

光ファイバを用いたデバイス間結合の高効率化に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2012-05-01 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 増田, 重史 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.11501/3058425

国内外での幹線系光ファイバ通信の急速な進展に伴い，地域単位，オフィスビル単位の光通信の導入も活発化している。しかし，家庭までファイバで結ぶ通信では未だ課題が残っている。高品質な通信サービスの家庭までの普及・促進に役立つ単一モードファイバとデバイスとの高効率な結合手法に研究課題がある。本研究では著者の工夫した新しいデバイス間ファイバ結合法の理論とその実験による検証を行った。

多モードファイバでは高次モードを制限して擬似的定常モードを作る手法を最初に提案し，これを用いたレンズ結合特性のモード依存性やレンズ曲率半径依存特性を明確にしている。さらに光素子とファイバのアレイ結合でのクロストーク特性の低減法や光分波器などで新規な光結合手法をそれぞれ提案し，その有効性は理論と実験から検証している。

単一モードファイバでは規格化周波数が2以上で，コアとクラッドの屈折率勾配が6以上の単一モードファイバのモード分布はガウシアン分布で近似できると考えて，被測定単一モードファイバ間の2波長での結合効率から等価段階屈折率分布のコア径，開口率，遮断波長を求める解析法を著者が考案して本論文の一部としている。

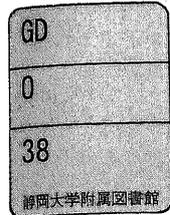
著者はこの解析法により構造パラメータを定義した単一モードファイバを4種類用いて，微細球レンズ式コネクタを工夫し理論解析と実験によりその有効性を証明した。本論レンズ式は，磨耗ゴミによるコア破壊や，軸ずれ結合時の劣悪な結合損失波長特性など，直接結合単一モードファイバコネクタの問題点を解決し，その上，着脱部精度が緩和できるなど優れた特長がある。

またガウシアン分布を仮定してファイバの端面間の距離と角度を変えることで連続的に大幅に減衰量が可変できる単一モードファイバ減衰器を考案して性能を確認した。さらに本論での単一モードファイバ方向性光結合器では光路と構成部品の機械的中心軸を傾けて，多重反射やファイバ端部反射を除去した。そして高効率なレンズやミラーの最適構成条件を明確にした。

偏波面保存ファイバレンズ式方向性結合器においてファイバ加工長0.7mmを考案評価し，方向性50dB以上，反射減衰量40dB以上で偏光度は25dB以上を確認した。この方向性結合器内半透明ミラー振動による位相変調型で外径寸法10cmの偏波保存ファイバジャイロでは回転角速度 $0.02^{\circ}/s \sim 20^{\circ}/s$ が安定に検知でき，使用光デバイスの有効性を確認した。

以上から光結合の高効率化に関する本研究の内容の妥当性と実用可能性が検証できた。これらの内容は将来性があり，工学的な意義がある。

0002515302 R



静岡大学 博士論文

光ファイバを用いたデバイス 間結合の高効率化に関する 研究

増田 重史

『目次』

頁

第1章 序論	3
1.1 研究の背景	3
1.2 研究の目的	6
第2章 ファイバ接続での課題	9
2.1 多モードファイバ接続での問題点	10
2.1.1 多モードファイバの定常モード	11
2.1.2 定常モードの作成法	13
2.2 単一モードファイバ接続での問題点	15
2.2.1 単一モードファイバ・パラメータ測定法の検討	15
2.3 ファイバ結合の問題点 — 反射光についての考察 —	23
2.4 まとめ — ファイバ結合の考察 —	27
第3章 光結合法の考察	28
3.1 ファイバのレンズ光結合特性の検討	28
3.1.1 多モードファイバのらせん光線の検討	28
3.1.2 別の手法による多モードファイバのらせん光線の検討	30
3.2 多モードファイバのレンズ結合の検討	31
3.2.1 光結合とファイバ遠視野像の関係	31

3.2.2	まとめ —多モードファイバのレンズ結合の検討—	35
3.3	単一モードファイバのレンズ結合の検討	36
3.4	デバイス間光結合法の考察	50
3.4.1	発光ダイオードとの光結合に関する考察	50
3.4.2	偏波保存ファイバとレーザダイオードとのレンズ結合法の検討	50
3.4.3	アレイ型光結合の検討	54
3.4.4	ファイバと PINダイオードのアレイ型結合の検討	55
3.5	まとめ — ファイバのレンズ結合法 工学的価値 —	58
	— 光デバイス結合法 工学的価値 —	58
第4章	ファイバ結合光デバイスへの応用	60
4.1	ファイバ型デバイス結合の課題	60
4.1.1	単一モードファイバ光可変減衰器	60
4.2	ファイバ型デバイスの提案	65
4.2.1	多モードファイバ分波器	65
4.2.2	単一モードファイバ光方向性結合器	69
4.2.3	偏波面保存単一モードファイバ光方向性結合器	76
4.3	まとめ — ファイバ型デバイス—	81
第5章	ファイバセンサへの応用	82
5.1	角速度センサ	82
5.2	まとめ — ファイバセンサと光通信ネットワーク —	90
第6章	結論	91
謝辞		92
・	『本論に関係する著者の発表』	93
・	『各章の参考論文』	96
・	<<本論文と筆者外部発表済論文との対応一覧>>	104
・	『本論分関係の著者の特許』	106

第 1 章 序論

本論では広帯域 ISDN・光加入者網で必要不可欠な高効率光結合法について検討を行う。内容は高いコストパフォーマンスを目標とした高効率結合法の研究であり、又その特性解析手法にも工夫を加えて理論と実験から検討し有効性を確認する。

1. 1 研究の背景 〔添字¹⁾ ; 8 頁参照〕

ファイバ通信方式は実用化され、幹線系では幅広く利用されているが、しかし光通信サービスの在宅加入者への普及を図る上では未だ課題が残っている状況がある。在宅者向けでは光接続、及び光基本回路デバイス（光分岐器、光方向性結合器、光分波器、光合波器、レーザ／ファイバ結合器など）の基本となる光技術に課題がある。特にファイバや光デバイス間の接続は複雑である。同軸ケーブルに比べファイバ芯線取り扱いは顕微鏡的な軸合わせ作業を必要とする。ファイバコネクタ（直接結合）ではファイバ端面突き当て力等着脱操作時の応力を規定する必要がある他、着脱時に発生するプラグフェルール側面の摩耗ゴミの掃除やお互いに突き当て結合するファイバ端面の清掃作業等は特殊で難しい。このようなファイバ直接結合操作は今までは敷設者など玄人に限定されており、一般加入者には難しく問題がある。

また、光基本回路の構成に於いて、ファイバ端面部をガラス片や素子面に光学コンタクトを目的として接着する場合（ファイバ軸方向の精密固定は難しく）温度等環境変化で光学コンタクトが破壊されて空隙が生じ、光多重反射で再現性が悪くなる問題がある。

以上の技術課題を取り扱うため、ファイバとデバイスとの光結合効率などを理論的に厳密に導き出すことは重要であるが、その計算や理論結果から最適な光結合法の具体的な仕組みを解析する目的には不向きであり、この解析用の扱いやすい理論手法の検討やその実験的な確認が必要であった。

本論では各種光結合の特性について理論計算と実験から検討を行っている。この中では理論計算を簡略化するために単一モードファイバ光結合ではガウシアンモード分布を仮定し、また多モードファイバ光結合では子午面内の光線を仮定しているが、これら伝搬モード分布やモード数について考察するに必要なファイバ特性方程式は次式で示される^{〔1. 1〕}～〔1. 6〕、〔1. 10〕；

$$u \{ J_{L-1}(u) / J_L(u) \} = -w \{ K_{L-1}(w) / K(w) \}. \quad (1.1)$$

ここで J, K はそれぞれベッセル関数と変形ベッセル関数,

$$\begin{aligned} v^2 &= u^2 + w^2, \\ &= 2 a^2 \kappa^2 n_c^2 \Delta, \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} v &= a \kappa (n_c^2 - n^2)^{1/2}, \\ &= a \kappa n_c (2 \Delta)^{1/2}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$u^2 = (\kappa^2 n_c^2 - \beta^2) a^2, \quad (1.4)$$

$$w^2 = (\beta^2 - \kappa^2 n^2) a^2, \quad (1.5)$$

$$\Delta = (n_c^2 - n^2) / (2n^2),$$

$\Delta \ll 1$ と仮定すると,

$$\Delta \approx (n_c - n) / n. \quad (1.6)$$

なお v はファイバの正規化周波数, u はコア内正規化伝搬定数,

w はクラッド内正規化減衰定数, a はファイバのコア半径,

Δ はコアとクラッドの比屈折率差, n_c はコア, n はクラッドの屈折率。

光波長 $0.8 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$ 使用の公衆通信用ファイバの比屈折率差 $\Delta \ll 1$ と小さい。そして $\Delta \ll 1$ の場合には主な横方向電界は一方向に偏光している。この場合、特性方程式は LP モード (Linearly Polarized Mode) で近似的に表すことが可能となる^[11]。LP モードの特性方程式は(1.3)式を用いさらに(1.1)式の両辺を v で微分して以下で表せる^[11, 21];

$$d u / d v = (u / v) [1 - \kappa_L (w)], \quad (1.7)$$

ただし,

$$\kappa_L (w) = K_1^2 (w) / [K_{L-1} (w) K_{L+1} (w)]. \quad (1.8)$$

すなわち TE, TM, EH, HE の各モードは (とくに遮断周波数 v_c 付近やこの周波数から充分離れた v 値では) 光ファイバ断面内の電界強度分布がほぼ LP モードとなり, 以下に示す如く縮退した各モードを近似的に LP_{Lm} モードで表現できる。

ベッセル関数 $J_0, J_1 (= -J_{-1})$ の根は LP_{0m} , LP_{Lm} モードのそれぞれの v_c 値 (遮断周波数値) を示し, それぞれ縮退している。 LP_{Lm} モードには TE_{L-1m} , TM_{L-1m} , $HE_{L+1m} \times 2$ の合わせて 2~4 種のモードが縮退している。

多モードファイバの Δ や a 値は単一モードファイバより大きく、 v 値は桁違いに大きい。この v 値以内に v_c が存在するLPモードの数は桁違いに多くなる。それで多モードファイバには高次モードを含む多数の可伝搬モードが存在する事になる。

伝搬モード毎の位相の遅延量差（モード分散）は正規化変数 $b(v)$ で下記のごとく示される^(1.11)；

$$\begin{aligned} b(v) &= 1 - (u/v)^2, \\ &= w^2 / (u^2 + w^2), \\ &= ((\beta^2 / \kappa^2) - n^2) / (n_c^2 - n^2). \end{aligned} \quad (1.9)$$

$\Delta \ll 1$ の条件下では、

$$b(v) \cong (\beta / \kappa - n) / (n_c - n), \quad (1.10)$$

$$0 < b(v) < 1, \quad (1.11)$$

である。それで (1.6), (1.11) 式をもちいて、

$$\begin{aligned} \beta &= n \kappa (b(v) \Delta + 1) = n \kappa (1 + \Delta - \Delta (u^2 / v^2)), \\ &\cong \kappa (b(v) (n_c - n) + n). \end{aligned} \quad (1.12)$$

となる。

結論として (1.11), (1.12) 式から $\kappa n < \beta < \kappa n_c$ となる。この条件では (1.5) 式から w は正の実数であり、ファイバのクラッド内の電磁界は指数関数的に減衰し、コアに電磁界のパワーが主に集まっている。このことからモード分布は；

『遮断周波数 v_c では (1.12) 式より $b(v_c) = 0$ で $\kappa n = \beta$ である。又 (1.5) 式より $w = 0$ となるのでクラッド内電磁界の減衰は無く、電磁界エネルギーはコアに閉じ込められなくなる（ファイバの光導波機能がなくなる）。 v_c 近傍の v 値ではファイバコアよりクラッドへ光が漏れ出し易くなっている事が判る。また v_c から十分離れた v 値では、 $b(v) \cong 1$ であり、(1.5), (1.12) 式から $w = a \kappa (n_c^2 - n^2)^{1/2}$ は正の最大値の実数である。電磁界エネルギーはコアに十分に閉じ込められた状況となる。

すなわち $b(v)$ が 1 に近づくにつれてファイバコア内に光パワーが集中する。

光ファイバのコアへの電磁界の閉じ込め割合は (1.11) 式から判るように v 値に依存し、モード分布特性はファイバの a , Δ と使用光波長 λ に依存して変化する。すなわち 複雑なファイバ構造パラメータが簡略に表現できる可能性があり、確認の必要がある。』

モード数については；

『LP_{L m}モードでの特定のv値で存在するファイバの可伝搬モード数はLP_{L m}モード特性式から $v < 2.405$ ではLP₀₁だけとなり、単一モード（縮退度2）となる。このモードはLP₀₁であり、LP₀₁モードにはHE₁₁モードの二種類が縮退しているが単一モードと見なして通常取り扱っている。LP₀₁モードの近似根は；

$$u(v) = (1 + 2^{1/2})v / [1 + (4 + v^4)^{1/4}] \quad (1.13)$$

である。

単一モードはLP₀₁モードで表現でき、ガウシアンパワー分布として近似可能となる [1.2], [1.5], [1.9], [1.10], [1.11], [1.12], [1.13]*, [1.14]。単一モードファイバ結合では、ガウシアン近似による解析手法の妥当性を実験確認する必要がある。

またv値の大きい多モードファイバでは可伝搬モードはLP₀₁~LP_{L m}モードで多数となる。すべての可伝搬モードに光入射をおこなった場合（一様励振）には、 $b \approx 0$ で遮断周波数に近い高次モードが多数含まれることになる。しかし、高次モードを減らして光入射結合する事でファイバコアの屈折率や形状の微細な変差、マイクロベンドや外乱による光損失を軽減できることが推察できる。そして多モードファイバの光結合特性を簡略に推察評価するためには、子午光線近似による計算法の妥当性の確認が必要である。』

1. 2 研究の目的

本論では結合損失の解析と実験評価を容易にするため、下記の仮説を立てて理論計算と実験検討を行っている。即ち単一モードファイバ光結合ではガウシアンモード分布を仮定して理論検討を行い [2]*, [19]*, また多モードファイバ結合では高次モードほど開口数が大きいものと仮定し子午面内の光線を活用して検討している [10]*, [11]*。

第2章では以上の仮定の基にファイバ評価・測定手法を検討し、確認する。すなわち、多モードファイバでは多モードの調整手法を子午光線近似を用いて検討し、単一モードファイバでは著者独創のガウシアン近似に基づいた簡易なファイバ構造パラメータの評価・測定手法を示す [2]*, [19]*。また光反射についても著者独創の検討を加える。

第3章では多モードファイバのレンズ結合及び、単一モードファイバの微細レンズ結合

手法について、著者工夫の解析手法とその実験結果について検証する。さらに1 μ m以内の超精密ファイバ接続の問題点を明らかにし、その一緩和手段の理論的考察と関連実験結果を示す。次に著者提案のファイバ接続手段を用いた半導体レーザ^{[23]*}、受光ダイオード、アレイ^{[21]*}デバイス光結合法の考察を行い、光デバイスとファイバ間結合に関する検討結果を示し、本論結合法の有用性や著者提案の解析手法の妥当性を実験から確認する。

本論の単一モードファイバ結合では上で述べた直接結合の問題点が解決できる低損失で広帯域なレンズ結合法の提案とその結合損失の解析検討を行い実験でその妥当性を確認する^{[3]*, [11]*, [12]*, [13]*, [16]*, [18]*}。すなわち微小焦点距離のレンズを用いることで単一モードファイバ結合時の着脱部分の精度が緩和できる事を示し、単一モードファイバ着脱接続での難点が解決できる事を示す。ここでは球レンズの各種収差の単一モードファイバ光結合損失に与える影響を理論的に検討してファイバ直接結合と同等の低損失光結合が(着脱部分の精度を緩和した状態で)得られる事を示し、実験でその内容を確認する。

この中で光通信で最も基本となる単一モードファイバ結合において著者独創のレンズ結合手法が工学的な意義がある事を実証する。

なお単一モードファイバ直接結合コネクタの低損失化のためにこのコア半径(or モードフィールド半径)は直接結合コネクタの着脱部機械精度を考慮して大きめに選定されている。しかし微小コア径であっても本論の手法による最適な微細焦点距離のレンズを選択して用いれば結合損失への影響は少ない。この妥当性を確認する。

この単一モードファイバのレンズ結合ではGRIN-RODレンズ^[1, 15]など多種のレンズが(微細焦点距離が実現できれば)利用できる筈であるがしかし、微小焦点距離レンズで再現性が良く、しかも大量生産のできる精密なレンズは球レンズを除いて他には無いのが現状である。さらに球レンズではレンズの倒れ(傾角誤差)が無いので超精密な組立が可能となる。そこで本論では球レンズを用いて実現している。

また光方向性結合器^{[4]*, [5]*, [7]* [20]*, [24]*}など本論の主な光回路ではファイバ軸方向の精密固定の必要がない(光学コンタクトの無い)構成になっている。すなわちファイバの結合部分にレンズを介入させ、レンズとの間に空隙を始めから儲けている。そのため、光多重反射などの上記問題が予め回避でき、再現性が得られる事を理論と実験で確認している。むろんコヒーレント光発生素子^{[23]*}や回路^{[28]*}では不要な反射戻り光によ

る干渉^{[25]*, [28]*}の除去, 回避が重要である。本論で提案した光デバイスはすべてこれらを考慮しており, 回避可能な仕組みとしている。

以上が本研究の主な目的である。

そして3章までに述べた光結合手法の応用の実例を4章と5章で述べる。すなわち本論光結合法を応用して光基本回路デバイスやファイバシステムに適用した新規な方式を提案し実現して実験し, これらの内容から, 本論独自の結合法や解析手法の有効性を応用面からも再確認する^{[1]*, [2]*, [3]*, [4]*, [5]*, [6]*, [7]*, [14]*, [20]*, [22]*, [23]*, [27]*}。

第4章では光加入者通信で必要不可欠となる光回路デバイスを提案する。

光減衰器^{[1]*}, 光分波器^{[14]*, [15]*}, 光方向性結合器^{[4]*, [5]*, [7]*, [20]*, [24]*}の各々について新しい方式を提案して考察する。さらにそれらの実験結果を示しその妥当性を明らかにする。

道路情報や移動体の位置情報検知はパーソナル通信網をダイナミックに発展させるのに役立つと思われる。そして広帯域通信の進展, ファイバの家庭への導入を促進する。そこで第5章では必要となるファイバ角速度センサ^{[6]*, [7]*, [22]*, [27]*}を探り上げて考察し, 前章までに得られた成果を踏まえ試作して検証した。

第6章に本研究の結論を示した。謝辞に続き, 文末には参考論文, 特許を記した。

『本論に関係する著者の発表』および『各章参考論文』の添字^[1]について

^[2]* etc 筆者筆頭の参考論文 巻末『本論に関係する著者の発表』参照

^[1.15] 章別参考論文 [章 . 論文番号] 巻末『各章の参考論文』参照

* 印 筆者筆頭の参考論文

第 2 章

ファイバ接続での課題

空中伝搬の光は航空標識や各種交通信号など、近距離の場合に手軽な通信手段として役立っている。ファイバ通信は 1970年にコーニング社のMaurer, Kapron, Keckらが伝搬損失20 dB/kmのファイバを報告してから、研究が急速に立ち上がり、半導体レーザと並行して開発された。ファイバには、多モードと単一モードがある。多モードファイバは最初の実用化され、現在は近距離・低速通信用として使用されている。多モードファイバは光接続精度が緩く光デバイスは安くできる。現在、通信用多モードファイバとして互換性を確保するために国際標準の構造パラメータ仕様が定められている(表(2.1) 参照)。

表(2.1) ファイバの仕様CCITT G651, G652

ファイバの種類	GI多モードファイバ	単一モードファイバ
	(GI:グレーデドインデクス)	
使用光波長	a) 0.85 μm b) 1.30 μm	a) 1.30 μm b) 1.55 μm
コア径 2 a	50 $\mu\text{m} \pm 6\%$	—————
モードフィールド径	—————	a) 9~10 $\mu\text{m} \pm 10\%$
クラッド外径 (μm)	125 $\mu\text{m} \pm 2.4\%$	125 $\mu\text{m} \pm 2.4\%$
遮断波長 (μm)	—————	1.1~1.28
偏芯率/ 偏芯量	6% 以下	0.5~3.0 μm
コア非円率	6% 以下	—————
クラッド非円率	2% 以下	2% 以下
開口数(NA)	a) 0.18~0.24 \pm 0.02 b) 0.15~0.30 \pm 0.02	モードフィールド径と遮断波長を指定すればNAの指定は不要
比屈折率差 Δ	0.015	—————
特 性	伝搬損失 (dB/km) \sim 1.3	a) \sim 0.35 , b) \sim 0.2
	帯域幅 \sim 0.2 Gb/s	Tb /s \sim

多モードファイバでは表(2.1)の構造パラメータ仕様だけでは互換性を確保できない。何故ならば、接続損失や伝搬特性はモード分布に依存した特性になり、再現性が良くないためである。多モードファイバでは伝搬に伴い、コアの屈折率変動やファイバ曲げ、接続などで頻繁にモード変換するのが原因である。

多モードファイバ結合損失評価時には結合部分に於けるモード分布を予め定めておく必要がある。そこで 2.1 の 2.1.1 でモード分布の仕組みを吟味してこれを踏まえ 2.1.2 では定常モード分布の作成法について述べる。

単一モードファイバ(偏波を保存しないもの)は中長距離・高速通信用として実用化されており、幹線系への大量使用によりコストダウンされつつある。最近では近距離用や企業内用など光加入者につながる方向で使用され始めている。

国際標準仕様の構造パラメータを持つ単一モードファイバであれば互換性が保たれる。そこで単一モードファイバでは伝搬特性を規定する構造パラメータを測定できる事は意義がある。そこで2.2の2.2.1ではこの測定法について述べる。

なお表(2.1)からファイバコネクタではファイバコアとクラッドの偏芯量として少なくとも $0.5 \mu\text{m}$ を考慮に入れて光コネクタを設計する必要がある事が確認できる。

2.1 多モードファイバ接続 での問題点

多モードファイバは、広帯域・低損失ではないが、単一モードファイバにはない特性と将来性も備えている。たとえば光パワー伝送や、漏洩光利用のイルミネーションや光センサへの応用が考えられる。近未来には加入者宅内光伝送用としての適用可能性があるが、接続法は今後の課題である。

多モードファイバ接続損失はファイバの特性だけでは決まらない。ファイバに入射結合した高次モードの励振割合によっても大きく影響を受ける。ファイバ同志をコネクタで光結合する場合にコアの軸ずれや形状変化があると光が漏れだし、高次モードの欠落が生ずる。高次モードを多く含む多モードファイバの伝送損失やコネクタ結合損失は大きくなる。

また、高次モードを含まない場合には、伝送損失やコネクタ結合損失は見掛け上小さくなる。それで結合損失値から光コネクタの精度を評価できない問題点がある^[2.1]。また、多モードファイバでは伝搬に伴い、モード変換・モード間の干渉によりモード毎に分配されている光パワーの割合が徐々に変化する。ファイバ分散遅延特性はモード分布に

よって変化するので問題がある。

2.1.1 多モードファイバの定常モード

多モードファイバを長距離伝搬させて高次モードを適度に欠落させた所謂定常モード分布をもちいると光結合損失値から光コネクタの精度が評価できる。また、分散遅延特性が(伝送距離)^{1/2}に依存するため分散遅延特性が予測できるようになる^[2, 21]。多モードファイバ通信では、この定常モードを利用することが必要となる。

但しこの定常モードもその後の接続での軸ずれやファイバの曲がりにより再び高次モードへの変換が起こり得る。

本論では多モードファイバ通信システム設計に必要な不可欠で重要な特性評価用のモード分布の作成法から検討する。

伝送帯域特性や伝搬損失が決定されるため重要なファイバ構造パラメータはコア半径:a (or モードフィールド径), ファイバコアの屈折率分布:n(r), 開口数:NA である。

ステップ屈折率(SI)型ファイバと仮定すると、コア中心の屈折率が n_c , クラッドの屈折率を n とした時のNA値は、ファイバ端面での最大入射角 θ_m としてファイバ内に光が閉じ込められる臨界角 ($\pi/2 - \theta_c$) から求まる。従ってNA値が子午光線近似で簡略に定義できる。

$$\sin \theta_m = n_c \sin \theta_c, \quad (2.1)$$

$$\sin(90 - \theta_c) = n / n_c, \quad (2.2)$$

$$\text{上式より} \quad (\sin \theta_m)^2 = n_c^2 - n^2, \quad (2.3)$$

$$\text{そして} \quad \text{NA} = \sin \theta_m = n_c (2\Delta)^{1/2}. \quad (2.4)$$

なお、 α 乗屈折率分布のGI(グレーデドインデクス)ファイバではコアの屈折率 $n(r)$ となり半径方向の位置 r に依存した NA となる。但し、

$$\begin{aligned} n(r) &= n_c (1 - 2\Delta(r/a)^\alpha)^{1/2} & 0 \leq r \leq a, \\ n(r) &= n_c (1 - 2\Delta)^{1/2} & a \leq r. \end{aligned} \quad (2.5)$$

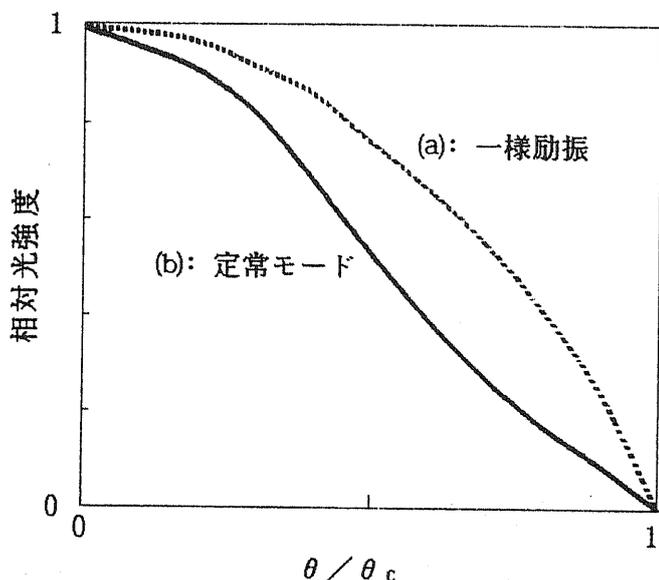
高次モードは(1.10)式の $b \approx 0$ でファイバコア内に光が閉じ込められにくい状況であり、ファイバ内伝搬光が臨界角 ($\pi/2 - \theta_c$) に近く光が閉じ込められにくい状態を意味する。ファイバ出射光で見ると高次モードほど大きな角度を持って出射するものと予想される。なおこの検討ではらせん光線を考慮していない。しかし光デバイスとファイバの接続評価では本論検討内容でも十分利用できることを後章で証明する。

多モードファイバにインコヒーレント光を高NAレンズを用いて入射結合する場合にはほ

ばすべてのモードが励振される（一様励振）。その時のモード数 N は一般に下式で示す事が可能^{[2.3], [2.4], [2.5]}；

$$\begin{aligned} \text{GI では } N &\approx 2 (NA / (\lambda / \pi a))^2 \alpha / (\alpha + 2), \\ &\approx v^2 \alpha / (2 (\alpha + 2)), \end{aligned}$$

$$\text{SI では } \alpha = \infty \text{ として, } N \approx v^2 / 2. \quad (2.6)$$



図(2.1) GIファイバの遠視野像(実測)

(GIファイバ: $NA = 0.2$, $\alpha = 2$, $a = 30 \mu\text{m}$)

そして伝搬可能なモード数が開口数 NA 又は伝搬光波の規格化周波数 v の二乗に比例するので、高次モードほど規格化周波数は高くなる事が判明する。そこで仮にファイバ端面から外に出射する光波を考えると高次モードほどファイバ軸に対して大きな角度 θ を成して出射する。あるいは NA 又は v の二乗に比例して N が増加している事から高次モードほどファイバ軸に対して大きな角度 θ を成して出射すると言える。図(2.1)の(a)(b)はGIファイバの一般的な遠視野像であり、近距離伝搬での一様

励振時の遠視野像(図(2.1)の(a))は高次モードに対応した大きな出射角度の光パワー成分が多い。そして、ファイバ長距離伝搬後の定常モード遠視野像(図(2.1)の(b))は大きい角度の光パワー成分が減少している。伝搬モードは高次になるほどファイバ出射角度が大きくなり、ファイバから円環状に放出されること^[1.3]が図(2.1)からも確認できる。

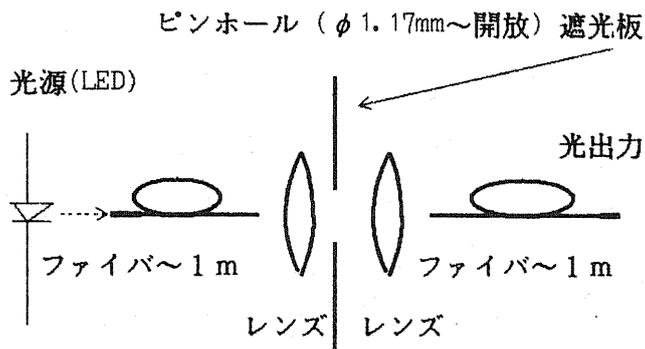
以上の結果は子午光線に特有の特徴である。そこで本論では多モードファイバ光を子午面内光線と仮定して検討し、その妥当性を確認する。

多モードファイバ長距離伝搬後はその後の伝搬距離に影響されず接続損失がほぼ一定になる^[1.4]。この事実と図(2.1)から判るように接続特性には高次モードが大きく影響していると考えられる。以上の考えに従って以下の装置を考案した。すなわち多モード

ファイバでは接続直前のモード分布差によりファイバ接続特性に差がある。これを避けるため、ファイバを長距離伝搬した後の定常モード分布を擬似的に作る装置である。

なおファイバ同志の接続特性評価や光デバイスの接続評価をする場合には、定常モード分布に到達する長尺ファイバを光源と被測定評価物の間に挿入し、被評価物の前後（入・出力）の光パワー比を測定し、評価する手法がある。しかし多モードファイバの特性が改善されると、定常モード分布に到達するファイバ長は数kmと長くなり、接続評価装置として被測定ファイバと同種の長尺ファイバを別に用意するのは困難で問題がある。

2.1.2 定常モードの作成法



図(2.2) モード調整器^{[2.18]*}

ファイバから出射する光をコンフォーカル配列した二枚のレンズを介してファイバを結合する図(2.2)の構成(モード調整器)で考える。

その原理は以下のようなものである。一般に収束レンズにおいて、焦点近傍からレンズ光軸に対して角度をもっ

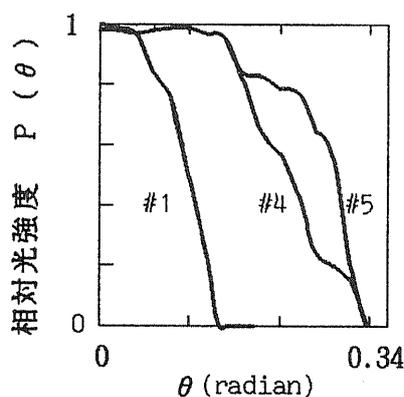
て出射する光波はその出射角度の大きさに比例してレンズ通過直後には光軸から離れた場所を通過する。すなわちファイバから角度 θ で出射する光は一枚目のレンズを介するとレンズの光軸から距離 D ($D = \text{レンズの焦点距離} \times \theta$)だけ離れた場所を通過する。

子午面光線と仮定した場合には、ファイバ端をレンズ焦点近傍に置いた場合には高次モードほどレンズ通過直後には光学系の中心軸から離れた場所を通過する。レンズ通過後にはファイバ伝搬モードは中心軸を中心にほぼ円環状に低次モードから高次モードへと拡がっていると考えられるので、この場所にピンホール付遮光板を設けることで高次モードを遮断できる。ピンホール径を選択しピンホール通過光波を他のファイバに正確に結合すれば長距離伝搬後の疑似モードが作成できる^{[2.18]*}。この方式は著者らが考案している。

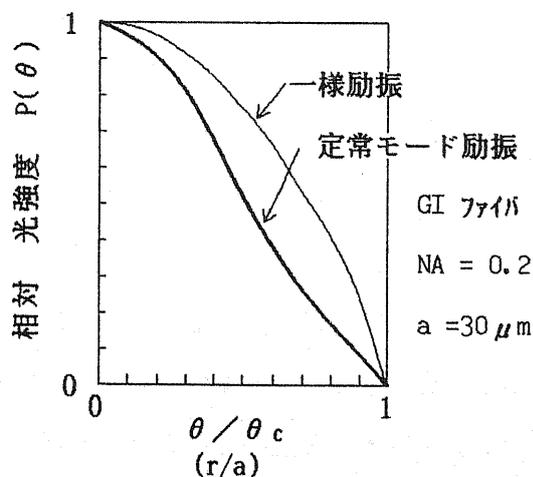
構成； 第一ファイバ出射光を二枚のレンズで第二ファイバに入射結合させる図(2.2)の構成であり、レンズ間にピンホール穴つき遮光板を挟んだ配列である。ここで、光源としてLEDや白色光源(モノクロメータ)などインコヒーレント光源が望ましい。

実験； 本論 3.1, 3.2 の多モードファイバのレンズ結合特性評価では図(2.2)の

モード調整器を用いて実験し、その効果を確認している。一例として図(2.3)に、シリコンクラッドSIファイバ($NA \geq 0.2$, $a=75 \mu\text{m}$)ではモード調整器を用いて高次モードを必要に応じて調整できる(後章のテーブル(3.1)及び図(3.1)で利用)。SIファイバ($NA=0.189$, $a=30 \mu\text{m}$)でLED光源($\lambda=8300 \text{\AA}$)ではモード分布を有効に調整できて再現性のある結合評価が可能である(図(3.4)で利用)。GIファイバ($NA=0.2$, $a=30 \mu\text{m}$, $\alpha=2$)では本論モード調整器により図(2.1)一様励振と定常モードに対応する遠視野像^{[2.19]*}がそれぞれ図(2.4)の如く調整でき(図(3.5)でも利用),着想の妥当性を確認している。



図(2.3) シリコンクラッドファイバの遠視野像
(ピンホール(番号#1, #4, #5)のモード調整器使用)



図(2.4) GIファイバ遠視野像 ($\lambda = 0.83 \mu\text{m}$)

図(2.2)のモード調整器使用による実測結果

まとめ; 多モードファイバでは(ファイバの開口数 \times コア半径/光波長 $= \theta_{NA} \times a / \lambda$)の二乗に比例して多モードファイバに入射可能なモード数が増大, その結果高次モードほどファイバ伝搬角が大きくなり, ファイバの構造パラメータ(a, Δ, v_c)の偏差や外乱によるゆらぎによって変化しやすい。モード変換やファイバ接続時の損失要因になる。ここでは定常モードの発生手法を示し, 子午光線近似の妥当性を実験から確認した。

