展 望

プラスチックオプティカルファイバー

大 塚 保 治

1. 緒 言

オプティカルファイバー¹⁾は光をファイバー内に閉じ込めて伝送するものであるが、光を伝送する原理からみるとStep-Index形(Clad形)とGraded Index形²⁾(光集束形³⁾)の二つに分けることが出来る。また、ガラスを素材とするものとプラスチック製のものがある。

Step-Index形ガラスファイバーは、これを束にして光像伝送し(Image Guide)、医用内視鏡として既に実用化されているほか、各種のセンサーとして使用されている。

Graded Index形ガラスロッドまたはファイバーは我が国で開発され、Selfoc⁴⁾として市販されている。最近、低損失のGraded Index形ファイバーが光通信伝送体として注目され開発が進められている^{5,6)}。

プラスチック製のオプティカルファイバーはガラスファイバーより遙かに遅れて1966年Du Pont社やPoly Optics社から市販されるようになった。これらはいずれもStep-Index形である。我が国においてはStep-Index形のプラスチックファイバーが旭化成・東レ・三菱レイヨンなどから製造されているが、これはここ2・3年のことである。

プラスチックに屈折率の分布を持たせようとの試みがいくつか行われている^{11~13)}が、Selfocのようなレンズ作用を持ったプラスチックファイバーを作成する方法は筆者らによって見出された。Light-Focusing Plastic Rod(LFR)^{14,15)}とかLight-Focusing Plastic Fiber(LFF)¹⁶⁾と称している。

ここでは我が国で製造されているStep-Index形プラスチックファイバーを中心にして、LFR、LFFをも含めて概要を述べることにする。

2. オプティカルファイバーの構造と伝送原理

オプティカルファイバーに入射する光には、ファイバーの中心軸を含む平面に沿って進行する光(Meridional Ray)と、上記平面上にはなくて中心軸のまわりを回転しながら進行する光(Skew Ray)がある。ここでは簡単のために前者のみを取扱っている。

2.1 Step-Index形

Step-Index形については優れた成書¹⁾もあるので、プラスチックオプティカルファイバーの特長を説明するのに必要な限度にしてある。

図1に示すように、直径数十ミクロンから数ミリメートルの芯部(Core)に数ミクロンから20ミクロン程度の鞘部(Sheath, Clad)が被覆されており、芯成分の屈折率 n_1 は鞘成分の屈折率 n_2 より0.1程度大きくしてある。ファイバー端面から入射する光線のうち、光線①は芯部から鞘部への入射角が臨界角 ϕ_c となる場合で、

$$\sin \phi_c = n_2 / n_1 \quad (1)$$

$$\sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

入射角 $\theta \leq \theta_c$ の光のみが伝送される。 θ_c が受光の最大角度で、(2)式が開口数(N.A.)である。

芯部半径 r 、長さ L のファイバー内を伝送される光の光路の長さ P 、全反射の回数 R は(3)、(4)式となる。

図1 Step-Index形オプティカルファイバーに入射する光(Meridional Ray)の光路

Plastic Optical Fibers

YASUJI OHTSUKA

KEIO GIJYU University, Faculty of Engineering,
Tokyo, Japan.

慶応義塾大学工学部応用化学科教授(工博)

$$P = Z / \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta}{n_1}\right)^2} \quad (3)$$

$$R = \{Z / (2r)\} \{ \sin \theta / \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta} \} \quad (4)$$

$\theta = \theta_C$ のとき P , R はいずれも最大値である。

$$P_C = (n_1 / n_2) Z \quad (5)$$

$$R_C = \{Z / (2r)\} \sqrt{(n_1 / n_2)^2 - 1} \quad (6)$$

$n_1 = 1.5$, $n_2 = 1.4$, $Z = 1$ m, $r = 50$ μ m とすれば $P_C = 1.07$ m, $R_C = 3850$ 回となる。

ファイバー端面の入射光の強さを $I_0(\theta)$, 他の端面からの射出光の強さを $I(\theta)$ とすると, 次のようになる。

$$I(\theta) = I_0(\theta) (1 - \alpha)^{\kappa} e^{-\kappa P(\theta)} (1 - \beta)^{R(\theta)} \quad (7)$$

