六角形クラッドマルチコアファイバのFCコネクタ接続

八若 正義, 田中 正俊, 藤巻 洋介, 谷口 浩一
三菱電線工業(株) (〒660-0856 兵庫県尼崎市東向島西之町8番地)

FC Connector of Hexagonal Cladding Multi-Core Fiber

Masayoshi HACHIWAKA, Masatoshi TANAKA, Yousuke FUJIMAKI, and Hirokazu TANIGUCHI
Mitsubishi Cable Industries, LTD., 8 Nishino-cho, Higashimukojima, Amagasaki, Hyogo 660-0856

(Received February 7, 2013)

We studied the connection of a multi-core fiber (MCF). We fabricated a FC-type connector with a hexagonal-shaped cladding MCF and achieved an average connector loss of 0.51dB. Further reduction of the connection loss can be realized by using of the connector parts which have higher fabrication accuracy.

Key Words: Multi-core fiber, Hexagonal cladding, FC connector

1. はじめに

光通信のトラフィックが増加し続けている。汎用のシングルモードファイバ(SMF)を使った光ファイバ通信網を使い、波長多重通信方式、多値変調方式などの通信方式の進歩によって伝送容量の拡大が進められてきた。しかし、汎用SMFの一心あたりの伝送容量は100 Tbps程度で限界があることが指摘されている¹⁾。伝送容量の制限を打破する目的でコアを複数設けたマルチコアファイバの提案がなされ²⁾、既に1心あたりの伝送容量では汎用SMFを超えている³⁾。

このマルチコアファイバの接続では、光ファイバの中心だけでなく、その外側にもコアが設けられているため軸回転方向の調整が必要になる。陸上系の光ファイバケーブルでは、数百から千本もの光ファイバが収納されており、軸回転方向の調整を短時間で済ませることが求められる。

同様に軸回転方向の調整が必要な偏波保存ファイバは、偏波主軸である応力付与方向とコネクタのキー方向が揃うように一般的に $\pm 3^\circ$ の精度で軸回転を調整して取り付けられている。マルチコアファイバでは、接続損失を考慮すると、 $\pm 1^\circ$ 以下の高い精度での接続が求められる⁴⁾。

本報告では、マルチコアファイバ同士の容易な接続が可能のようにクラッド外縁を非円形にして、軸回転方向の調整を必要としないFCコネクタ接続の検討を行なった結果について報告する。

2. 非円形クラッドによる軸回転規制

従来の光ファイバのようにクラッドが円形であれば、

Fig. 1 Schematic illustration of fiber in ferrule; (a) Hexagonal cladding fiber, (b) Circular cladding fiber.

光ファイバとフェルルは互いに回転する。しかし、クラッドが非円形で、かつフェルルのファイバ孔の形状がその形状に一致するものであれば、フェルルに対して光ファイバは一定の回転角度方向に固定できる。さらに、フェルルとコネクタのキーも一定の回転角度方向に固定されれば、軸回転方向の調整をすることなく接続が可能になる。Fig. 1にクラッドが六角形のマルチコアファイバをその形状に合わせたファイバ孔のフェルルに挿入した場合の模式図を示す。また、比較のため円形の光ファイバも示す。

3. 六角形クラッドファイバ、コネクタ

クラッドを六角形にしたマルチコアファイバの断面写真を図2に示す⁵⁾。光ファイバの構造パラメータをTable 1に示す。被覆除去時の欠けを抑える目的で意図的に六角形の頂点をわずかに丸めている。また、コア間のクロストークを抑制する目的で、屈折率分布はトレンチ型にしている⁶⁾。波長1.55 μm におけるモードフィールド半径は5.2 μm である。コア間のクロストークは波長

Fig. 2 Cross section of hexagonal multi-core fiber.

Table 1 Characteristic parameter of hexagonal multi-core fiber.

