

博士学位論文

マルチモード光ファイバ伝送システム評価  
におけるモードパワー分布に関する研究

堀口 幸二

宇都宮大学

2020年9月

宇都宮大学

要約

マルチモード光ファイバ伝送システム評価における

モードパワー分布に関する研究

堀口 幸二

本研究はステップインデックスマルチモードファイバ（SI-MMF：Step-index multimode fiber）の伝送システムにおいて、伝送システムの損失テストと動作テストを行うためにモードパワー分布（MPD：Modal power distribution）に関する一連の課題を解決することを目的とした研究である。本研究の主な貢献を以下に記述する。

近年、自動車、産業機器、鉄道、航空機などの機器内配線の短距離ローカルエリアネットワークにおいてデータレート高速化の要求が強くなっている。SI-MMF はコア径と開口数が大きいためアライメントトレランスが広く、堅牢性が高いという特徴を持つ。同ファイバは比較的高い伝送損失の特性を持ち、モード分散による伝送帯域制限があるという課題があるものの、短距離ローカルエリアネットワークでの使用に対して簡便性・経済性の点から注目されている。

SI-MMF を使用した高速伝送システムでは動作を保証するために、ファイバ同士の接続損失を損失テストとして行う。損失テスト用の励振ファイバでは、環境に依存せずに特定の MPD を維持するという、高安定性と高再現性が必要とされる。励振ファイバの MPD を安定化させる方法の一つとして、平衡モード分布の使用が提案されている。励振ファイバに平衡モード分布を使用することで、ファイバに付与されるベンドや側圧などの外因性の影響は受けにくくなる。また、平衡モード分布は光源の MPD に影響せずに特定の MPD を出力するという特性を持つ。しかし、平衡モード分布に到達するまでファイバ内ではマイクロベンドやコア・クラッド不整合などによる散乱や減衰などが影響して、MPD にばらつきが生じる。そのため、適切

に管理された方法で再現性の良い平衡モード分布を作成することが重要となる。その際に、平衡モード分布が取る MPD は損失テストの結果に大きく影響する。したがって、伝送システムのパワーバジェットの中で光ファイバに割り振られたロスバジェットから励振ファイバの MPD を決定する必要がある。しかしながら、これまでに励振ファイバの MPD を決めるための技術的な根拠を示す報告はない。本研究では光伝送システムにおいてファイバ接続に割り振られたロスバジェットを適切に消費するための励振光源の MPD 条件を決定するコンセプトを提案した。

前述したように励振ファイバの MPD 条件を決定するコンセプトにおいて、割り振られたロスバジェットに対する接続損失を算出することは、高精度な損失テストを成立させるために重要である。そのためには、高精度な接続損失シミュレーションが不可欠となる。SI-MMF の接続損失シミュレーションは様々な方法が報告されているが、シミュレーション値と実験値が一致するものは少なく、MPD に関するパラメータであるファーフールドパターンを考慮したものはほとんどない。本研究ではニアフィールドの光強度分布を構成する光線に対してファーフールドの放射角分布を重ねることによる、SI-MMF の高精度な接続損失シミュレーション法を提案し、実験値との高い一致を実証した。

高精度な接続損失テストを実際に行うためには、仕様に合わせた励振ファイバの MPD を正確に制御する必要がある。しかし、現在市場に流通している光源やモードコントローラおよびモードスクランブラは、SI-MMF の損失テスト規格に準拠したものはない。そのため、規格に準拠することができ、様々な損失テスト要件に合わせて MPD を調整できるデバイスが必要となる。これまでのモードコントローラには、MPD 制御性を有していながら平衡モード分布を生成できるものはなかった。本研究では、ファイバをツイストすることにより高効率なモード結合を起こすという独特な手法を利用した、平衡モード分布生成可能で MPD 可変性を有するモードコントロールデバイスを初めて提案・実証し、その MPD 制御メカニズムについて考察した。

伝送システムへファイバを実装した際に、SI-MMF に特有の MPD の不安定性のために伝送帯域が一時的に急激に悪化し、システムテストで想定外のエラーが発生することが懸念される。これまで SI-MMF の帯域改善については報告がほとんどなく、ファイバ長を短くして使用するか、高コストな他種ファイバに置き換える方法が主に行われていた。本研究では、ツイストモードコントローラのモード結合を利用した SI-MMF 帯域改善により、ファイバ自体の帯域を改善してシステム動作を安定化する方法を検証した。

本研究により、SI-MMF のテストシステムの構築において重要な要因である、励振光の MPD 規定を決めるためのコンセプト、およびそれに必要な接続損失シミュレーション方法を提案し、規定を満たす MPD の励振光を生成するためのモードコントローラを開発した。そして、実際の損失テストで MPD が不安定になったときのためにモードコントローラを使用した帯域改善について報告した。この研究が SI-MMF 伝送システム構築の技術的な根拠となり、その普及に貢献することを期待する。

# 目次

第1章 序論 .....	1
1.1 はじめに .....	1
1.2 Step-index Multimode Fiber 伝送システム動作への課題 .....	4
1.3 本研究の目的 .....	6
1.4 本論文の構成 .....	7
第2章 モードパワー分布 .....	9
2.1 モードパワー分布 .....	9
2.2 Encircled Flux .....	10
2.3 Encircled Angular Flux .....	11
2.5 おわりに .....	12
第3章 損失テストにおける励振モード分布デザイン .....	13
3.1 概要 .....	13
3.2 はじめに .....	13
3.2 モード分布規定の事例 .....	16
3.4 提案するモード分布設計コンセプト .....	19
3.5 ラウンドロビン試験 .....	21
3.6 シミュレーションに基づく境界条件のデザイン検討 .....	25
3.6.1 検証条件 .....	25
3.6.2 結果 .....	26
3.6.3 考察 .....	29
3.6.4 境界条件の決定 .....	30
3.7 おわりに .....	31
第4章 接続損失シミュレーション .....	32
4.1 概要 .....	32

4.2	はじめに .....	3 2
4.3	シミュレーションモデル.....	3 4
4.3	接続損失実験系 .....	3 7
4.4	励振条件の実測結果.....	3 8
4.5	励振条件の実測による考察 .....	3 9
4.6	シミュレーションモデルの妥当性考察 .....	4 2
4.7	おわりに .....	4 4
第 5 章	ツイスト処理を利用した可変モードコントローラ .....	4 5
5.1	概要 .....	4 5
5.2	はじめに .....	4 5
5.3	既存のモードコントローラ .....	4 7
5.4	ツイストタイプ可変モードコントローラの光学特性検証系 .....	5 2
5.5	光学特性検証結果.....	5 5
5.5.1	Near- and Far-field Pattern.....	5 5
5.5.2	Encircled Angular Flux and Encircled Flux.....	5 8
5.5.3	減衰と放射角 .....	6 0
5.6	他種のファイバへの適用.....	6 2
5.6.1	Step-index Multimode Fiber と Step-index Plastic Optical Fiber.....	6 2
5.6.2	Graded-index Multimode Fiber .....	6 3
5.6.2	Graded-index Plastic Optical Fiber.....	6 5
5.7	モード結合メカニズム.....	6 5
5.7.1	曲率パワースペクトル.....	6 5
5.7.2	モード結合係数.....	6 9
5.7.3	平衡モード分布係数.....	7 2
5.7	おわりに .....	7 3
第 6 章	可変モードコントローラによる伝送特性の改善.....	7 5

6.1 概要 .....	7 5
6.2 はじめに .....	7 5
6.3 検証システム .....	7 7
6.3.1 ツイストタイプ可変モードコントローラ .....	7 7
6.3.2 オシロスコープ計測システム .....	7 7
6.3.3 S パラメータ計測システム .....	7 8
6.3.4 Near- and Far-field Pattern 及び挿入損失測定システム .....	7 9
6.4 検証結果 .....	8 0
6.4.1 アイパターン .....	8 0
6.4.2 S パラメータ .....	8 2
6.4.3 Near- and Far-field Pattern 及び挿入損失 .....	8 3
6.5 考察 .....	8 4
6.6 おわりに .....	8 5
第7章 総括と今後の課題 .....	8 7
7.1 総括 .....	8 7
7.2 今後の課題 .....	8 8
参考文献 .....	9 0
謝辞 .....	1 0 2
研究業績 .....	1 0 4

## 略語

DMA	Differential mode attenuation
DMD	Differential mode delay
EAF	Encircled angular flux
EF	Encircled flux
EMC	Electromagnetic compatibility
EMD	Equilibrium mode distribution
FFP	Far-field pattern
GI-MMF	Graded-index multimode fiber
GI-POF	Graded-index plastic optical fiber
HML	Higher-mode launch
IEC	International electrotechnical commission
LAN	Local area network
LML	Lower-mode launch
MMF	Multimode fiber
MPD	Modal power distribution
MTF	Mode transfer function



NA	Numerical aperture
NFP	Near-field pattern
NoR	Number of rotations
NRZ	Non return to zero
OFL	Overfilled launch
OPM	Optical power meter
OTDR	Optical time domain reflectometer
PCSF	Plastic cladding silica fiber
POF	Plastic optical fiber
PRBS	Pseudo-random bit sequence
RML	Restricted mode launch
Rx	Receiver
SI-PCSF	Step-index plastic cladding silica fiber
SI-MMF	Step-index multimode fiber
SMF	Singlemode fiber
TIA	Telecommunications industry association
Tx	Transmitter

SI-POF	Step-index plastic optical fiber
SLD	Superluminescent diode
VMC	Variable mode controller
VNA	Vector network analyzer

# 第 1 章 序論

## 1.1 はじめに

プラスチックオプティカルファイバ（POF：Plastic optical fiber）やポリマークラッドシリカファイバ（PCSF：Plastic cladding silica fiber）等に代表されるステップインデックスマルチモードファイバ（SI-MMF：Step-index multimode fiber）は、国内外の短距離光通信で一定の市場を形成している。近年、この SI-MMF を使用した伝送システムにおいて、高速光トランシーバや変調・復調技術が急速な進歩を見せており、これまで利用されてこなかった車載ローカルエリアネットワーク（LAN：Local area network）や工業用構内 LAN などへの普及が進み始めている[1]-[3]。

現在、自動車産業業界では 100 年に一度といわれる技術革新が起ころうとしている。それは CASE と呼ばれ、自動車のネットワーク空間との接続（Connected）、自動運転（Autonomous）、シェアリング（Sharing）、および電動化（Electric）の 4 つの概念が同時に起こることによるパラダイムシフトである。次世代自動車の自動運転（Autonomous）の分野では、カメラ、レーダ、ディスプレイ機器、センサなどのデータ処理高速化の要求が高まっている。データ通信速度が高速化していくと、電磁的妨害源とならないように、かつ、電磁的な干渉を受けないように、あるいは受けても正常に動作するための電磁両立性（EMC：Electromagnetic compatibility）に課題が現れるようになった。通信速度の高速化により、これまで検討していなかった

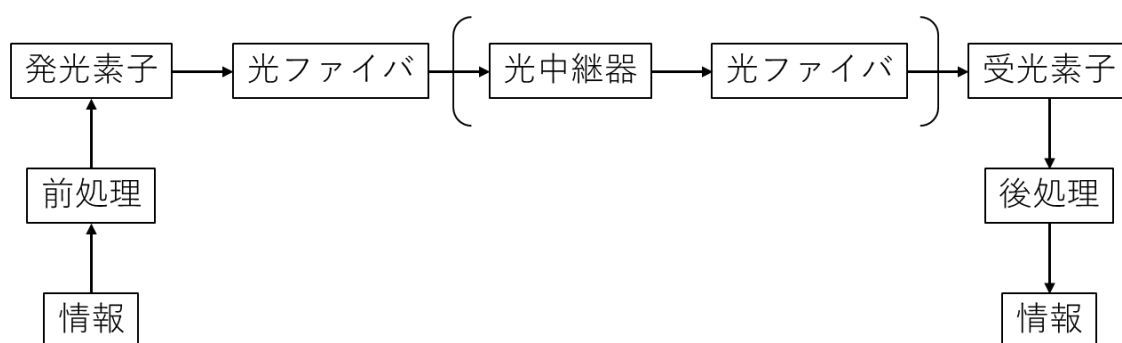


図 1-1 光伝送システムの基本構成

高い周波数の EMC 特性を満足する必要がある。メタルケーブルは導電率と透磁率から電磁波の影響を受けやすく、EMC 対策のために外部シールドやグラウンドプレーンの緻密な設計が必要となる。そのため、メタルケーブルを使用した場合、ワイヤハーネスの配策は高速化によりさらに複雑化し、重量の増加による電動化 (Electric) の妨げが懸念される[4]。それに対して光ファイバケーブルは電磁波の影響をほとんど受けず、電磁波源となることもない。そこで、従来のメタルケーブルに変わり、電磁波ノイズに強く、広帯域で軽量な光ファイバ配線による車載 LAN の期待が高まっている[5]。

図 1-1 に光伝送システムの基本構成を示す。光伝送システムの基本的な構成は送信端末、前処理回路、発光素子、光ファイバ、光中継器、受光素子、後処理回路、受信端末からなる[6]。まず、送信端末から発信された情報を送信回路が受け取り電気信号に変換する。続いて、電気信号は発光素子により光信号に変換される。信号が載った光は光ファイバにより伝搬され、場合により光中継器でアンプされて受光素子に届けられる。受光素子で受け取った光信号は、受信回路により電気信号に変換され、端末に届けられる。

光伝送システムにおける光信号の品質は、光ファイバを伝搬する光のモード分散の拡大、波長スペクトルの拡大や挿入損失の増加によって劣化する[7]-[16]。光伝送システムを成立させるために、システムを構成する各々のコンポーネントはロスバジェットの規定により振り分けられた損失を上回らないように管理されている[17]。ロスバジェットは高速化するほどマージンが小さくなるため、光ファイバの挿入損



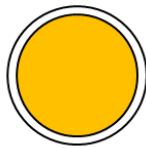

Name of fiber	Singlemode fiber	Graded-index multimode fiber	Step-index cladding silica fiber	Step-index plastic optical fiber
Core/cladding diameters (μm)	9.5/125	50/125, 62.5/125	200/230	980/1000
				

図 1-2 光ファイバの代表的な種類と構造

失を厳しく管理する必要がある。マルチモードファイバ (MMF : Multimode fiber) 伝送システムの一部では測定条件による不確かさを小さくするために、国際電気標準会議 (IEC : International electrotechnical commission) で規定された励振条件を使用することが推奨されている[18]。

図 1-2 に光ファイバの代表的な種類と構造を示す。光ファイバの基本構成は光が伝搬するコアと、その周囲を同心円状に覆うクラッドから構成され、コアの屈折率をクラッドの屈折率よりわずかに高く設定することにより、光の全反射により光信号をコアの中に閉じ込めて伝送させる。

光ファイバの種類は光伝搬の仕方により 2 つに大別される。光ファイバのコア径を小さくしていくと、伝搬できるモードの数が減っていき、最終的に基底モードのみが残る。このように基底モードのみを通す光ファイバをシングルモードファイバ (SMF : Singlemode fiber) という。一般的な SMF のコア直径は 6~10  $\mu\text{m}$  程度、コア・クラッド間の比屈折率差は 0.2~0.3% である。SMF は伝送帯域劣化の原因の一つであるモード分散が生じないため、伝送帯域が広い。

その一方で、基底モード以外に複数のモードが伝送されるファイバは MMF と呼ばれる。MMF に存在可能なモード数は規格化周波数により計算される[19]。規格化周波数  $V$  は以下の式で示される。

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad (1.1 - 1)$$

ここで、 $a$  はファイバのコア半径、 $\lambda$  は自由空間波長、 $NA$  は MMF の開口数を示す。その中でもコア内の屈折率分布が一様である光ファイバを SI-MMF と呼び、コア内の屈折率を周辺に向かって連続的に小さくなるように二乗分布状に変化させた光ファイバをグレーデッドインデックスマルチモードファイバ (GI-MMF : Graded-index multimode fiber) と呼ぶ。SI-MMF のモード数  $M_S$  は以下の式で示される。

$$M_S = \frac{V^2}{2} \quad (1.1 - 2)$$

また、GI-MMF のモード数  $M_G$  は以下の式で示される。

$$M_G = V^2 \left[ \frac{\alpha}{2(\alpha + 2)} \right] \quad (1.1 - 3)$$

ここで、 $\alpha$ は GI-MMF の屈折率分布係数を示す。一般的に使用される MMF のコア径 50  $\mu\text{m}$  で、NA 0.20 の場合、近赤外の波長において、数百のモードが MMF 内に存在することがわかる。

SI-MMF では、次数が異なる多数のモードが異なる光路を通過して伝搬する。そのため、それぞれのモード間に生じる光路差に起因して、異なる時間で光パルスが他端に到達するモード分散が生じる。モード分散が起こることにより、光パルス幅が広がってしまい、伝送特性が悪化する。一方、GI-MMF は、二乗分布状の屈折率分布により次数が異なるモードでも、パルス伝搬速度の差が小さくなるように設計されているため、光パルスの広がりが抑制される。モード分散抑制の屈折率分布構造を持つ GI-MMF は、SI-MMF と比較して広い伝送帯域幅を持つ。

SI-MMF は主に光ファイバ開発の初期段階において主な研究対象であったが、次第に、伝送損失が小さくて広帯域な SMF や GI-MMF が主流となっていった。SMF は光伝送システムのデバイスコストが比較的高いため、低損失で長距離伝送が要求される基幹ネットワークに使用されることが多い。GI-MMF はデバイスのコストが比較的低いため、短中距離 LAN で使用されることが多い。車載や医療分野などの厳しい環境ではメカニカルな特性を考慮して、SI 型の POF や PCSF などが使用されることもある。

## 1.2 Step-index multimode fiber 伝送システム動作への課題

これまで、マルチギガビットレベルの広帯域を要するネットワークで使用されるファイバは SMF や GI-MMF が多く、SI-MMF はほとんど使用されていなかった。しかし、近年 SI-MMF のモードパワー分布 (MPD : Modal power distribution) を制御することで、車載ネットワークを始めとする広帯域短距離高速通信システムに SI-MMF を搭載する動きが活発化している[20]-[22]。SI-MMF はモード分散による帯域制限が

あるが、励振光源・ファイバ長を適切な条件で使用することで、低コストで広帯域な光伝送システムの構築が可能であると期待されている。

先述したように、初期の光ファイバ開発時以来、SI-MMFを使用した光伝送システムの研究や議論はあまりされていなかった。そのため、SI-MMFを使用するマルチギガビット光伝送システムを動作させるためには解決すべき課題が残っている。

- i. 励振ファイバの MPD の規定
- ii. 精度の高いファイバ接続損失のシミュレーション
- iii. 励振ファイバの MPD の制御
- iv. ファイバの帯域を改善するためのデバイス開発

上記課題について詳細を以下に記述する。

励振ファイバの MPD は、光伝送システムのパワーバジェットにおいて、光ファイバリンクに割り振られたロスバジェットを満たす仕様で規定する必要がある。しかし、ロスバジェットの規定を満足する適切な MPD を規定するための方法論は開示されておらず、その規格が文書化されているのみである[18]。MPD の規定は伝送システムのデータレートや、使用するファイバ種によってそれぞれ行う必要があるため、デザインフローの体系化による定量的な規定制定が求められる。

MPD を規定するためのフローでは、実測とシミュレーションの損失値が一致する高精度なシミュレーション求められる。MMF の接続損失シミュレーションは、これまでに波動理論や幾何光学を利用した様々な方法が報告されている[23]-[31]。波動理論は、モード数が多くなると電磁界分布の厳密解を計算することが困難であるため、近似解を求める必要がある。また、幾何光学を利用した方法が報告されているが、励振ファイバのニアフィールドの強度分布をファイバの受光面積と重ね合わせて計算するものであり、ファーフィールドの放射角強度分布が考慮されていない。このような理由から、現在報告されている様々なシミュレーションでは実験値との相違が少なからず見られる。

MPD はファイバ内の伝搬モードの光強度を主モード番号（あるいは規格化モード群番号）でプロットした分布である[19]。SI-MMF の損失テストでは測定再現性のために、安定したモード状態である平衡モード分布 (EMD : Equilibrium mode distribution) で規定された MPD を使用することが推奨される。EMD はその状態に到達するまでのファイバコンディションによって様々な MPD をとることが明らかになっており、EMD の MPD 制御はファイバ接続の損失テストに不可欠であるが、EMD に到達可能で MPD が制御可能なデバイスは存在していない。

SI-MMF は通常の使用条件である限定励振 (RML : Restricted mode launch) では MPD の安定性が低い。MPD 不安定のため、モード分散に起因するモード間ディレイが MPD 不安定性の影響を受け伝送品質が悪化する。特に外部からの応力や振動による MPD の変動により、SI-MMF の帯域は一時的に急激に悪化し、伝送システムのシステムテストにエラーが発生する。

### 1.3 本研究の目的

本研究では、損失テスト励振光の MPD の規定を制定するためのデザインコンセプトを提示し、そのフローを明確にした。また、MPD のデザインコンセプトフローの一部である、MMF 接続損失シミュレーションモデルを提案した。また、損失テスト励振光の MPD を実際に作成することができる可変モードコントローラ (VMC : Variable mode controller) を製作した。最後に、伝送システム動作テストにおいて問題となる、モード分散による帯域劣化に対して、VMC を使用してモード安定化を促進することによりファイバ帯域の改善を試みた。これらの MPD に関する一連の研究により、伝送システムの損失テストと動作テストにおける MPD の課題を解決することを目的とする。



## 1.4 本論文の構成

図 1-3 に光伝送システムの基本構成に対応する各章の主題を示す。

第 2 章では、本研究で説明されている、モード規定およびモード制御の理解に関連する理論について説明する。MPD は各伝搬モードの光強度分布を示しており、SI-MMF と GI-MMF はそれを示すための解析方法として、エンサークルドアンギュラーフラックス (EAF: Encircled angular flux) とエンサークルドフラックス (EF: Encircled flux) を使用する。

第 3 章は、本研究の本質的な部分である光伝送システムの接続損失テストのための励振モード分布デザインのコンセプトについて説明する。本論文では、ステップインデックスプラスチッククラッドシリカファイバ (SI-PCSF: Step-index plastic cladding silica fiber) の励振モード分布デザインの実例を記載している。デザインの実例を得るにあたり、複数機関で EAF のラウンドロビン試験を行い、ファイバコンディションにより EMD にばらつきがあることを明らかにし、そのばらつきと損失変動を考慮した EAF テンプレートを報告した。

第 4 章は、MMF の接続損失についてまとめ、シミュレーションモデルを構築した。構築したシミュレーションモデルと実測結果の比較検証を行い、シミュレーションの妥当性を確認した。このシミュレーションモデルは、第 3 章における励振モード分布デザインコンセプトの接続損失の計算に取り入れられる。

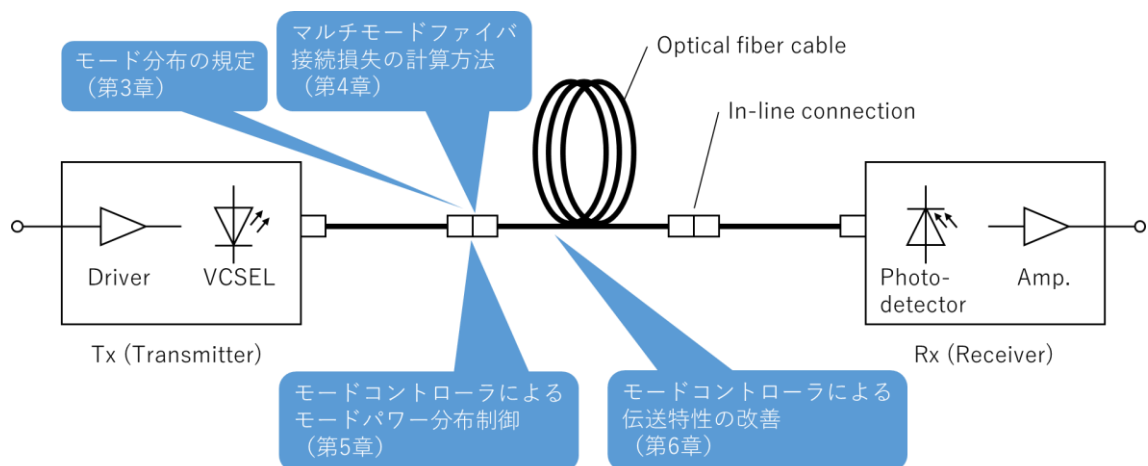


図 1-3 光伝送システムの基本構成に対応する各章の主題

第5章では、第3章の励振モード分布デザインにより設計された励振光のMPDを作成するためのモードコントローラを報告する。このモードコントローラのMPD可変制御性能と、モード結合性能によるEMD作成性能について説明した。このモードコントローラの光学特性を検証し、伝送システムの接続損失テストに使用するための性能を備えているか考察した。また、モードコントロールのメカニズムについて理論的な考察を行った。

第6章では、第5章で説明したモードコントローラを利用したSI-MMF伝送システムの光学特性改善について報告した。モードコントローラの光学特性と伝送特性をアイパターン、Sパラメータ、挿入損失、MPDなど様々な面から検証し、伝送特性改善の効果とメカニズムについて考察した。

第7章では本研究の総括を行い、今後の課題についてまとめた。

## 第2章 モードパワー分布

### 2.1 モードパワー分布

MPD は、各伝搬モードの光強度を主モード番号（あるいは規格化モード群番号）でプロットした分布である。対象となる光ファイバの屈折率分布がステップインデックスタイプの場合は、伝搬角が主モード番号に対応するが、グレーデッドインデックスタイプの場合は、径方向の位置が主モード番号に対応する指標となる。MPD は SI-MMF において遠視野像（FFP : Far-field pattern）により示され、GI-MMF において近視野像（NFP : Near-field pattern）により示される。図 2-1 に NFP と FFP の概

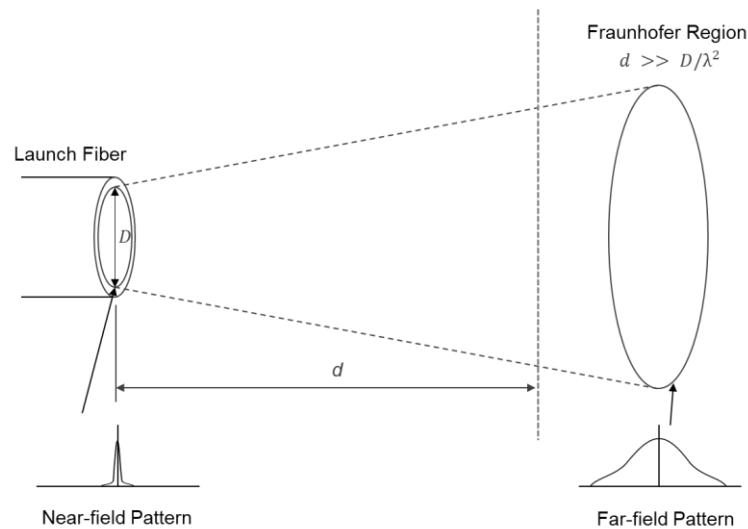


図 2-1 NFP と FFP の概略図

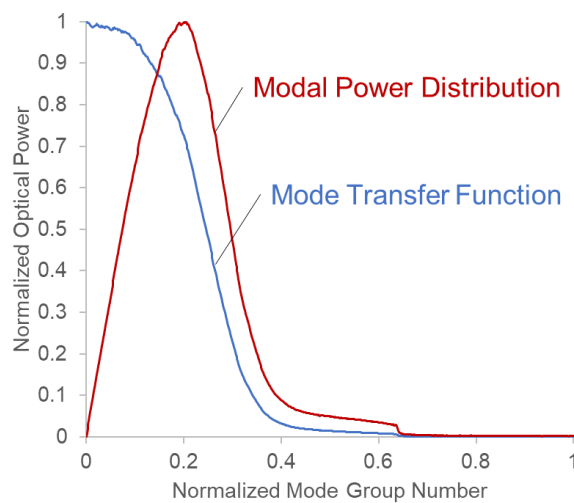


図 2-2 MTF の例と対応する MPD

略図を示す。ファイバの端面位置の強度分布を NFP、ファイバから放射した光がフラウンホーファ回折条件を満たす距離に投影した強度分布を FFP と呼ぶ。フラウンホーファ領域は開口径 $D$ 、距離 $Z$ 、波長 $\lambda$ としたとき、 $d \gg D/\lambda^2$ で示される。FFP は NFP とフーリエ変換の関係にある。FFP の測定はフーリエ変換レンズを使用してスクリーンに投影した強度分布を観察することが一般的である。

SI-MMF の場合、FFP の二次元プロファイルの中心を通る平面で切り出して一次元プロットしたものは、モード伝達関数 (MTF : Mode transfer function) とよばれる。図 2-2 に MTF の例とそれに対応する MPD を示す。あるモード群内に含まれるモード数は主モード番号 $m$ に比例する。最大主モード番号を $M$ とすると、規格化主モード番号は $m/M$ で示される。モード群内の光パワーは各モードへ均一に分布していると仮定すると、MPD は以下で示される。

$$\text{MPD} \left( \frac{m}{M} \right) = \frac{m}{M} \times \text{MTF} \left( \frac{m}{M} \right) \quad (2.1 - 1)$$

## 2.2 Encircled flux

エンサークルドフラックス (EF : Encircled flux) は光ファイバ端面の出力の強度分布である NFP の解析により得られる。

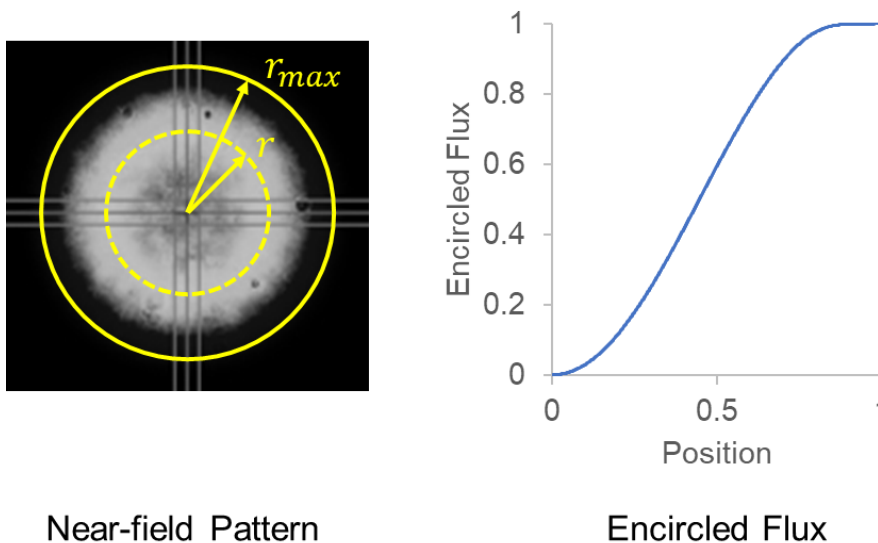


図 2-3 EF 解析の例 : 左図は NFP、右図は EF プロファイル。

EF は以下の式で示される。

$$EF(r) = \frac{\int_0^r I(r')r' dr'}{\int_0^{r_{max}} I(r')r' dr'} \quad (2.2 - 1)$$

ここで、 $r_{max}$ は最大解析画像半径、 $r'$ は任意の半径、 $I(r')$ は任意の半径における光強度の平均である。図 2-3 に EF 解析の例を示す。

また、EF は極座標表示により、以下の式で示される。

$$EF(r') = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{r'} I(r, \varphi) r dr d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_{max}} I(r, \varphi) r dr d\varphi} \quad (2.2 - 2)$$

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 $(r, \varphi)$ における光強度である。

EF は GI-MMF の MPD を直接示すものではないが、それに対応するパラメータである。GI-MMF の接続損失テストに使用する励振光源の EF テンプレートが IEC により文書化されている[18]。

### 2.3 Encircled angular flux

エンサークルドアンギュラーフラックス (EAF : Encircled angular flux) は光ファイバからの出力光をフラウンホーファ領域 ( $d \gg D^2/\lambda$ ) にあるスクリーンに投影された FFP 像の解析により得られる[32], [33]。光ファイバと FFP スクリーンの距離を $d$ 、放射角度を $\theta$ とすると次の式が得られる。

$$r = d \cdot \tan(\theta) \quad (2.3 - 1)$$

光ファイバからの放射角度 $\theta$ とスクリーン上の極座長位置 $\varphi$ は独立であることから次の関係が導かれる。

$$r \cdot dr = \frac{d^2 \cdot \sin(\theta)}{\cos^3(\theta)} d\theta \quad (2.3 - 2)$$

これを式 (2.2-1) に代入して整理することで EAF の式を導くことができる。

$$\text{EAF}(r') = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta'} I(\theta, \varphi) \frac{\sin(\theta)}{\cos^3(\theta)} d\theta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{max}} \int_0^{\theta'} I(\theta, \varphi) \frac{\sin(\theta)}{\cos^3(\theta)} d\theta d\varphi} \quad (2.3 - 3)$$

図 2-4 に EAF 解析の概要と解析の例を示す。

EAF は SI-MMF の MPD を直接示すものではないが、それに対応するパラメータである。SI-MMF の一種である SI-PCSF の損失テストに使用する光源の EAF テンプレートが IEC により文書化されている[34]。

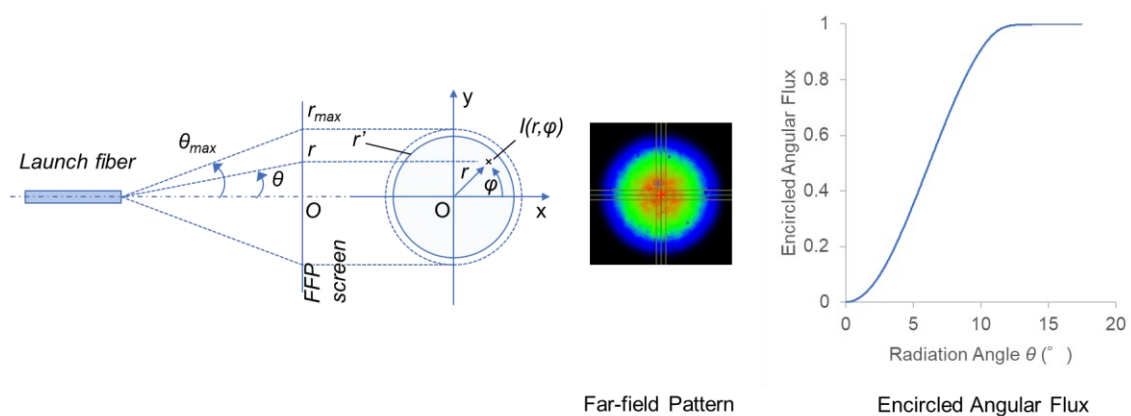


図 2-4 EAF 解析の概要と解析の例：左図は EAF 解析の概要、中図は FFP、右図は EAF プロファイル

## 2.5 おわりに

この章では、モード規定およびモード制御の理解に関連する理論である MPD の定義について説明した。また、MPD に関するパラメータとして、EF・EAF について説明し、関係性をまとめた。

