

空間結合型 SDM 用 MCF 光デバイス

所属 株式会社オプトクエスト
 技術開発第1部
 執筆者名 小林 哲也

1. はじめに

光ファイバによる高速大容量通信は、これまで様々な取り組みによって飛躍的な拡大を続けてきた。しかし、急速なデータトラフィックの拡大により既存のシングルモードファイバ (SMF) での伝送容量の限界が見えてきたため、その対策として空間多重伝送 (SDM: Space Division Multiplexor) が提唱された¹⁾。将来的なトラフィック量の増大に対応するため空間多重数を増大させる取り組みとして、Fig. 1 に示すようなマルチコアファイバ (MCF)、数モードファイバ (FMF)、そしてそれらを組み合わせた数モードマルチコアファイバ (FM-MCF) が検討されている。これらは1本の光ファイバに複数のコアまたは、複数の伝播モードが伝送できる光ファイバである。この新たな光ファイバを用いることにより、空間利用効率は飛躍的に向上するが、それら伝播した複数の信号を既存の SMF 伝送系と接続する必要がある。その機能を担うのが Fanin/Fanout デバイス (FIFO) であり、その方式は Fig. 2 に示す通り様々な方式が提案されている。代表的なものとして、SMF を MCF のコアピッチと同等まで細径化してバンドル化した上で MCF と直接接続するもの²⁾ や導波路を用いて配列変換して接続するもの³⁾ などが考えられ、シンプルな構成で低コスト化が実現できる技術として期待できる。

これらの方式に対し、空間結合デバイスはコア数やコア配列、非結合型や弱結合型といった方式にも拘らない柔軟性があり、またフィルタやアイソレータなど機能素子を組込んだ複合化も容易であり機能デバイスの利用効率をさらに高めることが出来るという優位性がある。本項ではそれらの特徴について述べる。

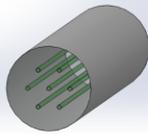
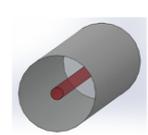
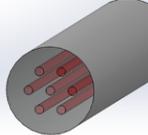
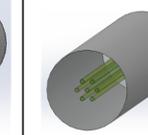
マルチコアファイバ (MCF)	フューモードファイバ (FMF)	フューモード-マルチコアファイバ (FM-MCF)	結合型マルチコアファイバ (CC-MCF)
			
複数コア	単一コア	複数コア	複数コア
単一モード	複数モード	複数モード	複数モード

Fig. 1 SDM 用ファイバ

結合方式	内容
空間結合	レンズを使用した空間結合 光路中はエアギャップ
細径 SMF バンドル	細径化した SMF を束ねて直接接続 フィジカルコンタクトや端面接着
ファイバ溶融	SMF バンドルと MCF に中間ファイバを挟んで融着し溶融延伸させコア整合
3D 導波路	3D 導波路を介して MCF コアの配列変換をさせ SMF アレイと接続

Fig. 2 MCF-FIFO の方式

2. 空間光学系の基本概念

SDM 用光ファイバで先行して検討された非結合型 MCF の各伝搬コアの間隔 (コアピッチ) はコア間クロストークを確保するため概ね 40 μm~50 μm で設定されている。弱結合型 MCF の場合はさらにコアピッチ間隔は狭くなり、15 μm~20 μm 程度が提案されている。既存の SMF (ITU-T

G. 652 等) はクラッド径が $125\mu\text{m}$ であるから, Fig. 3 のようにそれらをそのまま束ねても MCF との接続は出来ない. そこで, レンズの軸外に点光源を設置するとレンズ主軸に対して角度を持ったコリメートビームとなることを利用して, 狭ピッチの MCF の各コアを分離する方法を検討した. Fig. 4 に基本的なレンズの幾何光学光線図を示す. レンズの主軸上の焦点位置に配置されたコアからの光はレンズの主軸に平行なコリメート光となって入出射される. しかし, レンズの主軸から高さ h (物体高) を持った位置にコアを配置した場合, レンズの前側焦点 f_f を通るようにレンズ主軸に対して角度 θ で斜めに進むコリメート光となる. この時のコリメート光の角度 θ は物体高 h の位置によって変わるため, MCF を配置した場合, 中心コアと外周コアの距離とレンズ焦点距離によりビーム進行角度が変わることとなる. それぞれのコアからの光が違う方向へ角度を持ったコリメート光となって分離された後に, SMF コリメータと光学結合させれば空間結合型 FIFO の構成となる.

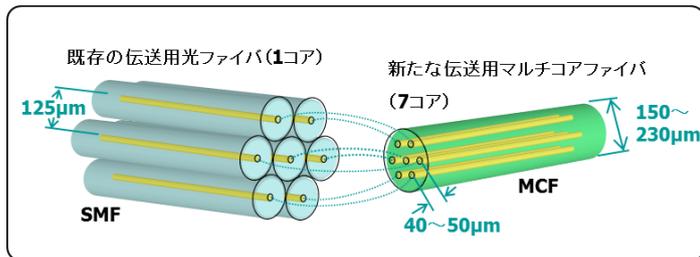


Fig. 3 SMF と MCF のコア間ピッチの違い

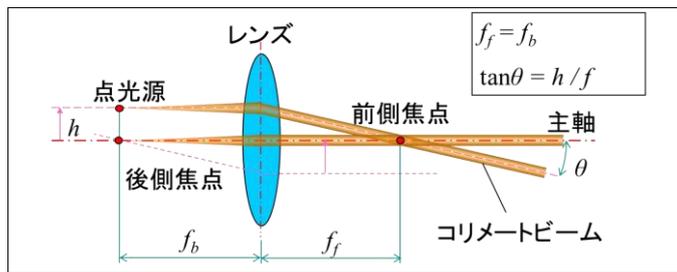


Fig. 4 レンズ幾何光学説明図

この方式を最初に検討したのは SDM が提唱されてから間もない 2009 年のことである. 今までにない新たなファイバとして 1 本のファイバに複数の伝搬コアを有する MCF を作製するが, そのファイバの伝搬損失とコア間クロストークなどのファイバ特性を評価する装置が必要と

