

第5節 新しいフェルールの開発—結晶化ガラスフェルール—

1 はじめに

光通信の本格的な普及に伴いシステムの経済化が急務になっている。光通信網においては、光ファイバを着脱可能な状態で接続するための光コネクタが大量に必要とされ、システムの経済化には光コネクタの低価格化が必須である。中でもフェルールは光コネクタの構成部品のうちコスト比率が最も高いため、低価格化の効果が大きい。図 4.40 に代表的な光コネクタの接続原理を示す。光ファイバは、フェルールの中心孔に

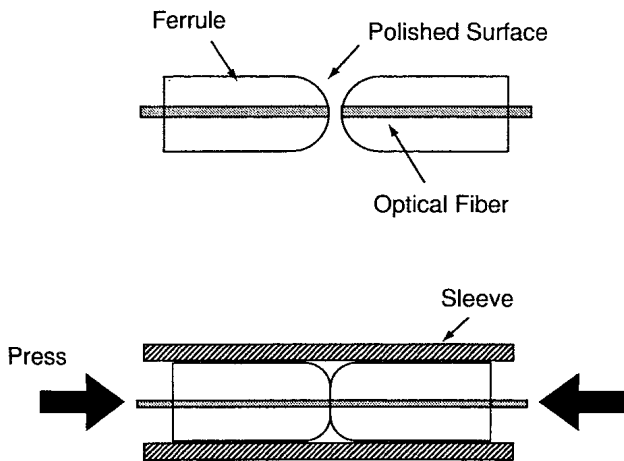


図 4.40 光コネクタの接続原理

挿入・接着固定された後、先端をフェルールと共に球面状に研磨される。次いでフェルールを両側からアライメントスリーブに挿入して押圧すると、フェルールおよび光ファイバの弾性変形によって先端が密着し光信号の伝送が可能になる。

二本の光ファイバを正確に対向させるため、フェルールにはサブミクロンの寸法精度が要求される。さらに、繰り返しの接続に対する耐磨耗性、高い曲げ強度、および温湿度の変化に対しても形状や物性が変化しないこと（環境安定性）が求められる。現在、フェルールには主にジルコニアやホウ珪酸ガラスが使用されているが、ジルコニアフェルールは精密加工に手間がかかり

低コスト化には限界があると見られている。また、ホウ珪酸ガラスフェルールは耐磨耗性や強度が低いため適用領域が限定される。低コストでかつ信頼性の高いフェルールの開発をめざして、ここ数年、結晶化ガラスやプラスチックを用いたフェルールの研究が活発に行われてきた¹⁻⁶⁾。中でも結晶化ガラスフェルールは既に量産技術が確立され各種の信頼性試験も終了しており、まさに実用化の段階を迎えている。本稿では新しいフェルールとして結晶化ガラスフェルールをとりあげ、その製法や材質の特徴および光コネクタとしての性能について解説する。

2 結晶化ガラスフェルールの製造方法

結晶化ガラスフェルール（Glass-Ceramic Ferrule, 以下 GCF）は、光ファイバやガラス毛細管の製造に用いられる線引き法によって製造される。線引き法は、プリフォームと呼ばれる予備成形ガラスを加熱・延伸して成型する方法で、精密な寸法を有するガラス製品を大量生産するのに適した方法である。以下に、結晶化ガラス毛細管を得るためのプリフォームの材料設計と得られた毛細管の特性について述べる。

2.1 結晶化プリフォーム

一般に線引きは、加熱しても結晶化や分相等が起こらない熱的に安定なガラスを用いて行われる。これに対して結晶化ガラスの原ガラス（結晶化前の非晶質ガラス）は、加熱によって結晶が析出するように組成設計されているため、原ガラスを線引きすることは事実上不可能である。この問題を解決するため、予め結晶化させたプリフォームが開発された。プリフォームを予め結晶化させておくことで熱的安定性を高め、加熱時に結晶を析出させることなく延伸することを目的としている。線引きを可能にするために、結晶化プリフォームには以下の特性が求められる。すなわち、① 線引き

に適した結晶化度を有すること, ② 線引き温度でも析出結晶が安定であること, ③ 残存ガラス相が表面結晶化に対して安定であること, である. 以下に GCF の製造に使用される結晶化プリフォームについてその材質的特徴を述べる.

