

## 3-2-2 革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発 ～マルチコアファイバ技術と標準化指標の確立～

### 3-2-2 *Research and Development of Innovative Optical Fiber and Communication Technology*

#### — *Development of multi-core fiber technology and standardization roadmap* —

松井 隆 中島和秀 永島拓志 中西哲也 安間淑通 竹永勝宏  
相曾景一 荒井慎一 齊藤晋聖 國分泰雄 大橋正治

Takashi MATSUI, Kazuhide NAKAJIMA, Takuji NAGASHIMA, Tetsuya NAKANISHI, Yoshimichi ANMA, Katsuhiro TAKENAGA,  
Keiichi AISO, Shin-ichi ARAI, Kunimasa SAITO, Yasuo KOKUBUN, and Masaharu OHASHI

将来の超大容量光伝送基盤の実現に向け、空間分割多重 (SDM) 技術が世界的に高い関心を集めている。ここでは 100 Pbit/s・km 伝送用マルチコアファイバ技術と標準化指標の確立及びコア多重とモード多重の融合による伝送容量拡大ポテンシャルの明確化、の2点を目的とした SDM 技術の研究成果について報告する。

The space division multiplexing (SDM) technology has been receiving increasing attention in the world to realize future ultra large capacity transmission system. In this paper, we report the some outputs for the SDM technology in a view of two points, one is the development of multi-core fiber technology for 100 P bit/s-km transmission and standardization roadmap, the other is the observation of potential for the much larger transmission capacity by mixing core division multiplexing with the mode division multiplexing.

## 1 まえがき

ネットワークサービスの多様化や携帯電話サービスの高速化に伴い、基幹系のトラフィックは年率数十%で増加している。一方、光通信網で広く用いられているシングルモードファイバ (SMF) の伝送容量は約 100 Tbit/s が限界と推定されており、2020 年代後半には基幹系ネットワークに必要な伝送容量が SMF の容量限界を超えると考えられている [1]。そこで近年、SMF の容量限界を克服するため、空間分割多重 (SDM) 技術が高い関心を集めている。SDM は 1 心の光ファイバに複数の光パスを構成し、従来の時分割多重、波長分割多重に加え、空間を多重軸として用いることで、光パスの数に応じた大容量化を図ることができる。

SDM は大別して、マルチコアファイバ (MCF) を用いたコア多重と、複数の伝搬モードを利用するモード多重に分けられる。2011 年には MCF を用いた世界初の 100 Tbit/s を超える SDM 伝送実験が報告され [2]、2013 年には 1 Ebit/s・km に及ぶ容量距離積が実現されている [3][4]。また高効率な MCF 光増幅器、

MCF に対応した接続技術や光コネクタなど、SDM 伝送システムの実現に必要な周辺技術も精力的に検討が進められている。

一方、モード多重は同一コア内に複数の光パスを構成できるため、空間多重密度及び伝送容量を飛躍的に増加できると期待される。特に近年、光マルチインプット・マルチアウトプット (MIMO) 技術によるモード間クロストークの補償が提案されたことにより、光 MIMO を用いたモード多重伝送実験が数多く報告されている。さらに、モード多重とコア多重を組み合わせた数モードマルチコアファイバ (FM-MCF) による超高密度 SDM 伝送も検討され、光ファイバ 1 心に 100 以上の空間パスを有する FM-MCF [5]-[7] や、FM-MCF を用いた 10 Pbit/s 超の伝送実験 [8] も報告されている。

しかしながら、これまでの MCF の報告例ではファイバ長が数十 km 以下に限られており、実際の光通信システムの構築を考慮すると、長手方向に十分な均一性と信頼性を有する 100 km 超級の MCF の製造が必要である。また FM-MCF における複数のモードを効率的に利用するには、各モードの伝送特性の評価技術

### 3 コアネットワークの大容量化を目指す研究開発

や、ファイバ中におけるモード間結合の振る舞いなどについても明確化する必要がある。さらに、MCFのコア数・コア配置・ファイバ外径などの設定指針については明確なコンセンサスが得られておらず、将来の標準化を見据えた指標の考え方を明らかにしていく必要がある。

本研究開発ではSDMによる大容量伝送基盤の実現に向けて、100 Pbit/s・km 伝送用 MCF 技術の確立と、FM-MCF による大容量伝送ポテンシャルの明確化に向け検討を行った。また、将来の MCF 標準化に向けた標準指標の策定を進め、マルチベンダ間の相互接続性について検証した。

## 2 高品質・長距離 MCF 製造技術

図1にMCFの母材製造方法を示す。MCFの製造では一般的に、図1(a)に示す孔開け法が多く用いられる。孔開け法ではガラス母材を穿孔し、そこにコアに相当するガラス部材を挿入・一体化することでMCF母材を作製する。孔開け法はコア位置の自由度も高く技術蓄積も大きいですが、穿孔工程は機械加工条件によって制約され、母材の大型化に課題がある。図1(b)に示すクラッド後付け法はコア部材を任意の形状に配列した後にクラッド領域を一括で形成する方法である。クラッド後付け法が実現できれば、機械加工の工程を経ずに柔軟なコア配置のMCFを製造することができ、製造距離や品質の改善につながると考えられ

る。ここでは孔開け法における母材大型化と高品質化並びにクラッド後付け法によるMCF製造の実現性について検討を行った。

### 2.1 孔開け法によるMCF母材の大型化

孔開け法では、穿孔における加工装置の制限や穿孔表面の凹凸による損失増が母材大型化の課題となる。そこで孔開け法における製造プロセスの最適化を行い、MCF母材の大型化について検討した。図2はMCF母材の断面図と損失特性の評価結果である。作製したMCF母材の断面構造は図2(a)に示すとおりである。母材寸法は長さ1,000 mm、直径86 mmであり、200 km超の素線に相当する。図2(b)は製造したMCFの損失特性の評価結果である。伝送損失は各コアの平均で0.192 dB/kmと、母材大型化による伝送損失の悪化は見られなかった。作製されたファイバ長は244 kmと、一連長で200 km以上の長尺なMCFが製造できたことが確認できる[9]。またコア間距離の長手方向の変動は $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下であり、長手方向に良好な均一性を有する長尺MCFの製造が実現されている。

