

多心-4コアマルチコア光ファイバを用いたDC内接続向け 400GBASE-FR4 2 km伝送試験

戦略センター

小池 恭史¹・尾崎 耕平¹・中根 裕樹¹・佐場 野多賀彦²・
西村 顕人³・山田 由美⁴

光R&Dセンター

小田 拓弥⁵

AFL Telecommunications Inc.

Naynesh Bansal⁶・Nikhil Angra⁶

400GBASE-FR4 Transmission Test over 2 km 4-core Multiple Multicore Fibers for Intra-Datacenter Interconnects

Y. Koike, K. Ozaki, H. Nakane, T. Sabano, A. Nishimura, Y. Yamada,
T. Oda, N. Bansal, and N. Angra

データセンター内光配線を想定し、2kmの4コアマルチコア光ファイバ、24心マルチコアファイバMPOコネクタ、24ペアのファンアウトデバイスを用いて伝送システムを構築し、400GBASE-FR4トランシーバを用いた伝送試験を行った。コア間クロストークのある環境下でエラーフリーの伝送を実証したため、その結果を報告する。

This study demonstrated a transmission test assuming intra-datacenter interconnection using a 400GBASE-FR4 transceiver on a transmission system built using 2 km 4-core multicore fibers, 24 pairs of fan-out devices, and multicore fiber MPO connectors. Error-free transmission was achieved in an environment with inter-core crosstalk, and the results are reported.

1. ま え が き

近年、人工知能（AI）や機械学習（ML）の需要が爆発的に増大している。AIやML向けデータセンター（DC）においては、大容量、高密度、低遅延で多数のグラフィックスプロセッシングユニット（GPU）間を接続することが求められ、それに伴い、DC内のデータトラフィックの増大とともに、大量の光ファイバ及び光ファイバ接続が必要とされる。そのため、サーバやスイッチのラックに設置できるファイバの数は、従来のシングルコア光ファイバ（SCF）では限界に近づいている。また収容面のみならず、各GPU間の相互接続による膨大な接続数が、AI/ML向けDC建設における配線工数を増大させている。空間分割多重（SDM）技術の一つであるマルチコア光ファイバ（MCF）は、前述の増大するデータトラフィックに対するSCFシ

ステムの限界を解決するソリューションとして積極的に開発されてきた。様々なSDMファイバの中でも、標準的なクラッド外径を持つ弱結合4コアMCF（4c-MCF）は国際標準化に向けた取り組みが進められており、また実用化に向けた伝送試験に使用されている¹⁾。4c-MCFの適用により、ファイバ及び接続のフットプリントは従来のSCFの4分の1に圧縮され、コア密度を高めることができる。

一方で、MCF導入過渡期にあっては、トランシーバなどの伝送装置については既存のSCFシステムが用いられる。そのため、MCF同士の接続に加え、SCFとMCFとの変換接続が必要となる。この時の接続イメージを図1に示す。

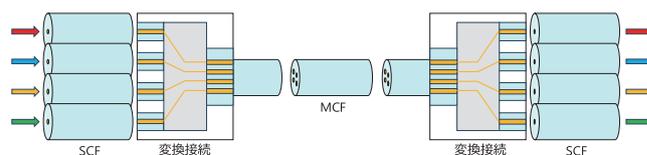


図1 MCF接続イメージ図

Fig.1. Schematic of MCF connection.

