

千葉工業大学
博士学位論文

マルチコアファイバ用光コネクタの
構造創成と設計に関する研究

平成 30 年 3 月
境目 賢義

目次

第 1 章 序論	1
1.1 目的と研究背景	1
1.2 空間分割多重伝送 (Space Division Multiplexing : SDM) について	3
1.3 SDM で提案されている光ファイバと MCF 伝送路について	4
1.4 通信用光ファイバについて	6
1) シングルモード光ファイバ (Single-Mode Fiber : SMF)	6
2) マルチモード光ファイバ (Multi-Mode Fiber : MMF)	6
1.5 マルチコアファイバ (Multicore Fiber : MCF) について	7
1.6 光コネクタの種類について	11
1.7 提案されている MCF コネクタについて	13
1.8 本論文の経緯, 目的と構成	14
第 1 章の参考文献	18
第 2 章 MCF 光コネクタの開発方針	22
2.1 はじめに	22
2.2 光コネクタの光学特性	22
1) 接続損失	22
2) 反射減衰量	26
2.3 光学特性の測定方法	26
1) 接続損失測定方法	27
2) 反射減衰量測定方法	28
2.4 ファンイン・ファンアウト (Fan-in, Fan-out) について	29
2.5 単心光コネクタに必要な技術要素	31
2.6 MCF コネクタの設計について	32
1) MCF コネクタの設計条件	33
2) MCF コネクタの課題と解決への取り組み	34
3) MCF コネクタに使用する部品について	35
4) MCF コネクタの製造方法	39
5) コネクタ接続時のアダプタについて	42
2.7 まとめ	43
第 2 章の参考文献	45
第 3 章 7-core MCF を用いた光コネクタの開発	47
3.1 はじめに	47
3.2 MCF コネクタの開発に向けて	48
1) 軸ずれと接続損失の関係	48
2) 使用した 7 コア MCF の概要	49

3.3	MCF コネクタの角度ずれ量測定	49
3.4	MCF コネクタの端面測定	51
3.5	光学特性評価	52
1)	接続損失測定	52
2)	反射減衰量測定	54
3)	接続点のクロストーク測定	55
3.6	機械特性評価	57
1)	繰り返し着脱試験	58
2)	振動試験	58
3)	衝撃試験	61
4)	引っ張り試験	62
5)	温度サイクル試験	64
3.7	MCF コネクタの APC 化について	65
3.8	MCF コネクタの設計手法確立	68
3.9	コネクタ型ファイババンドルファンアウトの開発	72
1)	MU コネクタ型 MCF ファンアウトの構造	73
2)	光学特性評価	75
3)	信頼性評価	77
3.10	まとめ	78
第 3 章の参考文献		81
第 3 章に関連する学会発表および論文		81
第 4 章 19-core MCF 用いたファイバ端面の微小変形解析		83
4.1	はじめに	83
4.2	接続損失評価	84
4.3	ファイバ端面の弾性変形メカニズム	86
4.4	フェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の関係	89
1)	反射減衰量測定	91
2)	フェルール押圧試験	92
3)	押圧力とファイバ端面弾性変形の有限要素解析	95
4)	実験, 解析, 計算の結果比較	105
4.5	まとめ	106
第 4 章の参考文献		108
第 4 章に関連する学会発表および論文		109
第 5 章 光コネクタ用割りスリーブの設計手法に関する検討		110
5.1	はじめに	110
5.2	光コネクタ整列技術の変移	111

5.3	割りスリーブの変形解析	112
1)	3Dモデルを用いた有限要素解析	112
2)	曲り梁を用いた計算	114
3)	解析と計算の差について	118
5.4	解析手法確立に関する実験と有限要素解析の比較.....	119
1)	スリーブ割り幅の測定	119
2)	実験と有限要素解析を用いたひずみ測定.....	121
3)	曲り梁を用いた計算 (2)	122
5.5	APC形コネクタを使用した割りスリーブの解析手法確立.....	124
1)	APC形コネクタの接続損失測定.....	126
2)	APC形コネクタと割りスリーブの有限要素解析.....	127
5.6	まとめ	129
	第5章の参考文献.....	131
	第5章に関連する学会発表および論文.....	131
	第6章 結論.....	133
	本論文に関する表彰.....	135
	謝辞.....	136

第1章 序論

1.1 目的と研究背景

本研究の目的は、既存の光コネクタに匹敵する光学特性と機械的特性及び信頼性を有するマルチコアファイバ用光コネクタの開発にある。

光通信用に開発された汎用シングルモードファイバ (Single-mode Fiber: SMF) が完成して以来、現在に至るまで光ファイバを使用した通信技術は世界的に普及した。今後も日本を含む世界各地で FTTH (Fiber To The Home) 回線の加入者が増え、ブロードバンド回線市場は成長する見込みとなっている。またデータセンタでは、米国や欧州、アジアで膨大なトラフィック需要の増大からデータセンタ内の増設やメタル配線から光配線への変更が多くなっている。このため光関連部品の需要も増大していくと考えられる¹⁾。

増え続ける信号トラフィックに対応すべく、これまで TDM (Time Division Multiplexing)²⁾、WDM (Wavelength Division Multiplexing)³⁾、DSP (Digital Signal Processing)⁴⁾などの技術が研究開発され光通信の容量拡大に貢献してきた。しかし 2010 年以降、インターネットによる動画配信やスマートフォンの世界的な普及により光ネットワークを流れる通信容量は年々増大を続けており、さらなる高速大容量化が求められている。

光ファイバの材料である石英は温度が 1000°C を超えると光を吸収する作用が非常に強くなる特性を持つことから、高強度の光をファイバのコアに入射すると温度が上昇しファイバヒューズ現象⁵⁾(高強度の光を入射するとファイバのコアが熱的破壊を起こす現象)が発生する。よって SMF に高強度の光を入射しても伝送容量を増やすことはできない。SMF の最大伝送容量はこれまでの研究から 100 Tbit/s (テラビット毎秒) 程度であることが明らかになっており、今後数年で理論限界に到達すると考えられる。よって今後の通信トラフィック需要に対応できる光通信技術創出が喫緊の課題となっている⁶⁻⁸⁾。これらのことから、現在の SMF を超える伝送容量の実現を目指して活発な研究開発や議論が行われている⁹⁾。

SMF の伝送限界である 100 Tbit/s 以上の伝送を実現する方法としては、ファイバを複数本束ねて使用する方法が考えられる。しかし、その方法ではファイバの本数に比例して光増幅器などのシステム機器が増加してしまう。その結果、消費電力の増加、周辺のシステム機器を置くスペースの問題が発生してしまい、空間利用効率(占有面積や体積や面積)の向上ができない¹⁰⁾。また日本から太平洋などを横断している海底ケーブルは、内部に光ファイバが実装されており、光増幅器などの周辺機器も海底に存在する。しかし地上から海底のシステム機器に送ることのできる電力は限界がある。よってファイバの本数に応じて海底に光

増幅器などが増えても、システム全体の電力が制限されているため、それらすべてに必要な電力を与えることは困難であると考えられる。

SMF は時間領域を利用した TDM, 波長領域を利用した WDM により伝送容量を増やしてきた。残された領域は空間のみであり, 空間領域を有効利用できる新しい光ファイバが必要になっている。その中で通信容量の飛躍的高度化を達成する 1 つの候補として空間分割多重伝送技術 (Space Division Multiplexing : SDM) が提案されており, 1 本の光ファイバにシングルモード条件を満たすコアを複数個有するマルチコアファイバ (Multicore Fiber : MCF) が注目されている¹¹⁾。

MCF は 1979 年には既に考案されていた光ファイバであるが¹²⁾, 当時は SMF を用いた光通信技術は発展途上であり, TDM 技術なども黎明期であったことから, 新しい光ファイバへの注目度は薄かった。しかし SDM 技術が提案されて以降, MCF は一気に注目されることになる。現在は新しい光通信の担い手として最有力候補の光ファイバとされており, 既に MCF に関連した様々な入出力デバイスが研究開発され紹介されている。また MCF を使用した 2017 年の伝送実験では 118.5 Tbit/s の容量で 316 km の長距離伝送に成功したことが報告され注目を集めた¹³⁾。

光ファイバを用いて光ネットワークを構築するためには, ケーブル間やモジュール間などを接続することが必要不可欠であり, MCF を使用した場合にもそれは例外ではない。光ファイバを接続する方法としては融着接続¹⁴⁾, メカニカルスプライス¹⁵⁾, コネクタ接続¹⁶⁾の 3 つが技術的に確立しており, 光ネットワークの構築には光コネクタによる接続が用いられる。しかしこれらの接続技術は単一コアのファイバ (SMF など) を前提としているため, MCF に適用できるかはまだ明らかになっていない。

増え続ける光ネットワーク需要に対応するため, 今後は MCF を使用した光通信へとシフトしていくことが考えられる。そのためには MCF の接続技術を確立させることが必要不可欠であり, それらを高信頼性かつ安価に供給することは重要な課題である。よって本論文では, 様々な環境下での高い信頼性, 安定した接続特性, 繰り返し再現性, これらを満たすことのできる接続技術として光コネクタをベースとし, MCF にも使用することのできる MCF 光コネクタについて述べる。

はじめに, 1.2 項で空間分割多重伝送技術 (SDM) について述べる。1.3 項では SDM で提案されている光ファイバについて説明する。1.4 項は既存の通信用光ファイバについて簡単に紹介する。1.5 項は MCF について述べるとともに, MCF の問題点について説明する。1.6 項では現在使用されている代表的な光コネクタの種類と使用個所について述べる。1.7 項では提案されている MCF コネクタについて紹介する。1.8 項最後に本論文の目的と構成について述べる。

1.2 空間分割多重伝送 (Space Division Multiplexing : SDM) について

ファイバの伝送容量拡大領域イメージを図 1.2.1 に示す。光ファイバはそれぞれの領域を多重化させることで伝送容量の拡大を達成してきた。これまでは時間領域 (TDM) と波長領域 (WDM) に多重化技術を用いることで伝送容量の拡大を行っており、空間領域の利用は行っていなかった。しかし TDM は電子回路の動作速度上限, WDM はシステム機器や使用するファイバの波長領域に制限があり、これらは限界に到達しつつある。そこで使用できる最後の領域である空間に注目が集まった。空間多重技術は、1 本の光ファイバ内に複数の信号伝送路を持たせ、空間をより有効に活用する新しい技術として提案された。

空間を利用するためには新しい構造のファイバが求められる。空間を有効利用することができる新しい光ファイバとしてシングルモード条件を満たすコアを複数個有する MCF やマルチモードのコアを有する数モード光ファイバ (Few-mode Fiber : FMF) ¹⁷⁾などが提案されている。また 2 つのファイバを合わせた数モード・マルチコアファイバ (FM-MCF) も検討されている。MCF はコア数を増やし、それぞれに信号を伝搬させることでファイバ 1 本あたりの通信容量拡大を、FMF はコア径を拡大し 1 つのコアに複数のモードを伝搬させることで通信容量拡大を狙っている。つまり、MCF はコア数を、FMF はモード数を増やすことで信号の空間多重を行う。

SDM はこれまで利用されてこなかったファイバ内の空間を有効利用し、通信容量の拡大を目的とし提案されたものである。また最終的には TDM, WDM, SDM の全領域 (3M) を併用して通信容量の拡大を目的としている。

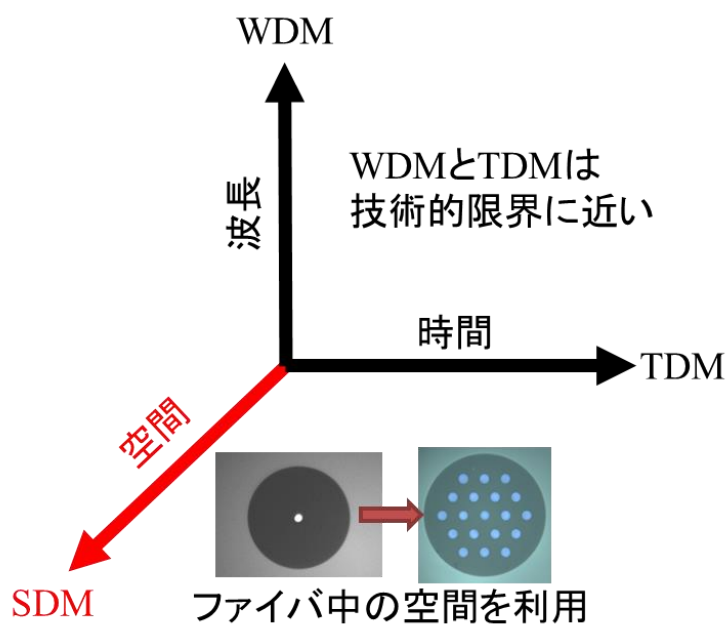


図 1.2.1 ファイバの伝送容量拡大領域イメージ

1.3 SDM で提案されている光ファイバと MCF 伝送路について

空間分割多重伝送 (SDM) にて、提案されている代表的な光ファイバの模式図を図 1.3.1 に示す。SDM で提案されている光ファイバはマルチコアファイバ (MCF) と数モードファイバ (FMF) の 2 つに大きく分けられる。

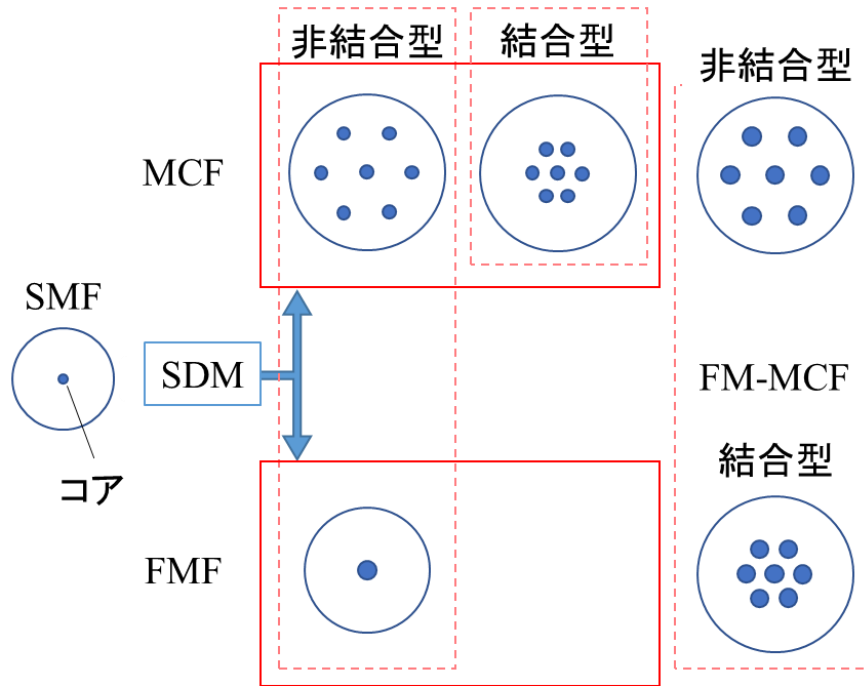


図 1.3.1 SDM で提案されている代表的な光ファイバ一覧

MCF の各コアはシングルモード条件を満たすコアであるため、光信号を個々に取り出すファンアウトを使用すれば従来の SMF 伝送システムと同じような光ネットワークが構築可能であると考えられる。

FMF はモード間クロストーク (光信号同士の干渉) の抑制は困難であるため、受信側で光 MIMO 信号処理 (MIMO : Multiple-Input Multiple-Output) にてクロストーク補償を行うことが必須となる。しかしモード間群遅延差 (DMD : Differential mode delay) が大きい場合、MIMO 信号処理の負荷が大きくなってしまうため、DMD を低減させる FMF が必要である。

また MCF と FMF は非結合型と結合型にそれぞれ分けることができる。非結合型とはクロストークの影響を可能な限り排除するよう設計されるファイバであり、コア間でのクロストークを防ぐためそれぞれのコアが一定の間隔で配置される。結合型は非結合型と異なり、それぞれのコアを近づけクロストークを積極的に利用する方法である。非結合型に比べてコア間隔を小さく設定できるため、ファイバ内の面積を有効に活用できると考えられている。

現在，SDM の実現に向けて，様々な形状やコア配置の光ファイバが検討されている．SDM で提案されている光ファイバでは，MIMO 信号処理を使用しない，DMD の影響を受けない，SMF の伝送システムが利用可能などの観点から，非結合型 MCF が最も実用化に近いと考えられる．非結合型 MCF を用いた伝送路の一例を図 1.3.2 に示す．

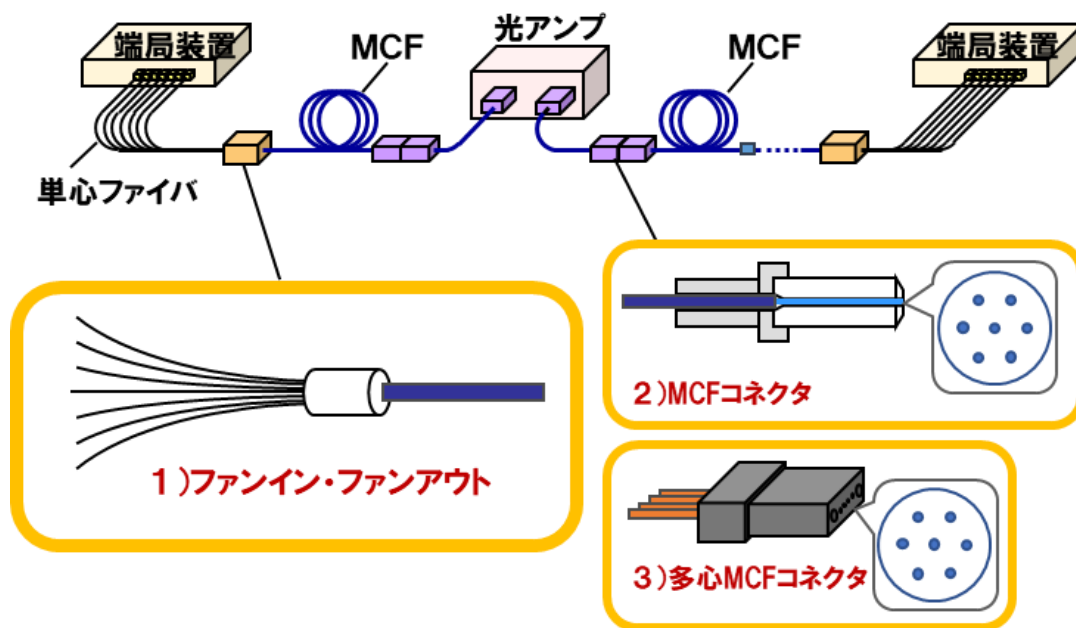


図 1.3.2 MCF を用いた伝送路の一例

MCF を使用した伝送路を構築するには，MCF に使用可能な光増幅器（光アンプ）の開発，実用化可能な接続技術の確立が必要不可欠となる．光増幅器は信号光と励起光をそれぞれのコアに結合，入射するコア励起方式と，一次クラッドを伝搬する励起光で全コアの信号光を励起するクラッド励起方式が存在する．代表的な利点として，コア励起方式は既存の EDFA（Erbium-Doped-Fiber-Amplifier）で用いられる方法であり高い励起効率，クラッド励起方式は高パワーの励起光が要求されるファイバレーザに用いられる方法であり消費電力が少ないことが挙げられる．

実用化可能な接続技術については SMF と MCF を繋ぐファンイン・ファンアウト，MCF 全コアを安定して接続させることのできる MCF 光コネクタ（単心や多心）を用意する必要がある．接続に用いられるデバイスには優れた光学特性，低いクロストーク，小型で低コスト，量産可能などが要求される．また様々な接続対象との互換性を確保する必要があるため，接続に用いられるデバイスは既存の接続対象と互換性を有することが望ましい．

1.4 通信用光ファイバについて

光ファイバは石英ガラスやプラスチックで繊維状に形成される細いケーブルを示し、光が伝搬するコアとその周囲を覆うクラッドから構成される。この2つはガラスやプラスチックのような導電性の無い物質を使用している。クラッドはコアと比較し屈折率が低く設計（0.2~3.0%）されており、光を全反射によりコア内に閉じこめ、長距離を伝搬するものである。現在使用されている通信用光ファイバの種類は単一モード（Single-Mode : SM）構造と多モード（Multi-Mode : MM）構造の2つに分類される。

1) シングルモード光ファイバ（Single-mode Fiber : SMF）

汎用光ファイバとも呼ばれる SMF はコア径を小さくすることで単一モードのみを伝搬するファイバであり、コア径が 9~10 μm 、クラッド径が 125 μm で構成され、1310 nm 帯に零分散波長がある。そのため光の浸み出しの程度が大きく、実際のコア直径との差が大きいため、浸み出しの分布から求めた実効的な直径であるモードフィールド径（mode field diameter : MFD）で示すことが多い。SMF はモード分散がないので伝送特性が優れており、高品質で安定した通信が求められる一般的な長距離伝送に広く用いられている。

2) マルチモード光ファイバ（Multimode Fiber : MMF）

MMF は複数のモードを伝搬するファイバであり、コア径が 50 μm （欧米では 62.5 μm ）、クラッド径が 125 μm で構成される。また屈折率が一樣であるステップ・インデックス（SI）型と、屈折率を緩やかに変化させたグレーデッド・インデックス（GI）型に大別される。

SI 型 MMF は屈折率が一樣であるため伝送帯域が狭く、伝搬損失が大きいため長距離伝送には向かない。しかしコア径が大きく接続が容易であるため、主に短距離伝送で使用されている。

GI 型 MMF はコア内部の屈折率がコアの中心から外へ行くに従って連続的に低くなるような構造である。よって相対的にどのモードの光も同じ速度で伝搬することが可能である。伝送損失は SMF より大きいが SI 型と同じく光ファイバ同士の接続が容易であること、また対応するネットワーク機器が安価であることから、LAN などの短距離伝送用として使用されている。

SDM で提案されている FMF は、一般的にこの MMF であり、1 個のコアに複数のモードそれぞれに信号を乗せ伝搬し、その信号を個別に取り出すことを目的としている。

1.5 マルチコアファイバ (Multicore Fiber : MCF) について

光通信用の光ファイバとして最も有名で普及している SMF は伝搬するモードが 1 つであり、またファイバ内のコア数も 1 つである。SMF のクラッド径は一般的に $125\ \mu\text{m}$ であることから信号伝搬に使用している割合は、断面積比で 0.5 % 程度である。

MCF は 1 本の光ファイバにシングルモード条件を満たすコアを複数有しており、それぞれに光を入射することができる。現在、多数のファイバメーカーから多種多様な MCF が提案、検討されておりクラッドが六角形¹⁸⁾の特殊なものや、コア配列が円環配列¹⁹⁻²⁰⁾、正方格子配列²¹⁻²³⁾や特殊なコア配置のもの²⁴⁻²⁵⁾などが存在する。また MCF は回転対称であることが多いため、コアを識別することができる識別マーカ―を有している。マーカ―は主に屈折率の異なる材料 (低屈折のガラス) を使用することが一般的である。また識別マーカ―を配置する個数や位置についての明確な規定は存在しない。

コア配列について、ファイバ内の面積を最も有効に活用できるのは六方最密配置である。結晶格子配列の六方最密充填と同じく、円径のコアを密に並べることのできる配置であるため、提案されている MCF にはこのコア配置が多い。一般的な六方最密配置の MCF 端面を図 1.5.1 に示す。六方最密配置は図 1.5.1 のようなファイバの中心に 1 つのコアとそれを取り囲むように 6 個のコアが配置されている。また 6 個のコアのさらに外周に 12 個のコアが配置された 19 コア MCF も実現可能でありすでに提案されている²⁶⁾。中心のコアをセンターコア、センターコアの周りの存在するコアを外周コアと呼ばれることが多い。(19 コア MCF などの場合、センターコア、内周コア、外周コアと呼ばれる。)

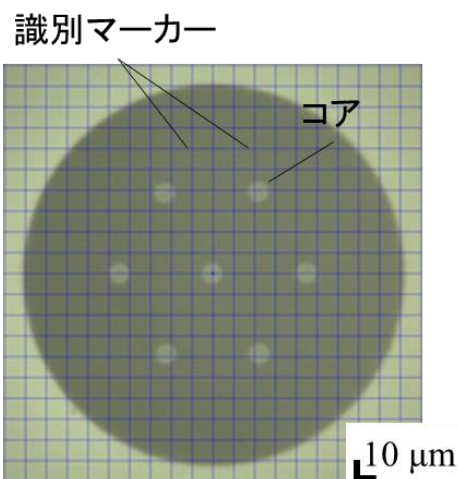


図 1.5.1 一般的な六方最密配置の MCF 端面

MCF は従来の通信用光ファイバと構造が異なるため様々な問題点が存在する。以下に MCF をネットワークに使用する際の問題点や、MCF 自体の問題点を示す。

(1) クロストーク (Crosstalk : XT) の低減, 排除

MCF は複数のコアを有する特性上、クロストーク (Crosstalk : XT) の低減・排除が課題となる。MCF におけるクロストークは、ファイバ曲げなどが原因で 1 個のコアから漏洩した光が他コアに干渉することを示す。光に情報を乗せて伝送する際に、クロストークは信号へのノイズ増大による伝送品質劣化の要因となることが考えられる。従ってクロストークは可能な限り小さくすることが望ましい。一方、MCF の伝送容量を高めるには、1 本のファイバクラッド内のコア密度 (コア数) を高める必要がある。コア密度を高めるということはコアとコアの間隔が狭まるということであり、これはクロストークの影響が大きくなる要因である。MCF には高密度コア配置と低クロストーク特性の両方が要求されており、これらはお互いに相反する要求特性である。MCF の低クロストークを実現するにはコア間隔をある程度確保し電界分布の重なりを抑制するとともに、MCF の各モードの伝搬定数に違いを持たせることが重要であると報告されている²⁷⁾。また MCF に要求される 2 つの相反する特性をお互い満たすために、MCF にはトレンチ構造が採用されていることが多い。単峰型およびトレンチ型の屈折率分布を図 1.5.2 に示す。

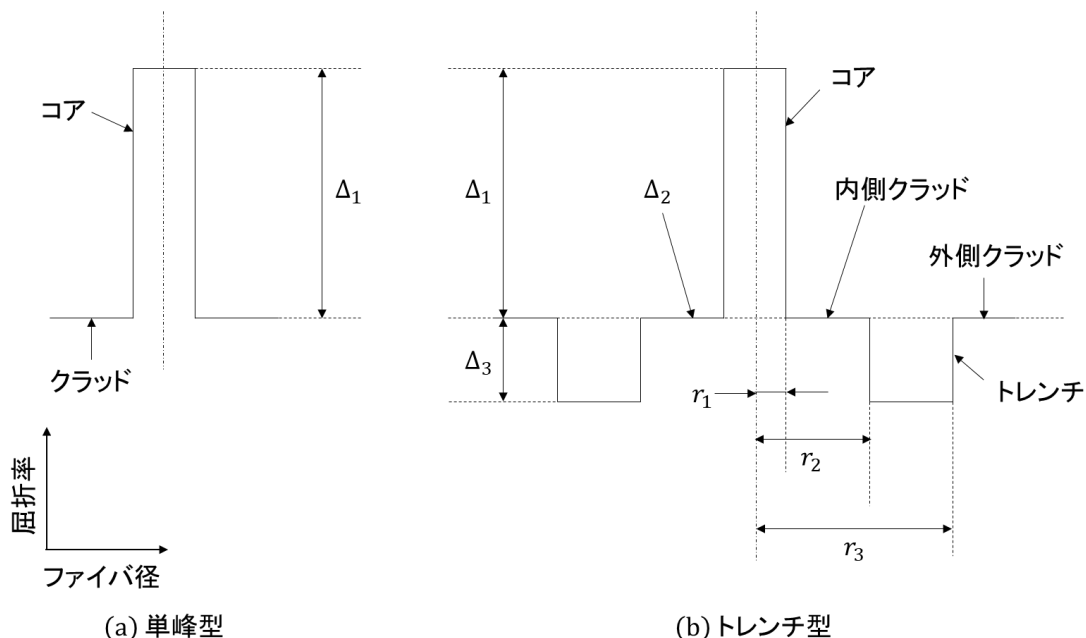


図 1.5.2 トレンチ構造の仕組み概略図

図中(a)の単峰型で光ファイバの曲げによる光学特性劣化を低減させるにはコアとクラッドの比率屈折率差 Δ を高くすることが有効である。しかし Δ の上昇は MFD の縮小を招き、ファイバ接続時の軸ずれ耐性低下は避けられない。そこで MCF の各コア周辺に屈折率の低下した溝を有する図中(b)のトレンチ型を用いると実効屈折率とクラッドの屈折率との差を大きくすることが可能となる。トレンチ部分は低屈折率なので光が伝搬しづらく、コア間隔を適切に配置することで電界分布の端部分をトレンチ内側に閉じ込めることができる。よって通常の単峰型に比べてファイバの曲げによる光学特性劣化の低減が期待される²⁸⁾。

クロストーク以外には、相互接続などの観点からコアの MFD や波長分散等の光学特性が均質であること、非線形効果による影響の観点からコアの実効断面積 (A_{eff}) が大きいことなどが MCF に要求される基本特性である。

(2) 外径増大による曲げに対する弱さ

光ファイバは石英で構成されているため、引張り方向の力には強いが曲げ方向の力に弱い特性を持つ。引っ張り方向に対して強度を持たせるにはファイバ外径を大きくする、また曲げ方向に対して強度を持たせるには、曲げた際の内径と外径の差を小さくするためにファイバ外径を小さくする必要がある。この2つの条件を考慮した結果、125 μm のクラッド径、すなわち SMF のクラッド径が理想的な外径となる。

ファイバ内面積を最も有効に活用できると考えられる六方最密配置の MCF は中心コアの外周にコアが存在し、クロストークの影響から各コアに間隔を持たせなければならない。トレンチ構造を採用した MCF の場合でも各コアの間隔は一定以上に設定する必要があるため、コア密度 (コア数) を増やそうとすると、それに伴いクラッド径も 125 μm 以上に増大する結果となる。ファイバの機械的強度を考慮した場合、クラッド径は最大でも 240 μm 程度に抑えられなければならない。これを考慮した場合、コア数は六方最密配置で 32 コア程度が限界であると考えられる²⁹⁾。また実用化を考えた場合、余長処理半径などの問題から、クラッド径は 200 μm 以下のファイバが望ましい。

(3) コア配置に関する問題

(1)でも説明したように、MCF のコア数増加とクロストークの低減はお互いに相反する要求特性であり、トレードオフの関係にある。トレンチ構造を採用した場合であっても過小なコア間隔はクロストーク増大を起こす。またクラッドに一番近いコア (外周コアの一部) から被覆までの距離 (Outer Cladding Thickness : T_c) が小さいと、そのコアの伝搬損失が大きくなる現象が発生す

る。これは外周コアの光の一部が高屈折率の保護被覆層に染み出すようになるために起こる現象である。よってクラッドと被覆の近くにコアを配置することはできない。ファイバ内の面積を最も有効に活用できると考えられる六方最密配置でコア間距離と T_c の大きさを保った設計を行った場合、MCF のファイバ直径は $125\ \mu\text{m}$ より太くなる場合が多い。図 1.5.3 に六方最密配置におけるファイバ直径と収容最大コア数の関係を示す³⁰⁾。六方最密配置、ファイバ直径をクロストークや T_c の影響を含めて考えた場合、ファイバ直径は $210\ \mu\text{m}$ であっても 7 個のコアしか配置できない。これはファイバ直径が $140\ \mu\text{m}$ の場合と同じコア数である。コアの六方最密配置はファイバ内の面積を最も有効に活用できるが、ファイバ直径の変化に応じた柔軟なコア数の選択という点で問題であることがわかる³⁰⁾。

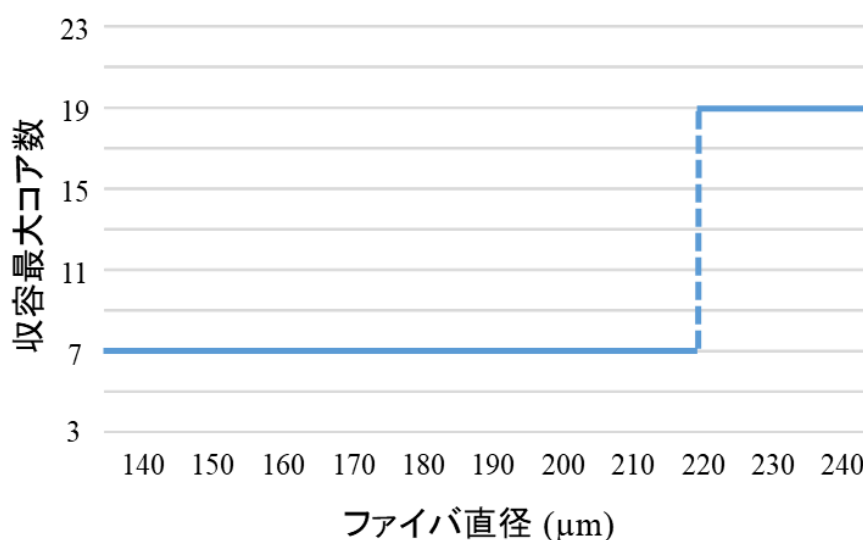


図 1.5.3 六方最密配置におけるファイバ直径と収容最大コアの関係³⁰⁾

(4) MCF の接続に関する問題

光ファイバを用いてネットワークを構築する場合、ケーブル間やモジュール間、ファイバ双方を接続する技術は必要不可欠である。光ファイバを接続する方法としては融着接続、メカニカルスプライス、コネクタ接続の 3 つが代表的な接続技術である。

融着接続技術としては、MCF 双方の自動調心および低損失融着接続技術について検討が行われている。また六方最密配置 7 コア MCF において、平均 $0.10\ \text{dB}$ 以下の融着損失、2 重円環 12 コア MCF を用いて、端面観察機構による調心角度ずれ量が平均 0.6° 以下であることがすでに報告されており³¹⁾、技術として確立しつつある。

メカニカルスプライスは各コアの回転調心や信頼性の観点から、MCF での運

用は難しいと考えられる。光コネクタの接続技術と MCF のコネクタ接続については本論文の第 2 章内にて詳しく説明する。

(5) MCF の製造コストに関する問題

コア数増加に伴うクラッド径の拡大，またクロストーク低減のためトレンチ構造については MCF の問題解決策として非常に有効であるといえる。しかしクラッド径を大きくすると母材 1 本あたりから製造されるファイバの長さが短くなってしまい，またトレンチ構造の採用もファイバの製造コストを上げてしまう。よって MCF の製造コストを考えた場合，トレンチ構造を使用せず，クラッド径は可能な限り小さい方が望ましい。

以上が MCF を実用化するうえでの代表的な問題点であり，問題点のそれぞれがトレードオフの関係にある。よってこれらの問題を解決するために活発な研究開発や議論が行われている。

1.6 光コネクタの種類について

光ファイバを接続する方法としては融着接続，メカニカルスプライス，コネクタ接続の 3 つが技術的に確立している。融着接続は非常に優れた光学特性を有しており，メカニカルスプライスは安価に提供することを目的とした技術である。しかしどちらの接続技術も再接続することができない。接続技術で唯一，再接続可能なものは光コネクタのみであり，また光学特性に関しても優れている。光コネクタはその特性を生かし，これまで使用環境や用途に応じた様々な種類のものが研究開発されてきた。光コネクタは接続対象がどのようなものでも一定の特性を要求されるため互換性を有することが重要である。光コネクタの互換性に関しては国際電気標準会議（International Electrotechnical Commission : IEC）と日本工業規格（Japan Industrial Standards : JIS）にて規格化され記載されている。光コネクタは一般的に単心（コネクタ内に 1 本のファイバが存在）と多心（コネクタ内に多数のファイバが存在）の 2 種類に大別できる。

局内や構内の装置間接続，公衆通信回線，伝送システム内などには単心光コネクタが用いられる。代表的な単心光コネクタを表 1.6.1 に，SC 形コネクタを例に単芯系光コネクタの概略図を図 1.6.1 に示す。一般的な単心コネクタはフェルール，プラグハウジング，ブーツなどのパーツで構成される。フェルールはジルコニア製が主流であり，ファイバの高精度な位置決めに貢献している。またコネクタの接続には，双方のフェルール位置決めに必要な割りスリーブが内蔵されたアダプタが一般的に使用される。

コネクタ普及当初は、ねじ締めによる接続形式を採用したコネクタが一般的であった³²⁻³³⁾。しかしコネクタ高密度実装を考えた場合、ねじなどの回転操作を伴う接続方式よりも、軸方向のみの操作で着脱可能なプッシュプル方式の方が望ましかった。そのため現在は、普及している単心コネクタのほとんどがプッシュプル接続方式によるものである³⁴⁻³⁶⁾。一方で計測器などの強固な接続が要求されるような箇所はねじ締め接続方式である FC 形や ST 形などが使用される。

表 1.6.1 代表的な単心光コネクタ

光コネクタ 名称	特徴	用途	接続方式
FC 形	最初に実用化	計測器	ねじ締め
SC 形	FC 形と比較して低コスト で高性能を実現 最も一般的 LAN の世界標準	LAN CATV 公衆通信回線 伝送システム内	プッシュプル
ST 形	FC 形の亜種	計測器 伝送システム内	バヨネット締結
MU 形	SC 形と同様の信頼性かつ 小型で高密度実装が可能 Mini SC と呼ばれる	局内装置 光中継器内	プッシュプル
LC 形	低コスト小型コネクタ 光トランシーバで一般的	構内配線 交換機	プッシュプル

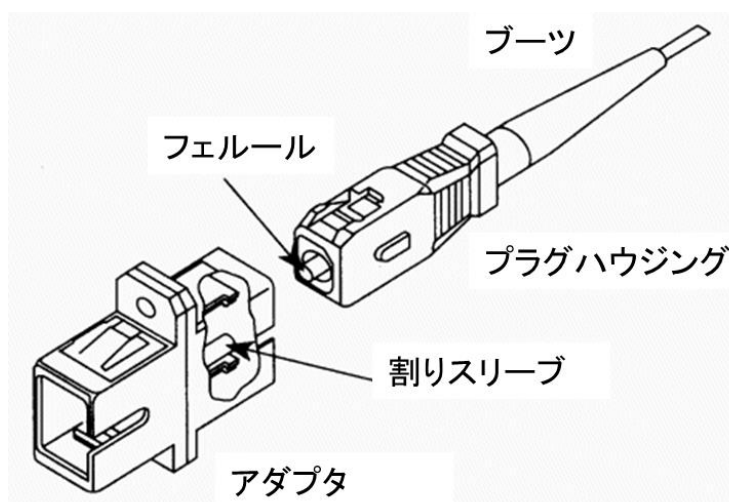


図 1.6.1 単心コネクタの概略図 (SC 形)

アクセス系，データセンタ内や伝送システム装置などにおいては高速大容量通信が必要とされるため主に多心光コネクタが使用される．多心光コネクタはファイバを並列に多数並べたような構造もつテープ心線を接続できるようにするコネクタなどがあり，MTコネクタ（Mechanically Transferable）やMPOコネクタ（Multifiber Push-on）などが代表的である³⁷⁻⁴⁰．

1.7 提案されている MCF コネクタについて

MCF を実用化に供するには，それらを接続することができる光コネクタが必要不可欠であるため，様々な MCF コネクタが提案され研究開発が進められている．単心コネクタを例に，提案されている MCF コネクタの一例を表 1.7.1 に示す．

表 1.7.1 提案されている単心 MCF コネクタの一例

構造	互換	利点，特徴	欠点
弾性保持方式	SC 形	板ばねでフェルールを保持し回転を抑制	外力が作用し続けると特性の維持が困難
空間結合方式 (光学結合)	FC 形	ダストの影響が小さい コア数が増えても安定した光学特性が得られる	コア配列に制限がある コネクタが大きい
V 溝とピンの 組み合わせ	SC 形	接続時に V 溝とピンが嵌合 コア間隔の大きい MCF であっても低損失	V 溝とピンに高い寸法精度が要求 量産が難しい

MCF を接続するコネクタとして，板ばねでフェルールを保持することで回転を抑制し，外力による光学特性への影響を排除した弾性保持方式 MCF 用光コネクタ⁴¹⁻⁴²，アダプタ内部にレンズを介し空間結合（光学結合）により接続するレンズ結合方式 MCF コネクタ⁴³，フェルールに V 溝を設け割りスリーブ内部にピンを配置しそれらを組み合わせることで，フェルール回転を抑制する構造⁴⁴などが報告されている．いずれのコネクタ構造も既存の光コネクタをベースにして互換性を保ちつつ開発されており，優れた光学特性を有している．しかし表 1.7.1 内に示した欠点から，これらの MCF コネクタを実際の伝送路で使用することは難しいと考えられる．またこれらの構造を採用した MCF コネクタで，SMF コネクタに要求される機械特性を満たした報告はされていない．実際の伝送路で使用できる MCF コネクタには，既存の光コネクタと互換性を有しつつ，SMF コネクタに要求される光学特性と機械特性を満たす必要があるといえる．

1.8 本論文の経緯，目的と構成

世界的に普及している SMF は実用化から既に 30 年以上が経過し，その信頼性と優れた光学特性からこれまで不動の地位を築いてきた．しかし年々増大する通信容量の問題，また SMF の伝送容量に物理的限界が存在することが明らかになり，光ファイバそのものを変更することが考えられるようになった．伝送容量増大に対する問題については 2008 年頃に本格的な議論が始まり，2011 年には MCF による伝送実験で SMF の伝送限界である 100 Tbit/s を超えることに成功している⁴⁵⁾．この伝送実験より，MCF は SMF に代わり使用することができる可能性を持つ光ファイバであることが証明された．

MCF の実用化には再接続可能な光コネクタ接続技術が必要不可欠であるが，MCF 双方を実用可能な精度で接続しつつ，SMF コネクタと変わらぬ信頼性を有するコネクタ技術はこれまで実現されていなかった．本研究の目的は，現在普及している光コネクタと互換性を保ちつつ，SMF コネクタと変わらぬ優れた光学特性と機械特性を有する MCF 用光コネクタの実現にある．そのため MCF コネクタは汎用性が高く，広く普及している既存の単心光コネクタをベースとして設計を進める．また MCF コネクタは，コネクタ内部のフェルール軸回りの自由度が接続損失発生要因となってしまう．詳細は第 2 章で述べるが，コネクタ端面における回転方向の位置決めと，その位置保証構造が重要となるため，偏波保持ファイバコネクタで使用されたオルダム・カップリング構造をベースとして更なる高精度化を狙い，従来の SMF コネクタに匹敵する光学特性の実現を目指す．本研究で提案する MCF コネクタは実用化を前提とし，既存の光コネクタと同等の作業性，信頼性を有することを目標として設計，検討を行う．

本研究は独立行政法人情報通信研究機構（National Institute of Information and Communications Technology : NICT）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，また空間多重フォトニックノード基盤技術の研究開発の一環としてなされたものである．単心 MCF コネクタの開発は 2011 年に研究課題名「革新的光通信インフラの研究開発」が開始され，その内容の一部を個別課題名「課題イ：MCF 接続技術」として古河電気工業株式会社を通じて千葉工業大学が受託研究として行った．「課題イ：MCF 接続技術」研究開発の課題全体目標を以下に示す．

1. 実践路での使用に耐える機能と特性を有する単心 MCF コネクタの開発を行う（接続損失 0.5 dB 以下）．
2. IEC 61753-1 において定義される Category C（Controlled environment）において，同種の光接続デバイスの性能基準に準拠すること．

3. IEC 61753-021-6（光学特性，機械特性，耐環境特性等について規定）に準拠すること。
4. 新しく開発する光接続デバイスについては，IEC へ新規の性能標準および光学互換標準として提案することを視野に入れる。

以上が「課題イ：MCF 接続技術」研究開発の課題全体目標である。よって本研究では単心 MCF コネクタにおいて，「課題イ：MCF 接続技術」課題全体目標をすべて満たし実用化に供するため，コネクタの設計手法確立について論ずる。

MCF は次世代の光通信用ファイバとして注目されているが，実線路に使用される MCF は未だ標準化されていない。今後，標準化された MCF の構造や各種寸法が既存の SMF と大きく異なってしまった場合，それらの MCF を接続する光コネクタには以下のような問題点が考えられる。

1. 既存の光コネクタ構造で標準化されている接続技術を，MCF の全コアに対して安定して実現させることが可能であるか。
2. フェルール端面を研磨する際，SMF の研磨条件を MCF にそのまま流用することは可能であるか。
3. 光コネクタ内部のフェルール押圧ばねのばね圧は SMF 基準で設計されているが，それらを MCF に使用することは可能であるか。
4. 光コネクタ内部のフェルール押圧ばねのばね圧が MCF に応じて変更された際，アダプタ内部の割りスリーブのフェルール保持力は適切であるか。

これらはいずれも SMF を基準として設計されているために発生する問題である。本研究で検討する MCF コネクタを実用化させるためには，これらの問題を全て解決し，信頼性を確保する必要がある。よって単心コネクタに関して，これまで明らかになっていなかったコネクタ接続時のフェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の関係及び，割りスリーブの設計手法について明らかにする必要がある。本研究では実験と有限要素解析（Finite Element Method : FEM）を用いて検討を行い，今後，標準化された MCF が接続可能かを検証できるよう，有限要素解析手法の確立を目的とした。

本論文の構成を図 1.8.1 に示す。本論文は 6 章から構成される。

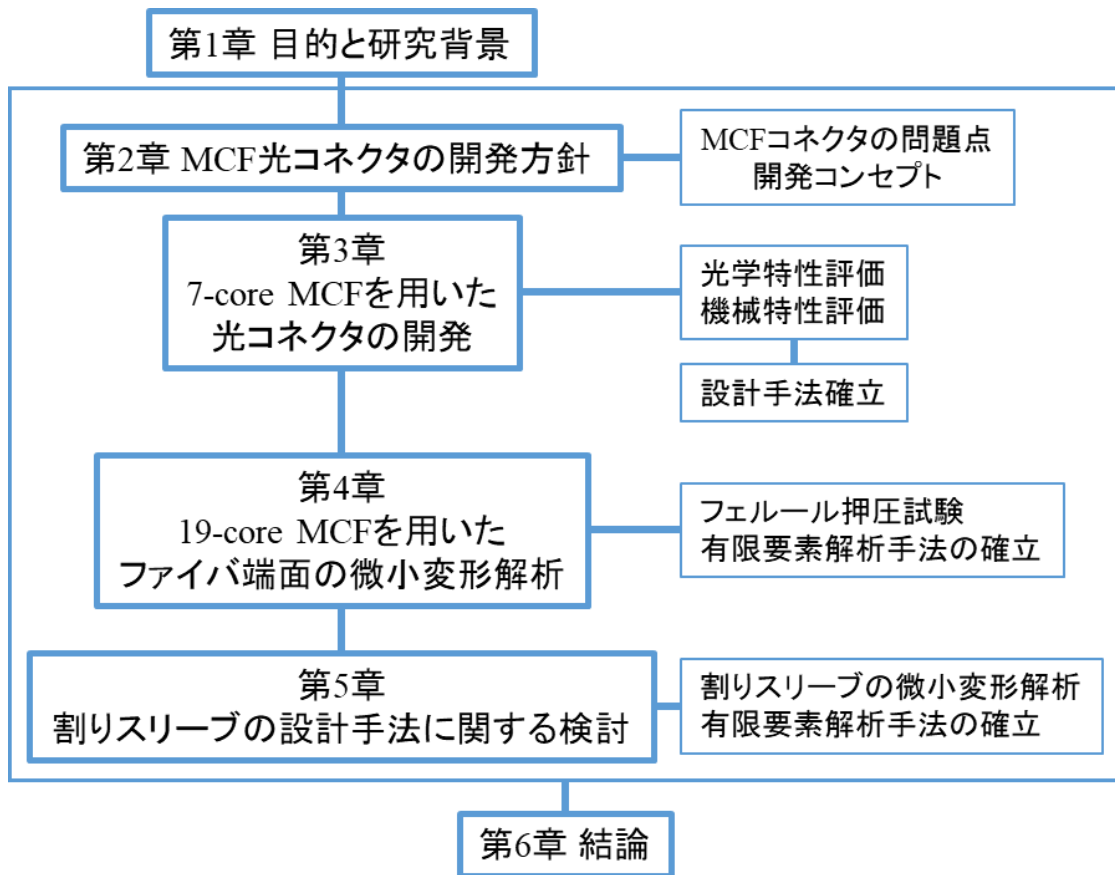


図 1.8.1 本論文の構成

本章（第1章）に続き，第2章では，コネクタを使用した光ファイバ接続時の基本特性である接続損失と反射減衰量について述べるとともに，その発生原因と測定方法について概説する．単心 MCF コネクタを設計するうえで，その設計コンセプトを述べるとともに，MCF 接続に要求される条件を満たすために必要な技術を解説する．また MCF コネクタの設計や接続に必要とされる部品やデバイスについて紹介する．

第3章では従来の SMF コネクタに匹敵する光学特性を有する MCF コネクタの実現を目指す．本研究で検討する MCF コネクタは実用化を前提とし，既存の光コネクタと同等の作業性，信頼性を有するとともに複数ベンダ間の互換性を確保できることを条件として設計を行う．そのため IEC 61753-1 において定義される Category C (Controlled environment) において，同種の光接続デバイスの性能基準に準拠すること目標とする．また MCF は複数の光ファイバ製造メーカーで作られている 7 コア MCF を対象とする．MCF コネクタの光学特性を評価し，MCF コネクタの接続損失データから軸ずれ量，角度ずれ量を算出し，接続損失発生要因を明らかにするとともに，MCF コネクタの設計手法確立までを

示す。また検討する MCF コネクタについて、IEC や JIS で定義されている様々な機械的特性評価を行い、光通信ネットワークを構築するための実使用に耐える MCF コネクタであるかを確認する。

第 4 章と第 5 章では MCF コネクタの信頼性を確保するため、未だ明らかになっていない既存の光コネクタ接続技術について検討を行う。

第 4 章では 2 章で提案する MCF コネクタを 19-core MCF に適用した内容について述べる。またこれまで明らかにならなかったコネクタ接続時のフェルール押圧力とファイバ端面微小変形との関係を明らかにする。19-core MCF の構造を用いた実験、実験と同じ端面形状の 3D モデルを使用した有限要素解析、ヘルツの接触理論式による予測を行い、それぞれの結果を比較する。MCF 各コアの PC 接続時の押圧力とファイバ中心以外の端面弾性変形の詳細を明らかにし、MCF コネクタ端面形状の許容範囲について検討するとともに、フェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の有限要素解析手法確立までを示す。

第 5 章ではコネクタ接続に使用されている割りスリーブの設計手法について検討を行う。フェルール挿入時の割りスリーブ微小変形に関して、実験面ならびに有限要素解析による理論面から比較検討する。また割りスリーブの有限要素解析手法の妥当性を確認するために、フェルール先端を斜め 8 度に凸球面状に研磨する APC コネクタにおいて、接続時に観測される接続損失の割りスリーブ方向依存性に着目し、フェルール挿入時の割りスリーブの変形に関する有限要素解析結果と接続損失変動の実測値を比較する。割りスリーブ微小変形の詳細を実験と有限要素解析より明らかにするとともに、割りスリーブの有限要素解析手法の確立について述べる。

第 6 章では本研究で検討した内容の結論について述べる。

第1章の参考文献

- (1) 竹崎元人, “多心光コネクタの設計と高機能化に関する研究”, 千葉工業大学博士学位論文, pp. 1, (2015).
- (2) Ming Zhu, Shu-Hao Fan, Liang Zhang, Cheng Liu, Ting Wang and Gee-Kung Chang: “High speed MIMO-OFDM wireless data transport in 60-GHz radio-over-fiber system multiplexed by optical TDM,” in *Proc. OFC/NFOEC 2013*, pp.1-3, 17-21, (2013).
- (3) K. Hagimoto: “Optical Core Network,” *NTT Technical Review 2005*, vol.3, no.6 pp.20-26, (2005).
- (4) K. kikuch: “Phase-Diversity Homodyne Detection of Multilevel Optical Modulation with Digital Carrier Phase Estimation,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 2006*, vol.12, no.4 pp.563-570, (2006).
- (5) K. Kurokawa and N. Hanzawa: “Fiber Fuse Propagation and Its Suppression in Hole-Assisted Fibers,” in *Proc. IEICE TRANS. COMMUN*, vol.E94-B, no.2 pp.384-391, (2011).
- (6) 盛岡敏夫, “光通信技術—極限への挑戦—”, 電子情報通信学会誌, vol.94, no.5 pp.412-416, (2011).
- (7) アドコム・メディア株式会社, “エクサへの挑戦: 超大容量光ファイバ通信技術の最新動向”, O plus E, 2011年9月号, (2011).
- (8) 中沢正隆, 鈴木正敏, 盛岡敏夫, “光通信技術の飛躍的高度化”, オプトロニクス社, (2011).
- (9) 盛岡敏夫, 淡路祥成, “光通信インフラの飛躍的な高度化に向けた取組み—概要—”, 電子情報通信学会誌, vol.97, no.2 pp.98-101, (2014).
- (10) 盛岡敏夫, “空間分割多重を用いた光通信技術の動向”, O plus E, 2014年7月号 pp.761-767, (2014).
- (11) K. Imamura, K. Mukasa and R. Sugizaki: “Trench assisted multi-core fiber with large Aeff over 100 μm^2 and low attenuation loss,” in *Proc. ECOC2011*, no.1, LeCervin. 1 (2011).
- (12) S. Inao, T. Sato, S. Setsui, T. Kuroha and Y. Nishimura: “Multicore optical fiber,” in *Proc. OFC1979*, WB1, (1979).
- (13) T. Matsui, T. Kobayashi, H. Kawahara, E. de Gabory, T. Nagashima, T. Nakanishi, S. Saito, Y. Amma, K. Maeda, S. Arai, R. Nagase, Y. Abe, S. Aozasa, Y. Wakayama, H. Takeshita, T. Tsuritani, H. Ono, T. Sakamoto, I. Morita, Y. Miyamoto and K. Nakajima: “118.5 Tbit/s Transmission over 316 km-Long Multi-Core Fiber with Standard Cladding Diameter,” in *Proc. CLEO-PR/OECC/PGC 2017*, (2017).

