

解 説

光後方散乱法による偏波保持光ファイバの 偏波モード結合係数の測定*

中 沢 正 隆

NTT 茨城電気通信研究所 〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 162

(1985年6月28日受理)

Measurement of Polarization Mode-Coupling along a Polarization-Preserving Optical Fiber Using a Backscattering Technique

Masataka NAKAZAWA

NTT Ibaraki Electrical Communication Laboratory,
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-11

1. はじめに

最近、光ヘテロダイン通信用伝送路もしくは安定な光ファイバセンサとしての偏波保持单一モード光ファイバの研究が盛んになってきている¹⁻³⁾。偏波保持光ファイバを利用する場合、その特性を決定する重要な要因として消光比がある⁴⁾。消光比は直交する二つの偏波モード間の結合の度合いによって定義され、消光比が大きいほど（結合が弱いほど）優れたファイバといえる。従来、偏波保持ファイバの消光比は透過法により測定され、あるファイバ長にわたる平均値として求められていた。しかし、この方法ではファイバのどの場所で消光比がどの程度変化しているのかを特定できない欠点があった。

本稿では、従来法では不可能であった長手方向にわたる偏波モード結合の様子を光後方散乱法を用いて非破壊で測定する方法について紹介する。この方法によると、長手方向のモード結合の様子ばかりでなく、被測定ファイバ全体としての消光比が求められる^{5,6)}。さらに、多段接続された偏波保持ファイバ伝送路に応用するとおのののファイバの消光比と各接続点でのモード結合（主軸ずれ）を測定できる特徴がある⁷⁾。

以下、2章において、光後方散乱法による偏波保持光

ファイバ中のモード結合係数の測定原理、3章において消光比の異なるファイバについての測定結果、および接続点を含むファイバへの応用について述べる。

2. 光後方散乱法による偏波モード結合の測定原理

2.1 光後方散乱法による偏波モード結合の取扱い

本測定法の原理を図1に示す。光後方散乱法は別名OTDR (optical time domain reflectometer) 法とも呼ばれ、光パルスをファイバ中に入射し、そのパルスの伝播に伴って生ずる後方レーリー散乱光の時間変化からファイバの長手方向の損失を評価する方法である⁸⁻¹⁰⁾。この散乱光は見方を変えるとcross-talkを生ずる雑音と見なされる（たとえばファイバジャイロにおける散乱等）が、この微弱信号から多くの情報が得られることは大変興味深い。光損失のほか、接続損失、光コネクタ損失等も測定できるため光通信用測定器として重要な役割を果たしている。OTDRを偏波保持光ファイバに応用すると複屈折によって生ずる偏波ビート長が測定でき、この方法はPOTDR (polarization OTDR)と呼ばれている¹¹⁾。

本測定法は原理的には図1に示すように2種類のPOTDR信号を処理する方法である。まず、直線偏光の光パルスを偏波保持光ファイバの主軸(X軸)に入射する。被測定光ファイバからの後方散乱光は半透過鏡で反

* 本稿は昭和59年度光学論文賞受賞論文の内容を中心としてまとめたものである。

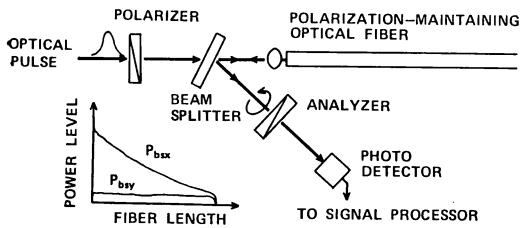


図 1 光後方散乱法による偏波モード結合の測定原理
左下の挿入図は両主軸方向からの散乱光の長手方向の変化 P_{bsx} および P_{bsy} を示す。

射されて光検出器に導かれる。ここで、まず検光子を回転させて入射主軸方向からの後方散乱光 $P_{bsx}(L)$ を測定し、次に検光子を 90° 回転させてもう片方の主軸方向 (Y 方向) からの散乱光 $P_{bsy}(L)$ を測定する。 $P_{bsy}(L)$ は重要な量で、モード結合がなければゼロとなる。両者の比率 $P_{bsy}(L)/P_{bsx}(L)$ を求めると、その量は長手方向に変化しており、その変化から被測定ファイバの偏波モード結合を非破壊で測定できる。

さて、この測定原理について考えよう。偏波保持光ファイバにおいては二つの直交した偏波をもつ伝播モード HE_{11}^X および HE_{11}^Y があり、それぞれ異なる伝播定数 k_x, k_y をもつ。 HE_{11} モードの電界分布は近似的にガウス分布で表わすことができるるので、ここでは簡単にこの近似を用いる¹²⁾。偏波モード結合は、光ファイバ中の誘電率ゆらぎ $\Delta\epsilon$ のテンソルの非対角項によって生ずる。この非対角項がゼロならば消光比は非常に大きくなる。しかし、一般には応力付与部もしくはコアの変形に伴いわずかな非対角項成分が発生し、モード結合が起こる¹³⁾。光後方散乱法によるこのモード結合の測定は図 2 に示すように、[a] $z=0$ から $z=L$ までの伝播過程、[b] $z=L$ から $z=L+V_g W$ の光パルス内での散乱過程 (V_g : 光パルスの群速度、 W : パルス幅)、[c] $z=L$ から $z=0$ までの後方伝播過程について分けて解析できる。ここでは、紙面の都合上結果のみを示すと $z=L$ での散乱光強度の比率 $\langle \eta_{bs}(L) \rangle$ は

