

マルチコアファイバ技術の開発

Development of the Multicore Fiber Technologies

今村 勝徳*
Katsunori Imamura

斎藤 恒聡*
Tsunetoshi Saito

渡辺 健吾*
Kengo Watanabe

杉崎 隆一*
Ryuichi Sugizaki

〈概要〉

持続的な光伝送容量拡大を実現するために空間多重伝送 (Space Division Multiplexing; SDM) が考えられており、SDMに対応したファイバ技術としてマルチコアファイバが有力視されている。当社では、(独)情報通信研究機構の委託研究課題146『革新的光ファイバ技術の研究開発』において、マルチコアファイバを開発した。コア密度を拡大した19コアファイバや、非線形性を低減した大Aeff (有効コア断面積) マルチコアファイバ、ファイババンドル型ファンアウトなど、課題146において取り組んだ開発の成果をまとめて報告する。

1. はじめに

インターネットトラフィックの増大を背景として、光通信の伝送容量に対する需要は年々伸び続けている。従来のシングルモードファイバ(SMF)を用いた伝送容量拡大の取り組みは続けられてきているが、ファイバ中で発生する非線形現象の影響を受け、いずれ限界が見えてくると予想される。持続的な光伝送容量拡大を実現するために空間多重伝送(Space Division Multiplexing; SDM)が考えられており、SDMに対応したファイバ技術としてマルチコアファイバ(MCF)が有力視されている^{1)~4)}。当社では、(独)情報通信研究機構の委託研究課題146『革新的光ファイバ技術の研究開発』において、マルチコアファイバを開発した。課題146は2012年度で終了しており、その成果をまとめて報告する。

2. マルチコアファイバの最適化検討

通常のシングルモードファイバの最適化と言えばコアの最適化を行うことが一般的である。これに対して、マルチコアファイバの最適化ではコア自体の最適化に加えてコアピッチの最適化及びクラッド径の最適化が追加される。本研究では、まず始めにクラッド径の最適化として信頼性についての設計を行い、クラッド径210 μm 以下であれば十分なスクリーニングを実施することにより通常の光ファイバと同等の長期信頼性が得られることを導き出した。次に、パワー結合理論をベースに、SMFと同等のAeffを持つマルチコアファイバの最密配置について検討し、200 μm のクラッド内に19個のコアを配置する設計を見出した。一方、コアの最適化についても検討を進め、Aeffを140 μm^2 まで拡大したトレンチ型マルチコアファイバの最適設計を見出した。さらに、マルチコアファイバ作製工程の

最適化検討も進めた結果、プリフォームサイズの大型化を実現し、50 kmを超えるマルチコアファイバの作製を可能とした。各項目について、以下詳述する。

2.1 クラッド径の最適化検討

マルチコアファイバの最大の特長は、1つのクラッド内に複数のコアを有することである。現在では単一ファイバ内のコア密度を高くすることに主眼を置き、多少のクラッド径の増大は許容されている。しかしながら、クラッド径の最大値は検討すべき点である。

クラッド径を拡大したときの信頼性を確認するための機械強度特性試験として、破断強度、動疲労特性、プルアウト試験を実施した。マルチコアファイバのクラッド径は210 μm とし、通常の光ファイバと同様内容で挙動の確認を行った。図1に湿熱前後(85°C-85%RH×30日間)のファイバのワイブル分布プロットを示す。湿熱後の引張強度に若干の劣化がみられるものの、電気通信分野の標準規格であるTelcodia規格を十分満足している。また、動疲労試験、プルアウト試験においても同様に規格を十分に満足することも確認している。

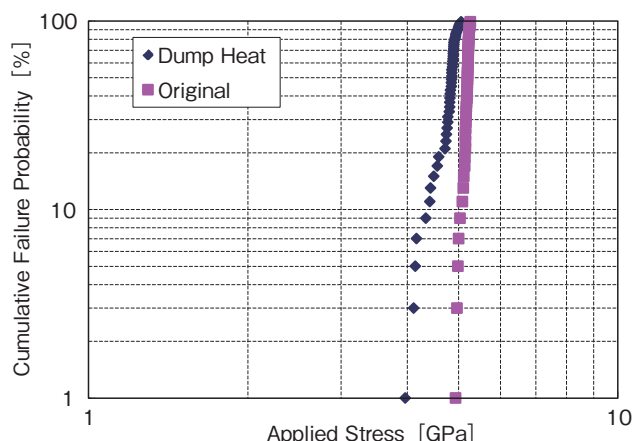


図1 210 μm クラッドMCFのエージングによる引張強度変化 Weibull distribution of tensile strength in MCF.