のことで Fig. 5 に示すような $500\text{mm} \times 600\text{mm}$ のブレッドボード上に 5 軸 ($X, Y, Z, \theta_x, \theta_y$ 軸) の調整機構を各ファイバに対し個別に配置して構成された MCF と SMF の結合装置を試作した. 調整機構により様々な種類の MCF と SMF とを結合可能なように自由度を持たせた構造で, MCF と SMF との初期の特性を評価する上で役目を果たしたが, その大きさが問題であった. そこで翌年の 2010 年には Fig. 6 に示すような, 光学系を縦型にした卓上型の結合装置を開発し, その後様々なコアの MCF に対応して 19 コアまでの結合装置を実現させた⁴⁾.

この時の結合装置の経験から, レンズ軸外を利用したビームの分離と低損失結合が実証できたため, その後の MCF と SMF とを結合する FIFO への開発へと繋がった.

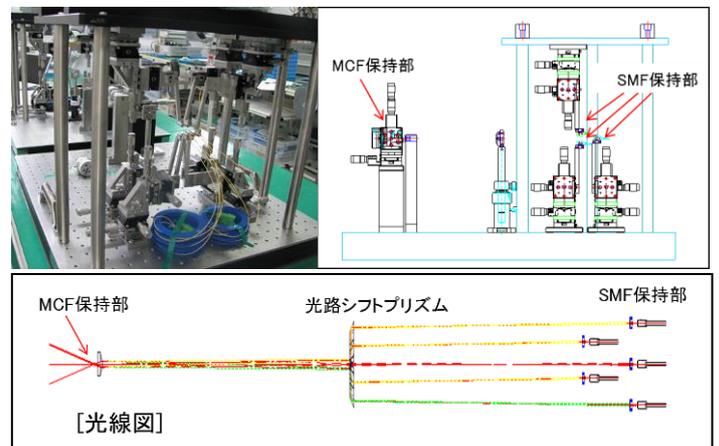


Fig. 5 初期の MCF 結合装置

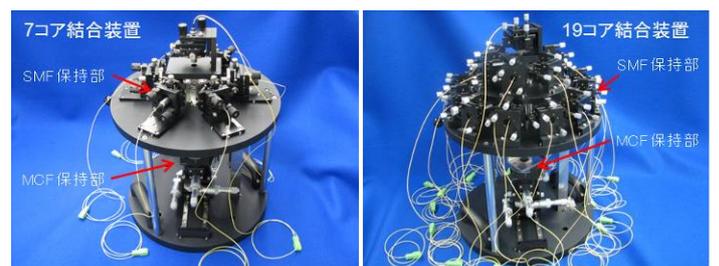


Fig. 6 縦型 MCF 結合装置

3. FIFO の研究開発

3.1 第一世代

初期に開発した FIFO を Fig. 7 に示す. 基本構造は前項で紹介した結合装置から調心ステージを排除して固定モジュール化したものであり, サイズは $\phi 40\text{mm} \times \text{L}62\text{mm}$ とモジュールとしては大きいサイズである. しかし, この

時から MCF と SMF との結合損失は 1dB を切る 0.6dB 以下の低損失が実現されており、その有用性を確認することが出来た⁵⁾。また、当初より長期信頼性を意識して部材の固定は YAG レーザ溶接固定を採用しており温度依存性も良好な特性が得られている。

レンズの軸外を利用したコリメートビームの分離は実際にはそれほど多くの角度差をつけることは難しい。

Fig. 8 に MCF のコアピッチとレンズ焦点距離で決まる分離角度の計算値を示す。レンズ焦点距離が短ければ分離角度を大きく出来るが、ガウシアンビームの拡がりによりコリメート光としての結合距離は短くなる。逆にレンズ焦点距離が長ければ結合距離は長くすることは出来るが分離角度は小さくなり、さらにビーム径が大きくなることで各コアのビーム同士が重なり合い、分離することが難しくなる。その相反する特性を確認しながらコアピッチの仕様に応じてレンズ焦点距離の最適化を行っているが、7 コア MCF で使用したコアピッチ 45 μm ではどのような条件でも分離幅が十分得られないため、光路中に光路シフトプリズムを配置することで分離幅を拡大させる構造を採用した。この基本構造は光学特性が非常に良好で各部材の精度に依存することも無く、さらに MCF コアピッチ精度に依存せず SMF 側で最適調整出来る等の応用が利くため、様々なコアピッチやコア配列、そして 4 コア 7 コア MCF だけではない、Fig. 9 に示すようにコア配列に合わせてプリズムを多段にすることで最大 36 コア MCF と単芯 SMF との結合も実現させている⁶⁾。

その設計の柔軟性と低損失特性から、第一世代とは言え現在でも利用している方式であり、直近の 4 コア用 FIFO では Fig. 10 に示すように $25\text{mm} \times 78\text{mm}$ (ファイバ保護部材を含む) のサイズとなっており、挿入損失も平均値で 0.3dB を下回るほどに最適化されているため、研究用途での MCF 用 FIFO として需要がある。

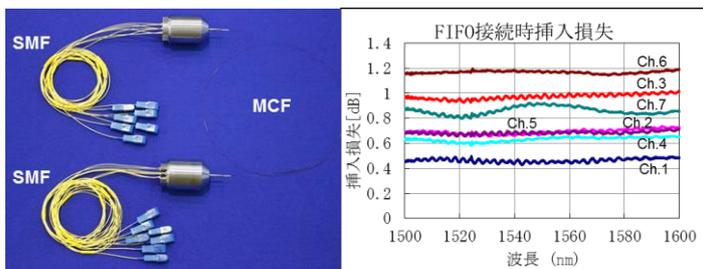


Fig. 7 7 コア MCF-FIFO と損失特性 (IN-OUT 接続時)

