

通信用石英系光ファイバの製造方法

古河電気工業(株)情報通信カンパニー技術企画部

小倉 邦男

Fabrication method of silica fiber for optical transmission

Kunio Kokura

Furukawa Electric Co., Ltd., Technical Planning Dept. Telecommunications Company

1. はじめに

現在の情報化社会を構築できたのは、メタルケーブルに比べて桁違いに大量の情報をかつ遠くまで送ることができる高性能な光ファイバが開発され、これを用いた通信網が全国に張り巡らされたからである。最近では光ファイバが家庭内まで引き込まれ、自宅でいつでも鮮明な動画を見たり、知人と大量のデータを高速でやり取りするのが、ごく普通の風景となっている。本稿では、この公衆通信に使われる光ファイバの製造方法^{1),2)}について解説する。

2. 光ファイバの構造

光ファイバは屈折率の高いコアとそれを取り囲むクラッドからなり、コアに入射された光の信号はクラッド界面での反射や屈折によってコアに閉じ込められ伝搬する。図1に光ファイバの代表的な構造を示す。クラッド外径は125 μm で髪の毛よりも細く、これを保護する樹脂被覆外径は250~500 μm である。コア径や屈折率分布の違いによって光の伝播状態が異なり、伝送特性や接続性なども違ってくるため、それぞれ

の特長を活かした使い分けがなされている。これらの断面屈折率分布は様々なガラスやプラスチック材料で実現できる。しかし、公衆通信の伝送媒体としては、850 nm~1,550 nmの使用波長帯で伝送損失が低く（光透過率が高い）、加工性に優れ、かつ20年以上の使用に耐えられる化学耐久性も求められることから、コアとクラッドともに石英ガラスを用いた光ファイバが採用されている。高純度なSiO₂をホストガラスとし、コアには屈折率を上げるGeO₂やP₂O₅を、クラッドにはFなどの屈折率を下げる材料（ドーパント）を添加することで、屈折率分布を形成する。

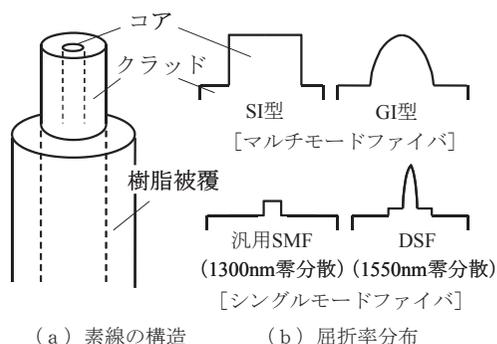


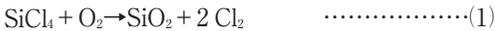
図1. 光ファイバの構造

3. プリフォームの製造方法

通信用光ファイバの製造では、まず光ファイバと同じ断面屈折率分布を持つ円柱状のガラス母材（プリフォーム）を合成する。原料に高純度な SiCl_4 、 GeCl_4 、 POCl_3 、 SiF_4 などのハロゲン化物を用い、化学気相反応でガラスを合成することで、使用波長帯に大きな伝送損失を生ずる遷移金属を ppb 以下まで低減することが可能となった。このことが光ファイバの実用化に繋がった。以下に、代表的な製法を紹介する。

3-1. MCVD 法（内付化学気相堆積法）

MCVD 法は、AT&T ベル研究所が開発し、工業化に初めて成功した製法で、図 2 の (a) に概要を示す。回転する石英管内に原料ガスと酸素を流し、酸水素バーナー火炎で石英管を外側から加熱し、原料の流れる方向にバーナーを移動させる。原料ガスが火炎付近の高温域（約 $1,600^\circ\text{C}$ ）を通過する際に、式(1)の高温酸化反応によってガラス微粒子（粒径：約 $0.1\ \mu\text{m}$ ）が生成し、熱泳動によって火炎前方の石英管内壁に付着する。



付着したガラス微粒子は、火炎が通過する時に高温に再加熱されて透明なガラスとなる、この工程を繰り返しながら、石英管の中心に向けて

厚さ数十 μm のガラスを何十層も堆積させて行く。断面の屈折率分布は、原料の SiCl_4 と GeCl_4 の比率を各層ごとに調整することで形成する。ガラス堆積後に火炎温度を約 $2,000^\circ\text{C}$ まで上げ、石英管の粘度を下げ、表面張力により中空部を潰す（コラップス）。更に、これを石英管に挿入して加熱一体化することにより、所定のコア・クラッド比を持つプリフォームが得られる。石英管によるサイズ制限はあるが（プリフォームの大型化が難しい）、装置構成が簡単で、かつ屈折率分布の制御がし易いことから、世界の多くのファイバメーカーで採用された。

