

マルチコア光ファイバと
その接続に関する研究

2017 年 1 月

田中正俊

内容梗概

本論文は、著者が三菱電線工業株式会社の勤務中に、国立研究開発法人情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究「革新的光ファイバ技術の研究開発」、並びに「革新的光通信インフラの研究開発」の一環として行ったマルチコア光ファイバとその接続技術の研究成果をまとめたものである。

光通信の伝送容量の拡大は、時間分割多重技術、波長分割多重技術によって図られてきた。将来も続くと考えられる旺盛な通信トラヒック需要に応えるには、これらの多重化技術の限界とともに、伝送媒体である光ファイバの物理的限界も明らかになってきた。著者は、もう1つの多重化技術として空間多重に注目して1本の光ファイバに複数のコアを設けたマルチコア光ファイバの研究を行った。加えて、マルチコア光ファイバ通信網を構成するために不可欠となるマルチコア光ファイバ同士の接続技術、マルチコア光ファイバを送信機・受信機に接続するためのファンイン・ファンアウト部品に関する研究を行った。

第1章は、序論であり、本研究の背景について述べた後、マルチコア光ファイバの目的について述べる。あわせて、マルチコア光ファイバ通信網を構成するための課題について述べる。

第2章は、マルチコア光ファイバの製法について述べる。プリフォームの作製方法として、単孔石英管法と多孔石英管法の2種類を比較した。その特性を比較した結果、コア非円率などの点で多孔石英管法が優れていたことを述べる。

第3章は、マルチコア光ファイバのコア間クロストークの挙動について述べる。マルチコア光ファイバは、1本の光ファイバに複数のコアを接近して配置するため、通信品質を劣化させるコア間のクロストークが生じる。伝搬距離、光の波長、コア間距離が変化した場合におけるクロストークの挙動を導波モード間の結合係数と電力結合理論から導出される見通しのよい簡易計算式で表した。この計算式から得られたクロストークの挙動は、測定結果と一致している。

第4章は、ファンイン・ファンアウト部品について述べる。マルチコア光ファイバを送信機・受信機に接続する場合は、ファンイン・ファンアウト部品を介して接続する。この部品は、複数の孔を設けた石英製のキャピラリーにシングルコア光ファイバを挿入して熔融延伸することで作られるテーパファイババンドルを、マルチコア光ファイバに接続した構成をしている。熔融延伸でシングルコア光ファイバのコア径が減少する。コア径が減少してもモードフィールド径の変化を抑制したシングルコア光ファイバを使うことでテーパファイババンドルとマルチコア光ファイバの接続損失を抑制した。

第5章では、マルチコア光ファイバを融着接続する場合の軸回転調整の方法に関して、ケーブル布設現場などのフィールドにおいても利用可能なパワーモニタ法を提案する。マルチコア光ファイバは中心軸だけでなく、その外側にもコアが設けられているため軸回転を調整してから接続する必要がある。側方入射と側方出射を用いることでフィールドでも適用できるパワーモニタ法を使った軸回転調整を確立した。この軸回転調整を利用して融着接続したときの接続損失は、従来のパワーモニタ法を使った結果と遜色なかった。

第6章では、マルチコア光ファイバを高精度でかつ容易に軸回転を調整できる方法を提案する。従来のパワーモニタ法におけるモニタ光電力の変化は、軸回転ずれが小さくなるほど緩やかになるため調整しにくいものであった。一方、提案の方法はクラッド励振を利用することで、その光電力の変化は軸回転ずれが小さくなるほど急になるので調

整しやすくなる。軸回転ずれが無い状態から 1° の回転角度ずれを与えた場合の光電力の変化量を測定したところ、従来のパワーモニタ法は 0.1dB の変化であったのに対し、提案の方法は、コアの屈折率分布がステップ型のマルチコア光ファイバにおいては 2.1dB 、トレンチ付加型においては 0.9dB に増加した。

第 7 章では、接続時の軸回転調整を容易にする目的で、マルチコア光ファイバのクラッド断面形状を六角形にした結果について述べる。光ファイバの融着接続において、光ファイバは V 溝上に固定する。六角形にすることで V 溝の斜面にクラッドを面接触させればマルチコア光ファイバを常に一定の回転方向に固定できる可能性がある。そこで、クラッドが六角形状のマルチコア光ファイバを作製して試みた。六角形状の光ファイバは、プリフォームを研削加工して作製するため、加工後の表面傷で光ファイバの機械強度が低下する恐れがある。機械強度を低下させない表面処理についても検討を行った。

第 8 章は、結論であり、得られた結果をまとめ、本論文の総括を行った。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	本研究で取り組む課題	2
1.3	論文の構成	3
第 2 章	マルチコア光ファイバの製法	5
2.1	はじめに	5
2.2	プリフォームの作製	5
2.3	特性の比較結果	6
2.4	まとめ	8
第 3 章	マルチコア光ファイバのコア間クロストーク	9
3.1	はじめに	9
3.2	電力結合理論	9
3.2.1	簡易計算式の導出	9
3.2.2	コア間クロストークの挙動	12
3.3	マルチコア光ファイバ構造	13
3.4	測定結果	15
3.4.1	クロストークの伝搬距離依存性	15
3.4.2	クロストークの波長依存性	16
3.4.3	定数 A , B の導出	19
3.4.4	クロストークの波長変化率とコア間距離依存性	20
3.4.5	クロストークのコア間距離依存性	22
3.5	まとめ	23
第 4 章	マルチコア光ファイバ用ファンイン・ファンアウト部品	24
4.1	はじめに	24
4.2	ファンアウト部品の作製工程	25
4.3	MFD の変化を抑制した光ファイバ	26
4.3.1	シングルコア光ファイバの設計	27
4.4	シングルコア光ファイバの特性	28
4.4.1	延伸箇所の MFD 測定	28
4.4.2	テーパファイババンドルの曲げ損失	30
4.5	ファンアウト部品	31
4.5.1	テーパファイババンドル	31
4.5.2	テーパファイババンドルのニアフィールドパターン	32
4.5.3	マルチコア光ファイバ	33
4.5.4	テーパファイババンドルとマルチコア光ファイバの接続	33
4.6	ファンイン・ファンアウト部品の光学特性	34
4.6.1	挿入損失	34
4.6.2	コア間クロストーク	35
4.7	まとめ	37
第 5 章	側方入出射を利用したマルチコア光ファイバの融着接続	38
5.1	はじめに	38
5.2	パワーモニタ法の機器配置	38

5.3	マルチコア光ファイバ構造	40
5.4	軸回転に伴う漏洩光電力の変化	41
5.4.1	漏洩光電力の変化量の計算	41
5.4.2	漏洩光電力の変化量の測定結果	43
5.4.3	結合光電力と漏洩光電力の関係	44
5.4.4	クラッドモードの影響	45
5.5	側方入出射系を利用した軸回転調整	46
5.5.1	側方入射系の構成と特性	46
5.5.2	漏洩光電力の変化量	47
5.6	トレンチ付加型マルチコア光ファイバを使った検討	49
5.7	融着接続実験	50
5.8	まとめ	52
第6章	クラッド励振を利用した軸回転調整	53
6.1	はじめに	53
6.2	パワーモニタ法の機器配置	53
6.3	マルチコア光ファイバ	54
6.4	クラッド励振時の光強度分布	56
6.5	軸回転に伴う光電力の変化	58
6.5.1	従来のパワーモニタ法	58
6.5.2	クラッド励振を利用したパワーモニタ法	59
6.6	光電力変化の計算	60
6.6.1	ステップ型の計算結果	61
6.6.2	トレンチ付加型の計算結果	62
6.7	融着接続損失	63
6.8	まとめ	64
第7章	六角形状クラッドのマルチコア光ファイバ	66
7.1	はじめに	66
7.2	六角形状クラッドのマルチコア光ファイバ	67
7.3	六角形状クラッド光ファイバの機械強度	68
7.3.1	プリフォームの表面状態	68
7.3.2	引張破断試験・動疲労試験	70
7.3.3	繰り返しプルーフ試験	71
7.4	融着接続	72
7.4.1	変形による接続損失の影響	72
7.4.2	軸回転調整方法	73
7.5	まとめ	75
第8章	結論	77
8.1	結論	77
8.2	将来展望	78
	謝辞	81
	参考文献	82
	業績目録	86

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景と目的

光通信の伝送容量は、過去 30 年間にわたり時分割多重 (TDM : Time Division Multiplexing) 技術と波長分割多重 (WDM : Wavelength Division Multiplexing) 技術によって拡大が図られてきた。その拡大は 30 年で約 1000 倍に近い増加であった。現在、研究開発が進んでいるデジタルコヒーレント技術を加えれば、光ファイバ当たりの総容量が 100T bit/s 級の伝送技術の研究が進められている [1,2]。

一方で、インターネットトラフィックの増加傾向をみると、現在も年間 1.2~1.4 倍で推移し続けている [3]。引き続き増加を続けると、20 年後は現在の 40~800 倍になる。固定・移動体アクセス速度の急増を考えると、今後 20 年間のトラフィックは 1000 倍程度の増加を想定しておく必要がある [4,5]。しかし、TDM、WDM などの既存の多重化技術による伝送容量の伸びが鈍化してきている。

また、トラフィックの増加に伴い、伝送媒体である光ファイバ中を伝搬する光電力が増加し続けている。現在使用されている光ファイバは、約 30 年以上前にその基本設計パラメータが決められたものである。当時は、トラフィックの増加に伴う光ファイバ中を伝搬する光電力の増加を想定したものではなかった。さらなる大容量化を進めても伝送媒体である光ファイバの物理的限界が顕在化してきた。この限界を考えると、光ファイバの伝送容量の限界は、あと 30~50 倍程度と予測されており、このままではキャパシティクラッシュと呼ばれる伝送容量の供給不足を迎えると予測されている [6,7]。

伝送媒体として国際標準化 (ITU-T.G652) されている汎用のシングルモード光ファイバ (汎用 SMF) の 3 つの物理的限界を以下に述べる。

①ファイバフェーズ

光ファイバに入力する光の電力を増大させていくと、ファイバフェーズが発生することがある [8,9]。このファイバフェーズが発生すると光ファイバのコアに弾丸状の空洞が形成され恒久的な損傷を受ける。ファイバフェーズの発生のきっかけは、数 W 以上の光が伝搬している光ファイバに発生する局所的な加熱である。例えば、光コネクタ端面に異物などが付着していると、コアを伝搬してきた光が熱に変換されてプラズマが発生する [10]。このプラズマが発生すると、コアは石英の熔融温度に達した状態になる。この温度では石英の光吸収係数は増加するため、光源から供給される光は熱に変換されて、プラズマが消えることなく光源に向かって伝搬し続ける [11]。ファイバフェーズの伝搬現象は光源の出力を停止させるか、もしくは閾値以下まで光電力を低下させるまで続く。一旦、ファイバフェーズが始まった場合、伝搬が停止する光電力を伝搬閾値と呼ばれているが、汎用 SMF の場合、IEC の Technical Report (61292-4) に約 1.4W と記載されている [12,13]。これを超える光電力を入力することは好ましくない [14]。伝送容量の増加に伴い光ファイバ中を伝搬する光の電力は、この伝搬閾値に近づいている。

陸上系の一部では、伝送線路を増幅媒体とみなした分布ラマン増幅が導入されている。この分布ラマン増幅は、伝送媒体となる光ファイバに高出力の励起光を入力して分布的に光信号を増幅させている。この方式において、WDM 信号とラマン励起光の光電力の和は、ファイバフェーズ伝搬閾値である 1.4W の数分の 1 にまで迫っている [15]。

②非線形シャノン限界

総伝送容量 (bit/s) は、信号の周波数利用効率 (bit/s/Hz) とその占有帯域 (Hz) の積で与えられる。総伝送容量を拡大するには、周波数利用効率を向上させ、増幅帯域を拡大すればよい。ここで、信号光の周波数利用効率の上限であるシャノン限界は、シャノンの定理により与えられ、SNR (Signal to Noise Ratio) を上げれば周波数利用効率も増大させることができる [16]。しかし、光ファイバを伝送媒体とする場合、光ファイバ中の光電力が大きくなると非線形光学効果により信号品質が低下する。このため、周波数利用効率は、ある最大値を持ち、一定以上の光信号パワーを入力しても周波数利用効率は逆に減少する。この現象は、「非線形シャノン限界」とよばれ、帯域あたりの伝送容量を制限する [7, 17]。伝送距離 (再生中継距離) 1000km 程度の場合、1 偏波あたりの最大の周波数利用効率は 8bit/s/Hz、偏波多重を用いても 16bit/s/Hz 程度であり、最新の伝送実験では、この限界まで数 dB (2~3 倍) まで迫っている [7,17,18]。

③増幅帯域制限

この増幅帯域が総伝送容量を制限するが、基幹網通信帯の 1550 nm では、C 帯、L 帯を合わせても 80 nm(約 10THz)、未使用の S 帯をいれても 120 nm(約 15THz)程度であり、周波数利用効率 10 bit/s/Hz を実現しても、総容量 150T bit/s が限界になる。これ以上の容量の増加のためには新たな波長資源の開拓しかなく、新規の波長帯で使える光増幅器の開発が進められている [19-21]。しかし、実用的に使用できる光増幅器の見通しは得られていない。

旺盛な通信需要に応えるため、上記の物理的制限を打破する新たな多重化技術として空間多重が有望と考える。1 心に複数のコアを設けたマルチコア光ファイバは、1 心あたりの伝送容量の増加と、ケーブル断面内の空間利用効率を抜本的に改善できる可能性がある [22]。マルチコア光ファイバは、それぞれのコアに異なる信号を伝送する。コア数に比例して、1 心あたりの伝送容量が増える可能性があり、既に汎用 SMF の限界を超える伝送実験の報告がされている [23-25]。

ファイバフューズに関しては、1 つのコアを伝搬する光電力がファイバフューズの伝搬閾値を越えなければ、1 心に複数のコアを設けてもファイバフューズは発生しないことが実験的に明らかにされている [26]。マルチコア光ファイバは、ファイバフューズの物理的限界に対しても有効である。

1.2 本研究で取り組む課題

マルチコア光ファイバ通信網を構成するために必要な要素技術が、本論文の研究課題である。以下に 4 つの課題を挙げる。

①マルチコア光ファイバ

汎用 SMF は 1 心に 1 つのコアがある。一方、マルチコア光ファイバは 1 心に複数のコアを配置する。マルチコア光ファイバは、従来の製法を利用しながら複数のコアを設けるための新たな製法を確立する必要がある。また、作製したマルチコア光ファイバはコアを接近させて配置するため、まるで光ファイバカプラのようにコア間で光電力の移行が予測される。コア毎に異なる信号を伝送するマルチコア光ファイバにおいて、この光電力の移行はコア間クロストークとなり、雑音として通信品質を劣化させる。マルチコア光ファイバの設計指針を得るためにコア間クロストークの挙動を把握することを課題と

した。光ファイバ通信網における局舎の間隔は最大 80 km とされている。コア間クロストークの目標値として、条長 100 km、波長 1550 nm において-30dB 以下とした。

②ファンイン・ファンアウト部品

マルチコア光ファイバを送信機・受信機に接続する場合は、ファンイン・ファンアウト部品が必要になる。複数の細径シングルコア光ファイバをバンドル状に接着剤で固定した部品を、マルチコア光ファイバに接続した構成が多数報告されている。しかし、接着剤の経年劣化、高出力光による焼損の恐れから長期信頼性に不安が残る。加えて、マルチコア光ファイバから分岐した後のシングルコア光ファイバは、細径であるため意図しない曲げが加わりやすく曲げ損失が発生する恐れがある。バンドルは接着剤を使用せずに石英ガラスで一体化したものが優れていると考えられる。また、シングルコア光ファイバに剛性を持たせるため、クラッド径を一定以上太きにすることが求められる。これらの要件を満たすファンイン・ファンアウト部品を開発することが課題である。

③マルチコア光ファイバの接続

マルチコア光ファイバのコアは中心軸だけでなく、その外側にもコアを配置するため、接続をする場合は軸回転の調整が必要になる。この調整作業は、設備が整っている工場、実験室だけではなく、ケーブル布設現場のフィールドにおいても発生する。フィールドでも軸回転調整できる方法を確立することが課題である。軸回転調整は、汎用 SMF において必要が無かった調整である。軸回転ずれで生じる接続損失は新たな接続損失要因になる。このため、高精度かつ容易に軸回転調整できることも求められる。この要求も応える必要があり、課題とした。

④接続を考慮したマルチコア光ファイバ

融着接続において、クラッドの断面形状が六角形のマルチコア光ファイバを使い、固定のための V 溝の斜面にクラッドを面接触させれば常に一定の回転方向に固定できる。これが達成できれば上記の③の課題から、さらに進展させて軸回転調整を必要としない接続ができる。軸回転調整を必要としない接続を達成するための問題点を明らかにすることを課題とした。なお、六角形状のマルチコア光ファイバは、六角形に研削加工したプリフォームを線引することで作製する。研削によるプリフォームの表面傷で、光ファイバの機械強度が低下する恐れがある。機械強度の低下を抑制する製法の確立を課題とした。

1.3 論文の構成

第 2 章以降の本論文の構成は以下の通りである。

第 2 章と第 3 章はマルチコア光ファイバの研究開発にかかわる。第 2 章は、マルチコア光ファイバの製法について検討を行っている。従来のプリフォームの製法を利用しながら、マルチコア光ファイバを 2 種類の製法で比較を行った。第 3 章は、マルチコア光ファイバの課題の 1 つであるコア間クロストークの挙動について明らかにした。その挙動は、簡易計算式で表されることを明らかにしている。

第 4 章は、熔融延伸型のファンアウト部品について述べている。この部品は、複数の孔を設けた石英キャピラリにシングルコア光ファイバを挿入して熔融延伸することで作られるテーパバンドル部品を、マルチコア光ファイバに接続した構成である。

第5章と第6章は、マルチコア光ファイバを接続する場合における軸回転調整方法の研究開発にかかわる。第5章は、従来のパワーモニタ法を改良してフィールドにおいても軸回転調整ができる新たなパワーモニタ法について述べる。第6章は、従来のパワーモニタ法の欠点を改善して、わずかな軸回転ずれでモニタ光電力の変化量を大きくすることで、高精度でかつ容易に調整する方法について述べる。

第7章は、軸回転調整を容易にする目的で、クラッドの形状を六角形にしたマルチコア光ファイバの機械強度、ならびに融着接続について検討した結果を述べる。

第8章において本研究の結論を述べるとともに、将来の展望について述べる。

第2章 マルチコア光ファイバの製法

2.1 はじめに

汎用 SMF は、VAD 法 (Vapor-phase axial deposition method)、MCVD 法 (Modified chemical vapor deposition method) などで作製されたプリフォームを線引することで製造する。マルチコア光ファイバは汎用 SMF と異なり、1 本の光ファイバに複数のコアを設ける。このため、複数のコアを設けたプリフォームを線引することで製造できる。マルチコア光ファイバのプリフォームは、最初にコア材と呼ばれる VAD 法で作製した石英部材を複数本準備する。次にこれらのコア材を束ねるように配列させて作製した。配列させる方法として単孔石英管法と多孔石英管法の 2 種類の方法で作製した。なお、2 つの製法で作製したマルチコア光ファイバは、特性を比較しやすいように、コアの直径、比屈折率差 Δ 、クラッド径などの光ファイバ構造が同じになるように設計した。

2.2 プリフォームの作製

単孔石英管法と多孔石英管法の模式図を図 2.1 に示す。単孔石英管法のプリフォームは、単孔の純粋石英管にコア材を 7 本挿入した。プリフォーム内の隙間が大きいので、単孔石英管とコア材の隙間に純粋石英棒からなるスペーサを 6 本挿入している。多孔石英管法のプリフォームは、7 つの孔を設けた石英管にコア材をすべて挿入して作製した。コア材は GeO_2 を添加したコアとなる石英の周囲に純粋石英のクラッドで覆われた構成である。 GeO_2 の添加によってコアの屈折率を上げている。この添加材料は汎用 SMF と同じである。コア材は VAD 法で製造され、コア材表面などの洗浄条件は同じである。なお、コア材におけるクラッド径とコア径の比 (CCDR : Cladding to core diameter ratio) は単孔石英管法の方が大きくなる。また、プリフォーム内に生じる隙間は塩素ガスを流すことで脱水した。次に、プリフォーム内の隙間を真空状態にして線引した。線引時の紡糸炉の加熱によって隙間はコラプスされ、光ファイバ内に空隙ができないようにしている。

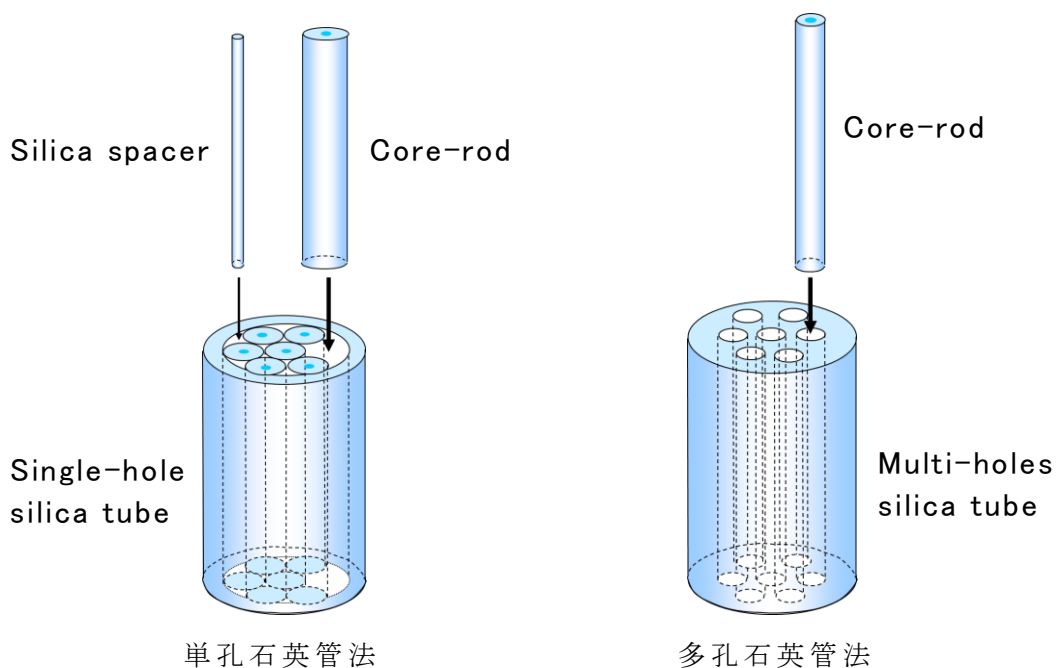


図 2.1 プリフォームの製法

マルチコア光ファイバの断面写真を図 2.2 に示す。中心コア 1 個と外側コア 6 個からなる 7 個のコアのマルチコア光ファイバである。単孔石英管法ではコア配列の識別のため、マーカーを配置している。例えばマーカー(大)とマーカー(小)の間に存在する外側コアを **Outer core1** としてマーカー(小)の方向へ順に **Outer core6** として識別が可能である。マーカーは空孔で構成されている。単孔石英管法では、プリフォーム内の隙間を利用してキャピラリ（細径ガラスパイプ）を挿入することで、容易にマーカーを設けることができた。

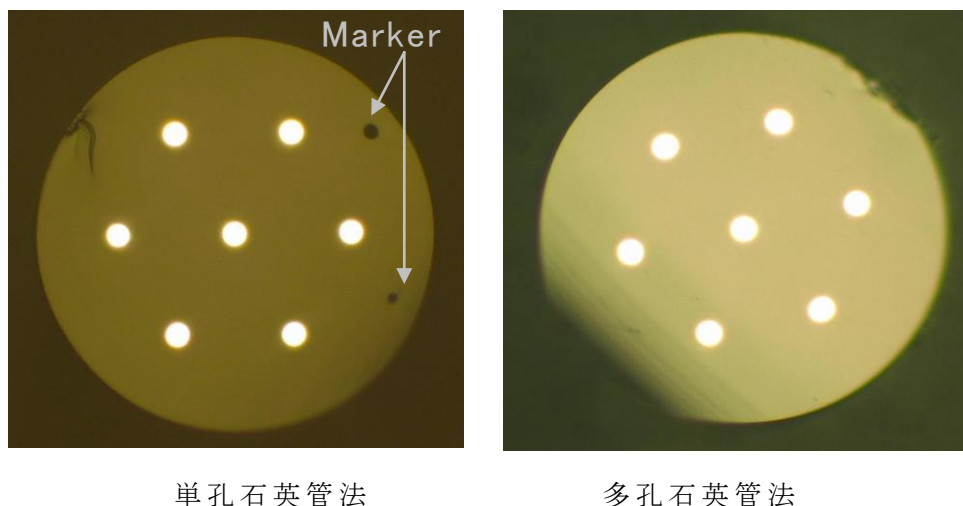


図 2.2 マルチコア光ファイバ断面写真

2.3 特性の比較結果

マルチコア光ファイバの構造測定の結果を表 2.1 に示す。ともにコア径、比屈折率差 Δ は汎用 SMF とほぼ同じである。コア間距離 Δ とクラッド径も、ほぼ同じ寸法である。コアの位置ずれ量の評価は、デジタルマイクロスコープの画像処理機能を使用した。コアが 7 個あることから、12 箇所の隣接するコア間距離を計測して、その最大値と最小値の差をコア位置ずれ量として測定している。両製法ともにコア位置ずれ量は $1 \mu\text{m}$ 以下であり、製法によるコアの位置ずれ量の違いは確認できなかった。

表 2.1 試作光ファイバ構造

Parameters	Method	
	Single-hole silica tube	Multi-holes silica tube
Core diameter (μm)	9	9
Relative Refractive index difference Δ (%)	0.36	0.36
Core pitch Δ (μm)	50.0	49.5
Core offset (μm)	< 1	< 1
Cladding diameter (μm)	170	170
Coating diameter (mm)	0.25	0.25

マルチコア光ファイバの屈折率分布の測定を行った。結果の一例を図 2.3 に示す。この測定結果から外側コアの非円率を比較したところ、製法で違いがみられた。非円率は、クラッドの屈折率とコアの屈折率の中間の屈折率における断面形状から、JIS 6822 に準拠する方法で求めた。図 2.4 は、単孔石英管法、多孔石英管法のそれぞれの外側コアの断面形状である。単孔石英管法の外側コアの非円率は 10% を超えている。プリフォーム内の隙間が大きく、コラプス時にコアの変形が生じたと考えられる。2 本の光ファイバの接続において、非円率の違いは接続損失の要因になる。単孔石英管を使った製法は、プリフォーム内の隙間を埋めて変形を抑えることが求められる。しかし、さまざまな直径のスペーサーを組み合わせながら隙間無くプリフォーム内に配列させることは難しい。特に長いプリフォームになると、単孔石英管、コア材、スペーサーのそれぞれの長手方向の外径変動によって配列させることが困難になると言える。

一方、多孔石英管法はコアの非円率が抑えられている。コア材の外径に合わせて孔が設けられているため、プリフォーム内の隙間が小さいためである [27]。

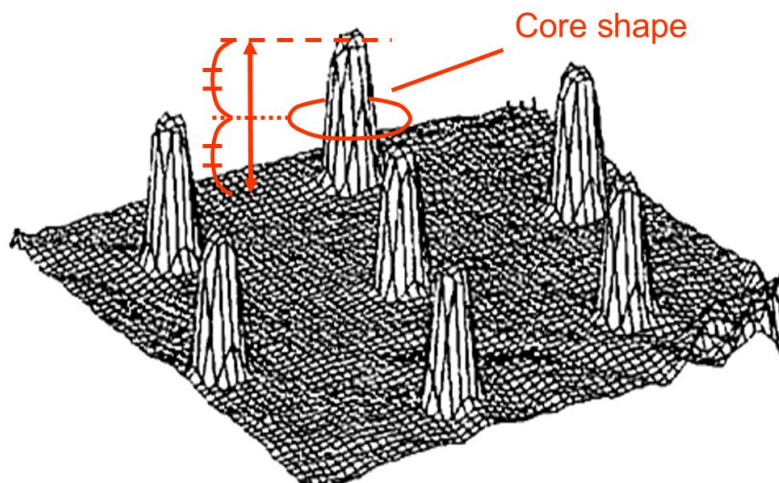
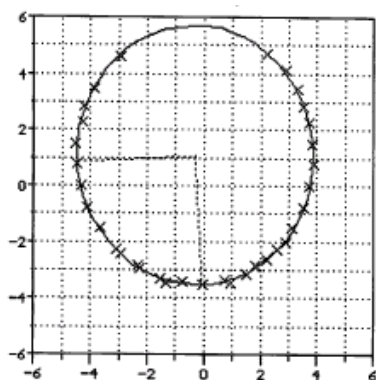
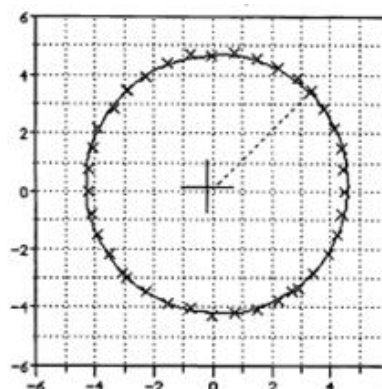


図 2.3 マルチコア光ファイバの屈折率分布



単孔石英管法 非円率 10.3%



多孔石英管法 非円率 2.3%

図 2.4 外側コアの形状（非円率）

マルチコア光ファイバの光学特性を表 2.2 に示す。2 つの製法の間で伝送損失に差がみられた。単孔石英管法の伝送損失は、多孔石英管法に比べ高い。単孔石英管法で使用したコア材の CCDR は、多孔石英管法より大きい。伝送損失増加の原因がコア材表面の影響によるものであれば、CCDR が大きい単孔石英管法の伝送損失の方が低くなると考えられる。しかし、測定結果は逆になった。単孔石英管法で伝送損失が高い原因は不明であるが、プリフォーム断面内の隙間が大きくコラプス時に残留歪が生じて伝送損失の増加を発生させている可能性が挙げられる。多孔石英管法の伝送損失は、汎用 SMF とほぼ同等の値である。コア径、比屈折率差 Δ は汎用の SMF とほぼ同じであることから、モードフィールド径 (MFD) は汎用 SMF とほぼ同じであった。

表 2.2 試作光ファイバの測定結果

Item	Wavelength	Single-hole silica tube method		Multi-holes silica tube method	
		Center core	Outer Cores	Center Core	Outer Cores
Attenuation (dB/km)	1310 nm	0.44	0.77	0.33	0.33
	1550 nm	0.41	0.69	0.19	0.19
MFD (μm)	1310 nm	9.1		9.2	
	1550 nm	10.3		10.5	

2.4 まとめ

単孔石英管法と多孔石英管法の 2 種類のプリフォームから作製されたマルチコア光ファイバの特性を比較した。その結果、単孔石英管法で作製したマルチコア光ファイバの外側コアは、多孔石英管法に比べて非円率が高くなった。プリフォーム内の隙間が大きく、線引工程でこの隙間が埋まるようにコラプスしたことでコアが変形したことが原因と考えられる。対策として、隙間を埋めるためのスペーサを増やして変形を減らす工夫が考えられる。しかし、さまざまな直径のスペーサを組み合わせることは困難と考えられ、量産に適さない。また、単孔石英管法で作製したマルチコア光ファイバの伝送損失は、多孔石英管法に比べて高くなった。コラプス時に生じる残留歪などが原因と推測ができるが、原因を特定するに至っていない。本論文では、外側コアの非円率、伝送損失の点で優れていた多孔石英管法でマルチコア光ファイバを作製することにした。

第3章 マルチコア光ファイバのコア間クロストーク

3.1 はじめに

マルチコア光ファイバは、1心の光ファイバに複数のコアを互いに接近して配置する。導波モードの電界分布は隣接するコアまで拡がり重なることで、コア間で摂動による光電力の移行が生じる。この光電力の移行がコア間のクロストークであり、それぞれのコアに独立した信号を伝送させるマルチコア光ファイバにおいて、通信品質を劣化させる雑音となる。マルチコア光ファイバを設計する上で、このクロストークの伝搬距離依存性、波長依存性、コア間距離依存性などを把握することが必要である。

伝搬軸方向にコア間の結合が均一であれば、クロストークは、モード結合理論で表される。しかし、マルチコア光ファイバは、伝搬軸方向にコア間距離やコアのランダムな変形などによって、結合の大きさが変動する。このような結合で生じるマルチコア光ファイバのクロストークは、電力結合理論を用いた結果と良い一致を示すことが報告されている[28]。

しかし、電力結合理論によりクロストークを求めるには、ランダムな不整によって決定される電力結合係数が必要になる。さらに、電力結合係数は不整の自己相関により決定され、直接求めることは容易ではない。実験結果と比較することによって自己相関関数を求める方法が報告されている[29]。

本章では、電力結合係数を求めることなく、伝搬距離、波長、コア間距離に対するクロストークの依存性について、見通しのよい計算式で表せることを示す。提案した式を用いるとクロストークの挙動を把握することが容易になる。

また、中心に1個、外側に6個の合計7個のコアからなるマルチコア光ファイバを製作して、そのクロストークの伝搬距離、波長、コア間距離に対する依存性を測定した。コアの屈折率分布はステップ型とトレンチ付加型の2種類である。その測定結果は、提案した式で示されるクロストークの挙動とよく一致している[30]。

3.2 電力結合理論

3.2.1 簡易計算式の導出

電力結合理論では、伝搬距離 L におけるクロストークは式(3.1)で表される[28]。ここで、 $P_1(L)$ は励振したコアの光電力、 $P_2(L)$ は隣接したコアに移行した光電力である。

$$CrossTalk = \frac{P_2(L)}{P_1(L)} = \frac{1 - e^{-2hL}}{1 + e^{-2hL}} \quad (3.1)$$

ここで指数項の変数 h は電力結合係数である。導波モード間の結合が小さく、クロストークが低い場合 ($hL \ll 1$) は式 (3.1) を次式で表せる。

$$CrossTalk = \frac{P_2(L)}{P_1(L)} \cong hL \quad (3.2)$$

伝搬軸方向の不整がない場合の2つの導波モード間の結合係数を C とすると、電力結合係数 h は式 (3.3) で表せる[31]。ここで、 F は比例定数で、不整の自己相関によって決まり、波長依存性は小さいと思われる。

$$h = FC^2 \quad (3.3)$$

式 (3.2) のクロストークを単位 dB で表すと式 (3.4) が得られる。

$$CrossTalk(dB) = 20\log_{10}(C) + 10\log_{10}(L) + 10\log_{10}(F) \quad (3.4)$$

コアの屈折率 n_{co} 、クラッドの屈折率 n_{cl} 、コア半径 a 、コア間距離 Λ の2つのコアからなるモデルを図 3.1 に示す。ここで、伝搬軸方向に不整がない場合の2つの導波モード（基本モード）間の結合係数 C は式 (3.5) で表せる[32]。 Δ は比屈折率差、 n_{01} は基本モードの実効屈折率、 k は波数、 β は伝搬定数、 V は正規化周波数、 K_1 は第2種変形ベッセル関数である。なお、中心に1個、外側に6個の合計7個のコアからなるマルチコア光ファイバの中心コアと外側コアの間の結合係数は、2つのコアの結合係数に等しいことが報告されている[33]。

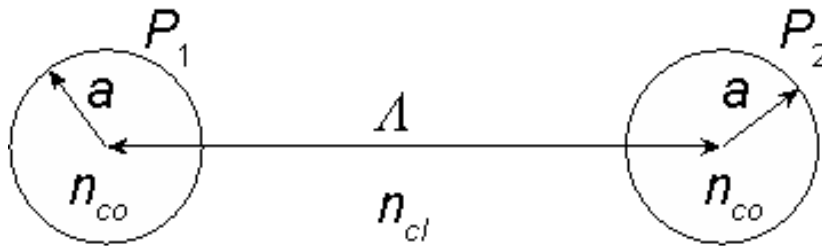


図 3.1 2つのコアのモデル

$$C = \left(\frac{\pi\Lambda}{W\Lambda a} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{U^2}{V^3 K_1^2(W)} \exp\left(-W \frac{\Lambda}{a}\right) \quad (3.5)$$

ここで、 U と W はそれぞれ式 (3.6)、(3.7) で表される。

$$U^2 = a^2(k^2 n_{co}^2 - \beta^2) \quad (3.6)$$

$$W^2 = a^2(\beta^2 - k^2 n_{cl}^2) \quad (3.7)$$

式 (3.5) を式 (3.4) に代入すると次式が得られる。

Crosstalk(dB)

$$\begin{aligned}
 &= 20 \log_{10} \left\{ \left(\frac{\pi \Delta}{W \Lambda a} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{U^2}{V^3 K_1^2(W)} \right\} \\
 &\quad - \frac{\Lambda}{\lambda} 2\pi \sqrt{n_{01}^2 - n_{cl}^2} (20 \log_{10} e) \\
 &\quad + 10 \log_{10}(L) + 10 \log_{10}(F)
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