本結晶化プリフォームの基本組成は, $\text{Li}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系であり, 析出結晶は β -スポジューメン固溶体 ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$, $n \approx 6$) である. 固溶体中の SiO_2 モル比 (n) がおよそ 6 であることは X 線回折によって確認した. この結晶化ガラスは熱的に安定で, 高強度, 高化学耐久性さらに低熱膨張といった特徴を有しており, フェルールの基本組成として適している. 結晶化プリフォームに要求される上記の三つの条件のうち先ず結晶化度について述べる. 図 4.41 は $\text{Li}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系のガラス組成を, β -スポジューメン固溶体を一つの頂点とする三角図で表したものである. 図中の各点に付した数値は各組成点における飽和結晶

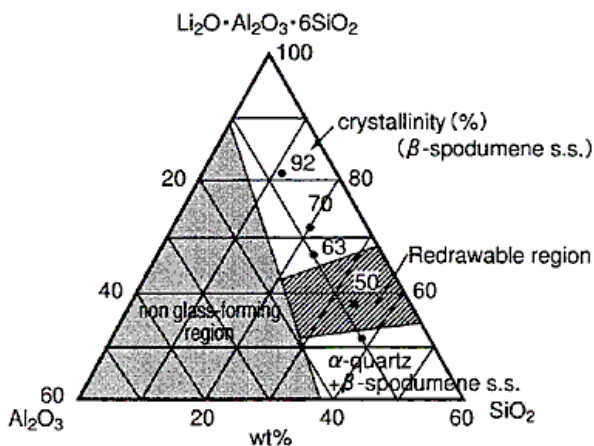


図 4.41 線引き成形可能な結晶化プリフォームの基本組成域

化度 (重量%) を示したもので, 残りはガラス相である. 飽和結晶化度は, β -スポジューメン固溶体の組成比にほぼ対応して変化し, 組成が β -スポジューメン固溶体の頂点から離れるにつれて飽和結晶化度が低下 (残存ガラス相が増加) することがわかる. ただし, ある範囲をこえると異種結晶 (α -石英) が析出し再び結晶化度は増加する. 結晶化度と線引きの可否の関係を

実験的に調査した結果, 基本組成が斜線で示した領域にあれば線引き成形が可能であることを確認した. つまり, 線引き可能な結晶化プリフォームの飽和結晶化度はおよそ 50 重量%である.

次に線引き温度における析出結晶の安定性について述べる. 一般に線引き成形は, プリフォームの粘度がおよそ $10^{5.5} \sim 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ である温度で行われる. 従って結晶化プリフォームには, この温度域において結晶相の融解や転移が起こらないことが求められる. 図 4.42 は温度に対する本結晶化プリフォームの粘度変化と発熱挙動を示したものである. 粘度変化は平行板式粘

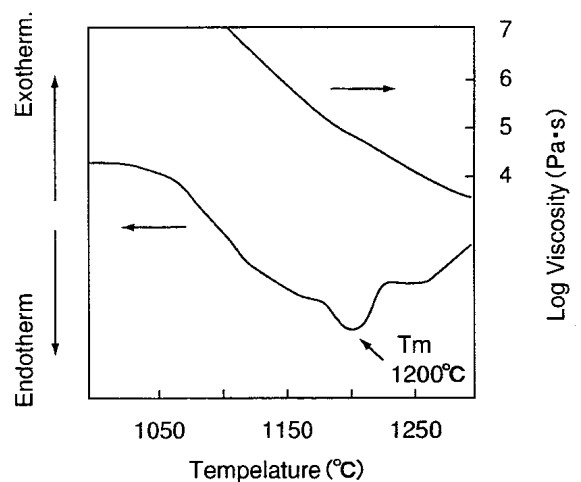


図 4.42 結晶化プリフォームの粘度と熱挙動

度計, 発熱挙動は DTA によって調査した. 図の粘度曲線から, この結晶化プリフォームの線引き温度 (粘度: $10^{5.7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) は約 1150°C であることが分かる. 一方, DTA 曲線の吸熱ピークの位置から, 析出結晶の融点 (T_m) は線引き温度よりも高い 1200°C であることが分かる. また, 結晶の転移に相当する発熱ピークは見られない. これらのことは, 本プリフォームを線引き温度へ再加熱しても, 結晶相の融解や転移が起こらないことを示している.

