

空間分割多重化された大伝送容量の光ファイバ

株式会社フジクラ 先端技術総合研究所
光通信研究部 主席研究員

北村 隆之

1. はじめに

日々の生活で意識することはほとんどないかもしれないが、光ファイバは情報社会のインフラとして我々の生活を支えている。インターネットの商用利用を端緒に、携帯電話、スマートフォン、音楽・映像配信が当たり前となり、通信量は30年で1000倍にもなった。またIoTの進展、5G通信の開始も目前に迫っている。光ファイバの年間生産量は5億km（地球と太陽の間を1往復半以上）を超え、さらに増大し続けている。光ファイバなくしては、世界の通信量の爆発的な増加は実現不可能だったし、今後も支え続けるだろう。光ファイバ技術の歴史の詳細については、最近非常に優れた総説[1]が発表されたので、ご興味のある方は参考にさせていただきたい。

光通信システムは、1つのモードの光のみを伝搬する単一モード光ファイバ（Single-Mode Fiber）を用いて主に構築されている。基本的には光のオンオフにデジタル化された情報を光ファイバを通じてやり取りするわけだが、複数の情報に時間差をつけて伝送する時間分割多重（Time Division Multiplexing）、波長ごとに異なる情報を伝送させる波長分割多重（Wavelength Division Multiplexing）といった通信方式により、1本の光ファイバの利用効率を高めてきた。さらに単純なオンオフ変調から位相変調方式の採用や、デジタルコヒーレントによる電気信号処理でさらに伝送容量を拡大し、2016年には10Tbit/sの伝送容量が商用化された。しかし、光ファイバに投入可能な光パワーの限界などから、既存SMFの1本当たりの伝送容量は100Tbit/s程度が限界であるといわれている。そこで、空間的な利用効率を高める空間分割多重（Spatial Division Multiplexing）技術が進展している。

2. 空間分割多重技術と弊社の取り組み

図1に様々な光ファイバ断面と屈折率分布の模式図を示す。通信用のSMFは、直径125 μm のシリカガラス製のクラッド内に、外径9 μm 程度で屈折率が0.3%程度高いコアが中心に1つ配置され、コア内を伝搬するモードは1つ（= Single Mode）、つまり信号伝送路は1つだけなので、断面積比でわずか0.5%程度しか伝送に利用できない。これに対し、光ファイバのSDM技術として、1つのコア内に複数のモードを伝搬させる数モードファイバ（Few-Mode Fiber）と、同一クラッド内に複数のコアを

配置したマルチコアファイバ（Multi-Core Fiber）が提案されている。FMFではモードごとに異なる情報を伝送し、MCFではそれぞれのコアに異なる情報を伝送すれば、空間的に多重化（高密度化）できる。

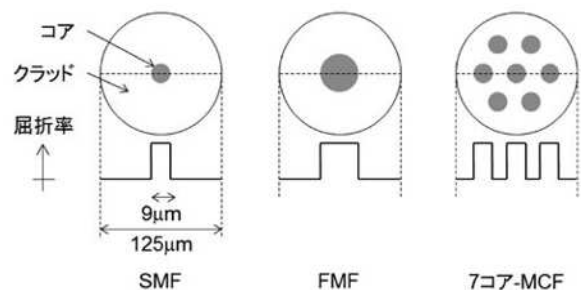


図1 種々の光ファイバ断面と屈折率分布の模式図

2-1. 数モードファイバ

FMFはクラッドの中心に、SMFと比べてやや大きな径のコアを持つ。モードごとに光ファイバ中の伝搬速度が異なるため、出力端側では特定のモードに遅延が生じてしまう。この速度差を極小にする設計や、互いに異なる符号の遅延を生じさせる2種のFMFを直列に接続して補償する設計など、屈折率分布を最適化することで、幅広い波長帯域でモード多重伝送に最適なFMFが実現可能である。無線信号処理で一般的なMIMO（Multi-Input and Multi-Output）処理と組み合わせ、SN比の向上が図られる。SMFと同じ標準外径125 μm の3モード伝搬可能なFMFを開発し、16振幅位相変調（Quadrature Amplitude Modulation）技術と組み合わせ、159Tbit/sで1000km超の伝送実験に成功している[2]。