結合係数 C のコア間距離 Δ と波長 λ に対する依存性は、式 (3.5) の指数関数内の影響が大きいことがわかる。したがって、式 (3.8) の第 1 項のコア間距離 Δ と波長 λ に対する依存性は、第 2 項に比べて小さいと思われるので、式 (3.8) は式 (3.9) のように近似的に表せる。比例定数 F が不明であると、クロストークの値を求めることができないが、クロストークの伝搬距離 L 、波長 λ 、コア間距離 Δ の依存性は、式(3.9)のように見通しのよい数式で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 \text{Crosstalk}(dB) &= A_1 - \frac{\Lambda}{\lambda} B + 10 \log_{10}(L) + A_2 \\
 &= A - \frac{\Lambda}{\lambda} B + 10 \log_{10}(L)
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

次に、 A_1 、 B 、第 2 項 ($-\Lambda \cdot B / \lambda$) の値を代表的な屈折率分布について計算で求め、コア間距離 Δ と波長 λ に対する変化について調べる。コアの比屈折率差は 0.37%、コア径は 9.3 μm のステップ型屈折率分布で計算をしている。

コア間距離 Δ に対する A_1 、 B 、第 2 項 ($-\Lambda \cdot B / \lambda$) の変化を図 3.2 に示す。波長 λ は 1550 nm である。 B はコア間距離 Δ に関わる変数が存在しないため、一定の値になる。 A_1 と第 2 項 ($-\Lambda \cdot B / \lambda$) は、コア間距離 Δ に対して単調に変化する。 A_1 の変化量は、第 2 項 ($-\Lambda \cdot B / \lambda$) に比べて小さい。これより、クロストークのコア間距離 Δ に対する挙動を知る上で、 A_1 、 B は一定の値とみなし、近似的に定数として扱うことができる。

波長 λ に対する A_1 、 B 、第 2 項 ($-\Lambda \cdot B / \lambda$) の変化を図 3.3 に示す。コア間距離は 50 μm である。 A_1 、 B 、第 2 項 ($-\Lambda \cdot B / \lambda$) は、波長 λ に対して単調に変化する。 A_1 、 B の変化量は、第 2 項 ($-\Lambda \cdot B / \lambda$) に比べて小さい。クロストークの波長 λ に対する挙動を知る上で A_1 、 B は、一定の値とみなし、定数として扱うことができる。

A も、定数 A_1 と比例定数からなる A_2 の和であり、一定の値とみなし、定数として扱うことができる。

導波モードの実効屈折率やコア外の界分布広がり波長の依存性は、屈折率分布形状によらずステップ型と同じ程度と考えられ、 A と B は定数として扱うことができると考えられる。

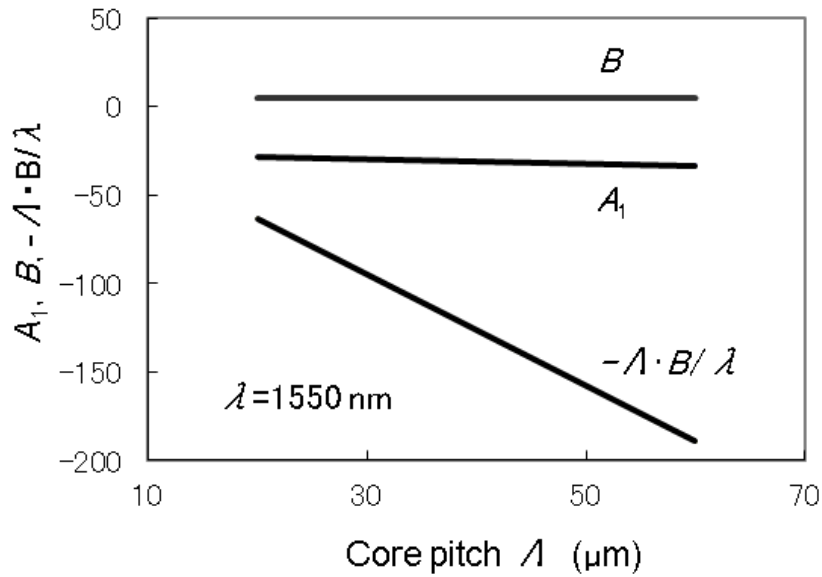


図 3.2 A_1, B , 第 2 項 $(-\Lambda \cdot B / \lambda)$ のコア間距離依存性

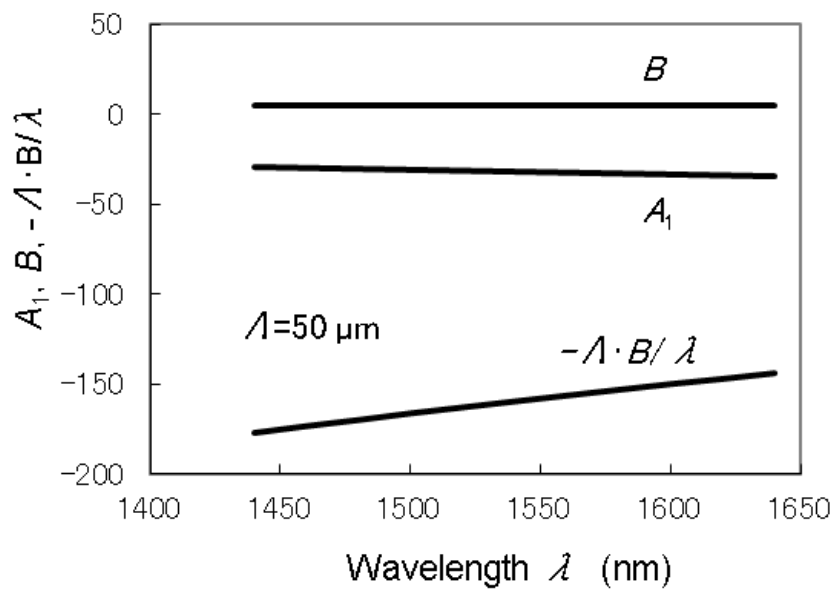


図 3.3 A_1, B , 第 2 項 $(-\Lambda \cdot B / \lambda)$ の波長依存性

3.2.2 コア間クロストークの挙動

式 (3.9) において、伝搬距離 L の変数は第 3 項のみに存在する。これより、クロストークの伝搬距離 L に対する依存性として、次の①～③の挙動が考えられる。なお、この挙動は、先行研究[28,34]で明らかにされており再確認したものである。

- ①単位を **dB** としたクロストークは伝搬距離 L の対数に線形的に増加し、その変化量は伝搬距離 L が 10 倍に対し 10 **dB** である。
- ②クロストークの伝搬距離 L に対する変化量は、波長 λ に依存しない。
- ③クロストークの伝搬距離 L に対する変化量は、コア間距離 Λ に依存しない。

また波長 λ の変数は第 2 項の分母のみに存在する。これより、クロストークの波長 λ に対する依存性として、次の④～⑥の挙動が考えられる。

- ④光通信で一般的に使用される C, L 帯の 1530 nm から 1625 nm の狭い波長範囲であれば、単位を dB としたクロストークは波長 λ が長くなると、ほぼ線形的に増加する。
- ⑤クロストークの波長 λ に対する変化量は、伝搬距離 L に依存しない。
- ⑥単位を dB としたクロストークの波長 λ に対する変化量は、コア間距離 Λ が長くなると大きくなり、その変化量とコア間距離 Λ は比例する。

さらに、コア間距離 Λ の変数は、第 2 項の分子のみに存在する。これより、クロストークのコア間距離 Λ に対する依存性として、次の⑦～⑨の挙動が考えられる。

- ⑦単位を dB としたクロストークはコア間距離 Λ に対して線形的に減少する。
- ⑧クロストークのコア間距離 Λ に対する変化量は、波長が短くなると大きくなる。
- ⑨クロストークのコア間距離 Λ に対する変化量は、伝搬距離 L に依存しない。

3.3 マルチコア光ファイバ構造

中心に 1 個と外側に 6 個の合計 7 個のコアからなるマルチコア光ファイバを作製した。コアの屈折率分布形状は、ステップ型とトレンチ付加型の 2 種類である。

ステップ型マルチコア光ファイバの断面写真とコアの屈折率分布形状の模式図を図 3.4 に示す。汎用 SMF に一般的に採用されている屈折率分布と同じ分布であるが、比屈折率差 Δ とコア径 $2a$ を大きくしている。3 種類のステップ型マルチコア光ファイバを作製した。光ファイバの諸特性を表 3.1 に示す。コア間距離 Λ がクロストークに与える影響を確認するために、比屈折率差 Δ 、コア径 $2a$ などのコアのパラメータはほぼ同じにして、コア間距離 Λ を意図的に変えている。

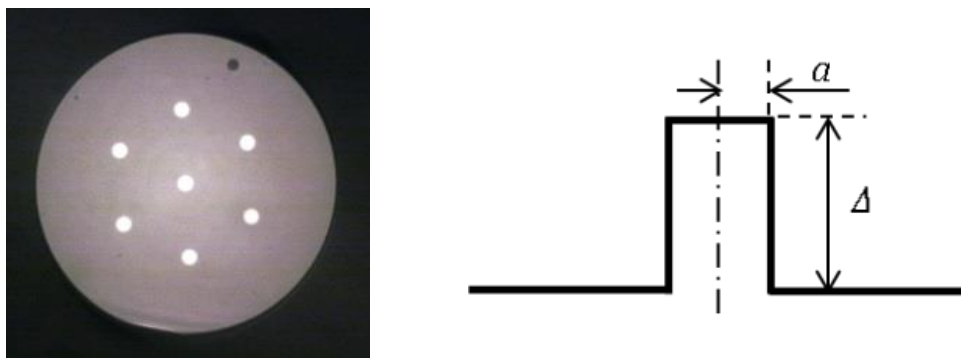


図 3.4 マルチコア光ファイバ（ステップ型）の断面写真と屈折率分布の模式図

表 3.1 ステップ型マルチコア光ファイバの諸元

Parameter	Fiber A	Fiber B	Fiber C
Δ (%)	0.36	0.37	0.38
$2a$ (μm)	9.2	9.3	9.3
Core pitch Λ (μm)	37	45	49
Mode field diameter ($\lambda = 1550 \text{ nm}$)	10.2	10.4	10.4

提案したクロストークを求める式(3.9)がステップ型以外の屈折率分布での適用可能性を確認するために、トレンチ付加型マルチコア光ファイバで評価を行った。

トレンチ付加型マルチコア光ファイバの断面写真と屈折率分布の模式図を図 3.5 に示す。2種類のトレンチ付加型マルチコア光ファイバを作製した。ステップ型と同様にコアのパラメータは維持したまま、コア間距離 Λ を変えている。光ファイバの諸特性を表 3.2 に示す。

トレンチ付加型はステップ型屈折率分布のコアをトレンチと呼ばれる低屈折率層で取り囲んでいる。トレンチの厚さ W は約 $8 \mu\text{m}$ である。トレンチの付加によって導波モードの電界分布の拡がりや抑えられ、クロストークが有効に抑制されることが知られている [34-36]。なお前述のステップ型マルチコア光ファイバのコアにトレンチを付加した際には、カットオフ波長は長波長側にシフトして 1550 nm 帯でマルチモードになり、さらにモードフィールド径は小さくなる。そこでトレンチ付加型では、コアの比屈折率差 Δ_1 、コア径 $2a_1$ を前述のステップ型に比べて小さくした。これにより、ステップ型とトレンチ付加型のモードフィールド径を、比較しやすいようにほぼ同じにしている。

ステップ型、トレンチ付加型ともに、コアの位置を識別するためのマーカーが設けられている。クラッドは純粋石英であり、コアは石英に GeO_2 を添加して屈折率を上げている。トレンチ部は F を添加して屈折率を下げている。なお、すべての光ファイバは同じ製造装置で作製している。

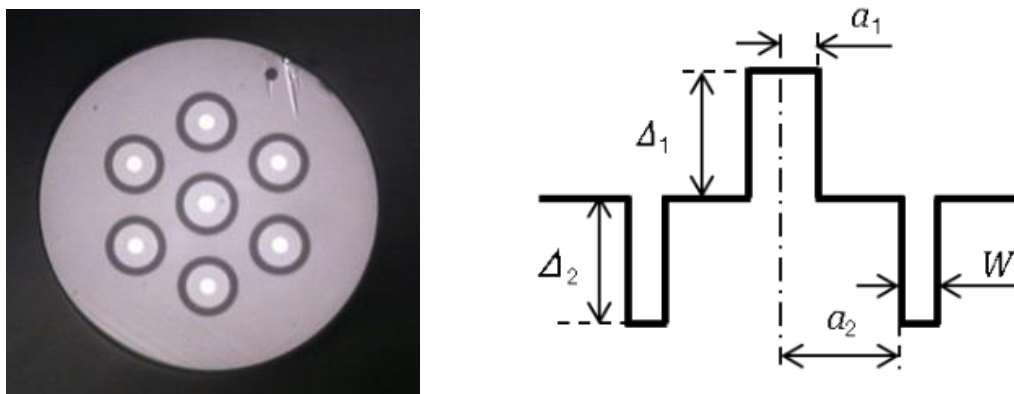


図 3.5 マルチコア光ファイバ（トレンチ付加型）の断面写真と屈折率分布の模式図

表 3.2 トレンチ付加型マルチコア光ファイバの諸元

Parameter	Fiber D	Fiber E
Δ_1 (%)	0.35	0.35
$2a_1$ (μm)	8.3	8.2
Δ_2 (%)	- 0.49	- 0.48
$2a_2$ (μm)	23.7	22.7
Core pitch Λ (μm)	43	48
Mode field diameter ($\lambda = 1550 \text{ nm}$)	10.4	10.1

3.4 測定結果

3.4.1 クロストークの伝搬距離依存性

クロストークは、マルチコア光ファイバを直径 160 mm のボビンに巻いた状態で計測している。マルチコア光ファイバのファイバ長を変えながら、クロストークの測定を行った。マルチコア光ファイバの入力端で中心コアのみに測定光を励振した時の、出力端における外側コアの光電力と中心コアの光電力の比として測定した。

測定系を図 3.6 に示す。マルチコア光ファイバの入力端は、シングルコア光ファイバを融着接続することで、中心コアのみを励振している。また出力端では、シングルコア光ファイバを突合せ接続をして、各々のコアから出力される光電力を選択的に測定した。この出力端に接続するシングルコア光ファイバの屈折率分布形状はトレンチ付加型である。測定するコア以外を伝搬する光の結合を防ぎ、低いクロストークの測定精度を確保するためである[37]。

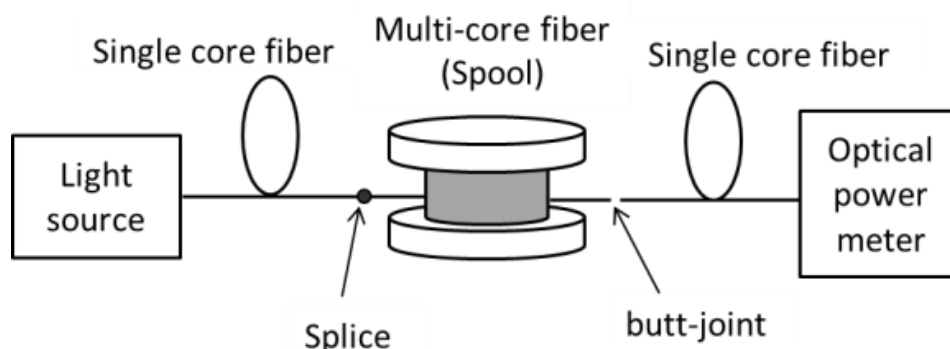


図 3.6 コア間クロストークの測定系

ステップ型の測定結果を図 3.7 に示す。クロストークは、外側コア 6 個分の平均値である。測定波長 λ は 1550 nm である。式(3.9) により示された前述の①では、単位を dB としたクロストークは伝搬距離 L の対数に線形的に増加し、その変化量は伝搬距離 L が 10 倍に対して 10 dB であった。図中の破線は、式(3.9)の定数 A と B を調整して測定点にフィッティングさせたものである。これより、図中の破線と測定点の傾きはほぼ同じであり、前述①に一致している [28,36]。

図 3.7 の Fiber A, B, C の比較から、コア間距離 A が異なっても、クロストークの伝搬距離 L に対する変化量はほぼ同じである。この測定結果は、前述③に一致している。

なお、図 3.8 にはトレンチ付加型の結果を示す。トレンチ付加型であっても、クロストークの伝搬距離 L に対する挙動はステップ型と同じである。

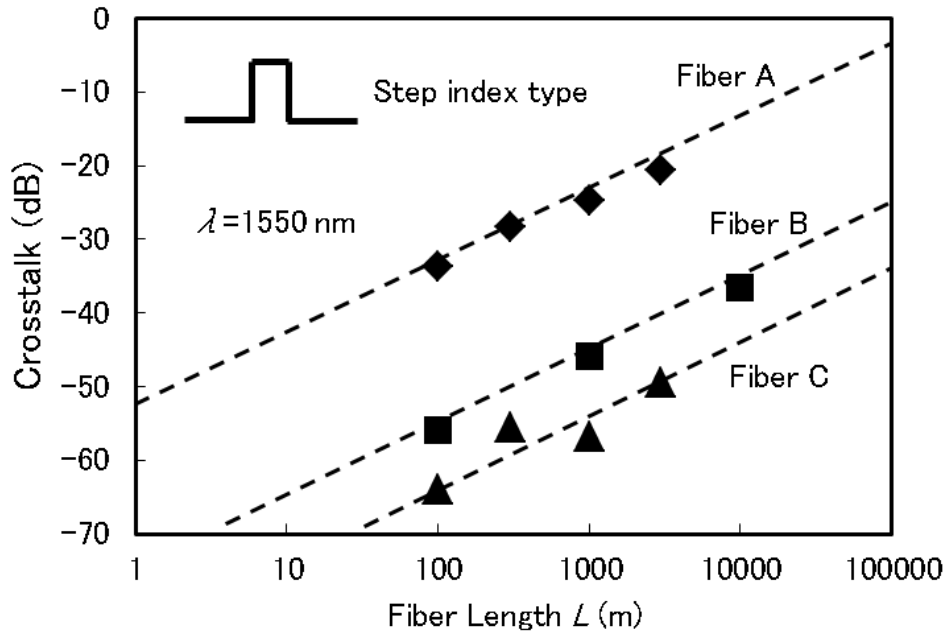


図 3.7 コア間クロストークの伝搬距離特性 (ステップ型)

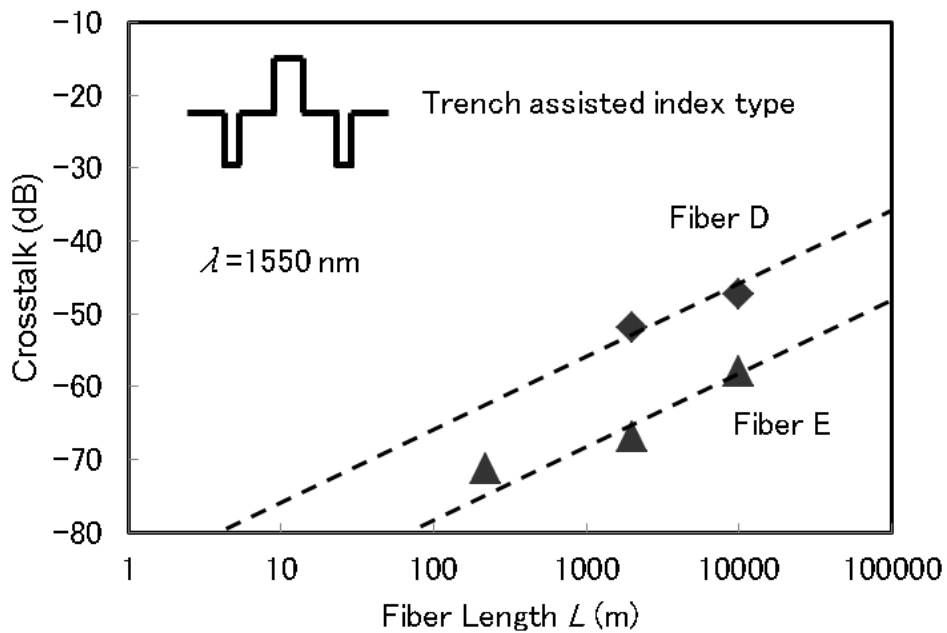


図 3.8 コア間クロストークの伝搬距離特性 (トレンチ付加型)

3.4.2 クロストークの波長依存性

マルチコア光ファイバは、波長多重通信で使用されることを考慮すれば、クロストークの波長依存性を把握する必要がある。導波モードの電界分布は、波長が長くなるほど拡がり、隣接するコアへの重なりが大きくなる。このためクロストークは、波長 λ に対して単調増加する[38]。そのためマルチコア光ファイバでは、光通信で使用する波長帯域内で最も長い波長のクロストークを考慮して、構造の設計をする必要がある。

ステップ型である Fiber B のクロストークの波長依存性を図 3.9 に示す。光源に高強度広帯域光源、受光器に光スペクトラムアナライザを使用して、光ファイバ長を変えながらクロストークの波長依存性を測定した。入力端で中心コアのみに測定光を励振したときの、出力端での 1 つの外側コアで測定されたクロストークの特性である。図中の破線は、式(3.9)の定数 A と B を調整して測定点にフィッティングさせたものである。

これより単位を dB としたクロストークは、波長 λ に対してほぼ線形的に増加していることが判る。この測定結果は、前述④に一致する。また、伝搬距離 L を 100 m, 1000 m, 10000 m に変化させても、そのクロストークの波長 λ に対する変化量は、それぞれ 0.110 dB/nm, 0.107 dB/nm, 0.108 dB/nm で、ほぼ同じである。この測定結果は、前述⑤に一致する。

また、クロストークの伝搬距離 L に対する変化量は波長 λ に依存しないという挙動(前述②)は、単位を dB としたクロストークは伝搬距離 L の対数に線形的に増加するという測定結果(図 3.7, 前述①)と、クロストークの波長 λ に対する変化量は光ファイバの伝搬距離 L に依存しないという測定結果(図 3.9, 前述⑤)から説明できる。

トレンチ付加型である Fiber D の結果を図 3.10 に示す。ステップ型と同様に、単位を dB としたクロストークは波長 λ に対してほぼ線形的に増加しており、伝搬距離 L を 2000 m, 10000 m に変化させてもその変化量はそれぞれ 0.109 dB/nm, 0.108 dB/nm で、ほぼ同じである。

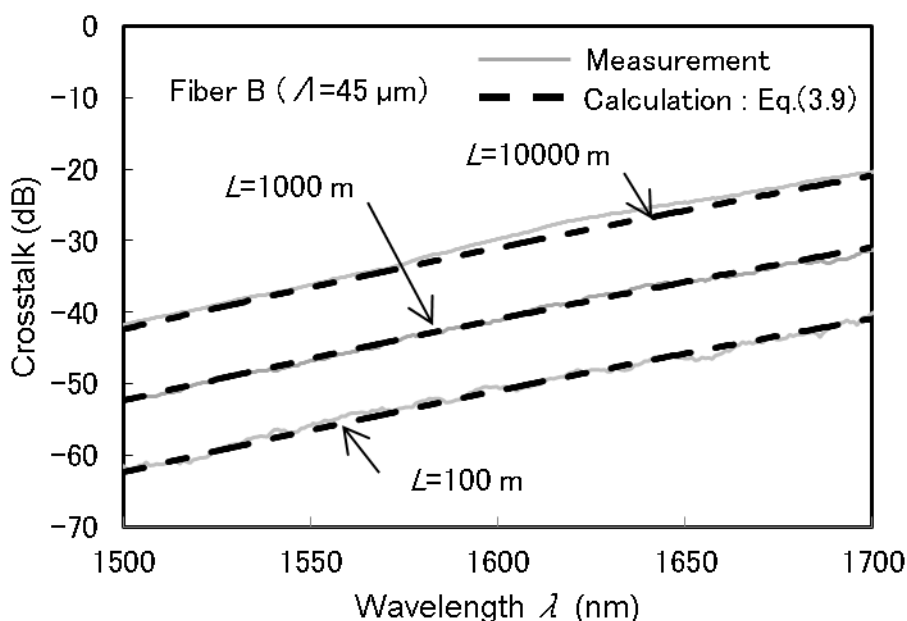


図 3.9 コア間クロストークの波長特性 (ステップ型, (FiberB), $L=100, 1000, 10000$ m)

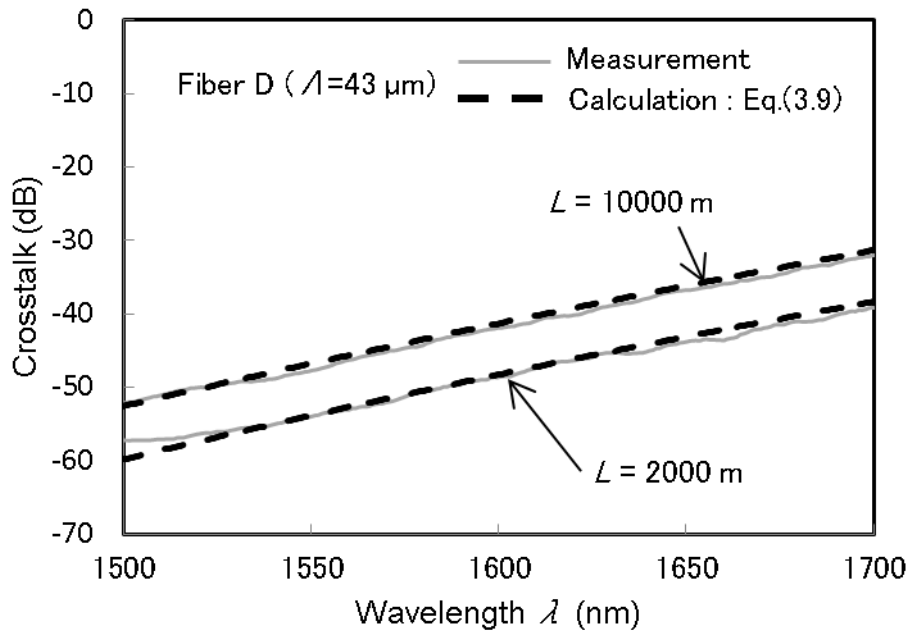


図 3.10 コア間クロストークの波長特性(トレンチ付加型, (Fiber D), $L=2000, 10000$ m)

ステップ型の Fiber A, B, C それぞれのクロストークの波長特性を図 3.11 に示す。すべて伝搬距離 L が 1000 m の結果である。コア間距離 Λ が長くなると、クロストークの波長 λ に対する変化量は増加している。図中の破線は、式(3.9)の定数 A と B を調整して測定点にフィッティングさせたものである。

図 3.12 はトレンチ付加型の結果である。ステップ型と同様にコア間距離 Λ が長くなると、クロストークの波長 λ に対する変化量は増加している。

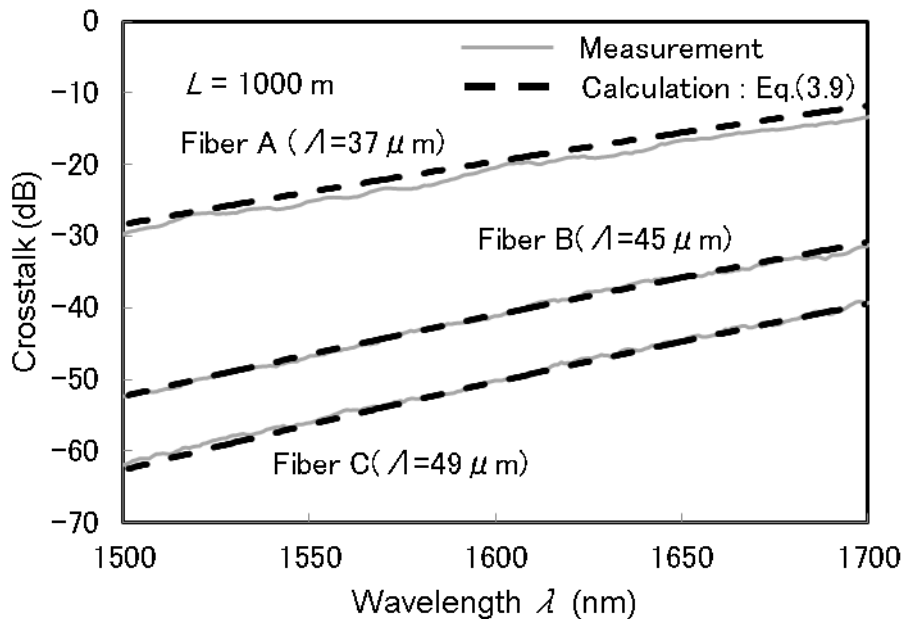


図 3.11 コア間クロストークの波長特性 (ステップ型, $\Lambda=37 \mu\text{m}$ (Fiber A), $45 \mu\text{m}$ (Fiber B), $49 \mu\text{m}$ (Fiber C))

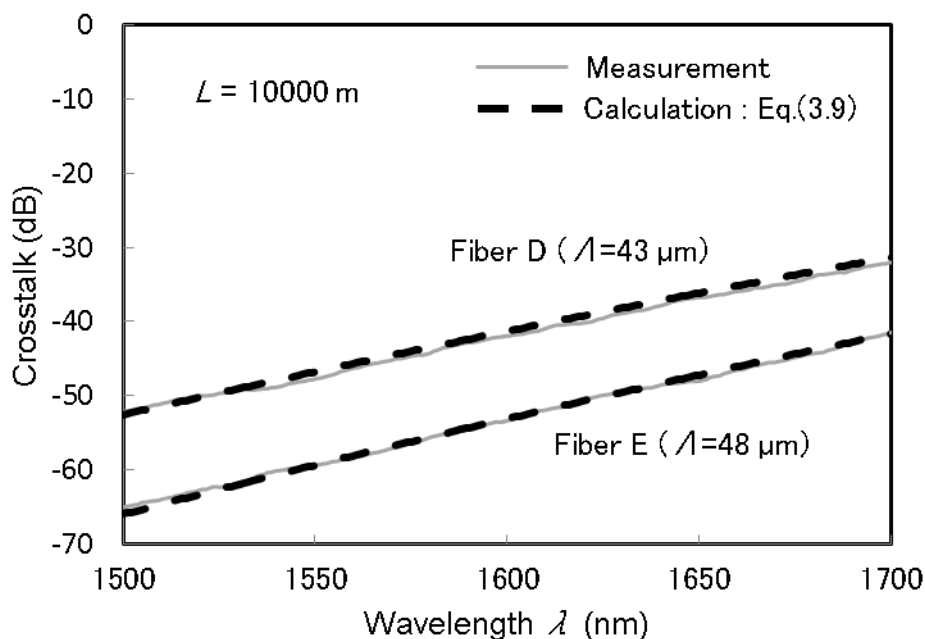


図 3.12 コア間クロストークの波長特性 (トレンチ付加型, $\Lambda = 43 \mu\text{m}$ (Fiber D), $48 \mu\text{m}$ (Fiber E))

3.4.3 定数 A , B の導出

図 3.7 から 3.12 の図中の破線は式(3.9)の定数 A と B を調整して測定結果にフィッティングさせたものである。この定数 A と B は以下の方法で決定した。

クロストークに波長依存性を与えるのは式(3.9)の第 2 項である。まず、クロストークの波長特性の図 3.11, 3.12 の破線の傾きに一致する第 2 項の定数 B を求めた。次に、上記の方法で求めた定数 B の値を式 (3.9) に代入して、クロストークの伝搬距離特性の図 3.7, 3.8 の破線に一致する第 1 項の定数 A を求めた。破線の傾きは、式(3.9)の第 3 項で与えられる伝搬距離 L が 10 倍に対しクロストークが 10 dB の変化である。

この方法で求められたステップ型の Fiber A, B, C それぞれの定数 A と B の値を表 3.3 に示す。また、トレンチ付加型の Fiber D, E それぞれの定数 A と B の値を表 3.4 に示す。

表 3.3 ステップ型マルチコア光ファイバの定数 A , B

Fiber	A	B
Fiber A	82	5.69
Fiber B	100	6.08
Fiber C	104	6.02
Average	95	5.93

表 3.4 トレンチ付加型マルチコア光ファイバの定数 A , B

Fiber	A	B
Fiber D	88	6.30
Fiber E	102	6.47
Average	95	6.39

なお、図 3.11 の Fiber A における測定結果の実線と、測定結果にフィッティングさせた破線の間には図中の上下方向にオフセットが見られる。1つの外側コアの測定結果からなる図 3.11 を利用してフィッティングによる破線の傾きを決定し、この傾きを維持して図中の破線の上下方向の平行移動を外側コア 6 箇所の平均値からなる図 3.7 の測定結果を利用して決定している。この図 3.11 の 1つの外側コアからなるクロストークの測定結果と、図 3.7 の外側コア 6 個からなるクロストークの平均値からなる測定結果の間に波長 1550 nm で 1.4dB の差があることで生じたものである。

式 (3.8) の第 2 項の後半部から計算で定数 B を求めた。Fiber A, B, C の定数 A は、それぞれ 4.76, 4.90, 5.00 である。測定結果から求められた表 3.3 の定数 B は計算で得られた定数 B に比べて大きい。これは以下の理由による。

簡易計算式 (3.9) においてクロストークに波長依存性を与えるのは第 2 項のみであり、これは数式 (3.8) の第 2 項に相当する。しかし、数式 (3.8) のクロストークの波長依存性は、第 2 項に比べて小さいものの第 1 項も変化する。一例として示した図 3.3 では、波長 1530 nm から 1620 nm に変化することで第 2 項 ($-A \cdot B / \lambda$) は、+15.0dB の変化を与えるのに対し、第 1 項の A_1 の波長依存性で、さらに +2.3dB の変化が加わる。これにより、測定で得られたクロストークの波長依存性は、式 (3.8) の第 2 項のみからなる波長依存性よりも大きくなり、定数 B の値も増加した。これは定数 A_1 , B を定数と扱ったことによる影響である。

なお、定数 A は光ファイバの製造工程で生じるファイバ長手方向の変動に依存する比例定数 F を含むため、実験結果を利用せずに計算で求めることはできない。

3.4.4 クロストークの波長変化率とコア間距離依存性

ステップ型における波長 1 nm あたりのクロストークの変化量とコア間距離 L の関係を図 3.13 に示す。変化量は波長 1530 nm から波長 1625 nm までの範囲を最小二乗法により線形近似を行い、その傾きから求めた。なお、クロストークの波長特性は、いずれも波長に対して細かな変動が見られる。外側コア 6 個分の波長特性を測定して、すべての変化量を図 3.13 に示している。単位を dB としたクロストークの波長 λ に対する変化量は、コア間距離が長くなると大きくなり、その変化量とコア間距離はほぼ比例している。この結果は前述⑥と一致する。クロストークの波長 λ に対する変化量は、式(3.9)を波長で微分することによって次式で表せる。

$$\frac{d}{d\lambda} \left(A - \frac{A}{\lambda} B + 10 \log_{10}(L) \right) = \frac{A}{\lambda^2} B \quad (3.10)$$

図 3.13 の破線は、表 3.3 の定数 B の平均値を利用して式(3.10)から求めたコア間距離 L とクロストークの波長に対する変化量の関係を示している。波長は 1530nm と 1625nm の中間の 1577.5nm で計算した。

波長に対する変化量は、簡易計算式 (3.9) を利用することなく、式 (3.8) の第 1 項と第 2 項の和からなる波長依存性から求めることができる。図 3.13 の 1 点鎖線は、Fiber B の比屈折率差 Δ 、コア半径 a において式 (3.8) から得られるコア間距離 L とクロストークの波長に対する変化量を示している。波長依存性が無くなるコア間距離 L は、簡易計算式 (3.9) では零になるのに対し、式 (3.8) ではコア直径 $2a$ に相当するコア間距離

になる。図中の破線と1点鎖線との間に差が生じるのは、簡易計算式で A_1 , B を定数と扱ったことによる影響と考えることができる。

図 3.14 はトレンチ付加型の結果である。ステップ型と同様に、単位を dB としたクロストークの波長 λ に対する変化量は、コア間距離が長くなると大きくなり、その変化量はコア間距離にほぼ比例している。

