

平成27年度研究開発成果概要書

課題名：革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発  
採択番号：17002  
個別課題名：  
副題：マルチコア光ファイバ技術と標準化指標の確立

(1) 研究開発の目的

本研究は、1Pbit/s・100km 伝送用マルチコア光ファイバ(MCF)技術の確立と標準化方針の策定、並びに数モードマルチコア光ファイバ(FM-MCF)技術による伝送容量拡大ポテンシャルの明確化を行うことを目的とする。

(2) 研究開発期間

平成25年度から平成29年度(5年間)

(3) 実施機関

日本電信電話(株)〈代表研究者〉、住友電気工業(株)、(株)フジクラ、古河電気工業(株)、国立大学法人北海道大学、国立大学法人横浜国立大学、公立大学法人大阪府立大学

(4) 研究開発予算(契約額)

総額 710百万円(平成27年度 142百万円)  
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発課題と担当

課題 A-1 MCF の高品質・長尺化技術の開発

- A-1-1 紡糸条件の最適化技術 (日本電信電話(株))
- A-1-2 生産効率の最適化技術 (住友電気工業(株))
- A-1-3 スケーラブル製造技術 ((株)フジクラ)
- A-1-4 粉末形成クラッド技術 (古河電気工業(株))

課題 A-2 MCF の多重効率の向上と最適化技術の開発

- A-2-1 多重容量の最大化技術 (住友電気工業(株))
- A-2-2 空孔構造の活用技術 (日本電信電話(株))

課題 A-3 MCF 標準化方針の策定

- A-3-1 標準化指標とマイルストーンの明確化 (日本電信電話(株))

課題 B-1 FM-MCF 設計技術の検討

- B-1-1 FMF 構造条件の明確化 (日本電信電話(株))
- B-1-2 FMF 解析技術の確立 (国立大学法人北海道大学)
- B-1-3 FMF 製造とクロストーク特性の明確化 ((株)フジクラ)

課題 B-2 FM-MCF 用入出力及び評価技術の検討

B-2-1 FMF 入出力技術の検討	(国立大学法人横浜国立大学)
B-2-2 FMF 評価技術の検討	(公立大学法人大阪府立大学)

## (6) これまで得られた成果（特許出願や論文発表等）

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	41	17
	外国出願	8	4
外部発表	研究論文	12	6
	その他研究発表	143	67
	プレスリリース・報道	2	0
	展示会	10	4
	標準化提案	1	1

## (7) 具体的な実施内容と成果

## 課題 A-1 MCF の高品質・長尺化技術の開発

## A-1-1 紡糸条件の最適化技術 (日本電信電話(株))

高張力紡糸による機械強度向上のメカニズムとして、光ファイバ表面の圧縮応力の増大が高強度化の原因と考えられることを示し、ファイバ断面内の残留応力がファイバの構造パラメータに及ぼす影響についても示した。

本知見に基づき、125 $\mu$ m よりも太いクラッド径を有する MCF の紡糸条件の明確化に向け、クラッド径と紡糸条件の関係に対する体系的な実験検証に着手した。併せて、紡糸条件による機械強度の制御性について多様な母材で検証を行うため、共同提案者の各種製造法を用い統一仕様の 1 コア母材を作製した。

## A-1-2 生産効率の最適化技術 (住友電気工業(株))

目標とするファイバ生産性指標を達成に向け、コア挿入線引法を実現する紡糸設備を立ち上げた。また、大型母材用の運搬設備等を検討・導入した。これらの設備を用いて、コアをもたない母材の紡糸を実施し、製造プロセス上の課題を抽出した。その結果、母材表面の処理に起因すると考えられるクラッド径の変動を確認した。

## A-1-3 スケーラブル製造技術 ((株)フジクラ)

最終目標であるファイバ長 200 km 級母材の孔開法での実現を目指して、孔開に用いる母材の外径や、ドリル径の検討を行った。また、実際に大型の母材に、径の大きな孔を開けられるか検討を行った。

クラッド一括合成法による km オーダー以上の MCF の製造実現を目指し、製造工程の最適化を検討した。また、コア間に空孔を有する空孔構造 MCF の母材作製を目指し、基礎検討を行い、空孔を残した母材作製が可能であることが分かった。

## A-1-4 粉末形成クラッド技術 (古河電気工業(株))

加圧成形法を用いて 7 コア MCF 母材の作製および線引きを実施し、構造寸法精度、光学特性、機械特性の評価を行い、粉末形成クラッド法の有効性を確認した。また粉体成形法による長尺 MCF の作製に向け、静水圧加圧により大型加圧成形体(75 $\phi$ ×570l)を作製し、大型化が実現可能であることを確認した。

## 課題 A-2 MCF の多重効率の向上と最適化技術の開発

### A-2-1 多重容量の最大化技術 (住友電気工業 (株))

多重容量の大きい MCF では、測定時間の増大が課題となる。本検討では、MCF の測定を効率的に行うため、複数のチャネルの伝送損失および曲げ損失の一括測定を実現する方法として、入力光に変調をかけて各チャネルを識別する測定構成を立案した。

### A-2-2 空孔構造の活用技術 (日本電信電話 (株))

空孔付き 2 コアマルチコア光ファイバのクロストーク特性を評価し、コア間に単一の空孔を配置することで 20 dB 以上のクロストーク改善が実現できることを実験的に確認した。また、高次モードに対する空孔のクロストーク抑圧効果について評価を行い、空孔径に対するクロストーク改善量の関係を実験的に確認した。

