



光ファイバとその応用—XI

製造側からみた光ファイバの将来

山内 良三・稲田 浩一

藤倉電線(株)光エレクトロニクス研究所 〒285 佐倉市六崎 1440

(1990年6月4日受理)

Optical Fiber and Its Applications—XI

Future of Optical Fiber Manufacturing

Ryozo YAMAUCHI and Koichi INADA

Optoelectronics Laboratory, Fujikura Ltd., 1440, Mutsuzaki, Sakura 285

1. ま え が き

ここ数年、わが国における通信用光ファイバの生産量は、年率数十%で伸びていると言われている。その大部分は、石英ガラスを主成分とする光ファイバであり、しかも、単一モードファイバが大部分を占めている。これまで、通信用光ファイバの適用領域としては、いわゆる局間中継、および企業を中心とする大ユーザへの加入系が主であり、一般加入者系への光ファイバの適用は必ずしも明確にはなっていなかった。しかし、この1年ほどの世界の動きを見ると、米国、欧州、日本において、いわゆる、fiber to the home に向けた取組みが始まっている¹⁾。

これまでにわが国で敷設された光ファイバの総延長は300万km程度と推定されるが、全加入者宅まで光ファイバを敷設する場合に推定される光ファイバの必要量、数千万～数億kmと比較すれば、まだ、わずかな量に過ぎないことがわかる。本解説では、このような状況を踏まえて製造技術からみた通信用石英系光ファイバの将来、とくに、量産化、低損失化、高強度化、等の動向について述べてみたい。

2. 光ファイバの量産化技術

2.1 ファイバの種類の動向

石英系光ファイバの種類の年度別の比率を見ると、過去数年間多モードファイバと単一モードファイバの割合

は、ほぼ1対1で推移してきた。しかし、1988年頃に大きな比率の変動があり、ほとんどの光ファイバが単一モードファイバになった。この理由は、いわゆる加入者系を含めて単一モードファイバを適用できる状況が揃ったためである。すなわち、

1) 光源にも依存するが、単一モードファイバは数十Gbit・km/sの広い帯域幅が得られ、適切なパラメータ設定を行えば、多モードファイバよりも固有損失、曲げ損失ともに小さい。

2) 多モードファイバに見られるようなモーダルノイズなどがなく、また、伝送帯域幅、等のファイバ長依存性が予測可能であるため、伝送系の設計が容易である。

3) 製造技術の進歩、とくに、ファイバの全合成ガラス化により、多モードファイバとの価格差がほぼ解消した。

4) コアの偏心が1μmを大きく下回るなど寸法の制御性が向上し、低損失な多心一括接続が可能となった。

5) そのほか、伝送損失、波長分散、モードフィールド径、機械的強度、等、諸特性も大幅に向上した。

2.2 基本製造方式の動向

これまで、さまざまな光ファイバの製造方法が提案されてきたが、わが国のVAD法²⁾以外に、外付け法(コーニング社)³⁾、MCVD法(AT&T社)⁴⁾、PCVD法(フィリップ社)⁵⁾の四つが生き残っている。

