

## 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
- ◆副題 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の研究開発
- ◆受託者 (大)香川大学、(株)KDDI総合研究所、日本電気(株)、santec AOC(株)、古河電気工業(株)
- ◆研究開発期間 令和3年度～令和5年度(3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1,900百万円(令和5年度300百万円)

## 2. 研究開発の目標

1 Pb/s級光リンク容量が必要となる状況で、現行技術と比べて転送コスト50%以上の削減と転送距離50%以上の延伸化を実証する。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、B5G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。

## 3. 研究開発の成果

### 研究開発項目1 SDM光ネットワーク・ノード設計技術

#### 最終目標

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・ノードの構成法の明確化。1Pb/s級リンクに対応可能な空間クロスコネク・プロトタイプからなるSDMネットワークテストベッドを用いて、コア単位光ルーティングが可能であることの実証。

#### 実施内容

CSSパッケージ試作で得られたCSSコストモデルと文献から得られたCDC-ROADMコストモデルを用いて、収容設計アルゴリズムに基づき、階層化光NWの構築コスト、消費電力、装置内配線数のシミュレーションを実施した。CSSクロストーク特性とMPI特性の実験と解析を行った。CSSの多芯化と多ポート化を検討した。19コアCSS、19コアコア選択器、19コアFIFO、19コアスプリッタをMCFコードで配線して構成されるモジュラー型SXCと、FIFOレス4コア光中継システム、全方向7コア光増幅器から構成されるSDM-NWテストベッドを構築し、実証実験(Phase1)を行った。コア間XT特性を改良したCSS試作機と19コアEDFA試作機を用いて実証実験(Phase2)を行った。

#### 結果

CDC-ROADMコストを含めても階層化SDM/WDM光ネットワークの構築コストを、従来方式に比べて50%以上削減可能であるとの見通しを得た(図3.1.1)。CSSクロストーク特性とMPI特性を明らかにした。SDM-NWテストベッド(Phase1、2)において、コア単位の光チャンネルの設定・切り替えの実証に成功した(図3.1.2)。

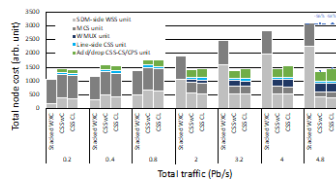


図3.1.1 コストシミュレーション結果

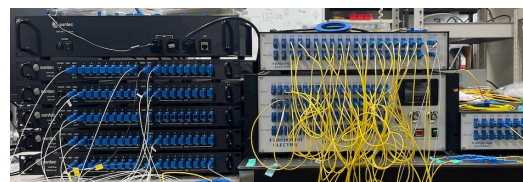


図3.1.2 SDM-NWテストベッド(Phase2)

### 研究開発項目2 SDM光ネットワークシステム技術

#### 最終目標

従来のFIFO有の場合と比較して、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

SDM光ネットワークノードとリンクとの連携仕様を精査した。また、FIFOレスMCF光中継器のキーデバイスの二次試作や評価を実施した。標準化活動の一環として、NTT、線材協会やNECと連携し、ITU-TでのSDM光ファイバに関する補助文書の作成を提案した。

#### 結果

上述の連携仕様としてSXCノードと従来のWXCノードの挿入損失値をそれぞれ7dB(CSSの挿入損失3.5dBx2)と14dB(WSSの挿入損失7dBx2)とした。キーデバイスであるマルチコア励起光コンバイナ(図3.2.1(左))の二次試作の結果、結合率の向上(13%)、挿入損失やコア間クロストーク、波長依存性の劣化が無いこと、サイズの低減(70%削減)が可能であることを検証した。また、試作した分岐可変カプラを用いて、モニタ用ポートとして活用可能であることを検証した(図3.2.1(右))。ITU-T SG15プレナリー会合(2023年11月開催)において、SDM光ファイバ標準化に向けて、SDM光ファイバに関する補助文書の作成開始が合意された。

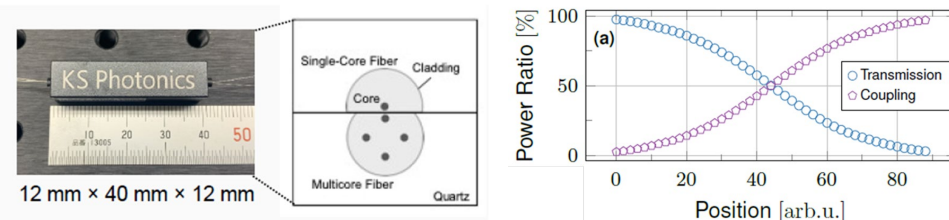


図3.2.1 マルチコア励起光コンバイナ(左)及び分岐比可変カプラの特性(右)