3章ではモード調整の手法を適用して多モードファイバのレンズ結合特性の実験と評価を行う。そしてレンズ結合特性から再現性のある妥当な結果が得られ, 子午光線近似の有効性を確認する。

2. 2 単一モードファイバ 接続での問題点

単一モードファイバ研究・開発では、広帯域・低損失化を狙っている。FDM方式、TDM方式、AM方式などマイクロ波で培った通信技術を光の領域で実現する事を目指している。これらの研究開発では空間伝搬や同軸ケーブルをファイバに置き換え、高周波フロントエンド回路部を光半導体デバイスに置き換えつつあり、広大な新光通信分野が開かれてきている。しかし、コア径は数 μm で超精密結合が必要であり、問題がある。

ファイバの光伝搬特性や、各種の光デバイスとの結合特性を左右している基本的な要素はファイバ伝搬モードフィールド分布である。モード数やモードフィールド分布はファイバの構造パラメータ（コア半径 a 、比屈折率差 Δ 、規格化遮断周波数 v_c ）で定まる。単一モードファイバ結合特性を評価するためにはこの構造パラメータを知る必要がある。

本論ではまずファイバ伝搬の基本モードの結合特性と単一モードファイバの構造パラメータの間にある関係を明確にする。ここでガウシアンモード分布を仮定した等価ステップ屈折率（ESI）ファイバ手法によればグレーデドインデクス構造の単一モードファイバを含め、その光結合特性の評価等が容易にできることを明らかにする。

2.2.1 単一モードファイバ・パラメータ測定法の検討

概要； 単一モードファイバのコア径、開口率、カットオフ波長をこのファイバ同志の光結合損失から推定する測定解析手法を提案する^{[2.20]*}。

ファイバ端面間隔をスペーサで精密固定して結合損失を測った。そして2m長の四種類のファイバの遮断波長が推定できて、著者の解析法が有効である事を証明する。

序論； 単一モードファイバの屈折率分布を測定することは極めて重要な事柄であった。

と言うのは、カットオフ波長、ファイバや光素子との結合効率はこの屈折率分布に依存するためである。

ファイバの屈折率分布の測定手法は数多く発表されている^{[2.6]、[2.7]、[2.8]}。これらは単一モードファイバの特性評価に役立っている。

一方、単一モードファイバのモードフィールドの研究結果により、ほとんど任意の屈折率分布を有するファイバでも、ステップ屈折率でモードフィールド径や伝搬定数が同じ値を採りうる単一モードファイバが存在することが判ってきている^[2.9]。この理論

は本論の目的に絞れば、ステップ屈折率とは異なる単一モードファイバの屈折率分布が等価的なステップ屈折率・ファイバ (ESI = Equivalent-step-index) のコア半径や開口数に置き換える事を暗示している。

そして使用するファイバの上記2種類のESIプロファイルを知ることで単一モードファイバ用コネクタの光学的特性を予め予測して設計を行う事ができる。むしろ直接屈折率分布を測定する場合に比べて本論はより簡易な特性評価手段を提供している。

また、評価手法の一手段として多面的な評価に生かす事も可能となる。

近視野像変化の光波長測定による遮断波長の測定手法が報告されている^[2.10]。しかし、本論ではより簡単で新しい測定手法を提案する。本論では、ファイバ端面間隔を開けた時の二波長での結合損失をもちいてESIプロファイルを求めるものである。測定にはパワーメータとファイバ端面間隔を開けたファイバコネクタ、波長可変の光源を必要とするだけである。

理論： 前述の如く遮断波長近傍ではステップ屈折率プロファイルの単一モードファイバのモードフィールドはほぼガウシアン分布^[2.11]で近似できる。

そこでステップ屈折率プロファイルの単一モードファイバにおいて、このファイバ端面間隔をDだけ開けた時の結合損失をL(λ)とすればその結合損失は次の式で表すことができる^{[2.12]*}。

$$L(\lambda) = -10 \log \left(4 / \left(4 + (\lambda D / \pi W^2)^2 \right) \right). \quad (2.7)$$

ここでλは光の波長、Wは光パワーがピーク値より1/e²になる光ビームの半径で定義されたガウシアン・モードフィールド半径、このWはコアの半径やファイバの開口数および光波長で近似される^[2.11]。

$$W = a \left(0.65 + 1.619 / v^{1.5} + 2.879 / v^6 \right). \quad (2.8)$$

ここでvは規格化周波。

$$v = 2 \pi a NA / \lambda. \quad (2.9)$$

aはコア半径、NAは開口数である。

(2.1) ~ (2.3) 式から明らかなようにファイバ端面間隔を開けた時の結合損失はD, a, NAおよびλを与えることで決定できる。

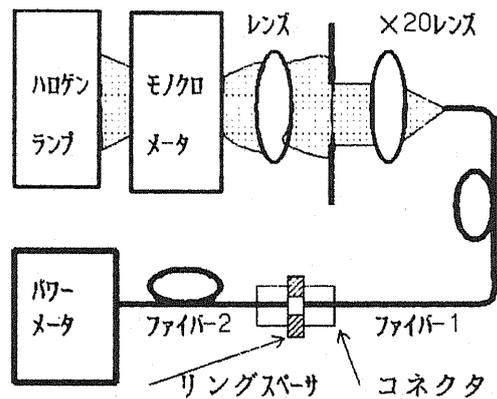
もしDが判っている条件下で二つの光波長 λ_1 と λ_2 での $L(\lambda)$ の値が得られたと仮定すると a , NA の値を決定できることになる。本論では a , NA の値はニュートン法^{[2.13], [2.14]}で計算して決定している。ここで得られた a , NA の値は先に述べたESIプロファイルを表していることになる。規格化周波数 v は遮断値として2.405をとる^[2.15]。そこで $L(\lambda_1)$, $L(\lambda_2)$ 測定値から計算して得られた a , NA の値を(2-3)式に代入することでこのファイバの遮断波長 λ_c が得られる。

$$\lambda_c = 2\pi a NA / 2.405 \quad (2.10)$$

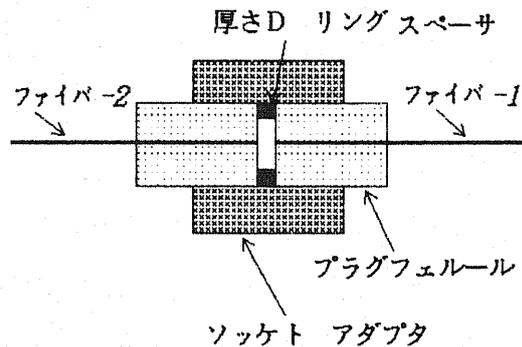
そこで本論で提案した測定手法の精度はモードフィールドのガウシアン分布からのずれに依存している。

二乗分布の屈折率プロファイルの被測定ファイバにおいてコア〜クラッド間での屈折率勾配が6以上で v 値が2以上であればモードフィールドのガウシアン分布からのずれは1.5%より小さいのである^[2.11]。そこで本論の手法による測定精度は1.5%以下と考えられる^{[2.20]*}。

測定手法;ファイバ・パラメータ測定用の光学系を図(2.5.1)に示す。ここでは光源としてハロゲンランプを用いニコンP250モノクロメータで分光して二光波長 λ_1 と λ_2 を得ている。また光パワーの測定はチョッパ内



図(2.5.1) ファイバ測定系^{[2.20]*}



図(2.5.2) ファイバ測定 結合部構造

蔵パワーメータを用いて測定を250回を行い測定誤差を0.01dB以内とした。図(2.5.2)はファイバの端面間隔を開けた時の結合損失測定用のコネクタ治具で、ファイバ結合部の断面構造を示している。ここではリングスペーサがファイバ端面間に置かれており、その間隔を一定値Dに精密に固定している。

ここで用いたファイバコネクタは材質精度を高めており、フェルールにはファイバを8mmの長さに渡り保持する微細穴が中心に開いている。この微細穴とファイバクラッド(直

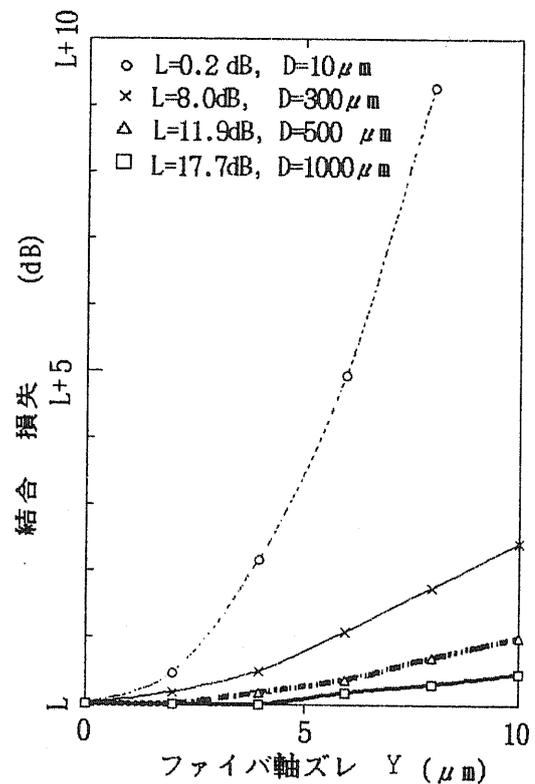
径約 $125\mu\text{m}$)とのクリアランスは $0.5\mu\text{m}$ 以内である。このため被測定ファイバ光軸間の角ずれ量は <0.01 度である。ファイバのコア中心とフェルールの中心との偏芯量は $<1\mu\text{m}$ である。それで、被測定ファイバコア間の軸ずれ量は $3\mu\text{m}$ 以下である。

検討; 被測定ファイバコア軸ずれやファイバ端面間での多重光反射に起因するファイバ結合損失の変化を押さえるためにファイバ端面間隔 D を選び、結合損失を $\sim 6\text{dB}$ 程度にした。多重光反射に起因する結合損失への影響は二つの光波長 λ_1 と λ_2 で異なるのでこれを避ける必要がある。

なお(間隔 D を調整)結合損失 6dB 以上では、多重光反射に起因するファイバ結合損失は 0.01dB 以内の変化に抑えられる。

被測定ファイバコア軸ずれに起因する測定値の変化の状態を図(2.6)に D をパラメータとして示す。ここではファイバ間隔 D を開ければ軸ずれによる結合損の変化量が小さくなることを示している。 D が $300\mu\text{m}$ では軸ずれ量 Y が $3\mu\text{m}$ 以下で損失変化は 0.3dB 以下である。そして同一軸ずれ要因によるオフセットとしての 0.3dB の損失変化はテーブル(2.1)からわかるように結果に数%の偏差しか与えない。即ち二つの光波長 λ_1 と λ_2 とを同じ軸ずれ量を与える状況で測定する必要がある。

またハロゲン光源から被測定ファイバに結合できる光パワーは微小(約 -55dBm)であり、間隔 D をむやみに広げることはいない。光パワー測定器のダイナミックレンジから最小測定感度は約 -80dBm であるため、ファイバ結合損失値は $6\sim 10\text{dB}$ が本論の測定では選ばれている。



図(2.6) ファイバ結合損失特性

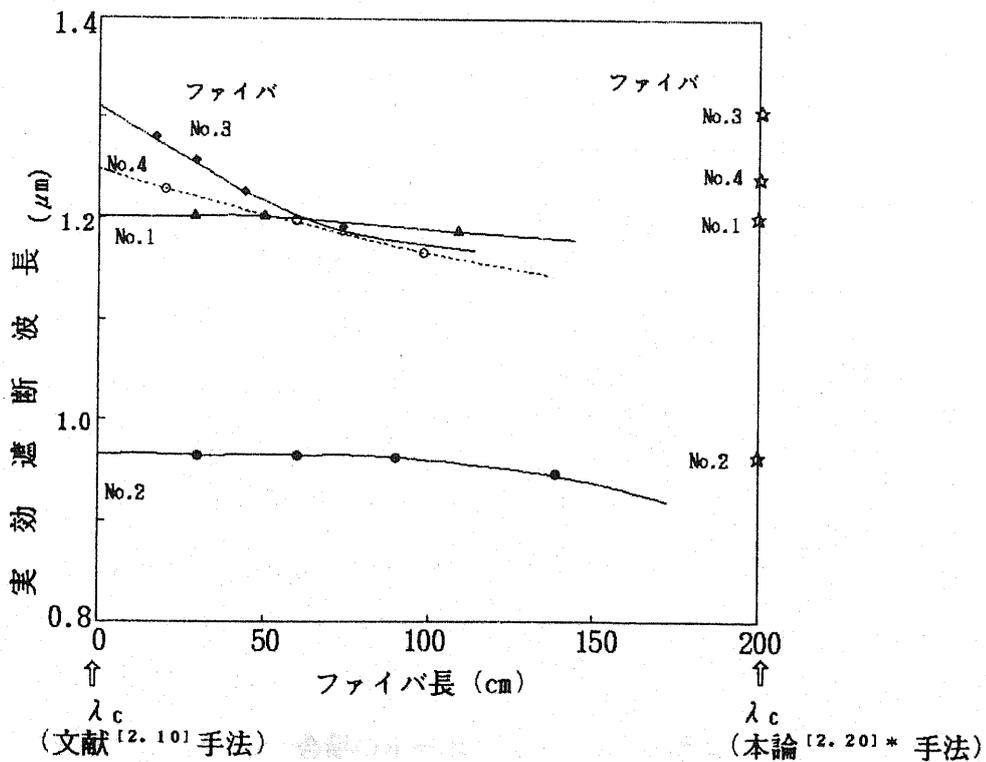
(2.20)*

D :ファイバ間隔, Y :軸ずれ量
 L : $Y=0$ で間隔 D での結合損失値
 なお
 テーブル(2.2)のファイバ-1で $\lambda=1.3\mu\text{m}$ の
 レザタイオフとGe-APDを使用して測定

測定結果； 提案した測定で得られたESIファイバ・パラメータ（比屈折率差 Δ 、コア半径 a 、遮断波長 λ_c 。）は他の手法で測定した結果と比較してテーブル(2.2)に示した。

ここでは被測定ファイバは石英で作られている。そこで、コアとクラディングの間の比屈折率差 Δ はファイバの開口数NAより求めた。コア半径 a の値は文献^[2.6]で詳説の手法『Focusing method』（顕微鏡観察）による測定結果と比較した。また、遮断波長 λ_c は文献^[2.10]の『Near-field technique』（近視野像変化の光波長）によって測定した結果と比較している。

文献^[2.10]の近視野像変化の光波長法による遮断波長 λ_c の測定では、被測定ファイバ長に依存して測定値が変化する。そこで、ファイバ長をパラメータとした多数の近視野像変化の光波長法による測定点から、ファイバ長が0での実効的遮断光波長 λ_c を外挿して求めている。その結果本論提案の手法で得られたESIファイバ・パラメータによる遮断波長 λ_c の値とほぼ一致し、本論手法の妥当性を確認した。これらの測定結果を図(2.7)に示した。なお本論で提案手法では図(2.7)に示したようにファイバ長2mにて測定した。ここで得られたファイバのESI近似パラメータは上記の他手法による結果とほぼ妥当な一致を得た（テーブル(2.2)）。



図(2.7) ファイバ実効遮断波長 (☆: 本論手法 測定結果^[2.201*])

ファイバ 1, 2, 3, 4 測定ファイバ No.1 ~4 テーブル(2.2)参照
 ▲, ●, ◆, ○: 文献 [2.10] の手法による測定結果 赤外ビジコンで近視野像変化観測

ファイバ間の軸ずれによる結合損失; 軸ずれにより ± 0.3 dB だけ結合損失にオフセットが生じた場合を仮定した計算結果をテーブル(2.1) に示した。

2 波長 λ_1 , λ_2 での接続損失の実測平均値 $L(\lambda_1)$, $L(\lambda_2)$ にそれぞれ ± 0.3 dB 偏差を与えた。テーブル(2.1) の結果から波長 λ_c , コア半径 a , 比屈折率差 Δ にはそれぞれ ± 0.5 , ± 5 , $\pm 4\%$ の変差が生じることが判明した。この結果は 2 波長での測定時に結合条件を変えない場合の本手法による測定誤差の目安になる。

テーブル(2.1) ファイバパラメータの測定誤差 [2.20] *

ファイバ No.	仮定した接続損失	Δ (%)	a (μm)	λ_c (μm)	実測結合損失 $L(\lambda_1)$, $L(\lambda_2)$		
					Δ	a	λ_c
					予想される誤差 (%)		
1	L-0.3	0.238	4.57	1.20	± 4.4	± 2.0	± 0
	L+0.3	0.259	4.40	1.20			
2	L-0.3	0.438	2.699	0.96	± 4.9	± 1.8	± 0.55
	L+0.3	0.481	2.60	0.97			
3	L-0.3	0.212	5.30	1.31	± 4.7	± 2.0	± 0.4
	L+0.3	0.232	5.10	1.32			
4	L-0.3	0.249	4.56	1.22	± 4.2	± 2.0	± 0.4
	L+0.3	0.270	4.39	1.23			

テーブル(2.2) ファイバパラメータの測定結果の比較

ファイバ No.	D (mm)	λ_1 (μm)	λ_2 (μm)	L (dB)	Δ (%)	a (μm)	λ_c (μm)	文献 [2.6]	文献 [2.10]
								a (μm)	λ_c (μm)
光源が モノクロメータの場合									
1	0.296	1.25	7.97	7.97	0.248	4.48	1.20	4.6	1.2
		1.35	7.68						
2	0.108	1.15	6.22	6.22	0.460	2.64	0.96	2.7	0.97
		1.20	5.99						
3	0.296	1.25	6.75	6.75	0.222	5.20	1.32	5.2	1.31
		1.35	6.58						
4	0.296	1.25	8.22	8.22	0.260	4.47	1.23	4.6	1.31
		1.35	7.96						
光源が レーザダイオードの場合									
3	0.296	1.30	7.97	7.97	0.226	5.05	1.29	5.2	1.31
		1.52	6.31						

ファイバ・パラメータの非破壊測定手法； 提案した手法では同一ファイバを二本必要としている。非破壊でファイバ・パラメータを測定する場合には予め基準となる別のファイバを用意し、あらかじめ本論の手法でそのファイバのガウシアンモードフィールド・スポット半径 W_p を測定しておく必要がある。式(2.7) の代わりに式(2.11)^[2.16] をもちい、上記と同様の手法で提案する E S I 近似のファイバ・パラメータを求めることができる。テーブル(2.3) はテーブル(2.2) のファイバ1 (スポット半径 W_p) を基準ファイバと見做してファイバ2 及び3 との相互結合による測定結果を示す。ここでは式(2.11)を式(2.7) の代わりに用いる。

$$L(\lambda) = -10 \text{ Log} \left(4 (W_p \cdot W)^2 / \left((W_p^2 + W^2)^2 + (\lambda D / \pi)^2 \right) \right) \quad (2.11)$$

コンパクトな測定手段； 提案した手法はモノクロメータによるインコヒーレント光を用いているが半導体レーザによる手法も考えられる。この場合にはレーザへの反射戻り光などによる雑音除去が必要である。

テーブル(2.3) ファイバパラメータの測定結果^{[2.20]*}

ファイバ No.	D (mm)	λ_1 (μm)	結合損失	本論による測定結果		
		λ_2 (μm)	L (dB)	Δ (%)	a (μm)	λ_c (μm)
2	0.302	1.25	10.45			
		1.30	10.15	0.445	2.67	0.96
3	0.304	1.25	7.52			
		1.35	7.59	0.220	5.20	1.31

・ファイバ1 (モード半径 W_p) を既知としてファイバ2, 3 について
(2.11) 式から求めた。

・ファイバ1～4: テーブル(2.2) 参照

E S I 近似法まとめ; ガウシアンパワー分布を仮定して単一モード光ファイバのパラメータとして重要なカットオフ波長 λ_c 、E S I 近似したコア半径 a と比屈折率差 Δ を非破壊で測定する簡易な手法を提案し、その妥当性を確認した^{[2.20]*}。

ここで提案したE S I 近似による測定によれば、複雑な構造のファイバであっても取り扱い容易な等価ステップ屈折率型単一モードファイバ構造パラメータを得ることができ、ファイバの評価、光結合特性予想、光デバイス評価などに有意義と思われる。

2.3 ファイバ結合の問題点

— 反射光についての考察 —

光ファイバコネクタ周波数特性の検討； 1978年ごろファイバコネクタの結合損失が光波長によって変動することが見つかった（図(2.8) 参照）。そして波長一定の条件でも温度変化で結合損失に変化が起きたり、結合損失値の再現性が悪いなど問題点があった^[2.1]。なお半導体レーザーでは強度雑音に周期性が見られた^{[2.21]*, [2.22]*}。

これは光多重反射に起因するものと考えられる。この場合、脈動の隣接する極大値と極小値の間の周波数間隔 $\Delta\lambda$ は；

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / (\pm 4 D n_2 - \lambda), \quad (2.12)$$

λ : 光波長

D : 光多重反射部媒質の間隔

n_2 : 光多重反射部媒質の屈折率

何故ならば λ' と λ で極大値と極小値が生まれる場合には 伝搬ベクトル k' と k は^[2.17]；

$$\begin{array}{l} k' = (2\pi / \lambda') n_2 \\ k = (2\pi / \lambda) n_2 \end{array} \quad \left| \begin{array}{c} \exp(-ik' r_1), \\ \exp(-ikr_2) \\ \leftarrow \quad D \quad \Rightarrow \end{array} \right|$$

λ' と λ の光波は位置の座標 r としてそれぞれ $\exp(-ik' r_1)$, $\exp(-ikr_2)$ 極大と極小の生まれる理由として往復で光位相反転の原理から

$$(k - k') D = \pm \pi / 2.$$

これと

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda.$$

より (2.12) 式が導かれる。

次に間隔 D と D' で極大値と極小値が生まれる場合の間隔 ΔD を求める。

$$D' - D = \Delta D.$$

位相反転の原理から

$$k(D' - D) = \pi/2.$$

故に

$$\Delta D = \lambda / (4 n_2), \quad (2.13)$$

である。

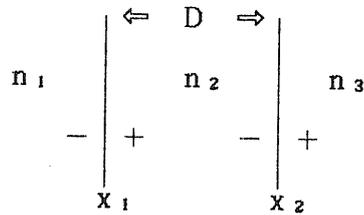
多重反射条件での 波長特性を示す (脈動を表す) 結合損失の式Lは;

$$L = -10 \log \left(\left(4 n_3 / n_1 \right) \right. \\ \left. / \left(\left(1 + n_3 / n_1 \right)^2 + \left(n_3 / n_2 + n_2 / n_1 \right)^2 \tan^2 \Theta \right) \cos^2 \Theta \right) \quad (2.14)$$

なお

$$\Theta = 2 \pi D n_2.$$

この導出法は 媒質の屈折率がそれぞれ n_1 と n_3 の間にある 長さDの n_2 部で光多重反射があると仮定している。 x_1 と x_2 の境界でそれぞれ区切られていると考える。境界の右を+, 左を-で表す。



n_1 媒質では

$$E_{yx1-} = A \exp(-ik_1 X_1) + B \exp(-ik_1' X_1)$$

$$H_{zx1-} = n_{1x} (A \exp(-ik_1 X_1) - B \exp(-ik_1' X_1)) (\epsilon_1 / \mu)^{1/2}$$

n_2 媒質では

$$E_{yx1+} = C \exp(-ik_2 X_1) + M \exp(-ik_2' X_1)$$

$$H_{zx1+} = n_{2x} (C \exp(-ik_2 X_1) - M \exp(-ik_2' X_1)) (\epsilon_2 / \mu)^{1/2}$$

$$\text{また } E_{yx2-} = C \exp(-ik_2 X_2) + M \exp(-ik_2' X_2)$$

$$H_{zx2-} = n_{2x} (C \exp(-ik_2 X_2) - M \exp(-ik_2' X_2)) (\epsilon_2 / \mu)^{1/2}$$

n_3 媒質では

$$E_{yX2+} = G \exp(-ik_3 X_2)$$

$$H_{zX2+} = n_{3X} G \exp(-ik_3 X_2) (\epsilon_3/\mu)^{1/2}$$

ここで $k = 2\pi/\lambda$ として

$$k_1 = -k_1' = 2\pi n_1/\lambda$$

$$= k n_1$$

$$k_2 = -k_2'$$

$$= k n_2$$

$$k_3 = K n_3$$

境界条件を $x = x_1$ と $x = x_2$ として解く;

$$D = x_2 - x_1 \text{ であるので,}$$

x_1 境界では,

$$E_{yX1-} = E_{yX1+}$$

$$H_{zX1-} = H_{zX1+}$$

x_2 境界では,

$$E_{yX2+} = E_{yX2+}$$

$$H_{zX2+} = H_{zX2+}$$

ここで

$$n_3/n_2 = (n_{3X}/n_{2X}) (\epsilon_3/\epsilon_2)^{1/2}$$

$$n_2/n_1 = (n_{2X}/n_{1X}) (\epsilon_2/\epsilon_1)^{1/2}$$

を用いて $|G/A|$ を求める。

$$\begin{aligned} |G/A| &= 2 | \exp(-ik_3 D) | / | \cos(1+n_3/n_1) - \sin(n_2/n_1 - n_3/n_2) | \\ &= 2 ((1 + n_3/n_1)^2 + (n_2/n_1 - n_3/n_2)^2 \tan^2 \Theta) \cos^2 \Theta)^{1/2} \end{aligned}$$

$$\text{但し } \Theta = 2\pi n_2 D/\lambda$$

そこで

$$T = (n_{3X}/n_{1X}) (\epsilon_3/\epsilon_1)^{1/2} |G/A|^2$$

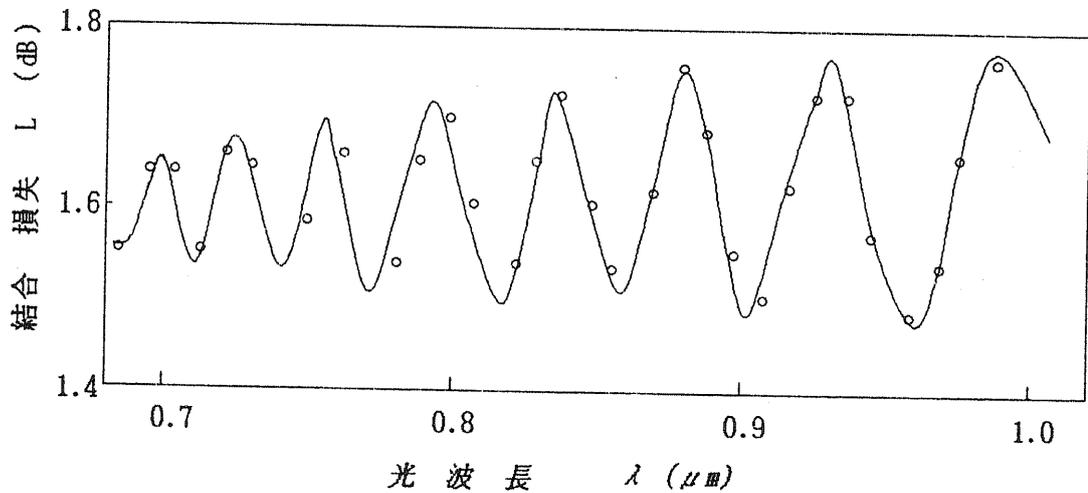
$$= 4 n_3 / (n_1 ((1 + n_3/n_1)^2 + (n_2/n_1 - n_3/n_2)^2 \tan^2 \Theta) \cos^2 \Theta)$$

故に

$$\begin{aligned}
L &= -10 \log (T) \\
&= -10 \log \left(\left(4 n_3 / n_1 \right) \right. \\
&\quad \left. / \left(\left(1 + n_3 / n_1 \right)^2 + \left(n_3 / n_2 + n_2 / n_1 \right)^2 \tan^2 \Theta \right) \cos^2 \Theta \right)
\end{aligned}
\tag{2.15}$$

と求まる。実際の計算では光源のスペクトラム幅 $\Delta \nu$ にわたり T を積分して図(2.8)の計算結果が得られた。

実験結果 (2.12)~(2.14)式と対応する図(2.8)の実験結果が得られ、理論の妥当性が示された。条件は光源 $\Delta \nu = 100 \text{ \AA}$, GIファイバ($a=30 \text{ \mu m}$, $NA=0.2$) 端面間での多重反射, $D=8 \text{ \mu m}$ での透過損失特性である。



図(2.8) ファイバコネクタ間での光多重反射特性 (実測 \circ , 計算—)

$\Delta \nu = 100 \text{ \AA}$, $D=8 \text{ \mu m}$, (なお計算値には 1.3 dB を実測との比較のため加算した)

反射光についてまとめ; 光ファイバ間の結合やレーザダイオードとファイバの結合では光多重反射の発生する可能性が高い。その場合に生ずる結合損失の波長特性について理論と計算からその特性を実証した。この内容はそのまま光干渉型の距離センサに応用できると思われる。光多重反射の発生はファイバコネクタの波長特性に悪影響を与えるものであり、間隔 D が小さいほど、また $\Delta \nu$ が小さいほど、そして光波長が長いほどこの影響が顕著になることが(2.15)式からわかる。

2. 4 ま と め

— ファイバ結合の考察 —

多モードファイバについては短距離であれば単一モードファイバよりも大きな光エネルギーを伝達可能なので、これを利用する用途がある。例えば (1)多モードファイバを介して光パワーを光電変換素子で受光し、この光電力でスピーカを鳴らすシステム、(2)家電機器や照明機器のON/OFF制御や確認など多モードファイバを介した遠隔での目視を主体とするシステム、(3) 光通信システムのコストを重視して光デバイス製造精度を甘くした(光損失増大を許容した)ものなどが考えられる。多モードファイバでは伝送容量は数メガビットで伝送距離が数kmが目安¹と考えられるが、特に低速度で百m内外の通信に限定した場合には伝送損失や分散劣化から開放され上記のメリットが活かしてローコスト化可能なため意義がある。この適用例としては住宅内や移動体内のコンピュータ、各種設備、音響機器間の通信用がある。今後、ファイバを伝搬する各々のモードにそれぞれ情報を乗せる並列伝送方式や、画像をそのまま伝送する、並列伝送用多モードファイバの研究開発が残っている。しかし、国内外で多チャンネル高品位画像ニーズが急速に高まり、またマルチメディア統合化サービスや通信と放送の統合化・国際化を促進すべく、公衆網には広範な拡張性を有する単一モードファイバ¹が世界的に導入される傾向にある。

そして将来の加入者に於ける多チャンネル高品位画像機器群(TV, ビデオレコーダ, 通信端末, パソコン)間の配線の輻輳化を避けるためには広帯域な単一モードファイバの活用が望まれる。さらに拡張性や公衆通信網との整合性を考えると加入者用として単一モードファイバが最適と思われる。

単一モードファイバはモード分布をガウシアン近似して取り扱っても問題は少ない。そして本論提案の単一モードファイバESI近似手法は簡易で汎用性がある。後に述べる単一モードファイバ光減衰器やレンズ結合の計算や実験ではESI型で取り扱いその有効性を確認する。ガウシアンビームであればレンズによりビームパラメータ変換ができる。それでレンズ結合によれば各種単一モードファイバ間の結合は常に可能となる。このことは光機器などのファイバ接続ではレンズが有効であることを示唆する。

直接結合コネクタはファイバコア端面圧着結合型で使用されている。コア端面間に微細な塵の嵌入を避けるため頻繁な清掃が必要である。安全上も素人には問題があり、宅内用には不向きである。その上、端面間にサブ μm ～数 μm の間隙がある場合には光多重反射により、伝送特性劣化や再現性劣化の可能性があり問題がある。これらの問題は次章で検討するようにレンズを用いれば防ぐことができる。

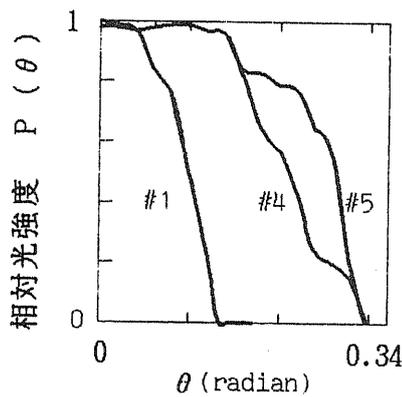
¹: (表(2.1)参照)

3 章 光結合法の考察

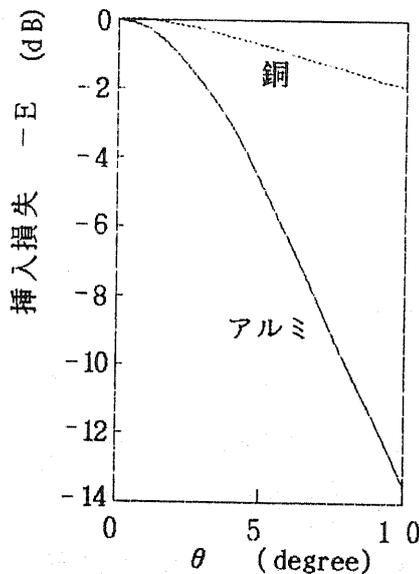
3. 1 ファイバのレンズ 結合特性の検討

3. 1. 1 多モードファイバのらせん光線の検討

子午光線（メリディオナルレイ）で考えればステップ屈折率ならば高次モードほど光射出角度 θ が大きくなる。そして子午光線の伝搬条件は $\sin(\theta) < n_c (2\Delta)^{1/2}$ である。



図(3.1) シリコンクラッドファイバ遠視野像 (ピンホール #1, #4, #5 利用)



図(3.2.1) 金属平行平板内伝搬損失

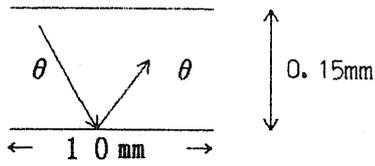
E (計算) 間隔0.15mmの金属
平行平板内を入射角 θ で10mm伝搬

本論検討では簡単化のためステップ屈折率多モードファイバについて考察している。ここではらせん光線（スキューレイ）を含めない場合の影響を確認しておく事は意義がある。実験ではシリコンゲルをクラッドに持つステップ屈折率石英ファイバの裸コアにアルミ膜を蒸着して実験した。このアルミ膜の反射損失は図(3.2.1)で示すように入射角度に強く依存する。それでファイバ伝搬角度依存性を予想できると考えた。

図(3.2.2) に子午面内伝搬の様子、損失 E の計算条件を示す。

2章モード作成器で(#1, #4, #5 とピンホール径を変え) 高次から低次モードまで作り出してこのファイバに入射結合した。アルミ膜クラッドファイバの子午光線仮定での伝搬損失の計算値とこのファイバの伝搬損失の実験値を比較検討した。これらの値の近似程度はファイバ伝搬光を子午光線と仮定した計算の近似度の目安になると考えられる。結果として子午光線を仮定しても大きな問題はない事が実験から確認できた。