これまでの光ファイバの研究開発は、①低損失化、②高強度化、③高精度化、④低分散化、⑤ファイバ

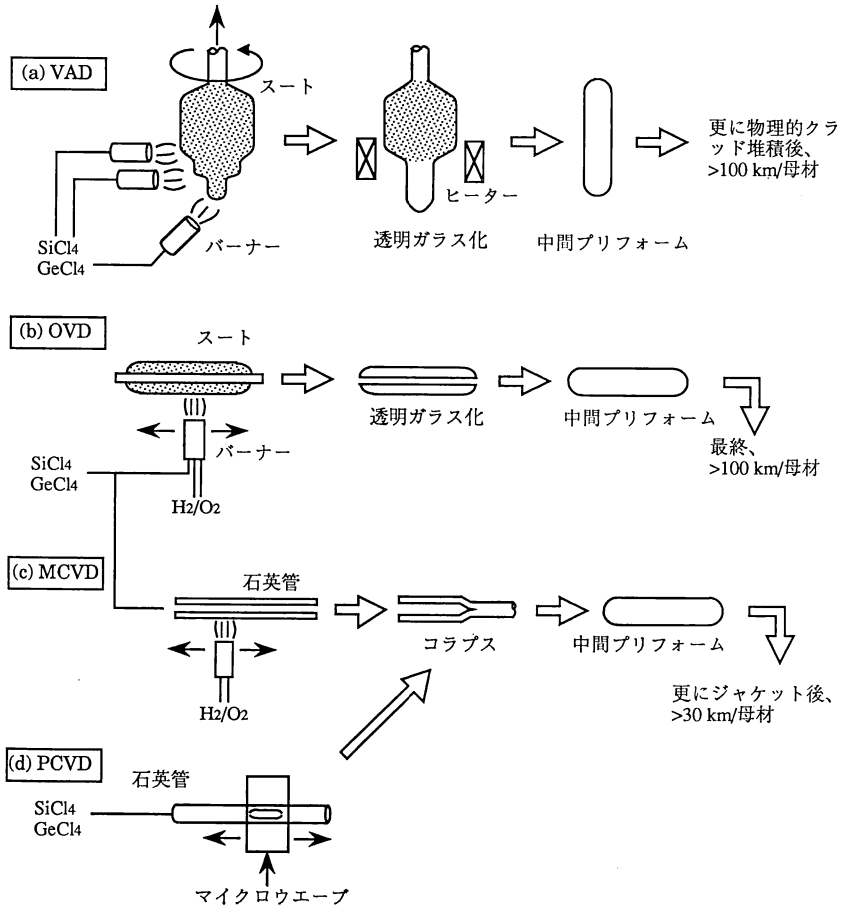


図1 光ファイバ母材基本製造方式の現状

母材の大型化、⑥ 連続製造可能なファイバの長尺化、⑦ ガラス堆積速度やファイバ線引速度の高速化、などを指標として進められてきた。しかし、前述の四つ製造方法のうち、後者二つの方法 (MCVD 法、PCVD 法) は、原理的に石英ガラス管内側に高純度ガラスを堆積させる内付け法であり、最終的なファイバ母材の大きさに制限を与えている。そのため、連続線引可能なファイバ長は 30 km ほどまじりと思われる。

図1に各製法の現状を示す。現在、母材の大きさに制限を生じにくいVAD法、外付け法では、1本のファイバ母材から線引可能なファイバの長さは100 kmを大きく越えていると思われる。

2.3 高速ガラス合成技術

図2は、単一モードファイバの断面形状を示している。ここで、光学的クラッドは伝播モードの電磁界が実質的に存在する領域を示しており、この領域のガラスは十分に高純度かつ、欠陥のないものでなければならない。例えば、OH 基残留レベルで 10 ppb 以下が標準的

な値となっている。これに対してその外側の領域は、物理的クラッドとも呼ぶべき領域であり、光のパワーはほとんど存在しないので、要求される純度はいくら下げることができる。具体的な数値としては、物理的クラッドの不純物レベルにもよるが、光学的クラッド径に対するコア径の比率 (しばしば、 D/d と呼ばれる) は、3~5程度あれば十分である。この結果、ガラス堆積量の10%前後しか占めないコアおよび光学的クラッドの