結晶化プリフォーム中の残存ガラス相の安定性は表面結晶化に影響を及ぼす. つまり, 線引きによってプリフォームの表面積は著しく増加するので, プリフォームが飽和結晶化度に達していても残存ガラス相が結晶化に対して安定でなければ, 新たに生じた表面でエネ

ルギーを獲得して結晶を析出することがある．これを防止するためには，対象となる結晶が析出しにくいような添加物質を加えるなどして残存ガラス相の組成を調整する必要がある．

以上の設計概念によって作製された $\text{Li}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系結晶化プリフォームの内部構造を図 4.43 に示す．析出結晶 (β -スボジューメン固溶体) の粒径はおよ

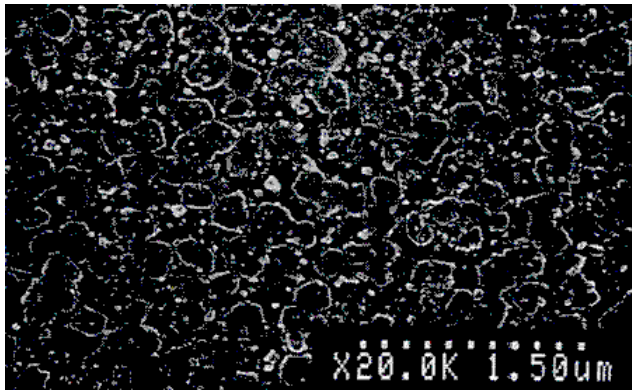


図 4.43 結晶化プリフォームの内部構造

よそ $0.3\mu\text{m}$ ，結晶化度は約 50 重量%である．以下にこの結晶化プリフォームを用いて線引き成形を行った結果について述べる．

3 線引き法による GCF の製造

線引きは，中心に孔を設けた結晶化プリフォームを 1150°C に保った加熱炉に一定速度で挿入し，他端をローラーで一定速度で引くことによって行った (図 4.44)．成形される毛細管の内外径は，プリフォームの送り速度，線引き速度，孔内の圧力等によって制御される．図 4.45 に結晶化プリフォームの軟化変形部分を示す．この図から結晶化プリフォームは，一般に線引き成形される非晶質ガラスと同じように，軸対称になめらかに延伸されていることが分かる．得られた結晶化ガラス毛細管は図 4.46 に示すように高い寸法精度を有しており，内外径の修正を行うことなくフェールに使用することができる．さらに予め結晶化されているため熱処理を必要とせず，切断，面取り，金属フランジの取り付け等の簡単な加工を経て GCF に仕上げられる

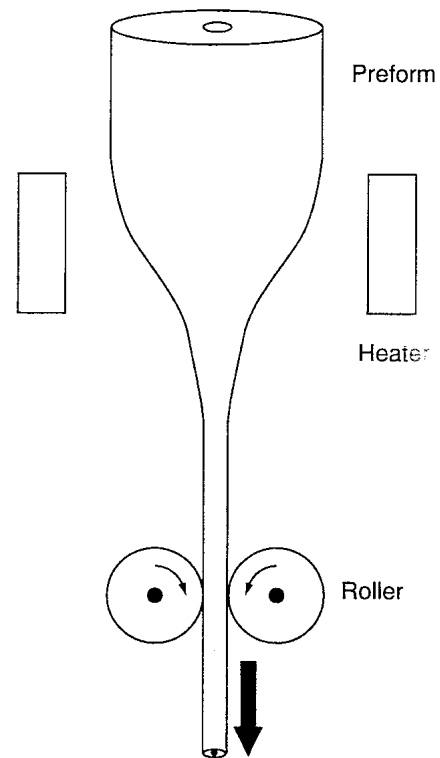


図 4.44 線引き成形 (概念図)

(図 4.47)．

表 4.4 に GCF の材料特性をジルコニア，シリカガラスおよびホウ珪酸ガラスと比較して示す．GCF の特徴として，硬さおよび被研磨速度が光ファイバ材質であるシリカガラスに近い，ヤング率が小さい，熱膨張係数がシリカガラスに近い，さらに高温高湿環境下でも寸法変化を起こさないという点が挙げられる．曲げ強度はジルコニアより低いものの，シリカガラスやホウ珪酸ガラスに比べてはるかに高く，実用上十分なレベルと考えられる．廣瀬ら⁷⁾は GCF を用いて光コネクタを作製し強度に問題のないことを確認している．次項では，GCF を用いた光コネクタの特性を材料特性との関連において述べる．

