

解説

光ファイバ伝送技術(1)*

島田 禎晉** 三木 哲也** 内田 禎二*** 関沢 義****

1. まえがき

光を通信に利用しようとするアイデアは古くからあったが、本格的な研究が展開されるようになったのは1690年にレーザが発明され、人類がコヒーレントな光を手に入れてからである。当初は、空間伝送方式と光ビームガイド伝送方式がもっぱら研究の対象であった。ところがSTLのKaoらが、ガラスを媒体とする光伝送方式が可能なることを提唱した¹⁾のがきっかけとなり、通信用の低損失光ファイバの研究が開始された。光ファイバが現実的な伝送路となり得るための必要条件といわれていた20 dB/kmの損失値を、1970年にコーニング社が達成²⁾し世界の研究者に衝撃を与えた。

一方1962年に出現した半導体レーザは小形で直接変調が可能なるため光ファイバ伝送用光源として適していると考えられていたが、1970年には室温連続発振に成功³⁾した。

これらを契機として多くの研究者が光ファイバ伝送の研究に着手することとなり、今では光伝送といえば光ファイバ伝送を意味するほどになっている。

光ファイバは従来の伝送媒体が持ち得なかった多くの利点と広範囲な適用性を有しており、素質の良さは万人の認めるところとなりつつある。光ファイバの損失も最近では5 dB/km以下が普通となり、使用波長

を選べば0.5 dB/kmという超低損失も実現されている。半導体レーザの寿命も1万時間を越えるデータが出はじめ、発光ダイオードでは実用品の寿命として最低限必要な10万時間を越えているといわれている。またケーブル化をはじめコネクタ、接続、減衰器などの関連技術も急速に進歩しつつある。さらに、このような技術をシステム化した多様な伝送方式の実験も各所で試みられはじめており、光ファイバ伝送の実用化への期待もますます大きくなってきている。

本稿は光ファイバ伝送関連技術の現状の紹介と、それらの応用について述べたものである。

2. 光ファイバ伝送の特徴

2.1 基本的な光ファイバ伝送系

光ファイバ伝送に利用することのできる光は、波長がおおよそ0.6~1.6 μmの可視から近赤外の領域で(周波数にして数百THz*****)、実用になっている最も高周波のミリ波と比べてもさらに3~4桁以上の違いがある。このような広大な波長域を無駄なく使いこなせば、1本の光ファイバを使用するだけでも超大量の情報伝送ができるわけであるが、それにはコヒーレントで十分安定な光*****を発振できる光源と、光の周波数変換器や分波器が必要となる。ところが、光ファイバ伝送に適した波長帯ではこのような高度な部品技術は未だ見通しが立っていないため、現在のところインコヒーレントな光(いわば雑音状の光)を用いてその電力を変化させることにより情報伝送を行おうとしている。

図-1 は中継器を含まない送受1組の伝送系の構成

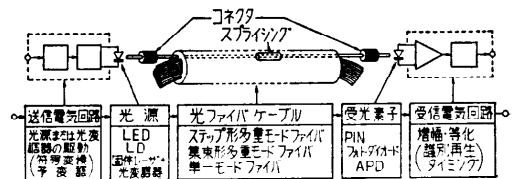


図-1 光ファイバ伝送系の基本構成

* Optical Fiber Transmission Technology by Sadakuni SHIMADA, Tetsuya MIKI (Yokosuka Electrical Communication Laboratory, N. T. T.), Teiji UCHIDA (Nippon Electric Co., Ltd.) and Tadashi SEKIZAWA (FUJITSU Laboratories Ltd.).

** 日本電信電話公社横須賀電気通信研究所基幹伝送研究部

*** 日本電気(株)レーザ装置開発本部

**** (株)富士通研究所トランスミッション研究部

***** 1 THz は 1000 GHz

一般に発光源は点光源の集合体と見なせるが、各点光源からの光の間に一定の位相関係が保たれていれば空間的にコヒーレントであるといひ、さらに一つの点光源からの光の位相が長時間にわたって安定であれば時間的にコヒーレントであるという。発光ダイオードは、空間的にも時間的にもコヒーレントでない(すなわちインコヒーレント)。また通常の半導体レーザは空間的にはコヒーレントであるが時間的にはインコヒーレントである。

を示している。デジタル信号の伝送かアナログ信号の伝送かによって電気回路部分の中味は異なる。仮にデジタル伝送として系の説明をすると、まず送信パルス信号を通常そのままの形で光の電力に対応づけるような変調すなわ強度変調(IM: Intensity Modulation)によって光パルス信号に変換する。光源としては、LED (Light Emitting Diode: 発光ダイオード)、LD (Laser Diode: 半導体レーザ) および固体レーザと光変調器を組み合わせたものが考えられているが、このうち LED と LD は駆動電流の変化で直接変調がかけられるので使いやすく、もっぱらこれらの素子を利用することが考えられている。光ファイバケーブルに使用される光ファイバの種類には現在、図-1 に示す3種類があり、伝送損失は検討の最も進んでいる波長 $0.85 \mu\text{m}$ 帯でおおよそ $3 \sim 5 \text{ dB/km}$ である。光信号の検出はフォトダイオードにより行われる。フォトダイオードには PIN 接合のもの、APD (アパランシェフォトダイオード) がある。フォトダイオードで光パルス信号が電気パルス信号に変換されたあとは、通常の等化増幅が行われ、パルスの識別再生と必要に応じてタイミング信号の抽出がなされる。

以上は中継器のない最も簡単な系を示したが、中継器は、受信電気回路の後に送信電気回路を接続して再び光源を駆動する回路から構成され、基本的には同一の構成要素から成り立っている。実用的な伝送系を構成するには、この他に光ファイバのスプライシング (永久的な接続) やコネクタが必要である。また、データバス・データリンクや CATV などでは光の分岐・結合も重要な構成要素となる。さらに、将来 光ファイバの帯域を有効に利用して、光多重伝送を行おうとすると、波長の異なる光源と光分波器などの部品が必要となる。

