

# CVD 法によるガラスの製造

古河電気工業(株) 黒羽 敏 明  
研究開発本部技師長

## はじめに

通信用光ファイバとしての石英光ファイバは、K. C. Kao 等<sup>1)</sup>による低損失化の指摘に始まり、1970年の米国コーニング社の外付けCVD法による20 db/km (1kmで1%の透過率)の光ファイバの発表<sup>2)</sup>、1974年の内付けCVD法<sup>3)</sup>、さらに軸付け法(VAD)法<sup>4)</sup>の発展により、理論限界に近い極低損失光ファイバが実現されている。

紫外から赤外にかけての広い波長領域での低損失性、広帯域性、物理的・化学的長期信頼性の点から各種CVD法による石英光ファイバは最も実用的な通信伝送路の位置を占めるに至っている。

石英系のファイバについては、第一回目のセミナーでNTTの高田氏が、前前回のセミナーで光ファイバの強度を同じくNTTの稲垣氏が報告した。従って、ここではVAD法及びファイバの強度については割愛し通称いわれているMCVD法を中心に報告する。

最初にいろいろな観点からファイバを分類整理すると、ファイバの構造には、コア部分の屈折率が均一的なステップインデックス形(SI形)ファイバと、分布を持ったグレーデッドインデックス形(GI形)ファイバに分類される。SI形ファイバは光ビームがコア部を伝搬する際に光路長差を生じ、モードにより伝搬時間が異なるのに対し、GI形ファイバはコア部の屈折率差が2乗分布になっており、周辺部に行くに従い屈折率差が小さくなるため、屈折率の大きいコア中心部を通る光は遅く、周辺部を通る光は速く進むので、光の伝搬時間は光路によらず同じとなる構造になっている。従ってGI形ファイバはSI形ファイバに比べ数10倍の大

容量の伝送が可能である。さらに最近では、屈折率の差が非常に小さくコア径が小さいシングルモードファイバというものに変化してきた。シングルモードファイバの中にも、マッチドクラッド(MCSF)という、クラッドの部分が最後まで全部フラットなもの、デプレッソドクラッド(DCSF)という、コア周辺の1部分のクラッドだけ屈折率が低くて、周辺に行くに従ってもう一度屈折率が上がるというような、山の字状のシングルモードファイバがある。さらには現在まだ実用化には至っていないが分散を調整したシングルモードファイバの分散シフトシングルモードファイバ(DSSM)や分散フラットシングルモードファイバ(DFSM)のように、石英系のファイバの中でも、この10年ぐらいの間に多くの構造が検討され変化してきた。

波長は、光源との関係、あるいはファイバとの関係で、最初は $0.83\mu\text{m}$ が使われていたが、現在では $1.3\mu\text{m}$ 、将来は $1.55\mu\text{m}$ が中心波長になるであろうといわれている。

機能は構造と密接に関係するが、多モード、シングルモードとモード数による違いのほか、例えばシングルモードの中にも屈折率分布の変化のほかに単一偏波、定偏波ファイバといったような機能を持った単一偏波ファイバ、さらには希土類元素をドープしたような、あるいはゲルマニウムファイバでのラマン効果をねらったような非線形効果を持つファイバがある。コア数については、いわゆる通信用のファイバにはシングルコアファイバが用いられているが、将来の多心ケーブルをねらいとしてデュアルコアというものも検討されている。1つのファイバの中に2つのコアを持つもので、別の用途としてはセンサ用に使われるケースもある。パンチファイバというのはファイバを5本、あるいは

表 1 光ファイバの分類

光ファイバ	屈折率分布	ステップインデックス型 グレーデッドインデックス型
	伝導モード数	シングルモード マルチモード
	材料組成	石英系 多成分系 石英コア・プラスチック・クラッド系 プラスチック系 その他(赤外用)
	製造法	内付けCVD法(MCVD法) 外付けCVD法(OVPO法) 軸付け法(VAD法) プラズマCVD法(PCVD法) ロッドインチューブ法(RT法) 2重ルツボ法
	使用目的	波形伝送用
		イメージ伝送用 エネルギー伝送用

は6本を横に並べて一体化してテープ状のファイバとしたもの、マルチというのはイメージファイバ等がよくいわれている1本のファイバ中に数千あるいは数万のコアを入れたもので、いろいろなコア数での変化がある。用途としては、信号伝送が圧倒的だがライトガイド、耐熱性、耐放射線性といわれるような特殊の用途にも道が拓けつつある。

表1は、本報で報告する内付けCVD法の各種製造法における位置付けのほか、すでに述べたいろいろな分類を整理したものである。

### 1. 光ファイバ用母材の合成

石英ガラス系ファイバは、通常光ファイバと相似な棒状ガラス体(プリフォーム、母材)を各種のCVD法によって作り、これを糸状に線引きする方法によって製造されている。母材の製造工程にはこれまでいくつかの方法が提案されているが、代表的な製造法には、

- 1) コーニング社で開発された外付けCVD法(OVPO法)<sup>2)</sup>
- 2) ベル研究所で改良された内付けCVD法(MCVD法)<sup>3)</sup>
- 3) NTT 茨城研で開発された気相軸付け法(VAD法)<sup>4)</sup>