## 第3章 損失テストにおける励振モード分布デザイン

### 3.1 概要

光伝送システムを構築し、正常に動作させるためには、発光素子と受光素子の間のパワーバジェットおよび光ファイバリンクにおけるロスバジェットを規定し、チャンネルロスがその仕様を満たしている必要がある。ロスバジェットの仕様を確実に満たすためには、システムに実装する前に接続損失テストにより検証することが重要となる。損失テストの検証には、測定環境や測定装置の違いによる結果のばらつきが無いように、規格により定められた EF あるいは EAF テンプレートを満たす励振光が使用される。

本章では SI-MMF の一種であるステップインデックスプラスチッククラッドシリカファイバ (SI-PCSF : Step-index plastic cladding silica fiber) を例に、損失テストのための励振モード分布デザインのコンセプトを提案する。SI-PCSF の励振モード分布の規格は EAF プロファイルで作られたテンプレートマスクにより定められた。このテンプレートは、ファイバ同士の接続に対して妥当な公差範囲で損失テストを合格するように設計されている。損失テストで合格判定が得られたコネクタを使用することで、伝送システムのチャンネルロスは規定のロスバジェットを満足し、伝送システムは正常な動作を保障される。

### 3.2 はじめに

近年、マルチギガビット通信が可能なファイバとして、SI-MMF の一種である SI-PCSF が注目されている[35], [36]。SI-PCSF の代表的な仕様は IEC 60793-2-30 で A3e ファイバとして標準化されている[37] : 200  $\mu\text{m}$  のシリカガラスコアに 230  $\mu\text{m}$  のポリマークラッドと 500  $\mu\text{m}$  のポリマーコーティングを施し、0.37 の開口数 (NA : Numerical aperture) を持つ。SI-PCSF は、コア径が大きいためコンタミネーションに

強く、ミスアライメントによる損失が比較的少ない。また、ポリマークラッドを有しているため、曲げ、応力、薬品に対する耐性が高い。SI-PCSF は、実用上の様々な利点があるため、自動車、産業機器、監視カメラ、鉄道車両などの過酷な環境での使用に適したファイバであると言われている[38]。

光通信システムを構築するためには、ファイバリンクの挿入損失が、伝送システムで割り振られたロスバジェット仕様を満たさなければならない[39], [40]。ファイバリンクのロスバジェットのマージンは、データ伝送速度の高速化に伴って減少していくと予想されている。典型的な MMF マルチギガビット光通信システムでは、中間接続を含まず、単独の MMF で接続することが前提とされている[41]-[44]。しかし、近年、自動車や産業機器に見られるような、LAN を冗長性の高いネットワークポロジで接続するためには、ファイバ同士を中間接続する必要がでてきた[45]。ファイバ同士の中間接続では、励振ファイバのモード状態によって接続損失が変化する。損失テストでは、異なる場所や測定装置を問わずにばらつきが小さい結果が得られることが、システム動作の再現性を高めるために重要である。測定結果のばらつきを抑えるためには励振条件を規定して、同一条件で検証を行うことが必要となる。

ファイバ接続の損失テストにおいて、励振ファイバの MPD を制御することで、再現性の高い測定結果を得ることができる。SI-MMF の MPD は第 2 章に先述されたように、ファイバから放射された光の FFP で示される[46]。さらに、二次元 FFP を輝度重心から円周方向に強度を積分することで、EAF が示される。SI-MMF において EAF プロファイルと MPD は対応したパラメータであるため、MPD の変化は EAF プロファイルに反映される。低次モード側と高次モード側の EAF プロファイルを作成することでそれらを境界条件とした EAF テンプレートが作成される。



SI-PCFS の一般的な仕様である A3e ファイバの損失テストの EAF テンプレートは、IEC 61300-1 で文書化されている[47]。表 3-1 に IEC 61300-1 で規定された A3e ファイバの波長 850 nm における EAF テンプレートの値を示す。また、図 3-1 に IEC 61300-1 で規定された EAF テンプレートを示す。テンプレートは、市販の SI-PCSF の EMD のばらつきを実測し、それを考慮して設計されている[48]。SI-PCSF の EMD 状態は 2000 m 以上のファイバ長の SI-PCSF を光伝搬させることで得られる。EMD 状態は MPD のモード結合による変動が飽和した状態であるため、安定した状態である。したがって、MPD と同様に EAF プロファイルも安定しており、外因性の要因によりほとんど変化しない。励振ファイバの MPD を EMD 状態で使用することで、再現性の高い損失テストが可能になることは既に報告されている[49]-[52]。

表 3-1 IEC 61300-1 で規定された A3e ファイバの波長 850 nm における EAF テンプレートの値

Radiation Angle [°]	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

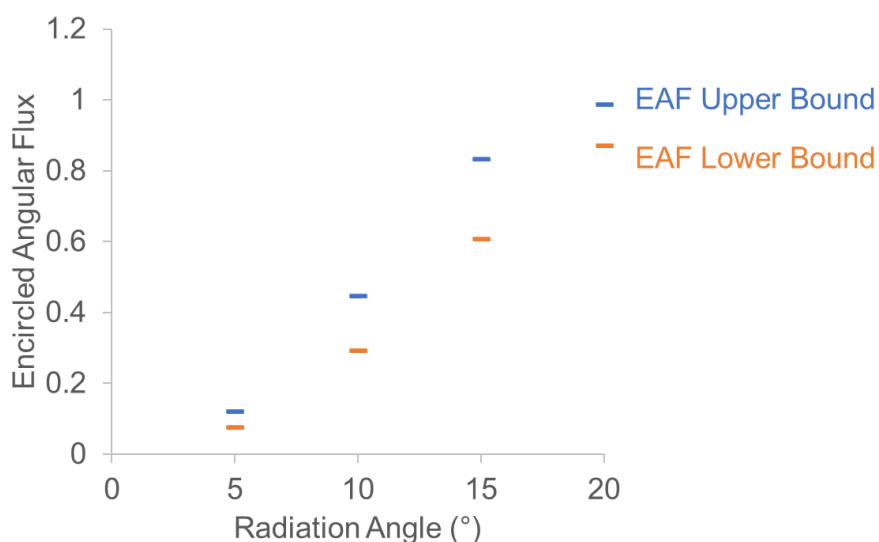


図 4-1 IEC 61300-1 で規定された A3e ファイバの波長 850 nm における EAF テンプレートの図示

このように EAF テンプレートを損失テストに適用することの利点は示されており、テンプレートの設定値が国際規格に文書化されている。しかし、その設定値がどのような基準により、どのようなフローで決められたものであるのか、そのデザインコンセプトは公開されていない。

本章では、シミュレーションと実験データを用いて、SI-PCSF の一般的な仕様である A3e ファイバの EAF テンプレートを設計する手法を提案する。今回、この手法は A3e ファイバに対して適用しているが、そのファイバに限った手法ではなく、あらゆる SI-MMF に適用可能である。テンプレートデザインの前提として、損失テストにおける、最大接続損失、損失のばらつきの許容範囲、光軸垂直方向と光軸方向のミスアライメント許容範囲の設定を決めておく必要がある。今回、最大接続損失を 2.0 dB、損失ばらつきを $\pm 0.20$  dB 以内とした。次に、一般的なコネクタによる実用的な接続ずれを考慮し、光軸垂直方向のオフセットを 40  $\mu\text{m}$  以下、光軸方向のオフセットを 100  $\mu\text{m}$  以下としてミスアライメントの許容範囲を決定した。

### 3.2 モード分布規定の事例

ここでは過去のモード分布規定の事例について述べる。過去のモード分布は GI-MMF のシステムを対象にしており、SI-MMF では検討されていない。また、損失テストの規定だけでなく、ファイバの帯域を測定するための規定や伝送システムの光源の規定など、用途に応じた規定が作成されている。

1990 年代以前のファイバ帯域幅の測定は、全モード励振 (OFL : Overfilled launch) を用いて行われてきた[53]。1990 年代に開発された垂直共振器面発光型レーザー (VCSEL : Vertical cavity surface emitting laser) 光源は、その高出力、低しきい値電流、高変調速度の優れた特性により、すぐに LAN システムに応用されるようになった。VCSEL 光源は限定励振 (RML : Restricted mode launch) の MPD を有しており、RML で測定されたファイバ帯域幅は OFL より得られた値をはるかに超えることが発見された。そのため、伝送性能をより良くするために MPD の規定が必要であるこ

とが認識され、規格化が進められるようになった。アメリカ電気通信工業会（TIA：Telecommunications industry association）は、ファイバ帯域幅は RML を使用して測定され、VCSEL 光源からの出力は特定の MPD テンプレートを満たさなければならないとした。この時、議論されたファイバの種類は GI-MMF であり、SI-MMF は使用されなかった。

10 Gb/s の場合、GI-MMF 帯域幅の要件は 2000 MHz.km であり、当時のファイバでは RML 励振でこの性能を保証することはできなかった。そこで TIA では、ディファレンシャルモード遅延（DMD：Differential mode delay）の測定を推奨した[54]。この技術は、試験対象ファイバの入力端をシングルモードの励振ファイバで横切るように走査し、試験対象ファイバから出射されたパルスの相対的な時間遅延を測定する手法である。DMD は、最も遅延の少ないパルスのエッジと、最も遅延が大きいパルスのエッジの間の時間遅延として与えられる。TIA では 10 Gb/s の帯域幅要件を満たすために、6 つの DMD テンプレートが導入された[55]。

ファイバの特性を示す DMD テンプレートの他に、励振光源が満たす必要がある EF テンプレートがある。ファイバと光源の両方がそれぞれの仕様を満たす場合、ファイバリンクは 10 Gb/s で動作することが可能となる[14]。

SMF を GI-MMF に結合すると、少数の低次モードしか励起されないため、DMD は改善されると予想される。これは一般的に当てはまるが、レーザと GI-MMF が完全なアライメント状態の場合で起こるモード分散が、OFL を励振するよりもはるかに悪い特性を示すことが報告されている[56]。これは、過去の GI-MMF で屈折率分布プロファイルの中心付近にリップルやディップなどの欠陥があったためである。この問題を回避するために、SMF と MMF の間にわずかな光軸垂直方向オフセットを導入することによって、帯域幅を改善している。

これらの励振条件は、1 Gb/s および 10 Gb/s 伝送システム用の IEEE802.3 規格に含まれている。指定されたオフセットは 62.5  $\mu\text{m}$  GI-MMF で 20  $\mu\text{m}$ 、50  $\mu\text{m}$  GI-MMF で 13  $\mu\text{m}$  である。

チャンネル損失とは、Transmitter (Tx) と Receiver (Rx) の間の光損失の合計で、ファイバ、コネクタ、スプライスを含む。また、チャンネル損失は、モード次数により減衰量が変化する差動モード減衰 (DMA : Differential mode attenuation) により、励振モード分布に依存することが知られている。光損失に割り振られたロスバジェットを確実に満たすためには、システムを動作させる前にチャンネル損失を確認することが重要である。チャンネル損失の測定は、通常、光パルス試験器 (OTDR : Optical time domain reflectometer) または光パワーメータ (OPM : Optical power meter) を使用して

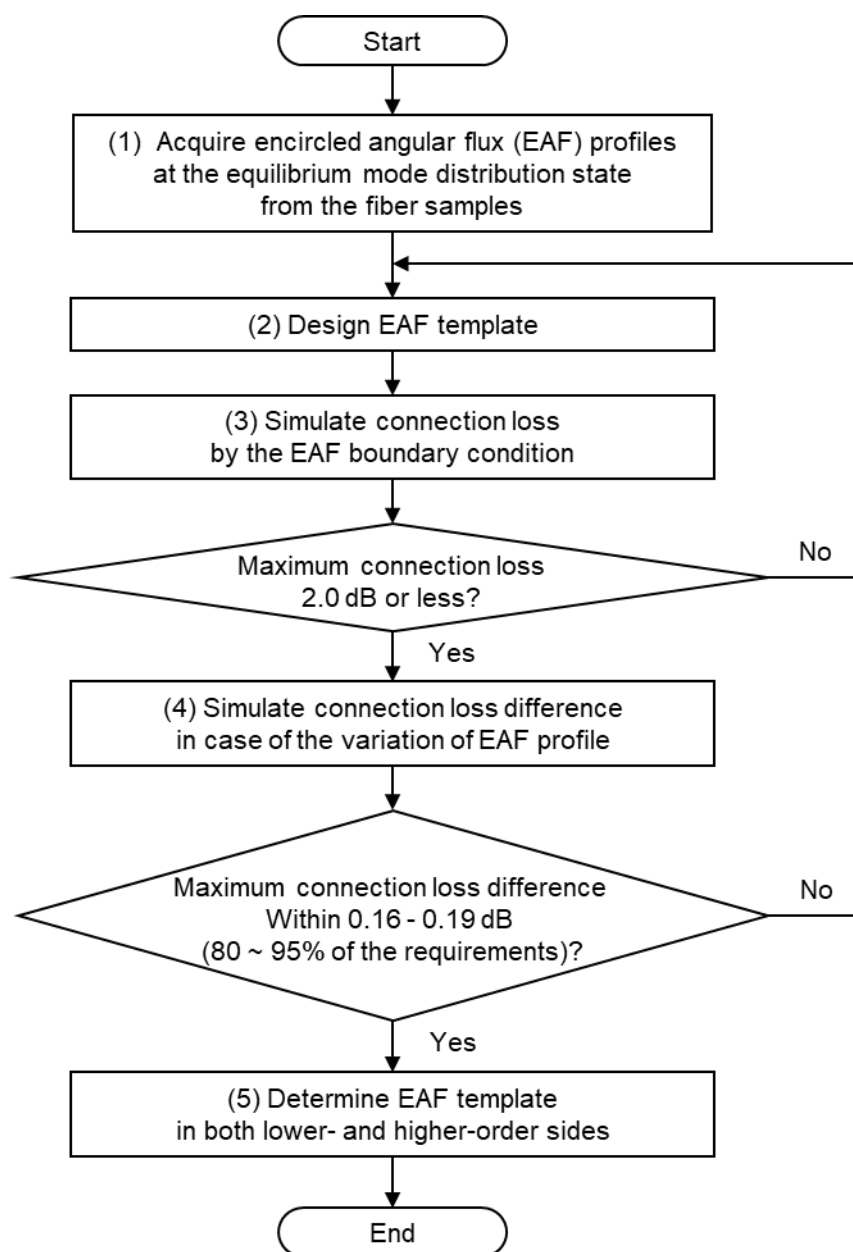


図 3-1 励振光の EAF テンプレートデザインのフローチャート

行われる。異なる環境、異なるタイプの試験装置でも再現性のある結果が得られるように、損失テストのための励振モード分布を定義する規格が必要である。試験規格である ISO/IEC 14763-3[57]および IEC 61280-1-4 [18]は、試験装置の適合性を検証するためのモード分布テンプレートを規定することで、この問題に取り組んでいる。

GI-MMF の EF テンプレートと同じように、損失テストのための SI-PCFS の励振モード分布を定義する必要がある。光ファイバ相互接続デバイスと受動部品 - 基本的な試験および測定手順の一般的な情報とガイダンスを提供している規格である IEC 61300-1 に SI-PCFS の EAF テンプレートが記載されている[47]。この EAF テンプレートの規定には本章で報告するデザインコンセプトが使用されている。

### 3.4 提案するモード分布設計コンセプト

図 3-1 に A3e ファイバの接続損失測定における励振光の EAF テンプレートデザインのフローチャートを示す。A3e ファイバは SI-PCSF の一般的な仕様であり、200  $\mu\text{m}$  のコア径、230  $\mu\text{m}$  のポリマークラッド径、500  $\mu\text{m}$  のポリマーコーティング径、NA 0.37 で構成される。以下に、実際にフローチャートを使用して A3e ファイバの EAF テンプレートを制定した際の手順を示す。

(1) EMD の実用的な MPD データを得るために、市販されている 2000 m 以上の A3e ファイバスプールを用いて EAF プロファイルを測定した。ファイバ長 2000 m は A3e ファイバが EMD に到達するために十分な長さである。A3e スプールは異なるロットのものを複数用意した。本検証では、EMD の EAF プロファイルのばらつきを観察し、多くの EAF プロファイルを得るための方法として、複数の測定機関によるラウンドロビン試験を行った。ラウンドロビン試験の詳細は後述する。得られた EAF プロファイルを重ね合わせることで、EMD 状態における EAF プロファイルのばらつきを実質的に把握できる。ファイバは EMD において固有の EAF プロファイル形状を有しており、これを次のステップ(2)で使用する。

(2) EMD 状態での EAF プロファイルを基にして EAF 値を調整することで、低次モードと高次モードの境界条件を設計した。EMD 状態における EAF は、ファイバのスプールロットによって多少ばらつきがあることが確認できる。SI-MMF において、EAF プロファイルは MPD に対応するものであるため、EMD 状態での EAF プロファイルの形状はファイバの種類によって概ね決まっており、曲げや応力などの状態によりばらつきが生じている。EAF 境界条件の設計では、EAF の実測値を適当な数値で乗算することで EAF 値を調整する。この時、EAF は規格化された値であるため上限値は変化しない。

(3) 設計された EAF 境界条件を励振条件としてファイバ接続損失のシミュレーションを行う。前提条件として設定されたミスアライメントの範囲で 2.0 dB 以上の損失が計算された場合は、損失を抑えるために EAF 境界条件を低次モード側にシフトするように再設計する。接続損失が 2.0 dB 以下であれば、次のステップへと処理を進める。

(4) EAF 境界条件の低次モード側と高次モード側プロファイル間の EAF プロファイル変動による接続損失差をシミュレーションで算出する。EAF プロファイルの変動による損失差は損失テストにおけるばらつきを示す。テンプレートデザインにおける損失ばらつきは測定の不確かさを考慮して、許容値上限からマージンを持たせることを推奨する。今回、シミュレーションによる接続損失差の最大値は、要求される損失ばらつき（本検証では 0.20 dB）の 80~95% の範囲内であることが妥当であるとした。すなわち、0.16~0.19 dB の範囲内であれば妥当な損失差であると判断し、次のステップに進む。シミュレーションによる接続損失の差が 0.19 dB より大きい場合は、目標値から外れているので、高次と低次の EAF 境界条件によるテンプレートマスクサイズを狭くする必要がある。接続損失の差が 0.16 dB 未満の場合は、EAF 境界条件によるマスクサイズを大きくして、十分なマージンの確保を行う。

(5) 低次モード側と高次モード側の両方の EAF 境界条件を EAF テンプレートとし、要件を満たす励振光条件として決定する。

### 3.5 ラウンドロビン試験

異なるロットの A3e ファイバスポールを複数用意して、複数の機関と共同でラウンドロビン試験を行い、EMD 状態の EAF プロファイルのばらつきを求めた。図 3-2 は、ラウンドロビン試験における EAF プロファイル測定の実験系を示す。

波長 850 nm のスーパーluminescentダイオード (SLD : Superluminescent diode) 光源 (LSS 002/850、シナジーオプトシステムズ) からの光を、以下の手順で FFP 測定装置 (M scope type F、シナジーオプトシステムズ) に入射した。まず、SLD 光源に SMF を接続する。続いて、SMF の他端を A3e ファイバの一端に接続し、A3e ファイバの他端を FFP 測定系に接続した。

EMD を得るためにファイバスポールは、2000 m 以上のものを使用した。ラウンドロビン試験の第 1 セットは 3 箇所の測定機関で実施し、第 2 セットは 1 回目の 3 機関を含む 6 箇所の測定機関で実施し、第 3 セットは 1 箇所の測定機関で実施し、計 3 セットを実施した。

第 1 セットのラウンドロビン試験の手順を、以下に説明する。4 本のファイバスポールを用いて 3 箇所の測定機関で EMD の EAF プロファイルを測定した。励振光の NA は 0.15 と 0.30 の 2 種である。励振光の入力はファイバスポールの始端側および終端側の 2 つの方向からそれぞれ行われた。大きく外れたプロファイルを除いて、21 の EAF プロファイルが得られた。

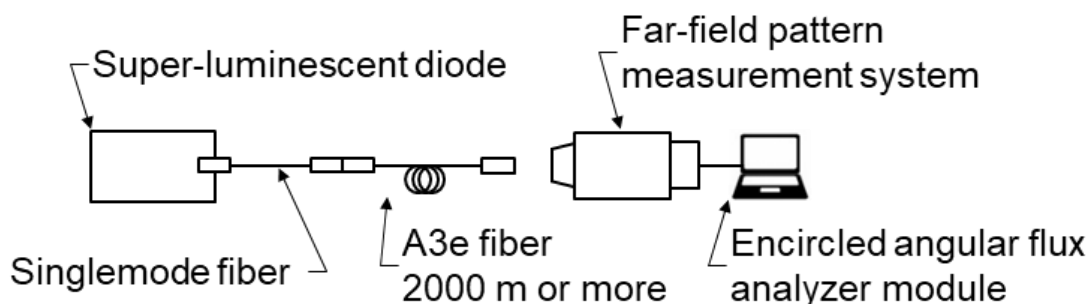


図 3-2 ラウンドロビン試験における EAF プロファイル測定の実験系

第2セットのラウンドロビン試験の条件は以下の通りであった。6つの測定機関で3本のファイバースプールを用いて、第1セットの試験と同じ測定条件で試験した。第2セットでは合計で72のEAFプロファイルが得られた。

第3セットのラウンドロビン試験は、11本のファイバースプールを用いて実施した。励振光はガウシアンビームを使用し、同一ファイバースプールを異なる日に測定したものを含めて、25のEAFプロファイルが得られた。計3セットのラウンドロビン試

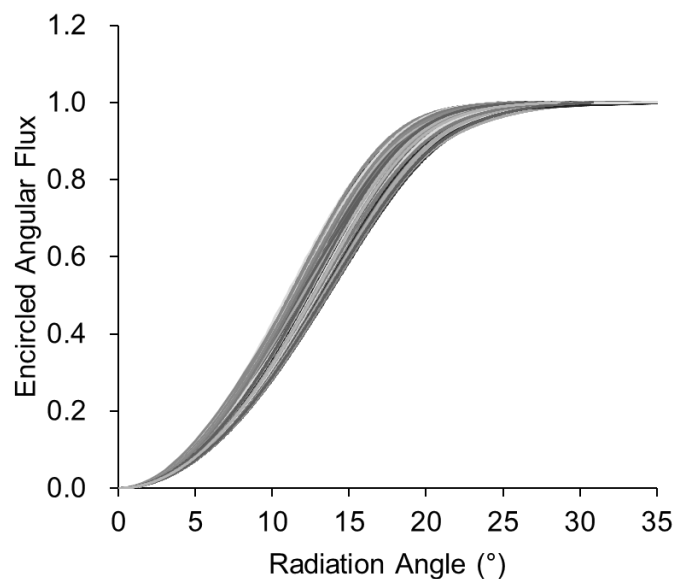


図 3-3 ラウンドロビン試験で得られた A3e ファイバの EAF プロファイル。EAF プロファイルは全て EMD 状態。

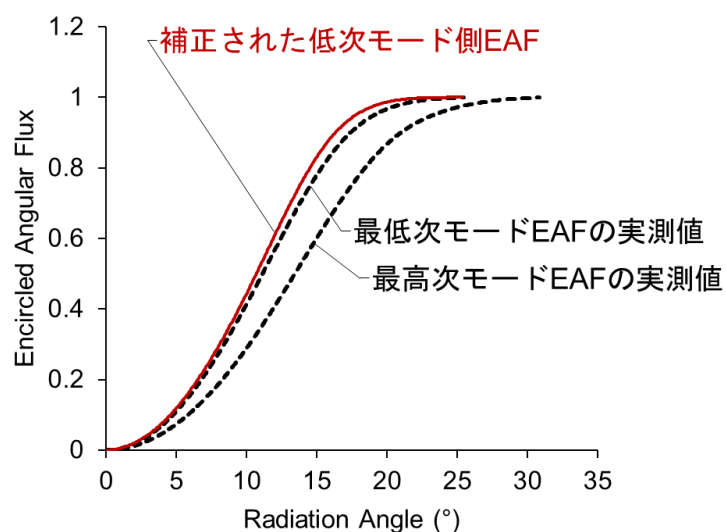


図 3-4 ラウンドロビン試験によって得られた最低次モードと最高次モード EAF 実測値および補正された低次モード側 EAF



験の結果、合計 118 の測定データが得られた。このようにして、多くの A3e ファイバの EMD の EAF プロファイルデータをデータに反映させることができた。

図 3-3 は、上記ラウンドロビン試験の一連の試験で得られた A3e ファイバの 118 の EAF プロファイルの重ね合わせを示す。図 3-4 はラウンドロビン試験によって得られた最低次モードと最高次モード EAF プロファイルおよび、補正された低次モード側 EAF を示す。図 3-5 は最低次モード FFP と最高次モード FFP および、補正された低次モード側 FFP を示す。図 3-6 は放射角度に対する補正係数を示す。最低次モード側 FFP に対して補正係数を乗算することで、図 3-5 の補正された低次モード側

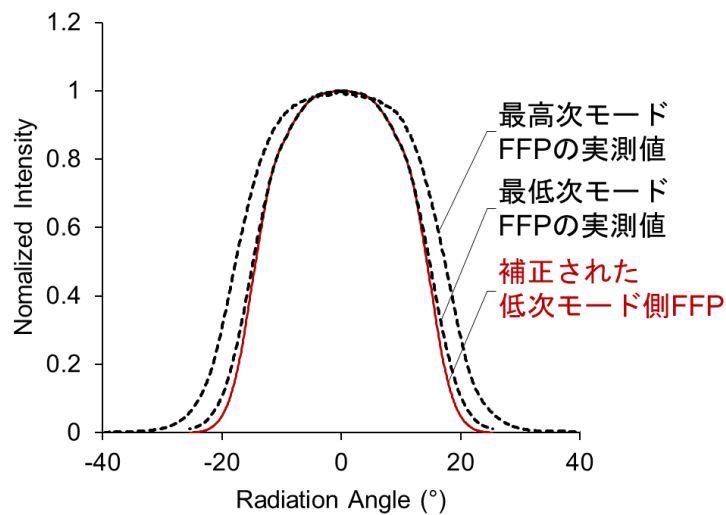


図 3-5 ラウンドロビン試験によって得られた最低次モードと最高次モード FFP 実測値および補正された低次モード側 FFP

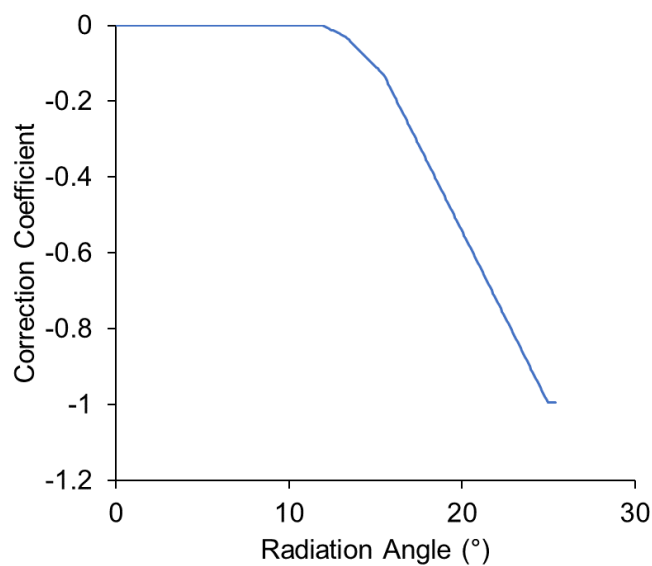


図 3-6 放射角度に対する補正係数

FFP が得られる。補正された低次モード側 EAF を *Prof-L1*、最高次モード側 EAF を *Prof-H1* とした。

図 3-7 は最低次モード側 EAF の NFP 実測値を示す。EMD において、NFP はコア中心がコア外周部と比較してやや強度が低いすり鉢状の形状となっている。これはファイバ内を伝搬するスキュー光の影響により、コア外周部で光強度の上昇が起こるためである。

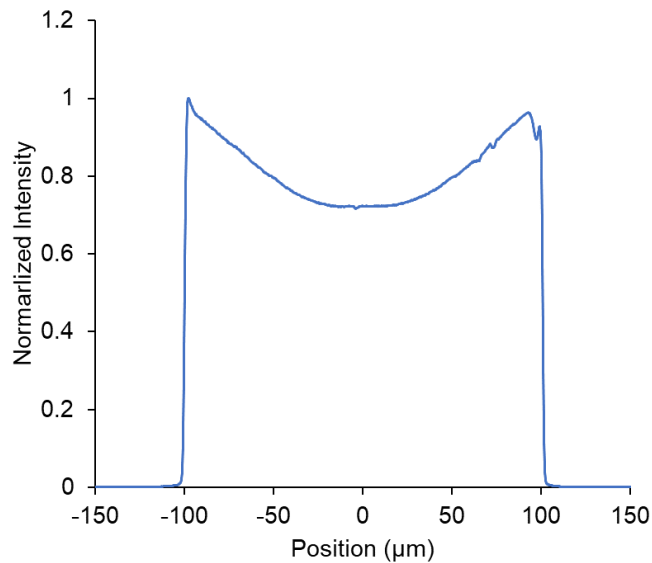


図 3-7 EMD の NFP の例

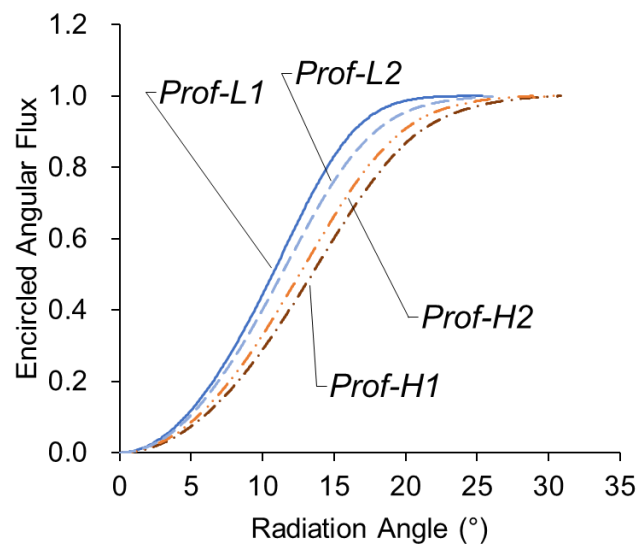


図 3-8 フローチャートに基づいてデザインした EAF プロファイル *Prof-L1*、*Prof-H1* と再デザインされた EAF プロファイル *Prof-L2* と *Prof-H2*

図3-8はEAFプロファイルの重ね合わせからデザインされた *Prof-L1*、*Prof-H1* と、それらをベースに再デザインされた EAF プロファイル *Prof-L2* と *Prof-H2* を示す。*Prof-L2* は *Prof-L1* の EAF 値を高次モード側へ調整することで得られた。放射角度に対する EAF 値は *Prof-H2* と *Prof-H1* を比較したとき、5°、10°、15°、20°でそれぞれ-12.0%、-10.6%、-9.1%、-3.3%である。*Prof-H2* は、*Prof-H1* の EAF 値を低次モード側へ調整することで得られた。放射角度に対する EAF 値は *Prof-H2* と *Prof-H1* を比較したとき、5°、10°、15°、20°でそれぞれ+13.9%、+12.4%、+9.3%、+4.5%である。

ラウンドロビン試験の結果、EMD 状態の EAF プロファイルのばらつきに影響を与えるいくつかの重要な要因が明らかになった。EAF プロファイルにばらつきを生じさせた要因の一つは、ファイバスプールのロットによる曲げ、応力のコンディションに個体差があったためであった。スプールに巻き付けられたファイバはそれらの重なりにより、バンドや応力に起因した固有のマイクロバンドのコンディションを持っている。A3e ファイバのモード結合はマイクロバンドにより促進されるため、それらのコンディションが異なっていることでモード結合の条件が変化し、EAF が変化する。EAF は最終的に EMD に到達し、変動がほとんど起こらなくなるが、到達するまでの過程でどのようにモード結合が進んだかにより EAF プロファイルは異なってしまう。それに関連して、スプールの始端と終端の光入力方向の違いによって光伝搬距離に対するマイクロバンドの位置が異なるため EAF に差が生じる。一方で、測定機関、測定日、および励振モード分布による EAF の変動は小さい。ラウンドロビン試験の結果は、マイクロバンドのコンディションが EAF に影響を及ぼす重要な要因であることを実証した。

### 3.6 シミュレーションに基づく境界条件のデザイン検討

#### 3.6.1 検証条件

A3e ファイバの接続損失は、光学設計ソフトウェア Zemax OpticStudio (Zemax, LLC) を使用して数値解析により計算された。シミュレーション手法については第 4

章で詳述する。実測された励振ファイバからの放射光の FFP と NFP をモデル化した。光源の波長は 850 nm とした。A3e ファイバはコアが大きく、フィジカルコンタクトが得られないため、接続部ではフレネル反射が発生する。接続損失は、励振ファイバから出射された光強度と受光ファイバ終端部に到達した光強度の差を求めて算出した。さらに、受光ファイバの光軸垂直方向と光軸方向のオフセットによる接続損失の変化を計算した。

### 3.6.2 結果

*Prof-L1*、*Prof-H1*、*Prof-L2*、*Prof-H2* の 4 つの励振条件を用いて、接続損失のシミュレーションを実施した。

図 3-9 に *Prof-L1*、*Prof-H1*、*Prof-L2*、*Prof-H2* の光軸垂直方向オフセットと光軸方向オフセットの接続損失を示す。全ての励振条件において、予想されるミスアライメント範囲での接続損失は 2.0 dB 以下であった。図 3-10 に *Prof-L1*、*Prof-H1*、*Prof-L2*、*Prof-H2* の光軸垂直方向オフセットと光軸方向オフセットの接続損失の一覧を示す。緑のマーカ部は接続損失 2.0 dB 未満、赤線はアライメント要件を示しており、アライメント要件の範囲内で最大接続損失要件を満たしていることが確認できる。

