

令和 6 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 07801
 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

(1) 研究開発の目的

現在の 4G/5G モバイルサービスは世界中に張り巡らされた光ファイバインフラを用いた光ネットワーク基盤上に構築されており、将来の B5G モバイルサービスも引き続き光ネットワークが支えることに疑問の余地はない。将来の B5G モバイルサービスが発生する莫大なモバイルトラフィックを支える B5G 時代の光ネットワークには、超大容量性と経済性・保守性・柔軟性の両立が求められる。本研究の目的は、これらの要求条件を満たしうる光ネットワーク基盤技術を開拓し、将来の B5G モバイルサービスを支える光ネットワークの実現に資することである。

(2) 研究開発期間

令和 6 年度から令和 6 年度（1 年間）

(3) 受託者

国立大学法人香川大学<代表研究者>
 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

(4) 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）
 ※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 1 SDM 光ネットワーク・ノード設計技術（国立大学法人香川大学）
 研究開発項目 2 SDM 光ネットワークシステム技術（（株）KDDI 総合研究所）
 研究開発項目 3 SDM 全方向光増幅技術（日本電気（株））
 研究開発項目 4 SDM 空間光スイッチ技術（santec AOC（株））
 研究開発項目 5 SDM 高密度配線・接続技術（古河電気工業（株））

(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	5	5
	外国出願	9	9
外部発表等	研究論文	3	3
	その他研究発表	41	41
	標準化提案・採択	2	2
	プレスリリース・報道	1	1
	展示会	1	1
	受賞・表彰	1	1

※関連課題(00201)における令和 6 年度成果を含む。

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目1：SDM 光ネットワーク・ノード設計技術

・SDM ネットワーク・ノードの構成法：

(成果概要) 新規開発のコア選択スイッチ(CSS)に基づく空間クロスコネクタ(SXC)と従来の波長クロスコネクタ(WXC)を併用した階層型光クロスコネクタ構成を採用すれば、従来のWXC 単独構成と比較して同程度の周波数利用効率を確保しつつ、50%以上のコスト削減が可能であることを、CSS 試作で得られた量産時コストモデルを用いたシミュレーションにより明らかにした。加えて、従来のファイバスイッチベースのSXCに比べて、本CSS ベースのSXCは、ノード内ファイバ配線数も50%以上削減可能であることを示した。その成果をOECC 2024で発表した。また、低コスト化が期待されるMCF スプリッタを用いたBroadcast and Select 構成のSXCの実証を完了している。さらに、マルチコアファイバ(MCF) 光デバイスの極性とコア位置反転の管理法を考案・実証し、その成果が国際論文誌JOCNに掲載された。

(達成度：120%) 現実に即したコストモデルを用いて50%以上のコスト削減可能の実証に加えて、ノード内ファイバ配線数の50%以上削減可能性の実証とMCF スプリッタを用いた低コストBroadcast and Select 構成SXCの実証、MCF ベース光デバイス極性管理法の確立にも成功しており、当初目標を上回る成果を上げた。

・コア単位の光ルーティング機能実証：

(成果概要) 他の研究開発項目の成果である、短尺用に専用設計した19 コアファイバ、CSS モジュール、コアセクタ(CS) モジュール、19 コアクラッド励起エルビウム添加ファイバ増幅器(EDFA)を用いて、当初目標のコア競合ありのコア単位の光ルーティング(ECOC 2024 発表済み)、ならびに追加目標のコアポートセクタ(CPS)を用いたコア競合なしSXCとこれを用いたSDM ネットワーキングの実証に成功した。さらに、考案したMCF 光デバイスの極性管理法をこれらSXC 実証実験で採用し有効性を確認した。

(達成度：120%) 当初目標の成果を達成し、世界最高峰の国際会議ECOC2024で口頭発表したことに加えて、追加した目標の研究項目4で新たに開発したCPSを用いたコア競合なしSXCの実証にも成功している。これらSXC 実証実験には考案したMCF 光デバイスの極性管理法を活用しており、当初目標を上回る成果を上げた。

・MCF 内のコア数の進化シナリオと世代間の整合性担保：

(成果概要) 4 コアファイバ(4-CF)から、4の整数倍のコアを有する16 コアファイバ(16-CF)等への商用マルチコアファイバの展開シナリオの想定の下、4-CF ドメインと16-CF ドメインを相互接続するゲートウェイSXCと、FIFO レス4C EDFA、19-C EDFAからなるヘテロジニアス空間チャンネルネットワークテストベッドを構築し、マルチコアファイバ(MCF) 世代間整合性確保が可能であることを実証した。その成果をOFC 2025で発表した。

