

石英イメージファイバとその応用

住友電気工業(株) 横浜研究所 千種 佳樹

Silica glass image fiber and its application

Yoshiki Chigusa

Yokohama Research Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd.

1. はじめに

近年、石英光ファイバは、当初の予想をはるかに越えて急速に発展を遂げ、日本を縦断する通信回線から更に海底ケーブルへと実用化の範囲を拡大してきた。

石英イメージファイバは、この通信用石英光ファイバの高度な製造技術を基に、1980年ごろから、我が国の光ファイバメーカーが競って開発を進めている画像直接伝送用の光ファイバである。この石英イメージファイバは、広い波長域にわたって伝送損失が低く、機械特性、耐放射線特性、および耐熱性等においても優れた特性を有する。また通信用光ファイバの技術を応用することによりきわめて細径のものを製造することが可能である。このため、従来の医療用内視鏡で代表される短尺の多成分ガラスイメージガイドに代り、その適用分野は急速に拡大しつつある。

本稿では、石英イメージファイバの製造方法、特性について概説し、更に最近の応用について述べる。

2. 石英イメージファイバの製造方法

2.1 母材の製造方法

石英イメージファイバ用の母材の製造は、通信用と基本的には同じであるがイメージファイバの母材は、①画素密度と明るさを向上させるためコアとクラッドの屈折率の差が大きく、屈折率分布がステップに近いものが望ましく、②可視域で用い、伝送距離が比較的短いため、通信用ほど低損失の必要がない等の点で通信用とは異なる特性を有する。ここでは主に、高NAをねらった石英系ガラス母材と耐放射線用ガラス母材の製造について述べる。

(1) 石英系高NAガラス母材の製造方法

高品質な光ファイバの母材を製造する場合にはMCVD法⁽¹⁾、VAD法⁽²⁾、OVD法⁽³⁾、P-CVD法⁽⁴⁾、P-OVD法⁽⁵⁾などの気相プロセスが実用化されている。一般に高NAガラス母材の場合には製造上、コアとクラッドの物性値の差が大きく、これに起因するトラブルが発生しやすくなる。上記各製法のうち、特にMCVD法とOVD法では、管状母材の段階でコアとクラッドの熱膨張係数差に基づく母材の破壊が生じやすく、加工工程を通して母材の保温を行う等の方法を工夫している。これに対して、VAD法で合成した高屈折率コア母材の外周に、直接溶融ガラス化プロセス(P-OVD

法)で弗素添加石英のクラッドを合成する方法では、割れることなくNA値0.4以上もの高NA化を達成している^{(6),(7)}。

(2) 耐放射線用石英母材の製造方法

特に耐放射線性の要求される光ファイバのコア材としては金属添加物を含まない純粋石英ガラスが用いられる。この母材の製法に関しては、OH基含有量を増すことが可能な酸水素炎直接ガラス化法が一般的で、そのほかにプラズマ法も利用されているようである。また塩素も耐放射線性を劣化させる要因と考えられており、塩素を含まないSiH₄等を原料に用いられることもある。

クラッド材の合成法に関しては、外付法(P-OVD法、OVD法)と内付法(MCVD法、P-CVD法)があるが、外付法の方が最外層のジャケット材料の除去が不要で好ましい。