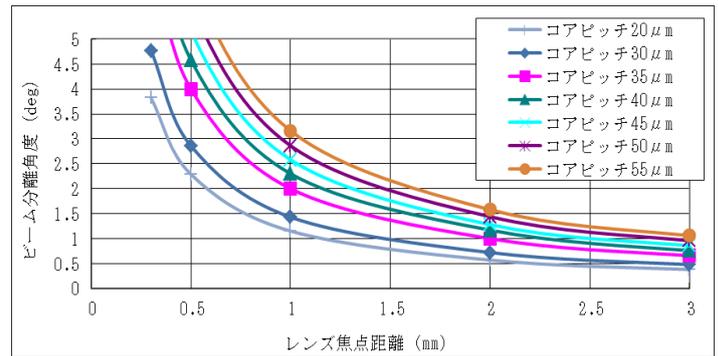


Fig. 8 コアピッチとレンズ焦点距離による分離角度

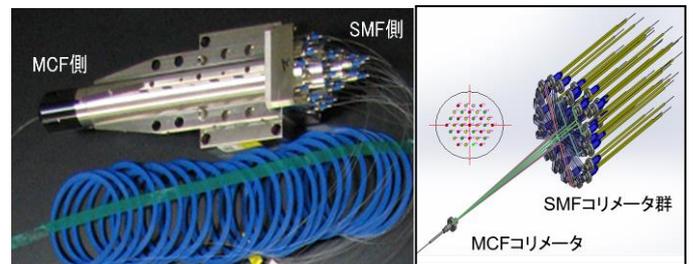


Fig. 9 36 コア MCF 用 FIFO

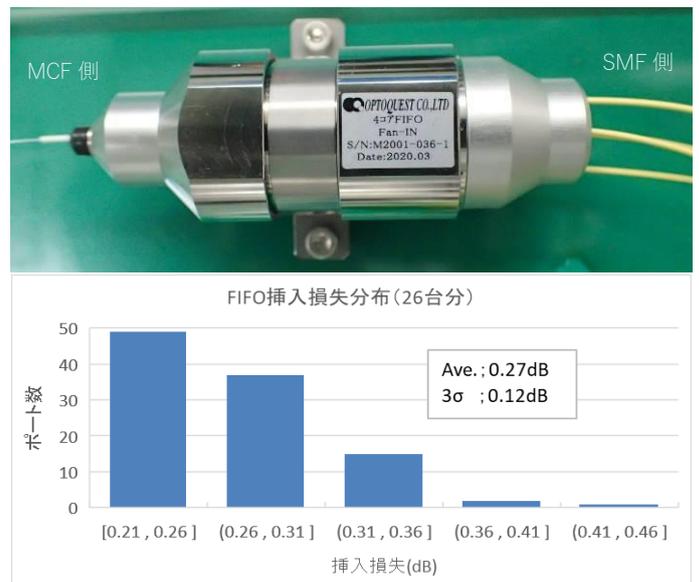


Fig. 10 4 コア MCF 用 FIFO と損失特性

3.2 第二世代

将来的なシステムへの導入を見据えて FIFO の小型化を進めるにあたり、モジュールサイズが課題となった。SMF を個別に保持する方法はコア数やコア配列に依存しない自由度がある一方で、SMF 間の調整スペースを確保しなくてはならず小型化が難しい。そこで、SMF をバンドル

化することで小型化することを検討した。Fig. 11 に基本構成と外観形状を示す。SMF を束ねてコリメート光を結合させるために 2D レンズアレイを採用し、そのレンズピッチの制約から SMF 間隔は 0.5mm として 2D アレイコリメータを構成した。MCF 中心コアのビームは主軸に平行で、外周コアからのコリメートビームは主軸に対して角度を持っているため、中心コアのコリメートビームはそのまま通過させ、外周コアのビームだけ 0.5mm 間隔の平行軸に配列するため、六角錐の先端をフラットにした特殊形状の偏角プリズムを用意した。この光学構造としたことでサイズは大幅に小型化し、 $\phi 10\text{mm} \times 50\text{mm}$ の FIFO が実現された⁷⁾。また、SMF コリメータとプリズムは部品精度依存の位置誤差が発生するが、その精度を最適化することで 0.5dB 以下の低損失での結合を実現している。

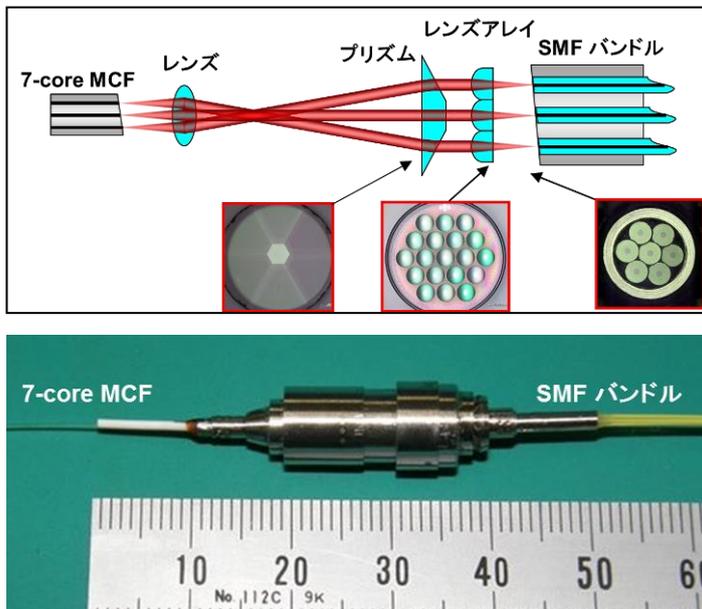


Fig. 11 細径化 FIFO 構成と外観

3.3 第三世代

更なる小型化の検討は大きく構造を変更している。コストの削減を目的に部品点数の削減による量産性の高い光学系を実現させるため、SMF バンドルを MCF コアピッチに近づけ、レンズアレイとプリズムを廃止してシンプルな単レンズ構成とする光学系にすることで、 $\phi 6\text{mm} \times \text{L}32\text{mm}$ の小型 FIFO を実現した。基本構成と外観を Fig. 12 に示す。特徴は MCF コアピッチ $45\mu\text{m}$ に対して SMF バン