また孔開け法の生産効率の向上に向け、新たにコア挿入線引法を提案した。図3にコア挿入線引法の概略図を示す。コア挿入線引法ではコア部材とクラッド部材を線引き炉で一体化しつつファイバ化することで、従来の孔開け法におけるコア部材とクラッド部材の一体化工程を省略し、効率的に長尺なMCFが製造できると期待される。ここでコア挿入線引法ではコア部材

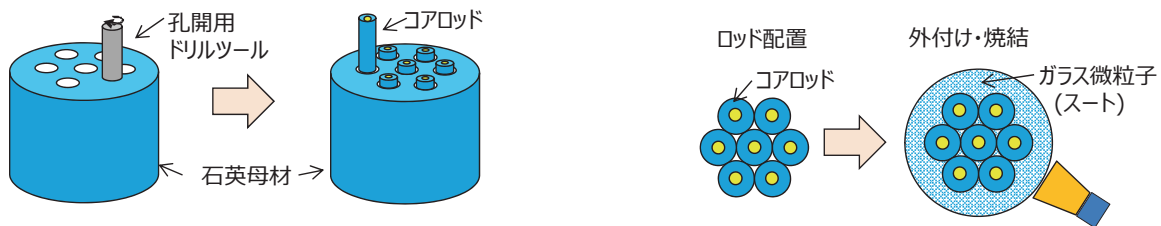


図1 MCF母材の製造技術。(a) 孔開け法、(b) クラッド後付け法

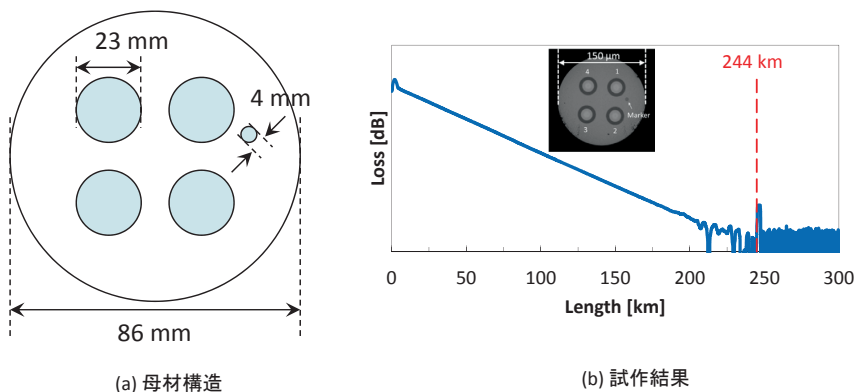


図2 孔開け法による長距離MCF製造

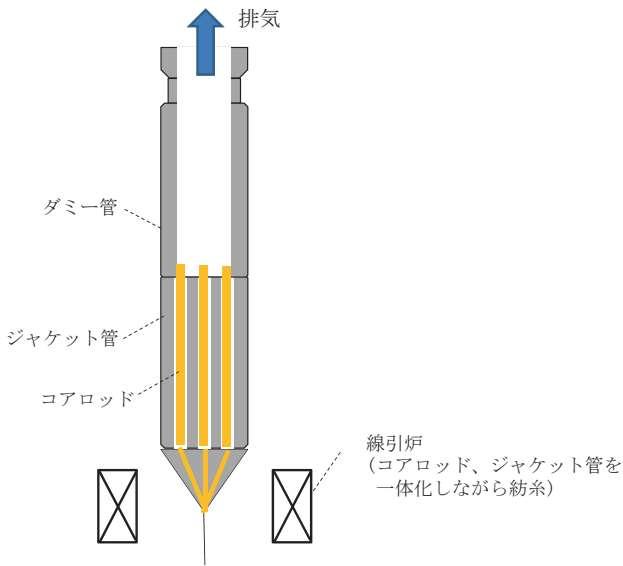


図3 コア挿入線引き法

とクラッド部材との界面に空隙が存在するため、構造パラメータや光学特性の長手方向の安定性や機械的な信頼性に影響する可能性がある。本検討ではこれらの影響の検証とプロセスの最適化を行い、200 km 超級の MCF 製造の実現性を確認した [10]。

上述のように、孔開け法における母材の大型化を図り、長手方向における均一性の高い高品質な MCF を、従来よりも 1 桁以上長い数百 km にわたり製造する技術を実現した。

## 2.2 クラッド後付け法による MCF 製造技術の確立

ここではクラッド後付け法として、Over-cladding Bundled Rods (OBR) 法と粉末成形法について検討を

行った。図4に検討した2種類のクラッド後付け法の製造工程を示す。図4(a)のOBR法では、コア部材を任意の配置で束ね、両端にダミーのガラスロッドを溶着し固定する。その後、外付け法(OVD法)によりガラス微粒子(スート)を周囲に堆積させることでクラッド部を形成し、MCF母材を得る。OVD法は汎用のSMF母材の作製にも用いられることから、既存設備を流用でき母材の大型化・長尺化も期待できる。図4(b)の粉末成形法では、コア部材を石英ガラス管の中に任意の形状で配置した後、石英ガラス粉末を充填して線引き用粉末充填体を作製する。粉末充填体を減圧雰囲気中で加熱することで、MCF母材とし、その後MCFを得ることができる。粉末成形法は高いコア配置の自由度と母材の大型化の両立が期待できる。本検討ではそれぞれの製造方法についてMCF製造の実現性について検討し、50 km 超のMCFの作製に成功した[11][12]。また伝送損失やコア間クロストーク(XT)の劣化は見受けられず、コア間距離の長手方向の安定性も良好であり、高品質なMCF製造への適用性を確認した。

またOBR法は、図5(a)に示すように複数の円筒状のコア材を束ねる際に生ずる空隙を意図的に制御することで、隣接するコア間に空孔を有するMCFを実現することができる[13]。図5(b)に試作した空孔付きMCFの断面及びXTの測定結果を示す。コア間に空孔を付与することでXTを低減できることが知られているが、ここではOBR法の製造工程の特長をうまく活用することで、穿孔加工を行うことなく空孔付きMCFを実現した。作製した空孔付きMCFでは、空孔無しのMCFに比べ約10 dBのXT改善が得られることを確認した。

