



## 光ファイバとその応用—IV

## 光ファイバ材料・製造方法・信頼性 (1)

飯野 顕・大久保勝彦

古河電気工業(株)光技術研究所 〒290 市原市八幡海岸通 6

(1989年10月6日受理)

## Optical Fiber and Its Applications—IV

## Materials, Fabrication Process, and Reliability (1)

Akira IINO and Katsuhiko OKUBO

Opto-Technology Laboratory, The Furukawa Electric Co., Ltd.,  
Yawata kaigandori, Ichihara 290

## 1. はじめに

本講義では、現在実際に使われている各種光ファイバを、材料、基本特性、製造方法、および信頼性の観点から解説する。これらの項目を二つに分け、本号では光ファイバの材料と基本特性を中心に記し、次号では光ファイバの製造方法と信頼性について詳述する予定である。また、本講義では最近のトピックスもできるだけ取り上げ、up-to-dateな内容となるように努めた。さらに幅広く深い知識を望む読者には、文献1)が参考となる。以上のような考え方にのっとり、本号では、始めに各種光ファイバ材料の特性、次いで光ファイバの伝送に関する基本特性、最後に最近の新しい構造の光ファイバについて解説する。

## 2. 光ファイバ材料

光ファイバ材料を選ぶ場合、その伝送特性に影響する固有の損失(3.1節参照)、分散、および屈折率が重要な評価項目となる。さらに、光ファイバの製造の容易さや、材料の安定性や経済性も考慮しなければならない。光ファイバを材料によって分類すると、図1のようになる。本章では、これら材料の特性を記す。

## 2.1 石英系ガラス

図1に示した材料のなかで、現在のところ石英系ガラスが最も低い損失を示す。石英系ガラス固有の損失は2.3項に記す中赤外透過材料に比べ大きい、不純物など

の混入を防ぐ製造技術が確立されているので、理論値に近い損失(1.55  $\mu\text{m}$  帯で約 0.20 dB/km)をもった光ファイバの製造が可能である。しかも石英系ガラスは安定かつ高強度であるため、長期間高い信頼性を維持しなければならない公衆通信用光ファイバに應用されている。

光ファイバ用石英系ガラスは、二酸化ケイ素( $\text{SiO}_2$ )が主成分であり、主として屈折率の制御のために二酸化ゲルマニウム( $\text{GeO}_2$ )、二酸化チタン( $\text{TiO}_2$ )、酸化アルミニウム( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、五酸化リン( $\text{P}_2\text{O}_5$ )、三酸化二ホウ素( $\text{B}_2\text{O}_3$ )、フッ素(F)などが添加される。これら添加物(ドーパント)の濃度と屈折率との関係を図2に示す<sup>2)</sup>。 $\text{GeO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ のドーパが石英ガラスの屈折率を増大させるのに対し、 $\text{B}_2\text{O}_3$ およびFはそれを低下させる。したがって、光ファイバのコア部に屈折率を増大させるドーパントを、クラッド部に屈折率を低下させるドーパントを用いる場合が多い。それらドーパントのうち現在実際に用いられているのは、おもに $\text{GeO}_2$ とFである。

これらのガラスは、塩化物などのハロゲン化物を原料として気相で混合・反応させる、CVD(chemical vapor deposition)法によって製造するのが一般的である。おもなハロゲン化物の温度と蒸気圧の関係を図3に示す<sup>2)</sup>。光ファイバの原料として用いるハロゲン化物は、室温付近でかなり大きな蒸気圧をもつことが特徴であり、塩化鉄( $\text{FeCl}_3$ )の蒸気圧より8~10桁ほど大きい。そこで、四塩化ケイ素( $\text{SiCl}_4$ )などをガスとして供給し反応させ

