

光ファイバカプラ

藤倉電線(株)光エレクトロニクス研究所 川上 登

Optical fiber coupler

Noboru Kawakami

Optoelectronics Laboratory, FUJIKURA Ltd.

1. はじめに

光ファイバ通信技術の発展と光ファイバの低価格化に伴い、各方面で光ファイバ通信の実用化が行なわれている。特に最近ではファイバ・トゥ・ザ・ホーム (fiber-to-the-home) といわれる加入者宅まで単一モードファイバを用いてサービスを行なう検討が進められている。また光ファイバセンサ、コヒーレント光通信、波長多重伝送技術の開発が進み実用化しつつある。これらのシステムを構成する上で、低損失性、ファイバとの接続性などから光ファイバカプラ、光合波分波器等の光ファイバ型部品が必要とされ、その重要性を増している。これらの光部品には波長依存性のあるものと波長依存性の無いものがある。

波長依存性のあるものとしては光ファイバカプラ、光合波分波器等がある。光ファイバカプラは、一本のファイバを伝搬する光を二本のファイバに分岐したり、2本のファイバを伝搬する光を一本のファイバに合流する働きをする¹⁾。光合波分波器(WDM)は、伝送容量の拡大や双方向通信など光ファイバの有効利用が図れる複数の異なる波長の信号光を同時に伝送する波長多重伝送システム

において、送信側では複数の異なる波長の光を一本のファイバに結合させ、受信側において異なる波長の光を異なるファイバに分離する働きをする^{2,3)}。

波長依存性の無いものとして最近、広波長域カプラの要求が高まっている。これは複数の異なる波長の光を同じ比率で分岐結合する、分岐結合比率に波長依存性の無いカプラである。

本文ではこの様な光ファイバ型部品について報告する。

2. 応用例

現在カプラの実用化および実用化検討が行なわれている分野として以下の様なものがある。

(例1) 光ファイバ通信網の拡大に伴い、光ファイバ通信網を自動的に保守業務を行なう線路試験システムを導入する計画が進められている。この線路試験システムにおいて、主回線の光と光ファイバの損失増、断線等の故障箇所を検出するOTDRの線路監視用の光を分岐結合させる部品として光ファイバ型WDM、広波長域カプラが利用されている^{4,5)}。

(例2) 電力関係においては、情報化、都市機能の高度化に伴い信頼度の高い電力供給が要請されている。この様な背景から、線路閉閉装置の監視制御、負荷集中制御等を行なう配電自動化システム、送電線異常情報システム等の導入が検討されている。このシステムにおいて光ファイバと光ファイバカプラの組合せによるマルチドロップ方式の検討が行なわれている^{6,7)}。

(例3) 光ファイバ増幅器の出現により光映像分配システムが、注目を浴びている。光映像分配システムはCATVなどへの応用が期待でき、100チャンネルの光を分岐結合するスターカプラを使用した100チャンネル光FDM情報伝送実験が行なわれている⁸⁾。

(例4) 光ファイバの保守修理を行なう上で、電話局と工事現場で既設光ファイバを使って波長多重の双方向通信(通話)を行なうことができる光通話器などに、ファイバ型光合波分波器が使用されている。

(その他) マルチドロップ型光LANの光アクセッサ用、LEDなどの光源を安定化させるためのフィードバック用、双方向通信用、センサ用等。

この様に最近では、カプラを使用したシステムの実用化、または実用化の検討が盛んに行なわれている。

3. カプラの形態

カプラは、バルク型、導波路型、ファイバ型の3種類に分類でき、その代表例をTable 1に示す⁹⁾。バルク型のカプラは従来技術の応用であり、プリズムやレンズ、誘電体多層膜フィルタ等の組合せで構成させる。光ファイバを伝搬してきた光を一旦ファイバから出射させ、レンズやプリズム等を通過させた後、再度光ファイバに入射させるので、組み立てや軸調整が難しく反射光が生じ易い欠点がある¹⁰⁾。導波路型は透明絶縁基板の表面に屈折率のわずかに高い部分をつくり光導波路を形成するものである。導波路型は、低コスト化が期待できる事と、集積化が可能であるので現在各方面で研究開発が進んでいるが、光ファイバとの接続性を向上させる必要がある。光ファイバを使用した光ファイバ型カプラは、光ファイバ中を伝搬

している光を直接処理するので、低損失で信頼性の高いカプラが期待できる。またファイバとの接続が融着接続で低損失に行なうことができる。

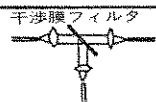
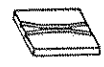
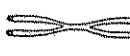
4. 結合原理

