

多心マルチコアファイバの低損失接続の研究

代表研究者

阿部宜輝

九州産業大学理工学部 教授

1 はじめに

インターネット技術の発展やスマートフォンの普及により、快適な通信コミュニケーションを享受できる時代となった。さらに、IoT (Internet of Things) 技術やAI (Artificial Intelligence) 技術の発展により、今後も社会および生活の変革が続くことで、通信トラフィックを支える光ネットワークでは、光ファイバにおける通信容量は継続的に拡大していくことが予想される。しかしながら、現在の通信容量は光ファイバの伝送容量の限界である 100 Tb/s に近づいている。現在の光ネットワークで使用されているシングルコアファイバ (SCF : Single-core fiber) の伝送容量の限界を超える技術として、同一ファイバに複数のコアを有するマルチコアファイバ (MCF : Multi-core fiber) を用いた空間多重伝送 (SDM : Space division multiplexing) 技術[1-3]が検討されている。MCF を用いた SDM 伝送システムを実現するためには、MCF を着脱可能に接続することが可能な MCF 用光コネクタが必要不可欠である。MCF 用光コネクタの実現に向けて、SCF 用光コネクタと同等の光学特性を達成するためには、光ファイバ中心以外にコアがある MCF の接続では光軸回り方向の回転調心が必要となり、中心以外のコア同士における軸ずれを低減して接続することが求められる。この課題を検討した単心 MCF コネクタ[4-7]と多心 MCF コネクタ[8-10]が報告されている。単心形 MCF コネクタでは、円筒形フェルールに MCF を接着固定する際にコアを光軸回り方向に回転調心する構造、もしくは MCF を円筒形フェルールに接着固定した後で、円筒形フェルールを回転調心してプラグと一体化する構造が報告されている。多心 MCF コネクタでは、別の部材で MCF を回転調心した上で MT (Mechanically Transferable) フェルールにその部材を挿入する構造として、MT 形コネクタや MPO (Multifiber Push-On) 形コネクタの形態で報告されている。単心形と多心形のどちらの光コネクタにおいても、これらの回転調心でコアを光軸回り方向に誤差なく固定することは困難であるため、回転調心による角度ずれが発生する。

本研究では、この回転角度ずれをゼロにすることは困難であることを前提として、多心の MCF を着脱可能に一括接続する多心 MCF コネクタにおいて、現状の多心 SCF コネクタと同等の接続損失を実現することを目的とした検討を実施した。最初に多心 SCF コネクタで低損失化するためのコネクタ部材の寸法パラメータを明らかにした上で、MCF の回転角度ずれによる接続損失が付加されても、従来の多心 SCF コネクタと同等の接続損失とするためのコネクタ部材の寸法値を計算により明らかにする。

2 光コネクタの構造

光コネクタは1本の光ファイバを接続する単心形光コネクタと、複数本の光ファイバを一括接続する多心形光コネクタに分類される。本研究では、多心形光コネクタを対象とした研究を実施したので、多心形光コネクタについて説明する。多心形光コネクタとしては、MT 形コネクタ[11]と MPO 形コネクタ[12]がある。まず、MT 形コネクタについて説明する。図1に多心形コネクタである MT 形光コネクタの外観模式図を示す。複数本の光ファイバを MT フェルールの光ファイバ挿入孔に挿入して接着剤で接着固定して、接続端面を研磨している。単心形光コネクタで使用される円筒形フェルールに対して、MT フェルールは形状から角形フェルールとも呼ばれる。MT フェルールには、並んだ光ファイバ挿入孔の外側にガイドピン挿入孔がある。接続する MT フェルールの一方のガイドピン挿入孔にはガイドピンを挿入した状態として、もう一方の MT フェルールのガイドピン挿入孔にガイドピンを挿入することで、MT フェルール同士が接続される。ガイドピン挿入孔に対して光ファイバを高精度に整列することで、多心の光ファイバ同士を低損失に接続する。MT 形コネクタでは、MT フェルール端面間にガラスと屈折率を整合させたジェル状の屈折率整合材を介在させて空気層をなくして、接続点における反射を抑制している。図2に MT フェルール同士をガイドピンにより結合して係止クリップで固定した外観写真を示す。現在では、MT 形コネクタが使用されることは少ない。MT 形コネクタは、専用の工具を用いた着脱が必要であり、着脱毎に屈折率整合材の拭き取りと塗布も必要なため、屈折率整合材が不要で手作業のみで着脱可能な MPO 形コネクタが一般的に利用されている。図3に MPO 形コネクタの外観模式図を示す。MPO 形コネクタは、MT フェルールを内蔵したプラグと、プラグ同士を結合するアダプタに

より構成される。ガイドピンが MT フェルールのガイドピン挿入孔に挿入された側を M 形プラグと呼び、ガイドピン挿入孔にガイドピンが挿入されていない側を F 形プラグと呼ぶ。MPO 形コネクタにおいても、一方の MT フェルールのガイドピンがもう一方のガイドピン挿入孔に挿入されることで、MT フェルールに接着固定された光ファイバ同士を接続する構造である。MT フェルールの寸法値は国際標準規格として定められている。また、MPO 形コネクタでは、MT フェルールの端面を斜め 8° に研磨し、かつ光ファイバ先端が MT フェルール端面から僅かに突き出るように研磨して、光ファイバ端面同士を PC 接続させて高反射減衰量を実現している。図 14 は MPO 形コネクタの外観写真である。MPO 形コネクタは SC 形コネクタと同様にプラグのノッチがアダプタの係止片に嵌合することで、手作業でプラグの着脱が可能である。多心の光ファイバを接続する光コネクタとしては、MPO 形コネクタがデータセンタ等で最も汎用的に使用されている。

多心 MCF を一括接続する光コネクタとしては、MPO 形コネクタの形態となることが予想されるため、本研究においても、MT フェルールを用いた MPO 形コネクタにて検討した。

