

4コアマルチコアファイバ用バンドル型 ファンイン・ファンアウトデバイス

Fiber Bundle Fan-in/Fan-out for Four-Core Multi-Core Fiber

菊地 貴広*
Takahiro Kikuchi

島川 修
Osamu Shimakawa

田澤 英久
Hidehisa Tazawa

データセンター用途を想定したマルチコアファイバ (MCF) を使った次世代伝送システムには、低挿入損失 (IL) と高反射減衰量 (RL) を両立するファンイン・ファンアウト (FIFO) が求められている。当社はファイババンドル (以下、バンドル) 型構造を選択し、バンドルの高精度コア偏心制御と高RLが期待できるMCFとバンドルの物理接触方式によりこれらの同時実現を目指した。当FIFOはMCFとの接続時に回転調心^{*1}のみ行える設計であるが、試作したFIFOの光学特性はIL0.3 dB以下、RL50 dB以上を達成した。

Next generation transmission systems using multi-core fiber (MCF) for data center applications require fan-in/fan-out (FIFO) devices with low insertion loss (IL) and high return loss (RL). We selected a fiber bundle structure that simultaneously achieves low IL and high RL by means of high-precision core eccentricity control of the fiber bundle and physical contact connection between the MCF and the fiber bundle. Although our FIFO device was designed to allow only rotational alignment between the MCF and the bundle, the optical characteristics of the fabricated FIFO device achieved IL less than 0.3 dB and RL more than 50 dB in a measurement.

キーワード：空間分割多重伝送技術、マルチコアファイバ、ファンイン・ファンアウト

1. 緒 言

近年、高精細な動画配信サービスの普及に伴い、急激にデータトラフィックが増大している。それに対応するように、シングルコアファイバ (SCF) の伝送容量も高密度波長分割多重技術等により拡大してきたが、ファイバ入力パワーの限界に到達しつつある⁽¹⁾。近い将来伝送容量の限界を迎えることが予想されるため、空間的に伝送路を分割して伝送容量を増やす空間分割多重伝送技術の開発が進んでいる。その一つとして、マルチコアファイバ (MCF) を用いた技術が有望視されている。MCFは1本の光ファイバ内に光の伝送路であるコアを複数持つファイバであり、敷設面積を増やさずにコア数に比例して伝送容量を拡大することが可能である⁽²⁾。

MCFを使った伝送システムは、伝送量の多いケーブルにはMCFを用い、SCF用の送受信機にファンイン・ファンアウト (Fan-in/Fan-out, FIFO) を用いて接続する構成から導入が始まると想定される。伝送路にFIFOを使用すると、接続点が現行のシステムより増加することから、FIFOには低挿入損失 (IL) と共に、接続点間の多光路干渉^{*2}による通信エラーを防ぐため55 dBを上回る高反射減衰量 (RL) も求められている^{(3)、(4)}。

当社は、データセンター用途に導入が期待されている非結合型4コアMCFとの親和性が高いファイババンドル (以下、バンドル) 型に着目し⁽⁵⁾、コア偏心制御による低ILと物理接触 (PC) 接続方式による高RLを目指し開発に着手した。本稿では、当社が開発したバンドル型FIFOの基本設計と諸特性について紹介する。

2. バンドル型FIFOの設計

4コアMCFとバンドルの諸元を図1に示す。FIFOは40 μm 正方コア配置の非結合型4コアMCFとの接続を想定して、同MCF (シングルモード (SM)、モードフィールド径 (MFD) : 8.6 μm (波長1.31 μm)、クラッド径 : 125 μm) と、バンドルを内部で接続させた構造である。バンドルには耐曲げ損失性のあるトレンチアシスト型SCFを用いた。MFDはMCFと同設計である。SCF先端は化学エッチングにより外径125 μm から40 μm まで細径化した。細径化したファイバ4本を束ね、ジルコニアフェルールの同一穴に挿入し終端処理した。バンドル用フェルール穴径は4本のファイバが正方最密構造になるよう設計されており、

4コアMCF		細径化SCFバンドル	
コア	SM/非結合	コア	SM/トレンチ
MFD	8.6 μm (波長1.31 μm)	MFD	8.6 μm (波長1.31 μm)
クラッド径	125 μm	クラッド径	40 μm
コアピッチ	40 μm		