$$\begin{aligned} \langle \eta_{bs}(L) \rangle &= \frac{P_{bsy}(L)}{P_{bsx}(L)} \\ &= \frac{2}{E_0^2} \langle |\alpha_{mey}^+(L)|^2 \rangle \\ &\times \left[1 + \left\{ \frac{\sin(\Delta k V_g W)}{2} \right\} \cos 2\Delta k L \right] \\ &+ \frac{k^2 \langle |\Gamma(2k)|^2 \rangle}{S\alpha_R} \end{aligned} \quad (1)$$

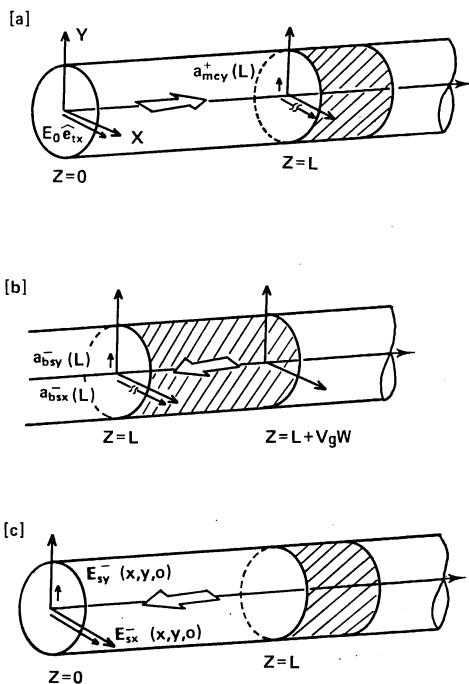


図 2 偏波保持光ファイバ中の後方散乱の解析
[a] $z=0$ から $z=L$ までの伝播,
[b] 光パルス内での後方散乱過程,
[c] $z=L$ から $z=0$ までの後方伝播過程

で与えられる⁶⁾。ここで $\Delta k = k_x - k_y$, S は後方散乱係数, α_R はレイリー散乱係数, E_0 は入射電界強度である。 S および α_R の詳細については文献 14)を参照されたい。右辺の [] 中の第 2 項はモード結合によって生ずる偏波ビートの項である。また、右辺第 2 項の k は $k_x \approx k_y = k$ とおいた。 $\alpha_{mey}^+(L)$ は x 軸から y 軸へのモード結合の振幅を表わし、

$$\alpha_{mey}^+(L) = \frac{-i\omega Z E_0}{2} \int_0^L \Delta\epsilon_{xy}(z) \exp[-i(k_x - k_y)z] dz \quad (2)$$

で与えられる。 Z はファイバの特性インピーダンス, $\Delta\epsilon_{xy}(z)$ は比誘電率テンソルの非対角項を示す。一般に $\Delta k V_g W / 2 \ll 1$ であるから、式(1)は次のように簡略化される。

$$\langle \eta_{bs}(L) \rangle = 2 \left\{ \frac{k^2}{4} \langle |\Gamma(\Delta k)|^2 \rangle \right\} L + \frac{k^2 \langle |\Gamma(2k)|^2 \rangle}{S\alpha_R} \quad (3)$$

ここで、 $\langle |\Gamma(\Delta k)|^2 \rangle$ は屈折率ゆらぎの非対角項に関する自己相関関数 $R_{xy}(u)$ の Δk についてのフーリエ変換であり、

$$\langle |\Gamma(\Delta k)|^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(u) \exp[-i\Delta k u] du \quad (4)$$

換を用いている。

$$\frac{1}{E_0^2} \langle |\alpha_{\text{mcy}}^*(L)|^2 \rangle = \frac{k^2}{4} \langle |\Gamma(\Delta k)|^2 \rangle L \quad (6)$$

式(6)においてモード結合係数 h は

$$h = \frac{k^2}{4} \langle |\Gamma(\Delta k)|^2 \rangle \quad (7)$$

で定義される⁴⁾。したがって、式(3)は最終的に次のように表わすことができる。

$$\langle \eta_{\text{bs}}(L) \rangle = 2hL + K \quad (8)$$

ここで、 K は

$$K = \frac{k^2 \langle |\Gamma(2k)|^2 \rangle}{S\alpha_R} \\ = -\frac{\pi W_{ox} W_{oy} \int_{\infty} R_{xy}(u) \exp[-i2ku] du}{\int_{\infty} B_n(r) \exp[-i2ku] dV} \quad (9)$$

で与えられる定数である⁶⁾。ここで W_{ox} , W_{oy} はそれぞれ x 軸, y 軸方向のスポットサイズである。 $B_n(r)$ はファイバ中の任意の2点間の屈折率ゆらぎにおける対角要素の自己相関関数である。したがって、 K は屈折率ゆらぎの非対角項の自己相関関数のフーリエ変換に対する対角項の自己相関関数とフーリエ変換の比率を示す。ただし、後方散乱であるから $2k$ に関するフーリエ変換となっている。

