

# 200 $\mu\text{m}$ 被覆4コアファイバとその実装ケーブル

光応用技術R&Dセンター 佐々木 雄 佑<sup>1</sup>・福 本 良 平<sup>1</sup>

## 200 $\mu\text{m}$ Coated Four-Core Fiber and its Cable

Y. Sasaki, and R. Fukumoto

細径ファイバ技術と空間多重の組み合わせは、高密度化が要求されるデータセンタ通信における伝送容量をアップさせる手段として有用である。今回被覆径を200  $\mu\text{m}$ に細径化した4コアマルチコアファイバ(200-4CF)を作製した。200-4CFの光学特性はこれまで報告された250  $\mu\text{m}$ 被覆の4CFと同等の特性であり、ITU-T G.657.A1に準拠していることを確認した。この200-4CFをSWR/WTC化した<sup>1)</sup>が、200-4CFのケーブル化の報告例は初めてとなる。この作製したケーブルをIECに基づいた機械試験と環境試験を行い、特性に問題ないことを確認した。最後に200-4CFのサイドビューによるコア番号が一致した全自動融着を確認した。

Combining small-diameter optical-fiber technology and space-division multiplexing employing multicore fiber is a promising method of further increasing the transmission capacity of optical networks in data-centers. Four-core multicore fibers with a 200- $\mu\text{m}$  coating diameter (200-4CFs), which was reduced from 250  $\mu\text{m}$ , were fabricated. The 200-4CFs had almost the same characteristics as the 4CFs with a 250- $\mu\text{m}$  coating diameter and satisfied ITU-T G.657.A1 standard. The 200-4CFs were ribbonized and cabled. This cabling is the first time a multicore fiber with a 200- $\mu\text{m}$  coating has been used. Mechanical and environmental tests based on IEC standards were performed on the cable employing 200-4CFs, and the cable exhibited excellent performance. Finally, the applicability of an automatic splice with core identification by side-view alignment to the 200-4CFs is presented.

### 1. ま え が き

データセンタにおける通信トラフィックが拡大していることを背景に、より大容量な光伝送技術が求められている。データセンタ間を接続するダクトのサイズやファイバを収納するスペースが限られているため、ファイバ数が多く、かつ、軽量で細径のケーブルが重要となる。ここで最適なケーブルの一つが間欠接着型光ファイバテープ心線(Spider Web Ribbon<sup>®</sup> 以下SWR)を用いたスロットレス型光ケーブル(Wrapping Tube Cable<sup>®</sup> 以下WTC)となる。SWRは容易に形を変えることができ、また、簡単に単心分離できる利点もある。汎用のシングルモードファイバ(Single-Mode Fiber 以下SMF)はクラッド径が125  $\mu\text{m}$ で被覆径が250  $\mu\text{m}$ である。これに対して、近年高密度ケーブル用に被覆径が200  $\mu\text{m}$ のSMF(200-SMF)が開発された。被覆径が250  $\mu\text{m}$ から200  $\mu\text{m}$ になることでファイバ断面積を36%縮小させることができる。この200-SMFをSWRに採用して、ケーブル外径33 mmで6912心のWTCが実現されている<sup>1)</sup>。

光通信システムの容量を拡大させる手段として、空間分割多重(Spatial Division Multiplexing 以下SDM)の研究開発が盛んに行われている。特にコア間のクロストークを抑制した非結合型マルチコアファイバ(Uncoupled Multicore Fiber 以下MCF)を用いたSDMは、MIMO(Multiple Input Multiple Output)による信号復元の必要性がなく、複数のコアを独立した信号伝送路とした扱うことができ、既存の光通信システムとの親和性が高い。さらにクラッド径を汎用SMFと同じ125  $\mu\text{m}$ とすることで、コネクタ部品の共用化など汎用SMFとの互換性が向上し、既存のケーブル製造装置の流用も期待できる。これまでクラッド径が125  $\mu\text{m}$ のトレンチ型やステップ型の屈折率プロファイルを持つ4コアMCFが開発された<sup>2,3)</sup>。しかし、これまで開発されたMCFは被覆径が250  $\mu\text{m}$ であった。被覆径を200  $\mu\text{m}$ と細くすることでさらなる高密度化が可能になると考えられる。