単一モード用光ファイバカプラ等のファイバ型部品は、エバネセント結合を利用して作製する。ファイバ内を伝搬する光は、光の電磁界がコアからクラッド領域に広がった状態(エバネセントフィールド)で伝搬する。Fig. 1は異なるV値を持つファイバを伝搬する光の電磁界の広がりを示す。V値は

$$V = 2\pi a(N_1^2 - N^2)^{1/2} / \lambda \dots \dots \dots (1)$$

と定義される。aはコア径、λは光の波長、N₁はコアの屈折率、Nはクラッドの屈折率、Xはコア

Table 1. カプラの形態

	構成例	特性
バルク型	干渉膜フィルタ 	従来技術
平面導波路型		小型 量産性
ファイバ型		温度安定性 接続性

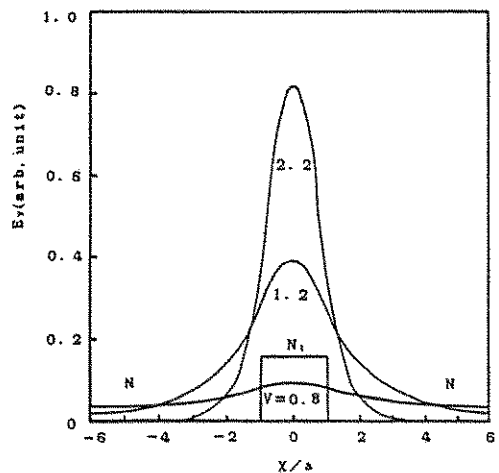


Fig. 1. 電磁界分布

中心からの距離である。V値が小さくなるに従い、電磁界分布はクラッドへ広がってくる。エバネセント結合は、平行に並んだ2つのコアの電磁界分布の広がり为重なり合うことにより光の結合現象が生じ、光のパワーが移動する (Fig. 2)¹¹⁾。電磁界の強度はコアから離れるに従い指数関数的に減少するので、結合を起こすためには電磁界分布を拡大し、ファイバのコア同士を互いの電磁界が重なり合うまで近づける必要がある。結合の割合は、コア間の距離、屈折率、コア径、相互作用長、波長で決定される。

5. 作製方法

カプラを作製する方法は、主として研磨法と融着延伸法がある。研磨法は Fig. 3 に示す様に石英基板に一定の曲率をもった溝を加工し、そこにファイバを埋め込む。ファイバを樹脂で固定し石英基板とファイバのクラッドを同時に研磨し、コアの数 μm のところまでクラッドを研磨する。この様にして研磨した2本のファイバを研磨した面を重ね合わせることによりエバネセント結合を起こさせる。石英基板を前後左右に移動させファイバの相対位置を変えることにより結合度の調整を行い接着剤で固定する。この方法は、偏波保持光ファイバカプラの作製に適している¹²⁾。

融着延伸法は Fig. 4 に示すように2本のファイバの側面を添わせ、加熱し融着する。次に加熱しながら融着部を延伸してテーパ部を形成する¹³⁾。延伸が進むにつれてコア径が減少し、V値が小さくなるので電磁界はクラッドへ広がっていくと共に、コアが接近するので2本のファイバを伝

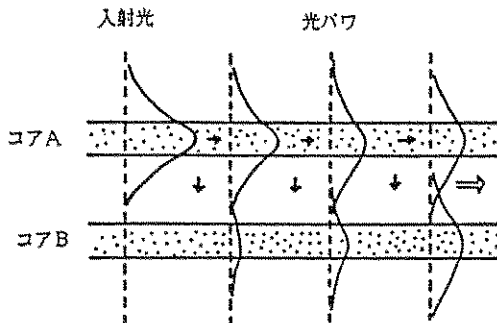


Fig. 2. 結合原理

搬する光の電磁界が重なり合い結合が生じる。延伸はモニタ光で結合の割合を測定しながら行い、所定の結合が得られたところで加熱延伸を停止する。Fig. 5 は延伸型と出射パワーの関係を示している。結合パワーは延伸長とともに増加し、その後周期的に増減する。この方法は作製時間が短く、低損失で安定性に優れているので研究開発が進み実用化段階にある。

本文では融着延伸法で作製した光ファイバカプラの特性について述べる。

6. 単一モードファイバカプラ

単一モードファイバカプラの特性を表わすパラメータを Fig. 6 に示す。カプラの過剰損失は、光がカプラの外へ失われる割合であり、重要な光学特性の一つである。融着延伸法は融着延伸部を滑らかにし、テーパ角度を小さくすることで過剰損失を低く抑えることができる。通信用に使用されている通常のファイバを使用して作製できるので、使用波長が $0.63 \mu\text{m}$ の短波長から $1.55 \mu\text{m}$ 帯の長波長用まで使用ファイバに合わせたカプラ