2.2 石英イメージファイバの製造方法

石英イメージファイバの製法は、マルチファイバ法とよばれ、全長にわたって画素が整列したファイバを製造する方法である。製造方法の概略をFig. 1⁽⁸⁾に示す。

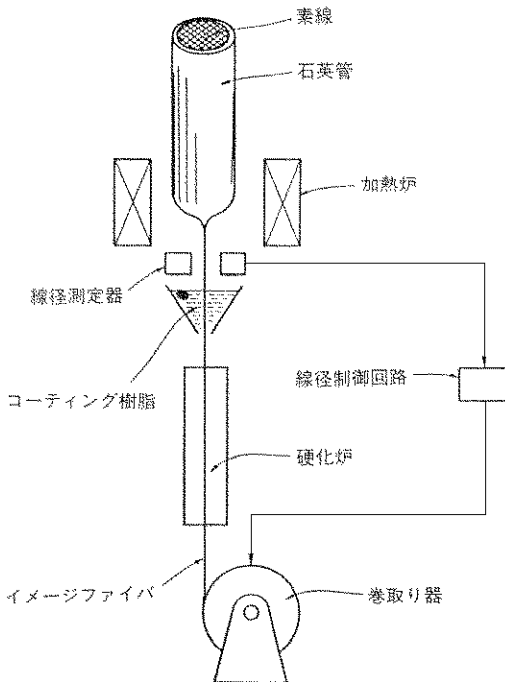


Fig. 1. 石英イメージファイバの製造方法

素線とイメージファイバの線引きの方法は基本的に通信用光ファイバのそれと同じである。適当な長さに切斷された多数の素線から成る束は、通常、石英管の中に整列充てんされる。整列の方法は種々開発されているが、超音波振動や流水を利用した方法が実用化されている。また、複数のコアを有する素線(ユニットファイバ)を準備し、この素線を束ねることにより多画素のイメージファイバを試作した例もある⁽⁹⁾。

石英管に充てんされた素線の表面が汚染されていると、イメージファイバ中に気泡を発生させ、伝送画質低下の原因となるため、異物混入の防止や清浄化には特に注意が払われている。

イメージファイバは、線引きの直後にシリコン樹脂やウレタン樹脂で一次被覆のコーティングが施されるが、これは機械強度や信頼性の上で重要な意味を持つ。機械強度を決定する他の要因としては、通信用光ファイバと同様に、石英の材質や表面処理、そして線引きの条件等が重要である。

3. 石英イメージファイバの特性

3.1 光学特性

(1) 明るさ

イメージファイバは、低輝度発光体の観察や照明光を用いたITV撮影等に用いられることが多く、伝送画像の明るさは重要な光学特性項目である。

イメージファイバの明るさをEとすると

$$E \propto (NA)^2 \cdot \tau \cdot kc \cdot S$$

で表される。ここでNAはイメージファイバの開口数、 τ はイメージファイバの端面反射も含めた透過率、kcは端面におけるコアの面積占有率、Sは画素部面積である。石英イメージファイバの透過率 τ は、現在需要の多い10m程度の長さでは端面反射を除けば100%に近く、明るさEはNA、kcおよびSに依存する。このうちkcは画素間の漏光量、Sは機械特性とのかねあい決定される。

石英ファイバは、多成分ガラスやプラスチックのファイバに比べてNAが小さいという欠点があるが、コアの素材としてGeO₂を多量に添加した石英を用い、更にF-SiO₂系ガラスのクラッド

との組合せにより、NAが0.4以上のものが実用化されている^{(6),(7)}。

石英イメージファイバは、通常可視域で用いられるが、この領域での伝送損失は多成分ガラスやプラスチックのファイバ(100~10,000 dB/km)に比べて低いため、その明るさへの寄与は長尺のものにおいて顕著であり、また短尺でも、波長依存性が小さいため、色の再現性に優れる。

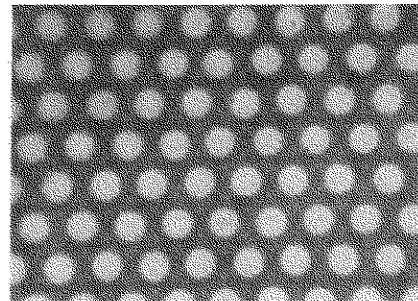
Fig. 2⁽⁸⁾に示すように、通常、イメージファイバの伝送損失は、構造上の問題や複雑な製造プロセスにより、通信用の高NA石英ファイバに比べて高くなっているが、その要因は、本質的には両者とも同じである。

