

平成24年度研究開発成果概要書  
革新的光ファイバ技術の研究開発（146イ01）  
課題イ マルチコア光ファイバの性能評価方法の研究  
および実用方式に向けての検討  
副題 マルチコア光ファイバの解析・評価技術の確立と  
国際標準化の推進に対する提案書

（1）研究開発の目的

非結合型マルチコア光ファイバ（MCF）における「結合特性の解析技術」、「入出力導波路の設計・製造技術」、「クロストーク評価技術」、並びに「光ファイバ構造条件」について検討を行い、100 Tbit/s/Fiber 伝送を実現する非結合型 MCF の最適構造を明確化する。また、結合型 MCF もしくは数モード光ファイバ（FMF）技術等との併用による更なる伝送容量の拡張性について明らかにし、今後の課題を抽出する。更に、「研究運営と標準化」に関して、課題146内及び課題150間との連携により効率的な研究開発を促進し、将来の国際標準化に向けたマイルストーンを策定する。

課題イ-1：「結合特性の解析技術」

光ファイバ伝搬方向における不均一性を考慮した、電力結合理論およびモード結合理論に基づく解析技術の確立により、非結合型 MCF の最適構造を明らかにする。更に、結合型 MCF、あるいは FMF におけるモード伝搬特性の解析技術について検討を行い、当該光ファイバ技術による伝送容量の拡張性、並びに今後の検討課題について明らかにする。

課題イ-2：「入出力導波路の設計・製作技術」

非結合型 MCF を対象とした Fan-out 導波路の設計・試作・評価を通じ、当該 Fan-out 導波路の最適構造を明らかにする。Fan-out 導波路の最適構造の検討を通じて、非結合型 MCF 自体のさらなる高密度化を可能にする構造についても検討する。また、モード合分波器の設計を通じ、結合型 MCF もしくは FMF 技術に関する今後の検討課題を抽出する。

課題イ-3：「クロストーク評価技術」

OTDR 法を含む非結合型 MCF のクロストーク評価技術を確立し、クロストーク測定における評価条件及び装置構成条件を明らかにする。また、MCF のパラメータ評価法に関する検討を行うとともに、一括評価法に関する装置構成条件について明らかにする。更に、結合型 MCF もしくは FMF の基本特性評価を行い、当該光ファイバの評価技術に関する今後の検討課題を抽

出する。

#### 課題イー4：「光ファイバ構造条件」

単一コア光ファイバにおける伝送特性と機械強度特性から、非結合型 MCF の幾何学構造条件を明らかにする。また、非結合型 MCF の高入力特性、並びに不均一性について検討を行い、当該光ファイバの高入力化に向けた検討課題、並びに伝送特性への影響について明らかにする。更に、結合型 MCF の基本特性について検討を行い、当該光ファイバによる伝送容量の拡張性、並びに今後の検討課題について明らかにする。

#### 課題イー5：「研究運営と標準化」

課題ア受託者、アドバイザー、並びに NICT 自主研究グループ殿と連携し、非結合型 MCF の目標特性を共有し、当該光ファイバの最適化を図ると同時に、課題 150 との連携により新たな光ファイバ技術研究を促進する。また、研究成果の対外活動方針について共有し、MCF 技術の効果的な普及に努める。更に、非結合型 MCF の国際標準化に向けたマイルストーンを策定し、ITU-T における議論の促進に向け適宜情報発信を行う。

### (2) 研究開発期間

平成 22 年度から平成 24 年度（3 年間）

### (3) 委託先

日本電信電話㈱＜幹事者＞、公立大学法人大阪府立大学、  
国立大学法人北海道大学、国立大学法人横浜国立大学

### (4) 研究開発予算（百万円単位切上げ）

|          |          |
|----------|----------|
| 平成 22 年度 | 40（契約金額） |
| 平成 23 年度 | 38（ 〃 ）  |
| 平成 24 年度 | 36（ 〃 ）  |

