光ファイバの製造方法

田中豪太郎*, 松井 和則*

A Review of Optical Fiber Fabrication

Gotaro TANAKA* and Kazunori MATSUI*

1. ま え が き

光ファイバは、過去10年間における製造技術開発の画期的な進展により、現在長距離大容量の公衆通信用基幹線路への適用を始めとし、コンピュータ、データリンク等産業用情報処理システム、センサ等への応用が始まっている。本稿では、これら光ファイバ製造技術の現状を紹介する。

2. 光ファイバおよびその構成材料

光ファイバの基本構成として、その代表的な断面構造例を図1に示す。コアは光が伝搬する部分であり、光を集中させるために、その屈折率が周辺のクラッドよりも高くなっている。第1被覆および緩衝層は、シリコン樹脂などの軟い樹脂となっており、外部圧力、微小曲りなどから光伝送特性を保護している。第2被覆はナイロンなどの硬い樹脂となっており、ファイバを機械的に保護する。

光ファイバに要求される基本的な特性は、(1)光伝送損失の少ないこと、(2)光伝送歪の少ないこと、(3)強度・耐候性に優れることであり、かつこれら特性の安定性・信頼性の高いことが重要である。

(1)については、その損失要因を表1にまとめる。構成材料に固有なものが、電子遷移に基づく紫外吸収、格子

振動に基づく赤外吸収、および屈折率・濃度ゆらぎに基づくレイレイ散乱損であり、本質的にはこれらから決まる損失の窓が選択できる。そしてファイバの合成過程で入りこむ二次的要因の不純物による吸収損、ファイバ構造の不完全性からくる散乱損を十分に除去する必要がある。表2に代表的な不純物による損失レベルを示す。ファイバの伝送損失は技術が向上すれば究極的には固有損失レベルまで下げることができる。また、この値は構成材料の選択によりほぼ決定されることになる。

(2)の伝送歪を少なくするためには、コア部とクラッド部とに精密な屈折率差を構成し、また、コア内に所定の屈折率分布を形成する必要がある。

(3)については、ファイバの破壊は主として材料の本質強度（原子間結合力の強さ）、および表面欠陥に依存する。そこで本質強度が強い材料を選び、また表面欠陥の発生を極力なくし、保護することが重要となる。

ファイバの構成材料としては、無機材料（ガラス、結晶）、有機材料、複合材料（有機・無機）があり、それぞれ長所・欠点を有するものが得られるが、現在、最も特性がよく、実用上からも欠点の少ないものが、気相合成による石英系ガラスファイバである。この石英系ガラスファイバの低損失波長域は、 $1.3\mu\text{m}$ および $1.5\mu\text{m}$ 近傍の近赤外領域であり、この波長域が長距離・大容量通信に用いられる。図2に、ほぼ固有損失レベルまで達しているとみられる石英系光ファイバの伝送損失の実現値を示す。

石英系光ファイバの屈折率の調整には、 GeO_2 、 P_2O_5 、 Al_2O_3 、 B_2O_3 、Fなどが使用される。図3にこれら添加剤濃度と屈折率値の関係を示す。現在、 GeO_2 が最も広く用いられている。これは、その添加によって結晶の生成や光吸収の発生がなく、また高純度で蒸気圧の比較的高い原料（ GeCl_4 ）があり、気相で合成し易いなどの長所による。ただしGeは、資源的には恵まれた材料でなく、また産出国がザイール1国に偏るなどの点で、将来の大量生産時（例えば100万km/年オーダ）には問題となる可能性がある²⁾。また、高屈折率差（＝高NA）ファイバの作成用としては、多量添加が必要で、この結果石英

図1 代表的な光ファイバの構造

*住友電気工業株式会社横浜研究部（〒244 横浜市戸塚区田谷町1）
Sumitomo Electric Industries Ltd., Laboratory
Yokohama (1, Taya-machi, Totsuka-ku, Yokohama-shi, 244)