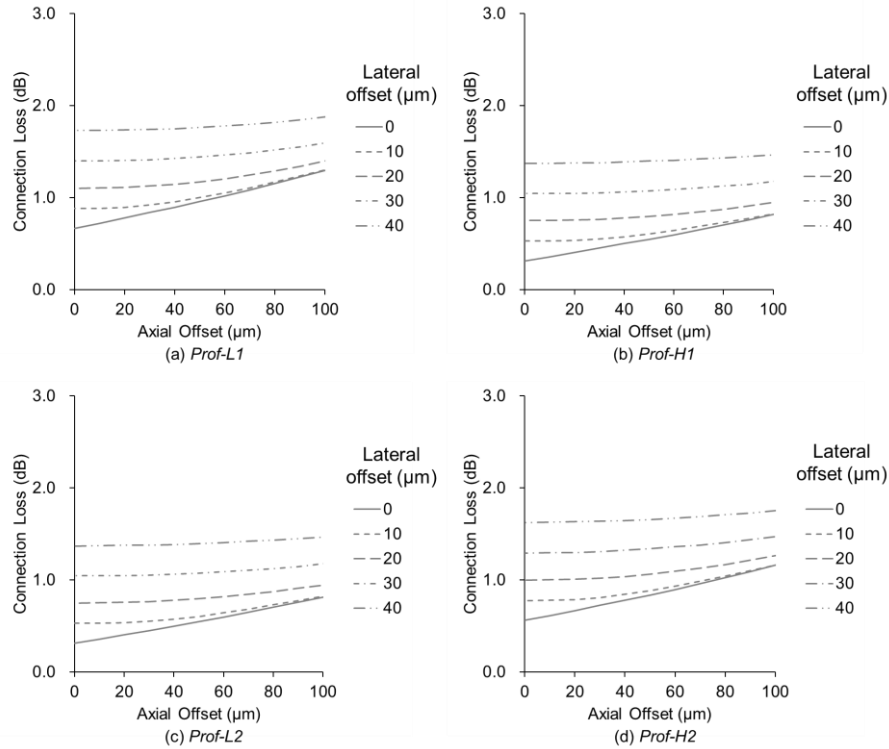


図 3-9 光軸方向と光軸垂直方向オフセットに対する接続損失値：励振条件；(a) *Prof-L1*, (b) *Prof-H1*, (c) *Prof-L2*, (d) *Prof-H2*

Axial Offset [μm]	Lateral Offset [μm]										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
300	2.12	2.11	2.15	2.24	2.39	2.59	2.98	3.18	3.55	3.98	4.47
290	2.05	2.03	2.17	2.32	2.53	2.90	3.13	3.51	3.95	4.44	4.94
280	1.97	1.97	2.00	2.10	2.26	2.47	2.75	3.08	3.47	3.91	4.41
270	1.90	1.90	1.93	2.03	2.19	2.42	2.70	3.04	3.43	3.88	4.38
260	1.83	1.82	1.86	1.97	2.14	2.37	2.65	3.00	3.40	3.85	4.35
250	1.76	1.75	1.79	1.91	2.08	2.31	2.61	2.96	3.37	3.82	4.32
240	1.69	1.68	1.73	1.84	2.02	2.26	2.57	2.92	3.33	3.80	4.30
230	1.63	1.61	1.66	1.78	1.96	2.21	2.53	2.89	3.30	3.77	4.27
220	1.56	1.55	1.59	1.72	1.91	2.17	2.49	2.86	3.27	3.74	4.25
210	1.49	1.48	1.53	1.66	1.85	2.12	2.45	2.82	3.25	3.72	4.23
200	1.42	1.41	1.47	1.60	1.81	2.08	2.42	2.79	3.22	3.70	4.21
190	1.36	1.35	1.41	1.55	1.76	2.04	2.38	2.76	3.20	3.68	4.19
180	1.30	1.29	1.35	1.50	1.72	2.01	2.35	2.74	3.18	3.66	4.18
170	1.24	1.23	1.30	1.45	1.68	1.97	2.32	2.71	3.15	3.64	4.16
160	1.17	1.17	1.24	1.40	1.64	1.94	2.30	2.69	3.13	3.62	4.15
150	1.11	1.11	1.18	1.35	1.60	1.91	2.27	2.67	3.12	3.60	4.14
140	1.05	1.05	1.13	1.31	1.57	1.89	2.25	2.65	3.10	3.59	4.12
130	0.99	0.99	1.08	1.27	1.54	1.86	2.23	2.64	3.08	3.57	4.11
120	0.93	0.93	1.03	1.24	1.51	1.84	2.21	2.62	3.07	3.56	4.09
110	0.87	0.88	0.99	1.20	1.49	1.82	2.19	2.60	3.06	3.54	4.08
100	0.81	0.82	0.95	1.17	1.47	1.80	2.18	2.59	3.04	3.53	4.07
90	0.75	0.76	0.91	1.15	1.45	1.79	2.15	2.58	3.03	3.52	4.06
80	0.70	0.73	0.87	1.13	1.43	1.77	2.15	2.56	3.02	3.50	4.06
70	0.65	0.68	0.84	1.11	1.42	1.76	2.14	2.56	3.01	3.50	4.05
60	0.60	0.64	0.82	1.09	1.41	1.75	2.13	2.55	3.00	3.49	4.04
50	0.55	0.60	0.80	1.07	1.40	1.75	2.12	2.55	2.99	3.48	4.03
40	0.50	0.57	0.78	1.06	1.39	1.74	2.11	2.54	2.98	3.48	4.03
30	0.45	0.55	0.76	1.05	1.38	1.74	2.11	2.53	2.98	3.47	4.03
20	0.40	0.54	0.76	1.05	1.38	1.73	2.11	2.53	2.98	3.47	4.02
10	0.36	0.53	0.75	1.05	1.37	1.73	2.10	2.52	2.97	3.47	4.02
0	0.31	0.53	0.75	1.04	1.37	1.72	2.11	2.52	2.97	3.47	4.02

(a) *Prof-L1*

Axial Offset [μm]	Lateral Offset [μm]										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
300	2.39	2.39	2.43	2.52	2.66	2.86	3.11	3.41	3.76	4.20	4.66
290	2.31	2.31	2.35	2.44	2.58	2.79	3.05	3.36	3.73	4.15	4.63
280	2.24	2.23	2.27	2.36	2.51	2.72	2.99	3.31	3.68	4.11	4.59
270	2.16	2.15	2.19	2.29	2.44	2.66	2.93	3.26	3.64	4.06	4.56
260	2.09	2.08	2.11	2.22	2.38	2.59	2.88	3.21	3.60	4.04	4.53
250	2.01	2.00	2.04	2.14	2.31	2.54	2.82	3.16	3.56	4.01	4.50
240	1.93	1.92	1.97	2.07	2.24	2.48	2.77	3.12	3.52	3.98	4.47
230	1.86	1.85	1.90	2.01	2.19	2.42	2.72	3.08	3.49	3.95	4.45
220	1.79	1.77	1.82	1.94	2.12	2.37	2.68	3.04	3.46	3.92	4.42
210	1.71	1.70	1.75	1.87	2.07	2.32	2.64	3.00	3.42	3.89	4.39
200	1.64	1.63	1.68	1.81	2.01	2.27	2.60	2.97	3.39	3.87	4.37
190	1.57	1.56	1.62	1.75	1.95	2.23	2.56	2.93	3.36	3.84	4.35
180	1.50	1.49	1.56	1.69	1.90	2.18	2.53	2.89	3.34	3.82	4.33
170	1.44	1.43	1.49	1.64	1.86	2.14	2.49	2.87	3.31	3.79	4.31
160	1.37	1.36	1.43	1.58	1.82	2.11	2.46	2.84	3.29	3.77	4.29
150	1.30	1.30	1.37	1.53	1.78	2.08	2.43	2.82	3.26	3.75	4.28
140	1.24	1.24	1.31	1.48	1.74	2.05	2.41	2.80	3.25	3.73	4.27
130	1.17	1.17	1.26	1.44	1.70	2.02	2.38	2.78	3.23	3.72	4.25
120	1.11	1.11	1.20	1.39	1.67	1.99	2.36	2.76	3.21	3.70	4.23
110	1.04	1.05	1.15	1.36	1.64	1.97	2.34	2.75	3.19	3.69	4.22
100	0.98	0.99	1.10	1.32	1.61	1.95	2.32	2.73	3.18	3.67	4.21
90	0.92	0.94	1.06	1.30	1.59	1.93	2.30	2.71	3.17	3.66	4.20
80	0.86	0.88	1.02	1.27	1.58	1.92	2.29	2.70	3.15	3.64	4.19
70	0.80	0.83	0.99	1.25	1.56	1.90	2.28	2.69	3.15	3.63	4.19
60	0.74	0.79	0.96	1.23	1.55	1.89	2.27	2.68	3.14	3.62	4.18
50	0.69	0.74	0.93	1.21	1.53	1.88	2.26	2.68	3.13	3.62	4.17
40	0.64	0.71	0.91	1.20	1.52	1.88	2.25	2.67	3.12	3.61	4.16
30	0.59	0.68	0.90	1.18	1.52	1.87	2.24	2.67	3.11	3.61	4.16
20	0.54	0.65	0.89	1.18	1.51	1.86	2.24	2.66	3.11	3.60	4.15
10	0.49	0.66	0.88	1.18	1.51	1.86	2.24	2.66	3.11	3.60	4.15
0	0.44	0.65	0.88	1.17	1.50	1.86	2.24	2.66	3.11	3.60	4.15

(b) *Prof-H1*

Axial Offset [μm]	Lateral Offset [μm]										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
300	2.73	2.72	2.76	2.85	2.98	3.16	3.40	3.69	4.02	4.42	4.86
290	2.64	2.64	2.67	2.76	2.89	3.08	3.32	3.62	3.96	4.38	4.83
280	2.55	2.55	2.58	2.67	2.81	3.01	3.25	3.56	3.91	4.33	4.78
270	2.47	2.46	2.50	2.59	2.73	2.93	3.18	3.49	3.85	4.28	4.75
260	2.38	2.37	2.41	2.51	2.65	2.86	3.12	3.43	3.80	4.24	4.72
250	2.30	2.29	2.33	2.42	2.58	2.79	3.05	3.38	3.76	4.20	4.68
240	2.22	2.21	2.24	2.35	2.51	2.72	2.99	3.33	3.71	4.16	4.65
230	2.13	2.13	2.16	2.28	2.43	2.65	2.94	3.28	3.67	4.12	4.62
220	2.05	2.04	2.08	2.19	2.36	2.59	2.88	3.23	3.63	4.09	4.59
210	1.97	1.96	2.00	2.12	2.30	2.53	2.83	3.19	3.59	4.06	4.56
200	1.89	1.88	1.93	2.05	2.23	2.48	2.78	3.14	3.56	4.03	4.53
190	1.81	1.80	1.85	1.98	2.16	2.42	2.74	3.11	3.53	4.00	4.51
180	1.73	1.73	1.78	1.91	2.10	2.37	2.70	3.07	3.50	3.97	4.48
170	1.66	1.65	1.71	1.84	2.05	2.32	2.66	3.04	3.47	3.94	4.46
160	1.58	1.58	1.64	1.78	1.99	2.28	2.62	3.00	3.44	3.92	4.44
150	1.51	1.50	1.57	1.72	1.95	2.24	2.59	2.97	3.41	3.90	4.42
140	1.44	1.43	1.51	1.67	1.90	2.20	2.56	2.94	3.39	3.87	4.40
130	1.37	1.36	1.44	1.61	1.86	2.17	2.53	2.92	3.37	3.85	4.39
120	1.30	1.30	1.38	1.56	1.82	2.14	2.51	2.91	3.35	3.84	4.37
110	1.23	1.23	1.32	1.51	1.79	2.11	2.48	2.88	3.33	3.82	4.35
100	1.16	1.16	1.27	1.47	1.76	2.08	2.46	2.87	3.32	3.80	4.34
90	1.09	1.10	1.21	1.44	1.73	2.06	2.44	2.85	3.30	3.79	4.32
80	1.02	1.04	1.17	1.41	1.71	2.05	2.42	2.83	3.29	3.77	4.32
70	0.96	0.99	1.13	1.38	1.69	2.03	2.41	2.82	3.27	3.76	4.31
60	0.90	0.93	1.09	1.36	1.67	2.02	2.39	2.81	3.26	3.75	4.30
50	0.84	0.89	1.06	1.34	1.66	2.00	2.38	2.80	3.25	3.74	4.29
40	0.78	0.84	1.04	1.32	1.65	2.00	2.37	2.80	3.24	3.74	4.29
30	0.72	0.81	1.02	1.31	1.64	1.99	2.37	2.79	3.24	3.73	4.28
20	0.67	0.79	1.01	1.30	1.63	1.98	2.36	2.78	3.23	3.72	4.28
10	0.61	0.78	1.00	1.30	1.63	1.98	2.36	2.78	3.23	3.72	4.27
0	0.56	0.78	1.00	1.29	1.63	1.98	2.36	2.78	3.23	3.72	4.27

(c) *Prof-L2*

Axial Offset [μm]	Lateral Offset [μm]										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
300	2.73	2.72	2.76	2.85	2.98	3.16	3.40	3.69	4.02	4.42	4.86
290	2.64	2.64	2.67	2.76	2.89	3.08	3.32	3.62	3.96	4.38	4.83
280	2.55	2.55	2.58	2.67	2.81	3.01	3.25	3.56	3.91	4.33	4.78
270	2.47	2.46	2.50	2.59	2.73	2.93	3.18	3.49	3.85	4.28	4.75
260	2.38	2.37	2.41	2.51	2.65	2.86	3.12	3.43	3.80	4.24	4.72
250	2.30	2.29	2.33	2.42	2.58	2.79	3.05	3.38	3.76	4.20	4.68
240	2.22	2.21	2.24	2.35	2.51	2.72	2.99	3.33	3.71	4.16	4.65
230	2.13	2.13	2.16	2.28	2.43	2.65	2.94	3.28	3.67	4.12	4.62
220	2.05	2.04	2.08	2.19	2.36	2.59	2.88	3.23	3.63	4.09	4.59
210	1.97	1.96	2.00	2.12	2.30	2.53	2.83	3.19	3.59	4.06	4

図 3-11 は、*Prof-L1 & Prof-H1*、*Prof-L1 & Prof-H2*、*Prof-L2 & Prof-H1*、*Prof-L2 & Prof-H2* の組み合わせを境界条件とした場合の EAF プロファイル変動による接続損失の差を示す。図 3-12 は、*Prof-L1 & Prof-H1*、*Prof-L1 & Prof-H2*、*Prof-L2 & Prof-H1*、*Prof-L2 & Prof-H2* の組み合わせを境界条件とした場合の EAF プロファイル変動による接続損失の差の一覧を示す。それぞれの励振条件の組合せによるアライメント範囲の接続損失の差は、光軸垂直方向オフセット 0  $\mu\text{m}$  かつ光軸方向オフセット 100  $\mu\text{m}$  の時に最大となり、それぞれ 0.48 dB (*Prof-L1 & Prof-H1*) , 0.34 dB (*Prof-L1 & Prof-H2*) , 0.32 dB (*Prof-L2 & Prof-H1*) , 0.18 dB (*Prof-L2 & Prof-H2*) であった。すなわち、*Prof-L2 & Prof-H2* の組み合わせ以外の励振条件では損失差の要件を満たしていなかった。

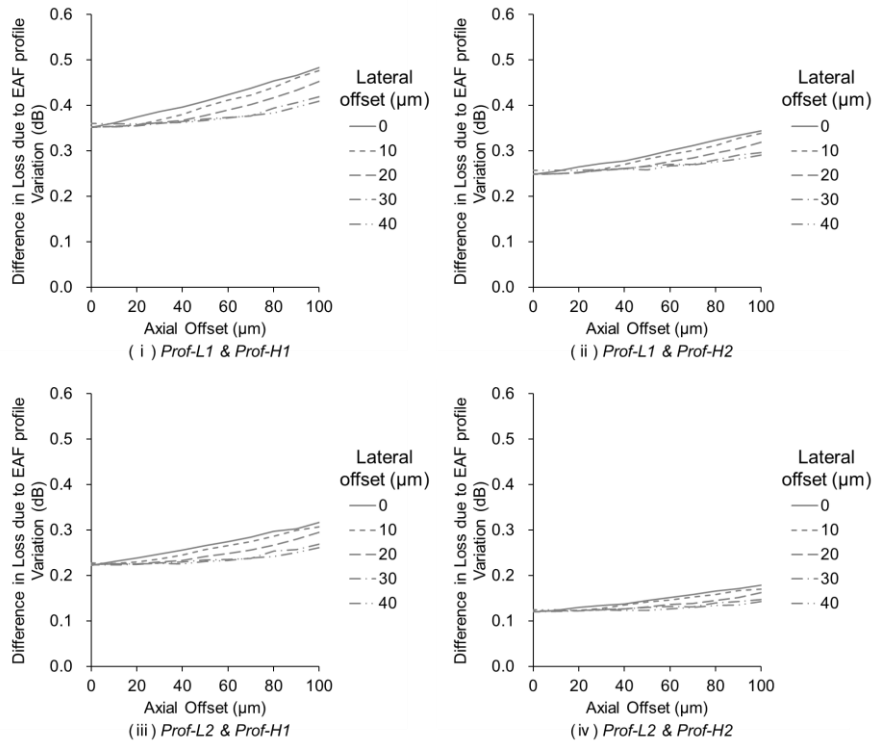


図 3-11 EAF の境界条件内変動による損失の差 : EAF 境界条件の組み合わせ ; (i)*Prof-L1 & Prof-H1*, (ii)*Prof-L1 & Prof-H2*, (iii)*Prof-L2 & Prof-H1*, (iv)*Prof-L2 & Prof-H2*



メント範囲が 0.20 dB の最大値を超えているため、接続損失変動の要件を満たしていなかった。(iv) *Prof-L2* & *Prof-H2* の組み合わせの損失の差は最大 0.18 dB であったため、マージンを考慮した損失の差の要件 0.16~0.19 dB (0.20 dB の 80~95%) の範囲内であった。したがって、この組み合わせは適切なマージンを持つ EAF 境界条件を満足していた。

### 3.6.4 境界条件の決定

図 3-13 は、*Prof-L2* と *Prof-H2* を EAF 境界条件として 5°、10°、15°、20°の放射角度に対する EAF 値を示す。

低次モード境界条件を *Prof-L2*、高次モード境界条件を *Prof-H2* とした。それぞれの EAF プロファイルから放射角 5°、10°、15°、20°の EAF 値を参照し、EAF 境界条件として規定した。この境界条件は図 3-1 に示されたフローチャートによって厳密に作成されており、ファイバ接続損失において要求された条件に対し優れた再現性が得られることが期待される。

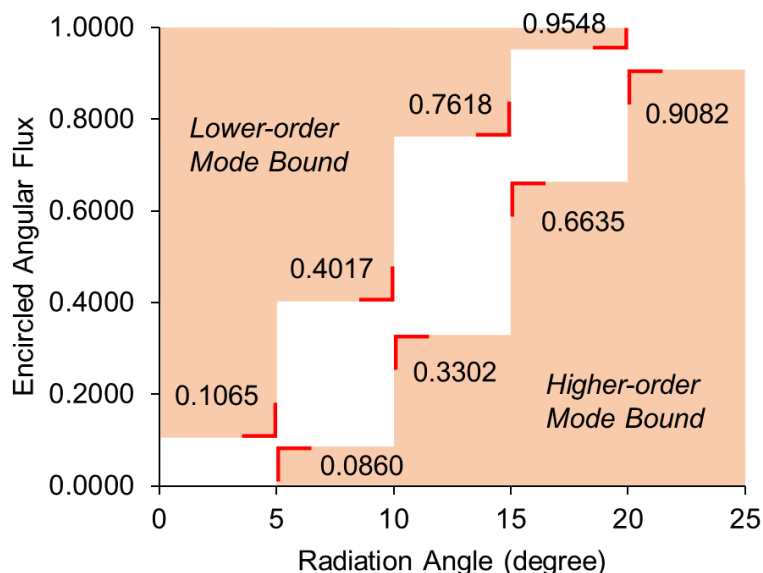


図 3-13 低次モード側境界を *Prof-L2*、高次モード側境界を *Prof-H2* とした場合の EAF 境界条件。5°、10°、15°、20°の放射角に対する EAF 値は、*Prof-L2* と *Prof-H2* の境界条件プロファイルからピックアップされている。



### 3.7 おわりに

SI-PCSF 接続において、光軸垂直方向オフセットが $\pm 40 \mu\text{m}$ 、光軸方向オフセットが  $100 \mu\text{m}$  以下のアライメント範囲に対して、 $2.0 \text{ dB}$  以下の最大接続損失と $\pm 0.20 \text{ dB}$  の EAF 変動による損失差の要件を満たす境界条件による EAF テンプレートを開設計した。EAF テンプレートはラウンドロビン試験により得られた EMD を基にデザイン、性能検討、再デザインのサイクルにより作成した。SI-PCSF における最大接続損失と EAF プロファイル変動による接続損失の差の要件を満たす EAF テンプレートの設計方法を提案した。

今回作成した EAF テンプレートは IEC 61300-1 で規定されたものと値が異なっていた。これは、損失測定シミュレーション方法が IEC 提案時と異なる手法を使用しているためである。シミュレーション方法の見直しにより、要件に対して適切な EAF テンプレートが作成された。

励振モード分布規定のコンセプトは、普遍的な考え方であるため、今後、通信速度の高速化やファイバの変更により要件が変更されたとしても、同様の設計手順を踏むことで、適切な境界条件を作成することが可能である。

## 第4章 接続損失シミュレーション

### 4.1 概要

伝送システムの励振モード分布を設計するためには、MMF の高精度な計算が必要となる。本章では MMF 接続に広く利用できるシミュレーションモデルを提案する。提案するシミュレーションモデルは、光源や励振ファイバなどの励振条件に対して NFP・FFP の実測データを適用する。SI-MMF、GI-MMF および SI-PCSF において、シミュレーションデータは実測データとよく一致した。本手法は MMF 接続全般に適用可能である。また、異種ファイバの接続にも対応できるため、汎用性が高い手法である。

### 4.2 はじめに

光伝送システムはパワーバジェットの様を満たすことで動作する設計であるため、光ファイバリンクのチャンネルロスが、パワーバジェットに基づいて振り分けられたロスバジェットの仕様を満足している必要がある。チャンネルロスはシステムに実装する前に損失テストで確認される。損失テストの前にシミュレーションで損失の予測をすることはコストと時間の削減のために重要である。そのため、光ファイバリンクの MMF 接続損失を正確に算出するためのシミュレーション方法の確立が求められている。

これまでに、波動理論や幾何光学を用いて MMF 接続損失をシミュレーションする様々な方法が報告されている。波動理論は SI-MMF に対しては電磁界分布の厳密解を解くことが可能であるが、GI-MMF に対しては厳密解を解くことができない。SI-MMF は多数のモードを持つため、厳密解の計算コストが高く、近似解を解くことが一般的である。その場合には、実際のモード状態を反映させることは困難である。幾何光学の分野では、小林・杉原らが、以前から代表的なモデルとして用いられて

きた均一分布[23]や定常分布を用いた方法[25]では、SI-MMF 接続においてモード結合が進む前の励振光の状態が反映されていないことを指摘した[38]。GI-MMF 接続は、GI-MMF 同士が密着していることを条件とした、FFP をガウス分布のフレネル回折から導出する計算方法が報告されており、計算結果と実測結果がよく一致していた[26]。SI-MMF は実用上、数メートルから数十メートルの比較的短い長さで使用されるため、ファイバ伝搬中の光はほとんどが過渡的なモード結合状態にある。そのため、伝送システムに実装される SI-MMF の NFP は、不均一な分布を示す可能性がある。この現象は、ファイバケーブル製造時の特性評価と、実装後の損失測定との間で損失値が異なる場合があるという事実の原因の一部となっている。しかしながら、これまで不均一に分布する NFP の接続損失を計算するモデルは提案されていない。従来の MMF 計算方法のほとんどは NFP・FFP のモード状態が特定の安定した分布（ガウス分布、一様分布、EMD）であることを前提としており、SI-MMF 不均一分布のような特定の不安定なモード状態への適用性が制限される。実際のモード分布は、モード結合の過渡状態やスキュー光による高次モードリッチ状態など、実用上の様々なモード状態によって形成されるため、特定の励振条件だけでなく、全ての励振条件を満たすことができる計算方法が求められている。

本章では、幾何光学を用いてファイバ種や励振条件のモード状態によらず利用可能な高精度な MMF 接続シミュレーションを提案する。MMF から出力された光の NFP と FFP の実測データを用いることで励振ファイバのモード分布をモデル化した。励振ファイバはシミュレーション上で面光源としてモデル構築し、受光ファイバモデルと接続することで接続損失を算出した。MMF 種は SI-MMF、GI-MMF、SI-PCSF を対象としており、同種ファイバ接続の検証の他、実用で使われることはほとんどないが汎用性を確認するために、GI-MMF と SI-MMF の異種ファイバ接続について検証した。

### 4.3 シミュレーションモデル

光学設計ソフトウェア OpticStudio を用いて MMF 接続をシミュレーションした。計算方法は幾何光学に基づくノンシーケンシャル法を使用している。光源には面発光光源モデルを用い、NFP の実測値にフィッティングさせた。NFP の強度分布  $I_{NFP}$  は以下の式で示される。

$$I_{NFP} = A + Bq^2 + Cq^4 \quad (4.3 - 1)$$

ここで、 $q$  は照射半径座標、 $A, B, C$  はそれぞれ NFP の分布係数を示す。FFP も同様に実測値にフィッティングさせた。FFP の強度分布  $I_{FFP}$  は以下の式で示される。

$$I_{FFP} = D + Eq^2 + Fq^4 \quad (4.3 - 2)$$

ここで、 $D, E, F$  はそれぞれ FFP の分布係数を示す。光源の生成アルゴリズムはモンテカルロ法を用いている。光源の波長は 850 nm とする。受光ファイバのモデル構造はファイバ種により異なる。SI-MMF の場合、受光ファイバのコア径は 50  $\mu\text{m}$ 、クラッド径は 125  $\mu\text{m}$ 、コア屈折率は 1.452、クラッド屈折率は 1.436 とした。GI-MMF の

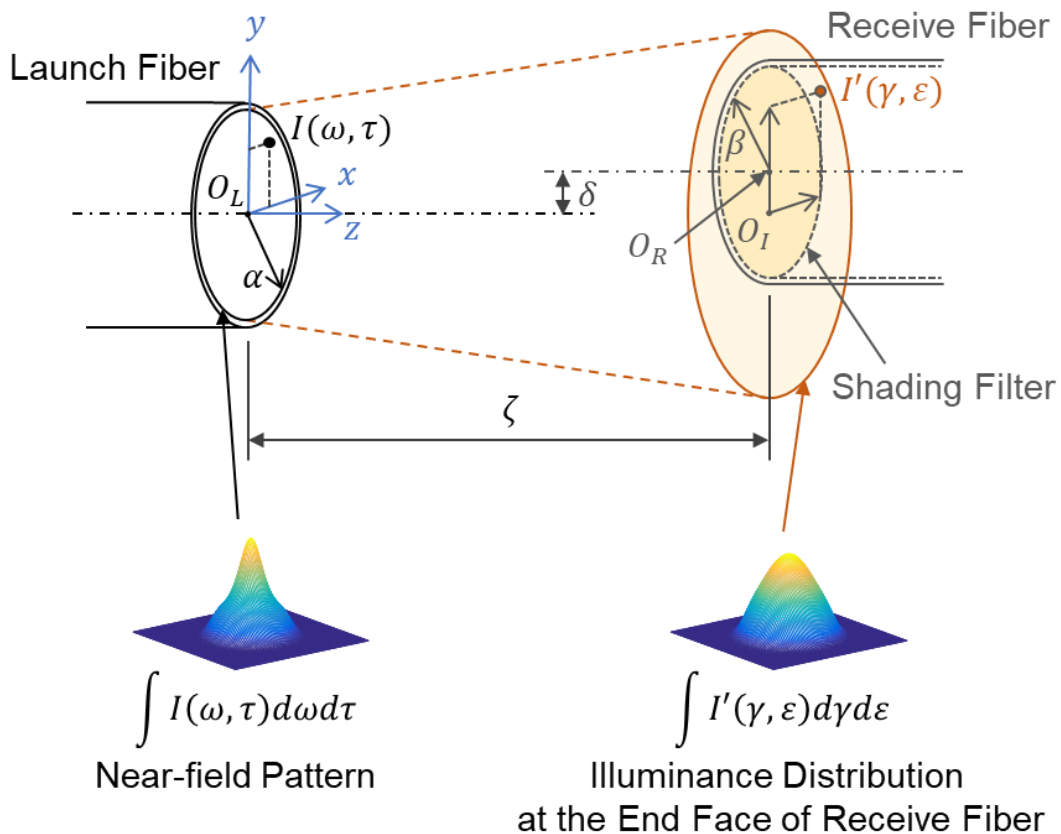


図 4-1 シミュレーションの NFP モデル

場合、コア径は  $50 \mu\text{m}$ 、クラッド径は  $125 \mu\text{m}$ 、クラッド屈折率は  $1.460$  であり、コア屈折率分布はコア中心屈折率  $1.475$  として、屈折率分布は二次曲線プロファイルとした。SI-PCSF の場合、受光ファイバのコア径は  $200 \mu\text{m}$ 、クラッド径は  $230 \mu\text{m}$ 、コア屈折率は  $1.453$ 、クラッド屈折率は  $1.405$  とした。

図 4-1 および図 4-2 は、それぞれ提案シミュレーションの NFP モデルおよび FFP モデルを示している。図 4-1 において、 $\alpha$  は励振ファイバのコア半径、 $\beta$  は受光ファイバのコア半径、 $O_L$  は出射光 NFP における重心を示す。図 4-1 において、 $\alpha$  は励振光 NFP のコア半径、 $\beta$  は受信光 NFP のコア半径、 $O_L$  は励振光 NFP の重心、 $O_I$  は受光ファイバ端面位置における照度分布の重心、 $O_R$  は受光ファイバコアによる遮光フィルタの重心、 $\omega$  と  $\tau$  は励振光 NFP における任意の点の  $x, y$  成分を示す。 $\gamma$  と  $\varepsilon$  は受光ファイバ端面位置における照度分布の任意の点の  $x, y$  成分を示し、 $I(\omega, \tau)$  は励振光 NFP の任意の点における強度、 $I'(\gamma, \varepsilon)$  は受光ファイバ端面位置の照度分布の任意の点における強度、 $\int I(\omega, \tau) d\omega d\tau$  は励振光の二次元 NFP、 $\int I'(\gamma, \varepsilon) d\gamma d\varepsilon$  は受光ファイバ

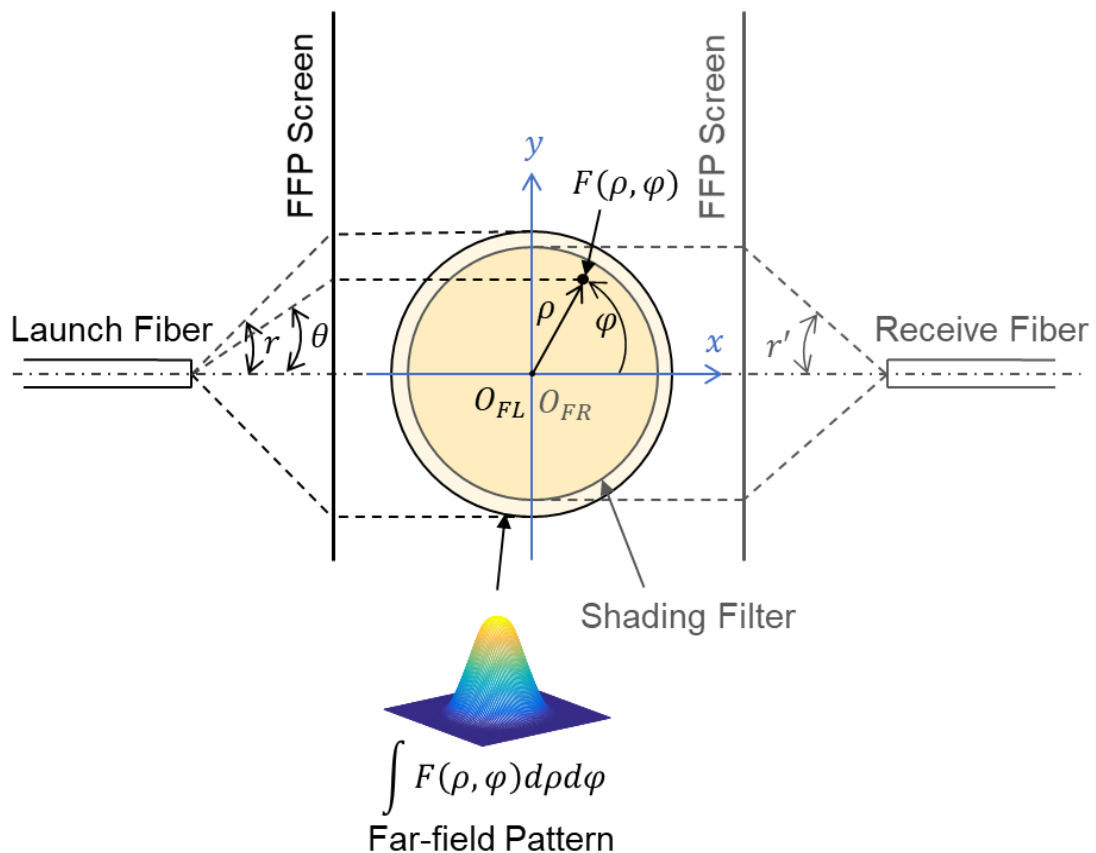


図 4-2 シミュレーションの FFP モデル

ファイバ端面位置における二次元照度分布を示している。 $\delta$ は光軸垂直方向の軸ずれを示し、 $\zeta$ は光軸方向の軸ずれを示す。また、 $\delta/\alpha$ 、 $\zeta/\alpha$ は、軸ずれの絶対値を励振ファイバのコア半径 $\alpha$ で割ることで、ファイバコア半径に対する軸ずれの相対値を示す。MMFのNAでは、市場に出回っているコネクタの性能を考慮したときに角度ずれの影響は無視できると考えられ、本研究では無視している。

図4-2において、 $r$ は励振光FFPの最大放射角度、 $r'$ はNAにより算出された受光ファイバの臨界角、 $\theta$ は励振光FFPの任意の放射角度、 $O_{FL}$ は励振ファイバからの放射光をFFPスクリーンに投影したときの極座標におけるFFPの重心である。ここで、 $O_{FR}$ は受光ファイバのNAによる遮光フィルタをFFPスクリーンに映した時の重心、 $\rho$ は放射光をFFPスクリーンに投影したときの極座標における $O_{FL}$ からの半径方向距離、 $\varphi$ は極座標における偏角、 $F(\rho, \varphi)$ はFFPの任意の点における強度、 $\int F(\rho, \varphi) d\rho d\varphi$ は放射光の二次元FFPを示す。