式(8)によると、光後方散乱法によるモード結合係数は透過法の2倍 ($2h$) で与えられることに注意したい。これは光の往復伝播に起因している。 h が距離に依存しない定数ならば式(8)は L の1次関数となる。しかし、実際には h が局所的に変化するため、その直線に変化が生ずる。その変化量から長手方向のモード結合が把握できることになる。

2.2 多段接続された偏波保持光ファイバでの一般化した表現

2.1 節で述べてきた測定法は、偏波保持光ファイバの接続における主軸合せ、および多段接続した偏波保持ファイバのおののおのの接続点でのモード変換の測定に応用できる⁷⁾。図3に示すような2本の偏波保持ファイバの接続について考えよう。接続角 θ が小さい場合には、ファイバ2から後方散乱光 $P_{\text{bsx}}(L_1)$ に対する $P_{\text{bsy}}(L_1)$ の比率 $\langle \eta_{\text{bs}}(L_1)_+ \rangle$ は

$$\langle \eta_{\text{bs}}(L_1)_+ \rangle \cong 2\theta^2 + 2h_1 L_1 + K_2 \quad (10)$$

ただし、 K_2 はファイバ2での式(9)で与えられる K を示す。 θ^2 の係数2は後方散乱法に特有な量でやはり光の往復伝播に起因する。同様にしてファイバ1からの $\langle \eta_{\text{bs}}(L_1)_- \rangle$ は式(8)より、

$$\langle \eta_{\text{bs}}(L_1)_- \rangle = 2h_1 L_1 + K_1 \quad (11)$$

で与えられる。したがって、式(10)と(11)より接続後の θ を測定できる。図4に示すように、接続点前後の $\langle \eta_{\text{bs}}(L_1) \rangle$ の変化には2通りが考えられる。

ケースI) ファイバ1からファイバ2の方向の段差 $\Delta_{1 \rightarrow 2}$ は式(10)と(11)より、

$$\Delta_{1 \rightarrow 2} = 2\theta^2 + K_2 - K_1 \quad (12)$$

一方、ファイバ2から1への段差 $\Delta_{2 \rightarrow 1}$ は

$$\Delta_{2 \rightarrow 1} = 2\theta^2 - (K_2 - K_1) \quad (13)$$

となる。したがって、両方向測定により、 θ は

$$\theta = \sqrt{\frac{\Delta_{1 \rightarrow 2} + \Delta_{2 \rightarrow 1}}{4}} \quad (14)$$

の関係から求まる。これは図4の(A), (B)に対応している。もし、2本のファイバがまったく同一ならば $K_1 = K_2$ となり、片端測定が可能となる。

ケースII) これは図4の(C), (D)に対応し、 θ は

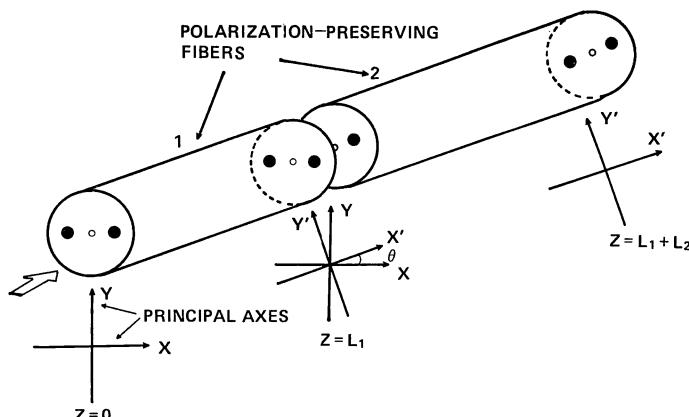


図3 角度 θ の主軸ずれをもって接続されている2本の偏波保持ファイバ

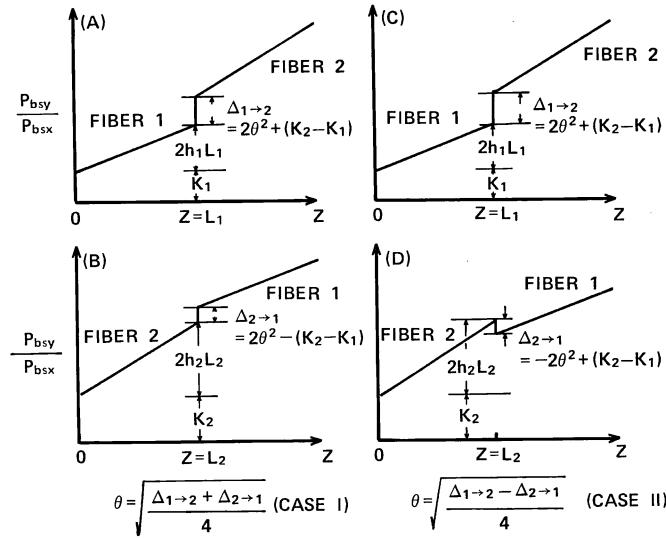


図 4 主軸ずれ角 θ の評価方法
(A), (B)はケース I), (C), (D)はケース II) に対応している.