* 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

さらに、今回の評価より得たパラメータから試作のマルチコアファイバの破断率を計算した。図2に破断率と曲げ半径の関係を示す。プルーフテストレベルを伸び歪み1.7%以上に設定する事で、曲げ半径30 mmでの破断確率を $1.0 \times 10^{-4}\%/km/20$ years 程度に抑制できる事が分かった。

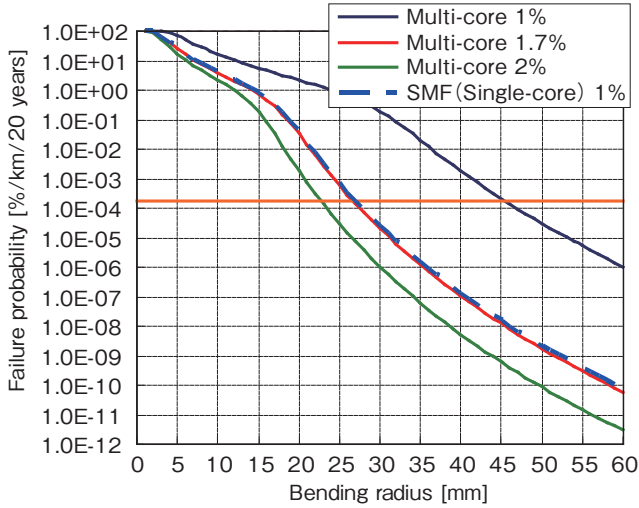


図2 クラッド径210 μmのファイバの破断確率と曲げ半径
Relation between spooling radius and failure probability.

2.2 高密度マルチコアファイバ

クラッド径の最大値の目安が決まると次に決定するのは最小コアピッチが重要となる。そこで、低屈折率部(トレンチ)による光閉じ込め効果によりクロストーク抑制に有利なトレンチ型プロファイルを採用し、 A_{eff} を $70 \mu m^2$ 以上(@1550 nm)、最外層コアの過剰損失を0.001 dB/km以下とするためのパワー結合理論をベースに設計最適化検討を行った結果、クラッド径200 μm(コアピッチ35 μm, クラッド厚30 μm)の19コアMCFにおいて、10 km伝搬後の隣接コア間クロストーク(XT)を-30 dB以下(@1550 nm)に抑制可能であることを確認した(図3)。

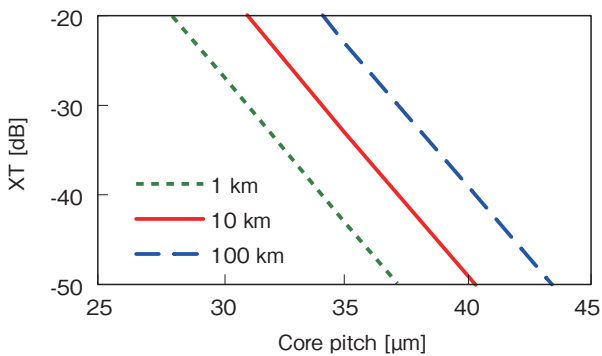


図3 19コアMCFのコアピッチと隣接コア間クロストーク(XT)の関係
Relation between core pitch and XT.

得られた設計結果に基づき、実際に19コアMCFを作製した(図4)。コアピッチは35 μm, クラッド径は200 μm, 被覆径は345 μmであり、従来の250 μm被覆のSMFと比較して約10倍の高密度化が達成された。

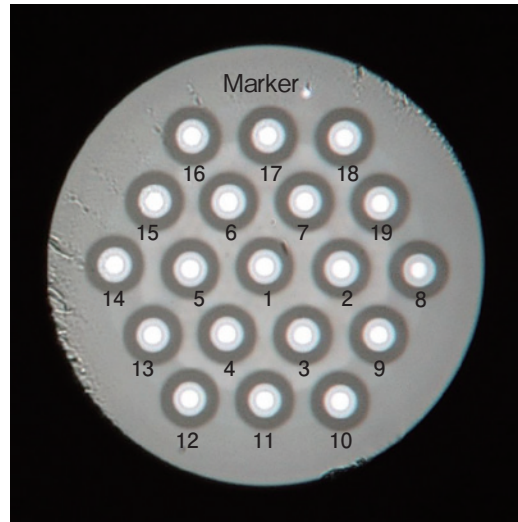


図4 19コアMCF断面写真
Cross section of fabricated 19-core MCF.