1 先進光接続部品研究開発部

2 先進光接続部品研究開発部 部長

3 技術マーケティング部 上席研究員

4 戦略センター センター長

5 光通信研究部 グループ長

6 AFL Telecommunications Inc.

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
400GBASE-FR4	400GBASE Forward Reach 4	IEEE 802.3 Ethernet標準に基づいた光通信の規格のひとつ。 波長分割多重（CWDM, 4波長）を使用し、シングルモードファイバーを介して最大2kmの距離で4 x 100G信号の伝送をサポートする。
MTフェルール	Mechanically Transferable Ferrule	複数の光ファイバを一括で、かつ高い位置決め精度で接続するための樹脂製素子。
MPOコネクタ	Multifiber Push-On Connector	MTフェルールが実装され、複数の光ファイバを一括で接続するプッシュプル型光コネクタ。
空間分割多重（SDM）	Space Division Multiplexing	伝送容量を拡大するために光ファイバ中の空間的な自由度を用いた多重化技術。1本の光ファイバにコアを複数有するマルチコアファイバ、モードが複数あるフューモードファイバなどがある。
マルチコア光ファイバ（MCF）	Multi-Core Fiber	通常の光ファイバは1本のファイバにコアが1本。一方MCFは1本のファイバに複数のコアを有する。
コア間クロストーク（IC-XT）	Inter-Core Crosstalk	複数のコアを持つマルチコア光ファイバにおける他コアからの漏れ込み。信号雑音として通信品質を低下させる。
ビット誤り率（BER）	Bit Error Rate	受信側が受け取った全データに対する誤ったデータの比率で表されるデータ伝送の品質指標。
Oバンド	Original-band	光通信で使用される波長帯のひとつで、1260 nm ~ 1360 nmの波長帯。
QSFP-DD	Quad Small Form-factor Pluggable Double Density	光ファイバーを通信機器に接続する光トランシーバの規格のひとつ。QSFPモジュール比で倍の密度（8レーン）の電気インターフェースを備える。
PAM4	Pulse Amplitude Modulation 4	信号の伝送方式のうち、信号振幅を4つの異なる値に変調する方式。 1ビット2値変調のNRZ（Non Return to Zero）と比べ、2倍の情報を伝送することができるが、各振幅の差が小さくなり、ノイズの影響を受けやすくなる。
前方誤り訂正（FEC）	Forward Error Correction	誤り訂正方式のひとつで、誤りが起こることを見越して冗長なデータを送受し、受け手がデータ復元する方式。PAM4ではFECが採用されている。

このような背景のもと、当社では開発している4c-MCF、MCF接続部品、及びIEEE802.3²⁾にて標準化されているSCFを用いた400GBASE-FR4トランシーバを用い、4c-MCFを用いたDC内における2km以下の光ネットワーク配線を想定した伝送試験を実施した。400 Gbpsの4値パルス振幅変調（PAM4）を適用したビット誤り率（BER）試験にお

いて、エンドツーエンド（E2E）のエラーフリー伝送を確認した。本稿では、試験系に用いたMCF接続部品であるファンイン/ファンアウトデバイス（FI/FO）とMPOコネクタの特性、及び伝送試験の結果を報告する。

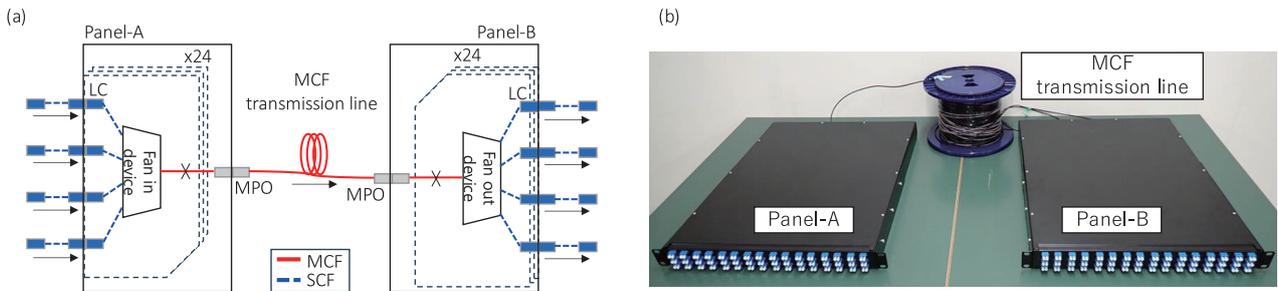


図2 MCF伝送試験用テストベッド (a)概略図 (b)外観図

Fig.2. Testbed for MCF transmission: (a)Schematic, (b) Exterior view.

