

解説

光ファイバセンサーシステムにおける周辺光学系の現状

西 沢 紘 一

日本板硝子(株)筑波研究所 〒300-26 茨城県筑波郡豊里町東光台 5-4

(1987年2月4日受理)

Optical Components for Optical Fiber Sensor Systems

Koichi NISHIZAWA

Tsukuba Laboratory, Nippon Sheet Glass Co., Ltd.,
5-4, Tokodai, Toyosato-cho, Tsukuba-gun, Ibaraki 300-26

1. ま え が き

光ファイバセンサーに用いられる周辺光学系は、光通信とその基本機能は変わらない。すなわちシステムを構成する3大要素といわれる発受光素子、光ファイバ、および光センサーの間を接続したり、調整したりする役目をもつ光回路部品と考えてよい。光通信分野ではまだ強度変調が信号処理の中心になっているのに対して光ファイバセンサーの分野では、偏波、位相、周波数、波長など光のもつ波動特性を利用していることが多い。したがって光ファイバセンサーの分野では単なる光の結合、分配、だけではなく、偏波、位相などの制御が周辺光学系として求められる。最近の話題をいくつか拾ってみたい。

2. マイクロオプティクス

周辺光学系を述べるにあたっては、マイクロオプティクスを避けるわけにはいかない。1968年セルフォックレンズ®(分布屈折率レンズ)の出現以降、2乗分布近似の屈折率変化をもつロッド状の微小レンズが光通信分野の光回路部品として広く用いられてきた¹⁾。この分布屈折率レンズを軸としてマイクロオプティクスという概念が生まれ、今日では光回路部品全般を含む広い技術分野にコミットしはじめているのである。

表1に光ファイバセンサーのシステム構成における周辺光学系の発展段階を表わしてみた。すなわちレンズ、プリズムなどを組み合わせ堅牢な光学台に固定して使わなければならない時代から、今日では半導体レー

ザー、光ファイバ、フォトダイオードなどの微小な素子が出現し、それに伴って分布屈折率レンズが用いられるようになってきた。これを第2世代またはハイブリッド光学系の時代といってもよい。すなわち集積一体化のコンセプトがシステムの一部に導入されてきており、次世代の集積型光センサーシステムへの過渡的現象とみることもできるからである。第3世代に入ると光を誘電体や半導体の中にとじこめたまま信号処理ができる導波路型光回路が主流となるであろうと考えられている。光集積回路のアナロジーでいえば集積型光センサーの実現も手の届くところまで来たといつてよい。

ここでは現在よく用いられている分布屈折率レンズ、光ファイバ型光学系、さらに最近注目されはじめた導波路型光学系をとりあげ、光ファイバセンサーを構成する周辺光学系という観点でまとめてみたい。

いま図1に示されるような z_0 なる長さをもち、 $n=n_0 \times (1 - (g^2/2)r^2)$ なる屈折率分布で表わされるレンズに光線が入ったとすると、次のような光線マトリックスが求められる。

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \dot{r}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos g z_0 & (1/n_0 g) \sin g z_0 \\ -n_0 g \sin g z_0 & \cos g z_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ \dot{r}_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

(1)式は入射時の位置と角度が一義的に決まることを意味しており、どちらか一方が与えられれば他方はこの式より自動的に求まることになる。

次にこのレンズによる結像関係に触れてみたい。分布屈折率レンズも、従来の球面レンズと基本的機能に差はない。すなわち球面厚肉レンズと等価と考えてよい。図2に示すように長さ z_0 をもつレンズを考え、O点にあ

表 1 光センサー周辺光学系の発展動向

	第 1 世代	第 2 世代	第 3 世代	基本技術
光技術	古典光学 Optics	微小光学 Microoptics	集積光学 Integrated optics	薄膜加工技術 微細加工技術
光部品	ガスレーザー、レンズ プリズム、フィルタ ポーラライザ	LD, LED, APD セルフオックレンズ 光ファイバ(マルチ) 光ファイバ型 Optics	光 IC, OEIC 導波路型デバイス 光ファイバ(シングル) 光集積型センサー	集積一体化 接続技術
光の伝送形態	ビーム	ビーム 多モード	単一モード	モード整合
特徴	立体個別部品の組合せ	部品の固体素子化 微小一体化	集積化 複合機能化	小型・高信頼性
電子部品とのアナロジー	真空管 コンデンサ コイル, 抵抗	トランジスタ プリンタ回路 マイクロプロセッサ	IC LSI ワンチップマイコン	

