

# マルチコア光ファイバーの種類とその設計指針

小柴正則

## Kinds of Multi-Core Fibers and the Design Guidance

Masanori KOSHIBA

One of the promising candidates to expand the transmission capacity is to use a multi-core fiber (MCF). The MCF could be classified into uncoupled MCF for space-division multiplexing and coupled MCF for mode-division multiplexing. Recently, as for the uncoupled MCF, various MCFs so-called homogeneous MCF, heterogeneous MCF, and quasi-homogeneous MCF have been fabricated. In this paper, kinds of MCFs and the design guidance are briefly reviewed.

**Key words:** multi-core fiber, space-division multiplexing, mode-division multiplexing

わが国の幹線系の光通信ネットワークは、1987年に1.6 Gbps、2007年に1.6 Tbpsと、過去20年間に1000倍の大容量化を実現してきた。新世代ネットワークが普及する今後20年間には、超高精細動画や三次元画像を含む超臨場感通信の普及に伴い、ペタビットの時代を迎えることになる。これに対応できるペタビット級の光通信ネットワークを構築するには、伝送容量をさらに1000倍増強する必要があるが、光増幅器の帯域、光ファイバーへの入力光パワーの観点から、1本の光ファイバーで伝送できる容量は急速に限界に近づきつつある<sup>1)</sup>。これまでの光通信ネットワークは時分割多重 (TDM) と波長分割多重 (WDM) とでその伝送容量を拡大してきたが、多重数の増大とともに入力光パワーも増大し、非線形効果による信号劣化やファイバーフェーズ現象による伝送路の熱損傷が問題になっている。現在のシングルコア光ファイバーは、約20年以上前にその基本設計パラメーターが決められたものであり、ファイバーフェーズ現象を引き起こすような入力光パワーを想定したものではなかったため、これまでの光通信ネットワークの伝送容量の限界は、変復調方式や中継器の雑音特性の改善などを考慮しても、たかだか100 Tbpsと予想される<sup>1)</sup>。

こうした状況のもとで、ペタビット級、さらにはエクサビット級の光通信ネットワークの実現を目指し、TDMや

WDMに加えて、空間分割多重 (SDM)、モード分割多重 (MDM) といった新たな多重化技術に対応するための革新的光ファイバーのひとつとして、マルチコアファイバー (MCF) に関する研究が活発化している<sup>2)</sup>。こうしたMCFは、SDM向けの非結合型MCF<sup>3)</sup>とMDM向けの結合型MCF<sup>4)</sup>とに分類される。特に非結合型MCFについては、最近、均一 (homogeneous) MCF<sup>5,6)</sup>、不均一 (heterogeneous) MCF<sup>7-9)</sup>、準均一 (quasi-homogeneous) MCF<sup>10,11)</sup>とよばれるさまざまなMCFの試作が相次いでおり、開発競争が激化している。均一MCFはすべて同一のコアを用いるものであり、不均一MCFは異種コア間の結合が同一コア間の結合に比べてきわめて小さくなることを積極的に利用してコア密度を高めたものである。また、準均一MCFでは、作製上不可避免的に生じる比屈折率差やコア径の不規則な変動を利用している。ここでは、非結合型および結合型MCFの種類を紹介するとともに、これらMCFの設計指針について述べる。

### 1. 非結合型マルチコアファイバー

多数のシングルモードコアを1本のファイバーに収容し、個々のコアを伝送チャネルに1対1に対応させるためには、コア間の結合をできるだけ小さくする必要がある。ここで、通常のシングルモードファイバー (SMF) と同程

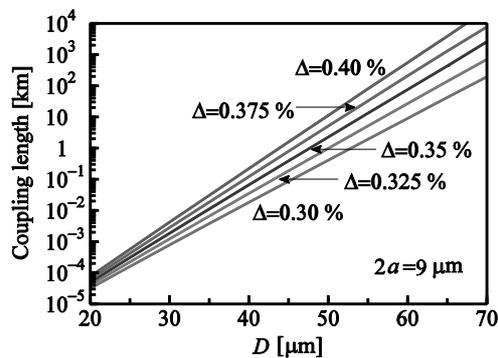


図1 低比屈折率差同一コア間の結合長のコア間隔依存性.

