

千葉工業大学

博士学位論文

多心光コネクタの設計と

高機能化に関する研究

平成 27 年 3 月

竹崎 元人

目次

第1章 序論	.....	1
1.1 背景	.....	1
1.2 光ファイバの種類	.....	2
1.3 光ファイバ接続理論	.....	3
1.3.1 接続損失		
1.3.2 反射減衰量		
1.3.3 モードフィールド径		
1.3.4 代表的な研磨方法と特徴		
1.4 光コネクタの種類	.....	7
1.5 本研究の目的	.....	10
1.6 本論文の構成	.....	15
参考文献	.....	16
第2章 多心光コネクタの設計	.....	19
2.1 はじめに	.....	19
2.2 MT コネクタとは	.....	19
2.3 多心光コネクタの接続損失発生要因	.....	22
2.3.1 ファイバの軸ずれによる挿入損失の発生		
2.3.2 MFD とファイバ軸ずれ量による接続損失発生の原因		
2.4 多心光コネクタの量産技術について	.....	25
2.4.1 成形技術について		
2.4.2 成形材料について		
2.4.3 多心光コネクタを量産するために		
2.5 結論	.....	32
参考文献	.....	33
第3章 量産時における低損失シングルモード用 MT コネクタに関する研究	.....	34
3.1 はじめに		
3.2 低損失シングルモード多心光コネクタの設計	.....	34
3.3 寸法測定結果	.....	35
3.3.1 外形寸法測定結果		
3.3.2 ガイド孔径測定結果		
3.3.3 ガイドピン外径測定結果		

3.3.4	ファイバ孔位置ずれ量測定結果	
3.3.5	ファイバ孔傾き量測定結果	
3.4	光学特性測定結果	..... 42
3.4.1	端面研磨形状測定結果	
3.4.2	接続損失測定結果	
3.4.3	反射減衰量測定結果	
3.5	環境特性測定結果	..... 47
3.5.1	試験条件	
3.5.2	試験結果	
3.6	長期信頼性試験結果	..... 51
3.6.1	試験条件	
3.6.2	試験結果	
3.7	機械的特性測定結果	..... 54
3.7.1	試験条件	
3.7.2	振動試験	
3.7.3	曲げ試験	
3.7.4	ねじれ試験	
3.7.5	衝撃試験	
3.7.6	着脱試験	
3.8	寸法特性と光学特性の関係	..... 62
3.8.1	ガイド孔径、ガイドピン外径、ファイバ傾き量の確率分布	
3.8.2	ファイバ孔位置ずれ、接続損失の確率分布	
3.8.3	モンテカルロシミュレーション結果	
3.9	結論	..... 66
	参考文献	..... 67
第4章	光配線板用多心光コネクタに関する研究	..... 68
4.1	はじめに	..... 68
4.2	MTPIPEとは	..... 68
4.2.1	MTPIPEの構造	
4.2.2	フロントブロックと光ファイバの接続	
4.2.3	屈折率整合フィルムの厚さ検証	
4.2.4	各ブロック間の接着強度	
4.3	50/125GI型マルチモードファイバの接続損失理論値	..... 75
4.4	MTPIPEの寸法設計	..... 76
4.5	MTPIPEのファイバ孔位置ずれ量測定結果	..... 77

4.6	MTPIPE の光学特性測定結果	.....	81
4.7	MTPIPE の環境特性測定結果	.....	82
4.8	MTPIPE の機械的特性測定結果	.....	85
4.9	結論	.....	87
	参考文献	.....	88
第5章	光導波路フィルム用多心光コネクタに関する研究	.....	90
5.1	はじめに	.....	90
5.2	PMT コネクタとは	.....	90
5.3	光導波路フィルムとは	.....	92
5.4	PMT コネクタの寸法設計	.....	93
5.4.1	PMT コネクタの接続損失発生要因		
5.4.2	PMT コネクタの開口部寸法設計		
5.4.3	光導波路フィルムのコア形状による接続損失への影響		
5.5	PMT コネクタの寸法精度確認	.....	97
5.5.1	PMT コネクタの外形寸法		
5.5.2	PMT コネクタの開口部寸法測定結果		
5.6	PMT コネクタへの光導波路フィルム取り付け	.....	101
5.7	PMT コネクタ組立品寸法測定結果	.....	105
5.7.1	PMT コネクタ取り付け光導波路フィルムのコア位置ずれ量およびコアサイズ測定結果		
5.7.2	PMT コネクタ取り付け光導波路フィルムの光学特性測定結果		
5.8	結論	.....	116
	参考文献	.....	117
第6章	結論	.....	119
	発表論文リスト	.....	120
	謝辞	.....	122

第1章 序論

1.1 背景

インターネット上の動画配信やスマートフォンの世界的な普及により、通信キャリアの通信回線はさらなる高速化・大容量化が求められている。光通信分野ではコアネットワークをけん引してきた 10 Gb/s 伝送から、1 波長あたり 40 Gb/s や 100 Gb/s 伝送に置き換わりつつある。また、データセンタにおける通信網もすでに 40 Gb/s~100 Gb/s 伝送が導入され、特に 100 Gb/s 伝送においては、そのキーデバイスとなる 100GE トランシーバの開発が行われ、クライアント側ではフォームファクターとして CFP (100G Form-factor Pluggable) が標準化され上市されている。更に小型規格として CFP2、CFP4、CPAK などの標準化が検討されるとともに、上位規格である 400 Gb/s トランシーバとして CDFP も検討されている。

日本を含む世界各地で FTTH(Fiber To The Home)回線の加入増により、ブロードバンド回線市場は今後も成長する見込みとなっている。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[1,2]。

光信号を用いた情報のやり取りを行うためには、ケーブル間やモジュール間を接続しなければ通信を行うことができないため、光通信網を構築するためには光ファイバ接続技術が重要となってくる。光ファイバの接続は光ファイバコア同士の接続となるため、シングルモード光ファイバではコア径が約 10 μm 、マルチモード光ファイバでは約 50 μm と光が導通する部分が小さいため正確な位置合わせが必要となり、高度な技術が要求される。現在実用化されている光ファイバ接続技術として融着接続技術[3-6]、メカニカルスプライス接続技術[7-9]、光コネクタ接続技術[10-26]の 3 種類があげられる。

融着接続技術は接続する光ファイバの先端を放電により加熱して溶融し、各々の先端を融着した状態で固定する技術である。光ファイバを溶融して突き合わせることで接続するため再接続は不可能であるが、調心された光ファイバのコア同士が物理的に接続されるため、接続時に発生する損失が低く、3 種類の接続方法の中では最も信頼性が高い技術である。しかし、融着部は光ファイバの素線がむき出しになり衝撃に弱くなってしまふ。よって、ステンレス棒やセラミック棒が組み込まれた補強スリーブで融着部を補強する。

メカニカルスプライス接続技術は V 形の溝などのガイドに沿って光ファイバ先端同士を密着させ、そのまま接着剤またはネジで固定して半永久的に接続する方法である。電源を必要とせず、簡単に短時間で接続可能であるが、光ファイバの精度と光ファイバを添わせる V 溝の精度が重要になってくる。メカニカルスプライス接続技術は融着接続技術と同様に光ファイバ同士を物理的に接続させるが、ファインカットされた光ファイバ同士が接続されるため再度接続することは可能であるが、再接続の際に信頼性が保証できなくなってしまうため、再接続して使用するのには困難であると考えられる。

光コネクタ接続技術は光ファイバの先端に光ファイバコアの位置合わせのために高精度に作製されたコネクタ部品を装着してコネクタ同士を接続する技術である。アダプタを介して接続されているため再接続が容易に行うことができるが、部品精度が接続精度に起因するため部品が高価になることや、使用する部品数量が多いことから価格面で他の技術より劣る。

今後さらに光通信が発達するためには、経済的かつ信頼性の高い光通信網を構築する必要がある。また、昨今における大容量通信の急激な発展や高速通信を実現するには、光ケーブルの多心化や機器間の実装密度を上げる必要がある。

光ファイバの接続安定性や耐信頼性を考慮し、通信回線の高速化・大容量化を目的とした実装密度の向上を実現させるためには、光コネクタ接続技術である多心光コネクタを高信頼性かつ安価で供給することが必要不可欠である。

よって本論文では、多心光コネクタの設計手法について MT (Mechanically Transferable) コネクタを用いてコネクタ構造および作製方法から確立させ、量産時における膨大な寸法データや接続損失データから設計手法の正確性について明らかにした後、データセンタやハイエンドルータなどの機器内に使用される短距離伝送用など様々な敷設環境に適合した多心光コネクタを開発し、その有効性について述べる。

最初に、本序論で光接続技術全般について述べる。1.2 項では現在使用されている代表的な光ファイバの種類について述べる。1.3 項では光ファイバ接続時における光学的特性について述べるとともに、その発生原因について概説する。1.4 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。1.5 項で本研究の目的について述べる。最後に 1.6 項で本論文の構成について述べる。

1.2 光ファイバの種類

光ファイバとは高純度なガラスやプラスチックで繊維状に形成される光を通すためのケーブルである。光が導通する部分であるコアとその周りを覆うクラッドから構成されている。クラッドの屈折率をコアより少し小さく設定することで光の全反射を利用し、信号をコアに閉じ込めて伝送するものである。

光ファイバの種類は大きく分けて 2 種類あり、伝搬するモードによりマルチモードファイバとシングルモードファイバに分けることができる。

複数のモードを通すマルチモードファイバは、屈折率が一樣であるステップインデックス(SI)型マルチモードファイバと、コア内の屈折率を緩やかに変化させたグレーテッドインデックス(GI)型マルチモードファイバがある。SI 型マルチモードファイバは屈折率が一樣であるため伝送帯域が狭く、昨今ではコア径を大きくすることで接続を容易にして短距離伝送で使用されている。GI 型マルチモードファイバは光を伝送するコア内部の屈折率がファイバ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になっているため、相対的にどのモードの光も同じ速度で伝搬することになる。標準的なコア径は、日本で主流は 50 μm 、欧米で主流なのは 62.5 μm であり、シン

マルチモードファイバより伝送損失は大きい光ファイバ同士の接続が容易で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利用されている。

シングルモードファイバ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る。汎用のシングルモードファイバは 1310 nm 帯に零分散波長がある。また、単一モード伝送であるためモード分散がなく、伝搬信号のゆがみがないため広帯域な特性を有する。よって幹線網などで多く使用される。各種光ファイバの光伝搬方式の違いについて概略図を図 1-1 に示す。

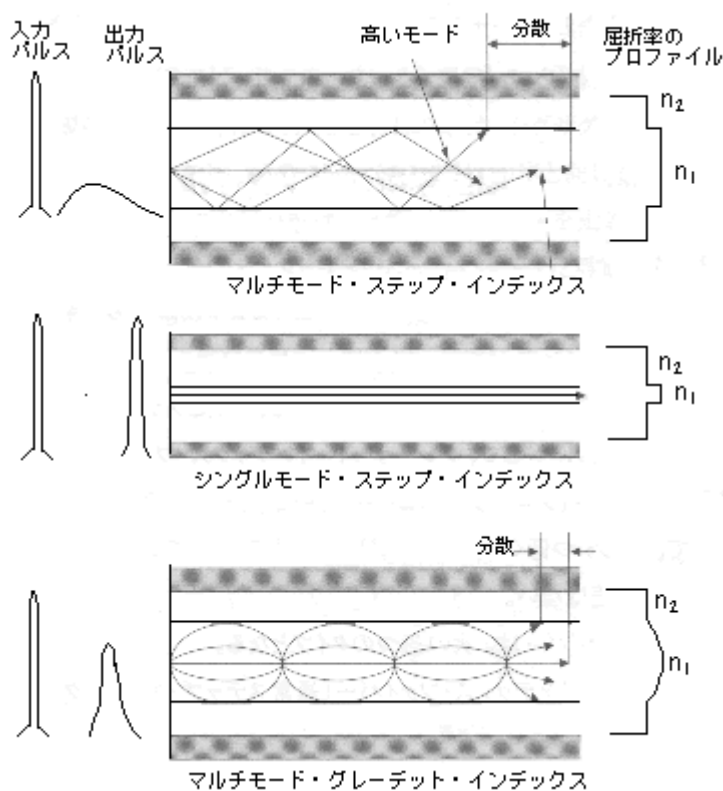


図 1-1 各種光ファイバの概略

1.3 光ファイバ接続理論

光ファイバを接続した場合、接続部の不整合により接続損失と反射が生じる。接続部において反射戻り光が発生すると信号伝送品質に悪影響を及ぼす可能性があるため、光接続部の性能パラメータとして、接続損失と並び反射減衰量として定義される。接続損失と反射減衰量の大きさは、光ファイバ同士の接続状態によって決まる。理想的なシングルモード型光ファイバ同士をメカニカルプライス接続や光コネクタ接続で接続した場合の接続損失と反射減衰量の理論式を示す。

接続損失、反射減衰量およびモードフィールド径の定義は下記のとおりである。

1.3.1 接続損失

光ファイバ同士を突き合わせて、接続する場合、双方の光ファイバのコア部を正確に対向させて、完全に接続する必要がある。接続が完全ではない場合、一方の光ファイバコアから出射された光の一部が他方の光ファイバコアに入射できず、クラッド内に放射され接続損失となる。光ファイバの接続における損失発生要因は、接続する光ファイバ同士の軸ずれ、軸の傾斜、端面のギャップ、コア径差、NA（Numerical Aperture）差、フレネル反射の6項目が考えられる。上記6項目の概略図を図1-2に示す。

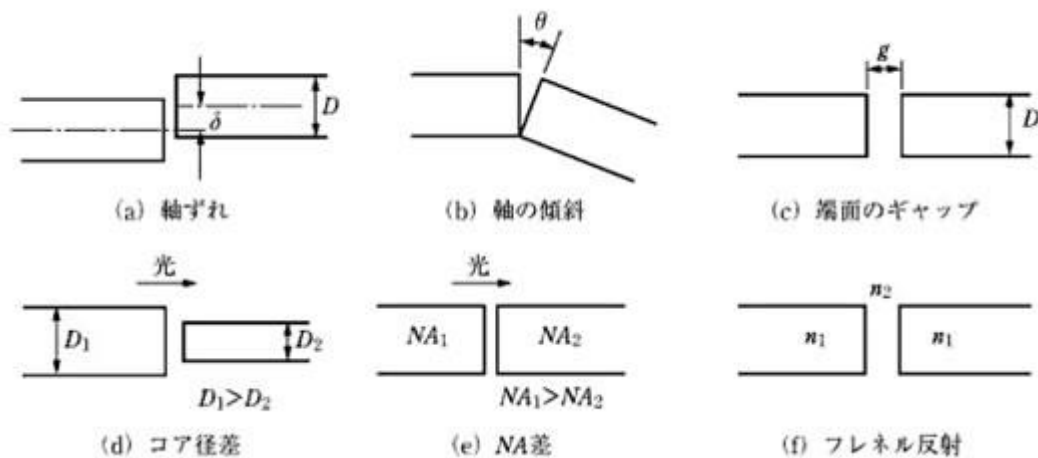


図 1-2 光ファイバ接続損失発生要因

接続損失 L (dB)は下記に示す式(1)で定義できる。

$$L = -10 \log \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \quad \dots(1)$$

ただし、入射光強度を P_{in} (W)、出射光強度を P_{out} (W)とする。

1.3.2 反射減衰量

反射減衰量 RL (dB)は入射光パワーに対する反射光の割合として式(2)で定義される。100%の全反射は 0 dB、1%の反射は 20 dB となる。

$$RL = -10 \log \left(\frac{P_{\text{ref}}}{P_{\text{in}}} \right) \quad \dots(2)$$

ただし、入射光強度を P_{in} (W)、反射光強度を P_{ref} (W)とした。

1.3.3 モードフィールド径

一般に光ファイバ中を伝搬する光のエネルギーは、コアにのみ集中しているわけではなくある分布をもってクラッドにもしみだしている。その分布からもとめた実効的な直径をモードフィールド径という。モードフィールド径はこの強度分布において強度が最大値の $1/e^2$ (13.5%)になる部分の直径で定義される (図 1-3) [27]。特に、シングルモードファイバではコア径が小さいので、コア径とモードフィールド径に差の大きい場合がある。そのためシングルモードファイバではコア径ではなく、光エネルギーの分布から読み取ったモードフィールド径を用いる。

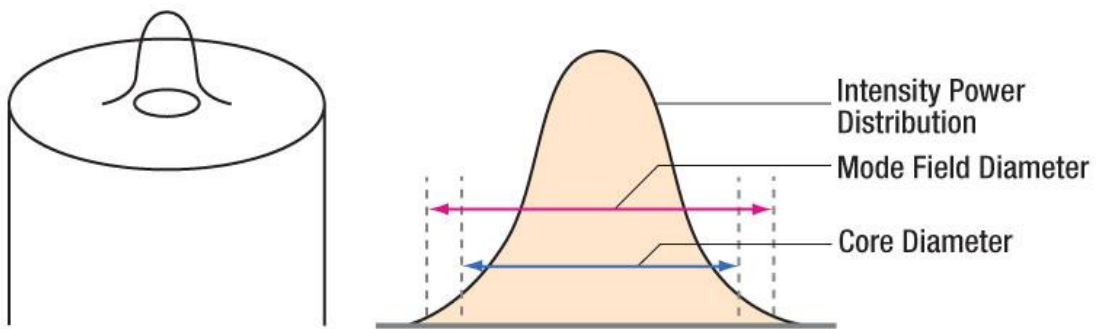


図 1-3 モードフィールド径 (MFD)

1.3.4 代表的な研磨方法と特徴

光ファイバケーブルの先端 (フェール端面) は、接続の際にファイバ同士が隙間なく接続できるように研磨を施さなければいけない。代表的な研磨形状と接続状態を表 1-1 に示す。

表 1-1 研磨面とその研磨形状および接続状態

研磨面		研磨形状と接続状態
垂直	平面	
	PC	
斜め	平面	
	PC	
球面	PC、UPC、AdPC	
斜め球面	APC	

平面研磨は光コネクタを直角平面に研磨加工を施したものである。研磨後の端面形状は光ファイバ部が少し凹んでいるため、フレネル反射を抑制するために屈折率整合剤を塗布して使用される。

PC(Physical contact)研磨は光コネクタを直角 PC に研磨加工を施したものである。PC 研磨は光コネクタの接続において、光ファイバ又は光導波路の先端同士を突き合わせて、物理的に接触させて接合する接続方法をいう。フェルール端面を変形させることにより、光ファイバ端面の密着を安定して保持することができる。接続する光コネクタへ押圧をかけることにより接続点における隙間が発生しないため、屈折率整合剤を使用しなくてもよい。図 1-4 に示すように、環境の変化によりフェルールとファイバ端面に段差が生じても、端面を弾性変形させることにより安定な PC 接続を維持することができる[27]。

反射減衰量を低減させる方法を用いた研磨法として、PC 研磨を行った後に加工変質層を除去する仕上げ研磨を行う SPC (Super PC)研磨や UPC (Ultra PC)研磨、凸球面形状に粗研磨を行った後に加工変質層を作らず低反射の仕上げ研磨を行う AdPC (Advanced PC)研磨がある。

APC (Angled PC)研磨はフェルールの先端を斜め 8 度で研磨したものであり、低反射で接続損失も小さく安定した接続が可能である。斜め 8 度で研磨されているため、接続していない状態でも反射減衰量が大い特徴があるが、PC 研磨品や平面研磨品との接続互換性はない。

フェルール(凸球面形状に端面研磨)

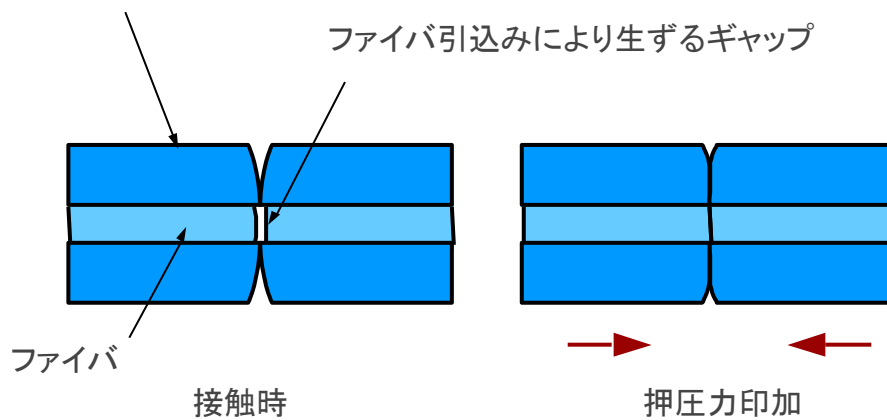


図 1-4 PC 接続の原理

1.4 光コネクタの種類

光コネクタの最大の特徴は再接続可能なことである。これまで様々な光コネクタが研究開発され、各光コネクタはそれぞれの特徴を生かし、その用途に合わせて使い分けられる。

これまで IEC(International Electrotechnical Commission : 国際電気標準会議)で規格化された代表的な光コネクタと日本工業規格(JIS: Japan Industrial Standards)の一覧を表 1-2 に示す。

表 1-2 光コネクタの種類

光コネクタ 名称	JIS	IEC	締結方式
FC コネクタ	C5970(F01)	61754-13	ねじ
SC コネクタ	C5973(F04)	61753-4	プッシュオン
DS コネクタ	C5980(F11)	61754-9	プラグイン
MT コネクタ	C5981(F12)	61754-5	クランプスプリング
MPO/MTP コネクタ	C5982(F13)	61754-7	プッシュオン プラグイン
MU コネクタ	C5983(F14)	61754-6	プッシュオン プラグイン
MT-RJ	C5988(F19)	61754-18	プッシュオン
LC コネクタ	-	61754-20	プッシュオン

その他にも各用途に合わせた様々な光コネクタの研究開発が活発に行われており、規格化活動も活発に行われている。

局内・構内の装置間接続など、単心の接続技術が主流な領域には主に単心コネクタが用いられている。代表的な単心光コネクタとしてはSCコネクタ (Single-fiber Coupling)、FCコネクタ (Fiber Connector)、MUコネクタ (Miniature Universal)、LCコネクタなどがあげられる [8-14]。単心光コネクタが導入された当初から主流であった SC コネクタや FC コネクタに比べ、MU コネクタや LC コネクタは小型化されており、実装密度が高くなっている。代表的な単心光コネクタとして図 1-5 に SC コネクタの外観を示す。

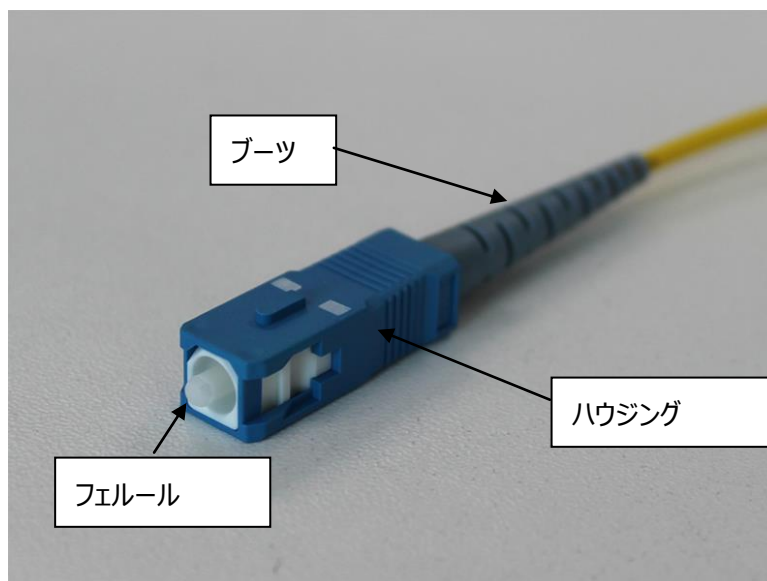


図 1-5 SC コネクタ外観

SC コネクタはフェルール部、ハウジング部、ブーツ部などから構成される。フェルール部はセラミック材質であるジルコニアフェルールを用いることが主流であり、ジルコニアフェールの外形が $\phi 2.5$ mm でその中心に $\phi 0.125$ mm のファイバを通すための孔があいている。ジルコニアフェールへ光ファイバを挿入し接着剤で固定することで高精度な位置決めができる。接続する光ファイバはフェールの外径とアダプタ内の位置決め機構である割スリーブの内径によって高精度に位置決めされる。光ファイバが挿入されたフェール端面は PC 研磨が施されており、SC コネクタが SC アダプタを介して接続される際にラッチ機構でフェール端面へ押圧力がかかることで、フェール端面が変形し、光ファイバ端面に間隙が生じない構造となっている。このため、SC コネクタには屈折率整合剤を使用せずに安定した接続が可能である。

アクセス系の光ファイバケーブルを始め、光トランシーバやデータセンタ内など大容量・高速通信を実現するために多心が必要な場所や実装密度を向上させたい場所には多心光コネクタである MT コネクタ (Mechanically Transferable) [16-18] やプッシュプル締結方式で簡易な着脱を可能とした MPO コネクタ (Multifiber Push-On) [19] が代表的であり、最も広く普及している。代表的な多心光コネクタとして MT コネクタの概略図を図 1-6 に示す。



図 1-6 MT コネクタ概略図

MT コネクタは MT フェルールに多心光ファイバを高精度に接着固定した MT コネクタプラグに、フェルール端面左右に形成されているガイド孔へガイドピンを挿入し、接続することで高精度な位置決めが可能である。MT コネクタは 2 個の MT コネクタプラグ、2 本のガイドピン、およびクランプスプリングで構成される。クランプスプリングは専用の着脱工具を使用することで着脱可能である。MT コネクタプラグは直角平面研磨および PC 研磨の 2 種類が代表的に使用される。直角平面研磨の場合は MT コネクタ端面に屈折率整合剤を塗布し、フレネル反射を抑制する。光通信ネットワークにおける光コネクタの適用領域を図 1-7 に示す[27]。

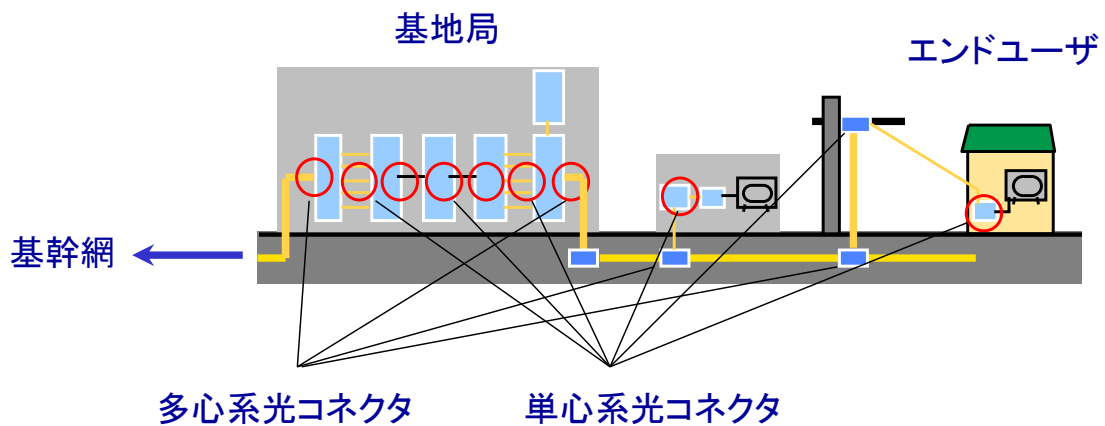


図 1-7 光通信システムにおける光コネクタの適用例

1.5 本研究の目的

光ファイバの接続技術には 1.1 項で述べたとおり融着接続技術、メカニカルスプライス技術、光コネクタ技術の 3 種類の方法があり、さまざまな領域で用いられている。表 1-4 に 3 種類の接続について特性、経済性、着脱可否、及び実装密度の観点で簡単にまとめた。

表 1-4 接続技術の性能

接続技術	性能	経済性	着脱	実装密度
融着接続技術	◎	○	×	◎
メカニカルスプライス技術	△	◎	×	○
単心光コネクタ技術	◎	△	◎	△
多心光コネクタ技術(MT コネクタ)	○	△	◎	◎

性能においては光ファイバ同士の加熱溶融による物理接続であり、安定した接続が構築されているため融着接続技術が優れていると考えられる。単心光コネクタ接続技術においても昨今では高精度化が進んでおり性能が向上しているため有利であると考えられる。経済性については融着技術のように特殊な接続工具を要せず、接続工具が安価であることからメカニカルスプライス技術が最も優れていると考えられる。着脱の観点からは融着接続技術及びメカニカルスプライス技術においては再接続が不可能であるため、光コネクタ接続技術が優位である。実装密度については光ファイバ素線毎で接続する融着接続技術と多心化された光ファイバを一括接続できる多心光コネクタが優位である。

上記に示す接続技術の性能から、通信回線の高速化・大容量化を目的とした実装密度の向上を実現させるためには、多心光コネクタを用いた光コネクタ接続技術が必要不可欠である。部品点数が多いことから価格面で不利ではあることや、単心光コネクタはファイバ偏心量をチューニングすることで安定した性能を実現することができるのに対し、多心光コネクタは接続精度を決める基準位置・面が多数存在し、位置精度と光学特性分布について明確になっていないため性能面で劣るが、一定の信頼性を有して安定した生産を実現することにより、高信頼性でかつ安価な多心光コネクタを供給することで問題点を解決できる。

図 1-7 に示す光コネクタの適用領域では MT コネクタを代表とする多心光コネクタの適用箇所は屋外・屋内共に使用されており、その適用領域で様々な仕様で使用されている。シングルモード用 MT コネクタについてはすでに様々な場所で使用されており技術としては確立されている。しかし、昨今の通信速度の高速化を実現するためには光コネクタ接続時における損失を今以上に低減させる必要があり、JIS で定められた規格では要求を満足することができない。

機器内でも省スペース化やフレキシブルな通信媒体として光配線の必要があり、光ファイバ同士の接続が必要不可欠である。光配線板での光ファイバの接続は融着接続技術または光コネクタ接続技術が用いられるが、融着接続技術では融着部を補強するために専用の工具が必要になるほか、融着部を形成するために余長が必要であり、光配線板内での取り回しが非

常に困難である。光コネクタ接続技術では融着接続技術で必要とされた余長は必要としないものの、安定した接続を維持するためには光コネクタ取り付け後に研磨する必要があるが、機器に実装された光配線板に取り付けられた光コネクタを研磨することは不可能である。光ファイバをファインカットして光コネクタへ挿入し接着固定する無研磨による多心光コネクタはすでに開発されているが、接続の際に接続される光ファイバの間隙をなくすための屈折率整合剤が必要となり、発熱する装置内で使用される光配線板内での屈折率整合剤の流出による特性劣化が懸念され、本用途には適していない。よって、無研磨による実装が可能で信頼性がある多心光コネクタの開発が必要不可欠である。昨今ではスーパーコンピュータやハイエンドルータ、サーバ内の光配線板として、フレキシブルに使用可能な通信媒体として光導波路フィルムの適用も活発に議論されている。光導波路フィルムへの光の入出力は通常的光ファイバとの接続となるため、入出力端には光コネクタの実装が必須である。光導波路フィルムは実装密度を向上させることが可能であるため多心光コネクタとの互換性が重要となる。

よって本論文では、多心光コネクタである MT コネクタ技術をベースとした多心光コネクタにおける設計手法および多心光コネクタの高機能化について論ずるとともに、様々な敷設環境に適応した多心光コネクタの有効性の確認を目的とする。本論文は以下の 4 項目からなる。

- (1)多心光コネクタの設計手法
- (2)量産時における低損失シングルモード多心光コネクタに関する研究
- (3)光配線板用多心光コネクタに関する研究
- (4)光導波路フィルム用多心コネクタの設計手法に関する研究

(1)多心光コネクタの設計手法

光通信ネットワークを実現するためにはシングルモード光コネクタが必須であり、1970 年代より開発が本格化した。1976 年に AT&T で開発された Biconic コネクタから始まり、1979 年に電電公社で開発された FC コネクタや 1989 年に NTT で開発された SC コネクタなど、2001 年に FTTH (Fiber To The Home) サービスが導入されるまでの間に様々な単心系光コネクタやその改良技術についての研究開発が活発に行われ、大きな進歩を遂げた。

一方、FTTH の急速な普及や、通信速度の向上・動画配信などの大容量通信が求められ、光ケーブルの多心化や装置間光接続の高密度化が進み、MT コネクタ[16-18]や MT 光コネクタ技術を基に着脱を容易にした MPO コネクタ[19]など、多心系光コネクタの適用領域が急速に拡大している。

SC コネクタや FC コネクタを代表とする単心系光コネクタは円筒形フェルールの外径基準による整列が基本となるため、接続特性と部材の精度や材料特性との因果関係が比較的明確で、これまでに性能向上や信頼性に関する技術が確立している[10-15]。

しかし、多心系光コネクタである MT コネクタはその構造上、接続精度を決める基準位置・面が多数存在し、位置決め精度と光学特性分布について明確になっていない。

多心光コネクタの最も重要な特性である接続損失の発生要因は接続する光ファイバの位置ずれが最も影響されると考えられるため、MT コネクタ接続時における接続損失の発生要因を明確にしなければならない。また、基礎研究などで少量の生産時における高精度多心光コネクタの生産はある程度容易に実現可能だが、量産時に精度を維持しながら安価に多心光コネクタを生産するためには、使用する設備の見直しや成形条件の検討が必要不可欠である。MT コネクタ導入当初は熱硬化性（EPOXY）樹脂を使用し、トランスファ成形機による成形をしていたが、成形タクトが長く材料費も高価であり、量産には適していなかったため成形材料については量産性・コスト面を考慮し熱可塑性樹脂である PPS(Poly Phenylene Sulfide) に変更して MT コネクタを成形するのが主流となった[22]。しかし、MT コネクタに使用されている PPS は成形材料内のガラス充填率が高く、長期的に安定した生産が困難である。

よって、本項では多心光コネクタの接続損失発生要因を明確にするとともに、量産時の精度維持の方法について成形機、成形金型および成形条件から検討する。

(2)量産時における低損失シングルモード多心光コネクタに関する検討

MT コネクタは屋外用としては光ファイバ導入時期から広く用いられている。しかし、通信の高速化による光ファイバ網の広がりとともに、低損失化への要求が高まってきた。JIS C 5981（F12 形多心光ファイバコネクタ（MT コネクタ））や JIS C 5982（F13 形多心光ファイバコネクタ（MPOコネクタ））で定められている軸ずれ量の規格では接続損失低損失化の新たな要求を満足することができない。

よって本項では、前項で明らかにした多心光コネクタの設計手法を用いて設計した低損失シングルモード用 MT コネクタの妥当性について考察する。両端に MT コネクタが取り付けられた光コードを無作為に選出して接続するランダム接続における平均接続損失の目標を単心系光コネクタ用国際標準規格である IEC 規格、IEC61755-1 Fibre optic connector optical interfaces - Part 1: Optical interfaces for single mode non-dispersion shifted fibres - General and guidanceにおける Grade B を参照し、 $99.41 \% \leq 0.35$ dB を満足することを目標とした。光ネットワークでは接続点が多いため、統計的に必要な性能がグレード分けされている光コネクタ用の規格が IEC61755-1 である。Grade B が必要とされるところは単心系光コネクタでしか実現できていないため、多心光コネクタでの実現を目標とした。

その設計手法の正確性を確認する為に、量産時における 50,000 心を超える接続損失のデータから設計値の妥当性を検証した。信頼性については Telcordia Technologies 社（旧 AT&T 社のベル研究所）が制定した通信機器向けの規格（Telcordia 規格）である Telcordia GR-1435-CORE (Generic Requirements For Multi-fiber Optical Connectors) を参照し、屋外で使用されることを想定した試験条件である Uncontrolled Environment を適用し、この規格を満足することを目標とした。

量産時に得られた寸法データおよび接続損失データの相関を実証する為にモンテカルロシミュレーションを実施するとともに、多心光コネクタの設計値の妥当性を確認し、低損失シングルモード光コネクタの有効性について示す。

(3)光配線板用多心光コネクタに関する検討

昨今では MT コネクタは屋内でも使用され、機器間での通信や光配線板への接続、小型光部品にも使用されている。機器内は 500 m 以下の短距離伝送であるため安価に機器が作製可能である GI 型マルチモード光ファイバが主に使用される。

光配線板等に光コネクタを直接アセンブリする場合には、光ファイバボードなどの光配線板が必須となる。融着接続の場合、融着部を補強することが必要となるため、狭小スペースでのコンパクトな配線要求に対して必要とされる特殊な装置がスペースに対して大きいことや、接続部の補強箇所がかさばるため障害となる。そこで、実装や接続が容易で信頼性があり、高歩留りかつ低コストに取り付け可能な光コネクタである MTP/MTPIPE (MT ferrules with Pre-Installed Pre-polished both Ends fibers)[26]を開発した。

MTPIPE は先端のフロントブロックにあらかじめ 50 μm のコア径および 125 μm のクラッド径を有する GI 型マルチモードファイバ（以下 50/125GI 型マルチモードファイバ）が挿入され、コネクタ端面側およびコネクタ内部側の両面に PC 研磨が施されている光コネクタである。コネクタ内部に PC 研磨が施されている部分があるため、ファインカットされた光ファイバを直接コネクタへ挿入することによりコネクタ内部で光ファイバ同士が接続され、MT コネクタプラグとして使用可能となる。ファインカットされた光ファイバはカットによる光ファイバ高さのバラつきが発生する為、コネクタ内部には装置内での使用を考慮し、光配線板内での屈折率整合剤の流出による汚染を防止する為に屈折率整合剤として屈折率整合フィルムを採用してファインカットされた光ファイバのばらつきを吸収している。

本項では(1)多心光コネクタの設計で接続損失の発生要因及び管理すべき寸法箇所を明らかにしたため、その設計手法を GI 型マルチモード光ファイバに適応させて検討する。通常の MT コネクタプラグは市場で使用されているため、特殊な形状の多心光コネクタでもその設計手法が間違っていないことを実証した。接続損失の目標は通常の MT コネクタプラグの既定値が 0.5 dB 以下/接続であることを考慮し、MTPIPE はコネクタ端面での接続および MTPIPE 内部での接続の 2 か所接続点が存在する為、最大損失を 1.0 dB 以下を目標値として設計した。

MTPIPE には接続点が 2 か所存在するほか、前後ブロックを接着固定していることから接着強度も懸念されるため、通常の MT コネクタプラグより信頼性および機械的特性においても影響が出やすいことを考慮し、運用上で安定した使用が可能であるか検討した。信頼性においては(2)項で使用した Telcordia GR-1435-CORE を参照し、機器内で使用されることを想定した Controlled Environment の規定を適用した。

以上の結果から GI 型マルチモードファイバにおいても多心光コネクタの設計手法の正確性を実証するとともに、実装が容易で無研磨で安定した接続可能な光配線板用多心コネクタとして適用可能であることを示す。

(4)光導波路フィルム用多心コネクタの設計手法に関する検討

スーパーコンピュータ、ハイエンドルータ・サーバ内、データセンタ等の光配線として、光導波路フィルムの適用が期待されている。光導波路フィルムへの光入出力にはコネクタ実装が必須であり、ファイバ用多心光コネクタとの互換性の観点から、MT コネクタと同等形状の光導波路フィルム用コネクタである PMT コネクタ (Connector for Polymer Waveguides connected with MT connector) が注目されている[28-31]。

PMT コネクタは、マルチモードのポリマ導波路フィルム用コネクタである。PMT コネクタは 2006 年に PMT 光コネクタ詳細規格(JPCA-PE03-01- 07S)として、JPCA (Japan Electronics Packaging and Circuits Association)規格の中に登録されている。

PMT コネクタは光トランシーバやアクティブオプティカルケーブル(AOC)など光ファイバケーブルを接続することが多く、主に GI 型マルチモード光ファイバと接続されることが多い。

本項では光ファイバではなく光導波路フィルムを用いた多心光コネクタである PMT コネクタの接続損失発生要因を明らかし、光導波路フィルムに PMT コネクタを取り付けた組立品の評価結果から、軸ずれの発生要因に対する問題点を明らかにする。

MT コネクタは端面側に高精度に形成されているファイバ孔に光ファイバを挿入し、接着固定することで光ファイバを高精度に位置決めすることが可能であるのに対し、PMT コネクタはコネクタ端面側に形成されている凹部分に光導波路フィルムを載せて位置決めを行う。よって、PMT コネクタの凹寸法と光導波路フィルムの寸法の差異によるクリアランスが発生しやすいと考えられる。よって、本検討では光導波路フィルムが設計通りの寸法で作製されていることを仮定したうえで 50/125GI 型マルチモードファイバとの接続を考慮して寸法設計を行った。

PMT コネクタの開口部以外の設計値に関しては上記 PMT 光コネクタ詳細規格(JPCA-PE03-01- 07S)を参照した。

設計した PMT コネクタを実際の光導波路フィルムを使用して組立て、組立後の寸法測定及び光学特性評価を実施した。PMT コネクタ取り付け後の寸法についてはまだ研究・開発段階であるため仕様が確立されていない。よって、コア位置ずれ量に関しては通常のマルチモードファイバ規格である接続損失 0.5 dB 以下を目標とする。