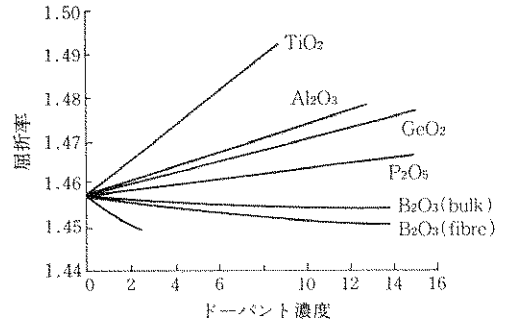


図 1 ドーパント量と屈折率

あるいは、プラズマを使用した低温プラズマCVD法、高温プラズマCVD法などがある。

CVD法による石英ガラス系ファイバでは二酸化けい素(SiO<sub>2</sub>)が主成分となり、これにGeO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>あるいはFなどがドーパントとして添加されている。これらのドーパントは屈折率の制御(図1に各種ドーパントと屈折率を示す)、または膨脹係数、ガラス軟化温度の調整のために用いられる。これらの原料はいずれも塩化物などのハロゲン化物から得られる。一般に、原料は室温での蒸気圧が比較的高く気相状態で扱うことができ、原料の精製が容易なことから、半導体工業で使用されるもので高純度の原料が市販されている。

原料供給系は、液体原料を入れたバブラを一定温度に保持し、液中にマスフローコントローラによって流量を精密にコントロールした酸素、アルゴンなどのキャリアガスを通気し、制御温度での原料の蒸気圧に相当する原料ガスを反応系まで同伴させる構成になっている。したがって原料の温度、蒸気圧とキャリアガス量によって供給される気体状原料の量が規定される。

通常は液体原料の温度を一定にしておき、キャリアガスの量を変えることによって気体原料の量を変化させている。原料の供給量や組成によって生成ガラス量や組成が規定されるため、キャリアガス量のコントロールが重要な因子となっている。

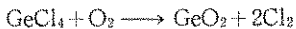
OVPO法やMCVD法では、所望の組成分布(屈折率分布)を持ったガラス層を数十層か

ら 100 層に分けて積層させるが、これら一層毎に原料組成を変化させるには、一層毎にマスフローコントローラを作動させ反応系へ供給するガス組成をコントロールしている。

石英系ファイバの主要部分であるコアおよびコア周辺のクラッドは上述のハロゲン化物から合成されるが、伝送に影響のないクラッド部分には石英管が用いられる。MCVD 法の出発石英管、VAD 法のジャケット管などに用いられるもので、一般には天然石英が用いられているが、少量の不純物を含んでいるために場合によっては合成石英から作られた石英管を用いることもある。石英管には不純物の他に気泡や寸法精度にきびしい要求が出されている。

### 1-1 プロセス

原料供給系から搬送された気体原料は、図 2 の模式図に示すように、ガラス旋盤に固定され回転している石英管内に供給される。石英管は外部より酸水素バーナにより加熱され加熱部では



などの反応により石英ガラス（上記の場合は  $\text{GeO}_2$  ドープ石英）の微粒子が生じ、石英管の内壁に付着する。酸水素バーナは左右にトラバースする構造になっており、バーナのトラバースにつれてガラス層が形成積層される。酸水素炎の 1 回の移動で厚さ数  $\mu\text{m}$  から 10 数  $\mu\text{m}$  のガラス層が形成される。

通常 MCVD 法では、はじめはクラッドに相当するガラス層を積層させ、次いでコアに相当するガラス層を積層させる。GI 形ファイバの

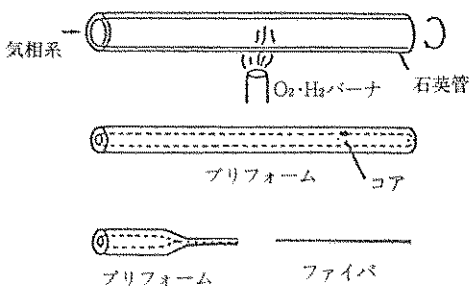


図 2 内付け法

コアは、一層毎に組成の異なる原料を供給しガラス組成の異なった層を 50-100 層積層させることで作られる。

微妙な屈折率分布を実現させるには、MCVD 法における石英管の外径を制御することが製造上の諸条件をおさえるためにきわめて有効である。外径をレーザー光で測定し、石英管内圧を排気口の調節弁で制御することにより、ガラス合成中の管径を常に一定に制御する等の方策がとられている。

コア/外径比に合った厚みまで合成ガラス層を堆積したのち原料供給を停止し石英管に内圧を付与しながら加熱温度を約  $1,900^\circ\text{C}$  とすると、石英管は軟化した石英ガラスの表面張力により石英管径を縮小させ、最終的には中空部分が完全につぶれて中実な母材となる。このようにしてできたプリフォームは、中心部が所定の屈折率分布を持った合成石英から成り、周囲が出発石英管からの純石英ガラスで取囲まれた構造になっている。

