

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超大容量無線通信を支える空間多重光ネットワーク・ノード技術の研究開発
- ◆受託者 国立大学法人香川大学、株式会社KDDI総合研究所、日本電気株式会社、santec AOC株式会社、古河電気工業株式会社
- ◆研究開発期間 令和6年度から令和6年度(1年間)
- ◆研究開発予算(契約額) 令和6年度から令和6年度までの総額100百万円(令和6年度100百万円)

2. 研究開発の目標

各研究開発項目の成果に基づき、1 Pb/s級光リンク容量が必要となるネットワーク環境において、既存の波長選択スイッチのみで構成したノードを用いる場合と比べて、1ビット当たりの転送コスト50%以上の削減と転送距離50%以上の延伸化を実証することである。本研究を通して、階層化光ネットワーク・光ノード設計技術、保守性に優れたFIFOレス中継システム構築技術、MCFのコア毎に伝搬方向が異なる光信号の一括増幅技術、MCFのコア毎に切り替え可能な光空間スイッチ技術、装置内接続用MCF配線・接続技術を開発し、Beyond 5G無線通信を支える、経済性と転送性能に優れた空間多重光ネットワーク基盤技術を確立する。

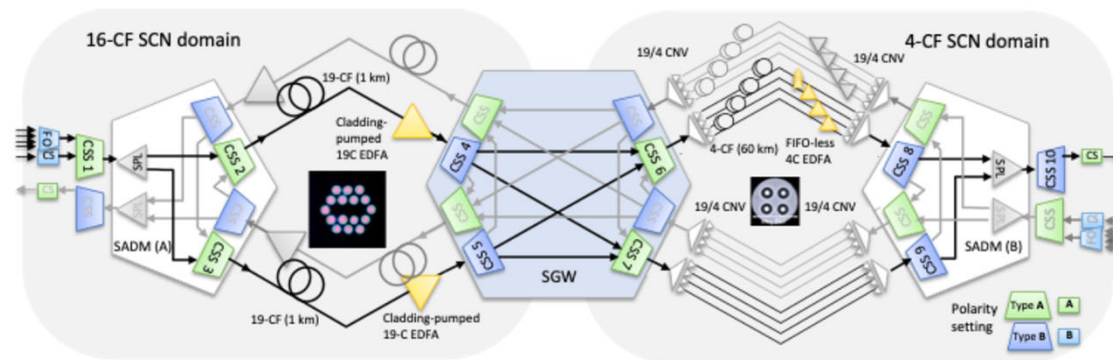


図1 各種試作MCFデバイスを用いた4CF/16CFネットワークテストベッド構成

3. 研究開発の成果

課題全体: 各種光デバイスの試作と実験を通して得られたデータに基づき、最終目標の1ビット当たり転送コスト50%以上の削減と転送距離50%以上の延伸化が可能であることを実証した。最終目標に追加した(1)コンテンションレス空間クロスコネクと(2)異種マルチコアファイバ (MCF) 混在収容の実現性を、各種試作MCFデバイスからなるテストベッドにより実証した(図1、2)。

研究開発項目1 SDM光ネットワーク・ノード設計技術: 転送コストに加え、ファイバ配線の50%以上削減可能性も実証した。MCFデバイスの極性と鏡面反転の管理法の有効性を実証した。

研究開発項目2 テストベッドと数値計算での評価により、転送距離を50%以上延伸する条件を明確化した。

研究開発項目3 SDM全方向光増幅技術: コア数7にて、コア毎に伝送方向によらずコア一括での光信号増幅可能な構成を考案、利得15 dB以上、雑音指数7 dB以下の性能で実証した。

研究開発項目4 SDM空間光スイッチ技術 CSSにおいて3dB以下の挿入損失が可能である事を明らかにした。コアポートセレクト(CPS)を実現、CSSと組み合わせ遠隔操作可能な19インチラックスイッチモジュールの試作を完了した。

研究開発項目5 SDM高密度配線・接続技術: 装置内配線用19コアMCFの最適化、MCFへの低損失でのSCコネクタ、FIFOの実現、小型増幅器特性確認を完了させた。