$\int I'(\gamma, \varepsilon) d\gamma d\varepsilon$ は、 $\int I(\omega, \tau) d\omega d\tau$ をベースとして距離とともに広がっていく。距離に対する照度分布の変化は、照度分布の初期値である $\int F(\rho, \varphi) d\rho d\varphi$ により異なる。したがって、受光ファイバに到達したときの照度分布は、光軸垂直方向の軸ずれや光軸方向の間隙などによる位置関係によって変化する。また、受光ファイバのコア半径 $\beta$ を越えて広がった $\int I'(\gamma, \varepsilon) d\gamma d\varepsilon$ は、遮光されて接続損失となる。さらに、受光ファイバの臨界角 $r'$ を超えた $\int F(\rho, \varphi) d\rho d\varphi$ も遮光されるため接続損失となる。また、ファイバ間に間隙がある場合( $\zeta/\alpha > 0$ )はフレネル反射が発生し、接続損失となる。これらの接続損失を合わせることでトータルの接続損失を算出する。

### 4.3 接続損失実験系

SLD 光源 (LSS 002/850、シナジーオプトシステムズ) に接続された励振ファイバの終端から放射される光の NFP と FFP を、それぞれ専用の測定器 (M-Scope Type F、Type I、シナジーオプトシステムズ) を用いて測定した。SI-MMF は、コア/クラッド径 50/125  $\mu\text{m}$ 、ポリマーコーティング径 250  $\mu\text{m}$ 、NA 0.22 のオールガラスファイバである。GI-MMF は、50/125  $\mu\text{m}$  のコア/クラッド径、250  $\mu\text{m}$  のポリマーコーティング径、NA 0.20 のオールガラスファイバである。SI-PCSF は 200  $\mu\text{m}$  のコア径、230  $\mu\text{m}$  のポリマークラッド径、500  $\mu\text{m}$  のポリマーコーティング径、NA 0.37 のポリマークラッドシリカコアファイバである。SI-MMF の典型的な損失測定評価では、測定の再現性を高めるために、マンドレルにファイバをラッピングして NFP を均一にする技術が用いられている[31], [58]。しかし、実際のファイバリンクではファイバをマンドレルにラッピングして使用していない。そこで、評価条件と実装条件の両方を検討するために、マンドレルにラッピングした場合とラッピングしない場合のデータを取得し、NFP のばらつきによる損失の違いを検証した。本検証では、プラスチックシリンダ (直径 10 mm) をマンドレルとして、ファイバを 2 回巻き付けた。なお、

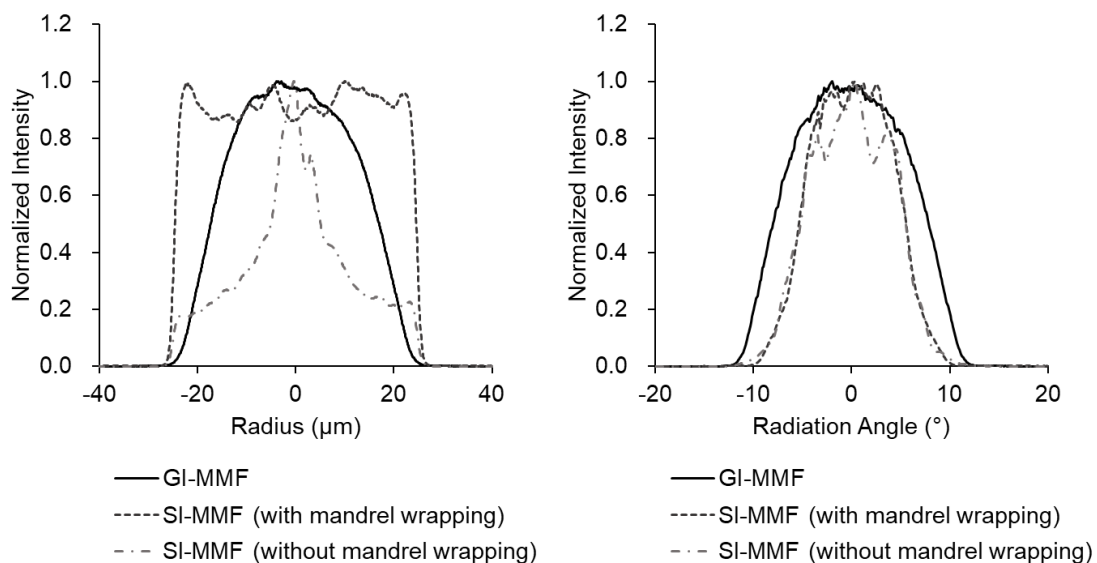


図 4-3 各種励振ファイバからの出力光の NFP (左) と FFP (右)。実線が GI-MMF、破線がマンドレルラッピング有りの SI-MMF、一点鎖線がマンドレルラッピング無しの SI-MMF。

今回データは記載していないが、GI-MMF はマンドレルにラッピングすることによる NFP の変化が極めて小さかったため、マンドレルラップを行っていない。

#### 4.4 励振条件の実測結果

図 4-3 は、SI-MMF と GI-MMF から出射した光の NFP と FFP のプロファイルを示している。SI-MMF の NFP は、マンドレルラップ無しの場合、ファイバコアの中心部に鋭いピークを持って分布していた。続いて、マンドレルラップ処理を行うことで、ファイバコア全体で強度のばらつきが小さく、均一な分布に変化した。一方、FFP ではマンドレルラップの有無にかかわらず、強度分布の肩が一致しており、放射角度はほとんど変化しなかった。GI-MMF の NFP と FFP は、中心部をピークとしたベル状の分布となっている。NFP において、コア半径  $25\ \mu\text{m}$  を超えた照射位置の光強度は低く、また、FFP において、NA 0.20 以上の角度では光強度は低く、暗電流ノイズレベルであった。

図 4-4 は SI-PCSF から出射した光の NFP と FFP のプロファイルを示している。NFP はコア半径  $100\ \mu\text{m}$  の範囲でピーク強度の 20% のばらつきがみられる程度の均一な分布を示していた。FFP は NA 0.18 で、ファイバの NA 0.37 よりも低い値であった。これにより、MPD は低次モードの割合が高いことが示されており、EMD に到達していないことが確認できた。

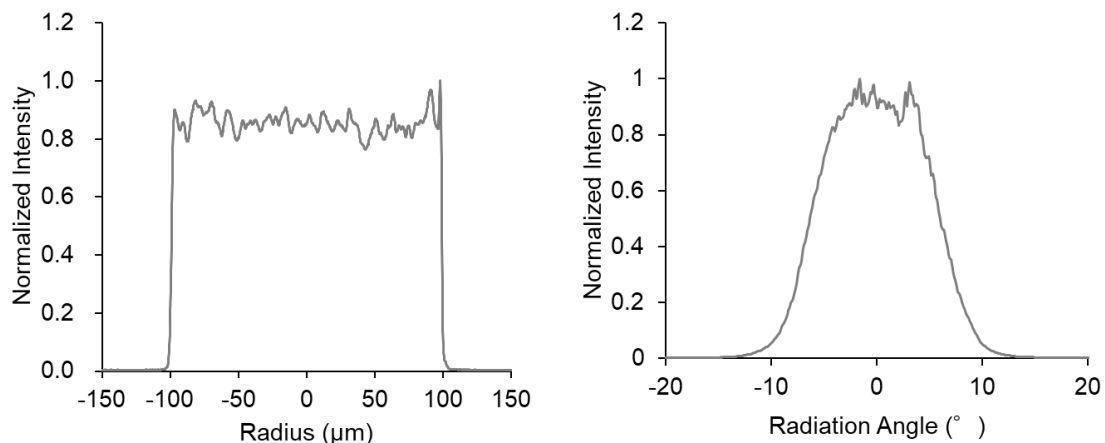


図 4-4 各種励振ファイバからの出力光の NFP (左) と FFP (右)



#### 4.5 励振条件の実測による考察

MMF を伝搬する光のモード数は式(1.1-2)と式(1.1-3)に示されるように、コア半径、NA、屈折率分布、波長によって変化する。多数のモードの集積によって形成されるMPD は、モード結合の進行によりその分布を変化させるため、MPD に関わるパラメータである、NFP と FFP もモード結合の進行に応じて変化する。モード結合は、外的要因（マイクロベンド、不純物、コア・クラッド境界の不完全性など）と内的要因（材料の密度不均一性、レイリー散乱、結晶化による散乱など）によって引き起こされる[59]-[64]。SI-MMF は GI-MMF よりも隣接するモードへのモード結合が起こりやすいため、外的要因により散乱などで広がった光が異なるモード次数へ結合し、モードの再分配を起こしやすい。図 4-3 を参照すると、マンドレルにラッピングされることでマイクロベンドが発生し、それによりモード結合が誘発されることで、NFP の均一性が得られることが確認できる。したがって、SI-MMF では不安定なモードに対してモード結合することでモードの安定化が起こる。モードの安定化が起こることで、NFP や FFP の変動は小さくなり、再現性の高い損失測定が可能となる。SI-MMF の一種である SI-PCSF は、SI-MMF と同様のモード結合の傾向を示す。

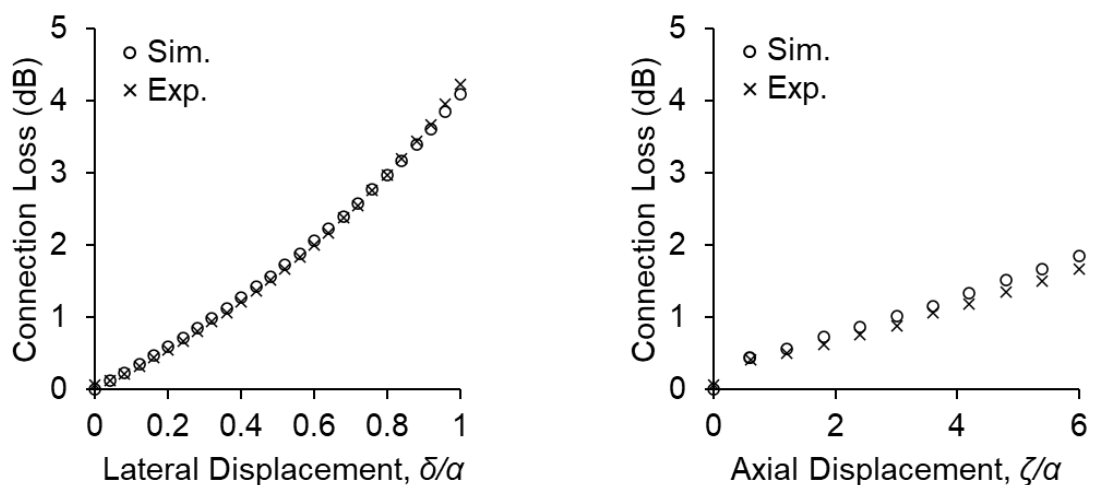


図 4-5 SI-MMF 同士の接続において、励振ファイバにマンドレルラップ有りの場合の、光軸垂直方向オフセットと光軸方向オフセットによる接続損失の実験結果(Exp.)とシミュレーション結果(Sim.)

これに対し、GI-MMF はファイバ特性としてモード結合が起こりにくい。また、GI-MMF 励振光のモードは、マンドレルのラッピングを行わなくてもすでに安定しており、ファイバのマイクロベンドによる NFP、FFP の変化は見られない。

#### 4.6 接続損失のシミュレーションと実測結果

図 4-5 は、SI-MMF 同士の接続において、励振ファイバにマンドレルラップを行った場合の、光軸垂直方向のオフセットと光軸方向のオフセットによる接続損失の実

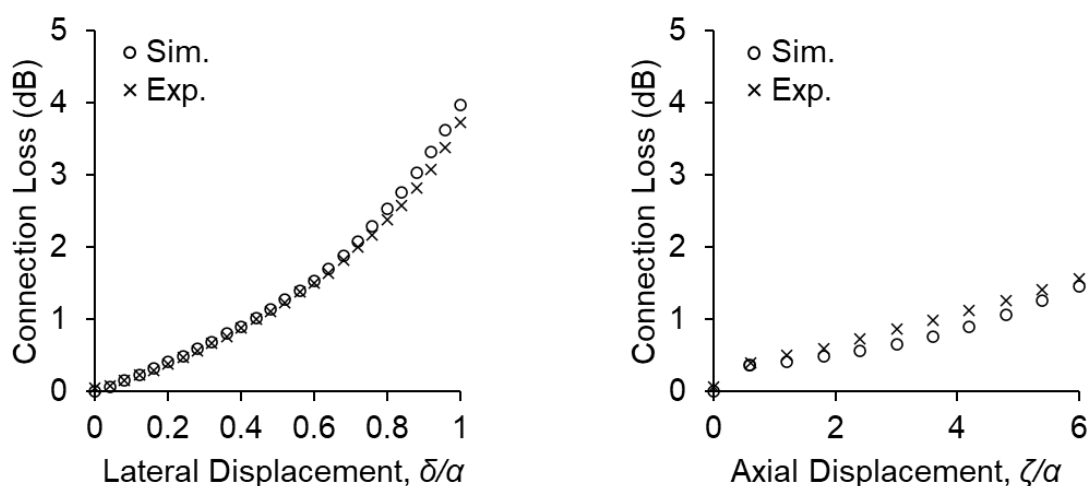


図 4-6 SI-MMF 同士の接続において、励振ファイバにマンドレルラップ無しの場合の、光軸垂直方向オフセットと光軸方向オフセットによる接続損失の実験結果(Exp.)とシミュレーション結果(Sim.)

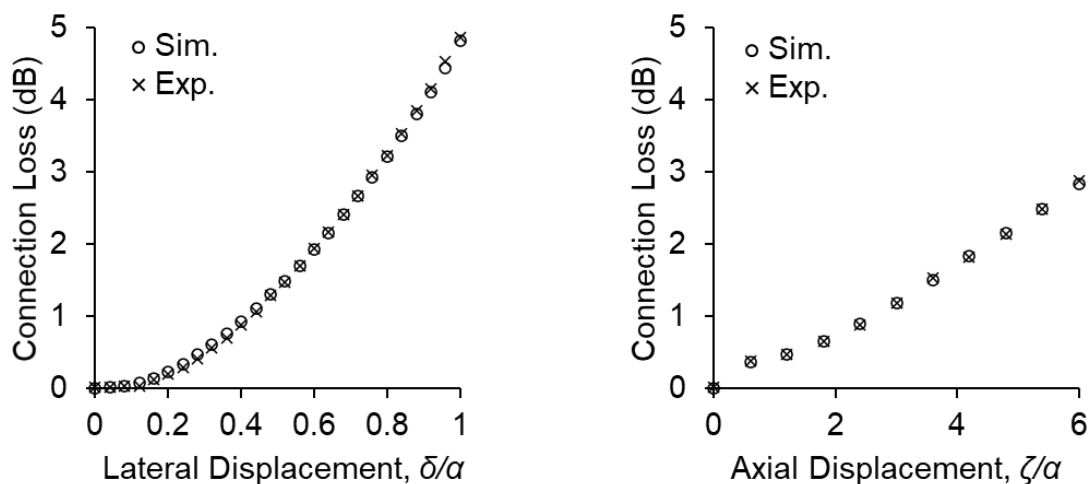


図 4-7 GI-MMF 同士の接続において、光軸垂直方向オフセットと光軸方向オフセットによる接続損失の実験結果(Exp.)とシミュレーション結果(Sim.)

験結果(Exp.)とシミュレーション結果(Sim.)を示したものである。いずれの結果も、Exp.と Sim.の差は常に 0.2dB 以下であった。

図 4-6 に、SI-MMF 同士の接続において、励振ファイバにマンドレルラップを行わなかった場合の光軸垂直方向のオフセットと光軸方向のオフセットによる接続損失を示す。いずれの結果からも、Exp.と Sim.の差は常に 0.3 dB 以下であった。

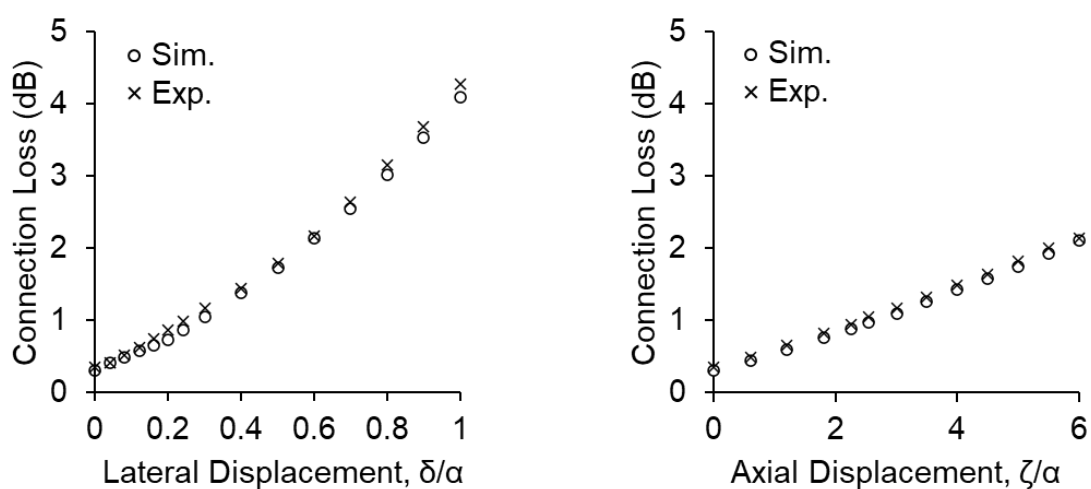


図 4-8 SI-PCSF 同士の接続において、光軸垂直方向オフセットと光軸方向オフセットによる接続損失の実験結果(Exp.)とシミュレーション結果(Sim.)

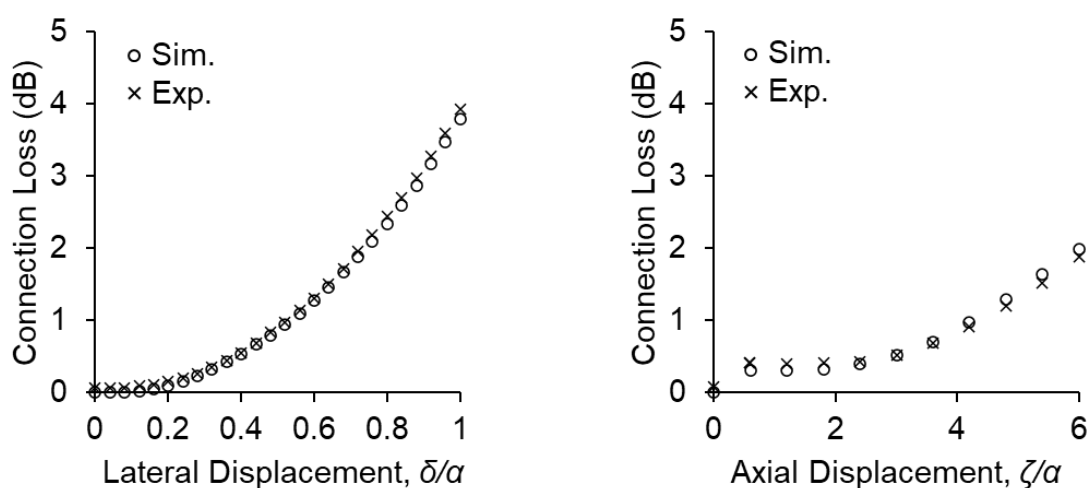


図 4-9 励振ファイバを GI-MMF、受光ファイバを SI-MMF とした異種ファイバ接続において、光軸垂直方向オフセットと光軸方向オフセットによる接続損失の実験結果(Exp.)とシミュレーション結果(Sim.)

図 4-7 に、GI-MMF 同士の接続における光軸垂直方向のオフセットと光軸方向のオフセットによる接続損失を示す。いずれの結果からも、Exp.と Sim.の差は常に 0.1 dB 以下であった。

図 4-8 に SI-PCSF 同士の接続に光軸垂直方向のオフセットと光軸方向のオフセットによる接続損失を示す。いずれの結果からも、Exp.と Sim.の差は常に 0.2 dB 以下であった。

図 4-9 に GI-MMF と SI-MMF の異種ファイバ接続における光軸垂直方向のオフセットと光軸方向のオフセットによる接続損失を示す。いずれの結果も、Exp.と Sim.の差は常に 0.2 dB 以下であった。

#### 4.6 シミュレーションモデルの妥当性考察

SI-MMF、GI-MMF、SI-PCSF を用いて様々な組み合わせで Exp.と Sim.の接続損失を比較した結果、全ての組み合わせで良好な一致が見られた。また、アライメント状態 ( $\delta/\alpha=\zeta/\alpha=0.0$ ) の接続損失は、どの MMF 接続においても 0.1 dB 以下の差であり、高い整合性を示していた。異種ファイバの接続では、ファイバの構造によって異なる結果が得られることが確認できた。GI-MMF から SI-MMF への接続を観察したところ、アライメント状態の接続損失は発生しなかった。これは、GI-MMF と SI-MMF のコア径が同じであり、受光ファイバである SI-MMF の NA が励振ファイバである GI-MMF の NA よりも大きいためである。したがって、励振ファイバのコア径および NA が、受光ファイバのそれらのパラメータと等しい、あるいは小さい場合には、アライメント状態において損失は発生しない。一方、励振ファイバのコア径および NA が、受光ファイバのそれらのパラメータよりも大きい場合には、アライメント状態でも損失が発生すると予想される。出射ファイバと受光ファイバでコアの屈折率が異なる場合には、フレネル反射による損失が発生する。この検証における SI-MMF と GI-MMF の異種ファイバ接続では、どちらもガラスコアのファイバであるため、屈折率の違いによるフレネル損失は無視できるほど小さい。フレネ

ル損失は接続部に間隙が生じることで、ファイバ間に空気層が介在すると発生する。フレネル損失を回避するためには、ファイバ同士がフィジカルコンタクトしている必要がある。フィジカルコンタクトの条件としては、ファイバ端面の曲率半径が適切であり、粗さが小さいこと、つまり端面の状態が良好であることである[65]。今回の検証では、SI-PCSF 接続を除いた MMF 接続において、アライメント条件 ( $\delta/\alpha = \zeta/\alpha = 0.0$ ) でフレネル損失は発生しなかった。したがって、MMF の端面の状態は良好であり、フィジカルコンタクトしていたことが示された。例外として SI-PCSF はコア径が大きいためフィジカルコンタクトができず、フレネル損失が発生していた。なお、図 4, 5, 6, 7 において、 $\zeta/\alpha$  が 0.0 から 0.6 に増加したときに損失増加が大きいののは、ファイバ間隙ができることでフレネル損失が発生したためである。

図 4-5 と図 4-6 のマンドレルラップ有り無しの SI-MMF 接続の結果を比較する。光軸垂直方向オフセットで比較するとマンドレルラップ有りの方がマンドレルラップ無しよりもオフセット量増加による損失の増加は大きくなっている。これはマンドレルラップにより NFP がファイバコア全体に均一化されたことに起因する。NFP 均一化によりコア外周部の強度割合が高くなると、光軸垂直方向オフセットが小さくても遮光量が大きくなるために損失に対して敏感になっている。これに対して、光軸方向オフセットはマンドレルラップの有無による差が小さい。これはマンドレルラップ有り無しにより FFP の放射角度が変化していないので、ファイバ間の距離が離れることにより遮光される光量の差が小さいためである。

続いて、図 4-7 の GI-MMF 接続の光軸垂直方向オフセットをみると、オフセット量が小さい間は損失の増加が緩やかだが、オフセット量が大きくなってくると著しく損失が上昇することがわかる。これは NFP がベル型であるため、小さいオフセット量ではすそ野の強度分布が遮光されるにすぎず損失への影響が小さいが、遮光が強度分布のショルダにかかってくると遮光される強度割合が急激に増えるためである。GI-MMF の光軸方向オフセットを見ると SI-MMF よりも損失の増加幅が大きい。これは出射ファイバの FFP が SI-MMF よりも広がっていたためである。なお、GI-

MMF の放射角度の大きさは出射ファイバに入射する光の FFP に依存するため、ファイバ種による特性ではない。

図 4-8 の SI-PCSF 接続の結果をみると、アライメント状態 ( $\delta/\alpha=\zeta/\alpha=0.0$ ) においてもフレネル損失が発生していることにより、0.30 dB の損失が発生している。NFP は均一分布であるため、光軸垂直方向オフセットに対する接続損失は SI-MMF に似たカーブを示しているが、フレネル損失があるためベースが高くなっている。光軸方向オフセットに対する接続損失は、SI-MMF よりも NA が大きいことに起因して SI-MMF よりもオフセット増加に対する損失の増加幅が大きい。

図 4-9 の GI-MMF と SI-MMF の異種ファイバ接続を見ると、光軸垂直方向オフセットと光軸方向オフセットの増加がどちらも比較的緩やかである。これは先述のように、出射ファイバである GI-MMF よりも受光ファイバである SI-MMF の NA が大きいため、受光可能な放射角度が大きいことに起因する。

#### 4.7 おわりに

SI-MMF、GI-MMF、SI-PCSF 同士の接続に加えて、異種間ファイバ接続にも適用可能な接続損失のシミュレーションモデルを提案した。このシミュレーションは、励振ファイバの FFP と NFP を実測し、それらのパラメータを光源としてモデリングする方法である。接続損失の評価には、SI-MMF、GI-MMF、SI-PCSF を使い、計算結果と実測結果がよく一致することを実証した。また、MMF 間のフィジカルコンタクトの有無によるフレネル損失の条件にもモデルを適応させることができた。これまでの MMF 接続損失は均一分布、EMD、ガウシアン分布などの特定の励振条件における計算方法が報告されており、実用上で様々なモード分布を取る種々の MMF に対して有効な結果が得られていなかった。本研究において、提案するシミュレーション方法により、シミュレーション結果と実測結果の整合を取れることを確認し、実用的な光ファイバリンクの解析に広く利用できることを示した。

## 第 5 章 ツイスト処理を利用した可変モードコントローラ

### 5.1 概要

損失テストに使用するための実用的なモードコントローラの開発に成功した。SI-PCSF を使用した伝送システムの損失テストでは、励振光に EMD の使用が推奨されている。理論的なアプローチにより開発されたモードコントローラは、ツイスト処理を使用する独特な手法であり、高効率、コンパクト、低損失で MPD 可変制御性を有し、EMD 生成可能であった。本研究では例として SI-PCSF を使用した、可変モードコントローラ (VMC : Variable mode controller) を提案する。VMC は、MPD を低次モード分布から高次モード分布 (EMD を含む) に可変的に調整することができる。そのメカニズムは、MMF へ負荷を与えることによる局所的な曲げと応力に起因するファイバの歪みにより説明される。VMC の減衰は EMD 生成条件において 2.1 dB と測定され、従来の EMD 生成手法における減衰の 1/5 程度に小さくなっていた。得られた EMD 光源は、損失テストの励振光に使用することが可能である。この手法はオールガラスタイプ SI-MMF、SI-PCSF および SI-POF など、あらゆる種類の SI-MMF に対して有効である。

### 5.2 はじめに

ファイバリンクシステムにおいて、一定水準の伝送品質を提供するためには、光ファイバの損失テストの再現性が重要となる[32]。損失テストにおいて、励振光の NFP と FFP がばらつくことによって測定結果の再現性は悪化する[31]。そのため、標準的な挿入損失測定には、励振光の MPD を高度に制御することにより、NFP と FFP の両プロファイルを制御することが重要となる。

過渡的なモード結合状態における SI-PCFS の FFP は、外的要因に応じて大きく変化することが知られている[66]。FFP の変動を抑制するためのモード条件として、

EMD の使用が推奨されている[33]。EMD はモード結合が飽和した状態であるため、モード変動が非常に小さい。EMD のプロファイルには、3 つの特徴がある。(1) FFP のピーク中心を  $0^\circ$  にシフトさせる。(2) 励振条件に関係なく特定の FFP が得られる。(3) NFP が均一分布となる (SI-MMF の場合に限定)。

SI-PCSF 長 2000 m 以上の長距離光伝搬で生成される EMD は、損失テストの基準光源として使用される[48]。長距離伝搬法とは、長い距離にわたって弱いモード結合を発生させることで EMD を得る方法である。しかし、この手法はレイリー散乱や OH 基などの不純物の影響を長距離に渡って受けるため減衰が大きくなる。

モード分布を制御するために様々なモードコントローラ (モードスクランブラ、モードコンディショナとも呼ばれる) が報告されている。モードコントローラは主に 2 つのカテゴリに分類される: 励振光の分布に関係なく全モード励振分布を生成するモードスクランブラ、および特定のモードを選択的に減衰させるモードフィルタ。これらのデバイスを組み合わせて使用することで、用途に合わせて MPD を調整する。モードフィルタにはモード結合を促進する効果はないため、EMD の生成は困難である。モードスクランブラはモード結合を促進する方法であり、モード結合を進めるためのファイバに対してどのようなアプローチをとるかにより、多くの方法が考案されてきた。現在報告されているモードコントローラの例を 5.3 節に後述する。報告されているモードコントローラでは、高モード結合効果、低損失、MPD 制御性、MPD 再現性を備えたものではなく、実用で SI-MMF の EMD を生成して損失テストに使用することは困難である。これまで SI-MMF の損失テストの要求が少なかったこともあり、モードコントローラの研究開発は積極的に行われておらず、モード結合効果を高めるための理論的なアプローチがされていない。しかし、SI-MMF の高速伝送システムの需要が高まっている現在において、モードコントローラの理論的なアプローチによる効率化は不可欠である。本研究では、これまであまり注目されていなかった SI-MMF のモードコントロールに焦点を当てて、理論的なアプローチにより、実用的なモードコントローラを開発することを試みた。



本章では、伝送システムの MPD 制御の課題を解決するために、効果的な手法となる VMC を提案する。例として SI-PCFS を用いて 10 m 以下の短距離伝搬で EMD を生成する低減衰な VMC を報告する。本手法では、SI-PCFS で複数のループを作ってツイストすることで、様々な方向からの立体的な応力によりモード結合を誘発する [67], [68]。VMC にはいくつかの利点がある：伝搬長が短いため、レイリー散乱や不純物吸収による減衰が少なく、また、EMD 生成に必要なファイバ長がこれまでの 2000 m から 10 m 以下に短縮されるため、EMD 生成装置としてコンパクトであることに加え、FFP の可変制御が可能である。このように、VMC は SI-MMF の EMD を得るための方法として高効率である。また、FFP の可変制御性を備えているため、EAF テンプレートの条件を満たす MPD を生成するための有用性が高い。

### 5.3 既存のモードコントローラ

MMF の MPD を制御するための方法について説明する。

- ・ポイントロード

図 5-1 にポイントロードモードスクランブラの例を示す [19]。ポイントロードモードスクランブラは、ファイバへのポイント擾動を引き起こす構成である。このスクランブラは、ファイバでループを作り、このループにより生じるファイバ同士の交差箇所に荷重を加える。この操作により、ファイバの荷重付加部分は他のファイバに対する点負荷源として作用する。結果として生じるファイバへの歪みは、広いス

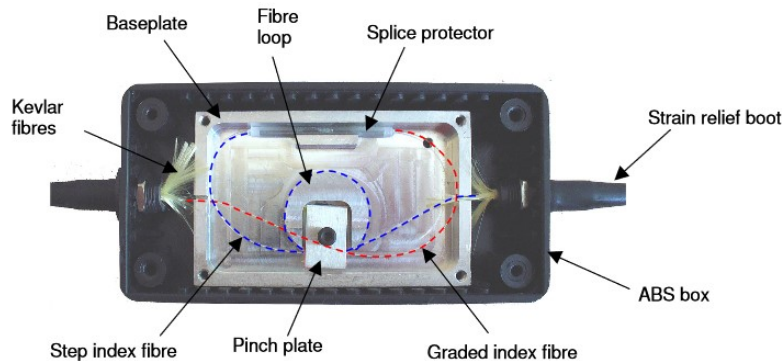


図 5-1 ポイントロードモードスクランブラ

ペクトルの空間周波数をもたらす。これは、特に隣接するモードが等間隔に配置されていない SI-MMF においてモード結合を強く促進する。

・マイクロベンドグレーティング

図 5-2 にマイクロベンドモードグレーティングスクランブラの例を示す[19]。マイクロベンドグレーティングは円筒形ピンのアレイにファイバが押し付けられている構成である[69], [70]。円筒形ピンは剛体の基部に取り付けられ、互いに接触して並んで置かれる。ピンのアレイに対してファイバを沿わせて配置して荷重を付与する。このモードスクランブラの特性として、特定周波数のモード結合が選択的に行われ

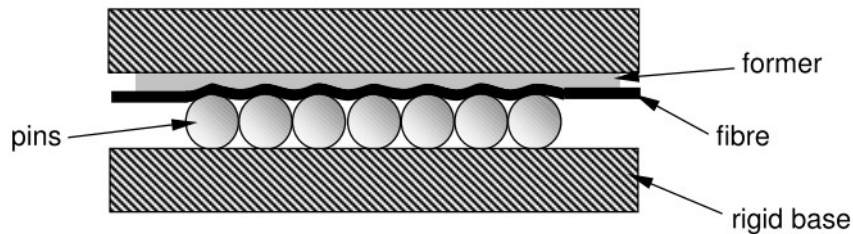
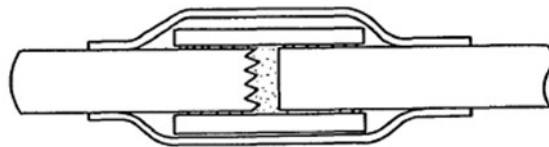
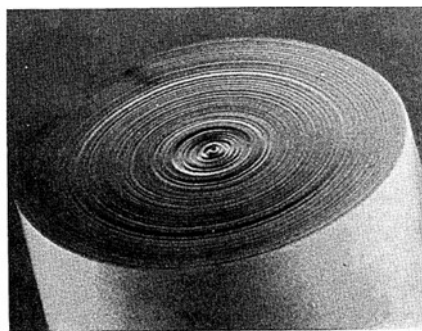


図 5-2 マイクロベンドグレーティングスクランブラ



(a)



(b)

図 5-3 (a) ギャップモードフィルタ、(b) モード変換のため励振ファイバに作製されたパターン。Adapted with permission from M. Ikeda, A. Sugimura, and T. Ikegami, "Multimode optical fibers: steady state mode exciter," *Appl. Opt.*, vol. 15, no. 9, pp. 2116-2020, 1976. © The Optical Society.