本稿では200  $\mu\text{m}$ 被覆かつクラッド径125  $\mu\text{m}$ の4コアMCF(200-4CF)およびこのMCFを用いたSWR/WTCの特性評価結果について報告する。さらにサイドビュー調心による200-4CFのコア番号が一致した全自動融着を実現したので、それについても述べる。

1 光通信研究部

略語・専門用語リスト 略語・専門用語	正式表記	説明
マルチコアファイバ	Multi-core fiber	マルチコアファイバは、通常のシングルモードファイバには1つしかないコアをクラッド内に複数配置させたファイバ。コア間のクロストークを抑制した非結合型マルチコアファイバでは、それぞれのコアに異なる光信号を伝送させることでファイバ1本あたりの伝送容量をコアの数だけ増やすことができる。
クロストーク	Crosstalk	マルチコアファイバにおけるクロストークは、コアからコアへの光の漏洩である。情報伝送する際は、信号へのノイズ増大による伝送品質劣化の要因となるので、できるだけ小さくすることが望ましい。
MFD	Mode Field Diameter	モードフィールド径。 ファイバ中を伝搬する光の電界分布の広がりを示す指標のひとつ。接続損失評価の指標となる。
$A_{\text{eff}}$	Effective Core Area	実効コア断面積。 ファイバ中を伝搬する光の電界分布の広がりを示す指標のひとつ。主として非線形現象の起こりにくさを示すときに用いられる。
IEC	International Electrotechnical Commission	国際電気標準会議IECは、電気および電子技術分野の国際規格の作成を行う国際標準化機関である。国際標準化機構(ISO)の電気・電子部門を担当する。
ITU-T	International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector	国際電気通信連合電気通信標準化部門ITU-Tは、通信に関わる標準の勧告を作成する。

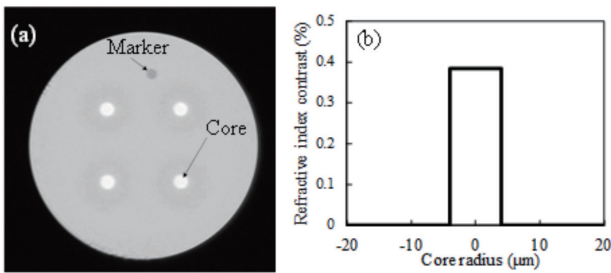


図1 作製した200-4CFの(a)断面写真と(b)屈折率分布  
Fig. 1. Cross-section and index profile of a fabricated 200-4CF.

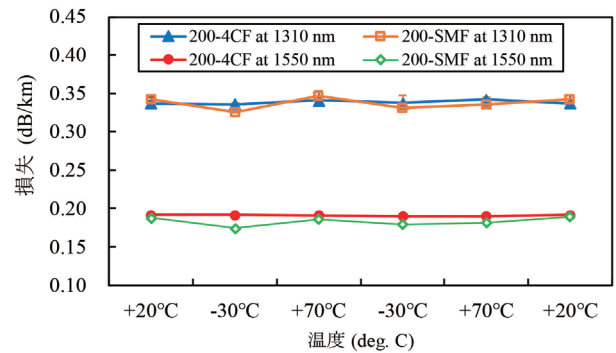


図2 素線状態における200-4CFと200-SMFの温度サイクル試験結果

Fig. 2. Temperature cycling test result of 200-4CFs and 200-SMFs before cabling.