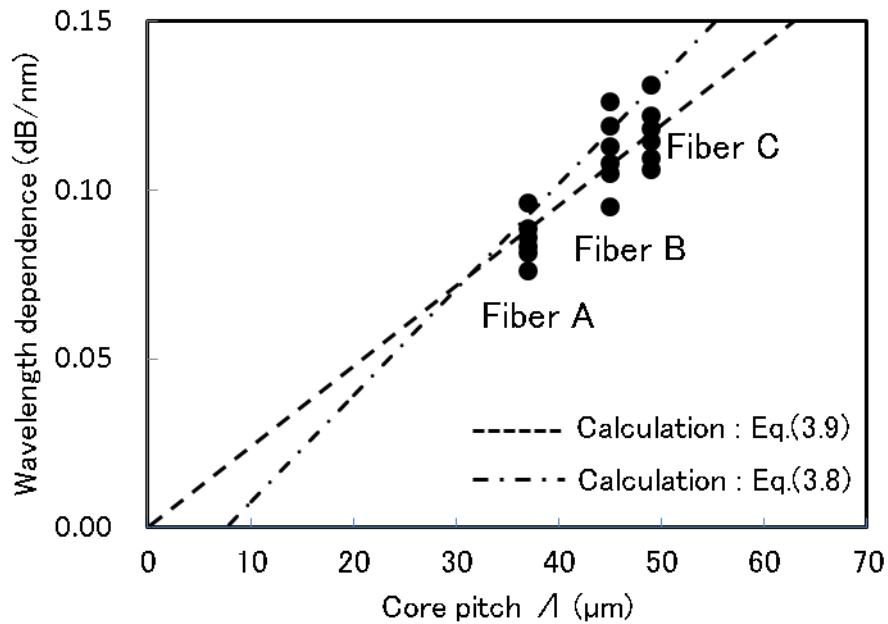


図 3.13 コア間距離とクロストークの波長変化量の関係（ステップ型）

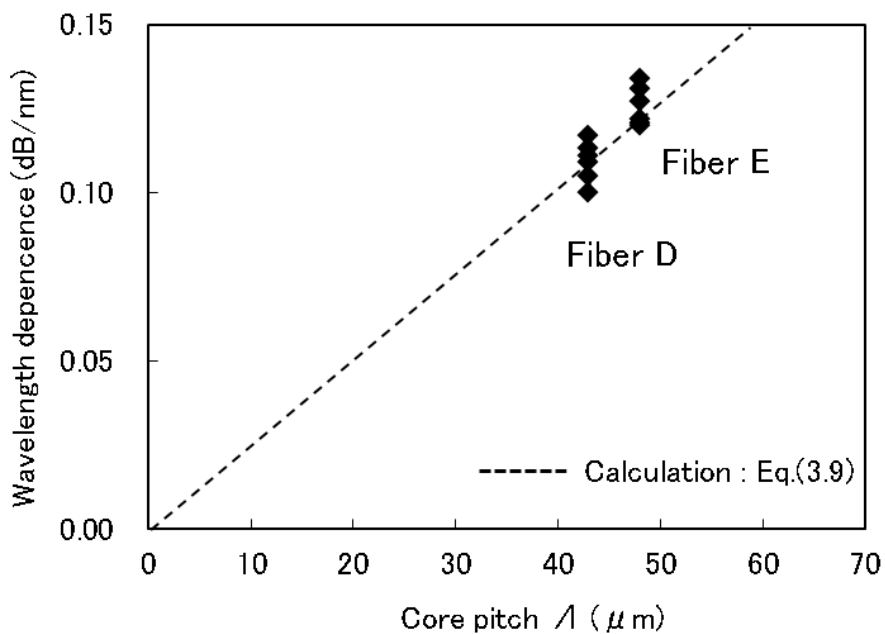


図 3.14 コア間距離とクロストークの波長変化量の関係（トレンチ付加型）

3.4.5 クロストークのコア間距離依存性

クロストークの抑制は、コア間距離 Λ を長くすれば実現できる。しかし、複数のコアを1心の光ファイバに収納するには、クラッド径を太くする必要がある。クラッド径が大きくなると、曲げ印加時の内部歪が増加するため、破断確率が増加する。プルーフ荷重を増加することで、従来の光ファイバと同等の信頼性を確保することはできるが[39]、生存長が短くなることが予測される。可とう性の低下によるハンドリングの問題、また、空間利用効率の点からも、許容されるクロストークを確保しつつ、コア間距離 Λ を短くしてクラッド径を細くすることが望まれる。このため、クロストークのコア間距離特性を把握することが必要になる。

コア間距離 Λ とクロストークの関係を図 3.15 に示す。クロストークは伝搬距離 L が 100 km 相当で波長 λ が 1550 nm の値である。単位を dB としたクロストークはコア間距離 Λ に対してほぼ線形的に減少している。この測定結果は前述⑦と一致する[35,36]。図中の破線は表 3.3, 3.4 の定数 A , B の平均値を利用して数式 (3.9) の計算で求めたコア間距離 Λ とクロストークの関係を示している。

また、図 3.15 の結果から、同じコア間距離 Λ で比較すると、トレンチ付加型はステップ型に比べて約 15 dB の改善がみられる。

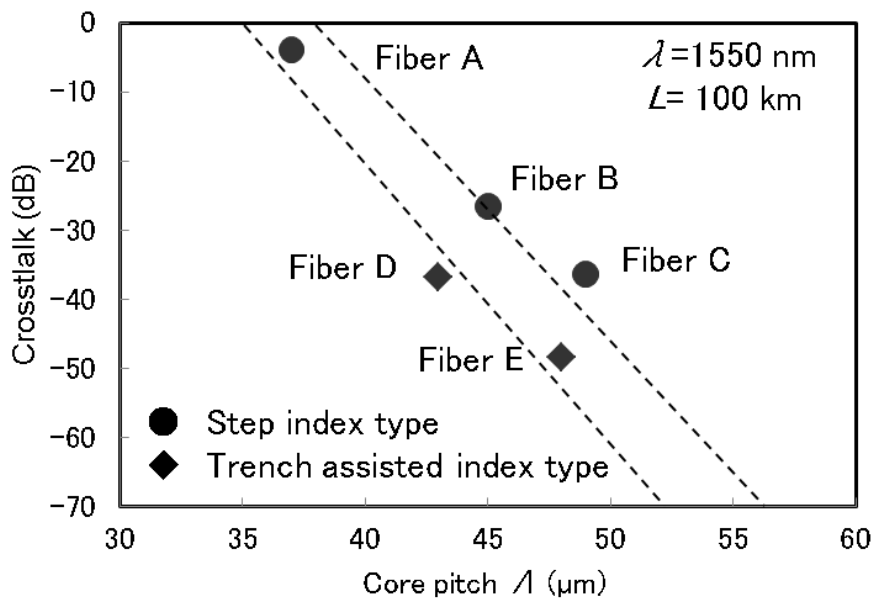


図 3.15 コア間クロストークのコア間距離依存性 (ステップ型, トレンチ付加型)

クロストークのコア間距離 Λ に対する変化量は、波長 λ が短くなると大きくなるという挙動 (前述⑧) は、異なるコア間距離 Λ のマルチコア光ファイバのクロストークが、短波長になるとその差が大きくなる図 3.11 の結果から説明できる。

クロストークのコア間距離 Λ に対する変化量は、伝搬距離 L で変化しないという挙動 (前述⑨) は、単位を dB としたクロストークが光ファイバ伝搬距離 L の対数に線形的に変化する測定結果 (図 3.7, 前述①) から説明ができる。

3.5 まとめ

マルチコア光ファイバにおけるコア間クロストークの伝搬距離、波長に対する挙動は、電力結合理論から導出される見通しのよい簡易計算式で表すことができる。さらに、コアパラメータを維持したマルチコア光ファイバにおいて、コア間距離を変化させた場合のクロストークも同様に簡易計算式で表すことができる。測定されたマルチコア光ファイバクロストークは、提案した数式から示されるクロストークの挙動と一致した。この一致は、ステップ型とトレンチ付加型のいずれの屈折率分布においても確認ができた。

提案した数式は、ランダムな不整によって決定される電力結合係数は不明なものとして扱うため、クロストークの絶対値は求めるもとができない。しかし、測定されたクロストークが得られると、数式に含まれる2つの定数を決定することができる。これにより数式から異なる伝搬距離、波長におけるクロストークを見積もることができる。また、同じコアパラメータからなるマルチコア光ファイバであれば、コア間距離を変化させた場合のクロストークも見積もることができる。

コア間クロストークの目標値である -30dB 以下（条長 100 km 、波長 1550 nm ）は、図 3.15 からコア間距離 A をトレンチ付加型で $42\text{ }\mu\text{m}$ 以上、ステップ型で $46\text{ }\mu\text{m}$ 以上設けることで達成できる。

第4章 マルチコア光ファイバ用ファンイン・ファンアウト部品

4.1 はじめに

マルチコア光ファイバを送信機・受信機などに接続する箇所でファンイン・ファンアウト部品が必要になる[40]。ファンアウト部品は、マルチコア光ファイバから各々のコアに対応した複数のシングルコア光ファイバに分岐するものである。

ファンアウト部品としてバンドル型が報告されている。これは、バンドルにした細径シングルコア光ファイバをフェルールに接着固定して、マルチコア光ファイバに接続したものである。バンドルにしたシングルコア光ファイバのコア配列は、マルチコア光ファイバのコア配列に一致させる必要がある。なお、マルチコア光ファイバのコア間距離はおよそ 40 から 50 μm と短い[34-36]。クラッド径がマルチコア光ファイバのコア間距離と等しい細径のシングルコア光ファイバをバンドルにしたファンアウト部品[41,42]、シングルコア光ファイバの先端部のクラッド径をマルチコア光ファイバのコア間距離と等しくなるまでエッチングして、バンドルにしたファンアウト部品が報告されている[43]。これらは、円柱状の光ファイバをバンドルにするために隙間ができる。フェルールに接着固定したファイババンドルは、隙間を接着剤で充填している。単心の光ファイバをフェルールに接着する場合と異なり、フェルール孔の断面内に占める接着剤の割合が大きくなる。突合せ接続部の反射を抑えるために、このようなファイババンドルをマルチコア光ファイバに押圧を加えて PC (Physical contact) 接続した場合の長期信頼性は不明である。

一方、複数の孔を設けた石英製のキャピラリにシングルコア光ファイバを挿入して溶融延伸することで作製したテーパファイババンドルを、マルチコア光ファイバに接続したファンアウト部品が報告されている[44]。溶融によってキャピラリとシングルコア光ファイバの隙間はコラプスされているため、石英で一体化されたテーパファイババンドルになる。このため、融着接続が可能になる。コネクタ接続においても、溶融延伸したテーパファイババンドルをフェルールに接着固定した状態は、単心の光ファイバを接着固定した状態とほぼ同じである。延伸によってテーパファイババンドルのコア配列をマルチコア光ファイバのコア配列に一致させる。延伸されていない分岐後のシングルコア光ファイバは、マルチコア光ファイバのコア間距離よりも太くできる。このため、剛性が増加して意図しない曲げが加わりにくくなるメリットがある。

しかし、テーパファイババンドルのシングルコア光ファイバは延伸されるため、その延伸の前と後でコア径が変化する。延伸後のモードフィールド径 (MFD) を延伸前とほぼ同じにすることで、テーパファイババンドルをマルチコア光ファイバに接続したときの損失を抑制できる。この対策として、ダブルコア型の屈折率分布を採用したシングルコア光ファイバを使った報告がある[45]。延伸前は中心のコアに光を閉じ込める。延伸後は、中心のコアが細くなるため閉じ込めが弱くなり、そのままでは MFD が広がってしまう。このため、中心コアを取り囲む外側の第2コアを設けて光を閉じ込める。このダブルコア型の屈折率分布を適切に設計することで延伸後も延伸前とほぼ等しい MFD を維持している。この報告では、汎用シングルモード光ファイバのクラッド径である 125 μm を 40 μm まで延伸している。しかし、延伸前の光ファイバは第2コアの存在で高次モードが伝搬すると考えられる。このため、中心コアだけに光を結合させて高次モードの伝搬を抑える工夫が求められる。

本研究では、ファンアウト用光ファイバの屈折率分布を作製が容易なステップ型にした。クラッド径は 80 μm で、延伸後のクラッド径を 40 μm まで減少させる。延伸前と後

の MFD の変化を抑制したシングルコア光ファイバを使用することで、ファンアウト部品の挿入損失を抑えた。このファンアウト用光ファイバは延伸前であっても C 帯でシングルモードを維持している [46]。

4.2 ファンアウト部品の作製工程

図 4.1 は熔融延伸型ファンアウト部品の作製方法を示したものである。外径 $910\ \mu\text{m}$ の円柱状の石英に、中心と外側 6 個の合計 7 個の孔を設けたキャピラリを準備した。孔径は $200\ \mu\text{m}$ 、孔間隔が $220\ \mu\text{m}$ である。図 4.2 はその断面写真である。キャピラリは加熱しながら延伸することで中間にくびれ部を設けた。このキャピラリのそれぞれの孔に、先端部の被覆を除去したシングルコア光ファイバを挿入する。その後、くびれ部を加熱熔融することでキャピラリとシングルコア光ファイバの隙間をコラプスして一体化する。さらに加熱しながらシングルコア光ファイバのコア配列が、マルチコア光ファイバのコア配列に一致するように延伸を行う。次に延伸された部分を切断することでテーパファイババンドルを作製した。さらにこれを、マルチコア光ファイバに接続することでファンアウト部品を完成させた。

キャピラリにくびれ部における孔径は約 $85\ \mu\text{m}$ で、挿入するシングルコア光ファイバのクラッド径は $80\ \mu\text{m}$ である。くびれ部の孔径とキャピラリ外径の比は、くびれ部がない箇所とほぼ同じである。なお、クラッド径が $80\ \mu\text{m}$ の光ファイバは、光ファイバジャイロや光ファイバカプラなどでの分野で利用されていることから、コネクタフェルールを入手しやすい。

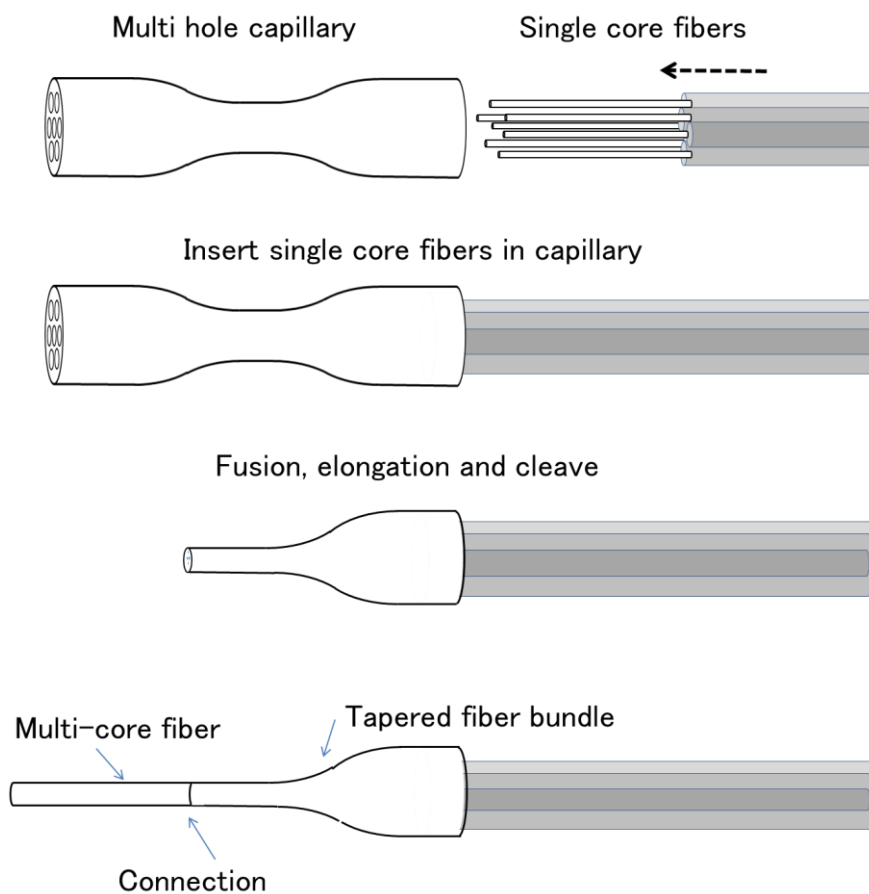


図 4.1 ファンアウト部品の作製工程

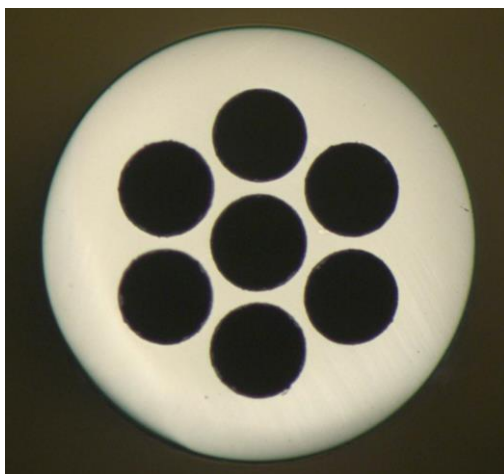


図 4.2 キャピラリ断面写真

クラッド径が $80\ \mu\text{m}$ のシングルコア光ファイバを半分の $40\ \mu\text{m}$ になるまで延伸するものとして設計をした。このため、延伸でコア径も半分に減少する。キャピラリの孔と孔の間にある石英の厚みによって、延伸後のコア間距離は約 $5\ \mu\text{m}$ 増加する。このため、延伸後のコア間距離は約 $45\ \mu\text{m}$ になる。シングルコア光ファイバの被覆径は約 $160\ \mu\text{m}$ である。この被覆を残している箇所はキャピラリのくびれを与えている手前まで挿入されている。

このように作製されるファンアウト部品の挿入損失として、次の 3 つの要因が考えられる。

- (A) テーパーファイババンドルとマルチコア光ファイバの接続箇所におけるコアの軸ずれによる接続損失。
- (B) テーパーファイババンドルとマルチコア光ファイバの接続箇所における MFD のミスマッチによる接続損失。
- (C) テーパーファイババンドルのテーパー部分において外側に配置したシングルコア光ファイバのコアが中心のシングルコア光ファイバのコアに接近するように曲がりが生じることで発生する曲げ損失。

4.3 MFD の変化を抑制した光ファイバ

MFD のミスマッチによる接続損失を抑制する方法について述べる。テーパーファイババンドルに使用されるシングルコア光ファイバは、延伸されて細くなった方にマルチコア光ファイバ、延伸されていない方に汎用 SMF を接続することになる。テーパーに加工されたシングルコア光ファイバの両端の MFD を同じ値にすることで挿入損失を減らすことができる。図 4.3 は、ステップ型屈折率分布の光ファイバのコア径が変化した場合の MFD 変化の一例を示している。MFD は、コア径の縮小と共に減少し、あるコア径で極小値を迎え、そして増加に転じる。延伸前と後のコア径を、極小値となるコア径の前と後にすることで MFD の差を抑えることが可能になる。

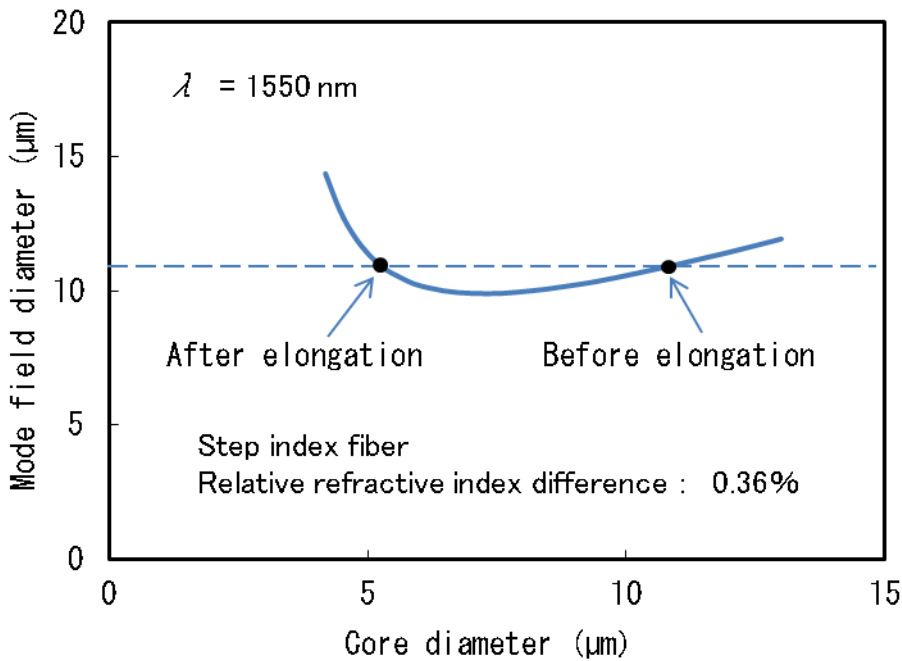


図 4.3 MFD のコア径依存性（一例）

4.3.1 シングルコア光ファイバの設計

MFD が異なる 2 本の光ファイバを接続した場合の損失は、Marcuse の計算式から求めることができる[47]。2 本の光ファイバの MFD を等しくすれば接続損失を無くすことができる。Marcuse の計算式は、導波モードの光強度分布をガウス分布と仮定している。導波モードの光強度分布が一致しない場合は、たとえ MFD を等しくしても接続損失は発生する。しかしながら、接続損失を抑制するには MFD を等しくする必要がある。

MFD の定義式は Petermann I [48]、Petermann II [49]が提案されている。それぞれの定義式を使って、延伸でコア径が半分になっても MFD が等しくなる条件を求めた。計算結果を図 4.4 に示す。図 4.4 の実線上は、コア径が半分になっても MFD は変化しないコア径と比屈折率差の関係を示している。細い実線、太い実線は、それぞれ Petermann I、Petermann II の結果である。延伸前の MFD は、定義式による差は小さい。しかし、延伸後は定義式によって MFD の差が大きくなる。これは、光強度分布はガウス分布から外れるためである[50]。破線は、ファイバカットオフ波長 λ_c [51]が、1500 nm になる条件を示している。破線の上側は波長 1500 nm で高次モードが伝搬する。C 帯でシングルモードを維持しながら、延伸前後の MFD が等しくなる条件は、Petermann II の一部を除き存在しない。図 4.4 から、いずれの定義式を採用しても、シングルモードを維持しながら延伸前後で MFD の差を抑制できる条件は、カットオフ波長 λ_c が 1500 nm となる破線付近になる。

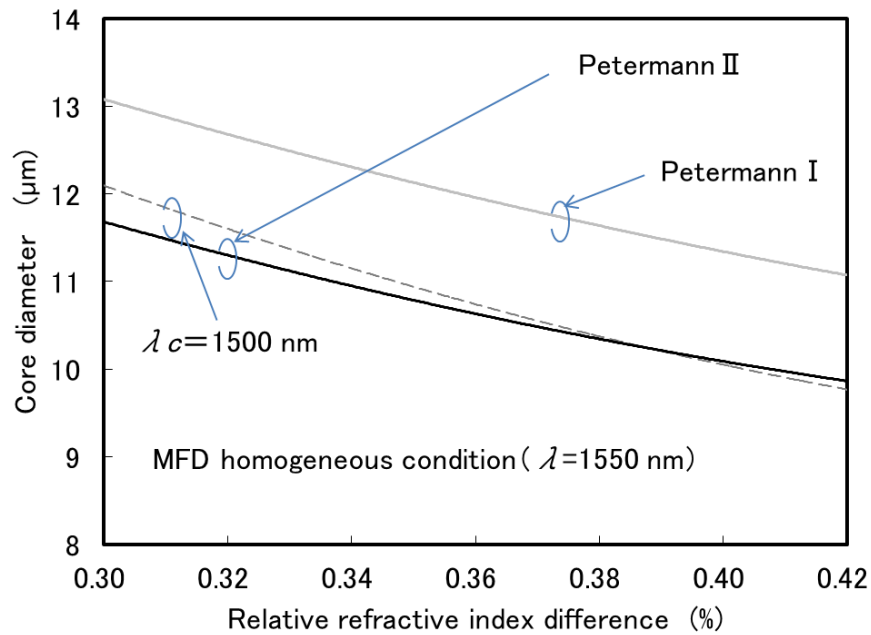


図 4.4 MFD 均一条件

4.4 シングルコア光ファイバの特性

図 4.4 を参考にしてシングルコア光ファイバを設計した。作製したシングルコア光ファイバの諸特性を表 4.1 に示す。波長 λ が 1550nm におけるシングルコア光ファイバの MFD は 10.6 μm である。なお、マルチコア光ファイバの MFD は 10.4 μm であり、シングルコア光ファイバと近い値である。比屈折率差は 0.38% であり、汎用 SMF とほぼ同じである。汎用 SMF 用のプリフォームの CDDR を調整することでシングルコア光ファイバを作製できる。

表 4.1 シングルコア光ファイバの諸特性

Parameters	Results
Core diameter (μm)	10.3
Relative refractive index Δ (%)	0.38
Cladding diameter (μm)	80
Coating diameter (μm)	160
Cut off wavelength (μm)	1.50
Mode field diameter ($\lambda=1550 \text{ nm}$) (μm)	10.6

4.4.1 延伸箇所の MFD 測定

単心のシングルコア光ファイバを延伸した箇所の MFD を測定した。図 4.5 に延伸の模式図を示す。シングルコア光ファイバの中間部の被覆を除去した。その除去した箇所を加熱しながら延伸することで、光ファイバをダンベル形状に加工した。テーパ部分の長さは約 4 mm で、均一な太さに延伸された長さは約 20 mm である。均一な太さに延伸された箇所を切断して MFD とクラッド径を測定した。MFD は、光ファイバの測定で一般的に用いられているファーフィールドパターンから得られる Petermann II の値である。

① Remove the coating



② Fusion and elongation



③ Cleave

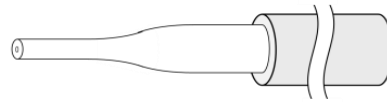


図 4.5 シングルコア光ファイバの延伸

図 4.6 はシングルコア光ファイバのクラッド径と波長 λ が 1550 nm における MFD の関係を示したものである。シングルコア光ファイバのクラッド径は 80 μm である。実線は、クラッドが無限に広がっているものとして計算した結果である。クラッド径が減少すると、MFD は緩やかに減少しながら極小値を迎える。さらにコア径が減少すると光の閉じ込めが弱くなるため MFD は増加する。測定結果は計算結果に比較的良好に一致している。クラッド径が細くなると、その外側の空気の影響を受けて MFD が小さくなることが考えられる。しかし、測定値は計算値よりわずかに大きい。コアは石英に GeO_2 を添加している。延伸時の加熱によって GeO_2 が拡散する。この熱拡散の影響が考えられる。延伸時における透過光電力の変化を測定した。その光電力の減少は 0.05dB 以下であった。

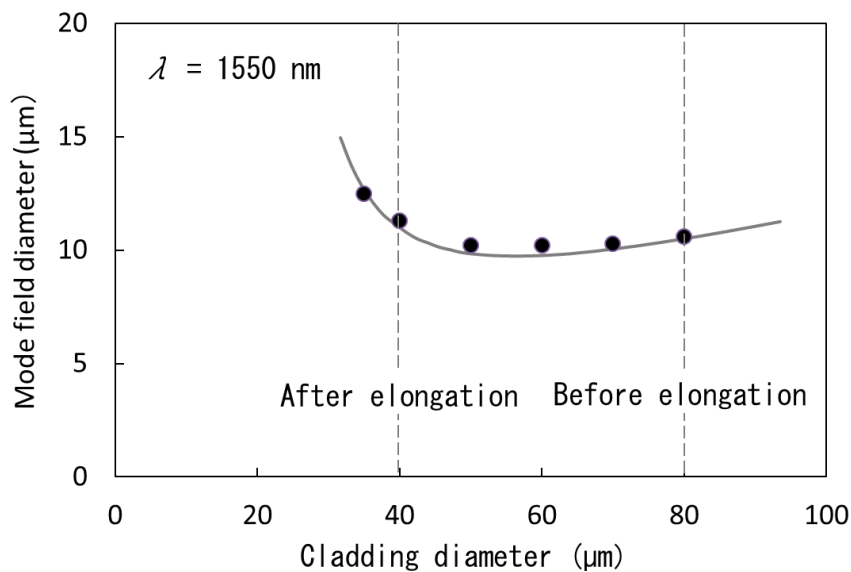


図 4.6 クラッド径と MFD の関係

4.4.2 テーパーファイババンドルの曲げ損失

テーパーファイババンドルのテーパー部分でコアに曲がり加わる。図 4.7 はその模式図を示したものである。中心に配置されたシングルコア光ファイバのコアに曲がりはない。しかし、外側に配置された 6 本のシングルコア光ファイバのコアは、中心の光ファイバに接近するような曲がり加わる。この曲がり生じる伝送損失が、先の 4.2 章の(C)で挙げた曲げ損失である。

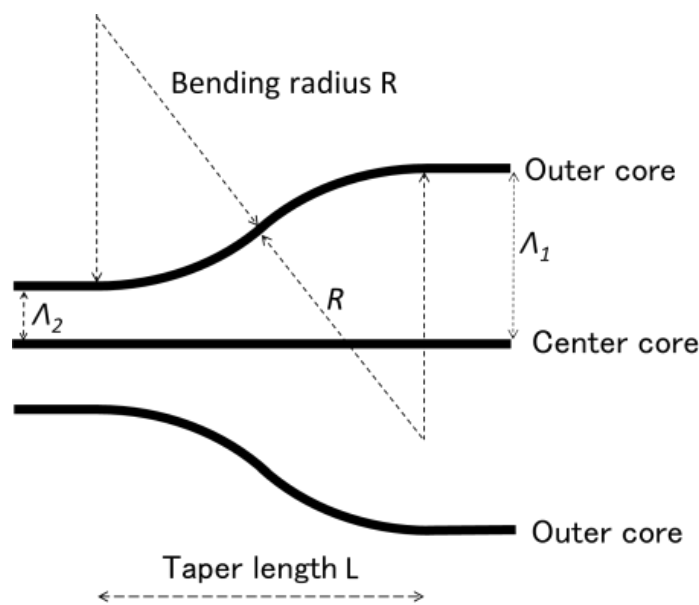


図 4.7 テーパーファイババンドルで加わるコアの曲がりの状態

この曲げ損失の影響を検討した。延伸後のコア間距離 A_2 を $45 \mu\text{m}$ 、延伸前のコア間距離 A_1 を $90 \mu\text{m}$ 、延伸でテーパー形状になっている距離 L を 10mm と仮定した。外側に配置されたシングルコア光ファイバのコアに加えられる曲りは、2つの円弧を接続した形状と仮定すれば、その外側コアの曲率半径 R は約 500mm になる。なお、図 4.7 の模式図では、コアを均一な太さに描いているが、コア間距離が狭くなる箇所ほどコア径は細くなる。曲げ損失を測定する目的で、ダンベル形状に加工したシングルコア光ファイバを準備した。その形状は、図 4.5 の②の状態である。テーパー部分の長さが約 4mm 、均一な太さに延伸された長さが約 20mm 、太さが約 $40 \mu\text{m}$ である。ダンベル形状に加工された部分に屈折率整合剤を塗布した状態で、曲げ印加前後の透過する光電力から曲げ損失を測定した。ダンベル形状に加工された部分をマンドレルにすべて巻き付けて測定している。曲げ損失の波長特性を図 4.8 に示す。曲率半径が 100mm を超えると C, L 帯で曲げ損失は抑えられている。

テーパーファイババンドルで想定される 500mm の曲率半径は、図 4.8 で曲げ損失がみられない曲率半径の 100mm よりも大きい。また、テーパーファイババンドルで想定される曲りが加わる長さ 10mm は、ダンベル形状で均一に延伸された長さ 20mm よりも短い。これらの結果から、テーパーファイババンドルで生じる曲げ損失は十分に小さいものと考えられる。

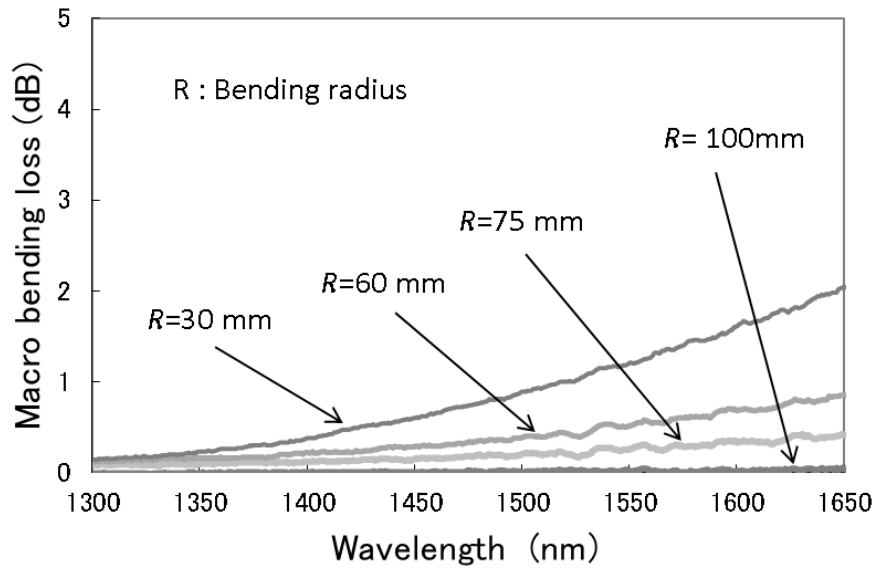


図 4.8 ダンベル形状ファイバの曲げ損失

4.5 ファンアウト部品

4.5.1 テーパーファイババンドル

図 4.1 に示す工程でファンアウト部品を作製した。テーパーファイババンドルのコア間距離が、マルチコア光ファイバのコア間距離に一致するように熔融延伸したところ、キャピラリの外径は約 190 μm であった。次に、その外径をエッチングで約 180 μm にした。

エッチング後の断面写真の一例を図 4.9 に示す。キャピラリの材質は、純粋石英とフッ素添加石英の 2 種類で作製した。フッ素添加石英の比屈折率差は、純粋石英に対して -0.2% である。延伸後のコア間距離はいずれも約 45 μm である。

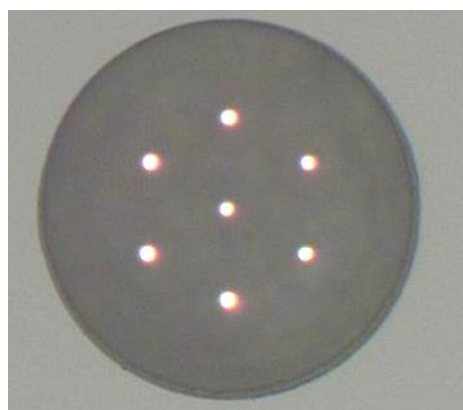


図 4.9 テーパーファイババンドルの断面写真

図 4.10 は純粋石英とフッ素添加石英のキャピラリをそれぞれ使用した場合の屈折率分布を示している。フッ素添加石英のキャピラリを使用すると、隣接するコアの間に低屈折率のトレンチが設けられ、導波モードの光強度分布の拡がりが抑えられる。これにより、隣接するコアの結合が抑えられ、コア間クロストークの改善が期待できる。

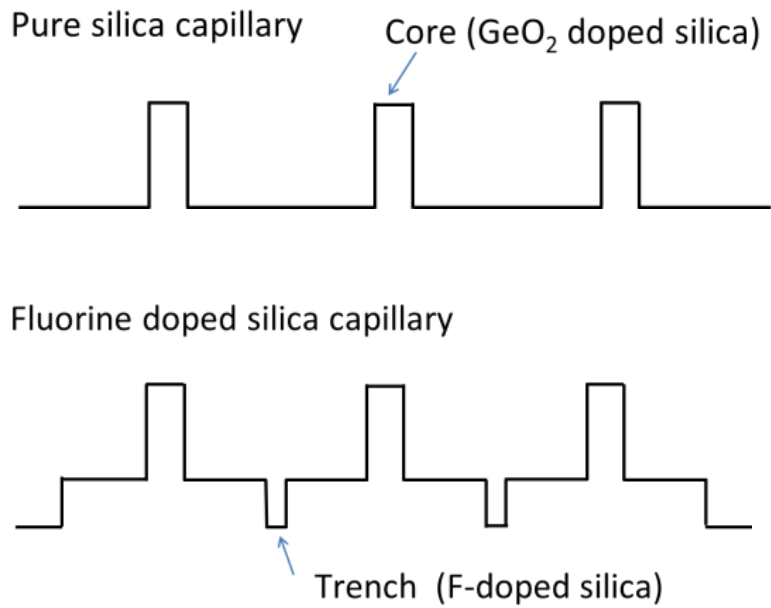


図 4.10 テーパーファイババンドルの屈折率分布

4.5.2 テーパーファイババンドルのニアフィールドパターン

延伸後のテーパーファイババンドルの端面を近赤外カメラで観察してニアフィールドパターンを測定した。光源はテーパーファイババンドルの中心に配置されているシングルコア光ファイバに接続した。比較のために、延伸していない単心のシングルコア光ファイバも観察した。測定光の波長 λ は 1550 nm である。図 4.11 は得られた光強度分布を示している。いずれも、光強度分布の最大値を基準に規格化して描いている。テーパーファイババンドルの光強度分布は、シングルコア光ファイバに比べて中心部よりも外側に拡がり大きい点で異なる。この差で接続損失が発生する。テーパーファイババンドルのキャピラリに純粋石英を使用した結果とフッ素添加石英を使用した結果の差は小さく、図中でほぼ重なっている