$$R_{xy}(u) = \langle n_{xy}(z)n_{xy}(z') \rangle \quad (5)$$

$$u = z - z'$$

で与えられる。また、式(2)と(4)より得られる次の変

$$\theta = \sqrt{\frac{\Delta_{1\rightarrow 2} - \Delta_{2\rightarrow 1}}{4}} \quad (15)$$

で求められることが容易にわかる。これらは OTDR による両方向測定から接続損失を見積もる方法とよく似ている¹⁵⁾。式(14), (15)は $\sin^2(2\theta) \approx (2\theta)^2$ が成り立つ範囲で有効であり、 $\theta = 20^\circ$ を越す軸ずれに対しては、誤差が大きくなる。

n 本の偏波保持ファイバが下記の条件を満たして接続されているとすると、

$$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m-1}, \theta_m, \dots, \theta_{n-1} \ll 1 \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^n h_k L_k \ll 1 \quad (17)$$

接続点 m の前後の段差量 $\Delta_{m-1 \rightarrow m}$ および $\Delta_{m \rightarrow m-1}$ は次のように与えられる。詳細については文献 7) を参照されたい。

$$\Delta_{m-1 \rightarrow m} = 2\theta_{m-1}^2 + K_m - K_{m-1} \quad (18)$$

$$\Delta_{m \rightarrow m-1} = 2\theta_{m-1}^2 - (K_m - K_{m-1}) \quad (19)$$

したがって、入射端から $m-1$ 個目の接続点での軸ずれは、

$$\theta_{m-1} = \sqrt{\frac{\Delta_{m-1 \rightarrow m} + \Delta_{m \rightarrow m-1}}{4}} \quad (20)$$

の関係式より評価できる。これらの一般化した関係を図 5 に示した。以上のように本測定法により、多段接続された偏波保持ファイバの各モード結合係数ばかりでな

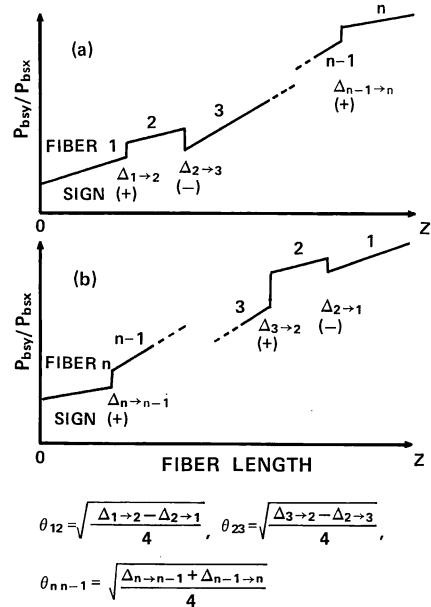


図 5 n 本多段接続された偏波保持光ファイバにおける主軸ずれ評価方法
本方法により各接続点での主軸ずれが独立に測定できる。

く、接続点の軸ずれを伝送路布設後、最終的に評価できる利点がある。

3. 偏波モード結合係数の測定

3.1 1 本の偏波保持光ファイバにおける測定

光後方散乱法による偏波モード結合の測定系を図 6 に

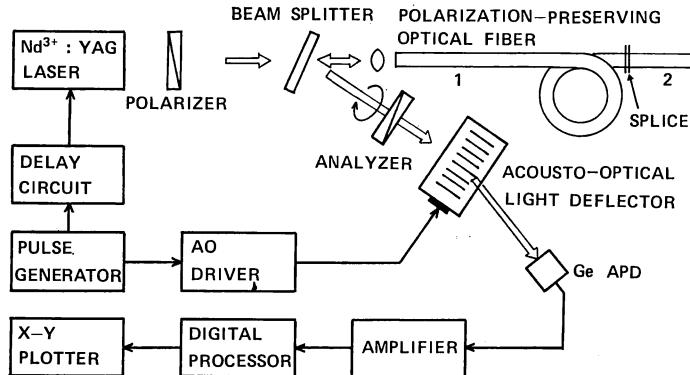


図 6 測定系構成図

示す。波長 $1.34 \mu\text{m}$ からの光パルスは偏光子により直線偏光になり、半透過鏡を経て被測定ファイバの主軸に入射する。光パルス幅は $1 \mu\text{s}$ (距離分解能 100 m)、繰返し周波数は 500 Hz 、ファイバ内入力は 100 mW 以下である。被測定ファイバは長さ約 1 km の偏波保持ファイバで $1.3 \mu\text{m}$ 帯で单一モードである。ファイバからの後方散乱光は、検光子により入射偏光成分と直交方向成分とに分離されて測定される。この散乱光は微弱信号なので低雑音増幅器により増幅され、さらに S/N 比改善のため平均化処理される。なお、入射偏光方向と同一方向の後方散乱光を測定する場合にはファイバ入射端でのフレネル反射を除去することが重要である。ここでは、偏波依存性の小さい超音波光偏向器を用いてその反射を除去している^{16,17}。