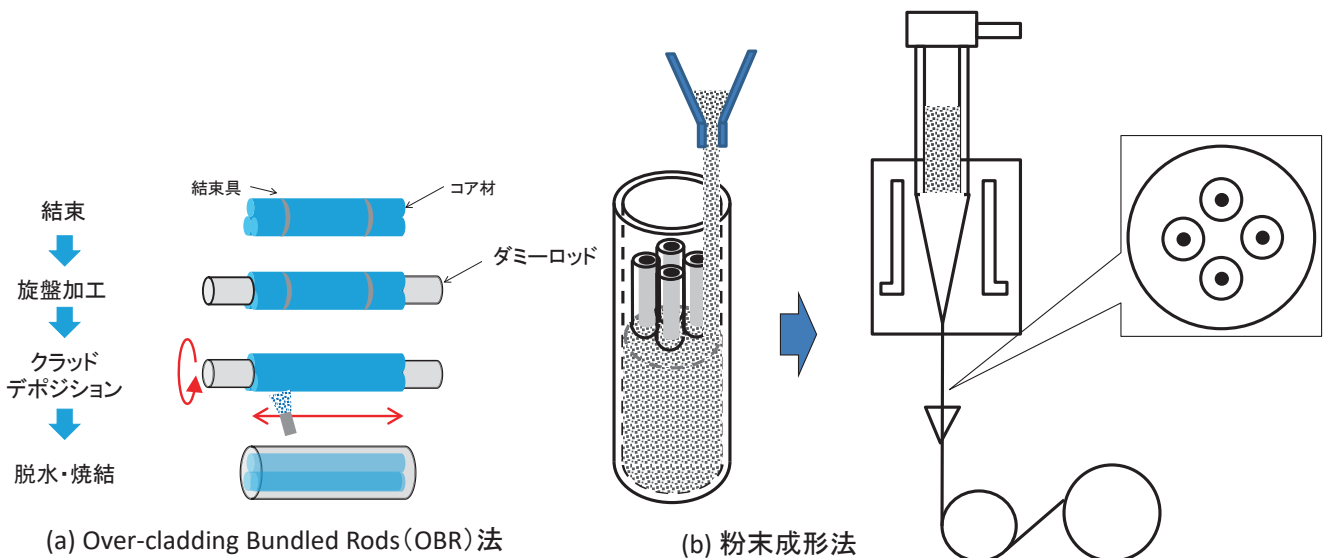


図4 検討したクラッド後付け法

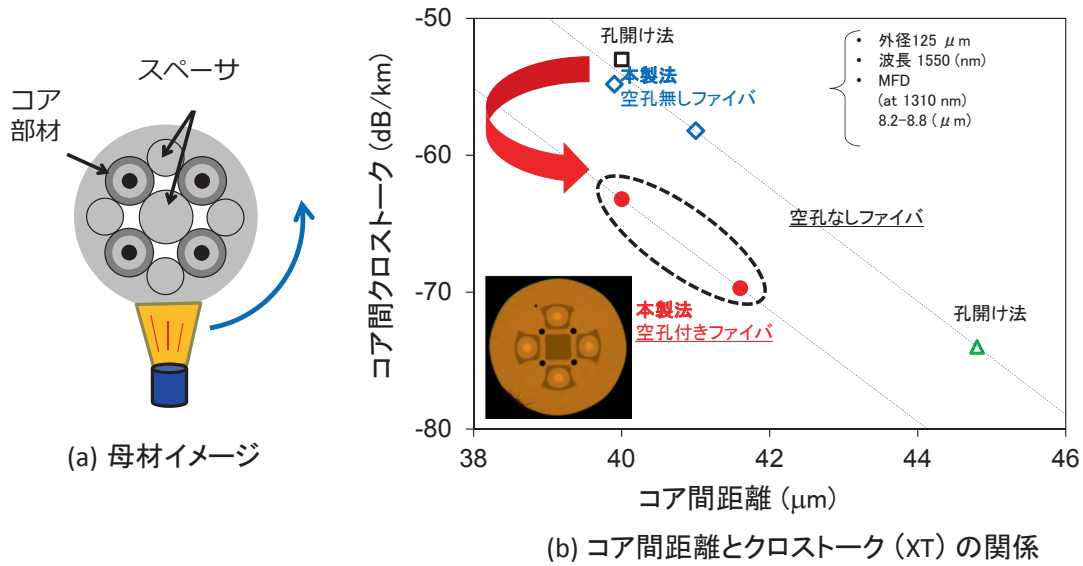


図5 OBR法による空孔付きMCFの作製

上記の結果より、機械加工を必要としないMCF母材の製造技術を世界で初めて検討し、高品質なMCFの製造が可能であることを示した。さらに、OBR法の特長を活かした空孔付き低XT-MCFの実現性も示した。

### 3 コア多重とモード多重の融合による空間多重密度の極限追求

先に述べたとおり、コア多重とモード多重を組み合わせたFM-MCFにより、空間パスと伝送容量の飛躍的な増大が期待できる。モード多重伝送で高次モードを空間パスとして利用するためには、高次モードも含めた解析技術の確立やファイバ伝搬中の振る舞いの解明、各モード特性の高精度な評価技術が不可欠となる。ここでは、高次モードの解析手法と評価技術並びにモード間結合特性の振る舞いについて検討するとともに、FM-MCFによる高空間密度化のポテンシャルについて検討した。

#### 3.1 高次モードの解析と評価技術

モード多重伝送ではファイバ中のモード間群遅延差(DMD)が伝送特性及び受信機の設計に大きく影響し、DMDを最小化するには、光ファイバコアの屈折率が中心から外周方向に向かって曲線的に減少するグレーデッド・インデックス(GI)構造を採用することが有効であることが知られている。さらに、FM-MCFではモード数の拡張に伴うXTの劣化も問題となり、XTの劣化を低減するためには、屈折率構造が異なるコアを配列したり、隣り合うコア間に低屈折率領域を設定したりする手法が用いられる。本検討では図6(a)