- (14) 佐藤武司, “光ファイバ融着接続機”, フジクラ技報 2012, vol.2, 第 123 号, pp.28-32, (2012).
- (15) 竹内宏和, 瀬戸直, 山口義正, 中嶋長晴, “メカニカルスプライスの信頼性”, 信学技報, EMD, 機構デバイス, pp.99 (77), 13-18 (1999).
- (16) N. Suzuki: “Design and Fabrication of High Performance Optical Connectors,” Globecom '83 Conference Record, 34, 8, (1983).
- (17) 山本貴司, “空間モード多重伝送技術の動向”, ITU ジャーナル, vol.46, no.1 pp.33-37 (2016).
- (18) 田中正俊, 八若正義, 谷口浩一, “次世代光通信を担うマルチコアファイバおよびファンアウト機能部品の開発”, 三菱電線工業時報 2012 年 9 月, 第 109 号, pp.1-5 (2012).
- (19) S. Matsuo, K. Takenaga, Y. Arakawa, Y. Sasaki, S. Tanigawa, K. Saitoh and M. Koshiba: “Large-effective-area ten-core fiber with cladding diameter of about 200 μm ,” *Opt. Lett.*, Vol.36, No.23, pp.4626-4628, (2011).
- (20) S. Matsuo, Y. Sasaki, T. Akamatsu, I. Ishida, K. Takenaga, K. Okuyama, K. Saitoh and M. Koshiba: “12-core fiber with one ring structure for extremely large capacity transmission,” *Opt. Express*, vol.20, no.27, pp. 28398-28408, (2012).
- (21) T. Hayashi, T. Taru, O. Shimakawa, T. Sasaki and E. Sasaoka: “Uncoupled multicore fiber enhancing signal-to-noise ratio,” *Opt. Express*, vol.20, no.26, pp. B94-B103, (2012).
- (22) J. Sakaguchi, B. J. Puttnam, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa, R. Sugisaki, T. Kobayashi and M. Watanabe: “305 Tb/s space division multiplexed transmission using homogeneous 19-core fiber,” *J. Lightwave Technol.*, vol.31, no.4, pp. 554-562, (2013).
- (23) K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa and R. Sugizaki: “Multi core fiber with large A_{eff} of 140 μm^2 and low crosstalk,” in *Proc. ECOC2012*, Mo.1.F.2 (2012).
- (24) B. J. Puttnam, R. S. Luis, W. Klaus, J. Sakaguchi, J. M. Delgado Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tamura, T. Hayashi, M. Hirano and J. Marcianite: “2.15 Pb/s Transmission Using a 22 Core Homogeneous Single Mode Multi-Core Fiber and Wideband Optical Comb,” in *Proc. ECOC2015*, PDP.3.1, (2015).
- (25) T. Kobayashi, H. Takara, A. Sano, T. Mizuno, H. Kawakami, Y. Miyamoto, K. Hiraga, Y. Abe, H. Ono, M. Wada, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Yamada, H. Masuda and T. Morioka: “2 x 344 Tb/s propagation direction interleaved transmission over 1500-km MCF enhanced by multicarrier full electric-field digital back-propagation,” in *Proc. ECOC2013*, PD3-e-4, (2013).
- (26) J. Sakaguchi, B. J. Puttnam, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi,

- K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa, R. Sugizaki, T. Kobayashi and M. Watanabe: "19-core fiber transmission of 19×100×172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305Tb/s," in *Proc. OFC2012*, PDP5C.1, (2012).
- (27) 小柴正則, 齋藤普聖, 竹永勝宏, 佐々木雄佑, 荒川葉子, 谷川庄二, 菅寧, 松尾昌一郎, "空間多重伝送用マルチコアファイバ", *フジクラ技報* 2011, vol.2, 第 121 号, pp.1-7, (2011).
- (28) 池田真拳, 松尾昌一郎, 姫野邦治, 原田光一, "接続損失を低減した低曲げ損失光ファイバ", *フジクラ技報* 2003, 第 105 号, pp.6-10, (2003).
- (29) 水野隆之, 芝原光樹, 小野浩孝, 阿部宜輝, 宮本裕, フェイフォン イエ, 盛岡敏夫, 佐々木雄佑, 安間淑通, 竹永勝宏, 松尾昌一郎, 愛川和彦, 齋藤普聖, ヨンミン ジュン, デイビッド リチャードソン, "32 コアファイバによる高密度空間分割多重 (DSDM) 光伝送技術 ~ OFC2016 ポストデッドライン報告 ~", *信学技報*, vol.116, no.27, OCS2016-8, pp.27-28, (2016).
- (30) 小柴正則, 齋藤普聖, 佐々木雄佑, 安間淑通, 竹永勝宏, 松尾昌一郎, "大容量伝送用マルチコアファイバ", *フジクラ技報* 2013, vol.2, 第 125 号, pp.5-11, (2013).
- (31) 安間淑通, 高橋中, 竹永勝宏, 松尾昌一郎, "太径マルチコアファイバの低損失融着技術", *信学技報*, vol.113, no.182, OCS2013-41, pp.27-32, (2013).
- (32) N. Suzuki, Y. Iwahara, M. Saruwatari and K. Nawata: "Ceramic capillary connector for 1.3 mm single-mode fibers," *Electron Lett*, vol.15, no.25, pp.809-811, (1979).
- (33) A. W. Carlisle: "Small size high performance lightguide connector for LANs," in *Proc. OFC1985*, TUQ18, (1985).
- (34) S. Nagasawa, T. Satake, I. Sankawa and R. Arioka: "Optical-fiber fanout connector for 10 fiber ribbon cable termination," *IEEE J. Lightwave Technol*, vol.LT-4, no.8 pp.1243-1247, (1986).
- (35) E. Sugita, R. Nagase, K. Kanayama and T. Shintaku: "SC-type Single-mode optical fiber connectors," *IEEE J. Lightwave Technol*, vol.7, no.11 pp.1689-1696, (1989).
- (36) R. Nagase, E. Sugita, S. Iwano, K. Kanayama and Y. Ando: "Miniature Optical Connector with Small Zirconia Ferrule," *IEEE Photonics. Technol. Lett*, vol.3, no.11 pp.1045-1047, (1991).
- (37) S. Nagasawa, T. Tanifuji, M. Matsumoto and M. Kawase: "Single-mode multifiber connectors for future large scale subscriber networks," in *Proc. ECOC1993*, MoP1.5, (1993).
- (38) 加島宜雄, 佐武俊明, "多心一括光コネクタ技術", *信学技報*, EMC87-43, pp.9-16 (1987).
- (39) 佐武俊明, 長沢真二, 加島宜雄, 平井正孝, "光ファイバ多心コネクタの設

計と試作”, 信学技報, CS83-165, pp.47-54 (1984).

- (40) M. Takaya, M. Kihara and S. Nagasawa: “Design and performance of multifiber backpanel type connector,” *IEEE Photonics Tehnol. Lett*, vol.8, no.5, pp.655-657, (1996).
- (41) 小林哲也, 遠藤浩幸, シンジャーユ シェーク, “軸回転防止機構付マルチコアファイバ用光コネクタ”, 電子情報通信学会, 総合大会 2014, B-10-1, (2014).
- (42) 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).
- (43) 小林哲也, 渡辺正行, 皆川洋介, “マルチコアファイバ空間結合型コネクタ”, 電子情報通信学会, 総合大会 2013, C-3-34, (2013).
- (44) K. Saito, T. Matsui, K. Nakajima and T. Kurashima: “Multi-Core Fiber Connector with Precise Rotational Angle Alignment,” in *Proc. OECC/ACOFT 2014*, TH10B-3, (2014).
- (45) T. Morioka: “New generation optical infrastructure technologies: EXAT initiative towards 2020 and beyond,” in *Proc. 14th OECC2009*, pp.13-17, (2009).

第2章 MCF 光コネクタの開発方針

2.1 はじめに

単心光コネクタで最も重要な特性は接続損失と反射減衰量であり，MCF を用いた場合でもそれは例外ではない．また光コネクタ双方を接続した場合，これらの光学特性に加えて，接続点に作用する振動や衝撃，光ケーブルに作用する外力，温度や湿度に対する耐性などが実用化，長期的使用を考慮するうえで重要となってくる．

本章ではまず，接続損失と反射減衰量の発生要因を述べた後，それらの測定方法について説明する．その後，既存の単心コネクタに採用されている要素技術について説明する．またそれらのコネクタ技術を MCF に適用した場合の課題や問題点について述べた後，問題解決への取り組みについて説明する．

2.2 光コネクタの光学特性

2つの光ファイバを接続した場合の代表的な光学特性は接続損失と反射減衰量である．この両特性は光ファイバ双方の接続状態によって決まる．

1) 接続損失

光ファイバ双方を突き合わせて接続する場合，直径 $10\ \mu\text{m}$ 程度のコアをサブミクロンオーダーで正確に整列させなければならない．コア双方のずれが大きいと一方のコアから光パワーの一部が放射モードとなってコアの外に漏れてしまい，それが接続損失の原因となる．単一モード光ファイバの接続損失発生要因は内的要因と外的要因に大別することができる．

接続損失の内的要因の概略図を図 2.2.1 に示す．内的要因としては，スポットサイズ（光パワーが最大値の $1/e^2$ になる半径）の不整合，ファイバ外径のばらつきやコアの偏心，非円率などが考えられる．これらの要因はすべてファイバの製造方法や工程に依存する．現在では高精度なファイバ製造方法¹⁻²⁾が確立しているため，同一規格の光ファイバを使用してそれらを接続すれば，内的要因はすべて無視できるほどの小さい損失となる．

MCF の製造方法や工程などはまだ確立されていないが，実験などで使用されている MCF は SMF と同じ高精度な製造方法で製造されているため，同じ母材から線引きされた MCF を使用すれば同じく内的要因は無視できると考えられる．

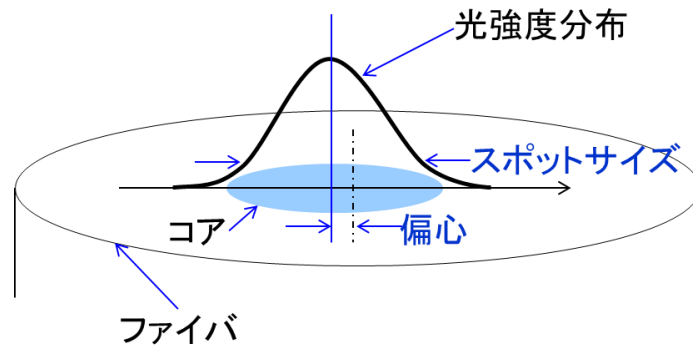
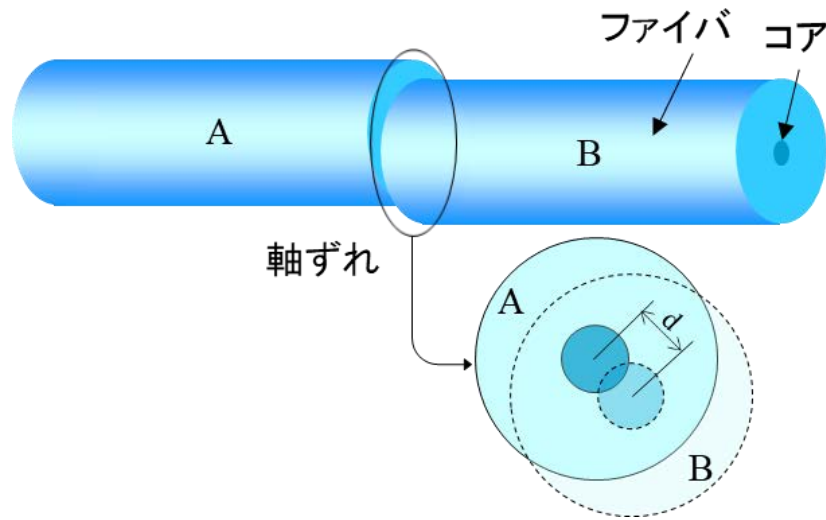


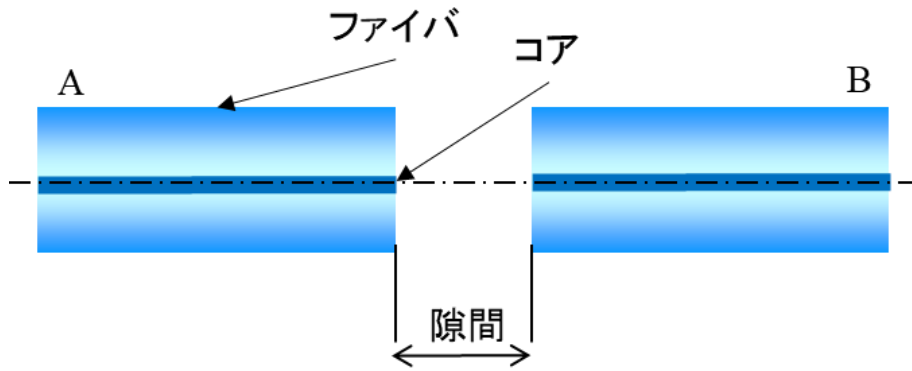
図 2.2.1 内的要因の概略図

外的要因としては、(a)軸ずれ、(b)角度ずれ、(c)端面間の隙間、(d)接続端面の汚れなどが考えられる。(d)は接続する前に、端面を適切に清掃すれば汚れを除去することができる。端面の清掃ツールは既にファイバクリーナーが製品化され普及しており、また 2016 年頃には粘着テープを用いたファイバクリーナーも提案されている³⁾。接続損失の外的要因はそれぞれを式⁴⁻⁵⁾で表すことができる。接続損失発生要因の(a)、(b)、(c)について、損失発生要因の概略図を式とともに図 2.2.2～図 2.2.4 に、それぞれの要因における接続損失値を比較したものを図 2.2.5 に示す。(MFD/2：モードフィールド半径)



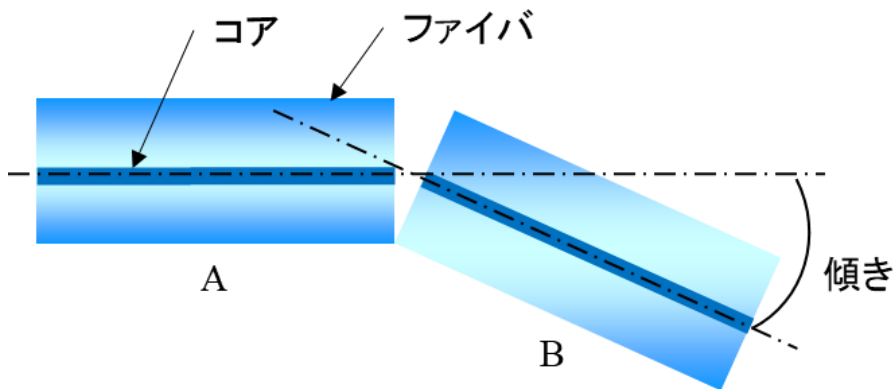
$$L_d = 4.34 \left(\frac{d}{w} \right)^2 \quad (\text{dB}) \dots (2.2.1)$$

図 2.2.2 L_d ：軸ずれによる接続損失 (d ：軸ずれ量, w ：MFD/2)
軸ずれの概略図



$$L_g = -10 \log \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_g}{2\pi n w^2} \right)^2} \right] \text{ (dB)} \dots (2.2.2)$$

図 2.2.3 L_g : 隙間による接続損失 (g : 端面間の隙間, λ : 波長, n : 端面間の屈折率, w : MFD/2)
ファイバ端面の隙間の概略図



$$L_\theta = -10 \log \left\{ \exp \left[- \left(\frac{\pi n w \theta}{\lambda} \right)^2 \right] \right\} \text{ (dB)} \dots (2.2.3)$$

図 2.2.4 L_θ : 傾きによる接続損失 (θ : 傾き角度, λ : 波長, n : 端面間の屈折率, w : MFD/2)
ファイバの傾きの概略図

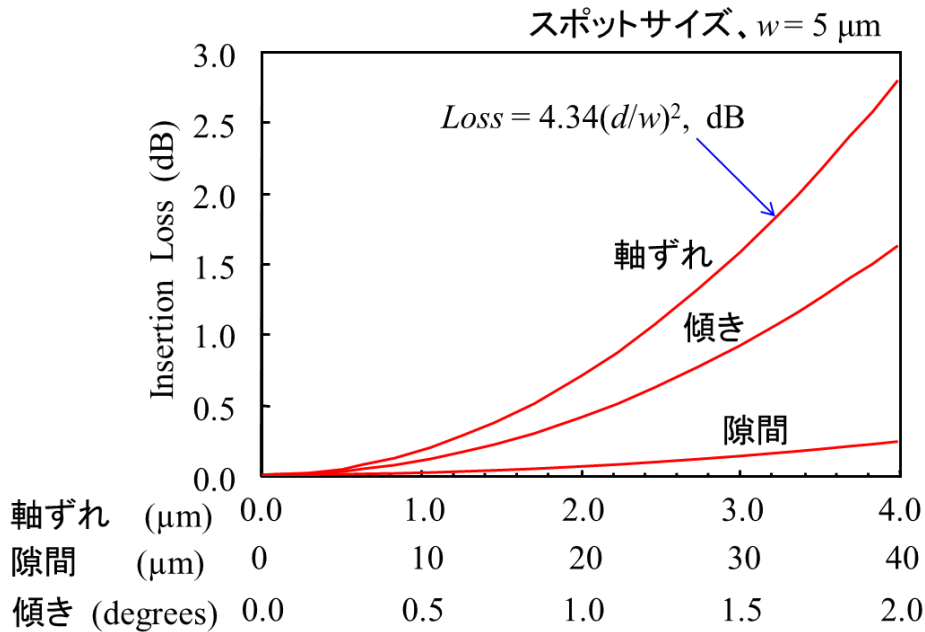


図 2.2.5 外的要因における接続損失値の比較 (各式を用いた値の比較)

接続する際に使用されるジルコニアフェルールは非常に高精度の部品である，また割りスリーブによって整列固定されるため角度ずれによる損失は無視できると考えてよい．またコネクタは PC 接続によって隙間なく接続される．詳細は第 4 章で述べるが，PC 接続はファイバ端面の弾性変形を利用して隙間なく接続されるため，端面間の隙間による影響も無視できる．よって外的要因では(a)軸ずれが接続損失の支配的要因であるといえる．

軸ずれを小さくし，可能な限り接続損失を低減させるには，コアをフェルール穴の中心に位置させることが重要である．しかしながらフェルール穴中心に対するコア偏心量は，フェルール穴やファイバの寸法公差や接着層の偏りなどにより，制御するには限界が存在する．そこで，コアが偏心しているフェルール双方をお互いに回転させてコア位置を合わせ，接続損失低減を狙った調心と呼ばれる方法が過去に報告されている⁶⁾．また使用される接着剤においても熱膨張や熱収縮によるコア偏心を考慮したものが普及している⁷⁻⁹⁾．現在ではフェルールやファイバがより高精度で製造されていることもあり，調心を行わずそのまま使用するケースが増えており，また IEC (国際電気標準会議) において無調心で接続できるコネクタの規格検討が進んでいる．

MCF コネクタは同じコア双方を接続しなければならないため調心作業による低損失化を狙うことはできない．よって本研究では MCF コネクタの軸ずれを可能な限り抑えるため，同じ母材から線引きされた MCF を使用し，またピンゲージによるフェルール穴径の選別を行い，MCF クラッド径とフェルール穴径

のクリアランスを可能な限り詰めることで、MCF コネクタの低損失化を狙っている。

2) 反射減衰量

接続点において端面間の隙間や加工変質層があると、屈折率の不整合となり、伝搬する光の一部が反射してしまう。このとき、入射光パワー (P_1) に対する反射光パワー (P_2) の比は反射減衰量と定義される。反射減衰量の概略図を図 2.2.6 に示す。

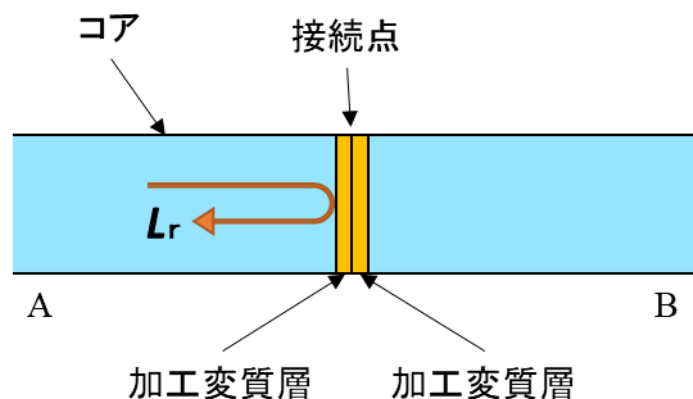


図 2.2.6 加工変質層による反射減衰量の概略図

接続されたファイバ双方の端面間には、フェルルール端面研磨の際に加工変質層が形成される。ファイバ端面の加工変質層は通常よりも屈折率が高くなるため、伝搬中の光に対して屈折率不整合が生じる。加工変質層を有するファイバ双方を接続した場合、加工変質層が密着して接続されるため、反射戻り光が発生すると考えられる。加工変質層の厚みなどを実際に測定することは困難であるが、それを均一な薄膜と仮定すれば、実験と計算で推定することができる。加工変質層に起因する反射減衰量については過去に報告がされており¹⁰⁾、また加工変質層を可能な限り排除する研磨方法についても複数の報告がなされている¹¹⁻¹³⁾。

2.3 光学特性の測定方法

光コネクタの特性を示す 2 つの光学特性については IEC や JIS において様々な標準的測定方法が規定されている。MCF を用いた光コネクタの特性を評価する場合、コア毎の信号を取り出すためのデバイス (ファンアウト) が必要である。よってそれらのデバイスが測定系内に存在しても、測定したい特性に影響を与えない方法をとる必要がある。規定されている様々な測定方法の中から、本研究で用いた測定方法について以下に説明する。

1) 接続損失測定方法

接続損失の測定系の概略図を図 2.3.1 に示す。

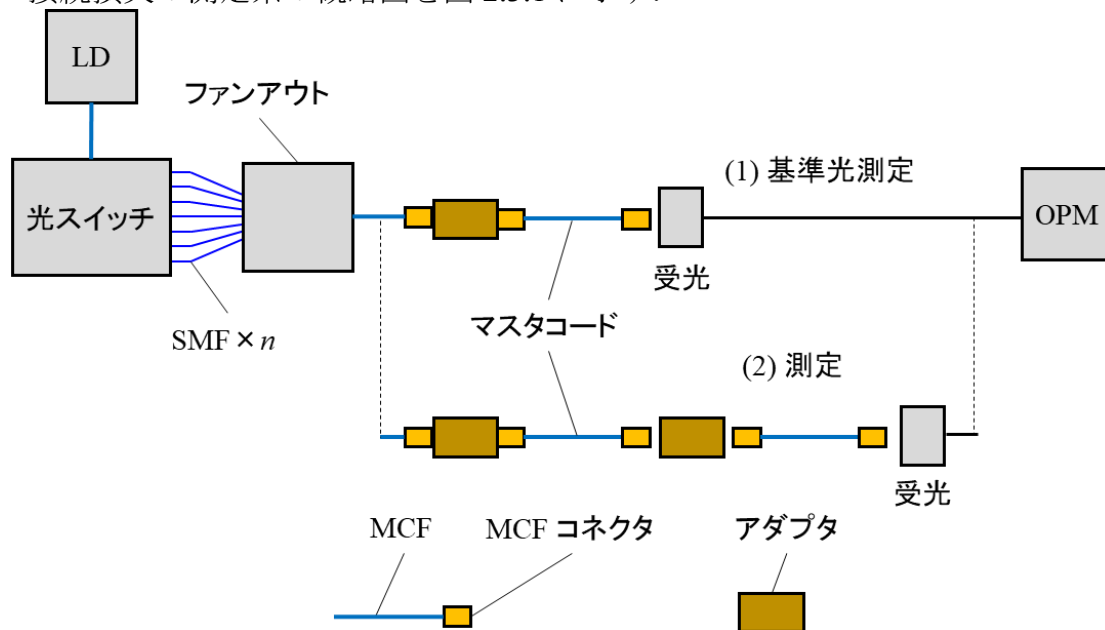


図 2.3.1 接続損失の測定系 (対マスタ法)

測定手順は以下の通りである。

(1) マスタコードからの出射光パワーを測定 (P_{ref})

両端 MCF コネクタ付のコードを複数作製し、その中の 1 本をマスタコードとする。光源は LD 光源 (1550 nm) を使用し、光スイッチとファンアウト (次の項にて説明) を用いて MCF それぞれのコアを選択して光信号を入射し、マスタコードを介した出射光パワーを OPM (Optical power meter) にて測定する。光スイッチの切り替えに伴う損失変動は 0.05 dB 以下である。

(2) 他端からの出射光パワーを測定 (P_m)

次に MCF 双方を光コネクタで接続し、同じく光スイッチを切り替えて各コアの出射光パワーを測定し、ファンアウト出力との差を取って接続損失とする。

この測定方法は対マスタ法と呼ばれ IEC 61300-3-34 に記載されている。対マスタ法の接続損失 (L) は次式 (3.2.1) で定義される。 (P_{ref} : マスタコードからの出射光パワー, P_m : 他端からの出射光パワー)

$$L = -10 \log \left(\frac{P_m}{P_{\text{ref}}} \right) \quad (\text{dB}) \dots (2.3.1)$$

2) 反射減衰量測定方法

反射減衰量の測定系の概略図を図 2.3.2 に示す。

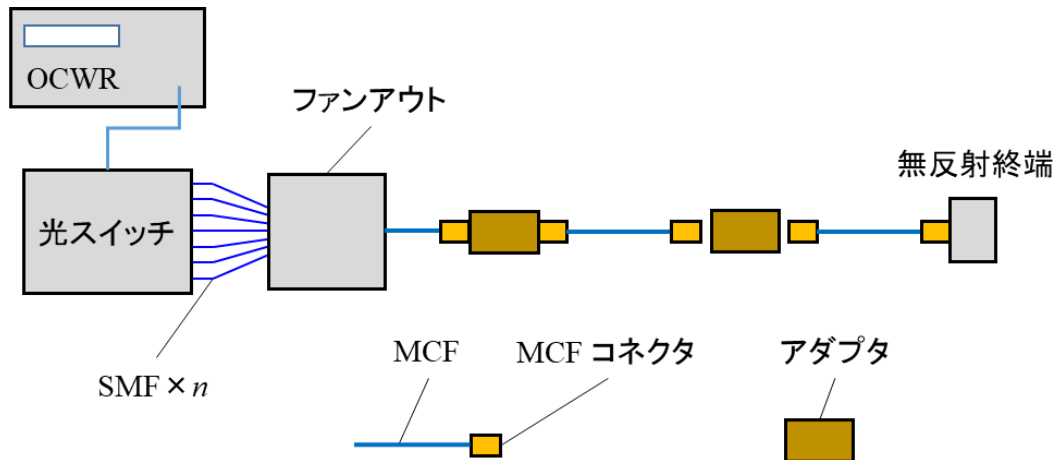


図 2.3.2 反射減衰量の測定系 (OCWR 法)

光スイッチとファンアウトを用いて MCF それぞれのコアを選択して光信号を入射し、反射戻り光パワーを OCWR にて測定する。この測定方法は OCWR 法 (Optical Continuous Wave Reflectometry) と呼ばれ、JIS C 61300-3-6 で定義されている。フェルール端面は一般的に凸球面状であるが、球面頂点の軸と中心軸の偏心量は $50 \mu\text{m}$ 以下になるよう設計されており、また曲率半径も $10\sim 35 \text{ mm}$ 程度となるため、ファイバ端面は直角平面とみなすことができる。このとき、直角なフェルール端面の場合に空気に対する反射減衰量はフレネルの式 (2.3.2) から表すことができる。 (n_0 : ファイバの屈折率, n_1 : 空気の屈折率)

$$14.7 = -10 \log \left| \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right|^2 \quad (\text{dB}) \cdots (2.3.2)$$

このフレネルの式から求められる値を基準とすると、反射減衰量 (RL) は次式 (2.3.3) で定義される。 (P_0 : 装置内のマスタコード解放端からの反射戻り光, P_1 : 測定点の戻り光)

$$RL = -10 \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right) + 14.7 \quad (\text{dB}) \cdots (2.3.3)$$

OCWR 法は測定対象までの接続点すべてを含んだ反射減衰量の測定を行う。MCF コネクタの反射減衰量を OCWR 法で測定する場合、測定系内に光スイッチやファンアウトが増えてしまうため、それらに存在する接続点も含んで測定

してしまう。図 2.3.2 の反射減衰量測定系では被測定対象の接続点まで、合計 5 カ所（OCWR から光スイッチ、光スイッチ 2 カ所、ファンアウト 2 カ所の合計 5 カ所）の接続点が存在する。これら 5 カ所の接続点すべてが等しい反射減衰量であると仮定した場合、被測定対象に至るまで 7 dB 程度の反射が発生していると考えられる。一般的な単心コネクタでは反射減衰量が 40~50 dB 程度要求されることを考え、本研究では OCWR 法による測定の場合、MCF コネクタ接続点における反射減衰量は 40 dB 以上で要求特性を満たしたと判断する。

複数の接続点の中で 1 カ所のみでの反射減衰量を測定するには OLCR（Optical Low Coherence Reflectometry）を用いる。OLCR 法の測定系を図 2.3.3 に示す。OLCR 法も OCWR 法と同じく JIS に定義されている。

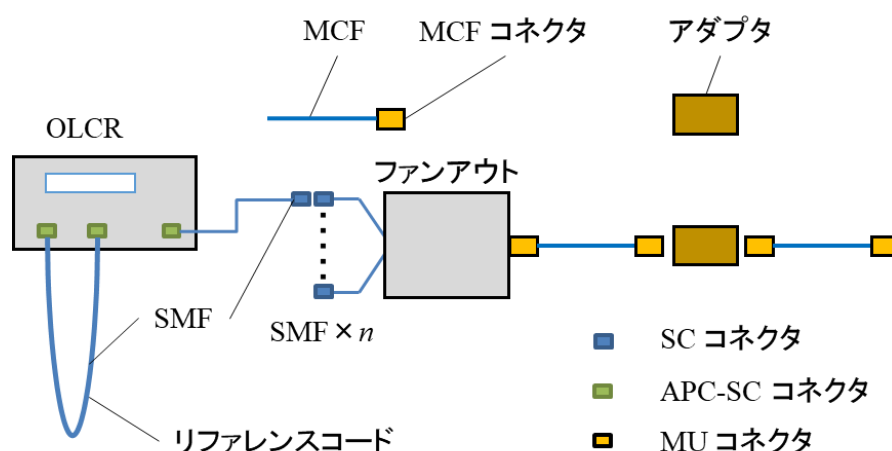


図 2.3.3 反射減衰量の測定系（OLCR 法）

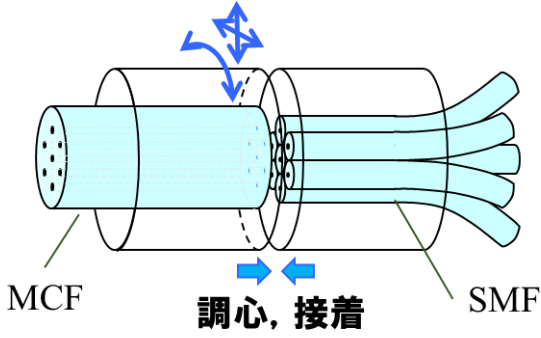
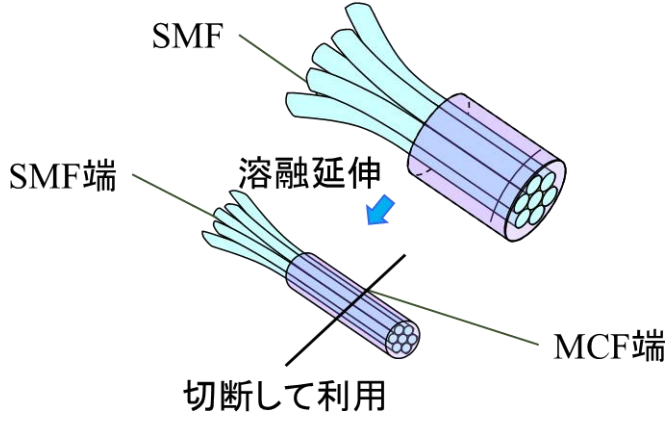
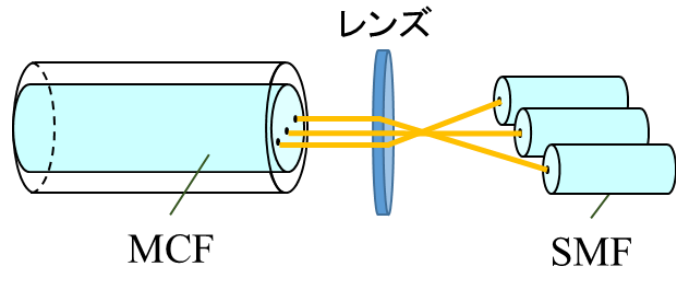
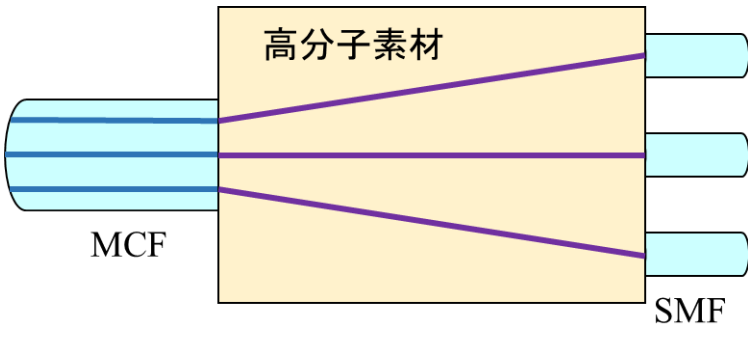
OLCR 法では測定点からの反射を、反射光と基準光との光学的干渉によって測定する方法である。基準光はリファレンスコードの長さに依存する。リファレンスコード長を、OLCR から測定点までの長さと同じにすることで光学的干渉による測定が可能となる。

MCF を使用した場合、測定系の構築にはファンアウトが必要不可欠であり、またファンアウトは各コアによって長さがすべて異なる。よってリファレンスコード長は各コアの測定毎に調整しなければならない。

2.4 ファンイン・ファンアウト（Fan-in, Fan-out）について

ファンアウトは MCF の各コアに個々の光信号を入射させる、または個々の光信号を取り出す役割を担うデバイスであり、コア数分の SMF と MCF 各コアを接続する中継点の役割を持つ。ファンアウトは MCF を使用するうえで必要不可欠な機器の 1 つとなる。表 2.4.1 にこれまで提案されているファンアウトの製造法について示す。

表 2.4.1 ファンアウトの製造法一覧

ファンアウトの製造方式	イメージ図
ファイババンドル型	
溶融延伸型	
空間結合 (空間光学) 型	
平面光導波路型	

ファイババンドル型はMCFのコア間隔と同じクラッド径になるような細径ファイバをコア数分用意し、それらをバンドルしてMCFに接着する方法である。細径ファイバを同じ距離で束ねるため、六法最密配置のように中心に細径ファイバが必要など、コア数に制限が存在するが、低コストで量産性に優れた製造法である¹⁴⁻¹⁶⁾。熔融延伸型はコア数分のファイバを束ね、MCFのコア配置と同じになるよう熔融延伸する方法である。この製造法も低コストで量産製に優れている¹⁷⁻¹⁹⁾。空間結合型はMCFとSMFの間にレンズを介することで光信号を空間結合する方式であり、レンズを調整することで低損失、低クロストークの実現が可能である²⁰⁾。平面光導波路型は、高分子材料を使用して3次元導波路を形成し、MCFと直接接続する方法が報告されている²¹⁾。

本デバイスは通常、入射光側と出射光側を見分けるため、ファンイン (Fan-in: 入射側) とファンアウト (Fan-out: 出射側) の2種類に分類される。本研究では古河電気工業株式会社より提供されたファイババンドル型のファンアウト (ファンイン) を使用した^{14),16)}。

2.5 単心光コネクタに必要な技術要素

光通信ネットワークで使用される単心コネクタとして、接続損失0.5 dB以下、反射減衰量40 dB以上が必要とされている。フェルールの端面接触でこれらの仕様を満足するためには、約1 μm 以下の精度でファイバを整列しなければならない。この機能を実現するために光コネクタに求められる基本的な要素技術として、以下の4点が挙げられる。

- (a) フェルールの精密位置決めおよび固定技術
- (b) 接続する双方の光ファイバ間を再現性良く整列させる技術
- (c) 接続する双方の光ファイバ端面間の反射を抑制する技術
- (d) 外力による光学特性への影響を排除

単心光コネクタの場合、(a)として極めて高精度なジルコニアフェルールの製造技術が確立しており、MCFにおいてもこれを流用するのが得策である。ただし、既存のフェールは軸回りの回転については考慮されていないため、軸回りの角度調整機能を新たに付加する必要がある。

(b)については、割りスリーブによるファイバ整列技術が確立しており、MCF接続においてもその優位性は同等である。よってMCFにも割りスリーブを使用した接続が適していると考えられる。

(c)についてはPC (Physical Contact) 接続技術が一般に使われており、コネクタ接続点の反射減衰量50 dB以上を実現する研磨方法が普及している。安定な

PC 接続を維持するためにはフェルルール端面を高精度な形状に研磨する必要があり、端面形状を決める寸法公差については IEC 61755 シリーズにおいて標準化されている。MCF の接続においても PC 接続技術をそのまま使うことができるはずであるが、複数のコアに対して安定な PC 接続を保証するためには、使用する MCF に応じた端面形状の寸法公差を見直す必要がある。

(d)の問題は光コネクタの宿命である。人手によるコネクタ着脱作業を考えた場合、数十 N の外力が光ケーブルに加わる可能性を配慮しなくてはならない。電気コネクタ程度の大きさの部材にこのような外力が作用すると、少なくとも 10 μm 以上コネクタ部材が弾性変形すると考えられるが、これは必要な位置決め精度を上回る。そこで、現在の単心系光コネクタでは割りスリーブ内部で、フェルルールをばねで前方へ付勢させる構造が一般的であり、部材が変形しても接続部分に影響しない二重かん合構造が採用されている。

2.6 MCF コネクタの設計について

光コネクタの接続時にはフェルルール押圧力が発生するとともに、端子盤では着脱操作時に隣接する光ケーブルに外力が発生することから、光コネクタ部品には微小な変形が発生する。一方、光ファイバ双方の位置決めには 1 μm 以下の精度でコアを整列することが要求されるため、光コネクタは変化量が必要精度を上回る特異な性質を持った光部品とすることができる。

光コネクタは安定な接続特性を維持するために通常、光コネクタ内部ではフェルルールをばねで前方へ付勢させる構造（フロート構造）が一般的である。コネクタ内部のフェルルールに自由度を与えることで、コネクタ部品の変形が光ファイバ双方の位置決めに影響しない構造が採用されている。しかしこのフロート構造はフェルルールの回転方向への制御については考慮されていない。MCF はファイバ中心のコア以外にもコアが多数配置されているためフェルルールの回転が各コアの軸ずれ要因となってしまう、光学特性に悪影響を及ぼす。よって現在のフロート構造は MCF の接続には適さない。また普及している既存の光コネクタや様々な接続対象との互換性が失われる可能性があるため、MCF 専用の光コネクタを新しく開発することは現実的とは言い難い。

MCF に使用する光コネクタは既存の光コネクタ構造を流用し互換性を保ちつつ、フェルルール軸回りの角度調整機能を持った構造が最も望ましい。以上のことから、MCF の光コネクタを設計する場合、互換性のある既存の光コネクタをベースとして検討を行う必要がある。

1) MCF コネクタの設計条件

MCF コネクタを設計するにあたり、以下の3項目を開発条件とした。

(a) 既存インタフェースを使用すること

光コネクタはコネクタ以外にも様々なデバイスに接続されるため、接続対象との互換性が重要である。全く新しいMCF専用の光コネクタを実用化するためには、複数ベンダによる相互接続時の互換性を確保する必要がある。開発には多くのコストと長い開発期間がかかるため現実的ではない。そこで、本研究ではIECで標準化され、既に互換性が確立しているコネクタを使用することにした。

(b) 小型の光コネクタを使用すること

MCFは伝送容量の飛躍的高度化が目的であるため、使用する光コネクタの実装密度は、現在使用されている高密度実装用光コネクタと同等かそれ以上であることが望ましい。そのため接続方式はねじ締め構造ではなく、プラグをアダプタに押し込むだけでロックされ、引っ張れば簡単には外すことができるプッシュプル構造が適している。またMCFは基幹伝送系だけでなく、光トランシーバ²²⁾間のパラレル信号伝送媒体としての可能性を秘めている。そのため光トランシーバで使用されるSFF (Small Form Factor) と呼ばれるカテゴリに属する光コネクタ形式が望ましい。

(c) 光コネクタ内部が対称構造であること

光コネクタは外力が作用することにより部材が変形するが、外力が作用しない状況においても、かん合時のフェルール押圧力によりプラグハウジングは変形する。MCFを安定にPC接続させるためには周辺コアに均等に力がかかることが望ましく、かん合時の変形が軸対称となる構造が適している。プッシュプル接続構造を取る既存の光コネクタの中で、フェルール押圧力を受けるラッチ構造が軸対称に2個配置されているものと片側に1個配置されているものがあるが、上記の理由により、軸対称に2個のラッチ構造を持った光コネクタがMCFには適している。

以上の開発条件をすべて満たす光コネクタとしてはMU (Miniature Universal) 形光コネクタ (IEC 61754-6) が最適である。またMUコネクタは世界基準とされるSCコネクタと構造が同じであるため、MU形MCFコネクタが完成すれば、それらの技術はSC形にもすぐ適用可能であると考えられる。よって本研究ではMU形光コネクタをベースとしてMCF用光コネクタの設計を行った。

一般的に普及している通常のフランジ寸法を使用し、MCF コネクタを設計した場合、フランジ外径の寸法とプラグフレーム内部の寸法との間には 0.2 mm 程度のクリアランスがある。コアが一般的な六方最密配置の MCF を例に、軸ずれ量を 0 μm とした場合の、MCF フェルールの回転と損失の関係を図 2.6.2 に示す。0.2 mm のクリアランスはフェルールに約 $\pm 10^\circ$ の回転自由度を与える可能性があり、それらの最悪値双方を接続すると最大角度ずれ量は 20 $^\circ$ にも達する。MCF のコア数やコア間隔などによりフェルールに要求される角度精度は変わってくるが、一般的な六法最密配置の MCF (コア間隔 40~50 μm) を例とした場合、光コネクタに要求される接続損失 (0.5 dB 以下) を MCF すべてのコアで満たすためには図 2.6.2 より、接続された双方のコネクタ角度ずれ量を合計で約 1.8~2.4 $^\circ$ 以下にすることが要求される。また、実際には軸ずれによる接続損失発生は免れないため軸ずれと角度ずれ両方を考慮すると、接続された双方のコネクタ角度ずれ量は合計で約 1.5 $^\circ$ 以下に抑えなくてはならないと考えられる。

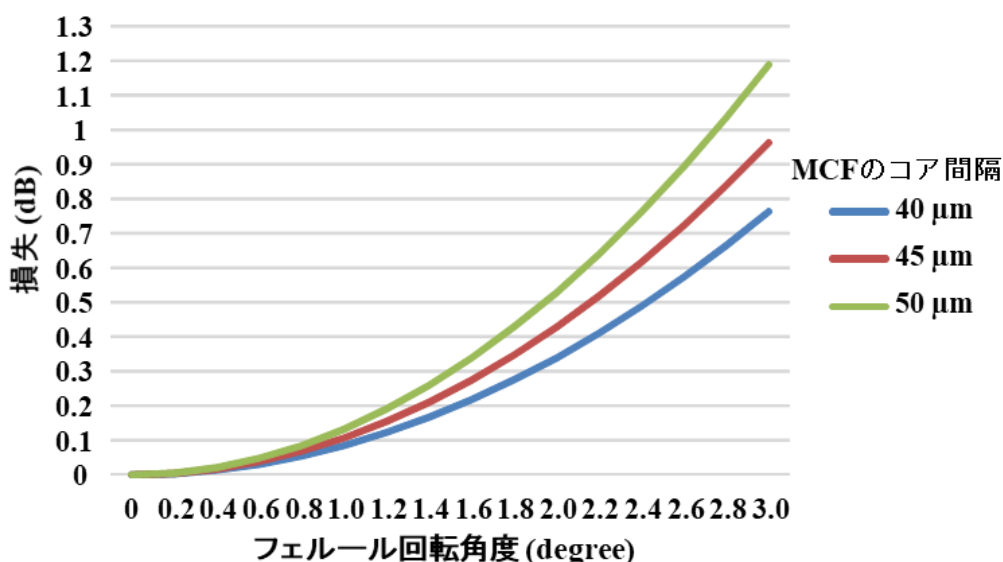


図 2.6.2 MCF フェルールの回転と損失の関係 (軸ずれ量 0 μm とした場合)

3) MCF コネクタに使用する部品について

フェルールのフロート構造を構成する部品であるプラグフレームは、フェルールの回転について考慮されておらず、オルダム・カップリング構造のフェルールを用いたとしても角度ずれを 0.75 $^\circ$ 以下に抑えることはできない。よってフェルールが十分にフロートするだけのクリアランスを確保しつつ、フェルールの回転を抑えるため、プラグフレームの寸法を見直す必要がある。MCF コネクタに使用したプラグフレームの各寸法を図 2.6.3 に、結合部品と接触するプラグフレーム内部の外観と寸法を図 2.6.4 に示す。コネクタパーツは既存の部品と互換