ここで, κ は芯成分の吸収係数, α は端面の Fresnel 反射損失, β は全反射 1 回あたりの損失である。 $R(\theta)$ は大きいと考えるのが妥当であるから β は極めて小さい必要がある。鞘部には金属などは不適当であり, 透明素材が使用されるのはこのためである。全反射回数はファイバー半径 r とともに減少するから I/I_0 は r とともに増大する。図 3 曲線①に, 市販のプラスチックファイバーの r と透光率の関係を示してある。厳密性を欠くが, ファイバーの減衰を実用上 (8) 式であらわす。 K は κ より $I = I_0 e^{-KZ}$ (8) はるかに大きくなる。また内部ロスを $-10 \log(I/I_0)/Z$ [dB/m] であらわす。

ファイバー内を伝送される光の光路の長さ P と全反射の回数は入射角に依存している。このため光を波動として見れば, いくつかのモード波がそれぞれ異なった伝搬速度 (ファイバー軸方向の) で伝送されることが判る。伝搬速度の違いが伝送帯域を制限することになる。大容量光通信の伝送路としては Step-Index 形ファイバーは不適当である。基本モード波のみを伝送するには芯部半径 r を μ m のオーダーとし, N.A. を小さくしなければならない。

ファイバーの中心軸を曲率半径 ρ で湾曲させると, 図 2 に示す ϕ'_0 について (9) 式が成立する。ここで x は光の入射点の中心軸からの距離である。 $\phi'_0 = \phi_C$ のときの入射角 θ'_C は (10) 式のようにになる。 θ'_C は θ_C より小さいとなる。

$$\sin \theta'_C = \sqrt{n_1^2 - n_2^2 (\rho + r)^2 / (\rho + x)^2} \quad (10)$$

ファイバーを曲げれば伝送光量が減少し, 太いファイバーほどその傾向は著しい。図 3 の曲線②に示すように, 透光量が 90% となるときの曲率 ρ は r とともに大きくなっている。

ファイバー端面に垂直に入射する平行光線が伝送されるための最小の曲率 $\rho_{\min}$ は (11) 式であり, r とともに増大する。図 4 は市販プラスチックファイバーの結果である。

$$\rho_{\min} = \{(n_1 + n_2) / (n_1 - n_2)\} r \quad (11)$$

図 2 湾曲した Step-Index 形光学ファイバー内の光 (Meridional Ray) の光路

図 3 市販光学ファイバーの特性と芯部直径の関係 (東レ光学繊維カタログのデータを, ファイバー中心軸の曲率 ρ に修正した)

図 4 市販光学ファイバーの湾曲による透光率の変化 ($Z = 1.5$ m, 平行光線入射, 三菱レイヨン エスカ カタログより)

2.2 Graded Index 形

Graded Index 形ファイバーは芯・鞘構造を持っていない。 n_0 を中心軸の屈折率とすれば, 中心軸から x の距離にある点の屈折率 $n(x)$ は (12) 式のようにになっている。

$$n(x) = n_0 \left(1 - \frac{1}{2} A x^2\right) \quad (12)$$

A が屈折率分布定数である。

図5に示すように、 P 点で傾き x'_1 を持った光が Q 点で傾き x'_2 を持って通るとすると、次の光線マトリックスが成立する⁷⁾。光はファイバーの中心軸に沿って蛇行し、そ

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{A}Z) & (1/\sqrt{A})\sin(\sqrt{A}Z) \\ -\sqrt{A}\sin(\sqrt{A}Z) & \cos(\sqrt{A}Z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

の周期 L は(14)式であらわされる。

$$L = 2\pi/\sqrt{A} \quad (14)$$

図6に $Z=132\text{mm}$ 、 $2r=1.4\text{mm}$ のLFR中を蛇行するHe-Neレーザービームを示した。 $L=26.9\text{mm}$ である。

伝送される光の受光範囲は次のようになる。端面の中心に入射して伝送される光のうちで最大の入射角を持った光線は図5の光線①であって光路の最大振幅がファイバー径と一致する。最大入射角 θ_c は(15)式で与えられる。 $2\theta_c$ を開口角という。

$$\sin\theta_c = n_0\sqrt{A}r \quad (15)$$

入射角が θ_c より小さければ光線②のようにファイバーの側面に触れることなくファイバー内を進行する。①と②では光路の長さが異なるが、それぞれの光は異なった屈折率の場所を通過するので、ファイバー軸方向の伝搬速度は理論的に等しくなる。伝送されるモード波はいくつかあるが、すべて等しい速度で伝搬されるので、広帯域の伝送路として使用できるようになる。