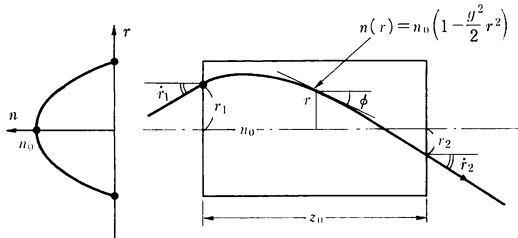


図 1 レンズに入射した光線軌跡

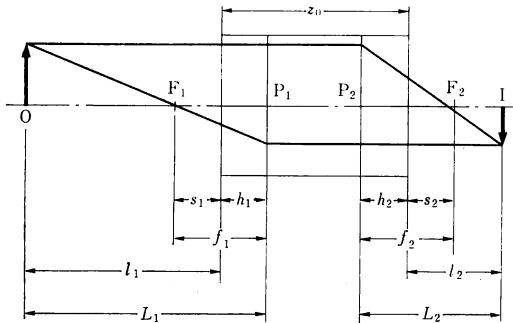


図 2 分布屈折率レンズの結像

る物体が I 点に結像したとする。レンズ端面から主点 P, 焦点 F, 物点または像点までの距離をそれぞれ h, s, l とおく。一方主点 P から焦点 F, 物点, 像点までの距離を f, L で表わし, 物空間側には添字 1 を, 像空間側に添字 2 を与える。また符号については, h に対してはレンズ端面を基準とし, レンズ側を正, 空間側を負とする。一方 f_1 に対しては主点 P_1 を原点に物側を正, 像側を負とする。一方 f_2 については, 主点 P_2 を原点とし f_1 の場合と逆である。レンズ設計上の各種レンズメーターは(1)式から導くことができる。その関係を表 2 に示した。

2.1 分布屈折率レンズの応用光学系

図 3 のような基本光学系に分類して考えると理解しやすい。基本機能のみ簡単に述べてみたい。

2.1.1 軸上結像系

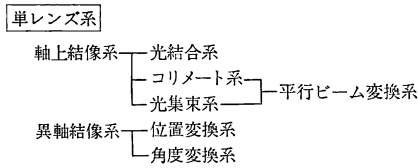
光軸上の物点がレンズを介して同じく光軸上に像点を作る光学系で, 拡大, 縮小, 等倍などの機能をもつ。

(1) 光源結合系

光ファイバセンサーシステムを構成するうえで最も重

表 2 分布屈折率分布の光学パラメータ

光学パラメータ	計算公式	備考
焦点距離 f	$\frac{1}{n_0 g \sin g z_0}$	主点からの距離
作動距離 s	$\frac{1}{n_0 g} \cot g z_0$	$l_1 = \infty$ レンズ端面からの距離
主平面位置 h	$\frac{1}{n_0 g} \tan\left(\frac{g z_0}{2}\right)$ または $\frac{1 - \cos g z_0}{n_0 g \sin g z_0}$	正立等倍結像面
倍率 M	$-\frac{1}{n_0 g l_1 \sin g z_0 - \cos g z_0}$ または $\sqrt{\frac{g^2 n_0 l_2^2 + 1}{g^2 n_0 l_1^2 + 1}}$	$M > 0$ 正方像 $M < 0$ 倒立像
レンズ開口数 NA	$n_0 g R$ または $\sqrt{2 n_0 \Delta n_0}$	R : レンズ半径



複合レンズ系

平板マイクロレンズ

図 3 レンズの応用光学系

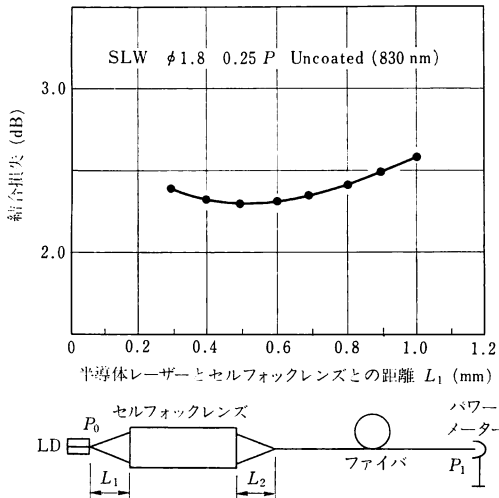


図 4 セルフフォックマイクロレンズによる半導体レーザー (LD) と光ファイバの結合特性 (上) 結合損失の測定例, (下) 測定系の構成

要な点は、半導体レーザーや LED などの微小光源からの出力光を光ファイバへ効率よく入力させる光学系である。最近のようにシングルモード光ファイバ (コア径 8~10 μm) へ光を高効率で入力させるのはそうとうむずかしいとされている。この光学系の基本は NA の変換にある。すなわち物空間と像空間の角度倍率を変換し、同時に生ずる像の横倍率の変換で補償しようという考え方で、光ファイバのもつ固有の NA (0.10~0.20) に整合させるために横倍率を上げ、角度倍率を下げることでマッチングをとっている²⁾。図 4 に光源結合系の代表例を示す。最近は光源側に球面加工をして高効率結合を実現した例が報告されている³⁾。