MCVD 法は、比較的容易に低損失、高帯域光ファイバが得られる方法であり、1976 年には長波長域で  $0.5\text{dB/km}$  以下を実現し、1979 年には  $1.55\mu\text{m}$  で  $0.2\text{dB/km}$  という石英系光ファイバの極低損失を実現した<sup>7)</sup>。

しかし MCVD 法は、ガラス合成速度が  $0.1 \sim 0.3\text{g/min}$  と遅く、また石英管 1 本毎に個別に合成しなければならないことや、その合成量にも限界があることなどにより量産性に欠ける欠点がある。反応効率や合成速度を高めるために石英管内にプラズマを発生させるプラズマ CVD 法 (PCVD 法) が提案されている。これには石英管内部を  $10 \sim 30\text{ torr}$  に減圧して行う低温プラズマ法と常圧下で高周波を使う熱プラズマ法がある。前者は反応効率は高いが合成速度は  $0.1\text{g/min}$  程度と遅く、後者は合成速度は速いがプラズマ炎が不安定である。

### 1-2 合成ガラスの性状

図 3 は  $\text{SiO}_2$  と  $\text{GeO}_2$  の粉末で、VAD 法とか OVD 法という火炎加水分解でつくられた粉末の温度に対する収縮率を示すが加水分解法と酸化分解法では、多少焼結の挙動が違うことが

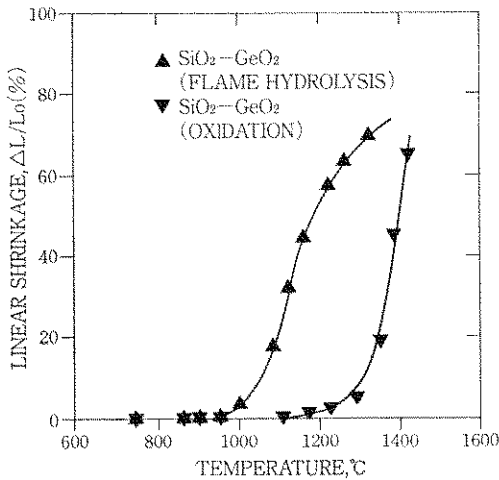


図3 加水分解法と酸化分解法による試料の線収縮率

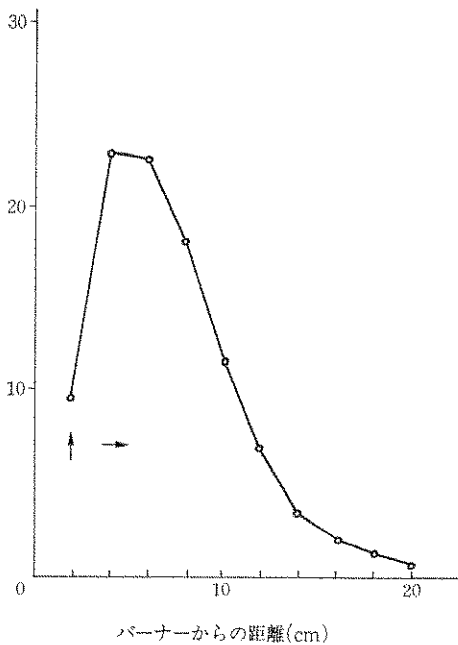


図4 長手方向堆積量分布

わかる<sup>6)</sup>。

図4はMCVD法でつくったときのガラスがどの程度均一かということ調べた一例で、MCVDプロセスにおける石英管の外側の加熱源(酸水素炎)を固定して、原料をある条件下でパイプの中に流してパイプ内にガラスを合成すると、固定されたバーナの部分は高温になるため、この部分では原料が完全に透明なガラス

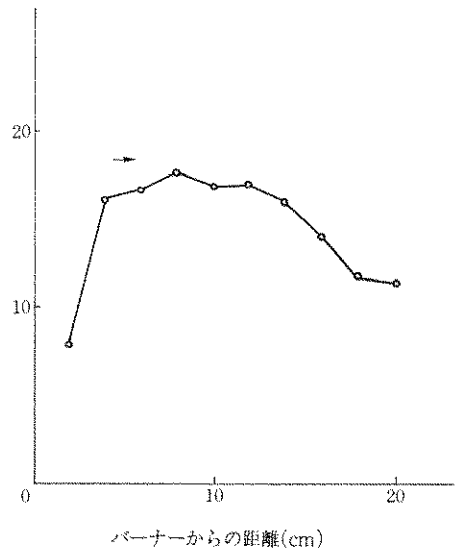


図5 長手方向 GeO<sub>2</sub> 濃度

となるが下流の方では温度が不足するためバーナ固定部分で熱分解した微粒子、スート(煤)がバーナの位置から下方にいくに従って図4のように長手方向堆積量分布を示す。これはパイプ内への原料の流量条件によって変わり長手方向に必ずしも均一なガラスが堆積していないことを示している。

堆積量はバーナを往復させることによって均一化させることができるが、堆積量の変化と同時に組成変化を示す。図5はバーナが直接原料を高温でガラス化した部分のゲルマニウムの含有率と、流れの下方の部分に堆積した煤中に含まれるゲルマニウムの含有率を示している。このようにMCVD法によるガラスはマイクロな点で不均一な合成ガラスということが出来る。これはファイバを切断して断面を顕微鏡等で観察した場合にバームクーヘン状の模様として現れるが、プリフォームをファイバ状にするには、20~30mmのものが100μm程度に細められ組成変動の厚さも波長オーダー以下となるので伝送上の問題にはならない。

