

マルチコアファイバ用コネクタ型 光分岐部品

島川 修*・荒生 肇・塩崎 学
佐野 知巳・井上 享

Multi-Core Fiber Fan-Out Devices — by Osamu Shimakawa, Hajime Arao, Manabu Shiozaki, Tomomi Sano and Akira Inoue — The space division multiplexing (SDM) system using multi-core fiber (MCF) is one of the promising solutions to overcome the capacity limitation of conventional fiber. To achieve practical use of MCF, a fan-out device that allows each core of MCF to be connected into individual single-core fiber is indispensable. We have developed a pluggable fiber bundle type fan-in/out device for MCF using an SC connector, which has low coupling loss less than 0.5 dB, low crosstalk less than -50 dB, and high return loss more than 50 dB.

Keywords: multi-core fiber, fan-out, connector, space division multiplexing

1. 緒 言

光ネットワーク通信は、1990年代に波長分割多重 (Wavelength division multiplexing; WDM) 方式が実用化されたのを機に情報トラフィック量が飛躍的に伸びており、現在でも年率約40%で増加している⁽¹⁾。それに伴い、光ファイバへの入力パワーも増大しており、光ファイバの許容限界に迫っている。その1つがファイバヒューズと呼ばれるもので、高パワーの光が直径約10 μ mのコアに集中することにより熱的な破壊現象が引き起こされる。これにより現行の汎用光ファイバを用いた伝送容量は100Tb/sが1つの壁となっている。この壁を打破する有望な方式の1つが、1本の光ファイバに複数のコアを設けたマルチコアファイバ (MCF) を用いた空間分割多重 (Space division multiplexing; SDM) 方式^{*1}である。図1に当社で開発したMCF⁽²⁾の一例を示す。このMCFはコアを高密度配置させるために中央コアと、その周囲に六角形状に配置された外周コアからなる。研究レベルではMCFを用いた光伝送システムにより既に1Pb/sを超える伝送実験が報告されている⁽³⁾。MCFを用いた光伝送システムを実現するには、周辺技術、とりわけMCFとMCFを接続、あるいはMCFの各コアをシングルコアファイバ (SCF) に分岐接続する技術が不可欠である⁽⁴⁾。図2にMCFを用いた光伝送システムの概略を示す。送信機、受信機の手前でそれぞれ、SCFの光をMCFへ合流するファンイン、あるいはMCFの各コアの光をSCFへ分岐するファンアウトが必要になる。また中継器でMCF内の各コアを個別に光増幅する場合にもこれらが必要となる。当社では、SCFの接続で一般的に用いられるSCコネクタをベースとした、着脱式のMCF用ファンイン、ファンアウトを開発した。本稿では、その開発課題、構造、MCFとの接続特性について報告する。なお、ファンインとファンアウトは使用形態により名称が区別されてい

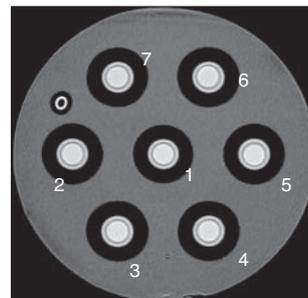


図1 マルチコアファイバの断面

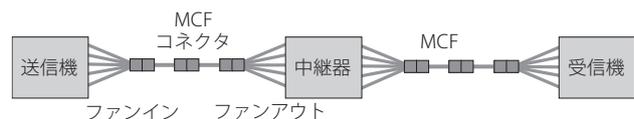


図2 MCF伝送システム概略

るが、構造は同じであるため、以降では呼称をファンアウトに統一する。

2. ファンアウトの開発課題

2-1 MCF特有の課題 既存の光伝送システムで使用するシングルモードファイバ用コネクタは、2本のファイバを接続損失0.5dB以下、反射減衰量40dB以上で接続しかつ、コネクタに外力が掛かっても特性が維持されることが必要とされている。これらを実現可能にしている技術を表1に、コネクタ構造を図3に示す。