2.2 光ファイバ伝送の利点と弱点

現在考えられている光ファイバ伝送のシステムは情報伝送手段として光の強度を利用しているだけであり、端局装置や中継器も電気から光、光から電気という変換 (これらを E/O 変換および O/E 変換と呼ぶ) を必要とする点を除けば従来のペアケーブルや同軸ケーブルのシステムに良く似ている。したがって従来の伝送方式との最大の相違点は、伝送媒体として光ファイバケーブルを使用する点であり、伝送方式の利点、弱点もほとんど光ファイバの特質に起因している。

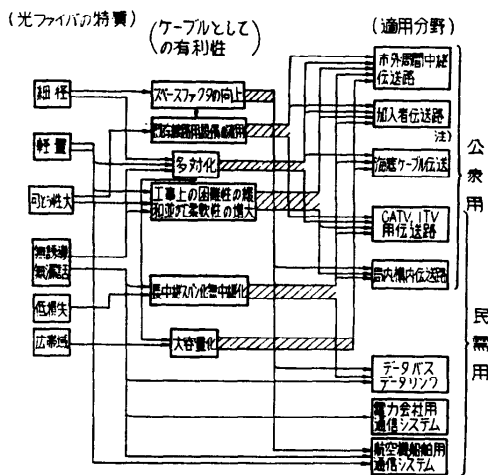
光ファイバの特質としては、

- (1) 細径である (直径 0.2 mm 以下)。

- (2) 軽量である (ガラスの比重は銅の約 $1/4$)。
- (3) 可とう性にすぐれている (曲率半径数 cm 以下)。
- (4) 無誘導・無漏話である。電気の伝導体ではないため、電力ケーブル、電気軌道などからの外部誘導、放送波などからの電波干渉および接地電位差の問題がない。また光相互の漏話も無視できる。
- (5) 極めて低損失である (数 dB/km)
- (6) 広帯域である (光ファイバの種類により異なるが、 1 km 当り数十 $\text{MHz} \sim$ 数十 GHz)。などがあげられる。

これらの特質から得られる光ファイバケーブルの既存伝送媒体 (空間伝播を除く) と比較した有利性、およびそれらを生かすことによって適用される可能性の大きい分野を図-2 に示す。これからわかるように、既存の銅ケーブルが適用されているほとんどの分野において使用され得る適性を有している。

公衆通信にあっては、多対化が可能で、中継間隔が長くとれ、場合によっては屋外中継器が不要になること、設備工事の困難性が従来のケーブルに比べて大幅に緩和しうることなどが大きな利点である。データバス・データリンク、電力会社および航空機・船舶内の通信システムにとっては、無誘導・無漏話であること、軽量でスペースファクタが良いことが主な利点である。さらに光ファイバの主成分であるシリカ (SiO_2) の原料が地球上に無尽蔵に存在するため資源問題が少



注. 音声の多重化信号あるいは種々の情報を多重化した信号の伝送を想定

図-2 光ファイバの伝送媒体としての利点と光ファイバ伝送の適用分野

表-1 光ファイバの伝送媒体としての弱点とその対応策

光ファイバの弱点	市外ケーブルに使うとき	市内ケーブルに使うとき	加入者引込線、構内用コードに使うとき	対応策
急峻な曲げに弱い	—	—	●	・補強効果の大きいケーブル化 ・布設法・工法の工夫
引張り強度が小さい	▲	▲	●	
芯線給電が不可能	●	▲	▲	給電系を別に用意
切断・接続に高度の技術を要す	▲	●	●	切断用、接続用具の用意
分岐・結合が不自由	—	—	▲	簡易な分岐、結合部品を用意
伝送特性の厳密な規定が困難	▲	▲	—	余裕を十分に見込んだ伝送系的设计

● 弱点となる可能性あり。 ▲ 弱点だが影響は小さい。
— 当該性質が要求されない。

ないという利点もある。

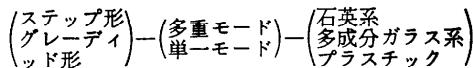
一方、光ファイバは、ガラスである、細径である(導波路が小さい)、 μm オーダの波長を扱っている、などが原因となっていくつかの弱点も持っており、適用のされ方によっては問題となる可能性がある。市外ケーブル、市内ケーブルおよび加入者引込線、構内用コードの3種に分類して表-1に弱点の程度とそれらの対応策を示した。これらの対応策についてはそれぞれ研究が進められているので、実用に耐え得る解決策はやがて用意されるものと思われる。

この他、光ファイバ伝送の一般的な問題点として、コネクタその他の光部品の製造に微細加工が要求されること、ケーブルの障害探索が銅ケーブルの場合より難しいこと、光源の効率が悪いことなどもある。しかし前述した利点の方がはるかに大きく評価される場合が多く、かつ将来の発展性も考え合わせると総合的に判断して、光ファイバ伝送はきわめて魅力の大きい技術であるといえる。

3. 光ファイバケーブルとその関連技術

3.1 光ファイバの種類

光ファイバは屈折率分布、伝播モード数および材料によって次のような組み合わせが考えられる。



(1) 屈折率分布

図-3に代表的な2種類の屈折率分布を示す。(a)はステップ形で中心の屈折率の高い部分(コア)と囲り

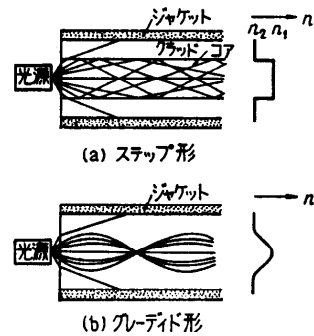


図-3 光ファイバの屈折率分布と光線の伝播

の低い部分(クラッド)の屈折率変化が階段状になっているものである。光線は図示したようにコアとクラッドの境界で全反射しながら伝播する。伝播可能な多くの光線のうち、光ファイバの軸にそってほとんど直進する光線と、反射を繰り返して進む光線では伝播路長に差があるため群速度差が生じる。これはモード分散と称され、3.3で詳しく述べるが、伝送特性の劣化の一要因である。(b)はグレーディッド形で、コア部分の屈折率が中心軸から離れるに従って連続的に小さくなっている。そのため中心軸をそれた光線は曲線的に中心部に集束されながら伝播する。この際、中心軸からそれた光線ほど伝播路長は長くなるが、低屈折率の領域を通るときは伝播速度が速いため、いずれの光線についても群速度をほぼ等しくすることが可能である。屈折率の変化を放物線状にしたときが最適である⁴⁾。