## 2. ファイバ特性

トレンチ構造を有しないステップ型プロファイルを持つ4CFは1310 nm帯でのデータセンタ間などの短距離通信に適しており、さらに1550 nm帯においても50 km程度のメトロネットワークの通信に活用可能である<sup>3)</sup>。このステップ型プロファイルはVAD法で作製可能であり、製造性に優れている。図1に作製した200-4CFに用いたコアの屈折率分布と端面画像を示す。実際にはガラス部の外側にプライマリ層とセカンダリ層の二層構造からなる被覆がある。通常、被覆層を薄くすると外乱に対するクッション効果が弱まり、マイクロバンド損失が悪化する。そこでプライマリ層とセカンダリ層の厚みとヤング率の最適化を200-SMFに対して行った<sup>4)</sup>。マイクロバンド損失の抑制効果を確認し、それを200-4CFに適用した。

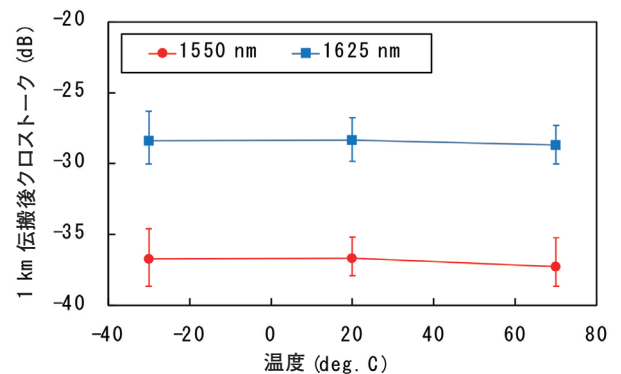


図3 素線状態における200-4CFの2 コア間クロストークの温度依存性

Fig. 3. Temperature dependence of core-to-core crosstalk of 200-4CFs before cabling.

表1 200-4CFおよび200-SMFの寸法および光学測定結果

Table 1. Measured optical characteristics and dimensions of a fabricated 200-4CF and 200-SMF.

項目	波長	ITU-T G.657.A1	200-4CF			200-SMF
			平均値	最大値	最小値	
伝搬損失 (dB/km)	1310 nm	< 0.4	0.34	0.34	0.34	0.33
	1550 nm	< 0.3	0.19	0.19	0.19	0.19
MFD ( $\mu\text{m}$ )	1310 nm	8.6-9.2 $\pm$ 0.4	8.3	8.4	8.3	8.5
	1550 nm	—	9.3	9.4	9.3	9.5
$\phi$ 30 mmでの 曲げ損失 (dB/10 turns)	1550 nm	< 0.25	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04
	1625 nm	< 1.0	0.02	0.02	0.01	—
ゼロ分散波長 (nm)		1300-1324	1314	1315	1312	1313
カットオフ波長 ( $\mu\text{m}$ )		<1.26	1.21	1.23	1.20	1.21
1 km伝搬後 クロストーク (dB)	1310 nm	—	-69	-68	-70	—
	1550 nm	—	-37	-36	-38	—
クラッド径 ( $\mu\text{m}$ )		124.3-125.7	124.9	125.2	124.6	125.0
被覆径 ( $\mu\text{m}$ )		—	194	194	194	194
コア間距離 ( $\mu\text{m}$ )		—	39.8	39.9	39.6	—

表1にケーブルに適用した200-4CFの素線状態での寸法および光学測定結果を示す。ITU-T G.657.A1を満足していることを確認した。1 km伝搬換算後クロストークは1310 nmと1550 nmでそれぞれ-37 dBと-69 dBであり、被覆径が250  $\mu\text{m}$ の4CF<sup>3)</sup>とほぼ同じであることが確認できた。

