

フィールド実装した288心4コアマルチコアファイバケーブルリンクの損失特性

光応用技術R&Dセンター 小田 拓弥¹・梶川 翔太²・竹永 勝宏³・市井 健太郎⁴
光ケーブル事業部 向井 興泉⁵・竹田 大樹⁶

Loss performance of field-deployed 288 4-core multi-core fibers cable link

T. Oda, S. Kajikawa, K. Takenaga, O. Mukai, D. Takeda, and K. Ichii

288心の4コアマルチコアファイバからなる高密度ケーブルと288対のファンインファンアウトデバイスを使ったリンクをフィールドに構築し、損失評価を実施した。マルチコアファイバ関連コンポーネントのフィールド敷設による過剰損失は観測されなかった。

A high-density optical fiber cable link with 288 four-core multi-core fibers (MCFs) and 288 pairs of fan-in-fan-out devices was deployed in the field and its losses were evaluated. No excess losses were observed from MCF-related components in field installation.

1. ま え が き

データセンター（Data Center：DC）サービスの需要拡大に伴い、DCビル間の大容量光ファイバネットワーク構築の必要性が急速に高まっている。通信容量の拡大には、限られたスペースの有効活用が必要となる。例えば、光ファイバケーブルのコア密度を向上することによってダクト内に敷設するコア数を向上することができる。高密度化に寄与する技術として、これまで光ファイバケーブルやシングルコアファイバ（Single-Core Fiber：SCF）の細径化の取り組みがなされてきた^{1) 2)}。近年では、マルチコアファイバ（Multi-Core Fiber：MCF）がSCFよりも高いコア密度を実現可能なソリューションとして注目を集めている。特に、標準クラッド外径である125 μmの非結合型4コアMCF（4c-MCF）は早期の実現が期待されている³⁾。MCFやその接続についての報告は多数されている一方で、フィールド構築されたMCFケーブルリンクの特性については、ほとんど報告がされてこなかった。加えて、過去のフィールド実験の報告ではケーブル内の4c-MCFの本数は数本に留まっており、100心を超える実用的な心数のMCF多心ケーブルリンクのフィールド特性については報告がされていない⁴⁾。

われわれは、テストフィールドに288心の4c-MCFケーブルから構成された1152チャネルのMCFリンクを構築し、損失特性を評価した。作製した4c-MCFケーブルは、同じコア数である1152心SCFケーブルに比べて5.2倍の高密度化を達成した。テストフィールドのダクトにMCFケーブルを敷設した後に、288対のファンインファンアウト（Fan-in-fan-out：FIFO）デバイスを両端に融着接続した。構築したMCFリンクの挿入損失（Insertion Loss：IL）を光ロステストセット（Optical Loss Test Sets：OLTS）にて測定した。フィールドでのIL測定値は、事前に評価した各コンポーネントの損失、すなわちMCFケーブルの伝搬損失・FIFOデバイスのIL・MCF融着損失の平均値をもとに算出したIL予想値と良い一致を示し、フィールド敷設による過剰損失が観測されなかったことを確認した。

2. MCF関連コンポーネントの損失特性

2.1 MCFケーブル

288心の4c-MCFを用いたAir-Blown Wrapping Tube Cable™（AB-WTC）を作製した。AB-WTCは、圧縮空気を使って内径10–16 mm程度のマイクロダクトに効率的に圧送敷設することができる構造である⁵⁾。AB-WTCとMCFの組み合わせにより、従来に比べて多くのファイバコアを高効率・長距離に敷設することが可能になる。4c-MCFはクラッド外径が125 μm、被覆径が200 μm、コアはITU-T G.657.A1準拠の光学設計にて試作した⁶⁾。図1はそれぞれ、MCFケーブルの断面図・作製したMCFケーブルの断面写

