

シングルモード光ファイバ用光コネクタの特性及び製造に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2012-01-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 高橋, 光雄 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.11501/3132506

電子科学研究科高

GD

K

0002513836

R

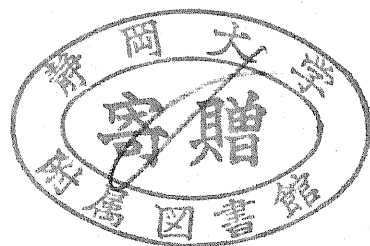
135

静岡大学附属図書館

静岡大学 博士論文

シングルモード光ファイバ用光コネクタの 特性及び製造に関する研究

静岡大学図書



1997年11月

静岡大学大学院電子科学研究科
電子応用工学専攻

高橋 光雄

概 要

本論文は、光ファイバ通信システムにおいて使用される、シングルモード光ファイバ用斜め球面研磨光コネクタ(A P Cコネクタ(Angled-physical-contact optical connector))に関する研究成果をとりまとめたものである。本研究のA P Cコネクタは、光コネクタの接続端面からの反射戻り光を極限にまで低減するために、光コネクタ・フェルールの接続端面を光ファイバ光軸の直角面に対して8度以上の傾斜球面に成形研磨して構成したものである。

本論文は、A P C光コネクタの生産に必要な、光ファイバ端面の斜め球面研磨装置に関する研究、及びA P C光コネクタの挿入損失特性の改善に関する研究の二つの主題により構成した。

光ファイバ端面の斜め球面研磨装置に関する研究に関しては、最初に、公転と自転の複合円軌跡運動をする弾性研磨盤に、固定保持した光ファイバ付きフェルールを押し付けて行う、新しい光ファイバ端面の斜め球面成形研磨法について提案し、新しい研磨装置の概要と特徴について記述した。次に、本研磨装置により光ファイバ端面の斜め球面に関して評価実験を行い、その結果から得られた斜め球面成形研磨装置の特性について記述した。

A P Cコネクタの挿入損失特性の改善の研究に関しては、最初に、テーパ・フェルール(Tapered-ferrule)について、斜め球面の形状特性、及び接続特性の理論解析を行なって、A P Cコネクタ用フェルールの特性改善に関する課題を明らかにした。

そこで、テーパ・フェルール付きA P Cコネクタの改善課題を解決するために、A P Cコネクタ用フェルールとして、フェルール先端部を段付き直円筒に成形した、新しいステップ・フェルール(Stepped-ferrule)を提案し、その形状特性と接続特性の理論解析を行うと共に、接続実験のデータからステップ・フェルール付きA P Cコネクタの優位性を明らかにした。

本研究により提案、実用化した光ファイバ端面の新しい球面研磨装置

はAPCコネクタの量産を可能にした。一方、本研究によるステップ・フェルールを使用したAPCコネクタは国際的に主流になっている。更に、本研究によるステップ・フェルールは、1997年にIEC 874-14-7, SC/APCコネクタの国際規格に採用された。

目次

第1章 序論

1.1	研究の背景	1
1.2	光コネクタの接続損失	3
1.2.1	光コネクタの挿入損失の要因	3
1.2.2	光コネクタの反射戻り光の要因	9
1.3	光コネクタ技術の変遷	12
1.4	光ファイバ端面研磨技術の変遷	15
1.4.1	従来の研磨技術	15
1.4.2	公知の鏡面研磨法	18
1.5	A P Cコネクタの研究課題	19
1.5.1	斜め球面成形研磨法及び装置	19
1.5.2	A P Cコネクタ	21
1.6	本研究の目的と構成	22
	第1章参考文献	24

第2章 斜め球面成形研磨法及び研磨装置，並びに研磨特性

2.1	まえがき	28
2.2	球面成形研磨法の理論	28
2.2.1	研磨軌跡	28
2.2.2	研磨盤の公転及び自転の複合運動機構	32
2.2.3	研磨領域とフェルールの配置	34
2.3	弾性研磨盤による斜め球面成形研磨	34
2.3.1	弾性研磨盤による斜め球面成形研磨法	35
2.3.2	研磨フィルム及び研磨液	37
2.4	斜め球面成形研磨装置	37
2.4.1	斜め球面成形研磨装置の構成と研磨軌跡	37
2.4.2	研磨盤の駆動機構	38
2.4.3	斜め球面成形研磨装置の実施例	40

2.5	斜め球面成形研磨の評価実験	42
2.5.1	評価実験項目と評価基準	42
2.5.2	評価実験結果	48
2.6	評価実験結果の考察	56
2.6.1	球面の曲率半径と弾性研磨盤のたわみ変形	57
2.6.2	弾性研磨盤による球面成形の限界条件	57
2.6.3	光ファイバ研磨面のフェルール端面からの凹み	62
2.7	まとめ	64
	第2章参考文献	66
第3章	テーパ・フェルール付きAPCコネクタの解析-1 フェルール回転角度 $\varphi = 0$ 度における接続特性	
3.1	まえがき	68
3.2	テーパ・フェルールの形状特性の理論解析	70
3.2.1	斜め球面頂点の光軸からの偏心の生成機構	70
3.2.2	斜め球面接点の光軸からの偏心及び接触角度	74
3.2.3	光ファイバ端面間のエアギャップ	81
3.3	テーパ・フェルールの接続特性の理論解析	84
3.3.1	光ファイバの接続原理	84
3.3.2	エアギャップの消去に要する接触力	85
3.4	考 察	87
3.4.1	斜め球面接点の許容偏心量	87
3.4.2	光軸上のエアギャップによる挿入損失	89
3.5	まとめ	92
	第3章参考文献	95
第4章	テーパ・フェルール付きAPCコネクタの解析-2 フェルール回転角度 $\varphi \geq 0$ 度における接続特性	
4.1	まえがき	97

4.2	フェルール回転による形状特性の理論解析	98
4.2.1	フェルール回転による接続状態の概要	98
4.2.2	斜め球面の接点の光軸からの偏心	100
4.2.3	斜め球面の接点の光軸に対する接触角度	109
4.2.4	光ファイバ光軸上のエアギャップ	112
4.3	フェルール回転による接続特性の変化の理論解析	113
4.4	考 察	118
4.4.1	テーパ・フェルールの接続時の許容回転角度	118
4.4.2	斜め球面の接点の光軸からの偏心	120
4.4.3	斜め球面の接点の光軸に対する接触角度	120
4.4.4	フェルールの回転による挿入損失	120
4.5	まとめ	123
	第4章参考文献	125

第5章 ステップ・フェルール付きAPCコネクタの解析 フェルール回転角度 $\varphi \geq 0$ 度における接続特性

5.1	まえがき	127
5.2	ステップ・フェルールの形状	128
5.3	ステップ・フェルール形状特性の理論解析	129
5.3.1	斜め球面頂点の光軸からの偏心	129
5.3.2	斜め球面接点の光軸からの偏心	131
5.3.3	斜め球面の接点の光軸に対する接触角度	140
5.3.4	光ファイバ端面間のエアギャップ	143
5.4	フェルール回転による接続特性の理論解析	143
5.5	考 察	148
5.5.1	ステップ・フェルールの接続時の許容回転角度	148
5.5.2	APCコネクタ用の構成部品仕様の提案	149
5.5.3	斜め球面の接点の光軸からの偏心	150
5.5.4	斜め球面の接点の光軸に対する接触角度	150

5.5.5	フェルールの回転による挿入損失	151
5.6	まとめ	153
	第5章参考文献	155
第6章 APCコネクタの挿入損失の実験		
6.1	まえがき	157
6.2	フェルールの形状及び回転角度による挿入損失の比較	158
6.2.1	実験試料及び実験方法	158
6.2.2	実験データ	161
6.2.3	実験結果と考察	166
6.3	ステップ・フェルールの回転角度と増加挿入損失	173
6.3.1	実験試料及び実験方法	173
6.3.2	実験データ	175
6.3.3	実験結果と考察	177
6.4	繰り返し着脱	178
6.4.1	実験試料及び実験方法	178
6.4.2	実験結果と考察	179
6.5	まとめ	181
	第6章参考文献	183
第7章 結 言		
7.1	本論文のまとめ	184
7.1.1	斜め球面成形研磨装置	184
7.1.2	APCコネクタの接続特性	185
7.2	本研究成果の実績と応用	189
	第7章参考文献	191

本研究に関する発表論文	192
本研究内容が採用された IEC 国際規格	193
本研究に関連して取得した USA 特許	194
付 録	195
謝 辞	199

第1章 序 論

1.1 研究の背景

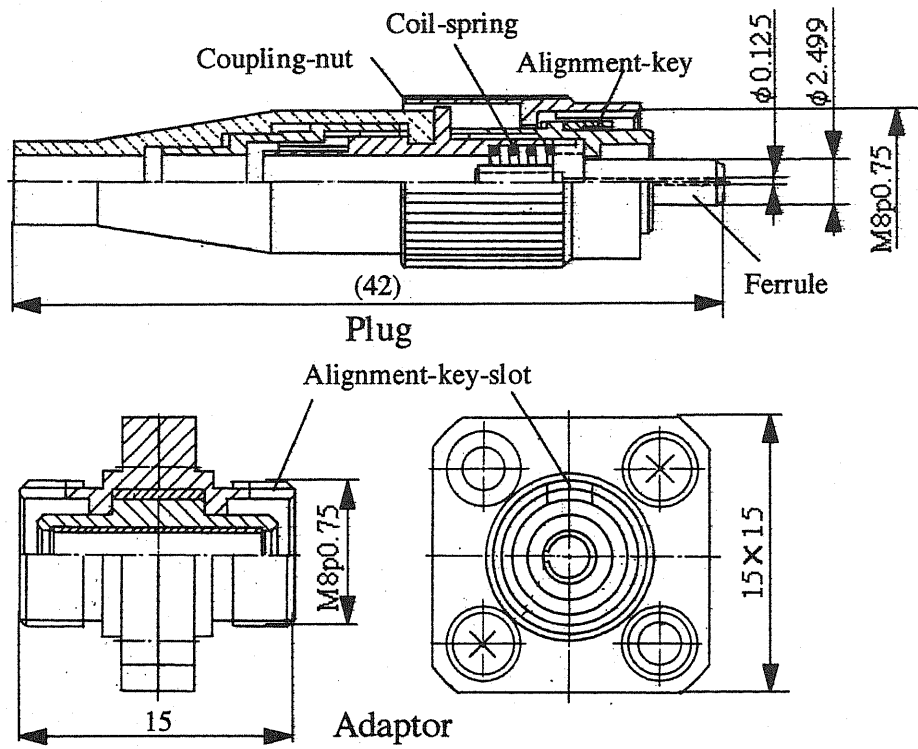
光ファイバ通信は、1960年代に要素技術が発明され、1970年代に始められたばかりである。すなわち、1964年に東北大学の西沢教授らによって、1本の光ファイバの半径方向に屈折率分布を与える事により、レンズ列導波路と同じ様な光の収束効果をもつグレーデッドインデックス型光ファイバが考案された。その後、1970年に至り、Bell Laboratory (USA)により室温で連続発振する半導体レーザが開発された。さらに同年、低損失光ファイバがCorning社 (USA)により実現された。

その後、光ファイバの低損失化の研究が積み重ねられて、現在、市場に現われている石英系光ファイバの損失は、波長 $1.310\ \mu\text{m}$ において $0.3\ \text{dB}/\text{km}$ 以下、波長 $1.550\ \mu\text{m}$ において $0.2\ \text{dB}/\text{km}$ 以下が達成されている。

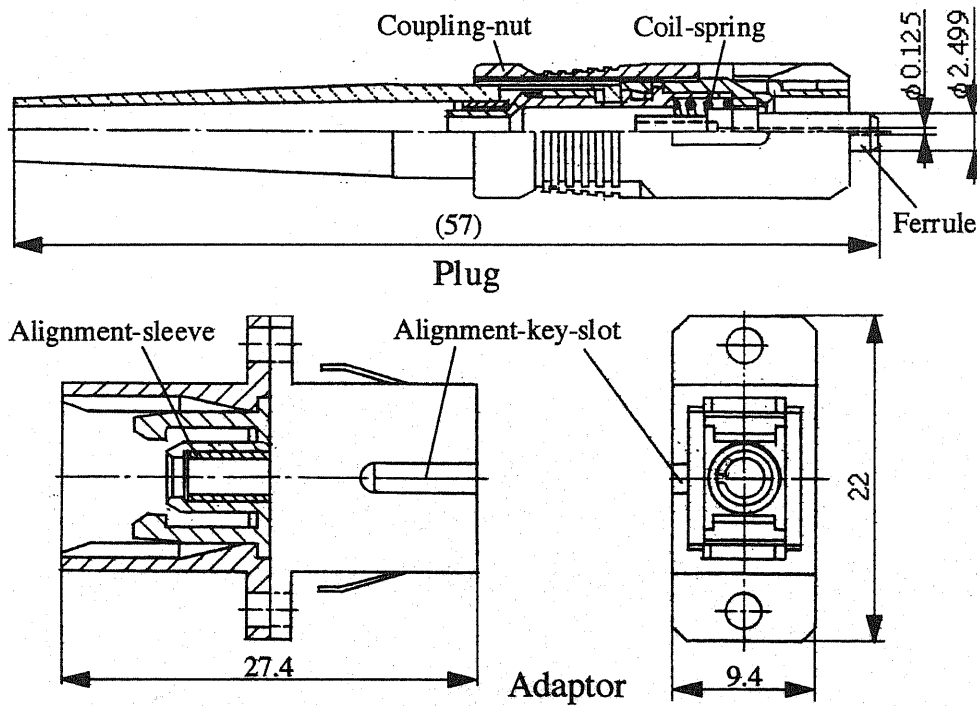
1980年代には、光ファイバ通信の実用化が一気に進み、1985年にはNTTにより日本縦貫光ファイバケーブルが敷設された。更に、1989年にはKDD (日本)、AT&T (USA)により、太平洋横断光ファイバケーブルが完成された[1]。

1990年代に入ると、FTTH (Fiber To The Home)の実現が論じられるようになると共に、その具体化のための光ファイバを使用した回路システムの実現、通信の高速大容量化、及び関連する各種光デバイスの実用化技術開発が急速に進められるようになった。

光コネクタは、光ファイバ通信の最も早い時期に製作された光ファイバ用デバイスであった。当初は、同軸ケーブル・コネクタを改造したものが光コネクタとして使用された。例えば、日本ではFA型光コネクタ、USAではSMA型光コネクタが挙げられる[2],[3]。その後、世界各国で多種多様な構造の光コネクタが考案されてきたが、要求される性能特性の高度化に伴って、性能及び互換性の点で、単心光ファイバ用コネクタは、ここ数年の間に世界的に数種類に集約された。



(a). FC type of optical connectors.



(b). SC type of optical connectors.

図 1.1 FC型及びSC型光コネクタの形状

図1.1(a),(b)に、現時点で、世界的に最も普及している代表的な単心光コネクタの例を示す。図1.1(a)はFC型光コネクタであり、図1.1(b)はSC型光コネクタである。これらの光コネクタは共に日本のNTTで開発されたものである[4],[5]。双方共にフェルールがプラグ・ハウジング内部で、コイルばねにより保持された所謂フローチング・フェルール (Floating-ferrule)構造を採用している。このため、振動、衝撃、及び引っ張りなどの外力による影響を受け難いので、安定した接続特性が得られる特徴がある。整列アダプタからの着脱は、各々FC光コネクタではカップリング・ナットによるねじ込みにより行い、SC光コネクタは外側プラグ部品のプッシュ・プルにより行う。

最近に至り、光交換機や多回路用光分岐結合器、ONU(Optical network unit)などの小型化の要望により、新規にMU光コネクタが開発され、一方、高密度光伝送を目的に開発された多心リボンファイバを一括して接続するため、2～16心のMT光コネクタなどが開発された[6],[7]。

送信容量も少なく、光ファイバ損失も大きかった光ファイバ通信技術開発の初期段階では、光コネクタに対する接続特性の要求レベルも低かった。1980年代に入って光ファイバ通信システム、及び光デバイス技術の研究開発によるデバイス性能の急速な向上により、大容量通信の可能性が見えてくるにつれて、光コネクタに対する接続特性の高度化の要請が年を追って高まってきた。

1.2 光コネクタの接続損失

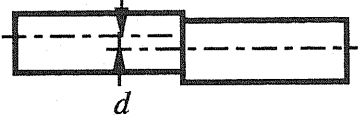
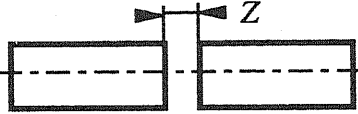
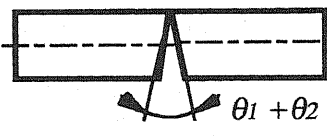
光コネクタの接続損失は、挿入損失 (Insertion loss)と反射戻り光 (Backreflection of light)による損失に大別される。これらについて次に概要を述べる。

1.2.1 光コネクタの挿入損失の要因

光コネクタにおける挿入損失に影響する要因を表1.1に示す[8]。

1) 光ファイバ間の光軸ずれによる挿入損失

表 1.1 光コネクタの接続損失に影響する要因

Factors to insertion losses	Schematic drawings
Shift in optical axes between a pair of optical fibers.	
Air-gap between a pair of optical fiber endfaces.	
Angled surface of each optical fiber endfaces.	

光ファイバ間の光軸ずれによる挿入損失は、一対の光ファイバ付きフェルールを整列スリーブ孔に挿入したときに、双方のフェルールに接着固定された光ファイバ光軸が一致しない場合に生じる。この主な原因としては、フェルールの外径に対する中心孔の偏心、及び光ファイバと中心孔の寸法差による隙間などが挙げられる。シングルモード光ファイバの場合の光ファイバ間の光軸ずれ d による挿入損失 IL (dB)は、式 (1.1) により与えられる [8]。

$$IL_d(\text{dB}) = -10 \log T \cdot \exp\left[-(d/\omega)^2\right] \quad (1.1)$$

ただし、

T : 光ファイバ間の光透過率、

ω : 光ファイバのモードフィールド半径。

図 1.2 光ファイバ間の光軸ずれによる挿入損失ここで、 $T=0.93$ 、 $\omega=4.1 \mu\text{m}$ と仮定して、光ファイバ間の光軸ずれ d による挿入損失 IL (dB)は、光軸ずれ d が $1 \mu\text{m}$ の場合には約 0.23 dB 、光軸ずれ d

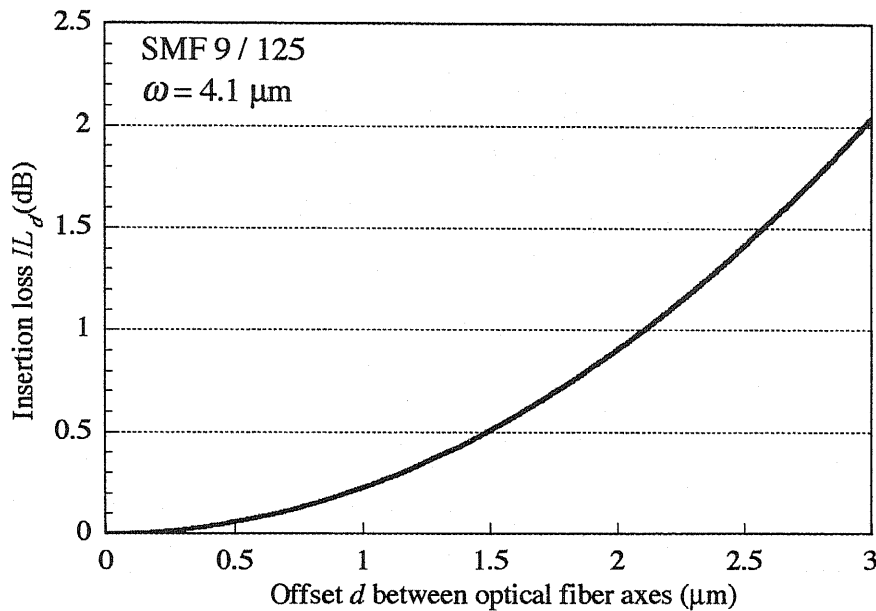


図 1.2 光ファイバ間の光軸ずれによる挿入損失 IL_d

が $2 \mu\text{m}$ の場合には約 0.9 dB になる。初期においては、フェルール及び光ファイバの寸法精度が不十分であったので、接続損失改善のための最大の課題は光軸ずれであったが、生産技術の進歩により解決され、現在では $1.5 \mu\text{m}$ 以下に調整できるようになった。このときの挿入損失 IL_d は約 0.5 dB である。

2) 光ファイバ端面間のエアギャップによるフレネル損失

光ファイバ端面間のエアギャップによる挿入損失は、一対の光ファイバ端面が密着しない場合に、光ファイバ・コアと空気層との境界における屈折率の差異によって生ずるフレネル損失 (Fresnel loss) が原因になる。光ファイバ端面が光軸に対して直角の場合のフレネル損失による挿入損失 IL_F は、式 (1.2) により与えられる[9]。

$$IL_F(\text{dB}) = -10 \log \left[\frac{16n_1^2}{(1+n_1)^2} \right] \quad (1.2)$$

ただし、 n_1 は光ファイバの光屈折率。

ここで、光ファイバの光屈折率 $n_1 = 1.47$ と仮定すれば、光ファイバ端面が光軸に対して直角の場合、シングルモード光ファイバについて

は、このフレネル損失による挿入損失 IL_F は約 0.32 dB になる。

3) エアギャップによる多重反射損失

エアギャップ z が数 μm 程度と狭く、かつ、光ファイバ端面が並行面の場合は、光ファイバ端面間において光の多重反射が生じて、挿入損失 IL_R 増加の原因になる。この多重反射による挿入損失 IL_R は式 (1.3) により与えられる[10]。

$$IL_R (dB) = -10 \log \left[\frac{a_0^2 (1-r^2)^2}{(1-r^2)^2 + 4r^2 \cdot \sin^2(\delta/2)} \right] \quad (1.3)$$

ただし、

$\delta = 4\pi \cdot n_1 \cdot z / \lambda$: 光束間の位相差,

λ : 光波長,

a_0 : 振幅,

$r^2 = |(n_1 - 1)/(n_1 + 1)|^2$: 光の反射率.

接続端面が光軸に対して直角の光ファイバの端面間にエアギャップがある状態で接続された場合、光波長 λ の $\lambda/4$ に相当するエアギャップ毎に最大で約 0.6 dB の挿入損失 IL_R を生ずる。この挿入損失 IL_R は 0 dB と 0.6 dB を振幅とする \cos 曲線で表わされる。

4) 光ファイバ端面の傾斜角度の差異による挿入損失

光ファイバ端面の傾斜角度の差異による挿入損失 IL (dB) は、式 (1.4) により与えられる[11]。

$$IL_\theta (dB) = -10 \log T \left\{ 1 - \left[\frac{(n_1/n_0) - 1}{\pi \cdot n_1 \sqrt{2\Delta/n_0}} \cdot \theta_1 + \frac{(n_1/n_0) - 1}{\pi \cdot n_1 \sqrt{2\Delta/n_0}} \cdot \theta_2 \right] \right\} \quad (1.4)$$
$$= -10 \log T \left\{ 1 - \frac{|n_1 - 1|}{\pi \cdot n_1 \sqrt{2\Delta}} (\theta_1 + \theta_2) \right\}$$

ただし、

T : 光ファイバ端面間の光透過率.

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} : \text{光ファイバの比屈折率差.}$$

n_0 : 空気層の光屈折率 $\doteq 1$.

n_1 : 光ファイバ・コアの光屈折率.

n_2 : 光ファイバ・クラッドの光屈折率.

フェルールの斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度, θ_2 が -11.94 度, 光ファイバ端面間の光透過率 $T = 0.916$, $\Delta = 0.002$, 及び $n_1 = 1.47$ と仮定して計算した挿入損失 IL は約 0.38 dB になる. 一方, フェルールの斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 8 度, θ_2 が -7.96 度, 光ファイバ端面間の光透過率 $T = 0.925$, $\Delta = 0.002$, 及び $n_1 = 1.47$ と仮定して計算した挿入損失 IL は約 0.34 dB になる.

5) 光ファイバ間のエアギャップによる光減衰量

エアギャップ z が大きくなるに従って, 光ファイバ 1 からの出射光のビーム直径がエアギャップ z の距離に比例して大きくなるので, 光ファイバ 2 に入射する光量は, その分だけ減衰して小さくなる. 光ファイバ 1 から出射する光束のパターンがガウス・ビーム (Gaussian beam) とし, 光ファイバ端面が光軸に対して直角の場合, このエアギャップ z によるシングルモード光ファイバの光減衰量 IL_A は式 (1.5) により与えられる [12].

$$IL_A (dB) = -10 \log T \left[\frac{1}{1 + (\lambda \cdot z / 2\pi \cdot n_0 \cdot \omega_0)^2} \right] \quad (1.5)$$

ただし,

λ : 光の波長

n_0 : 空気層の光屈折率 ($\doteq 1.0$)

ω_0 : 光ファイバ端面におけるモードフィールド半径

ここで, APC コネクタのように, 光ファイバの端面が傾斜球面の場

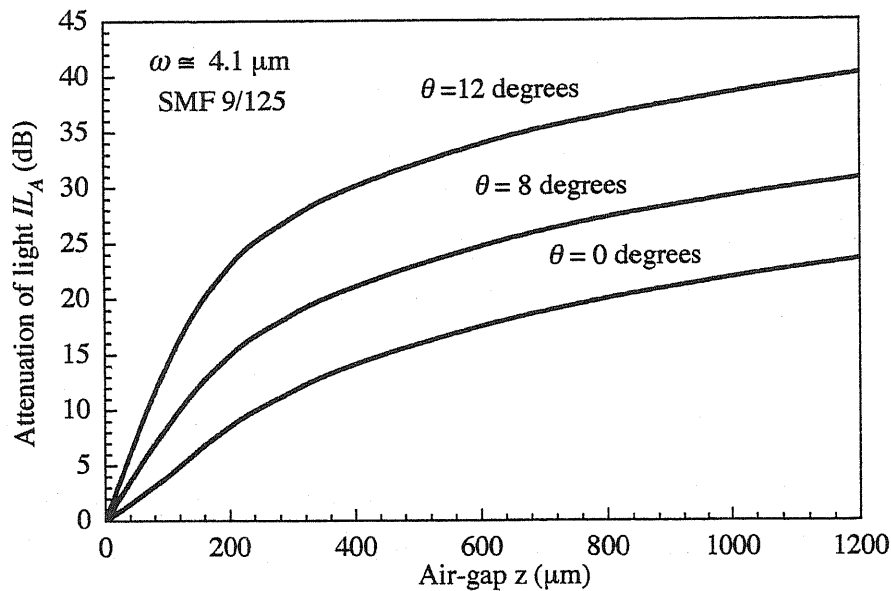


図 1.3 光ファイバ間のエアギャップによる光減衰量 IL_A

合は、この挿入損失は式 (1.6) により計算できる[13].

$$IL_A (dB) = -10 \log T \left\{ \left[\frac{1}{1 + (\lambda \cdot z / 2\pi \cdot n_0 \cdot \omega_0)^2} \right] \cdot \exp \left[- \left(\frac{z \cdot \sin \theta_0}{\omega \sqrt{1 + (\lambda \cdot z / 2\pi \cdot n_0 \cdot \omega_0)^2}} \right)^2 \right] \right\} \quad (1.6)$$

ただし、

θ_0 : 光軸に対する光ファイバ1の光出射角度

図 1.3 は、光ファイバ端面の傾斜角度 θ が、各々 0 度、8 度、及び 12 度について、式 (1.6) で計算した光ファイバ間のエアギャップ z による光減衰量 IL_A を示す。図 1.3 から、光ファイバ端面間距離が約 100 μm の範囲において、光ファイバ端面の傾斜角度 θ が、各々 0 度、8 度、及び 12 度における光減衰量 IL_A は、光ファイバ端面間距離が 1 μm につき、各々 0.04 dB、0.09 dB、及び 0.14 dB になる。

光コネクタの挿入損失に影響する要因は、以上に述べたように多岐にわたり、これらが複雑に相乗して最終的な挿入損失が決定される。特

に、光ファイバ端面間にエアギャップがある場合には挿入損失を低減できないので、エアギャップを生成させない接続法は光コネクタにとって重要な課題になる。

1.2.2 光コネクタの反射戻り光の要因

光ファイバの接続端面から光の入力側方向に反射される、反射戻り光は、広帯域な画像信号のアナログ伝送、或いは超高速なデジタル信号の伝送においては、光源であるレーザの雑音や歪を増加させる原因となる。更に、閉ループ内で多くの接続箇所を有する光LAN(Local area optical network)においては、クロストーク(Crosstalk=漏話)の原因となる[14],[15]。従って、この反射戻り光は極力低減しなければならない。この反射戻り光の要因の概要を次に述べる。

1) 光ファイバ端面の光軸直角面に対する傾斜角度

図1.4 (a), (b)に光ファイバ端面の光軸直角面に対する傾斜角度と反射戻り光の関係を示す。図1.4 (a)は、光ファイバ端面が光軸に対して直角面の場合の反射戻り光について示す。 P_0 は伝送光量、 P_R は光ファイバ端面からの反射戻り光量を示す。図1.4 (b)は、光ファイバ端面が光軸直角面に対して θ だけ傾斜したときの反射戻り光について示す。図1.4 (b)において θ_c は光ファイバ・コアを光が伝送できる最大角度である臨界角を示している。この臨界角 θ_c は式(1.7)で表わされる[16]。

$$\theta_c = \sin^{-1} \sqrt{2\Delta} \quad (1.7)$$

ここで、

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

フェルールの端面傾斜角度 θ を、光ファイバコアの臨界角度 θ_c の2倍以上にすることにより、光ファイバ端面で生じた殆どの反射戻り光 P_R は光ファイバ・クラッド層に放射吸収され、拡散して消滅するので、光ファイバ・コアを光源に逆伝送される反射戻り光 P_R を極限にまで小さく

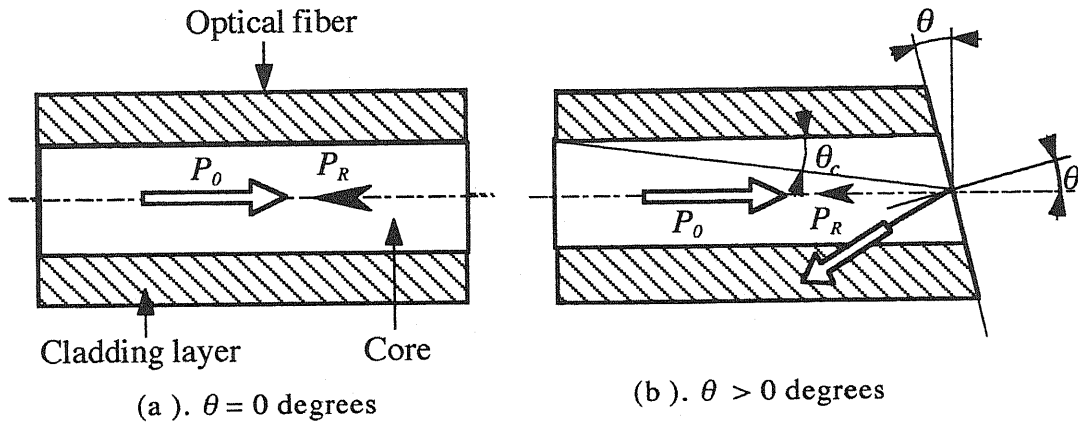


図 1.4 シングルモード光ファイバ端面の傾斜角度 θ と反射戻り光 B_R

くできる。従って、この形式の光コネクタ・フェルールは、光ファイバ端面の接続が開放された状態でも、反射戻り光は不変であるという特徴をもっている。図 1.5 から、光軸直角面に対するフェルール端面の傾斜角度 θ を 8 度として、光波長 $\lambda = 1.310 \mu\text{m}$ の場合、シングルモード光ファイバの伝送光量に対する反射戻り光を -60 dB (0.0001%) 以下に低減できる。

式 (1.7) において、 $\Delta = 0.002$ 、 $n_0 = 1.0$ 、及び $n_1 = 1.47$ と仮定すれば、臨界角 θ_c は約 3.626 度になる。従って、シングルモード光ファイバ付き APC コネクタ・フェルールの端面傾斜角度 θ は、一般に臨界角の 2 倍以上の 8 度に設定されている。次に、反射戻り光 B_R は、式 (1.8) で与えられる [17]。

$$B_R(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_R}{P_0} = 10 \log \left\{ R_0 \cdot \exp \left[- \left(\frac{2\pi \cdot n_1 \cdot \omega \cdot \theta_1}{\lambda} \right)^2 \right] \right\} \quad (1.8)$$

ただし、

$$R_0 = (n_1 - 1)^2 / (n_1 + 1)^2$$

$$V = 2\pi a n_1 \sqrt{2\Delta} / \lambda$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

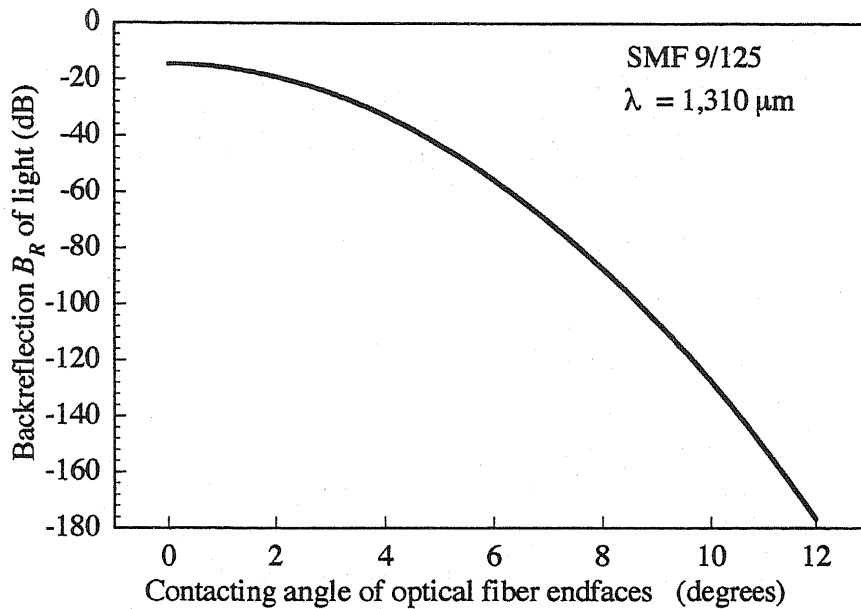


図 1.5 光ファイバ端面の接触角度と反射戻り光

ここで、

R_0 : 光ファイバ端面の傾斜角度 $\theta_1 = 0$ 度における反射戻り光

n_1 : 光ファイバ・コアの屈折率

n_2 : 光ファイバ・クラッドの屈折率

ω : フェルール孔に固定された状態での光ファイバ・コアの室温 (25° C) におけるモードフィールド半径

λ : 光源波長

V : 規格化周波数

a : 光ファイバ・コア半径

Δ : 比屈折率差

シングルモード光ファイバにおいて、 $n_1 = 1.47$ 、 $\omega = 4.1 \mu\text{m}$ 、 $\lambda = 1.310 \mu\text{m}$ として、光ファイバ端面の傾斜角度 θ_1 が0度から12度まで、各々2度おきに変化した場合の反射戻り光 B_R の、式 (1.8) により求めた理論計算値を図1.5に示す。ここで、高橋の知見によれば、光ファイバがフェルール孔にエポキシ接着剤で110~120° Cのキュアリング温度でフェルールのマイクロ孔に固定された場合、キュアリング温度以

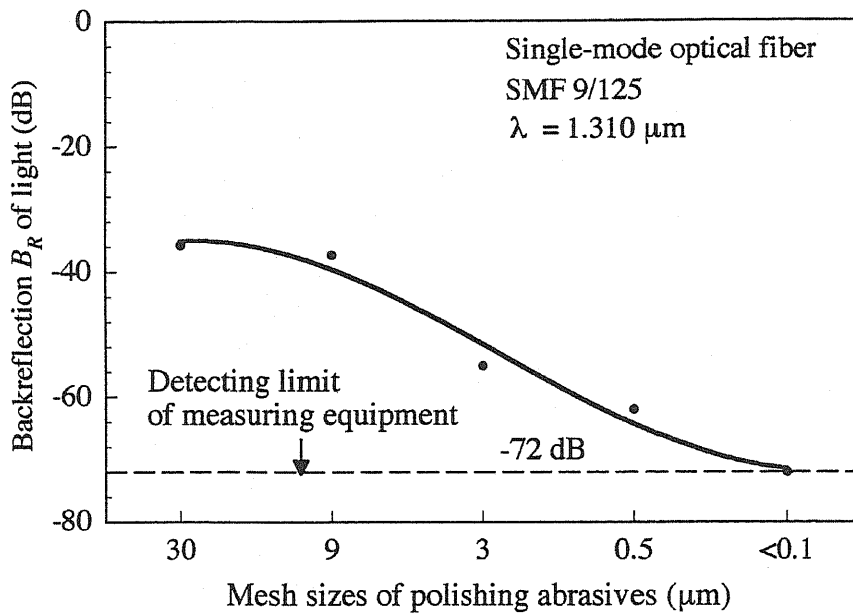


図 1.6 研磨剤の粒度による反射戻り光の差異

度以下の温度領域では、フェルールと光ファイバの線膨張係数の差異によって、光ファイバ・コアに圧縮力が働く、従って、キュアリング温度以下の温度領域では、光ファイバ・コアのモードフィールド半径 ω は、自由状態において測定されたカタログ値よりも縮小された数値を示す [18],[19].

2) 光ファイバ端面の面粗さ

光ファイバ端面の研磨面の粗さが大きい場合には、光ファイバ接続面で伝送光の乱反射を生じて反射戻り光の増加の原因になる。高橋らが行った、フェルール端面を異なる粗さの研磨剤で光軸直角面に対して8度の斜め球面研磨した場合の、光ファイバ端面からの反射戻り光の実測値の例を図 1.6 に示す。

1.3 光コネクタ技術の変遷

ここでは、光コネクタに対して要求される接続特性のうち、挿入損失と反射戻り光に大きな影響を及ぼす光コネクタ・フェルールの先端の接続面形状に関する従来技術の変遷について述べる。

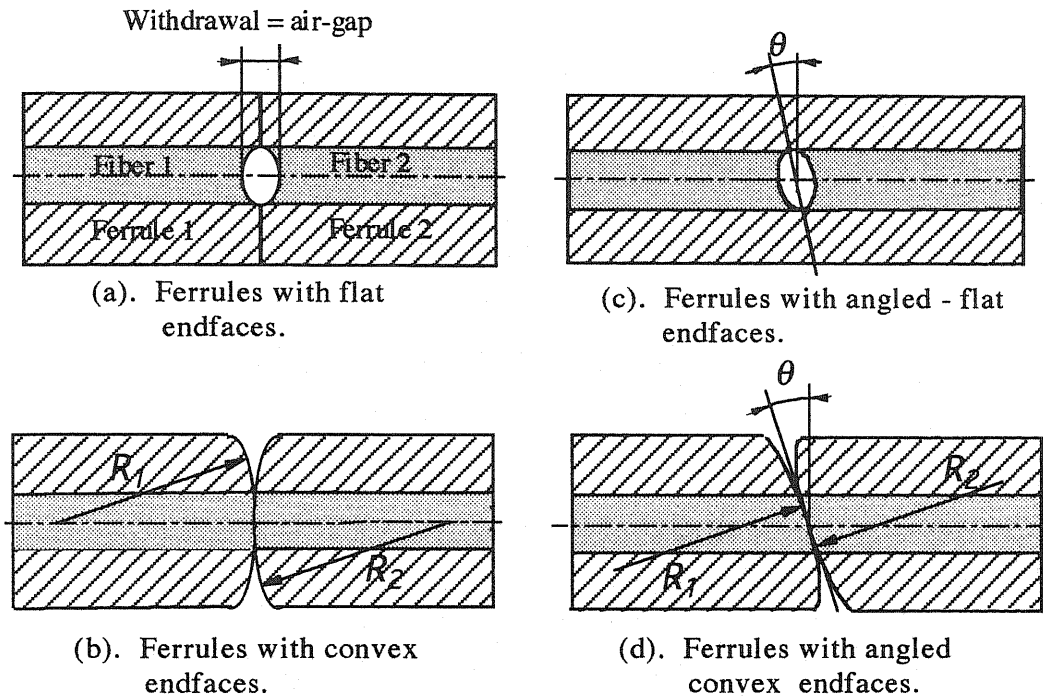


図 1.7 光コネクタ・フェルール研磨形状の変遷

光コネクタにより一対の光ファイバを接続した時に、一対の光ファイバが全く同一のパラメータでできており、その接続面が完全に接触し、光ファイバ間の光軸ずれがゼロ、かつ、曲がりなく接続されていれば、1本の連続した光ファイバと同じであるから接続による光損失はゼロになる。しかし、前述のように実際は多くの要因によりゼロにはならない。

図 1.7 (a)～(d) は、光コネクタの接続端面形状の変遷を示したものである。初期の光コネクタ・フェルールの端面形状は、図 1.5 (a) に示すように、直角平面接続型フェルールを使用していた。すなわち、光軸に対して直角面をもつフェルール端面を平面研磨することにより、光ファイバ端面がフェルール端面から、数 μm 程度の凹面に仕上げられていた。従って、光ファイバは数 μm のエアギャップを介して接続されることになるので、前述のように、光ファイバコアとエア層との屈折率差によるフレネル損失、光ファイバ端面間の多重損失による挿入損失、及び光ファイバ端面間の距離による光減衰量を生じていた。従って、シングルモード光ファイバの場合、光コネクタの挿入損失は 0.7～2 dB 程

度しか得られなかった[19].

同時に、光ファイバ端面から直角に反射される反射戻り光は約-14 dB程度しか得られなかった。従って、初期の光コネクタは、これらの挿入損失及び反射戻り光などの接続特性において、大規模、かつ、高性能の光ファイバ・ネットワークの構築には不適切であった。

図1.7 (b) は、以上の挿入損失及び反射戻り光などの接続特性を改善するために、光ファイバ端面間のエアギャップを除去することを目的として、1985年に発表された直角球面接続型光コネクタ・フェルールの先端部を示す。この光ファイバ付きフェールは、フェールの先端面を光軸に対して直角球面に成形研磨して仕上げられている。このフェールの球面の中央部分の接点には、軸方向のコイルばね力が負荷され、光ファイバを含むフェールの球面の中央の微小な球面部分が円形平面に弾性変形されて、光ファイバ端面間のエアギャップが除去される。この形式の光コネクタは、PCコネクタ (Physical-contact optical connector) と呼称されて、現時点では、最も広く使用されている光コネクタである[21].

光ファイバ端面が完全に密着した状態において、シングルモード光ファイバ用FC/PCコネクタの平均挿入損失は0.1~0.3 dB, 平均反射戻り光は-48~-55 dBであり、これらの値は容易に得られる。ただし、何らかの原因で光ファイバ端面が完全に密着していない状態で接続された場合、または、光ファイバ端面が接続されていない端面開放の状態では、前述のフレネル損失その他の要因により、最低挿入損失は0.32 dB以上に増加し、反射戻り光は約-14 dBに増加する。

図1.7 (c) は、斜め平面接続型光コネクタ・フェールの先端部を示す。この形式の光コネクタ・フェールの構想は、PCコネクタより以前の1983年に発表されている[22]. この形式の光コネクタは、前述の事由によりフェールの端面傾斜角度を、光ファイバコアの臨界角度の2倍以上にすることにより、光ファイバ・コアを光源に逆伝送される反射戻り光を極限にまで小さくできるようにしたものである。ただし、欠点としては、研磨加工による量産時に、フェール端面の傾斜平面の

角度の精度を厳密に一致させて研磨加工することは、工作技術的に至難であった。このために、光ファイバ間のエアギャップを完全に除去することが出来なかった、従って、この形式のフェルールは実用された例はなく、単なる提案に終わっていた。

図1.7 (d) は、本論文の課題とする、斜め球面接続型光コネクタ・フェールの先端部を示したものである。これは、前述のPCコネクタ及び斜め平面接続型光コネクタ・フェールの欠点を改善したものである。すなわち、フェールの端面傾斜角度 θ を光ファイバコアの臨界角度の2倍以上にすると共に、この傾斜面を球面に成形研磨したものである。従って、光ファイバ端面を開放した時でも、反射戻り光を-60 dBと無視できる大きさにできる。同時に、接続端面を斜め球面に成形研磨することにより、フェール端面の傾斜角度 θ の加工精度を斜め平面接続型光コネクタ・フェールのように厳密に規制する必要がないと言う特徴がある。この形式の光コネクタの提案としては、1985年に高橋によって出願された特許の公開特許公報が1987年に開示されている[23]。

斜め球面接続型光コネクタの実用化の実績としては、1986年に高橋により製品化され、APCコネクタ(Angled-physical-contact optical connector)と命名されて、主としてUSA国内のCATV市場に大量に供給された。

1.4 光ファイバ端面研磨技術の変遷

1.4.1 従来の研磨技術

光コネクタの組立工程で、最も重要な工程は、光ファイバをエポキシ接着剤によりフェールの中心孔に挿入して取付ける工程、及び組み立てた光ファイバ付きフェール端面を研磨加工する工程である。

前述の図1.7 (a)~(d)に示したように、光ファイバ通信システムの進歩に伴って、光コネクタ・フェールの端面の研磨形状は変遷してきたが、それに応じて、光ファイバ端面の研磨法も変遷してきた。図1.8及び図1.9にその実例の概要を示す。

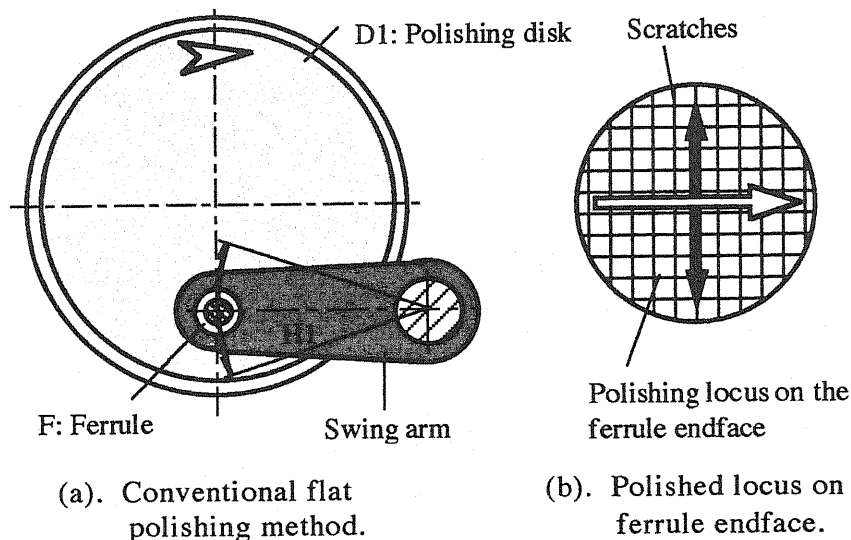


図 1.8 初期の直角平面接続型光コネクタ・フェルールの端面の平面研磨法の概要

図 1.8 (a),(b) は、初期の直角平面接続型光コネクタ・フェルールの端面の平面研磨装置の上平面図、及び研磨軌跡の一例を示す。すなわち、初期の直角平面接続型光コネクタ・フェルールの端面の平面研磨は、従来の金属などの顕微鏡試料用の平面研磨装置を、そのまま流用するか、もしくは一部改造して使用されていた[24],[25]。この場合、研磨加工は図 1.8 (a) に示すようにして行われていた。

第一の工程として、白矢印方向に同軸回転する金属製の研磨盤 D1 の面に研磨砥粒と研磨液を注いで、ホルダー H1 に保持したフェルールの先端面を研磨盤面に押し付けてフェルール先端面を平坦に研磨する。この場合、フェルール端面を通過する研磨砥粒の流れ方向は、研磨盤の回転方向と反対向きの黒矢印で示すように一定になる。このため、図 1.8 (b) に示すように、一定方向に研磨傷が生じ易く、一たん生じた研磨傷は、研磨の進行につれて成長拡大されて修復できない難点があった。従って、このままでは、光コネクタ用として使用できなかった。この研磨傷の修復手段として、第二の工程で、回転円盤面にフェルト布などの起毛材料を貼って構成したバフ研磨盤 D1 に、二酸化セリウムの微粉末と研磨液を注いでラッピングにより鏡面に仕上げていた。この場合、硬

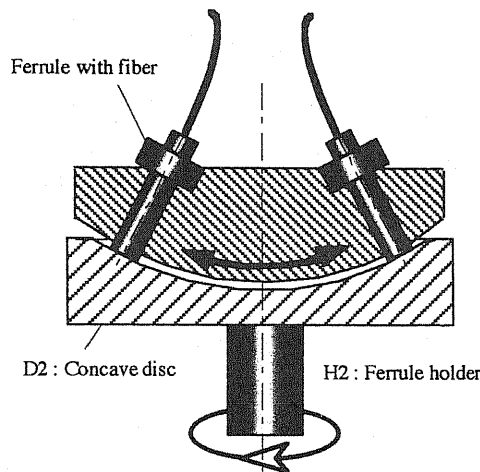


図 1.9 従来の直角球面研磨装置の構造の概略

質のセラミック製のフェルールと軟質の石英ガラス製光ファイバの硬さなどの物性の差異により、柔らかい光ファイバ端面のみが研磨除去されるので、前述の図 1.7 (a)に示したように、光ファイバ端面はフェルール端面から数 μm だけ凹面に陥没した面に仕上げざるを得なかった。図 1.7 (a)に示した平面接続型光コネクタの光ファイバの凹みは、光ファイバ研磨装置の技術不足によって生じたものであり、当時の研磨技術ではやむを得なかったと言える。

図 1.8 は、本論文による球面研磨装置が実用化される前に、市販されていた唯一の直角球面接続型光コネクタ (PCコネクタ)・フェルールの端面の直角球面研磨装置の一例を示す [26]。図 1.8 において、曲率半径 60 mm の球凹面に成形された研磨盤 D2 の凹面に研磨砥粒と研磨液を注いで、白矢印で示す方向に研磨盤 D2 を同軸回転させる。一方、ホルダー H2 に保持されたフェルールの先端面を研磨盤面に押し付け、ホルダー H2 を黒矢印方向に揺動させる十字型の複合直線運動させる。これにより、フェルール端面は曲率半径 60 mm の球面に成形研磨される。この場合、フェルール端面を通過する研磨砥粒の流れ方向は、図 1.7 (b)に示したと同様な十字形の研磨軌跡になる。従って、前述の理由により、いったん生じた研磨傷は修復できないという欠点があった。更

に、PCコネクタには光ファイバ端面の凹みは許容されないので、前述の図1.7に記述したような、バフ研磨盤によるラッピングにより、研磨傷を修復する方法は採用できなかつた。従って、光ファイバ端面の研磨品質、及び生産性の2点で、従来のPCコネクタの量産用研磨装置には解決すべき課題があった。

従って、本論文の主題であるAPCコネクタの実用化の前提として、十分な研磨品質、及び生産性を具備した光ファイバ端面の斜め球面成形研磨装置が必要であった。

1.4.2 公知の鏡面研磨法

図1.10(a),(b)は、本論文の斜め球面成形研磨装置の特徴を明らかにするために、従来のシリコン・ウエーハや、機械部品などの平面の鏡面加工装置として使用されてきた、ラッピング盤の鏡面研磨原理の一例の説明図を示す。図1.10(a)は、ラッピング盤の研磨メカニズムを示す。研磨盤(Polishing plate)は回転軸(Rotation axis)を中心にして矢印方向に回転させる。研磨盤面には、研磨剤スラリーが供給される。研磨盤の上面には、加工物(Work)を保持孔(Guide hole)に挿入して保持する円筒形の加工物ホルダ(Work holder)が配置されている。加工物ホルダは2個のガイドローラ(2-Guide rollers)に回転可能に位置決め保持される。加工物ホルダの保持孔は、加工物の形状に応じて任意の形状とすることができる[27]。

この状態で研磨盤を左回りに回転させると、研磨盤の中心側の周速度 V_1 よりも、外縁側の周速度 V_2 が大きいため、加工物ホルダは、この周速度 V_1 と V_2 の差により自動的に矢印方向に左回りに回転することになる。従って、加工物ホルダの保持孔に挿入された加工物も、同時に、加工物ホルダと同じ回転速度で回転されることになる。

この場合、加工物の研磨面を通過する研磨剤の流れ方向の研磨軌跡は、図1.10(b)に示すように、加工物ホルダの1回転につき、360度のあらゆる方向に変化することになる。従って、ある方向で、いったん研磨傷が生じて、連続して変化する研磨軌跡により、研磨傷は自動的に

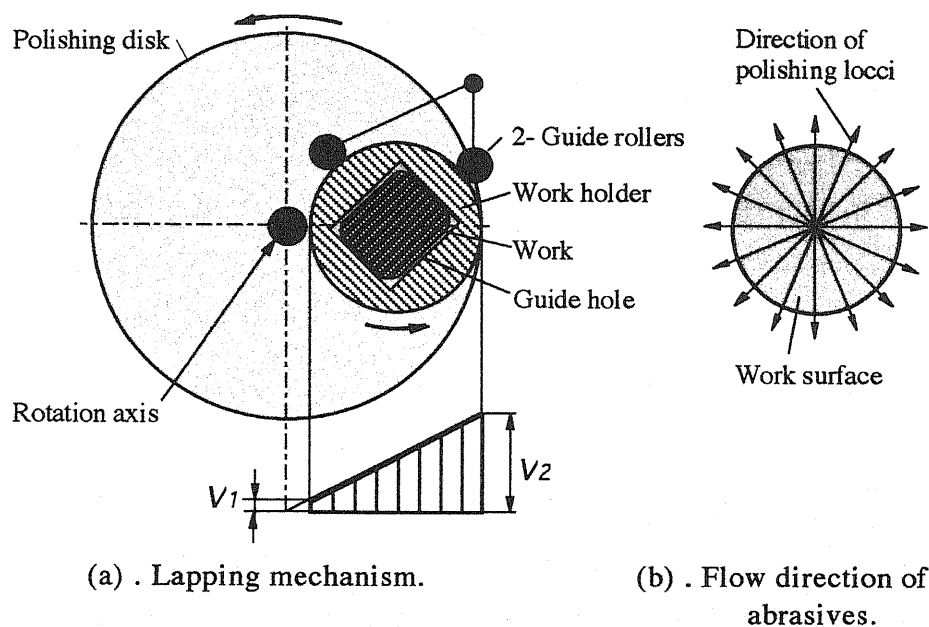


図 1.10 ラッピング盤の研磨メカニズムとその研磨軌跡

修復される。これと共に、次第に研磨傷の微細化が進行して最終的に加工面は鏡面にできる。

本方式のラッピング盤は、加工物自体を自転させて加工する原理によっている。ただし、光ファイバ付きフェルールを本方式の加工原理によって加工した場合には、光ファイバが捻られて切断されるので使用できない。

1.5 APCコネクタの研究課題

APCコネクタの研究課題として、まず、APCコネクタの製造の前提となる、フェルール接続端面の斜め球面成形研磨法及び装置が挙げられる。次に、APCコネクタの接続性能に重要な影響を与えるエアギャップを極力規制するために、APCコネクタの構成部品、及び構造がAPCコネクタの接続特性に与える影響についての理論解析が挙げられる。

1.5.1 斜め球面成形研磨法及び装置の所要特性

フェルール接続端面の斜め球面成形研磨法に関しては、要求される機

械特性及び光学特性から次の前提条件が要求される。

1) 所要の斜め球面の曲率半径に成形研磨できること

第3章以降に述べるが、APCコネクタの場合、フェルールの斜め球面の曲率半径の寸法、及びそのばらつきは接続特性に大きく影響する。従って、そのばらつき範囲は狭いほど良いが、生産技術、経済性の制約から、フェルールの斜め球面の傾斜角度が8度のAPCコネクタについては、一般に斜め球面の曲率半径の許容範囲は5 mm ~ 12.5 mm程度が目標になる。

2) 斜め球面の頂点の光軸に対する偏心が少ないこと

第3章以降に述べるが、APCコネクタの場合、斜め球面研磨球面頂点が光軸に対して偏心すると、接続時の斜め球面接点の光軸からの偏心を増加させる要因になる。従って、斜め球面の頂点の光軸に対する偏心は零に近い値が目標になる。

3) 光ファイバ端面の凹みが小さいこと

前述のように、APCコネクタに限らず、どの形式の光コネクタについて言えることであるが、光ファイバ端面の凹みが大きい場合には、光ファイバ端面間のエアギャップを消去できなくなるので重要である。光ファイバ端面の凹みの許容範囲は、一般には0.05 μm 以下に規定されている。ただし、本論文の第2章に述べるが、光ファイバ端面の凹みの許容範囲は斜め球面の曲率半径に依存する。

4) 光ファイバの端面の研磨傷が自動的に修復できること

前述のように、光ファイバの端面の研磨傷は、光コネクタの反射戻り光の特性に影響するので重要である。従って、光ファイバの端面の研磨傷が自動的に修復できる斜め球面成形研磨装置の研磨原理の新たな考案を要する。

5) 高い生産性、及び経済性を具備していること

APCコネクタの大量生産を前提とした場合、生産性、経済性の視点から、高い生産性、熟練を必要としない容易な操作性、簡単な保守管理

性、低廉な消耗材料費、及び小型軽量であることを考慮しなければならない。

1.5.2 APCコネクタ

1) 接続時のフェルール回転

APCコネクタが、フェルールが回転した状態で接続された場合、このフェルールの回転角度は、APCコネクタの接続特性に非常に大きな影響を及ぼす。すなわち、現在、最も広く普及しているFC及びSCコネクタの構造に見られるように、フェルールはプラグ・ハウジング内でコイルばねで浮動保持されており、接続時の円周方向の位置決め整列は、複数のキー及びキー溝の嵌合により行われている。従って、これらの隙間はゼロにはできない。FCコネクタを接続した場合、フェルール間の円周方向回転誤差は、これらの累積隙間により、計算では最大で16度に達する[4]。

PCコネクタの接続の場合は、このフェルール間の円周方向回転誤差が接続特性に及ぼす影響は無視できる。しかし、APCコネクタでは、接続状態によりフェルールが相互に回転することがあり、この時には各フェルールの斜め球面はV字形状に開くので、フェルールの回転角に対応したエアギャップが加算される。

1) APCコネクタの構成部品、及び構造

APCコネクタに組み込むフェルールは、前述のように、フェルールの接続端面が斜め球面に成形研磨されている。従って、PCコネクタの組み込むフェルールとは端面形状が異なっているので、APCコネクタの構成部品、及び構造を使用して、そのままAPCコネクタを構成しても良好な結果は得られない。従って、APCコネクタの接続特性を阻害しないAPCコネクタの構成部品、及び構造を新たに研究することが必要であった。

APCコネクタの課題としては、以上の斜め球面研磨装置の研磨特性、及び光コネクタの形状特性、寸法仕様などの総合された結果が、APCコネクタの最終の接続特性に反映されるので、これらの解析が重要

である。しかしながら、これらに関する論文、或いは特許は、ほとんど高橋によるものであった[28]~[45]。

1.6 本研究の目的と構成

本研究の目的は、A P C光コネクタの生産に必要な、光ファイバ端面の斜め球面研磨装置に関する研究、及びA P Cコネクタの挿入損失の改善に関する研究に関する。

第1章では、まず、光コネクタの接続損失に影響する要因、光コネクタ技術の変遷、及び光ファイバ端面研磨技術の変遷について記述した。次いで、本研究の対象とするA P Cコネクタに関する課題として、斜め球面成形研磨装置の具備すべき要件、及び接続特性に影響する球面研磨装置の研磨特性、並びにA P Cコネクタの構成上の問題点について列挙した。これらの研究の背景にもとずき、本研究の目的および内容について記述した。

第2章では、公転と自転の複合円軌跡運動をする弾性研磨盤に、固定保持した光ファイバ付きフェルールを押し付けて行う、新しい考え方による光ファイバ端面の斜め球面成形研磨法及び研磨装置、及び本装置の研磨特性について記述する。

第3章では、テーパ・フェルール付きA P Cコネクタについて、その形状特性及び接続特性の理論解析を行い、A P Cコネクタに関する普遍的な課題について記述する。

第4章では、第3章で記述したテーパ・フェルール付きA P Cコネクタについて、フェルール回転角度 $\varphi \geq 0$ 度の条件における接続特性を理論解析して明らかにする。

第5章では、第3章、及び第4章で明らかにした、テーパ・フェルール付きA P Cコネクタの課題を解決するために、新たに提案したステップ・フェルール付きA P Cコネクタについて、フェルール回転角度 $\varphi \geq 0$ 度の条件における形状特性、及び接続特性の理論解析を行い、更に、接続特性を改善するために、A P Cコネクタの構成部品の設計仕様の改善提案に関して記述する。

第6章では、テーパ・フェルール付きAPCコネクタと、ステップ・フェルール付きAPCコネクタについて、フェルール回転角度 $\varphi \geq 0$ 度の条件における接続特性の比較評価実験を行い、第3章から第5章に述べた理論解析値と実験データを比較して考察する。

第7章では、本研究結果の内容を取りまとめると共に、本研究による斜め球面成形研磨装置の実用実績と応用についての概要を記述する。次に、本研究により実用化したステップ・フェルール付きAPCコネクタに関して実用実績、及びステップ・フェルールのIEC国際規格への採用について概要を述べる。

第1章参考文献

- [1] 大久保勝彦, " ISDN時代の光ファイバ技術," 利理工学社, pp. 1-5, 1989.
- [2] " 技術指導資料 : FC Type Fiber Optic Connector 図面," NTTアドバンステクノロジー株式会社, 1986.
- [3] International Electrotechnical Commission, " INTERNATIONAL STANDARD IEC-874-2, Part 2: Sectional specification for fibre optic connector - Type F - SMA ," 1993.
- [4] " 技術指導資料 : FA Type Fiber Optic Connector 図面," NTTアドバンステクノロジー株式会社, 1986.
- [5] " 技術指導資料 : SC Type Fiber Optic Connector 図面," NTTアドバンステクノロジー株式会社, 1989.
- [6] " 技術指導資料 : MU Type Fiber Optic Connector 図面," NTTアドバンステクノロジー株式会社, 1994.
- [7] " 技術指導資料 : MT 型光ファイバコネクタの設計・組立技術," NTTアドバンステクノロジー株式会社, 1992.
- [8] D. Marcuse, " Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices," Bell System Tech' Journal, Vol. 56, No. 5, p. 714, 1977.
- [9] New-Port Catalogue, New-Port Co., LTD. pp. J-23, 1990.
- [10] 鈴木, 他, " 光コネクタ損失特性の端面処理効果," 昭56年度信学全大, No. 2256, 1981.
- [11] 土屋, 中込, 清水, " 二重偏心コネクタの損失特性," 信学光量IV研資, OQE75-52, 1975.
- [12] D. Marcuse, " Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices," Bell System Tech' Journal, Vol. 56, No. 5, p. 713, 1977.
- [13] M. Takahashi, " Variable Light Attenuator of Improved Air-gap Type with Extremely Low Returning Light," Proc, IEEE IMTC/94, Vol. 2, pp. 947-950, (May. 1994).
- [14] O. Hirota, et al., " Properties of intensity noises of laser Diodes Due to reflected

- waves from single-mode optical fibers and its reduction," IEEE, Quantum Electron, vol, QE-17, P. 1014,1980.
- [15] M. M. Choy, et al., " Interferometric conversion of laser phase noise by single mode fiber-optic components," Electron, Lett, vol. 23, p. 115, 1987.
- [16] "最近の光伝送入門," NTTアドバンスドテクノロジー株式会社, 1991.
- [17] A. Benner, et al, " Low-reflectivity in-line variable attenuator utilizing optical fiber taper," IEEE J. Lightwave Technology, Vol. 8, pp. 703-718, 1977.
- [18] M. Takahashi, " Generating Mechanism of Maintaining Force for Optical Fiber Installed in Ferrule Hole," IEEE Journal of Lightwave Technology. (Accepted subject to minor revision, October, 1997. Assigned No, 3250).
- [19] 高橋光雄, "光コネクタの温度特性に及ぼす要因の一考察," 電子情報通信学会. Vol. R95-45, pp. 57-62. (02, 1996)
- [20] N. Suzuki, " Design And Fabrication Of High Performance Optical Connectors," IEEE, GLOBECOM' 83, pp. 1196-1200, 1983.
- [21] E. Sugita, et al, " Highly Stable Physical Contact Optical Fiber Connector with Convex End," IEEE J. Lightwave Technology, Vol. 11, pp. 241-248, Feb., 1993.
- [22] 鈴木信夫. 他, " 光コネクタ損失特性の端面処理効果," 昭56年度信学全大, No.2256, 1981.
- [23] 高橋光雄, "光コネクタ組立体およびその研磨治具並びに光ファイバの接続方法," 公開特許公報 平1-121805, (1987)
- [24] T. Masuko, et al., " Polishing Machine For Ferrule Of Optical Fiber Connector," US Patent . No. 4,839,993. 1989.
- [25] カタログ, AT. NO. FP6-5NO :端面研磨機 OFL-2, セイコー電子工業株式会社. 1985.
- [26] カタログ, AT. NO. FP6-5NO :端面研磨機 OFL-601, セイコー電子工業株式会社. 1987.
- [27] 結城一郎, " ラッピング装置, 特許公報," 昭39-10298, 1964.
- [28] M. Takahashi, " Elastic Polishing Plate Method and Conditions for Forming Angled Convex Surface on Ferrule Endface," IEEE Journal of Lightwave Tech-

- nology. Vol. 15, No. 9, pp. 1675 - 1680, September, 1997.
- [29] M. Takahashi, "Optical Fiber end-surface Polishing Device", US Patent. No. 4,979,334. 1990.
- [30] M. Takahashi, " Method and Apparatus for Grinding Foremost End Surface of a ferrule," US Patent. No. 5,216,846. 1993.
- [31] M. Takahashi.: "Method for Grinding Ferrules For Ribbon Type Optical Connectors", US Patent. No. 5,265,381. 1993.
- [32] M. Takahashi.: "Apparatus For Grinding Endfaces of Ferrules Together with Optical Fibers Each Firmly Received in Ferrule", US Patent. No. 5,351,445. Oct 4, 1994.
- [33] M. Takahashi, " Optical Fiber End-Surface Polishing Device," US Patent. No. 5,547,418. 1996.
- [34] M. Takahashi, " Optical Fiber Ferrule Holding Plate for Optical Fiber End Polishing Apparatus," US Patent. No. 5,640,475. 1997.
- [35] M. Takahashi, " Compatibility of Conventional-Ferrule with Step-Ferrule for Angled Convex Optical Connectors," Proc. 45th IEEE ECTC, pp. 406-412, (May, 1995)
- [36] M. Takahashi, " Novel Stepped ferrule for angled convex polished optical fiber connector," Proc. IEEE OFC'95. San Diego, Vol. 8, pp. 184-185, (Feb, 1995)
- [37] M. Takahashi, " Compatibility for optical connectors with different slanted angles at their ferrule endfaces," Proc. IEEE CLEO / Pacific Rim'95. pp. 304. (July, 1995)
- [38] 高橋光雄, " 斜め球面研磨光コネクタの接続端面角度差異による互換性" 日本電子部品信頼性センタ、RCJ 第4回電子デバイスの信頼性シンポジウム、pp. 39 - 45, (11, 1995)
- [39] M. Takahashi, " Experimental Considerations for APC Optical Connectors with Slanted Angle of 8 degrees," Reports of The Graduate School of Electronic Science and Technology of Shizuoka Univ., Vol. 17, pp.89-95. 1996.
- [40] M. Takahashi, "Optical Fiber Connector", US Patent. No. 4,747,659. 1989.