入射角が θ_c より大きい光線③は点 B でファイバー側面にぶつかる。ここで全反射すれば伝送量は増す。しかし、Graded Index形は広帯域の伝送路として、また後述するようにファイバーレンズとして興味を持たれているが、この点からは全反射光は好ましくない。ファイ

図5 Graded Index形光学ファイバー内の光(Meridional Ray)の光路

図6 LFR#13($Z=132\text{mm}$ 、 $2r=1.40\text{mm}$ 、表2参照)中を蛇行するHe-Neレーザービーム

バー側面に光を吸収する層を設け、反射光を消すことが好ましい。

Graded Index形のファイバーを中心軸に垂直に切断し、研磨すると、厚肉凸レンズとなる⁸⁾。図7に示すような焦点距離 f 、焦点位置 s 、主平面位置 h は次式で示される。

$$f = \{n_0\sqrt{A}\sin(\sqrt{A}Z)\}^{-1} \quad (16)$$

$$s = (n_0\sqrt{A})^{-1}\cot(\sqrt{A}Z) \quad (17)$$

$$h = (n_0\sqrt{A})^{-1}\tan\left(\frac{1}{2}\sqrt{A}Z\right) \quad (18)$$

これらはいずれも A に依存するが、 Z を変えるだけで、 f は $\infty \sim (n_0\sqrt{A})^{-1}$ 、 s と h は $-\infty \sim +\infty$ の範囲に変えることができる。また、結像位置 l_2 (負は虚像)、像の倍率 M (正は正立像、負は倒立像)は次のようになる。

$$l_2 = \frac{1}{n_0\sqrt{A}} \frac{n_0\sqrt{A}l_1 + \tan(\sqrt{A}Z)}{n_0\sqrt{A}l_1 \tan(\sqrt{A}Z) - 1} \quad (19)$$

$$M = \{\cos(\sqrt{A}Z) - n_0\sqrt{A}l_1 \sin(\sqrt{A}Z)\}^{-1} \quad (20)$$

このようなレンズ作用を図8Aに示した。小穴式スライドチャートの像で、数値2500は平行線の間隔が60本/mmであることを意味している。また、 $Z=mL$ (m は整数)のとき、端面上の物体($l_1=0$)は他の端面上に等倍正立像($l_2=0$ 、 $M=1$)を結ぶ。図8Bは、0.1mm間隔のグリッドを $Z=101.5\text{mm}$ のファイバーレンズ端面にはりつけた場合の像である。

ファイバーレンズによる光像伝送では、ファイバー中の光路が長くなるので色収差が重要な問題となる¹⁹⁾。これについては後述する。

図7 Graded Indexファイバーのレンズ作用

図8 二段階共重合法によるLFRのレンズ作用

(A) 小穴式スライドチャートの像: LFR(#14)、 $Z=7.40\text{mm}$ 、 $2r=1.40\text{mm}$ 、 $l_1=1.40\text{mm}$ (表2参照)

(B) 0.1mm間隔のグリッドの像: LFR(#15)、 $Z=101.5\text{mm}$ 、 $2r=1.00\text{mm}$ 、 $l_1=0$ (表2参照)

次に湾曲した Graded Index 形ファイバーの光像伝送について述べる。長さ $Z = mL$ (m は整数) のファイバーの中心軸を曲率 ρ で曲げると、図 9 に示すような正立等倍像がみられるが、曲げられた内側に暗い部分があられる。湾曲により光学中心軸があたかも $1/(A\rho)$ だけ外側にシフトした形となるためである。像がみえる部分の差渡し $\overline{AB}$ は次のようになる⁹⁾。

$$\overline{AB} = 2(r - (A\rho)^{-1}) \quad (21)$$

図 10 の実線は (21) 式による計算値で実測値とよく一致している。また、像の欠ける程度は次のようになる。

$$1 - \frac{\overline{AB}}{2r} = \frac{1}{2A\rho r} = \frac{1}{4} \frac{1}{(dn/n_0)\rho}$$

