

令和 4 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 20301
研究開発課題名 マルチコアファイバの実用化加速に向けた研究開発
副 題 標準クラッド径マルチコアファイバ伝送路技術の確立

(1) 研究開発の目的

本研究開発では、先行課題 170「革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発」における標準クラッド径マルチコア光ファイバ（MCF：Multi Core Fiber）および新たな製造技術の検討成果を発展的に継承し、100 Pbit/s・km 級の伝送ポテンシャルを有する高品質・高信頼性の空間分割多重（SDM：Space Division Multiplexing）伝送路の効率的な実現、ならびに先行課題 188「空間多重フォトリックノード基盤技術の研究開発」との連携を通じた光通信線路技術の新たな技術標準の実現に向けた研究を推進することを目的とする。具体的には、MCF 製造技術、MCF 伝送路技術、および MCF 周辺技術の三つの要素に関し、以下の技術確立を目指す。

MCF 製造技術 : 紡糸長・コア数積における 1500 km・コア超の実現

MCF 伝送路技術 : 損失およびクロストーク制御技術の確立

MCF 周辺技術 : 接続・評価技術の確立と標準化提案への橋渡し

(2) 研究開発期間

平成 30 年度 ～ 令和 4 年度（5 年間）

(3) 受託者

日本電信電話株式会社<代表研究者>

株式会社 KDDI 総合研究所

住友電気工業株式会社

株式会社フジクラ

古河電気工業株式会社

(4) 研究開発予算（契約額）

平成 30（2018）年度から令和 4（2022）年度までの総額 850 百万円
（令和 4 年度 170 百万円） ※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目ア：高品質・高信頼性 MCF 技術

1. 標準クラッド径 MCF 技術（日本電信電話株式会社）
2. 高効率・高品質 MCF 製造技術（住友電気工業株式会社）
3. 高品質・高信頼性スケーラブル製造技術（株式会社フジクラ）
4. 非開削母材製造技術（古河電気工業株式会社）

研究開発項目イ：MCF ケーブル・伝送路技術

1. 敷設・特性制御技術（日本電信電話株式会社）
2. 伝送路設計技術（株式会社 KDDI 総合研究所）

研究開発項目ウ：標準化に向けた MCF 周辺技術

1. MCF 標準化技術（日本電信電話株式会社）
2. MCF 接続技術（住友電気工業株式会社）
3. MCF 高効率評価技術（株式会社フジクラ）
4. MCF 入出力技術（古河電気工業株式会社）

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	39	9
	外国出願	39	10
外部発表等	研究論文	5	3
	その他研究発表	122	37
	標準化提案・採択	7	2
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	10	4
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目ア 高品質・高信頼性 MCF 技術

研究開発項目ア-1：標準クラッド径 MCF 技術（日本電信電話株式会社）

【最終目標】

コア構造の製造性や光学特性の設計自由度を考慮し、適用距離と伝送帯域をパラメータとして標準クラッド MCF の設計条件および適用領域を明らかにすることを目標とする。なお、MCF ケーブルへの適用も鑑み、MCF のケーブル化後の光学特性として、損失が波長 1310 nm および 1625 nm で 0.4 dB/km 未満かつ波長 1550 nm で 0.35 dB/km 未満とすることで汎用的なシングルモード光ファイバ (SMF: Single Mode Fiber) の国際標準との整合を目指すとともに、クロストーク (XT) が 100 ~ 1000 km 長で所望の適用距離において波長 1625 nm で -24 ~ -16 dB ($10^{-5.4} \sim 10^{-2.6} \text{ km}^{-1}$) 未満であることを目標とする。

