

マルチコアファイバ用小型の空間光学型 ファンイン・ファンアウトデバイス

Compact Spatial Optical Coupling Fan-in/Fan-out Devices for Multi-core Fibers

島川 修*
Osamu Shimakawa

田中 正人
Masato Tanaka

小柳 佑平
Yuhei Koyanagi

田澤 英久
Hidehisa Tazawa

近年の通信トラフィックの急増に対応するため、マルチコアファイバ（MCF）の研究開発が進んでおり、同時にMCFをシングルコアファイバ（SCF）と接続するファンイン・ファンアウトデバイス（FIFO）も開発されている。これまでに報告されているFIFOは様々な方式があるが、低損失、高信頼性が要求されるシステムで使おうとすると方式は限られる。その一つが空間光学型^{*1}である。しかしMCFの場合、光学系が複雑になるためデバイスの小型化が難しかった。今回、熱拡散コア（TEC）ファイバ^{*2}を使った新しい設計で外径が3 mmの小型なFIFOを実現した。

Multi-core fibers (MCFs) have been developed to address the recent surge in communication traffic. Fan-in/Fan-out devices (FIFOs) that connect MCFs to single-core fibers (SCFs) have also been developed at the same time. While various types of FIFOs have been reported so far, Types suitable for systems requiring low loss and high reliability are limited. One option is the spatial optical coupling type FIFO. However, achieving compact FIFOs was challenging due to the complexity of the optical system. We have realized a compact FIFO with a diameter of 3 mm through a new design that utilizes thermally expanded core (TEC) fibers.

キーワード：マルチコアファイバ、ファンイン・ファンアウト、空間光学型

1. 緒 言

近年の通信トラフィックの急増に対応するため、マルチコアファイバ（MCF）の研究開発が進んでいる^{(1),(2)}。今後、海底光ケーブルネットワークやデータセンタネットワークでのMCFの実用化が期待されている。前者に関しては、既に一部でMCFを使ったシステムが開通しようとしている⁽³⁾。MCFはケーブルのスペースを削減できる大きな利点がある一方で、システム内で使うデバイスはまだMCFへの対応が十分追いついておらず、従来からのシングルコアファイバ（SCF）用のデバイスに頼っている。そのため、MCFとSCFを接続するためのファンイン・ファンアウトデバイス（FIFO）が必要である。例えば長距離MCF伝送システムの中継器内は、図1に示す通り光増幅器、利得等化器^{*3}の前後にFIFOを置くことで、SCF用と同じ光増幅技術を使うことができる。中継器内は元々スペースの制約が大きいことに加えて、SCFシステムにはなかったFIFOが新たに加わることで、小型化が重要である。また、光増幅後は通光パワーが高いため高パワーに対する耐性が必要で、例えば海底システムで使う場合には補修や交換が容易でないことから、陸上用途以上の長期間の信頼性も必要である。今回紹介するFIFOは、光路に樹脂を使用しない空間光学型であり、レーザ溶接組み立てのため、高パワー耐性を含む長期信頼性の面で有利である。MCF用デバイスは、SCF用に比べてチャンネル（ch）が増える分、光学系が複雑になり小型化の面で不利であるが、今回のFIFOは

熱拡散コア（TEC）ファイバ⁽⁴⁾を使うことでSCF用のデバイスと同等またはそれ以下の外径3 mmを実現した。本論文では、試作した2コアファイバと4コアファイバの2種のMCF用のFIFOの基本設計と諸特性について紹介する。

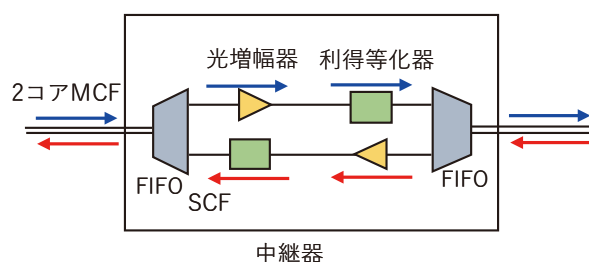


図1 MCF用中継器内の概略図

2. 従来と今回の光学系設計の概略比較

当社では過去にも空間光学型のFIFOの試作をしていた^{(5),(6)}。過去の光学系と、今回の光学系を比較するため、概略図をそれぞれ図2の(A)と(B)に示す。過去の設計(A)では4心SCFアレイに対向するレンズは心数と同じ4つであった。4つのレンズを配置させるとFIFOの外径が大幅に太くなるため、実際には4つのレンズが一体化されたマイ