測定の詳細な結果については、文献 6)に譲るとして、ここでは、2本の PANDA 型偏波保持ファイバ (A, B)¹⁸⁾に関する結果について述べる。図 7(a)はファイバ A の長さ方向にわたる後方散乱光 P_{bsx} , P_{bsy} の変化を示し、(b)は P_{bsy}/P_{bsx} の変化を示す。この変化は式(8)に示したように、ある一定のオフセット量 K と傾きから成る直線で表わされていることに注目したい。この傾きが $2h$ で与えられることを考慮してモード結合係数を求めると、 $h = 4.4 \times 10^{-6} \text{ } 1/\text{m}$ 、消光比約 23.6 dB/km を得る。この測定法は方向性をもたないので END 2 から END 1 にむけて同様な測定を行なうと同一の結果が得られるはずである。図 8 にその結果を示す。図 8(b)によると図 7(b)と同じ右上りの直線で表わされ、その傾きから $h = 5.1 \times 10^{-6} \text{ } 1/\text{m}$ 、消光比 23.0 dB/km と前の結果とよく一致する。透過法によって消光比を求めるとき $23.6 \pm 0.4 \text{ dB/km}$ となり、これは本測定結果とよく一致していることがわかる。

ファイバ B に関する測定結果を図 9 に示す。図 9

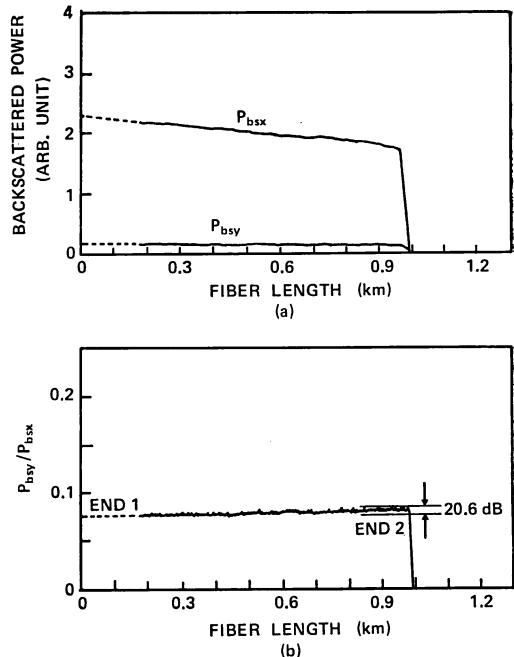


図 7 ファイバ A の偏波モード結合の測定
(a)は直交する偏光方向からの後方散乱光の長手方向の変化を示し、(b)は P_{bsy}/P_{bsx} の変化を示す。また、END 1, END 2 はファイバ端を表す。

(a) は END 1 から END 2 にむけて測定したモード結合の様子であり、(b) は逆側から測定したものである。いずれの場合にもわずかなうねりが観測されており、長手方向に偏波モード結合係数が変化している様子がよくわかる。図 9(b)を 180° 回転させると (a) の波形に一致し、このことからも本測定法は方向性をもたないことがわかる。図 9(a)から求まる h は $1.5 \times 10^{-5} \text{ } 1/\text{m}$ であり、(b) から求まるそれは $1.4 \times 10^{-5} \text{ } 1/\text{m}$ となり両者はよく一致する。従来の透過法により得られる消