### 1-3 管径制御

MCVD法ではパイプの中に原料を入れながら、外部から加熱して、通常、数十回の高温加熱が繰返されるために、パイプが徐々に縮んでいくという現象が起きる。パイプの径が変わる

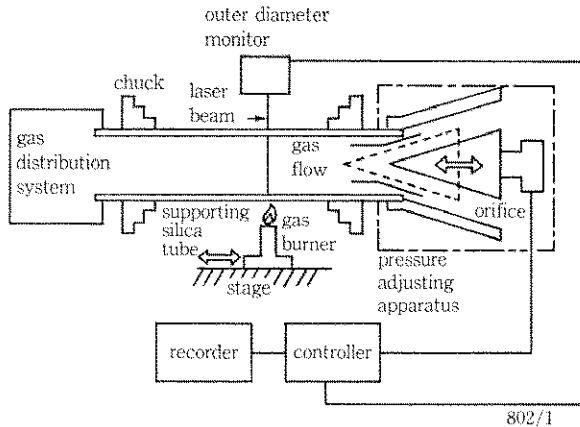


図 6 Schematic diagram of the improved c.v.d. system with control of the internal pressure of supporting tube  
パイプ内圧力を制御した改良 MCVD 法

と、一定の流量に対して流速が変わるとか、温度が変わるといふ現象が起きる。最近では MCVD 法を行うに当たっては、原料の供給される側を正圧に保つため原料の出口側に工夫を凝らして、パイプ内の圧力をコントロールし外部の加熱によってパイプが収縮することを防ぐような、加圧制御が採用され最初から最後まで 5~6 時間の加熱中にパイプの収縮を抑制することが行われている (図 6)。

図 7 は、管径制御をした場合の管径の変動と、管径制御をしなかった場合のパイプが徐々に細くなっていく様子を示したものである<sup>2)</sup>。

#### 1-4 各種ファイバの構造

各種ファイバのうちシングルモードファイバについて、最近の動向を紹介する。

シングルモードファイバは外径が 125  $\mu\text{m}$ 、光の通るコアの部分は波長によって異なるが約 10  $\mu\text{m}$  で、コアとクラッドの屈折率差が約 0.3% というのが現在の 1.3  $\mu\text{m}$  用のシングルモードファイバの標準の構造になっている。

光ファイバは条件によってシングルモード LP<sub>01</sub> から、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>、LP<sub>02</sub>…… というふうモードがだんだん増えマルチモードへと変化して行くが、その条件を規定するものに V 値がある。V 値はコア径 (2a) と屈折率差 ( $n_1, n_2$ ) と波長 ( $\lambda$ ) によって決まってくる数字で

$$V = 2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / \lambda$$

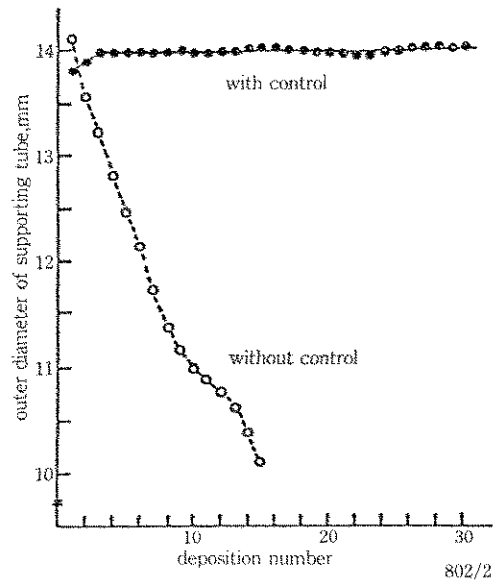


図 7 Examples of the outer diameter variation of the supporting silica glass tube during the deposition process at high temperature about 1,600°C  
管径制御の有無による管径変動

で定義される。

V 値 2.405 というのがシングルモード条件になっており、2.405 以下では LP<sub>01</sub> のモードしかコアの中を伝搬しない。2.405 を越えると、LP<sub>01</sub> のモードと LP<sub>11</sub> の 2 つのモードが伝搬するというので、シングルモードではなくなっ

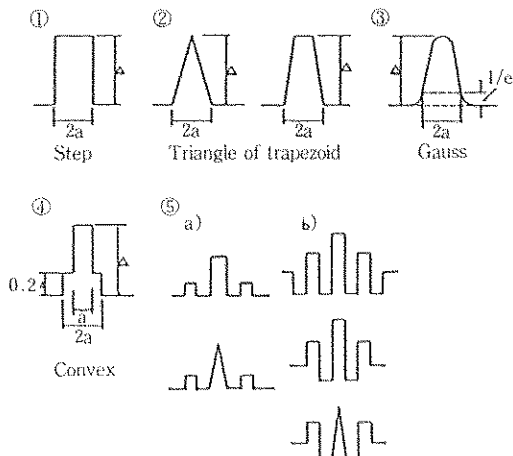


図 8 各種シングルモードファイバ

てしまう。

前述した如く、シングルモードファイバは数多くの伝送上の要求から図 8 に示すように各種の屈折率分布を有するファイバが開発されている。(1)が標準型のステップ型分布のシングルモードファイバ、(2)の左はコアの部分が三角形になっているもの、(2)の右は台形になっているもの、(3)は放物線でガウス分布になっているもの、(4)はコンベックスと呼ばれているが、2段の屈折率分布を持ったもの、(5) a)のように中央のコアの外に、クラッドの中に一部