- [41] M. Takahashi, "Optical Fiber Connecting Device," US Patent. No. 4,953,941. 1990.
- [42] M. Takahashi, "Optical Connector Ferrule", US Patent. No. 5,140,660. 1992.
- [43] 杉田悦治, 他, "斜めPC (APC)コネクタの互換性試験結果," 1995 信学春全大, C-289. 1995.
- [44] 平 淳司, 他, "超低反射戻り光Angled-PCコネクタ," 1994 信学春全大, C-204. 1994.
- [45] 皆見浩二, 他, "斜めPC (APC)コネクタの端面成形法," 1996 信学春全大, B-991. 1996.

第2章 斜め球面研磨法及び研磨装置，並びに研磨特性

2.1 まえがき

本論文の研究課題であるAPCコネクタの量産実用化のためには，第1章で述べたように，好適な性能を有する斜め球面成形研磨装置が前提となっていた．そこで，固定保持した光ファイバ付きフェルール端面を，公転及び自転の複合円運動をする弾性研磨盤に押し付けて行う研磨機構による斜め球面成形研磨装置が，1989年に高橋により新たに開発実用化されて，それが市場に提供されて，APCコネクタの量産が可能となった．

第2章では，初めに，フェルール端面の公転研磨軌跡と弾性研磨盤を併用した斜め球面成形研磨の原理について述べる．次に，量産を対象として製作した，12軸同時研磨用の斜め球面成形研磨装置の構成について述べる．さらに，本斜め球面研磨装置の量産上の実用性について記述する．ここで記述する実用性データは，本球面成形研磨装置を使用し，シングルモード光ファイバ用として，APCコネクタフェルールを8度に斜め球面成形研磨する実験により得られたものである．

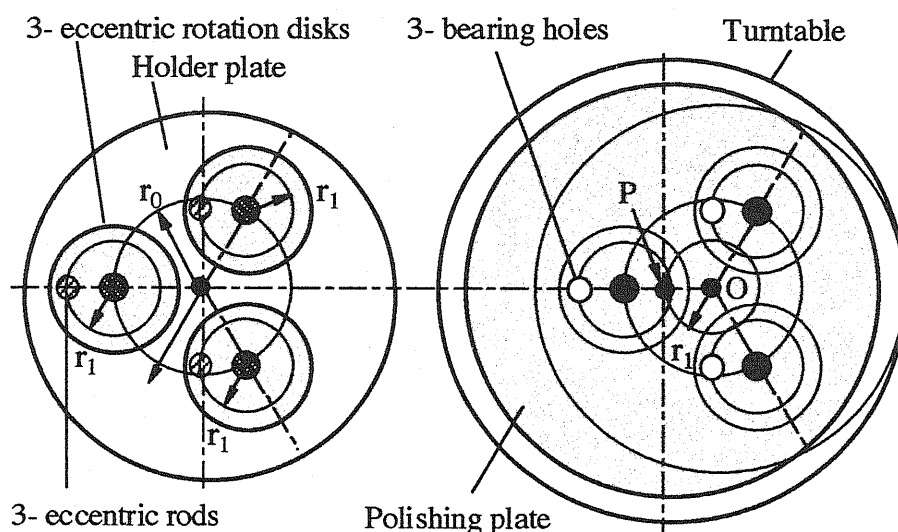
2.2 球面成形研磨法の理論

2.3項では，本論文の斜め球面成形研磨装置を構成するために，新たに提案した球面成形研磨法の理論について述べる．

2.2.1 研磨軌跡

1) 鏡面ラッピングの研磨原理

光コネクタの光学特性を満足させるために，光ファイバ端面は鏡面に仕上げなければならない．第1章で述べたように，シリコン・ウエーハや，機械部品などの平面の鏡面加工装置としては，ラッピング盤が使用されていることは公知である．ラッピング盤の加工は，加工面を通過する研磨剤の流れ方向が，常に変化するようにしたものであり，このときの研磨軌跡により，研磨過程において，ある一方向で研磨傷がついても，次の研磨軌跡で自動的に修復させることができる．本論文の研磨装



(a). 3-eccentric rotation disks. (b). 3-bearing holes of the turntable.

図 2.1 同期回転する偏心円盤による研磨盤の公転機構

置は、このようなラッピング盤の研磨原理により実現している[1],[2].

しかし、従来から公知のラッピング盤は、加工物自体を自転させて加工する原理によっている。従って、光ファイバ付きフェルールを本方式の加工原理によって加工した場合には、光ファイバが捻られて切断されるので使用できない。

本論文に述べる斜め球面成形研磨装置は、光ファイバ付きフェルールを固定保持した状態で、研磨盤を公転させて得られる研磨軌跡により、従来のラッピング盤と同一の研磨軌跡を得るように構成したことに特徴がある。

2) 偏心盤による公転機構

図2.1 (a), (b) は、新たに提案する研磨盤の公転機構を説明した図である。前述のように、光ファイバ付きフェールの端面の斜め球面の成形研磨では、光ファイバ付きフェール自体を回転して研磨を行うことはできない。そこで、図 2.1 (a) に示すように、固定されたホルダ・プレート(Holder plate)中心 O から半径 r_0 上に、3 個の回転偏心盤(3-Eccentric rotation plates)を、等角度、かつ、回転可能に取付け、研磨盤の公転駆動機構を構成する。各回転偏心盤は、中心の回転軸から

半径 r_1 上に、各々偏心ロッド(3-eccentric rods)を取付けて構成する。一方、研磨盤(Polishing plate)を取付けたターンテーブル(Turntable)の裏面には、中心から半径 r_0 上に、3個の軸受孔(3-bearing holes)を等角度に設けてある。公転機構は、ターンテーブルの裏面の3個の軸受孔に、3個の偏心ロッドを挿入して組み立てて構成する。

この場合、3個の偏心ロッドの位置関係は、ターンテーブルの裏面の3個の軸受孔に拘束されるので、ターンテーブル自体が結合リンクになる。従って、3個の回転偏心盤のうちの1個を回転駆動すれば、他の2個の3個の回転偏心盤は連動して、同期回転できる。ここで、ターンテーブルは、ターンテーブルの中心Pとホルダ・プレートの中心点Oとを結ぶ線分を公転半径 r_1 として、公転運動をする。

2) 偏心盤方式による研磨盤の研磨軌跡

図2.2 (a), (b), (c), (d) は、図2.1で述べた偏心盤方式による研磨盤について、公転運動の角度による研磨盤の位置関係を説明した図である。図2.2 (a)では、ターンテーブルの公転運動の角度が白矢印Aの示す位置関係を零度とする。ターンテーブル外縁の記号Kは、ターンテーブルの角度位相を示す。いま、3個の回転偏心盤の1個を右回りに駆動すれば、ターンテーブルは、K点の位置方向を保ったまま、公転半径 r_1 で右上方向に移動する。図2.2 (b)は、白矢印Bの示すように、回転偏心盤が90度回転した状態を示す。同様に、図2.2 (c), (d) は、白矢印C及びDの示すように、回転偏心盤が、各々180度、270度回転した時のターンテーブルの位置関係を示す。図2.2 (a)~(d)に図示したように、ターンテーブルの位相点Kの方向が一定のまま、ターンテーブルは1回公転する。

3) 公転による研磨軌跡

図2.3 (a), (b) は、フェルールが研磨盤面の任意の点に位置している場合に、研磨盤の公転により、フェルール先端面を通過する研磨砥粒の流れ方向(=研磨方向)が変化する状態を示す。図2.3 (a)においては、

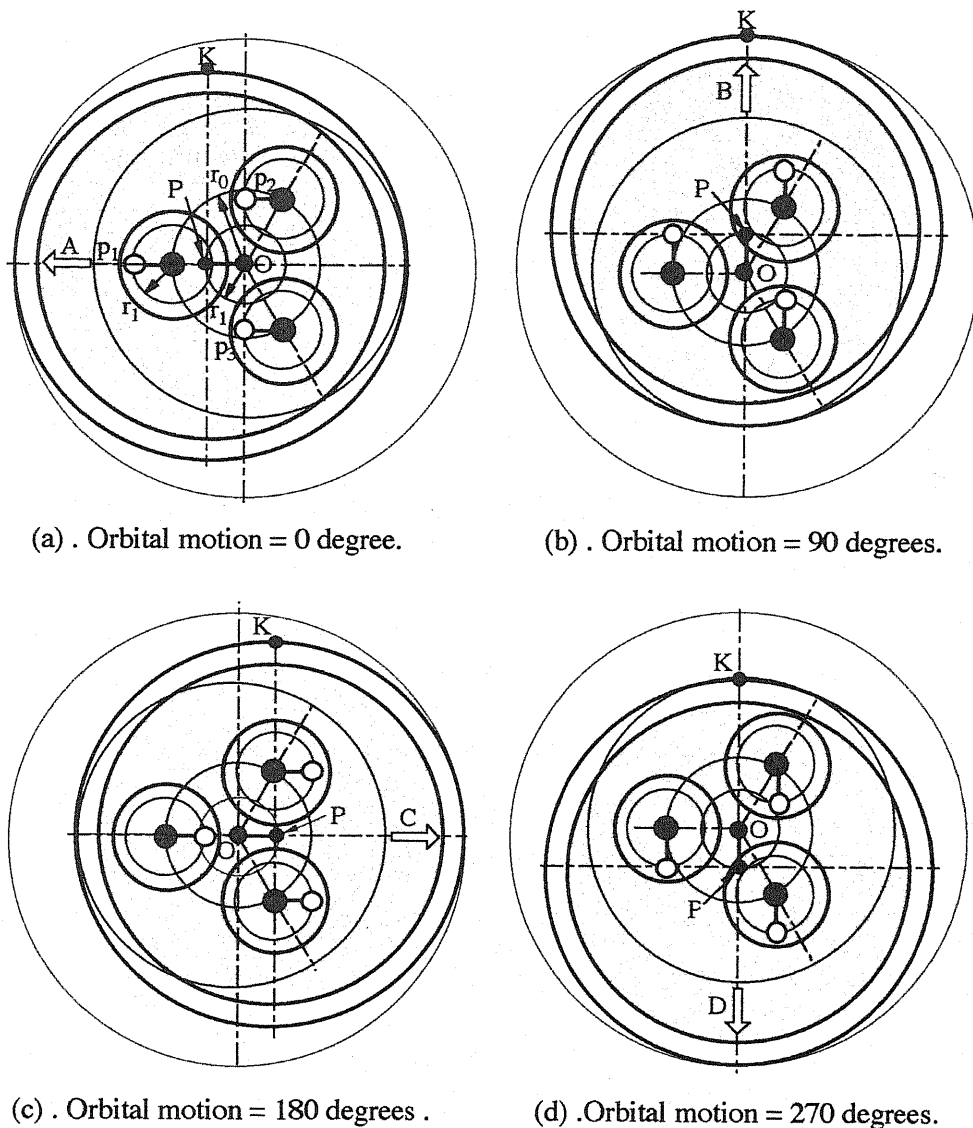


図 2.2 公転運動の角度による研磨盤の位置の説明図

ターンテーブルに載せた研磨盤は、黒矢印で示すように右回り方向に公転させているものとする。このとき、図2.2 (a), (b), (c), (d) に記した公転位置A, B, C及びDの各方向に対応するフェルールの位置を各々A', B', C'及びD'とすれば、各々の位置における研磨方向は、公転方向と逆方向の直線の黒矢印で表わされる。これらの研磨方向は、研磨盤の1公転毎に360度のあらゆる方向に連続して変化する。同時に、研磨速度はフェール端面の全面にわたって一様になる。従って、鏡面仕上げ研磨工程において、仮に、ある研磨方向で光ファイバ面に研磨すり

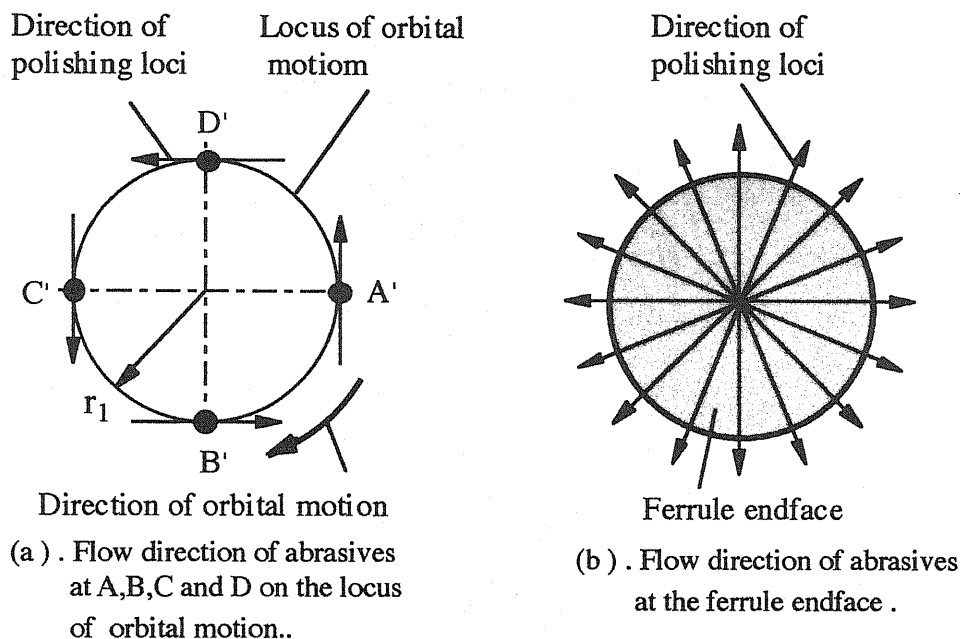


図 2.3 研磨盤の公転による研磨軌跡の説明図

傷が発生しても，連続して変化する研磨方向により，この研磨すり傷は自動的に修復できる．従って，光ファイバ端面は光学的に優れた研磨面に仕上げられる．このように，被加工物を回転しないように，固定保持して鏡面仕上げを行う研磨機構は，他の特許，文献には公表されていなかった特徴である[3]-[5]．

2.2.2 研磨盤の公転及び自転の複合運動機構

研磨盤の運動が公転のみの場合には，光ファイバ付きフェルール端面は，研磨盤面の一定の位置で連続して研磨が繰り返されることになる．従って，研磨盤は，公転しながら円周方向に自転させる必要がある．公転による円軌跡の楕円化を極力少なくするために，自転の角速度は，公転の角速度に比較して十分に遅くしなければならない．例えば，1 : 50 ~ 1 : 100 程度に十分に遅くしなければならない．従って，自転機構の回転数の減速比は大きくしなければならない．

図 2.4 は，前述の図 2.2 の公転機構に自転機構を付加して，研磨盤の公転及び自転の複合円運動を行わせる機構を説明した図である．本論文

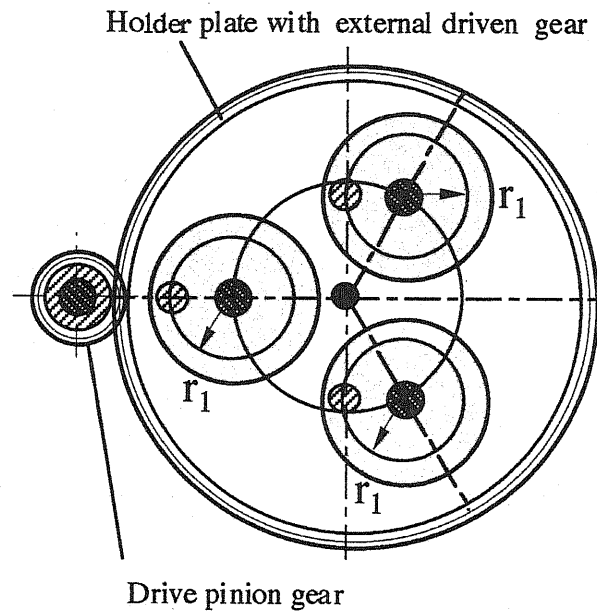


図 2.4 公転及び自転の複合円運動を行なう研磨盤の駆動機構

に記述する研磨盤の自転機構には、3個の回転偏心盤を取付けるホルダ・プレートの外周に大径の歯車を形成して、小径の駆動ピニオン歯車を噛み合わせる簡単な駆動機構を採用した。その他、自転の駆動機構としては、タイミング・ベルトによる方式、ハーモニック歯車機構などの方式を考えたが、いずれも、機械的な耐久性、保守性が懸念されたので採用しなかった[6]。

公転及び自転による複合円運動により、研磨した場合の研磨軌跡を図2.5に示す。図2.5において、 O は、ターンテーブルの中心 P の公転円の中心である。 F はフェルールであり、ターンテーブルの中心 P から距離 S の位置に固定されているものとする。ここで、ターンテーブルの公転方向を、黒矢印で示すように右回りとし、白矢印で示す自転方向を左回りにすれば、フェルール F は、公転半径 r_1 で右回りに公転する。この公転円軌跡を L_1 とし、また、公転円軌跡 L_1 の中心を P_F とすれば、フェルール F の公転軌跡 L_1 の中心 P_F のターンテーブルの中心点 P からの自転半径 r_2 は $(S + r_1)$ になる。従って、フェルール F の公転軌跡 L_1 の中心 P_F は、ターンテーブルの自転に連動して右回りに移動するので、

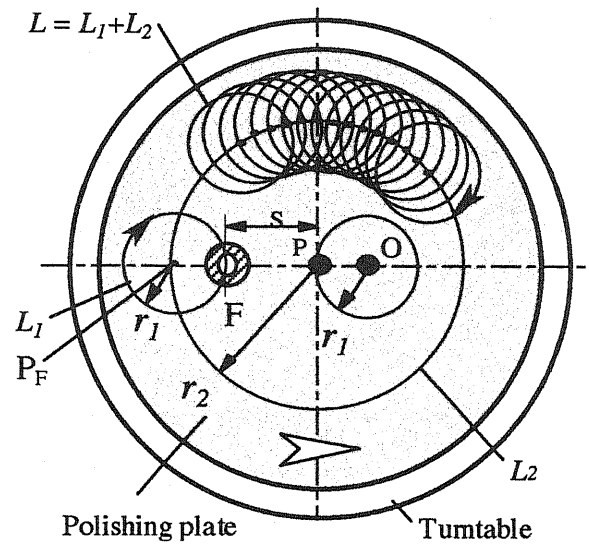


図 2.5 公転及び自転の複合円運動を行なう研磨盤によるフェルール端面の研磨軌跡

フェルール F の複合円運動による研磨軌跡 L は $(L_1 + L_2)$ で表わされる。

2.2.3 研磨領域とフェルールの配置

前述のように，光ファイバ付きフェルールの研磨加工には，面積の大きく取れる平板状の研磨盤を使用している．平板状の研磨盤では，多数個の研磨加工が同時にできる利点がある．図 2.6 に，公転及び自転の複合円運動をする研磨盤の研磨領域と，フェルールの配置例を示す．前述の図 2.5 から，研磨領域の最大直径は， $(2S + 4r_1)$ になる．また，最小直径は， $(2S)$ になる．従って，フェルール F が常にこの研磨領域の内部になるように，フェルール F を配置しなければならない．ここで，この研磨領域条件を満たす研磨ホルダの直径 ϕD は，図 2.6 から， $(2S + 2r_1)$ になる．この研磨ホルダの直径 ϕD の円周上に，複数個のフェルールを配置することができる．

2.3 弾性研磨盤による斜め球面成形研磨

2.2 項で述べたように，本論文の斜め球面成形研磨装置においては，弾性材質板の上面に研磨フィルムを貼付した弾性研磨盤を使用して，球

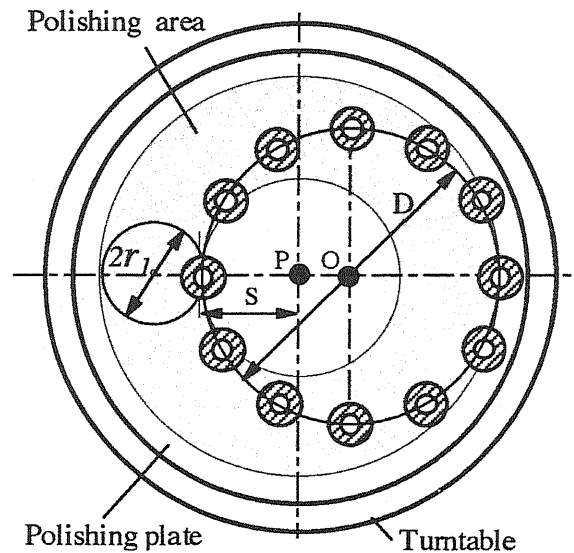


図 2.6 公転及び自転の複合円運動をする研磨盤の研磨領域とフェルールの配置例

面成形を実施する。

2.3.1 弾性研磨盤による斜め球面成形研磨法

図 2.7 (a), (b), (c) 及び(d) は, 弾性研磨盤による球面成形研磨の原理を説明した図である。弾性研磨盤は, ネオプレン合成ゴム平板の上面に, 研磨フィルムを貼付して構成する。図 2.7 (a)には, 予め, 先端面を所定の角度 θ に, 斜め平面研磨したフェルールの形状を示す。この斜め平面研磨は, ガラス製平板の上に研磨フィルムを貼付した平面研磨盤により行う。

図 2.7 (b) は, フェルールの先端部が, 研磨ホルダの下面から一部分突出するようにホルダプレートに取り付けて, 研磨荷重 $W (= \sum w)$ を負荷した状態を示す。このとき, フェルール下面と弾性研磨盤面の接触面とに負荷される分布荷重 w の大部分は, フェルールの外縁部に集中する[7]。この状態で弾性研磨盤を公転円運動させると, 最初にフェルール先端面の外周縁部付近のみが中空同心円状に研磨除去される。研磨の進行に伴って, 図 2.7 (c) に示すように, ドーナツ状の研磨除去面積は次第に増加し, フェルール下面と弾性研磨盤面の接触面とに負荷さ

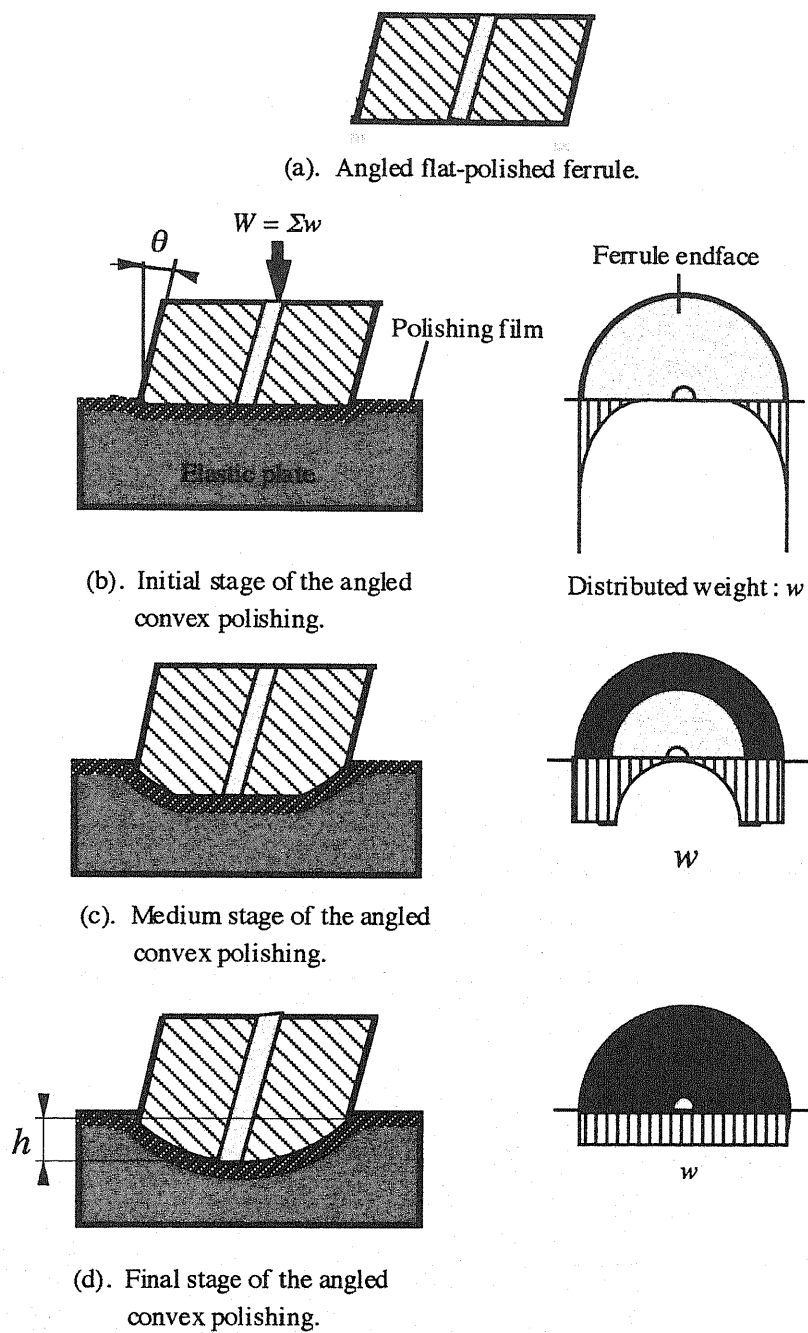


図 2.7 弾性研磨盤による斜め球面成形研磨の研磨原理の説明図

れる分布荷重 w は次第に減じてくる。最終的に、研磨除去面がフェルール中心に達した時点で、フェルール下面と弾性研磨盤面の接触面とに負荷される分布荷重 w は、図 2.7 (d) の小矢印に示すように、全面が均一になる。その結果、フェルール端面の研磨除去量は外縁部程多く、中

心に接近する程減じてくるので、最終的に、図 2.8 (d) に示すようにフェルール端面を球面状に成形することができる。

2.3.2 研磨フィルム及び研磨液

予備平面研磨及び球面成形用には、粒度が $15 \sim 20 \mu\text{m}$ の SiC 砥粒を結合した研磨フィルムを使用できる。粗研磨用には、粒度が $6 \sim 9 \mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒、中研磨用には粒度が $1 \mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒を結合した研磨フィルムを使用できる。仕上げ研磨には、粒度が $0.3 \mu\text{m}$ 以下の超微粒子の SiO_2 砥粒（ゾル）をポリエステル・フィルムに塗付したラッピング・フィルムを使用して好結果が得られる。研磨液は、蒸留水を研磨フィルム面に乾燥しない程度に少量散布する。

各工程の標準研磨時間は、使用するフェールの寸法形状によって若干異なるが、予備平面研磨及び球面成形に各 $30 \sim 40$ 秒、粗研磨、中研磨、及び仕上げ研磨には、各々 30 秒程度が必要である。

2.4 斜め球面成形研磨装置

2.4.1 斜め球面成形研磨装置の構成と研磨軌跡

図 2.8 (a), (b) に、前述の球面成形研磨理論を基本として構成した、量産用の 1 2 軸斜め球面成形研磨装置の構成及び駆動機構を示す。図 2.8 (a) は上平面図、図 2.8 (b) は側断面図を各々示す。図 2.8 (a) においては、直径が 125 mm 、厚さが 5 mm のネオプレン合成ゴム製弾性円盤の上面に、研磨フィルムの中心部分を両面接着テープ片で貼付して構成した弾性研磨盤を、ターンテーブルに載せて研磨盤 (Polishing plate) を構成する。本弾性研磨盤は各研磨工程毎に 1 枚ずつ準備しておく。これにより、各研磨工程毎にワンタッチで弾性研磨盤を交換できる。弾性研磨盤の代わりに、ガラス円盤に研磨フィルムを貼付した硬質研磨盤を使用して、フェルール端面の平面研磨に使用することもできる。

研磨プレートの中心点 P は、O 点を公転の中心軸とした半径 r_1 ($= OP = 15 \text{ mm}$) 上におく。そこで、研磨プレートを高速 (140 rpm)

で公転させると同時に微低速 (1.4 rpm) で自転させる。一方, 12 個の光ファイバ付きフェルールFを, ホルダー・プレート(Holder plate)に設けてあるアダプタの傾斜角度 8 度の取付け孔に挿入して固定する。この際, 研磨代としてフェルール先端部は, 0.1 ~ 0.2 mm だけホルダープレート下面と研磨フィルム上面間隙間 (= 0.2 mm) より多く突出するように設定しておく。ホルダー・プレートは, 4 隅のステイロッド(Stay-rod)に載せてから, 4 個の水平回転できるセットレバー(Set-lever)を内側に回して取付ける。ステイロッドには, 各々圧縮力調節可能に圧縮ばねが内臓されている。よって, セットレバーに設けたプレスピン(Press pin)により, ホルダー・プレートに研磨荷重を付加できる。

このようにして, O 点を公転軸として, 研磨プレートを半径 r_1 で右回りに高速公転させ, 同時に, 微低速で左回りに自転させる。これにより, L_1 で示す公転半径 r_1 (= 15 mm) の公転軌跡の中心が, L_2 で示す自転半径 r_2 (= 44 mm) に沿って移動する。これらの円運動によって図 2.8 (a) に示すような複合連続円軌跡 L_1+L_2 が得られる。

2.4.2 研磨盤の駆動機構

図 2.8 (b) は, 球面成形研磨装置の駆動機構を示す。動力部は, 一對の公転用減速電動機及び自転用減速電動機により構成する。ここで, 公転用減速電動機 1 (Geared motor 1) は, 先端部に駆動ピニオン歯車 1 (Drive pinion gear 1) を備え, 自転用減速電動機 2 (Geared motor 2) は, 先端部に駆動ピニオン歯車 2 (Drive pinion gear 2) を備えたものである。

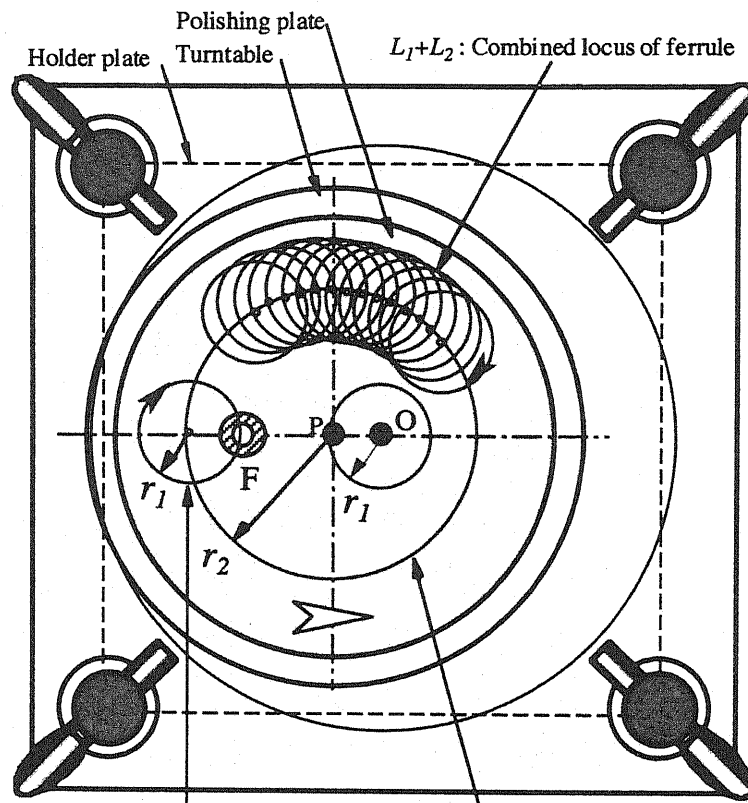
ターンテーブルの公転の駆動機構は次のようにして構成する。

1) 大径の外歯車円盤(External geared disk)

外歯車円盤の同一半径上には, 3 等配に配設した 3 本の軸受け孔を設けてある。

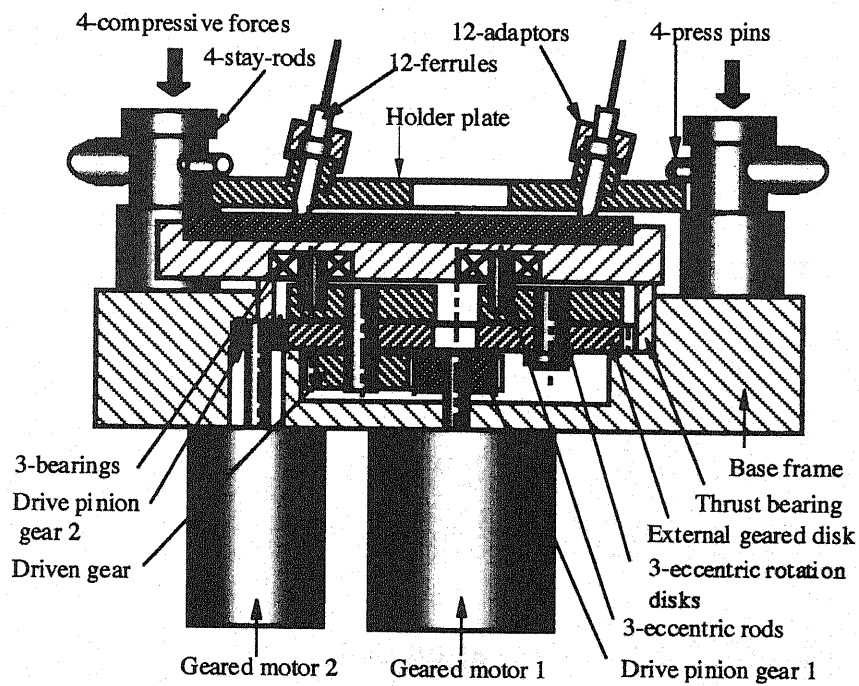
2) 3 個の偏心盤(Eccentric rotation disk)

各偏心盤には, 円盤の中心から半径 r_1 の位置に, 各々偏心ロッド(Eccentric rod)を設けてあると共に, 各偏心盤の中心には回転軸を取



L_1 : Revolving locus of the ferrule L_2 : Rotating locus of the turntable

(a). Upper plain view



(b). Side section view

図 2.8 12 軸斜め球面成形研磨装置の構成及び駆動機構の略図

付け、このうちの1本の軸には、前記の駆動ピニオン歯車1と噛み合う被駆動歯車(Driven gear)を取付けて1個の偏心盤を回転駆動するようにし、他の2個の偏心盤の回転軸は、自由に従動回転するようにする。

3) 歯車組立

外歯車円盤の同一半径上に、3等配に配設した3本の軸受け孔に、3個の偏心盤を挿入して構成した歯車組立。

4) ターンテーブル

ターンテーブルの裏面には、前記の3個の偏心盤に設けた3本の偏心ロッドを挿入する3個のベアリング孔を設けてある。

以上のように、ターンテーブルの公転駆動機構を構成する。ターンテーブルの公転運動において、動力は、駆動ピニオン歯車1⇒1個の偏心盤⇒3個の偏心盤の同期回転⇒3本の偏心ロッドの同期回転⇒ターンテーブル裏面の3個のベアリング孔⇒ターンテーブルの公転の順に伝達される。

ターンテーブルの自転駆動機構は、駆動ピニオン歯車2を大径の外歯車円盤に噛み合わせて構成する。ターンテーブルの自転においては、動力は、駆動ピニオン歯車2⇒大径の外歯車円盤の順に伝達される。

この自転機構により、研磨フィルムの局所的な摩滅防止、及び研磨スラッジの排除によって、光ファイバ端面の研磨品質の安定化が図られる。更に、この自転機構により、研磨フィルム面積を有効に使用できる。

図2.9は、図2.8で記述した12軸斜め球面成形研磨装置の構成部品、及び組立構造の詳細図である。表2.2は部品名リストである。

2.4.3 斜め球面成形研磨装置の実施例

図2.10は、図3の機構に準拠した12軸斜め球面成形研磨装置の写真を示す。この研磨装置は、12個の光ファイバ付きコネクタの同時研磨機能を備えたものである。本斜め球面成形研磨装置の寸法は、ファイバ支柱を除いて、230(W)×230(D)×255(H) mm、質量は16 kgfである。電源は100～240V AC電源を使用する。本研磨装置は、フェ

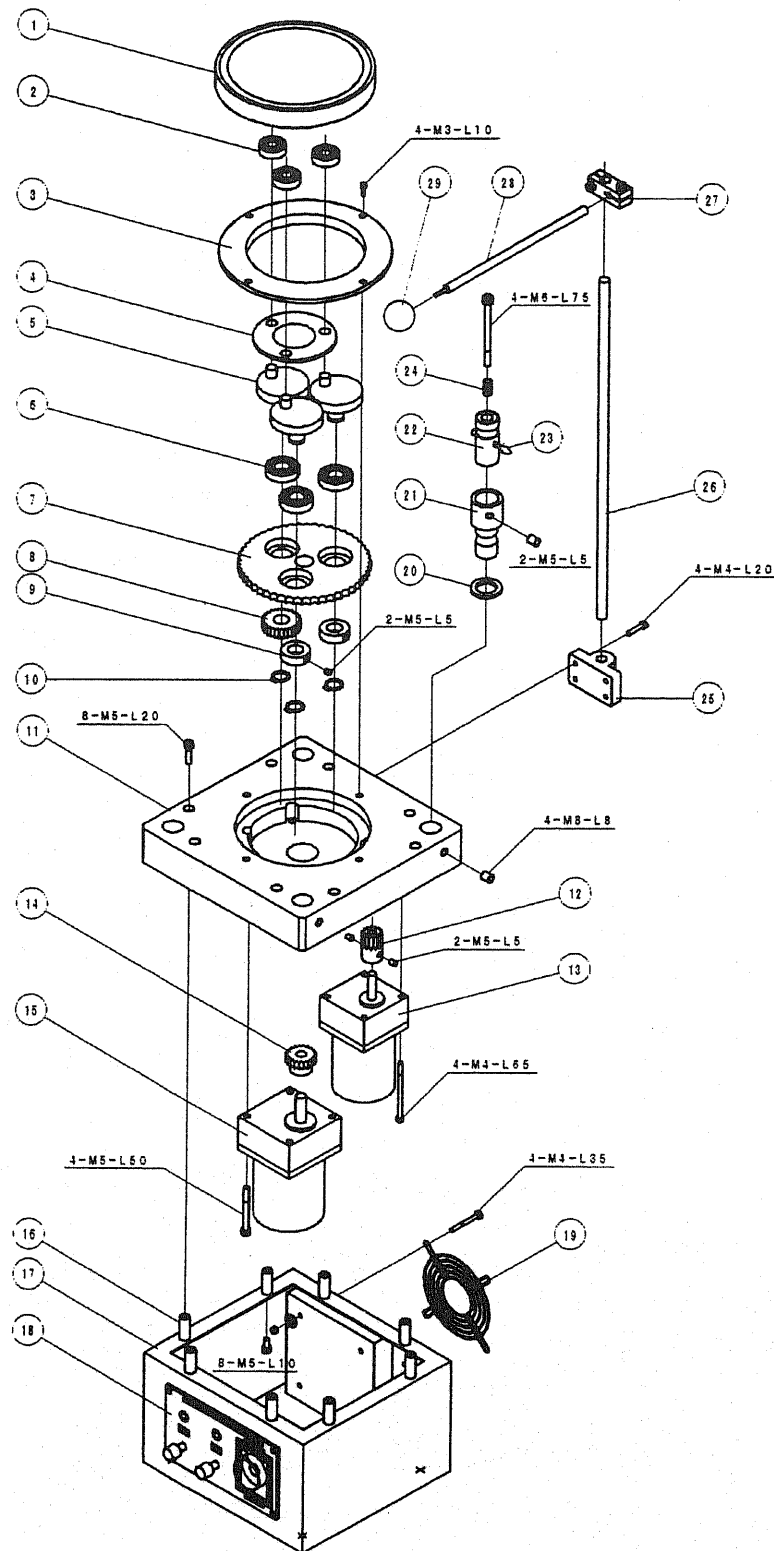


図 2.9 12 軸斜め球面成形研磨装置の組立部品及び構成図

表 2.2 12 軸斜め球面成形研磨装置の部品名リスト

No	Parts name	Q'ty	No	Parts name	Q'ty
1	Turntable	1	18	Control panal	1
2	Bearings	3	19	Fan guard	1
3	Thrust ring	1	20	Adjust washers	4
4	Alignment plate	1	21	Stay rods	4
5	Eccentric disks	3	22	Press rods	4
6	Bearings	3	23	Press pins	4
7	External geared disk	1	24	Coil springs	4
8	Driven gear	1	25	Hunger holder	1
9	Washers	2	26	Hunger rod	1
10	Snaprings	2	27	Beam holder	1
11	Baseframe	1	28	Beam	1
12	Drive pinion gear 2	1	29	Protect ball	1
13	Geared motor 2	1	30		
14	Drive pinion gear 1	1			
15	Geared motor 1	1			
16	Guide pins	8			
17	Base housing	1			

ルールのホルダープレート着脱時間，洗浄時間を含めて6～7分で12個の光ファイバ先端を同時に斜め球面成形研磨できる(傾斜平面研磨を含む)。従って、毎時100～120個の斜め球面成形研磨能力を具備している。

図 2.11 に、野外組み立て用に、DC12V で駆動できるようにした12軸，6軸及び2軸の同時研磨用の斜め球面成形研磨装置の写真を示す。これらの球面研磨装置の仕様の概要として、ファイバ支柱を除いた寸法は、150(W)×150(D)×165(H) mmから90(W)×120(D)×115(H) mmの範囲である。質量は、4.6 kgfから3.2 kgfであり、小型軽量に構成してある。

2.5 斜め球面成形研磨装置の評価実験

2.5.1 評価実験項目と評価基準

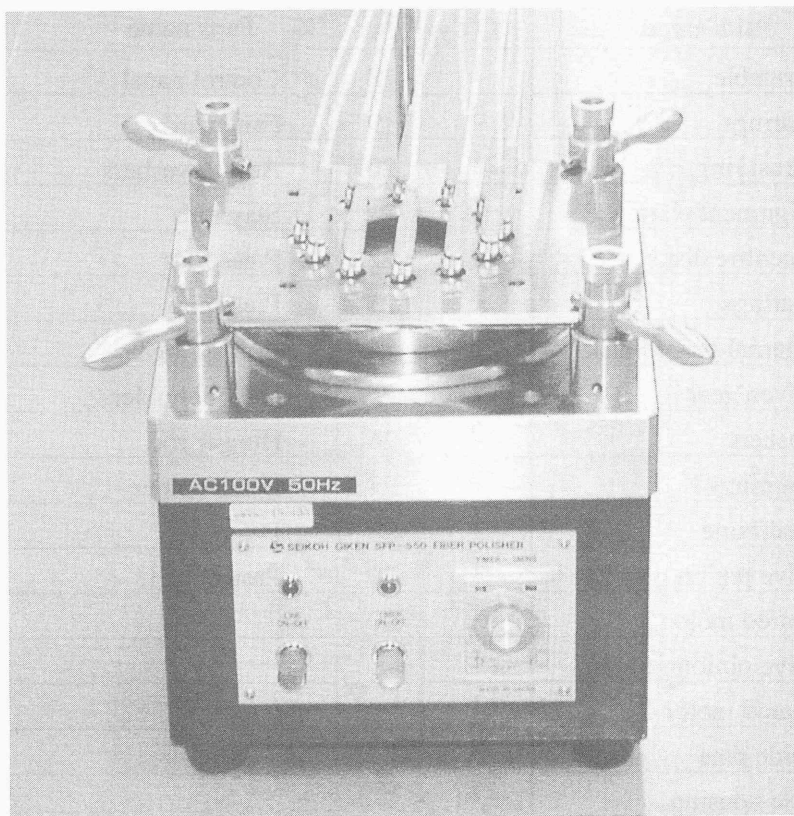


図 2.10 工場生産用の 12 軸斜め球面成形研磨装置の 1 例の写真

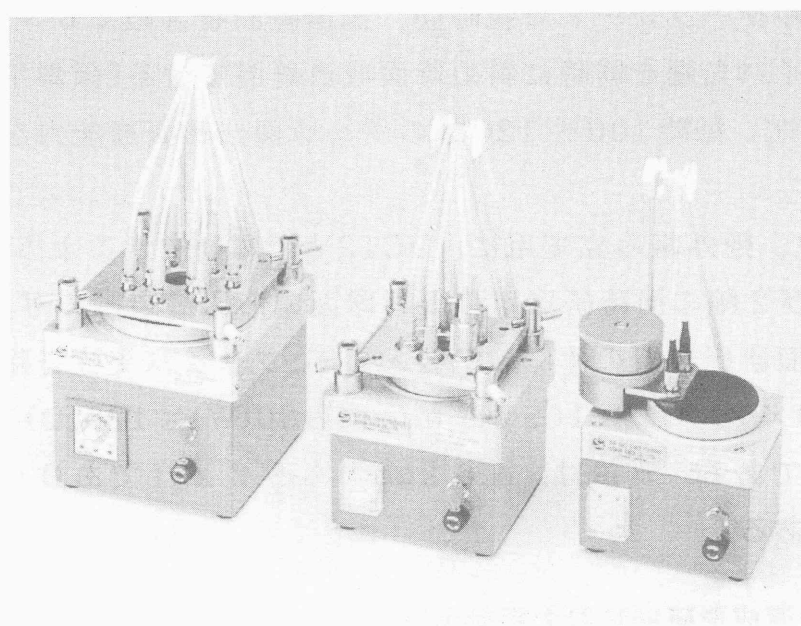


図 2.11 野外組立用の 12 軸，6 軸及び 2 軸斜め球面成形研磨装置の 1 例の写真

1) 評価実験項目

図2.10の写真に示した12軸斜め球面成形研磨装置を用い、フェルール端面傾斜角度を8度に設定したシングルモード光ファイバ付きAPC光コネクタ・フェルールについて、斜め球面成形研磨に関する性能評価実験を行った。一般に、斜め球面成形研磨装置の性能評価は、球面曲率半径のばらつき、光ファイバ光軸からの球面頂点の偏心、光ファイバ端面のフェルール端面からの凹み量などの機械特性、及び挿入損失、反射戻り光などの光学特性について行われている。

ここで、単心光ファイバ用APCコネクタの対象になるフェルールの代表的な直径は、FC型及びSC型コネクタ用の2.5 mm、及びMU型コネクタ用の1.25 mm、さらに、高橋により考案されたステップ・フェルールの1.4 mmである[8]-[13]。これらのフェルール端面の直径は、各々2 mm、1 mmおよび1.4 mmであるので、評価実験には以上の3種類のフェルールを使用した。

2) 評価基準の設定

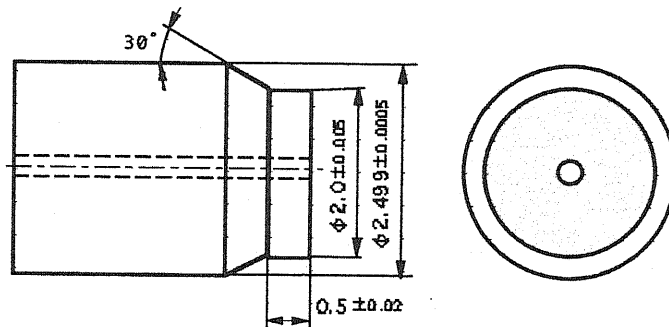
性能評価は、シングルモード光ファイバ用8度FC/APCコネクタの、一般市場取引に適用される規格に準拠する。すなわち、機械特性は、球面曲率半径が5～12.5 mm、斜め球面の傾斜が8度の計測基準面に対して測定した、光ファイバ光軸からの斜め球面の頂点の偏心が50 μm 以下、光ファイバ端面のフェルール端面からの凹み量が-0.05 μm 以内とした。光学特性の性能評価の基準としては、反射戻り光は-60 dB 以下、挿入損失は0.5 dB 以下とした。

3) 実験条件の設定

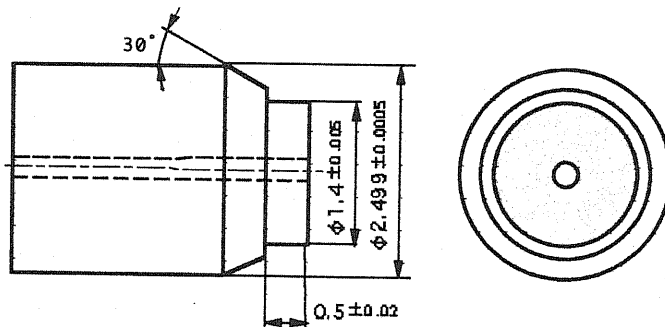
実験条件は次のように設定した。

3.1) フェルール

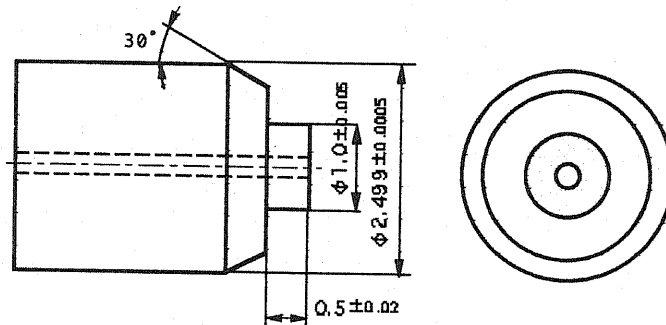
実験試料として、標準のFC形ジルコニア・セラミック製フェルールを使用した。フェルール先端部は、図2.12に示すように、直径が2 mm、1.4 mmおよび1 mm、長さが0.5 mmの直円筒に加工した。フェルールの直円筒部外径の中心孔に対する偏心は5 μm T.I.R(=Total in-



(a). Ferrule endface diameter of 2.0 mm.



(b). Ferrule endface diameter of 1.4 mm.



(c). Ferrule endface diameter of 1.0 mm.

図 2.12 フェルール試料の形状

indicator reading = ダイアルインチケータの読みの最大値と最小値の差)に規制した。このフェルールにシングルモード光ファイバを接着して、FC型光コネクタ・プラグに組み込んで実験試料とした。試料個数は1種類について、12個を1ロットとして、5ロット(合計60個)、3種類で合計180個を製作した。

3.2) コネクタ部品

コネクタプラグ及び整列アダプタはFC型コネクタ用を使用した。た

<第2章>

だし、相互のフェルール間の円周方向の回転誤差を4度以下に規制したものを使用した。

3.3) 研磨盤

最初の平面研磨用には、厚さ5 mmのガラス製円盤に研磨フィルムを貼付した研磨盤を使用した。球面研磨用には、厚さが5 mm、ショアー硬さ (H_s) が各々70, 80, 及び90のネオプレン合成ゴム製円盤の上面に、各々研磨フィルム貼付した3種類の硬さの弾性研磨盤を使用した。ただし、研磨フィルムを貼付した実装状態では、弾性研磨盤の研磨フィルム上面で、硬さの実測値は各々 $H_s \approx 80, 90$ 及び100であった。

3.4) 研磨荷重

研磨荷重は、各研磨工程共通に各々100 grf/mm², 150 grf/mm² 及び200 grf/mm²の3種類に設定した。

3.5) 研磨フィルム及び研磨液

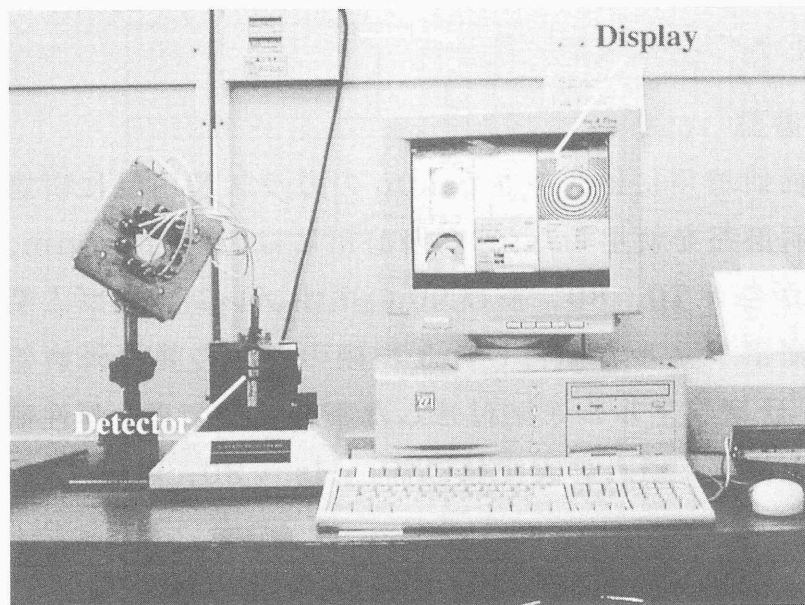
研磨フィルムは、予備平面研磨及び球面成形用には、粒度が15~20 μm のSiC砥粒を使用した。粗研磨用には粒度が6~9 μm のダイヤモンド砥粒、中研磨用には粒度が1 μm のダイヤモンド砥粒を使用した。仕上げ研磨には、粒度が0.3 μm 以下の超微粒子のSiO₂砥粒(ゾル)をポリエステル・フィルムに塗付したラッピング・フィルムを使用した。研磨液は、蒸留水を研磨フィルム面に乾燥しない程度に少量散布する方法で行った。

3.6) 研磨速度及び研磨時間

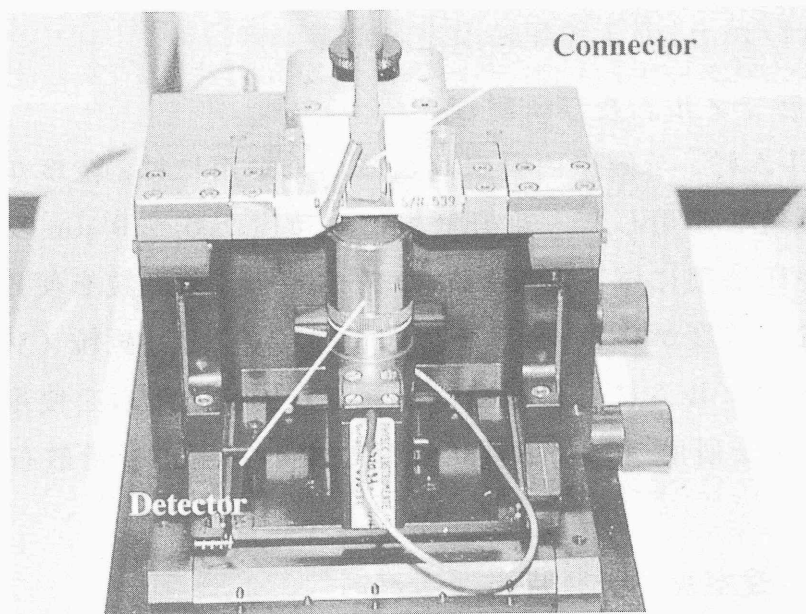
上記12軸斜め球面成形研磨装置では、研磨速度は約13 m/分である。各工程の標準研磨時間は、予備平面研磨及び球面成形に各30~40秒、粗研磨、中研磨、及び仕上げ研磨には、各々30秒の量産条件とした。

4) 測定装置

図2.13(a), (b)は、本研磨実験で使用した測定装置の写真である。測



(a) . View of measuring equipment.



(b) . View of detecting portion.

図 2.13 光干渉方式の光コネクタ端面測定装置

定は、光コネクタの表面からの反射光と、オプチカルフラットから反射された参照光との間の干渉縞を測定する方法によっている[14]。図 2.13(a)は、本測定装置の全体の構成を示す写真である。図 2.13(b)は、光コネクタの取付け部分の拡大写真である。

2.5.2. 評価実験結果

1) 研磨軌跡と研磨形状

図 2.14 に、フェルール先端の研磨軌跡例の写真を示す。この研磨軌跡は、研磨フィルム上でトレースされたものである。図 2.14 から、本研究の意図した公転及び自転による複合円研磨軌跡が明瞭に具現されていることが判る。

図 2.15 (a) は、光干渉測定器で測定したフェルール端面の干渉縞の写真を示す。図 2.15 (a) では、フェルールの先端部直径が 1.4 mm の場合を示している。図 2.15 (a) から、研磨面は同心円状の球面に成形されていることが判る。本研磨装置の公転及び自転の運動軌跡から計算すると、端面傾斜角度 8 度に起因する球面の楕円は約 1%、研磨軌跡に起因する楕円は約 2% と微小である。

図 2.15 (b) に、端面直径が 1.4 mm のフェルール先端部の側面プロフィールの 1 例を示す。

図 2.16 に、端面直径 1.4 mm のフェルール先端部の 3 次元プロフィールの実測値の一例を示す。測定は、前述の光干渉測定器により行った。ただし、研磨条件は、研磨荷重 w が $150 \text{ grf} / \text{mm}^2$ 、弾性研磨盤の硬さ H_s が 80 とした場合の実験試料について示す。図 2.16 において、Z 軸のスケール単位は μm 、X 軸及び Y 軸のスケール単位は各々 $10 \mu\text{m}$ で表示してある。下部にプロットされている記号表示は各々次の項目を示している。RADIUS は球面の曲率半径、HEIGHT は光ファイバ端面のフェルール端面からの凹み深さ、OFFSET は球面の頂点の光軸からの偏心を示している。このうち、LINEAR は球面の頂点の光軸からの直線距離、(x, y) は球面の頂点の x 軸及び y 軸方向の座標位置を示している。ANGLE はフェルール・キー位置と直角方向（傾斜面方向 = yy 軸）を零度としたときの球面の頂点の位置の振れ角度を示している。(x, y) は球面の頂点の x 軸及び y 軸方向の振れ角度を示している。を示している。

図 2.16 では、斜め球面の曲率半径 R は各々 14.8 mm 及び 15.8 mm、光ファイバ端面のフェルール端面に対する凹み深さは各々 $-0.01 \mu\text{m}$ 及

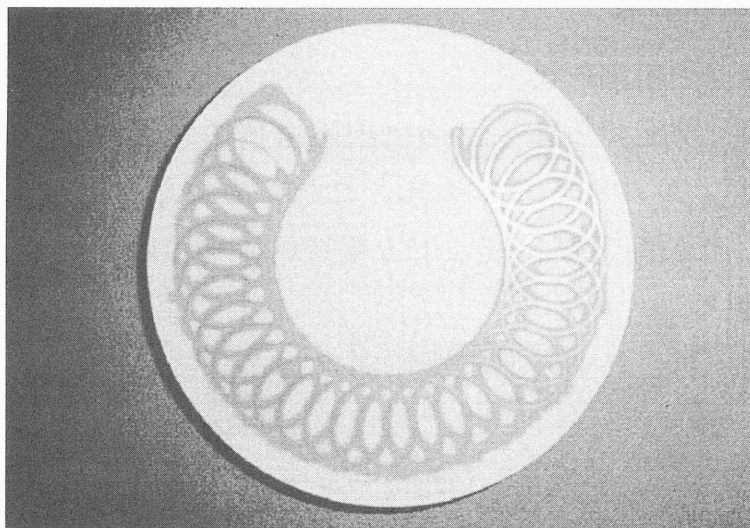
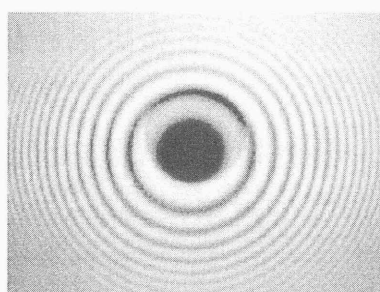
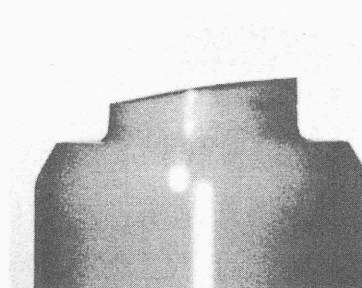


図 2.14 研磨フィルム面に印加されたフェルールの研磨軌跡痕



(a). Interference fringe.



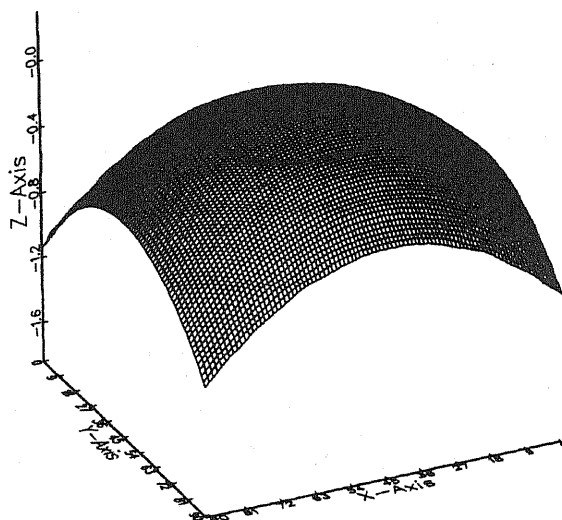
(b). polished profile.