1.8 本論文の構成

本論文の構成を図 1-8 に示す。

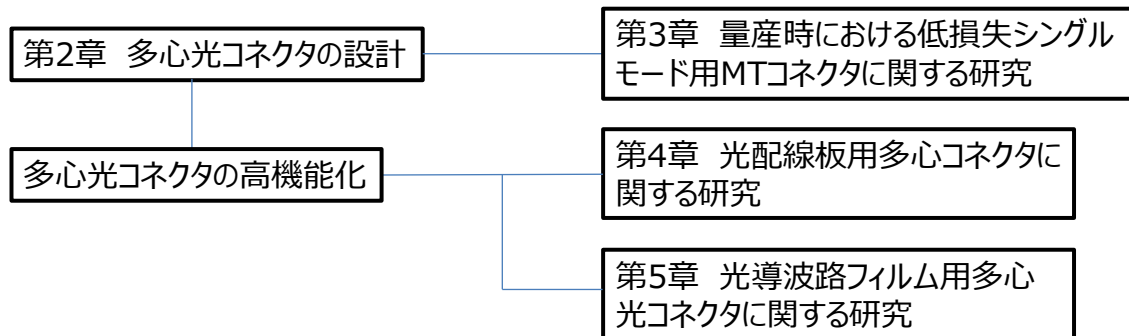


図 1-8 論文構成ブロック図

第2章では本論文の根幹となる多心光コネクタの設計について述べる。多心光コネクタの接続損失発生要因を明確にするとともに、量産手法に対する検討結果について述べる。

第3章では第2章で明確にした多心光コネクタの設計手法を用いて、低損失シングルモード用MTコネクタについて設計する。単心規格である IEC61755-1 の Grade B を多心コネクタであるMTコネクタで実現することを目標とし、その設計値で量産されたMTコネクタを用いて設計手法の妥当性について実証する。

第4章では多心光コネクタの高機能化を目的として、第2章で明確にした多心光コネクタの設計手法を用いて開発した光配線板用多心光コネクタについて述べる。

第5章では多心光コネクタの高機能化を目的として、光導波路フィルム用多心光コネクタであるPMTコネクタについての軸ずれの発生要因に対する問題点について述べる。

最後に第6章ではこれらの結果について総括する。

参考文献

- [1] 総務省 経済白書 2014
- [2] 富士キメラ総研, “2013 光通信関連市場総調査”
- [3] K. Inada, O. Watanabe, H. Taya, “Splicing of Fibers by Fusion Method”,
IEEE Journal on Selected Areas in Communications, No. 5, pp. 706-713,
1986
- [4] K. Kawata, O. Hoshino, K. Miyajima, Y. Ohnishi, M. Ishihara, “A splicing and
inspection technique for single-mode fibers using direct core monitoring”,
Journal of Lightwave Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 185-191, 1984
- [5] C. M. Miller, S. C. Metter, and I. A. White, “Optical Fiber Splices and
Connectors”, Marcel Dekker, Inc,
- [6] M. Matsumoto, T. Haibara, M. Kawase, “Fully Automatic Mass-Fusion
Single-Mode Optical Fiber Ribbon”, 38th IWCS, pp. 225-232, 1989
- [7] S. Nagasawa and I. Sankawa, “Reliability of V-groove Optical Fiber Mass
Splice”, IEICE of JAPAN, J-67-B, 4, pp. 369-379, 1986
- [8] M. P. Reynolds and P. F. Gagen, “Field Splicing of Single-Mode Lightguide
Cable”, ICC '84, 34.7, pp. 1071-1074, 1984
- [9] K. Mochida, K. Inada, K. Watanabe, “Splicing of SM Fibers by V-Groove
Connector”, Natl. Conv. 905, IEICE J. pp. 204-209, 1977
- [10] K. Hogari, et al, “Field-installable single fiber connector”, Electron. Lett.,
Vol 33, No.12, pp. 1072-1073, 1997
- [11] E. Sugita, R. Nagase, K. Kanayama, and T. Shintaku, “SC-type
single-mode optical fiber connectors”, J. Lightwave Technol., Vol 7, pp.
1689-1696, 1989
- [12] R. Nagase, E. Sugita, S. Iwano, “Miniature Optical Connector with Small
Zirconia Ferrule”, IEEE Transactions Photonics Technology Letters, Vol 3,
No 11, pp 1045-1047, 1991
- [13] S. Iwano, R. Nagase, K. Kanayama, E. Sugita, K. Yasuda, and Y.
Ando, “Compact and Self-Retentive Multi-Ferrule Optical Backpanel.
Connector”, J. Lightwave Technol., Vol. 10, No.10, pp. 1356-1363, 1992
- [14] C. Decusatis, “Optical data communication: fundamentals and future
directions”, Opt. Eng. Vol. 37 No. 12, pp. 3082-3099, 1998.
- [15] N. Suzuki, Y. Iwahara, M. Saruwatari, and K. Nawata, “Ceramic capillary
connector for 1.3 μm single-mode fibres”, Electron. Lett., Vol. 15, No. 25,
pp. 809-811, 1979

- [16] S. Nagasawa, T. Tanifuji, M. Matsumoto, and M. Kawase: "Single-mode multifiber connectors for future large scale subscriber networks," Proc.ECOC'93, MoP1.5, 1993
- [17] 加島, 佐竹, "多心一括光コネクタ技術", 信学技報, EMC87-43, pp. 9-16, 1987-1
- [18] 佐竹, 長沢, 加島, 平井, "光ファイバ多心コネクタの設計と試作", 信学技報, CS83-165, 1984-01
- [19] M. Takaya, M. Kihara, and S. Nagasawa: "Design and performance of multifiber backpanel type connector," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 8, No. 5, pp. 655-657, 1996
- [20] F. Ashiya, T. Satake, and S. Nagasawa, "Development of multifiber connector and their Applications", E-FOC '87, pp. 304-308, 1987
- [21] S. Nagasawa, Y. Yokoyama, F. Ashiya, and T. Satake, "A High-Performance Single-mode Multifiber Connector Using Oblique and Direct Endface Contact Between Multiple Fiber Arranged in a Plastic Ferrule", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 3, No. 10, pp. 937-939, 1991
- [22] T. Takaya, T. Katagiri, S. Nagasawa, Y. Murakami, "Development of MT Type Connector Using an Injection Molded Ferrule and Quick Assembly Technique", Proc. in 47th IWCS, pp/ 658-665, 1998
- [23] M. Takaya, S. Nagasawa, and Y. Murakami, "Single-mode Multifiber Connector Using an Injection Molded MT Type Ferrule and Quick Assembly Technique", Optical Engineering, Vol. 39, No.4, pp. 1025-1031, April 2000
- [24] N. Matsumoto, and S. Nagasawa, "Study on Reference Multifiber Connector", in Nat. Conv. Rec. IEICE, JAPAN, paper B-1034, 1985
- [25] 竹崎 元人, 長瀬 亮, "多心シングルモード光コネクタの量産時における光学特性と寸法精度の関係", 電子情報通信学会論文誌 C vol.J97-C No.6, pp258-263, Jun, 2014
- [26] M. Takezaki, R. Nagase, "A Novel MT Ferrule with Pre-Installed Pre-polished End Fibers (MTPIPE) for Multimode Fibers", 電子情報通信学会 英文論文誌 C vol.E97-C No.9, pp894-899, 2014
- [27] 長瀬 亮, 保苺 和男, "光コネクタ", NTT 技術ジャーナル, pp. 74-78, 2007.12
- [28] 疋田 真, 畠山 豊, 工藤 あや子, 高原 秀行, "ポリマ導波路用 PMT コネクタ", 信学技報, EMD2007-105, pp29-33, 2007

- [29]Y. Ishikawa, K. Hara, T. Iwashima, S. Saito, “Properties and reliabilities of Nobel Silicone-Based Film Optical Waveguide Carrying PMT Connector”, Proc. JIEP 17B-2, 2007 (in Japanese)
- [30] 竹崎 元人, 長瀬 亮, “PMT (Polymer waveguides connected with MT connector)コネクタの特性”, 電子情報通信学会信学技報 Vol.114 No.187 , 電子情報通信学会信学技報 Vol.114 No.186 , 電子情報通信学会信学技報 Vol.114 No.185 , 電子情報通信学会信学技報 Vol.114 No.184 , 電子情報通信学会信学技報 Vol.114 No.183, LQE2014-58 , OPE2014-84 , CPM2014-74, EMD2014-59, R2014-54, pp159-162, 2014
- [31] M.Takezaki, R.Nagase, “Design for PMT Connector (Polymer waveguides connected with MT connector)”, ICSJ2014, Nov, 2014

第2章 多心光コネクタの設計

2.1 はじめに

多心光コネクタの最も重要な特性である接続損失の発生要因は、接続する光ファイバの位置ずれが最も影響されると考えられる。よって、多心光コネクタ接続時における接続損失の発生要因を明確にしなければいけない。また、基礎研究などで少量の生産時における高精度多心光コネクタの生産はある程度容易に実現可能だが、量産時に精度を維持しながら安価に多心光コネクタを生産するためには、使用する設備の見直しや成形条件の検討が必要不可欠である。

本章では多心光コネクタの接続損失発生要因を明確にするとともに、量産時の精度維持の方法について成形機、成形金型および成形条件から検討する。まず、多心光コネクタである MT コネクタについて取り上げて構造や用途を説明した後に、MT コネクタの構造や光ファイバの特性から接続損失発生要因について考察する。次に MT コネクタの生産方法である成形方法および使用する成形材料について述べる。MT コネクタ導入当初は熱硬化性 (EPOXY) 樹脂を使用し、トランスファ成形機による成形をしていたが、成形タクトが長く材料費も高価であること、また量産には適していなかったため成形材料については熱可塑性樹脂である PPS(Poly Phenylene Sulfide)、成形機については射出成形に変更して量産性・コスト面を考慮し MT コネクタを成形した。最後に量産を考慮し、安定した生産を実現するために成形条件や成形材料、使用する設備環境や成形金型の見直しを検討する。

2.2 MT コネクタとは

MT コネクタとは、単心光ファイバおよび光ファイバテープ心線を一括接続するための多心用光コネクタである[1-3]。以前は国内において使用される光ファイバテープ心線は 4 心テープ心線および 8 心テープ心線であったため、4 心 MT コネクタや 8 心 MT コネクタが主流であったが、大容量通信や高密度化が進み 12 心テープ心線や $\phi 3.0$ mm の被覆に単心光ファイバが 24 本挿入されている光ケーブルなどが使用され、12 心 MT コネクタや 12 心を中心軸から 500 μm ピッチで 2 段配列した 24 心 MT コネクタなどが使用されている。

高速組立用 MT コネクタ[4,5]や超多心コネクタとして 50 心[6]での MT コネクタも検討され様々な用途に応じた幅広い研究が活発に行われている。図 2-1 に MT コネクタ外観、図 2-2 に MT コネクタの外形寸法を示す。

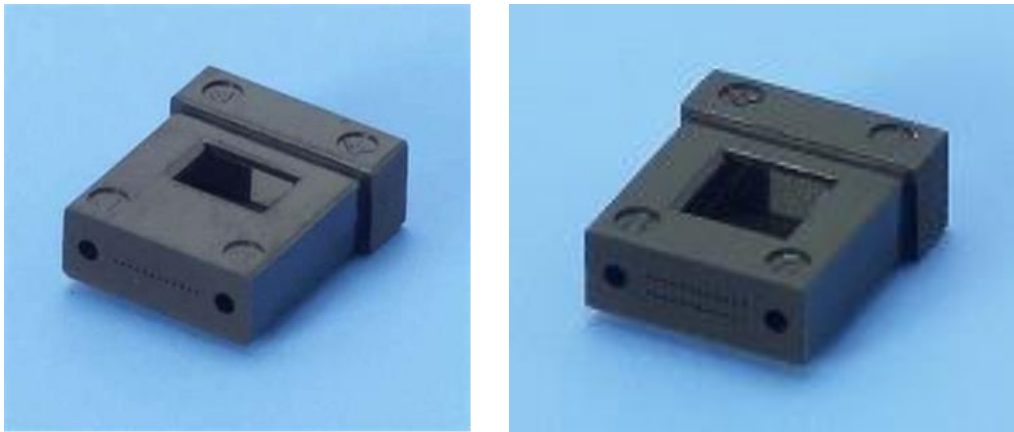


図 2-1 12 心 MT コネクタおよび 24 心 MT コネクタ

MT フェルールの寸法は JIS C 5981「F12 形多心光ファイバコネクタ (MT コネクタ)」で規定されており、全長寸法が 8.0 mm、接続端面の寸法が 2.5 mm × 6.4 mm、鍔部寸法が 3.0 mm × 7.0 mm、鍔部を除くファイバ軸方向長さが 6.0 mm となっている。

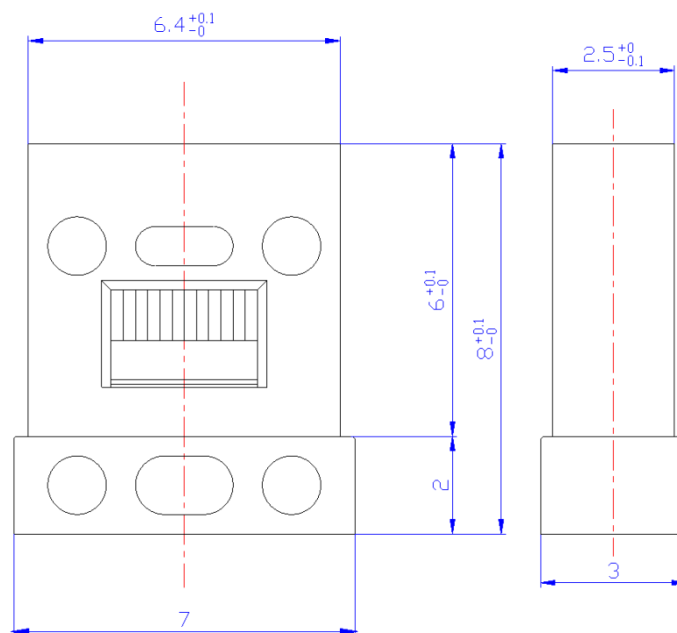


図 2-2 MT コネクタ外形寸法

MT フェルール接続端面には $\phi 0.7$ mm のガイドピン孔が 2 個と、そのガイドピン孔の間に $\phi 0.125$ mm のファイバ孔が形成されている。ファイバ孔は 0.25 mm ピッチで配列されており、光ファイバテープ心線の間隔に対応しているため、光ファイバ接着硬化時に光ファイバコアピッチが 0.25 mm となる。ガイドピン孔ピッチは 4.6 mm で、 $\phi 0.125$ mm のファイバ孔径で 12 心までの配列が可能である。

MT コネクタとプラスチックまたはゴムで成形された挿入する光ファイバを保護するための MT ブーツ、各種仕様に応じた光ファイバテープ心線が MT フェルールに接着固定されて MT コネクタプラグが構成される。図 2-2 に MT コネクタプラグの構成を示す。

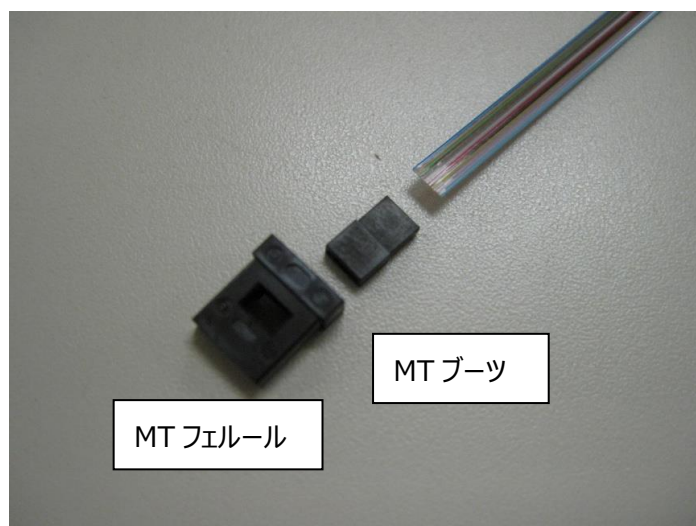


図 2-3 MT コネクタプラグの構成

MT コネクタ上面に接着剤滴下用の窓が形成されており、組立時にはその窓から熱硬化性光学接着剤を滴下して光ファイバを接着固定する。使用する光ファイバによって接着剤硬化温度条件を設定することにより、接着剤の応力による光ファイバへの影響を軽減することができる。接着硬化された MT コネクタを使用用途に合わせて端面研磨する。端面の形成状態については 1.3.4 項で述べた垂直及び斜め 8°研磨形状となる。

MT コネクタプラグ同士の接続には、2 個の MT コネクタプラグと 2 本のガイドピン、MT コネクタ用クリップが使用される。MT コネクタプラグ接続時は、片側の MT コネクタプラグに 2 本のガイドピンをガイドピン孔に挿入し、MT コネクタプラグの位置合わせをして接続し、MT コネクタ用クリップで締結させる。MT コネクタ用クリップは MT コネクタ着脱工具によって着脱可能である。

MT コネクタ端面の研磨状態によっては接続時に屈折率整合剤をあらかじめ塗布する。接続損失に影響するため、端面に汚れやゴミなどが付着しないように清掃することが望ましい。図 2-4 に MT コネクタプラグの接続概略図を示す。

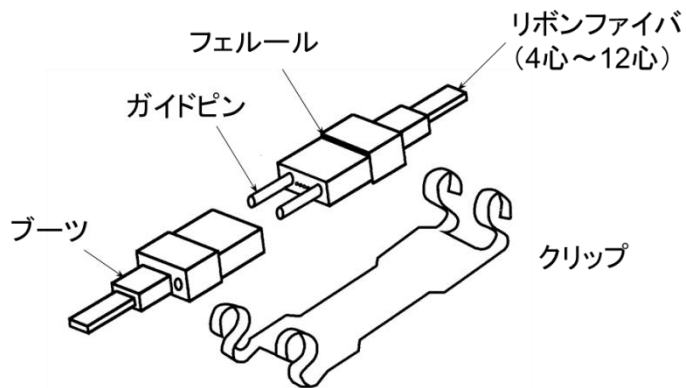


図 2-4 MT コネクタブラグ接続状態概略

2.3 多心光コネクタの接続損失発生要因

2.3.1 ファイバの軸ずれによる挿入損失の発生

接続点における挿入損失の発生原因は主にファイバ孔位置ずれ、ファイバとファイバ孔のクリアランスによるファイバ偏心、ガイド孔位置ずれ、ガイドピンとガイド孔のクリアランスによるガイドピン偏心の4つが考えられる。ファイバ孔位置ずれ (Position error)、ファイバ孔やガイド孔のクリアランスによるファイバやガイドピンの偏心 (Eccentricity from the hole) の模式図を図 2-5 に示す。

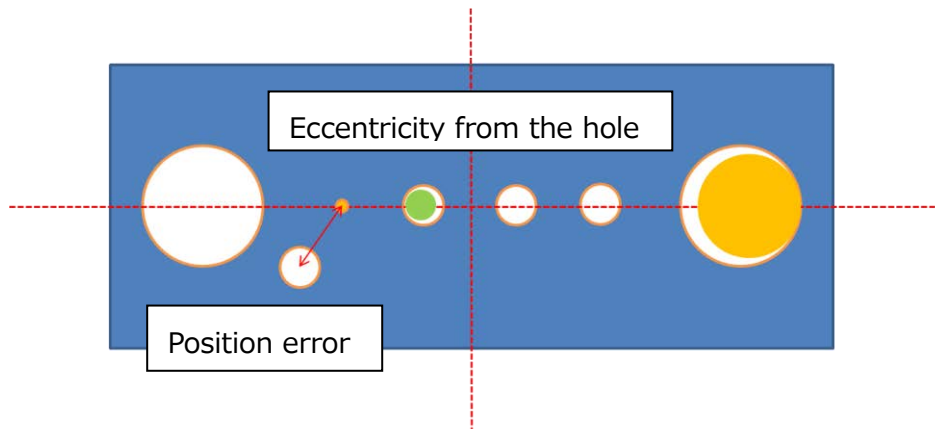


図 2-5 MT フェルールにおけるファイバの軸ずれ要因

図 2-5 は MT コネクタの端面側から見た図となっている。中央にある4つの孔がファイバ孔、両端の孔がガイド孔である。ファイバ孔位置ずれについては設計値からの位置ずれ量を示す。ファイバ孔やガイド孔のクリアランスによるファイバやガイドピンの偏心については、ファイバ孔やガイド孔と光ファイバおよびガイドピンとのクリアランスにより発生するずれ量のことを示す。

シングルモード用 MT コネクタは高い反射減衰量を維持するためにフェルール端面が斜め 8° に研磨されている。斜め研磨された MT コネクタを接続するとき、光ファイバ軸方向に約 9.8 N の力で押し付けるため、図 2-6 に示すように接続する双方のフェルールが軸直角方向にずれる力が作用する。この要因によって発生する位置ずれを、ここでは Y オフセットと呼ぶ。

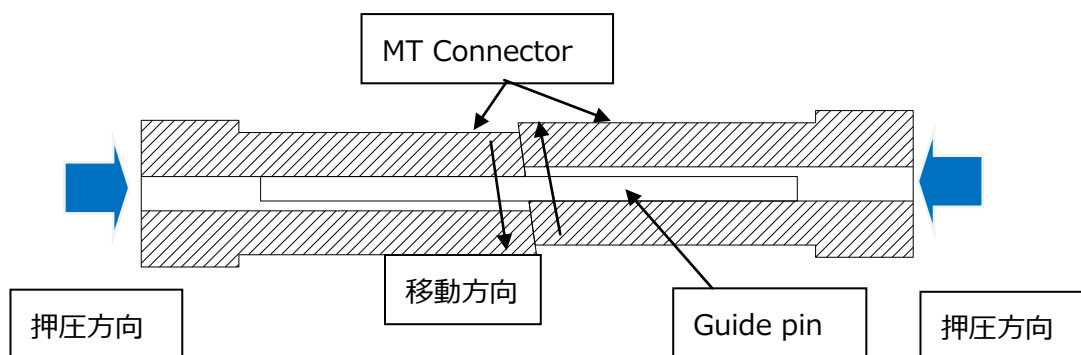


図 2-6 斜め 8°研磨 MT 光コネクタの Y オフセット

多心光コネクタの Y オフセットは式(1)で算出することができる。

$$Y = \frac{(D_2 - D_1)}{2} \quad \dots(1)$$

YはY オフセット値、 D_1 はガイドピン径、 D_2 はガイド孔径である。Yは接続時における双方の孔位置ずれ量ではなく、MT コネクタ片側の孔位置ずれとして考える。

次に、ファイバ孔がガイド孔軸に対して傾いているとき、端面から深さ dL だけ研磨すると、図 2-7 に示すようにファイバ孔位置が D_{offset} だけ設計値からずれると考えられる。

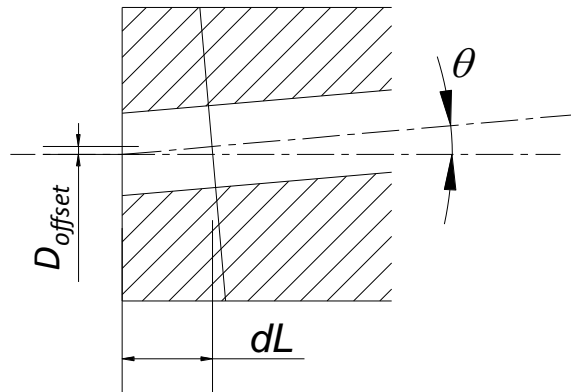


図 2-7 ファイバ孔傾きによる孔位置ずれ (Y 軸方向)

ファイバ孔の傾き量は下式(2)で計算することができる。

$$D_{offset} = \sqrt{(dL \tan \theta_x)^2 + (dL \tan \theta_y)^2} \quad \dots(2)$$

D_{offset} は研磨した後のファイバ孔位置ずれ、 dL は端面からの研磨深さ、 θ_x と θ_y は X 軸および Y 軸方向のファイバ孔の傾き角度である。

2.3.2 MFD とファイバ軸ずれ量による接続損失発生の原因

シングルモードファイバの接続損失は下記の式(3)で計算することができる[7,8]。

$$L = 10 \log \left\{ \exp \left(\frac{D^2}{W^2} \right) \right\} \quad \dots(3)$$

L は接続損失(dB)、 D はファイバ軸ずれ量、 W はモードフィールド半径(MFR)を示す。式(3)は MFR の 2 乗に反比例して光接続損失が低下することを示している。一般に、MFD は、光ファイバの構造や通信波長により変化するため、これを拡大して接続損失を低減させることは可能である。しかし、光通信網全体を考慮した場合、光ファイバ内での損失の増加や曲げ損失の増加など様々な問題が生じるため、現在は主に MFD が約 $9.2 \mu\text{m}$ のシングルモードフ

ファイバや波長 1310 nm 帯もしくは 1550 nm 帯の通信光が用いられる。MFDを $9.2 \mu\text{m} \pm 0.4 \mu\text{m}$ で設定したときの接続損失とファイバ軸ずれの関係を図 2-8 示す。

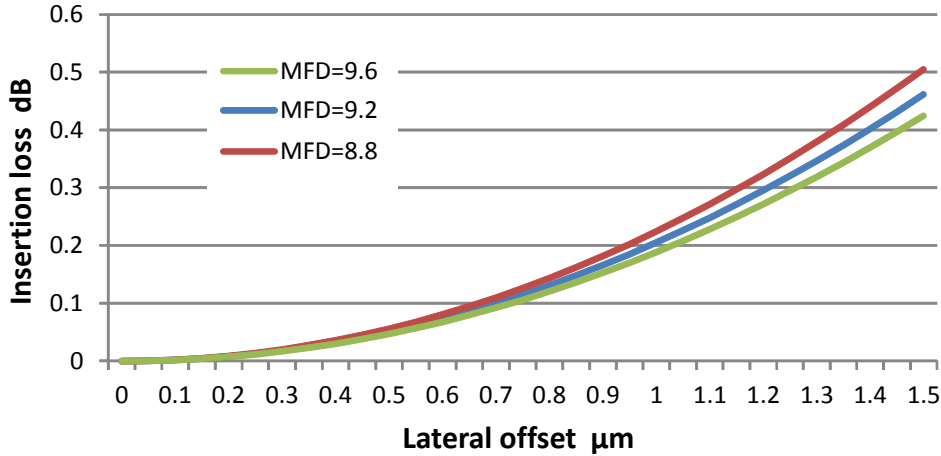


図 2-8 接続損失とファイバ軸ずれ量の関係 (MFD : $9.2 \mu\text{m} \pm 0.4 \mu\text{m}$)

2.4 多心光コネクタの量産技術について

MTコネクタはプラスチック成形により形成される。前項で接続損失の発生要因を明確にしたが、それを制御して精度よく安定した製品を生産するためには成形機や成形材料選定といった成形技術が重要となってくる。本項では成形技術、なかでも多心光コネクタで使用される射出成形技術について述べる。

2.4.1 成形技術について

射出成形はあらかじめホッパに投入されている原料ペレットを、型閉じから始まり、型締め・ノズルタッチ、射出、保圧、可塑化（スクリュー回転）、射出ユニット後退、型開き・成形品突き落とし（エジェクタピンの作動）という 7 つの基本的なステップを踏むことにより、ホッパからスクリュー内蔵のシリンダ内に送り込み、これを軟化もしくは可塑化させてシリンダ前方に輸送し、ノズルを経て金型中に注入して冷却固化させ、これを取り出して成形品とする方法である。

射出押出成型法

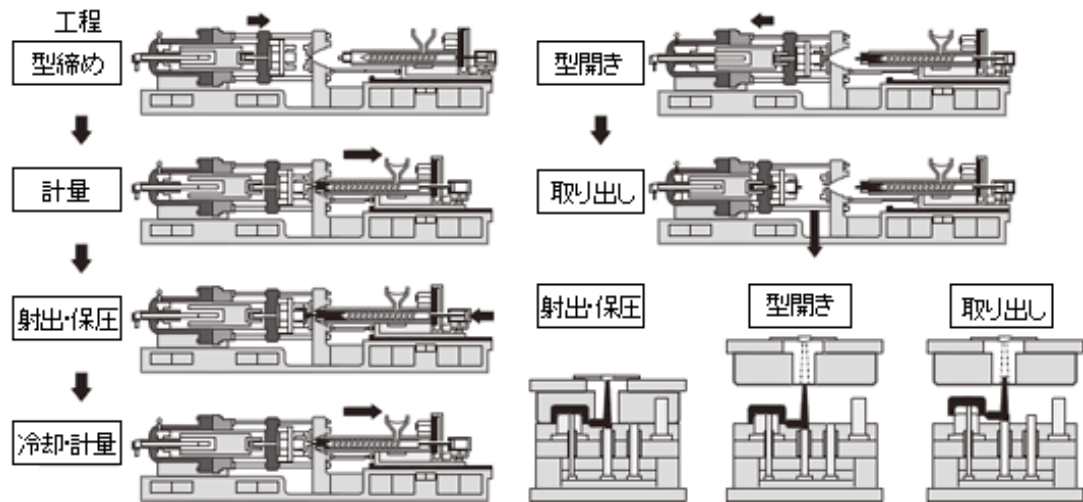


図 2-9 射出成型工程

射出成形機は一般的に、射出ユニット、型締めユニット、油圧ユニットおよび電子・電気制御ユニットの 4 ユニットから構成される。

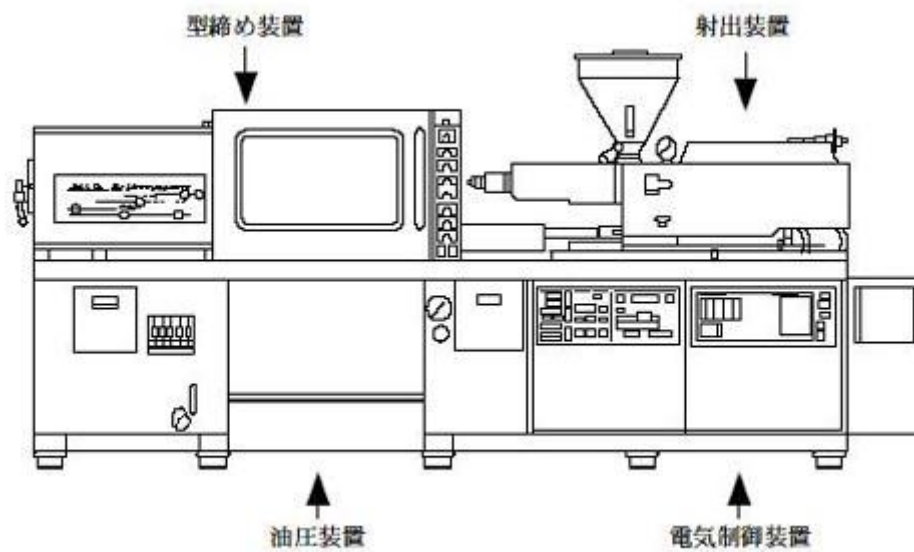


図 2-10 射出成形機外観



図 2-11 射出成形機外観

射出ユニットは、原料を貯留、供給するためのホッパー、原料を加熱溶融（可塑化）かつ混練して、金型内に射出するためのスクリー（もしくはプランジャ）を前進させ、射出圧力を立て、射出圧力を与えるための油圧シリンダ、加熱シリンダの先端に位置して溶融・混練の終わった原料を金型内に注入するためのノズルなどで構成されている。

次に型締めユニットは金型をサポートするための固定および可動の2つの型盤（ダイプレート）と、これらの型盤を連ねて金型開閉するために移動する可動盤のガイドともなり、型締め時には型締め力の反力を受けるダイバー、型閉開のための可動盤の移動動作をさせるとともに、型締め力を発生させる油圧シリンダ、射出成型の後に、金型が開かれた直後に成形品を金型から突き出すためのエジェクタ装置、作業者を金型開閉時の挟まれ事故から保護するための安全扉で構成されている。

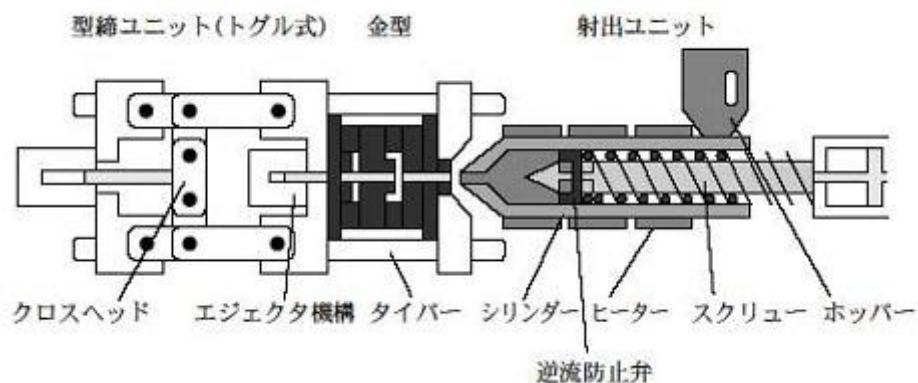


図 2-11 射出ユニットおよび型締めユニット

油圧ユニットは前述の両ユニットを構成している油圧シリンダに圧油を供給するための電動機、ポンプなどの動力源および油の回路を構成する油圧配管、油圧や流量さらには油の流れ方向などを制御するバルブ類、計器などで構成されている。



図 2-12 油圧ユニット

電気・電子制御ユニットは動力ユニットと制御ユニットに分かれ、動力ユニットは型締め、シリンダ前進、射出、保圧、型開き、成形品突きだし、シリンダ後退、スクリー後退、スクリー回転などの一連のシーケンスを、タイマ、リミットスイッチ、リレーで行わせる構造になっている。

他の重要な機械要素として金型がある。金型は射出成型機の型締めユニットに組み込むことができ、固定盤に固定される固定側と可動側に固定される可動側の 2 つに分かれる。

シリンダで溶融された成形材料が固定側のスプルーブッシュを通して金型内部の空間に射出される。金型内に射出された成形材料は一定時間冷却されることで固まる。成形品が固まった後に可動側の金型を開く。可動側の突き出しピン（エジェクタピン）が突き出されることにより、成形品が突き出され、取り出し機や自動落下により成形品が取り出される。成形品が取り出された後、エジェクタピンが元の位置に戻され再び金型が戻される。

取り出し機によって取り出された成形品のスプルー、ランナーをゲート部分から切断機によって切断し、製品として形成させる[9]。

2.4.2 成形材料について

プラスチック射出成形に使用される材料には熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂の2種類がある。熱可塑性樹脂は加熱すると可塑化（成形材料の溶融軟化）し、冷やすと固まる性質を有する。今回用いた PPS は黒褐色で高い耐熱性を持ち、荷重たわみ温度は 260℃以上にも及び耐熱性エンブラとして優れた特性を示す。高温下での機械的物性の低下が少ない。耐溶融性が極めて強く、200℃以下ではあらゆる溶剤に不溶であり、UL94-V0 の難燃性を有する。流動性が高く、肉薄など成形性に優れる。また、成形収縮率も低く精密な成形が可能である。ただし、成形時の結晶化度が物性に大きく影響するため、樹脂温度や金型温度の設定など、成形条件のコントロールには留意が必要となる。

熱硬化樹脂は重合または縮合という化学反応を伴って硬化した後は、再び熱を加えても溶融も硬化もできない性質を持つ。主な熱可塑性樹脂および熱硬化樹脂を表 2-1 および表 2-2 に示す。

表 2-1 主な熱可塑性樹脂

熱可塑性樹脂	汎用プラスチック		ポリエチレン (PE)	
			ポリプロピレン (PP)	
			ポリスチレン (PS)	
			AS 樹脂 (AS)	
			ABS 樹脂 (ABS)	
			メタクリル樹脂 (PMMA)	
			ポリ塩化ビニル (PVC)	
	エンジニアリングプラスチック (エンブラ)		汎用エンブラ	ポリアセタール (POM)
				ポリアミド (PA)
				ポリカーボネート (PC)
				変性ポリフェニレンエーテル (PPE)
				ポリブチレンテレフタレート (PBT)
				ポリエチレンテレフタレート (PET)
	エンジニアリングプラスチック (エンブラ)		超高性能エンブラ	ポリサルフォン (PSF)
				ポリエーテルサルフォン (PES)
				ポリフェニレンサルファイド (PPS)
				ポリアミドイミド (PEI)
				ポリメチルペンテン (TPX)
				液晶ポリマ (LCP)
ポリエーテルエーテルケトン (PEEK)				
ポリテトラフルオロエチレン (PTFE)				
ポリフッ化ビニリデン (PVDF)				

表 2-2 主な熱硬化性樹脂

熱硬化性樹脂	フェノール樹脂 (PF)
	ウリア樹脂 (UF)
	メラミン樹脂 (MF)
	エポキシ樹脂 (EP)
	ジアリルフタレート樹脂 (PDAP)
	不飽和ポリエステル樹脂 (UP)
	ポリイミド (PI)
	ポリウレタン (PUR)

量産性、コスト面、耐環境性、寸法安定性を考慮したうえで MT コネクタの成形に適した材料として、超高性能エンブラである PPS を使用することとした。

2.4.3 多心光コネクタを量産するために

MT コネクタを射出成形技術で PPS を使用して成形するだけでは、量産性としては不十分である。PPS は寸法安定性に優れるが、成形材料内のガラス充填率が高く、成形金型や成形機の摩耗が激しい。成形金型の摩耗が激しいと金型部品の精度も維持できなくなってしまう。MT コネクタの成形技術において重要なことは、「いかに金型部品の精度を継続して成形品に転写できるか」、「品質を維持しながら安定した成形ができるか」である。今までより一桁上の精度を出す必要がある低損失 MT コネクタを実現や、様々な形状の多心光コネクタを継続して安定した生産をするためには、成形に関する様々な条件を見直す必要がある。そこで、本項では下記に示す 3 項目について再検討する。

- ①成形材料・成形条件の最適化
- ②射出成型機の安定化
- ③金型部品、金型構造の再検討

①成形材料・成形条件の最適化

従来使用していた成形材料は、成形材料の加熱溶融時に圧力を加えた際の合成樹脂の挙動である流動性が悪く、成形条件を調整することで無理やり金型内部へ材料を充填しており、安定した射出成形が困難であった。そこで、成形材料の基本的な特性をほとんど変えずに流動性を向上させた。成形材料の見直しをした上で保圧、速度、温度など成形条件を調整したことにより、成形機および成形金型にかかる負荷を低減させた。成形方法も成形金型に使用する部品の破損を防ぐためにより負荷をかけない方法を選択し、量産性を向上させた手法に最適化した。

②射出成形機の安定化

MT コネクタに使用する成形材料である PPS はガラス充填率が高いため、成形機を材料を充填する部分に当たるシリンダやスクリーなどが従来の部品材質では成形数約 50,000 ショット程度で部品が摩耗してしまい、安定した成形が困難であった。

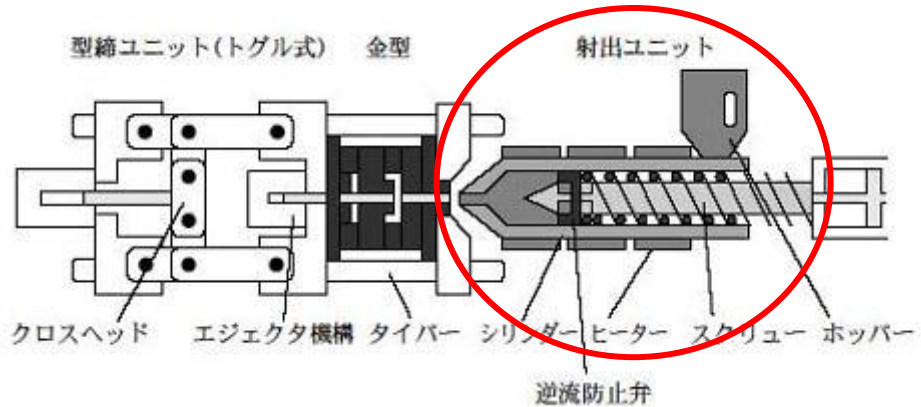


図 2-13 射出ユニット外観

そこで、成形機に使用されている部品の材質を見直し、部品の摩耗を低減させることに成功した。成形機の部品の材質を選定することにより、従来 50,000 ショットであった成形数が約 300,000 ショットまで継続が可能となった。

③金型部品、金型構造の再検討

金型精度の維持を実現するために、金型部品および金型構造について再検討した。成形金型については、従来は可動側と固定側をガイドピンで位置決めしていたが十分な位置決めが実現できていなかった。ガイド機構を見直すことにより、高精度な位置決めが可能となり、安定した成形が実現可能になった。また、成形材料の見直しと同時に、成形金型のランナーとスプルーの径を変更したことで、成形材料をより流れやすくすることに成功した。

部品精度維持を目標としてファイバ孔を形成および位置精度を出すための金型部品である V 溝ブロック、キャビブロック、ファイバコアピンの材質を変更した。また、金型の加圧接触による部品の破損を防ぐことができるように材料の選定を行った。部品の材質を変更したことにより耐久性が向上し、破損が低減された。

2.5 結論

本章でははじめに、MT コネクタの接続損失発生要因について MT コネクタの構造から接続時に発生する位置ずれの解析を行った。軸ずれが発生する要因としてファイバ孔と光ファイバのクリアランスによる光ファイバの偏心、ガイド孔とガイドピンのクリアランスによるガイドピンの偏心、ファイバ孔の設計値からの位置ずれ、ガイド孔の位置ずれの 4 項目が発生することを示した。MT コネクタに関しては端面形状を斜め 8°に研磨することから Y オフセットの発生、研磨することによるファイバ孔曲がりの発生も示した。

本章で明らかにした接続損失発生要因を抑制して、精度よく安定した製品を生産するために成形方法の再検討を実施した。成形材料を見直すことにより成形機及び成形金型にかかる負荷を低減することに成功したとともに、成形機の部品検討を行ったことで耐久性の向上や成形条件の最適化を実現し、成形の安定化に成功した。成形機を安定させることに成功したため、次に成形品精度の根幹となる金型部品の見直しに着手したことで金型精度を安定して成形品に転写可能となった。よって、高精度な金型を用いて安定した生産が可能となった。

