

(29-2)

様式1-4-2

平成 29 年度研究開発成果概要書

採択番号：18801

課題名：空間多重フォトニックノード基盤技術の研究開発

副題：空間多重光通信技術を適用したスケーラブルフォトニックノードの研究

(1) 研究開発の目的

本研究では、空間多重光通信技術をフォトニックノードに適用することにより、ノードスループットを現在の 100 倍以上の 10 Pbit/s 以上に拡大するための要素技術を確立する。具体的には、ノードアーキテクチャ技術とネットワークにおける方路制御技術を検討するとともに、膨大な光信号の方路制御を行うための光増幅・光スイッチの大規模化・小型化・省電力化技術の確立ならびに実現性を検証し、さらには装置内や装置架間の高密度配線を実現する空間多重ノード配線技術を確立する。産学官連携により、それぞれの強みを持ち寄ることによってオープンイノベーションを推進し、世界に先駆けた技術確立を目指す。

(2) 研究開発期間

平成 28 年度から平成 32 年度（5 年間）

(3) 実施機関

日本電信電話株式会社<代表研究者>
国立大学法人名古屋大学
株式会社 KDDI 総合研究所
日本電気株式会社
古河電気工業株式会社
学校法人千葉工業大学

(4) 研究開発予算（契約額）

総額 450 百万円（平成 29 年度 150 百万円） ※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

課題ア 空間多重ノードアーキテクチャ・システム制御技術

課題ア-1…空間多重ノードアーキテクチャ技術（国立大学法人名古屋大学）

課題ア-2…空間多重ネットワーク収容設計技術（日本電信電話株式会社）

課題ア-3…空間多重中継ノードシステム制御技術（株式会社 KDDI 総合研究所）

課題イ 空間多重ノード光増幅・方路制御技術

課題イ-1…空間多重光増幅方路制御中継ノードの構成設計・評価技術
（日本電信電話株式会社）

課題イ-2…空間多重光増幅方路制御中継ノードの省電力化技術（日本電気株式会社）

課題ウ 空間多重ノード配線技術

課題ウ-1…空間多重ノード装置間配線技術（日本電信電話株式会社）

課題ウ-2…空間多重ノード装置内配線技術（古河電気工業株式会社）

課題ウ-3…空間多重ノード配線用光コネクタ技術（学校法人千葉工業大学）

(6) 特許出願、論文発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	12	6
	外国出願	5	3
外部発表	研究論文	6	3
	その他研究発表	91	60
	プレスリリース・報道	3	3
	展示会	4	1
	標準化提案	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

課題ア 空間多重ノードアーキテクチャ・システム制御技術

課題ア-1 空間多重ノードアーキテクチャ技術 (国立大学法人名古屋大学)

【目標】

平成 29 年度は、前年度の検討を基に、スループットが 10 Pbit/s 程度までスムーズに拡張可能な、スケラビリティの高いフォトニックノードの基本アーキテクチャを明らかにする。以下の項目に重点を置く。

- ① M × M WSS を用いた波長パスクロスコネクットの有効性の評価
- ② ファイバクロスコネクットと波長パスクロスコネクットの評価

おのこの異なるレイヤのクロスコネクットを利用することによる光ファイバ利用効率を定量的に評価し、比較を行う。

【実施内容と成果】

- ① 大規模ノードを効率的に実現可能なサブシステム OXC 構成において、M × M WSS を適用した場合のファイバ収容効率、ならびに必要な WSS 数を複数のメトロネットワークトポロジに対してシミュレーションにより評価し、その有効性を示すとともに、課題イ-1 (NTT) で試作した 6 × 6 WSS を用いた伝送実験により、フィージビリティを確認した。得られた結果は ECOC 2017 で発表し、Highly ranked paper ならびに Short-listed paper for the best student paper award に選定された。
- ② ファイバクロスコネクット、あるいは波長パスクロスコネクットを利用することにより達成される光ファイバ利用効率を定量的に評価する手法を開発し、コスト低減が得られる条件をシミュレーションに基づき比較した。これにより、ネットワーク全体のコスト評価の基礎となるノードのクロスコネクット機能とリンクコストの関係が明確化された。