200-4CFについて、比較用の200-SMFとともに素線の状態で-30  $^{\circ}\text{C}$ から+70  $^{\circ}\text{C}$ の範囲で温度サイクル試験を行った。図2に損失の変化を示す。200-4CFの損失の温度変化は0.01 dB/km以下と十分小さいことを確認した。また、図3に温度サイクル試験と同時に行ったクロストーク測定結果を示す。波長1550 nmでの1 km伝搬換算後平均クロストークは-40  $^{\circ}\text{C}$ 、+20  $^{\circ}\text{C}$ 、+70  $^{\circ}\text{C}$ において-36.7 dB、-36.6 dBおよび-37.3 dBであった。素線状態では温度変化がクロストークに対して与える影響がほぼないことが確認できた。

### 3. ケーブル特性

200-4CFと200-SMFをSWR化し、エアブローン型WTCケーブルを作製した。ケーブル長は5 kmであり、ケーブル外径は9.3 mmであった。図4に作製したケーブルの外観写真と構造図を示す。ケーブルはポリエチレン製のシースと防水テープ、およびSWRから構成される。ケーブルにはSWRを6本束にしたものが4つ含まれる。1本のSWRは12本のファイバから構成される。ケーブルに含まれるファイバの合計本数は288本であるが、このうちの12本が200-4CFであり、残りの276本が200-SMFとなっている。図5に200-4CFと200-SMFの素線状態およびケーブル化後の損失変化を示す。ケーブル化前の200-4CFと200-SMFの損失の違いは孔開け等のMCF独自の工程起因およびコア間クロストークによる隣接コアへの漏洩と考えられる。200-4CFと200-SMFの両方でケーブル化後に伝搬損失が増大したが、平均で0.01 dB/km以下の変化量であった。

ルースチューブケーブル化した4CFについては素線状態からクロストーク量が5~6 dB増大したと報告されている<sup>5)</sup>。この原因は素線状態のスプールからケーブルのドラムへ巻き径が大きくなったことが原因と推定している。今回の200-4CFはSWRによるWTCである。WTC内のファイバはルースチューブケーブルよりも大きな側圧を受けると考えられ、200-4CFのクロストーク特性を悪化させる可能性がある。もしケーブル化でクロストークが悪化するのであれば200-4CFの設計の際にこの悪化分を考慮する必要がある。そこでケーブル化した200-4CFの1 km伝搬後クロ

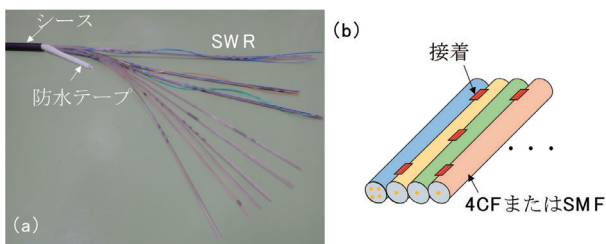


図4 作製したケーブルの(a)外観写真と(b)SWRの構造  
Fig. 4. Structure of the fabricated cable (a) Outlook of cable and (b) External view of an SWR.

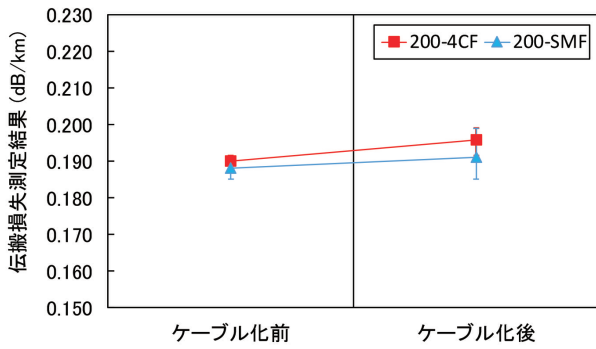


図5 ケーブル化前後の1550 nmでの損失変化  
Fig. 5. Variation in attenuation due to cabling process of the cable.

表2 機械試験後の損失変化量

Table 2. Averaged loss variation of cable after environmental test.