表1 SCF用コネクタの技術

項目	技術
低接続損失	高精度なジルコニアフェールールによる低XY軸ずれ接続
耐外力	コネクタ内部のフェールールをフローティングさせる2重かん合構造
高反射減衰量	コア同士を弾性変形により物理的に面接触させる技術 (PC接続: Physical-contact接続)

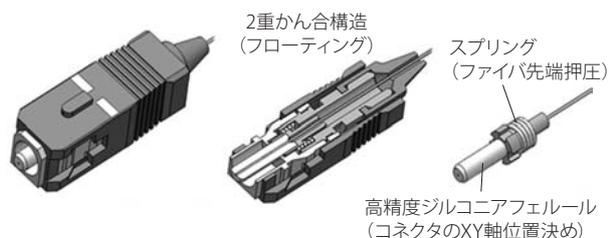


図3 SC型コネクタの構造

ところがMCF同士の接続では以下①②に示す新たな課題が発生する⁽⁵⁾。さらに、MCFとファンアウトの接続となると③も重要な課題である。

- ① 外周コアのフィジカルコンタクト (PC) 接続
- ② ファイバ軸回転方向の角度合わせ
- ③ ファンアウトのコア配列をMCFに整合させる

2-2 外周コアのPC接続 図4はPC接続におけるコネクタ断面の概略図である。球面状に研磨された光ファイバの端面が、押圧力により弾性変形することで面接触が実現される。SCFでは中央コアのみ面接触すればよいが、MCFでは外周コアも面接触が必要である。図4に示す通り、研磨品質によっては球面の頂上がファイバセンターからオフセットしたり、光ファイバがフェールール端面よりも引き込んだりといったことが発生する。それも考慮してPC接続されることが必要である。

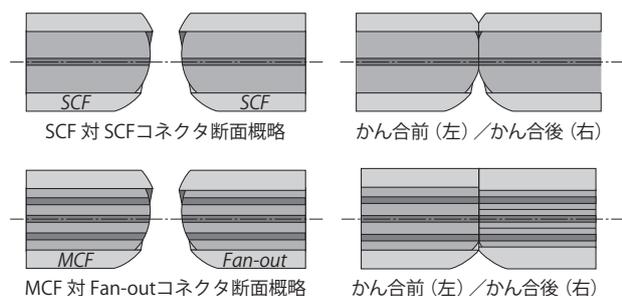


図4 PC接続の概略

2-3 低損失接続 MCFとファンアウトの低損失接続を実現するためには、ファンアウトのコア配置をMCFに一致させることと、互いに接続する際に光ファイバの軸回転方向の角度ずれを抑制することが必要である。図5は双方の外周コア接続において、X軸ずれと θ 回転軸ずれが発生した場合の結合損失値を計算で示したものである。軸ずれ量、角度ずれ量はそれぞれ対向する光ファイバの相対ずれ量を表している。計算前提としているMCFのコア間距離は45 μm 、波長1.55 μm におけるモードフィールド径(MFD)^{※2}は10 μm である。仮に相対的な偏心が1.5 μm 発生した場合、相対的な角度ずれを $\pm 1^\circ$ 以下に抑えなければ結合損失0.5dB以下を確保出来ない。

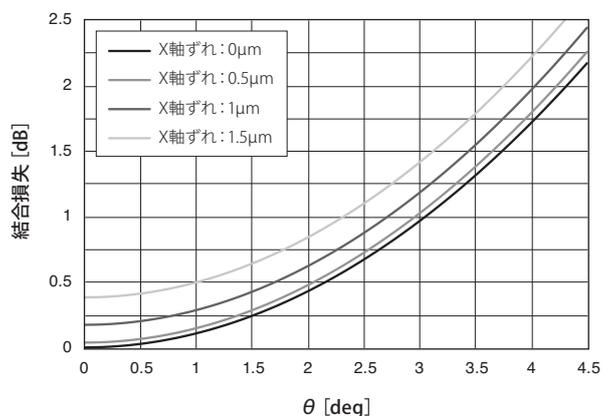


図5 軸・角度ずれと結合損失の関係 (計算値)