3-2. PCVD 法（プラズマ化学気相堆積法）

PCVD 法は、近年ドラカ社が量産技術として完成させた製法である。図 2 に (b) として MCVD 法と並べて記載したが、石英管内壁にガラスを堆積させ、その後にコラップスするという工程は同じである。ただ、ガラスを堆積する工程で、石英管内に高周波誘導熱プラズマを発生させ、ガラス微粒子を経ずに直接透明なガラスを堆積させる点が異なる。この製法の利点は、ドーパントも含めて投入した原料の収率が 100% 近いことと、MCVD 法よりも薄い層を高速で堆積するため、屈折率分布の制御がより精度よくできることにある。ただ、装置が複雑で高価なため、現在は GI 型マルチモードファ

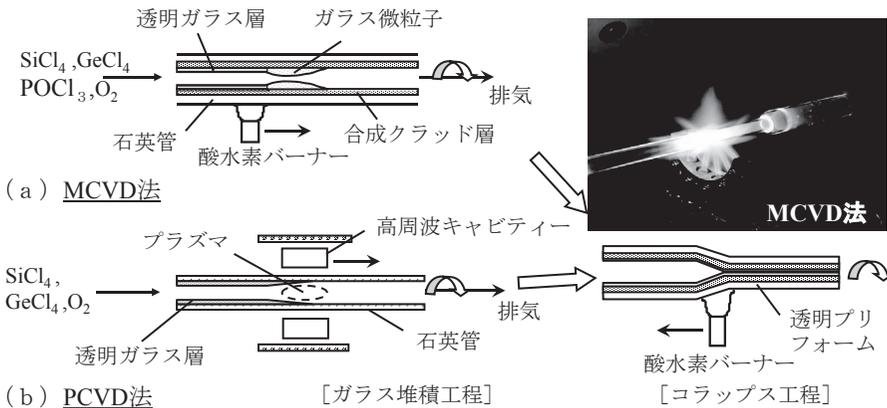


図 2. 光ファイバプリフォームの製造方法 (I)

イバのほか、複雑な屈折率分布が必要な特殊ファイバの製法として主に用いられている。

3-3. VAD 法（気相軸付堆積法）

VAD 法は、NTT と国内電線メーカー 3 社が共同開発した製法³⁾で、図 3 の (c) に概要を示した。酸水素バーナー火炎中に原料を投入し、式(2)の火炎加水分解反応によりガラス微粒子（粒径：0.3 μm）を生成させ、回転するガラス種棒の先端に吹き付けて、軸方向に連続的に堆積する方法である。



バーナーと堆積面の位置関係が一定に保たれるように、ガラス微粒子の堆積に合わせてスートを引き上げ、軸方向に均一な屈折率分布を形成する。VAD 法における屈折率分布の制御は、火炎内の GeO₂ 濃度分布や堆積面の温度分布（GeO₂ 付着効率が温度に依存することを利用する）を調整することで行なう。また、クラッドをコアと同時に合成する場合は、SiCl₄ のみを流すクラッド用バーナーをコア用バーナーの上方に配置する。合成されたスート（多孔質母材）は、約 1,500℃ のヒートゾーンを持つ高温炉へ挿入して焼結・透明ガラス化する。焼結時に空気が気泡となって残留するのを防ぐため、高温

炉内にはスート中を容易に拡散する He ガスを流す。同時に、火炎加水分解で合成したスートは多量の OH 基を含有するため、還元性の強い Cl₂ を He に添加することで数十 ppb 以下まで OH 基を除去する。これにより、通信で使用する 1,550 nm 帯において 0.18 dB/km（1 km の透過率で 96%）と材料固有の理論限界に近い低損失な光ファイバが工業レベルで得られるようになった。屈折率制御が難しいものの、大型化も容易なため、汎用 SMF や DSF の製法として国内メーカーの殆ど採用されている。

3-4. OVD 法（外付化学気相堆積法）

OVD 法は、コーニング社が開発した製法で、図 3 の (d) として VAD 法と並べて示した。VAD 法と同じ火炎加水分解反応を用いるが、ガラス微粒子は回転する芯棒に何層にも繰り返し堆積する。MCVD 法と同様に、バーナーの往復移動に合わせて原料の SiCl₄ と GeCl₄ の流量比を層ごとに調整することで、所望の屈折率分布を形成する。その後スートから芯棒を抜き取り、VAD 法と同様に焼結・透明ガラス化してプリフォームを得る。中空のプリフォームは必要に応じてコラップスする。芯棒の抜き取りや、焼結・透明ガラス化時のコア中

