

## 最近の光ファイバに関する研究動向 — 低損失性の追求 —

NTT光エレクトロニクス研究所  
轟 眞市

### A review on recent studies on optical fibers — pursuing low attenuation —

Shin-ichi Todoroki

NTT Opto-Electronics Laboratories

#### Abstract

Recent researches on pursuing lower attenuation of optical fibers than that of silica fibers were reviewed. Multi-component oxide glasses with low Rayleigh scattering are expected to be a candidate for ultra low loss fibers because their thermal stability is better than that of fluoride glasses which exhibit an excellent transmittance in infra-red region. Although several glass compositions have been proposed, fiber making techniques for them need to be refined.

#### 1. はじめに

光ファイバが通信用媒体として注目を集めるようになってから30年がたとうとしている。1966年にKaoらが、ガラスファイバの不純物を除去することにより、低損失化が達成できると具体的に示し<sup>(1)</sup>て以後、光ファイバの低損失が急速に進められた。最低損失値の推移を図1に示す。1979年に石英系ファイバの損失が、その理論限界に近い0.2dB/kmに達し<sup>(2)</sup>、現在では、情報通信の基幹回線として定着するに至っている。一方、来るべきマルチメディア時代における情報流通量の爆発的増大を支えるべく、インフラとしての通信ネットワークの一層の拡充（各家庭に光ファイバを導入するFTTH(Fiber To The Home)計画や情報スーパーハイウェイ構想など）が求められている。ガラス材料研究者

がこの分野に寄与できる仕事とは、言うまでもなく、このネットワークに組み込む光ファイバーおよび光導波路による部分材料の提供である。

ファイバ型光部分には、大きく分けて2種類ある。光を通すことを機能とする、受動的光部品と、光と相互作用することを機能とする能動的光部品である。能動的光部品の草分けは、1964年のKoesterらによるファイバレーザである<sup>(3)</sup>。しかし、当時の技術で作成できるファイバは損失が大きく、実用化が視野に入らないはたらなかった。今日のファイバ型光部品の代表的存在であるファイバアンプが、石英系ファイバやフッ化物ファイバの低損失化を契機に現実のものになったことを考えると、光ファイバの低損失化は、新規光部品創成への基盤技術の一つといえる。また受動的光部品に関しては、石英系ファイバを凌ぐ低損失性を有するファイバの開発は、中継距離の増大による通信コスト

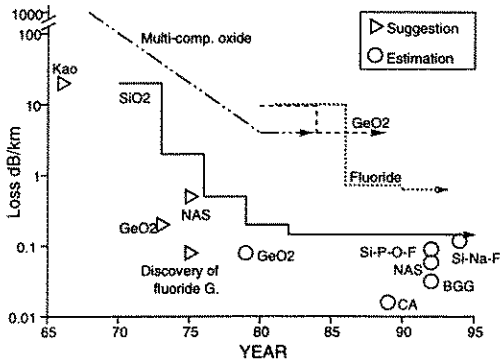


図1: History of the loss reduction of optical fibers. Suggestion ( $\triangleright$ ) and estimation ( $\circ$ ) of the loss value are also plotted.  
 NAS:  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,  
 CA:  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ , BGG:  $\text{BaO}-\text{Ga}_2\text{O}_3-\text{GeO}_2$ .  
 See also Table 2.

の低減や、通信網の拡大に大きく寄与するため、国内外で研究が継続されている。

そこでこの総説では、光ファイバの機能の原点である低損失性の追究に関する最近の研究動向および直面している問題についてまとめてみる。その他の光ファイバに関する話題については、本特集号の他の記事や、最近の総説<sup>(4, 5)</sup>を参照していただくことをご了承いただきたい。

## 2. ポスト石英系光ファイバの探索

光ファイバの損失は表1に示すような要因により決まる。フッ化物ファイバはその優れた赤外光透過性により、石英系ファイバの最低損失値をはるかに下回ると期待されたが、微結晶析

表1: 光ファイバにおける材料損失要因

	吸収	散乱
内因性	赤外光	紫外可視光
(材料固有)		(主に Rayleigh 散乱)
外因性	不純物	構造不均一性
	(特に遷移金属と OH 基)	(微結晶、脈理、気泡など)