項目	条件	200-4CF	200-SMF
長尺引張	IEC60794-1-21 E1	< 0.03 dB	< 0.01 dB
側圧	IEC60794-1-21 E3A	< 0.01 dB	< 0.01 dB
衝撃	IEC60794-1-21 E4	< 0.01 dB	< 0.01 dB
巻き付け	IEC60794-1-21 E11	< 0.01 dB	< 0.01 dB
繰り返し曲げ	IEC60794-1-21 E6	< 0.01 dB	< 0.01 dB
捻回	IEC60794-1-21 E7	< 0.01 dB	< 0.01 dB

ストークをケーブル化前の素線状態と比較をした。素線状態の200-4CFは半径155 mmのスプールに巻いていた。これに対してケーブルは半径500 mmのケーブルドラムに巻かれていた。一般的にMCFのクロストークは、ある曲げ径の閾値 ( $R_{pk}$ ) より曲げ半径が小さい位相整合領域においては曲げ径に応じて大きくなる<sup>6)</sup>。コアプリフォームの屈折率分布から計算した $R_{pk}$ は約1000 mmであったため、ケーブル化後クロストークは素線よりも大きくなると考えられる。図6に素線状態で測定したクロストークとケーブル化後に測定したクロストークの差分を各波長で示す。あわせて200-4CFの巻半径 (R) を変えたときのクロストーク変化量計算結果を示す。なお、それぞれ伝搬長を1 kmに統一している。200-4CFのクロストークは、素線を巻く半径155 mmのスプールからケーブルを巻く半径500 mmのドラムに変わることによって5~6 dB悪化することが計算上予想された。しかし、測定値の変化は3 dB程度と計算での予想値よりも小さかった。この3 dBの変化量は200-4CFの曲げ半径が300 mmになったときに相当することがわかった。これはケーブル内で200-4CFに曲げが入り、それが実効的に小さい曲げ径を200-4CFに与えており、このことが

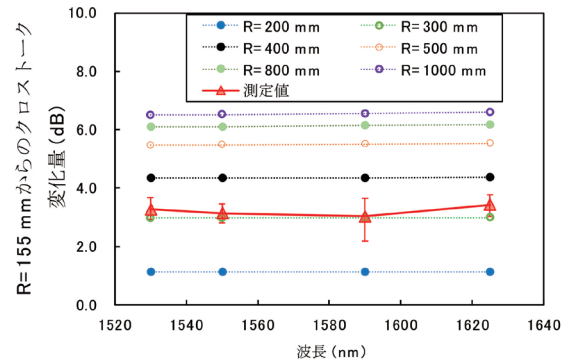


図6 ケーブル化前後の1 km伝搬後クロストーク変化量  
Fig. 6. Crosstalk (after 1 km propagation) increase after cabling as compared to before cabling for the cable.

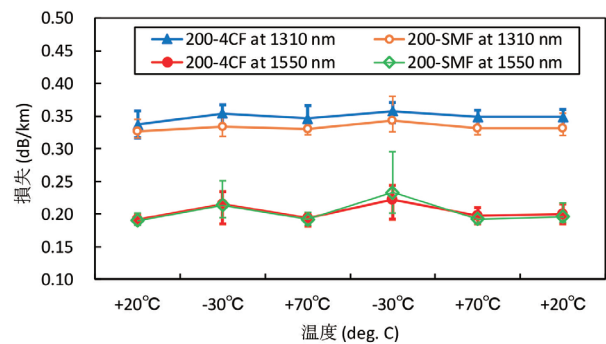


図7 ケーブル化後の温度サイクル試験結果  
Fig. 7. Temperature cycling test result of 200-4CFs and 200-SMFs before cabling.