2. 伝送試験システム

伝送試験は、高密度配線が必要なサーバラックやスイッチラック間の多心ケーブルにMCFを適用した状況を想定して実施した。そのため、トランシーバ間の伝送路として2 kmの4c-MCFを用いて構築されたMCFテストベッドを用いた(図2 (a) (b))。伝送路は24本の4c-MCF(合計96コア)で構成し、両端はMPOコネクタ³⁾で成端されており、1Uの19インチラックパネル背面に配置された同様のMPOコネクタと接続される。400GBASE-FRトランシーバはSCFによってパネル前面と接続される。パネル内には、MCFとSCFとを接続するために必要な変換デバイスであるファンイン/ファンアウトデバイス(FI/FO)が配置されている。

2.1 ファンイン/ファンアウトデバイス

上述の通り、既存のSCFシステムにMCFを導入し接続をするためにはFI/FOが必要となる。伝送試験に用いた当社のバンドル型FI/FOの構造を図3に示す。4c-MCFのクラッド径は125 μm であり、4つのコアはピッチ40 μm の正方格子状に配置されている。バンドルされた光ファイバは、ケミカルエッチングによって直径が125 μm から40 μm に

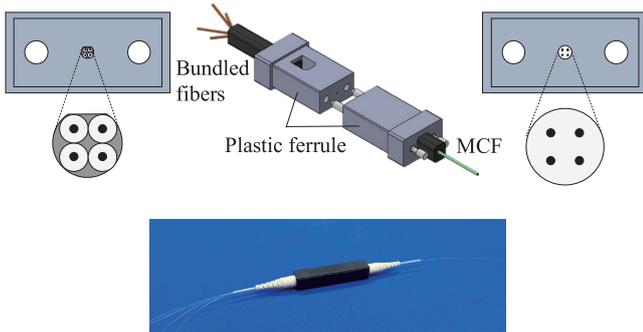


図3 バンドル型FI/FOデバイスの構造

Fig.3. Structure of bundle-type FI/FO device.

縮小された4本のSCFの束である。波長1310 nmのモードフィールド径(MFD)は、MCFが8.4 μm 、SCFが8.6 μm である。各光ファイバは射出成形で成形された樹脂製フェルールに挿入される。バンドルファイバの回転角度は、D字型に形成されたフェルールの孔に挿入することでパッシブに調心される⁴⁾。一方、MCFはカメラで観測しながら所定の角度に回転調心される。フェルールに固定されたMCFとバンドルされた4本の光ファイバが互いに突き合わされることによって光学的に接続される。両フェルールの端面は、低反射損失を達成するために8°に斜め研磨されている。SCFの逆端はLCコネクタ⁵⁾で成端されている。図4は48個のFI/FOデバイスの波長1310 nm(Oバンド)における挿入損失(IL)を示している。ILは平均0.26 dB/個、最大0.48 dB/個であった。ここで、ILにはLCコネクタの接続損失も含まれている。

2.2 4c-MCF 24心MPOコネクタ

図5に4c-MCFを用いた24心MPOコネクタを示す。各々のMCFは、MPOコネクタの基準であるMTフェルールの端面両端に位置する2つのガイド孔に対して回転調心される必要がある。当社では、回転調心角度を高精度に制御するため、回転調心された24本のMCFをあらかじめ保持基

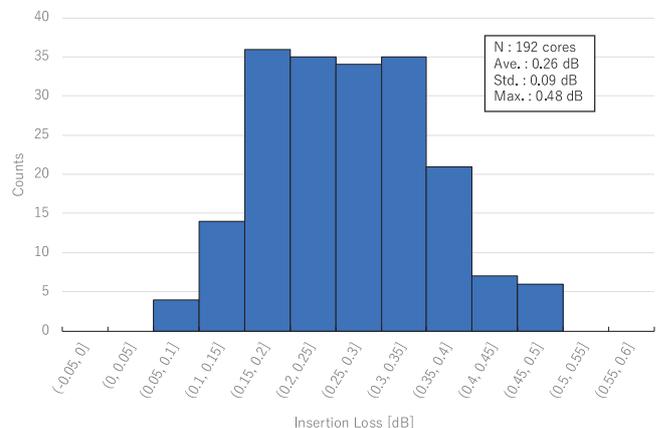


図4 FI/FOデバイスの挿入損失特性

Fig.4. Insertion loss performance of FI/FO devices.