(2) 伝播モード数

上に説明した例では、伝播可能なモードが多数存在する場合を示したが、このようなものを多重モードファイバと称する。ステップ形またはグレーディッド形ファイバのコア径を小さくしてゆくと、伝播可能なモードの数が減ってゆくが、最低次のモード(HE₁₁モード)しか伝播し得ないものを単一モードファイバと称する。通常は構造の簡単なステップ形であり、コア径は5~10 μm 程度*である。

(3) 材料

光ファイバの材料は、石英(SiO₂)を主体としてそれに屈折率を変化させるための添加物を入れたもの、および多成分ガラス系が主な研究の対象となっている。その他、石英をコアとして、これにプラスチックを被せクラッドとする光ファイバや、コア、クラッド共にプラスチックからなるプラスチックファイバがある。低損失化の点では石英ファイバが有利であるが、

* 波長が0.85 μm 帯で、比屈折率差: $(n_1 - n_2)/n_1$ が0.4~0.1%の場合。

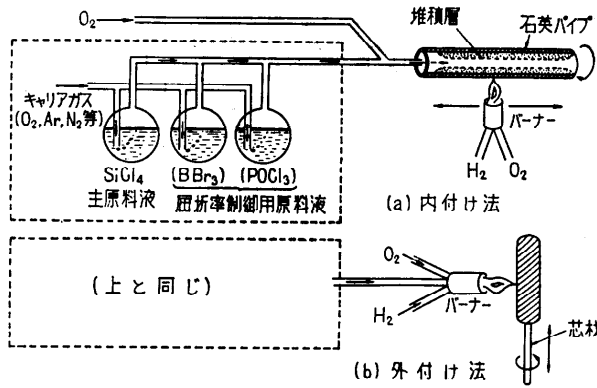


図-4 CVDによる内付け法および火炎加水分解法による外付け法の原理図

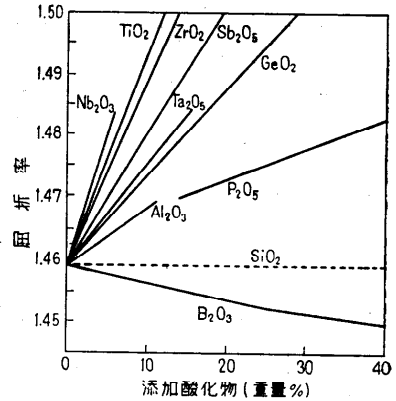


図-5 石英に各種酸化物を添加した場合の屈折率の変化

それ以外の光ファイバもそれぞれ捨てがたい特長を持っている。

3.2 光ファイバの製造法

石英系ファイバの製造法として現在有力であると考えられているのは次の2法である。

- (i) 化学気相沈積 (CVD) による内付け法
- (ii) 火炎加水分解による外付け法

これらの原理図を図-4 に示す。

内付け法では、酸素などをキャリアとして主原料の四塩化硅素 SiCl₄ と屈折率制御のための原料 (BBr₃, POCl₃, GeCl₄, その他) を1または2種類、石英パイプ内に導き、外からバーナーで加熱することにより煤状の石英と添加酸化物を生成させ、パイプ内面に堆積させる。続いてこれらを加熱熔融して、透明ガラス化する。石英管を回転させると同時に、バーナーを繰り返し移動させながら、上記のような反応を進める、通常このような移動を数十回繰り返す必要があり、このため数時間かかる。このあとパイプ内を減圧し、石英管を1,750°C程度で加熱すると、軟化したパイプが大気圧でつぶされて中空部がなくなる。この工程をコラプスと呼ぶ。このようにして作られた母材を、端部から高周波加熱炉、電気炉、酸素素炎などで2,000°C程度に加熱しながら紡糸してファイバとする。ファイバの直径は巻取り機を自動制御して一定値に保たれる。

一方、外付け法は主原料と屈折率制御用原料の混合までの方法は内付け法と同じであり、これらの原料を酸素素炎バーナーで燃焼させることにより火炎加水分解し、芯材の上に煤状の石英と添加酸化物をつもらせる。これに適当な熱処理をした後、1,400°Cまで加熱

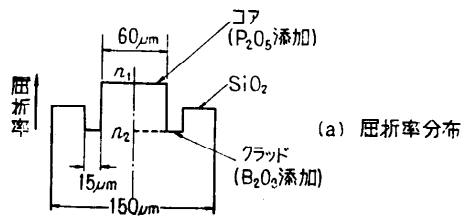


図-6 ステップ形多重モードファイバの屈折率分布と干渉顕微鏡写真

(b) 断面の干渉顕微鏡写真(真中の盛上って見える部分がコア)

してガラス化し、芯材を取り除き、研磨して母材を作る。紡糸については内付け法と同じである。

いずれの方法においても屈折率は添加酸化物の濃度で容易に制御できる。B₂O₃を含むと純粋石英よりも屈折率が下り、P₂O₅やGeO₂を含むと逆に上る。図-5にこれらの関係を示す。図-6に内付け法で作られたステップ形多重モードファイバの屈折率分布の形状と、干渉顕微鏡写真を示す。

内付け法は、反応系が閉じて不純物混入が避けられること、水素が直接関与しないので損失の主要因の一つであるOH基の含有量が著しく低減できること、により吸収損失が容易に下げられる。さらに屈折率分