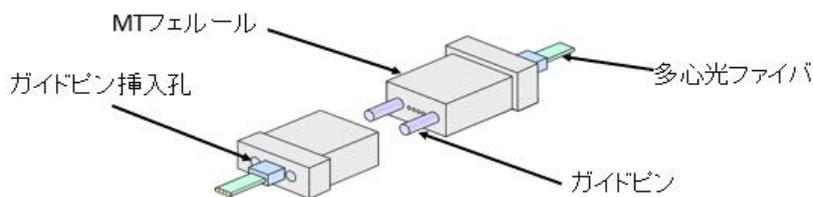


図 1 MT 形コネクタの外観模式図

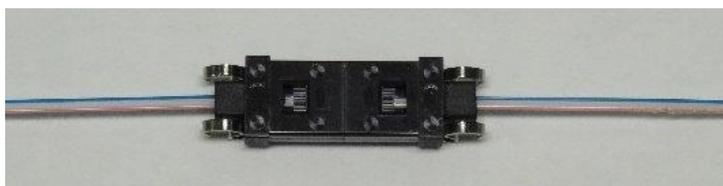


図 2 MT 形コネクタの外観写真

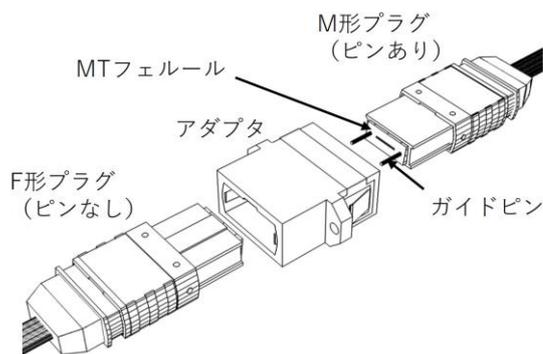


図 3 MPO 形コネクタの外観模式図

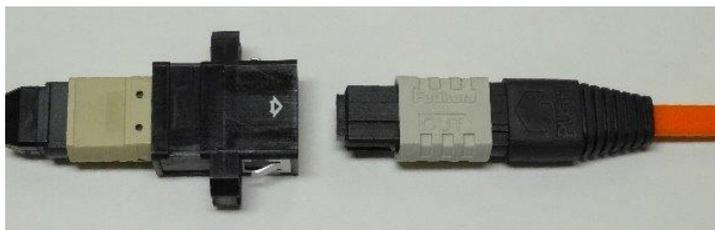


図4 MPO形コネクタの外観写真

3 多心 SCF コネクタの低損失化に関する検討

多心 MCF コネクタにおける低損失化を検討するにあたって、最初に多心 SCF コネクタにおける MT フェルールの寸法値と接続損失の関係を計算により明らかにする。

図5にMTフェルールの接続側端面の模式図を示す。MTフェルールには、並んだ光ファイバ挿入孔の外側にガイドピン挿入孔がある。接続するMTフェルールの一方のガイドピン挿入孔にはガイドピンを挿入した状態として、もう一方のMTフェルールのガイドピン挿入孔にガイドピンを挿入することで、MTフェルール同士が接続される。ガイドピン挿入孔に対して光ファイバを高精度に整列することで、多心の光ファイバ同士を低損失に接続する。

MTフェルール同士の接続における接続損失の要因について説明する。MTフェルールは、射出成型により製造されるため、製造誤差により、作製したMTフェルールの寸法は設計値とは異なる。さらに、光ファイバ挿入孔の内径は、光ファイバのクラッド外径より大きくする必要があるので、光ファイバ挿入孔の中心からの光ファイバの位置ずれも発生する。また、光ファイバ中心からのコアの位置ずれも発生する。接続損失の計算においては、これらの設計値からのずれを考慮する必要がある。図5において、MTフェルール端面の*i*番目の光ファイバ中心からの光ファイバコアの位置ずれを $\overline{d_{1i}}$ 、光ファイバ挿入孔からの光ファイバの位置ずれを $\overline{d_{2i}}$ 、光ファイバの挿入孔の設計値からの位置ずれを $\overline{d_{3i}}$ とした。光ファイバ挿入孔の内径を D 、光ファイバのクラッド外径を a としたとき、 $\overline{d_{2i}}$ は0から $(D-a)/2$ の範囲の値となる。これらの位置ずれの出現確率は二次元正規分布に従うと仮定することで接続損失を推測できる[13]。図6は、MTフェルール同士を接続したときの模式図を示す。図6の上部の模式図は、MTフェルール同士をガイドピンにより接続したときの断面模式図である。MPO形コネクタでは、MTフェルール端面は斜めになっており、ガイドピンをガイドピン穴に挿入したときに、MTフェルール後端よりバネによって押されたMTフェルールがスライドする。図6の下部の模式図は、MTフェルール端面が接触したときのMTフェルール端面を正面から見たときの模式図であり、MTフェルール端面同士がスライドした状態を示している。図6において、MTフェルールのスライドによる*i*番目の光ファイバ挿入孔の位置ずれを $\overline{d_{4i}}$ としたとき、 $\overline{d_{4i}}$ は次式で表すことができる[14]。

$$d_{4i} = (x_{4i}, y_{4i}) \quad (1)$$

$$x_{4i} = 250(i - 6.5) \left(\sqrt{\frac{E_A^2 - (R_A - L_A)^2 (\sin \varphi)^2}{E_A}} - 1 \right) + \frac{(L_A - R_A)}{2} \cos \varphi \quad (2)$$

$$y_{4i} = \left[\frac{\frac{R_A - L_A}{E_P} (x_{4i} + R_A \cos \varphi) + \frac{(L_A - R_A)}{2}}{1 - \frac{R_A + L_A}{E_P} \cos \varphi} + R_A \right] \sin \varphi - Y_{OFFSET} \quad (3)$$