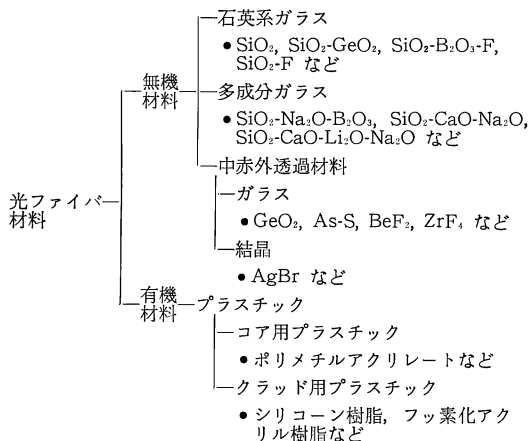


図1 光ファイバの材料

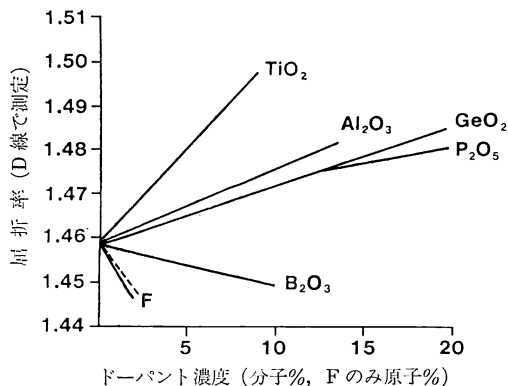


図2 ドーパント濃度と屈折率の関係<sup>2)</sup>  
(F; —急冷した場合, .....徐冷した場合)

れば、その蒸気圧の差によって鉄などの不純物の混入を全くといってよいほど (ppb レベル以下に) 防ぐことができる。

石英系ガラス固有の損失が、紫外域では波長の短いほど、また 1.6 μm より長波長の赤外域では波長の長いほど顕著に認められる。前者を紫外吸収、後者を赤外吸収とよんでいる。

紫外域における損失の立上り (エッジ) は、ガラス構成原子 Si の電子遷移によって生じる。この影響が可視域から近赤外域にまで及ぶ。さらに石英ガラスへ GeO<sub>2</sub> などをドーブすると、Ge 原子の電子遷移がより低いエネルギーで起こるので、紫外部における損失は増大する。逆に、金属不純物を含まない石英ガラスは紫外線をよりよく透過するので、ライトガイド等種々の分野に应用されている。

赤外域における損失のエッジは、ガラス構成原子の格子振動によって生じる。B-O、P-O、Si-O、Ge-O 結合の

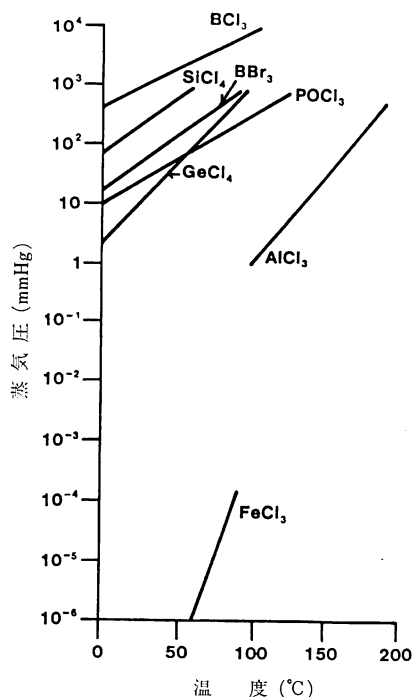


図3 各種ハロゲン化物の蒸気圧と温度の関係<sup>2)</sup>

基本振動による吸収ピークはそれぞれ 7.3, 8.0, 9.0, 11.0 μm に現れる<sup>3)</sup> が、そのハーモニック (倍周波数) や SiO<sub>2</sub> などとの結合によるエッジがほぼ 1.6 μm まで及ぶ。基本振動の振動数 ω は、それにあずかる二つの原子の換算質量 μ と、次式のような関係がある。

$$\omega = k\sqrt{V/\mu}, \quad k: \text{定数} \quad (1)$$

したがって、たとえば GeO<sub>2</sub> をドーブした石英系ガラスでは、赤外吸収のエッジは B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> をドーブしたものより長波長側にシフトする (Ge の質量 > B の質量)。図4に石英系光ファイバの使用波長域近傍での損失スペクトルを示す<sup>1)</sup>。

ガラス中には、その構造上濃度や密度のマイクロな不均一性が残存してしまう。この不均一部分の大きさが光の波長のほぼ 1/10 以下である場合に生ずる散乱をレーリー散乱と呼び、次の式で表すことができる。

$$L_R = A\lambda^{-4} \quad (2)$$

L<sub>R</sub>; レーリー散乱による損失への寄与 (dB/km), A; レーリー散乱係数 (dB/km・μm<sup>-4</sup>), λ; 波長 (μm)

GeO<sub>2</sub> や P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> などをドーブすると濃度の不均一性が生ずるため、図5に示すようにレーリー散乱係数は増大する<sup>2)</sup>。公衆通信に用いられる波長帯 (1.3 および 1.55 μm) では紫外吸収の影響はほとんどなく、レーリー散乱と赤外吸収によって損失の波長依存性が決まる (図4