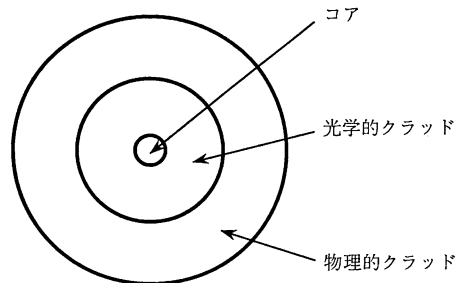


図2 全合成光ファイバの構造

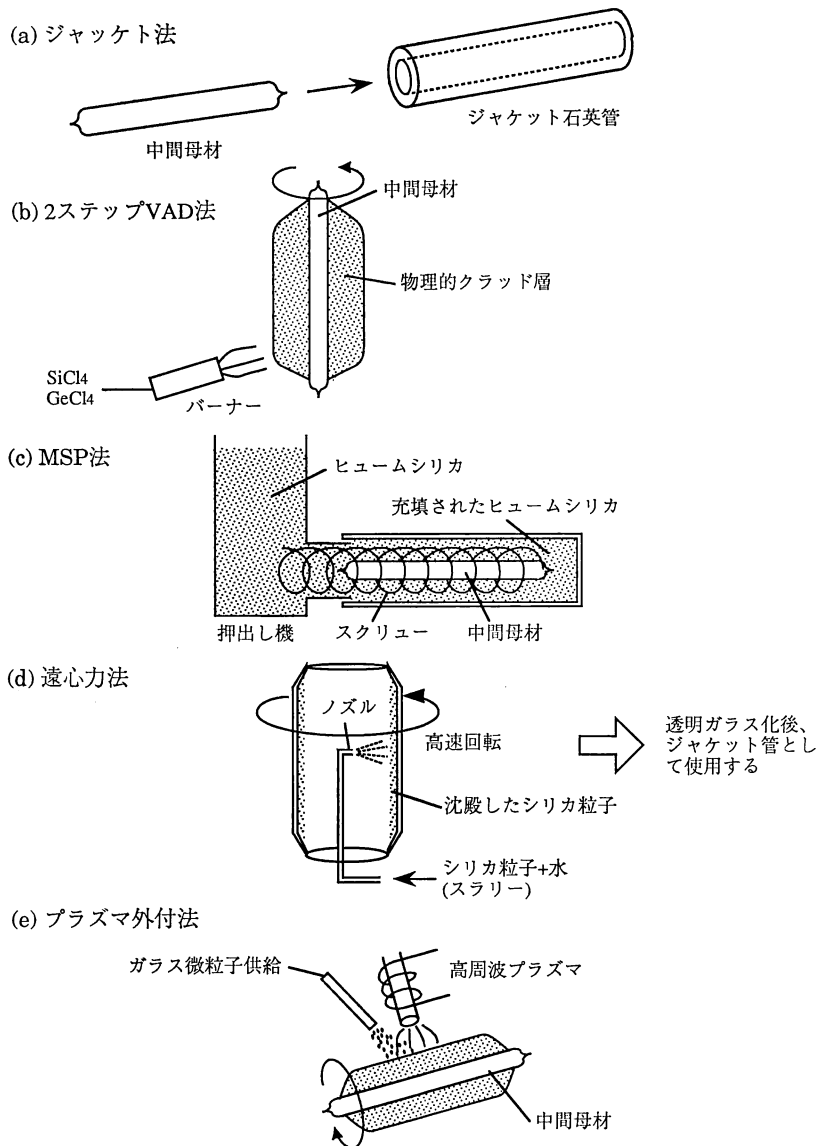


図3 物理的クラッド層の製造方式
中間母材はコアと光学的クラッド層からなる

ガラスは細心注意を払って作製するのに対して、その外側の物理的クラッドをいかに高速で、かつ、安価に作製するかが技術のポイントとなっている²⁾。この観点から、前述のファイバ基本製造法それぞれに検討が進められている。MCVD法など内付け法では、物理的クラッドとして市販されている石英ガラス管を中間段階のプリフォーム(母材)に被せて最終的な母材を作製することが行われる。また、この物理的クラッドを作製する方法として、このジャケット管法を含めて、図3に示すようないくつかの方法が提案されている。

VAD法で主として採用されている方法は、図3(b)に示すように、四塩化珪素を酸水素炎で熱酸化してきたガラス微粒子を中間段階のプリフォーム外周に堆積させるものである。これを加熱、透明ガラス化して最終母材を得る。本方式により、最大毎分40gのガラス堆積速度が報告されている。

図3(c)は、MSP (mechanical shaped preform) 法と呼ばれる方法で、安価なヒューム・シリカを物理的クラッドの原料として利用するものである⁶⁾。光学的クラッドまで形成されたファイバ母材の周囲に、ヒューム・

シリカを押し出し成形により充填し、次いで加熱・安定化、脱水、透明ガラス化する。利点としては、ガラス原料の収率がほぼ100%を見込めることであるが、ヒューム・シリカのかさ比重が極端に低いため、加熱透明化の過程で見かけの堆積は数十分の1になる。この結果、大きな母材を得るには設備が非常に大きくなることや、寸法制御性の改善が課題である。

図3(d)は遠心力法と呼ばれている方法である⁷⁾。比較的純度の低い石英ガラス管の内面に、シリカ粒子と水の混合液(スラリー)を吹き付けながら石英ガラス管を回転させ、遠心力によりシリカ粒子を石英管の内側に沈澱させるものである。これを加熱、乾燥、脱水、透明ガラス化することで物理的クラッド用のジャケット管を得る。本方法は、PCVDプリフォームに被せる安価な大型ジャケット管として検討されている。