理論検討; ファイバコアに蒸着した金属クラッド内面での反射特性を計算した。ここ



図(3.2.2) E 計算条件

(金属平行平板内を入射角 θ で伝搬)

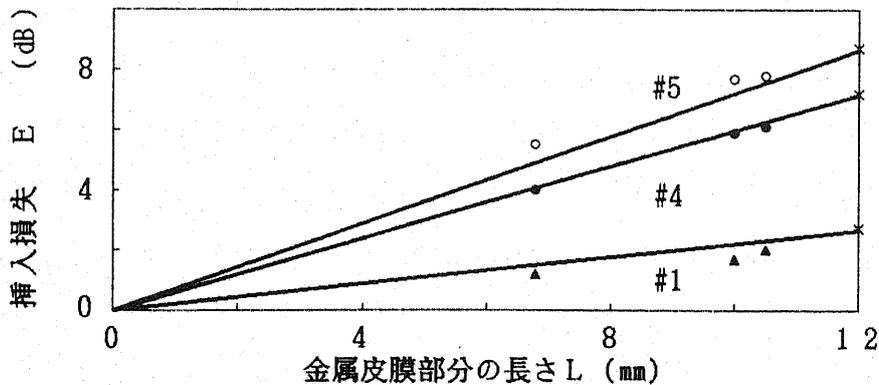
では子午面内の光を仮定した金属複素反射率 R (American Physics Handbook)より計算した。異なる多モード分布はモード調整器 (図(2.2)) のピンホール径を変えて作り出した。この時の遠視野分布 $P(\theta)$ を実測し、さらに金属クラッド部の長さ L とファイバ径から θ による金属部反射回数 $N(\theta)$ を求めて金属クラッドファイ

バの挿入損失 E (dB) を求めた。光源は偏光依存性の無いLED を想定した。

$$E = -10 \text{ Log} \left\{ \frac{\int P(\theta) \cdot \theta \cdot (R(\theta))^{N(\theta)} d\theta}{\int P(\theta) \cdot \theta \cdot d\theta} \right\} \quad (3.1)$$

なおアルミは光入射角度 θ 差による反射率差が大きい。偏光を平均化したアルミの反射率は0.81 (垂直入射) ~1.0 (平行入射) である。しかし銅は0.97~1.0 と差が小さくなる。長さ10 mm, 厚さ0.15 mm, 反射率 $R(\theta)$ の金属平行平板の間を伝搬する光で反射角度 θ の場合の挿入損失 E を図(3.2.1) に計算で示した (銅とアルミの場合)。

実験: LED 光源を用い、シリコンゲルをクラッドとした $\phi 0.15\text{mm}$ 石英コア多モードファイバで実験した。金属としてアルミ膜を約 7~11mm コア部に真空蒸着した。各種の多モードを定常モード作成器 (図(2.2)) のピンホール径を変えて作り出した。この時の10% 立ち上がりNAをテーブル(3.1) に示す。空気クラッドコア時NAは約0.12~0.22である。また実測遠視野分布 $P(\theta)$ は図(3.1) であった。ピンホール#1, 4, 5の光モードについ



図(3.3) 金属皮膜クラッドファイバの挿入損失

直径0.15mmのSIファイバコア部に長さ L のアルミを蒸着, #1, #4, #5モードは図(3.1),

▲ ● ○ はそれぞれピンホール番号#1, #4, #5 での実測値, — は計算値

てアルミクラッドファイバの伝搬損失E (dB) はそれぞれ計算結果と実測値がほぼ良い一致 (0.5 dB以内) を示した (図(3.3) 参照) 。

なおピンホール#1,4 での実測誤差は金属膜に開いたピンホールが原因と考えられ、ピンホール#5 での誤差は受光測定系のNA制限が影響していると考えられる。

またシリコンクラッド部と裸コア部の境界部でも反射が起きる。ここでの光透過率Tはシリコンクラッド部の屈折率 $n_1 = 1.4$ 空気が $n_2 = 1$ として

$$T = 4 n_1 n_2 / (n_1 + n_2)^2 \quad (3.2)$$

となる。Tは-0.12 dB となる。各種モードでの実測値と0.02dB以内で一致した。

テーブル(3.1) 10% 立ち上がりNA値 (実測) (裸コア $\phi 0.15\text{mm}$ 使用)

ピンホール番号 ファイバ	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
シリコンクラッド	0.16	0.22	0.25	0.31	0.33
アルミクラッド	0.15	0.20	0.23	0.24	0.26
空気クラッド	0.12	0.17	0.19	0.20	0.22

3.1.2 別の手法による 多モードファイバの らせん光線の検討

文献名『光ファイバ』^[3.11] 頁39の 3.2.5項 斜め光線の解析によると入射端における励振条件によっては らせん光線 の発生もありうると予想されている。

すなわち (x , y , z) 座標で z 方向にファイバ軸を取り、そして光線が方向ベクトル $s = L i + M j + N k$ でファイバ端面の位置 $P = x i + y j$ に光入射した条件では幾何学的な多モードSIファイバ内での全反射条件式は (文献^[3.11] 3-12 式より) 、

$$(L^2 + M^2 - ((x M - y L) / a)^2)^{1/2} \leq (n_c^2 - n^2)^{1/2} \quad (3.3)$$

ここで n_c はファイバコアの屈折率、

n はファイバクラッドの屈折率 である。

上式で $| x | = a$, $y = 0$ 位置の光入射条件でMによらない式になる。もしy 軸と平行に入射した $M \equiv 1$ でもLが小さければ(3.3) 式が成り立つ。ひんばんに反射してらせん光線となり、伝搬姿態の一つになり z 軸方向への伝搬時間が大きくなる事も予想できる。

しかし実際にはそのような励振は有限な開口数のレンズ系を介しては行われにくい。
即ちファイバ出射の伝搬光はレンズの開口数を越えるのでこのような極端ならせん光線は除去されてしまう。逆にレンズからファイバへの結合ではレンズとファイバの光軸を極端に傾けない限りこのようならせん光線は励振されないと云える。この仮定のもとに子午面内の光を基本とした計算を行った。

まとめ； 子午光線を仮定しても問題がない事が確認できた。この理由の一つにはレンズ結合ではその開口数で制限されるため、極端ならせん光線の発生する条件が整わないためである。

3. 2 多モードファイバの レンズ結合の検討

多モードファイバは使用条件によってその伝搬モードに差異が生ずる。具体的には多モードファイバ伝搬に伴い通常高次姿態から欠落していく。これは損失となるがその上、ファイバ曲がり部、光コネクタ部などでは低次と高次の姿態間での変換が発生しやすい。

そこで前章モード調整器を利用して実測に基づいた擬似的なモードを作り出して実験と計算を行い検証した。多モードファイバのレンズ結合特性を実験で評価した結果は筆者の工夫した解析法に基づく計算結果と妥当な一致をしてその妥当性を確認する。

3.2.1 光結合とファイバの遠視野像の関係

半導体レーザ等、ほぼ点光源やレーザチューブによるコヒーレントな略平行光線をレンズで絞り込みファイバに入射結合した場合には（その絞り込み光ビームの光軸とファイバの光軸が平行でかつ一直線上に重なる条件下で）低次モードに多くの光パワーが分配され、高次モードは励振されにくい。この場合にはファイバの開口数のゼロ付近（ファイバの遠視野像の中心）に光パワーが主に分配される事を示している。しかし上記条件を一つでも満たさない場合には高次モードに多くの光パワーが分配される。例えばファイバの光軸が平行でなく傾いている場合にはこの傾き角に対応した高次姿態に光パワーが分配される。また、光源がLEDの場合やインコヒーレント光ではファイバの開口数（ファイバの遠視野像）の広い範囲に光パワーが分配され易い。以上からファイバの遠視野像を条件とすることが重要である。そこで図(2.2)モード調整器（ $\lambda=0.83\mu\text{m}$, LED使用）によりステップ屈折率ファイバでは図(3.4)遠視野像を、グレーデド屈折率ファイバでは図(3.

5) の遠視野像 (≡近視野像^[3.2]) を作成し、これに基づいた条件で結合効率の実験と計算をしている^[3.4]*。本論で提案する計算手法^[3.4]*を以下に述べる;

ファイバコア中心からの距離を r 、光のファイバからの出射角度 θ として、

ファイバの近視野像: $N_{FP}(r)$,

ファイバ遠視野像: $F_{FP}(\theta)$,

(r, θ) 条件のファイバからの光パワーを $P_1(r, \theta)$ と円環状に仮定すると、ステップ屈折率ファイバでは、

$$P_1(r, \theta) = 2\pi r \cdot 2\pi\theta \cdot N_{FP}(r) \cdot F_{FP}(\theta). \quad (3.4)$$

グレーデド屈折率(GI)ファイバでは、

$$P_1(r, \theta) = 2\pi r \cdot 2\pi\theta \cdot \text{Sin}(\theta) \cdot Q(\theta). \quad (3.5)$$

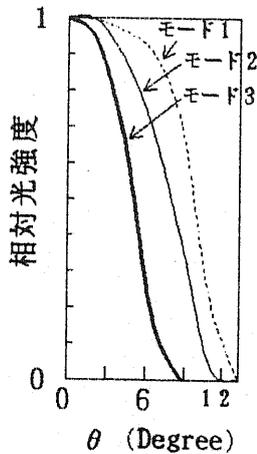
なお $Q(\theta)$ は文献^[3.3]による下式を用いる。

$$Q(\theta) = P(\delta) / (2\pi^2 a^2 n_0^2 \delta / \Delta),$$

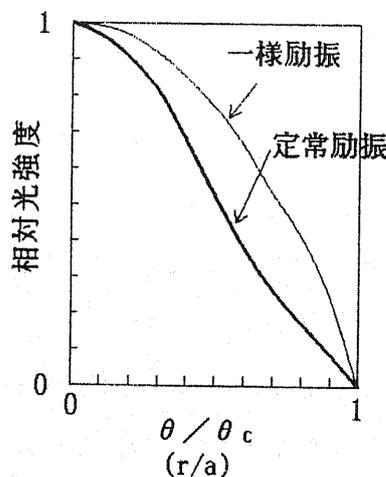
$$\delta = (1/2) (1 - \beta^2 / (k^2 n_0^2)).$$

第一ファイバからレンズを2個通過して別の第二ファイバに結合する条件で光線追跡をおこなった。ただし入射側と出射側のレンズとファイバは同種とした。また2組のレンズとファイバの距離は下記の結合効率 η 最大となる条件からそれぞれ最適に選ぶことにした。

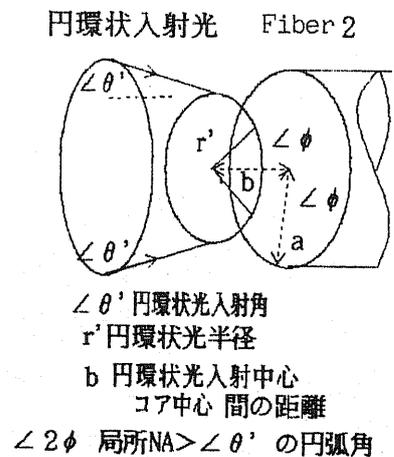
第一ファイバで $P_1(r, \theta)$ の出射光は第二ファイバ入射結合時には第二ファイバ中心からの距離を r' 、光のファイバへの入射角度 θ' として $S(r', \theta')$ になると仮定した。第二ファイバ中心と $S(r', \theta')$ の円環状ビームの中心間のずれ幅を b とすると第二ファイバ可伝搬の範囲は局所NA値から図(3.6)の $\angle 2\phi$ の円弧となる。



図(3.4)



図(3.5)



図(3.6)

SIファイバ遠視野像 $NA = 0.189, a = 30 \mu m$
 GIファイバ遠視野像 $GI\text{-Fiber:} NA = 0.2, a = 30 \mu m$
 ($\lambda = 0.83 \mu m$ モード調整器使用)

可伝搬範囲の円弧 $\angle 2\phi$

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{(b^2 + r'^2 - a^2(1 - \sin^2(\theta')))/(2\Delta n_0^2)}{2r'b} \right)$$

GIファイバは $0 < r < a$ で $n(r) = n_0(1 - 2\Delta(r/a)^2)^{1/2}$ の屈折率分布を仮定している。

SIファイバでは $\theta' = 0$ で、第二ファイバ結合光パワー $S(r', \theta')$ は;

$$S(r', \theta') = \phi / \pi. \quad (3.6)$$

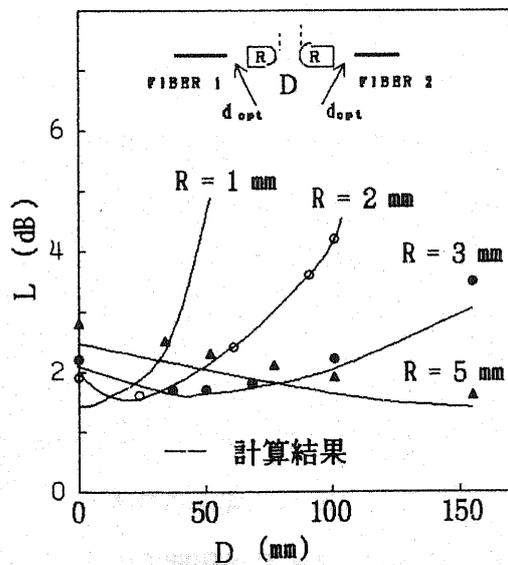
そして光結合効率 (第二ファイバ可伝搬光パワー / 第一ファイバ可伝搬光パワー) η は、

$$\eta = \frac{\iint P_1(r', \theta') S(r', \theta') T(r', \theta') dr' d\theta'}{\iint P_1(r, \theta) dr d\theta} \quad (3.7)$$

$$\text{損失 } L = -10 \text{ LOG}(\eta). \quad (\text{dB})$$

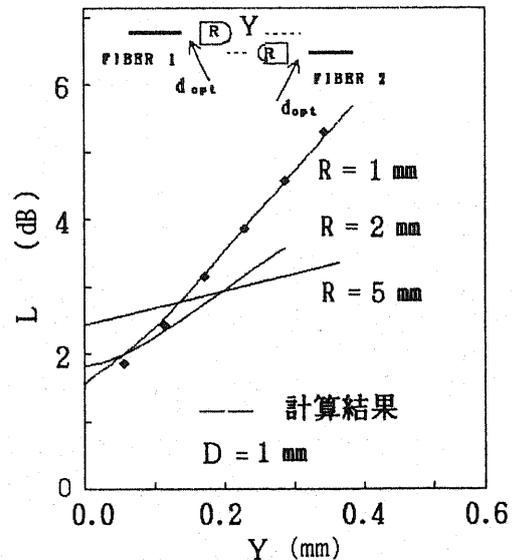
$T(r', \theta')$ はレンズ系やファイバ端面部分におけるフレネル反射を考慮した光透過効率。

$\lambda = 0.83 \mu\text{m}$ LED 光源による実験および計算条件を以下に示す。なお光結合効率 η の計算 ((3.7)式) はレンズとファイバ間距離で最良効率の d_{opt} を抽出して計算している。



図(3.7) レンズ間距離D特性

○ ● ▲ 実測 は R=2, 3, 5 mm (SI ファイバ, $a=30 \mu\text{m}$, $NA=0.189$, MODE-2, BK7, 球半径 R, 左右 d_{opt} 個別に最適化)



図(3.8) レンズ間軸ずれY特性

◆ 実測 は R=1 mm
Piano-Convex Lens

図(3.7)～図(3.11)に計算と実験の結果をそれぞれ示した。

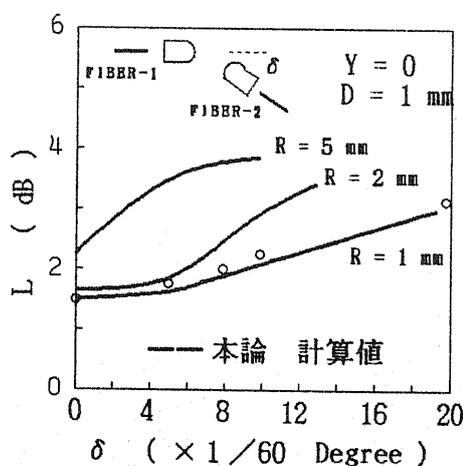
図(3.7)～図(3.9)ではファイバの遠視野像として図(3.4)のモード2を選択、ファイバはコア半径 $a=30\mu\text{m}$, $\text{NA}=0.189$ ステップ屈折率型、レンズは片球面型のBK7円筒状で焦点距離より約 0.2mm ($=d$) 短く最適調整を可能とした。図(3.9)と図(3.10)のSIファイバは $\text{NA}=0.189$ で球面曲率半径 R のレンズ、 d は個別に最適化(d_{OPT})。図(3.11)では図(3.5)の一樣励振と定常励振を仮定、ファイバはコア半径 $30\mu\text{m}$ で $\text{NA}=0.2$ のグレーデッド屈折率型、レンズは図(3.7)～図(3.10)の条件と同一とした。図(3.7)ではレンズ間隔 D を変えて計算した。レンズとして $R=1, 2, 3, 5\text{mm}$ で計算し、 $R=2, 3, 5\text{mm}$ では実測した。計算結果と実験結果はほぼ良好な一致を得ている。レンズ間の特定の距離で結合損失が極小を示す状況が判明した。

図(3.8)ではレンズ間軸ずれ Y を、図(3.9)ではレンズ軸間角ずれ δ をパラメータにそれぞれ検討した。 $R=1, 2, 5\text{mm}$ で計算し、 $R=1.0\text{mm}$ で実測しているが妥当な結果を得ている。図(3.10)では図(3.4)のSI型モード-1～3, $a=20\sim 40\mu\text{m}$, $R=1\sim 5\text{mm}$ で計算した。また実測条件はモード2, $a=30\mu\text{m}$, $\text{NA}=0.189$, $R=1.3\text{mm}$ であり、計算結果と実験結果はほぼ良好な一致を得ている。

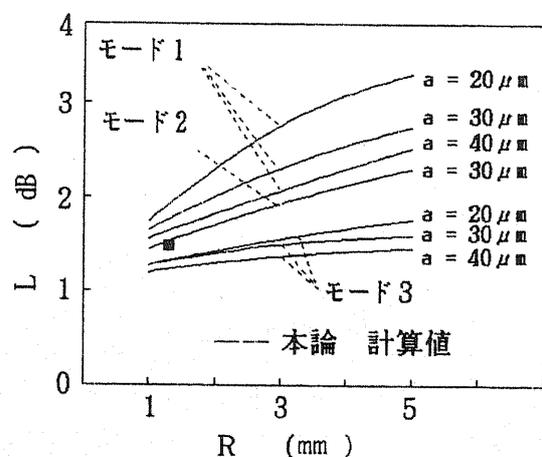
図(3.11)はGIファイバの定常モード励振と一樣励振でのそれぞれの結合特性であり、レンズ曲率半径 R 依存性を計算している。 $R=0.82\text{mm}$ で実験し妥当な一致を得ている。

図(3.10)の結果とあわせて、 $R\sim 1\text{mm}$ では損失が小さくなる傾向が判明した。

また、計算結果からモード依存による結合損失の傾向が得られた。



図(3.9) レンズ角度ずれ δ 特性
○ 実測 $R=1\text{mm}$ モード2 $a=30\mu\text{m}$

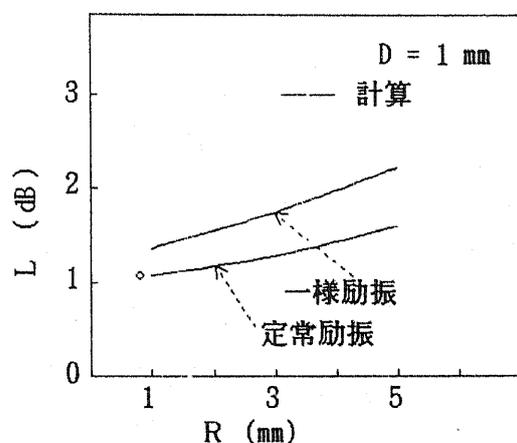


図(3.10) SIファイバレンズ結合特性
■ 実測 モード2 $R=1.3\text{mm}$

以上の実験と計算の結果はその傾向や絶対値で妥当な一致が得られた。計算には6つの

境界面（ガラス／空気）でのフレネル反射損失約0.9 dBがすべて含まれている。

結果からレンズの焦点距離が小さいほど最良結合損失値が小さくなる事が判明した。さらにレンズとファイバを組にした場合には軸ズレを許容すると角度ズレが厳しくなる。またレンズ間距離により最適なレンズ焦点距離があることなどが確認できた^{[3, 4] *}。



図(3.11) GIファイバレンズ結合特性

◇印 実測 $R = 0.82 \text{ mm}$
 (GI ファイバ, $a=30 \mu\text{m}$, $NA=0.2$, MODE図2, BK7, 球半径 R, 左右 d_{OPT} 個別に最適化)

3.2.2 まとめ —多モードファイバのレンズ結合の検討—

ファイバの各種の実測多モードを想定し、レンズ結合特性を著者の考察に基づく解析手法で検討した。その結果は実験結果とほぼ一致した。このことから多モードファイバのレンズ結合におけるらせん光線の取り扱いの妥当性が確認でき、子午光線近似による本論解析手法の妥当性が証明できた。さらにレンズ結合におけるモード依存特性、レンズ曲率依存性等を確認できた。またモード調整器を利用して多モードファイバの近似的な伝搬モードを作成できる事が確認できた。計算と実験から同じ形状のレンズでもレンズの焦点距離が小さい所で結合損失が小さくなる様子がわかった。

なお大きな焦点距離のレンズでは結合に伴うモード変換が小さい。挿入損のレンズ間距離依存特性も判明した。これらの結果を踏まえ単一モードファイバ結合では微細なレンズの可能性を確認する。

3. 3 単一モードファイバの レンズ結合の検討

[3. 17] *, [3. 18] *, [3. 19] *, [3. 20] *, [3. 21] *

まえがき; 光波長 $1.2 \sim 1.55 \mu\text{m}$ では単一モードファイバのガウシアンビーム半径 W は $3.55 \sim 6.63 \mu\text{m}$ 程度と小さい^{[3. 51] *}。この光結合では融着型で 0.2 dB 以下が報告されている^[3. 61]。同様の良好な結果は偏芯調整型^[3. 71]や精密フェルルール型^{[3. 81], [3. 91]}バットジョイント(直接結合)型コネクタで達成されている。これらの直接結合型コネクタでは 1 dB 以下の結合損を得るため、結合ファイバ間で $1.5 \mu\text{m}$ 以下の精密位置合わせが必要となる。コア中心とフェルルール中心間の偏芯やフェルルールとそのソケットの偏芯にはサブ μm の寸法精度や結合精度を要求することになる。そしてフェルルールとソケットの間隙は許容できないので両者は圧着固定される。圧着固定するとコネクタ着脱時の摩擦で削り粉の発生原因となり、常にコネクタの掃除が必要となる。これは頻繁な着脱をする場合には問題になると思われる。ところで多種類のレンズ結合ファイバコネクタが報告されている^{[3. 101], [3. 111], [3. 121]}。しかし寸法が大きく結合損失や波長特性などで直接結合型コネクタの性能を凌ぐのは難しい。本論では著者独創の小型・軽量で波長特性や挿入損失の優れたレンズ式単一モードファイバコネクタを検討する。ここではガウシアンビームを仮定した結合特性の解析を行った。そしてファイバ直接結合で問題となる $1.5 \mu\text{m}$ 以下の精密位置合わせ精度を緩和すべく図(3. 12)のフェルルール長 $L_p(\geq 2\text{mm})$ とフェルルールのソケットへの挿入長 $L_a(\geq 0.5\text{mm})$ を軸ずれ(E_1, E_2, E_3, E_a)に比較して十分に長くすると共にファイバ先端への図(3. 13)のレンズ(焦点距離 F)の取り付け精度 S を精密組立治具導入で高めてレンズ間での角度ずれの値 $\theta(\leq 2(x+S/F))$ を小さくした。

テーブル(3. 2) ファイバコネクタのフェルルールとソケットの配列精度

結合損失要因	軸ずれ量 (μm)	角度ずれ量 (radian)	関係式
プラグと微細穴の偏芯	(E_1) ≤ 0.5	($\phi 1$) $\leq 0.5/2500$ $= 2 \times 10^{-4}$	$\phi 1 \leq E_1/L_p$
ファイバと微細穴の偏芯	(E_2) ≤ 0.5	($\phi 2$) $\leq 0.5/2500$ $= 2 \times 10^{-4}$	$\phi 2 \leq E_2/L_p$
クラッドとコアの偏芯	(E_3) ≤ 0.5	0	
プラグ先端コアの直角研磨度		($\phi 3$) $\leq (0.5/2500)(n_c - 1)$ $= 9 \times 10^{-5}$	$\phi 3 \leq (J_1/J_2)(n_c - 1)$
プラグ ソケット間のスキマ	(E_a) ≤ 0.5	(ϕa) $\leq 0.5/500$ $= 1 \times 10^{-3}$	$\phi a \leq E_a / L_p$

($n_c = 1.45, L_p \geq 2500 \mu\text{m}, L_a \geq 500 \mu\text{m}$ and $J_1 \leq 0.5 \mu\text{m}, J_2 \approx 2500 \mu\text{m}$)

本論での機械精度はテーブル(3.2) に示した。 E1はフェルールとファイバ穴の偏芯量($\leq 0.5 \mu\text{m}$), E2はファイバとファイバ穴の偏芯量($\leq 0.5 \mu\text{m}$), E3はコアとクラッドの偏芯量($\leq 0.5 \mu\text{m}$), Eaはフェルールとソケットの軸ズレ量($\leq 0.5 \mu\text{m}$) である。

これらの値は多モード用直接結合型コネクタの機械精度以下と思われる。

直接結合型コネクタと仮定した場合(レンズ無)のフェルールとソケット間での角度ズレ量 x , 軸ズレ量 y は, $0 \leq y \leq E_a$,
 $x = |E_a/L_a - y/(2L_a)|$ となる。

(3.8), (3.9)式に示した。

そしてここでの角度ズレ量は $\phi_1 (\leq E_1/L_p)$,
 $\phi_2 (\leq E_2/L_p)$, $\phi_3 (\leq (J_1/J_2)(n_c - 1))$,
 $\phi_a (\leq E_a/L_a)$ となる。ただし ϕ_3 は屈折率 n_c のコア端面からの光軸の傾角度を示し,

J_1/J_2 は端面研磨精度を示す。またクラッドとコアの間の倒れ角($E_3/\text{ファイバ長}$) ≈ 0 とした。以下に機械精度の数値と内容を示す。

フェルールとファイバ保持穴との偏芯E1,

$$E_1 [\leq 0.5 \mu\text{m}],$$

ファイバ保持穴の長さ L_p [$\geq 2.5 \text{ mm}$],

これら中心軸の成す角度 ϕ_1 ,

$$\phi_1 [= E_1/L_p (\leq 2 \times 10^{-4})]$$

ファイバ保持穴と挿入するファイバとのクリアランスE2 [$\leq 0.5 \mu\text{m}$],

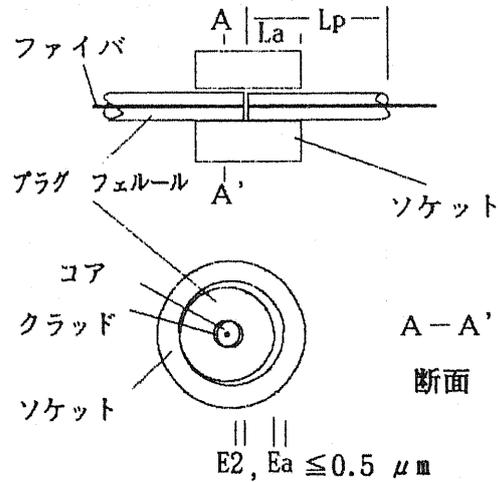
ここでのコア軸の倒れ角度 ϕ_2 ,

$$\phi_2 [= E_2/L_p (\leq 2 \times 10^{-4})],$$

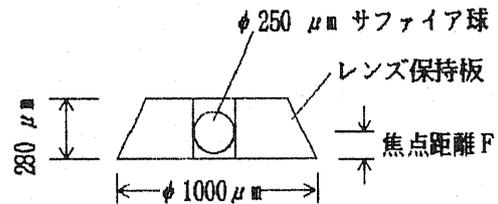
E3 [$\leq 0.5 \mu\text{m}$] はファイバのコア中心とクラッド外径中心のなす偏芯である(表(2.

1) 偏芯量の項参照)。

フェルールに挿入されたファイバは軸に対して直角に研磨される。この研磨治具には図(3.14)の如くフェルールを嵌入する精密な長さ J_2 [$\geq 2.5 \text{ mm}$] の穴があり, フェルールとのクリアランスは J_1 ($\leq 0.5 \mu\text{m}$), フェルール軸の倒れ角度は J_1/J_2 [$\leq 2 \times 10^{-4}$] その



図(3.12) フェルールと断面A-A'



レンズ保持部 断面

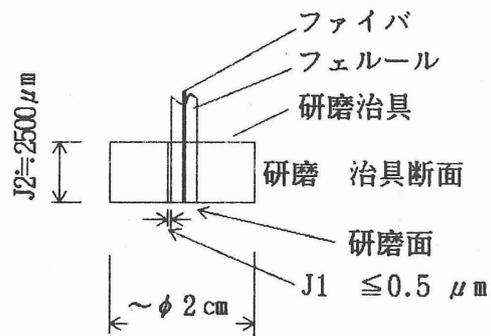


レンズ部 平面

図(3.13) レンズ保持部

ためファイバコア軸とファイバ出射光軸の成す角度 ϕ_3 $[=(n_c - 1)(J_1/J_2)]$ である。全体で傾き角度 ϕ_p $[=\phi_1 + \phi_2 + \phi_3$ $(\leq 5 \times 10^{-4} \text{ rad})]$ となる(テーブル(3.2)参照)。

フェルールとソケットとの嵌合長 $[La=0.5 \text{ mm}]$ でクリアランス $[Ea=0.5 \mu\text{m}]$ で、その軸の倒れ角度 ϕ_a $[=Ea/La (\leq 10^{-3})]$ となる。



図(3.14) ファイバ端研磨治具

これらの様子は図(3.12)に示す。そして次の

式が成り立つ [3.17]*, [3.18]*, [3.10]*, [3.20]*, [3.21]*。

$$0 \leq y \leq Ea, \quad (3.8)$$

$$x \leq |Ea/La - y/(2La)|, \quad (3.9)$$

$$E_p \leq E_1 + E_2 + E_3, \quad (3.10)$$

$$\phi_p = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3, \quad (3.11)$$

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = E_1/L_p + E_2/L_p + (J_1/J_2)(n_c - 1). \quad (3.12)$$

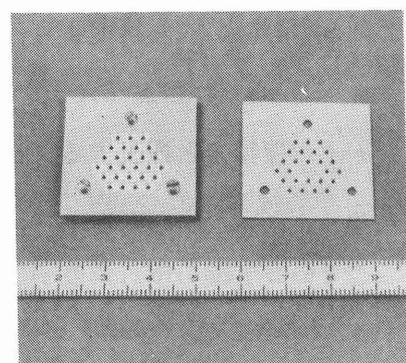
レンズ結合損失要因の軸ずれ Y と角度ずれ θ は(3.8) ~ (3.12)を用いると、

$$Y \leq 2(E_p + y + \phi_p F), \quad (3.13)$$

$$\theta \leq 2(x + S/F). \quad (3.14)$$

この内容はテーブル(3.3)にまとめた。次節では結合特性を解析し、実験検証する。

テーブル(3.3) レンズコネクタ損失要因	
機械 配列精度	レンズ式損失要因
$2(E_p + y)$ ファイル/フェール 軸ずれ	$Y \leq 2(E_p + y + \phi_p F)$
$2(\phi_p)$ ファイバ出射光の傾角	
$2(x)$ フェール/ソケット 間の傾角	$\theta \leq 2(x + S/F)$
$2(S)$ レンズ/ファイバの取付誤差	



図(3.15) 27レンズ蒸着治具

レンズ結合での損失要因について; [3.17]*, [3.18]*, [3.19]*, [3.20]*, [3.21]*

上記の他にレンズ球面収差, 色収差, レンズやファイバ表面でのフレネル反射損失がある。これらの条件をそれぞれ考察し, レンズ結合で留意すべき課題を抽出した。

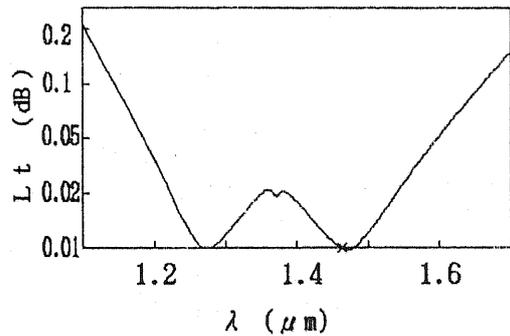
さらに最適レンズ形状や焦点距離を考察して検証実験を行い妥当な結果を得ている。

レンズ表面やファイバ端面にはフレネル反射損失をとり除くための誘電体多層無反射膜を蒸着した。サファイアレンズには蒸着温度は450℃でSiO₂/TiO₂/Al₂O₃/SiO₂よりなるハードコートを施している。無反射膜コートはレンズ表裏にする。そして高温に耐えるレンズ形状として図(3.13)を考案した。焦点位置に球レンズを圧入した微細円盤状である。また図(3.15)に27個のレンズを一括してコーティング保持する治具を示す。なお波長特性は板状のモニターサンプルで確認し、図(3.16)の透過損失 Lt(使用波長域 Lt ≤ 0.05 dB)を得ている。コネクタとしても広帯域で良好な総合波長特性を得る事ができている(後記 図(3.30)参照)。

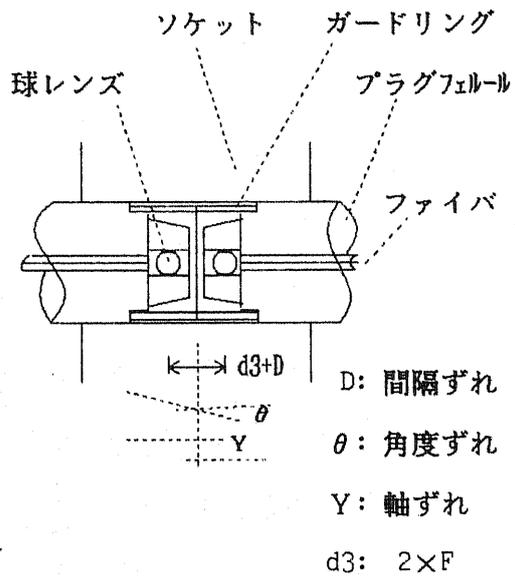
レンズコネクタの構造を図(3.17)に示す。ここにはレンズ結合損失要因としてレンズ間における角度ずれθ、レンズ間隔ずれD、軸ズレYの状況も示した。