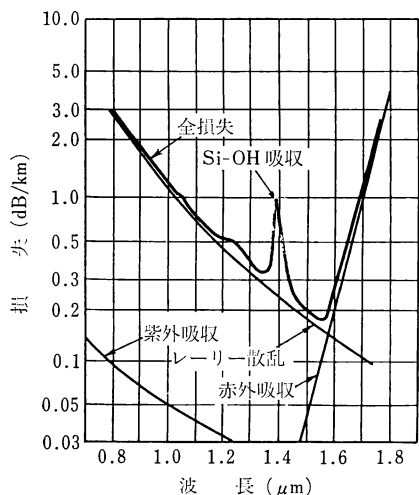


図 4 石英系光ファイバの損失スペクトル<sup>1)</sup>

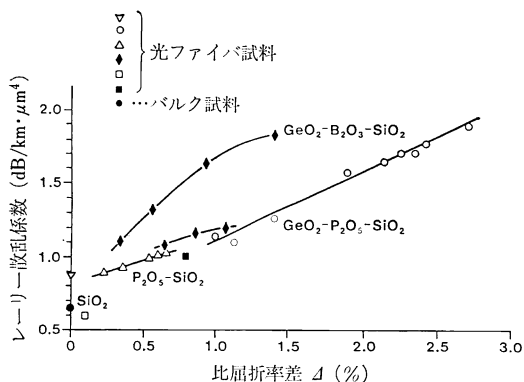


図 5 比屈折率差  $\Delta$  とレーリー散乱係数の関係<sup>2)</sup>

$$\Delta = \frac{n_{コア}^2 - n_{クラッド}^2}{2n_{コア}^2} \times 100 \approx \frac{n_{コア} - n_{クラッド}}{n_{コア}} \times 100 (\%), \quad n; \text{屈折率}$$

参照)。したがって、石英系光ファイバは 1.55  $\mu\text{m}$  帯で最も低い損失を示す。

## 2.2 多成分ガラス

図 1 に示すようにアルカリやアルカリ土類の酸化物を成分とするガラスを多成分ガラス (multi-component glass) と呼び、石英系ガラスと区別している。

多成分ガラスは、板ガラスや食器などのガラス製品と同じように酸化物や炭酸塩などを溶融して製造する。したがって、それらの原料からの不純物の混入や容器からの不純物の汚染をさけることが難しい。材料固有の損失は、石英系光ファイバと大きな違いはないが、それら不純物の影響で実際の損失はかなり大きくなる。多成分系光ファイバの損失は 0.85  $\mu\text{m}$  帯で 4~15 dB/km となり、石英系光ファイバの損失 (2~3 dB/km) の 2 倍以上

の値を示す。1.3  $\mu\text{m}$  帯では OH 基の吸収が大きくて使うことができない。

コアにドーピングする酸化ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) の量を増して屈折率差を大きくしたり、アルカリ融液に浸すイオン交換法によって屈折率を中心に向かって大きくさせることができる。多成分系光ファイバは、石英系光ファイバに比べコアとクラッドの屈折率差をより大きくできるので、光源との結合効率が大きくなるという長所がある。そこで、ローカルエリアネットワーク (LAN) などの短距離用途に利用されている。また、複写機用のロッドレンズも多成分ガラスである。

## 2.3 中赤外透過材料

石英系ガラスよりも、より長波長の中赤外域 (2~10  $\mu\text{m}$ ) で光損失が最小となる材料で構成された光ファイバをとくに赤外光ファイバと呼んでいる。また、石英系光ファイバが近赤外域の光を透過するのに対し、中赤外光ファイバ (mid-infrared fibers) と呼ぶ場合がある。

図 1 におもな材料を示したが、一般に Si などより質量の大きい元素で構成されているため、赤外吸収のエッジは石英系ガラスより長波長側へシフトする。そのためレーリー散乱の損失への寄与がより小さくなるので、材料の特性だけから見れば、きわめて低損失の光ファイバが得られる可能性がある。中赤外光ファイバの理論上の最低損失は、 $10^{-2}$ ~ $10^{-4}$  dB/km の範囲にあり、石英系光ファイバの最低損失より 1~3 桁小さい。しかし、実際は図 6 に示すように、石英系光ファイバの損失をしのぐものがまだ得られていない<sup>4)</sup>。これは、中赤外透過材料の光ファイバへの加工が困難であり (とくに結晶のもの)、製法上不純物の混入が避けられないなどの理由によっている。