図1 4コアMCFとバンドルの諸元

MCFとコア配置を容易に一致させられる。

当FIFOの特徴の一つは、フェルールに終端処理されたMCFとSCFがPC接続される点である。PC接続とは光ファイバコネクタに用いられる接続技術で、互いに先端を突き当てたフェルール間に押圧力をかけると、ファイバ端が弾性変形して隙間なく密着し、高いRLが得られる接続方法である。

図2にFIまたはFO単体（以下、FOデバイス）の組み立て方法を示す。MCFとバンドルはジルコニア材割りスリーブ内で回転調心したのち筐体内に収められてPC接続が完了する。PC接続のため、筐体はLCコネクタ^{*3}部品をベースに設計し、フェルールを固定する部品はLCコネクタ用部品と共通化した。筐体のサイズはブーツ部品を含め63 mm×□5.6 mmである。MCF両端にFOデバイスを接続したFIFOペアの外観を写真1に示す。FOデバイスの光学特性目標は、IL<0.5 dB、RL>55 dB、クロストーク（XT）<-50 dBに設定した。

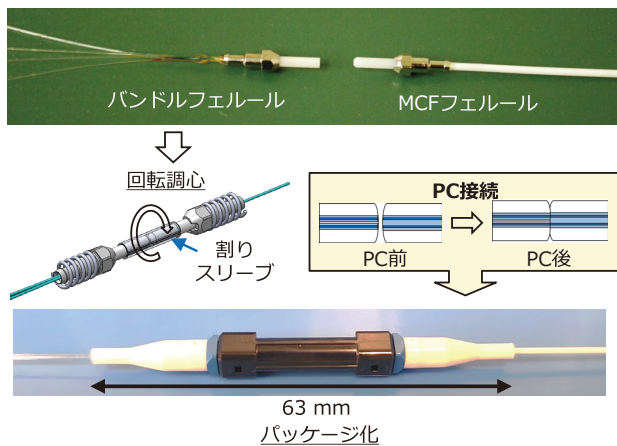


図2 バンドル型FOデバイス構造と外観

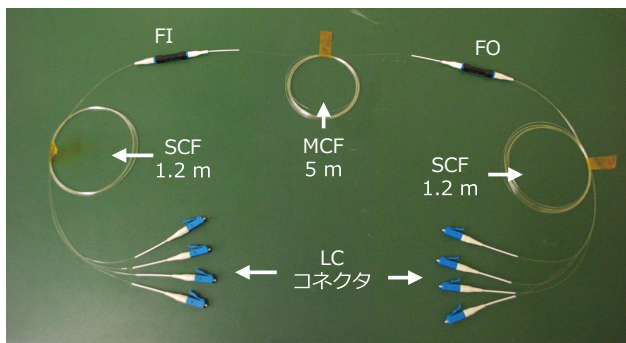


写真1 FIFOペアの外観

3. コア偏心制御

3-1 コア偏心

FIFOの主要特性であるILの劣化は、主にMCFとバンドルの製造ばらつき起因のコア偏心により生じる互いのコア位置不一致が原因である。図3にバンドルコア偏心の概要図を示す。本設計のバンドル型FIFOは、組立性を上げるためMCFとバンドルのフェルールを割りスリーブ内に挿入してXY軸を固定し、回転調心のみ行えるようにしている。光コネクタ分野で技術発展してきたフェルールは内外周の同軸度と内外径精度が高いため、通常のSCF同士の接続ではフェルール外周を合わせれば容易に調心できる。しかし、バンドルの場合は①フェルール外周中心に対するフェルール穴中心の偏心、②フェルール穴のクリアランスによるファイバの位置ずれに加えて、③エッチングファイバの外径ばらつきが加わるため、偏心抑制の難易度が高い。ここでバンドルおよびMCFのコア偏心は、フェルールの外周中心に置いた一辺40 μm の正方形の頂点を設計上のコア中心とし、実際のコア中心のそこからのずれと定義する。