なお 図(3.18)で示した如くφp = -Ep / Fの場合、ファイバ端面の偏心方向への斜め研磨補償角αで(3.13)式の(Ep + φp F) = 0となり、Y ≤ 2y 最小値に補正できる。しかし本論では最悪条件での計算をしている。

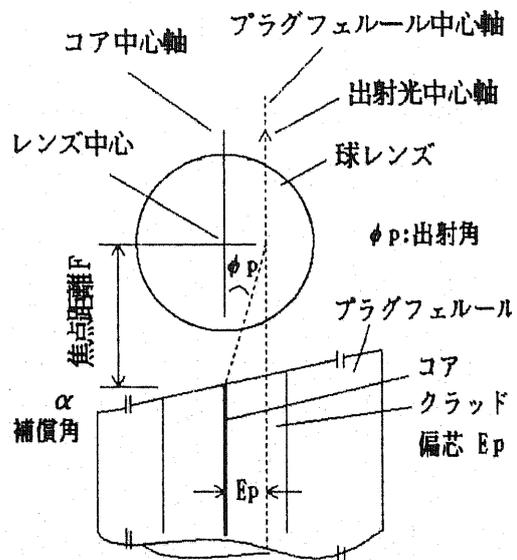
レンズ結合損失の原因は上記 Y, θ, Dによる損失がありこの値はガウシアン仮定の次式(3.15)~(3.17)で与えられる。



図(3.16) 無反射膜付サファイア板



図(3.17) レンズコネクタの構造



図(3.18) ファイバ端面とレンズ

$$GY = -10 \times \log(\exp(-(Y/W_L)^2)), \quad (3.15)$$

$$G\theta = -10 \times \log(\exp(-(\theta / \theta_L)^2)), \quad (3.16)$$

$$GD = -10 \times \log(\exp(4/(4 + (\lambda D / (\pi \cdot W_L^2 \cdot nf))^2))), \quad (3.17)$$

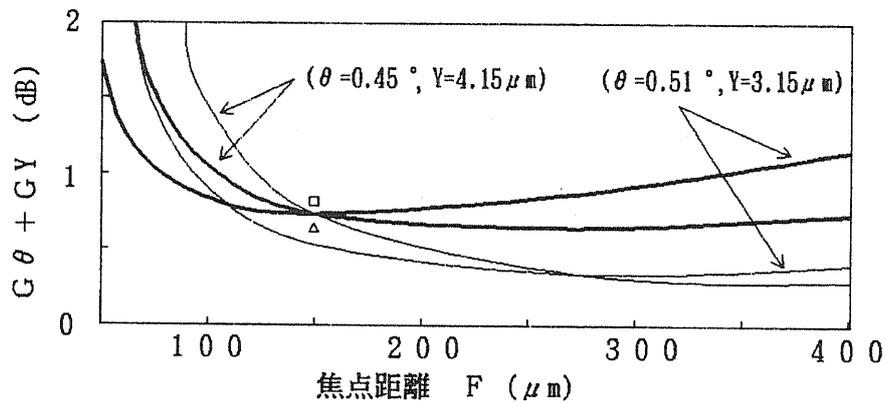
なおここでレンズ間での gaussian 光の半値幅 W_L は、

$$W_L = \lambda F / (\pi W), \quad (3.18)$$

また gaussian 光の半値開口角度 θ_L は、

$$\theta_L = W / (F \cdot nf), \quad (3.19)$$

となる。nf は自由空間の屈折率 ($nf \approx 1$)、 λ は自由空間光波長である。焦点距離 F を変数として最も厳しい条件での損失特性 ($GY + G\theta$) (図(3.19)) そして F/W をパラメータとした時の GD 損失特性 (図(3.20)) を (3.8) ~ (3.19) 式を用い求めた。このレンズ結合計算ではテーブル(3.4) の 4 種類のファイバと光波長を選び使用している。



図(3.19) 最悪条件での結合損失 (テーブル(3.2), (3.3), (3.4) 参照)

— ファイバ 2 ($W=3.55 \mu\text{m}$, $\lambda=1.2 \mu\text{m}$) □ 実測値 ($\theta=0.45^\circ$, $Y=4.15 \mu\text{m}$)
 — ファイバ 3 ($W=6.63 \mu\text{m}$, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$) △ 実測値 ($\theta=0.51^\circ$, $Y=3.15 \mu\text{m}$)

最もレンズ結合損失が大きく、最悪の各種条件を組み合わせた計算結果を図(3.19)で示している。実験結果ともほぼ一致した。以上の結果から光波長 $1.2 \sim 1.55 \mu\text{m}$ の範囲で $F=146 \mu\text{m}$ の時には ($GY+G\theta$) 損失値は $(0.53 \sim 0.76)$ dB と最小値をとることが判明した。最もモード半径 W が小さいファイバ 2 の $\lambda=1.2 \mu\text{m}$ 条件と最もモード半径 W が大きいファイバ 3 の $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 条件が厳しく $F=146 \mu\text{m}$ のレンズ出射光のスポット半径 W_L は $10.9 \sim 11.8 \mu\text{m}$ の範囲である。

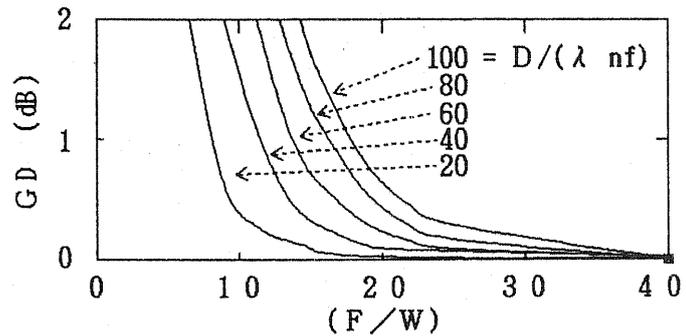
テーブル(3.4) ファイバのビーム径

a (μm)	Δ (%)	W (μm)	
		$\lambda=1.2 \mu\text{m}$	$\lambda=1.55 \mu\text{m}$
4.48	0.248	ファイバ 1 4.94	6.10
2.7	0.44	ファイバ 2 3.55	4.88
5.3	0.212	ファイバ 3 (5.52)	6.63
4.6	0.25	ファイバ 4 (4.97)	6.08

() は遮断波長が長波長側にある

$D \leq 30 \mu\text{m}$ であれば $F = 146 \mu\text{m}$ の時に同じ光波長範囲で $F/W \geq 22$ では損失 $GD \leq 0.05 \text{ dB}$ である。直接結合コネクタと本論レンズ型の最悪条件下での比較をテーブル(3.5)に示す。一般的多モードファイバ

($a \approx 25 \mu\text{m}$) であればレンズ付の単一モード光ファイバとの結合損失を 0.1 dB 以内にできる。何故ならば $25 \mu\text{m} \geq 1.5W_L$ の関係が常に成り立つからである。



図(3.20) レンズ間距離計算特性

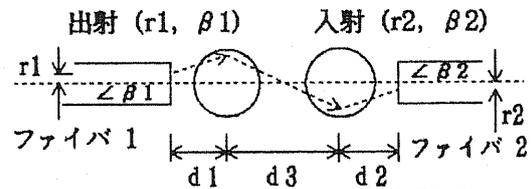
微細焦点レンズの選択;

テーブル(3.2), テーブル(3.5)

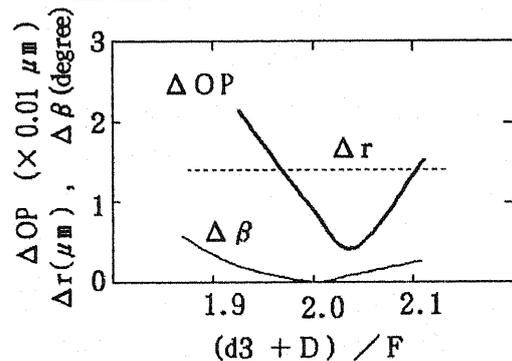
の条件下で 1 dB 以下の結合損失が $120 \sim 320 \mu\text{m}$ の F で得られる事が図(3.19)及びテーブル(3.5)から判明する。そして図(3.19)から ($GY + G\theta$) が $1.2 \sim 1.55 \mu\text{m}$ の波長範囲で ($0.53 \sim 0.76 \text{ dB}$) と最良となる $F = 146 \mu\text{m}$ を選択した。 $F = 146 \mu\text{m}$ では図(3.20)から $GD \leq 0.05 \text{ dB}$ ($1.2 \leq \lambda \leq 1.55 \mu\text{m}$, $D \leq 30 \mu\text{m}$, $F/W \geq 22$) となる。

この場合レンズ式単一モードファイバから多モードファイバ($a = 25 \mu\text{m}$)への光結合が 0.1 dB 以内で整合できる可能性がある。

関係式(3.20)は単一モード光ファイバの公衆網から(これからの)家庭内の多モード光フ



図(3.21) レンズコネクタ光学系



図(3.22) 位置r, 角beta, 光路長OP 誤差

テーブル(3.5) 本論レンズ式と直接結合コネクタの最悪結合比較

軸ずれ	直接結合コネクタ		レンズコネクタ $F = 146 \mu\text{m}$	
	$W = 3.55 \mu\text{m}$ $\lambda = 1.2 \mu\text{m}$ ファイバ2	$W = 6.63 \mu\text{m}$ $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ファイバ3	$W = 3.55 \mu\text{m}$ $\lambda = 1.2 \mu\text{m}$ ファイバ2	$W = 6.63 \mu\text{m}$ $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ファイバ3
$E_p (\mu\text{m})$				
1.5	$G\theta = 0$ [6.19] $GY = 6.19$	$G\theta = 0$ [1.58] $GY = 1.58$	$G\theta = 0.575$ [0.75] $GY = 0.174$	$G\theta = 0.13$ [0.76] $GY = 0.63$
0.5	$G\theta = 0$ [1.55] $GY = 1.55$	$G\theta = 0$ [0.4] $GY = 0.4$	$G\theta = 0.575$ [0.6] $GY = 0.023$	$G\theta = 0.13$ [0.3] $GY = 0.169$

ファイバにつながり場合には有効な機能と思われる。

$$25 \geq 1.5 W_L \quad (3.20)$$

単一モードファイバから多モードファイバへ直接繋ぐ場合も考えられるが、コア径差を活用、これらのファイバ間に微細な光フィルタを挿入し、安価な光波長多重システムを構成する事も考えられる。

現在サファイア球を用いれば微細な焦点距離で精密で安価なレンズが作成可能である。

色収差の検討； 図(3.21)のレンズ系において近軸光で薄肉レンズの仮定で検討する。

(r_1, β_1) , (r_2, β_2) は光出射および入射ファイバ端面でのコア中心軸からの距離 r と中心軸と成す角度 β をそれぞれ示す [3.17]*, [3.18]*, [3.19]*, [3.20]*, [3.21]*。

$$\begin{vmatrix} r_2 \\ \beta_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S_1 & S_2 \\ S_3 & S_4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_1 \\ \beta_1 \end{vmatrix} \quad (3.21)$$

ここで

$$S_1 = 1 - d_1/F_1 - (d_1 + d_3 - d_1 d_3/F_1)/F_2, \quad (3.22)$$

$$S_2 = d_2(1 - d_1/F_1) + (1 - d_2/F_2)(d_1 + d_3 - d_1 d_3/F_1), \quad (3.23)$$

$$S_3 = -1/F_1 - (1 - d_3/F_1)/F_2, \quad (3.24)$$

$$S_4 = -d_2/F_1 + (1 - d_3/F_1)(1 - d_2/F_2). \quad (3.25)$$

なお F_1, F_2 はそれぞれ光出射および入射ファイバに対面するレンズ1, 2 焦点距離を示す。
 d_1, d_2 は光出射および入射ファイバ端面とレンズ1, 2 の主点からの距離をそれぞれ示す。
 d_3 はレンズ1, 2 の主点間の距離を示す。コンフォーカルなレンズ結合条件では；

$$F_1 = F, \quad F_2 = F, \quad (3.26)$$

$$d_1 = d_3/2, \quad d_2 = d_3/2, \quad d_3/2 = F. \quad (3.27)$$

(3.26), (3.27)式は一つの光波長条件で成り立つ。左2式を(3.21)式に代入すると

$$r_2 = -r_1, \quad (3.28)$$

$$\beta_2 = -\beta_1, \quad (3.29)$$

一般に 焦点距離 F には光波長差により $F + \Delta F$ と偏差 ΔF が生ずる。

そしてファイバ出射光が光波長変化によりファイバ入射時までには受ける位置 r , 角度 β の最

初値からの偏差 Δr , $\Delta \beta$ は(3.21)式を微分してそれぞれ得られる。

$$\Delta r = 2 \Delta F \beta_1 = -R \Delta N \beta_1 / (N-1)^2, \quad (3.30)$$

$$\Delta \beta = -2 \Delta F r_1 / F^2 = 4 \Delta r_1 / (R N^2), \quad (3.31)$$

ただし 半径 R , 屈折率 N の球レンズの場合には,

$$F = NR / (2(N-1)) \quad (3.32)$$

$$\Delta F = -R \Delta N / (2(N-1)^2) \quad (3.33)$$

$F = 146 \mu\text{m}$, $R = 125 \mu\text{m}$ サファイア球レンズの $1.2 \mu\text{m} \sim 1.55 \mu\text{m}$ の光波長範囲では常光線での色収差はサファイアの屈折率 N の偏差 ΔN は,

$$\Delta N = 1.752185(\text{at } 1.2 \mu\text{m}) - 1.744045(\text{at } 1.55 \mu\text{m}) = 8.14 \times 10^{-3} \text{ である } [3.10]。そして$$

$$(\Delta r)_{\text{max}} = -0.19 (\mu\text{m}) \quad (3.34)$$

$$(\Delta \beta)_{\text{max}} = 0.03 (\text{degree}) \quad (3.35)$$

なお

$$\Delta F = -0.9044 (\mu\text{m}) \quad (3.36)$$

テーブル(3.4) のファイバは(3.34), (3.35) より色収差による結合損失増加は0.05 dB 以内と考えられる。

球面収差の検討: 光出射および入射ファイバ端面間での子午光線について(図(3.21)で (r, β) 値を変え) 光線追跡にてその行路長差 $\Delta O_p (= O_p(r_i, \beta_i) - O_p(r_j, \beta_j))$ を調べた。コア中心軸からの距離 r_1 , 中心軸と成す角度 β_1 の出射光を下記(3.37), (3.38.1) 式の範囲の98.8%の子午光線について解析した。

$$0 \leq r_1 \leq 1.6 W \quad (= r_m) \quad (3.37)$$

$$0 \leq \beta_1 \leq 1.6 \lambda / (\pi W) \quad (= \beta_m) \quad (3.38.1)$$

この結果は図(3.22)に示す。これらの値は,

$$\Delta O_p \leq 0.01 \cdot \lambda \quad (3.38.2)$$

である。その上同時に

$$\Delta r \leq 0.2 \cdot \lambda \quad (3.38.3)$$

そこで、新たに本論で球面収差による光結合損失増加量 ≤ 0.2 dB と (文献^[3.12]から) 推定できる事、図(3.22)で $d_3 + D \neq 2F$ の時 ΔOP が最小値を取るの、単一モードファイバ結合で最適なレンズ配置はコンフォーカルな位置から多少ずれる事が判明した。

著者によるその他の球面収差解析法^{[3.17]*, [3.18]*, [3.19]*, [3.20]*, [3.21]*}では;

ファイバ1を出射する光線の(位置 r_1 , 角度 β_1)条件が(3.37), (3.38.1)式の範囲であると仮定する。この場合、レンズ1,2は入射条件(r_1 , β_1)に依存、理想的薄肉レンズの焦点距離 F_1, F_2 からずれた特性を示すと考えられる。そこでこの特性を $F_1(r_1, \beta_1), F_2(r_1, \beta_1)$ として(3.37), (3.38.1)式の範囲で光線追跡にて算出した。そして文献^[3.13]をもとにしてガウシアンビーム光パワー透過係数 $P(r_1, \beta_1)$ と(3.41)式を用いて光ファイバ結合係数 H 式(3.39)を導いた^{[3.17]*, [3.18]*, [3.19]*, [3.20]*, [3.21]*}。

$$H = \frac{\int_0^{r_m} \int_0^{\beta_m} P(r_1, \beta_1) \exp(-(r_1/W)^2 - (\beta_1/\theta)^2) r_1 \beta_1 dr_1 d\beta_1}{\int_0^{r_m} \int_0^{\beta_m} \exp(-(r_1/W)^2 - (\beta_1/\theta)^2) r_1 \beta_1 dr_1 d\beta_1} \quad (3.39)$$

$$\int_0^{r_m} \int_0^{\beta_m} \exp(-(r_1/W)^2 - (\beta_1/\theta)^2) r_1 \beta_1 dr_1 d\beta_1$$

ここで $\theta = \lambda / (\pi W)$ (3.40)

$$P(r_1, \beta_1) = 4(W_{L1}^2(r_1, \beta_1)W_{L2}^2(r_1, \beta_1)) / (W_{L1}^2(r_1, \beta_1) + W_{L2}^2(r_1, \beta_1))^2 \quad (3.41)$$

なお W_{L1} はガウシアンビームウエスト半径でレンズ1によるもの、 W_{L2} は同レンズ2によるものでH.Kogelnikの光線マトリックス^[3.15]の手法による。

$$W_{L1}(r_1, \beta_1) = \lambda(4Z_1^2 + Q_1^2)^{1/2} / (2\pi W_1) \quad (3.42)$$

$$W_1 = \lambda(4d_1^2 + (kW^2)^2)^{1/2} / (2\pi W) \quad (3.43)$$

$$Z_1 = \frac{4(4d_1^2 + (kW^2)^2)(4d_1 - (4d_1^2 + (kW^2)^2)/F_1(r_1, \beta_1))}{(2kW^2)^2 + (4d_1 - (4d_1^2 + (kW^2)^2)/F_1(r_1, \beta_1))^2} \quad (3.44)$$

$$Q1 = \frac{4(4d_1^2 + (kW^2)^2)kW^2}{(2kW^2)^2 + (4d_1 - (4d_1^2 + (kW^2)^2)/F1(r_1, \beta_1))^2} \quad (3.45)$$

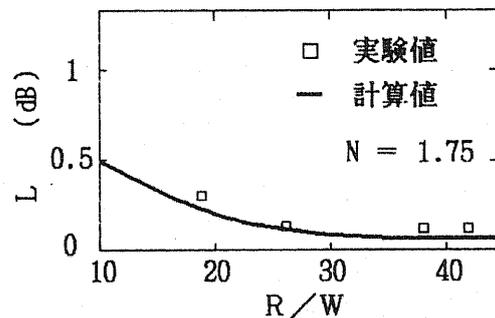
ここで $k = 2\pi / \lambda$ (3.46)

(3.42)式と同様にして、

$$W_{L2}(r_1, \beta_1) = \lambda(4Z_2^2 + Q_2^2)^{1/2} / (2\pi W_2) \quad (3.47)$$

W_2, Z_2, Q_2 の値は式(3.43)~(3.45)の W_1, Z_1, Q_1 中の d_1 を d_2 に F_1 を F_2 に置き直すことで得られる。 $N = 1.75$ 条件で(3.39)式で得られたレンズ結合損失 L [$= -10 \log(H)$] に対する R/W の結果を図(3.23)に示す。また $R/W = 19$ の条件で得られた L [$= -10 \log(H)$] に対する N の結果を図(3.24)に示す。

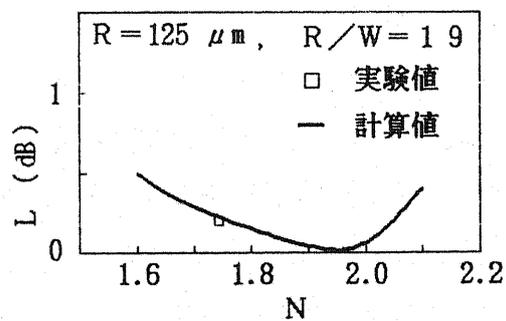
以上の計算から $N = 1.7 \sim 2$, $R = 125 \mu m$ のレンズで球面収差による損失増加は ≤ 0.2 dBにできることが確認された。



図(3.23) 球レンズ半径と結合損失

量産可能で低価格化の可能性があるレンズとして $R = 125 \mu m$ のサファイア球レンズを以上の検討に基づき選択した。

多重反射の影響； レンズには図(3.16)に示す如く表裏合わせて透過損失 ≤ 0.03 dB の前述無反射多層膜を、ファイバ端面には反射量 ≤ 0.04 dB の無反射膜 ZnS/MgF_2 を蒸着している。この場合には最大 ~ 0.14 dB ($= (0.03+0.04) \times 2$)の反射リップルが発生する(3.16)。この解析結果は図(3.30)の実験結果から $1.2 \sim 1.55 \mu m$ 波長で精度 ± 0.1 dB で証明されている。図(3.30)でのリップルはファイバ端面間での多重反射によるもので2.3の



図(3.24) レンズ屈折率と結合特性

検討結果を実証しており妥当である。また本レンズコネクタを無作為に1000回着脱した結合損失分布を図(3.31)に示した。ここでのバラツキの要因は主に多重反射によるもの

と考えられる。なお着脱力は数 gr 程度であり、またゴミの発生も無い。平行ばね

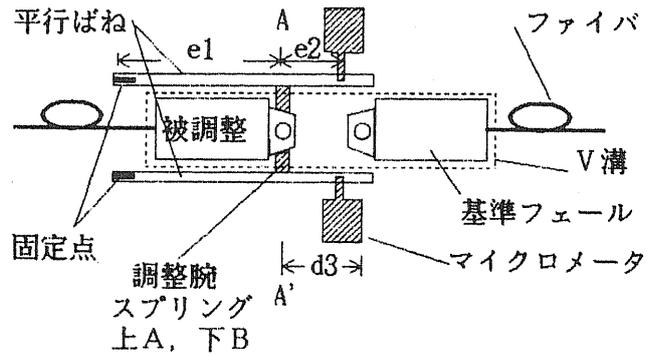
レンズのセンタリングの手法；

図(3.25)～図(3.27)にファイバ端面上で $R=125\mu\text{m}$ 球レンズアセンブリを微細調整できる機構を示した。図(3.25)に示すごとく基準となるレンズコネクタと間隔 $d3$ で被調整レンズとファイバをV溝上に配置した。図(3.26), 図(3.27)にあるようにフェルール端面上で微調整用のくさび型腕スプリング2本と底面スプリング1本の間に挟み微調整した。なお腕スプリングは図(3.25)に示すサブ μm 可動マイクロメータと梃の役割をする並行ばねで $e1/(e1+e2)$ 倍に極微動化される。ここではマイクロメータと並行板とが強い力で押し合い常に平衡状態を保つようにして油膜や外乱による影響を取り除いている。調整組立用の光パワー測定評価系を図(3.28)に示した。

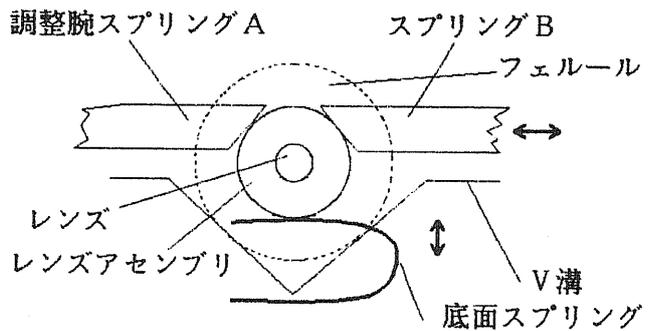
試作したレンズコネクタの外観を図(3.29)に示す。着脱部での所要寸法精度は多モードファイバ並みで、着脱力は数 gr 程度である。

試作実験・評価について；

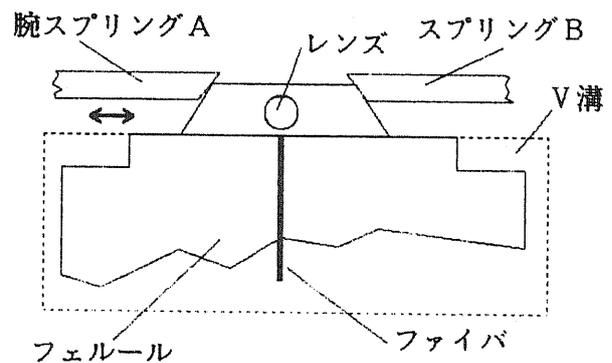
直接結合ファイバコネクタでは摩擦挿入・把持やファイバ端面突き当て圧着が必要不可欠であった。そ



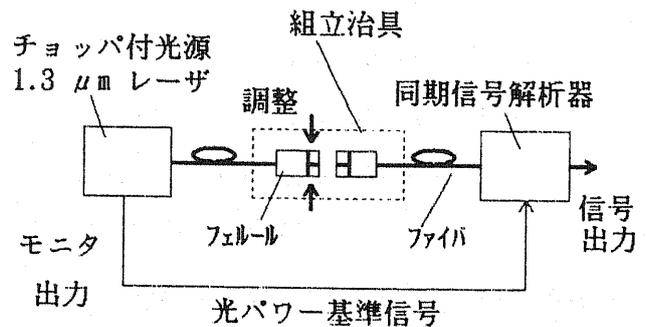
図(3.25) レンズ取り付け 治具



図(3.26) レンズ組立治具 A-A'部



図(3.27) レンズ組立治具 上断面



図(3.28) レンズ組立評価光学系

のためゴミの発生問題があり、取り扱い難いものであった。この問題を本論手法で解決することができた。すなわち、単一モード光ファイバからの光をガウシアンビームと仮定した。そして微細レンズにより軸ずれと角度ずれによる損失要因の最適化配分を行うよう検討結果に基づき試作して実験した。

結果としては；

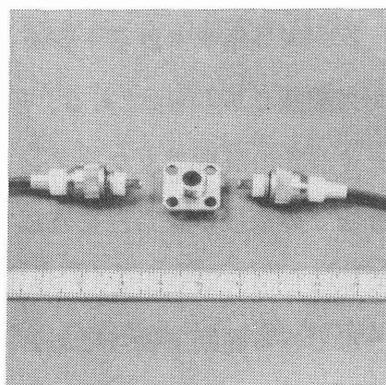
レンズ式ではスムーズな着脱特性を得た。着脱部での所要寸法精度は多モードファイバ程度である。着脱力は数 gr 程度であり、またゴミの発生や挟み込みも無い。

ファイバ端面突き当てによる破損は無い。

ファイバ軸方向への精度は緩い。

ファイバ結合するレンズ間に機能部品（反射膜など）を挿入すればファイバ入出力型の光デバイスが実現できる。

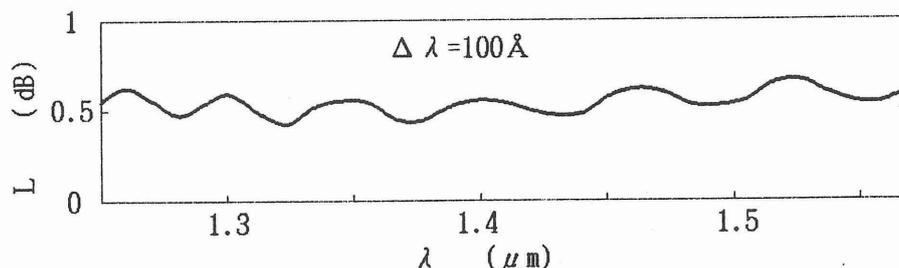
試作レンズコネクタは； レンズとして直径 $250\mu\text{m}$ のサファイア球レンズを2個用いて単一モード光ファイバを結合するコネクタである。フェルール 1.5 gr 、ソケット 3 gr と小型軽量である。ファイバ端面でのガウシアンモードフィールド半径 $3.55\sim 6.63\mu\text{m}$ ではレンズ結合損失 1 dB 以内を確認した。



図(3.29) レンズコネクタ 外観

テーブル(3.6) レンズコネクタ実験条件

レンズ曲率半径	$R=125\pm 0.5\ \mu\text{m}$
材質	合成サファイア $N=1.75$
レンズ焦点距離	$F=146\ \mu\text{m}$
プラグフェルール	長さ $LP\geq 2500\ \mu\text{m}$
フェルールとコア偏芯	$E_p\leq 1.5\ \mu\text{m}$
レンズとコアずれ	$S\leq 0.5\ \mu\text{m}$
プラグとソケット間スキマ	$E_a\leq 0.5\ \mu\text{m}$
プラグとソケット接触長	$L_a\geq 500\ \mu\text{m}$
プラグと出力光軸傾角	$\phi_p\leq 5\times 10^{-4}$
レンズコネクタ組立 総合精度	
レンズ間光軸ずれ	$Y\leq 4.14\ \mu\text{m}$
レンズ間光軸角ずれ	$\theta\leq 0.51^\circ$
レンズ間隔ずれ	$D\leq 30\ \mu\text{m}$

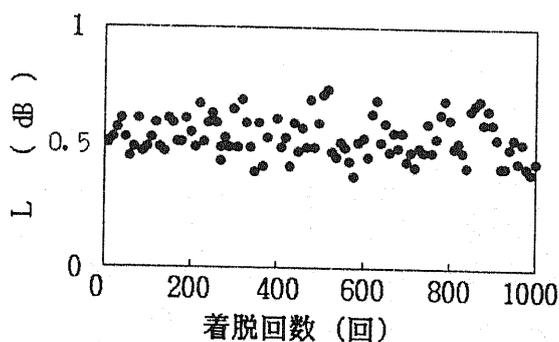


図(3.30) レンズコネクタ波長特性 (実測)

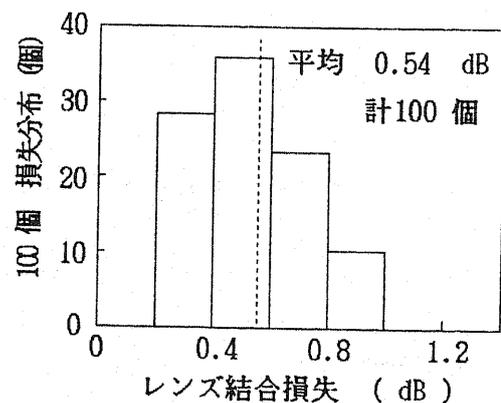
そして1.2 ~ 1.55 μm の光波長範囲での広帯域での使用可能性を確認した。この場合の本論レンズコネクタ許容トレランスは軸ずれ量は $Y \leq 4.15 \mu\text{m}$, 角度ずれ $\theta \leq 0.51^\circ$, レンズ間隔 $D \leq 30 \mu\text{m}$ である。以上の実験条件はテーブル(3.6)にまとめた。単一モードファイバ光の解析でガウシアンモード分布を仮定したが実験結果と良い一致を得た。本論解析法での取扱の妥当性を確認できた。図(3.31)に示す如く1000回のコネクタ着脱実験結果では結合損失偏差 $\pm 0.15 \text{ dB}$ 以内の再現性が確認できた。この値は無反射膜の特性から予想できる範囲で妥当である。レンズとファイバの光学的な軸合わせが $0.1 \mu\text{m}$ 精度で可能な組立手法も実証した。コアの偏心 E_p はコア端面を α だけ意図的に偏心方向に傾けて補正できる。すなわち図(3.18)で $\phi_p F = -E_p$, ($\phi_p = \alpha n_c$) その上光多重反射も抑圧できる。無選別の100個のレンズコネクタの平均結合損失として 0.54 dB (図(3.32)参照)を得た。実用になり得る値と思われる。

まとめ； — 単一モードファイバレンズ結合 —

光波長1.2 ~ 1.55 μm での単一モードファイバ(4種類)のガウシアンモードフィールド半径は $3.55 \sim 6.63 \mu\text{m}$ であり、直接結合ではファイバ配列精度や波長特性に問題がある。しかし、レンズを挿入して角度ずれと位置ずれの許容量の最適化を図ることで多モードファイバ並の配列精度が許容できて経済的で、しかも取り扱い易くできる事が著者により確認された。またファイバ直接結合ではそのビームモード半径が小さくなる光波長では結合損失が増える問題もあったが、(テーブル(3.5)記載の如く)本論のレンズコネクタは波長依存性が小さく、良好な光結合特性が得られる。光波長多重通信に必要な特性である。この内容は理論と実験から検証できた。さらに光多重反射による問題を避けることができその上フェルルール偏芯を補償し製造精度を緩和できる手法も図(3.18)で提案できた。



図(3.31) レンズ式で着脱1000回の特徴



図(3.32) レンズコネクタの特性

本論では単一モードファイバのモード分布をガウシアンと仮定し、光結合特性について理論的に解析を行った。そして対応する実験検証からこのガウシアン仮定の妥当性が確認された。以上、本論では世界に先駆けて微細球レンズを用いた単一モードファイバ結合特性の解析手法と実用的特性が検証できた [3. 17] *, [3. 18] *, [3. 19] *, [3. 20] *, [3. 21] *。

本論方式によれば単一モードファイバから微細レンズを介して多モードファイバへの定常モード結合が効率的にできる。さらに構造パラメータの異なるファイバ同志の結合においても低損失にて結合可能とする光ビーム整合の効率的な手段を明確にした。また本論方式は結合するファイバ端に設置した微細レンズ間に間隔を数十 μm 開ける事が許され、さらに、アダプタへのフェルール挿入部に $0.5 \mu\text{m}$ の間隙を許容できる方式である。この方式は圧入精密固定型やファイバコア圧着型のコネクタではないので摩耗によるゴミの発生やファイバ同志の突き当てによるコアの破損やそれに関連した問題は発生しない。そのため本方式はファイバコネクタとしては多数回に渡る着脱での再現性や信頼度を高くできるので、光加入者系への適用可能性を持つものといえる。圧入精密固定型やファイバコア圧着型コネクタでは着脱毎にファイバコア付近に存在する摩耗ゴミのクリーニングを必要とする。ところが光加入者は素人であり、問題があった。またコアから出射するレーザー光から目を保護する上で問題がある。本論の方式ではコネクタを外した時にゴミの進入を防ぎかつ光を遮蔽する保護具をコネクタ端部に備えることでレンズクリーニングはほぼ不用になる。将来の光加入者用として有効な候補の一つと思われる。