19個のコアを3つのグループに分類し(中心コア:コア1, 内層コア:コア2~7, 外層コア:コア8~19), グループ毎ならびに全体の平均特性を表1に示す。

表1 19コアMCFの光学特性
Optical properties of fabricated 19-core MCF.
(at 1550 nm)

項目	伝送損失	λ_{cc}	A_{eff}
単位	dB/km	nm	μm^2
中心コア	0.225	1459	71.8
内層コア	0.232	1463	72.3
外層コア	0.225	1350	71.1
全体	0.227	1392	71.5

伝送損失, A_{eff} の平均値は約0.23 dB/km, $72 \mu m^2$ (@1550 nm)であった。隣接コアのトレンチ部の影響によりケーブルカットオフ波長(λ_{cc})は中心コアならびに内層コアで外層コアよりも大きめの値となっているが、最大値は1528 nmであり、C+Lバンド伝送には影響を及ぼさない。全てのコアに関して隣接コアからのクロストークを測定した結果を、隣接コアから全てのコアからのクロストークの合計値とともに図5に示す。波長1550 nm, 曲げ半径R=90 mmにおいて、10.4 km伝搬後の隣接コア間クロストークは約-32 dBであることが確認された。隣接コア間のクロストークはシミュレーション結果とも概ね一致しており、目標通りの特性が実現されていることを確認した。

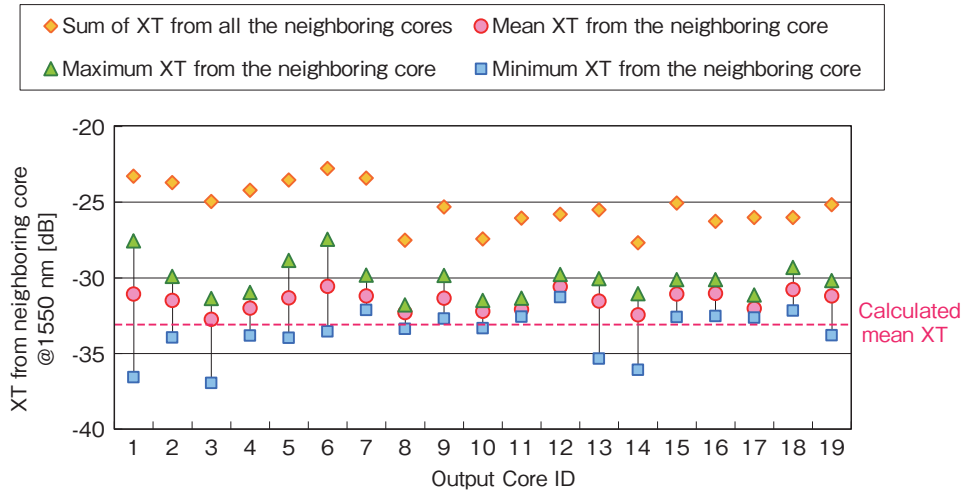


図5 隣接コアからのクロストーク (XT)
Crosstalk (XT) from the neighboring cores.

2.3 大Aeffマルチコアファイバ

次に、Aeffの拡大とクロストークの抑制という2つの目標を同時に達成するべく、カットオフ波長や過剰損失を考慮に入れた設計最適化検討を行った。まずシングルコアファイバにおいて、ケーブルカットオフ波長(λcc)を1530 nm以下に保ちつつ、Aeffを140 μm²以上に拡大可能なプロファイルの検討を行った結果、図6に示すトレンチ型の屈折率分布において、目標特性を実現可能な設計解が得られた。

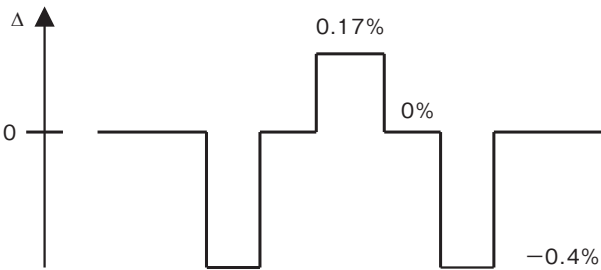


図6 トレンチ型プロファイル
Trench type refractive index profile.