に示すトレンチ(低屈折率層)付きGI型屈折率分布を用い、空間パス数及び空間多重密度の最大化について検討した。ここで単純にクラッド径を太くするだけでは空間パスの密度が大きにならないため、空間多重密度を比較する指標として、次式で定義されるSMFを基準とした相対コア多重指数(RCMF)を用いた。

$$RCMF = \frac{D^2 \sum A_{eff-n}}{D_{SM}^2 A_{eff-SM}}$$

$D$ 、 $D_{SM}$ はそれぞれFM-MCFとSMFのクラッド直径、 $A_{eff-n}$ と $A_{eff-SM}$ はそれぞれFM-MCF及びSMFの各モードの実効的な伝搬領域の面積である。ここで、一般的なSMFの $D_{SM}$ と $A_{eff-SM}$ は、それぞれ125 μm及び80 μm<sup>2</sup>である。図6(b)はクラッド径とRCMFの関係を示す。ここでは長距離伝送への適用を考慮し、基本モードの面積はSMFと同等の80 μm<sup>2</sup>、コア間XTは-30 dB/100 km以下であることを設計条件とした。図中の青、緑及び紫のプロットは、それぞれ各コアのモード数を2 LP(3モード)、4 LP(6モード)及び6 LP(10モード)としたときの計算結果を示し、同一モード数内の5個のプロットは、多重コア数を左から順7、12、19、27及び37とした場合に相当する。図6(b)から、モード数が一定の場合、コア数を増やしてもクラッド径が大きくなるためRCMFの改善量は小さく、RCMFの改善には各コアのモード数を増やすことが効果的であることが分かる。ここでクラッド径の太径化は機械的信頼性の劣化を生じ、一般的な光ファイバケーブルへの実装を考慮すると250 μm以下のクラッド径が望ましいことが報告されている[7]。クラッド径を250 μm以下とした場合、4 LPモード以上のコアを用いることで100チャンネル以上、また