(達成度：120%) 各研究開発項目の成果を高いレベルで融合したヘテロジニアス空間チャンネルネットワークテストベッドを設計・構築し、MCFの発展シナリオの実現性を実証した。これを世界最高峰の国際会議OFC 2025で口頭発表し、当初目標を上回る成果を上げた。

研究開発項目2：SDM 光ネットワークシステム技術(株式会社KDDI 総合研究所)

・FIFO レスMCF 光中継器を用いたSDM 光ネットワークシステムの性能検証

FIFO レス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を構築し、転送距離に関する性能検証を実施した。フルCバンドに渡る波長多重信号光を用いて長距離伝送実験を行い、SXC ノードにおいてコア単位でのルーティングを模擬した上で、1,685 kmの伝送可能性を明らかにした。本成果については、国際会議OFC2025に投稿しトップスコア論文として採択された。さらに、テストベッドにおける転送性能検証の結果を基にした数値計算評価から、従来のFIFO デバイスを有するMCF 中継システムの場合と比べて、FIFO レスMCF 光中継器を用いることによって、転送距離を50%以上延伸可能であることを確認した。(達成度：100%) FIFO レス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を用いた転送距離性能検証と、その結果を基にした数値計算から、最終目標に掲げていた転送距離50%以上の延伸化を満たすSDM 光ネットワークシステムが実現可能であることを明らかにした。また、光通信における世界最大規模の国際会議であるOFC2025に発表したことから、達成度は100%である。

- ・SDM 技術に関する国際標準化議論の推進：

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。ITU-T SG15 会合（2024 年 7 月開催）において、125 μ m 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 を今後の標準化対象とすることが合意された。また、その標準化に向けたフレームワークに関する補助文書のドラフト版が合意された。ITU-T SG15 会合（2025 年 3 月開催）において、上述のフレームワークに関する補助文書が完成すると共に、125 μ m 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 の勧告化開始が合意されたため、達成度は 100%である。

研究開発項目 3：SDM 全方向光増幅技術（日本電気株式会社）

- ・信号伝送方向に依存しないコアー括での信号光増幅技術開発：

（成果概要）コアー括での信号光増幅方式としてクラッド励起方式を採用、従来の単方向励起を双方向励起とすることで主要な光増幅性能である光増幅利得、雑音指数を信号伝送方向に依存しない構成を新規に考案、さらに光増幅部入出力に信号伝送方向をコアー毎に切替制御する方向切替部を設けた。これらにより、マルチコアー入出力に対応、光増幅性能がコアー毎に信号伝送方向に依存しない、かつ、コアー括での信号光増幅可能とした（FY2021: 第一ステップ）。コアー数 7 のプロトタイプを、光増幅部と方向切替部を 19 インチラック対応同一筐体収容とするなど実装サイズや可搬性をも考慮して試作した（FY2022: 第二ステップ）。1 dB 以下のオーダでの構成マルチコアーデバイス挿入損失低減やマルチコアーファイバ融着必要数低減等の施策を通じて、C 帯にて光増幅利得 12.5 dB(波長平均)以上、雑音指数 7.0 dB(波長平均)以下の性能を、コアー間偏差 0.5 dB 以下で得られることを実験的に明らかにした。双方向クラッド励起採用にて、励起光強度 20 W の条件の下、従来前方クラッド励起比較で 0.9 dB の光増幅度改善、後方クラッド励起比較で 0.7 dB の雑音指数改善効果を得た（FY2023: 第三ステップ）。

（達成度：100%）当初掲げた研究開発目標、マルチコアーの各コアーの一括光増幅に対応し、かつ、各コアーの信号伝送方向に無依存で光増幅度 12 dB 以上、雑音指数 7 dB 以下を実現する信号光増幅技術を FY2023 までに実証した。以上の成果を、査読付き国際学術論文誌掲載 3 件(目標 1 件)、査読付き国際学会口頭発表 6 件(目標 5 件)などによる国内外へのアピールをするなど、当初目標を十分に達成する成果をあげた。

- ・光増幅性能の倍増：

（成果概要）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、それに伴い構成マルチコアー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した。FY2024 プロトタイプにて光増幅度を FY2023 比較で +3 dB 向上すること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ー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。

