空間結合型マルチコアファイバ用接続部品

小林 哲也, 渡辺 正行, 鳥取 裕作

(株)オプトクエスト (〒362-0021 埼玉県上尾市原市1335番地)

Space Coupling Optical Connecting Devices for Multicore Fibers

Tetsuya KOBAYASHI, Masayuki WATANABE, and Yusaku TOTTORI

OPTOQUEST CO. LTD, 1335 Haraichi, Ageoshi, Saitama 362-0021

(Received January 23, 2013)

Lens optics technology is reviewed for the design and fabrication of fan-in/fan-out devices to connect a multicore fiber to single mode fibers and optical connectors for multicore fibers. We describe the design principle of lens coupling using spatial beam conversion theory for fan-in/fan-out devices and multicore fiber connectors and show their optical characteristics. We also discuss the feasibility of the devices for multicore fiber transmission systems.

Key Words: Multicore fiber, Fan-in/Fan-out device, Connector, Lens optics coupling, Space division multiplexing

1. はじめに

国内における通信トラフィックは、光ファイバを用いたブロードバンドサービスの急速な普及に伴い右肩上がりに増加を続けており、このまま増加が進めば通信容量がいずれ逼迫すると言われている。

このような状況から2009年に独立行政法人情報通信研究機構(NICT)が中心となって「EXAT」構想が提唱され¹⁾、「革新的光ファイバ技術の研究開発」により、1本の光ファイバに複数の伝搬コアを持つマルチコアファイバ(MCF)が開発された。

さらに2011年度からは「革新的光通信インフラの研究開発」が開始され、2012年9月には、12コアMCF-52 kmを用いて1.01 Pb/sの大容量伝送を実現し²⁾、長距離伝送に関しても7コアMCFとマルチコア光増幅器を用いた6,160 kmの長距離伝送実験³⁾も報告されている。

しかし、飛躍的に伝送容量を増大させることが可能なMCFを用いた伝送においても、MCF各コアへの信号入出力を行うためには、MCFとシングルモードファイバ(SMF)とを接続するファンイン/ファンアウト(FI/FO)デバイス、MCF同士を接続するMCFコネクタ技術が不可欠である。

本稿では、これらMCFのFI/FO接続技術、MCFコネクタ接続技術について、特に空間レンズ結合を用いた技術について解説する。

2. レンズによる空間結合原理

2.1 ファンイン/ファンアウトデバイスの原理

MCFのコアピッチは30~60 μm の間でコア間クロストークやファイバの曲げ等による特性劣化に配慮して設計されている^{4,5)}。一方、一般的に使用されているSMFはクラッド径125 μm にて規格化されており(IEC 60793-2-50)、単純にSMFを束ねるだけではMCFとの接続は出来ない(Fig. 1)。そこでSMFをMCFコアピッチと同径に細径加工後にバンドル化し、MCFと接続する方式が検討されている^{6,7)}。この方式は部品点数も少なく有望な方式ではあるが、1 μm 以下の高精度なファイバ外径加工を必要とし、かつSMFを細径化することでクラッド層が薄くなることによる光学的、機械的な悪影響がないか検討が必要である。また、MCFのコアピッチが変わるたびにSMFの細径加工条件を見直す必要もある。

本稿のように、空間光学系を利用すればSMF自体の加工を行わずにMCFと接続することが可能となるとも

Fig. 1 Direct connection of 7core MCF to SMFs.

Fig. 2 Geometrical optics ray diagram of single lens.

Fig. 3 Principle of lens coupling of MCF to SMFs.

Fig. 4 Comparison of coupling loss tolerance to the axial deviation between direct core coupling (MFD: 10.5 μm) and collimator coupling.

に、MCFのコアピッチやコア数が変わった場合でも対応することが出来る。以下にレンズを用いたMCFとSMFの空間結合原理について説明する。

Fig. 2は一般的な単レンズの幾何光学光線図を示したものである。主軸上のレンズ前側焦点位置 f_f に配置された点光源より出射された光はレンズを通過し、主軸と平行なコリメート光として進む。一方、主軸から h の高さでオフセットされた点光源からの光はレンズを通過することでコリメート光となり、レンズ後側焦点位置 f_b を通り、角度 θ で進む。

この原理を用いて点光源をMCF各コアと置き換えることでMCF各コアの光を、角度を持ったコリメート光として分離させることが出来る。分離されたコリメート光をFig. 3のように単レンズにより集光させ、SMFのコアに結合させることで、MCFとSMFとの空間結合を実現できる。空間結合の利点は、 $\phi 10 \mu\text{m}$ 程度のコアからの光が、焦点距離数mmのレンズを用いた場合 ϕ 数百 μm まで拡大されるため、Fig. 4に示すように、ファイバ直接接続に比べ、位置ずれに対する損失劣化を格段に緩和できる。

2.2 MCFコネクタの原理

MCFを用いた伝送において、FI/FOデバイスと共に、

Fig. 5 Schematic diagram of the coupling between MCF's by lens optics.

