

非開削法によるマルチコアファイバ製造技術

Multicore Fiber Fabrication Technique Using Modified Cylinder Method

高橋正典*
Masanori Takahashi

〈概要〉

従来のシングルモードファイバを用いた光通信システムでは、伝送容量増加が限界に達することが示唆されており、マルチコアファイバ(MCF: Multicore Fiber)を用いた空間分割多重伝送技術の早期実用化が期待されている。本報告では、MCFの実用化に向けた製造性向上の観点から、これまでに報告されているMCF製造技術の研究開発動向について紹介する。更に、現在最も多く用いられている製法である穿孔法における課題(穿孔コスト、母材サイズの制約)を解決するための新製法として我々が開発を進めている非開削法について報告する。非開削法は原理的に母材の大型化、低コスト化が可能という利点があり、実際に設計を最適化した非開削法による母材からMCFを作製し、穿孔法によるMCFと同程度となる低損失化を実現した。

1. はじめに

近年、動画配信サービスや様々なウェブサービスの進展を背景に、インターネットトラフィックが急増している。この急増するインターネットトラフィックに対応するために、光通信システムには伝送容量の大容量化が求められている。これまでに光通信システムの伝送容量は様々な技術革新により大容量化が実現している。しかしながら近年、従来のシングルモードファイバ(SMF: Single-Mode Fiber)を用いた光通信システムでは、光ファイバ中で発生する非線形現象等の影響により、ファイバ1本あたりの伝送容量増加が限界に達することが示唆されている。そこで近年、ファイバ1本あたりの伝送容量増加の限界を打破する技術として、空間分割多重(SDM: Space Division Multiplexing)伝送技術が注目されている。SDM伝送用の光ファイバについても様々な研究開発が行われているが、中でもマルチコアファイバ(MCF: Multicore Fiber)を用いたSDM伝送技術の開発が注目を集めており、多くの研究事例が報告されている。例えば、19コアファイバを用いた大容量伝送^{1), 2)}が報告されている。さらに、MCFの各コアにモード多重技術を組み合わせることで、SDMチャンネル数が100を超える伝送実験が報告されており、1ファイバ当たりの伝送容量は10 Pb/sを超える大容量化が実現している^{3), 4)}。これらのMCFを使用したSDM伝送実験では、従来のSMFを使用した伝送システムに対し大幅な大容量化を実現している一方で、MCFのクラッド径は通常のSMFの125 μm を大幅に超える200 μm 以上のク

ラッド径となっている。SMFに対しクラッド径が大幅に大きいファイバを実際の伝送システムに使用する場合には、曲げによる機械強度信頼性の確保等の観点から大きな課題がある。近年、実際の伝送システムに早期に適用することを目標として、通常のSMFとの接続親和性の良い、125 μm のクラッド径を有するMCFが報告されている^{5), 6)}。標準クラッド外径のMCFを使用することで、ファイバの切断、接続に用いる工具や技術、融着技術、ケーブル構造について既存の技術を利用できることになり、大きなメリットがある。

実際にMCFを使用した伝送システムを実現するためには、標準外径のMCFを使用することに加え、MCFの製造技術の向上が必要となる。特に母材の大型化によるコスト低減と大量生産が必要となる。本報告では、MCFの実用化に向けた製造性向上の観点から、MCF製造技術の研究開発動向について紹介する。さらに著者が検討している非開削法によるMCFの製造技術について報告する。

2. MCF母材の各種製造技術

本章では、これまでに報告されているMCFの製造技術について述べる。MCFの製造技術は実用化に向けた開発が進められている段階であり、各種製法にはそれぞれ特徴がある。これから検討されている主なMCFの製法を表1に示す。

* 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

表1 MCFの製造技術
MCF fabricatin technique.