(2) 分解能

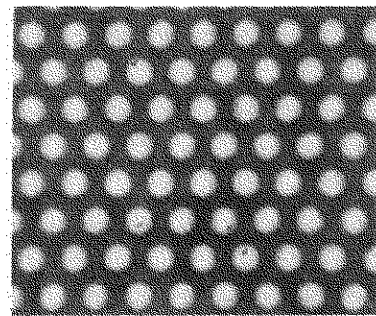
イメージファイバの分解能は、①画素数、②画素間の漏光、③クラッド伝送光、④画素配列、⑤画素欠陥等によって定まる。これらのうち①~③は構造設計上の問題であり、一方、④と⑤はイメージファイバの製造技術に関する問題である。

限られた断面積の中で、イメージファイバの分解能を最大限に引き出すための構造設計(コア径、コア間距離と屈折率差の決定)は重要な問題であ

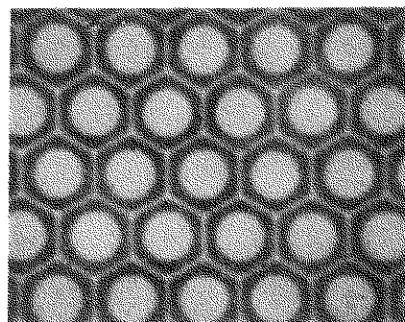
る。しかし画素間の漏光やクラッド伝送光による分解能への影響は、波長、長さ、入射条件、被覆構造等の条件に大きく依存するため複雑で、現在のところ、ある特定条件で解析された例があるにすぎない⁽¹⁰⁾。画素の配列は通常、六方最密充てん構造(Photo 1)をとるが、この場合、ITVとの結合時にモアレじまが生じることがあり、使用法によってはランダム配列にした方が有利な場合がある⁽¹⁰⁾。



(a) GeO₂-SiO₂ コア、SiO₂ クラッド



(b) SiO₂ コア、F-SiO₂ クラッド



(c) SiO₂ コア、F-SiO₂ クラッド、SiO₂ ジャケット

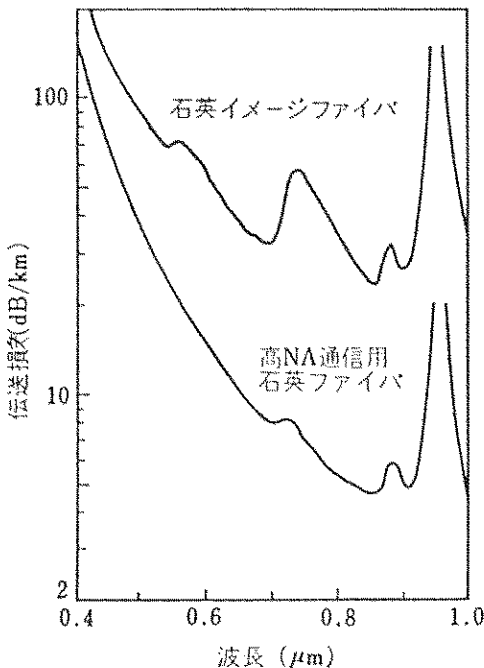


Fig. 2. 伝送損失波長特性

Photo 1 イメージファイバ画素部拡大写真

Fig. 3⁽⁸⁾には、コアとクラッドの屈折率差(またはNA)とイメージファイバの外径に対して最大充てん可能な画素数の目安を示す。通常の工業用監視には、画素数は3,000~50,000で十分であるが、ITVカメラに匹敵する250,000画素という高分解能のイメージファイバも開発されている⁽¹¹⁾。

分解能は、通常、簡便な方法として、テストチャートを用いて視覚的に評価されることが多いが、より定量的な方法としてMTF(Modulation Transfer Function)が利用できる^{(12),(13)}。これはイメージファイバを周波数フィルタと見なして、スペクトル分布がどのように変化するかを空間周波数領域で評価する方法である。具体的には、Fig. 4⁽⁸⁾のような装置(ダイナミックスキャン法)を用いて、入射端面の小さな幅のスリット像の伝送像(LSF: Line Spread Function)をフーリエ変換することによって行う。Fig. 5⁽⁸⁾はこの方法によりイメージファイバの画質を評価した例である。

3.2 耐放射線特性

石英ガラスは多成分ガラスと比べると、放射線を照射したときの着色中心の生成が少なく、それに基づく紫外域から可視域にわたる光の透過率の減少が少ない。そのため、石英イメージファイバ