クロレンズアレイを用いた。その際、ある1つのレンズに隣接chの光が掛かると光損失となってしまうため、隣接ch間のビームは図の通り分離してからマイクロレンズで集光する必要があった。そのため、自ずとSCFのファイバ間距離も離す必要があり小型化が難しかった。一方、今回の設計 (B) では、4本のSCFで1つのレンズを共用している。そのため、図の通り隣接ch間のビームが重なった状態でレンズにより集光することは問題ない。したがってSCFアレイも隣接SCF同士が接するバンドル状態にすることができて細径化が可能となった。本設計の場合、MCFのコアピッチを P_0 、SCFアレイのコアピッチを P_b とすると、レンズ系の倍率が P_b / P_0 であるため、MCFの出口でのビームサイズの指標であるモードフィールド径 (MFD) もSCFの入口で P_b / P_0 倍に拡大される。そこで各SCFの先端をTEC加工することで、SCFのMFDを拡大して低損失で結合できるようにした。レンズ系は、設計 (A) ではMCF側およびSCF側の各レンズの焦点距離を f_0 、 f_a とすると、MCFとSCF間でビームが等倍結合となるように $f_a / f_0 = 1$ にしているのに対して、設計 (B) ではMCF側およびSCF側の各レンズの焦点距離を f_0 、 f_b とすると、 $f_b / f_0 = P_b / P_0$ となるようにしている。

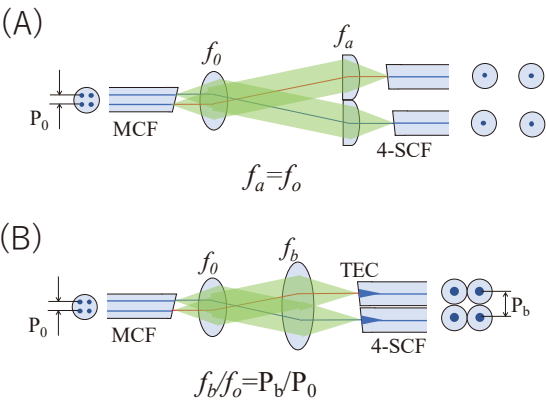


図2 過去 (A) と今回 (B) の光学系概略

3. 光ファイバの諸元

3-1 2コアMCFの諸元

2コアMCF用FIFOに用いたMCFとSCFアレイの諸元を表1に、またMCFとSCFアレイの端面写真と、SCFのTEC加工前後のビームのNFP^{*4}をそれぞれ図3の (A) ~ (C) に示す。MCFもSCFもコアの設計はシングルモード (SM) である。MCFはコア間のクロストーク (XT) が低い非結合型コアである。

MCFのコアピッチが35.5 μm に対して、SCFアレイのコアピッチが125 μm であり、コアピッチの倍率は3.5倍である。一方MCFの波長1.55 μm におけるMFDが10 μm であるため、SCF側はその3.5倍の35 μm になるようにTEC

加工をした。TEC加工前は10.4 μm である。

表1 2コアMCFとSCFアレイの諸元

	2コアMCF	SCFアレイ
コア種	SM／非結合	SM
MFD@ $\lambda 1.55 \mu\text{m}$ [μm]	10	10.4 35 (TEC部)
クラッド径 [μm]	125	125
最隣接コアピッチ [μm]	35.5	125

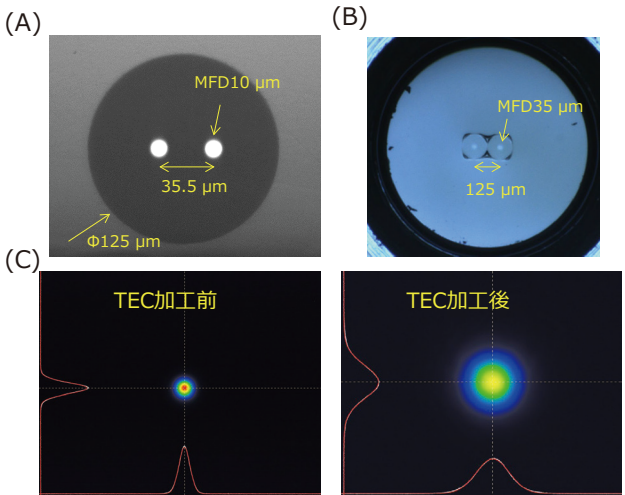


図3 2コアMCFおよび2心SCFアレイの端面写真とSCFのTEC加工前後のNFP

3-2 4コアMCFの諸元

4コアMCF用FIFOに用いたMCFとSCFアレイの諸元を表2に、またMCFとSCFアレイの端面写真と、SCFのTEC加工前後のビームのNFPを図4の (A) ~ (C) に示す。