参考文献

- [1] S. Nagasawa, T. Tanifuji, M. Matsumoto, and M. Kawase: "Single-mode multifiber connectors for future large scale subscriber networks," Proc. ECOC'93, MoP1.5, 1993
- [2] 加島, 佐竹, "多心一括光コネクタ技術", 信学技報, EMC87-43, pp. 9-16, 1987-1
- [3] 佐竹, 長沢, 加島, 平井, "光ファイバ多心コネクタの設計と試作", 信学技報, CS83-165, 1984-01
- [4] T. Takaya, T. Katagiri, S. Nagasawa, Y. Murakami, "Development of MT Type Connector Using an Injection Molded Ferrule and Quick Assembly Technique", Proc. in 47th IWCS, pp/ 658-665, 1998
- [5] M. Takaya, S. Nagasawa, and Y. Murakami, "Single-mode Multifiber Connector Using an Injection Molded MT Type Ferrule and Quick Assembly Technique", Optical Engineering, Vol. 39, No.4, pp. 1025-1031, April 2000
- [6] Y. Ando, S. Iwano, K. Kanayama, and R. Nagase: "Statistical analysis on connection characteristics of optical fiber connectors," IEICE Trans. Electron., Vol. E77-C, No. 12, pp. 1970-1981, Dec. 1994.
- [7] D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splices," The Bell System Technical Journal, Vol. 56, No.5, pp. 703-718, 1977
- [8] C. M. Miller, S.C. Metter, and I.A. White, "Optical Fiber splicer and connectors," Marcel Dekker, Inc
- [9] 福島 有一, "よくわかる射出成形金型設計", 日刊工業新聞社, pp. 2-7, 2002

第3章 量産時における低損失シングルモード多心光コネクタに関する研究

3.1 はじめに

本章では、第2章で明らかにした多心光コネクタの接続損失発生要因から低損失シングルモード用 MT コネクタを設計する。両端に MT コネクタが取り付けられた光コードを無作為に選出して接続するランダム接続における平均接続損失の目標を単心系光コネクタ用国際標準規格である IEC 規格、IEC61755-1 Fibre optic connector optical interfaces - Part 1: Optical interfaces for single mode non-dispersion shifted fibres - General and guidance における Grade B を参照し、99.41 %が 0.35 dB 以下となることを目標値とした。光ネットワークでは接続点が多いため、統計的に必要な性能がグレード分けされている単心光コネクタ用の規格が IEC61755-1 である。Grade B が必要とされる場所は単心光コネクタでしか実現できていないため、多心光コネクタでの実現を目標とする。

設計の正確性を確認する為に、50,000 心を超える量産時における膨大な接続損失のデータから設計値の妥当性を検証した。信頼性については Telcordia Technologies 社 (旧 AT&T 社のベル研究所)が制定した通信機器向けの規格 (Telcordia 規格) である Telcordia GR1435-CORE (Generic Requirements For Multi-fiber Optical Connectors)を参照し、屋外で使用されることを想定した試験条件である Uncontrolled Environment の規定を満足することを目標とした。

また、量産時に得られた寸法データおよび接続損失データの正確性を実証する為にモンテカルロシミュレーションを実施するとともに、低損失シングルモード光コネクタの設計の妥当性について検証した。

3.2 低損失シングルモード多心光コネクタの設計

光ファイバ心数は1段配列で最大数となる12心とし、ランダム接続時の接続損失が99.41 %が0.35 dB 以下となることを目標とした。使用する光ファイバの MFD を $9.2 \mu\text{m}$ と仮定したときに、2.3.2 項で述べた接続損失理論式から接続点における光ファイバの軸ずれ量を $1.4 \mu\text{m}$ 以下で設計する必要がある。図 3-1 に接続損失とファイバ軸ずれ量の関係を示す。

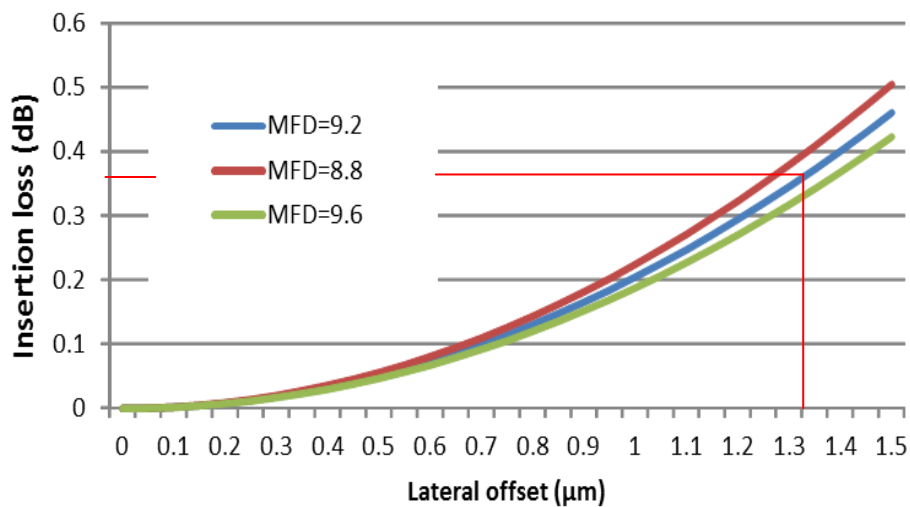


図 3-1 接続損失とファイバ軸ずれ量の関係 (MFD : 9.2 μm±0.4 μm)

その他の設計値は IEC61755-1 の Grade B を参照した。設計寸法値を表 3-1 に示す。

表 3-1 MT フェルールの設計寸法

	Designed value
Fiber hole position error	≤0.0014 mm
Fiber hole tilt	≤0.2°
Guide hole diameter	0.6990 mm~0.6996 mm
Guide pin diameter	0.6985±0.0001 mm

3.3 寸法測定結果

3.3.1 外形寸法測定結果

成形の安定性を確認するために量産された MT コネクタの外形寸法を測定した。外形寸法規格は JIS C 5981 (F12 形多心光ファイバコネクタ (MT コネクタ)) を参照した。外形測定にはマイクロメータを使用し、測定環境は 23±2℃で測定した。測定箇所および測定結果を図 3-2 および表 3-2 に示す。

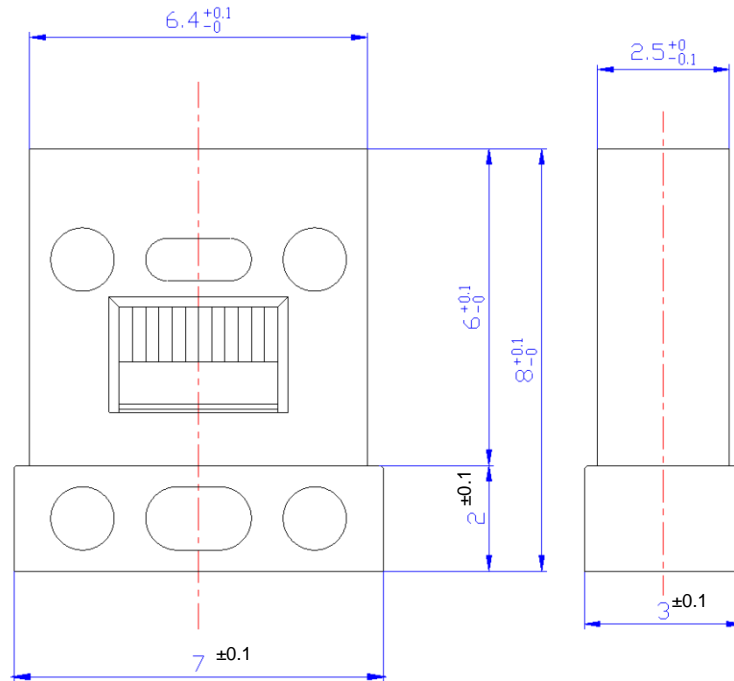


図 3-2 MTコネクタ外形寸法 単位：mm

表 3-2 MTコネクタ外形寸法測定結果 単位：mm

寸法	+0.1 8.00 0	±0.1 2.00	+0.1 6.00 0	±0.1 7.00	+0.1 6.40 0	±0.1 3.00	0 2.5 -0.1
AVG	8.045	1.970	6.075	6.990	6.432	3.018	2.449
MAX	8.054	1.971	6.084	6.994	6.433	3.021	2.451
MIN	8.032	1.969	6.062	6.920	6.428	3.014	2.446
σ	0.004	0.000	0.004	0.009	0.001	0.002	0.001
μ+3σ	8.057	1.971	6.087	7.017	6.434	3.023	2.453
μ-3σ	8.034	1.969	6.063	6.964	6.429	3.013	2.445
U.Limit	8.100	2.100	6.100	7.100	6.500	3.100	2.500
L.Limit	8.000	1.900	6.000	6.900	6.300	2.900	2.400
Cpk	3.84	96.17	2.06	3.44	25.24	16.82	11.75

測定数は68個で、全ての測定箇所にて工程能力を定量的に評価する指標の一つである工程能力指数(Cpk)が1.33以上を満足しており、安定した成形がされていると判断できる。

3.3.2 ガイド孔径測定結果

2.3 項で述べたファイバ孔やガイド孔のクリアランスによるファイバやガイドピンの偏心 (Eccentricity from the hole) や Y オフセットを算出するためにガイド孔径の測定を行った。ガイド孔径測定には精度 ± 0.00005 mm のピンゲージと孔径測定器を使用した。測定方法は MT コネクタを専用の治具に固定し、ガイド孔にピンゲージを挿入してプッシュプルゲージに取り付ける。判定は後に実測値と理論値の整合性を確認するため、プッシュプルゲージにより引き抜き荷重を管理し、0.98 N での引き抜き可否で通り止まりを 0.1 μ m 単位で判定した。孔径測定の測定系を図 3-3 に示す。

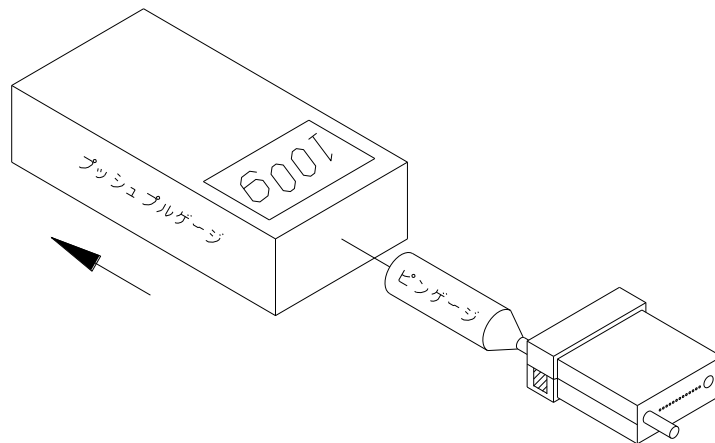
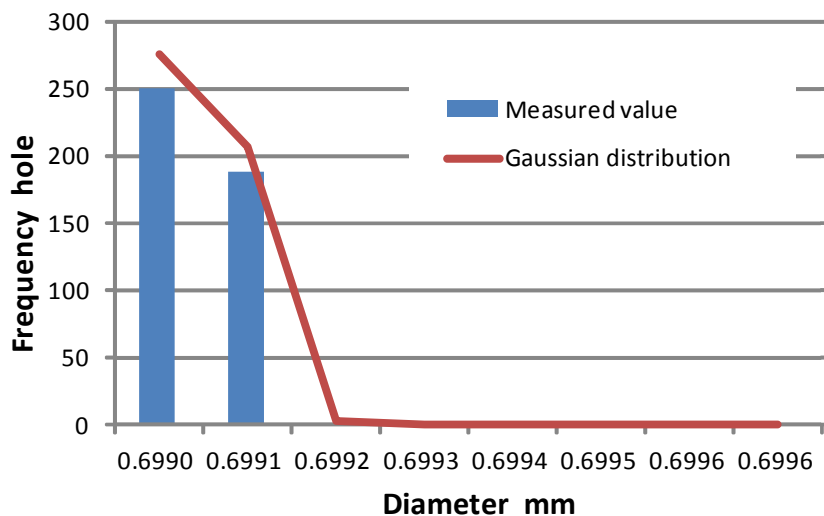


図 3-3 ガイド孔径測定系

ガイド孔径の分布を図 3-4 に示す。横軸がガイド孔径、縦軸が孔の頻度である。棒グラフは測定値の頻度、曲線は実測値から得られた値を使用して計算されたガウス分布を示す。 ϕ 0.6990 mm 以下は NG 判定となり使用しない。計算上は NG 判定を含めてガウス分布と仮定している。



	Guide pin hole
AVG	0.6990 mm
MAX	0.6991 mm
MIN	0.6990 mm
σ	0.0000

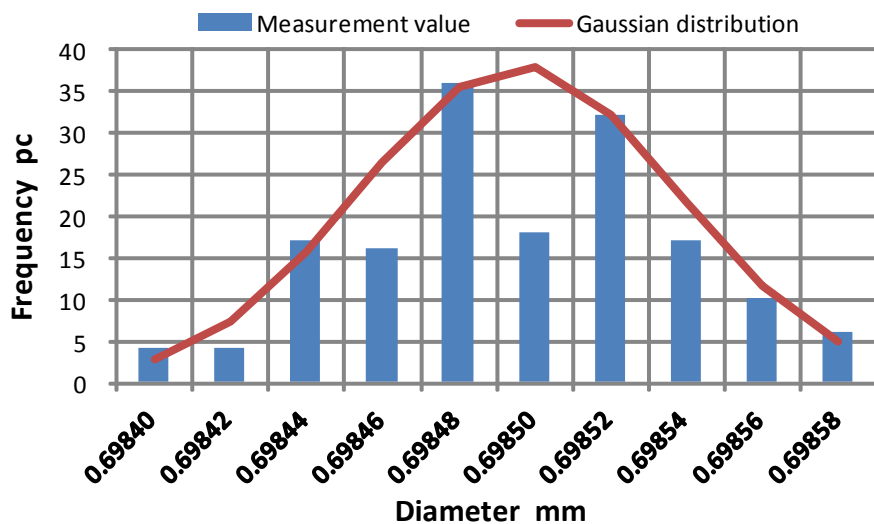
図 3-4 ガイド孔径分布

438 個のガイド孔について測定した結果、設計値である $\phi 0.6990$ mm～ $\phi 0.6996$ mm を満足していることを確認した。

3.3.3 ガイドピン外径測定結果

2.3 項で述べたファイバ孔やガイド孔のクリアランスによるファイバやガイドピンの偏心 (Eccentricity from the hole) や Y オフセットを算出するためにガイドピン外径の測定を行った。

ガイドピン外径の分布を測定した結果を図 3-5 に示す。棒グラフは測定値の頻度、曲線は実測値から得られた値を使用して計算したガウス分布を示す。160 本のガイドピン外径について測定した結果、設計値である $\phi 0.6985$ mm ± 0.0001 mm を満足していることを確認した。



	Guide pin outer diameter
AVG	0.69850 mm
MAX	0.69858 mm
MIN	0.69840 mm
σ	0.00004

図 3-5 ガイドピン外径分布

3.3.4 ファイバ孔位置ずれ量測定結果

2.3 項で述べたファイバ孔位置ずれを確認するため、ファイバ孔位置ずれ量の測定を行った。

ファイバ孔位置ずれ量測定には $\sigma \leq 0.00010$ mm の自動 2 次元寸法測定機を使用し、 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ の環境下で測定した。自動 2 次元寸法測定機は画像処理による寸法測定機で、顕微鏡で孔のエッジを検出して機械座標を取得するシステムである。ソフトウェア上に様々なプログラムがあり、円の大きさや距離の測定、角度の算出など様々な計算ができる。下記に示す測定手順でファイバ孔位置ずれ量を測定した。測定する位置ずれ量の基準点の位置を図 3-6 に示す。

●作業手順

- ① 両ガイド孔の中心座標を取得する。
- ② 両ガイド孔の中心座標を線で結び、垂直二等分線を引く。
- ③ 両ガイド孔の中心座標を結んだ線と垂直二等分線の交点を座標(0,0)とする。両ガイド孔の中心座標を結んだ線の長さから、ガイドピッチを算出する。
- ④ 座標(0, 0)からの各ファイバ孔位置ずれ量を測定し、設計値からのずれ量を算出する。

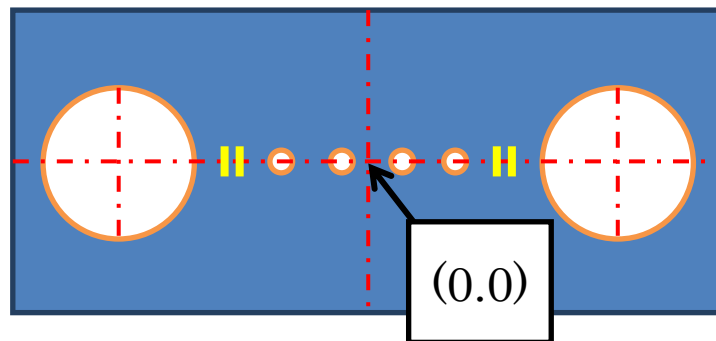
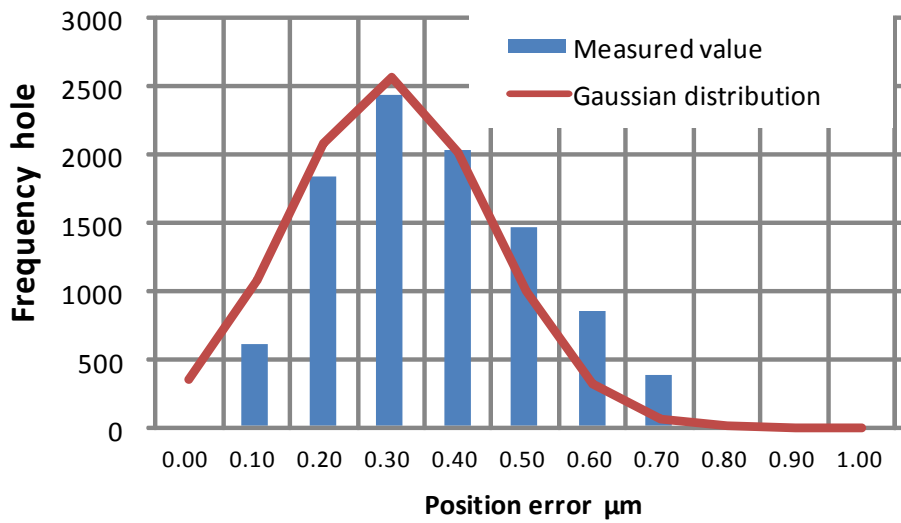


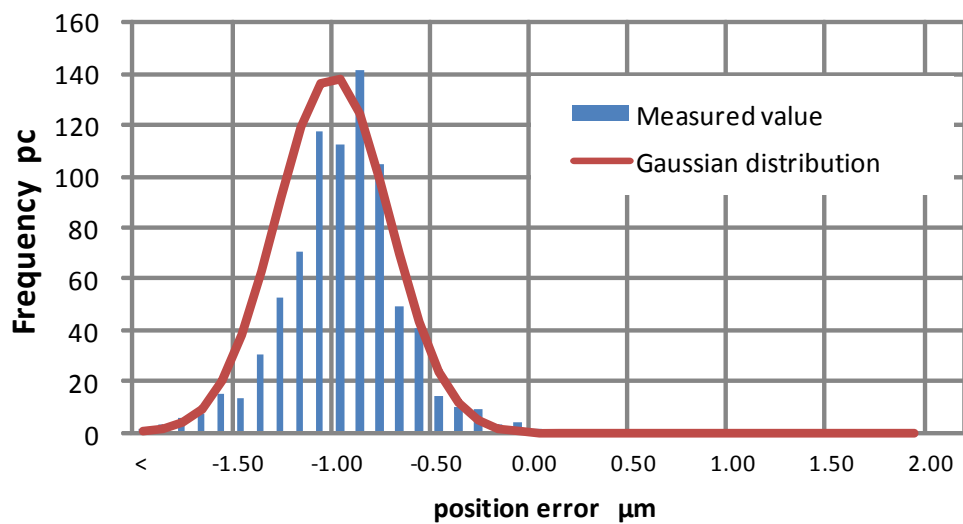
図 3-6 ファイバ孔位置ずれ量の基準点

ファイバ孔位置ずれおよびガイドピッチを測定した結果を図 3-7 および図 3-8 に示す。ファイバ孔位置ずれには Y オフセット量が含まれており、Y オフセット量はガイド孔径実測値平均とガイドピン外径実測値平均で計算した。棒グラフは測定値の頻度、曲線は実測値から得られた値を使用して計算したガウス分布を示す。



Fiber hole position error	
AVG	0.312 μm
MAX	0.699 μm
MIN	0.010 μm
σ	0.149

図 3-7 ファイバ孔位置ずれ量分布



Guide pitch	
AVG	4599.06 μm
MAX	4600.05 μm
MIN	4598.07 μm
σ	0.29

図 3-8 ガイドピッチ分布

9,600 心のファイバ孔位置ずれについて測定した結果、 $0.7\ \mu\text{m}$ 以下の設計値を満足していることを確認した。

3.3.5 ファイバ孔傾き量測定結果

2.3.1 項で述べたファイバ孔傾き量について測定を行った。ファイバ孔傾き量測定には 3.3.4 ファイバ孔位置ずれ量測定で使用した自動 2 次元寸法測定機を使用し、 $23\pm 2^\circ\text{C}$ の環境下で測定した。測定概略図を図 3-9 に示す。ファイバ孔傾き量は下記に示す方法で測定した。

- ① MT コネクタ端面のファイバ孔位置ずれ量 ($X1, Y1$) を測定する。測定方法は 2.5.3 で述べた方法による。
- ② MT コネクタの全長寸法を左右で測定し、値を記録する。
- ③ MT コネクタの端面を研磨機で約 $0.3\ \text{mm}$ 研磨する。
- ④ 約 $0.3\ \text{mm}$ 端面研磨された MT コネクタ端面のファイバ孔位置ずれ量 ($X'1, Y'1$) を測定する。
- ⑤ 端面研磨された MT コネクタの全長寸法を左右で測定し、値を記録する。
- ⑥ ① で測定した MT コネクタ端面のファイバ孔位置ずれ量と ④ で測定した約 $0.3\ \text{mm}$ 研磨された MT コネクタ端面の孔位置ずれ量、② で測定した全長寸法と ⑤ で測定した全長寸法の値から、式(2)を用いてファイバ孔傾き量を算出する。MT コネクタ端面については左右での高さの違いを $0.010\ \text{mm}$ 以下で研磨した。

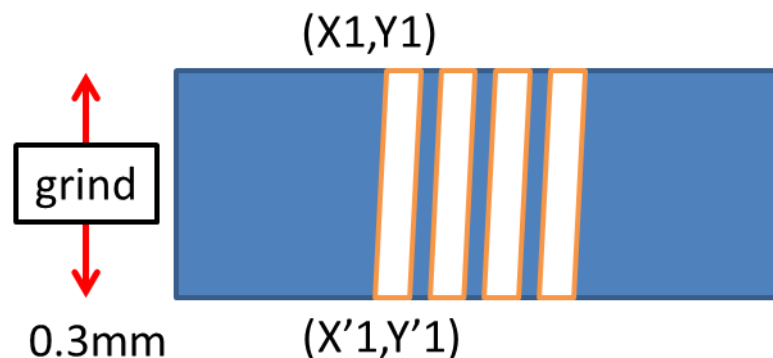
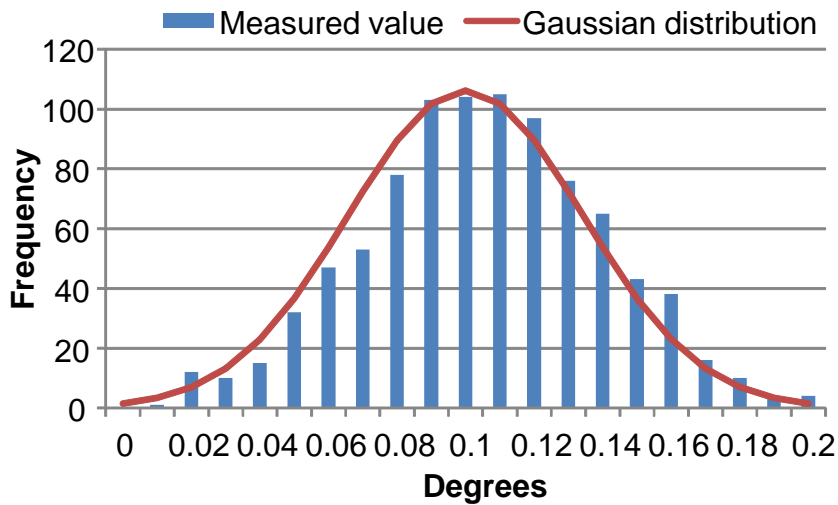


図 3-9 ファイバ孔傾き量測定概略

ファイバ孔の傾きについて実測した結果を図 3-10 に示す。棒グラフは測定値の頻度、曲線は実測値から得られた値を使用して計算したガウス分布を示す。



	Fiber hole position error
AVG	0.10°
MAX	0.20°
MIN	0.01°
σ	0.03

図 3-10 ファイバ孔傾き量分布

912 心のファイバ孔傾きについて測定した結果、設計値である 0.2°以下を満足していることを確認した。

3.4 光学特性測定結果

3.4.1 端面研磨形状測定

3.3 項で確認した MT コネクタを用いて両端 MPO(Multifiber Push-On)コネクタコードを作製した。両端 MPO コネクタコードはあらかじめ光ファイバテープコードに MPO プラグキットを挿入して MT コネクタコードを作製したものである。特性評価用で作製した MPO コネクタコードの MT コネクタ端面の形状測定を実施する。判定基準は IEC 61755-3-31/Ed1: Fibre optic interconnecting devices and passive components – Fibre optic connector optical interfaces – Part 3-31: Optical interface, 8 degrees angled PC, Polyphenylene sulphide rectangular ferrule, single mode fibres を参照した。これは PPS で成形された MT コネクタの端面形状の規格である。表 3-2 に詳細を示す。

測定には NORLAND 製 AC3005 を使用し、マイケルソン干渉計を用いて MT コネクタ研磨後の端面形状を測定する。使用機器を図 3-11 に示す。測定項目表 3-3 に示す項目について 12 端末分のサンプルを測定した。測定結果の一部として Fiber height を図 3-12 に示す。

表 3-3 IEC61755-3-31/Ed1 詳細規格

	Minimum	Maximum	Unit
Ferrule Surface X-angle	-0.15	0.15	°
Ferrule Surface Y-angle	7.8	8.2	°
Fiber height	1.0	3.5	μm
Adjacent fiber height	0	0.3	μm
Ferrule Surface X-radius	2,000 (Convex)	-	mm
	-10,000 (Concave)	-	mm
Ferrule Surface Y-radius	5	-	mm

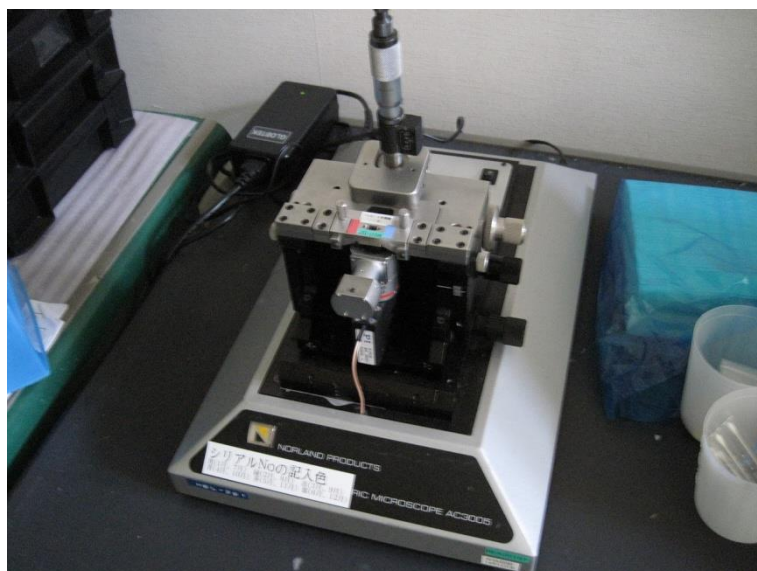


図 3-11 端面形状測定機 NORLAND AC3005

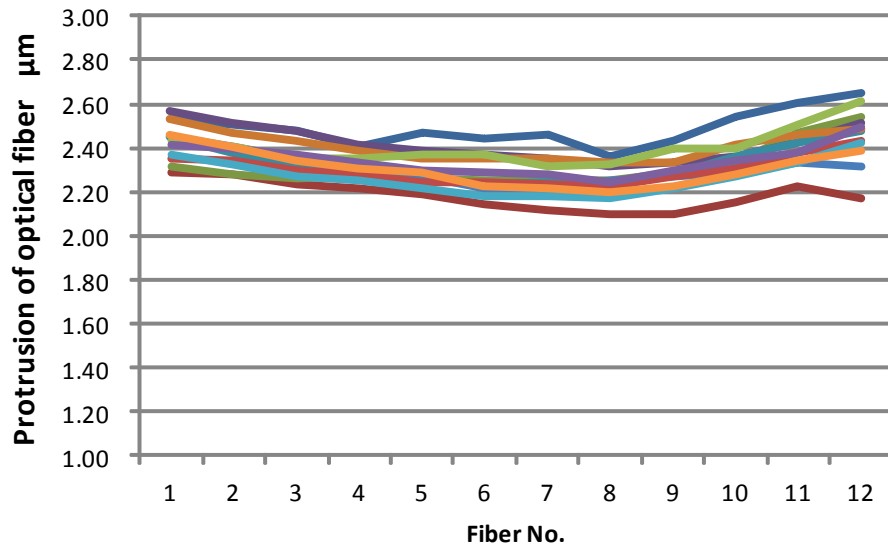
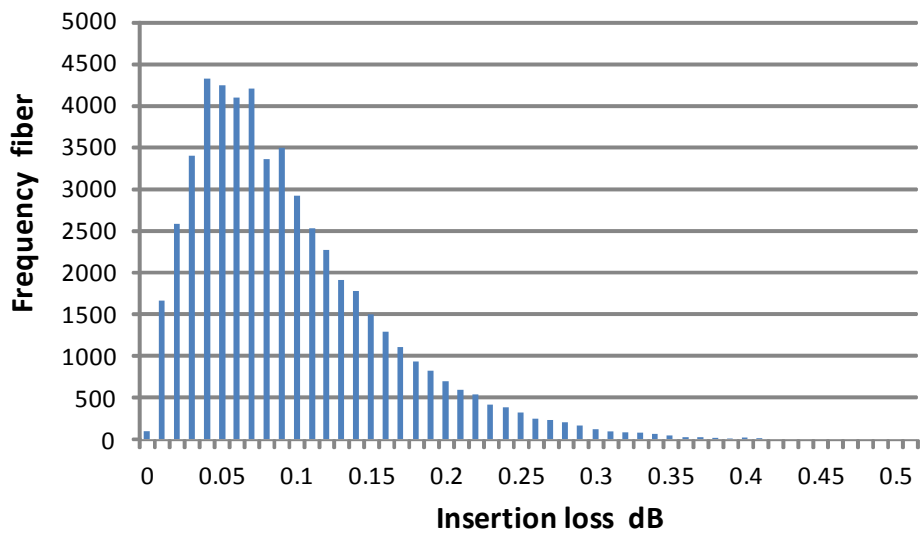


図 3-12 MPO コネクタコード ファイバ突き出し量

図 3-12 に示す横軸は光ファイバNo. (12 心 MT コネクタを使用しているため Fiber No.1 から No.12 まで)、縦軸は光ファイバ突き出し量、グラフ内の曲線は測定した 12 端末のファイバ突き出し量の推移となっている。MPO コネクタコードの端面形状を測定した結果、全ての端末において IEC 61755-3-31/Ed1 に示す測定項目について要求仕様を満足する形状を有していることを確認した。

3.4.2 接続損失測定結果

3.3 で確認した MT コネクタを用いて、MPO コネクタコードを作製し、接続損失を測定した。接続は MPO コネクタ、光源は波長 1310 nm の LD 光源を使用した。評価は 1 ロットにつき 12 端末作製し、その 12 端末からランダムに端末を選択して 20 接続分のランダム接続損失を測定した。MFD は $9.2 \pm 0.4 \mu\text{m}$ のシングルモードファイバを使用した。接続損失測定に使用した測定系の外観を図 3-14 に示す。220 ロット分 (合計 4,400 接続 \times 12 心 = 52,800 心) の測定結果を図 3-13 に示す。



	Insertion loss (dB)
AVG	0.091 dB
MEAN	0.076 dB
MAX	0.495 dB
MIN	0.000 dB
$\leq 0.25\text{dB}$	97.1 %
$\leq 0.35\text{dB}$	99.7 %

図 3-13 ランダム接続損失分布

図 3-13 に示す横軸は接続損失実測値、縦軸は光ファイバ心数、棒グラフは 0.1 dB 刻みでの接続損失の頻度を示す。

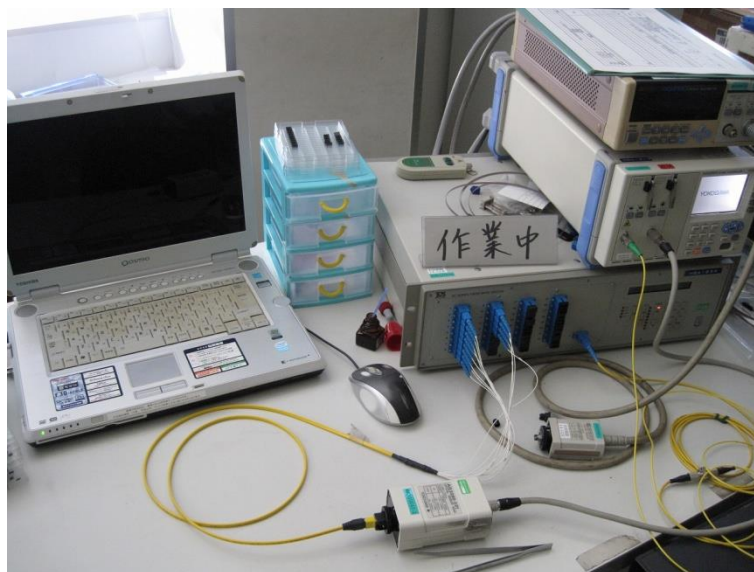


図 3-14 接続損失測定系

ランダムに4,400 接続したときの接続損失について測定した結果、97.0 %が0.25 dB 以下、99.7 %が0.35 dB 以下となり、設計目標である99.41 % \leq 0.35 dB を満足することができた。

これは IEC61755-1 Fibre optic connector optical interfaces - Part 1: Optical interfaces for single mode non-dispersion shifted fibres - General and guidance における Grade B を満足するものである。

3.4.3 反射減衰量測定結果

2.5 で確認した MT コネクタを用いて、反射減衰量を測定した。接続は MPO コネクタ、光源は波長 1310 nm の LD 光源を使用した。評価は 1 ロットにつき 12 端末作製し、その 12 端末からランダムに端末を選択して 20 接続分の反射減衰量を測定した。MFD $9.2 \pm 0.4 \mu\text{m}$ のシングルモード光ファイバを使用した。3 ロット分（60 接続 \times 12 心=720 端末分）の測定結果を図 3-15 に示す。図 3-15 に示す横軸は反射減衰量実測値、縦軸が光ファイバ心数、棒グラフが 1 dB 刻みでの反射減衰量の頻度、曲線グラフが実測値から得られた値を使用して計算したガウス分布を示す。

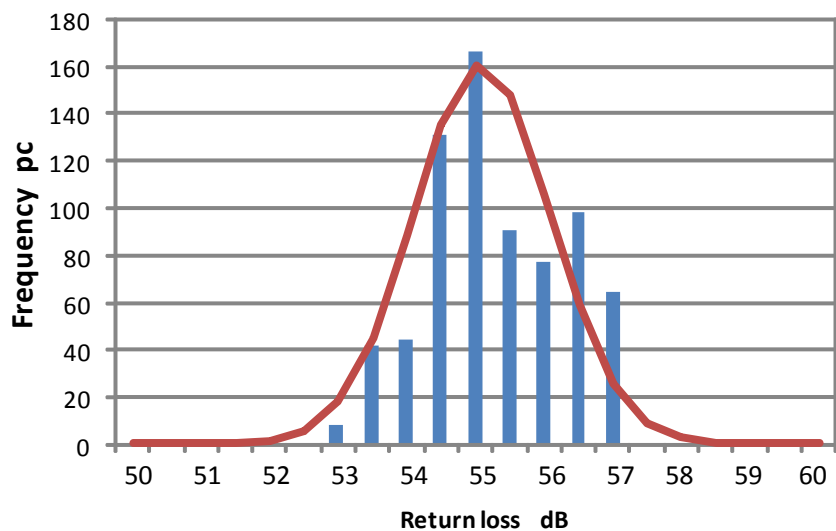


図 3-15 反射減衰量分布

全端末において反射減衰量が 50 dB 以上であり、目標性能を満足した。

3.5 環境特性測定結果

3.3 で作製した MT コネクタの耐環境性を確認するために環境試験を実施した。環境試験に用いた規格は Telcordia GR-1435-CORE (Generic Requirements for Multi-Fiber Optical Connectors) issue 1 を参照した。

3.5.1 試験条件

環境試験は高温試験、高温高湿試験、温度サイクル試験を実施した。各試験条件、合否判定を表 3-4 に示す。今回実施した試験の適応範囲は屋外の幹線系で使用することを考慮し、Uncontrolled Environmental とした。

表 3-4 Telcordia GR-1435-CORE issue1 耐環境性試験条件

	Thermal Aging	Humidity Aging	Thermal Cycle
Temperature	85 °C	75 °C	-40 to 75 °C
Humidity	Uncontrolled	95%	Uncontrolled
Duration	336 hrs.	336 hrs.	336 hrs.
Requirement (Insertion loss)	Max increase <0.3 dB	Max increase <0.3 dB	Max increase <0.3 dB
Requirement (Return loss)	>50 dB	>50 dB	>50 dB

環境試験の試験サイクルを図 3-16 から図 3-18 に示す。横軸は試験時間、縦軸は試験温度 (°C)、プロットされた線は試験時間経過における試験温度の推移を示す。

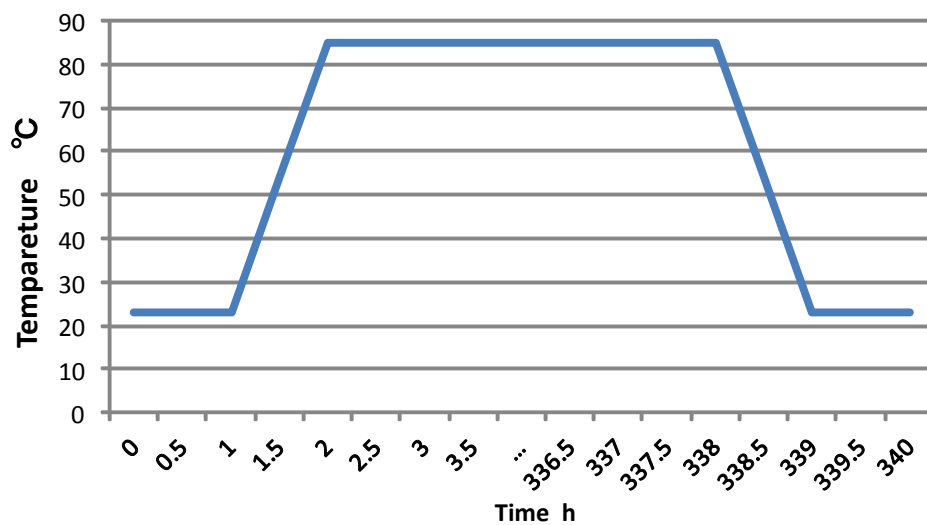


図 3-16 高温試験サイクル

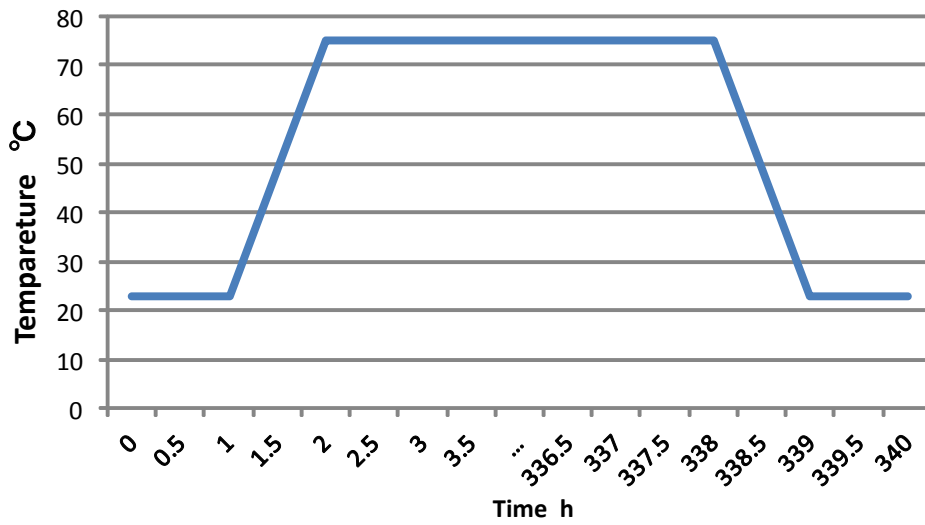


図 3-17 高温高湿試験サイクル

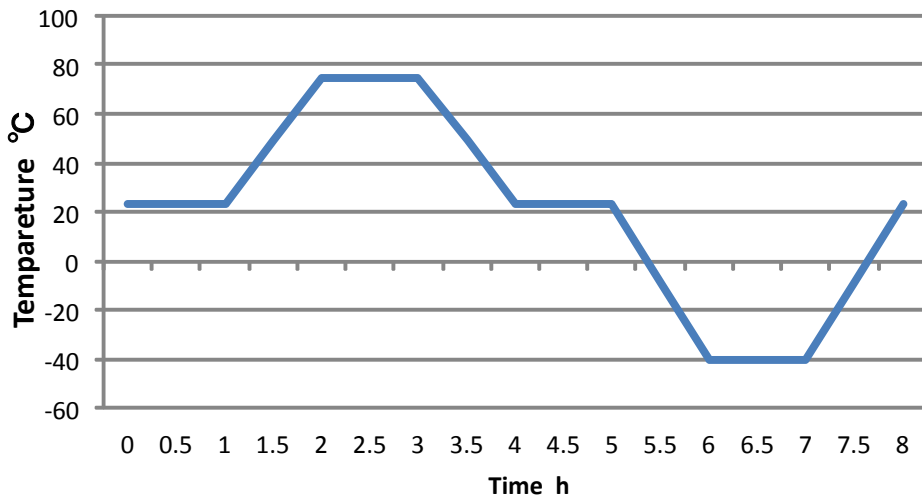


図 3-18 温度サイクル試験サイクル

3.5.2 試験結果

表 3-4 に示す試験条件で実施した環境試験結果を図 3-19 から図 3-21 に示す。

試験は高温試験から開始し、高温高湿試験、温度サイクル試験の順に行った。接続は MPO コネクタ、波長は 1310 nm および 1550 nm の LD 光源を使用した。試験サンプルは 11 組を評価した。