1 光通信研究部

2 光通信研究部 博士（工学）

3 光通信研究部グループ長

4 光通信研究部部長

5 光ケーブル開発部

6 ソリューション営業技術部グループ長

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	クラッド内に複数のコアを配置した光ファイバ。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。
シングルコアファイバ	Single-core fiber	クラッドの中心に1つのコアが配置された従来の光ファイバ。シングルモードファイバ（Single mode fiber：SMF）とも呼ばれる。
クロストーク	Crosstalk	マルチコアファイバのコアからコアへの光の漏洩が雑音となり伝送品質が劣化する現象。できるだけ小さくすることが望ましい。
ファンインファンアウトデバイス	Fan-in-fan-out device	マルチコアファイバの各コアの光信号を複数のシングルコアファイバに入出力するためのデバイス。
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、通信に関する標準の勧告を作成する。
100GBASE-LR4	100GBASE-LR4	最大通信距離10 km・伝送帯域100 Gbpsのシングルモードファイバ伝送用に設計されたIEEE 802.3ba規格準拠の伝送規格。波長1310 nm帯の4波長を多重して使用する。
光ロステストセット	Optical Loss Test Sets	光ファイバの施工・保守時における光損失測定を行うフィールド用測定器。光ファイバリンクの一端に接続した光源から光パワーを入射し、もう一端に接続したパワーメータにて出力光パワーを測定する。

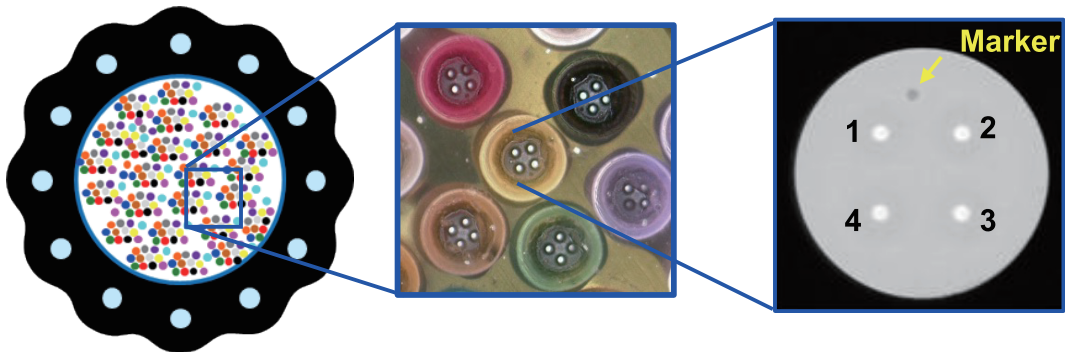


図1 製作したMCFケーブルの断面図

Fig. 1. Cross sectional images of fabricated MCF cable.

真・4c-MCFの断面写真を示す。ところで、MCFリンク構築時にはコア番号の管理が必要となる。4c-MCFのコアは正方格子状に等間隔に配置されており、コアと異なる屈折率を持つマーカを用いて各コアを区別する。図1に示すようにマーカはコア配置の対称性を破る位置に配置され、マーカと各コアとの距離の差により各コア番号を付与可能となる。その結果としてMCFの両端でコア番号の付与方向が逆回りになり、極性が生じる⁷⁾。MCF同士の接続時に、たがいのMCFの極性の組み合わせにより接続先のコア番号が変化する。そのため、コア番号を管理したMCFリンクを構築するためには極性管理が必要になる。極性管理の詳細については3章で記述する。

作製したMCFケーブルの外径は9.3 mmで、重量は59 kg/kmであった。比較のために、同じコア数を有する1152心のSCFケーブルの数値を引用すると、外径21.3 mm、重量313 kg/kmであった⁸⁾。MCFとAB-WTCの両技術の組み合わせにより、単位面積あたり5.2倍のコア密度と81%の軽量化を達成した。表1は作製したMCFケーブルの損失値

表1 MCFケーブルの損失（288心、1152コア分）

Table 1. Attenuation of MCF cable (Sample size: 288 fibers, 1152 cores).

Wavelength (nm)	Attenuation (dB/km)			
	Average	Max.	Min.	Target
1310	0.34	0.37	0.31	≤ 0.4
1550	0.20	0.23	0.18	≤ 0.3

を示す。ケーブル化前後での損失変動は十分に小さく、SCFケーブルと遜色のない特性であった。また、ケーブル化前後の4c-MCFの隣接コア間クロストーク（Crosstalk：XT）を図2に示す。コア間XTは透過法により測定した⁹⁾。エラーバーは、測定した1152コアの最大値と最小値の幅を示す。ケーブル化によりコア間XT値が増加し、変動も大きくなる傾向であった。コア間XT値の増加は過去に報告されているように、ケーブル化前の素線ボビン巻き状態からケーブルドラム巻き状態に変化したことによる曲げ半径の変化が主要因と考えられる⁶⁾。また、変動増加の要因はケーブル内の各4c-MCFの実装状態のバラつきが主要因と考えられる。