4 GCF を用いた光コネクタの特性

4.1 接続特性

(1) ランダム接続特性

表 4.4 GCF の材料特性

	GCF	silica glass	ZrO ₂	B.S.*
Bending strength (MPa)	700 (700)**	140	1350	250
CTE ($\times 10^{-7}/K$)	30	6	85	50
Young's Modulus (GPa)	80	70	190	70
Vickers Hardness	700	760	1200	550
Rubbing rate*** ($\mu m/min.$)	21	26	2	34
Volume Change** (ppm)	N.D.	N.D.	1000	N.D.

*Borosilicate Glass

**85 °C, 90%R.H., 1500H

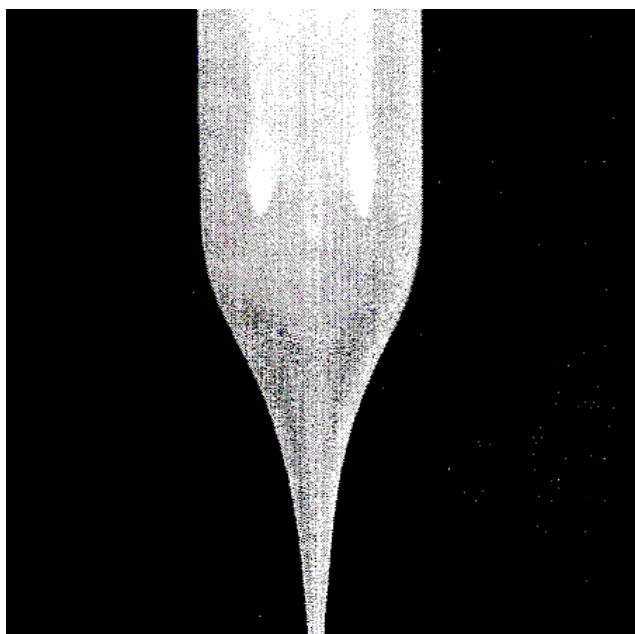
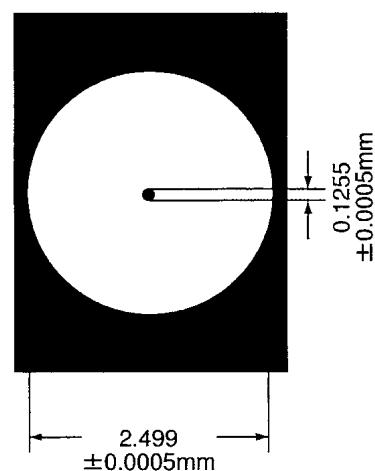
***Al₂O₃#1200, 24.5kPa

図 4.45 線引きされた結晶化プリフォームの軟化変形部分

図 4.48, 図 4.49 に GCF を用いた SC 型 (外径 2.5mm), MU 型 (外径 1.25mm) 光コネクタのランダム接続特性 (無調心) を示す. 実験に用いた光ファイバは 1.3 μm 零分散 SMF である. 図から分かるように接続損失は平均 0.1dB 以下, 最大でも 0.25dB 以下であり十分実用レベルにあることが確認された. また, 廣瀬ら⁸⁾ は GCF を用いた光コネクタでは, フェルール先端の球面半径および研磨面からの光ファイバの引き



Concentricity : <0.001mm

Roundness : <0.001mm

図 4.46 結晶化ガラス毛細管の断面

込み量の変動に対して, 光接続の安定性がジルコニアフェルールよりも優れていることを確認している. これは GCF のヤング率がジルコニアに比べて小さくシリカガラスに近似しているため, 光接続に必要なフェルール先端の弾性変形がジルコニアよりも小さな応力で達成されるためである.