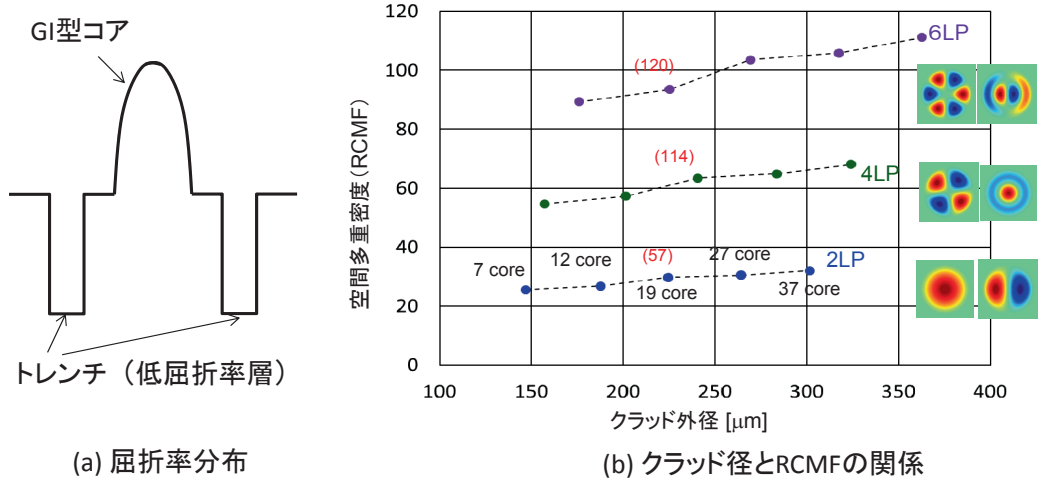


図6 FM-MCF の設計

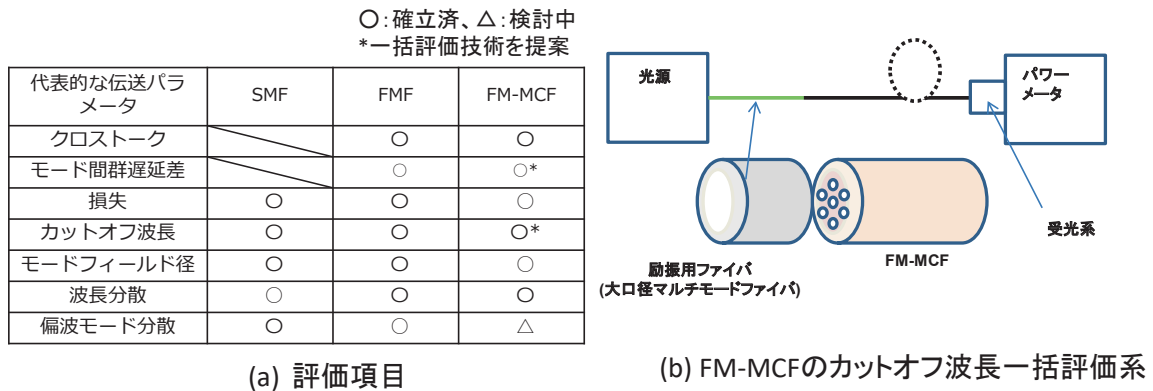


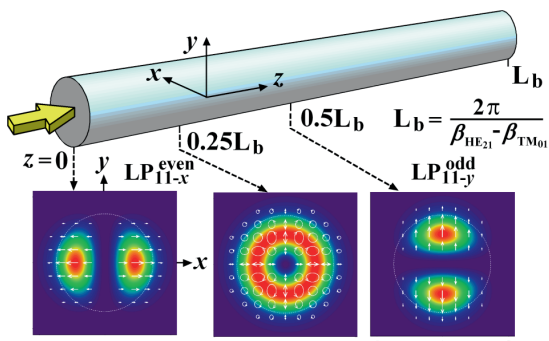
図7 FMF/FM-MCF の評価技術

6 LP モードのコアを用いることで約 100 倍の RCMF が得られることが確認できる [14]。

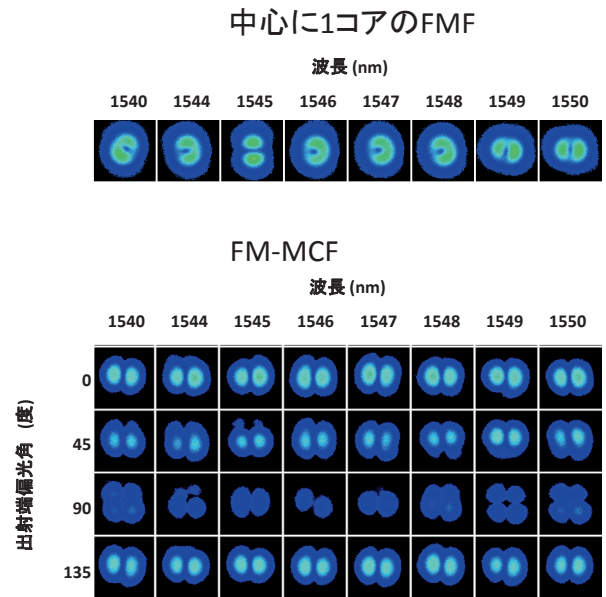
既存の SMF では相互接続性を担保するため、主要な伝送パラメータの特性範囲とその評価技術が標準化されている。図 7 (a) に代表的な伝送パラメータを示す。既存 SMF では、損失、カットオフ波長、モードフィールド径、波長分散や偏波モード分散などの詳細評価が不可欠となる。FMF や FM-MCF では、これらの伝送パラメータに加え、高次モードを含むモード間及びコア間のクロストークや DMD を評価する必要がある。本検討では、図 7 (a) に示すように、FMF 及び FM-MCF における代表的な伝送パラメータの評価技術について網羅的に検討を行い、その実現性を確認した。ここで FMF や FM-MCF ではモード数・コア数の分だけ評価が必要となるため、複数のコア・モードに対し一括で簡易に評価できることが望ましい。本検討では、図 7 (b) に示す FM-MCF のカットオフ波長の一括評価技術についても検討を行った。大口径のマルチモードファイバを励振用光ファイバとして用い、FM-MCF の全コアに同時に測定光を入射することで、

FM-MCF のカットオフ波長を 1 度の評価で取得することができる [15]。このように FMF や FM-MCF では、高次モードを考慮した定義や測定条件の明確化に加え、評価手順の最適化も考慮することが重要となる。

また高次モードの偏波モード分散評価技術についても検討がなされているが [16]、高次モードのファイバ中の偏波状態については不明確な点も多い。図 8 (a) に第 1 高次 ( $LP_{11}$ ) モードのファイバ中の伝搬の様子を示す。一般に、第 1 高次モード ( $LP_{11}$  モード) は縦若しくは横方向に 2 つの山を有し、さらに偏光方向も直交する 4 種類の電界分布として扱われるが、 $LP_{11}$  モードは擬縮退モードであって厳密には固有モード ( $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$ ,  $HE_{21}^{even}$ ,  $HE_{21}^{odd}$  モード) の線形結合で表されるため [17]、実際の光ファイバの伝搬過程では固有モード間の干渉によってドーナツ型の電界分布を経て周期的に変化していると考えられる。図 8 (b) の上図は、基本モードと  $LP_{11}$  モードまでが伝搬可能なコアを 1 つ有する FMF を用い、 $LP_{11}x^{even}$  モードを入射させた際に、光ファイバ出射端における電界分布を、波長を変えながら観測した例を示す。先に述べたよう



(a) 第1高次 (LP<sub>11</sub>) モードの伝搬状態の一例



(b) 第1高次 (LP<sub>11</sub>) モードの電界分布の変化  
上: 単一コアFMFの評価例、下: FM-MCFの評価例

図8 厳密固有モード

に、縦山・ドーナツ・横山の状態が波長に伴って変化している様子がうかがえる。一方、図8(b)の下図は第4高次(LP<sub>02</sub>)モードまでが伝搬可能なコアを複数有するFM-MCFにおけるLP<sub>11</sub>モード伝搬特性の観測例を示している。この観測例では、出射端に偏光子を挿入して偏光子を回転させながら出射パターンを観測しており、波長を変えても縦山の出射パターンに変化が見られず、さらに出射パターンの偏光状態もy方向(偏光子の0度方向がy方向)に偏光しているLP<sub>11-y</sub><sup>even</sup>モードになっており、そのモードが波長に無依存である様子がうかがえる。これは、固有モード間の伝搬定数差によって周期的に遷移しながら伝搬すると思っていたLP<sub>11</sub>モードが、特定の方向に固有軸を持ち、その方向の固有モードとして伝搬していると考えられる[18]。これらの伝搬状態は、本検討を通じて初めて観測された結果であるが、特定の方向のLP<sub>11</sub>モードが固有モードとして伝搬する要因については十分に解明されておらず[19]、今後、FM-MCFにおける偏波モード分散特性の評価技術を確立していくうえでも重要な足掛かりになると期待される。

以上に述べたように、本検討により高次モードに対する解析技術を確立しFM-MCFの最適な設計と空間多重密度を明らかにした。また、コア及びモードの一括評価も考慮した、高次モード特性の評価技術を網羅的に検討するとともに、FM-MCF中における伝搬状態の明確化に向けた礎を築いた。

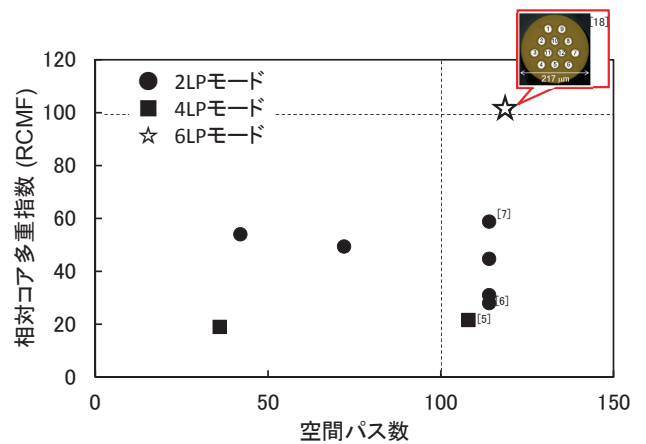


図9 高密度FM-MCFの報告例

### 3.2 超高密度FM-MCF

本検討では3.1で述べた、1心で100以上の空間パスを有する高密度FM-MCFの実現性について検討した。図9はFM-MCFの報告例を示す。高空間密度のFM-MCFは国内外で多くの報告例があり、2015年には初めて100以上の空間パスを有するFM-MCFが報告された[5][6]。しかしながら、これらのFM-MCFのRCMFは30程度にとどまっていた。ここで先に述べたとおり、実環境における機械的な信頼性を考慮するとクラッド径は250 μm以下であることが望ましい。本検討ではクラッド径上限を250 μmとし、図6で示した最適化設計を踏まえFM-MCFの試作を行った。試作したFM-MCFは4LPモード×19コア(空間パス114)であり、約60のRCMFを実証した[7]。さらに、