Parameter	Value (μm)
W_1	161
W_2	151
Λ	44

1.55 μm , 光ファイバ長2 kmで-59dBであった。クロストークの特性は電力結合理論に一致する⁷⁾。電力結合理論では、光ファイバ長が10倍になるとクロストークは10dB増加することから、100 km相当のコア間クロストークは、-42dBと推測される。

六角形クラッドのマルチコアファイバにFCコネクタ (JIS C 5970) を取り付けた。FCコネクタの外観をFig. 3に示す。フェルールのファイバ孔は光ファイバに合わせて六角形になっている。フェルールの光ファイバ挿入口にはテーパ状の誘い溝を設けており、容易に六角形クラッドのマルチコアファイバを挿入することができる。

フェルールと光ファイバの接着は、汎用ファイバと同じエポキシ接着剤を使用して、研磨は市販の研磨機で行った。研磨後の端面写真をFig. 4に示す。六角形の対向する辺方向のファイバ孔と光ファイバのクリアランスは1 μm 以下である。

FCコネクタは、フェルールの六角形孔の頂点とコネクタのキーは同じ軸回転面上の同じ角度で固定されるため、軸回転方向の調整をすることなく組み立てができる。

Fig. 3 Multi-core fiber with FC connector. The direction of connector key is adjusted to the top of the hexagon.

Fig. 4 End face of connector after the polishing.

4. 接続損失の要因

接続損失の要因は、モードフィールド径のミスマッチ、軸ずれ、角度ずれ、間隙、端面反射がある⁸⁾。端面を凸状球面研磨してPhysical Contact (PC) 接続が実現できると、間隙、端面反射の要因は無視できるほど小さくなる。マルチコアファイバは中心に位置するコアだけでなく、外側に位置するコアもPC接続が求められる。PC研磨の端面形状の推奨値を確保した上でFCコネクタの押圧力が加われば、光ファイバの弾性変形で外側コアもPC接続されることが示されている⁹⁾。なお後述する接続損失の測定では、40dB以上の反射減衰量でPC接続されていることを確認した上で行った。

光ファイバはフェルール内に固定されるため、角度ずれの要因も小さく、同じ光ファイバを使って接続する場合は、モードフィールド径のミスマッチの要因も小さい。このため、コネクタ接続の主な接続損失の要因は軸ずれである。

Fig. 5は、軸ずれが発生する要因を模式図として示したものである。(a)はコネクタキーとアダプタの嵌合部に発生するクリアランスからなる軸回転方向のずれ、(b)はフェルールのファイバ孔の偏心による軸ずれ、(c)はフェルールの六角形孔の頂点位置とコネクタキーの軸回転方向のずれ、(d)はフェルールのファイバ孔と光ファイバのクリアランスからなる軸ずれ、(e)は光ファイバのコア偏心である。

要因の(a), (b), (c)は、コネクタを構成する部品の寸法精度が原因で生じる軸ずれである。(d)はコネクタフェルールと光ファイバの寸法精度、(e)は光ファイバの寸法精度で生じる軸ずれである。なお、(a), (b), (d), (e)は円形クラッドのマルチコアファイバであっても生じる軸ずれ要因である。

フェルールの六角形孔の頂点とコネクタのキーは軸回転面上の同じ角度に固定される。これは、フェルールのフランジ溝が、六角形孔の頂点位置と同じ軸回転面上の同じ角度で固定され、さらに、フェルールのフランジ溝とコネクタキーが形成されているフレーム部品が常に同じ軸回転面上の同じ角度でのみ嵌め込まれる機構によって実現されている。しかしながら、これらの部品の勘合部のクリアランスでこれらの角度にずれが生じる。この

Fig. 5 Offset factors in FC Connector; (a) Connector - adaptor - connector offset, (b) Concentricity error (ferrule), (c) Key - fiber hole offset, (d) Fiber hole - fiber offset, (e) Core offset (fiber).

軸回転方向のずれが(c)の主な軸ずれ要因である。また、(a)のコネクタキーとアダプタの勘合部のクリアランスも軸回転方向のずれが生じる。FCコネクタのJIS規格(JIS C 5970)は、キー幅が 2 ± 0.14 mm、アダプタのキー溝の幅が 2.4 ± 0.2 mmである。クリアランスが大きいため、本開発ではキー幅を $2.02 + 0/-0.05$ mm、アダプタのキー溝の幅を $2.03 + 0.05/-0$ mmとした。

5. フェルールと光ファイバのクリアランス

光ファイバとフェルールのファイバ孔をともに六角形にすることで光ファイバの軸回転が規制される。しかし、フェルールのファイバ孔と光ファイバの間にクリア

Fig. 6 Relations between clearance ratio and angle offset.

