

# マルチモードポリマー導波路の評価技術

八木 生剛\*・柴田 慎弥\*\*†・森本 政仁\*\*\*

## Evaluation Methods for Multi-Mode Polymeric Optical Waveguides

Shogo YAGI\*, Shinya SHIBATA\*\*† and Masahito MORIMOTO\*\*\*

The purpose of this research is to propose the standard evaluation method for multi-mode polymeric optical waveguide, which will accelerate both of R&D and penetration into the market. In this type of waveguides, it is crucial to define the input light pattern because the roughness of core-cladding interface scatters higher order mode. By using LEDs, 50 GI fibers and SGS mode scramblers can meet this demand.

**Key words:** SGS mode scrambler, multimode waveguide, near field pattern, far field pattern

ホームフォトリクスやデータコム等の短距離通信においては、群速度のモード分散が問題とならないために、マルチモードポリマー導波路の適用が可能である。シングルモード導波路と異なり、マルチモードポリマー導波路は、大きなコア径を有するために接続位置ずれマージンが大きくなり、ポリマーの成形性とあわせて、結果的に接続を含めて価格的な優位性をもつことが期待される。

しかし、コア・クラッド界面の荒れによる散乱損失や、入出力ファイバーとの結合効率にモード依存性があるために、導波路への光の入射条件によって特性が変化するにもかかわらず、現時点で標準となる特性評価方法が存在しない。したがって、現状では各社各様の方法で性能試験を行っているために、ユーザーにとって客観的な評価が困難な状況にあり、結果的にマルチモード導波路の普及を妨げる一因となっている。

そこで、メーカーとユーザーにとって指針となる標準的な評価方法を提案し、マルチモードポリマー導波路の開発や導入の促進に資することを目的とし、NEDOの助成(16度新エネナ第0531001号, 17度新エネナ第0105006号)を受け、測定方法の検討を進めてきた。

## 1. 測定結果に影響を与えるパラメーター

### 1.1 測定の安定性

マルチモードポリマー導波路の評価は、モードの励振状態に左右されるため、導波路の正当な評価のためには測定結果に影響を与えるパラメーターを正確に決定する必要がある。また、評価方法として、①いつ、どこで、誰が測定しても、同じ導波路ならば、所定の精度で同じ評価結果を得る、あるいは、②対象とする導波路が使用される条件を再現する、の2つのスタンスがある。本稿では、前者①の方針に従って、測定方法を吟味した。「異なる2つのメーカーが作製した異なる導波路を、1つの評価基準に従ってその優劣を判定する」という、ユーザーサイドの視点を重視したためであるが、後者②は実際の使用環境を規定できない以上、汎用の方法としてはありえない。①を可能にするために、まず、測定結果に影響を与えるパラメーターが何であるかを決定する。

導波路両端にファイバーを突き当てて評価する場合、入力ファイバー端面での光分布 $|\Phi\rangle$ を、そのファイバーの伝搬モード $\{|\phi_i\rangle\}$ の線形結合 $|\Phi\rangle = \sum_i c_i |\phi_i\rangle$ で表すと、導波路と受光ファイバーを経由して受信される光量は、

\* NTT フォトリクス研究所 (〒243-0198 厚木市森の里若宮 3-1) E-mail: shogo@aecl.ntt.co.jp

\*\* 東北大学多元物質科学研究所 (〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)

\*\*\* 古河電工ファイナルフォトニクス研究所 (〒290-8555 市原市八幡海岸通 6)

† 現所属: 日本触媒(株) (〒564-8512 吹田市西御旅町 5-8)

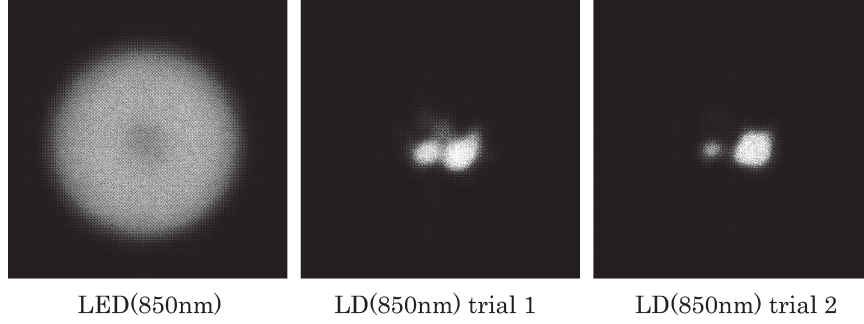


図1 75 cm 長 50 GI ファイバー NFP の光源依存性 (49  $\mu\text{m}$  角).