布の制御が高精度にできるので、グレーディッド形ファイバの製造に向いている。この方法は1974年京都で開催された国際ガラス会議でベル研より発表された⁵⁾ものであり、その後各所で追試され、今では製造法の主流の一つになっている。最近では石英ファイバの理論限界に近いのではないかとされるような超低損失のものも試作されるようになってきた^{6),7)}。図-7は、日本電信電話公社茨城電気通信研究所と藤倉電線で共同研究されたステップ形多重モードファイバの損失特性である。OH基の吸収損失は0.95μm付近と1.4μm付近に生ずるが、この例ではOH基の含有量がきわめて少ないため0.95μmの方はほとんど認められない。内付け法はこのように特性面からはきわめて優秀な方法であるが、欠点として量産性、製品の均質性および長尺化に難があり低価格化に向かない技術であるともいわれている。しかし最近では工程のスピードアップ、寸法の制御技術も研究されており、長所が短所を補う可能性も十分出てきた。

外付け法は、閉じた系ではないこと、水素を使うためOH基が含まれやすいこと、などで低損失化の面では内付け法に劣るが、それでも0.82μmで3dB/km、1.06μmで2dB/km程度の光ファイバは製造可能である⁸⁾。一方、量産性に関しては内付け法に比べて約1桁程度有利であるといわれており、製品の寸法精度が良いこと、コア径の大きいものが作りやすいことなど製造面での長所の大きい方法である。コーニング社は、この製造法を採用しているといわれている⁹⁾。

次に多成分ガラス系光ファイバの製造法を述べる。

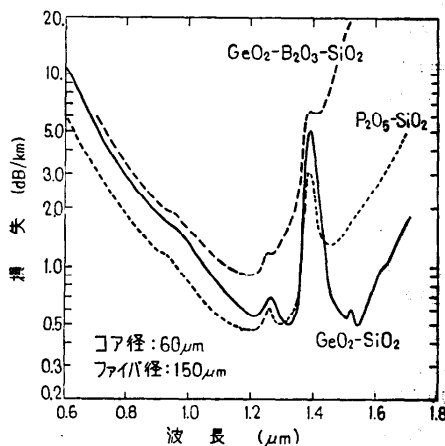


図-7 内付け CVD 法による各種石英ファイバの損失特性

表-2 多成分ガラスの組成と特徴

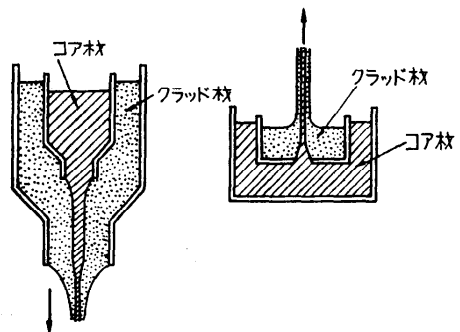
	組成	損失* (dB/km)	特徴	研究機関
ソーダ石灰シリケート	SiO ₂ -Na ₂ O-CaO	7.1 ⁽⁶⁾	T _m ** = 1400°C	茨城通研 東芝
ソーダボロシリケート	SiO ₂ -Na ₂ O-B ₂ O ₃	5.0 ⁽¹⁰⁾	T _m = 1250°C	日本板硝子 - 日本電気 BPO (英)
アルカリ鉛シリケート (フリントガラス)	SiO ₂ -Na ₂ O-PbO	-	T _m = 1400°C	Schott (独)
アルカリゲルマノシリケート	SiO ₂ -Na ₂ O-GeO ₂	-	屈折率大	Philips (オ)
ソーダアルミノシリケート	SiO ₂ -Na ₂ O-Al ₂ O ₃	-	T _m = 1450°C 散乱損失小	BTL (米) Philips (オ)

* 波長: 0.83 μm において. ** T_m: 熔融温度

多成分ガラスの組成は、SiO₂の他にNaO, K₂O, CaO, B₂O₃などのうち数種類から成る。表-2に光ファイバ用の各種の多成分ガラス組成の例を示す。現在はソーダ石灰シリケートとボロシリケートガラスが主に研究されている。

多成分ガラスファイバの製造工程は、まず主として化学的手法により原料を精製し、精製された原料を所定の割合で混合かつ溶融してガラスを作る。このガラスを図-8に示すように、コア材とクラッド材が同心円状に引き出せる構造の二重のつぼ¹¹⁾またはフローティングのつぼ内に入れ、外部から高周波加熱することにより紡糸する。通常は二重のつぼ法が使われており、つぼの材質としては白金が一般的である。

多成分ガラス系ファイバは、二重のつぼ法による連続紡糸が可能であるため量産性が良いこと、低融点であるため加工がしやすいこと、コアの大口径化が容易であること、などの特長をもっている。グレーディッド形ファイバもイオン交換の技術を用いて製造可能である¹²⁾。しかし損失に関しては、遷移金属やOH基など不純物が石英系より混入しやすいため、現在のところ数 dB/km 程度である。



(a) 二重のつぼ法 (b) フローティングのつぼ法

図-8 多成分ガラスファイバの紡糸法

3.3 光ファイバの伝送特性

光ファイバの電気特性の主要なものは、光損失とベースバンド伝送特性の二つである。ベースバンド伝送特性は、光ファイバの①モード分散*, ②材料分散**, および光ファイバの構造によって定まる③構造分散, の三つの要因で定まる。多重モードファイバでは①と②が支配的であり, 単一モードファイバでは②と③が支配的である。

モード分散によるベースバンド伝送特性では, その損失の周波数特性が近似的に次式で表わされる¹³⁾。

$$A(f) = 6 \left(\frac{f}{f_c} \cdot L \gamma \right)^2 \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

ここで L は光ファイバの長さ(km), f_c は長さ 1 km の光ファイバの 6 dB 帯域幅である。 γ は帯域の長さ依存性を表わす係数で, 普通のステップ形多重モードファイバでは $\gamma=0.5 \sim 0.6$ であることが確かめられている。