図 2.15 研磨後のフェルールの端面の干渉縞，及び側面形状例

び $-0.04 \mu\text{m}$ ，並びに斜め球面の頂点の光軸に対する偏心は各々 $9 \mu\text{m}$ 及び $24 \mu\text{m}$ であった。

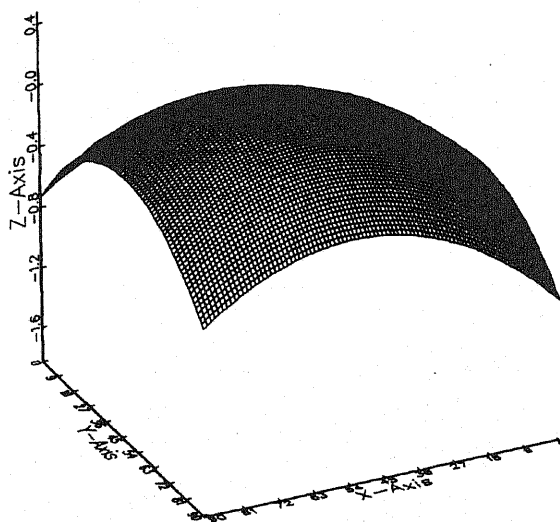
2) 曲率半径

図 2.17 に，弾性研磨盤の硬さ H_s を基準として，フェルールの先端面の半径 b ，及び研磨荷重 w を変えた場合の，斜め球面の曲率半径 R の測定値を示す。図 2.17 から，弾性研磨盤により斜め球面成形研磨を行った場合の研磨特性として次のことが判る。斜め球面の曲率半径 R は，弾性研磨盤の硬さ H_s が高くなるのに伴って急速に曲率半径 R は大きくなる。同様に，研磨荷重 w が小さくなるにしたがって，曲率半径 R は大



Connector ID: DEFAULT

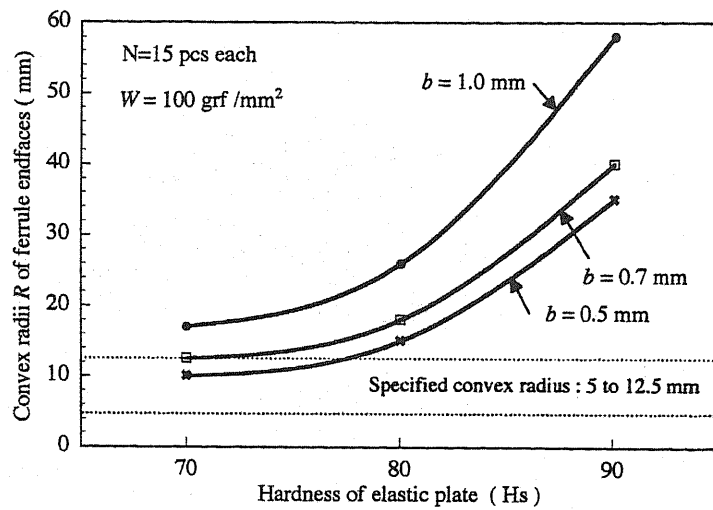
RADIUS : 14.8 mm PASS
HEIGHT : -0.01 μm PASS
OFFSET PASS
Linear : 9 μm (x: 4 y: -8)
Angle : 0.03 deg (x: 0.02 y: -0.03)



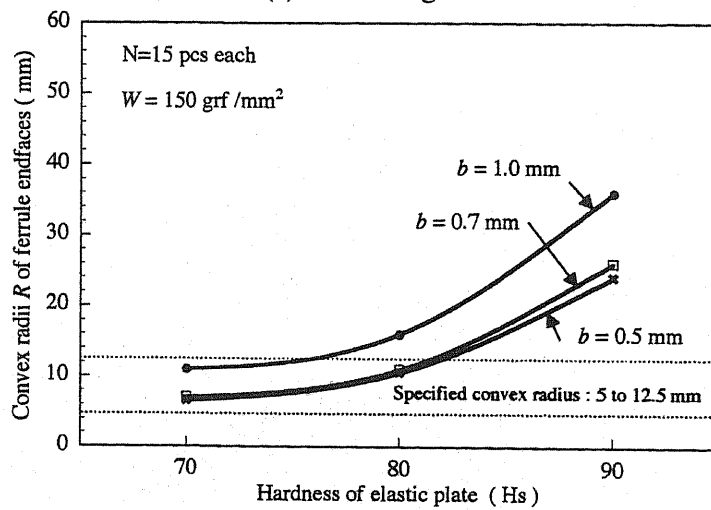
Connector ID: DEFAULT

RADIUS : 15.8 mm PASS
HEIGHT : -0.04 μm PASS
OFFSET PASS
Linear : 24 μm (x: -21 y: -12)
Angle : 0.09 deg (x: -0.08 y: -0.04)

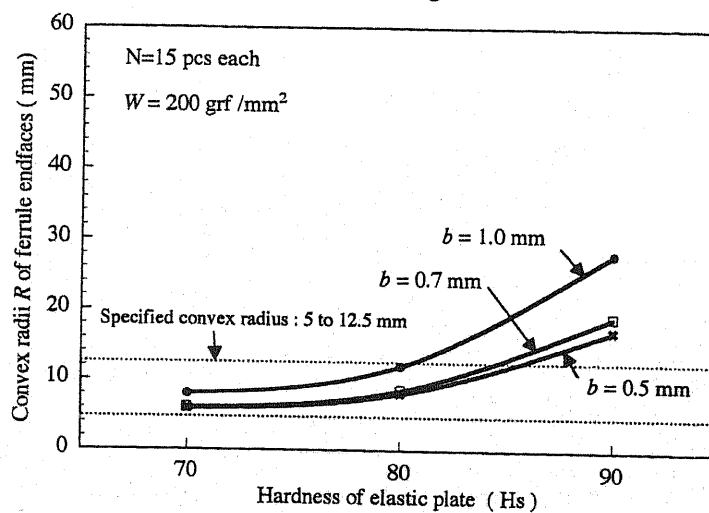
図 2.16 フェルールの斜め球面の 3 次元形状の測定プロット



(a) . $w = 100 \text{ grf/mm}^2$



(b) . $w = 150 \text{ grf/mm}^2$



(c) . $w = 200 \text{ grf/mm}^2$

図 2.17 各パラメータによる斜め球面成形研磨面の曲率半径

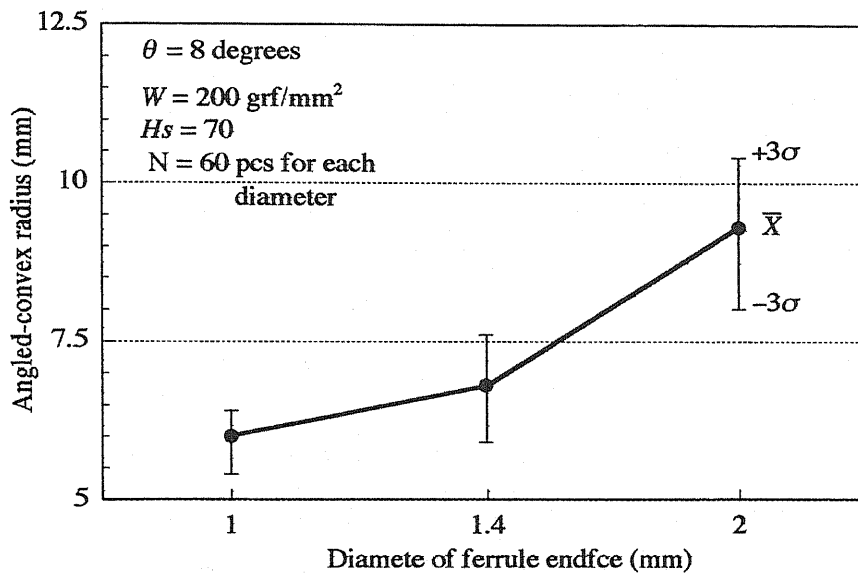


図 2.18 各パラメータによる斜め球面成形研磨球面の曲率半径と偏差

きくなる。更に、フェルールの先端面の半径 b が大きくなるのに伴って、曲率半径 R は大きくなる。一方、別の視点で言えば、研磨荷重 w が大きいとき、弾性研磨盤の硬さ H_s が低くなるのに伴って曲率半径 R は小さくなり、フェルールの先端面の半径 b が小さくなると、曲率半径 R が飽和してくる傾向が認められる。一例を挙げれば、研磨荷重 w が 200 gr/mm^2 、フェルールの先端面の半径 b が 1 mm の場合、弾性研磨盤の硬さ H_s が 80 と 75 における曲率半径 R は、各々 12.5 mm と 9.0 mm である。しかし、 H_s が 75 と 70 における曲率半径 R は、各々 9.0 mm と 8.0 mm であり、曲率半径 R の差異は各々 3.5 mm 、 1.0 mm になる。従って、フェルールの先端面の半径 b が一定の場合、曲率半径 R の寸法ばらつきを小さくするためには、弾性研磨盤の硬さ H_s を低くするか、研磨荷重 w を許容できる範囲で大きくすることを推奨できる。

更に、図 2.17 によれば、フェルールの先端面の半径 b が 1 mm の場合、曲率半径 R の評価基準の $5 \sim 12.5 \text{ mm}$ を満足させるためには、硬さ H_s は 80 以下の弾性研磨盤を使用して、研磨荷重 w は 200 gr/mm^2 にしなければならない。

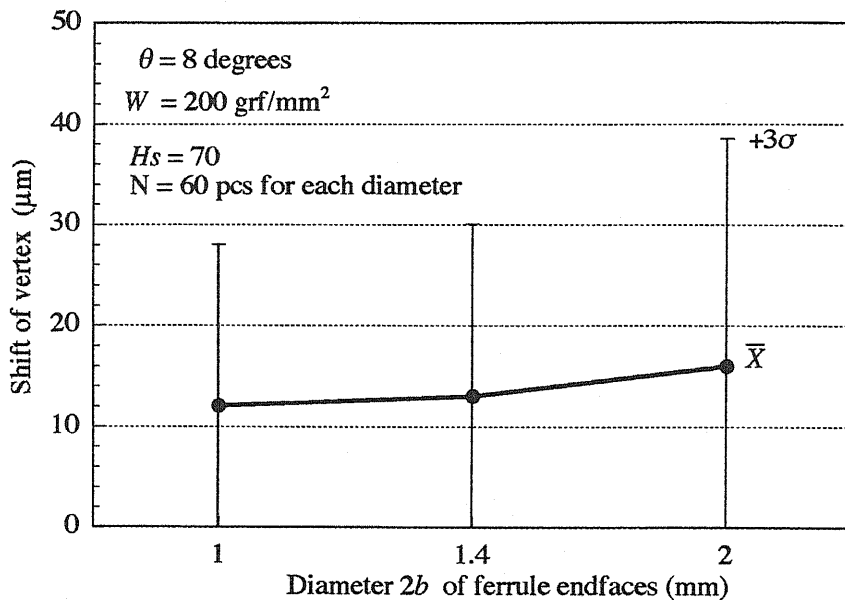


図 2.19 斜め球面の頂点の光軸に対する偏心量

図 2.18 は、本実験により得られた斜め球面の曲率半径 R の測定値の寸法ばらつきの偏差を示す。図 2.18 において、ばらつきの偏差は各フェルールの先端面の半径 b 毎に得たものであり、研磨荷重 w が 200 gr/mm^2 及び弾性研磨盤の硬さ H_s が 70 の場合について示したものである。図 2.18 から、この偏差は、フェルールの先端面の半径 b に略比例して増加することが判る。この結果から、フェルールの先端面の半径 b は小さいものが有利であると言える。

3) 球面頂点の偏心

図 2.19 に、斜め球面頂点の光軸に対する偏心とそのばらつきの偏差を示す。図 2.19 において、偏心とそのばらつきは、各フェルールの先端面の半径 b の差異による、光ファイバ光軸を基準として測定したものである。ただし、図 2.19 は、研磨荷重 w が 200 gr/mm^2 、及び弾性研磨盤の硬さ H_s が 70 の場合について示したものである。図 2.19 から、斜め球面頂点の偏心の偏差の最大値は 38.5 μm となり、前述の評価基準の 50 μm 以内にあることが判る。

前述のように、弾性研磨盤による球面研磨法では、フェルール端面の

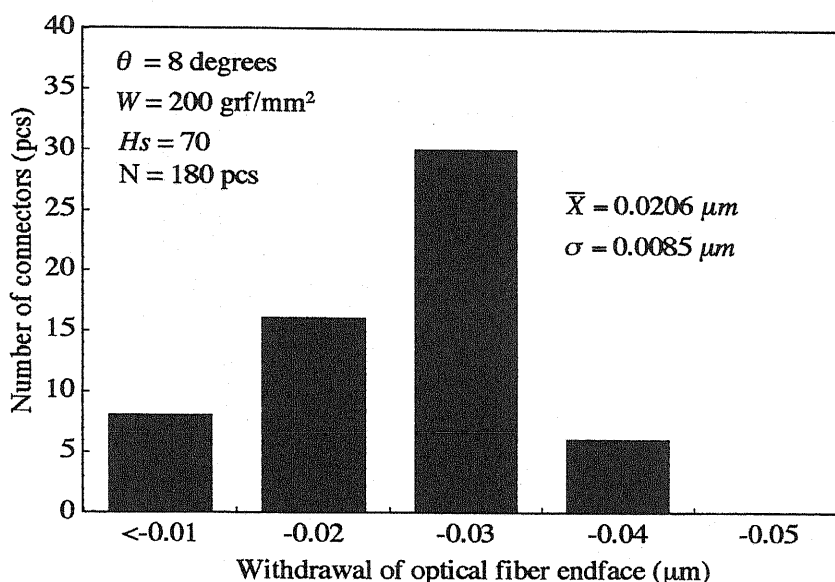


図 2.20 光ファイバの研磨端面のフェルール端面からの凹み深さ

中心が球面頂点になるように成形研磨されるので、この斜め球面頂点の偏心は、研磨機の研磨特性より、むしろ、フェルールの先端形状及び精度に大きく影響される。例えば、通常のコネクタ用フェルールの先端部には、テーパ面取り部を設けてあるが、このようなフェルールを斜め球面研磨した場合、研磨の進行につれて研磨面の中心が光軸から徐々にずれるので、斜め球面頂点の光軸からの偏心量が増加する。さらに、球面研磨前のフェルール素材の先端面が、中心孔に対して偏心している場合には、その偏心に比例して斜め球面頂点の偏心は大きくなる。この影響を改善するために、高橋は、フェルール先端部に小径の直円筒部を設けた、新しいステップ・フェルールを開発した[15]。このステップ・フェルールの先端部の構造は図 2.12 に示したものである。

4) 光ファイバ端面の凹み深さ

図 2.20 に、各端面直径のフェルールについて、光ファイバ端面のフェルール端面からの凹み深さのヒストグラムを示す。図 2.20 から、最大凹み深さは $-0.046 \mu\text{m}$ となり、前述の評価基準の $-0.05 \mu\text{m}$ 以内にあることが判る。

ただし、硬さ、ヤング率、及び被研磨性などの材質特性が大きく異な

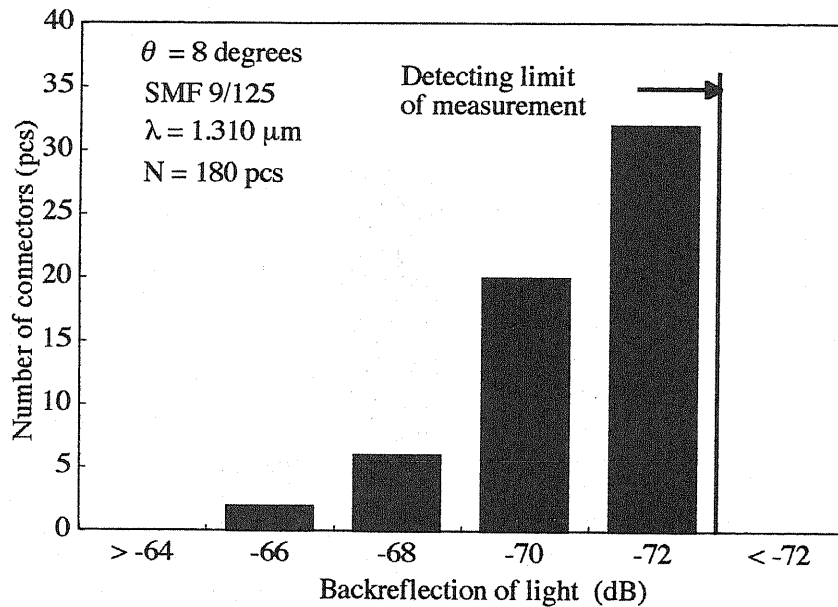


図 2.21 光ファイバの斜め球面研磨面からの反射戻り光

るフェルール面と光ファイバ面とを同時に研磨した場合、双方の研磨除去量を完全に一致させることは物理的に困難である。この光ファイバ端面の凹み量は、仕上げ工程の研磨フィルムの砥粒の材質、硬さ、メッシュサイズ、及びその均一分布度、バインダーの材質、製造方法、及び仕上げ研磨時間の長短などの多くの要因に依存する [16]。従って、光ファイバ端面の凹み量は、研磨装置の研磨機構と同時に仕上げ研磨フィルムの特長にも依存すると考えられる。

5) 反射戻り損失

図 2.21 は、各端面直径のフェルールについて、光源波長 $\lambda = 1.310 \mu\text{m}$ における光ファイバ端面からの反射戻り光の実測値の総合ヒストグラムを示したものである。図 2.21 から、反射戻り光の測定値は -66 dB 以下であり、前述の評価基準の -60 dB 以下の目標値を十分達成していることが判る。

反射戻り光 B_R は第 1 章の式(1.8)により与えられる [17]。シングルモード光ファイバにおいて、 $n_1 = 1.47$, $\omega_0 = 4.2 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.310 \mu\text{m}$ として、光ファイバ端面の傾斜角度が 8 度の場合、式 (1.8) により計算した反射戻り光 B_R の計算値は約 -84 dB である。ただし、反射戻り

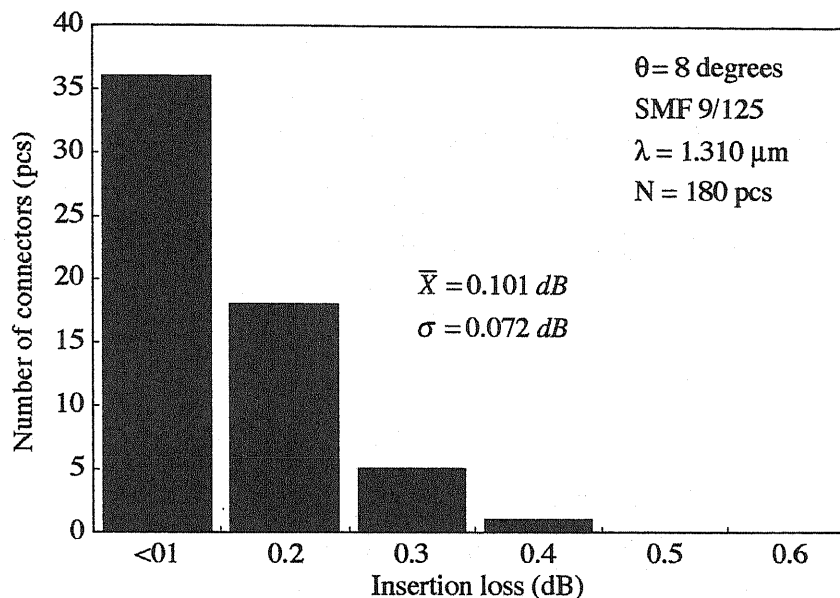


図 2.22 APCコネクタの接続時の挿入損失

光の測定値は、使用する測定器の測定感度により、最小測定値は制限される。本論文の反射戻り光測定は、測定感度 - 72 dB の測定器を使用した [18]。

6) 挿入損失

図 2.22 は、斜め球面の半径 r をもつ各フェルールについて、光源波長 $\lambda = 1.310 \mu\text{m}$ における挿入損失のヒストグラムを示したものである。図 2.22 から、挿入損失の最大偏差値は $(\bar{X} + 3\sigma)$ は 0.41 dB であり、前述の評価基準の 0.5 dB 以内の目標値を満足している。

挿入損失は、前述の評価基準の各項目を集約した総合評価結果を示すものであり、前述の適正なフェルール先端形状、偏心精度、及び適正な仕上げ研磨フィルムの適用により、本論文の斜め球面成形研磨装置は、APC 光コネクタフェールの斜め球面成形研磨用として、機械特性及び光学特性に関する基本的な性能を具備していることを示している。

2.6 評価実験結果の考察

斜め球面成形研磨装置において、特に実用上で重要な機能である、斜め球面の曲率半径の成形限界、及び光ファイバ研磨面のフェルール端面

からの凹みの限界について取り上げて考察する。

2.6.1 球面の曲率半径と弾性研磨盤のたわみ変形

2.3.1 項の図 2.7 (d) に示した、フェルールの円筒外縁からの球面頂点の高さ h は、弾性研磨盤の変形深さ (= h) に等しいものと仮定する。この場合、球面頂点の高さ h は次の式(2.1)により求められる。

$$h = R^2 - \sqrt{R^2 - b^2} \cong b^2/2R \quad (2.1)$$

ただし、 b : フェール先端部の半径

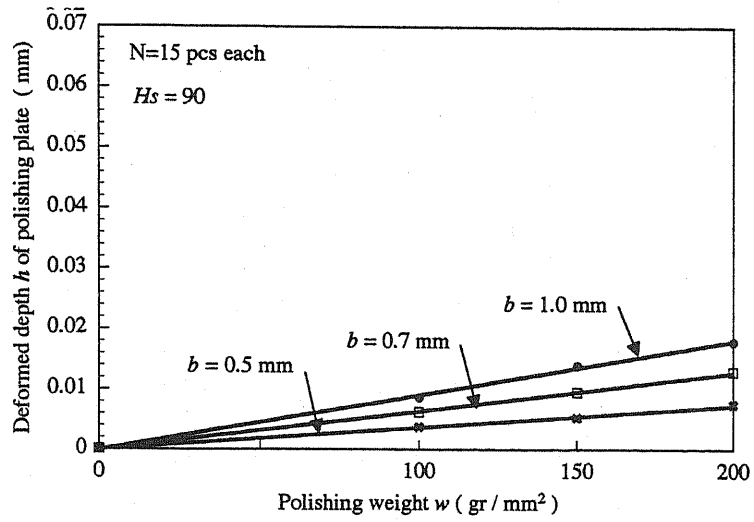
R : フェール球面の曲率半径

式(2.2)から、球面曲率半径 R 、球面頂点の高さ、及びフェールの先端部の半径 b は相互に関係のあることが判る。

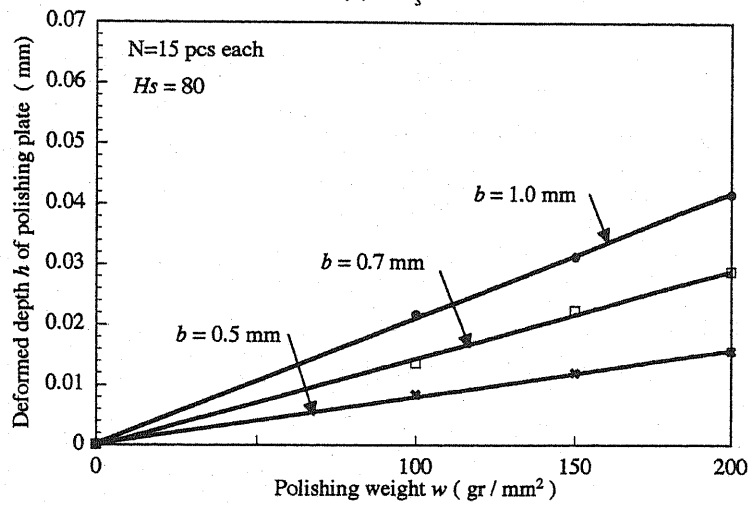
弾性盤の硬さ (H_s) が、各々 70, 80 及び 90, 研磨荷重 w が、各々 100 grf/mm², 150 grf/mm², 及び 200 grf/mm², フェールの端面半径 b を 1.0 mm, 0.7 mm 及び 0.5 mm であるとする。このとき、曲率半径 R の値として図 2.17 の値を与え、式 (2.1) により計算した球面頂点高さ h を図 2.23 にプロットして示す。ここで、研磨荷重 w が 0 grf/mm² の場合、弾性研磨盤のたわみ変形深さ h は 0 mm であるとして外挿してある。図 2.23 によれば、研磨荷重 w が 0 grf/mm² の場合には、弾性研磨盤は当然、変形しないから、弾性盤硬さ H_s 、及びフェール先端部の半径 b の値とは無関係に球面頂点高さ h は零となる。研磨荷重 w が 200 grf/mm² 以下の範囲では、研磨荷重 w が増加するのに伴って、フェール球面頂点高さ h (= 弾性研磨盤の変形深さ h) は、フェール先端部の半径 b 、及び研磨荷重 w に対応して、ほぼ直線的に増加する。一方、弾性研磨盤の硬さ H_s が低下するのに伴って、フェール球面頂点高さ h (= 弾性研磨盤の変形深さ h) は、フェール先端部の半径 b 、及び弾性研磨盤の硬さ H_s に対応して増加する。

2.6.2 弾性研磨盤による球面成形の限界条件

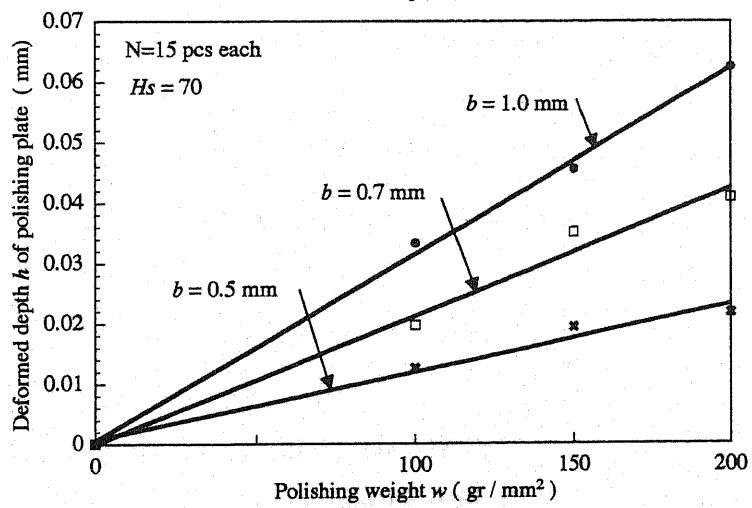
本論文の斜め球面成形研磨装置により、フェール端面の斜め球面成



(a) . $H_s = 90$



(b) . $H_s = 80$



(c) . $H_s = 70$

図 2.23 研磨荷重 w による弾性研磨盤のたわみ変形深さ h

形研磨を行った場合, 弾性研磨盤による球面成形の限界条件は次のようになる[19].

1) フェルールの端面半径 b による限界条件

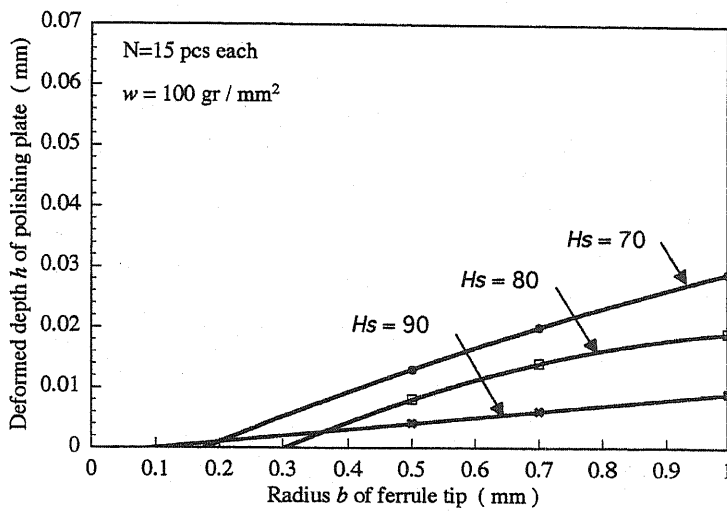
弾性盤の硬さ H_s が各々 70, 80 及び 90 であるとし, 研磨荷重 w が, 各々 100 grf/mm², 150 grf/mm², 及び 200 grf/mm² であるとする. 曲率半径 R の値として, 図 2.17 の値を与え, 式 (2.1) により計算した球面頂点高さ h を図 2.24 にプロットして示す. 図 2.24 はフェルールの端面半径 b が 1.0 mm, 0.7 mm 及び 0.5 mm についてプロットしたものである. 図 2.24 から, フェール先端部の半径 b が 0.3 mm 以下になると, 弾性研磨盤の硬さ H_s 及び研磨荷重 w の数値に関わりなく, 弾性研磨盤のたわみ変形深さ h は零に接近する. このことは, $b < 0.3$ mm の領域になると, 本論文の斜め球面成形研磨装置によっては, フェルールの先端面が球面研磨されなくなることを示している.

2) 弾性盤の硬さ H_s による限界条件

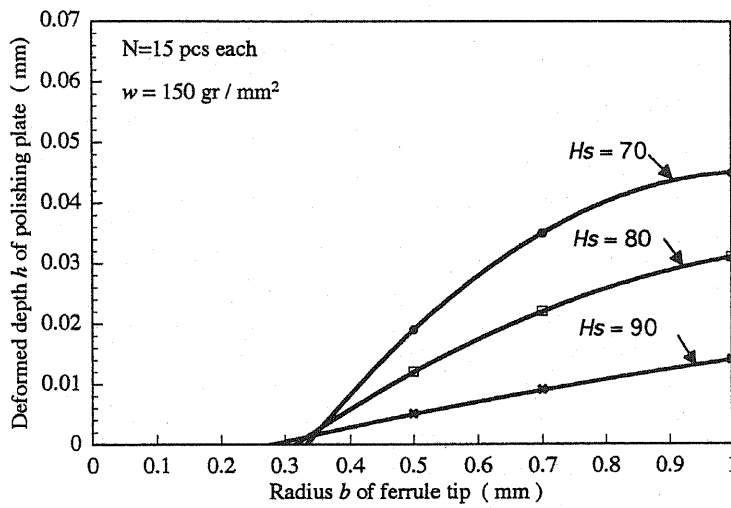
研磨荷重 w が, 各々 100 grf/mm², 150 grf/mm², 及び 200 grf/mm², フェルールの端面半径 b が 1.0 mm, 0.7 mm 及び 0.5 mm であるとする. このとき, 曲率半径 R の値として, 図 2.17 の値を与え, 弾性盤の硬さを変えたとき, 式 (2.1) により計算した球面頂点高さ h を図 2.25 にプロットして示す. 図 2.25 から, 弾性盤の硬さ H_s が約 95 に接近すると, 研磨荷重 w , 及びフェルールの端面半径 b の数値に関わりなく, 弾性研磨盤のたわみ変形深さ h は零に接近する. このことは, この領域になると, 本論文の斜め球面成形研磨装置によっては, フェルールの先端面が球面研磨されなくなることを示している.

弾性盤の硬さが $H_s > 95$ の領域では, 弾性盤の硬さ H_s やフェール先端部の半径 b により, 弾性研磨盤のたわみ変形深さ h が一意に決定されなくなる. ただし, 通常使用される FC 及び SC 型フェルールの先端部の半径 b は 0.7 mm 以上, 球面曲率半径 R は 5 ~ 12.5 mm 程度である. その場合に必要な弾性盤の硬さ H_s は 70 ~ 75 であり, 実用上問題のないことが実験的に証明された.

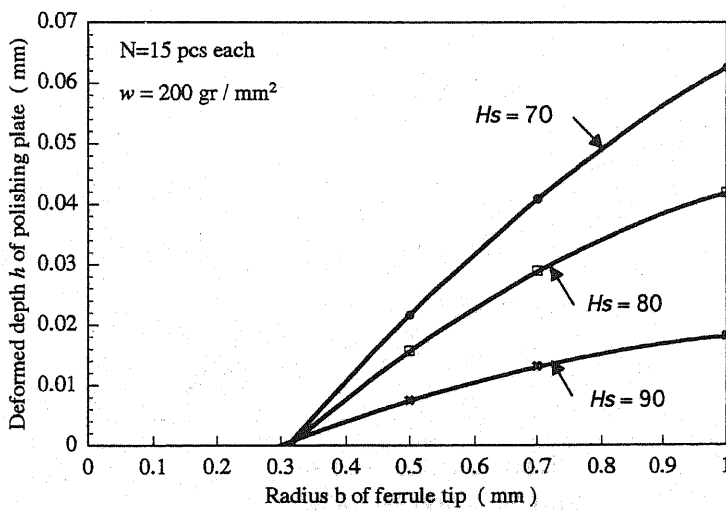
ただし, MU 型フェールの場合, フェルールの先端部の半径 b は,



(a) . $w = 100 \text{ grf} / \text{mm}^2$

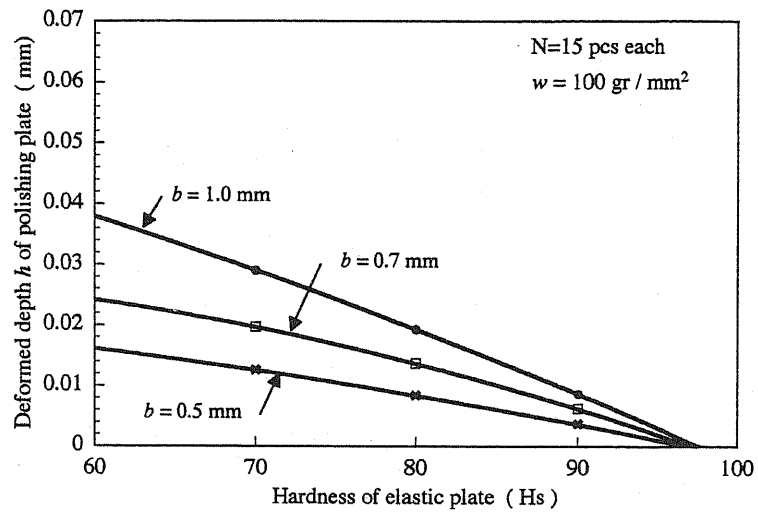


(b) . $w = 150 \text{ grf} / \text{mm}^2$

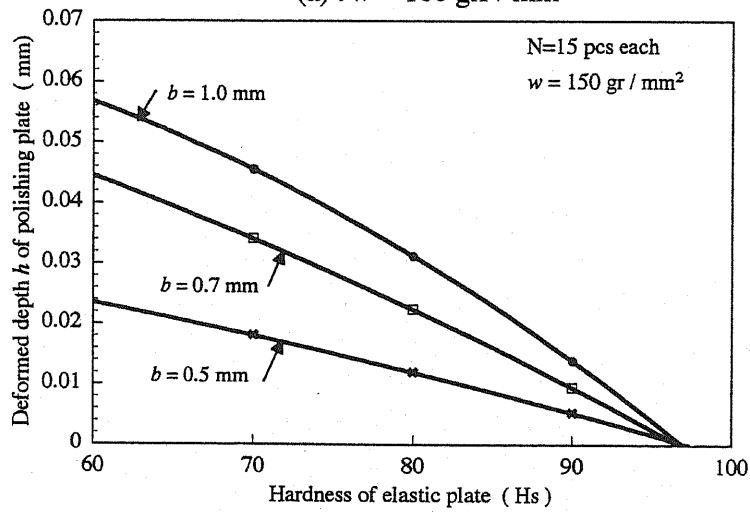


(c) . $w = 200 \text{ grf} / \text{mm}^2$

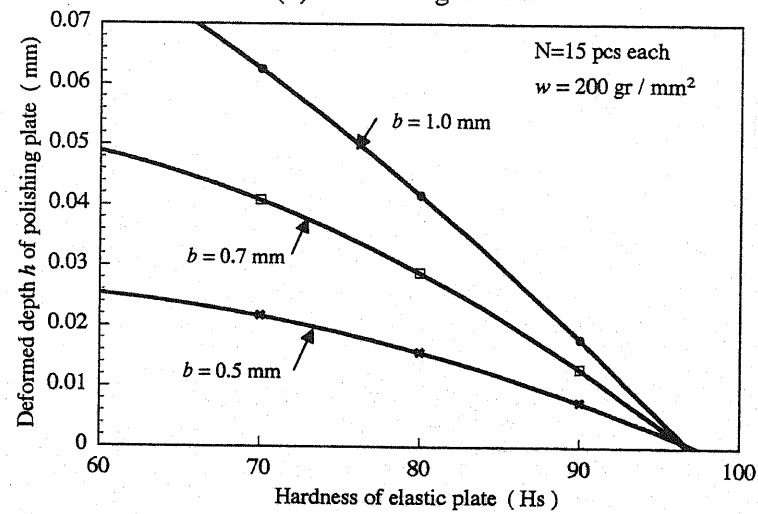
図 2.24 フェルール先端の半径 b と弾性研磨盤のたわみ変形深さ h



(a) . $w = 100 \text{ grf} / \text{mm}^2$



(b) . $w = 150 \text{ grf} / \text{mm}^2$



(c) . $w = 200 \text{ grf} / \text{mm}^2$

図 2.25 弾性研磨盤の硬さ H_s と弾性研磨盤のたわみ変形深さ h

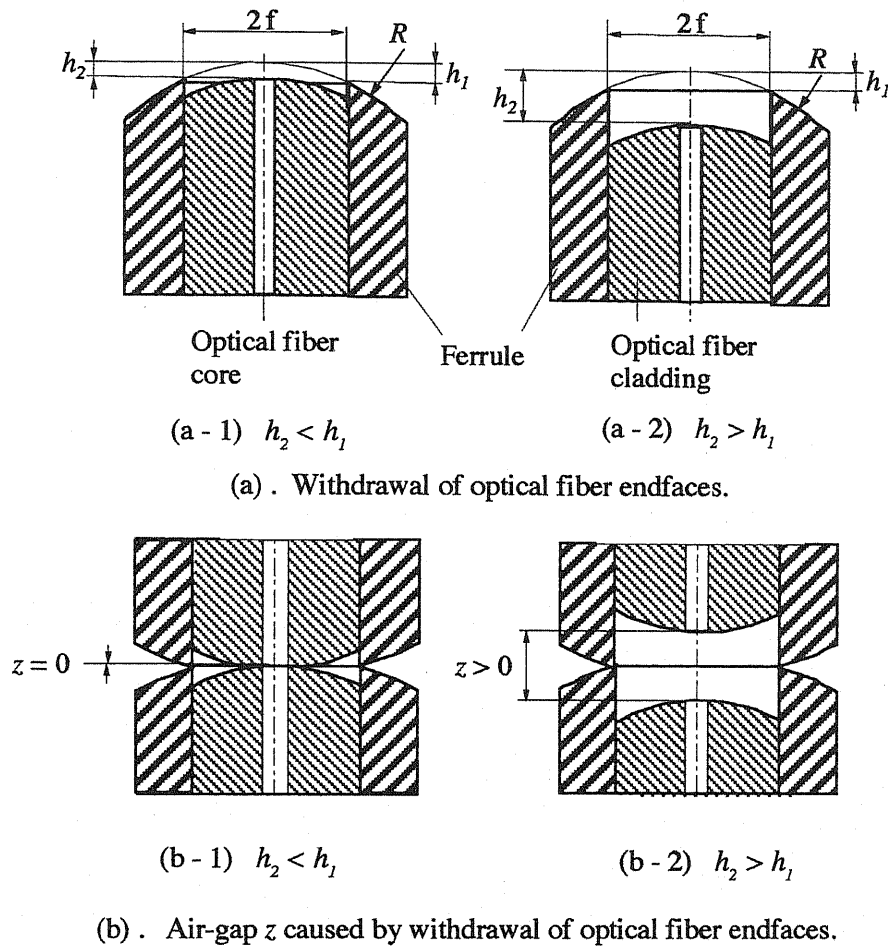


図 2.26 光ファイバ端面の凹みによる接続状態

ほぼ 0.3 mm であるので、今後、その研磨条件については、更に検討を要する。

2.7.3 光ファイバ端面のフェルール端面からの凹み

前述のように、フェルール端面の斜め球面研磨において、フェルールと光ファイバとの間で材質の硬さ、及びヤング率などの物性に差異がある場合には、各々の被研磨性が異なってくるので、フェルールと光ファイバの各々端面を均一に揃えて仕上げることは困難である。一般に、光ファイバ端面がフェルール端面より、わずかに凹んだ状態になることが多い。この凹み深さが大きい光ファイバ付きフェルールを使用した場合

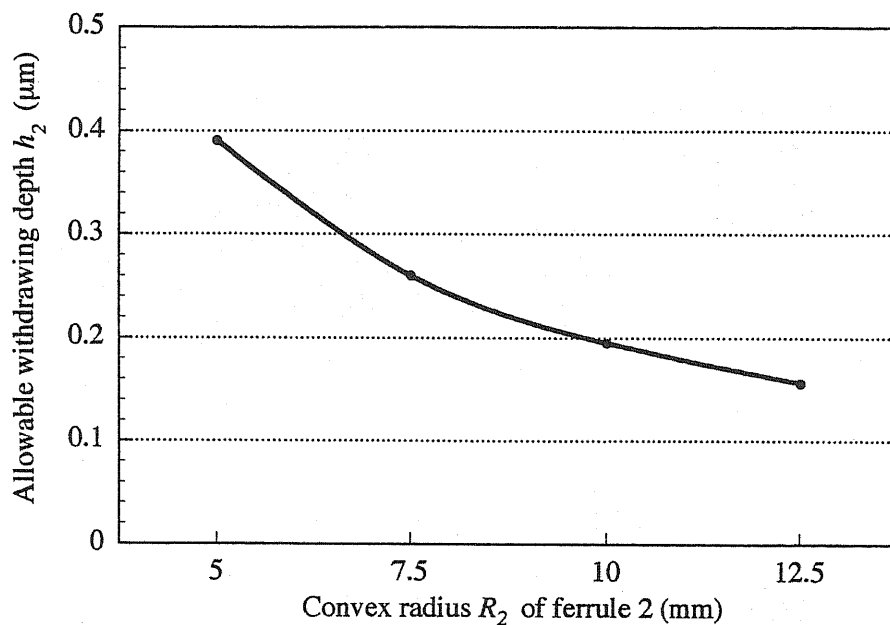


図 2.27 光ファイバ端面の許容凹み深さ h_2

には、一対の光コネクタで両方の光ファイバ端面を密着させるために、軸方向に接触力を負荷しても、両光ファイバ端面間のエアギャップを消去することは不可能になる。すなわち、このときには、フェルール端面のみが弾性変形して、その軸方向のたわみ分だけ、光ファイバ端面も同時に連動して変位し、両光ファイバ端面間のエアギャップは消去できない。この状態を図 2.26 (a),(b)によって説明する。図 2.26 において、 R は曲率半径、 h_1 は球面頂点からフェルール孔の縁までの高さ、 h_2 は球面頂点から光ファイバ頂点の縁までの深さ、 $2f$ は光ファイバ・クラッドの直径を示す。図 2.26 (a)において、(a-1)は $h_2 < h_1$ の状態を示す。この場合は、図 2.26 (b)における(b-1)に示すように、各々光ファイバの端面がフェルールの端面が接触する前に接触するので、エアギャップ g_c は生じない。一方、図 2.26 (a)において、(a-2)は $h_2 > h_1$ の状態を示す。この場合には、図 2.26 (b)の(b-2)に示すように、各々フェルールの端面が先に接触する。そのまま、接触力 W_c を増加させると、フェルール端面が弾性変形するが、光ファイバも連動して変位することになる。従って、エアギャップ z を消去することはできない。

エアギャップ z を消去した状態で各々光ファイバを接続できる光ファ

イバの凹み深さ h_2 は、次の式 (2.2) で計算できる。

$$h_2 \leq R^2 - \sqrt{R^2 - f^2} \cong f^2 / 2R \quad (2.2)$$

式 (2.2) により計算したエアギャップ z を消去した状態で、接続できる光ファイバ端面の許容凹み深さ h_2 を図2.27に示す。ただし、光ファイバの直径 $2f = 0.125$ mm, 及び球面の曲率半径 R が 5 mm から 12.5 mm まで変化する場合について計算した。図 2.27 から、フェルールの斜め球面の曲率半径 R の減少に伴って、光ファイバ端面の許容凹み深さ h_2 は大きくなることが判る。

2.7 まとめ

第2章では、最初に、APCコネクタの大量生産に不可欠な、フェルール端面の球面成形研磨装置を提案した。続いて第2章では、本球面成形研磨装置の実験結果にもとずいて、球面成形の研磨メカニズムを考察すると共に、研磨特性の評価を行った。その結果は次のように要約できる。

1) 研磨軌跡

研磨傷の自動修復を目的として、公転及び自転の複合得ん運動をする弾性研磨盤に固定保持力したフェルールの先端面を押し付けて球面成形研磨法、及び装置による研磨軌跡は十分に具現できた。

2) 曲率半径

研磨実験データから、フェルールの先端面の半径 b が 0.5 mm ~ 1.0 mm のフェルールについて、曲率半径の目標値 5 mm ~ 12.5 mm は、弾性盤の硬さは $H_s < 80$ 、研磨荷重は $w = 200$ grf/mm² の研磨条件の設定により得られた。

3) 斜め球面の頂点の光軸からの偏心

先端面の半径 b が 0.5 mm ~ 1.0 mm のステップ・フェルールについて、研磨荷重 w が 200 gr/mm²、及び弾性研磨盤の硬さ H_s が 70 の場合、斜め球面頂点の偏心の偏差の最大値は 38.5 μ m となり、前述の評

価基準の $50 \mu\text{m}$ 以内が得られた。

4) 光ファイバ端面の凹み

先端面の半径 b が $0.5 \text{ mm} \sim 1.0 \text{ mm}$ のステップ・フェルールについて、研磨荷重 w が 200 gr/mm^2 、及び弾性研磨盤の硬さ H_s が 70 の場合、最大凹み深さは $-0.046 \mu\text{m}$ となり、評価基準の $-0.05 \mu\text{m}$ 以内が得られた。

5) 反射戻り光

先端面の半径 b が $0.5 \text{ mm} \sim 1.0 \text{ mm}$ のステップ・フェルールについて、光源波長 $\lambda = 1.310 \mu\text{m}$ における反射戻り光の測定値は -66 dB 以下が得られた。

6) 挿入損失

先端面の半径 b が $0.5 \text{ mm} \sim 1.0 \text{ mm}$ のステップ・フェルールについて、光源波長 $\lambda = 1.310 \mu\text{m}$ における挿入損失の最大偏差 ($X+3\sigma$) は 0.041 dB 以下が得られた。

7) 球面の成形限界

フェルール端面の研磨球面の曲率半径 R は、フェルール端面の弾性研磨盤面への埋没深さ h と、フェルール先端部の半径 b とにより一意的に決定されることを実験的に示した。本論文による斜め球面成形研磨装置には球面の成形限界がある。ただし、フェルール先端部の半径 b が 0.3 mm 以上の場合、または弾性研磨盤の硬さ H_s が 95 以下の場合には、本論文の球面研磨法を適用できることを実験的に証明できた。

8) 光ファイバ端面の凹みの許容深さ

フェルール端面からの光ファイバ端面の凹みの許容深さは、フェルールの斜め球面の曲率半径に依存することを示した。

第2章参考文献

- [1] M. Takahashi, "Optical Fiber end-surface Polishing Device," US Patent. No. 4,979,334. Dec 25, 1990.
- [2] M. Takahashi, "Elastic Polishing Plate Method and Conditions for Forming Angled Convex Surface on Ferrule Endface," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 9, pp.1675 - 1680, 1997.
- [3] Ralph R. Doyle, "MULTIPLE OPTICAL FIBER POLISHING APPARATUS," US Patent No. 4,693,035. 1987.
- [4] James P. Luther, "Polishing Method," US Patent No. 5,136,820. 1992.
- [5] 落合俊宏, 他, "光コネクタ中子の端面凸球面研磨方法," 特許公報 昭61-192460. 1986.
- [6] 機械設計便覧編纂委員会, "機械設計便覧," 丸善株式会社, p. 1873. (1973)
- [7] 機械設計便覧編纂委員会, "機械設計便覧第3版," 丸善株式会社, p.845 (1992)
- [8] International Electrotechnical Commission, "INTERNATIONAL STANDARD, IEC 874-7, Connectors for optical fibers and cables Part 7: Sectional specification for fiber optic connector-Type FC," 1993.
- [9] "JIS C5970-1987, F01 Type Connectors for Optical Fiber Cords," Japanese Industrial Standards Committee, 1987.
- [10] International Electrotechnical Committee, "INTERNATIONAL STANDARD, IEC874-14, Connectors for optical fibers and cables Part 7: Sectional specification for fiber optic connector-Type SC," 1993.
- [11] "光製品カタログ," 株式会社 精工技研, 1996.
- [12] "技術指導資料: SC Type Fiber Optic Connector 図面," NTT アドバンステクノロジー株式会社, 1989.
- [13] "技術指導資料: MU Type Fiber Optic Connector 図面," NTT アドバンステクノロジー株式会社, 1994.
- [14] カタログ, 自動コネクトチェック干渉計システム ACCIS, NTT ア

ドバンステクノロジー株式会社, (1995)

- [15] M. Takahashi, " Optical Connector Ferrule," US Patent No. 5,140,660. 1992.
- [16] 松永和夫, 小薮国夫, 大平文和 : 光ファイバコネクタ用 S_1O_2 研磨フィルムの開発, 1997 信学会春期大会, C-311, 1997.
- [17] A. Benner, et al, " Low-reflectivity in-line variable attenuator utilizing optical fiber taper," IEEE J. Lightwave Technology, Vol. 8, pp. 703-718, 1977.
- [18] " Instruction manual for RM-3000," JDS Fitel INC, 1995.
- [19] M. Takahashi, " Elastic Polishing Plate Method and Conditions for Forming Angled Convex Surface on Ferrule Endface," IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol. 15, No. 9, pp. 1675 - 1680 , September, 1997.

第3章 テーパ・フェルール付きAPCコネクタの解析 - 1 フェルール回転角度 $\varphi = 0$ 度における接続特性

3.1 まえがき

PCコネクタでは、フェルールの接続端面が光ファイバの光軸に対して直角球面に成形研磨されている。一方、APCコネクタでは、フェルールの接続端面が、光ファイバの光軸直角面に対して斜め球面されている。従って、APCコネクタに特有な現象として、各々光コネクタ部品間の整列キーと整列キー溝との間に介在する隙間により、フェルールが相互に円周方向に若干回転した状態で接続される。この場合、各々フェルールの斜め球面はV字形状に開くので、光ファイバ端面間のエアギャップが大きくなり挿入損失を増大させるので、接続の互換性を阻害することは明らかである。APCコネクタの接続特性を考える上で、この接続時のフェルール間の回転は非常に重要である[1]。(この接続時のフェルール間回転による接続特性については、第4章で記述する。)

しかしながら、APCコネクタに関する論文、特許などは、高橋のものを除いては非常に少ない[2]-[9]。従って、第3章では、テーパ・フェルールを使用したAPCコネクタの基本的な形状特性と接続特性を明らかにするため、テーパ・フェルールの端面傾斜角度や、斜め球面の曲率半径などをパラメータとして取り扱うが、フェルール回転角度が0度と仮定して解析を実施する。すなわち、本章では、斜め球面の光軸からの偏心、接続時の各々テーパ・フェルールの斜め球面の接点の光軸ZZからの偏心、光ファイバ端面の接触角度、及び光ファイバ端面間に生ずるエアギャップについて、テーパ・フェルールの基本的な形状特性、及び接続特性の理論解析を行う。

1) 斜め球面の傾斜角度

標準のシングルモード光ファイバ用APCコネクタの場合、光ファイバの接続端面からの反射戻り光を-60 dB以下にするため、フェルールの接続端面の傾斜角度は通常8度に選定されている[10]。ただし、例外

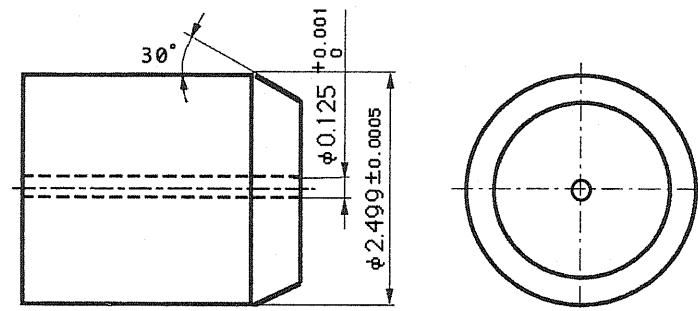


図 3.1 FC型, 及びSC型テーパ・フェルールの研磨前の形状例

的にドイツのPTTは9度の傾斜角度を採用している[11]. そのほかに, 光源波長 $\lambda=1.550 \mu\text{m}$ 帯の光伝送において, 光伝送損失を低減した分散シフト光ファイバ (Dispersion shifted optical fiber)が使用されている. 分散シフト光ファイバは, 標準のシングルモード光ファイバよりもモードフィールド半径が小さいので, この反射戻り光を -60 dB 以下にするため, 高橋によれば, フェルールの接続端面の傾斜角度は12度を要することが指摘されている[12]. (付録1参照)

従って, 第3章以降では, この斜め球面の傾斜角度が8度と12度の場合の形状特性及び接続特性について記述する.

2) フェルールの端面形状による斜め球面頂点の偏心

初期のAPCコネクタには, 従来のPCコネクタ用フェルールが, そのまま使用されていた. 整列スリーブ孔に円滑に挿入するため, このPCコネクタ用フェルールの先端部には, 軸方向に30度から40度のテーパ面取り加工が施されている. 本論文中では, この形式のフェルールをテーパ・フェルール(Tapered-ferrule)と呼称する. 図3.1に, 現在最も広く使用されているFC/PC型及びSC/PC型コネクタ用のテーパ・フェルールの研磨成形前の端面形状例を示す[13], [14].

APCコネクタ用フェルールの斜め球面の成形研磨には, 第2章で記述したように, 公転及び自転の複合運動をする弾性研磨盤上に, 固定保持したフェルール端面を押し付けて研磨する方式の球面研磨装置の使用が主流である. その斜め球面はフェルール端面の円形外縁の中心点を基

準として、同心円状に成形研磨される。従って、斜め球面成形研磨面の頂点は、研磨の進行につれて、フェルール中心にある光ファイバ光軸から徐々に偏心していく[15]。よって、第3章では、このフェルール端面形状と斜め球面の頂点の偏心との関係について記述する。

3) 斜め球面での曲率半径値の差異

第2章で記述したように、研磨により斜め球面を成形した後のフェルール端面の曲率半径値には、若干のばらつきが不可避である。従って、第3章では、この曲率半径値の差異と形状特性及び接続特性との関係について記述する。

3.2 テーパ・フェルールの形状特性の理論解析

3.2節では、初めに、テーパ・フェルール端面を斜め球面研磨した場合の、斜め球面頂点の光ファイバ光軸からの偏心の生成機構について理論解析を行う。次に、テーパ・フェルールの先端部の寸法諸元、及び端面傾斜角度、斜め球面の曲率半径などの研磨条件をパラメータとして、

斜め球面頂点の光ファイバ光軸ZZからの偏心、接続時における斜め球面の接点の光軸ZZからの偏心、及び光ファイバ端面間に生成されるエアギャップについて数値的に明らかにするため、理論解析を行った。

3.2.1 斜め球面頂点の光軸からの偏心の生成機構

図3.2は、斜め球面の頂点の光ファイバ光軸からの偏心の生成機構を求める解析図である。ただし、図3.2は斜め球面研磨前に斜め平面研磨を行った後の形状を示す。斜め球面の頂点の光ファイバ光軸からの偏心は、本論文による斜め球面成形研磨装置により、テーパ・フェルール端面を研磨した場合に生ずる。図3.2に示す斜め平面研磨の状態において、フェルール先端部の傾斜角度 β のテーパ面取りの斜面を線分Ⅰ及びⅡ、傾斜角度 θ_1 の斜め研磨面を線分Ⅲとする。このとき、斜め球面成形研磨面の中心点のyy座標 $C(y)$ は、線分Ⅰと線分Ⅲの交点のyy座標 $A(y)$ 、及び線分Ⅱと線分Ⅲとの交点のyy座標 $B(y)$ を結ぶ線分Ⅲの2分の1の点に位置する。 L は、線分Ⅲと直角(=光軸ZZに対する傾斜角度 θ)であって、かつ、yy座標 $C(y)$ を通る線分を示す。この場合、yy座

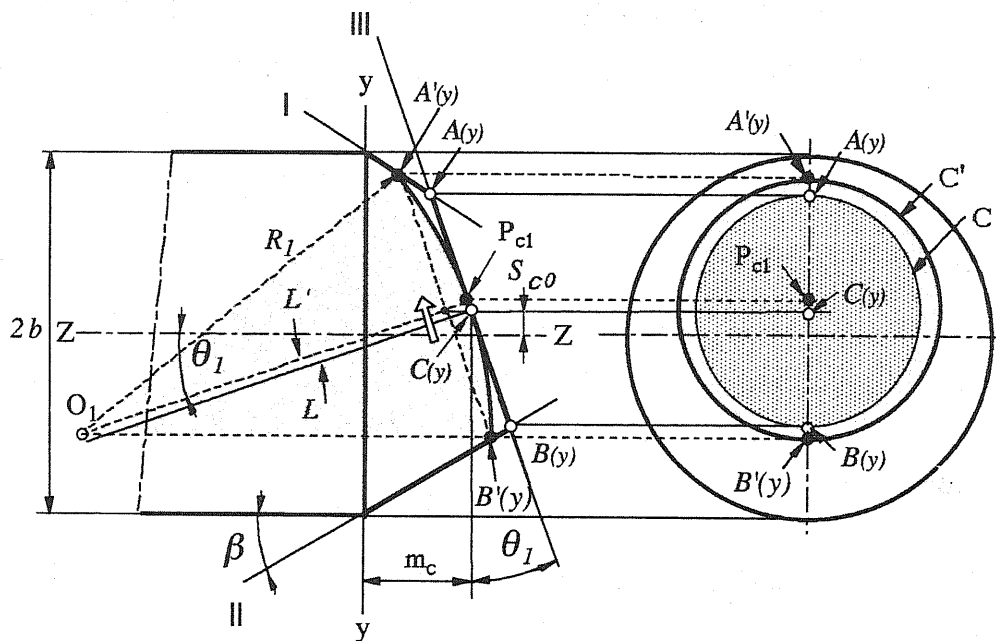


図 3.2 テーパー・フェルールの斜め球面の頂点の光軸 ZZ からの
偏心 S_c の生成機構

標 $A(y)$ 及び yy 座標 $B(y)$ の光軸 ZZ からの距離関係は、 $A(y) > B(y)$ になる。従って、斜め球面成形研磨面の中心点の yy 座標 $C(y)$ 点は光軸 ZZ と一致せず、図 3.2 に示したように、 S_{c0} だけ光軸 ZZ から偏心する。 m_c は、斜め球面成形研磨の軸方向の加工原点の位置を示す。 $C(y)$ 点は、テーパー・フェルール端面を斜め球面成形研磨する時、研磨面の基準中心になる。

図 3.2 において、点線及び黒点で示したプロフィールは、斜め球面の成形研磨の後の状態を示す。上記の研磨基準により斜め球面研磨を行った場合、次のようにフェルール端面状態は変化する。すなわち、各々座標点 $A(y)$ 、 $B(y)$ 、及び $C(y)$ は、新座標点 $A'(y)$ 、 $B'(y)$ 、及び $C'(y)$ に移動する。線分 L は白矢印で示すように、線分 III に並行に線分 L' に移行する。研磨面の中心点は、斜め平面の時の中心点 $C(y)$ から、斜め球面研磨面の頂点 P_{cl} に変化すると共に、光軸 ZZ に対する偏心値は大きくなる。研磨端面プロフィールは C から C' に拡大して、面積及び偏心値が大きくなる。

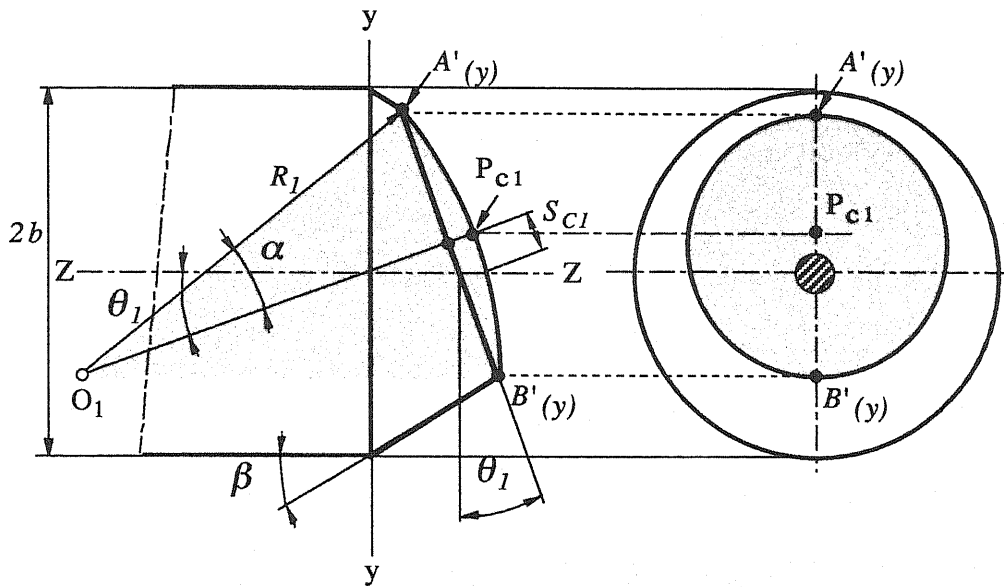


図 3.3 斜め球面研磨後のテーパ・フェルールの斜め球面の頂点の光軸 ZZ からの偏心 S_{c1}

図 3.2 から、研磨面の基準中心 $C(y)$ の光軸 ZZ からの偏心 S_{c0} は次の手順で求めることができる。

図 3.2 から、各々線分 I, II, 及び III は次の式 (3.1) ~ (3.3) で表わすことができる。

$$\text{線分 I} \quad y = -z \tan \beta + b \quad (3.1)$$

$$\text{線分 II} \quad y = -z \tan \beta - b \quad (3.2)$$

$$\text{線分 III} \quad y = \frac{m_c}{\tan \theta_1} - \frac{z}{\tan \theta_1} \quad (3.3)$$

従って、 $A(y, z)$, 及び $B(y, z)$ の各々座標は、次の連立式 (3.4), (3.5) で求めることができる。

$$A(yz) \begin{cases} y = -z \tan \beta + b \\ y = -z / \tan \theta_1 + m_c / \tan \theta_1 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$B(yz) \begin{cases} y = -z \tan \beta - b \\ y = -z / \tan \theta_1 + m_c / \tan \theta_1 \end{cases} \quad (3.5)$$

$A(y)$, 及び $B(y)$ の各々座標は、連立式 (3.4), (3.5) から次の式 (3.6), (3.7) で求めることができる。

$$A(y) = \frac{m_c \cdot \tan \beta - b}{\tan \theta_1 \cdot \tan \beta - 1} \quad (3.6)$$

$$B(y) = \frac{m_c \cdot \tan \beta - b}{\tan \theta_1 \cdot \tan \beta + 1} \quad (3.7)$$

ただし, $b \cdot \tan \theta_1 \leq m_c$.

研磨基準中心点になる yy 座標 $C(y)$, すなわち, 光軸からの偏心 S_{c0} は, 式(3.6), (3.7)から次の(3.8)式で求められる.

$$\begin{aligned} C(y) = S_{c0} &= [(A(y) + |B(y)|)/2] - |B(y)| \\ &= [(A(y) - |B(y)|)/2] \end{aligned} \quad (3.8)$$

図 3.3 は, 斜め球面成形研磨した後のテーパ・フェルールの先端部を示したものである. 図 3.3 において, P_{c1} は斜め球面の頂点, S_{c1} は頂点 P の光軸 ZZ からの偏心, O_1 は球面曲率半径 R_1 の中心, α は線分 O_1, P と線分 $A'(y)C'(y)$ の鋭角を各々示す.

斜め球面の頂点 P_{c1} の光軸 ZZ からの偏心 S_{c1} は, 次の式 (3.9) により計算できる.

$$S_{c1} = [(A(y) + |B(y)|) / 2 \cos \theta_1] + R_1 (1 - \cos \alpha) \tan \theta_1 \quad (3.9)$$

ただし, $\alpha = \sin^{-1} [(A(y) - C(y)) / R \cos \theta_1]$.

式 (3.9) により計算した, 斜め球面の頂点位置 P_{c1} の光ファイバ光軸 ZZ からの偏心 S_{c1} を図 3.4 に示す. 図 3.4 は, FC 型テーパ・フェルールについて示したものである. ただし, FC 型のテーパ・フェルールの斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 8 度及び 12 度, テーパ角度 β が 30 度, 軸方向研磨基準点位置 m_c が 0.25 mm, フェルール半径 b が 1.25 mm とし, 斜め球面の曲率半径 R_1 が 5 mm から 2.5 mm おきに 12.5 mm まで変化した場合について計算した.