【実施内容と最終成果】

簡易な屈折率分布で製造性向上が期待できるステップインデックス (SI: Step-Index profile) 型、XT を低減でき長距離伝送に適する屈折率分布を用いたトレンチ (TA: Trench Assisted) 型それぞれの標準クラッド径 MCF について、既存の SMF 標準との互換性を考慮した設計・試作を行い、研究開発項目イ等でのケーブル実装および敷設評価を通じて設計条件の妥当性を確認した。さらに、上記設計条件やケーブル敷設・経時変化を考慮し、標準クラッド径 MCF の標準仕様案を策定した。また SI 型 MCF (SI-MCF)・TA 型 MCF (TA-MCF) 混在伝送路について光信号の入力方向による XT 低減効果を確認し、1000 km 超の伝送実験で良好な伝送特性を得た。

研究開発項目ア-2：高効率・高品質 MCF 製造技術（住友電気工業株式会社）

【最終目標】

先行課題 170 で提案したコア挿入線引き法を含め孔開法の深耕により、品質と量産性が両立可能な MCF の製造技術の開発を行う。一般に光ファイバを安定して生産するには母材内部への異物混入や気泡発生を抑制する必要がある、これらの要因はクラッド径の変動や機械強度の低下といった問題を引き起こす。本検討では、 $\pm 1 \mu\text{m}$ 以上のクラッド径変動を異常点と定義し、ファイバが内包するコアの総長に対する異常点の頻度 (高品質生産指標) を 0.005 回/ (km・コア) 以下に抑制することを目標とする。これは例えば 4 コア MCF の場合、長さ 50 km 当たりの異常点を 1 回以下にすることに相当する。また、量産技術の拡張性を示すため、MCF 母材孔開技術を深耕し、母材加工効率の向上を実現し、1500 ~ 2000 km・コア超の紡糸長・コア数積を実現するための基盤技術を確立する。

【実施内容と最終成果】

- 石英硝材の長尺孔開を検討し、当初目標としていた長さの孔開が可能であることを、目標加工長に対するアスペクト比が約 68、および約 100 前後となる孔開ツールを用いて実証。

- コア挿入母材化法とコア挿入線引き法を試作実験含めて比較を行い、品質と量産性の両立が容易なのはコア挿入母材化法であることを明確化。コア挿入母材化法で異常点頻度を 0.00077 回/ (km・コア) に抑制。
- 目標加工長対比 2/3 のジャケット管を作製し、コア挿入母材化法で 1371 km・コアの MCF を紡糸。異常点は 0 回であり、目標加工長のジャケット管を用いることで 2056 km・コアを実現できる MCF 製造プロセス技術基盤技術を確立。
- 双方向 MCF 伝送における設計考慮要素を明らかにした。また、高精度な XT 検査方法についても提案した。

研究開発項目ア-3：高品質・高信頼性スケーラブル製造技術（株式会社フジクラ）

【最終目標】

孔開法を用いて、低コスト化を目指した母材大型化や高品質・高信頼性の検討を行い、2000 km・コア超の MCF 製造技術の確立を目指すとともに、引張りブルーフ試験（ブルーレベル 1 %）での破断回数が、単位長さ、コア当たり 0.005 回/ (km・コア) 以下を実現する。さらに、課題 170 でコンセプト実証を行った OBR (Over-Bundled Rods) 法に基づくクラッド一括形成法の検討を行い、高品質で、高信頼性のあるスケーラブル製造技術が実現可能か見極める。

【実施内容と最終成果】

孔開法による母材大型化技術を開発し、最長 718 km の 4 コア MCF (2872 km・コア)、引張りブルーフ試験（ブルーレベル 1 %以上）において、破断回数 0.004 回/ (km・コア) を実現した。また、クラッド一括形成法では、多角形ロッドの導入によりコア変形を平均 2 % 以下に抑制した。しかし、母材大型化では、束ねたロッドが太いため外付けすることが難しく、低コストを実現する量産技術には向かないと判断した。