度の比屈折率差のコアを用いて非結合型 MCF を構成することを考え、コア径  $d=2a$  ( $a$  はコア半径) を  $9.0 \mu\text{m}$ 、クラッドの屈折率  $n_2$  を  $1.45$ 、動作波長を  $1.55 \mu\text{m}$  とする。コアの屈折率  $n_1$  は、個々のコアをシングルモード伝送させるために、比屈折率差  $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / (2n_1^2)$  が  $0.41\%$  以下となる値に設定する。

図1は、比屈折率差を  $0.30\sim 0.40\%$  とした低比屈折率差同一コアについて、結合長とコア間隔  $D$  との関係を示したものであり<sup>2)</sup>、計算には有限要素法<sup>12)</sup>を用いている。伝送距離を  $100 \text{ km}$  とすると、 $100 \text{ km}$  伝送後の結合効率は、結合長が  $5000 \text{ km}$ 、 $10000 \text{ km}$  の場合それぞれ約  $-30 \text{ dB}$ 、 $-36 \text{ dB}$  となるので、コア間クロストークが  $-30 \text{ dB}$  すなわち  $1000$  分の  $1$  以下となるように、ここでは結合長の目標値を  $5000 \text{ km}$  とする。この図からわかるように、結合長を  $5000 \text{ km}$  以上とするには、比屈折率差を  $0.375\%$  以上としても、 $70 \mu\text{m}$  程度のコア間隔が必要になる。したがって、標準的なクラッド径  $125 \mu\text{m}$  の空間には、たかだか  $3\sim 4$  個程度のコアしか収容できないことになる<sup>13,14)</sup>。

### 1.1 均一マルチコアファイバー

最近、クラッド径を  $180 \mu\text{m}$  とした空孔型の均一7コア MCF が試作された<sup>5)</sup>。空孔径は空孔ピッチの  $0.43$  倍に設計されており、超広帯域シングルモード伝送が保証されている。空孔ピッチを  $5 \mu\text{m}$ 、コア間隔をその  $10$  倍程度にすると、波長  $1.55 \mu\text{m}$  で  $100 \text{ km}$  伝送が可能であること、また、閉じ込め損失を  $0.01 \text{ dB/km}$  以下とするには外側コアの周囲に空孔リングを  $5$  層以上積めばよいことが、シミュレーションによって明らかにされている。試作された MCF の実効断面積は  $40 \mu\text{m}^2$  程度になっており、クロストークはファイバー長  $1 \text{ km}$  で  $-60 \text{ dB}$  以下である。

こうした空孔型のみならず、ソリッド (充実) 型の均一7コア MCF も試作されている<sup>6)</sup>。この MCF のコア径は  $8 \mu\text{m}$ 、比屈折率差は  $0.40\%$  程度、コア間隔は  $38 \mu\text{m}$  であり、クラッド径は  $130 \mu\text{m}$  である。図1に示した同一コア

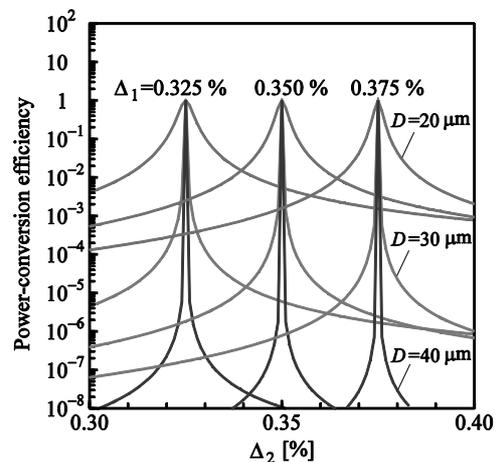


図2 異種コア間の結合効率の比屈折率差変動依存性.