図 3.4 では, FC 型テーパ・フェルールについて, 傾斜角度 θ_1 が 8 度及び 12 度の場合, 斜め球面の頂点 P_{c1} の光ファイバ光軸 ZZ からの偏心 S_{c1} は, 102 ~ 114 μm 及び 150 ~ 166 μm と各々大きな数値を示す. テーパ・フェルールでは, 斜め球面の頂点 P_{c1} の光軸 ZZ からの偏心 S_{c1}

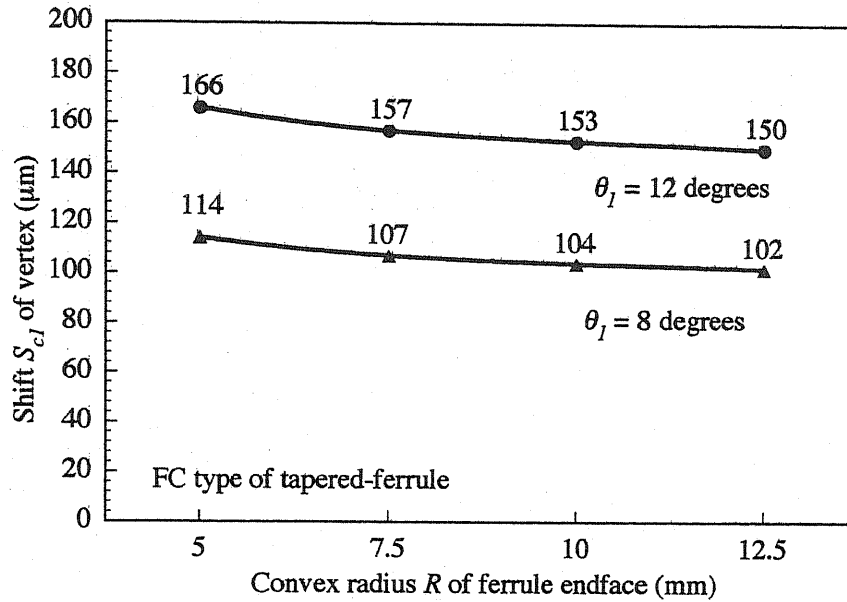


図 3.4 FC/APCコネクタ用テーパ・フェルールの斜め球面の頂点 P_{c1} の光軸 ZZ からの偏心 S_{c1}

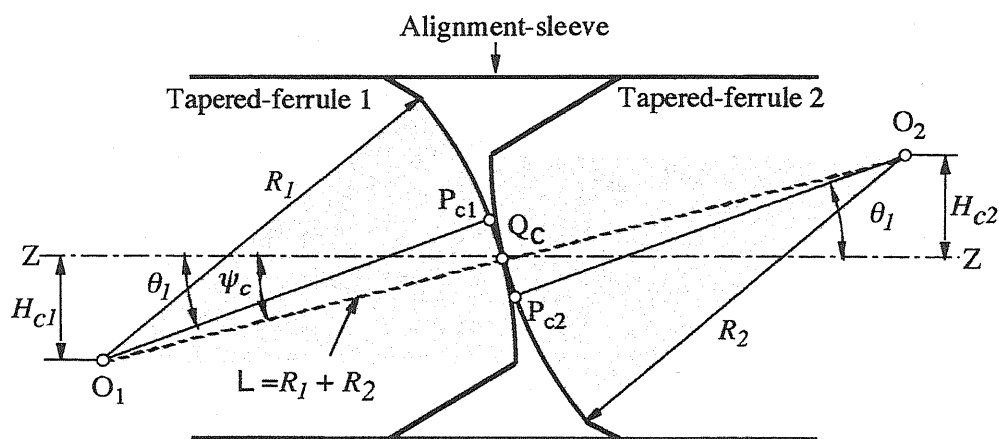
は、斜め球面の傾斜角度 θ_1 、フェルール外径 $2b$ 、及び斜め球面の曲率半径 R_1 に依存して変化することが図 3.4 から判る。

3.2.2 斜め球面接点の光軸からの偏心及び接触角度

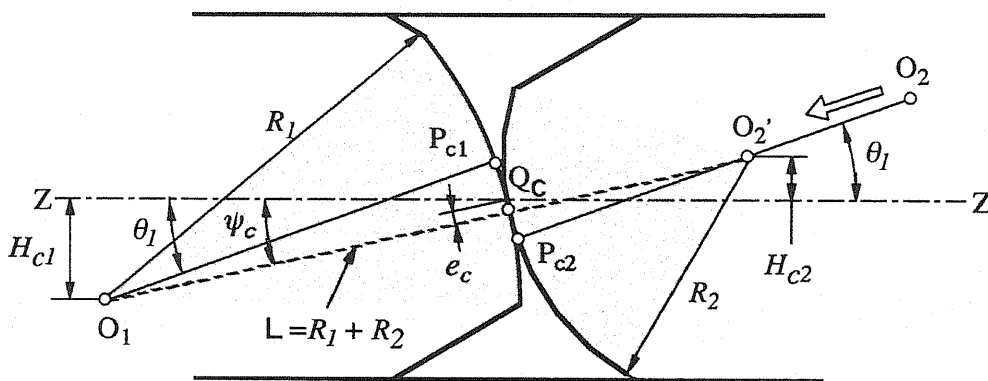
テーパ・フェルール付 APCコネクタの接続時において、テーパ・フェルールの斜め球面接点の光軸からの偏心に影響するパラメータとして、前項の斜め球面頂点 P_{c1} の光軸 ZZ からの偏心 S_{c1} 、ならびにテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 の差異を取り上げ、斜め球面上の接点の偏心について次に解析する。

図 3.5 (a),(b) は、斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 が同一または異なる一対のテーパ・フェルール 1 及び 2 を、整列スリーブ孔に挿入接触させた状態について、各々テーパ・フェルールの斜め球面の接点 Q_c の偏心 e_c 、及び接触角度 ψ_c を求める解析図である。

図 3.5 (a) において、 P_{c1} 、 P_{c2} は各々テーパ・フェルール端面の斜め球面の頂点の位置を示す。 O_1 及び O_2 は、各々テーパ・フェルール 1 及び 2 の球面曲率半径 R_1 及び R_2 の中心点を示す。この場合、各々フェ



(a) . $R_1 = R_2$, $\varphi = 0$ degree.



(b) . $R_1 > R_2$, $\varphi = 0$ degree.

図 3.5 斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の差異によるテーパ・フェルルール端面接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心 e_c , 及び接触角度 ψ_c .

ルール端面は球体の1部分であると考えられるから、各斜め球面の接点 Q_c は常に中心点 O_1 及び O_2 を結ぶ線分 L 上にある。 H_{c1} 及び H_{c2} は、テーパ・フェルルール1及び2の曲率半径の中心点 O_1 及び O_2 の光ファイバ光軸 ZZ からの距離を示す。 ψ_c は、各テーパ・フェルルールの斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する接触角度を示す。

図 3.5 (a) は、テーパ・フェルルール1と2の曲率半径 R_1 , R_2 が同一の場合の各テーパ・フェルルールの斜め球面の接点 Q_c の位置を示す。この場合、テーパ・フェルルール1と2の曲率半径 R_1 , R_2 の中心点 O_1 , O_2 は光軸 ZZ に対して対称、かつ、等距離 H_{c1} , H_{c2} に位置する。従って、

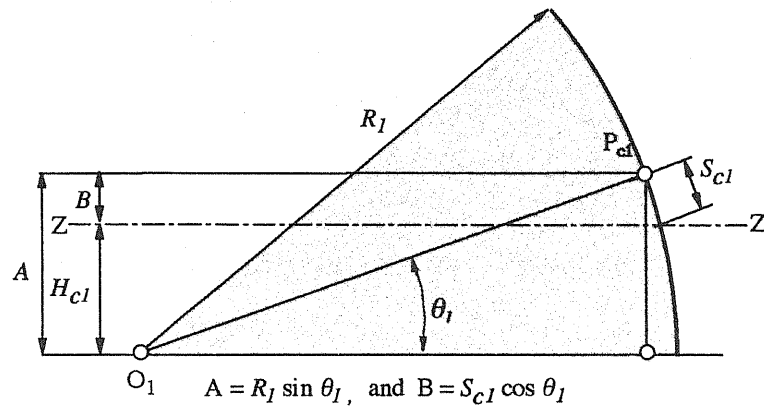


図 3.6 テーパ・フェルール 1 の曲率半径 R_1 の中心点 O_1 の光軸 ZZ からの距離 H_{c1} ($= A - B$).

斜め球面の接点 Q_c は光軸 ZZ 上に位置するので、斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心 e_c は零になる。

図 3.5 (b) は、テーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が、 $R_1 > R_2$ の場合の斜め球面の接点 Q_c の偏心 e_c を示す。この場合、テーパ・フェルール 2 の曲率半径 R_2 の中心 O_2' は、同一曲率半径の時のテーパ・フェルール 2 の中心点 O_2 と、斜め球面の頂点 P_{c2} とを結ぶ線分上を白矢印で示すように移動する。曲率半径 R_1, R_2 の中心点 O_1, O_2' の光軸 ZZ からの距離 H_{c1}, H_{c2} の関係は、 $H_{c1} > H_{c2}$ になる。従って、斜め球面接点 Q_c は光軸 ZZ から e_c で示す偏心した位置になる。

各々テーパ・フェルールの斜め球面の接点 Q_c は、曲率半径 R_1, R_2 の中心点 O_1, O_2 の光軸 ZZ からの距離 H_{c1}, H_{c2} の合計値を、各テーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の比率で分割した位置にあることが図 3.5 から判る。従って、斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の差異によるテーパ・フェルール端面の光軸 ZZ に対する接点 Q_c の偏心 e_c は、次の式 (3.10) より求めることができる。

$$e_c = \frac{1}{\cos\psi_c} \left[\frac{R_1(|H_{c1}| + H_{c2})}{R_1 + R_2} - |H_{c1}| \right] \quad (3.10)$$

ここで、テーパ・フェルール1の曲率半径 R_1 の中心点 O_1 の光軸 ZZ からの距離 H_{c1} は、図 3.6 に示す解析図により、次の式 (3.11) より求めることができる。

$$H_{c1} = R_1 \sin \theta_1 - S_{c1} \cos \theta_1 \quad (3.11)$$

同様に、テーパ・フェルール2の曲率半径 R_2 の中心点 O_2 の光軸 ZZ からの距離 H_{c2} は、次の (3.12) より求めることができる。

$$H_{c2} = R_2 \sin \theta_1 - S_{c2} \cos \theta_1 \quad (3.12)$$

従って、式 (3.10) は、次の式 (3.13) のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} e_c &= \frac{R_1 \left[|R_1 \sin \theta_1 - S_{c1} \cos \theta_1| + (R_2 \sin \theta_1 - S_{c2} \cos \theta_1) \right]}{(R_1 + R_2) \cos \psi_c} \\ &= \frac{|R_1 \sin \theta_1 - S_{c1} \cos \theta_1|}{\cos \psi_c} \\ &= \frac{R_1 (R_2 \sin \theta_1 - S_{c2} \cos \theta_1) - R_2 |R_1 \sin \theta_1 - S_{c1} \cos \theta_1|}{(R_1 + R_2) \cos \psi_c} \end{aligned} \quad (3.13)$$

ここで、斜め球面の接点の接触角度 ψ_c は次の式 (3.14) より求めることができる。

$$\begin{aligned} \psi_c &= \sin^{-1} \left(\frac{|H_{c1}| + H_{c2}}{R_1 + R_2} \right) \\ &= \sin^{-1} \left[\frac{|R_1 \sin \theta_1 - S_{c1} \cos \theta_1| + (R_2 \sin \theta_1 - S_{c2} \cos \theta_1)}{R_1 + R_2} \right] \end{aligned} \quad (3.14)$$

フェルール回転角度が $\varphi = 0^\circ$ の場合については、テーパ・フェルール端面接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心 e_c 、及び接触角度 ψ_c は、以上の式 (3.13) 及び式 (3.14) により求めることができる。

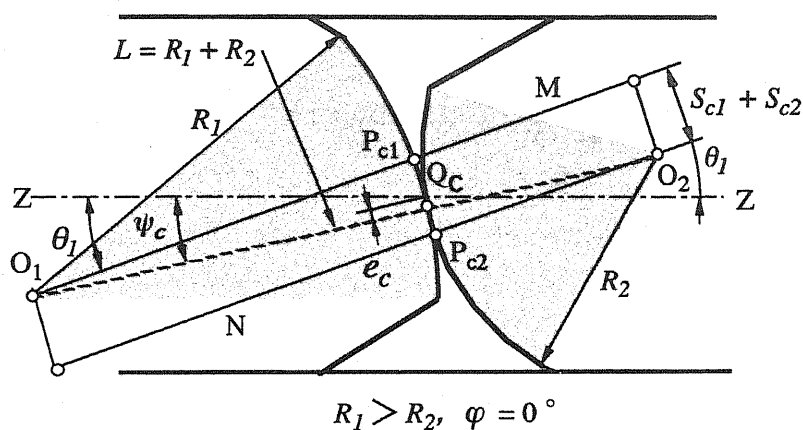


図 3.7 斜め球面の頂点 P_{c1}, P_{c2} の光軸 ZZ の偏心 S_{c1}, S_{c2} からのテーパ・フェルール端面の接点 Q_c の偏心 e_c .

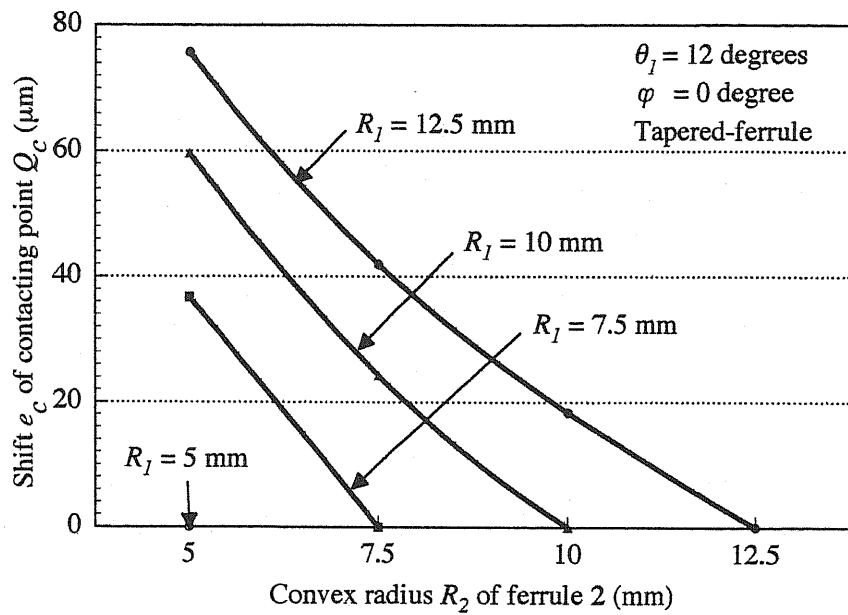
フェルールの回転角度 $\varphi = 0^\circ$ の場合に限定されるが、テーパ・フェルール端面の接点 Q_c の偏心 e_c は、式 (3.13) 以外に、図 3.7 の解析図によっても簡単に求めることができる。図 3.7 において、 M, N は斜め球面の頂点 P_1, P_2 の光軸 ZZ の偏心 S_1, S_2 を合計した $(S_1 + S_2)$ の距離において、斜め球面の傾斜角度 θ_1 に並行に、かつ、斜め球面の頂点 P_1, P_2 を通る仮想線である。この場合、各々テーパ・フェルールの斜め球面の接点 Q_c は、 $(S_1 + S_2)$ を斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の比率で分割した位置にある。従って、テーパ・フェルール端面の接点 Q_c の偏心 e_c は、次の簡便な式 (3.15) より求めることができる。

$$e_c = \left| S_{c1} - \frac{R_1(S_{c1} + S_{c2})}{R_1 + R_2} \right| = \left| \frac{R_2 \cdot S_{c1} - R_1 \cdot S_{c2}}{R_1 + R_2} \right| \quad (3.15)$$

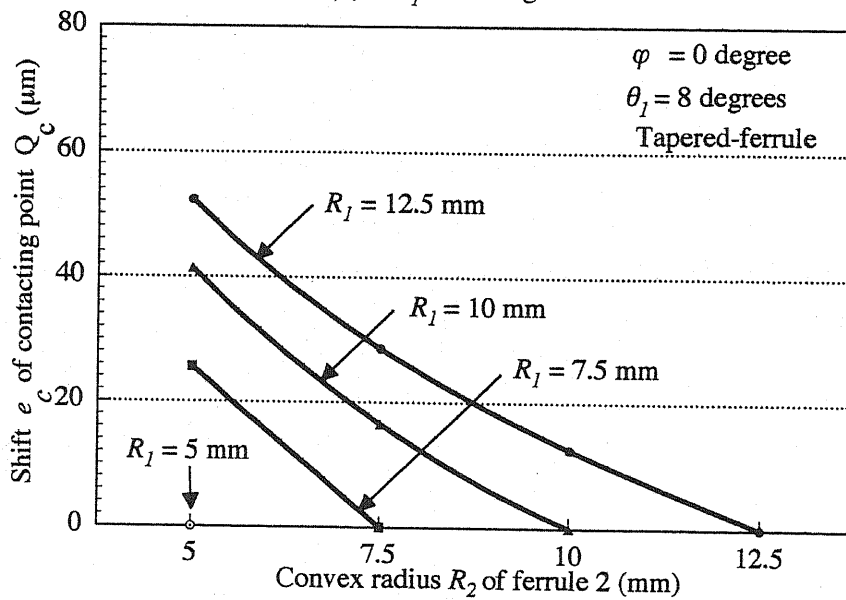
ただし、 $\varphi = 0, R_1 \geq R_2$.

従って、斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c は、斜め球面の頂点 P_{c1}, P_{c2} の光軸 ZZ からの偏心 S_{c1}, S_{c2} 、及び斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の差異に依存して決まることが式 (3.15) から判る。

図 3.8 は、式 (3.13)、または、式 (3.15) により計算した斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c を示す。ただし、斜め球面の傾斜角



(a) . $\theta_1 = 12$ degrees.



(b) . $\theta_1 = 8$ degrees.

図 3.8 斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の差異によるテーパ・フェルール端面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c .

度 θ_1 が 8 度及び 12 度として、一対のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 が、各々 5 mm, 7.5 mm, 10 mm, 及び 12.5 mm の場合について計算した。

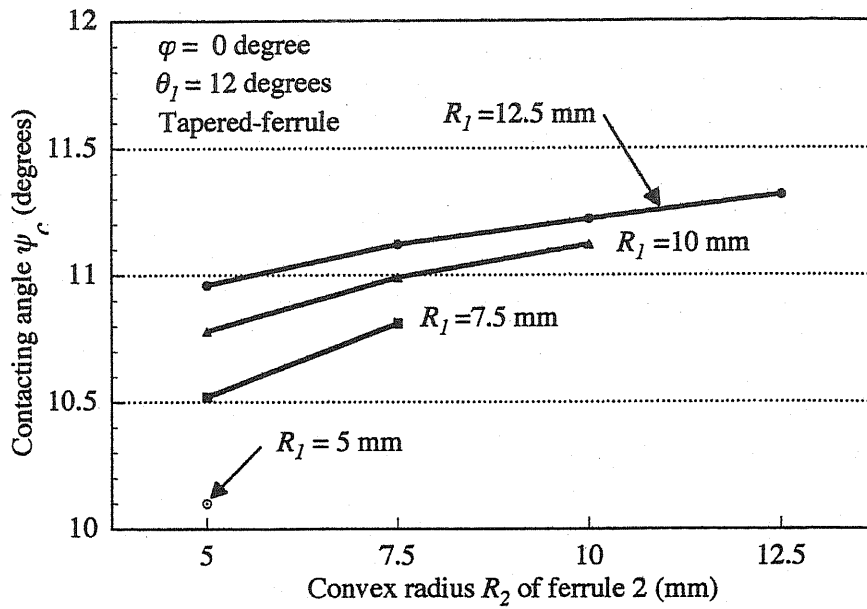
この斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c は、斜め球面の傾斜

角度 θ_1 、及びテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 の差異に依存することが図 3.8 から判る。更に、曲率半径 R_1 、 R_2 の差異が大きい組合せの接続では、この偏心 e_c が増加することを図 3.8 では示している。

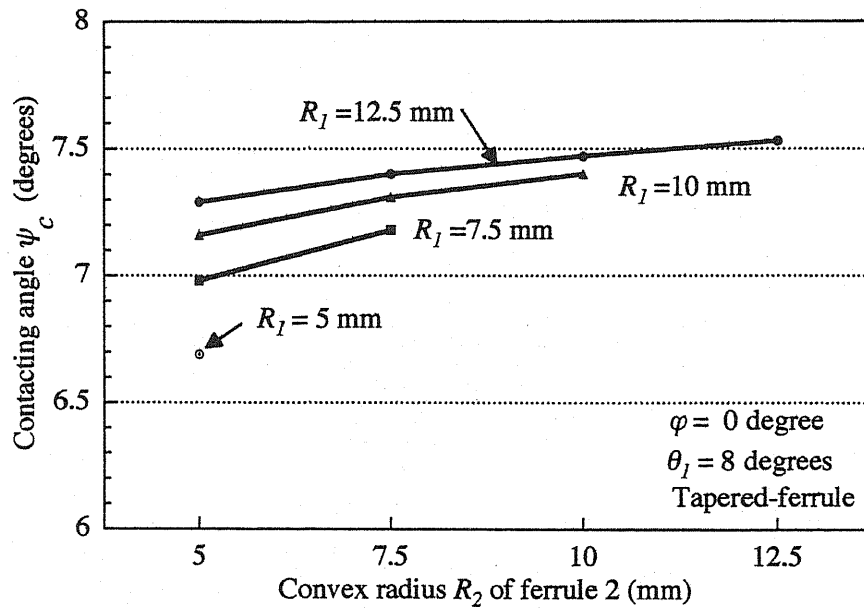
1 例として、図 3.8 では、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度、一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 が、各々 12.5 mm と 12.5 mm、及び 12.5 mm と 5 mm の場合、テーパ・フェルール端面の接点 Q_c の偏心 e_c は、各々 0 μm と 75.7 μm になった。同様に、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度、一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 が、各々 7.5 mm と 7.5 mm、及び 7.5 mm と 5 mm の場合、テーパ・フェルール端面の接点 Q_c の偏心 e_c は、各々 0 μm と 36.7 μm になった。

式 (3.14) によって計算した、斜め球面上の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する接触角度 ψ_c を図 3.9 に示す。ただし、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 8 度及び 12 度、一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 の組合せが、各々 5 mm、7.5 mm、10 mm 及び 12.5 mm の場合について計算した。

この斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する接触角度 ψ_c は、斜め球面の傾斜角度 θ_1 、及びテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 の差異に依存することが図 3.9 から判る。更に、曲率半径 R_1 、 R_2 の差異が大きい組合せ接続では、接触角度 ψ_c は小さな値になることを図 3.9 では示している。1 例として、図 3.9 から、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度、一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 の組合せが、各々 12.5 mm と 12.5 mm、及び 12.5 mm と 5 mm の場合、この斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する接触角度 ψ_c は、各々 11.3 度と 10.9 度になった。同様に、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 8 度、一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 の組合せが、各々 12.5 mm と 12.5 mm、及び 12.5 mm と 5 mm の場合、各々接触角度 ψ_c は 7.5 度と 7.3 度になった。いずれの場合も、接触角度 ψ_c は斜め球面の傾斜角度 θ_1 より小さくなる。



(a) . $\theta_1 = 12$ degrees.



(b) . $\theta_1 = 8$ degrees.

図 3.9 斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する接触角度 ψ_c .

3.2.3 光ファイバ端面間のエアギャップ

一対のテーパ・フェルールの斜め球面上で、斜め球面の接点 Q_c の光ファイバ光軸 ZZ からの偏心 e_c により、条件によってはエアギャップ Z_c が光ファイバ光軸 ZZ 上に生ずる。図 3.10 は、光ファイバ端面の光軸 ZZ におけるエアギャップ Z_c を求める解析図である。エアギャップ Z_c は

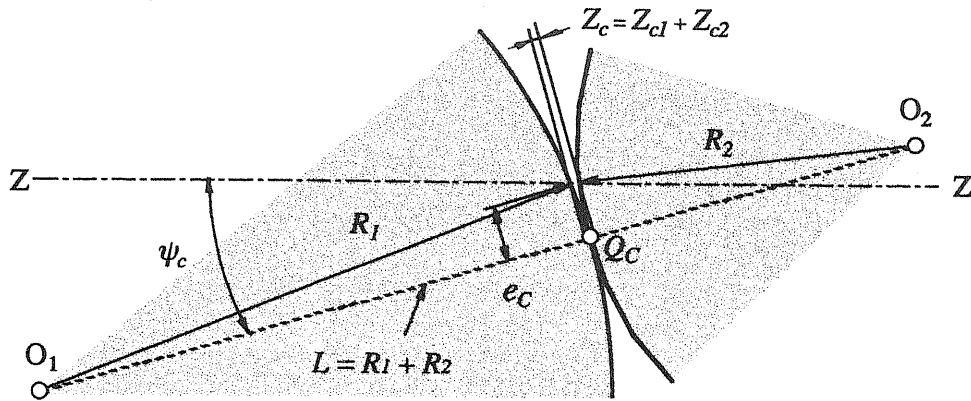


図 3.10 光ファイバ端面の光軸 ZZ におけるエアギャップ Z_c

テーパ・フェルール 1 及び 2 によるエアギャップ Z_{c1} , Z_{c2} を合計した光ファイバ光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_c を示す. 図 3.10 から, エアギャップ Z_c は次の手順で求めることができる.

テーパ・フェルール 1 及び 2 によるエアギャップ Z_{c1} , Z_{c2} は, 次の式 (3.16), (3.17) により求めることができる.

$$Z_{c1} = R_1^2 - \sqrt{R_1^2 - e_c^2} \cong e_c^2 / 2R_1 \quad (3.16)$$

$$Z_{c2} = R_2^2 - \sqrt{R_2^2 - e_c^2} \cong e_c^2 / 2R_2 \quad (3.17)$$

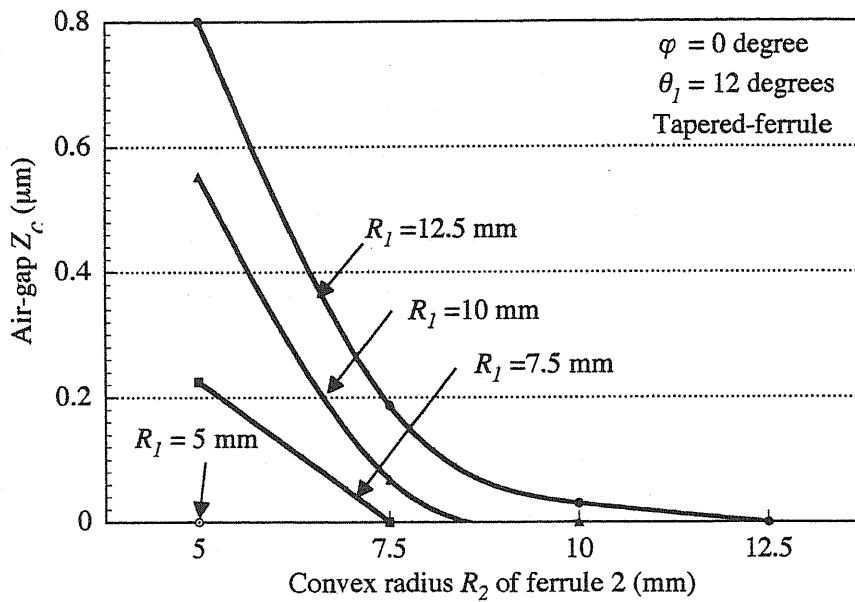
従って, エアギャップ Z_c は次の式 (3.18) により求めることができる

$$Z_c = Z_{c1} + Z_{c2} \cong (e_c^2 / 2R_1) + (e_c^2 / 2R_2) \quad (3.18)$$

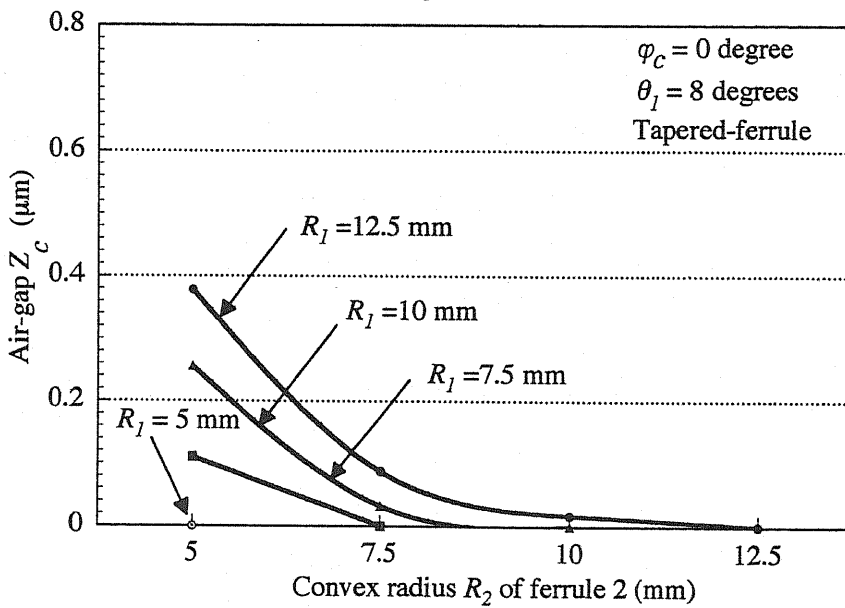
$$Z_c \cong (R_1 + R_2) e_c^2 / 2R_1 \cdot R_2$$

式 (3.18) によれば, エアギャップ Z_c は, 各々テーパ・フェルールの斜め球面上の接点 Q_c の, 光軸 ZZ からの偏心 e_c の 2 乗に比例すると共に, 各々曲率半径 R_1 , R_2 に反比例する.

前述の式 (3.15) によれば, 各々テーパ・フェルールの斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心 e_c は, 各々テーパ・フェルールの斜め球面



(a) . $\theta_1 = 12$ degrees.



(b) . $\theta_1 = 8$ degrees.

図 3.11 接触圧力ゼロの時のテーパ・フェルールの光ファイバ光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_c

の頂点 P_{c1}, P_{c2} の光軸 ZZ からの偏心 S_{c1}, S_{c2} に各々比例する。

図 3.11 は、式 (3.18) により計算した、接触圧力が零の時の光ファイバ光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_c を示す。斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 8 度及び 12 度、一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が、各々 5 mm, 7.5 mm, 10 mm 及び 12.5 mm の場合について計算し

た. 図3.11によれば, 接触圧力が零の時, 光ファイバ光軸ZZ上のエアギャップ Z_c は, 斜め球面の傾斜角度 θ_1 , 及びテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の差異に依存する. 更に, 斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の差異が大きい組合せの接続になるのに伴って, エアギャップ Z_c は急速に増加する. 1例として, 図3.11によれば, 斜め球面の傾斜角度 θ_1 が12度, 一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が, 各々12.5 mmと12.5 mm, 及び12.5 mmと5 mmの場合, この光ファイバ光軸上のエアギャップ Z_c は, 各々0 μm と0.80 μm であった. 同様に, 斜め球面の傾斜角度 θ_1 が8度, 一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が, 各々12.5 mmと12.5 mm, 及び12.5 mmと5 mmの場合, エアギャップ Z_c は各々0 μm と0.38 μm になった.

図3.11によれば, この光ファイバ光軸上のエアギャップ Z_c は, テーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の差異が大きいほど増加する. また, 斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が同一の組合せでは, エアギャップ Z_c は常に零になる.

3.3 テーパ・フェルールの接続特性の理論解析

第3.3項では, 第3.2項で理論解析した形状特性をもっているテーパ・フェルールを使用して構成したAPCコネクタの接続特性について, 光ファイバ端面間のエアギャップ Z_c を消去する接続原理, 及びエアギャップ Z_c を消去するために要する軸方向の接触力などの接続特性について記述する.

3.3.1 光ファイバの接続原理

図3.12はAPCコネクタの接続時におけるエアギャップ Z_c の消去のメカニズムの説明図である. 光ファイバ端面間のエアギャップ Z_c は, 軸方向に接触力 W_c を負荷して, 斜め球面の中心部の微小な面積部分を円形平面に弾性変形させて消去される[13]. この接触力 W_c は, コネクタ・プラグに内蔵された圧縮コイルばね力 W_0 により負荷される. しかし, FC型光コネクタの圧縮コイルばね力 W_0 の実効値は, 寸法の制約によ

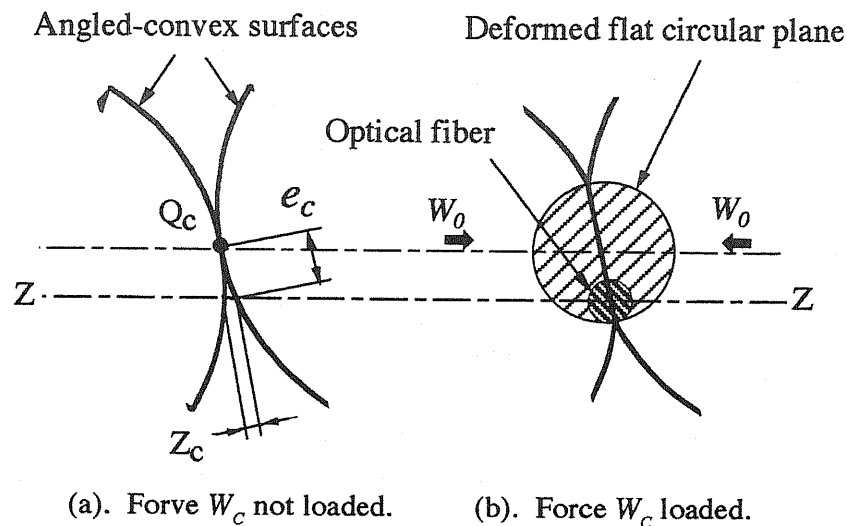


図 3.12 光ファイバ光軸上のエアギャップ Z_c の消去原理

り, 0.7 ± 0.2 kgf と小さな値に規定されている, 従って, テーパ・フェルールの斜め球面接点 Q_c の, 光ファイバ光軸 ZZ からの偏心 e_c に光ファイバのモードフィールド半径 a を加算した半径値が, 前記の圧縮コイルばね力 W_0 により形成される円形平面の半径範囲内にある時にのみ, 光ファイバ端面は密着できる. もし, 所要の軸方向接触力 W_c が圧縮コイルばね力 W_0 より大きい場合には, 光ファイバ端面は密着しない.

3.3.2 エアギャップの消去に要する接触力

曲率半径 R_1 及び R_2 の 2 個の中実球面を接触させて, 接触力 W で接触点を押した場合, 球面の弾性変形により生ずる円形平面の半径 r は, 次の Hertz の弾性方程式 (3.19) により与えられる [16].

$$r = \sqrt[3]{\frac{3\pi \cdot R_1 \cdot R_2 (\kappa_1 + \kappa_2)}{4(R_1 + R_2)}} \cdot \sqrt[3]{W} \quad (3.19)$$

ただし,

$$\kappa_1 = (1 - \nu_1^2) / \pi \cdot E_1, \quad \kappa_2 = (1 - \nu_2^2) / \pi \cdot E_2$$

$$r = e_c + a$$

<第3章>

$E_1 = E_2$: フェルールのヤング率

$\nu_1 = \nu_2$: フェルールのポアソン比

e_c : 球面接点 θ の光軸ZZからの偏心

a : 光ファイバ半径

各々テーパ・フェルールの材質をジルコニア・セラミックとして、ヤング率 $E_1 = E_2 = 15,000 \text{ kgf/mm}^2$, ポアソン比 $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$ とすれば、式 (3.19) は次の式 (3.20) に書き換えることができる。

$$r = e_c + a = 0.045 \cdot \sqrt[3]{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} \cdot \sqrt[3]{W_c} \quad (3.20)$$

従って、光ファイバ光軸ZZ上のエアギャップ Z_c を消去するのに必要な、軸方向の所要接触力 W_c は、式 (3.20) から次の式 (3.21) で求めることができる。

$$W_c = \left(\frac{e_c + a}{0.045} \right)^3 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \quad (3.21)$$

式 (3.21) によれば、光ファイバ光軸ZZ上のエアギャップ Z_c を消去するために必要な軸方向の所要接触力 W_c は、各々テーパ・フェルールの斜め球面の接点 Q_c の光軸ZZからの偏心 e_c の3乗に比例する。

式 (3.21) により計算した、光ファイバ光軸上のエアギャップ Z_c を消去するのに必要な、軸方向の所要接触力 W_c を図3.13示す。ただし、テーパ・フェルールの斜め球面の傾斜角度 θ_1 が8度及び12度であるとして、斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が、各々5 mm, 7.5 mm, 10 mm, 及び12.5 mmの場合について計算した。

図3.13によれば、軸方向の所要接触力 W_c は、テーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の差異が大きいくほど増加する。更に、所要接触力 W_c は曲率半径値が大きいくほど増加することが判る。1例として、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が12度、一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が、各々12.5 mmと12.5 mm, 及び12.5 mmと5 mmの場合、この光ファイバ光軸上のエアギャップ Z_c を消去する

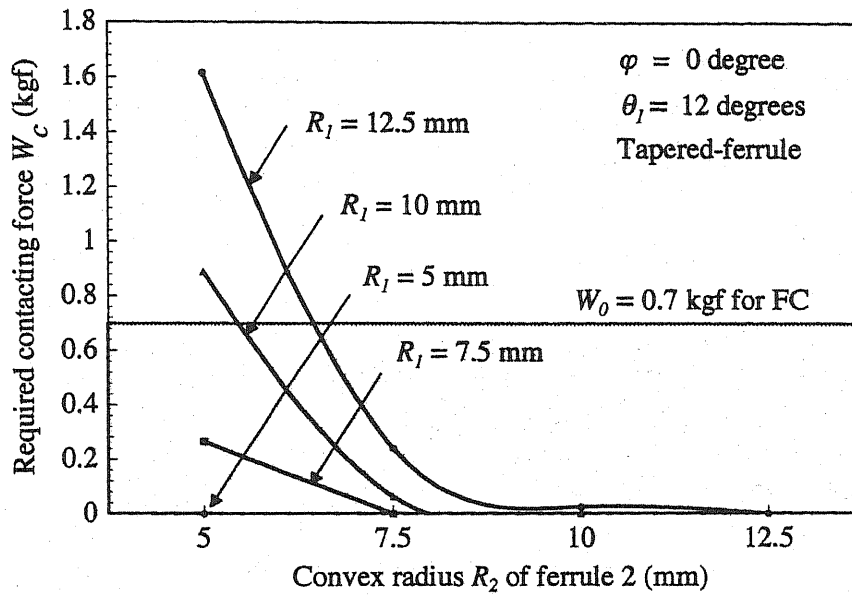
のに必要な軸方向の所要接触力 W_c は、図3.13から、各々0 kgfと1.61 kgfであった。同様に、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が8度、一对のテーパ・フェルール1の斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 が、各々12.5 mmと12.5 mm、及び12.5 mmと5 mmの場合、軸方向の所要接触力 W_c は、各々0 kgfと0.58 kgfであった。

なお、この接触力はコネクタ・プラグに内蔵した圧縮コイルばね力 W_0 により負荷される。従って、上述したように、FC/APCコネクタの圧縮コイルばね力 W_0 の実効値を0.7 kgfとすれば、 W_c が0.7 kgfより大きい領域では光ファイバ端面は密着しない。図3.13によれば、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が12度、テーパ・フェルール1の曲率半径 R_1 が12.5 mmの場合、フェルール1と組合せるフェルール2の最小曲率半径 R_2 が6.5 mm以上でなければ、光ファイバ端面は密着しない。一方、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が8度の場合には、斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 が、各々5 mmから12.5 mmの範囲の任意の組合せでも、所要接触力 W_c は圧縮コイルばね力 W_0 の実効値0.7 kgf以下であり、光ファイバ端面は密着する。斜め球面の傾斜角度 θ_1 が12度、テーパ・フェルール1の曲率半径 R_1 が12.5 mmの場合、フェルール1と組合せるフェルール2の最小曲率半径 R_2 は約7 mm以上でなければ、光ファイバ端面は密着しない。一方、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が8度の場合、フェルール1と組合せるフェルール2の最小曲率半径 R_2 は約5.5 mm以上でなければ、光ファイバ端面は密着しない。

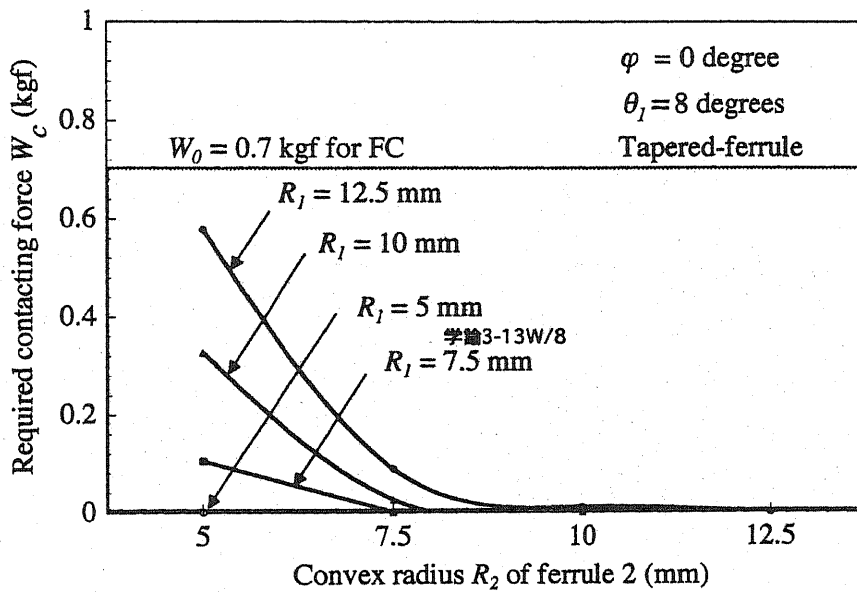
3.4 考察

以上に、テーパ・フェルールを使用して構成した従来のAPCコネクタについて、テーパ・フェルールの形状特性、及び接続特性について記述した。これらの解析結果から、曲率半径 R_1 、 R_2 及び接触力 W_c による許容偏心量 e_c 、光ファイバ端面のエアギャップ Z_c 、及び斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する接触角度 ψ_c と反射戻り光による挿入損失について考察する。

3.4.1 斜め球面接点の許容偏心量



(a) . $\theta_l = 12$ degrees.



(b) . $\theta_l = 8$ degrees.

図 3.13 光ファイバ光軸上のエアギャップ Z_c を消去に必要な軸方向の所要接触力 W_c

テーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 及び接触力 W_c が変化した場合の, 光ファイバ端面が密着できる許容偏心量 e_c は, 式(3.20)を書き換えた次の式(3.23)により計算できる.

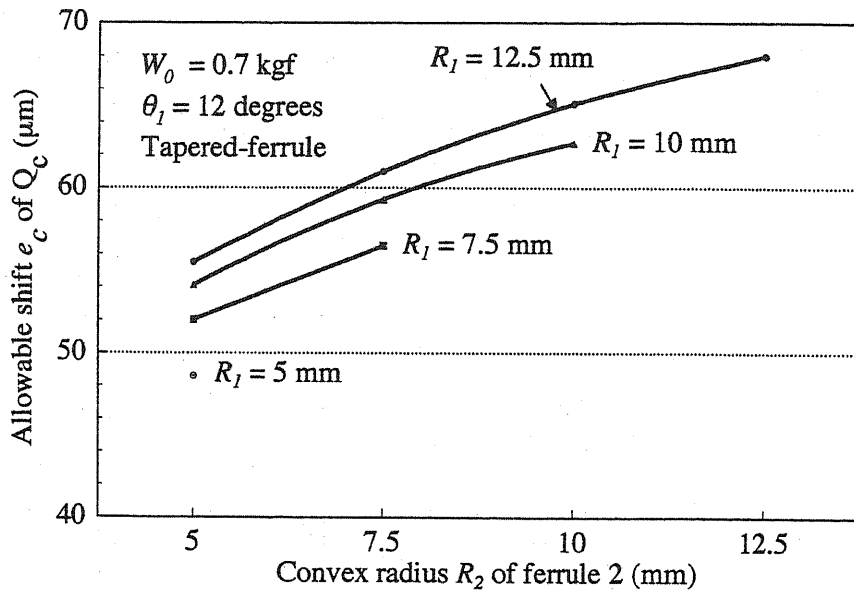


図 3.14 曲率半径 R_1 , R_2 及び接触力 W_c による許容偏心量 e_c

$$e_c = 0.045 \cdot \sqrt[3]{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} \cdot \sqrt[3]{W_c} - a \quad (3.22)$$

図 3.14 は、式 (3.22) により計算したテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 , 及び圧縮コイルばね力 W_0 により、光ファイバ端面が密着できる許容偏心量 e_c を示す。ただし、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度、圧縮コイルばね力 W_0 が、各々 0.5 kgf 及び 0.7 kgf、斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 が、各々 5 mm, 7.5 mm, 10 mm 及び 12.5 mm の場合について計算した。

図 3.14 によれば、曲率半径 R_1 , R_2 及び接触力 W_c による許容偏心量 e_c は、テーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の差異が大きいほど、また、曲率半径値が小さいほど減少する。

3.4.2 光軸上のエアギャップによる挿入損失

A P C コネクタにおいて、テーパ・フェルールの斜め球面に軸方向の圧縮コイルばね力 W_0 を負荷し、一对のテーパ・フェルールの斜め球面を相互に接続した場合、前述のように、接触力 W_c が圧縮コイルばね力 W_0 より大きい場合、光ファイバ端面間に生ずるエアギャップ Z_c を消去

できない。例えば，斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度，テーパ・フェルール 1 の曲率半径 R_1 が 12.5 mm，組合せるフェルール 2 の曲率半径 R_2 が 6.5 mm 以上の場合，図 3.11 から，このエアギャップ Z_c は約 0.4 μm となり消去できない。この場合，第 1 章で記述したように，光ファイバ・コアと空気層との屈折率差によりフレネル損失，光ファイバ端面間の多重反射，及びエアギャップ Z_c による光の減衰などが総合されて挿入損失が大きくなる。次に，これらの要因による挿入損失の計算値を示す。

1) フレネル損失による挿入損失

光ファイバ 1 から空気層への出射光の透過率を T_1 ，空気層から光ファイバ 2 への入射光の透過率を T_2 とすれば，フレネル損失による挿入損失 IL_F は次の式 (3.23) で与えられる [17]。

$$IL(\text{dB}) = -10 \log(T_1 \times T_2) \quad (3.23)$$

ただし，

$$T_1 = \frac{n_0 \cos \theta_0}{2n_1 \cos \theta_1} \left[\left(\frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_0 \cos \theta_0} \right)^2 + \left(\frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_0} \right)^2 \right]$$

$$T_2 = \frac{n_1 \cos \theta_1}{2n_0 \cos \theta_0} \left[\left(\frac{2n_0 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1} \right)^2 + \left(\frac{2n_0 \cos \theta_0}{n_1 \cos \theta_1 + n_0 \cos \theta_1} \right)^2 \right]$$

$$\theta_0 = \sin^{-1}(n_1 \sin \theta_1), \quad \varphi = 0 \text{ degree}$$

ここで，

θ_0 : 光ファイバ 1 から空気層への光の出射角度，または，空気層から光ファイバ 2 への光の入射角度，

θ_1 : フェルール 1 及び 2 の端面の光軸 ZZ に直角な面に対する傾斜角度，

n_1 : 光ファイバ・コアの屈折率

n_0 : 空気層の屈折率。

ここで，空気層の屈折率 $n_0 = 1$ ，光ファイバ・コアの屈折率 $n_1 = 1.47$

として式 (3.23) により挿入損失 IL を計算する. すなわち, フェルール 1 及び 2 の光軸 ZZ に直角な面に対する端面傾斜角度 θ_1 が 12 度及び 8 度の場合, 式 (3.23) により計算した挿入損失 IL_F は各々 0.38 dB 及び 0.34 dB になる. 従って, 光ファイバ端面間にエアギャップ Z_c が生じた場合, 密着状態に比較して上述の挿入損失 IL_F が加算される.

2) 多重反射による挿入損失

更に, 光ファイバ端面間の多重反射による挿入損失 IL_R が加算される. この多重反射による挿入損失 IL_R は式 (3.24) により与えられる [18].

$$IL_A(dB) = -10 \log T \left[\frac{1}{1 + (\lambda \cdot z / 2\pi \cdot n_0 \cdot \omega_0)^2} \right] \quad (3.24)$$

ただし,

$\delta = 4 \pi n_1 z / \lambda$: 光束間の位相差,

λ : 光波長,

a_0 : 振幅,

$r^2 = |(n_1 - 1) / (n_1 + 1)|^2$: 光の反射率.

接続端面が光軸に対して直角の光ファイバの端面間にエアギャップ Z_c がある状態で接続された場合, 光波長 λ の $\lambda / 4$ に相当するエアギャップ毎に最大で約 0.6 dB の挿入損失 IL_R を生ずる.

3) エアギャップによる光減衰

第 1 章で記述したように, 光ファイバ端面間の距離に応じて, 光ファイバ量が減衰する. この光量の減衰による挿入損失 IL_A は次の式 (3.25) により計算できる [19], [20].

$$IL_A(dB) = -10 \log T \left\{ \left[\frac{1}{1 + (\lambda \cdot z / 2\pi \cdot n_0 \cdot \omega_0)^2} \right] \cdot \exp \left[- \left(\frac{z \cdot \sin \theta_0}{\omega \sqrt{1 + (\lambda \cdot z / 2\pi \cdot n_0 \cdot \omega_0)^2}} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.25)$$

ただし、

λ : 光の波長

n_0 : 空気層の光屈折率 ($\cong 1.0$)

ω_0 : 光ファイバ端面におけるモードフィールド半径

θ_0 : 光軸に対する光ファイバ1の光出射角度

式(3.25)により計算した光量の減衰による挿入損失 IL_A は、光ファイバ端面の傾斜角度 θ_1 が12度及び8度について、各々 $0.14 \text{ dB}/\mu\text{m}$ 、 $0.09 \text{ dB}/\mu\text{m}$ になる。ただし、エアギャップ Z_c の範囲は $100 \mu\text{m}$ 以内とする。

ここで、図3.13 (a)によれば、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が12度、テーパ・フェルール1の曲率半径 R_1 が 12.5 mm の場合、光ファイバ端面が密着できるテーパ・フェルール2の曲率半径 R_2 は 6.7 mm になる。ここで、テーパ・フェルール2の曲率半径 R_2 が 5 mm のときのエアギャップ Z_c は、図3.11 (a)から $0.4 \mu\text{m}$ になる。式(3.23)から式(3.25)により計算した、このときのエアギャップ Z_c による挿入損失は、各々 $IL_F \cong 0.38 \text{ dB}$ 、 $IL_R \cong 0.076$ 、 $IL_A \cong 0.056 \text{ dB}$ になる。従って、これらを合算した挿入損失 IL は約 0.51 dB になる。

更に、光コネクタの挿入損失の要因として、第1章で記述した光ファイバ間の光軸ずれによる損失が加算される。従って、光コネクタにとっては、光ファイバ間のエアギャップの消去は重要な課題である。

3.5 まとめ

第3章では、APCコネクタの形状特性、及び接続特性に関する普遍的な課題を明らかにするために、フェルール回転角度 $\varphi = 0$ 度において、テーパ・フェルールの端面傾斜角度 θ_1 、及び斜め球面の曲率半径 R_1 と R_2 をパラメータとして、次の項目について理論解析を行った。

- (a) 斜め球面頂点 P_c の光軸 ZZ からの偏心 S_c
- (b) 接続時の斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心 e_c
- (c) 光ファイバ端面の接触角度 ψ_c

- (d) 及び光ファイバ端面間に生ずるエアギャップ Z_c
- (e) エアギャップ Z_c を消去するための所要接触力 W_c
- (f) エアギャップ Z_c による挿入損失 IL

解析結果は次のように要約できる。

1) 斜め球面の傾斜角度 θ_1

A P Cコネクタにおいて、斜め球面頂点 P_c の光軸 ZZ に対する偏心 S_c 、接続時の各々フェルールの接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c 、光ファイバ端面のエアギャップ Z_c 、及びエアギャップ Z_c を消去するためのフェルール端面の接触力 W_c は、いずれも斜め球面の傾斜角度 θ_1 の関数として与えられる。

2) 斜め球面頂点 P_c の光軸 ZZ に対する偏心 S_c

フェルールの接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c は偏心 S_c の1乗の関数、エアギャップ Z_c は偏心 S_c の2乗の関数、フェルール端面の接触力 W_c は偏心 S_c の3乗の関数で与えられる。

3) 斜め球面の曲率半径 R_1 と R_2 の差異-1

偏心 e_c 、エアギャップ Z_c 、及び接触力 W_c は、各々 $[R_1/(R_1+R_2)]$ 、 $[(R_1+R_2)/2R_1 \cdot R_2]$ 、及び $[(R_1+R_2)/R_1 \cdot R_2]$ の関数である。斜め球面頂点 P_c の光軸 ZZ に対する偏心 S_c のみが曲率半径 R の関数となる。

4) 斜め球面の曲率半径 R_1 と R_2 の差異-2

曲率半径 R_1 と R_2 に差異があるときは、曲率半径 R_1 と R_2 が同一の場合に比較して、偏心 e_c 、エアギャップ Z_c 、及び接触力 W_c は各々増加する。

曲率半径 R_1 と R_2 の減少に伴って、偏心 e_c 、エアギャップ Z_c 、及び接触力 W_c は各々減少する。

5) 斜め球面の接点 Q_c の接触角度 ψ_c

斜め球面の接点 Q_c の接触角度 ψ_c は、斜め球面の傾斜角度 θ_1 、及び斜め球面の曲率半径 R_1 と R_2 の関数である。また、 ψ_c の数値は常に θ_1 より小さい。

6) エアギャップ Z_c による挿入損失 IL

エアギャップ Z_c が消去できない場合の挿入損失 IL は、各々フレネル損失 IL_F 、多重反射損失 IL_R 、及びエアギャップの大きさによる光ファイバ減衰による損失 IL_A を合算したものになる。

以上の結論は、テーパ・フェルールを使用したAPCコネクタの基本接続特性として普遍的なものであり、以下に本論文では、これを基本として議論を進める。

第3章参考文献

- [1] M. Takahashi, "Experimental Considerations for APC Optical Connectors with Slanted Angle of 8 Degrees," Graduate School of Electronic Science and Technology of Shizuoka Univ., Vol.1-17. pp.89-95, 1996.
- [2] M. Takahashi, "Optical Fiber Connector", US Patent. No. 4,747,659. 1989.
- [3] M. Takahashi, "Optical Fiber Connecting Device," US Patent. No. 4,953,941. 1990.
- [4] M. Takahashi, "Compatibility of Conventional-Ferrule with Step-Ferrule for Angled Convex Optical Connectors," Proc, 45th IEEE ECTC, pp. 406-412, (May, 1995)
- [5] M. Takahashi, "Novel Stepped ferrule for angled convex polished optical fiber connector," Proc, IEEE OFC'95. San Diego, Vol. 8, pp. 184-185, (Feb, 1995)
- [6] M. Takahashi, "Compatibility for optical connectors with different slanted angles at their ferrule endfaces," Proc, IEEE CLEO / Pacific Rim'95. pp. 304. (July, 1995)
- [7] 高橋光雄, "斜め球面研磨光コネクタの接続端面角度差異による互換性" 日本電子部品信頼性センタ、RCJ 第4回電子デバイスの信頼性シンポジウム、pp. 39 - 45, (11, 1995)
- [8] 杉田悦治, 他, "斜めPC (APC)コネクタの互換性試験結果," 1995 信学春全大, C-289. 1995.
- [9] 平 淳司, 他, "超低反射戻り光 Angled-PC コネクタ," 1994 信学春全大, C-204. 1994.
- [10] International Electrotechnical Commission, "INTERNATIONAL STANDARD IEC-874-14-XX. "DETAIL SPECIFICATION FOR FIBRE OPTIC CONNECTOR TYPE SC-APC TUNED 8 DEGREES FOR SINGLE MODE FIBRE TYPE," May be published by the end of 1997.
- [11] International Electrotechnical Commission, "INTERNATIONAL STANDARD IEC 60874-14-6, Part 14-6: Detail specification for fibre optic connector Type SC-APC 9° untuned terminated to single-mode fibre type B1," pp. 6, 1997.

<第3章>

- [12] M.Takahashi, " Improved Design of APC connector with Slanted Angle of 12 degrees for Dispersion Shifted Optical Fiber," IEEE, Journal of Lightwave Technology. (Accepted subject to minor revision, October, 1997. Assigned No. 3371).
- [13] " 技術指導資料 : FC Type Fiber Optic Connector 図面," NTT アドバンステクノロジー株式会社, 1986.
- [14] " 技術指導資料 : SC Type Fiber Optic Connector 図面," NTT アドバンステクノロジー株式会社, 1989.
- [15] M. Takahashi, " Elastic Polishing Plate Method and Conditions for Forming Angled Convex Surface on Ferrule Endface," IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol. 15, No. 9, pp. 1675 - 1680, 1997.
- [16] 機械設計便覧編纂委員会, "機械設計便覧," 丸善株式会社 . pp.1872, 1973.
- [17] New-Port Catalogue, New-Port Co., LTD. pp. J-23, 1990.
- [18] 鈴木, 他, " 光コネクタ損失特性の端面処理効果," 昭56年度信学全大, No. 2256, 1981.
- [19] D. Marcuse, " Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices," Bell System Tech' Journal, Vol. 56, No. 5, p. 713, 1977.
- [20] M. Takahashi, " Variable Light Attenuator of Improved Air-gap Type with Extremely Low Returning Light," Proc, IEEE IMTC/94, Vol. 2, pp. 947-950, (May. 1994).

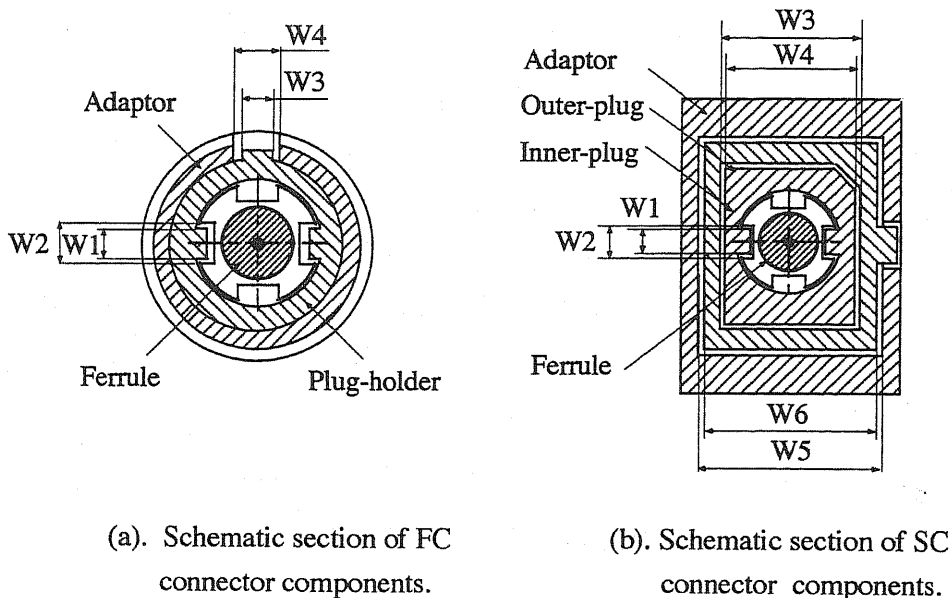
第4章 テーパ・フェルール付きAPCコネクタの解析 -2 フェルール回転角度 $\varphi \geq 0$ 度における接続特性

4.1 まえがき

APCコネクタでは、各光コネクタ部品間の整列キーと整列キー溝との間の隙間により、フェルールが相互に円周方向に若干回転した状態で接続されることが考えられる。この場合、各フェルールの斜め球面はV字形状に開くので、光ファイバ端面間に過大なエアギャップが生じ、挿入損失を増大させて接続の互換性を阻害する。従って、APCコネクタの接続を論ずる上でこの接続時のフェルール間の回転は非常に重要である[1]。

図4.1(a),(b)に、光コネクタ部品間の整列キーと整列キー溝との間の隙間の関係を説明するための光コネクタの断面を示す。図4.1(a),(b)は、各々FC型コネクタ及びSC型コネクタを示す。表4.1は、これらの光コネクタ部品間の整列キーと整列キー溝の隙間の寸法諸元の一例を示す[2],[3]。図4.1及び表4.1から、FC型コネクタ部品間の整列キーと整列キー溝との間の隙間によるフェルールの回転角度 φ は、相互のフェルールについて最大で約16度に達する。一方、SC型コネクタ部品間では最大で14.7度に達する。しかし、経験的に、実際の接続状態における一対のフェルール間の相互間の回転角度は平均して、これらの値より小さいものと推定される。従って、本論文では、フェルール回転角度の範囲は10度以内と仮定して論ずる。

フェルールが回転して接続された場合を含め、APCコネクタの形状特性、及び接続特性に関する文献等は少ない[4]-[14]。従って、第4章では、第3章で基本的な形状特性、及び接続特性について理論解析を行ったテーパ・フェルール、及び図4.1と表4.1に示す従来のPCコネクタ用部品を使用して構成したAPCコネクタについて、形状特性及び接続特性について理論解析をする。ここで、理論解析では、テーパ・フェルールの端面傾斜角度 θ_1 が各々8度と12度、斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が、各々5 mmから12 mmの範囲、及びテーパ・フェルールの回転



(a). Schematic section of FC connector components.

(b). Schematic section of SC connector components.

図 4.1 FC型及びSC型コネクタの接続時の断面

角度 φ が $0 \sim 10$ 度の範囲について取り扱う。また、第4章では、これらの解析結果にもとずいて、フェルール回転によるAPCコネクタの接続特性の改善課題を明らかにする。

4.2 フェルール回転による形状特性の理論解析

4.2.1 フェルール回転による接続状態の概要

最初に、フェルール回転に起因する接続状態の変化の概要を明らかにする必要がある。そこで、テーパ・フェルール2のテーパ・フェルール1に対する回転角度が、各々 $\varphi = 0$ 度及び $\varphi = 90$ 度の場合の接続端面状態を、各々図4.2(a), (b)に示す。

図4.2において、テーパ・フェルール1とテーパ・フェルール2の斜め球面の傾斜角度 θ_1 , θ_2 、及び曲率半径 R_1 , R_2 は、各々同一の値である。図4.2(a)は、フェルール回転角度 $\varphi = 0$ 度について示したものである。図4.2(a)において、 P_{c1} , P_{c2} は各々斜め球面の頂点、 O_1 及び O_2 は、テーパ・フェルール1及び2の球面曲率半径 R_1 及び R_2 の中心点、 Q_c は斜め球面の接点、 e_{cy} は斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心の yy 座標を示す。この場合、各フェルールの斜め球面は球体の表面の一

表 4.1 FC型, 及びSC型コネクタにおける整列キーと整列キー溝とによる隙間の寸法諸元の一例.

(a). FC connector components.

Locations of key and key-slit	Dimensions (mm)	Rotation angle (degrees)
Ferrule key-slit : W1	1.50	Up to 13.0
Holder key : W2	1.00	
Adaptor key-slit : W3	2.20	Up to 3.2
Plug key : W4	2.00	
Total rotation angle : φ		Up to 16.2

(b). SC connector components.

Locations of key and key-slit	Dimensions (mm)	Rotation angle (degrees)
Ferrule key-slit : W1	1.50	Up to 8.0
Holder key : W2	1.20	
Outer plug : W3	5.70	Up to 4.2
Inner plug : W4	5.50	
Adaptor : W5	9.10	Up to 2.5
Outer plug : W6	8.90	
Total rotation angle : φ		Up to 14.7

部であると考えられるので, 各斜め球面の接点 Q_c は常に中心点 O_1 及び O_2 を結ぶ線分 L 上にある. この線分 L は曲率半径 R_1, R_2 の和で与えられるので一定値である. H_{c1} 及び H_{c2} は, 各々テーパ・フェルール1及び2の曲率半径の中心点 O_1 及び O_2 の光ファイバ光軸 ZZ からの距離を示す. テーパ・フェルール2の斜め球面の頂点 P_{c2} と曲率半径 R_2 の中心点 O_2 とを結ぶ線分上に点 O_p は存在し, 点 O_p は線分 $P_{c2}O_p$ と光軸 ZZ との交点である. テーパ・フェルール2の曲率半径 R_2 の中心点 O_2 は, この交点 O_p を回転中心とし, 回転半径 H_{c2} の円上を移動する. テーパ・フェルール1と2の曲率半径 R_1, R_2 が同一の場合, 曲率半径 R_1, R_2 の中心点 O_1, O_2 は光軸 ZZ に対して対称であって, 等距離 H_{c1}, H_{c2} に位置する. $H_{c1} = H_{c2}$ であるため, 斜め球面の接点 Q_c は光軸 ZZ 上に位置するので, 斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心 e_{cy} は零になる.