る。EMD は幅広い周波数に対してモード結合が必要となるため、本手法は EMD を作るのには適していない。

・ギャップモード

図 5-3 にギャップモードフィルタの例を示す[71]。ギャップモードフィルタは、2つのファイバの間に空気あるいは透過性の材質で光軸方向のギャップを持たせたフィルタである[72]。励振ファイバから放射される光の角度は光軸方向のギャップが増加するにつれて制限される。モードの観点から見ると、光軸方向のギャップが増加するにつれて、励振ファイバからの高次モードと受光ファイバ内のモード結合が減少する。また、励振側のファイバあるいは導波路端面にパターンを作製する、あるいは粗くすることで散乱を起こし、受光ファイバへモード変換した光を入射する方法が報告されている。これらの手法は、励振側のモードを受光側で再分配する効果が期待できるが、モード結合が促進されないため、EMD の生成には適していない。

・マンドレルラップ

図 5-4 にマンドレルラップフィルタ (スクランブラ) の例を示す[73]-[75]。MMF に曲げを導入すると高次モードの優先的な減衰が引き起こされる[76]。この方法は全

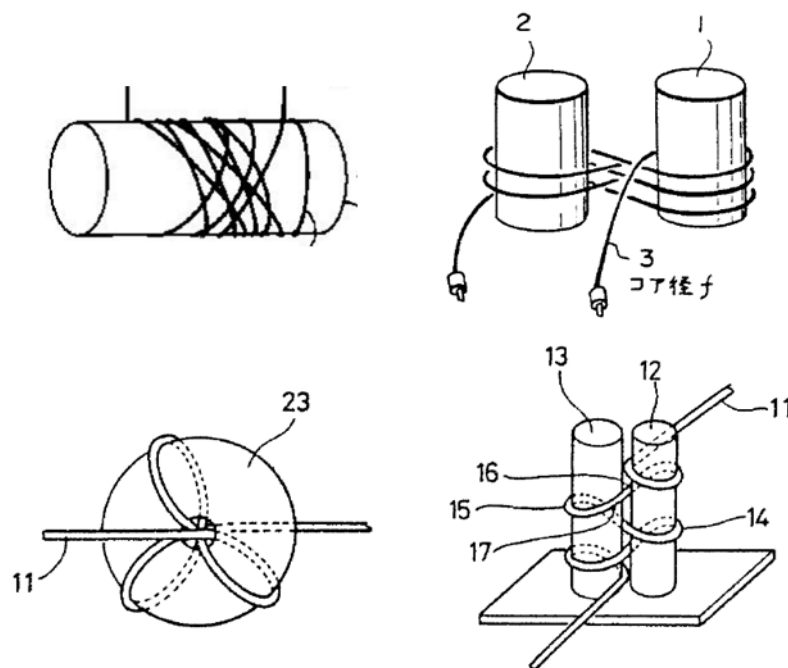


図 5-4 マンドレルラップフィルタ (スクランブラ) の例

モード励振された励振光から疑似定常モードモード条件を作成するために広く使用されている。曲げは通常、特定のサイズのマンドレルを中心にして数回巻きつける方法がとられる。たとえば、IEC 規格 61300-3-4 では、50  $\mu\text{m}$  ファイバ用に直径 18 mm のマンドレルを 5 回転、62.5  $\mu\text{m}$  用に直径 20 mm のマンドレルを 5 回転させることが規定されている[77]。これらの手法では、高次モードがリークすることによるモードフィルタリングが発生する。ただし、マンドレルとファイバの接触による応力の付与により、ポイントロードモードスクランブラと同様のモードスクランブル効果が見られるものもある。マンドレルへの巻き付け方を工夫することで様々な応力をファイバに与えることができ、スクランブルの効果がフィルタリングの効果よりも高く発生することも多い[50], [78], [79]。しかし、この方法はモード結合の促進の効果が低いため、モードスクランブラとしては効率的な方法ではない。そのため、本手法によって EMD を生成することは困難である。

・オフセット励振

図 5-5 にオフセット励振の例を示す。MMF に対して RML 光源を光軸垂直方向にオフセットあるいは光軸角度に対してオフセットする[80]-[83]。オフセットされた光は高次モードとして MMF に入射し、モード結合を繰り返して MPD が広がっていく。実用例を挙げると、シングルモードレーザ光源からのモード分布を均等化する 1 つの方法として、レーザ光源の出力ピグテールと MMF の間に小さなオフセットを導入することが報告されている[56]。GI-MMF においてはコア中心への入射ではビーム径が小さすぎる場合など、オフセット励振することで高次モード比率を高くして

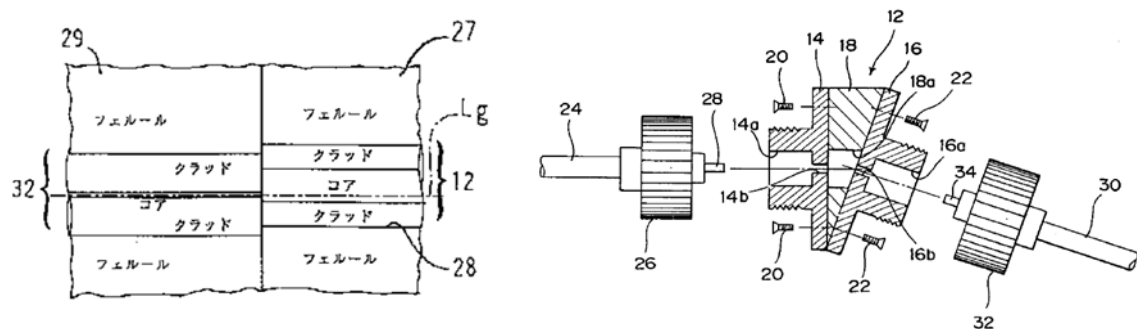


図 5-5 オフセット励振の例

ビーム径を広げる効果がある。SI-MMF においては、スキュー光の導波条件になる影響で、短いファイバ長で NFP が均一分布になる。しかし、入射直後からモード結合が進み、ファイバの曲げ状態などで MPD が変化してしまうため、MPD 再現性が低い。また、モード結合促進効果はないため、EMD の生成には適していない。

・応力付与スクランブラ

図 5-6 に応力付与スクランブラの例を示す。MMF に側圧あるいは絞りを与えることでファイバに歪みを与えてモードスクランブルを促進する[84]-[89]。応力を受けた MMF にはマイクロベンドが発生する。マイクロベンドは MMF 内の導波光は散乱を誘発し、それによりモード分散が起こる。モード分散によりモードは再分配され MPD が変換される。応力付与の方法としては、設置された MMF の径方向から荷重を加える、MMF をクランプで挟んで回転させることで絞る方法などがある。EMD を得るためには強い応力付与や、応力付与点を多くする必要があり、従来の使用方法で到達するためには長尺を要する。

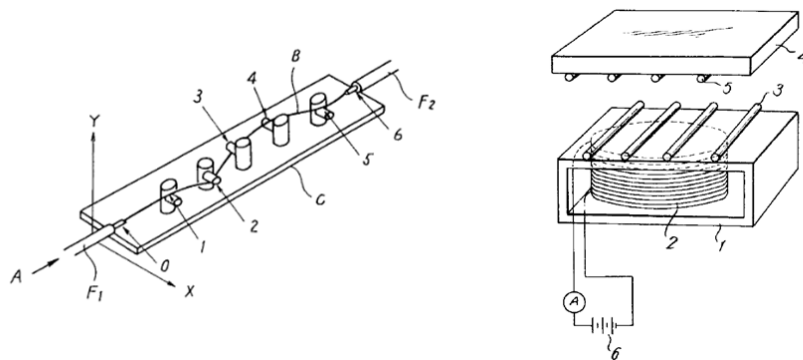


図 5-6 応力付与スクランブラの例

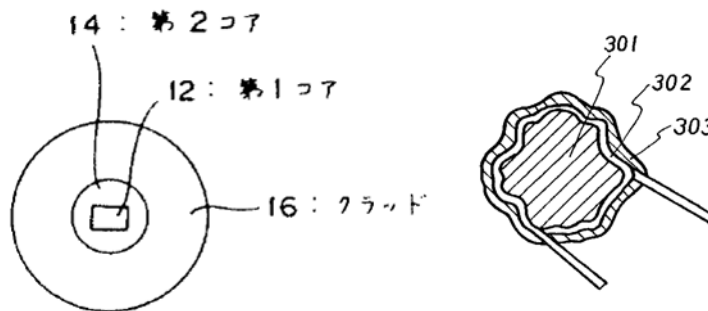


図 5-7 特殊コアファイバスクランブラの例

- ・矩形コアファイバ

図 5-7 に特殊コアファイバスクランブラの例を示す。コアの形状を円形以外の特殊形状にすることでモード結合を誘発する[90]-[92]。ファイバ形状が円形以外の場合、コア・クラッド界面の反射にコア中心を通過しないスキュー光が増加し、MPD が再分配される。短尺で EMD に到達可能であるが、円形ファイバと異なる MPD となるため、円形ファイバとの接続時に EMD が崩れてしまう。

- ・コルゲート構造

図 5-8 にコルゲート構造スクランブラの例を示す。エッチングなどでコア側面を荒らしてコルゲート構造を作ること、界面での散乱を誘発する[93],[94]。モードスクランブルの効果は高く、EMD が得られるが、コアを露出してコルゲート構造を作ることによってファイバの機械的特性に影響することが懸念される。また、コルゲート構造の再現性により散乱が変化することから MPD 制御が難しい。

#### 5.4 ツイストタイプ可変モードコントローラの光学特性検証系

VMC から放射された光の FFP、NFP、光出力を測定するためのシステムを構成した。

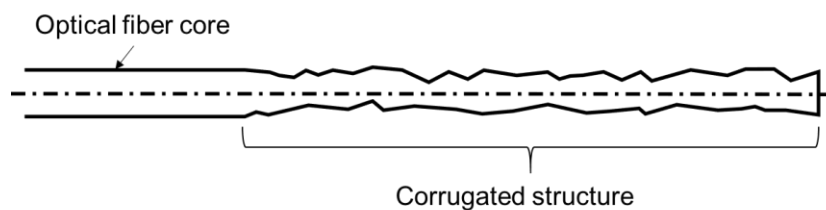


図 5-8 コルゲート構造スクランブラの例

図 5-9 に SI-PCSF を使用した VMC の概要、図 5-10 に VMC の光学特性を測定するためのシステムを示す。VMC は、回転プーリ、固定プーリ、SI-PCFS により構成されている。プーリの直径は 30 mm、2 つのプーリの中心間距離は 130 mm である。長さ 10 m の SI-PCFS 光パッチコードを回転プーリと固定プーリに 12 回巻き付けて SI-PCFS ループを作製した。次に、回転プーリを 0~5 回転させてファイバーループをツイストした。このツイストによってファイバーループは変形し、応力が発生する。ファイバーループ変形による応力は、回転プーリと固定プーリを引っ張る力として伝わる。回転プーリにかかる張力は、回転プーリの上部に取り付けられたフォースゲージで測定した。プーリ間の距離を調整することで張力を  $0 \pm 0.1$  N に保った。この方法で SI-PCFS に加えられた張力は、回転プーリと固定プーリにかかる応力をバランスさせ、設置位置を安定化させた。測定には、波長 850 nm の SLD 光源を使用し

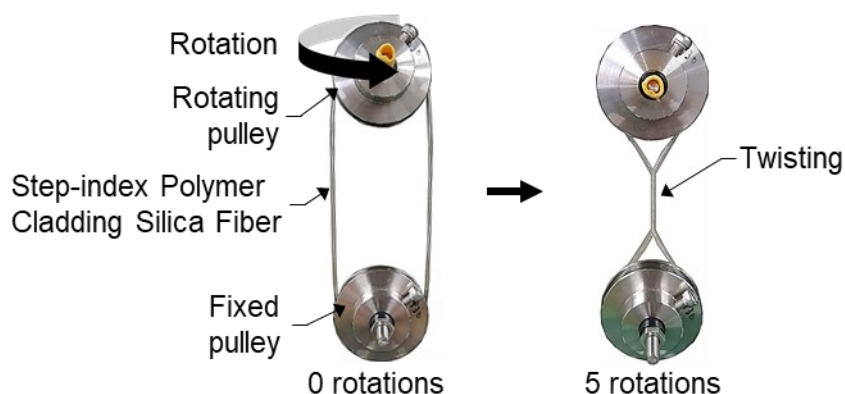


図 5-9 SI-PCSF を使用した可変モードコントローラの概要。左は回転回数 0 の時、右は回転回数 5 の時で、2 つのプーリの上にファイバーループを撚り合わせている。© 2019 IEEE

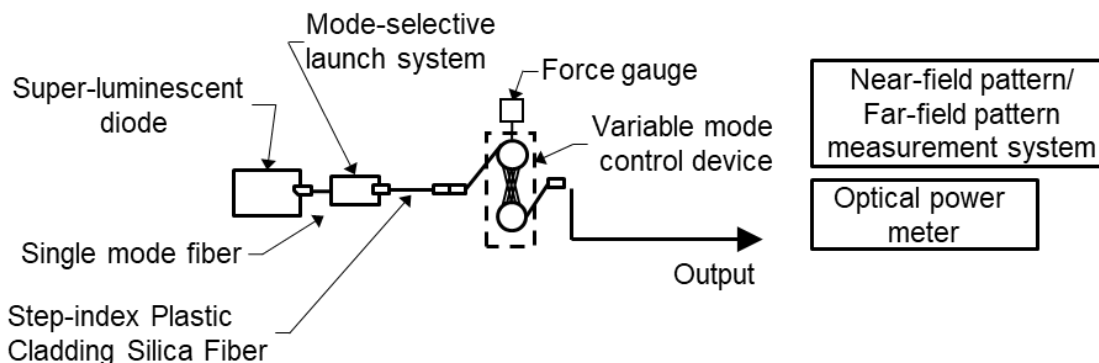


図 5-10 可変モードコントローラの光学特性測定システムの構成。© 2019 IEEE

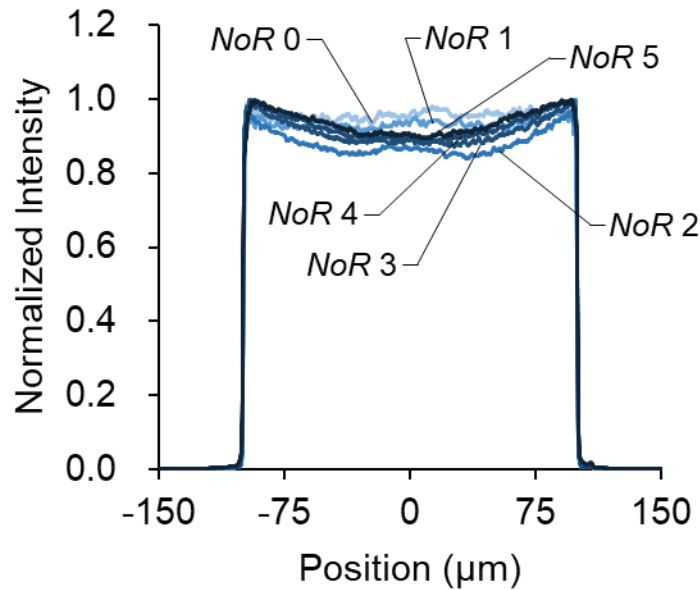
た。この SLD 光源を、アキシコンレンズ付き光学系を用いて任意の NA を選択して抽出するモード選択励振光学系 (M-Scope type ML、シナジーオプトシステムズ) に SMF パッチコードで接続した。任意の NA の抽出光はリング形状の FFP を形成する。VMC に対して低次モード励振 (LML : Lower-mode launch) と高次モード励振 (HML : Higher-mode launch) の 2 つの異なる励振条件を用いて検証した。VMC のビームプロファイルは、NFP 及び FFP 測定装置 (M-Scope Type F、Type I、シナジーオプトシステムズ) に接続されて測定される。VMC の出力側をパワーメータに接続し、出力光量を測定した。VMC に LML と HML を接続したときのプーリの回転数 (*NoR* : Number of rotations) が異なる場合の NFP と FFP の変化を測定した。なお、プーリ間の距離を調整することにより、ファイバループのツイストから供給される張力を制御しているが、回転プーリと固定プーリ間の距離が短いほど、回転プーリの回転によりファイバに加わる応力が大きくなることがわかった。応力が高すぎると減衰が大きくなるため、フォースゲージで確認しながら適切な張力になるように距離を調整している。また、回転プーリにかかる張力が高すぎると、ファイバがそれに耐えられず断線する可能性がある。



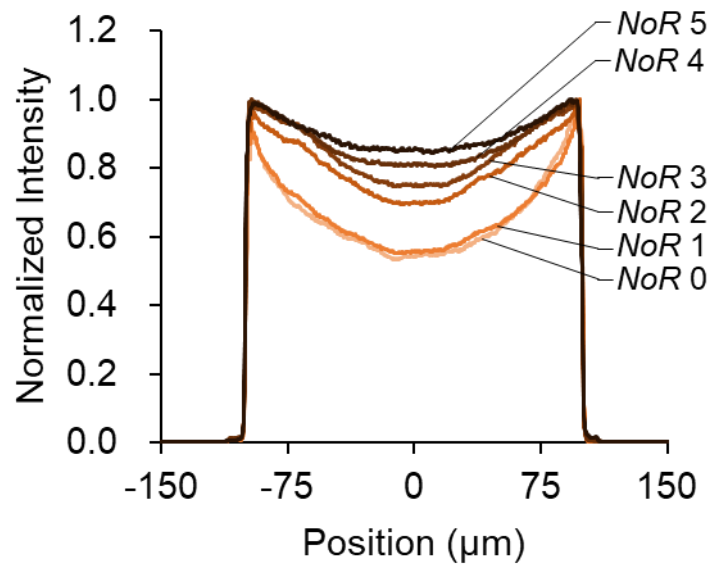
## 5.5 光学特性検証結果

### 5.5.1 Near- and Far-field patterns

VMC の  $NoR$  に対する、VMC の NFP 変化を測定した。図 5-11 は、LML と HML の励振光をそれぞれ VMC に接続した場合において、 $NoR$  を 0 から 5 に変化させていったときの NFP の変化を示している。LML 励振の NFP は、 $NoR=0$  でコア全体に



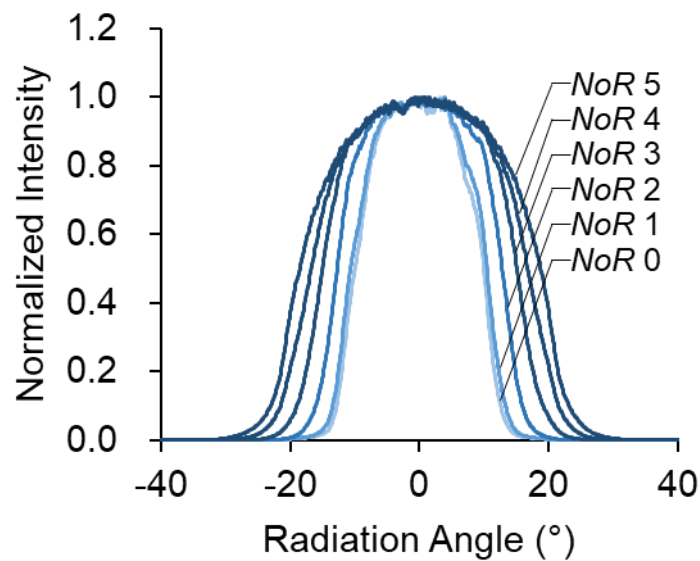
(a)



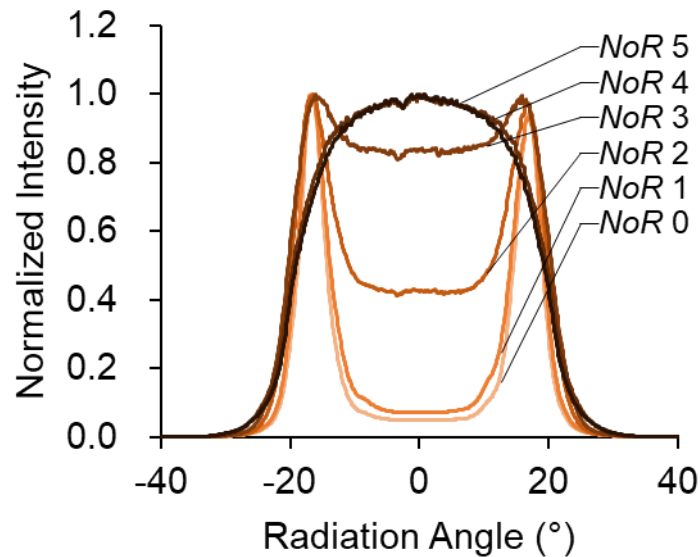
(b)

図 5-11 (a) 低次モード励振と(b) 高次モード励振において、可変モードコントローラのプリー回転回数 ( $NoR$ ) を変化させた場合の NFP。© 2019 IEEE

均一な分布を示したが、 $NoR = 5$  ではコア中心部の相対強度が約 10%低下した。一方、HML 励振の NFP は、 $NoR = 0$  のコア中心の相対強度は、コア外周の相対強度に比べて約 50%低下している。コア中心の相対強度は、 $NoR$  の増加に伴って増加していき、コア中心とコア外周の強度差は、 $NoR = 5$  で約 10%にまで低下した。したがって、LML および HML 励振の両方の NFP は、 $NoR = 5$  の VMC において、コア全体で



(a)



(b)

図 5-12 (a) 低次モード励振と (b) 高次モード励振において、可変モードコントローラの回転回数 ( $NoR$ ) を変化させた場合の FFP。© 2019 IEEE

約 10%の強度変動を有する均一な分布を示した。相対強度は、スキュー光の影響により、コア中心領域よりもコア外側領域の方が高くなる傾向があることがわかった。

続いて、VMC 出射光の FFP 変化について検証した。図 5-12 は、LML と HML の励振光をそれぞれ VMC に接続した場合において、NoR を 0 から 5 に変化させていったときの FFP の変化を示している。LML 励振の FFP は NoR=0 のとき、放射角 0° を中心としたベル状の強度分布を示しており、そのプロファイルは放射角 0°に相対強度のピークを持ち、放射角が大きくなるにつれて相対強度が低下している。この場合、FFP は低次モードから高次モードに広がるように変化していく。最大放射角は NoR とともに増加し、NoR=5 で最大値を示した。一方、HML 励振の FFP は NoR=0 のとき、放射角+16.5°と-16.5°を中心とした 2 つの強度ピークを示した。強度ピークが 0°を中心としていない場合、FFP は低次モード側と高次モード側の両側に広が

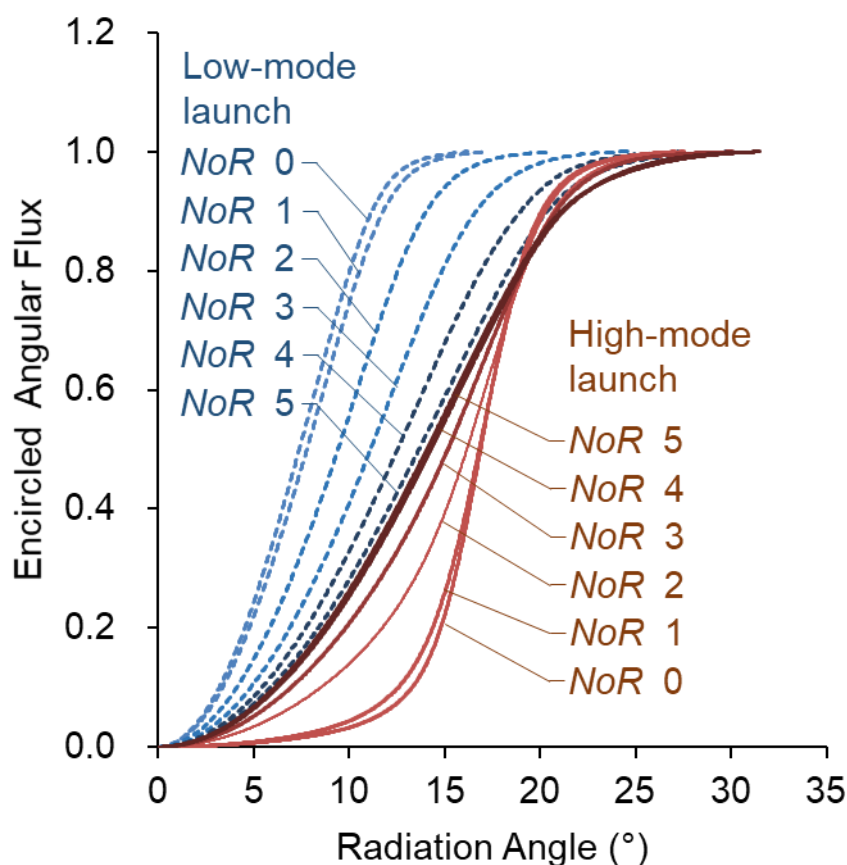


図 5-13 低次モード励振と高次モード励振において、可変モードコントローラの回転回数 (NoR) を変化させた場合の EAF プロファイル。© 2019 IEEE

っていく。すなわち、放射角度  $16.5^\circ$  に位置するピーク強度は、 $NoR$  を上げると低次モード側にシフトする。そして、 $NoR = 4$  以上では、ピーク中心が  $0^\circ$  となる FFP が得られた。HML 励振のピーク中心が  $0^\circ$  になる現象は、 $NoR = 4$  でモード結合が完了して EMD となるためであると推測される。 $NoR = 4$  で EMD に到達しているため、 $NoR = 4$  から  $5$  へ増加したときの FFP の変化は小さかった。VMC の FFP 変化を解析することで、励振条件によらず、 $0^\circ$  に強度ピークを持つ対称的な FFP が得られることを実証した。また、特定の FFP が得られるまでのプロファイルの変化は、LML と HML で異なる挙動をすることを確認した。その結果、プーリ回転により起こるファイバツイストにより、FFP が EMD に到達することを示した。

### 5.5.2 Encircled angular flux and encircled flux

図 5-13 は、LML 励振と HML 励振において、VMC の  $NoR$  に対する EAF プロファイルの変化の挙動を示す。LML 励振では、 $NoR = 0$  の EAF プロファイルは低次モ

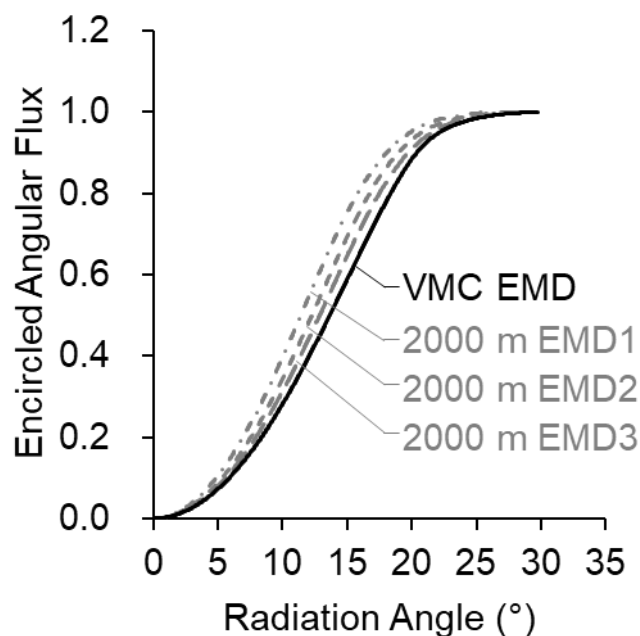


図 5-14 可変モードコントローラと長距離伝搬によって生成された SI-PCSF の EMD の EAF プロファイル。長距離伝搬手法では、2000m の SI-PCSF スプールを 3 ロット用意し、それぞれの EAF プロファイルを解析した。© 2019 IEEE

ード側に位置していたが、HML 励振では高次モード側に位置していた。このことは、LML は最も低次モード比率が高い励振条件であり、HML は最も高次モード比率が高い励振条件であることを示している。LML 励振の EAF プロファイルは、*NoR* の増加に伴って高次モード方向にシフトした。一方、HML 励振の EAF プロファイルは *NoR* の増加に伴い低次モード方向にシフトした。LML と HML 励振の EAF プロファイルは *NoR*=5 で重なっていた。この結果は、VMC を用いることで、最終的に励振条件によらず EMD に到達することができ、特定の EAF プロファイルが得られることを実証した。

図 5-14 は、VMC で生成した EMD と、SI-PCFS の 2000 m 長距離伝搬で生成した EMD のそれぞれの EAF プロファイルを示したものである。前者の EMD の EAF プロファイルは、後者の場合よりも高次モード側に位置していることがわかる。この 2 つの方法は、マイクロバンドの数とその位置が異なっている。長距離伝搬法は距離に対してマイクロバンドの数が少ないため、モードの変化は緩やかである。一方、VMC は、短距離で多数のマイクロバンドが発生するため、モードの変化が急速に起

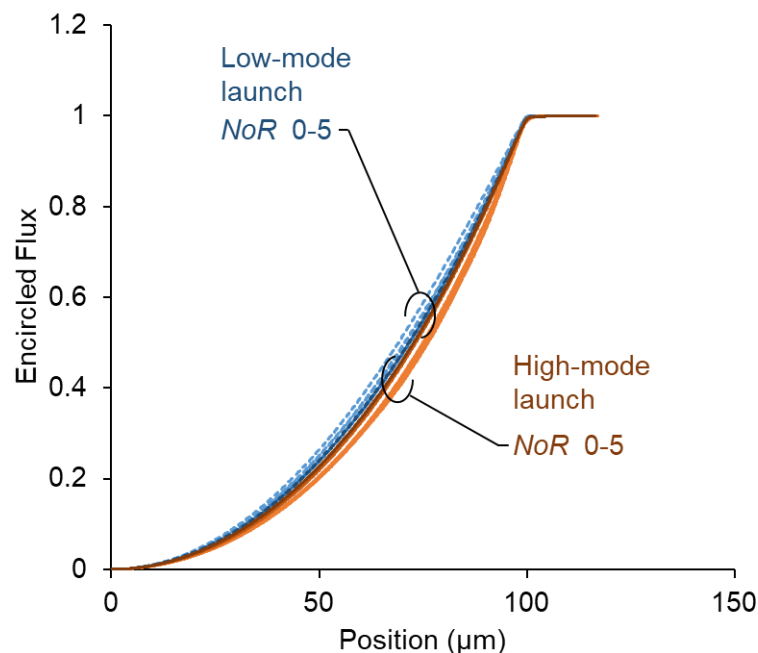


図 5-15 低次モード励振と高次モード励振において、可変モードコントローラの回転回数 (*NoR*) を変化させた場合の EF プロファイル。© 2019 IEEE

こる。このような違いから、それぞれの EMD は異なる EAF プロファイルを示していた。

図 5-15 に、LML 励振と HML 励振において、VMC の  $NoR$  に対する EF プロファイルの変化の挙動を示す。LML と HML 励振のどちらも  $NoR$  による変化は小さいが、 $NoR$  の増加とともに互いに近づいていき、 $NoR$  5 で一致している。これは NFP において、図 5-6 に示されるように中心付近の相対強度が近くなったことに起因する。

### 5.5.3 減衰と放射角

VMC の減衰特性を検証するために、減衰量と  $EAF_{0.5}$  に対する放射角を測定した。 $EAF_{0.5}$  は EAF の全強度積分値の 50% 積分値である。図 5-16 は、LML と HML 励振の  $NoR$  に対する VMC の減衰量と放射角度 ( $EAF_{0.5}$ ) を示したものである。LML の減衰量は  $NoR=0$  で 0.1 dB、 $NoR=5$  で 2.1 dB であった。HML の減衰量は、 $NoR=0$

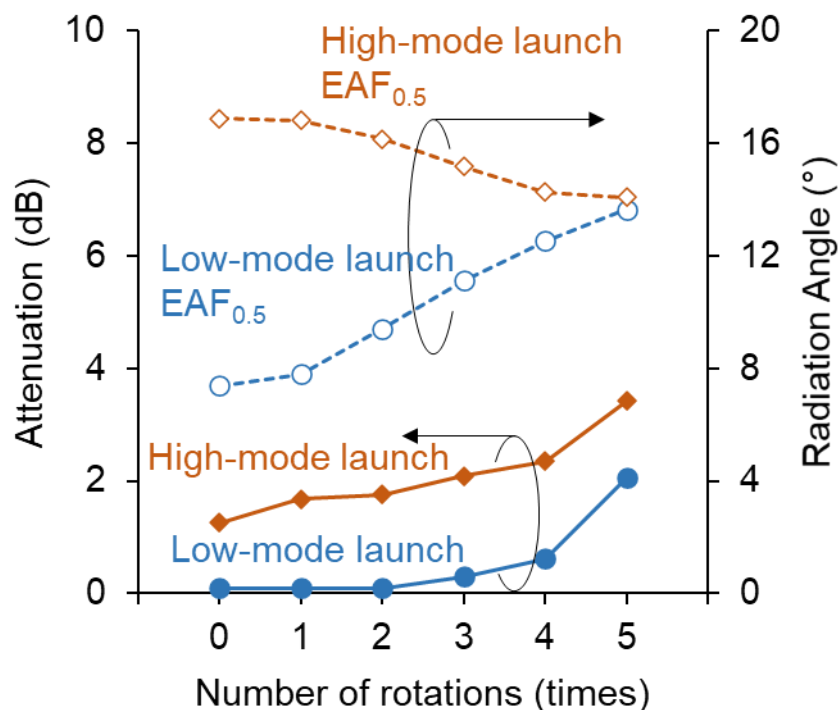


図 5-16 低次モード励振と高次モード励振において、プーリ回転回数に対する可変モードコントローラの減衰量と  $EAF_{0.5}$  に対する放射角度。© 2019 IEEE

で 1.3 dB,  $NoR=5$  で 3.4 dB であった。これに対して、従来の EMD 生成法である長距離伝搬法の減衰量は、伝搬長 2000 m で 10.7 dB であった。 $NoR=0$  における LML の EAF 値 0.5 の放射角は  $7.4^\circ$  であったが、 $NoR$  の増加とともに増加し、 $NoR=5$  では  $13.7^\circ$  となった。HML の  $NoR=0$  (EAF<sub>0.5</sub>) の放射角は  $16.9^\circ$  であり、 $NoR$  の増加に伴って減少し、 $NoR=5$  では  $14.1^\circ$  となった。また、LML と HML 励振は  $NoR=5$  でほぼ同じ放射角 (EAF<sub>0.5</sub>) であった。その結果から、異なる励振光を用いた場合においても、VMC の出力光が特定の放射角に収束すること、また、LML と HML 励振では減衰量が異なることを確認した。