$$P = \sum_{i,j,k,l,m} \exp\left\{-\frac{(\kappa_k + \kappa_l - i\beta_k + i\beta_l)L}{2}\right\} \times c_i c_j^* \langle \psi_m | \omega_k \rangle \langle \omega_k | \phi_i \rangle \langle \phi_j | \omega_l \rangle \langle \omega_l | \psi_m \rangle \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $\{|\omega_i\rangle\}$ ,  $\{|\psi_m\rangle\}$  は、それぞれ導波路、および受光ファイバーの伝搬モード、 $L$  は導波路長、 $\beta_k$ ,  $\kappa_k$  は、導波路の第  $k$  モードの伝搬定数と減衰定数である。 $\kappa_k$  は、後で述べるように導波路のモード ( $k$ ) の関数であり、高次モードのほうが伝搬損が大きくなる。 $\langle f | g \rangle$  は、 $f^*g$  の導波路の入射および出射端面での面積積分を意味し、芯ずれの影響は  $\langle \phi_i | \omega_k \rangle$  と  $\langle \omega_k | \phi_j \rangle$  の中に取り込まれている。

式 (1) において、受光ファイバーのコア径や NA が導波路のそれよりも十分大きく、適切に調芯されている場合、伝搬モードのみの和であっても、 $\sum_m |\psi_m\rangle \langle \psi_m| \approx 1$ , すなわち、導波路からの出射光をすべて受け取ると仮定して差し支えないので、そのような受光系採用時の受光パワー  $P_A$  は、

$$P_A = \sum_{i,j,k,l} \exp\left\{-\frac{(\kappa_k + \kappa_l - i\beta_k + i\beta_l)L}{2}\right\} \times c_i c_j^* \langle \omega_l | \omega_k \rangle \langle \omega_k | \phi_i \rangle \langle \phi_j | \omega_l \rangle = \sum_{i,j,k} \exp(-\kappa_k L) c_i c_j^* \langle \phi_j | \omega_k \rangle \langle \omega_k | \phi_i \rangle \quad (2)$$

のように簡略化される。光源が LED のようなインコヒーレント光源の場合には、式 (2) において、 $i \neq j$  のとき  $c_i^* c_j$  の時間平均は 0 であるから、受光パワー ( $P_{A,LED}$ ) は

$$P_{A,LED} = \sum_{i,k} \exp(-\kappa_k L) |c_i \langle \omega_k | \phi_i \rangle|^2 \quad (3)$$

と、さらに簡略化される。

一方、LD や VCSEL のようなコヒーレント光源の場合には、 $i \neq j$  のでも  $c_i^* c_j$  の時間平均は有限の値をもち、受光パワー ( $P_{A,LED}$ ) は、 $P_{A,LED}$  と非対角成分 ( $P_{A,OD}$ )

$$P_{A,OD} = 2\text{Re} \left[ \sum_k \sum_{i < j} \exp(-\kappa_k L) c_i^* c_j \langle \phi_i | \omega_k \rangle \langle \omega_k | \phi_j \rangle \right] \quad (4)$$

との和で表されることになる。導波路径がファイバー径よ

り十分大きく、導波モードのみの和でも、 $\sum_k |\omega_k\rangle \langle \omega_k| \approx 1$  とみなせる場合は  $P_{A,OD} \approx 0$  である。しかし、一般には、実ネットワークで用いるファイバーのコア径と同程度以下の大きさの導波路コアを作製するから、上記の条件は成立しない。つまり、入力ファイバーのモードのエネルギー分布のみに依存する  $P_{A,LED}$  に比べて、式 (4) に示されるような、ファイバーのわずかな曲げにも敏感なモードの位相差に影響を受ける  $P_A$  は不安定性が高いことが予想される。モードの数が多くなれば、中心極限定理により、 $P_{A,OD}/P_{A,LED}$  はゼロに近づくが、 $P_{A,LED}$  に比べて  $P_A$  がファイバーの取り回しに敏感であることに変わりはなく、測定の再現性に重点を置くと、インコヒーレント光源を用いることが勧められる。