モード分散によるベースバンド伝送特性の理論検討は数多く行われている。決定的な理論は未だ見出されていないが, 小山らの理論¹⁵⁾は, ステップ形多重モードファイバの実測値を良く説明し得るもので, 十分実用性のある理論といえる。特に長距離のところでの対応関係が良く, 実測値との比較例を 図-9 に示す。グレーディッド形では, コア内の半径 r 方向の屈折率を

$$n = n_1 \sqrt{1 - 2(n_1 - n_2)(r/a)^2} \quad (2)$$

n_1 : コア中心の屈折率,

n_2 : クラッドの屈折率,

a : コアの半径

で表わすと, 光ファイバのベースバンドにおけるインパルスレスポンスの概略のパルス幅 T は,

$$T = \begin{cases} \left| \frac{\alpha - 2}{\alpha + 2} \right| \Delta & (\alpha \approx 2 \text{ 以外}) \\ \frac{\Delta^2}{2} & (\alpha = 2) \end{cases} \quad (3)$$

で与えられる¹⁶⁾。ここで Δ はコア径 $2a$ の理想的なステップ形ファイバの場合のパルス幅に相当する。また α は屈折率変化の形状を表わす係数であり, $\alpha = \infty$ がステップ形に相当する。 $\alpha = 2$ は放物線状の屈折率変化となり, このときインパルスレスポンスのパルス幅が最小となる。すなわち伝送帯域幅は最大となる。

実際に試作されている多重モードファイバでは, 1

* 3.1 参照

** 光ファイバ材料の屈折率は波長依存性があるため, 光源の波長が異なると伝播速度が異なる。このため光源の発光スペクトルが広い場合には伝送特性の劣化が生じこれを材料分散と呼んでいる。

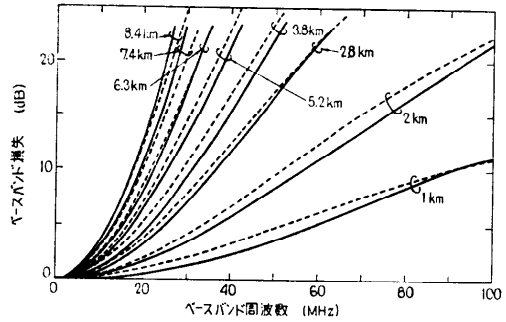


図-9 ステップ形多重モードファイバのベースバンド伝送特性 (点線は理論値)

km 長の 6 dB 帯域幅が, ステップ形で 30~100 MHz, グレーディッド形で 300~1000 MHz 程度のもが多い。また, このような伝送特性の測定には, 従来はパルス幅拡がりを観測する方法がもっぱら使われていたが, 最近では測定精度のとれるベースバンドの周波数掃引法¹⁴⁾が採用されるようになってきた。

材料分散によるベースバンド伝送特性は, 光源のスペクトルがガウス形に分布するものと仮定すると, その損失の周波数特性は,

$$A'(f) = 6 \left(\frac{f}{f_c'} \right)^2 L^2 \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

で与えられる。スペクトル分布の電力半値幅を $w \text{ \AA}$, 光ファイバの材料分散係数を $m \text{ ps/km} \cdot \text{\AA}$ とすると, 6 dB 帯域幅 f_c' は次式で与えられる。

$$f_c' = 4.4 \times 10^5 \frac{1}{mw} \quad (\text{MHz}) \quad (5)$$

石英の場合, 波長 $0.85 \mu\text{m}$ で $m=8.5 \text{ ps/km} \cdot \text{\AA}$ とされているので, $w=10 \text{ \AA}$ で $f_c'=5.2 \text{ GHz}$ になる。発光ダイオードは通常 $w=400 \text{ \AA}$ 程度であるから $f_c'=130 \text{ MHz}$ となる。

モード分散と材料分散の両方を考慮した 1 km の 6 dB 帯域幅 f_c は次式で与えられる。

$$\frac{1}{f_c^2} = \frac{1}{f_c'^2} + \frac{1}{f_c^2} \quad (6)$$

単一モードファイバでは, 構造分散は $0.5 \text{ ps/km} \cdot \text{\AA}$ 前後であるため, 波長 $0.85 \mu\text{m}$ の通常の光源 (LD で $w \approx 20 \text{ \AA}$) では材料分散が支配的である。

以上とりまとめて, 伝送特性について各種光ファイバの光損失とベースバンド帯域幅の関係を図示すると 図-10 (次頁参照) のようになる。また各種光ファイバの技術現状を表-3(次頁参照)に一覧表とした。それぞれ異なる特徴点をもっているため, 応用法により使い分けられてゆくであろう。

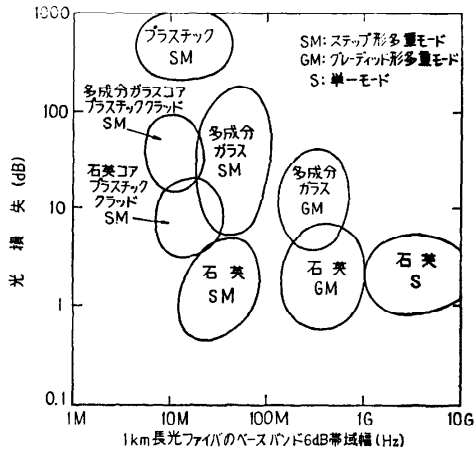


図-10 各種光ファイバの光損失とベースバンド伝送特性の関係

3.4 ケーブル化と接続

光ファイバの外径は100~300 μm が一般的である。石英では、そのものの破断応力は理論的には 850 kg/mm^2 といわれ、銅の破断応力の数十倍であるが、光ファイバではわずかのきずや紡糸時の不純物汚染で機械的強度が著しく低下する。そこで紡糸直後に光ファイバを数 μm 厚の樹脂で包みこむという方法がとられる。このような光ファイバを素線と称しており、さらに取り扱いやすくするためにナイロンやポリエチレンで被覆したものを芯線と称している。芯線の直径は1 mm 前後のものが多い。光ファイバにこのような被覆をほどこすと、損失が増加することがあるが、この原因は光ファイバにマイクロベンディングが生ずるため

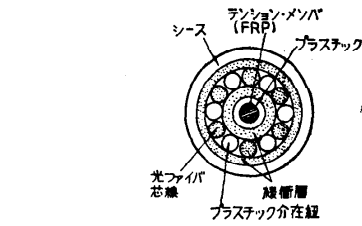


図-11 光ファイバケーブルの一例 (断面図)