2.2 MCF融着接続

4c-MCF同士の融着接続にはフジクラ製の融着接続機FSM-100Pを使用した。FSM-100Pは装置単独でサイド

ビュー方式にて自動的にマーカとコアの位置を検出し、接続先コア番号を調整することが可能である⁶⁾。サイドビュー方式はエンドビュー方式に比べて装置の構成をシンプルにすることができ、サイズ・コスト面でメリットがある¹⁰⁾。図3はフィールド敷設と同じ融着接続条件で実験した、4c-MCFの融着接続損失の結果である。44回の融着接続で176コア分のデータを取得した。融着損失は、1310 nmにおいて平均0.09 dB、最大0.35 dB、1550 nmにおいて平均0.08 dB、最大0.31 dBを示した。

2.3 FIFOデバイス

Vanishing-core技術を用いたChiral Photonics社製のFIFOデバイスを用いた¹¹⁾。本フィールドテストでは、36個の予備を含む612個のFIFOデバイスを用意した。612個、2448チャンネル分のFIFOデバイスのILの分布を図4に示す。1310 nmにおいて平均0.29 dB、最大0.58 dB、1550 nmにお

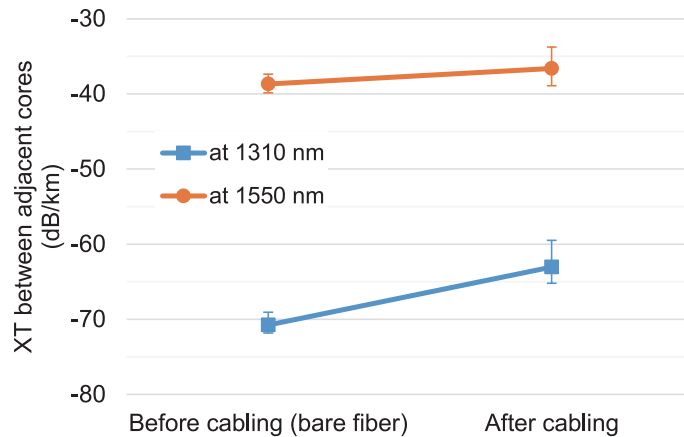


図2 ケーブル化前後の4c-MCFの隣接コア間XTの変化（288心、1152コア分）

Fig. 2. Changes in XT between adjacent cores of 4c-MCF before and after cabling (Sample size: 288 fibers, 1152 cores).

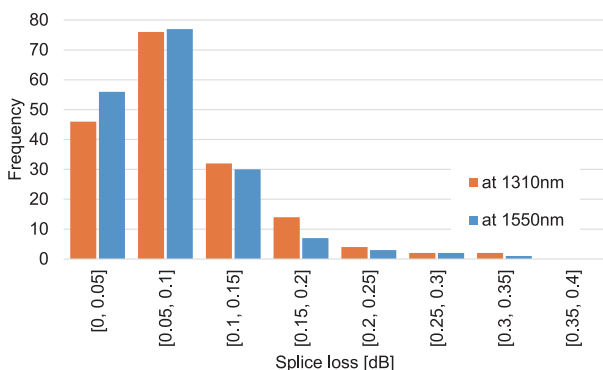


図3 4c-MCFの融着試験結果（44接続、176コア）

Fig. 3. Splice test result of 4c-MCF (Sample size: 44 connection, 176 cores).

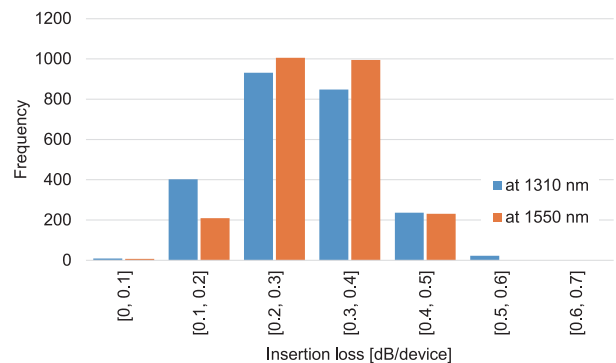


図4 FIFOデバイスの挿入損失（612個、2448チャンネル）

Fig. 4. Insertion loss distribution of FIFO device (Sample size: 612 pcs, 2448 channels).