その他、図3(e)はゾル・ゲル法で作製した石英ガラス粒子を、数MHzの高周波励起による高温プラズマ火炎を熱源として、光学的クラッドまで形成されたファイバ母材(中間体)の外側に堆積させるものである⁸⁾。高い収率を得るには、ガラス粒子径は数十 μm とかなり大きくなければならず、さもないと火炎でガラス粒子が吹き飛ばされて堆積しないなど意外に制限が多い。

これらの高速ガラス合成技術が生産に取り入れられるためには、やはり、ファイバの特性を劣化させることなく、コストを下げるができることが条件となることは確かであろう。すなわち、かつて、多少特性が悪くても安価なファイバの必要性が議論されたことがあったが、特性の優れたファイバが普及した結果、現在の通信用ファイバケーブルのユーザーが単に安価なだけのファイバの受け入れる素地は少ないように思われる。

2.4 高速線引技術

現在、石英ガラスファイバは全て、ファイバ母材を高温の加熱炉内で加熱して細く引き延ばすことにより製造されている。この温度は、 $2,000^{\circ}\text{C}$ を越す高温であり、ファイバの光学的、機械的特性を劣化させずに、工業的に利用できる発熱体および炉材は、ジルコニア、カーボンなどに限られている。

ファイバの線引速度は、ファイバ母材の大きさと密接な関係がある。すなわち、ファイバの線引速度がいくら早くても、1本のファイバ母材から線引可能なファイバ長が長くなければ、高速線引技術を活かすことができない。図4は母材の大きさと線引速度の関係を示したものであるが、これまでのトレンドでみると、将来、1本の母材から数百kmの光ファイバを毎分1,000m以上

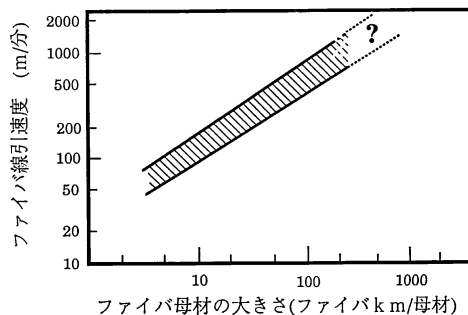


図4 光ファイバ母材と線引速度との関係

の速度で線引するようになることが予想される。計算上も、母材をファイバに線引するときに制限を与えるものは見あたらない。すなわち、十分な熱の供給が行われれば、数千m/分の高速線引は可能であり、事実、ファイバの特性を無視すれば、1,200m/分の線引速度がすでに報告されている⁹⁾。実際の高速化に当たって、大きな障害となるうるのはファイバの被覆であろう。ファイバの線引速度に同調して、ファイバの表面に適切な樹脂等のコーティングを被覆することが必要である。この樹脂に対する要求項目は、①ファイバの機械的な強度の保持、②ファイバに加えられる外力によって発生する曲がり損失の防止、③広い温度範囲での上記性能の維持、④接続時、等におけるファイバの取扱いやすさ、⑤長期安定性等、ファイバをケーブル化したり、持続したり、運用したりするところからくる要求とのいわゆる、trade-offとして決定される。この結果、現在の光ファイバのコー

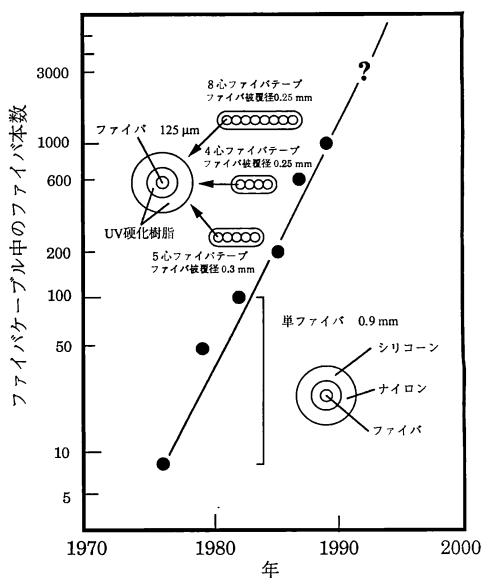


図5 光ファイバケーブル多心化の推移

表1 石英系光ファイバの典型的な特性

項目	ファイバ形式			
	通常型 SM ファイバ	分散シフトファイバ	高シリカファイバ	
損失	波長 1.3 μm	0.35 dB/km	—	0.32 dB/km
	波長 1.55 μm	0.20 dB/km	0.21 dB/km	0.18 dB/km
	1.39 μm OH 吸収ピーク	<1 dB/km		
モードフィールド径	9.5 $\mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ (@1.3 μm)	8 $\mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ (@1.55 μm)	10.5 μm (@1.55 μm)	
波長分散	$\pm 3.5 \text{ ps/km/nm}$ (1.285~1.330 μm)	$\pm 2.5 \text{ ps/km/nm}$ (1.525~1.575 μm)	19 ps/km/nm (@1.55 μm)	
偏心 ファイバ外径	<0.5 μm 125 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$			