ドルピッチを $50\mu\text{m}$ としたことである。7 コア MCF クラッド外径は $150\mu\text{m}$ となっており、SMF クラッド外径を $50\mu\text{m}$ とすればバンドル化した際の最外径が $150\mu\text{m}$ となり、将来的に保持部品の共通化を考慮した。また、細径化することによる SMF の強度劣化やクラッドからの光の漏れによる損失増加にも配慮してのことである。

MCF と SMF とはコアピッチが $5\mu\text{m}$ 異なるが、対向するレンズの倍率を変えることでコアピッチ変換を行い、挿入損失は 0.6dB 以下となっている⁸⁾。このように MCF と SMF との結合について段階を踏んで小型化を進めており、初期の調心機構を持った結合装置から比べると飛躍的に小型化を進めることが出来た。

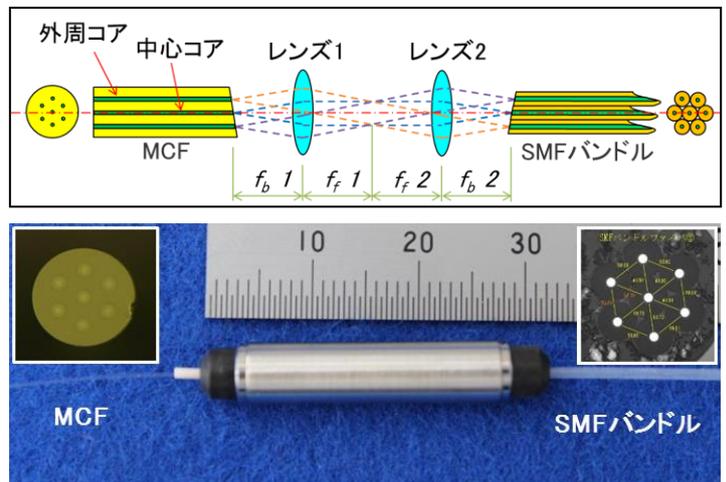


Fig. 12 小型 7 コア FIFO の構成と外観

3.4 第四世代

MCF は当初様々なコア数による提案がなされたが、実用化に向けてはクラッド外径を既存 SMF と同等にすることが量産性や信頼性の観点から望ましく、クラッド外径基準での最適コア数は非結合型 MCF においてはコア間 XT を考慮して 4 コアが相応しいとされ実用化検討が進められている⁹⁾。そこで 4 コア MCF を基準とした FIFO において、量産性や信頼性を考慮して光学構成の見直しを行った。前記した 7 コア用では MCF のクラッド外径に合わせて細径 SMF を $50\mu\text{m}$ としたが、MCF クラッド径が $125\mu\text{m}$ となったことで $50\mu\text{m}$ とする必然性は必ずしも必要なくなり、それよりも低損失化を目指し SMF 外径を MCF コアピッチと同様に $40\mu\text{m}$ としてバンドル化した。また、MCF

クラッド径が $125\mu\text{m}$ となったことにより、安価な既存 SMF 用デバイス部品の流用が可能になったことから、より部品点数を削減して光学系や調心方法を最適化させた。その外観形状と挿入損失特性を Fig. 13 に示す。サイズは $\phi 5.8 \times L38\text{mm}$ となり、挿入損失は MCF コアピッチ精度や SMF バンドル精度に起因する誤差が影響する構成であるが、光学系や製造方法の最適化を行うことで数量作製時にも挿入損失平均値が 0.4dB 以下となる FIFO を実現している。また、この FIFO においてブランディングデバイスの信頼性評価である IEC 60875-1 を実施し、劣化が無いことを確認している。

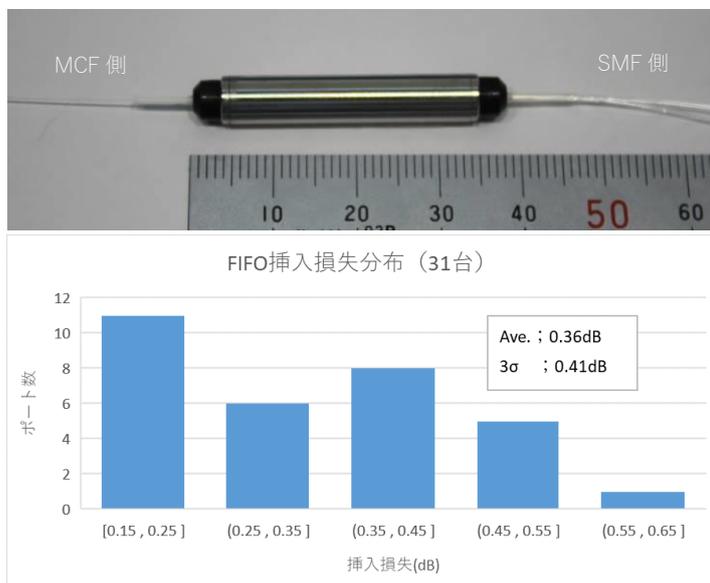


Fig. 13 小型4コアFIFOと損失特性

また、本構成において製造コストを下げる検討も実施している。MCF デバイスが既存の SMF デバイスと異なるのは、SMF がコア同士の結合を行うのに単一のコアの結合ピークのみを最適調心すれば良いのに対し、MCF の場合は外周コアがあり、全てのコアで最適調心出来るように回転方位の調心工程が必要になることである。そこで問題となるのがコアピッチの誤差である。同種の MCF 同士の結合であれば、同一 Lot の MCF を用いればコアピッチの誤差は無い。しかし、MCF と SMF バンドルを結合する FIFO の場合は双方のコアピッチ誤差が結合損失となってしまう。さらに、コアピッチ誤差は隣り合うコアピッチとの距離だけではなく、対角に対置されたコアとの相互関係も影響する。Fig. 14 にコアピッチ誤差について