(2) 繰り返し接続特性

図 4.50, 4.51 に GCF を用いた SC 型および MU 型光コネクタにおいて, 500 回の繰り返し接続を行った場合の接続損失の変化を示した. 実験にはジルコニア

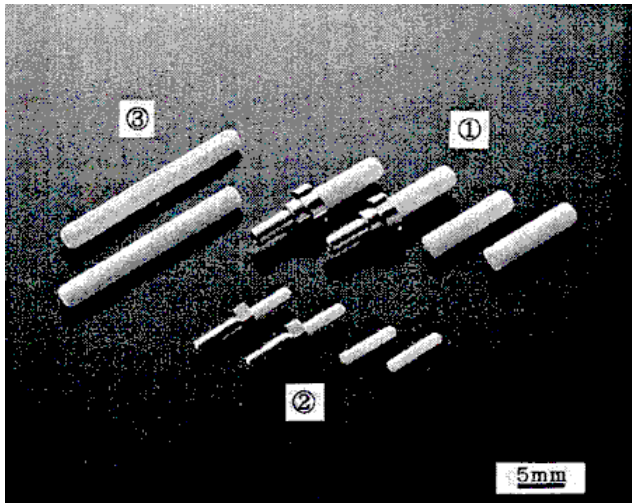


図 4.47 GCF 製品

① SC 型 (外径 2.5mm), ② MU 型 (外径 1.25mm), ③ 固定減衰器用 (外径 2.5mm),

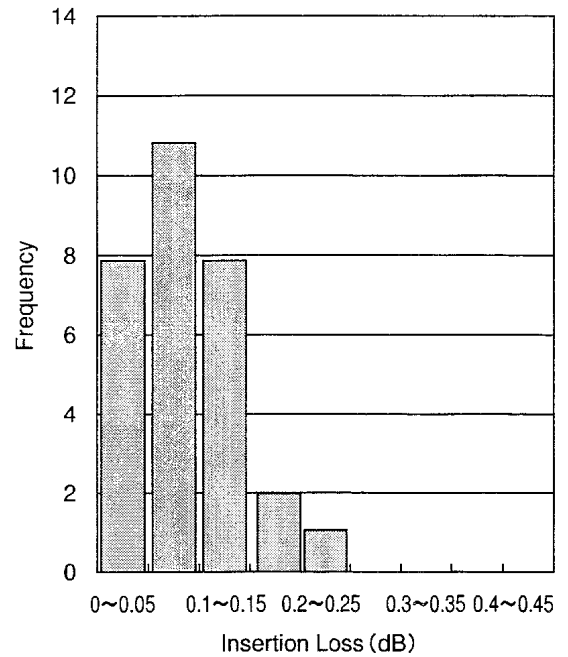


図 4.49 GCF を用いた MU 型光コネクタのランダム持続特性

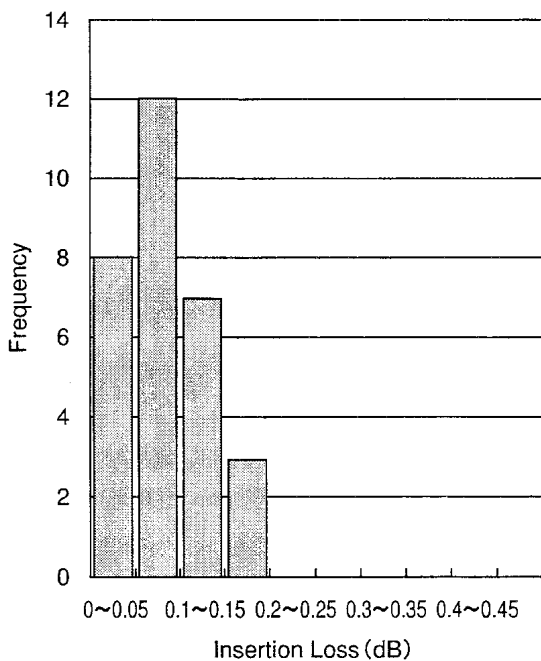


図 4.48 GCF を用いた SC 型光コネクタのランダム接続特性

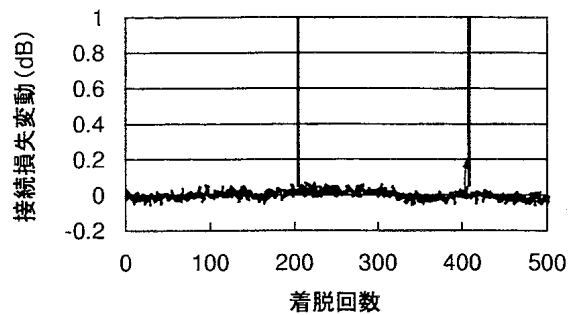


図 4.50 GCF を用いた SC 型光コネクタの繰り返し接続試験

製アライメントスリーブを用いた。毎回の接続ごとに接続損失の測定を行い、変化量が 0.2dB 以上となった場合にのみフェルール先端およびスリーブ内を清掃した。図から明らかなように、いずれの場合も 500 回中 2 回の清掃が必要であっただけで清掃後に接続損失はもとのレベルに回復した。500 回の繰り返し接続後も接続損失の変動はほぼ 0.1dB 以内であり、GCF 表面に傷の発生は見られなかった。これらの結果はジルコ