km以下)まで過剰損失を抑制するために、クラッド径の目標値を188 μmに定めた(図10)。

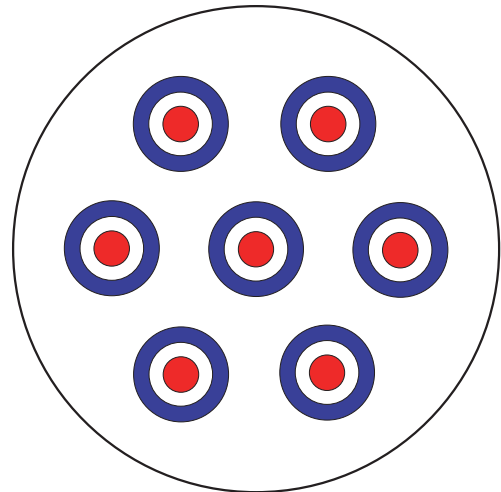


図7 7コアファイバ断面図
Cross-section of the 7-core fiber.

得られたシングルコアファイバでの最適プロファイルを用いて、7コアファイバ(図7)におけるコアピッチとクラッド径の最適設計を行った。コアピッチとクロストーク(100 km伝送後、波長1625 nm)の関係をシミュレーションした結果、コアピッチを53 μm以上とすることで、隣接6コアからのクロストーク合計値を-40 dB以下に抑えることが可能であることが分かった(図8)。一方、トレンチ型プロファイルを採用した場合、コアピッチはクロストークだけでなくカットオフ波長にも影響を与える。シミュレーションの結果、ケーブルカットオフ波長が外層コアでの値から増大しないためにはコアピッチを55 μm以上とする必要があることが確認された(図9)。さらに、空間利用率向上のためにはクラッド径は極力小さいほうが好ましいが、クラッド径の縮小は過剰損失の増大を招くことが知られている。そこで伝送損失に影響を及ぼさない程度(0.001 dB/

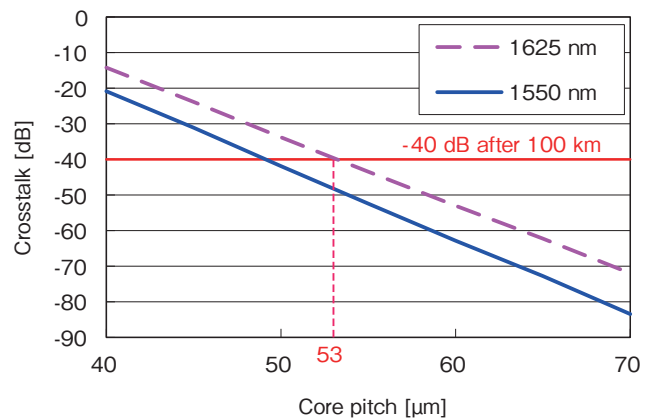


図8 コアピッチとクロストークの関係
Relation between core pitch and crosstalk.

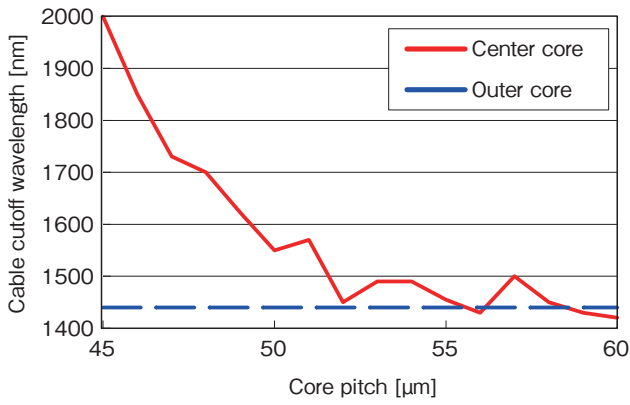


図9 コアピッチとカットオフ波長の関係
Relation between the core pitch and the cable cutoff wavelength.

