光ファイバ

伊 沢 達 夫*

1. はじめに

空気との境界で光線を全反射させながら、透明な媒質中に光を伝ばんさせる光ファイバの基本原理解(1)は非常に古く、1870年に John Tyndall によって発見されている。しかし、現在のような形の光ファイバが実用化されるようになったのは比較的最近のことであり、1950年以降である。初期の光ファイバは、単純なガラスの糸であり、一端から入れた光は、ファイバの内表面で全反射を繰り返しながら他端に伝わってゆくものであった。しかし、このような構造ではファイバの表面が汚れていると、光は吸収されたり、散乱してしまい伝ばんする光量は極端に減少してしまう。

この問題を解決するために、ガラスファイバの表面を、屈折率の低い透明なガラスまたはプラスチックにより被覆されたものが開発された。このような構造のファイバでは、入射光は中心のガラス(コアと呼ぶ)の中を被覆ガラス(クラッド)との境界で全反射しながら伝ばんしてゆき、ファイバ表面の汚れの影響はなくなる。このような構造では、コアとクラッドとの屈折率差があまり小さいと、光ファイバの軸にほぼ平行な光しか全反射しないため、伝ばん可能な光量は少なくなってしまう。したがって通常の光ファイバは屈折率差をできるだけ大きくし、斜めから入射した光も伝わるようにしてある。光ファイバは、このような構造のものが開発されて始めて実用的な応用が考えられるようになった。

光ファイバの代表的な応用例はファイバスコープであり、胃、気管支、血管などの内視鏡として、医療用に多く利用されている。このようなファイバスコープは直径数十 μm ～ 数 μm のファイバを、両端が同じ順序になるように配列し、束にしたもので、両端を切りそろえ、研磨してある。このようなファイバの束の一端に観察しようとする物体の像をレンズで結像すると、その像はファイバのコア径で決まる画素に分けられ、光の強度として他端に伝わる。入口と出口とファイバの並べ方が同一であれば、他端に伝えられた画素は像を再生する。

光ファイバの他の代表的応用例は、光通信の伝送媒体としての利用である。光通信は1960年にレーザが開発されて以来、レーザの応用技術として最も注目されていたが、低損失で安定に使用できる光の伝送路がなかったため、実用化は困難と考えられていた。1966年 Kao(2)は高純度のガラスを用いて光ファイバを作れば、光通信用伝送路として使用可能であることを明らかにした。しかし、当時はガラス中の不純物を除去する技術が発達しておらず、光の伝ばん可能距離は高々数十 m で、長距離の通信は不可能であった。

本文は、光通信用の高純度・低損失ファイバの開発の過程と現状を、主に材料的問題点を中心にまとめたものである。

2. 光通信用ファイバ

通常のガラスは、二酸化シリコン・ SiO_2 を主成分とし、アルカリ金属、アルカリ土類金属および半導体、半金属の酸化物よりなるが、この中に遷移金属の酸化物が混入すると可視光、近赤外光を吸収するようになり着色する。したがって、透明度の良い光ファイバを作ろうとすれば、ガラス中に残留する遷移金属を十分に除去しなければならない。

窓ガラスやレンズ用の光学ガラスは珪石、長石、ホウ砂など天然の鉱物を粉砕、洗浄してつばで熔融して作られるため、鉄、銅などの遷移金属を多量に含有している。このような従来の製法では不純物の除去が容易でないため、低損失の光ファイバは実現困難と思われていたが、1970年米国コーニング社で合成石英ガラスの製造技術を応用して、20 dB/km(3)の低損失ファイバの作製に成功した。これまでの光ファイバの損失が数千 dB/kmであったのに比べると、非常に大きな進歩であった。この製法の考え方が基本となって、光ファイバの飛躍的な低損失化が可能となり、光通信方式実現の可能性が増した。

合成石英ガラスの製法は1940年頃から知られていた方法である。精製の容易な四塩化シリコン・ SiCl_4 をガラスの主原料とし、これを酸水素炎中で火炎加水分解し、 SiO_2 を合成する。ガラスの屈折率等を制御するための副原料も、四塩化ゲルマニウム・ GeCl_4 、三塩化ボロン・

* 日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所調査役
Optical Fiber ; Tatsuo Izawa (Musashino Electrical Communication Laboratory, NTT, Musashino)
1978年10月21日受理

BCl_3 , 三塩化リン・ PCl_3 などの塩化物が用いられる。これらの塩化物は、半導体工業で精製技術の確立した材料であり、多段蒸留により容易に高純度のものが得られる。蒸留によって簡単に分離できるものは、蒸気圧の低い遷移金属の塩化物であり、Si 中の B, P などは分離しにくい。これらの物質は半導体工業では不純物であるが、ガラスにとっては、原料であるから問題にならず、簡易な装置によって遷移金属を 1 ppb 以下にすることができる。