MCF同士を接続する技術も重要である。その接続方式の一例として、既存のSMFと同様にフィジカルコンタクト(PC)接続によるMCFコネクタが検討されている^{8,9)}。球面研磨条件の頂点ズレ、引き込み量、曲率半径 R を制御することで中心以外に外周コアが存在するMCFであってもPC接続が可能であることが報告されている¹⁰⁾。しかし、これらはいずれも7コア程度のMCFで検討されたものであり、将来コア数が拡大した場合にすべてのコアでPC接続できるかは検討が必要となる。コア数やコアピッチに依存しない方式として2.1項にて説明した単レンズを用いた空間結合系にてMCF同士を結合させることが出来る。Fig. 5のように、外周コアのコリメートビームが交差するレンズ後側焦点を中心として対称の光学系を配置すれば1:1の空間結合が実現される。

本原理により、MCFとレンズを一体化したMCFコリメータを対向させる着脱構造を設けることでコネクタ接続が可能となる。

3. レンズ結合によるファンイン/ファンアウトデバイス

3.1 ファンイン/ファンアウトデバイス設計

FI/FOデバイスの概略構成をFig. 6に示す。MCFコアはレンズの前側焦点位置 f_f に配置されることで、ビームウェスト距離 X' とビームウェスト径 ω' は1枚薄肉レンズ系によるビーム変換式¹¹⁾より、以下のように表される。

$$X' = f - \frac{f^2(f+X)}{\alpha^2 + (f+X)^2} \quad (1)$$

$$\omega' = \frac{\omega_0 f}{\sqrt{\alpha^2 + (f+X)^2}} \quad (2)$$

ω_0 はMCFのモードフィールド径(MFD)である。ただし $\alpha = \pi\omega_0^2/(4\lambda)$ であり、 λ は波長を表す。

X' がビームウェスト最遠(X_m)、ビームウェスト径 ω' が最小(ω_m)となる条件は(1)式が極値をとるとき、すなわち(1)の微分が0となる時である。このことから次式を得る。

Fig. 6 Schematic configuration of FI / FO device.

$$X_m = f + \frac{f^2}{2\alpha} \quad (3)$$

$$\omega_m = \frac{\omega_0 f}{\sqrt{2}\alpha} \quad (4)$$

Fig. 6の関係から(5)(6)の関係が成り立つ.

$$\tan \theta = \frac{\Lambda}{f} \quad (5)$$

Λ はMCFのコアピッチを表す.

$$d = (X' - f) \tan \theta \quad (6)$$

(5), (6)および(3)からビームを最大分離できる距離(d_m)は次式により導かれる.

$$d_m = \frac{\Lambda f}{\sqrt{2}\alpha} \quad (7)$$

FI/FOデバイスは、コリメートビームの最大分離距離 X' とデバイスの全長を考慮してレンズ焦点距離 $f = 2$ mm前後が適当として設計した.

次に結合効率の検討結果を示す. 実際のMCFコアMFDは8~11 μm 程度が多く^{12,13)}, Table 1にMFD = 11 μm , Table 2にMFD = 8 μm の場合の結合効率計算結果を示す. 両方ともSMFコアのMFDは $\phi 10.5$ μm とし, MCFコアピッチ45 μm , 波長は1550 nmとしている. 中心コアと外周コア間の損失差は無く, MFDのミスマッチによる損失差があるという結果が得られた. さらに内部光学

Table 1 Coupling efficiency between MCF and SMF (MFD of MCF: 11 μm).

Center core	0.04dB
Outer core	0.04dB

Table 2 Coupling efficiency between MCF and SMF (MFD of MCF: 8 μm).

Center core	0.21dB
Outer core	0.21dB

Table 3 Calculated reflection loss of internal optical parts.

Center core	0.05dB
Outer core	0.07dB

Fig. 7 Example of measured return loss characteristics of AR coating for lenses and fiber.

部品の空気との境界での反射の影響による損失を計算した結果をTable 3に示す. 但し, 光学部品表面は反射防止膜が施されており, その反射率はFig. 7に示すように広帯域にわたって0.2%以下, 透過損失に換算すると0.01dB以下であるとし, 損失に寄与する面は, ファイバ端面, レンズ端面と光路変換のためのプリズム端面の計8面としている. これらの結果より, デバイスの挿入損失設計値はMCFのMFD = 11 μm の場合0.1dB以下, MFD = 8 μm の場合でも0.3dB以下ということになる. 構造は, ファイバとレンズを一体化してコリメータとする方式を採用した. コリメータ技術は, 従来のSMFを用いたデバイスにおいて一般的に使用されている. サイズは $\phi 40$ mm $\times$ 62 mmとしている.