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{E_B - E_A}{L_A + R_A + L_B + R_B} \right) \quad (4)$$

$$Y_{OFFSET} = \left(\frac{H - I}{2} \sin \varphi + 0.3 \right) \quad (5)$$

ここで、 L_A と R_A はフェルルールAにおける左と右のガイドピンとガイドピン穴のクリアランス、 L_B と R_B はフェルルールBにおける左と右のガイドピンとガイドピン穴のクリアランスを示す。ガイドピン穴の内径を H 、ガイドピン外径を I としたとき、ガイドピンとガイドピン穴のクリアランスは $(H-I)/2$ となる。光ファイバコアの位置ずれ \vec{d}_i と、 i 番目の光ファイバにおける軸ずれ l_i は次式で表すことができる。

$$\vec{d}_i = (\vec{d}_{1i} + \vec{d}_{2i} + \vec{d}_{3i} + \vec{d}_{4i}) \quad (6)$$

$$l_i = |\vec{d}_{LA} - \vec{d}_{LB}| \quad (7)$$

SMFの接続損失は軸ずれ l_i を用いて求めることができる[14]。MPOコネクタの i 番目の接続ペアの接続損失 α_i は次式で表すことができる[15]。

$$\alpha_i = -10 \log_{10} \left[\frac{(2\omega_1\omega_2)^2}{(\omega_1^2 + \omega_2^2)^2} \exp \left[\frac{-2l_i^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} - 2 \frac{\pi^2 n^2 \omega_1^2 \omega_2^2 \theta_i^2}{\lambda^2 (\omega_1^2 + \omega_2^2)} \right] \right] \quad (8)$$

ここで、 ω_1 はフェルルールAの光ファイバのモードフィールド半径、 ω_2 はフェルルールBの光ファイバのモードフィールド径であり、 n は光ファイバコアの屈折率、 λ は光ファイバを伝搬する信号光の波長である。

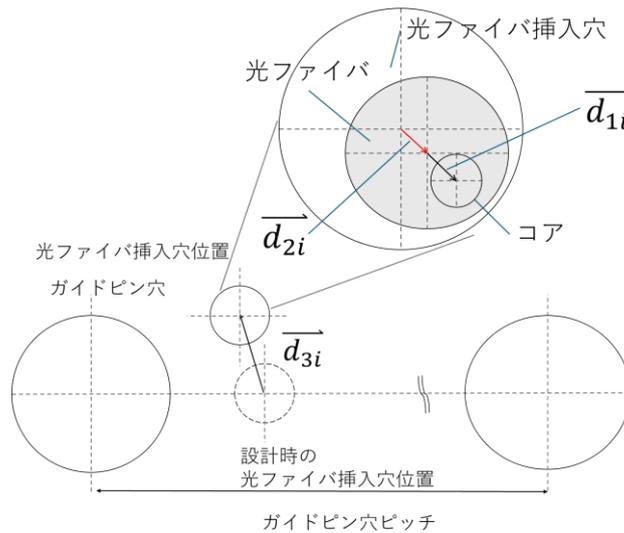


図5 MT フェルルール端面模式図

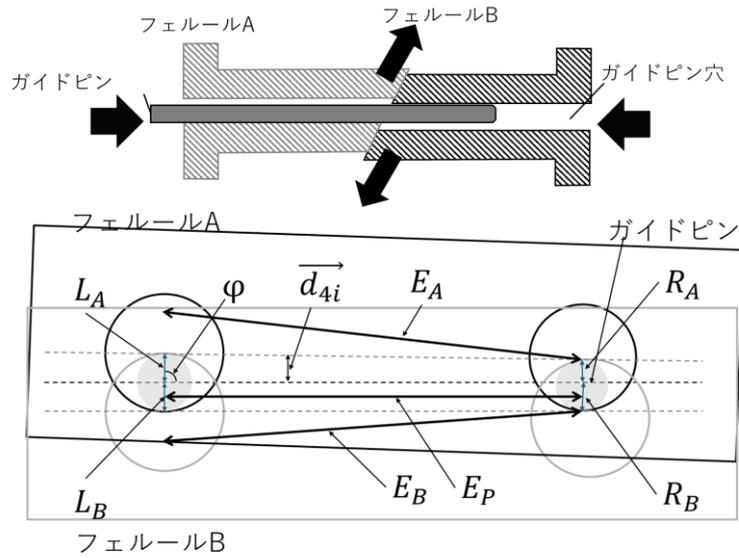


図6 MTフェルールが接続したときの模式図

多心SCFコネクタの接続損失を小さくすることに効果のあるMTフェルールと光ファイバの寸法パラメータを検討した。表1に接続損失の計算で使用するパラメータの一覧を示す。各パラメータには、国際標準規格もしくは市場での一般的な仕様として、値の範囲と標準偏差がある。実際の光コネクタでは製造誤差があるので、各パラメータの値はバラつくことを前提として計算する必要がある。各パラメータのバラつきは二次元正規分布となると仮定し、モンテカルロシミュレーションにより式(1)から(7)を計算して、式(8)により接続損失値を計算した。図7は、光ファイバ挿入穴の位置ずれ、光ファイバの挿入穴角度ずれ、ガイドピン穴ピッチ誤差、ガイドピン穴内径誤差の寸法値を表1に示した規格値の最大値から小さくしたときの接続損失値の計算結果である。計算では、光ファイバ中心からのコア位置ずれ \vec{d}_{1i} は0として計算した。一つのパラメータの寸法値を小さくするときは、他のパラメータの値は変化させていない。図7は、寸法パラメータを変化させたときの規格値からの減少比に対する接続損失計算値の変化を示している。各データは、12心コネクタの10000組の計算データにおける、平均値と累積出現率の97%値を示している。計算結果より、光ファイバ挿入穴位置 $|\vec{d}_{3i}|$ の寸法値を厳しく設定することが12心SCFコネクタの接続損失を小さくすることに効果があることを確認した。そこで、光ファイバ挿入穴位置ずれ \vec{d}_{3i} を0.6m ($\sigma=0.4$)としたときの12心SCFコネクタの接続損失値のヒストグラムを図8に示す。平均接続損失は0.25dB、97%値は0.83dBであった。本研究では、この12心SCFコネクタの平均接続損失値を基準として、12心MCFコネクタの低損失化を検討した。

表1 計算におけるパラメータと値

	項目	範囲	標準偏差
フェルールパラメータ	光ファイバ挿入穴内径 $D[\mu\text{m}]$	125.3-125.9	0.2
	光ファイバ穴位置ずれ $ \vec{d}_3 [\mu\text{m}]$	0-1.2	0.4
	光ファイバ挿入穴角度ずれ $\theta [\text{deg}]$	0-0.2	0.067
	ガイドピンピッチ $E[\mu\text{m}]$	4598-4602	0.67
	ガイドピン穴内径 $H[\mu\text{m}]$	699.0-699.6	0.1
	ガイドピン外径 $I[\mu\text{m}]$	698.4-698.6	0.033
光ファイバパラメータ	クラッド径 $a[\mu\text{m}]$	124.8-125.2	0.067
	コアクラッド偏心 $ \vec{d}_1 [\mu\text{m}]$	0-0.6	0.1
	MFD $2\omega [\mu\text{m}]$	9.1-9.3	0.15
	コア屈折率 n	1.46	-