図 1 に、75 cm 長の 50 GI ファイバーからの出射光の NFP (near field pattern) を、光源が LED と LD の場合について示している。光源が LD の場合には、ほぼ真っ直ぐに置かれた 50 GI ファイバーの NFP を測定 (trial 1) 後、測定端面とは反対側を約 3 cm ずらして測定 (trial 2) すると、大きく異なった NFP が得られる。LED の場合には、直径 35 mm のシリンダーに巻き付けて NFP の変化を観察したが、全く変化はみられなかった。

NFP に限らず、LD では FFP (far field pattern) も同様に変動する。図 2 には FFP のプロファイルを trial 1 と trial 2 の両方について示している。このようにわずかなファイバー取り回しに対して、LD では大きくパターンが変化するが、LED ではパターンが変化しないということは、50 GI ファイバーにおいては、モード間のエネルギー移動は起こりにくいが、モード間の相対位相は容易に変化することを意味している。

図 3 は、90  $\mu\text{m}$  角コア ( $NA=0.204$ ) をもつ分岐角が 10° の Y 分岐導波路に入力ファイバーとして Lucina を用い、光源が LD と LED の場合に挿入損の安定性にどのような差が生じるかを示したものである。系が静止している場合、LED では挿入損変動は 0.01 dB 以下であるが、LD

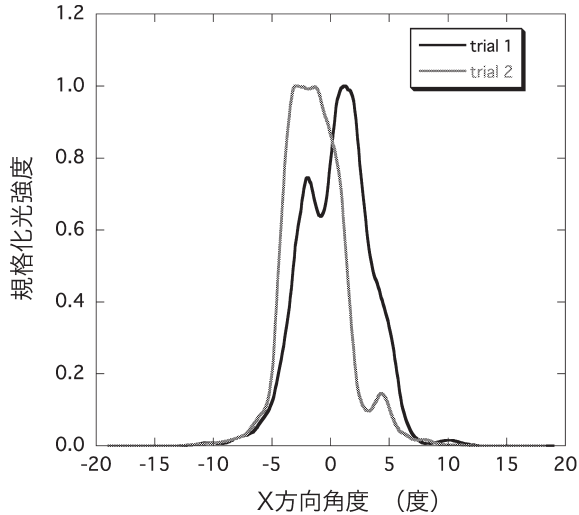


図2 コヒーレント光源での75 cm長50 GIファイバー FFP プロファイル安定性.

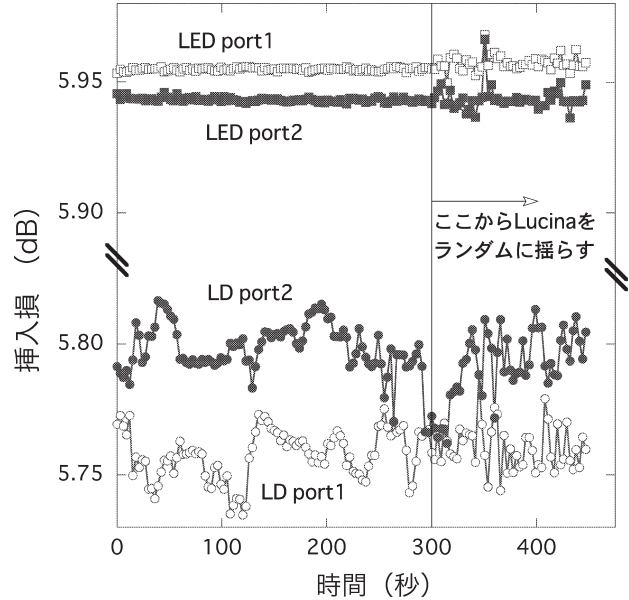


図3 LDとLEDでの挿入損の安定性の違い.