さらに本論レンズ間には機能光部品が挿入可能であり、この応用で微細なレンズによりレンズ結合効率を良くしかつ小型な光ファイバ部品が構成可能となる。

むしろこれらの部品にはファイバ、レンズ、機能光部品間での空隙があり、光多重反射による問題を避けるため、反射戻り光除去のための工夫を必要とする。

3. 4 デバイス間光結合法の考察

3.4.1 発光ダイオードとの光結合に関する考察

LED の構造は面発光型及び端面発光型の二種類に大別できる。これらは AlGaAs 又は InGaAsP からなり、信頼性が高く $10^6 \sim 10^7$ 時間の寿命が得られている。その上ローコストでもある。企業内通信網や家庭と通信サービスセンタ間の通信用では光通信速度 $\sim 150\text{M b/s}$ で数kmの伝送が望まれている。光波長 $1.3 \mu\text{m}$ 帯の端面発光型ではこの要求を満たす事ができ、中距離・近距離用の光源として十分な性能を有している。しかしLED の発光スペクトル線幅は $40 \text{ nm} \sim 100 \text{ nm}$ と広くファイバの分散の影響を受けやすく、高速光通信用としては不向きである。また、LEDの発光広がり角や発光面積はレーザダイオードに比べて格段に大きくファイバとの効率的な光結合は不可能である。近距離加入者ファイバ通信システムへの適用は難しい。なぜならば加入者通信システムでは『受動型（光ファイバ分岐）で広帯域情報を数十箇所に多分配できること』への根強い要求があり、ファイバ通信ではこれに対応できるだけのLED 光パワーを得る事が難しいからである。他方LED の屋内空間伝搬では干渉が小さく多分配できて、視認識を含め通信用の将来性は高い。

2000年代での発展性や単一モードファイバ幹線系との整合性、光ファイバ増幅の有効性を考慮すると半導体レーザが光加入者向けファイバ通信用として最適と思われる。

3.4.2 偏波保存光ファイバとレーザダイオードとのレンズ結合法の検討 [3. 25] *

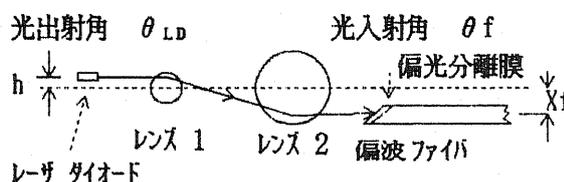
現状では偏波保存ファイバとレーザダイオードの結合には以下の問題点がある。

- ・ 反射戻り光を除くために結合光ファイバ端面を直角からずらして斜めに研磨するとレンズ系とファイバのそれぞれの光学系の間傾き角が必要となり結合調整が難しくなる。また小型化の妨げにもなる。
- ・ 偏波保存ファイバへの結合では物理的にファイバの偏光軸を意識して組み立てる必要があるが結合調整組立が難しい。
- ・ レンズ系やレーザダイオードの特性から一般には高い直線偏光度が得られない。そこで偏光フィルタを挿入することになるが構造が複雑で小型化の妨げにもなる

[3. 22], [3. 23]

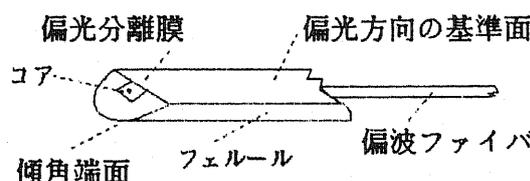
概要； 本論では上記の問題点が解決でき、光加入者向けとしての可能性のある方式を提案する。 偏波保存（単一モード）ファイバに高い偏光度で結合でき、結合ファイバ端面からの反射戻り光が除去できる。その上ファイバ軸とレンズ系光軸が並行で概略インライン配列を可能として小型化を可能とした構造を提案する。

構造； レンズ系の光軸にたいしてレーザダイオードの光出射位置を h だけ縦にずらして配列する。さらにダイオードの光出射軸が θ_{LD} だけ傾ける。このことでファイバへの光入射条件を最適に調整する図(3.33)の構造^[3.25]* である。

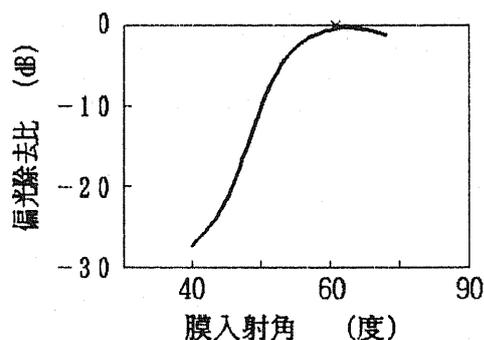


図(3.33) 結合系の構造

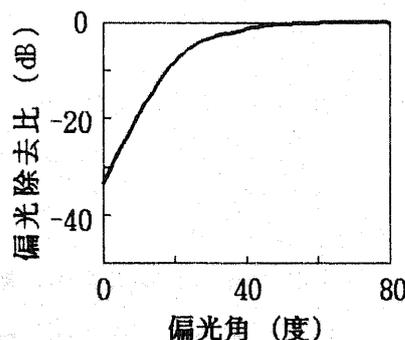
端面が斜めになり、その側面に平らな面（目印）を設けた図(3.34)で示すセラミック製のフェルールに挿入して、ファイバの偏光方向と直角な面とフェールの平らな面（目印）が並行になるように調整して組立てておく。なお厚さ約 $10 \mu\text{m}$ のガラス薄板上に蒸着した偏光分離ミラー（多層膜ハードコート）を $1000 \mu\text{m}$ 角に切り出して予め偏光方向を意識して (θ_p だけ) 斜めに研磨したフェルール内の偏波保存光ファイバ端面上に付ける（図(3.34)）。そしてレンズ系の光軸にたいして $-Xf$ だけずらして配置してレンズ結合する（図(3.33)）。この時ファイバへの光入射角 θ_f を斜め研磨ファイバの最良結合効率を与える光入射角度に一致させる。さらに図(3.35)の偏光分離膜 最適入射角度を ($\theta_p + \theta_f$) に合わせて偏光分離膜を取りつけ角度を調整する。



図(3.34) 基準面付フェルール



図(3.35) 偏光分離膜の特性



図(3.36) ファイバ出力偏光度

理論検討 光線マトリックスSを用いた光結合の条件式^[3, 25]* を以下に示す。

$$\begin{pmatrix} X_f \\ \theta_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ \theta_{LD} \end{pmatrix} \quad (3.48)$$

ここで $\theta_{LD} = 0$ とするとこれを満たす位置パラメータは、

$$S_{11} = 1 - d_1/F_1 - (d_1 + d_3 - d_1 d_3/F_1)/F_2,$$

$$S_{12} = d_2(1 - d_1/F_1) + (1 - d_2/F_2)(d_1 + d_3 - d_1 d_3/F_1),$$

$$S_{21} = -1/F_1 - (1 - d_3/F_1)/F_2,$$

$$S_{22} = -d_2/F_1 + (1 - d_3/F_1)(1 - d_2/F_2).$$

なお

F_1 は第一レンズの焦点距離、

d_1 はレーザと第一レンズの距離、

F_2 は第二レンズの焦点距離、

d_2 は結合ファイバ端面と第二レンズの距離、

d_3 は第一レンズと第二レンズの距離である。

なお、半導体レーザのガウシアンビームスポット半径が縦方向 ω_{LDT} 、横方向 $\omega_{LD//}$ でファイバが ω_f とした場合のビーム整合条件^[3, 24]はレンズの最適焦点距離比 ξ となる。

$$\xi = \omega_f / (\omega_{LD//} \omega_{LDT})^{1/2} = F_2 / F_1 \quad (3.49)$$

そして $F_1 = d_1$ で $F_2 = d_2$ 、 $d_3 \geq d_1 + d_2$ の条件では、

$$X_f = -\xi h, \quad (3.50)$$

$$\theta_f = ((d_3 - d_1 - \xi d_1)h / d_1^2) - \theta_{LD} / \xi. \quad (3.51)$$

なお、

h : レーザ出射光のレンズ系中心軸からの縦ずれ距離、

θ_{LD} : レーザ出射光のレンズ系中心軸からの傾き角度、

X_f : 入射ファイバ光軸のレンズ系中心軸からの縦ずれ距離、

θ_f : 入射ファイバ光軸のレンズ系中心軸からの傾き角度。

これを満たすように設計した。

実験結果；第一レンズとして $\phi 600 \mu\text{m}$ のサファイア球レンズをまた第二レンズとして $\phi 2\text{mm}$ のBK7球レンズをそれぞれ無反射膜付で用いた。偏波保存ファイバとしては日立電線 $1.3 \mu\text{m}$ 帯単一モードファイバを選んだ。 $1.3 \mu\text{m}$ の富士通製VSBレーザダイオード光出力との光結合で数mの偏波保存光ファイバ光出力とを調査した結果偏光分離膜の挿入損失は $\sim 0.2\text{dB}$ であり偏光分離度は $\sim 30\text{dB}$ である(図(3.35)参照)。これを含み結合損失 4.3dB が得られ、また図(3.36)の測定結果のごとく数mのファイバ出力での直線偏光度は $\sim 30\text{dB}$ 以上が確認でき、本論(3.50), (3.51)条件の妥当性が証明された^{[3.25]*}。

まとめ； 平行配列の偏波保存ファイバ、レーザ、レンズ系で組立易さと小型化を達成できた。ファイバ端面、レンズ表面からの光反射戻りを防ぎ、高い偏光特性と同時に良好な結合特性を得る手法を提案し、確認した^{[3.25]*}。

これらの考えかたなどの内容は著者の創意によるものあり、偏波保存ファイバ利用システムに利用できて汎用性がある。

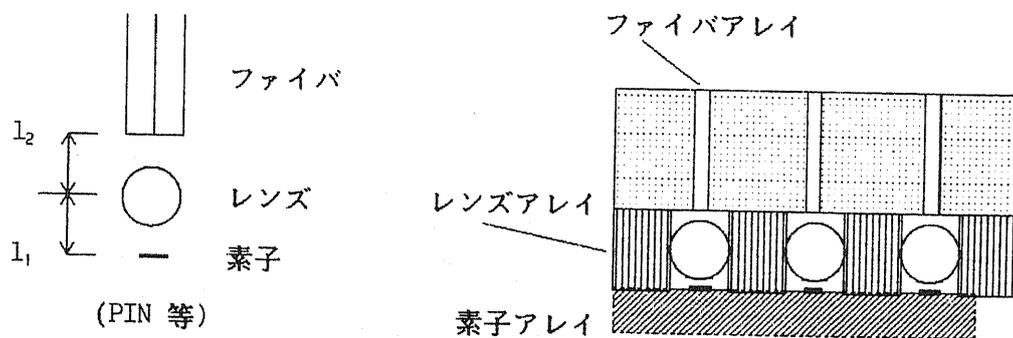
3.4.3 アレイ型光結合の検討^{[3.26]*}

問題点と課題； 光素子を多数並べる場合には、平面的に配列するアレイ型が製造上都合が良い。しかしそれぞれの光素子とファイバの位置合わせ精度にはミクロン以下の高精度が要求される。多数の光素子とファイバとのそれぞれの微調整は難しくアレイ型の光結合の問題点である。

基本検討； 本論では光素子、レンズ、ファイバのそれぞれが3次元空間で持つ自由度を減らす手段を示す。素子アレイは写真技術の使用で平面(2次元)的に精密配列できる。プレーナ構造とする。レンズは外形中心と光学中心が一致していて精密微細レンズの作りやすい球レンズを用い、平板に配列された複数の精密貫通穴に深さを焦点距離に合わせて嵌入する。アレイ状に精密穴を明ける事はセラミック材料や半導体材料、金属材料などで可能である。光ファイバも同様に平板に配列された精密貫通穴に嵌入するこの時ファイバ端面部をまとめて研磨する。これで素子アレイ、レンズアレイやファイバアレイは板状であるため図(3.52)の如く2次元で簡単に組立できる。板状であるため素子やレンズ表面に無反射コートを一括してつける事が容易になる利点もある。

ファイバと(PINダイオードなど)受光素子の間にレンズを挿入した場合の組立精度；

- l_1 : レンズと素子の距離,
- l_2 : ファイバとレンズの距離,
- ω_s : 素子の受光スポット半径,
- F : レンズの焦点距離,
- ω_f : ファイバの発光スポット半径,



図(3.52) 板状配列構造

上左図で一般に $\omega_s > \omega_f$ と考えられ、 $l_2 \cong F$ に調整、 F を選び次式を成立させる。

$$\lambda F / (\pi \omega_f) < \omega_s, \quad (3.52)$$

そして

$$F < (\pi \omega_f \omega_s) / \lambda. \quad (3.53)$$

(3.53)式から 微細なレンズが組立精度Sを緩和することが判る。

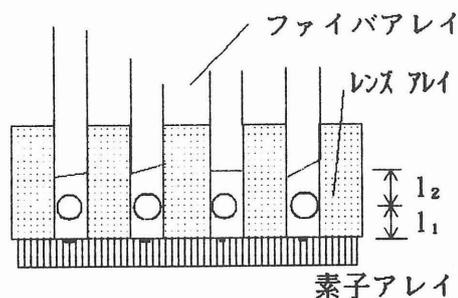
すなわち(3.54)式で許容されるS値が大きいにほど組立精度が緩和される。

$$S \leq | \omega_s - \lambda F / (\pi \omega_f) | \quad (3.54)$$

図(3.38)で示すようにファイバと球レンズをほぼ同じ外径にしてこれを共通の精密穴に嵌入固定し中心軸位置合わせも可能である。

この場合にはレンズの中心軸とファイバの軸を容易に一致させることが可能であり、

素子が受光用ならば組立は容易になる。



図(3.38) ファイバと同径の球レンズ

即ちファイバ端面を軸に対してほぼ直角に

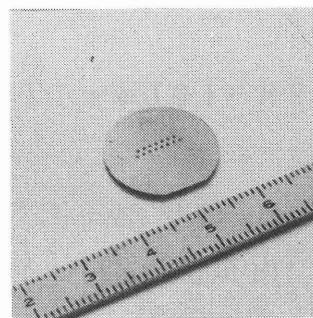
カット(切断)して挿入固定して最大光結合量が得られるように挿入長 l_2 を調整する。しかしカット時直角からのズレ角 α が存在しても(3.55)式を満たせば問題はない。それで全体の組立が容易になる。

(但しファイバ、レンズ、素子の単体アレイがそれぞれ理想的に作られている場合)

$$S \geq 2 | F \alpha n_c | \quad (3.55)$$

アルミナセラミック薄板の穴に直径250 μm サファイア球レンズを嵌入して焼結固定したレンズアレイを図(3.39)に示す。これは素子パッケージ光集束カバーとして有効と思われる。

まとめ; 精密にアレイ結合でき、素子パッケージを兼ねるなど組立調整の容易なアレイ結合方式を提案しその可能性を示した。



図(3.39) 焼結レンズアレイ板

3.4.4 ファイバとPINダイオードのアレイ型結合の検討

多モードファイバとPIN結合の最適化について;

アレイ結合はデバイスの

小型化・経済化・高信頼化を目指し、光集積回路化への第一歩でもある。複数のファイバ

入力の光アレイ [3. 27], [3. 28], [3. 29] の小型化・高信頼化は今後必要である。このため必要となる条件を考慮した方式を提案している。この方式条件は実験にて検証し、実用に供し得る妥当な結果を得た。

多モードファイバとPIN結合の検討 [3. 30]*, [3. 31]* ; 複数のファイバ入力の光受光器として多モードファイバとPINダイオードアレイを仮定する。PINダイオードアレイは製造上平面的なアレイ構造が最適と思われる。そこでファイバ端面アレイ構造も平面的にすることが合理的である。この場合には多数のファイバ端面の処理をこのファイバホルダと同時に行う事で精密で歩留まりの良い加工が容易になる。

図(3.40)の構成で光ファイバからの出射光を効率良く受光素子に入射して量子効率を向上するのに必要な条件は；

- (1) 受光素子の径を入射光のスポット径に比較して十分に大きくする,
- (2) ファイバよりの入射光を受光素子面と垂直にする,
- (3) 受光素子面に無反射膜を付ける, である。

さらに隣接する受光素子への不用光のクロストーク（入射結合）の低減が必要である。この低減のため、受光素子径には適度な大きさがある。

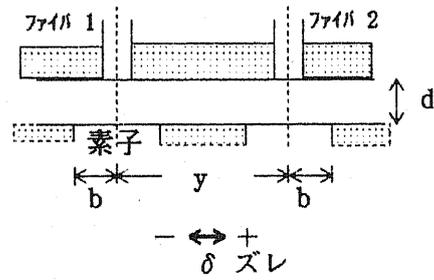
ファイバのコア半径 a , ファイバのニアフィールドパターンを $N(r)$, ファーフィールドパターンはガウシアンを仮定する。この場合のクロストーク X は [3. 30]*, [3. 31]* ;

$$X = \frac{2H - 10 \log \left[\int_0^a \left[1/2 - (1/(2\pi))^{1/2} \right] \cdot \left[((y-r)-b^2/(y-r)) / \left[\text{INT}((y-r)/(d \text{NA})) + 2 \right] d \text{NA} + ((d \text{NA})/(4(y-r))) \left[\text{INT}((y-r)/(d \text{NA})) + 2 \right] \right] r N(r) dr \right]}{\int_0^a r N(r) dr} \quad (3.56)$$

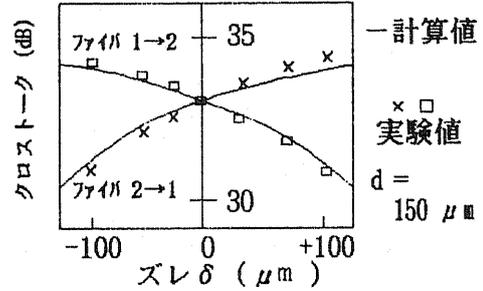
ただし b : 受光素子半径, d : ファイバ端と素子の距離, y : 受光素子の間隔,
 NA : ファイバ開口数, H : 受光素子の光反射減衰量, である。

実験; 図(3.40)で $y = 1000 \mu\text{m}$, $b = 225 \mu\text{m}$, $H \approx 10 \text{ dB}$ の受光素子(PINアレイ)と多モードファイバ(GI, コア径 $40 \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0.24$)で実験したこの結果は図(3.40)~図(3.43)で示したように(3.56)式の計算結果と良い一致が得られ、理論の妥当性が確認できた。

図(3.40)にはファイバアレイと素子アレイの位置関係を示す。 δ は相対位置ズレである。図(3.41)にPINアレイで $d=150\ \mu\text{m}$ の条件でズレ δ とクロストークの計算と実測値を、図(3.42)に $150 \leq d \leq 350\ \mu\text{m}$ 条件でのクロストークの計算と実測値を、図(3.43)に素子量子効率 η の δ 依存特性を、図(3.44)に54個のPINアレイとファイバアレイの実測クロストーク分布をそれぞれ示す。そしてクロストーク平均値は33 dBと十分な結果を得た。

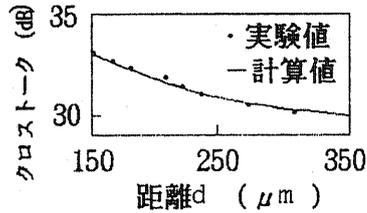


図(3.40) ファイバアレイと素子

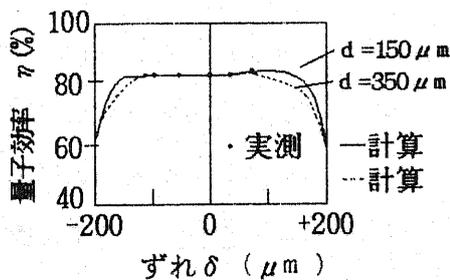


図(3.41) PINアレイ位置ずれ漏話

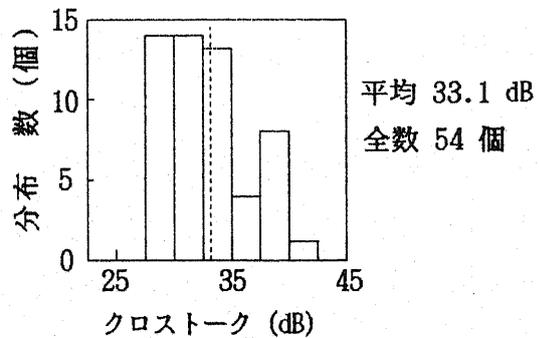
結論； 小型化・高性能化を旨とした複数ファイバ入力の光受光器の条件を提示してこの妥当性を確認した。



図(3.42) クロストーク距離依存特性



図(3.43) 素子量子効率(実測)



図(3.44) 試作PINアレイ素子特性(実測)

3. 5 ま と め

—ファイバのレンズ結合法 工学的価値—

多モードSIファイバのレンズ結合では極端ならせん光線を考慮する必要が無いことが実験と計算により実証できた。使用条件に合わせてレンズ焦点距離を選べばファイバ結合損失を最適化できる。 $a=30\mu\text{m}$ のSIファイバ低損失結合を目的とする場合は球レンズ焦点距離を1mm程度にする必要があることが判明した。

単一モードファイバの結合では等価ステップ屈折率 (ESI) で表現したガウシアン近似による取扱が有効であることを確認した。

単一モード (突け当て) 直接結合コネクタは結合精度がサブ μm 以内と厳しく着脱時のフリクションによる磨耗の問題や波長特性に問題があった。しかしレンズを介すれば結合精度を緩和できる, 広帯域化が可能なことを実証した。そしてレンズ結合は広帯域で低損失化も可能である。光波長多重の加入者通信システムへの適応可能性もある。また光分波器等にも適用の可能性があることがわかった。

本論では微細球レンズの使用可能性を実証した点に工学的な価値がある。

本論では単一モードファイバ端面に微細レンズを精密に取りつける装置を開発し, 着脱で磨耗のないレンズ式コネクタを試作してその特性を明らかにできた。

今後はレンズへの人手の接触や目の保護のための遮蔽器の開発等が必要である。

—光デバイス結合法 工学的価値—

ファイバを伝搬する光位相や光周波数の信号を検知する場合偏波保存ファイバを活用する必要がある。本論3.4.2 のレーザダイオードと偏波面保存ファイバ結合では偏光度を保持した結合法を示した。この中で一般的単一モードファイバとレーザダイオードの結合でも活用可能な光学系を提案した。例えばファイバ端面の斜めカットは多重反射を防ぐため必要不可欠である。この場合の最適な光学系を最初に示し, その上で偏光保持のための手段を示した。本手法は汎用性があり工学的な設計指針となりうるので意義がある。

国内外で光波長多重方式の研究がなされている。ところが光波長多重方式では端末部には光送信/受信用の光フロントエンド部を複数組備える必要がある。そして経済化のためにはアレイ化光デバイスが必要となる。光デバイス結合のアレイ化は光半導体素子のコストやファイバ精密結合・組立コストを圧縮できる有効な手段であり, 本論提案の手法もその一手段となりうる。 レンズアレイを光素子アレイ上面に配列し, 気密パッケージ機能と

ファイバアレイとの結合を同時に可能とする手段として本論提案方式は基本的で汎用性がある。本論3.4.4はファイバアレイと受光素子アレイを直接結合する簡易な手法である。この場合に問題となる光クロストークの状況を把握して、制御することができた。これらの内容は実用性がある。

なおレーザダイオードアレイ結合ではレーザ素子アレイの冷却や光取り出し構造などが重要である。これらの内容などの一般的なアレイ構造が不明であるので検討を控えた。

第4章 ファイバ結合 デバイスへの応用

4.1 ファイバ型 デバイス結合の課題

ファイバは外径 $\sim 125\ \mu\text{m}$ の SiO_2 硝子で作られているが、直径3Cm程度のファイバケーブルを作るところまでは曲げることもできる。しかしファイバをそのまま扱うと微細なキズがつき、破断しやすくなる。そこで被服された形で利用されている。構造は直径約400 μm の柔らかなシリコンゲル内にファイバ心線が保持され、その回りに直径約900 μm のナイロンを被せたものである。

ファイバを光導波用の硝子面などにバット結合する場合には信頼性に問題がある。何故ならばファイバは柔軟なナイロンジャケット内にルーズに保持されている。またファイバを強く押さえて固定すると光学特性を損なうので難しい。ファイバ心線を接着剤で止める手法もあるが接着剤が多いとその中でファイバがマイクロベンドを受けてやはり特性を損なうことになる。

本論ではセラミック製フェルール中心軸に設けられた微細な精密穴内にファイバを数mmに渡り挿入して（その間隙 $\leq 0.5\ \mu\text{m}$ に）極微量の接着剤で固定する手法を提案し、その有効性を先に確認している。しかし精密穴内でのファイバ端面部分のファイバ軸方向の位置を常時サブ μm 以内に固定できるわけではなく、温度変動などによる平均的な相対位置がほぼ固定されているにすぎない。

それでファイバコア端面と光導波用の硝子面の間に光学的なコンタクトを取る事は至難である。またここに屈折率整合する接着剤を用いても温度サイクルまで考えると信頼性の点で問題がある。光波長に比べて十分小さな接合間隔（光学コンタクト）を維持出来ない場合には間隙で光が干渉し、接続損失の温度依存性が大きくなる。また光結合特性の再現性が悪くなるので問題がある。

ここでは光の干渉を抑えたファイバ・直接結合形の光デバイスを提案する。

4.1.1 単一モードファイバ光可変減衰器

概要； 単一モードファイバ端面間隔を変えることで連続的に減衰量が可変できる小型化

可能で単純な減衰器を著者が考案し、試作によってその有効性を実証した^{[4.10]*}。

序論； ファイバ加入者分配系でセンタに近い加入者には光レベルを最適に調整するためにファイバ減衰器が必要不可欠と考えられる。

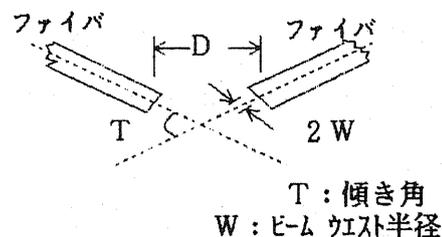
反射膜を蒸着したミラーをファイバ間に挿入する形の多モードファイバ用の減衰器がある^{[4.11], [4.21], [4.4]}。この中でミラーは光軸に対して傾けて挿入されている。これは多重反射^[4.3]による再現性劣化などの問題を防ぐ為であるが入射光が直線偏光の場合には入射偏光方向によってその挿入損失に本質的な差異が生ずるなど問題がある^[4.9]。

特に単一モードファイバではレーザ光源よりの直線偏光を扱うことので、再現性や確度には問題があった。

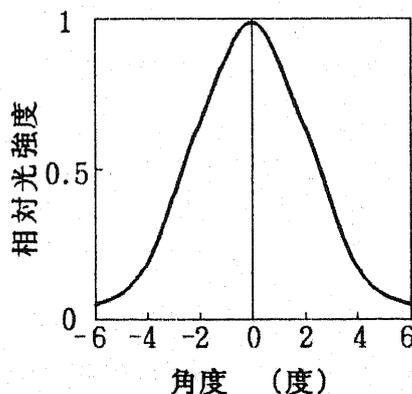
本論ではこれらの問題点を解決できる図(4.1)のファイバ減衰器を考案、有効性を実験と理論から確認する^{[4.10]*}。

理論 単一モードファイバの構造パラメータと光波長が一定であれば同種ファイバの遠視野光パワー分布は一義的に定まる^{[4.5], [4.8]}。光源との結合条件に依存しない状況は図(4.2)の実測からも確認できた。

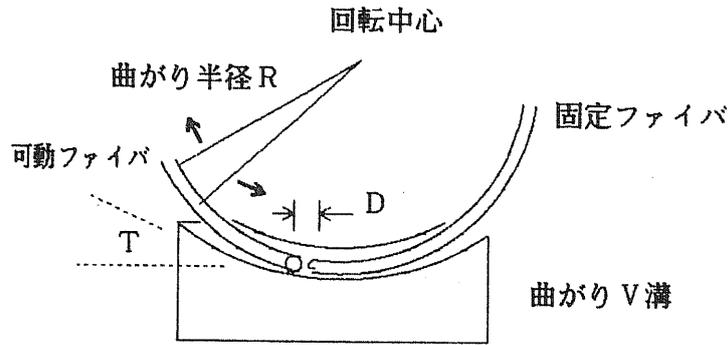
図(4.2)には $a=5\ \mu\text{m}$, $\Delta=0.2\%$ の単一モード・段階屈折率分布ファイバで光波長 $\lambda=1.3\ \mu\text{m}$ のレーザダイオードで実測した遠視野像を示した。ガウシアン型の遠視野像で、一定しているので図(4.1)のように光出射、光入射ファイバの配置(間隔 D と傾角 T およびファイバのガウシアン光モード半径 W)が決まればその光結合損は一定値をとる。そこでファイバ端面間の距離 D と傾き角度 T を変えて減衰量を設定する光減衰器を新しく提案する。V溝にファイバを配列する図(4.3)の構成である。



図(4.1) 光可変減衰器の基本原理



図(4.2) 単一モードファイバ遠視野像
 $a=5\ \mu\text{m}$, $\Delta=0.2\%$, $\lambda=1.3\ \mu\text{m}$
Ge-APD 有効径 $100\ \mu\text{m}$ 使用



図(4.3) 曲がり V 溝光減衰器

V 溝は再現性を得るため必要である。単純な直線 V 溝構成が望まれる。

しかし直線 V 溝を用いる場合にはファイバ端面間隔 D が 4 mm でも 19dB を上回る光減衰は難しく、図(4.4) に破線で示した飽和現象が観測された。

この原因は V 溝面での反射光がファイバに入射するためと考えられる。

そこで図(4.1) に示すように結合するファイバ間隔 D と同ファイバ軸の傾き角 T を同時に与える図(4.3) の構造を考案した。すなわちファイバ端面間の距離 D とファイバ光軸間の傾き角 T を同時に変えて減衰量を設定する光減衰器で円形曲がり V 溝にファイバを配置する手法を考案した。これらの値が決まればその光結合損失は一定値をとると考えられる。

図(4.2) の実測から遠視野像をガウシアン分布と仮定して^{[4.5], [4.6], [4.7]} ファイバ間隔 D と斜め角度 T とを変化した条件でのファイバ結合損失が計算できる。

単一モードファイバのコア径は 6 ~ 10 μm で波長 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ の条件で結合損失増大を 0.5 dB 以内に押さえる為にはファイバ間の横ずれ幅 $\leq 1 \mu\text{m}$, ファイバ光軸の傾き角度ずれ幅 $\leq 0.5^\circ$ と厳しい条件が想定されるがファイバを曲がり V 溝に添わせることで厳しい条件を満たし、しかも再現性を高めた^{[4.10]*}。

$$L = -10 \text{LOG} \left(\frac{4}{4 + (\lambda D / \pi W^2)^2} \right) \exp \left(- (\pi n_a W T / \lambda)^2 \right), \quad (4.1)$$

$$T = 2 \text{SIN}^{-1} (D / 2R). \quad (4.2)$$

なお D : 光出射/入射単一モードファイバ端面間距離

W : ファイバ端面におけるガウシアンビームウエスト半径

R : 曲がり V 溝の曲率半径

λ : 自由空間での光波長

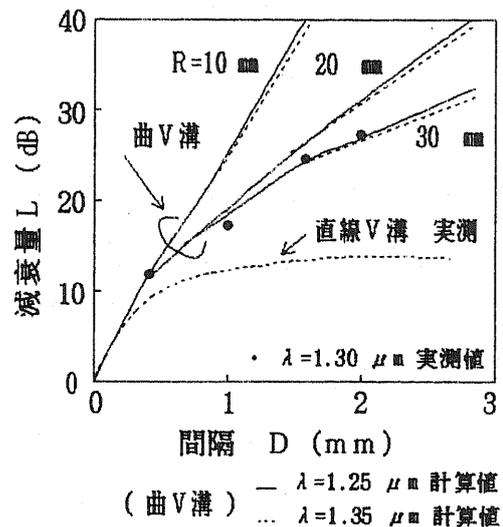
T : 結合ファイバ光軸間の斜め角度

n_a : 自由空間の屈折率

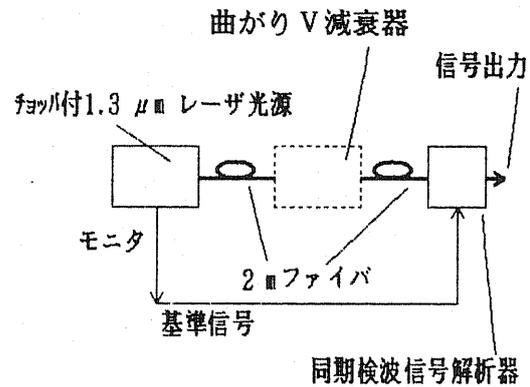
実験; 測定系は図(4.5)に示した。実験条件はテーブル(4.1)に示した。

使用した光源は $1.3 \mu\text{m} \pm 0.02 \mu\text{m}$ のレーザダイオードで、受光器はGe-APDと同期信号解析器からなり、単一モードファイバは段階屈折率型でコア半径 $a = 5 \mu\text{m}$ 、 $\Delta = 0.2\%$ 、曲がりV溝の半径 $R = 30 \text{mm}$ である。

実験結果; ガウシアン近似を用いた(4.1)式の計算結果は図(4.4)に示すように実験結果と良い一致を示し、その仮定の妥当性を確認した。実験結果をテーブル(4.2)に示した。実験結果としては減衰器最小挿入損失 0.5dB 以下、 $0 \sim 30 \text{dB}$ の可変減衰操作で往復100回の繰り返しでの再現性 0.5dB 以内を確認、外部温度 $5 \sim 55^\circ\text{C}$ に於ける偏差 0.5dB 以内、 35G の衝撃による偏差 0.5dB 以内の良好な結果を得た。



図(4.4) 減衰特性



図(4.5) 減衰特性評価光学系

テーブル(4.1) 光減衰器の実験条件	
光源	半導体レーザ $\lambda = 1.3 \pm 0.02 \mu\text{m}$
ファイバ	ステップ屈折率 $a = 5 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.2\%$
光検知器	Ge-APD 同期検波器
曲がりV溝	$R = 30 \text{mm}$

テーブル(4.2) 光減衰器の実測特性	
挿入損失 (コネクタ無し)	0.5dB 以下
再現性 (往復100回)	0.5dB 以下
連続減衰可変幅	30dB 以上
周囲温度安定性 ($5 \sim 55^\circ\text{C}$)	0.5dB 以下
機械衝撃 35G	0.5dB 以下

まとめ; 著者発案による単一モードファイバ用の光減衰器を検討した。

単一モードファイバ用の新しい構成の減衰器^{[4.10]*}を提案し、その実用性を確認した。ファイバの実測から遠視野像がガウシアンと仮定した計算結果は連続可変減衰量 30 dB の範囲で実験結果と良い一致が得られ、仮定の妥当性を確認した^{[4.10]*}。

本論ファイバ減衰器の特長は、

- (1) 単純な構造で小型化が可能、
- (2) 偏光依存性がない、
- (3) 固定挿入損失が小さく 連続可変の減衰範囲は大きい、
- (4) 減衰特性はファイバ構造パラメータから予想でき 設計性が高い、