2-2. マルチコアファイバ

MCFでは、同一のクラッド内に複数のコアを隣接して配置するため、コア間で互いに情報が漏えい（クロストーク）する可能性がある。クロストーク低減にはコア間距離の増加が有効で、その場合ファイバ径が大きくなるが、機械的な信頼性を担保するには、最大でも250 μm 程度までに抑制する必要がある。またコアの周囲にクラッドよりもさらに低屈折率の部分（リフレクティブ）を設けたり、互いに特性がわずかず異なるコアを配置する方法などでも、クロストークを抑制できる。

複数コアの配置は図2の様に様々な形態が考えられるが、ファイバ中心の1つのコア（中心コア）を取り囲むよう6つのコア（外側コア）を正六角形の頂点上に配した、六方最密配置の7コアMCFが代表で、立方格子状にコアを並べる配置についても検討されている。いずれの場合も、最外周部のコアとそれ以外のコアで最近接のコア数が異なることが特性の差を生じる場合があるが、円環状にコアを配置すればコア間距離を一定に、かつ最近接コア数を2に制限できる利点がある。回転対称位置にあるコアを識別するため、通信に使用しない非対称の位置に屈折率変動部を設けてマーカとしたり、クラッドの外周部を切り欠いて断面を非円形にすることもある。

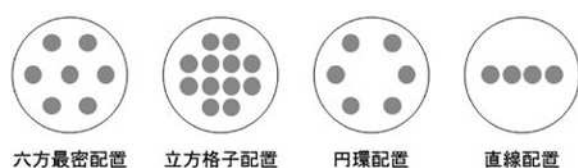


図2 MCFのコア配置の例

図3は、弊社で開発したMCFの例である。37コア最密配置ファイバでは、ファイバ径248 μ m内に特性の異なる3種のコアを配置し、1000km以上の長距離で4位相偏移変調（Quadrature Phase Shift Keying）の多値伝送が可能であることを確認した[3]。12コア円環配置ファイバでは、ファイバ径は225 μ mに収まり、世界で初めてファイバ1本あたり1Pbit/sを超える伝送容量を達成した伝送実験に使用された[4]。また、国内電線3社（弊社、および住友電気工業(株)殿、古河電気工業(株)殿）でそれぞれ作製した標準外径125 μ mの4コアMCFを相互接続した全長316kmの伝送路において16QAM信号を伝送し、118.5Tbit/sの容量が実現されている[5]。

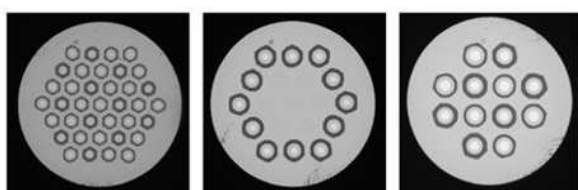


図3 弊社で試作したMCFの断面写真の例

2-3. 数モード・マルチコアファイバ

FMFをMCF化（FM-MCF）すれば、さらに空間多重度を高めることができる。ファイバ径160 μ mの4コア・3モードのFM-MCFにおいて、256QAMという非常に高密度な多値位相変調を行い、1.2Pbit/sの伝送にも成功している[6]。