### 3. 研究開発の成果（つぎ）

#### 研究開発項目3 SDM全方向光増幅技術 最終目標

マルチコアファイバ入出力に対応し、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12dB以上、雑音指数7dB以下の性能を有する事を明らかにする。

#### 実施内容

光増幅器全体の実装設計を見直すことで小型化、内部挿入損失低減を進めた。さらに構成光部品レベルの挿入損失や光部品同士の接続損失削減によって光雑音指数の改善を進め、最終目標達成に必要な設計所要を明確化した。光増幅器が多段接続された場合での性能評価が行える評価実験系を構築した。

#### 結果

信号方向切替部の構成を見直すことで光増幅器全体としての実装体積を約1/3に小型化に成功。内蔵光部品同士のMCF融着個所削減、伝送方向切替部構成の見直しにより最大で内部損失1.2dB削減可能な対策を行った。光増幅性能評価を行い、内部損失を削減することによって光雑音指数を改善、

光増幅度12dB以上、光雑音指数7dB以下の実現を確認した。

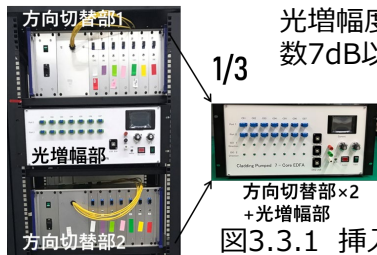


図3.3.1 挿入損失低減/小型化

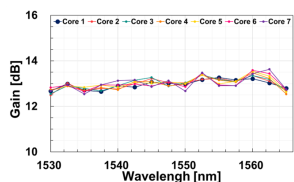


図3.3.2 光増幅度

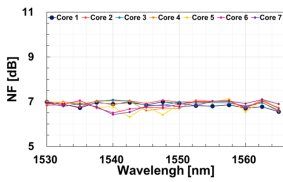


図3.3.3 光雑音指数

#### 研究開発項目4 SDM空間光スイッチ技術 最終目標

SDM光ネットワークの有用性を証明すべく、実証実験に耐える高性能な19コア1x8コア選択スイッチを設計、試作し、実験系に組み込んでノード性能評価を行う。

#### 実施内容

前年度までの試作評価で課題となったCSSの挿入損失低減、クロストーク性能改善を両立する光学設計、工法を検討するとともに、社会実装を意識した高信頼性パッケージング化を検討する。また、SDMノードの有用性を実証するための評価系に用いるCSSの試作を実施する。

#### 結果

光学系内のレンズ設計最適化、MCFアレイの製作精度改善により、クロストーク特性を維持したまま挿入損失0.5dBの改善に成功した（挿入損失3.5dB）。また、小型化、高信頼性を考慮したハーメチックパッケージを設計し、ノード性能評価用のCSS試作に適用した。また、SDN光ネットワークの実証実験用に、遠隔操作が可能な19コア1x8CSS、19コアCSベースのAdd/Dropユニット1セット、Line-sideユニット4セットを試作した。

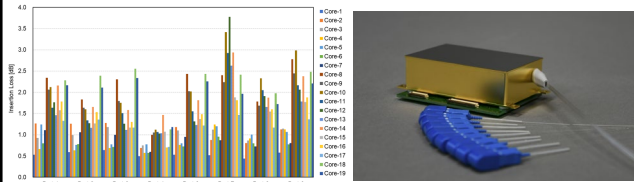


図3.4.1 CSSロス改善

図3.4.2 高信頼CSSパッケージ



図3.4.3 実験用ノードユニット

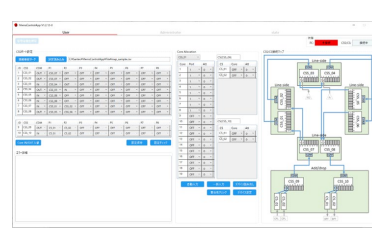


図3.4.4 遠隔操作パネル

#### 研究開発項目5 SDM高密度配線・接続技術 最終目標

装置内配線に適切な19コアファイバの構造を確定させ、この接続部材を完成させる。SCコネクタで構成していた配線材のLCコネクタ化を完了させる。装置内の損失補償に用いる増幅器に集積型部品を適用し小型化を実現する。

#### 実施内容

装置内での配線に最適化したMCFとその接続部材を実現する技術を確認し、柔軟性の高い、装置内高密度配線部材を実現させた。さらには、実現した配線材を基準とし、集積化を加味した光増幅器の基本設計を終了させ、試作に着手した。ファイバの小径曲げ対応にとどまらず、マルチコア型部品の導入によりMC-EDFAの小型化にも着手した。