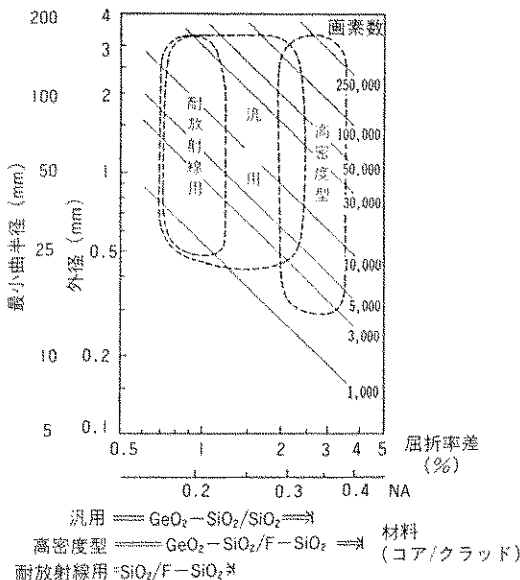


Fig. 3. 屈折率差(NA)、外径と最大画素数

の優れた耐放射線特性は、長尺、低伝送損失と共に大きな長所の一つとなっている。

石英ガラスのうちでも特にOH基を多量に含有し、構造欠陥の少ない純粋石英ガラスが耐放射線性に優れることが知られている。従って、一般にイメージファイバは、コアにはそのような純粋石英を、クラッドには弗素等を添加して屈折率を下げた石英を用い、構造欠陥が発生しないように特別な加熱加工条件で製造される。

Fig. 6は $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ コアの高NAイメージファイバと特別条件で製造した純粋石英コアの耐放射線イメージファイバに γ 線を照射したときの波長 $0.63\mu\text{m}$ での伝送損失増加量を測定した例⁽¹⁴⁾で、 10^5R の照射でも損失増は35dB/kmという優れたものが得られている。

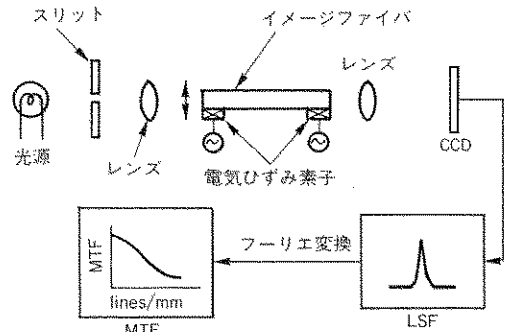


Fig. 4. MTF測定系

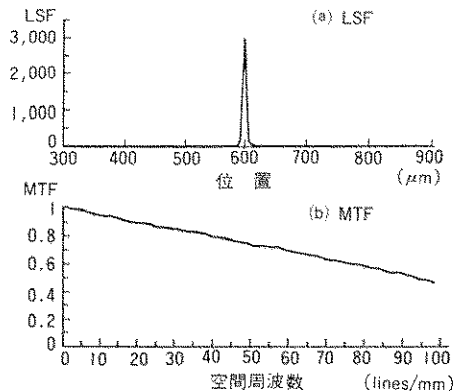


Fig. 5. MTFによるイメージファイバ評価例(30,000画素)

4. 石英イメージファイバの応用

石英イメージファイバの特徴を生かし、現在、工業監視用のみならず、計測⁽¹⁵⁾・制御方面^{(16),(17)}へも積極的に応用されつつあり、新たに医療用への適用も最近、活発に検討されている。

従来の医療用内視鏡に用いられている多成分ガラスイメージファイバは、製法上極端に細くすることができないため、適用部位には制約があった。石英イメージファイバは高い画素密度で極めて細くできることから、血管内等従来の内視鏡では見ることのできなかった狭小部の観察が可能であり、医療分野における内視鏡の適用領域が大きく広がりつつある。