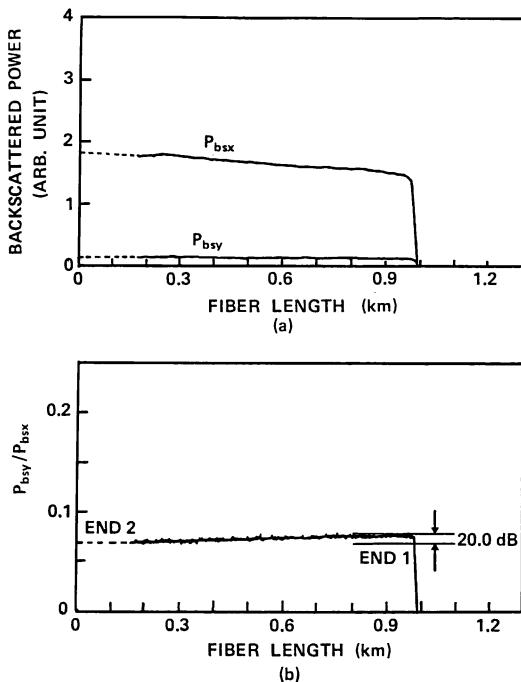


図 8 ファイバ A の END 2 から END 1 方向への偏波モード結合の様子

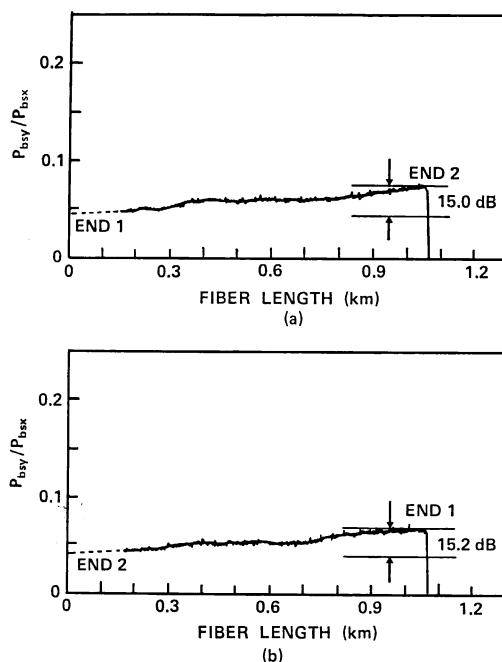


図 9 ファイバ B の偏波モード結合係数の測定
(a) は END 1 から END 2 へ、(b) はその逆に向かって測定している。

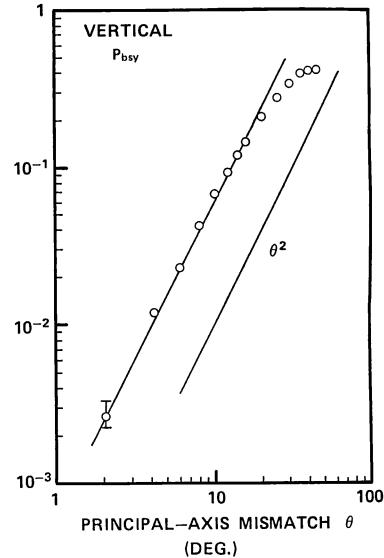


図 10 主軸ずれ θ に対する後方散乱光 ($P_{bsy}(\theta) - P_{bsy}(0^\circ)$) の変化

光比は $17.0 \pm 0.2 \text{ dB/km}$ であり、本測定によって得られた $17.1 \pm 0.2 \text{ dB/km}$ とよく一致していることがわかる。

3.2 接続された偏波保持光ファイバにおける測定

光後方散乱法の偏波保持光ファイバへの応用は、散乱量をモニタすることにより 2 本の偏波保持光ファイバの主軸合せができるという、思わぬ副産物がある。すなわち、ファイバ 1 と 2 を接続する場合、図 6 に示した偏光子と検光子とを直交ニコルに設定し、ファイバ 2 からの後方散乱光が最小になるようにファイバ 2 を回転させれば主軸合せができる。または、偏光子と検光子とを平行に設定し散乱光が最大になるようにファイバ 2 を回転させてよい。図 10 に直交ニコルの場合の主軸合せの結果を示す。ただし P_{bsy} において $\theta=0$ の場合の散乱量をオフセットとして $P_{bsy}(\theta)$ から差し引き、両対数表示した。容易にわかるようにこの関数は $\sin^2(2\theta)$ で表現されるので、 θ が小さい場合 θ^2 の依存性がある⁷⁾。図より、 θ^2 に従って後方散乱パワーが減少していく様子がよくわかる。接続精度は $\pm 1^\circ$ 程度である。

さて、2.2 節で述べた接続点での主軸ずれの測定結果を図 11~13 に示す。図 11 は 2 本の PANDA ファイバを $\theta=0^\circ$ として接続した結果であり、(a) にファイバ 1 から 2 への P_{bsx} と P_{bsy} の変化を、また (b) に P_{bsy}/P_{bsx} の変化を示す。これによると散乱光は接続点で急激に変化しているものの(接続損失は大きい)、 P_{bsy}/P_{bsx} は接続点でほとんど変化しておらず $\Delta_{1 \rightarrow 2} \approx 0$ である。

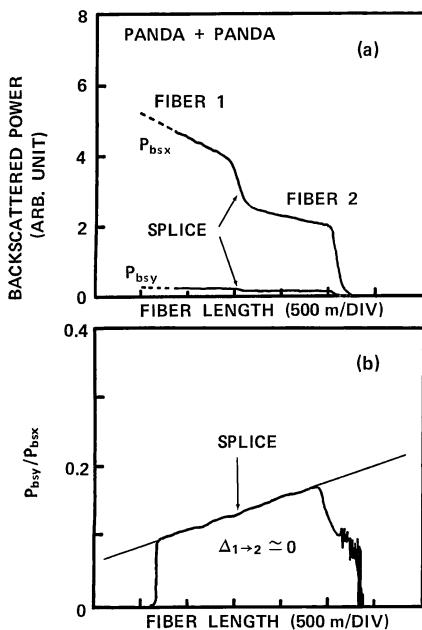


図 11 偏波保持光ファイバ接続点における主軸ずれの測定
(a)は P_{bsx} , P_{bsy} の変化を示し,
(b)には P_{bsy}/P_{bsx} を示す.