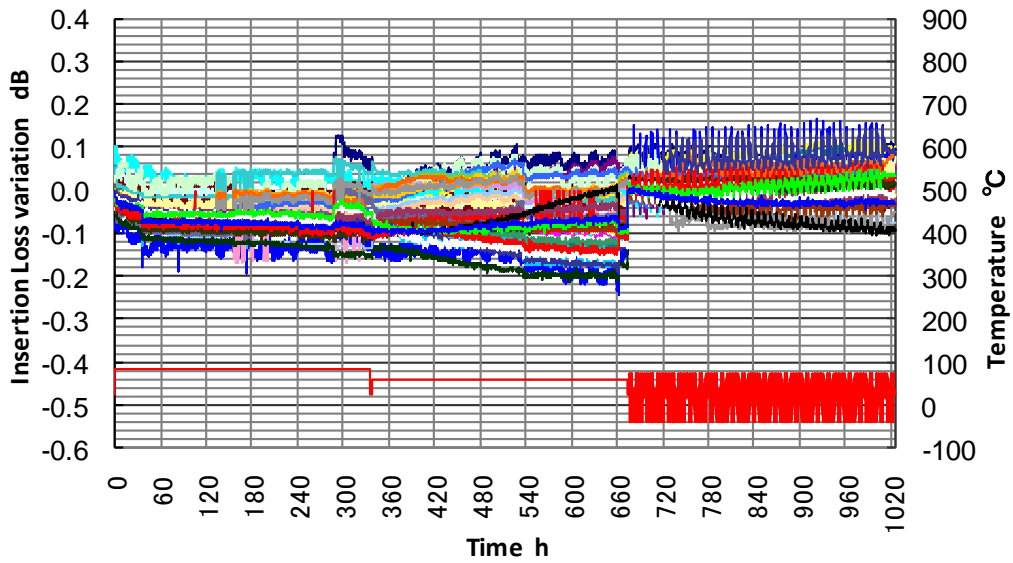


圖 3-19 1310 nm 環境試驗結果 (接統損失變動量)

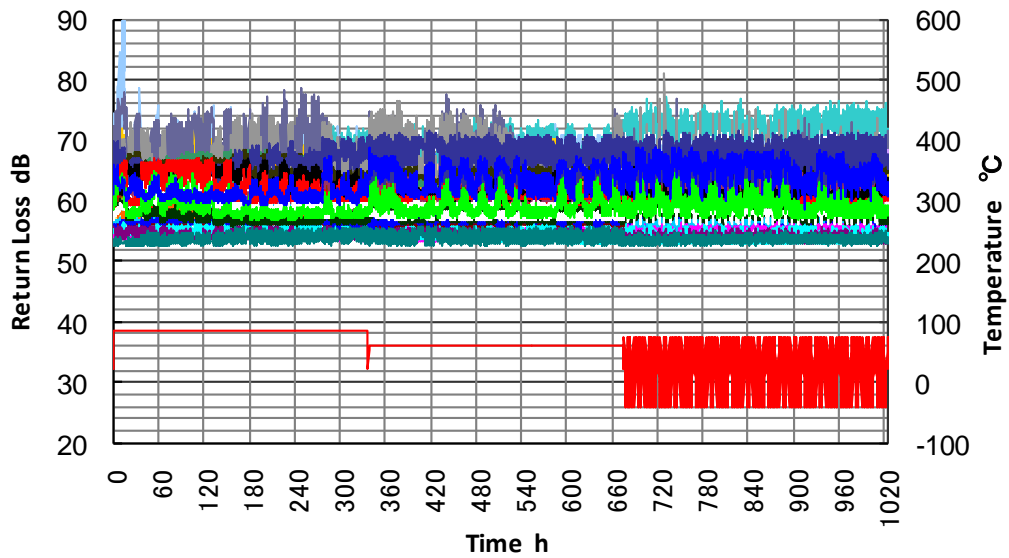


圖 3-20 1310 nm 環境試驗結果 (反射減衰量)

表 3-5 環境試驗結果 (1310 nm)

	Max increase of Insertion loss	Minimum Return loss
Thermal Aging	0.13 dB	52.5 dB
Humidity Aging	0.11 dB	52.6 dB
Thermal Cycle	0.17 dB	52.5 dB

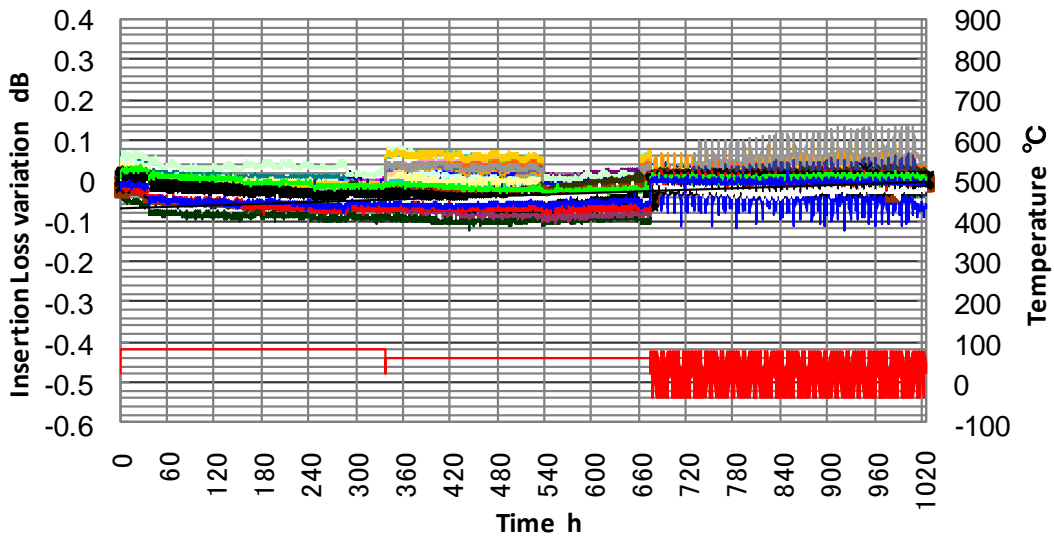


圖 3-21 1550 nm 環境試驗結果 (接統損失變動量)

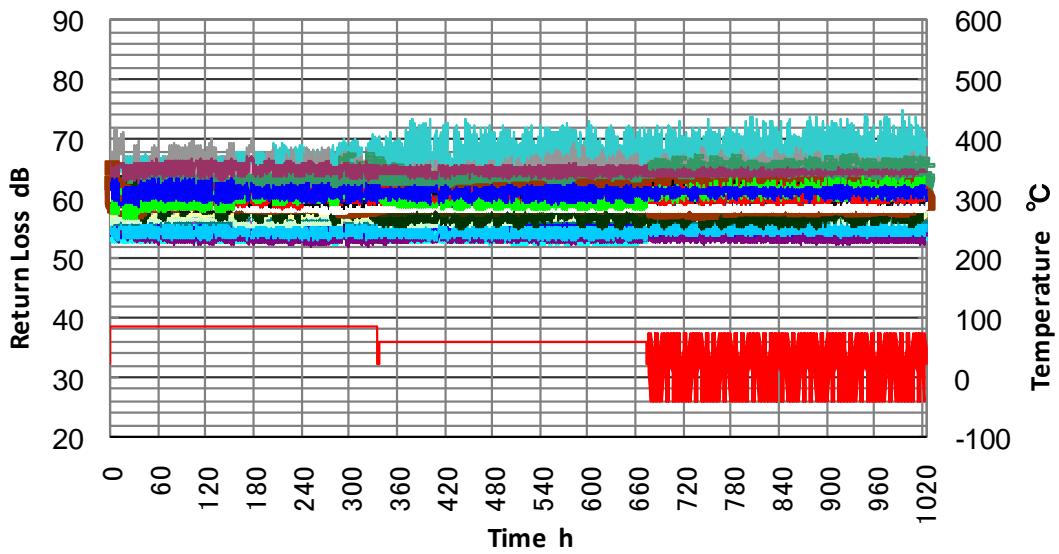


圖 3-22 1550 nm 環境試驗結果 (反射減衰量)

表 3-6 環境試驗結果 (1550 nm)

	Max increase of Insertion loss	Minimum Return loss
Thermal Aging	0.07 dB	52.0 dB
Humidity Aging	0.08 dB	52.2 dB
Thermal Cycle	0.13 dB	52.2 dB

各図に示す横軸は試験時間、縦軸が接続損失変動量、プロットされている線は試験に使用した 11 組接続分の各ファイバの接続損失変動量である。各波長における損失変動量は 1310 nm で最大 0.17 dB、1550 nm で最大 0.13 dB となり表 3-4 に示す要求規格である 0.3 dB 以下を満足することを確認した。また、反射減衰量についても 1310 nm で最小値 52.5 dB、1550 nm で 52.0 dB となり、表 3-3 に示す要求規格である 50 dB 以上を満足していることを確認した。試験前後での光学特性の劣化や MT コネクタの破損はなかった。

-40℃から 85℃の環境下において接続損失が 0.3 dB 以下であったことから、屋外でも使用できる MT コネクタであることを確認した。

3.6 長期信頼性試験

屋外の幹線系でを使用することを想定し、長期信頼性試験を実施した。

3.6.1 試験条件

長期信頼性試験として高温試験を実施した。試験条件を表 3-7 に示す。参照した規格は Telcordia GR1221 (Generic Reliability Assurance Requirements for Passive Optical Components)を参照する。Telcordia GR1221 は米国 Bellcore 社により決められた長期の信頼性評価規格であり、北米を中心に広く用いられている。

表 3-7 長期信頼性試験条件

	Thermal Cycle
Temperature	85 °C
Humidity	Uncontrolled
Duration	2000 hrs.
Requirement (Insertion loss)	Max increase <0.3 dB
Requirement (Return loss)	>50 dB

3.6.2 試験結果

表 3-7 に示す試験条件で実施した高温試験結果を図 3-23 から図 3-26 に示す。各図に示す横軸は試験時間、縦軸が接続損失変動量、プロットされている線は試験に使用した 11 組接続分の各ファイバの接続損失変動量である。接続は MPO コネクタ、波長は 1310 nm および 1550 nm の LD 光源を使用し、11 組の試験サンプルを評価した。

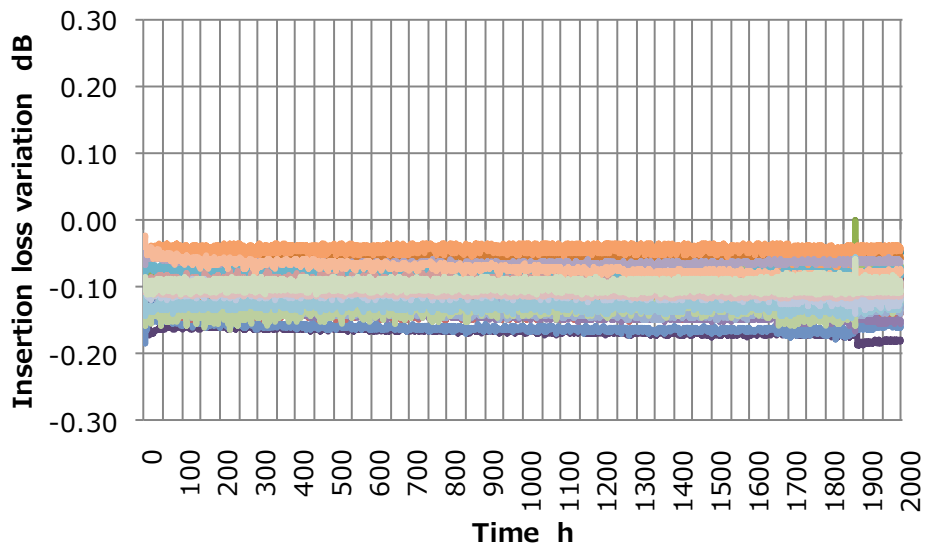


图 3-23 1310 nm 環境試驗結果 (接統損失變動量)

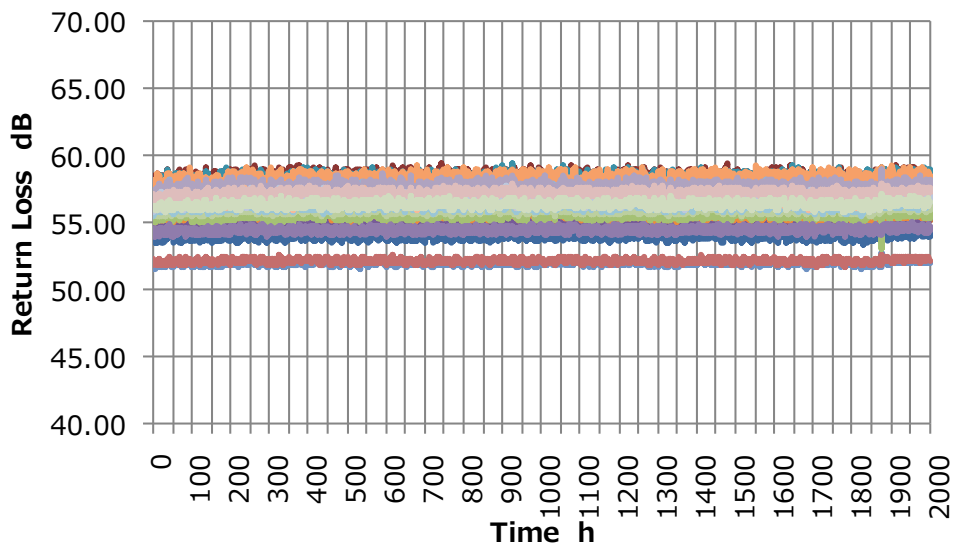


图 3-24 1310 nm 環境試驗結果 (反射減衰量)

表 3-8 環境試驗結果 (1310 nm)

	Max variation of Insertion loss	Minimum Return loss
Thermal Aging	0.19 dB	51.5 dB

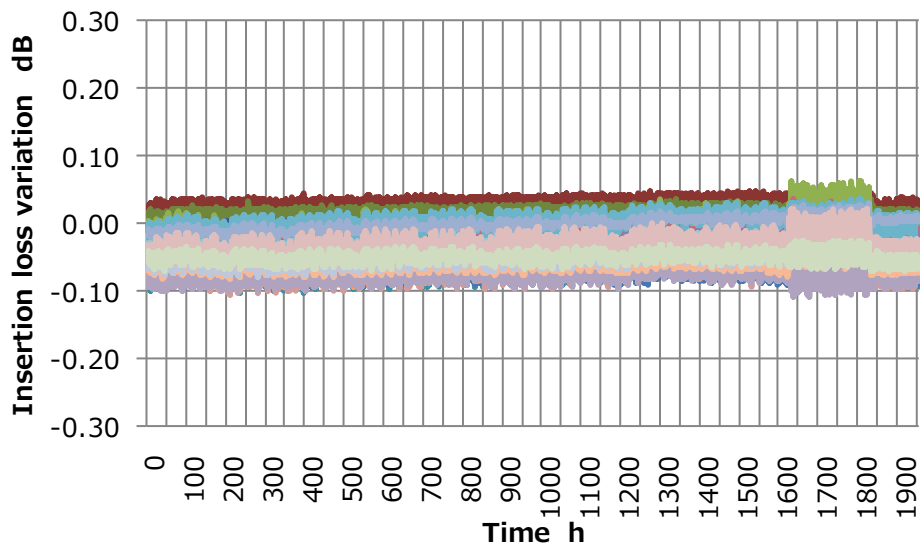


図 3-25 1550 nm 環境試験結果 (接続損失変動量)

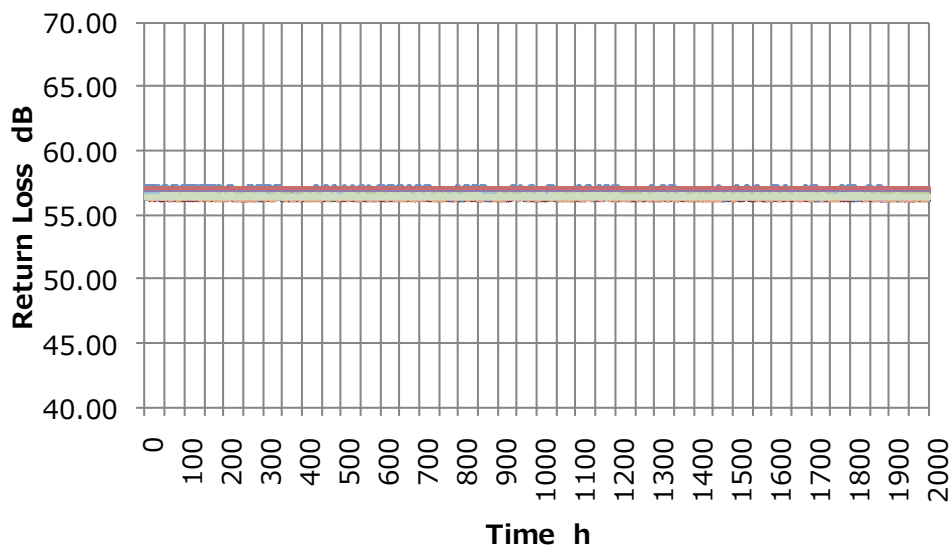


図 3-26 1550 nm 環境試験結果 (反射減衰量)

表 3-9 環境試験結果 (1550 nm)

	Max variation of Insertion loss	Minimum Return loss
Thermal Aging	0.11 dB	56.2 dB

長期高温試験時においても各波長における損失変動量は 1310 nm で最大 0.19 dB、1550 nm で最大 0.11 dB となり表 3-6 に示す要求規格である 0.3 dB 以下を満足することを確認した。また、反射減衰量についても 1310 nm で最小値 51.5 dB、1550 nm で 56.2 dB となり、表 3-6 に示す要求規格である 50 dB 以上を満足していることを確認した。試験前後での光学特性の劣化や MT コネクタの破損がないことを確認した。

3.7 機械的特性測定結果

3.7.1 試験条件

機械的特性試験は振動試験、衝撃試験、引っ張り試験、着脱試験の4項目について試験を実施した。各試験とも11接続について実施した。各試験条件、合否判定を表3-10および表3-11に示す。

引っ張り試験については、今回の実施した試験に使用したサンプルは12心MTテープコードタイプの為Telcordia GR-1435-COREに示すMedia Type Iの規定に従った。光学特性についてはすべての接続点で斜め8度研磨に形成されているため、反射減衰量の測定は実施していない。

表 3-10 機械的特性試験条件

Test	Duration	Test parameter	Measurement Interval	Requirement
Vibration	2 Hours/Axis for 3 Axis	10 to 55Hz	After each axis has been done.	Max increase <0.3 dB
Cable Tension	See table 3-10			Max increase <0.3 dB
Impact	8 Cycles	1.5 m drop	Before and after test	Max increase <0.3 dB
Durability	200 Cycles	Connect and disconnect	Every 10 Cycles (0, 10, 20...)	Max increase <0.3 dB

表 3-11 Cable tension 試験詳細

Test	Load (N)	Measure optical power with applied load
Flex test	2.2 N	No
Twist test	2.2 N	No

3.7.2 振動試験

表 3-10 に示す試験条件で MPO コネクタを用いた振動試験を行い、接続損失の安定性および MT コネクタの耐久性について確認した。波長は 1310 nm の LD 光源を使用した。試験サンプルは 11 組を評価する。試験は下記の手順で実施した。

- ① 環境試験後の MPO コネクタの着脱を解除せずに恒温槽から取り出す。
- ② 取り出した MPO コネクタを振動試験機にセットする。試験は X 軸、Y 軸、Z 軸の 3 軸を行う。
- ③ 光学特性を測定する。
- ④ 2 時間/1 軸で試験を行う。振幅が 1.5 mm(peak to peak)、周波数は 10 Hz から 55 Hz、45 Hz/分で上昇/下降させる。
- ⑤ 1 軸完了ごとに光学特性を測定する。
- ⑥ ④、⑤を 3 軸完了まで続ける。

設定した軸方向を図 3-27 に示す。

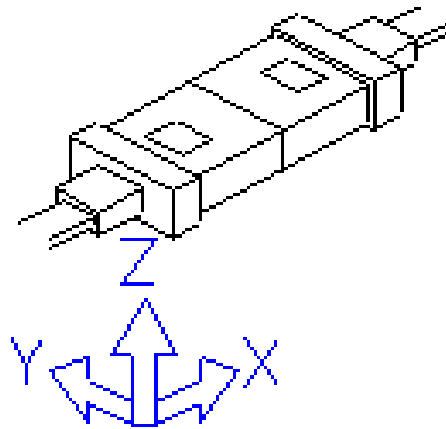


図 3-27 振動試験軸方向

振動試験結果を図 3-28 に示す。

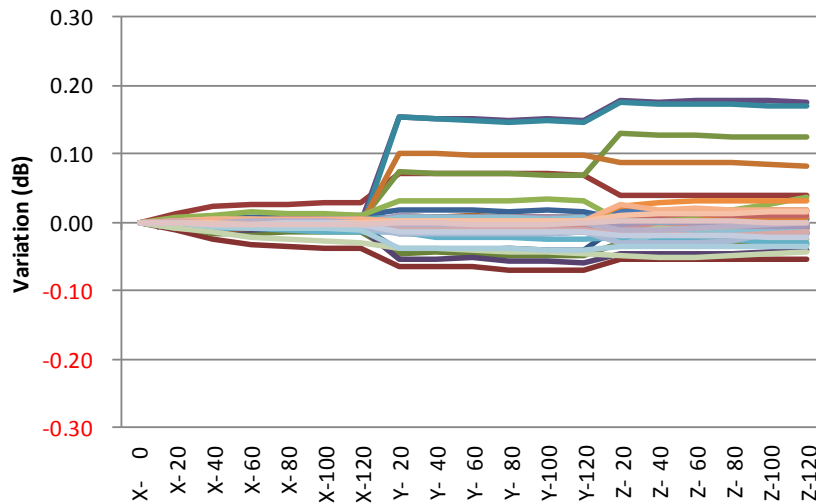


図 3-27 振動試験結果

図 3-28 に示す横軸は軸方向別の試験時間、縦軸は接続損失変動量、プロットされている線は試験に使用した 11 組接続分の各ファイバの接続損失変動量である。損失変動量が表 3-9 に示す要求規格である $\text{MAX} \leq 0.3 \text{ dB}$ となり、振動による接続特性が良好であることを確認した。

3.7.3 曲げ試験

表 3-10 に示す試験条件で MPO コネクタを用いた曲げ試験を行い、接続損失の安定性および MT コネクタの耐久性について確認した。波長は 1310 nm の LD 光源を使用し、11 組の試験サンプルについて評価した。試験は図 3-29 に概略を示す装置を使用し、以下の手順で実施した。

- ① 引っ張り、曲げ試験用治具をファイバ軸方向に対し 0° の位置にする。
- ② 治具に試験サンプルを接続し、光学特性を測定する。
- ③ 曲げ試験に使用する重りを Media type から選んで光ファイバへ取り付ける。
- ④ テストアームを 0° 、 90° 、 0° 、 -90° 、 0° を 100 回繰り返す。ただし、20 サイクル/分以下のペースで実施する。
- ⑤ 重りを外し、試験サンプルの状態を安定させるために 1 分間放置する。
- ⑥ 光学特性を測定する。

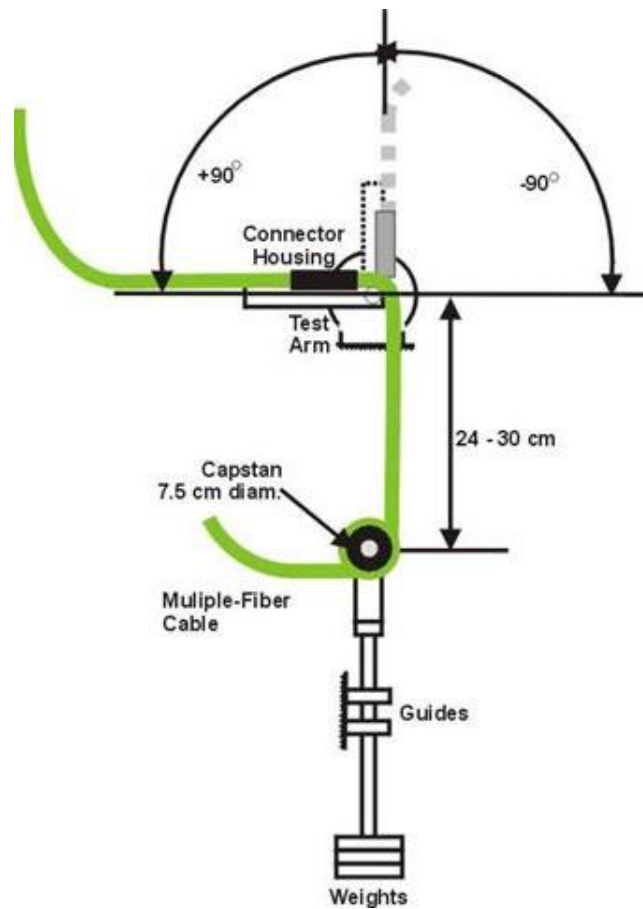


図 3-29 曲げ、引っ張り試験方法

図 3-29 において、180°稼働する専用治具に MPO コネクタコードを取り付け、治具から 24 cm から 30 cm のところに重りを設置し、MPO コネクタコードに負荷をかけた。荷重をかける部分は MPO コネクタコードを $\phi 7.5$ cm に巻いて固定した。

図 3-30 に曲げ試験結果を示す。

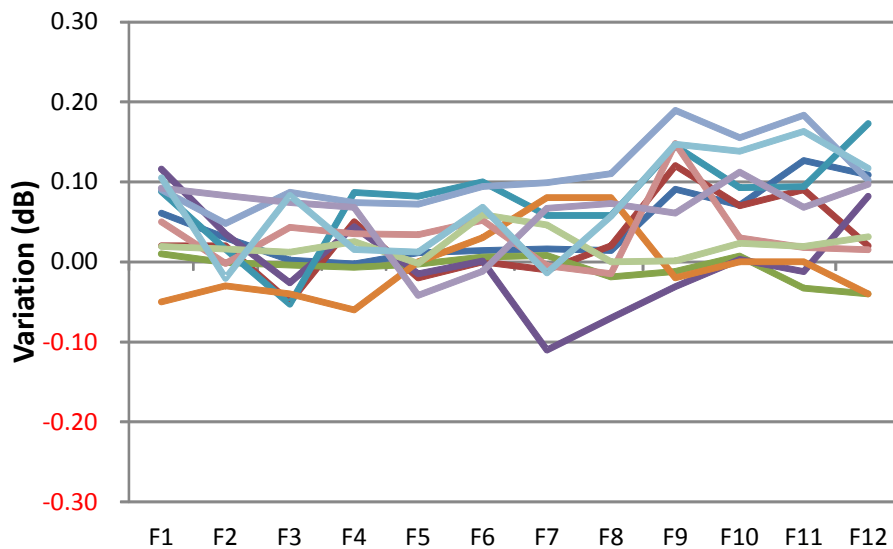


図 3-30 曲げ試験結果

図 3-30 に示す横軸はファイバ心線No.、縦軸は接続損失変動量、プロットされている線は試験に使用した 11 組接続分の各ファイバの接続損失変動量である。損失変動量が表 3-10 に示す要求規格である $\text{MAX} \leq 0.3 \text{ dB}$ となり、曲げによる接続特性が良好であることを確認した。

3.7.4 ねじり試験

表 3-10 に示す試験条件で MPO コネクタを用いたねじり試験を行い、接続損失の安定性および MT コネクタの耐久性について確認を行った。波長は 1310 nm の LD 光源を使用し、11 組の試験サンプルを評価した。曲げ試験と同じ図 3-29 の装置を使用し、以下の手順で試験を実施した。

- ① 引っ張り、曲げ試験用治具をファイバ軸方向に対し 0° の位置にする。
- ② 治具に試験サンプルを接続し、光学特性を測定する。
- ③ ねじり試験に使用する重りを Media type から選んで光ファイバへ取り付ける。
- ④ Capstan 部を時計回りに 1 回転させたのちに 0 点へ戻し、0 点に戻ってから反時計回りに 1 回転させる。
- ⑤ ④を 9 回繰り返す、合計 10 回ねじる。
- ⑥ 重りを外し、試験サンプルの状態を安定させるために 1 分間放置する。
- ⑦ 光学特性を測定する。

図 3-31 にねじり試験結果を示す。

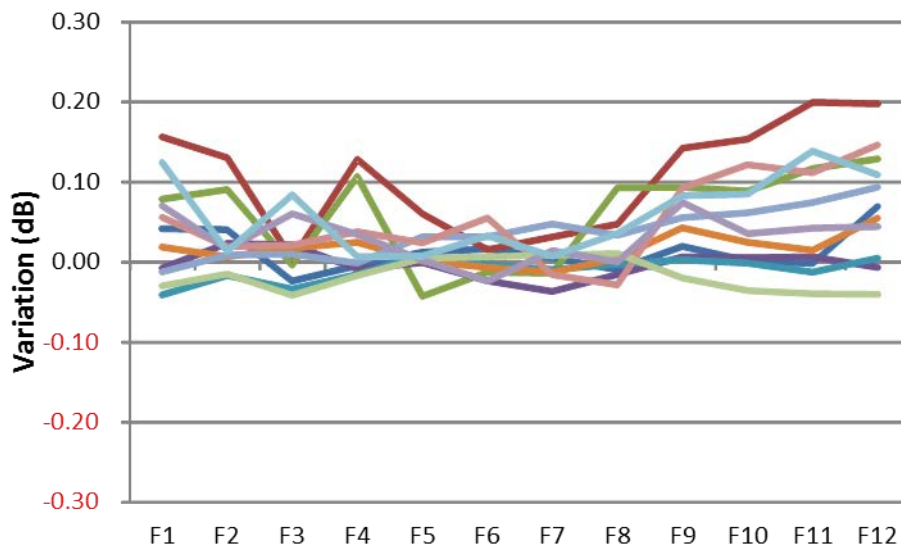


図 3-31 ねじり試験結果

図 3-31 に示す横軸はファイバ心線No.、縦軸は接続損失変動量、プロットされている線は試験に使用した 11 組接続分の各ファイバの接続損失変動量である。損失変動量が表 3-9 に示す要求規格である $\text{MAX} \leq 0.3 \text{ dB}$ となり、ねじりによる MPO コネクタの接続特性が良好であることを確認した。

3.7.5 衝撃試験

表 3-10 に示す試験条件で MPO コネクタを用いた衝撃試験を行い、接続損失の安定性および MT コネクタの耐久性について確認した。波長 1310 nm の LD 光源を使用し、11 組の試験サンプルを評価した。図 3-32 に概略を示す治具を用い、以下の手順で衝撃試験を実施した。

- ① 試験サンプルを衝撃試験治具へ取り付ける。治具へ取り付けた時に MPO コネクタ部が 1.5 m の高さに来るところにセットする。
- ② MPO コネクタを衝撃板から 1.5m のところまで持ち上げる。
- ③ MPO コネクタを 1.5m の位置から落下させ、衝撃板に当てる。
- ④ ②、③を 8 回繰り返す
- ⑤ 試験完了後に光学特性を測定する。

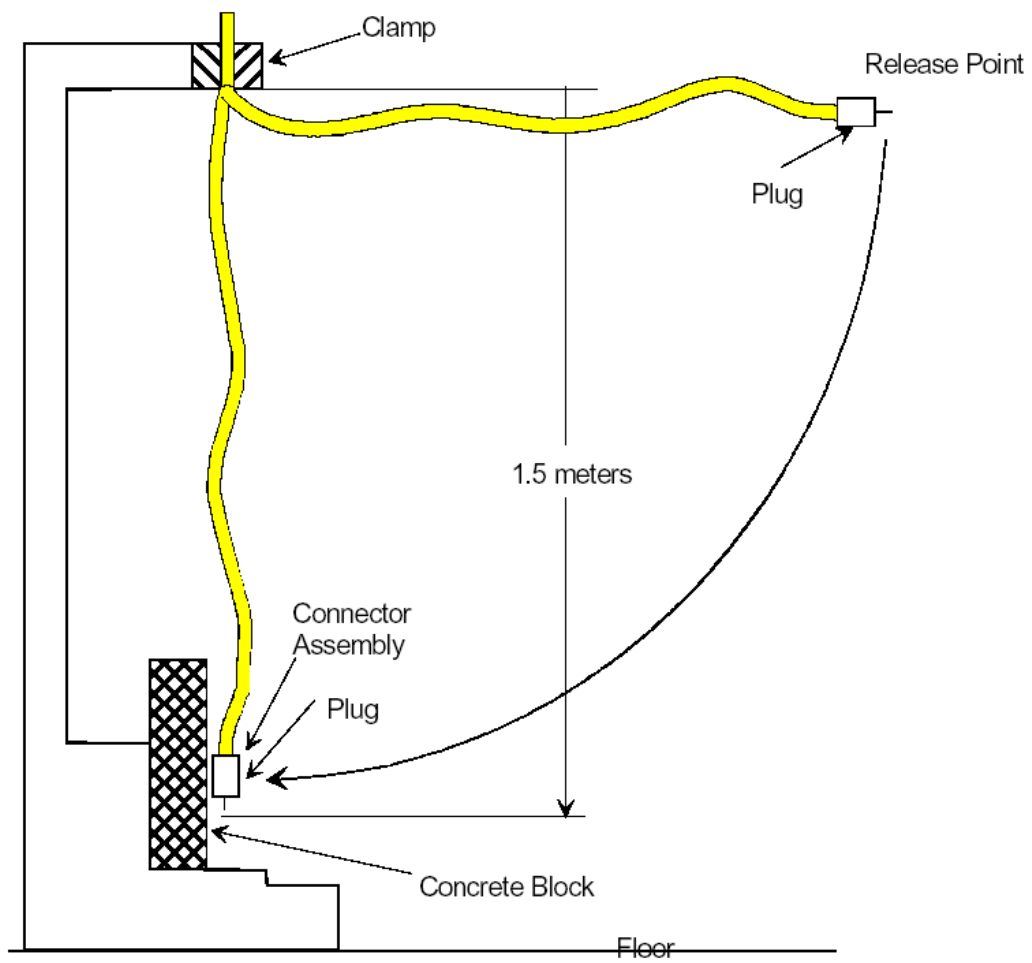


図 3-32 衝撃試験治具の構成

図 3-33 に衝撃試験結果を示す。

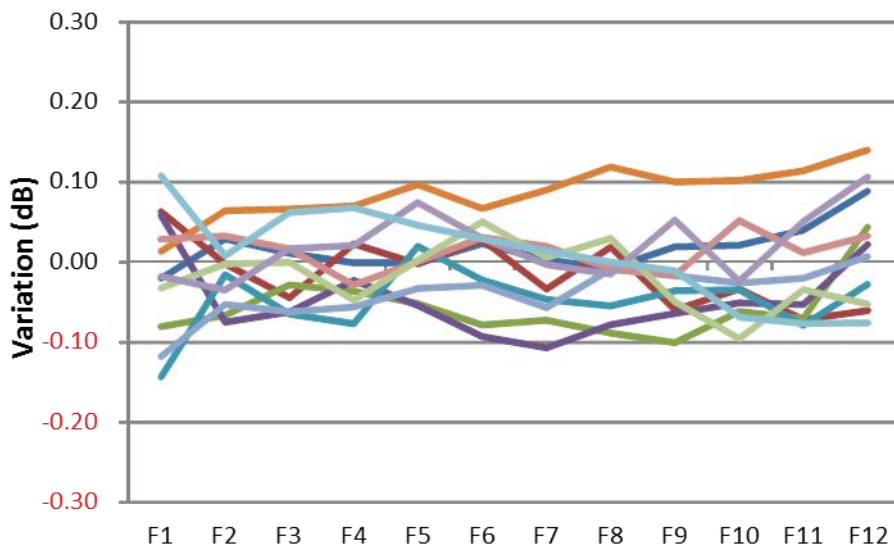


図 3-33 衝撃試験結果

図 3-32 に示す横軸はファイバ心線No.、縦軸は接続損失変動量、プロットされている線は試験に使用した 11 組接続分の各ファイバの接続損失変動量である。損失変動量が表 3-10 に示す要求規格である $\text{MAX} \leq 0.3 \text{ dB}$ となり、衝撃による MPO コネクタの破損は見られず、接続特性が良好であることを確認した。

3.7.6 着脱試験

表 3-10 に示す試験条件で MPO コネクタを用いた着脱試験を行い、接続損失の安定性および MT コネクタの耐久性について確認を行った。波長 1310nm の LD 光源を使用し、11 組の試験サンプルを評価した。試験は以下の手順で実施した。

- ① MPO コネクタの着脱を 4 回行う。
- ② 5 回目の着脱時に端面清掃を行い、清掃後に 5 回目の着脱を行う。
- ③ ①および②を再度実施し、10 回目の着脱終了時に光学特性を測定する。
- ④ 5 回毎のコネクタ端面清掃および 10 回毎での光学特性の測定を行い、全部で 200 回分の着脱を行う。

図 3-34 に着脱試験結果を示す。

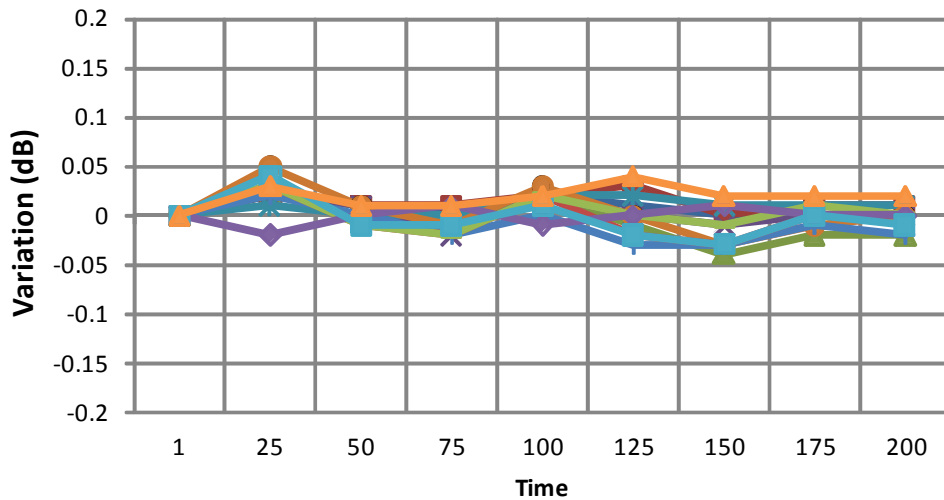


図 3-34 着脱試験結果（代表とする 1 サンプル）

図 3-34 に示す横軸は着脱回数、縦軸は接続損失変動量、プロットされている線は規定着脱回数でのファイバNo.ごとの接続損失変動量を示す。損失変動量が表 3-10 に示す要求規格である $\text{MAX} \leq 0.3 \text{ dB}$ となり、繰り返し着脱による接続特性が良好であることを確認した。

3.8 寸法特性と光学特性の関係

2.5 項で確認した MT コネクタの寸法特性を用いて MPO コネクタで接続した接続損失分布についてモンテカルロシミュレーションを用いて推定し、接続損失実測値との比較を行った。

接続損失が発生する一番の原因は、接続点におけるファイバの軸ずれ量である。軸ずれ量は接続する MT 光コネクタの孔位置ずれ量から算出することができる。

ガイド孔径、ガイドピン径、ファイバ孔傾き量およびファイバ孔位置ずれは実測値からガウス分布が仮定できる。ファイバ孔径とファイバ径のクリアランスによるファイバ偏心量は、接着硬化時に接着剤がファイバへ均一に応力がかかるためファイバ孔中心に調心されるものと考えられるため無視する[1]。

したがって、接続損失はファイバ孔位置ずれ量、ガイドピン外径とガイド孔径のクリアランスから計算される Y オフセットおよびファイバ孔傾きから推定することができる。

3.8.1 ガイド孔径、ガイドピン外径、ファイバ傾き量の確率分布

ガイド孔径、ガイドピン外径、ファイバ傾きはガウス分布すると仮定する。その場合、確率密度 $F(x)$ は式(4)で与えることができる。

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad \dots(4)$$

x はガイド孔径、ファイバ傾き量、ガイドピン外径、 u は各項目の平均値、 σ は各項目の標準偏差を示す。

3.8.2 ファイバ孔位置ずれ、接続損失の確率分布

接続点における双方の MT 光コネクタのファイバ軸ずれ量 d は、それぞれの MT コネクタの孔位置ずれ量 (X_1, Y_1) と (X_2, Y_2) から算出することができる。

$$d = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 + Y_2)^2} \quad \dots(5)$$