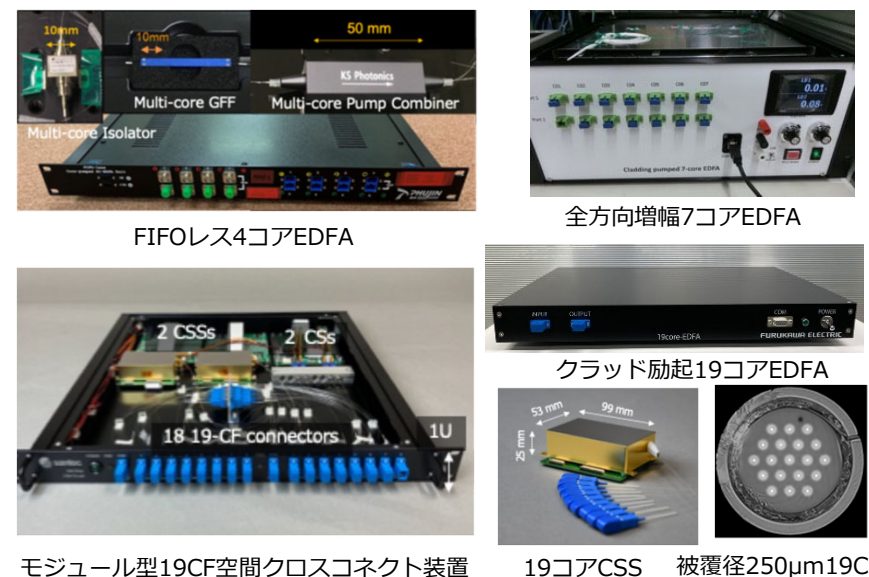


図2 各種MCFデバイス試作装置

3-1. 研究開発の成果の詳細

課題全体（香川大学・KDDI総合研究所・日本電気・santec AOC・古河電気工業）

最終目標

当初目標に次の3項目を追加する：(1)コア競合のないコンテンションレス（CL）SXCを用いたコア単位の光ルーティング実証、(2)MCF内のコア数の進化と世代間の整合性を担保する方策検討と実証、(3)各研究開発項目の最終目標を強化。

実施内容

(1)CL SXC：研究開発項目4にて新たに試作したコア・ポートセレクタ（CPS）を実装したCSSモジュールを用いてテストベッドを構築（図3.1.1）、伝送実験を実施した。(2)MCF内コア数の進化と整合性確保：4コア/16コアファイバ混在空間チャンネルNWテストベッドを構築（p.1、図1、2）、伝送実験を実施した。(3)各項目の目標強化：各項目のパートで個別に説明。

結果

(1)CL SXC：異なる方路に未使用コアがあれば、同一番号であっても独立にSCH設立が可能であることを実証した。(2)4CF/16CF混在NW：ゲートウェイSXCを介して異種MCFドメイン間にSCH設立可能であることを実証した（図3.1.2）。(3)各項目参照。

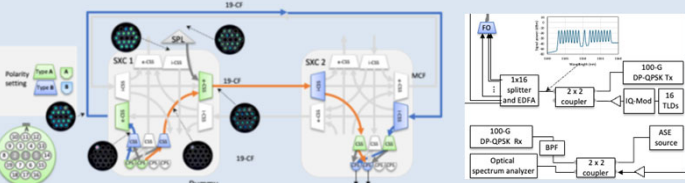


図3.1.1 CL SXC実験構成

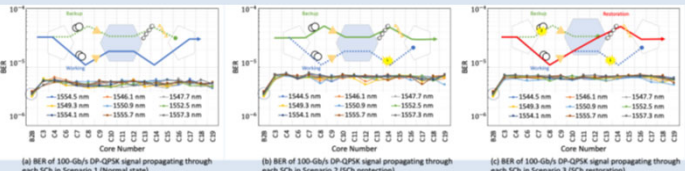


図3.1.2 4CF/16CF混在NW切り替え実験結果

研究開発項目1 SDM光ネットワーク・ノード設計技術（香川大学）

最終目標

現行技術を用いる場合と比べて、1ビット当たりの転送コストを50%以上削減可能なSDMネットワーク・ノードの構成法を明らかにする。SDM NWテストベッドを用いて、コア単位の光ルーティングが可能であることを実証する。