であるといわれている¹⁷⁾。損失増を避けるために被覆法の工夫が行われており、この技術も最近では進歩しつつある¹⁸⁾。また被覆の速度はケーブルの価格への影響が大きいため、高速の芯線化技術が今後の課題となっている。

ケーブル化は、このような光ファイバ芯線を集合する技術であるが、図-11 はその一例で6芯の場合である。ベル研では多芯ケーブルを検討しており、幅4 mm 程度の12芯のテープ状ファイバを12枚積みかさねて144芯の外径13 mmの光ファイバケーブルを試作している¹⁹⁾。光ファイバケーブルは従来の銅ケーブルと比較すると、重量的に約2桁以上軽量であるためケーブル布設が圧倒的に容易である。そのためケーブル長も長尺化が可能で、現在は1 km 程度のものが多い。

光ファイバの接続は、スプライシング (永久接続) と着脱可能なコネクタによるものに分類できる。主なスプライシング法には、ガラス毛細管に光ファイバ素線を両側から差し込み突き合わせたあと接着剤を注入するもの、V形の溝の上に光ファイバを突き合わせて置き上方から板でおさえつけるもの、および光ファイバの端面と端面を高温加熱して融着するもの、などが

表-3 光ファイバの技術現状

		石 英		多成分ガラス	石英コアプラスチッククラッド	プラスチック
		内 付 け	外 付 け			
損 失 at 0.85 μm (dB/km)	top data typical	<1.5 4~5	<3 5~7	<6 7~10	<4 4~10	<500(注1) 500~1000(注1)
ベースバンド6dB帯域幅 (MHz; 1 km 当り)	ステップ形 グレーディッド形	30~100 300~1000		20~100 300~800	20~40 —	? —
コ ア 径	($\mu\text{m}\phi$)	5~60	≈85	30~100	100~150	100~500
特 徴	注2) 損 失	◎	○	△	○	×
	伝 送 特 性	◎	◎	○	△	?
	使 用 波 長 帯	◎	○	○	△	×
	大 口 径 化 最 適 性	×	△	○	◎	◎
		×	△	◎	○	○

注 1) at 0.67 μm

注 2) 有利なものから順に ◎→○→△→×

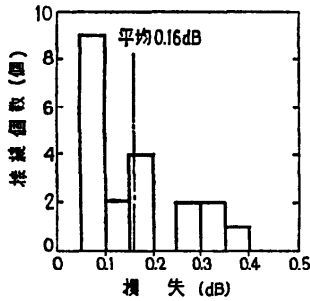


図-12 融着法によるスプライシングの接続損失ヒストグラム (試料はコア径 35 μm のステップ形多重モードファイバ)

ある。いずれの方法でも 0.5 dB 以下の接続損失が実現されている。V溝法は実験的には便利な方法である。融着法²⁰⁾は加熱装置が必要であるが、経時劣化の心配が少ない、接続点の外径変化がほとんどないなどの特長を有しており、接続損失も小さい。接続損失の実験結果を図-12 に示す。最悪でも 0.5 dB 程度が期待できる。加熱は、石英ファイバの場合は熔融温度が高いため放電が使われる。多成分ガラスファイバでは熔融温度が低いためニクロム線による加熱でも可能である。石英ファイバの融着部の例を図-13 に示す。

コネクタについても多数の案が出されているが、各所で種々の構造の試作検討が行われている段階であり、決定版にはたどりついていない。コネクタの基本的な考え方はいずれも同一であり、外径精度の良い円筒の中心に光ファイバのコア中心が一致するように固定されたプラグを、内面精度の良いスリーブの両側から差込むことにより、両方のプラグの中心の光ファイ

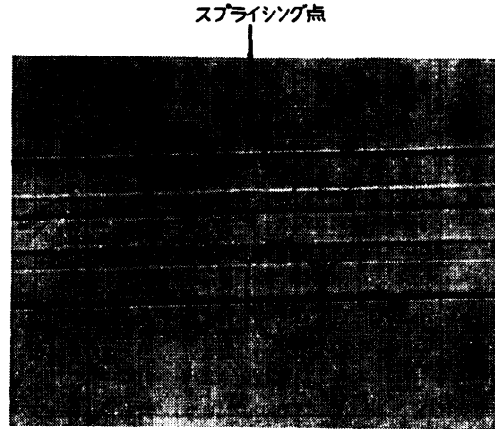


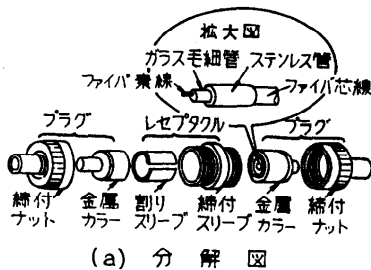
図-13 融着による光ファイバのスプライシング (中心の帯状の部分がコア: 35 μm 径, 黒い部分が外周: 154 μm 径)

バを突き合わせて接続するものである。コネクタの一例を図-14 に示す。損失の主要な原因はコアの軸ずれであり、コア径の 1/10 程度以上の軸ずれを生じると目立って接続損失が増加しはじめる。したがって多重モードファイバでは数 μm の加工精度が、単一モードファイバでは 1 μm 程度の加工精度が要求されており、きわめて難しい課題の一つである。現状でのコネクタの接続損失の実力は 0.5~1 dB 程度である。

4. 光源と受光素子

4.1 材料

初期の光ファイバは 0.95 μm 付近に OH 基の吸収によるきわめて高損失の領域があったため、使用波長



(b) コネクタの外観

図-14 光ファイバコネクタの試作例

はそれを避けた低損失の領域として 0.8~0.9 μm と 1.0~1.1 μm あたりが考えられていた。そのため光源、受光素子もこれに合わせた研究が進んでおり、特に 0.85 μm を中心とする波長帯の素子が最も実用性の高いレベルに達している。

