

結晶化ガラスフェルールの製法と特性 Fabrication and characteristics of glass-ceramic ferrules

坂本明彦*1, 中島外博*2, 竹内宏和*2
Akihiko SAKAMOTO, Sotohiro NAKAJIMA and Hirokazu TAKEUCHI

Key words : glass-ceramic, ferrule, optical connector, single mode optical fiber, drawing

1. 緒言

シリカガラスから成るシングルモード光ファイバ(SMF)は、各種の光通信ネットワークを支える光伝送路として今や不可欠な存在となった。これらのネットワークを支える基盤技術の一つにSMF間で光信号を結合させる光コネクタ技術があげられる。光コネクタには、直径10 μ m未満のSMFのコアを正確に対向させるためのフェルールと呼ばれる精密毛細管が用いられ、光ファイバを挿入、接着したフェルール先端を凸状に研磨して突き合わせることで(PC接続, Physical Contact)によって光信号の接続が行われる(図1参照)。フェルールには繰り返しの着脱や屋外環境での使用にも耐えられる高い信頼性が必要とされる。

従来、フェルール材料には主にジルコニアが用いられてきたが、サブミクロンオーダーでの寸法精度を確保するために内外径を精密に研磨する必要があり、またPC接続のための先端研磨に長時間を要するため、光コネクタの低価格化を困難にする要因となっていた。我々は高耐久性の結晶化ガラスを線引き法によって成形することにより、内外径の研磨を必要とせず、かつ、PC接続に必要な先端研磨を容易に行うことのできる結晶化ガラスフェルール(GCF:Glass-Ceramic Ferrules)を開発した¹⁾。

本稿ではGCFの材質設計および製法について述べた後、耐摩耗性や先端の研磨特性を中心にGCFの特性を解説する。砥粒加工分野の諸氏にとって多少なりとも参考となれば幸いである。

2. GCFの設計および製法

2.1 材質設計

精密毛細管の高効率な製法としてはガラスなど非晶質材料の線引き成形がある。一方、フェルールに必要な強度や耐摩耗性などの機械的特性は一般に多結晶材料の方が優れている。結晶化ガラスは、ガラス中に結晶を析出させた多結晶材料であり、フェルールに適した耐久性を示す材質がある。しかし、一般に多結晶材料の線引き成形は困難であり、また結晶化前の材料(原ガラス)も加熱によって容易に結晶化が進行するため線引き成形を行うことはできない。そこで我々は、結晶化後も線引きに適したガラスマトリックスを適量含有し、精密な線引き成形を行うことのできる新しい結晶化ガラス材質を