図 4.2 (b) は, テーパ・フェルール2の回転角度が $\varphi = 90$ 度について

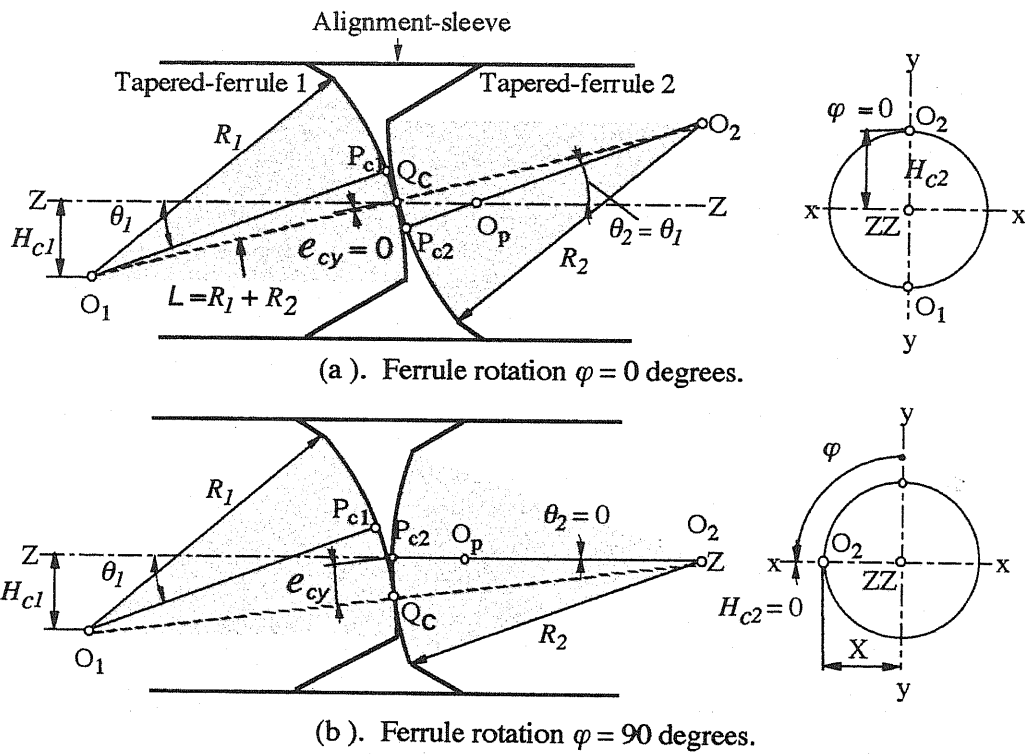
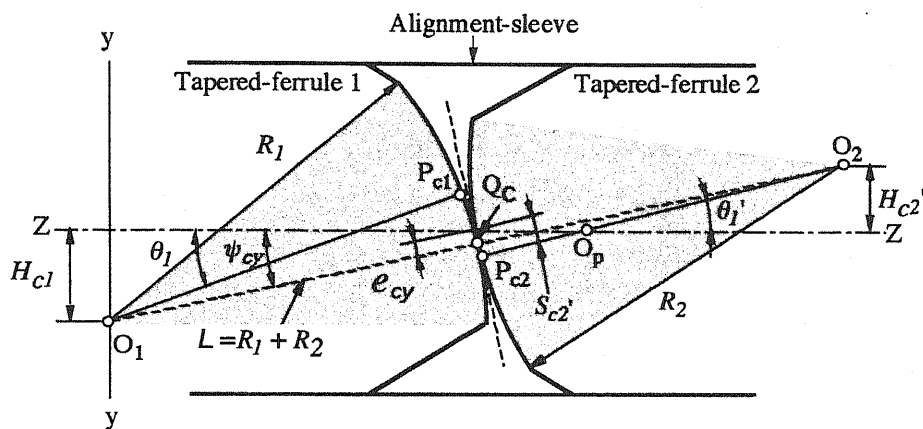


図 4.2 テーパ・フェルール 2 のテーパ・フェルール 1 に対する回転角度による端面の接続状態

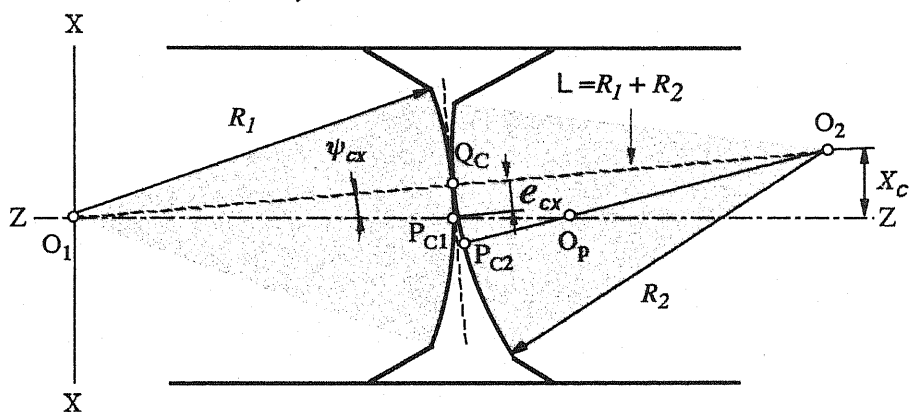
て示したものである。この場合、テーパ・フェルール 2 の曲率半径 R_2 の中心点 O_2 は、光軸 ZZ に一致する。従って、中心点 O_1 、 O_2 の光軸 ZZ からの距離 H_{c1} 、 H_{c2} の関係は、 $H_{c1} > H_{c2}$ である。このため、斜め球面の接点 Q_c は、 yy 座標上で光軸 ZZ から偏心 e_{cy} を生ずる。同時に、 xx 座標成分 X により、斜め球面球面 Q_c は xx 座標上でも偏心 e_{cx} を生ずる。

端面を斜め球面研磨した APC コネクタ用フェルールの一方を、回転角度 $\varphi < 90$ 度の範囲で回転させた場合、斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心は、 yy 軸座標成分の e_{cy} 、及び xx 軸座標成分の e_{cx} の複合成分として与えられる。同時に、斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する傾斜角度は、フェルール回転角度が $\varphi = 0$ 度において最大となり、 $\varphi = 90$ 度において最小になる。

4.2.2 斜め球面の接点の光軸からの偏心



(a). Shift e_{cy} of contacting point Q_c on ordinate yy .



(b). Shift e_{cx} of contacting point Q_c on abscissa xx .

図 4.3 テーパ・フェルール 2 の回転に起因する端面接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心 e_{cy} 及び e_{cx} .

図 4.3 (a), (b) は、各テーパ・フェルールの斜め球面の傾斜角度 θ_1, θ_2 、及び曲率半径 R_1, R_2 を各々同一とし、各々 yy 軸及び xx 軸について、斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心 e_c を求めたものである。図 4.3 (a), (b) においては、APC コネクタのフェルール 2 を、回転角度 $\varphi < 90$ 度の範囲で回転させたと仮定している。図 4.3 (a) は、斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心の yy 軸座標 e_{cy} を求める解析図である。図 4.3 (b) は、斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心の xx 軸座標 e_{cx} を求める解析図である。図 4.3 に使用した各記号は、図 4.2 で説明したものと同一である。ここで、 ψ_{cy}, ψ_{cx} は、各々 yy 座標及び xx

座標における斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する接触角度を示す。各々の理論式は、次のよう表わされる。

1) 斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心の yy 座標 e_{cy}

図4.3 (a)において、テーパ・フェルール1を固定して、テーパ・フェルール2をを、回転角度 $\varphi < 90$ 度の範囲で回転させたと仮定する。この場合、前述のように、テーパ・フェルール2の曲率半径 R_2 の中心点 O_2 は、斜め球面の頂点 P_{c2} と曲率半径 R_2 の中心点 O_2 を結ぶ線分 $P_{c2}O_2$ と光軸 ZZ との交点 O_p を回転中心、光軸 ZZ を回転軸として、回転半径 H_{c2} の円軌跡に沿って回転する。従って、回転角度 φ におけるテーパ・フェルール2の斜め球面の頂点 P_{c2} の光軸 ZZ からの偏心を S_{c2}' とすれば、 S_{c2}' は式 (4.1) より求められる。

$$S_{c2}' = S_{c2} \cdot \cos \varphi \quad (4.1)$$

回転角度 φ において、曲率半径 R_2 の中心点 O_2 の光軸 ZZ からの距離を H_{c2}' とすれば、 H_{c2}' は式 (4.2) により求められる。

$$H_{c2}' = H_{c2} \cdot \cos \varphi \quad (4.2)$$

回転角度 j において、テーパ・フェルール2の斜め球面の傾斜角度 θ_1' とすれば、 θ_1' は式 (4.3) より求められる。

$$\theta_1' = \tan^{-1} (\tan \theta_1 \cdot \cos \varphi) \quad (4.3)$$

テーパ・フェルール2の斜め球面上の接点 Q_c の yy 座標における光軸 ZZ からの偏心 e_{cy} は、各々の曲率半径 R_1, R_2 の中心点 O_1, O_2 の光軸 ZZ からの距離 H_{c1}, H_{c2}' の合計値 ($H_{c1} + H_{c2}'$) を、各テーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の比率で分割した位置にある。従って、テーパ・フェルール2の斜め球面の接点 Q_c の yy 座標における偏心 e_{cy} は、次の式 (4.4) より求めることができる。

$$e_{cy} = \frac{1}{\cos \psi_{cy}} \left[\frac{R_1 (|H_{c1}| + H_{c2}')}{R_1 + R_2} - |H_{c1}| \right] \quad (4.4)$$

ここで、テーパ・フェルール1の曲率半径 R_1 の中心点 O_1 の光軸 ZZ からの距離 H_{c1} は、図 3.6 及び図 4.3 から求めることができ、式 (4.5) により与えられる。

$$H_{c1} = R_1 \sin \theta_1 - S_{c1} \cos \theta_1 \quad (4.5)$$

同様にして、テーパ・フェルール2の曲率半径 R_2 の中心点 O_2 の光軸 ZZ からの距離 H_{c2}' は、式 (4.6) により与えられる。

$$H_{c2}' = (R_2 \sin \theta_1 - S_{c2} \cos \theta_1) \cos \varphi \quad (4.6)$$

従って、式 (4.4) に式(4.5)及び式(4.6)を代入すれば、式 (4.4) は、次の式 (4.7) のようになる。

$$\begin{aligned} e_{cy} &= \frac{R_1 \left[|R_1 \sin \theta_1 - S_{c1} \cos \theta_1| + (R_2 \sin \theta_1 - S_{c2} \cos \theta_1) \cos \varphi \right]}{(R_1 + R_2) \cos \psi_{cy}} \\ &= \frac{|R_1 \sin \theta_1 - S_{c1} \cos \theta_1|}{\cos \psi_{cy}} \\ &= \frac{R_1 (R_2 \sin \theta_1 - S_{c2} \cos \theta_1) \cos \varphi - R_2 |R_1 \sin \theta_1 - S_{c1} \cos \theta_1|}{(R_1 + R_2) \cos \psi_{cy}} \end{aligned} \quad (4.7)$$

2) 斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する zz-yy 平面上での傾斜角度 ψ_{cy}

式 (4.4), (4.7) において、 ψ_{cy} は、斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する zz-yy 平面上での傾斜角度であり、図 4.3 から式 (4.8) より求めることができる。

$$\begin{aligned} \psi_{cy} &= \sin^{-1} \left(\frac{|H_{c1}| + H_{c2}'}{R_1 + R_2} \right) \\ &= \sin^{-1} \left[\frac{|R_1 \sin \theta_1 - S_{c1} \cos \theta_1| + (R_2 \sin \theta_1 - S_{c2} \cos \theta_1) \cos \varphi}{R_1 + R_2} \right] \end{aligned} \quad (4.8)$$

以上の式 (4.1) ~ (4.8) より、斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対す

る yy 座標の偏心 e_{cy} , 及び斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する $zz-yy$ 平面上での傾斜角度 ψ_{cy} を計算できる.

3) 斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心の xx 座標 e_{cx}

図 4.3 (b) において, テーパ・フェルール 2 が角度 φ だけ回転した場合の, 斜め球面接点 Q_c の xx 座標を X_c として表わせば, X_c は式 (4.9) より求めることができる.

$$X_c = H_{c2} \cdot \sin \varphi \quad (4.9)$$

斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心の xx 座標 e_{cx} は, 式 (4.10) により求めることができる.

$$e_{cx} = \frac{R_1 \cdot H_{c2} \cdot \sin \varphi}{(R_1 + R_2) \cos \psi_{cy}} \quad (4.10)$$

4) 斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する $zz-yy$ 平面上での傾斜角度 ψ_{cx}

斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する $zz-yy$ 平面上での傾斜角度 ψ_{cx} は, 式 (4.11) で求めることができる.

$$\psi_{cx} = \tan^{-1} \left[\frac{H_{c2} \cdot \sin \varphi}{(R_1 + R_2) \cos \psi_{cy}} \right] \quad (4.11)$$

5) 斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c

図 4.4 (a), (b) は, テーパ・フェルール 1 とテーパ・フェルール 2 の斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が同一である場合, 及び異なる場合について, 偏心 e_c 及び斜め球面の接点 Q_c の軌跡を示す. フェルール 2 の回転角度が φ において, 偏心 e_c は, 各々 yy 座標および xx 座標の斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_{cy} 及び e_{cx} を総合したものである. 斜め球面の接点 Q_c は, 回転角度 φ によって移動する. 図 4.4 (a), (b) は, 図 4.3 の偏心を光軸 ZZ 方向から見た x, y 座標図である.

図 4.4 (a) は, フェルール 1 と 2 の斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が同一の場合について示したものである. 斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c は, テーパ・フェルール 1 の斜め球面の曲率半径 R_1 の中心 O_1

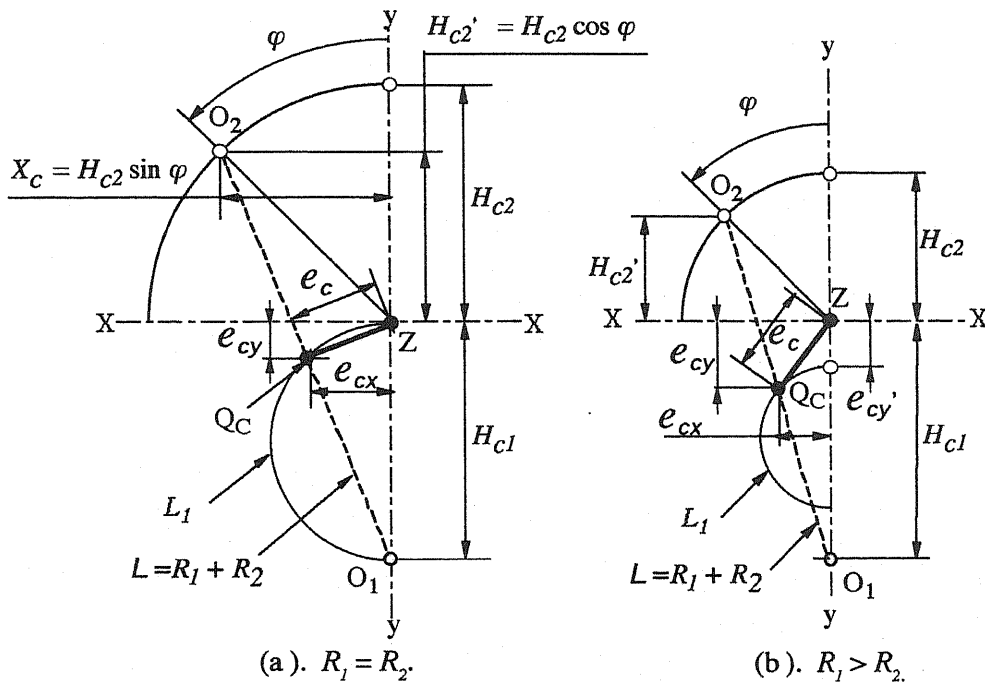


図 4.4 斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c と移動軌跡

と、テーパ・フェルール 2 の斜め球面の曲率半径 R_2 の中心 O_2 とを結ぶ線分 L 上にある。更に、 yy 座標および xx 座標での斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_{cy} 及び e_{cx} のベクトル和を表わす点 Q_c は、 O_1 と O_2 を結ぶ線分 L 上にある。従って、斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c は式 (4.12) により求めることができる。

$$e_c = \sqrt{e_{cx}^2 + e_{cy}^2} \quad (4.12)$$

6) 角度 φ による斜め球面接点 Q_c の移動を表わす軌跡

回転角度 φ の増加に伴う斜め球面接点 Q_c の移動を表わす軌跡 L_1 の xy 座標は、式 (4.4) 及び (4.10) から計算できる。図 4.4 では、移動軌跡 L_1 の形状は円になる。この移動軌跡円 L_1 の半径 L_R は式 (4.13) により求めることができる。

$$L_R = \frac{1}{2} \left\{ |H_{c1}| - \left[\frac{|H_{c1}| (|H_{c1}| - H_{c2})}{|H_{c1}| - H_{c2}} + e_{cy}' \right] \right\}$$

$$= \frac{2|H_{C1}| \cdot H_{C2} - (|H_{C1}| + H_{C2}) e_{cy}'}{2(|H_{C1}| + H_{C2})} \quad (4.13)$$

ただし、 e_{cy}' は回転角度 $\varphi = 0$ 度における偏心である。

曲率半径 R_1 , R_2 が同一の場合、線分 ZO_1 と線分 ZO_2 とは等しくなるから、角度 φ の増加による接点 Q_C の移動軌跡 L_{xy} は、半径 L_R が $(H_{C1}/2)$ の正円になる。これは、図 4.4 及び式 (4.13) から理解できる。一方、図 4.4 (b) に示すように曲率半径 R_1 , R_2 が $R_1 > R_2$ と異なる場合には、回転角度 $\varphi = 0$ 度について図 3.8 に示したような偏心 e_{cy}' が生じている。従って、曲率半径 R_1 , R_2 が同一の場合に比較して、同一回転角度 φ における偏心 e_c は大きくなる。この場合、接点 Q_C の移動軌跡円 L_1 の半径 L_R は式 (4.13) で示される。

7) 回転角度 φ に対応する斜め球面接点 Q_C の光軸 ZZ に対する傾斜角度 ψ_c

図 4.4 から、斜め球面接点 Q_C の光軸 ZZ に対する傾斜角度 ψ_c は、式 (4.14) により求めることができる。

$$\psi_c = \sin^{-1} \left[\frac{\sqrt{(|H_{C1}| + H_{C2} \cdot \cos\varphi)^2 + (H_{C2} \cdot \sin\varphi)^2}}{R_1 + R_2} \right] \quad (4.14)$$

従って、回転角度 $\varphi = 0$ 度の場合、式 (4.15) により傾斜角度 ψ_c を求めることができる。

$$\psi_c = \sin^{-1} \left[\frac{\sqrt{(|H_{C1}| + H_{C2} \cdot \cos\varphi)^2}}{R_1 + R_2} \right] \quad (4.15)$$

回転角度 $\varphi = 90$ 度の場合、式 (4.16) により傾斜角度 ψ_c を求めることができる。

$$\psi_c = \sin^{-1} \left[\frac{\sqrt{|H_{C1}|^2 + (H_{C2} \cdot \sin\varphi)^2}}{R_1 + R_2} \right] \quad (4.16)$$

この場合、式 (4.16) は第3章の式 (3.14) と同じ式になる。

図4.5から図4.7に、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が12度及び8度のテーパ・フェルールについて、フェルールの回転による斜め球面の接点 Q_c の光軸に対する偏心 e_c を示す。各々の図の偏心 e_c は以上の理論解析による計算式により求めたものである。

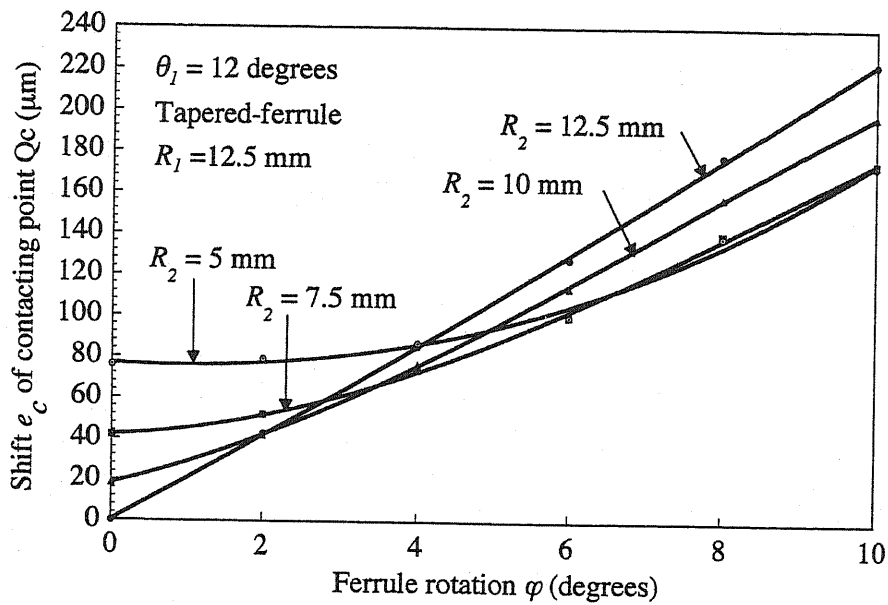
一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の組合せが、各々12.5 mmと12.5 mm, 12.5 mmと10 mm, 12.5 mmと7.5 mm, 及び12.5 mmと5 mmの場合について、テーパ・フェルール2の回転角度 φ を0度から10度まで2度おきに変えたときの値を図4.5に示す。

一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の組合せが、各々10 mmと10 mm, 10 mmと7.5 mm, 及び10 mmと5 mmの場合について、テーパ・フェルール2の回転角度 φ を0度から10度まで2度おきに変えたときの値を計算した、フェルールの回転に伴う斜め球面の接点 Q_c の光軸に対する偏心 e_c を図4.6に示す。

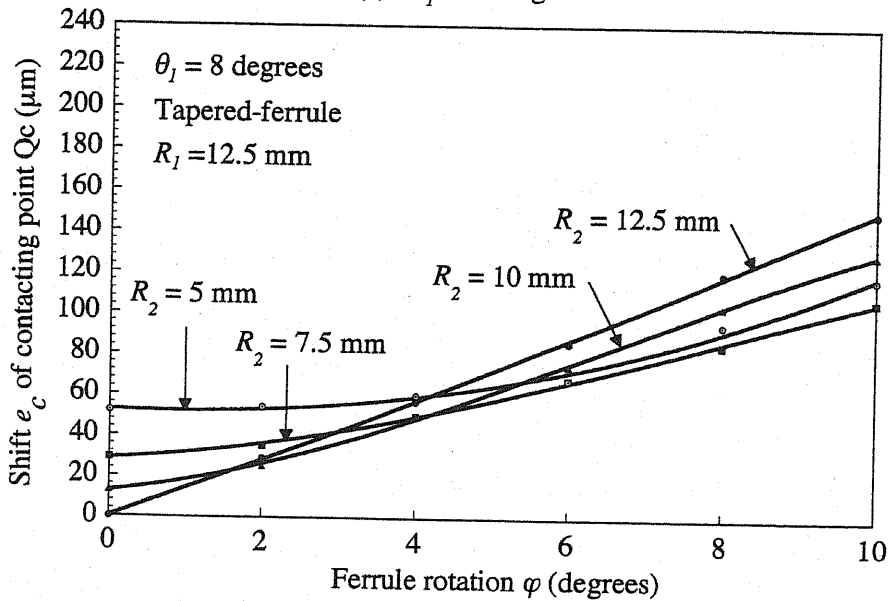
一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の組合せが、各々7.5 mmと7.5 mm, 及び7.5 mmと5 mm, 並びに、5 mmと5 mmの場合について、テーパ・フェルール2の回転角度 φ を0度から10度まで2度おきに変えたときのの値を計算した、フェルールの回転に伴う斜め球面の接点 Q_c の光軸に対する偏心 e_c の値を図4.7に示す。

図4.5～図4.7から、フェルール回転に起因する、斜め球面接点 Q_c の光軸ZZに対する偏心 e_c は、フェルール回転角度 φ , 斜め球面の傾斜角度 θ_1 , 及びテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の差異に依存することが判る。更に、曲率半径 R_1, R_2 が同一の値の組合せの接続では、偏心 e_c は、フェルールの回転角度 φ にほぼ比例して増加する。一方、曲率半径 R_1, R_2 に差異がある組合せの接続では、フェルール回転角度 φ が6～8度以下の範囲においては、yy座標上の偏心 e_{cy} の影響を受けて、フェルール回転角度 φ に直線的には比例しない。

1例として、図4.5及び図4.7において、フェルール回転角度 φ を6度と仮定する。そこで、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が12度、一对のテーパ・



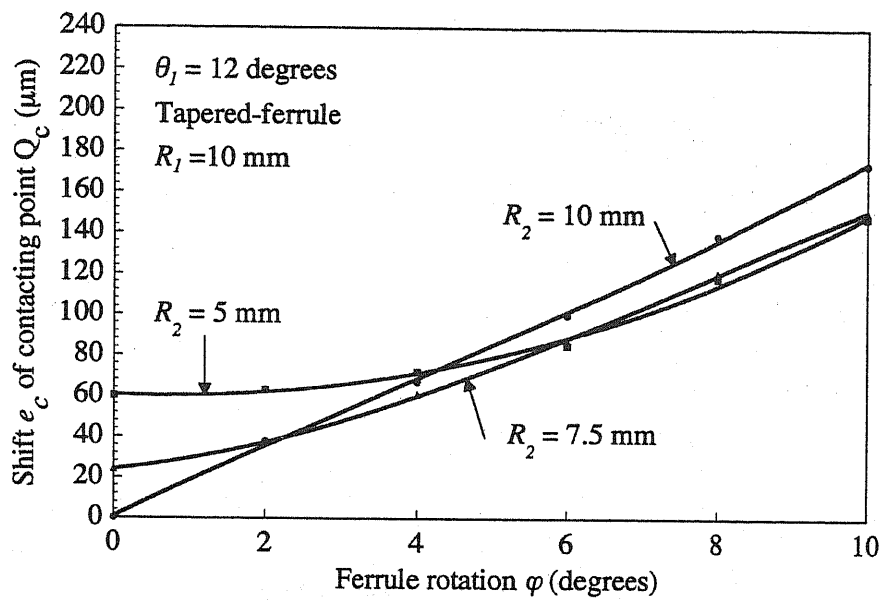
(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



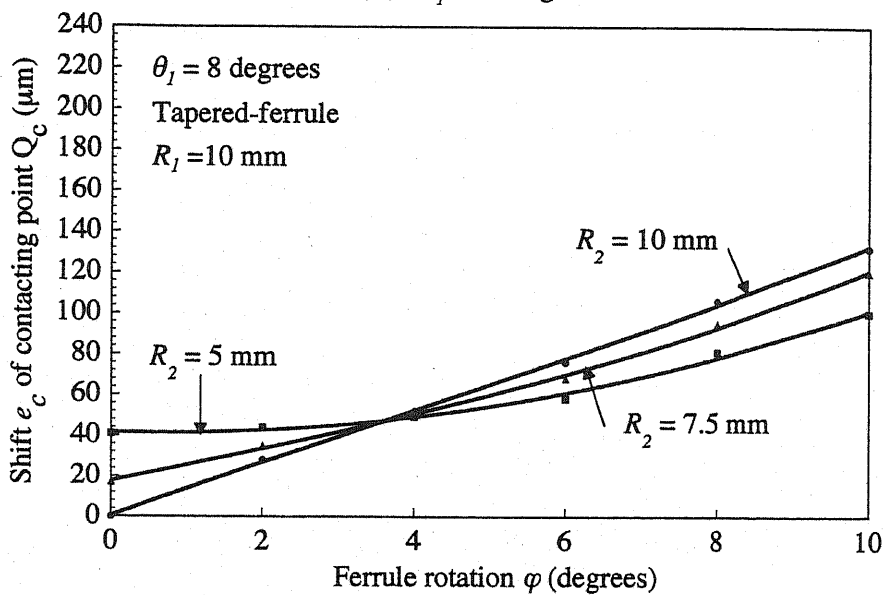
(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 4.5 フェルールの回転による斜め球面の接点 Q_c の光軸に対する偏心 e_c

フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 が、各々 12.5 mm と 12.5 mm, 12.5 mm と 5 mm, 及び 5 mm と 5 mm の場合、偏心 e_c は、各々 128 μm , 100 μm 及び 45 μm になった。同様に、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 8 度の場合、偏心 e_c は、各々 86 μm , 68 μm 及び 31



(a). $\theta_l = 12$ degrees.



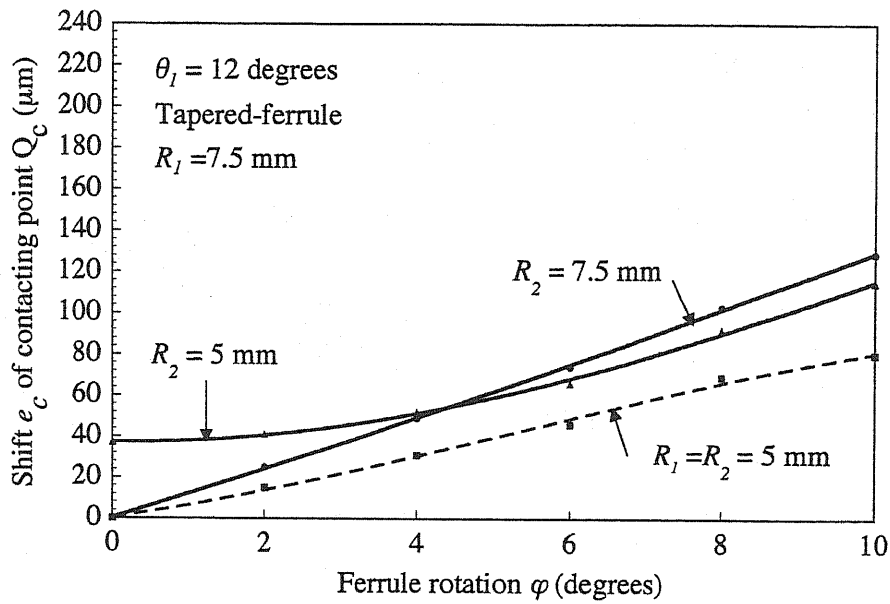
(b). $\theta_l = 8$ degrees.

図 4.6 フェルールの回転による斜め球面の接点 Q_c の光軸に対する偏心 e_c

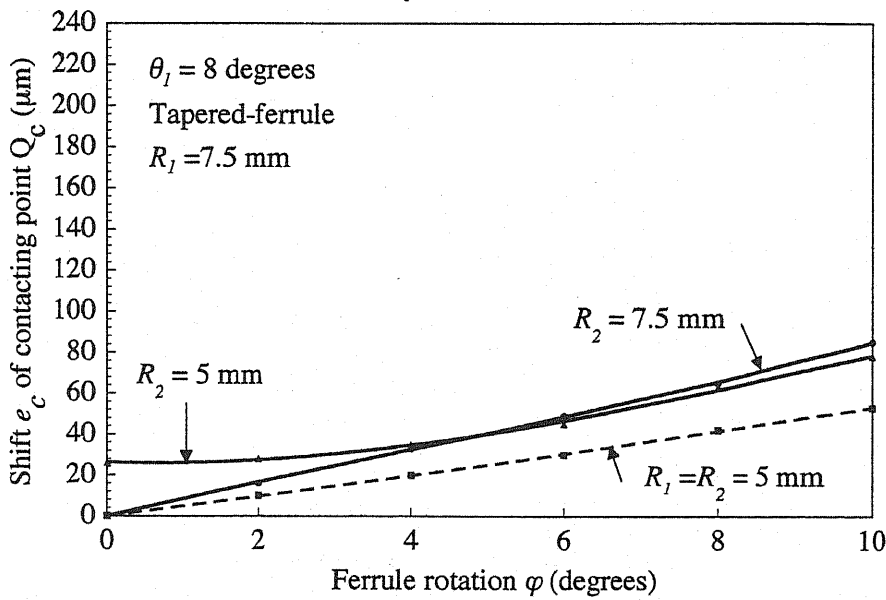
μm になった。

4.2.3 斜め球面の接点の光軸に対する接触角度

フェルール回転に起因する，斜め球面上の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する接触角度 ψ_c を，式 (4.14) により計算して図 4.8 に示す。ここでは，



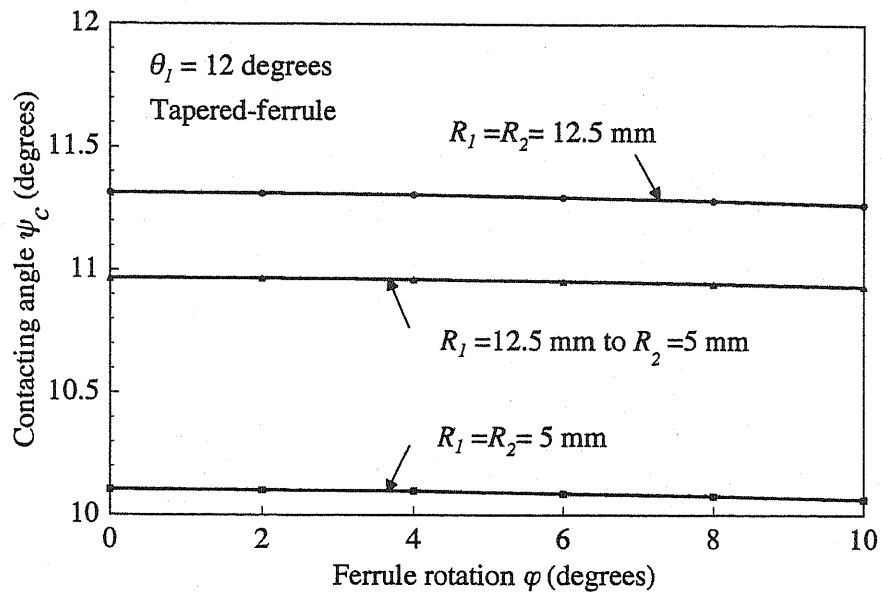
(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



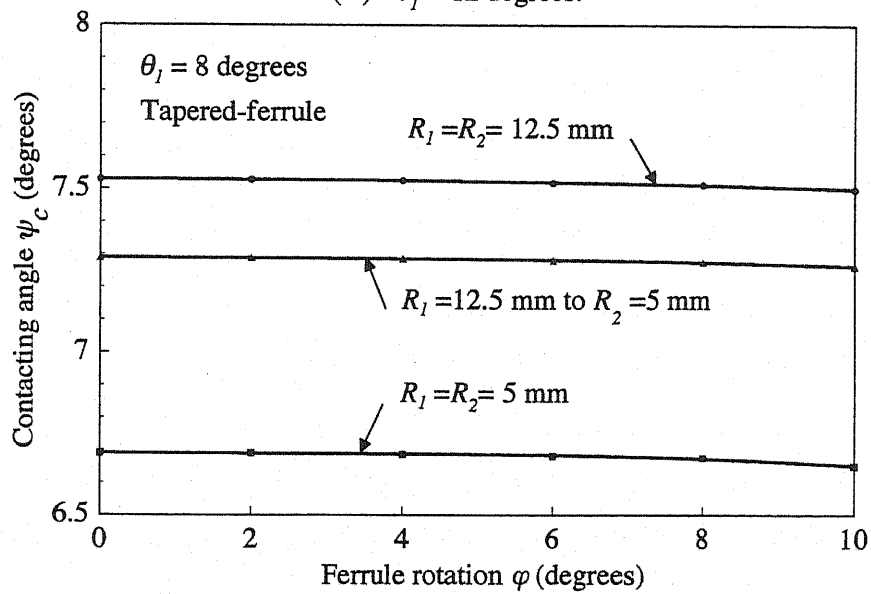
(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 4.7 フェルールの回転による斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c

斜め球面の傾斜角度 θ_1 が、各々 12 度及び 8 度、一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 の組合せが、各々 12.5 mm と 12.5 mm、12.5 mm と 5 mm、及び 5 mm と 5 mm の場合について、テーパ・フェルール 2 の回転角度 ϕ を 0 度から 10 度まで 2 度おきに変えて値を計算した。



(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 4.8 テーパ・フェルール回転角度による斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する接触角度 ψ_c

この斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する接触角度 ψ_c は、一般に、斜め球面の傾斜角度 θ_1 、及びテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 の差異に依存する。しかし、フェルール回転角度 φ が 10 度の範囲では、フェルールの回転による影響は殆ど受けないことが図 4.8 から判る。更に、曲率半径 R_1 、 R_2 の差異が大きい組合せの接続では、接触

角度 ψ_c は小さな値になることが図 4.8 から判る. 斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度, 一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の組合せが, 各々 12.5 mm と 12.5 mm, 12.5 mm と 5.0 mm, 及び 5.0 mm と 5.0 mm であると仮定する. この場合, フェルールの回転角度 φ が, 各々 0 度及び 10 度における接触角度 ψ_c の差異は, 図 4.8 によれば, いずれも 0.05 度以下であった.

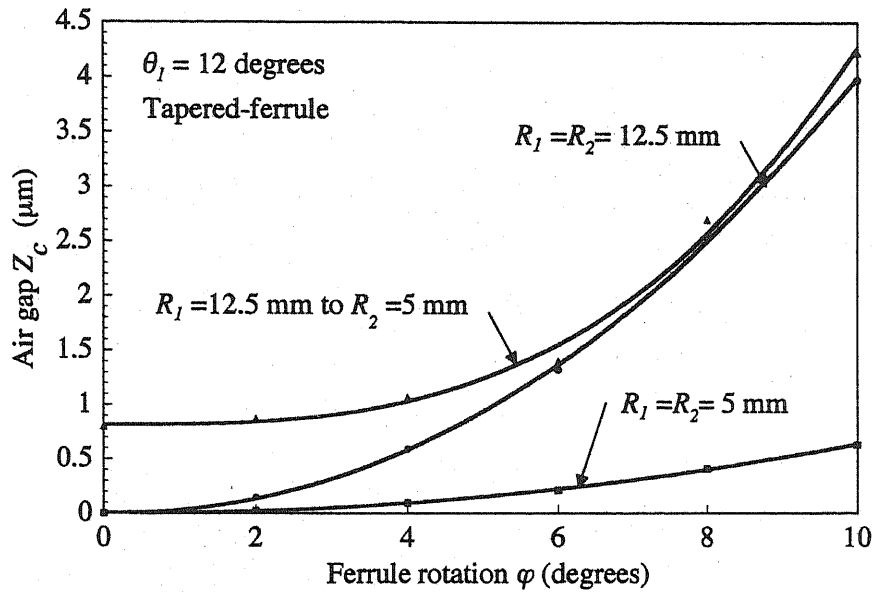
4.2.4 光ファイバ端面の光軸上のエアギャップ

フェルール回転によるエアギャップ Z_c は, 式 (3.18) によって得られた次の式 (4.17) で求めることができる.

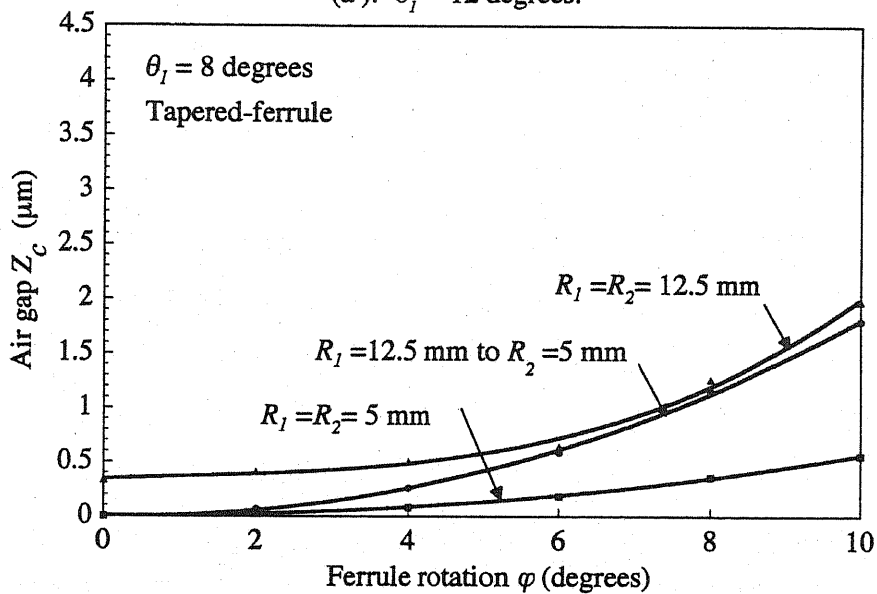
$$Z_c \cong (R_1 + R_2)e_c^2 / 2R_1 \cdot R_2 \quad (4.17)$$

図 4.9 は, 式 (4.17) により計算した, 接触圧力が零の時の光ファイバ光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_c である. ただし, 斜め球面の傾斜角度 θ_1 が, 各々 8 度及び 12 度, 一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の組合せが, 各々 12.5 mm と 12.5 mm, 12.5 mm と 5 mm, 及び 5 mm と 5 mm の場合について, テーパ・フェルールの 2 の回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 2 度おきに変えたときの値を計算した. フェルールの回転による接触圧力が零の時, 光ファイバ光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_c は, フェルールの回転角度 φ , 斜め球面の傾斜角度 θ_1 , 及びテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の差異に依存することが図 4.9 から判る. 更に, 曲率半径 R_1, R_2 が同一の値のときの組合せの接続では, このエアギャップ Z_c は, フェルールの回転角度 φ が 0 度の時には各々零になる. しかし, エアギャップ Z_c の増加は曲率半径 R_1, R_2 が小さいほど小さい. 一方, 曲率半径 R_1, R_2 に差異がある組合せの接続では, フェルールの回転角度 φ が 0 度のときでも, yy 座標上の偏心 e_{cy} の影響を受けてエアギャップ Z_c は零にはならない.

1 例として, フェルールの回転角度 φ が 6 度であると仮定する. このとき, 斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度, 一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が, 各々 12.5 mm と 12.5 mm, 12.5 mm と 5 mm, 及び 5 mm と 5 mm の場合, 図 4.7 では, エアギャップ Z_c



(a). $\theta_i = 12$ degrees.



(b). $\theta_i = 8$ degrees.

図 4.9 テーパ・フェルール回転角度による接触圧力ゼロの時の光ファイバ光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_c

は、各々 128 μm , 100 μm 及び 45 μm になった。同様に、斜め球面の傾斜角度 θ_i が 8 度の場合、エアギャップ Z_c は、各々 0.59 μm , 0.64 μm 及び 0.21 μm であった。

4.3 フェルールの回転による接続特性の変化の理論解析

第4.3項では、第4.2項で仮定した形状特性をもっているテーパ・フェルールを使用して構成したAPCコネクタについて、光ファイバ端面間のエアギャップ Z_c を消去するために要する軸方向の接触力について記述する。

曲率半径 R_1 及び R_2 の2個の中実球面を接触させて、接触力 W_c で接触点を押した場合、球面の弾性変形により生ずる円形平面の半径 r は、式(3.19)に引用したHertzの弾性方程式により与えられる[15]。

ここで、各テーパ・フェルールの材質をジルコニア・セラミックとして、ヤング率 $E_1 = E_2 = 15,000 \text{ kgf/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$ とする。

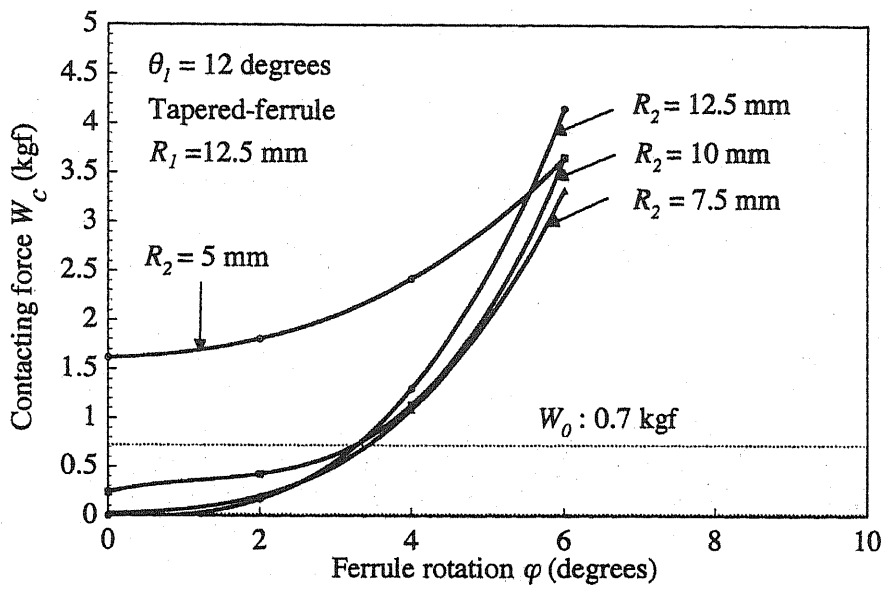
エアギャップ Z_c を消去するのに必要な、軸方向の所要接触力 W_c は、式(4.18)で求めることができる。

$$W_c = \left(\frac{e_c + a}{0.045} \right)^3 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \quad (4.18)$$

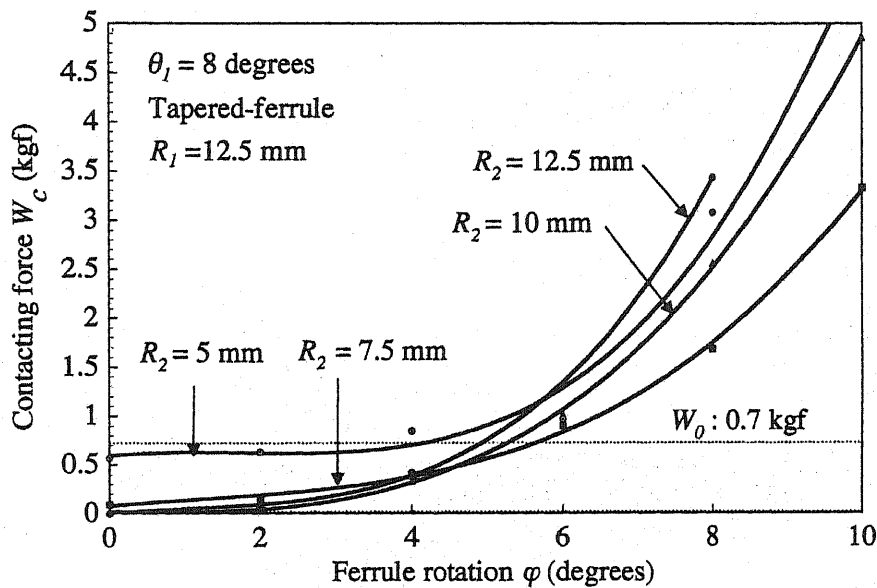
斜め球面の傾斜角度 θ_1 が、各々12度及び8度のテーパ・フェルールについて、式(4.18)により計算した光ファイバ光軸上のエアギャップ Z_c を消去するのに必要な、軸方向の所要接触力 W_c を図4.10から図4.12に示す。

一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 の組合せが、各々12.5 mmと12.5 mm、12.5 mmと10 mm、12.5 mmと7.5 mm、及び12.5 mmと5 mmの場合について、テーパ・フェルール2の回転角度 φ を0度から10度まで2度おきに変化させたときの値を図4.10に示す。グレイの塗色部分は、光コネクタ・プラグに内蔵されたコイルばね力 W_0 を0.7 kgfと仮定したときに、光ファイバ端面の密着できる領域を示す。

図4.10において、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が12度の場合、一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 の組合せが、各々12.5 mmと5 mmのときには、所要接触力 W_c は最低でも1.7 kgfを要する。従って、コイルばね力 W_0 を0.7 kgfとすれば、光ファイバ端面は



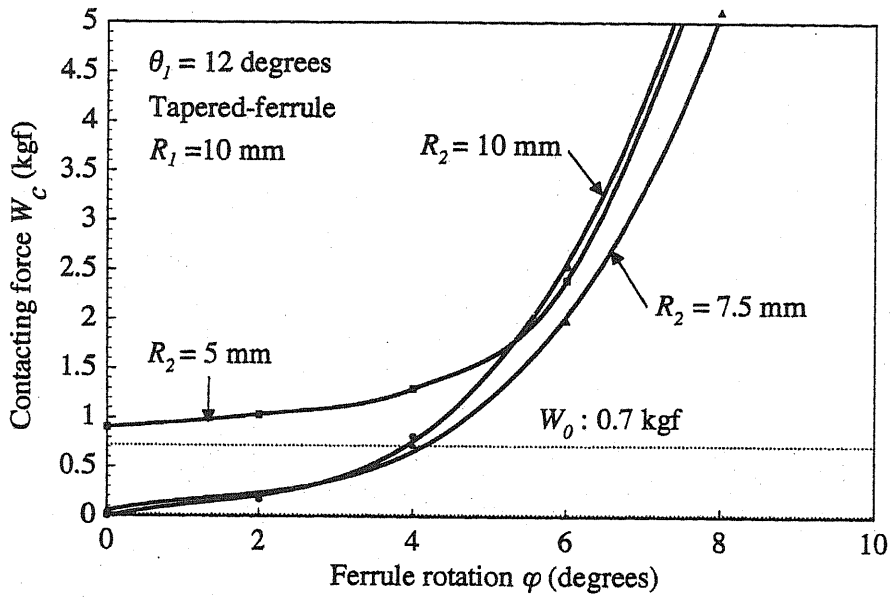
(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



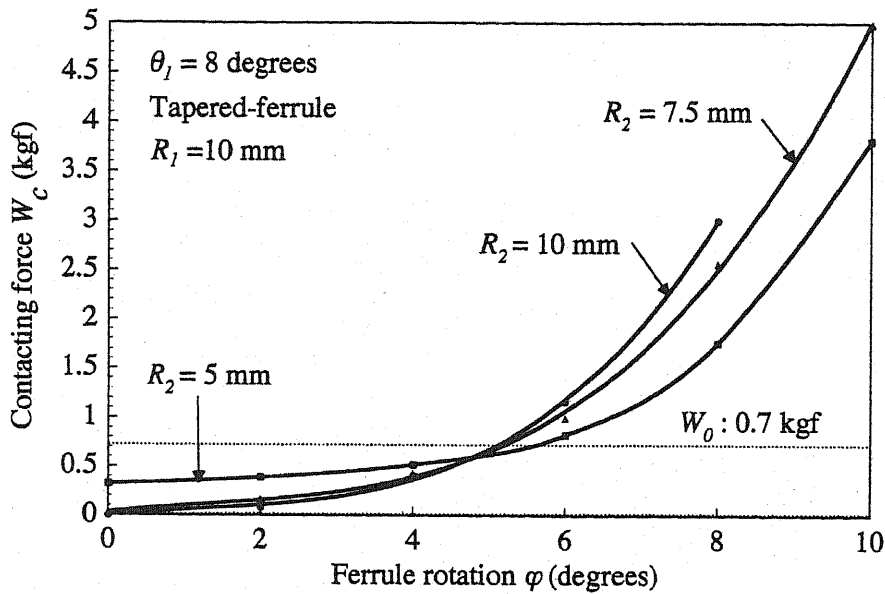
(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 4.10 テーパ・フェルールの回転角度による光ファイバ 光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_c を消去するための所要接触力 W_c

密着しないことが判る. その他の曲率半径 R_1, R_2 の組合せでは, テーパ・フェルールの 2 の回転角度 ϕ が約 3 度以下の範囲では, 光ファイバ端面は密着できる. 一方, 斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 8 度の場合, 一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の組合せが, 各々 12.5 mm と



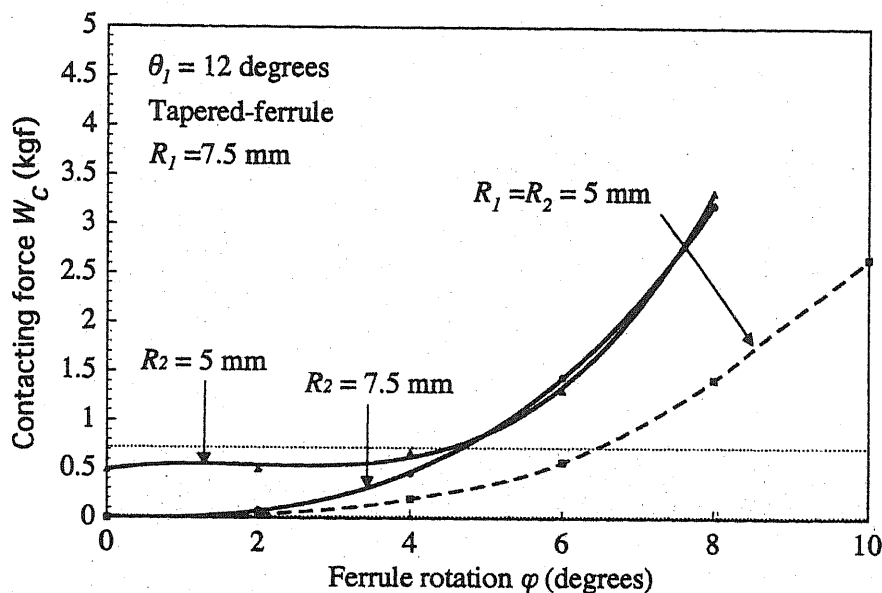
(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



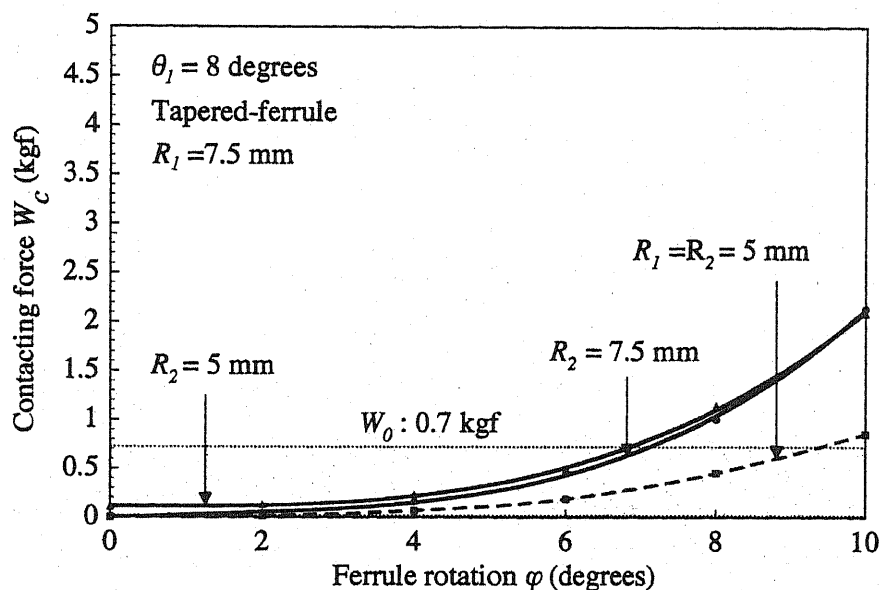
(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 4.11 テーパ・フェルールの回転角度による光ファイバ 光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_c を消去するための所要接触力 W_c

5.0 mm のときには、テーパ・フェルール 2 の回転角度 ϕ が約 4 度以下の範囲では、光ファイバ端面は密着できる。その他の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せの場合は、テーパ・フェルール 2 の回転角度 ϕ が約 5 度以下の範囲では、光ファイバ端面は密着できる。



(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 4.12 テーパ・フェルールの回転角度による光ファイバ 光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_c を消去するための所要接触力 W_c

一対のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せが、各々 10 mm と 10 mm, 10 mm と 7.5 mm, 及び 10 mm と 5 mm の場合について、テーパ・フェルールの回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 2 度おきに変えたときの値を図 4.11 に示す。

一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せが、各々 7.5 mm と 7.5 mm, 及び 7.5 mm と 5.0 mm, 並びに, 5.0 mm と 5.0 mm の場合について, テーパ・フェルール 2 の回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 2 度おきに変えたときの値を図 4.12 に示す,

図 4.10 ~ 図 4.12 によれば, テーパ・フェルール 2 の回転角度 φ の増加に伴って, 軸方向の所要接触力 W_c は急激に増大する. 更に, 斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の差異が大きいほど, また, 曲率半径が大きいほど軸方向の所要接触力 W_c は増加する.

4.4 考 察

ここでは, テーパ・フェルールの接続時の許容回転角度 φ , テーパ・フェルールの回転に起因する斜め球面の接点 Q_c の偏心 e_c , 斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ に対する接触角度 ψ_c , 及びフェルール回転によるフェルール 2 の斜め球面の傾斜角度の変化に起因する挿入損失について考察する.

4.4.1 テーパ・フェルールの接続時の許容回転角度

以上に, テーパ・フェルールを使用して構成した APC コネクタについて, テーパ・フェルールが回転した場合のテーパ・フェルールの接続端面の形状特性, 及び接続特性について記述した. これらの解析結果から, 特に, 光ファイバ端面間のエアギャップ Z_c を消去するための所要接触力 W_c は, 接続時のテーパ・フェルールの回転角度 φ により大きな影響を受けることがわかった. よって, テーパ・フェルールの接続時の許容回転角度について次に考察する.

各々斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度及び 8 度のとき, テーパ・フェルール 1 及びテーパ・フェルール 2 の斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 が変化した場合について, 光ファイバ端面間のエアギャップ Z_c を消去できるテーパ・フェルールの許容回転角度 φ を図 4.10 ~ 図 4.12 から求めた. これらの値を表 4.2 に示す. ここでは, 光コネクタのコイルばね力 $W_0 = 0.7$ kgf と仮定した.

表 4.2 によれば, 斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度の場合, 全ての斜め

図 4.2 光ファイバ 端面を密着できるテーパ・フェルール
の許容回転角度 φ

Convex radius R_1 and R_2 (mm)	Slanted angle $\theta_1 = 12$ degrees	Slanted angle $\theta_1 = 8$ degrees
12.5 and 12.5	$< 3.3^\circ$	$< 5.0^\circ$
12.5 and 10.0	$< 3.4^\circ$	$< 5.3^\circ$
12.5 and 7.5	$< 3.5^\circ$	$< 5.7^\circ$
12.5 and 5.0	None	$< 4.2^\circ$
10.0 and 10.0	$< 3.9^\circ$	$< 5.0^\circ$
10.0 and 7.5	$< 4.2^\circ$	$< 5.2^\circ$
10.0 and 5.0	None	$< 5.7^\circ$
7.5 and 7.5	$< 4.7^\circ$	$< 7.2^\circ$
7.5 and 5.0	$< 4.4^\circ$	$< 6.9^\circ$
5.0 and 5.0	$< 6.6^\circ$	$< 9.4^\circ$

球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せについて、光ファイバ端面間のエアギャップ Z_c を消去することができるというわけではない。特に、斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せが、各々 12.5 mm と 5 mm 及び 10 mm と 5 mm のときには、回転角度 φ が零であっても、光ファイバ端面間のエアギャップ Z_c を消去するための所要接触力 W_c はコイルばねの有効接触力 $W_0 = 0.7$ kgf より大きくなり、光ファイバ端面間のエアギャップ Z_c を消去することができない。一方、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 8 度の場合、全ての斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せについて、回転角度 φ が約 5 度以下であれば、光ファイバ端面間のエアギャップ Z_c を消去することができる。

更に、表 4.2 によれば、斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 が大きいときの組合せ接続では、斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 が小さいときの組合せ接続に対して、許容回転角度 φ は小さくなる。例えば、斜め球面の傾斜角度 θ_1

<第4章>

が12度の場合、斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 が、各々 12.5 mm と 12.5 mm 及び 5 mm と 5 mm のときには、許容回転角度 φ は、各々 3.3 度及び 6.6 度になる。

4.4.2 斜め球面の接点の光軸からの偏心

図 4.5～図 4.7 から、フェルール回転に起因する偏心 e_c は、フェルール回転角度 φ 、斜め球面の傾斜角度 θ_1 、及びテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の差異に依存することが判る。更に、曲率半径 R_1 , R_2 が同一の値の組合せの接続では、偏心 e_c は、フェルールの回転角度 φ に、ほぼ直線的に比例して増加する。一方、曲率半径 R_1 , R_2 に差異がある組合せの接続では、フェルール回転角度 φ が 6～8 度以下の範囲においては、 yy 座標上の偏心 e_{cy} の影響を受けて、フェルール回転角度 φ には直線的に比例しない。

4.4.3 斜め球面の接点の光軸に対する接触角度

フェルールの回転に起因して、斜め球面上の接点 Q_c は光軸 ZZ に対して接触角度 ψ_c が変化する。フェルール回転角度 φ が 10 度の範囲では、フェルールの回転角度 φ が各々 0 度及び 10 度のとき、接触角度 ψ_c の差異は、図 4.8 によれば、いずれも 0.05 度以下である。同図から、フェルールの回転角度 φ が 10 度程度の小さな領域では、フェルールの回転による接触角度 ψ_c の変化は無視できる。

4.4.4 フェルールの回転による挿入損失

A P C コネクタにおいて、テーパ・フェルールの斜め球面に軸方向の圧縮コイルばね力 W_0 を負荷し、一对のテーパ・フェルールの斜め球面を相互に接続した場合、前述のように、接触力 W_c が圧縮コイルばね力 W_0 より大きい場合、光ファイバ端面間に生ずるエアギャップ Z_c を消去できない。第 1 章で記述したように、光ファイバ・コアと空気層との屈折率差によりフレネル損失、光ファイバ端面間の多重反射、及びエアギャップ Z_c による光の減衰などが総合されて挿入損失が大きくなる。次に、これらの要因による挿入損失の計算値を示す。

1) フレネル損失による挿入損失

光ファイバ1から空気層への出射光の透過率を T_1 、空気層から光ファイバ2への入射光の透過率を T_2 とすれば、フレネル損失による挿入損失 IL_F は、第3章に記述した式(3.23)で与えられる[17].

式(3.23)により計算した挿入損失 IL_F は各々0.38 dB及び0.34 dBになる. 従って、光ファイバ端面間にエアギャップ Z_c が生じた場合、密着状態に比較して上述の挿入損失 IL_F が加算される.

2) 多重反射による挿入損失

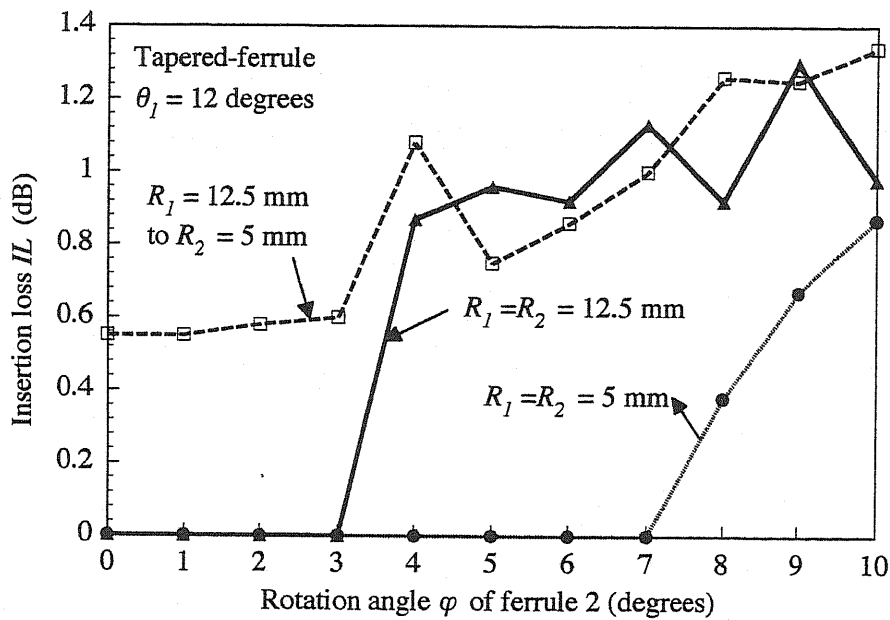
多重反射による挿入損失 IL_R は、第3章に記述した式(3.24)により与えられる[18]. この多重反射による挿入損失 IL_R は、光波長 λ の $\lambda/4$ に相当するエアギャップ毎に最大で約0.6 dBの挿入損失 IL_R を生ずる.