このように中赤外光ファイバの開発はまだ途上にある

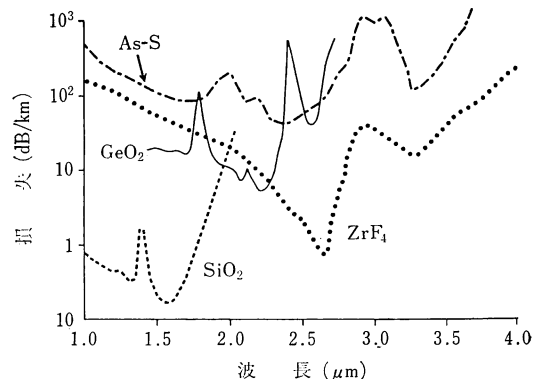


図 6 中赤外光ファイバの損失スペクトル<sup>4)</sup>

が、公衆通信という観点でとらえると、それらの材料のなかではフッ化物ガラスが、固有の損失が小さいことおよび比較的製造が容易であることなどの理由によって、将来最も有望なものと考えられている。2.5 μm において0.04 dB/km の損失が実現されれば、1500 km 無中継伝送も可能となるが<sup>4)</sup>、フッ化物ガラスの強度や長期間に及ぶ安定性など解決しなければならない課題も多い。そこで、現在、中赤外光ファイバは、放射温度計（赤外線）の伝送）、レーザーを用いた加工装置（エネルギーの伝送）、光増幅器や計測用の光源へ応用されている。

2.4 プラスチック

プラスチックを用いた光ファイバは、コアはガラスでクラッド部だけにプラスチックを用いたものと全てプラスチックから成るものの二つに分類できる。前者は、プラスチッククラッド光ファイバ (PCF) と呼ばれ、後者は全プラスチック光ファイバと呼ばれる。

PCF では、通常コア部は石英系ガラスとして、クラッド部にはより屈折率の小さいシリコンまたはフッ素化アクリル樹脂を用いる。クラッド部の影響により C-H 等の結合の倍周波数による吸収が認められるので、石英系光ファイバより損失は大きい (0.85 μm 帯で約 5 dB/km)、しかし、クラッドにガラスを用いない分だけ安価となるので、近距離通信のシステムや紫外域のライトガイドなどに用いられている。

全プラスチック光ファイバは、通常ポリメチルメタアクリレート (PMMA) のコア部とフッ素化アクリル樹脂のクラッド部から成る。この場合のレーリー散乱は、おもに密度の不均一と分子の配向によって生じる<sup>5)</sup>。

C-H 結合の倍周波数による吸収が支配的であるが、遷移金属やダストによる汚染も損失に影響する。0.6 μm において、約 150 dB/km と大きいのが、コアとクラッドの屈折率差を大きくとれるので使いやすく、また安価なため、CD プレーヤーの信号伝送などに応用されている。最近では、耐熱性 (約 150°C まで) に優れ、より損失の小さいものも実用化されており、近距離通信への用途も拡大している。