Y 軸方向は 2 つの MT フェルールを接続する時、片側を基準としたときにもう片側の軸方向が反転する。図 3-35 に Y オフセット軸方向を示す。

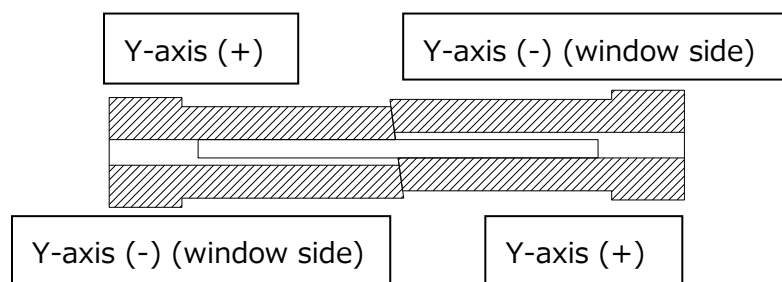


図 3-35 Y オフセット軸方向

軸ずれの確率密度は式(6)に示すようにレイリー分布で表すことができる[1]。

$$G(x) = \frac{d}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{d^2}{4\sigma^2}\right) \quad \dots(6)$$

3.8.3 モンテカルロシミュレーション結果

モンテカルロシミュレーションのアルゴリズムを以下に示す。計算には Excel VBA を使用した。

- (1) 2 つの MT フェルールのファイバ孔位置ずれ量を, (X_1, Y_1) と (X_2, Y_2) として、実測値で得られたガウス分布内で乱数を発生させる。
- (2)ファイバ孔傾き量、ガイド孔径、ガイドピン外径についてもファイバ孔位置ずれ量と同様に、実測値で得られたガウス分布内で乱数を発生させる。ファイバ孔傾き量については実測値と研磨量から位置ずれ量を算出した。
- (3)コネクタ端面研磨量と乱数で得られたファイバ孔傾き量からずれ量を算出し、ファイバ孔位置ずれ (X_1, Y_1) と (X_2, Y_2) に加算する。
- (4) 乱数で得られたガイド孔径とガイドピン外径から Y オフセットを算出し、ファイバ孔位置ずれ (X_1, Y_1) と (X_2, Y_2) に加算する。
- (5)ファイバ孔傾き量と Y オフセットが加算されたファイバ孔位置ずれ量 (X_1, Y_1) と (X_2, Y_2) から、接続点における軸ずれ量 d を式(5)から計算し、式(3)を使用して接続損失 L を算出する。
- (6)算出された接続損失 L を 0.01 dB 刻みで頻度を集計する。

上記(1)～(6)を繰り返し 5,280,000 回の計算を行い、接続時のファイバ軸ずれ量に対する接続損失の頻度を算出した。図 3-13 に示す実測値とシミュレーション計算結果の比較を図 3-36 に示す。

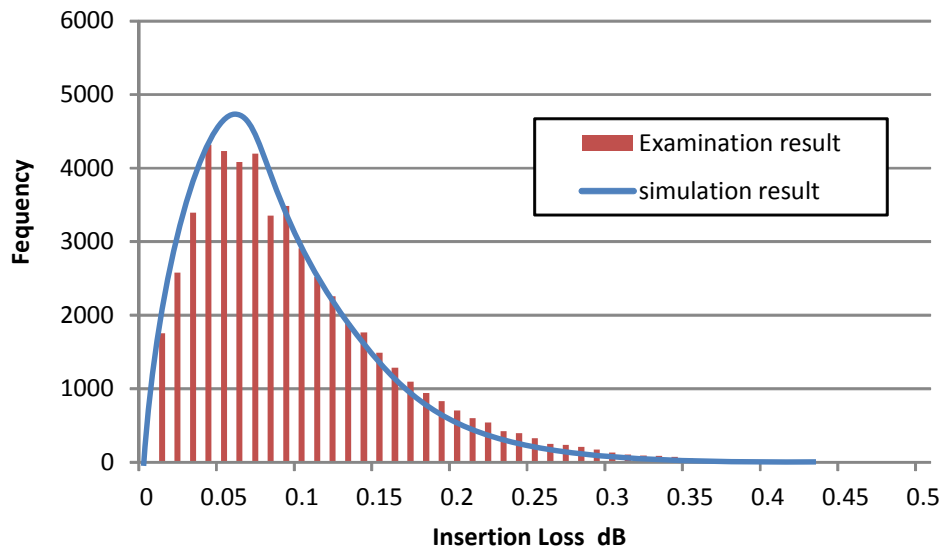


図 3-36 モンテカルロシミュレーション結果

シミュレーションを行った結果、実測値とシミュレーション計算値に良い一致が見られた。

3.9 結論

第 2 章で明らかにした多心光コネクタの接続損失発生要因から低損失シングルモード用 MT コネクタを設計した。

低損失シングルモード用 MT 光コネクタ接続時に発生する損失について接続損失理論式から計算し、単心系光コネクタ用の国際規格である IEC61755-1 Fibre optic connector optical interfaces - Part 1: Optical interfaces for single mode non-dispersion shifted fibres - General and guidance における Grade B を多心光コネクタでも満足することを目的として寸法値を設計し、その量産時における各種寸法の測定を行った。

ガイド孔径については 438 個のデータから規格値を安定して満足する結果が得られていることを確認した。偏心量については 9,600 心の測定データから最大 0.7 μm 以下で生産可能であることを確認した。ファイバ孔曲がりについては最大 0.2°以下で作製されており、仕様を満足していることを確認した。各種寸法精度において、量産時においても規定寸法を維持して生産が可能であることを実証した。

本研究で設計した量産された MT コネクタを使用して光学特性を評価した。接続損失は 52,800 心分測定したところ、99.41 % ≤ 0.35 dB 以下であり、IEC61755-1 における Grade B を多心光コネクタでも満足することを確認した。

信頼性評価として Telcordia GR-1435-CORE を参照して環境試験及び機械的特性試験を実施した。環境試験については高温試験、高温高湿試験、温度サイクル試験を実施し、要求規格を満足する結果が得られた。長期信頼性試験として高温試験を実施したが、試験前後で接続損失や反射減衰量の劣化は見られず、良好な特性を有していることを確認した。機械的特性試験は曲げ試験、ねじり試験、振動試験、衝撃試験、着脱試験を実施したが、試験前後で接続損失や反射減衰量の劣化は見られず、また試験時の MT コネクタの破損は見られず、良好な特性を有していることを確認した。信頼性評価結果から耐環境性、耐久性を兼ね備えた低損失シングルモード用 MT コネクタが設計できていることを実証した。

各種寸法ばらつきから想定される接続損失の分布について、モンテカルロ法を用いてシミュレーションを実施した。寸法実測値を基に約 5,000,000 回の計算を行い、接続時のファイバ軸ずれ量に対する接続損失の頻度を算出した。シミュレーションを行った結果、実測値とシミュレーション計算値に良い一致が見られたため、設計値と実測値の相関が取れていることを確認した。

よって、本章の研究成果を用いることで今まで単心系光コネクタでしか実現できていなかった IEC61755-1 における Grade B を多心光コネクタでも実現し、安定して量産可能であることを明らかにした。

参考文献

- [1] Y. Ando, S. Iwano, K. Kanayama, and R. Nagase: "Statistical analysis on connection characteristics of optical fiber connectors," IEICE Trans. Electron., Vol. E77-C, No. 12, pp. 1970-1981, Dec. 1994.

本研究の内容は以下の論文に掲載されている。

- [1] 竹崎 元人, 長瀬 亮, "多心シングルモード光コネクタの量産時における光学特性と寸法精度の関係", 電子情報通信学会論文誌 C vol.J97-C No.6, pp258-263, Jun, 2014
- [2] M.Takezaki, R.Nagase, "Relational Analysis on Optical Characteristics and Accuracy of Mass-Produced Multifiber Connectors", 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.112 No.332, EMD2012-80, pp91-94, 2012

第4章 光配線板および狭小スペース用多心光コネクタに関する研究

4.1 はじめに

光配線における入出力ファイバへの光コネクタ取り付けは、片端に光コネクタが付いて逆端側が終端処理を施さずにむき出しの状態であるピグテールを入出力ファイバと融着接続するか、入出力ファイバに光コネクタを直接アセンブリする方法が代表的である[1-2]。

光コネクタを直接光ファイバボードなどの光配線板へアセンブリする場合には、光コネクタを取り付けた状態での研磨が必要となり、様々な形状に対応した専用の研磨治具が必須となる。光コネクタ研磨時には、研磨方法にも依存するが光配線板と光コネクタの接続部に負荷がかかり、破損する恐れもあるため、取り付けは困難を極める。

融着接続の場合、融着部を補強することが必要となるため専用の大型な工具が必要となるほか、狭小スペースでのコンパクトな配線要求に対して補強部分が障害となる。また融着するためには余長が必要となり光配線板内での光ファイバの取り回しが非常に困難である。

ファインカットされた光ファイバを光コネクタへ挿入し接着固定して使用する無研磨による多心光コネクタについてはすでに開発されている[3]。しかし、無研磨で使用するため他の多心光コネクタと接続をする際に屈折率整合剤を使用しなければならず、温度が上昇する装置内では屈折率整合剤の流出による特性劣化が懸念され使用は困難である。別の形状をした無研磨による多心光コネクタも開発されているが[4]、光導波路と光ファイバの接続に用いられる多心光コネクタであり、光ファイバと光ファイバを接続することができない。

昨今の光配線板は高密度・小形化、多様化しており、従来の取り付け方法では対応に限界がある。さらに配線技術においては、さらなる技術開発が求められてきた。そこで、本研究では実装や接続が容易で信頼性があり、高歩留りかつ低コストに取り付け可能な多心光コネクタである MTPIPE(MT ferrules with Pre-Installed Pre-polished both Ends fibers)を開発した。

4.2 MTPIPE とは

4.2.1 MTPIPE の構造

図 4-1 に MTPIPE の構成及び外観を示す。本光コネクタは、フロントブロックとリアブロック、サイドプレートの 3 部品から構成される。

フロントブロックとリアブロックは各ブロックの突き合わせ面での接着固定と両ブロックの側面をサイドプレートで接着固定する構造とした。組み合わせたときの外形寸法を MT コネクタと同等にしたことによって、クリップ接続による MT コネクタとの接続[5]および MPO コネクタを使用した接続[6]が可能である。本検討では適用心数を現在市場で最も使用されている 12 心光ファイバ用とした。

フロントブロックには予め 50/125 GI 型マルチモードファイバが挿入され、フロントブロック両面ともに垂直突出し研磨が施されていることにより、PC 接続が可能である。使用用途によって

埋め込みファイバの種類も変更することができる。

両ブロックとも、成形材料には量産性、製品コスト面および耐環境特性で有利な PPS 材料を使用し、それぞれ射出成形により形成した[13]。フロントブロックのコネクタ接続端面は、垂直突出し研磨タイプと斜め 8 度突出し研磨タイプの 2 種を設定し、反射減衰量の要求値により、使い分けを可能な構造とした。また、光配線板には、光ファイバのコア部とクラッド部の屈折率差が高い高 Δ 光ファイバ等が用いられる場合が多いが、高 Δ ファイバを使用した光配線板に接続する光ファイバには汎用ファイバが適用されるケースが多いと考えられる。そこでボード側コネクタと接続するフロントブロックへの埋め込みファイバは、汎用ファイバとした。

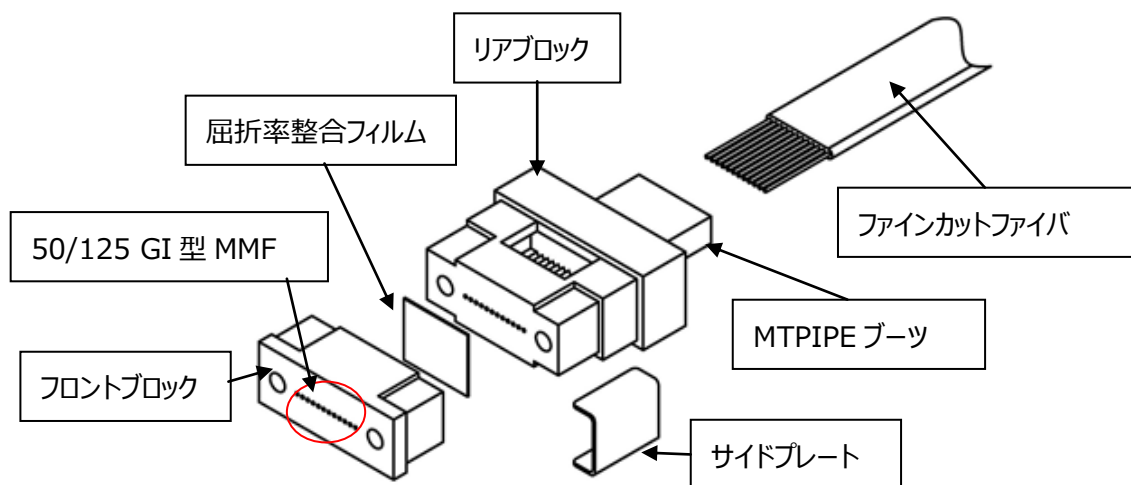


図 4-1 MTPIPE の構造概略図

MTPIPE の使用方法は、まず MTPIPE のリアブロック後端側からファイナカットした無研磨ファイバを挿入し、フロントブロック内埋め込みファイバと突き合わせる。次にリアブロックの角窓から高速組立用接着剤を滴下してファイバを固定することにより完成する。MTPIPE は MT コネクタと接続することが可能である。図 4-2 に MT クリップによる MTPIPE と MT コネクタの接続例を示す。

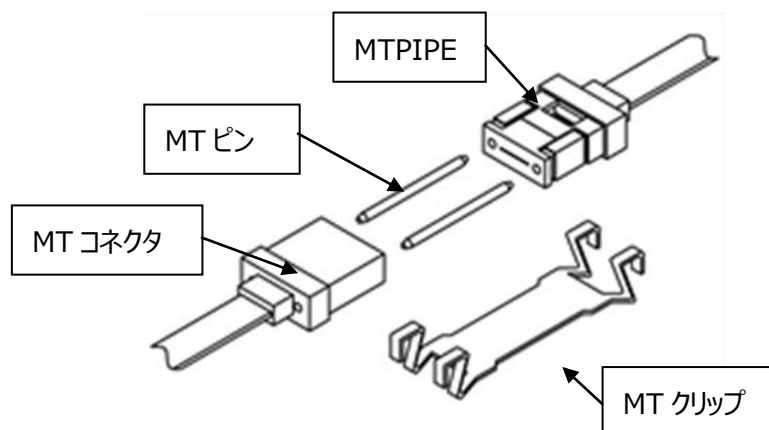


図 4-2 MTPIPE と MT コネクタの接続

4.2.2 フロントブロックと光ファイバの接続

光配線板への取り付けを容易にするため、ファインカットした光ファイバをリアブロックから挿入し、フロントブロックのリアブロック接続側の研磨された光ファイバと接続する構造とした。この部分の反射を抑制するため、屈折率整合剤を使用した。

ファインカットされた無研磨ファイバは切断長にばらつきが発生するため、液状、ゲル状などの流動性のある材質では高温環境にさらされた際接続が維持できなくなる場合がある。また光配線板内での屈折率整合剤の流出による汚染や特性劣化が懸念される[7]。この問題を解決するため、MTPIPE に使用する屈折率整合剤として、屈折率整合フィルム（株式会社 TOMOEGAWA の Fitwell)を採用した[10]。屈折率整合フィルムは、一定の厚さと柔軟性を有し、弾性変形することで光ファイバにかかる過剰な押圧力を緩衝しながら、密着させることが可能である[7]。この性質を利用することにより、無研磨テープファイバの切断長ばらつきを吸収し、均一に密着することが可能となった。図 4-3 に屈折率整合剤と屈折率整合フィルムの外観を示す。



図 4-3 屈折率整合剤（左）および屈折率整合フィルム（右）

屈折率整合フィルムの採用にあたっては、フィルム厚さが損失に与える影響を考慮し、ファイバ切断バラツキを吸収できる厚さで、かつ、低損失である条件の基に選定した。選定結果は次項で述べる。

4.2.3 屈折率整合フィルムの厚さ検証

MTPIPE に適切な屈折率整合フィルムを選定するため、FitWell A の高反発タイプと FitWell B の低反発タイプ（以下、A,B と略記）の 2 種類を選出し、フィルム厚さはそれぞれ 25、50、75、100 μm とした。図 4-4 に示す接続により屈折率整合フィルムの検証を行った。

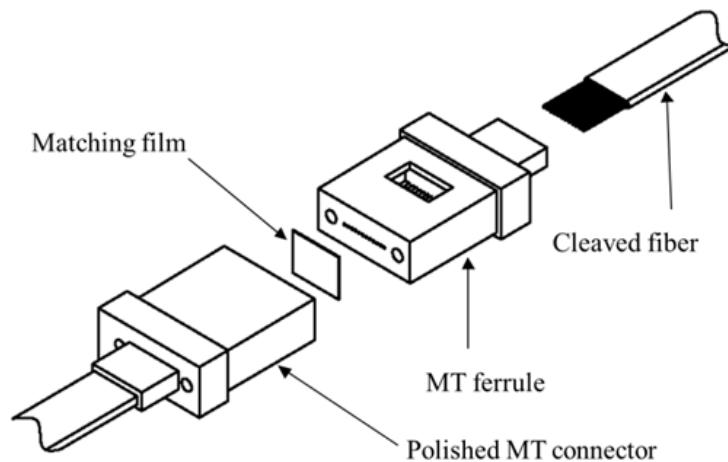


図 4-4 屈折率整合フィルムの検証

使用する光ファイバは、50/125 GI 型マルチモードファイバとし、波長 850 nm LED 光源を用いて測定した。図 4-5 に評価結果を示す。図 4-5 の横軸は屈折率整合フィルムの厚さ、縦軸は接続損失変動量、グラフは厚さによる接続損失平均変動量の推移を示す。A の高反発タイプでの接続損失値は、フィルム厚さによるファイバ間隔に依存することが判る。B の低反発タイプにおいて、フィルムが厚くなっても接続損失が増加しないのは、弾性変形により効果的な間隔が維持されているためと見られる。

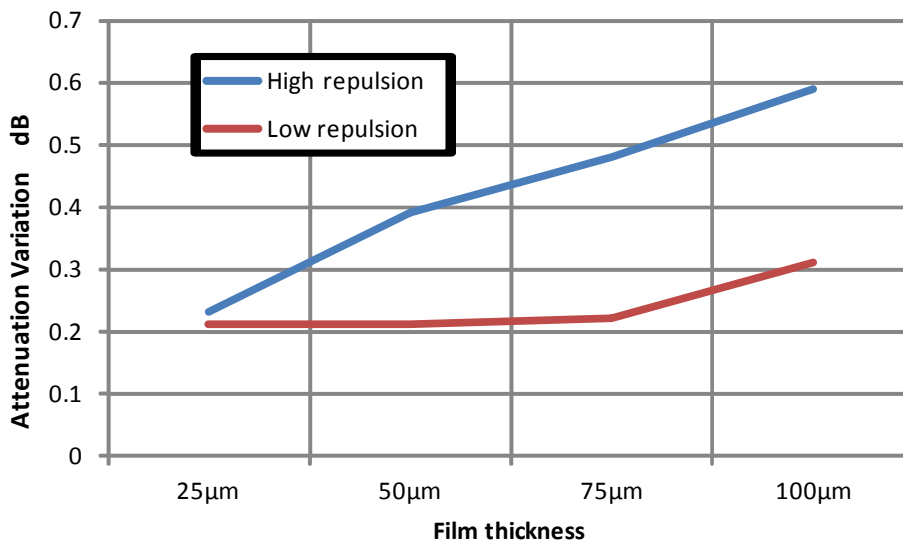


図 4-5 屈折率整合フィルムの違いによる接続損失変動量

屈折率整合フィルム検証試験結果から、屈折率整合フィルムの厚さを A の 25 μm、B の 25、50 μm に絞り込み、実際に MTPipe へ組み込んで屈折率整合フィルムの厚さによる耐

環境性への影響を確認するために温度サイクル試験を行った。環境試験に用いた規格は Telcordia GR-1435-CORE (Generic Requirements for Multi-Fiber Optical Connectors) issue 1 を参照した。試験条件詳細を表 4-1 に示す。試験は、MPOハウジングに搭載した MTPICE コードと MPO コネクタコードを接続した。使用する光ファイバは、50/125 GI 型マルチモードファイバ、測定波長は 850 nm LED とした。図 4-6 に温度サイクル試験結果を示す。

表 4-1 Telcordia GR-1435-CORE issue1 試験規格詳細

	Thermal Cycle
Temperature	-40 to 75 °C
Humidity	Uncontrolled
Duration	336 hrs.
Requirement (Insertion loss)	Max increase <0.3 dB
Requirement (Return loss)	>20 dB

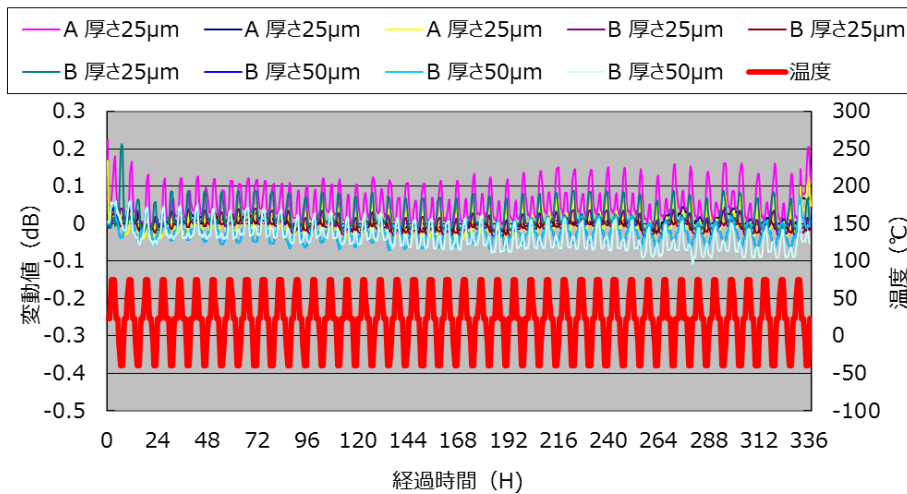


図 4-6 屈折率整合フィルムと温度の関係

昇降温時に損失変動する傾向が見られ、最大損失増で 0.23 dB であった。しかし、この値は目標値とした最大損失増 0.3 dB 以下を満足する結果である。損失変動に関して、屈折率整合フィルムの種類と厚さによる差異は見られず、試験に使用した各フィルムとも、MTPICE への適用に有効であることが分かった[10]。

4.2.4 各ブロック間の接着強度

図 4-7 にフロントブロックとリアブロックの内部接着面について示す。リアブロック、フロントブロックのみで接着に使用できる表面積は約 2.9 mm^2 であり、接着面をエポキシ接着剤で接着固定するだけでは固定強度が弱く平均強度が 13.4 N であるため、各ブロック間の接着面で剥離してしまう恐れがある。このため、サイドプレートを用いて両側から両ブロックを接着結合させ、接着剤で固定する面積を増やすことで高強度化する構造とした。サイドプレートには厚さ 0.1 mm のステンレス板を用い、プレス成形により作製した。また、フロントブロックとリアブロックにはサイドプレートを固定するための凹部を設けた。

フロントブロック-リアブロック間の引っ張りに対する最小結合強度の目標値は 50 N とした。これは小型同軸コネクタの引っ張り強度規格を参考とした。接着固定された MTPPIPE の両ブロック中心に穴加工を施して鋼線を通し、その鋼線両端を 10 mm/min の速度で引っ張り、10 個のサンプルについて各ブロック間およびサイドプレートが剥離する荷重により評価を行った。図 4-8 に試験に使用する MTPPIPE の孔加工位置、図 4-9 にサイドプレートの接着剤滴下位置について示す。

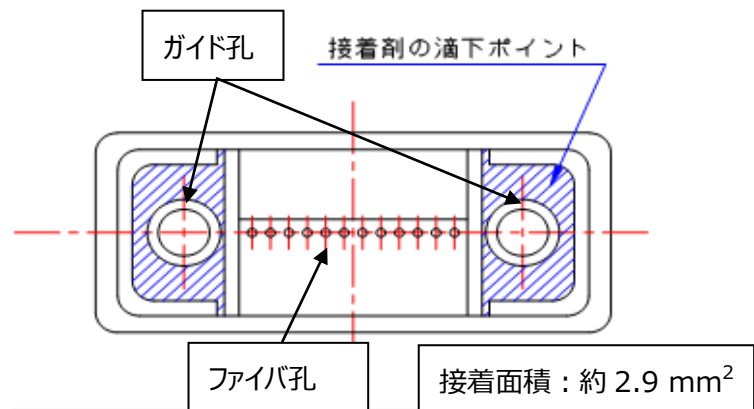


図 4-7 フロントブロックとリアブロックの内部接着面

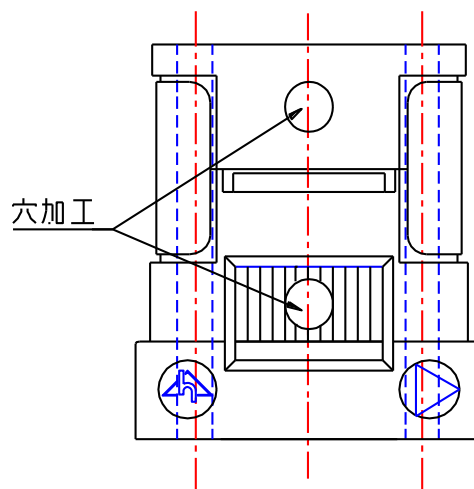


図 4-8 MTPPIPE 引っ張り試験孔加工位置

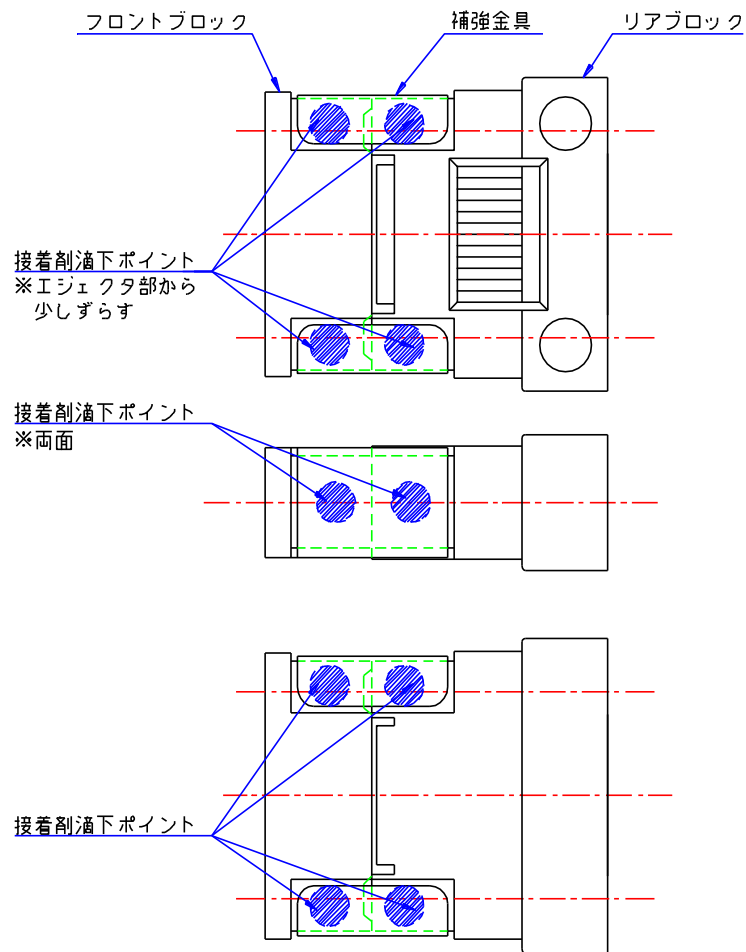


図 4-9 接着剤滴下ポイント

試験結果を図 4-10 に示す。横軸がサンプルNo.、縦軸が剥離した強度、棒グラフが各サンプルの剥離強度を示す。サイドプレートを装着しない状態では平均強度が 13.4 N あったが、サイドプレートを用いた構造では平均 76.2 N、最小値 65.7 N であり、目標値である 50 N を満足できることを確認した[8][9]。

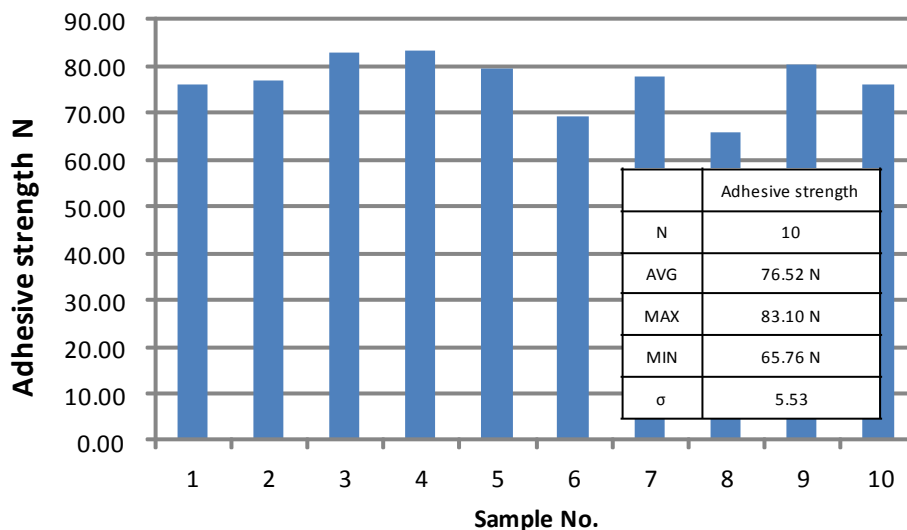


図 4-10 フロントブロック-リアブロック間接着強度

4.3 50/125 GI 型マルチモードファイバの接続損失理論値

MTPIPEとMTコネクタ等の多心光コネクタは各々を接続する際に、接続点においてファイバの軸ずれ（オフセット）を生じ、接続損失が発生する。GI 型マルチモードファイバの接続損失は下記に示す式(1)および(2)で計算することができる[11][12]。

$$L = 10 \log \left(\frac{1 - u^4 D^2}{8(u^2 - 4)} \right) \quad \dots (1)$$

$$D^2 = \left(\frac{d}{a} \right)^2 + \left(\frac{2n \tan \frac{\theta}{2}}{NA} \right)^2 \quad \dots (2)$$

L は接続損失、 u はカットオフ波長、 NA は開口数、 a はコア半径、 d は軸ずれ量、 θ はファイバの角度ずれ量を示す。コア径 50 μm でカットオフ波長を 2.405、角度ずれを 0 と設定し、定常モード励振を想定したときの軸ずれによる接続損失を図 4-11 に示す。横軸がファイバ軸ずれ量、縦軸が接続損失である。

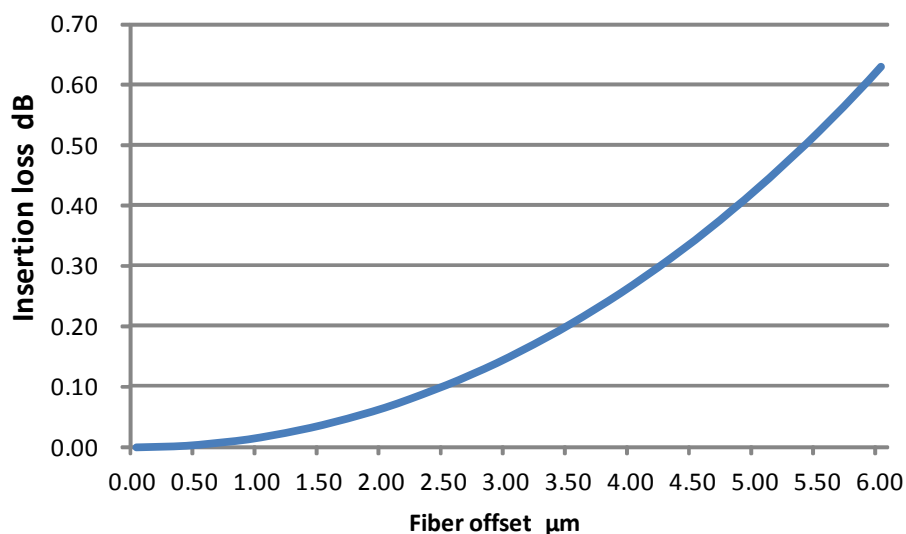


図 4-11 50/125 GI 型マルチモードファイバの接続損失

4.4 MTPiPE の寸法設計

MTPiPE と MT コネクタ接続時における接続損失を $\text{MAX} \leq 1.0 \text{ dB}$ を目標とする。接続損失設計値が $\text{MAX} \leq 1.0 \text{ dB}$ としたのは、MTPiPE と多心光コネクタの接続と、フロントブロックのリアブロック側とリアブロックに挿入されたファインカットファイバとの接続を各々 $\text{MAX} \leq 0.5 \text{ dB}$ を目標としたためである。接続損失 $\text{MAX} \leq 0.5 \text{ dB}$ は 50/125 GI 型マルチモードファイバ使用時の MT コネクタの要求仕様である。

図 4-12 に MTPiPE の接続損失および軸ずれ量目標値を示す。各接続点での接続損失を $\text{MAX} \leq 0.5 \text{ dB}$ に設計するためには、算出した理論値から、位置ずれ量を約 0.0050 mm 以下にする必要がある。位置ずれ量は接続される各々のファイバ孔ずれによって算出されるため、片孔の位置ずれ量を 0.0025 mm 以下で設計することで、位置ずれ量を 0.0050 mm 以下にすることができる。

その他のガイド孔径やファイバ孔径等の寸法は JIS C 5981「F12 型多心光コネクタ(MT コネクタ)」に準拠して作製した。

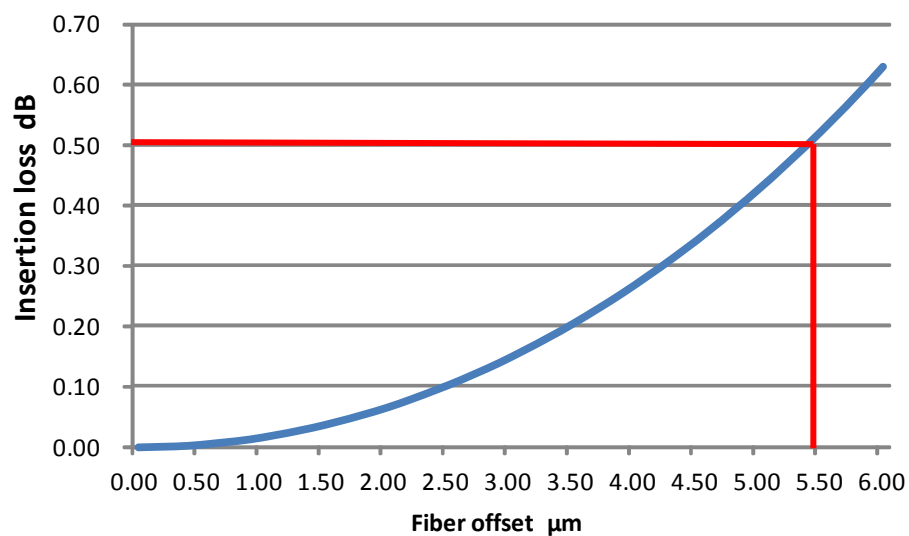


図 4-12 MTPiPE 接続損失および軸ずれ量目標値

4.5 MTPiPE のファイバ孔位置ずれ量測定結果

各ブロックのファイバ孔位置ずれについて測定した結果を図 4-13 から図 4-15 に示す。測定したサンプル数量は N=13 個でファイバ心数は 12 心である。

ファイバ孔位置ずれ量測定には $\sigma \leq 0.00010$ mm の自動 2 次元寸法測定機を使用し、 23 ± 2 °C の環境下で測定した。測定方法は 3.3.4 項で述べた測定手順に従った。

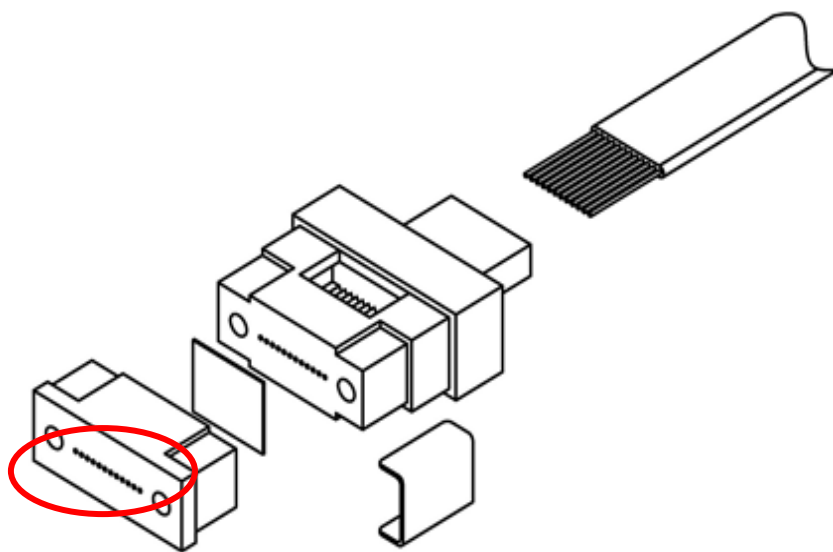
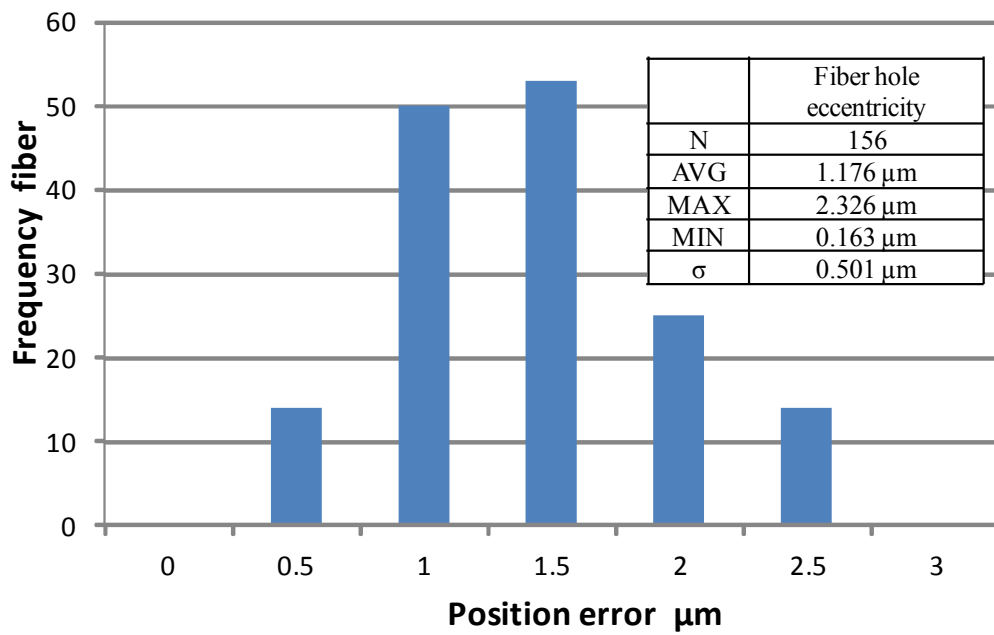


図 4-13 MTPipe フロントブロック接続側端面位置ずれ量分布

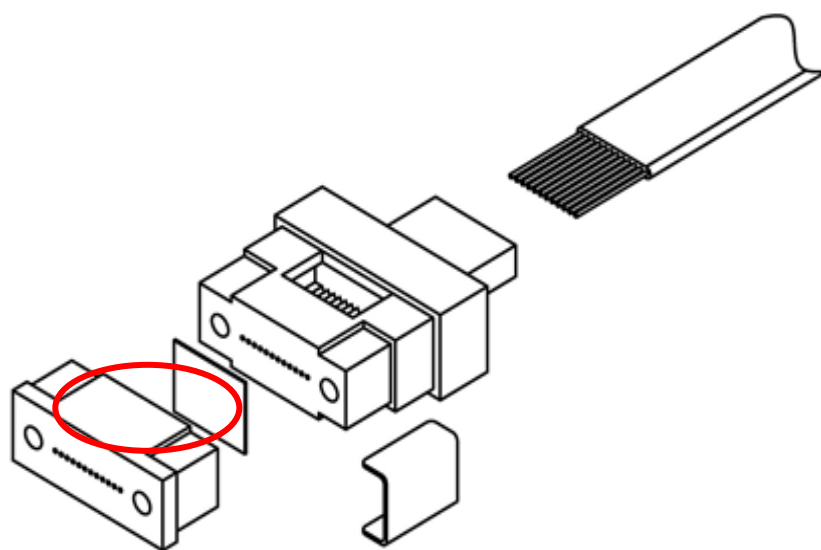
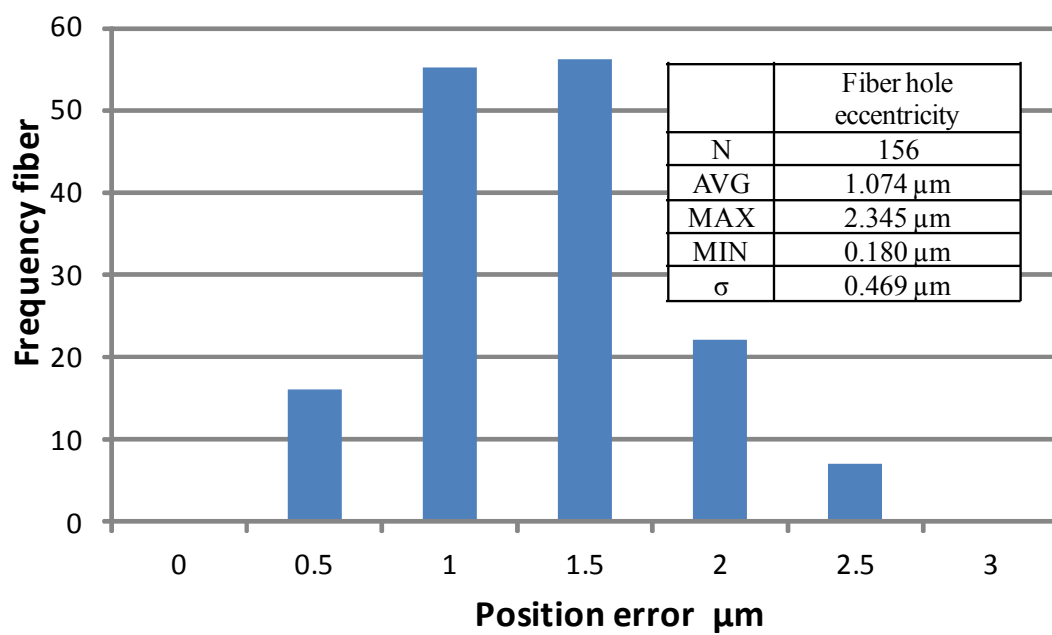