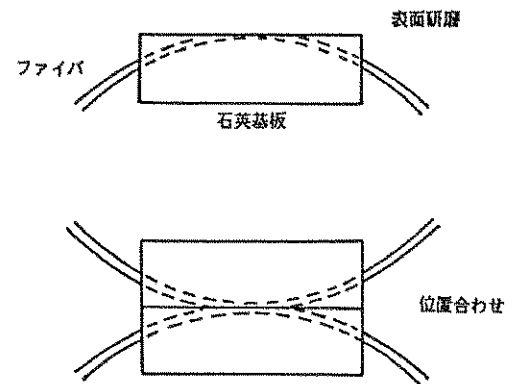


Fig. 3. 研磨法

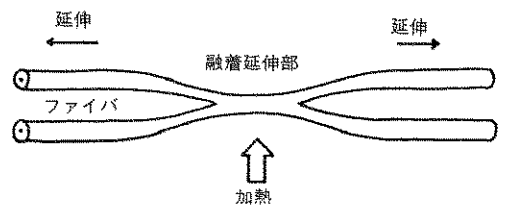


Fig. 4. 融着延伸法

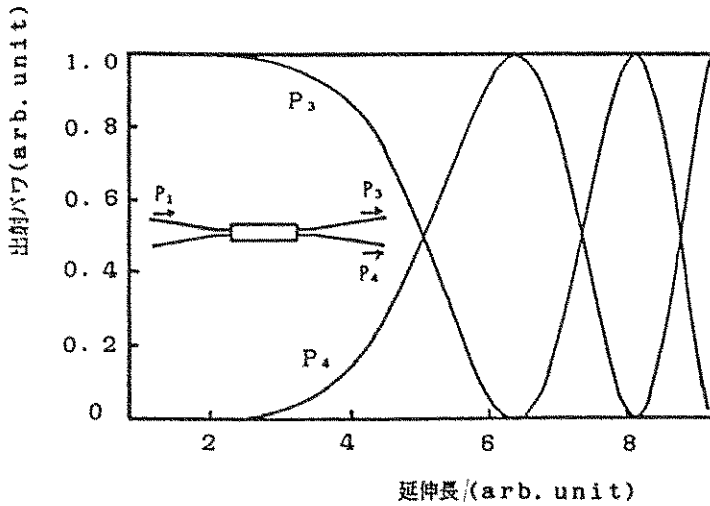
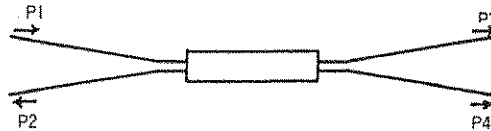


Fig. 5. 延伸長と出射パワの関係



$$\begin{aligned} \text{過剰損失} &= -10 \log [(P_3 + P_4) / P_1] && (\text{dB}) \\ \text{結合度} &= P_4 / (P_3 + P_4) \times 100 && (\%) \\ \text{方向性} &= 10 \log (P_2 / P_1) && (\text{dB}) \end{aligned}$$

Fig. 6. カブラのパラメータ

の作製ができる。低損失化が進み現在では0.1 dB以下の過剰損失が達成されている¹⁴⁾。また小型化も進み、外径寸法がφ3 mm×30 mmのものが作製されている。

光をモニターしながら作製するため、結合度の制御性は良好であり結合度が50%を目標に作製したカブラの結合度の平均値は50.5%であり、結合度が50±2%の範囲に80%のカブラが含まれる。結合度の温度依存性をFig. 7に示す。-60°C～140°C温度変化に対して結合度は安定していて、0.5%以下の変化である。また損失変動は0.1 dB以下である。-20°Cから70°Cの温度範囲で100サ

結合度、過剰損失の劣化は起こらなかった。

偏光した光を分岐結合する場合に、入射光の偏光状態が変化したときの結合度に与える影響を考慮する必要がある。Fig. 8に直線偏光に対する結合度の依存性を示す。光源にはLDを使用し、位相補償板、偏光子を通してカブラに直接偏光を入射させた。入射偏光角を0°から180°まで変化させたときの結合度の変動は0.5%以下である。

振動試験、衝撃試験などの機械特性について検討した結果¹⁵⁾では、振幅1.5 mmで周波数範囲が10から55 Hzで周期的に変化させたときの結合度と損失の変動をFig. 9に示す。結合度の変化は0.5%以下であり、損失の変動は0.1 dB以下であ