実施内容

CSS試作で得られたコストモデルに基づき、SDM/WDM階層化NWの必要コア数、構築コスト、必要配線数のシミュレーションを実施した。図1、図3.1.1のテストベッドを構築し、100 Gb/s WDMベースSDM信号による伝送実験を実施した（結果は課題全体枠参照）。

結果

CSSベースSDM/WDM階層化NWの構築コストがWXCに比べて50%以上、装置内ファイバ配線数がSMF-SXCに比べて50%以上、削減可能であることを実証した（図3.2.1）。

MCFデバイスの極性と鏡面反転の管理法を考案、有効性を実証した（図3.2.2）。

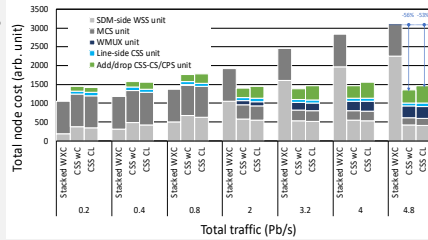


図3.2.1 階層化光NWの構築コストシミュレーション結果

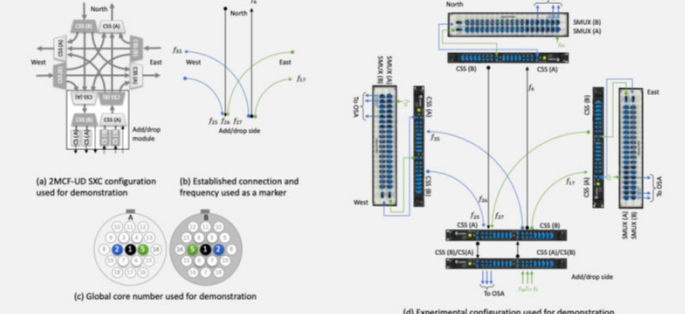


図3.2.2 SXC内極性・鏡面反転管理法とその実証実験

研究開発項目2 SDM光ネットワークシステム技術（KDDI総合研究所）

最終目標

従来のFIFOデバイスを有するMCF及びマルチコア中継器により構成されるMCF中継システムの場合と比較して、転送距離50%以上の延伸化を満たすSDM光ネットワークシステムを実証。また、ITU-T SG15本会合に対して寄書を提出し、マルチコア光ファイバの規格化を2024年度に開始。

実施内容

FIFOLess MCF光中継器とSXCノードから構成されるSDM光ネットワークテストベッドにおいて、転送距離性能検証を実施した。研究開発成果の展開・普及活動の一環として、NTT及び線材協会と連携し、ITU-T SG15において今後の標準化対象となるMCFについて議論すると共に、SDM光ファイバに関する補助文書の作成を進めた。

結果

テストベッドにおける転送性能検証とその結果を基にした数値計算評価の結果、転送距離50%以上の延伸化を満たす条件を明確化した（図3.3.1）。ITU-T SG15会合（2025年3月開催）において、これまで作成してきた標準化に向けたフレームワークに関する補助文書が完成した。また、125μmクラッド径かつITU-T勧告G.65xファイバ互換の非結合型MCFの標準化開始が合意された。

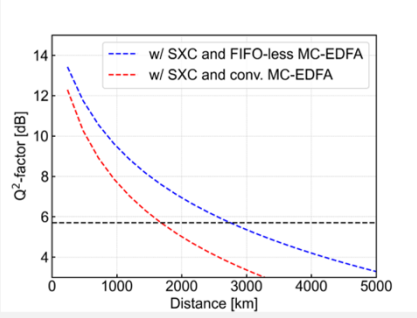


図3.3.1 転送距離延伸化条件

3-2. 研究開発の成果の詳細

研究開発項目3 SDM全方向光増幅技術
(日本電気)

最終目標

MCF 入出力に対応し、コア毎に伝搬方向の異なる信号の光増幅を一括増幅等にて実現する全方向光増幅器を実現する。実現する全方向光増幅器は、コア数4以上のMCF入出力に対応し、増幅利得15 dB以上、雑音指数7 dB以下の性能を有することを明らかにする。