表 1 光ファイバの伝送損失要因
損失(λ)=A(λ)+B(1/λ⁴)+C

損失要因	固有吸収	紫外吸収・赤外吸収	A(λ)
	不純物吸収	遷移金属・OH基	
散乱損失	固有散乱	レイレイ散乱	B(1/λ ⁴)
	構造不完全性	アワ・コア界面不整 マイクロベンディング	

表 2 不純物による
吸収損失¹⁾

元素	0.85μmλ	1.3μmλ
Fe	0.2	0.2
Ni	0.1	0.2
Cu	0.1	0.2
Cr	1.4	0.7
OH		0.001

(dB/km/ppb)

表 3 可視域に近い赤外
吸収ピーク位置

材料	赤外吸収ピーク
SiO ₂	9.1μm
GeO ₂	11.4μm
P ₂ O ₅	7.8μm
B ₂ O ₃	7.4μm
SiF	13.8μm

図 2 石英系光ファイバの伝送損失
(残留OHは数ppb, 遷移金属はppb
オーダー以下, 製法はVAD法による)

ガラスとの物性値 (特に膨張係数) のズレが大きくなり
ファイバの形成が難しくなること, コストが高つくこ
との点で好ましくない。

P₂O₅ を添加すると, 石英ガラスの 溶融温度が大きく
低下するため, ガラス合成時の長所となる。ただし, 近
頃 P₂O₅ 添加型ファイバは, 水素あるいは水分の拡散侵入
による伝送損失の経時増加を受け易いことが判明し⁸⁾,
この点では好ましくない。

TiO₂ は, ファイバ開発の 初期段階でとりあげられた
もので, 屈折率を上げる効果が大きく, また, 膨張係
数, 蒸気圧などの物性値が石英ガラスの値に近く, ファ
イバを構成し易いという長所がある。ただし, Ti³⁺ によ
る光吸収があり, これをなくしてゆくことは難しいが特
殊な高NAファイバには適している。

Al₂O₃ は, 豊富な材料であり, 安価な添加剤といえる
が, 結晶化を生じ易く, 添加プロセスも難しい。

以上は, 屈折率を上げる材料であるが, 下げる添加剤

図 3 添加剤濃度と屈折率の関係

としては, B₂O₃ および F がある。B の添加は, 赤外吸
収をより短波長化するため, 1.3~1.5μm 波長域での使
用には, その吸収の影響が出てくる。表 3 に赤外吸収ピ
ークの波長を示す。一方, B の添加により, 膨張係数を
大きくできるため, 残留応力を利用する定偏波ファイバ
の製造用として適している。

最近, 石英ガラスの屈折率を下げる添加剤として, フ
ッ素が注目され⁴⁾, これをクラッドに入れたファイバが
作られている。フッ素添加のねらいは, (1)伝送損失 (特
にレイレイ散乱損がより小さくなる) および耐放射線特
性に優れた 純 SiO₂ ガラスをコアとするファイバを得る
ことができること (最近 0.16dB/km という損失値が,
このタイプのファイバで得られた⁵⁾), (2)ガラスの加工温
度が下げられること, (3)コアとクラッドの屈折率差をよ
り大きくできること (例えば, NA=0.4 という 多成分
系ファイバに迫る高NAファイバの実用化⁶⁾), の 3 点で
ある。

以上あげた添加剤のうち, 蒸気圧の高いもの (P₂O₅,
B₂O₃, GeO₂) は, 気相合成反応において収率が低くなり,
直接溶融状態では殆んど添加することができない。これ
を解決したプロセスがスートプロセス (より低温下でガ
ラス微粒子の集合体=半焼結体を合成し, これをその後
に焼結して透明ガラス化する) である⁷⁾。

3. 石英系光ファイバの製造方法

石英系光ファイバをつくるには、あらかじめコア、クラッドを構成させた棒状ガラス母材（プリフォームと称する）を合成し、これを約 2000°C の電気炉で溶融線引してファイバとする。表 4 に石英系ガラスファイバの製造法とその特徴を示す。この中で実用化しているものが気相法によるプロセスである。この中で長尺・高品質な光ファイバの製法として、現在最も代表的なものが MCVD 法、VAD 法、OVD 法である。

