

ステップインデックス型マルチモード
光ファイバ接続の特性及び評価に関する研究

2017年9月

博士（工学）

小林 茂

宇都宮大学

ステップインデックス型マルチモード光ファイバ接続の特性及び評価に関する研究

概要

ステップインデックス型マルチモード光ファイバ(SI-MMF: Step-index multimode fiber)である Plastic optical fiber (POF)や Hard polymer cladding fiber (HPCF)は自動車、鉄道、工場などの分野で広く使われている。大口径のため接続が容易かつトレランスが広く、低コスト性や堅牢性を備えた特長がある。一方、同光ファイバは伝搬モード依存性が強く、光ファイバ中を伝搬する光の状態によりシステムや部品の性能が変わることがある。しかしこれまでの光データリンクは十分なリンクパワーバジェットがあり、全ての変動を許容していたためこれらの問題について議論されることは稀であった。最近、SI-MMF を用いた光高速伝送の仕様や規格が相次いで発行され、これを支える研究の要求が強くなった。

この様な背景の中、SI-MMF の伝搬モード分布を定義するエンサークルドアンギュラーフラックス(EAF: Encircled angular flux)が提唱された。本研究はその測定法開発の一端を担い、国際電気標準会議 (IEC: International Electrotechnical Commission)において国際規格 IEC 61300-3-53 EAF 測定法の確立に貢献した。具体的には HPCF 用の EAF 測定システムを新規に立ち上げ、同システムの検証及び SI-MMF 接続に関する測定評価を行った。先ず測定システムの検証において、EAF 95%値の変化量 $\pm 15\%$ を目安にしたとき $\pm 0.5 \text{ mm}$ またはそれ以上のトレランスを有し、また繰り返し測定再現性は標準偏差 0.008° と、何れも被測定光ファイバの測定に十分な性能を有することを示した。更に平衡モード分布(EMD: Equilibrium mode distribution)を同ファイバについて調べ、 2000 m またはそれ以上の長さで発生することを確認した。光源の出力ビームの開口数(NA: Numerical aperture)を可変できるモード選択励振光学システムと EAF 測定システムを組み合わせ、伝搬モード分布の振る舞いについて研究を行った。入力にガウシアンビームを用いた SI-MMF の接続解析では、光軸垂直方向軸ずれは小さな NA のビーム、光軸方向軸ずれは大きな NA のビームによる変化が大きいことを明らかにした。また伝搬モード分布は測定中にも変動することを確認し、測定用光源のランチ条件

(Launch condition)をコントロールする必要性を指摘した。更に HPCF の接続に関して規格化された測定用光源の条件を用いて実証実験を行い、規格適用外領域が存在することを初めて確認した。この研究で同光ファイバを用いた光データリンクは一般的に数十メートル以下であることから均一モード分布にはならない、また長さの点から平衡モード分布にはならないことを明らかにした。従って従来の接続理論モデルは実用では使えないことを指摘した。更に測定用光源の規定を満足し、かつ挿入損失及び測定不確かさを満足する光源の条件を見出した。加えて SI-MMF の遠視野像と近視野像の測定データを用いた接続モデルを考案し、EMD 光源に加えて不均一な分布光源においても測定結果に良く合うことを示した。

これらを踏まえ、車載光通信用接続部品について EAF を用いた応用研究を行った。従来の車載光通信 MOST (Media Oriented Systems Transport) と次世代車載光通信 GEPOF (Gigabit Ethernet over plastic optical fiber)の仕様の比較を行い、光接続部品の特性改善の必要性を明確にした。GEPOF 仕様であるリンク長 15 m で接続の数や位置の異なるモデルを準備し、伝搬モード分布と周波数特性を組み合わせて解析をした。光源に近い側で接続及びその数が増えると伝搬モード分布の変化と連動して帯域が劣化することを確認した。また特性改善のために接続に屈折率媒質を適用し、軸ずれ $z/a = 3.1$ (z 軸の軸ずれをコア半径 a で規格化)で EAF 50%値が 13.8° から 15.4° に変化し、挿入損失が 1.75 dB 改善した。

以上のように、SI-MMF を伝搬する光の状態を数値で定量化できる EAF を用いて SI-MMF 接続の特性及び評価に関する研究を行い、接続で発生する現象を明らかにした。また、実用で使われる長さ数十メートル以下の SI-MMF においては従来の理論モデルは適用できないことを明確にし、またこれに代わる接続モデルを考案し測定結果に良く合うことを示した。更に今後の高速伝送に向けて従来の車載光コネクタの光学特性の改善についての方向性を示した。関与した EAF 測定法や関連の国際規格が既に複数発行され、本研究の貢献は少なくない。本研究が SI-MMF の接続に関して学術的に新しい指針を与え、同時に SI-MMF を用いた光データリンクや次世代光通信において技術の根拠として貢献することを期待する。

A Study on Optical Characteristics and Evaluations of Step-Index Multimode Fiber Connections

Abstract

Step-index multimode fibers (SI-MMFs) have been used in many fields including the automotive, railroad, and factory industries. Plastic optical fiber (POF) and hard polymer cladding fiber (HPCF) are well-known SI-MMFs. These fibers are appropriate for applications in harsh environments because of their robustness and cost effectiveness. Since the specifications of these applications can cover extensive variations including fluctuation caused by the modal dependency of the fibers, data communications are carried out only through cables. Although the modal power distribution (MPD) of SI-MMF greatly influences its transmission characteristics, we rarely discuss the MPD dependency of systems and components composed of the fiber because there is no measurement metric to define MPD until recently.

Under the circumstances, encircled angular flux (EAF), which is a new metric for defining the MPD in SI-MMF, has been developed and standardized in the International Electrotechnical Commission. Using a newly developed EAF measurement system, we have practically studied behaviors of MPDs at a connection. We examined the measurement tolerances, which show that the apparatus has sufficient tolerances, ± 0.5 mm or more in the X, Y, and Z directions within a variation of $\pm 15\%$ at the EAF of 95%. We also investigated the measurement reproducibility of the apparatus, which had a standard deviation of 0.008° at the EAF of 95% based on repeated measurements. We found a launch excitation independent state as the equilibrium mode distribution (EMD) of fibers that are 2000 m or longer. Using a novel launch-beam-forming system (which optically simulates various launch NAs), we found a relatively large change of the MPDs in a small launch NA beam by determining the radial displacement and a large launch NA beam by determining the axial displacement. We proposed we must control the launch condition to ensure reproducible measurement results because MPDs are possibly changed during measurement. We confirmed the verification target for the EAF requirements of the HPCF for the launch light study, and we reported the conditions that give results outside the specified values stated in, even when the launch lights are within the defined tolerance bounds. We showed

to make uniform distribution of the near field pattern of SI-MMFs as a solution. We also proposed a connection model using the data from near field pattern and far field pattern of the SI-MMF and showed the calculation results are well agreed to the measurement ones.

In addition, we briefly introduced conceptual features and issues of the automotive optical connector. We performed the combination study of MPD and the frequency characteristics of a 15-m optical fiber cable with multiple connections, which are the link system models for the next generation in-vehicle optical networks, Gigabit Ethernet over POF (GEPOF). We also showed that automotive optical connections typically contain an air gap that generates higher-mode radiation. To minimize this radiation, we filled this gap with a cured gel. We found that the EAF profile shifts from 13.8° to 15.4° at 50% EAF with a 1.75-dB insertion loss improvement based on the shift at $z/a = 3.1$ (where z indicates the axial misalignment at the connection, and a is the core radius).

We successfully showed that the EAF measurement system has sufficient capability to analyze the MPDs in fibers and studied the reproducibility of the apparatus across repeated measurements. We found that insertion loss at a fiber connection was caused by radiation of higher modes. We clearly showed that different Gaussian launch light NAs cause a different insertion loss regardless of using the same connection, and we discussed the difficulties in measuring insertion loss under these conditions. We suggested that we need to define launch light sources based on EMD conditions for measurement and test as a rule. In the combination study of MPDs and the frequency characteristics of a 15-m link length with multiple connections using automotive optical fiber, we show for the first time that the transmission directivity and number of connections influence the bandwidth performance. We have shown that automotive optical connections typically contain an air gap. To the best of our knowledge, this is also the first time that the shift of the EAF profile from its original position with insertion loss improvement has been effectively demonstrated; this improvement was achieved by filling the connection air gap with an index medium. Our studies contribute to enhance not only current applications, but also to future higher data rate communications using the SI-MMFs.

目次

第1章	序論	1
1.1	緒言	1
1.2	ステップインデックス型マルチモード光ファイバ(SI-MMF)実用上の課題	6
1.3	本研究の目的	8
1.4	本論文の構成	9
第2章	SI-MMF 接続の基礎特性	11
2.1	緒言	11
2.2	光ファイバ接続と損失	11
2.3	光ファイバの光の入射条件と伝搬条件	14
2.4	従来理論モデルによる接続解析	15
2.5	まとめ	22
第3章	伝搬モード評価システムの開発と検証	23
3.1	緒言	23
3.2	エンサークルドアンギュラーフラックス(EAF)	23
3.2.1	EAF 測定法	23
3.2.2	Far field pattern (FFP)画像取得法	24
3.3	EAF 測定システムの構築と検証	26
3.3.1	EAF 測定システムの構築	26
3.3.2	EAF 測定システムの検証	28
3.3.3	接続と伝搬モード分布の評価	34
3.4	接続特性の解析	37

3.4.1	挿入損失のシミュレーション	37
3.4.2	EAF のシミュレーション	38
3.5	考察	40
3.5.1	FFP と EAF	40
3.5.2	EAF 測定システムの性能	41
3.5.3	接続と伝搬モード分布	42
3.6	まとめ	42
第 4 章	SI-MMF 接続の特性評価	44
4.1	緒言	44
4.2	SI-MMF 接続の測定評価システム	44
4.3	各種ランチ条件による接続特性の評価	46
4.3.1	ガウシアンビームの励振	46
4.3.2	リングビームの励振	49
4.3.3	Equilibrium mode distribution (EMD) 光の励振	52
4.4	考察	55
4.4.1	ガウシアンビームの励振	55
4.4.2	リングモードの励振 – クラッドモード	56
4.4.3	EMD 光の励振	56
4.4.4	従来理論モデルとの比較	57
4.5	まとめ	58
第 5 章	測定用光源の検証と接続モデルの考案	60
5.1	緒言	60

5.2	損失測定用光源の検証.....	60
5.2.1	光源と測定評価システム	60
5.2.2	測定による検証	61
5.3	接続モデルの考案.....	66
5.3.1	ランチファイバと受光ファイバ.....	66
5.3.2	接続モデルによる解析.....	67
5.4	考察.....	69
5.4.1	Near field pattern (NFP)の不均一分布と解消.....	69
5.4.2	接続モデルの考察.....	70
5.5	まとめ	70
第6章	高速伝送に向けた伝搬モード特性の評価.....	71
6.1	緒言.....	71
6.2	自動車用光データリンク	71
6.2.1	車載光コネクタのコンセプト	71
6.2.2	車載光データリンク仕様	72
6.2.3	車載光コネクタ	72
6.3	伝搬モード分布と諸特性.....	74
6.3.1	光データリンクモデルと評価項目	74
6.3.2	光データリンクモデルの測定評価	77
6.4	考察.....	81
6.4.1	接続の伝搬モード分布と周波数特性.....	81
6.4.2	接続の伝搬モード分布と挿入損失特性	82

6.5	まとめ	83
第7章	総括	84
7.1	本研究の成果.....	84
7.2	今後の課題	87
7.3	まとめ	88
謝	辞.....	90
参 考 文 献	92
研 究 業 績	101

略 語

ADAS	Advanced driver assistance systems
AV	Audio visual
CAN	Controller area network
CD	Compact disk
D2B	Domestic digital bus
DUT	Device under test
EAF	Encircled angular flux
ECU	Electronic control unit
EMC	Electro-magnetic compatibility
EMD	Equilibrium mode distribution
FFP	Far field pattern
FOT	Fiber optic transceiver
FTTH	Fiber to the home
FWHM	Full width at half maximum
GEPOF	Gigabit Ethernet over plastic optical fiber
GI-MMF	Graded-index multimode fiber
HDMI	High-definition multimedia interface
HPCF	Hard polymer cladding fiber
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization
IT	Information technology
LED	Light emitting diode
LIN	Local interconnect network

MOST	Media Oriented Systems Transport
MPD	Modal power distribution
NA	Numerical aperture
NFP	Near field pattern
O-GEAR	Optical Gigabit Ethernet for Automotive aRchitecture
PD	Photo diode
POF	Plastic optical fiber
PMMA	Polymethyl methacrylate
Rx	Receiver
SI-MMF	Step-index multimode fiber
SLD	Super luminescent diode
SMF	Single mode fiber
Tx	Transmitter
VCSEL	Vertical-cavity surface-emitting laser

第1章 序論

1.1 緒言

日本の産業構造が変革を遂げている。テレビ、パーソナルコンピュータ、携帯電話など2000年代まで国内メーカ各社がテレビなどのメディア広告を席卷し競い合っていた。しかし急速なグローバル化に伴い製造拠点が海外へ移転したことに加えて、製品自体も海外のメーカに取って代わり、これらの製品広告はほとんど見なくなった。今、エレクトロニクス企業各社は事業の特化や新たな分野の創出など模索し続けている。

日本が世界をリードした光ファイバ産業が牽引する情報通信分野は、国内基幹光通信網に加えて FTTH (Fiber to the home) も一通り普及し、2014年の国内生産額実績は2000年のピーク時の約1/3の4,413億円と、2002年以降、約5,000億円前後の横ばい状態が続いている[1]。一方、自動車産業は日本の産業を牽引しており、主要製造業の約2割を網羅する約52兆円、就業人口の約1割である約550万人の雇用に貢献している[2]。しかしながら人口の減少や高齢化の中で全体的な国内市場は成長が鈍化の傾向にある。この社会背景の中で成長を続けるには国外での生産や販売が必須である。また、今、自動車産業界で起こっているパラダイムシフトは2つの流れがある。ひとつは将来の自動運転システムに代表される先進運転支援システム(ADAS: Advanced driver assistance systems)を視野に入れた自動車の「高度コンピュータ化」である[3]。自動運転は従来の自動車メーカに加えて



図 1-1 自動車のワイヤーハーネス

情報企業、いわゆる IT (Information technology) 企業も参入して開発競争が展開されている。もうひとつは「共通化」の流れである[3]。自動車メーカーは海外展開を図り、数量増大に加えて海外調達などに対応しなくてはならない。このような状況の下、部品や技術の共通化や標準化は必要不可欠になった。それを裏付けるように国内外の主要メーカーは効率的な生産のため「モジュール化」を中長期の戦略に据えて事業を展開している[4], [5]。部品、ユニット、そしてそのインターフェースなど共通化を必要とするものは多い。この共通化の流れは他産業ではすでに一般化した。これまでメーカー毎のカスタマイズ品が中心の自動車産業では新たな流れになっている。

図 1-1 に自動車のワイヤーハーネスを示す。車体への設置の際、フレームに 3 次元に配線したときに納まるように各ケーブルの長さのみならず曲げや捻り、加えて補強部材を加えて束ねた構造になっている。実はこのワイヤーハーネスには光ファイバケーブルが組み込まれ、後述する車載光通信ネットワーク MOST (Media Oriented Systems Transport) の配線として使われている。図 1-2(a) に光データリンク (Optical datalink) の基本構成と対

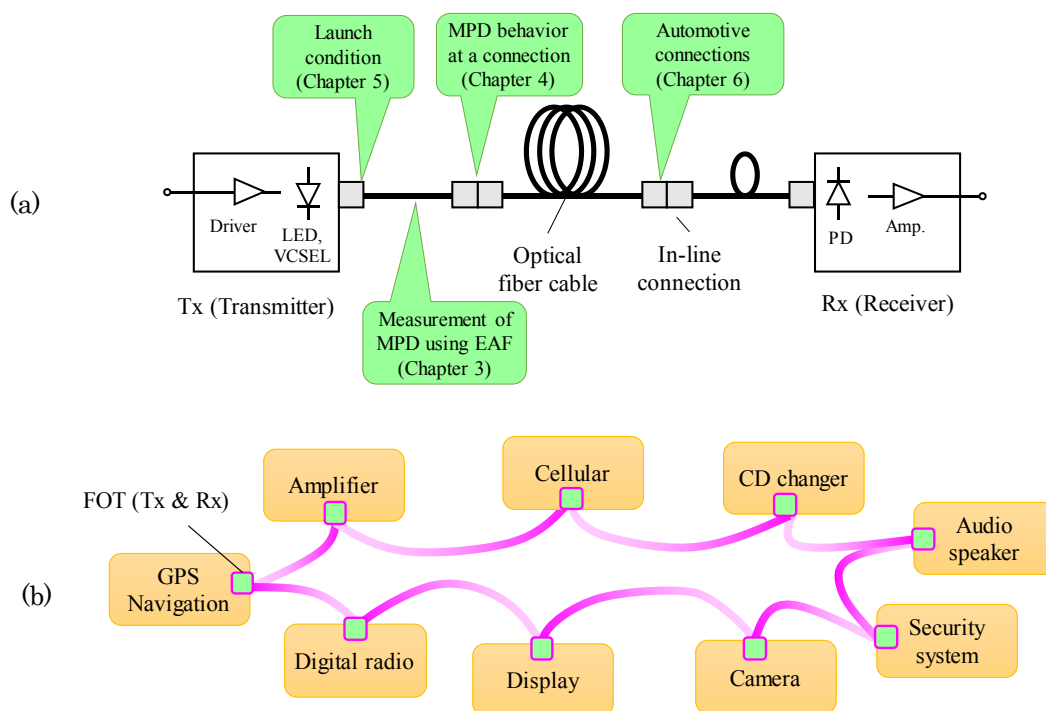


図 1-2 光データリンクの例: (a)光データリンク基本構成と各章の主題, (b)車載光データリンクの概略図

応する各章の主題を示す。送信機(Tx: Transmitter)と受信機(Rx: Receiver)を光コネクタ(Optical connector)付きの光ファイバケーブル(Optical fiber cable)により接続するものである。MOST では送信機と受信機が一組になっている光トランシーバ(FOT: Fiber optic transceiver)により 2 心双方向として使われ、例えば図 1-2(b)に示すようなインフォテインメント機器に FOT が組み込まれてネットワークを構成している。車載光通信に進む前に自動車の配線の課題について議論する。

自動車の電源供給及び信号を伝送する電気ケーブルの多くはピア・ツー・ピア接続になっている。高級車 1 台辺り全長約 4,000 m のケーブルが使われており、最近では 10 年前の 2 倍の増加との報告がある[6]。また、その重量は人ひとりに相当する約 60 kg と言われており、増加の一途をたどっている[7]。これは単に配線の複雑化の問題だけではなく、ワイヤーハーネスの重量増加は燃費低下につながり、省エネルギー化の流れに反する問題である。従来使われている車載ネットワークの最大伝送速度はミラー調整やドアロックなどボディ制御に使われる LIN (Local interconnect network)で 20 Kb/s、電子制御ユニット ECU (Electronic control unit)間の通信を行う CAN (Controller area network)で 1 Mb/s である[8]。最近、高解像度のディスプレイ機器などの搭載により高速・大容量化の要求があり、一部では車載 HDMI (High-definition multimedia interface)など数 Gb/s の伝送が使われている。そして高速化に伴う電磁ノイズの放射及び浸入、いわゆる電磁両立性(EMC: Electro-magnetic compatibility)の問題がよりクローズアップされるようになった。車載ネットワークはパワートレイン系、シャーシ系、安全系、インフォテインメント系などがあるが、それらはゲートウェイやスイッチなどで相互に連携し合いながら機能している[9]。複雑化するそれぞれの配線を次世代高速イーサネットによりネットワーク化する自動車内情報配線の開発が活発になっている[3]。図 1-3 に自動車内配線の概略図を示す。(a)は従来のワイヤーハーネスの配線である。このままでは電子機器の著しい増加に伴い更に配線重量が増し、配線が複雑化することが必至である。(b)は将来のネットワーク配線のモデルである。光ファイバによるバックボーン、そして電気及び光の枝線であるアクセス系が適材適所で使われる。先に触れた CAN や LIN などの車載ネットワークを導入しない場合を想定し、電気ケーブルの重量を見積もった研究では、ネットワーク導入により約

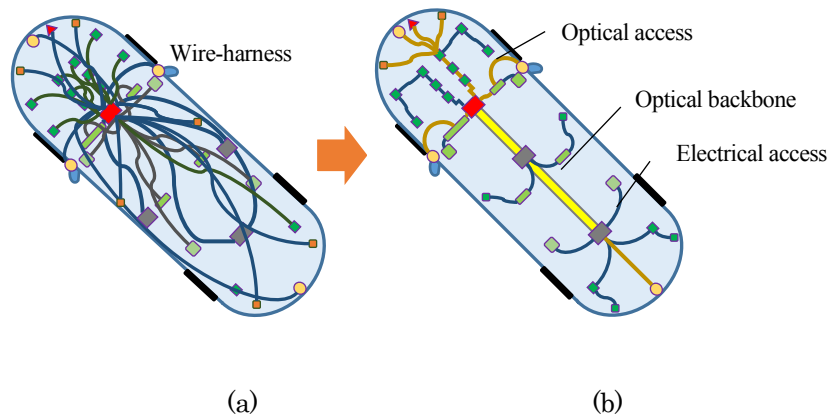


図 1-3 自動車内配線の概略図: (a)従来のワイヤーハーネス, (b)将来の車載ネットワーク

67%に圧縮できたとの報告がある[7]。今後、更に増え続ける電子機器配線の最適化のためには車載イーサネットによるワイヤーハーネスのネットワーク化は、配線のシンプル化及び軽量化のために切望される技術である[3]。

そして車載イーサネットは電線を伝送媒体にしたものに加えて、光ファイバを用いた車載光ギガビットイーサネットの標準化が始動した[10]。そもそも自動車内の光通信は日本がその創生を担い、1981年に日産自動車、1982年にトヨタ自動車、1986年に三菱自動車が機器のコントロールに採用している[11]。車載光ネットワークシステムは1998年にD2B (Domestic digital bus)がリリースされた。当時、伝送レート拡大への対応、かつ EMC 問題への対処が急務であった。伝送媒体にはコストに見合い、堅牢性に長けたコア/クラッド径が 980/1000 μm のステップインデックス型光ファイバ(SI-MMF: Step-index multimode fiber)であるプラスチック光ファイバ(POF: Plastic optical fiber)が採用され、最大伝送速度 5.6 Mb/s の光インフォテイメントネットワークを構成した[3]。1990年後半にカセットテープなどアナログ音源から CD (Compact disk)などデジタルメディアへの移行、カーナビゲーションシステム、自動車電話などを含めた統合型 AV (Audio visual) システムへの要求が高まった。そして 2001年に MOST がリリースされ[12], [13]、欧州を中心にインフォテイメントシステムに使用され発展してきた。MOST は当初 25 Mb/s の伝送速度のシステムから始まり、2012年には 150 Mb/s の高速化を実現した[3], [14]。MOST は2001年のリリースから15年の間に180車種に1.5億個以上のデバイスが使われた[15]。

従って POF を用いた光通信は自動車において長い間培われてきた技術といえる。この MOST で採用している POF、光源の発光ダイオード(LED: Laser emitting diode)及び受光素子 PD (Photo diode)を用い、多値通信が可能な通信用半導体を適用することで 1 Gb/s の高速伝送が可能となり[16]、これが車載光ギガビットイーサネット開発のトリガーとなった[17]。加えて SI-MMF であるコア径 200 μm の HPCF (Hard polymer cladding fiber) を用いた車載用光データリンクの検討や[18]、自動車用の 1 Gb/s 伝送の仕様書が IDB 1394 として 2011 年に発行されている[19]。更に一本の POF を用いたユニークな車載双方向光通信の報告もある[20]。

日本において、経済産業省支援プロジェクト「高速車載 LAN 用光伝送サブシステムの試験方法に関する標準化」[21]–[23]と「大口径マルチモード光ファイバ・コネクタ及びその通信性能に関する国際標準化・普及基盤構築」(呼称 O-GEAR: Optical Gigabit Ethernet for Automotive aRchitecture) [24], [25]が牽引し、将来の自動運転を視野に入れた車載光ネットワークで必要な国際規格づくりをリードしている[26], [27]。広く光ビーム解析で使われている 2 次元遠視野像(FFP: Far field pattern)の画像解析によりエンサークルドアンギュラーフラックス(EAF: Encircled angular flux)を導くコンセプトが高橋らにより提案された[28]。EAF を用いることで SI-MMF の伝搬モード分布(MPD: Modal power distribution)の規定及び測定光源のテンプレートが数値で定量化できる。この数値化により産業界では仕様書や図面への記載が可能となるため大きな発展が期待できる。著者は EAF 測定法の測定システムの開発、同システムの測定トレランスや測定再現性などの検証及び接続部品で発生する現象について EAF 測定法を用いて研究を進めてきた。







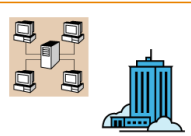
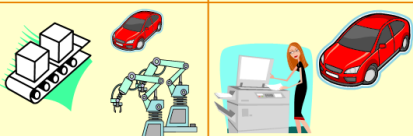
更に研究のみならず著者は国際電気標準会議 (IEC: International Electrotechnical Commission)において IEC TC 86/SC 86B (Fibre optic interconnecting devices and passive components)のエキスパートとして活動し、WG4 (Standard tests and measurement methods for fibre optic interconnecting devices and passive components)で EAF 測定法に関する規格文書のプロジェクトリーダーとなり、多くの協力者の支援により国際規格 IEC 61300-3-53 Ed 1.0 の発行に貢献した[29]。また 2016 年 7 月発行の改訂版 IEC 61300-1 Ed 4.0 において、コア径 200 μm かつ開口数 NA (Numerical aperture)

0.37 の SI-MMF、IEC カテゴリ A3e ファイバの光接続部品測定のための測定用光源の EAF テンプレートの開発及び文書審議に貢献している[30]。その他、米国の電気電子工学技術の学会(IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers)傘下の規格部門である IEEE 802.3 Ethernet working group の voting member として IEEE 802.3bv GEPOF (Gigabit Ethernet over POF)の規格化を推進し、2017 年 3 月の規格発行に寄与した[31]。また国際標準化機構 (ISO: International Organization for Standardization)において ISO TC 22/SC 31/WG 3 (Road vehicles, data communication, in-vehicle networks)、同 SC 32/WG 10 (Road vehicles, electrical and electronic components and general system aspects, optical components - Test methods and requirements)のエキスパートとして車載光ギガビットイーサネットの規格の審議を行っている。これら IEEE 及び ISO の規格には、IEC で国際規格となった EAF 測定法や EAF プロファイルを用いた規定が含まれている。また、適用領域が広い規定であるため光導波路や他の光ファイバの測定などの応用分野も広がっている。

1.2 ステップインデックス型マルチモード光ファイバ(SI-MMF)実用上の課題

表 1-1 に光ファイバの種類と代表的な性能を示す。光ファイバは伝搬するモードがひとつか複数かでシングルモード光ファイバ(SMF: Single mode fiber)とマルチモード光ファイバ(MMF: Multimode fiber)に大別できる。前者は主に基幹通信系や海底ケーブルなど長距離、大容量の通信に用いられている。後者はコアの屈折率分布によりグレーデッドインデックス型マルチモード光ファイバ(GI-MMF: Graded-index type multimode fiber) と SI-MMF に分けられ、前者は構内情報配線やデータセンターのラック間の配線に良く用いられている。本研究の対象である SI-MMF は他の光ファイバに比べて減衰が大きく帯域が狭いが、設計の公差を比較的大きくできるためプラスチックや金属などの比較的安価なフェルール部材が使われる。そのため自動車[14]、機器内配線、産業機器、医療、鉄道など短距離であるが耐環境性かつ低コストを要する用途に使われている。一方、同光ファイバは伝搬モード依存性が強いため[32]、光ファイバ中を伝搬する光の状態が変われば部品やシステムの性能が変わることがある。また同じ部品を測定しても測定に用いる光源の状態

表 1-1 光ファイバの種類と代表的な性能及び用途

Type of fiber		 Single mode	 Multimode	
Index profile			 Graded Index	 Step Index
Name of fiber		Single mode fiber (SMF)	Graded index fiber (GI-50, GI-62.5)	Hard plastic cladding fiber (HPCF) / Plastic optical fiber (POF)
Core/cladding diameters (μm)		9.5/125	50/125, 62.5/125	200/230 / 980/1000
Fiber	Attenuation	0.0005 dB/m	0.003 dB/m	0.006 dB/m / 0.3 dB/m
	Bandwidth	~ 5 GHz·km	≥ 500 MHz·km	≥ 10 MHz·km / ~ 6 MHz·km
Connector	Tolerance	~ 0.0001 mm	~ 0.001 mm	~ 0.01 mm / ~ 0.1 mm
	Ferrule	Zirconia ceramics	Zirconia ceramics	Metal / Plastic
Application				
Definition of propagating modal power distribution		--	EF: Encircled Flux IEC 61280-1-4	EAF: Encircled Angular Flux IEC 61300-3-53

を管理しないと測定再現性が得られない。それ故、同光ファイバを用いたシステムのリンクパワーバジェットは余裕を持って仕様化され全ての変動を許容していた。そのために同光ファイバを接続すればリンクが完結するという極めてシンプルな使い方がされていた。しかしながら測定ばらつきが大きいということは部品メーカー及びその顧客ともに潜在的な問題を抱えることになる。例えば製造メーカーの出荷検査と顧客の受入れ検査においてデータにばらつきが大きい場合、品質問題に発展することもある。また光の状態により光部品の測定結果にばらつきが発生することは一部の専門家の間では知られていたが、残念ながら産業界に広く知られるには至っていない。そのため例えば光コネクタの測定ばらつきが発生した際、執拗に設計や製造の公差を抑えることを要求され、光源の適切化については後回しされたこともある。これは光源の状態による測定不確かさや[33]、測定ばらつきが発生する可能性の解説や学术论文が希少であったことに一因があると考えている。加えて同光ファイバを伝搬する光の状態、いわゆる伝搬モード分布を表記する手法が存在しなかったため議論が進展しなかったことも背景にある。

また同ファイバの接続に関する研究は 1980 年代までに[34]–[37]など多くの報告があり、光ファイバ全体の基礎を構築した。しかしながら 1980 年代前後から長距離・大容量伝送

を可能にする GI-MMF や SMF へと研究対象がシフトし[38]、それらの光ファイバの市場が急速に立ち上がった。そのため光部品の光導波路素子[39]–[43]、光コネクタ[44]及び周辺技術[45]も含めて研究開発の主流がそれら光ファイバや関連の材料技術[46]及び応用技術となった。

このような動向の中、著者は 2000 年前後に SI-MMF、特に POF の接続部品の研究に携わり、接続特性の解析やそれに基づいた低損失化の試みなどについて報告している[47]。加えて専門書の POF に関する接続について執筆する機会があった[48], [49]。このときまでに SMF や GI-MMF のアプリケーションにおいて理論と実験の結果が極めてよく合うことを経験していた[50]–[52]。しかしながら POF を用いた実験結果と専門書から引用する数式から得られる結果の整合性が低いという問題に気づいていた[47]。また、POF 関連では材料や構造の最適化を図り高速伝送に向けての取り組みが盛んであったが[53]、接続に関しては何れも幾何学的な解析が用いられ、伝搬モードを均一モード分布(Uniform (mode) distribution)や平衡モード分布(EMD: Equilibrium mode distribution)として解かれた先駆者の引用がその後も継続して用いられてきた[11], [53], [54]。更に光源に LED を用い長さ 10 m 程度のリンクシステムが通信できるという報告はあっても、観測される光学現象について議論されることは稀であった。また実際に発生する問題に対して明確に説明する学術的な論文や技術解説もなかったので混乱を生むことも度々あった。更にこれらの光ファイバは自動車のみならず、産業機器、航空、医療、鉄道など幅広い産業で使用されており、それらに携わる研究者や技術者はそれらの機器や周辺技術に長けているが必ずしも光ファイバの専門家でないという事情も混乱の背景にある。

1.3 本研究の目的

本研究では SI-MMF としてコア径 200 μm 、開口数 NA 0.37 の HPCF (A3e ファイバ, IEC 60793-2-30)及びコア径 980 μm 、NA 0.5 の POF (A4a.2 ファイバ, IEC 60793-2-40)の 2 種類の光ファイバの接続を対象とした。そして新しいアプローチとして接続における伝搬モード分布の振舞いについて自ら関与し国際規格へと導いた EAF を用いて解析する。また実際に使われる光源や光ファイバ長さを基本とし、実用に見合ったモデルによって実

験や議論を進める。その中でこれまで顕在化または潜在化していた問題を明らかにする。そして測定評価の結果を実用で使える形でまとめ、実用で使える新たなモデルを構築することを目的とする。これ以降、混同することがない場合においては SI-MMF を単に光ファイバとして議論を進め、更に同様に各章毎に対象とする光ファイバを明確に示す。

1.4 本論文の構成

第 2 章では、先ず光ファイバ接続の挿入損失及びその要因についてまとめ、その全体像を把握する。また光ファイバ接続に関して基礎特性の理解を深めるため幾何光学を用いて光ファイバへの光の入力条件と伝搬条件を導出する。加えて従来研究の代表的な接続特性の理論式を導き本研究の根源を踏まえる。以下、図 1-2(a)の吹き出しで記した光データリンクの課題が第 3 章から第 6 章の主題となる。

第 3 章では光ファイバの伝搬モード分布を規定する EAF について解説し、構築した EAF 測定システムの性能を初めて検証した。コア直径 200 μm の HPCF の EMD が得られる条件を見出し、以降の測定評価に EMD 光源として使用した。更に光ファイバの接続の伝搬モード分布の振舞いについて EAF を用いて初めて解析して本手法の有効性を示す。

第 4 章では光ファイバ接続において入力光の状態、いわゆるランチ条件(Launch condition)を変えてその振舞いについて測定評価を行った。ランチ条件としてガウシアンビーム、リングビーム、EMD 光を用いて接続の光軸垂直方向軸ずれ、光軸方向軸ずれについて伝搬モード分布及び挿入損失について調べた。また本章で解析した光ファイバ接続の結果と従来理論モデルを用いて比較解析を行い隔たりがあることを明確にした。