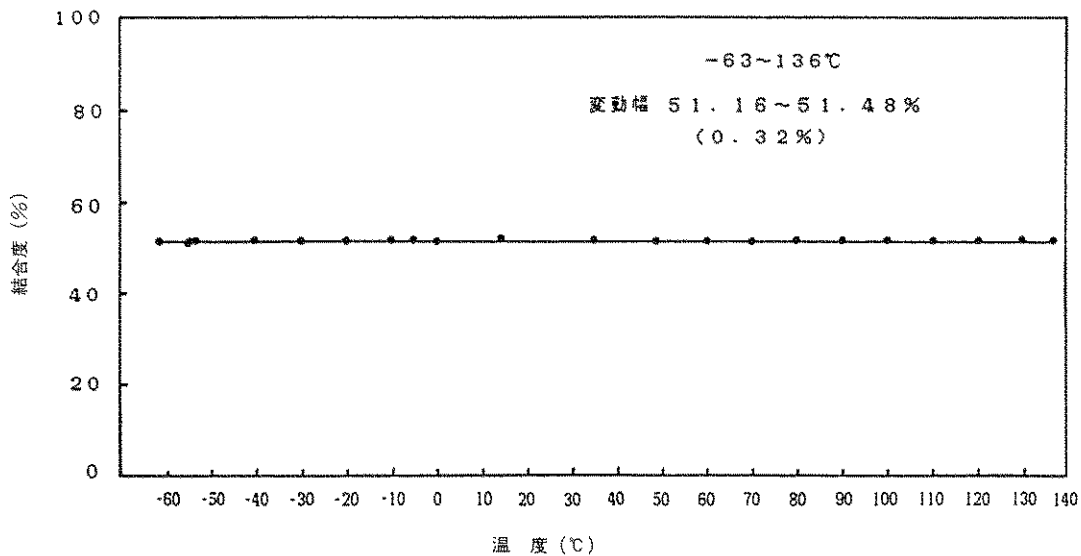


Fig. 7. 結合度の温度依存性

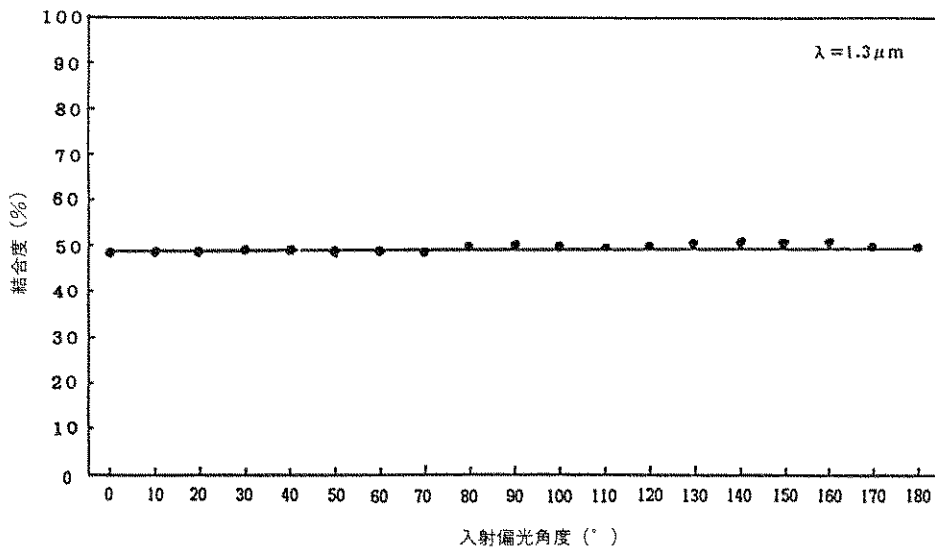


Fig. 8. 結合度の入射偏光角依存性

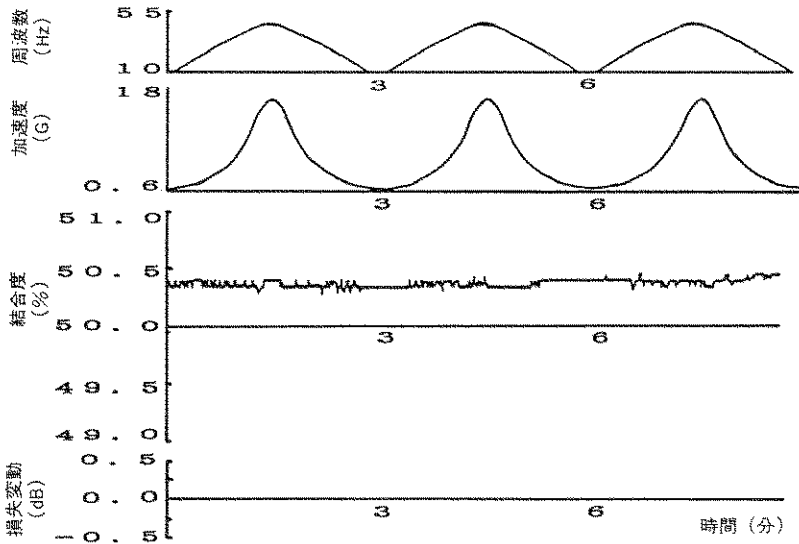


Fig. 9. 振動試験の結果

る。衝撃加速度のピーク値を 50 G、衝撃作用時間を 11 ms とした衝撃試験においても結合度の変動は 0.5% 以下、損失変動 0.1 dB 以下である。

7. 単一モードファイバ光合波分波器 (WDM)

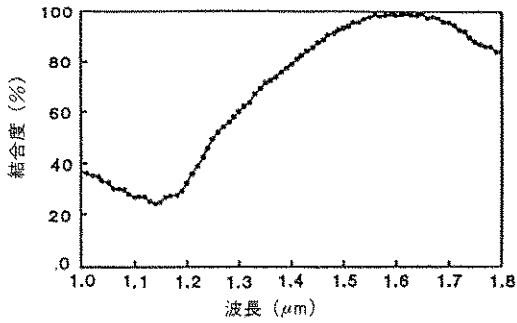
単一モードファイバ用のファイバ型光合波分波器は、カブラの結合度の波長依存性を利用して作製する。電磁界の重なりが大きく相互作用が強くなるほど、結合度が波長に対して周期的に変化する。そこで一つの波長で結合度が 0%、他の波長で 100% になるように調整することで光合波分波器の作製が可能となる^{2,16)}。作製方法及び構造は、基本的には単一モードファイバカブラと同様であるが、延伸条件を変える必要がある。延伸長を長くし融着延伸部を細くすることにより電磁界の重なりが大きくなり、結合度の波長依存性を異なる波長で結合度の山と谷にあわせる必要がある。結合度の波長依存性は延伸量によって変化する。Fig. 10 に 3 種類の延伸条件に対する結合度の波長依存性を示す。

(a) は延伸長が短かく波長 $1.3 \mu\text{m}$ で結合度が 50% になるように作製したカブラの波長特性である。(b) は (a) より延伸長を長くした場合であり、 $1.3 \mu\text{m}$ で結合度が 100%、 $1.55 \mu\text{m}$ で結合度が 0% に