3. 光ファイバの製法

光ファイバの製法は、相似な断面構造を持ち、直径 10 mm 程度のガラス棒（ファイバ母材）を作る工程と、ファイバ母材を溶かして紡糸する工程に分けられるが、ファイバの特性は、母材の製造工程によってほぼ決ってしまう。現在、光通信用ファイバ母材の製造で最も広く用いられている製法は、コーニング社で開発した製法⁽⁴⁾を改良したもので、内付け CVD (chemical vapor deposition) 法と呼ばれる方法⁽⁵⁾である。図 1 は、母材

図1 内付け CVD 法。

作製装置の概略図であり、基本的にはガラス原料流量制御装置とガラス旋盤より構成されている。 SiCl_4 などの原料は、一定温度に保たれた容器に入れられており、この中にサーマル・マスフロー・コントローラにより精密に流量制御された酸素ガスを導入し、原料蒸気を飽和させて取り出す。原料蒸気は、ガラス旋盤にセットされた石英管（外径 15~20 mm, 肉厚 1~1.5 mm）内に導入される。石英管を回転させながら外部より酸水素バーナで局部的に約 1800 K に加熱すると、内部を流れる原料は酸素と反応して透明なガラス膜として、石英管内壁に付着する。加熱部を長さ方向にゆっくり移動させると反応部が移動し一様な厚さのガラス膜が形成される。1 回のバーナの走査で、付着するガラス膜の厚さは数 μm ~数十 μm であり、通常このようなガラス膜を 100 層程度堆積させる。半径方向の屈折率分布を制御するためには、ガラス中に GeO_2 , P_2O_5 などが添加されるが、所定の屈折率分布を実現するために、各層毎に副原料の濃度が制

御される。一般に良く用いられるファイバは、コアの屈折率が一様なステップ型と、中心から半径の自乗に比例して屈折率の減少するグレーデッド型があるが、これらは共に、ガラス膜中の添加物濃度を制御することにより容易に作ることができる。

屈折率を制御するためには、 GeO_2 を添加する。屈折率差が 1% 程度の多モードファイバでは、 GeO_2 を 10% 程度、屈折率差が 0.3% 程度の単一モードファイバでは、3% 程度添加する。このほかに通常は、ガラスの軟化温度を下げるため、あるいはコア・クラッド間の膨張係数の違いによる歪を除去するため、 P_2O_5 , B_2O_3 を数% 程度添加してある。

石英管の内壁に所定の厚さのガラス層を形成した後、加熱温度を 2300 K 程度まで上げると、石英管は溶けて粘性が下り、表面張力により収縮してゆく。石英管の内径は、加熱すればするほど小さくなってゆき、最終的には直径 10 mm 程度の中空でないガラス棒になる。この時、合成したガラス膜は中心部に集まって同心円状のコアおよびクラッドを形成する。また周囲の石英管であった部分は、光の伝ばんには不要のものであるが、補強材として役割をはたすので、このままファイバ母材とする。

母材は図 2 に示すような高純度カーボンで作られた電気炉で、その端部を 2300 K 以上に加熱し、溶けた部分を一定速度で引き出し、太さ 100~150 μm のファイバにし、ドラムに巻き取る。ガラスの表面にキズがつくと非常に弱くなるので、保護するため光ファイバの表面には数 μm ~100 μm の厚さのプラスチックを、線引き直後、ドラムに巻き取る前に被覆することが多い。

図2 光ファイバ線引装置。

内付け CVD 法は 1 本のファイバ母材を作るのに約 8 時間程度を要し、得られるファイバの長さは 2~5 km 程度でしかない。また 1 本ごとに個別に作るため作業効率も悪く、寸法、特性を揃えるのが容易でない。このため最近では種々の改良技術が開発されており、筆者らが開発した VAD (vapor phase axial deposition) 法⁽⁶⁾も

その1つである。この方法は、太い母材を連続的に作ることができ、ガラス合成速度も内付け CVD 法の 10 倍以上であるなど多くの特徴を持っている。

4. 光ファイバの特性

光ファイバ伝送損失は、紫外部、赤外部にある材料個々の吸収と、ガラス中に存在する密度、組成のゆらぎによるレーレ散乱、および不純物による吸収によって決まる。不純物のうち遷移金属⁽⁷⁾は図3に示すように、数 ppb で 1 dB/km 程度の大きな損失原因となるが、現在用いられている製法では、測定不能程度まで精製されており、光ファイバの特性上何ら問題でなくなっている。

図3 金属不純物による分光損失特性(不純物が 1 ppb 混入した場合の損失)。

遷移金属不純物が完全に除去されたファイバは、図4⁽⁸⁾に示すような“V”字形の波長損失特性を持っており、V字の谷は波長 1.2~1.6 μm にある。谷の付近にある小さな山はもう1つの不純物である水によるもので、1 ppm の水が含まれていると 0.95 μm に 1 dB/km、1.25 μm に 3 dB/km、1.4 μm に 65 dB/km の吸収が現われ