図 4-14 MTPipe フロントブロック-リアブロック側位置ずれ量分布

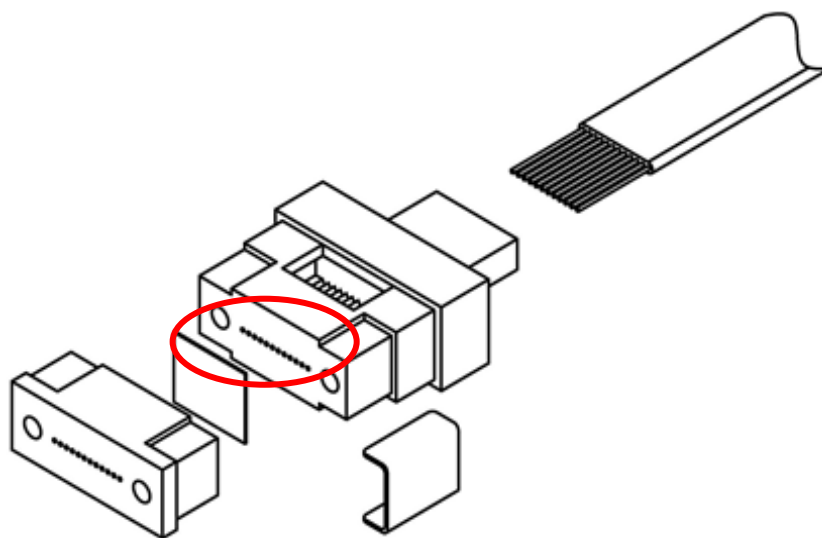
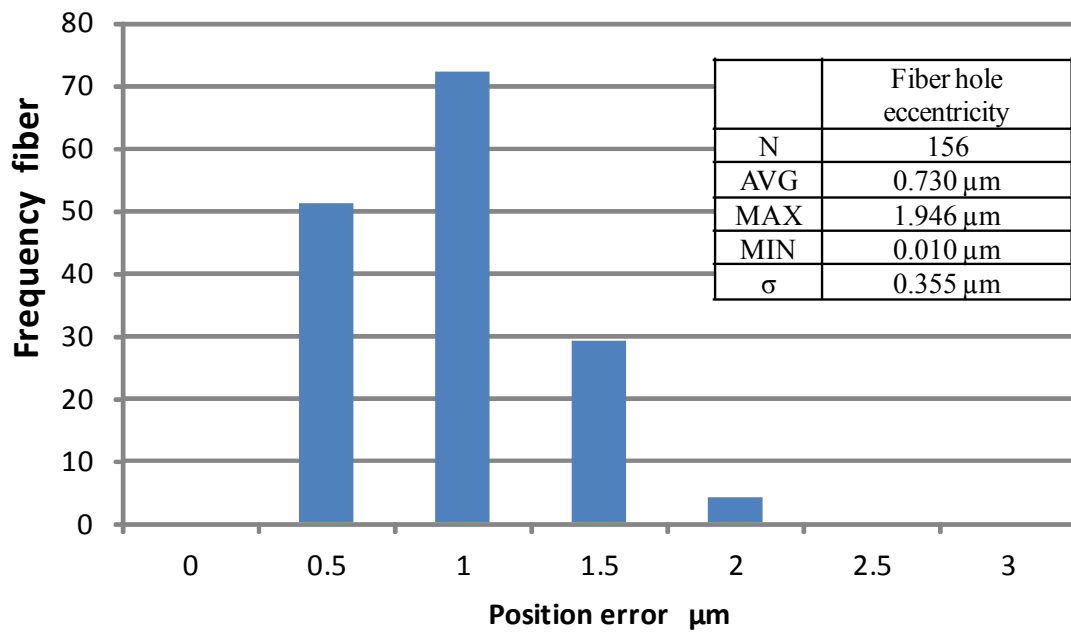


図 4-15 MTPPIPE リアブロック位置ずれ量分布

各ブロックのファイバ孔位置ずれ量は目標値である 0.0025 mm 以下となっていることを確認した。

4.6 MTPIPE の光学特性測定結果

4.5 で確認したフロントブロックおよびリアブロックを用いて MTPIPE を作製し、MT クリップを用いて接続し、波長 850 nm の LED 光源を用いて接続損失を測定した。片端 MT コネクタ、片端 MTPIPE を取り付けられたコードを 74 本作製し、基準とする MT コネクタとの接続によって評価を実施した。試験に用いた実験系を図 4-16 に示す。モードスクランブラーを経由することにより定常モード励振し、光スイッチへ入力した。光スイッチの出力光を FO (Fan-Out) コードを用いて MPO-MT 基準コードに接続した。基準コードからの出射光から光パワーの基準値(Ref)をセンサで取得した後、MTPIPE-MT コードを基準コードと接続して基準値との差異から接続損失を測定した。接続損失測定結果を分布について図 4-17 に示す。

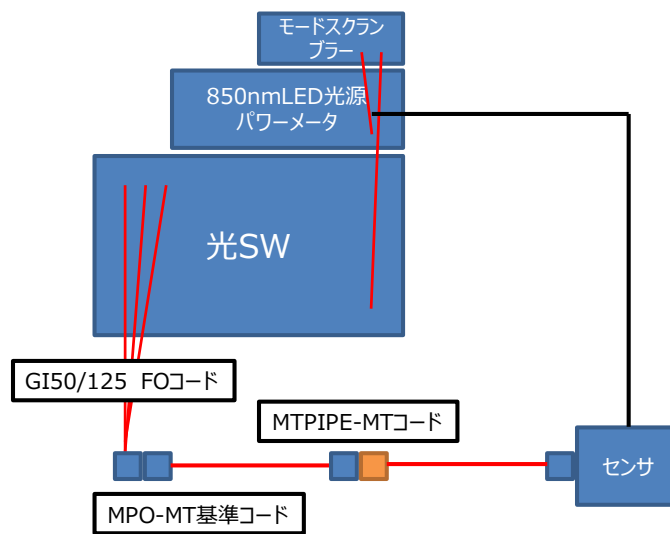


図 4-16 MPO-MTPIPE コード 接続損失測定系

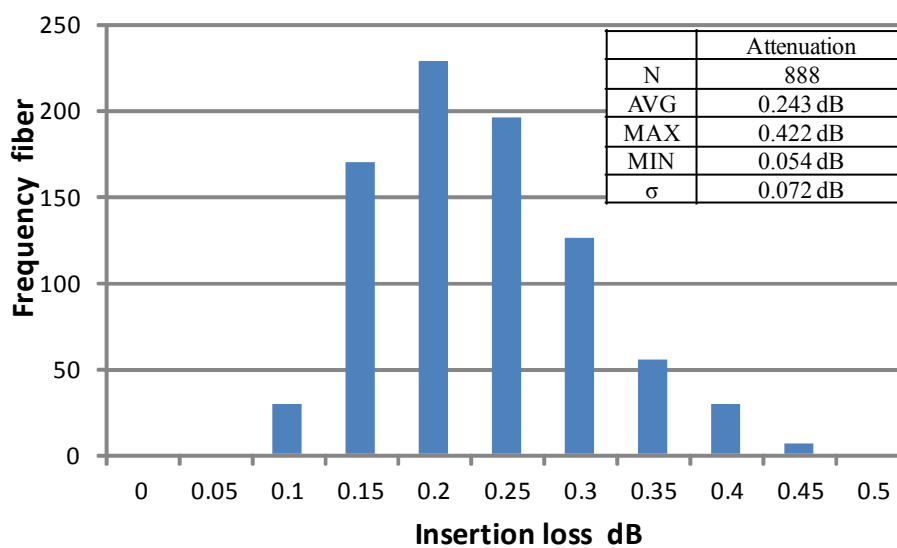


図 4-17 MTPIPE 接続損失分布

接続損失が MAX \leq 0.50dB であったことから、設計目標である MAX \leq 1.00dB を満足することができた。

4.7 MTPIPE の環境特性測定結果

MTPIPE の耐環境性を確認するために 4.6 で作製したコードを用いて環境試験を実施した。環境試験に用いた規格は Telcordia GR-1435-CORE (Generic Requirements for Multi-Fiber Optical Connectors) issue 2 を参照した。詳細試験条件を表 4-2 に示す。環境試験は高温試験、高温高湿試験、温度サイクル試験を実施する。今回実施した試験の適応範囲は屋内での使用を考慮し、Controlled Environmental とした。

表 4-2 Telcordia GR-1435-CORE issue2 環境試験条件

	Thermal Aging	Humidity Aging	Temperature Cycling
Temperature	60 °C	40 °C	-10 to 60 °C
Humidity	Uncontrolled	95%	Uncontrolled
Duration	96 hrs.	96 hrs.	40 hrs.
Requirement (Insertion loss)	Max <1.0 dB	Max <1.0 dB	Max <1.0 dB
Requirement (Return loss)	>20 dB	>20 dB	>20 dB

環境試験の試験サイクルを図 4-18 から図 4-20 に示す。各グラフの横軸は試験時間、縦軸が試験温度、プロットされた線が試験時間における温度推移を示す。

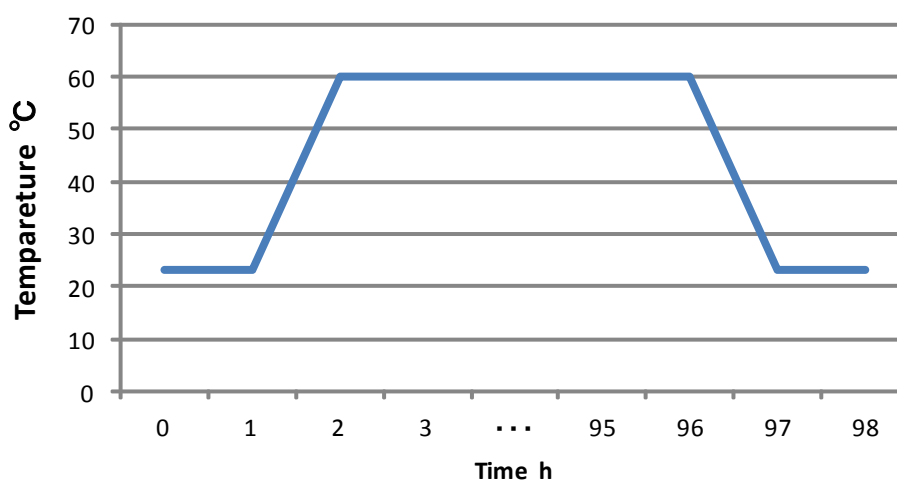


図 4-18 高温試験サイクル

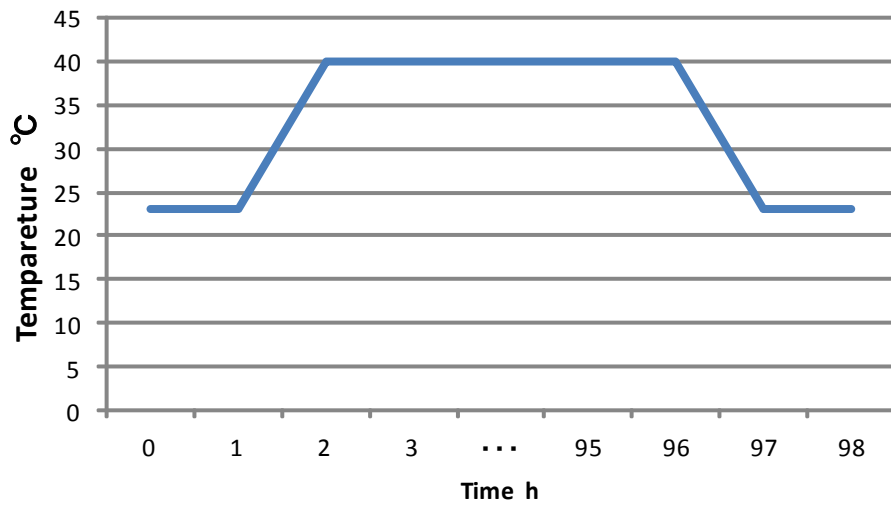


図 4-19 高温高湿試験サイクル

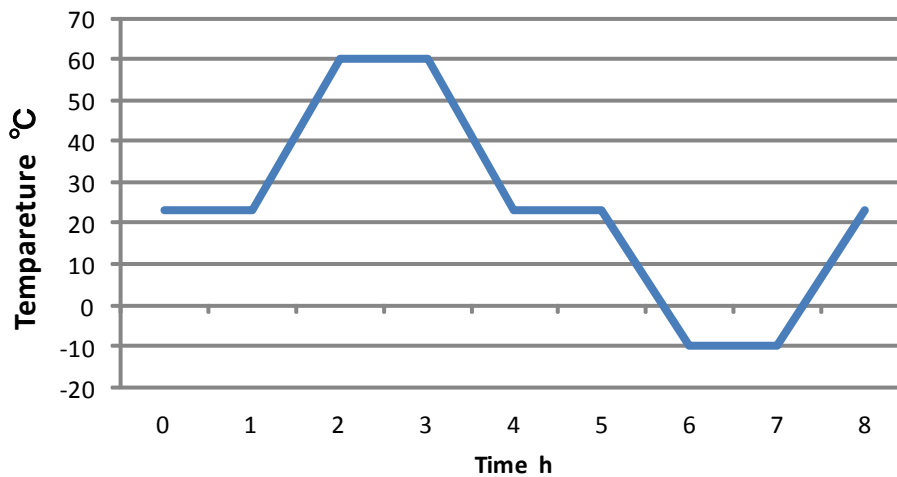


図 4-20 温度サイクル試験サイクル

表 4-2 に示す試験条件で実施した環境試験結果を図 4-21、図 4-22 および表 4-3 に示す。図 4-21 は横軸が試験時間、縦軸は接続損失変動量、プロットされた線は高温高湿試験および温度サイクル試験時の温度変化による接続損失変動量推移を示す。図 4-22 は横軸が試験時間、縦軸は反射減衰量変動量、プロットされた線は高温高湿試験および温度サイクル試験時の温度変化による反射減衰量推移を示す。高温試験結果については試験前後での変動量確認であったためグラフには記載していない。

試験は高温試験から開始し、高温高湿試験、温度サイクル試験の順に行った。接続は MT クリップ、波長 850 nm の LED 光源を使用し、11 組の試験サンプルについて評価した。

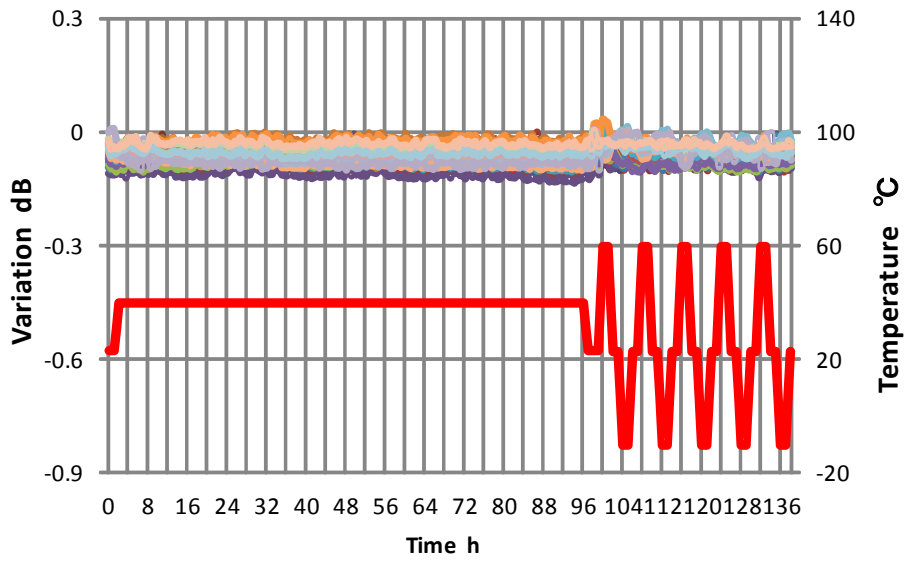


圖 4-21 環境試驗結果 (接續損失變動量)

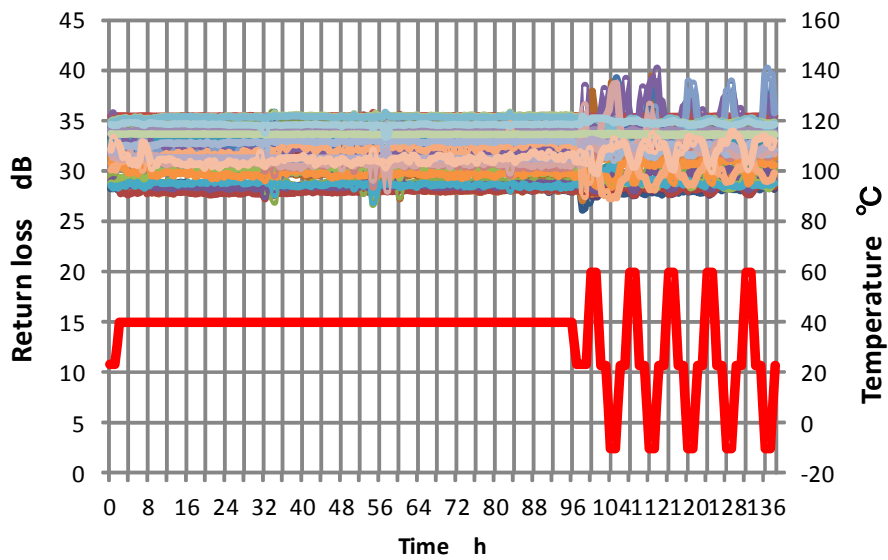


圖 4-22 環境試驗結果 (反射減衰量)

表 4-3 環境試驗結果

	Max in attenuation	Variation	Minimum return loss
Initial	0.51 dB	-	27.9 dB
Thermal Aging	0.43 dB	0.11 dB	28.3 dB
Humidity Aging	0.48 dB	0.05 dB	26.1 dB
Thermal Cycle	0.44 dB	0.09 dB	28.3 dB

環境試験時の損失が最大で 0.51 dB であり、目標値である $MAX \leq 1.0$ dB を満足していることを確認した。

4.8 MTPICE の機械的特性測定結果

MTPICE の接続損失安定性および前後ブロックの接着強度及び耐久性について着脱試験により確認した。用いた規格は Telcordia GR-1435-CORE (Generic Requirements for Multi-Fiber Optical Connectors) issue 1 を参照した。表 4-4 に詳細試験条件を示す。試験は下記に示す手順で実施した。

表 4-4 Telcordia GR-1435-CORE 着脱試験条件

Test	Duration	Test parameter	Measurement Interval	Requirement
Durability	200 Cycles	Connect and disconnect	Every 10 Cycles (0, 10, 20...)	【Insertion loss】 Max increase <0.3 dB 【Return Loss】 <20 dB

- ① MPO コネクタの着脱を 4 回行う。
- ② 5 回目の着脱時に端面清掃を行い、清掃後に 5 回目の着脱を行う。
- ③ ①および②を再度実施し、10 回目の着脱終了時に光学特性を測定する。
- ④ 5 回ごとのコネクタ端面清掃および 10 回ごとでの光学特性の測定を行い、全部で 200 回分の着脱を行う。

図 4-23 および図 4-24 に試験結果を示す。図 4-23 は横軸が着脱回数、縦軸は接続損失変動量、プロットされた線は着脱回数による接続損失変動量推移を示す。図 4-24 は横軸が着脱回数、縦軸は反射減衰量、プロットされた線は着脱回数による反射減衰量の推移を示す。

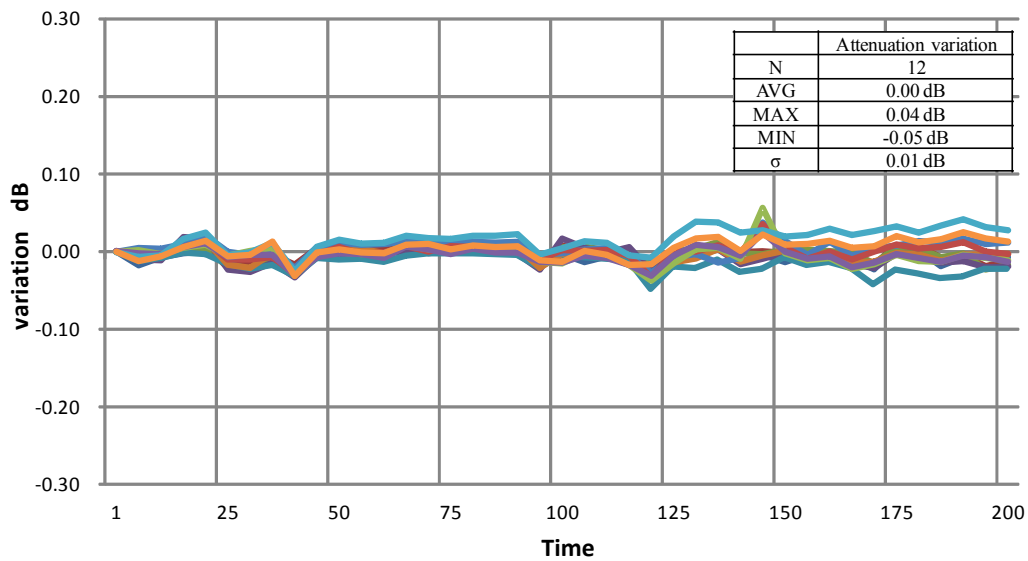


図 4-23 着脱試験結果 (接続損失)

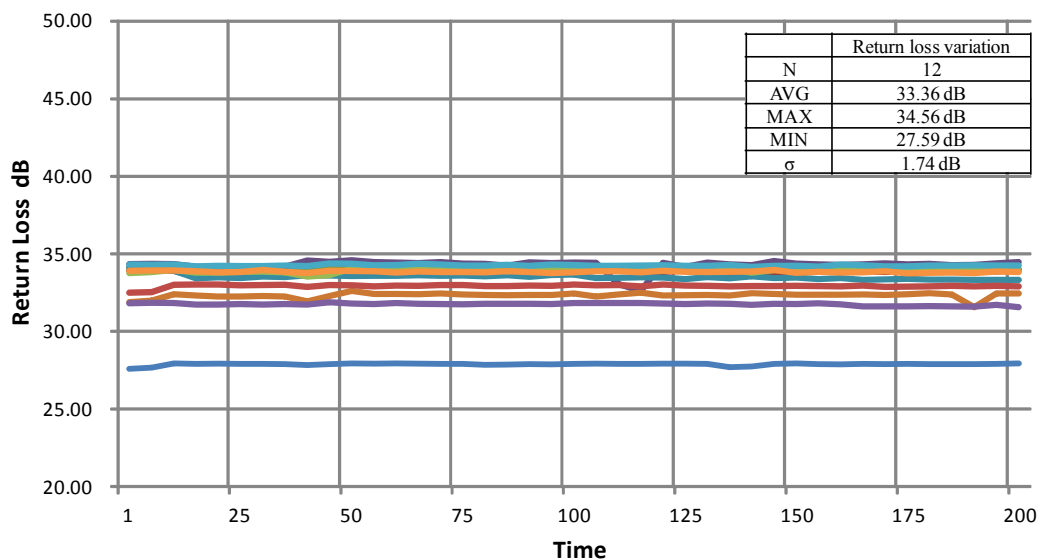


図 4-24 着脱試験結果(反射減衰量)

着脱による損失変動量が最大で 0.05 dB、反射減衰量の最小値が 27.6 dB であることから要求値である接続損失変動量 $MAX < 0.3$ dB、反射減衰量 $MIN > 20$ dB を確認した。また、着脱による MTPipe のフロントブロック-リアブロック間の接着部分における破損も見られず、耐久性に対し十分な性能を有していることを確認した。

4.9 結論

本章では多心光コネクタ端面の研磨が必要なく、容易に取り付けが可能である MTPIPE コネクタを開発した。MTPIPE は MT コネクタと互換性を有していることや MT コネクタや MPO コネクタと同等の性能で両多心光コネクタとの接続が可能である。また多心光コネクタ端面を無研磨で接続可能であることから、光配線板などの狭小スペースでの多心光コネクタの取り付けに適していると考えられる。本章で 50/125 GI 型マルチモードファイバを用いた多心光コネクタを設計したことにより、50/125 GI 型マルチモードファイバを用いた多心光コネクタを要求する性能で設計できることを明らかにした。

MTPIPE フロントブロック-リアブロック間の接着強度が懸念されていたため接着強度の検討を行った。前後ブロックの接着面積が限られているためサイドプレートを使用して接着強度の改善を図った。サイドプレート装着前の前後ブロック間の接着強度は平均で 13.4 N であったのに対し、サイドプレートを用いた本構造では平均 76.2 N、最小値 65.7 N であり、目標値である 50 N を満足した。

光配線板で使用するという観点から屈折率整合剤の検討を行った。従来使用されていたジェルタイプのような流動性がある屈折率整合剤では、高温環境にさらされた際、接続が維持できなくなる場合がある。また光配線板への屈折率整合剤の流出による汚染も懸念される。その問題点を解決するために屈折率整合フィルムの適用を検討した。屈折率整合フィルムの適正化を行い、環境変化時でも大きな温度依存性は見られず、屈折率整合フィルムの有効性を明らかにした。

光学特性においても接続損失が 1.0 dB 以下、反射減衰量は 20 dB 以上であり、目標を達成した。環境試験前後での光学特性の変動は最大で 0.10 dB、反射減衰量が 20 dB 以上であることを確認し、MTPIPE の光学特性が良好であることを明らかにした。

MTPIPE の接続損失の安定性およびフロントブロック-リアブロック間の接着強度を確認するために着脱試験を実施した。200 回着脱したが、最大損失変動量が 0.08 dB、反射減衰量が 20 dB 以上であることから、必要な接続安定性を有していることを明らかにした。また、着脱試験後にフロントブロック-リアブロック間の剥離もなく、十分な接着強度を有していることを明らかにした。

よって、50/125 GI 型マルチモードファイバで目標性能を有した MTPIPE が実現できることを証明した。

今回は研磨光ファイバと無研磨光ファイバの接続にスポットを当てて作製したが、リアブロックのフロントブロック接続側の設計をファイバ孔で形成された光ファイバ用からスリット形状等に変更して光導波路フィルムに適応させるなど、用途に合わせて形状を変更させることで光ファイバと接続できる様々な形態のもと容易に接続が可能になると考えられる。

参考文献

- [1] F. Shimizu, H. Furuyama, H. Hamasaki, F. Kuroda, M. Nakamura, and T. Tamura, "Optical parallel interconnection characteristics of 4-channel 2-Gbit/s bit synchronous data transmission module", Proc. of 42nd Electronic Components and Technology Conf., pp. 77-82, 1992.
- [2] K.P. Jackson, E.B. Flint, M.F. Cina, D. Lacey, Y. Kwark, J.M. Trehwella, T. Caulfield, P. Buchmann, Ch. Harder, and P. Vettiger, "A high-density, four-channel, OEIC Transceiver module utilizing planar-processed optical waveguides and flip-chip, solder-bump technology", J. Lightwave Technology, Vol. 12, No. 7, pp. 1185-1191, 1994.
- [3] K. Shibata, K. Hogari, and I. Sankawa, "High-speed MT connector assembly method", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, No. 7, pp. 1682-1684, 2004.
- [4] T. Aoki, H. Muranaka, S. Aoki, K. Suematsu, M. Iwaya, M. Shiino, "Development of low-cost polish-less optical multifiber backplane connector", Proc. of SPIE Vol. 8630, 863004, 2013.
- [5] T. Satake, S. Nagasawa, and R. Arioka, "A new type of demountable plastic-molded single-mode multifiber connector", J. Lightwave Technology, Vol. LT-4, No. 8, pp. 1232-1236, 1986.
- [6] M. Takaya, M. Kihara, and S. Nagasawa: "Design and performance of multifiber backpanel type connector," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 8, No. 5, pp. 655-657, 1996
- [7] M. Suzuki, K. Sasaki, K. Sukegawa, "The Examination of Optical connection using matching film," IEICE General Conf. 2005, C-3-48, Mar. 2005 (in Japanese).
- [8] 竹崎 元人, 石田 雅士, 岩本 政明, 杉田 悦治, 増田 宏, 茨木 修, "MTPIPE 技術の検討," 電子情報通信学会 2005 年ソサイエティ大会講演論文集, B-10-1, 2005
- [9] 竹崎 元人, 石田 雅士, 岩本 政明, 杉田 悦治, 増田 宏, 茨木 修, "MTPIPE 強度改善の検討," 電子情報通信学会 2006 年ソサイエティ大会講演論文集, C-3-30, 2006
- [10] 竹崎 元人, 石田 雅士, 岩本 政明, 杉田 悦治, 古江 友樹, 橋本 展宏, 助川 健, "MTPIPE の接続安定性向上検討," 電子情報通信学会 2007 年ソサイエティ大会講演論文集, C-3-39, 2007
- [11] Y. Koyamada, Y. Tamura and H. Sakamoto, "Statistical Connector Loss Estimation in Optical Fiber Transmission Line Include a Number of Connectors," Trans. IEICE, Vol. J66-B, No. 1, pp. 63-70, 1983 (in Japanese).

- [12] D. Gloge, "Offset and tilt loss in optical fiber splices," Bell Syst. Tech. J. 55, 905, 1976.
- [13] 竹崎 元人, 長瀬 亮, “多心シングルモード光コネクタの量産時における光学特性と寸法精度の関係”, 電子情報通信学会論文誌 C vol.J97-C No.6, pp258-263, Jun, 2014

本研究の内容は以下の論文に掲載されている。

- [1] M.Takezaki, R.Nagase, “A Novel MT Ferrule with Pre-Installed Pre-polished End Fibers (MTPIPE) for Multimode Fibers”, 電子情報通信学会英文論文誌 C vol.E97-C No.9,pp894-899,2014
- [2] 竹崎 元人, 長瀬 亮, ”MTPIPE 技術の検討”, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.113 No.189 , 電子情報通信学会信学技報 Vol.113 No.190, EMD2013-44 , pp51-55, 2013

第5章 光導波路フィルム用多心光コネクタに関する研究

5.1 はじめに

光配線材料には光ファイバや光導波路が考えられているが、数 cm 程度以下の伝送の場合、小型・高密度の観点から光導波路が有効である。さらにフィルム状の光導波路を用いることにより、3次元配列が可能となる。また、フィルム形状にすることでシート状の光配線になるためプリント配線と同様に扱えるなどメリットがある。そのため、電氣的ノイズによるエラーを考慮し光導波路フィルムを光-電気配線板に適用しようとした研究開発が活発に行われている[1]。昨今では応用分野も、携帯電話等のコンシューマ応用から、車載・ロボット更にはサーバ等のハイエンド機器にわたるまで多岐にわたっている[2]。

その光導波路フィルム[3-6]への光入出力は通常の光ファイバとの接続となるため、入出力端には光コネクタの実装が必須である。光導波路フィルムは設計によって実装密度を向上させることが可能であるため多心光コネクタとの互換性が重要となってくる。よって現在主流として使用されている MT コネクタ[7-9]と同等形状の光導波路フィルム用コネクタである PMT コネクタが注目されている[10-13]。

そこで、本章では、PMT コネクタにおける接続損失発生要因を明確にして、実際に生産された PMT コネクタと光導波路フィルムを組立・寸法特性評価をした結果から、接続損失とその原因を明らかにする。

5.2 PMT コネクタとは

PMT コネクタは、マルチモードのポリマ導波路フィルム用コネクタである。PMT コネクタは 2006 年に PMT 光コネクタ詳細規格(JPCA-PE03-01- 07S)として、JPCA(Japan Electronics Packaging and Circuits Association)規格の中に登録されている。

PMT コネクタは凹形状になっているフェルール本体と光導波路フィルム固定用の蓋、PMT コネクタ本体に挿入される光導波路フィルム用ブーツの 3 点で構成される。光導波路フィルムは光導波路フィルム用ブーツを挿通した状態で PMT コネクタ本体凹形状の開口部に挿入され、光導波路フィルムの上部へ蓋を装着し、PMT コネクタ本体へ押圧された状態で接着固定されることで PMT 光コネクタが構成される。詳細な組み立て方法については 5.6 項で述べる。図 5-1 に PMT コネクタの構成図を示す。

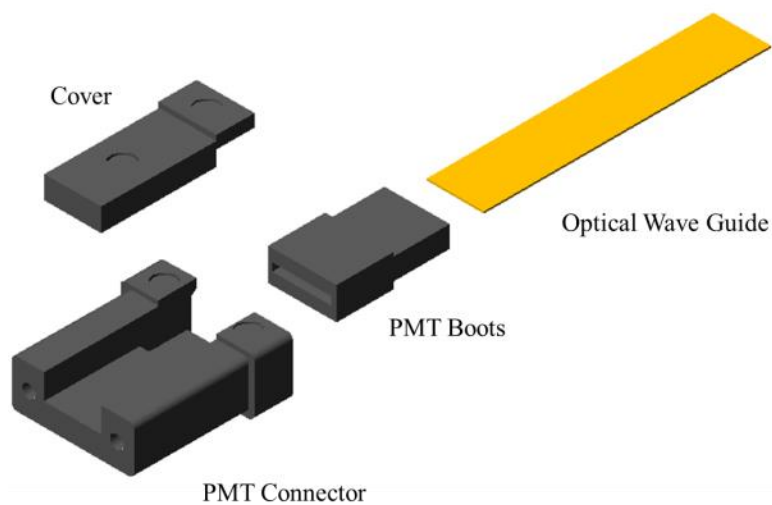


図 5-1 PMT コネクタの構造

外形寸法を従来の MT コネクタと同等にしたことによって、クリップ接続による MT コネクタおよび MPO コネクタ接続が可能である。成形材料には量産性、製品コスト面および耐環境特性で有利な PPS 材料を使用し、それぞれ射出成形により形成した[16]。

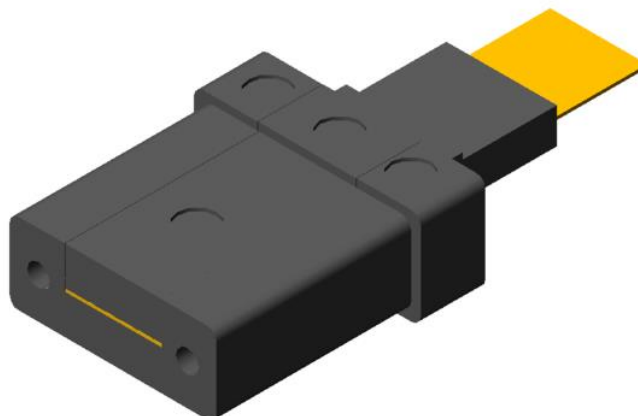


図 5-2 PMT コネクタ組立図

図 5-2 に PMT コネクタの組立図を示す。PMT コネクタの接続端面形状は平面研磨あるいは無研磨で作製可能である。

5.3 光導波路フィルムとは

光導波路フィルムとは、光の屈折率の違いを利用して基板の上に光の道を設け、光信号を導くように加工されたフィルム状の回路のことである。電気回路中を電子が流れるように、光を回路中に流すという点では、光導波路はいわば光の配線板であるといえる。光導波路フィルムは、光屈折率を利用して直進性の高い光を導くという点では光ファイバと同様であるといえるが、光ファイバのような 3 次元構造ではなく、一般に平面構造となっている。

厚さ 0.1 mm 程度の薄いフィルムに、光を通すコア材料を埋め込んだ構造を採る。最小曲げ半径が 1 mm~2 mm と小さく、繰り返し曲げても劣化しにくいという特徴を備える。発光素子である VCSEL (vertical cavity surface emitting laser) や、受光素子のフォトダイオードと組み合わせて使う。材料によっては 1 Gb/s を超えるデータ伝送速度を実現できる。折り畳み型携帯電話機の内部で、液晶パネルやカメラとマイクロコントローラ間の接続に用いることなどが検討されている。

光導波路フィルムのコア形状は、作製方法に依存するが矩形のコアが代表的である。本研究で使用した光導波路フィルムもコアの形状は矩形である。使用した光導波路フィルムの外観を図 5-3 に示す。

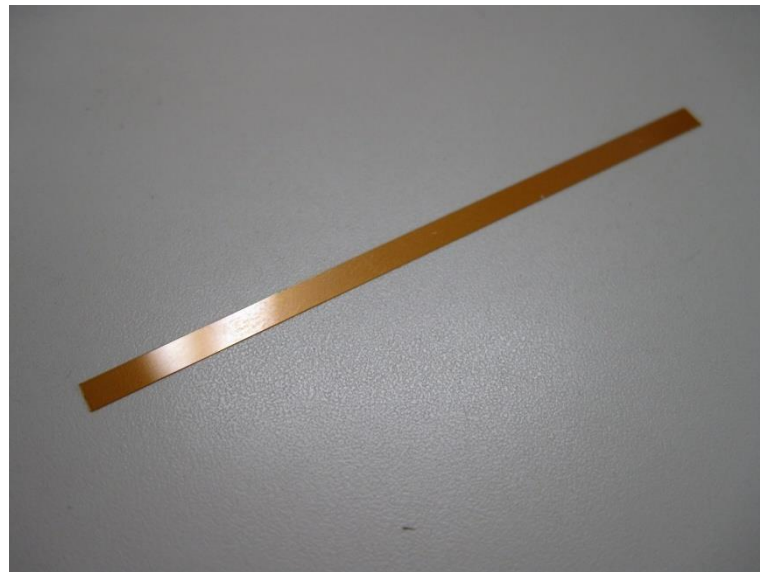


図 5-3 光導波路フィルム

光導波路フィルムの作製プロセスについては、様々な簡易プロセスが提案・実証されている。図 5-4 に 4 つの簡易作製法の工程概要図を示す。ほとんどのプロセスが光加工を利用しているため、材料に光硬化機能を与えて同時に耐熱性も向上させるという手法を用いることが多い [2]。

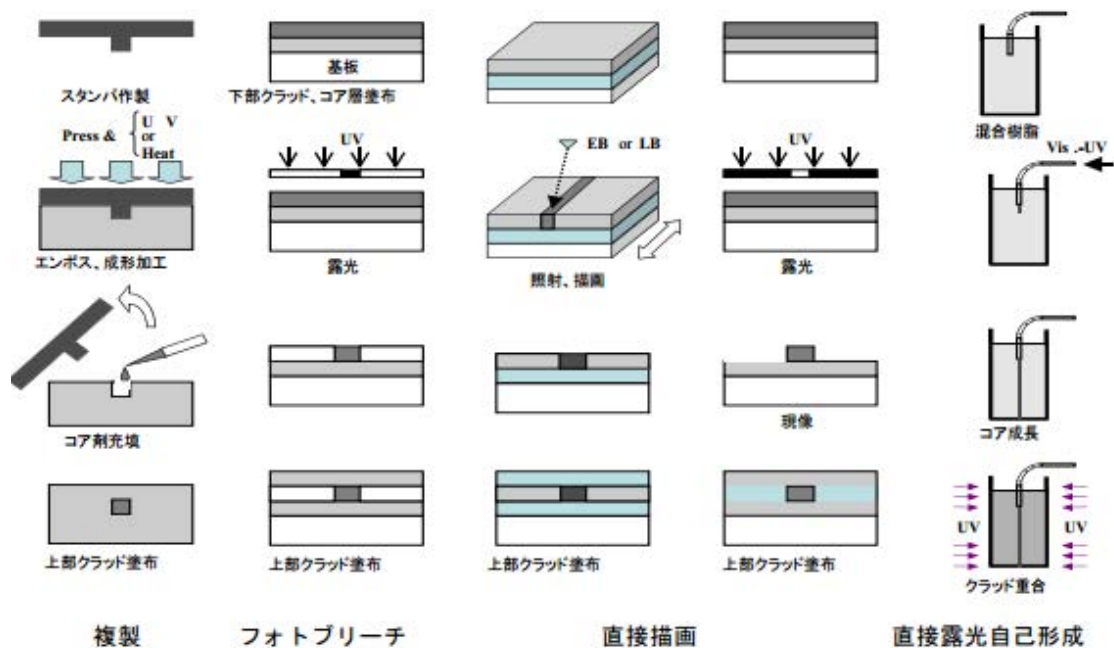


図 5-4 光導波路フィルムの代表的な作製方法[2]