	利点	課題
穿孔法	・コア位置精度が高い ・任意なコア配置	・穿孔コスト ・穿孔長の制限
スタック法	・組み立てが容易 ・サイズの制約が少ない	・コア位置の制約 ・コア位置精度が低い
クラッド一括合成法	・既存の設備を使用可能 ・サイズの制約が少ない	・ロッドの加工工数 (多角形ロッド使用時) ・適用例が少ない
スラリーキャスト法	・コア位置の自由度が比較的高い	・光学特性 ・適用例が少ない

2.1 穿孔法

穿孔法は、ドリルで石英棒を穿孔加工して複数の空孔を設けたクラッドロッドを作製し、クラッドロッドの空孔にコアを含むコアロッドを挿入してMCF母材を作製する製法である。穿孔法の利点としては、コア位置精度が高いこととコアの配置の自由度が高いことがあげられる。課題としては、穿孔にかかるコストが高いことと穿孔長に制約があることがあげられる。現状では、MCFの製造には穿孔法が最も多く用いられている(図1)。

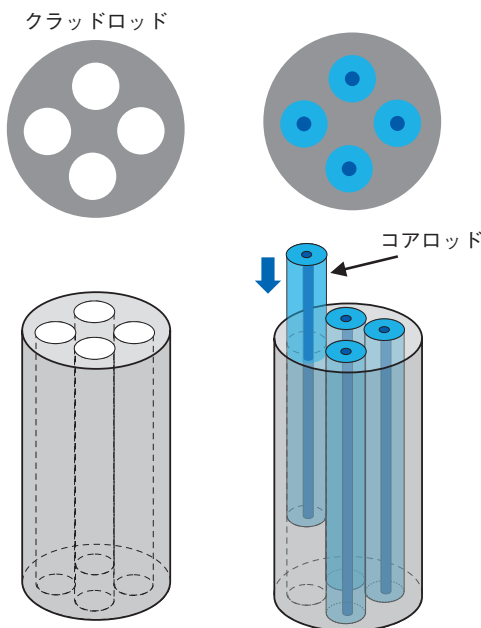


図1 穿孔法によるMCF母材の構成
Structure of MCF preform using drilling method.

2.2 スタック法

穿孔法以外のMCF母材の製法としては、スタック法⁷⁾が報告されている。スタック法は、石英パイプにコアロッドを挿入し、パイプの内径とコアロッドの外径を適切に設計することで、石英パイプと各コアロッドの外径の拘束でコアを六方最密構造の格子点上に配置する製法である。スタック法の利点は、部材の加工が容易であることと母材サイズの制約が少ないことがあげられる。課題としては、コアを六方最密構造の格子点上にしか配置できないことがあげられる。また、コアの位置精度はパイプの内径とコアロッド外径のクリアランスに依存するが、実

際の作製工程ではパイプにコアロッドを挿入するにはクリアランスが必要となる。このクリアランスがコア位置ずれにつながるため、コア位置精度が劣る点が課題となる。スタック法はMCFの製法以外にも空孔コアファイバの製法として多数の適用事例がある(図2)。

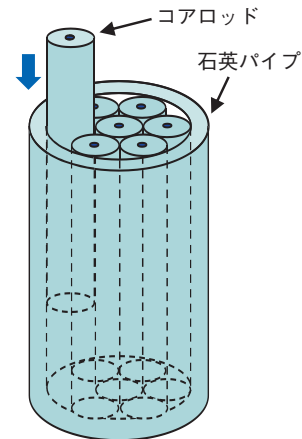


図2 スタック法によるMCF母材の構成
Structure of MCF preform using stuck and draw method.