の模式図を表す。(a)のパターンは結合させるコアピッチが単純に異なる場合である。コアの配列がお互いに揃っていたとしても結合誤差が生じてしまう。(b)のパターンは隣接コア及び対角コアのコアピッチ誤差がある場合で、この場合綺麗に整列されたコアと結合すると、いずれかのコアで結合ずれが発生するためコア間の損失差が発生する。(c)のパターンは隣接するコアピッチの誤差は無いものの、対角のコアピッチの誤差がある場合である。一般的に MCF 等のコアピッチを表す場合は隣接コアとのコアピッチで定義される場合が多いが、この場合に適用するとコアピッチ誤差は小さいにも関わらずいずれかのコアの結合ずれが発生することになる。どのような組み合わせで結合させれば全体の結合損失を下げ、コア間損失差が最も小さくなる組合せとなるかの条件を見つけるため、IRカメラを用いたビーム間隔測定とその結果をシミュレーションにより瞬時に最適な組み合わせと想定結合損失を導き出す計算式を構築することで解決した¹⁰⁾。Fig. 15 にその構成とカメラ画像を示す。これにより MCF のコア方位は目視により短時間で調整することが出来、その際の結合損失も想定できるため大幅な作業効率の向上を達成している。また、この方式は将来的に自動調心化も可能となるため量産に適した方式と考えている。

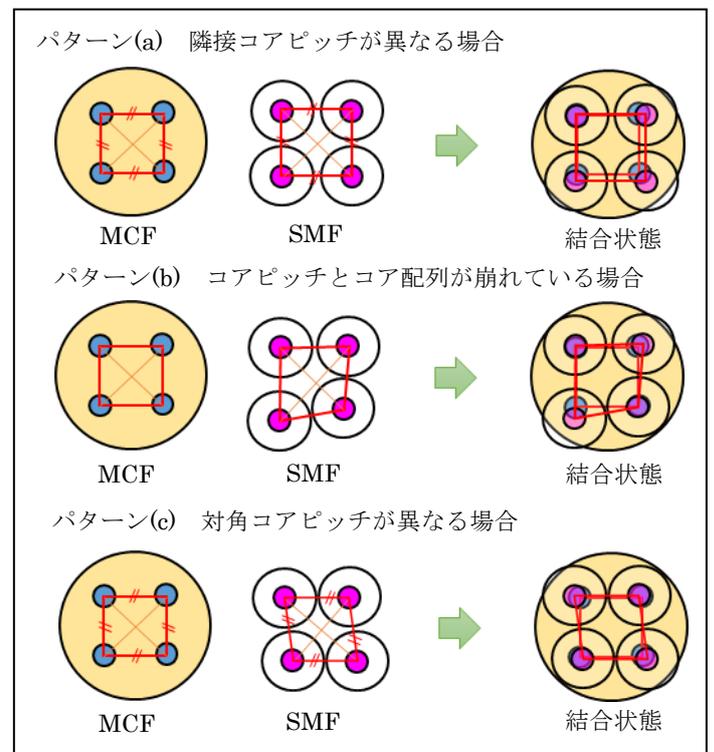


Fig. 14 コアピッチ誤差による結合状態

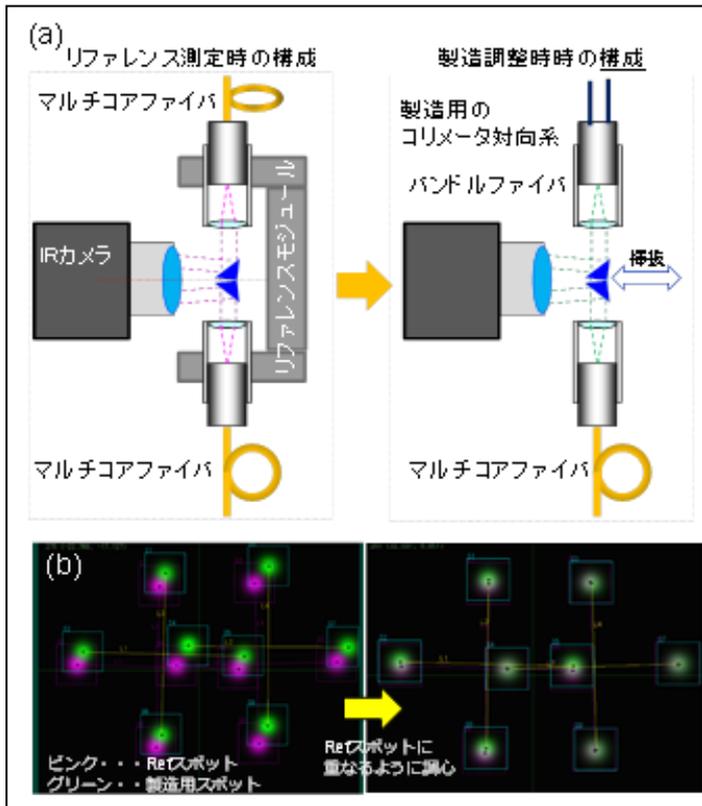


Fig. 15 MCF 結合装置構成 (a) とビーム画像 (b)

