

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	20世紀に名を残すガラス技術 , 「光ファイバー」
Title(English)	
著者(和文)	柴田修一
Authors(English)	SHUICHI SHIBATA
出典(和文)	New Glass, Vol. 15, No. , pp. 72-75
Citation(English)	, Vol. 15, No. , pp. 72-75
発行日 / Pub. date	2000,

光ファイバー

東京工業大学

柴田 修一

Optical fibers

Shuichi Shibata

Tokyo Institute of Technology

1. 光ファイバー開発の歴史

光ファイバー開発の歴史の概略を図1に示す。1966年、KaoとHockham（当時の所属：Standard Telecommunication Laboratories, England）によって、光ファイバーを用いた光通信の可能性が提案された。手元にある彼らの論文¹⁾を見ると、光ファイバー（論文ではDielectric-fibre waveguide）の候補として挙げられている、波長 $0.5\mu\text{m}\sim 1.1\mu\text{m}$ の波長域において透明度の高い材料は、必ずしも熔融石英ガラス（Fused quartz）だけではない。熔融石英ガラス、光学ガラス、ポリメチルメタクリレート、ポリスチレンがその光損失の波長特性とともに紹介されており、最も光損失の低いガラスで、 $200\text{ dB/km}^{\ast}$ の値（数mの光ファイバーをレーザー光が透過する程度の値）であることが記述されている。さらに、Fe不純物を1ppmまで低減化することにより、波長 $0.6\mu\text{m}$ で 20 dB/km の光損失が得られるとの推測がなされており、光通信は、光ファイバーの実現によって可能になるとの結論を引き出している。

1982年に書かれたKaoの著書²⁾とその日本語

訳³⁾もある。現在読むと、彼がいかに論理的に、しかも正確に光ファイバー通信の未来を予測していたかがわかり興味はつきない。

図2に、光ファイバー用ガラスの分類を示した。図1を同時に参照しながら見ると一層わかりやすい。現在、光通信に広く用いられているシリカガラス（Silica glass）だけではなく、多成分ガラス、フッカ物ガラス、カルコゲナイドガラス等々、多くの種類のガラスが検討された。多成分ガラスについて言うならば、むしろ、シリカガラスが優勢を極めるまでは、はじめてKaoの推測した 20 dB/km を実現し、しかも日本の会社が二重つぼ法によって作製したガラスファイバーとして「セルフロックファイバー」の名前を記憶に留めている⁴⁾。その後、シリカガラスが主流となった後は、イオン交換法によって作製するメリットを生かして、数々の光部品に発展をとげた。

シリカガラス光ファイバーに関しては、図1からもわかるように、「適切な目標を与えられた世界中の研究者」達の精力的な活躍によっ

[※]dB/km:

次式で定義されている単位であり、光ファイバーの光損失 α を表すときに用いられる。

$$\alpha = -\frac{10}{L} \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (\text{dB/km})$$