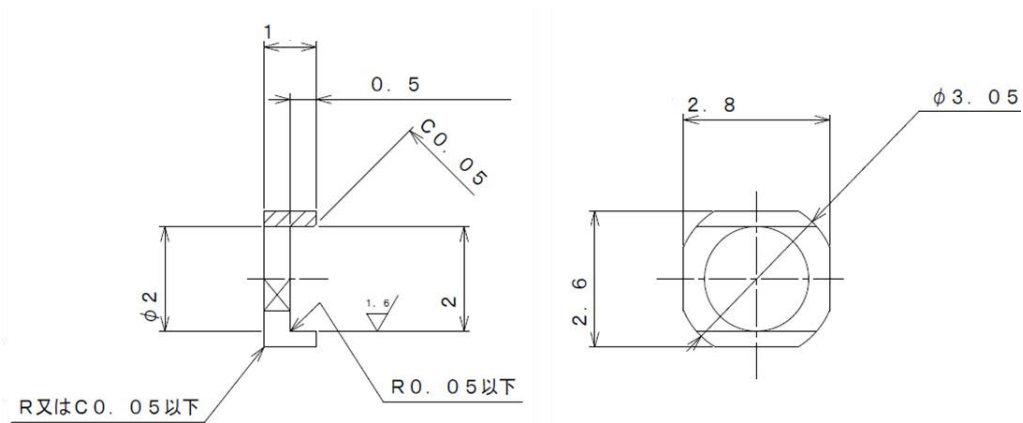


図 2.6.5 結合部品の各寸法

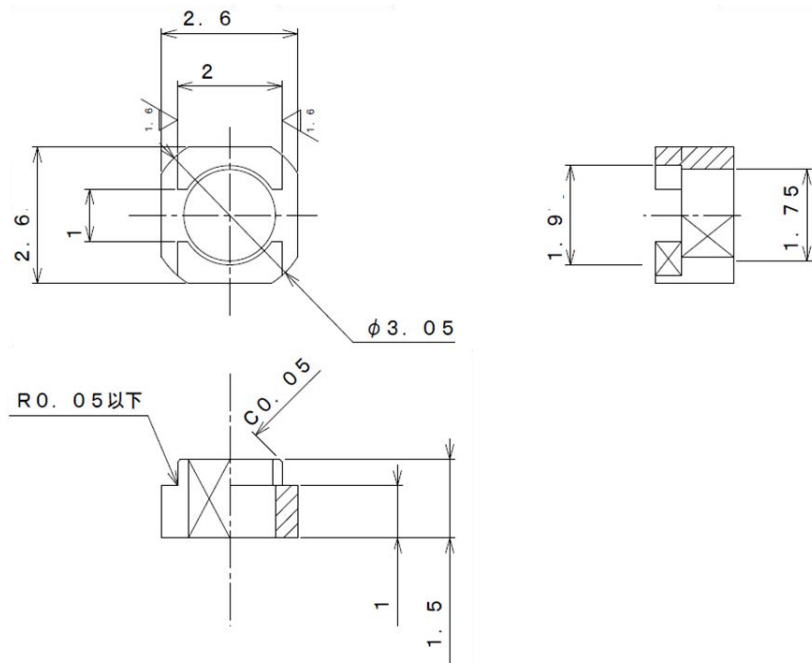
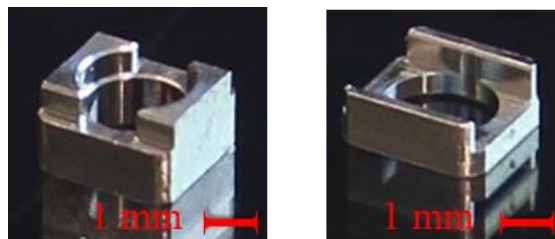


図 2.6.6 フランジの各寸法



(a) 結合部品

(b) フランジ

図 2.6.7 オルダム・カップリングを構成する部品の外観

現在使用しているこれらの外形寸法は結合部品が 2.6×2.8 mm，フランジが 2.6×2.6 mm である．結合部品とフランジはフェルールと別部品となっているため，使用する MCF に応じて，任意の方向に調整することが可能である．

通常フェルールは金属部分とフランジが一体になっているが，オルダム・カップリングを構成するにはフランジの無い金属部分が必要である．フランジの無いフェルール金属部分の各寸法を図 2.6.8 に示す．結合部品やフランジが圧入される個所は，それらの部品に応じて寸法を調整している．

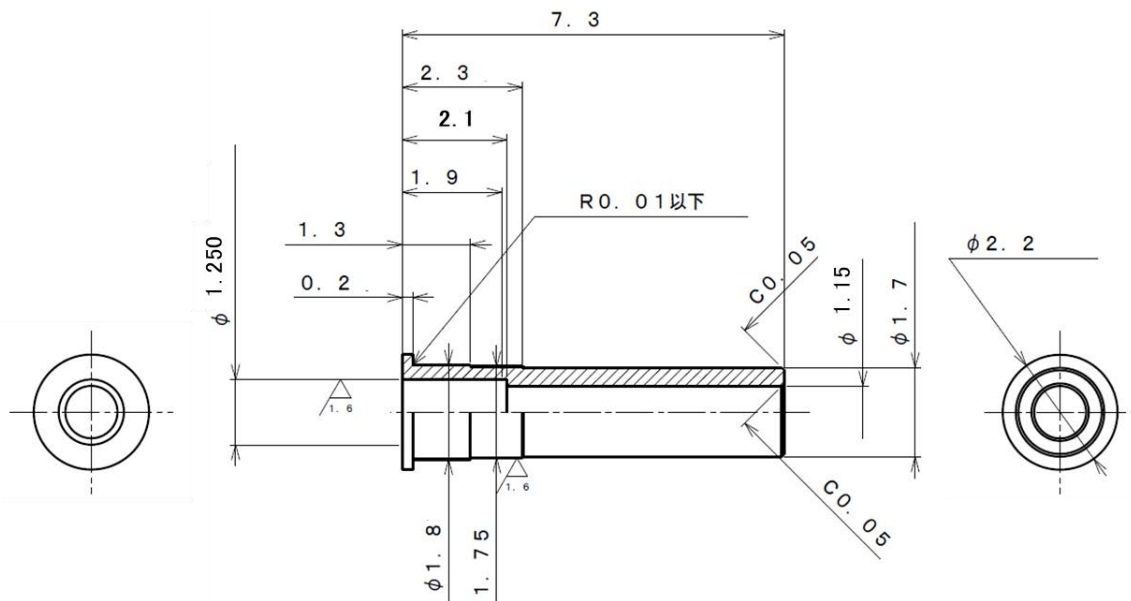


図 2.6.8 フェルール金属部分の各寸法

オルダム・カップリング構造の MU 形 MCF 用コネクタに使用する各部品を図 2.6.9 に示す．使用する部品はフランジと結合部品以外，すべて既存の MU コネクタパーツと互換性があるものを使用している．またフェルール押圧用のばねは一般的に右ねじ方向に巻かれたものが使用されているが，コネクタ双方を接続した際に発生するトルクによるフェールの回転を考慮し，本研究では右巻きばねと左巻きばねを MCF コネクタによって使い分けている．



図 2.6.9 MU 形 MCF 用コネクタに使用される部品

4) MCF コネクタの製造方法

結合部品とフランジは別部品となっているため、フェルールに結合部品を介し、フランジを圧入することでオルダム・カップリングを構成する。オルダム・カップリングのフェルールを組み立てるには、フェルールとフランジの角度を均一に合わせる作業（調心）やフランジの圧入を行う専用の組立て治具が必要である。よって、それらを満たすことのできる専用の治具を設計した。

フェルールにフランジを精度よく圧入するには、それらの位置関係が重要である。フェルールとフランジの位置関係を図 2.6.10 に示す。フランジの圧入に求められる精度とは、軸を合わせた状態でフランジが均一な力で圧入されることである。圧入の際、フェルールを固定する力が大きいとフランジ圧入時にフェルールが破損してしまう恐れがある。またフランジを圧入する際に偏った力で圧入、またはフランジとフェールの軸がずれていると、固定されているフェルールが回転する要因になってしまうと考えられる。そのため治具の設計にあたり、フランジとフェールの軸がずれることなくフランジを圧入できる構造が必要であった。

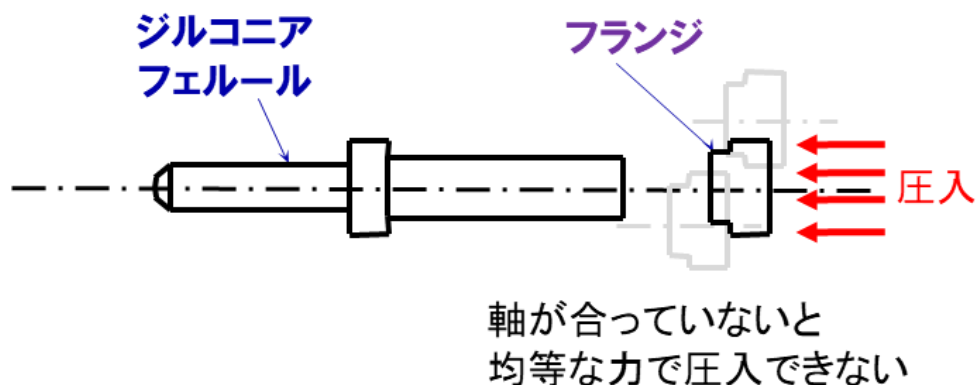


図 2.6.10 フェルールとフランジの位置関係

設計したフェルール調心治具の外観を図 2.6.11 と図 2.6.12 に示す。フェルール調心治具は圧入精度向上のため設計と調整を繰り返しており、図に示すのは現在使用しているものである。端面を研磨したフェルールを円筒治具の中心にある穴に入れることで顕微鏡を介しモニタで端面を観察する構造である。回転調心後のフェルールは円筒治具内の六角穴付き止めねじにより押圧ばねを介し固定する。また図 2.6.12 中に示すように、フランジを左右から均等な力で挟み込めるよう設計し、スライド方向にのみ自由度を与えることでフェルールとフランジの軸位置決め精度の向上を狙った。

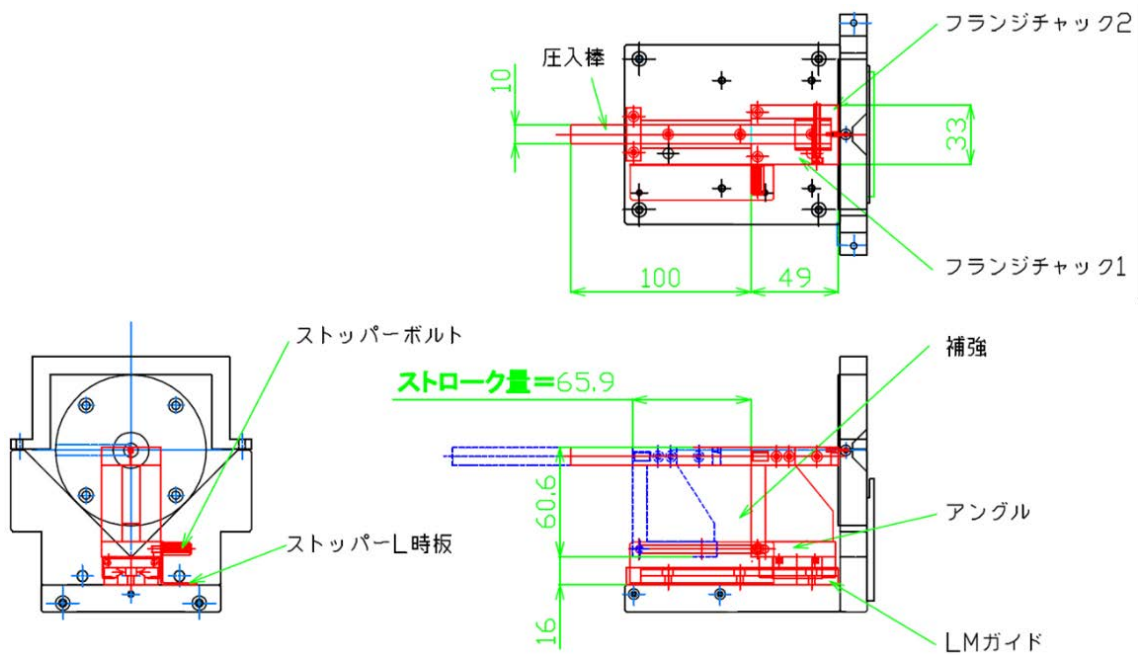


図 2.6.11 フェルール調心治具の詳細

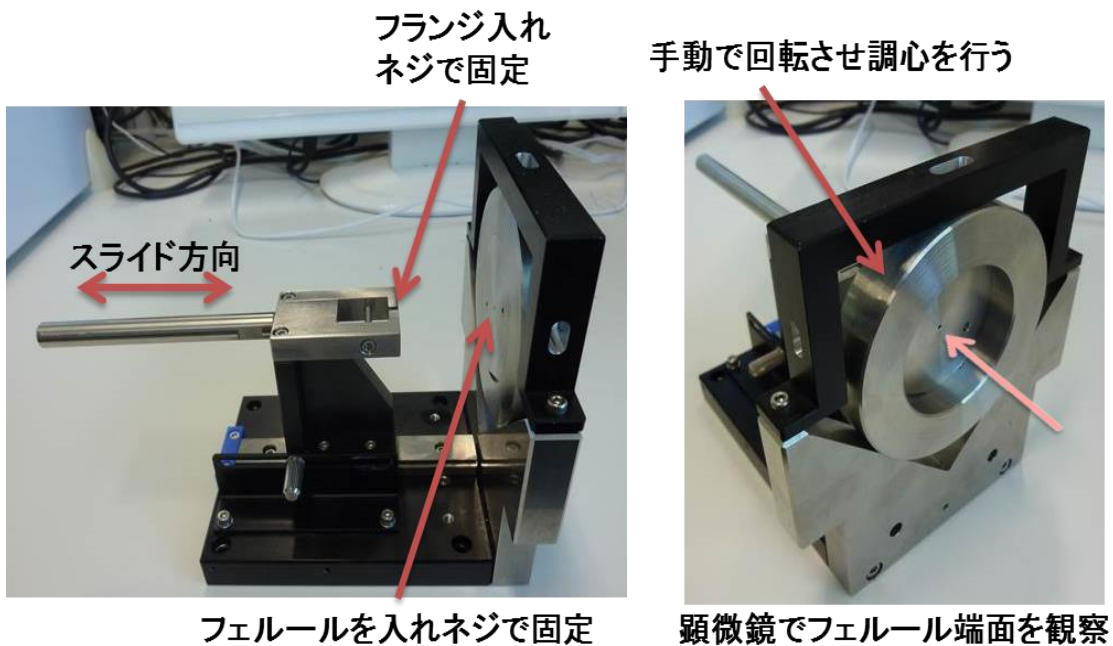


図 2.6.12 フェルール調心治具の外観

フランジ圧入治具と MCF コネクタの組立て治具の全体を図 2.6.13 に、MCF コネクタの組立て手順を図 2.6.14 に示す。顕微鏡を固定している台は微動台となっており、すべての軸方向に移動させることができる。フェルール調心治具を使

いフェルールに接着した MCF 端面を顕微鏡で観察する。観察用のモニタにはあらかじめ基準線を設定しておき、それに合わせて各コアを整列させ回転方向を整える。回転方向を合わせた状態でフェルール調整治具を固定し、その方向に合わせてフランジを圧入することにより組み立てを行う。

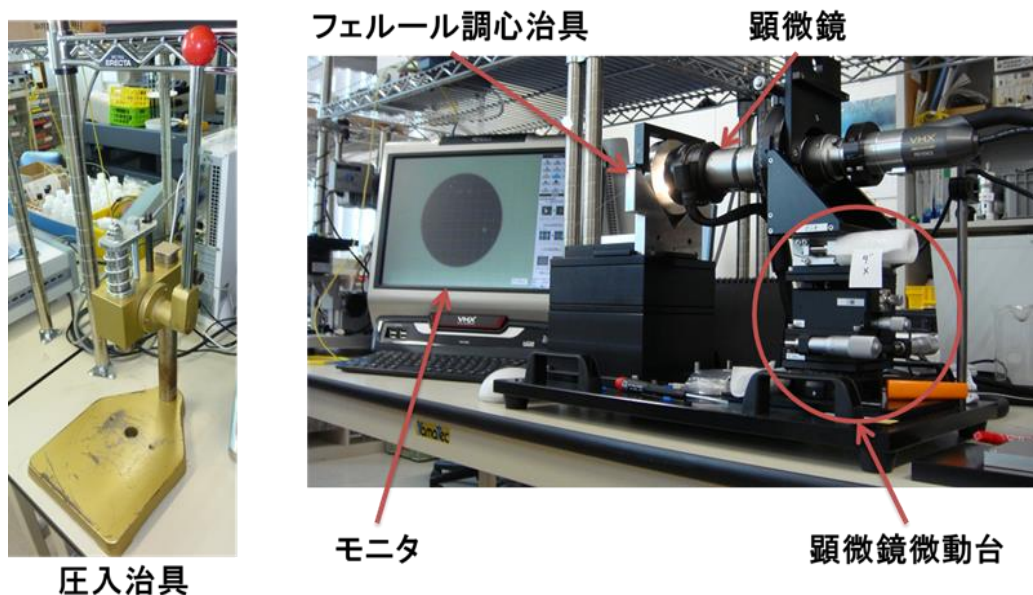


図 2.6.13 フェルール調心治具の全体と圧入治具の外観

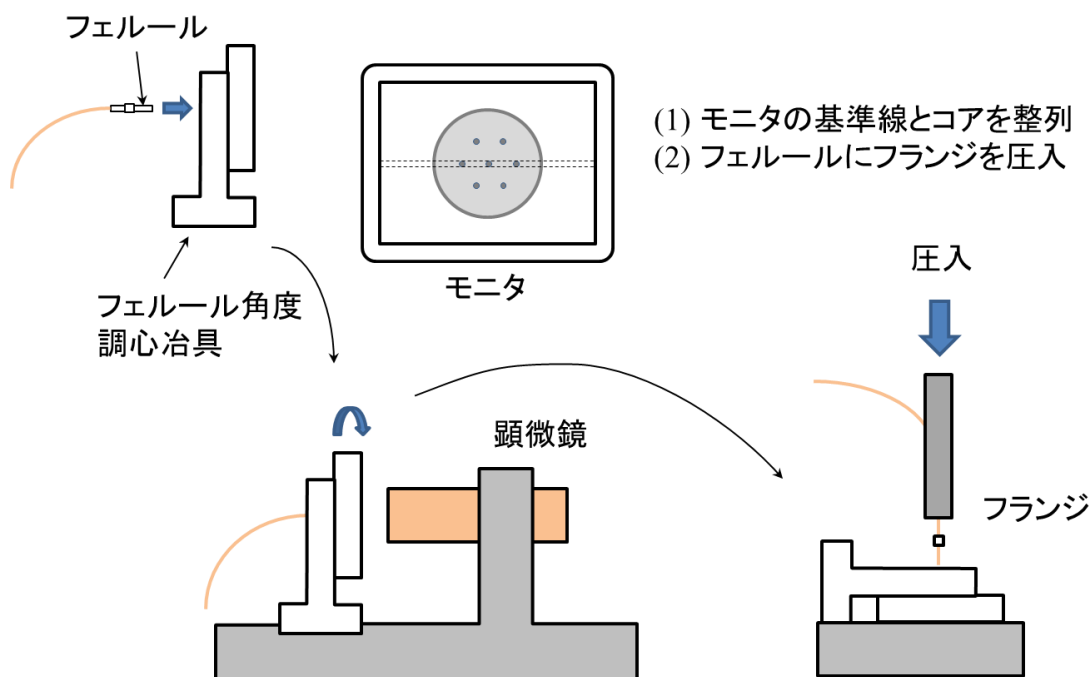


図 2.6.14 MCF コネクタのフランジ圧入までの手順

MU形コネクタとMCFの位置関係を図2.6.15に示す。本研究で開発したMCFコネクタは、識別マーカがMUコネクタの上方向に位置するようにフランジ角度を調整している。フランジは別部品となっているため、任意の角度で圧入することが可能であり、またMU形コネクタと互換性があるため、通常のMU形コネクタと同じように使用することができる。

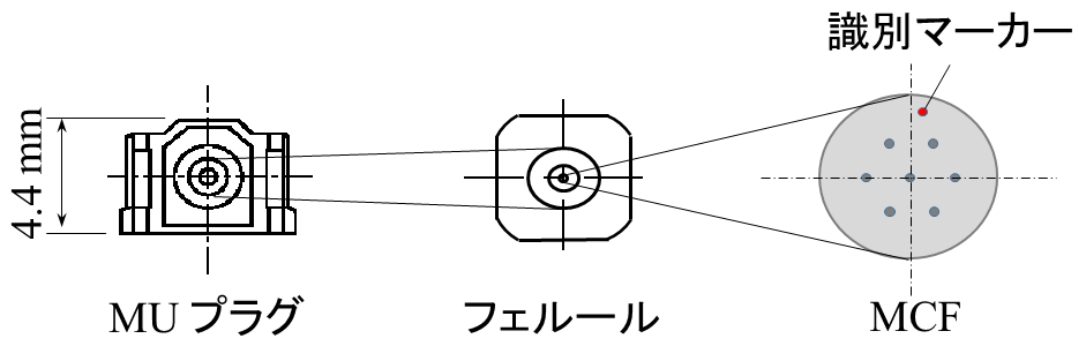


図 2.6.15 MU形コネクタとMCFの位置関係

5) コネクタ接続時のアダプタについて

コネクタ双方を接続するにはアダプタを使用することが一般的であるが、アダプタは着脱作業を容易にするため、差込口の寸法がコネクタに対し大きめに設計されている。MCFコネクタにこれらのアダプタを使用すると、コネクタとアダプタのクリアランスが軸ずれの原因となってしまう、接続損失の劣化要因となることが考えられる。そこで本研究ではコネクタを押さえつける板ばねをアダプタに組み込むことでコネクタ回転の抑制を狙った板ばね付きアダプタを使用した。板ばね付きMUアダプタの外観を図2.6.16と図2.6.17に示す。

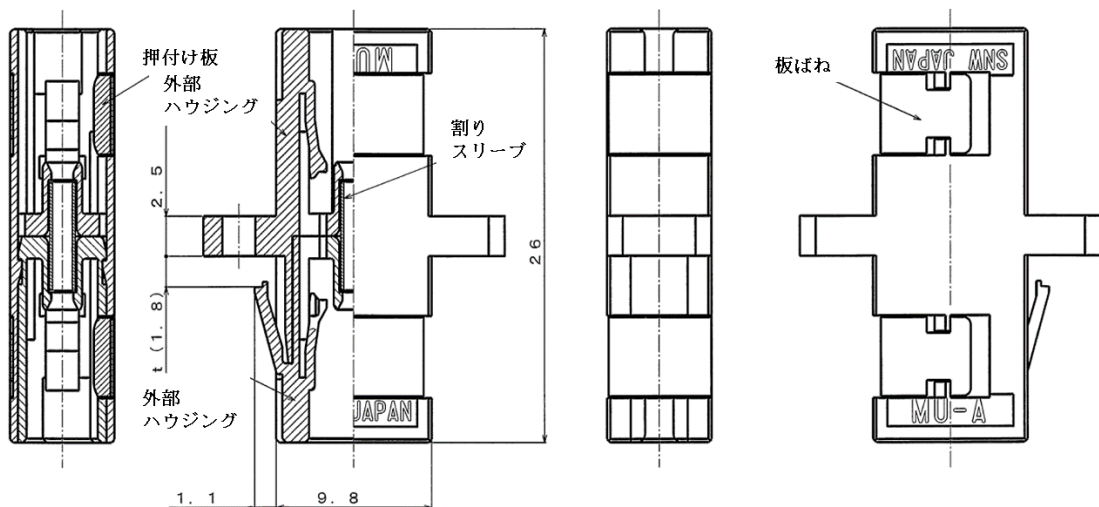


図 2.6.16 MCFコネクタ用アダプタの外観図

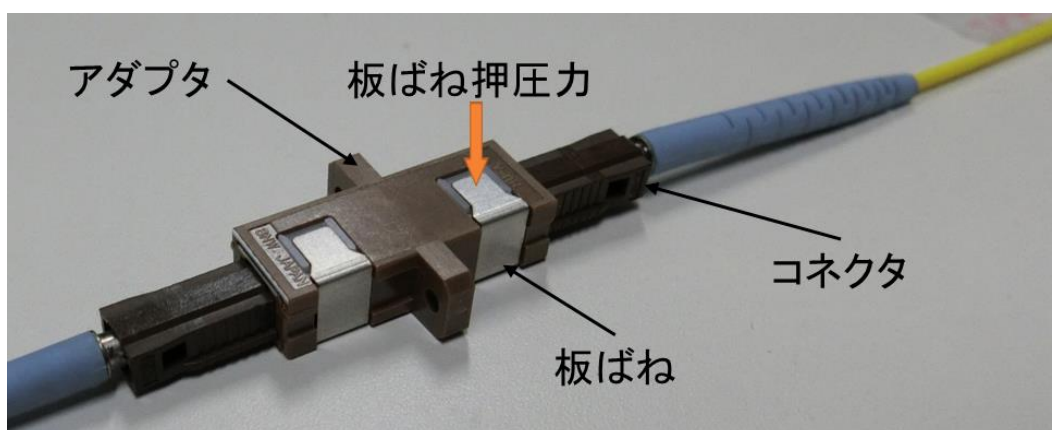


図 2.6.17 MCF コネクタ用アダプタの外観

板ばね付き MU アダプタは、アダプタに差し込んだ MCF コネクタを板ばねにより押さえつける構造である。板ばねの押圧力を大きくすればコネクタの回転をより抑えることができるが、その押圧力はコネクタ軸方向にも作用するため、着脱操作に影響を及ぼす可能性が考えられる。コネクタは着脱作業が容易である必要があるため、板ばねの押圧力もそれに伴い調整する必要がある。人手によりコネクタに外力が加わった場合、コネクタ部材には数十 N の力がかかるため、板ばね付きアダプタを使用しても接続損失の悪化は免れない。しかしコネクタ接続状態では板ばねの押圧力が常時作用しているため、コネクタに加わる外力が排除されれば、コネクタ双方は常にアダプタ底面（板ばね押圧力を上から受けているとして）押し付けられていると考えられる。

2.7 まとめ

本章では単心コネクタに要求される基本特性及び、単心 MCF コネクタ設計の課題と解決への取り組みについて説明したものである。

単心光コネクタとして、基本特性とされる接続損失と反射減衰量について、その発生要因と測定方法を説明した。またそれらの測定方法を MCF に適用した場合に必要な不可欠とされるファンアウト（ファンイン）について、その概要と製造方法について簡単に紹介した。本研究ではファイババンドル型のファンアウトを使用し、MCF コネクタの特性を評価する。3 章以降での接続損失と反射減衰量の測定結果は、本章で説明した測定方法に基づき測定を行っている。

一般的な単心光コネクタに使用されている 4 つの要素技術を説明した。説明した要素技術でフェルールのフロート構造と MCF フェルールの角度精度について、それらは相反する条件であることを明らかにした。また MCF コネクタの開発において、そのベースとなる光コネクタに必要な条件をあげ、それらの中から MU 形光コネクタ（IEC 61754-6）が最適であるという結論を得られた。

本研究で使用する MCF コネクタは、MU 形光コネクタをベースとしたものである。

フェルールのフロート構造と MCF フェルールの角度精度についての課題を解決するため、結合部品とフランジが別部品になっているフェールを紹介し、偏波保持ファイバ用コネクタに使用されたオルダム・カップリング構造を適用した MU 形 MCF コネクタを提案した。

フェールにフランジを圧入するための治具について説明した後、フランジ圧入までの手順を示した。また MCF コネクタ接続に使用する板ばね付きアダプタを提案し、その仕組みについて説明した。

第2章の参考文献

- (1) 小倉邦男, “通信用石英系光ファイバの製造方法”, *NEW GLASS*, vol.27, no.105, pp.36-39, (2012).
- (2) 河内正夫, “石英系光ファイバの低損失化と量産製法 (VAD 法) の開発”, *NTT 技術ジャーナル* 2013, vol.25, no.3 pp.42-47 (2013).
- (3) 鈴木正義, 橋本展宏, 後藤誠, 佐藤健, “光部品用粘着式清掃ツールの開発”, *電子情報通信学会, 総合大会 2016*, B-13-35, (2016).
- (4) 斎藤浩太郎, “新構造光ファイバの接続技術に関する研究”, 千葉大学審査学位論文, pp.3-5, (2015).
- (5) D. Marcuse: “Loss analysis of single-mode fiber splices,” *Bell System Technical Journal*, 56: 5, pp.703-718, (1977).
- (6) Y. Ando, S. Iwano, K. Kanayama and R. Nagase: “Statiscal analysis on connection characteristics of optical fiber connectors,” *IEICE Trans. Electron*, vol.E77-C, no.12, pp.1970-1982, (1994).
- (7) 中村孔三郎, “光学接着技術”, *回路実装学会誌*, vol.10, no.5, pp.298-301, (1995).
- (8) 中村孔三郎, 丸野透, “高信頼光学接着剤”, *通研技報*, vol.35, pp.1227 (1986).
- (9) 中村孔三郎, 村田則夫, 丸野透, “光通信用光学接着剤の設計と開発”, *通研技報*, vol.38, pp.81, (1989).
- (10) K. Kanayama, Y. Ando, R. Nagase and S. Iwano: “Evaluation method and performance of advanced low-reflection optical connectors,” in *Proc. 41st IWCS Conference*, pp.785-791, (1992).
- (11) S. Matsui, F. Ohira, K. Koyabu, and K. Matsunaga: “Characterization of Machining-Damage Layer for Optical Fiber Ends -Relation between Damaged Layer and Return Loss-,” *Japan Society for Precision Engineering*, vol.64, no.10, pp.1467, (1998).
- (12) T. Shintaku, E. Sugita, and R. Nagase: “Highly Stable Physical-Contact Optical Fiber Connectors with Spherical Convex Ends,” *IEEE J. Lightwave Technol*, vol.11, no.2, pp.241-248, (1993).
- (13) T. Shintaku, R. Nagase, and E. Sugita: “Connection mechanism of physical-contact optical fiber connectors with spherical convex polished ends,” *Appl. Opt*, vol.30, no.36 / 20, pp.5260-5265, (1991).
- (14) 斎藤恒聡, 渡辺健吾, 今村勝徳, 椎野雅人, “マルチコアファイバ用ファイババンドルタイプファンアウト”, *電子情報通信学会, 総合大会 2012*, B-10-26, pp.349, (2012).
- (15) 斎藤恒聡, 渡辺健吾, 今村勝徳, 椎野雅人, 長瀬亮, “マルチコアファイバ

- 用ファイババンドルタイプファンアウトの開発 (2) ”, 信学技報, vol.112, no.447, OCS2012-116, pp.105-110, (2013).
- (16) 渡辺健吾, 斎藤恒聡, 椎野雅人, “19 コア MCF 用ファイババンドル型ファンアウトの開発”, 信学技報, vol.114, no.195, OCS2014-35, pp.21-26, (2014).
- (17) 斎藤普聖, 植村仁, 竹永勝宏, 大道浩児, 松尾昌一郎, “マルチコアファイバ用ファンイン/ファンアウトデバイス”, フジクラ技報 2014, vol.2, 第127号, pp.13-17, (2014).
- (18) 植村仁, 竹永勝宏, 小里貞二郎, 松尾昌一郎, 斎藤普聖, 小柴正則, “熔融延伸型マルチコアファイバ用ファンイン/ファンアウトデバイス”, 信学技報, no.B-10-11, pp.342, (2013).
- (19) 八若正義, 田中正俊, 谷口浩一, “マルチコアファイバ用融着接続型ファンイン, ファンアウト部品の検討”, 信学技報, vol.115, no.202, OFT2015-16, pp.5-8, (2015).
- (20) 鳥取裕作, 坪谷博, 小林哲也, 皆川洋介, “集積化マルチコアファイバファンイン/ファンアウトデバイス”, 電子情報通信学会, ソサイティ大会 2013, B-13-26, pp.378, (2013).
- (21) T. Watanabe, M. Hikita and Y. Kokubun: “Laminated polymer waveguide fan-out device for uncoupled multi-core fibers,” *Opt. Express*, vol.20, no.24, pp. 26317-26325, (2012).
- (22) 赤津祐史, “光ネットワーク用光モジュール技術の研究開発動向”, NTT 技術ジャーナル 2006, vol.18, no.7 pp.42-45, (2006).
- (23) R. H. Stolen, V. Ramaswamy, P. Kaiser and W. Pleibel: “Linear polarization in birefringent single-mode fibers,” *Appl. Phys. Lett*, vol.33, no.8, pp. 699-701, (1978).
- (24) T. katsuyama, H. Matsumura and T. Suganuma: “Low-loss single-polarization fibers,” *Electron. Lett*, vol.17, no.13, pp. 473-474, (1981).
- (25) R. D. Birch, D. N. Payne and M. P. Varnham: “Fabrication of polarization-maintaining fibers using gas-phase etching,” *Electron. Lett*, vol.18, no.24, pp. 1036-1038, (1982).
- (26) N. Shibata, Y. Sasaki, K. Okamoto and T. Hosaka: “Fabrication of polarization-maintaining and absorption-reducing fibers,” *IEEE J. Lightwave Technol*, vol.LT-1, no.1, pp.38-43, (1983).
- (27) R. Nagase and S. Mitachi: “MU-type PANDA fiber connector,” in *Proc. Symposium on Optical Fiber Measurements, Boulder, U.S.*, pp.53-56, (1996).

第3章 7-core MCF を用いた光コネクタの開発

3.1 はじめに

本章では，第2章で説明したオルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタの光学特性と機械特性を評価し，実用化が可能であるかを明らかにする．本研究で検討する MCF コネクタに求められる要求条件を以下に示す．

1. 実践路での使用に耐える機能と特性を有する単心 MCF コネクタの開発を行う（接続損失 0.5 dB 以下）．
2. IEC 61753-1 において定義される Category C (Controlled environment) において，同種の光接続デバイスの性能基準に準拠すること．
3. IEC 61753-021-6（光学特性，機械特性，耐環境特性等について規定）に準拠すること．
4. 新しく開発する光接続デバイスについては，IEC へ新規の性能標準および光学互換標準として提案することを視野に入れる．

まず要求される光学特性を満足させるために，両端に MCF コネクタが取り付けられたコネクタコードを複数用意し，それらが無作為に選出して接続するランダム接続試験を行う．ランダム接続試験における平均接続損失の目標値を単心系光コネクタ用国際基準規格である IEC 規格（IEC 61300-3-34 Fiber optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 3-34: Examinations and measurements - Attenuation of random mated connectors）に定義されている Grade C (Controlled environment)を参照し，97 %以上が接続損失 0.5 dB 以下となる MCF コネクタを目標値とした．また MCF コネクタより得られたデータの正確性を確認するため，接続損失発生要因を特定しランダム接続試験と同じ条件でモンテカルロシミュレーションを実施した．ランダム接続試験より得られた実測値とモンテカルロシミュレーションの結果を比較することで，オルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタの設計手法の妥当性について検証した．

機械特性や耐環境特性については IEC 61753-021-6 (Fiber optic interconnecting devices and passive components performance standard - Part 021-6: Grade B/2 single-mode fiber optic connectors)を参照した．

これらの規格はすべて SMF を使用した単心光コネクタを想定した規格であるため，本研究ではオルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタでの実現を目標とした．

3.2 MCF コネクタの開発に向けて

1) 軸ずれと接続損失の関係

光コネクタの接続損失は軸ずれが主な要因となって発生するが、接続損失 (L) はマルクーゼの理論式 (3.2.1) より求めることができる. (d : 軸ずれ量, w : MFD/2)

$$L = 4.34 \left(\frac{d}{w} \right)^2 \quad (\text{dB}) \dots (3.2.1)$$

MFD は一般的な SMF で約 $10 \mu\text{m}$ 程度であり, また本研究で使用する MCF の MFD も SMF の値を参照している. よって w (MFD/2: モードフィールド半径) はおおよそ $5 \mu\text{m}$ となる. MCF のセンターコア (クラッド中心のコア) を例に, 軸ずれと接続損失の関係を図 3.2.1 に示す.

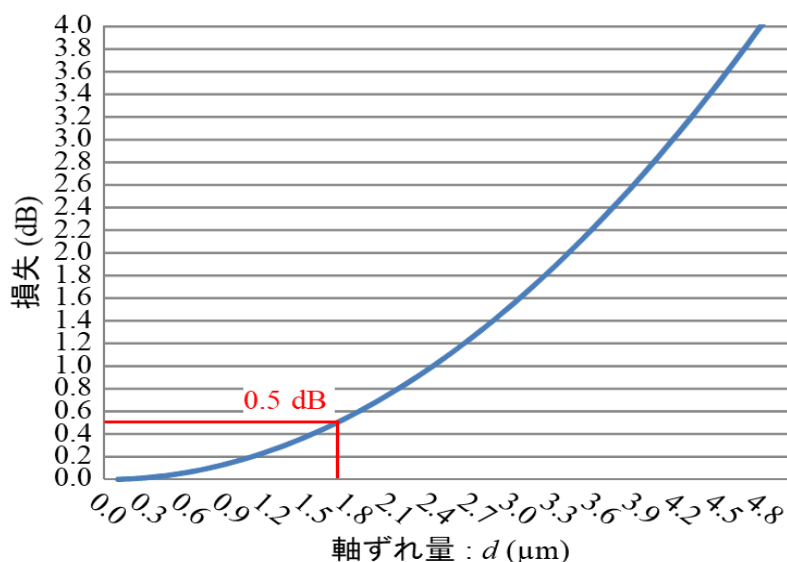


図 3.2.1 軸ずれと接続損失の関係

マルクーゼの理論式を用いた計算結果では軸ずれ量が $1.7 \mu\text{m}$ で接続損失が 0.5 dB 程度であった. また第 2 章で説明したように, MCF コネクタに要求される角度ずれ量は 0.75° 程度であることを考慮すると, MCF コネクタに要求されるフェルール位置決め精度は軸ずれ量 $1 \mu\text{m}$ 程度, 角度ずれ量 0.75° 程度である. 軸ずれ量 $1 \mu\text{m}$ で発生するセンターコアの損失は約 0.2 dB 程度, またセンターコアはフェルールの回転による影響を受けないことから, MCF のセンターコアの損失を 0.2 dB 以下に抑えることができれば, MCF の全コアで接続損失 0.5 dB 以下を達成できると考えられる.

2) 使用した7コア MCF の概要

MCF コネクタに使用した7コア MCF の端面画像を図 3.2.2 に示す.

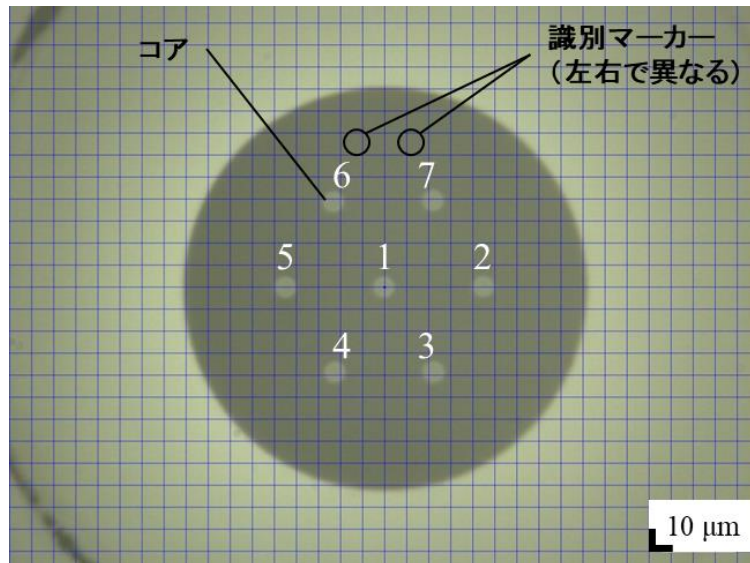


図 3.2.2 7コア MCF の端面画像

本研究ではクラッド中心のコアを基準に六方細密充填でコアが7個配置された非結合型7コア MCF を使用した. 7コア MCF のクラッド径は $180\ \mu\text{m}$, コア中心の間隔 (コア間隔) $45\ \mu\text{m}$, 波長 $1550\ \text{nm}$ における MFD は $10.1\sim 10.2\ \mu\text{m}$ であり, コア番号を特定するための識別マーカを左右どちらかに有する. 図中の格子は MCF の回転方向を合わせる基準線として使用する. 本研究では, クラッド中心に配置されたコアをセンターコア (Core ID 1), センターコアを取り囲む6個のコアを外周コア (Core ID 2~7) とする. 測定に使用する MCF は全て同じ母材から線引きされたものを使用しているため, コア外形のバラつき, スポットサイズの不整合, コアの偏心などによる損失発生要因は無視できると考えられる.

3.3 MCF コネクタの角度ずれ量測定

フェルール調心治具を使いフランジを圧入し, オルダム・カップリング構造の MCF コネクタを試作した. フェルール調心治具はフランジを均一な力で圧入できるよう設計されているが, 実際には寸法公差などの影響から, フェルールに不均一な力が加わりフェルールがフランジに対して角度ずれを起こしていると考えられる. そこで試作した MCF コネクタの端面を顕微鏡で観察し, 角度ずれ量の測定を行った. また角度ずれ量測定に伴い, フェルール調心治具に使用した顕微鏡微動台に対応したコネクタ端面観察治具を設計した. コネクタ端面観察治具を図 3.3.1 に, 測定系とフェルール回転方向の定義を図 3.3.2 に示す.

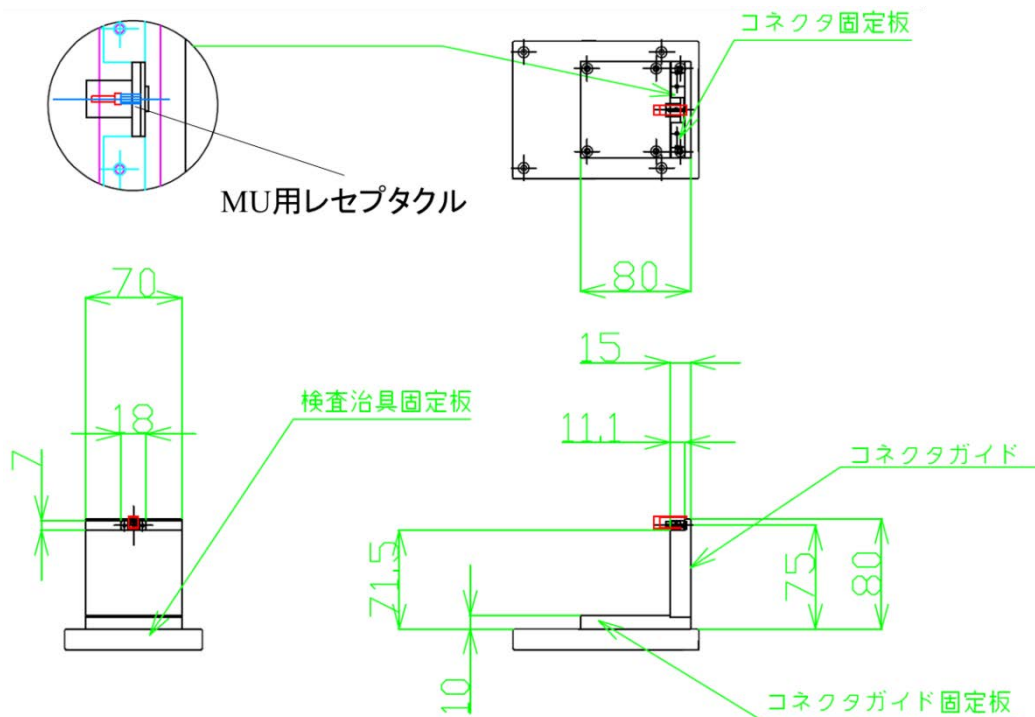


図 3.3.1 コネクタ端面観察治具の詳細図

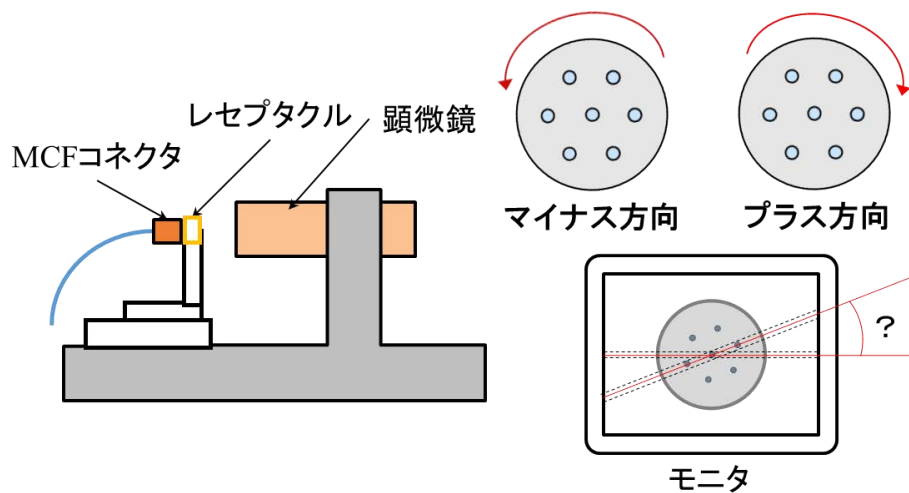


図 3.3.2 角度ずれ量の測定系とフェルール回転方向の定義

コネクタ端面観察治具は第 2 章内で説明したフェルール調心治具と取り換えることですぐに使用できるよう設計している。また治具に取り付けたレセプタクルは板ばね付アダプタと同じ構造のものを使用しており、外力によるコネクタ回転の影響を排除しつつ、通常の MU コネクタと互換性を有している。コネクタ端面観察治具に取り付けたレセプタクルに MCF コネクタを差し込むことで

顕微鏡を介してモニタでコネクタ端面を観察することが可能である。

端面観察治具に試作したMCFコネクタを取り付け、端面をモニタで観察する。モニタには基準線を設定しておき、MCFのコアが基準線に対してずれている量を角度ずれ量とした。またモニタの画像から右に傾いているものをプラス方向、左に傾いているものをマイナス方向とした。測定サンプルとして両端MCFコネクタ付コードを10本試作し、それらすべての角度ずれ量を測定する。(コード10本×コネクタ2個=20個)

MCFコネクタの角度ずれ量測定結果を図3.3.3に示す。測定結果より、平均角度ずれ量は -0.16° 、標準偏差は 0.37° であり、目標値である角度ずれ量 0.75° を大幅に下回る結果を得ることができた。軸ずれ量 $0\mu\text{m}$ 、角度ずれ量 0.16° を条件とし、コネクタ双方にこの条件を与えて接続したと仮定した場合、7コアMCF外周コアの接続損失は 0.01 dB 程度といえる。

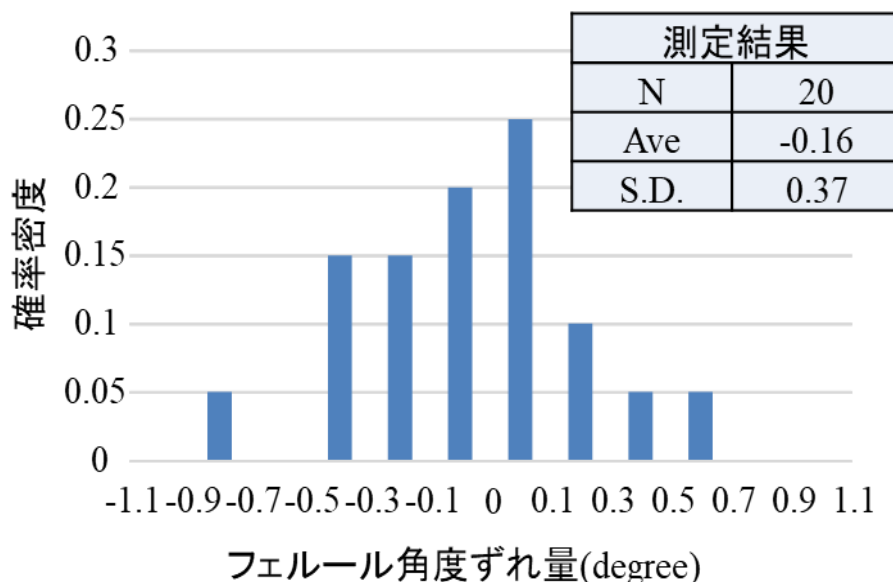


図 3.3.3 MCF コネクタの角度ずれ量測定結果

3.4 MCF コネクタの端面測定

安定した反射減衰量を得られるか確認するため、MCFコネクタのフェルール端面形状を測定した。フェルール端面形状の測定結果の一例を図3.4.1に示す。MCF端面の研磨方法は規格化されていないため、SMFフェルールに施される研磨方法を用いた。図3.4.1は凸球面研磨されたファイバ端面を示しており、端面形状は曲率半径、頂点ずれ、ファイバ引き込みで表すことができる。測定結果より、曲率半径 16.25 mm 、ファイバ引き込み(突出し) $-0.043\mu\text{m}$ 、頂点ずれ $14.9\mu\text{m}$ であった。SMF端面基準ではあるが、いずれの形状寸法もIEC規格の規定値内に入っていると同時に、頂点ずれが十分小さく、MCFの各コアをPC接続させ

するためには十分な精度に仕上がっている。一般的な端面形状のパラメータや端面研磨方法，MCF の端面形状については第 4 章で詳しく説明する。

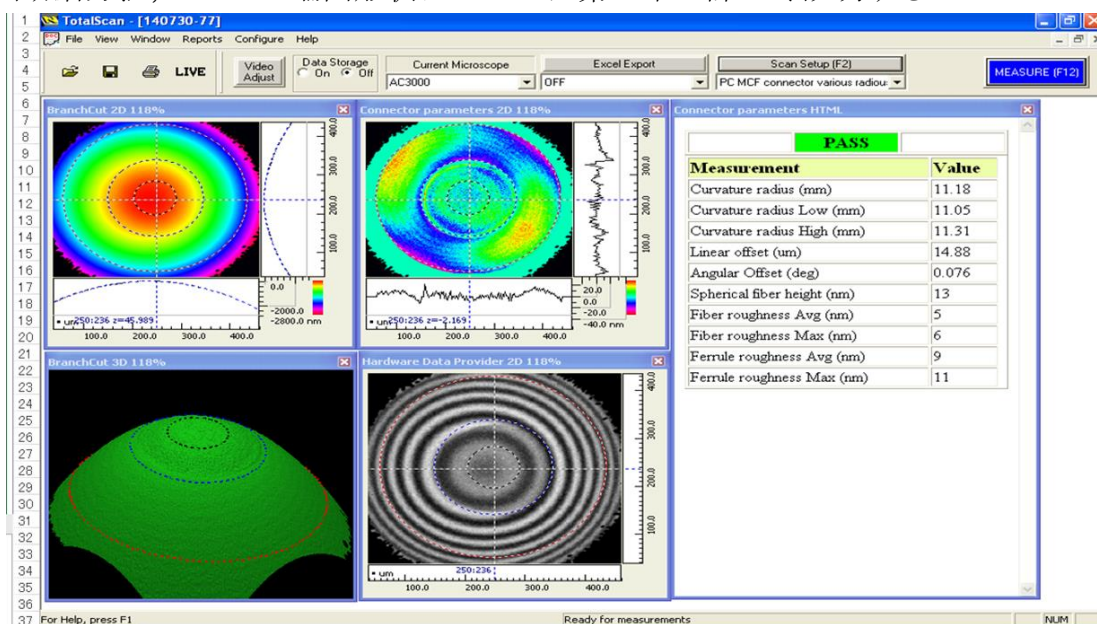


図 3.4.1 フェルル端面形状の測定結果の一例

3.5 光学特性評価

試作した MCF コネクタの光学特性の測定を行った。測定した光学特性は接続損失と反射減衰量である。

1) 接続損失測定

IEC 61300-3-34 (Fiber optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 3-34: Examinations and measurements - Attenuation of random mated connectors) に定義されているランダム接続試験に準拠し接続損失測定を行った。両端 MCF コネクタ付のコードを 10 本作製，その中で 1 本をマスタコードとし，着脱回数 1 回のランダム接続にて測定した。接続損失測定結果の分布をコア毎に図 3.5.1~3.5.3 に示す。測定結果より，全コアでの平均損失 0.12 dB，標準偏差 0.11 dB が得られた。センターコアの損失ばらつきが非常に小さく，外周コアの損失にばらつきが発生する傾向が得られた。これはフェルルとフランジの角度ずれやコネクタ部品のクリアランスによってフェルルが回転しているためと考えられる。しかし測定結果の 97%以上が 0.5 dB 以内であることから，IEC に規定されている Grade C の性能を有していることを確認した。この特性は一般的に普及している SMF コネクタと同等の性能である。

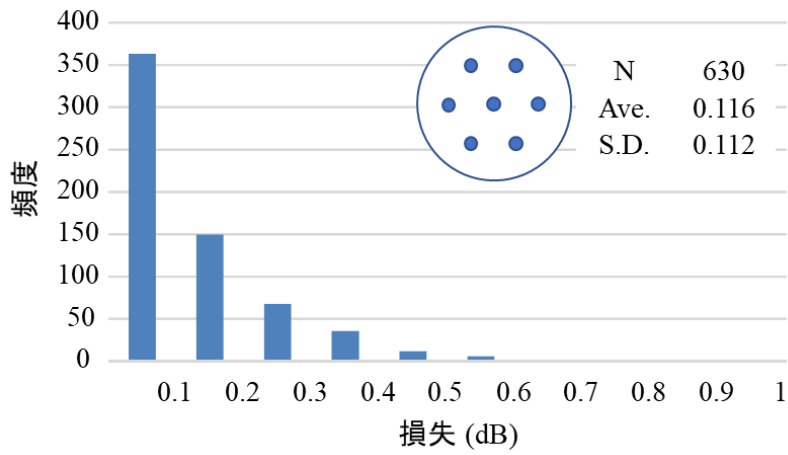


図 3.5.1 全コアの接続損失分布

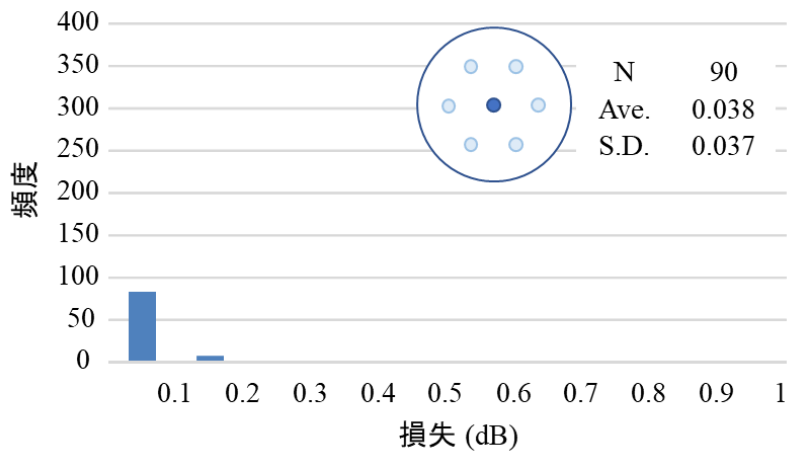


図 3.5.2 センターコア (Core ID 1) の接続損失分布

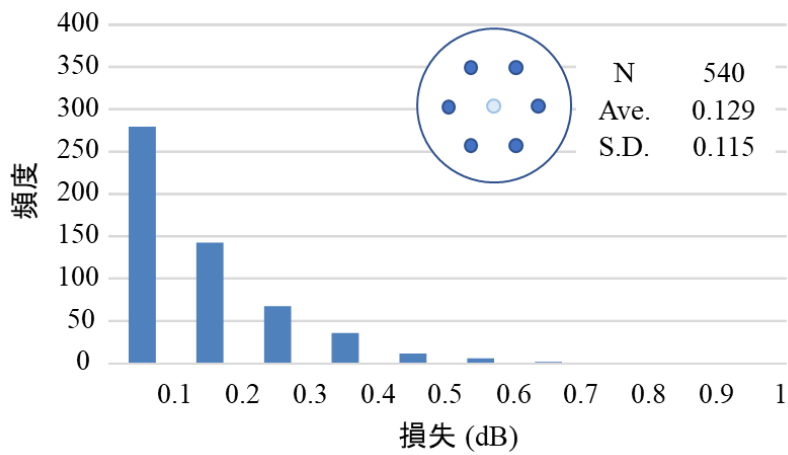


図 3.5.3 外周コア (Core ID 2-7) の接続損失分布

2) 反射減衰量測定

JIS C 61300-3-6 で定義されている OCWR 法 (Optical Continuous Wave Reflectometry) に準拠し, MCF コネクタの反射減衰量を測定した. 測定はランダム接続損失測定と同じコネクタの組み合わせとした. 反射減衰量測定結果の分布をコア毎に図 3.5.4~3.5.6 に示す. 通常の SMF コネクタでは 50 dB 以上の値を示すのに対し, MCF コネクタではファンアウトや光スイッチなどの接続点を含むため, 1 接続点の反射減衰量より低い値を示している. しかしすべての測定値が 40 dB 以上であることから全コアで PC 接続している事を確認した.