### (5) 研究開発課題と担当

課題イ：マルチコア光ファイバの性能評価方法の研究および実用方式  
に向けての検討の研究開発

1. 解析技術（国立大学法人北海道大学）
2. 入出力技術（国立大学法人横浜国立大学）
3. 特性評価技術（公立大学法人大阪府立大学）
4. 構造条件と信頼性（日本電信電話㈱）
5. 研究運営と標準化（日本電信電話㈱）

(6) これまで得られた研究開発成果

|      |         | (累計)144 件 | (当該年度)45 件 |
|------|---------|-----------|------------|
| 特許出願 | 国内出願    | 19        | 7          |
|      | 外国出願    | 0         | 0          |
| 外部発表 | 研究論文    | 12        | 5          |
|      | その他研究発表 | 118       | 54         |
|      | プレスリリース | 1         | 1          |
|      | 展示会     | 8         | 3          |
|      | 標準化提案   | 1         | 0          |

具体的な成果

(1) 解析技術

電力及びモード結合理論に基づく、非結合型 MCF のクロストーク特性の解析技術について検討し、曲げ、ねじれ、不均一性を考慮したアルゴリズムを開発した。特に、電力結合理論においては、指数型自己相関関数に基づく平均電力結合係数の解析的厳密解を導出した。また、FMF におけるモード伝搬特性の解析技術について検討を行い、FMF のマルチコア化による伝送容量の拡張性について明確化した。

(2) 入出力技術

異種非結合 MCF のコア高密度化法として、空孔アシスト 2 段クラッド構造によって 112 $\mu\text{m}$  の直径内に 37 本のコアを収納でき、電力結合理論によってクロストークは 100km 伝送後にも -52.2dB と低クロストークであることを明らかにした。また、積層ポリマー導波路型 Fan-in/Fan-out デバイスを設計、試作して 7 コア MCF との接続損失 0.2dB~6.8dB での接続を実証した。更に、同種結合系 MCF の結合モードを、入射角制御によって選択的に励振する方法と、モード励振分布を遠視野像分布から定量的に求める方法を開発して、曲げによるモード変換を定量的に評価する方法を開発した。

(3) 特性評価技術

周回方向の電界分布が一様でない光ファイバのモードフィールド径 (MFD) に関して、接続損失を考慮した定義を提案し、妥当性を実証するとともに、その定義に適した試験法について明らかにした。また、非結合型 MCF のクロストークの評価法について、パワー法および OTDR を用いた方法の装置化及び実証を行った。単一コアファイバのカットオフ波長と整合のとれる MCF のカットオフ波長の定義とその試験法について提案し、実証した。更に、2 モード光ファイバのモード群遅延時間差の評価法および高次モードの電界分布等に関する評価に関する基礎検討、MCF のコア形状パラメータ

$\alpha$  とクロストークとの関係、トレンチ型 MCF の伝送特性、モード多重用システムに適用可能な 2 モード光ファイバ (TMF) の最適構造設計について明らかにした。

(4) 構造条件と信頼性

伝送損失および機械強度のクラッド外径との関係について検討を行い、非結合型 MCF の最密構造について明らかにした。また、空間多重効率と光ファイバ性能指数を考慮し、非結合型 MCF による伝送容量の拡張性について提示した。また、マルチコア構造における高入力特性について確認すると同時に、空孔構造によるファイバヒューズの伝搬メカニズムについて明らかにし、空孔ファイバを用いたヒューズ伝搬停止部品を提案した。更に、長距離・高分解能な位相雑音補償型 OFDR の原理確認を行い、MCF における適用性を確認するとともに、偏波ゆらぎとクロストーク特性との関連性について提示した。その他、クロストーク特性の新たな評価法について提案すると同時に、遠視野分布を用いたモードフィールド径評価におけるクロストークの影響について明らかにした。