屈折率の高い部分を持たせ周辺部の光をこの中に閉込めたもの、等が提案されている。このようにシングルモードファイバにはいろいろな構造が提案されているが、これは分散をできるだけ小さくするために、図 9 には材料分散が波長によって変わる様子と導波路の分散を示したが、導波路の分散は構造によって変えることができる。材料の分散と導波路の分散を合せたものが全分散で、図 9 は材料分散とステップ型のシングルモードの導波路分散を合せた全分散が波長  $1.3 \mu\text{m}$  で零分散になることを示している。しかし  $1.3 \mu\text{m}$  より低損失領域である波長  $1.55 \mu\text{m}$  が使われるようになると材料分散が大きくなるので、この分散を導波路分散でキャンセルして全分散をゼロに持っていくために、図 8 に示したような各種の構造のものが提案されている。さらに  $1.3 \mu\text{m}$  から  $1.55 \mu\text{m}$  に互っていろいろな波長で多数の信号を送る目的から分散の小さい領域を広げたファイバとして分散フラットファイバも提案されている。

このような複雑な屈折率分布構造のファイバが製造できる方法としてクローズアップされるのが MCVD 法である。MCVD 法は量産性に欠ける欠点はあるが、幅の広い応用のきく方法として優れた特徴を有している。

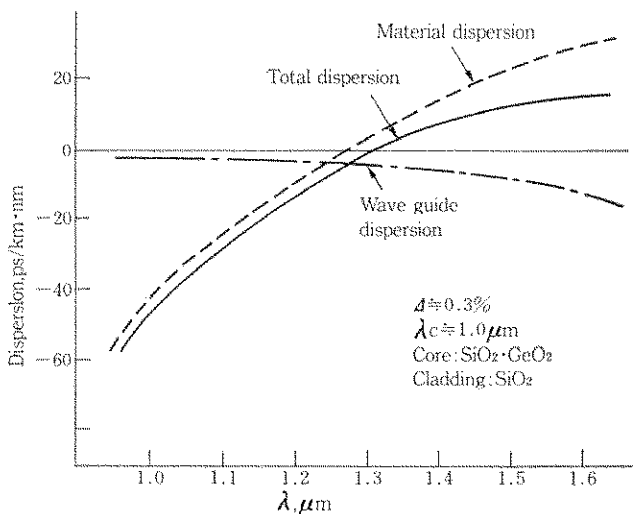


図 9 Dispersion of single mode fiber  
シングルモードファイバの分散

## 1-5 低損失化

光ファイバに要求される低損失化に対して、これを阻害する因子は吸収損失と散乱損失に分類される。

吸収損失には、遷移金属、OH 基などの不純物に起因する吸収あるいはガラス本来の吸収である長波長赤外部領域の分子振動吸収と紫外部領域の電子遷移吸収とに分類される。

散乱損失は、ガラスの微小屈折率ゆらぎに起因するレイリ散乱、コアクラッド界面の不完全性による散乱、曲りによる散乱などに分類される。

これらの損失要因は不純物吸収や構造不完全性による散乱などの製造技術上の不備で発生する要因と、分子振動吸収、レイリ散乱などガラスの本質的な要因とに分けられる。損失の要因を整理する方法として、ファイバの損失  $\alpha$  (dB/km) を

$$\alpha = a/\lambda^4 + b + c$$

ここに  $a$ : レイリ散乱係数

$b$ : 構造不完全性、マイクロバンドなどの波長に依存しない損失

$c$ : OH 基、遷移金属イオン、カラーレション、分子振動吸収、電子遷移吸収などの吸収損失

式で表現し、 $a, b, c$  を求める方法がある。

遷移金属イオンによる吸収は、例えば Cu; 2.5 ppb, Fe; 1 ppb, Cr; 1 ppb がそれぞれ 1 dB/km (波長 0.85  $\mu\text{m}$ ) の損失増加に対応するので、ファイバの製造では不純物の汚染を極力避けねばならない。

幸い CVD 法で使う原料の金属ハロゲン化物は半導体用の素原料として製造されており、低損失化を阻害する遷移金属は元素によって異なるものの、いずれも ppb オーダあるいはそれ以下の高純度品が入手できること、更に原料が CVD 反応工程に供給される段階で液体原料を気化して反応系に導入するため、この過程で低温蒸留による自己精製効果が起り不純物の混入は殆ど問題にならない。特に、MCVD 法は原料供給系から反応系に至るまでクローズドシステムになっているので、不純物による汚染の心