第 5 章では IEC 61300-1: 2016 で規定されたコア直径 200 μm の HPCF の接続部品測定用のランチ光源の検証を行った。しかし規格を満たしたランチ条件でも想定外の挿入損失となる規格適用外領域があることを発見した。これを解消する方法を検証し、また接続モデルを新たに考案し解析を行った。

第 6 章では実用が急がれる車載光ギガビットイーサネット実現に向けて接続に関する課題を明らかにし、接続における伝搬モード分布及び関連の周波数特性と挿入損失特性について評価検討を行った。自動車で使われる光コネクタについて他の産業の光コネクタとの

比較によりその違いを明らかにした。また既存の車載光コネクタの端面を解析し、コストを押さえた特性改善として屈折率媒質の適用について検討を行った。最後に同媒質を使い従来の車載光コネクタ付きケーブルを用いて4中継を含む15 mの伝送を行って伝送特性改善の可能性を示した。

第7章において本研究における成果と今後の課題をまとめる。

第2章 SI-MMF 接続の基礎特性

2.1 緒言

本章では、先ず光ファイバ接続の挿入損失及びその要因についてまとめ、接続において発生する損失の要因を予め把握する。次に光ファイバへの光の入射による伝搬条件を導出し光ファイバ中の光の伝搬についてまとめる。更に光ファイバ間の接続について代表的な従来理論を用いてその接続特性や主要なパラメータなどについて理解を深める。マクスウェルの方程式[55]より波動方程式[56], [57]及びモード分散方程式[58], [59]を SI-MMF 接続モデルとして解くこともあるが、実用上は先ず幾何光学を用いることがほとんどなので割愛する。

2.2 光ファイバ接続と損失

接続に存在する挿入損失は図 2-1 に示すように 4 つに大別できる[58]。第一に相対する光ファイバの構造パラメータの違い、いわゆる内的要因に起因する損失(Intrinsic loss)がある[58], [60]。これは図 2-2 に示したコア径、クラッド径、NA のミスマッチ及びコア非

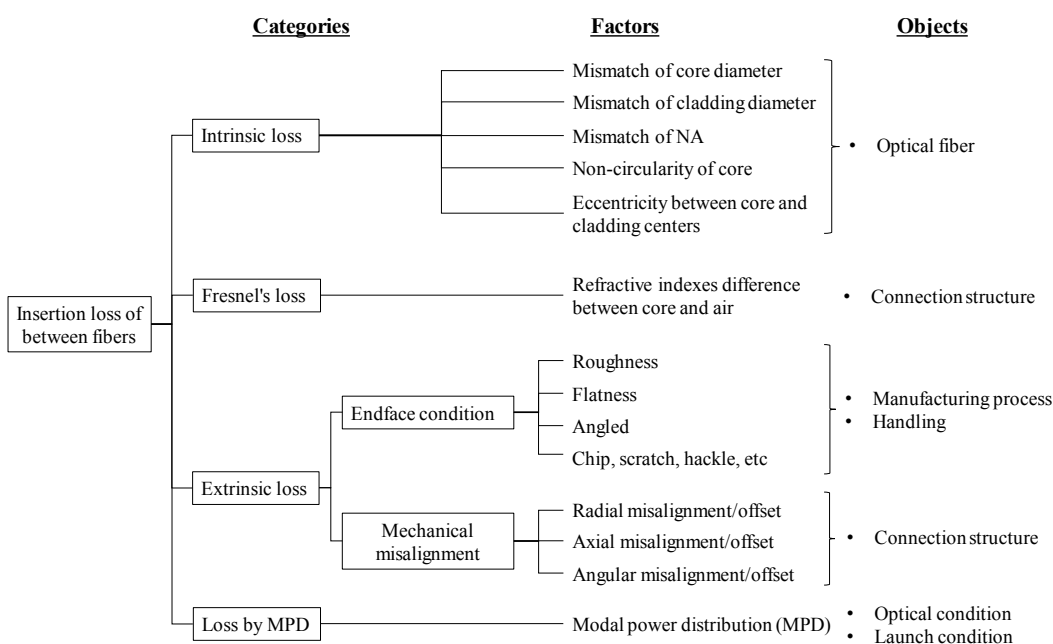


図 2-1 光ファイバの接続における損失及びその要因

円率、コア・クラッド偏心などに起因する。コア径のミスマッチ IL_{core} 、NA のミスマッチ IL_{NA} 、コア非円率 $IL_{non-cir}$ による挿入損失はそれぞれ次の式で求められる[58], [60]。ここで $a_{A_{core}}$ と $a_{B_{core}}$ は相対する光ファイバの半径、 NA_A と NA_B は同様に相対する光ファイバのNA、 a_L と a_S はコアの長径と短径である。

$$IL_{core} = -10 \log \left(\frac{2a_{B_{core}}}{2a_{A_{core}}} \right)^2 \quad (2.2-1)$$

$$IL_{NA} = -10 \log \left(\frac{NA_B}{NA_A} \right)^2 \quad (2.2-2)$$

$$IL_{non-cir} = -10 \log \left(\frac{a_S^2}{a_L a_S} \right) \quad (2.2-3)$$

第二に図 2-3 に示したコア-空気-コアの 2 箇所からの反射点から発生するフレネル損失がある[61]。SI-MMF は大口径のため他の光ファイバコネクタで用いられている Physical contact 技術 [62]を達成することが容易でない[47]。そのため接続においては必ずフレネル損失が発生する。光ファイバ端面が垂直な場合、コアと空気の屈折率をそれぞれ n_1 、 n_0 とするとひとつの接続で発生するフレネル損失 $IL_{fresnel}$ (dB)は次式で表される。

$$IL_{fresnel} = 2 \times \left(-10 \log \left(1 - \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \right) \right) \quad (2.2-4)$$

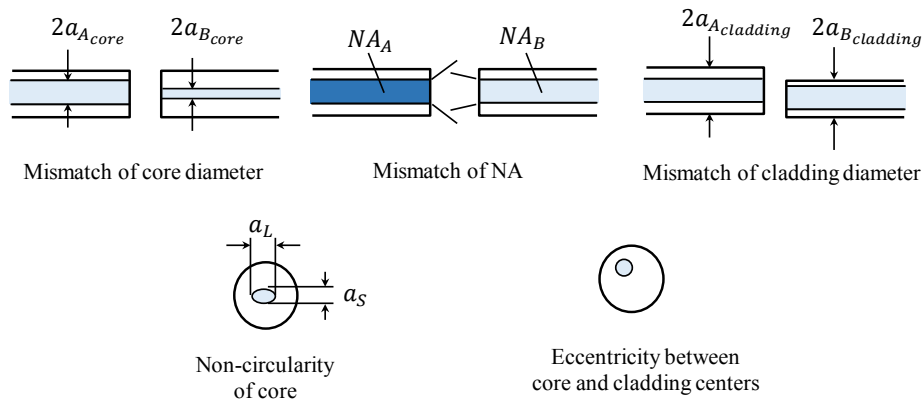


図 2-2 接続における構造パラメータに起因する損失要因

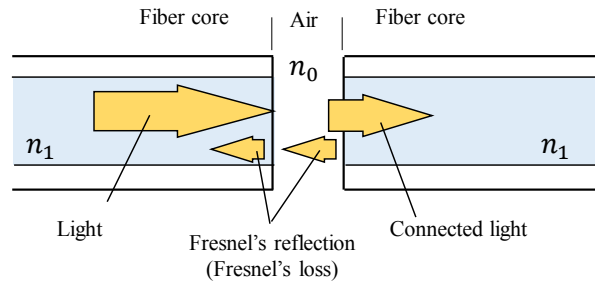


図 2-3 接続におけるフレネル損失

第三に光ファイバ端面形成やふたつの光ファイバ間の軸ずれ、いわゆる外的要因に起因する損失(Extrinsic loss)がある[58], [60]。さらに図 2-4 端面状態と図 2-5 構造的な軸ずれに分類できる。前者は加工プロセスにより表面粗さ、平坦度、角度及び欠けや傷などによるものである。欠けや傷は加工後の取り扱いでも容易に発生することがある[58]。構造的な軸ずれには光軸垂直方向軸ずれ、光軸方向軸ずれ、角度ずれがある[53]。SI-MMF の NA は大きいことから適切な部品を使用する限りにおいては角度ずれに起因する損失は極めて限定的である。

第四に伝搬する光の状態、いわゆる伝搬モード分布に起因する損失がある。同じ光コネクタであっても測定光の状態により測定結果が異なることがある。これまであまり議論されなかったが本稿の主な研究対象であり、接続における伝搬モード分布と光学特性の関係を明らかにする。



図 2-4 端面状態

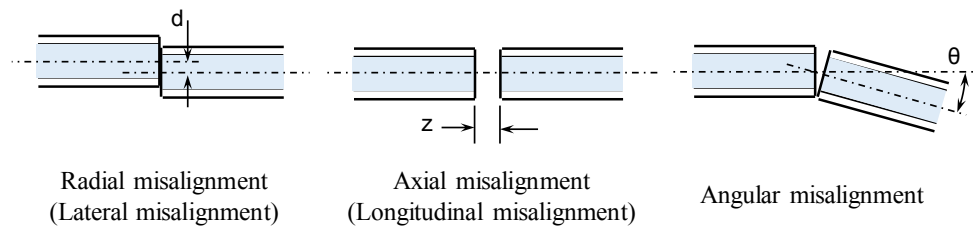


図 2-5 接続における構造的な軸ずれ

2.3 光ファイバの光の入射条件と伝搬条件

先ず光ファイバの光の入射条件と伝搬条件について議論を進める。本稿で対象とする光ファイバはステップインデックス型であり、ステップインデックス型光導波路と同様のモデルで解析できる[63]–[66]。図 2-6 に示す光ファイバのモデルで端面から入射する光線の導波条件を導く[67]。光ファイバ周辺の屈折率 n_0 、コアの屈折率 n_1 、最大受光角 θ_{max} 、光ファイバ内のコアとクラッド間の全反射角 θ_c を用いると端面からの入射光の伝搬についてスネルの法則を用いて次の式が導かれる[61], [68]。

$$n_0 \cdot \sin \theta_{max} = n_1 \cdot \sin \theta_c \quad (2.3-1)$$

ここでは、光ファイバ周辺の屈折率を空気とすると $n_0 = 1$ より次が導かれる。

$$\theta_{max} = \sin^{-1}(n_1 \cdot \sin \theta_c) \quad (2.3-2)$$

ここで比屈折率差

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (2.3-3)$$

を導入し、光ファイバ中の伝搬条件を求める。ここでクラッドの屈折率 n_2 を用いて光ファイバ内で全反射となり入射光が伝搬する条件は次式で表される。

$$\theta_c = \cos^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.3-4)$$

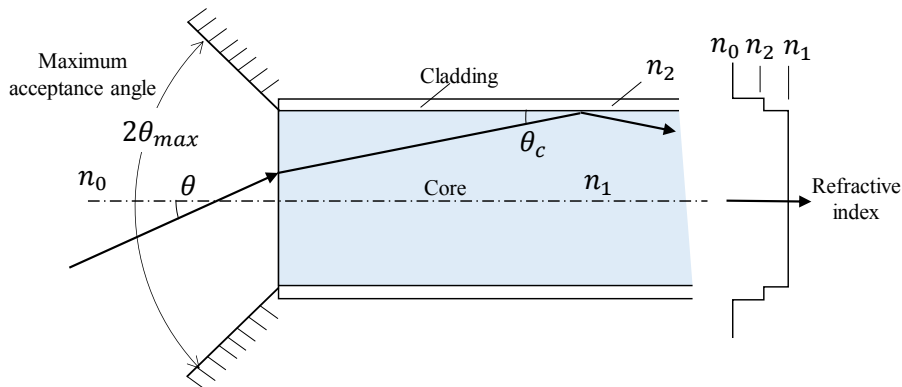


図 2-6 光ファイバの光の入射条件と伝搬条件

この式は三角関数より

$$\sin\theta_c = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} \quad (2.3-5)$$

が導かれ、式(2.3-3)を用いると伝搬条件は次式で表される。

$$\theta_c = \sin^{-1}\sqrt{2\Delta} \quad (2.3-6)$$

また、式(2.3-2)の受光角いわゆる受光条件は式(2.3-5)を用いると次式となる。

$$2\theta_{max} = 2 \cdot \sin^{-1}(n_1 \cdot \sin\theta_c) = 2 \cdot \sin^{-1}\left(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right) \quad (2.3-7)$$

そして導波の特性を代表するパラメータである開口数 NA は

$$NA \equiv n_1 \cdot \sin\theta_c = \sin\theta_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{2\Delta} \cdot n_1 \quad (2.3-8)$$

となる。また媒質の屈折率は伝搬する光の波長により異なる[69], [70]。いわゆる屈折率の波長分散があるため実用においては使用波長における屈折率を用いる。

2.4 従来理論モデルによる接続解析

広く用いられている従来理論モデルを用いて接続における挿入損失を求める関係式を導出する。入力側と受光側の光ファイバは同じ寸法及び構造パラメータとする。また入射側の光ファイバ端面は均一モード分布とすると、光軸垂直方向軸ずれは図 2-7 に示すように重ね合った光ファイバの面積比で求められる[34], [71]–[73]。ここで光ファイバコア半径 a 、中心の軸ずれ $2d$ とする。 O_1O_2 と O_1E がなす角は $\theta = \cos^{-1}(d/a)$ とすると扇形 O_1EF の面積 S_f は円 O_1 の面積 S の角度比 $2\theta/2\pi$ で求められるので、

$$S_f = \frac{2\theta}{2\pi} S = \frac{2\cos^{-1}\left(\frac{d}{a}\right)}{2\pi} \pi a^2 = a^2 \cos^{-1}\left(\frac{d}{a}\right) \quad (2.4-1)$$

となる。ここから三角形 O_1EF の面積 S_t を引くと円の一部の面積 S' が出る。

$$S' = S_f - S_t = a^2 \cos^{-1}\left(\frac{d}{a}\right) - d\sqrt{a^2 - d^2} \quad (2.4-2)$$

この円の一部の面積 S' の2倍が円の重ね合わせの部分

$$2S' = 2a^2 \cos^{-1}\left(\frac{d}{a}\right) - 2ad \sqrt{1 - \left(\frac{d}{a}\right)^2} \quad (2.4-3)$$

となる。これを円 O_1 の面積 S で割ると効率が導出される。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{2S'}{S} = \frac{2a^2 \cos^{-1}\left(\frac{d}{a}\right) - 2ad \sqrt{1 - \left(\frac{d}{a}\right)^2}}{\pi a^2} \\ &= \frac{2}{\pi} \left(\cos^{-1}\left(\frac{d}{a}\right) - \frac{d}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{a}\right)^2} \right) \end{aligned} \quad (2.4-4)$$

ここで、軸ずれ d が微小なら $d/a \approx 0$ となるので式(2.4-4)は

$$\begin{aligned} \eta &\approx \frac{2}{\pi} \left(\cos^{-1}(0) - \frac{d}{a} \sqrt{1 - (0)^2} \right) \\ &\approx 1 - \frac{2d}{\pi a} \end{aligned} \quad (2.4-5)$$

と簡略化できる[73]。さらに $IL = -10 \cdot \log(\eta)$ により挿入損失 IL (dB)が算出できる。

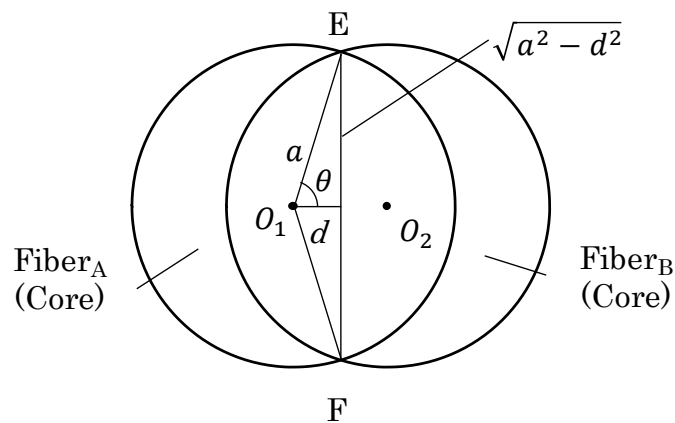


図 2-7 光ファイバ間の光軸垂直方向軸ずれ

次に光軸方向の軸ずれについて導出する。図 2-8 に示す光源内の任意の点光源Oから D に向かう光の X, Y, Z 軸の各成分は次式で表される[34]。

$$x = BC = z \cdot \tan\theta_x \triangleq zu \quad (2.4-6-a)$$

$$y = AB = z \cdot \tan\theta_y \triangleq zv \quad (2.4-6-b)$$

$$z = z \quad (2.4-6-c)$$

従って BD は式(2.4-6-a)と式(2.4-6-b)から、更に式(2.4-6-c)により OD が求められる。

$$BD = \sqrt{z^2u^2 + z^2v^2} = z\sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.4-7-a)$$

$$OD = \sqrt{z^2 + z^2(u^2 + v^2)} = z\sqrt{1 + u^2 + v^2} \quad (2.4-7-b)$$

放射光は中心軸に対して円錐状に角度対称であるとして三角形 OBD より

$$\cos\theta = \frac{1}{\sqrt{1 + u^2 + v^2}} \triangleq \frac{1}{\sqrt{1 + w^2}} \quad (2.4-8-a)$$

$$\tan\theta = \frac{z\sqrt{u^2 + v^2}}{z} = \sqrt{u^2 + v^2} \triangleq w \quad (2.4-8-b)$$

が導かれる。ここで $w^2 = u^2 + v^2$ としている。

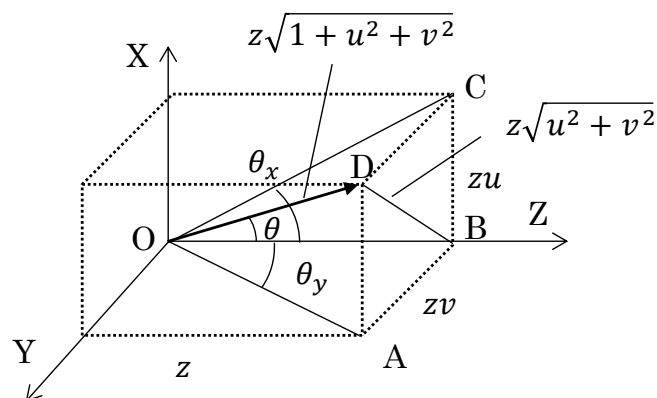


図 2-8 点光源 O から D への放射

ここで点光源0から放射される光の立体角を Ω 、放射表面の面積を S とすると全パワーは次式で表される。

$$P = \int_{\Omega} \int_S I \cos\theta d\Omega dS \quad (2.4-9)$$

図 2-9 (a)で点光源0から距離 $z = 1$ 、半径 w の微小幅 dw の環の面積は πdw^2 を微小とすると次式となる。

$$\begin{aligned} dS &= \pi(w + dw)^2 - \pi w^2 \\ &= 2\pi w dw + \pi dw^2 \\ &\cong 2\pi w dw \end{aligned} \quad (2.4-10)$$

しかし点光源0からは図 2-9 (b)のように角度 $d\theta$ 分だけ傾いて見えるので

$$dS = 2\pi w \cdot \cos\theta dw \quad (2.4-11)$$

となる。これを図 2-9 (c)の立体角で表し、同図(a)の環までの距離を考慮すると $r = \sqrt{1 + w^2}$ となり、また式(2.4-8-a)を用いると次式が導かれる。

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{2\pi w \cdot \cos\theta dw}{1 + w^2} = \frac{2\pi w dw}{(1 + w^2)^{3/2}} \quad (2.4-12)$$

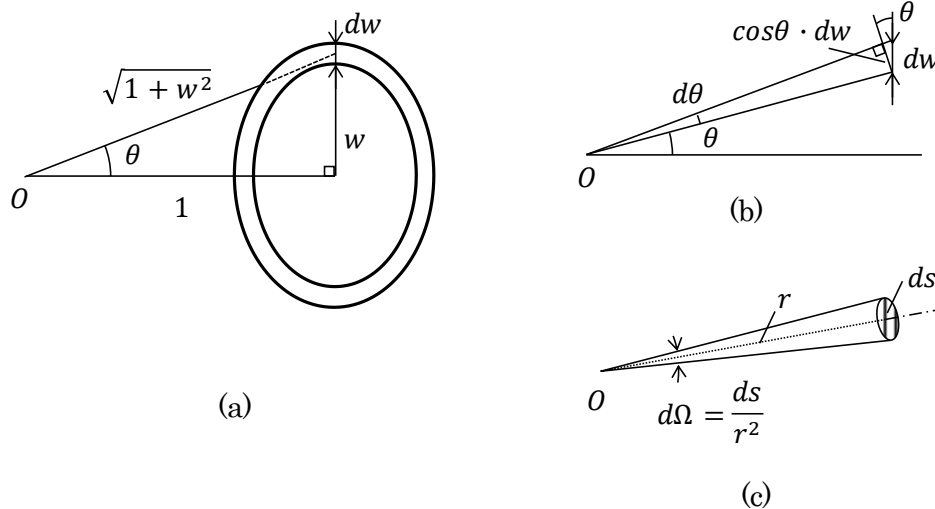


図 2-9 放射光の幾何学的描写. (a)環状領域の面積, (b)微小角度 $d\theta$ の放射光が微小面積 dw に到達する面積, (c)立体角と放射面の関係

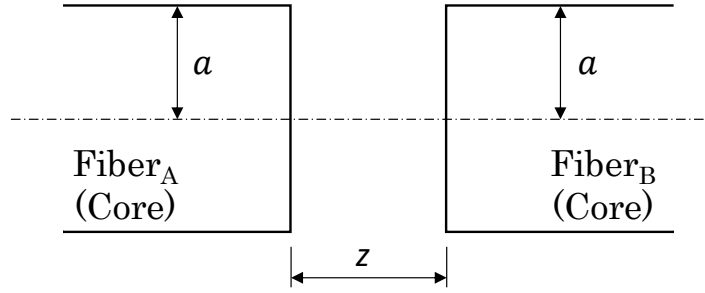


図 2-10 光ファイバ間の光軸方向軸ずれ

式(2.4-8-a)と式(2.4-12)を式(2.4-9)に代入して整理すると、

$$\begin{aligned}
 P &= \int_{\Omega} \int_S I \cos\theta d\Omega dS \\
 &= \int_w \int_S I \frac{1}{\sqrt{1+w^2}} \frac{2\pi w}{(1+w^2)^{3/2}} dw dS \\
 &= \int_w \int_S I \frac{2\pi w}{(1+w^2)^2} dw dS \tag{2.4-13}
 \end{aligned}$$

が得られ半径 w の関数として表される。さらに受光側の光ファイバとの関わりを解くと接続の特性が導かれる[60]。ここで位相空間における光線として扱うと、図 2-10 に示す位置関係で光線を発する側の Fiber_A の光線の密度は次式で表される。

$$F_1(x, y, u, v) = I p_a(\sqrt{x^2 + y^2}) p_T(w) \frac{2\pi w}{(1+w^2)^2} \tag{2.4-14}$$

ここで $p_{\beta}(\xi)$ は次式で表される窓関数である[34]。

$$p_{\beta}(\xi) = \begin{cases} 1, & \text{for } 0 \leq \xi \leq \beta \\ 0, & \text{other value of } \beta \end{cases} \tag{2.4-15}$$

図 2-8 から導出した式(2.4-6-a)と式(2.4-6-b)より出力側の Fiber_A 端面にある光線の位相空間における座標系 (x, y, u, v) とすると、受光側の Fiber_B 端面では座標系 $(x + uz, y + vz, u, v)$ となるので次式で表される。

$$\begin{aligned}
F_2(x, y, u, v) &= F_1(x + uz, y + vz, u, v) p_a(\sqrt{x^2 + y^2}) p_T(w) \\
&= 2\pi I p_a(\sqrt{x^2 + y^2}) p_a(\sqrt{(x + uz)^2 + (y + vz)^2}) p_T(w) \frac{w}{(1 + w^2)^2}
\end{aligned} \tag{2.4-16}$$

これを受光側の Fiber_Bの端面における光パワーは積分により導出される。

$$\begin{aligned}
P_2 &= 2\pi I \int_x \int_y \int_w p_a(\sqrt{x^2 + y^2}) p_a(\sqrt{(x + uz)^2 + (y + vz)^2}) \\
&\quad \times p_T(w) \frac{w}{(1 + w^2)^2} dx dy dw \\
&= 2\pi I \int_w \left\{ \int_x \int_y p_a(\sqrt{x^2 + y^2}) p_a(\sqrt{(x + uz)^2 + (y + vz)^2}) dx dy \right\} \\
&\quad \times p_T(w) \frac{w}{(1 + w^2)^2} dw
\end{aligned} \tag{2.4-17}$$

ここで大括弧{で括ったx, yの二重積分の部分は式(2.4-6-a)と式(2.4-6-b)より X 軸、Y 軸においてuz、vzの軸ずれなので次のように置き換えることができる。

$$\begin{aligned}
P_2 &= 2\pi I \int_w 2a^2 \left[\cos^{-1}\left(\frac{zw}{2a}\right) \right. \\
&\quad \left. - \frac{zw}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{zw}{2a}\right)^2} \right] p_a(zw) p_T(w) \frac{w}{(1 + w^2)^2} dw \\
&= 2\pi I \int_0^W 2a^2 \left[\cos^{-1}\left(\frac{zw}{2a}\right) - \frac{zw}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{zw}{2a}\right)^2} \right] \frac{w}{(1 + w^2)^2} dw
\end{aligned} \tag{2.4-18}$$

ここで

$$W \triangleq \min\left(\frac{2a}{z}, \frac{(NA)}{\sqrt{1 - (NA)^2}}\right) \tag{2.4-19}$$

である。式(2.4-18)で $z = 0$ が Fiber_A の出力 P_1 になり、このとき式(2.4-19)は $W = (NA)/\sqrt{1-(NA)^2}$ となるので有理関数の積分公式 $\int \frac{x}{(1+x^2)^2} dx = -1/(2(1+x^2))$ より、

$$\begin{aligned} P_1 &= 2\pi^2 a^2 I \int_0^{\frac{(NA)}{\sqrt{1-(NA)^2}}} \frac{w}{(1+w^2)^2} dw = 2\pi^2 a^2 I \left[\frac{-1}{2(1+w^2)} \right]_0^{\frac{(NA)}{\sqrt{1-(NA)^2}}} \\ &= \pi^2 a^2 I (NA)^2 \end{aligned} \quad (2.4-20)$$

が求められる。ここで、式(2.4-18)を式(2.4-20)で割ると X 軸ずれによる効率が求められ、

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{2\pi I \int_0^W 2a^2 \left[\cos^{-1}\left(\frac{zW}{2a}\right) - \frac{zW}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{zW}{2a}\right)^2} \right] \frac{w}{(1+w^2)^2} dw}{\pi^2 a^2 I (NA)^2} \\ &= \frac{4}{\pi(NA)^2} \int_0^W \left[\cos^{-1}\left(\frac{zW}{2a}\right) - \frac{zW}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{zW}{2a}\right)^2} \right] \frac{w}{(1+w^2)^2} dw \end{aligned} \quad (2.4-21)$$

Z 軸ずれにおいても $IL = -10 \cdot \log(\eta)$ で接続部の挿入損失 IL (dB)が算出できる。式(2.4-21)で $z/a \ll 1$ とすると漸近線を求められ軸ずれの小さい範囲は次式で表される。

$$\eta \approx 1 - \frac{z}{a} \frac{2}{\pi(NA)^2} \left[\sin^{-1}(NA) - (NA)\sqrt{1-(NA)^2} \right] \quad (2.4-22)$$

また、入力ファイバからの出力光、いわゆるランチ光源を EMD としたとき、光ファイバの接続を次のように表せる[34]。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{2\mu}{\pi N^2 J_1(\mu)} \int_{w=0}^W J_0\left(\frac{\mu}{N} \frac{w}{\sqrt{1+w^2}}\right) \left[\cos^{-1}\left(\frac{\zeta w}{2}\right) \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{\zeta w}{2}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\zeta w}{2}\right)^2} \right] \frac{w}{(1+w^2)^2} dw \end{aligned} \quad (2.4-23)$$

J_0 と J_1 は第1種のゼロ次ベッセル関数、同1次ベッセル関数である。 $\mu = 2.405$ は J_0 の第1根、 N は光軸を通る1次元の開口数、 $\zeta \triangleq (z/a)$ は光ファイバの間隔を同半径で規格化した値、 $w \triangleq \tan\theta$ は光線の角度成分で決まる変数である。 ζ が小さい値のとき次式で表される[34]。

$$\eta \approx 1 - \alpha \zeta \quad (2.4-24)$$

ここで

$$\alpha \triangleq -\lim_{\zeta \downarrow 0} \frac{d\eta}{d\zeta} \quad (2.4-25)$$

とすると次の式が求められる。

$$\alpha = \frac{2\mu}{\pi N^2 J_1(\mu)} \int_{w=0}^T J_0\left(\frac{\mu}{N} \frac{w}{\sqrt{1+w^2}}\right) \frac{w^2}{(1+w^2)^2} dw \quad (2.4-26)$$

N が小さな値なら式(2.3-24)は次のように簡略化できる。ここで $\zeta < 1$ 、 $N \ll 1$ のとき次式で表される[34]。

$$\eta \approx 1 - 0.33N\zeta \quad (2.4-27)$$

ランチ光源側の光ファイバの光の状態が均一モード分布のときの X 軸、Z 軸ずれ特性は式(2.4-5)、式(2.4-22)でそれぞれ表される。また EMD をランチ光源にしたときの Z 軸ずれ特性は式(2.4-27)で表される。これらの式を用いて実測との差異について 4.4.4 章で議論する。

2.5 まとめ

本章では、光ファイバ接続の挿入損失の原因についてまとめ、研究の対象を明らかにした。また、光ファイバへの入射光の伝搬条件について反射と屈折の関係から導出した。更に幾何光学による接続解析について光軸垂直方向軸ずれ、光軸方向軸ずれについて従来の理論式を導出した。

第3章 伝搬モード評価システムの開発と検証

3.1 緒言

前章で議論した従来研究は理論が先行し、測定評価からの検証の報告は必ずしも十分ではない。本章では測定評価を重視し、新しい伝搬モード分布の測定法の構築及び接続における伝搬モード分布の評価への適用を検討した。SI-MMF からの出力光の FFP 画像より求められる EAF、開発した f θ 光学系を用いた EAF 測定システムについて解説する。更に EAF 測定システムの測定トレランス、測定再現性について詳細に調べ、被測定対象(DUT: Device under test)であるコア径 200 μm の HPCF への適用において十分な性能を有することを明らかにした。そして同測定法を接続部品における伝搬モード分布の解析に初めて適用し、光軸方向軸ずれにおける挿入損失と伝搬モード分布の変化の関係を初めて示した。

3.2 エンサークルドアンギュラーフラックス (EAF)

3.2.1 EAF 測定法

SI-MMF の伝搬モードの分布を規定する EAF は、GI-MMF の伝搬モード分布の研究 [74]から国際規格として規定された EF (Encircled flux) [75]と同様のアプローチで導くことができる。図 3-1 に示すように光ファイバからの出力光をフランフォーファー (Fraunhofer)回折が得られる条件($d \gg a^2/\lambda$)の距離にあるスクリーンに投影された 2 次元

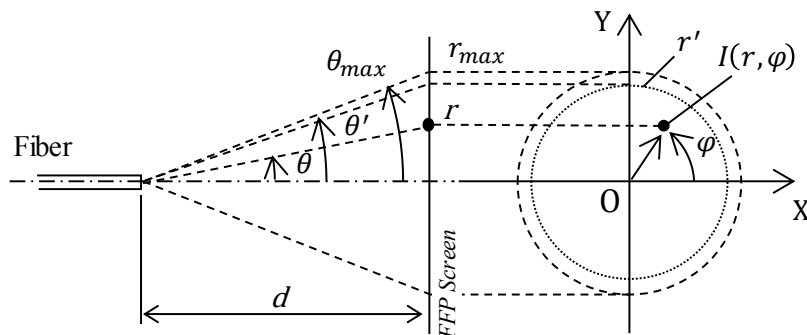


図 3-1 光ファイバ出力光の FFP スクリーンへの投影と EAF 解析

FFP 像の解析により得られる[76]。ここで、 a は光ファイバのコア半径、 λ は被測定光の波長である。一般的に EF は直径方向の光強度分布が全軸で対称であるとして 1 次元の解析 [77]を行っているが、2 次元の EF は極座標表示で次式となる[78]。

$$EF(r') = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{r'} I(r, \varphi) r dr d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_{max}} I(r, \varphi) r dr d\varphi} \quad (3.2-1)$$

ここで、 r_{max} は最大解析画像半径、 r' は任意の半径、 $I(r, \varphi)$ は座標 (r, φ) における光強度 ($1/m^2$)である[78]。光ファイバの端面の近視野像(NFP: Near field pattern)から得られた式(3.2-1)を光ファイバ出射光の FFP に置き換えて EAF の式を導く。光ファイバと FFP スクリーンの距離を d 、放射角度を θ とすると次が得られる。

$$r = d \cdot \tan(\theta) \quad (3.2-2)$$

光ファイバからの放射角度 θ とスクリーン上の極座標位置 φ は独立であることから次の関係を導くことができる。

$$r \cdot dr = \frac{d^2 \cdot \sin(\theta)}{\cos^3(\theta)} d\theta \quad (3.2-3)$$

これを式(3.2-1)に代入し整理することで EAF の式として扱うことができる。

$$EAF(\theta') = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta'} I(\theta, \varphi) \frac{\sin(\theta)}{\cos^3(\theta)} d\theta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{max}} I(\theta, \varphi) \frac{\sin(\theta)}{\cos^3(\theta)} d\theta d\varphi} \quad (3.2-4)$$