ここで、 L は光ファイバーの長さを、 I 、 I_0 はそれぞれ出射光強度、入射光強度を表す。

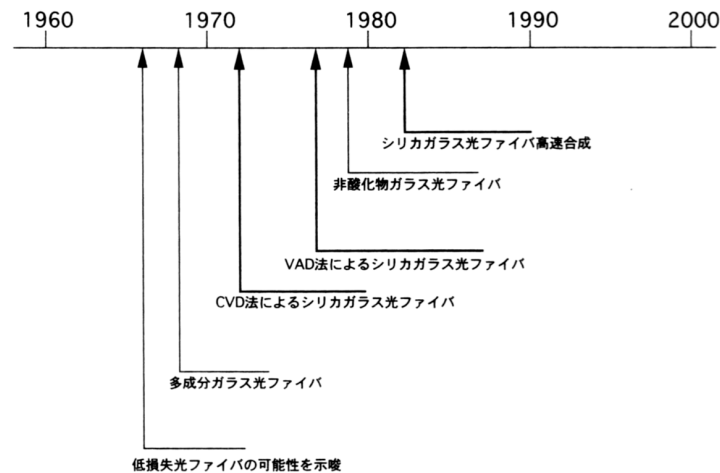


図1 光ファイバー開発の歴史

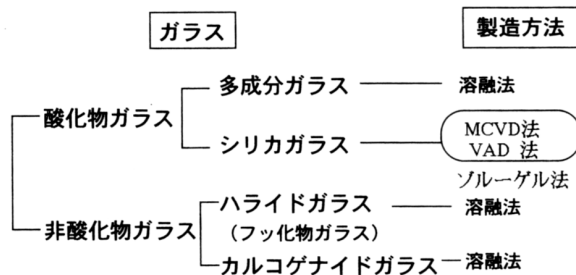


図2 光ファイバー用ガラスの分類

て、ほぼ10年間の低損失化競争（1970年～1980年）が行われた。当初、短い波長域が研究対象であったが、含有水分（OH基）の低減化技術が確立されるにつれて、低損失な領域は、 $0.8\mu\text{m} \rightarrow 1.3\mu\text{m} \rightarrow 1.5\mu\text{m}$ と長波長へ移っていき、最低損失値 0.154 dB/km が波長 $1.55\mu\text{m}$ で報告されることになった⁵⁾。この低損失化による波長シフトに伴い、発光素子（GaAs系の半導体レーザー）も、受光素子もその後を追って波長域の拡大が図られた。

このようにして光ファイバー通信のおおよその形はできあがっていき、1980年代後半には、量産化・経済化をも満足するシステムへと成長をとげることになる。具体的なシリカガラス作製技術に関しては次の節で述べるが、心に残っているエポックメイキングな発表・報告には以下のようなものを挙げることができる^{6),7)}。

- (1) コーニングガラスの 20 dB/km の報告、1970年

- (2) ベル研究所のMCVD法（Modified Chemical Vapor Deposition）による光ファイバー作製、1974年
- (3) 日本電信電話株式会社（NTT）のVAD法（Vapor-Phase Axial Deposition）による作製、1977年
- (4) 量産技術の確立、1980年代半ば
- (5) 希土類添加光ファイバー（光増幅）、1980年後半⁸⁾

さらに、1980年から、シリカガラス光ファイバーより光損失の低いガラス材料を探索するという命題⁹⁾の下に行われた、フッ化物やカルコゲナイドガラス材料を用いた光ファイバーの研究開発（非酸化物ガラス光ファイバー）も忘れることができない¹⁰⁾。残念ながら、シリカガラス光ファイバーの最低損失値⁵⁾を凌駕することはなかったが、非酸化物ガラスとしての新しい領域を開拓するという結果をもたらし、後の光増幅、あるいは非線形光学効果などで進展を示すことになった。

2. 微粒子からつくるシリカガラス

ガラスの作製法の観点から、光ファイバー用ガラス、特にシリカガラスを見たときどのような革新的技術進歩があったのだろうか。詳しくは拙著¹¹⁾を参照していただきたい。ここでは、

一般的ガラス作製法である「熔融法」とは、どこが異なっているのかについて概説しておきたい。微粒子からの作製法としては、代表的な MCVD 法と VAD 法について触れなくてはならない。

MCVD 法の原理を図 3 に示す¹²⁾。あらかじめガラス旋盤に熔融石英ガラス管をセットし回転させておき、下部から横方向に移動可能なバーナーで加熱する。気化された塩化物原料 SiCl_4 や GeCl_4 を管の内部に酸素とともに輸送し、バーナー移動で管内面に酸化物微粒子層 (SiO_2 と GeO_2) を形成させながら、逐次薄いガラス層に変化させていく。この操作を多数回繰り返すことにより管内部に外側よりも屈折率の高いガラス膜を形成させ、最後にバーナーの加熱温度を高めて中心部の空隙をつぶし、光ファイバーの母材（プレフォーム）とする。あとはこの母材を線引き炉中で再度加熱して、光ファイバーを作製する。