4. MCF 光学系の拡張技術

前記した FIFO の空間光学系を拡張発展させ、MCF 用の機能デバイスについても実現している。MCF のレンズによる空間結合が PC 接続や導波路型など直接接続型と異なる点はレンズ間にスペースを確保できる点にある。一般的な光機能素子は、WDM や合分波カップラに代表される誘電体多層膜フィルタや結晶を用いたアイソレータ等の空間光学系を前提にしたものであり、これらを MCF の空間光学系技術に組み入れることで、単一の機能素子で MCF のコア全てに一括で機能をもたせるデバイスを実現することができる。例えば MCF 伝送路に機能デバイスを組込もうとした場合、Fig. 16 のように Fan-out デバイスで SMF に変換後にコア毎に 1 つずつの機能デバイスを挿入し、Fan-in デバイスで再度 MCF へ変換する必要がある。しかし、MCF 機能デバイスとすることで 1 つの機能素子で複数コア同時に作用させることが出来るため、デバイス実装時の省スペース化や伝送路の低損失化、機能デバイスのコストダウンに貢献できる技術として注目している。

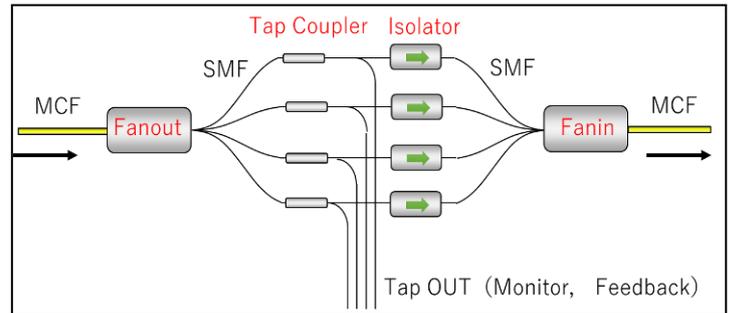


Fig. 16 MCF 伝送路での機能デバイス挿入例

4.1 アイソレータデバイス

2013 年に NICT 他研究機関と共著にて発表した 19 コア MCF 光増幅器¹¹⁾に使用したアイソレータの構成と外観を Fig. 17 に示す。FIFO の第三、第四世代の光学系と同様に単レンズ構成としているが、アイソレータコアを挿入するための空間距離を確保するためレンズは長焦点距離のものを使用している。その為、外周コアのコリメートビームのアイソレータへの入射角度も浅くなり、光学特性のバラツキが小さくなる効果も得られている。SMF 用アイソレータデバイスとほぼ同様のシンプルな光学系であるが、19 コア光信号のアイソレータ機能を 1 つのアイソレータコアで構成し、Fig. 18 に示すように全コアで挿入損失 0.6dB 以下となる SMF アイソレータデバイスと同等の低損失を実現し、アイソレーションも全コアで 55dB 以上を達成しており、1 つのデバイスで 19 経路分のアイソレータ機能を持つ機能デバイスとしてデバイスの利用効率を大幅に向上させている。直近の取組においては本技術と前記した FIFO を複合化して、Fig. 19 に示すような小型アイソレータ内蔵 FIFO デバイスも挿入損失 0.6dB 以下の低損失で実現している¹²⁾。