の場合には300秒間で0.05 dB程度のゆらぎを生じている。入力ファイバーであるLucinaをランダムにゆらすと、LEDでも挿入損に変動が生じるが、0.02 dB程度のゆらぎにとどまっている。LDの場合には安定性が劣ることが実験的にも示されている。

## 1.2 界面荒れによる散乱

次に、コア・クラッド界面荒れによって生じる伝搬損失のモード依存性について吟味する。コア・クラッド界面の荒れが十分小さく荒れを導波構造に対する摂動とみなせる場合、導波光外の観測点を原点とすると、散乱光による電場 ( $E_s$ ) は、

$$E_s(\vec{0}) = \frac{2\pi n_{\text{clad}}(n_{\text{clad}} - n_{\text{core}})}{\lambda^2} \times \sum_{i,m} \left\{ \int_{v_i} E_m(\vec{r}) \frac{\exp(i\omega n_{\text{clad}} r/c)}{r} d\vec{r} \right\} \quad (5)$$

で与えられる<sup>1)</sup>。ここで、積分範囲は  $i$  番目の荒れの領域 ( $v_i$ ) である。 $r$  は  $\vec{r}$  の絶対値、 $E_m$  は第  $m$  導波モードの電場分布、 $c$  は真空中の光速、 $\lambda$ 、 $\omega$ 、 $n_{\text{clad}}$ 、 $n_{\text{core}}$  は、それぞれ、真空中の波長、角周波数、クラッドおよびコアの屈折率である。

さらに、個々の荒れが波長に比べて十分小さい場合は、個々の  $v_i$  領域内で  $E_m$  を一定値 (第  $m$  モードのコア・クラッド界面における電場強度:  $E_{mb}$ ) とみなすことが可能となり、1個の荒れから発散されるエネルギーは、式(5)で与えられる電場からポインティングベクトルを求め、荒れを囲む面積で積分して、

$$\int E_s \times H_s d\sigma \approx \frac{16\pi^3 c \epsilon_0}{\lambda^4} n_{\text{clad}}^2 \delta n^2 V_i^2 \left( \sum_m E_{mb} \right)^2 \quad (6)$$

が得られる。 $\epsilon_0$  は真空の誘電率である。ここで、 $V_i$  は注目している  $i$  番目の荒れの体積である。もしも荒れが導波路のコア・クラッド界面の全体にわたって存在していたとすると、底面積は固定されているので、荒れの高さの2乗に比例して散乱が強くなることを意味している。単位エネルギーあたりでは、高次モードのほうが、コア・クラッド界面での電場強度  $E_{mb}$  が強いので、高次モードのほうが散乱強度が強いことが示されている。つまり、全モード励振で導波路に光を入射させた場合、高次モードから減衰し、低次モードが生き残ることになる。界面による散乱が伝搬損失の主因である場合、短い導波路であればあるほど単位長さあたりの伝搬損失を大きく見積もる危険性があることを認識しなければならない。散乱強度は、各モードの電場強度の和の2乗であるから、1個の荒れからの散乱強度はモード間位相に、すなわち、コヒーレンシーに依存することが予想される。しかし、荒れは無数にあり、モード間干渉による導波方向へのビートの波長よりも長い距離にわたって荒れが分布している場合、干渉の効果は相殺され、伝搬損失にはコヒーレンシーの効果は現れない。

$\delta n$  はコア・クラッドの屈折率差である。散乱強度は  $\delta n^2$  に比例する。同じ加工法を採用し、したがって、界面荒れが同程度ならば、埋め込み導波路よりリッジ導波路のほうが損失が高くなることを予想するが、これは、実験的にも正しい。また、使用波長の4乗に逆比例して散乱が強くなる。例えば、公衆網の通信波長帯である  $1.3 \mu\text{m}$  に対して、安価な VCSEL の存在する  $850 \text{ nm}$  では、 $1.3^4/0.85^4=5.5$  であるから、同じ加工精度の導波路に対し、界面荒れ由来