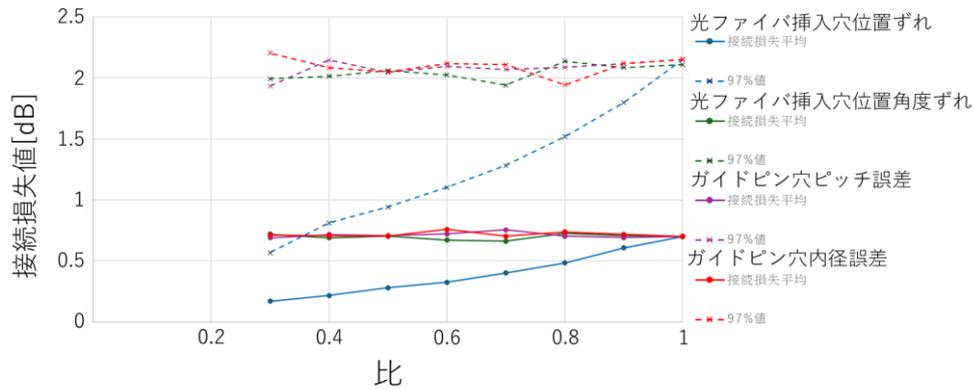


図7 寸法パラメータを変化させたときの12心SCFコネクタの接続損失計算値

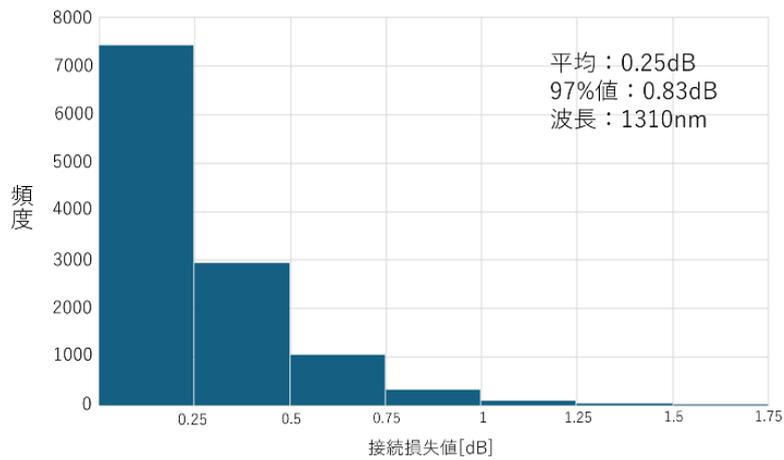


図8 12心SCFコネクタの接続損失計算値 ($|\vec{d}_3| = 0.6$ 、 $\sigma = 0.4$)

4 多心MCFコネクタの低損失化に関する検討

4-1 MCFの回転角度ずれによる接続損失

SCFでは光ファイバ断面中心にコアが1つだけ有る構造である。そのため、低損失接続を実現するためには、光ファイバ中心にあるコア同士を軸ずれなく接続することで重要である。MCFでは中心以外にもコアを配置する構造であるため、中心以外に位置するコアを光軸回り方向に回転調心した上で、回転を抑制するコネクタ構造とする必要がある。単心形MCFコネクタと多心形MCFコネクタのどちらにおいても、回転調心でコアを光軸回り方向に誤差なく固定することは困難であるため、回転調心による角度ずれが発生する。図9にMT形MCFコネクタとMCF端面の模式図を示す。回転調心の結果としてMCFに角度ずれが発生するとき、外側コアにおける軸ずれ量 d_θ は計算により求めることができる。対向して接続するMCFの相対的な角度ずれが θ_z であるとき、 θ_z が十分小さいと仮定すると下記式で d_θ を求めることができる。

$$d_\theta \approx \Lambda \cdot \sin^{-1} \theta_z \quad (9)$$

ここで、 Λ はクラッド中心から外側コア中心までの距離である。式(8)の軸ずれ量に d_{θ} を代入して、計算することで、回転角度ずれによる接続損失を計算することができる。図9に示した4コアMCF ($\Lambda=35\ \mu\text{m}$)における回転角度ずれに対する接続損失を計算した結果を図10に示す。MCFの接続では、SCFの接続でも発生する接続損失に加えて、回転調心の結果として発生する回転角度ずれによる接続損失が付加されることになる。

