

光ファイバケーブル及びデバイス

Optical Fiber Cable and Devices

光ファイバケーブル伝送方式は、光ファイバのもつ絶縁性や耐雑音性のほか、低損失・広帯域、細心・軽量のメリットを生かし、長距離無中継伝送、多心ケーブル化の動きをみせている。

光ファイバは長波長帯で最も低損失となるが、OH基を含むとその吸収損失により伝送損失が増加する。クラッド内面にバリア層を設けることにより、OH基の混入を防止し低損失化を図った。また最適グレーディング指数の設定により広帯域化を達成し、かつ伝送帯域の長さ特性を解析した。これらの結果から長波長帯を使用すれば、PCM32Mビット/s信号を25km以上無中継で伝送できることになる。

本論文では伝送損失の低減、広帯域化の検討結果を述べるとともに、3層補強構造による光ファイバの耐応力特性の改善と、融着接続部の加熱モールド補強法について報告する。また、光ファイバ通信システムを構成する光受動部品についても紹介する。

大西 満* Mitsuru Ônishi
 梶岡 博** Hiroshi Kajioka
 大橋晴志郎* Seishirô Ôhashi
 外谷茂雄** Shigeo Toya

1 緒言

光ファイバ通信方式は、絶縁性や耐雑音性から電力用通信方式に適しており、昭和51年には電力会社で現地実証実験が行なわれ実用化に向けスタートが切られた¹⁾。以来、鉄道、道路、構内で画像、データ伝送に幅広く採用されるようになった。

光ファイバについては低損失化、広帯域化が進み、短波長帯はもとより、更に低損失を得ることができる長波長帯を使った伝送システムの実用化がスタートしようとしている。

本報告では長波長帯ファイバの特性を中心に、ファイバ多心化要求への対応、より信頼性の高いファイバ接続法など、最新の開発状況と更に光受動デバイスの概要について述べる。

2 光ファイバの伝送特性

2.1 各種光ファイバとその特性

光ファイバ伝送で、伝送距離及び伝送信号速度を制限するファイバ特性は、

- (1) NA (Numerical Aperture : 開口数) : コア、クラッドの屈折率で決まる数値で、ファイバ内部に取り込む光量に関係する。
- (2) 伝送損失 : 伝送される信号強さの減衰を決定する。
- (3) 伝送帯域 : 伝送されるパルス波形のひずみを決定する。であり、代表的ファイバについてこれらの特性を表1に示す。

2.2 短距離伝送用光ファイバ

1 km程度までの短距離伝送には、伝送損失及び伝送帯域があまり問題とならないため、取扱性、経済性、発光素子との結合効率などの面から使用ファイバが決定される。ポリマクラッドファイバ²⁾は短距離伝送用に適している。

2.3 中距離伝送用光ファイバ

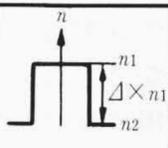
中、長距離伝送用には、コア及びクラッドとも石英で構成し、コア屈折率を径方向に分布をもたせたGI (Graded Index)タイプが適している。

2.3.1 石英系光ファイバの伝送損失

石英系ファイバの伝送損失は次式を用いて表わされる。

$$A(\lambda) = a \frac{1}{\lambda^4} + B + C_1 e^{-\frac{C_2}{\lambda}} + D(\lambda) \dots \dots \dots (1)$$

表1 各種光ファイバとその特性 伝送距離、伝送信号速度により最適ファイバを選定する。

項目	屈折率分布	コア径 (μm) ファイバ (μm)	損失 (dB/km) 帯域 (MHz·km) ($\lambda=0.85\mu\text{m}$)	特長
石英系	SI  $\Delta=1\%$ (NA=0.2)	85/150	3.5/25	中、短距離伝送用 低損失
	GI  $\Delta=1\%$ (NA=0.2)	50/125	3.0/800	低損失、広帯域 長距離伝送用 国際標準規格
		85/150	3.5/500	低損失、広帯域 中距離伝送用
ポリマクラッド (コア: SiO ₂ クラッド: シリコーン樹脂)	SI  $\Delta=3.6\%$ (NA=0.4)	180/320	6/20	大コア径 高NA 短距離伝送用

注: 略語説明 NA(Numerical Aperture : 開口数)

ここで、 λ は波長を意味し、第1項はガラスのランダムな分子構造に基づく微視的な揺らぎに起因するレーレー散乱損失であり、第2項はモード変換によるマイクロバンド損失、第3項は紫外線吸収損失、第4項は水酸基(OH基)固有の吸収損失である。

伝送損失決定の要因として、コアとクラッドの屈折率の差及びコア径があげられ、(1)式中のA及びBには次式のような実験式が与えられている³⁾。

$$A = 0.8 + 383 \Delta^{1.52} \text{ (dB/km} \cdot \mu\text{m}^4) \dots \dots \dots (2)$$

$$B = 3 \times 10^{-8} a^2 / \Delta^2 \text{ (dB/km)} \dots \dots \dots (3)$$

ここで a : コア半径 (μm)

* 日立電線株式会社日高工場 ** 日立電線株式会社電線研究所

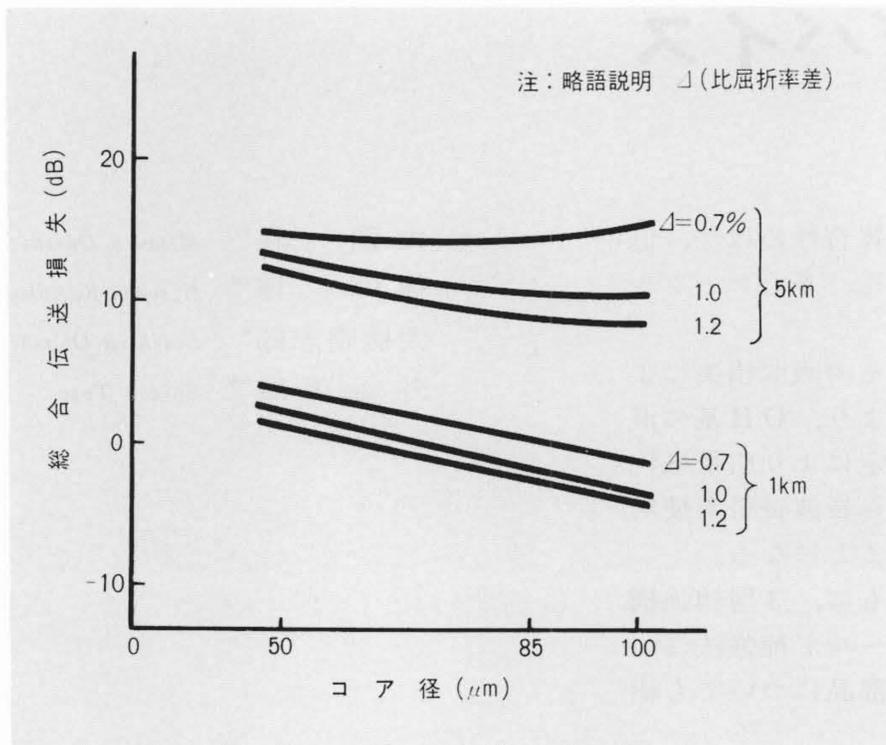


図1 コア径と伝送損失の関係 比屈折率差は最低1%必要であり、5 km以下の距離では80~100μmが適している(LED光源との結合損失を含んだ総合伝送損失、 $\Delta=1.0\%$ 、コア径50μmのファイバとLEDとの結合損失を基準とした相対値で示す。)