である。

ここで提案した方式は構成が単純で、しかも精密な特性を得ることができる。光多重反射の発生が押さえられ広い減衰域に渡り連続可変であることからこの構成は汎用性があり、しかも小型化可能な構造で、光ファイバ通信では必要不可欠なものであり、工学的な意義は大きいと思われる。

4. 2 ファイバ型デバイスの 提 案

ファイバの寸法は髪の毛ほどで微細である。この大きさを生かしたデバイスは小型で軽量となる。ファイバ間にレンズを挿入できればファイバ端面を斜めにできて、光の干渉雑音は小さくできる。またファイバやレンズの端面部分には無反射膜コートを施すことができるので干渉効果を低減できる。レンズを挿入することで光学コンタクトを維持する必要は無く、信頼性向上や製造精度の緩和を図ることも可能性となる^{[4.12]*}。

さらにレンズを使うと色々の機能をレンズ間に盛り込むことも可能となる。しかし小型化したレンズの可能性は未知であり、実現手法は限られていた。ここではレンズ付ファイバ型デバイスを提案し検討する。

4.2.1 多モードファイバ分波器；

多モードファイバ用光分波器 の一構成法を提案する^{[4.13]*, [4.14]*}。

構造； 略平行の複数本のファイバ間に球レンズ2個と干渉膜フィルタ（誘電体多層膜）一枚を対称に配置する図(4.6)の構成を提案する。この構成では干渉膜フィルタへの光入射角度を垂直に近くでき干渉膜フィルタの特性を十分に生かす事ができる^[4.11]。

光分波器^[4.11]で問題となるレンズの波長特性を改善するため、球レンズ(SFS-1, N = 1.92)の周りをオクタフロロベンチルメタクリレート(OFPM, n = 1.39)等で満たす構造も提案する。この場合は図(4.7)の波長特性が得られる。なお光干渉雑音の発生を防ぎ温度特性を良くするためにはファイバ端面とOFPMの間には図(4.6)のように予め空気層を設けておく。

図(4.6)の構成でレンズとファイバおよび干渉膜フィルタの最適配列条件を検討する。

Q：レンズと干渉膜フィルタとの距離（レンズ間の距離 = 2Q）；

f：レンズとファイバとの距離；

F：レンズの焦点距離；

h：ファイバ端部とレンズ光学系軸との距離

として $F = f$ の場合を考える。

レンズ系中心軸と結合ファイバ光軸の成す角度 δ は^{[4.13]*, [4.14]*}；

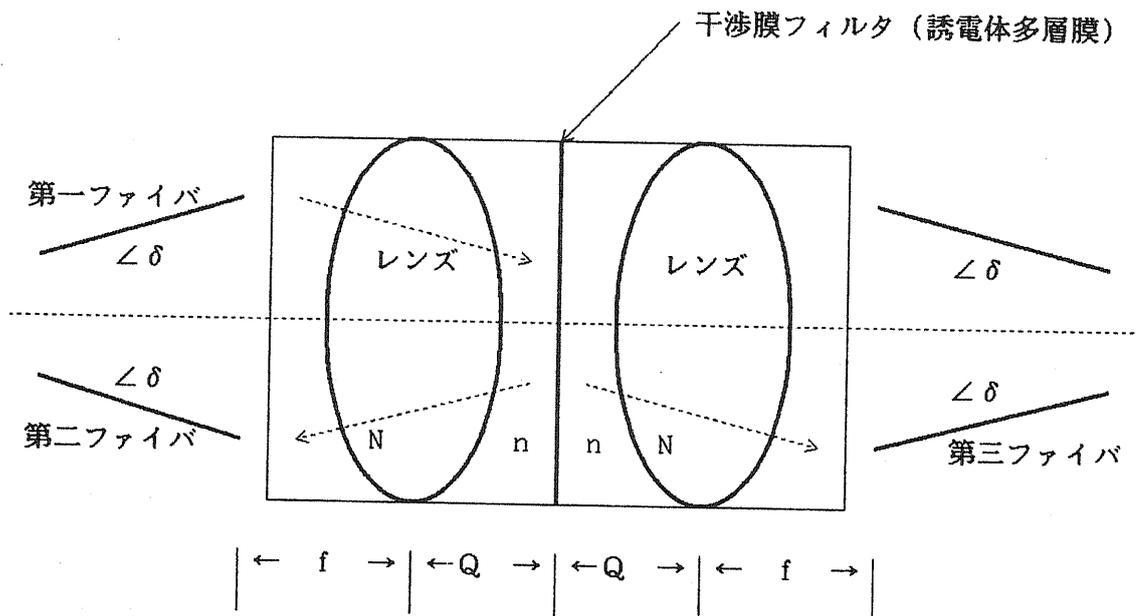
$$\delta = \text{Tan}^{-1} \left((Q - f) h / f^2 \right) \quad (4.3)$$

ここでファイバのレンズ結合での最適化はファイバ出射ビームを δ だけ傾けることで得られる。

$Q > f$ では $\delta > 0$ で第一ファイバ光軸右上がりの配置となり、レンズ中心に対してファイバ光軸が離れる方向に δ だけ傾ける。(下図の条件)

$Q < f$ では $\delta < 0$ で第一ファイバ光軸右下がりの配置となる。レンズ中心に向かってファイバ光が近づく方向に δ だけ傾ける。

$Q = f$ では $\delta = 0$ でレンズ系中心軸と結合ファイバ光軸は平行に配列する。



図(4.6) $Q > f$ 条件での光軸配置例

ここではファイバ端面はファイバ軸に直角に切断されている。

しかし光反射戻り光が(分波器外に)悪い影響を及ぼす事も考えられるのでファイバ端面を斜めに切断し、反射戻り光の削減が望まれる。さらにファイバ軸が δ だけ角度を持つと組立が煩雑になり、小型化の妨げにもなる。この問題は以下のようにして回避できる。

すなわちファイバからの出射ビーム軸を $\angle \delta$ だけ傾けるようにファイバ端面を斜めに切断すればよい。その傾け角度 θ は [4.13]*, [4.14]*,

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \left((Q - f) h / f^2 n_c^2 \right) \quad (4.4)$$

ここで n_c : ファイバのコア部屈折率

この(4.4)式の条件ではすべてのファイバ軸はレンズ系中心軸と平行配置になる。

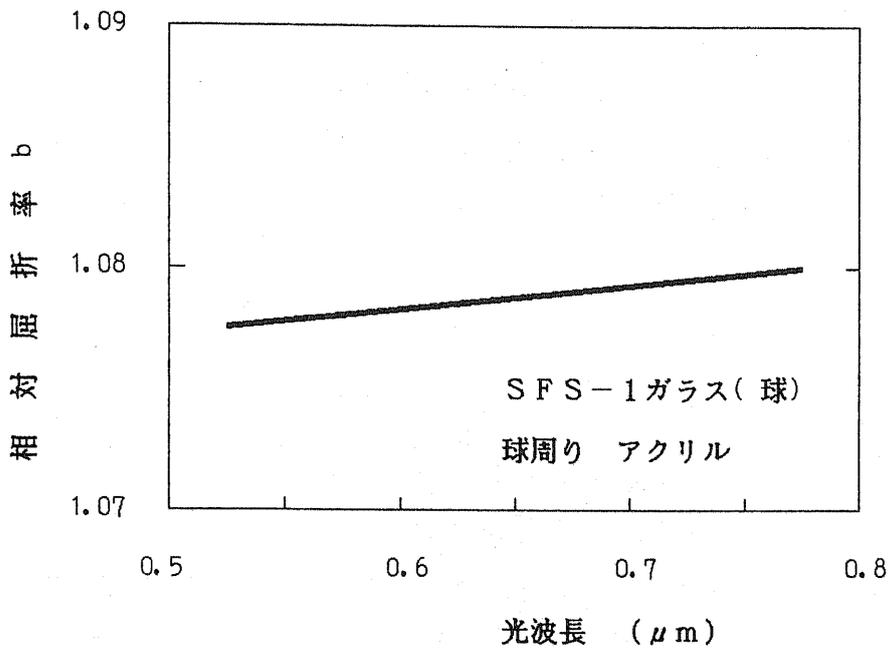
実験構成パラメータ; ステップ屈折率ファイバ : $a = 30 \mu\text{m}$, $NA = 0.19$,

実験条件での多モード : 多モード (図(3.4)のモード2 使用)

$$f \cong nR / (2(n_s - 1)) \quad (4.5)$$

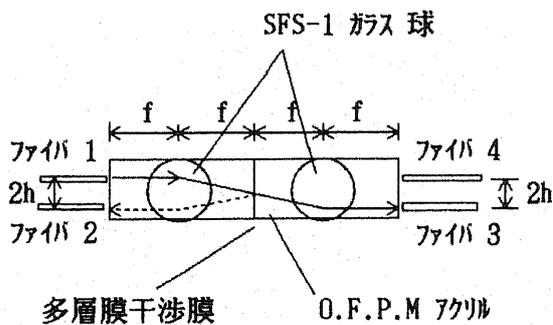
$n_s = N / n$, なお N =レンズ, n = レンズ周りの屈折率,

$N = 1.92$, $n = 1.39$, $R = 1 \text{ mm}$, $Q = 0.8 \text{ mm}$, $h = 0.1 \text{ mm}$.

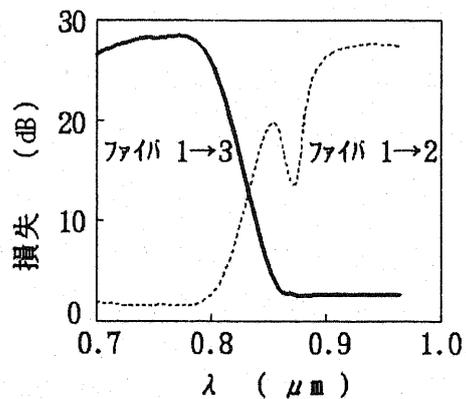


図(4.7) 相対屈折率 b の波長特性 [$b=(N/n) \cong (1.92/1.39)$]

実験結果; フィルタへの入射角度 は h/f で 0.55 (rad) であり, フィルタの損失は約 0.4 dB, ファイバ結合損失は約 1.3 dB であった。構成と分波特性を図(4.8), 図(4.9.1) にそれぞれ示す。本論レンズを4個一括して作成した一例を図(4.9.2) ^[4.14] * に示す。



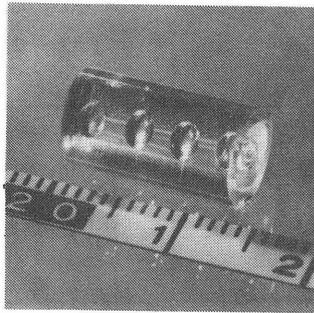
図(4.8) 試作分波器の構成と光路



図(4.9.1) 分波特性 (実験結果)

まとめ; 小型化で単純な構成の光2分波器の可能性を明らかにした。レンズの色収差を補正できるのでより広帯域な光分波器への適用可能性がある。

レンズ面への無反射膜処理を行った場合のレンズ結合損失の計算値は約0.7 dB である。実験ではファイバ端面やOFPM面には無反射膜処理をしてない。上記分波器のレンズ結合損失の実測値 1.3 dBには約0.5 dBのフレネル反射損失が含まれており、理論で予想される実験結果が得られ、本論の妥当性は確認されている [4. 13] *, [4. 14] *。なお、レンズと外囲材料の密着化、外囲材料の光学特性の均一化などには研究課題が残っている。



図(4.9.2) アクリル埋め込みレンズ4個

4.2.2 単一モードファイバ光方向性結合器

本論ではファイバ間に微細球レンズを挿入した小型軽量でしかも広帯域な方向性光結合器を著者が提案し試作・評価した [4.26]*, [4.27]*。

概要； 小型で低損失な2×2単一モードファイバ用の微細なレンズ式の方向性光結合器を検討した。この結合器内レンズ間に微細な機能部品を挿入して機能デバイスが形成できる。二本のファイバ端は凹型に研磨されている。このファイバは平行に近接させ、まとめて精密なフェルール穴内に配列している。これらのファイバ端対を対向させてその間に微細球レンズ2個とハーフミラーを挿入して構成している。

この構成での特徴は光路と機械的な構成部品の中心軸とが4.5°だけ傾いており、ファイバ端面やレンズ表面からの反射光のファイバ端への光結合とファイバ内部反射を防いでいる。このことで得られた方向性は光波長1.3 μmで53 dB以上、光波長1.53 μmで51 dB以上である。従来のレンズ方式では光路内部反射により高い40dB以上の反射減衰量は得られ難いものであった [4.15], [4.16], [4.17]。また半透明ミラー膜への光入射角度20度以上のものが多く報告されているが偏光依存性を小さく(≤0.1 dB)するには問題となる [4.15], [4.16], [4.18], [4.19]。光入射角度に合わせて膜を設計 [4.20], [4.21]すればよいが1.2 ~ 1.55 μmの広帯域に渡り特性を得るには光入射角度を小さくしたほうが生産性が高い。そこで本論ではあらゆる光入射面で垂直から最大4.5°だけ傾けた光路を取った。これにより上記問題点を解決した。この光方向性光結合器の過剰損失値は光波長域1.2 ~ 1.5 μmに於いて1.5 ~ 2.5 dBが得られている。

序論； 単一モードファイバ用の方向性結合器は光位相や周波数情報を再生するのに必要不可欠なデバイスである。ファイバ融着型の方向性光結合器では過剰損失が小さくできる特長があるが広帯域な光波長特性や偏波保存特性、光分岐比率などの設計性や調整性に問題があると思われ、如何なる場合でもファイバ型が使えるわけでは無い。

また従来からのレンズ利用での方向性光結合器はレンズ面やファイバ端面への光の入射角度が直角であり、~50 dBの光方向性や反射減衰量などは得られず問題があった。

本論では光路と機械的な構成部品の中心軸とが傾いており、ファイバ端面やレンズ表面からの反射光のファイバ端への光結合とファイバ内部反射を防いでいる。さらに誘電体多層膜を利用の分岐(又は分波)用の干渉膜(ハーフミラー)で波長特性や光偏光特性でそれぞれ最良の値を得られるよう垂直光入射に近い角度(≤4.5°)を用いている。シン

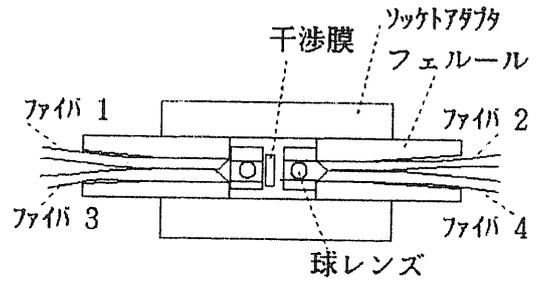
プルな構成で以上の目的を達成しその上で過剰損失を最良にできるレンズ間やミラーの最適配置の手法を明らかにしている。

構成： 図(4.10), 図(4.11)に示す構成である。2本の同じ径のファイバが互いに平行に精密なフェルルール穴内に配列されている。フェルルールにはファイバ径×2+1 μm の穴が開いている。ここで+1 μm はファイバ挿入のためのクリアランスである¹⁾。

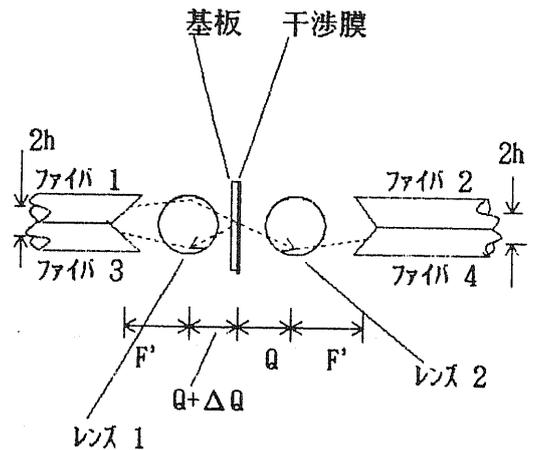
(¹⁾: 同じ径の2本のファイバを作るためにフッ酸液で同時に同じ条件でエッチングしている。また、外径寸法を精密にするために溶解速度を遅くして調整した。)

これらの2つのファイバ対は互に対向させ、その間に直径600 μm のサファイア球レンズ2個と分岐(又は分波)用の誘電体多層膜ハーフミラー(基板ガラス厚さd=100 μm 大きさ約800 μm 角)から構成されている。ファイバ対端面は図(4.12)に示す如く凹型に研磨されており、これにより近接ファイバへの光入射角度差をつけてクロストークの発生を防いでいる。このファイバ端面の傾き角 $\theta_p = 4.3^\circ$ である。その様子を図(4.13)に示す。ここで結合光とクロストーク光の関係をファイバ端面図(4.13)に示した。

図(4.11)光学系の構成を光線マトリックス式 [4.23] で示す [4.26]*, [4.27]* ;



図(4.10) 方向性結合器 断面

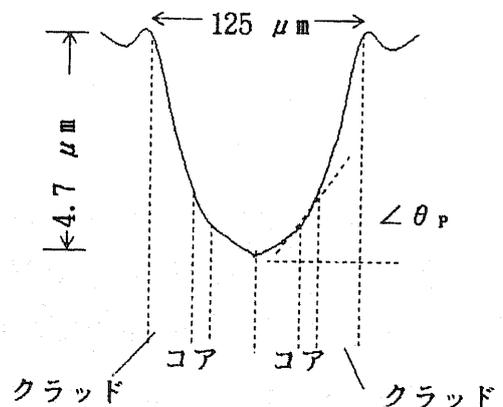


ファイバ 入出射光 : (位置, 角度)

ファイバ 1 ; (h, θ_0)

ファイバ 4, 3 ; (X_2, θ_2)

図(4.11) 方向性結合器 光学系



図(4.12) 2ファイバ端面凹面研磨部

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & F' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & Q \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & Q \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & F' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ \theta_0 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

なお h 及び x_2 はレンズ系中心軸とファイバコア中心との距離、
 θ_0 及び θ_2 はファイバ端への入出射光のファイバ中心軸に対して成す角、
 Q はレンズ主点面からハーフミラー膜までの距離、
 F' はレンズ主点面からファイバコア端までの距離、
 F はレンズの焦点距離である。

もし $F' \cong F$ を仮定すると (4.6) 式は以下のように簡略化される。

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 2(-1/F + Q/F^2) & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ \theta_0 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

さらに本構成で使用する四本の単一モードファイバのパラメータ^{[4.24]*} (コア系、比屈折率差) が同じであると仮定すればガウシアン光^{[4.24]*, [4.25]*} 整合の条件は(4.8)式で表される^{[4.26]*, [4.27]*}。

$$\theta_2 = \theta_0 \quad (4.8)$$

$$\theta_0 = \text{Sin}^{-1} \left[\frac{n_c}{n_a} \text{Sin} \theta_p \right] - \theta_p$$

なお

θ_p はファイバ端面の傾き角、 n_c はファイバコアの屈折率、
 n_a は空気の屈折率、である。

この結果から図(4.10)又は図(4.11)で示した方向性光結合器の光学系の整合条件式は(4.9)式で示すことができる^{[4.26]*, [4.27]*}。

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= -h \\ \theta_2 &= (Q-F)h/F^2 \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

上式がファイバ1 (図(4.11)参照) とファイバ4 との間の又はファイバ1 とファイバ3 との間の低損失結合条件式である。 図(4.11)の干渉膜保持ガラス基板透過による光路長Qの補正值 ΔQ は [4. 26] *, [4. 27] *,

$$\Delta Q = d(1 - (\tan(\sin^{-1}(n_a \sin(\theta_1) / n_m))) / \tan(\theta_1)), \quad (4.10)$$

$$\theta_1 = (F \tan(\theta_0) + h) / Q,$$

$$\theta_m = \sin^{-1}(n_a (\sin(\theta_1)) / n_m),$$

ここで d は片面にハーフミラー(干渉膜)が蒸着されたガラス基板の厚さ,

n_m は同上ガラス基板の屈折率,

θ_1 は同上ガラス基板への光の入射角度,

である。ファイバ4 端面反射によるファイバ2 (図(4.11)参照) への光クロストーク量或いはファイバ3 端面反射によるファイバ1 への光クロストーク量は(4.7) 式を用いて計算できる。 即ち図(4.11)で示したように θ_0 を θ_r に置き換えてクロストーク光路が得られる [4. 26] *, [4. 27] *。

$$\theta_r = -(\theta_0 + 2\theta_p) \quad (4.11)$$

ここで θ_p は (図(4.12), 図(4.13)に示した) ファイバコア端面の斜め角度,

クロストーク光の出力する位置にあるファイバ2 (或いはファイバ1) へのクロストーク光の入射位置 x と角度 T は, (4.12)式に示す。なおファイバ端面部での光入射角度の関係を図(4.13)に示した [4. 26] *, [4. 27] *。

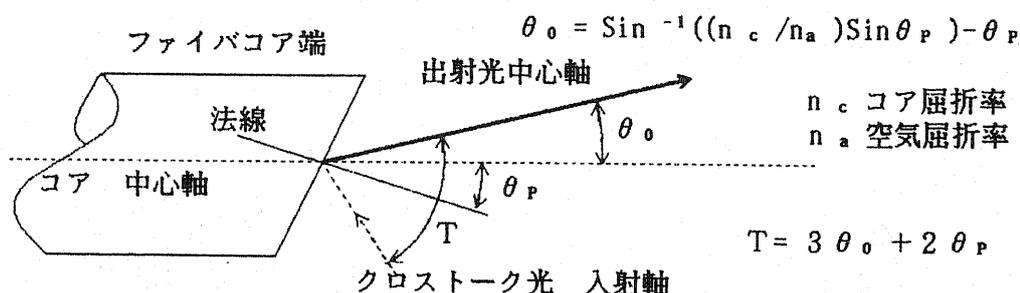
$$x = -h,$$

$$T = 3\theta_0 + 2\theta_p,$$

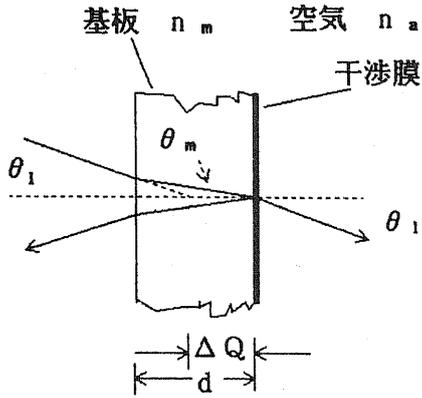
$$= 3 \sin^{-1}(n_c (\sin(\theta_p)) / n_a) - \theta_p. \quad (4.12)$$

そして方向性光結合器の方向性度 (Directivity) Ψ は [4. 26] *, [4. 27] *,

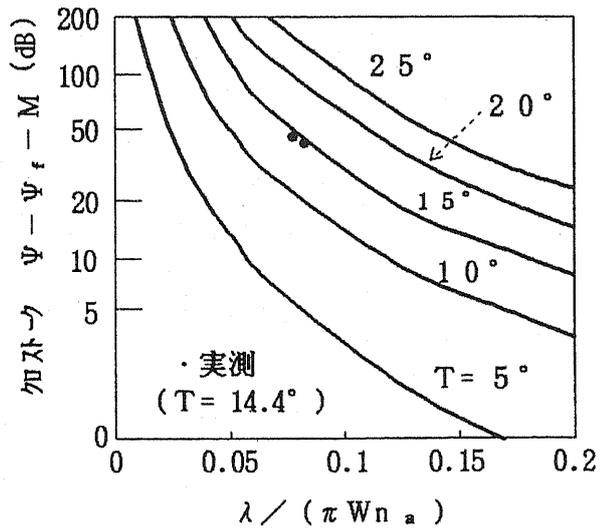
$$\Psi = -10 \log(\exp(-(\pi \cdot W \cdot n_a T / \lambda)^2)) + \Psi_f + M. \quad (4.13)$$



図(4.13) ファイバ出入射光



図(4.14) 干渉膜板への光入射



図(4.15) クロストーク特性 計算・実験

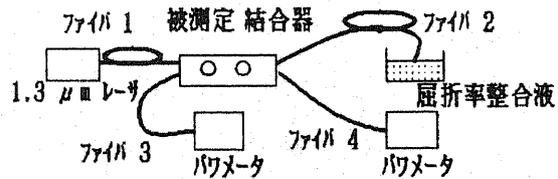
式(4.13)による計算

なお M は蒸着されたミラーの光透過（反射）損失量、ハーフミラーの場合には $M \approx 3 \text{ dB}$ 、 Ψ_f はファイバ端面のフレネル反射(Fresnel reflection) 損失、 $\Psi_f \approx 14 \text{ dB}$ 、 W は単一モードファイバのガウシアンビーム ウェストの半径、 λ は自由空間での光波長である。式(4.13)の計算結果を図(4.15)に示す。

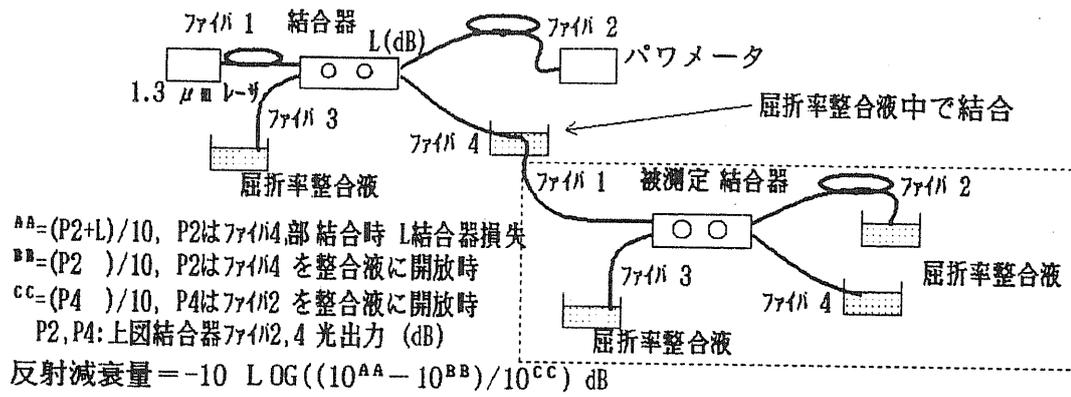
実験 [4.26]*、[4.27]*； 組み立てられた方向性光結合器は図(4.10)に示す構造であり、レンズ光学系の全長は数mm以内で、全体で数3gr と小型で軽量である。

また本論方向性光結合器の特性評価装置構成を図(4.16)、図(4.17)、図(4.18)に示す。

図(4.12)で示す2本のファイバの外径(クラッド径)はそれぞれ $62.5 \mu\text{m}$ であり、 $125 \mu\text{m}$ 径の穴の開いたフェルール内に平行に整列されている。この凹面の作成ではファイバ端面とフェルールとの研磨速度の差を利用している。このフェルールはアダプタの中で図(4.10)の如く2個のレンズを挟んで付き合わせて構成される。なお フェルールとアダプタの隙間は $0.5 \mu\text{m}$ 以下フェルール中心軸と $125 \mu\text{m}$ 径の穴の中心軸の偏芯は $1.5 \mu\text{m}$ 以下で、2個のレンズはそれぞれ $600 \mu\text{m}$ 径のサファイアである。



図(4.16) 挿入損失の測定系



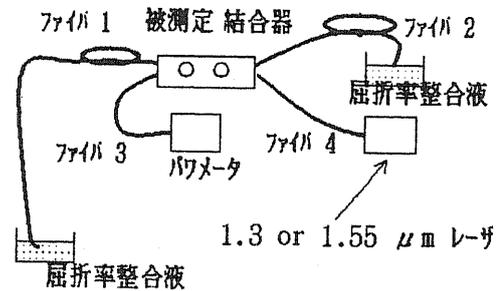
図(4.17) 反射減衰量 測定系

これらの方向性光結合器の評価条件をテーブル(4.3)に示す。また評価結果をテーブル(4.4)に示す。また光波長依存特性を図(4.19)に、周囲温度依存特性を図(4.20)にそれぞれ示す。反射減衰量は(4.13)式でTを θ_p にMを零に置き換えた形((4.18)式)になる。

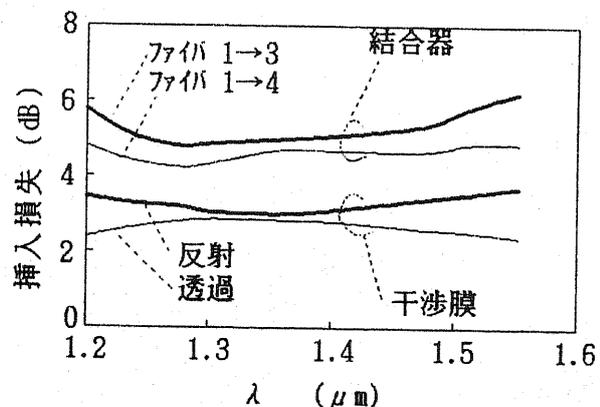
まとめ; 1. 25 μm ~ 1. 44 μm までの広い波長で低損失 (ハーフミラ含み5 dB以内) なレンズ式方向性光結合器を考案して検討を加えて試作実験で確認できた。

理論で予想される高い方向性 (Directivity) 60 dB (1. 3 μm 光波長) 以上が理論予測通り得られ、その妥当性が実験で検証された。周囲温度の $\pm 15^\circ\text{C}$ 変化に対して挿入損失変化は ± 0.3 dB以内であり、偏光度依存性は0.1 dB程度である。なお図(4.10)の本論方向性光結合器本体の重さは約3 grであり微細球レンズの有効性が確認された [4. 26] *, [4. 27] *。

以上の実験結果から本論方向性光結合器が実用化可能性が確認できた。国内外では情報通信セン



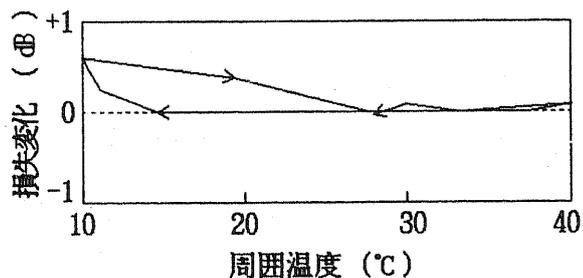
図(4.18) 方向性 Ψ 測定系



図(4.19) 結合器とその干渉膜の波長特性

図(4.16)で $\Delta \lambda = 100 \text{ \AA}$ のモノクロ光源を使用して測定

タと光加入者の間の上り下り通信用にそれぞれ2波長を用いることが考えられているが、レンズ間に挿入された干渉膜ハーフミラーに換えて光分波用干渉膜フィルタを用いれば、2波長分波器が構成でき有意義である。



図(4.20) 方向性結合器 実測温度特性

テーブル(4.3) 方向性結合器 の実験条件

レンズ	600 μm , サファイア球
Q	484 \pm 10 μm
θ_p	4.3 度
h	31 μm
干渉膜板寸法	(500 \times 400 \times 100) μm^3
θ_m	3.36度
ファイバ	a=4.48 μm , $\Delta=0.248\%$, $\phi=62.5 \mu\text{m}$
T	14.4度
屈折率整合液	反射減衰量 \sim 60dB

テーブル(4.4) 実験結果

挿入損 (ファイバ 1,3間)	4.7 dB ($\lambda=1.3 \mu\text{m}$)
挿入損 (ファイバ 1,4間)	4.4 dB ($\lambda=1.3 \mu\text{m}$)
方向性 (ファイバ 1,3間)	53 dB以上 ($\lambda=1.3 \mu\text{m}$) , (57.2 dB) * , (60.5 dB) **
	51 dB以上 ($\lambda=1.53 \mu\text{m}$) , (56.2 dB) * , (58.5 dB) **
反射減衰量	43 dB以上 ($\lambda=1.3 \mu\text{m}$) , (46.4 dB) * , (46.5 dB) **

注 () * 屈折率整合液の反射減衰量60dBでの (式(4.13)) 理論値

() ** 屈折率整合液の反射減衰量が無限大での (式(4.13)) 理論値

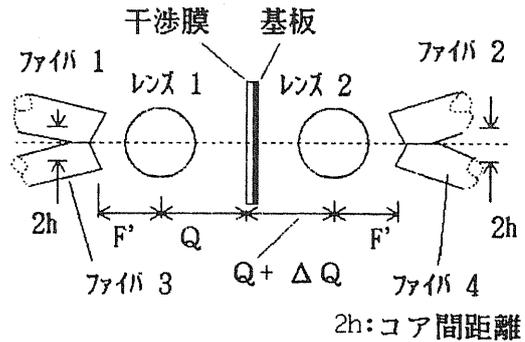
4.2.3 偏波面保存単一モードファイバ光方向性結合器 [4.31]*, [4.32]*, [4.33]*

光波のコヒーレントな特性を利用するには光方向性結合器には偏波保存性が要求される。偏波保存単一モード光ファイバを融着する(光結合長が短い)場合には平坦な広帯域特性は得られにくい [4.28], [4.29]。

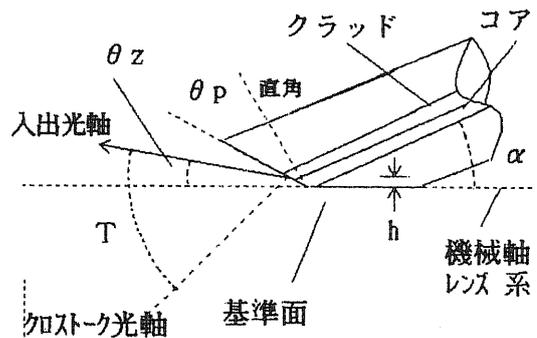
また偏波光ファイバを解かして融着するとファイバ組み込み応力歪み分布が変化して問題となると考えられる。それで最適融着条件は使用するファイバ毎に実験的に見出す必要があった。これを避けるため、レンズを用いた偏波面保存単一モードファイバ光方向性結合器を提案する。この場合には分岐比特性はレンズ間にある干渉膜ミラーの特性から決定できる [4.30]*。またレンズ間の空間を利用してミラーの振動を使った光位相変調など、他への発展性もある。

構造: 光学系として図(4.21)の構成をとった。4.2.2と異なりファイバ外形加工長を短くした。と言うのはフェルールに2本平行に納める場合には少なくとも10mmはファイバ外形の細径化加工が必要となるが、これを行うと偏波面保存単一モードファイバ内にあらかじめ組み込まれた応力歪みを壊してしまうからである。本論偏波結合器は図(4.22)ファイバ傾き角 $\alpha=5^\circ$ で加工長は0.7mmであり、極めて短いファイバ加工長で実現可能となる。

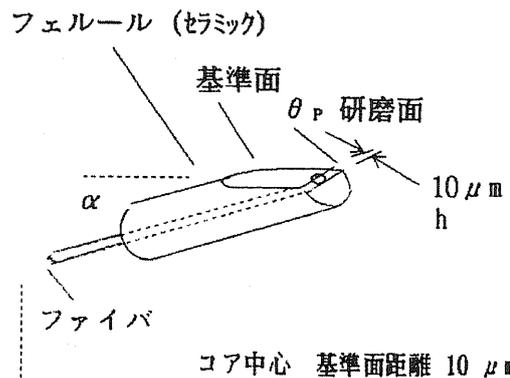
端面部が斜めになり、その側面に中心軸にたいして α だけ傾いた平らな基準面(目印)