本検討ではSMFの100倍以上の空間多重密度(RCMF>100)となるFM-MCFの実現性について検討した。図6に示したとおり、約100のRCMFを得るためには6LPモードの活用が必須となる。ここでは空間多重密度の最大化のため、図9に示す三角形のコア配置である12コア構造で設計・試作を行った。試作したFM-MCFはクラッド径217μmであり、1心の光ファイバに120の空間パスを有する。RCMFは約100であることを確認し、100以上の空間パスと100倍以上の空間多重密度を世界で初めて同時に達成した[20]。

以上より、FM-MCFの最適化設計を踏まえ100以上の空間パスかつSMFの100倍以上の空間多重密度となるFM-MCFを初めて実現した。試作結果より、FM-MCFによるSMFの100倍以上の伝送ポテンシャルが期待できる。

#### 4 MCFの標準化指標と相互接続検証

コア間XTはMCFに固有かつ重要な伝送特性であるが、仮にXTの要求条件を固定したとしてもコア数や配列の組合せは無限に考えることができ、光ファイバの標準化に不可欠な相互接続の条件を明確化することは難しい。一方、1本の光ファイバ母材から作製できるファイバ長はクラッド径の2乗に反比例して変化する。例えばクラッド径が250μmの場合、標準的なクラッド径(125μm)と比較して製造可能な光ファイバの長さは4分の1に減少してしまう。このため、現

在の光ファイバと同等の製造性を実現するには、ファイバ製造技術そのものの革新が必要となる。ここで光ファイバの製造性及び既存技術との親和性を考慮すると、光ファイバのクラッド径と被覆径を重要な標準指標として考えることができる。図10にクラッド径と被覆径を指標とするMCF標準の考え方を示す。標準クラッド径を採用したMCFは、製造性を損なわず既存の光ケーブルや光接続部品をそのまま活用することができ、第1の標準として早期の実用化が期待できる。さらに、各コアでSMFとの光学互換を担保することにより、既存の伝送システムとの併用を考えることができるうえ、標準クラッド径に配置可能なSMF互換のコア数は、実用的なXTレベルを考えると4～5個に限定できる[21][22]。また近年、被覆径を標準的な250μmから200μmに縮小したSMFの利用が広がりつつある。被覆径の縮小をMCFに応用すると、被覆径を既存標準の235～265μmとしたまま、クラッド径を125μm以上に拡張するオプションも考えられ、実際に標準被覆径を有する8コアファイバも検討されている[23]。このようにクラッド径及び被覆径を指標とし、将来的にはモード多重も加味することで、空間多重数の増加を考慮した段階的な標準化議論が推進できると考える。

本研究開発では関連するNICT委託研究(課題146「革新的光ファイバ技術の研究開発」、150「革新的光通信インフラの研究開発」、188「空間多重フォトニックノード基盤技術の研究開発」)と連携し、産学官によるMCFのマルチベンダ間相互接続検証をこれまで計3回実施してきた。

2013年には世界初のMCF相互接続検証を行った。7コア構造のMCFを用いて総長50kmのマルチベンダ伝送路を構築し、MCFの融着接続、マルチコア増幅技術と併せてSDMによる大容量伝送基盤のコンセプトを世界に先駆け実証した。2015年には6コア構造のMCFと高効率なマルチコア光増幅技術を用い、光コネクタによるPlug & Play形式のSDMシステム

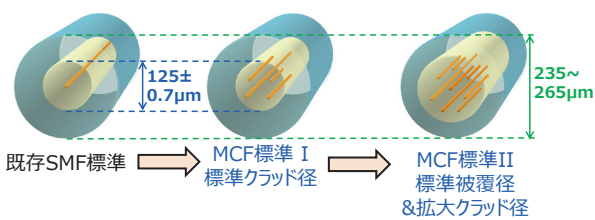


図10 クラッド径と被覆径を指標とするMCF標準

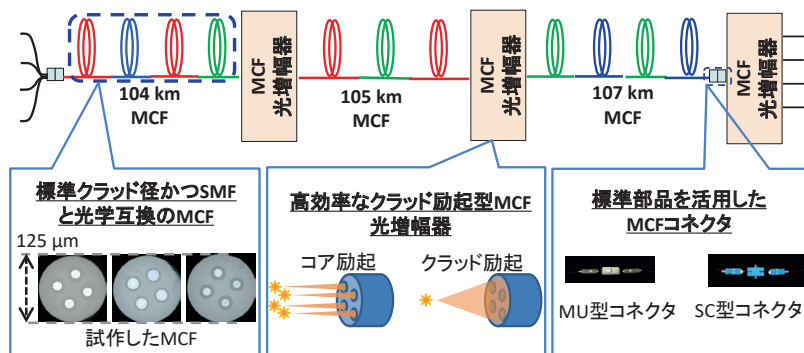


図11 MCF相互接続伝送路の構成



の実現性を示した。

2017年には標準クラッド径を採用したMCFを用いたマルチベンダ間の相互接続伝送路を構築し、NICTが保有する大容量伝送実験設備を活用し、既存技術との親和性に優れた大容量SDM伝送のコンセプトを実証した[24]。図11に相互接続伝送路の構成を示す。この相互接続伝送路では、標準クラッド径を採用したMCFと、高効率なMCF光増幅器、MCFコネクタを組み合わせたフルSDM伝送路を構築した。

ここではクラッド径及び光学特性が従来のSMFと完全互換であるMCFを、同一仕様の下3社で試作し、意図的にマルチベンダ間接続になるようにMCFを融着接続し、3つのスパンを構築した。スパン長は100km以上であり、各スパンの平均損失は接続損失を含み $0.21 \pm 0.02$  dB/kmと、従来のSMFを用いた伝送路と同等の損失特性が得られた。