3.2 デバイスの試作評価結果

空間光学系は様々な条件のMCFにも対応できるが, 試作したデバイスは7コア, コアピッチ45 μm , コア径10 μm のMCFを使用した. 試作したFI/FOデバイスをFig. 8, デバイス評価の測定系をFig. 9, 測定結果をFig. 10に示す. クロストークを評価する都合上, FI/FOデバイスはMCFにて直接接続された状態で試作・評価を行った. 挿入損失は2台が接続された状態で最小0.4dB, 最大1.2dB以下となり, 1台あたりのデバイス損失は0.6dB以下と推定できる. 偏光依存損失(PDL)は0.1dB以下, クロストークは55dB以上であった(a). レンズ光学系はレンズの色収差の影響から波長によって焦点距離が変わるが, 1500 nm~1600 nmでの波長依存性評価の結果は概ねフラットな特性を示しており, 問題ないレベルであることを確認した(b).

4. レンズ結合によるマルチコアファイバコネクタ

4.1 マルチコアファイバコネクタ設計

コリメート光同士の結合は, Fig. 4の通り位置ずれに

Fig. 8 Photo of the fabricated FI / FO devices.

Fig. 9 Measurement setup of insertion loss, PDL, crosstalk, and wavelength dependent loss.

Fig. 10 Measured optical characteristics of the fabricated module. (a): Insertion loss, cross-talk and PDL. (b): Wavelength dependent loss.

対する損失劣化の許容量は大きい。しかし、角度ずれに対しては損失劣化の許容量が小さくなる。Fig. 11はコアピッチ45 μm の時のビーム径に対する角度ずれ時損失の計算結果である。この結果から、ビーム径が小さいほど許容量を増すが、ビーム径が小さいとレンズ焦点距離は短くなるため、実装性を考慮してビーム径は297 μm とした。MCF同士の結合効率については、MFDは1:1となるため、理論上結合損失は生じない。ファイバ端面及び光学部品の端面反射による損失はTable 3に示したCenter coreと同じになるため、結合損失の設計値は0.1dB以下となる。

着脱構造部の構成は、Fig. 12のようにMCFとレンズを一体化するコリメータとした。MCF中心コアとレンズの主軸が同軸上であれば機械精度だけの位置合わせが

Fig. 11 Comparison of tolerance of the coupling loss to the angular deviation between direct fiber coupling (MDF: 10.5 μm) and lens coupling.

Fig. 12 Schematic of the MCF connector structure.

可能であるが、実際にはMCFコアの偏心、レンズ主軸の偏心、及び反射を考慮してMCF端面を斜め研磨した場合の光軸のオフセットの影響があるため、コリメータはコネクタの軸に対して位置と角度の調整固定を行える構造としている。また、着脱時に角度ずれが起きないようにフランジ部を設け、そのフランジ面を加圧固定することで角度ずれが影響しない構造とした。位置ずれに対してのクリアランスは最大20 μm あり、着脱を容易にしている。この構造により、通常のSMFコネクタのフェルール外径公差 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ に比べて格段に緩い寸法公差で設計でき、サイズは $\phi 19 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ とした。

4.2 マルチコアファイバコネクタの試作評価

Fig. 13に試作したコネクタ外観を示す。MCFはFI/FOデバイスと同じ仕様のものを使用した。評価のための測定系をFig. 14、測定結果をFig. 15に示す。試作時の結合損失は最小0.1dB、最大0.86dBとなった(a)。3回着脱時の最大損失はチャンネル3にて1.0dB、着脱再現性は0.75dB(b)。PDLは最大0.6dBとなった。結合損失とPDLが大きくなった主要因は、コア配置を適切に設定しなかった為コアピッチずれが発生して損失となったと考えている。初期の状態では結合ずれが起きているため、着脱再現性も悪くなったと考えられる。

接続損失はコア配置の見直しにより全コアを中心コア接続損失と同程度にできることが可能であり、同時に着脱再現性、PDLも改善可能である。

5. 今後の展開

MCFを使用して光伝送を行う為にはMCF各コアへ信号の入出力、既存デバイス及びネットワークに接続するためにFI/FOデバイスは必須である。7コアMCF-16.8 km

Fig. 13 Photo of the prototype connector: disconnected (a), and connected (b).