Δ : 比屈折率差

一方、LED(発光ダイオード)とファイバの結合は、ファイバ内への入射電力(P_{in})をみて次の関係で与えられる。

$$P_{in} \propto a^2 \Delta \dots \dots \dots (4)$$

素子との結合までを考慮した場合のコア径と伝送損失の関係は図1に示すようになる。製造法なども含め総合的に判断すると、5 km程度までの中距離伝送用にはコア径80~100μmが適しており、コア径85μm、クラッド径150μm、比屈折率差1%を標準品としている。これにより、0.85μmの波長で3.0dB/kmの伝送損失値を得ている。

2.3.2 伝送帯域特性

GIファイバではコアは径方向に屈折率が変化しており、屈折率をステップ状に設定したSI(Step Index)ファイバに比べ大幅に帯域を広げることができる。しかし、一般に短、中距離用に使用されるLED光源と組み合わせ使用する場合には、LEDの波長が単一スペクトルでなく一般には約40nm程度の半値幅をもつため、ファイバの材料分散に起因し大幅に帯域が制限される。LED光源と組み合わせたGIファイバの帯域特性を、SIファイバ及びLD(半導体レーザ)を光源とするGIファイバと比較して図2に示す。

2.4 長距離伝送用光ファイバ

コア径/クラッド径が50/125μmのGI形マルチモードファイバが長距離伝送用としてCCITT(国際電信電話諮問委員会)及びIEC(国際電気技術委員会)で標準化されようとしており、短波長帯(0.85μm付近)だけでなく長波長帯(1.30μm付近)でも実用化が進められている。

2.4.1 長波長帯伝送損失の改善

コアに($GeO_2-P_2O_5-SiO_2$)を使用し、比屈折率差0.01のGIファイバの損失波長特性の実験結果から、前述の(1)式の a 、 C_1 、 C_2 は次のように推定される。

$$\begin{aligned} a &\doteq 1.15 \mu m^4 \cdot dB/km \\ C_1 &\doteq 8.33 \times 10^{-3} \\ C_2 &\doteq 2.98 \end{aligned}$$