ティング構造はヤング率などの特性が異なる2層の樹脂被覆が採用されている。将来の光ファイバのコーティングについても、ケーブル構造に大きく依存し、加入者系への光ファイバの大量導入を目指した超多心ケーブルの開発に合わせて、ファイバのコーティング技術も対応を求められる。図5は、わが国における1本のケーブル中のファイバ心数最大値の推移を示している。結果として、過去10数年、ファイバ心数は一貫して指数関数的に増加しており、昨今の動向はさらに多心化を要求している。

3. 光ファイバの低損失化

表1に示すように石英系光ファイバの特性は、単にチャンピオン・データというだけでなく、量産レベルでもほとんど極限的なところに近づきつつあり改善余地は少ないように見える。しかし、過去2~3年をみても、ファイバのコアガラスとクラッドガラスの粘弾性的な性質の不整合を減らすことによりファイバ損失の低減が図られるなど、製造レベルで究極的な損失を目指す検討は今も続けられている¹⁰⁾。

光ファイバの低損失化のための非石英ガラスへのアプローチは、現在も続けられている。その主なものは、波長2.5 μm 帯の伝送を目指したフッ化物ガラスと、多成分酸化物ガラスによる低損失化である。フッ化物ガラスについてみると、数年前に約0.4 dB/kmの損失を数10m前後の長さのサンプルで達成した以後は、チャンピオンデータの更新は行われておらず下げ止まった状態にある¹¹⁾。一方、多成分酸化物ガラスについては、酸化アルミ・酸化カルシウム・シリカ…といった組成が検討されている¹²⁾。最低損失波長は1.9 μm と長いものの、理論損失が石英がガラスよりも低いということで着目さ

れている。しかし、まだ、バルク・ガラス作製の域を出ておらず、光ファイバとしての特性把握はこれからといった段階である。これらの「次世代」ファイバが実用化されるための条件を、筋が良いと言われてきた石英系ファイバの利点を顧みること考えてみる。すなわち、石英系ファイバでは、

- (1) 低損失化に欠かせない CVD 反応に適した原料が存在している。
- (2) 原料がシリコン工業等の副産物として容易に、かつ、比較的安価に得られる。
- (3) 原料が主としてハロゲン化物であり、炭素などを含まないのでガラス作製後の処理が容易。
- (4) 二成分、多くても三成分ガラスのため、組成の最適化がしやすい。また、ガラス化範囲も非常に広い。
- (5) ガラスの作業温度が結晶化温度よりも十分に離れており、結晶化による問題が基本的でない。
- (6) 不純物として考慮すべきものは、ほとんど、OH基だけであり、しかも、ガラス微粒子を多孔質母材として堆積するため、ハロゲン系ガスにより容易に脱水できる。
- (7) 線引における粘度対温度の関係が比較的緩やかであり、制御面では自由度が大きい。
- (8) 石英ガラスの熱膨張係数は小さいので、大きなファイバ母材を作製しても熱歪による破断などの問題が少ない。ガラス作製時に徐冷などの工程が不要か、もしくは、短時間で済む。このことは、長尺の光ファイバを連続かつ高速で得る条件を備えている。

すなわち、ファイバ製造の観点からは、フッ化物ガラスファイバ、多成分ガラスファイバを実用化するには、

材料そのものの検討を含めて、現在ほとんど満たされていない上記の点の少なくともいくつかをクリアするか代替技術を持つ必要があると考えられ、今後の研究開発に課せられた課題は多い。

4. 光ファイバの高強度化

石英系ファイバの機械的強度の劣化は、水分の存在下でファイバ引張り応力を印加すると、ファイバ表面の傷の先端で Si-OH を化学的に生成しながら傷を広げていくという過程で説明されている。このことから、ファイバの機械的な寿命を延ばすための手段としては、