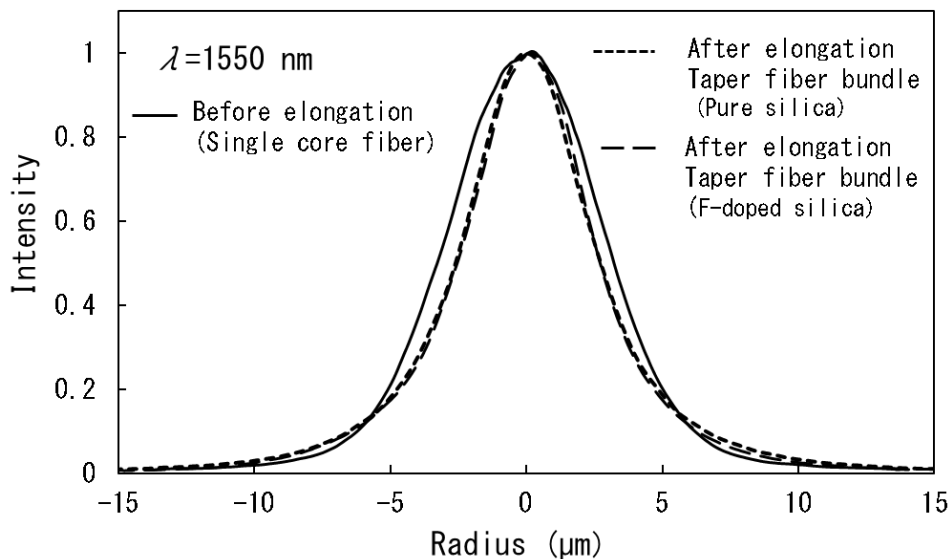


図 4.11 ニアフィールドパターン ($\lambda = 1550\text{nm}$)

4.5.3 マルチコア光ファイバ

テーパファイババンドルに接続するマルチコア光ファイバの断面写真を図 4.12 に示す。コアの屈折率分布は、マルチコア光ファイバで発生するクロストークを有効に抑制できるトレンチ付加型である[34-37]。外側のコアは、F 添加石英からなるマーカーを基準にして時計廻りに Outer core 1 から Outer core 6 としている。マルチコア光ファイバの諸特性を表 4.2 に示す。なお、MFD は、シングルコア光ファイバの MFD とほぼ同じである。

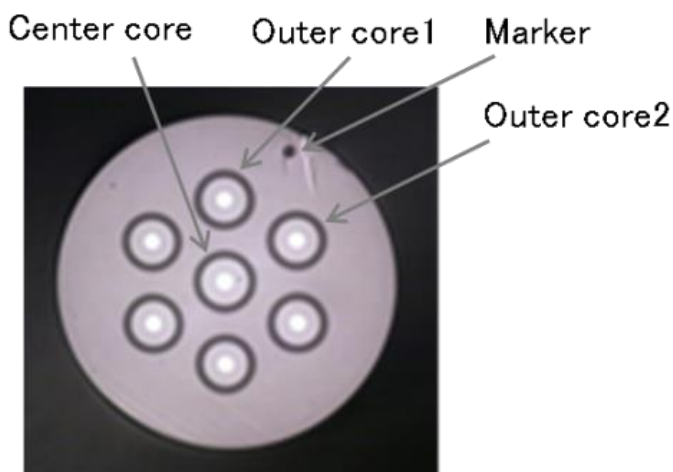


図 4.12 マルチコア光ファイバ断面写真

表 4.2 マルチコア光ファイバの諸特性

Parameters	Results
Core pitch Λ (μm)	45
Cladding diameter (μm)	180
Coating diameter (μm)	310
Mode field diameter ($\lambda=1550$ nm) (μm)	10.4
Cut off wavelength (μm)	1.45
Cross-talk ($\lambda=1550$ nm, fiber length=1 km) (dB)	-59
Attenuation ($\lambda=1550$ nm) (dB/km)	0.2

4.5.4 テーパファイババンドルとマルチコア光ファイバの接続

テーパファイババンドルとマルチコア光ファイバのそれぞれにコネクタフェルールを取り付けて突合せ接続を行った。接続部のフレネル反射を抑えるために接続部に屈折率整合剤を塗布している。コネクタフェールの孔径は約 $181 \mu\text{m}$ を使用している。融着接続は、光ファイバクリーブ時の切断角の影響[52]、アーク放電による光ファイバ断面内の加熱の不均一性による影響[53]があり、損失要因の分析が複雑になる。このため、突合せ接続を採用した。マルチコア光ファイバは、外側コアの軸ずれを無くすために、軸回転を調整してから接続をする必要がある。この調整はパワーモニタ法を利用して調整をした。

4.6 ファンイン・ファンアウト部品の光学特性

4.6.1 挿入損失

マルチコア光ファイバの両端にテーパファイババンドルをファンイン・ファンアウト部品として接続した。図 4.13 はその模式図である。マルチコア光ファイバの長さは 5 m である。7 対あるファンイン・ファンアウトの挿入損失を測定した。測定波長 λ は 1550 nm である。表 4.3 は、その結果を示している。表中の Core No. は、マルチコア光ファイバのコア番号に対応している。なお、マルチコア光ファイバは短いため、光ファイバ中で発生する伝送損失、クロストークは無視できるほど小さい。

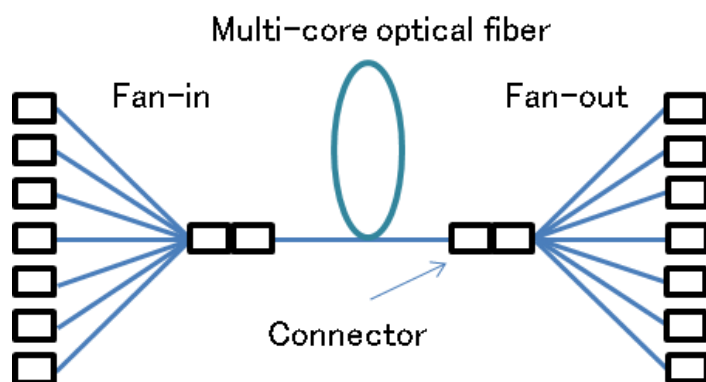


図 4.13 挿入損失の測定系

表 4.3 ファンイン・ファンアウト部品の挿入損失

Core No.	Insertion Loss ($\lambda=1550$ nm)	
	Pure silica capillary	Fluorine doped capillary
Center core	1.31 dB	1.02dB
Outer core 1	1.52 dB	1.20 dB
Outer core 2	2.13 dB	1.33 dB
Outer core 3	1.57 dB	1.00 dB
Outer core 4	1.56 dB	1.70 dB
Outer core 5	1.36 dB	1.20 dB
Outer core 6	1.87 dB	1.03 dB
Average	1.62 dB	1.21 dB

表 4.3 は、ファンイン、ファンアウトの 2 箇所挿入損失を含んでいる。1 箇所あたりの挿入損失は表 4.3 の半分の値になり、純粋石英キャピラリの場合は 0.81dB、フッ素添加キャピラリの場合は 0.61dB になる。光強度分布のミスマッチによる接続損失を見積もるために、40 μm に延伸されたシングルコア光ファイバと延伸していないシングルコア光ファイバの融着接続をした。その接続損失は 0.30dB であった。シングルコア光ファイバとマルチコア光ファイバの MFD はほぼ等しいため、残りの損失は、MFD のミスマッチ以外の要因であり純粋石英キャピラリの場合は、0.51dB、フッ素添加石英の場合は 0.31dB である。これらの損失が 10.4 μm の MFD を持つコアのミスアライメントによる

ものとすれば、Marcuse の式[47]から純粋石英キャピラリは $1.8 \mu\text{m}$ 、フッ素添加石英キャピラリは $1.4 \mu\text{m}$ の軸ずれになる。

マルチコア光ファイバは、石英棒に孔を設けてコア材を挿入したプリフォームを線引することで作製する。テーパファイババンドルもキャピラリに光ファイバを挿入して溶融延伸することで作製する。孔の位置ずれによってコアの位置ずれが発生する。コア間距離の最大値と最小値の差を顕微鏡で測定したところ、マルチコア光ファイバは $0.7 \mu\text{m}$ 、テーパファイババンドルは $2.7 \mu\text{m}$ であった。テーパファイババンドルのコアの位置ずれ量は、マルチコア光ファイバより大きかったことから、テーパファイババンドルの位置ずれ量を減らすことが挿入損失の改善に有効である。フェルール孔に対して、挿入するマルチコア光ファイバ、テーパファイババンドルはわずかに細いためクリアランスがある。これらのミスアライメントの挿入損失が 4.2 章の (A) である。製造時の寸法精度の改善を図ることでこれらの要因を抑制できる。

図 4.13 の構成で、L 帯の境界波長である 1625 nm の挿入損失を測定したところ、すべてのコアにおいて約 0.2dB の増加がみられた。これらは、テーパファイババンドルとマルチコア光ファイバの光強度分布の波長依存性が異なることによって発生したと考えられる。加えて、波長 1625 nm は波長 1550 nm より光の閉じ込めが弱くなり、テーパ部の損失が増えることが考えられる。

4.6.2 コア間クロストーク

図 4.13 の状態でクロストークを測定した。測定光の波長 λ は 1550 nm である。ファンイン側シングルコア光ファイバの 1 つに測定光を入力したときの、ファンアウト側シングルコア光ファイバのそれぞれから出力される光電力を測定した。クロストークは、測定光を入力したファンイン側シングルコア光ファイバに対応するファンアウト側シングルコア光ファイバの光電力を基準に、他の光ファイバに結合した光電力の比としている。

図 4.14 は純粋石英のキャピラリを使用したファンアウト部品の結果、図 4.15 はフッ素添加石英キャピラリを使用したファンアウト部品の結果である。図の横軸は測定光を入力したマルチコア光ファイバのコア番号、縦軸は他のコアに結合したクロストークである。中心のコアに測定光を入力した場合、他の 6 つのコアに結合するクロストークの値の差は小さい。一方、外側コアに測定光を入力した場合、他のコアに結合したクロストークの値に差がみられる。中心のコアは 6 つの外側コアにすべて等しい距離で隣接しているのに対し、外側コアは 3 つのコアに隣接しているが、残りの 3 つのコアは、その隣接コアよりも離れている。このため隣接コアとその他のコアで差が生じた。

純粋石英のキャピラリを使ったクロストークはおよそ -30 から -50dB であった。この値は、バンドル型のファンアウト部品の -50 から -65dB の結果に比べて大きい[41,42]。バンドル型はファイババンドルの隙間に接着剤が充填されている。接着剤を介して隣接する光ファイバのコアに光が結合することになり、接着剤によって光は減衰する。このためクロストークが抑制されると考えられる。一方、溶融延伸型ファンアウト部品は、シングルコア光ファイバと石英キャピラリの隙間を溶融延伸によってコラプスする。シングルコア光ファイバ間に空隙がないため、テーパファイババンドルは隣接するコアに光が結合しやすい。加えて、コア径が半分になるまで延伸されたシングルコア光ファイバの導波モードは、延伸前よりもクラッドへの拡がりが大きくクロストークが発生しやすくなると考えられる。

フッ素添加石英のキャピラリを利用したクロストークは、およそ -40 から -60dB であった。純粋石英のキャピラリよりも約 10dB 程度の改善が見られている。低屈折率のトレ

ンチの外側では、導波モードの光強度分布の拡がりが抑えられた効果と考えられる。これらの結果から、キャピラリのフッ素の添加量を増やして、トレンチ部の屈折率をさらに下げれば、さらなるクロストークの改善が期待できる。

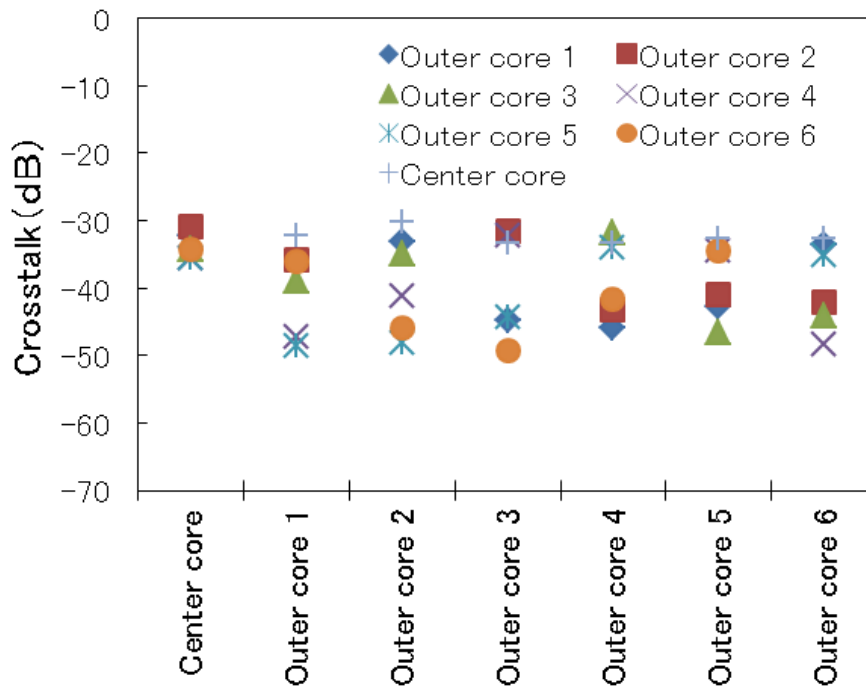


図 4.14 コア間クロストークの結果 (純粋石英)

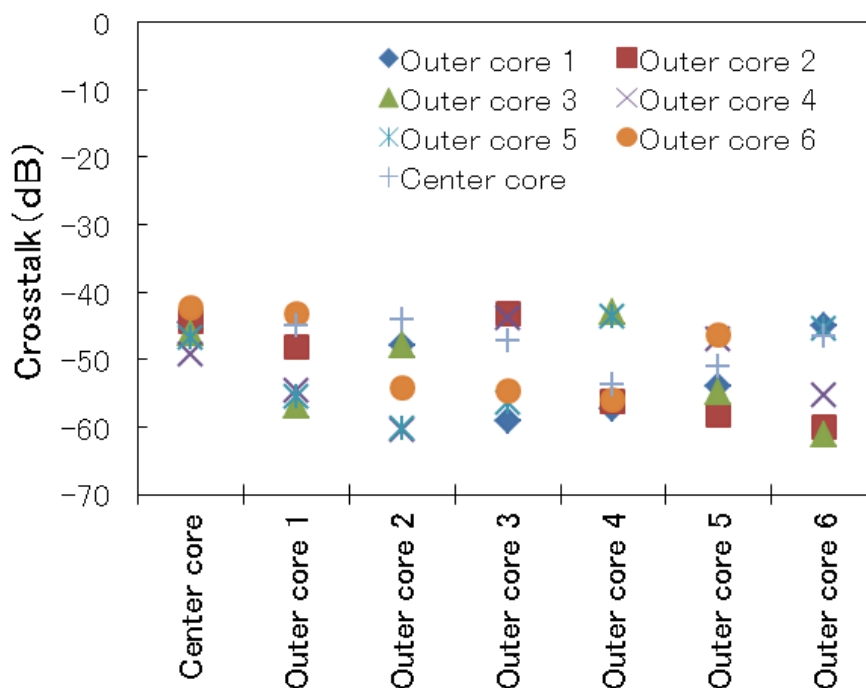


図 4.15 コア間クロストークの結果 (フッ素添加石英)

4.7 まとめ

テーパファイババンドルとマルチコア光ファイバを接続したファンアウト部品を提案した。テーパファイババンドルは、マルチホールキャピラリにシングルコア光ファイバを挿入したものを熔融延伸することで作製した。シングルコア光ファイバのコア径が半分に減少しても MFD の変化を抑制した設計によって、ファンアウト部品の挿入損失を抑制した。マルチコア光ファイバの両端にファンイン部品とファンアウト部品を接続した状態の挿入損失は、約 1.6dB であった。純粋石英キャピラリを使ったファンアウト部品のクロストークは、-30dB から -50dB であった。このクロストークは、純粋石英キャピラリからフッ素添加石英キャピラリに替えることで約 10dB 低減できた。コアとコアの間に低屈折率のトレンチが伝搬モードの光強度分布の拡がりを抑制するためである。トレンチの屈折率をさらに低下させることで、クロストークを改善できると考えられる。

第5章 側方入出射を利用したマルチコア光ファイバの融着接続

5.1 はじめに

マルチコア光ファイバ通信網を構築するためには、マルチコア光ファイバ同士を接続する必要がある。このマルチコア光ファイバは、光ファイバの中心軸だけでなく、その外側にもコアが設けられているため、軸回転調整してから融着接続をする必要がある。

軸回転調整を必要とする光ファイバとして、従来から PANDA(Polarization maintaining AND Absorption reducing)ファイバなどの偏波保持光ファイバがある。この PANDA ファイバでは、側面観察の画像を利用して軸回転を調整できる。一方、マルチコア光ファイバの側面観察の画像は複雑であるため調整は困難である。このため、端面観察の画像を利用してマルチコア光ファイバの軸回転を調整する方法が報告されている[53]。ところが、この方法は光ファイバの端面を観察できる機能を有する融着接続装置を必要とする。

側面観察の画像を利用して軸回転調整を可能にする方法として、マルチコア光ファイバにマーカーを設けて、これを利用して調整する方法が報告されている[52]。この調整に利用されているマーカーは、空孔で構成されている。空気と石英の屈折率差の高いコントラストを利用して側面観察を容易にしたものと考えられる。しかし、空孔で構成されるマーカーは、コネクタを取り付ける際の端面研磨時に研磨液、研磨屑が侵入する。研磨時はこれらの侵入を防ぐ対策が必要になる。

端面観察および側面観察を必要としない軸回転の調整方法として、パワーモニタ法がある[54]。この方法は、マルチコア光ファイバの端面から外側コアに試験光を入力して、接続されるもう1本のマルチコア光ファイバの出力端で試験光の光電力をモニタする。2本のマルチコア光ファイバの軸回転ずれが小さくなると、接続されるマルチコア光ファイバのコアに結合する光電力は増加する。このため、出力端でモニタする光電力が最大値になるように調整すれば、軸回転ずれの無い接続が可能になる。このパワーモニタ法は、試験光をモニタしながら調整することから確実に軸回転ずれを抑えることができると考えられる。実験室や工場で融着接続する場合において有効な調整方法である。しかし、融着接続装置とマルチコア光ファイバの出力端が離れているフィールドでは、モニタする光電力の値を接続現場で確認できない。

本章は、確実に軸回転ずれを抑えることができるパワーモニタ法の利点を生かしながら、接続現場でパワーモニタを可能とする側方入出射法を提案する。この方法は、ケーブル布設などのフィールドにおいて採用しやすいパワーモニタ法と言える[55]。

5.2 パワーモニタ法の機器配置

パワーモニタ法で、接続側マルチコア光ファイバと被接続側マルチコア光ファイバを軸回転調整する場合の機器配置を図 5.1 から図 5.3 に示す。

図 5.1 は、従来のパワーモニタ法の機器配置である。ファンイン部品を使うことで、接続側マルチコア光ファイバの端面から外側コアに試験光を入力する。次に、被接続側マルチコア光ファイバの出力端に光検出器を配置して、試験光の光電力を測定する。この光電力をモニタしながら最大値になるようにマルチコア光ファイバを軸回転調整すれば、軸回転ずれを抑えることができる。この機器配置では、光源と光検出器は融着接続機から離れた場所に配置せざるを得ない場合がある。

図 5.2 は、側方出射を利用したパワーモニタ法の機器配置である。接続側マルチコア光ファイバの端面から試験光を入力するのは図 5.1 と同じである。被接続側マルチコア

光ファイバの出力端に光検出器を配置する代わりに、融着接続装置の直後に側方出射系を配置する点で異なる。側方出射系は、マルチコア光ファイバに曲げを与えて試験光を光ファイバの側方に漏洩させる。この漏洩した光電力を光検出器で測定する。この漏洩光電力をモニタしながら、最大値になるように調整すれば軸回転ずれを抑えることができる[56]。

この機器配置は、融着接続機の直後でパワーモニタが可能になるが、融着接続装置から離れた場所に光源を配置せざるを得ない場合がある。また、光源から融着接続装置までの間に光ファイバ増幅器（EDFA: Erbium-Doped optical Fiber Amplifier）が配置される可能性を考慮すると、試験光の波長は増幅可能な 1550 nm の帯域に制限される。

図 5.3 の機器配置は本研究の提案である。被接続側マルチコア光ファイバに側方出射系を配置する点で図 5.2 と同じであるが、試験光をマルチコア光ファイバの側方から入射させる点で異なる。側方入射を利用することで融着接続装置の直前に光源を配置できるメリットがある。また、光源から光検出器の間に EDFA が配置されることは無いため、試験光の波長は自由に選択できる。

しかし、側方入射は特定のコアに試験光を入力することは困難で、全てのコアに試験光が励振されると考えられる。光ファイバの軸中心に配置されているコアは、軸回転させても軸ずれが生じないため、漏洩光電力の変化は生じない。このため、側方出射の漏洩光電力の変化は、外側コアのみに入力した場合に比べて緩やかになると考えられる。図 5.3 の機器配置においても、試験光の光電力を光検出器でモニタしながら最大値になるように軸回転調整する方法は、図 5.1, 5.2 と同じである[57]。

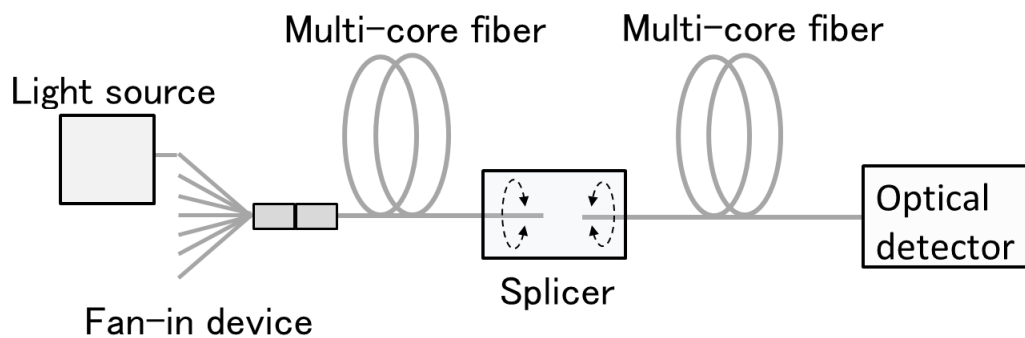


図 5.1 従来の機器配置

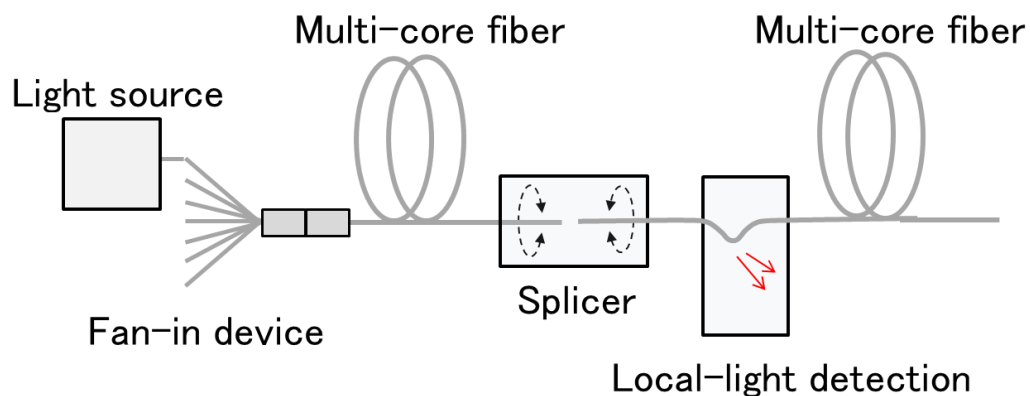


図 5.2 側方出射系を採用した機器配置

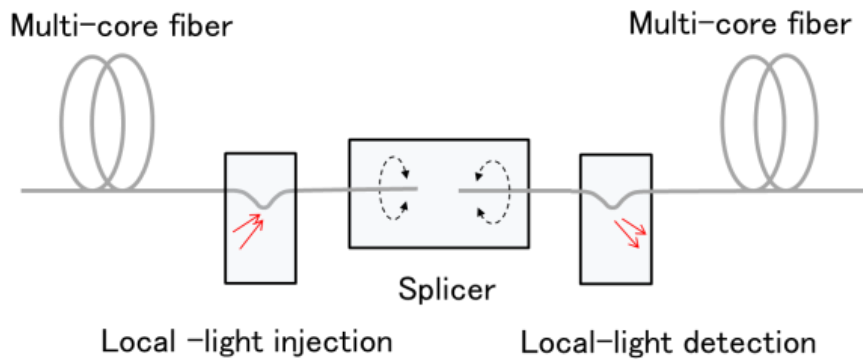


図 5.3 側方入射/出射系を採用した機器配置

5.3 マルチコア光ファイバ構造

実験に使用したマルチコア光ファイバを図 5.4 に示す。コアの屈折率分布はステップ型であり、中心コアの周囲に 6 個の外側コアが設けられている。マーカーを基準にして時計廻りに Outer core1 から Outer core6 としている。光ファイバの諸特性を表 5.1 に示す。光ファイバは、汎用のシングルモード光ファイバと同じウレタンアクリレートの紫外線硬化型樹脂で被覆されており、着色層は無い。

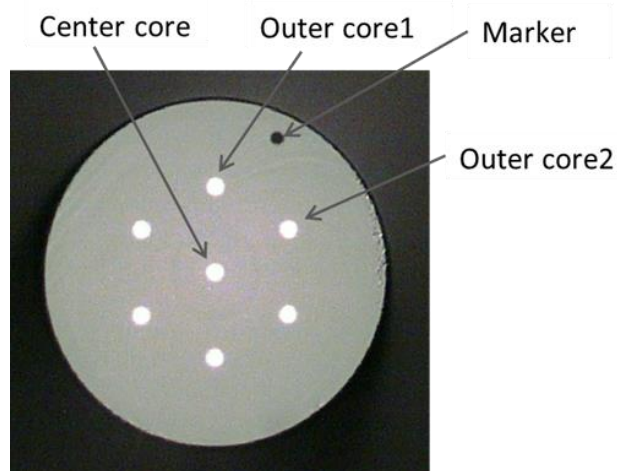


図 5.4 ステップ型マルチコア光ファイバの断面写真

表 5.1 ステップ型マルチコア光ファイバの諸特性

Parameters		Results
Relative refractive index difference (%)		0.37
Core diameter (μm)		9.3
Core pitch Λ (μm)		45
Cladding diameter (μm)		180
Coating diameter (μm)		310
Mode field diameter $2w$ (μm)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$	10.4
	$\lambda = 1620 \text{ nm}$	10.8

5.4 軸回転に伴う漏洩光電力の変化

5.4.1 漏洩光電力の変化量の計算

対向する2本のマルチコア光ファイバの軸回転ずれから、側方出射系の光検出器で測定される漏洩光電力の変化量の関係を計算で求める。漏洩光電力の変化量は、接続側マルチコア光ファイバから被接続側マルチコア光ファイバに結合する光電力の変化量に比例すると考えられる。このため、接続損失の変化量から漏洩光電力の変化量を求めることができる。

融着接続前に軸回転調整を行うため、対向するマルチコア光ファイバ間には必ず間隙がある。間隙がある場合のシングルコア光ファイバの接続損失のモデルを図5.5に示す。接続損失は、コアの軸ずれ量を x 、対向する光ファイバの間隙を z とすると、式(5.1)で表せる[58]。

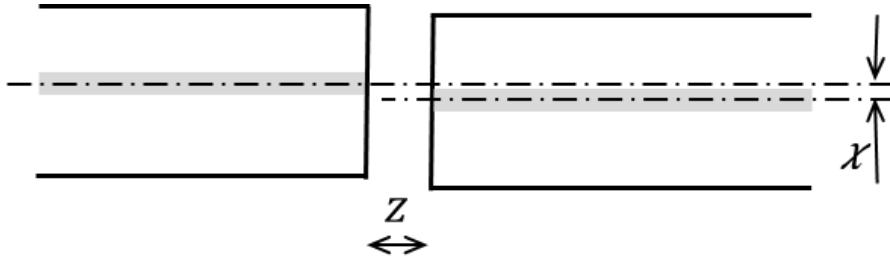


図 5.5 接続損失のモデル

$$\alpha(\text{dB}) = -10 \log_{10} \left[\left(\frac{16n_1^2 n_2^2}{(n_1 + n_2)^4} \right) \frac{1}{q} \exp\left(\frac{-\rho u}{q} \right) \right] \quad (5.1)$$

$$\rho = \frac{(kw)^2}{2} \quad u = 2 \left(\frac{x}{kw^2} \right)^2 \quad q = \left(\frac{z}{kw^2} \right)^2 + 1$$

$$k = \frac{2\pi n_2}{\lambda}$$

n_1 はコアの屈折率である。 n_2 は間隙の屈折率で空気の屈折率の 1.0 としている。 w は、ガウス近似の光分布のスポットサイズ半径で、表 5.1 のモードフィールド径の値を利用した。波長 1550 nm で 5.2 μm 、波長 1620 nm で 5.4 μm である。 λ は試験光の波長、 k は波数である。

外側コアの軸ずれ量 x は、対向する 2 本のマルチコア光ファイバの軸回転ずれを θ とすると式 (5.2) で表せる。なお、この式は中心コアの軸ずれが無い状態における外側コアの軸ずれ量を表している。 A はマルチコア光ファイバのコア間距離で表 5.1 の 45 μm とした。なお、中心コアは軸回転ずれが生じてても軸ずれは生じない。

$$x = 2A \sin \frac{\theta}{2} \tag{5.2}$$

軸回転に伴う漏洩光電力の変化量の計算結果を図 5.6 に示す。試験光の波長 λ は 1550 nm で、外側コアのみに入力したものと計算した。間隙 z は 5 μm と 50 μm で比較をしている。なお、横軸の軸回転ずれの 0° は、外側コアの軸回転ずれが無い状態である。軸回転ずれが生じると、漏洩する光電力は、放物線状に低下している。間隙 z が狭くなると、軸回転に伴う漏洩光電力の変化量が大きくなるため調整しやすい。このため、本章では、間隙 z をすべて 5 μm で検討した。

図 5.7 は試験光を外側コアのみに入力して、その波長 λ を 1550 nm と 1620 nm で比較した計算結果である。シングルモードの波長範囲内で試験光の波長を短くすれば、軸回転に伴う漏洩光電力の変化量が大きくなり調整しやすくなる。しかし、その差は小さい。なお、この波長依存性は、主にモードフィールド径の波長依存性によって生じた変化である。

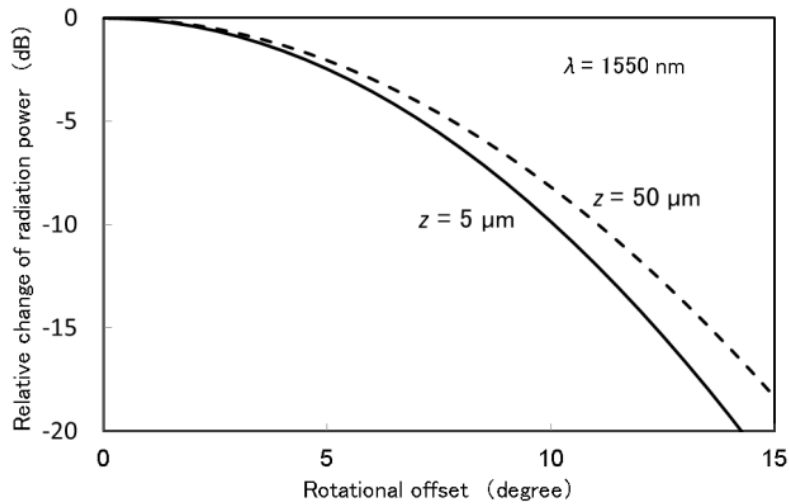
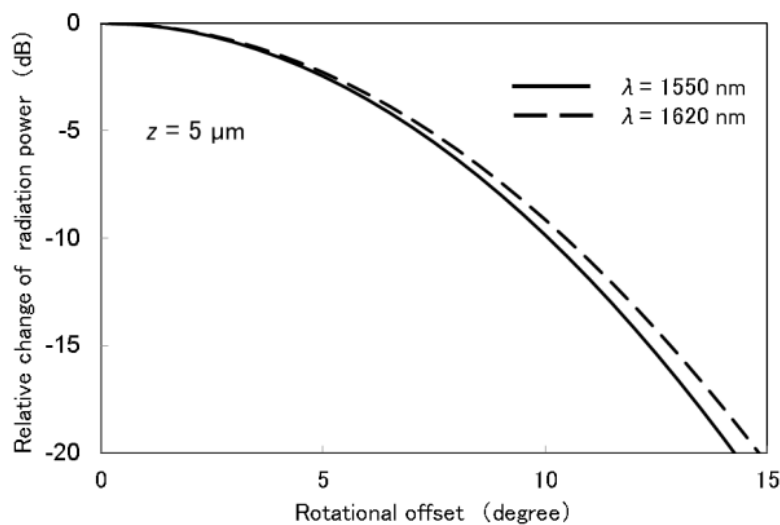


図 5.6 漏洩光電力の変化（計算結果，間隙の変化）



5.7 漏洩光電力の変化（計算結果，波長変化）

5.4.2 漏洩光電力の変化量の測定結果

図 5.2 に示す側方出射系を利用した機器配置で、2 本のマルチコア光ファイバに軸回転ずれを与えながら、漏洩光電力の変化量を測定した。試験光はファンイン部品を利用してマルチコア光ファイバの外側コアの 1 つに入力している。光源と融着接続装置の間に EDFA が配置されていることを想定して試験光の波長は 1550 nm にした。

側方出射系の模式図を図 5.8 に示す。曲げ印加部品の曲率半径は約 9 mm である。側方出射系において、マルチコア光ファイバの被覆は除去されていない。曲げによってコアから漏洩した試験光は、被覆を透過して光検出器に入力する。融着接続装置は、偏波保持光ファイバなどを接続するための軸回転調整機能を有する市販品を用いた。V 溝上に固定されたマルチコア光ファイバは、クラッドの側面観察による自動調心を行っており、中心コアの軸ずれは抑えられている。まず、被接続側マルチコア光ファイバの出力端に光検出器を接続して、光電力を最大値にすることで外側コアの軸ずれを無くした。そこから、意図的に軸回転ずれを与えながら、側方に漏洩する光電力の変化を測定した。

漏洩光電力の変化量の測定結果と図 5.6 の計算結果を合わせて図 5.9 に示す。接続箇所から側方出射系までの距離は約 1 m である。軸回転ずれによって漏洩光電力が減衰している。この結果から、漏洩光電力を最大値にすることで、軸回転ずれを抑えることができる。

なお、図 5.9 では計算結果と測定結果に乖離がみられる。2 本の光ファイバを接続した場合の損失は、コアの軸ずれ量とともに、計算結果と測定結果の間で乖離が大きくなるのが、式 (5.1) を引用した文献[58]においても指摘されている。接続損失を表す式 (5.1) は、導波モードの光強度分布をガウス分布に仮定している。軸ずれ量が大きくなると乖離が大きくなることから、伝搬しているモードの中心よりも外側で、ガウス分布から外れていると考えられる。また、側方出射では後述するクラッドモードの影響によっても、測定される光電力の変化が緩やかになっていると考えられる。

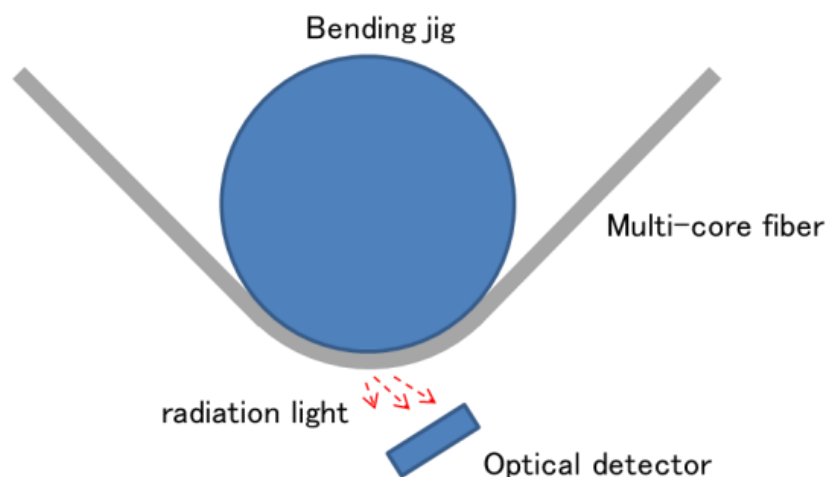


図 5.8 曲げ受光光学系

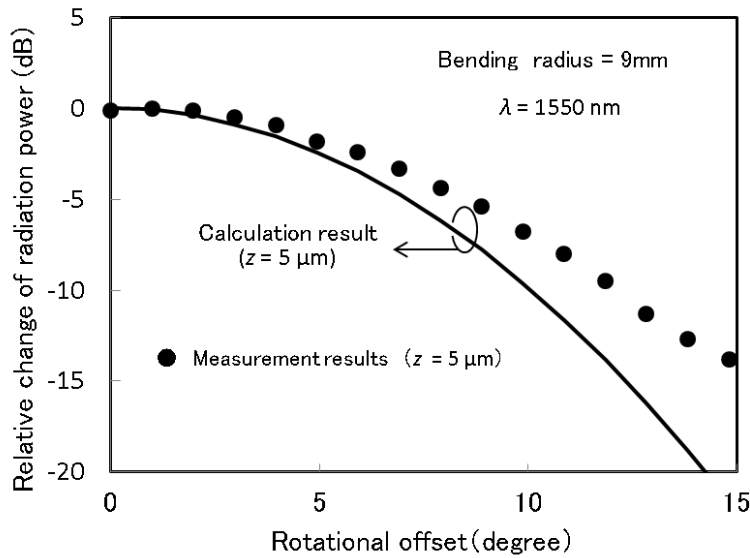


図 5.9 漏洩光電力の変化（測定結果）

5.4.3 結合光電力と漏洩光電力の関係

図 5.1 の機器配置で 2 本のマルチコア光ファイバに軸回転ずれを与えながら、接続側マルチコア光ファイバから被接続側マルチコア光ファイバに結合した光電力の変化量を測定した。この結合光電力は、被接続側マルチコア光ファイバを 1000 m 伝送させた後の出力端に光検出器を接続することで測定している。なお、波長 1550 nm の伝送損失は 0.2 dB/km で、側方出射のための曲げは与えていない。図 5.9 の漏洩光電力の測定時と同じ軸回転ずれを与えながら結合光電力を測定した。