ランスがあると、前述した(d)の軸回転方向にずれが生じる。これは、六角形にしても抑えることができない。

Fig. 6はクリアランスで生じる最大の角度ずれを示している。ファイバ孔の対角線方向を基準に光ファイバの最大の角度ずれ θ を幾何学的に求めた。計算ではファイバ孔と光ファイバはともに正六角形としている。横軸はフェルールの内径に対するクリアランスの比としている。二つの光ファイバを接続する場合は、互いに時計回りと反時計回りの回転が生じた状態で接続される場合に最も軸回転ずれが大きくなる。このためクリアランスで生じる最大の軸回転は 2θ になる。

コアの軸ずれは軸回転だけでなくFig. 5 (b)に示すフェルールのファイバ孔の偏りで中心コアも軸ずれが生じる。Fig. 7は中心コアの軸ずれと軸回転ずれが重疊的に生じた場合の模式図である。軸ずれは、光ファイバAを基準に、光ファイバBの軸ずれはXY平面内の平行移動と、平行移動後の中心コアを軸にした軸回転移動の合成で表される。XY平面内の平行移動は、中心コアの軸ずれ量 L 、ずれた方向を θ_1 とし、平行移動後の中心コアを軸にした軸回転角度を θ_2 とする。マルチコアファイバの隣接するコア間隔を Λ とすると、外側コア1の軸ずれ量 x は式(1)で表される¹⁰⁾。

$$x^2 = L^2 + \left(2\Lambda \sin \frac{\theta_2}{2} \right)^2 + 4\Lambda L \sin \frac{\theta_2}{2} \sin \left(\theta_1 - \frac{\theta_2}{2} \right) \quad (1)$$

外側コア1から時計回りに外側コア2～6とすると、それぞれの軸ずれ量は、 θ_1 に 60° の倍数を加えることで求められる。なお、中心コアの軸ずれ量は θ_1 、 θ_2 に関係なく L である。

軸回転が最も大きくなるのは、フェルール孔と光ファイバが同軸の場合である。つまり、XY平面内での平行移動がなく、中心コアの軸ずれ L が $0 \mu\text{m}$ である。このとき、外側のコアの軸ずれ量はすべて等しく、式(1)から式(2)で表される。

$$x = 2\Lambda \sin \frac{\theta_2}{2} \quad (2)$$

クリアランス比と外側コアの接続損失の関係をFig. 8に示す。クリアランスが原因で最も軸回転が大きくなる

(a)

(b)

Fig. 7 Schematic illustration of outer core offset.

Fig. 8 Clearance ratio VS. connection loss of outer core.

場合の結果である。軸ずれによって生じる接続損失 α の計算は式(3)を用いた¹¹⁾。

$$\alpha(\text{dB}) \approx 4.34 \left(\frac{x}{w} \right)^2 \quad (3)$$

式(3)は光の強度分布がガウス分布での計算式である。接続損失測定波長では、シングルモードであり、本式に略一致すると言える。 w はモードフィールド半径である。使用した光ファイバに合わせて Λ を $44 \mu\text{m}$ 、 w を $5.2 \mu\text{m}$ として計算した。

六角形の辺の幅方向におけるクリアランスは $1 \mu\text{m}$ 以

下に抑えた。クリアランスの比は 0.65% 以下で、接続損失は 0.16dB に抑えられることになる。

6. 接続損失

FCコネクタを取り付けた六角形クラッドのマルチコアファイバの接続損失を測定した。細径ファイバを7心束ねたファンアウト部品をマルチコアファイバに接続することで、7個のコアの接続損失を個別に測定している。測定波長は $1.55 \mu\text{m}$ である。FCコネクタとアダプタの嵌合は、キーとキー溝のクリアランスが小さく、嵌合後の軸回転の調整はしていない。接続した光ファイバ心線数は80本であり、1心の光ファイバに7個のコアがあるので、560コア分の接続損失を測定している。Fig. 9は得られた接続損失の結果をヒストグラムに示したものである。