フィールド実装した288心4コアマルチコアファイバケーブルリンクの損失特性

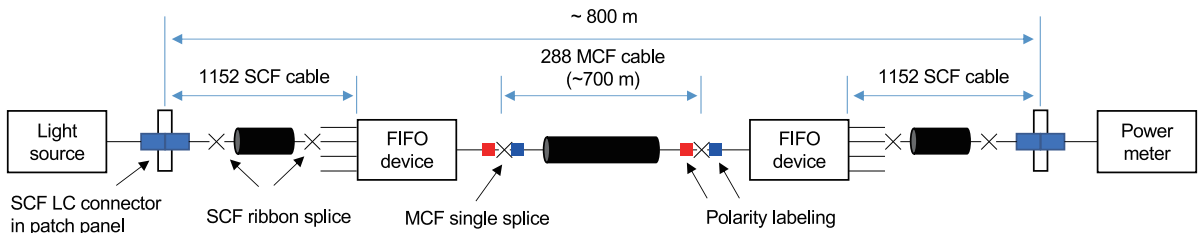


図5 構築したMCFリンクとOLTS試験系の概略図

Fig. 5. Schematic of constructed MCF link and OTSL measurement setup.

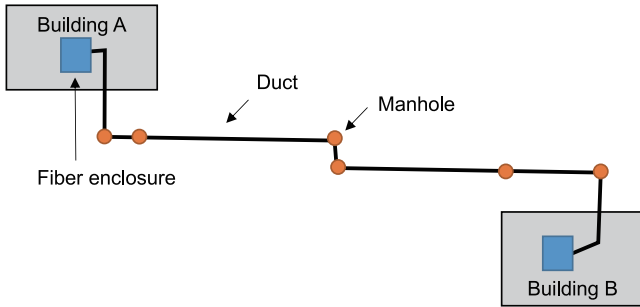


図6 テストサイトの概略図

Fig. 6. Schematic map of the test site.

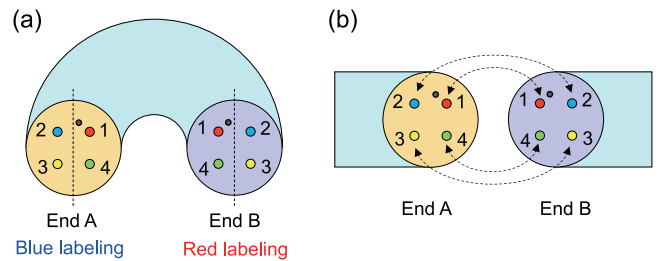


図7 (a) MCFの極性と識別色の定義,

(b) MCF接続におけるコア番号接続先

Fig. 7. (a) Definition of MCF polarity and labeling color, (b) Connected core numbers in MCF-MCF connection.

いて平均0.30 dB, 最大0.50 dBを示した。また, 反射損失は波長1550 nmにて1デバイスあたり平均-66 dB, 最大で-60 dBであった。隣接コア間XTは1310 nm帯において検出限界(およそ-70 dB)以下であり十分に低かった。また, 1550 nm帯においては最大で-45 dBであった。

3. MCFリンク構築と損失評価

図5に, 構築したMCFリンクの概要図を示す。パッチパネル(Patch Panel: PP)間のおよそ800 mの距離を, 約700 mのMCFケーブルおよびFIFOデバイス・SCFケーブル・融着接続・コネクタにより配線した。最初に, 地中に埋設された外径15 mm, 内径13 mmのマイクロダクトにエアブロン技術にてMCFケーブルを敷設した。図6に示すサイトマップの中央付近のマンホールからビルAの方向に向かってMCFケーブルを一方の端から敷設し, その後にもう一方の端をビルBの方向に向かって敷設した。次に, ケーブル内の各4c-MCFとFIFOデバイスに取り付けられた4c-MCFとを, 2.2節と同条件で単心融着接続した。FIFOデバイスに取り付けられたSCFは, ビル内に配線された約25 mのSCFケーブルと多心一括接続を行った。さらに, SCF

ケーブルはPPに取り付けられたLCコネクタ付きSCFと多心一括接続された。FIFOデバイスと周囲のSCF・MCFの融着接続部は, 保護のために光ファイバエンクロージャ内の融着トレイに収容された。

2.1節で述べたように, MCFリンクを構築する際にコア番号の接続先や極性の管理が必要となる。図7 (a)に, MCFの極性とラベリングの定義について示す。MCFケーブルおよびFIFOデバイスには, 極性を識別するためのラベリングを行った。A端には青色の, B端には赤色のラベリングを取り付けることで, フィールドで極性状態が視認できるようにした。本トライアルにおいては, 288本のMCFの極性が同一方向を向くように配列してケーブルを作製した。SCFケーブルでは個々のSCFの極性の配列を考慮する必要が無いため, MCFのために特別な極性の工程管理と検査を実施した。図8に示すように, ケーブル内のMCFの極性状態に合わせて両端にそれぞれ赤色・青色のテープを貼り付けて, 敷設時にMCFケーブルの極性状態が区別できるようにした。同様に, FIFOデバイスに取り付けられたMCFの極性の状態によって, A端が露出したFIFOデバイスには青色のジャケットを, B端が露出した