軸回転ずれを与えた場合の結合光電力の変化量と漏洩光電力の変化量の関係を図 5.10 に示す。結合光電力の変化量は漏洩光電力の変化量にほぼ比例する。しかし、-13dB 以下になると比例関係から外れている。これは、後述するクラッドモードの影響と考えられる。

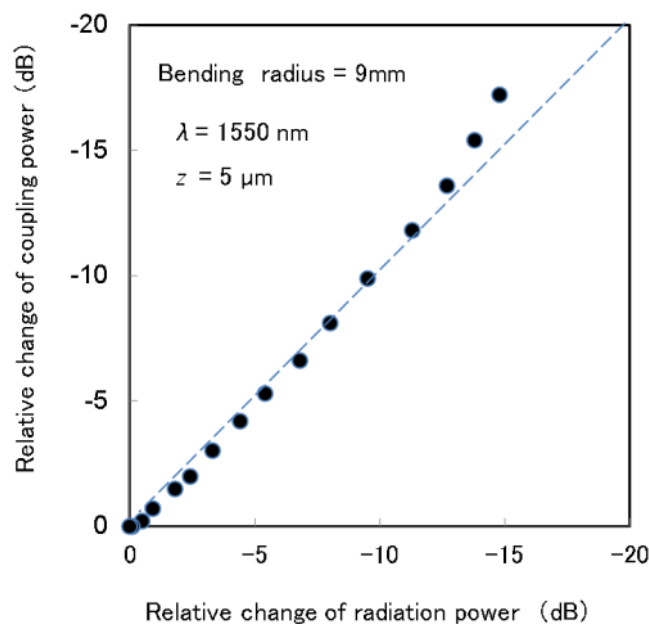


図 5.10 漏洩光電力と結合光電力の変化量の関係

5.4.4 クラッドモードの影響

対向したマルチコア光ファイバに軸回転ずれが生じると、試験光は被接続側マルチコア光ファイバのコアだけでなく、クラッドにも入力される。このクラッドに入力された試験光は、被覆で吸収されて減衰しながらクラッドモードとしてしばらくの距離を伝搬する。

側方出射系の光検出器で測定される漏洩光電力は、コア導波モードの曲げによる漏洩成分だけでなく、クラッドモード成分の和になる。これらは区別して受光できないため、クラッドモード成分は雑音として軸回転の調整に影響を与える。また、接続箇所と側方出射系までの距離 L が短くなるほど、その影響は大きくなると考えられる。

図 5.2 の機器配置で接続箇所と側方出射系との距離 L を変えながら、軸回転に伴う漏洩光電力の変化量を測定した。結果を図 5.11 に示す。距離 L を 0.25 m, 0.5 m, 1 m にした測定では、融着接続装置から側方出射系までのマルチコア光ファイバを直線状にしている。距離 L を 1000 m にした測定では、直径 160 mm のポビンに巻いた状態で測定している。

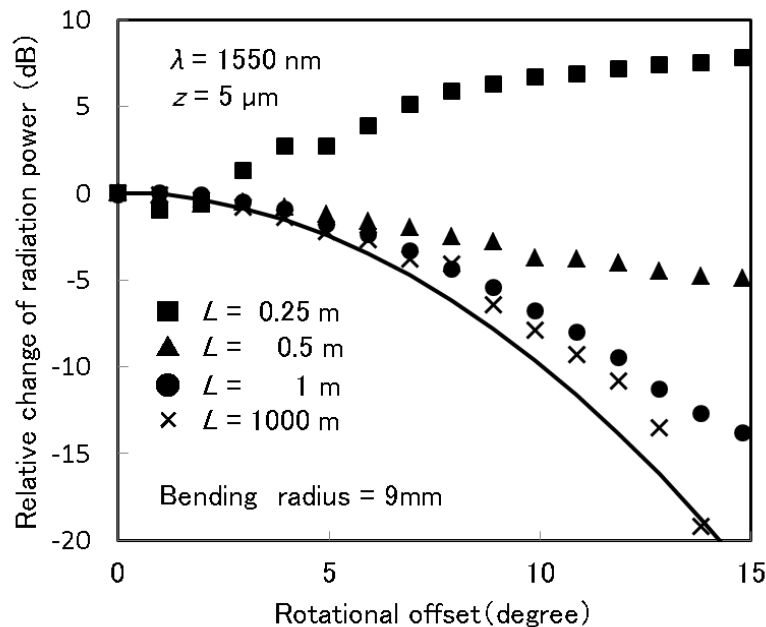


図 5.11 接続箇所と側方出射系の距離の依存性

距離 L を 1000 m まで長くすると、クラッドモードの影響は無いと考えられ、漏洩光電力は軸回転ずれに伴い減衰している。距離 L を 1 m にした結果は、1000 m の結果とほぼ同じ減衰特性が得られている。しかし、軸回転ずれが 10° を超えると距離 L が 1000 m の結果に比べて減衰量が小さくなる。これは、わずかに残留しているクラッドモードの影響と考えられる。

距離 L が 0.5 m になると、クラッドモードの影響がさらに大きくなり、軸回転ずれに伴う漏洩光電力の減衰が小さくなる。さらに、距離 L を 0.25 m まで短くなると、軸回転ずれに伴い漏洩光電力は逆に増加している。コア導波モードの曲げによる漏洩成分の減少量よりも、クラッドモード成分の増加量が上回ることで生じたと考えられる。接続箇所と側方出射系までの距離 L を 1 m 以上離せば、クラッドモードの影響は小さく、軸回転調整に影響しないと考えられる。

なお、先に示した図 5.10 は、距離 L を 1 m にした結果である。-13dB 以下において比例関係から外れる理由は、この残留しているクラッドモードの影響と考えられる。

5.5 側方入射系を利用した軸回転調整

5.5.1 側方入射系の構成と特性

側方入射系も採用した本研究の図 5.3 の機器配置は、光源を融着接続装置の直前に配置することができる。側方入射系の模式図を図 5.12 に示す。マルチコア光ファイバは、直径 5 mm の曲げ印加部品で曲げられている。側方出射と同様に、側方入射系におけるマルチコア光ファイバの被覆は除去されていない。曲げ部の近傍に汎用のシングルモード光ファイバからなるプローブ光ファイバの出力端を配置し、その間に屈折率整合剤を塗布している。プローブ光ファイバとマルチコア光ファイバの被覆の間に空気が介在することによる試験光の反射を抑え、結合効率を改善するためである。試験光は、この曲げ部を介してマルチコア光ファイバに側方入射される。

この側方入射系を採用した場合の試験光の波長は、EDFA の増幅帯域に制限されないため、側方入射の結合効率が良い波長帯を選ぶことができる。結合効率はプローブ光ファイバとマルチコア光ファイバの固定状態を維持して、試験光の波長を 1550 nm と 1620 nm で測定した。マルチコア光ファイバの出力端ですべてのコアから出力する光電力を測定することで、結合効率を求めている。波長 1620 nm は、波長 1550 nm に比べて約 2dB の結合効率の改善が見られた。試験光の波長を長くすることで、側方入射の結合効率が向上することは、先行のシングルコア光ファイバに側方入射する研究においても明らかにされている [59]。

先に示した図 5.7 は、試験光の波長を短くすると軸回転に伴う漏洩光電力の変化が大きくなり、調整がしやすくなることを示している。しかし、その波長による効果は小さいため、結合効率を優先して波長を 1620 nm にした。

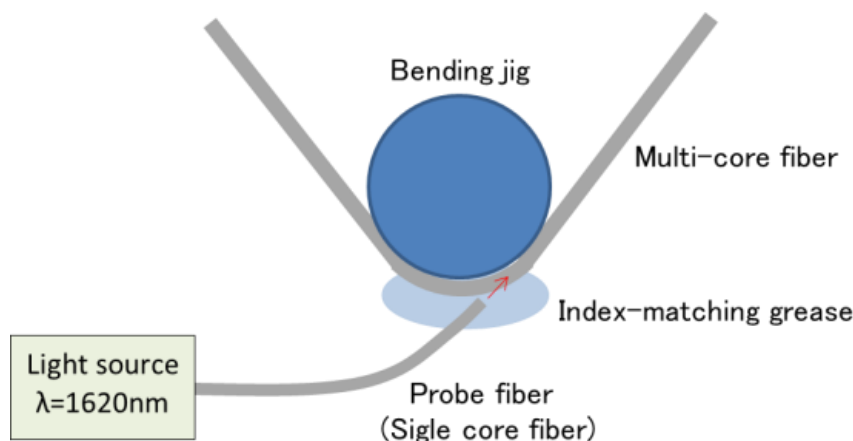


図 5.12 側方入射系の模式図

ファンアウト部品を使うことで、側方入射された試験光のコアごとの分配状況を測定した。結果を表 5.2 に示す。コアごとの結合光電力に差がみられる。マルチコア光ファイバとプローブ光ファイバの配置を変えて測定を 3 回行った。配置を変えることで励振状態が変化している。試験光の波長 λ は 1620 nm、プローブ光ファイバから出力する光電力は +10 dBm である。

プローブ光ファイバから出力した試験光をシングルコア光ファイバに側方入射させる構成において、そのプローブ光ファイバの位置ずれに対する結合効率の変化が報告されている[60]。曲げが与えられたシングルコア光ファイバの曲げ平面に対して、プローブ光ファイバが垂直な方向に位置ずれした場合の結合効率の低下が大きく、その低下量はマルチコアファイバのコア間距離 A である $45 \mu\text{m}$ でおおよそ 20dB である。

マルチコア光ファイバに側方入射する場合は、曲げを与えている平面に対し、外側コアは中心コアを基準にして垂直方向に最大 $\pm 45 \mu\text{m}$ の差が生じる。これより、コアごとに結合効率に差が生じることは予測されたものである。

表 5.2 側方入射のコアごとの分配状況 ($\lambda=1620 \text{ nm}$)

Core No.	First time	Second time	Third time
Center core	-32.4 dBm	-34.3 dBm	-23.8 dBm
Outer core 1	-35.3 dBm	-57.3 dBm	-34.4 dBm
Outer core 2	-23.6 dBm	-57.6 dBm	-27.4 dBm
Outer core 3	-45.3 dBm	-51.0 dBm	-42.4 dBm
Outer core 4	-44.3 dBm	-29.6 dBm	-29.8 dBm
Outer core 5	-34.3 dBm	-24.9 dBm	-22.5 dBm
Outer core 6	-45.7 dBm	-35.7 dBm	-34.9 dBm
$P_{\text{center}} / P_{\text{total}}$	10%	7%	31%

5.5.2 漏洩光電力の変化量

側方入射で励振状態が変化した場合における、側方出射系の漏洩光電力の変化量を式 (5.1) と式 (5.2) から求めた。図 5.13 は、計算結果の 1 例である。試験光の波長 λ は 1620 nm で計算した。側方入射によってコアに結合した全ての光電力の和を P_{total} 、中心コアに結合された光電力 P_{center} として、中心コアに結合された割合 ($P_{\text{center}}/P_{\text{total}}$) が 50%、25%、10%、0%、および、すべてのコアが均一に励振された場合の 14% の結果を示している。

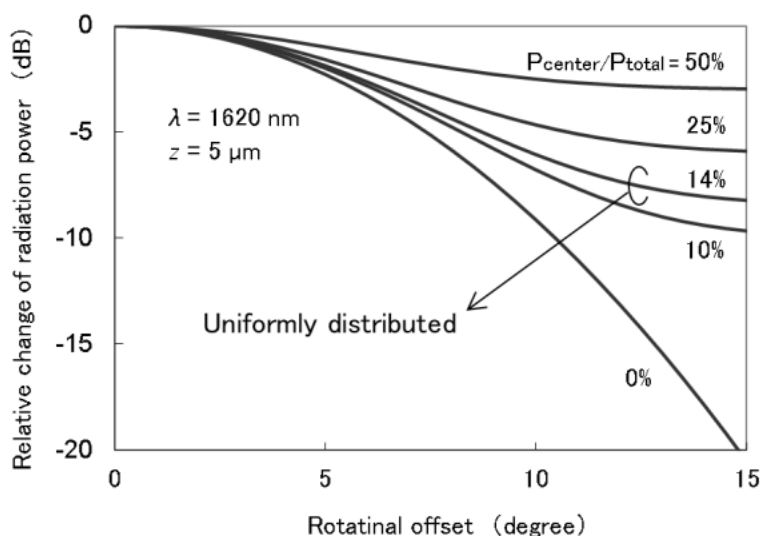


図 5.13 漏洩光電力の変化 (励振状態の依存性, 計算結果)

中心コアに入力された試験光は、軸回転ずれが生じてても漏洩光電力に変化を与えない。中心コアに結合する試験光の割合が増加すると、軸回転ずれによる漏洩光電力の変化は緩やかになる。このため、側方入射は中心コアの結合効率よりも、外側コアの結合効率を向上させることが求められる。

図 5.3 に示す側方入射を利用した機器の配置で、マルチコア光ファイバの軸回転ずれに伴う漏洩光電力の変化量を測定した。試験光の波長 λ は 1620 nm である。融着接続装置の V 溝上に固定された光ファイバは、クラッドの側面観察による自動調心を行っており、中心コアの軸ずれは抑えられている。

まず、ファンイン部品を使って接続側マルチコア光ファイバの外側コアのみに試験光を通し、被接続側光ファイバの出力端に光検出器を接続して、光電力を測定する。光電力が最大になるように軸回転の調心をすることで、外側コアの軸回転ずれを無くした。次に側方入射系と側方出射系を配置して、意図的に軸回転ずれを与えながら、漏洩光電力の変化を測定した。なお、側方入射系から接続箇所、接続箇所から側方出射までは、それぞれ約 1 m の距離を設けた。クラッドモードの影響を避けるためである。

側方入射における光源からマルチコア光ファイバに結合する試験光の効率は、ファンイン部品を使って端部から結合させる効率よりも低い。そのため側方出射系で漏洩光電力の変化量を測定するために必要な光電力が得られなかった。そこで、側方出射系の曲げ印加部品の曲率半径を 5 mm に小さくすることで、漏洩する光電力を増やして、測定に必要な光強度を確保した。

軸回転ずれに伴う漏洩光電力の変化量を測定した結果を図 5.14 に示す。図中の各点は、表 5.2 に示す 3 回の側方入射の状態で行った実験結果であり、実線は計算値である。中心コアの光電力の割合が抑制されることで、軸回転ずれに伴う漏洩光電力の変化が大きくなっている。いずれの励振状態においても、側方出射系の漏洩光電力が最大値になるように調整することで、軸回転ずれを抑えることができる。

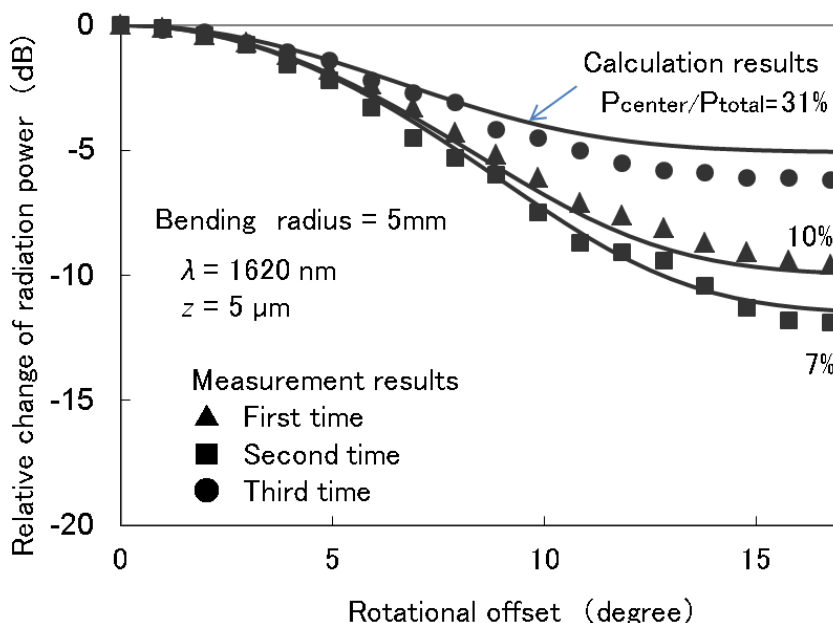


図 5.14 漏洩光電力の測定結果（側方入射の励振状態の依存性）

図 5.14 は、図 5.9 に比べて計算結果と測定結果の乖離が小さくみられる。図 5.14 は側方入射によってすべてのコアが励振された場合の測定に対し、図 5.9 はファンイン部品

を使って、外側コアのみを励振して測定した点で異なる。側方入射は、プローブ光ファイバの配置によってコアごとに試験光の結合効率が異なるが、側方出射においても試験光が光検出器に結合する効率はコアごとに差がみられる。この差は曲げを印加するマルチコア光ファイバの設置状態で変化するが、おおよそ 3dB 以下であり、側方入射に比べると小さい。

側方出射においても、中心コアよりも外側コアの結合効率が增加すれば、軸回転ずれに伴う漏洩光電力の変化量が大きくなる。図 5.14 に示した 3 回の測定結果は、いずれも側方出射におけるコアごとの結合効率の差によって、結果として計算結果に近くなったと考えられる。

なお、図 5.9 の結果は、外側の 1 つのコアだけに試験光を励振しているため、側方出射におけるコアごとの結合効率の差の影響は受けない。

5.6 トレンチ付加型マルチコア光ファイバを使った検討

トレンチ付加型のマルチコア光ファイバは、コア間クロストークの抑制に効果的であるととも[34-36]、曲げ損失が低下する。側方入出射は曲げ損失を利用するため、結合効率の低下が考えられる。トレンチ付加型を使って側方入出射を利用した軸回転調整の検討を行った。実験に使用したマルチコア光ファイバを図 5.15 に示す。光ファイバの諸特性を表 5.3 に示す。コア間距離 A 、モードフィールド径、クラッド径などは表 5.1 のステップ型のマルチコア光ファイバとほぼ同じである。この光ファイバも汎用のシングルモード光ファイバと同じウレタンアクリル系の UV 硬化型樹脂で被覆されており、着色層は無い。

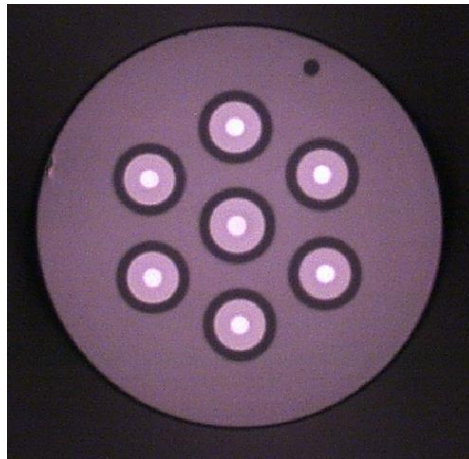


図 5.15 トレンチ付加型マルチコア光ファイバの断面写真

表 5.3 トレンチ付加型マルチコア光ファイバの諸特性

Parameters		Results
Core pitch A (μm)		45
Cladding diameter (μm)		180
Coating diameter (μm)		310
Mode field diameter $2w$ (μm)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$	10.4
	$\lambda = 1620 \text{ nm}$	10.7

5.5章の側方入出射と同じ構成で、マルチコア光ファイバをステップ型からトレンチ付加型に代えたところ、軸回転調整に必要な光電力が得られなかった。曲げ損失が抑制されたものと考えられるため、側方出射の曲げ半径を5 mmから2.5 mmに小さくすることにした。その結果、軸回転調整に必要な光電力が得られた。側方入出射を利用してトレンチ付加型マルチコア光ファイバの軸回転ずれに伴う漏洩光電力の変化量を測定した。試験光の波長 λ は1620 nmで、側方入出射において与えた曲げ半径はともに2.5 mmである。融着接続機に固定された2本のマルチコア光ファイバの間隔は5 μm である。また、側方入射系から接続箇所、接続箇所から側方出射まではクラッドモードの影響を避けるため、それぞれ約2 mの距離を設けた。

軸回転ずれに伴う漏洩光電力の変化を測定した結果を図5.16に示す。軸回転ずれが無い状態から回転ずれを与えながら漏洩光電力の変化を測定した。図中の2種類のプロットは、側方入射のアライメントを変化させた結果である。軸回転ずれによって漏洩光電力が減衰している。この結果から、トレンチ付加型は与える曲げ径を小さくすることで、ステップ型のマルチコア光ファイバと同様に軸回転調整ができることを確認した[61]。

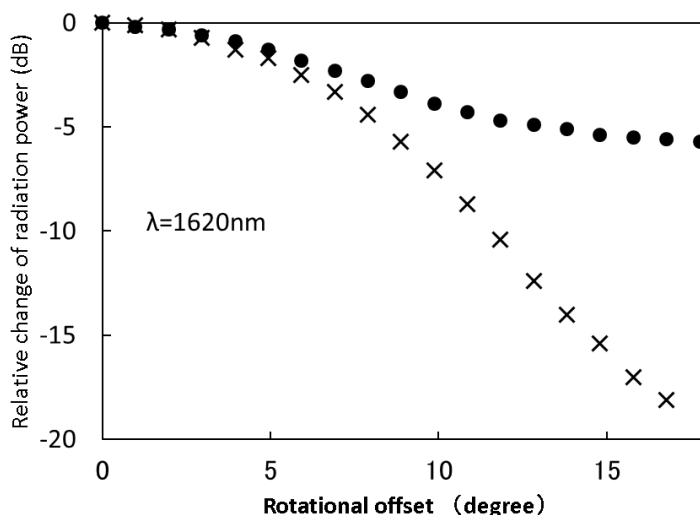


図 5.16 側方入出射を利用した漏洩光電力の変化量

5.7 融着接続実験

図5.3に示す側方入出射を利用した機器配置で、図5.4に示すステップ型マルチコア光ファイバの軸回転を調整して融着接続をした。接続損失の測定結果を図5.17に示す。軸回転調整時の試験光の波長は1620 nmである。10回の繰り返し接続を行った。コア数が7個のマルチコア光ファイバであるため、測定数は70である。接続損失はファンアウト部品を利用して、それぞれのコアを選択的に測定した。接続損失の測定波長 λ は1550 nmである。

測定の結果、中心コアの接続損失の平均値が0.025dBであるのに対し、外側コア6個の接続損失の平均値は0.136dBであった。中心コアは、接続損失が抑えられていることから、クラッドの側面観察による自動調心で軸ずれが抑えられている。外側コアの平均値である0.136dBが軸回転ずれの要因によって生じたとすれば、約1.17度の回転ずれに相当する。なお、中心コアと外側コア6個を合わせたすべてのコアの接続損失は、平均値で0.120dBであった。融着接続損失の要因は、軸回転ずれだけでなく、ファイバクリープ時の切断角の影響[52]、アーク放電による光ファイバ断面内の加熱不均一性による影響[53]についても報告されている。先の接続損失の測定結果は、軸回転ずれ以外の要因も含まれていると考えられる。

比較のために、従来のパワーモニタ法である図 5.1 の機器配置で軸回転を調整した後に融着接続をした。融着接続時のアーク放電加熱の条件は、先の側方入出射を利用したパワーモニタ法で軸回転調整して接続した実験と同じである。接続損失の測定結果を図 5.18 に示す。同じく 10 回の繰り返し融着接続を行った。試験光の波長と接続損失の測定波長は、それぞれ 1620 nm と 1550 nm である。測定の結果、中心コアの接続損失の平均値が 0.021dB であるのに対し、外側コア 6 個の接続損失の平均値は 0.133dB であった。また、中心コアと外側コア 6 個を合わせたすべてのコアの接続損失は、平均値で 0.117dB であった。

側方入出射を利用したパワーモニタ法の融着接続で得られた接続損失は、従来のパワーモニタ法とほぼ同等であった。これより、提案するパワーモニタ法は、従来のパワーモニタ法と同等の軸回転の調整精度を有すると言える。

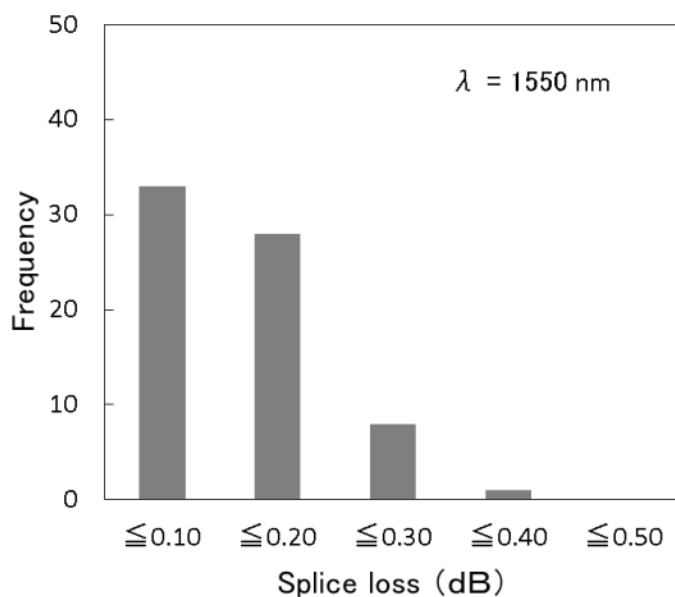


図 5.17 接続損失の結果（図 5.3 側方入出射のパワーモニタ法）

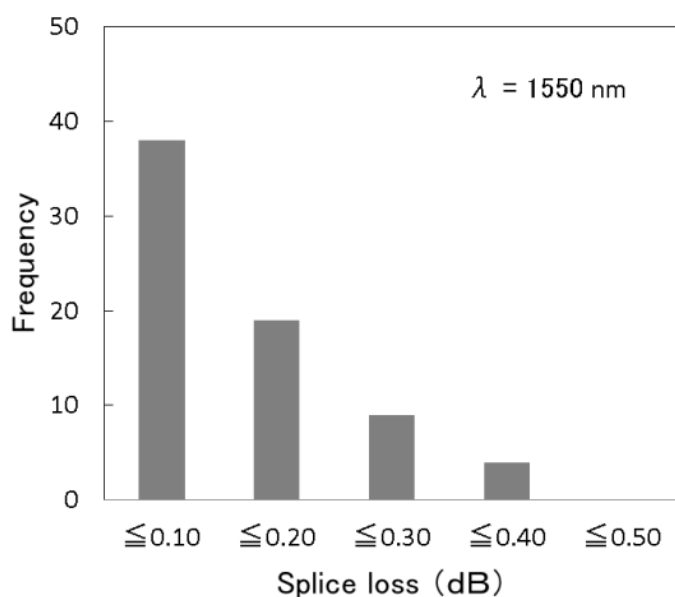


図 5.18 接続損失の結果（図 5.1 従来のパワーモニタ法）

5.8 まとめ

融着接続におけるマルチコア光ファイバの軸回転調整方法として、側方入出射を利用したパワーモニタ法を提案した。本提案の方法は、試験光の光源とその光電力を測定する光検出器を融着接続装置の近くに配置できるのでフィールドでも利用できる。モニタする試験光の光電力が最大値になるように軸回転調整する点は、従来のパワーモニタ法と同じである。

軸回転に伴い、モニタする光電力の変化量が大きくなると調整しやすい。このためには、接続箇所に対向するマルチコア光ファイバの間隙を狭くする。側方入射系において中心コアよりも外側コアに効率的に試験光を結合させる。試験光の波長をシングルモードとなる範囲で短くする方法が挙げられる。しかし、側方入射系の光源からマルチコア光ファイバに結合する試験光の結合効率、その波長は長い方が有利である。

提案の側方入出射を利用したパワーモニタ法を利用してマルチコア光ファイバの融着接続をしたところ、その接続損失は平均値で **0.120dB** である。これは、従来のパワーモニタ法で調整した接続損失と同等である。本提案の方法は、従来のパワーモニタ法の軸回転精度を維持しながら、フィールドでも採用しやすいパワーモニタ法と言える。

第 6 章 クラッド励振を利用した軸回転調整

6.1 はじめに

2本のマルチコア光ファイバを接続する場合における軸回転調整の方法としてパワーモニタ法がある [54]。この方法は、軸回転調整のためにマルチコア光ファイバにファンイン部品などを接続した上で外側のコアに試験光を励振する。次に接続されるもう1本のマルチコア光ファイバの出力端で試験光の光電力をモニタする。2本のマルチコア光ファイバの軸回転ずれが小さくなるほどモニタする試験光の光電力は増加する。この光電力が最大値になるように調整すれば軸回転ずれを無くすることができる。試験光をモニタすることから確実な調整が可能である。しかし、軸回転ずれが小さくなるほどモニタする光電力の変化は緩やかになるため調整しにくいものであった。

5章において、フィールドで利用することを目的に側方入射と側方出射を利用したパワーモニタ法を提案した [55]。マルチコア光ファイバの曲げ損失が発生する程度の曲げを加えたところに側方からコアに試験光を励振している。この方法はファンイン部品が不要である。しかし、マルチコア光ファイバのコアに試験光を励振するという点で従来の方法と同じであり、軸回転ずれが小さくなるほど光電力の変化は緩やかになる。コア間クロストークを抑制するのに有効なトレンチ付加型マルチコア光ファイバは曲げ損失が小さい。このため、非常に小さな曲げを与えて側方からコアに励振することになる [61]。

本章ではマルチコア光ファイバの側方からクラッドに試験光を励振してパワーモニタする方法を提案する。この方法は、外側のコアに試験光を励振するためのファンイン部品が不要である。また、側方からコアに試験光を励振するときのようにマルチコア光ファイバに曲げを与える必要が無い。加えて、軸回転ずれが小さくなるほどモニタする光電力の変化が急になり軸回転を調整しやすくなる [62]。

6.2 パワーモニタ法の機器配置

接続側マルチコア光ファイバと被接続側マルチコア光ファイバを軸回転調整する場合の機器配置を図 6.1, 6.2 に示す。

図 6.1 は、従来のパワーモニタ法の機器配置である。この配置は第 5 章の 5.2 節の図 5.1 と同じである。クラッドモード励振法との違いを比較するために改めて説明する。この方法は、接続側マルチコア光ファイバの入力端にファンイン部品を接続して外側のコアに試験光を励振する。試験光は接続側マルチコア光ファイバの外側のコアから間隙を介して被接続側マルチコア光ファイバの外側のコアに結合する。被接続側マルチコア光ファイバの出力端で試験光の光電力を光検出器でモニタする。

図 6.2 は、提案のクラッド励振を利用したパワーモニタ法の機器配置である。この機器配置は、図 6.1 の機器配置で用いたファンイン部品が不要である。接続側マルチコア光ファイバの側方に設置した発光ダイオード (LED) が試験光の光源である。マルチコア光ファイバの被覆上から垂直方向に LED の光を照射してクラッドに試験光を励振している。マルチコア光ファイバの先端部は融着接続のために被覆が除去されている。この被覆の除去際から LED までの距離は 10 mm である。この距離が長くなるとクラッドを伝搬する光は被覆で吸収されてしまうため、除去際に近いところに LED を配置した。LED は OptoSupply 社製の OSW 4XME3C1E の高輝度の白色光で、融着接続装置の内部に設置した。図 6.3 に LED の発光スペクトルを示す。接続側マルチコア光ファイバのクラッドに励振された試験光は、間隙を介して被接続側マルチコア光ファイバのコアに結合

する。被接続側マルチコア光ファイバの出力端でコアに結合した試験光の光電力をモニタする。

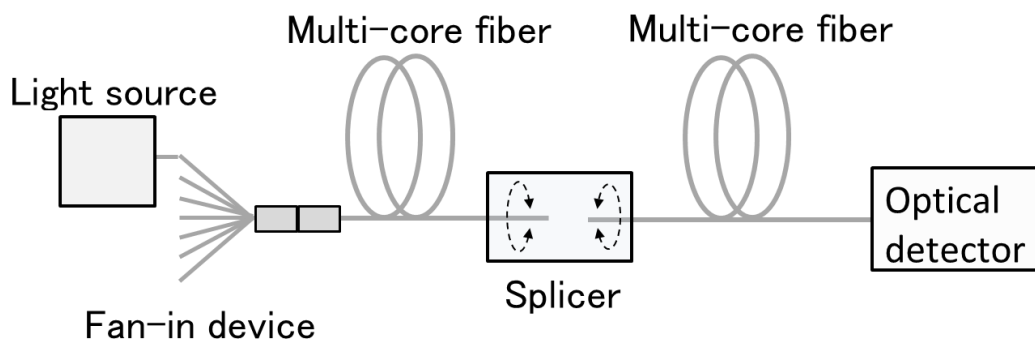


図 6.1 従来のパワーモニタ法の機器配置

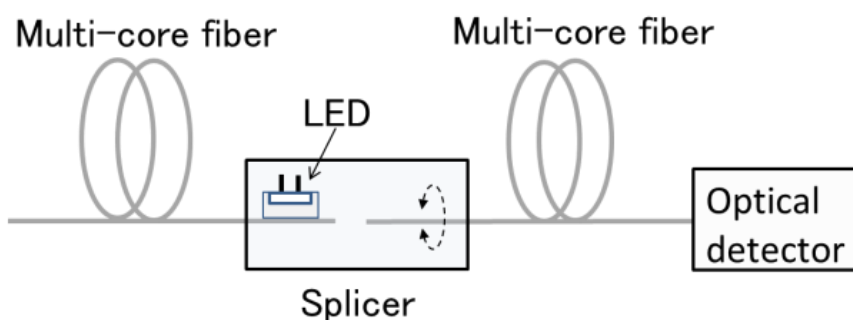


図 6.2 クラッド励振を利用した機器配置

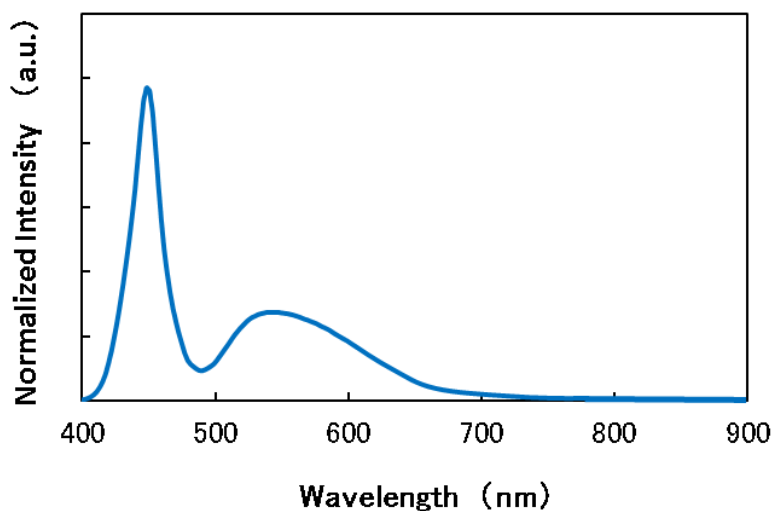


図 6.3 LED のスペクトル

6.3 マルチコア光ファイバ

コアの屈折率分布形状は、ステップ型とトレンチ付加型の 2 種類で検討を行った。共に中心に 1 個と外側に 6 個の合計 7 個のコアからなるマルチコア光ファイバである。ス

トップ型の断面写真とコアの屈折率分布形状の模式図を図 6.4 に示す。トレンチ付加型の断面写真とコアの屈折率分布の模式図を図 6.5 に示す。

光ファイバは、汎用のシングルモード光ファイバと同じウレタンアクリレートの紫外線硬化型樹脂で被覆されており着色層は無い。マルチコア光ファイバの諸特性を表 6.1 に示す。