(2) コリメート系

光ファイバから出た光は、その固有 NA に従って空間に拡がっていく。したがって指向性をもつ光ビームを得るためには、レンズの焦点に光ファイバの出射端を置きコリメート光を作る必要がある。

分布屈折率レンズを用いる場合は、1/4 周期長 (0.25 μm)

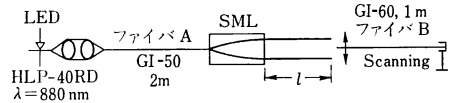
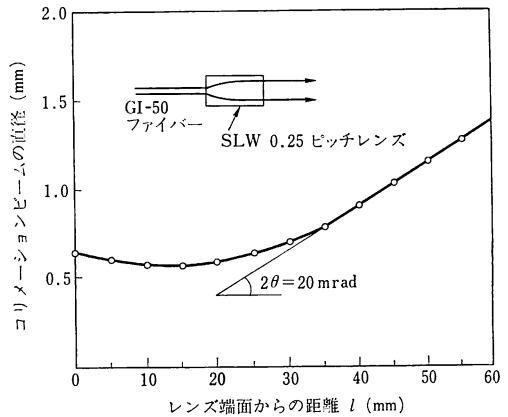


図 5 コリメート系レンズの測定系とビーム径

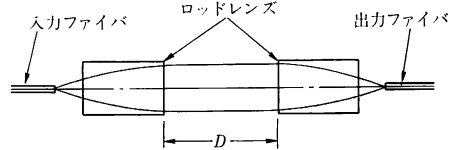


図 6 平行レンズ対による平行ビーム系

のレンズを光ファイバに直接接合すればよい。図 5 に測定系とコリメートビームの拡がり角の関係を示した²⁾。この例では 20 mrad ($\cong 1.1^\circ$) の拡がり角をもっているが、二次光源としての入力ファイバの種類によりこの角度は変化する。シングルモード光ファイバ (1.3 μm 帯) を用いたときは、 2θ としてわずか 0.12° の拡がりしかなくきわめて指向性のよいビームが得られる。これは二次光源が点光源に近いほど、コリメーション効率はよいことを意味している。

(3) 平行ビーム変換系

(2) で述べたコリメート系を 2 個対向して用いると図 6 のような平行ビーム変換系を作ることができる。これは入出力ファイバを平行ビームで結合させることができるため、このスペースにフィルタ、プリズム等の光学素子を挿入し、分岐・分波などの光回路を構成しうればかりか、光センサーを挿入しセンシング回路を作ることもしることができる。図 7 からわかるようにレンズ間隔は数十 mm まで低損失で広げることができる。このようなビーム変換系は、伝播モードの保存性がよく、光信号の歪を低く抑えられるためシステム構成上きわめて重要な光学系を提供しうる。

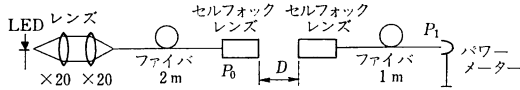
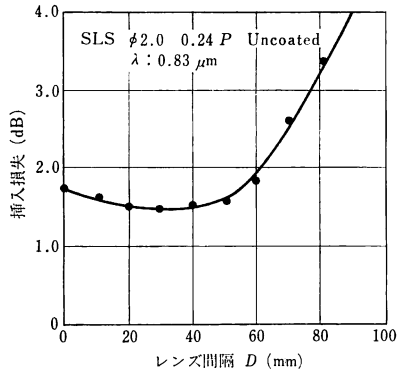


図7 平行レンズ対実験

発光ダイオード (LED): ME-1203 (三菱製).
λ=830 nm ファイバ: GI-50 (藤倉製)