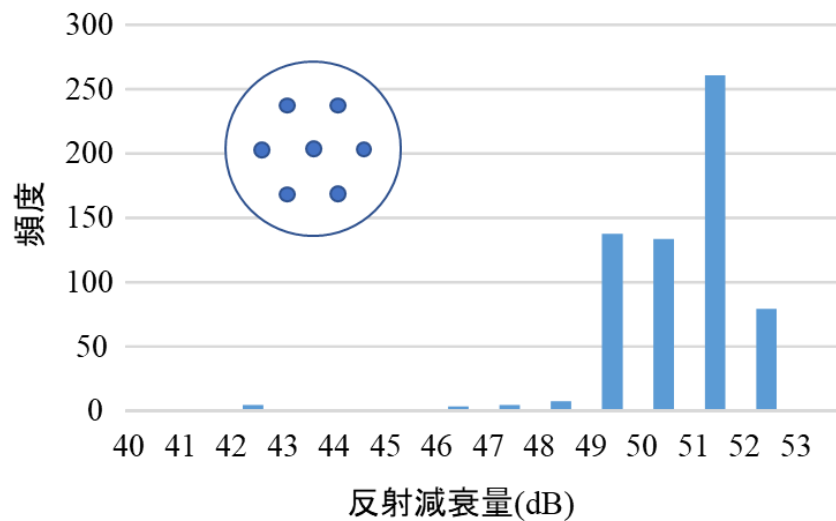


図 3.5.4 全コアの反射減衰量分布

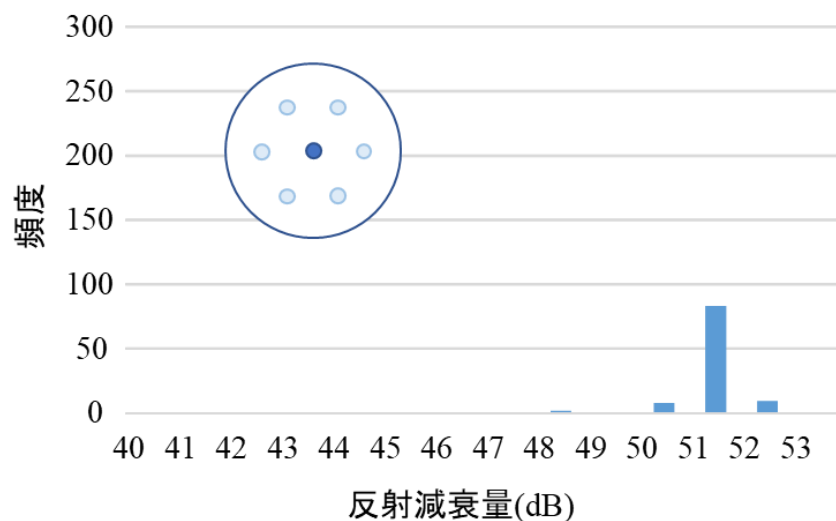


図 3.5.5 センターコア (Core ID 1) の反射減衰量分布

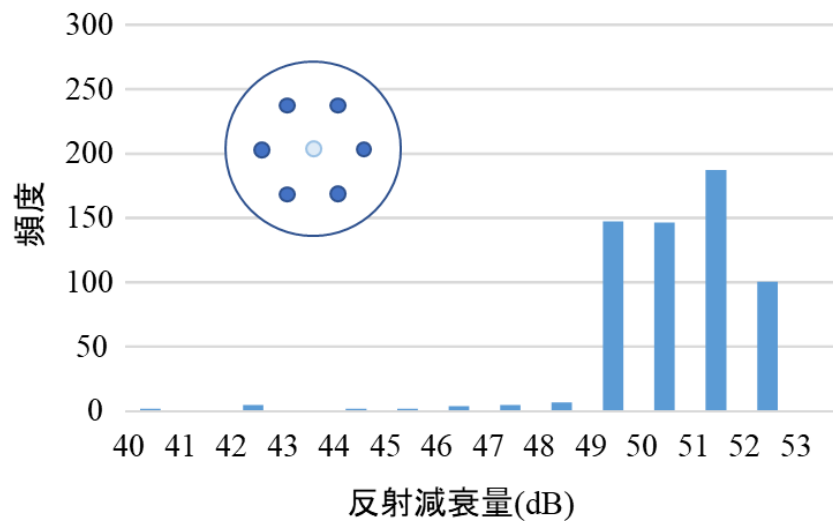


図 3.5.6 外周コア (Core ID 2-7) の反射減衰量分布

MCF コネクタの 1 接続点の反射減衰量を調べるため OLCR 法 (Optical Low Coherence Reflectometry) に準拠し測定を行なった. 1 接続点の反射減衰量測定結果の一例を表 3.5.1 に示す. MCF 全てのコアで 反射減衰量 50 dB 以上の値が得られた. 以上より全コアで PC 接続していることを確認することができ, 通常の SMF コネクタと同等の特性であることが確認できた.

表 3.5.1 1 接続点の反射減衰量測定結果の一例

Core ID	反射減衰量 (dB)
1	51.6
2	52.2
3	53.7
4	52.9
5	53.5
6	52.8
7	51.6

3) 接続点のクロストーク測定

クロストーク (XT) は第 1 章で説明したように, MCF の各コアから漏れた光が他コアに干渉し, 信号を劣化させる現象である. 一般的にクロストークはファイバ曲げなどにより発生するものであるが, MCF コネクタにおいては接続点の軸ずれが原因で一部のコアから光が漏洩し, その漏洩光が他コアに干渉することでクロストークが発生することが考えられた. そこで本研究では, MCF コネクタ接続点に起因するクロストーク発生の有無を確認するため, 複数の MCF コ

ネクタ接続点を有する測定系を構成し、各コアに光を入射したときの他コアの出射光強度を測定した。クロストーク測定の測定系を図 3.5.7 に示す。ファンアウト（ファンイン）を 2 個使用し、その間に両端 MCF コネクタ付コードを 5 個接続する。ファンイン（入射側）のいずれかの SMF コネクタ部分から光を入射し、ファンアウト（出射側）より、ファンインで入射したコア以外をパワーメータにて測定する。着脱回数は 5 回とし、各コアでの出射光強度の変動を調べた。

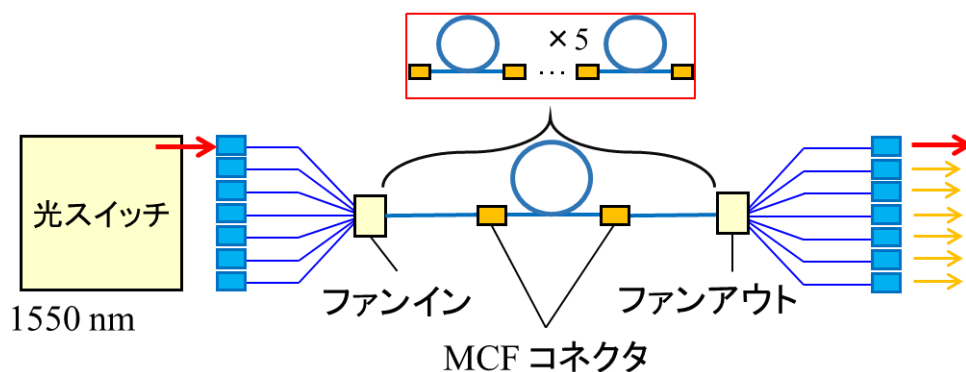


図 3.5.7 クロストークの測定系

クロストーク測定結果の一例を図 3.5.8 と図 3.5.9 に示す。ファンアウトには SMF と MCF を繋ぐための融着点や接着点があり、コア間で挿入損失にばらつきがあるため、各コア入射時のクロストークを正確に比較することはできない。しかしファンインとファンアウトの 2 種類を接続してもクロストークはすべての結果で 50 dB 以上であることから、ファイババンドル型ファンアウトの構造に問題はないと考えられる。入射から出射までの測定系全体の挿入損失は平均 0.27 dB、最大 0.47 dB であった。すべての MCF コネクタコードを接続した組み合わせでもクロストークは 50 dB 以上であった。

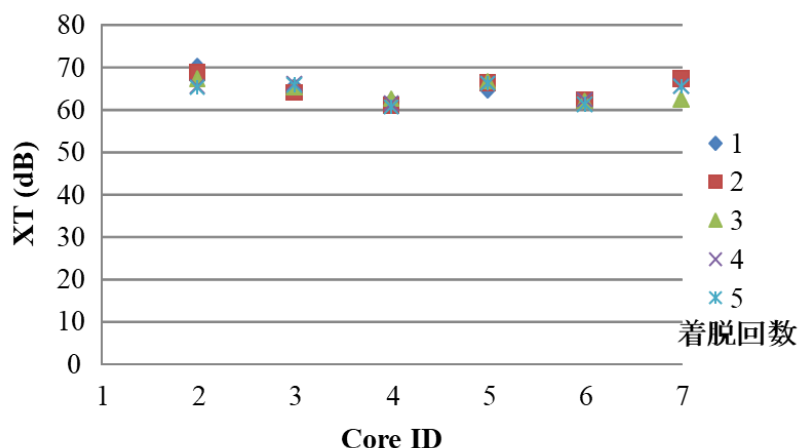


図 3.5.8 センターコア（Core ID 1）に入射したときの他コアの出射光強度

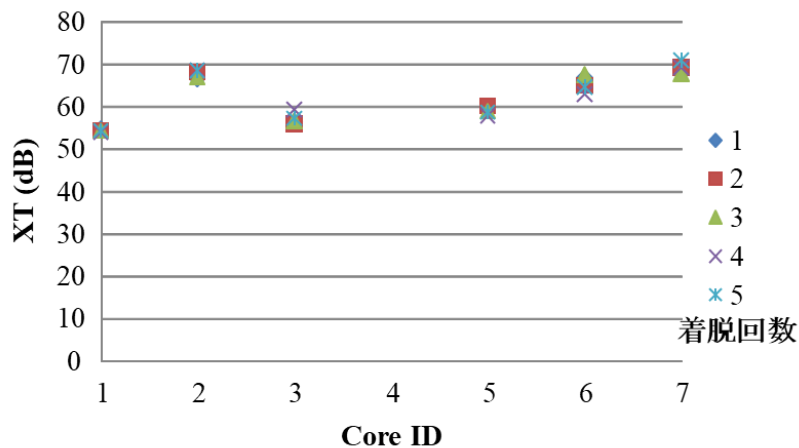


図 3.5.9 外周コア（Core ID 4）に入射したときの他コアの出射光強度

コネクタ接続点に起因するクロストークの主な要因は、MCF コア双方の軸ずれにより発生した漏洩光が次の接続点で再結合するためと考え測定を行なったが、測定結果より影響がないことがわかった。よって、比較的短距離に複数の接続点が存在する場合でもクロストークは実用上十分低いことを確認した。

3.6 機械特性評価

ここまでの特性評価より、オルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタは優れた光学特性を有していることを確認した。MCF に使用できる光コネクタの研究開発は本論文のオルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタ以外にも第 1 章内で説明したように、板ばねでフェルールを保持することで回転を抑制しフロート量を確保する弾性保持方式 MCF 用光コネクタ、アダプタ内部にレンズを介し空間結合（光学結合）により接続するレンズ結合方式 MCF コネクタ、フェルールに V 溝を設け割りスリーブ内部にキーを配置しそれらを接続することで、組み合わせフェルール回転を抑制する構造などが提案されている。いずれの構造も優れた光学特性が報告されているが、IEC や JIS で規定されている機械特性を満たしたという報告はされていない。

光コネクタはどのような環境下においても、常に安定した光学特性が要求される。今後、MCF が光通信ネットワークを構築した場合、MCF コネクタは様々な場所で使用されることが想定される。そこでオルダム・カップリング構造 MCF コネクタの信頼性を評価するため、機械特性の測定を行った。測定する機械特性は、フェルールフロート構造有効性を確認するために繰り返し着脱試験、振動試験、衝撃試験、引っ張り試験であり、また MCF の可逆的引き込みを確認するため温度サイクル試験を行った。

1) 繰り返し着脱試験

光コネクタは容易に着脱ができ、且つ良好な光学特性が常に発揮できる再現性が求められる。そこで MCF コネクタの繰り返し再現性を確認するため、IEC 61753-1 Category U (Fiber optic interconnecting devices and passive components - Performance standard - Part 1-3: General and guidance for single-mode fiber optic connector and cable assembly for industrial environment, Category U) に基づき、接続損失測定 of 繰り返し着脱試験を行なった。着脱回数は 500 回、10 回毎に 7 コア全ての接続損失を測定し、いずれかのコアの測定値が大きく変動した場合に、コネクタ端面の清掃を OPTIPOP クリーナで行なうことを条件とした。測定系はランダム接続試験と同じである。

繰り返し着脱測定結果の一例を図 3.6.1 に示す。着脱回数 300 回付近で 0.2 dB 以上の損失変動が確認できたので着脱の際にコネクタ端面をクリーナで清掃し試験を再開した。端面清掃後は損失の大きな変動は確認できなかった。MCF コネクタの全コアにおいて、試験中の損失変動は 0.2 dB 以下であった。また 500 回すべての過程で接続損失 0.3 dB 以下の値を得ることができた。この結果より、開発した MCF コネクタは IEC 61753-1 Category U の基準を満たしており、これは通常の SMF コネクタに匹敵する光学特性である。

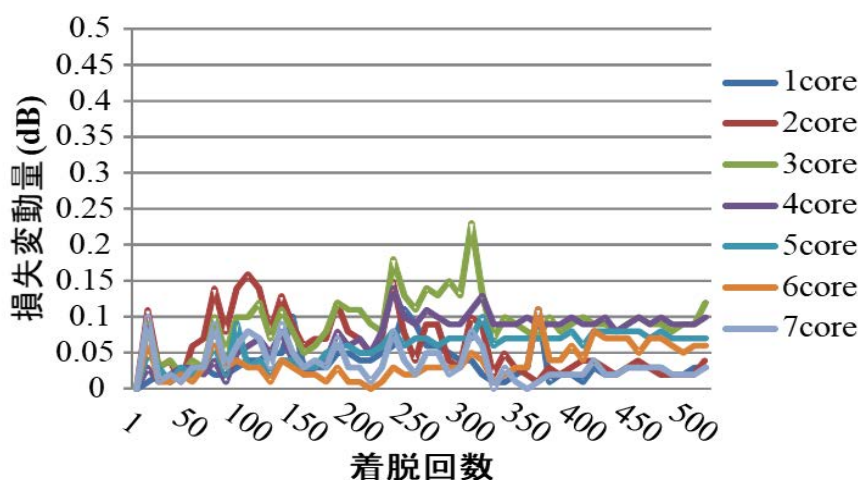


図 3.6.1 500 回繰り返し着脱試験結果の一例

2) 振動試験

機械特性評価試験に使用した MCF コネクタを、試験方向の定義とともに図 3.6.2 に示す。機械特性評価試験で使用する MCF コネクタには外径 0.9 mm のナイロン被覆した MCF 芯線をケブラと共に、外径 1.7 mm の PVC 被覆でコード化したものを用いた。このコードは SMF コネクタに使用されているものと同じである。

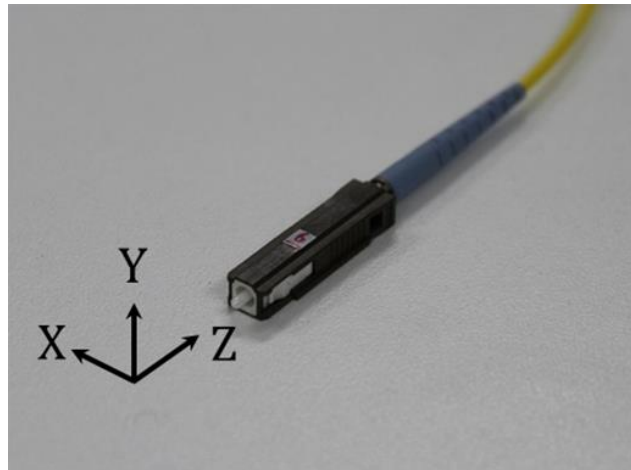


図 3.6.2 MCF コネクタの外観と試験方向の関係

IEC 61753-1 Category O (Fiber optic interconnecting devices and passive components - Performance standard - Part 1-3: General and guidance for single-mode fiber optic connector and cable assembly for industrial environment, Category O) に準拠し、コネクタ接続点における振動試験を行った。振動試験機の外観と振動試験の測定系を図 3.6.3 と図 3.6.4 に示す。振動は 10~55 Hz, 全振幅 1.5 mm を条件とし、コネクタ接続点 3 方向それぞれに 2 時間の振動を加えて測定を行なった。振動を与えていない状態での接続損失を基準とし、そこから振動を与え損失変動量をモニタする。IEC の規格では試験中の損失変動については定められていないが、オルダム・カップリングによるフローティング構造の有効性を確認する為に、試験中の全ポートの変動をモニタした。また試験後に着脱試験を 5 回行い、損失変動の有無を確認した。

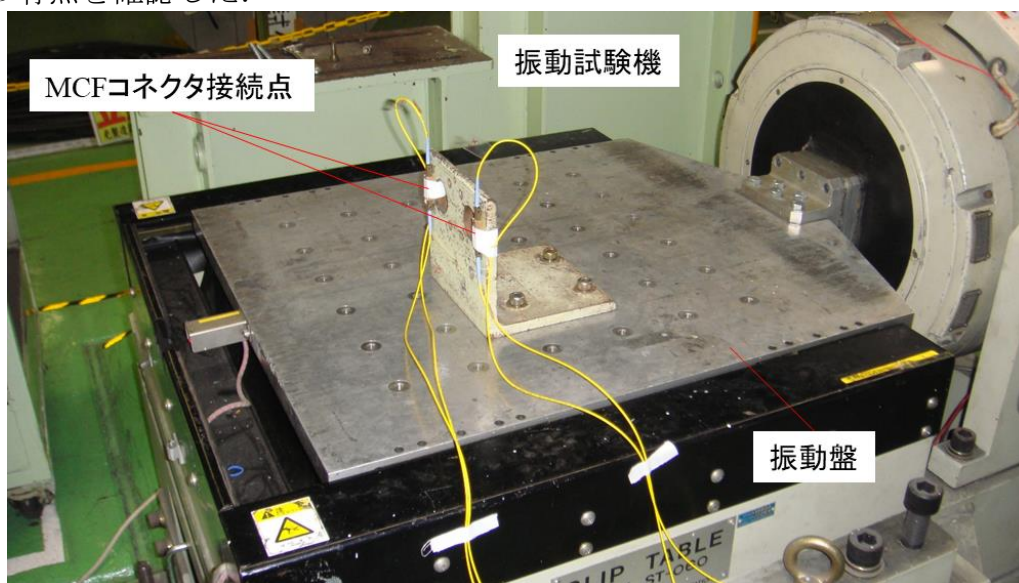


図 3.6.3 振動試験機の外観

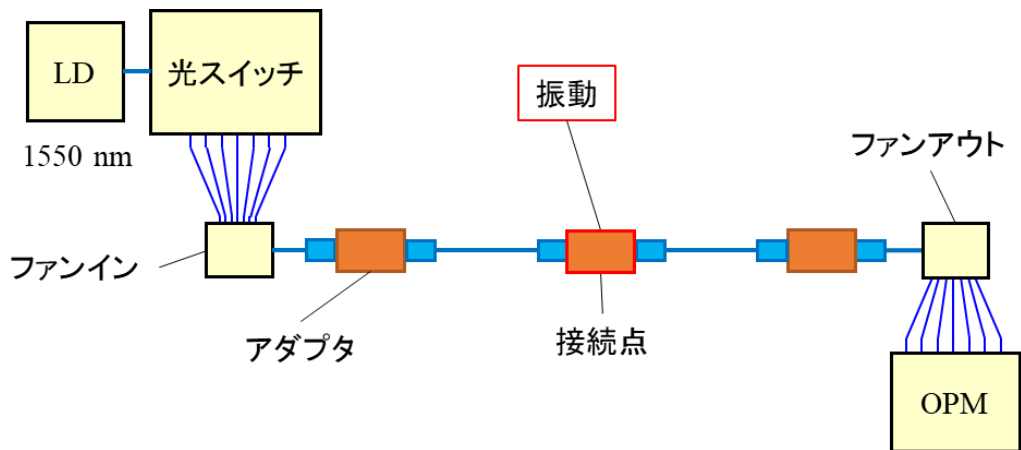


図 3.6.4 振動試験の測定系

振動試験の測定結果の一例を図 3.6.5 に、振動試験後の着脱試験結果を図 3.6.6 に示す。

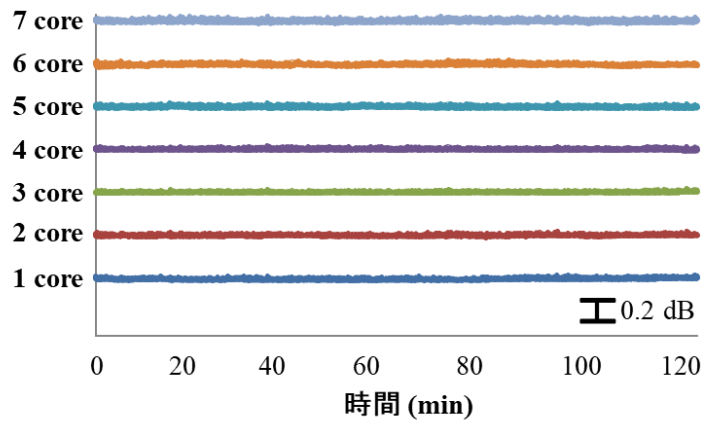


図 3.6.5 振動試験測定結果の一例

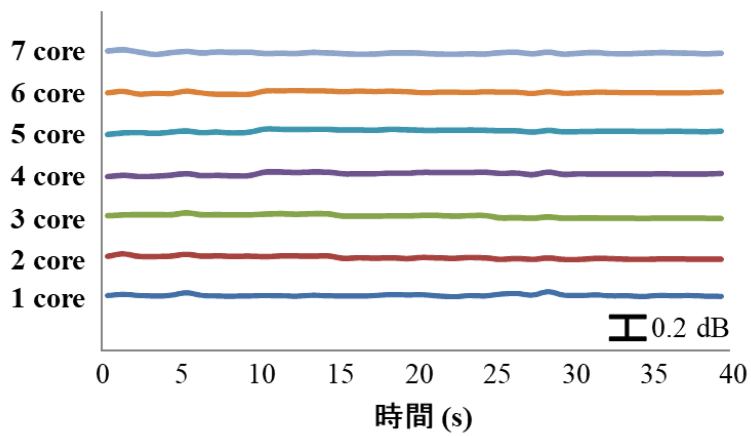


図 3.6.6 振動試験後の着脱試験結果の一例

振動試験中，前後における変動の最大値はそれぞれ 0.09 dB，0.08 dB であり，全ての方向の振動に対して安定した特性を維持できることを確認した．また振動試験後の着脱試験でも 0.1 dB 以上の損失変動は確認できなかった．

3) 衝撃試験

次に衝撃試験についての特性評価を行った．光コネクタ全般の耐衝撃性に関する IEC の規格は落下試験であるが，地震が頻繁に発生する日本では JIS（日本工業規格）により，光コネクタそれぞれに衝撃試験としてより詳しく規定されている．よって IEC 規格ではなく MU 形光コネクタが規定されている JIS C 5983 に基づき衝撃試験を行った．衝撃試験機の外観を図 3.6.7 に示す．

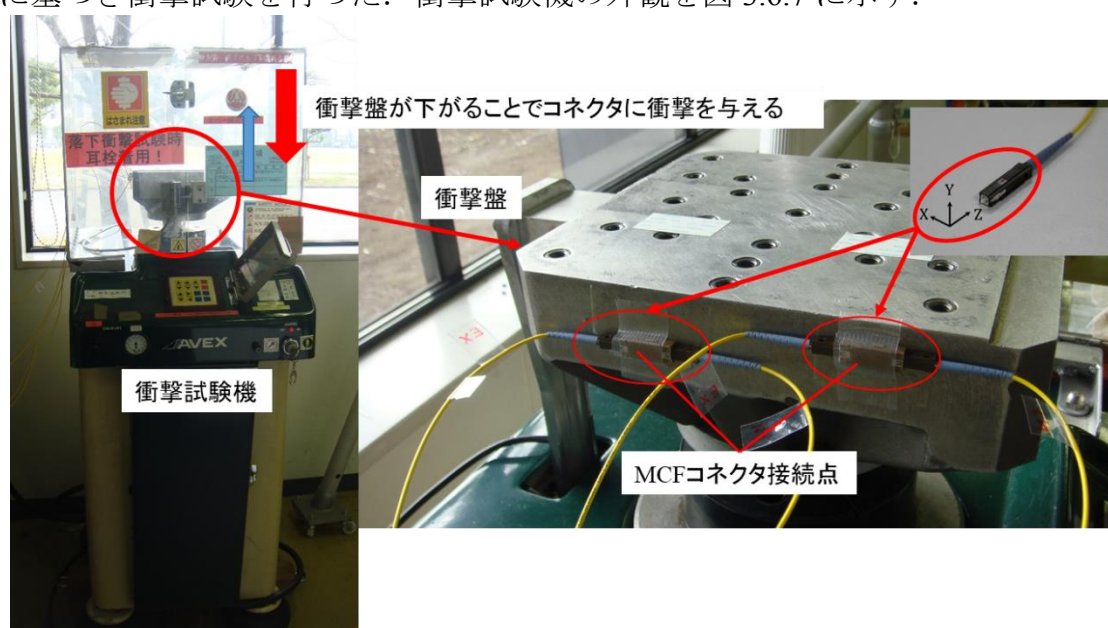


図 3.6.7 衝撃試験機の外観

試験条件として 100 G，作用時間 6 ms の衝撃を X 方向，Y 方向，Z 方向の 3 方向それぞれに行なった．なお測定回数は 10 回とした．衝撃試験の測定系は図 3.6.3 の振動試験と同じ系である．試験後は振動試験と同じく着脱試験を 5 回行い，損失変動の有無を確認した．

衝撃試験結果の一例を図 3.6.8 に，衝撃試験後の着脱試験結果を図 3.6.9 に示す．図中の点線は衝撃が作用した個所を示している．各方向 10 回の衝撃を通して，試験中，前後における変動の最大値はそれぞれ 0.10 dB，0.07 dB であり良好な耐衝撃性を確認することができた．また衝撃試験後の着脱試験でも 0.1 dB 以上の損失変動は確認できなかった．

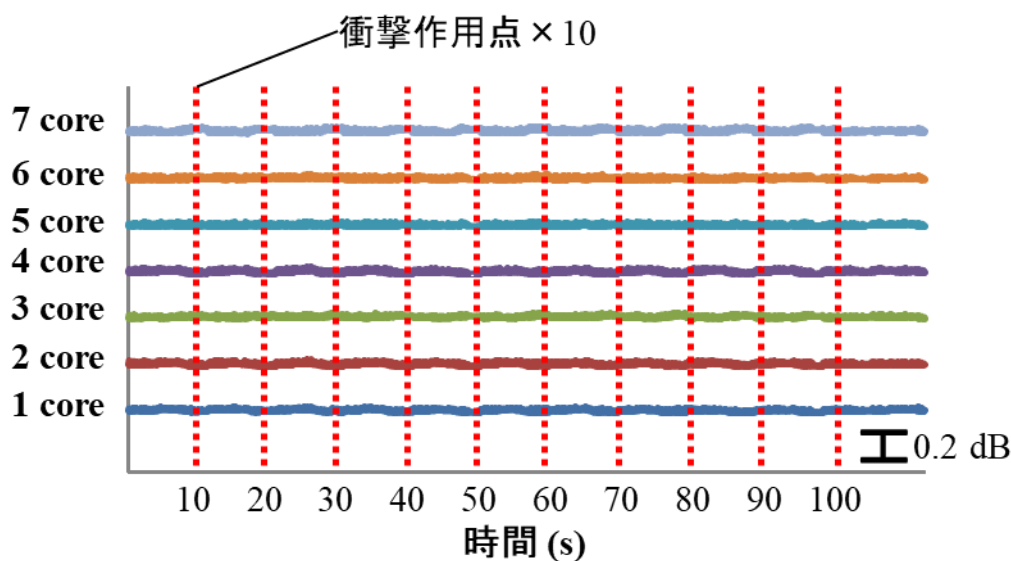


図 3.6.8 衝撃試験測定結果の一例

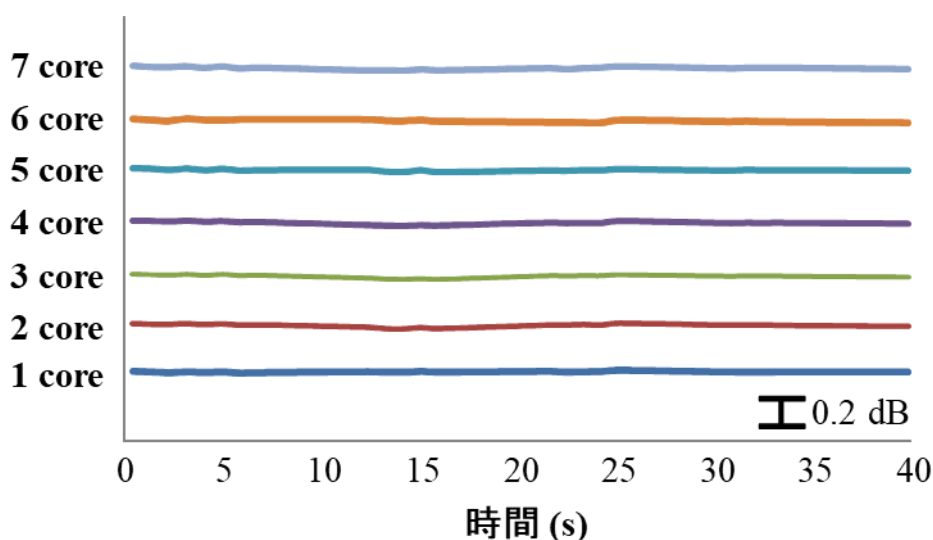


図 3.6.9 衝撃試験後の着脱試験結果の一例

4) 引っ張り試験

MCF コネクタのブーツ部分に重りを与え、引っ張り方向 0° (Z) 及び 90° (X, Y) について試験を行なった。引っ張り試験の測定系を図 3.6.10 に示す。引っ張り荷重 0 N 時の損失を 0 dB とし、そこから引っ張り荷重を与え変動した損失との差をとって損失としている。IEC に規定されている引っ張り荷重は通常 2.4~19.6 N であるが、MU 形コネクタは SFF に分類されるため規定荷重の $2/3$ の値が基準となる。本試験では基準値の $2/3$ である 1.6~13.1 N で試験を行い損失変動の傾向を調べた。

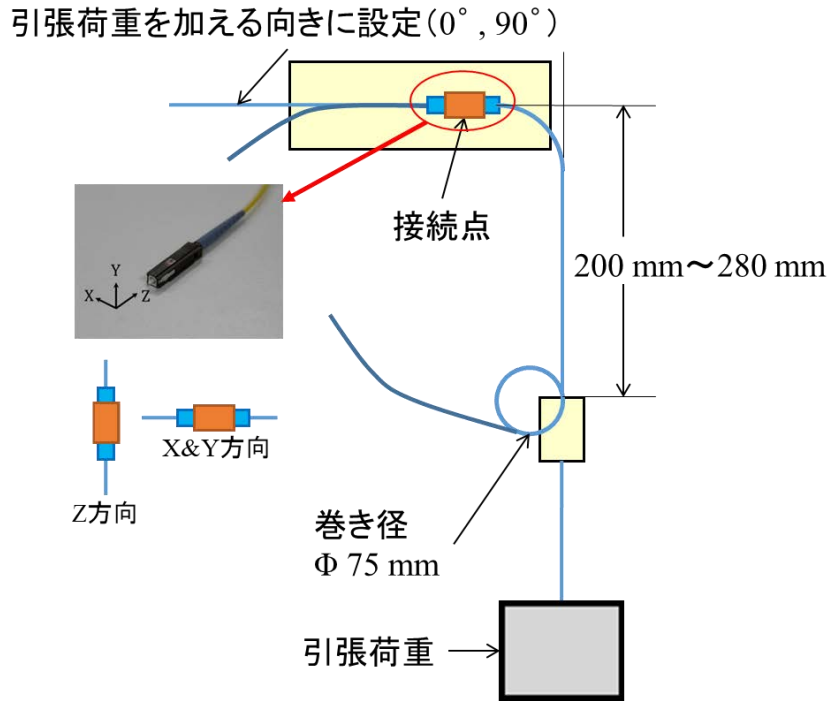


図 3.6.10 引っ張り試験の測定系

引っ張り試験結果の一例を図 3.6.11 と図 3.6.12 に示す。Z 方向においてはほとんど損失の変動が確認できず、X と Y 方向においては最大荷重 13.1 N での損失増加は 0.2 dB 以下であった。測定結果より全方向において大きな損失変動は見られなかった。また引っ張り試験を繰り返し行なっても損失変動量は 0.2 dB 以下であったことから、引っ張り荷重が作用しているような状態であっても、オルダム・カップリング構造においてフェルールのフロート構造が確保されていることを確認した。

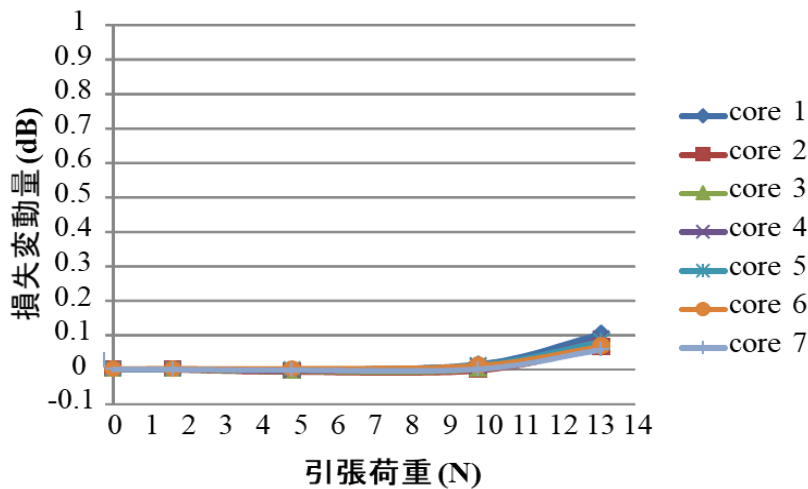


図 3.6.11 引っ張り試験結果の一例 (X 方向)

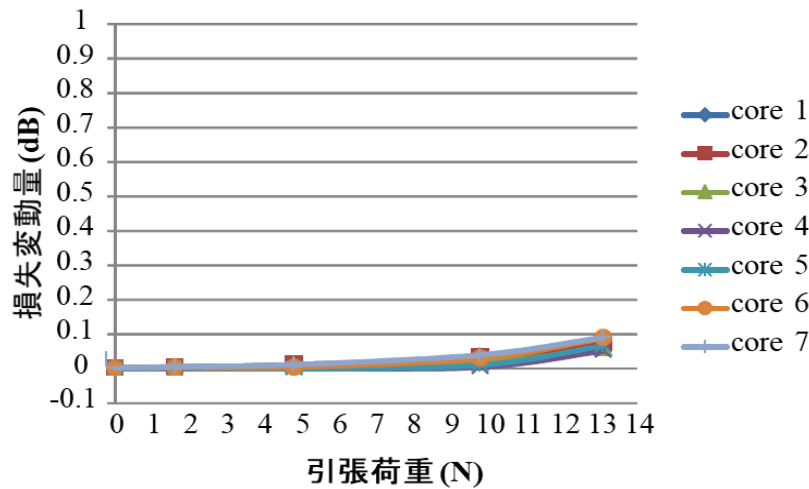


図 3.6.12 引っ張り試験結果の一例 (Y 方向)

5) 温度サイクル試験

光コネクタに使用されるフェルールはファイバを固定するためにエポキシ系接着剤を使用している。この接着剤はフェルールやファイバよりも温度変化による変形を引き起こしやすい。接着剤が温度変化によって変形してしまうと、その変形に伴いファイバがフェルールに対して引き込んでしまう現象が発生する。このファイバ引き込み現象は接続されているファイバ双方の間に隙間を設けてしまい光学特性の劣化要因となりえる。使用している MCF のクラッド径は $180\ \mu\text{m}$ であり、一般的な SMF のクラッド径より大きいことから接着剤の接触面積も大きくなっており、温度変化によるファイバの可逆的な引き込みが発生しやすいことが考えられる。よって MCF コネクタの接続点において、温度サイクル試験を行った。測定系は図 3.6.3 と同じ系であり、MCF コネクタの接続点に $-10\sim 60\ ^\circ\text{C}$ の温度を 140 時間与え損失の変動を調べた。

温度サイクル試験結果の一例を図 3.6.13 に示す。測定結果より、損失の変動量は $\pm 0.1\ \text{dB}$ 以内に収まっていることを確認した。損失の変動量が非常に小さいことから、温度変化に起因するファイバ引き込み現象は発生しておらず、故にコネクタ接続点における PC 外れは発生していないと考えられる。

測定したすべての機械特性で損失変動量が $0.2\ \text{dB}$ 以下であり、また繰り返し着脱を行っても安定した光学特性を維持していることを確認した。これらの機械特性評価より、オルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタであってもフェールのフロート構造が常に有効であり、損失の変動が IEC や JIS に規定値内に収まっていることを確認した。

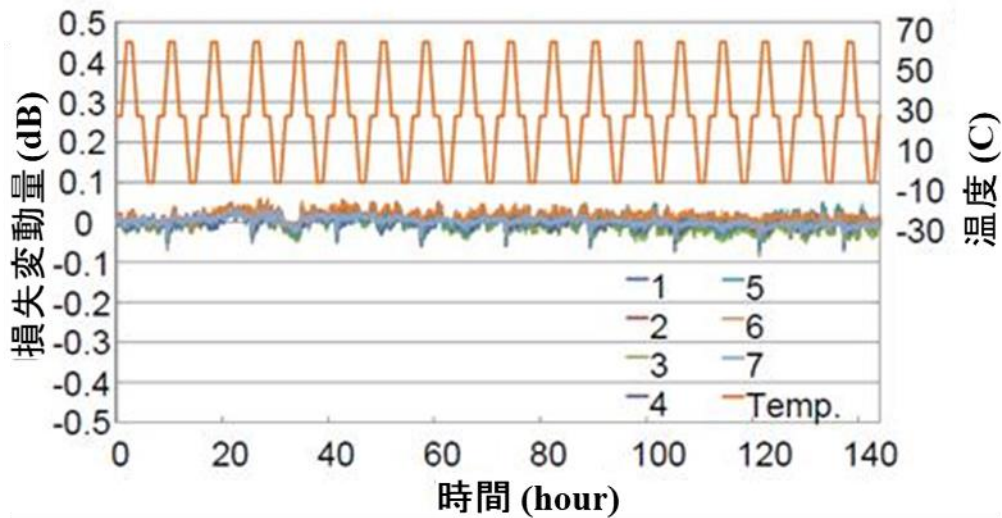


図 3.6.13 温度サイクル試験結果の一例

3.7 MCF コネクタの APC 化について

一般的な光コネクタに要求される反射減衰量は 50 dB 以上であるが、より高い反射減衰量が要求される接続点にはフェルル端面を斜めに研磨した APC 光コネクタが使われる。PC 接続と APC 接続について、また APC の原理の概略図を図 3.7.1 に示す。

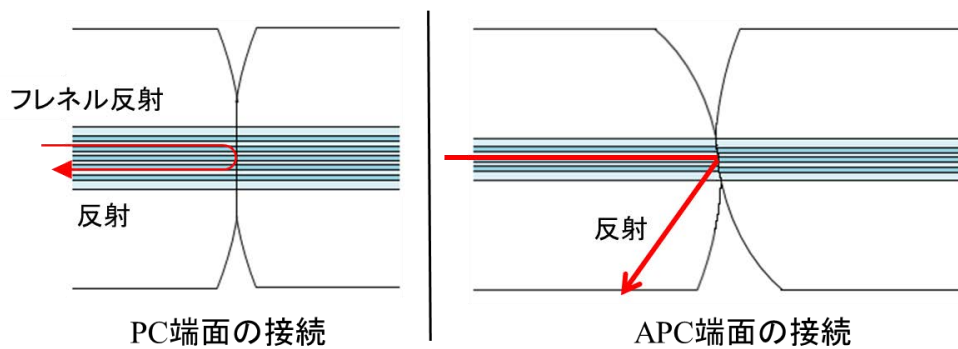


図 3.7.1 PC 接続と APC 接続について

フェルル端面を凸球面状に研磨した通常の PC 端面は加工変質層の影響でわずかな反射が発生する。APC 端面はフェルルを斜めに凸球面研磨することにより加工変質層による反射戻り光をクラッドモードに逃がすことにより、反射減衰量を 60 dB 以上、解放時は 55 dB 以上を得ることができる。APC コネクタは主に測定系内の接続点や MMF を使用したアナログ伝送に使用される。今後、MCF の接続点に高い反射減衰量が要求された場合、それらを満たすためには MCF コネクタの APC 化が考えられる。よって開発した MCF コネクタの端面に

APC 研磨を施した APC-MCF コネクタを試作し光学特性を評価した。

PC 端面のコネクタはフェルルール端面の頂点ずれがファイバ引き込みに換算されるが、APC コネクタはそれに加え、斜めに研磨されたフェルルール双方を接続するため、フェルルールの回転、すなわち軸回りの角度ずれもファイバ引込みに相当する。よって APC でファイバ端面の接触を安定に保つためには一般に端面曲率半径を小さく研磨し、頂点ずれの影響を小さくする必要がある。そのため PC 端面の曲率半径は 5~30 mm が設計値であるが、APC 端面の曲率半径は 5~12.5 mm となる。一方、MCF はクラッド中心以外すべてのコアが安定して PC 接続できるよう、曲率半径は設計値内に収まる範囲で大きい方が望ましいと考えられる。よって MCF コネクタに APC 端面の条件を適用した場合、全コアで PC 接続させることが困難である。

MCF フェルルールの曲率半径を小さくすると外周コアの接触条件が厳しくなることが予想されるが、軸回り角度ずれが小さければ曲率半径を大きくしても APC 接続できる可能性がある。本研究ではフェルルールの角度ずれを抑えるためにオルダム・カップリング構造を採用しているため、APC 端面の曲率半径を大きくしても全コアで PC 接続が可能であると考えられる。そこで MCF コネクタの端面を APC 化し、それらを接続して反射減衰量を測定する。APC 形 MCF コネクタのフェルルール端面概略図を図 3.7.2 に示す。

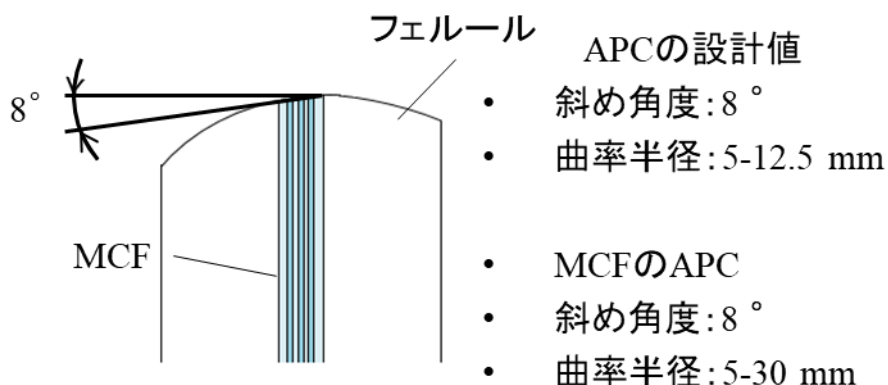


図 3.7.2 APC 形 MCF コネクタのフェルルール端面概略図

MCF の APC について、曲率半径を通常の PC 端面と同じ値で設計した。またその他のパラメータについては MCF の研磨条件についてはまだ最適化されていないため SMF の条件をそのまま使用した。

APC コネクタは反射戻り光をクラッドモードで逃がしてしまうため反射減衰量を正確に測定するのは困難である。そこで PC 接続の確認方法としてエタノール滴下試験を行った。APC 形 MCF コネクタの PC 接続確認方法について図 3.7.3

に示す。APC 形 MCF コネクタの接続点であるアダプタに穴を空け、その穴からエタノールを滴下する。フェルルル双方の間に隙間が存在するとエタノールが浸透して接続損失に影響を及ぼすため、損失の変動を調べ PC 接続の有無を調べた。測定系は接続損失測定（対マスタ法）と同じ系である。

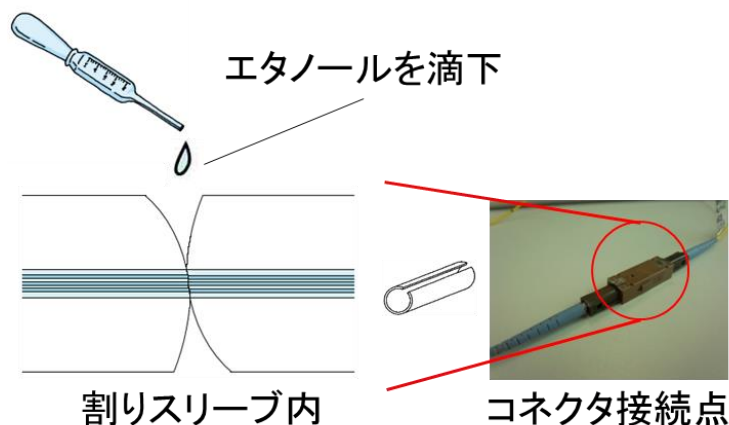


図 3.7.3 APC 形 MCF コネクタの PC 接続確認方法について

まず始めに APC 形 MCF コネクタの接続損失を測定した。サンプルは片側 APC の MCF コネクタを複数本作成しランダムで組み合わせ損失を測定した。測定結果を図 3.7.4 に示す。図中の赤いグラフはセンターコアを示しており、それ以外は外周コアを示している。測定結果より、平均損失 0.23 dB、最大損失は 0.84 dB であった。通常の PC 端面の接続損失と比較し若干大きい接続損失分布となった。APC コネクタ接続損失のばらつきについては 5 章で詳しく説明する。