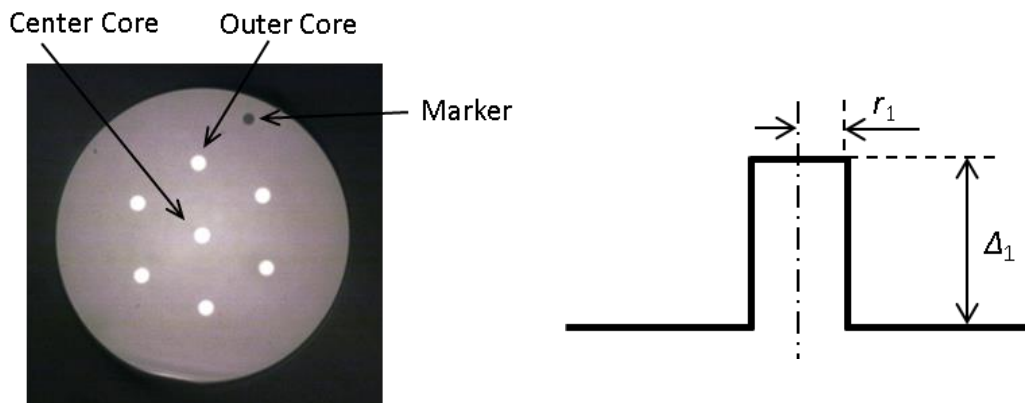


図 6.4 マルチコア光ファイバ（ステップ型）の断面写真と屈折率分布

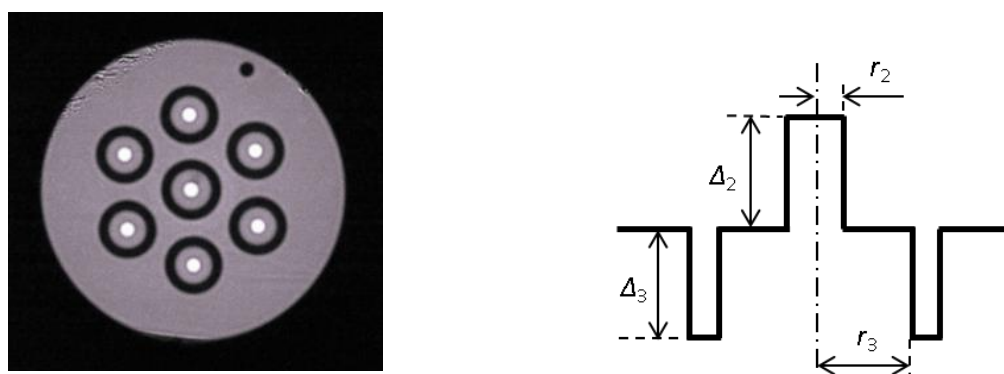


図 6.5 マルチコア光ファイバ（トレンチ付加型）の断面写真と屈折率分布

表 6.1 マルチコア光ファイバの諸特性

Parameters		Index type	
		Step	Trench assisted
Core radius (μm)	r_1	4.6	—
	r_2	—	4.1
	r_3	—	11.5
Relative refractive index (%)	Δ_1	0.37	—
	Δ_2	—	0.35
	Δ_3	—	-0.48
Core pitch Λ (μm)		45	45
Cladding diameter (μm)		180	180
Coating diameter (μm)		310	310
Mode field diameter (μm) $\lambda = 1550 \text{ nm}$		10.4	10.3

6.4 クラッド励振時の光強度分布

先の図 6.4, 6.5 の断面写真は、マルチコア光ファイバを 20 mm に切断して観察したものである。照明光は、観察している断面の反対側から入力している。屈折率が高いコアは明るく観察され、クラッドに入力した光は被覆で吸収されるためコアに比べて暗い。マーカとトレンチは周囲のクラッドに比べて屈折率が低く、最も暗く観察されている。

図 6.6 の機器配置で光ファイバ断面を観察した。この LED とマルチコア光ファイバの配置は、図 6.2 のクラッド励振を利用した機器配置の光源と接続側マルチコア光ファイバの配置と同じである。CCD カメラで観察されたステップ型マルチコア光ファイバの断面写真を図 6.7 に示す。屈折率が高いコアは暗く、屈折率が低いクラッドは明るく観察されている。図 6.4 の写真と比較するとコントラストが逆転している。マルチコア光ファイバの側方から LED の光を照射することによって、コアよりもクラッドに効率良く試験光が励振されている。断面写真の A-A' の線上の光強度分布を図 6.8 に示す。コアの光強度はクラッドよりも低く、コアの幅は表 6.1 の r_1 に一致している。また、クラッド内の試験光は均一に励振されている。

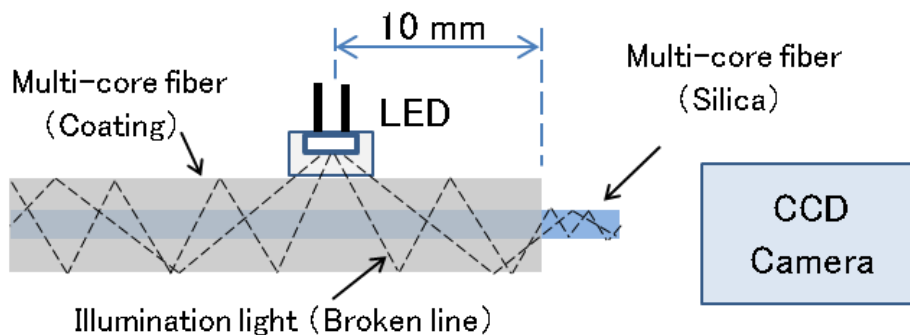


図 6.6 断面の観察系

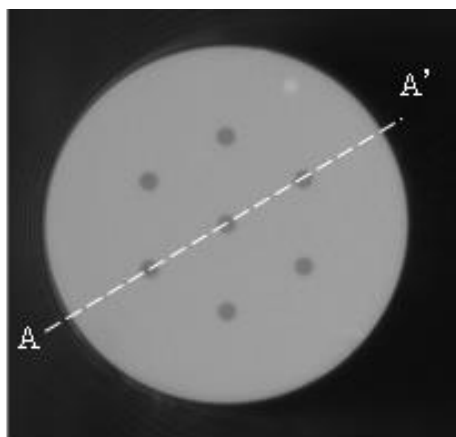


図 6.7 ステップ型マルチコア光ファイバの断面写真（クラッド励振）

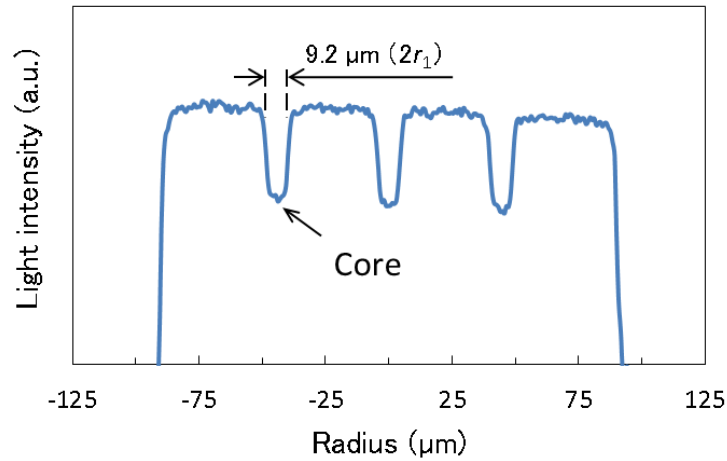


図 6.8 A-A' 線上の光強度分布

トレンチ付加型も同様に図 6.6 の機器配置で断面を観察した。断面写真を図 6.9 に示す。このトレンチ付加型も図 6.5 の写真と比較するとコントラストが逆転している。屈折率が低いトレンチとマーカーが最も明るく観察され、屈折率が高いコアの中心部は暗い。断面写真の B-B'、C-C' の線上の光強度分布をそれぞれ図 6.10, 6.11 に示す。コアの幅は表 6.1 の r_2 と r_3 にそれぞれ一致している。トレンチ付加型もクラッド内の試験光は均一に励振されている。

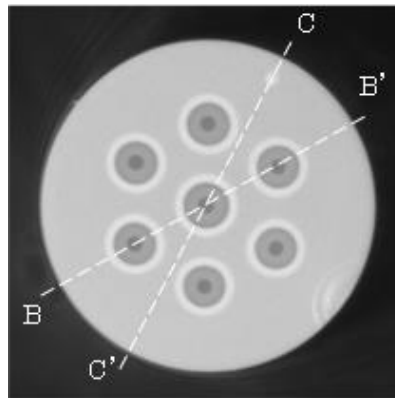


図 6.9 トレンチ付加型マルチコア光ファイバの断面写真（クラッド励振）

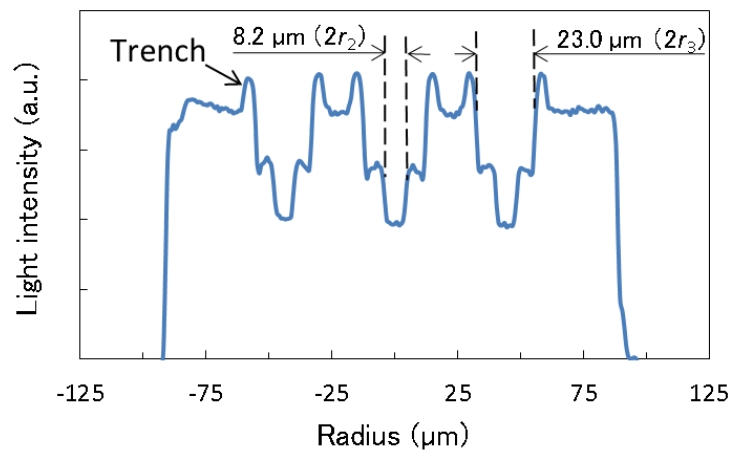


図 6.10 B-B' 線上の光強度分布

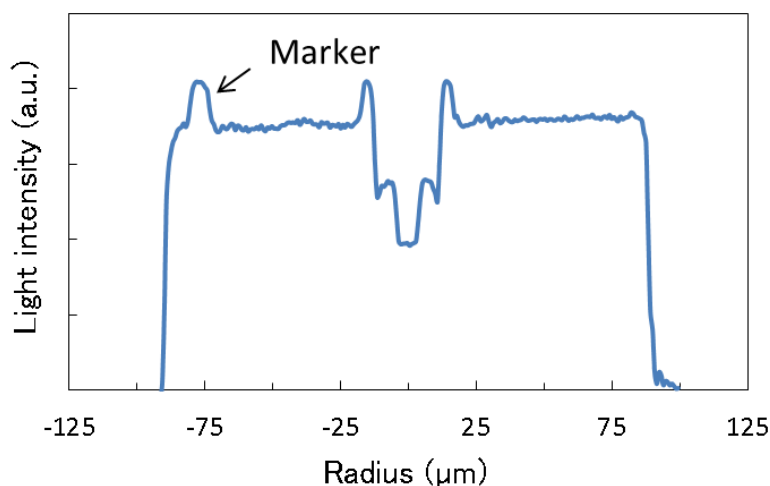


図 6.11 C-C' 線上の光強度分布

6.5 軸回転に伴う光電力の変化

6.5.1 従来のパワーモニタ法

図 6.1 に示す従来のパワーモニタ法の機器配置で、被接続側マルチコア光ファイバに軸回転を与えながら、光検出器で光電力の変化を測定した。試験光の波長 λ は 1550 nm である。融着接続装置は、偏波保持光ファイバを接続するための軸回転調整機能を有する市販品を用いた。V 溝上に固定されたマルチコア光ファイバは、クラッドの側方観察による自動調心を行っており中心コアの軸ずれは抑えられている。2 本のマルチコア光ファイバに間隙が存在すると、接続側マルチコア光ファイバの出力端でコアから出力した試験光は空間に拡がる。その拡がった光を被接続側マルチコア光ファイバで受光する。この間隙が狭くなるほど軸回転に伴う光電力の変化量は大きくなることが知られており軸回転調整しやすい[55]。間隙は、軸回転時の光ファイバの振動で 2 本の光ファイバが接触することを避けるための最小限の距離として 5 μm を設けた。被接続側マルチコア光ファイバの長さは 3 m である。クラッドに結合した試験光は被覆で吸収されるため、出力端に接続された光検出器はコアを伝搬してきた試験光のみを受光している。また、光ファイバ出力端を光検出器に直接接続しているため、全てのコアから出力される試験光を受光している。

コアの軸回転ずれも無くした状態から意図的に軸回転ずれを与えながら光電力の変化量を測定した。測定の結果を図 6.12 に示す。横軸の軸回転ずれ 0° が軸回転ずれの無い状態である。軸回転ずれが無い状態で光電力は最大値を示し、軸回転ずれと共に光電力は減少する。光電力が最大値を示すように調整すれば軸回転ずれを抑制できる。ところが、軸回転ずれが小さくなるほど光電力の変化は緩やかになり調整がしにくいと言える。図 6.12 の結果は、ステップ型とトレンチ付加型の間で軸回転に伴う光電力の変化の挙動に大きな差はみられない。これは、ステップ型とトレンチ付加型のモードフィールド径がほぼ一致しているためである。

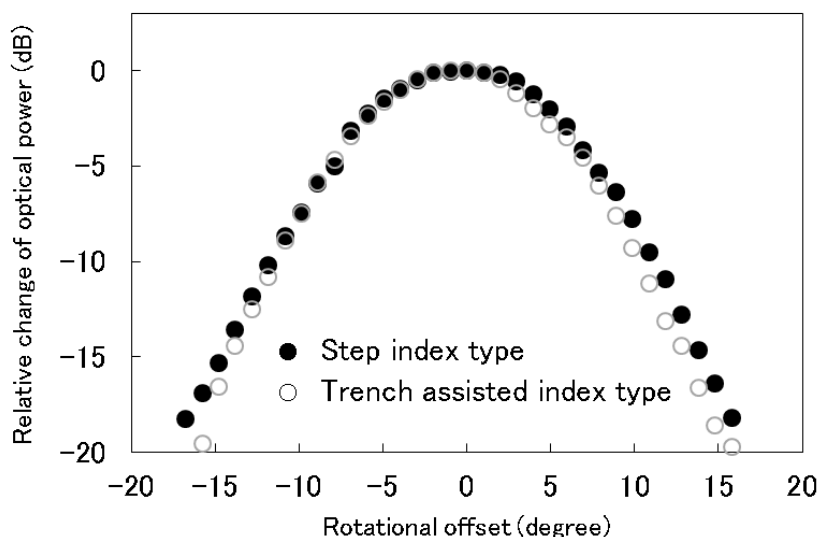


図 6.12 軸回転に伴う光電力の変化（従来のパワーモニタ法）

6.5.2 クラッド励振を利用したパワーモニタ法

図 6.2 に示すクラッド励振を利用したパワーモニタ法の機器配置で、被接続側マルチコア光ファイバに軸回転を与えながら光検出器で光電力の変化を測定した。試験光となる LED の光を接続側マルチコア光ファイバの側方からクラッド励振させると、マルチコア光ファイバ端面において図 6.8 または図 6.10 で示される断面内の光強度分布になる。この断面から出力した試験光は、間隙を介して対向している被接続側マルチコア光ファイバに結合する。2本のマルチコア光ファイバに間隙があると、接続側マルチコア光ファイバの出力端でクラッドから出力した試験光は空間に拡がる。空間中の伝搬軸方向の断面内において、暗いコアによって生じる暗点はクラッドから出力される試験光の拡がりによって消えていく。このため、間隙が拡がるほど軸回転に伴う光電力の変化は緩やかになる。軸回転に伴う光電力の変化を大きくして調整しやすくするため間隙は最小限の距離として $5\ \mu\text{m}$ を設けた。被接続側のマルチコア光ファイバの長さは従来のパワーモニタ法の測定時と同じ $3\ \text{m}$ である。光ファイバ出力端を光検出器に直接接続しているため、全てのコアから出力される試験光を受光している。

外側コアの軸回転ずれを無くした状態から意図的に軸回転ずれを与えて光電力の変化量を測定した。測定結果を図 6.13 に示す。軸回転ずれを 30° 与えることで光電力が最大値を示す値を基準にした変化量を示している。このクラッド励振は、軸回転ずれがない状態で最も光電力が小さく、軸回転ずれが生じると光電力が増加する。これは、クラッド励振によって接続側マルチコア光ファイバの断面でコアは暗く、クラッドが明るいことによる。軸回転ずれを無くすためには、モニタする光電力が最小値を示すように調整する。この方法は、軸回転ずれが小さくなるほど光電力の変化量が大きくなることから調整しやすいと言える。この図 6.13 の結果は従来のパワーモニタ法の図 6.12 の結果と異なり、ステップ型とトレンチ付加型の間で軸回転に伴う光電力の変化の挙動に差がみられる。

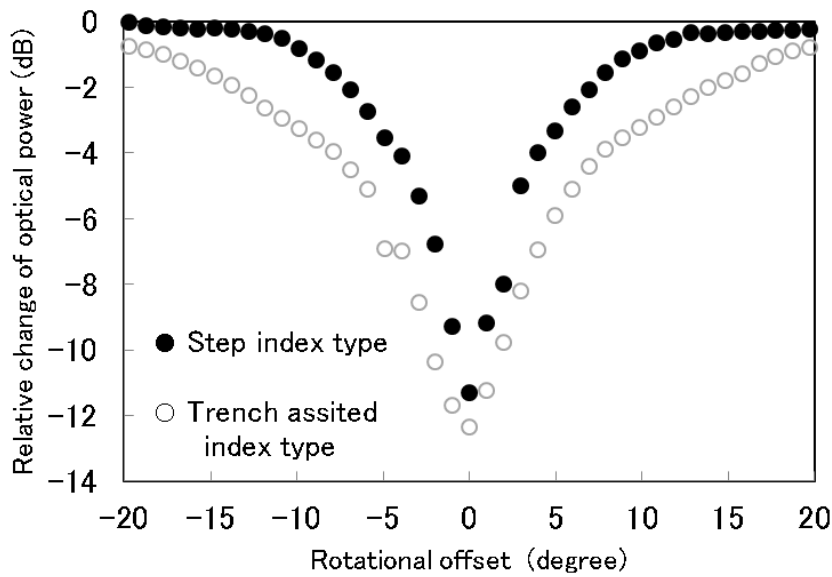


図 6.13 軸回転に伴う光電力の変化（クラッド励振）

図 6.12, 6.13 の測定結果から、軸回転ずれが無い状態から 1° の回転角度ずれを与えた時の光電力の変化量を表 6.2 に示す。クラッド励振を利用した方法は、従来の方法に比べて変化が大きくなる。試験光となる光源出力の時間変動などの影響を受けにくいと考えられる。

表 6.2 1° の軸回転ずれを与えた時の光電力の変化量

Index type	Conventional method as shown in Fig. 6.1	Cladding excitation method as shown in Fig.6.2
Step	0.1dB	2.1dB
Trench assisted	0.1dB	0.9dB

2種類のマルチコア光ファイバのカットオフ波長は、ともに約 1450 nm である。試験光は白色の可視光であるため、被接続側マルチコア光ファイバのコアに高次モードも伝搬する。なお、マルチコア光ファイバの側方からクラッドを励振した際の結合効率が低いため、LED は高出力のものを選定した。その結果、試験光がシングルモードとなる近赤外光の LED ではなく、白色の可視光の LED を選定した。

6.6 光電力変化の計算

クラッド励振を利用したパワーモニタ法の軸回転ずれに伴う光電力の変化は、2つのコアが重なる面積の変化と同じと考えて計算をした。外側コアの軸ずれ状態の模式図を図 6.14 に示す。図は接続側、被接続側のそれぞれの外側コアを 1つだけ描いている。接続側マルチコア光ファイバの外側コアを Outer core 1 としている。クラッド励振によって試験光はコアに励振されないものとした。このため暗く描いている。そこに光検出器につながる被接続側マルチコア光ファイバの外側コアを Outer core 1' としている。 r はコア半径、 x は軸回転ずれで生じた外側コア間の軸ずれ量である。

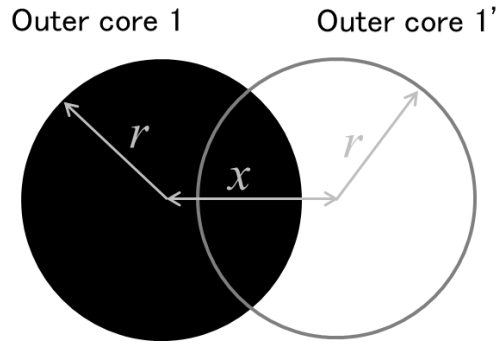


図 6.14 1 対の外側コアの軸ずれモデル

光検出器につながる Outer core 1' は、軸ずれ量 x が小さくなるほど試験光が励振されていない Outer core 1 と重なりが大きくなる。光検出器でモニタする光電力は、重なり量に比例して減少するとした場合、その光電力の最大値からの変化量を規格化した ΔP は、コア半径 r とコア間距離 x を使って式 (6.1) で表せる。

$$\Delta P = 1 - \frac{2 \left(r^2 \cos^{-1} \left(\frac{x}{2r} \right) - \frac{x}{2} \sqrt{r^2 - \left(\frac{x}{2} \right)^2} \right)}{\pi r^2} \quad (6.1)$$

なお、軸ずれ量 x は、対向する 2 本のマルチコア光ファイバの軸回転ずれを θ とすると式 (6.2) で表せる。この式は中心コアの軸ずれが無い状態における外側コアの軸ずれ量を表している。 Λ はマルチコア光ファイバのコア間距離である。

$$x = 2\Lambda \sin \frac{\theta}{2} \quad (6.2)$$

6.6.1 ステップ型の計算結果

ステップ型マルチコア光ファイバの計算結果を図 6.15 の実線で示している。計算で用いるコア半径 r は図 6.4, 表 6.1 で示す r_1 の $4.6 \mu\text{m}$, コア間距離 Λ は表 6.1 の $45 \mu\text{m}$ で計算した。図中のプロットは図 6.13 で示した測定結果と同じである。測定で得られた軸回転に伴う光電力の変化は、2 つのコアが重なる面積の変化に比較的良く一致している。しかし、軸回転ずれが無い 0° 付近において、測定結果と計算結果の間で乖離が大きくなっている。計算はクラッド励振によってコアは励振されないものとして扱っている。しかし、図 6.2 の機器配置でクラッド励振をすると、図 6.8, 6.10 で示されるように、クラッドよりも光電力が低下するもののコアにも試験光が存在することが理由と考えられる。

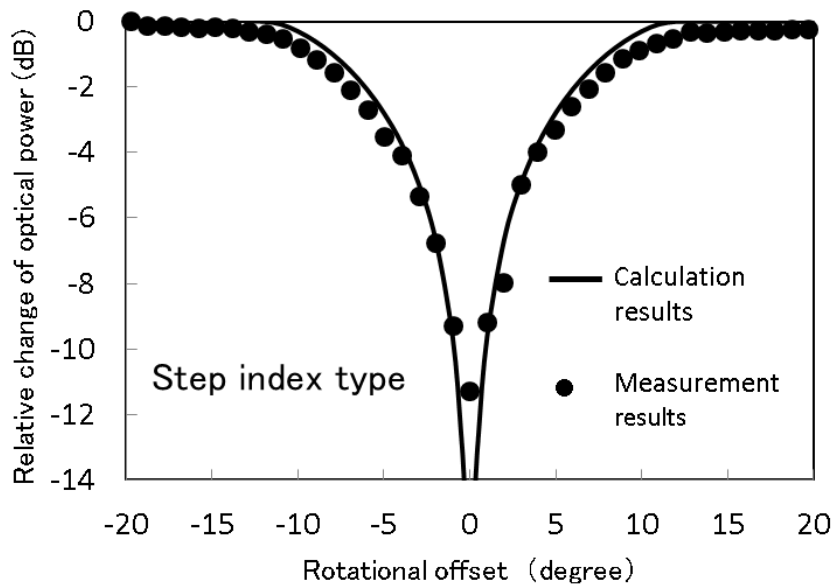


図 6.15 ステップ型において式(6.1)から得られる計算結果と測定結果の比較

6.6.2 トレンチ付加型の計算結果

トレンチ付加型マルチコア光ファイバの計算結果を図 6.16 に示す。併せて測定結果も示す。図中の破線は、コア半径 r を図 6.5、表 6.1 で示す r_2 の $4.1 \mu\text{m}$ で計算した。一方、実線はコア半径 r を図 6.5、表 6.1 で示す r_3 の $11.5 \mu\text{m}$ で計算したものである。この r_3 はトレンチの内側全体を大きなコアとして扱っている。ともにコア間距離 A は表 6.1 の $45 \mu\text{m}$ で計算している。図中のプロットは図 6.13 で示した測定結果と同じである。測定結果は、コア半径を r_3 として計算した結果の実線とよく一致する。被接続側マルチコア光ファイバのコアを伝搬する試験光は可視光である。この試験光はトレンチの内側を大きなマルチモードのコアとして伝搬していると考えられる。

図 6.13 においてトレンチ付加型の光電力の変化がステップ型より緩やかな挙動を示した理由は、試験光が伝搬するコア半径 r が大きくなったことで、式 (6.1) で表される軸回転に伴い 2 つのコアが重なる面積の変化が緩やかになったためである。

なお、式 (6.1) の計算式から得られるモニタする光電力は、2 つのコアの重なり量に比例して減少するものとしており、2 本のマルチコア光ファイバに間隙が存在する場合の光の拡がりを見無視したモデルである。間隙が拡がるとトレンチ付加型、ステップ型ともに軸回転に伴う光電力の変化は緩やかになり、式 (6.1) から得られる計算結果と測定結果は乖離すると考えられる。光ファイバ出力端からの試験光の拡がりに対し、間隙が小さい場合において、式 (6.1) の計算結果は、測定結果と比較的良好な一致がみられる。

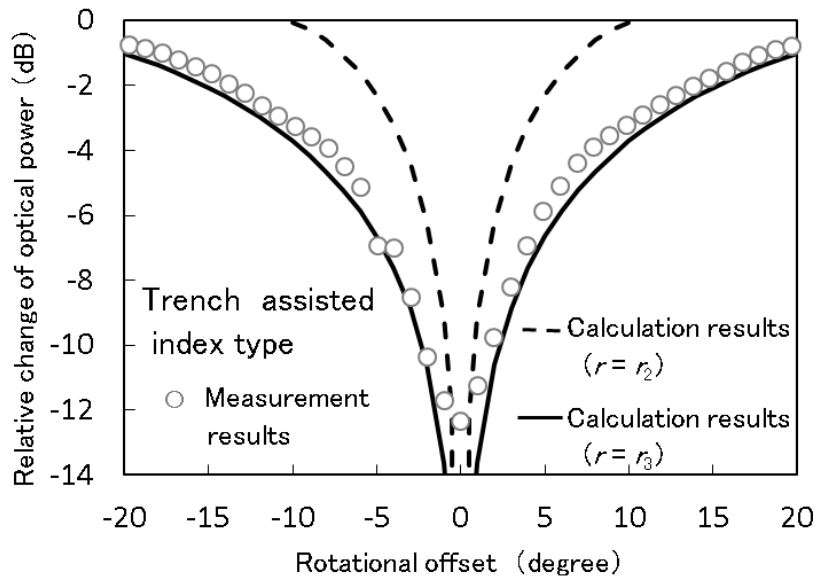


図 6.16 トレンチ付加型において式(6.1)から得られる計算結果と測定結果の比較

6.7 融着接続損失

図 6.2 のクラッド励振を利用したパワーモニタ法で軸回転を調整して融着接続をした。トレンチ付加型のマルチコア光ファイバを使った。接続損失の測定結果を図 6.17 に示す。10 回の繰り返し接続を行った。コア数が 7 個のマルチコア光ファイバであるため、測定数は 70 である。接続損失はファンアウト部品を利用してそれぞれのコアを選択的に測定した。接続損失の測定波長 λ は 1550 nm である。測定の結果、すべてのコアの接続損失の平均値は 0.115dB であった。中心コアの接続損失の平均値は 0.075dB であるのに対し、外側コア 6 個の接続損失の平均値は 0.122dB である。外側コアの平均値である 0.122dB が軸回転ずれ要因のみによって生じたとすれば、文献[47]に記載の計算式を使って得られる軸回転ずれは約 1.1 度に相当する。

比較のために図 6.1 の従来のパワーモニタ法で軸回転を調整して融着接続をした。融着接続時のアーク放電加熱の条件は、先のクラッド励振を利用した融着接続実験と同じである。10 回の繰り返し接続を行い、その接続損失の測定結果を図 6.18 に示す。軸回転調整時の試験光の波長と、測定波長はともに 1550 nm である。測定の結果、すべてのコアの接続損失の平均値は 0.136dB であった。中心コアの接続損失の平均値が 0.057dB であるのに対し、外側コア 6 個の接続損失の平均値は 0.148dB である。クラッド励振を利用したパワーモニタ法の接続損失は従来のパワーモニタ法と遜色の無い値を示している。なお、接続損失の要因は、軸回転ずれだけでなく、ファイバクリーブ時の切断角の影響[52]、アーク放電による光ファイバ断面内の加熱不均一性による影響[53]についても報告されている。また、中心コアの軸ずれも考えられる。接続損失の測定結果は、軸回転ずれ以外の要因も含まれていることに注意が必要である。

軸回転調整の精度は、光ファイバを軸回転させる機構の分解能と光検出器の分解能に依存する。0.1 度の最小分解能を持つ軸回転の機構と 0.01dB の最小分解能を持つ光検出器を使用した。従来のパワーモニタ法は、軸回転が無い状態から 0.1° の軸回転ずれを与えた場合の光電力の変化量が約 0.01dB である。このため、0.01dB の分解能を持つ光検出器で測定する限り、提案のクラッド励振を利用したパワーモニタ法と同じ調整精度が

得られる。しかし、これよりも分解能が劣る光検出器を利用する場合において、提案の方法は従来のパワーモニタ法より高い調整精度が得られる。

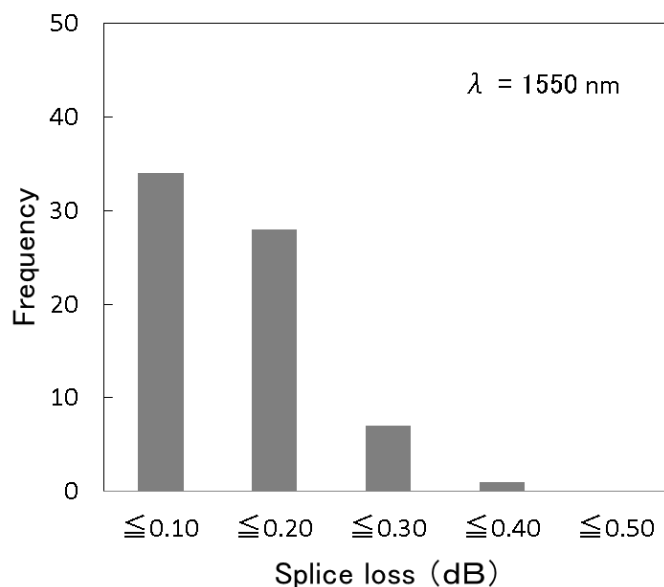


図 6.17 接続損失の結果（図 6.2 の クラッド励振を利用した方法）

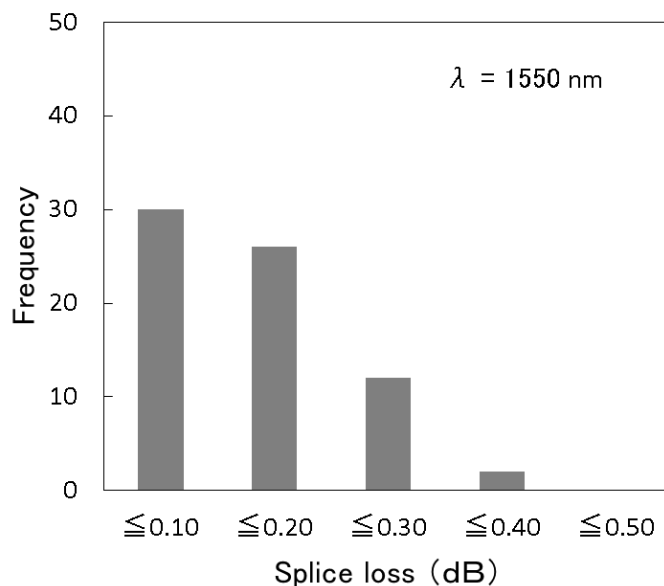


図 6.18 接続損失の結果（図 6.1 の 従来のパワーモニタ法）

6.8 まとめ

マルチコア光ファイバの融着接続時における軸回転調整の方法として、クラッド励振を利用したパワーモニタ法を提案した。接続側のマルチコア光ファイバの被覆上から垂直方向に LED の光を照射してクラッドに試験光を励振した。この方法は従来のパワーモニタ法のように外側コアに試験光を励振するためのファンイン部品は不要である。被接続側のマルチコア光ファイバの出力端でモニタする光電力が最小値を示すように調整すれば軸回転ずれを無くすことが出来る。その光電力は軸回転ずれが小さくなるほど変化量が大きくなる点で従来のパワーモニタ法と異なる。軸回転ずれが無い状態から 1° の

回転角度ずれを与えた場合の光電力の変化量を測定した。ステップ型屈折率分布のマルチコア光ファイバを用いると、従来のパワーモニタ法は **0.1dB** の変化であったのに対し、提案の方法は **2.1dB** であった。また、トレンチ付加型屈折率分布のマルチコア光ファイバを用いると、従来のパワーモニタ法は **0.1dB** の変化であったのに対し、提案の方法は **0.9dB** であった。提案の方法は、光電力の変化量が大きいので調整しやすい。また、軸回転調整後に融着接続をした。提案のクラッド励振を利用したパワーモニタ法の接続損失と従来のコアを励振するパワーモニタ法の接続損失を比較した結果、提案の方法は従来の方法と同等以上の結果が得られた。

第7章 六角形状クラッドのマルチコア光ファイバ

7.1. はじめに

非円形状のクラッドを持つ光ファイバは、産業分野におけるファイバレーザの希土類添加ダブルクラッド光ファイバなどで実用化されている[63,64]。その目的は、希土類イオンが添加されたコアに効率良く励起光を吸収させるため、クラッドを伝搬する励起光のスキュー光成分を減らすことである。一方、参考文献[65]においては、図7.1に示すように、クラッド形状が六角形のマルチコア光ファイバと、その形状に一致する挿通孔のコネクタフェルールを使ってコネクタを取り付ける提案がされている。光ファイバはコネクタに対し常に一定の回転方向に固定され軸回転調整が不要になる。特に、光基地局の配線で使用される両端にコネクタが取り付けられたパッチコードは短尺であるため、光ファイバ自体の価格よりもコネクタを取り付ける費用の占める割合が大きい。単尺のパッチコードにおいて有効な方法と考えられている。

本章では、同じ六角形状クラッドのマルチコア光ファイバを使って、融着接続機のV溝の斜面にクラッドを面接触させて、常に一定の軸回転方向に固定する検討を行った[66]。市販されている融着接続装置の構成を図7.2に示す。融着接続装置はV溝上の光ファイバをクランプで固定する。図7.2では省略しているが、CCDカメラが取り付けられており、光ファイバの側面を観察できる。図7.3は、円形状クラッドと六角形状クラッドのマルチコア光ファイバをV溝上に固定したときの模式図を示している。円形状はV溝上で軸回転が生じるのに対し、六角形状はV溝の斜面に面接触させることで常に一定の回転方向に固定できる可能性がある。

六角形状の光ファイバは、六角形に研削加工したプリフォームを線引することで製造する。研削加工後の表面傷によって光ファイバの機械強度が低下する恐れがある。機械強度を調べる目的で、引張破断試験、繰り返しプルーフ試験を行った。研削面を適切に処理することで低機械強度の発生を抑制できたことを述べる[67]。

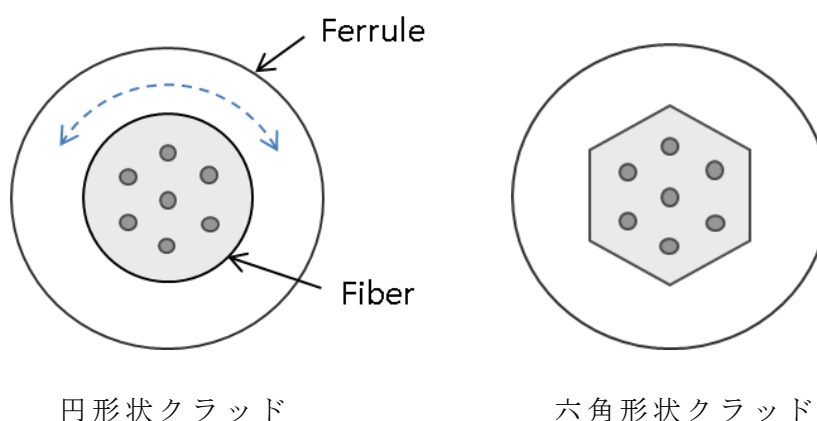


図 7.1 六角孔フェルールを使った固定

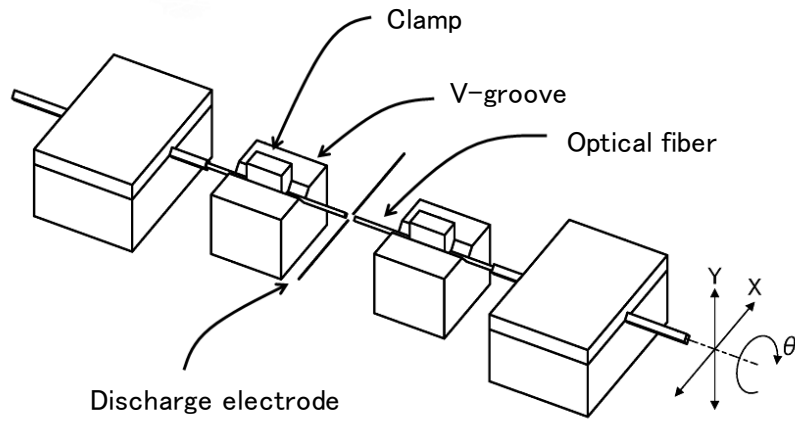


図 7.2 融着接続装置の構成

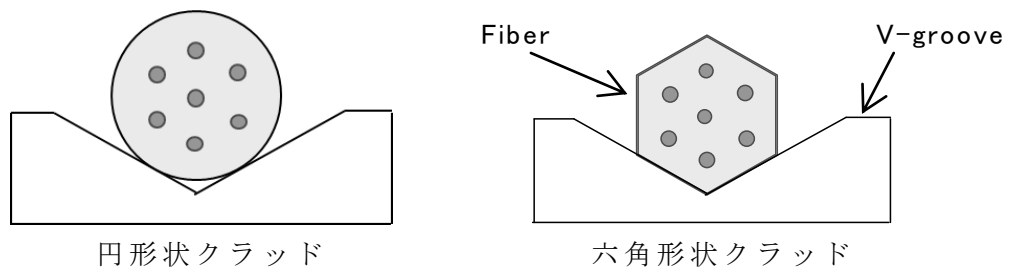


図 7.3 光ファイバの V 溝固定

7.2 六角形状クラッドのマルチコア光ファイバ

六角形状クラッドのマルチコア光ファイバの断面写真を図 7.4 に示す。断面が六角形になるように研削加工したプリフォームを準備して、これを線引することで製造した。コア間のクロストークを抑えるために屈折率分布はトレンチ付加型を採用している。被覆を機械的に除去する場合、六角形の角が欠ける恐れがある。角の欠けを抑える目的で、すべての角を意図的に丸めている。六角形クラッドマルチコア光ファイバの諸特性を表 7.1 に示す。六角形クラッドの対角の距離を W_1 、対辺の距離を W_2 としている。