3) エアギャップによる光減衰

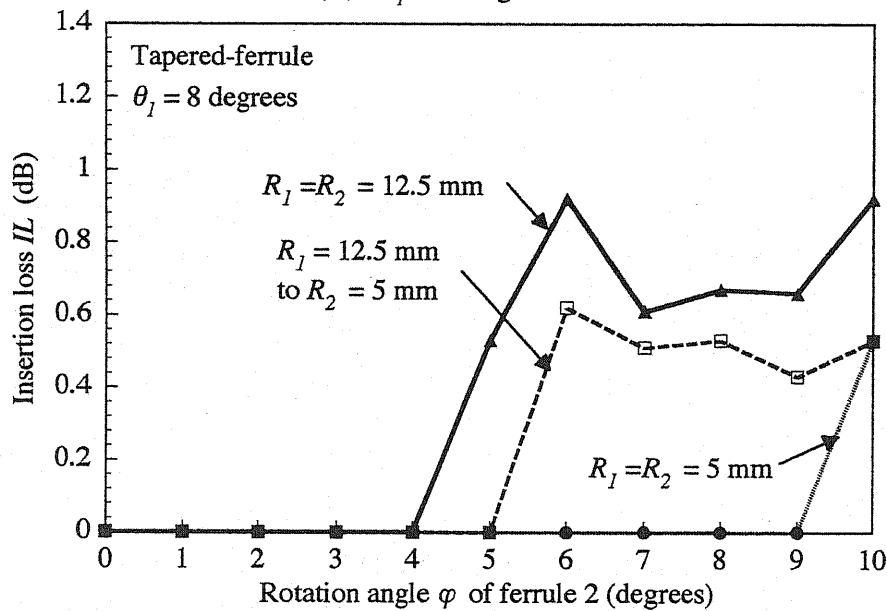
光ファイバ端面間の距離に応じて、光ファイバ量が減衰する. この光量の減衰による挿入損失 IL_A は、第3章に記述した式(3.25)により計算できる[19],[20]. 式(3.25)により計算した光量の減衰による挿入損失 IL_A は、光ファイバ端面の傾斜角度 θ_1 が12度及び8度について、各々0.14 dB/ μm 、0.09 dB/ μm になる. ただし、エアギャップ Z_c の範囲は100 μm 以内とする.

図4.13 (a),(b)は、テーパ・フェルール付きAPCコネクタの斜め球面の傾斜角度 $\theta_1=12$ 度、及び $\theta_1=8$ 度とし、一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 及び R_2 が、各々12.5 mmと12.5 mm、12.5mmと5mm、及び5mmと5mmの組合せについて、フェルールの回転角度 φ を0度から10度まで1度おきに変えた場合の挿入損失 IL を、式(3.23)から式(3.25)にもとずいて計算してプロットしたものである. ただし、図4.13 (a),(b)において、挿入損失 IL は、フレネル損失による挿入損失 IL_F 、多重反射による挿入損失 IL_R 、及び光量の減衰による挿入損失 IL_A を合算した値を示す.

図4.13 (a),(b)において、挿入損失の零dBは、図4.10及び図4.12



(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 4.13 傾斜角度 θ_1 が 12 度及び 8 度のテーパ・フェルールの回転角度 ϕ と挿入損失 IL

の圧縮コイルばねによる接触力 W_0 を 0.7 kgf のときのエアギャップ Z_c を零として、各々図 4.9 のエアギャップ Z_c の図から求めた。図 4.13 (a), (b) では、挿入損失 IL は必ずしも所要接触力 W_c 、及びエアギャップ Z_c の変化とは比例しないことを示している。ここで、一對のテーパ・フェ

ルール端面の斜め球面の曲率半径 R_1 及び R_2 が異なる組合せの場合、特に、斜め球面の端面傾斜角度 θ_1 が 12 度、及び曲率半径 R_1 、 R_2 に差異がある組合せの接続では、フェルール回転角度 φ が小さい領域においても、斜め球面の接点 Q の光軸 ZZ からの偏心の yy 座標成分 e_{cy} により挿入損失 IL は大きい値を示す。

図 4.13 (a), (b) によれば、挿入損失 IL のプロットは山と谷が不規則に連続しているが、これは、光ファイバ間の微小なエアギャップ Z_c が、光波長 λ の $\lambda/4$ になる毎に増減する光ファイバ端面間の多重反射による 0.6 dB に及ぶ光損失の影響が大きいと考えられる。

更に、光コネクタの挿入損失の要因として、第 1 章で記述した光ファイバ間の光軸ずれによる挿入損失 IL_d が加算される。

3.5 まとめ

第 4 章では、テーパ・フェルールが回転した状態で接続された場合の、APC コネクタの形状特性、及び接続特性に関する普遍的な課題を明らかにするために、フェルール回転角度 φ が 0 度から 10 度の範囲において、テーパ・フェルールの端面傾斜角度 θ_1 、斜め球面の曲率半径 R_1 と R_2 などをパラメータとして、次の項目について理論解析を行なった。

- (a) 接続時の斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心 e_c
- (b) 光ファイバ端面の接触角度 ψ_c
- (c) 光ファイバ端面間に生ずるエアギャップ Z_c
- (d) エアギャップ Z_c を消去するための所要接触力 W_c
- (e) フェルールの回転角度 φ による挿入損失 IL

解析結果は、次のように要約できる。

1) 接続時の斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心 e_c

曲率半径 R_1 、 R_2 が同一の値の組合せの接続では、偏心 e_c は、フェルールの回転角度 φ に、ほぼ直線的に比例して増加する。一方、曲率半径 R_1 、 R_2 に差異がある組合せの接続では、フェルール回転角度 φ が 6 度以下の範囲においては、yy 座標上の偏心 e_{cy} の影響を受けて、偏心 e_c はフェルール回転角度 φ に直線的には増加しない。

2) 光ファイバ端面の接触角度 ψ_c

フェルール回転角度 φ が10度以下の範囲では、斜め球面の接点 Q_c の接触角度 ψ_c は、フェルール回転角度 φ による影響を殆ど受けない。

3) 光ファイバ端面間に生ずるエアギャップ Z_c

エアギャップ Z_c は、斜め球面の傾斜角度 θ_1 、曲率半径 R_1 と R_2 、及びフェルールの回転角度 φ の関数として与えられる。

4) エアギャップ Z_c を消去するための所要接触力 W_c

エアギャップ Z_c を消去するための所要接触力 W_c は、斜め球面の傾斜角度 θ_1 、曲率半径 R_1 と R_2 、及びフェルールの回転角度 φ の関数として与えられる。

5) フェルールの回転角度 φ による挿入損失 IL

斜め球面の曲率半径 R_1 及び R_2 が異なる組合せの場合、特に、斜め球面の端面傾斜角度 θ_1 が12度、及び曲率半径 R_1 、 R_2 に差異がある組合せの接続では、フェルール回転角度 φ が0度においても、斜め球面の接点 Q の光軸 ZZ からの偏心の yy 座標成分 e_{cy} により挿入損失 IL は大きい値を示す。挿入損失 IL は光ファイバ端面間の多重反射による影響により、その値は不規則に変化する。

以上の解析結果を更に要約すれば、テーパ・フェルール付き APC コネクタの接続特性として、斜め球面の接点 Q_c の偏心 e_c 、エアギャップ Z_c 、および所要接触力 W_c は、フェルールの回転により拡大されると結論できる。

第4章参考文献

- [1] M. Takahashi, "Experimental Considerations for APC Optical Connectors with Slanted Angle of 8 Degrees," School of Electronic Science and Technology of Shizuoka Univ. Vol.1-17. pp.89-95, 1996.
- [2] "技術指導資料：FC Type Fiber Optic Connector 図面," NTT アドバンステクノロジー株式会社, 1986.
- [3] "技術指導資料：SC Type Fiber Optic Connector 図面," NTT アドバンステクノロジー株式会社, 1989.
- [4] M. Takahashi, "Compatibility of Conventional-Ferrule with Step-Ferrule for Angled Convex Optical Connectors," Proc, 45th IEEE ECTC, Lasvegas, pp. 406 - 412, (May, 1995)
- [5] M. Takahashi, "Novel Stepped ferrule for angled convex polished optical fiber connector," Proc, IEEE OFC'95. San Diego, Vol. 8, pp. 184-185, (Feb, 1995)
- [6] M. Takahashi, "Compatibility for optical connectors with different slanted angles at their ferrule endfaces," Proc, IEEE CLEO / Pacific Rim'95, pp. 304. (July, 1995)
- [7] 高橋光雄, "斜め球面研磨光コネクタの接続端面角度差異による互換性" 日本電子部品信頼性センタ、RCJ 第4回電子デバイスの信頼性シンポジウム、pp. 39 - 45, (11, 1995)
- [8] M. Takahashi, "Optical Connector Ferrule", US Patent. No. 5,140,660. 1992.
- [9] 杉田悦治, 他, "斜めPC (APC)コネクタの互換性試験結果," 1995 信学春全大, C-289. 1995.
- [10] 平 淳司, 他, "超低反射戻り光Angled-PCコネクタ," 1994 信学春全大, C-204. 1994.
- [11] 皆見浩二, 他, "斜めPC (APC)コネクタの端面成形法," 1996 信学春全大, B-991. 1996.
- [13] 皆見浩二, 他, "斜めPC (APC)コネクタの端面成形法," 1996 信学春全大, B-991. 1996
- [14] International Electrotechnical Commission, "INTERNATIONAL STANDARD

<第4章>

IEC 60874-14-6, Part 14-6: Detail specification for fibre optic connector Type SC-APC 9° untuned terminated to single-mode fibre type B1," pp. 6, 1997.

- [15] 機械設計便覧編纂委員会, "機械設計便覧," 丸善株式会社 . pp.1872, 1973.

第5章 ステップ・フェルール付きAPCコネクタの解析 フェルール回転角度 $\varphi \geq 0$ 度における接続特性

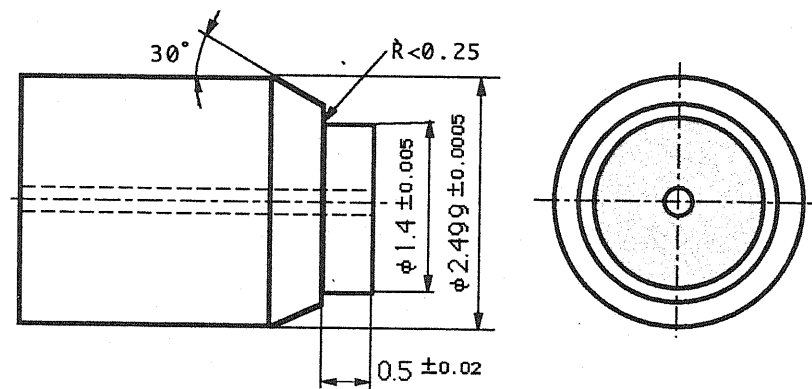
5.1 まえがき

APCコネクタの普遍的な形状特性及び接続特性については、第3章及び第4章で解析を行った。その解析結果から、APCコネクタの接続特性に影響する最大の要因として、フェルール端面に成形した斜め球面の頂点の光軸からの偏心、及び接続時のフェルールの回転を挙げることができる。そこで、第5章では、APCコネクタの接続特性の改善のために、フェルール端面の斜め球面の頂点の光軸からの偏心を極めて小さくするために、新しいステップ・フェルール (Stepped-ferrule) を提案し、その形状特性および接続特性について記述する。

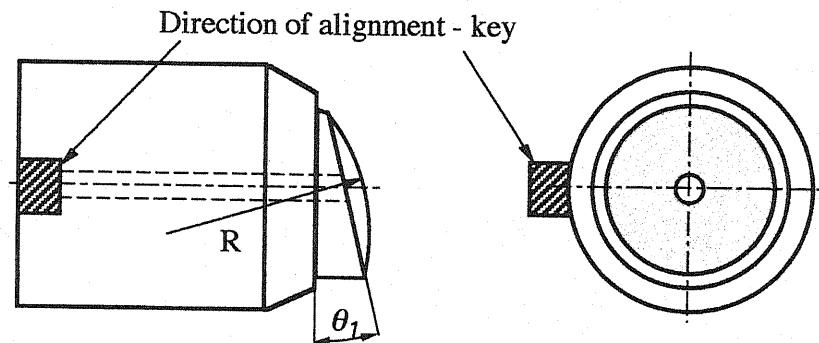
新しいステップ・フェルールは形状に特徴があり、先端部にフェルール外径より小径の段付き円筒部を設けたものである[1]。このような形状にすることによって、斜め球面の頂点の光軸からの偏心を極めて小さくできる[2]-[5]。

表4.1に示したように、従来のFC型コネクタ部品間の整列キーと整列キー溝との間の隙間によるフェルールの回転角度 φ は、相互のフェルールについて最大で約16度に達する。一方、SC型コネクタ部品間では最大で14.7度に達する[6],[7]。このような、フェルールの回転角度 φ を低減するためには、フェルール回転角度の範囲をできるだけ狭くなるように設計製作することが必要である。このために、APCコネクタのフェルール回転による接続特性の改善を目的として、光コネクタ部品の整列キーと整列キー溝との間の隙間を小さくした、新しい光コネクタ部品の仕様を提案する。

第5章では、新しく提案したステップ・フェルール、及び新しく提案したコネクタ部品により構成したAPCコネクタの形状特性、及び接続特性について理論解析をする。理論解析では、ステップ・フェルールの端面傾斜角度 θ_1 が各々8度と12度、斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が、各々5.0 mmから12.5 mmの範囲、及びステップ・フェルールの回転角度



(a). Stepped-ferrule for use in FC and SC connectors.
(Before an angled-convex is formed.).



(b). Stepped-ferrule for use in FC and SC connectors.
(After an angled-convex is formed.).

図5.1 FC型及びSC型APCコネクタステップ・フェルールの形状例

φ が0～10度の場合について取り扱う。

5.2 ステップ・フェルールの形状

図5.1 (a), (b) に, FC型及びSC型コネクタ用として, 使用されているフェルールと互換性のあるステップ・フェルールについて, 斜め球面成形研磨の前後での先端部の側面の形状を比較して示す. 図5.1 (a), (b) から, ステップ・フェルールの形状は, 先端部にフェルール外径より小径の段付き円筒部を設けたものである. なお, 整列キーの方向は, 図5.1 (b)の斜線で示した位置に定めてある. なお, 本論文の図5.1に提案した整列キーの位置の仕様は, 1997年にIEC 874-14-7国際規

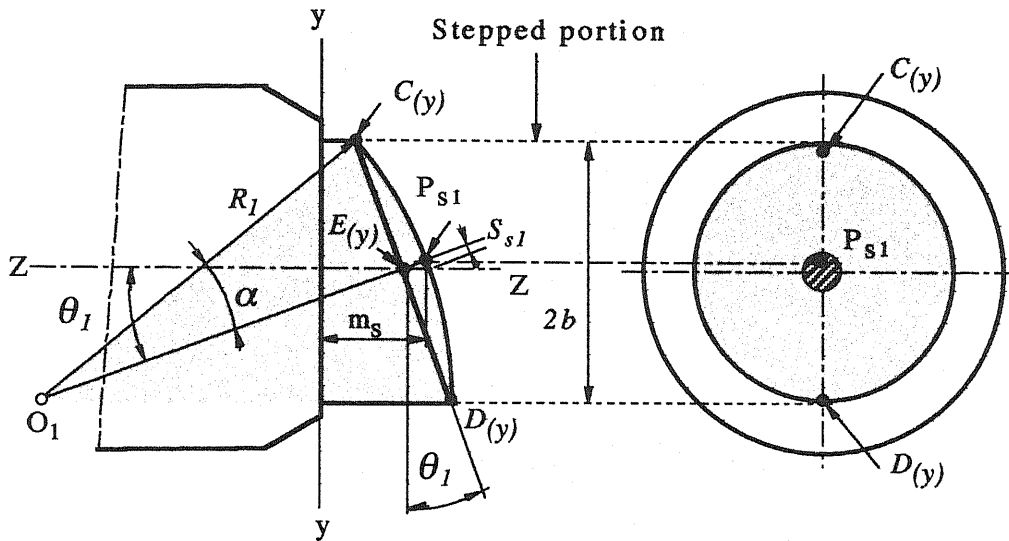


図 5.2 ステップ・フェルールの斜め球面成形研磨後の形状

格に採用された[8],[9].

5.3 ステップ・フェルールの形状の理論解析

5.3.1 斜め球面の頂点の光軸からの偏心

ステップ・フェルールの斜め球面成形研磨法としては、題2章で述べた、公転及び自転の複合運動をする弾性研磨盤に、固定保持したステップ・フェルール端面を押し付ける方式の球面研磨装置によるものが主流である[10]-[12]. その球面はステップ・フェルール端面の円形外縁の中心点を基準として、同心円状に成形研磨される性質をもっている[13].

図5.2は、ステップ・フェルールの斜め球面の頂点の光軸からの偏心を求める解析図である。図5.2において、 θ_1 は斜め球面の光軸ZZに対する直角面からの傾斜角度、 R_1 は斜め球面の曲率半径、 O_1 は曲率半径 R_1 の中心、 P_{s1} は斜め球面の頂点、 S_{s1} は、斜め球面球面の頂点 P_{s1} の光軸ZZからの偏心、 m_s は研磨基準位置、及び $2b$ は直円筒部の外径を各々示す。前述のように、ステップ・フェルールは、その先端部に小径の直円筒部を設けてある。従って、フェルール端面を斜め球面に研磨した場合、研磨中心となるフェルール端面上の円形外縁の $C(y)$ 点と $D(y)$ 点

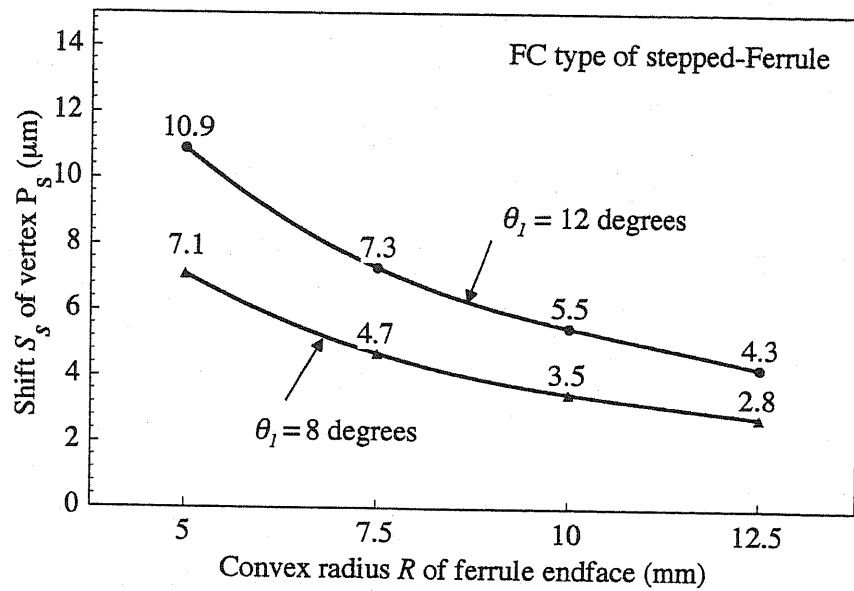


図 5.3 斜め球面の頂点 P_s の光軸 ZZ からの偏心 S_s

との中点 $E(y)$ 点は、光ファイバの光軸 ZZ に一致する。ただし、ステップ・フェルールの斜め研磨球面の頂点 P_{s1} は、光ファイバ光軸 zz から S_s だけ偏心する。この偏心 S_s は次の式 (5.1) により計算できる。

$$S_s = R_1(1 - \cos \alpha) \tan \theta_1 \quad (5.1)$$

ただし、

$$C(y) = D(y) \leq b, \quad 0 \leq \theta_1 \leq \tan^{-1}(m_s / 2b),$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left[\frac{C(y) - |D(y)|}{R_1 \cdot \cos \theta_1} \right],$$

ここで、 α は、線分 $O_1A(y)$ と $O_1E(y)$ の鋭角である。

式 (5.1) により計算したステップ・フェルールの斜め球面の頂点位置 P_{s1} の、光ファイバ光軸 zz からの偏心 S_s を図 5.3 に示す。第 3 章で記述したテーパ・フェルールの偏心 S_c は、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が、各々 12 度及び 8 度の場合、 $150 \sim 166 \mu\text{m}$ 及び $102 \sim 114 \mu\text{m}$ であったが、ステップ・フェルールの場合は、この偏心 S_s は、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度及び 8 度の場合、 $4.3 \sim 10.9 \mu\text{m}$ 及び $2.8 \sim 7.1 \mu\text{m}$

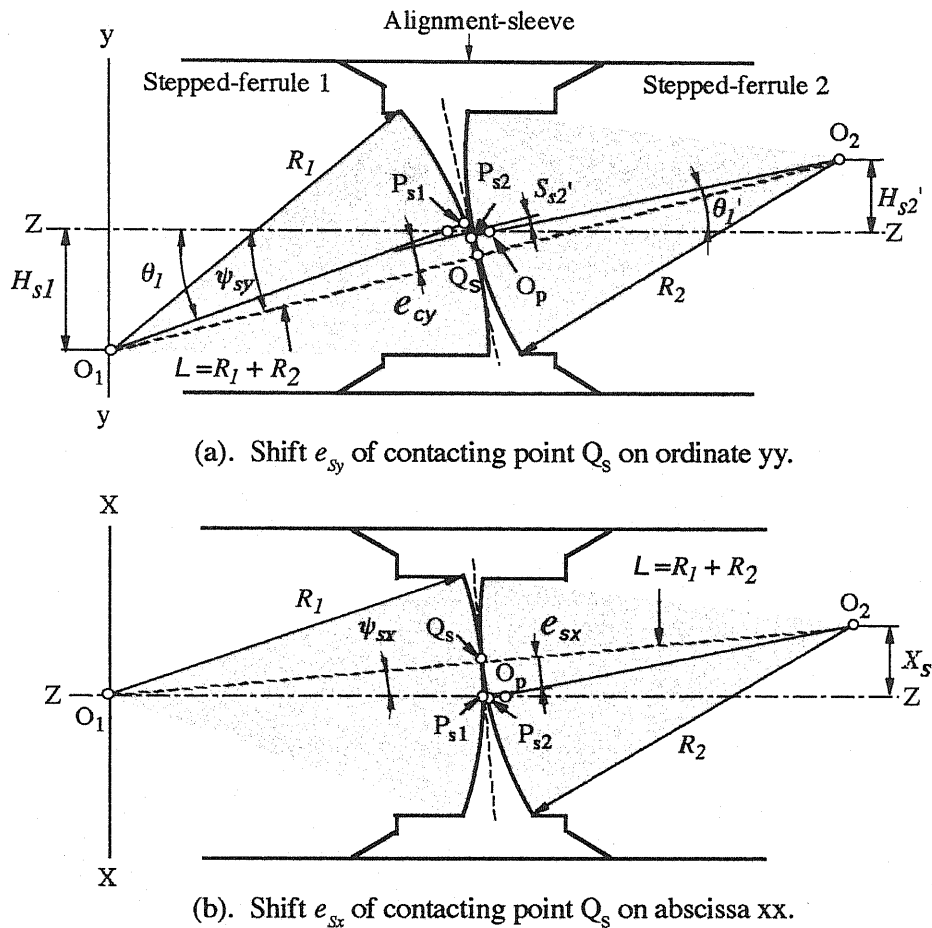


図 5.4 ステップ・フェルルール 2 の回転に起因する斜め端面の接点 Q_s の光軸 ZZ からの偏心 e_{sy} 及び e_{sx}

と極めて小さな値にできる。

5.3.2 斜め球面の接点の光軸からの偏心

図 5.4 (a), (b) は、各ステップ・フェルルールの斜め球面の傾斜角度 θ_1 を各々同一とし、曲率半径 R_1, R_2 を各々同一として、各々 yy 軸及び xx 軸について、斜め球面の接点 Q_s の光軸 ZZ からの偏心 e_s を求めるための解析図である。図 5.4 (a), (b) において、APC コネクタのフェルルール 2 を、回転角度 $\varphi < 90$ 度の範囲で回転させたと仮定している。図 5.4 (a) は、斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心 e_{sy} の yy 軸座標を求める解析図である。図 5.4 (b) は、斜め球面の接点 Q_s の光軸 ZZ からの偏心 e_{sx} の xx 軸座標を求める解析図である。ここで、 ψ_{sy}, ψ_{sx} は、各々

yy 座標及び xx 座標における斜め球面の接点 Q_s の光軸 ZZ に対する接触角度を示す。各々の理論式は、図 5.4 の解析図から次のように求めることができる。

1) 斜め球面接点 Q_s の光軸 ZZ に対する偏心の yy 座標 e_{sy}

図 5.4 (a)において、ステップ・フェルール1を固定して、ステップ・フェルール2を、回転角度 $\varphi < 90$ 度の範囲で回転させたと仮定する。この場合、前述のように、ステップ・フェルール2の曲率半径 R_2 の中心点 O_2 は、図 5.4 に示す点 O_p を回転中心、光軸 ZZ を回転軸として、 H_{s2} を回転半径とする円軌跡に沿って回転する。ここで、点 O_p は斜め球面の頂点 P_{s2} と曲率半径 R_2 の中心点 O_2 とを結ぶ線分 $P_{s2}O_2$ と光軸 ZZ との交点である。従って、回転角度 φ において、ステップ・フェルール2の斜め球面の頂点 P_{s2} の光軸 ZZ からの偏心を S_{s2}' とすれば、 S_{s2}' は式 (5.2) より求められる。

$$S_{s2}' = S_{s2} \cdot \cos \varphi \quad (5.2)$$

回転角度 φ における曲率半径 R_2 の中心点 O_2 の光軸 ZZ からの距離を H_{s2}' とすれば、 H_{s2}' は式 (5.3) により求められる。

$$H_{s2}' = H_{s2} \cdot \cos \varphi \quad (5.3)$$

回転角度 φ におけるステップ・フェルール2の斜め球面の傾斜角度を θ_1' とすれば、 θ_1' は式 (5.4) より求められる。

$$\theta_1' = \theta_1 \cdot \cos \varphi \quad (5.4)$$

ステップ・フェルール2の斜め球面上の接点 Q_s の yy 座標における光軸 ZZ からの偏心 e_{sy} は、各々の曲率半径 R_1, R_2 の中心点 O_1, O_2 の光軸 ZZ からの距離 H_{s1}, H_{s2}' の合計値 ($H_{s1} + H_{s2}'$) を、各ステップ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の比率で分割した位置にある。従って、ステップ・フェルール2の斜め球面の接点 Q_s の yy 座標における偏心 e_{sy} は、次の式 (5.5) より求めることができる。

$$e_{sy} = \frac{1}{\cos \psi_{sy}} \left[\frac{R_1 (|H_{s1}| + H_{s2}')}{R_1 + R_2} - |H_{s1}| \right] \quad (5.5)$$

ここで、ステップ・フェルール1の曲率半径 R_1 の中心点 O_1 の光軸ZZからの距離 H_{S1} は、式(5.6)により求められる。

$$H_{S1} = R_1 \sin \theta_1 - S_{S1} \cos \theta_1 \quad (5.6)$$

同様にして、ステップ・フェルール2の曲率半径 R_2 の中心点 O_2 の光軸ZZからの距離 H_{S2}' は、式(5.7)により求められる。

$$H_{S2}' = (R_2 \sin \theta_1 - S_{S2} \cos \theta_1) \cos \varphi \quad (5.7)$$

従って、式(5.5)に式(5.6)及び式(5.7)を代入すれば、式(5.5)は、次の式(5.8)のようになる。

$$\begin{aligned} e_{Sy} &= \frac{R_1 [|R_1 \sin \theta_1 - S_{S1} \cos \theta_1| + (R_2 \sin \theta_1 - S_{S2} \cos \theta_1) \cos \varphi]}{(R_1 + R_2) \cos \psi_{Sy}} \\ &\quad - \frac{|R_1 \sin \theta_1 - S_{S1} \cos \theta_1|}{\cos \psi_{Sy}} \\ &= \frac{R_1 (R_2 \sin \theta_1 - S_{S2} \cos \theta_1) \cos \varphi - R_2 |R_1 \sin \theta_1 - S_{S1} \cos \theta_1|}{(R_1 + R_2) \cos \psi_{Sy}} \end{aligned} \quad (5.8)$$

2) 斜め球面接点 Q_s の光軸ZZに対するzz-yy平面上での傾斜角度 ψ_{Sy}

式(5.5), (5.8)において、 ψ_{Sy} は、斜め球面の接点 Q_s の光軸ZZに対するzz-yy平面上での傾斜角度であり、図5.4から式(5.9)より求めることができる。

$$\begin{aligned} \psi_{Sy} &= \sin^{-1} \left(\frac{|H_{S1}| + H_{S2}'}{R_1 + R_2} \right) \\ &= \sin^{-1} \left[\frac{|R_1 \sin \theta_1 - S_{S1} \cos \theta_1| + (R_2 \sin \theta_1 - S_{S2} \cos \theta_1) \cos \varphi}{R_1 + R_2} \right] \end{aligned} \quad (5.9)$$

3) 斜め球面の接点 Q_s の光軸ZZに対する偏心のxx座標 e_{Sx}

図5.4(b)において、ステップ・フェルール2が角度 φ だけ回転し

た場合、斜め球面の接点 Q_s のxx座標を X_c として表わす。 X_c は式(5.10)より求めることができる。

$$X_s = H_{s2} \cdot \sin \varphi \quad (5.10)$$

斜め球面の接点 Q_s の光軸ZZに対する偏心のxx座標 e_{sx} は、式(5.11)より求めることができる。

$$e_{sx} = \frac{R_1 \cdot H_{s2} \cdot \sin \varphi}{(R_1 + R_2) \cos \psi_{sx}} \quad (5.11)$$

4) 斜め球面の接点 Q_s の光軸ZZに対するzz-yy平面上での傾斜角度 ψ_{sx}
 斜め球面接点 Q_s の光軸ZZに対するzz-yy平面上での傾斜角度 ψ_{sx} は、式(5.12)で求めることができる。

$$\psi_{sx} = \tan^{-1} \left[\frac{H_{s2} \cdot \sin \varphi}{(R_1 + R_2) \cos \psi_{sy}} \right] \quad (5.12)$$

5) 斜め球面接点 Q_s の光軸ZZに対する偏心 e_s

図5.5 (a), (b) は、ステップ・フェルール1とステップ・フェルール2の斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が同一である場合、及び異なる場合について、偏心 e_s 及び斜め球面の接点 Q_s の軌跡を求める解析図である。ここで、図5.5 (a), (b) は、図5.4の解析図を光軸ZZ方向から見た図である。フェルール2の回転角度が φ において、偏心 e_s は、各々yy座標およびxx座標の斜め球面接点 Q_s の光軸ZZに対する偏心 e_{sy} 、及び e_{sx} を総合したものである。斜め球面の接点 Q_s は、回転角度 φ の変化に伴って移動する。

図5.5 (a) は、フェルール1と2の斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 が同一の場合について示したものである。斜め球面接点 Q_s の光軸ZZに対する偏心 e_s は、ステップ・フェルール1の斜め球面の曲率半径 R_1 の中心 O_1 と、ステップ・フェルール2の斜め球面の曲率半径 R_2 の中心 O_2 とを結ぶ線分L上にある。更に、yy座標およびxx座標での、斜め球面接点 Q_s の光軸ZZに対する偏心 e_{sy} 及び e_{sx} のベクトル和を表わす点 Q_s は、

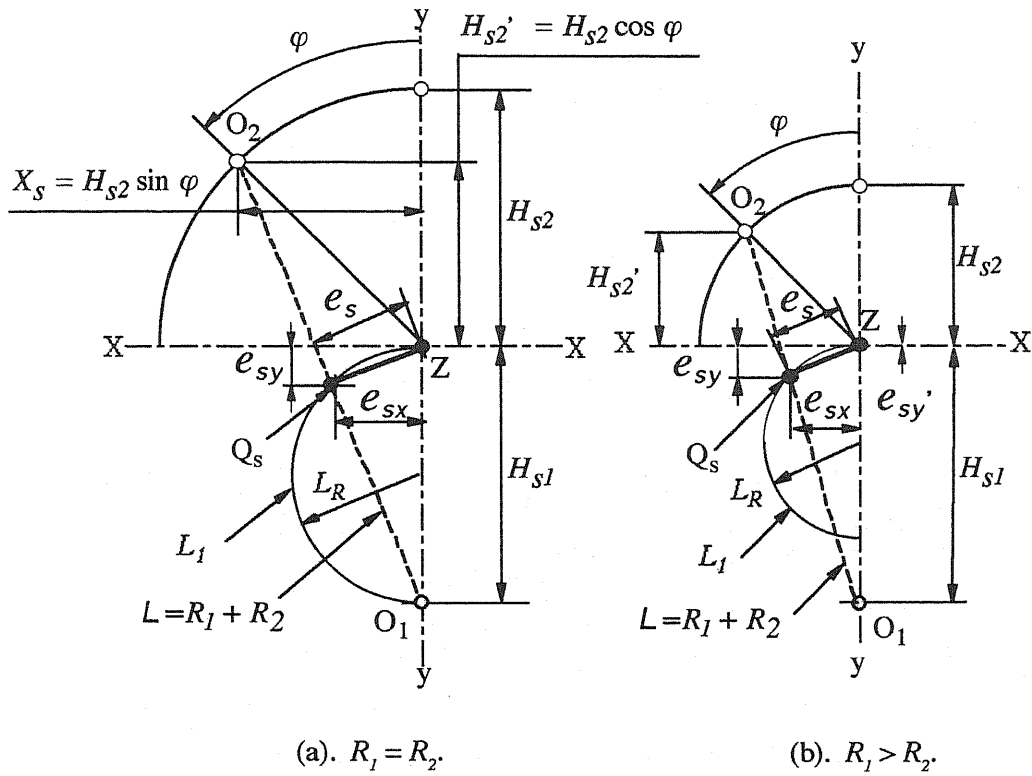


図 5.5 斜め球面の接点 Q_s の光軸 ZZ に対する偏心 e_s と移動軌跡

O_1 と O_2 を結ぶ線分 L 上にある。従って、斜め球面接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_s は式 (5.13) により求めることができる。

$$e_s = \sqrt{e_{sx}^2 + e_{sy}^2} \quad (5.13)$$

6) 角度 φ による斜め球面の接点 Q_s の移動を表わす軌跡

角度 φ の増加に伴う斜め球面の接点 Q_s の移動を表わす軌跡 L_1 の xy 平面上に座標は、式 (5.5) 及び (5.11) から計算できる。図 5.5 では、移動軌跡 L_1 の形状は円になる。この移動軌跡円 L_1 の半径 L_R は式 (5.14) により求めることができる。

$$L_R = \frac{1}{2} \left\{ |H_{S1}| - \left[\frac{|H_{S1}| (|H_{S1}| - H_{S2})}{|H_{S1}| - H_{S2}} + e_{sy}' \right] \right\}$$

$$= \frac{2|H_{S1}| \cdot H_{S2} - (|H_{S1}| + H_{S2}) e_{sy}'}{2(|H_{S1}| + H_{S2})} \quad (5.14)$$

ただし、 e_{sy}' は回転角度 $\varphi = 0$ 度における yy 座標における偏心である。

曲率半径 R_1, R_2 が同一の場合、 $H_{S1} = H_{S2}$ となり、角度 φ の増加による接点 Q_s の移動軌跡 L_1 は、半径 L_R が $(H_{S1}/2)$ の正円になる。これは、図 5.5 及び式 (5.14) から理解できる。一方、曲率半径が $R_1 > R_2$ の場合には、図 5.5 (b) に示すように、回転角度 $\varphi = 0$ 度においても偏心 e_{sy}' が生じている。ただし、図 5.3 に示したように、ステップ・フェルールの場合には、この e_{sy}' は非常に小さく無視できる大きさである。

7) 回転角度 φ に対応する斜め球面接点 Q_s の光軸 ZZ に対する傾斜角度 ψ_s

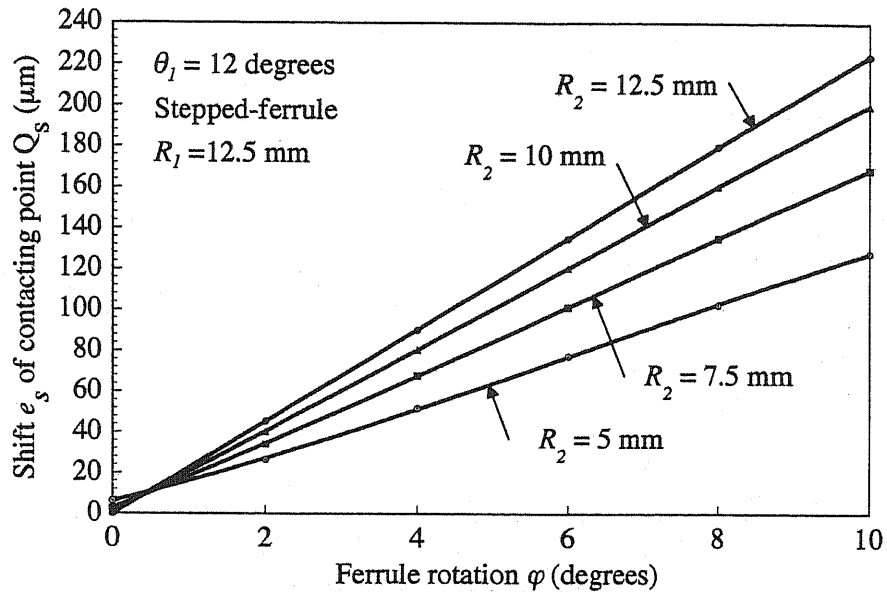
図 5.5 から、斜め球面接点 Q_s の光軸 ZZ に対する傾斜角度 ψ_s は、式 (5.15) により求めることができる。

$$\psi_s = \sin^{-1} \left[\frac{\sqrt{(|H_{S1}| + H_{S2} \cdot \cos \varphi)^2 + (H_{S2} \cdot \sin \varphi)^2}}{R_1 + R_2} \right] \quad (5.15)$$

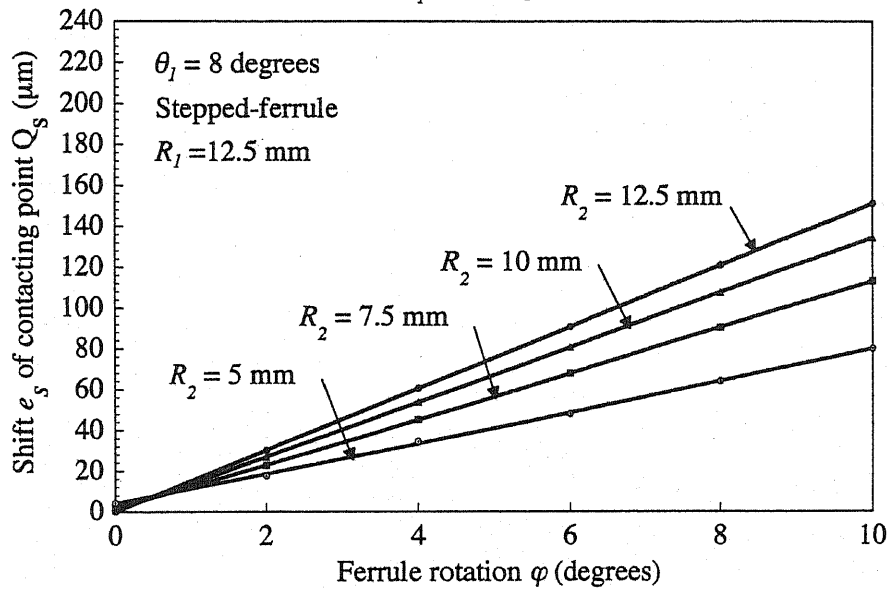
従って、回転角度 $\varphi = 0$ 度の場合は、式 (5.16) により傾斜角度 ψ_s を求めることができる。

$$\psi_s = \sin^{-1} \left[\frac{\sqrt{(|H_{S1}| + H_{S2} \cdot \cos \varphi)^2}}{R_1 + R_2} \right] \quad (5.16)$$

回転角度 $\varphi = 90$ 度の場合は、式 (5.17) により傾斜角度 ψ_s を求めることができる。



(a). $\theta_1 = 12$ degrees.

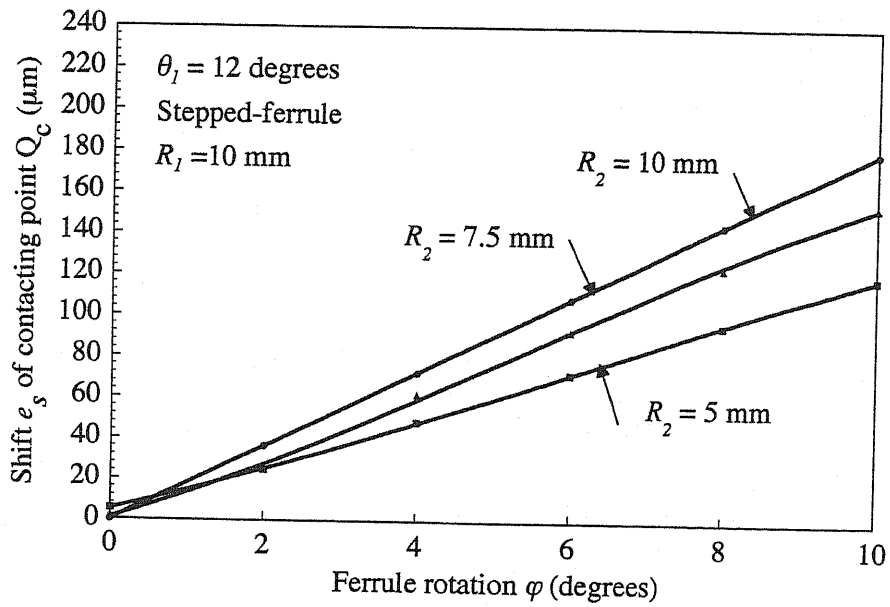


(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

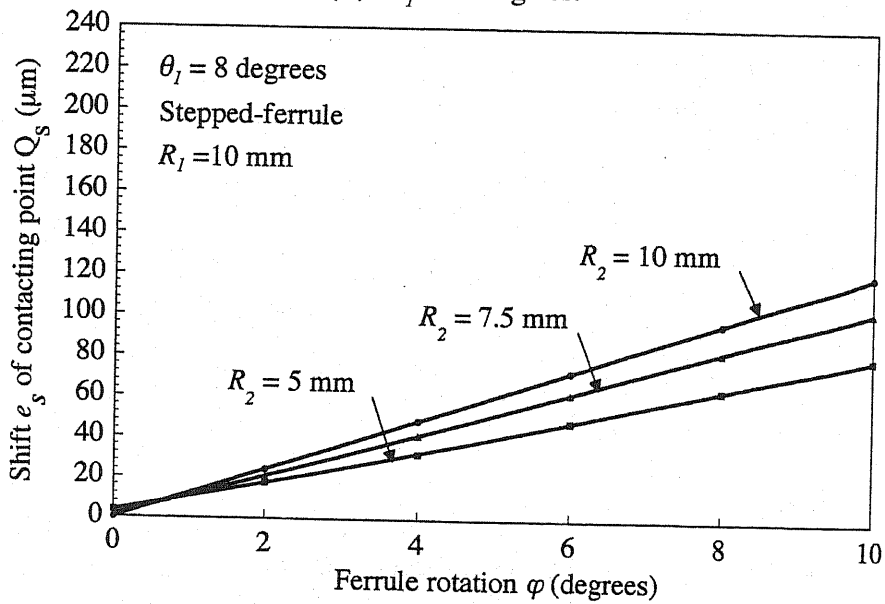
図 5.6 ステップ・フェルールの回転による斜め球面の接点 Q_s の光軸に対する偏心 e_s

$$\psi_s = \sin^{-1} \left[\frac{\sqrt{|H_{s1}|^2 + (H_{s2} \cdot \sin \varphi)^2}}{R_1 + R_2} \right] \quad (5.17)$$

図 5.6 から図 5.8 に、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度及び 8 度のステッ



(a). $\theta_1 = 12$ degrees.

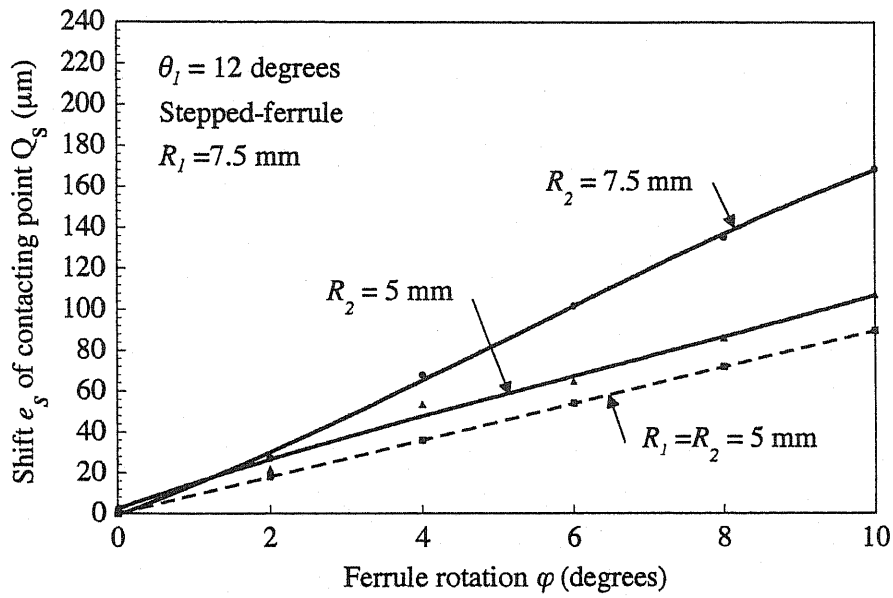


(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

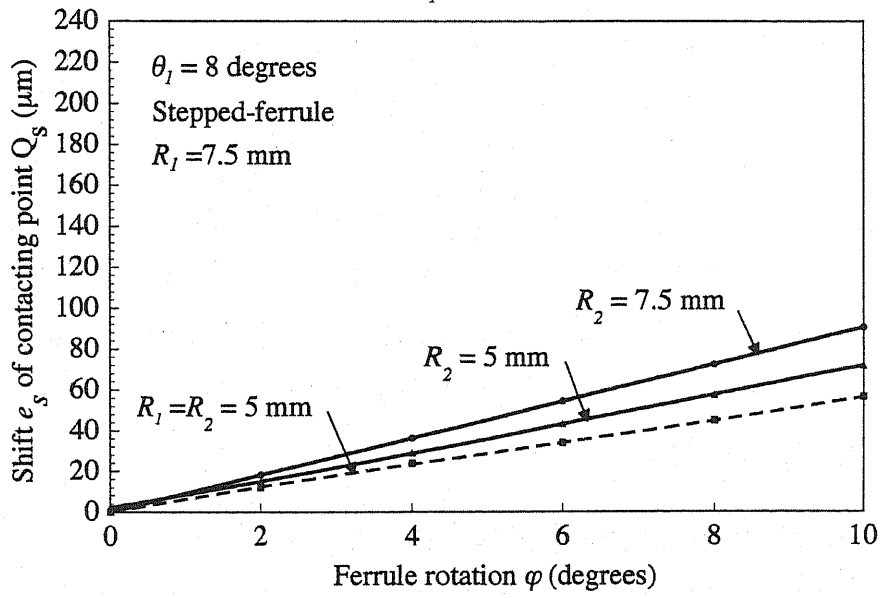
図 5.7 ステップ・フェルールの回転による斜め球面の接点 Q_s の光軸に対する偏心 e_s

プ・フェルールについて、フェルールの回転による斜め球面の接点 Q_s の光軸に対する偏心 e_s を示す。各々の図の偏心 e_s は以上の理論解析による計算式により求めたものである、

一対のステップ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せ



(a). $\theta_l = 12$ degrees.



(b). $\theta_l = 8$ degrees.

図 5.8 ステップ・フェルールの回転による斜め球面の接点 Q_s の光軸に対する偏心 e_s

が、各々 12.5 mm と 12.5 mm, 12.5 mm と 10 mm, 12.5 mm と 7.5 mm, 及び 12.5 mm と 5 mm の場合について、ステップ・フェルール 2 の回転角度 ϕ を 0 度から 10 度まで 2 度おきに変えたときのフェルールの回転に伴う斜め球面の接点 Q_s の光軸に対する偏心 e_s を図 5.6

に示す。

一对のステップ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せが、各々 10 mm と 10 mm, 10 mm と 7.5 mm, 及び 10 mm と 5 mm の場合について、ステップ・フェール 2 の回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 2 度おきに変えたときの値を計算した、フェールの回転に伴う斜め球面の接点 Q_s の光軸に対する偏心 e_s を図 5.7 に示す。

一对のステップ・フェールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せが、各々 7.5 mm と 7.5 mm, 及び 7.5 mm と 5 mm, 並びに、5 mm と 5 mm の場合について、ステップ・フェール 2 の回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 2 度おきに変えたときの値を計算した、フェールの回転に伴う斜め球面の接点 Q_s の光軸に対する偏心 e_s の値を図 5.8 に示す。

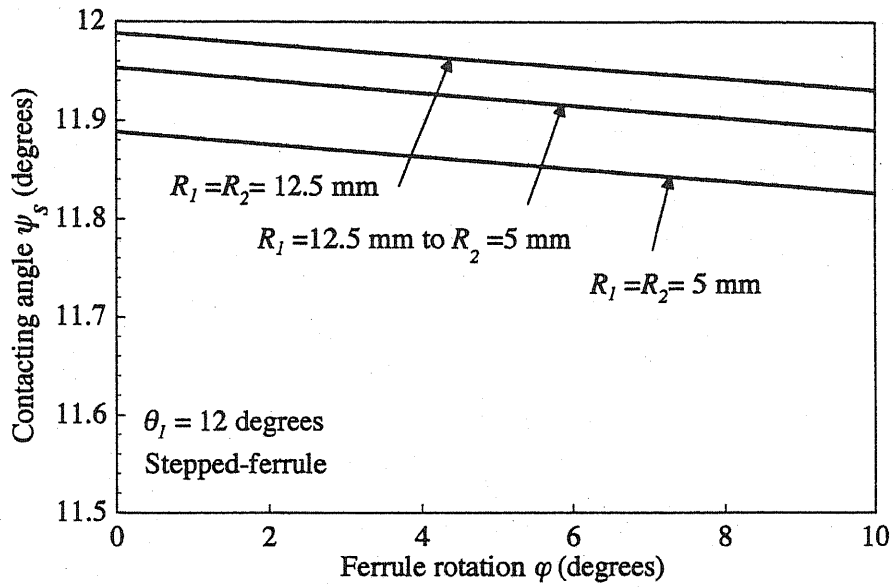
図 5.6 ~ 図 5.8 から、フェール回転に起因する、斜め球面接点 Q_s の光軸 ZZ に対する偏心 e_s は、フェール回転角度 φ , 斜め球面の傾斜角度 θ_1 , 及びステップ・フェールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の差異に依存することが判る。

ただし、ステップ・フェールの場合には、曲率半径 R_1 , R_2 が同一、またはことなる値の組合せの接続においても、偏心 e_s はテーパ・フェールのように yy 座標上の偏心 e_s の影響を受けない特徴をもっている。この点は、テーパ・フェールの場合と異なるステップ・フェールの大きな利点である。

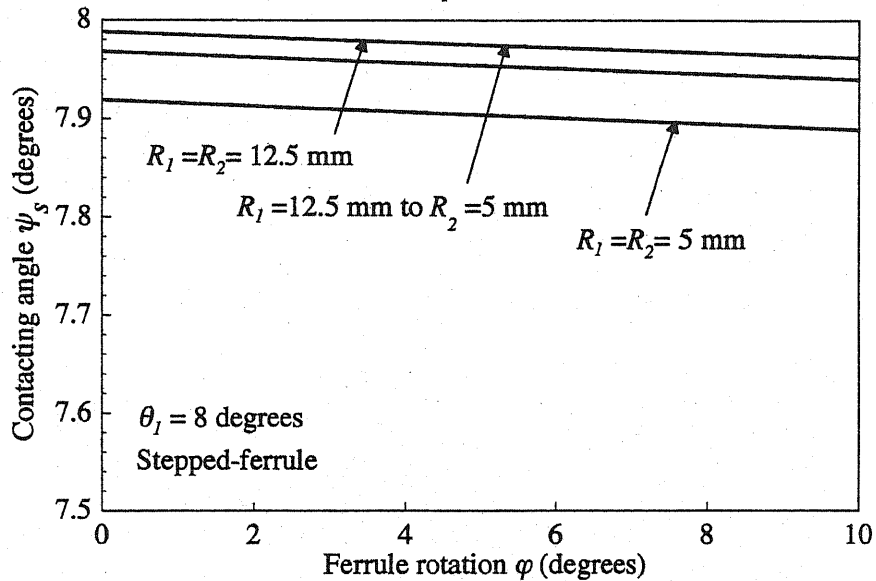
5.3.3 斜め球面の接点の光軸に対する接触角度

フェール回転に起因する、斜め球面上の接点 Q_s の光軸 ZZ に対する接触角度 ψ_s を、式 (5.15) により計算して図 5.9 に示す。ここでは、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 8 度及び 12 度、一对のステップ・フェールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せが、各々 12.5 mm と 12.5 mm, 12.5 mm と 5 mm, 及び 5 mm と 5 mm の場合について、ステップ・フェール 2 の回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 2 度おきに変えたときの値を計算した。

この斜め球面の接点 Q_s の光軸 ZZ に対する接触角度 ψ_s は、一般に、斜



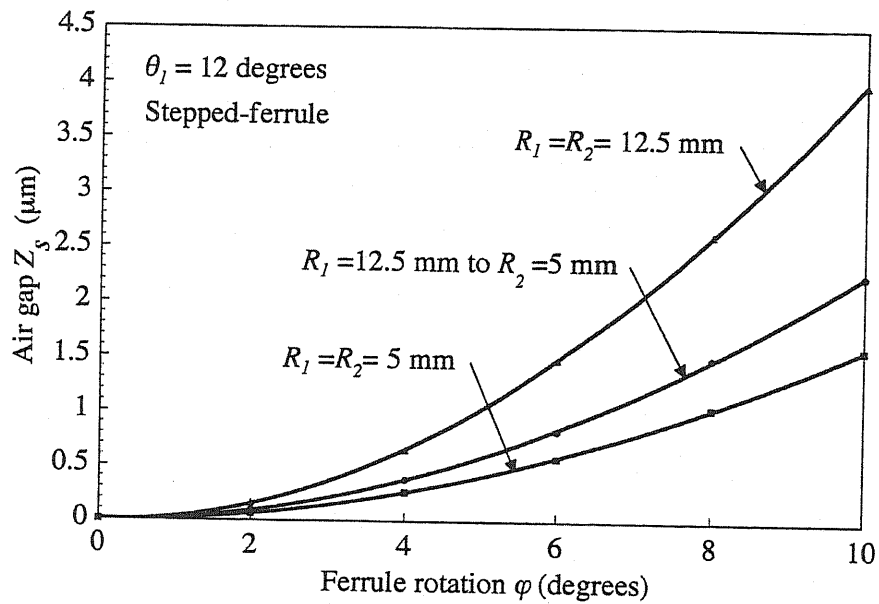
(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



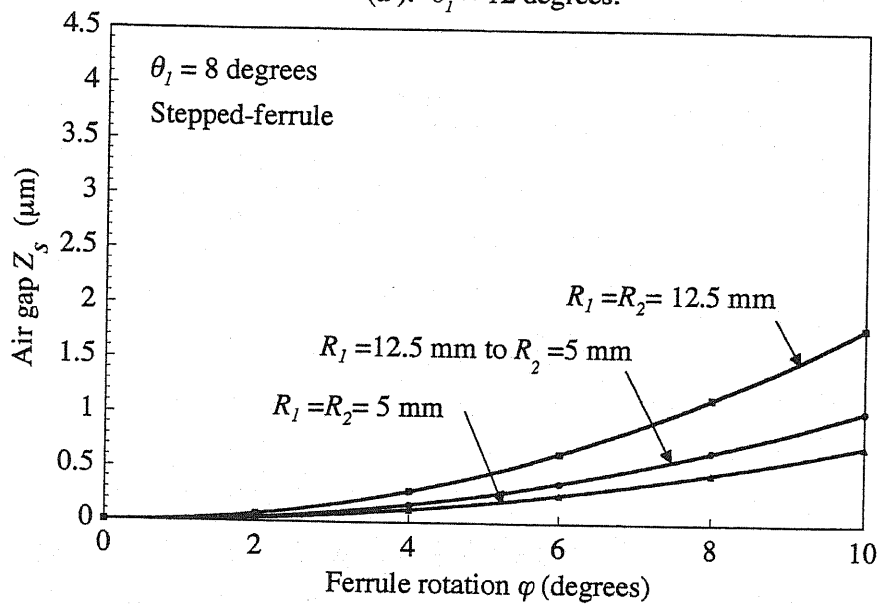
(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 5.9 ステップ・フェルール回転角度による斜め球面の接点 Q_s の光軸 ZZ に対する接触角度 ψ_s

め球面の傾斜角度 θ_1 、及びステップ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 、 R_2 の差異に依存する。しかし、ステップ・フェルールの回転角度 ϕ が 10 度以下の範囲では、フェルールの回転による影響は殆ど受けていない。更に、曲率半径 R_1 、 R_2 の差異が大きいステップ・フェルールの組合せの接続では、曲率半径 R_1 、 R_2 が同一の場合に比較して、接触角



(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 5.10 ステップ・フェルールの回転角度による接触圧力ゼロの時の光ファイバ 光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_s

度 ψ_c は若干小さな値になることが図 5.9 から判る。

第 4 章で記述したように、テーパ・フェルールの場合は、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度、斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せが、各々 12.5 mm と 12.5 mm, 12.5 mm と 5 mm, 及び 5 mm と 5 mm の場合、

接触角度 ψ_c は、各々 11.3 度、10.95 度及び 10.10 度に低下した。一方、ステップ・フェルールの場合、接触角度 ψ_s は 11.85 度以上に保たれている。このような接触角度の特性はステップ・フェールの利点である。

5.3.4 光ファイバ端面間のエアギャップ

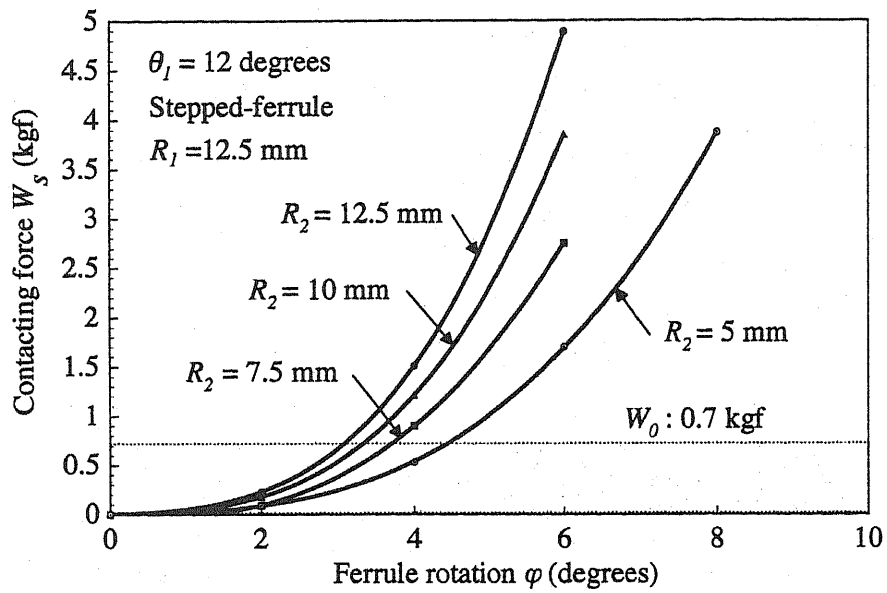
フェールール回転によるエアギャップ Z_s は、式 (3.18) によって得られた次の式 (5.18) で求めることができる。

$$Z_s \cong (R_1 + R_2)e_s^2 / 2R_1 \cdot R_2 \quad (5.18)$$

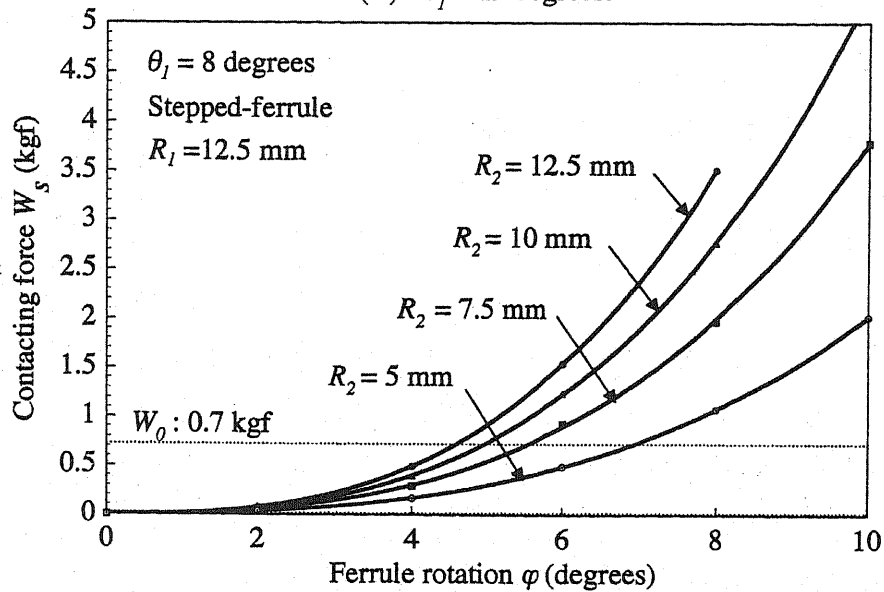
図 5.10 は、式 (5.18) により計算した、接触圧力が零の時の光ファイバ光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_s である。ただし、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度及び 8 度、及び一対のステップ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せが、各々 12.5 mm と 12.5 mm, 12.5 mm と 5 mm, 及び 5 mm と 5 mm の場合について、ステップ・フェール 2 の回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 2 度おきに変えたときの値を計算した。フェルールの回転による接触圧力が零の時、光ファイバ光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_s は、フェルールの回転角度 φ , 斜め球面の傾斜角度 θ_1 , 及びステップ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の差異に依存する。ここで、ステップ・フェールの場合、曲率半径 R_1 , R_2 が同一、または差異のある接続の場合でも、ステップ・フェールの回転角度 φ が 0 度の時には、このエアギャップ Z_s は零または近似的に零になる特徴がある。これは、yy 座標上の偏心 e_{sy} が極めて小さいためである。この点はステップ・フェールの接続特性の特徴である。テーパ・フェールールの場合には、図 4.9 について記述したように、曲率半径 R_1 , R_2 に差異のある接続の場合、yy 座標上の偏心 e_{cy} の影響により、テーパ・フェールールの回転角度 φ が 0 度の時には、このエアギャップ Z_c は零にはならなかった。

5.4 フェルール回転による接続特性の理論解析

第 5.4 項では、前述の形状特性をもっているステップ・フェールールを



(a). $\theta_1 = 12$ degrees.