ここで dn は中心軸とファイバー外周部との屈折率差である。視野の欠けは ρ の減少とともに増すが、 A が一定なら r が小さいほど、 dn が一定なら r が大きいほど、

図 9 湾曲した LFR ($Z = mL$) の光像伝送

図 10 湾曲した LFR の画像伝送

像の欠けは甚だしくなる。

ファイバーの一部分を曲げる場合には、湾曲部分の長さ、湾曲部分がファイバー中に占める位置によって暗く見える部分の位置は変化する⁹⁾。

3. オプティカルファイバーの作成とその性能

3.1 Step-Index 形

次のような作成法がある。

(1) 芯となるファイバーを作成し、ついでこれに鞘成分を溶液法や溶融法で被覆する。

(2) 芯となるロッドを、鞘となる中空円筒にはめ込んでから、加熱しながら延伸する。

(3) 芯用と鞘用のポリマーのそれぞれの溶融体を二重ノズルを用いて押し出してファイバーとする。この方法が最も作業性に優れているので、我が国では工業的に行われている。

大部分のポリマーの屈折率は 1.60～1.40 の範囲にあり⁷⁾、高い透明性のポリマーが要求されるので、芯-鞘素材の組合せはかなり限られて来る。我が国で製造されているプラスチックファイバーはポリスチレンを芯としポリメタクリル酸メチルを鞘とするもの (SM 系) とポリメタクリル酸メチルを芯としフッ化ビニリデン系ポリマーを鞘とするもの (MF 系) の二系列である。表 1 に市販品の性能を示した。

有機ポリマーを素材としているので、可視光線領域では優れた光透過性を有しているが、近赤外域より長波長ではポリマーに特有の吸収がある。熱線は吸収され、透過光は冷光線となる特長を有する。一方では、光通信の

表 1 市販プラスチックオプティカルファイバーの特性

商 品 名	ルミナス	東レ光学繊維	エ ス カ
製 造 会 社 名	旭化成(株)	東レ(株)	三菱レイヨン(株)
芯 部	PSt ($n=1.5924$)		PMMA ($n=1.495$)
鞘 部	PMMA ($n=1.495$)		PVdF 系 ($n=1.402$)
開口数 (N.A.)	0.56		0.50
受光角 (°)	68		60
強度 (kg/mm ²)	700～800	620～950	700～1300
伸度 (%)	2.5～5		50～80
内部ロス (dB/m)	1.47～3.42	1.27～4.55	1.02～1.93
使用温度範囲 (°C)	-40～80	-30～80	～80
市販ファイバーの直径 (mm)	0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0	0.1, 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0	0.10, 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5

* 各社カタログのデータから算出
PSt, ポリスチレン
PMMA, ポリメタクリル酸メチル
PVdF, ポリフッ化ビニリデン

光源として有望視されている発光ダイオードの発光波長が近赤外より長波長であるので、これらの光の伝送は難かしくなる。

可視光の内部ロス率は1~4 dB/m程度である。SM系では長尺において黄色に見えることが多く、MF系が透明性においても優っている。

プラスチックファイバーの特長の一つはその可撓性にある。ガラスファイバーでは不可能な太いファイバーでも作成することができる。図3に示したように、芯部の半径 r が増大すると透光率は増すが、図3、4に示したようにファイバーを曲げるとより大きな ρ で伝送光量は減少するようになる。また、図3曲線③にはファイバーにクラックを生ずる曲率を示してあるが、ファイバーが力学的に破壊される前に湾曲によって透過量が著しく影響されることが判る。これは r が小さいガラスファイバーの場合と異なった状況であって、プラスチックファイバーの使用上注意すべき点と思われる。

プラスチックファイバーが耐薬品性、耐熱性に乏しいことはその材質からいってやむを得ない。常用温度はいずれも100℃以下であるが、MF系がSM系よりはやや優っている。