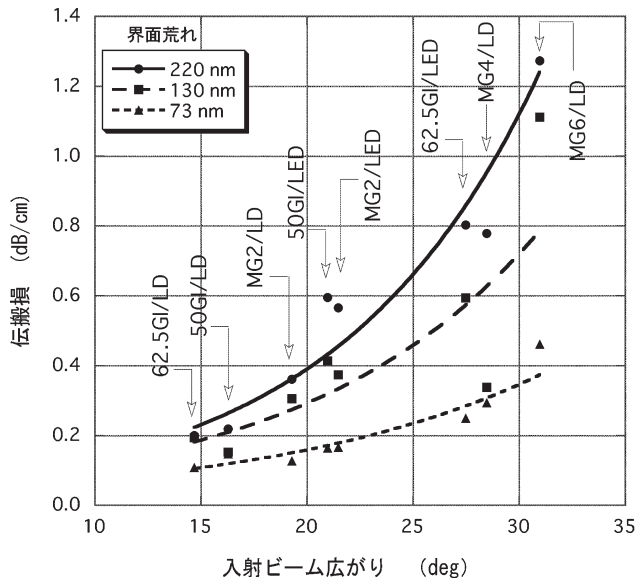


図4 界面荒れが異なる導波路の伝搬損の入射広がり角度依存性。波長850 nmのLDもしくはLEDを光源とし、62.5  $\mu\text{m}$ もしくは50  $\mu\text{m}$ 径のGIファイバーと、3種のモード励振器(MG2, MG4, MG6)を組み合わせ導波路への入射ビーム広がり角を制御した。

の損失は5.5倍に達する。したがって、評価に際しては使用波長を明記する必要がある。

図4に、光源として波長850 nmのLEDおよびLDを用い、複数のコア径をもつファイバーとモード励振器を組み合わせることによって入射光広がり角を変化させたとき、コア・クラッド界面荒れが異なる3種の導波路への伝搬損が、入射光広がり角に伴ってどのように変化するかを実験的に調べた結果を示す。界面荒れは、220 nm, 130 nm, 73 nmの3種である。受光系は、大きいコア径とNAをもつ200 SI (200  $\mu\text{m}$  コア径 step index ファイバー)を用い、式(2)における $P_A$ を受光していることに相当している。広がり角度は、ファイバー出射端のFFPを測定して $1/e^2$ 径で定義している。

明らかにガウシアンとは異なる広がり分布をもつ場合も同じ広がり角の定義を用いているために、多少のばらつきはあるものの、「界面荒れが大きいほど損失が大きい」「入射広がり角が大きいほど損失が大きい」「光源がLEDかLDによらず、損失は同一の関数系で表現される。したがって、伝搬損はコヒーレンシーに依存していない」ことが実験的にも確かめられる。式(6)の帰結と合わせ、導波路入射端でのモード励振状態が再現されることが伝搬損の測定結果を再現するためには重要であり、マルチモードファイバー突き当てによる被測定導波路への入射を前提にすると、入力ファイバーのモード励振状態を再現し、かつ必要精度で調芯できることが必要十分条件であることがわかる。

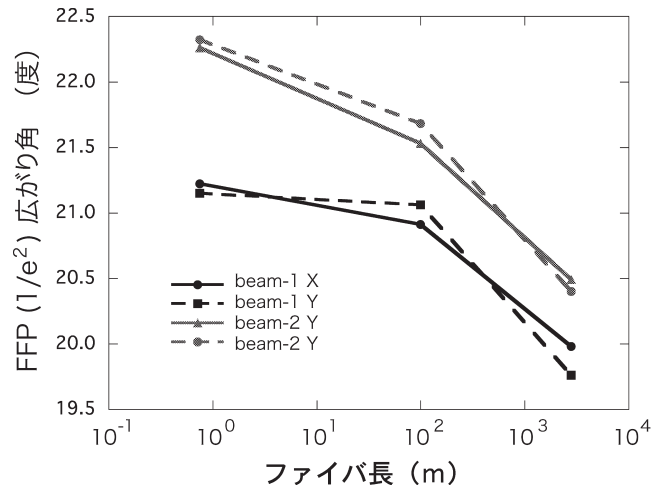


図5 50 GIファイバー長とFFP広がり角の関係。

### 1.3 入力ファイバーのモード励振状態の再現性

大前提として、入力ファイバーのモードそのものの個体差を排除できることが必要である。そこで、品質が安定していて入手が容易な50  $\mu\text{m}$  コア径のGI石英ファイバーを入力ファイバーとして選定した。また、「入力ファイバーのモード励振状態を再現する」に際して、光源がコヒーレント光源の場合、モード間干渉を含めて再現されねばならないが、インコヒーレント光源であれば、モードのエネルギー分配比のみ再現されればよい。50 GIファイバーでの入射を前提とする限り、前者は実現性に乏しいので、後者的を絞って検討した。モード励振状態を再現するために、a) ファイバー長を延ばして定常励振モードを実現する、b) 心棒にファイバーを巻き付けたいわゆるマンドレルを形成することでモードを制御する、c) SGSモードスクランブラーを通すことでモードを制御する、の3種の方法について吟味した。