3. ファンアウトの構造

3-1 ファイババンドル型構造 開発したファンアウトの構造を図6に示す。クラッド径125 μm の光ファイバ先端を化学エッチングにより45 μm に細径化し、7本を穴径135 μm のSC型フェールールに挿入して、接着剤で固定する。これにより、コア間距離45 μm のMCFのコア配列に等しいファイババンドル構造のファンアウトを実現している。逆端はクラッド径125 μm であるため、標準のSCフェールールに挿入している。いずれのフェールールもSCコネクタハウジングに実装してコネクタ化する。

写真1にエッチングされた光ファイバの外観写真を示す。フェールールに挿入する際、クリアランスが大きいとコア偏心が発生する。そこで7本の集合光ファイバに対するフェールール穴のクリアランスは1 μm 以下とした。線引きで細径化した光ファイバの場合、剛性が低いため1 μm 以下のクリアランスでは挿入作業が困難であるが、本方式では先端のみ細径化しているため、挿入作業性が優れるという利点がある。さらに逆端ファイバがクラッド径125 μm であるため、コネクタ接続する場合も融着接続する場合も、光

ファイバ接続用の標準的な部品、装置を用いることが出来るという利点も持ち合わせている。

写真2はファイババンドル部の端面写真である。クラッド径45 μm にエッチングされた7本の細径光ファイバが内径135 μm のフェルールの穴に最密充填されており、図1に示すMCFと同様のコア配列であることが分かる。また

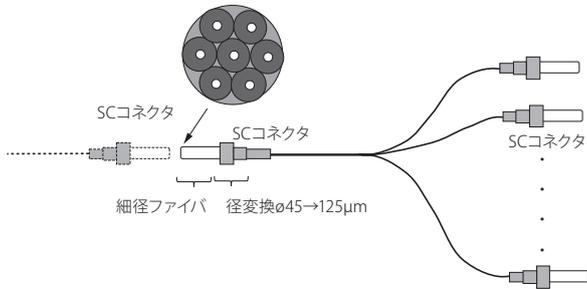


図6 ファンアウトの構造



写真1 エッチングされた細径光ファイバ

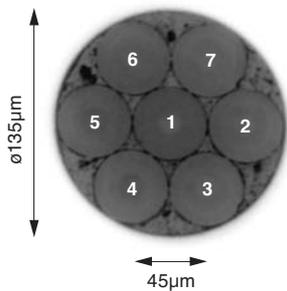


写真2 ファイババンドル部の端面

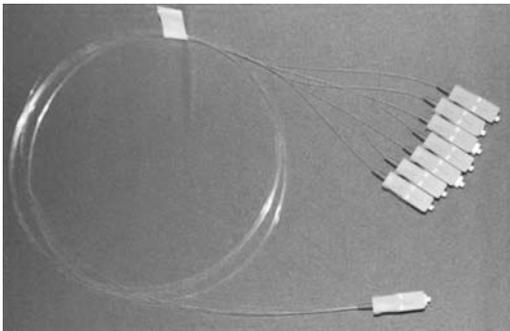


写真3 ファンアウト全体の外観

写真3にファンアウト全体の外観写真を示す。右下のSCコネクタ内に写真2に示すファイババンドルが収納されており、MCFとの着脱が可能である。

3-2 ファンアウトのコア偏心 製作したファンアウトのコア偏心の評価結果を図7に示す。点線は中央コアを基準として、外周コアの設計位置からのずれ量を示したものである。実際のコネクタはフェルールの外径を基準にして割スリーブで軸合わせされる。そこで、フェルールの外径中心を基準とした偏心量も実線で示した。いずれも1 μm 以下の低偏心が実現されている。