課題ア-2 空間多重ネットワーク収容設計技術 (日本電信電話株式会社)

【目標】

平成 29 年度は、前年度の機能要件に基づいたネットワーク収容設計技術の基本方式の検討を行い、ネットワーク収容設計方式を提案する。前年度に調査したノード特性結果を基に、本項目の研究実施に必要な空間多重ノード特性を明確にする。また、ネットワーク収容設計方式を評価する上で必要な評価モデル・手法についても検討する。

【実施内容と成果】

・ネットワーク収容設計方式の検討と提案、および評価

空間多重光ネットワークにおけるネットワーク収容設計方式の実現に向け、光パス収容設計基本方式の検討と評価、ならびに収容設計方式の評価のための評価モデルと評価手法について検討した。特に、光パス収容設計基本方式に関しては、伝送路となるマルチコアファイバのコア選択アルゴリズムの特性について、各種ネットワークトポロジを用いて、光パス収容の 1st Blocking 発生パス数、1st Blocking 抑圧効果を評価し、光パスの 1st Blocking 発生を遅らせる効果を有し、従来の FirstFit によるコア選択と比較して、複数のパス設定順序において平均 3 %程度（最大 10 %程度）の効果があることを明らかにした。また、空間多重ノード特性の明確化に向けて評価した光信号入力時のクロストーク特性を対外報告した。

課題ア-3 空間多重中継ノードシステム制御技術（株式会社 KDDI 総合研究所）

【目標】

- ① 複数段の中継ノードを考慮したブロック等化ノードの調査・設計・作成
2 つの中継ノードを用いて中継伝送させた際のブロック等化器の設計に基づき、ブロック等化ノードの試作を行い、その評価を行う。
- ② 信号雑音比（SNR）をコア間で均等化する手法の検討
2 信号の SNR を均等化する伝送技術の計算機シミュレーションを実施し、コア間／波長間の 2 信号の SNR の均等化を推定し、コア間／波長間の 2 信号の SNR 均等化の性能を評価する。

【実施内容と成果】

- ① 12 コアファイバと 19 コア EDFA を用いて、巡回により複数段中継が可能な 4 コア並列のマルチコア伝送路を構築し、1 段～4 段中継後の利得特性を取得した。その利得特性に応じてブロック等化ノードを設計・構築した。
- ② 異なるコアの 2 チャネルを用い、ベクトル表現均等化シミュレーションおよび実験を行った結果、偏差を 0.1 dB 未満に低減可能であること、かつ Q 値の改善効果、およびビットベースの平均化と異なり、エラー発生抑制効果による Q 値の単調増加性が確認された。

課題イ 空間多重ノード光増幅・方路制御技術

課題イ-1 空間多重光増幅方路制御中継ノードの構成設計・評価技術
（日本電信電話株式会社）

【目標】

- ① 平成 29 年度は、平成 28 年度に実施した多方路制御技術に関する要素技術検討を基に、多方路制御技術の基本設計および検証を行う。
- ② 平成 28 年度に実施した要素技術検討を基に、多方路制御技術と組み合わせて利得制御技術の検討を行う。多方路制御とマルチコア光増幅制御の連携制御に向けた基本設計を行い、初期評価を行う。

【実施内容と成果】

① 空間多重ノード構成および多方路制御技術の検討

空間多重ノード物理構成を検討し、6×6規模の光スイッチについて動作を確認した。また、特性評価と課題抽出を行い、方路規模を拡大するための構成を提案した。また、空間多重ノード多方路制御技術の要素技術として、性能制限要因であったクロストークを低減したスイッチ光学系を光学定盤上のベンチトップおよびモジュールに構築し、-50 dB 以下のクロストーク性能を確認した。さらに、複数の信号品質を計測する多アレイ光信号雑音比測定装置の基本光学系を構築し、100 ch 超の信号一括計測の動作を確認した。