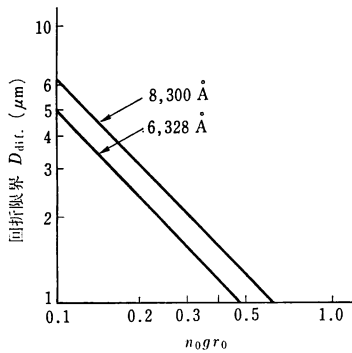


図8 レンズの回折限界

(4) 光集束系

分布屈折率レンズの回折限界を与える式は通常の球面レンズの場合と同様、無収差を仮定すると次のように表わすことができる。

$$D_{dif.} = 1.22\lambda/NA \quad (2)$$

いま 1/4 周期長 (0.25 ピッチ) のレンズを用いると

$$D_{if.} = 1.22\lambda/(n_0gr_0) \quad (3)$$

$$= 1.22\lambda f/r_0 \quad (4)$$

図8に $D_{if.}$ と n_0gr_0 の関係を 6,328 Å と 8,300 Å について示した。通常入手できるレンズでは $n_0gr_0=0.3$ であり、6,328 Å において 1.6 μmφ のスポットが得られることがわかる。

2.1.2 異軸結像系

分布屈折率レンズに光線を異軸入射させると、入出射端面で位置と角度が保存されるような光学系を作ることができる。たとえば、1/4 周期長レンズに軸外入射すれば

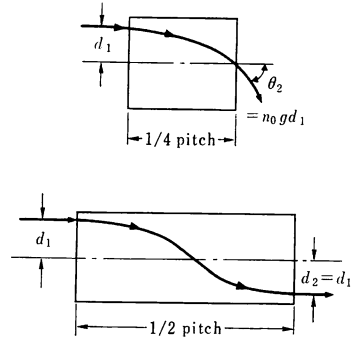


図9 軸外入射によるレンズ中の光線軌跡

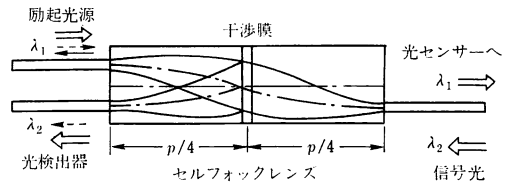


図10 分波合波光回路

ば入射位置が角度に変換される。角度の場合も同様である。この例でわかるように位置・角度、位置・位置、角度・角度、への変換がいずれもレンズの内部で行なわれ一切空气中に光が出ないため一体化構造の光学系を設計しうる。また等倍像変換を利用しているためモードの保存性がよい。この基本ユニットを図9に示す。光ファイバとのアライメントが面倒であるが、小型で低損失の光回路の実現が可能となる。

図10に異軸結像を利用した分波合波光回路の例を示す。光ファイバセンサーのなかで、蛍光を用いた温度センサーにこのデバイスが組み込まれている。センサーロープで発生した蛍光をフィルターで分波し検出器側に分配するために用いられている。

3. 光ファイバ加工型光学系

光ファイバは光信号の伝送が主な機能であるが、機械的、または熱的加工により光の制御を行なう方式である。レンズを介さずに光の結合、集束、分岐、分波が可能のため、小型化が容易でかつ接続部がないため低損失である。ただし欠点としては光ファイバ自身に加工するため製作にやや困難さを伴う。

以下代表的な光ファイバ加工型光学素子を紹介してみたい。

光ファイバセンサーシステムを構成する際、光信号の分岐合流は不可欠な要素技術である。光ファイバを用い

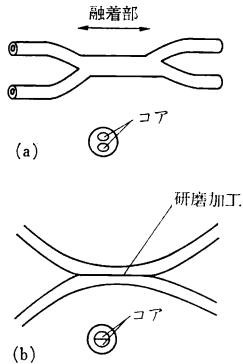


図 11 光ファイバ型分岐合流器

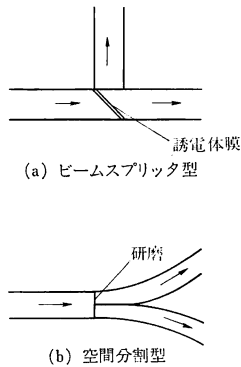


図 12 集中結合型分岐合流光回路

る場合は分布結合型と集中結合型に大別できる。図 11 は前者の例で、(a) は光ファイバを束ねて加熱延伸し、融着したもので中心部でコアどうしが接触し光が互いに隣の光ファイバへ漏れだしカップリングする。一方(b) は光ファイバの側面を精密に研磨し、2本の光ファイバを接着したものでこの場合もコアどうしが接触している。いずれの場合もテーパ縮小部で伝播モードからいったんクラッドモードへ変換され、またテーパ拡大部で再び伝播モードへ変えられる。このとき互いの光ファイバどうしの接近により伝播モードの電磁界の重なりにより分岐合流が実現される。

図 12 は集中結合型分岐合流素子の例である。(a) は光ファイバ端面を 45° に斜め研磨し、研磨面に金属膜または誘電体多層膜のビームスプリッタを形成させたものである。一方(b) の例は、1本の光ファイバに分岐用ファイバアレイを突き合わせ接続したものである。