3.2 Graded Index 形

棒状・繊維状あるいはシート状のプラスチックに屈折率分布を持たせるには次のような方法が報告されている。

(1) 希釈剤膨潤法¹¹⁾: 棒状のポリメタクリル酸メチルやポリスチレンを限られたスペース内で二酢酸エチレンやフタル酸ジメチルのような希釈剤で膨潤させる。

(2) γ 線照射法: ポリカーボネート(PC)、ポリスチレン(PSt)またはポリメタクリル酸メチル(PMMA)のフィルムに適当なビニルモノマーを含浸させて、紫外線または γ 線を照射して重合させる。図11Aに示すように、断面形状が連続した三角形からなるPCシートを溝金型法で作成し、アクリル酸メチル(MA)を含浸して γ 線を照射して重合するとオプティカルファイバーシートが得られる¹²⁾。また、図11Bに示すように平滑なPCシートにMAを含浸させ、フォトマスクをして紫外線を照射し、ついでシート全面に紫外線を照射してもファイバーシートが得られる¹³⁾。これによって10本/mm程度の伝送路が得られ、ファクシミリ直線-円コンバーターに使用し得る。しかし、屈折率分布が(12)式に従い、良好なレンズ作用を有するとの報告はない。また、ファイバーシートは大部分がポリマーブレンドから成ると考えられるので、相分離による白化、クラックの発生のおそれがある。上記PC-MAの組合せが最適とのことである。

(A) 溝金型法

(B) フォトマスク法

図11 オプティカルファイバーシートの作成法

(3) 二段階共重合法^{14~16)}: 高屈折率ポリマーを与えるジビニルモノマー(M_1)を一部重合して得られるゲル(Pre-Polymer Gel)を、低屈折率ポリマーを与えるビニルモノマー(M_2)中に浸漬して共重合させる。 M_1 としてはフタル酸ジアリル(DAP)、フタル酸イソジアリル(DAIP)、ジエチレングリコールビスアリルカーボネート(CR-39)¹⁷⁾などを、 M_2 としてはメタクリル酸メチル(MMA)や含フッ素アルコールのメタクリル酸エステルなどを使用できる。予めプレポリマーゲルを棒状または繊維状に注型重合して得ておけば、 M_2 モノマーはゲル中を拡散しながら重合し(12)式に従う屈折率分布が得られる。また、このポリマーは網目構造となっているので耐熱性である。屈折率分布定数 A は、 M_1 - M_2 の組合せ・重合条件によって制御することができる。代表的な例を表2に示した。光像伝送のためには低色収差LFRを必要とする。 M_1 、 M_2 のホモポリマーを P_1 、 P_2 とすると、 P_1 、 P_2 の屈折率の光波長依存性ができるだけ近いモノマーの組合せが必要であって、CR-39と含フッ素アルコールのメタクリル酸エステルとの組合せは低色収差に適したものである¹⁸⁾。

(4) 光共重合法¹⁹⁾: 高屈折率ポリマーを与えるビニルモノマー(M_1)と低屈折率ポリマーを与えるビニルモノマー(M_2)の混合物をチューブ状容器に入れ、容器を回転させながら光共重合させる。この際に、重合初期には M_2 が M_1 より速かに重合するようなモノマー反応性比 r_1 、 r_2 を持った M_1 - M_2 の組合せと、 M_1 / M_2 の比を選択しておく。 M_1 - M_2 の組合せとしては安息香酸ビニル誘導体-メタクリル酸エステルなどが適当である。分布定数 A は重合条件によって制御することができる。代表的な例を表2に

表2 代表的なLFRの特性

作 成 法	二段階共重合法						光共重合法		
#	11	12	13	14	15	16	21	22	23
モノマー-M ₁	DAP	DAIP	CR-39	CR-39	CR-39	CR-39	VB	VCB	VB
モノマー-M ₂	MMA	MMA	3FMA	3FMA	3FMA	4FMA	MMA	MMA	EMA
光路周期L (mm)	50	63	27	31	34	51	178	66	81
分布定数A (mm ⁻²)	0.0158	0.0099	0.0546	0.042	0.034	0.0154	0.00124	0.0090	0.0061
色 収 差	高	高	低	低	低	低	高	高	高