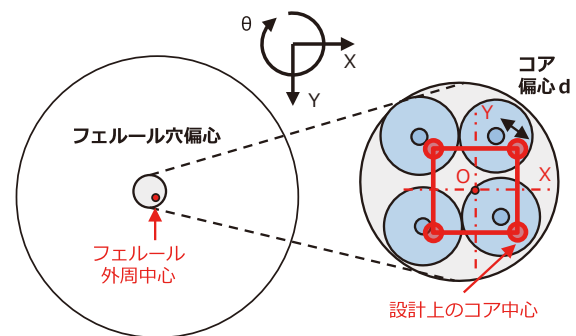


図3 偏心概要図

3-2 バンドルコア偏心制御

バンドルコア偏心の主要因であるエッチングファイバの外径ばらつき制御の目標を定めるためシミュレーションを行った。MCFのコアピッチ40 μm に合わせるため、エッチングファイバ外径は40 μm としてフェルール穴に隙間なく挿入するのが理想である。その時のフェルール穴径は約96.6 μm となる。一方、実際の製造を考えると、ファイバをフェルール穴に挿入するにはクリアランスが必要なため、フェルール穴を拡げるか、ファイバ径を細くしなくてはいけない。そのためシミュレーションでは、 $\Phi 97 \mu\text{m}$ のフェルール穴に対して外径39~40 μm のファイバを想定しILを計算した。モンテカルロ法に基づき、フェルール内のコア位置をコア間距離がファイバ径以上であるようにランダムに配置させ、コア偏心量dを求めた。ILはコア偏心量dから式(1)を用いて計算することができる⁽⁶⁾。

$$IL = 10 \log \left(\exp \left(\frac{d^2}{MFD^2} \right) \right) \dots\dots\dots (1)$$

なお、偏心量から計算される4コアのILのうち最大値がそのバンドルのIL値である。10000回の計算結果得られたILの累積確率を図4に示す。目標のIL<0.5 dBに対し、ファイバ外径39.5 μm以上であれば歩留まり9割達成可能であることが示された。この結果からファイバ径制御の目標を±0.25 μmに設定した。

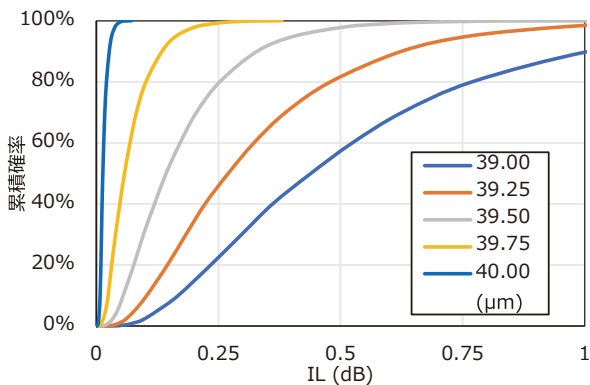


図4 ファイバ径ごとのIL歩留まり

この結果を参考にファイバエッチングを行い、実際に作製した8本のSCFバンドルのコア偏心量を画像処理測定器で測定した結果を図5に示す。バンドルのコア偏心量は平均0.42 μmであった。さらに、理想的なMCFからの偏心量に基づいて計算したIL推定値の分布を図6に示す。MFDは8.6 μm (波長1.31 μm) に設定した。平均ILは0.06 dB、IL最大値0.30 dBであった。フェルルール径に適した外径狙いと径ばらつき抑制により、目標通りコア偏心量が抑えられていると考えられる。