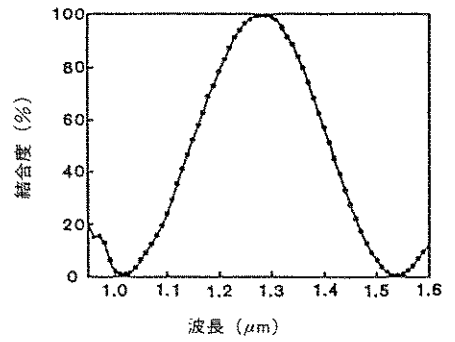
なっている。これは $1.3 \mu\text{m}$ と $1.55 \mu\text{m}$ の両波長を合波分波する光合波分波器として作用する^{17,18)}。このカブラのポート 1 より $1.3 \mu\text{m}$ と $1.55 \mu\text{m}$ の波長の光を入射させた場合、 $1.3 \mu\text{m}$ の光はポート 4 から出射し、 $1.55 \mu\text{m}$ の光はポート 3 から出射する。光合波分波器の重要なパラメータとして波長分離度がある。これはある波長における 2 本の出射ポートに分離されるパワーの比 ($10 \log P_4/P_3$) で表わされる。波長分離度は $1.3 \mu\text{m}$ と $1.55 \mu\text{m}$ に対して 20 dB 以上の値が得られている。過剰損失は、作製条件の適正化により 0.1 dB 以下が達成されている。

(c) はさらに延伸長を長くした場合の結合度の波長依存性であり、波長依存性が強く現われている。したがって (b) より波長間隔が狭い領域で合波分波が可能となる。このタイプのカブラは Er 添加ファイバを利用したファイバ増幅器において、励起光である $1.48 \mu\text{m}$ の光と信号光である $1.55 \mu\text{m}$ の光を合波する目的で作製された合波分波器であり、分波合波できる波長間隔は 70 nm である。延伸量が増加すると波長分離度の劣化が起こるが 16 dB 程度の波長分離度が得られている。過剰損失は 0.3 dB 以下のものが得られている。

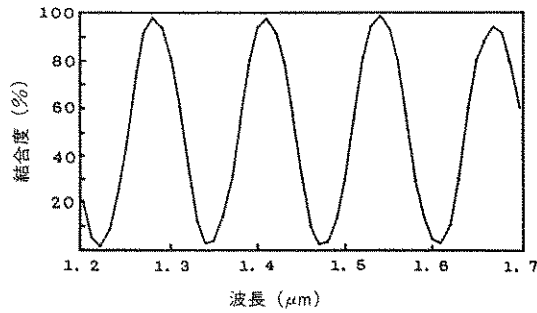
Fig. 11 に $1.3/1.55 \mu\text{m}$ 合波分波器の波長分離



(a) 延伸量 小



(b) 延伸量 中



(c) 延伸量 大

Fig. 10. 延伸量の違いによる結合度の波長依存性

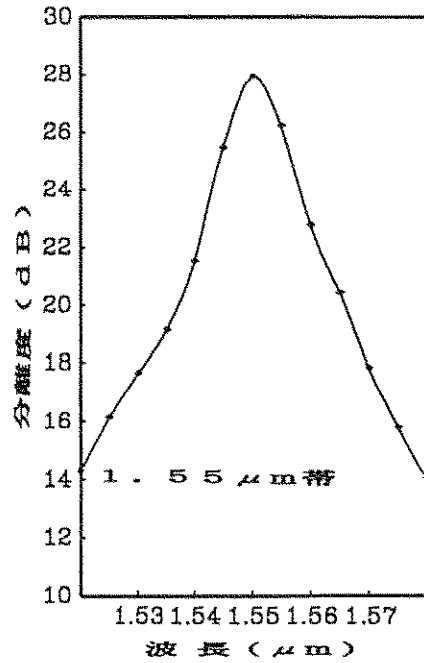
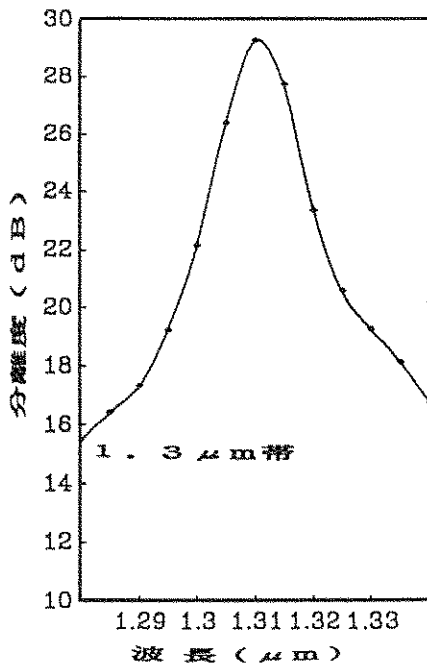


Fig. 11. 波長分離度の波長依存性

度の $1.3\ \mu\text{m}$ 帯と $1.55\ \mu\text{m}$ 帯の波長依存性を示す。20 dB の波長分離度が得られる波長幅は $1.3\ \mu\text{m}$ 帯で 30 nm, $1.55\ \mu\text{m}$ 帯で 28.5 nm となっている。Fig. 12 にヒートサイクル試験結果を示す。試験条件は、温度範囲が -20°C から 70°C で 1 サイクル 4 時間である。分離度の変動は 0.5 dB であり、損失変動は 0.1 dB 以下と安定して劣化する傾向は見られない。波長分離度の入射偏光角依存性を Fig. 13 に示す。入射偏光角が 180° 変化することによる分離度の変化は $1.3\ \mu\text{m}$, $1.55\ \mu\text{m}$ とも 2 dB 以下であり、入射偏光の状態が変化しても安定して 20 dB 以上の分離度が得られる。