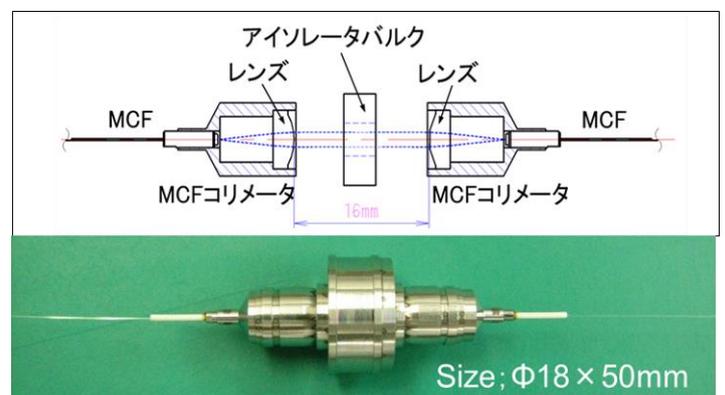


Fig. 17 MCF アイソレータの構成と外観

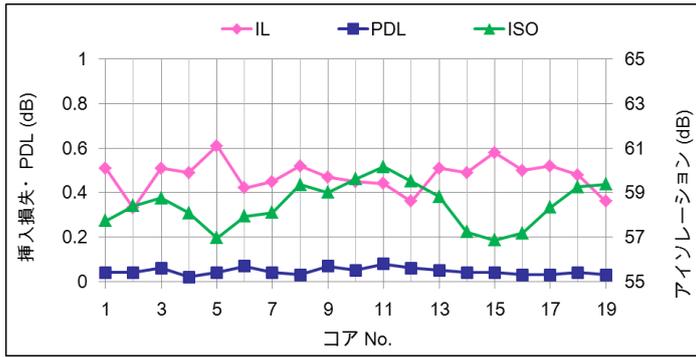


Fig. 18 MCF アイソレータ光学特性

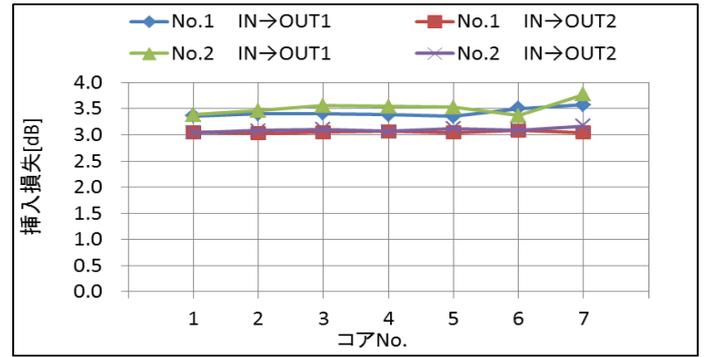


Fig. 21 50:50 合分波カプラ損失特性

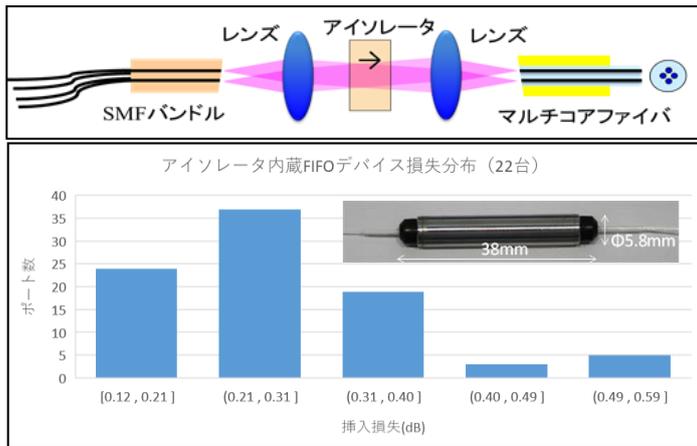


Fig. 19 ISO 内蔵 FIFO デバイス構成と損失特性

4.2 カプラデバイス

MCF 用合分波カプラ及び WDM カプラの基本構成を Fig. 20 に示す。光学系はアイソレータと同様の技術を用いているが、光機能素子として誘電体多層膜フィルタを配置し、フィルタの反射側にも MCF コリメータを配置することで MCF 同士の合分波デバイスを実現させている。Fig. 21 に 50 : 50 ビームスプリッタを配置した際の合分波カプラの挿入損失を示すが、分岐損失 3dB を含んで 4dB 以下の低損失な特性を実現できている。

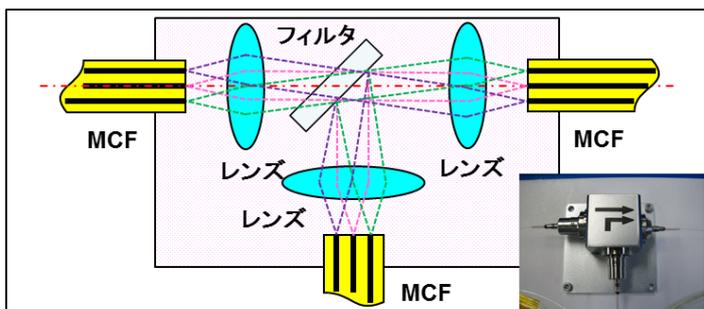


Fig. 20 カプラデバイス構成

また、カプラデバイスについても小型化が進められ、SMF 用 WDM デバイスなどに用いられている 2 芯アレイを利用した TAP カプラデバイスと WDM デバイスも実現している。Fig. 22 に基本構成と外観を示す。アイソレータも内蔵したカプラデバイスとして、全コア一括で 1dB 以下の挿入損失を実現している¹³⁾。また、本構成ではビームスプリッタを波長フィルタに変えることで WDM デバイスを構成することも可能となる。Fig. 23 に示す WDM フィルタを搭載することでアイソレータ内蔵 C-L Band WDM モジュールとなり、Fig. 24 に示す光学特性のように低損失な MCF 用 WDM デバイスを実現している。

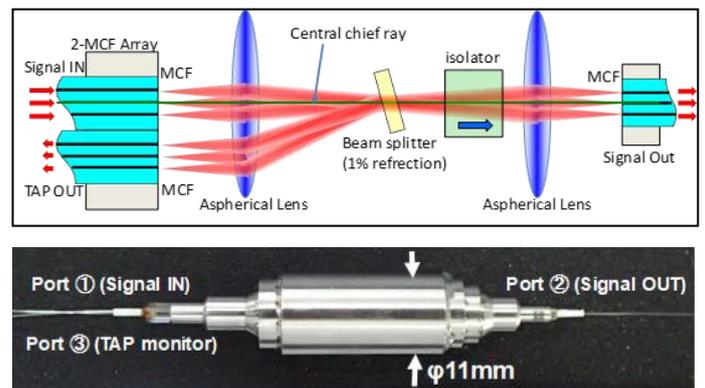


Fig. 22 アイソレータ内蔵 TAP デバイス

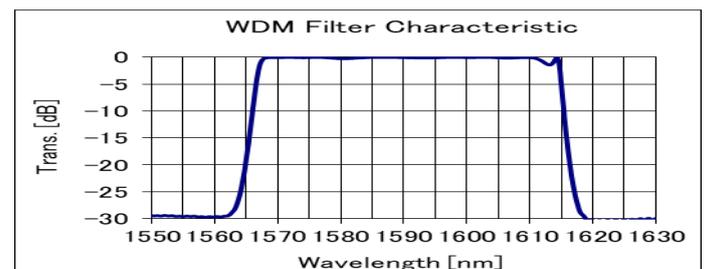


Fig. 23 アイソレータ内蔵 WDM デバイス光学特性

コア	挿入損失(dB)			
	C-band側		L-band側	
	1528nm	1565nm	1570nm	1610nm
1	0.31	0.33	0.40	0.49
2	0.25	0.52	0.39	0.38
3	0.38	0.35	0.44	0.38
4	0.47	0.14	0.42	0.48

Fig. 24 アイソレータ内蔵 WDM デバイス光学特性

同様の技術を用いることで MCF 用 TAP モニタデバイスも構成することができる。MCF の各コアの光量をモニタする為には Fan-out によりコアごとに分割する必要があるが、MCF の 2 芯アレイを用いた合分波構成を利用することで各コアの光量モニタを可能にする TAP カプラ付モニタが実現できる。TAP モニタには各コアの光量を独立してモニタするという用途から、Fig. 25 に示すようなモニタ側に Fan-Out 機能を内蔵させて SMF にて光信号を取り出す方式と、Fig. 26 に示すようにモニタ側に各光信号に対応した Pin-フォトダイオードを内蔵して、電気信号として取り出すことが出来る方式を提案している。それぞれ信号光側の挿入損失は 1dB 以下となる低損失でのデバイス化を実現している¹⁴⁾¹⁵⁾。