（達成度：100%）双方向ターボクラッド励起方式を新規に取り入れるなどして目標を達成、さらに周回伝送実験によって光増幅器多段接続時における双方向クラッド励起方式のメリットを実証するなど新たな知見を得た。これらを FY2024 だけで、査読付き国際学会論文誌掲載 1 件、査読付き国際学会口頭発表 2 件追加するなど、国内外への研究開発成果のアピールを行い、FY2023 に追加した当初目標を十分に達成した。

研究開発項目 4：SDM 空間光スイッチ技術（santec AOC 株式会社）

前年度までの試作評価で課題となった CSS の挿入損失の更なる低減のためシミュレーションによる主原因の調査と対策を実施した。またコアー競合なし方路切り替え機能有する SXC の実現のために不可欠となるコアーポートセレクト(CPS)の光学設計、社会実装を意識した小型化筐体設計を検討した。さらに SDM ノードの有用性を実証するための SDM 光ネットワークテストベッド用 CPS の試作を実施した。

その結果、過剰損失発生の主原因が MCF アレイの MCF 実装精度である事を明らかにし、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 3 dB 以下（当初計画 10 dB 以下）の挿入損失を実現できる事を示した。また新規設計した CPS は複数台の試作結果を通じ 1.5

dB 以下の挿入損失で実現できる事を示した。さらに、SDM 光ネットワークの実証実験用に遠隔操作可能な 19 コア入力 8 出力 CSS、19 コア 1 入力 8 出力 CPS ベースの Add/Drop ユニットの 2 セット試作した。

研究開発項目 5：SDM 高密度配線・接続技術（古河電気工業株式会社）

被覆径 250 μm 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 SC 及び LC コネクタを完成させ接続損失 0.5 dB 以下を確保するとともに FIFO の最適化により挿入損失 1.3 dB 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。

（達成度：100%）

装置内配線用光ファイバの高密度化技術

（成果概要）19 コア MCF の接続損失の低減のためコア位置の高精度化を実現した。回転ずれ 1° での接続損失を 1 dB 以下にするためコア位置ズレ 1.2 μm 以下となるコア位置精度を目指し、これを達成した。寿命試験の加速試験として曲げ半径 7.5 mm における破断寿命確認試験を行い、目標最小曲げ半径 15 mm において 10 年以上の推定寿命を確認した。

（達成度：100%）

装置内配線用光接続デバイスの高密度化技術

（成果概要）クラッド径 180 μm 、コアピッチ 30 μm で構成される標準被覆外径の 19 コア MCF を用いた SC コネクタ化および LC コネクタ化を行い、全コアにおいて接続損失 0.5 dB 以下と全心の PC 接続を実現した。FIFO も高精度調心の適用により、挿入損失 1.3 dB (片端) 以下を実現した。LC コネクタでの実証を完了させた。

（達成度：100%）

装置内配線用増幅器の小型化技術

（成果概要）19 コア MC-EDF の条長を 50 m に延長し、C バンド MC-EDFA の L バンド化した。19 インチラック 1 ユニット分のサイズを維持しつつ、接続部材の最適化効果も加え、出力 24 dBm を達成した。3 台の増幅器が駆動可能な 1 ユニットの電源ユニットを使用することで従来の 4 ユニットの 19 コア増幅器と同じ大きさで 3 台の 19 コア増幅器を構成した。

（達成度：100%）

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

(1) 計画

香川大学：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、多粒度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。

KDDI 総合研究所：SDM（空間分割多重）技術の実用化及び普及に向けた手段の一つとして、国際標準化を進めている。国内関係者（NTT、通信電線線材協会）と連携し、ITU-T SG15 において SDM 光ファイバに関する補助文書の作成を完了したが、さらに、その補助文書を基に新規 SDM 光ファイバの勧告化が 2025 年に開始される見込みであり、その完成には 2 年程度を要する見通しである。また、ITU-T における標準化と並行して、IEC の参加者とも連携し、試験法標準や接続標準等の周辺技術の標準化についても進めていく予定である。IOWN Global Forum では UWOT（Ultra-Wideband Optical Transmission）技術白書を作成中であり、フォーラム内のメンバーと共に SDM 技術の早期導入ユースケースの深耕を進めている。今後、検討した早期ユースケースに基づいた PoC の実施を検討する計画である。