一般に分布結合型は、結合を強くするために光ファイバどうしの近接間隔、またその近接部の長さ、クラッド厚、ファイバの屈折率などを精密に制御する必要があ

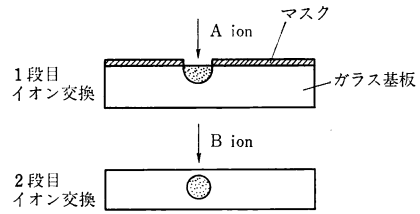


図 13 埋込み型光導波路の製法

る。また、テーパ部の形状にも依存し、製作にあたってこれらのパラメータを正確におさえないといけない。しかしこのテーパ部はモード変換がスムーズになされるためモードの依存性は小さい。一方、集中結合型は機械加工で形状が決まるため製作上の安定性は得られるもののモード依存性が大きく、光ファイバのモード励振状態で分岐比が変わることもあるので注意しなければならない。以上はマルチモード系への応用例であるが、シングルモード系の場合は分布結合型が主流となる。

4. 導波路型光学系

光ファイバセンサー用周辺光学系においてもディスクリットからインテグレーションへの流れがあると述べたが、導波路型光学系はその流れを具体的に示唆している点で興味深い。これは周辺光学系というだけでなく導波路自身もセンサーとして応用されており、複合機能光学素子といってもよい。まず導波路の製法から紹介してみたい。

基板上に導波路パターンを作成する方法としては、イオン交換による埋込み型⁴⁾と CVD 法による積層型が提案されている⁵⁾。図 13 はガラス基板を用いた埋込み型導波路の製作例を示す。ガラス基板に必要なマスクパターンをフォトリソグラフ技術で形成し、溶融塩中に浸漬しそのマスク開口部を通してイオン交換を生ぜしめ、高屈折率イオンを注入する。この際、電界を印加することにより拡散を促進させ、かつ分布のコントロールを行なう。第 2 段目はマスクを除去したのち再び溶融塩中で低屈折率イオンを導入し、高屈折率部（この部分が光導波路部となる）をガラス基板中に埋め込むのである。こうしてできた導波路は円対称な屈折率分布を有し、かつ伝播損失もきわめて小さい。マスクパターン形状を任意に選ぶことによりいろいろな光回路を作ることができる。

図 14 に光導波路を用いた油漏れセンサーの例を示した⁶⁾。すなわち導波路をへくの字型に作り途中で空気と接する露出面を設ける。導波路と露出面は角度 θ で入射するよう設計されており、導波路を伝播してきた光はこ

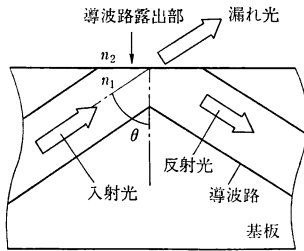


図 14 導波路型油漏れセンサーの動作原理

の面で全反射して出射していくことになる。屈折率 n_2 をもつ油が露出面に付着すると全反射条件がこわれ、一部の光が導波路外部に漏れて伝播光量が減少する。したがって出力光変化で油漏れが検知できる。導波路露出面への入射角度 θ を選択することにより油の種類およびそのときの感度を自由に設計できる。

5. あとがき

光ファイバセンサーシステム構成上必要な周辺光学系についての現状をまとめてみたが、まだ従来のバルク光学系のコンセプトから脱していない。今後は光センサー

と機能光学素子が集積一体化されてパッケージ化されたデバイスから光ファイバが1本出ているという形になるのではないだろうか。現在実用化が最も期待されているのがファイバジャイロ用光 IC で、位相変調型のファイバジャイロ光学系が LiNbO_3 基板上に集積一体化されたものがすでに提案されている。周波数変調型のファイバジャイロ光 IC も試作されており、 LiNbO_3 基板上に、2個の SAW トランスデューサーを配置し、光の周波数をシフトを実現している。このように周辺光学系は、今後ますます微小化、機能化、集積化が進み、本稿で述べたような素子がすっかり形を変えてしまう日もそう遠い未来ではない。

文 献

- 1) T. Uchida, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **QE-6** (1970) 606.
- 2) 日本板硝子製品カタログ, “セルフロックマイクロレンズ (SML)” (1983).
- 3) R. Ishikawa, *et al.*: IOOC-ECOC Conf., Venice, Italy (1985).
- 4) E. Okuda, *et al.*: 4th GRIN, Kobe F2 (1983).
- 5) 山田泰文, ほか: 昭和59年信学総大全, S 10-2 (1985).
- 6) 和田 弘, ほか: 昭和60年信学技報, OQE 85-161 (1986).