5.4 PMT コネクタの寸法設計

5.4.1 PMT コネクタの接続損失発生要因

PMT コネクタの接続点における損失の発生原因は光導波路フィルムのコア部位置ずれである。PMT コネクタ起因で光導波路フィルムコア部の位置ずれが発生する要因として、PMT コネクタ本体凹形状開口部の幅長さと光導波路フィルム幅長さの違いにより発生するクリアランス、PMT コネクタ本体凹形状開口部の高ささと光導波路フィルムの厚さの違いにより発生するコア位置ずれ、ガイドピンとガイド孔のクリアランスによる位置ずれが考えられる。これらの模式図を図 5-5 に示す。

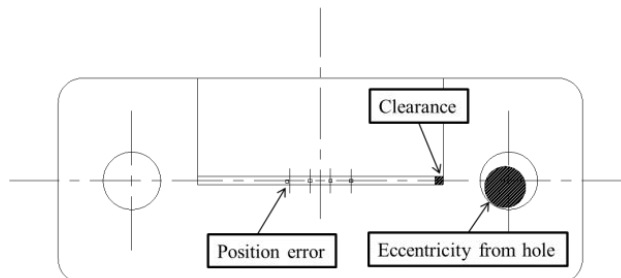


図 5-5 PMT コネクタの接続損失発生要因

また、PMT コネクタ本体凹形状部分の位置ずれが発生すると考えられる。PMT コネクタ本体の凹形状部分の位置ずれについては凹形状の湾曲、傾斜、ガイド孔中心を結ぶ線の垂直二等分線の交点を中心としたとき、その中心からの位置ずれが考えられる。凹形状の湾曲については PMT コネクタ成形時における応力の逃げにより成形品の変形によって凹部底面のみ発生する可能性がある。傾斜については金型のずれにより凹部底面、成形時における応力の逃げにより凹部側面で発生する可能性がある。凹部位置ずれについては金型のずれにより発生が考えられるため X 軸方向および Y 軸方向でずれが発生する。これらの模式図を図 5-6 に示す。

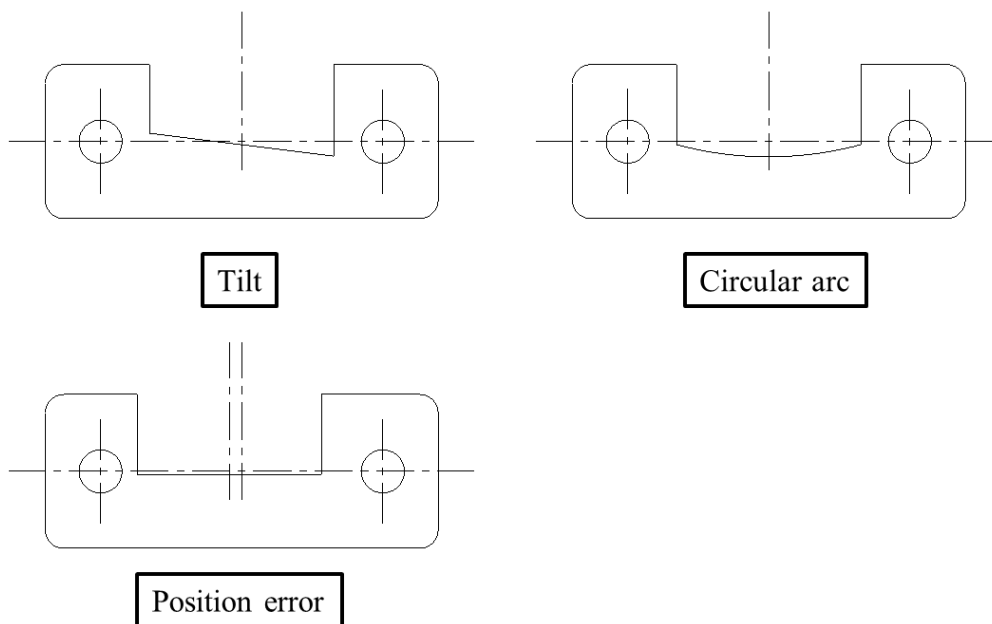


図 5-6 PMT コネクタの開口部形状

光ファイバ用の多心光コネクタである MT コネクタは、第 2 章で議論した通りあらかじめ成形によってファイバ孔が形成されており、そのファイバ孔へ光ファイバを挿入し接着固定することにより高精度な位置決めがされ、かつ、両ガイド孔を線で結び垂直二等分線を引いて出来る交点からのファイバ孔ピッチについても成形により安定した位置精度を得ることで低損失化を可能にしているのに対し、PMT コネクタは凹形状である開口部に矩形の光導波路フィルムを実装するため、光導波路フィルム自体の寸法精度も重要となってくる[12]。

例を挙げると、実装する光導波路フィルムの厚さが規定値よりばらつきがあったり、コアピッチがずれていたり、光導波路フィルムをダイシングソーで切り出す工程であるダイシングをする際に中心からずれて切られてしまったりすると、PMT コネクタの精度が要求値を満足する結果でも、実際に使用する際に組立後の要求寸法が維持できない可能性がある。よって、光導波路フィルムの仕上がり寸法精度も PMT コネクタと呼応するように高精度に作製できなければ、安定した接続の低損失化は難しいと考えられる。図 5-7 に光導波路フィルムによる損失発生原因を示す。

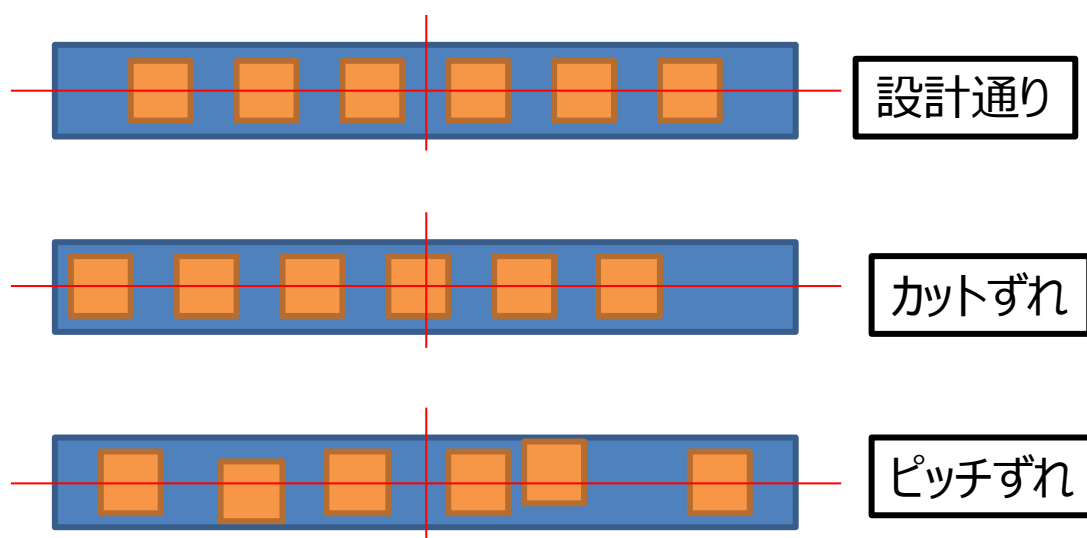


図 4-7 光導波路フィルムによる損失発生原因

5.4.2 PMT コネクタの開口部寸法設計

50/125 GI 型マルチモードファイバと $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ コアを有する光導波路フィルムを接続すると仮定して PMT コネクタの寸法設計を行う。

接続損失を MT コネクタと同等の性能を目標とし、最大 0.5 dB 以下と設定した。接続点での接続損失を $\text{MAX} \leq 0.5\ \text{dB}$ に設計するためには、光導波路フィルムのフィルム幅やフィルム厚さ、コアピッチ等の各種寸法が設計値通りで作製されていると仮定し、位置ずれ量を約 0.0050 mm 以下にする必要がある。よってコア位置ずれ量を 0.0025 mm 以下で設計することで、位置ずれ量を 0.0050 mm 以下にすることができる。ファイバ軸ずれと接続損失の関係を図 5-8 に示す[14]。横軸はファイバ軸ずれ量、縦軸は接続損失、プロットされた線は軸ずれ量における接続損失の推移である。算出方法は 4.3 項で述べた式を用いる。

その他の寸法は JPCA 規格(JPCA-PE03-01-07S)に準拠して作製した。

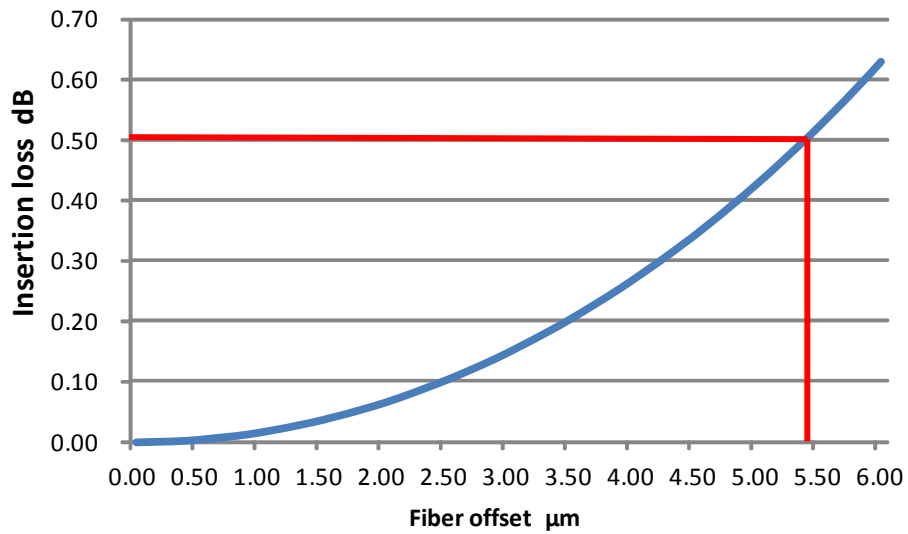


図 4-8 50/125 GI 型マルチモードファイバの接続損失

5.4.3 光導波路フィルムのコア形状による接続損失への影響

50/125 GI 型マルチモードファイバと接続する際に、光ファイバはコア形状が円形であるのに対し、光導波路フィルムのコア形状は矩形であるため、接続時に形状の違いによる損失が生じる。円形コアと矩形コアの接続損失がどの程度発生するか計算した結果を図 5-9 に示す。

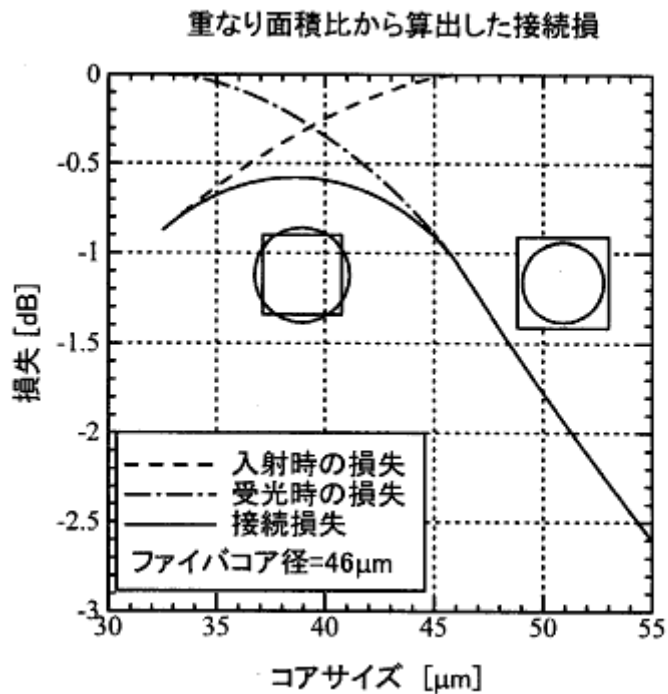


図 5-9 コア形状の違いによる接続損失計算結果[15]

この計算結果は円と四角（矩形）の重なる面積から計算した。位置ずれがない場合、光導波路フィルムのコアが 35~40 μm であれば接続損失は最も低く、0.6 dB になることがわかる。なお、50/125 GI 型マルチモードファイバのコア径は 46 μm として計算した[15]。

5.5 PMT コネクタの寸法精度確認

5.5.1 PMT コネクタの外形寸法

実際に生産された PMT コネクタおよび PMT コネクタ蓋の外形寸法について成形の安定性を確認するために、JISZ9015-1「計数値検査に対する抜取検査手順－第 1 部：ロットごとの検査に対する AQL 指標型抜取検査方式」に示す AQL1.0 特別検査水準 S-3 を参照とし、13 個ずつ測定した。測定はマイクロメータを使用して測定した。測定結果を図 5-10、図 5-11 および表 5-1、表 5-2 に示す。

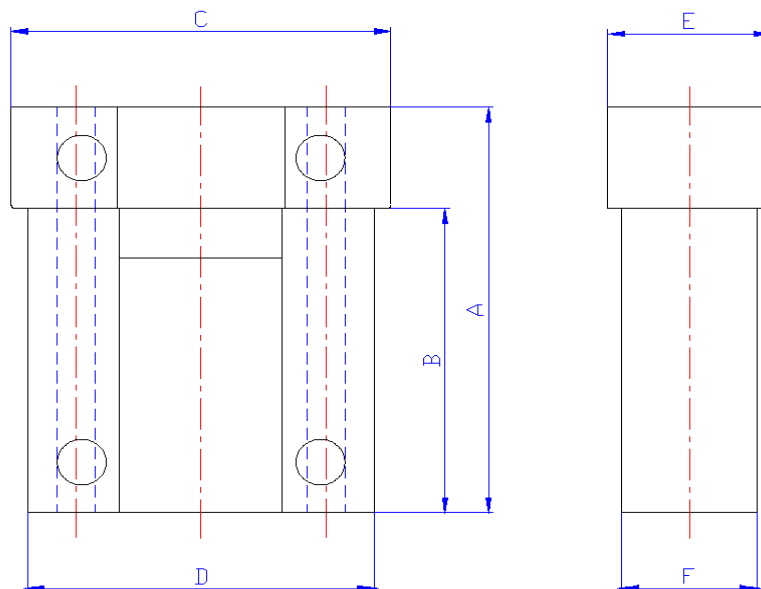


図 5-10 PMT コネクタ 外形寸法測定箇所

表 5-1 PMT コネクタ 外形寸法測定結果

単位:mm

寸法	A	B	C	D	E	F
		+0.1 8.00 0	+0.1 6.00 0	+0.1 7.00 -0.1	+0.1 6.40 -0.1	+0.1 3.00 -0.1	0 2.50 -0.1
AVG	8.07	6.09	6.98	6.38	3.00	2.45
MAX	8.08	6.10	6.98	6.38	3.01	2.45
MIN	8.06	6.08	6.97	6.38	3.00	2.45
σ	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

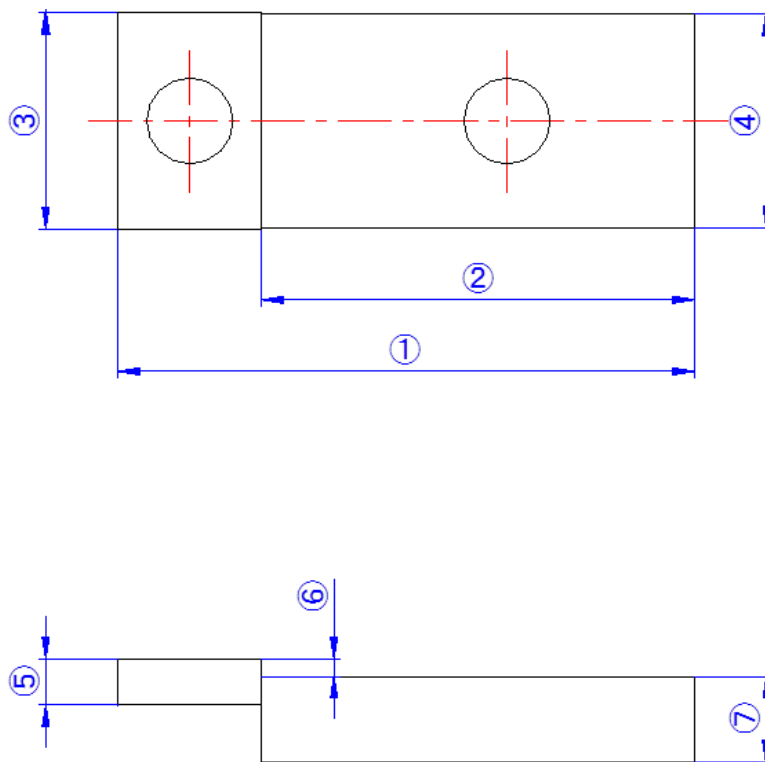


図 5-11 PMT コネクタ蓋 外形寸法測定箇所

表 5-2 PMT コネクタ蓋 外形寸法測定結果

単位:mm

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
寸法	+0.1	+0.1	+0.04	+0.005	0	0	0
	8.00	6.00	3.02	2.995	0.85	0.25	1.20
	0	0	0	-0.005	-0.05	-0.05	-0.05
AVG	8.04	6.03	3.03	2.992	0.64	0.22	1.18
MAX	8.05	6.04	3.04	2.993	0.64	0.22	1.18
MIN	8.04	6.03	3.03	2.991	0.64	0.22	1.18
σ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

PMT コネクタの外形寸法を測定した結果、規格値を満足していることを確認した。この規格値はMTコネクタと同寸法であることから、MTコネクタとの互換性を有した多心光コネクタであることを確認した。

5.5.2 PMT コネクタの開口部寸法測定結果

実際に生産された PMT コネクタ凹形状の開口部位置ずれ量を測定する。測定結果について図 5-13 および表 5-3 に示す。測定サンプルは 13 個/ロットとし、3.3.4 項で使用した自動 2 次元寸法測定機で測定した。測定箇所は 5.4.1 項で議論した接続損失発生原因を考慮し、開口部の傾き、湾曲およびセンター位置ずれを考慮し、開口部の左端、中央、右端の 3 点について位置ずれを測定した。測定方法を下記に示す。

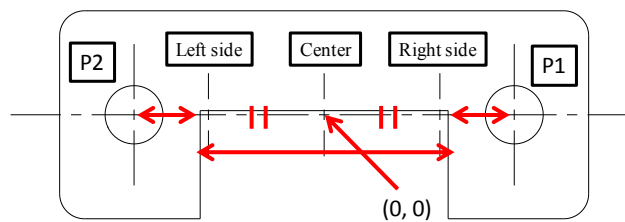


図 5-12 PMT コネクタ寸法測定箇所

- ①両ガイド孔(P1, P2)の中心位置を自動 2/3 次元寸法測定機で取得する。
- ②両ガイド孔の中心点を線で結び、垂直二等分線を引く。
- ③中心線と垂直二等分線の交点を座標(0, 0)とする。
- ④湾曲や傾斜があることを想定し、座標 (0, 0) からの X 軸および Y 軸ずれ量を、右側、中央、左側の 3 点について測定する。
- ⑤開口部幅寸法の測定、ガイド孔から開口部側面までの距離を測定し、光導波路フィルム組み込み時のコア位置ずれ量を算出する。

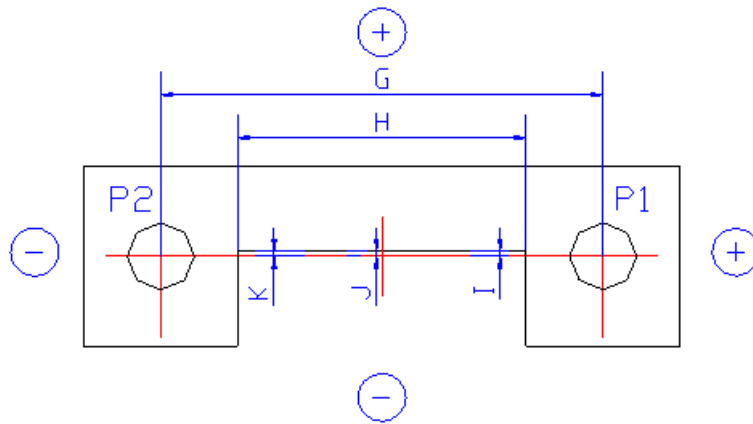


図 5-13 PMT コネクタ開口部 寸法測定箇所

表 5-3 PMT コネクタ開口部 寸法測定結果

単位 : mm

寸法	G	H	I	J	K
	+0.003	+0.01	+0.003		
	4.600	3.000	0.050		
	-0.003	0	-0.003		
AVG	4.5989	3.001	0.0490	0.0490	0.0482
MAX	4.5993	3.001	0.0497	0.0496	0.0488
MIN	4.5984	3.000	0.0484	0.0484	0.0478
σ	0.0003	0.000	0.0004	0.0003	0.0003

開口部寸法の位置ずれ量について図 5-14 および表 5-4 に示す。グラフの横軸は開口部位置ずれ量、縦軸は測定箇所における頻度、棒グラフは開口部位置ずれ量における頻度を示す。

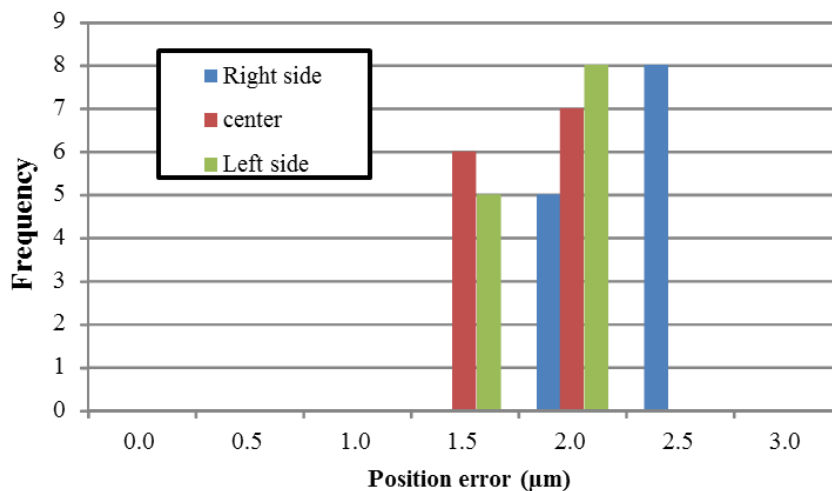


図 5-14 PMT コネクタ寸法測定結果

表 5-4 測定結果

	Right side	Center	Left side
AVG	2.10 μm	1.57 μm	1.55 μm
MAX	2.47 μm	1.99 μm	1.90 μm
MIN	1.70 μm	1.10 μm	1.10 μm
σ	0.26 μm	0.31 μm	0.27 μm

開口部寸法ずれを測定した結果、測定した凹部分全箇所において設計値からの位置ずれは 2.5 μm 以下となり、目標を満足する結果であった。PMT コネクタ開口部幅寸法については 3.000 mm-0/+0.010 mm の規格に対し平均で 3.001 mm と下限値であるが、これは次項に述べる光導波路フィルムの規格である 3.000 mm+0/-0.006 mm の上限値に合わせることで、PMT コネクタ開口部に光導波路フィルムをはめ込む際に発生するクリアランスを最大限に抑えるため、下限値に設定した。

5.6 PMT コネクタへの光導波路フィルム取り付け

PMT コネクタに実装する光導波路フィルムは、多心光コネクタである MT コネクタとの接続が前提となっているため、光ファイバリボンケーブルと接続可能であることが必須である。12 心の 50/125 GI 型マルチモードファイバとの接続で評価するため、光導波路フィルムのコア数を 12 心とし、コアピッチも MT コネクタと同様の 250 μm とした。Y 軸ずれも考慮し、両ガイド孔中心を結んだ線とコア位置が一致する必要があるため、光導波路フィルムの基準面からの高さを 50 μm とした。

使用する接着剤の熱膨張による光導波路フィルムへの影響を考慮し、本研究では2種類の接着剤を使用してPMTコネクタへ光導波路フィルムを取り付けた。本研究で使用した光導波路フィルムの仕様を表5-5に示す。今回使用した光導波路フィルムの要求寸法は加工可能限界寸法で設定したため、実際の規格より厳しい要求となっている。

表 5-5 光導波路フィルム仕様

寸法箇所	設定値
フィルム厚さ	0.100±0.005 mm
コア径	0.040±0.003 mm
フィルム幅	3.000+0/-0.006 mm
コアピッチ	0.250±0.003 mm
フィルム側面から隣接するコアの中心までの長さ	0.125±0.006 mm
コア高さ	0.050±0.003 mm

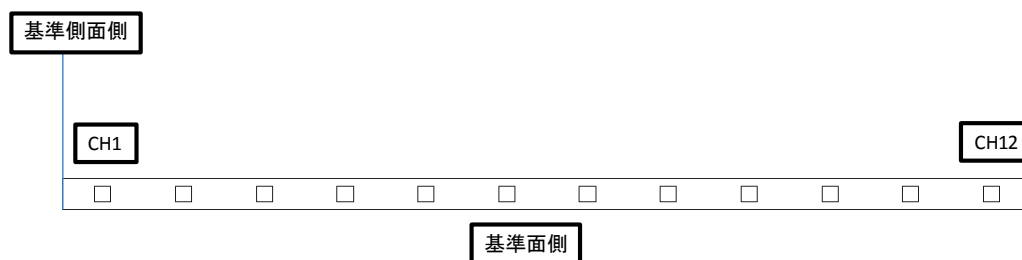


図 5-15 光導波路フィルム外観

具体的な組立方法は以下のとおりである。

- (1)光導波路フィルムに PMT コネクタ用ブーツを取り付け、PMT コネクタへ挿入する。

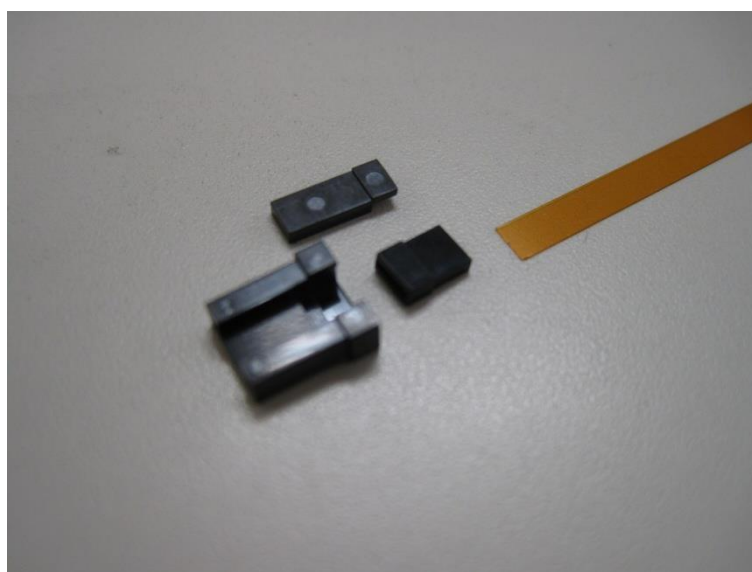


図 5-16 PMT コネクタ構成部品および光導波路フィルム

- (2) PMTコネクタに挿入された光導波路フィルム上へ接着剤を滴下し、PMTコネクタ蓋を載せる。Y軸の位置ずれ抑制を考慮し、PMTコネクタの開口部底面と光導波路フィルムの基準面には接着剤を塗布しない。



図 5-17 PMTコネクタ組立（蓋装着）

- (3) 接着時の蓋の浮き上がりを防止するために、PMTコネクタ蓋が取り付けられたPMTコネクタ取り付け光導波路フィルムを治具で固定する。固定時には光導波路フィルムにかかる押圧力によるフィルムへのダメージを考慮し、トルクドライバで荷重管理する。研磨後の光導波路フィルムとPMTコネクタの端面位置を揃えるために、治具固定時は光導波路フィルム端面をPMTコネクタから一定量突き出させる。

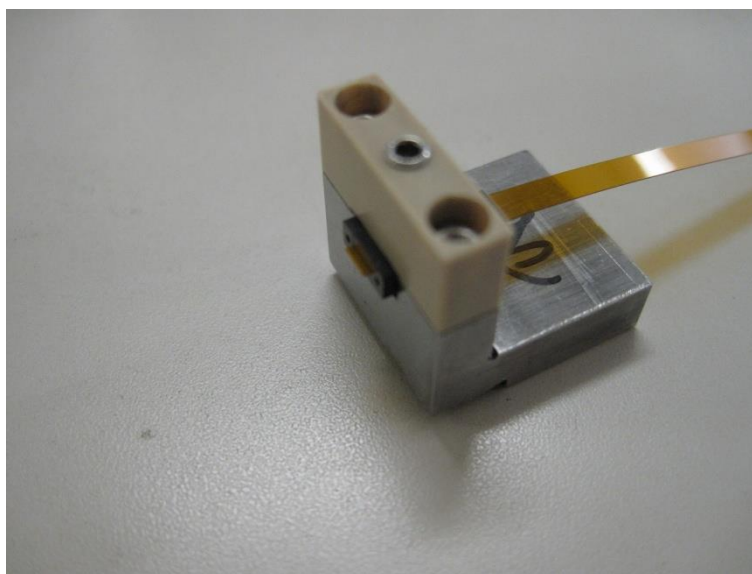


図 5-18 光導波路フィルム取り付け

- (4) 接着剤の硬化条件に合わせて、接着剤を硬化する。接着硬化後、PMT コネクタ組立品を治具から取り外す。

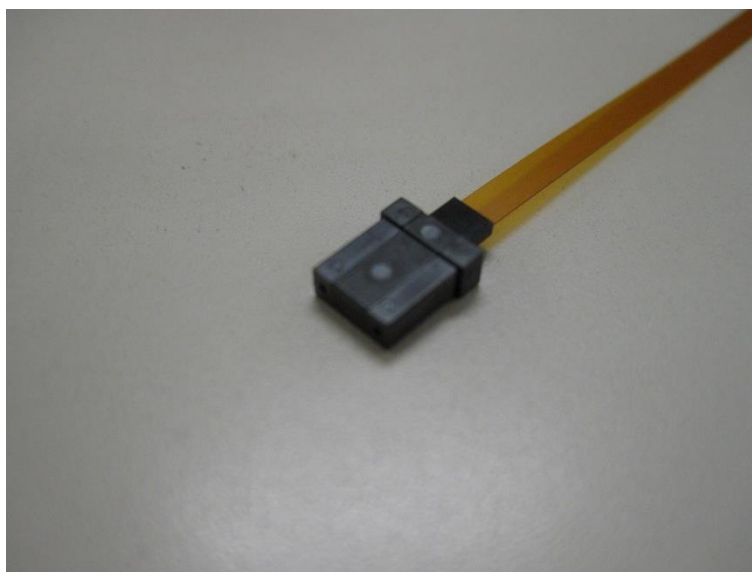


図 5-19 PMT コネクタ取り付け光導波路フィルム

- (5) 光導波路フィルムの端面と PMT コネクタの端面が同一面となるよう、PMT コネクタ端面の研磨を行う。

PMT コネクタ組立品の研磨後に端面の形状を測定した。測定には MT コネクタで使用する専用の形状測定機では測定ができないため、非接触形状測定機である Zygo New View 7300 を使用した。使用した測定機の外観を図 5-20 に示す。



図 5-20 Zygo New View 7300

代表的な PMT コネクタ組立品の端面形状測定結果を図 5-21 に示す。

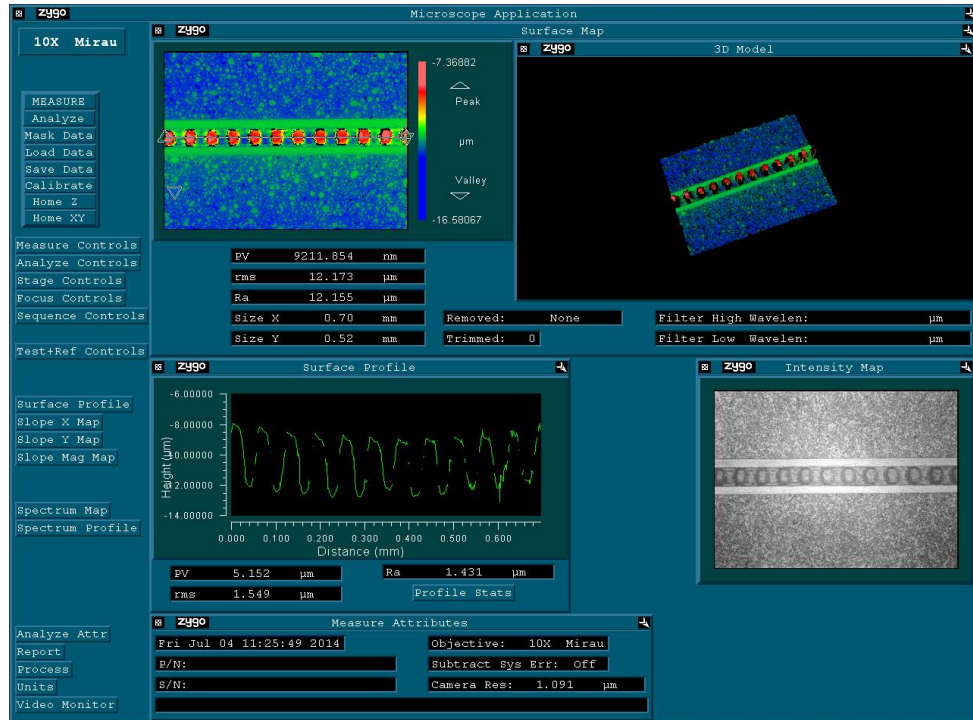


図 5-21 光導波路フィルム端面形状測定結果

端面形状を測定した結果、光導波路フィルムのクラッド部に対してコア部が 4 µm 程度凹んでいることを確認した。原因としては光導波路フィルムのコアとクラッドの材質の違いにより、研磨レートが異なったためと考えられる。

5.7 PMT コネクタ組立品寸法測定結果

5.7.1 PMT コネクタ取り付け光導波路フィルムのコア位置ずれ量およびコアサイズ測定結果

5.5 項で確認した PMT コネクタを光導波路フィルムに取り付けてコア位置ずれ量の測定を行った。測定サンプルは 2 種類の異なる接着剤を用いて PMT コネクタを両端に取り付けたコア数 12 心の光導波路フィルム各 5 本（5 本×2 種類の接着剤×2 端末/本=20 端末）について 3.3.4 項で使用した自動 2 次元寸法測定機で測定した。図 5-22 に PMT コネクタ取り付け光導波路フィルムコア位置測定の基準を示す。測定方法は以下の手順による。

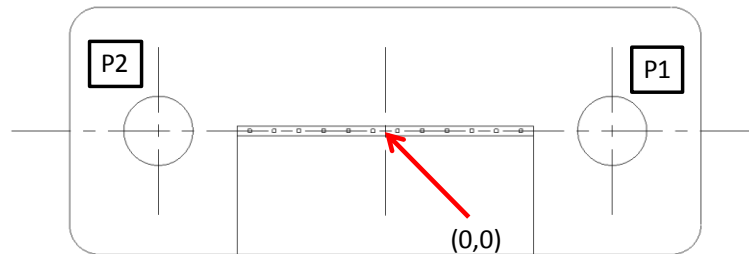


図 5-22 PMT コネクタ取り付け光導波路フィルムコア位置測定

- ①両ガイド孔(P1, P2)の中心位置を自動 2/3 次元寸法測定機で取得する。
- ②両ガイド孔の中心点を線で結び、垂直二等分線を引く。
- ③中心線と垂直二等分線の交点を座標(0, 0)とする。
- ④光導波路フィルムのコア部に白色光を均一に透過させて、座標(0, 0)からの各コア位置ずれを測定する。

図 5-23 に光導波路フィルムコア位置測定時の写真を示す。

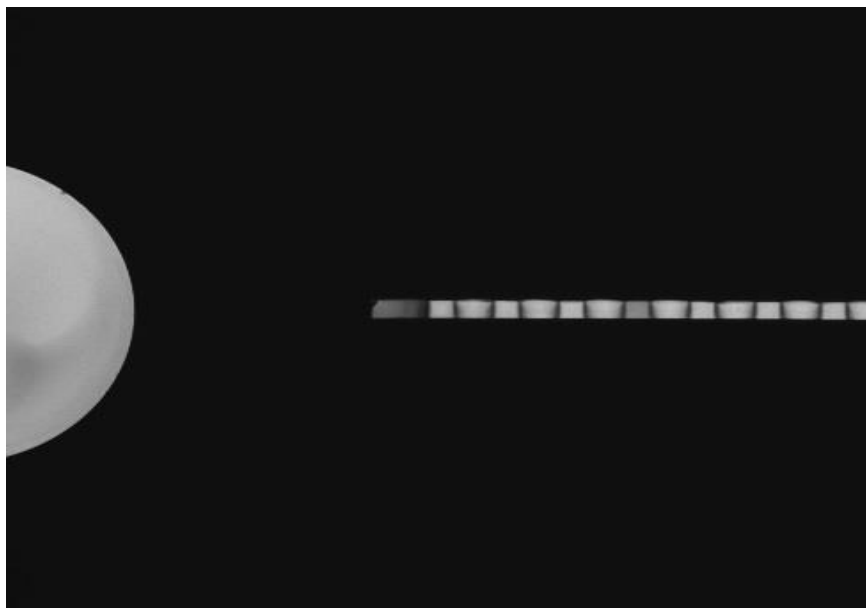
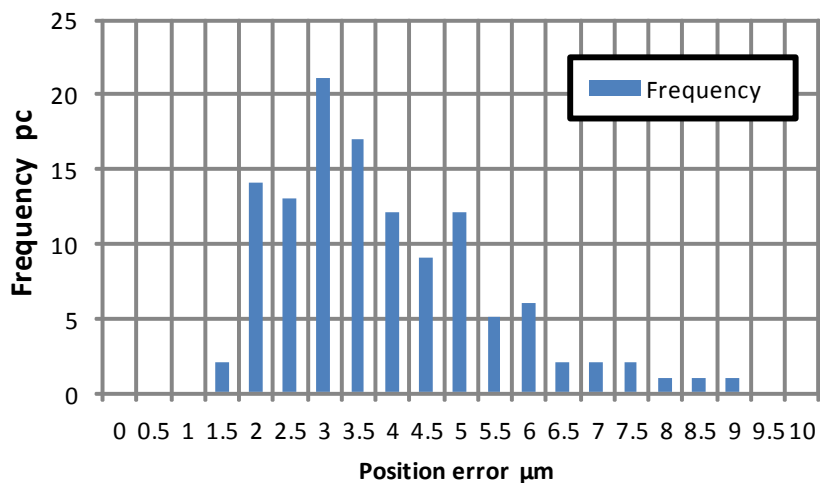


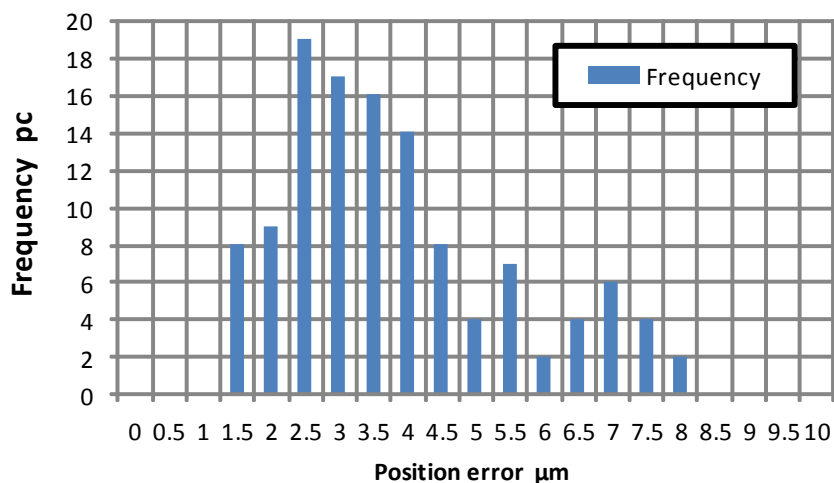
図 5-23 光導波路フィルム端面写真(透過照明時)

各種接着剤における光導波路フィルムのコア位置測定結果を図5-24から図5-25に示す。横軸が開口部位置ずれ量、縦軸が測定頻度、棒グラフが開口部位置ずれ量による頻度を示す。



接着剤 A	
AVG	3.64 μm
MAX	8.64 μm
MIN	1.23 μm
σ	1.53 μm

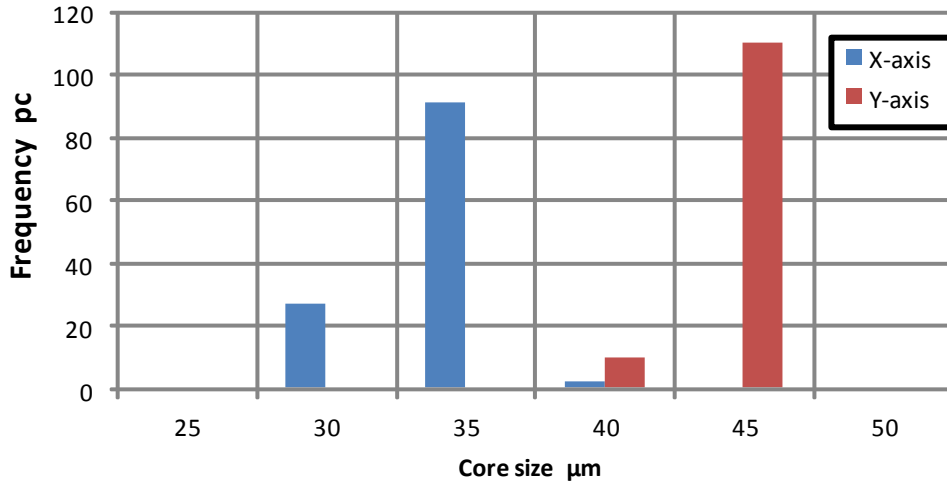
図 5-24 光導波路フィルムコア位置測定結果(接着剤 A)