式(3.2-1)で示された光ファイバ半径方向の位置情報 r が式(3.2-4)では光ファイバ出射光からの放射角度 θ となっている。

3.2.2 Far field pattern (FFP) 画像取得法

FFP の画像取得には f θ レンズ光学システムを用いた f θ 方式[79]とフランフォーファー条件を満足する領域において直接画像を取得する直接方式[80]の 2 つの方式が国際規格となっている[29]。f θ 方式は図 3-2(a)に示すよう FFP 測定装置を用い、光学系を通してイメージセンサ(Image sensor)に FFP 像を結像させて計測する[81]。FFP 測定装置の内部には f θ レンズ光学システムがあり、この光学系に対し角度成分 θ を持った入射光が焦点位置 f で

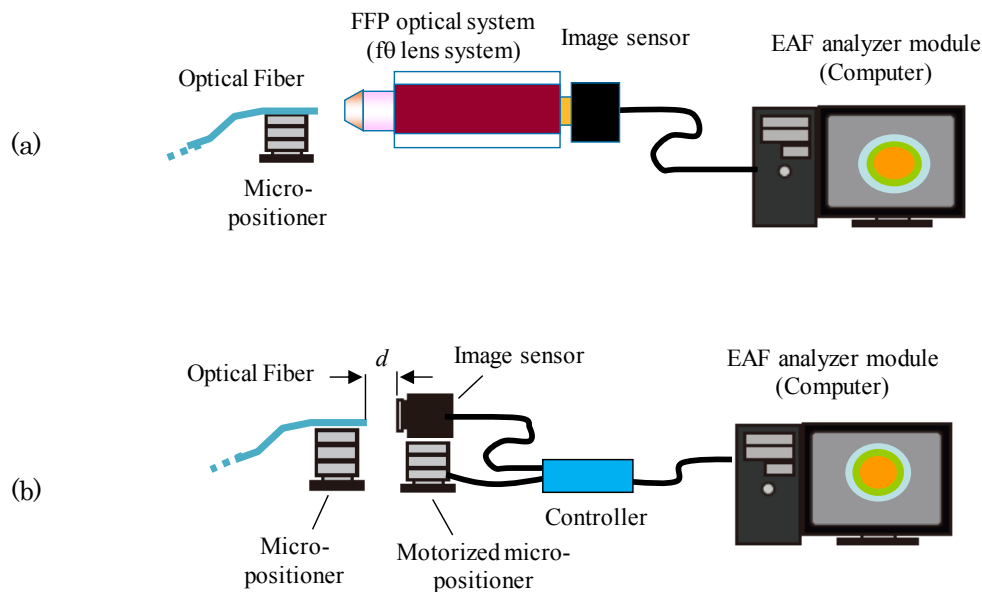


図 3-2 EAF 測定システム: (a) $f\theta$ 方式, (b)直接方式

高さ h に変換され、その関係は $h = f \times \theta$ で表される[79]。 $f\theta$ 方式は光学系によりフランフォーファー回折の条件を満たすことができるため測定系を比較的小型にできる特徴がある。一方、直接方式は図 3-2 (b)に示すように被測定光ファイバの出射端面からイメージセンサの位置関係を先のフランフォーファー回折の条件を満たす距離を保たなくてはならない。またイメージセンサに代えて光ファイバや積分球による計測も直接方式には含まれている。直接方式は FFP 測定システムを用いることなく構成できる。しかし被測定光ファイバのコア直径が $200 \mu\text{m}$ の A3e ファイバは数十 cm、 $980 \mu\text{m}$ の POF は数 m 以上の距離 d を離してイメージセンサを配置する必要がある。そのため全 FFP 画像情報を取得するには微動ステージ(Micro-positioner)の稼動範囲が距離 d に比例して大きくなるため装置が大掛かりになる。また複数画像の合成、迷光処理、測定安定性、球面補正、イメージセンサの入射角度依存性など課題が多い。そのため当初 $f\theta$ 方式と直接方式の結果に差異があった[80]。しかし上記課題を解消していくことでその差は解消されることが分かってきた。本研究では A3e ファイバ及び A4a.2 ファイバで適用できる $f\theta$ 方式[79]を採用した。

3.3 EAF 測定システムの構築と検証

3.3.1 EAF 測定システムの構築

図 3-3 に新たに構築した $f\theta$ 方式を用いた EAF 測定システムの(a)写真及び(b)概略図を示す。インコヒーレント光源である波長 850 nm、半値幅 50 nm のスーパールミネッセントダイオード安定化光源(SLD: Super luminescent diode, Synos LSS002/850)を測定用光源として用い、同光源からの出力光をモード選択励振光学システム(Launch beamforming system, Synos M-Scope Type-GR)の入力ポートへ接続した。同システムからの出力光は DUT である光ファイバへ入力する。光ファイバ(OFS HCP-M0200T)は 1.3 章で示した IEC カテゴリ A3e ファイバ(IEC 60793-2-30)である。光ファイバからの出力光は FFP 光

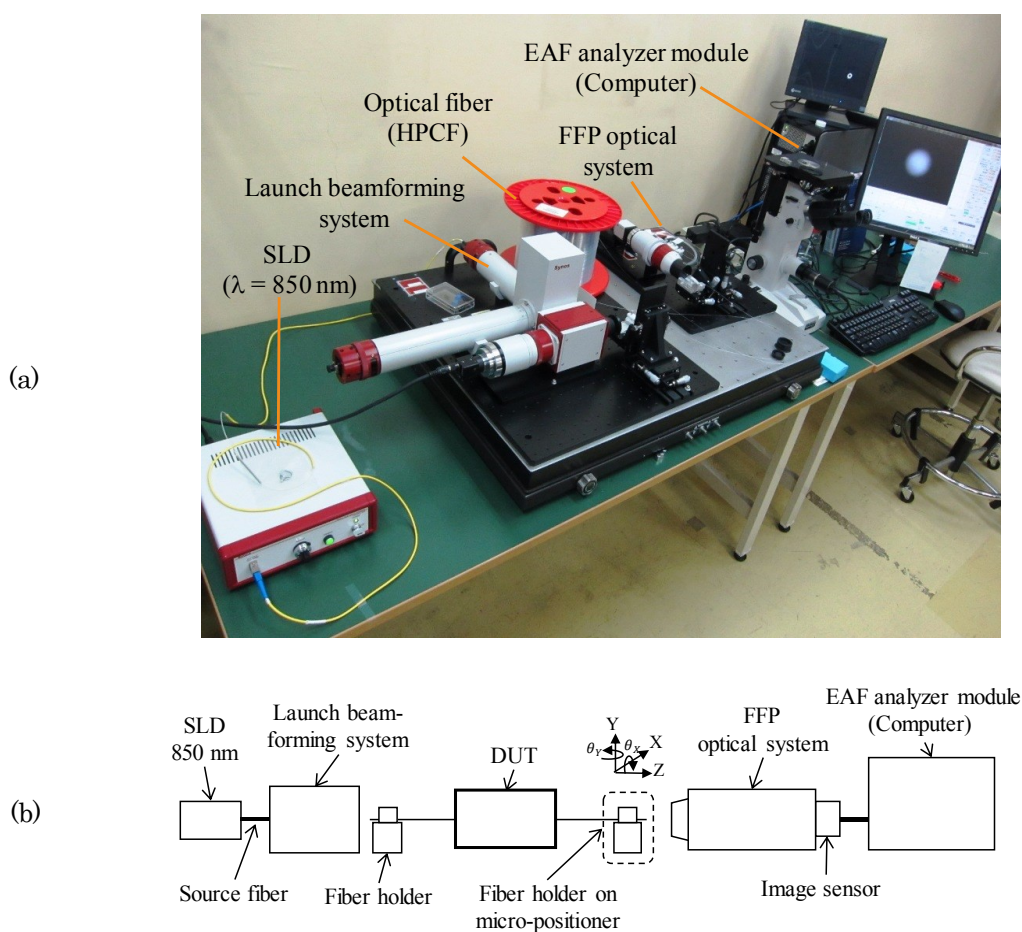


図 3-3 EAF 測定システム: (a)写真, (b)概略図

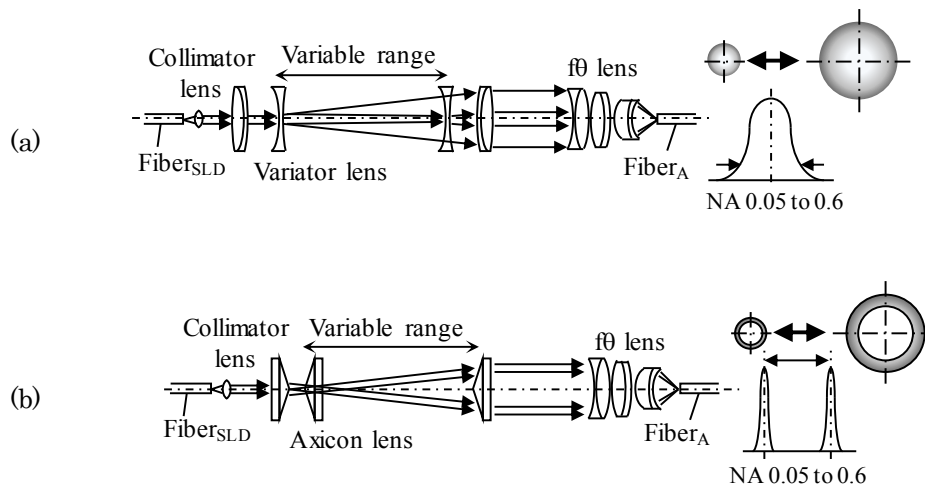


図 3-4 モード選択励振光学システム: (a)ガウシアンビームポート, (b)リングビームポート

学システム(Synos M-Scope Type-F)とイメージセンサにより FFP 像を取得する。取得した画像はコンピュータの EAF 解析モジュールにより解析される[79]。

モード選択励振光学システムは図 3-4 に示すようにガウシアンビームを成形できる(a)ガウシアンビームポート(Gaussian beamforming port)と、限定的に高次モードを発生することができる(b)リングビームポート(Ring beamforming port)がある。何れも予め設定した目盛に合わせることで内部にあるズーム光学系の位置が決まり、0.05 から 0.6 の任意の NA のビームを得ることができる。例えば光ファイバの光源として良く使われる面発光レーザ(VCSEL: Vertical-cavity surface-emitting laser)や LED の代表 NA 値である 0.2 や 0.4 のビームを容易に成形することができる。またリングビームのリング幅は入力アパーチャ径を可変することによりリング NA 幅で 0.025、0.05、0.1 に可変することができる。本研究では NA 幅が最も細くなる 0.025 を用いた。

被測定光ファイバからの出力光は図 3-3(a)のコンピュータのライブモニタでイメージセンサの中心に結像するよう位置を決める。次に光ファイバからの被測定光の FFP 像を取得し、コンピュータで解析を行う。解析は先ず取得した FFP 像から事前に測定した入力光が無い状態で取得した画像を差し引き、イメージセンサの暗電流補正を行う。次に図 3-5(a)に示すようにイメージセンサが持つ基準から、被測定 FFP 像の光学重心へ式(3.3-1)により座標変換を行う。

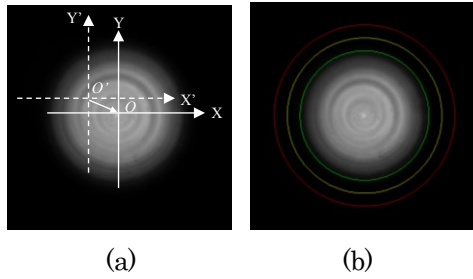


図 3-5 コンピュータ画面の FFP 像:
(a)基準を光学重心へ変換, (b)解析領域

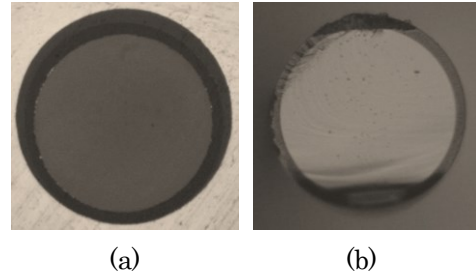


図 3-6 光ファイバ端面処理: (a)金属フェルルール研磨端面, (b)クリーブ端面

$$\begin{aligned}
 O(x = 0, y = 0) \\
 &= O'(x' = 0, y' = 0) \\
 &= \left(\frac{\sum_{x'} x' \sum_{y'} I(x', y')}{\sum_{x'} \sum_{y'} I(x', y')}, \frac{\sum_{x'} y' \sum_{y'} I(x', y')}{\sum_{x'} \sum_{y'} I(x', y')} \right)
 \end{aligned} \tag{3.3-1}$$

ここで O' は x - y 座標系で示した FFP 光学システムとイメージセンサが持つ初期の座標 (x', y') 、 O は FFP 像の光学重心座標 (x, y) 、 $I(x', y')$ は座標 (x', y') における光強度である。FFP 像は規格化された最大光強度の 5%の 1.2 倍の領域を解析領域とした。これは被測定光をガウシアンビームした場合、最大光強度の 1%をカバーすることになる[79]。

図 3-5(b)にコンピュータ画像上の解析画像を示す。一番内側の緑色の円は最大光強度の 5%の領域、次の黄色の円は最大光強度の 5%の範囲を 1.2 倍した領域である。一番外の赤色の円は最大光強度の 5%の 1.4 倍の領域で最大光強度の 0.3%をカバーし、最大解析範囲とした。この赤色の円の外側のデータは解析から除かれる。本稿で A3e ファイバを DUT とした解析はこの条件を用いている。取得した画像はコンピュータにより式(3.2-4)を用いて EAF 値が求められる[79]。

3.3.2 EAF 測定システムの検証

(1) 光ファイバ端面の加工

測定で使用した光ファイバは両端を金属フェルルールにエポキシ接着剤で接着固定し、フェルルール端面をマニュアル研磨により仕上げた。まず#2000 の研磨シートにより先端の光ファイバのエッジを除去した。次に平面かつ平坦なガラス板上に 3 μm アルミナ研磨フィ

ルムを乗せ、フェルール端面が研磨フィルムに垂直に接触する治具を用いた。水を少し垂らした研磨フィルム面に8字を描きながら僅かに移動させて研磨を行った。最後に仕上げとして $1\ \mu\text{m}$ の同種フィルムを用いて平面研磨を行い図 3-6(a)の端面を得た。更に端面状態の違いによる EAF 値及びばらつきを比較検討するため市販の光ファイバクリーブを用いてクリーブを行った。図 3-6(b)に示すように切断痕(Score mark)、ミスト(Mist)、ロールオフ(Roll-off)など典型的なクリーブ面状態が得られている[45], [82]。実際にこの種の光ファイバは研磨加工に加えてクリーブ加工を施すこともあるので両方の処理面を用いて評価することになる。

(2) 長さ 12 m の光ファイバの伝搬モード分布

図 3-3 の EAF 測定システムでモード選択励振光学システムのガウシアンビームポート(図 3-4 (a))を用いて、長さ 12 m の光ファイバを DUT として評価を行った。ガウシアンビームポートの NA を 0.05 から 0.6 にそれぞれ設定したときの FFP 像を図 3-7 に示す。

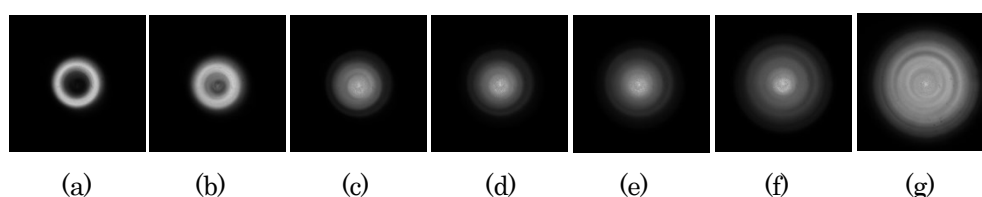


図 3-7 長さ 12 m の A3e ファイバ出力光の FFP 像。モード選択励振光学システムのガウシアンビームポート NA: (a) 0.05, (b) 0.1, (c) 0.2, (d) 0.3, (e) 0.4, (f) 0.5, (g) 0.6

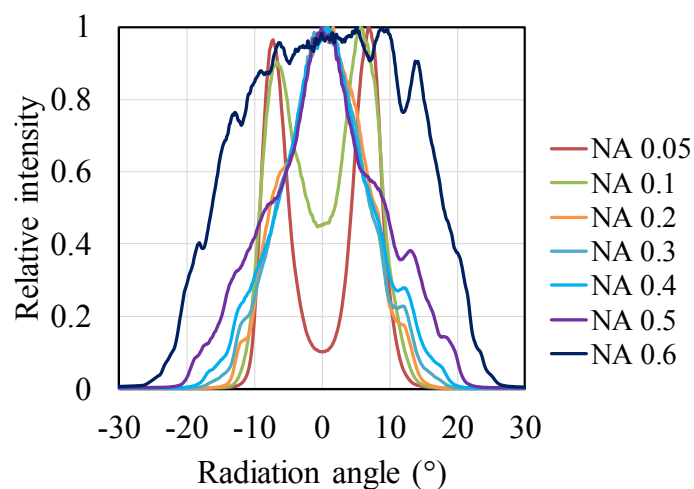


図 3-8 長さ 12 m の A3e ファイバの出力光の 1 次元 FFP プロファイル

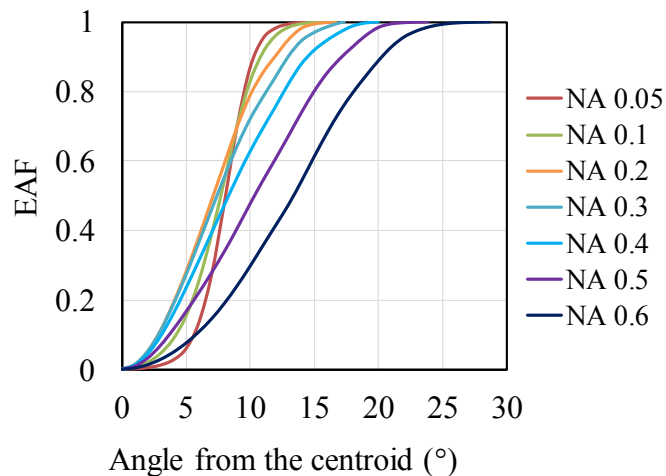


図 3-9 長さ 12 m の A3e ファイバの出力光の EAF プロファイル

入射ビーム NA が違えば異なる FFP 像が得られることが分かる。図 3-8 に図 3-7 の 2 次元 FFP 像の各 X 軸から求めた 1 次元 FFP プロファイルを示す。従来このプロファイルの 50%幅や 5%幅の値を代表値として使用した。例えば入力ビーム NA 0.4 のプロファイルではそれぞれ 14.3°及び 34.5°である。しかしながら全体像の把握は容易ではなかった。

図 3-7 の FFP 像から 3.2.1 章で示した手順により図 3-9 に示す EAF プロファイルが得られる。同様に入射ビーム NA0.4 の結果は 5%, 50%, 95% の EAF 値として 4.3°, 8.4°, 16.2° がそれぞれ得られた。また図 3-7(a) の NA0.05 では中心部分に光が無く、図 3-9 でも横軸の角度 0°付近では EAF はゼロに近い。しかし 5°を越えると急激に立ち上がることが表されている。また 10°より高い角度でそれぞれの NA に順じて 1 へ漸近していくことが分かる。このように EAF プロファイルは FFP 像の変化に対して一義的な対応が示される。

(3) 平衡モード分布

十分に長い距離の光ファイバを伝搬すると光ファイバのパラメータで決まる EMD になる[32]。EMD は光ファイバの入射条件や光ファイバ状態に依存しないため測定再現性に優れている。そのため光部品の測定用光源の分布として検討されている[83]。図 3-3 の EAF 測定システムを用いて DUT として 1 m から 3000 m の光ファイバを測定した。ここで図 3-4(a)のガウシアンビームポートを用いて NA 0.05 のガウシアンビームによる低次モードの励振、また同 (b)のリングビームポートから光ファイバの受光 NA の上限に近

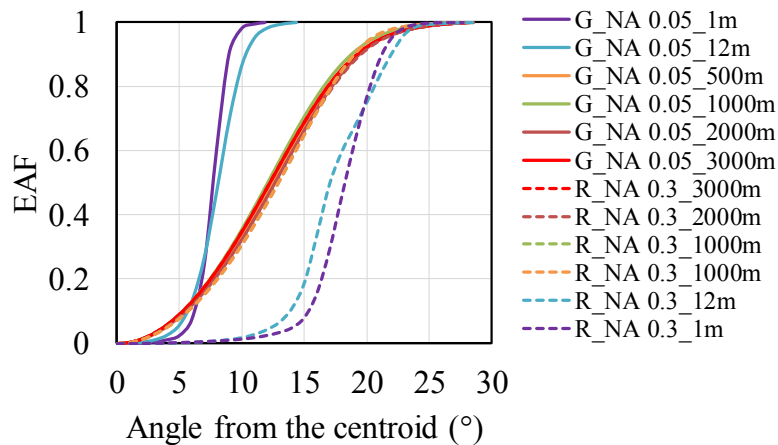


図 3-10 A3e ファイバの励振条件及びファイバ長さとの伝搬モード分布の関係

い NA 0.3 のリングビームによる高次モードの励振をした。その測定結果を図 3-10 に示す。凡例には G : ガウシアンビーム、R : リングビーム、入射ビーム NA、そして光ファイバ長さを示している。この実験により光ファイバは長さ 2000 m またはそれ以上の長さで励振条件に依らずほぼ同一プロファイルである。これが入射条件に依らない EMD である。本研究において A3e ファイバの EMD 光を用いる場合は 2000 m の光ファイバを用いる。

(4) 測定装置トレランス

測定システムの開発においてそのシステムの性能を検証することは重要である。先ず図 3-3 の測定装置の FFP 光学システムの測定トレランスを評価した。DUT として 2000 m の光ファイバからの出力光である EMD 光を用いた。この光ファイバの両端面は図 3-6(a) に示すように平面研磨されている。図 3-11 に X 軸(対地水平)方向で -0.7 mm から $+0.7\text{ mm}$ まで 0.1 mm ずつ移動させて EAF を測定した結果を示す。EAF の裾の領域を示す EAF 95%値において変化量の目安を $\pm 15\%$ とすると、測定トレランスは $\pm 0.5\text{ mm}$ であった。同様に他の軸でも評価した結果を表 3-1 に示す。Y 軸(対地垂直)方向、Z 軸(光軸)方向はそれぞれ $\pm 0.7\text{ mm}$ 、 $\pm 0.8\text{ mm}$ であった。また、X 軸及び Y 軸の周りの角度 θ_x 、 θ_y は $\pm 2.8^\circ$ 以上と角度ステージの可動範囲を超えるトレランスであった。従ってこれらの結果からコア直径 $200\text{ }\mu\text{m}$ の光ファイバを測定するには十分な測定トレランスを有する測定システムであることを確認した。

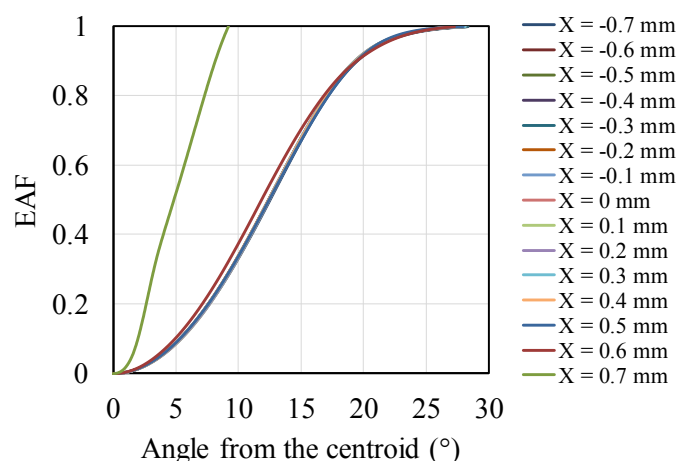


図 3-11 A3e ファイバの EMD 光による FFP 光学システムの X 軸トレランス測定評価。

表 3-1 FFP 光学システムの EMD 光によるトレランス測定評価

Axis	Tolerance	Unit
X	± 0.5	mm
Y	± 0.7	mm
Z	± 0.8	mm
θ_x	$\geq \pm 2.8$	°
θ_y	$\geq \pm 2.8$	°

(5) 測定再現性

測定装置の測定再現性もまた重要な装置性能を示す指標である。図 3-3 の測定装置を用いて長さ 2000 m の光ファイバ出力光の EMD 光を用いて測定再現性の評価を行った。

繰返し測定再現性は DUT の光ファイバフェルールをフェルールホルダに装着した後、10 回連続の測定を行った。図 3-12 に MMT-1 から MMT-10 と示した測定結果の EAF プロファイルは互いに重なり合っており全領域で中央プロファイルからの変化量は $\pm 0.3\%$ 、EAF 95%値の平均値(最大最小値)は $21.9^\circ \pm 0.01^\circ$ 及び標準偏差は 0.008° であった。

入力ポート着脱再現性は DUT の入力側フェルールをフェルールホルダに着脱する毎に 10 回測定した。EAF 95%値の平均値は $21.7^\circ + 0.00^\circ / - 0.01^\circ$ 、標準偏差は 0.004° であった。

出力ポート着脱再現性は DUT の出力側フェルールをフェルールホルダに着脱する毎に 10 回測定した。EAF 95%値の平均値は $21.7^\circ + 0.06^\circ / - 0.15^\circ$ 、標準偏差は 0.060° であった。

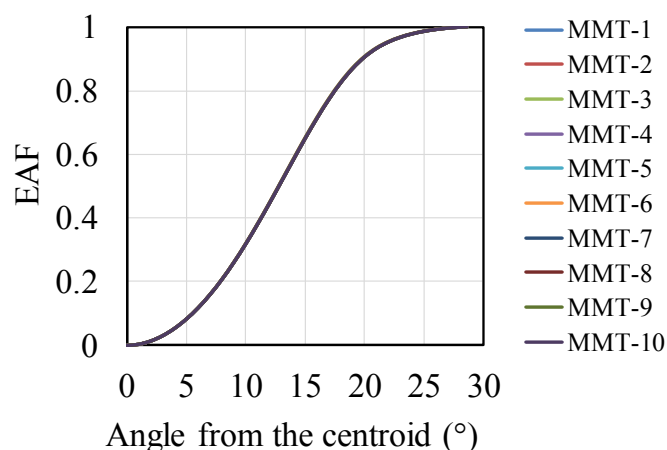


図 3-12 EAF 測定システムの繰返し測定再現性

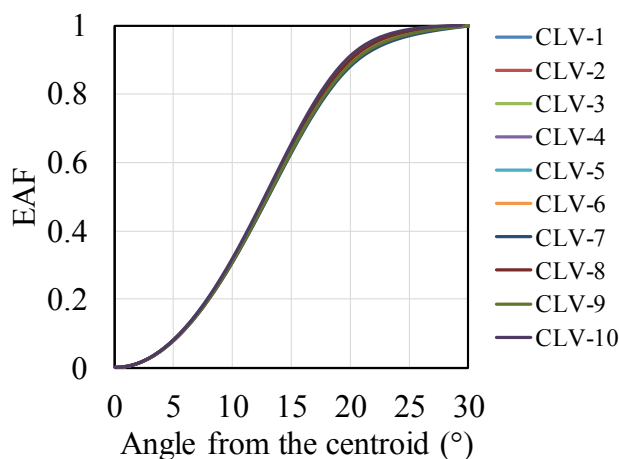


図 3-13 出力ポートのクリーブ加工再現性

両端末取り付け再現性は DUT の入射側と出射側の両端のフェルール加工を行う毎に 5 回測定した。図 3-6(a)に示すような研磨面が加工毎に得られた。EAF 95%値の平均値は $21.8^{\circ} + 0.07^{\circ} / - 0.18^{\circ}$ 、標準偏差は 0.103° であった。

出力ポートのクリーブ加工再現性は DUT の出力ポートを市販のクリーバーでクリーブする毎に 10 回測定した。ばらつきがあるもののおおよそ図 3-6(b)に示すようなクリーブ面が加工毎に得られた。図 3-13 に CLV-1 から CLV-10 と示した測定結果の EAF プロファイルを示す。図 3-12 の繰返し測定再現性に比べて大きな角度または EAF 値が大きい領域でばらつきが特に大きくなっており、EAF 95%値の平均値は $22.4^{\circ} + 0.75^{\circ} / - 0.84^{\circ}$ 、標準

表 3-2 EAF 測定装置の測定再現性の一覧

	Repeat	Treated Port(s) of DUT	Times	Average, max., min., range of max. and min. (°)									Standard deviation (°)		
				5%			50%			95%			5%	50%	95%
				Avg.	Max./Min.	Range	Avg.	Max./Min.	Range	Avg.	Max./Min.	Range			
(i)	Measurements	-	10	3.9	+0.00 -0.00	0.00	12.8	+0.00 -0.00	0.00	21.9	+0.01 -0.01	0.02	0.001	0.002	0.008
(ii)	After attaching/detaching	Input	10	3.9	+0.00 -0.00	0.00	12.8	+0.00 -0.00	0.00	21.7	+0.00 -0.01	0.01	0.001	0.002	0.004
(iii)	After attaching/detaching	Output	10	3.9	+0.02 -0.02	0.04	12.8	+0.03 -0.06	0.09	21.7	+0.06 -0.15	0.21	0.008	0.023	0.060
(iv)	With ferrule terminations	Input and Output	5	3.9	+0.03 -0.05	0.08	12.8	+0.07 -0.07	0.14	21.8	+0.07 -0.18	0.25	0.032	0.053	0.103
(v)	With cleaved fibers	Output	10	3.9	+0.04 -0.04	0.08	12.9	+0.10 -0.19	0.29	22.4	+0.75 -0.84	1.59	0.029	0.086	0.479

偏差は 0.479°であった。これらの結果を表 3-2 に EAF 5%, 50%, 95%値の平均値、最大値、最小値及び標準偏差をまとめた。

3.3.3 接続と伝搬モード分布の評価

光データリンクを構成する光コネクタや光部品など、接続における伝搬モード分布の振舞いや基本特性を把握することは重要である。図 3-4 の測定装置を用いて EMD 光の入力パワー P_{in} (dBm) を測定した。また長さ 1 m の同光ファイバとの接続を DUT としてその出力パワー P_{out} (dBm) を測定した。使用した光ファイバ端末は金属フェルルールに成端し、図 3-6(a) のように平面研磨で仕上げている。2000 m と 1 m の光ファイバはスリーブでかん合している。フェルルール・スリーブによるかん合構造は広く産業界で使われており、適切な部品及び加工プロセスを使用する限りにおいては光軸垂直方向及び角度による軸ずれは

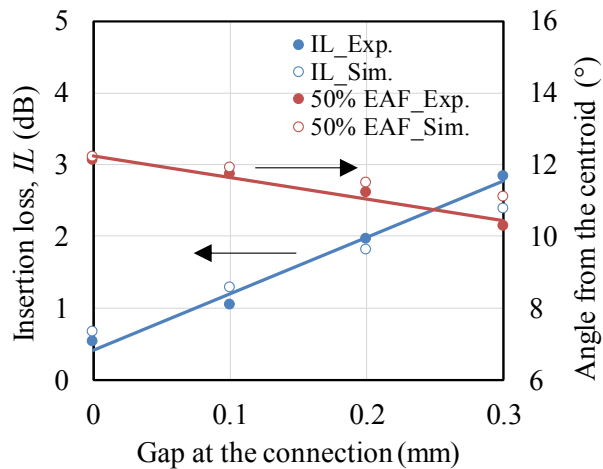


図 3-14 接続における光軸方向軸ずれによる挿入損失と EAF 50%値. 実験及びシミュレーション結果

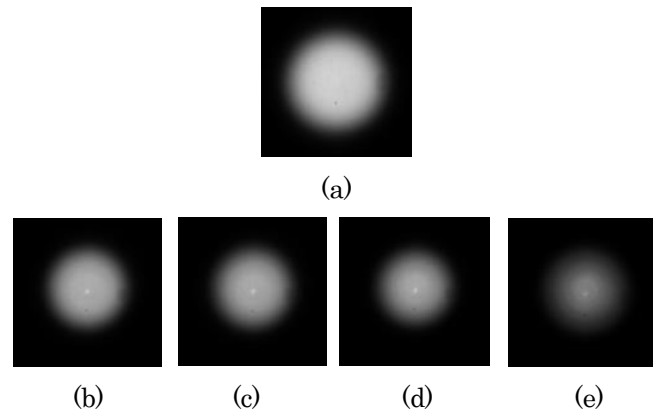


図 3-15 FFP 像. (a)A3e ファイバの EMD 光. 同ファイバを長さ 1 m の光ファイバに接続させたときの光軸方向軸ずれ: (b) 0 mm, (c) 0.1 mm, (d) 0.2 mm, (e) 0.3 mm

限定的である[79]。一方、SI-MMF の接続はその大口径ゆえに Physical contact 技術[62] が使えないので間隙、いわゆる光軸方向軸ずれが必ず発生する。そこで、ここでは光軸方向軸ずれについて検証した。

図 3-14 に光軸方向軸ずれの挿入損失について測定及びシミュレーション結果を示す。ここで測定による挿入損失 IL (dB) は $IL = P_{out} - P_{in}$ で求めた。接続における挿入損失のシミュレーションは 3.4.1 章で説明する。何れの結果とも軸ずれの増加に伴い挿入損失が増加する傾向及びその値は共に良く一致している。

図 3-15(a)に 2000 m 伝搬後の EMD 光、いわゆる測定ポイント P_{in} の FFP 像を、また同図(b)-(e)に測定ポイント P_{out} において DUT の接続の間隙を 0 mm から 0.3 mm 変化させたときの FFP 像を示した。FFP 像は軸ずれに伴い小さくなる。

これらの FFP 像から EAF を求めると図 3-16(a)に示す EAF プロファイルが得られる。光源の EAF 50%値は 12.3°、1 m の光ファイバを接続し間隙を 0 mm, 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm と広げると EAF 50%値は 12.1°, 11.7°, 11.2°, 10.3°と角度が小さくなった。また図 3-16(b)は軸ずれによる EAF の変化を解析的にシミュレーションした結果である。接続における EAF のシミュレーションは 3.4.2 章で説明する。シミュレーション結果は上記間隙でそれぞれ EAF 50%は 12.2°, 11.9°, 11.5°, 11.1°と測定結果と同じ傾向の角度変化が得られた。