MCFの最隣接コアピッチが40 μm に対して、SCFアレイの最隣接コアピッチが125 μm であるため、コアピッチの倍率は3.1倍である。MCFのMFDが9.8 μm であるため、SCF側はその3.1倍の30.5 μm になるようにTEC加工をした。TEC加工前は10.4 μm である。加工前のNFPに関しては図3 (C) の加工前と同じである。

表2 4コアMCFとSCFアレイの諸元

	4コアMCF	SCFアレイ
コア種	SM／非結合	SM
MFD@ $\lambda 1.55 \mu\text{m}$ [μm]	9.8	10.4 30.5 (TEC部)
クラッド径 [μm]	125	125
最隣接コアピッチ [μm]	40	125

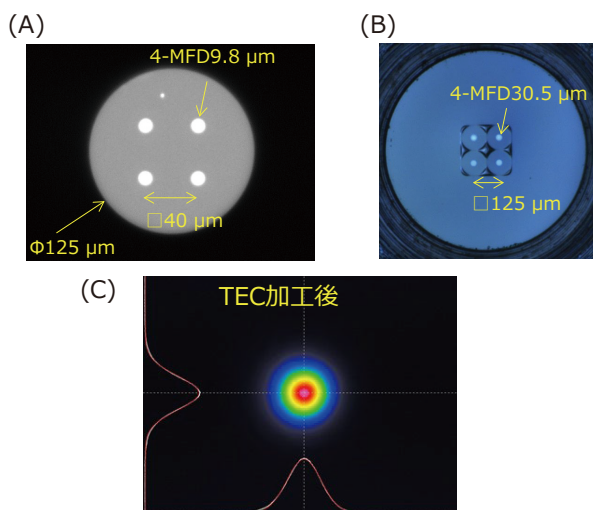


図4 4コアMCFと4心SCFアレイの端面写真およびSCFのTEC加工前後のNFP

4. 試 作

2コアMCF用および4コアMCF用FIFOの組み立て方法はほぼ共通である。共にまず金属ホルダに保持されたサブアセンブリ品^{*5}を組み立てて、その後透光させた状態でサブアセンブリ品同士を損失が低くなるようにアクティブに調心^{*6}し、レーザ溶接でサブアセンブリ品同士を固定した。両者の違いは、調心の際に光パワーモニターしたポートが2心か4心かの違いだけである。前述の図3と図4の各(B)に示しているファイバ保持用のフェールルの外径は、2心用も4心用も同じである。そのため、サブアセンブリ品も同じ外径にできている。写真1に組み立てた4コアMCF用のFIFOの外観写真を示す。外装金属管の外径が3 mmで、ブーツを除く金属管部分の全長が50 mm、ブーツを含めた全長も65 mm以下である。2コアMCF用FIFOについても外寸は同じであるため、外観写真の掲載は省略する。

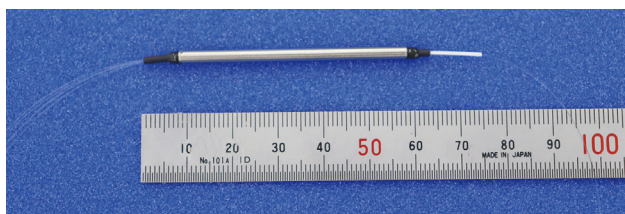


写真1 組み立てた4コアMCF用のFIFO

当FIFOの特徴は、前述の通りSCFアレイ側のレンズを1枚にするためにSCFの先端をTEC処理してMFDを拡大していることである。MFDが3.5倍に拡大されたTECファ

イバを用いていることで、MFDが拡大されていない通常のSCFに比べて軸ずれに対して光損失の変化が大幅に鈍感になっている。一方、逆に角度ずれに関しては敏感になっているが、構造的に角度ずれが発生しにくい設計となっている。従って、レーザ溶接時の組み立て失敗のリスクを低減できるだけでなく、組立後も仮に温湿度など環境の変化などで軸がずれたとしても、ほとんど損失劣化が発生しないという信頼性面での利点もある。