3-1 MCVD 法 (Modified Chemical Vapor Deposition)⁹⁾

1974年に米国のベル研究所(現在の A T T テクノロジ)の MacChesney らが、本方法により 2dB/km という固有損失レベルに近い低損失なファイバを発表し⁹⁾、一躍

表 4 石英系ガラスファイバの製造法

反応	積層方向		内 方 向	外 方 向	軸 方 向
	熱化酸法	火炎加水分解			
気相法	$\text{SiCl}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Cl}_2$	$\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 4\text{HCl}$	M-CVD法		
	火炎酸化 $\text{SiH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$			OVD法	VAD法
	低温プラズマ $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Cl}_2$		P-CVD法		SiH_4 法 (SiO_2 のみ)
液相法	高温プラズマ $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Cl}_2$		P-MCVD法	P-OVD法	
	液 相 法		ゾルゲル法		
	固 相 法		分 相 法

図 4 MCVD 法概要図

有名となった。ただし、このプロセスの原型としては、コーニング社の一層内付法¹⁰⁾、二層内付法¹¹⁾、ISE 社の内付コラップス法¹²⁾、住友電工の内付濃度分布形成法¹³⁾などがある。この MCVD 法では、比較的容易に低損失ファイバが得られるので、各所でフォローされ、全世界にこのプロセスが広まった。

図 4 にプロセスの概要図を示す。ガラス旋盤に取りつけられた石英ガラス管内に、酸素と SiCl_4 などのガラス形成用塩化物ガスを流し、移動加熱源によって局所加熱することにより、酸化物ガラス微粒子(スートと称する)を石英ガラス管内に発生させ、このスートを管内壁に堆積させる。この堆積したスートは移動してくる加熱源により連続的に溶融ガラス化され、管内壁にガラス膜が形成される。このガラス膜堆積工程を数 10～数 100 回繰返した後に、原料ガスの供給を停止し、より高温で加熱して石英管を収縮させ管を充実化する。この工程をコラップス工程¹²⁾と称し、これにより棒状ガラス母材(プリフォーム)を得る。屈折率分布は、合成するガラス膜の各層毎に原料ガスの流量比を変えることにより形成する。

MCVD 法を洗練させた技術のいくつかを表 5 に示す。

3-2 VAD 法 (Vapor Axial Deposition)^{19),20)}

VAD 法は電電公社等が開発を進めてきた純国産技術で、母材を連続的に軸方向に合成できる特徴がある。図 5 に装置の概要、図 6 にプロセスの概要を示す。

原料供給系は MCVD 法とほぼ同様である。酸素素炎中に原料ガスを供給し、火炎中での加水分解反応によりスート ($0.1\mu\text{m}$ 以下) を合成し、このスートを回転す

表 5 MCVD 法における改良技術

改 良 技 術	ね ら い
管径制御 (内圧制御) ¹⁴⁾	<ul style="list-style-type: none"> ガラス堆積過程で生じる出発石英管の変形を石英管内圧制御を行って防止する。 堆積ガラス厚を厚く形成できる。
原料添加コラップス法 ¹⁰⁾ エッチング-コラップス法 ¹⁵⁾	<ul style="list-style-type: none"> コラップス過程で生じる添加剤の揮散による屈折率変動を抑制する。
管壁冷却 ¹⁶⁾	<ul style="list-style-type: none"> サーモフォレシス効果を利用してガラスの堆積効率を向上させる。
塩素導入コラップス法 ¹⁷⁾	<ul style="list-style-type: none"> OH汚染の生じやすいコラップス時に、Cl_2 ガスを導入して低 OH 化を図る。
He 添加堆積法 ¹⁸⁾	<ul style="list-style-type: none"> 原料ガスに He を添加することで透明ガラス化を容易にして、ガラスの合成速度を向上させる。