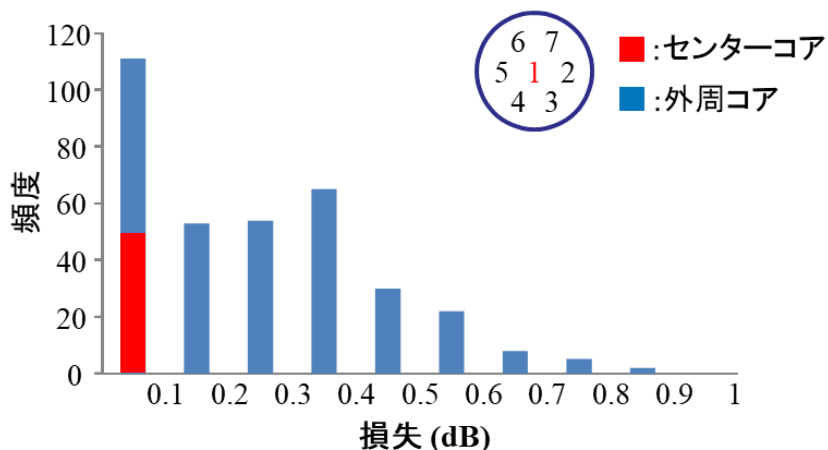


図 3.7.4 APC 形 MCF コネクタの接続損失測定結果

次にエタノール滴下試験を行った。試験結果を図 3.7.5 に示す。エタノールを滴下前は青いグラフ、滴下後は赤いグラフで示している。エタノールを滴下前と

滴下後で損失の変動量は 0.05 dB 以下であった。損失の変動量が確認できなかったことから、作成した APC 形 MCF コネクタは双方を接続しても全コアで PC 接続されていると考えられる。これらの結果から、本研究で開発したオルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタは曲率半径を PC 端面の設計値で設計しても APC 化できることが確認できた。

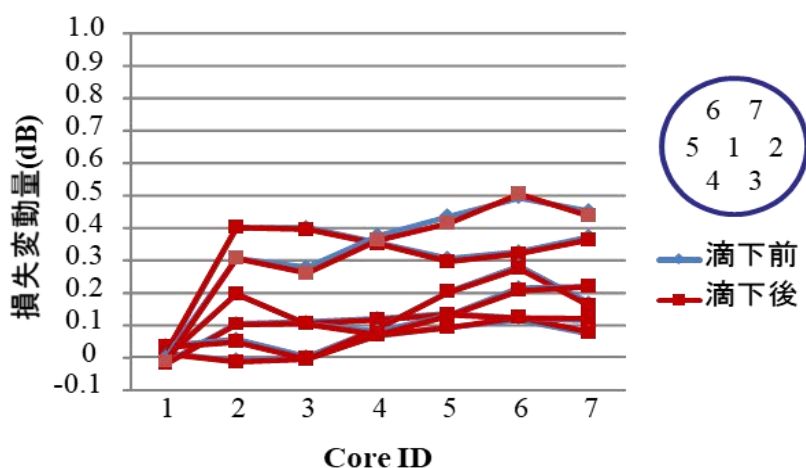


図 3.7.5 APC 形 MCF コネクタのエタノール滴下試験結果の一例

3.8 MCF コネクタの設計手法確立

オルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタの特性改善や安定した製造を実現するには、コネクタ双方を接続したときに発生する接続損失の要因を明らかにし、設計の妥当性を検証する必要がある。本研究で検討した MCF コネクタは、外力が均等に分散する左右対称構造、光トランシーバに使用することができるという条件の基、既存の MU 形コネクタ(IEC 61754-6)をベースとしているため支配的な接続損失発生要因はフェルール及びそこに取り付けられた MCF の軸ずれ及び回転ずれのみと考えられる。しかしフェルールのフランジ部分にオルダム・カップリング構造を採用し内部寸法を変更しているため、フロート構造が機能しない場合の損失発生要因も可能性として考えられる。ここまでの光学特性評価と機械特性評価より、オルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタは光学特性、機械特性共に実用レベルの結果であるといえるが、コネクタ内部でフェルールが有効にフロートしているかを今までの実験結果のみで判断することは難しい。そこで MCF コネクタの接続損失発生要因を明らかにするため、ランダム接続損失測定の実験結果に基づき、軸ずれと角度ずれのみを条件として与えたモンテカルロシミュレーションを行い、両方の結果を比較することにより、接続損失発生要因の特定を試みた。

光コネクタを用いたファイバの接続損失発生要因は外的要因と内的要因に分

けられる。外的要因としては、軸ずれ、端面間ギャップおよび角度ずれの3点
 が、内的要因としてはコアの偏心、外形寸法のバラつき、スポットサイズ不整合
 などがあげられる。本研究のMCFコネクタは全コアPC接続が確認されている
 こと、ジルコニアフェルールと割スリーブを用いたコネクタ接続ではファイバ
 傾きによる損失を無視できること、また同じロットのMCFを使用していること
 から軸ずれ以外の要因は無視できると考え、軸ずれのみを損失発生条件に与え
 たシミュレーションを行った。

SMFの接続損失は軸ずれのみが支配的要因であるが、MCFの軸ずれは3つの
 要因に切り分けることができる。軸ずれと総軸ずれについて図3.8.1に示す。セ
 ンターコアの場合、MCFはSMFと同じクラッド中心に配置されているため接
 続損失の支配的要因は軸ずれのみである。しかし外周コアの接続損失は、MCF
 の軸ずれ以外に、フェルールの回転（角度ずれ）及び軸ずれの方向にも影響を受
 ける。よってMCFの接続損失は軸ずれと角度ずれ及び軸ずれの方向に依存する。
 本論文ではこの軸ずれと角度ずれ及び軸ずれの方向を総軸ずれと定義した。

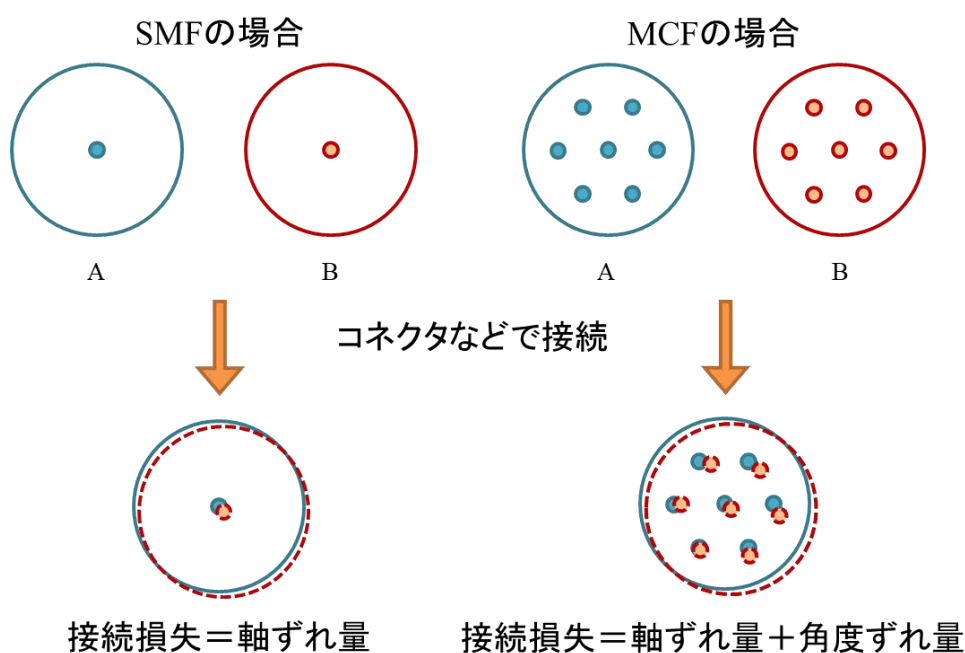


図 3.8.1 軸ずれと総軸ずれについて

接続した光ファイバのコア軸ずれ量を直接測定することは困難であるが、測
 定した接続損失からマルクーゼの理論式(3.2.1)を用いて逆算することにより求
 めることができる(pp.47を参照)。ランダム接続損失測定試験より得られたMCF
 センターコアの平均損失を使用して式(3.2.1)で計算することにより、MCFコネ
 クタを接続した際の平均軸ずれ量を求めることができる。

センターコアの接続損失はファイバの軸ずれ量のみ依存するが、外周コアの接続損失は軸ずれ量と角度ずれ量及び軸ずれ方向のすべてを合わせた総軸ずれ量に依存する。そこで総軸ずれ量を X 成分と Y 成分に分解し、センターコアを基準に外周コアの座標を角度成分で表すことにより、外周コアの総軸ずれ量を求めた。外周コアの ID を N (Core ID=2~7) とすると、外周コアの基準座標は式(3.8.2)で表すことができる。 (a : MCF のコア間隔, $\theta_{\text{core}N}$: 外周コアの設計配置角度)

$$\text{Core } N(a \cos \theta_{\text{core}N}, a \sin \theta_{\text{core}N}) \cdots (3.8.2)$$

式(3.8.2)を元に軸ずれ量, 角度ずれ量, 軸ずれ方向を与えることで最終的なコアの座標を式(3.8.3)で表すことができる。 (d_1 : 軸ずれ量, θ_2 : 角度ずれ量, θ_3 : 軸ずれ方向)

$$\text{Core } N \left(\begin{array}{l} a \cos \theta_{\text{core}N} \cos \theta_2 - a \sin \theta_{\text{core}N} \sin \theta_2 + d_1 \sin \theta_3, \\ a \cos \theta_{\text{core}N} \sin \theta_2 + a \sin \theta_{\text{core}N} \cos \theta_2 + d_1 \sin \theta_3 \end{array} \right) \cdots (3.8.3)$$

以上より、式(3.8.2)と式(3.8.3)を使用することで MCF 外周コアの総軸ずれ量は式(3.8.4)で表すことができる。 ($d_{\text{core}N}$: 各外周コアの最終的な総軸ずれ量)

$$d_{\text{core}N} = \left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} a(\cos \theta_{\text{core}N} \cos \theta_2 - \sin \theta_{\text{core}N} \sin \theta_2) \\ + d_1 \cos \theta_3 - a \cos \theta_{\text{core}N} \end{array} \right\}^2 \\ + \left\{ \begin{array}{l} a(\cos \theta_{\text{core}N} \sin \theta_2 + \sin \theta_{\text{core}N} \cos \theta_2) \\ + d_1 \sin \theta_3 - a \sin \theta_{\text{core}N} \end{array} \right\}^2 \end{array} \right]^{\frac{1}{2}} \cdots (3.8.4)$$

これら計算式を使用することで測定したセンターコアの接続損失を基に、軸ずれ量と角度ずれ量を見積もる事が可能となり、コネクタ設計の妥当性 (各部材の寸法, クリアランス等) を検証する事が可能できると考えられる。

これらの計算式を使用してモンテカルロシミュレーションを行い、実測値との比較をした。シミュレーションの条件を表 3.8.1 に示す。シミュレーションに与える条件として、軸ずれ量はランダム接続試験結果 (センターコア: Core ID 1) の平均損失より $0.45 \mu\text{m}$, 角度ずれ量は角度ずれ量測定結果の標準偏差より 0.37° とした。またシミュレーションでは与えた条件外の値も含む, すなわち軸ずれ量と角度ずれ量のガウス分布に含まれる全ての値を使用して計算してしまう。実際にはガウス分布の 3σ 外の値は非常に低い確率で発生するものであり, MCF コネクタを製造する際には, これらの値は外れ値 (エラー値) と考えられ

使用されることはない。よってこれらのエラー値を排除するために排除値をそれぞれ設定した。排除軸ずれ量は一般的な SMF コネクタを考慮し $1.5\ \mu\text{m}$ ，排除角度ずれ量は実測値（角度ずれ量測定結果）より $\pm 0.5^\circ$ に設定した。実際のコネクタ接続では 2 つのコネクタ双方が総軸ずれを引き起こすと考えられるためシミュレーション条件として，接続された MCF 双方が与えられた条件内でランダムに総軸ずれを起こすように設定した。

表 3.8.1 モンテカルロシミュレーション条件

与える条件	値	排除値
計算数	70000	—
軸ずれ量（平均）	$0.45\ \mu\text{m}$	$1.5\ \mu\text{m}$
角度ずれ量（標準偏差）	0.37°	$\pm 0.50^\circ$

ランダム接続試験結果とモンテカルロシミュレーション結果を表 3.8.2 と図 3.8.2 に示す。試験結果とシミュレーション結果を比較したところ，平均損失，標準偏差共に値がよく一致している事がわかった。

表 3.8.2 ランダム接続試験結果とモンテカルロシミュレーション結果

	ランダム接続試験	シミュレーション
N	630	70000
Ave. (dB)	0.12	0.11
S.D. (dB)	0.11	0.11
< 0.5 dB (%)	99.05	99.02

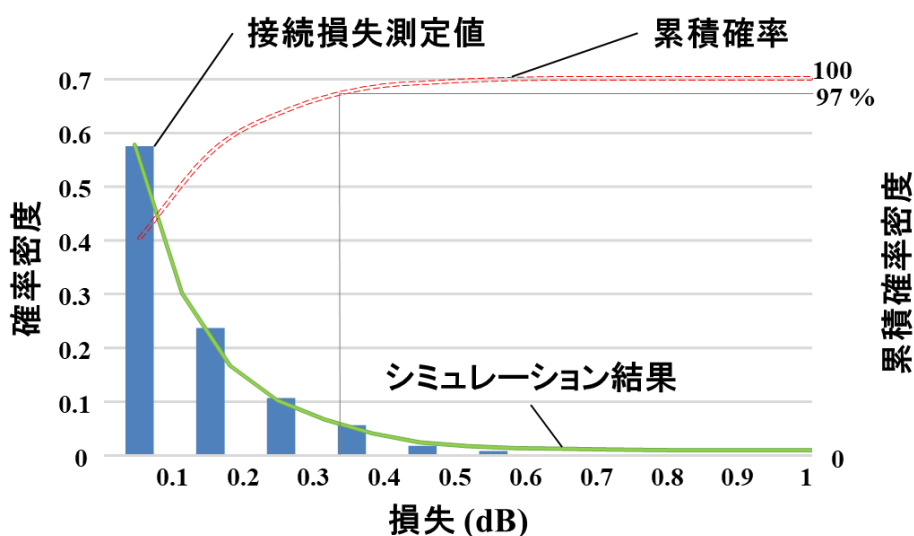


図 3.8.2 ランダム接続試験結果とモンテカルロシミュレーション結果

シミュレーション条件には総軸ずれ量のみを与えていることから、MCF コネクタの損失発生要因は総軸ずれのみと考えられ、その他の損失発生要因（コネクタ部材の弾性変形やオルダム・カップリング構造によるフェルールのフロート構造不備による傾きなど）が考えられないことから、オルダム・カップリング構造を採用したMCFのフェルールであってもフロート構造が有効に機能していることを確認できた。

機械特性評価より、コードなどに外力が作用しコネクタ部材が弾性変形している状況でもフェルールのフロート構造は有効に機能していることから、本構造のMCFコネクタの接続損失発生要因は如何なる状況であってもコアの総軸ずれ量のみ依存するといえる。以上のことから、接続損失発生要因を明らかにすることで、オルダム・カップリング構造MCFコネクタの設計手法を確立することができた。

3.9 コネクタ型ファイババンドルファンアウトの開発

MCF を実線路で使用する場合、MCF の各コアを SMF と繋ぐことのできるファンイン・ファンアウトは必要不可欠なデバイスである。本研究で使用しているファンアウトは 2 章内で紹介したファイババンドル型であり、これらの製造法によるファンアウトは低コストかつ良好な光学特性を有していることが報告されている²⁻⁴⁾。

MCF 伝送路を構築した場合、ファンアウトを置くスペースにより、SMF 伝送路と比較して空間利用効率（占有面積や体積や面積）が向上できない可能性がある。ファンアウト配置スペースに関する模式図を図 3.9.1 に示す。

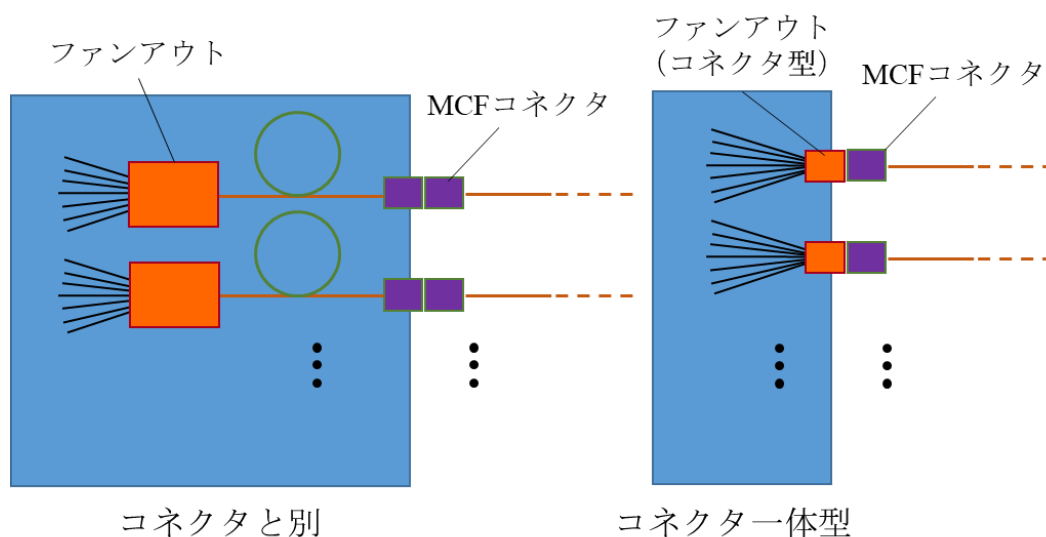


図 3.9.1 ファンアウト配置スペースに関する模式図

ファンアウトが使用される場所としては幹線・メトロで端曲装置やラック，アクセス系では局内架や架空クロージャなどが考えられる．その際，図 3.9.1 のようにファンアウトをコネクタ一体型にすれば，配線部を含めた省スペース化が可能となり空間利用効率向上に貢献できると考えた．よって本研究ではファンイン・ファンアウト機能を内蔵した MU 形 MCF コネクタについて検討した．本検討の内容は古川電気工業株式会社の渡辺，斎藤らにより報告されているものである⁵⁻⁶⁾．

1) MU コネクタ型 MCF ファンアウトの構造

ファイババンドルファンアウト (FBF) の概要を図 3.9.2 に示す．接続する MCF コア間隔と等しいクラッド径を有する細径ファイバを MCF のコア数だけ用意する．この細径ファイバを六方最密配置で束ねる (バンドルする) ことで，MCF と同じ構造の FBF が実現可能となる．この FBF と MCF を接続することで低損失なファンアウトが構成される．高精度な FBF を製造する方法については，接着剤の表面張力による細径ファイバの自己凝集を利用した配列方法が報告されている²⁾．

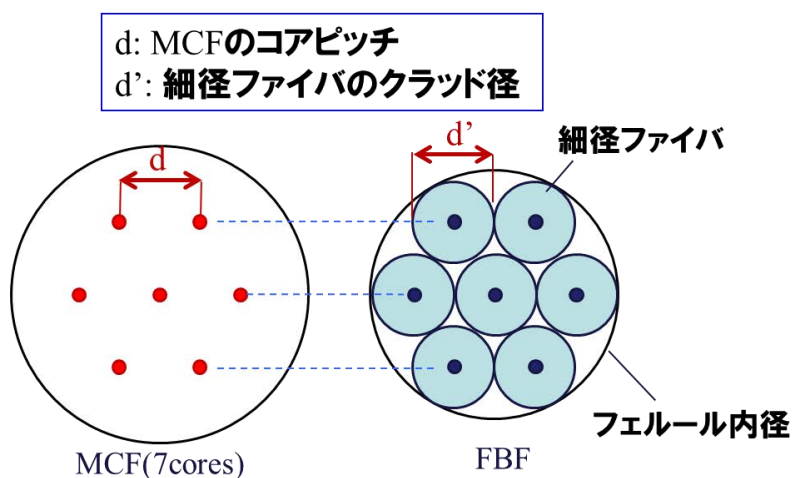


図 3.9.2 FBF の概略図

MU コネクタ型 MCF ファンアウトの構造概略図を図 3.9.3 に，作製方法を図 3.9.4 に示す．MCF を接着固定し FBF 接続面に研磨を施した MCF フェルール (キャピラリ) と FBF を調心し，接着剤でボンディングする．接着剤は屈折率が石英ガラスと整合したものを使用する．次に，MU フェールの端面側を研磨し，これを MU フェール金属部分の部品に圧入する．最後に MCF コネクタに使用したオルダム・カップリング構造に関する部品を組み合わせることでファンアウト機能を内蔵した MU 形 MCF コネクタを実現することができる．

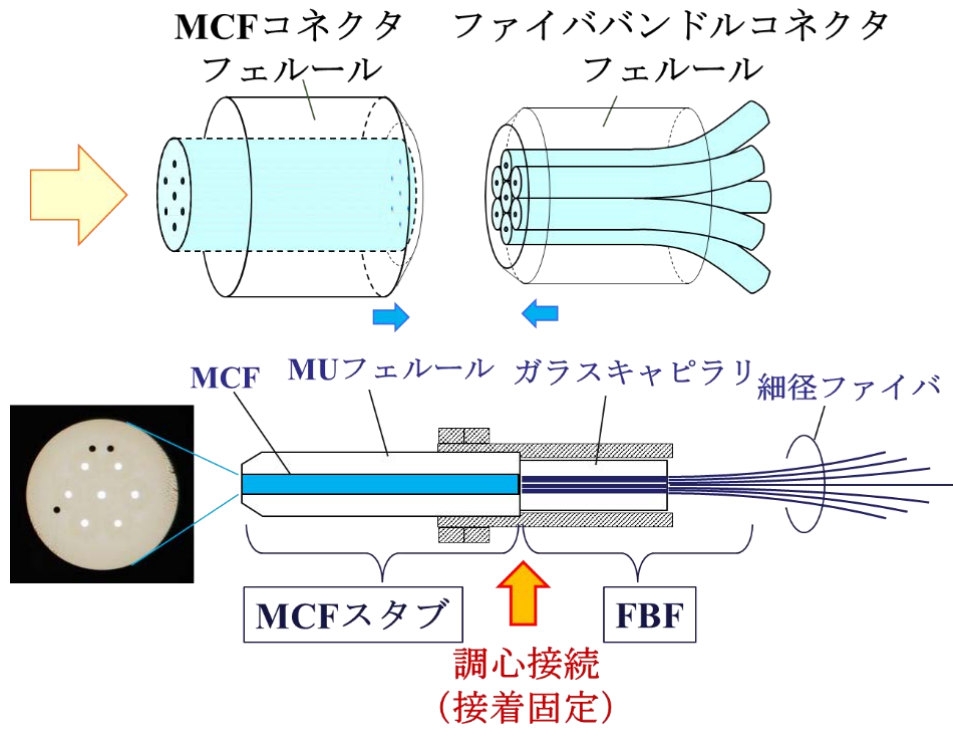


図 3.9.3 MU コネクタ型ファンアウトの構造

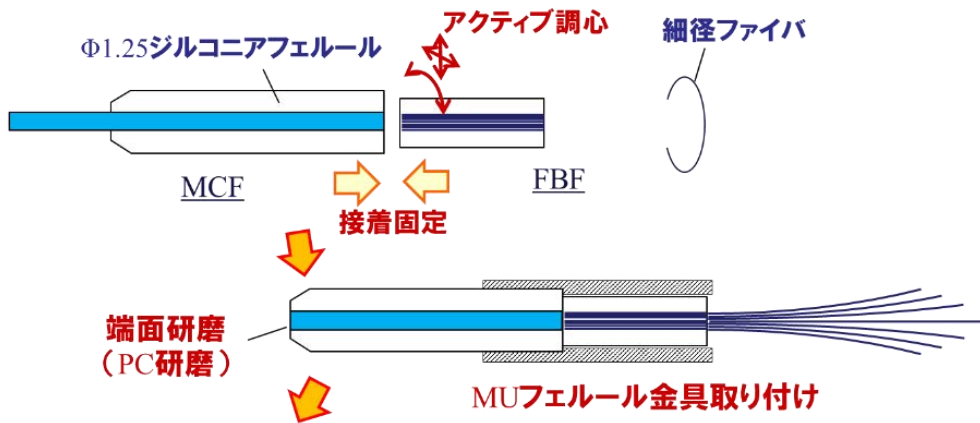


図 3.9.4 MU コネクタ型ファンアウトの作製方法

2) 光学特性評価

コネクタ型ファンアウトの接続損失測定を行った。はじめに全体損失を測定した。全体損失の測定系概略図を図 3.9.5 に示す。測定波長は 1550 nm とし、MU 形 MCF コネクタとコネクタ型ファンアウトを接続し、全体の損失を測定した。全体損失はコネクタ接続点, FBF ボンディング点, 細径ファイバ融着部を全て含んだものである。

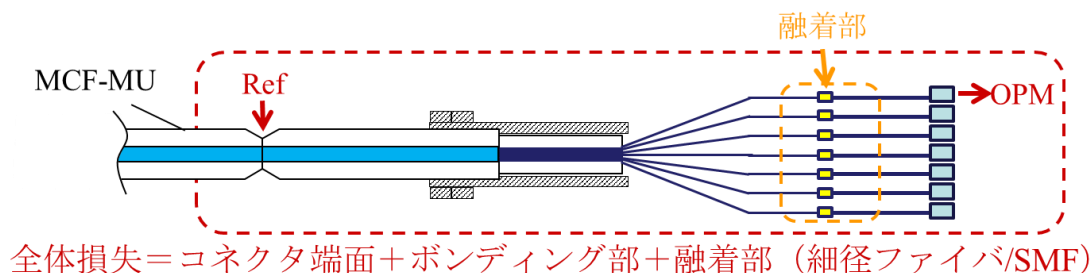


図 3.9.5 全体損失の測定系概略図

全体損失の測定結果の一例を図 3.9.6 に示す。赤線はファンアウト全体損失、黄線は融着損失を示している。ファンアウト全体損失は最大 1.09 dB、融着損失の最大は 0.6 dB 程度であった。次に融着損失を差し引いた損失について測定した。この損失はコネクタ損失と FBF ボンディング損失の合計であり、コネクタ型ファンアウトと MCF コネクタを接続した際の接続損失となる。コネクタ型ファンアウトの接続損失一例を図 3.9.7 に示す。緑線はコネクタの接続点、青線は FBF ボンディング部分、赤線は接続損失を示している。接続損失の最大は 0.6 dB 以下であり、良好な特性であることを確認した。

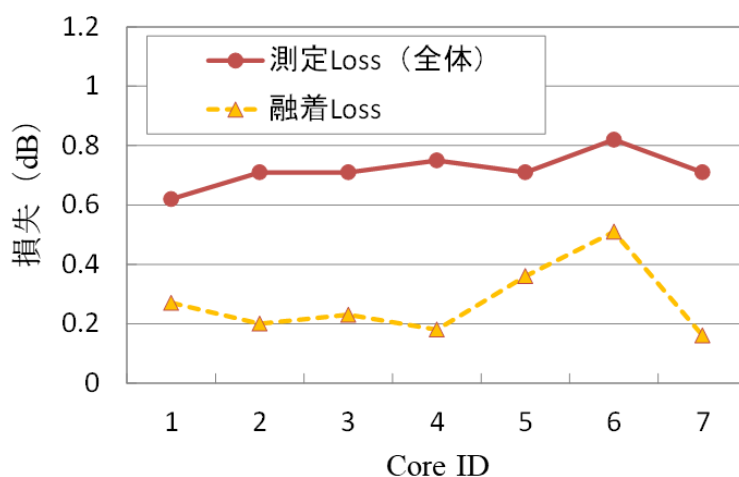


図 3.9.6 コネクタ型ファンアウトの全体損失の一例

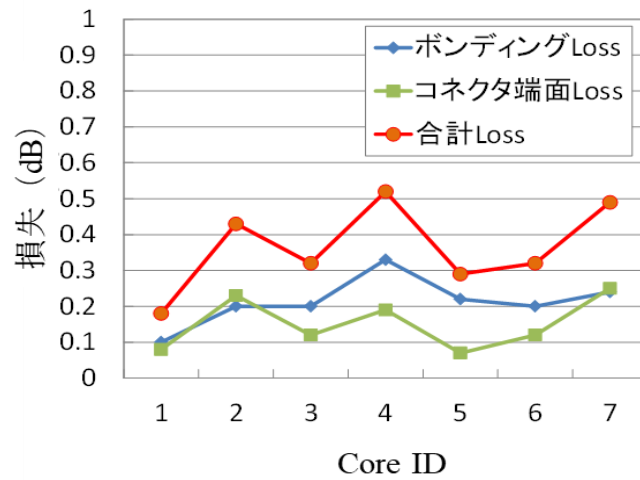


図 3.9.7 コネクタ型ファンアウトの接続損失の一例

コネクタ型ファンアウトの反射減衰量を測定した。反射減衰量の測定系を図 3.9.8 に示す。反射減衰量は OLCR 法にて行い、ボンディング部分とコネクタ接続点の反射を測定している。

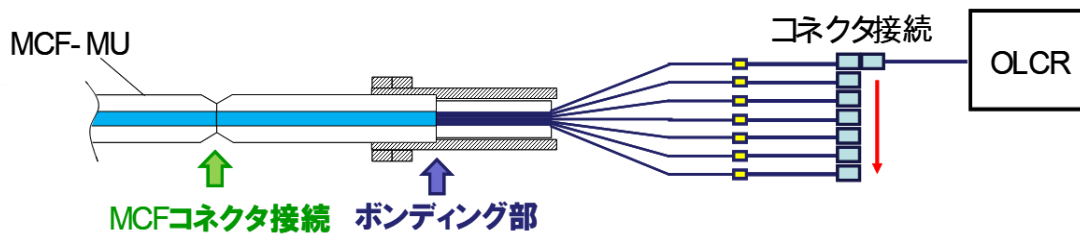


図 3.9.8 コネクタ型ファンアウトの反射減衰量測定系

コネクタ型ファンアウトの反射減衰量測定結果の一例を図 3.9.9 に示す。

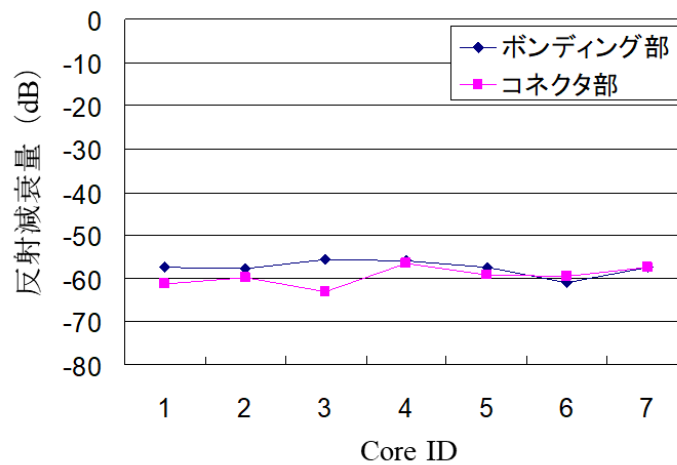


図 3.9.9 コネクタ型ファンアウトの反射減衰量測定結果一例

コネクタ接続点で 52 dB 以上，ボンディング部分で 55 dB 以上であったため，全ての接続点で PC していることを確認した。

3) 信頼性評価

コネクタ型ファンアウトについて信頼性を評価した。信頼性試験の項目を表 3.9.1 に，信頼性評価試験の測定系を図 3.9.10 に示す。

表 3.9.1 信頼性評価の項目

試験項目	試験条件，準拠規格
温度サイクル	温度：-10~60°C，5 サイクル 規格：IEC 613753-1 Category C
湿熱	温度：40°C，湿度 95 %，96 時間 規格：IEC 613753-1 Category C
振動	全振幅：1.5 mm，周波数：10~55 Hz，2 時間/軸 規格：IEC 613753-1 Category O
衝撃	加速度：100 G，持続時間：6 ms 衝撃回数：5 回×3 軸×2 方向 規格：JIS C5983

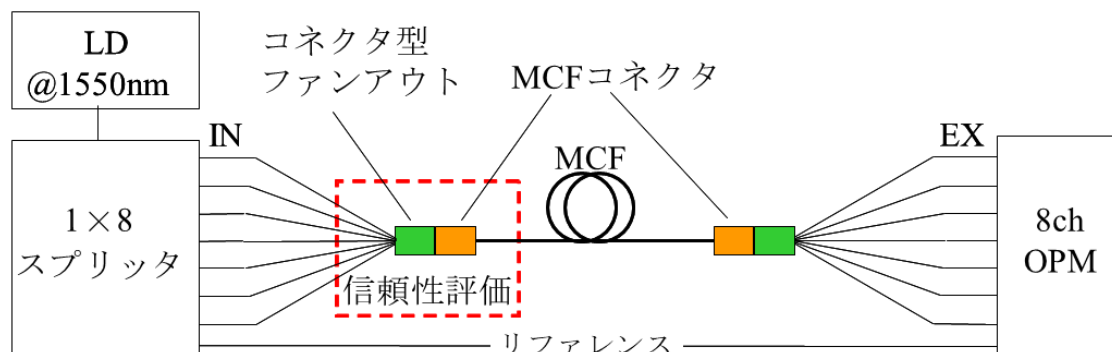


図 3.9.10 コネクタ型ファンアウトの信頼性評価の測定系

信頼性試験については温度サイクル試験，湿熱試験，振動試験，衝撃試験を実施し，接続点の損失変動を波長 1550nm でモニタした。両端 MU 形 MCF コネクタに対し，コネクタ型ファンアウトを接続し，図 3.9.10 中の赤枠で囲っている個所に，それぞれの試験項目に応じた条件を与えた。コネクタ型ファンアウトの方向定義は，MU 形 MCF コネクタの機械特性評価時に定義した方向（図 3.6.2）と同じとした。

信頼性評価結果の一覧を表 3.9.2 に示す。全ての信頼性評価において，損失の変動量が非常に小さいことを確認した。これらの結果から，ファイババンドル型

ファンアウトをコネクタ化しても、必要とされる光学特性と信頼性を満たすことを確認した。本検討より、小型ファンアウトが要求された場合であっても、ファンアウトをコネクタと一体型にし、配線部を含めた省スペース化（小型化）が可能であることを確認した。

表 3.9.2 信頼性評価結果の一覧

試験項目	最大損失変動幅
温度サイクル	<0.06 dB
湿熱	<0.07 dB
振動	<0.02 dB
衝撃	<0.04 dB

3.10 まとめ

オルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタの光学特性と機械特性を評価し、実用化が可能であることを明らかにした。

はじめに IEC に規定されているランダム接続損失測定試験を行った。測定結果より、MCF 全コアでの平均損失は 0.12 dB、また測定結果の 97%以上が 0.5 dB 以下であることを確認した。また OCWR 法と OLCR 法を用いて反射減衰量を測定した。測定結果よりどちらの測定結果も全コアで 40 dB 以上の値を得ることができた。以上の結果から、光学特性は IEC 61753-1 において定義される Category C (Controlled environment) において、同種の光接続デバイスの性能基準に準拠していることがわかった。

MCF コネクタにおいては接続点の軸ずれが原因で一部のコアから光が漏洩し、その漏洩光が他コアに干渉することでクロストークが発生することが考えられた。そこで MCF コネクタ接続点に起因するクロストーク発生の有無を確認するため、複数の MCF コネクタ接続点を有する測定系を構成し、各コアに光を入射したときの他コアの出射光強度を測定した。測定結果より、接続点に起因するクロストークは確認できなかった。よってコネクタ接続点に起因するクロストークは発生しないことがわかった。

MCF を接続する光コネクタの研究開発はオルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタ以外にも、板ばねでフェルルールを保持することで回転を抑制しフロート量を確保する弾性保持方式 MCF 用光コネクタ、アダプタ内部にレンズを介し空間結合（光学結合）により接続するレンズ結合方式 MCF コネクタ、フェルルールに V 溝を設け割りスリーブ内部にキーを配置しそれらを接続することで、組み合わせフェルルール回転を抑制する構造などが提案されている。いずれの構造も優れた光学特性が報告されているが、IEC や JIS で規定されている機械特性を満たしたという報告はされていない。よってオルダム・カップリング構造

を採用した MCF コネクタの信頼性を確認するため、IEC の規定に準拠し機械特性評価を行った。機械特性評価結果より、繰り返し着脱試験、振動試験、引っ張り試験、温度サイクル試験においては IEC 61753-1 Category. O を、衝撃試験については MU 形光コネクタを規定する JIS C 5983 の性能基準を満足できることを確認した。以上の結果より、MCF コネクタに外力が加わるような状況下であっても、オルダム・カップリング構造によってフェルールのフロート構造が常に有効であることがわかった。

MCF コネクタの APC 化が可能かどうかを判断するため、開発した MCF コネクタの端面を斜めに研磨し通常の APC 端面より曲率半径の大きい APC 形 MCF コネクタを試作した。APC-MCF コネクタについては光学特性の評価およびエタノール滴下試験を行い PC 接続の確認を行った。測定結果より、平均接続の損失は 0.23 dB であり、また APC 形 MCF コネクタの接続点にエタノールを滴下しても損失の変動は確認できなかった。よって APC-MCF コネクタの接続点は全コアで PC 接続されていると考えられ、MCF コネクタを APC 化することが可能であることを確認した。

ここまでの特性評価結果より、オルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタは実用レベルであると考えられるが、コネクタ接続時の損失発生要因についてはこれまでの評価結果からは明らかにできない。よって MCF コネクタの接続損失発生要因を明らかにし、設計手法を確立させるため、モンテカルロシミュレーションを用いて、接続損失測定結果との比較を行った。はじめにシミュレーションを行うために必要な計算式を求めた。次にランダム接続試験の実測値を基に求めた計算式からモンテカルロシミュレーションを行い、試験結果と比較をした。その結果、非常に近い値で一致していることを確認した。シミュレーション条件には総軸ずれ量のみを与えていることから、MCF コネクタの損失発生要因は総軸ずれのみと考えられ、その他の損失発生要因（コネクタ部材の弾性変形やオルダム・カップリング構造によるフェルールのフロート構造不備による傾きなど）が考えられないことから、オルダム・カップリング構造を採用した MCF のフェルールであってもフロート構造が有効に機能していることを確認でき、MCF コネクタの設計手法を確立した。

MCF 伝送路を構築する際のファンアウトについて、省スペース化を狙ったコネクタ型ファンアウトについて検討した。開発したコネクタ型ファンアウトは光学特性、信頼性ともに良好な結果を得ることができた。これらの結果からファイババンドル型ファンアウトをコネクタ化し、ファンアウトの省スペース化を実現できることがわかった。

MCF が光ネットワークを構築するファイバとして標準化される場合、余長処理半径や機械的強度、製造コストの問題から、クラッド径は SMF と同様の 125

μm である可能性が高いと考えられる。クラッド径が $125\ \mu\text{m}$ で MCF を設計する場合、コア間隔（クラッド中心からの）を $40\ \mu\text{m}$ 以上の値で設計することは、コア数の問題を考慮すると可能性としては非常に低いといえる。本章で検討した MCF コネクタはコア間隔が $45\ \mu\text{m}$ で六方最密配置の 7 コア MCF を使用して IEC grade C（接続損失 $0.5\ \text{dB}$ 以下）の性能を満たしているため、クラッド径 $125\ \mu\text{m}$ の MCF であっても、それらの特性は容易に満たすことができると考えられる。

本章で検討した MCF コネクタは実用化を前提として設計しており、互換性を確保するため既存のコネクタをベースとした開発、IEC や JIS に規定されている光学特性、機械特性を満たしていることから、光通信ネットワークを構築するための実用に耐える MCF コネクタであることを示した。

第3章の参考文献

- (1) R. Nagase, T. Shibuya, T. Takahashi, D. Kudo and H. Matsuura: “Fiber Withdrawal Phenomenon in Optical Connectors,” in *Proc. IS-EMD2010*, vol.110, no.270, EMD2010-128, pp.255-258, (2010).
- (2) 斎藤恒聡, 渡辺健吾, 今村勝徳, 椎野雅人, “マルチコアファイバ用ファイババンドルタイプファンアウト”, 電子情報通信学会, 総合大会 2012, B-10-26, pp. 349, (2012).
- (3) 斎藤恒聡, 渡辺健吾, 今村勝徳, 椎野雅人, 長瀬亮, “マルチコアファイバ用ファイババンドルタイプファンアウトの開発 (2) ”, 信学技報, vol. 112, no. 447, OCS2012-116, pp. 105-110, (2013).
- (4) 渡辺健吾, 斎藤恒聡, 椎野雅人, “19 コア MCF 用ファイババンドル型ファンアウトの開発”, 信学技報, vol. 114, no. 195, OCS2014-35, pp.21-26, (2014).
- (5) 渡辺健吾, 斎藤恒聡, 境目賢義, 長瀬亮, 椎野雅人, “MU コネクタ形 MCF ファンアウトの開発”, 信学技報, vol. 113, no. 182, OCS2013-42, pp. 33-38, (2013).
- (6) 渡辺健吾, 斎藤恒聡, 境目賢義, 長瀬亮, “マルチコアファイバ用 MU コネクタ形ファンアウトの信頼性評価”, 信学技報, 電子情報通信学会, ソサイティ大会 2015, B-10-19, (2015).

第3章に関連する学会発表および論文

- (1) 境目賢義, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, “MU 形マルチコアファイバコネクタ”, 電子情報通信学会, ソサイティ大会 2012, B-13-9, (2012).
- (2) 境目賢義, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, “MU 形マルチコアファイバコネクタ”, 信学技報, vol. 112, no. 310, OCS2012-80, pp. 43-46, (2012).
- (3) R. Nagase, K. Sakai, K. Watanabe and T. Saito: “MU-type multicore fiber connector,” in *Proc. 61st IWCS Conference*, SESSION 17 17-2, pp.823-827, (2012).
- (4) R. Nagase, K. Sakai, K. Watanabe and T. Saito: “MU-type Multicore Fiber Connector,” *Trans. IEICE*, vol.E96-C, no.9, pp.1173-1177, (2013).
- (5) 境目賢義, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, “マルチコアファイバコネクタのコア位置精度”, 電子情報通信学会, 総合大会 2013, B-13-18, (2013).
- (6) K. Sakai, R. Nagase, K. Watanabe and T. Saito: “Connection Characteristics of Multicore Fiber Connector,” in *Proc. CLEO-PR & OECC/PS 2013*, TuPS-1 (2013).
- (7) K. Sakai, R. Nagase, K. Watanabe and T. Saito: “Connection Characteristics of Multicore Fiber Connector,” in *Proc. IEEE summer topicals 2013*, MC2.3 pp. 76, (2013).
- (8) 境目賢義, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, “MCF コネクタのコア位置精度と

- 繰り返し再現性”, 信学技報, vol. 113, no. 183, OFT2013-21, pp. 37-40, (2013).
- (9) 境目賢義, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, “MCF コネクタ接続点のクロストーク特性”, 信学技報, vol. 113, no. 262, OCS2013-59, pp. 53-56, (2013).
 - (10) 境目賢義, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, “MU 形 MCF コネクタ接続点の機械的特性”, 信学技報, vol. 113, no. 446, OCS2013-118, pp. 97-100, (2014).
 - (11) K. Sakai, R. Nagase, K. Watanabe and T. Saito: “Mechanical Characteristics of Multicore Fiber Connector,” in *Proc. IEEE summer topicals 2014*, MuE2, pp. 172-173, (2014).
 - (12) 境目賢義, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, “MU 形 MCF コネクタの機械的特性(2)”, 信学技報, vol. 114, no. 195, OCS2014-34, pp. 17-20, (2014).
 - (13) K. Sakai, R. Nagase, K. Watanabe and T. Saito: “Mechanical Characteristics of Multicore Fiber Connector,” in *Proc. MOC2015 20th MICROOPTICS CONFERENCE*, H54, p.172-173, (2015).
 - (14) 境目賢義, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, “【招待論文】MCF 用 MU 形光コネクタ”, 2016 年 2 月 EXAT 研究会, (2016).
 - (15) 境目賢義, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, “MU 形マルチコアファイバコネクタのランダム接続特性”, 電子情報通信学会, 総合大会 2016, B-10-8, (2016).
 - (16) 荒井健汰, 境目賢義, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, 杉崎隆一, “MCF コネクタ PC 接続安定性のコア数依存性”, 信学技報, vol. 116, no. 198, OFT2016-13, pp. 11-14, (2016).
 - (17) 境目賢義, 荒井健汰, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, 杉崎隆一, “MU 形マルチコアファイバコネクタにおける接続損失要因の検討”, 電子情報通信学会, 総ソサイティ大会 2016, B-10-13, (2016).
 - (18) 境目賢義, 荒井健汰, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, 杉崎隆一, “MU 形マルチコアファイバコネクタにおける接続損失要因の検討”, 信学技報, vol. 116, no. 455, OCS2016-81, pp. 53-56, (2017).
 - (19) K. Sakai, K. Arai, R. Nagase, K. Watanabe and T. Saito: “Study on the attenuation factor of MU-Type MCF connector,” *Trans. IEICE*, (2018). 投稿中

第4章 19-core MCF 用いたファイバ端面の微小変形解析

4.1 はじめに

本章ではMCFを用いてフェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の関係を明らかにし、それらの有限要素解析手法の確立を目的とする。

光通信ネットワークの構築に使用される光コネクタは FC 形光コネクタ¹⁾や SC 形光コネクタ²⁾などが代表的であり、これらはフェルールに接着固定されたファイバ端面を接続対象に直接突き合わせるバット・ジョイント (butt joint) 法が用いられる。バット・ジョイント法はフェルール双方を、アダプタを介して突き合わせ、コネクタ内部の押圧ばねで押圧力をフェルールに与えることで接続している。しかしバット・ジョイント法による接続はファイバ双方の端面間に空隙が存在するとファイバと空隙(空気層)との間の屈折率の不整合によりフレネル反射が生じてしまい、光学特性に影響を及ぼすことが過去の研究より明らかになっている。このフェルール間の隙間を無くするため、フェルール端面を凸球面上に研磨し、コネクタ内部の押圧ばねによりファイバ双方を軸方向に押し付ける PC (Physical contact) 接続が技術として確立されている。PC 接続はフェルールに接着された光ファイバ双方に、軸方向の押圧力により端面間で弾性変形を生じさせることで、双方が空隙無く接触した状態を保つことが可能である。

PC 接続を実用化する上での問題点は過去の様々な研究結果により報告、解決されている³⁻⁴⁾。しかしフェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の関係については未だ明らかになっていない。ファイバ端面の弾性変形やファイバ引き込み量は nm オーダーであり、実際にこれらを測定することは非常に困難である。また PC 接続の確認は反射減衰量の測定で行うのが一般的であるが、フレネル反射は接続している双方のコア間に空隙が存在しない場合は発生しない。よって通常の SMF を用いた従来の反射減衰量測定では、ファイバコアの接触判断しかできず、ファイバ全体の弾性変形を反射減衰量で測定することはできない。

光通信用に MCF が標準化された場合、その MCF をバット・ジョイントで接続できるかの判断は、フェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の関係が明らかになっていなければ検証することができず、また MCF の端面形状や研磨条件の最適化は有限要素解析手法が確立していないと困難になること考えられる。よって本章では今まで明らかになっていなかった PC 接続時のフェルール押圧力とファイバ端面弾性変形関係を、MCF を用いて明らかにすると共に、有限要素解析手法の確立を目的とする。使用する MCF はクラッド中心からコアが六方最密で広範囲に配置されている 19 コア MCF である。はじめにオルダム・カップリング構造の 19 コア MCF コネクタを試作し、光学特性を評価する。

4.2 接続損失評価

本章で使用する 19 コア MCF の端面画像を図 4.2.1 に示す. クラッド中心のコアを基準に六方細密充填でコアが 19 個配置された 19 コア MCF を使用する.

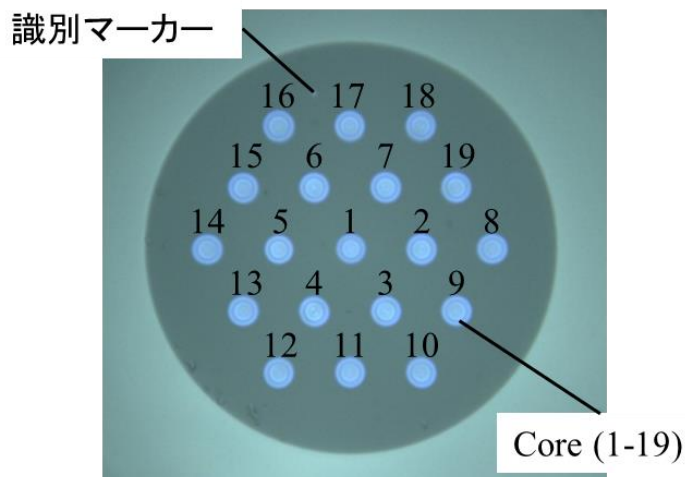


図 4.2.1 19 コア MCF の端面画像

クラッド径は $210\ \mu\text{m}$, コア中心の間隔 (コア間隔) $36.6\ \mu\text{m}$, 波長 $1550\ \text{nm}$ における MFD は $9.8\ \mu\text{m}$ であり, コア番号を特定するための識別マーカーを左右どちらかに有する. 19 コア MCF においては, クラッド中心に配置されたコアをセンターコア (Core ID 1), センターコアを取り囲む 6 個のコアを内周コア (Core ID 2~7), さらにその周りの 12 個のコアを外周コア (Core ID 8~19) とする. 使用する MCF は全て同じ母材から線引きされたものを使用しているため, コア外形のバラつき, スポットサイズの不整合, コアの偏心などによる光学特性へ影響は無視できる.