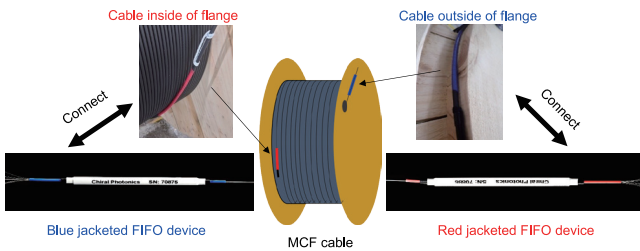


図8 極性の識別表示を施したMCFケーブルとFIFOデバイスの写真

Fig. 8. Photos of MCF cable and FIFO devices with polarity labeling.

FIFOデバイスには赤色のジャケットを取り付けた。MCFケーブルとFIFOデバイスは図5に示すように、それぞれの赤ラベルと青ラベルが接続されるように配置した。この配置構成を実現するために、ビルA・ビルBへのケーブルの敷設方向および各FIFOデバイスの設置先に配慮した。さらに図7 (b) に示すように、接続先コア番号が合致するように融着接続機でマーカ位置を識別・回転調心して接続された。フィールドテストにおいて、すべてのコア番号が計画通りに一致して接続されたことを確認した。これは、上述の極性ラベルが機能したことに加えて、融着接続時に正しいマーカ位置で調心できたことを意味する。なお、上述のように今回のトライアルにてMCFの極性管理がケーブル製造やフィールド敷設における負荷の要因となることが判明した。実用化に向けて極性の運用方法についての配慮が必要になると考えられる¹²⁾。

次に、構築したMCFリンクのILを測定した。図5に示すように、リンク両端のPPに光源およびパワーメータを接続して、波長1310 nmおよび1550 nmにて評価を行った。OLTS測定は双方向で行い、平均値をIL測定値とした。図9に測定結果を示す。本トライアルにおけるIL値の目標値3 dB以下に対して、全1152チャンネルのうち1102チャンネルが目標を達成した。損失増加した50チャンネルの原因を調査したところ、ほとんどの損失増加要因はSCFのコネクタおよび一括融着接続部にて生じていた。IL値が3 dB以下のチャンネルに着目すると、IL実測値の平均値は1310 nmにおいて1.46 dB、1550 nmにおいて1.17 dBであった。

次に、フィールド敷設による影響について検証するためにIL実測値とIL予測値の比較を行った。IL実測値には、上述の3 dB以上チャンネルにおける平均値を用いた。IL予想

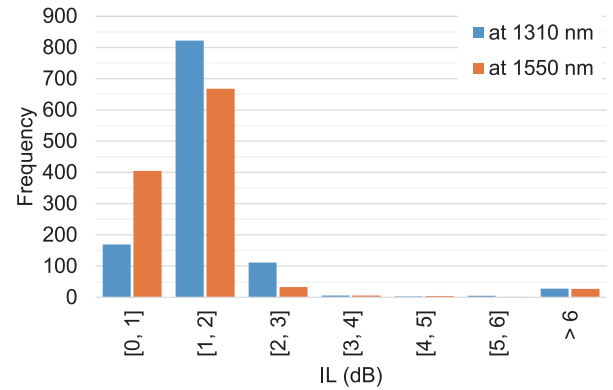


図9 構築したMCFリンクのIL測定結果 (1152チャンネル)

Fig. 9. IL measurement result of constructed MCF link (Sample size: 1152 channels).