日本電気：特許出願等によって知的財産権を確保したうえで行う外部発表等を通じて、得られた成果を積極的かつタイムリーにアピールしていく。確保した知的財産権は、市場動向を注視しながら適切なタイミングで製品開発に活用するとともに、必要に応じて外部にライセンスするなどして技術の普及に貢献する。伝送システム、ノードシステム等さまざまなシステムへの応用・組み込みを海底システムなども含めて行うなどして、研究開発成果を広く普及させることに取り組む。市場動向から適切な製品導入タイミングを見極め、成果の実用化に努める。

santec AOC: 海底ケーブルシステム応用に注力、特に世界シェア 80%以上を占める 4 社 (NEC (日本)、SubCom (米国)、ASN (フランス)、HMN Tech (中国)) と密に連携し、早期実用化を目指す。取得した特許の先行技術優位性を生かし、競合他社へのライセンス、及び独占化でビジネスを優位に進める。

古河電気工業: 本活動は装置内配線に特化し、部品集約化や小型化を意識した活動してきた。この内容を実用化するために、まずは 4 コア MCF をベースにした活動に適用して早期の商品化を目指す。ただし、本活動は装置内のビジネスを考えているため、積極的な標準化を行わず、顧客とのクローズしたビジネスを想定し、実用化段階になった段階で積極的な対外発表や広報活動を進めていく。製品化に向けては伝送路に MCF が入ることが先決と考えており、そのための活動を重視していく。伝送路の MCF 化と同期して本活動の製品化を考えており、2030 年頃を想定した活動を進めていく。取得した知財権は自社使用を目指した権利化を進めるが、技術普及を目指し、必要な許諾も実施していく予定である。

(2) 展望

香川大学: 本研究開発で、初めて明らかにした各種 MCF 光デバイスにおける極性とその管理手法ならびに SDM ネットワーク全体で一貫性のあるコア資源指定法として提案したグローバルコア番号は、近い将来の実現が想定される非結合 MCF に基づく SDM ネットワークの管理・運用上、必須の技術になると期待される。

KDDI 総合研究所: SDM (空間分割多重) 技術の実用化及び普及に向けた手段の一つとして、国際標準化が重要である。これまで、国内関係者 (NTT、通信電線線材協会) と連携し、ITU-T SG15 において SDM 光ファイバに関する補助文書の作成を進めており、2024 年度中に文書作成が完了した。さらに、その補助文書を基に新規 SDM 光ファイバの勧告化が 2025 年 3 月に開始され、その完成には約 2 年を要する見込みである。新規 SDM 光ファイバ勧告のスコープは、125 μm クラッド径かつ既存の ITU-T 勧告 G.65x ファイバ互換の非結合型 MCF (マルチコアファイバ) を標準化対象とすることが合意されている。この勧告化により、試験法標準、ケーブル標準、接続標準、サブシステム標準、システム標準といった SDM 関連技術の標準化も加速されることが期待される。市場規模に関しては、SDM 技術は次世代の通信インフラとして、特にデータセンタ間の大容量通信や、5G および 6G ネットワークのバックボーンとしての需要が予想される。また、SDM 技術はデータセンタ内やビル内等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としても期待される。今後、SDM 技術の標準化の進展と相まって、SDM 技術のエコシステム形成を促進し、技術普及の後押しとなることを見込まれる。

日本電気: 研究開発成果の一部、あるいは研究開発活動を通じて得た知見を、マルチコアファイバ伝送システムにおける光中継器技術に応用、2028 年には光海底ケーブルシステム市場への供給準備を完了する。これらの活動を通じて、増大する一途の B5G モバイルネットワーク通信需要を支えることに貢献する。

santec AOC: 5 年後は MCF システムの導入が加速的に進んでおり、本研究対象である MCF 単位での空間光スイッチ、光増幅器も採用され始めていると予想する。これらの実用化には、周辺で使われる MCF 単位で処理できる光デバイスであるアイソレータ、モニタ、アッテネータ、WDM カプラーも新規に開発が必要である。MCF 導入で先行している我が国は研究開発面でも世界を先導しており、本課題が研究開発をより活性化させる一助となることを期待する。

古河電気工業: 今回の 19 コア MCF を活用する活動に先立ち、5 年後に 4 コアファイバの実用化が活性化していると想定している。この市場に必要とされる技術は本課題の検討が含まれており、本技術の最初の適用先となると考えている。5 年後の実用化に向けて 4 コア伝送路、2 コア伝送路、およびその接続技術の標準化が進んでいるものと想定している。実用化に向けて、特に増幅技術は研究開発が必要な分野と考える。この分野での学術論文等はこれからも増加することを予想しており、若手研究者を中心にこのテーマを介した学会とのコミュニティを利用した人材育成が進むと想定している。本検討により通信容量は莫大に増大し、新たなビジネスモデルも創出され则认为している。