分散シフトファイバの普及に伴い、分散シフトファイバを使用した光合波分波器が要求されるが、作製条件の適正化により単一モードファイバ用と同等の特性が得られている¹⁹⁾。

8. 広波長域カプラ (WIC)

先に述べた光合波分波器はカプラの波長依存性を利用したものであるが、波長の異なる光に対して同じ結合度で分岐結合する場合には、波長依存性の少ない広波長域カプラが必要となる。広波長

域カプラは、ファイバパラメータの異なる 2 本のファイバを用いて、最大結合度が 100% 以下になるようにし、最大結合度が得られる領域を使用波長範囲に合わせることでより作製することができる²⁰⁾。異なるファイバパラメータにはファイバ径、コア径、プロファイル、屈折率などがある。Fig. 14 に 2 種類の結合特性を示すカプラの結合度の波長依存性を示す²¹⁾。①は結合度が 50% のものであり、②は結合度が 20% のものである。波長依存性の平坦化が進み、結合度が 20% のものでは波長 $1.2\ \mu\text{m}$ から $1.65\ \mu\text{m}$ の範囲で結合度の変化は 18.5% から 21.4% で、 $20 \pm 1.5\%$ 以内である。この波長域における結合度は、最大結合度の 86% に納まっていることになる。Fig. 15 は透過損失の波長依存性を示す。スルーポートにおける透過損失の変動は 0.3 dB 程度であり、クロスポートの変動は 0.6 dB 程度である。過剰損失は $1.38\ \mu\text{m}$ で OH 基による損失増がみられるが 0.1 dB 程度の損失が得られている。