#### 1.3.1 長いファイバー

FFPの異なる2種類の入射光について、異なる長さの50 GIファイバーを伝搬後、定常励振モードにどのように近づくかを調べた。75 cmから2.8 kmの範囲で、FFPの広がり角( $1/e^2$ 幅)がどのように変化するかを図5に示す。方位は、FFPの $x$ 断面と $y$ 断面の広がり角を示している。図5を見る限り、2.8 kmまでのファイバー長では一定のFFP広がり角に漸近する傾向を示さず、「どれくらいのファイバー長があれば定常励振モードにどれくらい近づく」のかさえ示すことができない。850 nmにおいて、50 GIファイバーの減衰は2.5 dB/km程度であるから、もう1桁ファイバー長を伸ばすことは光量の70 dBダウンをもたらす、非現実的である。したがって、長いファイバーを用いての定常励振モード実現は困難であることがわかる。

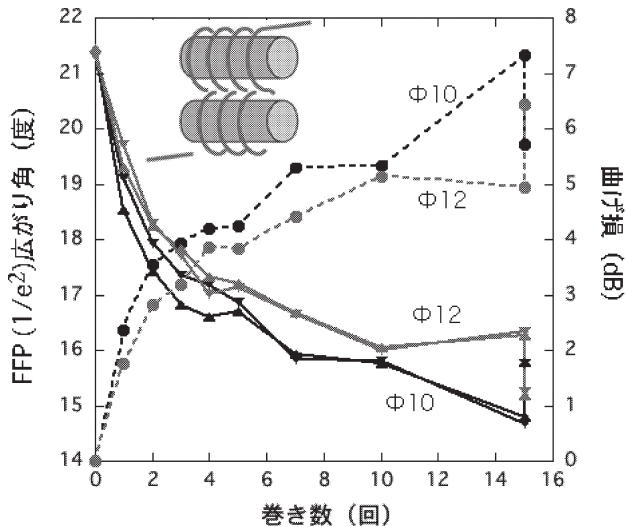


図6 8字巻きマンドレル巻き数とFFPおよびマンドレル挿入損の関係。

### 1.3.2 マンドレル

そこで、曲率半径を小さく巻くために、ジャケットのないテープ芯線を用い、シリンダーに巻き付けることによってマンドレルの効果を確かめた。50 GI ファイバーでは曲げ半径が6 mm 以下で FFP に顕著な変化が現れるので、直径が10 mm $\Phi$ と12 mm $\Phi$ のシリンダーに沿って8字型に巻き付け、巻き数と FFP の変化を調べた。結果を図6に示す。実線が FFP を、破線が曲げ損を示す。結果は、再現性に乏しく、かつ、FFP は一方的に狭くなるのみであって、導波路の界面荒れによって影響を受ける高次モードを励起していない。つまり、8字巻きマンドレルを繰り返し精度よく作製するジグの存在なくしては、入射モードを再現できないこと、また導波路評価の指針としても、導波路製造技術の良否を判断しやすい高次モードを抑制するマンドレルは、50 GI ファイバーのモード励振器としては推奨できない。