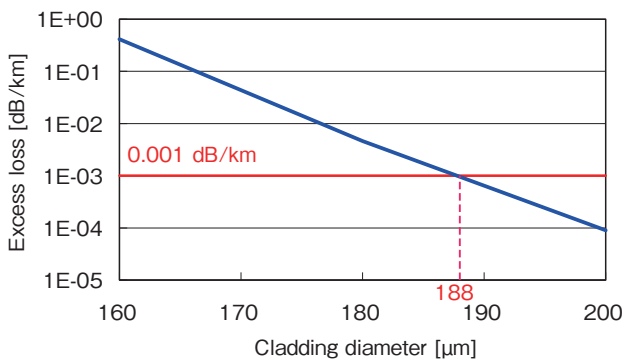


図10 過剰損失のクラッド径依存性
Cladding diameter dependence of excess loss.

得られた最適設計に基づき、7コアのマルチコアファイバを作製した(図11)。 A_{eff} の平均値は $140 \mu\text{m}^2$ を超えており、多値変調に有効な A_{eff} 特性が実現されている(表2)。カットオフ波長は 1500 nm 以下であるため、C+Lバンドの伝送に影響を及ぼさない。得られた 1 km のファイバにおけるクロストークの測定結果を、シミュレーションでの予測特性とともに図12に示す。曲げ半径 $R=140 \text{ mm}$ における隣接コア間クロストークの平均値は、波長 1550 nm 、 1625 nm ともに -70 dB であり、中心コアにおける全ての隣接コアからの合計値は約 -62 dB であった。波長間で測定結果に差が見られないのは、クロストーク測定系の測定限界(約 -70 dB)によるものと推測される。シミュレーション結果より、 100 km 伝搬後のクロストークは 1550 nm において -52 dB 、 1625 nm においても -44 dB が実現されることが推測される。

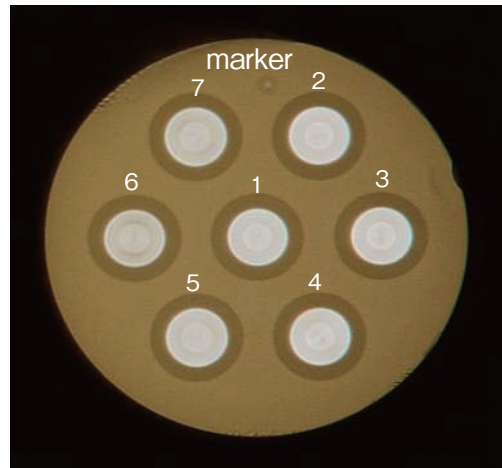


図11 試作マルチコアファイバの断面写真
Cross-section of fabricated multi core fiber.

表2 試作マルチコアファイバの光学特性(波長 1550 nm)
Optical properties of fabricated multi core fiber.

Core ID	A_{eff} 1550 nm dB/km	λ_{cc} nm	伝送損失 1550 nm dB/km	分散 1550 nm ps/nm ² /km	分散スロープ 1550 nm ps/nm ² /km	PMD 1550 nm ps/rkm	曲げ損失* 1550 nm dB/m
1	136.7	1478	0.255	20.9	0.062	0.11	0.08
2	145.8	1479	0.216	20.9	0.062	0.02	0.16
3	141.9	1488	0.204	21.1	0.062	0.06	0.18
4	143.2	1468	0.204	20.8	0.062	0.07	0.14
5	140.9	1467	0.229	20.8	0.062	0.04	0.13
6	136.8	1469	0.216	20.6	0.061	0.02	0.17
7	141.8	1480	0.242	20.7	0.061	0.06	0.18
平均	141.0	147.6	0.224	20.8	0.062	0.05	0.15

* $\phi 20 \text{ mm}$ に曲げたときの曲げ損失

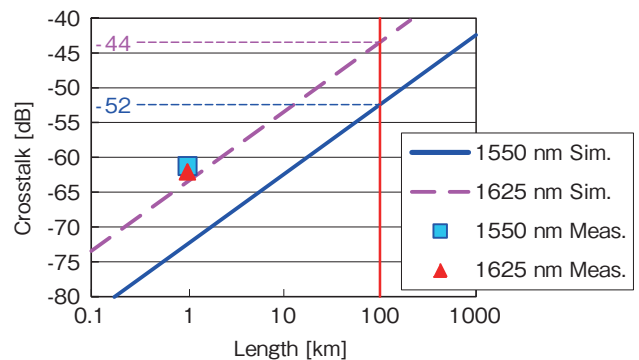


図12 隣接6コアからの合計クロストーク
Simulated value and the measured value of the total crosstalk from the neighboring 6 cores.