クロストークの悪化を抑制していると考えられる。したがって、SWRを用いたWTCであってもクロストークはケーブル化で大きく悪化しないことが確認できた。

#### 4. 機械試験および環境試験

試作したケーブルの機械試験をIEC60794-1-21に基づいて行った<sup>7)</sup>。波長は1550 nmである。表2に試験結果を示す。同じケーブル内の200-4CFと200-SMFの両方の結果を示している。両者ともケーブル化前後での損失変化量が全項目で0.05 dB以下であり、試験に合格していることを確認した。

ケーブル化後の温度サイクル試験を温度は素線状態と同じ-30℃~+70℃で2サイクル行った。入出力デバイス(FIFO)やループを構成するための融着点は温度変化の影響を受けないように恒温槽の外に設置した。図7に温度サイクル試験の結果を示す。200-4CFの温度による損失変化は200-SMFとほぼ同等であった。200-4CFについて、図2に示した素線状態での温度サイクル試験結果に比べると変化量は大きいですが、波長1550 nmおよび1310 nmともに0.05 dB以下に抑えられていた。実用化に問題ない範囲といえ

る。図8にこのとき同時に測定した200-4CFの伝搬長1 kmにおける最近接2コア間クロストークの温度変化を示す。図8から素線状態と異なりケーブル化後では温度とクロストークの間には、-30℃から+70℃で2 dB程度であるが温度が低下するとクロストークが改善するという明確な関係性があることがわかった。温度が低下するとケーブルが収縮する。この収縮によりケーブル内の200-4CFの実効曲

げ径が小さくなりクロストークが小さくなったと考えられる。

### 5. 融着

200-4CFを実用化するうえでは簡単な融着方法の確立と融着損失の低減が重要となる。汎用SMFの融着では側面画像による調心（サイドビュー調心）を行っている。MCFの融着では低損失な融着方法として端面観察方式が提案されているが<sup>9)</sup>、端面観察可能な融着機は複雑な機構を持ち、調心に時間を要することからサイドビュー調心で融着できることが望ましい。したがって、サイドビュー調心でどれくらい200-4CFを自動で正確に調心できるか、また、低い損失で融着できるか検討をした。今回の200-4CFのサイドビュー調心の検討では、改良されたInter-relational Profile Method (IPA) 調心を用いた。このIPA調心はFSM-100 PやFSM-100P+で利用可能である。IPA調心では左右にセットしたファイバを360度回転させたときの側面画像における特徴量の輝度変化を用いる<sup>10)</sup>。200-4CFはコア位置を特定するために低屈折率部で構成されたマーカがある（図1 (a) 参照）。このマーカがサイドビュー調心でもコア番号を識別した調心を可能とする。図9は左

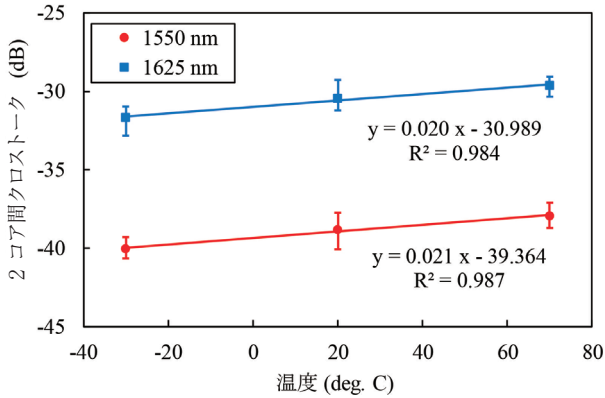


図8 ケーブル化後クロストークの温度依存性  
Fig. 8. Temperature dependence of crosstalk after cabling.