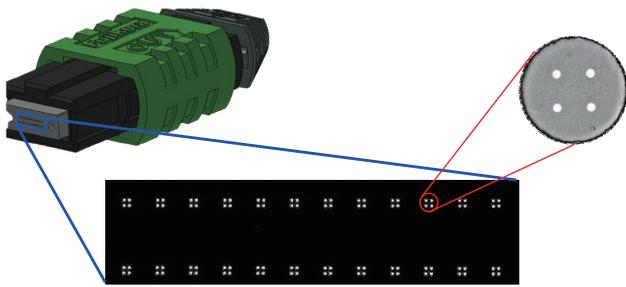


図5 4c-MCF 24心MPOコネクタの概略図

Fig.5. Schematic diagram of 4c- MCF-24MPO connector.

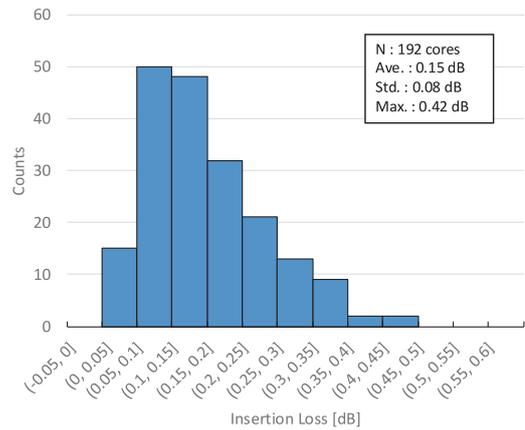


図6 4c-MCF 24心MPOコネクタの挿入損失特性

Fig.6. Insertion Loss performance of 4c-MCF-24MPO Connectors.

板に固定し、保持基板ごと一括してMTフェールに挿入する構造及び工法を採用した。なお、MTフェール、及びMPOコネクタ部品には、当社製の既製品を使用した。MCFテストベッドに用いた4つの4c-MCF 24心MPOコネクタに挿通固定された96本の4c-MCFの平均角度ズレは0.49°であった。図6に使用した4c-MCF 24MPOコネクタのILの測定結果を示す。ILは平均0.15 dB、最大0.42 dBであった。これらの結果は、IEC 61753に定義されるGrade-C（ランダム嵌合におけるIL測定値において、平均 ≤ 0.25 dB、97%値 ≤ 0.5 dB）に相当する⁶⁾。

2.3 テストベッド

400G伝送試験に用いたMCFテストベッドを図7 (a) に示す。96個のSCF-LCコネクタレセプタクルが1Uの19インチラックパネル前面に配置され、400GBASE-FR4 トランシーバに接続された標準的な SCF-LC パッチコードと接続される。各パネル（パネルAとB）には、24個のFI/FO

が配置され、パネル背面で4c-MCF 24心MPOとして成端され、伝送路のMCFと接続される。MCFテストベッドのファイバリンクには、DC内光配線を想定した8つの接続点（2つのMPOコネクタ接続、2つのFI/FO、2つのMCF間融着接続、2つのSCF-LCコネクタ接続）が含まれており、このテストベッドで伝送性能を評価することにより、DC内配線アプリケーションに対するMCFソリューションの実現可能性を評価した。図8に、OバンドにおけるMCFテストベッドのILの測定結果を示す。MCF伝送路における損失を排除するため、MCF伝送路長を50 mと短尺とした系においては、平均ILは1.42 dB、最大ILは2.39 dBであった。400GBASE-FR4伝送の仕様では、光ファイバ伝送、コネクタ接続、融着接続を含めたリンク損失バジェットを最大4 dBにする必要がある。使用したMCFの伝送損失はOバンドでtyp. 0.35 dB/kmであり、伝送路に2 kmのMCFを使用しても、十分にリンク損失の仕様を満たす。