研究開発項目ア-4：非開削母材製造技術（古河電気工業株式会社）

【最終目標】

母材大型化を目指した開発を行う。特に、クラッド一括形成法に準ずる、非開削（非孔開）による母材作製技術に取り組み、開削（孔開）方式では実現できていない母材サイズを実現しつつ、引張りブルーフ試験（ブルーレベル 1 % 以上）における単位長さ、コア当たりの破断回数が、0.005 回/ (km・コア) 以下を目標とした高品質化を図る。必要に応じて非開削で培った技術を開削による技術にも適用し、両者の比較をしつつ最適な製法を模索することにより、目標とした 1500 km・コア超母材実現を可能とする技術を確立する。

【実施内容と最終成果】

非開削法、孔開法の両製法にて 1500 km・コア超母材を実現。孔開法による母材から 1500 km・コア/母材超の 4 コア MCF を作製した。1500 km・コア超サイズとなる非開削法母材を作製し、母材の組立、一体化を行い、4 コア MCF の線引きに成功した。4 コア MCF の引張りブルーフ試験での破断回数 0.0015 回/ (km・コア) を実現した。

研究開発項目イ MCF ケーブル・伝送路技術

研究開発項目イ-1：敷設・特性制御技術（日本電信電話株式会社）

【最終目標】

研究開発項目ア-1 で設計・試作した MCF を用いてケーブル化における工程間およびフィールド環境下における経時的な特性変化を検証し、既存光ケーブル構造による MCF の損失および XT の制御性を明らかにする。さらに汎用 SMF に対する既存光ファイバケーブル標準を考慮し、損失が波長 1310 nm および 1625 nm で 0.4 dB/km 未満かつ波長 1550 nm で 0.35 dB/km 未満であり、XT が 100 ~ 1000 km 長で所望の適用距離において波長 1625 nm で -24 ~ -16 dB ($10^{-5.4} \sim 10^{-2.6} \text{ km}^{-1}$) 未満である標準クラッド径 MCF ケーブル技術を確立することを目標とする。なお、研究開発項目ア-1 の最終目標で述べたように、XT 低減に必須となる TA 型屈折率分布部分では、1380 nm 帯で OH 基吸収による損失増加が発生し、上述の 0.4 dB/km

を上回る可能性が高いと考えられるが、初期目標としては上述の損失特性を目指した検討を行うこととする。

【実施内容と最終成果】

- 標準クラッド径 MCF の高密度光ケーブル構造への適用性および伝送特性を明らかにするため、ファイバ素線、ケーブル化、敷設工程間特性検証結果に基づき、低損失性と XT 特性の制御性の明確化を完了。また、フィールドに敷設した MCF 伝送路を用いたコア特性偏差低減技術やコア間 XT の波長依存性補償技術、簡易 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) DSP (Digital Signal Processor) を用いたコア間補償技術検証を実施し、伝送ポテンシャルを明示。
- TA-MCF を含むフィールド環境における季節変動特性の評価を完了し、長期安定性を確認。

研究開発項目イ-2：伝送路設計技術（株式会社 KDDI 総合研究所）

【最終目標】

研究開発項目ア-1 で設計・試作する標準クラッド径 MCF を用いて、伝送路設計のために必要となる MCF 接続時の損失や XT の制御性を統計的に検証し、長距離用伝送路設計の指針を明確化する。さらに、研究開発項目イ-1 が設計・試作する多心 MCF ケーブルを用いて、MCF 多段接続時の長距離伝送特性（～1000 km）を検証し、上記設計指針の妥当性と 100 Pbit/s・km 級の実現性を評価し明らかにする。加えて、MCF 伝送路の適用領域拡大を念頭に、今後の高速 Ethernet のインタフェースなどとの親和性や適用性についても明らかにする。

