging effective core area ( $A_{\text{eff}}$ ), if we keep macro-bending losses constant. We will introduce recent R&D results on multi-core fibers, including SMF type and other types of solid multi-core fibers, and holey multi-core fibers for ultra wide-band transmissions.

**Key words:** multi-core fibers, space division multiplexing, holey fibers, solid fibers

インターネットトラフィックが年々大幅に増大する中、伝送特性に大きな影響を与える伝送用ファイバーにも革新が求められてきている。ファイバー断面内に複数のコアを有するマルチコアファイバーは、空間多重伝送によるさらなる超大容量伝送を実現する新たな光ファイバーとして注目を集めている。構造としては、従来のソリッド型ファイバーだけでなく、空孔構造（ホーリーファイバー/フォトリソニック結晶ファイバー）型も提案されている<sup>1,2)</sup>。マルチコアファイバーの設計では、分散、有効コア断面積 ( $A_{\text{eff}}$ )、曲げ損失、カットオフ波長 ( $\lambda_c$ ) 等の従来の要素に加え、コア間の干渉（クロストーク）を考慮しなければならない。本稿ではまず、ソリッド型とホーリー型のマルチコアファイバーを、 $A_{\text{eff}}$  拡大とコア密度拡大の観点から比較する<sup>3)</sup>。その後、両者に関する最近の研究結果を報告する。

### 1. ソリッド型とホーリー型のマルチコアファイバーの特性比較

マルチコアファイバーの特性としては、曲げ損失や一定  $\lambda_c$  での  $A_{\text{eff}}$  拡大、単位面積のコア数（空間多重度）などが考えられる ( $A_{\text{eff}}$  を拡大すると、コアのパワー密度が低減され、結果として非線形現象による波形歪みを抑制する

ことが可能となる)。これらについて、100 km 伝送後のクロストークが -30 dB となる計算値を図 1 に示す<sup>3)</sup>。同じ  $\lambda_c$  では、ホーリー型のほうが大  $A_{\text{eff}}$  と小コアピッチ（すなわち高密度なコア配置）を実現できることがわかる。一方、ソリッド型は、VAD や MCVD 法などの成熟した従来製法が適用可能というメリットがある。さらに、ソリッド型では、 $\lambda_c$  によらずコアピッチが一定という特性が得られている。そこで、ソリッド型マルチコアファイバーに関して、 $A_{\text{eff}}$  と曲げ損失およびクロストークを 100 km で -30 dB の一定値に保つのに必要なコアピッチの関係を詳細に計算した。その結果、曲げ損失の値を一定とすれば、 $A_{\text{eff}}$  を拡大してもコアピッチはほぼ一定というユニークな特性を有していることがわかった。

### 2. ソリッド型マルチコアファイバーの研究開発

続いて、ソリッド型マルチコアファイバーの最近の研究動向を述べる。

#### 2.1 SMF 型ソリッドファイバーの開発

SMF は、 $80 \mu\text{m}^2$  程度の  $A_{\text{eff}}$  を有するコアを直径  $125 \mu\text{m}$  の光ファイバー断面中に 1 つ配置した、現在最も広く用いられている光ファイバーである。この SMF 型のコアを 1 つ

古河電気工業(株) (〒290-8555 市原市八幡海岸通 6) E-mail: mukasa@ch.furukawa.co.jp

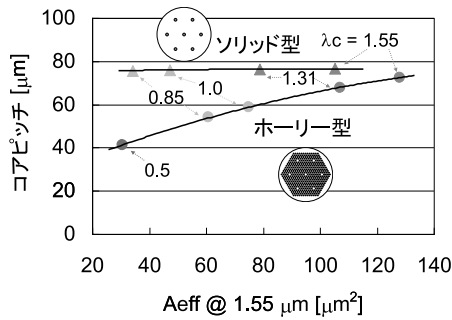


図1 ソリッド型とホーリー型のマルチコアファイバー特性比較.

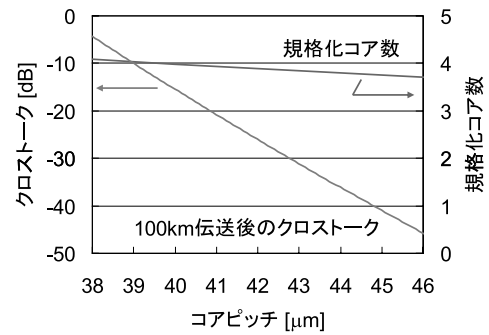


図2 マルチコアファイバーのシミュレーション特性.

