

3. 研究開発の成果

研究開発項目1) 空間モード制御光ファイバ実装技術

研究開発項目1-a) ケーブル伝送路設計・実装技術（日本電信電話株式会社）

- 【最終目標】長尺(5km)ケーブルで20ps/√km以下のSMD係数の制御性を実証。研究開発項目2) 連携検討用の12コアMCF素線を試作し提供。
- 【最終成果】結合MCFの光学特性コア数依存性を明確化し、4~12コアMCFを実装した短尺(1km)ケーブルの構造最適化による広波長域なSMD低減効果を実証。長尺(5km)ケーブルを試作し、最終目標(20ps/√km以下のSMD係数)を達成、損失・SMD係数の季節変動を評価。研究開発項目2) 検討用12コアMCF素線試作およびFI/F0含む線路を提供。

研究開発項目1-b) ケーブル伝送路接続・構築技術（住友電気工業株式会社）

- 【最終目標】数10km超の結合MCFの融着接続においてMDL<1.0dB/30接続/4コアの融着接続および引張ひずみ2%以上の高強度とMDL≤0.5dB/30接続/4コアを実証する。
- 【最終成果】研究開発項目1-a)、3-a)と連携し、伝送長68.5kmの結合型12コアMCFおよびケーブルを融着接続してMDL≤0.13dB/30接続/4コアを実証するとともに、引張ひずみ2.1%の高強度接続においてもMDL≤0.11dB/30接続/4コアを実証。

研究開発項目2) 長距離ダイナミック低負荷MIMO処理構成基盤技術

研究開発項目2-a) 低負荷ダイナミックMIMO信号処理方式基盤技術（日本電信電話株式会社）

- 【最終目標】空間多重数4以上の結合型MCFリンクにおいて動的追従速度25kHzまで対応可能なMIMO処理構成基盤技術の検討を行う。
- 【最終成果】種々の高速追従・低負荷MIMO方式を提案し、効果を実証(世界最長10モード1560km伝送の実現などを含む)。研究開発項目1-a)、1-b)、2-b)、3-a)、3-c)と連携の下、動的変動を加えたフィールド敷設結合12コア伝送路において40kHzまでの変動への動的追従を確認し、目標値を超えて達成。

研究開発項目2-b) 長距離MIMO処理検証基盤技術（日本電気株式会社）

- 【最終目標】10程度の空間多重数かつ6000km程度の海洋横断級の伝送システムでの1Tb/s程度のスループットで動作するMIMO信号処理の基盤を実現。回路実装性やスケール性を明確化。
- 【最終成果】研究開発項目1-a)、2-a)連携の下実施した結合型12コアMCF長距離伝送実験で、1.2Tb/s空間多重信号の9360km伝送を確認。MDL耐力向上のための非線形演算を含むMIMO受信方式を開発。計算量低減に向けて低サンプリングレート動作周波数領域適応MIMOフィルタを提案、10000km級伝送向けの信号処理の計算量を明確化。研究開発項目2-a)連携の下、MIMO信号処理リアルタイム検証プラットフォームを構築し、項目間統合連携実験でのリアルタイム動作および結合型12コアMCF長距離伝送でのセミリアルタイム動作を実証。

研究開発項目3) 空間モード多重光増幅中継基盤技術

研究開発項目3-a) 空間モード制御伝送統合検証技術（日本電信電話株式会社）

- 【最終目標】項目間統合連携実験に向けた空間多重光増幅中継伝送リンクの構築に着手する。
- 【最終成果】全研究開発項目成果を統合した項目間統合連携実験を実施し、陸上フィールド環境における世界初・世界最大容量の長距離大容量光伝送記録を樹立。さらに、全研究開発項目を統合により同環境を拡張した無中継伝送評価を完遂し、動的MIMO指数K=1187を上積みで達成。

研究開発項目3-b) 空間モード多重光増幅設計・評価技術（古河電気工業株式会社）

- 【最終目標】増幅器のコア数増大検討を進め、10程度のコアを増幅するためのデバイス要求事項の整理を行う。
- 【最終成果】モード間遅延とモード間利得差を制御した12コアモード多重増幅器を完成し、項目間統合連携実験に供与。挿入損失1dB以下の4コア結合型FI/F0を実現。MC-EDFのクラッド径最適化により、C帯にて増幅器出力18dBmを超えるMC-EDFAを実現。六角クラッド型19コアEDFAの増幅特性のコア間偏差測定を完了。

研究開発項目3-c) 空間モード多重伝送コネクタ設計・評価技術（学校法人千葉工業大学）〔令和3年度～令和5年度〕

- 【最終目標】結合型MCF用光コネクタに必要な組立精度の実現、接続特性評価方法の確立および非結合型MCF用光コネクタ標準化の推進。
- 【最終成果】結合型MCF用光コネクタの試作と性能確認。項目間統合連携実験へ向けケーブルに取り付け可能な光コネクタ提供(研究開発項目3-a)と連携)。非結合型MCF用光コネクタ接続損失測定法IS発行および光学互換標準PAS発行。最終目標を上回る成果を1年前倒しで達成。