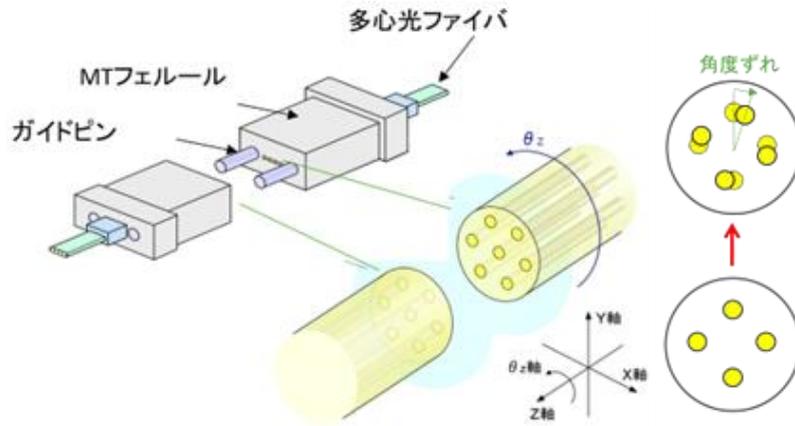


図9 多心MCFコネクタにおけるMCFの回転角度ずれの模式図

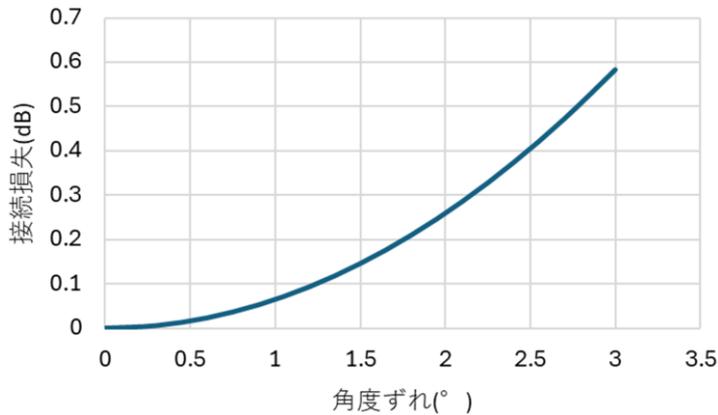


図10 4コアMCF ($\Lambda=35\ \mu\text{m}$)における回転角度ずれに対する接続損失計算結果

3-2 多心MCFコネクタの接続損失の計算

MCFを伝送媒体として社会実装するために、国際標準化団体 (ITU-T, IEC) では、MCFに関する技術の国際標準規格の制定に向けた検討が開始されている。現在の動向では、クラッド外径が $125\ \mu\text{m}$ であり、4つのコアを持つ4コアMCFが検討候補の一つとなる見込みである。そのため、本研究でも、光ファイバが4コアMCF (クラッド径 $125\ \mu\text{m}$) であるときの多心コネクタにおける接続損失をモンテカルロシミュレーションで計算した。図11に計算する4コアMCF端面におけるコア配置を示す。コアの位置座標は、MCF中心からの距離 r と、 r が水平軸となす角度 θ で設定した。 r の設計値からのズレ量を Δr 、 θ の設計値からのズレ量を $\Delta\theta$ とし、回転調心による角度ずれを $\Delta\theta_{\text{error}}$ としたとき、各コアの位置は下記式で表すことができる。

$$\vec{d}_1 = ((r + \Delta r) \cos(\theta + \Delta\theta + \Delta\theta_{\text{error}}), (r + \Delta r) \sin(\theta + \Delta\theta + \Delta\theta_{\text{error}})) \quad (10)$$

図7において、1のコアは $\theta=45^\circ$ 、2のコアは $\theta=135^\circ$ 、3のコアは $\theta=225^\circ$ 、4のコアは $\theta=315^\circ$ となる。計算において、MCFのコアはコア間距離 $40\ \mu\text{m}$ で配置されているとし、MCF中心からの距離 r は $28.3 (=20 \times \sqrt{2})\ \mu\text{m}$ と設定した。MCFに関する国際標準規格はまだ存在しないが、国際標準規格の制定に向けて、MCFのコア位置

の設計値から許容するズレ量を $\pm 0.6 \mu\text{m}$ とすることが検討されている。そこで、 Δr は $\pm 0.6 \mu\text{m}$ とし、 $\Delta\theta$ は回転方向で $\pm 0.6 \mu\text{m}$ となる角度を設定した。光ファイバ挿入穴からの光ファイバ中心の位置ずれと設計時の光ファイバ挿入穴位置からの位置ずれ、MT フェルールのスライドによる i 番目の光ファイバ挿入穴の位置ずれは、3章における 12 心 SCF コネクタの計算と同様に表 1 に示したパラメータと値で計算した。

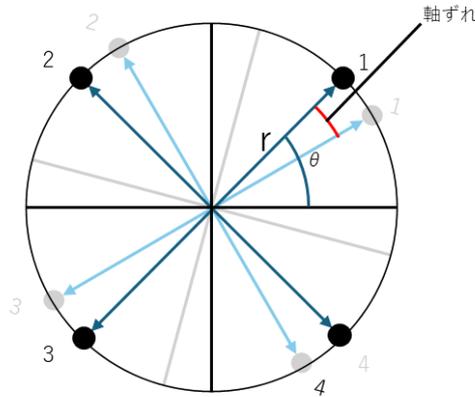


図 11 MCF コア位置模式図

12 心 MCF コネクタにおいても、光ファイバ挿入穴の位置ずれ、光ファイバの挿入穴角度ずれ、ガイドピン穴ピッチ誤差、ガイドピン穴内径誤差の寸法値を表 1 に示した規格値の最大値から小さくしたときの接続損失値を計算した。回転調心による角度ずれ $\Delta\theta_{\text{error}}$ をゼロとして計算したときの計算結果を図 12 に示す。一つのパラメータの寸法値を小さくするときは、他のパラメータの値は変化させていない。図 12 は、規格値からの減少比に対する接続損失の変化を示しており、各データは、12 心 MCF コネクタの 10000 組の計算データにおける、平均値と累積出現率の 97% 値を示している。計算結果より、12 心 MCF コネクタにおいても、光ファイバ挿入穴位置の寸法値を厳しく設定することが接続損失を小さくすることに効果があることを確認した。そこで、光ファイバ挿入穴位置ずれを $0.6 \mu\text{m}$ とし、光ファイバ挿入穴位置ずれ以外のパラメータは範囲の最大値としたときの 12 心 MCF コネクタの接続損失値のヒストグラムを図 13 に示す。平均接続損失は 0.31 dB 、97% 値は 1.03 dB であった。図 8 に示した 12 心 SCF コネクタの接続損失の計算結果と比較して、コア位置以外は同じ寸法値で計算したが、接続損失が大きくなる結果となった。SCF はコア位置を高精度に作製できるようになっているため、12 心 SCF コネクタの計算では、設計値からのズレをゼロとしていたが、MCF のコア位置ずれの範囲を $\pm 0.6 \mu\text{m}$ として計算したため、接続損失が大きくなった。将来的には SCF と同様に設計値からのズレはゼロに近い値となる可能性はあるが、SCF と同程度に高精度に作製できるようになるまでは時間を要することが想定されるため、本報告では MCF のコア位置ずれは $\pm 0.6 \mu\text{m}$ として検討を進める。