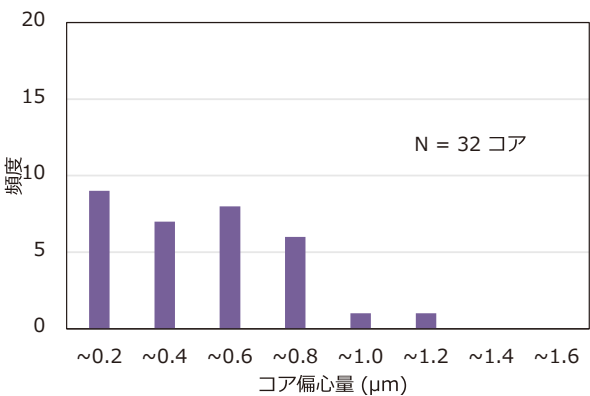


図5 バンドル偏心測定結果

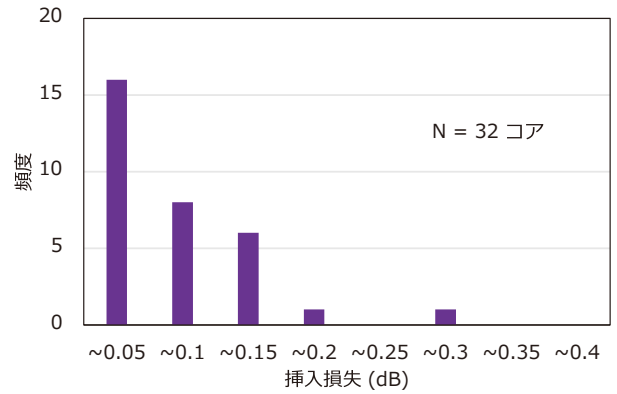


図6 バンドル偏心から計算したIL推定値

3-3 回転調心

FIFO製造では、バンドル同様にコア偏心を持つMCFと回転調心を行い、コア偏心を補償しあう。回転調心の模式図を図7に示す。MCFとバンドルのコアは割りスリーブ内でフェルルール外周中心を軸に回転する。共にフェルルール中心が外周中心に対して偏心を持つため、回転調心のみ行うと、MCFとバンドルのコア間距離が最大となる位置とコア間距離が最小かつILが最小となる位置がある。MCF8本のコア偏心量測定も行い、回転調心のシミュレーションを行った。MCFのコア偏心は平均0.60 μm、最大1.02 μmであった。図8に、平均コア偏心0.85 μmのバンドルと同0.79 μmのMCFを回転調心した際の回転角度毎のIL変化例を示す。4コアが正方配置されているため90度ごとに4コア合計のIL値が小さくなる角度があるが、その中でもフェルルール穴偏心方向が一致する1方向の近傍で4コアのILが最小となる。

8本ずつのMCFとバンドルで回転調心を模擬したIL推定を行った結果を図9に示す。回転調心によって互いのコア偏心が補償され、IL最大値は0.1 dBと推定された。この結果から、本構造のような回転調心のみによる簡易な組立でも偏心制御されたバンドルを用いれば十分低ILのFIFO製造が可能と考えられる。