る出発棒先端に軸方向に半焼結状態で堆積させてゆく。得られたスト体を電気炉に挿入し塩素導入下で脱水し、透明ガラス化する。この脱水処理工程により、残留OH量の極めて少ないファイバが得られる。屈折率分布は、(1)火炎内でのドーパントの拡散および、(2)堆積表面温度分布により決まり、これらを高度に調節する必要がある。GeO₂添加の場合には、特に(2)が重要である。原料の堆積収率はMCVD法に比べて高い。また、MCVD法では低OH化を図るために原料の高純度化、配管系の吸湿対策、コラップ時の低OH化手法等、特殊な工夫が必要であるが、VAD法ではスト体自体が多量にOH

を含有するものの、脱水処理工程により、より容易に低OHなファイバを実現することができる。また、原料自体を特に高純度にする必要がない(図7参照)²¹⁾。

また、大型・長尺の合成ガラスが得られるので、合成クラッド層を厚く形成しなければならないシングルモードファイバの製造には特に有利となる。

3-3 OVD法 (Outside Vapor Deposition)^{22), 23)}

コーニング社によって開発された方法であり、図8にその概要図を示す。この方法は、ストプロセスを光ファイバの製造に適用した最初のプロセスである。

VAD法と同じくバーナに原料と酸素および水素(または天然ガス)を供給し、火炎加水分解を生じさせてストを合成し、このストを回転する出発棒(マンドレル)の外周部に半焼結状態で堆積させてゆく。所定量堆積させた後、マンドレルを引き抜き、電気炉中で脱水しながら透明ガラス化する。屈折率分布は、MCVD法と

図5 VAD装置の概要(連続合成法の場合)

図6 VAD法によるガラス合成(連続製造の場合)

図7²¹⁾ SiHCl₃含有原料による1.39μmOH吸収損失の関係(MCVD法ではSiHCl₃含有量とともに吸収損失が増加するが、VAD法では増加しない)

マンドレル除去
脱水・焼結

図8 OVD法

同じく、堆積層毎に原料組成比を変えることで形成させる。生産性は VAD 法と同等であるが、コラップス工程が必要であり、また、連続製造はできない。

3-4 Plasma 法 (P-CVD²⁴⁾, P-MCVD²⁵⁾, P-OVD²⁶⁾)

前記した方法はいずれも、反応の加熱源として酸水素炎を用いているが、この代りに、低温(=減圧)プラズマ、あるいは高温プラズマを利用する方法がある。

表 6 に、それらの方法の特徴を示す。低温プラズマを用いる P-CVD 法は、気相と管内壁とでヘテロジニアスな反応を低温下で生じせしめている点で他のスートプロセスと大きく異なる。

3-5 線引

プリフォームを光ファイバにする工程を線引という。図 9 に線引装置の概略を示す²⁷⁾。線引機の基本構成は主として、(a)プリフォーム送り部、(b)線引炉、(c)コーティング部、(d)ファイバ巻取り部、(e)線径制御部である。光ファイバの線引装置は、光ファイバに要求される高強度、低損失、高精度の線径均一性等を実現する様技術開発されたものである。表 7 に光ファイバ特性と関連する

線引の要素技術、その開発例を示す。本稿では、(b)、(c)を中心として述べる。

線引炉は、光ファイバの強度特性を決定する主要因の一つで、2000°C以上の高温での温度安定性、炉の清浄性が要求される。線引炉の熱源としては、カーボン抵抗²⁷⁾炉、ジルコニア誘導炉²⁸⁾、CO₂ レーザー²⁹⁾、酸水素炎³⁰⁾等が検討されている。CO₂ レーザーは清浄性の点では優れているが、温度安定性、取扱い性等に問題があり、酸水素炎は炎の変動のため線径制御が困難となるなどの欠点があり、両者とも製造設備には適していない。

高純度カーボンを発熱体とした抵抗炉は、線引温度の安定性に優れ、その取扱い性も容易であるので製造設備に使用される場合が多い。炉内の清浄性を保つため、炉心管をつけ、炉内で発生するダストを強制的に排出する工夫もなされている³¹⁾。線径制御の観点からは、線引炉の構造、パージガス流量の検討も必要である。