DAP, フタル酸ジアリル

DAIP, イソフタル酸ジアリル

CR-39, ジエチレングリコールビスアリルカーボネート

MMA, メタクリル酸メチル

EMA, メタクリル酸エチル

3FMA, メタクリル酸トリプロピエチル

4FMA, メタクリル酸1,1,3-トリヒドロパーフロプロピル

VB, アン息香酸ビニル

VCB, 0-クロロ安息香酸ビニル

示してある。また図12Aにはそのレンズ作用を示してある。

(5) 熱延伸法¹⁰⁾: 光共重合法によるLFRは線形共重合体から成っていて、これを熱延伸して細い繊維状にすることができる。屈折率分布定数Aは延伸率とともに増加することになる。図12Bには延伸したファイバーレンズのレンズ作用を示した。また、図13にはPreform(延伸前のLFR)と延伸後のファイバーの屈折率分布を示した。屈折率分布のプロファイルは延伸によって殆んど変化しないことが判る。Preformの屈折率分布を制御することによってファイバーの分布を制御できる。

4. 用 途

4.1 Step-Index形

Step-Index形プラスチックファイバーは次の理由により大容量を目的とする光通信用の伝送路(Wave Guide)としては不向である。

- (1) いくつかのモードがそれぞれ異なった伝搬速度で伝送される。
- (2) 素材が有機ポリマーであるため1dB/kmといった低損失は期待できない。
- (3) 近赤外より長波長には固有の吸収がある。

また、直径10~30ミクロンのガラスファイバーが、その束による精密なイメージガイドとして、精密なセンサーとして使用されているように、ガラスファイバーはその細さに特長がある。プラスチックファイバーには次のような特長がある。

- (1) 直径ミリメートルのオーダーのファイバーでも十分に可撓性があり、作成できる。
- (2) 軽量である。
- (3) 加工しやすい。

プラスチックファイバーはこのような特長を生かした用途に向けなければならない。

(1) 装飾ディスプレイ(ムードランプ、クリスマスツリー、水中ディスプレイ、インテリアディスプレイなど):

図12 光共重合法によるLFRのレンズ作用

(A) ベンマークの像: LFR(#22), $Z=12.3\text{mm}$, $2r=2.15\text{mm}$

(B) 文字Aの像: LFR#22を50.6倍に熱延伸して得られたファイバーレンズ, $Z=1.80\text{mm}$, $2r=0.377\text{mm}$

図13 Graded Index形プラスチックファイバー(LFF)の屈折率分布¹⁰⁾

(Interphako干渉顕微鏡による干渉縞から測定¹⁰⁾)

Pseries(LFR#21を熱延伸する): P_0 , preform; P_{121} , 121倍長に熱延伸

Q series(LFR#22を熱延伸する): Q_0 , preform; Q_{370} , 370倍に熱延伸

現時点ではプラスチックファイバー、特にSM系の用途の大部分はこの分野である。

(2) 広告ディスプレイ、標識パネルの表示(ショウウィンドディスプレイ、商品ディスプレイ、商標・公共標識の表示など): プラスチックファイバーは機械的・化学

の方法によって側面に傷をつけ光を洩出させることが容易である。ファイバーストにこのような方法をとると、ファイバースト面に標識を表示できる。ファイバーストの代りに、低屈折率ポリマーを被覆したフィルムの使用も試みられている。

(3) 照明装置(防爆・安全照明, ピンポイント照明, 自動車内の各種メーター・パネル照明および灯火モニターなど): 自動車関係の用途には期待がかけられている。この分野には炭化水素溶剤に耐えるMF系が適しているようである。

(4) 光学センサー

(5) インフォメーションシステム(カードリーダー・テーブリーダーヘッド, 直線-円コンバーター, マークセンサー, ライトペンなど)。

4.2 Graded Index形

レンズ作用(集光作用)を持っているファイバーであるから、この特長を生かした用途が考えられる。

(1) 一本のファイバーによる光像伝送: ファイバーを曲げると像の一部が欠けるから、あまり曲げる必要のない場合に利用できる。Selfocが医用内視鏡に使用されている分野であるが、プラスチックの場合には直径数ミリメートルの伝送体も容易に作成し得るので、医用以外の分野にも使用できそうである。

(2) 集光素子: Step-Index形ファイバーは指向性に乏しいので、伝送すべき情報源に光学センサーを近接させなければならない。Graded Index形ファイバーでは、分布定数 A の異なるファイバーの組合せ、これと光発散形ファイバー²¹⁾(凹レンズ作用がある)の組合せなどにより指向性のよい集光素子が可能で、素子から特定の距離・範囲の情報のみを捕えることができる²²⁾。