図 3-14 には接続の挿入損失に加えて上記 EAF 50%値の結果をそれぞれ測定及びシミュレーションを併せて示している。ここで測定による挿入損失 $IL(\text{dB})$ は $IL = P_{\text{out}} - P_{\text{in}}$ で求めた。これにより光軸方向の軸ずれに伴い従来から知られている挿入損失の増加、それと同時に角度成分が小さくなっていることが分かる。これは高次モード、いわゆる伝搬光の大きな角度成分が減少することを示している。このように EAF 値を用いることで挿入損失ともに伝搬モード分布の変化を一枚のグラフに初めて記載することができ、その現象を明確に説明することが出来た。

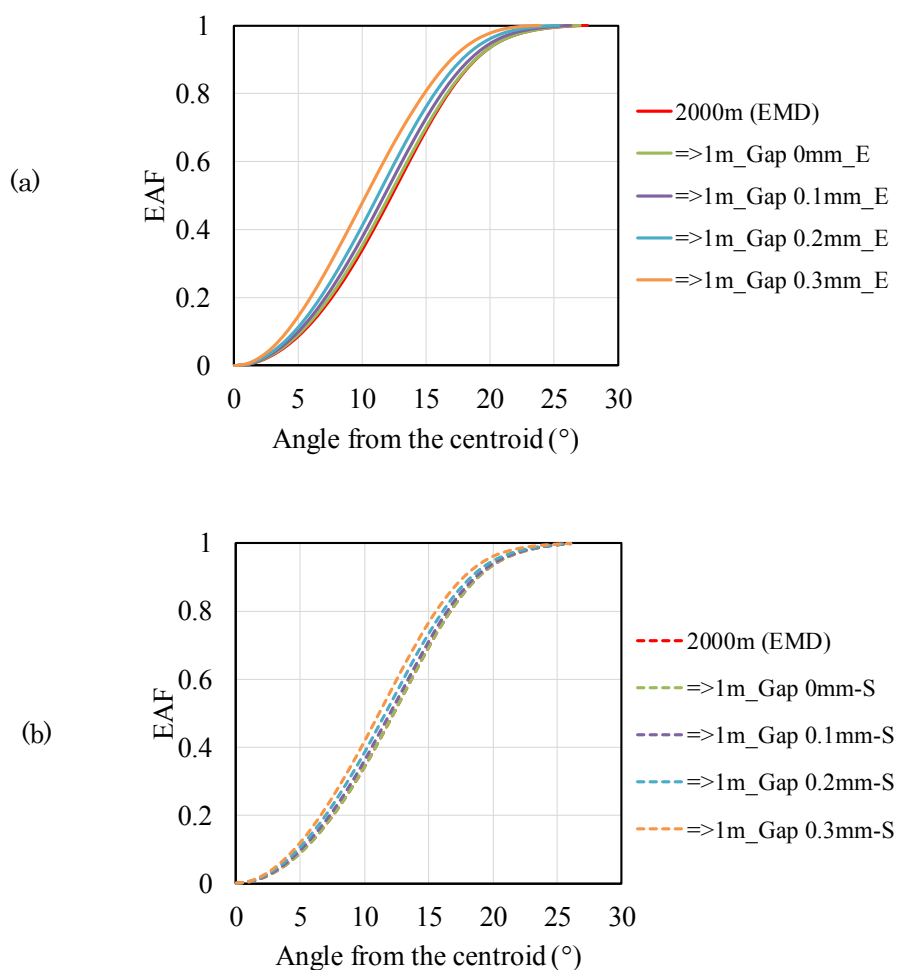


図 3-16 EAF プロファイル. EMD 光及び長さ 1 m の A3e ファイバ接続の光軸方向軸ずれによる伝搬モード分布の EAF 表示: (a)測定, (b)シミュレーション

3.4 接続特性の解析

3.4.1 挿入損失のシミュレーション

本研究で接続における挿入損失のシミュレーションは光線追跡法のシミュレーションソフトウェア Zemax OpticStudio を用いた。接続に特化して解析するため同様の解析を行っている参考文献[83]を参照し、図 3-17 に示す基本モデルを用いて同ソフトウェアのノンシーケンシャルモードにより解析を行った。入力側光ファイバに代えて入力側光ファイバ出力の FFP プロファイルを光源(Light source)とし、受光側光ファイバ入射端面に配置している。光源と導波路(Waveguide)の間に入力パワー P_{out1} (dBm) を計測するディテクタ 1 (Detector 1) を置いている。導波路は長さ 1 mm と短い光ファイバが光源との接続を解析するには

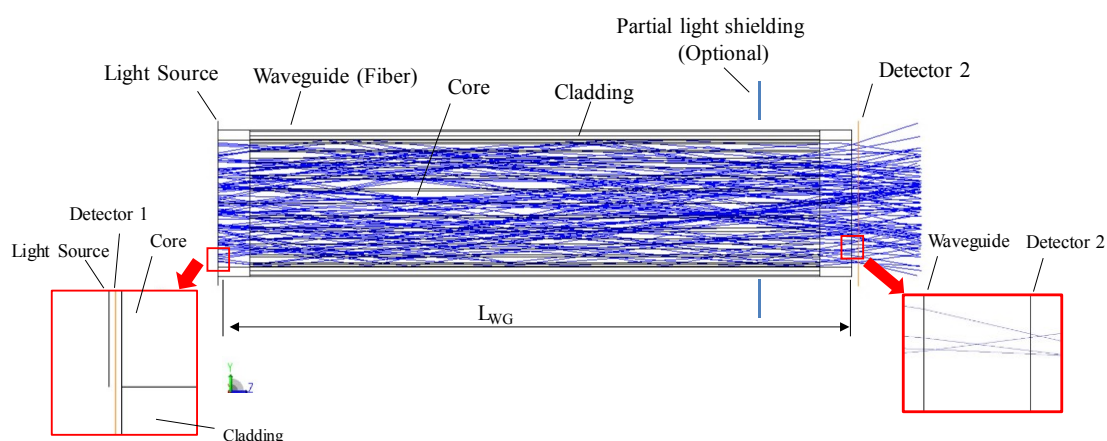


図 3-17 接続のシミュレーションモデル

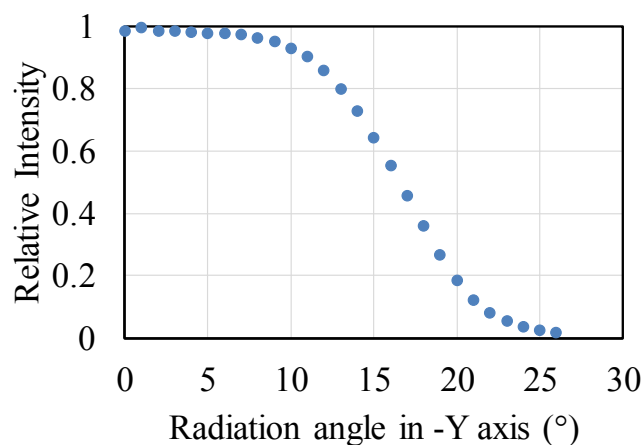


図 3-18 光源に用いた 1次元 FFP プロファイルの例

十分な長さである。導波路のコア(Core)外周にはクラッド(Cladding)を配置し、クラッド内部には吸収層を加えている。この吸収層によりクラッドに漏洩した光をコアに戻さないことになる。導波路の出力端の外にはディテクタ 2(Detector 2)を配置し、光パワー P_{out2} (dBm)を計測した。光源と導波路の間を DUT として X 軸、Z 軸の軸ずれによる解析を行い、接続における挿入損失 IL (dB) = $P_{out1} - P_{out2}$ を算出している。モデルにより受光レベルが低くなる場合などは迷光の影響を受けやすいので、その場合は環を用いた Partial light shielding を用いて遮光を行った。

3.3.3 章のシミュレーションで用いた光源は図 3-18 に示す EMD 光の 1 次元 FFP プロファイルより 1°刻みの離散データを用いた。FFP プロファイル裾は 3.3.1 章で説明したように最大光強度の 1%まで使用した。ソフトウェア上では図 3-18 の離散的なデータ間を補完し、滑らかな光源曲線となる光源コンポーネント”Radial”を用いている。図 3-14 で既に表示したとおり実験によく合ったシミュレーション結果を得ている。本稿を通して使った光ファイバのパラメータを表 3-3 に示す。第 4 章、第 5 章における Zemax OpticStudio を用いたシミュレーションも、解析するモデルに合わせて同様のプロセス及びパラメータを用いて解析を行った。

3.4.2 EAF のシミュレーション

EAF のシミュレーションは表計算ソフトに幾何光学の接続モデルを設定して実施した。3.3.3 章では図 3-19 に示すように光軸方向(Z 軸)軸ずれの EAF シミュレーションをしている。EMD 光は図 3-15(a)に示したように FFP 像の輝度重心を通過する中心線は 360°どの軸に対しても等しい分布になっているので 1 軸の解析で解が得られる。従って図 3-19

表 3-3 シミュレーションで用いた光ファイバパラメータと導波路長さ

	Diameter (μm)		Refractive index		NA	Wavelength (nm)	Waveguide length L_{WG} (mm)
	Core, 2a	Cladding	Core	Cladding			
A3e fiber (HPCF)	200	230	1.4526 (Silica glass)	1.4096	0.37	850	1
A4a.2 fiber (POF)	980	1000	1.49 (PMMA)	1.4036	0.5	660	5

の Fiber_A の任意の点光源の光輝度 $I(x, \theta)$ は、 x に依らず同じなので $I(\theta)$ のみを考慮すればよい。光ファイバのパラメータは表 3-3 に示した A3e ファイバを用いている。

- ① 先ず図 3-20(a) に示す EMD の FFP データを準備する。ここでは 0.1° 刻みの同データを準備した。
- ② 距離 z における Fiber_A の位置 x から放出する光分布を 0.01 mm 毎に計算した。
- ③ 双方の位置関係により受光側ファイバの NA で決まる受光条件を図 3-20(b) のように予め計算しておく。NA 0.37 なので $\theta_{max} = \pm 21.7^\circ$ より大きな角度の光は受光できない。
- ④ 図 3-20(c) に示すよう縦軸に角度 θ を、横軸に位置 x を配置しそれぞれの条件で $I(\theta)$ を求める。右のほうの赤いセルは条件外につき計算では排除している。
- ⑤ さらに式(3.2-4)を離散数の総和で表した式(3.4-1)を用いて分母を光学重心 0 からの累積値 $\sum \theta' \cdot I(\theta') \cdot \Delta\theta'$ を全体の合計 $\sum \theta \cdot I(\theta) \cdot \Delta\theta$ で規格化すると EAF が求められる。

$$EAF(\theta') = \frac{\sum \theta' \cdot I(\theta') \cdot \Delta\theta'}{\sum \theta \cdot I(\theta) \cdot \Delta\theta} \quad (3.4-1)$$

同様に距離 $z = 0, 0.1, 0.2, 0.3 \text{ mm}$ を計算すると図 3-16(b) のシミュレーション結果が得られ、同図(a)の実験結果とよく合っている。

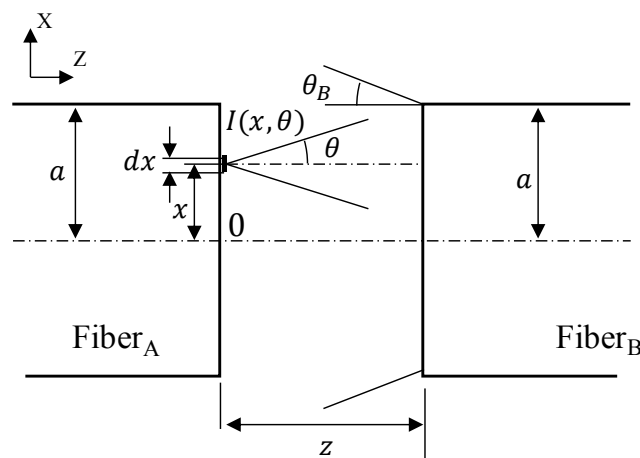


図 3-19 EAF シミュレーションに用いた Z 軸ずれモデル

角度(°)	+Y
0	0.984243
0.1	0.980198
0.2	0.980976
0.3	0.982679
...	...
26.7	0.013398
26.8	0.012857
26.9	0.012197
27	0.011953

(a)

α	(°)					
	x	z	0.01	0.1	0.2	0.3
-0.1	89.7	87.1	63.4	45.0	33.7	
-0.09	89.7	87.0	62.2	43.5	32.3	
-0.08	89.7	86.8	60.9	42.0	31.0	
-0.07	89.7	86.6	59.5	40.4	29.5	
-0.06	89.6	86.4	58.0	38.7	28.1	
-0.05	89.6	86.2	56.3	36.9	26.6	
-0.04	89.6	85.9	54.5	35.0	25.0	
-0.03	89.6	85.6	52.4	33.0	23.4	
-0.02	89.5	85.2	50.2	31.0	21.8	
-0.01	89.5	84.8	47.7	28.8	20.1	
0	89.4	84.3	45.0	26.6	18.4	
0.01	89.4	83.7	42.0	24.2	16.7	
0.02	89.3	82.9	38.7	21.8	14.9	
0.03	89.2	81.9	35.0	19.3	13.1	
0.04	89.0	80.5	31.0	16.7	11.3	
0.05	88.9	78.7	26.6	14.0	9.5	
0.06	88.6	76.0	21.8	11.3	7.6	
0.07	88.1	71.6	16.7	8.5	5.7	
0.08	87.1	63.4	11.3	5.7	3.8	
0.09	84.3	45.0	5.7	2.9	1.9	
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

(b)

z =	0.3											EAF	
	角度(°)	-0.1	-0.09	0.08	0.09	0.1	$I(\theta)$	$\Delta \theta$	$I(\theta)\Delta \theta$	$\theta I(\theta)\Delta \theta$	$\Sigma \theta I(\theta)\Delta \theta - [1]$	$\Rightarrow 1m, Gap 0.3mm-S$	$[2]/[1]$
0	0.984243	0.984243	...	0.984243	0.984243	0.984243	19.68487	0.1	1.968486851	0	0	0	0
0.1	0.980198	0.980198	...	0.980198	0.980198	0.980198	19.60396	0.1	1.960395927	0.196039593	0.196039593	0.000102579	
0.2	0.980976	0.980976	...	0.980976	0.980976	0.980976	19.61952	0.1	1.961951944	0.392390389	0.588429981	0.000307899	
0.3	0.982679	0.982679	...	0.982679	0.982679	0.982679	19.65358	0.1	1.96535822	0.589607466	1.178037447	0.000616415	
0.4	0.984749	0.984749	...	0.984749	0.984749	0.984749	19.69499	0.1	1.969498531	0.787799412	1.96583686	0.001028635	
...
25.7	0.018735	0.018735	...	0.018735	0.018735	0.018735	0.112411	0.1	0.011241149	0.288897528	1910.305984	0.999578096	
25.8	0.018002	0.018002	...	0.018002	0.018002	0.018002	0.10801	0.1	0.010801002	0.27866584	1910.58465	0.999723909	
25.9	0.017338	0.017338	...	0.017338	0.017338	0.017338	0.104028	0.1	0.010402823	0.269433122	1910.854083	0.999864891	
26	0.016552	0.016552	...	0.016552	0.016552	0.016552	0.099311	0.1	0.009931061	0.258207595	1911.112291	1	
26.1	0.016364	0.016364	...	0.016364	0.016364	0.016364	0.098185						
										1911.112291			
										$\Sigma \theta I(\theta)\Delta \theta - [2]$			

(c)

図 3-20 EAF のシミュレーションの例。(a) 0.1°刻みの FFP データ例, (b) 受光角度条件 (黄色), (c) EAF のシミュレーションの例 z = 0.3 mm (条件外は赤色)

3.5 考察

3.5.1 FFP と EAF

図 3-7 に示した長さ 12 m の光ファイバからの出力光の FFP 像は、入射ガウシアンビーム NA の違いだけで異なる伝搬モード分布が得られた。SI-MMF は数十メートル以下の光データリンクでの使用が多く、車載光データリンクは 15 m 以下のリンク長が規定[17], [19]されているため、ここで得られた結果は実際の状態を反映している。実用上、発光素子や光ファイバ、周辺部品などにも公差が存在するため、公差の範囲内で異軸入射となるため、光軸中心を通らず螺旋状に伝搬するスキュー光によりもっと多彩な FFP 像が現れると推測できる。

EAF が開発される以前は図 3-7 に示すように伝搬モード分布が異なることは分かっても具体的に数値で示すことは出来なかった。そのため光データリンクの仕様は変動やばらつきを考慮した最悪値で決められることが多く、その過大なマージンはコスト的にはマイナス要因であった。国際規格となった EAF 測定法により初めて伝搬モード分布の数値化が可能となり、学術的な議論に加え仕様書や規格書に具体的に記載できることは大きな進歩である。また、EAF は光ファイバだけではなく広義のステップインデックス型導波路への適用が可能で[29], [84]、導波路測定のため GI-MMF への適用も研究されている[80]。

3.5.2 EAF 測定システムの性能

EAF 測定システムの検証では表 3-2 にまとめたように測定再現性を明らかにすることは重要である。繰返し測定(i)と入力ポート着脱再現性(ii)の EAF 95%値の標準偏差はそれぞれ 0.008° と 0.004° 、EAF 50%値の平均は何れも $12.8^\circ \pm 0.00^\circ$ とその差は極めて小さい。従って EMD 光を用いた測定では入力ポート着脱の影響は小さいといえる。

一方、出力ポート着脱再現性(iii)の同標準偏差は 0.060° と入力ポート着脱再現性(ii)の 15 倍大きく、EAF 95%値の平均値は 21.7° と同じであるが、その最大最小の幅を比べると 0.21° と 0.01° と出力ポート着脱による測定ばらつきは入力ポート着脱のそれより大きくなっている。従って出力ポートの位置決め及びトレランスが測定結果に与える影響は入力ポートより大きいといえる。

両端末取り付け再現性(iv)と出力ポート着脱再現性(iii)を比べると、EAF 95%値の標準偏差はそれぞれ 0.103° と 0.060° 、EAF 値の平均及び最大最小もそれぞれ同程度であった。これらより光ファイバの端末処理が図 3-6(a)のように平面かつ平坦な面が得られれば、出力ポートの着脱再現性程度の測定ばらつきと同程度であるといえる。また端面研磨は手動によるマニュアル研磨であるが適切な加工ができていることを示している。

出力ポートのクリーブ加工再現性(vi)は EAF 95%値の最大最小の範囲は 1.59° 、同標準偏差は 0.479° と最も大きい。これらの結果及び図 3-6(b)の端面の状態からクリーブ面の欠陥による出力光の散乱が原因であると推測される。

また何れも EAF 5%値の標準偏差は同 EAF 95%値より十分小さな値になっている。これは FFP プロファイルにおいて相対的に中心付近は輝度が高い一方で裾は輝度が低い。そのため裾の方が大きな変化として現れるためと考えている。従って EAF 95%値は変化に敏感なため変化やばらつきの指標として適切であろう。

ここで測定再現性や端末加工再現性を研究の対象にすることは測定に関する不確かさの検証に繋がる。以上より f θ 方式による EAF 測定及び開発した同測定システムは本研究を進めるにあたり十分な性能を有することを確認した[79]。

3.5.3 接続と伝搬モード分布

接続における光軸方向の軸ずれは挿入損失の原因になることは良く知られている。ここに EAF の変化を組み合わせることで図 3-14 に示すように高次モードの放射が起因していることが明らかである。SI-MMF は大口径であるためシングルモードファイバや GI-MMF のような物理接続の構造を採用することはできない。そのため接続部には必ず光軸方向の軸ずれが発生する。本章の解析により接続における低損失化についてふたつのことが導かれる。ひとつは高次モードの放射を抑えること、もうひとつは限定的な低次のモードによる接続である。何れにせよ伝送において SI-MMF における伝搬モード分布の適切な管理及び制御が必要不可欠である。

3.6 まとめ

本章では SI-MMF の伝搬モード分布を規定する EAF 測定法について解説した。また IEC 61300-3-53 に準拠し、新たに開発した EAF 測定システムについて検証を行った。更に同システムの測定トレランスや測定再現性の解析を行い、対象とした光ファイバの伝搬モード分布の解析に十分な性能を有することを明らかにした。加えて SI-MMF の接続における挿入損失の原因は高次モードの放射であることを初めて一枚のグラフで示した。これらより高次モードの放射を抑えることと、低次のモードによる接続が SI-MMF の接続の低損失化のポイントであることを考察した。本章の結果は SI-MMF を用いた従来の光

データリンクで発生している現象であり、次章では更にランチ条件を変えて測定評価を行う。

第4章 SI-MMF 接続の特性評価

4.1 緒言

前章で SI-MMF の伝搬モードの規定に加えて接続の伝搬モード分布の把握に EAF が有効であることを示した。本章では SI-MMF 接続においてランチ条件を変えて伝搬モード分布の振舞いについて明らかにすることを目的とする。本章で用いた光ファイバは代表的な SI-MMF である A3e ファイバ(コア/クラッド径 200/230 μm , NA 0.37)、A4a.2 ファイバ(コア/クラッド径 980/1000 μm , NA 0.5)である。混乱を避けるためそれぞれ A3e ファイバ、A4a.2 ファイバと IEC カテゴリで表記する。具体的には、それぞれ長さ 1 m の光ファイバ同士の接続を DUT としてランチ条件を変えて伝搬モード分布及び挿入損失の変化、また現実モデルを考慮してクラッドモードや迷光も含めて解析を行った[85]。更に接続の挿入損失に関して本章の測定評価結果と従来理論[34], [37]との比較を行い、傾向は合っているが相違点があることを明確にした[85]。これらは本章で取り扱う実用的アプローチの必要性を改めて支持する結果となっている。

4.2 SI-MMF 接続の測定評価システム

A3e ファイバは OFS HCP-M0200T、A4a.2 ファイバは三菱レイヨン GH-4001-P を用いた。後者は国際規格ではコア径はクラッド径より 15 μm から 35 μm 小さいことが規定されているが [86]、ここでは一般的に用いられるメーカ仕様の 980 μm [87]をパラメータとして用いる。図 4-1 (a)に接続における伝搬モード分布及び接続損失を測定する評価システムの全体構成を示す。また同(b)及び(c)に A3e ファイバ及び A4a.2 ファイバの光源ユニットをそれぞれ示した。図 4-1 (b)は波長 850 nm の SLD (Synos LSS002/850)及びモード選択励振光学システム(Synos M-Scope Type GR)を用い、生成された出力光は Fiber_A (ここでは A3e ファイバ)の入力ポートに入射した。図 4-1 (c)は A4a.2 ファイバ評価用の波長 660 nm の LED (SAWAKI FOLS-01)を用いてその出力光は Fiber_A (ここでは A4a.2 ファイバ)の入力ポートに入射した。

図 4-1 (a)の Fiber_A 出力ポートは、同一種類の長さ 1 m の光ファイバ Fiber_B の入力ポートと相対して、それぞれ微動ステージ上のフェルールホルダまたはコネクタホルダに配置し DUT とした。それぞれの微動ステージは独立して X, Y, Z 軸の位置決めができる。同様に角度ずれも挿入損失の要因であるが両光ファイバの NA が比較的大きく、また部品の公差も含めても想定される角度ずれの影響は小さい。Fiber_B の出力ポートからの出力光は伝搬モード分布及び光パワー P_{out2} (dBm) を EAF 測定システム (Synos M-Scope Type F) と光パワーメータでそれぞれ測定した[85]。加えて Fiber_A からの出射光、いわゆる DUT の入力光の伝搬モード分布と光パワー P_{out1} (dBm) を測定した。挿入損失 IL (dB) は $IL = P_{out1} - P_{out2}$ により計算した。Fiber_A 及び Fiber_B の両端面はフェルールを用いた端末加工を行い、図 3-6(a)に示すような平面かつ平坦な研磨処理を行った[79]。ここでは X 軸、Z 軸の軸ずれをそれぞれの光ファイバの半径で規格化した x/a 、 z/a をパラメータとした[85]。ガウシアンビームの励振、リングビームによる特定の高次モードの励振には図 3-4 のモード選択励振光学システムを用いた。3.3.1 章で述べたようにこのモード選択励振光学システムを用いることで光源や光学系の部品を変えることなくランチ光源の NA を効率的に可変することができる。

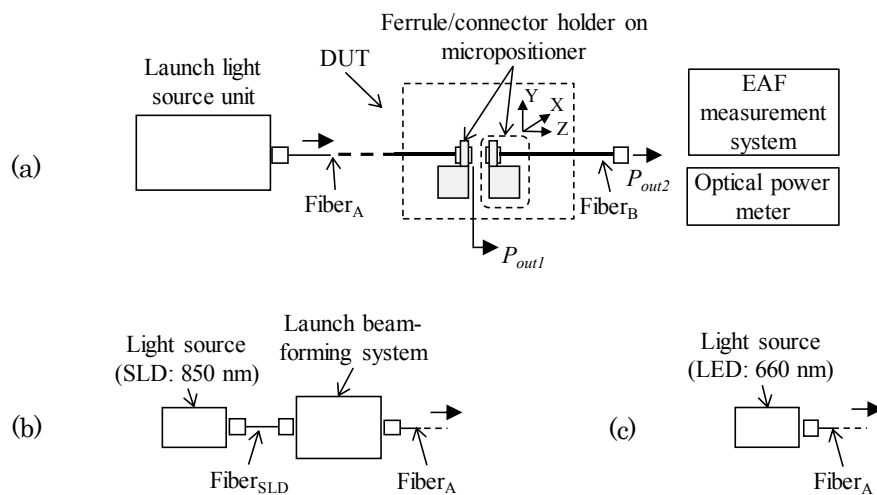


図 4-1 SI-MMF 接続の測定評価システム: (a)全体構成, (b)A3e ファイバ用光源ユニット, (c)A4a.2 ファイバ用光源ユニット

4.3 各種ランチ条件による接続特性の評価

4.3.1 ガウシアンビームの励振

(1) FFP による伝搬モード分布の解析

A3e ファイバ接続を DUT として、ガウシアンビームの NA を変えて DUT の軸ずれによる伝搬モード分布の振舞いについて調べた。図 4-1 (a)の基本評価システムに同図(b)の光源モジュールを用いた。モード選択励振光学システム(図 3-4)はガウシアンビームポートに $\text{Fiber}_{\text{SLD}}$ を接続し光源の光を導いた。図 4-2 (a)から(d)にそれぞれガウシアンビームポートを NA 0.05, 0.2, 0.4, 0.6 に設定した際の Fiber_{A} 出力光、いわゆる P_{out1} の観測点で測定した 2 次元 FFP 像を示す。それぞれの画像で相対的な光強度は高い側から低い側へ赤、黄、緑、青、黒で示した。X 軸の 1 次元 FFP プロファイルの 50%値幅(FWHM: Full width at half maximum)はそれぞれ 13.5°, 15.3°, 28.2°, 39.7°、プロファイルの裾としてよく利用される 5%値幅は 17.0°, 25.8°, 41.2°, 47.8°と、FFP 像の大きさが何れも NA に順じることを確認した。また図 4-2 (c)のように必ずしも円形ではない FFP 像も得られている。

図 4-3 (a-1)から(a-4)はガウシアンビームポートを NA 0.05 に設定 [図 4-2 (a)] し、 Fiber_{A} に接続した長さ 1 m の Fiber_{B} 出力光、いわゆる P_{out2} の観測点で測定した 2 次元 FFP 像である。(a-1)から(a-4)のパラメータは Fiber_{A} と Fiber_{B} の接続点、いわゆる DUT をそれぞれ $x/a = 0, 0.4, 0.8, 1.6$ と X 軸ずれを増やしている。変化が最も大きかったのは光ファイバの NA より小さな NA 0.05 のガウシアンビームの励振で、 x/a の増加に伴い FFP 像が大きくなった。

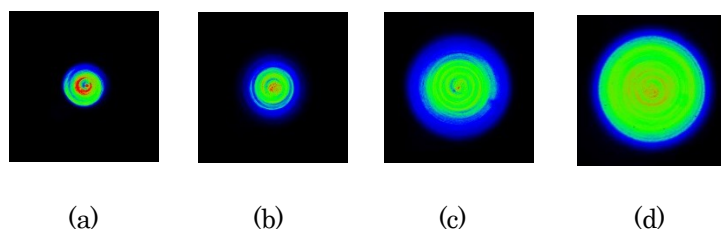


図 4-2 Fiber_{A} (長さ 1 m の A3e ファイバ)の出力光 P_{out1} の 2 次元 FFP 像. 入射ガウシアンビーム NA: (a) 0.05, (b) 0.2, (c) 0.4, (d) 0.6

図 4-3 (b-1)から(b-4)はガウシアンビームポートを NA 0.6 に設定[図 4-2 (d)]し、FiberA に接続した長さ 1 m の FiberB 出力光、いわゆる P_{out2} の観測点で測定した 2次元 FFP 像である。(b-1)から(b-4)のパラメータは接続点である DUT においてそれぞれ $z/a = 0, 0.8, 2.4, 4.0$ と Z 軸ずれを増やしている。変化が最も大きかったのは光ファイバの NA より大きな NA 0.6 のガウシアンビームの励振で、 z/a の増加に伴い FFP 像が小さくなった。

(2) EAF による伝搬モード分布の解析

EAF は FFP から導出される規格化累積強度といえる[79]。図 4-4 (a)に上記同様にモード選択励振光学システムのガウシアンポートの NA を 0.05, 0.2, 0.4, 0.6 にしたときの FiberA 出力光 P_{out1} と、これに接続した長さ 1 m の FiberB の出力光 P_{out2} の EAF プロファイルを示す。DUT のパラメータは X 軸ずれ x/a である。変化が容易に分かるように EAF 5%, 50%, 95%値に破線を記している。5%と 95%はそれぞれビーム重心付近とビーム裾の状態をそれぞれ示している[79]。NA 0.05 の入力ビームでは X 軸ずれが増加すると角度が大きい方向へシフトする。EAF 50%値でその差は 2.2° [(7.8° at $x/a = 0.16$) minus (5.6° at $x/a = 0$)] であった。これは図 4-3 (a-1)から(a-4)に示した 2次元 FFP 像から EAF に数値化したものである。NA 0.2 と 0.4 の入力ビームの EAF 変化は変化量が違うものの NA 0.05 と同様の傾向にある。一方、A3e ファイバの受光 NA 0.37 より大きい NA 0.6 の入力ビームは X 軸のずれ量 x/a が大きくなるに従い角度が小さい方向へシフトしている。

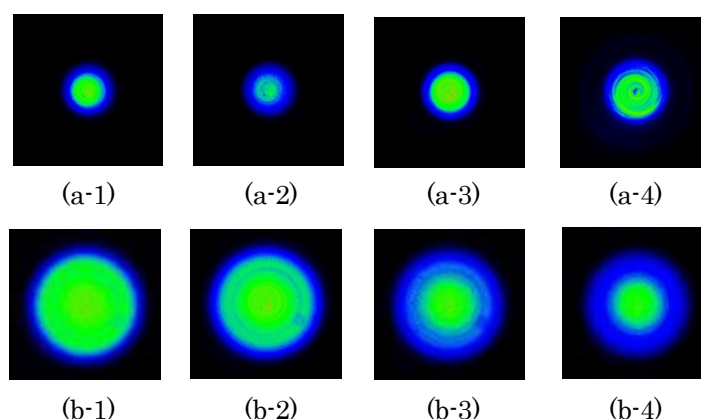


図 4-3 FiberB の出力光 P_{out2} の 2次元 FFP 像. モード選択励振光学システムのガウシアンビームポート NA 0.05 による X 軸ずれ: (a-1) $x/a = 0$, (a-2) $x/a = 0.4$, (a-3) $x/a = 0.8$, (a-4) $x/a = 1.6$ と同 NA 0.6 による Z 軸ずれ: (b-1) $z/a = 0$, (b-2) $z/a = 0.8$, (b-3) $z/a = 2.4$, (b-4) $z/a = 4$

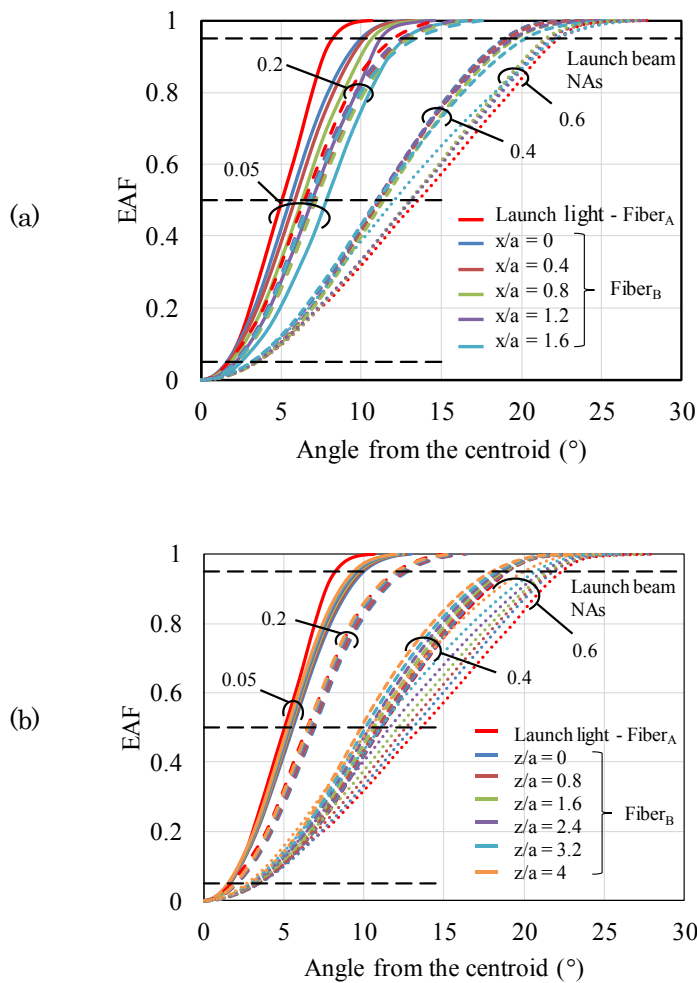


図 4-4 DUT の軸ずれによる伝搬モード分布の変化. モード選択励振光学システムの gaussian ビームポートの NA 0.05, 0.2, 0.4, 0.6: (a) X 軸ずれ, (b) Z 軸ずれ