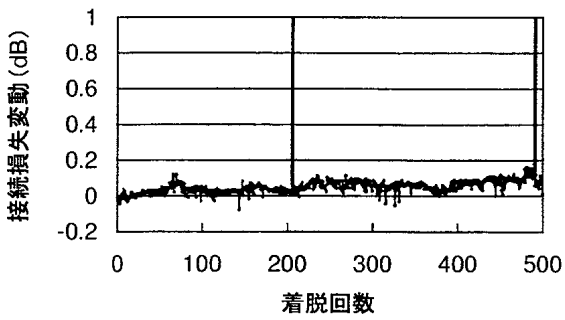


図 4.51 GCF を用いた MU 型光コネクタの繰り返し接続試験

ニアフェールを用いた場合の試験結果と同等であり、GCF が繰り返し接続に対して十分な信頼性を有していることが確認された。これは、非晶質ガラス製フェールに対する GCF の長所として最も顕著な点である。

4.2 研磨特性

光コネクタの低価格化を達成するにはフェールそのものの価格の他、アセンブリコストの低減が不可欠である。アセンブリコストの中でもフェールの先端研磨の占める割合が高い。表 4.5 に GCF とジルコニアフェールの研磨条件と反射減衰量を示す。GCF はジルコニアフェールに比べて少ない工程数で研磨を行うことができ、所定の反射減衰量を達成するための研磨時間をジルコニアフェールの 1/2 近くまで短縮できることが分かる。さらに、GCF は高価なダイヤモンド研磨材を必要とせず、生産性の向上の他、資材費の削減の面からも研磨費用を低減させることができる。これは、表 4.4 に示したように GCF の被研磨特性がジルコニアに比べてはるかにシリカガラスに近いためである。

4.3 環境安定性

光コネクタは屋外での使用においても高い信頼性を有していることが必要で、気温の変化に対する接続安定性は重要な評価項目となる。表 4.4 に示したように、GCF は高温高湿環境下でも体積変化や強度劣化を起

こさない材質であるが、光コネクタとしてより詳細な検討が行われている。図 4.52、4.53 に GCF を用いた SC および MU 型光コネクタに熱サイクルを与えた場合の接続損失および反射減衰量の変化を示す。実験の