したがって、 $\lambda=0.85\mu m$ 及び $\lambda=1.30\mu m$ での伝送損失は次のようになる。

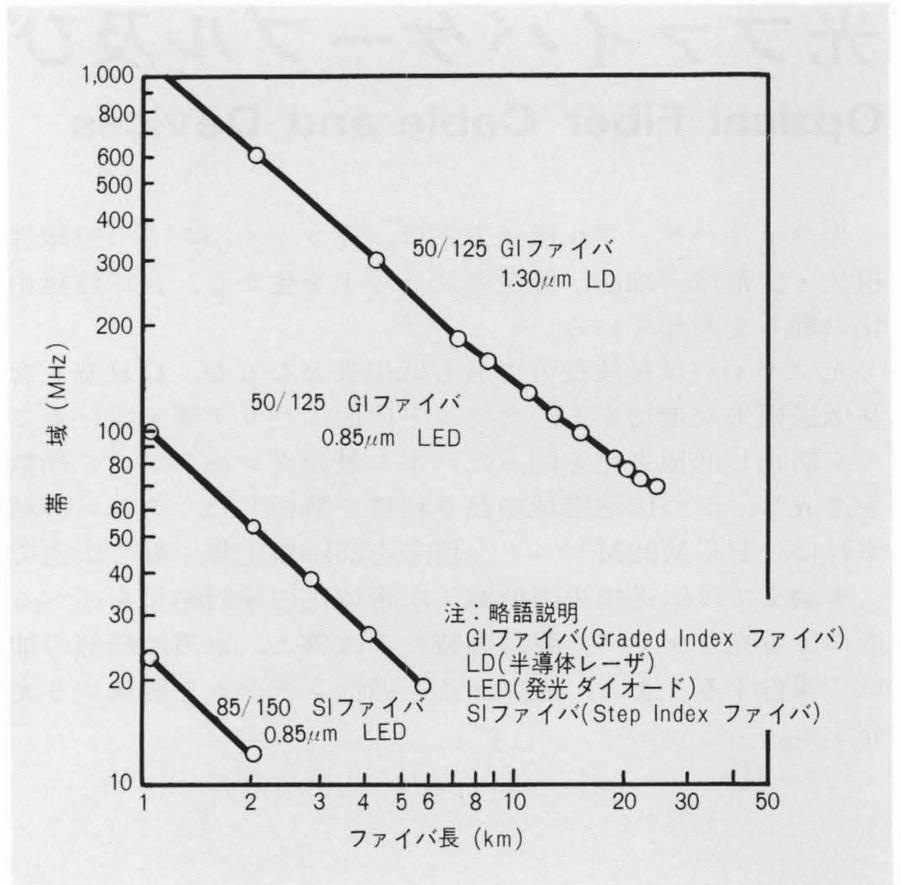


図2 各種ファイバ伝送帯域の長さ特性 GIファイバの帯域は十分あっても、LEDと組み合わせると材料分散のため帯域が狭くなる(短波長帯)。

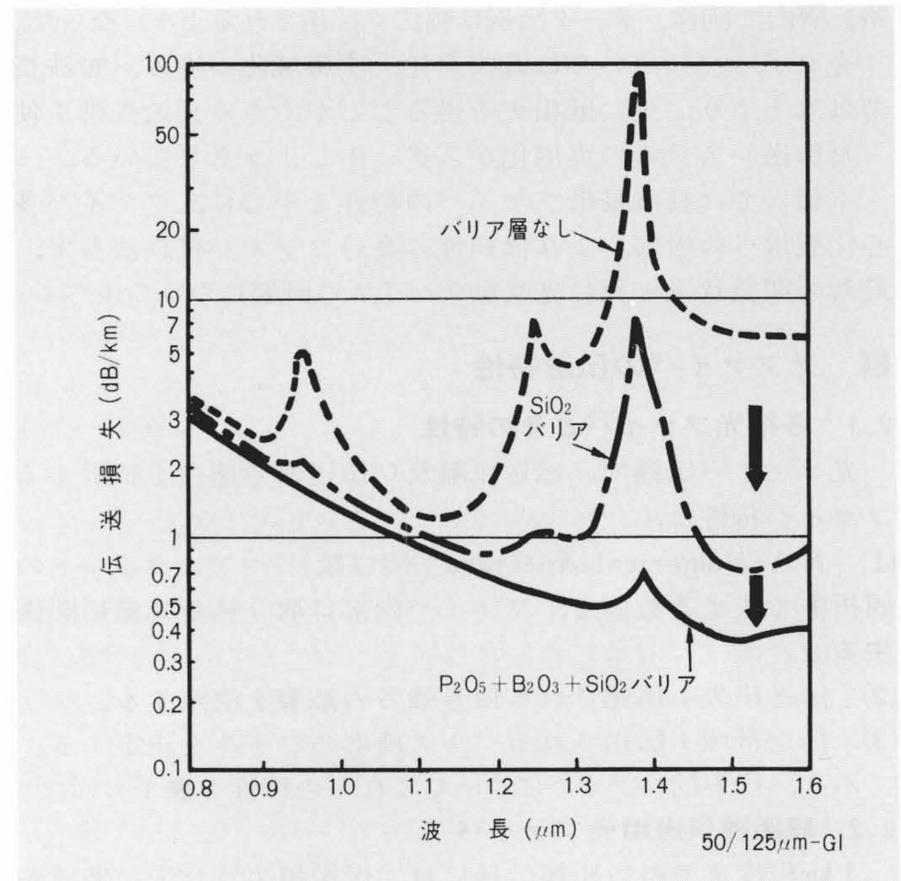


図3 伝送損失の波長特性 バリア層の改善により、OH基吸収損失の低減が図られた。

$$\left. \begin{aligned} A(0.85) &= 2.48 + B \text{ (dB/km)} \\ A(1.30) &= 0.49 + B + D(\lambda) \text{ (dB/km)} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

すなわち、材料、構造で決まる損失分は0.85μm、1.30μmで平均値で2.5dB/km、0.5dB/km程度と考えられる。

(5)式から長波長帯での低損失化はマイクロバンド損失とOH基吸収損失の低減が特に重要である。

図3に伝送損失の波長特性を示す。0.95μm、1.26μm、1.39μmにみられる損失ピークがOH基吸収であり、その大きさは順次1:2:40の比を示すものである。図4に示すようにバ

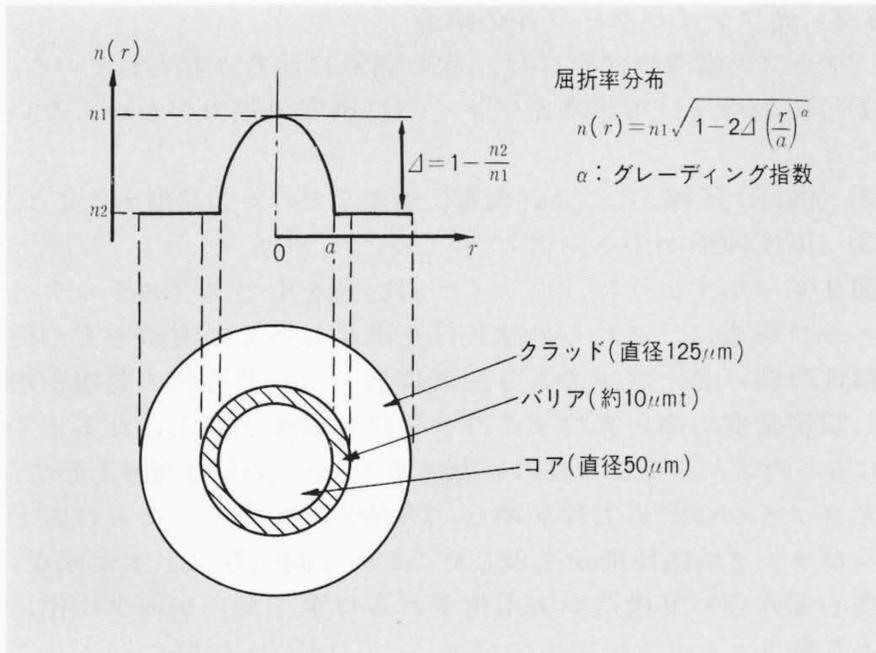


図4 光ファイバコアの屈折率分布 グレーディング指数 $\alpha \approx 2$ で最も広帯域な特性を示す。

リア層を設けることにより、製造時点で出発石英管(クラッド部)に含まれているOH基がコア部に侵入するのを防止し、大幅にOH基吸収損失を低減することができた。1.39 μ mでの吸収損失1dB/km以下のものが製造可能であり、他の波長では無視できるようになってきた。1ppmのOH基を含むと1.39 μ mで約40dB/kmの吸収損を生ずると言われており、約20ppb程度の含有率に抑えられている。

マイクロバンド損失については、ファイバの補強方法により改善されるもので、0~0.2dB/km程度に抑えられている。

2.4.2 長波長帯における伝送帯域特性

半径方向の屈折率 $n(r)$ 、図4のようないわゆる α 乗分布である場合、最も広帯域を得るための最適グレーディング指数 α_{opt} は次式で与えられる⁴⁾。

$$\alpha_{opt} \approx 2 + \epsilon - \Delta \frac{(\epsilon + 4)(\epsilon + 3)}{2\epsilon + 5} \dots\dots\dots (6)$$

ϵ はガラスの屈折率の波長依存性で決まるパラメータでガラスの合成温度、ドーパントの種類などに依存する量である。

図5にモード変換のない場合の帯域、及び α の理論計算結果並びに実測値を示す。一般に多モード光ファイバでは、モード変換が存在するため帯域特性は改善する方向であるが、一方、実際のファイバでは屈折率分布に α 乗分布からの微小なずれが発生し、悪化の傾向を示す。1.3 μ mでは $\alpha_{opt} = 1.90$ であり、1km当たり平均800MHz以上が達成できている。

長波長帯ファイバを用いた伝送では、25km以上の無中継伝送が可能となるため、伝送帯域の長さ特性に注目する必要がある。多モード光ファイバの伝送帯域の長さ特性を支配する要因は、モード変換効果にある。また、モード変換はマイクロバンド損失に関連するため、伝送帯域特性及びその長さ特性は伝送損失と密接な関係をもつ。これらは、理論的に散乱行列法によって解析報告されている^{5),6)}。

伝送帯域の長さ依存係数 γ は厳密には長さ l の関数であり、図2にデータ例を示すように $l = 1 \sim 2$ kmで $\gamma \approx 0.9$ 、 $l \geq 16$ kmでは、ほぼ $\gamma \approx 0.5$ を示している。しかし、一般には1kmの帯域幅 BW_0 を用いて次のように求めることが多い。

$$BW(l) = BW_0 \cdot l^\gamma \dots\dots\dots (7)$$

25km長で $\gamma = 0.75$ 程度が得られており、70MHzの伝送帯域が確保できる。これらの試験結果からPCM(Pulse Code Modulation)32Mビット/s伝送を考えた場合、伝送損失、帯域とも