IEC 61300-3-34 (Fiber optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 3-34: Examinations and measurements - Attenuation of random mated connectors) に定義されているランダム接続試験に準拠し接続損失測定を行う. 測定系は 2 章で説明した対マスタ法である. 両端 MCF コネクタ付のコードを複数本作製, その中で 1 本をマスタコードとし, 着脱回数 1 回のランダム接続にて測定する. ファンアウトは 19 コア MCF に対応するものを使用している⁵⁻⁶. 接続損失測定結果の分布をコア毎に図 4.2.2~4.2.5 に示す. 測定結果より, 全コアでの平均損失は $0.03\ \text{dB}$, 内周コアの平均損失 $0.18\ \text{dB}$, 外周コアの平均損失は $0.52\ \text{dB}$ であった. センターコアの損失ばらつきが非常に小さく, 外周コアで損失にばらつきが発生する傾向が得られた. センターコアは一般的に普及している SMF コネクタと同等の特性であることから, 内周コアと外周コアの接続損失はフェルルール角度ずれの影響であると考えられる.

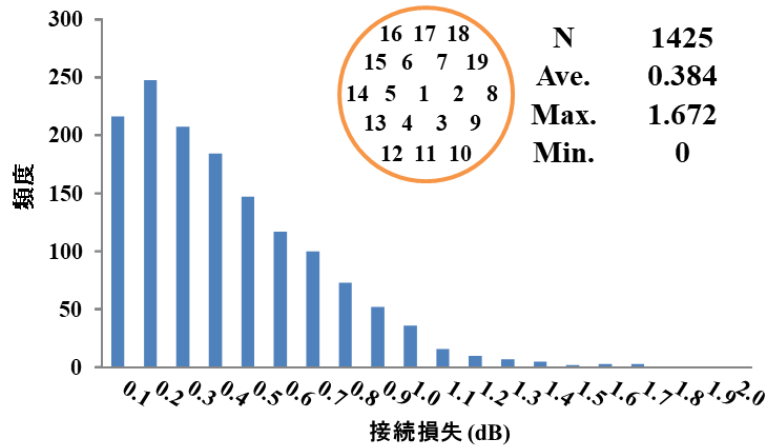


図 4.2.2 19 コア MCF コネクタの接続損失分布

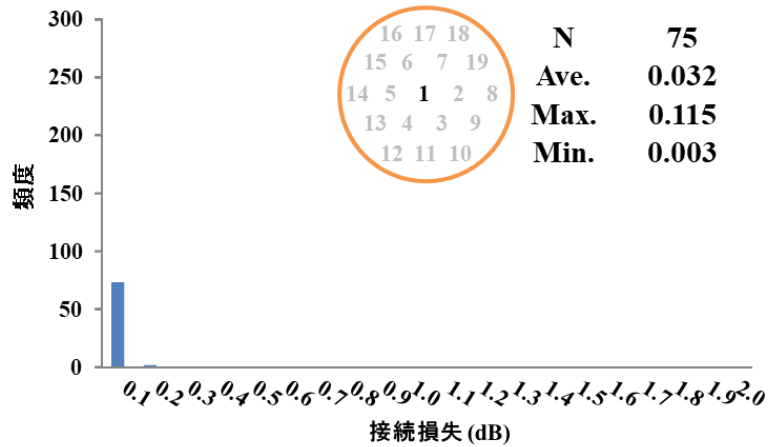


図 4.2.3 センターコア (Core ID 1) の接続損失分布

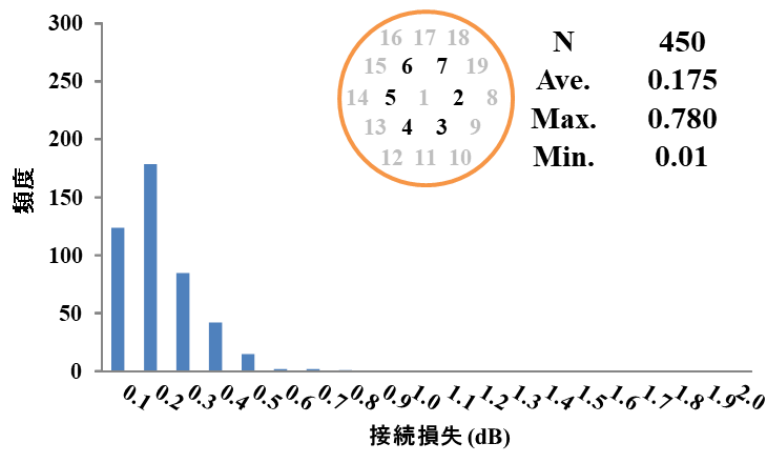


図 4.2.4 内周コア (Core ID 2-7) の接続損失分布

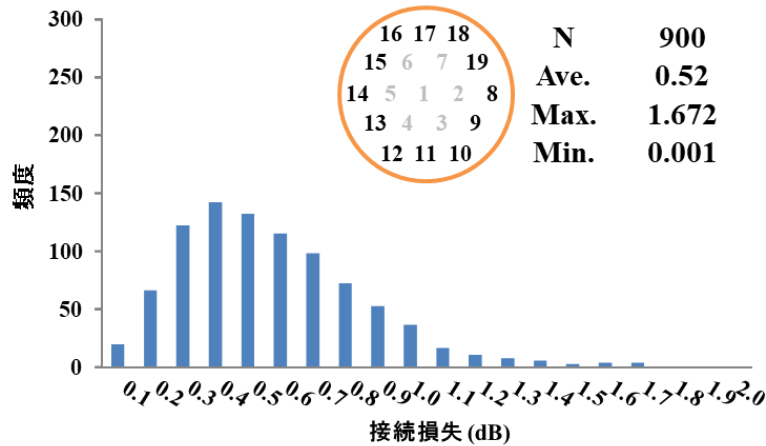


図 4.2.5 外周コア (Core ID 8-19) の接続損失分布

4.3 ファイバ端面の弾性変形メカニズム

研磨したファイバ端面パラメータの概略図を図 4.3.1 に示す。多くの光コネクタで用いられる PC 接続構造は、凸球面形状に研磨されたファイバ端面双方を突き合わせ、押圧力をかけて端面を弾性変形させることにより安定な接続特性を実現している。

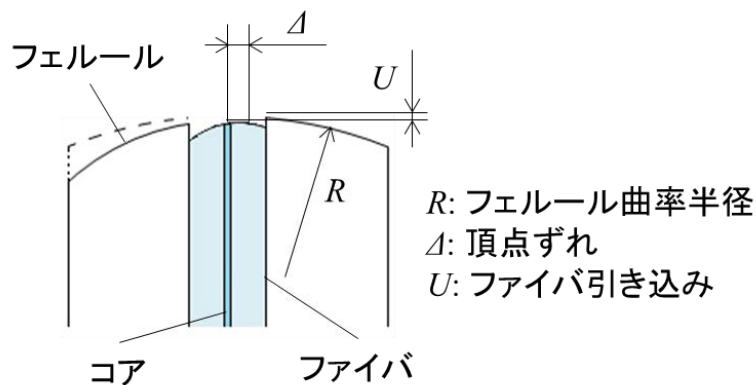


図 4.3.1 研磨したファイバ端面パラメータの概略図

研磨したファイバ端面は曲率半径 (R)、ファイバ引き込み (U)、頂点ずれ (Δ) の 3 つで表すことができる。光ファイバはエポキシ樹脂などの接着剤でフェルールに固定されているため、湿度や温度の変化によりファイバ端面がフェルール端面より数十 nm 引き込む (U) 可能性があり、これは端面間の空隙発生要因になり得る。また実際の凸球面研磨においては必ずしも研磨頂点がフェルール中心軸上には無く、ある程度の頂点ずれ (Δ) が発生する。SMF およびジルコニア円筒フェルールの組み合わせの場合には、50 μm までの頂点ずれ量が許容できるように設計されている⁷⁾。また研磨後の頂点ずれ量はファイバコアから

凸球面頂点までの距離であるため、すべてファイバ引き込み量 (U) に換算することができる。従ってファイバの引き込み量が弾性変形による変形量を上回らないようにするため、SMF を用いた光コネクタの場合、接着剤が起因となる引き込み量は 50 nm 以下が必要とされ、頂点ずれを含むすべてのファイバ引き込み量を合計した場合、約 200 nm までの引き込み量であれば PC 接続を達成できることがわかっている⁸⁾。

PC 接続の模式図を図 4.3.2 に示す。フェルールを使用した光コネクタは、その端面双方をお互いに接触させて接続する。このとき、ファイバコア双方に隙間が存在するとフレネル反射を引き起こし光学特性の劣化要因となる。PC 接続はフェルールに接着された光ファイバ双方が軸方向の押圧力により端面間で弾性変形を生じさせることで、双方が空隙無く接触した状態を保つ技術である。

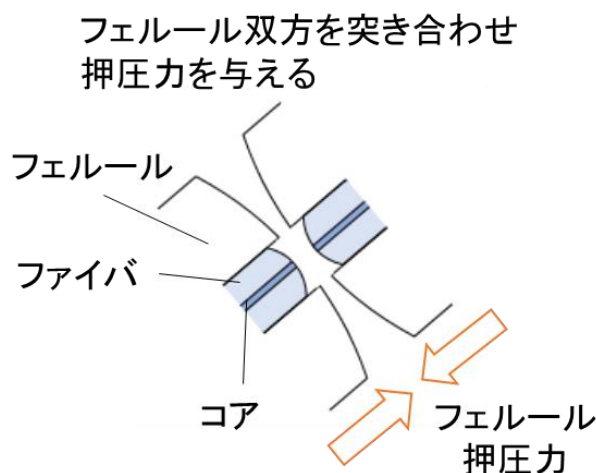


図 4.3.2 PC 接続の模式図

4.1 項で説明したように、コネクタ内部の押圧ばねによるフェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の関係については未だ明らかになっていない。これらの課題を解決するため、本研究では MCF に注目した。研磨した MCF 端面とその模式図を図 4.3.3 に示す。MCF はクラッドの中心だけでなく中心以外にもコアが多数配置されている。一般的な PC 研磨ではクラッド中心のコアが凸球面の頂点になるよう研磨されるため、それを MCF に適用した場合、頂点のコアと周辺のコアに高さの差 (d) が生じる。よって周辺のコアが PC 接続するためには、センターコアよりも高さの差分の押圧力が必要であると考えられる。この差 (d) によって生じる押圧力の違いを利用することでファイバ端面の弾性変形を反射減衰量で測定することが可能ではないかと考えた。押圧力による MCF 端面の弾性変形イメージ図を図 4.3.4 に示す。ファイバの押圧力と弾性変形の関係は、押圧力が上がるに従ってファイバ端面の変形量が大きくなり、中心のコアから周

囲のコアに接触範囲が広がっていくものと考えられる。従って、押圧力と MCF 各コアの反射減衰量の変化を測定することで、押圧力とファイバ端面弾性変形
 の関係を明らかにできると考えられる。よって本研究では押圧力と MCF 各コア
 の反射減衰量の関係を試験より求める。また試験に使用したサンプルと同じ端
 面形状を持つ 3D モデルを複数作成し、それらを組み合わせ端面接触に必要な押
 圧力を有限要素解析より求める。最後に、計算より PC 接続に必要な押圧力を求
 め、それらすべての結果を比較する。

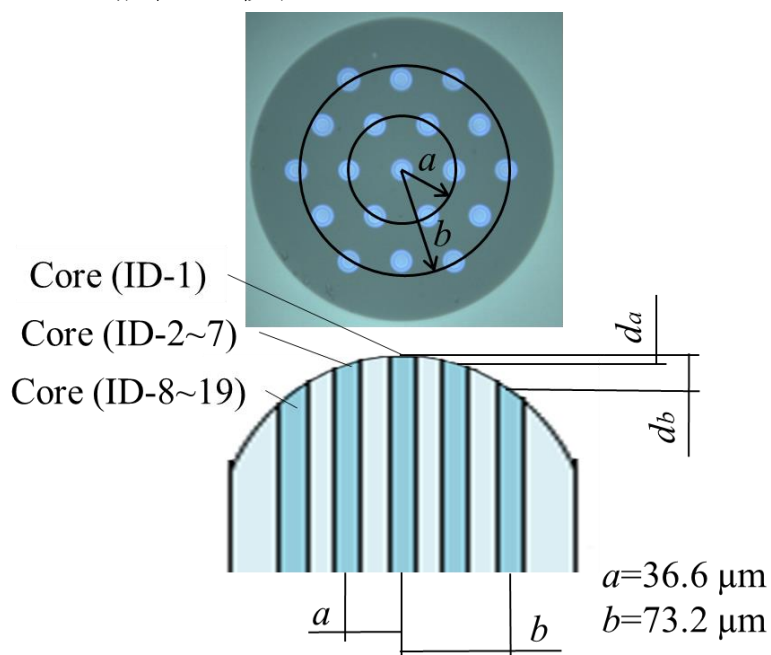


図 4.3.3 研磨した MCF 端面とその模式図

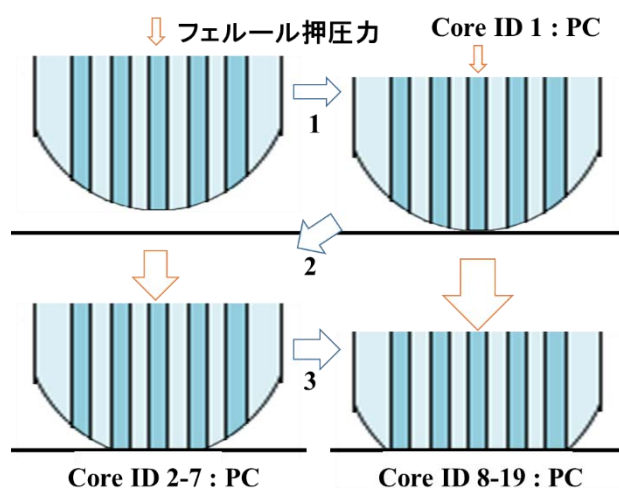


図 4.3.4 押圧力による MCF 端面の弾性変形イメージ図

4.4 フェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の関係

使用した 19 コア MCF はセンターコアと内周コアの中心間距離 (a) が $36.6 \mu\text{m}$, センターコアと外周コアの中心間距離 (b) が最大 $73.2 \mu\text{m}$ となるため, 全てのコアを PC 接続させるにはファイバ端面の弾性変形による接触が外周コアまで及ばなくてはならない. MCF は未だ標準化されていないため, MCF の端面形状も最適化されていない. コア間隔が大きい MCF の場合, 通常の SMF と比較して押圧ばねの圧力を見直すかフェルールの曲率半径を大きくしなければならない可能性も考えられる. しかし使用する 19 コア MCF は密にコアが配置されていることから, PC 接続に必要な各コアの押圧力の差は極めて小さいと考えられる. よって本研究では SMF と同じ AdPC 研磨 (Advanced Physical Contact) を MCF 端面に施した.

ファイバの研磨工程模式図を図 4.4.1 に示す. 接着剤硬化後, フェルール端面より飛び出した余分なファイバを, 治具を使いクリーブして研磨を施す. フェルール端面の余分な接着剤やファイバを除去するため, 研磨砥粒が大きいものを使用し研磨を行う. その後は粗研磨を施し凸球面状にする. また研磨過程で生成される加工変質層や微細な傷を取り除くため, 仕上げには SiO_2 超微粒子を用いて研磨を行う. AdPC 研磨の設計値は, 曲率半径 (R) $5\sim 30 \text{ mm}$, 頂点ずれ (Δ) $50 \mu\text{m}$ 以下 (文献によっては $70 \mu\text{m}$ 以下), ファイバ引き込み (U) は頂点ずれとの合計で $200 \mu\text{m}$ 以下である. これらの値は SMF の端面に要求されるものである.

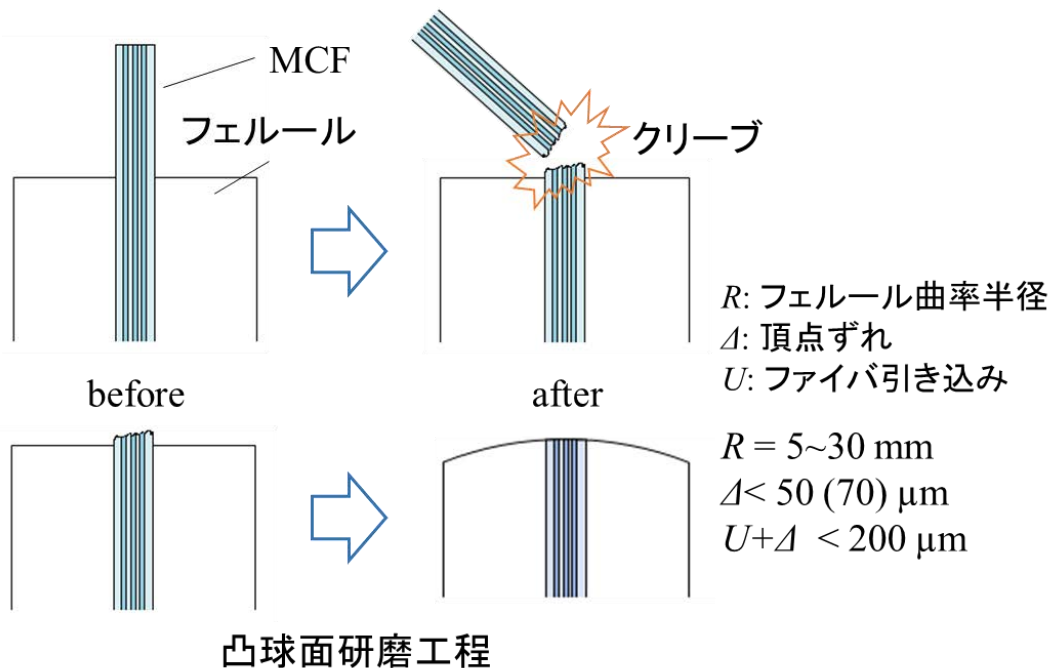


図 4.4.1 ファイバの研磨工程模式図

AdPC 研磨を施した MCF 端面形状の一例を図 4.4.2 と図 4.4.3 に示す。図は凸球面研磨されたファイバ端面を示しており、端面形状を曲率半径、頂点ずれ、ファイバ引き込みで表す。研磨工程の最後に行う SiO₂ 研磨は、フェルールよりもファイバを僅かに削りやすい傾向がある。AdPC 研磨は SMF を基準にしているため、ファイバ外径が大きい MCF などはファイバ引き込み量の制御が難しく、図 4.4.3 に示すように許容値以上のファイバ引き込みが発生することがわかった。本研究では各寸法が設計値内に収まっているファイバ端面の弾性変形を明らかにする関係からファイバ引き込みが無いサンプルを用いるのが好ましいため、仕上げ研磨に SiO₂ を使用するとそれらを満たせない可能性がある。よって本研究では、仕上げ研磨にダイヤモンド研磨材として粒径 1 μm の遊離砥粒研磨フィルム（ダイヤモンド研磨）を使用しファイバ引き込みの抑制を狙った。図 4.4.2 はダイヤモンド研磨仕上げを施した端面であり、ファイバ端面のパラメータすべてが設計値内に収まっていることが確認できる。またダイヤモンド研磨を行うことで発生する反射減衰量はおおよそ 30 dB であるため⁹⁾、本項では反射減衰量が 30 dB を達成したコアは PC 接続していると判断する。試作したサンプルの端面形状は平均曲率半径 13.46 mm，平均頂点ずれ 12.27 μm，平均ファイバ引き込み-9.38 μm であった。ファイバ引き込み量がマイナスの値を示しているのはファイバがフェルール端面に対して突き出していることを示す。

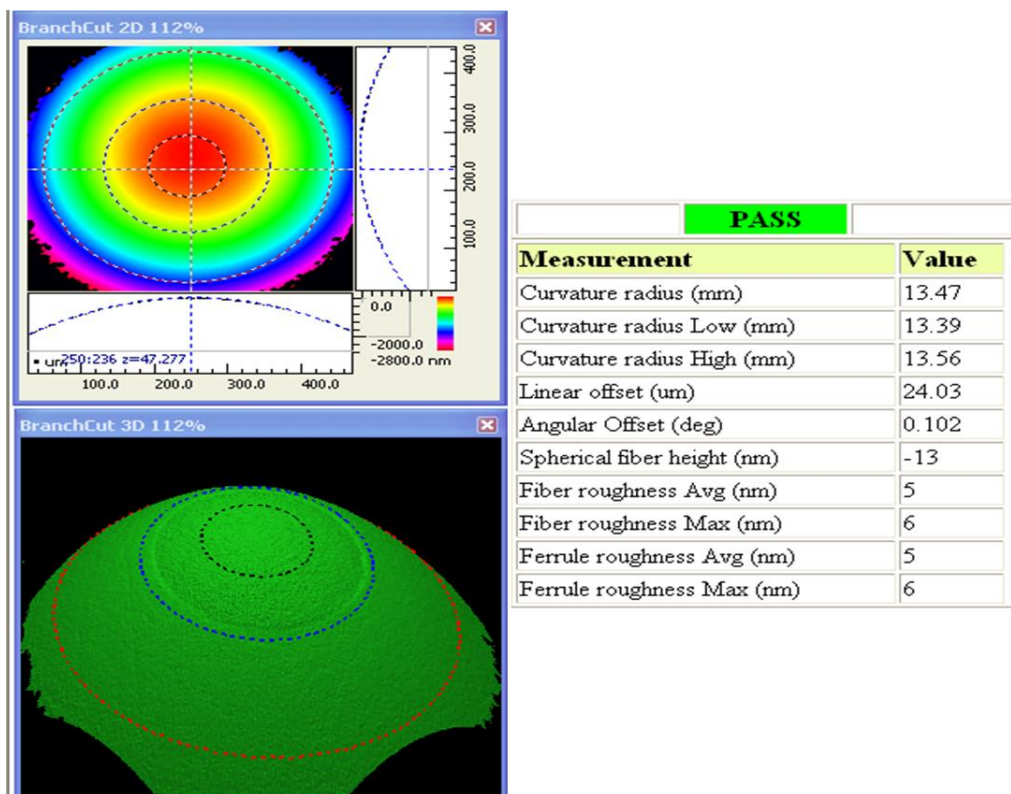


図 4.4.2 研磨後の MCF 端面形状一例（ダイヤモンド研磨仕上げ）

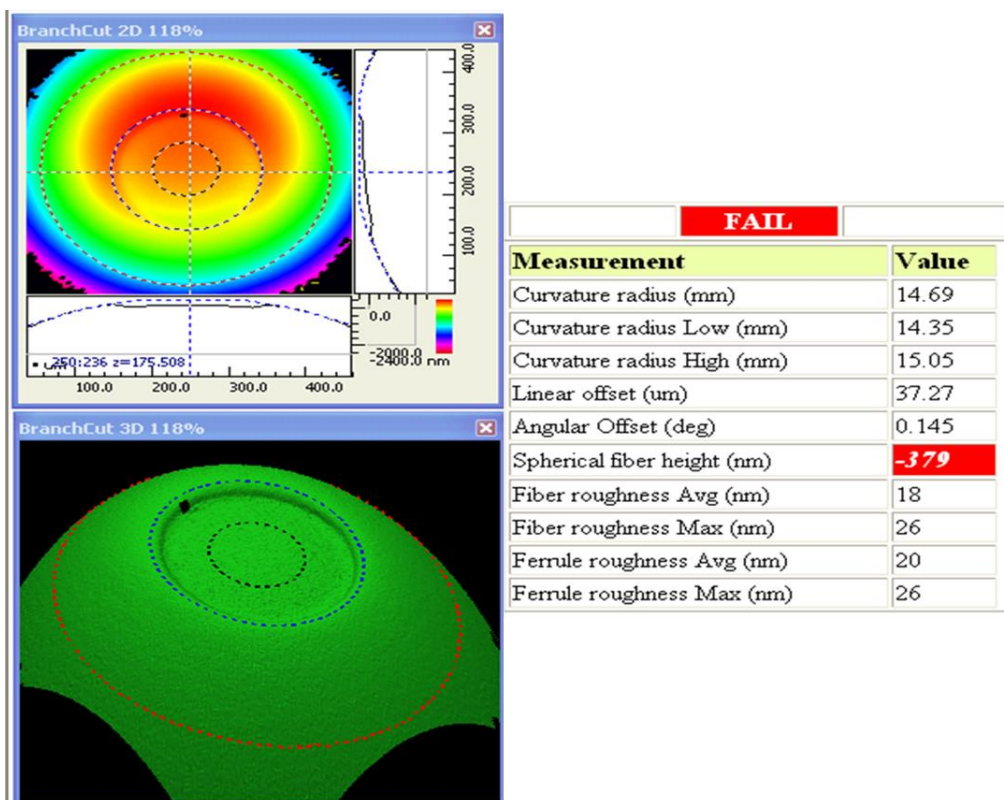


図 4.4.3 研磨後の MCF 端面形状一例 (SiO₂ 研磨仕上げ)

1) 反射減衰量測定

試作した 19 コア MCF のサンプルを使用し、OCWR (Optical Continuous Wave Reflectometry) 法にて反射減衰量の評価を行った。19 コア MCF コネクタの反射減衰量測定結果の分布を図 4.4.4 に示す。

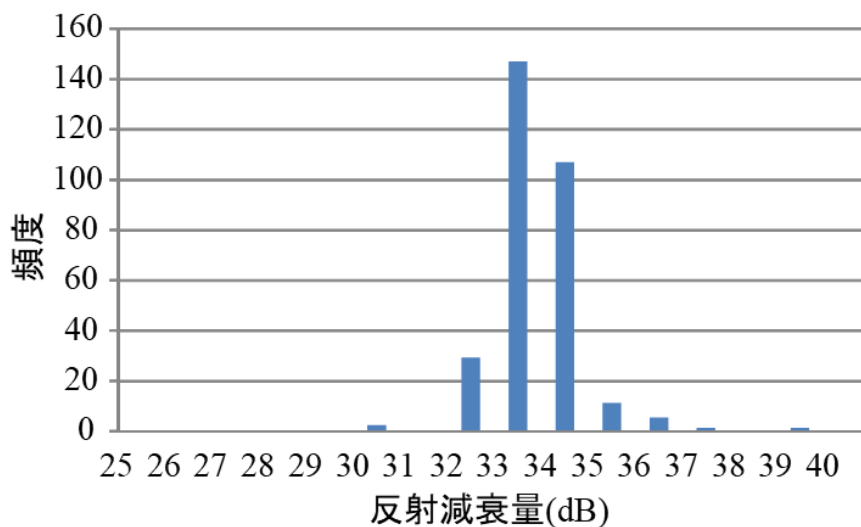


図 4.4.4 19 コア MCF コネクタの反射減衰量測定結果の分布

すべての反射減衰量が 30 dB 以上であることから全コアで PC 接続している事を確認した。19 コア MCF コネクタの接続損失, 反射減衰量ともに良好な結果を得られたことから, オルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタを 19 コア MCF に適用可能であることがわかった。また仕上げ研磨である SiO_2 研磨の条件を最適化することができれば, クラッド径の大きな MCF であっても AdPC 研磨の条件をそのまま流用できる可能性があることを示した。

2) フェルール押圧試験

19 コア MCF が全コア PC 接続するために必要とされる押圧力を調べるためフェルール押圧試験を行う。フェルール押圧試験の測定系と外観を図 4.4.5 と図 4.4.6 に示す。押圧力による反射減衰量測定は前節と同じく OCWR 法を用いる。はじめに測定系の内部反射を調べるため, 図 4.4.6 内に示す OCWR からマスタコードまでの反射減衰量を測定する。本検討では内部反射を正確に調べるため, マスタコードの端面は加工変質層を可能な限り除去したサンプルを使用する。

測定結果を表 4.4.1 に示す。測定系の内部反射は全コアでおおよそ 47~50 dB であった。ファンアウトと接続したマスタコードは加工変質層を可能な限り除去しているため, 反射減衰量は全コアで 47 dB 以上を示した。測定結果より得られた内部反射は後述する反射減衰量の計算で使用する。

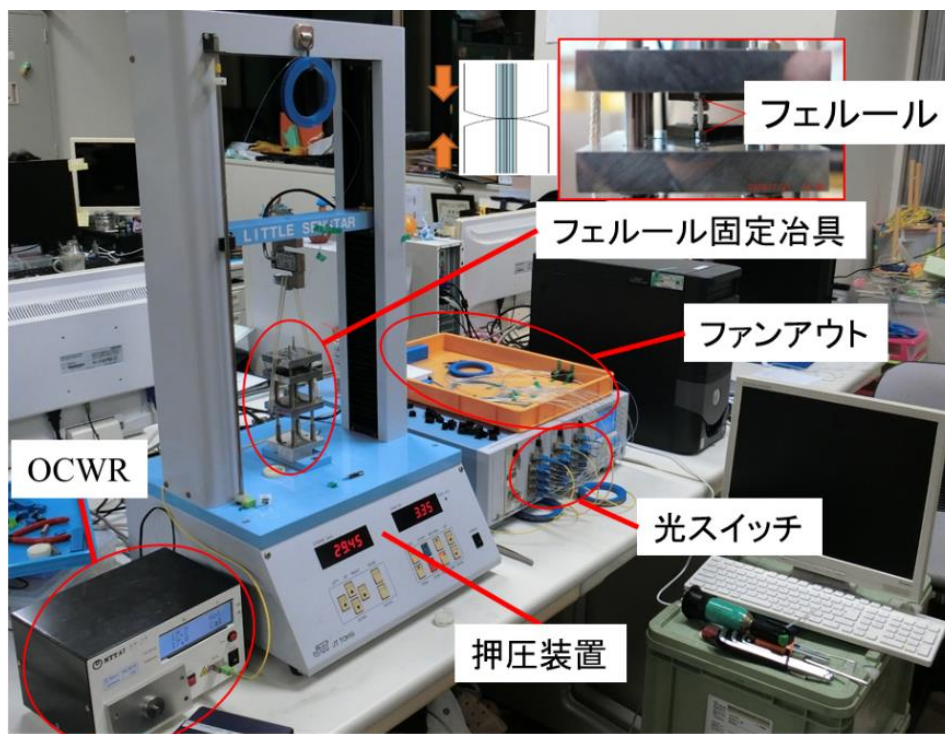


図 4.4.5 フェルール押圧試験測定系の外観

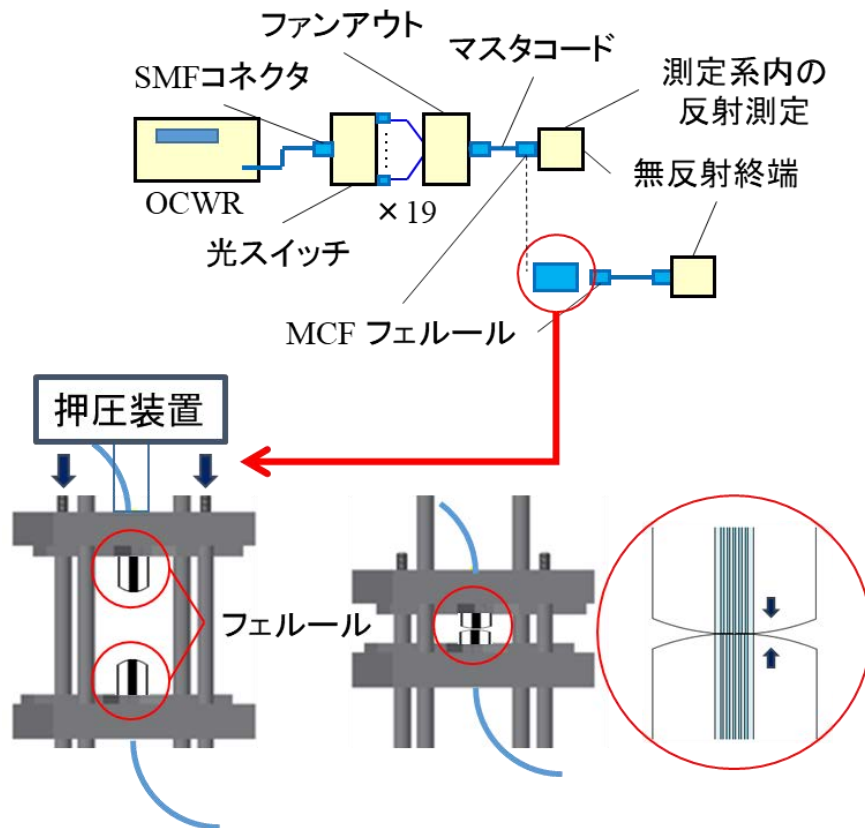


図 4.4.6 フェルール押圧試験の測定系

表 4.4.1 測定系の内部反射

Center core ID	内部反射 (dB)	Outer core IDs	内部反射 (dB)
Core 1	48.6	Core 8	47.5
Inner core IDs		Core 9	47.6
Core 2	48.8	Core 10	48.4
Core 3	48.8	Core 11	48.4
Core 4	49.7	Core 12	48.2
Core 5	48.7	Core 13	46.7
Core 6	50.2	Core 14	47.2
Core 7	49.2	Core 15	47.3
		Core 16	47.0
		Core 17	47.6
		Core 18	47.6
		Core 19	47.3

次に 19 コア MCF が接着されたフェルールを治具に固定しそれらを突き合わせ、押圧力を与えて反射減衰量の測定を行う。フェルール双方を同じ軸に整列させるため整列スリーブを使用する。ここで割りスリーブを使用すると、フェルールに保持力が作用し、押圧力に影響を及ぼすため、実験には精密スリーブを使用する。本検討に用いる MCF 端面はセンターコアが凸球面の頂点であることが好ましいが、実際には頂点ずれの発生は避けられず本検討に用いたサンプルで平均 12.27 μm の頂点ずれが発生した。しかしながら本検討に用いた 19 コア MCF では密にコアが配置されていることから、頂点に近いコアの PC 接続に必要な押圧力は極めて小さいと考えられる。本検討では、MCF いずれかのコアが 30 dB を達成したときを押圧力のゼロ点とする。ゼロ点から押圧力を 0.1 N 毎に増加させることで、反射減衰量と押圧力の関係を調べる。

フェルール押圧試験結果の一例を図 4.4.7 と図 4.4.8 に示す。一例では内周コアでは押圧力が 0.3 N 付近、外周コアでは 2.2 N 付近になると反射減衰量が 30dB 以上を示した。全サンプルの測定結果では内周コアは押圧力 0.3~0.6 N、外周コアは押圧力 1.8~3.0 N で反射減衰量が 30 dB 以上を示したため PC 接続を確認した。30~40 dB の範囲で反射減衰量が山なりになっているのは、端面間の距離に起因した多重反射の影響と考えられるが、押圧力の上昇により以降の値が安定していることから、反射減衰量への影響はないといえる。MU 形光コネクタ内部の押圧ばねは 5.5~6.5 N であるため、クラッド中心から 73.2 μm の位置にコアが配置されていても、PC 接続の達成に十分な押圧力が与えられていることを確認した。

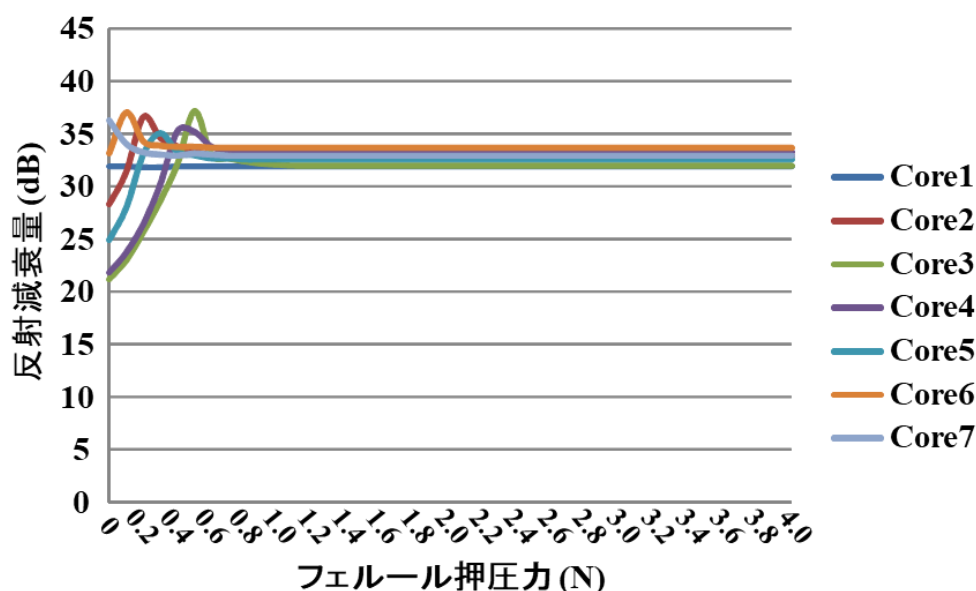


図 4.4.7 Core ID 1~7 (中心コアと内周コア) の測定結果一例

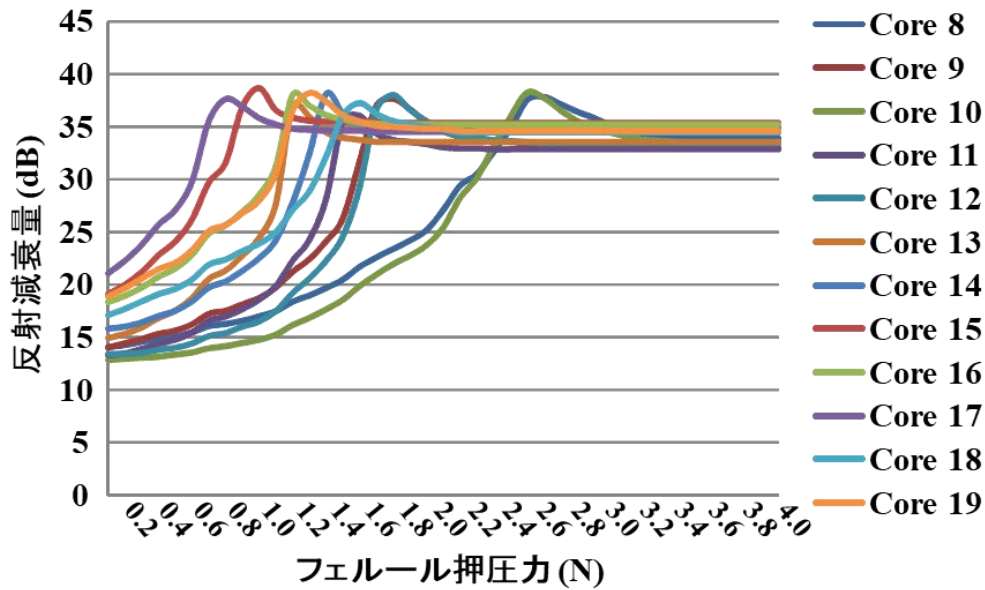


図 4.4.8 Core ID 8~19 (外周コア) の測定結果一例

3) 押圧力とファイバ端面弾性変形の有限要素解析

試験結果との比較を行うため有限要素解析より、フェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の間係を調べる。有限要素解析に使用する 3D モデルは 4 つ作成する。3D モデルに使用した材料特性 (物性値) を表 4.4.2 に¹⁰⁾、MU フェルールの各寸法値を表 4.4.3 に¹¹⁾、測定したサンプルの端面形状を表 4.4.4 に、3D モデルの構成と外観を図 4.4.9 に示す。作成した 3D モデルの曲率半径 (R)、頂点ずれ (Δ)、ファイバ引き込み (U) は実験に使用したサンプルと同じ値 (表 4.4.4) を 3D モデルの 4 つそれぞれに設定した。3D モデルには 1.25 mm 径の MU フェルール、19 コア MCF、接着層の 3 つをそれぞれ固着させている。また接着層の厚さは 0.5 μm に設定した。3D モデルに使用したフェルールの寸法値や各物性値は表 4.4.2 と表 4.4.3 に示した値を参考にし反映させている。

表 4.4.2 3D に使用した材料特性 (物性値)¹⁰⁾

	材料	E (Pa)	ν
MCF	Silica glass	7.15×10^{10}	0.14
フェルール	Zirconia	1.47×10^{11}	0.23
接着剤	Epoxy	1.96×10^9	0.34

表 4.4.3 MU フェルールの各寸法値 ¹⁾

直径	1.249±0.0005 mm
長さ	5.95±0.05 mm

表 4.4.4 測定したサンプルの端面形状一覧

サンプル番号	R (mm)	Δ (μm)	U (mm)
1	15.95	12.34	-32
2	19.47	5.10	0.2
3	15.12	8.60	4
4	13.57	23.02	-39

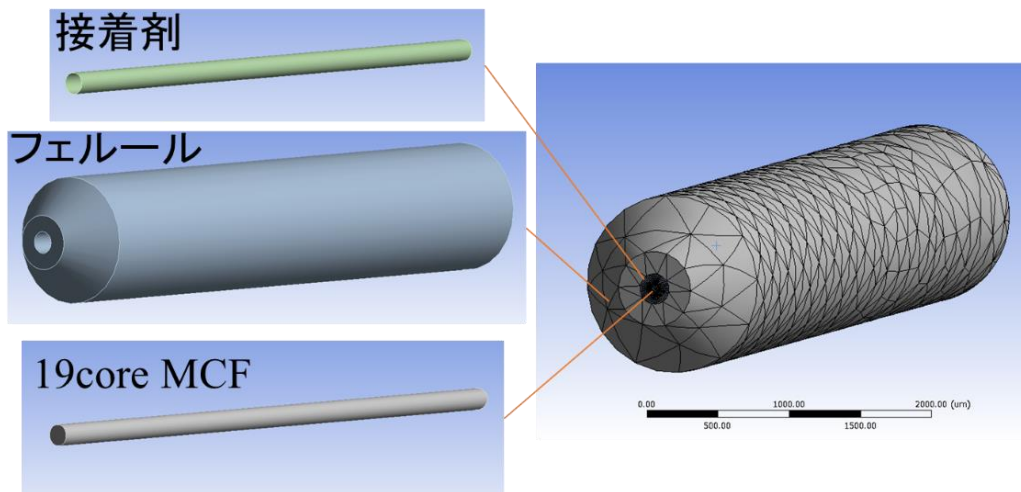


図 4.4.9 3D モデルの構成と外観

3D モデル双方を突き合わせた際のイメージ図を図 4.4.10 に示す. 解析では 3D モデル接続点の反射減衰量を示すことはできないので, MCF の各コアが頂点との高さの差分 (d) だけ軸方向に移動すれば接触していると判断する. 図 4.4.10 に示すよう, 頂点ずれを有するファイバ端面双方を突き合わせると, MCF 各コアそれぞれの高さ (d) が異なるため, PC 接続にするために必要な押圧力も各コアによって異なる. 使用した 19 コア MCF はコア間隔 $36.6 \mu\text{m}$ の六方最密配置であるため, センターコアから内周コアまでの距離 (a) は $36.6 \mu\text{m}$, センターコアから外周コアまでの距離 (b) は $73.2 \mu\text{m}$ となる. (六方最密配置のため外

周コアの奇数番号は $63.4 \mu\text{m}$) また高さの差 (d) はフェルール双方をそれぞれ突き合わせることで、双方が接触に必要な移動量 (D) とみなすことができる。

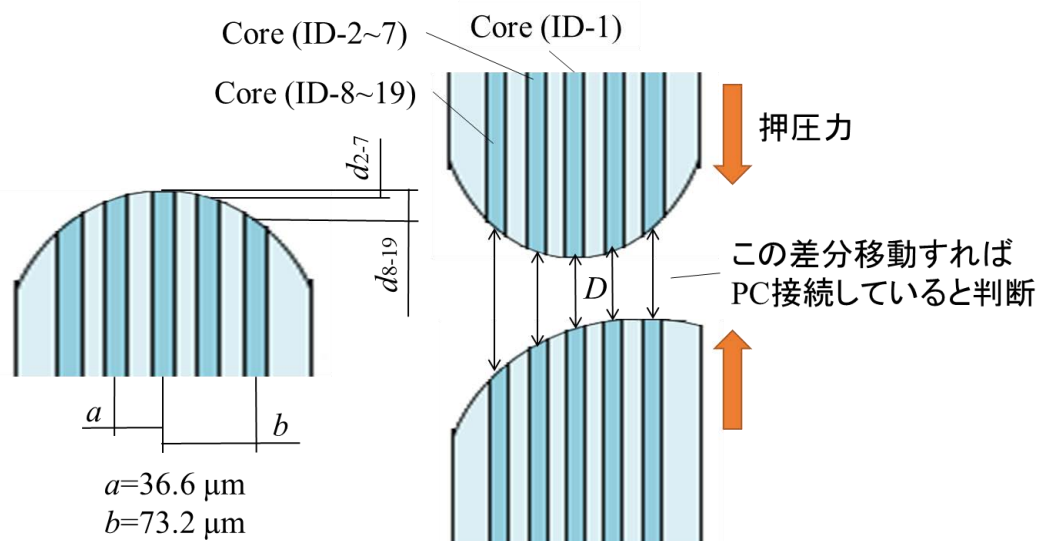


図 4.4.10 3D モデル双方を突き合わせた際のイメージ

3D モデルには押圧試験に使用したサンプルの端面形状を与えているため、頂点ずれたファイバ双方がお互いに突き合わせることになる。その結果、内周コアや外周コアそれぞれのコアで接触に必要な移動量 (D) が異なる。本検討では 3D モデル双方を突き合わせ、各コアの接触に必要な移動量 (D) を測定する。解析は突き合わせたフェールの頂点双方が接触したところをゼロ点とし、そこから徐々に押圧力を与え、接触に必要な移動量 (D) だけ移動した場合にファイバコア双方が接触していると判断する。

解析条件としてフェルール、ファイバ、接着剤はそれぞれボンドで固定した。また厚み $0.5 \mu\text{m}$ の接着層はスイープ、それ以外のメッシュは $10 \mu\text{m}$ の四面体で設定した。フェルール双方は挿入で設定後、円筒支持を施した。円筒支持は軸方向をフリーにし半径方向と接線方向は固定している。

MCF 端面形状の測定結果を基に、有限要素解析を用いてフェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の解析を行った。突き合わせた 3D モデルより測定した各コアの接触に必要な移動量 (D) の一例を表 4.4.5 に、解析結果の一例を図 4.4.11 と図 4.4.12 に示す。図 4.4.11 と図 4.4.12 の解析結果一例は、MCF の各コアが表 4.4.5 に示したコア毎の移動量を満たした場合にコア双方が接触している、すなわち移動量 (D) が 0 nm になったところで接触していると判断した。解析結果の一例より、センターコア (Core ID 1) は押圧力 0.8 N 付近で接触に必要な移動量を満たした。また全ての解析結果より、内周コアは $0.3\sim 1.6 \text{ N}$ 、外周コアは $1.6\sim 3.3 \text{ N}$ で接触に必要な移動量を満たした。

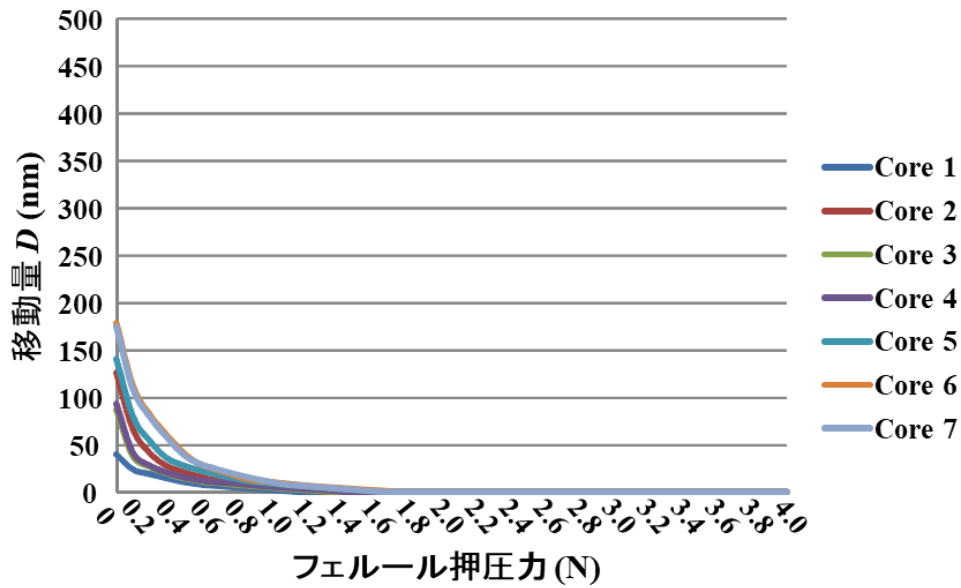


図 4.4.11 有限要素解析結果の一例 (Core ID 1-7)

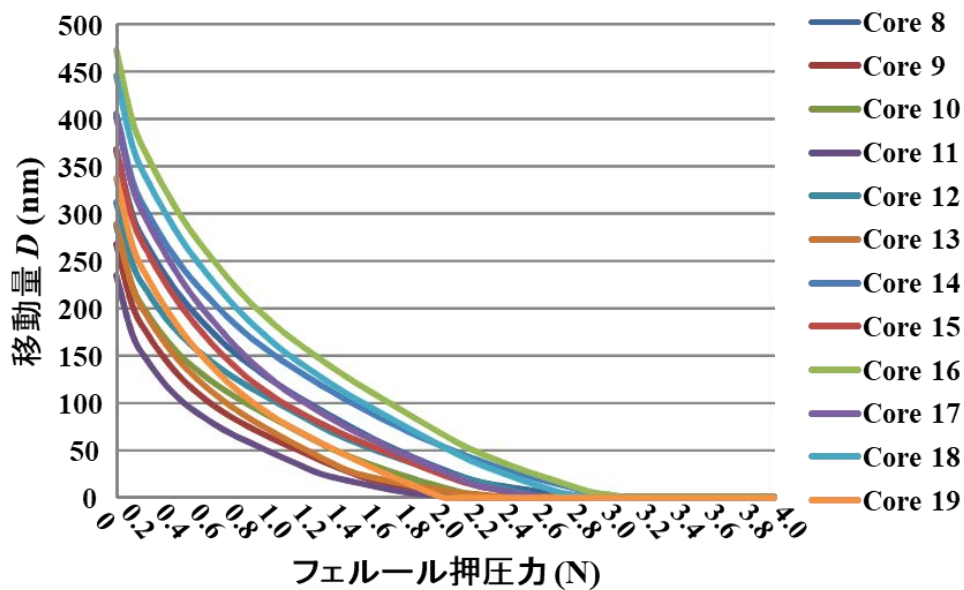


図 4.4.12 有限要素解析結果の一例 (Core ID 8-19)

これらの解析結果より、押圧力 0.1 N 毎の各コアの移動量 (D) を得ることができた。また頂点ずれを有するファイバ双方を接続しても、おおよそ 3 N 程度で 19 コア MCF の全コアが PC 接続していると考えられる。

表 4.4.5 接触に必要な移動量 (D) の一例 (押圧力 0 N の時)

Center core ID	D (nm)	Outer core IDs	D (nm)
Core 1	40.3	Core 8	367.9
Inner core IDs		Core 9	267.8
Core 2	126.2	Core 10	286.7
Core 3	87.7	Core 11	234.9
Core 4	93.9	Core 12	311.9
Core 5	141.6	Core 13	288.4
Core 6	179.4	Core 14	405
Core 7	175.5	Core 15	366.2
		Core 16	472.5
		Core 17	401.8
		Core 18	445.8
		Core 19	336.7

次に解析結果より得られた各コアのフェルール押圧力と移動量 (D) 使用し、押圧試験結果との比較を行うため反射減衰量の計算を行った。反射減衰量計算に使用した計算モデルを図 4.4.13 に、薄膜内で発生する多重反射のイメージ図を図 4.4.14 に示す。

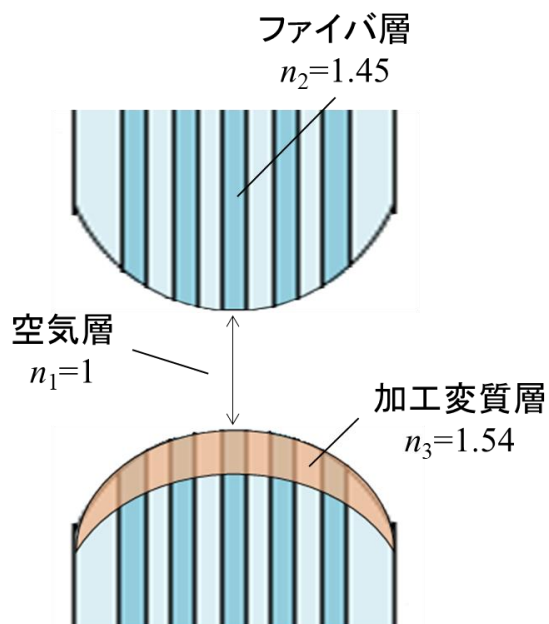


図 4.4.13 反射減衰量計算に使用した計算モデル，薄膜干渉スペクトルの計算式を用いた反射減衰量の導出

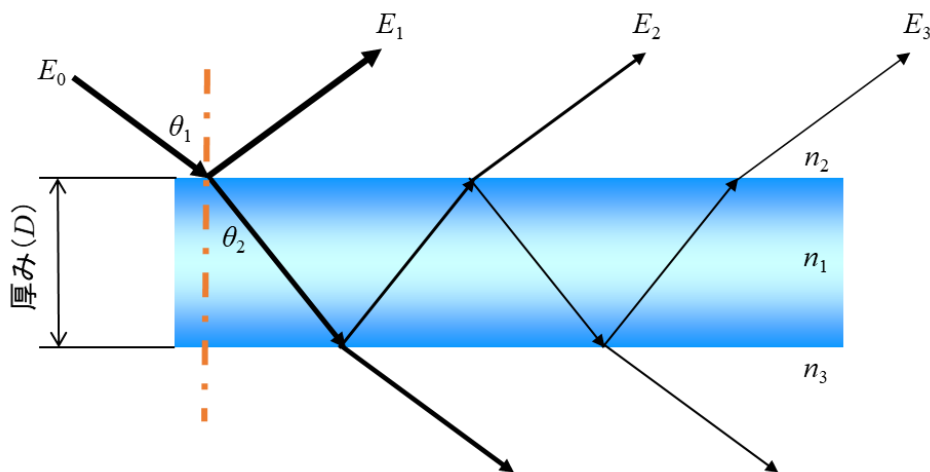


図 4.4.14 薄膜内（ファイバ端面間）で発生する多重反射のイメージ図

押圧試験に使用したマスタコードは内部反射測定のため加工変質層を可能な限り除去している。また、その他のサンプルはフェルールの仕上げ研磨にダイヤモンド研磨を施しているため、フェール端面には加工変質層が存在する。これらを突き合わせた際のフェール移動量 (D) はフェール双方の間隙であるため、空気層とみなすことができる。空気層、ファイバ層、加工変質層、これら3つの領域を薄膜とみなすことで、押圧力毎の移動量 (D) を使用し反射減衰量を計算することができる。

各層の屈折率をそれぞれ n_1 , n_2 , n_3 、入射角度を θ_1 、層中の屈折角を θ_2 とすると、 θ_2 はスネルの法則 (4.4.1) より計算できる。(n_0 : 空気層の屈折率, n_1 : ファイバの屈折率, n_2 : 加工変質層の屈折率)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \cdots (4.4.1)$$

また反射した光の電場 E は、多重反射を考慮して式 (4.4.2) のように無限級数で表すことができる¹²⁾。(E_0 : 入射光の電場, r : 振幅反射率, t : 振幅透過率)

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \cdots$$

$$E = E_0 \left(r_{12} + t_{12} t_{21} r_{23} e^{i\Delta} \frac{1}{1 - r_{23} r_{21} e^{i\Delta}} \right) \cdots (4.4.2)$$

ここで Δ は薄膜を V 字型に往復したときの位相差で、光の波長 λ を用いて式 (4.4.3) で与えられる。(D : 膜の厚み, または移動量)

$$\Delta = \frac{4\pi n_2 D \cos\theta_2}{\lambda} \dots (4.4.3)$$

計算に使用した値を表 4.4.6 に示す. 表 4.4.6 内の屈折率や厚みなどは過去に報告された内容を参考に設定した¹³⁻¹⁴⁾.