3. 光ファイバの基本特性

光ファイバを信号の伝播モードによって分類すると、図7のようになる。本章では、各種光ファイバの伝送特性について記す。

3.1 損失

光ファイバ中を伝播する光のパワーは、図8に示すような要因によってその一部が失われる。これを損失と呼

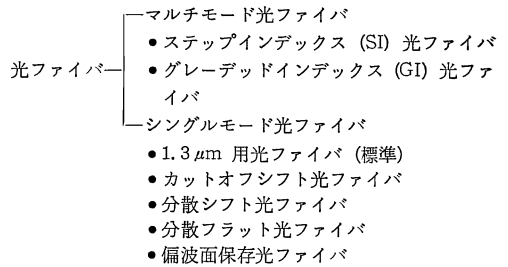


図7 光ファイバの分類

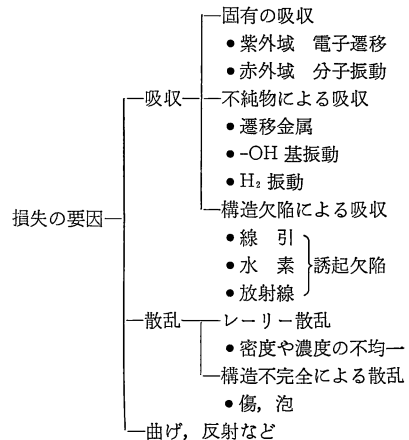


図8 光ファイバの損失要因

び、以下の式で定義される。

$$\text{損失 (dB)} = -10 \log_{10} (P_o/P_i) \quad (3)$$

$P_i$ ; 入射光パワー,  $P_o$ ; 出射光パワー

図8の要因のなかで、材料固有の損失、不純物による吸収、レーリー散乱などはすでに記した。ここでは構造欠陥による吸収、構造不完全による散乱、および曲げによる損失について補足したい。石英系光ファイバは、急冷により熔融状態が凍結された構造をもつガラスであるため、電子スピン共鳴 (electron spin resonance: ESR) などによって構造欠陥 (構成原子の規則的な配列に異常のある部分。たとえば、石英ガラスでは、≡Si-O-Si≡が正常であり、≡Si-Si≡, ≡Si-O-O-Si≡, ≡Si·, ≡Si-O·などを構造欠陥という。·は不対電子を示す) が認められる場合が多い。線引条件などが不適切であると、構造欠陥が発生し、0.63 μm 付近に吸収ピークが現れる。水素や放射線被曝により生じる構造欠陥については次稿に記す。

構造不完全による散乱は、ガラス中の比較的サイズの大きい (サブミクロン以上) 傷や泡によるもので、波長に依存しない損失増をもたらす。光ファイバを曲げると、図9に示すように、伝播光の一部が抜け出てしま

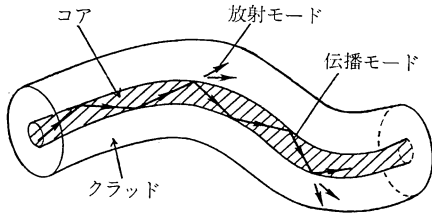


図 9 曲げによる損失<sup>1)</sup>

損失が増大する<sup>1)</sup>。これをマクロバンド損失あるいはマイクロバンド損失と呼んでいる。これら損失増は、製造条件の工夫や被覆材料まで含めた光ファイバの構造を最適化することで、通常の使用ではほとんど無視できるレ

ベルに抑えることができる。

### 3.2 帯域 (マルチモード光ファイバの場合)

入射した光が種々のモードに別れて伝播する光ファイバをマルチモード光ファイバという。各モードごとに光ファイバの終端へ到達する時間が異なるため (図 10<sup>1)</sup> 参照), 伝播パルスの幅が拡がり, 高速にしていくと前後のパルスの分離ができなくなってしまう。伝播する信号の速さの限界を帯域と呼び, 通常 1 km 伝送できる最大の変調周波数 (MHz・km) で表す。

ステップインデックス (SI) 型の屈折率プロファイルをもつものでは上記の現象が顕著となるので (図 10 参照), 帯域の上限は 5~20 MHz・km 程度である。これを改善するためにコアの屈折率プロファイルをグレーデッ