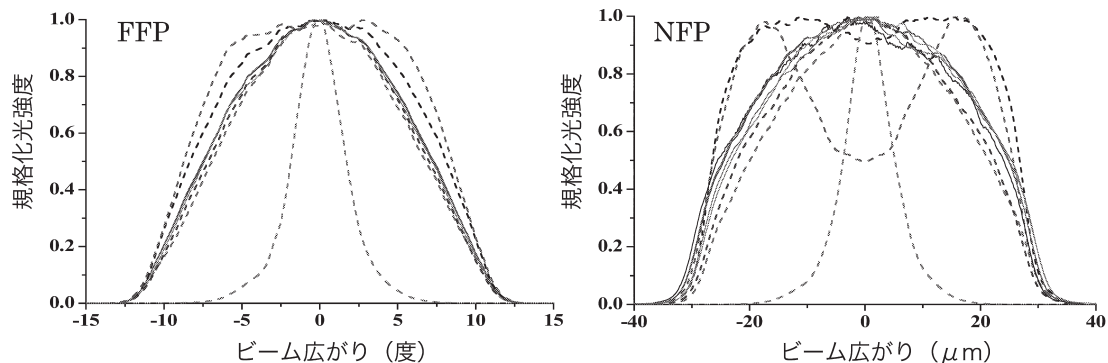


図7 50 $\mu$ m コア径 SGS モードスクランブラーによる FFP と NFP の変化。

### 1.3.3 SGS モードスクランブラー

SI ファイバーと GI ファイバーと SI ファイバーを接続した SGS モードスクランブラーは、全モード励振と定常モード励振の中間的なモードを励振するモード励振器として知られている<sup>2)</sup>。図7に、50 $\mu$ m コア径の SGS モードスクランブルにてその効果を調べた結果を示す。SI, GI, SI の各ファイバー長は2 m で計6 m に固定し、さらに1 m 長の50 GI を透過後の FFP と NFP を示している。シングルモードファイバーや、Lucina 等、さまざまな NFP, FFP をもつ光を入射させ、SGS モードスクランブラーの有無による変化を調べたものである。破線と実線は、それぞれ SGS モードスクランブラーを用いていないもの、用いたものである。ピークパワーで規格化を行ったところ、FFP においては、すべての実線が重なり、違いを認識できない。NFP では実線同士の区別は可能であり、若干の違いは認められるが、SGS なしの場合に比べてその差は圧倒的に小さい。SGS モードスクランブラーによって、スクランブラー入射前の情報が消され、一定のエネルギー分配比でポリマー導波路に入射できることがわかる。なお、この SGS モードスクランブラーの効果は、必ずしもファイバーを融着接続する必要はなく、FC コネクターによる接続でも同等の効果が得られることがわかっている。

SGS スクランブラーから出た光を50 GI ファイバーを経由してポリマー導波路に入射させるが、そのファイバー長についても注意が必要である。表1は、FFP の  $1/e^2$  広がり角の数値と、90 $\mu$ m 角コアで4.25 cm 長のポリマー導波路への挿入損を示す。50 m 長では、0 m に比べて挿入損が0.012 dB 少なくなっている。これは、式(6)を反映し、広がり角の大きい成分すなわち高次モードが少なくなったために、壁面荒れの影響が緩和されたことに由来すると考えられる。ここに示した挿入損は、たまたま測定に用いたポリマー導波路での実験値であって、より壁面荒れ

表1 FFPとポリマー導波路挿入損の50 GIファイバー長依存性.

50 GIファイバー長	1/e <sup>2</sup> 径 (x)	1/e <sup>2</sup> 径 (y)	挿入損 (dB)
0 m	21.5°	21.6°	0.419
5 m	21.1°	21.1°	0.417
50 m	20.6°	20.6°	0.407

ポリマー導波路は90 μm角正方形断面コア, 4.25 cm長を使用.

の大きな導波路ではより変化が大きいであろうし, 挿入損の差0.012 dBをもって入力ファイバー長の上限を規定することは困難である.

## 2. マルチモードポリマー導波路の挿入損測定法

図8に測定光学系のブロック図を示す. LSは光源である. 波長は任意であるが, 使用波長の明記が必要である. LEDやSLD等のインコヒーレント光源の使用を推奨するが, LDやVCSEL等のコヒーレント光源の使用を禁止するものでない. コヒーレント光源使用時にはデータばらつきが大きくなることに留意しなければならない. SPはスプリッターであり, 光源の出力ゆらぎを補償するためのモニタリングに用いる. 分岐比等, 特に指定はしない. PM1はパワーメーターで, SPからのモニタリング光量を測定し, 光源の出力ゆらぎを補償するために用いる. MSはモードスクランブラーであり, 50 μmコア径のSGSモードスクランブラーを用いる. S-GおよびG-Sの各ファイバー間接続は, 融着接続もしくはコネクタを用いるものとする. F1は入力ファイバーである. 50 μmコア径の石英GIファイバーを用いる. 長さに制限を設けなければならないが, 現時点では推奨値が求められていない. DUT(device under test)は被測定対象であるポリマー導波路である. F2は受光ファイバーである. DUTよりもコア径, NAともに大きなSIファイバーを使用することで, 導波路からの出射光の結合にかかわる不確定要素をなくすることができる. PM2は, 受光ファイバー経由でDUTの挿入損を測定するパワーメーターである.