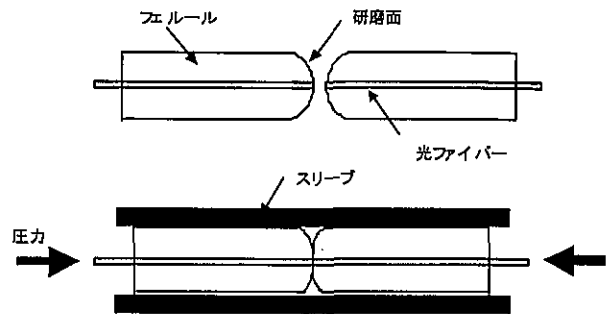


図1 一般的な光コネクタの接続原理

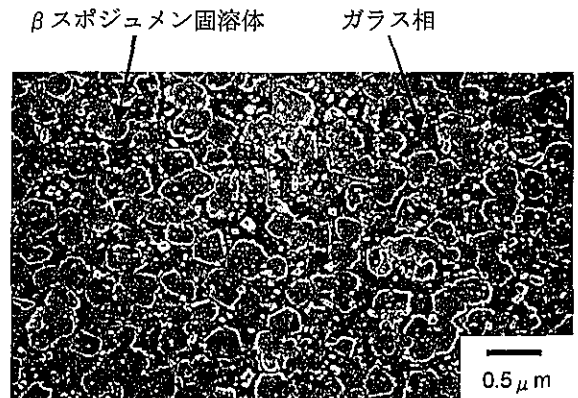


図2 GCF用結晶化ガラスの内部構造

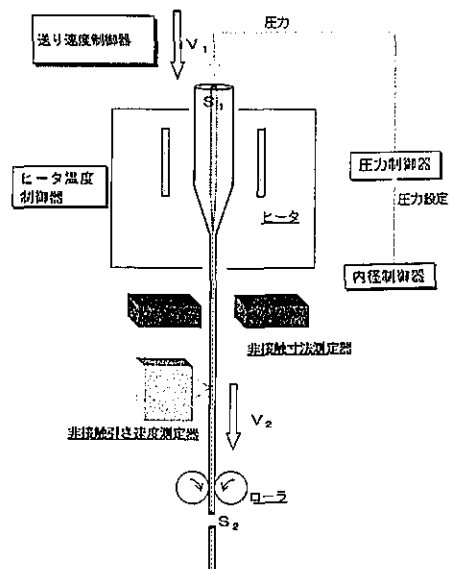


図3 GCFの線引きプロセス

*1 日本電気硝子㈱技術部:〒520-8639 大津市晴嵐 2-7-1

*2 日本電気硝子㈱電子部品事業部: 同上

(学会受付日:2003年5月14日)

開発した。

図2に開発した結晶化ガラスの内部構造を示す。この結晶化ガラスは、ガラスマトリクス中に粒径約0.3 μm の結晶粒子(β -spodumene solid solution)が分散した構造を有し(結晶化度:約50質量%),結晶の融点以下の温度でガラスマトリクスが軟化流動するため、結晶を融解することなく線引き成形することが可能となる。

2.2 線引き成形

図3にGCFの線引き成形プロセスの概略を示す。結晶化後、研削加工によって中心孔を設けたプリフォームを管状電気炉に挿入しつつ、下端を延伸することによって結晶化ガラス毛細管が連続的に成形される。毛細管の内径は内圧によって外径とは独立に制御され、内外径はレーザーセンサによってオンライン計測され制御系にフィードバックされる。線引き後の毛細管は内外径ともにサブミクロンレベルの寸法精度を有しており、研磨による寸法の修正を必要としない。図4にGCF製品の外観を示した。

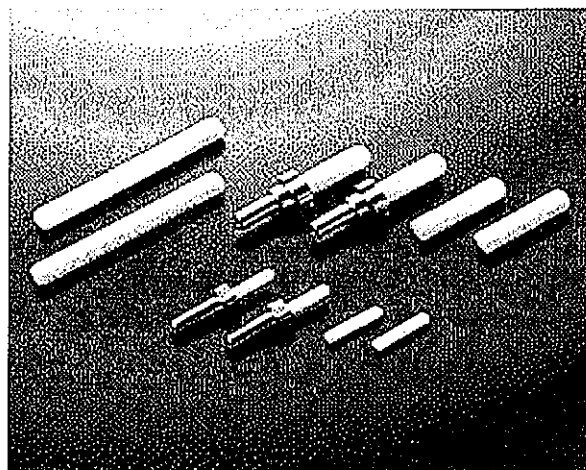


図4 GCF製品の外観

3. GCFの特性

3.1 材料特性

表1にGCFの材料特性を他材料と比較して示す。GCFの曲げ強度は、ジルコニアより低いが生産コストが低く、他のガラス材料に比べてかなり高く、フェルールとして十分な強度を有することが確認されている²⁾。GCFの熱膨張係数は他材質と比較して光ファイバ材料であるシリカガラスのそれに近く、温度変化に対してフェルールと光ファイバ間に応力が発生しにくいいため、安定した光接続が維持される。またGCFは硬さや被研磨速度がシリカガラスのそれらに近い。このため接続のための先端研磨を短時間で行える利点があり(後述)、さらにヤング率もジルコニアよりはるかに小さくシリカガラスに近似しているためPC接続が容易に行える。さらにGCFは屈折率がシリカガラスに近く散乱係数が大きいため、光ファイバ側面から漏れた光を吸収減衰させる機能を併せ持つ。また、GCFは高温高湿下でも結晶転移を起こさず、高い寸法安定性を示す。

表1 GCFの諸特性

	GCF	silica glass	ZrO ₂	B.S.*
曲げ強度 MPa	700	140	1350	250
熱膨張係数 $\times 10^{-7}/\text{K}$	30	6	85	50
ヤング率 GPa	80	70	190	70
ビッカース硬さ	700	760	1200	550
反射率 % at 1.55 μm	1.521	1.442	2	1.5
散乱係数 /mm at 1.55 μm	0.1	0.02E-6	-	-
被研磨速度** $\mu\text{m}/\text{min}$	21	26	2	34
体積変化*** ppm	N.D.	N.D.	1000	N.D.