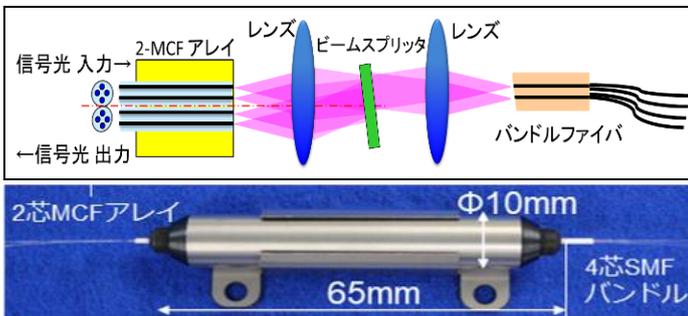


Fig. 25 Fan-Out 内蔵 TAP モニタデバイス

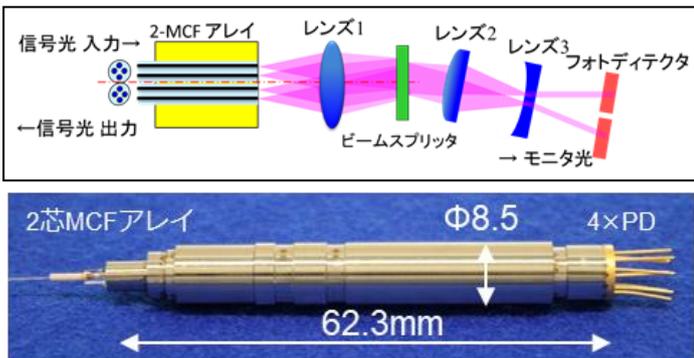


Fig. 26 Pin-PD 内蔵 TAP モニタデバイス

4.3 コアピッチ変換デバイス

FIFO の第三世代に用いた技術であるが、単レンズによる空間光学系の利点は、対を成すレンズの焦点距離の組み合わせを変えることで倍率変換が可能なことである。非結合型 MCF に関しては、コア間クロストークの問題などから冒頭に記載した通り $40\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ 程度のコア間ピッチを有する MCF が存在する。異なるコア間ピッチを持つ MCF 同士の直接接続は不可能であるが、レンズ光学系を用いることでそれを実現させている。Fig. 27 にコアピッチ変換デバイスの構成と外観を示す。本構成でコアピッチ $40.5\mu\text{m}$ と $50\mu\text{m}$ という、直接接続ではコアが接続できない MCF 同士を 0.6dB 以下の損失で結合させている¹⁶⁾。本技術を応用すればコアピッチや MFD の異なる異種 MCF の低損失接続も可能となる。

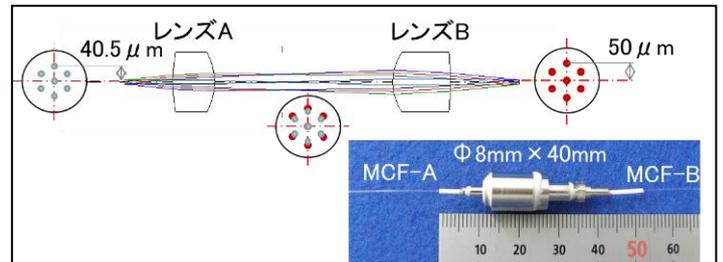


Fig. 27 コアピッチ変換デバイスの構成

5. まとめ

レンズを用いた空間光学系技術は光通信が実用化された初期から現在のシステムにも組み込まれている技術であり、更に発展的に MCF への適用を行うことで様々な光ファイバとの接続を可能とした。また本技術は単一の素子で MCF の複数の伝搬信号を一括で処理出来る光機能デバイスが実現できておりその拡張性も示した。今後は更なる高密度化や小型化をすすめ、空間利用効率の向上と共に更なる低損失化や生産性も向上させ、将来の SDM 用光デバイスに資する技術にしたいと考えている。

本研究の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究/革新的光通信インフラの研究開発及び、総務省の「ICT 重点技術の研究開発プロジェクト 新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発 (JPMI00316) (課題 II : OCEANS)」の成果を含みます。

文 献

- 1) T. Morioka : Technical Digest of Opto Electronics And Communications Conference Hong Kong, Jul 2009, Paper FT4
- 2) 渡辺健吾 他 : 電子情報通信学会ソサイエティ大会 東北大学(2015) B-10-19
- 3) Robert R. Thomson : European Conference and Exhibition on Optical Communications Düsseldorf, Sep 2016 Th.1.B.5
- 4) Werner Klaus et al. : IEEE Photonics Society Summer Topicals Washington, Jul 2012, WC3.3
- 5) 小林哲也 他 : 電子情報通信学会ソサイエティ大会 富山大学(2012) C-3-82
- 6) Jun Sakaguchi et al. : OSA Publishing Journal of Lightwave Technology Vol.34 P.93 2016
- 7) 鳥取裕作 他 : 電子情報通信学会ソサイエティ大会 福岡工業大学(2013) B-13-26
- 8) 小林哲也 他 : 電子情報通信学会ソサイエティ大会 東北大学(2015) B-10-29
- 9) 山田裕介 他 : 電子情報通信学会総合大会(2022) BI-10-3
- 10) 高島武敏 他 : EXAT 研究会(2022) EXAT2021-14
- 11) Jun Sakaguchi et al. : European Conference and Exhibition on Optical Communications London, Sep 2013 Th.1.C.6
- 12) Taketoshi Takahata et al. : European Conference and Exhibition on Optical Communications Bordeaux, Sep 2021 We1A.5
- 13) Taketoshi Takahata et al. : European Conference and Exhibition on Optical Communications Dublin , Sep 2019 W.2.C
- 14) 小林哲也 他 : 電子情報通信学会総合大会 (2021) B-10-1
- 15) 榎明日美 他 : 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会(2021) OFT2021-5
- 16) 小林哲也 他 : 電子情報通信学会総合大会 立命館大学(2015) B-10-5

2023年4月

Tetsuya KOBAYASHI

OPTOQUEST Co., Ltd