## 課題 A-3 MCF 標準化方針の策定

### A-3-1 標準化指標とマイルストーンの明確化 (日本電信電話 (株))

MCF のケーススタディとして、125  $\mu\text{m}$  の標準クラッド径で光学特性が汎用の単一コア SMF に完全互換となる 4 コア MCF の設計指針を明らかにし、その広波長域における高速伝送への適用性を明らかにした。

Telefonica、KDDI と協調し、ITU-T SG15 に SDM 技術に関する標準化検討について寄書提案し、今後の標準化に向けた布石とした。

課題 150 および 17001 と連携し、コネクタ付き長距離・低損失 MCF と増幅・接続技術を用いた相互接続デモを構築し、国内外の展示会を通じて日本の MCF 技術における先導性を幅広く主張した。

## 課題 B-1 FM-MCF 設計技術の検討

### B-1-1 FMF 構造条件の明確化 (日本電信電話 (株))

高次モード伝送損失のクラッド外径依存性について、実験および理論解析の両面から評価を行い、LP11 モードに対して漏洩損失を十分低減するために必要なクラッド厚を明らかにした。

FMF/FM-MCF 技術の確立に向け連携体制を一層強化し、北海道大・フジクラとの連携により 4LP モードの 12 コア及び 19 コア MCF の実証を進め、空間多重密度で世界最高の性能指数 (RCMF>60、114ch) を有する FM-MCF を実現し、OFC2016 Post deadline に採択された。また FMF 評価技術に関しては、共同提案者間でモード間励振比のクロスチェックを行い、今後の課題を抽出した。

### B-1-2 FMF 解析技術の確立 (国立大学法人北海道大学)

コア多重とモード多重の組み合わせによる空間多重度向上の有効性について検討を行った。特に、2LP モード MCF と 4LP モード MCF の詳細な比較を実施し、4LP モード 12 コア MCF により相対コア多重度指数 RCMF50 以上 (クラッド外径 < 230  $\mu\text{m}$ ) が実現可能であることを明らかにするとともに、4LP モード 19 コア MCF により RCMF60 以上 (クラッド外径 < 250  $\mu\text{m}$ ) が実現可能であることを明らかにした。また、フィールド結合理論に基づく、マイクロバンドによるモード間結合を考慮したモード間群遅延差、及び、群遅延広がり解析法を開発するとともに、マルチモード非線形シユレディンガー方程式に基づく、FMF 伝送特性解析法を開発した。

### B-1-3 FMF 製造とクロストーク特性の明確化 ((株) フジクラ)

前年度作製を行った FM-MCF の評価結果をフィードバックし、多重度が高く、モー

ド間群遅延差の小さな FM-MCF (6 モード・12 コア) を設計し、作製評価した。この結果は、ECOC2015 にて発表された。さらに、コア数を増やした FM-MCF (6 モード・19 コア) を設計、作製評価した。小さなモード間群遅延差および、高い空間多重度 ( $RCMF > 60$ ) を実現し、OFC2016 Post Deadline に採択された。

2 コアファイバを用いて、高次モード ( $LP_{11}$  モード) と基本モード ( $LP_{01}$ ) のクロストーク ( $XT_{11-01}$ ) について評価を行い、非軸対称の  $LP_{11}$  モードのクロストークがモードの向き依存性があるという結果を得た。

## 課題 B-2 FM-MCF 用入出力及び評価技術の検討

### B-2-1 FMF 入出力技術の検討 (国立大学法人横浜国立大学)

3モードファイバの  $LP_{01}$  モード、 $LP_{11}^{even}$ 、 $LP_{11}^{odd}$  モードを合分波できる非対称テーパー結合モード遷移型モード合分波器を再設計して試作した。しかしクロストークは  $-6\text{dB} \sim -10\text{dB}$  と前年度からほとんど改善されなかったため、その原因を調査中である。また、 $LP_{21}^{odd}$  モードまでの4モード合分波器の設計を行い、試作中である。一方、新しいモード分析技術として縮退モードの振幅と位相まで含めた複素振幅を求められるモード分析法を考案して、高次モードの偏波状態の測定に初めて成功した。さらに当初の予定にはなかった新たな発見として、偏光分離器とコヒーレント4象限分割光検出を用いた高速モード分析法を考案して、その測定システム構築に着手し、また従来の LP 近似モードを用いたモード多重伝送の問題点を解析によって明らかにして、厳密固有モードを用いるモード多重伝送とそのための厳密固有モード合分波器を提案した。

### B-2-2 FMF 評価技術の検討 (公立大学法人大阪府立大学)

曲げを用いたモードフィルタによる単一コア2モードファイバ (TMF) のモード励振比評価の相対誤差を明確にするとともに、MF に適したファイバパラメータの設計法を明らかにした。FM-MCF の遮断波長の定義とその測定法を提案し、2コア MCF の遮断波長を測定し、本提案の有用性を確認した。また、ヒューモードファイバ (FMF) の我々の提案している高次モードの実効的なモードフィールド径を用いて波長分散を評価する方法を提案し検証した。更に、双方向 OTDR を用いて、FMF の高次モードの電界の広がりに対応する実効断面積を評価する方法を提案し検証した。