

## 1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆ 課題名 : 革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発
- ◆ 副題 : ペタビット級空間多重光ファイバの実用化・大容量化技術
- ◆ 実施機関 : 株式会社KDDI総合研究所、古河電気工業株式会社、住友電気工業株式会社、国立大学法人東北大学
- ◆ 研究開発期間 : 平成25年度から平成29年度(5年間)
- ◆ 研究開発予算 : 総額577百万円(平成27年度115百万円)

## 2. 研究開発の目標

マルチコアファイバの低コスト・大量生産ファイバ製造技術、ならびに、多心ケーブル化を念頭においた高信頼・高精度ファイバ製造技術を確立するとともに、それらファイバの評価技術を実現し、ペタビット伝送性能を有するマルチコアファイバの実用化を推進させる。また、マルチコアファイバにモード多重技術を融合させ、モード多重マルチコアファイバ作製技術およびその評価・伝送技術を検討する。モード多重数、コア数、そして変調多値数を最適化することで、マルチペタビット級空間多重多値変調伝送の実現可能性を実証することを目的とする。

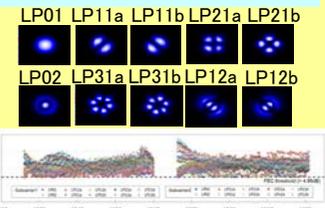
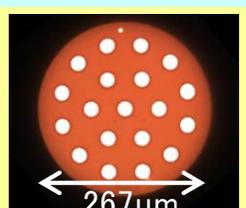
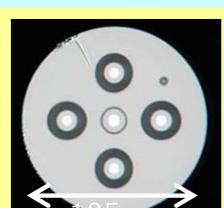
## 3. 研究開発の成果

研究開発目標

研究開発成果

課題1700101(KDDI総合研)

モード間結合とコア間クロストークを十分抑圧するためのコア数とモード多重数の最適設計及び大容量マルチコアファイバ伝送システムの設計指針を明らかにする。マルチペタビット級の潜在的伝送性能を実証する。

モード多重伝送システムの伝送性能評価	モード多重マルチコアファイバの潜在的伝送性能	マルチコアファイバの実用化検討
 <p style="font-size: small;">LP01 LP11a LP11b LP21a LP21b LP02 LP31a LP31b LP12a LP12b</p> <p style="font-size: x-small;">Q値特性</p>	 <p style="font-size: x-large;">267µm</p>	 <p style="font-size: x-large;">125µm</p>
<p>&lt;伝送に用いた10モードと48km伝送後のQ値特性&gt;</p>	<p>&lt;10.16 Pbit/s伝送に用いた6モード19コアファイバ&gt;</p>	<p>&lt;シングルモードファイバと互換性を有する5コアファイバ&gt;</p>

研究開発成果: 大容量マルチコアファイバ伝送技術

- モード間結合が極力抑圧された実用的なモード多重伝送システムにおけるモード多重数を見極めるため、48km **10モード多重伝送実験**を行い、2×2または4×4MIMO処理のみを用いて、単一コアファイバにおける**世界最大の伝送容量257 Tbit/s**を達成した。
- 課題1700103と連携し、マルチコア・マルチモード空間多重ファイバの設計・試作を行い、その周辺部品の開発も進め、**超100空間多重伝送技術**を確立した。
- 6モード19コアファイバを用いた高密度空間・波長多重伝送実験を行い、ファイバ1芯あたり、**世界最大となる10.16 Pbit/sの伝送容量**と周波数利用効率1099.9 bit/s/Hzを達成した。これにより、モード多重マルチコアファイバの**究極性能を見極めるとともに、そのファイバ設計指針を明確化**した。
- マルチコアファイバの実用化を見据え、既存のシングルモードファイバからのマイグレーション案を検討した。課題1700102と連携し、**シングルモードファイバと互換性のある125µmクラッド径の5コアファイバ**を試作し、そのケーブル開発・フィールド検証を実施した。