VMC は、応力、マイクロバンド、張力などの複合的な力をファイバに与えることにより、モード結合を促進する方法である。低次モードの限定励振光は、低次モードから高次モードへのモード結合により EMD に到達した。高次モードを超えてリーキーモードに結合したモードは、続いて放射モードとモード結合することでリークアウトすることが確認された。しかし、LML 励振の場合、低次モードから高次モードを介してリーキーモードに到達するモードは少ないため、LML 励振の減衰は小さい。一方、HML 励振は、高次モードから低次モードへモード結合が完了する前に高次モードからリーキーモードにモード結合が起こる。その後、リーキーモードから放射モードに結合してリークアウトした。そのため、HML 励振での減衰量は大きい。しかし、放射モードによるリークアウトは、長距離伝搬法におけるレイリー散乱や不純物吸収に比べてはるかに小さいものであった。このことから、VMC は低い減衰量で EMD が得られる手法であることが示された。

## 5.6 他種のファイバへの適用

### 5.6.1 Step-index Multimode Fiber と Step-index Plastic Optical Fiber

VMC を用いて SI-MMF と SI-POF の EAF の変化を検証した。SI-MMF の仕様は、コア径  $50\ \mu\text{m}$ 、クラッド径  $125\ \mu\text{m}$ 、ポリマーコーティング径  $250\ \mu\text{m}$ 、NA 0.22 となっており、SI-POF の仕様は、コア径  $980\ \mu\text{m}$ 、クラッド径  $1000\ \mu\text{m}$ 、ジャケット径  $2200\ \mu\text{m}$ 、NA 0.50 である。励振光は波長  $850\ \text{nm}$  の SLD 光源からの LML 励振を使用した。図 5-17 に  $3\ \text{m}$  の SI-MMF と  $2\ \text{m}$  の SI-POF に対して、プーリの  $NoR$  を変えた場合の EAF の変化を示す。SI-MMF の EAF プロファイルは、 $NoR = 0$  の時には低次モード側であったが、 $NoR$  を 0 から 5 に増加させていくと高次モード側にシフトしていく。SI-POF の EAF プロファイルは  $NoR$  が 0 から 3 に増加すると高次モード側にシフトする。この結果から、VMC は SI-PCFS だけでなく、SI-MMF や SI-POF に対しても有効であることを示した。

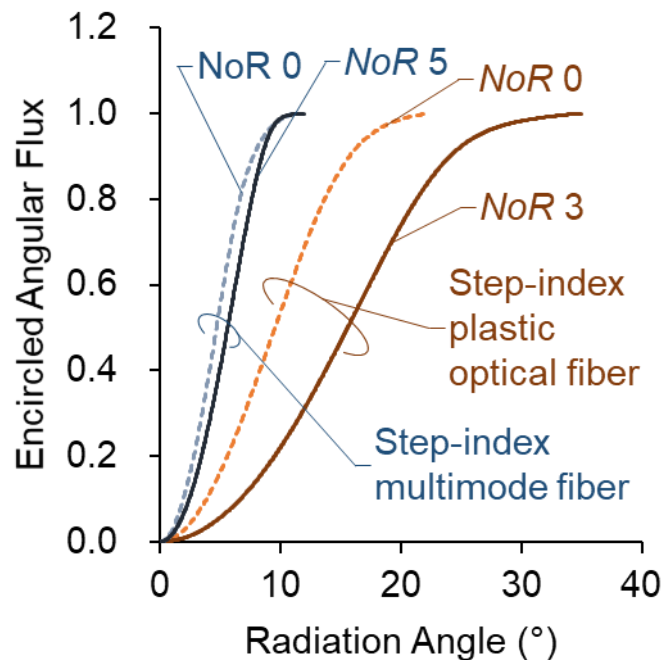


図 5-17 低次モード励振と高次モード励振において、SI-MMF と SI-POF をセットした可変モードコントローラのプーリ回転回数 ( $NoR$ ) を変化させた場合の EAF。© 2019 IEEE



### 5.6.2 Graded-index Multimode Fiber

VMC を用いて GI-MMF の EAF の変化を検証した。

GI-MMF の仕様は、コア径  $50\ \mu\text{m}$ 、クラッド径  $125\ \mu\text{m}$ 、ポリマーコーティング径  $250\ \mu\text{m}$ 、NA 0.20 である。励振光は波長  $850\ \text{nm}$  の SLD 光源を NA 0.22 の SI-MMF に接続して、VMC により EMD にした光を使用することで OFL とした。図 5-18 に 3 m の GI-MMF に対して、プーリの  $NoR$  を変えた場合の NFP と FFP の変化を示す。 $NoR$  の増加により、NFP と FFP は縮小していることが確認できる。図 5-19 に 3 m の GI-MMF に対して、 $NoR$  を変えた場合の EF と EAF の変化を示す。 $NoR$  の増加によ

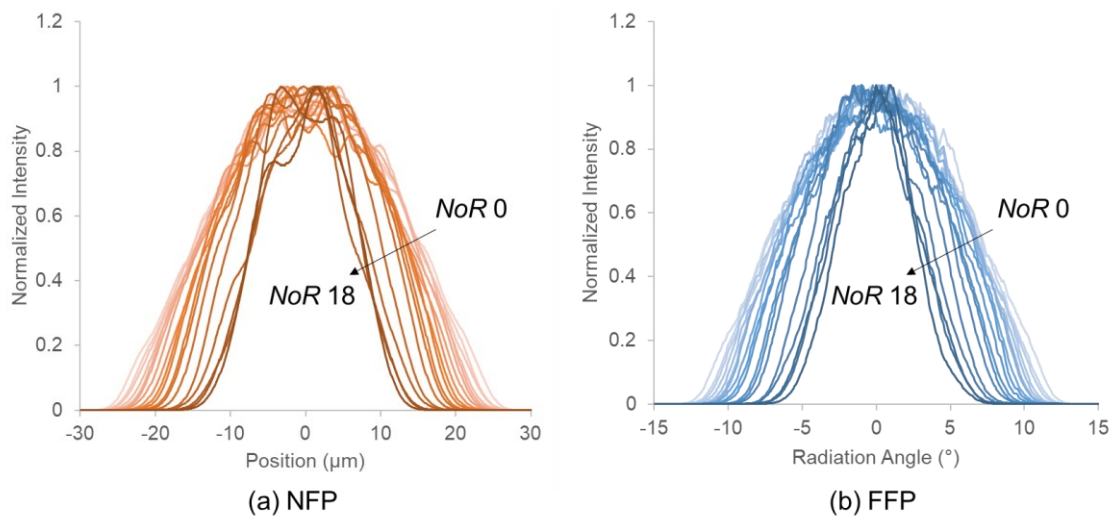


図 5-18 GI-MMF をセットした可変モードコントローラのプーリ回転回数 ( $NoR$ ) を変化させた場合の光学特性 : (a) NFP、(b) FFP

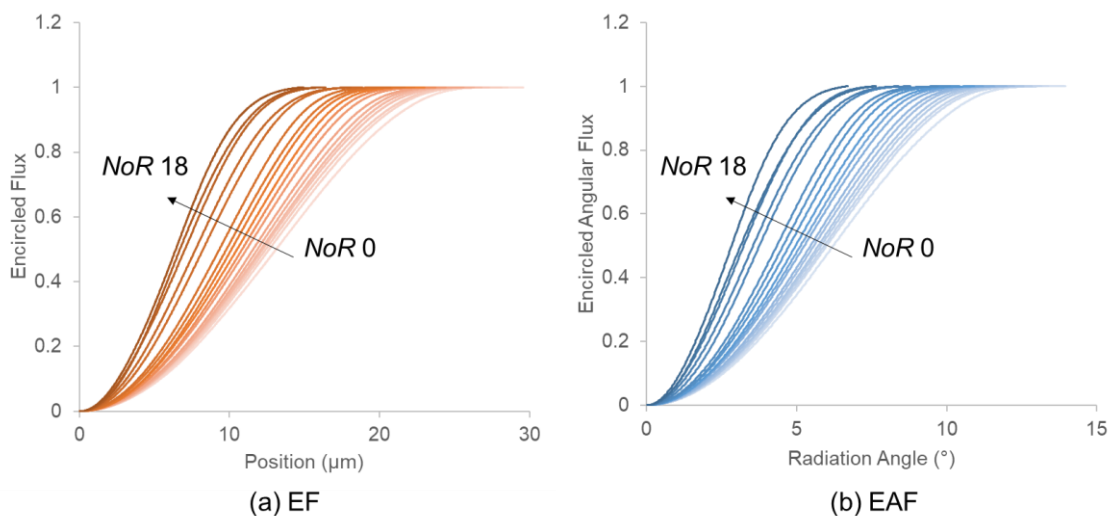


図 5-19 GI-MMF をセットした可変モードコントローラのプーリ回転回数 ( $NoR$ ) を変化させた場合の光学特性 : (a) EF、(b) EAF

り、EF と EAF は低次モード側シフトしていることが確認できる。これらの結果から、VMC の GI-MMF への適用は SI-MMF と異なる挙動を示すことがわかる。

SI-MMF はモードスクランブルによる高次モードへのモード結合が起こっていたが、GI-MMF ではモードフィルタリングの効果が表れており、低次モードの割合が多くなる。モードフィルタリングは曲げ半径が小さくなることによる影響であるため、GI-MMF ではファイバ束がツイストされることによって、極小曲げ半径となることで高次モードがリークアウトしており、モード結合がほとんど起こっていないことが推測される。

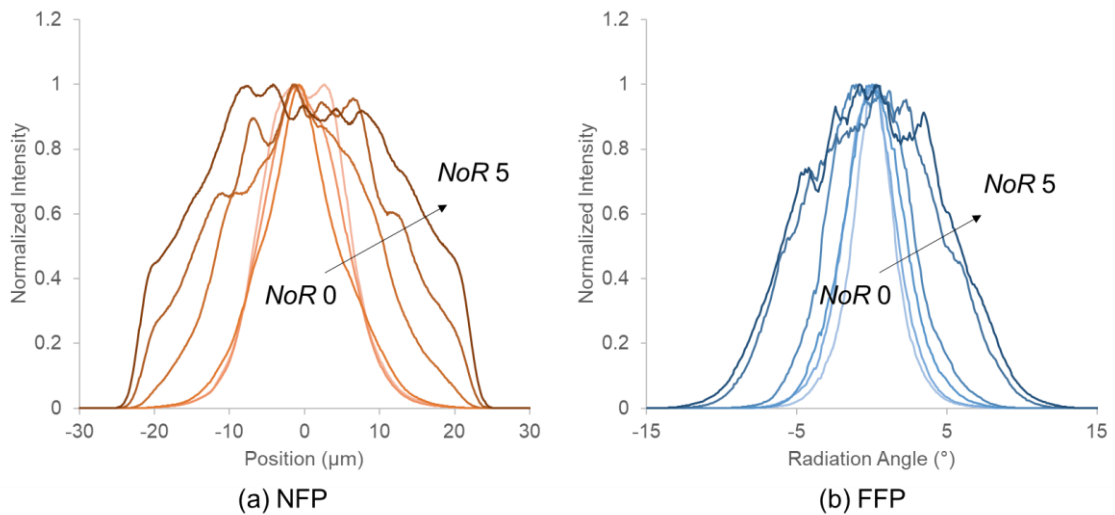


図 5-20 GI-POF をセットした可変モードコントローラのプリー回転回数 ( $NoR$ ) を変化させた場合の光学特性 : (a) NFP、(b) FFP

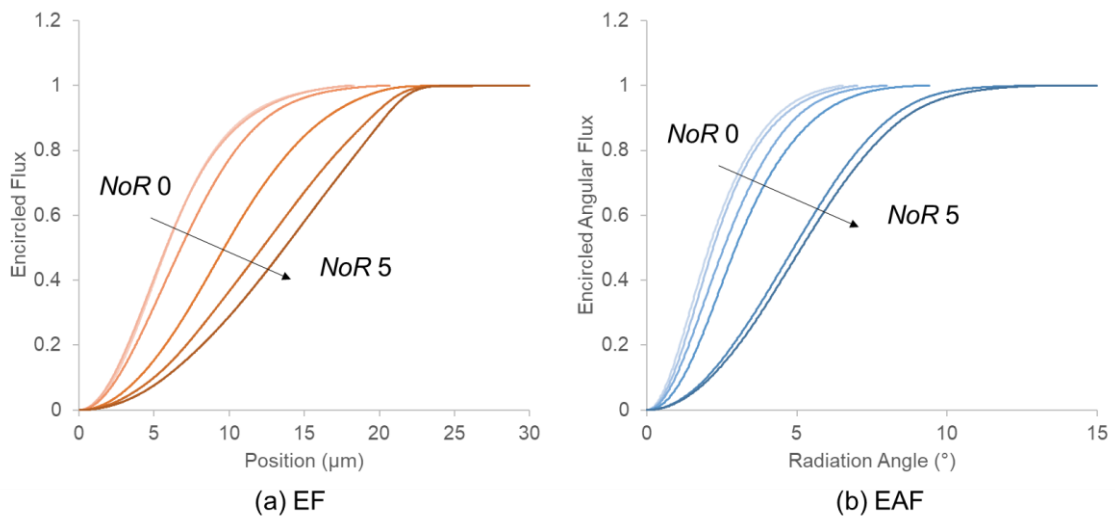


図 5-21 GI-POF をセットした可変モードコントローラのプリー回転回数 ( $NoR$ ) を変化させた場合の光学特性 : (a) EF、(b) EAF

## 5.6.2 Graded-index Plastic Optical Fiber

VMC を用いてグレーデッドインデックスプラスチックオプティカルファイバ (GI-POF : Graded-index plastic optical fiber) の EAF の変化を検証した。

GI-POF の仕様は、コア径 55  $\mu\text{m}$ 、補強層 490  $\mu\text{m}$ 、NA 0.245 である。励振光は SLD 光源からの LML 励振を使用した。図 5-20 に 3 m の GI-POF に対して、プーリの  $NoR$  を変えた場合の NFP と FFP の変化を示す。 $NoR$  の増加により、NFP と FFP は拡大している。図 5-21 に 3 m の GI-POF に対して、 $NoR$  を変えた場合の EF と EAF の変化を示す。 $NoR$  の増加により、EF と EAF は高次モード側にシフトしている。

GI-POF はモードスクランブル効果により高次モードの割合が増加することが確認できる。この挙動は VMC によりモードフィルタリングが主に起こっていた GI-MMF と異なっている。GI-POF はファイバの特性としてモード結合が起こりやすいためであると推測される。

## 5.7 モード結合メカニズム

### 5.7.1 曲率パワースペクトル

VMC によるモードコントロールは、ファイバ束のツイストによって生じる複雑な現象の結果である。複雑な現象としては、ファイバ自体が持つ様々な散乱 (レイリー散乱、ブルリアン散乱、ラマン散乱、コア・クラッド不整合による散乱) により誘起されるモード結合に加えて、VMC による点荷重、曲げ、引張、圧縮、歪みなどによるモード結合、モードフィルタリング、光散乱、光弾性効果などが予想される。これらの現象は互いに関連しており、解析は非常に複雑になる。そのため、要素を切り分けて解析することで、影響の大きい現象を把握する方法が有効である。最も影響が大きいと予想されるのはファイバ同士が絡み合っ生じる歪みである。歪みの計算には弾性曲線方程式を使用する[19]。軸方向距離 $z$ の関数として、弾性基礎上の無限梁にかかる集中荷重の変位 $y(z)$ は、

$$y(z) = -\frac{W}{8EI\beta^3} e^{-\beta z} (\cos \beta z + \sin \beta z)$$

伝搬係数 $\beta$ は、

$$\beta = \left(\frac{b_0 k_0}{4EI}\right)^{1/4}$$

ここで、 $W$ は印加荷重、 $E$ は梁のヤング率、 $I$ は梁の慣性モーメント、 $b_0$ は梁幅、 $k_0$ は基礎弾性率（単位たわみあたりの単位応力）である。小さな隆起によって弾性材料に押し付けられたファイバの線力定数 $g$ は、弾性材料のヤング率 $E_e$ にほぼ等しく、式(5.3)では $g = b_0 k_0$ となる[95]。したがって、(5.2)と(5.3)から $z = 0$ のときの変位は次式で与えられる。

$$y(0) = -\frac{W}{8EI} \left(\frac{4EI}{E_e}\right)^{3/4} \quad (5.7-1)$$

ここで、半径 $a$ の円筒の慣性モーメントは、

$$I = \frac{\pi}{4} a^4 \quad (5.7-2)$$

ファイバの局所的な曲率 $c(z)$ は次式で与えられる。

$$c(z) = \frac{y''(z)}{\left(1 + y'(z)^2\right)^{3/2}} \quad (5.7-3)$$

モード間の結合強度はフーリエ変換で与えられるファイバ内の曲率パワースペクトルに比例することが知られている[96]。パワースペクトルの強度は、 $\beta$ が大きいほど強くなり、スペクトル幅は狭くなる。そのため、ヤング率 $E$ や円筒半径 $a$ は小さく、印加荷重 $W$ は大きいほど、 $\beta$ は大きくなる。 $\beta$ はMMFにおいてモード結合に関連するパラメータであり、その値が大きいほど異なるモードへのモード結合が起こりやすい。MMFはその種類により $\Delta\beta$ と呼ばれる隣接モード間の伝搬係数の差が異なっており、SI-MMFはGI-MMFと比較して $\Delta\beta$ が小さく、その値にばらつきが大きい。

そのため、SI-MMF は様々な要因によるパワースペクトルで容易にモード結合が起こり、モード分布が安定しないことを示している。

曲げの影響を確かめるために SI-MMF に曲率半径 15 mm のベークライト円筒あるいは曲率半径 1 mm の SUS304 (ステンレス) 円筒を 7.5 mm の間隔で 2 つ並べ、3 m SI-MMF を 2 つの円筒に 10 周巻き付けて FFP・NFP を測定した。続いて、SI-MMF を曲率半径 15 mm のベークライト円筒に 8 の字に 10 周巻き直し、その後、ファイバがクロスしている箇所指で応力を加えた。図 5-22 に種々の曲げ状態における FFP、図 5-23 に種々の曲げ状態における NFP を示す。曲率半径 1 mm 円筒は、曲率半径 15 mm 円筒よりも FFP・NFP が広がっていた。曲率半径 15 mm 円筒巻き付けか

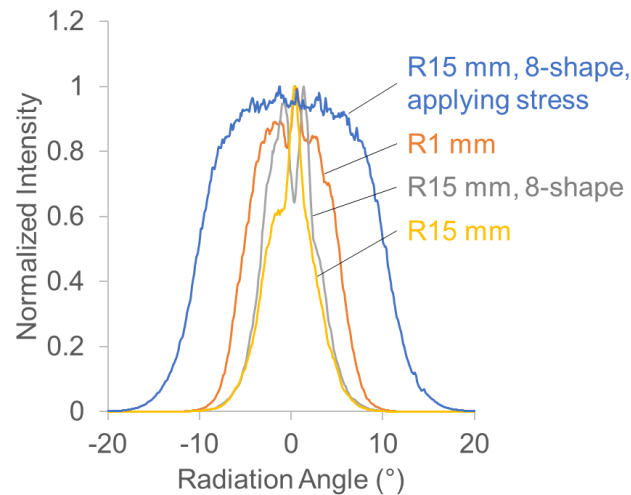


図 5-22 種々のファイバ曲げ状態における FFP

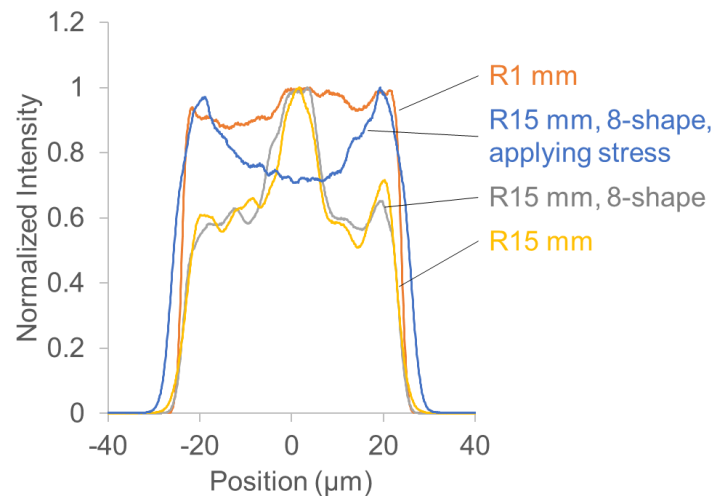


図 5-23 種々のファイバ曲げ状態における NFP

ら、8 の字へ巻き直すことによる FFP・NFP の変化は見られなかった。8 の字に巻き付け時にファイバがクロスしている箇所に指で応力を加えることにより、NFP・FFP は大きく広がった。

円筒の曲率半径が小さくなることで FFP・NFP が広がるという結果は、曲げの曲率半径が小さくなることにより曲率パワースペクトルの相対強度が高くなり、それによってモード結合が起こることを示している。8 の字にファイバを巻き直すことによる影響が小さいのは、局所的な曲率半径が変化していないためである。FFP・NFP に与える影響として最も大きかったのは、8 の字巻きのファイバがクロスした箇所に対する応力付与である。応力付与により、局所的に小さい曲率半径が発生することと、歪みが発生することにより非常に大きく、広い曲率パワースペクトルが発生していることが予想される。NFP を見ると、ファイバコアの外周部の強度が高く、コア径以上に強度分布が広がっていることが確認できる。これは、高次モードへのモード結合が強く起こっており、リーキーモードが多く発生していることを示している。この現象はファイバ長が 3 m と短いために、リーキーモードは多少の減衰をしながらもファイバ端へ到達していることにより起こっている。

簡易的に歪みの影響を確かめるために SI-MMF を板上に静置し、円筒でファイバを押し付けることで局所的な応力を与えた。板の材質はフッ素ゴムの硬度ショア A60 タイプとアルミニウムを使用し、円筒の材質はフッ素ゴムの硬度 A69、クロロプレンゴムスポンジの硬度アスカーC20 を使用した。板厚は 1 mm、円筒の曲率半径は 1.5 mm であった。

フッ素ゴムの硬度ショア A60 の板とフッ素ゴムの硬度 A69 の円筒を使用した場合、FFP は広がっていた。一方、アルミニウムの板を使用した場合、応力を付与する材料の形状や材質によらず FFP の変化はほとんど見られなかった。また、フッ素ゴムの板に対してクロロプレンゴムの円柱を使用した場合、FFP の変化は小さかった。したがって、ファイバに発生する歪みによりモード結合が促進されることが示される。また、ファイバを弾性率が高い板に押し付ける場合や、ファイバよりも弾性率

が著しく低いものでファイバに応力をかける場合、ファイバの変形が起こらないため、曲率パワースペクトルの強度が小さくなる。

### 5.7.2 モード結合係数

MMF のモード結合は様々な要因が複雑に重なり合うことで起こるため、それらをすべて含んだモード結合係数を定義することは特性の把握に有効な手段である。Savović らは FFP を利用して SI-MMF のモード結合係数  $D$  を算出する方法を報告している。

特定の励振から生じる MPD は、モード結合の影響によって、入力ファイバ端からの距離と共に徐々に変化し、結果としてファイバから出力される光の FFP は変化する[97]。例えば、光軸に対して  $\theta = \theta_0$  の固定された角度で RML したとき、短尺ファイバの出力光はリング状の FFP となる。ファイバ長が長くなると、このリング光のエッジがぼやけていき、リング状から徐々にディスク状に変化する。これは、入力端からの距離に応じてモード結合が累積していき、最初は  $\theta = \theta_0$  を中心とした FFP が  $\theta = 0^\circ$  に向かってシフトしていくためである。ファイバ長  $Lz$  より長くすることによって、FFP は  $0^\circ$  をピークとしたプロファイルとなり、分布形状が励振条件によらず固定される。この時のモード状態が EMD である。 $Lz$  はモード結合係数  $D$  によって変化し、以下の式で示される。

$$Lz = \frac{0.2}{D} \left( \frac{NA}{n} \right)^2 \quad (5.7 - 4)$$

ここで、 $NA$  はファイバの開口数、 $n$  はファイバコアの屈折率である。

光軸に沿ってファイバコア中心に励振された光に対する出力光 FFP の分散  $\sigma_z^2$  は以下の式で示される[98]

$$\sigma_z^2 = \sigma_0^2 + 2Dz \quad (5.7 - 5)$$

ここで、 $\sigma_0^2$  は励振光 FFP の分散であり、 $z$  は光軸からの距離である。(5.7-5) から、結合係数  $D$  は以下の式で示される。

$$D = \frac{\sigma_z^2 + \sigma_0^2}{2z} \quad (5.7 - 6)$$

(5.7-6) より  $D$  を求めるためには、任意のファイバ長  $z$  における出力光 FFP の分散  $\sigma_z^2$  を求める必要がある。また、励振光の分散  $\sigma_0^2$  は既知でなければならない。FFP の分散が大きいほど、多数の高次モードが励起されることを意味する。出力光 FFP の分散と励振光 FFP の分散との差は、光ファイバにおけるモード結合の結果である。

励振光の分散  $\sigma_0^2$  が既知でない場合、結合係数  $D$  は、以下の式を使用して算出される。

$$D = \frac{\sigma_{z2}^2 - \sigma_{z1}^2}{2(z2 - z1)} \quad (5.7 - 7)$$

ここで、 $\sigma_{z1}$  および  $\sigma_{z2}$  は、それぞれ、ファイバ長  $z1 > 0$  および  $z2 > 0$  ( $z2 > z1$ ) で測定した出力光 FFP の分散である。

Savović らは本章で使用した VMC に対してモード結合係数  $D$  の計算を行った[99]。励振光条件はモード選択励振光学系からの RML である。図 5-24 に VMC のそれぞれの回転回数における、結合係数と EMC 到達に必要なファイバ長を示す。励振光の

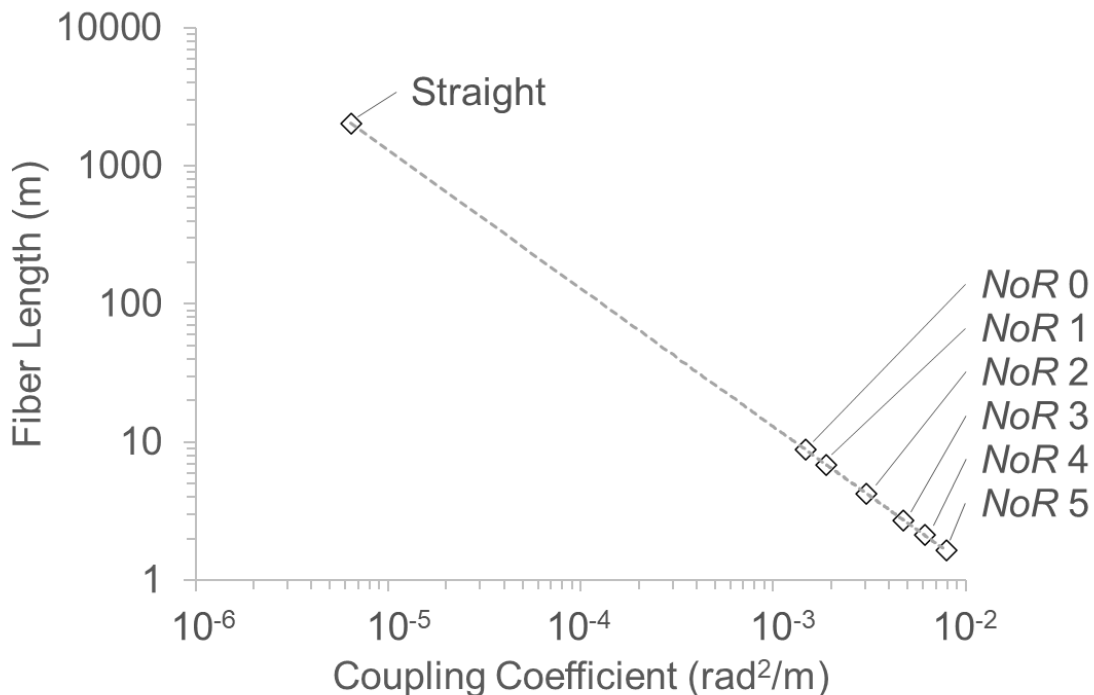


図 5-24 VMC の回転回数 NoR における、結合係数と EMC 到達に必要な SI-MMF のファイバ長



標準偏差 $\sigma_0$ は  $5.6^\circ$ であった。VMC の回転回数( $NoR$ )による標準偏差はそれぞれ $\sigma \doteq 8.5^\circ$  ( $NoR=0$ )、 $9^\circ$  ( $NoR=1$ )、 $10.8^\circ$  ( $NoR=2$ )、 $12.8^\circ$  ( $NoR=3$ )、 $14.2^\circ$  ( $NoR=4$ )および  $15.9^\circ$  ( $NoR=5$ )となった。これらの値を (6) に代入すると、VMC の結合係数は $D = 1.47 \times 10^{-3} \text{ rad}^2\text{m}^{-1}$  ( $NoR=0$ )、 $D = 1.89 \times 10^{-3} \text{ rad}^2\text{m}^{-1}$  ( $NoR=1$ )、 $D = 3.06 \times 10^{-3} \text{ rad}^2\text{m}^{-1}$  ( $NoR=2$ )、 $D = 4.75 \times 10^{-3} \text{ rad}^2\text{m}^{-1}$  ( $NoR=3$ )、 $D = 6.10 \times 10^{-3} \text{ rad}^2\text{m}^{-1}$  ( $NoR=4$ )、 $D = 7.90 \times 10^{-3} \text{ rad}^2\text{m}^{-1}$  ( $NoR=5$ )となった。なお、ストレートタイプの SI-PCSF の結合係数は $D = 6.4 \times 10^{-6} \text{ rad}^2\text{m}^{-1}$ である[100]。VMC によって SI-PCSF の結合係数が増加することが確認できた。

EMD に到達するファイバ長は(5.7-4)により結合係数に関係していることが示されている。SI-PCSF のストレートタイプでは結合係数が低いためモード結合の進行が遅く、ファイバ長  $L_z = 2026.4 \text{ m}$  で EMD に到達する。VMC を使用することで EMD に到達するファイバ長は  $L_z = 8.8 \text{ m}$  ( $NoR=0$ )、 $6.9 \text{ m}$  ( $NoR=1$ )、 $4.2 \text{ m}$  ( $NoR=2$ )、 $2.7 \text{ m}$  ( $NoR=3$ )、 $2.1 \text{ m}$  ( $NoR=4$ )、 $1.6 \text{ m}$  ( $NoR=5$ )となった。VMC によって結合係数が増加し、EMD に到達するために必要なファイバ長が著しく減少することが確認できた。



図 5-25 VMC のパラメータ概要

これは 5.7.1 項で述べたように、ツイストによって曲率パワースペクトルが増加したことが主な要因である。この結果はファイバ長と  $NoR$  の調整によりモード結合の過渡状態から EMD までのモード状態を調整可能であることを示している。

### 5.7.3 平衡モード分布係数

前節では EMD 到達に必要なファイバ長をモード結合係数により算出した。本節では VMC 使用時の、EMD 到達条件をパラメータ毎に検証する。

図 5-25 に VMC におけるパラメータの概要を示す。VMC におけるパラメータはボビン径  $P$ 、ファイバループ巻き数  $R$ 、ボビン間距離  $D$ 、ボビン回転回数  $NoR$ 、ファイバ係数  $F$  である。ファイバ係数  $F$  は VMC によるモード結合の影響を示しており、ファイバのコア径・クラッド径・屈折率分布・ヤング率等により変化する。EMD 到達

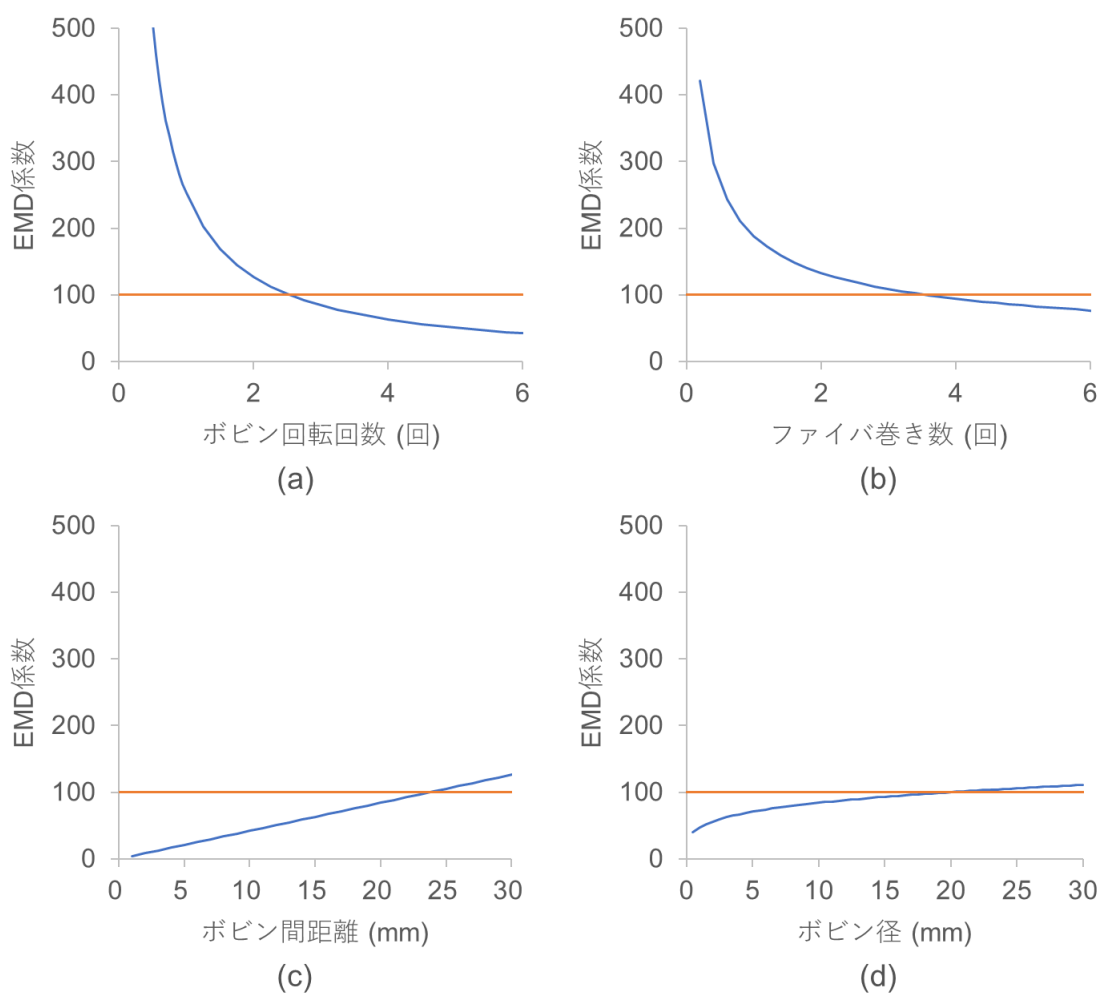


図 5-26 VMC の各種パラメータに対する EMD 係数

条件はこれらのパラメータで算出される EMD 係数 (EMDc) が特定の値を下回る  
ときに満たされる。EMD 到達時の EMDc の値はファイバ種により異なっており、SI-  
MMF では EMDc < 100 で EMD に到達する。EMDc は以下の式により算出される。

$$\text{EMDc} = \frac{FDP^{\frac{1}{4}}}{NoR \cdot R^{\frac{1}{2}}} \quad (5.7 - 8)$$