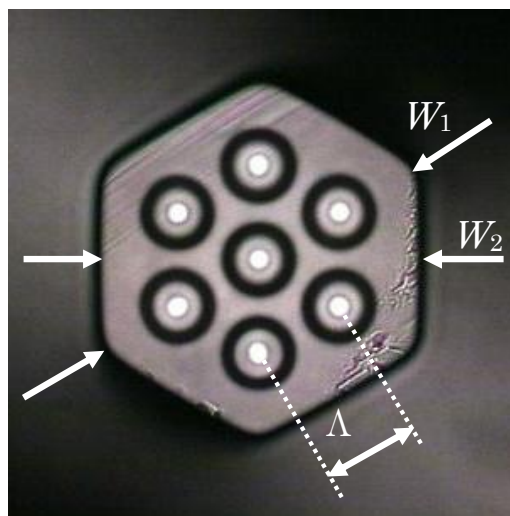


図 7.4 六角形状クラッドのマルチコア光ファイバ断面写真

表 7.1 六角形状クラッドのマルチコア光ファイバの諸特性

Parameters	Value
W_1 (μm)	161
W_2 (μm)	155
Core pitch Λ (μm)	44
Mode field diameter (μm) $\lambda=1550$ nm	10.2

レーザ干渉式表面形状測定器を用いて、クラッド側面の形状を観察した。六角形を構成する辺の形状の一例を図 7.5 に示す。高さは強調して図示されている。辺は直線ではなく、わずかに丸みを帯びている。これは、線引工程でプリフォームが加熱されることで表面張力により生じた変化である [68]。4 箇所の計測による曲率半径の平均値は $873 \mu\text{m}$ で、P-V 値 (Peak-Valley) 値は、 $0.828 \mu\text{m}$ であった。

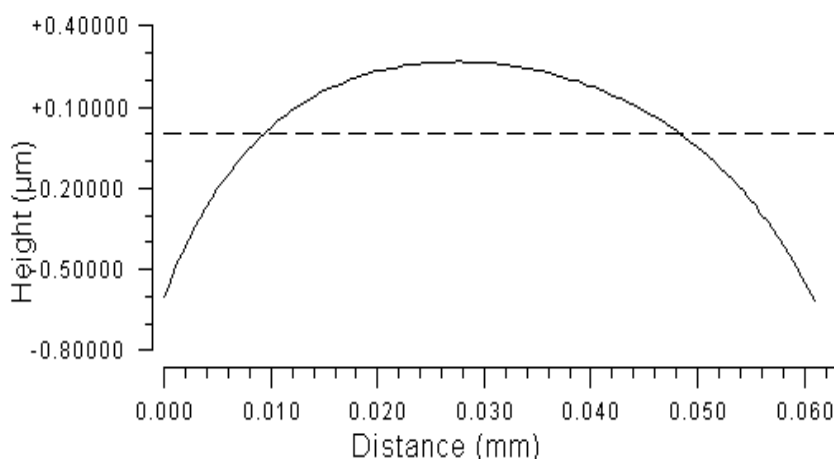


図 7.5 六角形状クラッドマルチコア光ファイバの側面形状

7.3 六角形状クラッド光ファイバの機械強度

7.3.1 プリフォームの表面状態

六角形クラッドのマルチコア光ファイバは、断面が円形のプリフォームを研削で六角形に加工して、これを線引することで製造している。この製造方法では、研削加工によるプリフォーム表面の傷によって、製造された光ファイバの機械強度 (引張破断強度) が低下する恐れがある。

研削加工後の表面処理を変えて、表面状態が異なる 3 種類のプリフォームを準備した。表 7.2 にプリフォームの表面処理と目視による研削面の外観状態を記す。図 7.6 に光ファイバ断面を示す。引張破断試験を目的としているために、コアを設けていない。光ファイバの断面形状は六角形である。六角形の対角線の距離は約 $166 \mu\text{m}$ 、対向する辺の距離は約 $151 \mu\text{m}$ である。いずれもプリフォーム、光ファイバのサイズは同じで、線引条件、被覆材料、被覆径も同一にしている。

サンプル B は、プリフォームの研削面を酸化セリウムで化学機械研磨をしている。サンプル C は、酸化セリウムによる研磨に加えて、酸水素炎で火炎研磨をしている。

火炎研磨前後でプリフォームを 180 度の軸回転をさせながらその幅をレーザ外径測定器で計測した結果を図 7.7 に示す。横軸はプリフォームの軸回転角度、縦軸はプリフォーム幅の最大値と最小値の中間値で規格化した変化量である。火炎研磨はプリフォームを加熱するため、表面張力による変形の恐れがあるが、変形が生じない程度に留められていることを確認した[67]。

表 7.2 プリフォームの表面処理、外観

Sample	Surface treatment	Appearance (Visual observation)
A	No treatment	Ground glass state
B	Chemical-mechanical (Cerium oxide) polishing	Mirror state
C	Chemical-mechanical and fire polishing	Mirror state

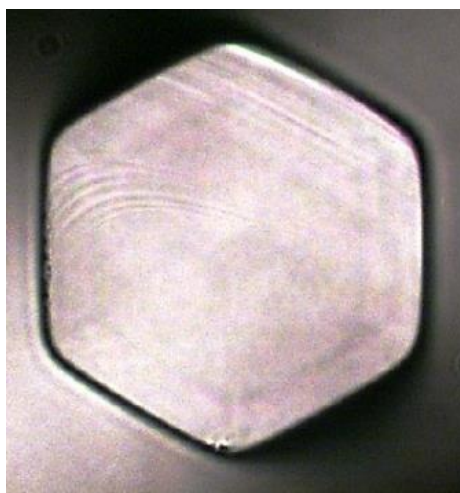


図 7.6 機械強度試験用光ファイバの断面写真

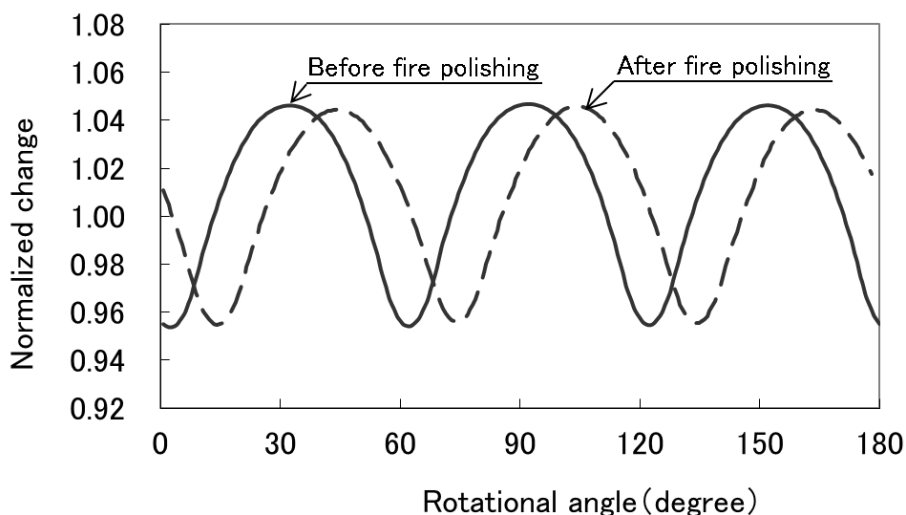
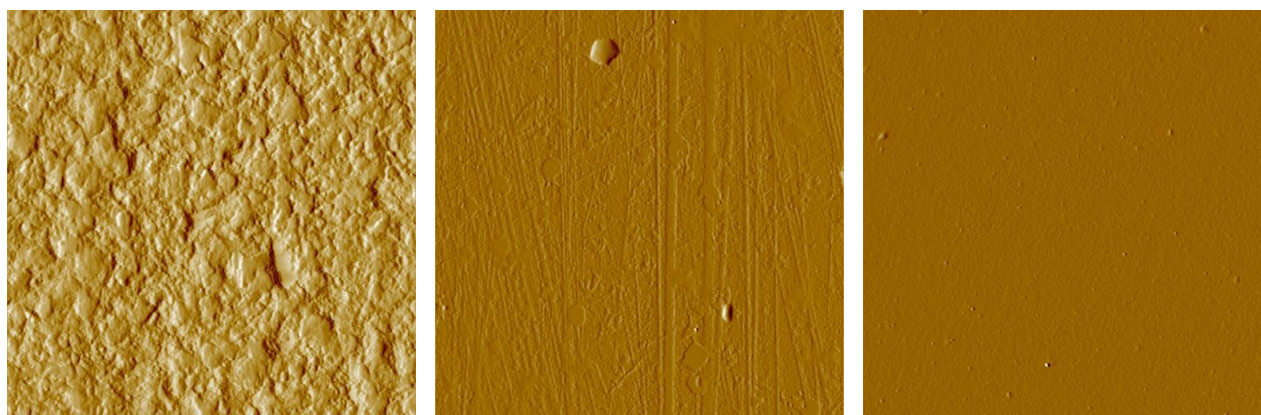


図 7.7 軸回転に伴うプリフォーム幅の変化

プリフォームと光ファイバの表面状態を AFM（原子間力顕微鏡）で観察を行なった。プリフォームの表面状態の画像を図 7.8 に示す。いずれも縦 5 μm ×横 5 μm である。表面処理を行っていない試料 A は粗い状態が観察され、化学機械研磨の表面処理をした試料 B では、粗さは抑えられているが線状の研磨傷が残っているのが確認できる。化学機械研磨と火炎研磨をした試料 C では、研磨傷は除かれている。

表 7.3 にプリフォームと光ファイバの表面粗さを RMS(二乗平均平方根)の値で示す。いずれも AFM で測定されている。RMS は値が小さいほど表面が平滑であることを示す。試料 A のプリフォームは、表面処理をしていないため他の試料に比べて RMS の値が大きく、光ファイバにおいても他の試料に比べて表面が粗い状態が維持されている。プリフォームにおける RMS の値は、試料 A は試料 C の約 100 倍であるが、光ファイバではその差が抑えられている。線引時にプリフォームが加熱されるため、その熱で表面が平滑になっているためと考えられる。



Sample A
(初期状態)

Sample B
(化学機械研磨)

Sample C
(化学機械研磨+火炎研磨)

図 7.8 プリフォーム表面

表 7.3 表面粗さ

Sample	RMS (Unit : nm)	
	Preform	Fiber
A	137.6	1.38
B	2.03	0.94
C	1.22	0.79

7.3.2 引張破断試験・動疲労試験

引張破断試験(IEC 60793-1-B2A)を実施した。ワイブル分布を図 7.9 に示す。試験条件は試験長 0.5 m で、引張速度 5 %/min、サンプル数 50 である。

表面処理を実施していない試料 A の破断強度が低下しており、化学機械研磨をした試料 B で改善がみられた。化学機械研磨と火炎研磨の表面処理をした試料 C では、低強度部は見られなかった。なお、汎用の SMF の破断強度 (60N) に比べ、光ファイバ断面積が広がることで約 100N にまで増加している。

光ファイバの寿命計算には、 n 値(疲労係数)、 m 値(ワイブル形状係数)が必要である[69]。低強度部がみられなかった試料 C について引張り法 (IEC 60793-1-B7A) で動疲労試験を実施した。試験長 0.5 m、引張速度を 2.5、5、25、50、250 mm/min で動疲労試験を行った。試験結果を図 7.10 に示す。 n 値は 20.4 で、汎用の SMF と同等の結果であった。

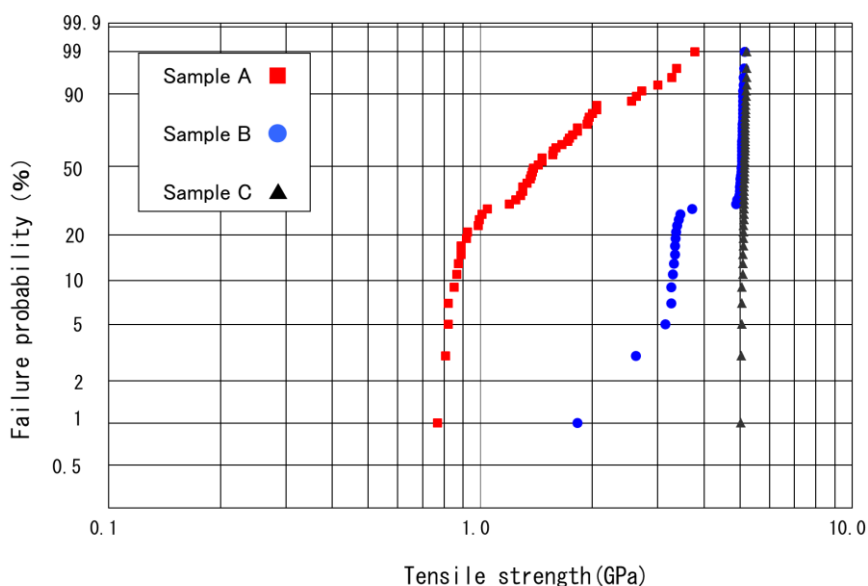


図 7.9 ワイブル分布

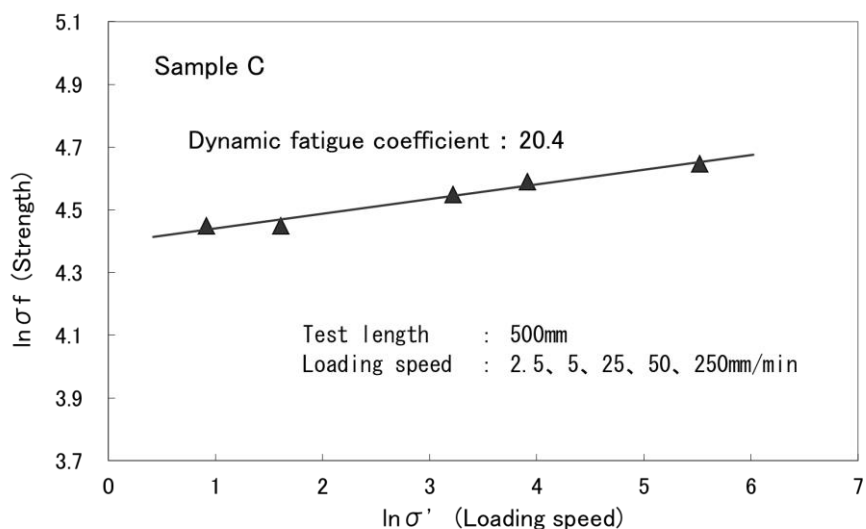


図 7.10 動疲労特性

7.3.3 繰り返しプルーフ試験

光ファイバケーブルの信頼性確保には、数 km に 1 ヶ所以下という稀にしか存在しない低強度部が問題になる。このような低強度部は短尺で行なわれる引張破断試験だけで把握が困難である。このため、試料 C について繰り返しプルーフ試験を行った。試験に用いた光ファイバの長さは 9.5 km である。結果を表 7.4 に示す。一般的な光ファイバのプルーフは、1%の伸び歪に相当する印加応力を加えるのに対し、2%を超える伸び歪を

加えても断線が無く、低強度部の発生を抑制することが出来た。光通信のように高い信頼性を求められる用途においても、非円形の光ファイバを利用できると考えられる。

光ファイバ表面に存在するクラックの分布を表すm値の測定は、繰り返しプルーフ試験法[70]が有効であるが、実施した試験では断線が発生しなかったため、求めることができなかった。断線が無いことから有害な低強度部は抑えられ、ワイブル形状係数も正常な値であると考えられる。なお、4回目に実施した2.06%の印加応力が、使用した装置で加えることができる最大の荷重である。

表 7.4 繰り返しプルーフ試験結果

Number of times	Proof condition		Number of breakage
	Applied stress (%)	Applied time (sec)	
First time	0.53	0.9	0
Second time	1.03	0.9	0
Third time	1.54	0.9	0
Fourth time	2.06	0.9	0

7.4 融着接続

7.4.1 変形による接続損失の影響

六角形状クラッドのマルチコア光ファイバを融着接続すると、熱が加わる接続箇所が表面張力によって円形に変形する。この変形が接続損失に与える影響を確認するため測定を行った。接続後に変形が生じたマルチコア光ファイバの断面写真を図 7.11 に示す。クラッドだけでなく、コアも変形しているのが確認できる。接続損失の測定方法を図 7.12 に示す。細径光ファイバを束ねて作製したファンイン・ファンアウト部品を用いて測定している。接続損失は、六角形状クラッドのマルチコア光ファイバを中間で切断し、そこを融着接続したときのパワーの変動で計測した。軸回転を確実にするためパワーモニタ法で調整した。光源の波長は 1550 nm である。中心コアの接続損失は 0.08dB に対して、外側コア 6 つの平均接続損失は 0.15dB（最大 0.25dB、最小 0.08dB）であった[66]。外側コアは、コアの変形の影響を受けて、中心コアに比べて接続損失が高くなっていると考えられる。

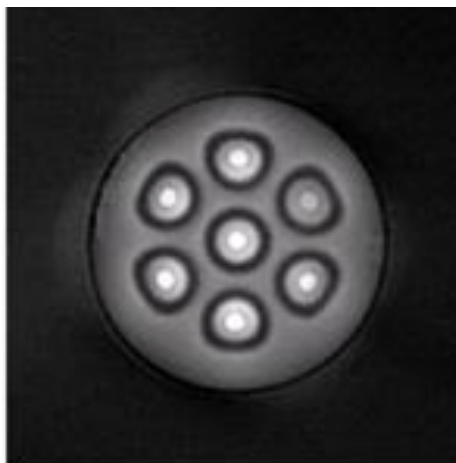


図 7.11 融着接続前後の光ファイバ断面写真

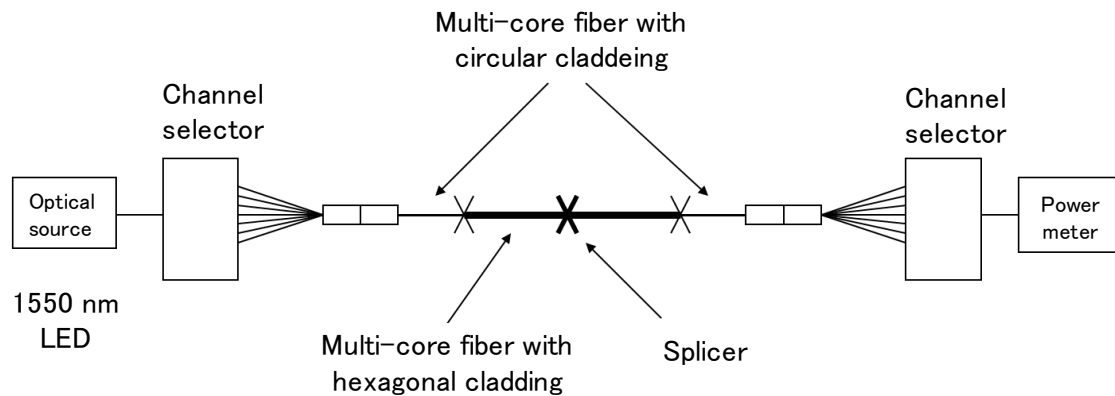


図 7.12 接続損失の測定方法

7.4.2 軸回転調整方法

V 溝上の光ファイバをクランプで押さえることで、光ファイバに回転モーメントを与えて軸回転させることができる[66]。光ファイバが V 溝の斜面に面接触の状態になれば、モーメントは釣り合うので軸回転が止まる。押圧で軸回転させ、V 溝の斜面に面接触させて接続する実験を行った。V 溝の角度は 120° と 60° の 2 種類を試した。いずれも 5 回の繰り返し融着接続をした。図 7.13 に角度が 120° 、 60° の V 溝で面接触した状態の図を示す。

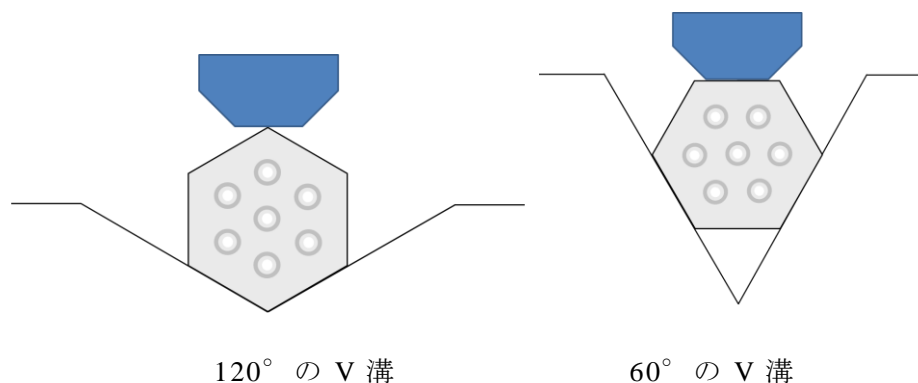


図 7.13 V 溝固定方法

測定の結果、 120° の V 溝を使うと、すべて測定限界を超える接続損失であった。面接触した状態が得られなかったと考えられる。一方、 60° の V 溝では、測定限界を超える状態が 1 回発生した。残り 4 回の接続損失の結果を図 7.14 のヒストグラムに示す。表 7.5 に 60° の V 溝を用いた場合の接続損失結果の一例を示す。損失が高い例は、低い例に比べると中心コアの接続損失も高くなっている。接続損失の要因として、V 溝と光ファイバの間に塵が挟まるなどで生じた軸回転ずれ、図 7.5 に示したように、六角形を構成する辺が丸みを帯びたことで V 溝とファイバとの間で面接触の状態にならず、軸回転ずれが生じたことが挙げられる。

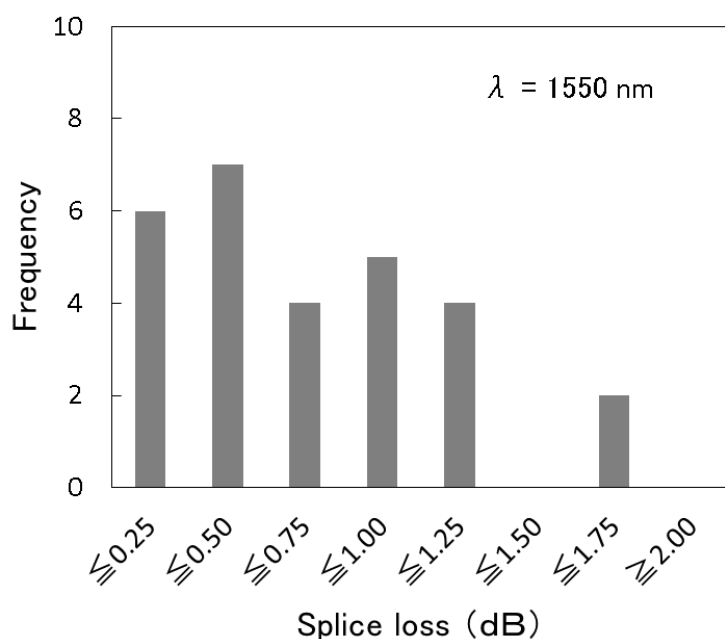


図 7.14 接続損失 (ヒストグラム)

表 7.5 測定結果の一例

Core No.	Examples of splice loss ($\lambda = 1550 \text{ nm}$)	
	Low loss	High loss
Center Core	0.16dB	0.47dB
Outer Core 1	0.04dB	1.06dB
Outer Core 2	0.37dB	1.70dB
Outer Core 3	0.47dB	1.60dB
Outer Core 4	0.68dB	0.98dB
Outer Core 5	0.79dB	0.81dB
Outer Core 6	0.69dB	0.80dB
Average	0.46dB	1.06dB

60° の V 溝を使うことで、面接触の状態に固定される確率が高い結果になった。図 7.13 で示したように、60° は六角形状の辺をクランプで押さえた状態で面接触するのに対し、120° では角を押さえた状態で面接触する点で異なる。図 7.15 に示すような軸回転ずれが生じた状態から面接触させるには、光ファイバを反時計回りに回転させる必要がある。しかし 120° はクランプで光ファイバに押圧を加えると回転させたい方向と反対の時計回りの回転モーメントが働く。一方、60° の V 溝では、回転させたい方向と同じ反時計回りの回転モーメントが働く。

なお、面接触していない状態でも回転モーメントが釣り合った状態になり、押圧を加えても光ファイバが回転しないことがある。その状態を図 7.16 に示す。押圧のみですべて面接触の状態にすることはできない。非円形状のマルチコア光ファイバを軸回転させると、側面から観察される光ファイバの幅は図 7.7 のように変化する。この幅の変化を

モニタしながら粗調整をしておき、後に押圧で光ファイバをV溝の斜面に面接触するまで軸回転させる微調整させる組み合わせの方法で、この課題は解決できると考えられる。

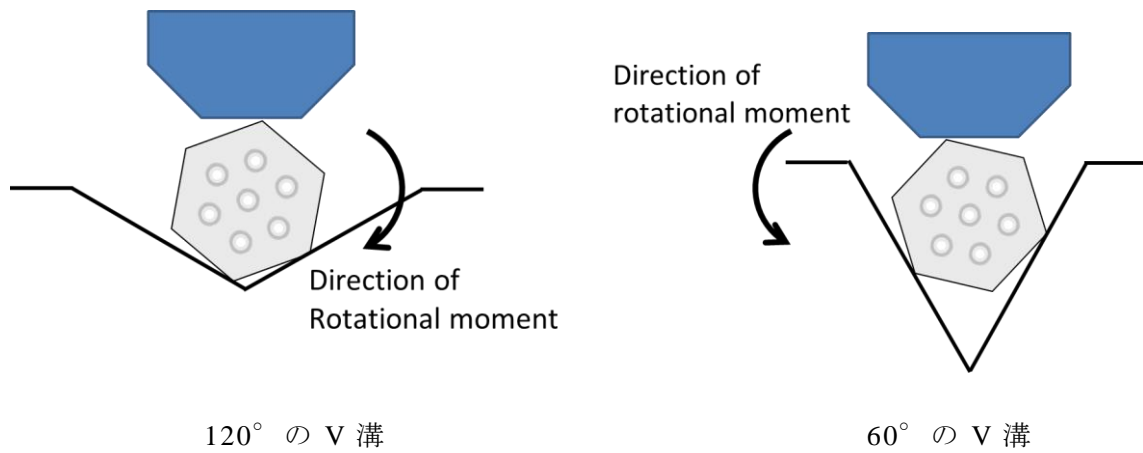


図 7.15 回転モーメント方向の比較

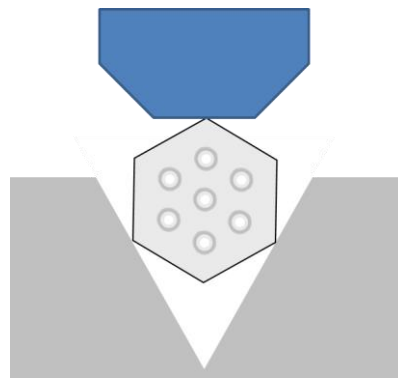


図 7.16 回転モーメントが釣り合う一例

7.5 まとめ

融着接続時において、クラッドの断面形状が六角形のマルチコア光ファイバを使い、V溝の斜面に面接触させることで軸回転調整を必要としない接続の検討を行った。

光ファイバの断面を六角形にするためにプリフォームを研削加工しても、その表面傷を化学機械研磨と火炎研磨で除くことで光ファイバの機械強度の低下を抑制できた。9.5 kmの繰り返しスクリーニング試験において、一般的な通信用光ファイバのプルーフを超える2%の伸び歪を与えても断線は無く、光通信のように高い信頼性を求められる用途においても、利用できると考えられる。

融着接続において、V溝の斜面に面接触させることで、常に一定の軸回転方向に固定する検討を行った。しかし、再現良く低い接続損失が得られる状態に至らなかった。また、接続損失が測定できなほどの回転ずれも生じた。光ファイバをクランプで押さえても、光ファイバに生じる回転モーメントが釣り合うことがあり、面接触に至らないことが原因である。六角形状のマルチコア光ファイバは、軸回転させると側面観察の画像で

観察される光ファイバの幅が変化する。この変化を利用して軸回転の粗調整をしてから、クランプで押さえて安定してV溝に面接触させるなどの改良が考えられる。

また、六角形を構成する辺の形状が線引時の熱によって、僅かに丸みを帯びていることで、V溝の斜面に面接触ではなく、点接触に近い状態になっていることが考えられる。さらなる接続損失の低減には、この点も改善する必要がある。

第 8 章 結論

8.1 結論

光ファイバ 1 心あたりの伝送容量とケーブル断面内の空間利用効率の拡大が期待できるマルチコア光ファイバについて研究開発を行った。加えて、マルチコア光ファイバ通信網の構築に必要なファンイン・ファンアウト部品、およびマルチコア光ファイバ同士の接続に関する研究開発を行った。得られた結論を総括する。

第 2 章において次の結論を得た。

- (1) 単孔石英管法で作製されたマルチコア光ファイバは、プリフォーム断面内にある大きな空隙が線引でコラプスされることによって変形が生じる。その結果、外側コアの非円率が高くなった。一方、プリフォーム断面内の隙間を小さくできる多孔石英管法は、コアの非円率を抑制できた。また、伝送損失は、汎用 SMF と同等であった。

第 3 章において次の結論を得た。

- (1) マルチコア光ファイバにおいて、通信品質を劣化させるコア間クロストークは、簡易計算式でその挙動を把握できることを初めて示した。
- (2) コア間クロストークは、以下の挙動を示すことを明らかにした。
 - ① 単位を dB としたクロストークは伝搬距離 L の対数に線形的に増加し、その変化量は伝搬距離 L が 10 倍に対し 10 dB である。
 - ② クロストークの伝搬距離 L に対する変化量は、波長 λ に依存しない。
 - ③ クロストークの伝搬距離 L に対する変化量は、コア間距離 A に依存しない。
 - ④ 光通信で一般的に使用される C, L 帯の 1530 nm から 1625 nm の狭い波長範囲であれば、単位を dB としたクロストークは波長 λ が長くなると、ほぼ線形的に増加する。
 - ⑤ クロストークの波長 λ に対する変化量は、伝搬距離 L に依存しない。
 - ⑥ 単位を dB としたクロストークの波長 λ に対する変化量は、コア間距離 A が長くなると大きくなり、その変化量とコア間距離 A は比例する。
 - ⑦ 単位を dB としたクロストークはコア間距離 A に対して線形的に減少する。
 - ⑧ クロストークのコア間距離 A に対する変化量は、波長が短くなると大きくなる。
 - ⑨ クロストークのコア間距離 A に対する変化量は、伝搬距離 L に依存しない。
- (3) コア間クロストークの目標値である -30dB 以下（条長 100 km、波長 1550 nm）は、コア間距離 A をトレンチ付加型で 42 μm 以上、ステップ型で 46 μm 以上で達成できることが明らかになった。

第 4 章において次の結論を得た。

- (1) マルチコア光ファイバから複数のシングルコア光ファイバに分岐する熔融延伸型のファンイン・ファンアウト部品を開発した。熔融延伸型を採用したことで、分岐後のシングルコア光ファイバのクラッド径は、マルチコア光ファイバのコア間距離よりも大きい。従来のバンドル型に比べてクラッド径が太くなったことで意図しない曲げが加わりにくくなる。
- (2) 熔融延伸の前と後で MFD がほとんど変化しないシングルコア光ファイバを設計した。この設計の光ファイバを使ってテーパファイババンドルを作製することで、マルチコア光ファイバとの接続部の損失を抑制できた。

- (3) キャピラリの材質を純粋石英から、屈折率が低いフッ素添加石英に変えることで、テーパーファイババンドル先端のコア間に低屈折率層を設けた。その結果、クロストークを低減できることを明らかにした

第 5 章において次の結論を得た。

- (1) 従来のパワーモニタ法を使ったマルチコア光ファイバの軸回転調整法を発展させて、側方入射と側方出射を利用してフィールドで適用できるパワーモニタ法を確立した。
- (2) 側方入射において、各コアに結合する光電力の分配状態で軸回転に伴う光電力の変化の挙動が変わることを明らかにした。外側コアに効率良く結合させると軸回転に伴う光電力の変化が大きく調整しやすくなることを明らかにした。
- (3) 側方出射において、クラッドモードからの漏洩光成分の影響を排除するために、接続部から約 1 m 以上はなれた箇所で側方出射による光のパワーモニタが必要であることを示した。
- (4) 提案のパワーモニタ法は、従来のパワーモニタ法に比べて遜色ない接続損失が得られたことから、従来のパワーモニタ法と同等の軸回転の精度が得られることを確認した。

第 6 章において次の結論を得た。

- (1) 従来のパワーモニタ法は、軸回転ずれが小さくなるほどモニタする光電力の変化が小さくなる欠点があるところを、試験光をマルチコア光ファイバのクラッドに励振することで、光電力の変化を大きくして調整しやすくなることを確認した。
- (2) 軸回転ずれが無い状態から 1° の回転角度ずれを与えた時の光電力の変化量は、従来の方法においては 0.1dB であったのに対し、クラッド励振を使うことでステップ型のコアは 2.1dB、トレンチ付加型は 0.9dB に変化量が増加した。
- (3) 軸回転に伴う光電力の変化量は、幾何学的なコアの重なり量から得られる計算式とよく一致することを明らかにした。ただし、トレンチ付加型において、この計算式で用いるコア径は、石英に GeO_2 を添加して屈折率を高くした箇所の直径ではなく、F 添加したトレンチの内側をマルチモードのコアと扱うことで良い一致がみられた。

第 7 章において次の結論を得た。

- (1) 光ファイバの断面を六角形にするためにプリフォームを研削加工しても、その表面傷を化学機械研磨と火炎研磨で除くことで、高い信頼性が求められる光通信でも使用できる程度の機械強度が得られた。
- (2) 六角形状のマルチコア光ファイバを融着接続機の V 溝の斜面にクラッドを面接触させて、軸回転を必要としない検討を行った。しかし、再現良く低い接続損失が得られる状態に至らなかった。軸回転調整を必要としない接続を達成するには、次の 2 つの対策を行う必要があると考えられる。①六角形状のマルチコア光ファイバは、軸回転させると側面から観察する光ファイバの幅が変化する。これを利用して軸回転の粗調整してから、クランプで光ファイバに押圧を加えて V 溝に光ファイバを面接触させる。②六角形を構成する辺の形状が線引時の熱によって、僅かに丸みを帯びている。この丸みを抑制することで V 溝にクラッドを理想的な面接触の状態にする。

8.2 将来展望

国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究を受託した光ファイバメーカー 5 社（住友電工、古川電工、フジクラ、日立金属、三菱電線工業）は、それぞれ 10km、2 式

分のマルチコア光ファイバと、ファンアウト部品などを提供して相互接続トライアルが行われた。同じ委託研究を受託した NTT のアクセスサービス研究所がマルチコア光ファイバ同士の相互接続と各種部品の接続をして 100km 長の伝送線路を構築して信号伝送を行った。構成図を図 8.1 に示す。このトライアルは国際会議である OECC2013、NICT オープンハウス 2013 において公開された。図 8.2 は公開されたトライアルの様子である(参考文献 71 から引用)。光ファイバ通信網はインフラであり、その構築に長期に渡る建設時間と多額の費用が必要になる。また、インフラとして構築されると数十年間に渡り使用される。実用化には、このようなトライアルに加え、ヒートサイクル、高温高湿度などの信頼性試験、実証実験を繰り返して進めることになると考えられる。

広く普及している通信用の光ファイバは、国際電気通信連合の国際標準化部門の勧告によって国際標準化されている。マルチコア光ファイバの普及のためには、国際標準化の作業を進めることになる必要と考えられる。