2-4. マルチコアファイバの接続

MCF自体の設計や製造方法もさることながら、MCF同

士の接続技術や、入出力デバイスも新たに開発する必要がある。光ファイバ同士の融着は、端面をアーク放電で溶解して突き合わせることで実現できる。通常のSMFであれば中心にコアがあるので、X-Y軸方向のみ調心して突き合わせればよいが、中心以外にもコアのあるMCFではこれにZ軸周りの θ 回転調心が加わる（図4）。コアのずれは接続損失に直結し、外周にあるコアほど回転調心の精度の影響を受け、特にFM-MCFでは、非軸対称な電界分布を持つモードにおいて大きな損失増が生じる場合がある。融着接続機には、MCF端面の画像を取得、解析して調心する機能が付与されている。さらに、全てのコアを均一に加熱しなければ、損失の小さな接続は望めないが、加熱用電極を光ファイバに対して相対的に移動させながら加熱する方法が一般的である。

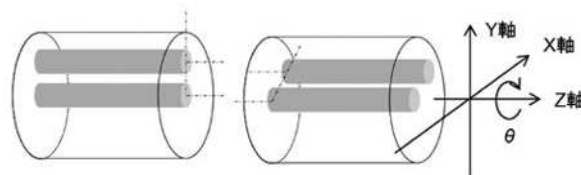


図4 MCFの調心の概念図

入出力端では、図5のようにMCFのコアの配置に合わせて複数のSMFを束ね、接着、あるいは溶解延伸して作製した部品を接続すれば、それぞれのコアを個別の経路に集合、分割することができる。また、平面導波路と直接接続するため、コアを直線配置したMCFも研究されている。

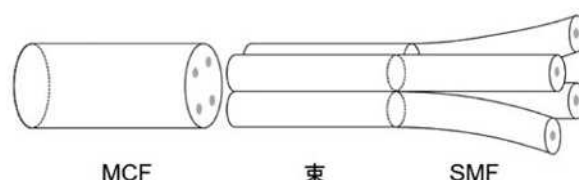


図5 MCFとSMFの入出力部の概念図

3. 空間分割多重ファイバの応用

大伝送容量を志向するMCFの長距離伝送用としては、標準外径125 μ mで4コアのMCFについて、国際規格制定への動きが始まっている。一方、伝送経路の高密度化という利点を生かして、データセンタ内、データセンタ間といった比較的短距離で閉じた経路での応用が、実用化の面では先行しそうである。短距離閉経路の用途であれば、MCFとコネクタを専用に設計し、融着接続の問題を回避できる。

4. 光ファイバの新たな展開

光ファイバの通信用媒体以外の用途も広がっている。長手方向での変位、振動、圧力を検知するセンサとして機能するため、土木建築物、プラント、医療分野などへ

応用されている。すでに敷設された通信用光ファイバを用いて、地震動を検知できることも分かってきた。光ファイバをレーザ増幅媒体として用いるファイバレーザの市場も急速に伸びている。光ファイバの光を「閉じ込め」、「漏らさず」、「伝える」機能が、様々な「つなぐ」技術として展開されていくだろう。

参考文献

- [1] 河内正夫, 「石英系光ファイバ技術発展の系統化調査」, 国立科学博物館技術の系統化調査報告, 第25集, 2018.
- [2] G. Rademacher *et al.*, “159 Tbit/s C+L band transmission over 1045km 3-mode graded-index few-mode fiber”, *Proc. OFC* (San Diego, 2018) Th4C.4.
- [3] Y. Sasaki *et al.*, “Single-mode 37-core fiber with a cladding diameter of 248 μm ”, *Proc. OFC* (Los Angeles, 2017) Th1H.2.
- [4] 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”, *Proc. ECOC*, (Amsterdam, 2012) Th.3C.1.
- [5] T. Matsui *et al.*, “118.5 Tbit/s transmission over 316 km-long multi-core fiber with standard cladding diameter”, *Proc. OECC*, (Singapore, 2017) PDP2.
- [6] R. S. Luis *et al.*, “1.2 Pb/s transmission over a 160 μm cladding, 4-core, 3-mode fiber, using 368 C+L band PDM-256-QAM channels”, *Proc. ECOC*, (Roma, 2018) Th3B.3.

(応用化学 平成4年卒,

プロセス工学 平成6年前期, 平成9年後期)