5. 光学特性

5-1 2コアMCF用FIFO用光学特性例

2コアMCF用FIFOのCバンド帯における挿入損失 (IL) と偏波依存性損失 (PDL)、ILの分布、XT、アイソレーション (ISO) を測定した。測定系の概略を図5に示す。

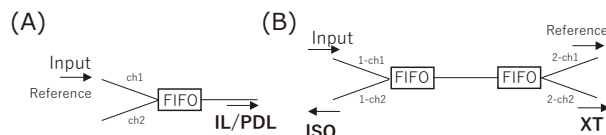


図5 2コアMCF用FIFOの光学特性測定系の概略

(A)のILとPDLについてはFIFOを1つで測定したのに対して、(B)のXT、ISOはFIFOを2つ接続した状態で測定した。ここではXTは信号光の一部が隣接chへ漏えいする量を、ISOは信号光の一部が信号光の方向とは逆方向に戻ることを遮断する性能を表す。ILは低損失すなわち高効率さを表す指標で、低い方が好ましい。PDLは光信号の偏波状態によってどれだけILが変動し得るかを示すもので、こちらも低い方がILが安定して好ましい。XTは低い方が隣接chの信号品質を阻害しないため、低いことが好ましい。MCFは2コアの場合、上り信号用、下り信号用で使い分けことが想定される。その場合、隣接chに逆方向へ漏えい光が発生すると、隣接chの信号品質を悪化させる。したがってXTとはプラスマイナスの符号が逆のISOは値が大きい方が好ましい。

IL、PDL、XT、ISOの特性例を図6の(A)~(C)に示す。(A)に示す通り、ILはCバンド^{*7}帯において波長依存性が小さいフラットな波形が得られた。PDLも0.1 dB以下と良好であった。(B)と(C)に示すXTおよびISOも各-55 dB以下、55 dB以上と良好であった。なおXTに関しては、FIFOが空間光学系部分で持つXT以外にMCF自身が持つXTも含まれる。しかし当FIFOのMCFは10 m以下と短いため、MCFの影響は少ないと思われる。

図6の(D)にはN=38、計76ch分のILの分布を示す。IL分布に用いている値は各サンプルのCバンド帯域内にお

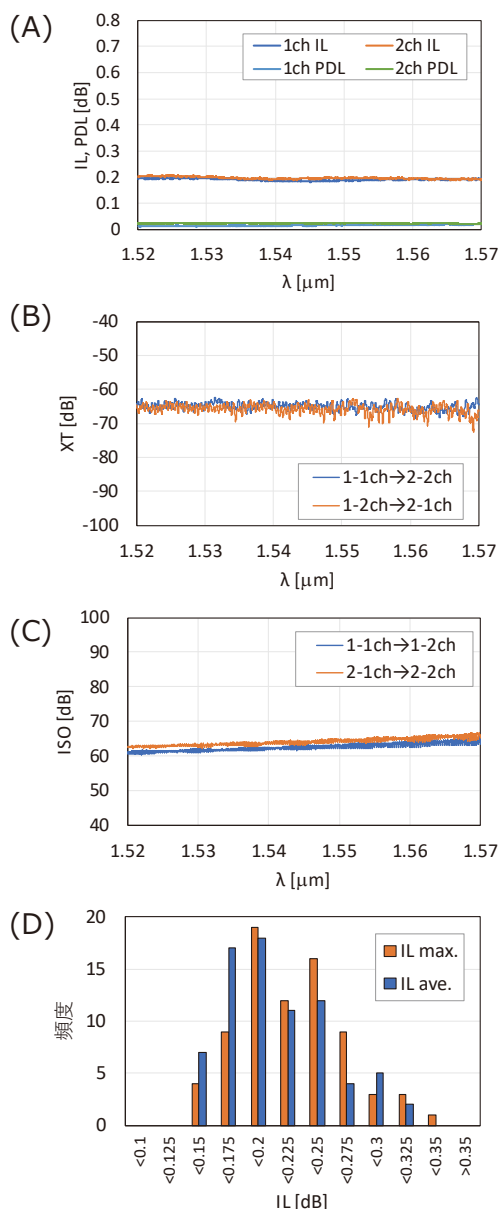


図6 2コアMCF用FIFOの光学特性例
(A) IL, PDL、(B) XT、(C) ISO、(D) IL分布

ける最大値および平均値である。いずれも0.35 dB以下の低損失で、平均は各々0.22 dBおよび0.2 dBである。他にもFIFOを2つ接続した状態で各chの波長1.55 μm における反射減衰量も測定し、いずれも50 dB以上と良好であった。