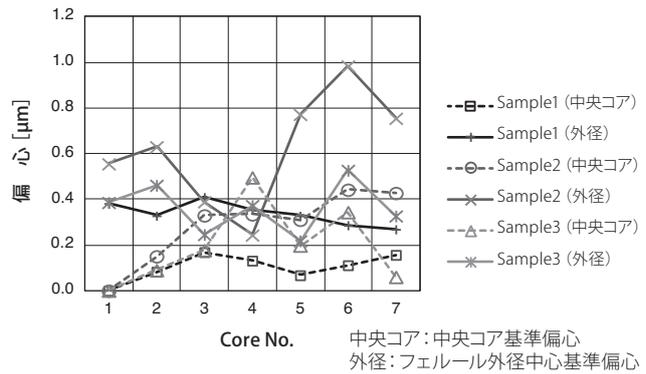


図7 バンドルのコア偏心量測定結果

3-3 SCコネクタハウジング 2-3項で述べた通り、MCF接続では光軸回転方向の角度ずれは $\pm 1^\circ$ 以下に抑えなければならない。本コネクタではフローティング機能を損なわない範囲で内部のノッチ&キーのクリアランスを低減し、 $\pm 0.5^\circ$ 以下の角度ずれを実現した(図8)。

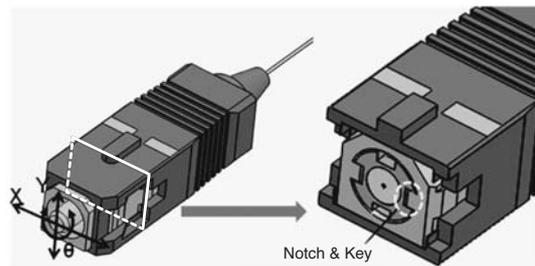


図8 SCコネクタの回転部構造

3-4 コネクタ端面形状 2-2項で述べた通り、MCFとファンアウトの全コアPC接続を実現するためにはSCコネクタの端面形状や押圧条件を見直す必要がある。端面の形状は、光ファイバ端面の曲率半径、中央コア中心からの研磨頂点ずれ量、光ファイバの引き込み(突き出し)量の

3つのパラメータで規定される。これに押圧荷重を加えた4条件が可変パラメータとなる。これらと、光ファイバのクラッド径、コア位置、各種部材の物性値などの不変パラメータからPC接続する条件が計算出来る。有限要素法を用いて計算し、製造性も加味した上でPC接続可能な端面形状条件を算出した。その結果より、端面形状を決める3パラメータと押圧荷重の計4パラメータのうち、研磨頂点ずれ量のみ当社のSCFコネクタのパラメータ基準に対して見直せば、PC接続が実現出来ることを明らかにした⁽⁶⁾。

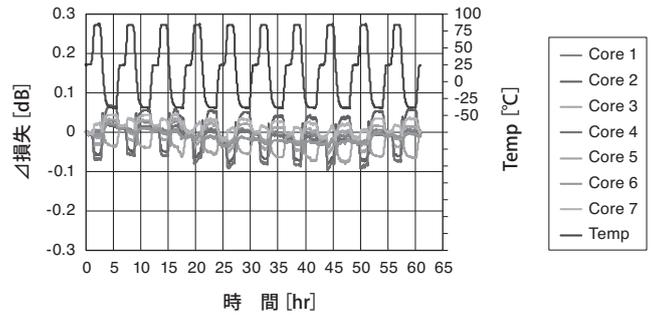


図11 接続損失の温度特性

4. MCFとファンアウトの接続部光学特性評価

4-1 接続損失 室温環境下においてMCFとファンアウトの接続損失を評価した。接続実験に用いた光ファイバの特性と評価系は、それぞれ表2、図9に示す通りである。

1対のMCFとファンアウトを50回着脱した際の接続損失の結果を図10に示す。平均損失は中央コア、外周コア各々0.12dB、0.18dB、最大損失においても中央コア、外周コア各々0.18dB、0.44dBと良好な結果である。

表2 MCFとファイババンドルの設計

項目	MCF	ファイババンドル
MFD (@1.55μm) [μm]	10	10
コア間距離 [μm]	45	45
コアプロファイル設計	トレンチ型 ⁽²⁾	MCFと同等
クラッド径 [μm]	150	各45