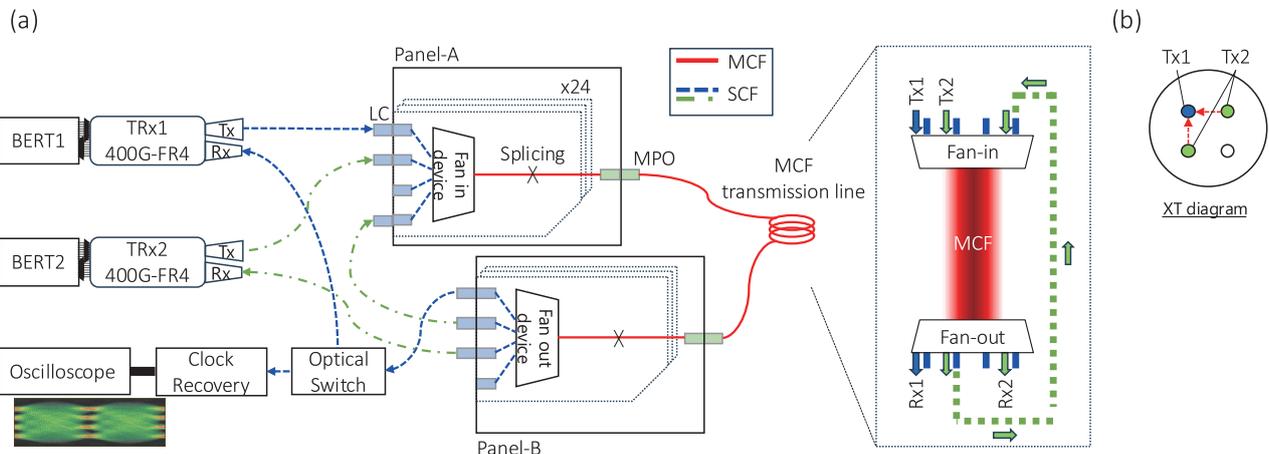


図7 400 Gbps伝送試験用MCFテストベッドの構成図

Fig.7. Setup for 400 Gbps transmission MCF testbed.

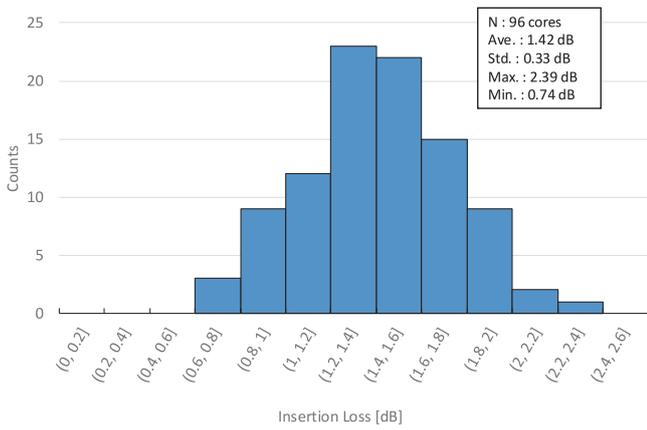


図8 MCFテストベッドの挿入損失特性 (50m MCF)
Fig.8. Insertion loss performance of MCF testbed (50 m MCF) .

3. 2 km MCFでの400GBASE-FR4伝送試験

上述した MCFテストベッドを含む伝送試験のセットアップは図7 (a) に示されている。QSFP-DDインターフェースの400GBASE-FR4トランシーバ1 (TRx1) をBERテスト1 (BERT1) に接続することで、TRx1に8レーンの50 Gbps電気信号が入力され、400 GbpsのPAM4光信号が伝送される (Tx1, 青矢印)。MCFテストベッドを伝送した後、光信号はTRx1のRx1に続くBERT1と、光スイッチデバイス (OS) を用いたデジタルサンプリングオシロスコープに分波され、BERが評価される。ここで、OSの標準ILは3.0 dBであった。さらに、2台目のトランシーバ (TRx2) を用いて、同じMCFの他の隣接する2コアに同じ方向の信号を送信し、同一光ファイバ内の他コア間のクロストーク (IC-XT) が伝送品質に与える影響を評価した