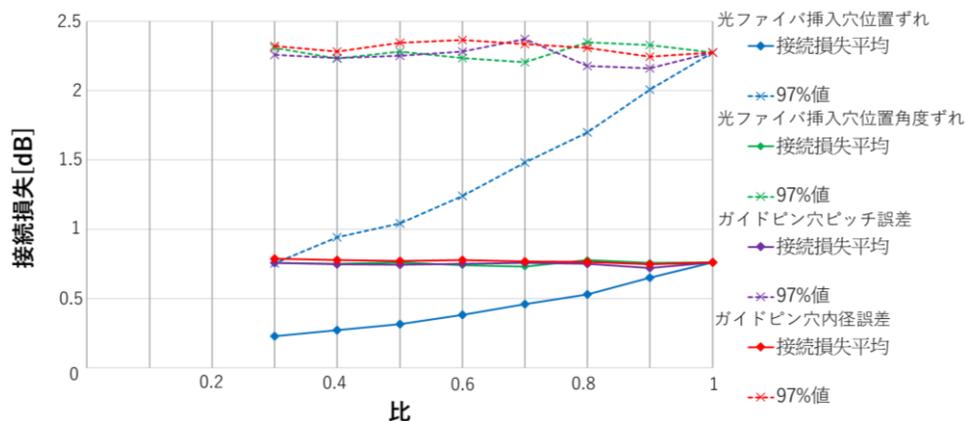


図 12 寸法パラメータを変化させたときの 12 心 4 コア MCF コネクタの接続損失計算値

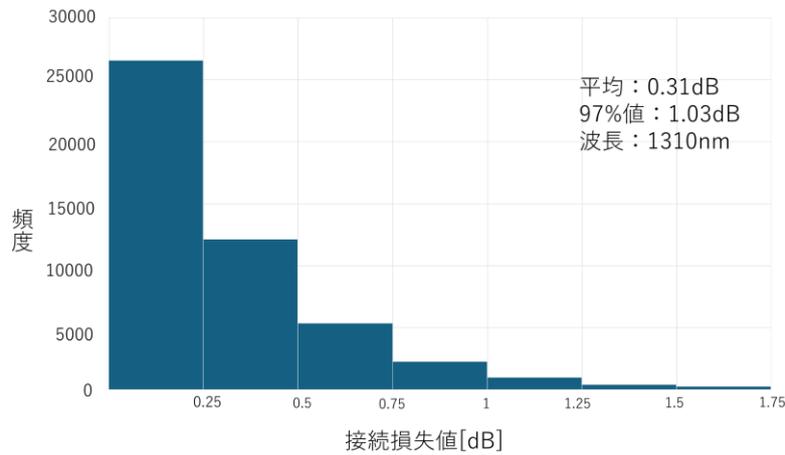


図 13 12 心 SCF コネクタの接続損失計算値 ($|\vec{d}_3|=0.6$ 、 $\sigma=0.4$ 、 $\Delta\theta_{\text{error}}=0$)

12 心 MCF コネクタ接続において、光ファイバ挿入穴位置ずれを変化させて、12 心 SCF コネクタと同等の平均接続損失 0.25 dB を実現することを検討した。図 14 に光ファイバ挿入穴位置ずれを 0.5 μm 、 $\sigma=0.4 \mu\text{m}$ としたときの接続損失計算値のヒストグラムを示す。回転角度ずれ $\Delta\theta_{\text{error}}$ は 0° としたときの計算結果である。光ファイバ挿入穴位置ずれを SCF コネクタにおける 0.6 μm から 0.5 μm に小さくすることで、12 心 MCF コネクタの接続損失の平均値を約 0.25 dB とすることができた。

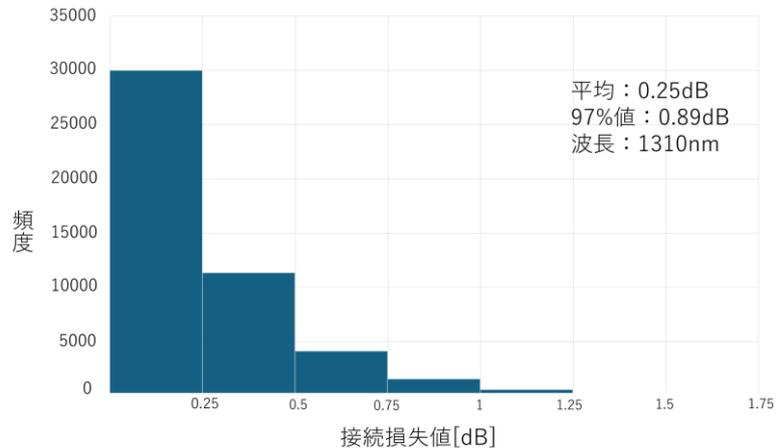


図 14 12 心 SCF コネクタの接続損失計算値 ($|\vec{d}_3|=0.5$ 、 $\sigma=0.4$ 、 $\Delta\theta_{\text{error}}=0$)

しかしながら、回転調心による角度ずれ $\Delta\theta_{\text{error}}$ をゼロにすることは困難であるため、 $\Delta\theta_{\text{error}}$ が発生することを前提として接続損失値を見積もる必要がある。図 14 で示した結果は $\Delta\theta_{\text{error}}$ をゼロとして計算した結果であった。そこで、図 15 と図 16 に回転角度ずれ $\Delta\theta_{\text{error}}$ がそれぞれ 0.25° 、 0.5° としたときの 12 心 MCF コネクタの接続損失計算値のヒストグラムを示す。光ファイバ挿入穴位置ずれは 0.5 μm 、 $\sigma=0.4 \mu\text{m}$ としたときの計算結果である。 $\Delta\theta_{\text{error}}$ による位置ずれが発生することで、コアの位置ずれが大きくなり、12 心 SCF コネクタよりも接続損失が増加する結果となった。そこで、回転調心による角度ずれ $\Delta\theta_{\text{error}}$ が付加されても、12 心 SCF コネクタと同等の接続損失となる光ファイバ挿入穴位置ずれを計算により見積もった。回転調心による角度ずれ $\Delta\theta_{\text{error}}$ が 0.25° であるときに、光ファイバ挿入穴位置ずれを 0.4 μm としたときの接続損失計算値のヒストグラムを図 17 に示す。光ファイバ挿入穴位置ずれを 0.4 μm とすることで、平均接続損失 0.24 dB となり、12 心 SCF コネクタと同等の接続損失を実現できる。次に、回転調心による角度ずれ $\Delta\theta_{\text{error}}$ が 0.5° であるときを検討した。光ファイバ挿入穴位置ずれを 0.3 μm としたときの接続損失計算値のヒストグラムを図 18 に示