VAD 法の原理を図 4 に示す。酸素炎バーナーに送り込まれた塩化物原料は、火炎中で酸化物に変化し、ターゲットである多孔質母材上に堆積する。このようにして得られた多孔質母材を電気炉中で、脱水剤（塩素系ガス）を含有する雰囲気ガス下で焼結し、透明なガラスを作製する。

MCVD, VAD どちらの方法でもまず酸化物微粒子をつくり、それをガラス化する点で共通している。ではなぜ、光ファイバー通信に適用できる高純度のシリカガラスを得るために微粒子から作製する新しい手法の開発が不可欠だったのか。私は次のような理由によるものと考えている¹¹⁾。

(1) 容器に接することなく、ガラスを作製することができる。

いかに高純度な原料から出発しようとも、高温でガラス融液とるつば壁が接触するのでは、不純物が混入してしまう。

(2) 微粒子からつくることにより比較的低温でシリカガラスを作製することができる。

原料を熔融する方法でシリカガラスを得るためには、 2000°C もの高温を必要とする。

しかし、表面積の大きな酸化物微粒子を用いると $1400\sim 1500^\circ\text{C}$ で作製することができる。半導体産業で行われている高温下での高純度サンプルの扱いと同様に、熔融石英ガラス炉心管 (SiO_2) 中で焼結を行いシリカガラス (SiO_2) を得ることができる。

(3) 焼結プロセスにおいて不純物を除去することができる。

特に VAD 法では、微粒子を焼結させて透明なガラスを作製する工程で、希釈した塩素系脱水剤を流すことにより、水分や遷

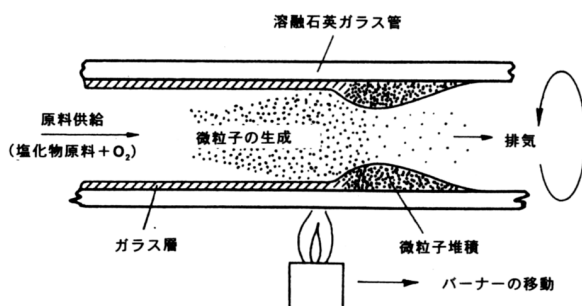


図3 MCVD法の原理を示す図

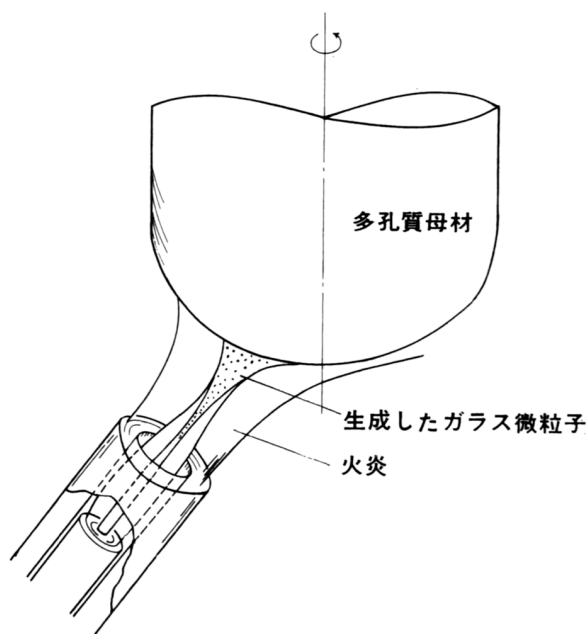


図4 VAD法の原理を示す図

移金属の除去が可能となる。

- (4) シリカ系ガラスは、微粒子からガラスをつくる作製法に適している。

すべてのガラスがこの方法で作製できるわけではない。この方法に適したシリカ系ガラスを対象として開発を進めたことは成功のためのキーポイントとなった。

これら酸化物微粒子からのシリカガラス作製は、原料を熔融する一般的なガラス作製に比較すると、「CVD」などの語句に現れているようにむしろ半導体作製技術に近い側面を有している。さらに原料的には、光ファイバー用シリカガラスと半導体 Si は同じ鉱物から出発しており、一度は塩化物 (SiHCl_3 や SiCl_4) に姿を変え、一方は SiO_2 ガラスへ、また他方は半導体 Si 結晶になる。むしろ、歴史的には、半導体の開始が 1940 年代であることを考えると、半導体で培われた高純度物質を作製する技術をうまく光ファイバーに適用したと言えるかもしれない。