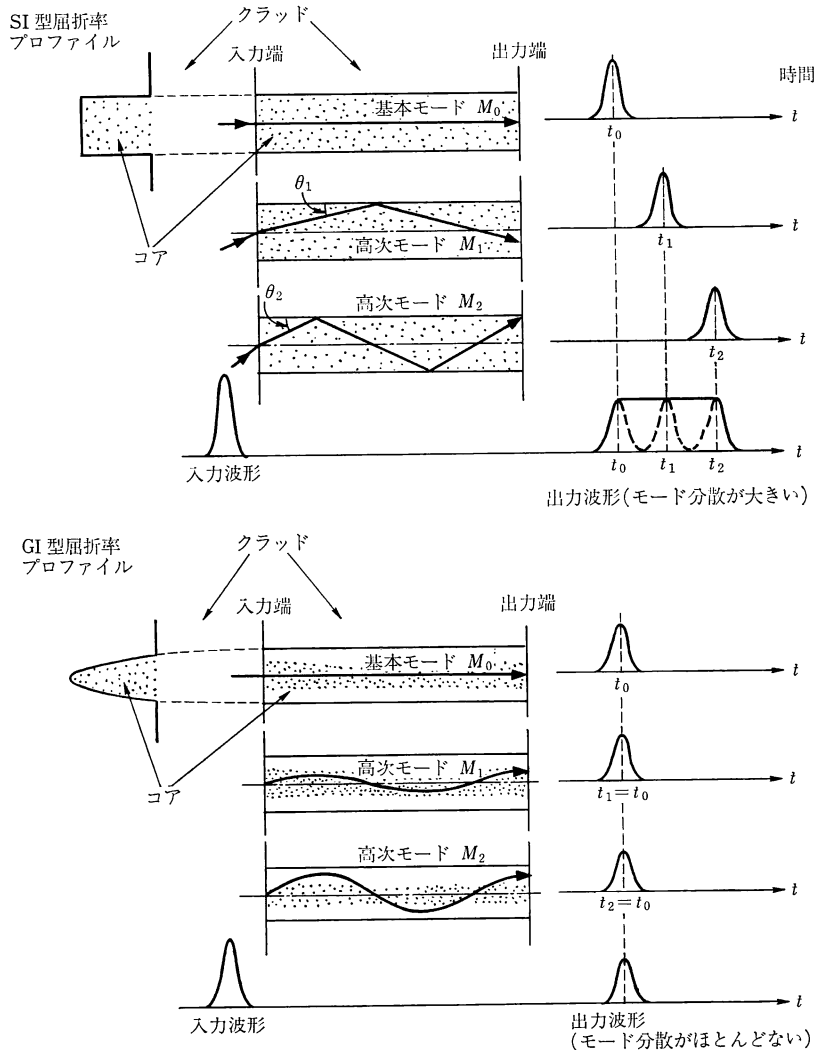


図 10 マルチモード光ファイバにおけるパルスの伝播<sup>1)</sup>

ドインデックス (GI) 一放射線の曲線一とすると、屈折率の大きいコア中心部を進む光は遅く、周辺部を通るものは速く進むので、各モード間の到達時間差を非常に小さくすることができる (図 10 参照)。屈折率プロファイルがよく制御された GI 型光ファイバの帯域は、1GHz・km 程度である。

なお石英系マルチモード光ファイバのコア径は、通常 50, 62.5, 80  $\mu\text{m}$ 、外径は 125  $\mu\text{m}$ 、またはコア径 100  $\mu\text{m}$ 、外径 140  $\mu\text{m}$  であり、コアとクラッド間の比屈折率差  $\Delta$  は 1% 以上である場合が多い。0.85  $\mu\text{m}$  帯で約 2.5, 1.3  $\mu\text{m}$  帯で 0.5 dB/km の損失を示す (石英系ガラス GI 型)。

### 3.3 分散 (シングルモード光ファイバの場合)

光ファイバのコアとクラッド間の比屈折率差  $\Delta$  を小さくし、コア径を細くしていくと、ある波長より長い波長では一つのモードしか伝播できなくなる (この波長をカットオフ波長  $\lambda_c$  と呼ぶ)。このように使用波長での伝播モードが一つであるように設計された光ファイバをシングルモード光ファイバという。この光ファイバでは、マルチモード光ファイバのようにモードによる伝播時間の違いからくる信号の歪が生じないので、きわめて高速の伝送が可能である。

シングルモード光ファイバの伝送容量を示す指標は、分散である。石英系ガラスの屈折率は波長に依存する。また伝播モードの速度も波長によって変化し、その大きさは光ファイバの構造 (屈折率プロファイルや  $\Delta$ ) によって決まる。前者を材料分散、後者を構造分散と呼び、両者の和を単に分散という (図 11<sup>1)</sup> 参照)。使用する光源の波長が単一 (線スペクトル) であればパルスは全く歪まない。しかし実際入手できる光源は、そのような理

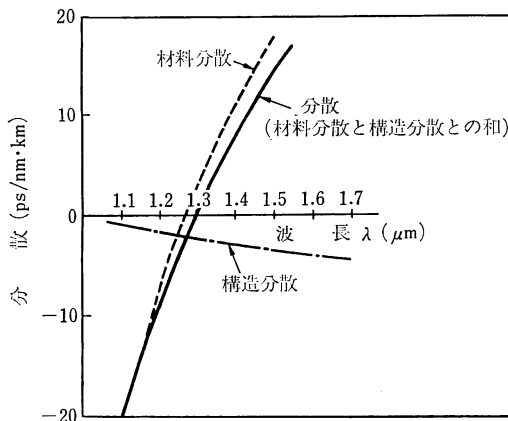


図 11 シングルモード光ファイバの分散<sup>1)</sup>

想的なものではなく、必ずスペクトルに幅を有している (発光ダイオードで数十 nm、半導体レーザーで 2 nm、分布帰還形 (DFB) レーザーで 0.1 nm 程度)。そこで、光ファイバの分散値と光源のスペクトル幅に依存して伝播パルスがわずかではあるが歪み、これがシステムを設計する際重要なポイントの一つになっている。シングルモード光ファイバの分散はある波長でゼロになる。GeO<sub>2</sub> をコアにドーピングした標準的なシングルモード光ファイバ ( $\Delta$ ; 0.3%,  $\lambda_c$ ; 1.2  $\mu\text{m}$ , コア径 9  $\mu\text{m}$ , 外径 125  $\mu\text{m}$ ) の場合、その波長は図 11 に示すように 1.3  $\mu\text{m}$  付近にある。この波長をゼロ分散波長  $\lambda_0$  という。