表 4.4.6 反射減衰量の計算に使用した値

空気層の屈折率 (n_1)	1
空気層の厚み (D)	押圧力毎の移動量
ファイバ層の屈折率 (n_2)	1.452
加工変質層の屈折率 (n_3)	1.537
加工変質層の厚み (D_3)	77.5 nm
θ_1	0
θ_2	0

押圧試験結果は測定系の内部反射を含んだ結果であるため, それらの値と計算結果を比較すると誤差が生じると考えられる. よって測定系の内部反射 (表 4.4.1) と計算結果を足し合わせることで反射減衰量を計算した. 押圧試験と同じ条件で反射減衰量を計算する場合, フェルール押圧力毎の反射減衰量 (RL_n) は式 (4.4.4) のように表すことができる. ($coreN$: コア番号 1~19, $R_{coreN-in}$: 各コアの測定系内部反射率, R_{coreN} : 各コアの全体反射率)

$$RL_n = -10 \log \left(\frac{R_{coreN-in} + R_{coreN}}{100} \right) \dots (4.4.4)$$

これらの式を用いて反射減衰量の計算を行った. 計算は空気層の厚みを接触到に必要な移動量 (D) とした. フェルール押圧力毎に変化する移動量 (D) を使用し, 各コアの押圧力 (0.1 N 刻み) と移動量 (D) から反射減衰量を計算した.

反射減衰量計算結果の一例を図 4.4.15 と図 4.4.16 に示す. 計算結果より, センターコアが接触した時点で内周コアも 30 dB 以上を示しており, 外周コアは押圧力 2 N 付近で全コア 30 dB 以上を示した. また押圧試験結果 (図 4.4.7 と 4.4.8) と同じく, 反射減衰量が山なりに変化していることを確認した. 押圧試験結果では精密スリーブを使用しているため, フェルールとスリーブに隙間 (1 μ m 程度) が生じること, またフェルール双方の向きの違いなどから, 計算結果と多少のズレが生じたと考えられるが, 内周コアと外周コアで接触到に必要な押圧力は, 押圧試験結果と近い値を示していることを確認した.

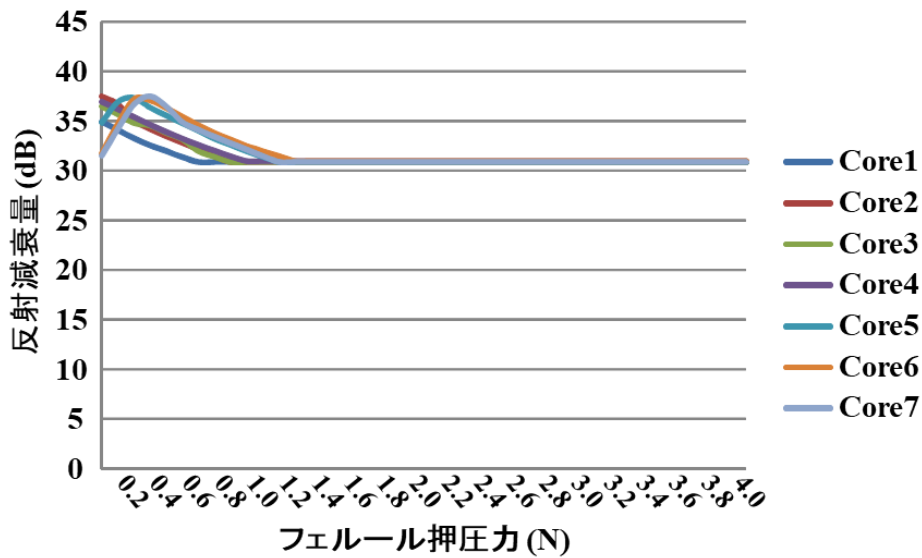


図 4.4.15 Core ID 1~7（中心コアと内周コア）の計算結果一例

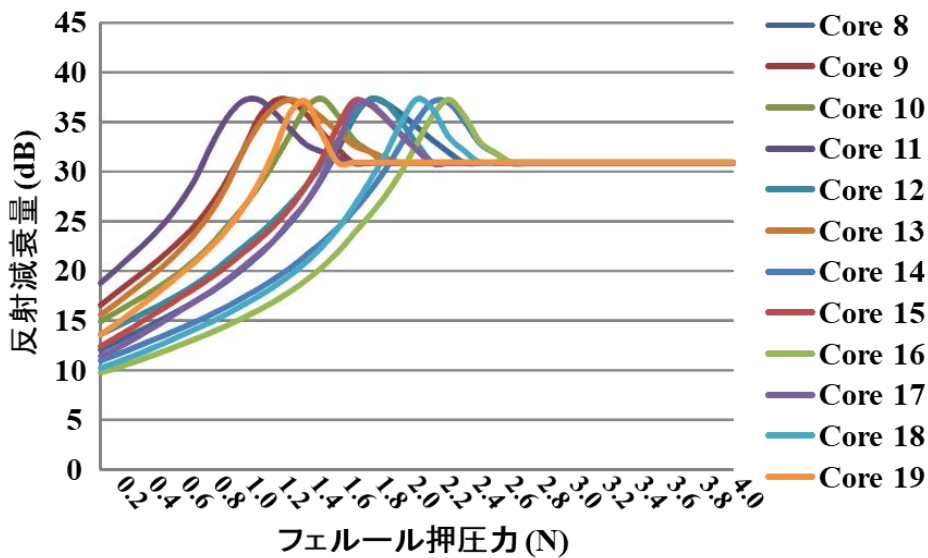


図 4.4.16 Core ID 8~19（外周コア）の計算結果一例

フェルール押圧力と接触したコアの関係を試験結果と解析結果で比較した。フェルール押圧試験結果と解析結果の比較を図 4.4.17 に、押圧力と接触範囲の関係を図 4.4.18 に示す。これらの図より 2 つの結果を比較したところ、どちらもフェルール押圧力が上がるごとに接触コア数も増えていき、2.0 N 以上で 19 コア全てが接触する結果であった。どちらの結果も同じ傾向であることから押圧試験より得られた結果は適当であるといえ、有限要素解析の解析手法も適当で

あると考えられる。

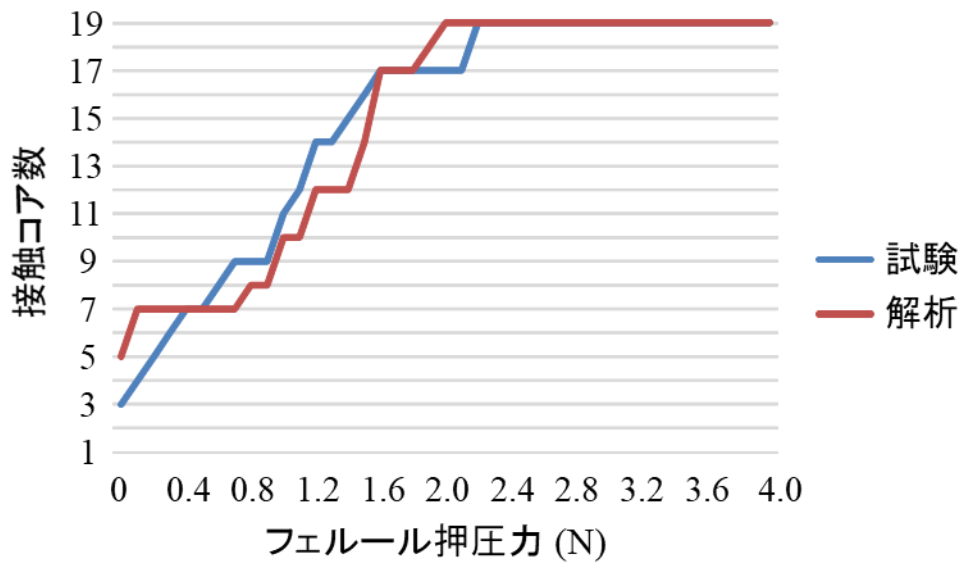


図 4.4.17 フェルール押圧試験結果と解析結果の比較

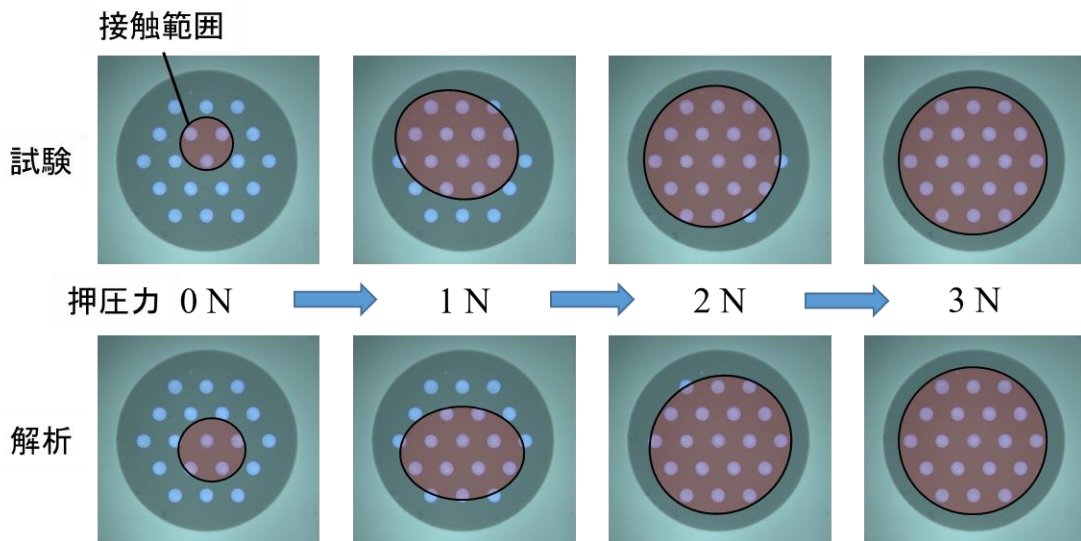


図 4.4.18 押圧力と接触範囲の関係

またファイバ端面が設計基準値（曲率半径 16 mm，頂点ずれ 0 μm ，引き込み 0 nm）の 3D モデルを 2 つ用意しそれらを突き合わせ，接触に必要な移動量 (D) を解析より求めた．センターコアが接触したところをゼロ点とし，そこから押圧力を与え内周コアと外周コアの接触に必要な押圧力を調べ，反射減衰量を計算した．

解析結果を図 4.4.19 と図 4.4.20 に示す．頂点ずれが存在しない，また各コア

の内部反射に大きな差がないため、各コアの押圧力に違いは確認できず、内周コアは 0.2 N 程度、外周コアは 1.8 N 程度で反射減衰量が 30 dB 以上を示した。頂点ずれが有る場合と無い場合の解析結果を比較したところ、接触に必要な押圧力におおきな差が生じることはなかった。よってクラッドの大きい MCF で頂点ずれが存在しても、その頂点ずれが設計値内に収まっていれば接触に必要な押圧力に大きな違いは生じないと考えられる。

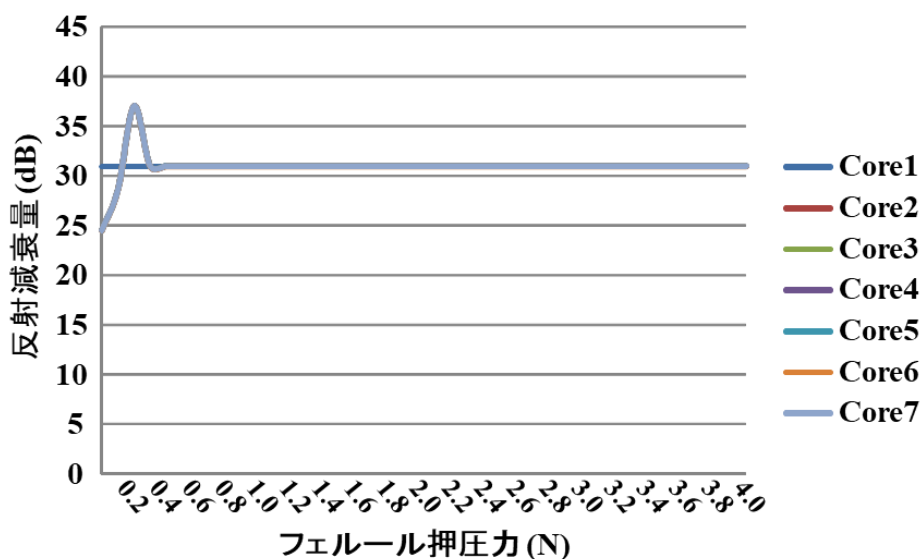


図 4.4.19 Core ID 2~7 (内周コア) の計算結果

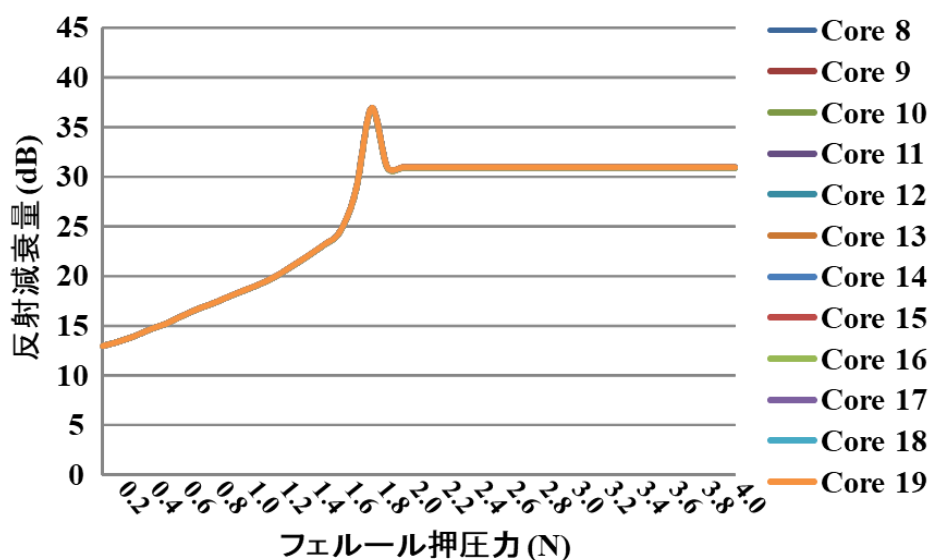


図 4.4.20 Core ID 8~19 (外周コア) の計算結果

4) 実験, 解析, 計算の結果比較

ファイバの頂点双方が接触した後の弾性変形はヤング率 E , ポアソン比 ν 共に MCF の値 (表 4.4.1) を用いて, ヘルツの接触理論式 (4.4.5) で表すことができる¹⁵⁾. 使用した MCF より, センターコアから内周コアの距離 (a) は $36.6 \mu\text{m}$, センターコアから外周コアの距離 (b) は $73.2 \mu\text{m}$ である.

$$F_p = \frac{4(a \text{ or } b)^3 E}{3(1 - \nu^2)R} \dots (4.4.5)$$

ヘルツの接触理論式を用いて計算した結果, 内周コアは 0.35 N , 外周コアは 2.79 N で接触に必要な押圧力を満たすことがわかった. 以上の検討から, PC 接続に必要なとされる押圧力を試験結果, 解析結果, 計算結果をそれぞれ比較した. 試験結果, 解析結果, 計算結果を表 4.4.7 にまとめて示す. 使用した 19 コア MCF の全コア PC 接続を満たすのに必要とされる押圧力は試験結果では $1.8\sim 3.0 \text{ N}$, 解析結果では $1.5\sim 3.3 \text{ N}$ であり, 試験結果と解析結果が近い値を示していることを確認した. また計算結果も実測値と解析結果の値内に収まっていることを確認した. 以上の結果から, フェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の関係を, 試験と解析を用いて明らかにすると共に, 有限要素解析手法を確立した.

一般的な光ファイバは押圧力 $0.3\sim 1.2 \text{ N}$ 付近で接触半径 $36 \mu\text{m}$ 程度, 押圧力 $1.8\sim 3.3 \text{ N}$ で接触半径 $73 \mu\text{m}$ 程度の弾性変形を起こしていると考えられる. また SMF のクラッド径は $125 \mu\text{m}$ であることから, 押圧力 $1.2\sim 1.8 \text{ N}$ 付近でファイバ全体が接続対象に接触していると考えられる. SC 形光コネクタの押圧ばねは $7.8\sim 11.8 \text{ N}$, MU 形光コネクタの押圧ばねは $5.5\sim 6.5 \text{ N}$ のものを使用されているため, PC 接続されたファイバは接続対象に端面全体が接触していると考えられる.

表 4.4.7 PC 接続に必要な押圧力の結果比較

Ferrule pressure (N)	Measured	FEM	Herz's formula
Inner core (ID2-7)	0.3 – 0.6	0.3 – 1.2	0.35
Outer core (ID8-19)	1.8 – 3.0	1.5 – 3.3	2.79

4.5 まとめ

光通信用に MCF が標準化された場合，その MCF をバット・ジョイントで接続できるかの判断は，フェルール押圧力と弾性変形の関係が明らかになっていなければ検証することができないため，本研究では今まで明らかになっていなかった PC 接続時のフェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の間を，MCF を用いて明らかにした．MCF はクラッド中心からコアが六方最密で広範囲に配置されている 19 コア MCF を使用した．

はじめにオルダム・カップリング構造の 19 コア MCF コネクタを試作し，19 コア MCF コネクタの光学特性を評価するため，ランダム接続損失測定試験と反射減衰量測定を行った．測定結果より，全コアでの平均損失は 0.03 dB，内周コアの平均損失 0.18 dB，外周コアの平均損失は 0.52 dB であった．センターコアの損失ばらつきが非常に小さく，外周コアで損失にばらつきが発生する傾向が得られた．センターコアは一般的に普及している SMF コネクタと同等の特性であることから，内周コアと外周コアの接続損失はフェルール角度ずれの影響であると考えられる．

試作した 19 コア MCF コネクタを使用し，反射減衰量の評価を行った．測定結果より，すべてのコアで反射減衰量が 30 dB 以上であることから全コアで PC 接続している事を確認した．19 コア MCF コネクタの光学特性が良好な結果を得られたことから，仕上げ研磨である SiO₂ 研磨の条件を最適化すれば，クラッド径の大きな MCF であっても AdPC 研磨の条件をそのまま流用できる可能性があることを示した．

光コネクタのフェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の間を明らかにするため，19 コア MCF を使用し，全コア PC 接続するために必要とされる押圧力を調べた．フェルール押圧力を徐々に増加させることで荷重と反射減衰量の間を調べた．測定結果より，内周コアは押圧力 0.3~0.6 N，外周コアは押圧力 1.8~3.0 N で反射減衰量が 30 dB 以上を示した．MU 形光コネクタ内部の押圧ばねは 5.5~6.5 N であるため，クラッド中心から 73.2 μm の位置にコアが配置されていても，PC 接続の達成に十分な押圧力が与えられていることを確認した．

試験結果との比較を行うため有限要素解析により，フェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の間を調べた．有限要素解析に使用する 3D モデルの曲率半径，頂点ずれ，ファイバ引き込みは実験に使用したサンプルと同じ値をそれぞれに設定した．解析結果より，センターコアは頂点ずれを引き起こしていても押圧力を与えた直後に接触に必要な移動量を満たした．内周コアは 0.3~1.2 N，外周コアは 1.5~3.3 N で接触に必要な移動量を満たしていることを確認した．

ヘルツの接触理論式を用いてファイバ端面の弾性変形を計算した結果，内周コアは 0.35 N，外周コアは 2.79 N で接触に必要な押圧力を満たすことがわかつ

た．試験結果，解析結果，計算結果のすべてが近い値を示していることを確認した．

SMF のクラッド径は $125\ \mu\text{m}$ であることから，押圧力 $1.2\sim 1.8\ \text{N}$ 付近でファイバ全体が接続対象に接触していると考えられる．SC 形光コネクタの押圧ばねは $7.8\sim 11.8\ \text{N}$ ，MU 形光コネクタの押圧ばねは $5.5\sim 6.5\ \text{N}$ のものが使用されているため，PC 接続された SMF は接続対象にファイバ端面全体が接触していると考えられる．

本研究により，これまで検討されていなかった PC 接続時の押圧力と中心以外のファイバ端面弾性変形の詳細を明らかにすると共に，フェルルール押圧力とファイバ端面弾性変形の有限要素解析手法を確立した．

第4章の参考文献

- (1) N.Suzuki, Y.Iwahara, M.Saruwatari, and K.Nawata: “Ceramic capillary connector for 1.3 μ m single mode- fibers,” *Electron. Lett*, vol.15, no.25, pp.809-811, (1979).
- (2) E. Sugita, R. Nagase, K. Kanayama, and T. Shintaku: “SC-type single-mode optical fiber connectors,” *IEEE J. Lightwave Technol*, vol.7, no.11, pp.1689-1696, (1989).
- (3) T. Shintaku, E. Sugita, and R. Nagase: “Highly Stable Physical-Contact Optical Fiber Connectors with Spherical Convex Ends,” *IEEE J. Lightwave Technol*, vol.11, no.2, pp.241-248, (1993).
- (4) T. Shintaku, R. Nagase, and E. Sugita: “Connection mechanism of physical-contact optical fiber connectors with spherical convex polished ends,” *Appl. Opt*, vol.30, no.36 / 20, pp.5260-5265, (1991).
- (5) K. Watanabe, T. Saito, and M. Shiino: “Development of fiber bundle type fan-out for 19-core multicore fiber,” in *Proc. OECC2012*, 5C1-2, pp.44-46, (2012).
- (6) 渡辺健吾, 齋藤恒聡, 椎野雅人, “19 コア MCF 用ファイババンドル型ファンアウトの開発”, 信学技報, vol.114, no.195, OCS2014-35, pp. 21-26 (2014).
- (7) 大平 文和, 松永 和夫, 斉藤 忠男, “光コネクタの加工技術”, 光学素子加工の進歩 25 巻 2 号, pp.95 (21), (1996).
- (8) R. Nagase, T. Shintaku, and E. Sugita: “Effect of Axial Compressive force for Connection Stability in PC Optical Fiber Connectors,” *Electron Lett*, vol.23 no.3, (1987).
- (9) S. Matsui, F. Ohira, K. Koyabu, and K. Matsunaga: “Characterization of Machining-Damage Layer for Optical Fiber Ends -Relation between Damaged Layer and Return Loss-,” *Japan Society for Precision Engineering*, vol.64, no.10, pp. 1467, (1998).
- (10) K. Shikama, Y. Abe, S. Yanagi and T. Takahashi: “Physical-contact conditions for multicore fiber optical connectors,” in *Proc. OSA Publishing OFC2013*, pp. OM3I-1, (2013).
- (11) アダマンド工業: シングルモードフェルルール(ϕ 1.25 mm), AMU-FSD タイプ. (2018 年現在).
- (12) S. Yoshioka: “Structural Color in Nature: Basic Observation and Analysis,” *Pattern Formation and Oscillatory Phenomena*, Chapter 6, pp. 199-251, (2013).
- (13) K. Kazunori, Y. Ando, R. Nagase, and S. Iwano: “Evaluation Method and Performance of Advanced Low-Reflection Optical Connectors,” *IWCS Proceedings*, pp. 785-790, (1992).
- (14) 松井伸介, 大平文和, 小藪国夫, 松永和夫, “光ファイバの端面研磨と加工変質層—加工変質層と反射減衰量の関係—”, 精密工学会誌, vol.64, no.10

pp.1467-1471, (1998).

- (15) S. Timoshenko, and J. N. Goodier: “Theory of Elasticity,” McGraw-Hill, New York: D. Van Nostrum Company Inc. (1951).

第4章に関連する学会発表および論文

- (1) 境目賢義, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, “19 コアマルチコアファイバの PC 接続”, 信学技報, vol. 115, no. 202, OFT2015-17, pp. 9-12, (2015).
- (2) 青野志郎, 境目賢義, 三枝大祐, 長瀬亮, “光コネクタ接続部の微小変形に関する研究 (2) ”, 信学技報, vol.115, no.455, EMD2015-97, pp. 25-30 (2016).
- (3) 青野志郎, 三枝大祐, 境目賢義, 長瀬亮, “光コネクタ接続部の微小変形に関する研究”, 信学技報, vol.115, no.489, EMD2015-110, pp. 45-48 (2016).
- (4) 境目賢義, 荒井健汰, 長瀬亮, 渡辺健吾, 斎藤恒聡, 杉崎隆一, “MCF コネクタを用いた PC 接続におけるフェルール端面変形解析”, 信学技報, vol. 116, no. 197, OCS2016-34, pp. 47-52, (2016).
- (5) 荒井健汰, 境目賢義, 豊田誠, 長瀬亮, “ [ポスター講演] MCF コネクタを用いた PC 接続におけるフェルール端面変形解析 (2) ”, 信学技報, vol. 117, no. 54, OFT2017-7, pp. 29-34, (2017).
- (6) K. Sakai, K. Arai and R. Nagase: “Microscopic deformation analysis of PC connector endfaces using multicore fiber,” in *Proc. 43rd European Conference on Optical Communication ECOC2017*, SC1, P1.SC1.7, (2017).
- (7) 境目賢義, 荒井健汰, 園田輝, 長瀬亮, “MCF を用いた PC 端面の微小変形解析”, 信学技報, vol.117, no.433, OCS2017-82, pp.15-20, (2018).

第5章 光コネクタ用割りスリーブの設計手法に関する検討

5.1 はじめに

本章では明らかになっていない割りスリーブの設計手法を確立させるため、割りスリーブの設計に役立つ有限要素解析手法の確立を目的とする。

光通信ネットワークで使用される SMF 用光コネクタの光学特性として、接続損失 0.5 dB 以下、反射減衰量 40 dB 以上が要求される。この要求条件を満たす 1 つの技術として、光コネクタは一般的にファイバをフェルールに接着固定し、その端面を直接突き合わせるバッドジョイント法が用いられる。光コネクタの要求条件をバッドジョイント法で満足させるには、約 1 μm 以下の精度でファイバ中心軸を整列しなければならない。この精度を再現性よく実現させる方法として、ファイバを中心に接着固定したフェルール双方を弾性スリーブで整列、突き当てることにより接続する方法である。ここで使用される弾性スリーブとして、フェールの外径よりわずかに小さい内径を有する円環に割りを入れた割りスリーブが一般的に使われており、単心コネクタ接続時の必須部品となっており広く普及している。

現在使われている通信用単心コネクタのほとんどは割りスリーブを使用して接続している。割りスリーブはフェールの外径よりわずかに小さい内径を有しているため、フェール挿入時の弾性変形により隙間なくフェールを保持すると考えられているが、変形量が微小なため実測が難しく、これまで経験則により設計されていた。割りスリーブの微小変形については過去に様々な試みがなされているが¹⁻⁵⁾、割りスリーブの変形量はナノメートルオーダーであり実際に測定するのは非常に困難である。

標準化された MCF の各種寸法が既存の SMF と異なる場合、MCF 全コアを PC 接続させるためにフェール押圧力を変更する可能性が考えられる。その場合、既存の割りスリーブのフェール保持力が適切であるかを判断しなければならないが、割りスリーブの設計手法は未だ確立しておらず、フェール保持力の最適化は困難である。よって本研究では、今まで明らかにならなかった割りスリーブの微小変形を、実験と有限要素解析を用いて明らかにし、経験則により設計されていた割りスリーブの設計手法確立について検討した。はじめに SC 形光コネクタに使用される割りスリーブの微小変形について、実験と有限要素解析を同じ条件で行い、それら比較することで微小変形詳細について調べた。またフェール先端を斜め 8 度に凸球面状に研磨する APC コネクタにおいて、接続時に観測される接続損失の割りスリーブ方向依存性に着目し、フェール挿入時の割りスリーブ変形に関する有限要素解析結果と接続損失変動の実測値を比較した。これら実験と有限要素解析の比較により、割りスリーブの微小変形の詳

細を明らかにするとともに、割りスリーブの設計手法について検討した。

MU 形光コネクタに使用される割りスリーブは非常に小さく実験が困難であるため、本章では MU 形ではなく SC 形の割りスリーブについて検討を行う。

5.2 光コネクタ整列技術の変移

光コネクタ（フェルール）の軸を整列させる最も簡単な方法は、円筒軸（フェルールと穴（スリーブ）のはめあいである。光コネクタでこの方法を用いて接続するには、貫通した円筒スリーブの双方からフェルールを挿入して突き合わせる方法が一般的である。これらのスリーブは精密スリーブ（ソリッドスリーブ）と呼ばれ、フェルールを用いた光コネクタの整列技術として提案された。

精密スリーブを用いた整列方法は DIN コネクタや SMA コネクタなどで採用されている⁶⁾。軸と穴のはめあいを用いた方法は、フェルールを簡単に挿入できるように穴に隙間を設ける必要がある。この隙間は最小でも 2 μm 程度必要であり、SMF を接続するには隙間が軸ずれ要因となる関係上、整列精度は不十分である。

より精度の高い整列方法として、フェルールやスリーブ内をテーパ状（円錐形状）にして接続する方法が Biconic コネクタ（AT&T）で使用された⁷⁾。この方法は双方のフェルール軸を高精度で整列できるが、フェルール端面間の調整が難しく、またテーパの形成に高い精度が要求されるためコストが高くなってしまいう問題があげられた。

SMF に要求される精度を有しつつ、低コストを実現するために提案されたのが弾性スリーブである。弾性スリーブはフェールの外径よりわずかに小さい内径を有する円環に割りを入れた割りスリーブである。割りスリーブは、半径方向に適度な弾性を有しつつ、軸方向に剛性を有するものが望ましいため、材料として当初は、代表的なばね材料の 1 つであるリン青銅が使われてきた。

リン青銅製割りスリーブにジルコニアフェルールを挿入すると、フェルール先端のエッジ部分により割りスリーブの内面が削られることで、金属粉が発生することがある。この金属粉がフェルール端面に付着するとフェルール端面間に隙間を発生させ、光学特性の劣化要因となる。通常はフェルール端面を清掃することにより、光学特性の劣化を防ぐことができるが、ファイバに高パワーの光信号が伝搬されている場合、金属粉がフェルール端面に焼き付き、コネクタ自体を破損することがある。よって割りスリーブにジルコニアを使用することが提案された。

ジルコニアはフェルールと同じ硬度であるため、割りスリーブとの摩擦で研磨粉が発生することは極めて稀である。またジルコニアはセラミック材料の中で最も曲げ強度が高く、かつ比較的縦弾性係数（ヤング率）が低いため、ばね材料として適しており、安価で高精度な製造方法が確立しているため、現在はリン

青銅製割りスリーブよりもジルコニア製割りスリーブが一般的に普及している。割りスリーブの特徴は、割りスリーブ各寸法に精密スリーブほどの精度が要求されないこと、フェルールを再現性良く整列できることである。フェルール外径さえ一致していれば、割りスリーブの弾性変形によって双方の軸を高精度に再現性良く整列されることが可能である。フェルール外径の高精度加工は容易であるため、割りスリーブを使用すれば、高精度で安価な光コネクタ（フェルール）の整列が可能となる。

5.3 割りスリーブの変形解析

1) 3D モデルを用いた有限要素解析

有限要素解析に使用する割りスリーブとフェルールの 3D モデルを作成した。3D モデルに使用した寸法と物性値を表 5.3.1 に、フェルールと割りスリーブの 3D モデル外観を図 5.3.1 に示す。3D モデルには表 5.3.1 の寸法と物性値を基に、SC 形光コネクタに使用される PC 端面用 SC フェルールとそれに対応する割りスリーブをそれぞれ作成した。

表 5.3.1 3D モデルに使用した寸法と物性値

SC 用フェルール外径 (mm)	2.499
割りスリーブ長さ (mm)	11.4
割りスリーブ厚さ (mm)	3.6
ジルコニアのヤング率 (GPa)	200
ジルコニアのポアソン比	0.31

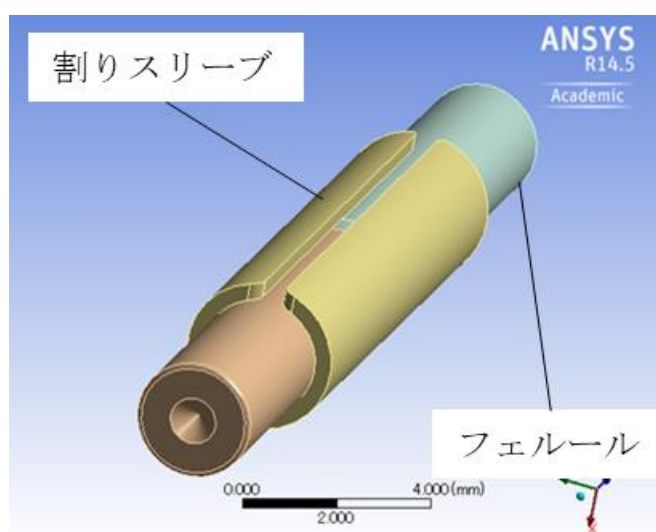


図 5.3.1 フェルールと割りスリーブの接続状態の 3D モデル外観

フェルール挿入時、割りスリーブは図 5.3.2 に示す形状に変形すると考えられている。フェルール挿入前の割りスリーブ内径はフェルール外径よりわずかに小さく作られているため、割りスリーブにフェルールを挿入すると、割りスリーブは弾性変形し、フェルールを保持する力が発生する。このときフェルールと割りスリーブの接触部分は、図 5.3.2 に示すように、割りのエッジ部分 2 点 (α , β) および割りの反対側 (γ) の 3 点で接触すると考えられる。この形状はフェルールを挿入した割りスリーブ内面のフェルール先端付近を真円度測定器で測定することにより確認されている⁸⁾。よってフェルール挿入時の割りスリーブは、 γ を支持部として最大応力が作用し、 α 及び β が変形していると考えられる。本研究ではフェルールを挿入した際の接触している 3 点について、割りスリーブに加わる最大応力値とエッジ部分（割り幅）の最大変形量を解析より求めた。

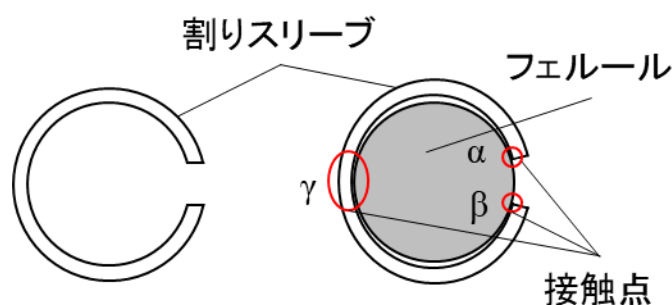


図 5.3.2 割りスリーブとフェールの関係図

解析はフェルール挿入前の割りスリーブを基準とし、フェルール双方を割りスリーブに挿入し突き合わせたときの、割りスリーブに加わる最大応力と割り幅の最大変形量を求めた。解析では割りスリーブにフェルールを挿入すると、スリーブ内径とフェルール外径の違いから、接触点 (α , β , γ) が干渉してしまう。よって本解析ではフェルール挿入時の干渉部分の接触距離（オフセット）をゼロに設定した。またフェルール双方には軸ずれを起こさないよう円筒支持で拘束した。本解析では割りスリーブに拘束は与えていないため、弱いばねで支える設定をしている。解析でのエラーを防ぐため、割りスリーブとフェルールに摩擦を設定した。ジルコニアの摩擦係数は 0.2 とした。

フェルール挿入前の割りスリーブを基準とし、フェルール双方を割りスリーブに挿入し突き合わせたときの最大応力と割り部分の最大変形量を解析により求めた結果を主応力分布のコンター図と合わせて図 5.3.3 に示す。最大応力は主応力を示しており、フェルール挿入時の割りスリーブの変形方向に作用する力である。解析結果より、最大応力は 90 MPa、割り部分の最大変形量は 17 μm であった。また図 5.3.3 に示すように接触点 γ が 2 カ所ある結果を示した。

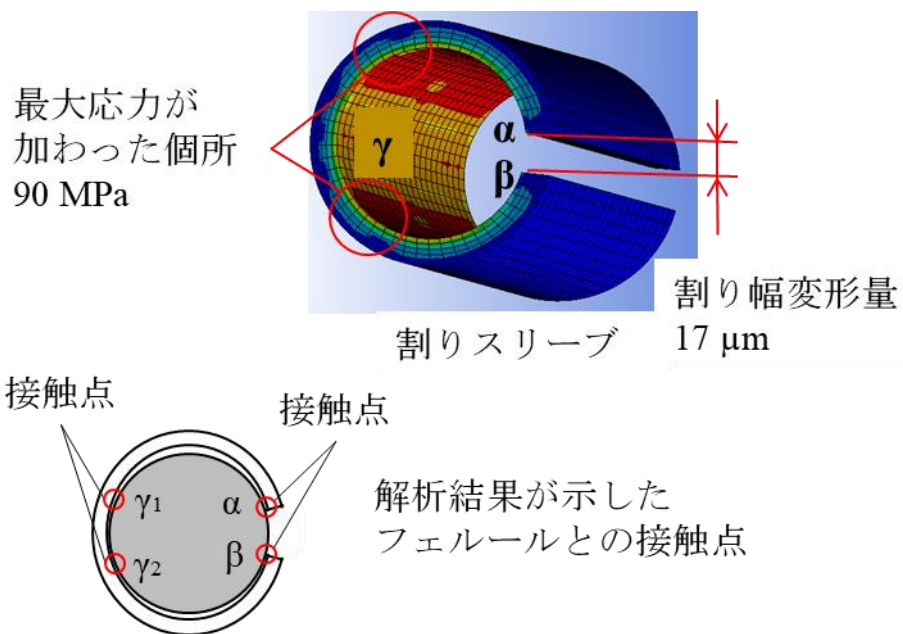


図 5.3.3 フェルール挿入時の割りスリーブ解析結果

2) 曲り梁を用いた計算

有限要素解析より得られた最大応力と比較をするため、割りスリーブに加わる最大応力を計算より求めた。曲り梁を使用した計算モデルの模式図を図 5.3.4 に示す。

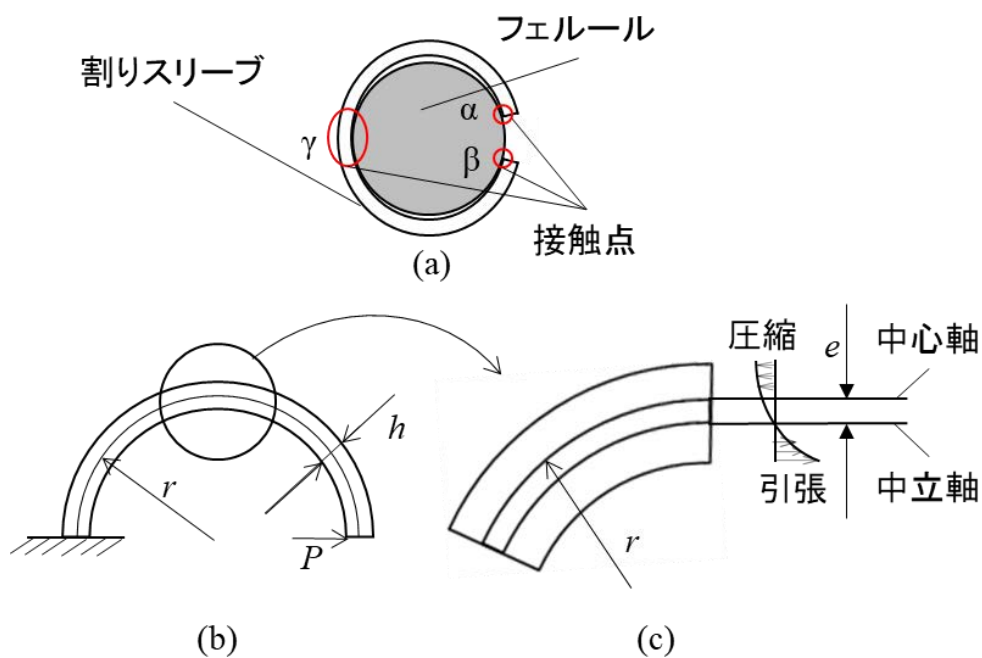


図 5.3.4 曲り梁を使用した計算モデルの模式図

図 5.3.4 (a)において、割りスリーブの変形は図の上下で対称であるので変形を計算するには図 5.3.4 (b)に示すように片持ちの曲り梁とみなすことができる。割りのエッジにかかる力は、正確には力の釣り合いを考慮する必要があるが、割りが細い場合には、図 5.3.4 (b)に示すように半円形の梁のエッジに直径方向の力が作用すると近似することにより計算することができる⁸⁾。

図 5.3.4 (b)に示すように曲り梁の先端に力 P が作用したとき、曲り梁の近接 2 断面間に作用する曲げモーメントを M 、梁の中心線方向の縦力を N 、せん断力を V とする。このとき、中心角 $d\phi$ の微小部分における M 、 N 、 V の関係を図 5.3.5 に示す。

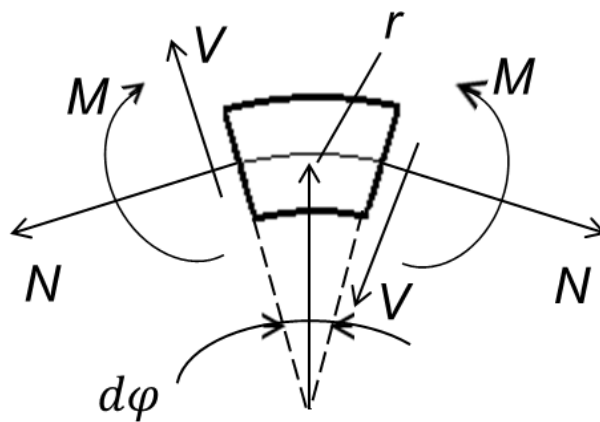


図 5.3.5 中心角 $d\phi$ の微小部分における M 、 N 、 V の関係

この微小部分に蓄えられる曲げモーメントによるひずみエネルギー dU_1 は次式 (5.3.1) で求められる。ここで A は梁の断面積、 E はヤング率、 e は図 5.3.2 (c) 中に示す曲り梁の中心軸と応力の中立軸の距離である。

$$dU_1 = \frac{1}{2} M \Delta d\phi = \frac{M^2 ds}{2AEer} \dots (5.3.1)$$

中心軸の内側では引張荷重、外側では圧縮応力が作用する。割りスリーブは矩形断面であるから、梁の中心軸までの半径を r 、厚みを h とすれば、 e は式 (5.3.2) で表すことができる⁹⁾。

$$e = r - \frac{h}{\log_e \left(\frac{r+h/2}{r-h/2} \right)} \dots (5.3.2)$$

次に縦力 N によってこの微小部分に蓄えられるひずみエネルギー dU_2 は式 (5.3.3) で求められる。

$$dU_2 = \frac{N^2 ds}{2AE} - \frac{MN ds}{2AEr} \dots (5.3.3)$$

また、せん断力 V によるひずみエネルギー dU_3 は式 (5.3.4) で求められる。

$$dU_3 = \frac{\alpha V^2 (1 + \nu)}{AE} ds \dots (5.3.4)$$

ただし、 α は断面の形によって定まる係数、すなわち最大せん断応力と平均せん断応力の比であり、短形断面の場合は $\alpha=3/2$ である。また ν はポアソン比である。曲り梁に蓄えられる全ひずみエネルギー U は式 (5.3.1) , (5.3.3) , (5.3.4) の和を梁の全長にわたって積分することによって式 (5.3.5) より得られる。

$$U = \int_0^s \left(\frac{M^2}{2AEer} + \frac{N^2}{2AE} - \frac{MN}{2AEr} + \frac{\alpha V^2 (1 + \nu)}{AE} \right) ds \dots (5.3.5)$$

曲り梁に作用する力 P について図 5.3.6 に示す。力 P が X 方向に作用しているとした場合、力 P は図 5.3.6 のように表すことができる。

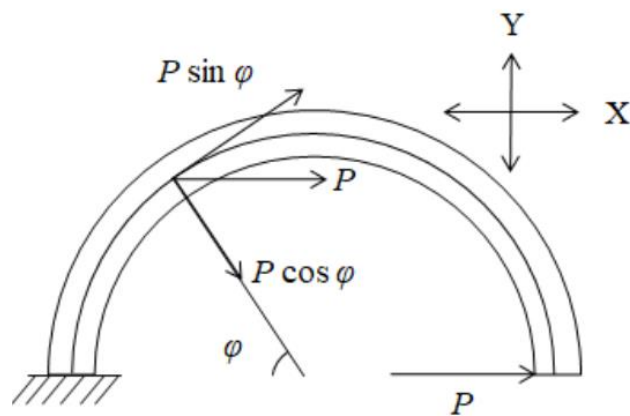


図 5.3.6 曲り梁に加わる力 P (X 方向) について

また図 5.3.6 より、 M 、 N 、 V 、 s 、 ds は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
M &= Pr \sin \varphi \\
N &= P \sin \varphi \\
V &= P \cos \varphi \quad \dots (5.3.6) \\
s &= r\varphi \\
ds &= r d\varphi
\end{aligned}$$