間の結合長のコア間隔依存性のデータから判断すると、長距離伝送は不可能と考えられるが、クロストークの測定値は波長  $1.49 \mu\text{m}$ 、ファイバー長  $11.3 \text{ km}$  で約  $-24 \text{ dB}$  になっている。これは、MCF をボビンに巻いた状態 (曲げ半径  $140 \text{ mm}$ ) でクロストークを測定している<sup>6)</sup> ため、ファイバーの曲げやねじれによってコアの屈折率が変動し、コア間の同一性が失われることによるものと考えられる。

### 1.2 不均一マルチコアファイバー

前述したように、波長  $1.55 \mu\text{m}$  で  $100 \text{ km}$  伝送後のクロストークを  $-30 \text{ dB}$  以下、クラッド径を標準寸法の  $125 \mu\text{m}$  とし、通常の SMF と同程度の比屈折率差 ( $\Delta = 0.3\sim 0.4\%$ ) を想定すると、1芯に収容できるコア数は  $3\sim 4$  個程度にすぎない。ところが、異種コア間の結合が同一コア間の結合に比べてきわめて小さくなることを積極的に利用すると、コア密度を格段に高めることができる<sup>2)</sup>。

いま、比屈折率差が互いに異なる2つのコア1, 2を考え、コア1の比屈折率差を  $\Delta_1 = 0.325\%$ 、 $0.350\%$ 、 $0.375\%$  のいずれかに固定する。動作波長を  $1.55 \mu\text{m}$  とし、有限要素法によって求められた異種コア間の結合効率とコア2の比屈折率差  $\Delta_2$  との関係を図2に示す<sup>2)</sup>。コア間隔  $D$  が  $30 \mu\text{m}$  の場合、2つのコアの比屈折率差が互いにわずかに  $0.005\%$  異なると、結合効率は  $1000$  分の  $1$  から  $10000$  分の  $1$  以下になっている。コア間隔が  $40 \mu\text{m}$  になると、結合効率はさらに小さくなる。したがって、異種コア間のクロストークが  $-30 \text{ dB}$  以下となるような比屈折率差を3種類選択し、これらのコアをコア間隔  $40 \mu\text{m}$  (同一コアの間隔はその  $\sqrt{3}$  倍で  $70 \mu\text{m}$ ) で三角配置すると、クラッド径が標準寸法の  $125 \mu\text{m}$  の場合、図3に示すように、7個のコアを収納できることになる<sup>2)</sup>。

以上の議論では、コア内の屈折率は一定で、コア径もすべて同じとし、比屈折率差のみを変えたが、コア内の屈折

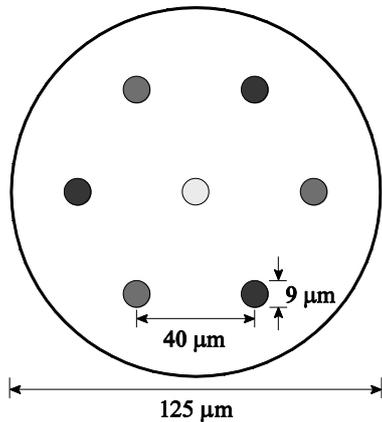


図3 不均一7コアMCF.

率は必ずしも一定である必要はなく、また、大きさが異なるコアを用いることも、もちろん可能である。最近、コア径  $10.2\ \mu\text{m}$ 、 $10.4\ \mu\text{m}$ 、 $10.6\ \mu\text{m}$  の3種類のコアをコア間隔  $40\ \mu\text{m}$  で三角配置した不均一7コアMCFが試作された<sup>7-9)</sup>。コアの比屈折率差は通常のSMFと同程度の0.31%である。カットオフ波長は  $1.53\ \mu\text{m}$  以下であり、波長  $1.55\ \mu\text{m}$  で  $100\ \mu\text{m}^2$  を超える大きな実効断面積が実現されている。最初に試作されたクラッド径  $141\ \mu\text{m}$ 、 $215\ \mu\text{m}$  の不均一MCFのクロストークは、いずれのクラッド径のMCFも  $-20\ \text{dB}$  程度と大きかった<sup>7)</sup> が、その後、ファイバー長  $3.5\ \text{km}$  で  $-38\ \text{dB}$  程度まで低減化されている<sup>8)</sup>。なお、クラッド径はできるだけ小さいほうが望ましいが、クラッド径が小さいとマイクロバンドによる損失が大きくなる。最近、MCFの空間多重度向上の観点から、最適クラッド径、最適クラッド厚、最適コアピッチに関する検討が、ファイバー破断に対する信頼設計を含めて行われている<sup>9)</sup>。