図 4-4 (b)は上記同様のランチ条件による Z 軸ずれによる伝搬モード分布の振舞いである。NA 0.6 の入力ビームでは Z 軸ずれが増加すると角度が小さい方向へシフトする。EAF 50%値でその差は -2.7° [(10.4° at $z/a = 4$) minus (13.1° at $z/a = 0$)] であった。これは図 4-3 (b-1)から(b-4)に示した 2 次元 FFP 像から EAF に数値化したものである。NA 0.4 の入力ビームの EAF 変化量は異なるが NA 0.6 と同じような傾向であった。一方、A3e ファイバの受光 NA 0.37 より小さい他のふたつの NA の入力ビームは変化が小さいが、上記と逆、いわゆる角度の大きい側へシフトする傾向にある。

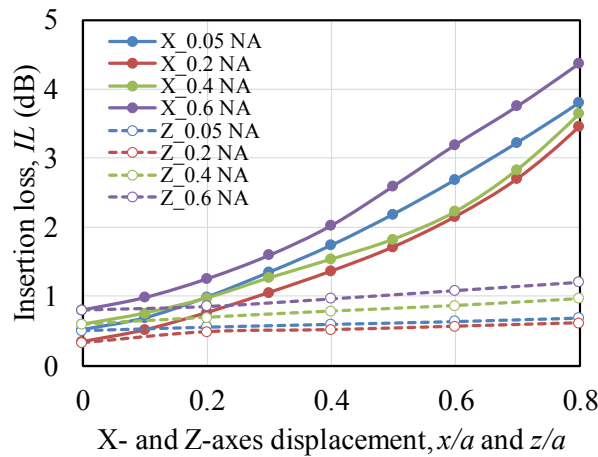


図 4-5 A3e ファイバ接続の X 軸, Z 軸ずれによる挿入損失. モード選択励振光学システムのガウシアンビームポート NA 0.05, 0.2, 0.4, 0.6

(3) 挿入損失

図 4-5 に NA 0.05, 0.2, 0.4, 0.6 の入力ビームを用いて測定した DUT を X 軸及び Z 軸の軸ずれによる挿入損失特性を示す。この図にはふたつの大きな課題が現れている。ひとつは同じ接続であっても、ランチ条件として異なる NA の光源を用いると挿入損失が異なることが明確である。もうひとつは挿入損失の並びはランチ条件の NA の順番になっ
ておらず、またそれぞれのカーブの揺れも小さくない。例えば $x/a=0.6$ で上記 NA の順の挿入損失は 2.69, 2.16, 2.23, 3.20 dB である。このふたつの課題は SI-MMF の接続における挿入損失の測定を困難にしている。そこで一定範囲内の測定再現性を得るために SI-MMF の接続部品の測定用光源を IEC で規格化を進めている。

4.3.2 リングビームの励振

(1) FFP による伝搬モード分布の解析

ここでは図 4-1 (a)と(b)を用いた A3e ファイバの測定評価システムで、モード選択励振光学システム(図 3-4)のリングビームポートを用いた。そして A3e ファイバの NA 0.37 を境界とし、その下側の NA 0.3 と上側の NA 0.4 のリングビームを発生させて、DUT の X 軸、Z 軸ずれによる伝搬モード分布の測定を行った。このときリングビーム幅は NA 0.025

を用いた。図 4-6 (a-1)と(b-1)に長さ 1 m の $Fiber_A$ からの出力光の 2 次元 FFP 像を示す。それぞれの FFP 画像で光強度は規格化されている。X 軸方向の 5%値幅はそれぞれ 42.4° , 53.5° であった。これらのリングビームは A3e ファイバの受光角が 43.4° なので、前者が受光角の範囲内、後者が範囲外となる。従って理論的には前者は A3e ファイバを伝搬するが、後者は伝搬しないことになる。この $Fiber_A$ に長さ 1 m の同種の A3e ファイバである $Fiber_B$ を微動ステージ上で接続させ DUT として軸ずれを与えた。図 4-6 (a-2), (a-3)は NA 0.3 のリングビーム [図 4-6 (a-1)] を用い、本測定で最も大きく X 軸及び Z 軸ずれを発生させた条件 $x/a = 1.6, z/a = 4$ における $Fiber_B$ 出力光の FFP 像である。また図 4-6 (b-2), (b-3)は NA 0.4 のリングビーム [図 4-6 (b-1)] を用い、同様に $x/a = 1.6, z/a = 4$ における $Fiber_B$ 出力光の FFP 像である。これらは軸ずれによる光パワーの減衰が大きいが、輝度を補正して可視化している。特徴的なのが図 4-6 (a-2)と(b-2)に示すように X 軸ずれにより中央部に光が現れている。また Z 軸ずれにより図 4-6 (a-3), (b-3)に示すようにリングビームの縁が内側に広がることが観測された。

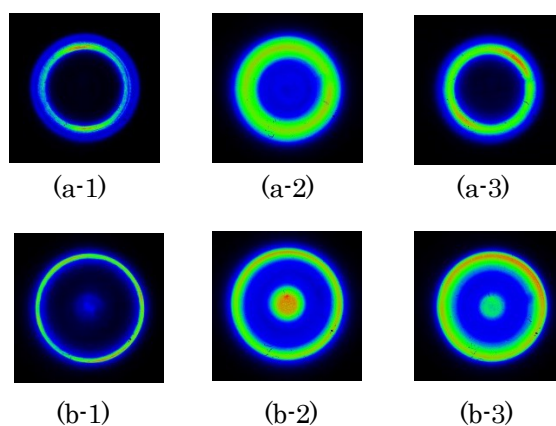


図 4-6 リングビームを用いた接続特性の 2 次元 FFP 像. $Fiber_A$ (長さ 1 m の A3e ファイバ)の出力光 P_{out1} : リングビーム NA(a-1) 0.3, (b-1) 0.4. $Fiber_B$ の出力光 P_{out2} : 入力リングビーム NA と軸ずれ(a-2) NA 0.3 & $x/a = 1.6$, (a-3) NA 0.3 & $z/a = 4$, (b-2) NA 0.4 & $x/a = 1.6$, (b-3) NA 0.4 & $z/a = 4$

(2) EAFによる伝搬モード分布の解析

図 4-7 にランチ条件として NA 0.3 と 0.4 のリングビームを入射させたときの Fiber_A 出力光及び DUT に軸ずれを与えたときの Fiber_B 出力光の EAF プロファイルを示す。(a)は X 軸ずれ、(b)は Z 軸ずれの結果である。両方のグラフにおいて NA 0.3 のリングビームの FFP 像 [図 4-6 (a-1)] の光学重心付近には光がほとんど存在せず、およそ 15°から光が存在することが分かる。一方、NA 0.4 のリングビームの FFP 像 [図 4-6 (b-1)] は双方のグラフにおいて光学重心 0°付近から光が現れている。図 4-7 に示すように X 軸、Z 軸の軸ずれによって EAF プロファイルが角度の小さい方向にシフトしている。この結果は軸ずれにより伝搬角度の大きな光線成分が小さな光線成分に変換される、いわゆる高次モードが低次モードに変わったといえる。モード選択励振光学システムを用いることで初めてこれらの伝搬モード分布の振舞いを把握することができた。

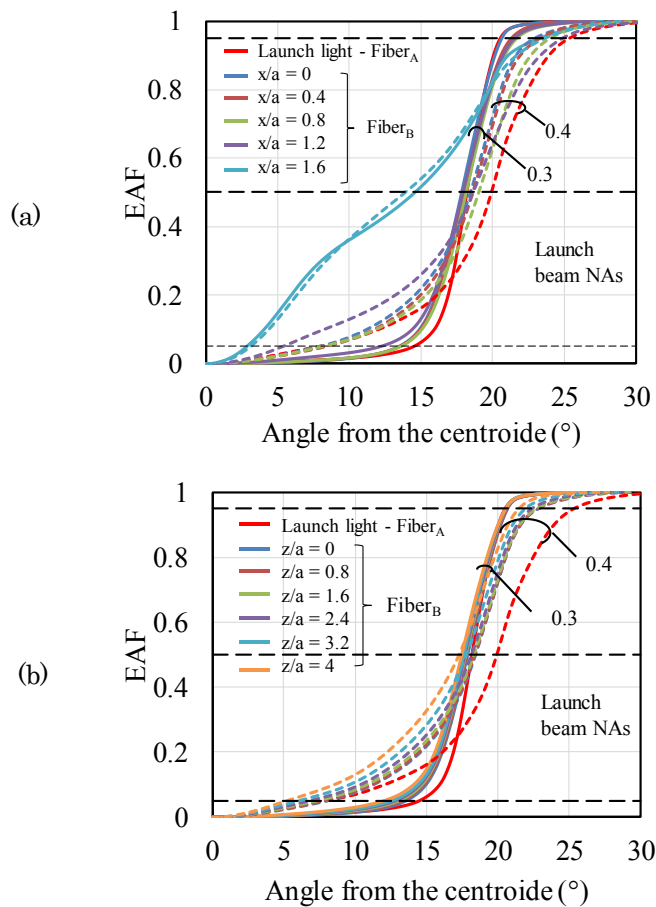


図 4-7 A3e ファイバ接続の軸ずれによる伝搬モード分布の変化. モード選択励振光学システムのリングビームポート NA 0.3, 0.4: (a) X 軸ずれ, (b) Z 軸ずれ

(3) 挿入損失特性

図 4-8 にランチ条件として NA 0.3, 0.4 のリングビーム、いわゆる A3e ファイバにおける境界条件の入力光を用いて DUT の X 軸、Z 軸の軸ずれによる挿入損失の結果を示す。NA 0.3, 0.4 のリングビームを入力した Fiber_A からの出力光の挿入損失は $x/a = z/a = 0$ においてそれぞれ異なっている。3.4.1 章で解説した光線追跡法(Zemax OpticStudio)によるシミュレーションを実施したところ、NA 0.3 では実験とシミュレーションの挿入損失の差は 0 dB [1.2 dB (実験) minus 1.2 dB (シミュレーション)] と測定とシミュレーションが合う結果だが、NA 0.4 の同様の比較では -1.1 dB [2.8 dB (実験) minus 3.9 dB (シミュレーション)] と実験結果のほうが小さくなった。

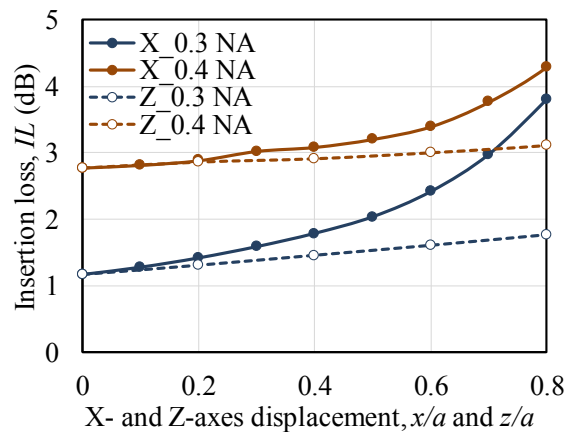


図 4-8 A3e ファイバ(NA 0.37)接続の軸ずれによる挿入損失. モード選択励振光学システムのリングビームポート NA 0.3, 0.4

4.3.3 Equilibrium mode distribution (EMD) 光の励振

(1) EMD ランチ光源

EMD はファイバパラメータで決まる固有の伝搬モード分布の状態であり [79]、測定再現性が良好なため光部品を測定する際の安定したランチ光源として使うことが期待されている [83]。A3e ファイバの EMD 条件は長さ 2000 m の同ファイバを伝搬することで得られることを 3.3.2 章で確認している。これを Fiber_A として用い、測定評価システムは図 4-1 (a)と(b)を組み合わせた。A4a.2 ファイバの EMD は専用のモードスクランブラを Fiber_A として用い [88]、測定評価システムは図 4-1 (a)と(c)を用いた。DUT の対の光ファ

ファイバはそれぞれ同じ種類の長さ 1 m の光ファイバを Fiber_B とした。Fiber_A 出力(EMD 光)の 2 次元 FFP 像を図 4-9 (a)と(b)に、また、それら 1 次元 FFP 像の X 軸のプロファイルを図 4-9 (c)に示す。両プロファイルの 50%値幅はそれぞれ 31.0°, 43.7°、そして 5%値幅は 46.2°, 60.4°であった。図 4-10 に図 4-9 (a)と(b)の 2 次元 FFP 像から導出した EAF プロファイルを示す。A3e ファイバと A4a.2 ファイバの EAF 5%値, 50%値, 95%値はそれぞれ 3.7°, 12.3°, 21.0°及び 5.0°, 16.4°, 27.2°であった[85]。

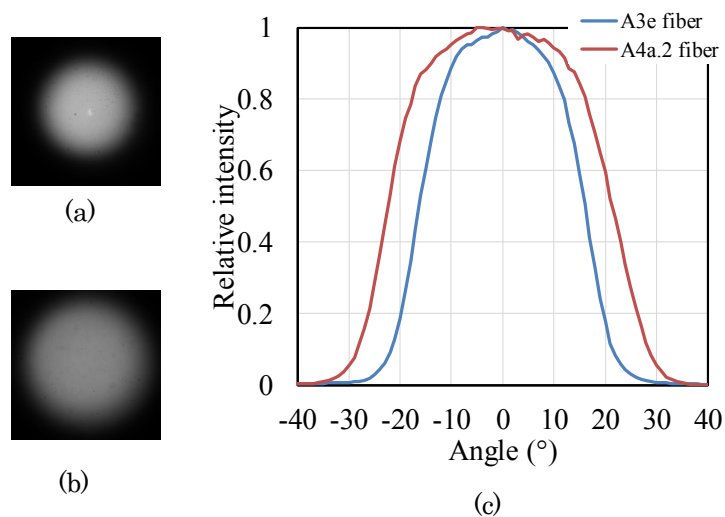


図 4-9 EMD 光: (a) A3e ファイバ, (b) A4a.2 ファイバ, (c) 両ファイバの 1 次元 X 軸プロファイル

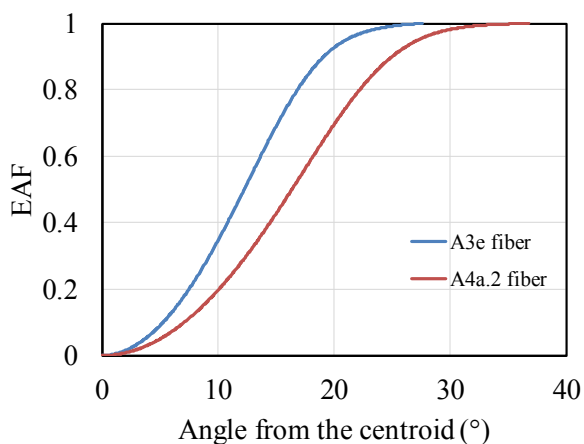


図 4-10 EMD 光の EAF プロファイル

(2) EAF による伝搬モード分布の解析

EMD 光をランチ光源に用いて X 軸、Z 軸の軸ずれによる伝搬モード分布の振舞いを測定評価した結果を図 4-11 に示す。同図(a)は DUT である X 軸ずれの評価結果で、何れの光ファイバでも軸ずれに対して小さい変化である。EAF 50%値の変化量は A3e ファイバで 0.2° [(12.4° at $x/a = 1.2$) minus (12.2° at $x/a = 0$)]、A4a.2 ファイバで 0° [(16.4° at $x/a = 1.2$) minus (16.4° at $x/a = 0$)] であった。一方、Z 軸ずれは同図(b)に示すように Z 軸ずれに従って小さい角度の方向へプロファイルが変化し、EAF 95%の変化は A3e ファイバで -3.1° [(17.8° at $z/a = 4$) minus (20.9° at $z/a = 0$)]、A4a.2 ファイバで -6.0° [(21.4° at

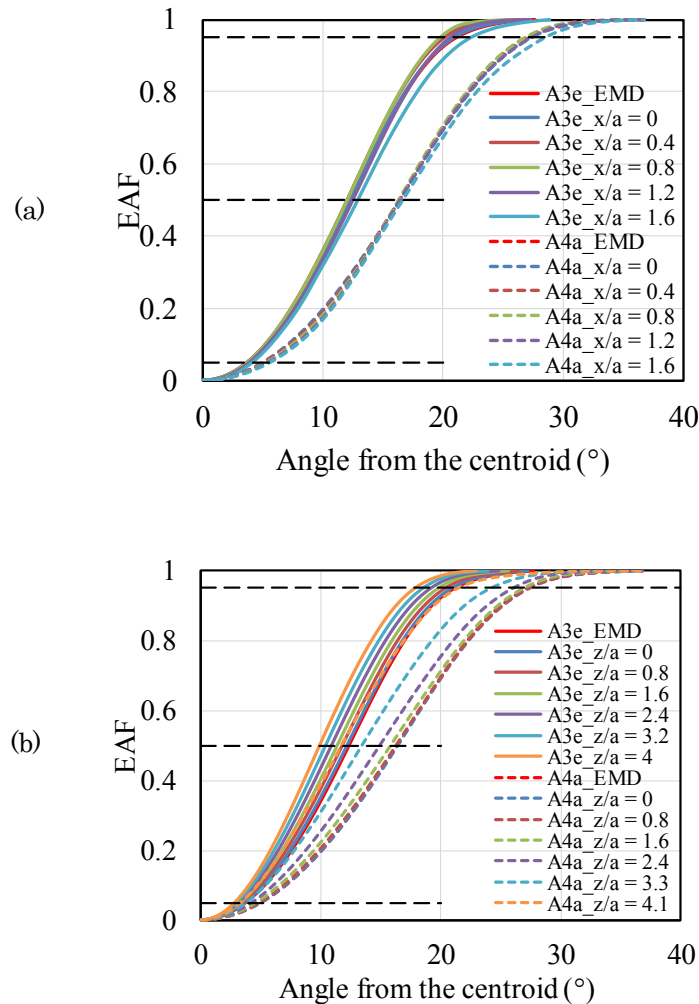


図 4-11 A3e ファイバと A4a.2 ファイバ(表示 A4a)の EMD 光をそれぞれ用いた DUT の軸ずれによる伝搬モード分布の EAF プロファイル表示: (a) X 軸ずれ, (b) Z 軸ずれ

$z/a = 4$) minus (27.4° at $z/a = 0$)] であった。EAF プロファイルは Z 軸ずれに従って小さい角度の方向へシフトするので、大きな角度成分の光の減少、いわゆる高次モードが放射または漏洩していることを示している[85]。EMD をランチ光源に用い接続の軸ずれによる伝搬モード分布の変化は、X 軸ずれより Z 軸ずれが大きな影響を与えることが分かった。

(3) 挿入損失特性

EMD をランチ光源として用いて DUT の X 軸、Z 軸ずれによる挿入損失の結果を図 4-12 に示す。A3e ファイバ、A4a.2 ファイバの接続における X 軸ずれによる変化は、例えば $x/a = 0.8$ で 4.2 dB、3.7 dB と両ファイバで異なる結果となった。Z 軸ずれによる特性は、例えば $z/a = 0.8$ で 1.2 dB と同じプロファイルとなった。

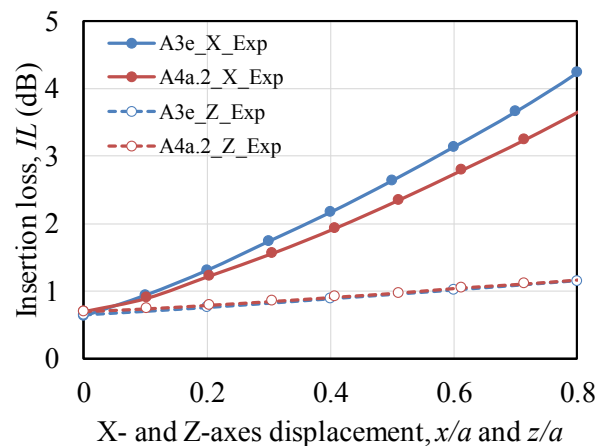


図 4-12 EMD を光源に用いた A3e ファイバと A4a.2 ファイバの軸ずれによる挿入損失特性

4.4 考察

4.4.1 ガウシアンビームの励振

NA の小さなガウシアンビーム入力では低次モードの励振となる。接続を DUT のとした測定評価で X 軸ずれは小さな NA、Z 軸ずれは大きな NA のランチ条件がそれぞれ大きく変化した。DUT の X 軸ずれは伝搬モード分布の全ての角度成分が同じ割合で変化するの

で EAF の変化は理論的には起こらない。4.3.2 章のリングビームによる接続解析で明らかになったクラッドモード及びクラッドモードが伝搬光に変化した光がこの変化に現れていると考えるのが妥当であろう。

測定で用いたガウシアンビームの NA に順じて挿入損失の相対的な結果が一義的に決まることを期待したが、図 4-5 に示すようにその通りにはならなかった。EAF 測定システムの FFP 像をライブモニタで観察すると、被測定 SI-MMF を取り扱っている間に FFP 像が変動していた。測定におけるわずかな時間や限られた範囲の光ファイバの取り扱いだけでも伝搬モード分布が変化する。この現象が SI-MMF の伝搬モード分布のコントロールを困難にし、またその変動など全てカバーするために、これまで使われてきた光データリンクでは大きなシステムマージンが設定されていた理由であろう。この変動をコントロールすることは新たなチャレンジだが、光部品の測定不確かさをある一定の範囲に収めることを前提とした測定用光源のルール化を推し進めている。これが A3e ファイバの接続部品の測定を、EAF テンプレートの上限値下限値の間を通るプロファイルの光を用いることが IEC で審議され、2016 年 7 月に改訂された IEC 61300-1 に規定されている[30]。

4.4.2 リングモードの励振 - クラッドモード

特定の高次モードを限定的に励振させることが可能なリングビームによる解析でふたつの重要な結果を得た。ひとつはリングビームであっても SI-MMF 受光角内であればガウシアンビームのシミュレーションモデルが使えることを明らかにした。もうひとつは同受光角から外れる大きな伝搬角を有するリングビームはガウシアンビームのシミュレーションモデルが使えないことが分かった。仮に後者の解析を推し進めるためには更にクラッドモードを調べて新たな解析モデル作りが必要である。またこれが伝搬モードへも変換されることを確認した。実際の光データリンクにおいてピンホールなどでこれを除去する手法は使わないので現実には起こっている現象であるといえる。

4.4.3 EMD 光の励振

図 4-11 に示したように X 軸ずれによる EAF プロファイルのシフトは限定的であるが、Z 軸ずれによるものは EAF プロファイルのシフトに大きな変化を与えることを確認した。

SI-MMF では接続において光ファイバの間にギャップが発生する[79]。このギャップをコントロールすることが挿入損失の改善のカギとなると考えている。また本研究で図 4-12 に示したように A3e ファイバ、A4a.2 ファイバともに Z 軸ずれによる挿入損失特性のカーブは一致することを確認した。また EMD を光源に用いることで安定かつ再現性よく測定できることも確認した。

4.4.4 従来理論モデルとの比較

1970 年代から 80 年代に発表された Tsuchiya らのモデル[37]、van Etten らのモデル[34]を用いて A4a.2 ファイバによる本研究の結果との比較を行う。

(1) Tsuchiya らのモデル

Tsuchiya らは均一モード分布として解析している[37]。光ファイバコアの屈折率 n 、接続における光ファイバ間の媒質の屈折率 n_0 、伝搬光の入射角 θ_i 、さらに $\theta_i \ll 1$ 、 $K = n/n_0$ のとき透過係数 T は次式で表される。

$$T \cong \frac{16K^2}{(1+K)^4} [1 + 0(\theta_i^2)] \quad (4.4-1)$$

コア半径 a 、X 軸ずれ量 x とすると X 軸ずれは次のように表される。

$$\eta = \frac{16K^2}{(1+K)^4} \frac{1}{\pi} [2\cos^{-1}(x/2a) - (x/a)[1 - (x/2a)^2]^{1/2}] \quad (4.4-2)$$

また光ファイバの NA から算出される最大受光角度 ϕ_0 のとき、Z 軸ずれ量が $z < a/\tan \phi_0$ と十分小さいとき結合効率は次から計算できる。

$$\eta \cong \frac{16K^2}{(1+K)^4} \left[1 - \frac{z}{4a} K(2\Delta)^{1/2} \right] \quad (4.4-3)$$

ここで、 Δ はコアとクラッドの屈折率差、 ϕ_0 は $K(2\Delta)^{1/2}$ で表している。

(2) van Etten らのモデル

van Etten らは平衡モード分布としたとき光ファイバ間の接続は式(2.4-27)を導いた。

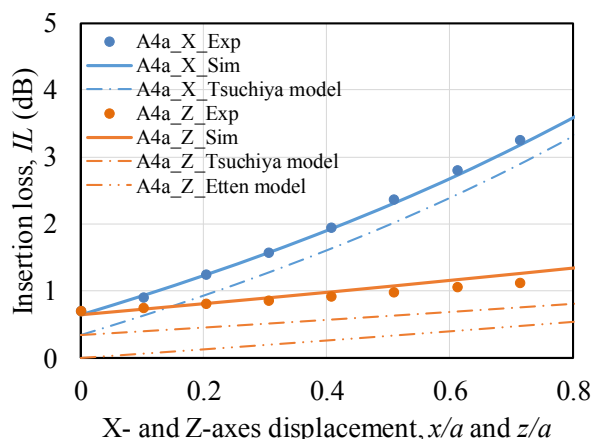


図 4-13 A4a.2 ファイバ(表示 A4a)の軸ずれによる挿入損失特性. 本研究の測定及びシミュレーションの結果と Tsuchiya らと van Etten らのモデル

(3) 解析モデルの比較

図 4-13 に A4a.2 ファイバによる本研究の測定及びシミュレーションの結果に加えて、Tsuchiya らと van Etten らの理論式より導出した同計算結果を示す。Tsuchiya らのモデルは $x/a = z/a = 0$ において本研究で測定した挿入損失より 0.31 dB 小さい値となっている。van Etten らのモデルは EMD を用いているが $x/a = z/a = 0$ で挿入損失が 0 dB となっている。これらの過去の解析的モデルは挿入損失の全体的な傾向を良く表しているため理解を深めるためには重要である。しかしながら、このように実際に得られる結果と隔たりがあることから、実際に使う際には適宜実験により測定評価データを構築して光部品の設計などをすることがほとんどである。本研究における光線追跡法のシミュレーション結果は測定結果と良く合っており、従来の解析モデルと比べても実験結果を裏付ける妥当性がある。そのため最初に一度 FFP などのパラメータを取得すれば同じモデルでの解析は容易である。

4.5 まとめ

本章では代表的な SI-MMF である A3e ファイバ及び A4a.2 ファイバを用いてガウシアンビームの励振、リングビームの励振、EMD 光の励振とランチ条件を変えて、接続における伝搬モード分布の振舞いについて詳細に調べた。ガウシアンビームをランチ光源とし

た測定において X 軸ずれは小さな NA、Z 軸ずれは大きな NA の条件のときに伝搬モード分布の変化が大きいことが分かった。また同じ接続であっても異なる NA のランチ条件では異なる挿入損失となることを明確に示した。特定の高次モードを励振するリングビームに依る解析で、A3e ファイバの NA より大きな角度成分の光がクラッドモード及び伝搬モードへ変換されることを明らかにした。また実際のアプリケーションにおいては測定ばらつきを考慮する必要があることを示唆した。そして挿入損失において本研究の結果と従来研究の理論式を比べ、差異があることを明確にした。以上により SI-MMF 接続において発生する現象を体系的にまとめることができた。

第5章 測定用光源の検証と接続モデルの考案

5.1 緒言

SI-MMF 接続に関して一定範囲の測定再現性が得られるよう測定用光源の国際規格が発行された[30]。本章では国際規格となった A3e ファイバ接続部品の測定用光源条件の検証を行った。ガウシアンビームの NA をコントロールし、測定用光源条件に入るランチ光源を用いた測定では、想定された挿入損失が得られない、いわゆる規格適用外領域があることを確認した。原因を調査するために長さの異なる同光ファイバを用いて NFP を測定したところ、実用で使用する数十メートル以下の範囲では NFP が不均一モード分布になっていることを確認した。加えてこの不均一モード分布を解消することで同規格を満足することを示した[89]。更に SI-MMF の接続モデルに NFP と FFP の測定データを用い、挿入損失を計算する方法を考案した。ランチ条件が EMD 光源だけでなく上記のように NFP で輝度分布が残る状態の光源モデルにおいても有効であった[89]。

5.2 損失測定用光源の検証

5.2.1 光源と測定評価システム

(1) 光源の条件

A3e ファイバは表 3-3 に示すようにコア/クラッド径は 200/230 μm 、NA が 0.37 と規定されている。同光ファイバ接続を測定する際に使用するランチ条件は表 5-1 に示す上限値、下限値の間に入る EAF プロファイルの光源を用いると、接続損失は一接続当たり 2.0 dB 以下であれば測定不確かさは ± 0.2 dB 以内になると規定されている[30]。

表 5-1 A3e ファイバ接続の測定用ランチ光源の EAF 要求値 (波長 850 nm)

Radiation angle ($^{\circ}$)	EAF LOWER BOUND	EAF Upper Bound
5	0.0753	0.1197
10	0.2934	0.4454
15	0.6069	0.8329
20	0.8708	0.9871

(2) 測定評価システム

図 5-1 に接続特性の測定評価システムを示す。SLD 光源(Synos LSS002/850)、モード選択励振光学システム(Synos M-Scope Type GR)、DUT、光パワーメータ及び FFP 測定システム(Synos M-Scope Type F)は図 4-1(a)と(b)の組み合わせと同じである。新たに NFP 測定装置 (Synos M-Scope Type I)を評価システムに追加して測定を行った。DUT である光ファイバは(1)光源の条件で紹介した A3e ファイバ(OFS HCP-M0200T)であり、クラッドの外側はバッファコートにより外径 500 μm となっている[89]。同光ファイバの両端はフェルルールに成端され、平面かつ平坦な研磨が施されている。また光ファイバからの出力光 P_{out1} (dBm)、 P_{out2} (dBm)は光パワーメータで測定し、挿入損失 IL (dB)を $IL = P_{\text{out1}} - P_{\text{out2}}$ を求めた。

5.2.2 測定による検証

(1) 規格適用外領域の確認

図 5-2 に Fiber_A からの出力、いわゆる測定点 P_{out1} の EAF プロファイルを示す。何れのカーブも表 5-1 に示した上限値と下限値で示されるテンプレート内に入っているためこの条件を満たすことになる。光源 LL は 3.3.2 章で得た長さ 2000 m の光ファイバからの出力光、いわゆる EMD 光である[79]。光源 A1, A3, A3 はモード選択励振光学システムのガウシアンポート NA 0.5 を使い、条件をわずかに可変して出力をテンプレートの上側、中央、下側に沿うようにした。このとき Fiber_A、Fiber_B 共に長さ 1 m を用いた。このように IEC 61300-1 の条件を満たす A3e ファイバの接続部品測定用の光源を生成した[89]。

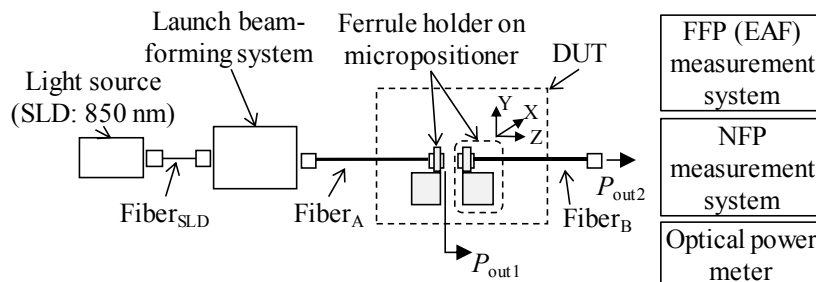


図 5-1 A3e ファイバ接続の測定評価システム

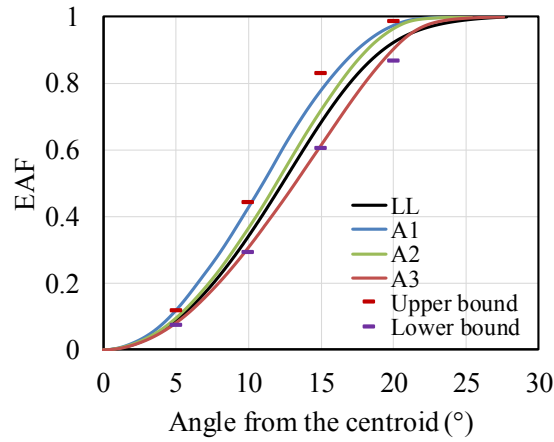


図 5-2 ランチ光源テンプレート(上限値・下限値)と測定点 P_{out1} の EMD 光源(LL) とガウシアンビーム NA 0.5 より生成した光源 A1, A2, A3

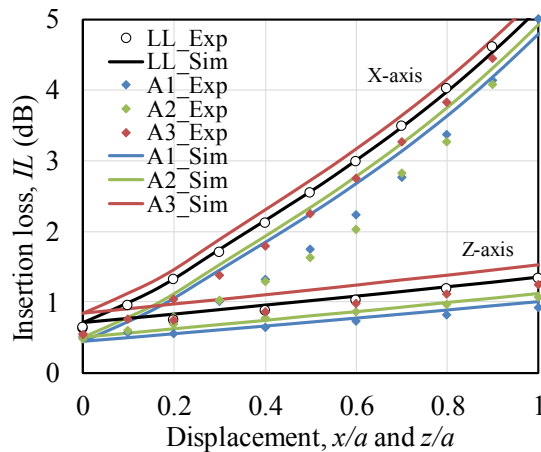


図 5-3 光源 LL, A1, A2, A3 による挿入損失特性. 測定値(Exp)とシミュレーション値(Sim)