1dB以下の接続損失が得られたのは84%であった。接続損失の平均値は 0.51dB である。中心コアの接続損失の平均値は 0.19dB であるのに対し、外側コアの平均値は 0.56dB である。

2dB以上の接続損失が一つのコアでも発生した15接続について、キー溝の幅が大きいアダプタに嵌合し直し、嵌合部間のクリアランスを利用して、軸回転方向の調整後の接続損失を測定した。コネクタのキーに最も近いコアと遠いコアの二つの接続損失が小さくなるように嵌合させながら手動で調整した。

調整前後の接続損失の結果をTable 2に示す。なお、表中の数値は、1心に7個のコアがあるので105コア分の結

Fig. 9 Result of the connection loss measurement.

Table 2 Connection loss comparison between before and after of adjustment.

Item	Connection loss (dB)	
	Before adjustment	After adjustment
Average	1.24	0.57
Maximum	3.73	1.52
Standard deviation	1.033	0.333

果である。軸回転方向の調整後の接続損失が抑制されている。この結果から、設計したコネクタは主に軸回転ずれの抑制が不足していると考えられる。前述の(a), (c), (d)の軸回転ずれの要因を抑制することで、接続損失を改善できるが、特に(d)の要因について、フェルールのファイバ孔は正六角形であるのに対し、ファイバは六角形の角を意図的に丸めているため、設計に比べ軸回転ずれが大きくなっていると考えられる。ファイバ形状に合わせたファイバ孔のフェルールの使用と、コネクタを構成する部品のクリアランスを抑えた設計が必要である。

また、中心コアの平均0.19dBの接続損失は、汎用SMFのFCコネクタ接続の平均値(約0.1dB)に比べて大きい。フェルールのファイバ孔の偏心の影響と考えられる。偏心の改善で中心コアだけでなく、外側コアの接続損失も改善が期待できる。

7. まとめ

マルチコアファイバのコネクタ接続における軸回転方向の調整を容易にするための検討を行った。六角形クラッドのマルチコアファイバと六角形孔のフェルールのFCコネクタを設計し、これらによる接続損失の評価を行った。560コアの接続損失の測定結果より、1dB以下の接続損失は84%の確率で達成させていること確認した。さらにコネクタ部品などの寸法精度の向上により、接続損失の低減が可能であると期待している。

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「革新的光ファイバ技術の研究開発」、および「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) D. Qian, M. Huang, E. Ip, Y. Hang, Y. Shao, J. H. and T. Wang: *Optical Fiber Communication Conference* (2011) PDPB5.
- 2) T. Morioka: *OptoElectronics and Communications Conference* (2009) FT14.
- 3) H. Tahara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, *et al.*: *European Conf. on Opt. Commn.* (2012) Th.3.C.1.
- 4) 長瀬 亮: in光通信技術の飛躍的高度化 ed.中沢 正隆, 鈴木 正敏, 盛岡 敏夫(オプトロニクス社, 東京, 2012) p.269.
- 5) 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 楠修一, 谷口浩一: 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会技術研究報告, OFT2012-2 (2012).
- 6) T. Hayashi, T. Taru, O. Shimakawa, T. Sasaki, and E. Sasaoka: *Optical Fiber Communication Conference* (2011) OWJ3.
- 7) K. Takenaga, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuoka, K. Saitoh, and M. Koshiba: *Optical Fiber Communication Conference* (2011) OWK7.
- 8) D. Marucuse: *The Bell System Technical Journal* **56** (1977) 703.
- 9) 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講演論文集, エレクトロニクス C-3-80 (2012).
- 10) 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一: 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会技術研究報告, OFT2012-68 (2013).
- 11) S. Nemoto and T. Makimoto: *Opt. Quantum Electron.* **11** (1979) 447.