配はさらに少ない。

光が伝搬される領域に OH 基が存在すると、OH 基の分子振動に基く強い吸収が赤外領域に現れる。波長 2.73  $\mu\text{m}$  の OH 基の基本振動のほかに、その第二および第三高調波が 1.38  $\mu\text{m}$  および 0.95  $\mu\text{m}$  にあり、これらの波長で OH 基の吸収損失となる。例えば 1 ppm の水が存在すると 0.95  $\mu\text{m}$  で約 1 dB/km、1.38  $\mu\text{m}$  では約 65 dB/km の損失となる。したがって光ファイバでは、この OH 基を低減することが低損失化のための重要な課題、特に 1.3  $\mu\text{m}$  での低損失化のための必須条件となっている。

熱酸化反応を利用する MCVD 法と火炎加水分解反応を利用する OVPO 法および VAD 法では、ガラス中への OH 基混入経路が異なる。前者はガラス生成が水の存在しない雰囲気で行うのに対して、後者は酸水素炎中でガラスが生成するため、高温下とは云え非常に高濃度の水蒸気にガラス生成物がさらされるので、この時にガラスの中に OH 基が混入する。

このように MCVD 法では反応に起因する OH 基の混入はないが実際のファイバでは少量の OH 基が混入し問題となっていた。この原因は詳細な検討の結果、出発石英管中に含まれる 100~200 ppm の OH 基が工程中に熱拡散し合成ガラス中に混入してくるのが主要因であると報告されている。

MCVD 法の OH 基の低減化法としては、石英管からの OH 基の拡散を抑制するために、(1)デポジションやコラプス工程をできるだけ低温で実施すること、(2)合成クラッド層を厚くつけて OH 基の拡散をクラッド層で吸収させることなどが有効で、例えば図 10 は合成クラッドの厚さを 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm と変化させた時の OH の濃度を示したものでクラッド層を厚くすることが有効であることを示している<sup>8)</sup>。

レイリ散乱は、ガラス材料固有の微小屈折率ゆらぎに起因し、その損失値は  $1/\lambda^4$  に比例して増減する。図 11 はドーパントが入ったガラス組成によるレイリ散乱が示されている。ドーパント濃度の減少によりレイリ散乱係数は小さ

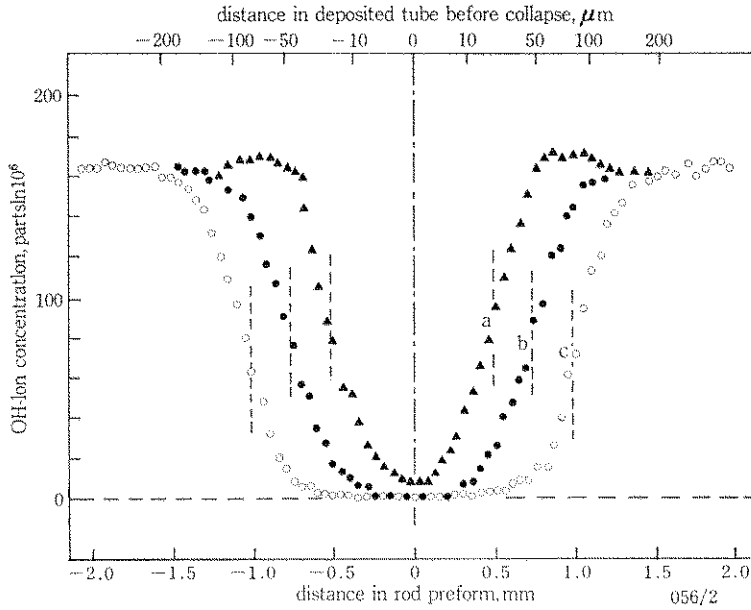


図 10 OH-ion distribution profiles for nondoped silica rod preforms  
 Deposited silica glass diameter : (a) 1.0 mm, (b) 1.5 mm and  
 (c) 2.0 mm  
 合成クラッドの厚みと OH イオン濃度の変化

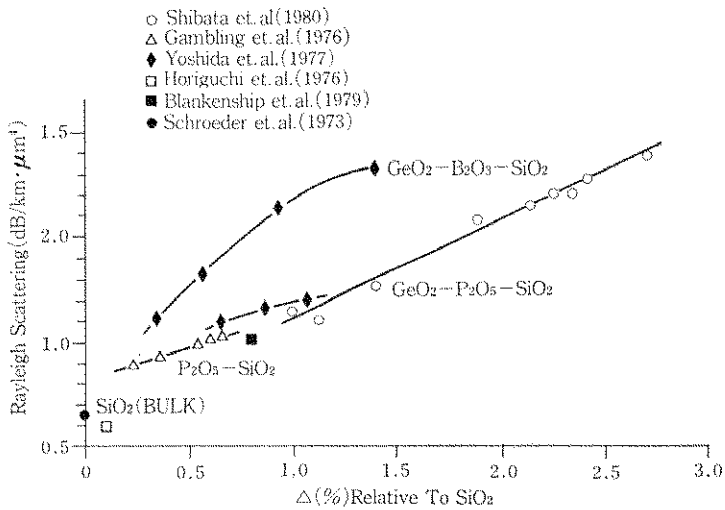


図 11 Rayleigh Scattering Coefficient vs Composition  
 ドーパント濃度とレイリ散乱



くなり 1.55  $\mu\text{m}$  で約 0.15 dB/km の低損失が実現される。したがってシングルモードファイバでは、ごく僅かのドーパントを用いるか純粋な  $\text{SiO}_2$  をコアとし、クラッドにフッ素をドーブするのが低損失化にとって有利となる。