図 5-2 の測定用光源を用い、DUT を X 軸及び Z 軸の軸ずれによる挿入損失を図 5-3 に示す。横軸はそれぞれの軸ずれ量を半径 $a = 0.1 \text{ mm}$ で規格化してある。プロットした点は測定結果(Exp)、実線で示したシミュレーション結果(Sim)である。シミュレーションは光ファイバのパラメータ、DUT の位置関係、Fiber_A 出力光の FFP データを用い、3.4.1 章で解説した光線追跡法 (Zemax OpticStudio)により得た[79]。光源 LL の測定及びシミュレーションの結果は X 軸及び Z 軸の軸ずれともよく一致している。しかしながら光源 A1 は例えば、 $x/a = 0.4$ において実験結果が 1.31 dB、シミュレーション結果が 1.84 dB と前

者が 0.53 dB 低い。光源 A2, A3 も光源 A1 と同じ傾向にある。これらは X 軸について測定ばらつきや測定不確かさの点からも説明ができない。従って IEC 61300-1 の規格を満たす光源を用いても規格適用外領域があることを初めて確認した[89]。

(2) NFP の伝搬距離依存性

図 5-4 (a)と(b)に光源 LL と A1 の Fiber_A 出力光である測定点 P_{out1} の FFP 像を示す。(b)は(a)のように均一ではなくムラが見られるが FFP 像としては双方とも同程度の大きさであり、FFP 像から求める図 5-2 の EAF プロファイルも同程度になることが分かる。また図 5-4 (c)と(d)は NA 0.28 の対物レンズで撮影した光源 LL と A1 の NFP 像である。(c)はコア全体に渡り均一な強度分布を示しているが、同 (d)はコア中心付近に輝度ピークが存在している。ここでは先に紹介した NFP 測定装置で光ファイバ出力端面の光ビーム像を直接対物レンズで取得した画像を NFP として議論を進める。また(d)は説明を容易にするために輝度ピークが中央に来るよう撮影しているが、入射位置を変えるとコア内で光ビーム形状が容易に変化する。図 5-5 に NA 0.5 のガウシアンビームを用いて長さ 1 m から

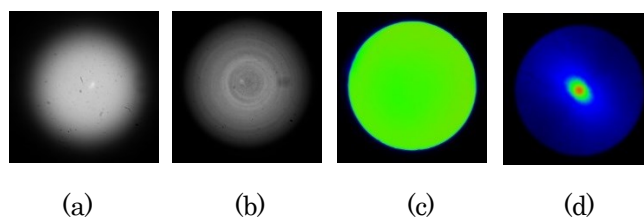


図 5-4 Fiber_A からの出力光 P_{out1} の FFP 像: (a) $L = 2000$ m (EMD), (b) $L = 1$ m. 同 NFP 像: (c) $L = 2000$ m (EMD), (d) $L = 1$ m. 条件: モード選択励振光学システムのガウシアンビームポート NA 0.5

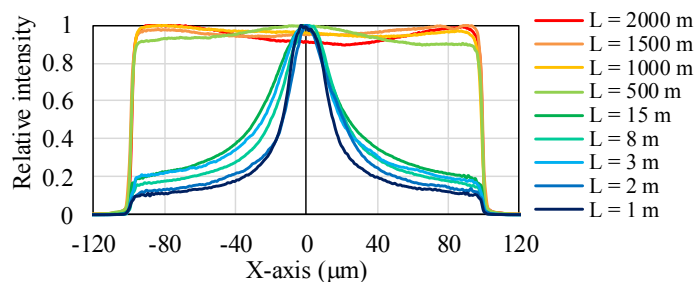


図 5-5 Fiber_A からの出力光 P_{out1} の 1 次元 NFP プロファイル. A3e ファイバ長さ $L = 1$ m ~ 2000 m. 条件: モード選択励振光学システムのガウシアンビームポート NA 0.5

ら 2000 m の光ファイバからの出力光 1 次元 NFP プロファイルを示す。光ファイバが長くなるに伴い NFP プロファイルが均一になることを検証した。ここでも短いファイバにおいては輝度ピークが中央に来るよう撮影しているが、入射位置を変えるとコア内で光ビーム形状が容易に変化する。SI-MMF は一般に数十メートル以下の光データリンクで使用するがその場合、NFP は均一モード分布ではないことになる。

(3) ランチ光源の検証

光源に NA 0.5 のガウシアンビームを用いて長さ 3 m の Fiber_A へ入力した。Fiber_A を直径 10 mm の円柱(Φ10 mm)に巻きつけてその出力光について調べた。予備実験で NA 0.5 から 0.6 のガウシアンビームを Fiber_A に入射し、その出力光を調べたところ表 5-1 の測定用光源の条件を満足することも確認している。図 5-6(a), (b), (c)に光ファイバを上記円柱に巻いた回数をパラメータにしたときの Fiber_A 出力光の 1 次元 NFP、1 次元 FFP、

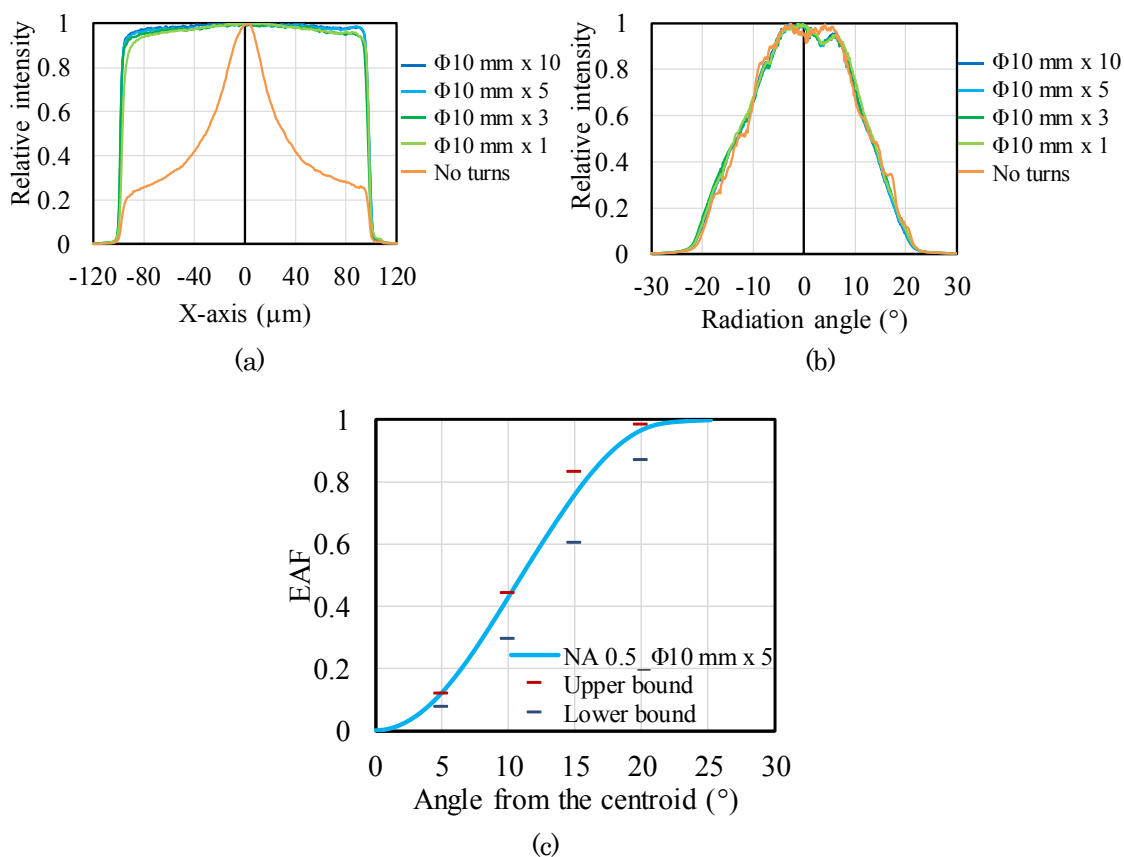


図 5-6 Fiber_Aからの出力光 $P_{out,i}$: (a) 1次元 NFP プロファイル, (b) 1次元 FFP プロファイル, (c) EAF プロファイル. 条件:光ファイバの入力ポートに NA 0.5 のガウシアンビームを光ファイバに入射し直径 10 mm の円柱に巻いた

EAF プロファイルをそれぞれ示す。図 5-6(a)では 1 次元 NFP プロファイルが 3 回以上の巻き回数でほぼ均一分布になることが分かる。図 5-6(b)は 1 次元 FFP プロファイルが巻き回数によりあまり大きな変化を起こさず、よりスムーズな形状になっていることを示している。図 5-6 (c)は FFP 像より導出した NA 0.5 のガウシアンビームを入射させて上記円柱に 5 回巻きの EAF プロファイルであり表 5-1 の光源の規定を満足している。

図 5-1 のモード選択励振光学システムのガウシアンポートの NA をそれぞれ 0.5, 0.55, 0.6 にし、その入射光を 3 m の光ファイバ Fiber_Aに入力し、その出力光 P_{out1} を用いて測定した DUT の挿入損失特性を図 5-7 に示す。直径 10 mm の円柱にはいずれも 5 回巻きつけた。 $x/a = 0.3$ の挿入損失はそれぞれ 1.55, 1.57, 1.54 dB であった。これらの値は光源 LL を用いた軸ずれ量の挿入損失 1.7 dB に近く、また上限及び下限の条件でシミュレーションした値の 1.89 dB と 1.45 dB の間に存在している。このように輝度中心が光ファイバ端面に残るような NFP の状態であってもロッドに複数回巻くことにより均一モード分布の様にすることができた。またこの状態で表 5-1 に示した測定用ランチ光源の EAF 要求値を満足すれば挿入損失も規格の範囲になることが分かった。

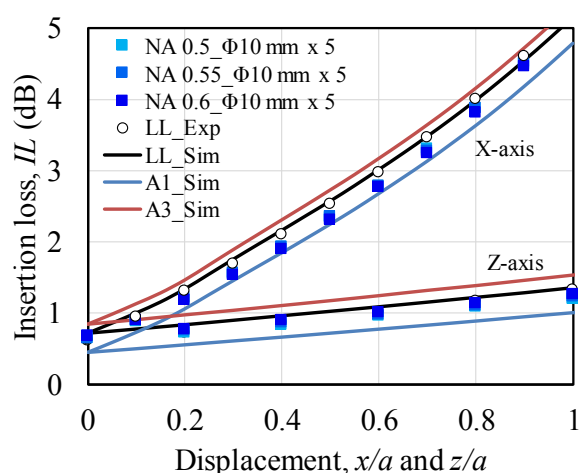


図 5-7 挿入損失の結果: (1) 直径 10 mm の円柱に巻いた Fiber_A の入力ポートに NA 0.5 ~ 0.6 のガウシアンビームを光ファイバに入射させて出力光 P_{out1} をランチ光源として測定. 比較のため光源 LL 及び上限と下限の範囲に相当する光源 A2 と A3 のシミュレーション結果(図 5-3 参照)

5.3 接続モデルの考案

SI-MMF の接続モデルに FFP と NFP の測定データを用い、挿入損失を計算する方法を考案した。本方法を用いることでランチ光源が EMD 光のみならず NFP で輝度分布が残る状態、いわゆる実用的な光源モデルにも有効であった。

5.3.1 ランチファイバと受光ファイバ

図 5-8 に光ファイバ接続の解析モデルを示す。同じ半径 a を持つランチファイバ(入力側光ファイバ)Fiber_A と受光側光ファイバ Fiber_B が相対して配置されている。入力側光ファイバ Fiber_A の端面には輝度 $I(x_A, y_A)$ を持つ微小面積 $ds (= dx dy)$ の点光源が存在する。その点光源から放射角度分布 $I(\theta_A)$ で光が放出される。ここで Fiber_A の出力光パワー P_A は式 (5.3-1) で示される。

$$P_A = \int_{-a}^a \int_{-a}^a I(x_A, y_A) I(\theta_A) ds \quad (5.3-1)$$

距離 z における Fiber_A からの出力光パワー P_A' は式(3.5-2)で求められる。ここで x_A' , y_A' は距離 z での位置情報である。また積分範囲はこの位置での光の広がり範囲となる。

$$P_A' = \int_{-x_A'_{max}}^{x_A'_{max}} \int_{-y_A'_{max}}^{y_A'_{max}} I(x_A', y_A') I(\theta_A) ds' \quad (5.3-2)$$

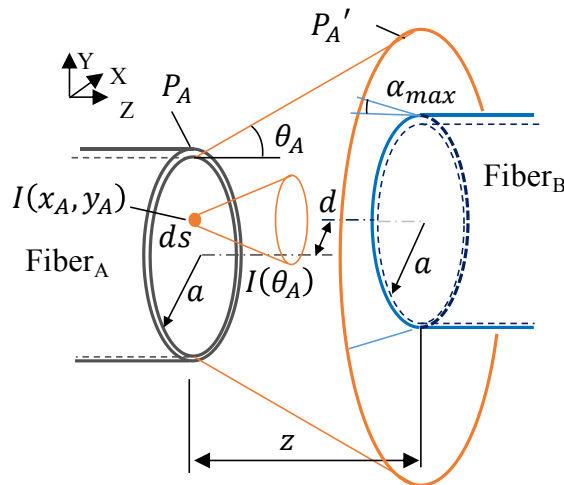


図 5-8 光ファイバ接続の解析モデル

Fiber_Aからの出力光が距離 z 、軸ずれ d における Fiber_Bに受光される条件は2つある。ひとつは Fiber_Bのコアの位置関係、もうひとつは最大受光角度 $\alpha_{max} = \sin^{-1}NA$ を満たすことである。この条件に合った光線の合算による受光パワー P_B が求められる。 NA は Fiber_Bの開口数である。そして式(5.3-3)で接続における挿入損失 IL (dB)が算出できる。ここで $IL_{fresnel}$ は一接続あたりのフレネル損失である。

$$IL = -10 \log\left(\frac{P_B}{P_A}\right) + IL_{fresnel} = -10 \log\left(\frac{P_B}{P_A}\right) + IL_{fresnel} \quad (5.3-3)$$

5.3.2 接続モデルによる解析

(1) FFP と NFP データ

前章で議論したふたつのランチ条件、LL と A2 を用いて計算を行った。図 5-4(a)と(b)の FFP の X 軸から取得した 1 次元の FFP を図 5-9(a)に示す。何れもほぼ同じプロファイルで、半値幅で LL が 31.4°、A2 が 30.8°である。同様に図 5-4(c)と(d)の NFP の X 軸から取得した 1 次元の NFP を図 5-9(b)に示す。LL は EMD 光であり NFP が均一モード分布になっている。一方、A2 は輝度中心が中央部付近に残っている。

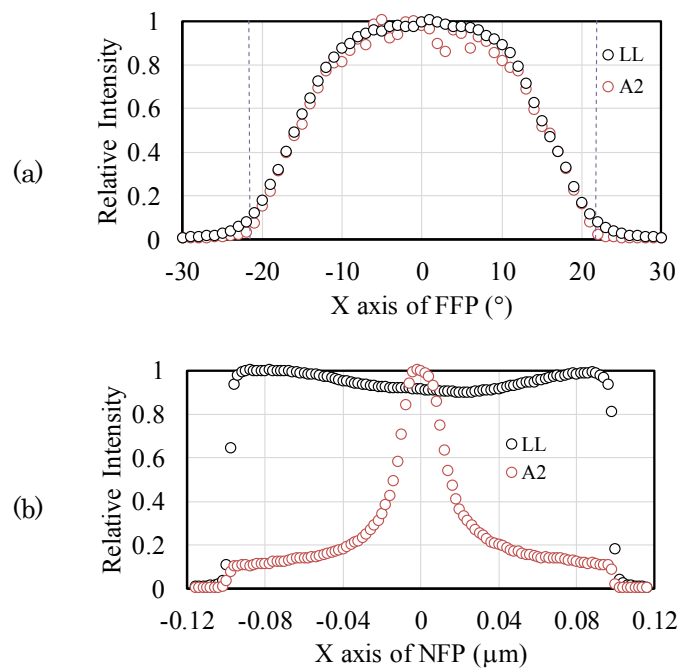


図 5-9 解析に用いた 1 次元プロファイルデータ: (a)FFP, (b)NFP

(2) 接続の計算

LLとA2について、それぞれ図5-9のFFPは1°間隔のデータを抽出して放射角度分布 $I(\theta_A)$ 、またNFPは間隔2 μm 毎のデータを用いてコア面内の輝度分布 $I(x_A, y_A)$ とした。ここで輝度はパワー情報であり、乗算で使うことから乗算後にパワー情報となるように、データとしてはそれぞれ平方根にして用いた。コア径200 μm の端面内を2 μm 間隔で7,844の点光源とし、それぞれについて角度分布を-40°から+40°を1°毎に81点計算し、ビームの直交方向について計算したので2倍となり、1プロットあたり1,270,728ポイントの計算を行った。計算には表計算ソフトを用いて離散的なデータを扱ったので、式(5.3-2)は式(5.3-4)として計算した。

$$P_A' = \sum_{-x_A'_{max}}^{x_A'_{max}} \sum_{-y_A'_{max}}^{y_A'_{max}} I(x_A', y_A') I(\theta_A) \Delta s' \quad (5.3-4)$$

図5-10に考案したモデルで計算した結果を示す。白抜きのは点は図5-3と同じ測定したLLとA2のデータである。同じ色の実線がそれぞれの計算結果である。本稿で提案した計算方法は軸ずれの小さい範囲、特に初期値である $x/a = z/a = 0$ において良く合っており、LLでは測定値0.63 dB、計算値0.68 dB、A2では定値0.50 dB、計算値0.59 dBである。4.4.4章の図4-13の従来理論を用いた計算では、特に初期値が異なっていた点を考慮すると良く合っているといえる[85]。コアは石英の屈折率1.4526($\lambda = 850\text{ nm}$)からフレ

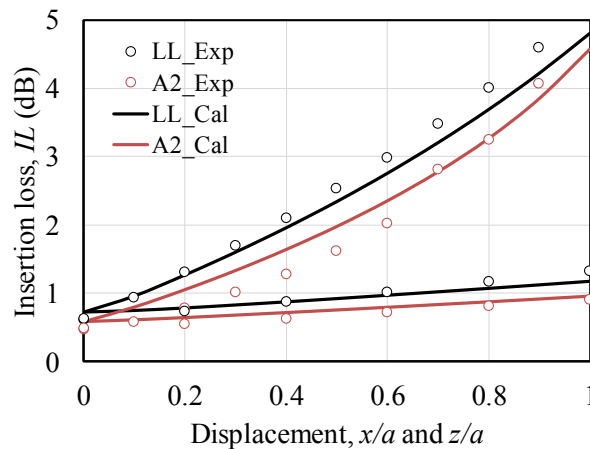


図 5-10 測定(Exp)と考案したモデルによる計算(Cal)による挿入損失

ネル損失を求めると一接続あたり 0.30 dB となる。従って計算値でみると前者で 0.38 dB、後者で 0.29 dB の差分が存在する。NA から計算できる Fiber_B の最大受光角度は $\pm 21.7^\circ$ であるが、Fiber_A の出力の伝搬モード分布は図 5-9 (a)の破線で示した -21.7° で 8.9%、 21.7° で 8.5%の成分を保っている。これより外側の成分は Fiber_B に受光されないことになる。その他、図 2-1 で示したようなコア径のミスマッチ、コア非円率、開口数のミスマッチもあるが、同一ファイバロットからのケーブルなので差異は小さいものと推測する。端面の状態は研磨により仕上げているので、こちらの影響も大きくない[79]。また A2 の X 軸ずれでプロファイルが下側に突き出している傾向は計算結果においても測定結果をよく反映している。

5.4 考察

5.4.1 Near field pattern (NFP) の不均一分布と解消

SI-MMF では一般的に FFP プロファイルで議論を進めており、本章でも当初 FFP データのみを用いて接続損失について光線追跡によるシミュレーションを行った。しかしながら測定結果がシミュレーションより小さな挿入損失となり、その原因は NFP が不均一であることに起因することが分かった。SI-MMF を用いた光データリンクは一般的にはせいぜい数十メートル以下であり、この条件では中心付近に輝度中心が残り、不均一な分布になることが容易に推測できる。2.4 章で議論したように SI-MMF 接続の理論は 1980 年ごろまでに均一モード分布と仮定して確立され、このような輝度分布が残るモデルの具体的な解析はされなかったようだ。本研究において従来理論と測定結果の違いの原因を明確にした。

不均一な NFP の状態で、直径 10 mm のロッドに光ファイバを複数回巻きつけることで均一になることを示した。この巻きつける操作でコア面内の NFP の輝度の均一化に寄与するが、いわゆる伝搬角度が変わり FFP を変化させる効果は無いことも明らかにした。FFP を変えるにはマイクロベンドなどさらに大きなひずみを与えることが必要である[90],

[91]。また図 5-9 (b)の LL の NFP で均一であるものの周辺がやや高くなっている。これは相対的に大きな NA となるスキュー光の伝搬が計測されたようだ[92],[93]。

5.4.2 接続モデルの考察

同ファイバの損失測定用光源プロファイルの規格では挿入損失 2 dB 以下の場合、測定不確かさを ± 0.2 dB 以下としている[30]。図 5-10 で 2 dB 以下は X 軸ずれ $x/a \leq 0.4$ 、Z 軸ずれ $z/a \leq 0.1$ の挿入損失に相当する。これを本測定に測定不確かさの議論を当てはめると、挿入損失 2 dB 以下の領域で測定と計算の結果の差は 0.2 dB 以下であり、この範囲であれば極めて合理的な計算モデルであるといえる。また A2 において若干ずれが大きいのは 4.4.1 章で考察したように測定中または測定中の作業などで伝搬モードが容易に変わるためであると考えられる[85]。さらに NFP 及び FFP から導出されるモデルを関数で示すことが出来れば実用的な理論モデルとして活用することが出来ると考えている。

5.5 まとめ

A3e ファイバの測定用光源を IEC 61300-1:2016 の規定に基づいて生成したが、不確かさの範囲を超えて挿入損失が大きく外れる規格適用外条件があることを見出した。同光ファイバからの出力光の NFP を解析し、SI-MMF の光データリンクで良く使用される数十メートル以下の範囲であれば光源の分布が不均一で輝度ピークがコア中心部に残ることを示した。さらにこれを解消することで挿入損失が規格に入ることを示した。加えて FFP と NFP のデータを用いて挿入損失を求める計算モデルを考案し、EMD のみならずコアに輝度中心があるランチ条件でも測定結果を反映することを検証した。

第6章 高速伝送に向けた伝搬モード特性の評価

6.1 緒言

第3章で構築した EAF および EAF 測定法、第4章で得た接続における伝搬モード分布の振舞い、そして前章では SI-MMF の測定用光源に焦点を当てて議論を進めた。本章ではこれらを踏まえて実際の光データリンクをモデル化し、接続における伝搬モード分布の測定評価をした。自動車内の光通信で用いられている光コネクタの情報を整理し、他の産業の光コネクタと異なるコンセプトであることをまとめた。次に高速通信で重要となる伝搬モード分布と周波数特性との関係を調べ、接続の位置や数により両特性が異なることを相互解析で検証した。また接続における間隙による伝搬モード分布の広がりが認められた。接続の間隙に屈折率媒質で埋めることにより高次モード成分の放射が抑制され、挿入損失が改善することを具体的に示した。

6.2 自動車用光データリンク

6.2.1 車載光コネクタのコンセプト

自動車用の光コネクタは(i)低コスト、(ii)簡単な端末処理、(iii)機械的及び化学的耐久性が求められる[38]。先ず(i)車載光コネクタは低コストが最重要視され、光学特性は仕様の範囲内であれば良いという程度であるため高性能化の要求はほとんど無い。(ii)他の分野の光コネクタのケーブル成端工程は接着や研磨など人手による工程が入る。一方、自動車用においては量産効果を最重要視し、全自動加工組み立てが行われている[14], [38]。またこの全自動組立ては品質の安定を第一にする自動車業界の強い要望でもある。(iii)車載光コネクタは他の産業では採用されない試験も実施され、例えば、タバコの煙、エンジンオイルなどを用いた評価もある[38],[94]。このように車載光コネクタは他産業の光コネクタとは要求が異なり全く別の技術領域といえる[95]。

6.2.2 車載光データリンク仕様

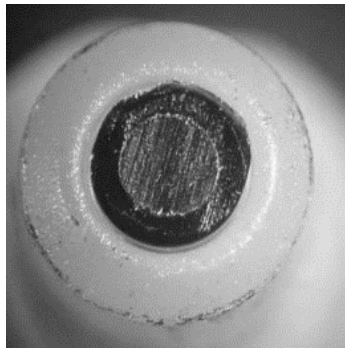
表 6-1 に伝送速度 150 Mb/s の MOST[14]及び 1 Gb/s の GEPOF[31]の代表的な仕様を示す。双方とも光ファイバはクラッド径 1000 μm , NA 0.5 のアクリル樹脂である PMMA (Polymethyl methacrylate)をベースにした POF (IEC 60793-2-40 のカテゴリ A4a.2 ファイバ)が用いられる[14], [87]。他の章と連動するよう本章ではこの POF の名称を A4a.2 ファイバとする。表 6-1 によると MOST はリンクパワーバジェットが 13.5 dB、発光素子や受光素子と光コネクタの挿入損失は ≤ 2.5 dB、中継光コネクタの挿入損失は ≤ 2.0 dB となっている。これらの光コネクタの要求は 6.2.1 章で議論したように低コスト化を達成するため光学特性は寛容な仕様となっている。一方、GEPOF の自動車用途の分類 1000BASE-RHC Type III では最大で長さ 15 m かつ 4 中継の仕様である[31]。GEPOF のリンクパワーバジェットは MOST のそれより 4 dB 狭い 9.5 dB、中継光コネクタの挿入損失は 0.5 dB 低い ≤ 1.5 dB である。限られたリンクパワーバジェット及び厳しい環境条件の中で光データリンクの通信を成立させるため接続において発生する現象の把握と対策が求められる。ここで扱う光ファイバの接続に関する報告はあるが[96], [97]、車載光コネクタに特化すると光学特性の報告は他産業の光コネクタに比べて少ない。

6.2.3 車載光コネクタ

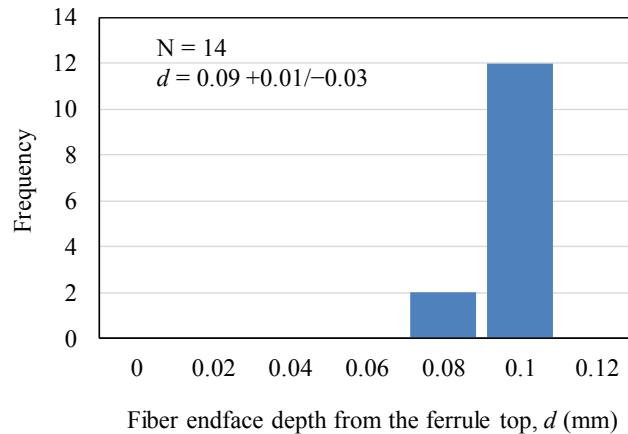
図 6-1(a)に自動車用光ファイバケーブル[87]を用いて自動機で端末加工している車載光コネクタ[13], [14]のフェルール端面の写真を示す。光ファイバ端面には切断痕が残っており、通過する光の逸れや散乱が発生することが容易に推測できる。しかしながら、低コス

表 6-1 MOST と GEPOF の主な仕様

	UNIT	MOST	GEPOF
Data rate	b/s	150 M	1 G
Minimum transmitter power	dBm	-8.5	
Minimum receiver sensitivity	dBm	-22	
Average optical power	dBm		-18.5
Link power budget	dB	13.5	9.5
Insertion loss between transmitter (or receiver) and connector	dB	≤ 2.5	
Insertion loss of in-line connection	dB	≤ 2	≤ 1.5



(a)



(b)

図 6-1 自動車用光コネクタ: (a)フェルール端面写真, (b)フェルール端から光ファイバ面までの凹み

ト化を達成するためこれらの切断痕を除去するような研磨などの追加の処理は考慮されない。

図 6-1(b)に同フェルールアセンブリの端面の高さを計測した結果を示した。光ファイバ端面はフェルール先端より $d = 0.09 + 0.01 / -0.03$ mm 低くなっていることを確認した(サンプル数 $N = 14$)。この凹みはその公差範囲から十分コントロールされており、安定した品質で製造されていることが分かる。光ファイバ端面がフェルール先端より凹んでいることは光コネクタ接続において光軸方向軸ずれ、いわゆる間隙が発生していることになる。これが SI-MMF の接続において挿入損失の主な原因である[79]。しかし絶えず振動が発生している自動車環境では光ファイバ端面の摩擦や擦れによる劣化を防止する効果もある。これらの設計コンセプトはやはり他の光コネクタ[62]と異なるものである。それゆえ設計コンセプト及び全自動低コスト量産が確立されている車載光コネクタを変えることは簡単ではない。挿入損失が ≤ 2 dB の MOST から ≤ 1.5 dB の GEPOF の中継光コネクタの要求を何らかの方法で満たす接続を確立する必要がある。

6.3 伝搬モード分布と諸特性

6.3.1 光データリンクモデルと評価項目

VCSEL を光源に用いた光ファイバ A4a.2 ファイバの接続に関する周波数特性について報告があるが[98]、伝搬モード分布及びその関連性についての報告はない。本研究で初めてこのふたつの関係について評価を行った[95], [99]。自動車用光データリンクは、例えば長さ数 cm などの短い光ファイバケーブルの接続がある。そのため接続の位置や数に起因する現象を把握することは高速伝送の実用に向けて重要である。

(1) DUT と周波数特性の測定評価システム

表 6-2 に接続の位置と数及び測定方向が異なる全長 15 m の光データリンクのモデルの組み合わせを示す。これを DUT として伝搬モード分布と周波数特性について調べた。伝搬モード分布は EAF 測定システム[79]により EAF として計測した。また周波数特性はネットワークアナライザ(Keysight E5061B)、電気/光(E/O)コンバータ(Graviton LL-650GI: 658 ± 10 nm, 100 KHz to 1.2 GHz)、光/電気(O/E)コンバータ(Graviton SPA-2 for the fiber of 1-mm cladding diameter, 1 GHz (max.))を用いた。コネクタ端面状態をパラメータに入れると問題を複雑にすることから、ここでは数と位置に注目して検討を行った。本研究では光ファイバケーブル (Mitsubishi ESKA Premier) の両端を FC コネクタに成端し、そのフェルール端面は平面かつ平坦な研磨を行った[95]。

表 6-2 ケーブル長さ 15m の接続組み合わせと測定方向

Name	Direction	Link configurations						Total length					
A	→	1 (15 m)						15 m					
B1	→	3/4					1/4	15 m					
B2	←	(11.25 m)	+			(3.75 m)							
C1	→	3/4	+	1/8			1/8	15 m					
C2	←	(11.25 m)	+	(1.88 m)	+	(1.88 m)							
D1	→	3/4	+	1/8	+	1/16	+	1/16	15 m				
D2	←	(11.25 m)	+	(1.88 m)	+	(0.94 m)	+	(0.94 m)					
E1	→	3/4	+	1/8	+	1/16	+	1/32	+	1/32	15 m		
E2	←	(11.25 m)	+	(1.88 m)	+	(0.94 m)	+	(0.47 m)	+	(0.47 m)			
F1	→	3/4	+	1/8	+	1/16	+	1/32	+	1/64	+	1/64	15 m
F2	←	(11.25 m)	+	(1.88 m)	+	(0.94 m)	+	(0.47 m)	+	(0.23 m)	+	(0.23 m)	

(2) 伝搬モード分布の測定評価システム

図 6-2 に光コネクタ接続に関する伝搬モード分布と挿入損失の測定評価システムを示す。光源は波長 660 nm の LED 光源をモードスクランブラの入力ポートに接続した[88]。モードスクランブラの出力ポートから同光ファイバ固有の EMD 光が出力されこれをランチ光源とした。モードスクランブラの出力ポート末端は、同様に末端処理された長さ 1 m の同種の光ファイバを相対するように微動ステージ上のコネクタホルダに設置した。この微動ステージは X, Y, Z 軸の位置決めをすることができる。角度ずれも接続における重要なパラメータであるが、NA が大きく実用範囲ではその寄与が小さいためここでは扱わない[79]。ここで用いた光ファイバケーブルは 6.3.1 章(1)で紹介した光コネクタ末端加工をしたものを用いている。受光側の長さ 1 m の光ファイバの出力光は、伝搬モード分布を EAF 測定システム (Synos M-Scope Type F) [79]、光パワー P_{out2} (dBm)を光パワーメータで測定した。同様にモードスクランブラの出力光の伝搬モード分布及び光パワー P_{out1} (dBm)を測定した。光コネクタ接続における挿入損失 IL (dB)は $IL = P_{out1} - P_{out2}$ により計算した。

(3) 屈折率媒質

光コネクタやメカニカルスプライスなどの接続点における屈折率媒質の適用は挿入損失及び反射減衰量の改善のために使われる[100], [101]。これらは石英系ガラスファイバへの適用した屈折率整合剤であり、光ファイバコアと屈折率媒質の間の反射を除去するため、その屈折率を精密に合わせているため高価である。更にガラスファイバ用の光コネクタは、その光ファイバ端面同士に物理接触が導入されているため本質的に光軸方向の軸ずれは

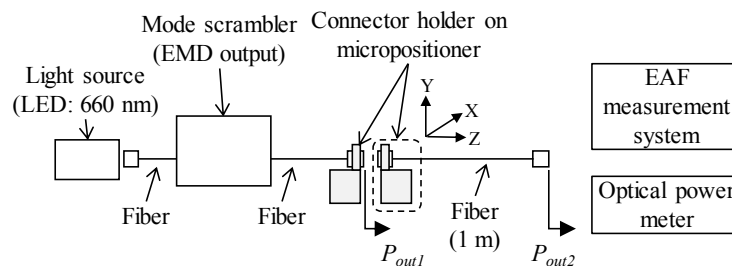


図 6-2 A4a.2 ファイバの接続の測定評価システム

排除されている[62]。一方、車載光コネクタを含む SI-MMF 用光ファイバ用コネクタは 6.2.3 章で議論したように必ず光軸方向の軸ずれが発生する構造となっている[79]。従って車載光コネクタ接続において挿入損失の主原因はガラスファイバ光コネクタと異なる。ここでは温度環境 200°C 以上でも安定な物性を有する熱処理の屈折率媒質を用いた[102]。この種の材料は自動車用途を含む電子部品の封止などに使われている。車載光コネクタは接続点における反射光は光データリンクの性能に影響を与えないため屈折率を厳密に整合させる必要がない。この取り組み自体、車載光コネクタへの屈折率媒質を適用する最初の事例と思われる。