*Borocilicate Glass(ホウケイ酸ガラス)

** Al₂O₃#1200, 24.5kPa

*** 85 $^{\circ}\text{C}$, 95%RH, 1500H

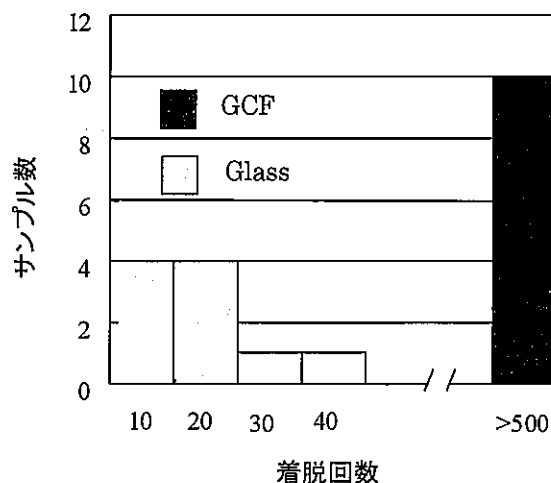


図5 GCFの耐摩耗試験結果

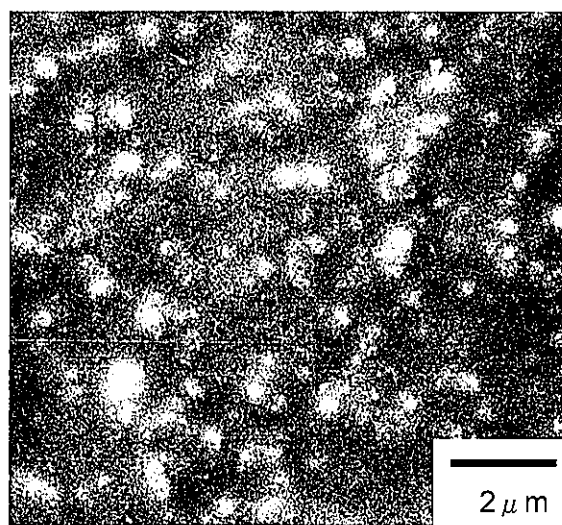


図6 GCF表面の結晶析出状態

3.2 耐摩耗性

GCF を用いて光コネクタを作製し、ジルコニア製スリーブにフェルールを繰り返して着脱することで、フェルールの耐摩耗性を評価した。結果を図5に示す。図の横軸はフェルールにスクラッチが発生することなく着脱が行われた回数を示す。図に示すように GCF は 500 回の着脱によってもスクラッチが発生せず、非晶質ガラスフェルールに比べて格段に高い耐摩耗性を示した。このような GCF の耐摩耗性はジルコニアフェルールと同等レベルであり、表面に存在する多数の微細結晶(図6)が耐摩耗性に重要な役割を担っていることがわかる。

3.3 被研磨特性

フェルールに押圧力を加えることによりフェルールの凸球面に研磨された先端が弾性変形し、光ファイバ同士の PC 接続が行われる(図1参照)。図7に凸球面先端の模式図を示す。

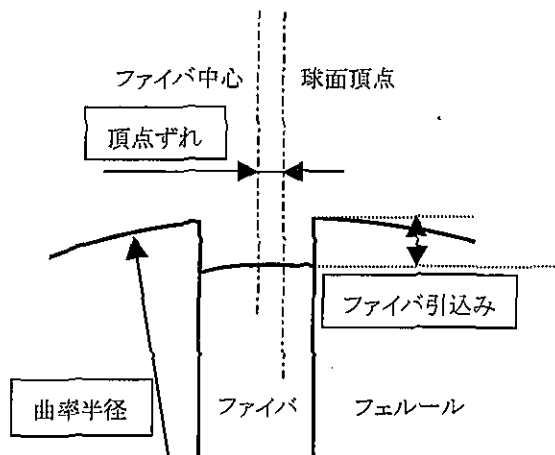


図7 フェルール凸球面先端模式図

安定した PC 接続を維持するために、フェルール端面形状の3種類のパラメータ(曲率半径、ファイバ引込み、頂点ずれ)を許容範囲内で研磨する必要がある。規格内の曲率半径を有することでフェルール押圧時に弾性変形を起こし、ファイバ同士の接触が温度変化、引っ張り、振動などで容易に外れなくなる。ところが、ファイバ引込み量、頂点ずれ量が許容範囲から外れると、フェルールが弾性変形しても光ファイバが十分接触せず PC 接続が不安定になる。この点において、GCF はジルコニアフェルールよりヤング率が低いので、同形状、同押圧力であっても弾性変形量が大きく PC 接続安定性が高い。ヘルツの公式に基づいた理論計算による GCF の PC 接続優位性とその実証試験はすでに報告しており³⁾、表2には理論計算結果を示す。例えば曲率半径 10mm、ファイバ引込み量 50nm のとき、PC 接続可能な最大頂点ずれ量はジルコニアフェルール:40 μ m に対し、GCF:62 μ m であり、GCF は大幅に有利な頂点ずれ許容値を示す。