## 3. 研究開発の成果

### 研究開発目標

### 研究開発成果

#### 課題1700102(古河電工)

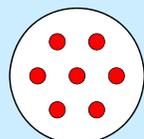
マルチコアファイバのコア密度拡大を達成し、単一モードによるマルチペタビット級伝送に耐え得る100km級ファイバの実現を目指す。また、母材大型化、高速測定技術の開発を通じて、マルチコアファイバの実用化の道筋を立てる。

将来の通信需要増大に対応可能な技術



空間多重伝送技術

マルチコアファイバ



多重効率最大化  
製造性向上

- A マルチコアファイバのコア密度拡大技術
- B マルチコアファイバ母材の大型化技術
- C マルチコアファイバの高速測定技術

#### 研究開発成果: マルチコアファイバのコア密度拡大技術

マルチコアファイバによる伝送容量拡大のためには、コア密度向上とクロストーク増大のトレードオフ解消が不可欠。

- 本研究開発では、**高コア密度MCFの設計最適化とケーブル化実証を完了**。

#### 研究開発成果: マルチコアファイバ母材の大型化技術

母材大型化による低価格化が、マルチコアファイバ実用化に向けた重要な鍵。

- 本研究開発では、3種の新製法を精査し、**100km超級のマルチコアファイバを可能とする製法と十分な精度を確認**。

#### 研究開発成果: マルチコアファイバの高速測定技術

マルチコアファイバの測定効率化による製造性向上も、実用化の鍵。

- 本研究開発では、ファンアウトをベースとした**複数コアを一括して測定可能な測定方法を確立**。

#### 課題1700103(住友電工)

マルチコアファイバ(MCF)の実用化に向け、光ケーブル化技術を考慮したファイバの構造・性能を下記の2テーマを通じて明らかにする。

##### 高信頼マルチコアファイバの開発

MCF及びMCF光ケーブルの機械強度、及び光学特性の影響に関する検討を行い、通信インフラとして実用的とされる「25年後の実用的な敷設状況下で破断確率 $10^{-5}$ 以下」、「対環境変化によるクロストークの上限値:  $-30\text{dB}/100\text{km}$ 以下」を満足するMCFの構造の制約を明らかにする。

尚、モード多重伝送用ファイバを試作し、その実用性を課題170-01-01と協調して検証する。

##### マルチコアファイバのコア配列高精度化技術の開発

接続損失の低減を単芯・多条にて実証するための製造方法、及びマルチコアファイバのコアの配列を容易とするための光ファイバ形状の検討を行い、各コアのコア位置偏差:  $0.5\mu\text{m}$ 以下の実現、単芯・多条接続方法の提案・実証を行う。

#### 研究開発成果: マルチコアファイバの高信頼化

- スクリーニングなど適切な条件の設定により、**外径 $200\sim 320\mu\text{m}$ クラッドファイバでも汎用SMF同等の機械的信頼性を実現できる**ことを明らかにした。
- MCFのケーブル化実験を通じ、推測される**最悪ケースでも、半径 $14\text{cm}$ のポビン巻き時のXTが $-46\text{dB}/100\text{km}$ であれば、十分に対環境変化によるXTの上限値:  $-30\text{dB}/100\text{km}$ 以下にできる**ことを明らかにした。
- 上記からMCF設計制約を解明。信頼性目標を満たすMCFの具体設計も実施。

#### 研究開発成果: マルチコアファイバの高精度化

- MCFのコア位置精度向上について、誤差要因の特定と誤差の低減手法を明らかにし、**コア間隔誤差を $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以下に抑えたMCFを実証**した。
- MCF多条コネクタを提案し、**最大256コアを1つのMPOコネクタで、 $1\text{dB}$ 以下の損失で接続することと、全コアのPC接続を実現**した。
- 回転調心を容易とする**樽型クラッドMCFの開発**を行い、試作MCFを用いたV溝実装で、80本中79本で $\pm 0.9^\circ$ 以下の回転調心精度を**パッシブ調心で実現**。

## 3. 研究開発の成果

研究開発目標

研究開発成果

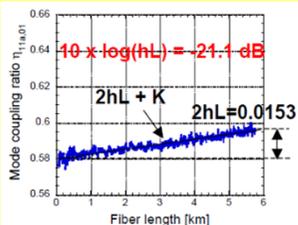
課題1700104(東北大学)