コアおよびその近傍を伝播するシングルモード光ファイバの光パワー分布から、モードフィールド径を求めることができる。モードフィールド径はマルチモードファイバのコア径に相当するパラメータであり、大きいほうが接続等を考えると有利であるが、大きすぎると曲げによる損失増が無視できなくなる。

標準的なシングルモード光ファイバのモードフィールド径は 9~10  $\mu\text{m}$  であり、損失は 1.3  $\mu\text{m}$  帯で約 0.36, 1.55  $\mu\text{m}$  帯で約 0.21 dB/km である。

## 4. 1.55 $\mu\text{m}$ 帯用シングルモード光ファイバ

### 4.1 カットオフシフト光ファイバ

石英系光ファイバは 1.55  $\mu\text{m}$  帯で損失が最小になる。1988 年より中継間隔を伸ばすために 1.55  $\mu\text{m}$  帯を利用したシングルモード光ファイバの導入が始まった。その一つが  $\lambda_c$  を標準の 1.18~1.285  $\mu\text{m}$  から 1.4~1.55  $\mu\text{m}$  の範囲にシフトさせたもので、カットオフシフト光ファイバと呼ばれている。 $\lambda_c$  を 1.18~1.285  $\mu\text{m}$  に設定しても 1.55  $\mu\text{m}$  帯でシングルモード伝送を行うことは可能であるが、1.55  $\mu\text{m}$  帯での曲げによる損失増がやや大きくなってしまふのが欠点である。そこで  $\lambda_c$  をより長波長側へシフトさせ、1.55  $\mu\text{m}$  帯の曲げによる損失増を無視できるほど小さくさせたものがカットオフシフト光ファイバである。したがって 1.55  $\mu\text{m}$  付近では分散値が 15~16 ps/km·nm と大きくなる (図 11 参照) ので、システム設計に際しては、スペクトル幅の小さい光源 (DFB レーザーなど) を使うことがその低損失を生かすポイントになる。

カットオフシフト光ファイバの損失をさらに下げするために、コアに GeO<sub>2</sub> をドーピングする代わりにクラッドにフッ素 (F) をドーピングした光ファイバも開発されている。コアは純 SiO<sub>2</sub> か、F を微量ドーピングした SiO<sub>2</sub> であり、レーリー散乱係数を小さくできる。このため、1.55  $\mu\text{m}$

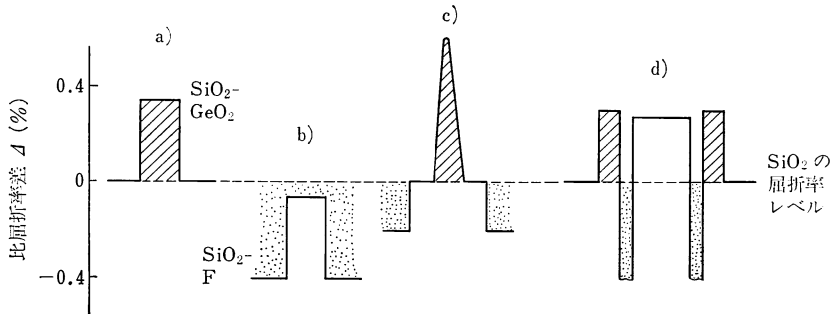


図 12 各種シングルモードファイバの屈折率プロファイル  
(a) 標準, (b) 全フッ素ドープ ( $\lambda_c$ シフトファイバへ応用されている),  
(c) 分散シフトの一例, (d) 分散フラットの一例

帯で 0.20 dB/km 以下の損失を示すカットオフシフト光ファイバが得られる。

#### 4.2 分散シフト光ファイバ

カットオフシフト光ファイバの短所は、 $1.55 \mu\text{m}$  帯で分散値がかなり大きいことにある。これを改善するため、ゼロ分散波長  $\lambda_0$  を  $1.55 \mu\text{m}$  帯へ移した光ファイバを分散シフト光ファイバという。構造分散の曲線を変える一コアの屈折率プロファイルと  $\Delta$  を適切なものとする一ことによって分散をシフトさせる。石英系光ファイバで最も低損失な  $1.55 \mu\text{m}$  帯で分散がゼロであるので、超高速・長距離伝送が可能である。