Fig. 14 Measurement setup of insertion loss, PDL, and reproducibility of coupling loss for connecting and disconnecting.

Fig. 15 Measured optical characteristics of the connector.
(a): coupling loss and PDL as manufactured. (b): polarization dependence of coupling loss after connecting and disconnecting three times.

にて109 Tb/s伝送を行った伝送実験¹⁴⁾や、19コアMCF-10 kmにて305 Tb/s伝送を実現した伝送実験¹⁵⁾にはSMFとの接続に本稿で述べた空間結合によるFI/FO技術が用いられていたが、原理実験器であることから調整機構を有しており $\phi 300 \times 400$ mm程度というサイズであった。今回試作したFI/FOデバイスはこれに対して体積比1/360の小型デバイスで実現しており、より実用に近い伝送系の構成が可能である。また、長距離伝送実験を行う際に複数のMCFをコネクタにより簡便に接続出来れば多様な伝送実験の構成が可能となる。今後本MCF用FI/FOおよびコネクタを用いた伝送実験によってその適用性を検証していきたい。

6. まとめ

空間結合系にて低損失なFI/FOデバイスとコネクタ構造を実現できることを確認した。今後は更なる低損失、小型化の検討を進め、実用に耐えうる性能を実現することが課題である。現在7コアMCFを主に検討しているが、MCF自体は更なる通信容量拡大の為に12コア、19コ

アについても既に実現されており、空間光学系を用いた接続技術は今後の更なるコア数の増加にも対応できる技術として期待している。また、空間光学系は光路中に接着剤等の有機物が介在しないため、ハイパワー光入力への対応や高リターンロスを必要とする用途に適したデバイスとして重要であると考えている。

謝 辞

本研究は、(独)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の一環としてなされたものである。

参考文献

- 1) T. Morioka: Technical Digest of Opto Electronics And Communications Conference Hong Kong, July 2009, Paper FT4.
- 2) H. Takara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, *et al.*: *Proc. European Conference Optical Communication Amsterdam, September 2012*, Paper Th.3.C.1.
- 3) H. Takahashi, T. Tsuritani, E. L. T. de Gabory, T. Ito, W. R. Peng, K. Igarashi, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, I. Morita, Y. Tsuchida, *et al.*: *Proc. European Conference Optical Communication Amsterdam, September 2012*, Paper Th.3.C.3.
- 4) 佐々木 雄佑, 竹永 勝宏, 荒川 葉子, 谷川 庄二, 松尾 昌一郎, 齊藤 晋聖, 小柴 正則: 電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-10-27 (2011).
- 5) 今村 勝徳, 武笠 和則, 杉崎 隆一: 電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-13-36 (2011).
- 6) 島川 修, 佐野 知巳, 井上 亨: 電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-13-7 (2012).
- 7) 渡辺 健吾, 斎藤 恒聡, 今村 勝徳, 椎野 雅人: 電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-10-9 (2012).
- 8) 蟹江 智彦, 島川 修, 井上 亨: 電子情報通信学会総合大会 岡山大学 B-13-50 (2012).
- 9) 境目 賢義, 長瀬 亮, 渡辺 健吾, 斎藤 恒聡: 電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-13-9 (2012).
- 10) 鹿間 光太, 阿部 宜輝, 柳 秀一, 高橋 哲夫: 電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-3-80 (2012).
- 11) 河野 健治: 光結合系の基礎と応用(現代工学社, 1991) p.166.
- 12) 五藤 幸弘, 中島 和秀, 富田 茂: 電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-13-35 (2011).
- 13) 小柴 正則: 電子情報通信学会ソサイエティ大会 BCI-2-1 (2011).
- 14) J. Sakaguchi, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, T. Hayashi, T. Taru, T. Kobayashi, and M. Watanabe: Technical Digest of OFC/NFOEC Los Angeles, March 2011, PDPB6.
- 15) J. Sakaguchi, B. J. Puttnam, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa, *et al.*: Technical Digest of OFC/NFOEC Los Angeles, March 2012, PD-P5C.1.

レーザーワード

コリメート光(collimated beam)

レーザー光は単色性に優れているため指向性が良く、空間を長距離伝搬してもビーム径が変化せず平行のまま伝搬させることが可能である。このような平行な光束を「コリメート光」と呼ぶ。単一モード光ファイバ中を進むレーザー光は内部全反射を繰り返して伝搬するため、空間へ出射すると出射角を有する拡散ビームになる。その

ためレンズ等の屈折を用いてコリメート光を発生させる方法が一般的に用いられている。コリメート光を用いることで、空間光路中に様々な機能素子を入れたり、ミラーなどにより光路を曲げることが可能となりレーザー光を自在に操作することが可能となる。(小林 哲也)