- ① ファイバガラス表面に水分が到達しないようなハーメチック・コーティングを施す。
- ② ファイバ表面に実質的に引張り応力が加わらないように、あらかじめ圧縮歪をいわばバイアスとしてかけておく。
- ③ 水分とガラスの反応が遅くなるようなガラス組成を利用する。

などが検討されている。

4.1 アモルファス・カーボン・コーティング

光ファイバの線引時に、加熱炉から出てきたファイバ表面で有機物(ガス)の熱分解しアモルファス・カーボンとしてコーティングする(図6(a))¹³⁾。膜厚は数百オングストロームである。カーボン膜が緻密に形成できれば、ガラス表面への水分の浸透を防げるだけでなく、ファイバの伝損失を劣化させる水素の拡散を防ぐことができる。ファイバの静的な疲労を表す指数 n でみると、通常の樹脂をコーティングされたファイバでは、 $n=20$

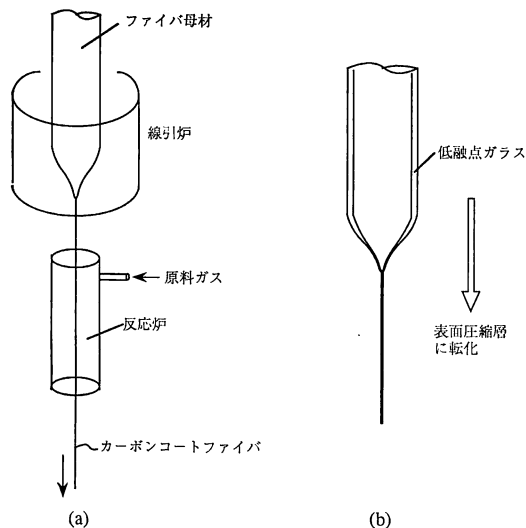


図6 光ファイバの高強度化

~24程度であるのに対して、カーボン・コートにより100以上の値に高められる。しかし、現状の光ファイバの樹脂コーティングでも適切なブルーテストが行われれば、光ファイバの強度は保証されているため、これらの高強度ファイバの用途としては、海底ケーブル、軍用ケーブルなどの特殊用途に限定される可能性もある。

その他のハーメチック・コートファイバとしては、これまで、アルミニウムなどの金属被覆が知られている。

4.2 表面圧縮ファイバ

図6(b)に示すように、ファイバ母材表面にクラッドガラスよりも、線引温度における粘度が低いガラスを薄く被覆しておく。ファイバが母材から延伸され、溶融、固化する段階でクラッドガラスがまず最初に固化するため、線引張力は選択的にクラッドが分担するようになる。この張力分担は弾性的歪を生じるので、線引後には再び、歪のない状態に戻ろうとするが、このとき、ファイバ最外層のガラスは断面積が小さいので、クラッドガラスに引きずられてファイバ軸方向に圧縮される。この結果、ファイバの表面には、ファイバ線引張力によってクラッドに発生した歪と同じ絶対値の圧縮歪が永久歪として残留する。現在、ファイバ表面に0.5%の軸方向圧縮歪が付与されたファイバが報告されている¹⁴⁾。これは、理論上ファイバに0.5%までの引張り歪を与えても、疲労は生じないことを意味する。

このほか、ファイバ表面のガラスに酸化チタンを添加することにより、 n 値を30近くまでガラスの耐水性を向上させたファイバが報告されている。

5. 光ファイバの高機能化

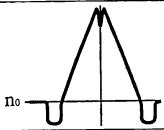
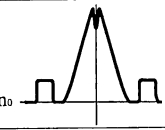
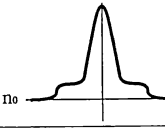
ここでは、分散シフトファイバ、光増幅用エルビウム添加ファイバなど、ファイバに何らかの機能を付加したファイバについて述べる。

(1) 1.55 μm 分散シフトファイバ

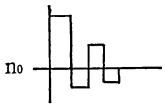
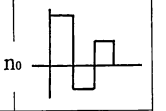
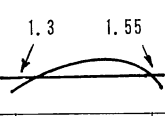
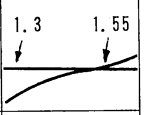
石英ファイバの最低損失波長帯である1.55 μm において、波長分散が零となるように設計されたファイバが分散シフトファイバである。表2(1)に示すように、製法に応じた屈折率分布が採用されている。しかし、実用化の観点ではわが国が先行しており、他の製法の分散シフトファイバはほとんど生産されていないとされている。VAD法における分散シフトファイバの製造プロセスは、通常の単一モードファイバと基本的に同じであり、コアと光学的クラッドを一つのプロセスで作製し、次いで残りの物理的クラッドを形成する。現在、わが国の単一モードファイバの10%程度が分散シフトファイ