出と不純物混入の抑制が難しく、最低損失は約 1 dB/km にとどまっている<sup>(6)</sup>。これを受けて、最近ではより結晶化傾向の小さい多成分酸化物ガラスを再評価する動きがみられている。そもそも多成分酸化物ガラスによる光ファイバの検討は石英系ファイバに先立ち検討がなされていた。日本板硝子によるSELFOCファイバに始まり、80年代初頭にはその損失は数dB/km にまで低減されていた<sup>(7)</sup>。しかし、同時に石英系ファイバの製造方法が洗練されていき、競争力を失った経緯がある。当時の研究では不純物の除去に全精力が注がれていたのに対し、最近の研究では、材料設計の段階としては一歩さかのぼって、Rayleigh散乱の小さいガラス組成を追求している。

## 3. Rayleigh散乱とガラス構造の関係

Rayleigh散乱は、ガラス中の密度揺らぎと濃度揺らぎの寄与に分けて考えられ、前者はにより散乱強度は、古典電磁気学及び熱力学を用いて次のように記述できる<sup>(8)</sup>。

$$B_p = \frac{8}{3} \pi^3 n^8 p^2 k T_F K_T(T_F) \quad (1)$$

ここで、 $n$  は屈折率、 $p$  は光弾性定数、 $k$  は Boltzmann 定数、 $T_F$  は仮想温度、 $K_T(T)$  は温度  $T$  における静的等温圧縮率である。ガラスの Rayleigh散乱に関する研究は、古くから主に光学ガラスについてなされているが、上式に基づき屈折率や仮想温度との関係を論じられるにとどまっていた。

ガラス構造との関係を考察したのは、1988年、AT&TのLinesによる論文<sup>(9)</sup>が初めてである。上式を、分極率に関係する量である $\Lambda$ パラメータを用いて以下のように展開し、

$$B_p = \frac{8}{3} \pi^3 (n^2 - 1)^2 (1 - \Lambda)^2 k T_F K_T(T_F) \quad (2)$$

(1-Λ) が0に近づく条件を考察した。結局酸化ガラスにおいては、“ガラス構造中の微視的空隙を非架橋酸素を生成させずに埋めていく”アプローチが、Rayleigh散乱低減に有効としている。これは例えば、シリカガラスの開放構造に $AlO_{3/2}$ と $NaO_{1/2}$ を対にして導入することに相当し(図2)、実際アルミノケイ酸塩ガラスのRayleigh散乱が小さいことは、Pinnowらが1975年に既に指摘している<sup>(10)</sup>。

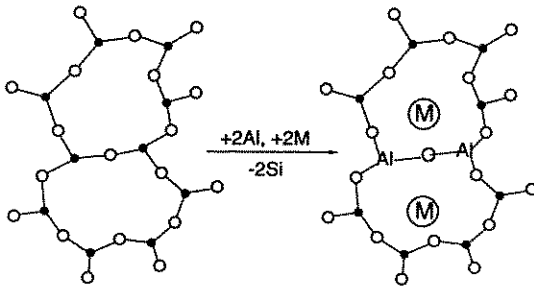


図2 : A schematic of the hole-stuffing by the introduction of alumina and alkali oxide. Solid circles are Si, small open circles are oxygen, and the open circles marked M are alkali metal cations.

#### 4. 低散乱ガラス組成の提案

この考察を元に、Lines らはカルシウムアルミネートを低損失ファイバ材料として提案した<sup>(11)</sup>。しかしこの系のガラスは臨界冷却速度が極めて大きく、現在までに導波構造を有したファイバが作成された例は無い。

NTTの白木らは $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2$ 系ガラスを再評価し、最低損失予測値を $0.055\text{dB/km}@1.56\mu\text{m}$ としている<sup>(12)</sup>。その後、筆者らはこの系と同様の低散乱特性を有する $Na_2O-MgO-SiO_2$ 系ガラスを提案した<sup>(13)</sup>。また、Lines は最近、シリカガラスにアルカリ金属とフッ素を微量ドーブした系を提案している<sup>(14)</sup>。