マルチモードファイバのモード結合評価技術ならびにモード結合測定装置を開発する。また、他課題との連携により3つの“マルチ”技術の結合によりペタ～マルチペタビットの超大容量伝送を実現する。

モード結合評価技術の開発

モード結合測定装置の開発

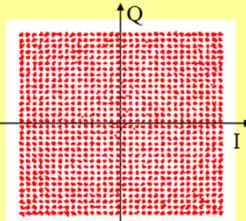
超多値QAMマルチコアファイバ伝送技術の開発



LP<sub>01</sub>-LP<sub>11a</sub>間のモード結合測定結果



モード結合測定装置の概観写真



1024 QAM, 19コアファイバ伝送

- ①モード結合評価技術
- ②超多値QAM伝送技術

研究開発成果:モード結合評価技術の確立ならびに測定装置の作製

- マルチモードファイバを用いたモード分割多重伝送において、異なるモード間の結合によるクロストークの影響の高精度な評価技術が重要となる。本課題では、モード結合係数の大きさと長手方向の局所的なモード結合の分布を非破壊で同時に評価することが可能な新しいモード結合評価技術を開発した。
- マルチコアファイバおよびマルチモードファイバの両方に対応したモード結合測定装置を開発した。

研究開発成果:超多値QAM信号のマルチコアファイバ伝送特性評価

- 課題1700102で連携して256値以上の超多値QAM伝送に適した19コアファイバを開発し、本ファイバを用いて1024値の超多値QAM信号のマルチコアファイバ伝送が実現可能であることを実証した。
- WDM伝送用光源として、CバンドおよびLバンド全域で波長可変である外部共振LDならびに注入同期用DFB-LDアレイを開発した。そして、これら光源と19コアファイバを組み合わせ、C, LバンドWDM-256値QAM伝送実験を行い、2.2ペタビットの超大容量伝送の可能性を実証した。

4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

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 報道	展示会	標準化提案
23 ( 3 )	11 ( 3 )	19 ( 9 )	164 ( 53 )	22 ( 10 )	10 ( 1 )	0 ( 0 )

※成果数は累計件数、( )内は当該年度の件数です。

(1) 6モード19コアファイバを用いた世界最大容量10ペタ伝送実験の成功

光通信分野でヨーロッパ最大の国際学術会議ECOC2017@スウェーデンにて、10ペタビット伝送の研究成果が**ポストデットライン(PD)論文**(伝送カテゴリ)セッションの**トップで採択**され、**ECOC公式プレスリリースにて高く評価**された。(下記ECOC HPより)  
 One of the major achievements include breaking the record for how much data can be transmitted through a single optical fiber. In a heroic effort, researchers from Japan have managed to break the current record by a factor of 5, reaching a mesmerising total transmission of 10 petabits per second using over 100 spatial channels

(2) 標準外径125μm 8コアファイバを用いた世界最高密度のケーブル及びコネクタの開発に成功

125μmの標準クラッド外径に8コアを内蔵した短距離0帯伝送用のマルチコアファイバを用いて、MCFを12本内蔵する外径3mmのインドアコードを試作し、通信用光ファイバケーブルとしては世界最高のコア密度の13.6 core/mm<sup>2</sup>を実現するとともに、同じファイバを用いて高精度のSMF用MTフェルールに32本のMCFを実装することで、世界最高密度の256コア光コネクタを実現した。光通信分野で世界最大の国際会議OFCにて、ファイバの開発と**ケーブル**の試作結果は**2015年にPD論文**として採択され、**コネクタ**の成果は**2017年にPD論文**として採択された。

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

空間多重(SDM)伝送技術は、陸上長距離や海底向けや、データセンター内といった短距離向け配線としての活用が期待されるが、その普及には各用途に適した標準化、またはMSA等による実効的な規格化が望まれる。そこで、課題17002及び関連課題間(課題188)と連携し、今後1)標準外径MCFを対象としたファイバおよびコネクタ標準のケーススタディを積極的に提案し、かつ2)大容量SDM(標準外径よりも大きなファイバ)標準への橋頭堡とする予定である。また、さらなる対外連携等の推進により技術の成熟化を行い、市場形成や技術デファクト化への貢献を行う。