表2 波長分散を制御したファイバの状況

(1) 1.55 μm 分散シフトファイバ

形 式	三角型	セグメントコア型	二重コア型
製 法	MCVD法	OVD法	VAD法
屈折率分布 n ₀ : 石英ガラス の屈折率			
伝送損失典型値 [dB/km] @1.55 μm	0.23	0.21	0.21
導 入 状 況	開発終了	商用	商用

(2) 分散フラットファイバ

形 式	4重クラッド型			3重クラッド型
	PCVD	OVD	MCVD	VAD
屈折率分布 n ₀ : 石英ガラス の屈折率				
波長分散曲線	波長 [μm] 			
伝送損失 [dB/km] @1.3 μm @1.55 μm	0.43 0.25	0.4 0.2	0.35 0.2	0.41 0.23
モードフィールド径 [μm] @1.3 μm @1.55 μm	6 7	— —	— —	6 7
導 入 状 況	当面の開発は終了			

バであると言われている。この傾向は、今後とも続くものと考えられている。

(2) 分散フラットファイバ

分散フラットファイバとしては、① 波長 1.55 μm 付近で零分散となる波長幅を広げたものや、② 1.3~1.55 μm の広い波長域で数 ps/km/nm の低波長分散を目指したファイバなどが考えられるが、わずかなファイバ径等、パラメータの変化で大きな波長分散特性の変化をもたらすため、現状のファイバ製造技術では、量産化は難しい。制御の精度として、コア径 $\pm 0.01 \mu\text{m}$ 、比屈折率 $\pm 0.01\%$ 、ファイバ径 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ オーダの技術が確立される時期を待つ必要がある。また、曲がり損失を減らすために比屈折率差を高めに設定するので、高いドーパント濃度の影響で損失もやや高く、さらに、モードフ

ールド径も小さいので低い接続損失が望めないなど総合的な評価は低くならざるをえない(表2(2)参照)。

(3) 希土類添加ファイバ

ファイバのコアに希土類を添加したファイバに励起光と信号光を入射し、光増幅を行わせる検討が盛んである¹⁵⁾。最も実用に近いのは、1.55 μm 帯増幅用のエルビウム添加ファイバである。製法としては、図7に示すように、ガラス微粒子焼結体(いわゆるスートプリフォーム)の空隙に気相、もしくは、液相でエルビウム・イオンまたは、エルビウム化合物を導入し、ついで、ガラスを透明化するのが一般的である。現状技術でも、1.55 μm 帯で、30 dB 以上の増幅度が比較的容易に得られる。特性としては、① 広い波長域での高い増幅度、② 高い励振効率、③ パワーアンプとして必要な高い飽和

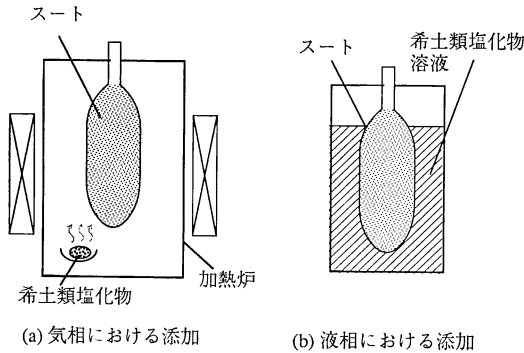


図7 希土類添加光ファイバの製法

出力などが重要であろう。

一方、加入者系伝送で重要な $1.3\mu\text{m}$ 付近での増幅は、石英系ガラスをホストガラスとした場合には難しく $1.39\mu\text{m}$ 帯に利得のピークが存在する。フッ化物ガラスを用いて利得波長を $1.32\mu\text{m}$ 程度までシフトさせることができるが¹⁶⁾、利得、その波長特性、飽和出力など課題は多い。

(4) その他のファイバ

その他、今後とも検討が続けられるファイバとしては、

- 1) 偏波保持ファイバ：光ファイバジャイロなどファイバセンサー用に根強い需要が見込まれる。
- 2) ソリトン伝送用ファイバ：ファイバの非線形性を利用するため、コア径は比較的細く、モードのパワー密度を上げ、かつ、ソリトン条件を満たすために波長分散を使用波長で精密に制御したファイバが要求される¹⁷⁾。