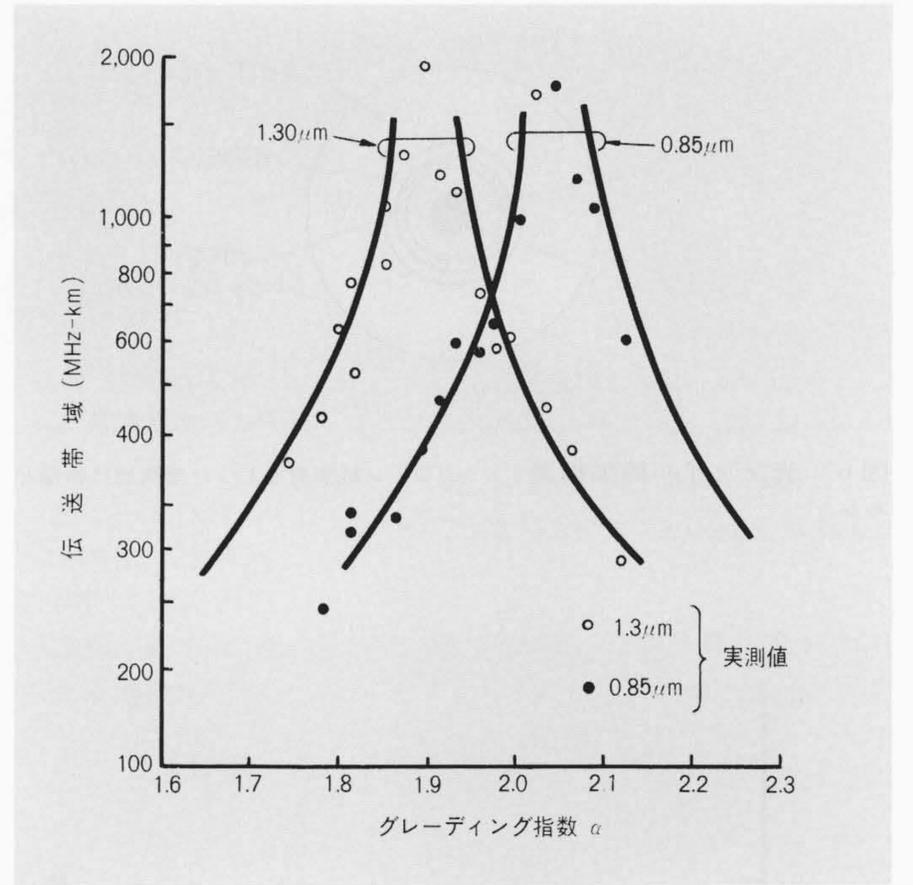


図5 グレーディング指数と伝送帯域の関係 実線はモード変換を考慮しない理論カーブを示した。

表2 長波長帯光ファイバの特性 最近製造された光ファイバ 100kmの特性の平均値を示す。

構造	コア直径	50 μ m	
	クラッド直径	125 μ m	
	比屈折率差	1%	
特性	波長	0.85 μ m	1.30 μ m
	伝送損失	2.65dB/km	0.60dB/km
	伝送帯域	400MHz-km	850MHz-km

に25km以上の伝送が可能であることが分かる。以上述べた長波長帯ファイバの特性をまとめると、表2に示すようになる。

3 光ファイバケーブルの構造と特性

光ファイバは機械的外力を受けた場合、例えば、ケーブリング時あるいは低温時にマイクロバンドが発生し、損失が増加する傾向がみられ、耐力特性の改善が不可欠である。

3.1 光ファイバの耐力特性

光ファイバの耐力特性の改善には、石英クラッドと被覆ナイロン層との間に緩衝層を設けることが有効であり、現在は図6に示すような3層補強方法が採用されている。緩衝層の効果を確認するため、緩衝層のない2層補強構造のファイバと比較した耐側圧特性を図7に示す。

3.2 光ファイバ破断強度

光ファイバの破断強度はガラスの表面状態によって決定され、その確率分布はワイブル分布にのると言われている。図8にコア/クラッド外径：50/125 μ mの3層補強構造光ファイバ(ナイロン外径：0.9mm)の破断強度データを示す。1%の破断確率で6.2kgの強度が確保されており、ケーブリング及びケーブル布設にも十分な強度であると言える。