これら (5.3.6) の値を式 (5.3.5) に代入し整理すると以下の式 (5.3.7) が得られる。

$$\begin{aligned}
U &= \int_0^s \left(\frac{M^2}{2AEer} + \frac{N^2}{2AE} - \frac{MN}{2AEr} + \frac{\alpha V^2(1+\nu)}{AE} \right) ds \\
&= \frac{1}{AE} \int_0^\pi \left(\frac{P^2 r^2 \sin^2 \varphi}{2er} + \frac{P^2 \sin^2 \varphi}{2} - P^2 r \sin \varphi^2 + \alpha P^2 (1+\nu) \cos^2 \varphi \right) r d\varphi \\
&= \frac{\pi P^2 r}{4AE} \left\{ \frac{r}{e} + 2\alpha(1+\nu) - 1 \right\} \dots (5.3.7)
\end{aligned}$$

ここでエッジ部分の水平方向のたわみ δ は Castigliano の定理により式 (5.3.8) で与えられる。

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{\pi Pr}{2AE} \left\{ \frac{r}{e} + 2\alpha(1+\nu) - 1 \right\} \dots (5.3.8)$$

エッジの水平方向のたわみ δ について、曲り梁の概略図を図 5.3.7 に示す。本論文では割りスリーブを曲り梁としたとき、力 P による割り幅の変形量をたわみ δ とした。この計算では力 P が X 方向に作用しているため、割り部分も X 方向に変形していると考えられる。

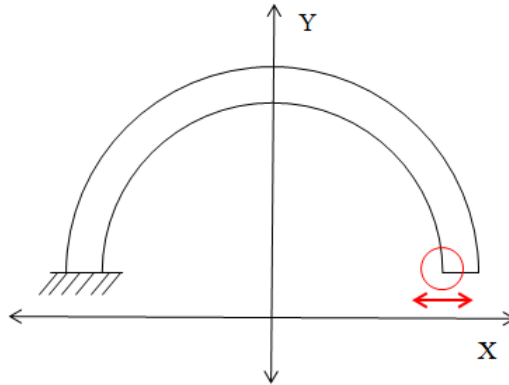


図 5.3.7 エッジの水平方向のたわみ δ についての曲り梁概略図

次に、割りスリーブに発生する最大応力 σ_{\max} は割りスリーブ内面に発生し、その値は式 (5.3.9) で表すことができる。

$$\sigma_{\max} = \frac{Ph}{2mA(r - h/2)} \dots (5.3.9)$$

ここで mA は曲り梁の相当面積であり、係数 m は次式 (5.3.10) で与えられる。

$$m = \frac{r}{h} \log_e \left(\frac{r + h/2}{r - h/2} \right) - 1 \dots (5.3.10)$$

各式より求めた e と m の値、及び計算に使用する各値を表 5.3.2 に示す。ヤング率、ポアソン比は表 5.3.1 のジルコニアの物性値を使用した。解析によって得られた割り幅の最大変形量は $17 \mu\text{m}$ であったため、たわみ δ は $17 \mu\text{m}$ として最大応力 σ_{\max} を計算した。計算結果より、最大応力 σ_{\max} は 425.8 MPa となった。有限要素解析によって求めた最大応力は 90 MPa であり、計算した最大応力の値を比較すると 335 MPa の差が生じた。

表 5.3.2 計算に使用した各値

SC フェルール外径 (mm)	$\phi 2.5$
r (mm)	1.4225
h (mm)	0.355
A (mm ²)	2.0235
P (MPa)	31.61
e (mm)	7.413×10^{-3}
m	5.24×10^{-3}

3) 解析と計算の差について

計算モデルと解析モデルの模式図を図 5.3.8 に示す。計算モデルでは接触点 γ を支持部として、力 P を X 方向に加えた場合の最大応力を求めている。このときの最大応力は支持部 γ と力 P の作用個所の中心、つまり曲り梁の中心付近で発生すると考えられる。次に有限要素解析より、3D モデルを使用し割りスリー

ブにフェルールを挿入したところ、これまで支持部と考えられていた γ が 1 箇所ではなく 2 個所存在し、合計 4 箇所フェルールを保持する結果を示した。また力 P は X 方向ではなく Y 方向に作用していた。曲り梁に力 P が Y 方向に作用する場合、最大応力は支持部付近で発生すると考えられる。以上の結果から、計算結果と解析結果の最大応力の差は、それらの条件が異なるために発生したと考えられる。

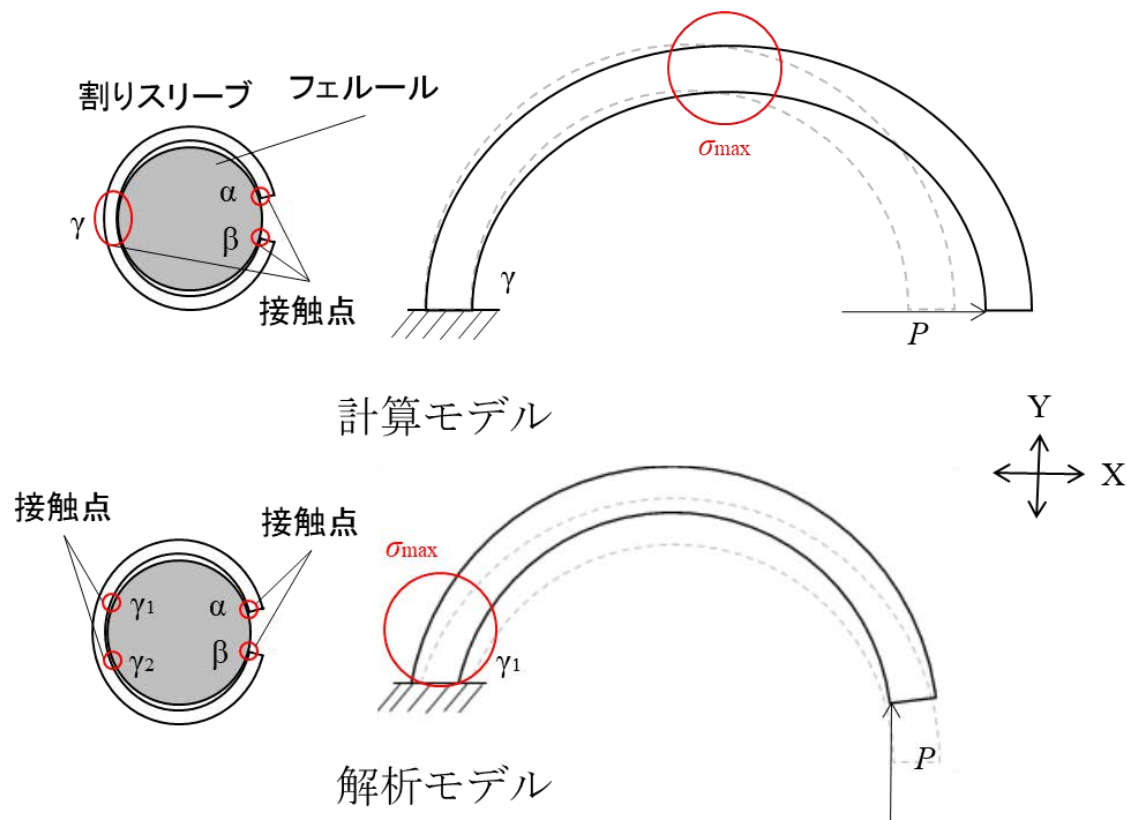


図 5.3.8 計算モデルと解析モデルの模式図

5.4 解析手法確立に関する実験と有限要素解析の比較

計算結果と解析結果の最大応力を比較したところ、近い値を得られなかった。よって計算結果と解析結果より、どちらの最大応力が適当であるかの確認をするため、割りスリーブの割り幅と割りスリーブのひずみを測定した。

1) スリーブ割り幅の測定

解析結果より得られた割り幅の最大変形量 ($17\ \mu\text{m}$) が適当であるか確認するため、フェルール挿入時の割りスリーブの割り幅を測定した。測定方法の模式図を図 5.4.1 に示す。割りスリーブはサンプルを 50 個用意した。また割りスリーブの製造公差を考え図 5.4.1 に示す $L_1 \sim L_3$ (○部分) それぞれについてデジタル

マイクروسコープを用いて測定した。フェルールは 2 つ使用し割りスリーブの両側から挿入した。フェルール挿入前の割り幅を基準とし、フェルール挿入後に測定した値との差を割り部分の変形量とした。

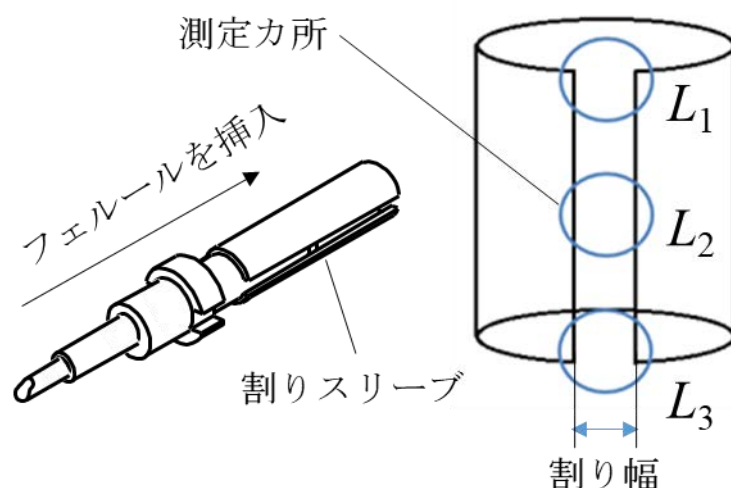


図 5.4.1 スリーブの割り幅測定方法

フェルール挿入後の割り幅変形量測定結果を図 5.4.2 に示す。フェルール挿入後の変形量平均値は 20.9 μm 、標準偏差は 2.2 μm であった。

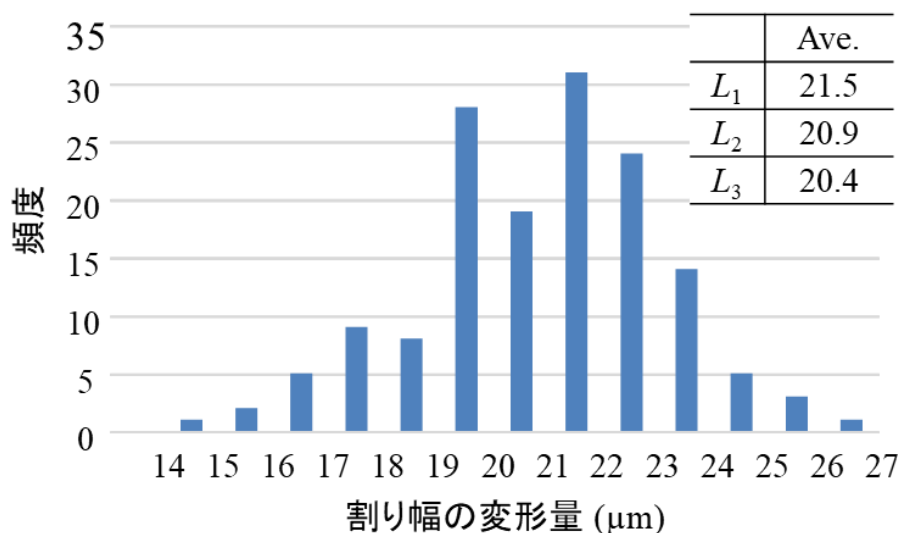


図 5.4.2 フェルール挿入後の割り幅変形量測定結果

測定結果のばらつきは割りスリーブの製造公差や測定個所による幅の違いによるものだと考えられる。また測定個所 (L_1) が他の測定個所 (L_2, L_3) よりも大きい値を示した。これは使用した 2 つのフェルール径の違い (製造公差) により

変形量に影響を及ぼしたと考えられる。解析結果より得られた値は $17 \mu\text{m}$ であるため、解析結果の値が実験結果の分布内に収まっていることを確認した。

2) 実験と有限要素解析を用いたひずみ測定

次に、割りスリーブの弾性ひずみを実験と有限要素解析によって求め、それらと比較した。ひずみ測定は $\phi 2.5 \text{ mm}$ 割りスリーブにひずみゲージを張り付け測定を行った。ひずみゲージを張り付けた箇所の模式図と外観を図 5.4.3 に示す。

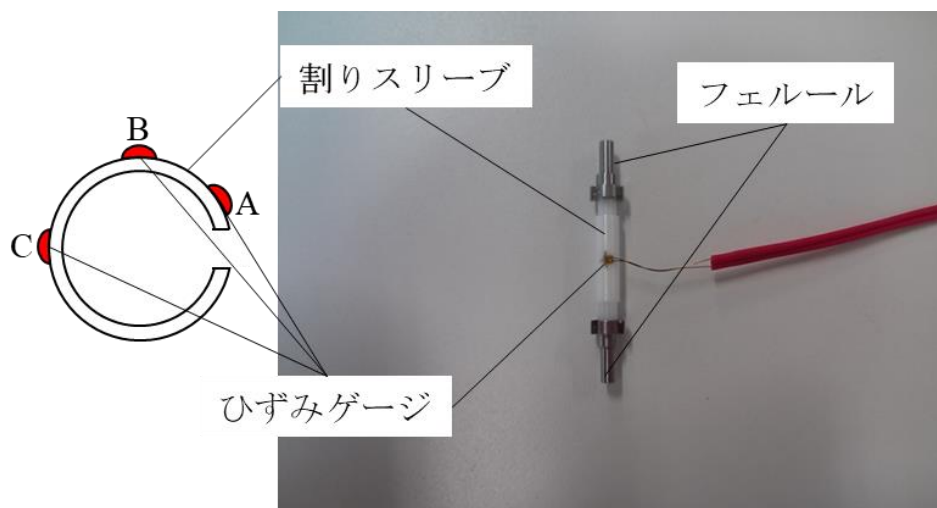


図 5.4.3 ひずみゲージを張り付けた箇所の模式図と外観

割りスリーブの内径側にひずみゲージを貼り付けるのは困難であるため、本測定では割りスリーブの外径側に小型のひずみゲージを貼り付け測定した。測定は、ひずみゲージを割りスリーブに張り付けた状態で生じるひずみを基準とし、フェルール挿入後に生じるひずみを測定した。ひずみゲージは図 5.4.3 中に示す 3 カ所 (A,B,C) に張り付けた。

実測したひずみの値と解析により得られたひずみの値の比較を図 5.4.4 に示す。実測値と解析結果の双方で割りスリーブの割り部分 A から最大応力部 C に向かって割りスリーブ表面のひずみが増大していく傾向が確認できるとともに、解析結果と実測値で近い値が得られた。

以上述べた通り、変形量とひずみの点において実測結果と解析結果が近い値を示したことから、解析結果より得られた最大応力 90 MPa が妥当な値であると考えられる。またフェルールを割りスリーブに挿入すると、フェルールと割りスリーブの接触部分は、図 5.3.2 に示すように割りのエッジ部分 2 点 (α, β) および割りの反対側 (γ) の 3 点で接触する状態になると考えられてきたが、解析結果では図 5.3.3 に示したように 4 点で保持していた。実際には製造公差などの影響により γ_1 から γ_2 の範囲で接触 (面接触) していると考えられる。

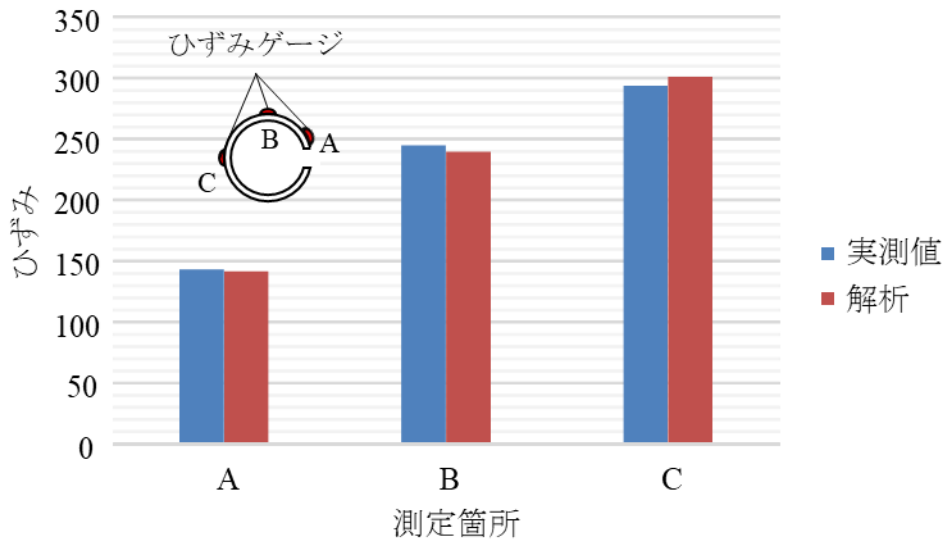


図 5.4.4 ひずみゲージによる測定結果及び有限要素解析によるひずみの値

3) 曲り梁を用いた計算 (2)

前項での実験結果より，有限要素解析より得られた最大応力 90 MPa は適当であったと考えられる．よって図 5.3.8 に示した解析モデルを基に，曲り梁の計算を再度行った．有限要素解析を基にした計算モデルを図 5.4.5 に示す．解析より，力 P は X 方向ではなく Y 方向に加わっていた．よって曲り梁の Y 方向に加わる力 P は図 5.4.5 のように表すことができる．

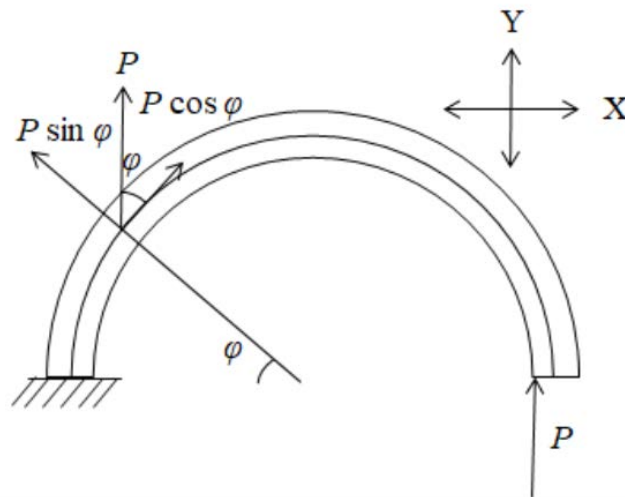


図 5.4.5 曲り梁に加わる力 P について

このとき曲り梁に蓄えられる全ひずみエネルギー U は以下の式 (5.4.1) より得られる．

$$U = \frac{1}{AE} \int_0^s \left(\frac{M^2}{2er} + \frac{N^2}{2} - \frac{MN}{2r} + \alpha V^2(1 + \nu) \right) ds \dots (5.4.1)$$

また力 P が Y 方向に作用したときの M , N , V は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} M &= Pr \cos \varphi \\ N &= P \cos \varphi \dots (5.4.2) \\ V &= P \sin \varphi \end{aligned}$$

これら (5.4.2) の値を式 (5.4.1) に代入し整理すると以下の式 (5.4.3) が得られる。

$$\begin{aligned} U &= \frac{r}{AE} \int_0^\pi \left(\frac{P^2 r^2 \cos^2 \theta}{2er} + \frac{P^2 \cos^2 \theta}{2} - \frac{P^2 r \cos^2 \theta}{2r} + \alpha P^2 \sin^2 \theta (1 + \nu) \right) d\theta \\ U &= \frac{\pi P^2 r}{2AE} \left(\frac{r}{2e} + \alpha(1 + \nu) \right) \dots (5.4.3) \end{aligned}$$

ここで、垂直方向のたわみ δ は Castigliano の定理により、偏微分にて以下の式 (5.4.4) で表すことができる。

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{\pi Pr}{AE} \left(\frac{r}{2e} + \alpha(1 + \nu) \right) \dots (5.4.4)$$

曲り梁支持部と最大応力までの距離について図 5.4.6 に示す。

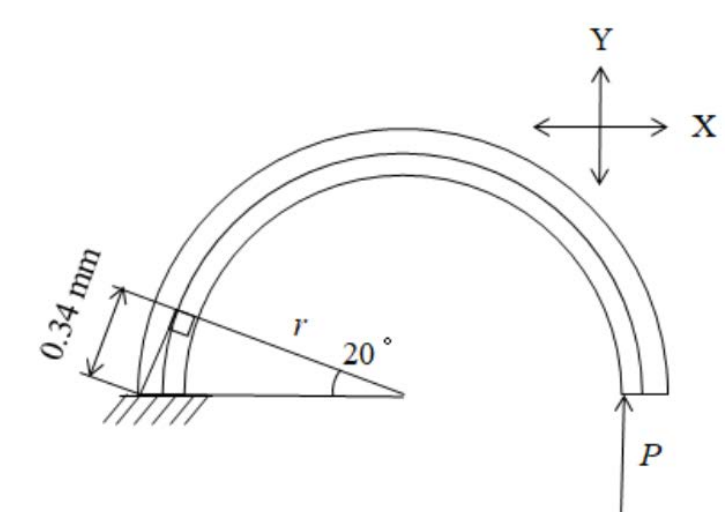


図 5.4.6 力 P と最大応力までの距離について

力 P が Y 方向に作用する場合、最大応力は支持部付近で発生すると考えられる。このとき、支持部から最大応力作用力所までの距離は図 5.4.6 に示すようにして求めることができる。有限要素解析より、最大応力が作用した力所の角度は、支持部をゼロとして 20° 付近であることを確認した。よって支持部から最大応力作用個所までの距離は 0.34 mm であると考えられる。以上の結果から、曲り梁の Y 方向に力 P が作用したときの最大応力 σ_{\max} は次式 (5.4.5) で表すことができる。

$$\sigma_{\max} = \frac{0.34Ph}{2mA(r - h/2)} \dots (5.4.5)$$

式 (5.4.5) より、割りスリーブに作用する最大応力を求めた。力 P は式 (5.4.4) より、 31.44 MPa であった。その他の値は表 5.3.1 と表 5.3.2 に示したものを使用した。割りスリーブにフェルールを挿入した際の最大応力は計算結果より、 141.4 MPa であり、有限要素解析によって求めた最大応力の値と、式 (5.4.5) から計算した最大応力の値を比較すると約 36% の差が生じた。この差は有限要素解析と計算モデルで支持部の場所が異なる、すなわち図 5.3.8 中に示した接触点 γ と計算モデルの支持部が異なることや、力の方向を単純化したために生じたものと考えられ、大きな差とは言えない。

5.5 APC 形コネクタを使用した割りスリーブの解析手法確立

割りスリーブの設計手法を確立させるには、ここまで使用してきた割りスリーブの有限要素解析手法を確立させる必要がある。よって割りスリーブの解析手法が正しいかを確認するため、APC 研磨を施した APC 光コネクタの接続時に観測される接続損失の割りスリーブ方向依存性に着目した。

一般的に普及している PC コネクタはフェルール端面を凸球面状に研磨する AdPC 研磨¹⁰⁻¹²⁾により優れた反射減衰量を実現している。また、より高い反射減衰量 (60 dB 以上) が要求される場合、フェルールを斜めに凸球面研磨した APC コネクタ (Angled-PC) が用いられる¹³⁻¹⁴⁾。APC 研磨を施したフェルール端面形状の概略図と外観を図 5.5.1 に示す。図 5.5.1 中の R は研磨時の曲率半径、 θ はフェルール中心軸と角度基準面の法線とのなす角度を示している。APC コネクタの端面は R が 8 mm (許容設計値は $5\sim 12.5 \text{ mm}$)、 θ が 8° になるよう設計される。APC コネクタは端面を斜めに研磨しそれらを接続することで、反射戻り光をファイバコア外に逃がし高い反射減衰量を得るものである。

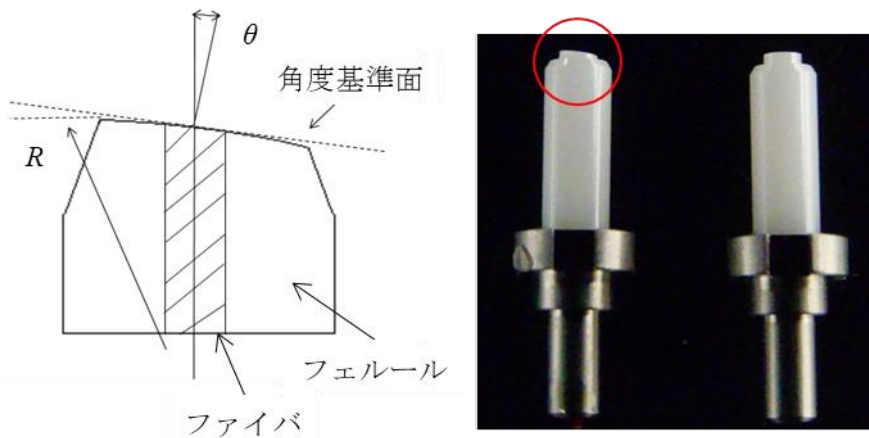


図 5.5.1 APC 研磨を施したフェルルール端面形状の概略図と外観

APC コネクタ双方の接続は優れた反射減衰量を有する一方で、通常の PC コネクタに比べて接続損失が若干大きくなるとともに、ばらつきが大きい点を確認されている。その原因として、APC 研磨を施したフェルルールの研磨角度に対し作用する力と、割りスリーブの割り方向依存性が考えられる。APC フェルルール双方に作用すると考えられる力のイメージと割りスリーブの方向定義を図 5.5.2 に示す。

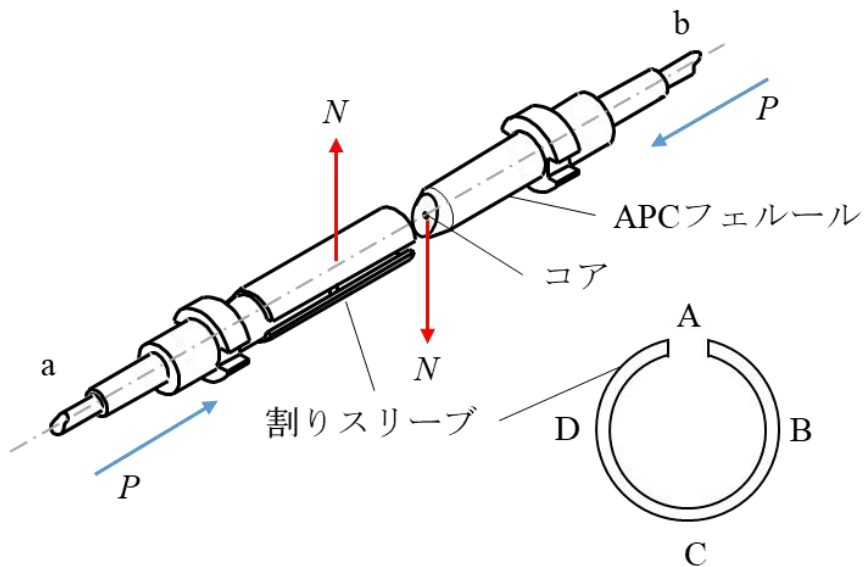


図 5.5.2 APC フェルルール双方に作用すると考えられる力のイメージと
割りスリーブの方向定義

APC フェルルール両端に押圧力 P をかけると、研磨角度に応じてフェルルール軸方向とは別方向の力 N が生じる。この力 N がファイバの軸ずれ要因となり接続

損失に影響していると考えられる。また割りスリーブの保持力は割り方向に依存すると考えられるため、図 5.5.2 中の割りスリーブの方向も接続損失に関係していると考えられる。

本研究ではフェルール先端を斜めに 8 度凸球面状に研磨する APC 研磨を施した APC 光コネクタの接続時に観測される接続損失の割りスリーブ方向依存性に着目し、フェルール挿入時の割りスリーブ変形に関する有限要素解析結果と接続損失変動の実測値を比較した。

1) APC 形コネクタの接続損失測定

APC 光コネクタの接続損失と割りスリーブ方向との関係を明らかにするため、接続損失を測定した。接続損失測定系の概略図を図 5.5.3 に示す。光源は干渉による測定値のゆらぎを抑制するため ASE 光源 ($\lambda=1550\text{ nm}$) を使用した。SC 形 APC コネクタと接続アダプタはそれぞれ 5 組用意し、アダプタ内部の割りスリーブの方向を変えながらランダムな組み合わせで接続損失を測定した。また割りスリーブの割り方向はそれぞれ図 5.5.2 に示した A, B, C, D と定義する。

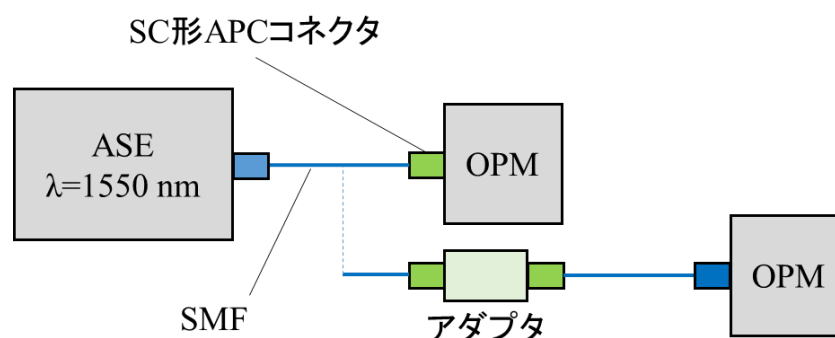


図 5.5.3 測定サンプルと接続損失測定系の概略図

APC コネクタの接続損失測定結果を、割りスリーブ方向の関係と合わせて図 5.5.4 に示す。割りスリーブの B-D 方向において A-C 方向よりも接続損失が 0.05 dB 程度多くなる傾向があることを確認できた。この結果から、軸方向の垂直に生じた力 N が割りスリーブ方向 B-D 方向に作用したとき、接続損失が増加傾向であることがわかった。よって APC コネクタ接続時の割りスリーブは B-D 方向において、力 N の影響を受け変形しやすく、それが接続損失の要因になっていると考えられる。本測定結果より、APC コネクタの軸ずれ量をマルクーゼの理論式(5.5.1)より逆算で求めた。(接続損失： L ，軸ずれ量： d ，MFD/2： w)

$$L = 4.34 \times \left(\frac{d}{w}\right)^2 \dots (5.5.1)$$

計算結果から、測定に使用した APC コネクタの軸ずれ量は平均でおよそ $0.8\sim 0.9\ \mu\text{m}$ であると考えられる。

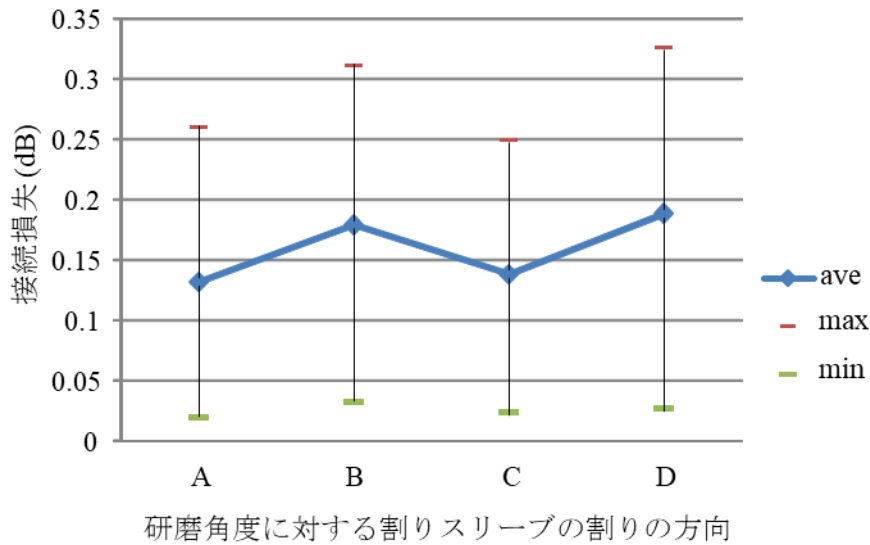


図 5.5.4 接続損失と割りスリーブ方向の関係

2) APC 形コネクタと割りスリーブの有限要素解析

次に APC コネクタ接続時の割りスリーブの変形量を有限要素解析で求めた。解析に使用した 3D モデルの外観を図 5.5.5 に示す。3D モデルは SC コネクタ用ジルコニア割りスリーブと APC 端面用 SC フェルールを使用し、フェルールを挿入した際のフェルール軸ずれ量を求めた。3D モデルの寸法と物性値は表 5.3.1 に示した値と同じである。解析条件は割りスリーブの変形解析で説明した条件を使用しているが、フェルールの円筒支持は半径方向と軸方向をフリーに設定し、フェルール後方から押圧力を与えた。

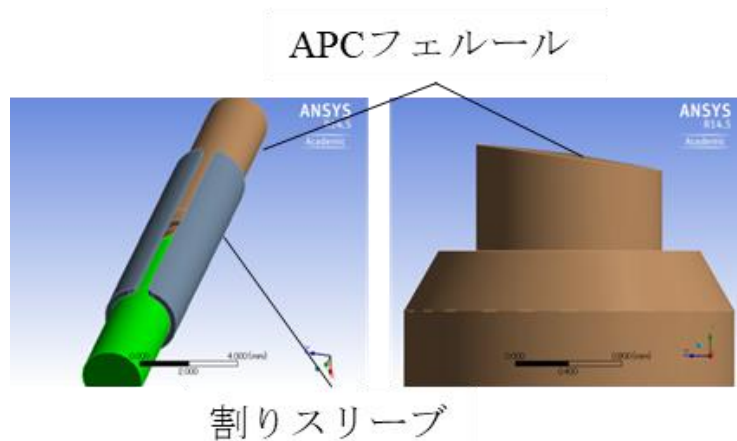


図 5.5.5 APC フェルール 3D モデルの外観

SC 形光コネクタのフェルール押圧力は 9.8 N が標準であるため、突き合わせた 3D モデルのフェルール端面双方が接触した箇所を 0 N とし、そこから押圧力を 9.8 N 与えたときの変形量を図 5.5.2 に示した割りスリーブの方向 (A, B, C, D) 毎に求めた。

割りスリーブ方向によるフェルール軸ずれ量の解析結果を表 5.5.1 に示す。解析結果から、割りスリーブの方向によりフェルール軸ずれ増加量に違いがあることを確認した。ここで、初期の軸ずれが大きいほど、押圧力による軸ずれ増加に伴う損失増加量が大きくなる。そこで、仮定した初期軸ずれ量に軸ずれ増加量を加算した総軸ずれ量について接続損失を求め、実測値と比較した結果を図 5.5.6 に示す。仮定した初期軸ずれ量は、計算結果が実測値の分布に収まるよう、0.8~0.9 μm の範囲に選定した。解析値も実測値と同じように割りスリーブの B-D 箇所において A-C 箇所よりも接続損失が多くなる傾向であることを確認した。

表 5.5.1 割りスリーブ方向によるフェルール軸ずれ量の違い

押圧力 9.8 N	割りスリーブ A-C 方向	割りスリーブ B-D 方向
軸ずれ量 (μm)	0.08	0.134

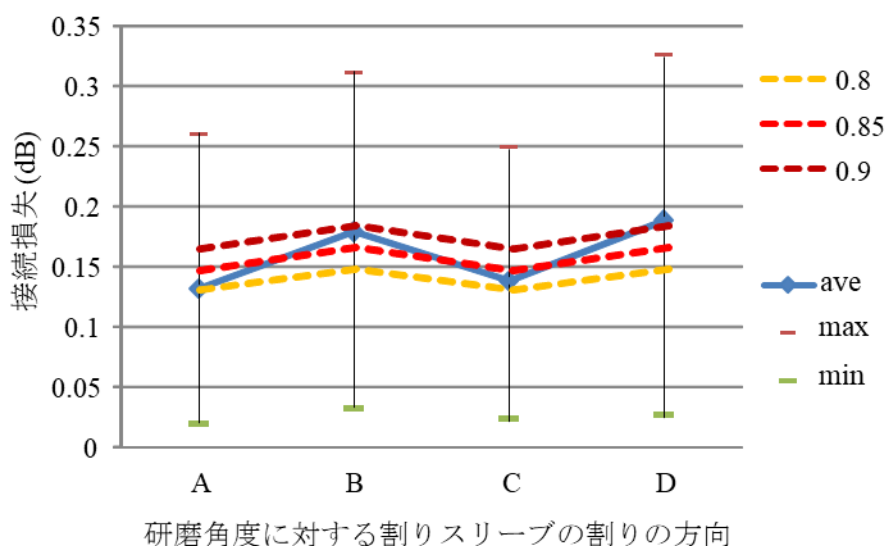


図 5.5.6 接続損失測定結果と有限要素解析結果の比較

以上の結果から、APC コネクタの接続において、研磨角度に対する割りスリーブの方向によって接続損失が変動する原因は、斜め端面に働く押圧力の分力

による割りスリーブの弾性変形と、それに伴うフェルールの微小な軸ずれによるものであると考えられる。これらの結果から、実測値や解析で得られた割りスリーブ微小変形に関する値は妥当であると考えられ、割りスリーブの変形に関する有限要素解析手法が確立できたと言える。

5.6 まとめ

フェルール挿入時の割りスリーブの微小変形について、実験結果と有限要素解析結果を比較した。比較結果を基に解析結果の妥当性について検証し、割りスリーブの有限要素解析手法を確立した。

はじめに、割りスリーブにフェルールを挿入した際の微小変形を有限要素解析より求めた。フェルール挿入時の割りスリーブ解析結果より、最大応力は 90 MPa、割り部分の最大変形量は 0.017 mm であった。有限要素解析によって得られたエッジ水平方向のたわみ δ より、最大応力 σ_{\max} を計算より求めた。結果は最大応力 425.8 MPa となり、有限要素解析の値を比較すると 335 MPa の差が生じた。これは解析結果と計算式の支持部が異なるためと考えられる。次に、有限要素解析により得られた最大応力が適当であるか確認するため、割りスリーブの弾性ひずみを有限要素解析によって求めた。また割りスリーブ表面にひずみゲージを張り付け弾性ひずみの測定を行い、実測値と解析結果を比較した。比較結果より、実測値と解析の両方で近い値を得ることができた。有限要素解析モデルを使用し、最大応力の計算を再度行った。計算結果より、最大応力は 141 MPa であり、有限要素解析結果 90 MPa に近づくことができた。

APC 形コネクタとスリーブの割り方向との関係性を調べ、割りスリーブの微小変形を明らかにするため、APC コネクタ接続時の割りスリーブの割り方向を操作し、それぞれの接続損失測定を行った。測定結果より、割りスリーブの方向より接続損失が 0.05 dB 程度多くなることを確認した。また測定に使用した APC コネクタの軸ずれ量は平均でおおよそ 0.8~0.9 μm であることがわかった。

接続損失との比較を行うため、フェルール双方に押圧力を与えた状態で有限要素解析を行った。SC 形コネクタは内部に押圧ばねが組み込まれており、その押圧力は 9.8 N 程度であるため、突き合わせた 3D モデルのフェルール端面双方が接触した箇所を 0 N とし、そこから押圧力 9.8 N を与えた。解析は APC フェルール双方を軸ずれ量 0 μm として突き合わせた状態で、割りスリーブの方向による軸ずれ量の違いを求めた。解析結果から、割りスリーブの方向によりフェルール軸ずれ量に違いがあることを確認した。

ここで、仮定した初期軸ずれ量に軸ずれ増加量を加算した総軸ずれ量について接続損失を求め、実測値と比較した。仮定した初期軸ずれ量は、計算結果が実測値の分布に収まるよう、0.8~0.9 μm の範囲に選定した。解析値も実測値と同

じように割りスリーブの B-D 箇所において A-C 箇所よりも接続損失が多くなる傾向であることを確認した。以上の結果から、APC コネクタの接続において、研磨角度に対する割りスリーブの方向によって接続損失が変動する原因は、斜め端面に働く押圧力の分力による割りスリーブの弾性変形と、それに伴うフェルール微小な軸ずれによるものであると考えられる。

これらの結果から、有限要素解析で得られた値は妥当であることが確認できたので、割りスリーブの設計に役立つ有限要素解析手法を確立することができた。

第5章の参考文献

- (1) 青野志郎, 長瀬亮, “光コネクタ用割りスリーブの微小変形に関する研究”, 信学技報, vol.114, no.257, EMD2014-63, pp. 19-22 (2014).
- (2) 青野志郎, 長瀬亮, “光コネクタ用割りスリーブの微小変形に関する研究 (2)”, 信学技報, vol.114, no.412, EMD2014-104, pp. 15-18 (2015).
- (3) 青野志郎, 長瀬亮, “光コネクタ用割りスリーブの微小変形に関する研究 (3)”, 信学技報, vol.115, no.32, EMD2015-7, pp. 33-38 (2015).
- (4) 青野志郎, 長瀬亮, “光コネクタ用割りスリーブの微小変形に関する研究 (4)”, 信学技報, vol.115, no.195, EMD2015-58, pp. 133-138 (2015).
- (5) 青野志郎, 長瀬亮, “光コネクタ接続部の微小変形に関する研究”, 信学技報, vol.115, no.380, EMD2015-85, pp. 13-18 (2015).
- (6) Fiber Optic Product Catalog, Molex Fiber Optics. Inc., Illinois.
- (7) J. S. Cook et al: “An exploratory fiber-guide interconnection system,” in *Proc. 2nd ECOC*, Paris paper VIII.3, (1976).
- (8) R. Nagase, E. Sugita, S. Iwao and K. Kanayama: "Design for MU-Type Single-Mode Miniature Optical Connector," *Trans. Electron*, vol.E81-C, no.3, pp.408-415, (1998).
- (9) S. Timoshenko: "Strength of materials," D. Van Nostrand Company, Inc., New York, (1955).
- (10) 松井伸介, 大平文和, 小藪国夫, 松永和夫, “光ファイバの端面研磨と加工変質層—加工変質層と反射減衰量の関係—”, 精密工学会誌, vol.64, no.10, pp. 1467-1471 (1998).
- (11) 金山和則, 長瀬亮, 安藤泰博, 松永和夫, “アドバンスド PC コネクタ”, 信学会秋季全国大会, C-283, p. 4-325, (1990).
- (12) K. Kanayama, Y. Ando, R. Nagase, S. Iwao and K. Matsunaga: "Advanced physical contact technology for optical connectors," *IEEE Photon Technol Lett*, 4, pp.1284-1287, (1992).
- (13) 高橋光雄, “光コネクタ組立体およびその研磨治具並びに光ファイバの接続方法”, 公開特許公報, 平 1-121805, (1987).
- (14) 高橋光雄, “シングルモード光ファイバ用光コネクタの特性及び製造に関する研究”, 静岡大学博士論文, (1997).

第5章に関連する学会発表および論文

- (1) 境目賢義, 荒井健汰, 青野志郎, 長瀬亮, “光コネクタ用割りスリーブの微小変形解析”, エレクトロニクス実装学会誌, vol.21, no.2, (2018).

- (2) 荒井健汰, 青野志郎, 境目賢義, 長瀬亮, “光コネクタ用割スリーブの微小変形解析”, 信学技報, vol.117, no.433, OCS2017-83, pp.21-24, (2018).

第6章 結論

本論文は SMF に代わる新しい光通信用ファイバとして提案されている MCF において、MU 形コネクタを基盤としたオルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタを設計し、その光学特性、機械特性と信頼性および設計手法の確立についてまとめたものである。まず第 2 章では単心光コネクタとして、基本特性とされる接続損失と反射減衰量について、その発生要因を測定方法とともに説明した。またそれらの測定方法を MCF に適用したときに、必要とされるファンアウトについて説明した。MCF をコネクタ化した際の問題点について示した。またその問題を解決するためにオルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタを提案し、その原理について説明した。第 3 章以降において、本研究で得られた成果を以下に示す。

第 3 章では六方最密配置の 7 コア MCF を使用し、オルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタを設計し、従来の SMF コネクタに匹敵する光学特性の実現を目標とした。

設計した MCF コネクタは実用化を前提とし、既存の光コネクタと同等の作業性、信頼性を有するとともに複数ベンダ間の互換性を確保できることを条件として設計、検討を行った。そのため IEC 61753-1 において定義される Category C (Controlled environment) において、同種の光接続デバイスの性能基準に準拠すること目標とした。MCF コネクタの光学特性を評価するとともに、MCF コネクタの接続損失データから軸ずれ量、角度ずれ量を算出し、モンテカルロシミュレーションを行った。その結果、実測値とシミュレーション値に良い一致が見られたため、オルダム・カップリング構造を採用した MCF コネクタの設計手法が正しいことを実証した。

また、MCF コネクタについて様々な機械的特性評価を行った結果、IEC 61753-021-6 に規定された光学特性や、ケーブル引張等の機械的特性に関する性能を満足することを確認した。よって、本章で検討した MCF コネクタは、IEC に規定されている光学特性、機械的特性を満たしていることから、光通信ネットワークを構築するための実使用に耐える MCF コネクタであることを示した。

第 4 章では PC 接続時のフェルール押圧力とファイバ端面微小変形の関係性を、MCF を用いて明らかにし、MCF 端面形状について検討できるよう、有限要素解析手法の確立を目的とした。

1 接続点で複数の反射減衰量を測定するためにコアが多数配置されている 19 コア MCF を用いた。はじめに第 3 章で使用したオルダム・カップリング構造を

採用した MCF コネクタを 19 コア MCF に適用し光学特性を評価した。その結果、接続損失、反射減衰量ともに良好な光学特性が得られた。

フェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の関係性を明らかにするため、19 コアの MCF が接着されたフェルールに押圧力を与えながら各コアの反射減衰量を測定することにより、押圧力と接触領域変化の関係性を実測した。また 3D モデルを使用した有限要素解析にて、実験と同じ端面形状について解析を行った。その結果、ヘルツの接触理論式による予測、実測値と解析結果がそれぞれ近い値を示していることを確認した。

本研究により、これまで検討されていなかった PC 接続時の押圧力と中心以外のファイバ端面弾性変形の詳細を明らかにすると共に、フェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の有限要素解析手法を確立した。

第 5 章では光コネクタ接続時の必須部品である割りスリーブについて、フェルール挿入時の微小変形を実験と有限要素解析にて明らかにし、割りスリーブの設計に役立つ有限要素解析手法の確立を目的とした。

割りスリーブにひずみゲージを使用しフェルール挿入時の微小変形を実験より明らかにしたのち、割りスリーブ微小変形を有限要素解析により求め、それらを比較することで割りスリーブ微小変形について調べた。またフェールの先端を斜め 8 度に凸球面状に研磨する APC 研磨を施したフェールをジルコニア製割りスリーブに挿入したとき、研磨角度に対する割りの方向によって、割りスリーブがどのように変形しているかを有限要素解析法により解析すると共に、APC 接続時の接続損失との関係性を調べ、割りスリーブ微小変形解明を試みた。

これら実験結果と有限要素解析結果のすべてにおいて近い値を得ることができた。よって、有限要素解析で得られた値は妥当であることが確認でき、割りスリーブの設計に役立つ有限要素解析手法を確立することができた。

以上述べた通り、本研究では、実用化を前提とした新たな MCF コネクタを設計した。また MCF コネクタの信頼性を確保するため、今まで明らかにならなかった PC 接続時のファイバ端面変形および、フェルール挿入時の割りスリーブ微小変形に関する解析手法を確立した。これまで長年の実績を有する SMF の接続条件とは異なる MCF において、SMF コネクタと同等の特性と信頼性を確保するための MCF コネクタの設計手法を提案した。

SMF に代わる新しい光ファイバとして MCF が注目され、活発な研究開発が進められている。光ネットワークを構築する上で、光コネクタは必要不可欠なデバイスである。しかしながら光コネクタには低コスト、優れた特性や信頼性、様々な接続対象との互換性など要求されるものは多い。また光ファイバの構造

などにより，光コネクタの設計コンセプトは変化する．今後の光コネクタ開発には，世界の技術動向を注視し，その時代に必要とされる要求を満たすことのできる光コネクタを設計する必要がある．

本論文に関する表彰

- (1) 境目賢義，長瀬亮，渡辺健吾，斎藤恒聡，“19 コアマルチコアファイバの PC 接続”，社団法人電子情報通信学会，光ファイバ応用技術研究会，2015 年学生奨励賞．

謝辞

本論文をまとめるにあたり、千葉工業大学大学院工学研究科、長瀬亮教授には、学部生時代から一方ならぬご指導とご援助を頂きました。これまで執筆してきた論文の添削や研究内容など、多岐にわたってご指導を賜りました。ここに厚く感謝いたします。

また、本論文をまとめるにあたり千葉工業大学大学院工学研究科、坂本幸弘教授、松井伸介教授、徳永剛准教授、慶応義塾大学理工学部物理情報工学科、石樽崇明准教授にはお忙しい中、多岐にわたるご指導を頂きました。本論文をまとめられたのは皆様にご指導頂いたおかげであります。ここに深く感謝いたします。

本論文の研究内容は独立行政法人情報通信研究機構（National Institute of Information and Communications Technology : NICT）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、また空間多重フォトニックノード基盤技術の研究開発の一環として助成を受けて実施されました。何不自由ない研究環境を提供して頂きましたことに深く感謝いたします。

本研究を進め、まとめるにあたり協力してくれた長瀬研究室院生メンバーや学部生メンバー、卒業生の方々に感謝します。

長瀬研究室、松田健太郎さんには測定プログラムの作成などを手伝って頂き、またお互いの研究についてよく議論をしていました。研究遂行にあたり様々なことを手伝ってもらったことを感謝します。ありがとうございました。

長瀬研究室、荒井健汰さんには、後輩でありながら研究遂行の重要な部分をたくさん手伝ってもらいました。ここに感謝します。

本論文 5 章の内容は、後輩である青野志郎さんがしっかりとした基礎研究および実験を行ってくれたことであり成り立ったものであります。ここに感謝します。

本研究は古河電気工業株式会社および千葉工業大学長瀬研究室において行われたものであります。研究を進めるにあたり、多数の関係者の方々からご指導、ご配慮を頂きました。また古河電気工業株式会社、八木健様、椎野雅人様、杉崎隆一様、斎藤恒聡様、渡辺健吾様らには特にお世話になりました。

古河電気工業株式会社、斎藤恒聡様には長瀬先生と同じくらいのご指導とご援助を頂きました。また学会などの外出先でも常にご配慮を頂きました。今現在の私自身の研究の進め方や様々な状況下での立ち振る舞いなどは、長瀬先生と斎藤さんから学んだことだと思っております。斎藤さんは私にとっての目標の一人であり、私の理想の上司です。ありがとうございました。

古河電気工業株式会社、渡辺健吾様は、年齢が比較的近いこともあり、常に先に行く先輩として見ていました。また研究を進めるにあたり様々なことを教え

て頂きました。ここに感謝の意を表します，ありがとうございました。

古河電気工業株式会社，八木健様，椎野雅人様，杉崎隆一様らには，私の研究進捗状況や行動などご迷惑をお掛けしたこともあるかと思いますが，そのような状況であっても変わらぬご指導，ご配慮を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり，様々な方々からご指導，ご配慮を頂きました。関わって頂いた全ての皆様に深く感謝します。