ジルコニアフェルールの場合には、ジルコニアに比較して光ファイバ(シリカガラス)の被研磨速度が大きく、PC 研磨時に光ファイバが端面より引込んでしまうことが懸案であった。一方 GCF の場合には、光ファイバとの被研磨速度がほぼ一致しており光ファイバの引込みが発生しない。光ファイバの端

表2 理論計算による頂点ずれ許容値

パラメータ	標準規格	ジルコニアフェルール		GCF	
		10	25	10	25
曲率半径 mm	10~25	10	25	10	25
ファイバ引込み nm	-100~+50	+50	+50	+50	+50
頂点ずれ μ m	< 50	40	48	62	80

ファイバ引込みは+が引込み側

表3 フェルール研磨条件

	ジルコニアフェルール	GCF
接着剤除去	3' 00"	1' 00"
	アルミナ#3000	GC#2000
粗研磨	3' 00"	1' 00"
	ダイヤモンド#4000	アルミナ#4000
仕上研磨	4' 00"	2' 00"
	シリカ	酸化クロム#8000
		2' 00" アルミナ#20000
総研磨時間	10' 00"	6' 00"

面同士を密着させる PC 接続を考えたとき、この特性は重要であり PC 研磨のコストダウンに寄与できるものである。被研磨速度の一致は表1に示したように GCF のピッカース硬度をシリカガラスに近づける材料設計を行ったことが奏功したものと考えられる。

研磨工程は通常、接着剤除去、粗研磨、仕上研磨の工程から成る。フェルールに光ファイバを接着固定した際、フェルール端面に余分な接着剤と光ファイバがあるため、まずこれらを取り除く。次に研削により凸球面に加工し、最後にスクラッチを取り除く仕上研磨を行う。凸球面研磨は、ゴム板上に研磨シートを貼り付け、フェルール端面を加重研磨することによるゴム板の凹みにより形成する。加重とゴム硬度により曲率半径をコントロールする。

表3に GCF とジルコニアフェルール⁴⁾の代表的な研磨条件を示す。同じ研磨機で同じサイズのフェルールを研磨しても、GCF はジルコニアフェルールよりも被研磨速度が大きいので、短時間で鏡面に仕上げることができる。ジルコニアフェルールは先に述べた光ファイバの引込みを防止するために、粗研磨に高価なダイヤモンド研磨シートを使用し比較的大きな押圧力で研磨する必要がある。これによりジルコニアと光ファイバの被研磨速度の違いを乗り越えて光ファイバの引込みを少なくして凸球面研磨ができる。このときの激しい研磨のダメージが光ファイバの先端に屈折率の微小な変化層として残ってし

まう。この加工変質層はPC接続時に反射を発生させるので、これを除去するため仕上げ研磨で高価なシリカの研磨シートを使用する必要がある。このシリカの研磨シートは、研磨中にシリカの砥粒が遊離化するものである。

一方、GCF では安価な研磨シートのみで粗研磨、仕上げ研磨の凸球面加工が可能である。また、GCF の場合、酸化クロム#8000 の研磨でも反射減衰量 45dB 以上の PC 接続が可能なレベルに鏡面研磨できるが、市場の要求に、より高いレベルで応えるために#20000 の研磨を加えている。総研磨時間はジルコニアフェールールの約 1/2 である。

GCF の被研磨優位性を以下にまとめる。

- a) ヤング率が低いので弾性変形量が大きく PC 接続安定性が高い。
- b) 被研磨速度が光ファイバに近似しているため、ファイバ引込みが発生しない。
- c) 被研磨速度がジルコニアより大きいので、研磨時間が短い。
- d) 安価な研磨シートのみで鏡面研磨が可能。

3.4 光接続特性

GCF を用いた光コネクタのランダム光接続試験の結果を図 8 に示す。図から分かるように初期接続損失は 0.2dB 以下であり、光コネクタとして優れた特性を示した。図 9, 10 は GCF を用いた光コネクタに対して-10~25~65°C, 93%の温湿度サイクル試験(JIS C 5961)を行った結果を示す。いずれの試料も接続損失の変動は 0.1dB 未満であり、かつ反射減衰量にも変化が見られない。また、85°C/85%, 2000 時間の湿熱試験後の PC 端面の曲率半径の変動もなかった⁵⁾ことから、GCF を用いた光コネクタが屋外にも適用可能な高い信頼性を有していることがわかる。