接続における高次モード放射を抑制する効果を調べるためシリコン樹脂が母材の屈折率媒質を準備し、その製品取扱書に基づいて温度 150°C で 5 分間の熱処理を行い、屈折率 $n_D = 1.404$ のゲル状物質(柔らかいエラストマー)を得た。そして約 1 mm³に切り出したこの媒質をフェルール先端に塗布してアダプタ内でフェルール間の接続に用いた。

(4) 自動車用光ケーブル 15 m × 4 中継

長さ 3 m の自動車用光ファイバケーブルを直列に 5 本接続して 15 m × 4 中継の接続モデルを構成し、周波数特性とリンクマージンの測定評価を行った。ここでは図 6-1 に示したようなフェルール端面に先の屈折率媒質を塗布している[95]。

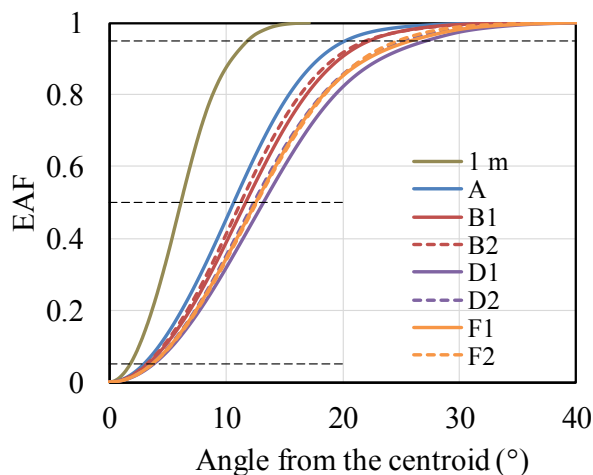


図 6-3 ケーブル長さ 15m の接続の組み合わせと測定方向による伝搬モード分布の EAF プロファイル

6.3.2 光データリンクモデルの測定評価

(1) 伝搬モード分布と帯域

表 6-2 に示した成端した各種長さの光ファイバケーブルを全長 15 m となるよう組み合わせさせて接続した伝搬モード分布を EAF で表示した結果を図 6-3 に示す。長さ 1 m のケーブルと A(長さ 15 m 中継接続無し)の変化を比べることで、中継接続の影響を受けずに伝搬モード分布が長さ 1 m から 15 m の間でどのように変化するか分かる。EAF 5%値, 50%値, 95%値はそれぞれ 1.8°, 6.1°, 11.8° から 3.0°, 10.7°, 20.3° と、伝搬モード分布の光学重心付近、中間付近、裾付近の何れにおいても大きな角度成分、いわゆる高次モード成分が発生していることが分かる。更に接続が増えるに従い高次のモード成分が増加することを示している。例えば、A (1)、B1 (3/4 → 1/4)、そして D1 (3/4 → 1/8 → 1/16 → 1/16)の EAF 95%値はそれぞれ 20.3°, 22.3°及び 27.2°に変化している。また光源に近い側の接続が増えると EAF プロファイルは小さい側にシフトする傾向にある。例えば EAF 95%値で比較すると D1 (3/4 → 1/8 → 1/16 → 1/16)は 27.2°、この逆の構成の D2 (1/16 → 1/16 → 1/8 → 3/4)は 25.3°である。

図 6-4 に表 6-2 に示した接続構成の周波数特性を示す。初期値より相対的に 3 dB 低下するポイントを帯域 f_B として測定結果の比較を行った。接続が光源に近い位置にあると帯域の劣化が著しい。例えば B1 (3/4 → 1/4) は $f_B = 320$ MHz だが、B2 (1/4 → 3/4)は $f_B =$

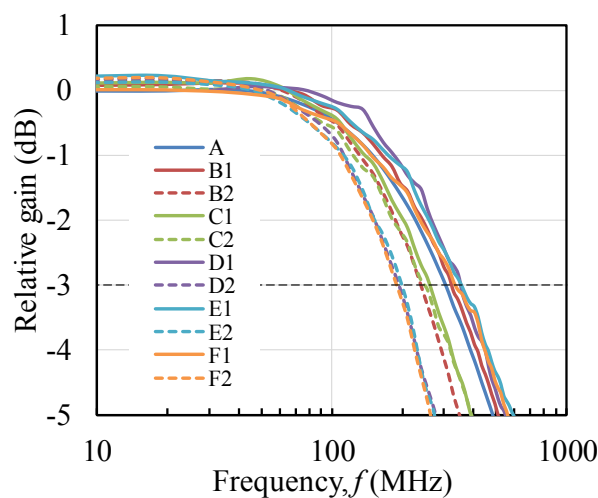


図 6-4 ケーブル長さ 15m の接続の組み合わせと測定方向による周波数特性

241 MHz となっている。これは周波数特性に伝送方向依存性があることを示している。更に光源に近い側で接続箇所が増えると帯域劣化が著しくなる。例えば光源から 1/4 までの範囲で接続数をパラメータとして調べた F2 (1/64 → 1/64 → 1/32 → 1/16 → 1/8 → 3/4) が $f_B = 187$ MHz、一方、同じ区間で接続を持たない B2 (1/4 → 3/4) は $f_B = 241$ MHz であった。

これら伝搬モード分布特性と周波数特性からその関係性をまとめた結果を図 6-5 に示す。EAF は変化が大きく現れる 50%値と 95%値をプロットし、また周波数特性は帯域 f_B をデータに用いた。最初の 3/4 の領域で接続がない構成 B1, D1, F1 は同範囲で接続がない A と同じ帯域 $f_B = 320$ MHz だが同じ構成で伝送方向を反対(B2, D2, F2)にすると著しい帯域の劣化がみられた。加えて最初の 3/4 の領域に接続がない B1, D1, F1 は伝送方向が反対の B2, D2, F2 に比べて大きな角度成分を含み、また帯域劣化が相対的に抑えられている。例えば D1 の EAF 95%値の 27.2°、 $f_B = 320$ MHz と D2 の同値の 25.3°、 $f_B = 181$ MHz である。ここで接続に関して位置と数及び伝送方向について依存性があることを明らかにした。さらに伝送モード分布と帯域の関係は詳細な研究が必要である。

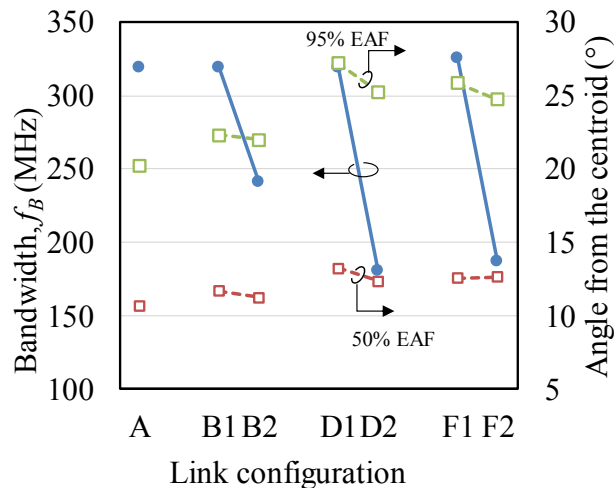


図 6-5 異なるリンク構成における帯域と EAF 50%値・95%値の関係

(2) 伝搬モード分布と挿入損失

図 6-2 の評価システムを用いて接続を DUT として X 軸、Z 軸の軸ずれによる伝搬モード分布の変化を EAF プロファイルで示した結果を図 6-6 に示す。パラメータは光ファイバコア直径($a = 490 \mu\text{m}$) [87] で規格化した x/a 及び z/a である。また接続に先に説明した屈折率媒質(CG: Cured gel)を入れた結果を-CG として示している。図 6-6(a) の X 軸ずれ特性は屈折率媒質の有りに関わらずほとんど変化しない。一方、図 6-6(b) に示した Z 軸ずれ特性は軸ずれの増加とともに EAF プロファイルが左側、いわゆる角度の小さい方向にシフトすることを観測した。例えば EAF 50% 値で $z/a = 0$ の 16.4° から $z/a = 3.1$ の 13.8°

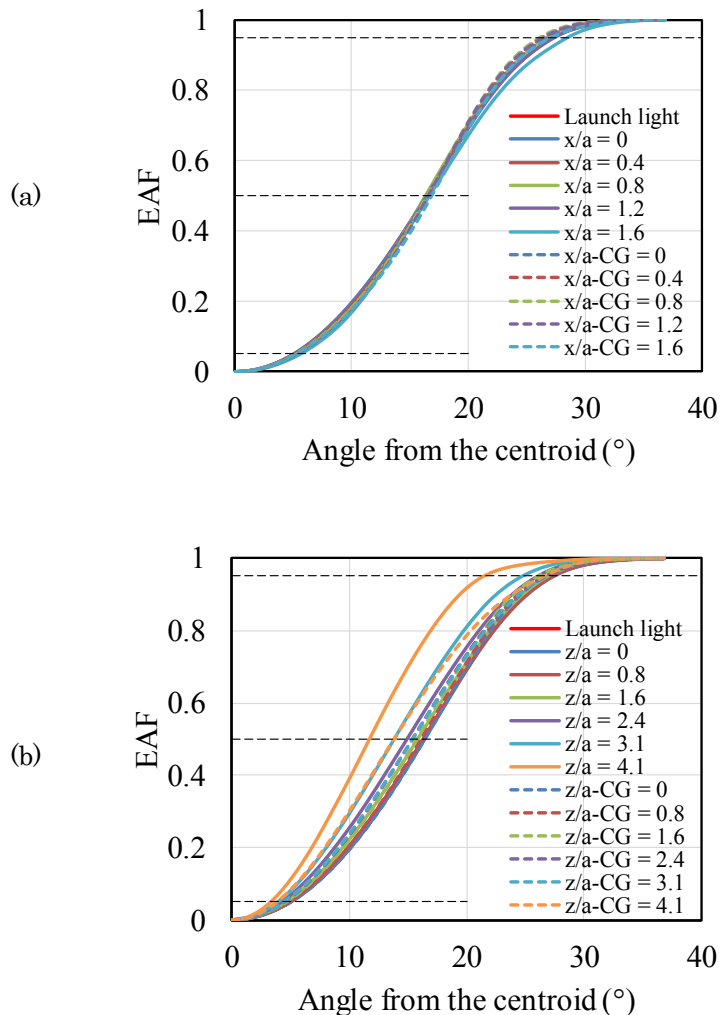


図 6-6 EMD 光源を用いた DUT の軸ずれに伝搬モード分布の変化: (a) X 軸ずれ, (b) Z 軸ずれ. 接続に屈折率媒質の有り(-CG)と無し

である。さらに接続に屈折率媒質を入れることにより EAF プロファイルは右側、いわゆる角度の大きい方向にシフトしていくことが示された。例えば $z/a=3.1$ において EAF 50% 値で屈折率媒質の無しの 13.8° から有りの場合は 15.4° となっている。

図 6-6(a)と(b)から EAF 50%値を抽出し、挿入損失 IL と合わせた複合軸ずれ特性を図 6-7(a)と(b)に X 軸ずれ、Z 軸ずれについてそれぞれ示した。(a)より X 軸ずれに伴い挿入損失は大きくなるが EAF 50%値は変化せず $x/a = 0$ から 1.4 の範囲で 16.5° と一定である。一方、(b)の Z 軸ずれはずれ量の増加に伴い挿入損失が大きくなり、EAF 50%値は小さな角度の方向に変化していく。 $z/a = 3.1$ において屈折率媒質が無し、有りでそれぞれ 3.6 dB

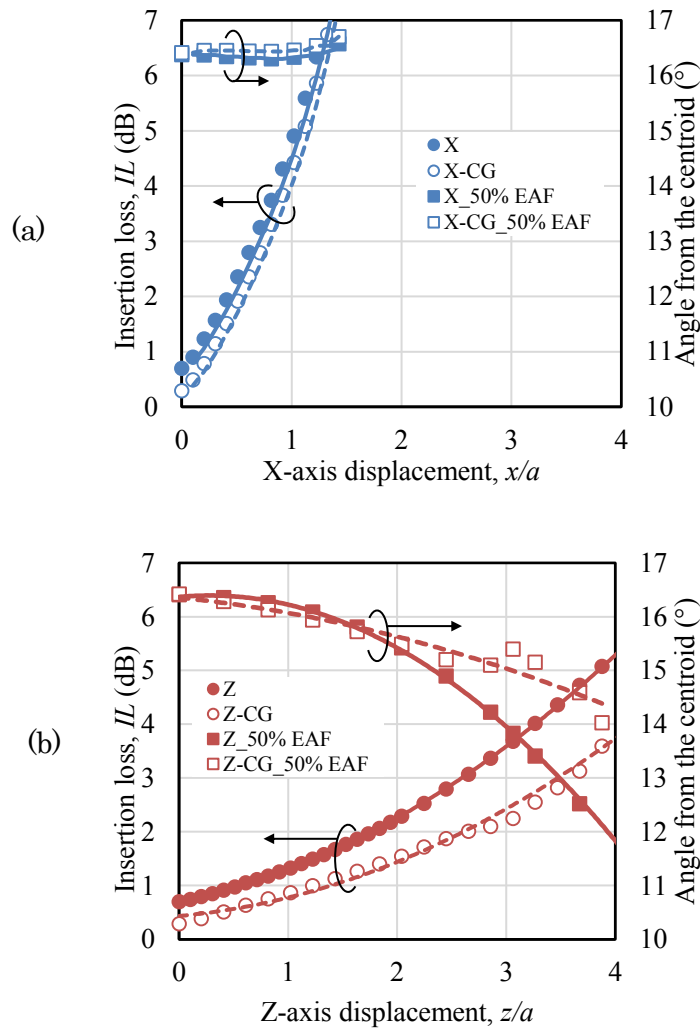


図 6-7 EMD 光源を用いた接続における軸ずれの EAF 値 50%と挿入損失の変化: (a) X 軸ずれ, (b) Z 軸ずれ. 接続に屈折率媒質の有り(-CG)と無し

と 2.2 dB、同じポイントで EAF 50%値はそれぞれ 15.4°と 13.8°となっている。これは接続において大きな角度成分のコントロールが挿入損失に影響することを示している。

(3) 自動車用ケーブルによる長さ 15 m × 4 中継接続

既存の自動車用フェルール付きケーブル 3 m を 5 本用いて GEPOF 要件である 15 m × 4 中継を構成し、全接続における屈折率媒質の有り無しで周波数特性及び全リンクマージンの変化について調べた。屈折率媒質有り無しで、帯域はそれぞれ $f_B = 245$ MHz と 235 MHz と僅かに改善した。一方、リンクマージンは 3.0 dB [= -22.8 dBm (屈折率媒質有り) minus -25.8 dBm (屈折率媒質無し)] と大きく改善した。

6.4 考察

6.4.1 接続の伝搬モード分布と周波数特性

自動車用光データリンクは、LED や PD で構成される光トランシーバ(FOT: Fiber optic transceiver)が置かれる ECU 内の部品配置や ECU 筐体でコネクタ接続がある。そのため光源の近くで数 mm から数十 mm の短い長さの光ファイバ接続が複数使われる[24]。従って本章での検証は重要である。

図 6-5 に示したように、D2 (接続点は光源から全長の 1/4 まで 3 箇所)は伝送方向が反対の D1 (EAF 95%値は 27.2°かつ帯域 $f_B = 320$ MHz)に比べて、EAF 50%値と 95%値は相対的に小さな角度成分かつ狭い帯域 (EAF 95%値で 25.3°かつ帯域 $f_B = 181$ MHz)であった。その他のリンク接続構成(B2 と B1、F2 と F1)においても同様の傾向であった。EAF 値が小さい、いわゆる高次モードが少ないのは遅延が少ないこと意味するが、劣化が著しいのは他の要因が働いていると思われる。この実験で光源は半導体レーザを使用しており、低次モードで光ファイバに入力している。このビームがある程度の高次モードが含まれる以前の接続点は帯域阻害要因になると推測できる。詳細の言及は避けるが、発光素子に近いところで適度に伝搬モード分布を広げると、広げない場合に比べて帯域劣化が押さえられる可能性を確認している。この点は今後さらに研究を深める必要がある。

ここでの結果は高速伝送を用いる自動車のネットワークアーキテクチャーにおいて、ふたつの重要な点を示唆している。ひとつは光源に近い接続点を避けること、もうひとつは高速伝送においては伝搬モード分布のコントロールが必要となることである。

6.4.2 接続の伝搬モード分布と挿入損失特性

まず光コネクタ端面を研磨加工した構成での考察を進める。Z 軸ずれ $z/a=0$ における屈折率媒質を用いた改善は 0.36 dB [= 0.65 dB (屈折率媒質無し) minus 0.29 dB (屈折率媒質有り)] であった。ファイバコアの屈折率 n_D が 1.49 なので、屈折率媒質の有りと無しによる一接続あたりのフレネル損失の改善(理論値)は 0.33 dB [= 0.34 dB (屈折率媒質無し) minus 0.01 dB (屈折率媒質有り)] である。従って上記ふたつの値の差は光ファイバ間のミスマッチを表し、0.03 dB [= 0.36 (屈折率媒質による改善) minus 0.33 dB (フレネル損失)] と算出できる。一定値となるフレネル損失改善とファイバスマッチ改善は 0.36 dB [= 0.33 dB (フレネル損失改善) plus 0.03 dB (ファイバミスマッチ改善)] となるので、高次モードの放射抑制による損失改善は $z/a = 1, 2, 3.1$ でそれぞれ 0.42 dB, 1.00 dB, 1.75 dB となる。高次モードは伝搬遅延の原因であるが、リンクパワーバジェットに余裕がないアプリケーションにおいては、伝搬モード分布と挿入損失をコントロールする手段を持つことが重要である。

接続における光軸方向の軸ずれは図 6-1(b)に示したように一端あたり 0.09 mm なので一接続あたり $z = 0.18$ mm ($z/a = 0.4$) となる。従って、Z 軸ずれの挿入損失特性より 0.96 dB となる。そこに屈折率媒質を用いる挿入損失は 0.48 dB に低下した。その差の 0.48 dB [= 0.96 dB (屈折率媒質無し) minus 0.48 dB (屈折率媒質有り)] は 6.2.3 章で議論した挿入損失改善ターゲット 0.5 dB にほぼ匹敵する。ここで扱う光ファイバである A4a.2 ファイバは公差が大きいことから周辺部品の公差も大きい。そのため一部の公差を小さくして低損失化を図る方法には限界がある。屈折率媒質を既存の自動車用中継コネクタに適用することで一箇所あたり 0.75 dB の改善が認められた。この改善は本研究で用いた FC コネクタの改善値 0.48dB より、また改善ターゲットの 0.5 dB より大きな効果である。これは

フレネル損失や高次モード放射の抑制だけでなく図 6-1(a)に示した切断痕が光学的に緩和されたためと考えている。このように接続に屈折率媒質を使うことでリンクマージンの改善が行われることを具体的に示した。

6.5 まとめ

本章では自動車で使われる光データリンクをモデル化して接続における伝搬モード分布と周波数特性及び挿入損失特性を測定評価した。まず車載光コネクタについて情報を整理し、他の産業の光コネクタと全く異なるものであることを明らかにした。更に従来の車載光コネクタの端面に切断痕があり、またフェルール端部より光ファイバ端面は一定量低いことを確認した。研磨により成端した光コネクタが付いた自動車用光ファイバケーブルにより構成した長さ 15 m の光データリンクにおいて、伝搬モード分布と周波数特性を複合的に調べ、接続の位置や数そして伝搬方向が帯域特性に大きな影響を及ぼすことを初めて明確に示した。更に光軸垂直方向の軸ずれによる伝搬モード分布の変化は小さいが、光軸方向の軸ずれによる伝搬モード分布の変化が大きいことを EAF プロファイルにより明らかにした。また接続において屈折率媒質を用いることで挿入損失特性が改善することを示した。またこれに伴って EAF プロファイルもシフトし、これが高次モード放射の抑制を表すことも示唆した。さらに自動車用に適した屈折率媒質及び接続構造についての研究が更に前進することを期待する。

第7章 総括

7.1 本研究の成果

SI-MMF は自動車、鉄道、産業機器、鉄道、医療など耐環境性が求められる短距離の光データリンクとして広く使われている。高速化への要求に伴って各仕様のトレランスが狭まり、伝搬モード分布などをコントロールする要求が出てきた。また従来の理論と測定の結果に隔たりがあることも分かっている。本研究では SI-MMF 接続に関して実用を踏まえて学術的理解を進め、従来技術ならびに将来の高速化技術を支えることを目的とした。以下、本研究の成果を簡潔に記載する。

(1) EAF 測定法を支える EAF 測定システムの検証 (IEC 61300-3-35) – 第 3 章

SI-MMF の伝搬モード分布を測定することを可能とした EAF 測定システムの開発及び得られた検証結果は本研究の第一の成果である。また著者らが牽引した国際規格 IEC 61300-3-53 EAF 測定法を支える検証データとしての貢献もある。

2次元 FFP 像より伝搬モード分布を規定する EAF 測定システムを開発した。実用モデルとして長さ 12 m の A3e ファイバに NA の異なるガウシアンビーム入力し、同じ光ファイバであってもランチ条件が違えば全く違う伝搬モード分布出力となることを明確に示した。また同光ファイバのランチ条件に依存しない EMD の条件を調べ、2000 m またはそれ以上の長さで得られることを確認した。測定システムの検証として測定トレランスや測定再現性が極めて重要になる。EAF の変化の範囲を $\pm 15\%$ としたとき X, Y, Z 軸方向の許容軸ずれ量は ± 0.5 mm 以上、X 軸及び Y 軸の回転では微動ステージの可動範囲を超える $\pm 2.8^\circ$ 以上であった。これより本測定システムの被測定対象物であるコア径 200 μm の A3e ファイバに対して十分広いトレランスを有することを確認した。更に測定再現性として繰り返し測定再現性、光ファイバ入力側着脱再現性、同出力側着脱再現性、両端末フェルール加工再現性、出力側光ファイバクリーブ再現性の評価を行った。繰り返し測定再現性は全領域で中央プロファイルからの変化量は $\pm 0.3\%$ 、EAF 95%値の平均値(最大最小値)は

21.9° ± 0.01°及び標準偏差は 0.008°と、他の測定評価項目とも測定システムとして高い再現性が得られることを示している。

(2) 接続における伝搬モード分布の把握 – 第3章, 第4章

入射条件を変えて接続の軸ずれによる EAF の変化を評価し、接続における伝搬モードやクラッドモードの振舞いについて明らかにした。

先ず EAF を接続の評価に初めて適用し、EMD をランチ光源に用いた測定において SI-MMF 接続で必ず発生する光軸方向軸ずれにより、挿入損失の増加に伴い EAF プロファイルが数値の小さい側にシフトする、いわゆる高次モードが放射されることを初めて示した。またモード選択励振光学システムによりガウシアンビームの NA を 0.05~0.6 に可変し、接続の軸ずれによる伝搬モード分布及び挿入損失について測定評価を行った。一般的に実用で使用される光源は VCSEL (NA 0.2)、LED (NA 0.4)なのでこれを含む広い範囲を把握することになる。その結果、X 軸ずれが大きくなるほど小さな NA のガウシアンビームの EAF プロファイルが高次側へシフトすることが分かった。クラッドモードの解析と合わせてコアとクラッド境界の不整合などが原因であると考察した。また Z 軸ずれが大きくなるほど大きな NA のガウシアンビームの EAF プロファイル、低次側へシフトすることが分かった。これは高次モードが放射されることに起因する。接続の挿入損失の実験でふたつの大きな事情が明確になった。ひとつは同じ接続であっても入力ビームの NA が異なると挿入損失特性が異なる。もうひとつは挿入損失の結果は入力ビームの NA の順番ではなく、またそれぞれのカーブの揺れも小さくない。前者は測定用光源の規定の必要性、後者はその規定に不確からしさを含める必要性を示している。SI-MMF 接続の測定用ランチ条件を規定する IEC 61300-1 は本稿の結論に沿っているといえる。リングビーム NA 0.3 と 0.4 を用いて A3e ファイバの接続解析を行い、クラッドモードの存在を明らかにし、またこれが伝搬モードに変わることも示した。更に従来研究の理論式により本研究の結果との挿入損失特性の比較を行い傾向は合うが絶対値が異なることを明確に示した。

(3) ランチ光源と接続モデル (IEC 61300-1) – 第 5 章

国際規格 IEC 61300-1 の挿入損失測定法で規定された A3e ファイバ接続部品の測定用光源の検証を行った。モード選択励振光学システムによりビーム NA をコントロールして EAF 規定値を満足する光源を生成した評価実験で、規定された不確かさの範囲を超えて挿入損失が大きく外れる規格適用外条件があることを初めて示唆した。同光ファイバ端面の NFP を解析したところ光源の状態がコア中心部に残り不均一な輝度分布であることが分かった。更に光ファイバをロッドに複数回巻くことで NFP の不均一な輝度分布は解消されることを示した。これをランチ光源として用いて挿入損失を測定すると規格の想定範囲に収まることを合わせて示した。

NFP の不均一な状態は SI-MMF の光データリンクで用いられる数十メートル以下の長さで発生していることを確認している。更に EMD 条件の解析で 2000 m またはそれ以上の長さを要することが本研究で分かったが実用では使われない長さである。従って従来理論の均一モード分布、平衡モード分布のランチ条件による理論モデルは実用上当てはまらないことを初めて明らかにした。そこで新たなモデルとして NFP と FFP の測定データを用いて挿入損失を求めるモデルを考案し、平衡モード分布光源のみならずコアに輝度中心が残る不均一なランチ光源を用いても測定結果を反映することを実証した。

(4) SI-MMF 接続の高速伝送への適用に向けた課題と対応 (IEEE 802.3bv) – 第 6 章

本稿を執筆中の 2017 年 3 月に POF を用いた光ギガビットイーサネット規格 IEEE 802.3bv が発行された。この規格には自動車用途が含まれ本稿では車載光ギガビットイーサネット実現へ向けての接続に関する課題を明確にした。

車載光コネクタについて広く文献などを調べ、低コストが最重要である一方、光学特性は優先されなかったことを明らかにし、他の光コネクタと異なる扱いが必要であることをまとめた。次に従来の車載光通信の MOST と車載光ギガビットイーサネット GEPOF の要求仕様の差異から改善すべき特性及びその目標を明らかにした。また従来の車載光コネクタを調査したところ光ファイバ端面はフェルール先端より低くなっており、一接続当たり 0.18 mm の光軸方向の軸ずれが発生していることを明らかにした。切断痕により光路

が逸れ、散乱の原因が存在していることを示した。車載光ネットワーク要件である長さ 15 m において接続の位置、数及び測定方向を変えて伝搬モード分布と周波数特性、挿入損失特性の関係を調べた。この複合評価からふたつの重要な知見を得た。ひとつは帯域劣化が著しいため光源に近い接続点を避けること、もうひとつは高速伝送においては伝搬モード分布のコントロールが肝心となることである。また屈折率媒質に耐環境特性で実績のある熱硬化シリコンゲルを接続に付加し、伝搬モード分布及び挿入損失特性について調べた。改善効果は著しく、実験で用いた FC コネクタでは 0.5 dB、従来の車載光コネクタでは 0.75 dB の改善が見られた。適用可能な屈折率材料としての樹脂材料をさらに調査し、既存の製造プロセスを変えることなくリンクパワーバジェットを改善する技術としてその方向性を示した。

7.2 今後の課題

SI-MMF は産業界において信頼を得ている通信媒体として今後とも使い続けられるであろう。また、必ずしも高速用途に限らず周囲の電磁環境に影響を受けず、また与えないという点も周囲で電気ケーブルや電子部品の増加が進む中で益々重要視される点である。以下、本研究をさらに発展させるために今後の課題と期待を記す。

(1) EAF 測定法のふたつの方式の整合

第 3 章で解説したように EAF 測定法には f θ 方式と直接方式のふたつがある。f θ 方式は f θ レンズシステムを用いた FFP 測定システムにより画像データを得ているため、実用として確立している方法での測定である。一方、直接方式はフランフォーファー領域において画像を取得する、いわばマニュアル操作的な要素が残っている。そのため平面で受光するイメージデバイスの曲面変換や受光パワーの角度依存性などを検討する必要がある、ふたつの方式の整合にいたるにはまだ検討を要するところが有る。何れも国際規格となっているので相互に整合するための研究が進むことを望むものである。

(2) 接続と帯域

SI-MMF はそもそも高速伝送用途ではないので、周波数特性についての研究は多くない。他の光ファイバの先行研究によると帯域の劣化は伝送路のプロファイルエラーやばらつきで起こることが知られている。SI-MMF 接続における間隙は伝搬光から見ると導波構造が破られ自由空間の伝搬となることからプロファイルエラーになるのではないだろうか。SI-MMF の光データリンクでは当初より帯域保障光コネクタの要求があるが、光コネクタだけでは困難なことが分かってきており、光源及びリンクシステム全体のアプローチが必要であろう。第 6 章の考察で触れたが伝送に使う光源からの出力光を予め成形することで帯域改善の可能性の一端を観察している。周波数特性に関してさらに研究が進められることを期待する。

(3) 接続の理論モデル

第 5 章で FFP と NFP の測定データを用いた解析モデルを作り、計算結果が測定結果を反映することを示した。FFP と NFP のデータを一般化できる関数に置き換えて定式化することでこの分野の研究は更に発展すると考えている。関数の開発は容易ではないが境界条件を設定することで主要な領域の解析ができると思われる。新しい理論モデルが構築され、本研究がその一端を担うことを望むものである。

(4) 実用化

最後に、車載光ギガビットイーサネットや産業機器などでの高速化の要求にこたえるために、本稿の伝送路や接続に関する研究に加えて、光半導体である FOT や通信コントロール IC である PHY についての研究が進められている。将来の自動車の自動運転を支える基幹技術となるよう、更なる高速化や高機能化など、実用化の研究及び開発が前進することを大いに期待するものである。

7.3 まとめ

本研究は産業に広く使われている SI-MMF の接続に関して、理論と実用の隔たりを埋め、接続部品で発生している事象明らかにし、また今後期待される高速伝送を実現するた

めのために必要な指針を与えた。更に新たに開発された **EAF** により光ファイバの伝搬モード分布を定量的な数値として用いた初めて研究である。**EAF** の定義や測定法が幅広く普及し、その有益さが認知され、さらに議論が拡大するとともに、導波路や **GI-MMF** など新たな応用分野の礎のひとつになることを切望する。

謝 辞

著者が宇都宮大学大学院工学研究科博士後期課程在学中、また入学前より終始親身にご指導、ご鞭撻を賜りました主任指導教員の宇都宮大学大学院工学研究科システム創成工学専攻 杉原興浩 教授に心より感謝いたします。本研究の遂行並びに本論文の作成に当たり、有益なご教示、ご激励を頂きました副指導教員の湯上登 教授、依田秀彦 准教授に深く感謝いたします。本研究について真摯に審査いただきました大谷幸利 教授、早崎芳夫 教授に感謝いたします。

著者が豊橋技術科学大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程の在学時に研究のご指導を賜った宮崎保光 元教授（愛知工科大学名誉教授）に深く感謝いたします。熱心にご指導いただきました山家光男 元講師（岐阜大学名誉教授）、後藤信夫 元助手（徳島大学教授）に感謝いたします。同修士課程在学中、励ましあい学生生活をともにした山田光志 氏（ネオフォトニクス日本合同会社）、中野基生 氏（日本電気株式会社）、佐藤智夫 博士に感謝いたします。

タイコ エレクトロニクス ジャパン合同会社の在職中、自己啓発として宇都宮大学大学院工学研究科博士後期課程への入学及び奨学規定の適用を認めていただき、ご支援、ご協力を頂いた同社オートモーティブ 技術・開発本部 ITW 製品技術統括部 島岡学 統括部長、同技術・開発本部 桑野文義 本部長、同社 上野康之 社長に心より感謝いたします。本研究の開始当時から多大な御支援をいただきました同本部 戦略製品開発統括部 小田駿三 統括部長、同第六部 秋山裕之 元部長（2017年4月定年退職）に感謝いたします。同社在籍時、本研究の立上げに多大なご協力を頂きました同社 **Fiber Optics Business Unit Asia/Pacific** 林武弘 元部長（株式会社ハットラボ 社長）、菊田知宏 元主任技師（アダマント株式会社先端開発本部先進開二部 部長）、大津信亮 元主任技師（三協立山株式会社タテヤマアドバンス社）に感謝いたします。更に同社1996年入社当時より本研究対象の光ファイバについて熱心にご指導頂きました同社 VAO 事業部 高木信一 元本部長（POF コネク ト 代表）に感謝いたします。

著者が本研究を遂行するきっかけとなった経済産業省国際標準共同研究開発事業「高速車載LAN用光伝送サブシステムの試験方法に関する標準化」及びそれに続くプロジェクト

ト、呼称 O-GEAR: Optical Gigabit Ethernet for Automotive aRchitecture において終始、御指導、御鞭撻を賜り、また著者の大学院修士課程の先輩でもある株式会社豊田中央研究所システム・エレクトロニクス1部主席研究員 各務学 博士に心より感謝いたします。上記プロジェクトにおいて EAF 測定法について開発及び議論を進め、国際標準化について御指導いただきました千葉工業大学工学部機械電子創成工学科 長瀬亮 教授に感謝いたします。POF の加工や測定についてご協力を頂き、また EAF 測定法の提唱者である POF プロモーション 高橋聡 代表、同測定の直接方式について議論を深めた University College London, Reader, David R. Selviah 博士、同博士課程学生 Ruichen Tao 氏、EAF 関連の研究について議論をしたアダマンド株式会社先進開発本部先進開発二部 車載システム課 百武康弘 課長、飯久保忠久 氏（千葉工業大学工学部大学院修士課程より従事）に感謝します。特に同社の堀口幸二 氏（宇都宮大学大学院工学研究科博士後期課程在学）にはシミュレーションソフト Zemax OpticStudio の考え方及びモデルについてご教授頂き、また互いの研究について議論を深めたことに感謝いたします。光計測に関してご支援頂きましたシナジーオプトシステムズ社 安川学 社長及び関係各位に感謝いたします。

前職の日本板硝子株式会社筑波研究所でお世話になった方々には社会人研究者の姿勢を、現職のグローバル会社 TE Connectivity の仲間には国を超えて事を成す取り組みを学び、本研究遂行の潤滑となりました。両社の関係各位に感謝いたします。

最後に、プライベートの時間を本研究に費やすことについて承諾し、絶えず協力と支援を惜しまなかった家族に最大の感謝をいたします。

2017年9月

参考文献

第1章

- [1] “2015（平成27）年度光産業全出荷額、国内生産額調査結果について,” 一般財団法人光産業技術振興協会, 平成28年3月16日.
- [2] “自動車産業を巡る構造変化とその対応について,” 経済産業省 製造産業局 自動車課, 平成27年11月.
- [3] K. Matheus, and T. Königseder, *Automotive Ethernet*, Cambridge University Press, 2014.
- [4] 宇山通, “自動車企業におけるモジュール化の新展開 – 新興国市場急拡大とパワートレイン多様化のインパクト,” 経営学論集(九州産業大学), 第24巻第2号, pp. 27–47, 2013年11月.
- [5] 片山修, “トヨタの「モジュール化」の考察,” 自動車技術, vol. 68, no. 6, pp. 12–18, 2014年6月.
- [6] K. Matheus, “How automotive Ethernet helps to meet the challenges of future E/E architectures,” 第4回 車載 Ethernet が変えるクルマの未来, 日経エレクトロニクス/日経 Automotive, 東京, 2016年6月.
- [7] 杉村竹三, 杉本薫, “次世代ワイヤーハーネスシステム,” 古河電工時報, 第132号, 2013年9月.
- [8] 高田広章, 倉地亮, 西村政信, “車載制御ネットワーク技術とその発展性,” 信学誌, vol. 95, no. 8, pp. 724–729, Aug. 2012.
- [9] 小林茂, “車載光ネットワークの最新動向,” 平成26年度 光ネットワーク産業・技術研究会 第5回公開討論会, 一般財団法人光産業技術振興協会 光ネットワーク産業・技術研究会, 2015年2月25日.
- [10] IEEE 802.3 Ethernet Working Group, “Gigabit over plastic optical fibre study group call for interest,” Beijing, China, Mar. 2014. [Online]. Available:
http://www.ieee802.org/3/GEPOFSG/public/CFI/GigPOF%20CFI%20v_1_0.pdf
- [11] 宮地杭一, プラスチック光ファイバの応用技術, 電気書院, 1988年.
- [12] T. Kibler, S. Pofperl, G. Böck, H. -P. Huber, and E. Zeeb, “Optical data buses for automotive applications,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 22, no. 9, pp. 2184–2199, Sep. 2004.