測定手順としては, まず, PM1を用い, LSの安定性が予定している測定時間内で安定しているか, 変動周期がモニタリング可能な範囲であることを確かめる. 次に, DUTが未設置の状態, F1とF2をバットジョイントし, PM2でパワーをモニターしつつ, 最も高いパワーが得られるようF1とF2の位置を調整する. 得られた最高パワーを $P_B$ とし, そのときのPM1の指示値 $P_p$ をモニターする. F1とF2の間をマッチングオイルで満たすと測定の信頼性が増すので, マッチングオイルの使用が推奨される. 次にDUTを設置し, 入出力ポートのそれぞれにF1

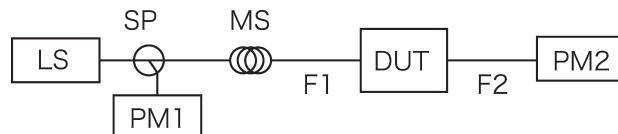


図8 マルチモードポリマー導波路の測定光学系.

とF2をバットジョイントする. 入出力ポートがそれぞれ1個の導波路の場合には, PM2の指示値が最大になるようにF1とF2の位置を微調整する. PM2の指示値を $P_2$ , そのときのPM1の指示値を $P_1$ とすると, 挿入損( $A$ )は, dB表示にて $A = P_B - P_2 + P_1 - P_p$ と与えられるので, 得られた $A$ の値を記載する. DUTが分岐回路の場合には, 入力ポートと, 2つの出力ポートのうち一方のポートにF1とF2をバットジョイントし, PM2の指示値が最大になるようにF1とF2の位置を微調整する. 次に, F2を動かさず, F1をDUTの入射端面に沿ってスキャンし, PM2の指示値をF1の位置の関数( $P_{2,1}(\tilde{r})$ )として記録する. 次に, 先に求めたPM2の指示値が最大になるF1の位置にF1を戻して固定し, F2をもう一方の出力ポートにバットジョイントし, PM2の指示値が最大になるF2の位置を求め固定する. 最後にF2を動かさず, F1をDUTの入射端面に沿ってスキャンし, PM2の指示値をF1の位置の関数( $P_{2,2}(\tilde{r})$ )として記録する. 同時に,  $P_{2,1}(\tilde{r})$ と $P_{2,2}(\tilde{r})$ の各測定時刻におけるPM1の指示値( $P_1(t)$ )をモニターしておく. それぞれのポートでの挿入損( $A_1, A_2$ )は,  $A_1(\tilde{r}) = P_B - P_{2,1}(\tilde{r}) + P_1(t) - P_p$  および,  $A_2(\tilde{r}) = P_B - P_{2,2}(\tilde{r}) + P_1(t) - P_p$ で与えられる.

マルチモードポリマー導波路の損失評価法を, 「安定測定」に重きを置いて検討を進めた. コア・クラッド界面の散乱のモード依存性を理論と実験の両面から解析し, 高次モードほど散乱が強いことを確かめた. 光源としてインコヒーレントなLEDを用いた場合に, SGSモードスクランブラーを用いると測定が安定することは確かめられたが, 実際の使用環境ではVCSEL等のコヒーレント光源を用いることが一般的であるから, そのギャップをどう埋めるかが今後の課題である.

## 文 献

- 1) 八木生剛: ホログラフィックメモリのシステムと材料, 志村努監修 (シーエムシー出版, 2006) pp. 103-112.
- 2) 徳田正満, 堀口常雄, 谷藤忠敏: “グレーデッド型ファイバー伝送帯域測定用SGS励振器の設計と特性”, 電子通信学会論文誌, **J65-B** (1982) 585-592.

(2007年9月12日受理)