2.3 クラッド一括合成法

MCF母材の製法として近年提案された製法に、クラッド一括合成法⁸⁾がある。クラッド一括合成法は、コアロッドを束ねたものにクラッドとなるシリカガラス層を外付け法にて堆積させてMCF母材を得る製法である。クラッド一括合成法の利点は、クラッドの外付けに既存の製造設備を使用できること、母材サイズの制約が少ないことがあげられる。課題は、円形のコアロッドを使用した場合に、コアロッドの間にクラッドを堆積させることが困難な点があげられる。この問題を解決するために、コアロッドを多角形に加工してそれらを束ねてターゲットする手法が報告されている⁸⁾。この例ではクラッドをコアロッドの周りに均一に堆積可能という利点があるが、多角形に加工したコアロッドを使用するため、コアロッドの加工工数がかかることが懸念される。また、クラッド一括合成法は比較的新しい製法であるため、MCFへの適用例が少ないという課題がある(図3)。

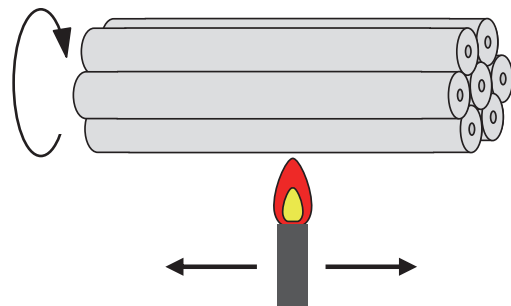


図3 クラッド一括合成法の模式図
Schematic illustration of Over-cladding bundled rods method.

2.4 スラリーキャスト法

スラリーキャスト法⁹⁾によるMCF母材の作製についても報告されている。スラリーキャスト法は、石英粉末に硬化性樹脂等を加えて液状のスラリーを作製し、これをMCFのクラッド材の形状となるような型に流し込むことでクラッド材を成型する製法である。スラリーキャスト法の利点としては、比較的小さいコア位置の自由度が高い点がある。加工の容易さから多数の空孔を有する母材の作製に適していると考えられるが、課題としては、現状では比較的小さい母材への適用事例が報告されており、大型母材への適用事例が報告されていない点が挙げられる。また、MCF母材への適用例が少なく、現状では伝搬損失等の光学特性が不十分であることが報告されている。

2.5 非開削法

近年、我々はMCFの新製法として非開削法の開発を実施している¹⁰⁾。非開削法では、クラッド材を通常の光ファイバ母材の製造時に使用する石英管と同様の製法で作製するため、母材の大型化、低コスト化が可能である。半面、クラッド一括合成法と同様に現時点では適用事例がまだ少なく、技術成熟度を向上させていかなければならない。次章では非開削法について詳しく述べる。

3. 非開削法

各種MCF母材の製法が検討されているが、現状では穿孔法が最も広く使用されている。我々は、2.5章で述べた通り、穿孔法の課題となる加工コスト低減、母材サイズの大型化に適した、MCF母材の新製法である非開削法の開発を進めている。

3.1 非開削法によるMCF母材の設計

非開削法によるMCF母材の構成を図4に示す。非開削法では、十字形状の空孔を有する石英管(十字管)をクラッドロッドとし、十字管に4本のコアロッドを挿入し、中心にクラッドロッドを挿入することで、4コアMCF母材を構成した。非開削法による十字管は、通常の光ファイバ母材に使用される石英管を作製する際と同様の製法で作製可能なため、原理的には母材の大型化、低コスト化が可能である。この設計では、使用する部材が少なく組み立て工程も簡素であるため、製造性に優れた設計であると考えられる反面、十字管の空孔におけるコアロッドとクラッドロッドとの空隙が大きいため、MCF母材を練り引きした後のコア位置ずれ、コア非円率が懸念される。

図5に十字管によるMCF母材の空隙を低減した設計を示す。本設計では、十字管と、コアロッド及び中心に挿入したクラッドロッドとの空隙を低減するために、新たに径の異なるフィラーロッドを挿入した。この結果、空隙が大幅に低減され、コアピッチずれとコア非円率の低減が期待できる。その反面、使用する部材が増え、組み立て工程が複雑になるため、製造性が損なわれることが予想される。図6に、空隙の低減と製造性の両立を目的として、空孔形状を最適化した十字管(改良十字管)を用いたMCF母材の設計を示す。本設計では、コアロッド4本とクラッドロッド1本を使用してMCF母材を構成しており、使用部材が少なく、組み立て工程もシンプルであるため、製造性に優れた設計である。改良十字管とコアロッド、中心に挿入するクラッドロッドの形状を最適化した結果、空隙が大幅に低