表-4 に現在研究されている材料の主要なものを各波長帯ごとにまとめて示す。0.8 μm 帯の光源用半導体材料の GaAs/AlGaAs は、この材料で初めて室温連続発振の LD が実現した³⁾こともあって、これまで最も良く研究が積み重ねられている材料である。1 μm 帯では、最近、光ファイバが 1.6 μm 程度まで低損失領域があることと、1.3 μm 程度に材料分散が零になる点のあることが注目されだし、この波長帯の素子の研究も活発に行われはじめた²¹⁾。3~4 元素の化合物半導体や Nd 系の新しい固体レーザ用結晶が研究されているが、素子化されているのは今のところ 1.0~1.15 μm の領域のものである。

4.2 光 源

LED, LD, 固体レーザの 3 種類の光源についてその主要な特性を表-5 にまとめる。さらにこのうちで、伝送方式の構成上光源の選択に重要なパラメータである光ファイバ入力電力と変調帯域について、これまでに発表されたデータをもとにすると、それらの分布図は図-15 のようになる。

LED, LD とともに半導体の p-n 接合を順方向にバイアスすることによってキャリアを注入し、その再結合遷移による発光を利用している。LED には出力光の取り出し方法により面発光型と端面発光型の 2 種類

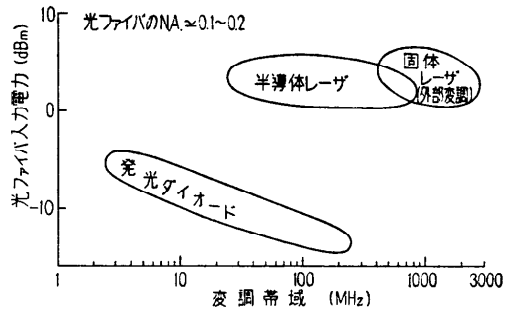


図-15 各種光源の変調帯域と光ファイバ入力電力

の構造が考案されているが、どちらも光ファイバ入力として数十から数百 μW が得られている。LED の変調帯域は不純物の種類や濃度によってきまり、一般に変調帯域をひろげると効率が落ちる傾向にある。LED の寿命については研究が進展し、最近では 10 万時間以上の見通しがつけられつつある。さらに駆動電流対光出力の直線性が比較的良好いのでアナログ強度変調に適しており、加入者系などにおける画像伝送用光源としても期待されている。

LD はキャリアの再結合発光を結晶のへき開面等を用いて共振器の中に閉じ込めることによってレーザ発振光を得ている。LD のチップの大きさは 300×100×100 μm³ 程度であり、放熱用のヒートシンクの上につけられている。活性領域のまわりの層を活性領域よりもエネルギーギャップの大きい媒質で囲んだ DH (ダブルヘテロ) 構造の採用によって、活性領域へのキャリアと光の閉じ込め作用が共に良くなり、発振しきい値電流も低下し、レーザの特性が飛躍的に向上した。光ファイバ伝送用に考えられている LD はいずれもこの DH 構造を用いている。LD は小形、軽量、高効率、機械的振動に強いなど LED にも共通する半導体素子に特有な特長の他に、LED より高速の直接変調が可能である、光ファイバへ高効率に光を結合できる、などの特長を持つ。現在までに各種のストライプ形 LD (帯状の発振領域を持つ LD) が開発されており、発振しきい値電流が約 100 mA、しきい値の 1.5 倍の電流で 10 mW 程度の光出力が得られている。出射ビームはその断面がきわめて扁平になっていることが多く、後で述べるように光ファイバとの結合に工夫が必要であるが、埋め込みヘテロレーザ²²⁾や TJS レーザ²³⁾のようにほぼ円形断面のビームを出射するレーザも得られている。

LD の変調帯域は数 GHz にも及ぶが、出力光にあ

表-4 光素子用の材料

		0.8 μm 帯	1 μm 帯
光源	LED	GaAs, AlGaAs	GaAsSb, GaInAs, GaInAsP
	LD		
	固体レーザ	—	Nd ³⁺ : YAl ₃ O ₁₂ , NdP ₃ O ₁₄ , LiNdP ₄ O ₁₂
受光素子		Si, Ge, GaAs	Ge, GaAsSb, InGaAs

表-5 光源の主要な特性

	発光ダイオード (LED)		半導体レーザ (LD)		固体レーザ
	0.8 μm	1 μm	0.8 μm	1 μm	1.06 μm
波長帯	0.8 μm	1 μm	0.8 μm	1 μm	1.06 μm
ファイバ入力	-5~-15dBm		1~5dBm		0~5dBm
ファイバ結合効率	-10~-15dB		-2~-3dB		<1dB
出力効率	1~3%	1~2%	10~20%	数%	0.1~1%
微分効率	—	—	40~60%	10~25%	~40%
変調速度	~100Mb/s		~1Gb/s		1~2Gb/s (外部変調器)
スペクトル幅	300~400 Å		~20 Å		<1 Å

らわれる固有緩和振動のために、パルス直接変調の実用的な速度は数 100 Mb/s 程度である。より高速の直接変調を目指して外部光注入法²⁴⁾なども試みられている。LD の寿命は当初より最大の課題の一つであり、現在までに AlGaAs DH レーザで 1~2 万時間の連続動作が報告されている²⁵⁾。LD の劣化には結晶内部の問題と共振器鏡面の劣化という表面の問題がある。

1 μm 帯の LED と LD の研究も表-4 に示した材料を中心に最近急速に進展しつつあり、いくつかの室温連続発振の報告があり²⁶⁾、今後の進展が期待される。1 μm 帯の光源の一つとして考えられている連続発振の固体レーザでは Nd:YAG や LNP などのレーザが研究されている。中継器などに組込むためには小形化が要求されるため、ポンピング用光源に LED を使うことが検討されている。固体レーザは単一モードの光源であるため、高速の光変調器と組み合わせて超広帯域伝送をねらった単一モード光ファイバ伝送用の光源として有力な候補と考えられている。

4.3 受光素子

高速で小形な受光素子である PIN-PD (フォトダイオード) と APD の主要な特性を表-6 に示す²⁷⁾。PD も APD も光のエネルギーを吸収して電子-正孔対を作り、それを電流として外部にとりだすものである。APD ではさらにその電子-正孔対を結晶内部に設けた高電界領域に導くことによって電流のなだれ増倍を行っているので高感度である。0.8 μm 帯の受光素子は、ほぼ満足できる性能に達している。一方、1 μm 帯では、Ge では低雑音化や暗電流の低減が難しいという問題があり、InGaAs などの新しい材料の研究が始められている。