偏光特性、温度特性は単一モードファイバカプラと同じ特性が得られている。

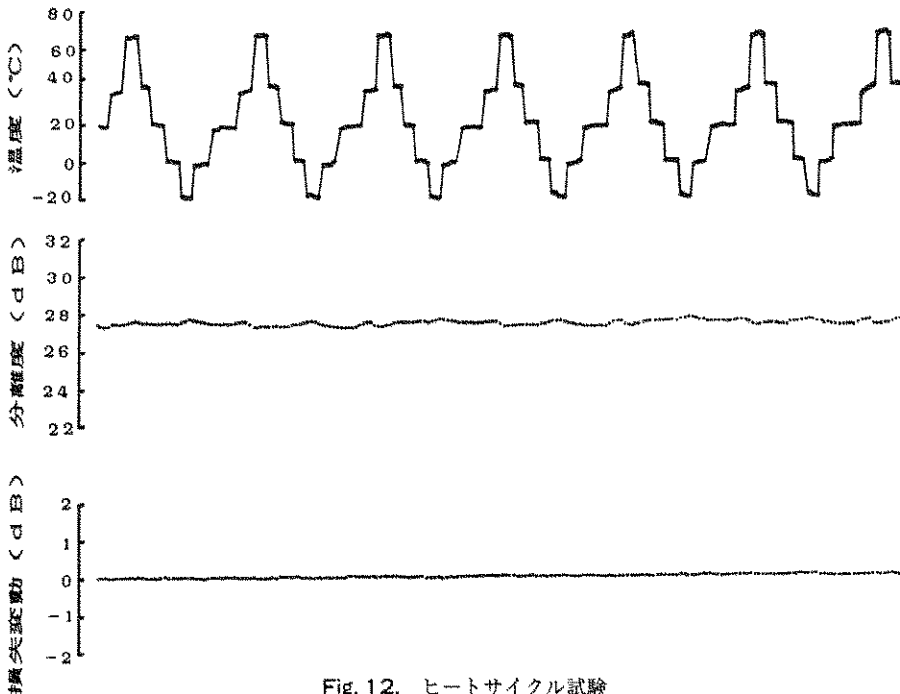


Fig. 12. ヒートサイクル試験

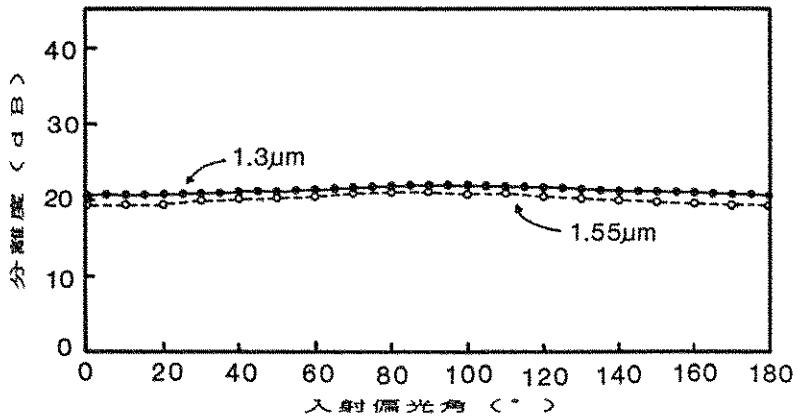


Fig. 13. 分離度の入射偏光角依存性

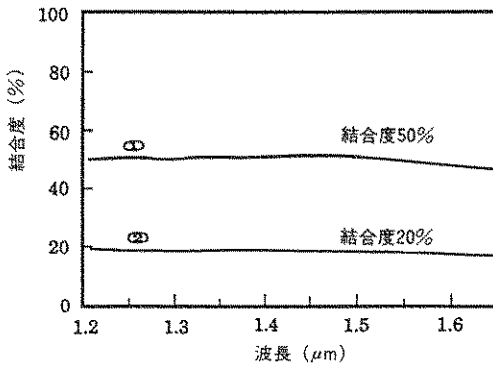


Fig. 14. 結合度の波長依存性

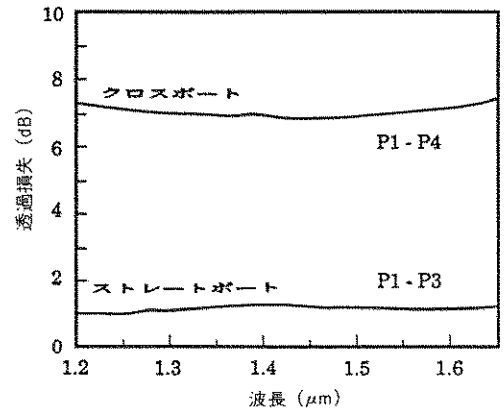


Fig. 15. 透過損失の波長依存性

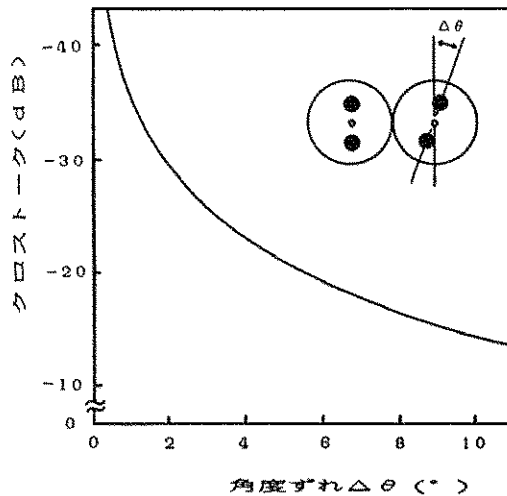


Fig. 16. クロストークと角度ずれの関係

9. 偏波保持光ファイバカプラ

光の偏波面を保持して伝送できる偏波保持光ファイバを使用したセンサなどでは使用されるカプラに偏波保持特性が要求される。偏波保持光ファイバカプラは、入射ポートの主軸 x 軸または y 軸に直線偏光を入射させた場合に、直線偏波を保持した状態で2つのファイバに分岐させる部品である。偏波保持特性を表わすクロストークは、入射した主軸と同じ主軸の出射パワーと直交する主軸の出射パワーの比で表わされる。ここでは PANDA ファイバ²²⁾を使用して作製した偏波保持光ファイバカプラ^{23,24)}について述べる。作製は融着延伸法で行なった。

融着延伸に先立ち、PANDA ファイバの応力付与部とコアの中心を通る主軸が2本のファイバで平行になるように配列する。2本のファイバの主軸の角度ずれがカプラのクロストーク特性を劣化させる。主軸の相対的な角度ずれを $\Delta\theta$ とすると結合光のクロストーク CT は

$$CT = 10 \log(\tan^2 \Delta\theta) \dots\dots\dots(2)$$

で与えられる。Fig. 16にクロストークと $\Delta\theta$ の関係を示す。クロストークを -20 dB 以下にするためには、主軸の角度ずれを 5.7° 以下にして融着する必要がある。