【実施内容と最終成果】

- フィールド環境下に敷設した SI-MCF および低 XT な TA-MCF ケーブルにおいて、マルチコア融着接続やマルチコアコネクタ接続の低損失化を実現し、光ケーブル内の MCF を多段接続することにより評価用伝送路を構築。
- 多段接続（融着・コネクタ）された SI-MCF および低 XT な TA-MCF における、挿入損失（IL：Insertion Loss）やコア間 XT、偏波変動性、マルチベンダ環境での光学特性など伝送路設計に必要なパラメータを測定し、設計指針を明確化。
- マルチベンダ接続された敷設済みの低 XT な TA-MCF ケーブルを用いて、周回系を用いた長距離伝送ポテンシャルの検証を行い、伝送距離 1800 km および伝送容量 63.58 Tbit/s（容量距離積 114 Pbit/s・km）の実現性を確認。
- 最新の 100 G/400 GbE テスタを用いて敷設 SI-MCF ケーブルを評価し、データセンタ間接続（DCI：Data Center Interconnection）等への適用性を確認。

研究開発項目ウ 標準化に向けた MCF 周辺技術

研究開発項目ウ-1：MCF 標準化技術（日本電信電話株式会社）

【最終目標】

MCF の相互接続および標準化に必須となる幾何学パラメータについて、その定義および試験法を明確化する。さらに、複数の MCF 入出力技術についてハイパワー耐性を比較・検証することで、SDM 伝送システムへの適用性と課題を明らかにする。さらに本検討と研究開発項目アおよびイでの検討結果を勘案し、標準クラッド径 MCF の標準化提案に向けた計画を策定することを目標とする。特に幾何学パラメータについては、パラメータ条件とその試験法の草案を作成し、前述した標準化提案に備えるものとする。

【実施内容と最終成果】

MCF の断面画像 2 値化による幾何学構造の定義・評価方法を提案し、評価結果と接続損失との相関による定義・評価方法の妥当性を確認した。またマルチコアファンイン・ファンアウト(FI/FO：Fan-In/Fan-Out) デバイスのハイパワー耐性について、動作原理による耐性の違い、および時間安定性を実験的に明らかにし、各種 FI/FO デバイスの大容量 MCF 伝送路への適用性を明確化した。SDM 技術に関する国際標準化議論については研究分担者および関連する研究課題と連携して提案・議論を推進し、ITU-T (International Tele-communication Union

Telecommunication Standardization Sector) において SDM 技術に関する技術レポートの発行を実現するとともに、研究開発項目ア・イの検討も加味し、標準クラッド径 MCF の標準仕様案を策定して国内関係者と共有した。さらに、標準仕様案の検討では、コア間双方向伝送を考慮することにより、標準クラッド径 SI-MCF・TA-MCF でコア間隔を含む統一した標準仕様を見出した。

研究開発項目ウ-2：MCF 接続技術（住友電気工業株式会社）

【最終目標】

MCF 実用化を見据えた接続技術を確立するため、試作向きの小ロット製法ではなく量産性のある製法を用いて作成した単心 MCF コネクタの信頼性評価を行う。これにより実用化が可能な量産性と信頼性の両立に向けた課題を明らかにするとともに、量産性と信頼性を両立した単心 MCF コネクタを、IL 0.5 dB 以下、反射減衰量 (RL : Return Loss) 40 dB 以上、有意な XT 劣化なしに実現することを目標とする。

また、MCF の接続部品製造には回転調心プロセスが必須となるが、MCF は線引き時に一定のねじれが発生するため、ファイバ長手方向のコア位置の回転状態は必ずしも一定ではない。このため、ある断面において回転調心を行っても、接続部品端面の研磨等を行うことで回転方向のずれが発生し、製造する MCF 接続部品の歩留まりや製造性に影響する。そこで本研究開発項目では、調心すべき断面位置を直接観察し側方調心を可能とするため、ファイバの側面からコアの回転角度を観察・定量化する方法、および、側面調心を可能とする MCF が備えるべき特徴と状態を明らかにする。

一方、MCF の利点である光配線の高密度性を高めるため、MCF を多心で扱う技術の重要性が高まると想定される。そこで MCF の多心整列技術の原理検討を行い、その課題の明確化または実証を行うことを目標とする。