6. あとがき

光ファイバ伝送はもはや新技術ではないといわれてすでに何年かが過ぎた。しかし、光ファイバの使用量は銅の通信線と比べるとまだ1%程度と思われる。残りの99%を置き換えるためには、技術的に多くの革新を必要とすると思われる。本稿で拾うことができなかった技術の中に将来大きく成長するものがあるかもしれないが、そのときはご容赦されたい。いずれにしても、ここ数年の製造技術の動向を注視していきたい。

文 献

- 1) たとえば、1990年2月18日(日)付、読売新聞朝刊、p.16.
- 2) A. Wada, R. Yamauchi, M. Miyamoto, T. Uehara, K. Seto, K. Harada, N. Sato and K. Inada: "Fully synthesized single mode fiber fabrication by two-

step V.A.D. process using high rate cladding deposition burners," European Conf. on Opt. Communication (1987) pp. 159-162.

- 3) R.V. Vandewoestine and A.J. Morrow: "Developments in optical waveguide fabrication by the outside vapor deposition process," J. Lightwave Technol., **LT-4** (1986) 1020-1025.
- 4) D.P. Jablonowsky: "Fiber manufacture at AT & T with the MCVD process," J. Lightwave Technol., **LT-4** (1986) 1016-1019.
- 5) H. Lydtin: "PCVD: A Technique suitable for large-scale fabrication of optical fibers," J. Lightwave Technol., **LT-4** (1986) 1034-1038.
- 6) A. Baumgaertner, R. Dorn, A. Goeth, A. Gutu-Nelle, J. Koppenborg, W. Rehm, R. Schneider, S. Schneider and J. v. Wirth: "Further progress low-cost MSP preform process," Int. Conf. on Integrated Opt. and Opt. Fiber Commun. (1989) 19B2-1.
- 7) P. Bachmann, P. Geittner, H. Lydtin, G. Romanowski and M. Thelen: "Preparation of quartz tubes by centrifugational deposition of silica particles," European Conf. on Opt. Communication (1988) pp. 449-452.
- 8) J.B. MacChesney: "Sol-gel and other fourth generation process," European Conf. on Opt. Communication (1987) pp. 71-77.
- 9) S. Sakaguchi and T. Kimura: "A 1200-m/min speed drawing of optical fibers with pressurized coating," Conf. on Opt. Fiber Communication (OFC '85) (1985) MG 2.
- 10) R. Yamauchi, T. Abiru, D. Tanaka, A. Wada and M. Miyamoto: "Direct observation of drawing-induced anisotropic refractive-index change in quasifibers by a polarization preform analyzer," Conf. on Opt. Fiber Communication (OFC '90) (1989) TH 13.
- 11) S. Mitachi, S. Shibata and T. Manabe: "Teflon FEP-clad fluoride glass fibre," Electron. Lett., **17** (1981) 128-129.
- 12) P.L. Higby, L.E. Busse and I.D. Aggarwal: "Properties of low-silica calcium aluminosilicate glasses," 6th Int. Symposium on Hilde Glasses (1989) pp. 381-385.
- 13) R.G. Huff, F.V. DiMarcello and A.C. Hart, Jr.: "Amorphous carbon hermetically coated optical fibers," Conf. on Opt. Fiber Communication (OFC '88) (1988) TUG 2.
- 14) Y. Ohuchi, A. Wada, R. Yamauchi, N. Satoh and K. Inada: "Abrasion resistant optical fibers with mechanically induced compressive surface stress," Conf. on Opt. Fiber Communication (OFC '90) (1990) THH 2.
- 15) たとえば、「光ファイバ増幅器とLD増幅器」特集、応用物理学会 日本光学会 微小光学研究グループ機関誌, **8** (1990) 2-16.
- 16) Y. Miyajima, T. Komukai, T. Sugawa, and Y. Katsuyama: "Nd³⁺ doped fluoro-zirconate fiber amplifier operated around $1.3\mu\text{m}$," Conf. on Opt. Fiber Communication (OFC '90) (1990) PD 16.
- 17) M. Nakazawa, K. Suzuki and Y. Kimura: "20 Gb/s soliton amplification and transmission with an Er³⁺-doped fiber," Int. Conf. on Integrated Opt. and Opt. Fiber Commun. (IOOC '89) (1989) 20 PDA-3.