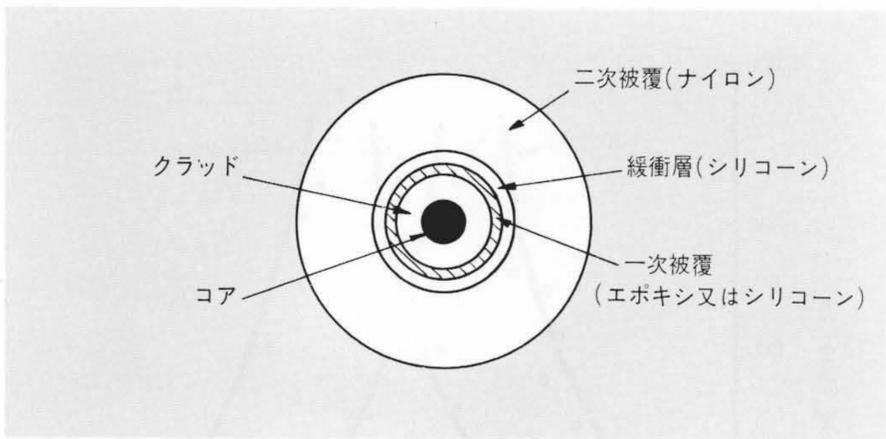


図6 光ファイバ補強構造 シリコン緩衝層をもつ3層構造に特徴がある。

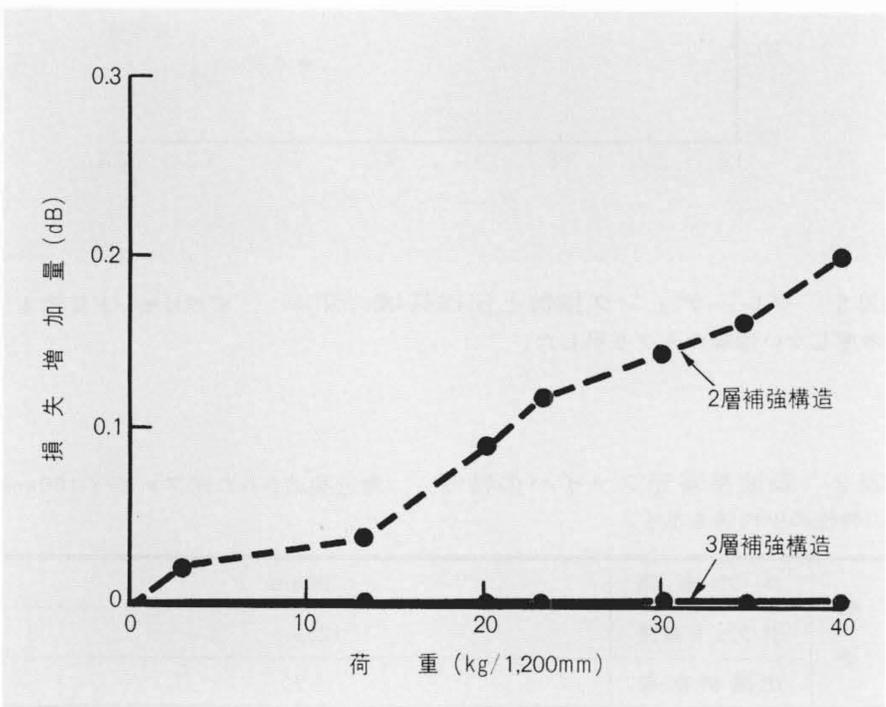


図7 光ファイバの耐側圧特性 3層構造(緩衝層)の改善効果は大である。

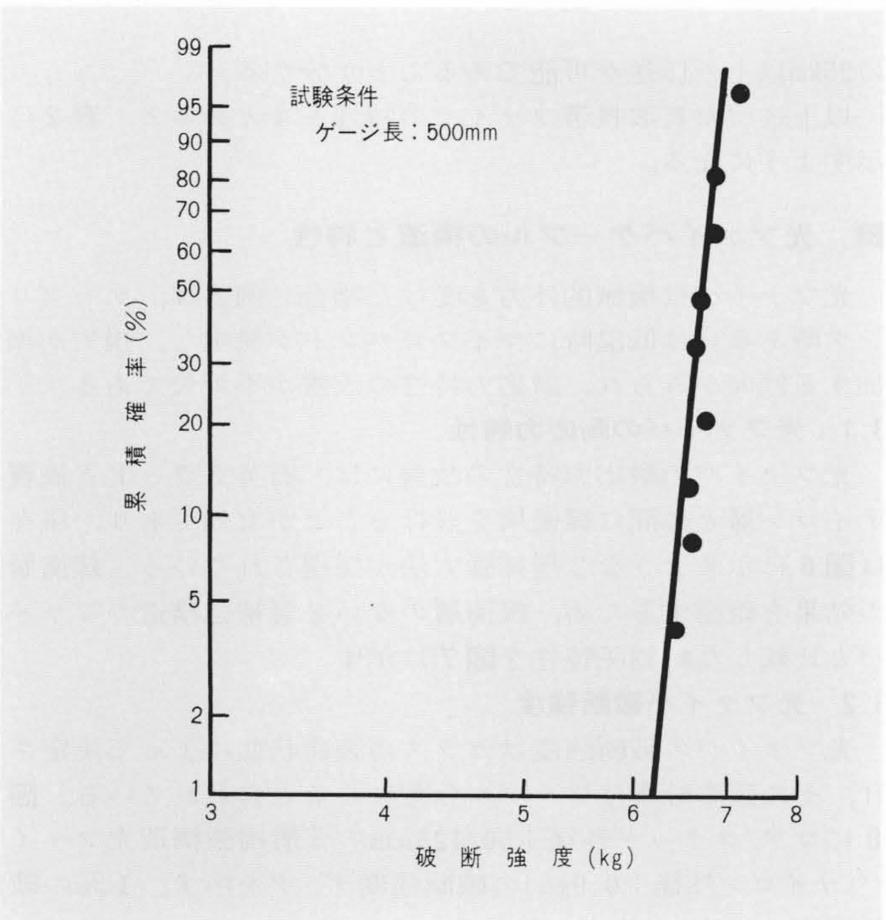


図8 光ファイバ破断強度の確率分布 1%の破断確率で6.2kgの強度が得られている。

3.3 光ファイバケーブルの構造

- ケーブル構造の決定には、次の諸点に注意が払われている。
- (1) 製造時及び布設時光ファイバに過度の張力がかからないこと。
 - (2) 曲げ、圧縮、しごき、衝撃、振動などの外力に耐えること。
 - (3) 温度伸縮が小さいこと。

図9(a)に示すように、ファイバ収容溝をもつプラスチックスペーサ構造は、これらの諸条件を満足し多くの実績をもつ信頼性の高いケーブルである。更に最近では、多心化の要求が増し収容密度の高い光ファイバケーブル構造が要求されるようになったこと、及びそれにこたえるための技術的改善として、光ファイバの耐応力性が増し、機械強度が大きくなったこと及びケーブル化技術が進歩したことから同図(b)に示すような、多心より合わせ構造が実用化されるに至った。ケーブル化による光ファイバ伝送損失の増加は、0.1dB/km程度に抑えることができる。

4 光ファイバケーブルの接続

4.1 光ファイバの接続

光ファイバ自体の接続法としては、放電融着接続が接続損失も小さく最も信頼性のある方法であり、現在標準的に採用されている。ただし、接続部は石英が露出状態にあるため、なんらかの補強を必要とする。従来、ガラス管やプラスチック製ガイドを接着剤で固定する方法が一般的に採用されてきたが、今回ガラス繊維で補強したナイロンチューブを加熱モ