ジルコニアの誘導炉も製造設備でよく使用されている。カーボン炉と異なりパージガスは必要ないが炉内の清浄性を保つためにクリンエアを吹流す場合もある³²⁾。

表 6 Plasma 法による光ファイバの製造

製 法	開発機関	特 徴
P-CVD ²⁴⁾	Philips 社	<ul style="list-style-type: none"> ・出発石英管内を1~100 mmHgに減圧し、プラズマを管内に発生させて管内壁にガラス膜を堆積させる。 ・反応率が80~100%と高い。堆積速度は0.5 g/分程度。Fを多く添加できる([F]≒8 wt%)。
P-MCVD ²⁵⁾	BTL	<ul style="list-style-type: none"> ・出発石英管内に熱プラズマを発生させて、管内壁にガラス膜を形成させる。 ・堆積速度を数 g/分と大きくできる。
P-OVD ²⁶⁾	Heraeus	<ul style="list-style-type: none"> ・出発コアガラスの外周部に、プラズマトーチによる火炎反応を用いたスートを堆積・熔融させる。 ・Fクラッド層を形成するのに適している。

表 7 光ファイバ特性と要素技術

ファイバ特性	要素技術	例
強度	線 引 炉	カーボン抵抗炉 ²⁷⁾ ジルコニア誘導炉 ²⁸⁾ O ₂ /H ₂ 炎炉 ³⁰⁾ CO ₂ レーザー ²⁹⁾
損 失	コーティング方法	開放ダイス 加圧ダイス ³⁴⁾ スプレーコート ³⁵⁾ CVD (Si ₃ N ₄) ⁴⁰⁾
線 径	スクリーニング 線 径 制 御	熱硬化型シリコン UVウレタンアクリレート UVエポキシアクリレート

(a) プリフォーム送り部
(b) 線引炉
(c) コーティング部
(d) ファイバ巻取り部
(e) 線径制御部

図 9 石英系ファイバの線引装置²⁷⁾

光ファイバのコーティング方法は、そのコーティング材料と密接な関係があり、光ファイバの強度特性、伝送特性に重大な影響を与える。熱硬化型シリコン樹脂、紫外線硬化型ウレタンアクリレート樹脂、エポキシアクリレート樹脂等の高分子が通常光ファイバのコーティングに用いられるが、開放型のダイスでコートするのが主である³⁸⁾。高速化をねらう場合コーティング材料のすべりが生じるので、密閉構造の加圧型ダイス等の開発が必要となる³⁴⁾。また約 $1\mu\text{m}$ の紫外線硬化樹脂の薄膜をスプレーコートした後、シリコン樹脂をダイスでコートする技術も開発されている³⁵⁾。この光ファイバの特徴は、シリコンの皮むき性が良く（ファイバ同士の接続時に被覆を除去し易い）、接続強度が大きいという点である。コーティングの偏肉は、強度、伝送損失に悪影響を与えるので、偏肉を検知して防止する工夫も行われている³⁶⁾。

一般にコーティング材料は先に述べたものがしばしば使用されるが、コーティングの不均一性等に由来するマイクロベンド損失（ファイバの微小曲りに基づく伝送損失）を防止する効果の点でシリコン樹脂は極めて優れている³⁷⁾。通常シリコン樹脂だけではもろいため、ナイロンを押出被覆してケーブルに使用される。標準的構造は、光ファイバ $125\mu\text{m}\phi$ 、シリコン樹脂 $400\mu\text{m}\phi$ 、ナイロン $900\mu\text{m}\phi$ である。

光ファイバには、一定の応力を加えておくと、傷が生長して破断に至る静疲労という現象がある³⁸⁾。通常は、使用時の寿命保証を考慮して、あらかじめ0.5%程度の伸び歪を光ファイバに加え、生き残ったものを使用する。海底ケーブルのように、特殊な条件下で使用されるものについては、2%程度の伸び歪を要求される場合もある³⁹⁾。疲労現象を抑制する手段として、光ファイバにシリコンナイトライド⁴⁰⁾、シリコンオキシナイトライド⁴¹⁾、アルミ⁴²⁾などのコーティングを施す方法も検討されているが、初期強度、伝送特性等の点で問題があり、まだ実用化には至っていない。