【技術用語略称】	EDFA	: Erbium doped fiber amplifier	MC-EDF	: Multicore erbium-doped fiber	MIMO	: Multiple-input multiple-output
	FI/F0	: Fan-in/Fan-out	MCF	: Multicore fiber	PAS	: Publicly available specification
	IS	: International standard	MDL	: Mode dependent loss	SMD	: Spatial mode dispersion

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	標準化提案・採択	プレスリリース報道	展示会	受賞・表彰
19 (5)	30 (11)	12 (5)	91 (21)	13 (3)	4 (1)	6 (1)	2 (1)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

(1) 主な学会発表

- ・【招待講演】Yutaka Miyamoto, “Key Enabling Technologies for High-Capacity Transport System with Channel Rate over Terabit per Second,” ECOC2023, We. D.5.1 (Invited), 2023年10月.
- ・Takayoshi Mori et al., “Randomly-Coupled Multi-Core Fibre Cable with Flattened Spatial Mode Dispersion over S-L Band,” ECOC2023, Th. A.6.5, 2023年9月.
- ・【招待論文】長谷川, 「長距離伝送向けマルチコアファイバ技術の開発」, EXAT研究会, EXAT2023-12, 2023年11月.
- ・【Top-scored】Kohki Shibahara et al., “10-spatial-mode 1300-km Transmission over 6-LP Graded Index Few-Mode Fiber with 36-ns Modal Dispersion,” OFC2023, M2B.2, 2023年3月.
- ・【ポストデッドラインセッション採択】Akira Kawai et al., “389.3-Tb/s 1017-km C-band Transmission over Field-Installed 12-Coupled-Core Fiber Cable with >12-Tb/s Spatial MIMO Channels,” ECOC2024ポストデッドライン, Th3B.1, 2024年9月.
- ・【Top-scored】Manabu Arikawa et al., “Transoceanic-Class WDM/SDM Transmission of PDM-QPSK Signals over Coupled 12-Core Fiber,” OFC2024, Th3E.1, 2024年3月.
- ・Koichi Maeda et al., “Hexagonal Cladding 19-core EDF for Improved Output Power of Cladding Pumped Amplification,” ECOC2024, Tu1A.3, 2024年9月.
- ・Kiyoshi Kamimura et al., “Ferrule Endface Dimension Optimization for Standard Outer Diameter 4-Core Fiber Connector,” IEICE Trans. Electron. Vol.E106-C, No.12, pp. 781-788, 2023年12月.

(2) 展示会

- ・OECC/PSG 2022 (2022年7月、富山県富山市)にて現地パネル展示.
- ・International Symposium EXAT2023 (2023年5月、島根県松江市)にて現地パネルおよび静態展示.
- ・光通信システム (OCS) シンポジウム (年1回12月開催) に毎年出展.

(3) 標準化活動

- ・【ITU-T SG15】標準化提案 3件。新規技術レポート (SDM光ファイバ/ケーブル) の発行 (2022年9月)。SDM光ファイバ/ケーブル新勧告制定への作業課題・作業計画策定の寄書提案 (2023年11月)、SDM光ファイバ勧告制定に向けたフレームワーク・ロードマップ議論開始の合意。
- ・【IEC】標準化提案 5件、標準化採択 2件。MCF用光コネクタ接続損失測定法の国際規格 (IS: International Standard) IEC 61300-3-4の発行 (2023年5月)。MCF用光コネクタ光学互換標準の公開仕様書 (PAS: Publicly Available Specification) IEC PAS 63503-3-30 (2023年11月) の発行。MCF用光コネクタ反射減衰量測定法の委員会原案 (CD: Committee Draft) 化の合意。

ITU-T : International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization Sector
SG : Study Group
IEC : International Electrotechnical Commission

(4) プレスリリース

- ①世界初、10空間多重光信号の空間モード多重増幅中継伝送に成功～従来の10倍以上の長距離・大容量光ネットワークの実現へ貢献～ (2023年3月)
- ②NECとNTT、世界初、12コア光ファイバーによる7,000km以上の長距離伝送実験に成功～大洋横断級光海底ケーブルの大容量化に向けて前進～ (2024年3月)
- ③世界初、陸上フィールド環境における最大455テラビット毎秒の空間多重長距離光伝送実験に成功～結合型マルチコアファイバケーブル伝送による1,000kmまでの長距離化も実証～ (2024年12月)

①<https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/03/06/230306a.html>
②https://jpn.nec.com/press/202403/20240321_04.html
③<https://group.ntt.jp/newsrelease/2024/12/09/241209a.html>

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

関連する光ケーブル技術および光接続技術の国際標準制定に向けた取り組みを引き続き進めるとともに、SDM光物理基盤を対象とした光信号処理技術のデファクト標準、およびこれに関連する光伝送システムインタフェースのデジュール標準の議論を主導することで、本研究開発課題の目指す空間モードを制御可能なSDM技術の社会実装を目指す。