接着剤 B	
AVG	3.57 μm
MAX	7.73 μm
MIN	1.09 μm
σ	1.66 μm

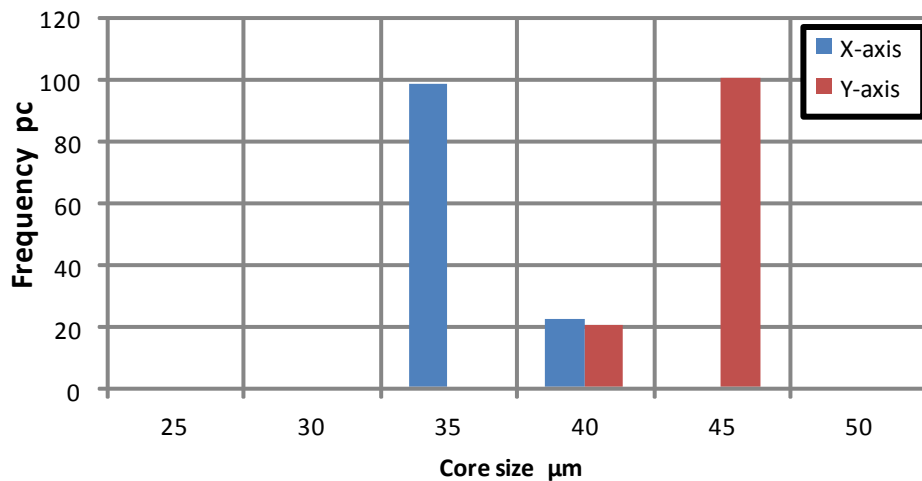
図 5-25 光導波路フィルムコア位置測定結果(接着剤 B)

図 5-26 および図 5-27 に各種接着剤におけるコアサイズ測定結果を示す。横軸がコアサイズ、縦軸が頻度、棒グラフが各コアにおけるコアサイズの頻度を示す。



接着剤 A	X 軸	Y 軸
AVG	31.53 μm	40.44 μm
MAX	35.51 μm	41.12 μm
MIN	28.71 μm	36.93 μm
σ	1.62 μm	0.51 μm

図 5-26 光導波路フィルムコアサイズ (接着剤 A)

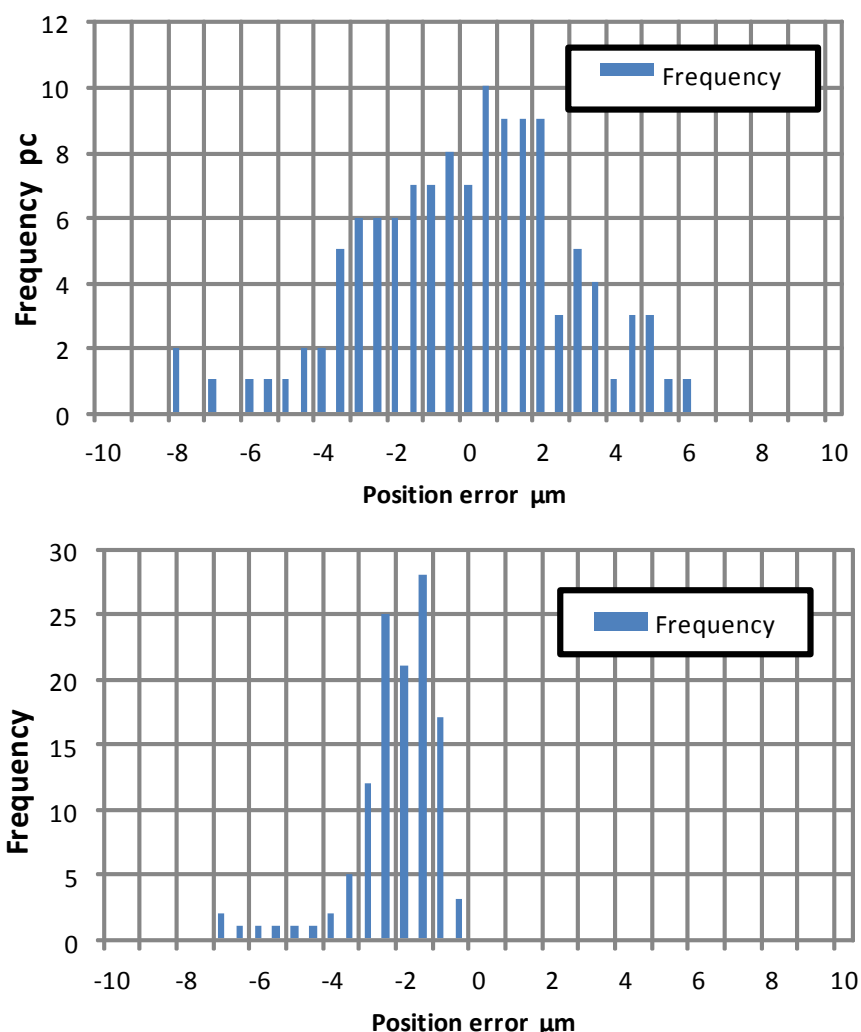


接着剤 B	X 軸	Y 軸
AVG	33.95 μm	40.47 μm
MAX	39.61 μm	41.57 μm
MIN	31.17 μm	39.54 μm
σ	1.46 μm	0.43 μm

図 5-27 屈折率整合フィルムコアサイズ (接着剤 B)

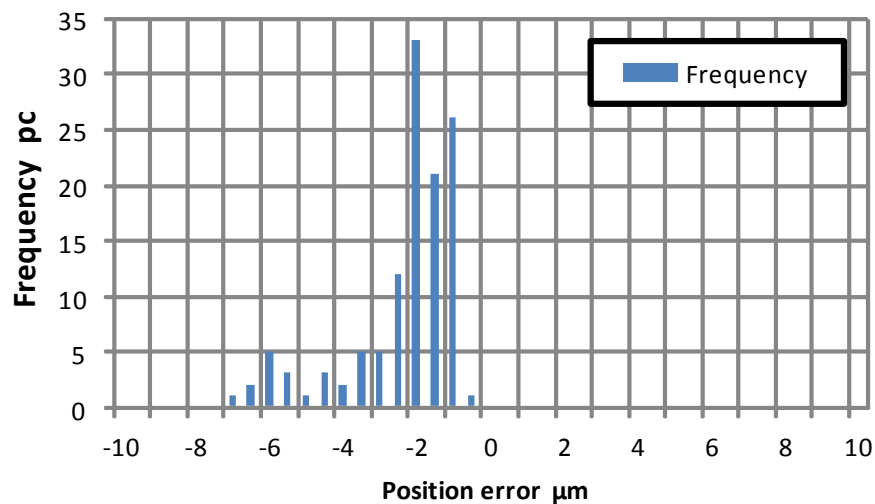
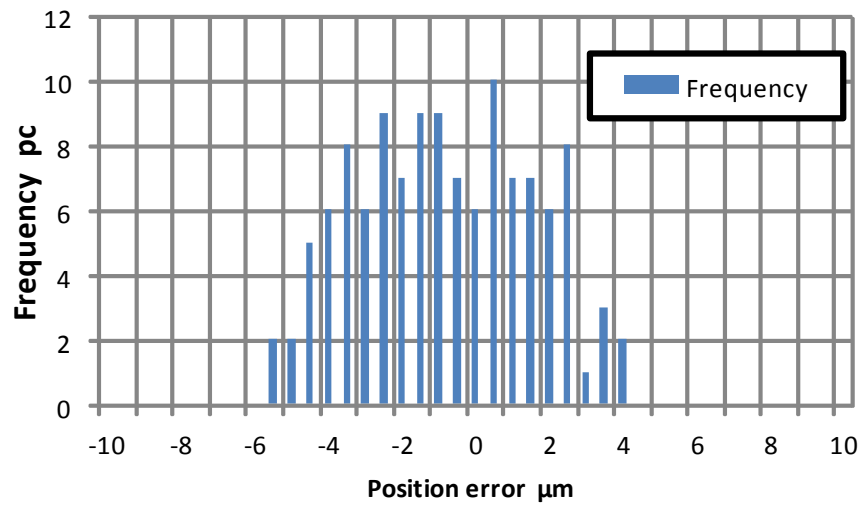
2種類の接着剤で組立した光導波路フィルムのコア位置ずれを測定した結果、接着剤 A では最大値 8.64 μm 、平均値が 3.64 μm 、接着剤 B では最大値 7.73 μm 、平均値が 3.57 μm となり、接着剤の違いによる差異は見られなかったが、設計値より大きいずれ量となった。原因としては、光導波路フィルム幅寸法のばらつきにより生じた PMT コネクタ開口部の幅寸法と光導波路フィルムのクリアランスによる X 軸ずれ、光導波路フィルムのコアピッチの累積ずれ、開口部基準面と光導波路フィルム間へ接着剤が入り込むことによる Y 軸ずれが考えられる。

PMT コネクタ組立品のコア位置ずれ量について、細かく分析する為に軸方向ごとでずれ量の分布をまとめた。図 5-28 および図 5-29 に各軸方向における位置ずれ分布を示す。



接着剤 A	X 軸ずれ	Y 軸ずれ
AVG	-0.38 μm	-2.44 μm
MAX	5.58 μm	-0.61 μm
MIN	-8.42 μm	-7.48 μm
σ	2.80 μm	1.19 μm

図 5-28 光導波路フィルムコア位置 軸方向別測定結果 (上 : X 軸ずれ 下 : Y 軸ずれ)



接着剤 B	X 軸ずれ	Y 軸ずれ
AVG	-1.08 μm	-2.58 μm
MAX	3.66 μm	-0.83 μm
MIN	-5.57 μm	-7.00 μm
σ	2.37 μm	1.47 μm

図 5-29 光導波路フィルムコア位置 軸方向別測定結果（上：X 軸ずれ 下：Y 軸ずれ）

各図の横軸は各軸における軸ずれ量、縦軸は頻度、棒グラフは軸ずれ量における頻度を示す。軸方向別に光導波路フィルムのコア位置ずれ量を分解すると、Y 軸方向のずれ量に対し、X 軸方向のずれ量が大きく、またばらつきも Y 軸に比べて約 2 倍程度大きいことが分かる。

Y 軸ずれ量については PMT コネクタへ光導波路フィルムを接着固定する際に、光導波路フィルムを上部から PMT コネクタ蓋でクランプし押圧力をかけて押さえるため、光導波路フィルムの厚さや PMT コネクタ開口部のガイド孔中心を結んだ線から基準面までの高さのばらつきが発生しても、光導波路フィルムが載る PMT コネクタの開口部底面と光導波路フィルム基準面がしっ

かりと位置決めされながら組み立てられるため、ばらつきが少なくなったと考えられる。PMT コネクタの開口部底面と光導波路フィルム基準面間に接着剤を塗布すると押圧力によっては接着剤が押し出されず、Y 軸方向の位置ずれが発生しやすいと考えられるため、精度良く組み立てるためには塗布しないほうが良いと考えられる。

X 軸方向の位置ずれについては Y 軸方向とは異なり、基準面が PMT コネクタ開口部と光導波路フィルムの側面となるため、PMT コネクタに関しては開口部の幅寸法および開口部位置ずれ、光導波路フィルムに関してはフィルムの幅寸法およびフィルム側面からの最寄りコアまでの距離、コアピッチずれに依存するため、位置ずれ量が各種部品の仕上がり精度に依存し、組立時の制御が難しい。

問題を解決するためには、PMT コネクタと光導波路フィルム双方の X 軸に起因する個所の精度向上やコアサイズ的设计変更、組立方法の改良などで X 軸ずれを軽減することで位置ずれの発生を抑制できると考えられる。

5.7.2 PMT コネクタ取り付け光導波路フィルムの光学特性測定結果

5.7.1 項で確認した PMT コネクタ取り付け光導波路フィルムを用いて、接続損失の測定を行った。接続はクリップ接続、光源は波長 850 nm の LED 光源を使用した。作製した両端 PMT コネクタ取り付け光導波路フィルム 10 本（20 端末）について、基準となる 12 心 MT コード（50/125GI-MMF）との接続 20 接続分および光導波路フィルムのランダム接続 80 接続分を行った。接続損失値は光導波路フィルム単体での伝送損失を実測値より引いた値とした。損失測定時は屈折率整合剤を光コネクタ端面へ塗布し、MT クリップにより接続した。使用した実験系を図 5-30 に示す。850 nm LED 光源からモードスクランブラー経由で定常モード励振し、光スイッチへ入力する。光スイッチの出力光を FO(Fan-Out)コードにより MPO-MT 基準コードと接続した。基準コードの出射光パワーを基準値(Ref)としてセンサで取得した後、光導波路フィルム PMT コネクタ取り付け品を基準コードと接続し、基準値との差異を接続損失として測定した。

MT コネクタを取り付けた 12 心 50/125 GI ファイバと PMT コネクタの接続損失測定結果を図 5-31 に示す。グラフの横軸は接続損失、縦軸は頻度、棒グラフは接続損失における頻度を示す。

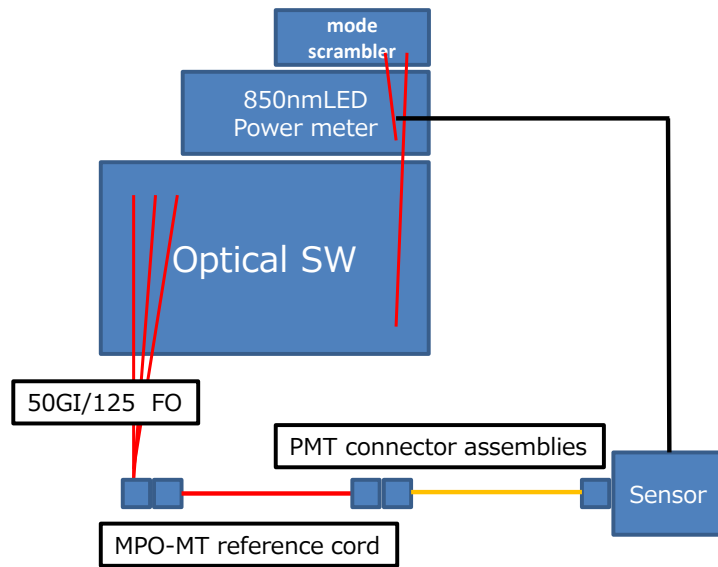
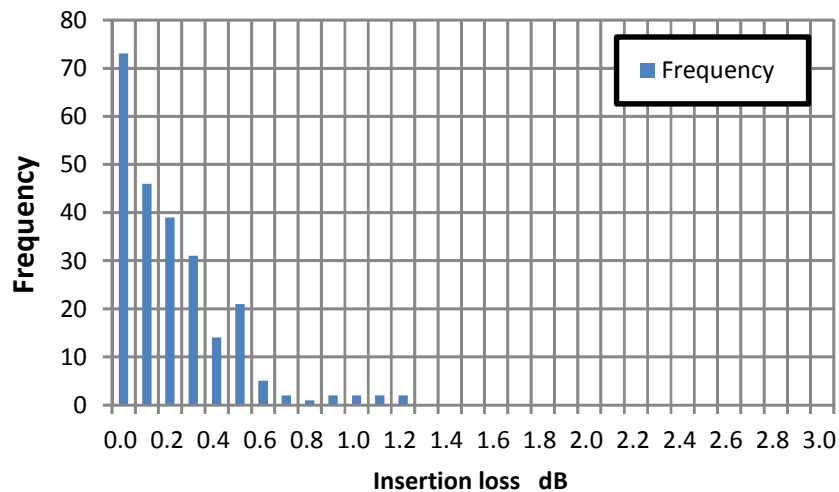


図 5-30 12MT-PMT コネクタ組立品 接続損失測定系



	12MT-PMT
AVG	0.157 dB
MAX	1.183 dB
MIN	-0.175 dB
σ	0.246 dB

図 5-31 12 心 MT コネクタコードと PMT コネクタの接続損失

次に、PMT コネクタ同士を接続する場合において、図 5-24 および図 5-25 の測定結果から計算した接続部のコア軸ずれ量の分布を図 5-32 に示す。目標値である 5 μm を超えた軸ずれが多くみられる。グラフは横軸が PMT コネクタ接続時における軸ずれ量、縦軸が頻度、棒グラフは軸ずれ量における頻度を示す。

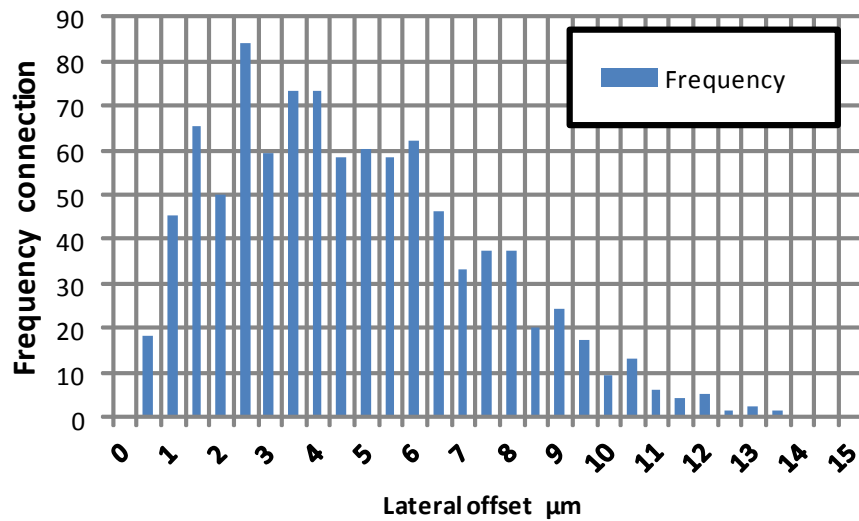


図 5-32 光導波路フィルム接続時の軸ずれ量

PMT コネクタ同士をランダム接続したときの接続損失測定結果を図 5-34 に示す。接続数は 40 接続分とし、PMT コネクタ蓋面上-PMT コネクタ蓋面上の状態で接続した。接続はクリップ接続、光源は波長 850 nm の LED 光源を使用した。実験系を図 5-33 に示す。光源にモードスクランブラーを接続して定常モード励振し、光スイッチへ入力する。光スイッチの出力光を FO(Fan-Out)コードを仲介して光導波路フィルム PMT コネクタ取り付け品と接続した。PMT コネクタからの出射光を基準値(Ref)としてセンサで取得した後、光導波路フィルム PMT コネクタ取り付け品を基準コードと接続して基準値との差異を接続損失として測定した。

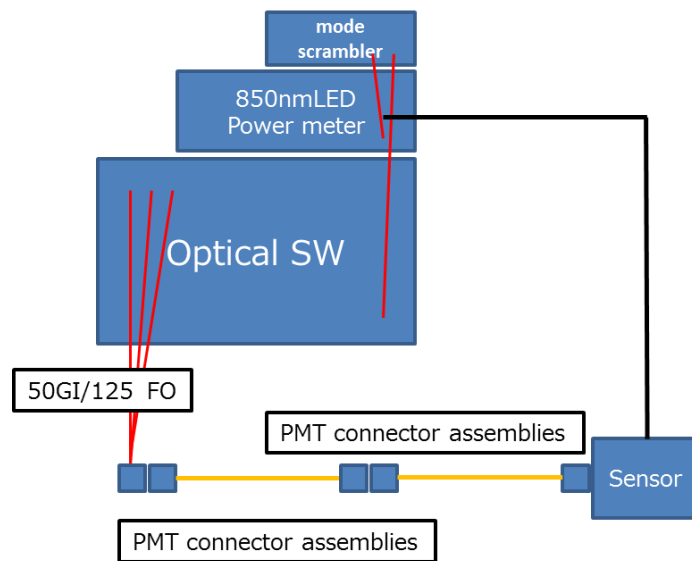
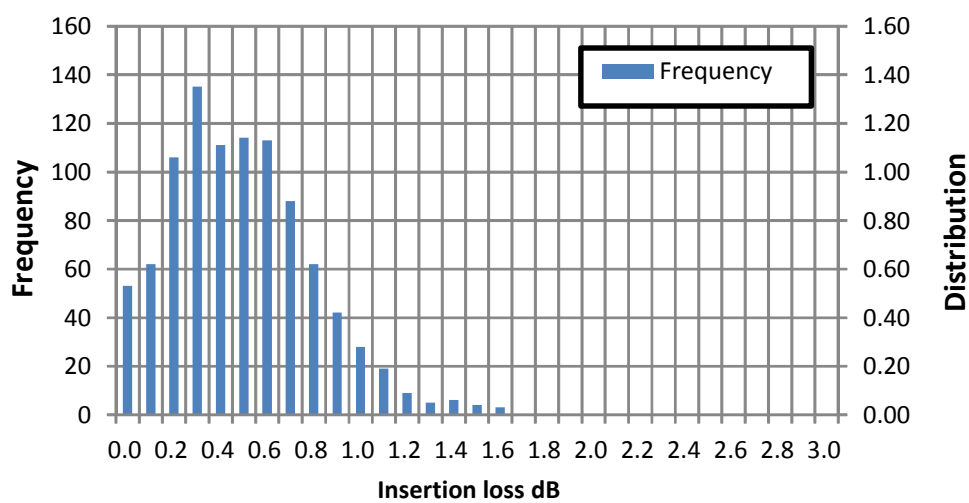


図 5-33 光導波路フィルム-光導波路フィルム 接続損失測定系



	PMT-PMT
AVG	0.438 dB
MAX	1.549 dB
MIN	-0.286 dB
σ	0.311 dB

図 5-34 光導波路フィルムランダム接続時の接続損失

グラフは横軸が接続損失、縦軸が頻度、棒グラフが接続損失における頻度を示す。PMT コネクタ同士を接続した状態を図 5-35 に示す。

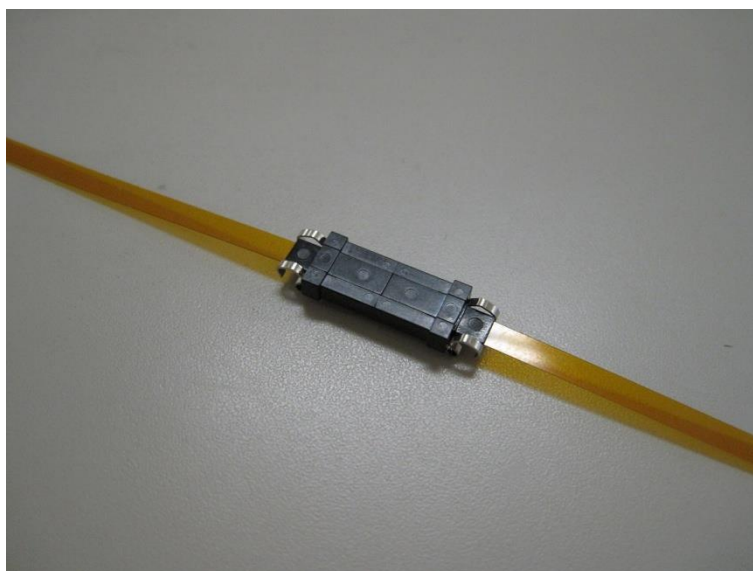


図 5-35 PMT コネクタ組立品同士の接続

PMT コネクタ組立品同士の接続損失を確認したところ、平均で 0.438 dB、最大で 1.549 dB という結果が得られた。PMT コネクタ同士の接続の場合、矩形のコア同士の接続となる。光のパワーが光導波路フィルムのコアへ一様に分布すると仮定し、本研究で利用した光導波路フィルム組立品のコアサイズ平均値から軸ずれによる接続損失の推移を算出した。図 5-36 に算出した結果を示す。

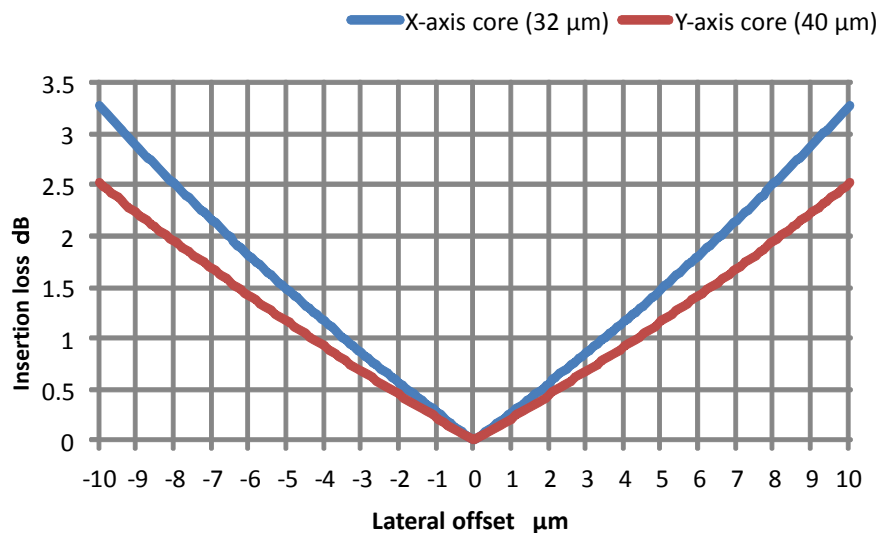


図 5-36 光導波路フィルム同士の接続による接続損失の推移

この計算結果は四角と四角（矩形）の重なる面積から計算した。この算出結果と実測値を比較すると、最大で 13.35 μm のずれ量が発生していて接続損失の最大が 1.549 dB であるため、計算結果のほうが実測値より接続損失が大きい結果となった。これは、図 5-33 に示す実験系での測定のため、光源から被測定サンプルまでの接続途中に 50/125GI 型マルチモードファイバが存在するため、パワー分布がグレーテッドインデックス型になっており一様分布ではない。また、光ファイバの NA についても考慮していないため算出された接続損失が実測値より大きくなっていると推察される。

5.8 結論

本章では光導波路フィルム用多心コネクタである PMT コネクタについて検討した。

はじめに PMT コネクタの構造や特徴について述べ、PMT コネクタ接続時における接続損失要因について、PMT コネクタの形状や第 2 章、第 3 章で実証した内容から考察し、発生原因を明確にした。

実際に作製された PMT コネクタの外形寸法を確認し、MT コネクタと全長寸法や接続部分の寸法が同一形状であることから互換性を有することを確認した。

接続損失発生要因を考慮し PMT コネクタの寸法精度を理論計算式から導き出し、PMT コネクタの開口部寸法について目標設計値を策定した。次に設計値を反映させて生産した PMT コネクタの仕上がり寸法について検証した。PMT コネクタ開口部の位置ずれは測定サンプル 13 個で、光導波路フィルムが設計値通りに作製されていると仮定した場合、最大ずれ量が 2.47 μm となり、目標値である最大 2.5 μm 以下での安定した生産が可能であることを確認した。

次に実際に PMT コネクタへ光導波路フィルムを取り付けた。使用した光導波路フィルムの寸法は現時点での加工可能限界寸法で寸法値を設定した。光導波路フィルムの組立方法を考察し、PMT コネクタへの適切な取り付け方法を明らかにした。接着剤の影響による光導波路フィルムの変形も考慮し、2 種類の接着剤を使用して検証を行った。今回使用した光導波路フィルムは組立後の端面形状について非接触形状測定機を使用して測定し、コア部が他の部分より凹む性質があることを見出した。

組み立てられた光導波路フィルムのコア位置測定およびコアサイズの測定をサンプル数 20 端末分実施した。光導波路フィルムのコア位置については接着剤による差異は見られなかったが、最大で 8.64 μm 、平均で 3.60 μm となり、大幅な位置ずれが発生した。この原因は、組立後の X 軸ずればらつきによるものであることを確認した。Y 軸方向については指定寸法内で作製されていれば本組立方法で制御可能であることを実証した。X 軸については各種部品の精度によるところの影響が大きく、組立後の精度を確保するためには、X 軸に起因する部分の精度向上が PMT コネクタおよび光導波路フィルム双方で必要となることを明確にした。

組立品の光学特性評価として 50/125GI 型マルチモードファイバとの接続と、PMT コネクタ同士の接続について評価した。50/125GI 型マルチモードファイバとの接続損失では光導波路フィルムの透過損失を引いた値で、最大値が 1.183 dB、平均値が 0.157 dB、PMT コネクタ同士の接続では、最大値が 1.549 dB、平均値が 0.438 dB と目標値である 0.5 dB を満足することができなかったが、接続損失とその原因について明らかにした。要求する光学特性を満足するためには光導波路フィルムおよび PMT コネクタの X 軸精度に起因するフィルム幅や開口部位置ずれ量を向上・規定することやコアサイズの変更、組立方法の改良により、安定した性能を有するコネクタが設計可能であることを明らかにした。

参考文献

- [1] 塩田 剛, “光導波路 フィルム技術と光電気配線板への応用”, エレクトロニクス実装学会誌、Vol.5, No.5, PP444-448, 2002
- [2] 財団法人機械システム振興協会, 財団法人光産業技術振興協会, “光配線・接続システムに関する調査研究報告書”, システム技術開発調査研究, 22-R-3, PP-1-61, March, 2011
- [3] M. Hikita, S. Tomaru, K. Enbutsu, N. Ooba, R. Yoshimura, M. Usui, T. Yoshida, and S. Imamura, “Polymeric Optical waveguide films short-distance optical inter connects”, IEEE J. Select. Topics Quantum, Electron, Vol. 5, pp. 1237-1242, 1999
- [4] M. Usui, M. Hikita, R. Yoshimura, S. Tomaru, S. Imamura, K. Katsura, and Y. Ando, “Basic evaluation of polymeric optical waveguide films applied to optical inter connections”, OEOCE Trans. Electron., Vol.E81-C, No. 7, pp.1027-1033, 1998
- [5] S. Tomaru, K. Enbutsu, M. Hikita, M. Amano, S. Tohno and S. Imamura, “Polymeric optical waveguide with high thermal stability and its application for optical interconnection”, Optical Fiber Conference and the International Conference on Integrated Optic and optical Fiber Communication (OFC '99/ IOOC), WM28, San Diego, 1999
- [6] K. Hara, Y. Ishikawa, Y. Shoji, “Preparation and properties of novel silicone-based flexible optical waveguide”, Proc. SPIE, 6376, 63760k, 2006
- [7] F. Ashiya, T. Satake, and S. Nagasawa, “Development of multifiber connector and their Applications”, E-FOC '87, pp. 304-308, 1987
- [8] S. Nagasawa, Y. Yokoyama, F. Ashiya, and T. Satake, “ A High-Performance Single-mode Multifiber Connector Using Oblique and Direct Endface Contact Between Multiple Fiber Arranged in a Plastic Ferrule”, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 3, No. 10, pp. 937-939, 1991
- [9] N. Matsumoto, and S. Nagasawa, “Study on Reference Multifiber Connector”, in Nat. Conv. Rec. IEICE, JAPAN, paper B-1034, 1985
- [10] 疋田 真, 畠山 豊, 工藤 あや子, 高原 秀行, “ポリマ導波路用 PMT コネクタ”, 信学技報, EMD2007-105, pp29-33, 2007
- [11] Y. Ishikawa, K. Hara, T. Iwashima, S. Saito, “Properties and reliabilities of Nobel Silicone-Based Film Optical Waveguide Carrying PMT Connector”, Proc. JIEP 17B-2, 2007 (in Japanese)

- [12] 竹崎 元人, 長瀬 亮, “PMT (Polymer waveguides connected with MT connector)コネクタの特性”, 電子情報通信学会信学技報 Vol.114 No.187 , 電子情報通信学会信学技報 Vol.114 No.186 , 電子情報通信学会信学技報 Vol.114 No.185 , 電子情報通信学会信学技報 Vol.114 No.184 , 電子情報通信学会信学技報 Vol.114 No.183, LQE2014-58 , OPE2014-84 , CPM2014-74, EMD2014-59, R2014-54, pp159-162, 2014
- [13] M.Takezaki, R.Nagase, “Design for PMT Connector (Polymer waveguides connected with MT connector)”, ICSJ2014, Nov, 2014
- [14] D. Gloge, "Offset and Tilt Loss in Optical Fiber Splices," Bell Syst. Tech. J. 55, 905 (1976)
- [15] 川上 直美, 畠山 豊, 疋田 真, 高原 秀行, “フィルム導波路への PMT コネクタ実装”, 信学技報, R2010-6, CPM2010-6, OPE2010-6 (2010-4) , PP29-34, 2010
- [16] 竹崎 元人, 長瀬 亮, “多心シングルモード光コネクタの量産時における光学特性と寸法精度の関係”, 電子情報通信学会論文誌 C vol.J97-C No.6, pp258-263, Jun, 2014

本研究の内容は以下の論文に掲載されている。

- [1] M.Takezaki, R.Nagase, “Design for PMT Connector (Polymer waveguides connected with MT connector)”, IEEE CPMT Symposium Japan 2014, 15-3, Nov, 2014

第6章 総括

本論文では MT コネクタを基盤とした多心光コネクタの接続損失発生要因を明らかにするとともに、以下に示す 3 つの適用領域に最適な接続形態を開発し、実験により実証した。

第 2 章では多心光コネクタである MT コネクタを用いて、その構造から接続損失発生要因を考察した。接続損失発生要因を考慮した多心光コネクタを安定して量産するために成形条件および成形環境の再検討を行った。成形機使用部品や金型部品の材質変更、成形材料の最適化を行ったことにより、従来は継続成形の限界が 50,000 ショットであったのに対し、300,000 ショットまで継続可能となり、高精度な状態で安定して量産が実現可能であることを明らかにした。

第 3 章では多心光コネクタをシングルモードファイバに適用する場合でも、単心系光コネクタに匹敵する損失分布を得るため、多心光コネクタの量産時における寸法精度と光学特性の関係について研究し、 $99.41 \% \leq 0.35 \text{ dB}$ 以下を目標として、新たに設計した低損失シングルモード用 MT コネクタを量産し、その寸法特性、光学特性および信頼性について検証した。50,000 心を超える低損失シングルモード用 MT コネクタの接続損失データから寸法設計値に対する光学特性評価を行い、目標値である $99.41 \% \leq 0.35 \text{ dB}$ を満足する結果を得るとともに、モンテカルロシミュレーションを行い、実測値とシミュレーション計算値に良い一致が見られたため、設計値と実測値の相関が取れていることを確認した。また Telcordia GR-1435-CORE を参照し、耐環境性および耐久性について検証を行った結果、試験前後での劣化や破損は見られず十分な性能を有していることを実証した。よって、本章で検証した低損失シングルモード用 MT コネクタの設計値を用いることにより、これまで単心系光コネクタでしか実現できなかった IEC61755-1 Grade B の性能を有した低損失シングルモード用 MT コネクタを量産時でも安定した生産が可能であることを示した。

第 4 章では光配線板での多心一括接続を容易にするため、多心光コネクタ端面の研磨が必要なく、簡易な組み立てが可能であり、かつ MT コネクタとの互換性を有する 50/125 GI 型マルチモードファイバを使用した MTP/MTPIPE コネクタの開発を行った。50/125 GI 型マルチモードファイバにおける接続損失理論式から接続損失目標設計値を $\text{MAX} \leq 1.0 \text{ dB}$ と設定した。機器内での使用を考慮し、研磨を要しない組立て方法を新たに提案するとともに、必要となる屈折率整合剤として屈折率整合フィルムの検討を行った上、量産ラインにより MTP/MTPIPE を開発した。

寸法についてはコア偏心量の目標値である最大 $2.5 \mu\text{m}$ 以下を満足し、光学特性については、1 接続あたり 2 か所の接続点を含むものの、最大で 0.42 dB が得られ、目標の 1.0 dB より良好な性能を有していることを確認した。信頼性については Telcordia

GR-1435-CORE を参照して環境試験およびコネクタの耐久力確認試験として着脱試験を実施した結果、試験前後で光学特性の変動が見られず、また MTPIPE の接着部分の剥離も見られなかったことから、十分な強度と性能を兼ね備えた多心光コネクタを開発したことにより、組立時に研磨が不要である新たな構造により装置内での多心一括接続を実現し、実用に供せられることを明らかにした。

第 5 章では PMT コネクタにおける接続損失発生要因を明確にして、実際に生産された PMT コネクタと光導波路フィルムを組立・寸法特性を評価した。

PMT コネクタの構造を解析し接続損失発生要因について明確にした上、50/125GI 型マルチモードファイバとの接続を考慮して寸法設計を行った。設計に基づき量産ラインで製造した PMT コネクタの寸法評価を行い、目標値である開口部寸法ずれ量 $2.5 \mu\text{m}$ 以下を満足し、十分な精度で量産できることを確認した。次にこの PMT コネクタを使用して実際に光導波路フィルムを取り付け、コア位置寸法測定を実施したところ、目標値であるコア位置ずれ量 $2.5 \mu\text{m}$ 以下を満足する結果が得られず、合わせて光学特性である接続損失も目標値である 0.5 dB 以下を満足する結果が得られなかったが、取得したデータからコア位置ずれが発生する原因について解析した結果、PMT コネクタ組み込み時における光導波路フィルムの X 軸ずれが大きく起因していることを明らかにした。よって、PMT コネクタおよび光導波路フィルム双方から接続損失とその原因を明らかにした。

以上により、多心光コネクタの設計として接続損失発生要因を明らかにし、量産時における低損失シングルモード用 MT コネクタによりその妥当性について実証した。また、多心光コネクタの高機能化として 50/125 GI 型マルチモードファイバの装置内無研磨接続およびボード上光導波路フィルム接続に関し、MT コネクタを基盤とした多心光コネクタの開発及び検討を行い、接続損失とその原因について明らかにし、様々な適用領域における多心光コネクタの設計手法を実証した。

昨今では様々な用途で使用される特殊な形状をした多心光コネクタについて研究開発が活発に行われている。今後の多心光コネクタの研究開発には世の中の技術動向を注視し、斬新なアイデアで設計する必要がある。

発表論文リスト

論文

- (1) 竹崎 元人, 長瀬 亮, “多心シングルモード光コネクタの量産時における光学特性と寸法精度の関係”, 電子情報通信学会論文誌 C vol.J97-C No.6, pp258-263, Jun, 2014
- (2) M.Takezaki, R.Nagase, “A Novel MT Ferrule with Pre-Installed Pre-polished End Fibers (MTPIPE) for Multimode Fibers”, 電子情報通信学会英文論文誌 C vol.E97-C No.9,pp894-899,2014
- (3) M.Takezaki, R.Nagase, “Design for PMT Connector (Polymer waveguides connected with MT connector)”, IEEE CPMT Symposium Japan 2014, 15-3, Nov, 2014

口頭発表

- (1) 竹崎 元人, 石田 雅士, 岩本 政明, 杉田 悦治, 増田 宏, 茨木 修, “MTPIPE 技術の検討,” 電子情報通信学会 2005 年ソサイエティ大会講演論文集, B-10-1, 2005
- (2) 竹崎 元人, 石田 雅士, 岩本 政明, 杉田 悦治, 増田 宏, 茨木 修, “MTPIPE 強度改善の検討,”電子情報通信学会 2006 年ソサイエティ大会講演論文集, C-3-30, 2006
- (3) 竹崎 元人, 石田 雅士, 岩本 政明, 杉田 悦治, 古江 友樹, 橋本 展宏, 助川 健, “MTPIPE の接続安定性向上検討,”電子情報通信学会 2007 年ソサイエティ大会講演論文集, C-3-39, 2007
- (4) M.Takezaki, R.Nagase, “Relational Analysis on Optical Characteristics and Accuracy of Mass-Produced Multifiber Connectors”, 電子情報通信学会信学技報 Vol.112 No.332, EMD2012-80, pp91-94, 2012
- (5) 竹崎 元人, 長瀬 亮, ”MTPIPE 技術の検討”, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.113 No.186, EMD2013-44 , pp51-55, 2013
- (6) 竹崎 元人, 長瀬 亮, “PMT (Polymer waveguides connected with MT connector)コネクタの特性”, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.114 No.183, EMD2014-59, pp159-162, 2014

特許

- (1) 特許公開 2012-247732, 「光導波路用フェルルール及び光導波路用コネクタ」, 小林、岩本、稲川、竹崎
- (2) 特許公開 2008-151931, 「光コネクタ用フェルルール、光コネクタおよび光コネクタの製造方法」, 杉田、岩本、石田、金戸、竹崎、古江、鈴木、助川

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、一方ならぬご指導とご援助を頂きましたことを厚く感謝いたします。また、本論文をまとめるにあたりご指導、ご鞭撻を頂きました千葉工業大学大学院工学研究科武石洋征教授、梅村茂教授、坂本幸弘教授、徳永剛准教授に深く感謝いたします。

本研究は株式会社白山製作所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。本研究を進めるにあたり長瀬研究室の皆様をはじめ、多数の関係者の方々からご指導、ご配慮を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。また、MTPPIPE については NEDO 様の御支援を受け、独立行政法人産業技術総合研究所様のご協力を頂いています。厚く感謝いたします。

本研究を進め、まとめるにあたりご指導、ご鞭撻を頂きました株式会社白山製作所顧問杉田悦治氏、元監査役稲垣伸夫氏、光・機構開発開発部中山弘明氏、光営業部岩本政明氏、光・機構開発部稲川康二氏、成形技術グループ小林護章氏、光成形製造グループ石田雅士氏に厚く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、数多くの実験に協力していただいた株式会社白山製作所元蓄熱技術開発グループ新谷久雄氏、光成形製造グループ山崎雄貴氏、光成形製造グループ伊藤将氏、成形技術グループ吉越靖明氏、社長室岡本智行氏に厚く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、各種物品の試作にご協力いただいた株式会社巴川製紙所鈴木正義様、住友ベークライト株式会社藤原誠様に厚く感謝いたします。

最後に本論文をまとめるにあたり、常に協力と激励を惜しなかつた妻妙子に深く感謝します。