値は、2章で示したMCF関連コンポーネントの平均値と、表2に示すSCF関連コンポーネントのIL平均値から算出した。これらの前提のもとに図5のリンクにおける各コンポーネントのIL平均値の総和からIL予想値を算出すると、1310 nmで1.44 dB、1550 nmで1.32 dBとなった。このIL予想値は上述のIL実測値と非常に近い値となった。この結果から、フィールドテストにおいてMCF関連コンポーネントによる有意な過剰損失は観測されず、期待どおりのILが得られたことが明らかとなった。さらに、図5のリンク構造でMCFの条長のみを延長した場合にどのくらいの距離までの伝送が可能となるかを見積もった。具体的には、1310 nm帯で伝送する100GBASE-LR4のパワーバジェットである6.3 dBで伝送可能な距離を、各コンポーネントの最大損失を考慮して計算した¹³⁾。MCFケーブルの伝送損失は表1に示す1310 nmにおけるターゲット値である0.40 dB/kmとした。MCF融着損失とFIFOデバイスの損失は2章で示した1310 nmにおける最大値を用いた。SCF関連コンポーネントは、表2のIL最大値を仮定した。これらの前提のもとに計算すると、最長で8 kmまでの伝送が可能と見積もられた。なお、本フィールドテストにおいては、敷設後のコア間XT測定は実施できなかった。そのため、フィールド敷設におけるコア間XTへの影響は今後のさらなる検討が必要である。しかし、10 kmまでの伝送距離で主流となる1310 nm帯の伝送においては個々のMCF関連コンポーネントのコア間XTは十分に低く、仮にフィールド敷設によりコア間XTが上昇したとしても伝送品質には影響を与えないと考えられる³⁾。

表2 リンクロス推定に用いたSCF関連コンポーネントの損失設定値, 1310 nmと1550 nmで同じ値を取ると仮定

Table 2. Loss setting values for SCF-related components used for link loss estimation, assumed to be the same value at 1310 nm and 1550 nm.

	SCF LCコネクタ	SCF融着接続	SCFケーブル
単位	1接続点	1接続点	1本
IL平均値 (dB)	0.1	0.05	0.01
IL最大値 (dB)	0.2	0.2	0.01

4. むすび

フィールド敷設した288心の4c-MCFから構成される1152チャンネルMCFリンクの損失特性を評価した。MCF関連コンポーネントはフィールドにおいても想定どおりの損失特性を示し、過剰損失は観測されなかった。今回のテスト結果から、1310 nm帯で8 km程度までの距離への高密度MCFリンクの適用可能性が示された。実用化に向けてはMCF関連技術の個々の仕様だけでなく、コア番号管理方法についても考慮が必要である。

参考文献

- 1) S. Matsuo et al., "1,728-Fiber Cable with 12-Fiber Ribbons Comprising 160- μ m Coating Fiber with 80- μ m Cladding," OFC2021, M3C.3.
- 2) S. Kaneko et al., "Innovative Solution Using SWR/WTC for Data Centers," Fujikura Technical Review, No. 49, 2019.
- 3) T. Matsui et al., "Step-index profile multi-core fibre with standard 125 μ m cladding to full-band application," ECOC2019, M.1.D.3.
- 4) T. Hayashi et al., "Field-Deployed Multi-Core Fiber Testbed," OECC/PCS2019, PDP 3.
- 5) S. Shimizu et al., "Air-Blown Fiber Optic Cable with SWR and WTC Technologies," Fujikura Technical Review, No. 49, 2019.
- 6) Y. Sasaki et al., "Optical-Fiber Cable Employing 200- μ m-Coated Four-Core Multicore Fibers," in Journal of Lightwave Technology, vol. 40, no. 5, pp.1560–1566, 2022.
- 7) T. Oda et al., "Multi-Core Fiber Link with Its Polarity Management in View," OECC/PSC2022, WP-C-2.
- 8) https://na.prysmiangroup.com/sites/default/files/product_center/north-america/files/TLS-DS-B-205-0321_576-1728F%20MassLink%E2%84%A2%20FlexRibbon%C2%AE%20I%26IO%20Multi-Tube%20NA%20250um.pdf, accessed on Feb. 2023.
- 9) T. Hayashi et al., "Characterization of Crosstalk in Ultra-Low-Crosstalk Multi-Core Fiber," in Journal of Lightwave Technology, vol. 30, no. 4, pp.583-589, 2012.
- 10) <https://www.fusionsplicer.fujikura.com/products/specialty-fiber-fusion-splicer-fsm-100-series-2/>
- 11) Victor I. Kopp et al., "Ultra-dense, 1152-core, broadband multicore fiber link deployed in a metro network," Opt. Express 31, 5794-5800, 2023.
- 12) 小田ほか:「マルチコアファイバの実用化に向けた極性管理方法の提案」, 信学会OCS研究会資料, OCS2022-73, 2023.
- 13) <https://standards.ieee.org/ieee/802.3/10422/>, accessed on Feb. 2023.