

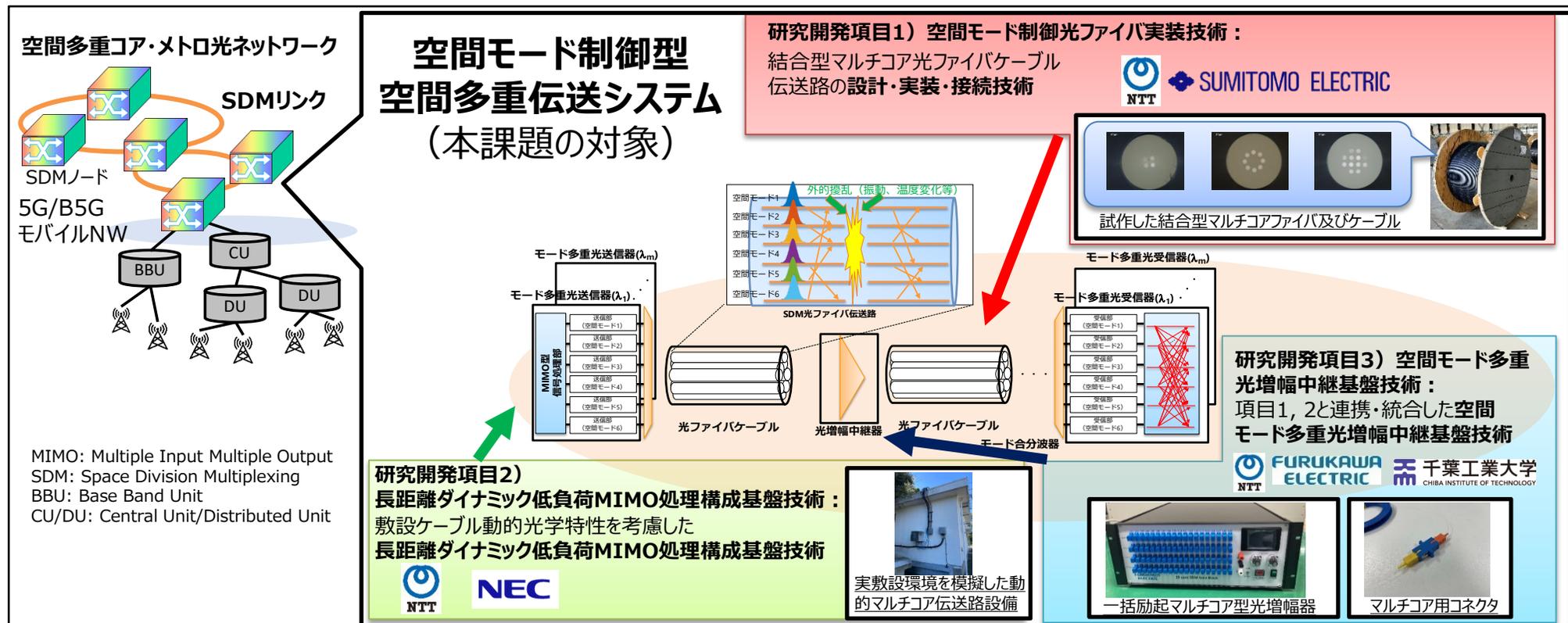
## 1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆研究開発課題名 Beyond 5G時代に向けた空間モード制御光伝送基盤技術の研究開発
- ◆受託者 日本電信電話(株)、住友電気工業(株)、日本電気(株)、古河電気工業(株)、(学)千葉工業大学
- ◆研究開発期間 令和3年度から令和6年度(4年間)
- ◆研究開発予算(契約額) 令和3年度から令和5年度までの総額1,220百万円(令和5年度300百万円)

## 2. 研究開発の目標

B5G時代の超大容量光コアネットワーク実現に向け、空間モードを積極的に活用・制御した3つの大容量・長距離光トランスポート基盤技術を確立し、陸上光ネットワークにおける相互接続性の担保、並びに、グローバル市場形成・ビジネス化を念頭に、空間分割多重技術の国際標準化を推進する。

- 研究開発項目1: 既存光ファイバケーブル技術との親和性に優れた空間モード制御光ファイバ実装技術
- 研究開発項目2: 敷設ケーブル動的光学特性を考慮した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3: 研究開発項目1, 2と連携・統合した空間モード多重光増幅中継基盤技術



### 3. 研究開発の成果

#### 【技術用語略称】

FI/F0	: Fan-In/Fan-Out	MDL	: Mode dependent loss
IS	: International standard	MIMO	: Multiple-input multiple-output
MC-EDF	: Multicore erbium-doped fiber	PAS	: Publicly available specification
MCF	: Multicore fiber	SMD	: Spatial mode dispersion

#### 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）

【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。また研究開発項目2）連携検討用の12コアMCF素線を試作し提供。

【成果】4、8、12コアMCFを実装した短尺（1km）ケーブルを用いてケーブル構造の最適化による広波長域なSMD低減効果を確認。長尺（5km）ケーブルを試作し、最終目標である20ps/√km以下のSMD係数を実証。研究開発項目2）検討用12コアMCF素線を試作し提供完了。試作した長尺ケーブルの検証設備への移設・敷設を完了（研究開発項目3-a）と連携）。