光ファイバーを伝送媒体とする通信システムは大きく発展した。開発の初期には、アメリカでのテレビ電話の普及実験の失敗を引き合いに出し、こんなにも大きな情報量の伝送を社会が必要とするのかとの懸念も出された。しかし、現在のインターネットの普及と、画像情報のより早い伝送に対する要求は、「ペタビット社会 (10^{15} bit)」¹⁴⁾ の到来を予想させ、1 本の光ファイバーに多数の異なる波長の光を伝送させる技術により、2 テラビット/秒の伝送実験も報告されているように聞く¹⁵⁾。

一方、ガラスの一研究者として現時点で気にかかることは、「シリカ系ガラスの物性的な基礎は十分検討され理解されたのか」ということである。紫外線やガンマ線などの照射による欠陥生成や、水素発生により生じた光損失増加現象¹¹⁾ 等の特異な物性に関してはある程度の研究がなされている。しかし、基礎をなすガラス物性（構造に由来する光学、熱、機械特性等々）に関しては、通常のガラスに比較してその

歴史も浅く、極限的とも言える特性（例えば極低損失、優れた耐熱性、化学的耐久性、高機械強度）のためか、とても十分な探索ではない。その作製方法も、また測定方法も従来のガラスとは異なるため、いわゆる「ガラスの科学」からの研究課題が 21 世紀にもまだまだ残されているのではないだろうか。

参考文献

- 1) K. C. Kao and G. A. Hockham, Proc. IEE, 113 (7), 1151-1158 (1966).
- 2) Charles K. Kao, "Optical Fiber Systems: Technology, Design and Applications", McGraw-Hill, Inc., 1982.
- 3) 「光ファイバシステム」, チャールズ・K・カオ著, 島田潤一, 平野正浩監訳, 啓学出版 1983 年.
- 4) I. Kitano, K. Koizumi, H. Matsuyama, T. Uchida and M. Furukawa, Jpn. J. Appl. Phys, 39, 63-70, (1970).
- 5) H. Yokota et al., Tech. Dig. OFC '86, Atlanta, PD paper No. PD3 (1986).
- 6) 「光ファイバ通信入門」(改訂 3 版) 末松安晴, 伊賀健一, オーム社 1989 年.
- 7) 「光ファイバ通信」大越孝敬, 岩波新書 1993 年.
- 8) 「光増幅器とその応用」石尾秀樹監修, オーム社 1992 年.
「エルビウム添加光ファイバ増幅器」須藤昭一編, オプトロニクス社 1999 年.
- 9) S. Shibata, M. Horiguchi, K. Jinguji, S. Mitachi and T. Manabe, Electron. Lett., 17, 775-777 (1981).
- 10) T. Miyashita and T. Manabe, IEEE J. Quant. Elec. QE-18, 1432-1450 (1982).
- 11) 「微粒子からつくる光ファイバ用ガラス」柴田修一, 内田老鶴圃 1997 年.
- 12) P. C. Schultz, Appl. Opt. 18, 3684-3693 (1979).
- 13) 「材料科学への招待」第 15 章, 培風館 1997 年.
- 14) 伊澤達夫, NTT R & D フォーラム'97, 「光ファイバの科学, —マルチメディアからペタメディアへ—」(NTT R & D 47, 521-540 (1998)).
- 15) 池上徹彦, 数理科学, 427, 「光情報社会」58-63 (1999).