図(4.21) 偏波方向性結合器光学系

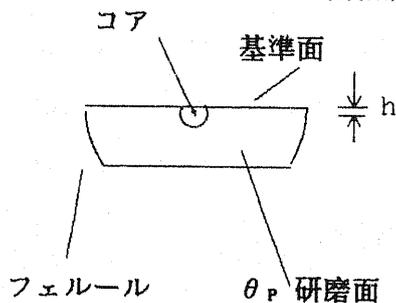


図(4.22) θ_p 斜め研磨ファイバ端



図(4.23) フェルールとファイバ端面

(フェルール内でファイバを回転調整)



*1500 倍に拡大 ファイバを回転して調整
図(4.24) フェルール内偏光軸調整

を設けたセラミック製のフェルール図(4.23)

に挿入し、図(4.24)の偏光方向調整治具

でファイバの偏光方向と直角な面とフェルールの基準面(目印)が並行になるように調整して組立てたものを図(4.25)のようにフェルール2個一組にして寄り添わせる。この時ファイバコア端面間の距離は図(4.26)の如く $20\mu\text{m}$ とした。2個一組のフェルール内ファイバ光軸は図(4.22)のようにレンズ系中心軸にたいして $\pm\alpha$ だけそれぞれ傾いている。さらにファイバ端面はファイバ光軸に対して傾き角 $(\theta_p - \alpha)$ であり、機械的な中心軸に対しては図(4.22)、図(4.25)のように傾き角 θ_p である。この条件でのフェルール内のファイバ端面(θ_p 研磨済)を図(4.26)に示す。

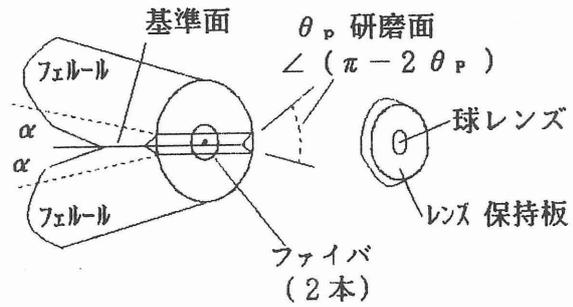
2個一組のフェルール端は図(4.25)のように機械的な中心軸(基準面)に対して垂直になる。ここに板に嵌入された図(4.25)、図(4.27)のレンズを図(4.21)のように中心軸上に位置合わせして取りつけた構造である。

ここで

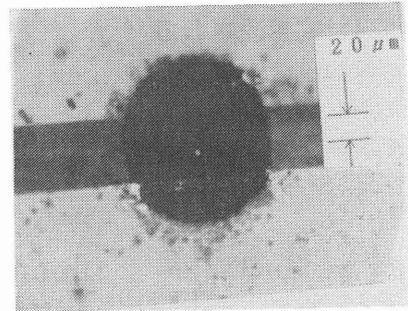
$$F' \cong F$$

を仮定すると光学系は(4.14)式のように簡略化して表現できる [4.31]*、[4.32]*、

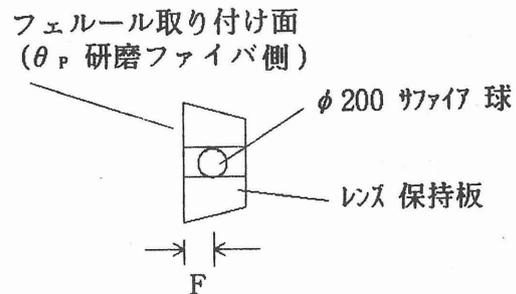
[4.33]*。



図(4.25) フェルール2個とレンズ



図(4.26) θ_p 研磨面とコア(2つ)



図(4.27) レンズと保持板の断面

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 2(-1/F + Q/F^2) & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ \theta_z \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

なお h 及び x_2 はレンズ系中心軸とファイバコア中心との距離,

θ_0 及び θ_2 はファイバ端への入出射光のファイバ中心軸に対して成す角度,

ただし $\theta_z = \theta_0 - \alpha$, (なお θ_0 は 図(4.13)参照)

Q はレンズ主点面からハーフミラー膜までの距離,

F' はレンズ主点面からファイバコア端までの距離,

F はレンズの焦点距離である。

さらに本構成で使用する四本の単一モードファイバのパラメータ^{[4.24]*} (コア系, 比屈折率差) が同じであると仮定すればガウシアンビーム (ガウシアン 光線) 整合の条件は(4.15)式で表される^{[4.31]*, [4.32]*, [4.33]*}。

$$\theta_2 = \theta_0 - \alpha \quad (4.15)$$

$$\theta_0 = \sin^{-1} \begin{pmatrix} n_c \\ - \\ n_a \end{pmatrix} \sin(\theta_p) - \theta_p$$

なお

θ_p はファイバ端面フェイスの傾き角

n_c はファイバコアの屈折率

n_a は空気の屈折率

である。

この結果から図(4.21)で示した方向性光結合器の光学系の整合条件式は(4.16)式で示すことができる^{[4.31]*, [4.32]*, [4.33]*}。

$$\begin{aligned} x_2 &= -h, \\ \theta_z &= (Q-F)h/F^2. \end{aligned} \quad (4.16)$$

これが光ファイバ1 (図(4.21)参照) と光ファイバ4 との間の低損失結合, 又は光ファイバ1 と光ファイバ3 との間の低損失結合条件式である。 図(4.22)に示すごとくクロストーク光と結合光との角度差 T は前記4.2.2と同様にして,

$$T = 3\theta_0 + 2\theta_P - \alpha,$$

となる。この角度差から極近接(20 μm)した図(4.25)のファイバコア間でのクロストークを防ぐことが可能となる。また(4.2.2と同様にして)クロストークが計算でき、方向性光結合器の方向性(Directivity)Ψは、

$$\Psi = -10 \log(\exp(-(\pi \cdot W \cdot n_a T / \lambda)^2)) + \Psi_f + M, \quad (4.17)$$

なお M は蒸着されたミラーの光透過(反射)損失量、

$$\text{ハーフミラーの場合には } M \approx 3 \text{ dB}$$

Ψ_f はファイバ端面のフレネル反射損失、

$$\Psi_f \approx 14 \text{ dB}$$

W は単一モードファイバのガウシアン 光線 ウエストの半径、

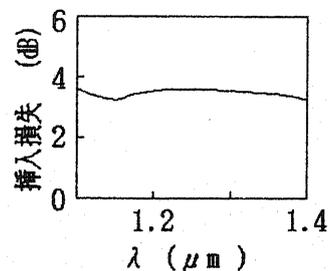
λ は自由空間での光波長、

であり、この(4.17)式の計算結果は図(4.15)となる。また、反射減衰量はRLは4.2.2と共通の以下の式で表す事ができる。

$$RL = -10 \log(\exp(-(2\pi \cdot W \cdot n_c \theta_P / \lambda)^2)) + \Psi_f, \quad (4.18)$$

となる。

実験； 実験では図(4.24)のようにファイバ偏光保持構造を1500倍に拡大してIR-TVで観察してフェルル基準面に合致するように回転調整し固定した。この方向性結合器は全長約20mm(4個のフェルル、レンズ2個含む)である。α=5°の3dB方向性結合器の特性例として以下の結果が得られている。



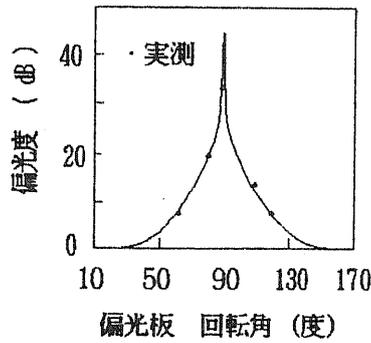
図(4.28) ファイバ1→3波長特性

光波長帯域1.2 μm~1.4 μmでの過剰損失1dB以内(図(4.28)参照)、

数m長のファイバを伝搬した後の直線偏光度は25dB以上(図(4.29)参照)、

光波長1.3 μmにおいて 方向性；Ψ ≥ 50dB, 反射減衰量；RL ≥ 40dB,

を確認できた(テーブル(4.5))、理論の妥当性を確認できた。



図(4.29) ファイバ1→3 偏光特性

テーブル(4.5) 偏波方向性結合器特性 実測

方向性	50 dB 以上
反射減衰量	40 dB 以上
過剰損失	1 dB 以下
	(1.2 ~ 1.4 μm)
偏光度	25 dB 以上

まとめ; 偏光ファイバ結合器で微細球レンズを用いて小型, 軽量な偏波保存方向性結合器を提案し, その有効性を確認した。

ここで理論的に示した手法により方向性や反射減衰量を高く保ちかつ高効率レンズ結合が得られる事を示した。またレンズ系内での光多重反射の除去も実現している。

偏波保存ファイバのコア径(ガウシアンスポット径)など, 偏波保存ファイバ構造パラメータに関係無く製造でき, しかも広波長範囲に渡り平坦で低損失な特性を実現できた。

この内容は偏波ファイバを取り扱う上で工学的に意義があると思われる。

以上から偏波保存単一モードファイバ出射光を ガウシアン と仮定した取扱が妥当であることも確認できた。

4. 3 ま と め

— ファイバ型デバイス —

4.1では単純な構成の光可変減衰器を提案し、実用性のある内容が得られた。

光通信センタとの距離が近い受信部や多重反射雑音をきらう送信端など、光反射減衰量を必要とする場合に使われる。光伝送と等価な損失値を与えて伝送システム評価に役立てることもできる。光増幅が可能な現在、光減衰器も同様に各所で必要となる。

4.2ではファイバ用の各種光デバイスを提案し、それぞれ良好な結果が得られることを実験で証明した。レンズとして球レンズを用いた。4.2.1～4.2.2では微細な球レンズが有効に活用できることを証明した。球レンズは精密加工が容易である。さらに微細なレンズの大量生産も容易である。レンズ間に挿入する干渉膜フィルタ(3dB膜)は約500 μm 角と極微細にでき、数 cm 角基板から多量に切り出すことが可能で量産できる。これらは光加入者系で必要な小型光ファイバ型デバイスの実現を可能としている。単一モードファイバ型では広帯域に渡る光分岐の機能を証明したが、この特性を生かした2分波器も同様にして実現可能である。高価な分波用の干渉膜ミラーの経済化に有効である。

提案のファイバ型デバイスはそれぞれ独創的で固有の特徴が有り、将来の光通信用として工学的な寄与の可能性がある。

4章では、3章までの検討結果の応用としてガウシアン仮定で単一モードファイバを取扱った。そして微細レンズによる単一モードファイバ型デバイス結合の検討を行った。その理論解析結果は実験結果と矛盾はなく、偏波保存ファイバを含め、本論の仮定の妥当性は検証された。

3章提案の結合手法の有効性は再び証明された。

第5章 光ファイバセンサ への応用

5.1 角速度センサ

まえがき； ジャイロ導入により、衛星通信アンテナ制御情報や移動体の位置情報などを実時間で入手できるので、加入者の動きにダイナミックに対応する移動体間高速通信網を構築することができる。そこで小型で高感度化の可能性があるファイバジャイロを本章のデバイスを応用して検討した^{[5.3]*, [5.6]*, [5.7]*, [5.8]*}。

光の位相や周波数の信号を電気に変換して検知する光ホモダイン／ヘテロダイン方式では信号光と局発光を混ぜ合わせる所で光結合器を使うが、混合する光の偏波面が揃わないと信号出力に問題が生じる。偏波面保存システムであれば、このような問題を軽減できる。

ファイバジャイロではこの光ホモダイン／ヘテロダイン検波を必要とする。本論では4.2.3の偏波面保存ファイバ方向性結合器に光位相変調機能を追加して構成したファイバジャイロ^{[5.6]*, [5.8]*}から検討する。

最初ファイバジャイロの動作原理を説明し必要となる光回路の構成を検討する。次に発光・受光機能部分（PINダイオード／レーザダイオード）の構成を示す。ここでは3.4.2の偏波保存ファイバとレーザのレンズ結合手法を活用している。そして光位相変調機能のある偏波面保存ファイバ結合器を検討する。これらの機能部分をまとめたファイバジャイロの動作原理を検討し、実験結果を示す。最後にまとめとして、将来の技術課題を述べる。

ファイバジャイロの動作原理； 動作原理はサナック(Sagnac)効果である。すなわちファイバコイル(=センシングループ)を左右廻りの光波は、ファイバコイルの回転角速度 Ω に比例しただけの光位相変化 $\pm\phi$ をそれぞれ受ける。それでコイル半径 B 、ファイバの全長 A 、ファイバ伝搬光の波長を λ 、 C を真空中での光速度とするとサナックの式は、

$$\phi = \pm | 2 \pi B A \Omega / (\lambda C) | \quad (5.1)$$

左右廻りの光波の位相差 2ϕ は結合器で合成されてホモダイン検波されるが、この場合

電気出力は $\cos(2\phi)$ に比例するので、感度向上のために非相反位相差 $\pi/2$ をファイバコイル中の光波に与える必要がある。それで左右廻り光がそれぞれ異なった時間に光位相変調を受けるよう光位相変調器をファイバコイルの一端に設けて非相反位相差 $\pi/2$ を与えている。複素ベクトル表示による光の偏光状態で表現する。ファイバコイル左右廻り入射光電界をそれぞれ a_0, b_0 として $k=2\pi/\lambda$, 光強度を I , サナック位相シフト ϕ_s , コイル長 A , 非相反変調位相 $\phi_{R1,2}$ では,

$$a_0 = (I/2)^{1/2} \exp(i(\phi_s + kA + \phi_{R1})) \quad (5.2)$$

$$b_0 = -i(I/2)^{1/2} \exp(i(-\phi_s + kA + \phi_{R2})) \quad (5.3)$$

光結合器通過後の光電界をそれぞれ a, b として,

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

$$\text{それで } a = (a_0 - ib_0) / \sqrt{2} \quad (5.5)$$

光検知(電気)出力 P は光位相変調を $\sin(2\pi f_{pm} t)$ とし, m を振幅係数として,

$$\begin{aligned} P &= \langle a a^* \rangle \\ &= [1 + \cos(2\phi_s) - 2J_1(2m \sin(nA\pi f_{pm}/C)) \sin(2\phi_s) \cos(\pi f_{pm}(2t - nA/C)) \\ &\quad - 2J_2(2m \sin(nA\pi f_{pm}/C)) \cos(2\phi_s) \cos(2\pi f_{pm}(2t - nA/C)) + \dots] (I/2) \end{aligned} \quad (5.6)$$

ここで J_1, J_2 は1th, 2th, Bessel関数であり n はコアの屈折率である。実効位相変調関数 ϕ_{NR} は $(\phi_{R1} - \phi_{R2})$ から,

$$\phi_{NR} = 2m \sin(nA\pi f_{pm}/C) \cos(\pi f_{pm}(2t - nA/C)) \quad (5.7)$$

(5.6)式の1thの項を狭帯域バンドパスフィルタで切り出せば,

$$P \sim 2 \sin(2\phi_s) \quad \text{となる。} \quad (5.8)$$

(5.8) 式は振幅出力である。

ジャイロの技術課題； 周波数変化の出力を得るには奇関数（鋸歯状）の位相変調 $\phi(\omega t)$ を信号に加える。この条件下で位相変移 $\Delta\phi$ を調整して(5.9) 式^[5.2] を満たせばイメージサイドバンドが打ち消されて周波数変化出力が得られる。なお $\omega = 2\pi f_{pm}$ 、振幅変調分を $g(\omega t)$ とする、

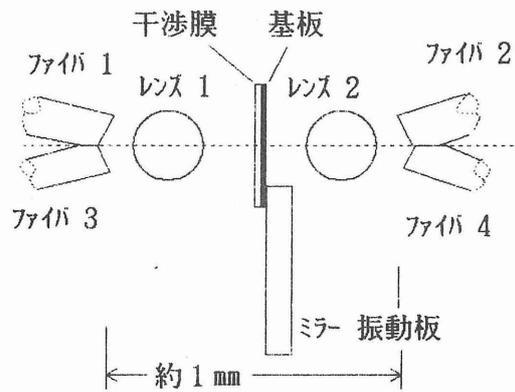
$$\int_{-\pi}^{\pi} g(\omega t) \cos(\omega t + \Delta\phi \cdot \phi(\omega t)) d\omega t = 0 \quad (5.9)$$

光位相変調器機能つき偏波面保存ファイバ結合器^{[5.1]*, [5.6]*, [5.8]*}

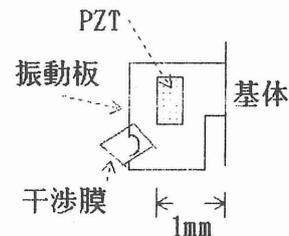
ファイバ側面型は二本（複数）の略平行に配列したファイバのコア間をサブミクロンの精度で数mmの長さに渡り近接させて光結合するものである。ファイバ融着や研磨加工で製造され、結合損失、偏波保存特性など良好な結果が報告されている。ここでは使用ファイバの偏波保持構造や、コア構造を熟知している事が必要であり、融着や研磨加工作業は難しい。しかしレンズを用いれば（2章で考察した）ファイバの W （ガウシアンビーム半径）が判れば開発が可能と思われる。

レンズを用いて結合する方式は一般には部品点数が多く、超低損失結合には不向きである。しかしレンズ間に機能部材を挿入できる利点がある。そこでレンズ型を提案した。

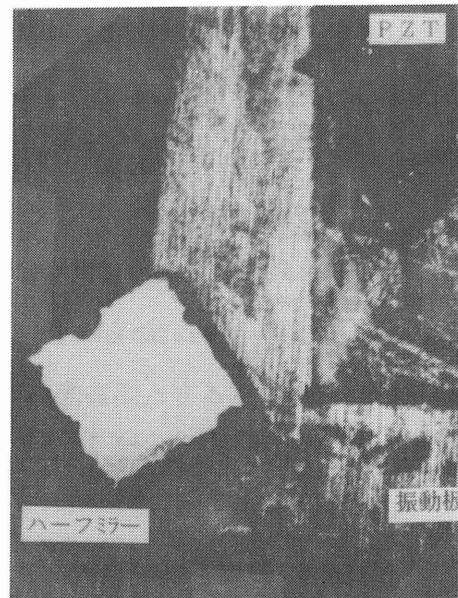
本論で提案する干渉型ジャイロでは、超低損失な結合器は必要としない。ただし、回転角速度の検知感度向上のためになるべく結合器に近接



図(5.1) 位相変調・方向性結合器



図(5.2) 半透明膜付 P Z T 振動板

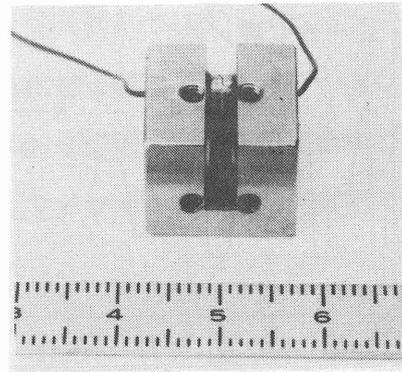


図(5.3) 半透明膜付 P Z T 振動板

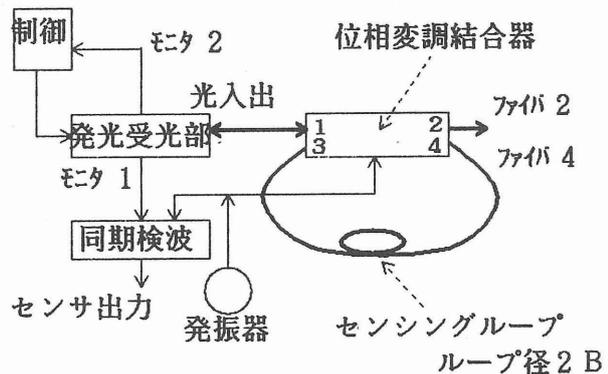
して、非相反性の光位相変調器を必要とする、この小型化は雑音除去のため重要である。

・光位相変調器内蔵型偏波面保存ファイバ結合器 [5.61]*, [5.81]* ;

図(5.1)には、提案する偏波面保存ファイバ結合器の構成を示す。高い方向性、高反射減衰量、広い波長特性、低損失、高偏波保持特性が得られる構成を実現している。球レンズ(直径200 μm のサファイア)二個と多層干渉膜による半透明膜を使用し、偏波ファイバ(図(5.1)参照)よりの光波を他の偏波ファイバ2本と結合するもので4.2.3とほぼ同じ構成である。レンズ面やファイバ端など光の通る境界面は全て無反射膜が施されている。図(4.25)に示した $\alpha=5^\circ$ のフェルルールにファイバを内蔵したものを用いた。その他4.2.3とほぼ同様な内容である。なお主なパラメータを挙げると、ファイバコア端部 $\theta_p=4.3^\circ$ 、ファイバ加工長は700 μm 以内、1.2~1.4 μm の光波長帯での過剰挿入損失は1dB以下、偏光保持度は20dB以上、方向性及び反射減衰量は40~50dBがそれぞれ得られた。この結合器では図(5.1)の振動板上の3dB膜を振動させて行路長を時間的に変える。すなわちPZT振動子を張りつけ

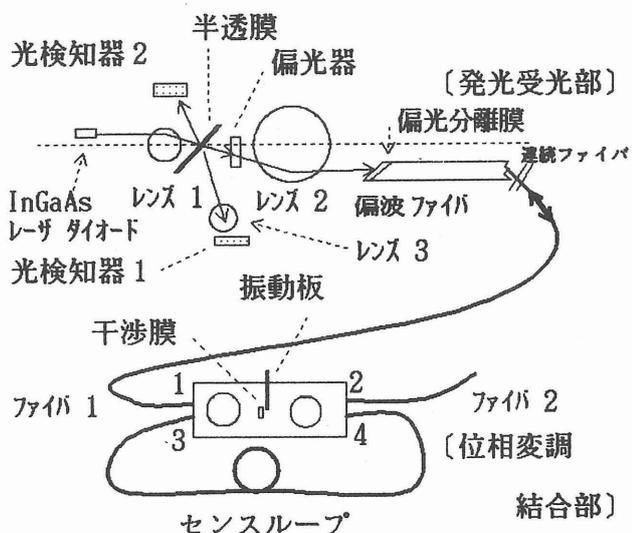


図(5.4) 位相変調・方向性結合器

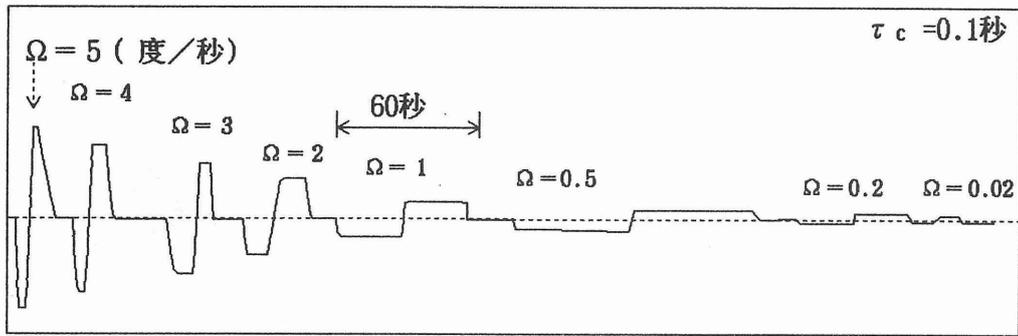


図(5.5) 偏波ファイバ ジャイロ構成

[5.61]*, [5.81]*

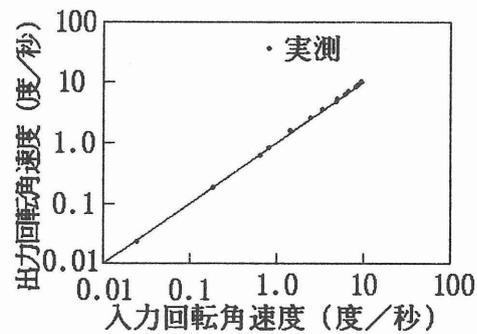


図(5.6) 偏波ファイバジャイロ光学系

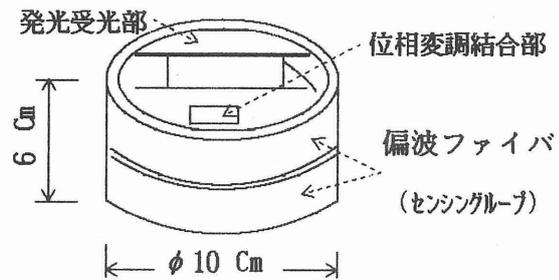


図(5.7) $\pm\Omega$ 回転角速度 応答 (実測ジャイロ特性)

た超鋼製の図(5.1)の振動板を振動させ、左右両回り光間で変調のタイミング差による光位相変調がしている。なお結合器通過光には変調はわからない。図(5.3)に振動板上のPZT振動子と3dB干渉膜(500 μm 角)の拡大写真を図(5.7)に角加速度 $\pm\Omega$ 入力時の実測ジャイロ出力を示す。図(5.4)にPZT用駆動リード線をついた結合器框体(ファイバ無し)を示した。このPZT用駆動周波数は約13.4kHzである。



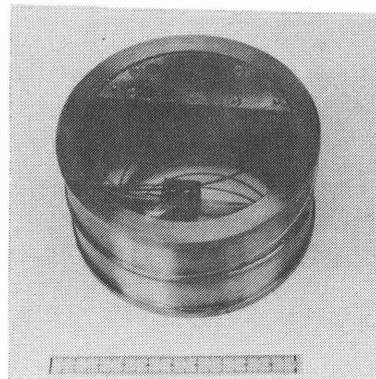
図(5.8) ジャイロ 線型応答性 (実測)



図(5.9) 偏波ファイバジャイロ

光ファイバジャイロの構成；

図(5.5), 図(5.6)に位相変調機能のある偏波面保存ファイバ結合器を用いたファイバ・ジャイロの構成を示す。光源として、ファイバ後方散乱を小さくするため、1.3 μm のレーザダイオードを用いている。ここでのレーザダイオードと偏波ファイバ光結合系(図(5.6))は3章と同じ手法である。後方散乱を小さくす



図(5.10) 偏波ファイバジャイロ(図(5.9))

るため、センサコイルから結合器までは一本の偏波ファイバから形成している。pin ダイオード受光器²でレーザのパワー制御光を、また、受光器¹ではジャイロ出力光をそれぞれ検知している。レーザからの光は、偏光器を介して結合器で二分され、一方は図中1⇒4⇒3⇒1の光路をセンサコイル（直径約8cm, 175m）を通過してから位相変調を受けるが他方は（1⇒3⇒4⇒1）先に変調を受けてからセンサコイルを通過し、兩回り光同時に1のファイバに戻り、受光器¹で干渉光が検知される。この光学系を図(5.6)に示す。

兩者同一光路を取るが、これは、 10^{-9} m オーダの光位相差をも検知可能にするために、ファイバに加わる音波、気圧差などの外乱で同相分を除去するためである。この効果を向上するため図(5.9)に示すようにファイバコイルを2分割して巻き始めと終わりでの外乱除去を効果的にしている。本論構成^{[5.6]*, [5.8]*}ではファイバコイル中心から見て光学系配置は全く対象であり、同相分除去比を大きくできる点に特長がある。

回転角速度 ϕ_s のジャイロ出力は $\cos(\phi_s)$ 型になる。微小信号を効率的に検知するには不都合である。そこで、変調位相 ϕ_{NR} を制御し、前記(5.8)式を保っている。

このことでダイナミックレンジを向上できる。検知した結果を図(5.7)、図(5.8)に示す^{[5.6]*, [5.8]*}。回転角速度 ϕ_s の範囲 $0.02^\circ/s \sim 20^\circ/s$ を再現性よく検知できた。

なお片持ち型でミラーを振幅変調しており、振動板の一面だけにPZT板を張りつけているため、振動の行き帰り速度がアンバランスになる。これから光位相変調は奇関数にでき、位相変移 $\Delta\phi$ を調整し前記(5.9)式を満たせばより高感度化の可能性がある。

ファイバコイルの構成；

左右廻り光が受ける外乱が同相で同時期に光検知器に到達するようにボビンを上下に分割して中心位置から巻き始める。その時ファイバコイル全長の半分だけを別のボビンに残して置いて、上下同様に巻いた。このことで同相雑音を除去した。ボビンはスーパインバーである。図(5.9)および図(5.10)参照。

発光・受光機能部分^{[5.6]*, [5.8]*}；

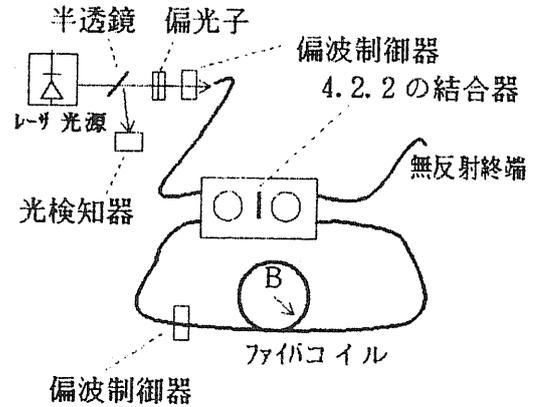
ファイバ光入射端面部からレーザダイオードまでの約7mmの中にPINダイオード2個、レーザダイオード、ハーフミラー、偏波保存ファイバ結合用レンズ2個、信号光受光用レンズ1個、偏光子を含む図(5.6)の部分である。これは小型化を狙った構造である。

まとめ；

すでに実用的特性が種々報告されている^{[5.4], [5.5]}しかし小型軽量化は十分ではな

い。本論では小型偏波面保存ファイバ結合器により、単純な構成のファイバジャイロが実現できることを示した。将来の課題として、光位相検知器回りの低雑音化、安定化のため、SLDの採用などがある。安定度を向上しコストも下げるためには、ジャイロの小型化が重要と思われる。特にコイルを小さくするためファイバの最適化が重要である。

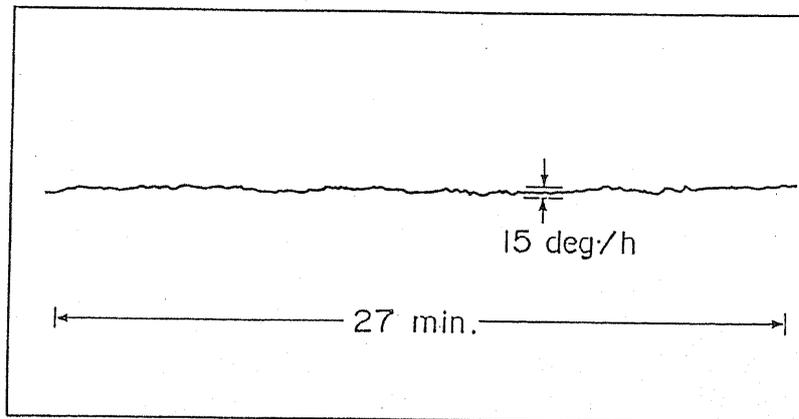
偏波保存性の無い単一モードファイバでジャイロを構成できる。偏波保存性の無いファイバでコイル長300mのジャイロを4.2.2の方向性結合器と、光波長 $1.3\ \mu\text{m}$ レーザダイオードを用いて位相変調を行わないジャイロでも実験した。その構成を図(5.11)^{[5.31]*, [5.71]*}に示した。ここでは光波の位相検出のために多数個の受動的な偏波面制御素子を用いている。短期的な測定結果を以下に示す。安定度特性の実測結果として $15^\circ/\text{時}$ (図(5.12)^{[5.31]*, [5.71]*}) が得



図(5.11) 非偏波ファイバジャイロ

$B \approx 15\text{cm}$

られ、この結果から、使用した光方向性結合器の方向性や反射減衰量が高く、ファイバセンサループ内部での残留反射量が小さい事が証明された。



図(5.12) 非偏波ファイバジャイロの安定性測定結果

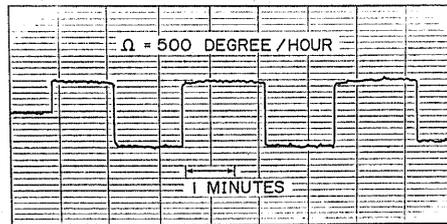
(横軸：矢印範囲27分間, 縦軸：矢印範囲 $15\ \text{deg/h}$)

図(5.13)に回転角速度の評価結果を示す。検知実験では $\pm 500^\circ/\text{時}$ が再現良く得られている。そして図(5.14)^{[5.31]*, [5.71]*}に偶然検知された地震の検出結果($800^\circ/\text{時}$)を示す。なおここでは地震の最初の振れが記録されており、本震部は記録が途絶えて

いる。

このジャイロでは偏波面制御器を必要とする [5. 3] *, [5. 7] * このため小型化や長期安定化は難しい。長期の安定性を得るには能動偏波面制御素子が必要となる。

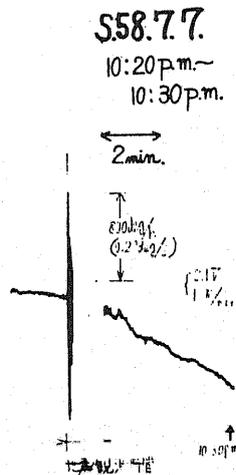
しかし、通常の単一モードファイバは損失が小さいので都市を囲む規模や地球規模のファイバジャイロが構成できる。将来、本論で構成を提案したジャイロの発展により、重要な役割が果たせるものと考えられ、工学的に意義がある。以上、単一モードファイバからの光をガウシアン近似にて解析した本論の手法の妥当性は実験的に確認された。



図(5.13) 非偏波ファイバジャイロ応答特性 (入力 $\Omega = \pm 500 \text{deg/h}$)

(横軸：1目盛 1分, 縦軸：1目盛 90.9 deg/h)

地震検知例



図(5.14) 非偏波ジャイロ地震検知 例

(横軸：矢印範囲 2分, 縦軸：矢印範囲 800 deg/h)

5. 2 ま と め

— ファイバセンサと光通信ネットワーク —

光ファイバジャイロによる位置情報を取り入れ、道路上の加入者を含むダイナミックな道路情報通信光ネットワークへの適応が考えられる。現在、移動体通信の分野ではパーソナル通信ネットワークの急速な需要拡大が見られる。バスや、新幹線など、移動体中でも自由で高品位な情報通信が実現されつつある。

オフィスの中でも従来机に備付けられていたビジネスコンピュータも電源ケーブルの無い可搬型が主流となり、高品位プリンタもケーブルレスの無線になりつつある。移動する多数の通信端末に位置情報を与えることがファイバジャイロにより可能となれば通信ネットワークをさらに高速で大容量化できる。

そして今後は加入者系の通信ネットワークはさらに高度化する必要がある。ただしコストパフォーマンスを考慮すると、安価で高速な光情報直接処理^{[5.9]*, [5.10]*, [5.11]*}が望まれており、この実現により、光通信ネットワークの加入者への導入が加速されると思われる。

その他に課題として、高速で高信頼度の多重通信を可能とする広帯域光ファイバ道路通信網の構築や道路情報収集センサの開発、移動体通信システムの展開、高速無線通信器の開発などがある。

第6章 結論

高品質な通信サービスの家庭までの普及・促進を考えた場合には、単一モードファイバとデバイスとの高効率な結合手法に研究課題がある。本研究ではデバイス間ファイバ結合法を工夫して理論解析と実験を行い、本論提案結合方式の有効性を検証した。

多モードファイバでは高次モードを制限して擬似的定常モードを作る手法を最初に提案し、これを用いたレンズ結合特性のモード依存性やレンズ曲率半径依存特性を明確にしている。さらに光素子とファイバのアレイ結合でのクロストーク特性の低減法や光分波器などで新規な光結合手法をそれぞれ提案し、その有効性は理論と実験から検証した。

単一モードファイバでは規格化周波数が2以上で、コアとクラッドの屈折率勾配が6以上の単一モードファイバのモード分布はガウシアン分布で近似でき、被測定単一モードファイバ間の2波長での結合効率から等価段階屈折率分布のコア径、開口率、遮断波長を求める解析法を著者が考案し、実験でその有効性が検証されている。

著者はこの解析法により構造パラメータを定義した単一モードファイバを4種類用いて、微細球レンズ式コネクタを工夫し理論解析と実験によりその有効性を証明した。本論レンズ式は、磨耗ゴミによるコア破壊や、軸ずれ結合時の劣悪な結合損失波長特性など、直接結合単一モードファイバコネクタの問題点を解決し、その上、着脱部精度が緩和できるなど優れた特長がある。またファイバの端面間の距離と角度を変えることで連続的に大幅に減衰量が可変できる単一モードファイバ減衰器を考案して性能を確認した。さらに本論での単一モードファイバ方向性光結合器では光路と構成部品の機械的中心軸を傾けて、多重反射やファイバ端部反射を除去した。そして高効率なレンズやミラーの最適構成条件を明確にした。偏波面保存ファイバ光方向性結合器においてファイバ加工長0.7mmのレンズ式を考案評価し、方向性50dB以上、反射減衰量40dB以上で偏光度も25dB以上を確認した。この方向性結合器のハーフミラー振動による位相変調ファイバジャイロでは $0.02^{\circ}/s \sim 20^{\circ}/s$ の回転角速度が安定に検知でき、ファイバの良好な結合特性が検証された。

以上から光結合の高効率化に関する本研究の内容の妥当性と実用可能性が検証できた。これらの内容は将来性があり、工学的な意義がある。

単一モード光ファイバの家庭での使用は現在では考えられない状況である。しかしプラスチック光ファイバは自動車内通信用やAV機器接続用として実用になっている。この差は光結合の難易さから来ているのではなかろうか？ここで提案した手段が手軽な光接続のため役に立つことを願うものである。

謝 辞

本論文の作成で懇切丁寧なご助言をいただく静岡大学 宮川教授, 岡本教授, 池田教授, 篠原教授, 大坪助教授, 小楠助教授 に深謝致します。

本論文は富士通において筆者が行った1977年ごろからの研究内容をもとにしている。
関連された諸氏のご指導, ご援助に心から感謝します。

本論文でご支援していただいた富士通の高梨博士に御礼致します。

最後に静岡大学の学部と修士課程の指導教官で卒業当時から激励を続けてくださる一条博士に御礼致します。

本論文に關係する筆者の發表

(筆者筆頭著者 *印)

< Papers >

- [11] * S. Masuda, : "Variable attenuator for use in single-mode fiber transmission systems", Applied Optics Vol. 19, No. 14, pp. 2435-2438, (July, 1980).
- [12] * S. Masuda, T. Iwama, and Y. Daido, : "Nondestructive measurement of core radius, numerical aperture, and cutoff wavelength for single-mode fibers", Appl. Optics Vol. 20, No. 23, pp. 4035-4038, (December 1, 1981).
- [13] * S. Masuda, and T. Iwama, : "Low-loss lens connector for single-mode fibers", Applied Optics Vol. 21, No. 19, pp. 3475-3483, (October 1, 1982).
- [14] * S. Masuda, and T. Iwama, : "Single-mode fiber-optic directional coupler", Applied Optics Vol. 21, No. 19, pp. 3484-3488, (October 1, 1982).
- [15] * Shigefumi Masuda, Terumi Chiama, Takashi Tohge, : "Polarization preserving 2×2 directional coupler", Optical Engineering 25(8), pp. 984-989, (August 1986).