【実施内容と最終成果】

- 単心 MCF コネクタにて、目標を上回る低接続損失と、量産性と信頼性の両立を前倒しで実現した。
- ファイバ側方から回転角度を評価する観察系を立ち上げ、側方調心が可能なファイバが備えるべき幾何的・光学的要件を明確化した。
- 多心整列技術を用いた、複数サンプルの試作評価を実施した。多数の MCF を調心した際の回転調心精度は $\leq 0.23^\circ$ と、高精度な多心整列技術であることを実証した。また、当整列技術を応用し、4 コア MCF を 24 本実装した MPO コネクタの試作評価を実施した。これまでに 3 ペアの MPO コネクタの試作・評価を行い、3 ペアすべて、全 96 コアで ≤ 0.7 dB の低接続損失を確認し、多心一括低損失接続を実証した。

研究開発項目ウ-3：MCF 高効率評価技術（株式会社フジクラ）

【最終目標】

複数コア並列測定技術の検討（モードフィールド径 (MFD : Mode Field Diameter) 測定など）により、通常 SMF の測定時間比で、1.5 倍以下が実現可能であることを示す（4 コアの場合、コア当たりの測定時間 1/2.7 以下）。

【実施内容と最終成果】

MCF の MFD 評価技術を開発し、4 コア MCF の MFD 測定時間で、通常の SMF 比 1.5 倍（1 コア当たり 1/2.7）を達成。測定精度は、 $\pm 5\%$ 以下であることを確認。

研究開発項目ウ-4：MCF 入出力技術（古河電気工業株式会社）

【最終目標】

標準クラッド径 MCF に最適な FO を実現する。MCF との接続性はもとより、ユースケースを鑑みて、フィールドでの使用や工場内測定に有効な融着にて接続可能な構成での実現を検討する。さらには使用状況を鑑みた環境試験や接続再現性試験などを行い、実用性の高い入出力デバイスを実現する。

【実施内容と最終成果】

4 コア MCF 用 FO の設計最適化を実施した。フィールド環境で求められる環境試験、機械試験、接続再現性試験を完了した。MCF 同士の融着損失を 0.1 dB 以下に低減した。MCF の自動調心から融着までの時間を 2 分 30 秒以内に短縮することに成功した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

MCF 技術の実用化、国際標準化に向けては、特に断面構造に関する指標の明確化が重要となる。本委託研究では、周辺技術および運用技術との親和性・要求条件を考慮し、クラッド径、コア数、コア間隔および適用領域に応じた XT 値を規定した標準草案を策定するとともに、課題内・課題間の連携によるフィールドに敷設した MCF ケーブル伝送路やコネクタや MCF 入出力デバイス、融着機等の周辺機器を活用した相互接続実証を行い、展示や对外発表を通じ効果的にアピールしてきた。

MCF 技術は将来のペタビット級伝送の実現に加え、屋内や管路等、光配線スペースに制約が存在する空間へのソリューションとしても期待される。MCF のコスト削減のみならず、本委託研究成果を含むこれまでの検討成果および知的財産権が有効に活用されるものと考えられる。

また、本委託研究では既存 SMF 標準との親和性、ならびに汎用屈折率分布を活用した SI-MCF の可用性を新たに明らかにしたことから、MCF 技術の低コスト化、実用展開および標準化の加速に向けた効果が期待される。

MCF 技術については、当面の市場として中継機を伴わないポイント・ツー・ポイントでの陸上ネットワークや、データセンタ内やデータセンタ間、ビル内などの限られたスペースにおける光配線によるソリューションが見込まれる。本委託研究を含む設計・製造技術の成果、および標準クラッド径の採用により、高品質・長尺製造技術が確立されるとともに、関連課題等の成果も通じ周辺技術も確立されつつある。特に、汎用的な SI 型の屈折率分布を適用した MCF の最適化と、その適用性の明確化、ならびに TA 型と同等のコア間隔の適用性を見出したことは、MCF 技術の低コスト化および早期展開に有効であり、これらの技術を活用した短距離伝送向けの市場形成および標準化が進むものと期待される。