4. その他の光ファイバの製造方法

4-1 多成分系光ファイバ

多成分系による光ファイバの開発は、石英系ガラスよりも早く着手され、1970年頃には100dB/km程度の光ファイバが開発されていた。製法としては、2重るつぽ法が代表的なものである。ガラスの原料は、蒸留・イオン交換・溶媒抽出法などの方法で精製した後、石英または白金などのるつぽで溶融し、るつぽの底からガラスを引き出し、線引する。一般に、各種固体原料中に含まれる不純物あるいはるつぽからの汚染を完全に防ぐことは難しく、石英系ファイバ程には低損失化が果せていない。

ただし、加工温度が低く、安価に製造できること、組成の自由度が大きいこと、高NAファイバの製造が容易であること、などの利点がある。

4-2 プラスチックファイバ

加工や取扱いが容易であり、低価格なファイバである。ポリマ中のC-H、C=Oなどの振動吸収や密度ゆらぎによるレイレイ散乱損失は近赤外域で大きな損失要因であり、これらのため低損失化はかなり難しい。実用化している例は、PMMAをコアに、フッ化ビニリデン系ポリマをクラッドとしたもの、ポリスチレンをコアに、ポリメタクル酸メチルをクラッドとしたものなどがある。製法としては、2重るつぽ法、重合紡糸法がある。低損失化の検討としては、ポリマ中の水素を重水素で置換し、C-H結合の振動吸収を長波長側に移すことで、20dB/km(at 0.66 μm 波長)という低損失なファイバが得られている。

用途としては、伝送損失の点から、短距離伝送用あるいは、胃カメラなどの短尺イメージファイバや、自動車灯火モニタ、ディスプレイ用などがある。

4-3 プラスチッククラッドファイバ

無機ガラスをコアに、有機材料をクラッドとするファイバで、コアに純粋石英ガラス、クラッドにシリコン樹脂を用いたものが実用化されている。製法としては、高純度石英ガラス棒を電気炉で溶融線引し、ダイスによりシリコン樹脂を被覆している。低損失のステップインデックスファイバ（コア・クラッドの屈折率分布が一定値なファイバ）が容易に製造できるが、欠点としては、接続が難しいこと、また耐候性の点で信頼性に劣ることである。

4-4 赤外ファイバ

光伝送損失の大きな要因の1つであるレイレイ散乱損失は、長波長程小さくなるため、格子振動に基づく赤外吸収がより長波長側にシフトした物質では、石英系ガラスファイバよりもさらに低損失なファイバの得られる可能性がある。また、熱情報の伝送（测温）あるいは炭酸ガスレーザ（10.6 μm 波長）のエネルギー伝送を可能とする。これらファイバの材料としては、振動吸収の面から、原子量が大きくゆるい結合をした材料が好ましく、ハロゲン化物・カルコゲナイド化合物などの非酸化物が有利である。一方、これらの物質は本質的に結晶化し易く、また強度、耐候性の面で弱いため、信頼性を具えた長尺ファイバを構成するには現在のところ十分でない。

図10に各種材料の理論検討例を示す⁴³⁾。表8に実際に検討された材料例を示す。表9にCO₂レーザ伝送用ファイバの特性例を示す。AgCl-AgBr系、TlBr-TlI系などは数m長のレーザメス等のエネルギー伝送用として実用化し始めている。製造法としては、ガラスは母材線引

図10 各種材料の赤外域吸収レベル⁴³⁾ (理論値: J.R. Gannon)