(3) コネクター: 細いオプティカルファイバーの連結はなかなかやっかいであるが、このファイバーの集光作用を利用すればコネクターとして使用できよう。

(4) 光通信伝送路: 内部ロスから短距離(例えばビル内の通信)には使用できるのではないか。

Graded Indexファイバーの作成は研究室段階であるから用途といっても可能性の域を出るものではない。

5. む す び

プラスチックオプティカルファイバーはガラス製のそれとは若干異なった特長を持っている。両者の競合する分野もあろうが、それぞれの特長を生かしつつ、あい補って発展してゆくものと期待される。

本稿の作成にあたり資料を提供いただいた関係各位に感謝いたします。

文 献

- 1) N. S. Kapany, *Fiber Optics: Principles and Applications*, Academic Press, Inc., New York (1967)
- 2) 長尾和美, 光学ファイバー, 共立出版, (1974)
- 3) I. Kitano, K. Koizumi, H. Matsumura, T. Uchida, and M. Furukawa; *Jap. J. Appl. Phys.* 39, 63 (1970)
- 4) A. D. Pearson, W. G. French, and E. G. Rawson, *Appl. Phys. Lett.* 15, 76 (1969). W. G. French and A. D. Pearson; *Bull. Am. Ceram. Soc.* 49, 974 (1970)
- 5) Registered tradename of the Nippon Electric Co. and the Nippon Sheet Glass Co.
- 6) P. Kaiser and H. W. Astle; *Bell Syst. Tech. J.* 53, 1021 (1974). W. G. French, J. B. MacChesney, P. O. O'Connor, and G. W. Tasker, *Bell Syst. Tech. J.* 53, 951 (1974). F. W. Dabby, D. A. Pinnow, F. W. Ostermayer, L. G. Van Uiter, M. A. Saifi, and I. Camlibel; *Appl. Phys. Lett.* 25, 714 (1974). S. Kobayashi, H. Nakagome, N. Shimizu, H. Tsuchida, and T. Izawa, *Electron Lett.* 10, 411 (1974). P. Kaiser, A. C. Hart, Jr., and L. L. Blyler, Jr., *Appl. Opt.* 14, 156 (1975).
- 7) K. Koizumi, Y. Ikeda, I. Kitano, and M. Furukawa, and T. Sumitomo, *Appl. Opt.* 13, 255 (1974).
- 8) H. Kogelniki, *Bell Syst. Tech. J.* 1965, 467.
- 9) E. G. Rawson, D. R. Herriott, and J. McKenna; *Appl. Opt.* 9, 753 (1970).
- 10) Y. Ohtsuka, T. Senga, and T. Sugano; *Appl. Phys. Lett.* 29, 298 (1976).
- 11) M. Kline, *Analytical Chemistry of Polymers III. Identification Procedures and Chemical Analysis*, Interscience, New York, 1962.
- 12) R. S. Moore, U.S.P. 3718,383 (Feb. 27, 1975).
- 13) H. Nomura, T. Okada, S. Oikawa, and J. Shimada, *Appl. Optics*, 14, 586, (1975).
- 14) 岡田, 及川, 島田, 第23回高分子学会年次大会(1974) 第36回応用物理学学術講演会(1975)
- 15) Y. Ohtsuka, *Appl. Phys. Lett.* 23, 247 (1973).
- 16) Y. Ohtsuka, T. Senga, and H. Yasuda, *Appl. Phys. Lett.* 25, 659 (1974).
- 17) K. Iga, K. Yokomori, and T. Sakayori, *Appl. Phys. Lett.* 26, 578 (1975).
- 18) Registered trademark of P.P.G. Industries.
- 19) Y. Ohtsuka and I. Nakamoto, *Appl. Phys. Lett.* 29, 559 (1976)
- 20) Y. Ohtsuka and Y. Hatanaka, *Appl. Phys. Lett.* 29, 735 (1976)
- 21) Y. Ohtsuka and Y. Shimizu, *Appl. Optics*, 16, 1050 (1977)
- 22) 大塚, 大橋, 第37回応用物理学学術講演会(昭51.10. 仙台)
- 23) 大塚, 菅野, 宇崎, 第24回応用物理学関係連合講演会(昭52. 3. 横浜)

(昭和52年5月19日受理)