以下に応用の一例として歯科用ファイバコープシステム⁽¹⁸⁾（住友電工㈱、㈱森田製作所共同開発）について紹介する。

現在の歯科医療では患部を直視かデンタルミラーによって観察するか、X線写真などによる間接

的な診断を行なっている。これらの方法では見づらいところがあったり、歯の内部のように直接観察が不可能な部位がある。これらの部位を他の医療分野で普及しているファイバコープにより、直接観察したいというニーズが高まっていたが、従来の多成分光ファイバでは製法上直径1 mm以下にすることが難しく、歯科治療の分野には応用されていなかった。石英イメージファイバの細径化により、歯根内の深部まで直接観察できるファイバコープシステム（商品名ビジョナー21A）（Photo 2）が開発されている。

本システムは、超小型テレビカメラを内蔵したハンドピースと、ハンドピースに着脱可能な数種類のプローブ（Photo 3）、およびモニターテレビからなり、用途に応じてプローブを交換使用し、顔全体から口腔内、歯肉縁下、歯の隣接面や、根管内の深部まで歯科医療に必要なほとんど全ての部位を拡大画像として観察することが可能であ

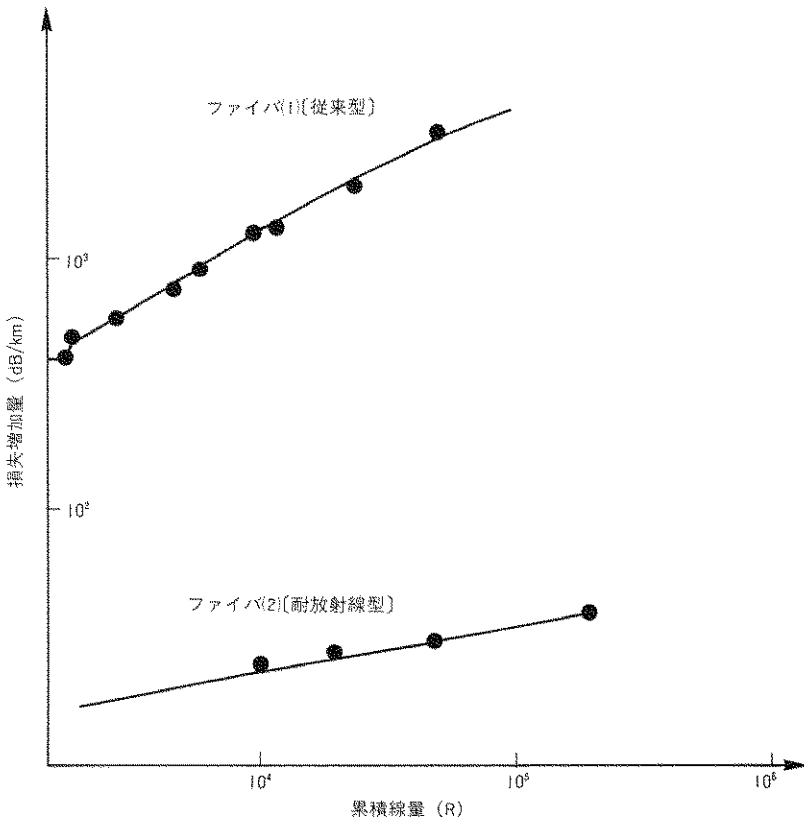


Fig. 6. γ 線照射特性

る。プローブには石英イメージファイバが使われており、最も細いものは、3000画素のイメージファイバ、対物レンズ及び照明用のファイバを含めて、外径0.69mmとなっている。

臨床評価の結果、歯科医療における診断、治療はもとより、学生及び患者の教育の面においても有効性及び実用性が確認されている¹⁹⁾。

5. おわりに

石英イメージファイバについて概説し、その主要な技術動向について述べた。

石英イメージファイバは開発が始まって約10年になるが、今後もその諸特性は、ますます向上することが予想され、製造技術の向上と量産効果による低コスト化が期待できる。更に、多様なシステム化技術の向上により、その適用範囲は急速に拡大するものと思われる。