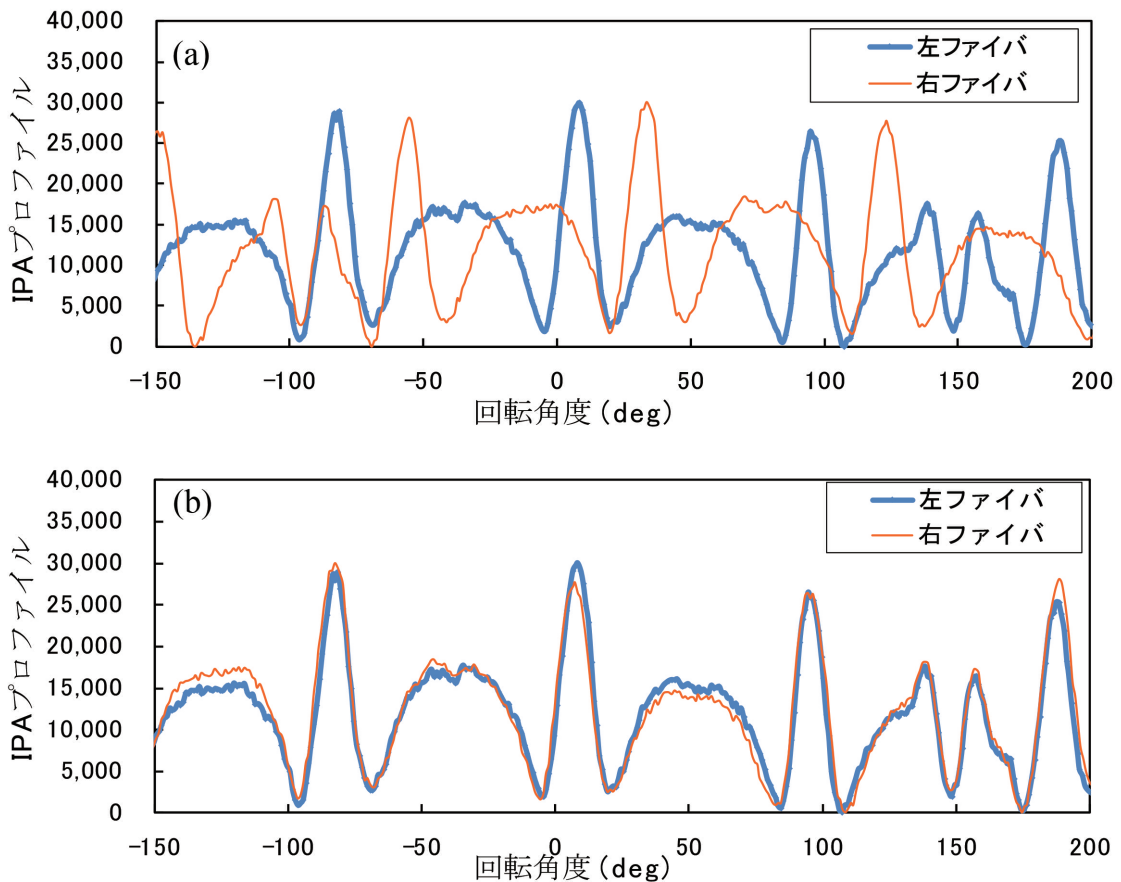


図9 得られたIPAプロファイル ((a): 回転調心前, (b): 回転調心後)  
Fig. 9. Obtained IPA profiles (a) before and (b) after alignment.

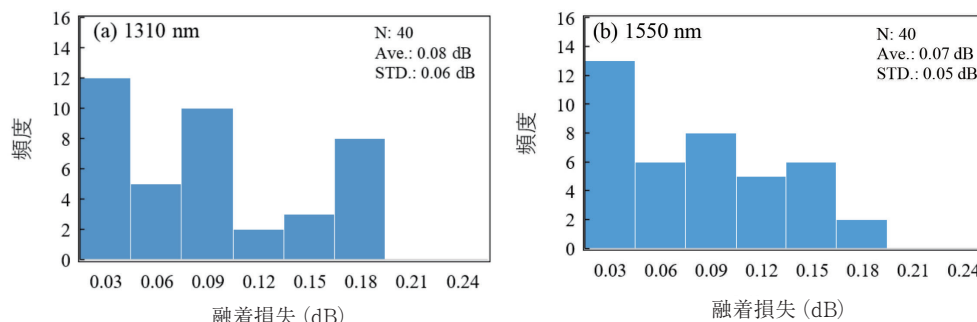


図10 1310 nmと1550 nmでの融着損失測定結果

Fig. 10. Histogram of measured splice loss at (a) 1310 nm and (b) 1550 nm.