以上より、 $A_{eff}=140 \mu\text{m}^2$ と 1625 nm でのクロストーク -44 dB (100 km 伝送時)を両立するファイバの設計及び試作を実施し、多値変調などの新信号フォーマットを用いた大容量伝送にも対応可能なマルチコアファイバを実現した。

2.4 マルチコアファイバ長尺化検討

ファイバの長尺化は量産性の証明と長距離伝送実験への寄与のために重要である。MCFの長尺化への課題としては大クラッド径であることと複雑な製法を用いていることの2点が克服すべき要素であると考えられる。特に、MCFのクラッド径が通常の光ファイバの125 μmよりも大きい200 μmの場合には、通常のSMFと比較して外径で1.6倍、断面積にして2.5倍の大きさになるため、大型のプリフォームを作製する必要がある。

本検討では、プリフォームサイズの大型化に成功し、単一長で55 kmの約200 μmクラッドの7コアファイバを実現した(図13, 表3)。母材の大型化を実現しつつ製造工程の最適化も進めた結果、すべてのコアの損失も0.20 dB/km以下(0.188 ~ 0.200 dB/km)と低損失に抑えることができた(表4)。1550 nmにおけるAeffは99 μm²と通常SMFと比較して大Aeff特性が実現されている。ケーブルカットオフ波長は1390 nm、波長分散は18.6 ps/nm/kmであった。このファイバを用いて、参考文献⁵⁾において報告されている6,000 km超の伝送実験が実現された。

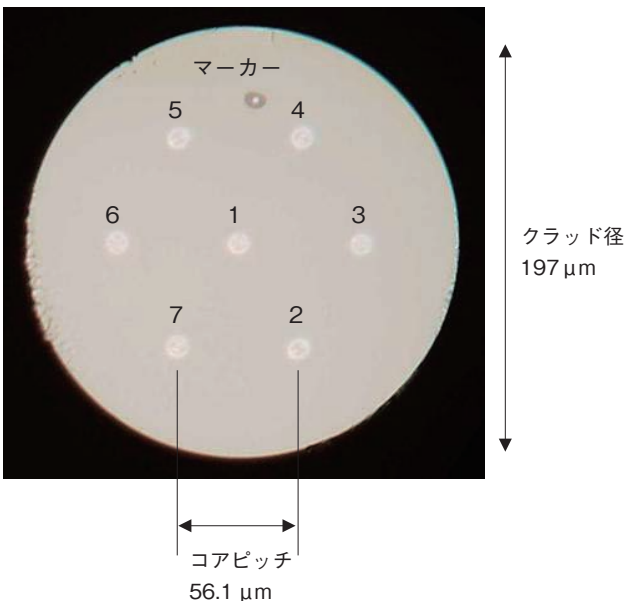


図13 マルチコアファイバの断面写真
Cross-section of fabricated multi core fiber.

表3 構造パラメータ
Structural parameters.

項目	条長	クラッド径	被覆径	コアピッチ (平均)
単位	km	μm	μm	μm
値	55	197	342	56.1

表4 マルチコアファイバの光学特性*
Optical properties of fabricated multicore fiber.

項目	単位	コアID							平均
		1	2	3	4	5	6	7	
伝送損失	dB/km	0.196	0.196	0.196	0.195	0.188	0.192	0.200	0.195
分散	ps/nm/km	18.5	18.6	18.4	18.6	18.7	18.7	18.6	18.6
スロープ	ps/nm ² /km	0.060	0.061	0.060	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061
PMD	ps/√km	0.04	0.18	0.11	0.03	0.10	0.15	0.11	0.010
Aeff	μm ²	97.5	98.7	97.1	98.5	99.2	99.8	98.7	98.5
MFD	μm	11.2	11.3	11.1	11.2	11.2	11.3	11.2	11.2
λcc**	nm	1359	1394	1373	1411	1411	1399	1406	1393
曲げ***	dB/m	8.5	6.0	7.7	4.5	5.5	6.2	4.6	6.1

* 波長1550 nm(ケーブルカットオフ波長以外)

** ケーブルカットオフ波長

*** φ20 mmに曲げたときの曲げ損失

3. 評価用接続機構の検討

試作したファイバの評価と、評価工程最適化のためのバンドル機構作製検討を行った。さらに、長尺評価等を視野に入れたマルチコアファイバのパラメータのばらつき評価やマルチコアファイバ同士の接続検討を行った。