一方、 $GeO_2$ をベースにした系も提案されている。ゲルマニアガラスは石英ガラスよりもRayleigh散乱強度が大きい、その赤外透過性

によって相殺されると期待されている。NRLのHigby らは、 $BaO-Ga_2O_3-GeO_2$ 組成を提案し、最低損失予測値を $0.03\text{dB/km}@2\mu\text{m}$ としている<sup>(15)</sup>。この系は、前述のLinesの指針(§3)を $GeO_2$ 系ガラスにあてはめた組成となっている。一方、NTTの坂口らは、 $GeO_2-P_2O_5-MF_2$ の三元系にすることによりRayleigh散乱を低減できるとしている<sup>(16)</sup>。以上の提案組成を表2にまとめた。

表2 : 低損失光ファイバ組成の提案

着目点	ケイ酸塩系	ゲルマン酸塩系
低 Rayleigh 散乱 (54)	$Na_2O-Al_2O_3-SiO_2$ [10]	$BaO-Ga_2O_3-GeO_2$
	$(0.055\text{dB/km}@1.56\mu\text{m})$ [12]	$(0.03\text{dB/km}@2\mu\text{m})$ [15]
	$Na_2O-MgO-SiO_2$ [13]	$MF_x-GeO_2-P_2O_5$ [16]
	Si-M-O-F(M=alkali metal)	
	$(0.12\text{dB/km}@1.55\mu\text{m})$ [14]	
高純度合成 (56)	Si-P-O-F	$GeO_2-P_2O_5$ [22, 23]
	$(0.11\text{dB/km}@1.55\mu\text{m})$ [20]	

#### 5. ファイバ化の試み

この様に様々な組成が提案されてはいるものの、実際に光ファイバを制作した報告はまだ少ない。その貴重な例の一つに、昭和電線のRyan らによるアルミノケイ酸塩系ガラスのマルチモードファイバ(二重のつぼ法により線引き)がある<sup>(17)</sup>。最低損失値は $500-950\text{dB/km}@0.8\mu\text{m}$ であり、従来の多成分ガラスファイバの実績( $5-10\text{dB/km}@0.85\mu\text{m}$ <sup>(18)</sup>)と比べても、損失に2桁近い差がある。この原因は(微結晶析出などによる)ファイバーの構造不完全性とOH基による不純物吸収によるとしている。

これはまさに、フッ化物ファイバの低損失化における問題と同じ局面に立たされている。ガラス組成を低散乱性を優先させて決めているので、結晶化に対する安定性は従来の多成分酸化ガラスファイバの実績に比べ劣るのは無理からぬところである。しかし、前進の余地はまだ

残されている。損失予測値に近づけるためには、従来のファイバ製造法から脱却する必要がある。すなわち、(1)気相合成法では簡単に導入できない揮発性の低い元素 (Al, Na等) が高純度に導入でき、(2)結晶析出を避けるため系の温度が必要最低限に押さえてあり、(3)塩素ガス雰囲気下での熱処理のようなOH除去が可能な、製造プロセスの考案が道を開くであろう。(1)については、現に希土類ドーブ石英ファイバという形で、蒸気圧の小さい希土類やアルミニウムをドーブする技術は存在する<sup>(19)</sup>。(2)については、対象とするガラス組成における結晶核生成温度域や結晶成長温度域の把握から検討を始めるべきであろう。

## 6. 合成法からのアプローチ

一方、気相合成法で実績のある元素のみを用いた系も提案されている。NTTの田島らは、Si-O-P-F系を提案し、最低損失予測値を0.11dB/km @1.55 $\mu$ mとしている<sup>(20)</sup>。また、実際にファイバの状態で、Rayleigh散乱強度がSiO<sub>2</sub>ファイバよりも小さいことを示している<sup>(21)</sup>。また、東工大の柴田はGeO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>系を提案している<sup>(22, 23)</sup>。これらの系は、ファイバ化が可能という点で1歩リードしているといえる。問題は、Rayleigh散乱などによる内因的損失をどれだけ下げられるかであろう。

## 7. おわりに

導波路が構成可能な材料のなかでガラス材料は、低損失性で高分子材料に優り、長尺化可能という点で単結晶材料に優っている。これが、ガラスがフォトニクス材料として注目されている理由であろう。しかし現段階で本命視されているのは石英ガラスだけではなく、シリコンがエレクトロニクスを支えるキーマテリアル足り得たのは、その物性もさる事ながら、高純度化と集積化の技術が確立できたからである。フォトニクス材料については、高純度化を既にクリアした石英ガラスが集積化の技術を育て