この光ファイバは、図 12 に示すようにコアの屈折率プロファイルが単純でないので、製造がやや複雑になるという欠点をもつ。 $\lambda_c$  を  $1.3 \mu\text{m}$  以下とすれば、 $1.55 \mu\text{m}$  に加えて  $1.3 \mu\text{m}$  帯も使うことができる。しかし、 $\lambda_0$  が  $1.55 \mu\text{m}$  帯にあるので逆に  $1.3 \mu\text{m}$  での分散がかなり大きくなってしまふ。したがって両波長を使う場合、 $1.3 \mu\text{m}$  帯ではスペクトル幅の小さい光源を用いなければならない。損失は、 $1.55 \mu\text{m}$  帯で約 0.21 dB/km くらいである。

#### 4.3 分散フラット光ファイバ

分散シフト光ファイバは、 $1.55 \mu\text{m}$  帯で分散がゼロになるのに対し、 $1.3 \mu\text{m}$  帯では分散が大きくなる。そこで  $1.55 \mu\text{m}$  に加え  $1.3 \mu\text{m}$  帯でも分散を小さく ( $\pm 5 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$  以内) したものが開発されている。これを分散フラット光ファイバと呼ぶ。

分散特性を制御するため、屈折率プロファイルは通常かなり複雑になる (図 12 参照)。またこの光ファイバでは、モードフィールド径が  $7\sim 8 \mu\text{m}$  であり、分散シフト光ファイバと同程度である。損失は  $1.3 \mu\text{m}$  帯で約 0.40、 $1.55 \mu\text{m}$  帯で約 0.23 dB/km のものが得られているが、プロファイルが複雑で製造コストが高くなる点が

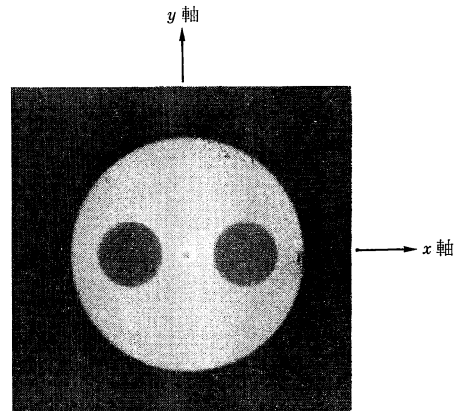


図 13 偏波面保存光ファイバの断面  
中心がコア部、その両側が応力付与部  
( $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ )

克服されていないために、まだ実用化されるには至っていない。

#### 4.4 偏波面保存光ファイバ

シングルモード光ファイバは、直交する二つの偏波モードを伝播する。構造が軸対称である前述のシングルモード光ファイバでは、二つの直線偏波モードの伝播定数は等しく、両者は縮退していて区別することができない。

そこで、シングルモード光ファイバ内に図 13 に示すような応力付与部 (通常  $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$  ガラス) を設けると<sup>6)</sup>、屈折率が  $x$  と  $y$  軸で異なるため、光ファイバの軸対称性をなくすことができる。これによって二つの直線偏波モードの伝播定数に差が生じ、 $x$  または  $y$  軸に沿って直線偏波を入射させるとそのまま伝播させることができる。このようなファイバを偏波面保存光ファイバという。

$x$  と  $y$  軸の屈折率が大きいほど偏波をそのまま伝播

できるが、損失などと相反する関係にある。通常  $1.3\ \mu\text{m}$  帯で約  $0.6\ \text{dB/km}$ ,  $1.55\ \mu\text{m}$  帯で約  $0.3\ \text{dB/km}$  のものが得られる。偏波面保存光ファイバは、主として光部品や光センサーおよび光ファイバジャイロスコープなどに応用されている。

## 5. おわりに

本稿では、材料および伝送特性から光ファイバを分類し、各種光ファイバの特徴について解説した。次稿では、主として石英系光ファイバの製造方法および信頼性について記す。

## 文 献

- 1) 大久保勝彦: ISDN 時代の光ファイバ技術 (理工学社, 1989) 2-4 章.
- 2) A. J. Morrow: "Introduction to optical fibers," Conf. on Optical Fiber Commun. (Atlanta, 1986) Minitutorial MF 1.
- [3] T. Izawa, N. Shibata and A. Takeda: "Optical attenuation in pure and doped fused silica in the IR wavelength region," *Appl. Phys. Lett.*, **31** (1977) 33-35.
- 4) P. W. France, S. F. Carter, M. W. Moore, J. R. Williams and C. R. Day: "Status and prospects of MID IR fibers," *14th Eur. Conf. Opt. Commun.*, Vol. 1 (Brighton, 1988) pp. 428-432.
- 5) T. Kaino: "Absorption losses of low loss plastic optical fibers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24** (1985) 1661-1665.
- 6) Y. Sasaki: "Long-length low-loss polarization-maintaining fibers," *J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 1139-1146.