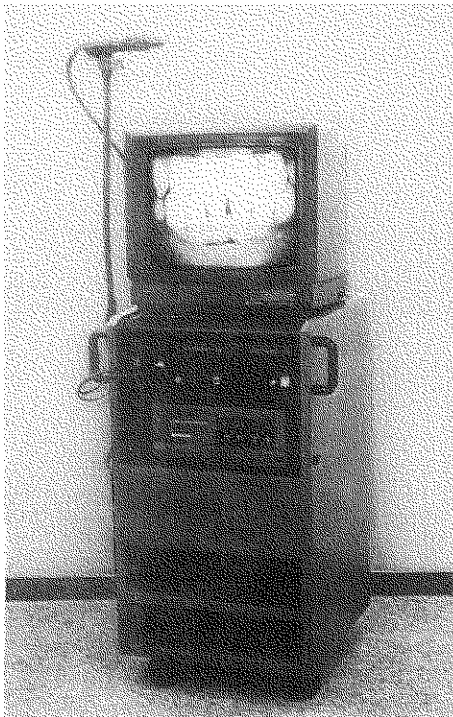


Photo 2 歯科用ファイバースコープシステム (商品名 ビジョナー 21 A)

参考文献

- 1) J. B. Mac Chesny, et al: Proc. 10 th International Congress on Glass, 6, p. 40(1974)
- 2) T. Izawa, et al: IOOC '77, p.375(1977)
- 3) D. B. Keck, et al: USP 3,775,075(1973)
- 4) P. Geitter: Appl. Phys. Lett. 28, p. 645 (1976)
- 5) A. Mühlich, et al.: Proc. 3rd ECOC, 10 (1977)
- 6) G. Tanaka, et al: OFC '84, TUG-3(1984)
- 7) K. Sanada, et al: Denshi Tokyo No. 27, p. 71(1988)
- 8) 松田裕男: 電子通信学会誌 Vol. 168, No. 6, p. 666(1985)
- 9) Y. Matsuda, et al: OFC '84, TUN-12 (1984)
- 10) 石橋時夫: 光学技術コンタクト, 21, 12, p. 50(1985)
- 11) Y. Matsuda, et al: OFC '86, TVB-5(1986)
- 12) N. S. Kapany: "Fiber Optics, Principles and Applications", Academic Press(1967)
- 13) 久保田広, ほか編集: "光学技術ハンドブック", 朝倉書店(1978)
- 14) 千種佳樹, ほか: 住友電気, No. 124, P. 142 (1984)
- 15) 松田美一, ほか: 古河電工時報, No. 74, P. 147(1983)
- 16) 京極, ほか: 住友金属, 35, P. 2(1983)

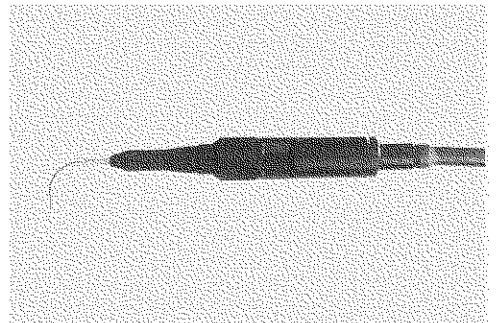


Photo 3 プローブとハンドピース部

- 17) 吉田健一, ほか: 住友電気, No. 124, P. 126 (1984)
- 18) 吉村耕三, ほか: 住友電気, No. 135, P. 43 (1989)
- 19) 岩久正明, ほか: “保存領域におけるファイバコープの応用 歯内療法を中心として” 日本歯科保存学会春季学会, P-39(平 1)

〔著者紹介〕



千種 佳樹 (ちぐさ よしき)
 昭和 57 年 静岡大学大学院工学
 研究科修士課程終了
 同 年 住友電気工業株式会社
 現 在 同社横浜研究所線路研
 究部光ファイバ担当

Abstract

Recently, a long, low-loss image fiber has been developed by using silica glass optical fibers. Using this fiber, we can observe objects in remote places or environments that are inaccessible owing to, for example, extremely high temperature and radiation. The manufacturing method and properties (optical and γ -ray irradiation) are detailed, and the dental fiber scope system is described for the image fiber application.