表 8 既発表の主な赤外ファイバー一覧

種 類	形態(対象波長)	組 成
金 属 化 ハロゲン物	単 晶 (10.6 μm)	AgBr, AgCl, KCl, KBr, KRS-5(TlBr-TlI) など
	多 結 晶 (10.6 μm)	KRS-5, TlBr, CsI, LiF, KCl, KBr, KI, NaCl, NaF, AgCl-AgBr
	ガ ラ ス (2 ~ 4 μm)	BeF ₂ , LaF ₃ -BaF ₂ -ZrF ₂ , BaF ₂ -GdF ₃ -ZrF ₄ -AlF ₃ , ZnCl ₂
酸 化 物	ガ ラ ス (2 ~ 3 μm)	TeO ₂ -ZnO ₂ -BaO, GeO ₂ - Sb ₂ O ₃ , CaO-Al ₂ O ₃
カルコゲン 化 物	ガ ラ ス (2 ~ 6 μm)	Ge-P-S, Ge-Se-As, La-Ga-Ge-Se

図11 定偏波ファイバの構造例⁴⁹⁾

法, 2重るつぼ法があり, 単結晶は引下法, 多結晶は押出法が用いられる。

4-5 定偏波ファイバ

偏波面を保存できるようにしたファイバのことで, (1) コアあるいはクラッドをだ円にし, 残留応力分布をファイバに加える構造としたもの (図11-I, II, III), (2) 残留応力発生部を孤立対称的に生成させたもの (図11-IV) がある。製法としては, 非円対称的にガラスの気相堆積を行うもの, クラッド部を非円とし, 線引時に外径が真円状となることを利用したもの, コア近傍にその長手方向にミゾを掘り, ここを応力発生層もしくは応力発生材料を挿入溶着するものなどがある。ガラス材料としては,

石英系 ガラス+B₂O₃ 添加の組合せによるものが多い。

5. 今後の課題

光ファイバ製造分野での今後の課題は,

- (1) 電電公社 INS 計画の端末通信網などの公衆通信加入者系統に用いうる様な低コストファイバの大量生産技術の確立
- (2) 海底ケーブルなどに用いる超低損失・超高強度ファイバの技術開発
- (3) エネルギー伝送を可能とする赤外ファイバの実用化
- (4) 定偏波ファイバの特性向上化などであろう。

表 9 CO₂ レーザ伝送用ファイバの特性

材 料	損失(dB/km)
KRS-5	170~250 ^{44), 45)}
AgBr-AgCl	220 ⁴⁶⁾
CsBr	400 ⁴⁷⁾
KCl	1700 ⁴⁸⁾