5-2 4コアMCF用光学特性例

4コアMCF用FIFOについてもCバンド帯におけるIL、PDL、XT、ISOを測定した。測定系の概略を図7に、特性例を図8の(A)~(C)に示す。こちらも2コアMCF用FIFOと同様に、(A)のILとPDLについてはFIFOを1つで測定したのに対して、(B)のXT、ISOはFIFOを2つ接続した状態で測定した。XTとISOの定義についても2コアMCF用FIFOと同じである。

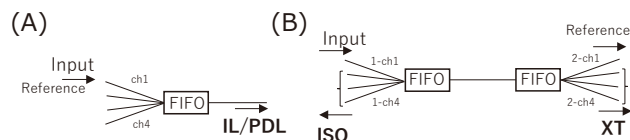


図7 4コアMCF用FIFOの光学特性測定系の概略

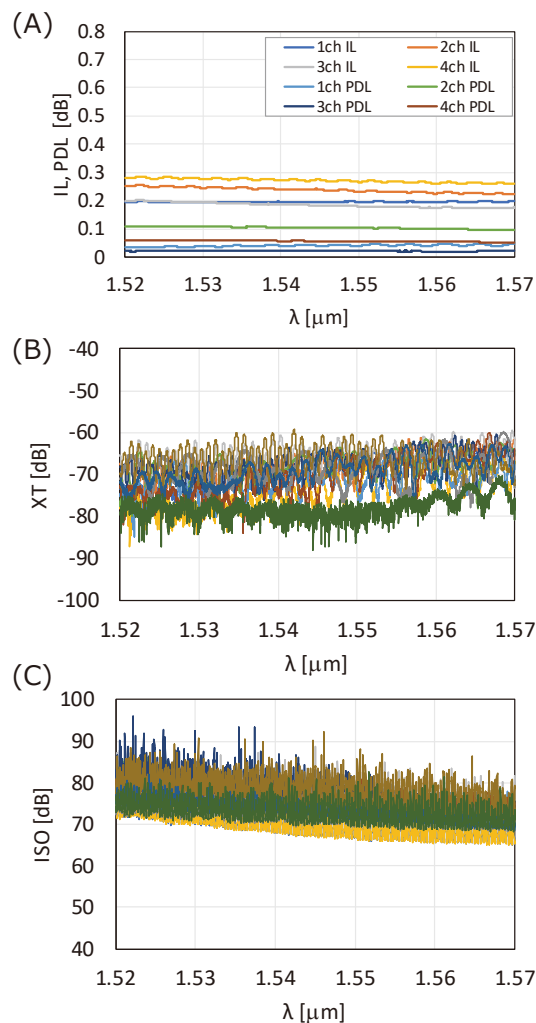


図8 4コアMCF用FIFOの光学特性
(A) IL,PDL、(B) XT、(C) ISO

ILは2コアMCF用と比べると高いものの、それでも0.3 dB以下の低損失で、Cバンド帯において波長依存性が小さなフラットな波形が得られた。PDL、XT、ISOも2コアMCF用と同様に良好な結果が得られた。

6. 信頼性評価

6-1 環境試験

2コアMCF用FIFOについては、Telcordia^{®8}の光パッシブ部品用の信頼性規格GR-1221-COREの中でも主要な

環境試験を実施し良好であることを確認している。主な結果は表3の通りである。高温高湿度試験、温度サイクル試験、高温放置試験、低温放置試験でいずれも11個のサンプルで評価し、試験前後のILの変動は目標とする0.3 dB以下に対して十分に低い結果となった。

表3 信頼性試験項目とその結果

試験項目	条件	試験時間 or サイクル数	N数	判定基準	判定
高温高湿度試験	85℃/85 %RH	2000 hr	11	Δ IL < 0.3 dB	良好
温度サイクル	-40℃/85℃	500 cycle	11		良好
高温放置	85℃	2000 hr	11		良好
低温放置	-40℃	1000 hr	11		良好

6-2 高パワー通光試験

2コアMCF用FIFOについて、高パワー通光耐性を確認するための試験を行った。中継器内での通光パワーは通常23 dBm以下と考えられるが、図9に示す通り、12倍以上の34 dBmの通光試験を100時間行い、FIFOペアの下流のパワーメータで計測した光パワーの低下は見られず、良好な耐性が確認された。