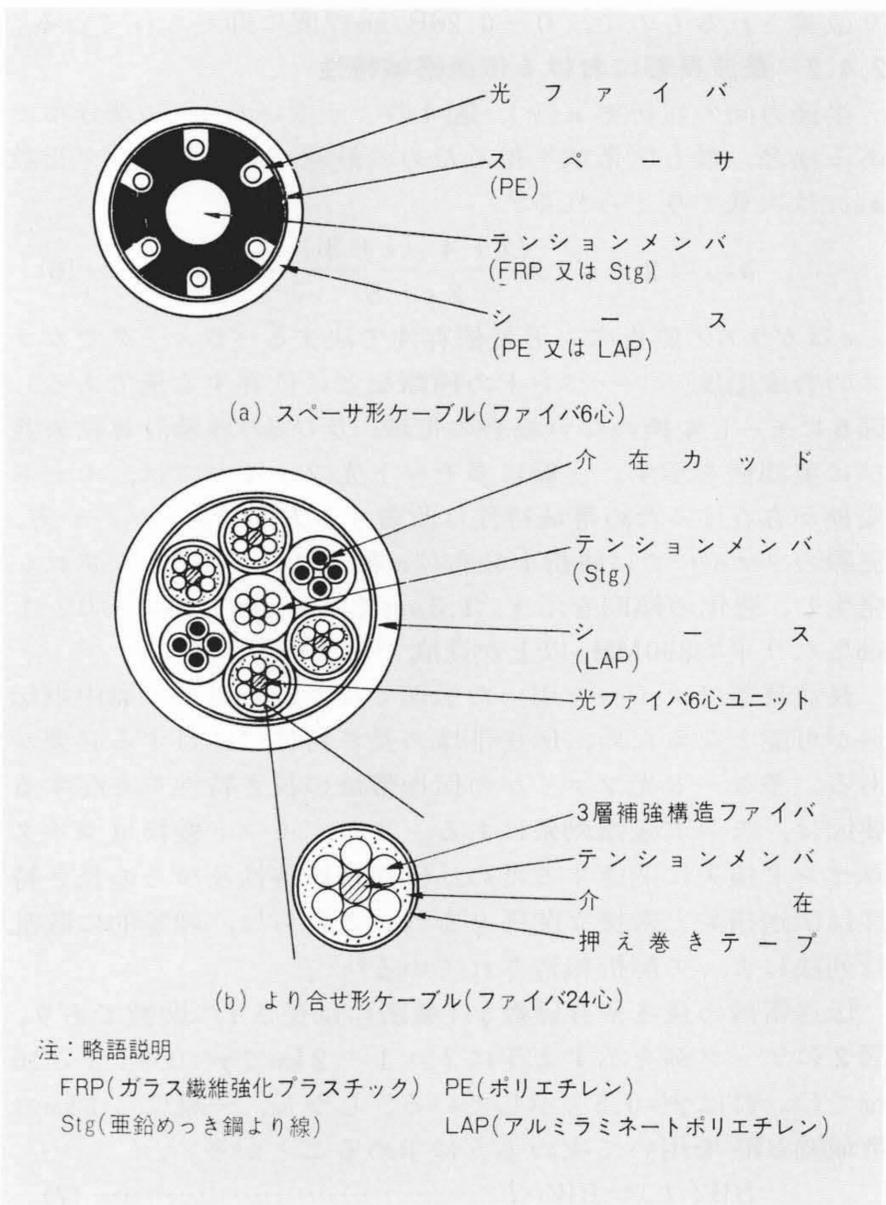


図9 光ファイバケーブルの構造 スペーサ形ではファイバはスペーサ溝に保護収容されており、機械的強度が大きい。また、より合わせ形ではファイバの多心収容が可能である。

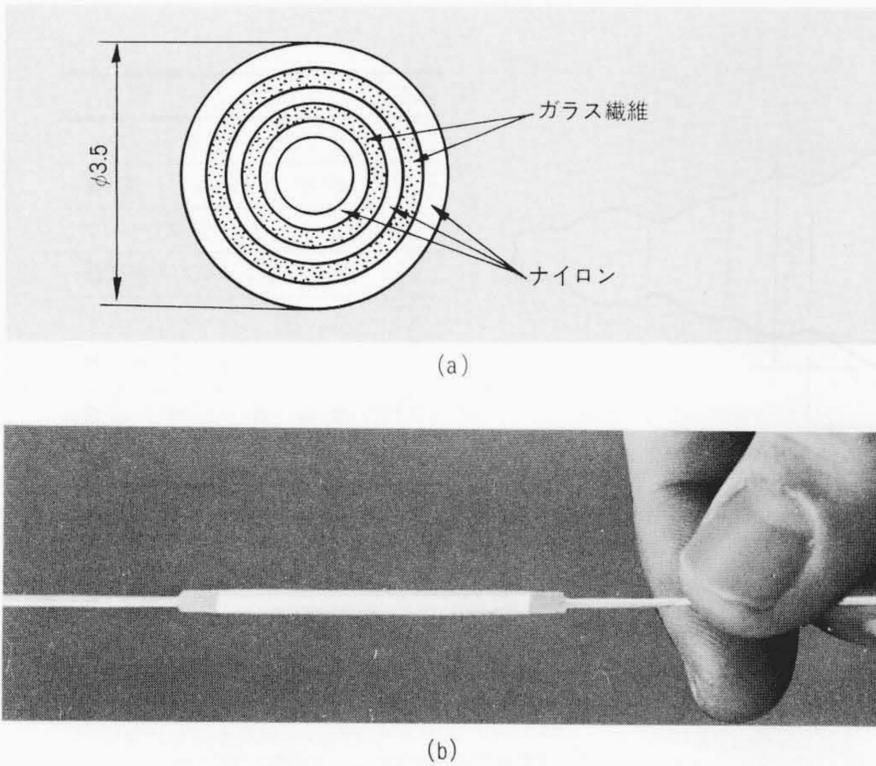
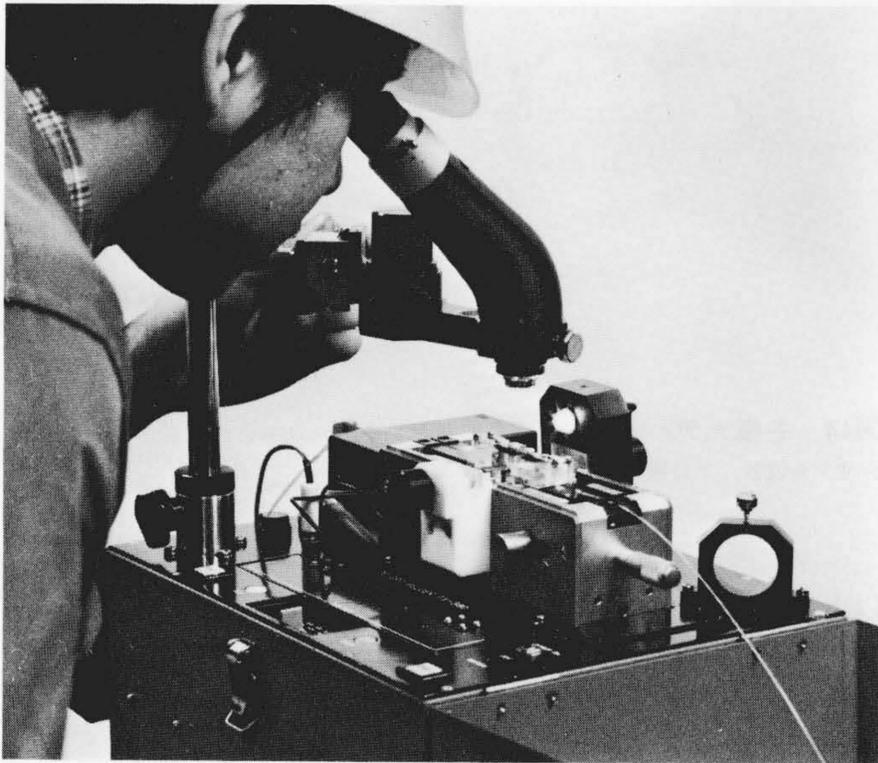
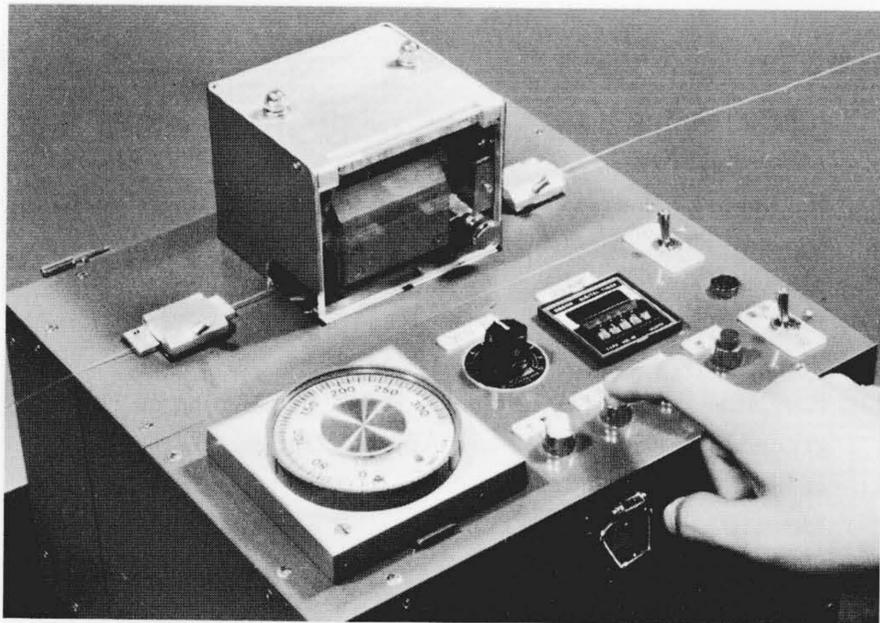