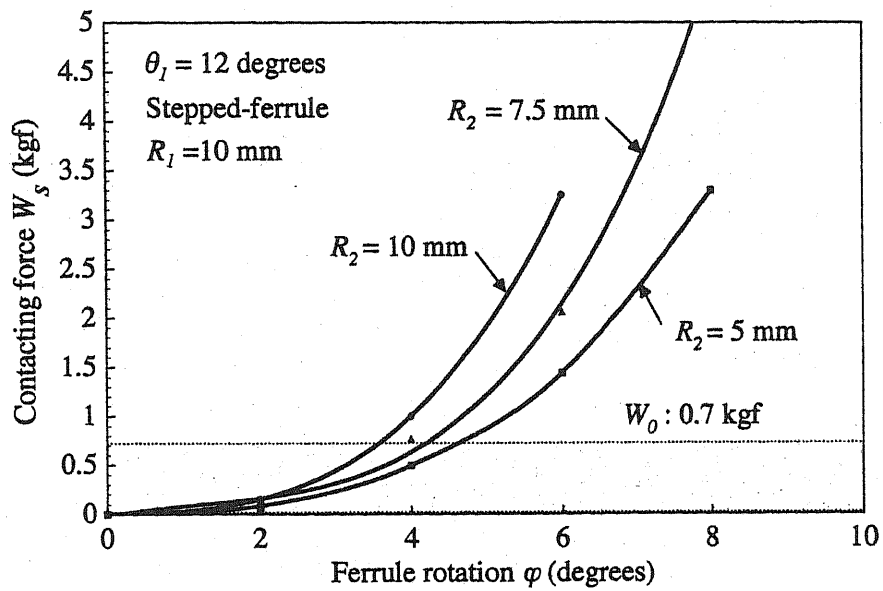


(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

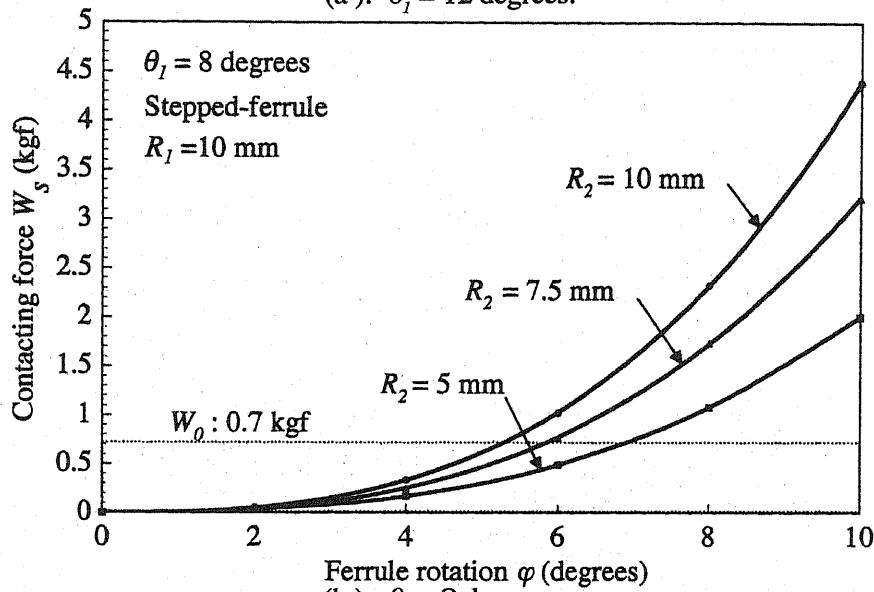
図 5.11 ステップ・フェルールの回転角度による光ファイバ光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_s を消去するための所要接触力 W_s

使用して構成した APC コネクタの接続特性において、光ファイバ端面間のエアギャップ Z_s を消去するために要する軸方向の接触力 W_s について記述する。

曲率半径 R_1 及び R_2 の 2 個の中実球面を接触させて、接触力 W_s で接



(a). $\theta_l = 12$ degrees.

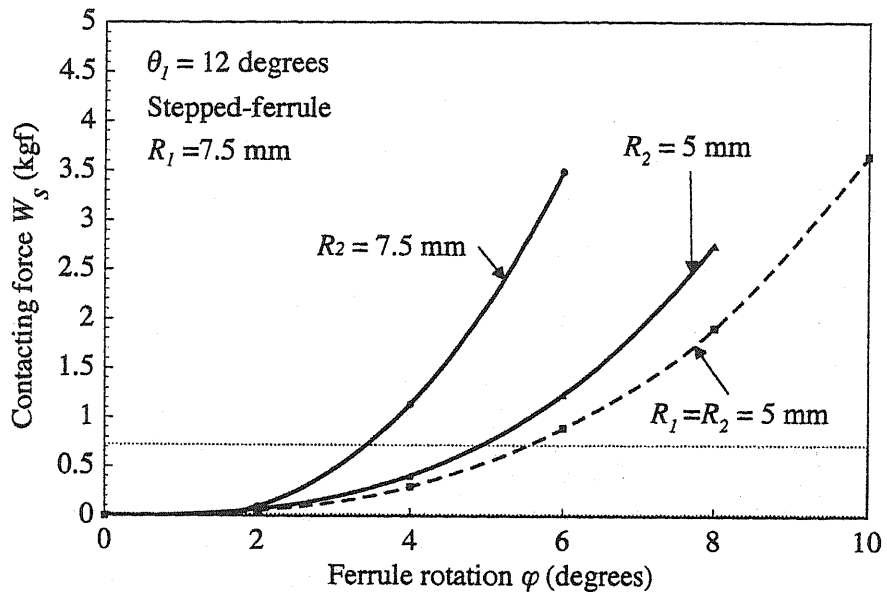


(b). $\theta_l = 8$ degrees.

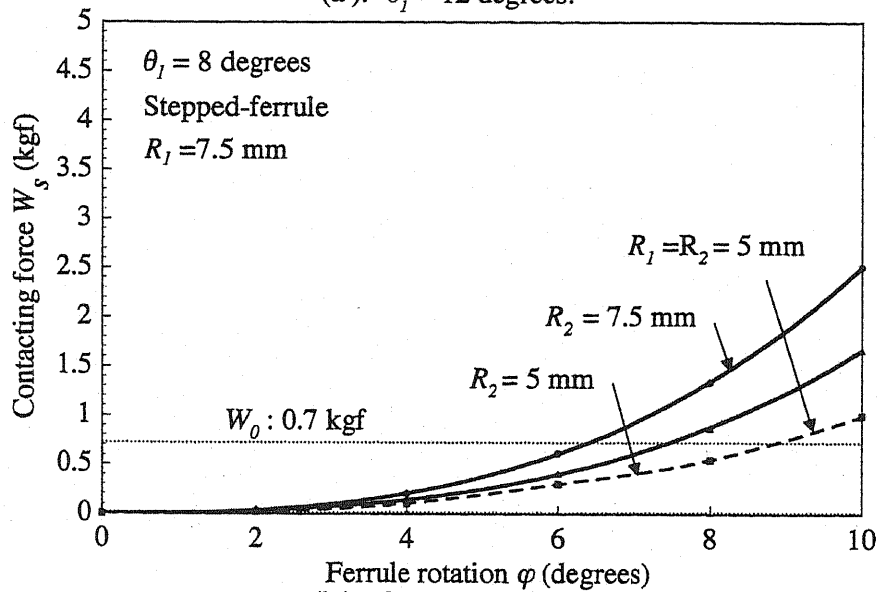
図 5.12 ステップ・フェルールの回転角度による光ファイバ光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_s を消去するための所要接触力 W_s

触点を押した場合，球面の弾性変形により生ずる円形平面の半径 r は，式 (3.19) に引用した Hertz の弾性方程式により与えられる [14].

ここで，各々テーパ・フェルールの材質をジルコニア・セラミックとして，ヤング率 $E_1 = E_2 = 15,000$ kgf/mm²，ポアソン比 $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$



(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 5.13 ステップ・フェルールの回転角度による光ファイバ光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_s を消去するための所要接触力 W_s

とすれば、フェルール回転により生じた、光ファイバ光軸 ZZ 上のエアギャップ Z_s を消去するのに必要な、軸方向の所要接触力 W_s は、式 (5.19) で求めることができる [14].

$$W_s = \left(\frac{e_s + a}{0.045} \right)^3 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \quad (5.19)$$

斜め球面の傾斜角度 θ_1 が、各々 12 度及び 8 度のステップ・フェルールについて、式 (5.19) により計算した光ファイバ光軸上のエアギャップ Z_s を消去するのに必要な、軸方向の所要接触力 W_s を図 5.11 から図 5.13 に示す。

一對のステップ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せが、各々 12.5 mm と 12.5 mm, 12.5 mm と 10 mm, 12.5 mm と 7.5 mm, 及び 12.5 mm と 5 mm の場合について、ステップ・フェルール 2 の回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 2 度おきに変化させたときの値を図 5.11 に示す。グレイの塗色部分は、光コネクタ・プラグに内蔵されたコイルばね力 W_0 を 0.7 kgf と仮定したときに、光ファイバ端面が密着できる領域を示す。

一對のステップ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せが、各々 10 mm と 10 mm, 10 mm と 7.5 mm, 及び 10 mm と 5 mm の場合について、ステップ・フェルール 2 の回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 2 度おきに変えたときの値を図 5.12 に示す。

一對のステップ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せが、各々 7.5 mm と 7.5 mm, 及び 7.5 mm と 5 mm, 並びに、5 mm と 5 mm の場合について、ステップ・フェルール 2 の回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 2 度おきに変えたときの値を図 5.13 に示す。

図 5.11 ~ 図 5.13 によれば、軸方向の所要接触力 W_s は、ステップ・フェルール 1 に対するステップ・フェルール 2 の回転角度 φ の増加に伴って急激に増大する。更に、軸方向の所要接触力 W_s は、斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の差異が大きいほど、また、曲率半径が大きいほど増加する。ただし、ステップ・フェルールの所要接触力 W_s は、曲率半径 R_1 , R_2 が同一、及び差異のある接続の場合でも、ステップ・フェルールの回転角度 φ が 0 度の時には、この所要接触力 W_s は零、または近似的に零になる。これは、yy 座標上の偏心 e_{sy} が極めて小さいためである。

この点は、ステップ・フェルールの接続特性の特徴である。

テーパ・フェルールの場合は、図 4.10～図 4.12 において記述したように、曲率半径 R_1 , R_2 に差異のある接続の場合には、テーパ・フェルールの回転角度 φ が 0 度の時でも、yy 座標上の偏心 e_{cy} の影響により、この所要接触力 W_s は零にはならなかった。

5.5 考 察

5.5.1 ステップ・フェルールの接続時の許容回転角度

以上に、ステップ・フェールを使用して構成した APC コネクタについて、ステップ・フェールが回転した場合の、ステップ・フェールの接続端面の形状特性、及び接続特性について解析結果を記述した。これらの解析結果から、特に、光ファイバ端面間のエアギャップ Z_s を消去するための所要接触力 W_s は、接続時のステップ・フェールの回転角度 φ により大きな影響を受けることが判ったので、ステップ・フェールの接続時の許容回転角度について考察する。

斜め球面の傾斜角度 θ_1 が、各々 12 度及び 8 度であって、ステップ・フェール 1 及びステップ・フェール 2 の斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 が変化した場合について、光ファイバ端面間のエアギャップ Z_s を消去できるステップ・フェールの許容回転角度 φ を表 5.1 に示す。表 5.1 の許容回転角度 φ は、図 5.11～5.13 から求めたものである。ここでは、光コネクタのコイルばねの有効接触力を $W_0 = 0.7 \text{ kgf}$ と仮定した。

ここで、ステップ・フェールの接続において、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度の場合に、斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せの範囲が、各々 12.5 mm と 5 mm のとき、光ファイバ端面間のエアギャップ Z_s を消去すると仮定する。表 5.1 によれば、ステップ・フェールの回転角度を 4.6 度に制限しなければならない。一方、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 8 度の場合に、斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せの範囲が、各々 12.5 mm と 5 mm のとき、光ファイバ端面間のエアギャップ Z_s を消去するためには、ステップ・フェールの回転角度 φ を 6.9 度に制限しなけれ

表 5.1 光ファイバ 端面を密着できるステップ・フェルールの許容回転角度 φ

Convex radius R_1 and R_2 (mm)	Slanted angle $\theta_1=12$ degrees	Slanted angle $\theta_1=8$ degrees
12.5 and 12.5	< 3.2°	< 4.6°
12.5 and 10.0	< 3.5°	< 5.0°
12.5 and 7.5	< 3.9°	< 5.5°
12.5 and 5.0	< 4.6°	< 6.9°
10.0 and 10.0	< 3.7°	< 5.4°
10.0 and 7.5	< 4.4°	< 6.0°
10.0 and 5.0	< 4.9°	< 7.0°
7.5 and 7.5	< 3.6°	< 6.4°
7.5 and 5.0	< 5.0°	< 7.4°
5.0 and 5.0	< 5.7°	< 8.9°

ばならないことを示している。

5.5.2 APCコネクタ用の構成部品仕様の提案

表 5.1 に要約したように、ステップ・フェルールにおいて、斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度の場合には、斜め球面の曲率半径 R_1 , R_2 の組合せの範囲が、各々 12.5 mm と 5 mm のとき、光ファイバ端面間のエアギャップ Z_s を消去するためには、ステップ・フェルールの回転角度 φ を 4.6 度に制限しなければならない。従って、前述の図 4.1 及び表 4.1 に示したような、従来の PC コネクタを対象として設計されたコネクタ部品の仕様を、そのまま、APC コネクタに転用することはできないことが判る。ただし、接続時の実際のフェルール回転角度は、計算値よりも小さいものと経験的に推定される。従って、ここでは、フェルール回転の許容回転角度を 4 度を満足し、更に製造コストの上昇を招かないよう

表 5.2 新たに提案する F C 型, 及び S C 型コネクタの整列キーと整列キー溝とによる隙間の寸法諸元の一例.

(a). FC connector components.

Locations of key and key-slit	Dimensions (mm)	Rotation angle (degrees)
Ferrule key-slit : W1	1.48 -1.50	Up to 1.3
Holder key : W2	1.45 -1.47	
Adaptor key-slit : W3	2.03 -2.07	Up to 1.7
Plug key : W4	1.98 -2.02	
Total rotation angle : φ		Up to 4.0

(b). SC connector components.

Locations of key and key-slit	Dimensions (mm)	Rotation angle (degrees)
Ferrule key-slit : W1	1.48 -1.50	Up to 1.3
Holder key : W2	1.45 -1.20	
Outer plug : W3	5.62 -5.65	Up to 2.1
Inner plug : W4	5.58 -5.60	
Adaptor : W5	9.02- 9.07	Up to 1.3
Outer plug : W6	8.88 -8.90	
Total rotation angle : φ		Up to 4.7

に考慮した.

そこで, 表 5.2 に, A P C コネクタ用コネクタ部品の新しい設計仕様を提案する.

5.5.3 斜め球面の接点の光軸からの偏心

図 5.6 ~ 図 5.8 から, フェルール回転に起因する偏心 e_s は, フェルール回転角度 φ , 斜め球面の傾斜角度 θ_1 , 及びステップ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1, R_2 の差異に依存することが判る. ただし, ステップ・フェルールの場合は, 曲率半径 R_1, R_2 が同一, または異なる値の組合せの接続においても, 偏心 e_s はフェルールの回転角度 φ にほぼ直線的に比例して増加する.

5.5.4 斜め球面の接点の光軸に対する接触角度

フェルールの回転に起因して、斜め球面上の接点 Q_s は光軸ZZに対して接触角度 ψ_s が変化する。フェールール回転角度 φ が10度の範囲では、フェールールの回転角度 φ が各々0度及び10度のとき、接触角度 ψ_s の差異は、図5.9によれば、いずれも0.05度以下である。同図から、フェールールの回転角度 φ が10度程度の小さな領域では、フェールールの回転による接触角度 ψ_s の変化は無視できる。

5.5.5 フェールールの回転による挿入損失

APCコネクタにおいて、ステップ・フェールールの斜め球面に軸方向の圧縮コイルばね力 W_0 を負荷し、一对のステップ・フェールールの斜め球面を相互に接続した場合、前述のように、接触力 W_s が圧縮コイルばね力 W_0 より大きい場合、光ファイバ端面間に生ずるエアギャップ Z_c を消去できない。この場合、第1章で記述したように、光ファイバ・コアと空気層との屈折率差によりフレネル損失、光ファイバ端面間の多重反射、及びエアギャップ Z_c による光の減衰などが総合されて挿入損失が大きくなる。次に、これらの要因による挿入損失の計算値を示す。

1) フレネル損失による挿入損失

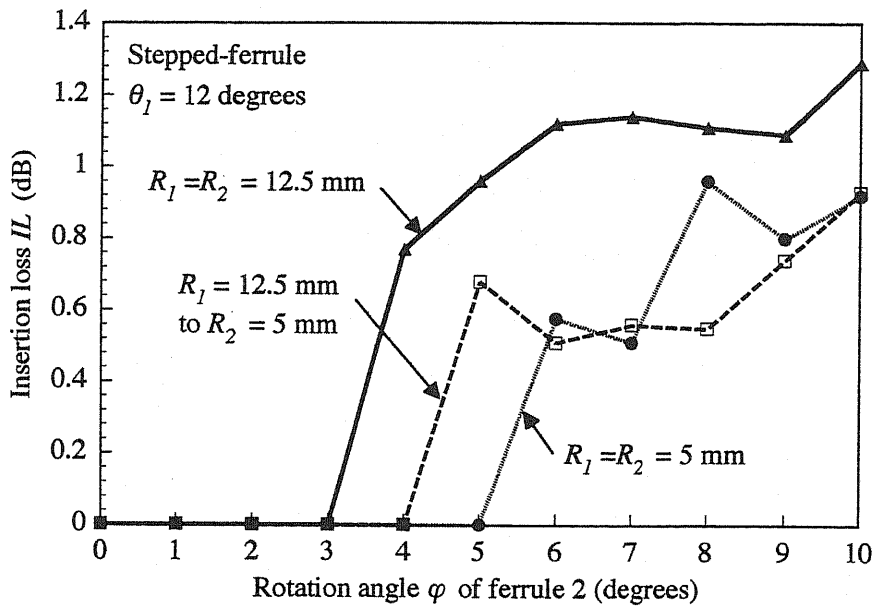
光ファイバ1から空気層への出射光の透過率を T_1 、空気層から光ファイバ2への入射光の透過率を T_2 とすれば、フレネル損失による挿入損失 IL_F は、第3章に記述した式(3.23)で与えられる[16]。

式(3.23)により計算した挿入損失 IL_F は各々0.38 dB及び0.34 dBになる。従って、光ファイバ端面間にエアギャップ Z_c が生じた場合、密着状態に比較して上述の挿入損失 IL_F が加算される。

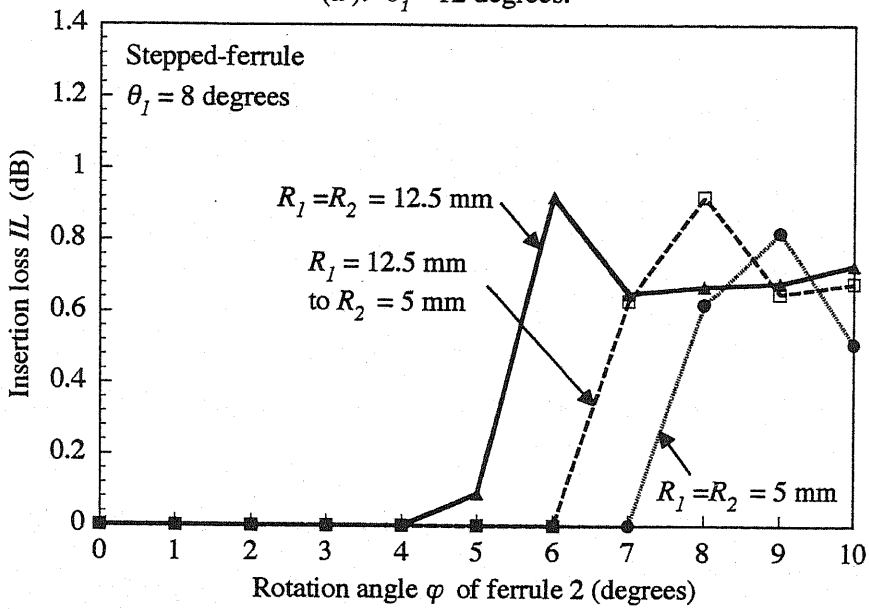
2) 多重反射による挿入損失

多重反射による挿入損失 IL_R は、第3章に記述した式(3.24)により与えられる[17]。この多重反射による挿入損失 IL_R は、光波長 λ の $\lambda/4$ に相当するエアギャップ毎に最大で約0.6 dBの挿入損失 IL_R を生ずる。

3) エアギャップによる光減衰



(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 5.14 傾斜角度 θ_1 が 12 度及び 8 度のステップ・フェルールの回転角度 φ と挿入損失 IL

光ファイバ端面間の距離に応じて、光ファイバ量が減衰する。この光量の減衰による挿入損失 IL_A は、第 3 章での記述した式 (3.25) により計算できる [18], [19]。式 (3.25) により計算した光量の減衰による挿入損失 IL_A は、光ファイバ端面の傾斜角度 θ_1 が 12 度及び 8 度について、

各々 $0.14 \text{ dB} / \mu\text{m}$, $0.09 \text{ dB} / \mu\text{m}$ になる。ただし, エアギャップ Z_s の範囲は $100 \mu\text{m}$ 以内とする。

図 5.14 (a), (b) は, ステップ・フェルール付き APC コネクタの斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度, 及び $\theta_1 = 8$ 度とし, 一对のテーパ・フェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 及び R_2 が, 各々 12.5 mm と 12.5 mm , 12.5 mm と 5 mm , 及び 5 mm と 5 mm の組合せについて, フェルールの回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 1 度おきに変えた場合の挿入損失 IL を, 第 3 章に記述した式 (3.23) から式 (3.25) にもとずいて計算してプロットしたものである。ただし, 図 5.14 (a), (b) において, 挿入損失 IL は, フレネル損失による挿入損失 IL_F , 多重反射による挿入損失 IL_R , 及び光量の減衰による挿入損失 IL_A を合算した値を示す。

図 5.14 (a), (b) において, 挿入損失の零 dB は, 図 5.11 及び図 5.13 の圧縮コイルばねによる接触力 W_0 を 0.7 kgf のときのエアギャップ Z_c を零として, 各々図 5.10 のエアギャップ Z_c の図から求めた。図 5.14 (a), (b) では, 挿入損失 IL は必ずしも所要接触力 W_c , 及びエアギャップ Z_c の変化とは比例しないことを示している。

図 5.14 (a), (b) によれば, 挿入損失 IL のプロットは山と谷が不規則に連続しているが, これは, 光ファイバ間の微小なエアギャップ Z_c が, 光波長 λ の $\lambda/4$ になる毎に増減する光ファイバ端面間の多重反射による 0.6 dB に及ぶ光損失の影響が大きいためと考えられる。

更に, 光コネクタの挿入損失の要因として, 第 1 章で記述した光ファイバ間の光軸ずれによる挿入損失 IL_d が加算される。

5.6 まとめ

第 5 章では, 第 3 章, 及び第 4 章で問題提起した, テーパ・フェルール付き APC コネクタの課題を解決している。すなわち, 第 5 章ではステップ・フェルール付き APC コネクタを新たに提案し, この新しい APC コネクタについて, フェルール回転角度 $\varphi \geq 0^\circ$ の条件における形状特性, 及び接続特性の理論解析を行って, その優位性を明らかにした。更に, 接続特性を改善するために, APC コネクタの構成部品の設

計仕様の改善を提案した。これらは、次のように要約できる。

1) 斜め球面の頂点 P_{s1} の光軸ZZからの偏心 S_s

斜め球面の頂点 P_{s1} の光軸ZZからの偏心 S_s は、テーパ・フェルールに比較して $1/15$ から $1/35$ と無視できる程度に低減できる。

2) 接続時の斜め球面の接点 Q_s の光軸ZZからの偏心 e_s

斜め球面の接点 Q_s の光軸ZZからの偏心 e_s は、曲率半径 R_1 、 R_2 の差異には無関係であり、偏心 e_s はフェルールの回転角度 φ にほぼ直線的に比例する。

3) 光ファイバ端面の接触角度 ψ_s

斜め球面の接点 Q_s の接触角度 ψ_s は、フェルールの回転角度 φ による影響を殆ど受けず微小である。

4) 光ファイバ端面間に生ずるエアギャップ Z_s

光ファイバ端面間に生ずるエアギャップ Z_s は、回転角度 φ の一次関数として近似される。

5) エアギャップ Z_s を消去するための所要接触力 W_s

所要接触力 W_s は、斜め球面の傾斜角度 θ_1 、斜め球面の曲率半径 R_1 と R_2 、及びフェルールの回転角度 φ の関数として与えられる。

6) フェルールの回転角度 φ による挿入損失 IL

フェルール回転角度 φ による挿入損失 IL の値は、フェルール回転角度 φ を超える領域では増加する。

以上、得られた結論は、フェルールが回転して接続された場合の、ステップ・フェルールを使用したAPCコネクタの基本接続特性として普遍的なものである。

第5章参考文献

- [1] M. Takahashi, "Optical Connector Ferrule", US Patent. No. 5,140,660. 1992.
- [2] M. Takahashi, "Compatibility of Conventional-Ferrule with Step-Ferrule for Angled Convex Optical Connectors," Proc, 45th IEEE ECTC, Lasvegas, pp. 406-412, (May, 1995)
- [3] M. Takahashi, "Novel Stepped ferrule for angled convex polished optical fiber connector," Proc, IEEE OFC'95. San Diego, Vol. 8, pp. 184-185, (Feb, 1995)
- [4] M. Takahashi, "Compatibility for optical connectors with different slanted angles at their ferrule endfaces," Proc, IEEE CLEO / Pacific Rim'95, pp. 304. (July, 1995)
- [5] 高橋光雄, "斜め球面研磨光コネクタの接続端面角度差異による互換性" 日本電子部品信頼性センタ、RCJ 第4回電子デバイスの信頼性シンポジウム、pp. 39 - 45, (11, 1995)
- [6] "技術指導資料：FC Type Fiber Optic Connector 図面," NTT アドバンステクノロジー株式会社, 1986.
- [7] "技術指導資料：SC Type Fiber Optic Connector 図面," NTT アドバンステクノロジー株式会社, 1989.
- [8] International Electrotechnical Commission, "INTERNATIONAL STANDARD IEC-874-14-16. DETAIL SPECIFICATION FOR FIBRE OPTIC CONNECTOR TYPE SC-APC TUNED 9 DEGREES FOR SINGLE MODE FIBRE TYPE," Published in May, 1997.
- [9] International Electrotechnical Commission, "INTERNATIONAL STANDARD IEC-874-14-XX. "DETAIL SPECIFICATION FOR FIBRE OPTIC CONNECTOR TYPE SC-APC TUNED 8 DEGREES FOR SINGLE MODE FIBRE TYPE," To be published by the end of 1997.
- [10] "SP-500 POLISHING MACHINE OPERATION MANUAL," Siecor Co., LTD, Feb, 1997.
- [12] "APM Polishing Machine Operating Instruction," Domaille Engineering, INC, 1997.

- [13] "OFL12 シリーズ研磨機取扱説明書," セイコー電子工業株式会社, No. 39NPM-53EI-01, 1997.
- [14] M. Takahashi, "Elastic Polishing Plate Method and Conditions for Forming Angled Convex Surface on Ferrule Endface," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 9, pp. 1675 - 1680, 1997.
- [15] 機械設計便覧編纂委員会, "機械設計便覧," 丸善株式会社 . pp.1872, 1973.
- [16] New-Port Catalogue, New-Port Co., LTD. pp. J-23, 1990.
- [17] 鈴木, 他, "光コネクタ損失特性の端面処理効果," 昭56年度信学全大, No. 2256, 1981.
- [18] D. Marcuse, "Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices," Bell System Tech' Journal, Vol. 56, No. 5, p. 713, 1977.
- [19] M. Takahashi, "Variable Light Attenuator of Improved Air-gap Type with Extremely Low Returning Light," Proc, IEEE IMTC/94, Vol. 2, pp. 947-950, (May. 1994).

第6章 APCコネクタの挿入損失の実験

6.1 まえがき

第6章では、第4章及び第5章で形状特性及び接続特性の理論解析を行った、テーパ・フェルール付きAPCコネクタとステップ・フェルール付きAPCコネクタについて、つぎの3項目について挿入損失の実験を行った。

1) フェルールの形状及び回転角度による挿入損失

初めに、フェルールの回転を伴う実際の接続状態において、挿入損失の変化を確認する。第3章及び第4章において理論解析を行ったテーパ・フェルール、及び第5章で新しく提案し、理論解析を行ったステップ・フェルールを対象とする。各FC/APCコネクタは、表4.1(a)に示した従来の許容回転角度を16度にしたFC/PCコネクタ用部品にテーパ・フェルールを組み込み、新しく提案した許容回転角度を4度にした表5.2(a)に示すFC/APCコネクタ用部品にステップ・フェルールを組み込んで構成した、実験では、フェルール回転角度 φ を変えて挿入損失の変化を比較した[1],[2]。

2) フェルールの回転角度と増加挿入損失

次に、フェルールの回転角度が0度における初期挿入損失に対して、フェルールが10度まで回転した場合の挿入損失の増加の状態を調査することを目的として、フェルールの回転角度を1度おきに回転させて各々のフェルール回転角度における挿入損失の増加を測定する実験を行った。測定試料として、第5章で新しく提案した表5.2(a)に示すFC/APCコネクタ用部品に、ステップ・フェルールを組み込んで構成したAPCコネクタを使用した[3]。

3) 繰り返し着脱特性

最後に、フェルールの先端形状の差異、及びコネクタ部品によるフェルール回転角度 φ に起因した挿入損失の接続安定性を確認することを目的として、テーパ・フェルール及びステップ・フェルールを各々組み込んで構成したFC/APCコネクタについて、50サイクルの繰り返し

着脱の実験を行った。

6.2 フェルールの形状及び回転角度による挿入損失の比較

前述のフェールの形状及び回転角度による挿入損失を調査するために、次のようにして実験を行った。

6.2.1 実験試料及び実験方法

1) 実験試料

1.1) 光ファイバ

光ファイバは、長さ3メートルのシングルモード光ファイバ (SMF9 / 125)、及び分散シフト光ファイバ(DSF8 / 125)を使用した。ここで、シングルモード光ファイバは、斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 8$ 度の APCコネクタに使用し、分散シフト光ファイバは斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度の APCコネクタに使用した。

1.2) フェール材質と接着条件

図3.1 (a)に示したジルコニア・セラミック製の FC / PCコネクタ用テーパ・フェール、及び図5.1 (a) に示したジルコニア・セラミック製 FCコネクタ互換型ステップ・フェールの中心孔に、各々上記の長さ3メートルのシングルモード光ファイバ、または分散シフト光ファイバをエポキシ接着剤で各々接着固定して使用した。エポキシ接着剤のキュアリング温度は各々110℃、キュアリング時間は各々30分に設定して行った。

1.3) フェールの曲率半径及び傾斜角度

各々のフェールの斜め球面の曲率半径は、5 mmから12.5 mmの範囲のものをランダムに選択して使用した。フェール端面の斜め球面の傾斜角度 θ_1 は12度及び8度の2種類とした。

1.4) コネクタ部品

コネクタ部品は、表4.1 (a) に示す従来の FC / PCコネクタ用部品、及び新しく提案した表5.2(a) に示す FC / APCコネクタ用部品の2種類を使用した。従って、接続時のフェール間の最大回転角度 φ

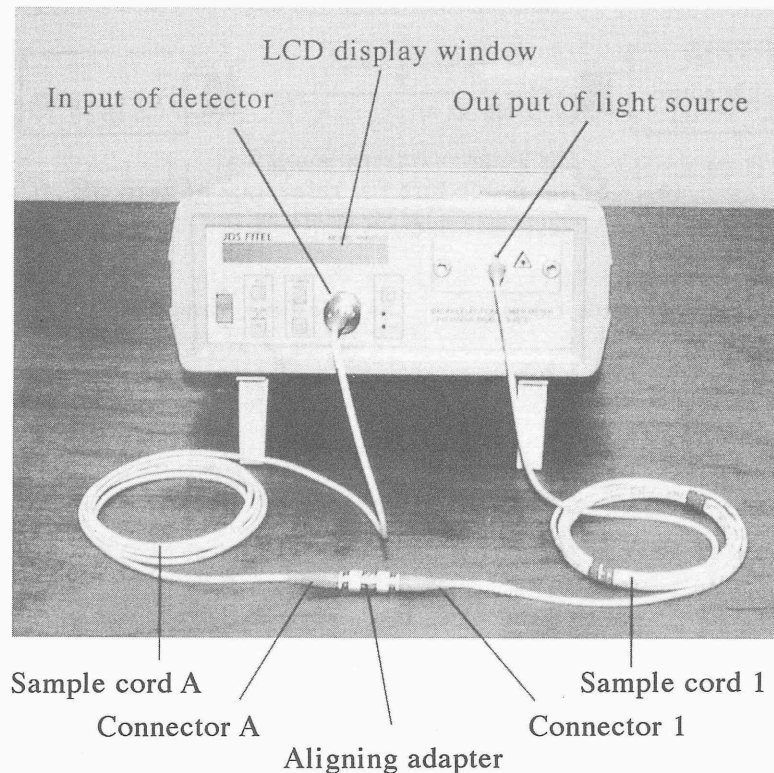


図 6.1 挿入損失の測定器の一例

は、各々 16 度及び 4 度である。これらのコネクタ部品に各々のフェルルを組み込んで測定試料とした。

1.5) 測定試料数

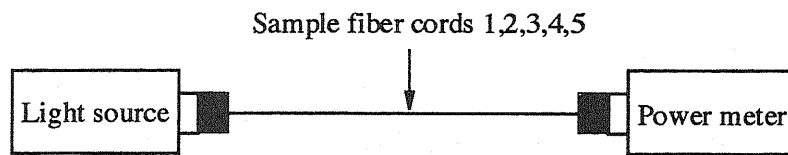
試料数は、各々のグループ毎に 11 本（合計 44 本）を製作した。

2) 測定法

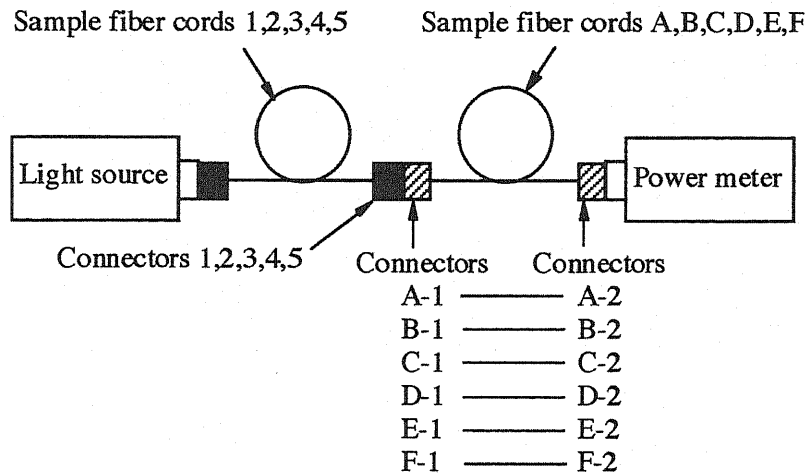
2.1) 測定器及び光源波長

図 6.1 に測定装置の写真を示す。測定光源として、この測定装置には波長 $\lambda = 1.310 \mu\text{m}$ と $\lambda = 1.550 \mu\text{m}$ の 2 種類のレーザ光源、及びパワーメータが各々内蔵されている[4]。

斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度の分散シフト光ファイバの試料には測定波長 $\lambda = 1.550 \mu\text{m}$ の光源を使用した。斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 8 度のシングルモード光ファイバの試料には測定波長 $\lambda = 1.310 \mu\text{m}$ の光源



(a). Setup procedure for reference of zero dB.



(b). Procedure for measurement of insertion loss.

図 6.2 挿入損失の手順のダイアグラム

を使用した。

2.2) 試料の接続法

挿入損失の測定方法は、JISでは、マスターコネクタコードによる方法が定められているが、本論文では、実際の接続状態を再現するために、ランダムに各々のコネクタを接続する方法により測定した[5]。従って、マスタコネクタコードを使用した挿入損失よりも若干大きな測定値になる。

2.3) 測定法

挿入損失の測定法を図 6.2 (a), (b) に示す。図 6.2 (a) は、パワーメータの零 dB の測定基準調節の説明図である。長さ 3 メートルの光ファイバ・コードの両端に取付けた APC コネクタを、各々光源及びパワーメータに接続した状態で、パワーメータの読みを零 dB に調節する。

図 6.2 (b) は、挿入損失の測定手順の説明図である。試料のコネクタ付き光ファイバ・コードとして、光源側接続用として、記号 1, 2, 3, 4, 及び 5 の 5 本使用する。一方、パワーメータ側には、A-1/A-2, B-1/B-2, C-1/C-2, D-1/D-2, E-1/E-2, 及び F-1/F-2 の 6 本のコネクタ付き光ファイバ・コードを使用する。

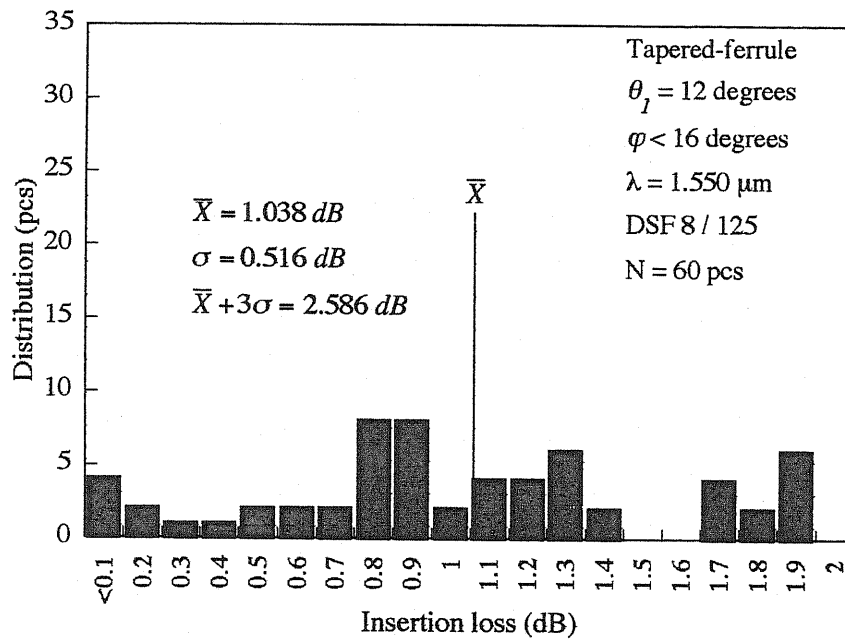
測定の一例として、コネクタ 1 に A-1 を接続して、コネクタ 1 とコネクタ A-1 の間の挿入損失を測定する。次に、パワーメータ側のコネクタ付き光ファイバ・コード A-1/A-2 反対に取付けて、コネクタ 1 とコネクタ A-2 の間の挿入損失を測定する。このようにして、順次に、B-1/B-2, C-1/C-2, D-1/D-2, E-1/E-2, 及び F-1/F-2 のコネクタ付き光ファイバ・コードを取付けて、各々コネクタ 1 との間の挿入損失を測定する。次に、光源側のコネクタ付き光ファイバ・コード 2 を取付けて、同様に挿入損失を測定する。このようにして、1 グループにつき 60 組の接続の挿入損失値が得られる。

6.2.2 実験データ

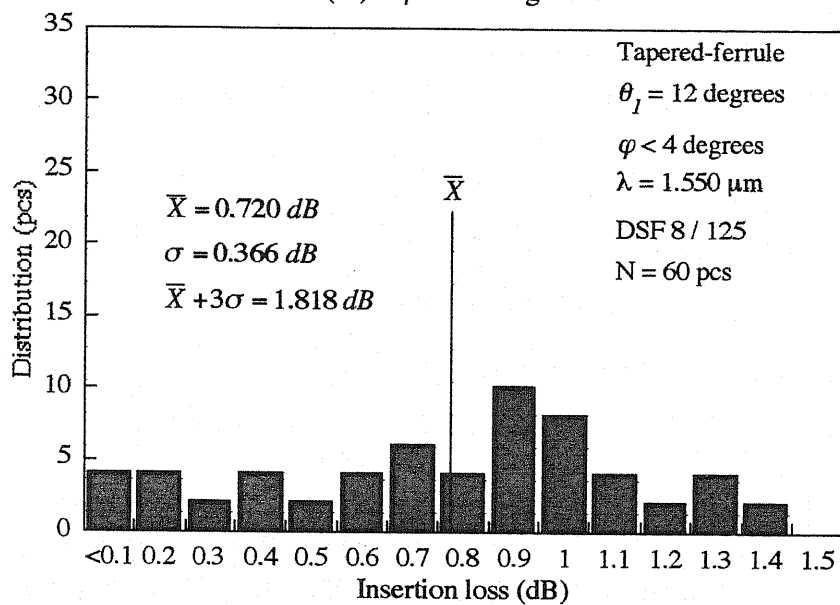
1) テーパ・フェルール付き APC コネクタの挿入損失

図 6.3 に、フェルールの回転角度 $\varphi < 16$ 度、及び $\varphi < 4$ 度のコネクタ部品に組み込んだ、斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度のテーパ・フェルール付き APC コネクタの挿入損失のヒストグラムを示す。前述のように、本試料には分散シフト光ファイバを使用している。図 6.3 から、フェルール回転角度 $\varphi < 16$ 度のコネクタ部品に組み込んだ、テーパ・フェルール付き APC コネクタの挿入損失の偏差は、 $\bar{X} \pm 3\sigma = 1.038 \pm 0.516$ dB となった。一方、フェルール回転角度 $\varphi < 4$ 度のコネクタ部品に組み込んだ場合の、テーパ・フェルール付き APC コネクタの挿入損失の偏差は、 $\bar{X} \pm 3\sigma = 0.720 \pm 0.366$ dB となり、挿入損失の偏差の最大値は 1.818 dB となり、フェルールの回転角度 φ の規制効果には多少の改善は認められる。

図 6.4 に、フェルールの回転角度 $\varphi < 16$ 度、及び $\varphi < 4$ 度のコネクタ部品に組み込んだ、斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 8$ 度のテーパ・フェル



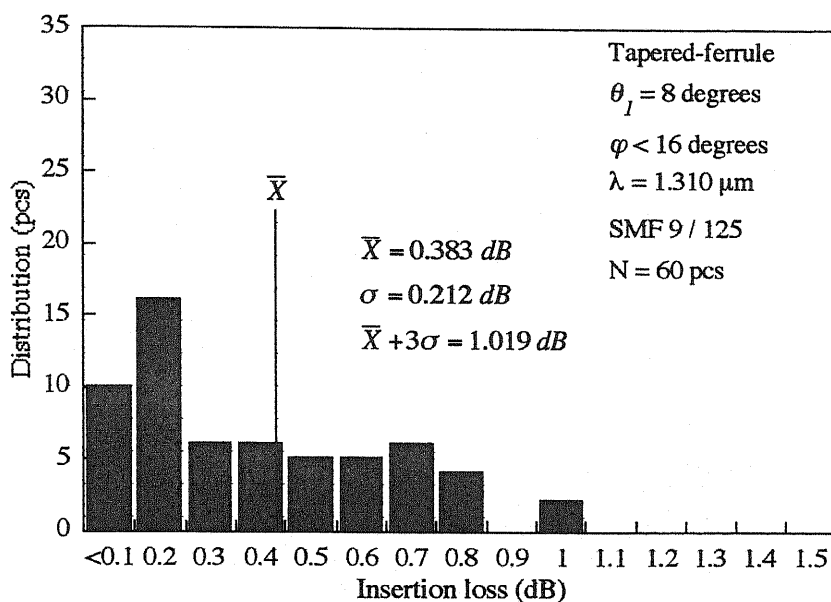
(a). $\varphi < 16 \text{ degrees}$.



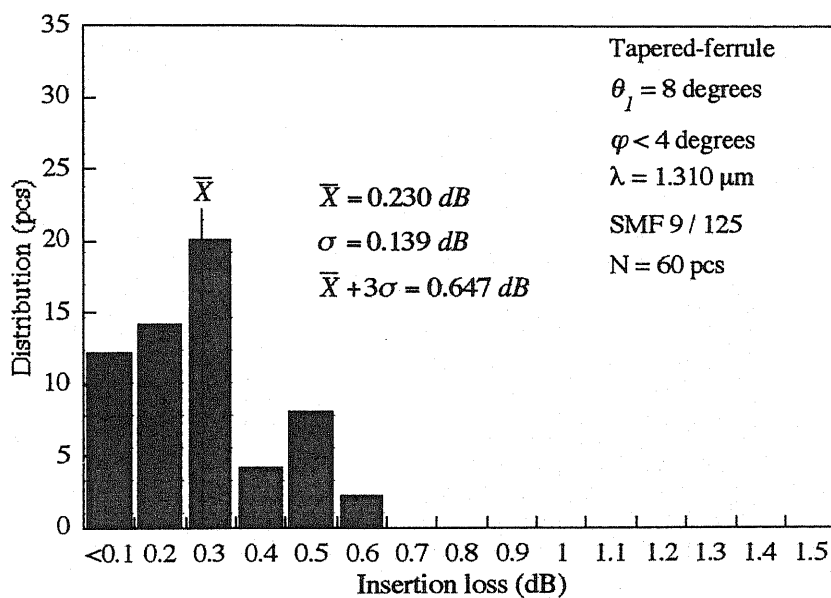
(b). $\varphi < 4 \text{ degrees}$.

図 6.3 回転角度 $\varphi < 16$ 度, 及び $\varphi < 4$ 度, 傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度のテーパ・フェルール付き APCコネクタの挿入損失 IL

ル付き APCコネクタの挿入損失のヒストグラムを示す. 本試料にはシングルモード光ファイバを使用している. 図 6.4 から, フェルール回転角度 $\varphi < 16$ 度のコネクタ部品に組み込んだ, テーパ・フェルール付き APCコネクタの挿入損失の偏差は, $\bar{X} \pm 3\sigma = 0.383 \pm 0.636 \text{ dB}$ と



(a). $\varphi < 16$ degrees.

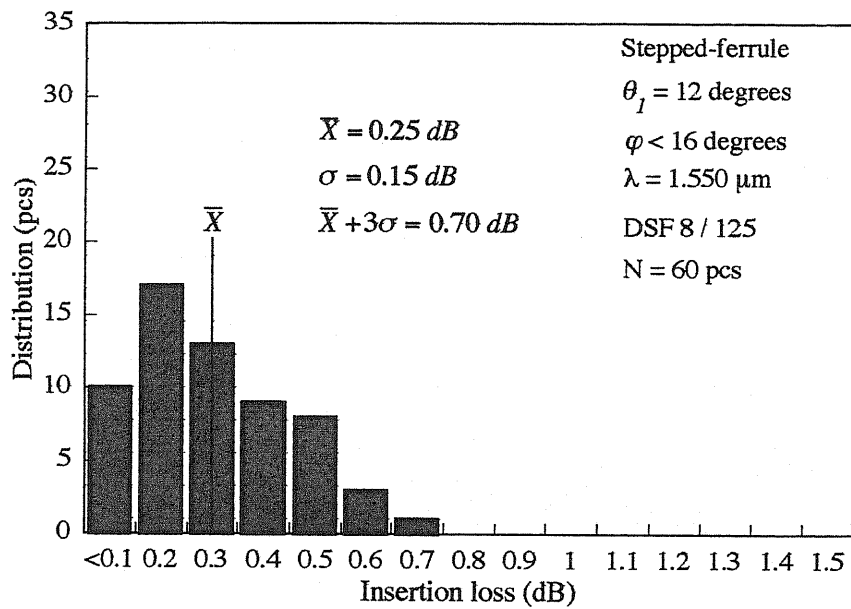


(b). $\varphi < 4$ degrees.

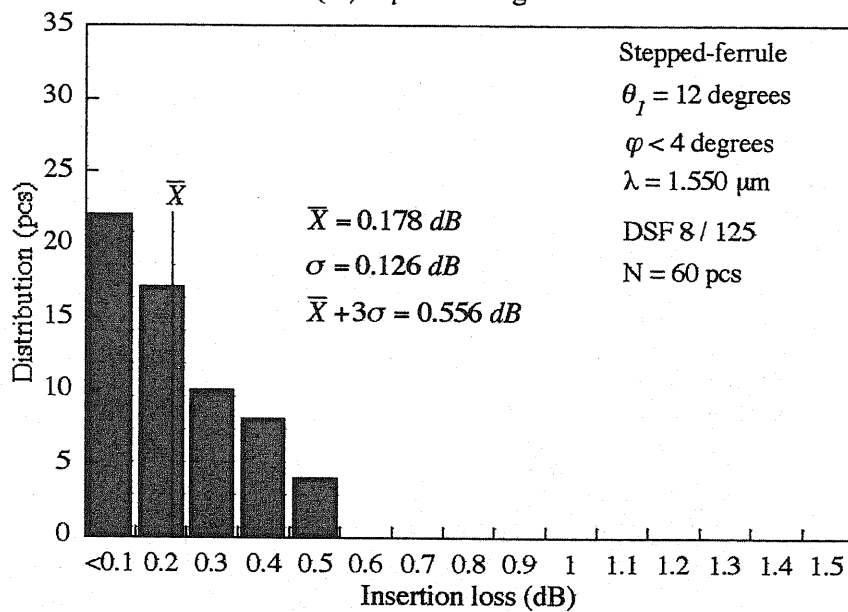
図 6.4 回転角度 $\varphi < 16$ 度, 及び $\varphi < 4$ 度, 傾斜角度 $\theta_1 = 8$ 度のテーパ・フェルール付き APC コネクタの挿入損失 IL

なった。一方、フェルール回転角度 $\varphi < 4$ 度のコネクタ部品に組み込んだ場合の、テーパ・フェルール付き APC コネクタの挿入損失の偏差は、 $\bar{X} \pm 3\sigma = 0.230 \pm 0.417 \text{ dB}$ であった

2) ステップ・フェルール付き APC コネクタの挿入損失



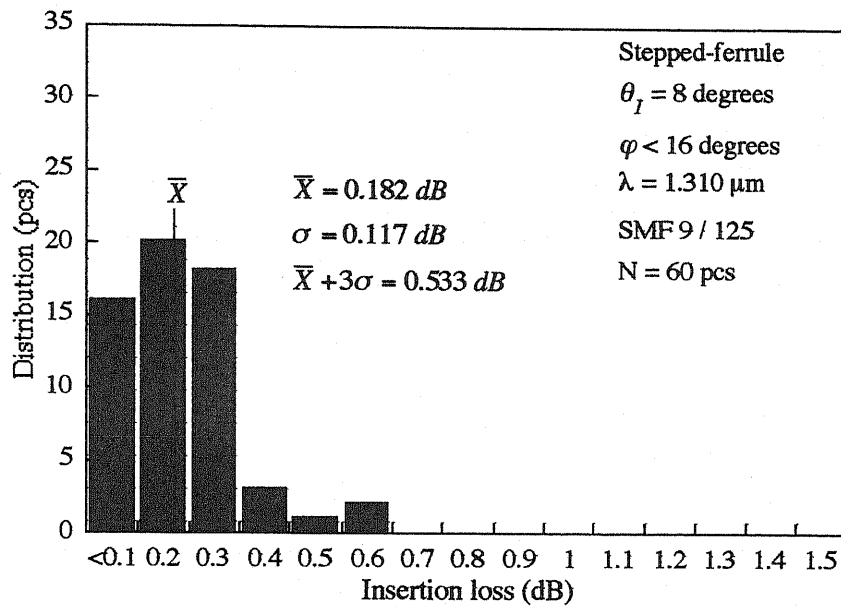
(a). $\varphi < 16$ degrees.



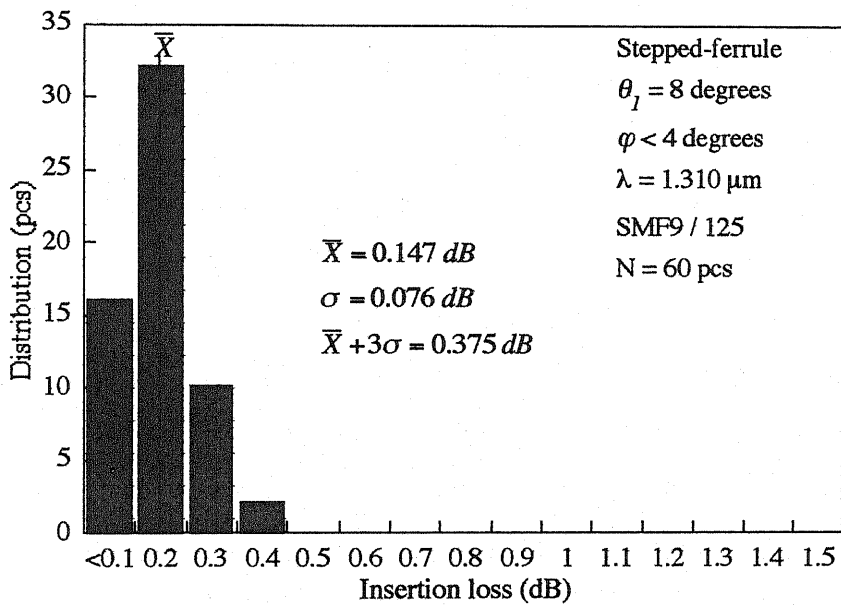
(b). $\varphi < 4$ degrees.

図 6.5 回転角度 $\varphi < 16$ 度, 及び $\varphi < 4$ 度, 傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度のステップ・フェルール付き APCコネクタの挿入損失 IL

図 6.5 に, フェルールの回転角度 $\varphi < 16$ 度, 及び $\varphi < 4$ 度のコネクタ部品に組み込んだ, 斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度のステップ・フェルール付き APCコネクタの挿入損失のヒストグラムを示す. 図6.5から, フェルール回転角度 $\varphi < 16$ 度のコネクタ部品に組み込んだ, ステッ



(a). $\varphi < 16$ degrees.



(b). $\varphi < 4$ degrees.

図 6.6 回転角度 $\varphi < 16$ 度, 及び $\varphi < 4$ 度, 傾斜角度 $\theta_1 = 8$ 度のステップ・フェルール付き APCコネクタの挿入損失 IL

ステップ・フェルール付き APCコネクタの挿入損失の偏差は, $\bar{X} \pm 3\sigma = 0.25 \pm 0.45$ dB となった. 一方, フェルール回転角度 $\varphi < 4$ 度のコネクタ部品に組み込んだ場合の, ステップ・フェルール付き APCコネクタの挿入損失の偏差は, $\bar{X} \pm 3\sigma = 0.178 \pm 0.378$ dB であった.

図6.6に、フェルールの回転角度 $\varphi < 16$ 度、及び $\varphi < 4$ 度のコネクタ部品に組み込んだ、斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 8$ 度のステップ・フェルール付きAPCコネクタの挿入損失のヒストグラムを示す。図6.6から、フェルール回転角度 $\varphi < 16$ 度のコネクタ部品に組み込んだ、ステップ・フェルール付きAPCコネクタの挿入損失の偏差は、 $\bar{X} \pm 3\sigma = 0.182 \pm 0.351$ dBとなった。一方、フェルール回転角度 $\varphi < 4$ 度のコネクタ部品に組み込んだ場合の、ステップ・フェルール付きAPCコネクタの挿入損失の偏差は、 $\bar{X} \pm 3\sigma = 0.147 \pm 0.228$ dBであった。

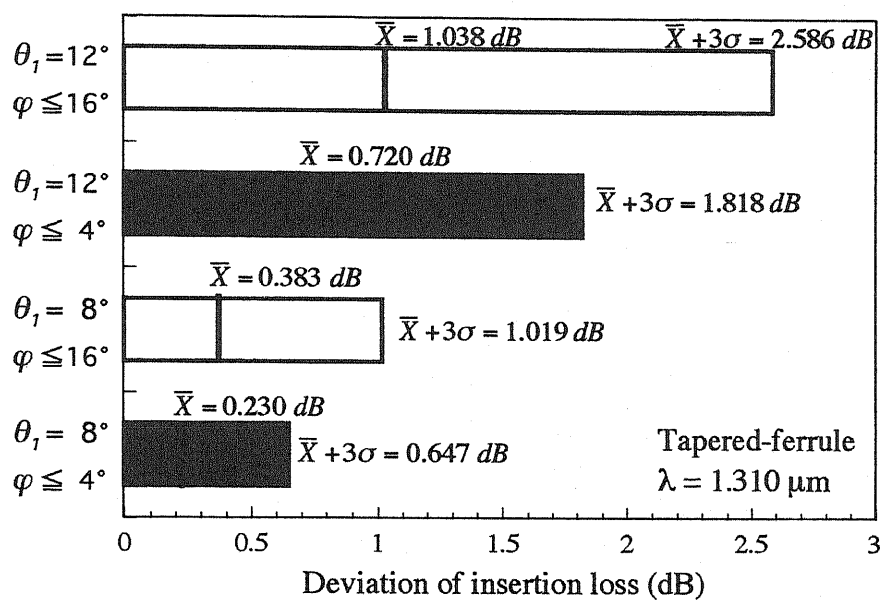
6.2.3 実験結果と考察

図6.7は、フェルールの回転角度 $\varphi < 16$ 度、及び $\varphi < 4$ 度のコネクタ部品に組み込んだ、斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度及び $\theta_1 = 8$ 度のテーパ・フェルール付きAPCコネクタ及びステップ・フェルール付きAPCコネクタの挿入損失の偏差の要約図を示す。図6.7から、実験結果は次のように要約できる。

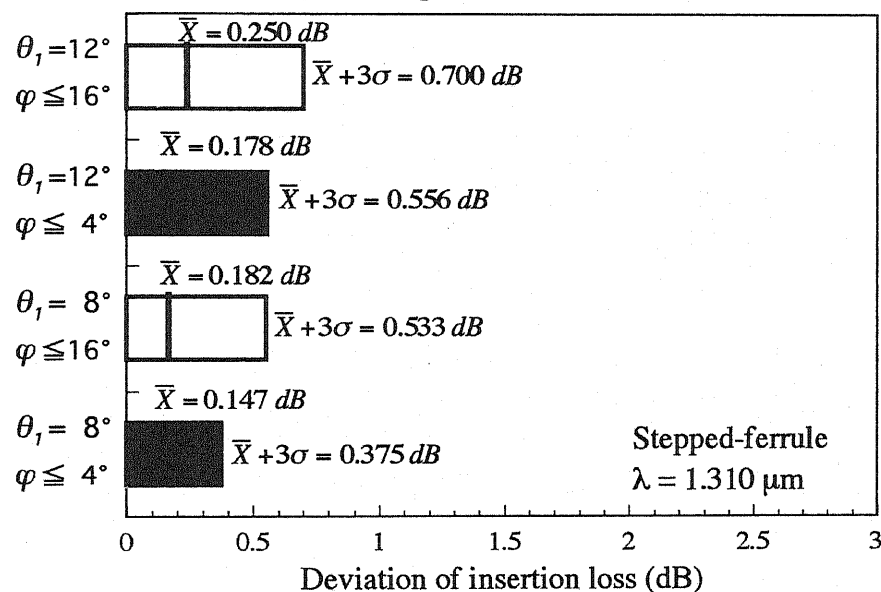
1) 挿入損失の偏差

図6.7から、テーパ・フェルール付きAPCコネクタの場合は、フェルールの斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度及び $\theta_1 = 8$ 度における挿入損失の中心値 \bar{X} は、フェルールの回転角度 φ を16度から4度に規制したコネクタ部品を使用することによって改善できる。特に、挿入損失の偏差 σ の改善効果は大きいことが判る。それでも、最大挿入損失の目標値を0.5 dBと仮定すれば、斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度のテーパ・フェルール付きAPCコネクタの場合、正規確率紙により求めた合格率は約25%になる[6]。一方、フェルールの斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 8^\circ$ のテーパ・フェルール付きAPCコネクタの合格率は約97.5%になり、2.5%の不良率になる。

図6.7から、ステップ・フェルール付きAPCコネクタの場合は、フェルールの斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度及び $\theta_1 = 8$ 度における挿入損失の中心値 \bar{X} は、フェルールの回転角度 φ を16度のコネクタ部品を使用した場合においても、テーパ・フェルール付きAPCコネクタに比較



(a). Tapered-ferrule.



(b). Stepped-ferrule.