図 5-26 に各種パラメータ変化に対する EMDc を示す。パラメータは以下の数値を  
基準にして、指定したパラメータのみを変数としている：F = 15.9、P = 10、R = 5、  
D = 20、NoR = 3。それぞれのパラメータを調整することで EMD を作成することが  
可能となる。それぞれのパラメータはファイバにかかる応力が大きくなるように調  
整することで EMD に近づいていく。ボビン径P、ボビン間距離Dを小さくすること  
で EMD 化が促進されるため、VMC の更なる小型化が可能であることを示している。  
その場合、ファイバループ巻き数R、ボビン回転回数NoRの影響がさらに大きくなり  
可変制御を行う際の MPD 調整が粗くなると予想される。この結果は、VMC のツイ  
ストによって発生する応力が一部分に偏った場合には成立しない。また、一定以上  
の応力を与えるとファイバが破断することに注意する必要がある。破断しない場合  
においても過剰に応力を与えるとリーキーモードが発生し、損失が大きくなるため、  
EMD 到達条件に近い EMDc となる設計が推奨される。

## 5.7 おわりに

SI-PCFS のファイバループをツイスト処理することで FFP と NFP を可変制御する  
VMC を提案し、そのメカニズムについて述べた。本手法では、従来よりも減衰量を  
抑えて EMD を生成することが可能である。また、本手法で生成した EMD 光源は、  
測定再現性の高い基準光源として SI-PCFS ファイバリンクの損失テストに利用する  
ことが可能である。本手法は、SI-PCFS だけでなく、SI-MMF や SI-POF に適用でき  
ることを確認しており、原理上、あらゆる種類の SI-MMF に適用可能であると考え  
られる。また、GI-POF に対しても SI タイプのファイバと同様にモードスクランブ

ルの効果を示すことが明らかになった。GI-MMF に対してはモードフィルタリングの効果を示しており、高次モード割合の可変的な減衰が可能である。

## 第 6 章 可変モードコントローラによる伝送特性の改善

### 6.1 概要

SI-MMF に誘起されるモード分散は、伝送特性や帯域幅を著しく劣化させる。この問題を解決するために、VMC を用いてファイバ束にツイストによる応力を加えてモード結合とモード再分配を発生させることにより、伝送信号のパルス遅延を抑制した。伝送遅延を抑制することで、VMC にセットされたファイバの伝送特性と帯域幅を改善した。また、VMC にセットされたファイバのモードは、モード結合により EMD に達するため、VMC の NFP と FFP は安定していた。

### 6.2 はじめに

SI-MMF は異なるモード群に容易にモード結合するため、オフセット励振による伝送特性の劣化が起こりにくい。そのため、狙った伝送特性を得るためには、光の損失が無いように接続することに気を付ければ良く、アライメントが比較的容易である。高精度のアライメントを必要としない MPD 特性から、耐塵性が高く、アライメントコストが低いという特徴を有する。そのため、SI-MMF は車や工場内のような環境耐性が重要な短距離 LAN に広く使用される[101],[102]。その一方で、SI-MMF は必ずモード分散が発生するという屈折率構造に起因して伝送帯域が低いという欠点がある[103],[104]。SI-MMF に発生するモードはそれぞれ異なる速度でファイバ中を伝搬するため、ファイバの出力側に到達する光信号にモード間遅延によるモード分散が生じる。モード分散はファイバの伝送帯域を悪化させ、伝送システムの伝送特性を劣化させる[105]-[107]。SI-MMF は屈折率の構造上、どのようにファイバへ入射しても高次モードが発生し、それに起因するモード分散が発生するため、ミスアライメントに起因するディレイに変化が生じにくい[98]。このように、SI-MMF は取

扱いの容易さによるアドバンテージと引き換えに伝送帯域に厳しい制限があることが従来の課題とされていた。

本章では、VMCにより SI-MMF に対してねじり応力を与えてモード結合を誘発することで伝送信号のディレイを抑制し、伝送特性と伝送帯域を改善することを試みた。効率的にファイバにねじり応力を与えることができる VMC の光学的特性とメカニズムは第 5 章に記述している。ねじり応力は SI-MMF において多数のマイクロバンドを引き起こし、光散乱を誘発する[108]。散乱された光は複数のモードを形成し、異なるモード群に再分配される[109]-[113]。それらのモードが結合することによりそれぞれのモード群は次第に EMD に達する[114]。EMD になったモードを伝送することで伝送帯域幅が改善され、良好な伝送特性が得られるようになると期待される。しかしながら、これまで、モードスクランブラの伝送帯域や伝送特性について調べた報告はなかった。本研究でその特性を測定評価したので、詳細に述べる。

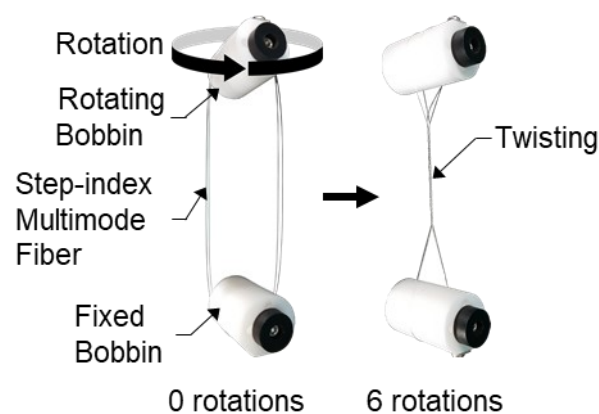


図 6-1 SI-MMF を使用した可変モードコントローラの概要。左は回転回数 0 の時、右は回転回数 6 の時で、2つのボビンの間にファイバを捻り合わせている。Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

### 6.3 検証システム

#### 6.3.1 ツイストタイプ可変モードコントローラ

SI-MMF のモード制御を行うための VMC の構成を述べる。図 6-1 に VMC の概要を示す。VMC は、回転ボビン、固定ボビン、SI-MMF から構成される。SI-MMF は、直径  $50\ \mu\text{m}$  のガラスコア、直径  $125\ \mu\text{m}$  のガラスクラッド、直径  $250\ \mu\text{m}$  のポリマーコーティング、0.22 の NA から構成され、ボビンの直径は  $10\ \text{mm}$  であり、二つのボビンの中心間の距離は  $100\ \text{mm}$  である。回転ボビンと固定ボビンに長さ  $2\ \text{m}$  の SI-MMF パッチコードを 3 回巻きつけ、SI-MMF ループを作成する。次に、上側のボビンを 0 - 6 回回転 ( $NoR\ 0\ -6$ ) させて、ファイバーループをツイストする。このとき、 $NoR\ 0$  は通常の使用状況における SI-MMF パッチコード単体と同じ状態である。ツイストによってファイバーループが変形し、様々な応力が発生する。回転ボビンには、SI-MMF に一定の張力を付与するための定荷重ばね  $5.9\ \text{N}$  が取り付けられている。

#### 6.3.2 オシロスコープ計測システム

図 6-2 Exp.1 に VMC を用いたオシロスコープによる伝送特性測定システムの構成を示す。パルスパターングジェネレータに同軸ケーブルを用いて VCSEL (1784、ニュー

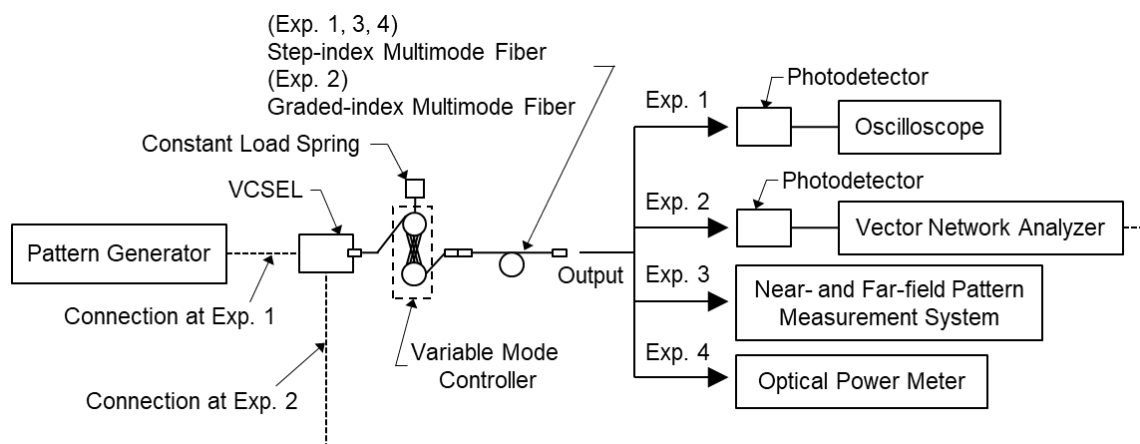


図 6-2 可変モードコントローラを用いた伝送システムのレイアウト: Exp.1 はオシロスコープを用いた伝送特性測定システム、Exp.2 はベクトルネットワークアナライザを用いた S パラメータ測定システム、Exp.3 は NFP・FFP 測定システム、Exp.4 は挿入損失測定システムである。Exp.1 と Exp.2 では、VCSEL にパターングジェネレータとベクトルネットワークアナライザがそれぞれ接続される。Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

ーポート)に接続した。VMCをVCSELに接続し、VMCとフォトディテクタ(PD: Photodetector)(1580-B、ニューポート)を長さ2m SI-MMFで接続し、PDを同軸ケーブルでオシロスコープに接続した。パルスパターンジェネレータは、10.3125 Gbpsの伝送レート、擬似ランダム・ビット・シーケンス(PRBS: Pseudo-random bit sequence)  $2^{15}-1$ 、ノンリターンゼロ(NRZ: Non return to zero)の信号を発生させた。

### 6.3.3 Sパラメータ計測システム

図6-2 Exp. 2にベクトルネットワークアナライザ(VNA: Vector network analyzer)によるSパラメータ測定システムの構成を示す。VNA(MS4642B, Anritsu)の2つのポートに同軸ケーブルをそれぞれ接続し、それぞれの同軸ケーブルでVCSELとPDを接続した。続いて、VCSELとPDを2m GI-MMFで接続して、Sパラメータを

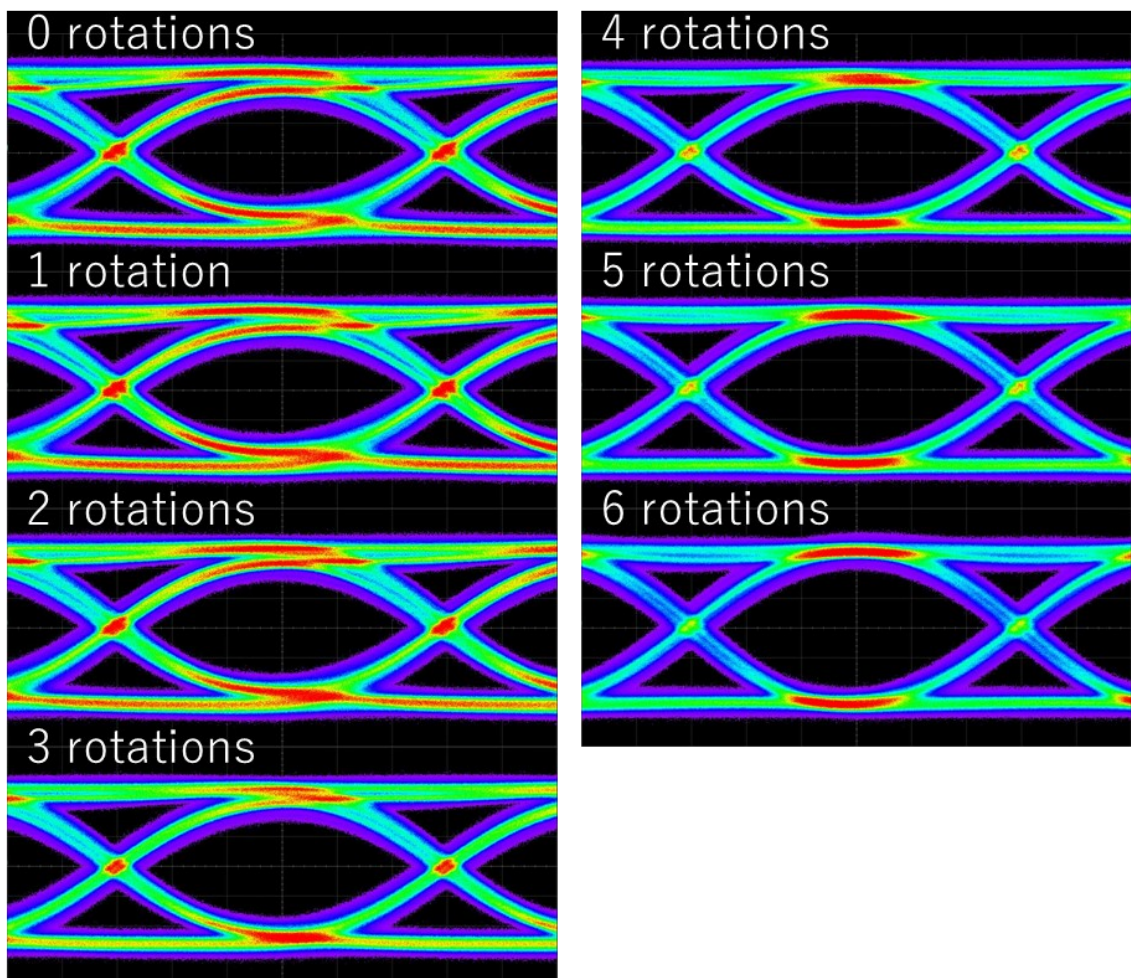


図 6-3 可変モードモードコントローラの回転回数に対する伝送系のアイパターン。Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics



測定し、リファレンスとした。GI-MMF と PD の間に VMC を接続することで、VMC の S パラメータを測定した)。VMC の周波数スイープは 10 MHz–20 GHz とした。

#### 6.3.4 Near- and far-field patterns 及び挿入損失測定システム

図 6-2 Exp. 3 に VMC の NFP と FFP、および Exp.4 に挿入損失の測定システムを示す。VMC を VCSEL に接続し、VMC から放射される光を NFP あるいは FFP 測定装置 (M-Scope Type F、Type I、シナジーオプトシステムズ) で測定した。また、VCSEL

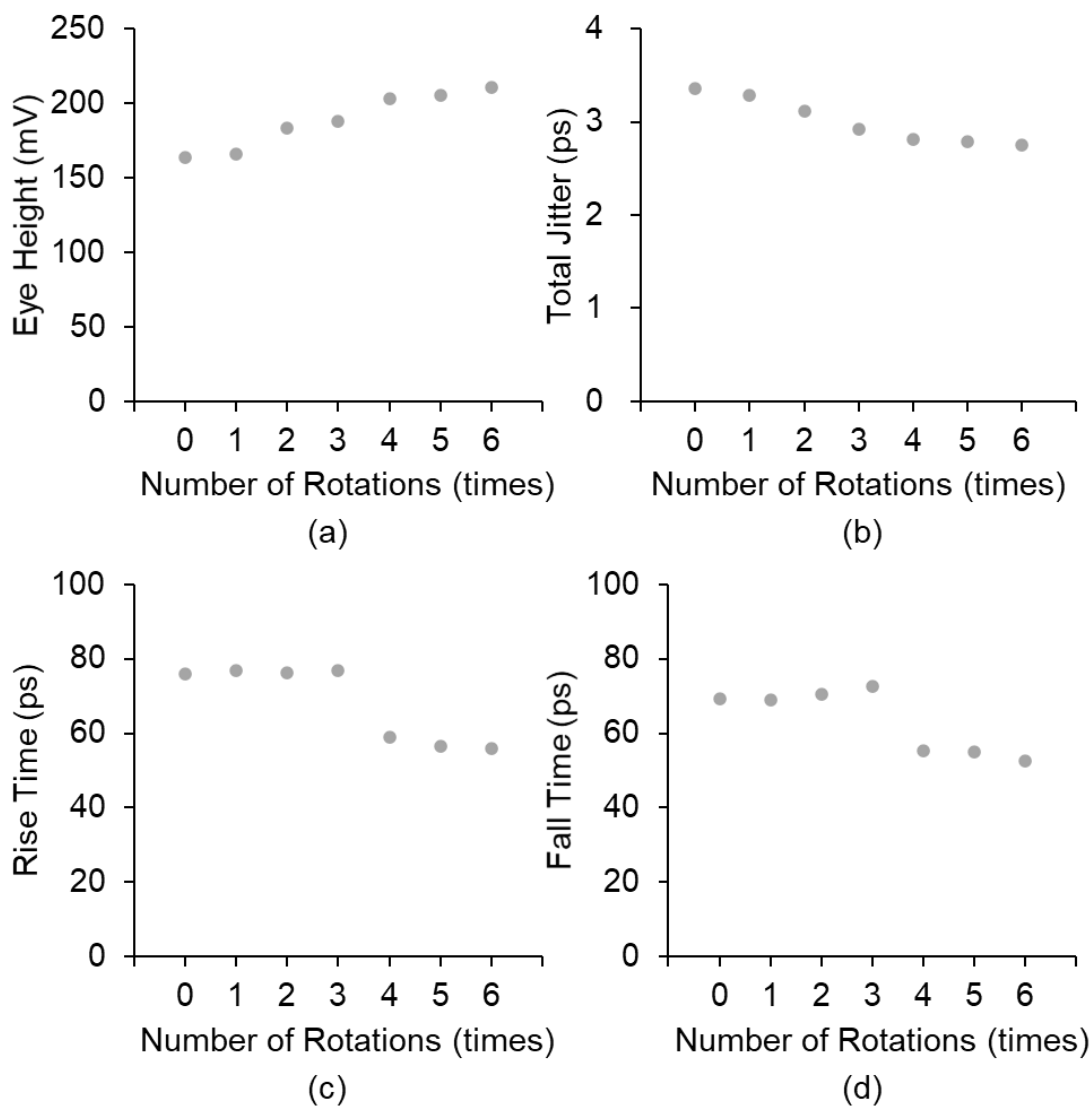


図 6-4 可変モードコントローラの回転回数に対する伝送特性の変化：a)アイ高さ、(b)トータルジッタ、(c)立ち上がり時間、(d)立下がり時間。Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

を VMC に接続し、続いてパワーメータに接続して挿入損失を測定した。VCSEL の波長は 850 nm である。

## 6.4 検証結果

### 6.4.1 アイパターン

オシロスコープ測定結果を解析することにより VMC に搭載した SI-MMF の伝送特性パラメータが得られた。図 6-3 に VMC のそれぞれの NoR に対する伝送システムのアイパターンを示す。VMC の NoR の増加により、アイ開口が広がっている。図 6-4 に VMC のそれぞれの NoR に対するアイパターンから得られたアイ高さ、トータルジッタ、立ち上がり時間、立下り時間を示す。VMC の NoR 0 で立ち上がり時間 75.8 ps だったが、NoR 4 で 59.1 ps に減少し、NoR 6 で 55.8 ps に減少した。立下り時間も同様の傾向で、NoR 0 から 6 の増加により、69.4 ps から 52.6 ps に減少した。アイ高さは NoR 0 で 163.9 mV であり、NoR の増加とともに増加していき、NoR 6 で 210.8 mV になった。トータルジッタは NoR 0 から 6 の増加により 3.4 ps から 2.8 ps に減少した。図 6-5 に VMC の NoR に対する Q-factor を示す[115]-[118]。また、図 6-

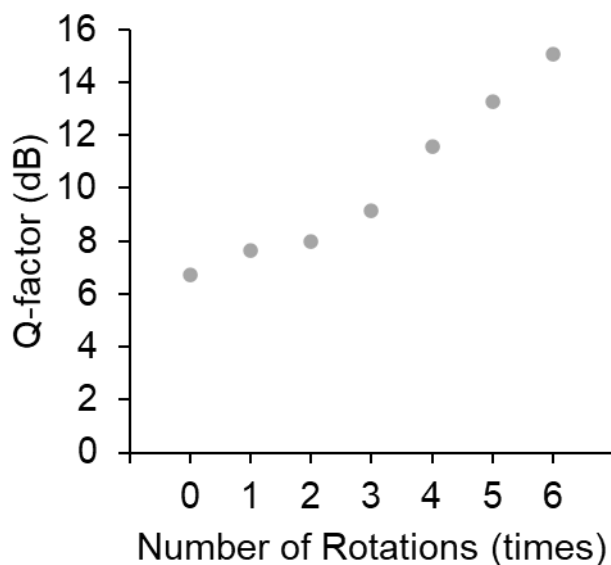


図 6-5 可変モードコントローラの回転回数に対する Q-factor の変化。Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

6 に Q-factor から算出された VMC の  $NoR$  に対するビット誤り率 (BER : Bit error rate) を示す。Q-factor は  $NoR$  0 から 6 の増加により 6.7 から 15.1 dB に増加した。BER は  $NoR$  0 から 6 の増加により  $9.9 \times 10^{-12}$  から  $1.3 \times 10^{-51}$  に減少した。

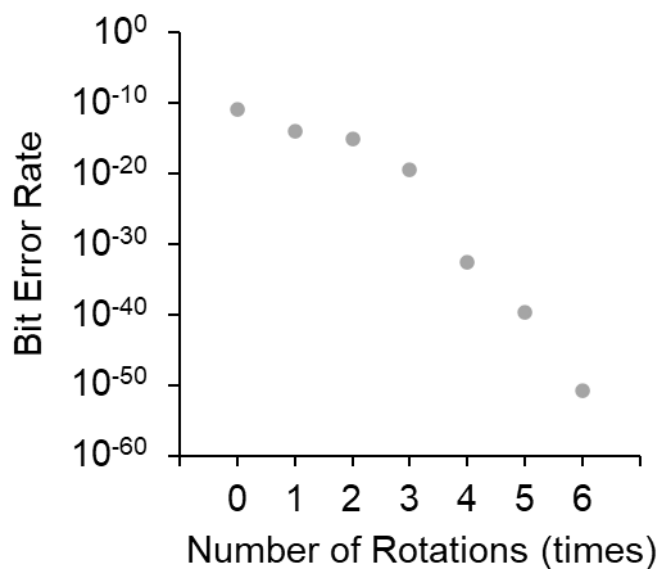


図6-6 可変モードコントローラの回転回数に対するBERの変化。Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

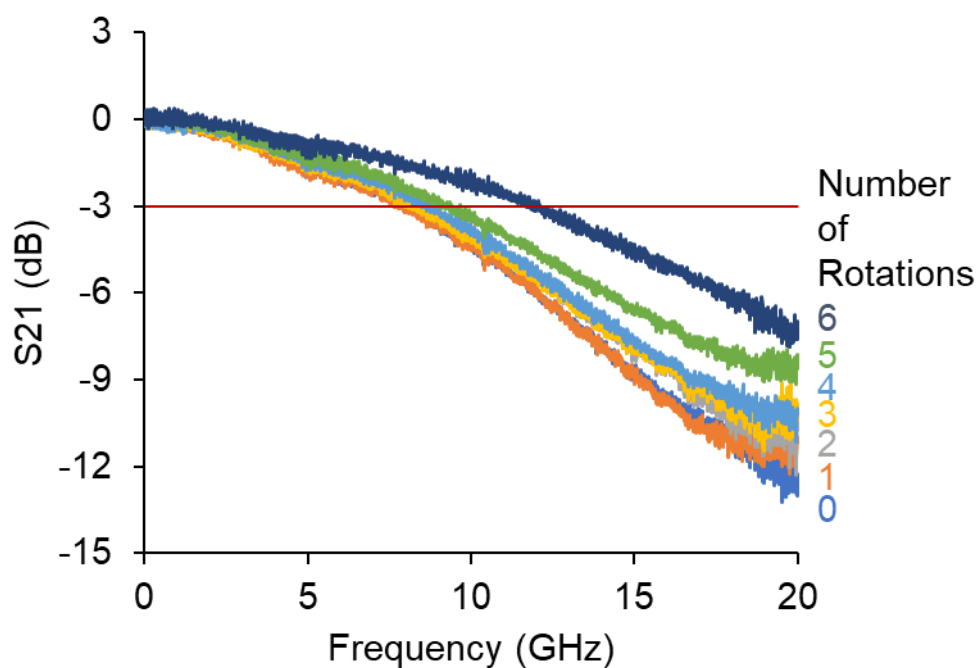


図 6-7 可変モードコントローラの回転回数に対する S-21 パラメータの変化。Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

### 6.4.2 S パラメータ

図 6-7 に VMC の S-21 パラメータ測定結果を示す。-3 dB 周波数は  $NoR$  0, 1 で 7.7 GHz だった。さらに  $NoR$  を増やしていくと -3 dB 周波数は増加し、 $NoR$  2 で 8.3 GHz、3 で 8.0 GHz、4 で 8.5 GHz、5 で 9.1 GHz、6 で 11.7 GHz となった。

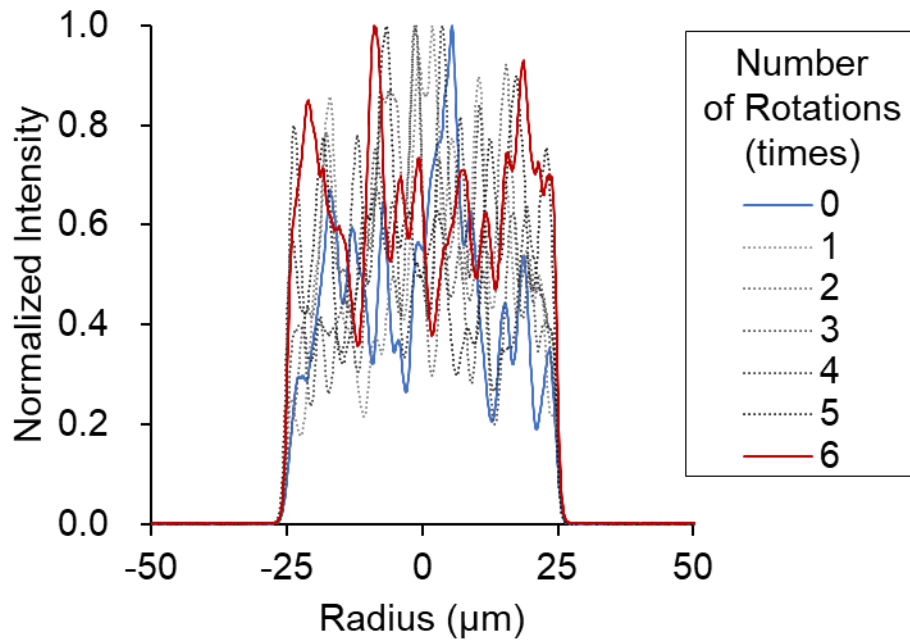


図 6-8 可変モードコントローラの回転回数に対する NFP の変化。Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

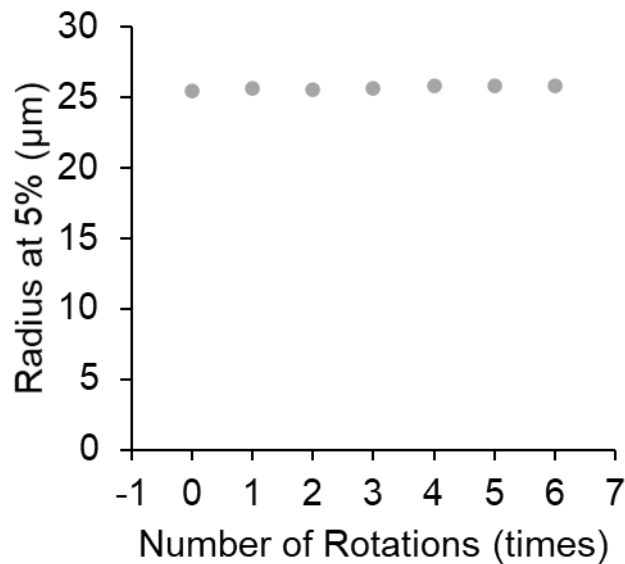


図 6-9 可変モードコントローラの回転回数に対する出射光半径 (5%強度時) の変化。Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

### 6.4.3 Near- and far-field patterns 及び挿入損失

VMC の  $NoR$  に対する NFP と FFP の変化を測定した。図 6-8 に VMC の  $NoR$  0 から 6 の NFP の一次元プロファイルを示す。図 6-9 に NFP の一次元プロファイルから得られた VMC のそれぞれの  $NoR$  に対する 5%強度の出射光半径を示す。5%強度の出射光半径は  $NoR$  0 から 6 でほとんど変化せず、25.5 から 25.8  $\mu\text{m}$  の変化幅だった。図 6-10 に VMC の  $NoR$  0 から 6 の時の FFP の一次元プロファイルを示す。図 6-11 に FFP の一次元プロファイルから得られた VMC のそれぞれの  $NoR$  に対する 5%強度の放射角を示す。5%強度の放射角は  $NoR$  0 で 10.3°、 $NoR$  6 で 9.6°となり、 $NoR$  の増加によりわずかに減少した。

図 12 に VMC の挿入損失測定結果を示す。ここで、 $NoR$  0 の挿入損失をリファレンスとした。 $NoR$  が増加とともに挿入損失は増加していき、 $NoR$  0 で 0.0 dB から 6 回で 0.7 dB となった。

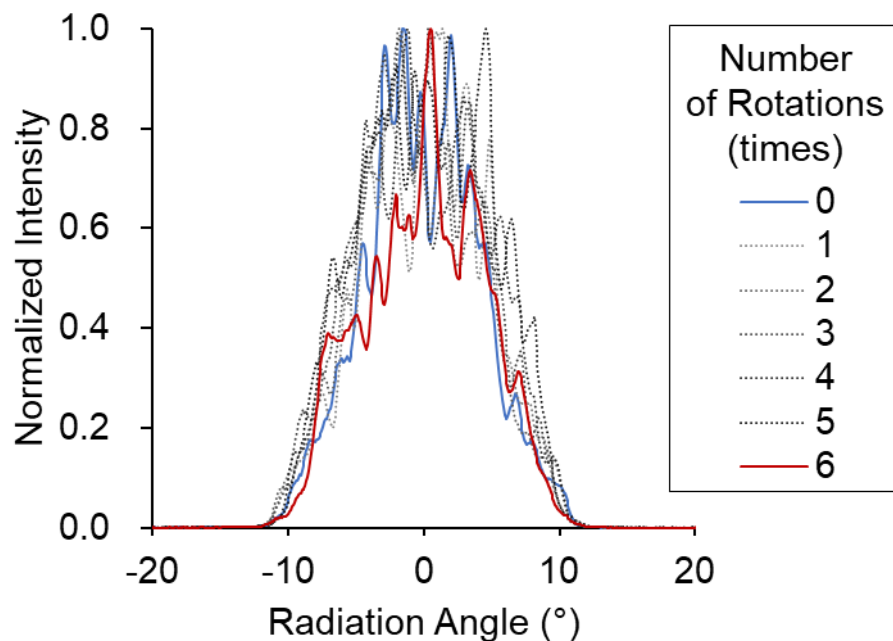


図 6-10 可変モードコントローラの回転回数に対する FFP の変化。Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

## 6.5 考察

VMC を用いて SI-MMF のモードを制御し、伝送特性を改善することを試みた。

光伝送システムを構築し、アイパターンを測定したところ、VMC の *NoR* 0 回で、帯域不足の特徴である緩やかな立ち上がり立ち下りの波形を観測した（図 3 参照）。*NoR* 0 回は通常の使用環境における SI-MMF パッチコード単体に相当する。VMC の *NoR* を増やしていくと、アイパターンは改善していき、良好なアイ開口を示すようになった。Q-factor は 6.7 から 15.1 dB への著しい改善が見られている。これを BER に換算すると  $9.9 \times 10^{-12}$  から  $1.3 \times 10^{-51}$  への改善となり、伝送系の信頼性向上に高い効果を示している。S-21 パラメータでは *NoR* の増加により -3 dB 周波数のシフトが見られる。特に *NoR* 6 回目での改善が著しい。

伝送特性劣化の原因は光伝搬途中にランダムに発生するモード結合に起因すると推測される。VMC により SI-MMF がモードスクランブルされた場合、モード結合が起こることで MPD は次第に EMD に近づいていく。その後、EMD に到達すると、それ以上のモードの結合が起こりにくくなる[119]。一方、VMC を使用しない場合、モード結合はゆっくりと進行するため、長距離伝送でないと EMD に到達しない。そ

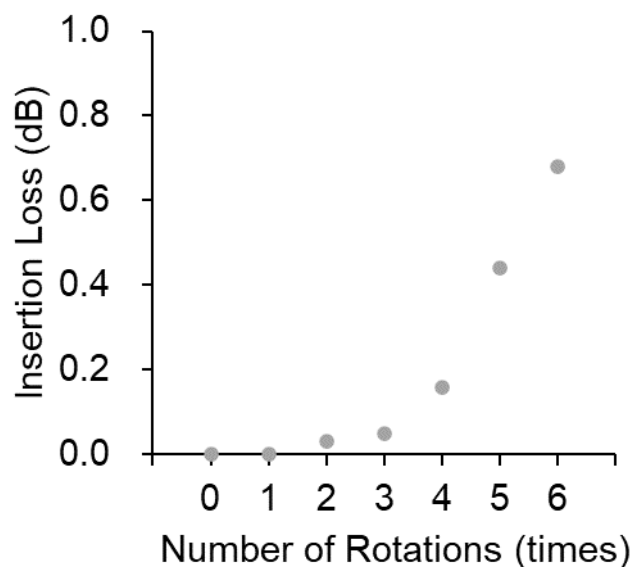


図 6-12 可変モードコントローラの回転回数に対する挿入損失の変化。Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

のため、先に出したパルス信号と後に出したパルス信号の間でモード結合が起こり、ディレイが大きくなる。

本検証において NFP と FFP の変化は VMC の *NoR* によらずほとんど起こっていない。FFP がほとんど変化しないという結果から、入射時の MPD を保ったまま、低次モードと高次モード間の結合のみが起こっていると予想される。挿入損失は *NoR* が増加すると少しずつ増加していき 6 回で 0.7 dB となっている。この値は伝送システム全体で考えた場合、低損失であり伝送品質への影響は十分に小さい[120]。したがって、VMC は伝送特性の改善には有効であるが、NFP や FFP の特性は変わっていない。しかし、この結果は励振条件により異なることが予想される。例えば、励振条件が LML や HML であった場合、NFP と FFP の特性は EMD に近づくように変化する。