(5) 研究運営と標準化

課題 146 運営委員会を設置し、試作方針、並びに検討結果等をタイムリーに共有し、効率的に研究を推進した。併せて、課題 150 との間にも連携幹事会を設置し、課題を超えた情報の共有と効率的な研究開発を促進した。また、課題 146 を象徴するロゴを作成し、効率的な対外活動を展開すると同時に、依頼展示等を含む各種展示により検討技術の普及を促進した。更に、MCF 技術の標準化に向け課題提起を行い、ITU-T、SG15、Q5 における次会期 (2013~2016 年会期) の検討課題として採択された。

(7) 研究開発イメージ図

別添の通り

以上

# 「革新的光ファイバ技術に関する研究開発」の研究開発目標・成果と今後の研究計画

## 1. 実施機関・研究開発期間・研究開発費

- ◆実施機関 日本電信電話株式会社(幹事者)、大阪府立大学、北海道大学、横浜国立大学
- ◆研究開発期間 平成22年度から平成25年度(3年間)
- ◆研究開発費 総額112百万円(平成23年度 37百万円)

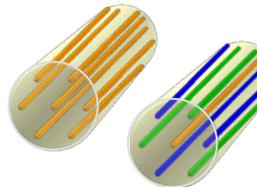
## 2. 研究開発の目標

マルチコア光ファイバ(MCF)の「解析技術」、「入出力技術」、並びに「評価技術」について検討を行い、既存光ファイバの伝送容量限界を打破する、超大容量伝送用光ファイバの技術基盤を確立し、MCF技術の国際標準化に向けた礎を築く。

## 3. 研究開発の成果

### ①解析技術

- 非結合型MCFのクロストーク特性解析技術
- 結合型MCFのモード伝搬特性解析技術(北海道大学)

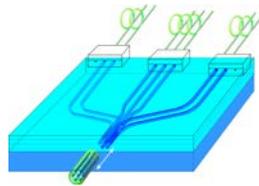


#### 研究開発成果: 解析技術

- 多重効率を最大化するMCFの構造条件の明確化では、結合特性とモード伝搬特性の解析技術が不可欠。
- 非結合型MCF中の**曲げやねじれ**、さらには**伝搬方向における不均一性**が結合特性に及ぼす影響を考慮
  - モード結合理論ならびに電力結合理論に基づく**クロストーク特性の解析技術を開発**
  - 実際に試作されたMCFの測定結果との**整合性を検証**するとともに、曲げおよびねじれと、それらの伝搬方向における不均一性が**伝送特性に及ぼす影響を明確化**
  - 電力結合理論において、数値計算を不要とする**平均電力結合係数の解析的厳密解を導出**
  - 結合型MCFに対応する**フューモード光ファイバ(FMF)のマルチコア化のための伝搬特性解析技術を開発**

### ②入出力技術

- 非結合型MCF用のFan-out導波路の設計・製作および評価
- 結合型MCF用のモード合分波導波路の設計(横浜国立大学)

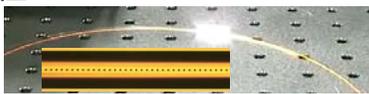
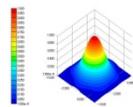


#### 研究開発成果: 入出力技術

- MCFの特性評価、並びにMCFを用いた光通信システムの構築では、非結合型MCFを対象としたFan-out導波路、並びに結合型MCFを対象としたモード合分波導波路等による入出力技術の開発が不可欠。
- 非結合型MCFを対象とした**積層ポリマー導波路型Fan-in/Fan-outデバイス**の設計・製作技術を開発し、7コアマルチコアファイバとの接続を確認
  - 結合型MCFを対象とした**非対称テーパ逐次分岐形モード分波器**を考案・設計し、全ての伝搬モードに対して**-24.3 dB以下のクロストーク特性**が実現できることを確認
  - 同じく結合型MCFの**選択的励振およびモード励振比の定量的評価法**を開発して曲げ特性を評価

### ③評価技術

- 電界分布とクロストークの評価技術(大阪府立大学)
- 光ファイバ構造条件、入力光強度限界、並びに光ファイバ伝搬方向の均一性(NTT)