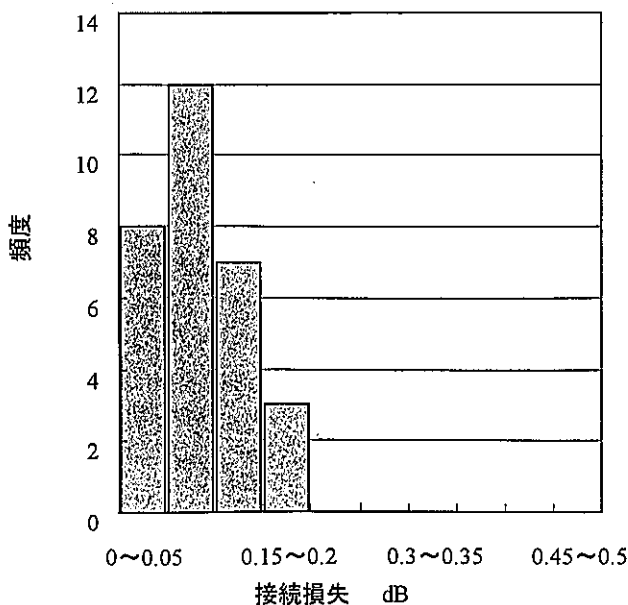


図 8 GCF を用いた光コネクタのランダム接続試験における接続損失分布

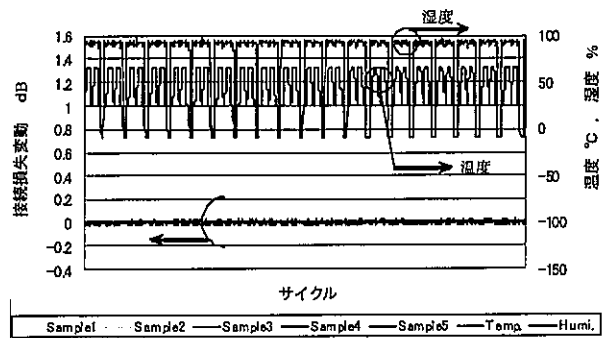


図 9 GCF 温湿度サイクル試験 接続損失変動 (-10~25~65°C, 93%, 24hr/cycle, 20cycles)

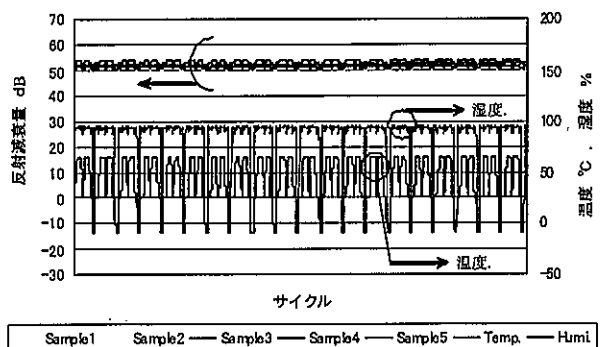


図 10 GCF 温湿度サイクル試験 反射減衰量 (-10~25~65°C, 93%, 24hr/cycle, 20cycles)

4. まとめ

結晶化後に線引き成形が可能な結晶化ガラスを作製し、高い生産効率と高性能を両立する GCF を開発した。GCF は表面上の微細結晶の存在によって高い耐磨耗性を示す一方、約 50 質量%のガラス質を含有することによって非晶質ガラスに近似した被研磨特性を示す。さらに GCF は屋外の使用にも適用可能な高い信頼性を有し、広がりつつある光通信ネットワークの構築に大きな役割を果たしている。

5. 参考文献

- 1) A. Sakamoto, M. Wada, H. Takeuchi and M. Ninomiya: Glass-ceramic ferrule for optical connector fabricated by redrawing the cerammed preform, Proc. 18th Int. Cong. Glass, C6(1998)62.
- 2) Y. Takeuchi, S. Mitachi and R. Nagase: High-strength Glass-ceramic ferrule for SC-Type single-mode optical fiber connector, IEEE Photonics Tech. Letters, 9, 11(1997)1502.
- 3) 三田地, 米川, 中島, 竹内: 2003 年電子情報通信学会総合大会 C-3-20.
- 4) (株)NTT-ME: 量産型光コネクタ研磨機(MEP-16) 取扱説明書(付-2 LCフェールール).
- 5) S.MITACHI, R.NAGASE, Y.TAKEUCHI: PDP1-4, TECH.Digest, OECC'97 (1997.7).