フッ素をドーブする手法として MCVD 法の場合は  $\text{SiCl}_4$  と共に  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{SF}_6$  などを流しフッ素の入った石英をつくっている。

しかし、MCVD 法や VAD 法では多量のフッ素をドーブすることが困難で屈折率差で 0.6% がフッ素ドーブの上限になっている。シングルモードファイバは屈折率差 0.3% が一般的なので問題はないが、さらに多量のフッ素をドーブするには別法として MCVD 法に類似した加熱源にプラズマを用いるプラズマ CVD 法がある。

## 2. MCVD 法の応用

以上、通常の通信用に使われる MCVD 法について述べたが、ここでは通信用途以外への MCVD 法の応用について紹介する。

通常の MCVD 法は原料に液体を用いて気相にして原料を供給するが、蒸気圧の小さいドーパントを用いる場合は気相での供給ができないため、図 12 のような工夫が施されている<sup>9)</sup>。図 12 はネオジウムをドーブしたファイバの例で、石英反応管の端部に凹みをつけそこに  $\text{NdCl}_3$  を入れ  $\text{SiCl}_4$  を流しながら凹み部分を約 1,000°C に加熱して通常の MCVD 法によってネオジウム入りのコア部分を合成している。これをファイバ化したものはネオジウムを約 30 ppm 含有しており、パンプ光に 0.59  $\mu\text{m}$  を使って 1.07

$\mu\text{m}$  のスペクトルを得たことが報告されている<sup>9)</sup>。また石英管の内側にリンをドーブした石英を積層した後にイッテルビウムを積層し、熱拡散でコア部分を形成したファイバも報告されている。

図 13 は MCVD 法で定偏波ファイバをつくらせたプロセス図である<sup>10)</sup>。石英管内にクラッドを合成したのち、フッ素ガスを流しながら石英管を回転させずに上下だけに熱を加えることによって部分エッチングをして、クラッドの一部を削り取り、再度通常の MCVD 法に戻してコアになるゲルマニウムを含んだ  $\text{SiO}_2$  を析出させ、引続き加熱コラプスして母材とするもので、コア部分を中心に両側に応力付与層が配された構造となる。これは、通常のシングルモードファイバの X 方向あるいは Y 方向に応力をかけることによって、横モードあるいは縦モードのどちらかを消去する定偏波ファイバを作った一つの例で、bow tie ファイバと呼ばれている。日本では、VAD 法をベースとした応力付与層が丸いバンダファイバが作られている。

1986 年の ECOC のポストデッドラインペーパーでコーニングが CVD 法によってハライドガラス、フッ化ベリリウム ( $\text{BeF}_2$ ) を作製したと報告し、フッ化物ガラスいわゆる赤外ファイバを CVD 法で作ることによって OH 基の吸収の非常に小さいものが得られると述べられている。また、得られたフッ化ベリリウムの短波長領域のレイリ散乱係数を求め、2~3  $\mu\text{m}$  の赤外領域の損失が 0.007 dB/km になると低損失の可能性を報告している。