図10 光ファイバのモールド補強部 (a)はモールド補強用複合チューブ、(b)はモールド補強された融着接続部を示す。



(a) 放電融着接続装置



(b) 全自動式ナイロン加熱モールド補強装置

図11 光ファイバ接続装置 ファイバの石英部(コア及びクラッド)を放電融着接続し、その後、外被ナイロン部をモールド補強する。

表3 モールド補強部の信頼性 サンプル数各50個のデータを示す。ロス変化測定用試料は、接続間隔3mで5接続したものを使用した。

項目		信頼性	
引張り強さ		avg. 5.6 kg (max. 7.1) (min. 4.8)	
高温高湿試験	85℃ 85%RH	ロス変化(dB/1接続)	
		5日後	20日後
		0~0.03	-0.03~+0.04
熱衝撃試験	-20℃~ +90℃	ロス変化(dB/1接続)	
		10回	300回
		-0.03~+0.03	-0.02~+0.03

ールドする方法を開発した。この方法は非常に信頼性が高く、かつ熟練を必要としない工法であり、実用化に移されている。

図10にモールド補強用複合チューブ、及びモールド補強された融着接続部の外観を示す。

この補強法の特徴は、(1)補強部は外被ナイロンと一体化する、(2)補強部の熱膨張係数及び機械特性は、ナイロンとガラス繊維の合成された特性となり、金属チューブなどの補強を必要としないことが挙げられる。

モールド装置はプログラム化された全自動式であり(図11)、作業時間は約8分である。融着補強された接続部の接続損失分布と信頼性データを、図12及び表3に示す。

4.2 光ファイバケーブルの接続

光ファイバ接続作業に必要な余長をケーブル接続部に收容することになるが、光ファイバ許容曲げ径は伝送損失を低く抑える意味から直径80mm程度(50/125μm GIファイバの場合)にする必要があり、接続部は直径約100mm程度と大きくなる。ケーブル外被接続は一般ケーブルと変わるところなく、機械的強度、防水性、信頼性などを考慮したものであり、また、作業時の熱による温度上昇が、ファイバに悪影響を与えないものでなければならない。図13にポリエチレン融着工法により接続した中間接続部を示す。