図4 低損失光ファイバの分光損失特性。

る。これらの吸収は、OH 基の分子振動によるもので、1.4 μm、0.95 μm は基本振動(2.7 μm)の1次、2次高調波であり、1.25 μm の吸収は、Si-O の振動と OH 基の振動の結合波によるものである。このような OH 基による吸収損失は、光ファイバに残された唯一の不純物の影響であり、現在では 50 ppb 程度まで低減されているが、1.3~1.6 μm の波長帯で長距離の光通信を行なおうとする場合には大きな問題となる。

不純物を全く含まない光ファイバの伝送損失は、材料個々の電子遷移による紫外吸収と Si-O の分子振動による赤外吸収および、レーレ散乱によって決まる。これらの吸収はそれぞれ 0.13, 10 μm にあり、光通信に用いられる 1 μm 前後の波長では、直接関係はないが、これらの吸収帯の裾が、ごく微小ではあるが、1 μm 前後まで延びている。レーレ散乱による損失は、波長の4乗に逆比例して変化するが、ファイバ用ガラスでは 0.6 μm で 1 dB/km の損失となり、0.6~1.5 μm の波長域で主要損失原因となる。

これらの損失原因を分析してみると、シリカ系ファイバの損失限界は 0.2 dB/km 程度⁽⁹⁾であり、その波長は 1.6 μm 程度であると推定できる。実際に実現されているファイバは 0.35 dB/km であり、ほぼこの限界に近いものが得られているといえる。0.35 dB/km の損失とは、光を 10 km 伝送しても、45% は伝わるということであり、現存するもので最も透明なものである。図5は 1970 年頃からのハイシリカ光ファイバの損失低減の様子を示したもので、製造技術が急速に改善されていることがわかる。

図5 ハイシリカ系光ファイバの損失低減化。

5. ま と め

光通信の低損失光ファイバは、1970 年にその端緒となる技術が開発されて以来約 6 年で、材料物性上の限界に近い損失特性を持つものが得られるようになっていいる。残された問題は、OH 基の完全除去のみであり、他は、量産化技術等工業化のための幾分の問題がある程度

で、材料面での基礎技術はほぼ完成されたといつて良い。光ファイバ作製技術の発展と、半導体レーザ等光源の長寿命化によって、光通信は夢でなくなり、現在ではその大きな信号伝送能力をいかに利用するか、あるいはそれを有効に生かした通信サービスの研究開発が必要とされる段階に達している。

0.35 dB/km という値は、光の超伝導ともいえる透明度であるが、このような材料がシリカ以外にもないかという疑問がでてくる。事実、最近では多くの材料について検討されており、特にアルカリハライドは物性的には低損失化が可能ながわかつているため、実験も行われている。今後このような新材料の研究がどの位進展するかは予断を許さないが、安定性、加工性が優れ、シリカガラスと同程度あるいはそれ以上低損失は材料を見出すことは容易でない。このような材料を精製して不純物を 1 ppb 以下にすることには多くの問題がある。特に酸素、水などが不純物として最後まで残るであろう。シリカガラスの原料は、地球上に多く存在し安価であるが、このような材料で低損失の光ファイバが得られるということは、まさに天が与えた“光の糸”といえる。

本文は紙面の制限で、細部にわたる記述はできなかつ

たが、光ファイバの電磁波論的取り扱いなど、通信に用いる場合の問題については、参考文献⁽¹⁰⁾を参照されたい。

文 献

- (1) N.S.Kapany : *Fiber Optics*, Academic Press, (1967).
- (2) K.C.Kao and G.A.Hockham : *Proc. IEEE*, **113**(1966), 1151.
- (3) F.P.Kapron, D.B.Keck and R.D.Maurer : *Appl.Phys.Lett.*, **17**(1970), 423.
- (4) D. B. Keck and P. C. Schultz : US Patent 3711262; 公開特許公報(日本)特開昭 46-5788.
- (5) J. B. MacChesney, P. B. O'connor, F. V. DiMarcello, J.R.Simpson and P.D.Lazay : *Xth Int.Congr.Glass*, **6**(1974), 40.
- (6) T. Izawa, S. Kobayashi, S. Sudo and F. Hanawa : *Int. Conf. Integrated Optics and Opt.Fiber Comm.*, (1977), 375.
- (7) P.C.Schultz : *J.Am.Ceramic.Soc.*, **57**(1974), 309.
- (8) H. Osanai, T. Shioda, T. Moriyama, S. Araki, M. Horiguchi, T. Izawa and H. Takata : *Elect.Lett.*, **12**(1976), 549.
- (9) T. Izawa, N. Shibata and A. Takeda : *Appl. Phys.Lett.*, **31**(1977), 33.
- (10) 末松安晴, 伊賀健一 : 光ファイバ通信入門, オーム社, (1976).