図 6.7 回転角度 $\varphi < 16$ 度, 及び $\varphi < 4$ 度, 傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度及び $\theta_1 = 8$ 度のテーパ・フェルール付き APC コネクタ及びステップ・フェルール付き APC コネクタの挿入損失 IL の偏差

して十分に小さい。フェルールの回転角度 φ を 4 度に規制したコネクタ部品を使用した場合も、挿入損失 IL の低減効果は、テーパ・フェルール付き APC コネクタに比較して顕著ではない。最大挿入損失の目標値を 0.5 dB と仮定すれば、フェルールの斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度

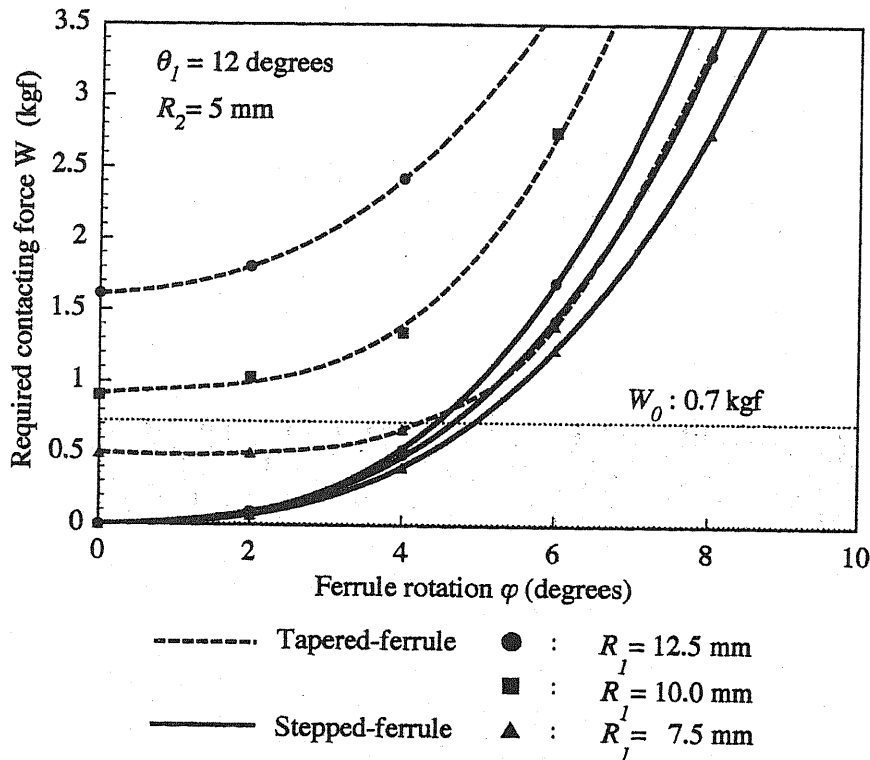


図 6.8 斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度における，テーパ・フェルール付き APCコネクタとステップ・フェルール付き APCコネクタのフェルール回転角度 φ と所要接触力 W

のステップ・フェルール付き APCコネクタの場合，正規確率紙により求めた合格率は約 99.5% になる．一方，フェルールの斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 8$ 度のテーパ・フェルール付き APCコネクタの合格率は約 100% になる．

2) 曲率半径の差異と挿入損失

第 4 章に記述したように，テーパ・フェルール付き APCコネクタの場合は，一对のフェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 と R_2 に差異があるときには，斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心の yy 座標 e_{cy} の値が大きくなり，そのために，光ファイバ端面間のエアギャップ Z_c の消去に要する接触力 W_c は，フェルールの回転角度 φ が 0 度においても大きな値になる．

一方，ステップ・フェルール付き APCコネクタの場合は，第 5 章に記述したように，一对のフェルールの斜め球面の曲率半径 R_1 と R_2 に差

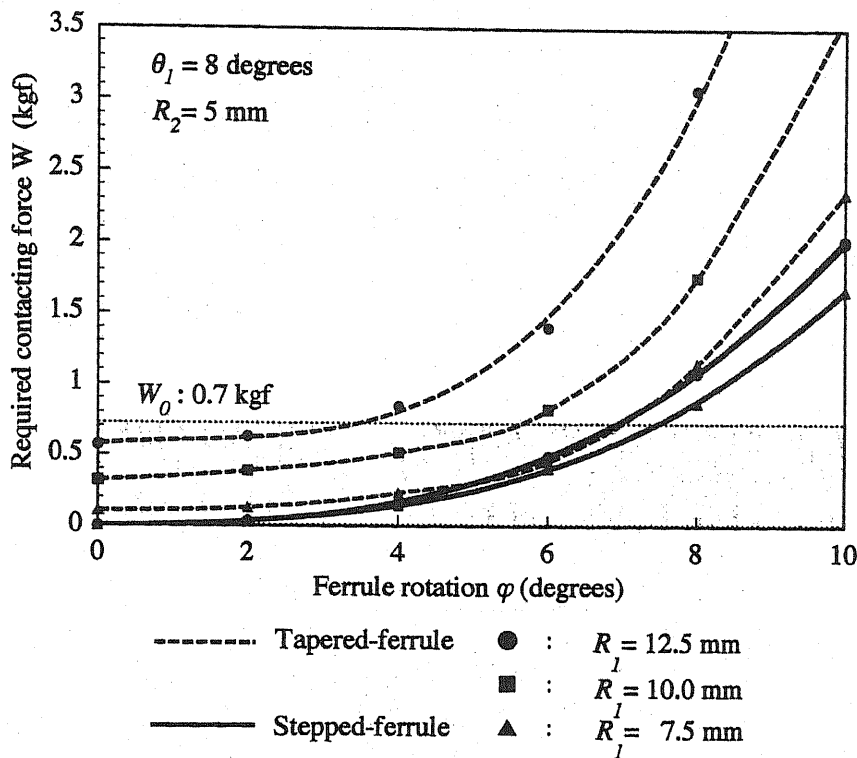


図 6.9 斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 8$ 度における，テーパ・フェルール付き APCコネクタとステップ・フェルール付き APCコネクタのフェルール回転角度 φ と所要接触力 W

異があるときでも，斜め球面の接点 Q_s の光軸 ZZ からの偏心の yy 座標 e_{sy} の値は無視できる程度に小さい。従って，光ファイバ端面間のエアギャップ Z_s の消去に要する接触力 W_s は，フェルールの回転角度 φ が 0 度においては近似的に 0 kgf になる。

図 6.8 及び図 6.9 は，斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度及び 8 度のテーパ・フェルール付き APCコネクタとステップ・フェルール付き APCコネクタについて，各々のフェルール 2 の斜め球面の曲率半径 R_2 が 5 mm に固定し，フェルール 1 の斜め球面の曲率半径 R_1 が 12.5 mm，10 mm 及び 7.5 mm に変化させた場合に，フェルールの回転角度 φ が各々 0 度から 10 度まで 2 度おきに変化したときの，光ファイバ端面間のエアギャップの消去に要する接触力 W の理論計算値をプロットしたものである。

図 6.8 及び図 6.9 から，コネクタ・プラグに内臓された圧縮コイルば

ねの有効接触力 W_0 を 0.7 kgf とすれば，光ファイバ端面間のエアギャップの消去に要する接触力 W_c が $W_0 = 0.7$ kgf よりも大きな領域では光ファイバ端面間のエアギャップは消去できない．図 6.3 から図 6.7 に示したフェルール回転角度 φ による挿入損失 IL の比較実験結果では，テーパ・フェルール付き APC コネクタの挿入損失の値に対して，ステップ・フェルール付き APC コネクタの挿入損失 IL の値が全般的に小さな値を示すが，図 6.8 から図 6.9 はこの根拠を示している．

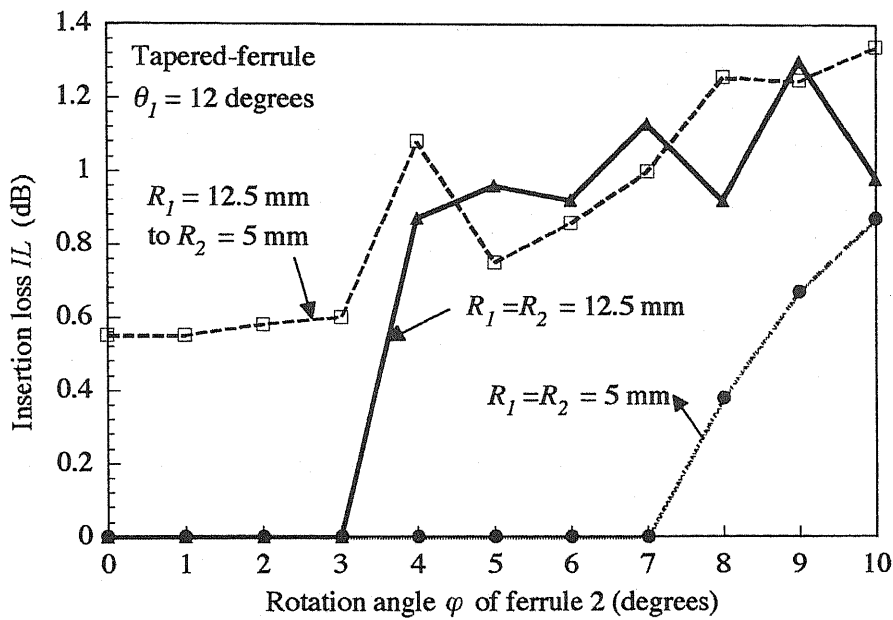
3) エアギャップと挿入損失

APC コネクタの接続時の挿入損失の構成要素としては，第 1 章において，式 (1.1) から (1.5) について概要を述べたように，整列アダプタにフェルールを挿入して接続したときの，光ファイバ間の光軸の偏心による光損失 IL_d などの機械的な要因のほか，一对の光ファイバの端面が密着しない場合，光ファイバと空気層の光屈折率差異によるフレネル損失 IL_F ，エアギャップが光波長 λ の $\lambda/4$ になる毎に増減する光ファイバ端面間の多重反射による光損失 IL_R ，及び光ファイバ端面間に距離による光の減衰 IL_A などが挙げられる．最終的に，これらの挿入損失の構成要素による光損失の累積されたものが挿入損失 IL として表われる．

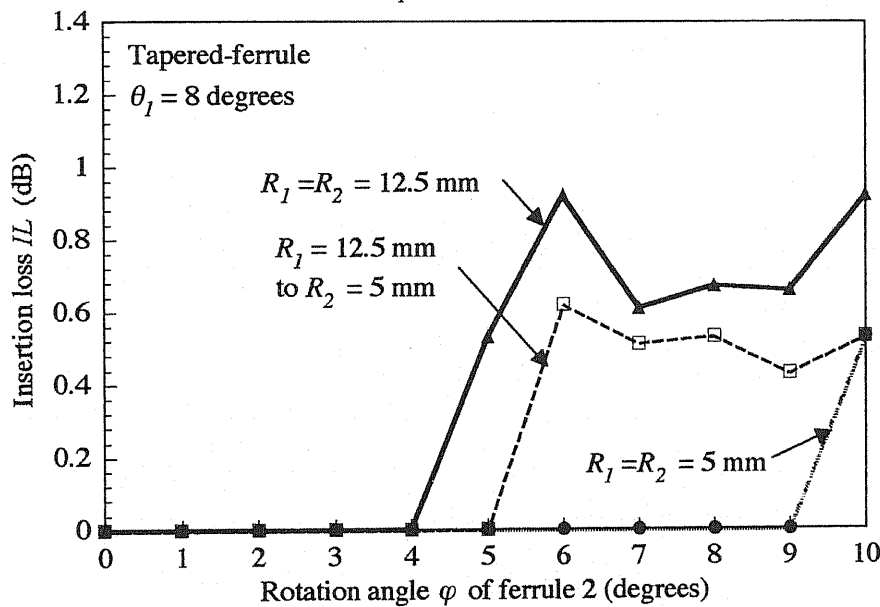
図 6.10 及び図 6.11 は，テーパ・フェルール付き APC コネクタ，及びステップ・フェルール付き APC コネクタについて，斜め球面の傾斜角度 $\theta_1 = 12$ 度及び $\theta_1 = 8$ 度における，フェルールの回転角度 φ と挿入損失 IL の関係を式 (1.2) から式 (1.4) にもとずいて計算した値を合算してプロットしたものである．

図 6.10 及び図 6.11 において，挿入損失 IL の 0 dB は，コネクタプラグに内蔵された圧縮コイルばねによる接触力 W_0 を 0.7 kgf のときのエアギャップを零として，第 4 章及び第 5 章に示した各々図 4.9 及び図 5.10 のエアギャップの図から求めた．前述のように，挿入損失 IL は必ずしもフェルールの回転角度 φ には比例しないことが図 6.10 及び図 6.11 は示している．

ここで，図 6.10 に示したテーパ・フェルールの場合，一对のフェルール端面の斜め球面の曲率半径が異なる組合せの場合は，フェルール回



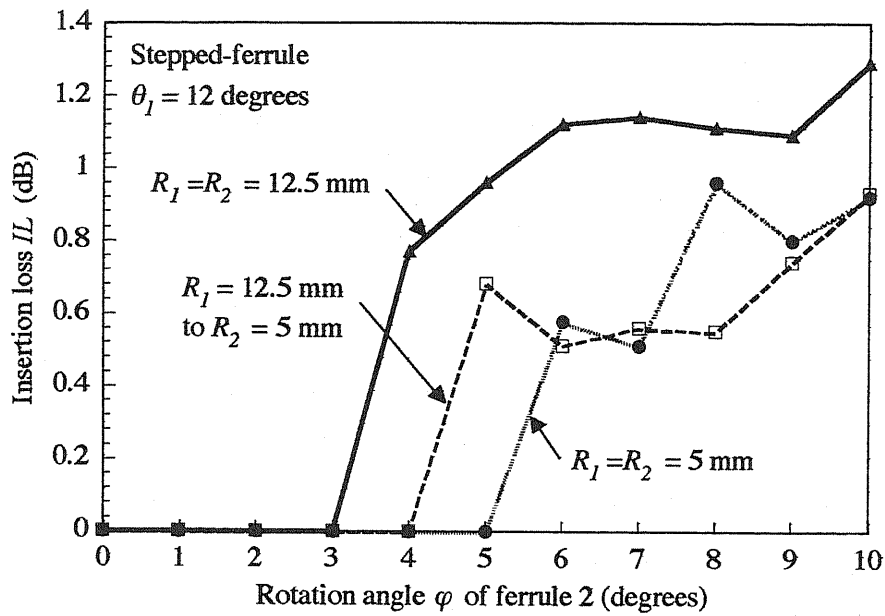
(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



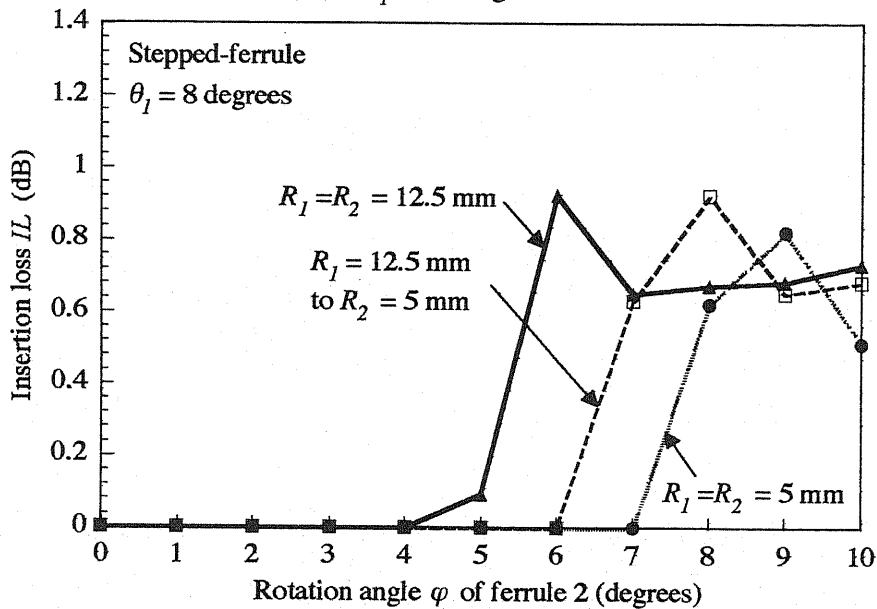
(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 6.10 傾斜角度 θ_1 が 12 度及び 8 度のテーパ・フェルールの回転角度 φ と挿入損失 IL

回転角度 $\varphi < 6$ 度の領域において、斜め球面の接点 Q_c の光軸 ZZ からの偏心の yy 座標成分 e_{cy} によりエアギャップ Z_c を消去できない。従って、テーパ・フェルール付き APC コネクタのエアギャップ Z_c による挿入損失 IL がステップ・フェルール付き APC コネクタの挿入損失 IL より



(a). $\theta_1 = 12$ degrees.



(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

図 6.11 傾斜角度 θ_1 が 12 度及び 8 度のステップ・フェルールの回転角度 φ と挿入損失 IL

大きくなる原因と考えられる。

図 6.10 及び図 6.11 によれば、挿入損失 IL のプロットは山と谷が不規則に連続しているが、これは、光ファイバ間のエアギャップ Z が、光波長 λ の $\lambda/4$ になる毎に増減する光ファイバ端面間の多重反射 IL_R に

よる 0.6 dB に及ぶ光損失の影響によると考えられる。

光ファイバ端面間にエアギャップ Z が生じた場合は、テーパ・フェルール付き APC コネクタ及びステップ・フェルール付き APC コネクタは、共に挿入損失 IL の増加は避けられないことを図 6.10 及び図 6.11 は示している。

6.3 ステップ・フェルールの回転角度と増加挿入損失

本節では、ステップ・フェルールの回転角度 φ と挿入損失の変化の相関性を詳細に調査することを目的として、第 5 章で新しく提案した表 5.2 (a) に示す FC/APC コネクタ用部品に、ステップ・フェルールを組み込んで構成した APC コネクタについて、フェルールの斜め球面の傾斜角度 θ_1 、曲率半径 R_1 、 R_2 をパラメータとして、フェルール回転角度 φ と挿入損失の増加に関する実験を行った[7],[8]。

6.3.1 実験試料と実験方法

1) 測定項目

ステップ・フェルールの端面傾斜角度 θ_1 が 8 度及び 12 度、曲率半径 R_1 と R_2 の組合せが、各々 12.5 mm 対 12.5 mm, 12.5 mm 対 5 mm, 及び 5 mm 対 5 mm について、ステップ・フェルール 2 の回転角度 φ の変化に対応する挿入損失の増加を測定した。すなわち、ステップ・フェルール 2 の回転角度が 0 度における初期挿入損失値 IL_1 に対して、フェルール回転角度 φ が 1 度おきに 10 度まで増加した時の各回転角度 φ における挿入損失 IL_2 を測定して、次の式 (6.1) により挿入損失の増加 ΔIL を計算により求めた。

$$\Delta IL = IL_2 - IL_1 \quad (6.1)$$

図 6.12 は、今回の実験に測定治具として使用した整列アダプタを示す。すなわち、整列アダプタの一端の整列キー溝 1 の位置に対して、他端側の整列キー溝 2 を、0 度から 10 度まで 1 度間隔に円周方向に Δ ずつ、ずらした位置に設けた整列アダプタを各 1 個、合計 11 個製作した。

測定では、整列アダプタの左側に、基準となる FC/APC コネクタ

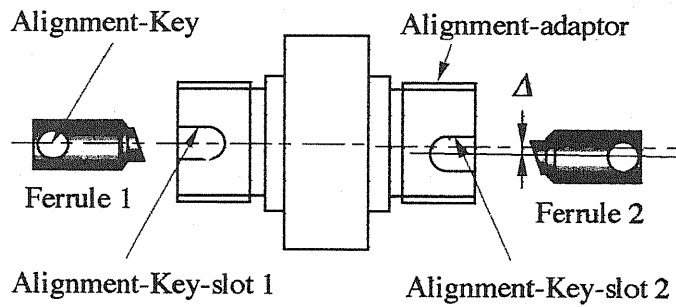


図 6.12 測定治具として使用した整列アダプタ

を取り付け、整列アダプタの右端側に供試 F C / A P C コネクタを 1 個ずつ順次交換して取り付けて、挿入損失を測定した。なお、測定光源には光波長 $\lambda = 1.310 \mu\text{m}$ の半導体レーザを使用した。

2) 供試 F C / A P C コネクタ部品仕様

2.1) ステップ・フェルールの曲率半径

各傾斜角度 θ_1 が 8 度及び 12 度について、斜め球面の曲率半径 $12.5 \pm 0.5 \text{ mm}$ 、及び $5 \pm 0.5 \text{ mm}$ の精度範囲のステップ・フェルールを各 10 個、合計 40 個を使用した。

2.2) コネクタプラグ

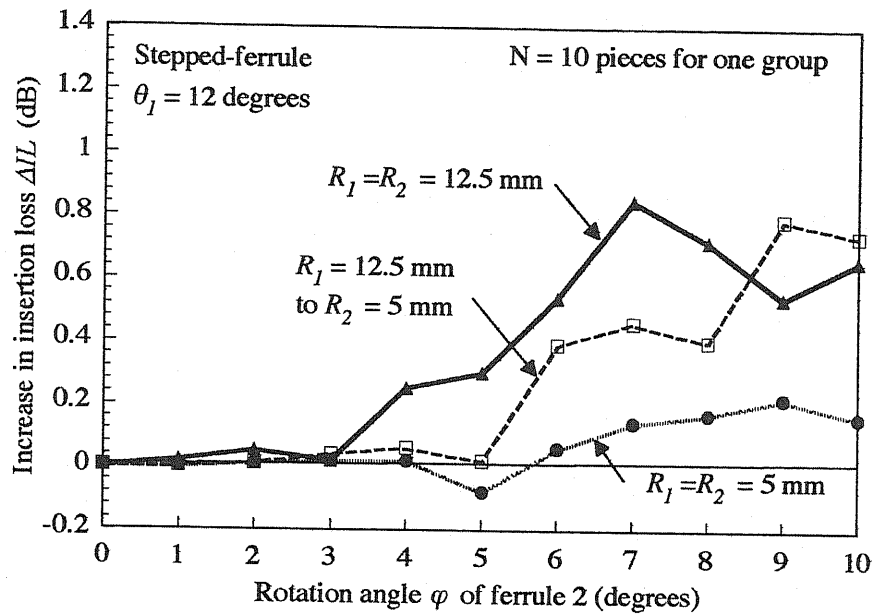
ステップ・フェルールのフランジに設けられた整列キー溝幅と、F C コネクタプラグの整列キー幅の間の隙間が、 0.02 mm 以下の精度範囲のもの（定偏波光ファイバ用）を所要数製作して使用した（自由回転角度 ± 0.34 度以下）。

2.3) 整列アダプタ

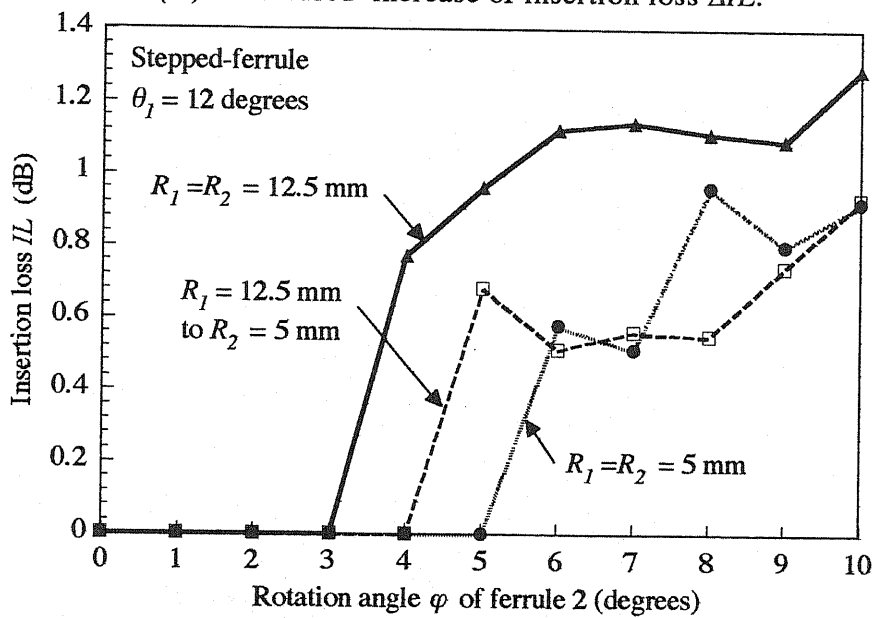
F C コネクタプラグの整列キー直径との隙間が 0.02 mm 以下の整列キー溝幅のものを、前述のように各 1 個、合計 11 個製作して使用した（自由回転角度 ± 0.15 度以下）。整列スリーブ材質は磷青銅製 F C コネクタ用標準スリーブを使用した。

2.4) ばね仕様

接続時の、ばね圧力 $W_0 = 0.7 \pm 0.2 \text{ kgf}$ の F C コネクタ用標準コイ



(a). Measured increase of insertion loss ΔIL .



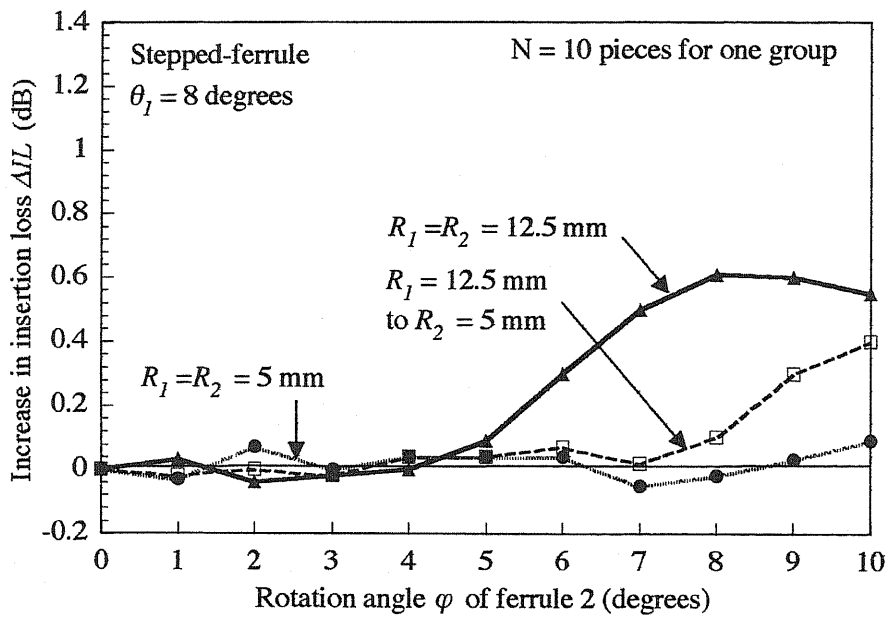
(b). Calculated insertion loss IL .

図 6.13 斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 12 度のステップ・フェルールの回転角度 φ と挿入損失の増加 ΔIL , 及び計算による挿入損失 IL

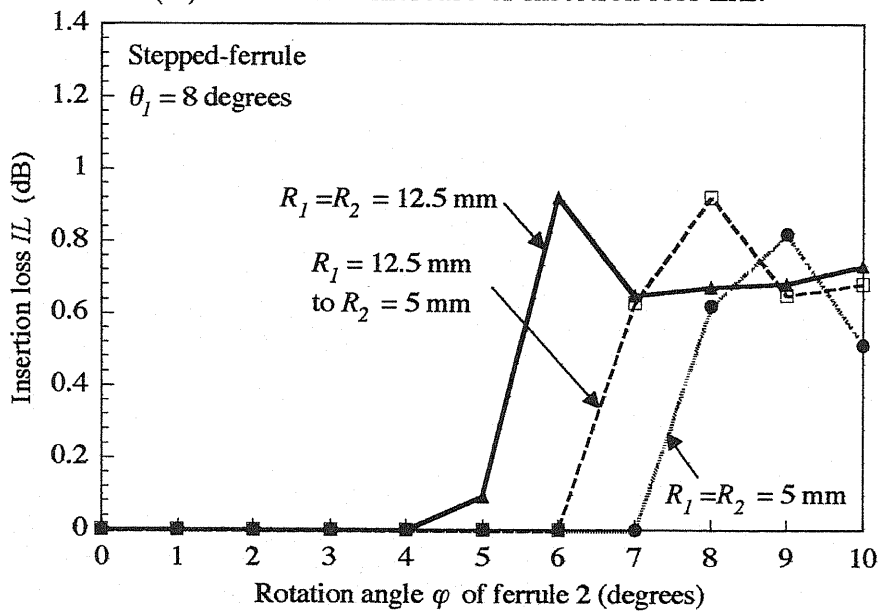
ルばねを使用した。

6.3.2 実験データ

図 6.13 (a) に, 各傾斜角度 θ_1 が 12 度のステップ・フェルールについ



(a). Measured increase of insertion loss ΔIL .



(b). Calculated insertion loss IL .

図 6.14 斜め球面の傾斜角度 θ_1 が 8 度のステップ・フェルールの回転角度 φ と挿入損失の増加 ΔIL ，及び計算による挿入損失 IL

て、ステップ・フェルール 2 の回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 1 度おきに変化させた時に、回転角度 $\varphi = 0$ 度における初期挿入損失に対して、各回転角度における増加挿入損失 ΔIL の平均実測値をプロットし

たものである。図 6.13 (b) は、前述の図 6.11(a)に示した挿入損失の理論計算値を、実験値との比較のために再度示したものである。

図 6.14 (a)に、各傾斜角度 θ_1 が 8 度のステップ・フェルールについて、ステップ・フェルール 2 の回転角度 φ を 0 度から 10 度まで 1 度おきに変化させた時に、回転角度 $\varphi = 0$ 度における初期挿入損失 IL_1 に対して、各回転角度における増加挿入損失 ΔIL の平均実測値をプロットしたものである。図 6.14 (b) は、前述の図 6.11(b)に示した挿入損失 IL の理論計算値を、実験値との比較のために再度示したものである。

ここで、図 6.13 (a) と図 6.14 (a) の増加挿入損失 ΔIL の平均実測値は、式 (6.1) で述べたように、回転角度 $\varphi = 0$ 度における挿入損失値 IL_1 の初期値を 0 dB として図示しているが、図 6.13 (b) と図 6.14 (b) の挿入損失の計算値 IL は以上の初期値を含んで示している。

6.3.3 実験結果と考察

ステップ・フェルールの回転角度 φ が 10 度以内の場合、APC コネクタの増加挿入損失 ΔIL の実験結果については、次のように考察できる。

1) 増加挿入損失 ΔIL の実測値と理論値の差異

図 6.13 及び図 6.14 では、フェルール回転による増加挿入損失 ΔIL の実験値のプロットを、計算で求めた挿入損失 IL のプロットと比較すると、増加挿入損失 ΔIL の実験値の増加しはじめるフェルールの回転角度 φ は、計算で求めた挿入損失 IL の増加しはじめるフェルールの回転角度 φ に極めて近似している。

一方、増加挿入損失 ΔIL の実験値は、計算で求めた挿入損失 IL の値よりも平均して 0.2 dB から 0.3 dB 程度の小さな値ではあるが差異が認められる。この理由としては、上述の増加挿入損失 ΔIL の初期値 IL_1 を 0 dB とおいてプロットしているからである。

2) フェルール形状による増加挿入損失 ΔIL

今回は、ステップ・フェルール付き APC コネクタについて増加挿入損失 ΔIL の実験を行ったが、テーパ・フェルール付き APC コネクタの

場合も、同様なフェルールの回転角度 φ と挿入損失の増加 ΔIL の関係があると考えられる。ただし、テーパ・フェール付きAPCコネクタの場合は、一对のテーパ・フェール端面の曲率半径 R_1 、 R_2 が異なる場合は、フェールの回転角度 φ が0度から増加挿入損失 ΔIL が始まるのが前述の図6.10から判る。従って、ステップ・フェール付きAPCコネクタに比較して、テーパ・フェール付きAPCコネクタの挿入損失 IL は全般的に大きくなる。

6.4 繰り返し着脱

フェールの先端形状、及びコネクタ部品によるフェール回転角度 φ による挿入損失 IL の安定性を確認することを目的として、テーパ・フェール及びステップ・フェールを、各々組み込んで構成したFC/APCコネクタについて、50サイクルの繰り返し着脱の実験を行った。

6.4.1 実験試料及び実験方法

1.1) 光ファイバ

光ファイバは、前述の実験と同様のものを使用した。

1.2) フェールの曲率半径及び傾斜角度

各々のフェールの斜め球面の曲率半径は、5 mmから12.5 mmの範囲のものをランダムに選択して使用した。フェール端面の斜め球面の傾斜角度は12度及び8度の2種類とした。

1.3) コネクタ部品

コネクタ部品は、表4.1(a)に示す従来のFC/PCコネクタ用部品、及び新しく提案した表5.2(a)に示すFC/APCコネクタ用部品の2種類を使用した。従って、接続時のフェール間の最大回転角度 φ は、各々16度及び4度である。これらのコネクタ部品に各々のフェールを組み込んで測定試料とした。

1.4) 測定試料数

試料数は、各々のグループ毎に2本(合計8本)を製作した。(各グ

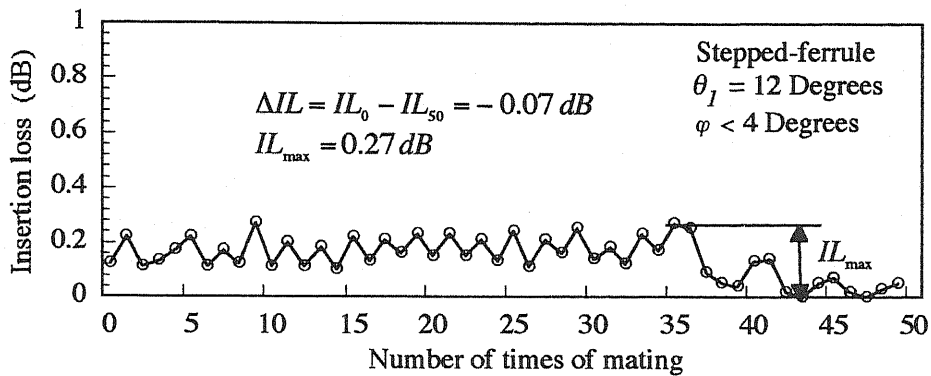


図 6.15 繰り返し着脱実験値の一例

ループ毎に接続を変えることにより、各グループ毎に4組のデータが得られる)。

2) 測定法

2.1) 測定器及び光源波長

図 6.1 に示した測定装置を使用した[3]。測定光源として、この測定装置には波長 $\lambda = 1.310 \mu\text{m}$ と $\lambda = 1.550 \mu\text{m}$ の2種類のレーザー光源、及びパワーメータが内蔵されている。ここでは、波長 $\lambda = 1.310 \mu\text{m}$ の光源を使用した。

2.2) 試料の測定法

挿入損失の測定方法は、JISに準拠した。繰り返し着脱の回数は50回とした。JISの繰り返し着脱試験の規格としては、測定前の挿入損失値に対して、繰り返し着脱試験後の挿入損失の変動値が0.2 dB以下に規定されている[4]。

6.4.2 実験結果と考察

図 6.15 に実験データの一例を示す。図 6.15 では、繰り返し着脱試験の間における最大挿入損失値と最小挿入損失値のばらつき値 IL_{\max} 、及び繰り返し着脱試験の前後の挿入損失の変化 ($\Delta IL = IL_0 - IL_{50}$) を示してある、

繰り返し着脱実験結果を要約した結果を表 6.1 に示す。表 6.1 では、フェルールの斜め球面の傾斜角度 θ が、各々12度及び8度、及びフェ

表 6.1 繰り返し着脱の実験データ

(a). $\theta_1 = 12$ degrees.

Ferrule & connector $\theta = 12$ degrees	Maximum variation IL_{max} while testing	Averaged change of insertion loss ΔIL at initial and final stages
1. Tapered-ferrule Ferrule rotation		
$\varphi < 16$ degrees	0.47 dB	0.16 dB
$\varphi < 4$ degrees	0.39	0.13
2. Stepped-ferrule		
$\varphi < 16$ degrees	0.13	0.09
$\varphi < 4$ degrees	0.09	0.05

(b). $\theta_1 = 8$ degrees.

Ferrule & connector $\theta = 8$ degrees	Maximum variation IL_{max} while testing	Averaged change of insertion loss ΔIL at initial and final stages
1. Tapered-ferrule Ferrule rotation		
$\varphi < 16$ degrees	0.48 dB	0.06 dB
$\varphi < 4$ degrees	0.39	0.04
2. Stepped-ferrule		
$\varphi < 16$ degrees	0.20	0.09
$\varphi < 4$ degrees	0.07	0.07

ルールの回転角度が、各々 $\varphi < 16$ 度、及び4度のコネクタ部品を使用した場合の、テーパ・フェルール付きAPCコネクタ及びステップ・フェルール付きAPCコネクタの、繰り返し着脱試験の間における最大挿入損失値と最小挿入損失値のばらつき値 IL_{max} 、及び繰り返し着脱試験の前後の挿入損失の変化 ($\Delta IL = IL_0 - IL_{50}$)を示してある、図6.1では、フェルールの回転角度 φ の大きいほうが、テーパ・フェルール及びステップ・フェルールに無関係に、ばらつき値 IL_{max} 、及び挿入損失の変化 ΔIL の値は大きくなる。従って、新たに提案したコネクタ部品を使用

したAPCコネクタは接続安定性の視点で従来のPCコネクタ部品を使用したAPCコネクタに比較して優れている。

6.5 まとめ

第6章では、第3章から第5章に記述したテーパ・フェルール付きAPCコネクタ及びステップ・フェルール付きAPCコネクタの接続特性の理論解析の結果を検証するために、次の3項目について実験を行った。

- (a) フェルールの先端形状及び回転角度 φ による挿入損失 IL
- (b) フェルールの回転角度 φ と増加挿入損失 ΔIL
- (c) 繰り返し着脱特性

その結果は次のように要約できる。

1) フェルールの先端形状及び回転角度 φ による挿入損失 IL

テーパ・フェルール付きAPCコネクタの挿入損失 IL が大きな値を示す要因として、曲率半径 R_1 、 R_2 に差異がある場合、フェルールの回転角度 φ が0度においても接触力 W_c が大きくなり、ばね力 W_0 では密着しない確率が増加することによる。

2) フェルールの回転角度 φ と増加挿入損失 IL

実験値の方が理論値より約0.2 dB程度の良い数値を示しているが、この理由としては、実験値は初期値を0 dBとして計算したからである。その他の理由としては、石英ガラス製光ファイバのヤング率はジルコニア・フェルールの約1/2と小さいので弾性変形し易く、光ファイバの半径より小さい領域を含めた接触力を考慮した場合、光ファイバ端面間の密着させる接触力が小さめになることが考えられる。これらの要素を考慮した場合、増加挿入損失 ΔIL の実験データは理論計算式から求めた挿入損失 IL の値にほぼ一致していると結論できる。

3) 繰り返し着脱特性

繰り返し着脱試験による挿入損失 IL のばらつき値 IL_{max} 、及び挿入損失の変化 ΔIL の値は、フェルールの回転角度 φ が大きくなるほど増加す

<第6章>

る。一方、ステップ・フェルール付きAPCコネクタの挿入損失のばらつき値 IL_{max} 、及び挿入損失の変化 ΔIL の値は、テーパ・フェルール付きAPCコネクタの値に比較して小さい値を示す。

以上の挿入損失に関する実験結果から、更に次のように再要約できる。

I) ステップ・フェルール付きAPCコネクタの挿入損失特性は、テーパ・フェルール付きAPCコネクタに比較して優れている。

II) 挿入損失特性及び安定性は、回転角度を規制したコネクタ部品を使用したAPCコネクタの方が優れている。

第6章参考文献

- [1] M. Takahashi, "Experimental Considerations for APC Optical Connectors with Slanted Angle of 8 degrees," Reports of The Graduate School of Electronic Science and Technology of Shizuoka Univ., Vol. 17, pp.89-95. 1996.
- [2] M. Takahashi, "Novel stepped-ferrule for angled convex polished optical fiber connector," Proc, OFC'95, San Diego, Technical Digest, pp. 184-185, 1995.
- [3] "Instruction manual for RM-3000," JDS Fitel INC, 1995.
- [4] "JIS C5961-1987, Test Methods for Connectors for Optical Fiber Cords," Japanese Industrial Standards Committee, 1987.
- [5] "JIS C9041-1968, Quality Control," Japanese Industrial Standards Committee, 1968.
- [6] 高橋光雄, "斜め球面接続光コネクタ用ステップ・フェルールの回転ずれによる挿入損失の増加," 電子情報通信学会論文誌C-II, (1997年8月投稿)
- [7] M. Takahashi, "Connections of APC Optical Connectors with Stepped-Ferrules," IEEE, Journal of Lightwave Technology. (Submitted in August 1997. Assigned No. 3610)

第7章 結 言

7.1 本論文のまとめ

本研究では、シングルモード光ファイバ用光コネクタの実用化の前提となっていた、光ファイバ端面の斜め球面研磨装置に関する研究に関しては、公転と自転の複合円軌跡運動をする弾性研磨盤に、固定保持した光ファイバ付きフェルールを押し付けて行う新しい光ファイバ端面の斜め球面成形研磨法について提案し、新しい研磨装置の概要と特徴について記述した。次に、本研磨装置により成形された光ファイバ端面の斜め球面に関して理論的検討を加え、更に、評価実験から得られた斜め球面成形研磨の特性について記述した。

A P Cコネクタの挿入損失の改善に関する研究に関しては、最初に、テーパ・フェルールについて、斜め球面の形状特性、及び接続特性を理論解析した。その解析結果によってA P Cコネクタ用フェールの接続特性の改善に関する課題を明らかにした。その課題を解決するために、A P Cコネクタ用フェールとして、フェール先端部を段付き直円筒に成形した新しいステップ・フェール(Stepped-ferrule)を提案し、その形状特性と接続特性の理論解析を行なうと共に、接続実験のデータからステップ・フェール付きA P Cコネクタの優位性を明らかにした。

更に、フェール回転角度による挿入損失の増加を規制するために、新しい光コネクタの構成部品を提案し、挿入損失の実験によって、その有効性を明らかにした。以下に、本研究の主な内容及び特徴を要約する。

7.1.1 斜め球面成形研磨成形装置

第2章では、最初に、A P Cコネクタの大量生産に不可欠な、フェール端面の球面成形研磨装置を提案し、併せて本球面成形研磨装置による研磨特性の評価実験を行って、球面成形の研磨メカニズムを明らかにした。その結果は次のように要約できる。

1) 公転と自転の複合円軌跡運動をする弾性研磨盤に、固定保持した光ファイバ付きフェルールを押し付けて研磨を行う、新しい光ファイバ端面の斜め球面成形研磨装置は、実用上必要な機械特性及び光学特性を具備していることを実験データにより明らかにした。

2) フェルール端面の研磨球面の曲率半径 R は、フェルール端面の弾性研磨盤面への埋没深さ h と、フェルール先端部の半径 b とにより一意的に決定されることを実験的に示した。

3) 本研究による斜め球面成形研磨装置には球面の成形限界がある。ただし、フェルール先端部の半径 b が0.3 mm以上の場合、または弾性研磨盤の硬さ H_s が95以下の場合には、本論文の球面研磨法を適用できることを実験的に証明できた。

7.1.2 APCコネクタの接続特性

第3章では、APCコネクタに関する基本的な課題を明らかにするために、フェルール回転角度 $\varphi=0$ 度において、テーパ・フェルールの端面傾斜角度 θ_1 、及び斜め球面の曲率半径 R_1 と R_2 をパラメータとして、テーパ・フェルールの形状特性、及び接続特性に関する理論解析を行った。その解析結果は次のように要約できる。

1) APCコネクタにおいて、斜め球面頂点 P_c の光軸 ZZ に対する偏心 S_c 、接続時の各々フェルールの接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c 、光ファイバ端面のエアギャップ Z_c 、及びエアギャップ Z_c を消去するためのフェルール端面の接触力 W_c は、いずれも斜め球面の傾斜角度 θ_1 の関数として与えられる。

2) フェルールの接点 Q_c の光軸 ZZ に対する偏心 e_c は偏心 S_c の1乗の関数、エアギャップ Z_c は偏心 S_c の2乗の関数、フェルール端面の接触力 W_c は偏心 S_c の3乗の関数で与えられる。

3) 偏心 e_c 、エアギャップ Z_c 、及び接触力 W_c は、各々 $[R_1/(R_1+R_2)]$ 、 $[(R_1+R_2)/2R_1 \cdot R_2]$ 、及び $[(R_1+R_2)/R_1 \cdot R_2]$ の関数である。斜め球面頂点 P_c の光軸 ZZ に対する偏心 S_c のみが曲率半径 R の関数となる。

4) 曲率半径 R_1 と R_2 に差異があるときは、曲率半径 R_1 と R_2 が同一の場合に比較して、偏心 e_c 、エアギャップ Z_c 、及び接触力 W_c は各々増加する。曲率半径 R_1 と R_2 の減少に伴って、偏心 e_c 、エアギャップ Z_c 、及び接触力 W_c は各々減少する。

5) APCコネクタにおいて、斜め球面の接点 Q_c の接触角度 ψ_c は、斜め球面の傾斜角度 θ_1 、及び斜め球面の曲率半径 R_1 と R_2 の関数である。また、 ψ_c の数値は常に θ_1 より小さい。

6) エアギャップ Z_c が消去できない場合の挿入損失 IL は、各々フレネル損失 IL_F 、多重反射損失 IL_R 、及びエアギャップ Z_c の大きさによる光ファイバ減衰による損失 IL_A を合算したものになる。

第4章では、テーパ・フェルールが回転した状態で接続された場合の、APCコネクタの形状特性、及び接続特性に関する普遍的な課題を明らかにするために、フェルール回転角度 φ が0度から10度の範囲において、テーパ・フェルールの端面傾斜角度 θ_1 、斜め球面の曲率半径 R_1 と R_2 などをパラメータとして、テーパ・フェルール付きAPCコネクタの形状特性、及び接続特性に関する理論解析を行なった。解析結果は次のように要約できる。

1) 曲率半径 R_1 、 R_2 が同一の値の組合せの接続では、偏心 e_c は、フェルールの回転角度 φ に、ほぼ直線的に比例して増加する。一方、曲率半径 R_1 、 R_2 に差異がある組合せの接続では、フェルール回転角度 φ が6度以下の範囲においては、yy座標上の偏心 e_{cy} の影響を受けて、偏心 e_c はフェルール回転角度 φ に直線的には増加しない。

2) フェルール回転角度 φ が10度以下の範囲では、斜め球面の接点 Q_c の接触角度 ψ_c は、フェルール回転角度 φ による影響を殆ど受けない。

3) エアギャップ Z_c は、斜め球面の傾斜角度 θ_1 、曲率半径 R_1 と R_2 、及びフェルールの回転角度 φ の関数として与えられる。

4) エアギャップ Z_c を消去するための所要接触力 W_c は、斜め球面の傾斜角度 θ_1 、曲率半径 R_1 と R_2 、及びフェルールの回転角度 φ の関数

として与えられる。

5) 斜め球面の曲率半径 R_1 及び R_2 が異なる組合せの場合、特に、斜め球面の端面傾斜角度 θ_1 が 12 度、及び曲率半径 R_1 , R_2 に差異がある組合せの接続では、フェルール回転角度 φ が 0 度においても、斜め球面の接点 Q の光軸 ZZ からの偏心の yy 座標成分 e_{cy} により挿入損失 IL は大きい値を示す。挿入損失 IL は光ファイバ端面間の多重反射による影響により、その値は不規則に変化する。

以上の解析結果を再要約すれば、テーパ・フェルール付き APC コネクタの接続特性として、斜め球面の接点 Q_c の偏心 e_c 、エアギャップ Z_c 、および所要接触力 W_c は、フェルールの回転により拡大されると結論できる。

第5章では、第3章、及び第4章で問題提起したテーパ・フェルール付き APC コネクタの課題を解決している。すなわち、第5章ではステップ・フェルール付き APC コネクタを新たに提案し、この新しい APC コネクタについて、フェルール回転角度 $\varphi \geq 0^\circ$ の条件における形状特性、及び接続特性の理論解析を行って、その優位性を明らかにした。更に、接続特性を改善するために、APC コネクタの構成部品の設計仕様の改善を提案した。これらは、次のように要約できる。

1) 斜め球面の頂点 P_{s1} の光軸 ZZ からの偏心 S_s は、テーパ・フェルールに比較して $1/15$ から $1/35$ と無視できる程度に低減できる。

2) 斜め球面の接点 Q_s の光軸 ZZ からの偏心 e_s は、曲率半径 R_1 , R_2 の差異には無関係であり、偏心 e_s はフェルールの回転角度 φ にほぼ直線的に比例する。

3) 斜め球面の接点 Q_s の接触角度 ψ_s は、フェルールの回転角度 φ による影響を殆ど受けず微小である。

4) 光ファイバ端面間に生ずるエアギャップ Z_s は、回転角度 φ の一次関数として近似される。

5) 所要接触力 W_s は, 斜め球面の傾斜角度 θ_1 , 斜め球面の曲率半径 R_1 と R_2 , 及び フェルールの回転角度 φ の関数として与えられる.

6) フェルール回転角度 φ による挿入損失 IL の値は, フェルール回転角度 φ を超える領域では増加する.

第6章では, 第3章から第5章に記述したテーパ・フェルール付き APC コネクタ及びステップ・フェルール付き APC コネクタの接続特性の理論解析の結果を検証するために, 次の3項目について挿入損失の実験を行った.

- (a) フェルールの先端形状及び回転角度 φ による挿入損失 IL
- (b) フェルールの回転角度 φ と増加挿入損失 ΔIL
- (c) 繰り返し着脱特性

その結果は次のように要約できる.

1) フェルールの先端形状及び回転角度 φ による挿入損失 IL の実験に関して, テーパ・フェルール付き APC コネクタの挿入損失 IL が大きな値を示す要因として, 曲率半径 R_1 , R_2 に差異がある場合, フェルールの回転角度 φ が0度においても接触力 W_c が大きくなり, ばね力 W_0 では密着しない確率が増加することによる.

2) フェルールの回転角度 φ と増加挿入損失 ΔIL の実験に関しては, 実験値の方が理論値より約0.2 dB程度の良い数値を示しているが, この理由としては, 実験値は初期値を0 dBとして計算したからである. その他の理由としては, 石英ガラス製光ファイバのヤング率はジルコニア・フェルールの約1/2と小さいので弾性変形し易く, 光ファイバの半径より小さい領域を含めた接触力を考慮した場合, 光ファイバ端面間の密着させる接触力が小さめになることが考えられる. これらの要素を考慮した場合, 増加挿入損失 ΔIL の実験データは理論計算式から求めた挿入損失 IL の値にほぼ一致していると結論できる.

3) 繰り返し着脱特性に関しては, 繰り返し着脱試験による挿入損失

IL のばらつき値 IL_{max} , 及び挿入損失の変化 ΔIL の値は, フェルールの回転角度 φ が大きくなるほど増加する. 一方, ステップ・フェルール付きAPCコネクタの挿入損失のばらつき値 IL_{max} , 及び挿入損失の変化 ΔIL の値は, テーパ・フェルール付きAPCコネクタの値に比較して小さい値を示す.

以上の挿入損失に関する実験結果から, 更に次のように再要約できる.

I) ステップ・フェルール付きAPCコネクタの挿入損失特性は, テーパ・フェルール付きAPCコネクタに比較して優れている.

II) 挿入損失特性及び安定性は, 回転角度を規制したコネクタ部品を使用したAPCコネクタの方が優れている.

7.2 本研究成果の実績と応用

APCコネクタ用フェルールとしては, 本研究の成果にもとずいて提案されたステップ・フェルールは, ほぼ国際的に主流になっている. すなわち, ステップ・フェルールの形式は, 1997年にIEC 874-14-7, SC/APCコネクタの国際規格に正式に採用された[1],[2]. 更に, ステップ・フェルールに関する高橋の特許の通常実施権は, 国内外のフェルール製造者, 及び需要者の数社に供与されている.

本研究により提案, 実用化した光ファイバ端面の新しい球面成形研磨方式における研磨原理, 及び偏心盤の同期回転により研磨盤を公転させる駆動機構は, 近年に至って, 他社から市場に新しく提供されるようになった球面成形研磨装置の設計標準となっている.[3],[4],[5],[6]. ただし, 高橋により提案された斜め球面成形研磨装置は, 世界の70%以上の市場占有率を保持している.

更に, 本研究による研磨装置は, 加工物を回転させないで鏡面ラッピングできる特徴をもっているので, 本研磨装置の原理及び研磨装置の構造は, 加工物を回転できない形状, 及び構造をもっている部品や材料の鏡面ラッピング装置にも広く応用できる可能性を備えている. 従って,

<第7章>

光コネクタ以外の光デバイス, 及び一般の機械工業や電子工業分野へも適用できるものと考えられる.

第7章参考文献

- [1] International Electrotechnical Commission, "INTERNATIONAL STANDARD IEC-874-14-16. DETAIL SPECIFICATION FOR FIBRE OPTIC CONNECTOR TYPE SC-APC TUNED 9 DEGREES FOR SINGLE MODE FIBRE TYPE," published at May, 1997.
- [2] International Electrotechnical Commission, "INTERNATIONAL STANDARD IEC-874-14-XX. "DETAIL SPECIFICATION FOR FIBRE OPTIC CONNECTOR TYPE SC-APC TUNED 8 DEGREES FOR SINGLE MODE FIBRE TYPE," May published within 1997.
- [3] "光コネクタ研磨機," OPTOCOM誌, No. 83. (1996) 25-29.
- [4] "SP-500 POLISHING MACHINE OPERATION MANUAL," Siecor Co., LTD, Feb, 1997.
- [5] "APM Polishing Machine Operating Instruction ," Domaille Engineering, INC, 1997.
- [6] "OFL12 シリーズ研磨機取扱説明書," セイコー電子工業株式会社, No. 39NPM-53EI-01, 1997.

本研究に関する発表論文

[有審査論文]

- [1] M. Takahashi, "Variable Light Attenuator of Improved Air-gap Type with Extremely Low Returning Light," Proc, IEEE IMTC/94, Vol. 2, pp. 947-950, (May, 1994).
- [2] M. Takahashi, "Compatibility of Conventional-Ferrule with Step-Ferrule for Angled Convex Optical Connectors," Proc, 45th IEEE ECTC, pp. 406-412, (May, 1995).
- [3] M. Takahashi, "Novel Stepped ferrule for angled convex polished optical fiber connector," Proc, IEEE OFC' 95. Vol. 8, pp. 184-185, (Feb, 1995)
- [4] M. Takahashi, "Compatibility for optical connectors with different slanted angles at their ferrule endfaces," Proc, IEEE CLEO / Pacific Rim'95. pp. 304. (July, 1995).
- [5] 高橋光雄, "斜め球面研磨光コネクタの接続端面角度差異による互換性," 日本電子部品信頼性センタ, RCJ 第4回電子デバイスの信頼性シンポジウム、pp. 39 - 45, (11, 1995)
- [6] M. Takahashi, "Experimental Considerations for APC Optical Connectors with Slanted Angle of 8 degrees", Reports of The Graduated School of Electronic Science and Technology of Shizuoka Univ. Vol. 17, pp.89-95. (1996)
- {7} 高橋光雄, "光ファイバ端面の斜め球面研磨装置とその研磨実験," 精密工学会, (1996年4月投稿.1997年7月見直し再提出) .
- [8] M. Takahashi, "Elastic Polishing Plate Method and Conditions for Forming Angled Convex Surface on Ferrule Endface," IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol. 15, No. 9, pp. 1675 - 1680, September, 1997.
- [9] M. Takahashi, "Generating Mechanism of Maintaining Force for Optical Fiber Installed in Ferrule Hole," IEEE Journal of Lightwave Technology. (Accepted subject to minor revision, October, 1997. Assigned No, 3250)
- [10] M. Takahashi, "Improved Design of APC connector with Slanted Angle of 12

- degrees for Dispersion Shifted Optical Fiber,” IEEE Journal of Lightwave Technology. (Accepted subject to minor revision, October, 1997. Assigned No. 3371).
- [11] M. Takahashi, “ Connections of APC Optical Connectors with Stepped-Ferrules,” IEEE Journal of Lightwave Technology. (Submitted in August, 1997. Assigned No. 3610)
- [12] 高橋光雄, “ 斜め球面接続光コネクタ用ステップ・フェルールの回転ずれによる挿入損失の増加, ” 電子情報通信学会論文誌 C-Ⅱ, (1997年11月条件付採録決定) .

[口頭発表論文]

- [13] 高橋光雄, “光コネクタの温度特性に及ぼす要因の一考察, ” 電子情報通信学会. Vol. R95-45, pp. 57-62. (02, 1996)
- [14] 呉玉英, 高橋光雄, “高性能型光分波器, ” 電子情報通信学会. 1997総合大会, pp. C-3-47.

本研究内容が採録された国際規格

- [1] International Electrotechnical Commission, " INTERNATIONAL STANDARD IEC-874-14-16. DETAIL SPECIFICATION FOR FIBRE OPTIC CONNECTOR TYPE SC-APC TUNED 9 DEGREES FOR SINGLE MODE FIBRE TYPE," Published in May, 1997.
- [2] International Electrotechnical Commission, " INTERNATIONAL STANDARD IEC-874-14-XX. “DETAIL SPECIFICATION FOR FIBRE OPTIC CONNECTOR TYPE SC-APC TUNED 8 DEGREES FOR SINGLE MODE FIBRE TYPE," To be published by the end of 1997.

本研究に関する取得特許

(日本及びE U特許は重複するので, US Patentのみ記載)

- [1] M. Takahashi, "Optical Fiber Connector," US Patent. No. 4,747,659. May 23, 1989.
- [2] M. Takahashi, "Optical Fiber Connecting Device," US Patent. No. 4,953,941. Sept 4, 1990.
- [3] M. Takahashi, "Optical Fiber end-surface Polishing Device," US Patent. No. 4,979,334. Dec 25, 1990.
- [4] M. Takahashi, "Variable Optical Light Attenuator," US Patent. No. 5,066,094. Nov 19, 1991.
- [5] M. Takahashi, "Optical Power Attenuator of Variable Attenuation Type," US Patent. No. 5,136,681. Aug 4, 1992.
- [6] M. Takahashi, "Optical Connector Ferrule," US Patent. No. 5,140,660. Aug 18, 1992.
- [7] M. Takahashi, "Method and Apparatus for Grinding Foremost End Surface of a ferrule," US Patent. No. 5,216,846. June 8, 1993.
- [8] M. Takahashi. "Method for Grinding Ferrules For Ribbon Type Optical Connectors," US Patent. No. 5,265,381. Nov 30, 1993.
- [9] M. Takahashi, "Optical Fiber Termination Device," US Patent. No. 5,337,377. Aug 9, 1994.
- [10] M. Takahashi. "Apparatus For Grinding Endfaces of Ferrules Together with Optical Fibers Each Firmly Received in Ferrule," US Patent. No. 5,351,445. Oct 4, 1994.
- [11] M. Takahashi, "Optical Demultiplexing/Multiplexing Device," US Patent. No. 5,400,421. Mar 21, 1995.
- [12] M. Takahashi, "Light Attenuating Element and Method of Producing the same," US Patent. No. 5,267,342. Jul 2, 1996.
- [13] M. Takahashi, "Optical Fiber End-Surface Polishing Device," US Patent. No. 5,547,418. Aug 20, 1996.

付録 1

A.1 分散シフト光ファイバの反射戻り光特性

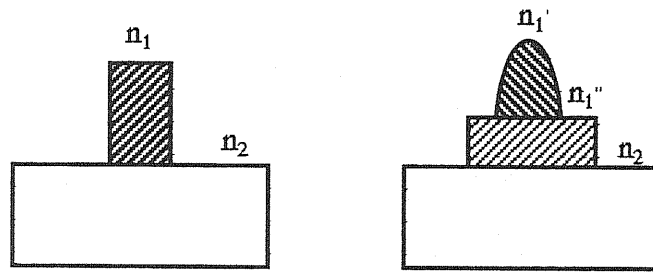
A.1.1 分散シフト光ファイバ

石英系シングルモード光ファイバの伝送損失が1.550 μm 帯で最小であることを生かして、大容量（高速でもある）の光信号の通信を行うには、分散も1.550 μm 帯で最小にしなければならない。このためには、光ファイバの屈折率分布形状を変えて構造分散を変え、ゼロ分散波長を1.550 μm 帯にシフトさせる。このとき、カットオフ波長は勿論1.550 μm 以下にする。これが分散シフト光ファイバであるが、通常のシングルモード光ファイバに適用されているステップ・インデックス形で分散をシフトさせるとすると、光ファイバのモードフィールド直径が5 μm 以下となって実用的でない。そこで、図A.1.1 (a)の通常のステップ・インデックス形シングルモード光ファイバの屈折率分布ではなく、図A.1.1 (b)のような屈折率分布をもつデュアル・コア形の構造のものが日本では実用化されている[1],[2]。

この場合、分散シフト光ファイバのモードフィールド直径は約8～8.2 μm であり、通常のステップ・インデックス形シングルモード光ファイバのモードフィールド直径である約9～9.2 μm に比較して小さくなる。更に、ジルコニア・フェルールに組み込まれた光ファイバは、エポキシ接着剤のキュアリング温度以下の温度領域では、直径方向の圧縮応力により、見かけのモードフィールド直径は、温度に応じて若干小さくなる[3],[4]。

ここで、光ファイバ端面からの反射戻り光 B_R は第1章の式(1.5)で与えられる[5],[6]。

図A.1.2は、ステップ・フェルールに分散シフト光ファイバを組み込んで、斜め球面の傾斜角度 θ_1 を8度から12度まで1度おきに変えて成形研磨したAPCコネクタについて行った反射戻り光の実験値をプロットしたものである[7]。図A.1.2では、光の波長を1.310 μm 及び1.550 μm の2種類についての反射戻り光 B_R を測定した。図A.1.2から、反



(a). Step index type

(a). Dual core index type

図 A.1.1 シングルモード光ファイバの屈折率分布，及び分散シフト光ファイバの屈折率分布の例

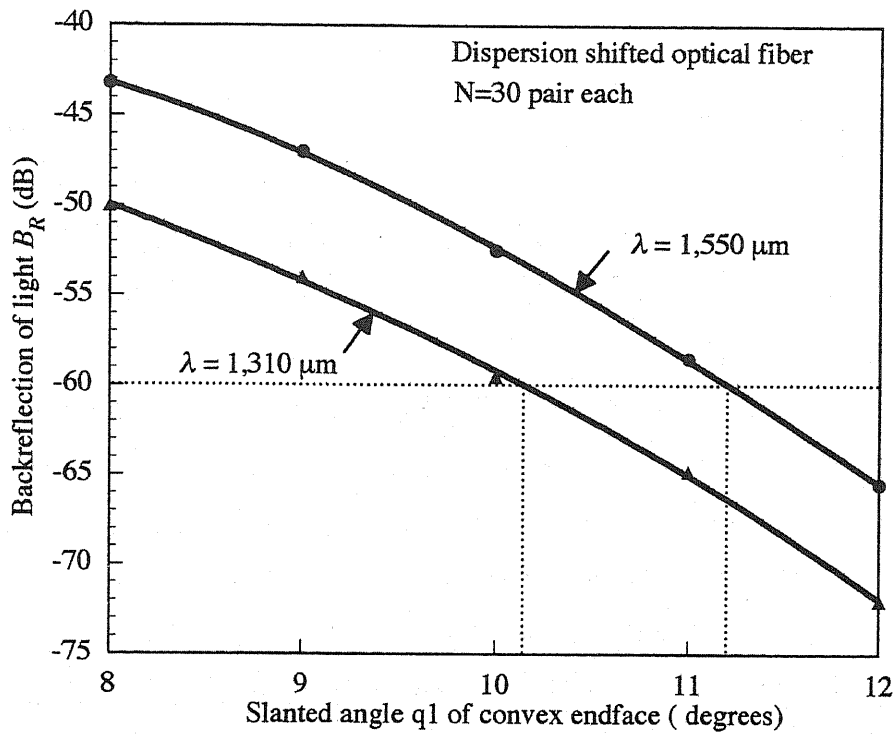
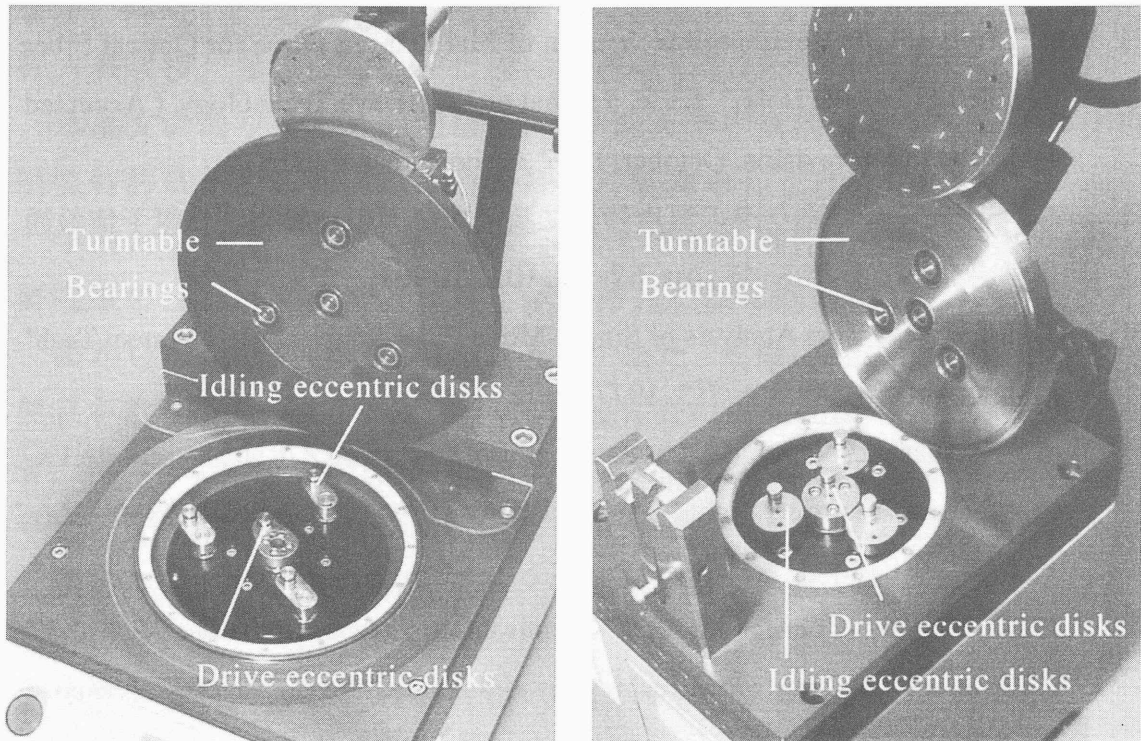


図 A.1.2 分散シフト光ファイバ付きAPCコネクタの斜め球面の傾斜角度 θ_1 の変化による反射戻り光 B_R の実験値

射戻り光 B_R を -60 dB 以下にするに要する斜め球面の傾斜角度 θ_1 は、光の波長が $1.310 \mu\text{m}$ については約 10 度以上、及び $1.550 \mu\text{m}$ については 11 度以上になる。

付録 2

図 A.2.1 (a), (b)は、本研究の成果である、”同期回転する偏心盤による研磨盤の公転駆動方式、”と”弾性研磨盤、”を採用して構成された他社の球面研磨装置の例の写真である[7]-[10].



(a). A.

(b). B.

図 A.2.1 ”同期回転する偏心盤による研磨盤の公転駆動方式、”を採用した他社の球面研磨装置の例

付録参考文献

- [1] 大久保勝彦, " ISDN時代の光ファイバ技術," 利理工学社, pp. 4/10-4/11, 1989.
- [2] 重松昌行, 他, " 1.55mm 帯分散シフトファイバの開発," 住友電工, vol. 130, pp. 1-6, 1987.
- [3] M. Takahashi, " Generating Mechanism of Maintaining Force for Optical Fiber Installed in Ferrule Hole," IEEE Journal of Lightwave Technology. (Accepted subject to minor revision, October, 1997. Assigned No, 3250).
- [4] 高橋光雄, "光コネクタの温度特性に及ぼす要因の一考察," 電子情報通信学会. Vol. R95-45, pp. 57-62. (02, 1996)
- [5] D. Marcuse, " Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices," Bell System Tech' Journal, Vol. 56, No. 5, p. 713, 1977.
- [6] M. Takahashi, " Variable Light Attenuator of Improved Air-gap Type with Extremely Low Returning Light," Proc, IEEE IMTC/94, Vol. 2, pp. 947-950, (May. 1994).
- [7] M. Takahashi, " Connections of APC Optical Connectors with Stepped-Ferrules," IEEE Journal of Lightwave Technology. (Submitted in August, 1997. Assigned No. 3610)
- [8] " 光コネクタ研磨機 ," OPTOCOM 誌 , No. 83. (1996) 25-29.
- [9] " SP-500 POLISHING MACHINE OPERATION MANUAL," Siecor Co., LTD, Feb, 1997.
- [10] " APM Polishing Machine Operating Instruction ," Domaille Engineering, INC, 1997.
- [11] " OFL12 シリーズ研磨機取扱説明書," セイコー電子工業株式会社, No. 39NPM-53EI-01, 1997.

謝 辞

本研究をまとめる機会を与えて頂き、国際会議での発表の場のご紹介並びにサポートを頂き、また、論文の取りまとめに際して、ご懇切なご指導を賜わった静岡大学工学部の池田弘明教授には心から感謝申し上げます。同時に、光学に関するご懇切な講義をして頂いた久保高啓教授、皆方誠教授、篠原茂信教授に深く感謝申し上げます。

本論文の取りまとめのために、大学院入学の動機付けを頂いた井ノ口国際特許事務所の井ノ口寿所長に深く感謝申し上げます。

学内において、事務処理、通信連絡その他の用件で、お世話を頂いた、研究室の吉田博文技官、澤木年子教務員に深く感謝申し上げます。

暖かいご鞭撻並びにご支援を頂き、また、支障のないように業務上の便宜を取り計らって頂いた国内外の顧客先の皆様に深く感謝申し上げます。特に、高橋の国際会議における論文発表に際してご支援を頂いた、年来の友人である Dr. Joseph Straus に深く感謝申し上げます。

私的には、本論文の実験データの作成、並びに論文のとりまとめにご協力頂き、また、業務に支障のないように私を支えて頂いた株式会社精工技研の役員、及び社員の皆様に感謝いたします。