### 1.3 準均一マルチコアファイバー

実際に作製されるMCFでは、コア間で、コアの屈折率やコア径にばらつきがある。すでに述べたように、同一コアを用いた均一MCFのコア密度を、異種コアを用いた不均一MCF並みに高めることはできないが、コア間のばらつきを考慮すると、図2の結果からも予想されるように、

均一MCFのコア密度をこれまでよりも高めることができる。また、複数のコアの光学特性が実質的に等しければコアの違いを意識することなく設計でき、不均一MCFに比べて有利であると考えられる。

最近、こうしたコア径の製造上のばらつきに着目し、光学特性が実質的に等しい7個のコアからなる準均一MCFが試作された<sup>10,11)</sup>。その構造パラメーターと光学特性を表1に示す<sup>11)</sup>。ケーブルカットオフ波長は、いずれのファイバーもほぼ  $1.26\ \mu\text{m}$  以下になっている。ファイバーA、Bのコアの比屈折率差は0.7%と比較的大きいため、モードフィールド径と実効断面積はコアの比屈折率差が0.4%のファイバーC、Dに比べて小さくなっている。

これらの準均一MCFを対象として、クロストークのファイバー長依存性が測定され、ファイバー長とともにクロストークが劣化することが初めて明らかにされた<sup>10,11)</sup>。また、クロストークの理論的評価にパワー結合理論が初めて導入され、実験結果をよく説明できることも明らかになった<sup>10,11)</sup>。なお、波長  $1.55\ \mu\text{m}$  におけるクロストークの測定値は、ファイバーAではファイバー長  $2.5\ \text{km}$  で  $-63.5\ \text{dB}$ 、ファイバーBではファイバー長  $2\ \text{km}$  で  $-36.5\ \text{dB}$ 、ファイバーCではファイバー長  $5\ \text{km}$  で  $-27.3\ \text{dB}$ 、ファイバーDではファイバー長  $3\ \text{km}$  で  $-12.5\ \text{dB}$  である(クロストークのファイバー長依存性については、波長  $1.31\ \mu\text{m}$  の場合を含めて文献<sup>11)</sup> 参照)。ファイバーA、Bのコアの比屈折率差がファイバーC、Dに比べて大きくなっているため、コア間の干渉が小さくなり、クロストークも小さくなる。また、標準のクラッド径  $125\ \mu\text{m}$  に近い構造のファイバーB、Dのコア間距離がファイバーA、Cに比べて小さくなっているため、当然のことながら、ファイバーB、DのクロストークはファイバーA、Cに比べて大きくなる。

## 2. 結合型マルチコアファイバー

非結合型MCFでは、クロストークをあるレベル以下に

表1 準均一MCFの構造パラメーターと光学特性.

ファイバー (準均一MCF)	A	B	C	D
比屈折率差 (%)	0.7	0.7	0.4	0.4
コア径 ( $\mu\text{m}$ )	6.1	5.3	7.9	7.2
コア間隔 ( $\mu\text{m}$ )	40.4	35.4	39.2	34.9
クラッド径 ( $\mu\text{m}$ )	142.4	125.9	146.8	124.8
ケーブルカットオフ波長 ( $\mu\text{m}$ )	1.27	1.12	1.26	1.13
モードフィールド径 ( $\mu\text{m}$ ) @ $1.31\ \mu\text{m}$	6.6	6.3	8.6	8.2
@ $1.55\ \mu\text{m}$	7.4	7.3	9.6	9.4
実効断面積 ( $\mu\text{m}^2$ ) @ $1.31\ \mu\text{m}$	34.5	31.1	58.6	52.3
@ $1.55\ \mu\text{m}$	42.6	40.1	71.6	66.3