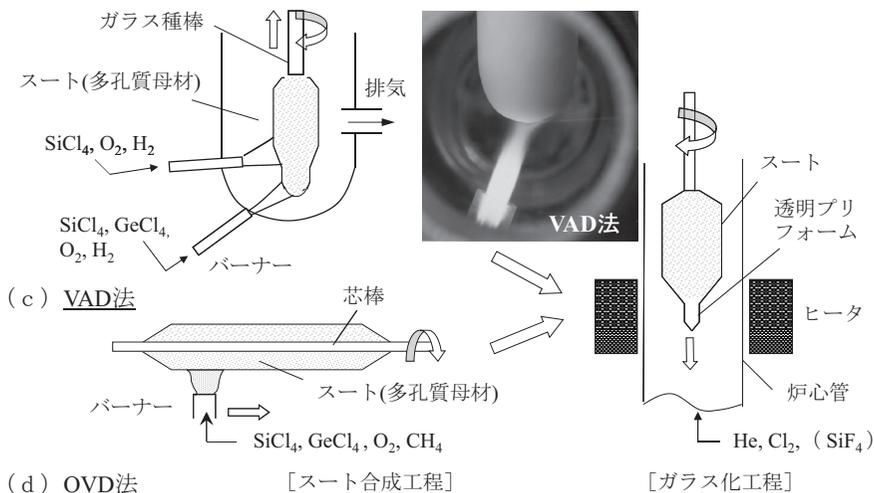


図 3. 光ファイバプリフォームの製造方法（II）

心部からの GeO_2 揮散防止など、特殊なノウハウが必要となるが、量産性に優れることから代表的な製法のひとつとなった。また、所定のコア・クラッド比を得るため、石英管ジャケットに替えて、クラッドを追加合成する方法としても広く活用されている。更に、焼結・透明ガラス化の際に He に SiF_4 ガスを添加することで、低屈折率のクラッドが容易に合成できるので、複雑な屈折率分布が求められる特殊ファイバの製造においても有利な方法である。

4. ファイバ化工程

石英系ファイバのファイバ化工程（線引）を図4に示す。前述した製法で合成したプリフォームを、高温炉に先端部から徐々に挿入する。高温炉としては、 2000°C 以上で狭いヒートゾーンが実現できるカーボン抵抗炉、もしくはジルコニア炉が用いられ、炉内は清浄なガス雰囲気には保たれる。プリフォームの先端が軟化して自重で落下すると、炉の下でファイバを巻き取り始める。高温炉の直下に設置したレーザー外径測定器（測定精度 $0.05\ \mu\text{m}$ ）でクラッド外径を測定し、ファイバの巻き取り速度とプリフォームの挿入速度を調整する。プリフォームは $200\ \text{mm}\phi$ を超える太いものもあるが、張力などを調整することにより、外径 $125\pm 0.5\ \mu\text{m}$ と高精度に寸法が制御でき、かつ $1,000\ \text{m/分}$ 以上の高速での線引が可能となっている。

石英系光ファイバは表面にキズがつくと強度が大幅に低下するため、線引直後に樹脂を被覆することで表面を保護する。液状の樹脂をダイスから押し出し、直下で紫外線照射もしくは加熱により硬化させる。通常、樹脂被覆は2層に分けて施され、内層にはクッション層として柔らかい樹脂が、外層は外傷を受けにくい硬い樹脂が用いられる。線引速度は樹脂の硬化速度によっても制限を受けるため、現在は硬化速度の速いアクリル系の紫外線硬化樹脂が主流となっている。光ファイバの引張強度はクラッド径が $125\ \mu\text{m}$ のもので約 $7\sim 8\ \text{kgf}$ あり、またファイ

バ化後に一定荷重をかけて低強度部を除く（スクリーニング）ことで長手に渡って高強度な光ファイバを得ている。

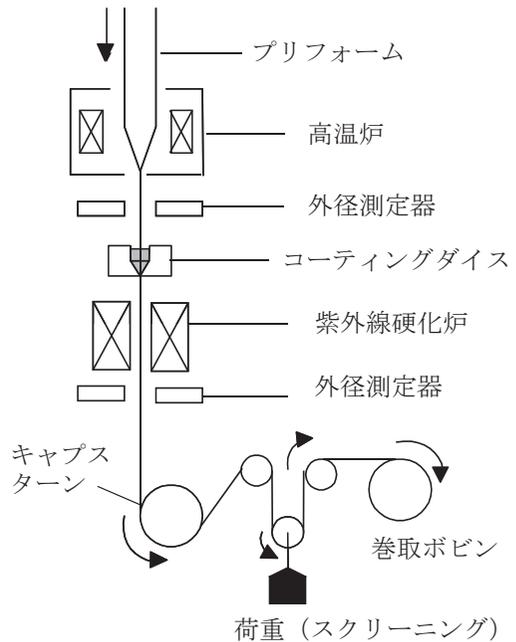


図4. 光ファイバの線引方法

5. まとめ

本稿では、通信用石英系光ファイバの代表的な製法を解説した。近年、クラッドに空孔を設けることで屈折率分布を形成する光ファイバや、全く異なる導波路原理を用いたフォトニックバンドギャップファイバなどの研究が注目を集めている。情報化社会の到来にともない通信量は増大し続けており、これに対応できる新しい光ファイバの実現と製造技術の確立に期待したい。

参考文献

- 1) 大久保“ISDN時代の光ファイバ技術”理工学社
- 2) 三木, 須藤 “光通信技術ハンドブック” オプトロニクス社
- 3) 鈴木, 山内, 小倉 “光ファイバの高品質化・経済化への取り組み” 電気通信 2008年1月号, pp. 27-35