(Tx2, 緑矢印)。なお、2コアの内の一方は、伝送後の光信号を折り返して再度入力している (図7 (b))。

図9は、MCF伝送路が2 kmの場合の伝送試験のBERであり、ボックスプロットの範囲は電気信号8レーン間のばらつきを表している。なお伝送試験は、MCFテストベッドにおけるIL値が高い方から4コアと、低い方から4コアをそれぞれ選択して実施した (IL 1.3 ~ 2.9 dB)。また、隣接するコアからIC-XTが存在する場合と存在しない場合のそれぞれの状況についても比較している。その結果、前方誤り訂正 (FEC) 前のBERは、IL値の大小やIC-XTの有無にかかわらず 10^{-6} 以下であり、テストベッドを介さずにトランシーバ同士を直接接続するバック・トゥ・バック (B2B) と同レベルであった。これらの結果は、FECによってエラー訂正可能なBERの閾値 2.4×10^{-4} よりも約2桁小さく、IC-XTが存在する状況下であっても、DC内接続を想定した2 kmのMCFを伝送路に用いた400GBASE-FR4伝送において、エラーフリー通信が実現されたことを示している。

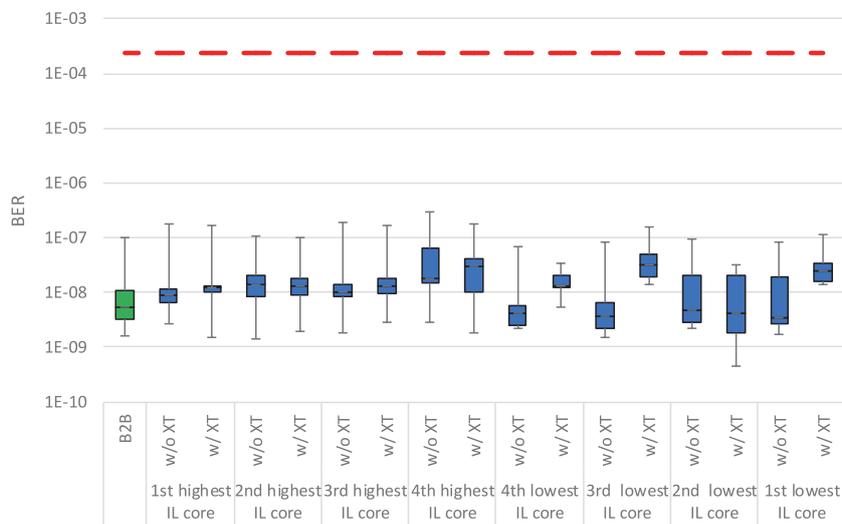


図9 2 km MCF伝送試験のビット誤り率 (IC-XT有/無)
Fig.9. BER of the transmission over 2 km MCF line with/without IC-XT

4. むすび

本稿報告では、標準クラッド外径の弱結合4c-MCFを伝送路とし、開発を進めているMCFとSCFの変換接続デバイスであるFI/FO、及び4c-MCF 24心MPOコネクタを用いてDC内配線を想定したテストベッドを構築し、400GBASE-FR4トランシーバによる2kmの伝送試験を実証した。その結果、IC-XTが存在する状況下において、FEC閾値以下のBER $<10^{-6}$ でエラーフリー通信が確認され、MCF及びMCF接続部品によるDC内光配線の高密度化の実現可能性が示された。今後もDC市場の需要にこたえるべく、FI/FOやMCFコネクタを始めとする接続部品を含むMCFソリューションの開発に取り組んでいく。

参考文献

- 1) T. Mori et al., "Applicability of Standard Cladding Diameter Multi-Core Fiber Cables for Terrestrial Field," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 42, no. 3, pp. 1044–1055, 2024.
- 2) IEEE Standard for Ethernet, IEEE 802.3, P802.3cu-2021, "IEEE Standard for Ethernet – Amendment 11: Physical Layers and Management Parameters for 100 Gb/s and 400 Gb/s Operation over Single-Mode Fiber at 100 Gb/s per Wavelength," 2021.
- 3) IEC 61754-7, "Fibre optic interconnecting devices and passive components – Fibre optic connector interfaces- Part 7: Type MPO connector family," Edition 3.0, 2008.
- 4) K. Ozaki et al., "Bundle-type fan-in/fan-out device for 4-core multi-core fiber with high return loss," *Proc. of OFC2023*, W2A.10.
- 5) IEC 61754-20, "Fibre optic interconnecting devices and passive components - Fibre optic connector interfaces - Part 20: Type LC connector family" , Edition 2.0, 2012.
- 6) IEC 61753-1 "Fibre optic interconnecting devices and passive components – Performance standard – Part 1: General and guidance," Edition 2.0, 2018.