のファイバー断面中に7つ配置しようとするファイバー径が大きくなってしまいが、わずかに実効屈折率の異なるコアを隣同士に配置するとクロストークが劇的に抑制できることが報告されており<sup>1)</sup>、実際に試作も行われている<sup>4)</sup>。異種コアを用いることで高密度なコア配置が可能となるが、実際のファイバー開発では、伝送損失やマイクロ曲げ損失などの特性を考慮に入れる必要がある。われわれは、これらの特性を考慮した SMF 型7コアファイバーの最小ファイバー径に関して検討を行っている<sup>4)</sup>。さらに、実用においては、プロファイルの長手変動やケーブルでの曲げ/ひねりなども加えられるため、これらも考慮に入れて最適化設計を行うべきとの報告もあり<sup>5)</sup>、最小コアピッチや最小ファイバー径の設定には、さらなる研究が必要と思われる。

## 2.2 その他のソリッド型マルチコアファイバー

マルチコアファイバーとしては、ファイバー径が 125  $\mu\text{m}$  より大きくなることを前提に信頼性の議論等が進められているが<sup>4)</sup>、125  $\mu\text{m}$  径で実現できれば、現状のシステムへの適用が容易であることは間違いない。そこで、 $A_{\text{eff}}$  は通常 SMF より小さくなってしまふものの、ファイバー径 125  $\mu\text{m}$  の7コアファイバーが提案されている<sup>6)</sup>。一方、われわれは、SMF 型より  $A_{\text{eff}}$  を拡大したマルチコアファイバーの開発を行っている<sup>3,7)</sup>。シミュレーションの結果をもとに、 $\lambda_c$  をシフトさせることで、曲げ損失を一定のまま  $A_{\text{eff}}$  を拡大し、かつコア径の異なる3種類の異種コア (A, B, C) を用いることで、クロストークの増大を抑えた<sup>1)</sup>。さらに、 $A_{\text{eff}}$  拡大に伴うマイクロ曲げ損失の増大を抑えるため、外側コアに対するクラッド厚を従来の SMF と同程度とした。図2の計算結果をもとにコアピッチを 46  $\mu\text{m}$  とし、実際に試作を行った (図3, 表1)。信頼性の議論は必要だが、クラッド厚の最適化により、マイクロバンドの影響が低減され、比較的低損失な特性が得られている。また、3.5 km 伝搬後のクロストーク特性は -38 dB で

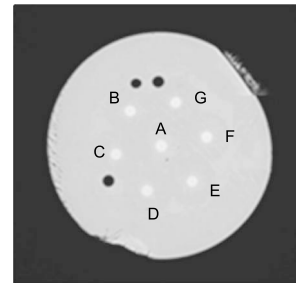


図3 マルチコアファイバーの試作断面図.

表1 マルチコアファイバーの光学特性 (1550 nm).

Core No.	各コアの特性			
	A	B	C	
損失	dB/km	0.213	0.237	0.237
分散	ps/nm/km	19.6	19.4	19.0
分散 Slope	ps/nm <sup>2</sup> /km	0.062	0.062	0.061
$A_{\text{eff}}$	$\mu\text{m}^2$	110	107	99
$\lambda_c$	nm	1491	1470	1408
曲げ損失*	dB/m	3.0	3.9	8.1

\*曲げ損失は直径 20 mm での値.

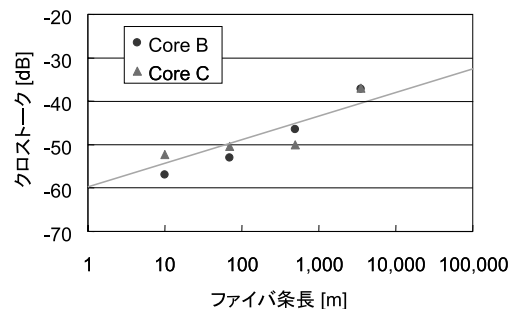


図4 クロストークの測定結果.

あり (図4)、100 km 伝送後では約 -33 dB と予測される。これは長距離伝送が十分可能なクロストーク特性である。

## 3. マルチコアホーリーファイバーの開発

マルチコアホーリーファイバーに関しても開発が進んでいる<sup>2)</sup>。7コアホーリーファイバーの構造を図5に示す。われわれはこの構造をもとに、超広帯域用マルチコアファイ