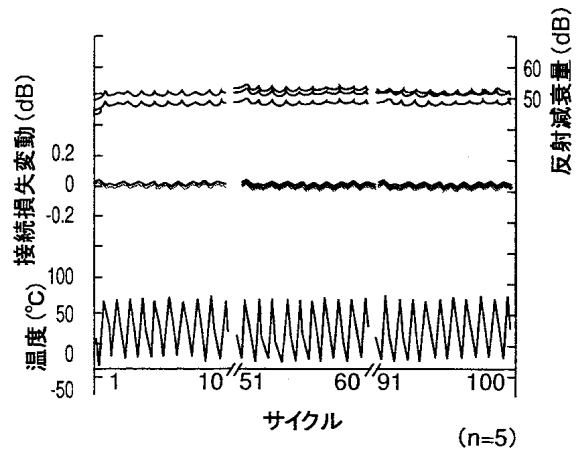


図 4.52 GCF を用いた SC 型光コネクタの熱サイクル試験

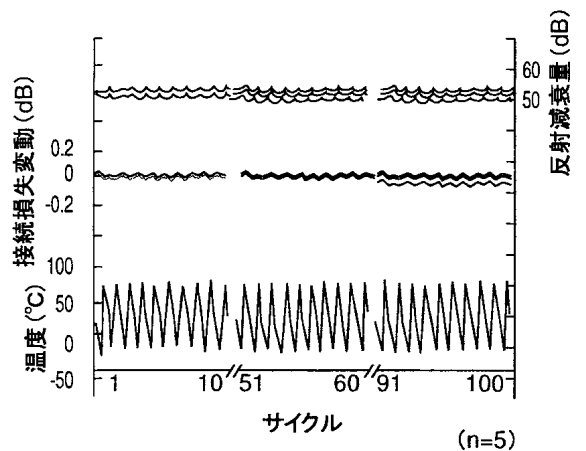


図 4.53 GCF を用いた MU 型光コネクタの熱サイクル試験

温度範囲は -25°C ~ 70°C であり 1 サイクル 2 時間として合計 100 サイクルの試験を行った。図から明らかなように、いずれの光コネクタでも熱サイクルによる接続特性の劣化は観測されなかった。さらに長瀬ら⁴⁾は、GCF を用いた SC 型光コネクタに温湿度サイクル

表 4.5 GCF およびジルコニアフェルールの先端研磨工程

工 程	GCF		ZrO ₂	
	SC	MU	SC	MU
接着剤除去 (秒)	30	60 (サンドペーパー)	15 (サンドペーパー)	15
フラット研磨 (秒)	—	—	90 (ダイヤモンド/水)	90
粗研磨 (秒)	120 (酸化クロムシート/水)	120	120 (アルミナシート/ダイヤモンドスラリー)	180
仕上げ (秒)	120 (酸化クロムシート/水)	120	180 (酸化セリウムシート/SiO ₂ スラリー)	180
総研磨時間 (秒)	270	240	405	405
反射減衰量 (dB)	55	54	54	54

を与えて接続特性に変化がないことを確認した。竹下ら⁹⁾は先端の球面半径を種々変化させたGCFを用いて温湿度サイクル下における反射減衰量の変化を調査し、GCFが先端の球面半径によらず安定した接続特性を示すことを確認した。これらの結果は、GCFの熱膨張係数が小さいこと、ヤング率が小さく先端の密着状態が良好なことによる。三田地ら²⁾は85℃85%RHでの長期間の接続におけるGCF接続面の形状を調査し、2000時間の接続後でも接続面の球面半径に変化がないことを確認した。このことは、高温高湿下における接続面の平坦化が指摘されているジルコニアフェール¹⁰⁾に対し、GCFがより高い環境安定性を有していることを示している。さらに三田地らは、温水中への浸漬によってもGCFの重量に変化が見られないことも報告している²⁾。以上の実験結果から、GCFは屋外環境においても信頼度の高い光接続を維持できるものと考えられる。

5 まとめ

結晶化後に線引き成形できる新規な結晶化ガラスの開発によって結晶化ガラスフェール(GCF)が誕生した。線引きによって得られる結晶化ガラス毛細管は光コネクタ用フェールとして十分な寸法精度を有しており、内外径を研磨することなくフェールに仕上げることができる。このためGCFは従来のジルコニアフェールに比べて生産性が高く、大幅に低価格化

することができる。また、GCFは被研磨特性が光ファイバに近く接続面の研磨が容易なため、光コネクタのアセンブリコストをも低減させることが可能である。GCFを用いた光コネクタは種々の条件下で優れた光接続特性を有することが確認されており、今後、低価格で高信頼性のフェールとして光通信の普及に寄与していくものと思われる。

(坂本 明彦)

[参考文献]

- 1) 坂本明彦 他, 97 信学会ソサエティ大会 C-3-53, (1997)
- 2) S.Mitachi *et al.*, *Glass Technol.*, **39** [3], p.98, (1998)
- 3) Y.Takeuchi *et al.*, *IEEE Photonics Tech.Letters*, **9** [11], 1502 (1997)
- 4) R.Nagase *et al.*, *Electronics Letters*, **33** [14], 1243 (1997)
- 5) A.Sakamoto *et al.*, *Proc. 18th Int. Cong. Glass*, **C6**, 62 (1998)
- 6) S.Yanagi *et al.*, *IEICE Technical Report EMD99-28* (1999)
- 7) 廣瀬潤 他, 98 信学会ソサエティ大会 C-3-54 (1998)
- 8) 廣瀬潤 他, 98 信学会総合大会 C-3-25 (1998)
- 9) 竹下潤治 他, 98 信学会総合大会 C-3-26 (1998)
- 10) L.A.Reith *et al.*, *12th Annual Fiber Optic Eng.Conf.* **3**, p.675 (1996)