文 献

- 1) P.C. Schultz; *J. Am. Ceram. Soc.*, **57**, 309 (1974)
- 2) 新関暢一; 電気通信研究所研究実用化報告, **32**, 309 (1984)
- 3) K. Mochizuki, Y. Namihiro and H. Yamamoto; *Electron. Lett.*, **19**, 743 (1983)
- 4) 特公昭55-15682
- 5) R. C. Sencsits, P.J. Lemaire, W.A. Reed, D.S. Shenk and K.L. Walker; in *Technical Digest on Conference on Optical Fiber Communication(OFC)*, TUI 3, 54 (1984)
- 6) G. Tanaka, K. Fujiwara and K. Osaka; *OFC'84*, TUG 3 (1984)
- 7) USP-3, 644, 607, USP-4, 042, 404
- 8) S.R. Nagel, J.B. MacChesney and K.L. Walker; *IEEE Vol. MTT-30*, No. 4, 305 (1982)
- 9) J.B. MacChesney, et al., *Proc. 10th International Congress on Glass*, Vol. 6, 40 (1974)
- 10) USP-3, 711, 262
- 11) USP-3, 737, 293
- 12) 特公昭58-4323
- 13) 特公昭59-13451
- 14) M. Okada, M. Kawauchi and A. Kawana; *Electron. Lett.*, **14**, 89 (1978)
- 15) 特公昭59-1222
- 16) 特願昭53-58474, USP-4, 302, 230
- 17) 特開昭55-3365
- 18) T. Akamatsu; *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 174 (1977)
- 19) 稲垣伸夫; 日経エレクトロニクス 1, 5, 144(1981)
- 20) T. Izawa, S. Kobayashi, S. Sudo and F. Hanawa; *IOOC '77 Technical Digest*, 375 (1977)
- 21) 千田和憲, 須田裕之, 岡崎久晃, 中原基博; 昭和55年電子通信学会, 光・電波部門全国大会予稿集, 357
- 22) USP-3, 775, 075
- 23) M.G. Blankenship, C.W. Deneka; *IEEE. Vol. QE-18*, 1418 (1982)
- 24) D. Küppers, H. Lydtin; *J. Electrochem. Soc.*, **125**, 1298 (1978)
- 25) J.W. Fleming and V. Raju; *Proc. 3rd IOOC*, WD 2 (1981)
- 26) A. Muhlich, K. Rau and N. Treber; *Proc. 3rd ECOC*, 10 (1977)
- 27) 中原基博, 坂口茂樹, 宮下忠; 電気通信研究所研究実用化報告, **26**, 2557 (1977)
- 28) L.L. Blyler, Jr. and F.V. DiMarcello; *Proceeding of The IEEE*, **68**, 1194 (1980)
- 29) R.E. Jaeger; *Ceramic Bulletin*, **55**, 270 (1976)
- 30) T.T. Wang and H.M. Zupko; *Fiber and Integrated Optics*, **3**, 73 (1980)
- 31) S. Sakaguchi, M. Nakahara and Y. Tajima; *J. Non-Cryst. Solids*, **64**, 173 (1984)
- 32) F.V. DiMarcello, A.C. Hart, Jr., J.C. Williams and C.R. Kurkjian; *Fiber Optics, Advances in Research and Development*, Edited by B. Bendow and S.S. Mitra (Plenum Publishing Corporation, pp. 125 1979)
- 33) 倉内憲孝, 椋梨浩明; SEN-I GAKKAISHI (繊維と工業) **39**, 171 (1983)
- 34) 千田和憲, 木村隆男, 我妻誠; 電気通信研究所研究実用化報告, **32**, 2675 (1983)
- 35) K. Tsuneishi, T. Yamanishi, S. Suzuki and M. Yoshida; *OFC'84*, WF 8 (1984)
- 36) D.H. Smithgall and R.E. Frazee, Jr; *OFC'82 WCC5* (1982)
- 37) T. Yamanishi, K. Yoshimura, S. Suzuki, S. Seikai and N. Uchida; *Electron. Lett.*, **16**, 100 (1980)
- 38) 木村隆男, 柴田修一, 坂口茂樹, 首藤義人, 中原基博, 高橋志郎; 研究実用化報告, **29**, 1771 (1980)
- 39) N. Kojima, Y. Miyajima, Y. Murakami, T. Yabuta, O. Kawata, K. Yamashita and N. Yoshizawa; *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-18, 733 (1982)
- 40) R. Hiskes; *OFC'79*, WF 6 (1979)
- 41) C.A. Schantz, E.G. Hanson and R. Hiskes; *OFC'82*, WCC 2 (1982)
- 42) D.A. Pinnow, J.A. Wysocki and G.D. Robertson, Jr.; *IECE*, E61, 171 (1978)
- 43) J.R. Gannon; *J. Non-Cryst. Solids*, **42**, 239 (1980)
- 44) 池戸才, 筒井博, 渡正文, 胡桃沢利光; 第29回応物学会関係連合講演会予稿集, 2p-W-5, 104 (1982)
- 45) 可知純夫, 木村正樹, 中村一則, 増田満, 城山魁助; *ibid.*, 2p-W-8, 105 (1982)
- 46) 住友電工, 日経新聞, 9月29日 (1982)
- 47) 三村栄紀, 太田忠一; 第29回応物学会関係連合講演会予稿集, 2p-W-2 (1982)
- 48) 高橋謙一, 村上一仁, 横田稔; 第28回応物学会関係連合講演会予稿集, 29a-k-2 (1981)
- 49) S.C. Rashleigh; *CLEO'85*, WH4, 100 (1985)
- 50) 特公昭59-18327