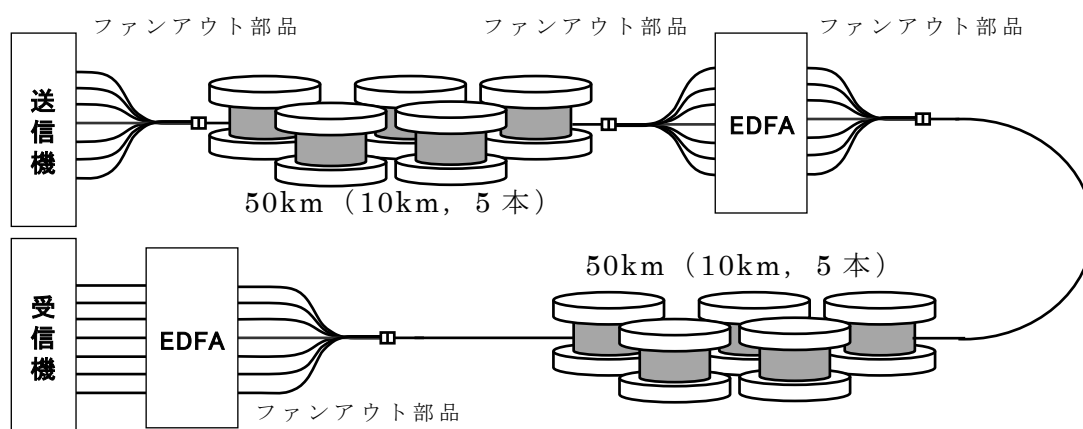


図 8.1 相互接続トライアルの構成図



図 8.2 公開相互接続トライアルの様子

マルチコア光ファイバの高い空間利用効率を考えると、光ファイバの配線において空間的制限がある用途に適していると考えられる。例として以下に 3 つの用途を挙げる。このような用途から実用化されていくものと期待する。

- ①光ファイバケーブルの布設は、マンホールとその間をつなぐ管路に配線する。特に都内は通信需要が高く次々と光ケーブルを増設したために、新たに光ケーブルを増設するための管路の空間が少なくなっている。この空間が無くなれば新たな管路を設けるための土木工事が必要になる。マルチコア光ファイバは、このような少なくなった管路の空間を有効利用する目的で適していると考えられる。
- ②光海底ケーブルは高水圧に耐えるための保護、漁具などによる損傷に対する保護が必要になる。光ファイバ心線を金属パイプの中に収納して、さらにその外側に抗張力線を配置するなどの構造をしている。心線を保護するための構造物が多く、1本のケーブルに収納できる心線数を増やすことが出来ない。陸上用の光ケーブルには1000心を超えるケーブルがあるのに対し、海底用の光ケーブルは、6から24心程度である。光海底ケーブル断面内の狭い空間を有効利用する目的でマルチコア光ファイバが適していると考えられる。
- ③大規模データセンタなどのサーバ間の通信配線に単心の光ファイバコードが使用されている。大規模化に伴い光ファイバのコードが増えてスペースを必要とするとともに配線の錯綜と、サーバ増設における配線変更作業の煩雑化が課題になっている。光ファイバコードの数を減らして配線の錯綜を解消する目的でマルチコア光ファイバが適していると考えられる。

謝辞

本論文をまとめるに当たり、その端緒を与えてくださり、さらに懇切なるご指導とご助言、ご鞭撻を賜りました大阪電気通信大学森下克己教授に心より感謝申し上げます。

研究開始時からご指導を賜りました三菱電線工業株式会社谷口浩一事業部長補佐に深く感謝申し上げます。また、本研究の遂行の機会を与えてくださりました、三菱電線工業株式会社藤田盛行元光部品事業部長補佐に心から感謝いたします。

ファンアウト部品の開発ならびに接続技術の開発で、困難な要求に快く応じていただいた八若正義氏に感謝の意を表します。

マルチコア光ファイバならびに接続技術の研究開発に協力いただいた三菱電線工業の山本哲也氏、橋本守氏、澤田久氏、木下貴陽氏、樋口隆幸氏、石田智彦氏、楠修一氏、藤巻洋介氏、平岡章弘氏に感謝いたします。

本論文の研究は、国立研究開発法人情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究である「革新的光ファイバ技術の研究開発」と「革新的光通信インフラの研究開発」で行ったものであり、この委託研究を始める端緒をいただいた元 NTT でデンマーク工科大学盛岡敏夫教授、また委託研究の研究委員会においてご指導およびご支援を下された NTT アクセスサービス研究所中島和秀特別研究員、情報通信研究機構淡路祥成マネージャ、北海道大学小柴正則特任教授をはじめとする皆様に心より感謝いたします。

電子情報通信学会の光通信インフラの飛躍的高度化に関する時限研究専門研究会において御討論をいただいた、歴代の委員長である東北大学中沢正隆教授、KDDI 研究所鈴木正敏副所長、早稲田大学松島裕一教授をはじめとする各委員の方々に心より感謝いたします。

特殊なプリフォームの作製を快く応じていただいた三菱電線工業株式会社 光部品事業部生産グループ光学ファイバ1区の岡本晋区長、さまざまな条件で線引していただいた光学ファイバ2区の片山太区長をはじめ光学ファイバ区の皆様にお礼申し上げます次第です。

本研究は、以上に書ききれなかった多くの方々のご協力、ご鞭撻により達成されたものであり、ここに心より厚く御礼申し上げます。

最後に、本論文に協力を惜しまず精神的にも支え励まし続けてくれた妻 佳子、娘 佑菜の支援の賜である事を書き添え、心から感謝を捧げる次第です。

参考文献

- [1] D.Qian, M.Huang, E.Ip, Y.Huang, Y.Shao, J.Hu, T.Wang, “101.7Tb/s(370×294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM Transmission over 3×55km SSMF using pilot based phase noise mitigation,” Optical Fiber Communication Conference, no.PDPB5 (2011).
- [2] M.Nakazawa, K.Kikuchi, T.Miyazaki, “High spectral density optical communication technologies,” Springer (2010).
- [3] 総務省報道発表「我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算」(平成 28 年 3 月 2 日) http://www.soumu.go.jp/main_content/000402062.pdf
- [4] E.Desurvire, “Capacity demand and technology challenges for lightwave systems in the next two decades,” J.Lightwave Technology, vol.24, no.12, pp.4697-4710 (2006).
- [5] 松岡伸治, “経済的なコア・メトロネットワークを実現する超高速大容量光トランスポートネットワーク技術,” NTT 技術ジャーナル, vol.23, no.3, pp.8-12 (2011).
- [6] R-J.Essiambre, G.Foschimi, P.Winzer, G.Kramer, “Capacity Limits of Fiber-Optic Communication Systems,” Optical Fiber Communication Conference, OThL1 (2009).
- [7] P.J.Winzer, “Challenges and evolution of optical transport networks,” European Conference on Optical Communication, We.8.D.1 (2010).
- [8] R.Kashyap, “Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibers,” Electronics Letters, vol.24, no.1, pp.47-49 (1988).
- [9] D.P.Hand, P.St.Russel, “Solitary thermal shockwaves and optical damage in optical fibers, the fiber fuse,” Optics Letters, vol.13, no.9, pp.767-769 (1988).
- [10] S.Yanagi, S.Asakawa, R.Nagase, “Characteristics of fibre-optics connector at high-power optical incidence,” Electronics Letters, vol.38, no.17, pp.977-978 (2002).
- [11] Y.Shuto, S.Yanagi, S.Asakawa, M.Kobayashi, R.Nagase, “Fiber fuse phenomenon in step-index single mode optical fiber,” J.Quantum Electronics, vol.40, no.8, pp.1113-1121 (2004).
- [12] Y.Shuto, S.Yanagi, S.Asakawa, M.Kobayashi, N.Nagase, “Evaluation of high temperature absorption coefficients of optical fibers,” Photonics Technology Letters, vol.16, no.4, pp.1008-1010 (2004).
- [13] IEC Technical report IEC 61292-4, Optical power for the damage-free and safe use of optical amplifiers including Raman amplifiers (2004).
- [14] ITU-T Recommendation G.664, Optical safety procedures and requirements for optical transport systems (2006).
- [15] Y.Emori, “Less than 4.7dB noise figure broadband in-line EDFA with a Raman amplifier -1300ps/nm DCF pumped by multi-channel WDM laser diodes,” Optial Amplifiers and their Applications, PD3 (1998).
- [16] C.E.Shannon, “A mathematical theory of communication,” The Bell System Technical Journal, vol.27, no.3, pp.379-423 (1948).
- [17] R-J.Essiambre, G.Kramer, P.J.Winzer, G.J.Foschini, B.Goebel, “Capacity limits of Optical fiber network,” IEEE J.Lightwave Technology, vol.28, no.4, pp.662-701 (2010).
- [18] 盛岡敏夫, “光通信の現状と今後の飛躍のための光ファイバ技術,” 光学, 第 40 巻, 第 6 号, pp.258-263 (2011).
- [19] T.Suzuki, Y.Arai, Y.Ohishi, “Quantum efficiencies of near-infrared emission from Ni²⁺-doped glass-ceramics,” J.of Luminescence, vol.128, no.4, pp.603-609 (2008).
- [20] S.Tanabe, H.Yamazaki, “New glass materials for optical fiber amplifier,” OptoElectronics and Communication Conference, 14D4-2 (2004).
- [21] C.Tsai, Y.Lin, K.Huang, Y.Lin, C.Lai, S.Huang, “Enhancement of Cr⁴⁺ concentration in Y3Al5O12 crystal fiber by pregrowth perimeter deposition,” Jpn.J.Applied Physics, vol.47, no.8R, pp.6369-6373 (2008).

- [22] T.Morioka, "New generation optical infrastructure technologies, EXAT initiative toward 2020 and beyond," OptoElectronics and Communication Conference, FT-4 (2009).
- [23] J.Sakaguchi, Y.Awaji, N.Wada, A.Kanno, T.Kawanishi, T.Hayashi, T.Taru, M.Watanabe, "109-Tb/s(7×97×197-Gb/s SDM/WDM/ PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber," Optical Fiber Communication Conference, PDPB6 (2011).
- [24] H.Takara, A.Sano, T.Kobayashi, H.Kawakami, A.Matsuura, Y.Miyamoto, Y.Abe, H.Ono, K.Shikama, Y.Goto, K.Tsujikawa, Y.Sasaki, I.Ishida, K.Takenaga, S.Matsuo, K.Saitoh, M.Koshiba, T.Morioka, "1.01-Pb/s(12 SDM/ 222 WDM/ 456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency," European Conference and Exhibition on Optical Communication, Th.3.C.1 (2012).
- [25] B.J.Puttnam, R.S.Luis, W.Klaus, J.Sakaguchi, J.M.Delgado Mendinueta, Y.Awaji, N.Wada, Y.Tamura, T.Hayashi, M.Hirano, and J.Marciante, "2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogenous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb," European Conference on Optical Communication, PDP-3.1 (2015).
- [26] 関谷晴彦エジソン, 齊藤和也, 姚兵, 小倉明, 大藺和正, "マルチコア光ファイバにおけるファイバフューズ," 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2012-22 (2012).
- [27] 田中正俊, 山本哲也, 木下貴陽, 楠修一, 谷口浩一, "マルチコア光ファイバの最適製法に関する検討," 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2011-18 (2011).
- [28] K.Takenaga, Y.Arakawa, S.Tanigawa, N.Guan, S.Matsuo, K.Saitoh, M.Koshiba, "An investigation on crosstalk in multi-core fibers by introducing random fluctuation along longitudinal direction," IEICE Trans. Commun., vol.E94.B, no.2, pp.409-416 (2011).
- [29] M.Koshiba, K.Saitoh, K.Takenaga, S.Matsuo, "Analytical expression of average power-coupling coefficients for estimating intercore crosstalk in multicore fibers," IEEE Photon. J., vol.4, no.5, pp.1987-1995 (2012).
- [30] 田中正俊, 谷口浩一, 森下克己, "マルチコア光ファイバにおけるコア間クロストークの挙動把握のための簡易計算式," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J97-B, no.5, pp.383-392 (2014).
- [31] D.Marcuse, "Theory of Dielectric Optical Waveguide," Academic Press, New York, ch.5, (eq(5.2-20)) (1974).
- [32] A.W.Snyder, J.D.Love, "Optical Waveguide Theory," Chapman and Hall, New York, ch.18, (eq(18-42))p.392 (1983).
- [33] D.B.Mortimore, J.W.Arkwright, "Monolithic wavelength-flattened 1×7 single-mode fused coupler," Electronics Letters, vol.25, no.9, pp.606-607 (1989).
- [34] T.Hayashi, T.Taru, O.Shimakawa, T.Sasaki, E.Sasaoka, "Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber," Optics Express, vol.19, no.17, pp.16576-16592 (2011).
- [35] K.Takenaga, Y.Arakawa, S.Tanigawa, N.Guan, S.Matsuo, K.Saitoh, M. Koshiba, "Reduction of crosstalk by Trench-Assisted multi-core fiber," Optical Fiber Communication Conference, OWJ4 (2011).
- [36] 田中正俊, 山本哲也, 木下貴陽, 楠修一, 谷口浩一, "マルチコアファイバのクロストーク低減に関する検討," 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2011-58 (2012).
- [37] T.Hayashi, T.Taru, O.Shimakawa, T.Sasaki, E.Sasaoka, "Characterization of crosstalk in ultra-low-crosstalk multi-core fiber," J.Lightwave Technology, vol.30, no.4, pp.583-589 (2012).
- [38] 田中正俊, 山本哲也, 木下貴陽, 楠修一, 谷口浩一, "マルチコアファイバのコア間クロストークの波長依存性," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-28 (2011).

- [39] K.Imamura, I.Shimotakahara, K.Mukasa, N.Oyama, R.Sugizaki, "A Study on reliability for large diameter multi-core fiber," International Wire & Cable Symposium, P-2 (2011).
- [40] B.Zhu, T.F.Taunay, M.F.Yan, J.M.Fini, M.Flshteyn, E.M.Monberg, F.V.Dimarcello, "Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network," Opt. Express, vol.18, no.11, pp.11117-11122 (2010).
- [41] K.Watanabe, T.Saito, M.Shiino, "Development of fiber bundle type fan-out 19-core multi-core fiber," OptoElectronics and Communication. Conference, M01E-2 (2014).
- [42] 八若正義, 田中正俊, 佐々木徹, 藤巻洋介, 谷口浩一, "マルチコアファイバ用ファンイン,ファンアウト部品のコア配列," 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2012-18 (2012).
- [43] O.Shimakawa, M.Shiozaki, T.Sano, A.Inoue, "Pluggable Fan-out realizing Physical-contact and low coupling loss for Multi-core fiber," Optical Fiber Communication Conference, OM3I.2 (2013).
- [44] H.Uemura, K.Takenaga, T.Ori, S.Matuo, K.Saitoh, M.Koshiha, "Fused taper fan-in/fan out devices for multi-core EDF," OptoElectronics and Communication Conference, TuS1-3 (2013).
- [45] 植村仁, 竹永勝宏, 大道浩児, 松尾昌一郎, 齋藤晋聖, 小柴正則, "2 段コアファイバを用いた熔融延伸型ファンイン/ファンアウトデバイス," 電子情報通信学会総合大会, B-10-37 (2013).
- [46] M.Tanaka, M.Hachiwaka, H.Taniguchi, "Fan-out devices suppressed mode field diameter change for multi-core fibers," IEICE Trans.Commun., vol.E99-B, no.3, pp.622-629 (2016).
- [47] D.Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splices," Bell System Technical Journal, vol.56, no.5, pp.703-718 (1977).
- [48] K.Petermann, "Microbending loss in mono-mode fibers," Electronics. Letters, vol.12, no.4, pp.104-108, (1976).
- [49] K.Petermann, "Constraints for fundamental-mode spot size for broad-band compensated single-mode fibers," Electronics. Letters, vol.19, no.18, pp.712-714 (1983).
- [50] 桑木信夫, 大橋正治, 田中千速, 植村直, "単一モード光ファイバのモードフィールド径定義と測定条件に関する検討," 電子情報通信学会論文誌 C, vol.J70-C, no.6 pp.739-845 (1987).
- [51] J.Sakai, T.Kimura, "Bending loss of propagation modes in arbitrary-index profile optical fibers," Applied Optics, vol.17, no.10, pp.1499-1506 (1978).
- [52] K.Watanabe, T.Saito, K.Imamura, Y.Nakayama, M.Shino, "Study of fusion splice for single-mode multi-core fiber," Microoptics Conference, no.H-8 (2011).
- [53] Y.Amma, Y.Arakawa, A.Takahashi, K.Takahashi, K.Takenaga, S.Matsuo, "Low-loss fusion splice technique for multicore fiber with a large cladding diameter," IEEE Summer Topicals, MC2.2 (2013).
- [54] W.Zheng, "Automated alignment and Splicing for multicore fibers," Optical Fiber Communication Conference, OM3I.4 (2013).
- [55] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一, "側方入出射を利用したマルチコア光ファイバの融着接続," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J97-B, no.12, pp.1144-1152 (2014).
- [56] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一, "曲げによる漏洩光を利用したマルチコア光ファイバの軸回転調整," 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2013-19 (2013).

- [57] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一, “側方入出射を利用したマルチコア光ファイバの融着接続,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J97-B, no.12, pp.1144-1152 (2014).
- [58] C.M.Miller, S.C.Mettler, I.A.White, “Optical fiber splices and connectors,” pp.90-176, New York, Marcel Dekker (1986).
- [59] 清水正利, 小林英夫, “現用光ファイバ線路の心線対照を目的とした光ファイバ曲げ入射/曲げ出射光学系の検討,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J74-B-I, no.7, pp.570-576 (1991).
- [60] 納戸一貴, 田中郁昭, 真鍋哲也, 東裕司, “光ファイバ側方入射法の高性能化,” 電子情報通信学会総合大会, B-10-15 (2011).
- [61] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介洋介, 谷口浩一, “側方入出射を利用したトレンチ付加型マルチコア光ファイバの軸回転調整,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2015-16 (2014).
- [62] 田中正俊, 八若正義, 谷口浩一, “クラッド励振を利用したマルチコア光ファイバの融着接続,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J99-B, no.8, pp.572-580 (2016).
- [63] Yahua Li, S.D.Jackson, S.Fleimng, “High absorption and low splice properties of hexagonal double-clad fiber,” Photonics Technology Letters, vol.16, no.11, pp.2502-2504 (2004).
- [64] R.Renner, M.kehrli, W.Luthy, H.P.Weber, “Manufacturing of a D-shaped fiber,” Laser Physics, vol.13, no.2, pp.232-233 (2003).
- [65] 八若正義, 田中正俊, 藤巻洋介, 谷口浩一, “六角形クラッドマルチコアファイバの FC コネクタ接続,” レーザー学会, vol.41, no.6, pp.442-446 (2013).
- [66] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 平岡章宏, 谷口浩一, “マルチコア光ファイバの融着接続に関する検討,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2012-70 (2013).
- [67] 田中正俊, 石田智彦, 藤巻洋介, 楠修一, 谷口浩一, “多角形クラッドマルチコアファイバの機械強度特性,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2012-21 (2012).
- [68] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介洋介, 楠修一, 谷口浩一, “コネクタ接続を考慮した多角形クラッドのマルチコアファイバ,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2012-2 (2012).
- [69] Y.Mitsunaga, Y.Katsuyama, H.Kobayashi, Y.Ishida, “Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing,” J.Applied Physics, vol.J66-B, no.7, pp.4847-4853 (1982).
- [70] 満永, 勝山, 小林, 石田, “スクリーニング試験による光ファイバ強度保証法,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J66-B, no.7, pp.489-496 (1982).
- [71] 中島和秀, 高良秀彦, 宮本裕, 森田逸郎, “マルチコア光ファイバ技術の相互接続トライアル,” ITU ジャーナル, vol.43, no.11, pp.20-22 (2013).

業績目録

A. 原著論文

- [1] 田中正俊, 谷口浩一, 森下克己, “マルチコア光ファイバにおけるコア間クロストークの挙動把握のための簡易計算式,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J97-B, no.5, pp.383-392 (2014).
- [2] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一, “側方入出射を利用したマルチコア光ファイバの融着接続,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J97-B, no.12, pp.1144-1152 (2014).
- [3] M.Tanaka, M.Hachiwaka, H.Taniguchi, “Fan-out devices suppressed mode field diameter change for multi-core fibers,” IEICE Trans.Commun., vol.E99-B, no.3, pp.622-629 (2016).
- [4] 田中正俊, 八若正義, 谷口浩一, “クラッド励振を利用したマルチコア光ファイバの融着接続,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J99-B, no.8, pp.572-580 (2016).

B. 関連論文

論文

- [1] T.Yamamoto, H.Kubota, S.Kawanishi, M.Tanaka, S.Yamaguchi, “Highly nonlinear dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber in 1.55um region,” IEICE Trans.Electron., vol.E85-C, no.1, pp.250-252 (2003).
- [2] S.Kawanishi, T.Yamamoto, H.Kubota, M.Tanaka, S.Yamaguchi, “Dispersion controlled and polarization maintaining photonic crystal fibers for high performance network systems,” IEICE Trans.Electron., vol.E87-C, no.3, pp.336-342 (2004).
- [3] 相葉孝充, 若林知敬, 田中正俊, 小山田弥平, “トレンチ付曲げ不感多モード光ファイバの解析と設計,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J97-B, no.2, pp.1153-1170 (2014).
- [4] 八若正義, 田中正俊, 藤巻洋介, 谷口浩一, “六角形クラッドマルチコアファイバの FC コネクタ接続,” レーザー研究, vol.41, no.6, pp.442-446 (2013).

レター

- [1] K.Suzuki, H.Kubota, S.Kawanishi, M.Tanaka, M.Fujita, “High-speed bi-directional polarization division multiplexed optical transmission in ultra low-loss(1.3dB/km) polarization-maintaining photonic crystal fibre,” Electronics Letters, vol.37, no.23, pp.1399-1401 (2001).
- [2] K.Suzuki, H.Kubota, S.Kawanishi, M.Tanaka, M.Fujita, “Optical properties of a low-loss polarization-maintaining photonic crystal fiber,” Optics Express, vol.9, no.13, pp.676-680 (2001).
- [3] T.Yamamoto, H.Kubota, S.Kawanishi, M.Tanaka, S.Yamaguchi, “Supercontinuum generation at 1.55um in a dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber,” Optics Express, vol.11, no.13, pp.1537-1540 (2003).

- [4] H.Kubota, S.Kawanishi, S.Koyanagi, M.Tanaka, S.Yamaguchi, “Absolutely single polarization photonic crystal fiber,” Photonic Tehchnology Letters, vol.16, no.1, pp.182-184 (2004).

国際会議

- [1] H.Kubota, K.Suzuki, S.Kawanishi, S.Nakazawa, M.Tanaka, M.Fujita, “Low-loss 2 km-long photonic crystal fiber with zero GDV in the near IR suitable for picosecond pulse propagation at the 800nm band,” Conference on Lasers and Electro-Optics, CPD3-1 (2001).
- [2] O.Toyama, M.Tanaka, T.Kinoshita, S.Yamaguchi, H.Kubota, S.Kawanishi, “Temperature cycling tensile proof of photonic crystal fiber,” European Conference on Optical Communication, We2.7.2 (2003).
- [3] M.Tanaka, S.Kawanishi, “Fabrication of dispersion controlled and polarization maintaining photonic crystal fiber for high performance systems and devices,” Optical Fiber Communication Conference, OWL3 (2005) [Invited paper].
- [4] S.Kawanishi, M.Ohmori, M.Tanaka, H.Sakaki, “Observation of photoluminescence of semiconductor nanocrystal quantum dots in the core of photonic bandgap fiber,” IEEE Lasers and Electro-optics Society, ThN4 (2006).
- [5] S.Kawanishi, M.Tanaka, M.Ohmori, H.Sakaki, “Photonic band gap fiber for new wavelength range,” Optical Fiber Communication Conference, OThR3 (2008).
- [6] M.Ohmori, S.Kawanishi, M.Tanaka, H.Sakaki, “Photoluminescence spectroscopy of semiconductor colloidal quantum dots in the photonic bandgap fiber,” IEEE Laser and Electoro-Optics Society, MD2.2 (2008).
- [7] T.Aiba, Y.Koyamada, H.Ishida, M.Tanaka, “Numerical and experimental analysis of trench-assisted bend-insensitive multimode fibers,” Conference on Lasers and Electro-Optics - PR & OECC/PS, ThS3_2 (2013).

解説論文

- [1] 田中正俊, “フォトニック結晶ファイバ,” レーザー学会誌, vol.40, no.6, pp.428-434 (2012).

研究会

- [1] 田中正俊, 遠山修, 山口俊一郎, “フォトニック結晶ファイバの開発,” 電子情報通信学会 LQE 研究会, LQE2002-126 (2002) [招待講演].
- [2] 田中正俊, 鈴木聡人, 山本哲也, 木下貴陽, 大泉晴郎, “LMA フォトニック結晶ファイバの諸特性,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2008-2 (2008).
- [3] 楠修一, 橋本守, 木下貴陽, 田中正俊, 鈴木聡人, 八若正義, 大泉晴郎, “耐曲げ型 GI ファイバの開発,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2008-3(2008).
- [4] 鈴木聡人, 澤田久, 山本哲也, 石田智彦, 田中正俊, 厨子敏博, “HR 膜つき Yb ドープエアホール型ダブルクラッドファイバレーザーのレーザー発振特性,” 電子情報通信学会 LQE 研究会, LQE-2008-10 (2008).
- [5] 田中正俊, 澤田久, 金成珍, 石田智彦, 山本哲也, 湖東雅弘, 谷口浩一, “エアホールクラッド形マルチモードファイバを接続した光コンバイナの検討,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT-2009-52 (2009).
- [6] 楠修一, 木下貴陽, 八若正義, 田中正俊, 大泉晴郎, “宅内用細径光ファイバコードの開発,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2009-36 (2009).

- [7] 田中正俊, 山本哲也, 木下貴陽, 楠修一, 谷口浩一, “マルチコア光ファイバの最適製法に関する検討,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2011-18 (2011).
- [8] 田中正俊, 山本哲也, 木下貴陽, 楠修一, 谷口浩一, “マルチコアファイバのクロストーク低減に関する検討,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2011-58 (2012).
- [9] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 楠修一, 谷口浩一, “コネクタ接続を考慮した多角形クラッドのマルチコアファイバ,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2012-2 (2012).
- [10] 田中正俊, 石田智彦, 藤巻洋介, 楠修一, 谷口浩一, “多角形クラッドマルチコアファイバの機械強度特性,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2012-21 (2012).
- [11] 八若正義, 田中正俊, 佐々木徹, 藤巻洋介, 谷口浩一, “マルチコアファイバ用ファンイン, ファンアウト部品のコア配列,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2012-18 (2012).
- [12] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一, “六角形クラッドマルチコアファイバの突合せ接続,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2012-68 (2013).
- [13] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 平岡章弘, 谷口浩一, “マルチコア光ファイバの融着接続に関する検討,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2012-70 (2013) [招待講演].
- [14] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一, “非円形クラッドマルチコアファイバ,” 電子情報通信学会 EXAT 研究会 (2013) [招待講演].
- [15] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一, “曲げによる漏洩光を利用したマルチコアファイバの軸回転調整,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2013-19 (2013).
- [16] 相葉孝充, 若林知敬, 田中正俊, 小山田弥平, “トレンチ型曲げ不感マルチモードファイバのモード解析と実験,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2013-34 (2013).
- [17] 八若正義, 田中正俊, 藤巻洋介, 谷口浩一, “六角孔フェルールを用いたマルチコアファイバ接続,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2013-37 (2013).
- [18] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一, “側方入出射を利用したマルチコア光ファイバ接続の軸回転調整,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2013-43 (2013).
- [19] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一, “熔融延伸型ファンアウト用光ファイバの MFD 制御に関する検討,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2013-68 (2014).
- [20] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一, “側方入出射を利用したトレンチ付加型マルチコア光ファイバの軸回転調整,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2014-16 (2014).
- [21] 八若正義, 藤巻洋介, 田中正俊, 谷口浩一, “マルチコアファイバ用 FI, FO 部品のコア間隔自動測定の見直し,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2014-33 (2014).
- [22] 八若正義, 田中正俊, 谷口浩一, “マルチコアファイバ用熔融延伸型ファンイン, ファンアウト部品の検討,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2015-16 (2015)
- [23] 田中正俊, 八若正義, 谷口浩一, “側方クラッド励振法を利用したマルチコア光ファイバの軸回転調整の見直し,” 電子情報通信学会 OFT 研究会, OFT2015-24 (2015).

学会発表

- [1] 鈴木聡人, 田中正俊, 藤田盛行, 久保田寛和, 鈴木和宣, 川西悟基, “短波長零分散シフトフォトニック結晶ファイバの長波長分散特性,” 電子情報通信学会総合大会, C-3-90 (2002).
- [2] 田中正俊, 山取真也, 藤田盛行, 鈴木和宣, 久保田寛和, 川西悟基, “フォトニック結晶ファイバの伝送損失温度特性,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-47 (2002).
- [3] 久保田寛和, 鈴木和宣, 川西悟基, 小柳繁樹, 田中正俊, 藤田盛行, “絶対単一偏波保持フォトニック結晶ファイバ,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-55 (2002).
- [4] 小柳繁樹, 田中正俊, 藤田盛行, “フォトニック結晶ファイバの光源との結合効率,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-50 (2002).
- [5] 鈴木聡人, 田中正俊, 藤田盛行, 久保田寛和, 鈴木和宣, 川西悟基, “高非線形フォトニック結晶ファイバの非線形定数,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-48 (2002).
- [6] 田中正俊, 遠山修, 山口俊一郎, 久保田寛和, 川西悟基, “偏波保持フォトニック結晶ファイバの温度・機械特性,” 電子情報通信学会総合大会, C-3-85 (2003).
- [7] 木下貴陽, 田中正俊, 山口俊一郎, 久保田寛和, 川西悟基, “フォトニック結晶ファイバの機械強度特性,” 電子情報通信学会総合大会, C-3-83 (2003).
- [8] 山本貴司, 久保田寛和, 川西悟基, 田中正俊, 山口俊一郎, “分散フラット偏波保持フォトニック結晶ファイバを用いた $1.55\ \mu\text{m}$ スーパーコンティニウム光の発生,” 電子情報通信学会総合大会, C-3-38 (2003).
- [9] 田中正俊, “ホーリーファイバの特性とその応用,” 電子情報通信学会総合大会, BP-2-4 (2005).
- [10] 山本哲也, 田中正俊, 木下貴陽, 伊藤秀明, 藤田盛行, “フォトニック結晶ファイバの非線形特性,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, CS-2-3 (2005).
- [11] 小向哲郎, 山本貴司, 川西悟基, 田中正俊, 山本哲也, “サイドトンネル型ホーリーファイバの非線形光学特性,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-114 (2005).
- [12] 澤田久, 鈴木聡人, 石田智彦, 田中正俊, 山本哲也, 厨子敏博, “HR膜付き Yb ドープエアホール型ダブルクラッドファイバレーザの開発,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS-9-3 (2007).
- [13] 田中正俊, 山本哲也, 木下貴陽, 楠修一, 谷口浩一, “マルチコアファイバのコア間クロストークの波長依存性,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-28 (2011).
- [14] 田中正俊, 山本哲也, 木下貴陽, 楠修一, 谷口浩一, “障壁層付加マルチコアファイバの特性,” 電子情報通信学会全国大会, B-10-19 (2012).
- [15] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 木下貴陽, 谷口浩一, “MCF のクラッド形状を利用した融着接続の回転角度調整,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-13 (2012).
- [16] 藤巻洋介, 八若正義, 田中正俊, 木下貴陽, 谷口浩一, “六角形クラッド MCF の融着接続損失測定,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-14 (2012).
- [17] 八若正義, 田中正俊, 藤巻洋介, 中井忠彦, 谷口浩一, “マルチコアファイバのコネクタ接続時の反射減衰量,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-11 (2012).
- [18] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一, “曲げによる漏洩光を利用したマルチコアファイバの融着接続,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-7 (2013).
- [19] 八若正義, 田中正俊, 藤巻洋介, 谷口浩一, “六角形マルチコア光ファイバのコネクタ接続,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-8 (2013).

- [20] 八若正義, 田中正俊, 藤巻洋介, 谷口浩一, “マルチコア光ファイバ用溶融延伸型ファンアウトの構造検討,” 電子情報通信学会総合大会, B-13-5 (2014).
- [21] 田中正俊, 八若正義, 藤巻洋介, 谷口浩一, “溶融延伸型ファンアウト用光ファイバの最適化検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-15 (2014).
- [22] 八若正義, 田中正俊, 藤巻洋介, 谷口浩一, “マルチコアファイバ用溶融延伸型ファンアウトの光学特性,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-16 (2014).
- [23] 藤巻洋介, 八若正義, 田中正俊, 谷口浩一, “マルチコアファイバ用 F I, F O 部品のコア間隔自動測定の見直し,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-17 (2014).
- [24] 八若正義, 田中正俊, 谷口浩一, “マルチコアファイバ用溶融延伸型ファンアウトのクロストーク改善,” 電子情報通信学会総合大会, B-13-11 (2015).
- [25] 田中正俊, 八若正義, 谷口浩一, “ファンアウト部品の接続損失ばらつき低減に関する検討,” 電子情報通信学会総合大会, B13-12 (2015).
- [26] 八若正義, 田中正俊, 谷口浩一, “マルチコアファイバ用ファンアウト部品の多心化検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-20 (2015).
- [27] 田中正俊, 八若正義, 谷口浩一, “マルチコアファイバの軸回転調整におけるモニタ光電力の変化,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-13-33 (2015).
- [28] 田中正俊, 八若正義, 谷口浩一, “側方クラッド励振を利用したマルチコア光ファイバの融着接続損失,” 電子情報通信学会総合大会, B-13-30 (2016).

その他

報告書、時報

- [1] 藤田盛行, 田中正俊, 山取真也, “フォトリック結晶ファイバ (1), ” 三菱電線工業時報, 99 号, pp.1-9 (2002).
- [2] 田中正俊, “ホーリーファイバ,” 光技術動向調査報告書, 財団法人光産業振興協会, pp.9-13 (2012).
- [3] 三宅和幸, 八若正義, 田中正俊, 遠山修, 山口俊一郎, “フォトリック結晶ファイバ (2), ” 三菱電線時報, 101 号, pp.1-6 (2004).
- [4] 遠山修, 木下貴陽, 田中正俊, 伊藤秀明, 藤田盛行, “フォトリック結晶ファイバ (3), ” 三菱電線時報, 102 号, pp.33-36 (2005).
- [5] 田中正俊, 八若正義, 谷口浩一, “次世代光通信システムを担うマルチコアファイバ及びファンアウト機能部品の開発,” 三菱電線工業時報, 109 号, pp.1-5 (2012).

雑誌

- [1] 田中正俊, “フォトリック結晶ファイバの応用,” 月刊オプトロニクス, vol.27, no.27, pp.183-187, オプトロニクス社 (2008).
- [2] 田中正俊, “多角形構造マルチコア光ファイバ技術,” ITU ジャーナル, vol.43, no.11, pp.14-15, 日本 ITU 協会 (2013).

著書 (共著)

- [1] フォトリック結晶技術の新展開 共著 CMC 出版 (2005).
- [2] 光通信技術の飛躍的高度化 共著 オプトロニクス社 (2012).

特許（国内登録分、筆頭分のみ）

- [1] 特許 3513101 フォトニッククリスタルファイバの製造方法
- [2] 特許 3576947 フォトニッククリスタルファイバの製造方法
- [3] 特許 3630664 偏波保持フォトニッククリスタルファイバ
- [4] 特許 3691795 光ファイバの製造方法
- [5] 特許 3701875 フォトニッククリスタルファイバの接続方法及びその接続構造体並びにその接続構造体の構成部材
- [6] 特許 3746687 フォトニッククリスタルファイバの製造方法
- [7] 特許 3825381 偏波保持フォトニッククリスタルファイバ
- [8] 特許 3836731 偏波保存フォトニッククリスタルファイバの製造方法
- [9] 特許 3869329 単一偏波光ファイバ
- [10] 特許 3875567 偏波保持フォトニッククリスタルファイバ
- [11] 特許 4025031 分散減少ファイバ
- [12] 特許 4065219 光伝送構造体、及び、それに用いられる光ファイバ
- [13] 特許 4554178 偏波保持フォトニック結晶ファイバ、そのファイバ端部処理方法、光ファイバ融着接続装置を制御するためのコンピュータープログラム及びそのプログラムの読み取り可能な記録媒体
- [14] 特許 4664271 光ファイバ及びその製造方法
- [15] 特許 4855429 ダブルクラッドファイバの接続方法
- [16] 特許 4981632 ダブルクラッドファイバのファイバ端部加工方法
- [17] 特許 5042964 光ファイバ及びその製造方法
- [18] 特許 5095652 光コンバイナ
- [19] 特許 5128913 光コンバイナの製造方法
- [20] 特許 5154484 光ファイバ端部構造
- [21] 特許 5199185 光ファイバカップリング構造及びその製造方法
- [22] 特許 5985297 光ファイバ接続方法
- [23] 特許 5989949 光ファイバの製造方法
- [24] 特許 6018688 光ファイバ、及び光ファイバを製造する方法

意匠（国内登録、筆頭分のみ）

- [1] 意匠登録 1399836 光ファイバ収束器
- [2] 意匠登録 1399985 光ファイバ収束器
- [3] 意匠登録 1399986 光ファイバ収束器
- [4] 意匠登録 1487064 光コネクタ付きコード
- [5] 意匠登録 1498631 光コネクタ