す。光ファイバ挿入穴位置ずれを $0.3 \mu\text{m}$ とすることで、平均接続損失 0.24 dB となり、12 心 SCF コネクタと同等の接続損失を実現できる。

回転調心による角度ずれがあっても 12 心 SCF コネクタと同等の接続損失を実現する 12 心 MCF コネクタの設計を明らかにした。回転調心による角度ずれがある場合は、光ファイバ挿入穴位置ずれを厳しくすることで 12 心 MCF コネクタの低損失化を実現できることが分かった。

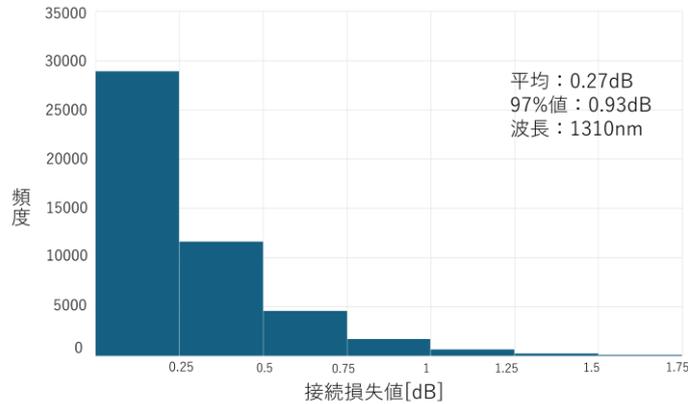


図 15 12 心 SCF コネクタの接続損失計算値 ($|\vec{d}_3|=0.5$ 、 $\sigma=0.4$ 、 $\Delta\theta_{\text{error}}=0.25$)

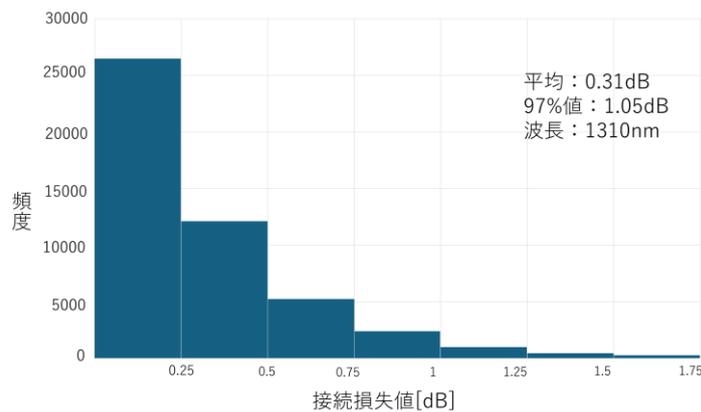


図 16 12 心 SCF コネクタの接続損失計算値 ($|\vec{d}_3|=0.5$ 、 $\sigma=0.4$ 、 $\Delta\theta_{\text{error}}=0.5$)

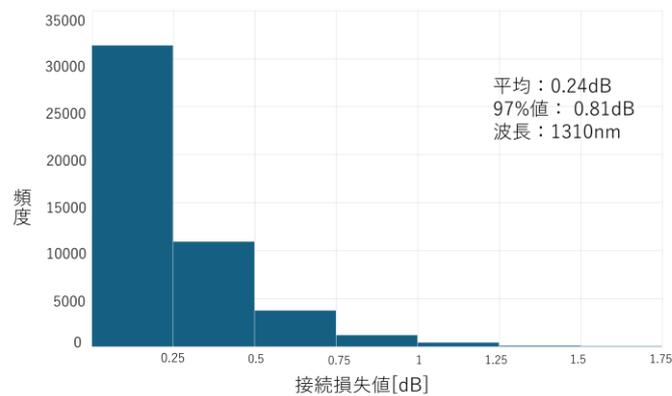


図 17 12 心 SCF コネクタの接続損失計算値 ($|\vec{d}_3|=0.4$ 、 $\sigma=0.4$ 、 $\Delta\theta_{\text{error}}=0.25$)

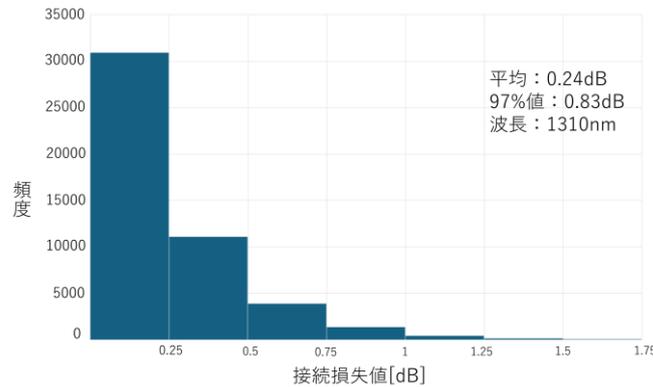


図 18 12 心 SCF コネクタの接続損失計算値 ($\overline{|d_3|}=0.3$ 、 $\sigma=0.4$ 、 $\Delta\theta_{\text{error}}=0.5$)

4 実験による検討

計算した結果を評価するために実験による検証を開始した。単心の 4 コア MCF、12 心の SCF テープファイバと 12 心 MT フェルールを入手して、実験サンプル作製の準備を実施した。多心 MCF コネクタを作製するためには、MCF を回転調心して接着固定する MCF 固定部材が必要であり、その MCF 固定部材を挿入可能な MCF 用 MT フェルール[8-10]も必要となる。調査の結果、これらの MCF 固定部材と MCF 用フェルールを入手することは難しいことが判明したため、まずは、多心 SCF コネクタを作製して検証する方針とした。12 心 MT フェルールに 12 心の SCF テープファイバを接着固定した後、MT フェルール端面を研磨して、12 心 MT コネクタを作製した。作製した MT コネクタの端面形状を評価した。多心 SCF コネクタである MPO 形コネクタに内蔵する MT フェルール端面に関する規格は、IEC 61755-3-31[16]で規定されている。IEC 61755-3-31 では、接続損失と反射減衰量に関する要求性能を満足するための接続部のパラメータとその寸法値を規定している。作製した 10 個の 12 心 MT コネクタの端面は、IEC 61755-3-31 を満足することを確認した。今後は、作製した 12 心 MT コネクタの接続損失を測定し、12 心 MT フェルールの仕様寸法値と比較して、計算値を評価する予定である。また、多心 MCF コネクタを作製するために必要となる部材を入手する方法を調査して、多心 MCF コネクタを作製できるように準備を進める。