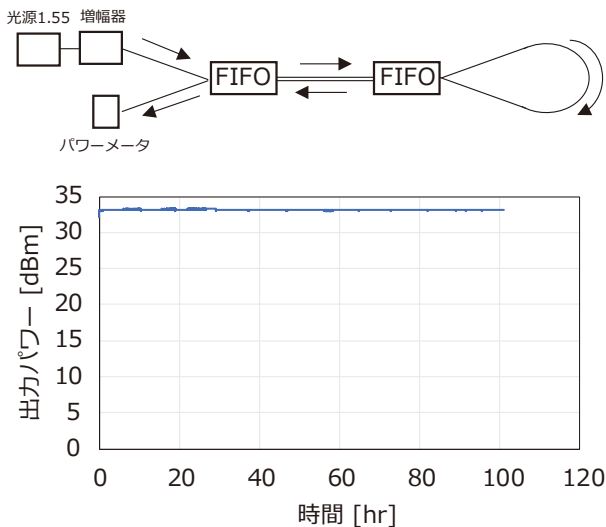


図9 高パワー試験系と出力光パワー安定性

7. 結 言

小型、低損失、高信頼性が求められる用途向けMCF用FIFOの試作および評価を行った結果を紹介した。外寸はφ3.0 mm×L65 mmと小型である。ILは0.3 dB以下と低損失で、Cバンド内における波長依存性もなく良好であった。その他のPDL、XT、ISO、RLについても良好であった。Telcordia信頼性規格GR-1221-CORE準拠の環境試

験項目の中から主要な試験を行い、特性が安定して良好であることを確認した。また、実使用の12倍以上の光パワーで100時間の通光試験を行い、ILの劣化は見られず良好であった。

高パワー耐性と高環境耐性を兼ね備えているのは、空間光学型の設計で、組み立てにレーザ溶接技術を用いているからである。また、TEC加工ファイバを導入することで、小型化にも成功した。

今後、MCF伝送システムの普及および、当FIFOがその中で活躍できることを期待している。

用 語 集

※1 空間光学型

光ファイバ等に閉じ込められて伝搬してきた光を、一度空間に出してレンズやミラーなどで伝搬させる光学系。

※2 熱拡散コア（TEC）ファイバ

TECはThermally expanded coreの略で、光ファイバを加熱処理するにより、光が伝送するコア部を拡大したファイバ。

※3 利得等化器

光信号を増幅させる際に、波長によって増幅の幅に差が出る。それを等化させるためのデバイス。

※4 ニアフィールドパターン

Near Field pattern：光ファイバやレーザ素子などの出射端面での光出力の強度面分布

※5 サブアセンブリ品

デバイス全体を構成する部品の集合体。複数の集合体（サブアセンブリ品）を組み合わせることで一つのデバイスになる。

※6 調心

光デバイスの組み立てにおいて、光が進む軸（光軸）が合うように光ファイバやレンズの位置や角度を合わせること。光を通光させながら、低損失になるように調整する場合をアクティブ調心と呼ぶ。

※7 Cバンド

Conventional-bandの略で、光通信で使用する波長帯域の1つ。波長は1.53～1.565 μmで、光ファイバの伝送損失が最も低い。

※8 Telcordia

米国のBell研究所が光通信機器向けに制定した規格が起源で、現在も広く使われている標準規格。

参 考 文 献

(1) T. Morioka, New Generation Optical Infrastructure Technologies, "EXAT Initiative" Towards 2020 and Beyond," in Proc. OECC2009, FT4

(2) P. J. Winzer et al., "From scaling disparities to integrated parallelism: A decathlon for a decade," J. Lightw Technol., vol.35, no. 5, pp. 1099-1115 (Mar. 2017)

(3) T. Hasegawa, "Ultra-low loss 2-core fibre for expanding submarine cable capacity," IET Optoelectron., vol.18, pp.157-161 (2024)

(4) K. Shirai et al., "Beam expanding fiber using thermal diffusion of the dopant," J.Lightw Technol., vol.8, no. 8, pp. 1151-1161 (Aug. 1990)

(5) O. Shimakawa et al., "Compact Multi-core Fiber Fan-out with GRIN-lens and Micro-lens Array," in Proc. OFC, OM3I.2 (2013)

(6) O. Shimakawa et al., "Lens-integrated Fan-in/Fan-out Device for Multi-core Fiber," Proc. OECC/PS, No.1570261433 (2016)

執 筆 者

島川 修* : 光通信研究所 主幹



田中 正人 : 光通信研究所 主幹



小柳 佑平 : 光通信研究所 主席



田澤 英久 : 光通信研究所 グループ長
Ph.D.



*主執筆者