右に200-4CFをセットしたときの回転調心前のIPAプロフィールである。左右それぞれの波形でコア由来の4つの高いが見られる。そして、高さが低く、広い山の一つにマーカー由来のディップが見られ、これが波形に非対称性をもたらしている。山やディップの角度位置が左右で異なっているが、形状はほぼ同一である。この角度がずれた波形を一致させるのに必要な角度を計算して回転させる。この回転調心後の波形が図9 (b) となり、ディップを含めてほぼ波形が重なっていることがわかる。このことからコアとマーカー位置が一致した調心に成功していることがわかる。実際にこのIPA調心を行い、融着を行った。融着損失測定結果のヒストグラムを図10に示す。測定波長は1310 nmと1550 nmであり、N数は40である (10回×4コア)。どちらの波長でも平均融着損失0.10 dB以下となった。以上からIPA調心によるコア番号が一致した全自動低損失接続融着を確認した。

## 6. む す び

被覆径を200  $\mu\text{m}$ に縮径した4コアMCFを用いてケーブル化を行った。作製したケーブルは光学特性、機械特性および環境試験で良好な特性を示した。また、サイドビュー方式で全自動の回転調心と低損失接続損失を200-4CFで実現した。被覆径200  $\mu\text{m}$ の4コアMCFはデータセンタでの高密度配線に問題なく適用可能といえる。

## 参 考 文 献

- 1) S. Kaneko et al.: "Innovative solution using SWR / WTC for data centers," in Proc. 67th Int. Cable Connectivity Symp., Providence, RI, Oct. 2018, Paper 10-5.
- 2) T. Matsui et al.: "118.5 Tbit/s transmission over 316 km-long multi-core fiber with standard cladding

diameter," in Proc. CLEO-PR/OECC/PGC, Singapore, Aug. 2017, Paper PDP2.

- 3) T. Matsui et al.: "Applicability of step-index type standard cladding multi-core fiber to full-band transmission," in Proc. Eur. Conf. Exhib. Opt. Commun., Dublin, Ireland, Sep. 2019, Paper M.1.D.3.
- 4) Y. Sajima et al.: "Development of ultra-high density and fiber-count cable using 200-  $\mu\text{m}$ -coated bend insensitive optical fiber complying with G.652.D and G.657.A1," in Proc. 69th Int. Cable Connectivity Symp., Oct. 2020, Paper 6-6.
- 5) T. Hayashi et al.: "Field deployed multi-core fiber testbed," in Proc. 24th OptoElectron. Commun. Conf. Int. Conf. Photon. Switching Comput., Fukuoka, Japan, July 2019, paper. PDP3.
- 6) M. Koshiba et al.: "Multi-core fiber design and analysis: coupled-mode theory and coupled-power theory," Opt. Express, vol. 19, no. 26, pp. B102-B111, Dec. 2011.
- 7) International Electrotechnical Commission, IEC 60794-1-21 Optical fibre cables -Part 1-21: Generic specification -Basic optical cable test procedures - Mechanical test methods, 2020.
- 8) M. Ohno et al.: "Development of Ultra-high Density and Fiber-count WTC with SWR," in Proc. 67th Int. Cable Connectivity Symp., Orlando, FL, Oct. 2017, Paper 9-6.
- 9) Y. Amma et al.: "Low-loss fusion splice technique for multicore fiber with a large cladding diameter," 2013 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, 2013, pp. 74-75.
- 10) W. Zheng et al.: "Interrelation profile analysis method for alignment of polarization-maintaining fiber," Proc. 30th Opt. Fiber Commun. Conf., Mar. 2010, JThA61.