##### 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）

【目標】結合型MCFの融着接続において $\leq 0.1$ dB/接続/4コアのMDLを実現する。

【成果】1接続あたり $\leq 0.1$ dB/接続/4コアのMDL、および敷設前ケーブルを用いた30接続累積で $\leq 1.0$ dB/30接続/4コアのMDLを達成。敷設後ケーブルを用いた30接続累積においても $\leq 1.0$ dB/30接続/4コアのMDLを達成できる融着接続装置の準備完了。

#### 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）

【目標】試作ケーブルを用いた伝送路の構築とチャネル動的特性の把握を行い、リアルタイム検証用プラットフォームへの低負荷MIMO方式の実装可能性検討を行う。

【成果】研究開発項目1-a）との連携の下、高速追従MIMO方式による高速動的変動下ケーブル伝送路伝送に成功。研究開発項目2-b）との連携の下、回路実装を考慮した動的評価を行い追従性向上MIMO処理方式を提案。収束性の高い低負荷MIMO方式を提案し世界最長10モード1560km伝送に成功。低負荷MIMO信号処理方式のリアルタイム検証用プラットフォームへの適用可能性の見極めを実施。

##### 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）

【目標】コア数10程度の長距離オフライン伝送評価で大洋横断級伝送に向けた課題を抽出。リアルタイム検証プラットフォームのMIMO処理の前段処理まで構築、基本動作を確認。

【成果】結合型12コアMCFで長距離伝送系を構築、伝送ファイバおよびFI/F0の接続で生じるMDLという課題を抽出。研究開発項目1-a）、2-a）との連携の下、改良したFI/F0で、空間多重チャネルあたり1.2Tbps信号の7280kmの長距離伝送を確認。MDL耐力の向上のための非線形演算を含むMIMO受信アルゴリズムを開発。リアルタイム検証プラットフォームをMIMO処理の前段処理まで構築し、基本動作を確認。

#### 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）

【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。

【成果】試作短尺ケーブルと一括光増幅器の統合検証系による4空間多重増幅中継伝送評価を完了（研究開発項目1-a）、3-b）連携）。結合型MCF用光コネクタの伝送評価試験を実施（研究開発項目3-c）連携）。項目間統合連携実験へ向けた長尺ケーブルのとう道および架空区間への敷設を完了。各研究開発項目成果を統合した項目間統合連携実験系の構築着手（研究開発項目1-a）、1-b）、3-b）、3-c）連携）。

##### 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）

【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。

【成果】モード間遅延、モード間利得差の制御技術確立し、4コアモード多重増幅器を完成。4コア結合型FI/F0の挿入損失低減に取り組み、挿入損失を $< 1$ dBに低減。MC-EDFのクラッド径の最適化で出力増大化、消費電力削減に目途。12コアのモード多重増幅器に必要な技術見極め完了。

##### 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）

【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。

【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向けケーブルに取り付け可能な光コネクタ提供完了。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。

#### 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
13 (5)	19 (12)	7 (4)	70 (32)	10 (5)	3 (2)	5 (2)	0 (0)

※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

- 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.
- 長谷川, 【招待論文】「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.
- Kohki Shibahara et al., “Recursive Least Squares Based Low-Complexity Frequency-Domain MIMO Equalisation for MDL-Tolerant Long-Haul Space Division Multiplexed Transmission,” ECOC2023, Th.B.5.3, 2023年10月.
- Akira Kawai et al., “Low-Complexity 4D × D MIMO Equalizer Enabling 2.6-Tb/s/λ SDM Signal Reception Over Dynamic Four-Coupled-Core Cabled Transmission Line,” OFC2024, W1E.2, 2024年3月.
- 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., “Output Power Increase of Cladding Pumped 7-core EDFA by Hexagonal Cladding,” ECOC2023, P.10, 2023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

- 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。
- 第37回光通信システム(OCS)シンポジウム(2023年12月、東京都港区)にて現地パネルおよび静態展示。

##### (3) 標準化活動等

- ITU-T SG15に寄書(ITU-T SG15, Contribution, New work item proposal for developing framework and roadmap toward new Recommendation for space division multiplexing optical fibre, G-0797)を2023年11月に提出し、SDMファイバ勧告作成に向けたフレームワーク・ロードマップ議論開始が合意された。
- MCFコネクタを含む接続損失測定法に関するIEC 61300-3-4のIS(International Standard)が2023年5月に発行された。
- 標準外径4コアMCF用光コネクタ光学互換Part 3のPAS(Publicly Available Specification) IEC PAS 63503-3-30が2023年11月に発行された。

##### (4) その他

- 研究開発方針および成果に関して幅広い意見を採り入れるため、外部有識者から成るアドバイザリ委員会を設置し、年2回(2023年10月、2024年2月)開催。
- OFCに採択された12コアMCFの大洋横断級伝送成果の論文(上記(1)「主な学会発表」に記載の“Transoceanic-Class WDM/SDM …”)は注目論文としてハイライトされ、Optica・OFC、およびNEC・NTT各社からプレスリリース発行された。  
<https://www.ofcconference.org/en-us/home/news-and-press/press-releases/2024/12-spatial-channel-wdm-sdm-transmission-over-trans/>  
[https://jpn.nec.com/press/202403/20240321\\_04.html](https://jpn.nec.com/press/202403/20240321_04.html)  
<https://group.ntt.jp/newsrelease/2024/03/21/240321a.html>

#### 5. 今後の研究開発計画

令和6年度は、研究開発項目間連携により空間モード一括増幅光中継技術を含む空間モード制御光伝送路を構築し、MIMO信号処理の適用性を確認し、空間モード制御光伝送基盤を実証する。