< 國際学会 関連 >

- [16] * S. Masuda, T. Iwama, T. Nakagami, : "A Novel fiber-optic gyroscope using 2×2 single-mode fiber directional coupler", IOOC 83' Tokyo (1983).
- [17] * Shigefumi Masuda, Terumi Chikama, Takashi Tohge, : "Polarization preserving 2×2 directional coupler", Proceeding SPIE 568, pp61-68(1985).
- [18] * S. Masuda, N. Fujimoto, H. Rokugawa, K. Yamaguchi, and S. Yamakoshi: "Experiments on optical drop/insert function using bistable laser diodes for optical access nodes" Photonic Switching, Technical Digest, Optical Society of America, PP145-147, (Washington, D. C. 1989).
- [19] * S. Masuda, H. Rokugawa, N. Fujimoto, and S. Yamakoshi, : "Architecture on optical processing for communications", OSA Proceeding on Photonic SW. 89' Vol. 3, pp286-290, (1989).

< 国内発表 >

- [101] * 増田重史, 岡本明, 古田洋介 『光ファイバ接続損失測定法の一案』
昭和52年度電子通信学会総合全大No. 840, P4-144 .
- [111] * 増田重史, 常世界, 『ファイバのレンズ結合特性』, 電子通信学会光・量子
エレクトロニクス研究会, OQE78-47, (1978-7).
- [112] * 増田重史, 常世昇, 『シングルモード用レンズ式コネクタ』,
電子通信学会光・量子エレクトロニクス研究会, OQE79-7, PP45-52(1979).
- [113] * 増田重史, 常世昇, 『シングルモード用レンズ式コネクタの基礎検討』, 昭和54
電子通信学会総合全国大会802
- [114] * 増田重史, 池上佳住, 中島啓幾, 常世界, 『光分波器』電子通信学会光・量子
エレクトロニクス研究会, OQE79-84, (1979).
- [115] * 増田重史, 池上佳住, 中島啓幾, 『マイクロ・レンズシステム』,
昭和55電子通信学会総合全国大会817, (1980-3).
- [116] * 増田重史, 『シングルモード用レンズ式コネクタ』, 電子通信学会光・量子
エレクトロニクス研究会, OQE79-133, (1980).
- [117] * 増田重史, 岩間武夫, 藤田賢吾, 『ファイバ入力光受光素子間のクロストーク
の一検討』, 昭和56電子通信学会半導体・材料部門全国大会383.
- [118] * 増田重史, 岩間武夫, 常世界, 『シングル・モードファイバ用レンズ式コネクタ』
昭和56電子通信学会総合全国大会2259.
- [119] * 増田重史, 岩間武夫, 『単一モード・ファイバのコア径・屈折率差・単一モード
限界波長の測定法』, 昭和57電子通信学会総合全国大会972
- [120] 岩間武夫 増田重史 『シングルモードファイバ用光方向性結合器』
58年度電子通信学期総合全大1020.
- [121] * 増田重史, 岩間武夫 『レンズ・アレイの構成法』58年度電子通信学
総合全大1018(1983年3月22日).
- [122] * 増田重史, 岩間武夫, 中神隆清, 『高精度光ファイバ・ジャイロの一構成』,
電子情報通信学会光・量子エレクトロニクス研究会, OQE82-103, PP57-64(1983).
- [123] * 増田重史, 中神隆清, 『偏波面保存ファイバと半導体レーザの結合方式一案』,
昭和59電子通信学会光・電波部門全国大会348.
- [124] * 増田重史, 岩間武夫, 『偏波面保存ファイバ用光方向性結合器』
昭和59電子通信学会光・電波部門全国大会407.

- [25] * 増田重史, 他, 『DFB-LDのスペクトル線幅に対する反射戻り光の影響』
昭和60電子通信学会半導体・材料部門全国大会319.
- [26] * 増田重史, 尾中寛, 近間輝美, 峠隆, 『偏波面保存カップラを用いた半導体レーザのスペクトル線幅測定装置』, 昭和60電子通信学会半導体・材料部門全国大会334.
- [27] * 増田重史, 峠隆, 『光ファイバ回転角速度センサの一検討』, 昭和60電子通信学会総合全国大会1062.
- [28] * 増田重史, 寿山益夫, 尾中寛, 桑原秀夫, 『外部共振器型半導体レーザの狭スペクトラム線幅化と周波数安定化の一検討』,
電子通信学会光・量子エレクトロニクス研究会OQE85-173 (1986).
- [29] * 増田重史, 『全光処理交換方式』, 昭和63年電子情報通信学会秋期全国大会 B179.
- [30] * 増田, 岩間『PIN フレイモジュール』実用新案公告: 昭61-38207.

各章の参考論文

- (1. 1) Gloge, D. : "Dispersion in weakly guiding fibers", Appl. Opt., 10, 11, pp. 2442-2445 (Nov. 1971).
- (1. 2) A. W. Snyder, : "Asymptotic expressions for eigenfunctions and eigenvalues of dielectric or optical waveguide", IEEE Trans. on Microwave Theory Techniques MTT-17, No. 12, pp. 1130-1138, (Dec. 1969).
- (1. 3) Gloge, D. : "Weakly guiding fibers", Appl. Opt., Vol. 10, No. 10, pp. 2252-2258, (Oct. 1971).
- (1. 4) D. Marcuse and H. M. Presby, : "Focusing method for nondestructive measurement of optical fiber profiles", Appl. Opt. Vol. 18, No. 1, pp. 14-22, (Jan. 1979).
- (1. 5) D. Marcuse, : "Loss analysis of single-mode fiber splices", Bell Syst. Tech. Jour., 56, pp. 703-718, (1977).
- (1. 6) S. A. Shchelkunoff, Electromagnetic Wave, P94 (Van Nostrand, New York, 1943)
- (1. 7) S. D. Personick: "Time dispersion in dielectric waveguides", Bell Syst. Tech. Jour., 50, 3, p. 843, (1971).
- (1. 8) D. Gloge: "Optical Power Flow in Multimode Fibers", Bell Syst. Tech. Jour., Vol. 51, No. 8, pp. 1767-1783, (Oct. 1972).
- (1. 9) W. A. Gambling, D. N. Payne, H. Matsumura, and S. R. Norman, : "Measurement of normalised frequency in single-mode optical fibers", Electron. Lett. 13, No. 5, 133 (1979).
- (1. 10) K. Hotate and T. Okoshi, : "Measurement of refractive-index profile and transmission characteristics of single-mode optical fiber from its exit-radiation pattern", Appl. Opt. Vol. 18, No. 19, pp. 3265-3271 (1979).
- (1. 11) H. Matsumura, T. Suganuma, : "Normalization of single-mode fibers having an arbitrary index profile", Appl. Opt. Vol. 19, No. 18, pp. 3151-3158, (Sept. 1980).
- (1. 12) Y. Murakami, A. Kawana, and H. Tsuchiya, : "Cut-off wavelength measurements for single-mode optical fibers", Appl. Opt. Vol. 18, N. 7, pp. 1101-1105, (April, 1979).
- (1. 13) * or (1) * S. Masuda, : "Variable attenuator for use in single-mode fiber transmission systems", Appl. Optics Vol. 19, No. 14, pp. 2435-2438, (July, 1980).

- (1. 14) H. Kogelnik, : "Coupling and Conversion Coefficients for Optical Modes in Quasi-Optics," in Microwave Research Institute Symposia Series, Vol. 14, J. Fox, Ed. 333, (Polytechnic Press, Brooklyn, 1964).
- (1. 15) W. J. Tomlinson, : "Application of GRIN-Rod lenses in optical fiber component s", 微小光学システム会議, 東京 (昭和56年 5月).
or Appl. Opt. 19, 1127(1980)
- (2. 1) 関沢義, 工藤達夫 『光ファイバの結合特性に関する計測』昭和51年電気四学会連大, 講演番号286, PP 7-65~68.
- (2. 2) S. D. Personick: "Time dispersion in dielectric waveguides", Bell Syst. Tech. Jour., 50, 3, p. 843, (1971).
- (2. 3) Gloge, D. : "Dispersion in weakly guiding fibers", Appl. Opt. Vol. 10, No. 11, pp. 2442-2445, (Nov. 1971).
- (2. 4) G. Toraldo, di Francia, J. Opt. Soc. Am. 59, 799(1969).
- (2. 5) 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫 『光ファイバ』オーム社 P115 (昭和58年).
- (2. 6) D. Marcuse and H. M. Presby, : "Focusing method for nondestructive measurement of optical fiber profiles", Appl. Opt. Vol. 18, No. 1, pp. 14-22, (Jan. 1979).
- (2. 7) W. A. Gambling, D. N. Payne, H. Matsumura, : "Cutoff frequency in radially inhomogeneous single-mode fiber", Electron. Lett. 13, No. 5, pp. 139-140, (March 1977).
- (2. 8) K. Hotate and T. Okoshi, : "Measurement of refractive-index profile and transmission characteristics of single-mode optical fiber from its exit-radiation pattern", Appl. Opt. Vol. 18, No. 19, pp. 3265-3271(1979).
- (2. 9) H. Matsumura, T. Suganuma, : " Normalization of single-mode fibers having an arbitray index profile", Appl. Opt. Vol. 19, No. 18, pp3151-3158, (Sept. 1980).
- (2. 10) Y. Murakami, A. Kawana, and H. Tsuchiya, : "Cut-off wavelength measurements for single-mode optical fibers", Appl. Opt. Vol. 18, No. 7, pp. 1101-1105, (April, 1979).
- (2. 11) D. Marcuse, : "Loss analysis of single-mode fiber splices", Bell Syst. Tech. Jour., 56, pp. 703-718, (1977).
- (2. 12) * or (1) * S. Masuda, : "Variable attenuator for use in single-mode fiber transmission systems", Applied Optics vol. 19, no. 14, pp. 2435-2438, (July, 1980).

- [2. 13] A. A. Grau, J. Soc. Ind. Appl. Math. No. 2, 50, 11(1963).
- [2. 14] C. Lanczos, Applied Analysis(Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. (1969).
- [2. 15] A. W. Snyder, : "Asymptotic expressions for eigenfunctions and eigenvalues of dielectric or optical waveguide", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques MTT-17, No. 12, pp. 1130-1138, (Dec. 1969).
- [2. 16] H. Kogelnik, : "Coupling and Conversion Coefficients for Optical Modes in Quasi-Optics," in Microwave Research Institute Symposia Series, Vol. 14, J. Fox, Ed. (Polytechnic press, Brooklyn, 1964), 333.
- [2. 17] D. Marcuse : "Light Transmission Optics" Bell Laboratories Series, Van Nostrand Reinhold, NY, (1972).
- [2. 18] * or [10] * 増田重史, 岡本明, 古田洋介 『光ファイバ接続損失測定法の一案』, 昭和52年度電子通信学会総合全大No. 840, P4-144.
- [2. 19] * or [11] * 増田重史, 常世昇, 『ファイバのレンズ結合特性』, 電通学会 光・量子エレクトロニクス研究会OQE78-47(1978-7).
- [2. 20] * or [2] * S. Masuda, T. Iwama, and Y. Daido, : "Nondestructive measurement of core radius, numerical aperture, and cutoff wavelength for single-mode fibers", Applied Optics vol. 20, no. 23, pp. 4035-4038, (December 1, 1981).
- [2. 21] * or [25] * 増田重史, 他, 『DFB-LDのスペクトル線幅に対する反射戻り光の影響』 昭和60電子通信学会半導体・材料部門全国大会319.
- [2. 22] * or [28] * 増田重史, 寿山益夫, 尾中寛, 桑原秀夫, 『外部共振器型半導体レーザーの狭スペクトラム線幅化と周波数安定化の一検討』, 電子通信学会光・量子エレクトロニクス研究会OQE85-173 (1986).
- [3. 1] 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫 著 『光ファイバ』昭和58年 (株)オーム社 P39 「3.2.5 斜め光線の解析」 より
- [3. 2] 大洞, 岩間, 宮内 電子通信学会 技術報告資料 CS77-149, (1977).
- [3. 3] 大洞, 岩間, 宮内 電子通信学会 技術報告資料 OQE78-39, (1978).
- [3. 4] * or [11] * 増田, 常世 『ファイバのレンズ結合特性』 信学技報 OQE78-47, LEG-78-10, (1978).

- [3. 51] * or [2] * S. Masuda, T. Iwama, and Y. Daido, : "Nondestructive measurement of core radius, numerical aperture, and cutoff wavelength for single-mode fibers", Appl. Optics Vol. 20, No. 23, pp. 4035-4038, (December 1, 1981).
- [3. 61] I. Hatakeyama and H. Tsuchiya, : "Fusion splices for single-mode optical fibers ", IEEE, J. Quantum Electron. QE-14, p. 614 (Aug. 1978).
- [3. 71] N. Shimizu and H. Tsuchiya, : "Single-mode optical fiber connectors", The Transaction of Institute of Electrical and Communication engineers of Japan Vol. J62-c, No. 4, pp237-243, (April, 1979).
- [3. 81] K. Nawata, : "Connectors and single-mode fiber technology", Digest of Topical meeting on optical fiber communication, Washington, D. C. pp. 40-43, WA4, (March 1979).
- [3. 91] N. K. Cheung, in Technical Digest, Third Int. Conf. on OFC 1981 WC7.
- [3. 101] C. A. Millar and D. B. Payne, : "Monomode Fiber Connector Using Fiber Bead Location," in Technical Digest, Sixth European Conference on Optical Communication, U. York (1980), pp306-309.
- [3. 111] A. Nicia and A. Tholen, : "High-Efficient Ball-Lens Connector and Related Functional Devices for Single-Mode Fibers," in Technical Digest, Seventh European Conference on Optical Communication, Copenhagen (1981), 7. 5-1, 2.
- [3. 121] R. E. Wagner and W. J. Tomlinson, J. Opt. Soc. Am. 70, 1596 (1980).
- [3. 131] D. Marcuse, : "Loss analysis of single-mode fiber splices", Bell Syst. Tech. Jour., 56, pp. 703-718, (1977).
- [3. 141] D. E. Gray, Ed. American Institute of Physics Handbook (McGraw-Hill, NY, 1972).
- [3. 151] H. Kogelnik, : " Imaging of optical mode-resonators with internal lenses", Bell Syst. Tech. Jour., Vol. 44, pp. 455-494, (March 1965).
- [3. 161] G. D. Boyd and H. Kogelnik, : "Generalized confocal resonator theory", Bell Syst. Tech. Jour., Vol. 41, pp. 1347-1369, (July 1962).
- [3. 171] * or [3] * S. Masuda, and T. Iwama, : "Low-loss lens connector for single-mode fibers", Applied Optics Vol. 21, No. 19, pp. 3475-3483, (October 1, 1982).
- [3. 181] * or [12] * 増田重史, 常世 昇, 『シングルモード用レンズ式コネクタ』, 電子通信学会光・量子エレクトロニック研究会, OQE79-7, PP. 45-52, (1979).
- [3. 191] * or [13] * 増田重史, 常世昇, 『シングルモード用レンズ式コネクタの基礎検討』, 昭和54電子通信学会総合全国大会802

- [3. 20] * or^[16] * 増田重史, 『シングルモード用レンズ式コネクタ』, 電子通信学会光・量子エレクトロニクス研究会, OQE79-133, (1980)
- [3. 21] * or^[18] * 増田重史, 岩間武夫, 常世昇, 『シングル・モードファイバ用レンズ式コネクタ』, 昭和56電子通信学会総合全国大会2259
- [3. 22] Y. Yamamoto, T. Kimura, : "Coherent optical fiber transmission systems", IEEE J. Quantum Electron. QE-17(6), p919, (1981).
- [3. 23] 飯塚, 他 昭和59年 電子通信学会総合全国大会976.
- [3. 24] R. O. Miles, etal, Appl. Opt. V. 23, 1984 P1096.
- [3. 25] * or^[23] * 増田重史, 中神隆清, 『偏波面保存ファイバと半導体レーザの結合方式一案』, 昭和59電子通信学会光・電波部門全大会348 増田, 中神 昭和59年光電波部門信学全大 348.
- [3. 26] * or^[21] * 増田重史, 岩間武夫 『レンズ・アレイの構成法』 58年度電子通信学会春期総合全大1018(1983年3月22日)
- [3. 27] 大西, 他 通信技術研究所 技術資料CS79-214
- [3. 28] 菅原, 他 昭55 電子通信学会総合全国大会 760
- [3. 29] 大西, 他 昭56 電子通信学会総合全国大会 2244
- [3. 30] * or^[17] * 増田重史, 岩間武夫, 藤田賢吾, 『ファイバ入力光受光素子間のクロストークの一検討』, 昭和56電子通信学会半導体・材料部門全国大会383
- [3. 31] * or^[30] * 増田, 岩間 『PIN アレイ モジュール』 実用新案公告: 昭和61-38207.
- [4. 1] J. S. north and J. H. Stewart, : "A Rod Lens Connector for Optical Fivbers, " presented at the Optical Communication Conference Proceedings, Amsterdam, ECOC, 17-19 , pp. 9.4-1 to 4. (Sept. 1979).
- [4. 2] K. Nawata, J. Minowa, : "Active and Passive devices for optical transmission systems", Electrical Communication Laboratories Technical Journal, Japan, Vol. 28, No. 9, pp1959-1970, (1979).
- [4. 3] H. Kogelnik and T. Li, : "Laser beams and resonators", Applied Optics, Vol. 5, No. 10, pp. 1550-1567, (October, 1966).
- [4. 4] A. Nicia, : "Practical low-loss lens connector for optical fibers", Electron. Lett. No. 16, Vol. 4, 3rd, pp. 511-512, (August, 1978).

- [4. 5] D. Marcuse, : "Loss analysis of single-mode fiber splices", Bell Syst. Tech. Jour., 56, pp. 703-718, (1977).
- [4. 6] J. A. Arnaud, Beam and Fiber Optics (Academic, New York, 1976).
- [4. 7] H. Kogelnik, : "Coupling and Conversion Coefficients for Optical Modes in Quasi-Optics," in Microwave Research Institute Symposia Series, Vol. 14, J. Fox, Ed. 333, (Polytechnic Press, Brooklyn, 1964).
- [4. 8] D. Marcuse, : "Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers", J. Opt. Soc. of Am. Vol. 68, No. 1, 103 (January, 1978).
- [4. 9] D. Marcuse : "Light Transmission Optics" Bell Laboratories Series, Van Nostrand Reinhold, NY, (1972).
- [4. 10] * or [11] * S. Masuda, : "Variable attenuator for use in single-mode fiber transmission systems", Applied Optics Vol. 19, No. 14, pp. 2435-2438, (July, 1980).
- [4. 11] 石尾, 長船, 中邨, 宮崎, 花野; 電子通信学会通信システム研究会, CS78-81, (May, 1978).
- [4. 12] * or [11] * 増田重史, 常世界, 『ファイバのレンズ結合特性』, 電子通信学会光・量子エレクトロニクス研究会, OQE78-47, (July, 1978).
- [4. 13] * or [14] * 増田重史, 池上佳住, 中島啓幾, 常世界, 『光分波器』, 電子通信学会光・量子エレクトロニクス研究会 OQE79-84, (1979).
- [4. 14] * or [15] * 増田重史, 池上佳住, 中島啓幾, 『マイクロ・レンズシステム』, 昭和55電子通信学会総合全国大会817, (March, 1980).
- [4. 15] B. Costa, B. Sordo, U. Menaglia, L. Piccari, and G. Grasso, : "Comparison of attenuation measurements performed by the back scattering technique with different experimental set-ups", in Technical Digest, Sixth European Conference on Optical Communication, pp. 160-164, (Sept. 1980).
- [4. 16] P. Matthijsse and C. M. de Block, in Technical Digest, Fifth Optical Communication European Conference, Amsterdam, pp. 9.5-1-9.5-4. (1979),
- [4. 17] Minemura, K. Kobayashi, T. Yanase, R. Ishikawa, M. Shikada, A. Ueki, and S. Sugimoto, : "Two-way transmission experiments over a single optical fiber at the same wavelength using micro-optic 3dB couplers", Electron. Lett. Vol. 14, No. 11, pp. 340-342, (May 1978).
- [4. 18] F. Mahlein, H. Michel, W. Rauscher, A. Reichelt, and G. Winzer, Electron. Lett. 16, 584 (1980).

- [4. 19] A. J. Conduit, A. H. Hartog, and D. N. Payne, *Electron. Lett.* 16, 77(1980).
- [4. 20] A. Thelen, *Appl. Opt.* 15, 2983(1976).
- [4. 21] H. F. Mahlein, *Opt. Laser Technol.* 13, 13(Feb, 1981).
- [4. 22] A. Thelen, *J. Opt. Soc. Am.* 71, 309(1981).
- [4. 23] H. Kogelnik, : "Imaging of optical mode-resonators with internal lenses",
Bell Syst. Tech. Jour., Vol. 44, pp. 455-494, (March, 1965).
- [4. 24] * , [4. 10] * or [2] * S. Masuda, T. Iwama, and Y. Daido, : "Nondestructive
measurement of core radius, numerical aperture, and cutoff wavelength for
single-mode fibers", *Applied Optics* vol. 20, no. 23, December 1, 4035-4038(1981).
- [4. 25] * or [1] * S. Masuda, : "Variable attenuator for use in single-mode fiber
transmission systems", *Applied Optics* Vol. 19, N. 14, pp. 2435-2438, (July, 1980).
- [4. 26] * or [4] * S. Masuda, and T. Iwama, : "Single-mode fiber-optic directional
coupler", *Applied Optics* Vol. 21, No. 19, PP. 3484-3488, (October 1, 1982).
- [4. 27] * or [20] * 岩間武夫 増田重史 『シングルモードファイバ用光方向性結合器』
昭和 58 年度電子通信学期総合全大1020.
- [4. 28] S. K. Sheem, et al, *Opt. Lett.*, Vol. 4, (1979) p29.
- [4. 29] R. A. Bergh, et al, *Electron Lett.*, Vol. 16, (1980), p260.
- [4. 30] * or [4] * S. Masuda, and T. Iwama, : "Single-mode fiber-optic directional
coupler", *Applied Optics* vol. 21, no. 19, October 1, 3484-3488, (1982).
- [4. 31] * or [5] * Shigefumi Masuda, Terumi Chiama, Takashi Tohge, : "Polarization
preserving 2x2 directional coupler", *Optical Engineering* 25(8),
pp. 984-989, (August 1986).
- [4. 32] * or [24] * 増田重史, 岩間武夫, 『偏波面保存ファイバ用光方向性結合器』
昭和59電子通信学会光・電波部門全国大会407.
- [4. 33] * or [7] * Shigefumi Masuda, Terumi Chikama, Takashi Tohge, : "Polarization
preserving 2 x2 directional coupler", *Proceeding SPIE* 568, pp61-68, (1985).
- [5. 1] * or [1] * S. Masuda, et al "Polarisation Preserving fiber-optic 2X2
directional coupler" *SPIE Vol. 568 Coherent Technology in Fiber Optic
Systems*, (Aug. 1985).

- [5. 2] Olaf Ostwald, : "Network Analysis by Phase-Modulated Homodyne Detection"
IEEE Transaction on Inst. and Measurement, Vol. IM-30, No2,
PP152-154, (June, 1981).
- [5. 3] * or [6] * S. Masuda, T. Iwama, T. Nakagami, : "A Novel fiber-optic gyroscope
using 2x2 single-mode fiber directional coupler", IOOC 83' Tokyo,
28D3-14. (1983).
- [5. 4] R. A. Berugh, H. C. Leffevre, and H. J. Show, : "All-single-mode fiber-optic
gyroscope with log-term stability", Opt. Lett. 6, p. 198, (1981).
- [5. 5] A. D. Kersey, A. C. Levin., etal, Electron. Lett., 1984, 20, pp368-370.
- [5. 6] * or [5] * Shigefumi Masuda, Terumi Chiama, Takashi Tohge, : "Polarization
preserving 2x2 directional coupler", Optical Engineering 25(8),
pp. 984-989(August 1986).
- [5. 7] * or [22] * 増田重史, 岩間武夫, 中神隆清, 『高精度光ファイバ・ジャイロの
一構成』, 電子情報通信学会光・量子エレクトロニクス研究会,
OQE82-103, PP57-64(1983).
- [5. 8] * or [27] * 増田重史, 峠隆, 『光ファイバ回転角速度センサの一検討』,
昭和60電子通信学会総合全国大会1062
- [5. 9] * or [29] * 増田重史, 『全光処理交換方式』, 昭和63年電子情報通信学会秋期
全国大会 B179.
- [5. 10] * or [8] * S. Masuda, N. Fujimoto, H. Rokugawa, K. Yamaguchi, and S. Yamakoshi:
"Experiments on optical drop/insert function using bistable laser diodes
for optical access nodes" Photonic Switching, Technical Digest,
(Optical Society of America, PP145-147, (Washington, D. C. 1989).
- [5. 11] * or [9] * S. Masuda, H. Rokugawa, N. Fujimoto, and S. Yamakoshi, :
"Architecture on optical processing for communications",
OSA Proceeding on Photonic SW. 89' V. 3, pp286-290, (1989).

<<本論文 と筆者外部発表済論文との対応一覧>>

筆者の関連論文番号

第1章 序論

↓

- 1.1 研究の背景
- 1.2 研究の目的

第2章 ファイバ接続での課題

- 2.1 多モードファイバ接続での問題点
 - 2.1.1 多モードファイバの定常モード
 - 2.1.2 定常モードの作成法 (10) *
- 2.2 単一モードファイバ接続での問題点 (2) *, (19) *
 - 2.2.1 単一モードファイバ・パラメータ測定法の検討
- 2.3 ファイバ結合の問題点 — 反射光についての考察 — (25) *, (28) *
- 2.4 まとめ — ファイバ結合の考察 —

第3章 光結合法の考察

- 3.1 ファイバのレンズ光結合特性の検討
 - 3.1.1 多モードファイバの らせん光線の検討
 - 3.1.2 別の手法による 多モードファイバの らせん光線の検討
- 3.2 多モードファイバのレンズ結合の検討 (11) *
 - 3.2.1 光結合とファイバ遠視野像の関係
 - 3.2.2 まとめ — 多モードファイバのレンズ結合の検討 —
- 3.3 単一モードファイバのレンズ結合の検討 [3] *, [12] *, [13] *, [16] *, [18] *
- 3.4 デバイス間光結合法の考察
 - 3.4.1 発光ダイオードとの光結合に関する考察
 - 3.4.2 偏波保存ファイバとレーザダイオードとのレンズ結合法の検討 [23] *
 - 3.4.3 アレイ型光結合の検討 (21) *
 - 3.4.4 ファイバと PINダイオードのアレイ型結合の検討 [17] *, [30] *
- 3.5 まとめ — ファイバのレンズ結合法 工学的価値 —
— 光デバイス結合法 工学的価値 —

第4章 ファイバ結合光デバイスへの応用

4.1 ファイバ型デバイス結合の課題

4.1.1 単一モードファイバ光可変減衰器 [11] *

4.2 ファイバ型デバイスの提案

4.2.1 多モードファイバ分波器 [14] *, [15] *

4.2.2 単一モードファイバ光方向性結合器 [4] *, [20] *

4.2.3 偏波面保存単一モードファイバ光方向性結合器 [5] *, [7] *, [24] *

4.3 まとめ — ファイバ型デバイス—

第5章 ファイバセンサへの応用

5.1 角速度センサ [5] *, [6] *, [22] *, [27] *

5.2 まとめ —ファイバセンサと光通信ネットワーク— [8] *, [9] *, [29] *

第6章 結論

以上

本論文関係の著者の特許

外国出願 外国出願済特許 10 件 (トップネーム件数)

国内出願 登録済 30 件 登録中120 件 (トップネーム件数)

主な海外特許

1. シングルモードファイバコネクタ

United States Patent 4, 371, 233 Feb. 1. 1983 (他 EPC)

"Lens-Applied Optical Fiber Connector"

<13 Claims, 10 Drawing Figures>

Inventor: Sigefumi Masuda, Yokohama, Japan

Appl. No. : 162, 875

Filed. Jun. 25, 1980

2. ファイバジャイロ

United States Patent 4, 621, 925 Nov. 11. 1986 (他 EPC)

"Fiber-Optic Gyro"

<15 Claims, 38 Drawing Figures>

Inventor: Sigefumi Masuda, Yokohama,

: Takeo Iwama, Kawasaki, both Japan

Appl. No. : 534, 126

Filed. Sep. 20, 1983

3. 光交換システムズ

Application No. 89112944.7 14.08.1989 (DE FR GB US他)

"Optical switching systems"

< 5 Claims, 8 Drawing Figures>

Inventor: Sigefumi Masuda, Yokohama 227 Japan

Appl. No. : No. 89112944.7 14.08.1989

Filed. 23; 05, 1989

など

主な国内 登録済特許

4. 精密測距離装置 特許 昭63-38642 増田

内容 光出力 極大を与える 光波長 λ_p と

光出力 極小を与える 光波長 $\lambda_p + \Delta\lambda$ から 被測定間隔Lを測る。

式(2.13)より

$$L = \frac{\lambda_p}{4n_1} \left(\frac{\lambda_p}{\Delta\lambda} + 1 \right)$$

n_1 は被測定間隔媒質の比屈折率

5. 光減衰器 昭58-53521 増田

内容 V 溝中でファイバ間隔を変えて光減衰量を調整する。4.1.1 の原案

6. 精密部品組立治具 昭63-7473 増田, 岩間

内容 平行バネを用いた 3.3 に示した調整器。

7. 光ファイバコネクタ 昭59-32985 増田

コネクタ端面保護リングをつけたフェルール構造, 3.3 のGUARD RING

8. 光半導体素子と光ファイバの結合方法 昭59-22204 増田, 宮崎, 常世, 関沢

光学材料中に球体を包み込んだ球レンズ光学系を介して光半導体からの光をファイバに入射するようにしたことを特徴とする結合方法。 (簡易な光結合法)

9. 一定偏波ファイバリボン 昭61-39365 増田, 大洞

偏波保存ファイバの偏光方向を合わせて束ねたファイバリボン

10. レンズアセンブリ 昭63-19841 増田

中心にレンズを嵌入した板を他のレンズを嵌入済の他の板にさらに嵌入した同芯構成レンズ。