3.1 ファイババンドル型 Fan-out デバイス

MCFの評価を開始するためには、いかに既存の測定系でMCFを測定するかが重要である。測定開始前にこれまでに検討した製法でどの程度のコアピッチのばらつきで作製されているか確認を行った。測定にはスタックアンドドロウ法により作製されたMCFを用いた。測定結果を図14に示す。この結果からコア間のピッチバラツキは±1 μm以内になっていることがわかる。

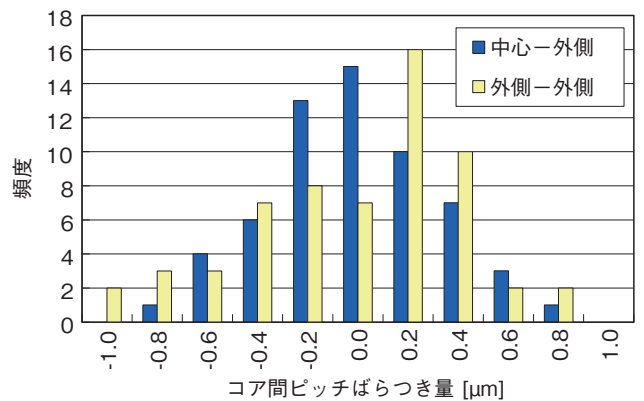


図14 MCFのコアピッチばらつき
Core pitch distribution of MCF.

MCFのコアピッチばらつきが1 μm以内であることが確認できたので、実際にMCFを既存のSMFと接続することを検討し、Fan-outデバイスを開発した。我々はファイバ型で簡易組み立てが可能であることからファイババンドル型のFan-outデバイス(FBF)を作製し接続に適用した。得られたFBFの端面写真を図15に示す。2つのFBFをMCF(長さ:約5 m)の両端

に調心接続した際のコア間クロストークは-64 dB以下であった。また、N=3サンプルのFBFとMCFを調心接続したときの接続損失特性を図16に示す。図16の通り、この接続損失は0.35 dB以下であり、MCF評価のために十分な値であることを確認した。

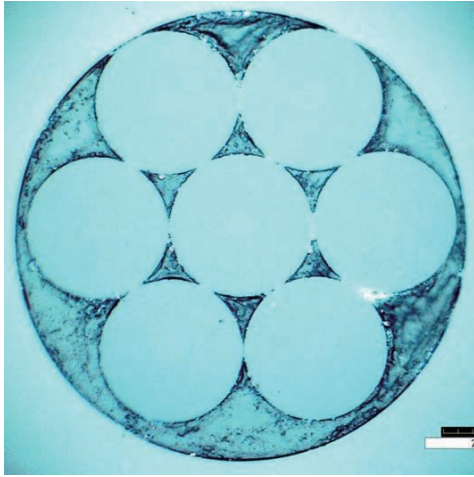


図15 ファイババンドルの端面形状
Optical microscope image of the end face of FBF.

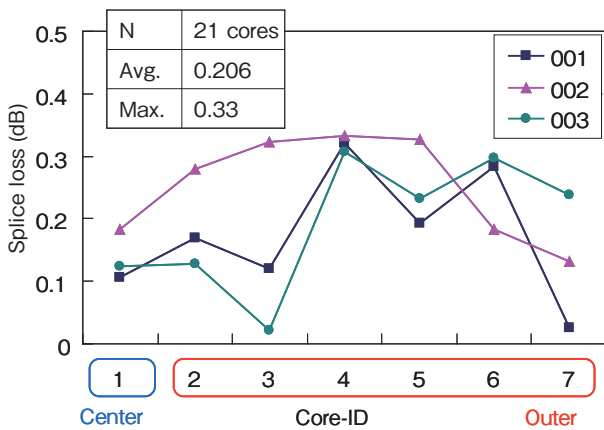


図16 ファイババンドルとMCFの接続損失(平均値)
Splice loss of the seven cores between FBF and MCF.

3.2 MCF 同士の融着特性検討

MCFの評価を簡素化するためには融着特性も重要である。融着損失の低減の鍵である調心法としてアクティブ調心(Active alignment; 光源とパワーメータを用いてパワー調心)、パッシブ調心(Passive alignment; MCFのマーカを融着器のカメラにて検出して調心)の2つのアプローチにて検討した。表5、図17に示す通り、結果として両者の接続損失で大きな差は出ず、最大でも0.3 dB以下で融着可能なことを確認した。

表5 MCF 同士の融着損失
Comparison of the maximum and the average value of the splice loss of MCF actively or passively aligned.