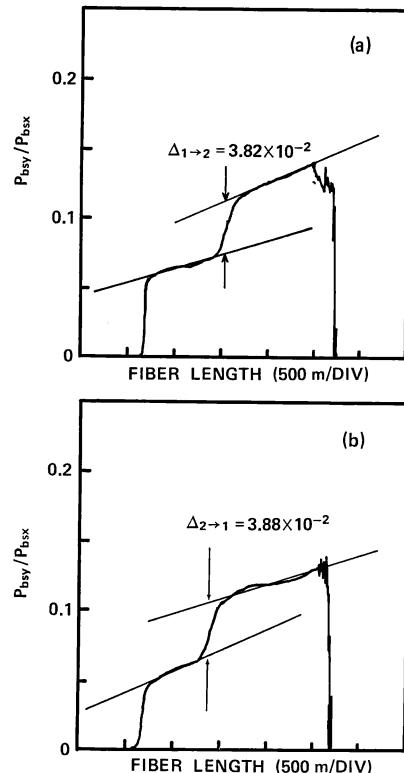


図 13 2本のPANDA ファイバの主軸を約8°ずらして接続した場合の接続点での P_{bsy}/P_{bsx} の変化

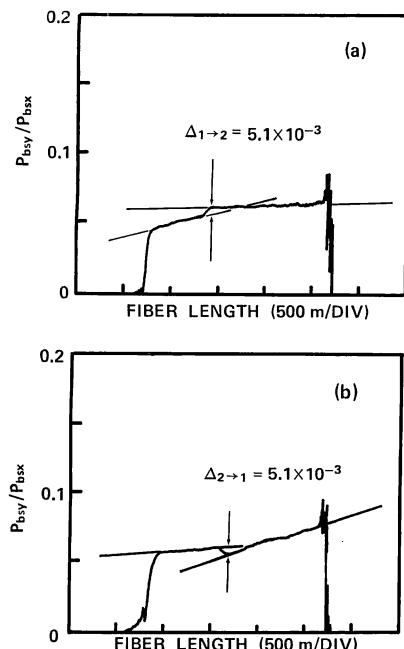
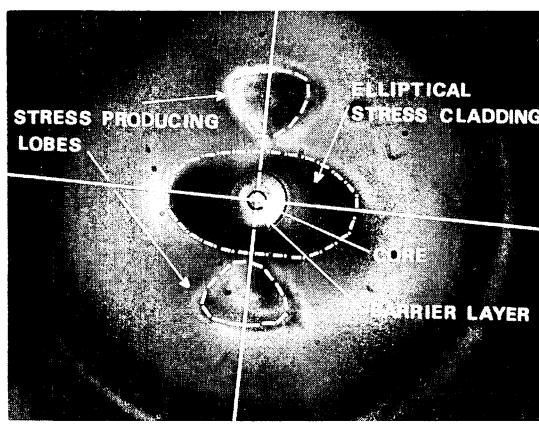


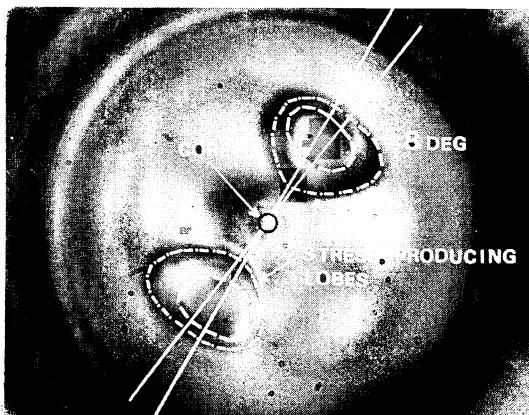
図 12 PANDA ファイバと楕円ジャケットファイバの接続点での P_{bsy}/P_{bsx} の変化
(a)は楕円ジャケットファイバから PANDA ファイバに向けて測定し,(b)はその逆に対応している.

逆方向からの測定を行なった結果、 $\Delta_{2 \rightarrow 1} \approx 0$ となり、この場合、主軸が一致していることがわかる。ファイバ 1 と 2 のそれぞれのモード結合係数 h_1, h_2 はほぼ等しく $h_1 = h_2 = 2.4 \times 10^{-5} \text{ 1/m}$ であることが図からわかる。図 12 は PANDA ファイバと楕円ジャケットファイバ¹⁹⁾の接続点での P_{bsy}/P_{bsx} を示す。図からわかるようにこれは図 4 のケース II に相当する。図 12(a)から $h_{(\text{PANDA})} = 1.8 \times 10^{-5} \text{ 1/m}$, $h_2 = 4.2 \times 10^{-6} \text{ 1/m}$ であり、また $\Delta_{1 \rightarrow 2} = 5.1 \times 10^{-3}$ である。逆方向測定の結果は(b)に示され、 $h_2 = 5.2 \times 10^{-6} \text{ 1/m}$, $h_1 = 2.1 \times 10^{-5} \text{ 1/m}$, $\Delta_{2 \rightarrow 1} = 5.1 \times 10^{-3}$ である。この値は負の値として計算されるので、結局主軸ずれ θ はゼロとなり、両ファイバの主軸が正確に接続されていることを示している。

最後に、故意に 2 本の PANDA ファイバに約 8°の軸ずれをさせて接続した結果について紹介しよう。図 13(a)に示すファイバ 1 から 2 への測定により、 $h_1 = 2.1 \times 10^{-5} \text{ 1/m}$, $h_2 = 3.1 \times 10^{-5} \text{ 1/m}$, $\Delta_{1 \rightarrow 2} = 3.82 \times 10^{-2}$ が得られる。逆方向測定を行なうと図 13(b)に示すように、 $h_2 = 3.1 \times 10^{-5} \text{ 1/m}$, $h_1 = 2.1 \times 10^{-5} \text{ 1/m}$, $\Delta_{2 \rightarrow 1} = 3.88 \times 10^{-2}$



(a)



(b)

図 14 偏波保持光ファイバ接続部の微分干渉顕微鏡写真

(a)は PANDA ファイバ+楕円ジャケットファイバ、(b)は PANDA ファイバ+PANDA ファイバに対応している。

$\times 10^{-2} \text{ 1/m}$ が得られる。したがって、式(14)より $\theta = 139 \text{ mrad}$ となり、軸ずれは 8° と見積もることができる。