減されており、コアピッチずれとコア非円率の低減が期待できる。

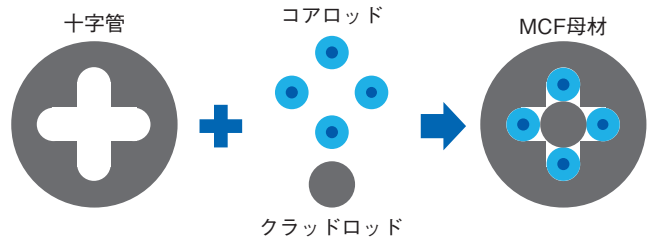


図4 十字管によるMCF母材の設計
Design of MCF preform using cross-shaped cylinder.

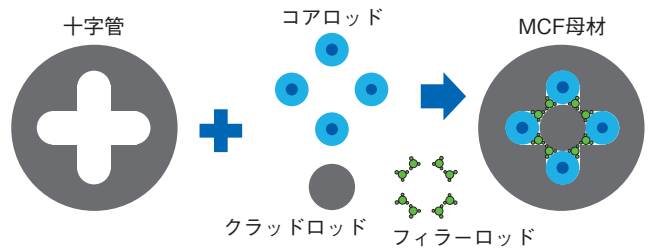


図5 空隙低減十字管によるMCF母材の設計
Design of MCF preform using cross-shaped cylinder with low void ratio.

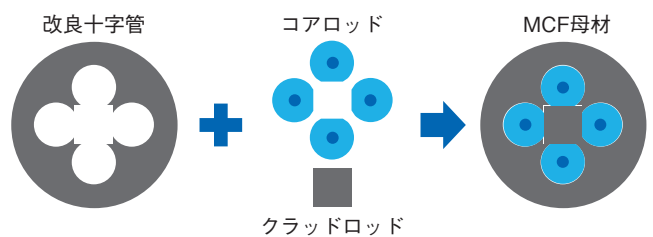


図6 改良十字管によるMCF母材の設計
Design of MCF preform using modified cross-shaped cylinder.

3.2 非開削法により作製したMCFの特性

図4～6に示す設計を有する、非開削法により作製した母材を使用して、4コアMCFを作製した。作製したMCFの端面写真を図7～9に示す。図7に見られるように、十字管によるMCF母材から作製したMCFでは大きなコア非円が発生した。これに対し、図8、図9に示すように、空隙を低減した母材から作製したMCFではコア非円が大幅に低減した。各ファイバの設計値からのコアピッチずれとコアの非円率を算出した結果、図7～9のMCFのコアピッチずれと非円率はそれぞれ9.2 μm, 2.3 μm, 1.7 μm, 20.0%, 2.1%, 1.1%であった。

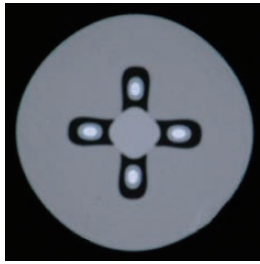


図7 十字管母材から作製したMCFの断面形状
Cross sectional image of fabricated MCF by Cross-shaped cylinder.

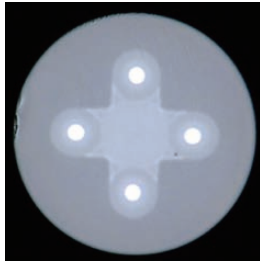


図8 空隙低減十字管母材から作製したMCFの断面形状
Cross sectional image of fabricated MCF by Cross-shaped cylinder with filler cladding rods.

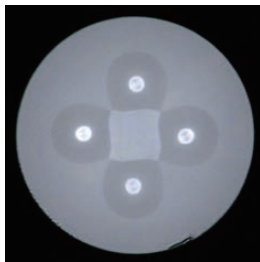


図9 改良十字管母材から作製したMCFの断面形状
Cross sectional image of fabricated MCF by Modified cross-shaped cylinder.