PANDA 型のファイバカプラは、コアに応力を与える応力付与部の屈折率が周囲のクラッドの屈

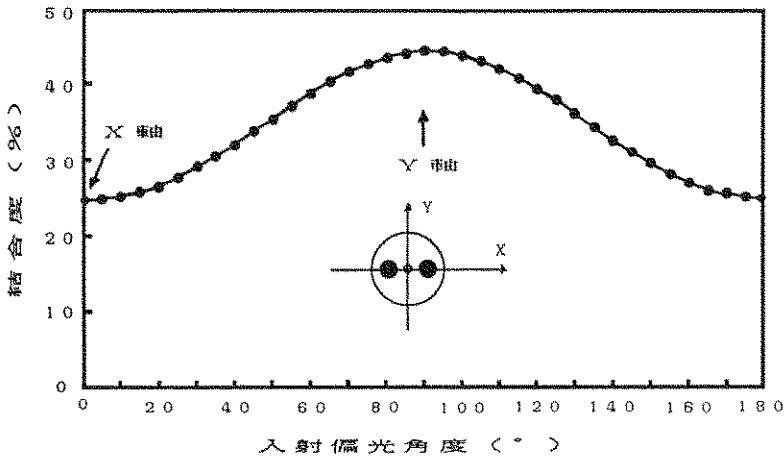


Fig. 17. 結合度の入射偏光角依存性

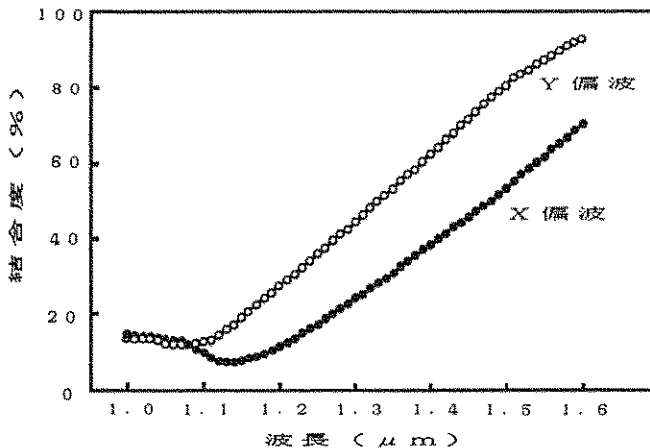


Fig. 18. 結合度の波長依存性

折率より低いので、損失増加を起こし易い。しかし応力付与部の屈折率をクラッドの屈折率と同じに補償する事により過剰損失を0.1 dB以下にする事ができる²⁴⁾。最近では応力付与部の屈折率を補償しなくても、延伸条件を適正化することにより低損失にできるようになってきた²⁵⁾。過剰損失が0.5 dB以下でクロストークが-20 dB以下のカップラも作製が可能である²⁶⁾。

Fig. 17 に PANDA 型カップラの結合度の入射偏光角依存性を示す。単一モードファイバカップラに比べて入射偏光角依存性が強く現われている。この様に x 偏波と y 偏波で結合度が異なるのは、複屈折により x 偏波と y 偏波で伝搬定数が異なるためである。Fig. 18 に x 偏波と y 偏波に対する結合度の波長依存性を示す。入射偏光角依存性と同様に、伝搬定数の違いから x 偏波と y 偏波で違った波長依存性を示す。温度特性は他のカップラと同様に安定している。

10. まとめ

以上述べたように光ファイバ通信の実用化に伴い、光部品の要求が高まっている。とくにファイバ型のカプラ、光合波分波器、広波長域カプラは重要な光部品である。融着延伸法によるカプラは、低損失で、耐環境特性に優れているので各方面で実用化されている。

参考文献

- 1) F. de Fornel, et al.: IEE proceeding, Vol. 131, No. 4, pp. 221~228, 1984
- 2) M. Dignonnet, et al.: Applied Optics, Vol. 22, No. 3, pp. 484~491, 1983
- 3) 三木ほか: 信学技報, CS 77-19, pp. 1~8, 1977
- 4) 富田ほか: 1990年春季信学全大, B-888, 1990
- 5) 高杉ほか: 1990年春季信学全大, B-889, 1990
- 6) 田中ほか: 1989年秋季信学全大, B-475, 1989
- 7) 二階堂ほか: 1989年秋季信学全大, B-474, 1989
- 8) H. Toba, et al.: OFC, PD1-1~PD1-4, 1990
- 9) 河内ほか: O/E, 11月, pp. 84~89, 1984
- 10) 柳井ほか: 光通信ハンドブック, pp. 314~331
- 11) 宮永ほか: 信学技報, OQE 82-60, pp. 23~30, 1982
- 12) T. Arikawa, et al.: OFS, pp. 480~483, 1988
- 13) B. S. Kawasaki, et al.: Applied Optics, Vol. 16, No. 7, pp. 1794~1795, 1977
- 14) 鈴木ほか: 信学技報, OQE88-22, pp. 71~78, 1988
- 15) 藤本ほか: 1989年秋季信学全大, C-211, 1989
- 16) C. W. Lawson, et al.: Electron. Lett., Vol. 20, pp. 963~964, 1984
- 17) 川上ほか: 昭和 62 年信学全大, 365, 1987
- 18) 川上ほか: 昭和 63, 第一回光波センシング技術研究会, pp. 179~186
- 19) 西出ほか: 1990年春季信学全大, C-198, 1990
- 20) D. B. Mortimore, et al.: Electron. Lett., Vol. 21, pp. 742, 1985
- 21) 実倉ほか: 1990年春季信学全大, C-280, 1990
- 22) Y. Sasaki et al.: J. Lightwave Technol., Vol. LT-4, No. 8, pp. 1097~1101, 1986
- 23) 河内: 信学技報, OQE 83-81, pp. 23~30, 1983
- 24) I. Yokohama, et al.: J. Lightwave Technol., Vol. LT-5, No. 7, pp. 910~915, 1987
- 25) 横浜ほか: 信学技報, OSC 88-10, pp. 7-12, 1988
- 26) 川上ほか: 昭和 63 年信学全大, C-555, 1988

[著者紹介]



川上 登 (かわかみ のぼる)

昭和 52 年 名古屋大学工学部原子核工学科卒業

昭和 54 年 名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻, 修士課程終了

昭和 57 年 藤倉電線株式会社入社, 以来, 光ファイバおよび光部品の研究開発に従事

現在, 同社光エレクトロニクス研究所主任研究員, 電子情報通信学会会員

[連絡先]

〒 285 千葉県佐倉市六崎 1140

藤倉電線株式会社光エレクトロニクス研究所

TEL 0434-82-2111

Abstract

An optical fiber coupler which can combine light from several fibers into a single fiber or split light from one fiber into two or more fibers is an important component in optical fiber communication systems, optical fiber sensors. The optical fiber coupler fabricated by a fused-elongation technique has the advantage of low excess loss, good thermal stability.