- [13] D. Seibl, M. Böhm, and O. Strobel, “Polymer-optical-fiber data bus technologies for MOST applications in vehicles,” in *Proc. International Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON-MW 2008)*, Dec. 2008.
- [14] A. Grzempa, MOST – The automotive multimedia network: from MOST 25 to MOST 150. Poing, Germany: Franzis Verlag GmbH, 2011.
- [15] MOST Annual Achievement Report 2015, MOST Cooperation. [Online]. Available: <http://www.mostcooperation.com/publications/most-brochures-newsletters/archive/download/annual-achievement-report-2015/>
- [16] P. Reviriego, R. Perez-Aranda, and C. Pardo, “Introducing energy efficiency in the VDE 0885-763 standard for high speed communication over plastic optical fibers,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, pp. 97–102, Aug. 2013.
- [17] IEEE P802.3bv. Gigabit Ethernet over plastic optical fiber (GEPOF) Study Group Objectives. [Online]. Available: http://www.ieee802.org/3/bv/Objectives_GEPOF_2_0714.pdf
- [18] H. Hurt, J Wittl, and M. Weigert, “Automotive fiber optic transceiver drive the change of datacom applications towards POF,” in *Proc. Int’l Plastic Optical Fiber (POF) Conf. 2004*, Nürnberg, Germany, pp. 378–385, Sep. 2004.
- [19] Document number 2010003–1394, Automotive glass fiber specification (Supplement to IDB-1394), Revision 1.0, Jun. 2011. [Online]. Available: <http://1394ta.org/wp-content/uploads/2015/07/2010003.pdf>.
- [20] A. López-Lagunas, S. M. Chai, J. Cross, B. Buchannan, L. A. Carastro, S. Wang, D. S. Wills, N. M. Jokerst, M. A. Brocke, and M. A. Ingram, “Bidirectional single fiber low-cost optoelectronic interconnect for automotive applications,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 1, pp. 281–287, Jan. 2000.
- [21] “高速車載 LAN 用光伝送サブシステムの試験方法に関する標準化 平成 23 年度国際標準共同研究開発事業,” 光産業技術振興協会・千葉工業大学, 2012 年.
- [22] “高速車載 LAN 用光伝送サブシステムの試験方法に関する標準化 平成 24 年度国際標準共同研究開発事業：戦略的国際標準化加速事業,” 光産業技術振興協会・千葉工業大学, 2013 年.

- [23] “高速車載 LAN 用光伝送サブシステムの試験方法に関する標準化調査報告書 平成 25 年度戦略的国際標準化加速事業：国際標準共同研究開発事業,” 光産業技術振興協会・千葉工業大学, 2014 年.
- [24] 小林茂, “進化する車載用光コネクタ – 車載用光コネクタと標準化動向,” 光アライアンス, vol. 27, no. 3, pp. 23–26, Mar. 2016.
- [25] O. Sugihara, and S. Takahashi, “Standardization activities of Gigabit Ethernet operation over plastic optical fiber,” *2015 IEEE Standards Association (IEEE-SA), Ethernet & IP @ Automotive Technology Day*, Yokohama, Oct. 2015. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/events/automotive/2015/02_Standardization_Activities_of_Gigabit_Ethernet_over_plastic_optical_fiber.pdf
- [26] 各務学, 小林茂, 芹澤直嗣, 平岩徹也, 麻生修, 後藤英樹, “車載光ファイバ通信の現状と今後,” レーザー研究, 第 42 巻, 第 4 号, pp. 320–325, Apr. 2014.
- [27] 小林茂, “車載光ネットワークの最新動向 – 開発と国際標準化の連携,” 信学会 第 24 回シリコンフォトニクス研究会, SIPH2016-04, pp.15– 20, 2016 年 7 月.
- [28] S. Takahashi, T. Noda, and Y. Koike, “Restricted mode launch condition for graded index plastic optical fibers,” in *Proc. 17th Int. Conf. Plastic Optical Fibers 2008*, pp. 124–126.
- [29] Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 3-53: Examinations and measurements - Encircled angular flux (EAF) measurement method based on two-dimensional far field data from step index multimode waveguide (including fibre). IEC 61300-3-53, Ed 1.0, Feb. 2015.
- [30] Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 1: General and guidance, IEC 61300-1, Ed 4.0, Jul. 2016.
- [31] 802.3bv-2017 - IEEE Standard for Ethernet Amendment 9: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 1000 Mb/s Operation Over Plastic Optical Fiber, Mar. 2017.
- [32] D. J. Sterling, *Technician’s Guide to Fiber Optics*, 2nd ed. New York, USA: Delmar Publishers, 1993.

- [33] 今井秀孝, 測定不確かさ評価の最前線 – 計量計測トレーサビリティと測定結果の信頼性, 日本規格協会, 2013年7月.
- [34] W. van Etten, W. Lambo, and P. Simons, “Loss in multimode fiber connections with a gap,” *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 7, pp. 970–976, 1985.
- [35] K. Kitayama, and M. Ikeda, “Mode coupling coefficient measurements in optical fibers,” *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 24, pp. 3979–3983, 1978.
- [36] J. T. Horng, and D. C. Chang, “Coupling an elliptical Gaussian beam into a multimode step-index fiber,” *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 23, pp. 3887–3891, 1983.
- [37] H. Tsuchiya, H. Nakagome, N. Shimizu, and S. Ohara, “Double eccentric connectors for optical fibers,” *Appl. Opt.*, vol. 16, no.5, pp. 1323–1331, 1977.
- [38] D. A. Messuri, G. D. Miller, and R. E. Steele, “A fiber optic connection system designed for automotive applications,” in *Proc. Automotive Power Electronics*, pp. 39–45, Jan. 1989.
- [39] M. Seki, S. Sato, K. Nakama, H. Wada, H. Hashizume, and S. Kobayashi, “New approaches to practical guided-wave passive devices based on ion exchange technologies in glass,” in *Proc. SPIE 1583, Integrated Optical Circuits*, pp. 184–195, Dec. 1991.
- [40] S. Sato, H. Wada, H. Hashizume, S. Kobayashi, M. Seki, and K. Nakama, “Guided-wave directional couplers with polarization maintaining fiber arrays,” *Electron. Lett.*, vol.27, no. 4, pp.303–304, 1991.
- [41] 仲間健一, 小林茂, “イオン交換ガラス Y 分岐導波路の低損失化,” 信学論 (C-1), vol. J75-C-I no.6, pp.480–482, Jun. 1992.
- [42] I. Tanaka, H. Wada, S. Sato, K. Nakama, H. Hashizume, S. Kobayashi, and M. Seki, “Glass waveguide 1 x N branching devices,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E75-B, no.9, pp. 886–893, Sep. 1992.
- [43] U. Hollenbach, H. Eckstein, N. Fabricius, M. Krause, and S. Kobayashi, “Polarization dependent losses of integrated optical splitters in glass,” in *Proc. SPIE 2695, Functional Photonic and Fiber Devices*, pp. 123–131, Jan. 1996.

- [44] 小林茂, 林武弘, ブライアン パターソン, ベス マーフィー, “LIGHTRAY MPX 光バックプレーン用コネクタ,” 信学技報, vol. 100, no. 110, EMD 2000-16, pp. 7–12, Jun. 2000.
- [45] 小林茂, 大津信亮, 菊田知宏, 林武弘, “光ファイバ斜め切断技術の開発,” 2011 信学総大, B-10-23, p. 332, Mar. 2011.
- [46] 応用物理学会 光学懇話会, オプトエレクトロニクス—材料と加工技術, 朝倉書店, 1986年9月.
- [47] 高木信一, 小林茂, “POF リンク,” O plus E, vol. 21, no. 6, pp. 667–672, Jun. 1999.
- [48] 小林茂, “第3編第3章, 光コネクタ,” 分担執筆, 小池康博, 宮田清蔵 監修: プラスチックオプティカルファイバの基礎と実際, 株式会社エヌ・ティ・エス, pp. 112–128, 2000年7月.
- [49] 林武弘, 小林茂, “部品技術編, 第3章接続部品, 3.1 コネクタ, 3.1.4 光コネクタ,” 井原惇行, 益田昭彦 共同編集, 最新電子部品・デバイス実装技術便覧, R&D プランニング, pp. 709–721, 2002年12月.
- [50] K. Kawano, H. Miyazawa, and O. Mitomi, “New calculations for coupling laser diode to multimode fiber,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 4, no.3, pp. 368–374, Mar. 1986.
- [51] 河野健治, 光デバイスのための光結合系の基礎と応用, 現代工学社, 1991年1月.
- [52] 中島洋, Excel でできる光学設計—レーザ光学系の実用計算, 新技術コミュニケーションズ, 2007年3月.
- [53] POF コンソーシアム編, プラスチック光ファイバ, 共立出版, 1997年12月.
- [54] 井出文雄, オプトエレクトロニクスと高分子材料, 共立出版, 1995年5月.

第2章

- [55] 砂川重信, 電磁気学, 岩波書店, 1984年2月.
- [56] 多田邦雄, 神谷武志, 光エレクトロニクスの基礎, 丸善, 昭和60年2月.
- [57] 宮崎保光, 応用ベクトル解析, コロナ社, 昭和58年8月.
- [58] 小池康博, 宮田清蔵 監修, プラスチックオプティカルファイバの基礎と実際, 株式会社エヌ・ティ・エス, 2000年7月.
- [59] 飯塚啓吾, 現代光工学の基礎, オーム社, 昭和62年4月.

- [60] W. van Etten, and J. van der Plaats, *Fundamentals of optical fiber communications*, Prentics Hall International, London, 1991.
- [61] 谷田貝豊彦, 応用光学—光計測入門, 丸善, 平成 2 年 6 月.
- [62] T. Shintaku, E. Sugita, and R. Nagase, “Highly stable physical-contact optical fiber connectors with spherical convex ends,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 241–248, Feb. 1993.
- [63] 西原浩, 春名正光, 栖原敏明, 光集積回路, オーム社, 昭和 60 年 2 月.
- [64] 小柴正則, 光導波路解析, 朝倉書店, 1990 年 11 月.
- [65] 末松安晴, 光デバイス, コロナ社, 昭和 61 年 4 月.
- [66] 米津宏雄, 光通信素子工学—発光・受光素子, 光学図書, 昭和 59 年 12 月.
- [67] 末松安晴, 伊賀健一, 光ファイバ通信入門 (改訂 2 版), オーム社, 昭和 62 年 7 月.
- [68] 霜田光一, レーザー物理入門, 岩波書店, 1984 年 10 月.
- [69] 藤井陽一, 光ファイバ利用技術, アグネ, 1985 年 7 月.
- [70] 作花濟夫, 境野照雄, 高橋克明, ガラスハンドブック, 朝倉書店, 1994 年 5 月.
- [71] M. Young, “Geometrical theory of multimode optical fiber-to-fiber connectors,” *Opt. Commun.*, vol. 7, no. 3, pp. 253–255, Mar. 1973.
- [72] D. Gloge, “Offset and tilt loss in optical fiber splices,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 55, no. 7, pp. 905–916, Sep. 1976.
- [73] E.-G. Neumann, and W. Weidhaas, “Loss due to radial offsets in dielectric optical waveguides with arbitrary index profiles,” *Archiv fuer Elektronik und Uebertragungstechnik*, vol. 30, pp. 448–450, Nov. 1976.

第 3 章

- [74] P. Pepeljugoski, M. J. Hackert, J. S. Abbott, S. E. Swanson, S. E. Golowich, A. J. Ritger, P. Kolesar, Y. C. Chen, and P. Pleunis, “Development of system specification for laser-optimized 50- μm multimode fiber for multigigabit short-wavelength LANs,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 21, no. 5 pp. 1256–1275, May 2003.

- [75] Fibre optic communication subsystem test procedures - Part 1-4: General communication subsystems - Light source encircled flux measurement method, IEC 61280-1-4, Ed 2.0, Nov. 2009.
- [76] M. Kagami, A. Kawasaki, and M. Yonemura, "Modal power distribution in short reach optical communications using step-index-type multimode optical fibers," in *Proc. IEEE CPMT Sym. Japan*, pp. 1–4, Nov. 2013.
- [77] J. B. Schlager, M. J. Hackert, P. Pepeljugoski, and J. Gwinn, "Measurements for enhanced bandwidth performance over 62.5- μm multimode fiber in short-wavelength local area networks," *J. Lightw. Technol.*, vol. 21, no. 5 pp. 1276–1285, May 2003.
- [78] M. Kagami, A. Kawasaki, M. Yonemura, M. Nakai, P. V. Mena, and D. R. Selviah, "Encircled angular flux representation of the modal power distribution and its behavior in a step index multimode fiber," *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 3, pp. 943–951, Feb. 2016.
- [79] S. Kobayashi and O. Sugihara, "Encircled angular flux: A new measurement metric for radiating modal power distributions from step-index multimode fibers," *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 16, pp. 3803–3810, Aug. 2016.
- [80] R. Tao, T. Hayashi, M. Kagami, S. Kobayashi, M. Yasukawa, H. Yang, D. Robinson, H. Baghsiahi, F. A. Fernández, and D. R. Selviah, "Equilibrium modal power distribution measurement of step-index hard plastic cladding and graded-index silica multimode fibers," in *Proc. SPIE 9368, Optical Interconnects XV*, 93680N, Apr. 2015.
- [81] S. Kobayashi, O. Sugihara, M. Hijiriyama, and R. Nagase, "Interconnection study for step index multimode fiber using $f\theta$ imaging of encircled angular flux measurement method," *IEICE Technical Report*, EMD2015-79, pp. 67–70, Nov. 2015.
- [82] S. Kobayashi, N. Otsu, T. Kikuta, and T. Hayashi, "Handheld angle fiber cleaver," in *Proc. 60th IWCS Conf.*, Charlotte, NC, USA, pp. 192–197, 2011.
- [83] K. Horiguchi, Y. Hyakutake, Y. Beppu, T. Iikubo, T. Hayashi, S. Kobayashi, R. Nagase, and M. Kagami, "Optical interface study of SI type PCS fiber for a gigabits network application," in *Proc. 64th IWCS Conf.*, GA, USA, pp. 327–333, 2015.

- [84] F. S. Tan, O. Sugihara, and T. Kaino, “New approach on multimode polymer optical waveguides evaluations,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 12, pp. 1994–2000, Jun. 2013.

第4章

- [85] S. Kobayashi, M. Yasukawa, and O. Sugihara, “Launch light dependency of step-index multimode fiber connections analyzed by modal power distribution using encircled angular flux,” *Appl. Opt.*, vol. 56, no. 4, pp. 876–883, 2017.
- [86] Optical fibres - Part 2-40: Product specifications - Sectional specification for category A4 multimode fibres, IEC 60793-2-40, Ed 3.0, 2009.
- [87] Y. Tsukamoto, “Plastic optical fiber and required performance for car network POF cable,” *Sen'i Gakkaishi*, vol. 66, no. 9, pp. 303–307, 2010.
- [88] S. Takahashi, and O. Sugihara, “Launch optics for evaluation of step-index plastic optical fibers,” in *Proc. Int'l Workshop on Photonics Polymer for Innovation (IWPPi)*, Tochigi, Japan, pp. 46, Oct. 2016.

第5章

- [89] S. Kobayashi, and O. Sugihara, “Transformation of the intensity profile for a step-index multimode fiber core,” *IEICE Electron. Express*, vol. 14, no. 11, pp. 20170375, May 2017.
- [90] 飯久保忠久, 長瀬亮, 小林茂, 米村正寿, 各務学, “HPCF の励振条件に対する側圧の影響,” 2013 信学総大, C-5-2, 2013 年 3 月.
- [91] 飯久保忠久, 長瀬亮, 小林茂, 米村正寿, 各務学, “HPCF の平衡モード分布に関する実験,” 信学技報, vol. 113, no. 48, 機構デバイス研究会 EMD2013-2, pp. 5-9, 2013 年 5 月.
- [92] M. J. Adams, D. N. Payne, and F. M. E. Sladen, “Leaky rays on optical fibres of arbitrary (circularly symmetric) index profiles,” *Electron. Lett.*, vol. 11, no. 11, pp. 238–240, May 1975.
- [93] A. W. Snyder, and D. J. Mitchell, “Leaky rays cause failure of geometric optics on optical fibres,” *Electron. Lett.*, vol. 9, no. 19, pp. 437–338, Sep. 1973.

第 6 章

- [94] A. Engel, A. Bartels, K. Wiese, and S. Schröder, “Investigation of the influence of severe contamination on fibre optic contacts for car applications,” in *Proc. International Plastic Optical Fiber (POF) Conference '98*, Berlin, Germany, pp. 212–215, Oct. 1998.
- [95] S. Kobayashi, K. Horiguchi, Y. Hyakutake, and O. Sugihara, “Evaluation of modal power distribution of automotive optical Gigabit Ethernet connections,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 35, no. 17, pp. 3664–3670, Sep. 2017.
- [96] N. Sudo, and S. Kobayashi, “Optical connector for high performance plastic optical fiber,” in *Proc. 8th Int'l Plastic Optical Fiber (POF) Conf. '99*, Chiba, Japan, pp. 213–216, Jul. 1999.
- [97] O. Ziemann, and W. R. White, “100 Mbit/s - Gbit/s - 10 Gbit/s and beyond, the use of POF in home networking and interconnection,” in *Proc. 33rd European Conf. and Exhibition of Optical Communication (ECOC 2007)*, Berlin, Germany, Sep. 2007.
- [98] E. Grivas, D. Syvridis, and G. Friedrich, “Influence of connectors on the performance of a VCSEL-based standard step-index POF link,” *Photon. Technol. Lett.*, vol. 21, no. 24, pp. 1888–1890, Dec. 2009
- [99] S. Kobayashi, K. Horiguchi, Y. Hyakutake, and O. Sugihara, “Encircled angular flux profile shift via reduction in higher-mode radiation of automotive plastic optical fiber connections,” in *Proc. International Workshop on Photonics Polymer for Innovation (IWPPi)*, P-17, pp. 47, Tochigi, Japan, Oct. 2016.
- [100] P. K. Runge, and F. Haven, “Optical fiber connector,” U.S. Patent 4512630, Apr. 23, 1985.
- [101] L. A. Reith, “Issues relating to the performance of optical connectors and splices,” in *Proc. SPIE 1973, Passive Fiber Optic Components and Their Reliability*, pp. 294–305, Nov. 1993.
- [102] D. S. Stone, and S. R. Connor, “Engineering properties of high refractive index optical gels for photonic device applications,” in *Proc. SPIE 3937, Micro- and Nano-photonic Materials and Devices*, pp. 144–155, Apr. 2000.

研究業績

[1] 原著論文

- (1) S. Kobayashi, and O. Sugihara, “Encircled angular flux: A new measurement metric for radiating modal power distributions from step-index multimode fibers,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 16, pp. 3803–3810, Aug. 2016.
DOI: 10.1109/JLT.2016.2585577
- (2) S. Kobayashi, M. Yasukawa, and O. Sugihara, “Launch light dependency of step-index multimode fiber connections analyzed by modal power distribution using encircled angular flux,” *OSA Appl. Opt.*, vol. 56, no. 4, pp. 876–883, Feb. 2017.
DOI: 10.1364/AO.56.000876
- (3) S. Kobayashi, and O. Sugihara, “Transformation of the intensity profile for a step-index multimode fiber core,” *IEICE Electron. Express*, vol. 14, no. 11, pp. 20170375, May 2017.
DOI: 10.1587/elex.14.20170375
- (4) S. Kobayashi, K. Horiguchi, Y. Hyakutake, and O. Sugihara, “Evaluation of modal power distribution of automotive optical Gigabit Ethernet connections,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 35, no. 17, pp. 3664–3670, Sep. 2017.
DOI: 10.1109/JLT.2017.2716981

[2] 国際会議

- (1) S. Kobayashi, K. Horiguchi, Y. Hyakutake, and O. Sugihara, “Encircled angular flux profile shift via reduction in higher-mode radiation of automotive plastic optical fiber connections,” in *Proc. International Workshop on Photonics Polymer for Innovation (IWPPi)*, P-17, pp. 47, Tochigi, Japan, Oct. 2016.
- (2) S. Kobayashi, B. Bergner, E. DiBiaso, “Ethernet Standards for the Automotive Industry,” *Intelligent and Connected Vehicles Symposium, SAE International (Society of Automotive Engineers)*, Kunshan, China, Sep. 26–27, 2017.

- (3) M. Uchida, H. Tanaka, S. Kobayashi, T. Kikuta, F. S. Tan, and O. Sugihara, “Heat-resistant low-loss connectors for gigabit plastic optical fiber communication,” *MOC 2017 (Microoptics Conference 2017)*, Tokyo, Japan, Nov. 19–22, 2017.

[3] 学会・研究会

- (1) S. Kobayashi, O. Sugihara, M. Hijiriyama, and R. Nagase, “Interconnection study for step index multimode fiber using f θ imaging of encircled angular flux measurement method,” *IEICE Technical Report, (15th International Session on Electro-Mechanical Devices)*, EMD2015-79, pp. 67–70, Nov. 2015.
- (2) 小林茂, “[招待講演] 車載光ネットワークの最新動向 – 開発と国際標準化の連携,” 電子情報通信学会 第24回シリコンフォトンクス研究会, SIPH2016-04, pp.15–20, 2016年7月.

[4] 寄稿

- (1) 小林茂, “進化する車載用光コネクタ – 車載用光コネクタと標準化動向,” 光アライアンス, 第27巻, 第3号, pp. 23–26, Mar. 2016.

(以上、在学期間)

[5] 関連発表・著書・論文 (光ファイバ・光導波路関連等)

- (1) 小林茂, 根本浩之, 宮崎保光, “DCM 色素含有高分子固溶体を用いた光導波路型増幅素子の屈折率改善,” 信学’86 全大, 993, Mar. 1986.
- (2) 小林茂, 宮崎保光, “DCM 色素含有高分子薄膜を用いた光導波路型増幅素子の基礎特性,” 信学’86 光・電波全大, 185, Sep. 1986.
- (3) 小林茂, 宮崎保光, “DCM 色素含有高分子薄膜を用いた光導波路型増幅素子の光学特性,” ’86 東海連大, 358, Oct. 1986.
- (4) 小林茂, 宮崎保光, “DCM 色素含有高分子薄膜を用いた光導波路型増幅素子の増幅特性,” 信学’87 全大, 888, Mar. 1987.

- (5) 小林茂, 宮崎保光, “レーザ色素含有高分子薄膜を用いたシングルモード光導波路型増幅素子,” ’87 東海連大, 330, Oct. 1987.
- (6) 小林茂, 宮崎保光, “レーザ色素含有高分子薄膜を用いた光導波路型増幅素子,” 信学技報 Vol. 87, No. 388, MW87-110, Feb. 1988.
- (7) 小林茂, “レーザ色素含有高分子薄膜を用いた光導波路型増幅素子に関する研究,” 豊橋技術科学大学大学院工学研究科修士課程修士学位論文, 1988年3月.
- (8) 橋爪秀樹, 仲間健一, 小林茂, 関雅文, “イオン交換法による単一モード分岐素子の特性,” 応用物理学会, 1a-PB-5, 1988.
- (9) 橋爪秀樹, 仲間健一, 佐藤史郎, 小林茂, 関雅文, “ガラス導波路型方向性結合器の偏光特性,” 応物予稿集, 30a-ZH-9, 1989.
- (10) ハンス ボルスタ, 谷田貝豊彦, 橋爪秀樹, 小林茂, 関雅文, “イオン交換による位相型CGHの効率改善と応用,” ’89 応物春季予稿集, 1p-Z-15, 1989.
- (11) 橋爪秀樹, 仲間健一, 小林茂, 関雅文, “ガラス導波路型方向性結合器,” 1989 信学秋季全大, C-263, 1989.
- (12) 仲間健一, 橋爪秀樹, 小林茂, 関雅文, “ガラス Y 分岐導波路の低損失化についての検討,” ’90 応物春季予稿集, 28a-F-7, 1990.
- (13) 佐藤史郎, 関雅文, 及川正尋, 橋爪秀樹, 小林茂, 仲間健一, 和田弘, “平板マイクロレンズ装荷ガラス導波路型方向性結合器,” 1990 信学春季全大, C-188, 1990.
- (14) T. Yatagai, H. Bolstad, H. Hashizume, S. Kobayashi, M. Seki, “Optimization of gradient-index computer generated hologram,” in *Proc. SPIE* 1211, Computer and Optically Formed Holographic Optics, pp. 191–197, May 1990.
- (15) 佐藤史郎, 橋爪秀樹, 和田弘, 小林茂, 関雅文, “偏波保持ファイバアレイ付きカプラデバイス,” 1990 信学秋季全大, C-195, 1990.
- (16) H. Hashizume, S. Kobayashi, S. Sato, and M. Seki, “Glass waveguide directional couplers fabricated by a two-step purely thermal ion exchange technique,” Annual Meeting, OSA, MZ5, Boston, 1990.

- (17) S. Sato, M. Seki, H. Hashizume, M. Oikawa, S. Kobayashi, K. Nakama, and H. Wada, "Planar micro lens-loaded glass waveguide directional coupler with a single-mode fiber array," OEC 90, 13D2-2, Makuhari, 1990.
- (18) 仲間健一, 小林茂, 橋爪秀樹, 関雅文, "1 x N 分岐イオン交換導波路の低損失化," 1991 信学春季全大, C-214, 1991.
- (19) 小林茂, 仲間健一, 佐藤史郎, 和田弘, 関雅文, "新しい導波路レイアウトによる 1 x N 分岐の低損失化," 1991 信学秋季全大, C-188, 1991.
- (20) 和田弘, 仲間健一, 佐藤史郎, 橋爪秀樹, 小林茂, 田中一郎, 関雅文, "ガラス導波路素子," 信学集積フォトニクス研究会, IP91-11, Nov. 1991.
- (21) K. Nakama, S. Kobayashi, H. Hashizume, and M. Seki, "Loss reduction of ion-exchanged glass waveguide Y-junction," *Integrated Photonics Research*, ThE5, Monterey, 1991.
- (22) M. Seki, S. Sato, K. Nakama, H. Wada, H. Hashizume, and S. Kobayashi, "New approaches to practical guided-wave passive devices based on ion exchange technologies in glass," in *Proc. SPIE* 1583, Integrated Optical Circuits, pp. 184–195, Dec. 1991.
- (23) S. Sato, H. Wada, H. Hashizume, S. Kobayashi, M. Seki, and K. Nakama, "Guided-wave directional couplers with polarization maintaining fiber arrays," *Electron. Lett.*, vol.27, no. 4, pp.303–304, 1991.
- (24) 仲間健一, 小林茂, "イオン交換ガラス Y 分岐導波路の低損失化," 信学論 (C-1), vol. J75-C-I, no.6, pp.480–482, Jun. 1992.
- (25) I. Tanaka, H. Wada, S. Sato, K. Nakama, H. Hashizume, S. Kobayashi, and M. Seki, "Glass waveguide 1 x N branching devices," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E75-B, no.9, pp. 886–893, Sep. 1992.
- (26) 田中一郎, 小林茂, 今西秀樹, B. Wolf, N. Fabricius, "イオン交換ガラス導波路による 2 x 16 分岐導波路デバイスの開発," 信学技報, OQE93-115, OCS93-51(1993-11), pp. 43–48, Nov. 1993.

- (27) 小林茂, 仲間健一, “偏波ダイバーシティ受信器用ガラス導波路型方向性結合器カプラモジュール,” 信学技報, OPE94-63 (1994-09), pp. 73–78, Sep. 1994
- (28) 小林茂, “偏波ダイバーシティ受信機用ガラス導波路型方向性結合器カプラモジュール,” 第5回 OIEC・光インターコネクション技術懇談会, Dec. 1994.
- (29) U. Hollenbach, H. Eckstein, N. Fabricius, M. Krause, and S. Kobayashi, “Polarization dependent losses of integrated optical splitters in glass,” in *Proc. SPIE 2695, Functional Photonic and Fiber Devices*, pp. 123–131, Jan. 1996.
- (30) 高木信一, 小林茂, “POF リンク,” O plus E, vol. 21, no. 6, pp. 667–672, Jun. 1999.
- (31) N. Sudo, and S. Kobayashi, “Optical connector for high performance plastic optical fiber,” in *Proc. 8th International POF conference '99*, pp. 213–216, Chiba, Japan, Jul. 1999.
- (32) 小林茂, “第3編第3章, 光コネクタ,” 分担執筆, 小池康博, 宮田清蔵 監修: プラスチックオプティカルファイバの基礎と実際, 株式会社エヌ・ティ・エス, pp. 112–128, 2000年7月.
- (33) 林武弘, 小林茂, “部品技術偏, 第3章接続部品, 3.1 コネクタ, 3.1.4 光コネクタ,” 分担執筆, 井原惇行, 益田昭彦 共同編集: 最新電子部品・デバイス実装技術便覧, R&D プランニング, pp. 709–721, Dec. 2002.
- (34) 小林茂, 林武弘, ブライアン パターソン, ベス マーフィー, “LIGHTRAY MPX 光バックプレーン用コネクタ,” 信学技報, vol. 100, no. 110, EMD 2000-16, pp. 7–12, Jun. 2000.
- (35) 小林茂, 大津信亮, 菊田知宏, 林武弘, “光ファイバ斜め切断技術の開発,” 2011年電子情報通信学会総合大会, B-10-23, p. 332, 2011年3月.
- (36) S. Kobayashi, N. Otsu, T. Kikuta, and T. Hayashi, “Handheld angle fiber cleaver,” in *Proc. 60th IWCS Conf.*, Charlotte, NC, USA, pp. 192–197, 2011.
- (37) 飯久保忠久, 長瀬亮, 小林茂, 米村正寿, 各務学, “HPCF の励振条件に対する側圧の影響,” 2013 信学総大, C-5-2, 2013年3月.
- (38) 飯久保忠久, 長瀬亮, 小林茂, 米村正寿, 各務学, “HPCF の平衡モード分布に関する実験,” 信学技報, vol. 113, no. 48, 機構デバイス研究会 EMD2013-2, pp. 5–9, 2013年5月.
- (39) 各務学, 小林茂, 芹澤直嗣, 平岩徹也, 麻生修, 後藤英樹, “車載光ファイバ通信の現状と今後,” レーザー研究, 第42巻, 第4号, pp. 320–325, Apr. 2014.

- (40) R. Tao, T. Hayashi, M. Kagami, S. Kobayashi, M. Yasukawa, H. Yang, D. Robinson, H. Baghsiahi, F. A. Fernández, and D. R. Selviah, “Equilibrium modal power distribution measurement of step-index hard plastic cladding and graded-index silica multimode fibers,” in *Proc. SPIE 9368, Optical Interconnects XV*, 93680N, Apr. 2015.
- (41) 小林茂, “車載光ネットワークの最新動向,” 平成26年度 光ネットワーク産業・技術研究会第5回公開討論会, 一般財団法人光産業技術振興協会, 2015年2月25日.
- (42) K. Horiguchi, Y. Hyakutake, Y. Beppu, T. Iikubo, T. Hayashi, S. Kobayashi, R. Nagase, and M. Kagami, “Optical interface study of SI type PCS fiber for a gigabits network application,” in *Proc. 64th IWCS Conf.*, GA, USA, pp. 327–333, 2015.

以上