図 12, 13 に示した主軸ずれの評価法が適当かどうかを調べるために、それらを接続点を含む $\pm 250 \mu\text{m}$ の肉厚のサンプルとし、微分干渉顕微鏡で観察した。その結果を図 14 に示す。図 14(a)は図 12 に、(b)は図 13 に対応している。図 14(a)によると、PANDA ファイバの応力付与部と、楕円ジャケットファイバの楕円クラッド部とが明瞭に識別でき、PANDA の主軸と楕円ジャケットファイバの主軸とは直交する 2 本の白線で示したようによく一致していることがわかる。図 14(b)からは、大きさの異なる応力付与部がわずかな角度を有しながら接合されている様子がわかる。コア中心を通る 2 本の直線を引くとそれらのなす角度は 8° となり、前述

の測定結果と一致することがわかる。

4. む す び

光後方散乱法による偏波保持光ファイバの長手方向にわたる偏波モード結合係数の測定法および多段接続された偏波保持ファイバにおける接続点での主軸ずれの測定法について紹介した。本方法では、偏波モード結合にのみ起因した情報を取り出すために直交する主軸からの 2 種類の後方散乱信号を処理するところに特徴がある。これにより、従来測定不可能であった長手方向にわたるモード結合を非破壊で測定可能であることが明らかにされた。

レイリ散乱光は、ファイバジャイロ等においては感度を限定する一つの雑音となるが、この非常に微弱な信号から光損失、接続損失、障害点探索、偏波ビート長、モード結合係数、主軸ずれ等多くの量が測定できることは大変興味深い。本方法は、偏波保持光ファイバのケーブル化前後もしくはケーブル布設前後における消光比の変化を測定する上で有効な手段となる。加えて、偏波保持ファイバ製造時のモニタとして用いるならば、消光比の高いファイバが歩留りよく製造できるであろう。

文 献

- Y. Yamamoto and T. Kimura: "Coherent optical fiber transmission systems," IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 919.
- T.G. Giallorenzi, J.A. Bucaro, A. Dandridge, G.H. Siegel Jr., J.H. Cole, S.C. Rashleigh and R.G. Priest: "Optical fiber sensor technology," IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 626.
- T. Okoshi: "Heterodyne and coherent optical fiber communication: Recent progress," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **MTT-30** (1982) 1138.
- I.P. Kaminow: "Polarization in optical fibers," IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 15.
- M. Nakazawa, M. Tokuda and Y. Negishi: "Measurement of polarization mode coupling along a polarization-maintaining optical fiber using a backscattering technique," Opt. Lett., **8** (1983) 546.
- M. Nakazawa, N. Shibata, M. Tokuda and Y. Negishi: "Measurements of polarization mode coupling along polarization-maintaining single-mode optical fibers," J. Opt. Soc. Am., **A-1** (1984) 285.
- M. Nakazawa, N. Shibata, T. Horiguchi and S. Seikai: "Polarization mode coupling measurements along a spliced polarization-preserving fiber using a backscattering technique," J. Opt. Soc. Am. **A-2** (1985) 1066.
- M.K. Barnoski and S.D. Personick: "Measurements in fiber optics," Proc. IEEE, **66** (1978) 429.
- A.J. Conduit, J.L. Hullett, A.H. Hartog and D.N. Payne: "An optimized technique for backscatter attenuation measurements in optical fibers," Opt. Quantum Electron., **12** (1980) 169.

- 10) M. Nakazawa, M. Tokuda, K. Washio and Y. Asahara: "130-km-long fault location for single-mode optical fiber using 1.55 μm Q-switched Er³⁺: glass laser," Opt. Lett., **9** (1984) 312.
- 11) M. Nakazawa: "Theory of backward Rayleigh scattering in polarization-maintaining single-mode fibers and its application to polarization optical time domain reflectometry," IEEE J. Quantum Electron., **QE-19** (1983) 854.
- 12) D. Marcuse: "Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers," J. Opt. Soc. Am., **68** (1978) 103.
- 13) K. Okamoto, Y. Sasaki and N. Shibata: "Mode coupling effects in stress-applied single-polarization fibers," IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 1890.
- 14) M. Nakazawa: "Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers," J. Opt. Soc. Am., **73** (1983) 1175.
- 15) B. Costa, F. Esposto, C. D'orio and P. Morra: "Splice loss evaluation by means of the backscattering technique," Electron. Lett., **15** (1979) 550.
- 16) M. Nakazawa, T. Tanifugi, M. Tokuda and N. Uchida: "Photon probe fault locator for single-mode optical fiber using an acoustooptical light deflector," IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 1264.
- 17) T. Horiguchi, M. Nakazawa, M. Tokuda and N. Uchida: "An acoustooptical directional coupler for an optical time domain reflectometer," IEEE J. Lightwave Tech., **LT-2** (1984) 108.
- 18) T. Hosaka, K. Okamoto, T. Miya, Y. Sasaki and T. Edahiro: "Low-loss single polarization fibres with asymmetrical strain birefringence," Electron. Lett., **17** (1981) 530.
- 19) T. Katsuyama, H. Matsumura and T. Suganuma: "Low-loss single-polarization fibres," Electron. Lett., **17** (1981) 473.