#### 結果

標準的な光ファイバと同様の被覆外径250umにて実現可能な30umピッチの19コアMCFの構造設計を完了させ、実際にファイバ化した。ターゲットである配線性向上の目安として許容曲げ直径を15mmに設定し、直径15mmでの破断率を推定し、破断率を通常SMFと同様に設定可能なことを確認した。19コアMCFの構造と呼応し30umピッチのFIFOも実現した。連携実験等で引き続き活用される40umピッチで構成された240umクラッドファイバのLCコネクタ化も実現した。集積型部品により増幅器の小型化も実現した。

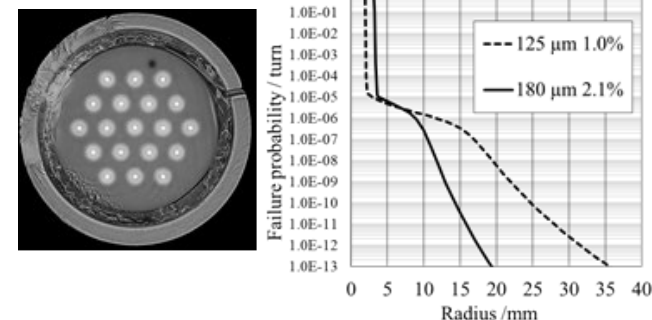


図3.5.1 19コアMCF

図3.5.2 19コアMCFの破断率

#### 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
20 (9)	12 (6)	6 (3)	99 (43)	5 (4)	4 (0)	4 (1)	4 (0)

- **特許出願**：20件の国内特許出願、12件の外国特許出願により、知的財産権の確保を行った。 ※成果数は累計件数、( )内は当該年度の件数です。
- **研究論文・国際会議**：研究論文6編（Journal of Lightwave Technology 5編、Journal of Optical Communications and Networking 1編）を発表するとともに、国際会議講演41件（OECC 2022 3件、ECOC 2022 9件、OFC 2023 6件、ECOC 2023 8件、OFC 2024 4件など）を行い、研究成果を国内外にアピールした。
- **プレスリリース・報道**：報道発表「非対称データ通信を効率的に収容可能な空間分割多重光ネットワーク技術を実証」を行い、読売新聞オンライン、日本経済新聞オンラインなど5つのメディアに掲載された。
- **受賞等**：OFC 2022にてTop Scored 1件（香川大学、サンテック、古河電工）、ECOC 2022にてHighly Scored 1件（KDDI総研）、OFC 2023にてTop Scored 2件（香川大学、NEC、サンテック、古河電工）（KDDI総研）として顕彰された。
- **展示会**：国際会議OECC/PSC 2022、国際会議EXATシンポジウム 2023、信学会OCSシンポジウム 2023に併設の展示会に出展し、CSSプロトタイプとFIFOLesMCF光中継器プロトタイプの静態展示を行った。
- **ウェブサイト**：PHUJINプロジェクトのウェブサイト（<https://phujin-project.jp>）を開設し、成果を発信した。



図4 EXAT Symposium2023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

本研究開発成果は、令和6年度開始の「革新的情報通信技術基金事業」委託研究（採択番号07801、1年間）に引き継ぎ、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、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50%以上の削減と転送距離50%以上の延伸化を実証する。当初計画より収容効率の高いコア競合のない方路切り替え機能を具備したSXCを用いた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。

**研究開発項目1 SDM光ネットワーク・ノード設計技術**：SXC内コンテンションレスのコア単位の光ルーティングが可能であることをテストベッドで実証するとともに、MCF内のコア数増加のシナリオと世代間の整合性を担保する方策について整理し、その実現性を検証する。

**研究開発項目2 SDM光ネットワークシステム技術**：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する。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令和6年度に開始する。

**研究開発項目3 SDM全方向光増幅技術**：コア数4以上で、複数コアを一括増幅可能、かつ伝送方向無依存のSDM全方向光増幅技術を実現する。令和5年度までに得られた結果を利用することで増幅利得の達成目標を倍増して15dB以上、雑音指数で7dB以下達成の実証を完了する。

**研究開発項目4 SDM空間光スイッチ技術**：低損失で切り替え可能なSDM空間光スイッチを開発する。コア数10以上のMCFに対応し、1入力8以上のMCF出力、3 dB以下の挿入損失が可能であることを明らかにする。また、コア競合のない方路切り替えを有するSXC実現に不可欠なコア・ポートセレクタを実現する。

**研究開発項目5 SDM高密度配線・接続技術**：完成した19コアファイバを用いた配線材の性能を向上させ、19コアファイバ接続部材を完成させる。配線材末端のコネクタに開発したLCコネクタを適用する。装置内の損失補償に用いる増幅器に集積型部品を適用し小型化技術を完成させる。