		N	@1310 nm		@1550 nm	
			Max.(dB)	Ave.(dB)	Max.(dB)	Ave.(dB)
Active alignment	Center core	3	0.019	0.010	0.039	0.022
	Outer core	18	0.285	0.085	0.295	0.145
Passive alignment	Center core	3	0.063	0.032	0.038	0.031
	Outer core	18	0.155	0.062	0.198	0.119

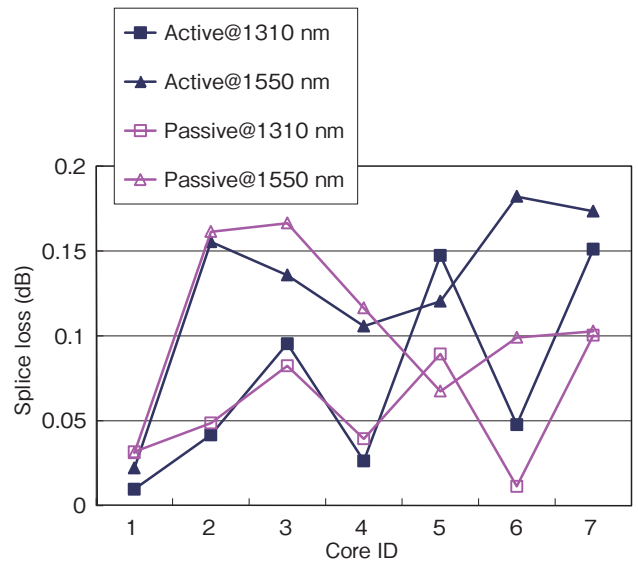


図17 MCFのコア毎の融着損失
Average value of the splice loss of each core.

4. まとめ

(独)情報通信研究機構の委託研究課題146『革新的光ファイバ技術の研究開発』において取り組んだ、マルチコアファイバ開発の成果をまとめて報告した。クラッド径210 μm以下であれば十分なスクリーニングを実施することにより通常の光ファイバと同等の長期信頼性が得られることを導き出した。パワー結合理論をベースとして、200 μmのクラッド内に19個のコアを配置する設計や、A_{eff}を140 μm²まで拡大したトレンチ型マルチコアファイバの最適設計を見出した。マルチコアファイバ作製工程の最適化検討にも取り組み、50 kmを超えるマルチコアファイバの作製を可能とした。評価工程最適化のためのバンドル機構作製と、マルチコアファイバ同士の融着接続についても検討を行った。今後もマルチコアファイバの実用化に向けた開発を継続していく。

参考文献

- 1) S. Inao, T. Sato, S. Sentsui, T. Kuroha, and Y. Nishimura, "Multicore optical fiber," in Optical Fiber Communication, 1979 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 1979), paper WB1.
- 2) T. Morioka, "New Generation Optical Infrastructure Technologies: "EXAT Initiative" Towards 2020 and Beyond," in

Proceedings of OptoElectronics and Communications Conference 2009, paper FT4.

- 3) M. Koshiha, K. Saitoh, and Y. Kokubun, "Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle," IEICE Electronics Express, 6, 98-103 (2009).
- 4) S. Chandrasekhar, A. H. Gnauck, X. Liu, P. J. Winzer, Y. Pan, E. C. Burrows, B. Zhu, T. F. Taunay, M. Fishteyn, M. F. Yan, J. M. Fini, E. M. Monberg, and F. V. Dimarcello, "WDM/SDM transmission of 10 x 128-Gb/s PDM-QPSK over 2688-km 7-core fiber with a per-fiber net aggregate spectral-efficiency distance product of 40,320 km b/s/Hz," ECOC 2011, Th13.C4.
- 5) H. Takahashi, T. Tsuritani, E. L. T. de Gabory, T. Ito, W. R. Peng, K. Igarashi, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, I. Morita, Y. Tsuchida, Y. Mimura, K. Maeda, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, and M. Suzuki, "First demonstration of MC-EDFA-repeated SDM transmission of 40 x 128-Gbit/s PDM-QPSK signals per core over 6,160-km 7-core MCF", Optics Express, Vol. 21, Issue 1, pp. 789-795, 2013.