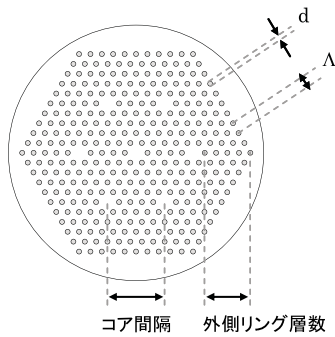


図5 マルチコアホーリーファイバーの構造。

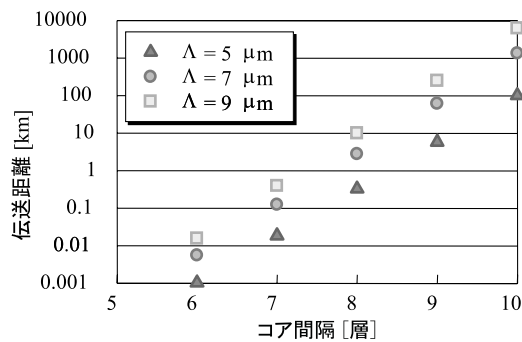


図6 マルチコアホーリーファイバーのコア間隔と伝送距離の関係。

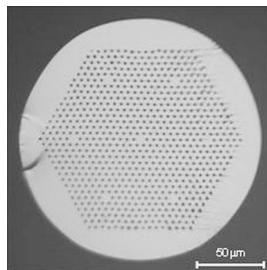


図7 試作ファイバーの断面構造。

バーの開発を行った。まずコア間干渉を見積もるため、モード結合理論により、結合長（コア内のパワーが隣のコアに100%移る条長）を計算した。そして、空孔径 ( $d$ ) と空孔間隔 ( $\Lambda$ ) の比 ( $d/\Lambda$ ) を endlessly single mode (ESM) 特性が得られる 0.43 に固定し、伝搬距離は結合長の 1/100 としてプロットした (図6)。これより、コア間隔 (コア間の空孔層数) を9層以上にするこゝで、伝送距離が100 km 以上となることがわかった。また、外側コアの閉じ込め損失を 0.01 dB/km 以下にするために、外側コアの外層に5層の空孔層を設け、それぞれのコアが 500 nm~1700 nm にわたる伝送を実現できるように、各コアの曲げ損失等を最適化した。設計結果を検証するために、マルチコアホーリーファイバーの試作を行った。所望の構造が作製でき (図7)、中心コア (コアA) と外側コアの1つ (コアB) の

表2 試作ファイバーの光学特性 (1550 nm)。

コア	分散	分散スロープ	$A_{\text{eff}}$
	ps/nm/km	ps/nm <sup>2</sup> /km	$\mu\text{m}^2$
計算結果	40.0	0.071	35.5
コアA	41.2	0.072	38.7
コアB	40.2	0.071	41.8

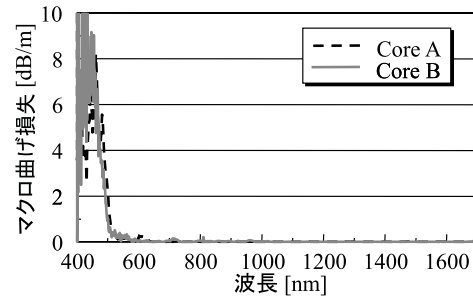


図8 コアごとのマクロバンド損失。

光学特性は、計算結果と一致した結果が得られている (表2)。設計どおりに、コアA、Bともに閉じ込め損失の影響はなく、曲げ損失も 500 nm まで低い値であった (図8)。ESM 特性と広帯域低曲げ損失特性により、超広帯域伝送が可能と考えられる。サンプル 1 km でのクロストークは -60 dB 以下であり、100 km では -35 dB 以下が期待できる。この特性は計算と一致しており、十分に低い値である。

## 文 献

- 1) M. Koshiba, K. Saitoh and Y. Kokubun: "Heterogeneous multi-core fibers: Proposal and design principle," *IEICE Electron. Exp.*, **6**, No.2 (2009) 98-103.
- 2) K. Imamura, K. Mukasa, Y. Mimura and T. Yagi: "Multi-core holey fibers for the long-distance (>100km) ultra large capacity transmission," *The Optical Fiber Communion Conference and Exposition*, OTuC3 (San Diego, 2009).
- 3) K. Imamura, K. Mukasa and T. Yagi: "Investigation on multi-core fibers with large  $A_{\text{eff}}$  and low micro bending loss," *The Optical Fiber Communion Conference and Exposition*, OWK6 (San Diego, 2010).
- 4) K. Imamura, K. Mukasa and T. Yagi: "Effective space division multiplexing by multi-core fibers," *ECOC 2010*, P1.09 (Torino, 2010).
- 5) M. Koshiba: "Recent progress in multi-core fibers for ultralarge-capacity transmission," *OECC 2010*, 6B1-3 (Sapporo, 2010).
- 6) K. Takenaga, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshiba and K. Takenaga: "Reduction of crosstalk by quasi-homogeneous solid multi-core fiber," *The Optical Fiber Communion Conference and Exposition*, OWK7 (San Diego, 2010).
- 7) K. Imamura, K. Mukasa and T. Yagi: "Design optimization of large  $A_{\text{eff}}$  multi-core fibers," *OECC 2010*, 7C2-2 (Sapporo, 2010).

(2011年1月11日受理)