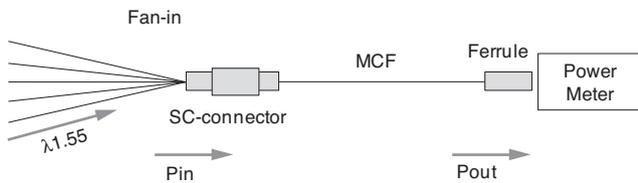


図9 接続損失評価系

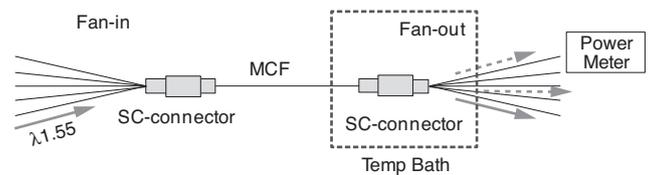


図12 クロストーク評価系

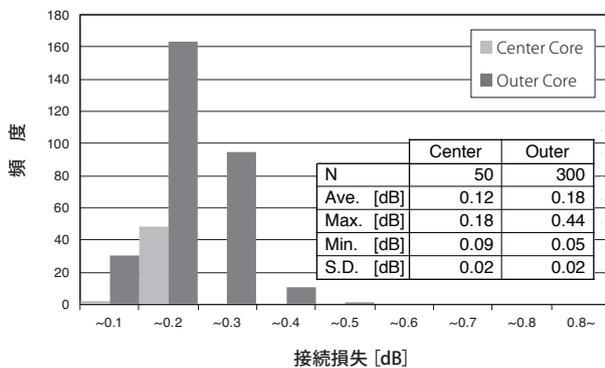


図10 MCFとファンアウトの接続損失

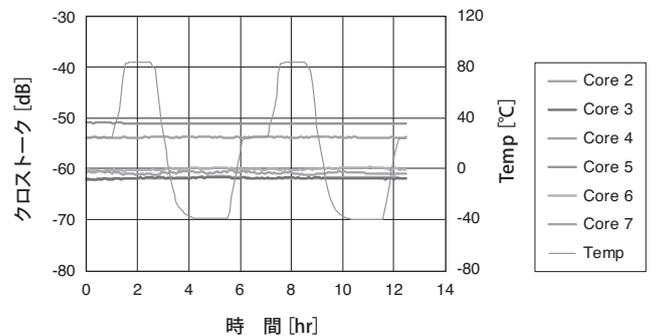


図13 コア間クロストーク (中央コア1入射)

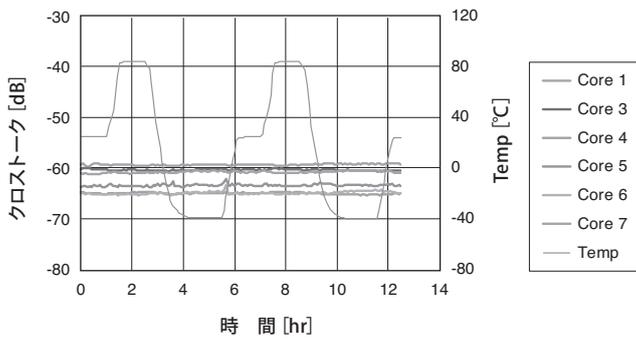


図14 コア間クロストーク (外周コア2入射)

したときのクロストークの挙動を示している。中央コア1と外周コア3, 7はコア2に対して隣接しているため、他に比べて高い値となっているが、全心-58dB以下を確保しており良好である。また温度変化に対する変動量も3dB以下と良好である。

4-3 反射減衰量 MCFとファンアウトを接続し、1.55 μ m光を入射したときの反射減衰量を測定した。図15に測定結果を示す。-40~85 $^{\circ}$ C環境下において、いずれの心もSCFコネクタの一般的な基準である40dB以上を確保しており良好である。これは当該温度範囲において、全コアのPCが確保されていることを示している。