上記の相互接続伝送路及びMCF光増幅器、MCFコネクタを用いて、100 Tbit/s 超級の大容量伝送特性について検証した。ここではCバンド全域で多重したWDM信号を用い、256 Gbit/s  $\times$  116 波長  $\times$  4 コア伝送を行った。316 kmのSDM伝送路を伝送後の受信信号は全コア・全波長チャンネルで良好な伝送品質を示し、トータルで118.5 Tbit/sの大容量伝送特性が確認できた。この伝送容量は標準外径MCFでは世界トップの容量である。またここでは伝送帯域としてCバンドのみを用いたが、Lバンドまで拡張することを考えると伝送容量は約2.7倍となり、約100 Pbit/s  $\cdot$  kmの容量・距離積が得られる。

上記の結果より、標準クラッド径を用いたMCFによる大容量伝送のコンセプトと、標準クラッド径を考慮した相互接続伝送システムの実現性が確認された。標準クラッド径を採用したMCFは製造性に加え、既存の光ケーブルや接続部品を活用できるなど既存技術との親和性が高く、SDM技術の早期展開と国際標準化の加速を促す有望な要素技術のひとつとして期待できる。

## 5 むすび

本研究開発を通じ、MCFの高品質・長尺化や高密度SDMファイバ、標準クラッド径MCFなど、SDM技術のポテンシャル明確化と早期実用化の礎となる多くの成果が創出されてきた。特にSDM技術の早期展開に向け、標準クラッド径を採用したMCFを提案し、その相互接続性及び大容量伝送特性を実証した。しかしながら標準クラッド径MCFの標準化・実用化には、SMFと同等の信頼性や量産性の実現や実環境を勘案した特性検証が必須となる。またFM-MCFは更なる

超大容量化のポテンシャルが実証されたが、モードの制御技術をはじめとする周辺技術についても検討すべき課題が多く残されている。これらの検討を通じ、世界に先駆けてAll Japanによる超大容量SDM伝送基盤が実現されることが期待される。

## 謝辞

本研究はNICTの委託研究「革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発」の一環及び「革新的光通信インフラに関する研究開発」並びに「空間多重フォトニックノードに関する研究開発」との連携で行われたものである。またMCFの相互接続と大容量伝送実験に当たり指導いただいたNICTの足立樹泰企画室室長並びにフォトニックネットワークシステム研究室の平木貢専門研究技術員に感謝申し上げる。

## 【参考文献】

- 1 T. Morioka, "New generation optical infrastructure technologies: "EXAT initiative" towards 2020 and beyond," Proc. OECC, FT4, 2009.
- 2 J. Sakaguchi, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, T. Hayashi, T. Taru, T. Kobayashi, and M. Watanabe, "109-7Tb/s (7x97x172-Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber," Proc. OFC, PDPB6, 2011.
- 3 K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, Y. Tsuchida, K. Maeda, M. Tadakuma, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, and M. Suzuki, "1.03-Exabit/s  $\cdot$  km Super-Nyquist-WDM Transmission over 7,326-km Seven-Core Fiber," Proc. ECOC, PD3.E3, 2013.
- 4 T. Kobayashi, H. Takara, A. Sano, T. Mizuno, H. Kawakami, Y. Miyamoto, K. Hiraga, Y. Abe, H. Ono, M. Wada, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Yamada, H. Masuda, and T. Morioka, "2  $\times$  344 Tb/s Propagation-direction Interleaved Transmission over 1500-km MCF Enhanced by Multicarrier Full Electric-field Digital Back-propagation," Proc. ECOC, PD3.E4, 2013.
- 5 J. Sakaguchi, W. Klaus, J.-M. D. Mendinueta, B.J. Puttnam, R.S. Luis, Y. Awaji, N. Wada, T. Hayashi, T. Nakanishi, T. Watanabe, Y. Kokubun, T. Takahata, and T. Kobayashi, "Realizing a 36-core, 3-mode Fiber with 108 Spatial Channels," Proc. OFC, Th5C.2, 2015.
- 6 K. Igarashi, D. Souma, Y. Wakayama, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, T. Tsuritani, I. Morita, and M. Suzuki, "114 Space-Division-Multiplexed Transmission over 9.8-km Weakly-Coupled-6-Mode Uncoupled-19-Core Fibers," Proc. OFC, Th5C.4, 2015.
- 7 T. Sakamoto, T. Matsui, K. Saitoh, S. Saitoh, K. Takenaga, T. Mizuno, Y. Abe, K. Shibahara, Y. Tobita, S. Matsuo, K. Aikawa, S. Aozasa, K. Nakajima and Y. Miyamoto., "Low-loss and Low-DMD Few-mode Multi-core Fiber with Highest Core Multiplicity Factor," Proc. of OFC, Th5A2, 2016.
- 8 D. Soma, Y. Wakayama, S. Beppu, S. Sumita, T. Tsuritani, T. Hayashi, T. Nagashima, M. Suzuki, H. Takahashi, K. Igarashi, I. Morita, and M. Suzuki, "10.16 Peta-bit/s Dense SDM/WDM transmission over Low-DMD 6-Mode 19-Core Fibre across C+L Band," Proc. ECOC, Th.PDP.A1, 2017.
- 9 福本良平, 安間淑通, 竹永勝宏, 愛川和彦, "孔閉法による200 km超の4コア長尺マルチコアファイバの作製," 信学総大, B-10-9, 2017.
- 10 永島拓志, 林哲也, 中西哲也, 佐野知巳, "ロッドインチューブ線引法によるマルチコア光ファイバの生産性の改善," 信学技報, EXAT2017-14, 2018.
- 11 福本良平, 安間淑通, 竹永勝宏, 愛川和彦, "クラッド一括合法による低損失マルチコアファイバの作製," 信学ソ大, B-10-6, 2017.
- 12 荒井慎一, 松本成人, 八木健, "粉末成形技術を用いたマルチコア光ファイバ," 信学技報, OFT2017-57, 2018.
- 13 S. Nozoe R. Fukumoto, T. Sakamoto, T. Matsui, Y. Amma, K. Tsujikawa,