実施内容

光増幅度向上に向け、励起光回生を双方向で実現する方式を新たに導入、構成マルチコアデバイスの一つである励起光コンバイナを空間レンズ結合タイプからファイバタイプに交換したプロトタイプを新規試作（図3.4.1、図3.4.2）、動作原理実証と光増幅性能評価を行った。

結果

増幅利得15 dB以上、雑音指数7 dB以下の性能を実験的に明らかにした。また、光増幅器が多段接続したマルチコア双方向伝送路において、双方向クラッド励起採用にて単方向クラッド励起比較で伝送可能容量が7ポイント向上できることを実験的に実証した。

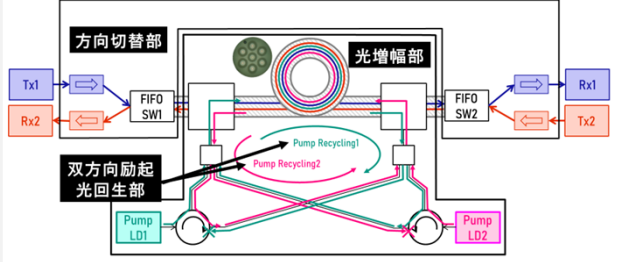


図3.4.1 全方向光増幅器の構成概要



図3.4.2 全方向光増幅器プロトタイプ外観

研究開発項目4 SDM空間光スイッチ技術
(santec AOC)

最終目標

SDM空間光スイッチは10コア以上MCF、1入力 8 出力に対応、3dB以下の挿入損失が可能である事を明らかにする。コア競合なし方路切り替え機能を有するSXCの実現に不可欠なコアポートセレクトを実現する。

実施内容

過去試作した空間光スイッチ（CSS）の損失発生原因を調査しその改善方法を検討、試作によりCSS挿入損失の改善効果検証を行った。コアポートセレクト(CPS)の光学設計、1次試作と評価を実施した。CSSとCPSを組み合わせた遠隔操作可能な1U-19インチラックモジュールの設計、試作（図3.5.1）と評価を実施した。

結果

過去試作結果を元にシミュレーションを実施、CSS過剰損失の主原因がMCFアレイの実装精度である事を明らかにした。該当部品の実装精度を改善した試作を実施し光損失1.8dBを確認、1入力8出力CSSにおいて3dB以下の挿入損失が可能である事を実験的に実証した（図3.5.2）。また、CPSの試作と評価をおこない、全長52mm、直径9mmサイズにおいて、光損失1.5dB以下を確認、コア競合なし方路切り替え機能に不可欠な部品の実現可能性を示した。



図3.5.1 19インチモジュール

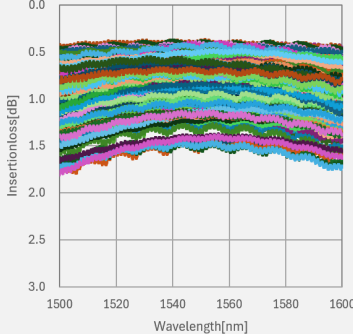


図3.5.2 CSS挿入損失

研究開発項目5 SDM高密度配線・接続技術
(古河電気工業)

最終目標

伝送路MCFよりも2倍以上のコア数を収容したMCFの基本設計を完了させ、その装置内配線部材としての試作と評価を終了させる。装置内配線周りで発生する損失を補償することが可能な配線用MCFと同数のコア数を増幅できるMC-EDFAの基本動作を確認する。

実施内容

ノード内での配線することを想定したMCF、コネクタ、ファンイン／アウト（FIFO）の最適化を行った。クラッド径180umで構成した被覆径250umの19コアMCFを完成させ、その信頼性評価を行うとともに、それに対応した各種コネクタとFIFOの最適化を行った。

MC-EDFAの小型化に向け上記記述のMCFや接続部品を適用するほか集約型デバイスの適用を行った。

結果

被覆径250umのMCFの信頼性設計を完成させ、曲げ半径15 mmにて装置内配線を行った際に10年の製品寿命が確保できた。このファイバを用いた接続デバイスとしてS Cコネクタ、LCコネクタを完成させ接続損失0.5dB以下を確保するとともにFIFOの最適化により挿入損失1.3dB以下を確保した。上記部材を活用し、19インチラック1Uに搭載可能なLバンドMC-EDFAを実現した。これにより電源部と合わせ4Uに最大3台のMC-EDFA実装を実現した（図3.6.1）。