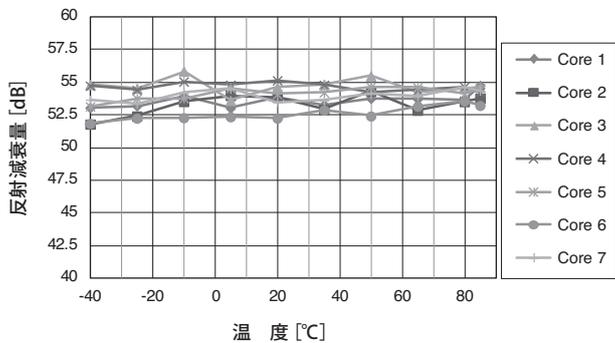


図15 コネクタ接続部の反射減衰量温度特性

5. 結 言

コア偏心量1 μ m以下の7心バンドル型ファンアウトを製作しSCコネクタ化したことで、着脱可能で作業性に優れたMCF用のファンイン、ファンアウトを実現した。MCFとの接続は、単心コアファイバ同士の接続でも基準とされる0.5dB以下の低損失を達成した。また-40~85 $^{\circ}$ Cの温度環境下において、全心損失変動量0.1dB以下、クロストーク-50dB以下、反射減衰量50dB以上と良好であり、耐環

境性にも優れている。今後、100Tb/sの伝送容量限界を商用レベルで打破するには、MCFを用いたSDM伝送システムを支えるファンイン/アウトをはじめとしたファイバ周辺技術の進歩が重要である。本ファンイン/アウトの更なる性能向上に努め、SDMシステムの実用化に寄与出来ることを望む。

6. 謝 辞

この研究は、独立行政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/革新的インフラの研究開発の一環としてなされたものである。

用語集

※1 空間分割多重 (SDM) 方式

伝送の回線を複数引いて同時に使う方式。本稿では光ファイバの断面に複数のコアを設けて同時に伝送することを、マルチコアファイバを用いた空間分割多重方式と呼んでおり、省スペース、高密度な伝送路を実現出来る。

※2 モードフィールド径 (MFD)

シングルモードファイバのパラメータ。光はコア領域を通るが、シングルモードファイバの場合、クラッド領域にも漏れ出すため、コア径ではなく光パワー分布から求められる実効的な直径MFDで規定する。MFDが小さいほどファイバ接続時の損失は軸ずれに敏感になる。

※3 クロストーク

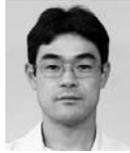
伝送信号が他の伝送路に漏れること。本紙ではマルチコアファイバの特定のコアから他のコアに光が漏れることを指している。

参 考 文 献

- (1) T. Morioka, "New Generation Optical Infrastructure Technologies: "EXAT Initiative" Towards 2020 and Beyond," in Proc. OECC '09, FT4 (2009)
- (2) T. Hayashi et al., "Ultra-low-crosstalk multi-core fiber feasible to ultra-long-haul transmission," in Proc. OFC2011, paper PDP2 (2011)
- (3) H. Takara et al., "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency" in Proc. ECOC '2012, paper PDP Th.3.C.1 (2012)
- (4) 齋藤 他, 「マルチコアファイバの接続技術」, 2011 信学会ソサイエティ大会, BCS-1-3 (2011)
- (5) 長瀬 他, 「マルチコアファイバのコネクタ接続技術」, 信学技報, vol. 112, no. 449, pp.1-4 (2013)
- (6) O. Shimakawa et al., "Pluggable fan-out realizing physical-contact and low coupling loss for multi-core fiber," in Proc. OFC2013, OM3I.2 (2013)

執筆 者

島川 修* : 光通信研究所 主席



荒生 肇 : 光通信研究所



塩崎 学 : 解析技術研究センター グループ長



佐野 知巳 : 光通信研究所 グループ長 (工学博士)



井上 享 : 光通信研究所 部長



*主執筆 者