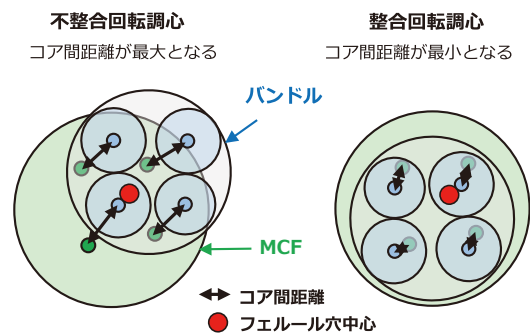


図7 回転調心の模式図

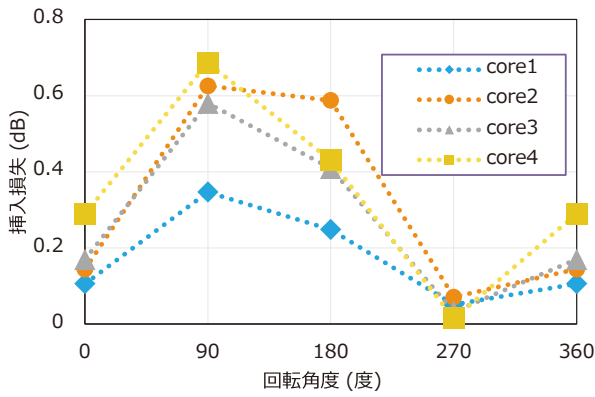


図8 回転調心における回転角度毎のIL

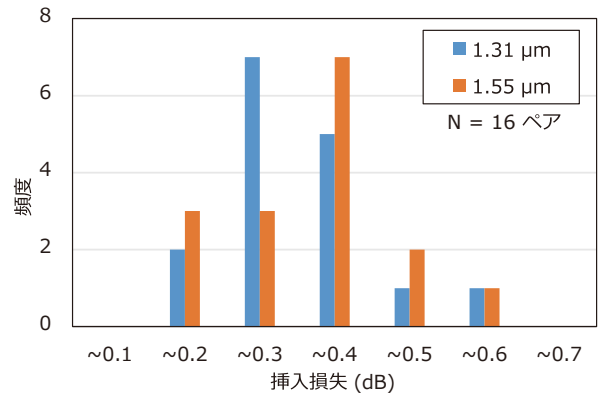


図10 IL測定結果

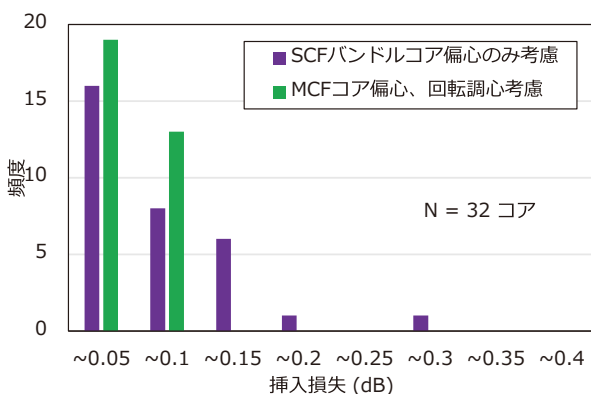


図9 回転調心を考慮したIL推定値

4. 光学特性

コア偏心測定を行ったMCFとバンドルを組み合わせたFIFOペアを4ペア作製し、諸光学特性評価を行った。測定はそれぞれ波長1.31 μmと1.55 μmで行った。主要特性であるIL、RL、XTの測定結果を表1にまとめた。

表1 光学特性測定結果

(1.31/1.55 μm) 【Unit : dB】

	IL	RL	XT
N	16	32	48
Ave.	0.29/0.33	57.5/58.3	-68.0/-61.6
Min.	0.16/0.12	51.7/54.5	-74.9/-68.4
Max.	0.51/0.57	61.1/61.5	-63.7/-55.8
SD.	0.10/0.11	2.2/1.9	2.4/3.1

まず、図10にFIFOペアのILの分布を示す。FOデバイス単位のロスに換算するため単純にペアの測定値を0.5倍すると、最大値は波長1.31 μmにおいて0.255 dBであり、回転調心のシミュレーションで得られた0.1 dB以下とは乖離のある結果となった。理由として、本測定系ではLCコネクタ接続損を含むことと、バンドルフェルール内でのファ

イバ曲げ損失の発生が考えられる。

次にFIFOデバイスのRLの測定結果を図11に示す。なお、RLはOTDR^{*4}システムを用いて測定され、FOデバイス毎の測定値である。一部のコアでは目標の55 dBを下回ったものの、平均は57.5/58.3 dB (波長1.31/1.55 μm) であり目標を達成した。

次に、FIFOペアのXTの結果を図12に示す。m番目のコ

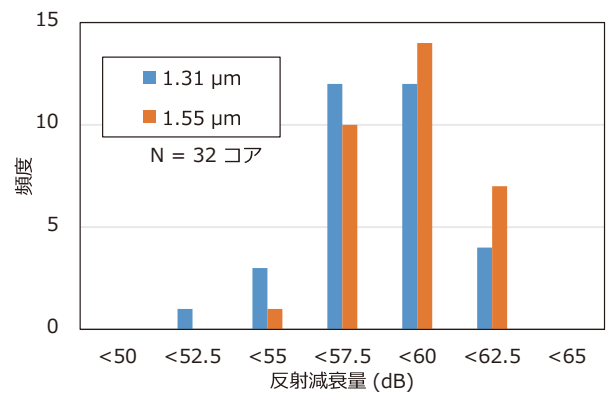


図11 RL測定結果

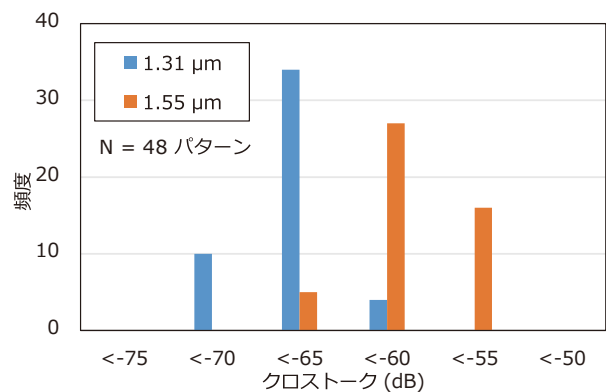


図12 XT測定結果

アに光を入れn番目のコアに生じるXTを式(2)として定義した。XTはいずれの波長でも目標を達成した。

$$XT_{m,n} = \frac{Pout_n}{Pout_1 + Pout_2 + Pout_3 + Pout_4} \quad (m \neq n) \quad \dots (2)$$