VMC により、MPD を EMD にしてパルス間のモード結合が起こらないようにすることで、伝送特性の改善するメカニズムについて述べた。もしオフセット励振などをした場合、通常であれば、それによって発生する高次モードが、パルス間モード結合とモード分散を起こすことで伝送特性を悪化させる。しかし、VMC を使用すると、MPD は光入射後すぐに EMD に達するため、励振条件の違いによる悪影響を伝送特性に与えにくい。そのため、より長尺の SI-MMF を VMC に搭載する場合においても、伝送特性が改善されると考えられる。したがって、SI-MMF のアドバンテージである取扱いの容易さを損なうことなく、従来の課題であった伝送帯域の厳しい制限を改善することが可能となる。

## 6.6 おわりに

VMC を用いて SI-MMF にねじり応力を与えることでモードスクランブルを発生させ、伝送特性を改善することができた。モードスクランブルによってアイ高さ、トータルジッタ、立ち上がり時間、立ち下がり時間、Q-factor が改善された。Q-factor は 6.7 から 15.1 dB へ著しく改善し、BER は  $9.9 \times 10^{-12}$  から  $1.3 \times 10^{-51}$  に改善した。

また、-3 dB 帯域は 7.7 GHz から 11.7 GHz に改善した。NFP と FFP は VMC によるねじり応力付与の有無でほとんど変化していなかった。VMC による減衰は NoR 6 回時の最大値 0.7 dB と低かった。シンプルな構造の VMC により、ファイバのディレイを改善するという、従来のアプローチとは異なる方法で伝送特性を改善することに成功した。



## 第 7 章 総括と今後の課題

### 7.1 総括

本論文の主な動機は、SI-MMF の伝送システムにおいて、損失・動作テストを実施するために必要な MPD に関する課題を解決することであった。SI-MMF を光ファイバリンクに使用した伝送システムでは、システムの動作を保証するためにファイバ同士の接続損失を損失テストとして測定することが推奨されている。本研究では、励振光の MPD を設計するための設計コンセプトを提案するにあたり行った一連の検証により、シミュレーションによる解析・設計、VMC を利用した実測検証・システム動作改善という伝送システムの MPD に関する一連のサイクルを確立することに成功した。

第 3 章では、伝送システムの損失テストに使用する励振光のモード分布をデザインするコンセプトを提案した。本論文では、実施例として SI-PCSF の励振モード分布の設計を示した。励振モード分布の規定は、EAF 境界条件によるテンプレートが使用される。提案する励振モード分布デザインコンセプトを使用することで、光軸垂直方向オフセットが $\pm 40 \mu\text{m}$ 、光軸方向オフセットが  $100 \mu\text{m}$  のアライメント範囲に対して、 $2.0 \text{ dB}$  以下の最大接続損失と $\pm 0.20 \text{ dB}$  の EAF 変動による損失差の要件を満たす EAF 境界条件を設計により確立した。

第 4 章では、MMF 全般に適用可能なシミュレーションモデルを提案し、シミュレーションと実測結果の比較により、シミュレーション方法が妥当であることを確認した。検証に使用したファイバ種は SI-MMF、GI-MMF、SI-PCSF で、それぞれ同じファイバ種同士の接続に加えて、SI-MMF と GI-MMF の異種ファイバ接続についても検証した。シミュレーションモデルは、励振ファイバの FFP と NFP を実測して、それらのパラメータをシミュレーションでモデリングする方法である。シミュレー

シジョンと実測を比較し、いずれのファイバ種を使用した場合でも計算結果と実測結果はよく一致することを実証した。

第 5 章では、伝送システムの損失テストに使用可能な励振光を作成するためのモードコントローラを提案した。SI-PCSF の VMC を作製し、MPD を RML から EMD まで可変制御できることを確認した。VMC による減衰は低く、従来の EMD 作成手段である長距離伝搬手法の 1/5 程度だった。また、VMC に SI-MMF、SI-POF を適用できることを実験的に確認し、高い汎用性があることを実証した。VMC のメカニズムは複雑であったが、モード結合要素を切り分けることで明らかになった。

第 6 章では、伝送システム動作テスト時の MPD の変動に起因する不安定な動作を解消するための VMC 特性について説明した。VMC を用いて SI-MMF のモード状態を EMD にすることで MPD を安定化させる。安定化した MPD を伝送することで過渡的なモード結合が起こらないようにし、モード分散によるディレイが抑制される。伝送特性の改善効果はアイパターンと S パラメータを解析することで確認された。具体的には VMC の導入によって、Q-factor は 6.7 から 15.1 dB、BER は  $9.9 \times 10^{-12}$  から  $1.3 \times 10^{-51}$  に改善した。また、-3 dB 帯域は 7.7 GHz から 11.7 GHz に改善した。

## 7.2 今後の課題

本論文では、SI-MMF 伝送システムを構築するための MPD の設計・検証サイクルに必要な一連の研究成果を記載している。伝送システムは今後様々な用途に導入されていき、その通信速度の高速化が進められるだろう。SI-MMF は耐環境性が高く、デバイスコストが比較的安価であり、導入実績により信頼を得ている通信媒体として今後さらなる利用拡大が見込まれる。本研究をさらに発展させるための課題を以下に記す。

本論文では、一接続点での MMF 接続損失シミュレーションモデルを提案した。伝送システムはネットワークトポロジーの形式により、複数の接続点による従属接

続が必要となることが予測される。幾何光学に基づくシミュレーションはモード結合によるモード再分配が計算できないため、接続点が増加するとシミュレーションと実測結果に差が生じることが懸念される。波動理論に基づくシミュレーションでモード結合の理論計算は可能であるが、実用時に起こりえる、外的要因と内的要因を含めた計算は困難である。これらの課題を解決する従属接続シミュレーションモデルの構築が望まれる。

本論文で提案した MMF 接続損失シミュレーションは実測結果と高い整合性を示していた。これは通常の測定環境において概ね一致するが、MMF のモーダルノイズによる測定不確かさにより実測値にばらつきが発生し、シミュレーションと実測値に差が生じる可能性があることが報告されている。モーダルノイズによる不確かさの影響を実証し、理論的な考察により励振光のモード分布デザインコンセプトにフィードバックすることにより、より厳密な MPD 設計が可能になることが期待される。

VMC による SI-MMF の伝送特性改善が示された。MPD が VMC により EMD に到達することでモード分散によるディレイを改善する方法であるが、そのパルスパターンは確認できていない。励振光にインパルス光源を使用して励振光の MPD によるパルスパターンの違いを確認することで、SI-MMF が伝搬途中でどのようにモード結合とモード再分配が起こり、それがパルス信号にどのように影響を与えているか明らかにすることが望まれる。

## 参考文献

### 第 1 章

- [1] K. Matheus, and T. Königseder, *Automotive Ethernet*, Cambridge University Press, 2014.
- [2] 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.
- [3] G. M. Choudhury et al., “Standards, Technology, Market and Industry Trends and Future Direction for MMF. Current Market & Future Trends,” 2000.
- [4] 杉山竹三, 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 11 月.
- [5] T. Kibler, S. Poferl, G. Böck, H. P. Huber, and E. Zeeb, “Optical data buses for automotive applications,” *J. Light. Technol.*, vol. 22, no. 9, pp. 2184–2199, 2004.
- [6] 河内正夫, “石英系光ファイバ技術発展の系統化調査,” pp. 14–15, 1382.
- [7] P. Pepeljugoski, D. Kuchta, and A. Risteski, “Modal noise BER calculations in 10-Gb/s multimode fiber LAN links,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2586–2588, 2005.
- [8] T. Ishigure, H. Endo, K. Ohdoko, K. Takahashi, and Y. Koike, “Modal bandwidth enhancement in a plastic optical fiber by W-refractive index profile,” *J. Light. Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 1754–1762, 2005.
- [9] B. Kose *et al.*, “Characterization of Modal Dependence of MMF Chromatic Dispersion for Wideband MMF Modal Dependence of Chromatic Dispersion on MMFs,” in *Proc. IWCS*, 2015.
- [10] G. Yabre, “Comprehensive theory of dispersion in graded-index optical fibers,” *J. Light. Technol.*, vol. 18, no. 2, pp. 166–177, 2000.

- [11] K. P. Ho and J. M. Kahn, *Mode Coupling and its Impact on Spatially Multiplexed Systems*, Sixth Edit. Elsevier Inc., 2013.
- [12] C. Xia, M. Ajgaonkar, and W. Rosenkranz, "On the performance of the electrical equalization technique in MMF links for 10-Gigabit Ethernet," *J. Light. Technol.*, vol. 23, no. 6, pp. 2001–2011, 2005.
- [13] J. Park, S. Mackay, and E. Wright, "Local area networks (LANs)," *Pract. Data Commun. Instrum. Control*, vol. 21, no. 5, pp. 291–324, 2007.
- [14] M. S. Lans *et al.*, "Development of System Specification for Laser-Optimized 50-um Multimode Fiber for Multigigabit Short-Wavelength LANs," *J. Light. Technol.*, vol. 21, no. 5, pp. 1256–1275, 2003.
- [15] J. Bohata, S. Zvanovec, T. Nemecek and M. Komanec, "Detailed analysis of multi-mode optical components for utilization in data centers," *2017 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, St. Pierre, 2017, pp. 45-49.
- [16] B. Drljača, S. Savović, and A. Djordjevich, "Calculation of the impulse response of step-index plastic optical fibers using the time-dependent power flow equation," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 116, no. 4, pp. 658–660, 2009.
- [17] S. Kobayashi, K. Horiguchi, Y. Hyakutake, and O. Sugihara, "Evaluation of Modal Power Distribution of Automotive Optical Gigabit Ethernet Connections," *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 17, pp. 3664–3670, 2017.
- [18] 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.
- [19] A. G. Hallam, "Mode control in multimode optical fibre and its applications," Birmingham, Aston University, 2007, Ph. D. thesis.

- [20] M. Kagami, A. Kawasaki, and M. Yonemura, "Modal power distribution in short reach optical communications using step-index-type multimode optical fibers," *ICSJ 2013 - IEEE CPMT Symp. Japan*, 2013.
- [21] D. Seibl, M. Böhm, and O. Strobel, "Polymer-optical-fiber data bus technologies for MOST applications in vehicles," *ICTON-MW 2008 - Int. Conf. Transparent Opt. Networks "Mediterranean Winter" 2008 - Conf. Proc.*, pp. 1–6, 2008.
- [22] A. Grzempa, MOST–The Automotive Multimedia Network: From MOST 25 to MOST 150. Poing, Germany: Franzis Verlag GmbH, 2011.
- [23] 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.
- [24] J. M. Senior, S. D. Cusworth, N. G. Burrow, and A. D. Muirhead, "Misalignment losses at multimode graded-index fiber splices and GRIN rod lens couplers," *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 7, pp. 977-983, 2009.
- [25] 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.
- [26] T. Satake *et al.*, "Low - Loss MM MPO Connectors Under EF Launched Power Condition Theoretical simulation and experimental results," *in Proc. IWCS*, 2017, p.495-509.
- [27] X. Liu, J. Guo, G. Li, N. Chen, and K. Shi, "Research on the influence of alignment error on coupling efficiency and beam quality for Gaussian beam to multimode fiber," *Results Phys.*, vol. 12, no. 3888, pp. 1044–1049, 2019.
- [28] D. H. Richards *et al.*, "Modeling methodology for engineering SI-POF and connectors in an avionics system," *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 3, pp. 468–475, 2013.
- [29] S. Werzinger, C. A. Bunge, S. Loquai, and O. Ziemann, "An analytic connector loss model for step-index polymer optical fiber links," *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 16, pp. 2769–2776, 2013.

[30] D. Gloge, “Offset and Tilt Loss in Optical Fiber Splices,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 55, no. 7, pp. 905–916, 1976.

[31] 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. 1–6, 2017.

## 第 2 章

[32] 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. Light. Technol.*, vol. 34, no. 3, pp. 943–951, 2016.

[33] S. Kobayashi and O. Sugihara, “Encircled Angular Flux: A New Measurement Metric for Radiating Modal Power Distributions from Step-Index Multimode Fibers,” *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 16, pp. 3803–3810, 2016.

[34] 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.

## 第 3 章

[35] D. U. Kim, S. C. Bae, J. Kim, T. Y. Kim, C. S. Park, and K. Oh, “Hard polymer cladding fiber (HPCF) links for high-speed short reach  $1 \times 4$  passive optical network (PON) based on All-HPCF compatible fused taper power splitter,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, no. 11, pp. 2355–2357, 2005.

[36] B. Drljača, A. Simović, S. Savović, and A. Djordjevich, “Influence of wavelength on the bandwidth of W-type plastic-clad silica optical fibers,” *Laser Phys.*, vol. 30, no. 2, pp. 1–7, 2020.

[37] Product specifications—Sectional specification for category A3 multimode fibres, IEC 60793-2-30 ed.4.0, Jun. 2015

- [38] 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, p. 876-883, 2017.
- [39] A. Larsson *et al.*, "1060 nm VCSELs for long-reach optical interconnects," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 44, no. May 2017, pp. 36–42, 2018.
- [40] X. Li *et al.*, "µLED-Based Single-Wavelength Bi-directional POF Link with 10 Gb/s Aggregate Data Rate," *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 17, pp. 3571–3576, 2015.
- [41] J. A. Tatum *et al.*, "VCSEL-based interconnects for current and future data centers," *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 4, pp. 727–732, 2015.
- [42] B. Cimoli, J. M. Estaran Tolosa, G. A. Rodes Lopez, J. J. Vegas Olmos, and I. T. Monroy, "100G shortwave wavelength division multiplexing solutions for multimode fiber data links," *Opt. Appl.*, vol. 46, no. 3, pp. 409–419, 2016.
- [43] A. Larsson *et al.*, "Investigation of 60 Gb/s 4-PAM Using an 850 nm VCSEL and Multimode Fiber," *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 16, pp. 3825–3836, 2016.
- [44] C. Kottke *et al.*, "High-Speed DMT and VCSEL-Based MMF Transmission Using Pre-Distortion," *J. Light. Technol.*, vol. 36, no. 2, pp. 168–174, 2018.
- [45] D. Richards *et al.*, "Overcoming challenges in large-core SI-POF-based system-level modeling and simulation," *Photonics*, vol. 6, no. 3, p. 88, 2019.
- [46] D. Gloge, "Optical Power Flow in Multimode Fibers," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 51, no. 8, pp. 1767–1783, 1972.
- [47] 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.
- [48] S. Savović, A. Djordjevich, A. Simović, and B. Drljača, "Equilibrium mode distribution and steady-state distribution in 100–400 µm core step-index silica optical fibers," *Appl. Opt.*, vol. 50, no. 21, p. 4170, 2011.



- [49] J. Mateo, M. A. Losada, and A. López, “POF misalignment model based on the calculation of the radiation pattern using the Hankel transform,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 6, p. 8061, 2015.
- [50] J. Arrue, G. Aldabaldetrekú, G. Durana, J. Zubia, I. Garcés, and F. Jiménez, “Design of mode scramblers for step-index and graded-index plastic optical fibers,” *J. Light. Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 1253–1260, 2005.
- [51] S. Savović, A. Djordjevich, P. W. Tse, J. Zubia, J. Mateo, and M. A. Losada, “Determination of the width of the output angular power distribution in step-index multimode optical fibers,” *J. Opt.*, vol. 12, no. 11, p. 115405, 2010.
- [52] S. Werzinger and C.-A. Bunge, “Statistical analysis of intrinsic and extrinsic coupling losses for step-index polymer optical fibers,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 17, p. 22318, 2015.
- [53] Mode Scrambler Requirements for Overfilled Launching Conditions to Multimode Fibers TIA-455-54, Aug. 1998.
- [54] Differential Mode Delay Measurement of Multimode Fiber in the Time Domain, TIA-455-220, Jan. 2003.
- [55] Detail Specification for 850-nm Laser- Optimized, 50- $\mu\text{m}$  Core Diameter/125- $\mu\text{m}$  Cladding Diameter Class Ia Graded-Index Multimode Optical Fibers, TIA-492AAAC, Nov. 2009
- [56] L. Raddatz, I. H. White, D. G. Cunningham, and M. C. Nowell, “Influence of restricted mode excitation on bandwidth of multimode fiber links,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 10, no. 4, pp. 534–536, 1998.
- [57] Information technology — Implementation and operation of customer premises cabling — Part 3: Testing of optical fibre cabling, ISO/IEC 14763-3, ed. 2.0, Jun. 2014.

#### 第 4 章

- [58] K. Horiguchi, T. Iikubo, Y. Beppu, Y. Hyakutake, and O. Sugihara, “Low-Attenuation Variable Mode Control Using Twist Processing for Step-Index Optical Fiber Loops,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 31, no. 15, pp. 1217–1220, 2019.
- [59] S. Savović *et al.*, “Temperature dependence of mode coupling in low-NA plastic optical fibers,” *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 1, pp. 89–94, 2015.
- [60] S. Savović and A. Djordjevich, “Optical power flow in plastic-clad silica fibers,” *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 36, p. 7588, 2007.
- [61] S. Werzinger, C. A. Bunge, S. Loquai, and O. Ziemann, “Application and experimental evaluation of an analytic connector loss model for SI-POF,” *Proc. 22nd Int. Conf. Plast. Opt. Fibers, POF 2013*, no. May 2014, pp. 193–198, 2013.
- [62] G. Jiang, R. F. Shi, and A. F. Garito, “Mode coupling and equilibrium mode distribution conditions in plastic optical fibers,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 9, no. 8, pp. 1128–1130, 1997.
- [63] A. Inoue, R. Furukawa, M. Matsuura, and Y. Koike, “Reflection noise reduction effect of graded-index plastic optical fiber in multimode fiber link,” *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 12, p. 3662, 2014.
- [64] A. Djordjevich and S. Savović, “Investigation of mode coupling in step index plastic optical fibers using the power flow equation,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 12, no. 11, pp. 1489–1491, 2000.
- [65] L. Yin, H. Huang, W. K. Chen, Z. Xiong, Y. C. Liu, and P. L. Teo, “Polishing of fiber optic connectors,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 6, pp. 659–668, 2004.

#### 第 5 章

- [66] W. Ha, S. Lee, Y. Jung, J. K. Kim, and K. Oh, “Acousto-optic control of speckle contrast in multimode fibers with a cylindrical piezoelectric transducer oscillating in the radial direction,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 20, pp. 17536–46, 2009.

- [67] S. Savović and A. Djordjevich, “Mode coupling in multimode step-index plastic-clad silica fibers with corrugated surfaces,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 97, pp. 400–404, 2017.
- [68] S. Savović and A. Djordjevich, “Mode coupling in bent and twisted step-index plastic-clad silica fibers,” *Laser Phys. Lett.*, vol. 17, no. 3, p. 035104, 2020.
- [69] フルカワエレクトリックノースアメリカインコーポレーテッド. シッドハース ラマチャンドラン, ミクハイル サメットスキー, ポール エス. ウェストブルック. 局所的に摂動を加えたモード変換器用光ファイバ. 特開 2009-145892. 2009-07-02.
- [70] ロフィン-ジナル レーザー ゲゼルシャフト ミット ベシュレンクテル ハフツング. サロカトヴェ アルト, ヤッピ ヤリ. 光ファイバ・モードスクランブラ及びその製造方法. 特表 2015-528135. 2015-09-24.
- [71] M. Ikeda, A. Sugimura, and T. Ikegami, “Multimode optical fibers: steady state mode exciter,” *Appl. Opt.*, vol. 15, no. 9, pp. 2116–2020, 1976.
- [72] 日本電気株式会社. 石川朗. モードスクランブラ. 昭 59-062803. 1984-04-10.
- [73] 古河電気工業株式会社. 梅村哲也. モードスクランブラ. 特開平 11-038255. 1999-02-12.
- [74] 三菱レイヨン株式会社. 市村清, 戸田正利, 高橋聡, 小宮正快. モードスクランブラ. 平 2-042407. 1990-02-13.
- [75] 三菱レイヨン株式会社. 岡田博司, 高橋聡. モードスクランブラ. 平 2-163707. 1990-0625.
- [76] J. N. McMullin, “Simulation and Measurement of Radiation Loss at,” *Lightwave*, vol. 8, no. 8, pp. 1250–1256, 1990.
- [77] Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 3-4: Examinations and measurements – Attenuation, IEC 61300-3-4 ed.3.0, Dec. 2012.

- [78] M. A. Losada, J. Mateo, I. Garcés, J. Zubía, J. A. Casao, and P. Pérez-Vela, “Analysis of strained plastic optical fibers,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 16, no. 6, pp. 1513–1515, 2004.
- [79] W. Ha, S. Lee, Y. Jung, J. K. Kim, and K. Oh, “Acousto-optic control of speckle contrast in multimode fibers with a cylindrical piezoelectric transducer oscillating in the radial direction,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 20, pp. 17536–17546, 2009.
- [80] 富士通株式会社. 佐々木和哉, 吉澤栄, 稲垣真也, 武田恵子, モード変換アダプタ, 平 2-048906. 1990-04-05.
- [81] 日立電線株式会社. 須永義則, 小林雅彦, モードコンディショナ. 特願平 11-033129. 1999-02-10.
- [82] 富士通株式会社. 鈴木紀夫, 守谷薫, 目崎明年, 鴨原正義, モード変換器の構造. 平 2-093606. 1990-04-04.
- [83] 富士通株式会社. 宮内榮三. モードスクランブラー. 昭 54-68254. 1979-06-01.
- [84] L. Su, K. S. Chiang, and C. Lu, “Microbend-induced mode coupling in a graded-index multimode fiber,” *Appl. Opt.*, vol. 44, no. 34, pp. 7394–7402, 2005.
- [85] J. Arrue, G. Aldabaldetrekú, G. Durana, J. Zubia, I. Garcés, and F. Jiménez, “Design of mode scramblers for step-index and graded-index plastic optical fibers,” *J. Light. Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 1253–1260, 2005.
- [86] M. Ikeda, Y. Murakami, and K. Kitayama, “Mode scrambler for optical fibers,” *Appl. Opt.*, vol. 16, no. 4, pp. 1045–1049, 1977.
- [87] 日本電信電話公社. 青山啓. 小型モードスクランブラ. 昭 53-126653. 1978-10-07.
- [88] 日立電線株式会社. 梶岡博, 佐藤東史. モードスクランブラ. 昭 61-013803. 1986-01-27.
- [89] General Photonics Corporation. L. Yan, L. Lin, X. Chen, X. S. Yao. Mode scrambling apparatus for multimode fiber. US 7,945,130 B2. 2011-05-17.

- [90] S. Halverson *et al.*, “AN EFFICIENT, COMPACT, and VERSATILE FIBER DOUBLE SCRAMBLER for HIGH PRECISION RADIAL VELOCITY INSTRUMENTS,” *Astrophys. J.*, vol. 806, no. 1, pp.1-9, 2015.
- [91] 日本電気株式会社. 石川朗. モードスクランブラ. 昭 59-33008. 1984-02-29.
- [92] 富士通株式会社. 有馬忠夫, 岡村浩司. モード変換器製造用ファイバ及びその製造方法並びに上記ファイバを用いたモード変換器. 平 4-152305. 1992-05-26.
- [93] E. I. Chaikina, S. Stepanov, A. G. Navarrete, E. R. Méndez, and T. A. Leskova, “Formation of angular power profile via ballistic light transport in multimode optical fibers with corrugated surfaces,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 71, no. 8, pp. 1–9, 2005.
- [94] S. Savović and A. Djordjevich, “Mode coupling in multimode step-index plastic-clad silica fibers with corrugated surfaces,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 97, pp. 400–404, 2017.
- 第 6 章
- [95] R. Olshansky, “Distortion Losses in Cabled Optical Fibers,” *Appl. Opt.*, vol. 14, no. 1, pp. 20–21, 1975.
- [96] D. Marcuse, “Coupled Mode Theory of Round Optical Fibers,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 52, no. 6, pp. 817–842, 1973.
- [97] A. F. Garito, J. Wang, and R. Gao, “Effects of Random Perturbations in Plastic Optical Fibers,” *Science*, vol. 281, pp. 962–967, 1998.
- [98] S. Savović and A. Djordjevich, “Method for calculating the coupling coefficient in step-index optical fibers,” *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 9, pp. 1477-1481, 2007.
- [99] S. Savović and A. Djordjevich, “Mode Coupling in Plastic-Clad Silica Fibers and Organic Glass-Clad PMMA Fibers,” *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 7, pp. 1290–1294, 2014.
- [100] S. Savović and A. Djordjevich, “Optical Fiber Technology Mode coupling and its influence on space division multiplexing in step-index plastic-clad silica fibers,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 46, no. August, pp. 192–197, 2018.

- [101] D. A. Messuri, G. D. Miller, and R. E. Steele, "A fiber optic connection system designed for automotive applications," *SAE Tech. Pap.*, pp. 39–45, 1989.
- [102] A. López-Lagunas *et al.*, "Bidirectional single fiber low-cost optoelectronic interconnect for automotive applications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 1, pp. 281–287, 2000.
- [103] L. G. Wright *et al.*, "Multimode nonlinear fiber optics: Massively parallel numerical solver, tutorial, and outlook," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 3, pp. 1–16, 2018.
- [104] M. A. Losada, J. Mateo, I. Garcés, J. Zubía, J. A. Casao, and P. Pérez-Vela, "Analysis of strained plastic optical fibers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 16, no. 6, pp. 1513–1515, 2004.
- [105] L. Raddatz, I. H. White, D. G. Cunningham, and M. C. Nowell, "An experimental and theoretical study of the offset launch technique for the enhancement of the bandwidth of multimode fiber links," *J. Light. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 324–331, 1998.
- [106] M. Webster, L. Raddatz, I. H. White, and D. G. Cunningham, "Statistical analysis of conditioned launch for Gigabit Ethernet links using multimode fiber," *J. Light. Technol.*, vol. 17, no. 9, pp. 1532–1541, 1999.
- [107] P. Pepeljugoski, S. E. Golowich, A. J. Ritger, P. Kolesar, and A. Risteski, "Modeling and simulation of next-generation multimode fiber links," *J. Light. Technol.*, vol. 21, no. 5, pp. 1242–1255, 2003.
- [108] L. Jeunhomme and J. P. Pocholle, "Mode Coupling in a Multimode Optical Fiber With Microbends," *Appl. Opt.*, vol. 14, no. 10, pp. 2400–2405, 1975.
- [109] A. G. Hallam, D. A. Robinson, and I. Bennion, "Mode control for emerging link performance standards," *IET Optoelectron.*, vol. 2, no. 5, pp. 175–181, 2008.
- [110] R. T. Schermer and J. H. Cole, "Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 43, no. 10, pp. 899–909, 2007.

- [111] S. Savović, A. Djordjevich, A. Simović, and B. Drljača, “A transmission length limit for space division multiplexing in step-index silica optical fibres,” *J. Mod. Opt.*, vol. 66, no. 16, pp. 1695–1700, 2019.
- [112] C. Schulze *et al.*, “Mode resolved bend loss in few-mode optical fibers,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 3, pp. 3170-3181, 2013.
- [113] W. Xiong, P. Ambichl, Y. Bromberg, B. Redding, S. Rotter, and H. Cao, “Principal modes in multimode fibers: exploring the crossover from weak to strong mode coupling,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 3, pp. 2709-2724, 2017.
- [114] M. Rousseau and L. Jeunhomme, “Numerical Solution of the Coupled-Power Equation in Step-Index Optical Fibers,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 25, no. 7, pp. 577–585, 1977.
- [115] W. M. Osman, K. Hammed Billal, and A. B. Al Nabi, “Bit Error Rate Performance for Optical Fiber System,” *J. Electr. Electron. Syst.*, vol. 07, no. 01, pp. 1–13, 2018.
- [116] D. Kajfez and E. J. Hwan, “Q-Factor Measurement with Network Analyzer,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 32, no. 7, pp. 666–670, 1984.
- [117] S. Norimatsu and M. Maruoka, “Accurate Q -Factor Estimation of Optically Amplified,” *J. Light. Technol. IEEE/OSA*, vol. 20, no. 1, pp. 19–27, 2002.
- [118] S. Ohteru and N. Takachio, “Optical signal quality monitor using direct Q-factor measurement,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 11, no. 10, pp. 1307–1309, 1999.
- [119] S. Savović, A. Djordjevich, B. Drljača, and A. Simović, “Equilibrium mode distribution and steady state distribution in step-index glass optical fibers,” *Acta Phys. Pol. A*, vol. 116, no. 4, pp. 655–657, 2009.
- [120] M. A. Losada, I. Garcés, J. Mateo, I. Salinas, J. Lou, and J. Zubía, “Mode coupling contribution to radiation losses in curvatures for high and low numerical aperture plastic optical fibers,” *J. Light. Technol.*, vol. 20, no. 7, pp. 1160–1164, 2002.

## 謝辞

本論文は著者が宇都宮大学大学院工学研究科システム創成工学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものです。同専攻 杉原興浩 教授には主任指導教員として本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、ご指導を戴きました。心より厚く御礼申し上げます。副指導教員の大谷幸利 教授、並びに、松本太輝 准教授には本研究の遂行に当たってご助言、ご激励を戴きました。心よりお礼申し上げます。本研究についてご指導、ご助言を戴いた副専門指導の早崎芳夫 教授、依田秀彦 准教授に深く感謝いたします。本論文について真摯に審査いただきました博士論文副査の湯上登 教授、山本裕紹 教授に深く感謝いたします。

著者が長崎大学大学院生産科学研究科物質工学専攻博士前期課程の在学時に研究のご指導を賜った鎌田海 准教授に深く感謝いたします。また、研究の遂行にご助言を頂きました同大学の江頭誠 元教授、清水康博 教授、兵頭健生 准教授に感謝いたします。

アダマンド並木精密宝石株式会社の百武康弘 課長には本研究の遂行に多大なご支援を戴き、論文の作成にご助言、ご激励を戴きました。深く感謝いたします。同社 菊田知宏 部長、並びに、野代卓司 本部長には宇都宮大学大学院工学研究科システム創成工学専攻博士後期課程への入学を快く認めて戴き、ご支援、ご協力を戴きました。心よりお礼申し上げます。同社 飯久保忠久 氏、並びに、別府芳忠 氏には本研究にご助力、ご意見を戴きました。深くお礼申し上げます。

経済産業省国際標準共同研究開発事業「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）においてご指導を賜り、また、宇都宮大学大学院工学研究科システム創成工学専攻博士後期課程の先輩として本研究について議論を交わすことで研究を進めていただいたテクノバード代表取締役 小林茂 博



士に心より感謝いたします。本研究の遂行に方向性を導いていただき、熱心にご指導いただいたハットラボ代表取締役 林武弘 氏に深くお礼申し上げます。EAF 規定についてご討論、ご助力を頂きました POF プロモーション代表 高橋聡 氏、千葉工業大学工学部機械電子創成工学科 長瀬亮 教授、名古屋工業大学 各務学 特任教授に厚くお礼申し上げます。EAF 測定装置についてご助言を頂きましたシナジーオプトシステムズ代表取締役 安川学 氏に感謝いたします。EAF 測定法の直接方式について議論を交わし、測定データを提供していただいた University College London の David R. Selviah 博士、同大学の Ruichen Tao 氏に感謝いたします。本研究の実験にご助力を戴きました宇都宮大学大学院工学研究科先端光工学専攻杉原研究室の皆様  
に感謝いたします。

また、ここに記しきれない多くの方々のご支援、ご協力によって本研究が成立していることを銘記し、深く感謝いたします。

自分の選んだ道をいつも温かく見守ってくれた両親に感謝します。最後に、宇都宮大学博士後期課程に入学することを快く承諾し、辛抱強く支援を続けてくれた妻と息子たちに心より感謝いたします。

## 研究業績

### 原著論文

K. Horiguchi, T. Iikubo, Y. Beppu, Y. Hyakutake and O. Sugihara, "Low-Attenuation Variable Mode Control Using Twist Processing for Step-Index Optical Fiber Loops," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 31, no. 15, pp. 1217-1220, 2019, doi: 10.1109/LPT.2019.2922345.

K. Horiguchi, Y. Beppu, Y. Hyakutake and O. Sugihara, "Improvement of transmission characteristics of step-index multimode fibers using variable mode controller," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 59, no. SOOA02, pp. 1-6, 2020, doi: 10.35848/1347-4065/ab9651

### 国際会議

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 The International Cable Connectivity Symposium (IWCS)*, GA, USA, pp. 327-333, 2015.

K. Horiguchi, T. Iikubo, Y. Hyakutake and O. Sugihara, "Encircled Angular Flux Template for Reasonable Optical Interface Design of Step Index Multimode Fibers," in *Proc. International Workshop Photonics Polymer for Innovation (IWPPPI)*, Tochigi, Japan, 2016.

K. Horiguchi, T. Iikubo, Y. Hyakutake, Y. Beppu and O. Sugihara, "Improvement of frequency characteristics by using variable mode control device for graded-index and step-index multimode fiber," in *Proc. International Workshop Photonics Polymer for Innovation (IWPPPI2018)*, Nagano, Japan, 2018.

K. Horiguchi, T. Iikubo, Y. Beppu, Y. Hyakutake and O. Sugihara, “Low attenuation mode converter with modal power distribution controllability by twist processing in step-index optical fibers,” in *Proc. 22nd Microoptics Conf. (MOC2017)*, Tokyo, Japan, 2017, pp. 288–289.

K. Horiguchi, Y. Beppu, Y. Hyakutake and O. Sugihara, “Bandwidth Improvement of Step-index Multimode Fiber Using Variable Mode Scramble Device,” in *Proc. 24th Microoptics Conf. (MOC2019)*, Toyama, Japan, 2019, pp. 120.

#### 特許

アダマンド並木精密宝石株式会社. 堀口 幸二, 百武 康弘, 別府 芳忠, 飯久保 忠久. モードスクランブラ. 特願 2017-529885. 2016-07-15

アダマンド並木精密宝石株式会社. 堀口 幸二, 百武 康弘, 別府 芳忠, 飯久保 忠久, 菊田 知宏. モードコントローラ. 特願 2018-032718. 2018-02-27

#### 関連発表・論文

S. Kobayashi, K. Horiguchi, Y. Hyakutake and O. Sugihara, “Evaluation of Modal Power Distribution of Automotive Optical Gigabit Ethernet Connections,” *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 17, pp. 3664–3670, 2017.

M. Uchida, H. Tanaka, S. Kobayashi, K. Horiguchi, T. Kikuta, F. S. Tan and O. Sugihara, “Temperature insensitive low-loss optical connection for automotive gigabit plastic optical fiber communication,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 08PB03, pp. 1-5, 2018.

本論文に記載された内容に関して、変更、削除の求めがあった場合には速やかに対応いたします。

If there are complaints for changes or removal of the content of this thesis, I will respond promptly.