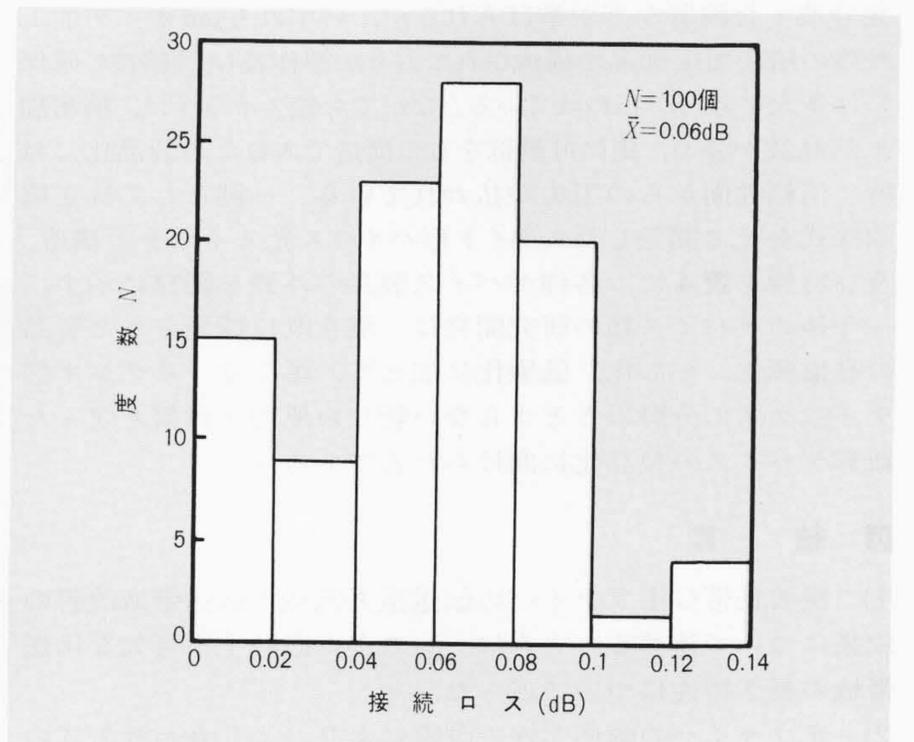


図12 光ファイバ接続部損失 加熱モールド補強作業による損失増加は0.01dB以下である。

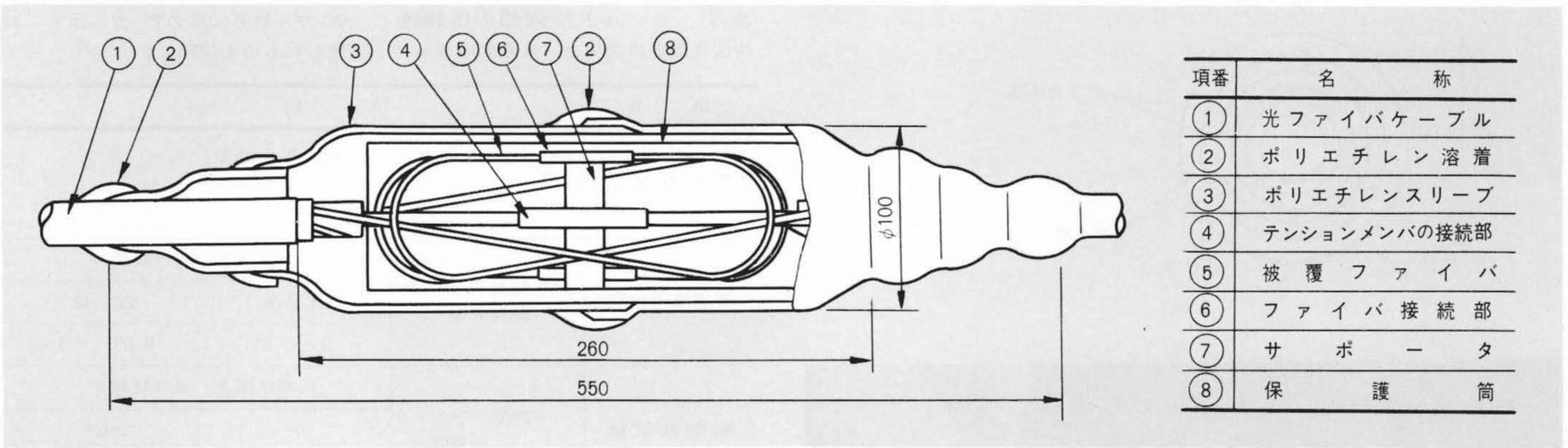


図13 光ケーブル中間接続部 外被接続にポリエチレン融着工法を採用した例を示す。

表4 スライド形バイパス光スイッチ 4本の光ファイバ(2入力, 2出力)を2本ずつ対向させ, 入力及び出力に接続されたファイバを可動にし, 電磁コイルにより駆動する。

構造	寸法, 重量	36×25×100(mm), 250g	
	可動部構造	板ばね保持, ファイバ移動	
駆動方式	電磁リレー		
使用温度	-20~70℃		
挿入損失	1.0dB以下(除コネクタ損)		
駆動	5V, 100mA		
特性試験	項目	条件	損失変化 (dB)
	振動	±0.5mm 16Hz 3方向 各1時間	<0.05
	高温・高湿	85℃, 85%RH 100時間	<0.18
	ヒートショック	-20/80℃ 24サイクル	<0.18
	切換	1×10 ⁵ 回	<0.12
	衝撃	10G 2回	<0.18

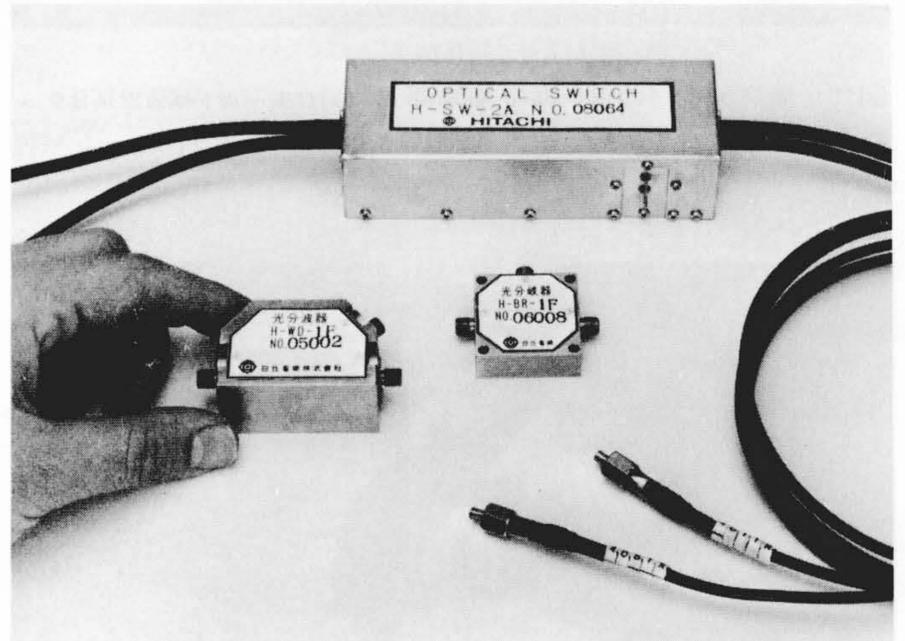


図14 各種光デバイス 受動部品として, 光コネクタ, 光スイッチ, 光分波・合波器, 光分岐・挿入器などが準備されている。

5 光デバイス^{7)~9)}

光ファイバ伝送システムを構成する光受動部品としては, 光ファイバのほかに光コネクタ, 光スイッチ, 光分岐・挿入器, 光分波・合波器などが挙げられるが, いずれもμmオーダ加工精度の精密加工部品で構成されており, 製作及び信頼性の確保には多大な努力が払われている。なかでも光スイッチは, 精密加工部品数が多く, 更に可動部をもつ構造であるため製品化には特に信頼性面からの工夫が払われている。一例として日立電線株式会社で開発したスライド形バイパス光スイッチの構造, 及び特性を表4に, 各種デバイス製品の外観を図14に示す。

今後のデバイス類の研究開発は, 現在既に開発された製品の高信頼化, 小形化, 低廉化に加えて, 単なるマイクロオプティックスの分野にとどまらない新しい原理・材料を使った新形デバイスの製品化に向けられるであろう。

6 結 言

- (1) 長波長帯G Iファイバの伝送損失低減と伝送帯域改善の成果について述べるとともに, システム設計上不可欠な伝送帯域の長さ特性について述べた。
- (2) 光ファイバの耐応力性の改善により, より合わせ方式の多心ケーブルの製造が可能であり, 量産ベースで短波長帯2.7 dB/km, 長波長帯0.7dB/kmの伝送損失と長波長帯800MHz-km

以上の光ファイバケーブル製造ができるに至った。

- (3) 光ファイバ融着接続部の補強法としてガラス繊維補強のナイロンスリーブ加熱モールド法が, 実用性も高く, かつ高信頼性のあることを述べるとともに, 光伝送システムを構成するのに重要な高信頼性の部品についても論及した。

参考文献

- 1) 久保田, 外: 電力系統制御用光ファイバケーブルの開発, 日立評論, 59, 223~228, (昭52-3)
- 2) N. Ohmori: Improvement and Application of Polymer Clad Optical Fiber for Communication Use, 28th IWCS, 319~326, (1979-11)
- 3) 田中, 外: 多モード光ファイバの屈折率差とコア径の伝送損失への影響, 信学全大, 929 (昭54-3)
- 4) R. Olshansky and D. B. Keck: Pulse broadening in graded-index optical fibers, Applied Optics, 15, (1976-2)
- 5) 梶岡: 散乱行列によるマルチモードファイバの伝送特性の考察, 信学, C S 78-35 (1978-6)
- 6) 梶岡, 外: 散乱行列によるG Iファイバの解析, 信学全大, 334 (昭55-3)
- 7) 島田, 外: 光コネクタの特性, 信学全大, 951 (昭54-3)
- 8) 大森, 外: モールド形光コネクタ, 信学全大, 298 (昭55-3)
- 9) 近藤, 外: スライド形バイパス光スイッチ, 信学全大, 310 (昭55-3)