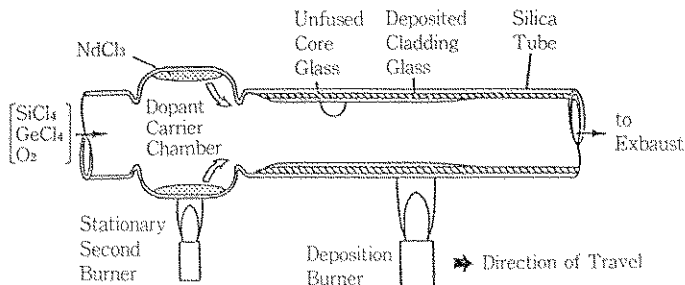


図 12 MCVD process for low vapour-pressure dopants.  
蒸気圧の小さいドーパントを用いる MCVD プロセス

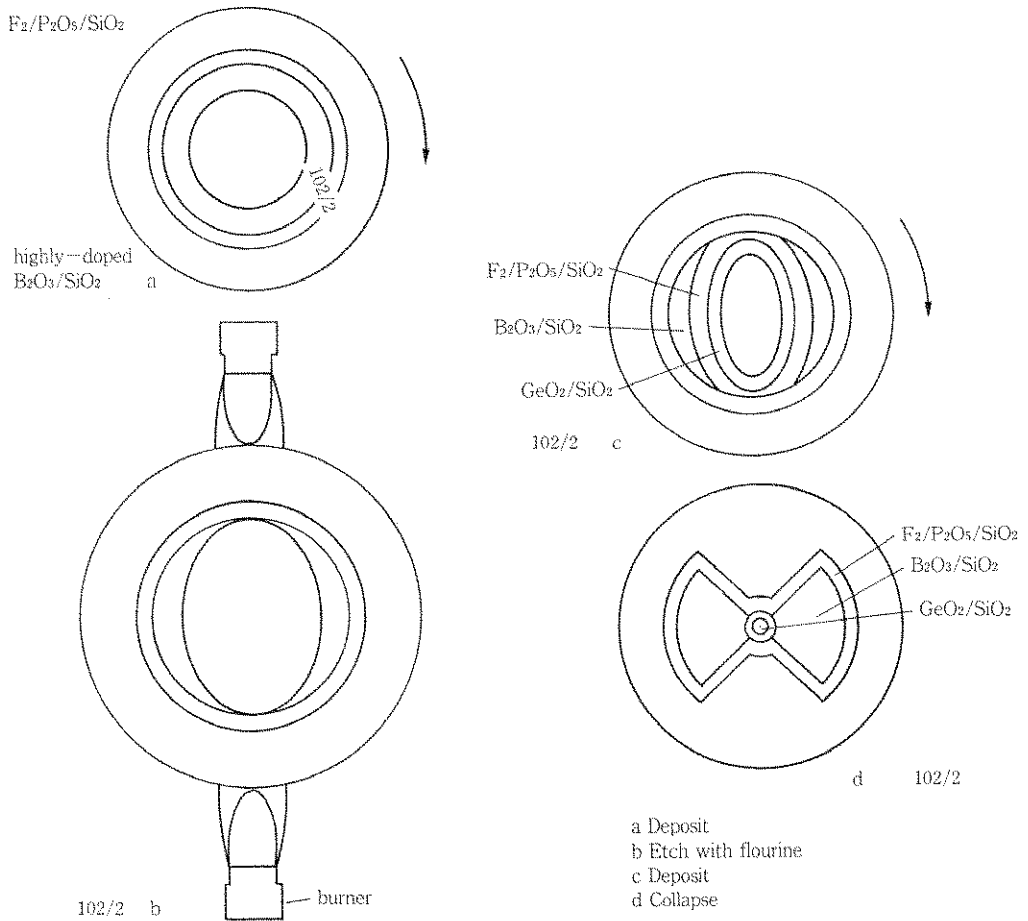


図 13 MCVD 法による定偏波ファイバ

### あとがき

1982 年の秋、光ファイバの長波長ロス増の問題が起きた。1980 年 5 月に布設したファイバが 2 年後に長波長領域で非常に大きな損失増加を起こした。この現象は、今では長波長ロス増とは言わず水素がファイバ中に拡散しロス増加に結びついたことから水素ロス増と言う名称で呼ばれている。多くの関係者の検討から水素の発生源が究められ、直ちに種々の対策が施された結果、現在では全く問題にならない水準に達している。主な水素発生源には光ファイバのコーティング材料に用いられるシリコン樹脂があったが、現在は水素発生の極めて少ない紫外線硬化型樹脂や水素の発生源 (SiH と考えら

れている) を極力減少させた改良シリコン樹脂が用いられるようになってきている。ガラス組成の点ではリンの濃度が高いとロス増加を招きやすいことが明らかにされ、最近ではリンの含有量を少なくしほとんど使わないか、使うにしても極く微量に抑えられている。

開発以来 10 余年を過ぎ実用段階を迎えた光ファイバは途中前記したような水素ロス増加と言う全く予想もしなかった問題に遭遇したが、その極めて優れた性能は今後の発展を約束させている。

### 〔参考文献〕

- 1) Kao K.C. and Hockham G. A. (1966): Dielectric-fibre Surface Waveguides for Optical

- Frequencies. Proc IEE, **113**, 1151~1158.
- 2) Kapron F.P, Keck D.B. and Maurer R.D. (1970): Radiation Losses in Glass Optical Waveguides. Appl. Phys. Lett., **17**, 423~425.
  - 3) MacChesney J. B., Oconner P. B., DiMarcello, F. V. Simpson J. R. and Lazay P. D. (1974): Preparation of Low Loss Optical Fibers Using Simultaneous Vapor Phase Deposition and Fusion. Xth Int. Congr. Glass, **6**, 40~45.
  - 4) Izawa T., Kobayashi S., Sudo S. and Hanawa F. (1977): Continuous Fabrication of High-Silica Fiber Preform, Technical Digest, IOOC '77, 375~378.
  - 5) Miya T., Terunuma Y., Hosaka T. and Miyashita T. (1979): Ultimate Low-Loss Single-Mode Fiber at 1.55  $\mu\text{m}$ , Electron. Lett., **15**, 106~108.
  - 6) I. B. Cutler: Sintering of Glass Powders During Constant Rates of Heating, J. Am. Ceram. Soc., **52**, 14~17 (1969).
  - 7) M. Okada et al: Electron. Lett., **14**, 89-90 (1978).
  - 8) M. Kawachi et al: Electron Lett., **13**, 247-248 (1977).
  - 9) S. B. Poole and D. N. Payne: IOOC-ECOC '85, 11~14 (1985).
  - 10) S. B. Poole and D. N. Payne: Electron. Lett., **18**, 153 (1982).

〔著者紹介〕



黒羽 敏明 (くろはとしあき)  
 昭和 33 年東京教育大学理学部  
 化学科卒同年古河電工入社  
 分析化学及び光ファイバの研究  
 に従事  
 現在研究開発本部技師長。工学  
 博士