表2に、試作したMCFの特性を示す。十字管では、大きなコア非円により伝搬損失の増加が顕著にみられた。空隙低減十字管と改良十字管は共にG.652相当のコアを使用した。空隙低減十字管では通常のSMFと比較してロスが増加がみられた。ロス増加の要因はコア非円に加え、製造時にコアに応力が印加された影響と考えられる。一方、母材設計を最適化した改良十字管では通常のSMFと同程度の損失が得られた。この結果から、改良十字管を使用することで、母材の製造性を損なうことなく、MCFの特性改善が可能になったことが明らかになった。

表2 作製したMCFの特性
Characteristics of fabricated MCFs.

	クラッド径 (μm)	コアピッチ (μm)	伝搬損失 (dB/km)
十字管	124.9	35.8	0.853
空隙低減十字管	124.8	42.7	0.412
改良十字管	124.9	38.2	0.190

4. おわりに

本報告では、MCFの実用化に向けた製造性向上の観点から検討されているMCF製造技術の研究開発動向について紹介した。コア位置の自由度、位置精度の高さから、現在最も多く用いられている製法は穿孔法であること、及び穿孔法においてMCF実用化に向けた取り組むべき課題(穿孔コスト、母材サイズの制約)について述べた。さらに穿孔法の課題を解決するための新製法として我々が開発を進めている非開削法によるMCFの製造技術について報告した。非開削法による十字管は通常の光ファイバの製造に使用される石英管と同様の製法で作製可能なため、母材の大型化、低コスト化が可能という利点がある。一方、新製法のためMCF作製への適用事例はまだ少なく、MCF特性を満たすプロセス開発はまだ途上である。これまでに非開削法によるMCF母材の設計を最適化することで、MCFのコアピッチずれ、コア非円の低減を実現した。今後はMCF実用化に向けてさらなる製造性向上に向けた技術開発を進める予定である。

謝辞

本研究成果は、国立研究開発法人情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究(20301)「マルチコアファイバの実用化加速に向けた研究開発」の一環としてなされたものである。

参考文献

- 1) J. Sakaguchi et al., "19-core fiber transmission of 19x100x172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305Tb/s," OFC2012, PDP5C.1.
- 2) J. Sakaguchi, et al., "19-core MCF transmission system using EDFA with shared core pumping coupled via free-space optics," Opt. Express, Vol.22, Issue 1, pp. 90-95, 2014.
- 3) D. Soma, et al., "10.16 Peta-bit/s Dense SDM/WDM transmission over Low-DMD 6-Mode 19-Core Fibre across C+L Band," ECOC2017, Th.PDP.A.1.
- 4) G. Rademacher, et al., "10.66 Peta-Bit/s Transmission over a 38-Core-Three-Mode Fiber," OFC2020, Th3H.1.
- 5) T. Matsui, et al., "Design of 125 μm cladding multi-core fiber with fullband compatibility to conventional single-mode fiber," ECOC2015, We1.4.5.
- 6) T. Gonda, et al., "125 μm 5-core fibre with heterogeneous design suitable for migration from single-core system to multi-core system," ECOC2016, W.2.B1C.
- 7) I. Ishida, et al., "Possibility of Stack and Draw process as Fabrication Technology for Multi-Core Fiber," OFC2013, OTu2G.1.
- 8) R. Fukumoto, et al., "Multi-core Fiber Fabrication in Over-Cladding Bundled Rods Method Applying Polygonal Rods," OECC2019, TuC3-1.
- 9) J. Yamamoto, et al., "Fabrication of Multi-Core Fiber by using Slurry Casting Method," OFC2017, Th1H.5.
- 10) M. Takahashi, et al., "Multicore Fiber Fabricated by Modified Cylinder Method," OFC2020, Th2A.17.