5 まとめ

本研究は、多心 MCF を一括で接続する多心 MCF コネクタの低損失化を検討した。従来の多心 SCF コネクタと同等の接続損失となる多心 MCF コネクタの設計を確立することを目的として、計算による検討を実施した。MCF の接続では、クラッド中心以外に配置されたコアを回転調心して接続する必要がある。しかしながら、光コネクタの作製において、回転調心時の回転角度ずれをゼロにすることは困難である。そこで、この回転角度ずれをゼロにできないことを前提として、12 心 MCF コネクタを例として、従来の 12 心 SCF コネクタと同等の接続損失を達成するための MT フェルールの寸法パラメータとその値を検討した。最初に、12 心 SCF コネクタを低損失化するための設計を計算により明らかにして、光ファイバ挿入穴位置ずれを小さくすることが低損失化に効果があることを確認した。次に、12 心 MCF コネクタにおいても光ファイバ挿入穴位置ずれを小さくすることが低損失化に効果があることを確認した。さらに、12 心 MCF コネクタにおいて回転角度ずれがあっても 12 心 SCF コネクタと同等の接続損失を実現するための MT フェルールの寸法パラメータと寸法値を計算により明らかにした。本研究により、多心 MCF コネクタの作製時に回転角度ずれが発生して接続損失が付加されても、多心 SCF コネクタと同等の接続損失となる多心 MCF コネクタの設計を明らかにした。今後、多心 MCF コネクタ作製における MCF の回転角度ずれの値を実験により明らかにすることで、多心 SCF コネクタと同等の接続損失を実現できる多心 MCF コネクタの設計値を確定できる。

【参考文献】

- [1] T. Morioka, Y. Awaji, R. Ryf, P. Winzer, D. Richardson, and F. Poletti, "Enhancing optical communications with brand new fibers," *IEEE Com. Mag.*, vol. 50, issue 2, pp. S31-S42, Feb. (2012).
- [2] D. J. Richardson, J. M. Fini, and L. E. Nelson, "Space-division multiplexing in optical fibres," *Nature Photonics*, vol. 7, no. 5, pp. 354-362 (2013).
- [3] Y. Miyamoto and R. Kawamura, "Space Division Multiplexing Optical Transmission Technology to Support the Evolution of High-capacity Optical Transport Networks," *NTT Technical Review*, vol. 15, no. 6, Jun. (2017).
- [4] R. Nagase, K. Sakaime, K. Watanabe, and T. Saito, "MU-type multicore fiber connector," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E96-C, no. 9, pp.1173-1177 (2013).
- [5] E. Nomoto, K. Hiruma, T. Sugawara, K. Tanaka, and Y. Lee, "SC-type Multi-core Optical-fiber Connectors Using a Pressurization Spring," *Optical Review*, vol. 22, no. 5, pp. 679-685 (2015).
- [6] K. Saito, T. Matsui, K. Nakajima, and T. Kurashima, "Multi-Core Fiber Connector with Precise Rotational Angle Alignment," *Proc. Optoelectronics and Communications Conference, Melbourne, Australia*, paper TH10B-3 (2014).
- [7] K. Shikama, Y. Abe, S. Asakawa, S. Yanagi, and T. Takahashi, "Multicore fiber connector with physical-contact connection," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E99-C, no. 2, pp.242-249, Feb.(2016).
- [8] K. Watanabe, T. Saito, K. Suematsu, R. Nagase, and M. Shiino, "Development of small MT type 2-multicore fiber connector," *Proc. Optical Fiber Communication Conference, San Francisco, CA, USA*, paper W4D.6 (2014).
- [9] K. Watanabe, T. Saito, K. Kawasaki, M. Iwaya, T. Ando, K. Suematsu, and M. Shiino, "Development of MPO type 8-multicore fiber connector," *Proc. Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, CA, USA*, paper W4B.3 (2015).
- [10] T. Morishima et al., "MCF-enabled Ultra-High-Density 256-core MT Connector and 96-core Physical-Contact MPO Connector," *Proc. Optical Fiber Communication Conference, San Francisco, CA, USA*, paper Th5D.4 (2018).
- [11] T. Satake, S. Nagasawa, and R. Arioka, "A new type of demountable plastic-molded single-mode multifiber connector," *IEEE J. Light. Technol.*, vol. 4, no. 8, pp. 1232-1236(1986).
- [12] S. Nagasawa, Y. Yokoyama, F. Ashiya, and T. Satake, "A high-performance single-mode multifiber connector using oblique and direct contact between multiple fibers arranged in plastic ferrule," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 10, pp. 937-939 (1991).
- [13] Masaaki Takaya and Koji Shibata, "Design and Performance of Very-High-Density 60-Fiber Connectors," *J. of Lightwave Technol.*, Vol.21, No.6, pp.1549-1556(2003).
- [14] Toshiaki Satake, Shinji Nagasawa, Mike Hughes and Sharon Lutz, "MPO-type single-mode multi -fiber connector: Low-loss and high-return-loss intermateability of APC-MPO connectors", *Optical Fiber Technol.*, Vol.17, pp.17-30(2011).
- [15] Dietrich Marcuse, "Loss Analysis of Single -Mode Fiber Splices," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 56, No. 5, pp .703-718(1977)
- [16] IEC 61755-3-1, Fibre optic connector optical interfaces - Part 3-1: Optical interface, 2.5 mm and 1.25 mm diameter cylindrical full zirconia PC ferrule, single mode fibre: International Electrotechnical Commission, April (2024).

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
多心マルチコアファイバ接続における低損失化の検討	電子情報通信学会機構デバイス研究会 信学技報 EMD2024-41,	2025年2月

	pp. 54-59	
--	-----------	--