4.4 光源、受光素子と光ファイバの結合

受光素子と光ファイバの結合は両者の端面を突き合わせる直接結合でほとんど問題なく行える。一方、LED や LD と光ファイバの結合においては、光源の放射角の大きな出射ビームを光ファイバへ効率良く入射させるために、光ファイバ端面を丸める方法や独立したレ

ンズ系を用いる方法^{28), 29)}などが考案され、LED の場合には -10~-20 dB, LD の場合には -3 dB 程度の結合効率が得られている。

参考文献

- 1) K.C. Kao and G.A. Hockham: Dielectric-fibre surface waveguide for optical frequency, Proc. IEE, **113**, 7, p. 1151 (July 1966).
- 2) F.P. Kapron, D.B. Keck and R.D. Maurer: Radiation Losses in Glass Optical Waveguides, Appl. Phys. Lett., **17**, p. 423 (Nov. 1970).
- 3) I. Hayashi, et al.: Junction lasers which operate continuously at room temperature, Appl. Phys. Lett., **17**, p. 109 (Aug. 1970).
- 4) S. Kawakami and J. Nishizawa: An Optical Waveguide with the optimum distribution of refractive index with reference to waveform distortion, IEEE Trans., **MTT-16**, p. 814 (Oct. 1968).
- 5) J.B. MacChesney, et al.: Preparation of low loss optical fibers using simultaneous vapor phase deposition and fusion, Xth International Congress on Glass, 6-40 (July 1974).
- 6) M. Horiguchi and H. Osanai: Special losses of low-OH-content optical fibers, Electro. Lett., **12**, 12, p. 310 (June 1976).
- 7) 赤松ほか: CVD 法で試作した fiber の屈折率低下(Dip)の補償, 信学技報, **OQE 76-35** (1976-06).
- 8) 川島: 低損失光ファイバの現状と問題点, 信学誌, **58**, 12, p. 1333 (1975-12).
- 9) 今川ほか: 多成分ガラスファイバの吸収損失, 散乱損失, 曲げ損失, 昭 51 信学会光・電波部門全大, S3-6 (1976-11).
- 10) Y. Ikeda, et al.: Development of low-loss Glasses for SELFOC fibers, 2nd Europ. Conf. on Optical Fiber Comm., p. 27 (Sept. 1976).
- 11) 上野: 光学用繊維の製造と加工, 光学技術コンタクト, **5**, p. 20 (1967-04).
- 12) K. Koizumi, et al.: New light-focusing glass fibers made by a continuous process, 1973 IEEE/OSA CLEA, paper 3.3 p. 21 (May 1973).
- 13) 岡野, 三木: 光ファイバの伝送特性とデジタル中継系の SNR, 信学技報, **CS 75-205** (1976-03).
- 14) 小林, 小山: マルチモードファイバの伝送特性, 信学技報, **MW 75-110** (1976-01).
- 15) 小山, 小林, 青山: マルチモードファイバ伝送系の特性とその設計法, 同上, **CS 76-13** (1976-05).
- 16) D. Gloge and E.A.J. Marcatili: Multimode theory of graded-core fiber, Bell Syst. tech. J., **52**, 9, p. 1563 (Nov. 1973).

表-6 受光素子の主要な特性

	0.8 μm 帯		1 μm 帯	
	PIN-PD	APD	PIN-PD	APD
材 料	Si		Ge	
量子効率	~80%		~50%	
応答速度	~1 GHz		~2 GHz	
増倍度	1	~1000	1	~100
過剰雑音指数	-	~0.4	-	1

- 17) W.G. Gardner and D. Gloge: Microbending loss in coated and uncoated optical fibers, Topical Meeting on Optical Fiber Transmission, WA 3-1 (Jan. 1975).
- 18) たとえば, 勝山ほか: 光ファイバケーブル化の検討, 昭 51 信学会通信部門全大, S3-2.
新谷ほか: 光ファイバの被覆構造と伝送特性の安定性, 同上, S3-6.
- 19) J.S. Cook, et al.: Experimental fiber optics communications system, 1976 IEEE/OSA CLEOS, THE 4 (May 1976).
- 20) 畠山, 土屋: 放電による光ファイバ融着接続, 信学技報, **OQE 76-27** (1976-07).
- 21) 木村, 大黒: 長波長・低損失帯における光伝送方式の基礎検討, 信学技報, **OQE 76-47** (1976-08).
- 22) T. Tsukada: GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs buried heterostructure injection lasers, J. appl. Phys., **45**, 11, p. 4899 (Nov. 1974).
- 23) H. Namizaki: Single mode operation of GaAs-GaAlAs TJS-laser diode, Trans. IECE Japan, **E 59**, 5, p. 8 (May 1976).
- 24) R. Lang and K. Kobayashi: Suppression of the relaxation oscillation in the modulated output of semiconductor lasers, IEEE J. Quantum Electron., **QE-12**, 3, p. 194 (March 1976).
- 25) W.B. Joyce, et al.: Statistical characterization of the lifetimes of continuously operated (Al,Ga)As double-heterostructure lasers, Appl. Phys. Letters, **28**, 11, p. 684 (June 1976).
- 26) J. A. Rossi, J. J. Hsieh and J. P. Donnelly: Ga_xIn_{1-x}As_yIn_{1-y}-InP heterostructure lasers, Abst. Papers, I-6, Device Res. Conf. (May 1976).
- 27) 西田: 光通信用受光素子, 昭和 50 年電四学会連大, 184 (1975-10).
- 28) 関沢: 光回路素子, 信学誌, **59**, 7, p. 728 (1976-07).
- 29) 小林ほか: スラブセルフオックレンズによる半導体レーザとセルフオックファイバの結合, 昭49年信学会全大, S14-7 (1974-07).

(昭和51年10月25日受付)

(昭和51年12月8日再受付)