ているところである<sup>(24)</sup>。石英ガラス以外のガラスがフォトニクス材料としての地位を得るかどうかは、まずその高純度化、すなわち低損失な導波路の作成が、工業的に量産可能な方法によって達成できるかにかかっている。その試金石となるのは、新しい光ファイバの高純度合成の達成ではあるまいか。

## 謝 辞

本稿をまとめるにあたり、数々の示唆を与えてくださった、坂口茂樹主幹研究員 (NTT光エレ研) に感謝します。

## 参考文献

- (1) K. C. Kao and G. A. Hockham, *Proc. Inst. Electr. Eng.*, 113, 1151 (1966).
- (2) T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, and T. Miyashita, *Electron. Lett.*, 15, 116-108 (1979).
- (3) C. J. Koester and E. Snitzer, *Appl. Optics*, 3, 1182 (1964).
- (4) 須藤昭一, 藤浦和夫, 化学工業, 1994, 785-791.
- (5) 山下俊晴, 日本赤外線学会誌, 4, 56-67 (1994).
- (6) S. Takahashi, *J. Non-Cryst. Solids*, 140, 172-178 (1992).
- (7) K. J. Beales and C. R. Day, *Phys. Chem. Glasses*, 21, 5-21 (1980).
- (8) D. A. Pinnow, T. C. Rich, J. F. W. Ostermayer, and J. M. DiDomenico, *Appl. Phys. Lett.*, 22, 527-529 (1973).
- (9) M. E. Lines, *J. Non-Cryst. Solids*, 103, 279-288 (1988).
- (10) D. A. Pinnow, L. G. V. Uitert, T. C. Rich, F. W. Ostermayer, and W. H. Grodkiewicz, *Mat. Res. Bull.*, 10, 133-146 (1975).
- (11) M. E. Lines, J. B. MacChesney, K. B. Lyons, A. J. Bruce, A. E. Miller, and K. Nassau,

- J. Non-Cryst. Solids*, 107, 251-260 (1989).
- (12) K. Shiraki and M. Ohashi, *J. Non-Cryst. Solids*, 149, 243-248 (1992).
- (13) S. Todoroki and S. Sakaguchi, *J. Am. Ceram. Soc.*, 78[9](1995), in print.
- (14) M. E. Lines, *J. Non-Cryst. Solids*, 171, 219-227 (1994).
- (15) P. L. Higby, C. I. Merzbacher, I. D. Aggarwal, and E. J. Friebele, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 244, 115-120 (1992).
- (16) S. Sakaguchi and S. Todoroki, *Japanese J. Appl. Phys.*, 34, 145-150 (1995).
- (17) T. Ryan, 渡辺秀, 牟田健一, 松浦宏司, 昭和電線レビュー, 43, 138-146 (1993).
- (18) 八木賢二, *New Glass*, 7, 29-33 (1992).
- (19) J. B. MacChesney and D. J. DiGiovanni, *J. Am. Ceram. Soc.*, 73, 3537-3556 (1990).
- (20) K. Tajima, M. Ohashi, K. Shiraki, M. Tateda, and S. Shibata, *J. Lightwave Tech.*, 10, 1532-1535 (1992).
- (21) K. Tajima, M. Tateda, and M. Ohashi, Low Rayleigh-scattering loss of  $P_2O_5$ - $SiO_2$ -core single-mode fiber, in "Opt. Fiber Commun Conf.," (1994), pp. 2-3.
- (22) 柴田修一, 光ファイバー用酸化物ガラスの固有光損失, "第35回ガラスおよびフオトニクス材料討論会講演要旨集," 名古屋11月(1994), 19-20ページ.
- (23) 柴田修一, 大西剛, 福井靖, 矢野哲司, 山根正之, 坂口茂樹,  $GeO_2$ - $P_2O_5$  ガラスの固有光損失, in "The 6th meeting on glasses for optoelectronics," 東京1月(1995), 17-18ページ.
- (24) 河内正夫, *NTT R&D*, 43, 1273-1280 (1994).

## 第16回日本物性シンポジウムの開催

1. 日 時 : 平成7年11月7日(火)～9日(木)
2. 場 所 : 広島県情報プラザ(県立産業技術交流センター)
3. 内 容 : 熱または物質の移動現象、エネルギー変換と平衡状態を対象とする応用科学、工学
4. 参加申込 : 広島大学工学部 化学工学科 化工熱力学教室気付  
TEL : 0824-24-7721