最後に、FIFOペアを恒温槽に入れIL温度依存性を評価した。評価条件は、IEC61753-1の「Category OP + ^{HD}」条件を参考にし-40℃～85℃とした。図13に1サンプルにおける波長1.31 μmのIL変動を示す。いずれのコアもILが温度変化に追従するものの変動幅は±0.1 dBに収まっており良好な結果であった。

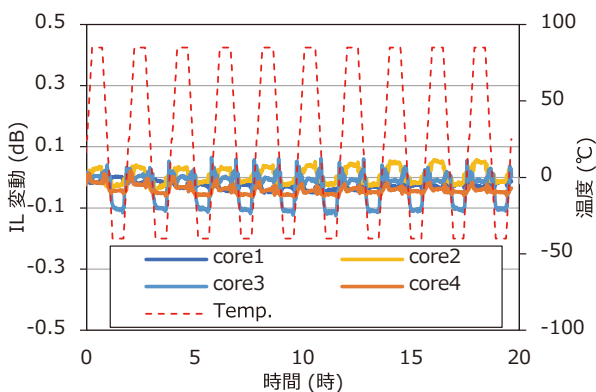


図13 IL温度依存性

5. 結 言

4コアMCFを用いたデータセンターの伝送システムに適したバンドル型FIFOに関して、高精度なコア偏心制御による低IL化と、PC接続による高RL化を目指した設計と試作品の諸特性について紹介した。

実際に作製したバンドルの偏心量データから、エッチングファイバ径管理により偏心量制御できていることがわかったが、MCFとの回転調心も考慮すると偏心が補償され、コア偏心に起因するILは0.1 dB以下が可能であることを確認した。

実際に作製したバンドルFIFOの特性はIL、XTで目標を達成した。RLは一部目標の55 dB未達であるが平均値で目標達成した。IL温度依存性も良好であった。

今後、さらなるFIFO特性の向上によりFIFOを用いたMCF伝送方式の普及に貢献していきたい。

用語集

※1 調心

光デバイスの組み立てで、光軸の位置合わせを行うこと。縦横前後、回転、傾き方向に調整を行う。光強度をモニターしながら行うことが多い。

※2 多光路干渉

光ファイバ中を伝播する光信号の、複数のモード間や反射光との干渉のことで、光強度が時間的に揺らぐことで伝送品質の劣化につながる。

※3 LCコネクタ

小型のPC接続型コネクタで、サーバー内のラック間配線等高密度な配線が必要な場所で用いられている。

※4 OTDR

Optical Time Domain Reflectometerの略称で、光ファイバ伝送経路の損失測定や反射量測定を評価する測定器。

参考文献

- (1) T. Morioka, New Generation Optical Infrastructure Technologies: "EXAT Initiative" Towards 2020 and Beyond," in Proc. OECC2009, FT4
- (2) G. Rademacher et al., "10.66 Peta-Bit/s Transmission over a 38-Core-Three-Mode Fiber," in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, paper Th3H.1
- (3) Y. J. Wen et al, "Mitigation of optical multipath interference impact for directly detected PAMn system," Opt. Express 28, 38317-38333 (2020)
- (4) IEEE Standard for Ethernet Amendment 10: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 200 Gb/s and 400 Gb/s Operation
- (5) O. Shimakawa, M. Shiozaki, T. Sano, and A. Inoue, "Pluggable fan-out realizing physical-contact and low coupling loss for multi-core fiber," 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)
- (6) D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splices." The Bell System Technical Journal 56 (1977): 703-718

執 筆 者

菊地 貴広* : 光通信研究所 主査



島川 修 : 光通信研究所 主幹



田澤 英久 : 光通信研究所 グループ長
Ph.D.



*主執筆者