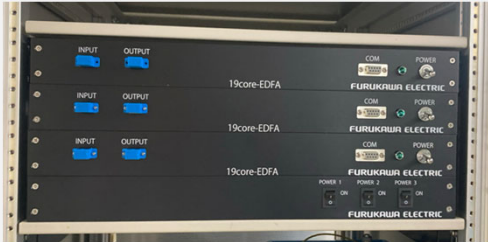


図3.6.1 小型19コアMC-EDFA
Cバンド用2台+Lバンド用1台

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
5 (5)	9 (9)	3 (3)	41 (41)	2 (2)	1 (1)	1 (1)	1 (1)

※成果数は累計件数、（ ）内は当該年度の件数です。
関連課題(00201)における令和6年度成果を含みます。

- ・ **特許出願**：採択番号07801/00201累計では、目標の3倍以上の20件の外国出願を行った。
- ・ **研究論文・国際会議**：採択番号07801/00201累計では、研究論文9編が主要国際論文誌JLT、JOCNに掲載され、3件が査読中である。査読付き国際会議は目標の2倍以上の50件を達成した。
- ・ **標準化提案**：採択番号07801/00201累計では、ITU-T SG15ならびにIOWN GFにおいて、累計7件の標準化提案を行い、成果技術の普及に努めた。
- ・ **プレスリリース・報道**：採択番号07801/00201累計では、4件のプレスリリース・報道に加え、OFC 2025で発表に合わせて、総合成果として「空間クロスコネクト装置とマルチコアファイバ光増幅器からなる大規模な空間多重光ネットワークの実証実験に初めて成功」を2025年3月28日に報道発表した。
- ・ **受賞等**：ECOC、OFCにて発表した論文が、Top/Highly Scored Paperとして顕彰された（採択番号07801/00201累計で6回）。
- ・ **展示会**：採択番号07801/00201累計で、国際会議OECC/PSC 2022ならびにEXAT 2023、OCS研究専門委員会主催のOCSシンポジウム2021, 2022, 2023, 2024の各展示会に出展し、19-CF CSS、FIFO-less 4C-EDFA、クラッド励起19C-EDFAの静態展示を行って、研究開発成果をアピールした。
- ・ **ウェブサイト**：PHUJINプロジェクトウェブサイト（<https://phujin-project.jp>）にて研究開発成果を発信した。



図4 OCSシンポジウム2024における展示

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

- 研究開発項目1 SDM光ネットワーク・ノード設計技術**：CSSに基づくSXCの研究開発を通して得られた知見とノウハウを、海底MCFケーブルシステムへ適用することを目指し、マルチグラニューラ海底分岐挿入器ならびに陸揚げ局設置のSDM多重分離器のアーキテクチャと設計技術の研究開発を進める。
- 研究開発項目2 SDM光ネットワークシステム技術**：研究開発成果の展開・普及活動の一環として、ITU-T SG15においてマルチコア光ファイバの規格化を推進し、2027年を目途に勧告化を完了する。
- 研究開発項目3 SDM全方向光増幅技術**：本研究開発成果や活動を通じて得た知見を、MCF伝送システムにおける光中継器技術に適用、光海底ケーブルシステム市場などへの応用を目指す。将来的に伝送容量Pbps級への拡張に貢献し、増大する一途のB5Gモバイルネットワーク通信需要を下支えする。
- 研究開発項目4 SDM空間光スイッチ技術**：CSS/CS/CPSの研究開発で得られた知見と弊社の高信頼性化技術を組み合わせ、海底SDMネットワークに適用しうる高信頼スイッチの実現を目指す。また、MCF光中継器に必要なMCF光部品の研究開発を進め、SDMネットワークの普及促進を図る。
- 研究開発項目5 SDM高密度配線・接続技術**：伝送路MCFの4倍以上のコア数を収容した装置内配線用MCFとそのコネクタ、FIFOを適用した装置内配線部材の実用化を進める。さらにその配線材を適用した高密度マルチコアエルビウム添加光ファイバ増幅器（MC-EDFA）を完成させ空間多重ノードに適用可能な配線ソリューションを完成させる。