#### 研究開発成果: 電界分布とクロストークの評価技術

- 空孔構造および結合型MCFでは、電界分布の定義と評価技術、及びクロストーク等の特性明確化が不可欠。
- 非円型電界分布の**モードフィールド径の定義**を明確化、**開口数可変法の有効性**を実験的に検証
  - パワー法およびOTDR法を用いたクロストーク測定法の測定装置**を構築し検証
  - MCFの遮断波長の定義と評価法**、及びFMFの**モード群遅延時間差評価法と高次モード励振法**を実現

#### 研究開発成果: 構造条件と入力光強度限界および均一性

- MCFの最適化では外形寸法条件、高入力耐性、および均一性について明確化することが不可欠。
- MCFの**最大コア数(約20)**を明確化し、伝送容量の**拡大ポテンシャル(通常ファイバの約10倍)**を提示
  - MCFの**ヒューズ伝搬特性**を確認すると同時に、空孔構造ファイバにおける**ヒューズ伝搬のメカニズムを明確化**し、低損失なヒューズ停止部品を実現
  - 位相補償型OFDRの均一性評価**への適用性を確認し、MCFにおける**偏波揺らぎとクロストーク特性の相関**を提示

4. これまで得られた成果(特許出願や論文発表等) ※成果数は累計件数と( )内の当該年度件数です。

|                 | 国内出願  | 外国出願 | 研究論文  | その他研究発表 | プレスリリース | 展示会  | 標準化提案 |
|-----------------|-------|------|-------|---------|---------|------|-------|
| 革新的光ファイバ技術の研究開発 | 19(7) | 0(0) | 12(5) | 118(54) | 1(1)    | 8(3) | 1(0)  |

5. 研究成果発表会等の開催について

(1) 課題内および課題間連携によるMCF技術の検討促進

課題146ーアおよびイの受託者が一堂に会し、各受託者における検討状況と今後の検討方針を共有することにより、効率的な研究開発の実施を促進。外部有識者、並びにNICT自主研究グループにもご参画・ご助言頂くことにより、**光通信システム全体を俯瞰した研究開発を推進した。**課題150との間に連携幹事会を設置し、**光ファイバ技術、接続技術、増幅技術、伝送技術の連携**により、MCF技術の検討を促進した。

(2) 各種展示会を通じたMCF技術の普及

|                                  |                                 |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 2011年2月22日 NTT R&Dフォーラム (社内展示会)  | 2011年6月16日 IEEE ICC2011 (社外展示会) |
| 2011年11月29日 NTT つくばフォーラム (社内展示会) | 2011年12月15日 OCSシンポジウム (社外展示会)   |
| 2012年2月15日 NTT R&Dフォーラム (社内展示会)  | 2012年9月25日 インターオプト2012 (社外展示会)  |
| 2012年10月18日 NTT つくばフォーラム (社内展示会) | 2012年12月13日 OCSシンポジウム (社外展示会)   |

社内外の展示会において、光通信基盤の革新に向けた国家プロジェクトとして、MCF技術の研究開発を紹介。引き続き、国内外に向けMCF技術の普及に努める。 **※OECC2013にてMCF相互接続の展示デモを計画中(課題150とも連携)**

6. 今後の研究開発計画

本公募研究の成果を基盤として、MCF技術の実用化・標準化につなげることを最終目標とする。実用化に向けては実際の光伝送システムの構築に不可欠となる、**光ケーブル等の各種光線路物品の検討・評価を継続的に実施**していく予定である。標準化に関しては、ITU-T(国際電気通信連合、電気通信標準化部門)、Q5/SG15(光ファイバの特性と試験法)において、**空間多重用光ファイバを次会期(2013~2016年会期)の検討課題**として盛り込むことが採択された。今後の技術動向を勘案し、日本発の技術として国際標準化の主導権を握る。また、後継課題の【革新的光通信インフラの研究開発(課題150)】との連携を継続し、新たな光通信基盤技術の更なる普及に向け、研究開発活動のみならず、**各種展示会を通じた広報活動も展開**していく予定である。