保つ必要があるため、空間多重度には限界がある。最近、コア間隔をより狭めてコア密度を高めることが可能な結合型 MCF が提案された<sup>3)</sup>。結合型 MCF では、同一のコアを密に配置することによってコア間結合をできるだけ大きくし、個々の結合モード（スーパーモード）を伝送チャンネルに 1 対 1 に対応させるので、伝送容量をコアの数だけ増大させることができる。ただし、結合するコアの数が多すぎると、結合モード間の伝搬定数差が小さくなってモード変換が起こりやすくなるので、コアとクラッドの比屈折率差を大きくするとともに、結合するコア数をあまり多くしない工夫が必要になる。例えば、コアとクラッドの比屈折率差を 1.1%，コア径を 5  $\mu\text{m}$  とすると、有限要素法による解析結果から、最適な結合コア数は 4~5 個程度になり、伝送チャンネル数も 4~5 個程度になる<sup>3)</sup>。

ところで、結合型 MCF を用いた MDM では、個々の結合モードを伝送チャンネルに 1 対 1 に対応させるためのモード合分波器が必要になり、そのひとつとして平面回路型モード合分波器が提案されている<sup>3)</sup>。こうしたモード合分波器との接続には、光ファイバーの断面形状を円形にする必要がなければ、コアを一次元配列したりボン状ファイバーが適している<sup>3)</sup>。また、従来の円形断面ファイバーを前提とした場合、ファイバー内にできるだけ多くのコアを収容するには、結合コア数を 4~5 個に制限し、複数の結合コアを互いに非結合となるように配置すればよい。すなわち、結合型 MCF と非結合型 MCF とのハイブリッド構成になる<sup>3)</sup>。なお、モード合分波器として、ファイバー型のものも提案されている<sup>15)</sup>。

SDM 向けの非結合型 MCF と MDM 向けの結合型 MCF の種類を紹介するとともに、こうした MCF を設計する基本的な考え方を述べた。特に非結合型 MCF については、最近、均一 MCF、不均一 MCF、準均一 MCF といったさまざまな 7 コア MCF が相次いで試作されており、開発競争が激化している。非結合型 MCF の最も重要な課題はクロストークの低減であり、現在、その暫定値はファイバー長 100 km で -30 dB 以下とされている。コア数を現行の 7 からさらに増やして空間多重度を高めるためには、最適構造の探索を進めるとともに、コアの周囲に空孔<sup>16)</sup> やトレンチ<sup>17)</sup> を付加するといったことも検討する必要がある。

最近、ファイバーの曲げやねじれが非結合型 MCF のクロストークに大きな影響を与えることが、理論的、実験的に明らかにされた<sup>18-21)</sup>。この場合の理論的な検討には、モード結合理論が用いられており、今後、パワー結合理論も含めて、非結合型 MCF のクロストーク解析技術の完成

度を高めることが望まれる。また、これまでマルチモードファイバーを用いた MDM は困難とされていたが、最近、長さ 10 km の 2 モードファイバーによる MDM 伝送に関する世界初の実験結果が報告された<sup>22)</sup>。MCF に限らず、シングルコアファイバーを含めて、SDM あるいは MDM 向けの革新的光ファイバーに関する研究開発動向には、ここの当分、目が離せない。