- S. Aozasa, K. Aikawa, and K. Nakajima, "Low crosstalk 125 mm-cladding multi-core fiber with limited air-holes fabricated with over-cladding bundled rods technique," Proc. OFC, Th1H.6, 2017.
- 14 齊藤晋聖, 藤澤剛, 竹永勝宏, 愛川和彦, 坂本泰志, 松井 隆, 中島和秀, "高密度空間多重光ファイバの設計技術," 信学技報, EXAT2017-13, 2018.
- 15 T. Hibino, M. Ohashi, H. Kubota, and Y. Miyoshi, "Measurement of cutoff wavelength in a few mode multi-core fiber," Proc. EXAT2017, P-14, 2017.
- 16 S. Igarashi, M. Ohashi, Y. Miyoshi, H. Kubota, T. Sakamoto, T. Matsui, and K. Nakajima, "PMD Measurements of Two-Mode Fibers Using Mode Coupler Based on Fixed Analyzer Technique," Proc. OECC, MC2-5, 2016.
- 17 Y. Kokubun, T. Watanabe, S. Miura, and R. Kawata, "What is a mode in few mode fibers?: Proposal of MIMO-free mode division multiplexing using true eigenmodes," IEICE Electronics Express, vol.13, no.18, p.20160394, 2016.
- 18 T. Yamaguchi, S. Miura, and Y. Kokubun, "Demonstration of true-eigenmode propagation in few-mode fibers by selective LP mode excitation and near-field observation," IEICE Electronics Express, vol.15, no.10, p.20180344, 2018.
- 19 Y. Kokubun, "Rigorous mode theory and analysis of few-mode fibers," (Progress Review), Jpn. J. Appl. Phys. (MOC2017 Special Issue), vol.57, 08PA05, 2018.
- 20 T. Sakamoto, K. Saitoh, S. Saitoh, Y. Abe, K. Takenaga, A. Urushibara, M. Wada, T. Matsui, K. Aikawa, and K. Nakajima, "120 Spatial Channel Few-mode Multi-core Fibre with Relative Core Multiplicity Factor Exceeding 100," Proc. ECOC, We3E.5, 2018.
- 21 Takashi Matsui, Taiji Sakamoto, Yukihiro Goto, Kotaro Saito, Kazuhide Nakajima, Fumihiko Yamamoto, and Toshio Kurashima, "Design of 125 μm cladding multi-core fiber with full-band compatibility to conventional single-mode fiber," Proc. ECOC, We4.3, 2015.
- 22 T. Gonda, K. Imamura, R. Sugizaki, Y. Kawaguchi, and T. Tsuritani, "125 μm 5-core fibre with heterogeneous design suitable for migration from single-core system to multi-core system," Proc. ECOC, p.547, 2016.
- 23 T. Matsui, T. Sakamoto, and K. Nakajima, "Zero-Dispersion Wavelength Optimized Single-Mode Multi-Core Fiber for High Speed Gigabit Ethernet," Proc. ECOC, W.1.B.2, 2017.
- 24 T. Matsui, T. Kobayashi, H. Kawahara, E. L. T. de Gabory, T. Nagashima, T. Nakanishi, S. Saitoh, Y. Amma, K. Maeda, S. Arai, R. Nagase, Y. Abe, S. Aozasa, Y. Wakayama, H. Takeshita, T. Tsuritani, H. Ono, T. Sakamoto, I. Morita, Y. Miyamoto, and K. Nakajima, "118.5 Tbit/s Transmission over 316 km-Long Multi-Core Fiber with Standard Cladding Diameter," Proc. CLEO-PR/OECC/PGC, PDP2, 2017.

**松井 隆** (まつい たかし)

日本電信電話株式会社  
 アクセスサービスシステム研究所  
 アクセス設備プロジェクト  
 主任研究員  
 博士(工学)  
 通信用光ファイバの設計・評価技術

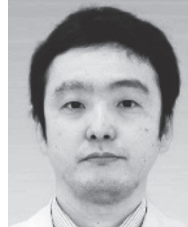
**中島和秀** (なかじま かずひで)

日本電信電話株式会社  
 アクセスサービスシステム研究所  
 アクセス設備プロジェクト  
 グループリーダー  
 博士(工学)  
 通信用光ファイバの設計・評価技術



**永島拓志** (ながしま たくじ)

住友電気工業株式会社  
 光通信研究所  
 主査  
 通信用光ファイバの設計・製造・評価技術



**中西哲也** (なかにし てつや)

住友電気工業株式会社  
 光通信研究所  
 グループリーダー  
 通信用光ファイバの設計・製造・評価技術

**安間淑通** (あんま よしみち)

株式会社フジクラ  
 先端技術総合研究所  
 光通信研究部  
 光ファイバの設計・作製・評価技術

**竹永勝宏** (たけなが かつひろ)

株式会社フジクラ  
 先端技術総合研究所  
 光通信研究部  
 グループ長  
 光ファイバの設計・作製・評価技術

**相曽景一** (あいそ けいいち)

古河電気工業株式会社  
 情報通信・エネルギー研究所  
 光線路開発部  
 光線路開発課  
 主査  
 光ファイバの設計・製造・評価技術

**荒井慎一** (あらい しんいち)

古河電気工業株式会社  
 情報通信・エネルギー研究所  
 光線路開発部  
 光線路開発課  
 課長  
 光ファイバの設計・製造技術

### 3 コアネットワークの大容量化を目指す研究開発



**齊藤晋聖** (さいとう くにまさ)  
北海道大学  
大学院情報科学研究科  
メディアネットワーク専攻  
情報通信フォトンクス研究室  
教授  
博士(工学)  
光ファイバ通信、光エレクトロニクス、光ファイバ応用技術



**國分泰雄** (こくぶん やすお)  
中部大学  
副学長、教授  
工学博士  
空間／モード多重伝送用光ファイバと入出力デバイス



**大橋正治** (おおはし まさはる)  
大阪府立大学  
大学院工学研究科  
電気・情報系専攻  
電気情報システム工学分野  
専攻長、教授  
工学博士  
光ファイバの設計・伝送特性の評価及び光ファイバセンサ