## 文 献

- 1) T. Morioka: "New generation optical infrastructure technologies: "EXAT initiative" towards 2020 and beyond," *Proceedings of OptoElectronics and Communications Conference (OECC)*, FT-4 (2009).
- 2) M. Koshiba: "Recent progress in multi-core fibers for ultralarge-capacity transmission," *Proceedings of OptoElectronics and Communications Conference (OECC)*, 6B1-3 (2010).
- 3) M. Koshiba, K. Saitoh and Y. Kokubun: "Heterogeneous multi-core fiber: Proposal and design principle," *IEICE Electron. Express*, **6** (2009) 98-103.
- 4) Y. Kokubun and M. Koshiba: "Novel multi-core fibers for mode division multiplexing: Proposal and design principle," *IEICE Electron. Express*, **6** (2009) 522-528.
- 5) K. Imamura, K. Mukasa, Y. Mimura and T. Yagi: "Multi-core holey fibers for the long-distance (>100 km) ultra large capacity transmission," *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, OTuC3 (2009).
- 6) B. Zhu, T. F. Taunay, M. F. Yan, J. M. Fini, M. Fishteyn, E. M. Monberg and F. V. Dimarcello: "Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network," *Opt. Express*, **18** (2010) 11117-11122.
- 7) K. Imamura, K. Mukasa and T. Yagi: "Investigation on multi-core fibers with large Aeff and low micro bending loss," *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, OWK6 (2010).
- 8) K. Imamura, K. Mukasa and T. Yagi: "Design optimization of large Aeff multi-core fibers," *Proceedings of OptoElectronics and Communications Conference (OECC)*, 7C2-2 (2010).
- 9) K. Imamura, K. Mukasa and T. Yagi: "Effective space division multiplexing by multi-core fibers" *Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC)* P1.09 (2010).
- 10) K. Takenaga, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh and M. Koshiba: "Reduction of crosstalk by quasi-homogeneous solid multi-core fiber," *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)* OWK7 (2010).
- 11) K. Takenaga, Y. Arakawa, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh and M. Koshiba: "An investigation on crosstalk in multi-core fibers by introducing random fluctuation along longitudinal direction," *IEICE Trans. Commun.*, **E94-B** (2011) 409-416.
- 12) K. Saitoh and M. Koshiba: "Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: Application to photonic crystal fibers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **38** (2002) 927-933.
- 13) G. Le Naone, D. Boscher, P. Grosso, J. C. Bizeul and C. Botton: "Ultra high density cables using a new concept of bunched multicore monomode fibers: A key for the future FTTH networks," *International Wire & Cable Symposium Proceedings*

(1994) pp. 203–210.

- 14) R. R. Thomson, H. T. Bookey, N. D. Psaila, A. Fender, S. Campbell, W. N. MacPherson, J. S. Barton, D. T. Reid and A. K. Kar: “Ultrafast-laser inscription of a three dimensional fan-out device for multicore fiber coupling applications,” *Opt. Express*, **15** (2007) 11691–11697.
- 15) F. Saitoh, K. Saitoh and M. Koshihara: “A design method of a fiber-based mode multi/demultiplexer for mode-division multiplexing,” *Opt. Express*, **18** (2010) 4709–4716.
- 16) K. Saitoh, T. Matsui, T. Sakamoto, M. Koshihara and S. Tomita: “Multi-core hole-assisted fibers for high core density space division multiplexing,” *Proceedings of OptoElectronics and Communications Conference (OECC) 7C2-1* (2010).
- 17) K. Takenaga, Y. Arakawa, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh and M. Koshihara: “Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber,” *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, OWJ4 (2011).
- 18) J. M. Fini, T. Taunay, B. Zhu and M. Yan: “Low cross-talk design of multi-core fibers,” *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science (CLEO/QELS) CtuAA3* (2010).
- 19) J. M. Fini, B. Zhu, T. F. Taunay and M. F. Yan: “Bends in the design of low crosstalk multicore fiber communications links,” *Proceedings of OptoElectronics and Communications Conference (OECC) 7C2-3* (2010).
- 20) J. M. Fini, B. Zhu, T. F. Taunay and M. F. Yan: “Statistics of crosstalk in bent multicore fibers,” *Opt. Express*, **18** (2010) 15122–15129.
- 21) T. Hayashi, T. Nagashima, D. Shimakawa, T. Sasaki and E. Sasaoka: “Crosstalk variation of multi-core fibre due to fibre bend,” *Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC) We.8.F.6* (2010).
- 22) N. Hanzawa, K. Saitoh, T. Sakamoto, T. Matsui, S. Tomita and M. Koshihara: “Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fiber with mode-coupler,” *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, OWA4 (2011).

(2011 年 1 月 6 日受理)