② 利得制御技術の検討

クラッド励起のマルチコア光増幅器の光強度をモニタし、分布ラマン増幅器と組み合わせるハイブリッド分布増幅技術を提案し、SN 劣化を抑制しつつ、コア間の損失ばらつきを補償し、長距離伝送試験できることを確認した。また、コア数に対する励起光パワーの関係を検討した。

課題イ-2 空間多重光増幅方路制御中継ノードの省電力化技術（日本電気株式会社）

【目標】

以下の3項目について技術開発を行う。

① 省電力光増幅モジュール構成技術

省電力化に適した励起光源と光増幅媒体の組み合わせで構成される光増幅モジュール構成技術の開発を行う。具体的には、コア個別励起マルチコアエルビウムドープファイバ（EDF：Erbium Doped Fiber）にマルチモード励起光源を用いたクラッド一括励起マルチコア EDF を組み合わせるなど、省電力化を図る光増幅モジュール構成技術を確立する。

② 光増幅モジュール省電力化制御技術

光増幅モジュールを効率的に制御して省電力化を図る光増幅モジュール省電力化制御技術の開発を行う。具体的には、コア内の波長多重信号光量に応じてコアごとに励起光量調整を最適化するなど、励起光源電力を効率的に制御する方式を確立する。

③ 高効率利得平坦化技術

①で開発する省電力光増幅モジュール構成技術と②で開発する省電力化制御技術とを用いた光増幅モジュールにおいて、光損失を緩和した高効率利得平坦化技術の開発を行う。具体的には、コア個別励起マルチコア EDF で波長帯域内の利得平坦化を行う際、損失となる光量が緩和するように励起光源を制御するなど、利得平坦化と省電力化を両立する技術を確立する。

平成 29 年度は、省電力光増幅モジュールの単体での動作検証を行うとともに、光増幅モジュール省電力化制御の試作、および高効率利得平坦化制御の仕様策定を行う。

【実施内容と成果】

平成 29 年度は、光増幅モジュール構成技術の開発を継続した。コア個別励起マルチコア EDF にマルチモード励起光源を用いたクラッド一括励起マルチコア EDF を組み合わせたモジュールの単体動作検証として、4 コアマルチコアファイバを用いた実験検証により省電力化の可能性を示した。また、検証結果に基づいて光増幅モジュール構成技術の改良として、コア個別励起方式で省電力効果が見込まれる異種光源を用いた構成について効果検証および権利化を行った。

さらに、光増幅モジュールを効率的に制御して省電力化を図る光増幅モジュール省電力化制御技術について、検証用制御部を試作した。具体的には、励起光源電力を効率的に制御する方式として、コア内の波長多重信号光量などに応じてコアごとに励起光量調整を最適化する方式を確立するとともに、実験結果を用い、光量条件に応じた最適な励起方式を明確化した。加えて、クラッド励起方式においてコア内の波長多重信号光量に応じた励起光源制御により省電力化が図れることをシミュレーションにより確認した。

また、効率的に光増幅モジュールの利得を平坦する高効率利得平坦化技術の開発を行った。具体的には、損失プロファイルおよび利得プロファイルを最適化することで光損失を緩和するコア間利得平坦化に加え、コア内の利得平坦化技術として、波長軸の利得プロファイルを光フィルタにより調整する方式を確立した。

課題ウ 空間多重ノード配線技術

課題ウ-1 空間多重ノード装置間配線技術（日本電信電話株式会社）

【目標】

- ① 平成 28 年度に試作した MCF 多心 MT コネクタの特性評価を実施し、光学特性向上に向けたコネクタ構造・作製方式の再設計・試作を実施する。また、平成 28 年度に試作した PLC 型 SMF-MCF 接続デバイスの基本特性を評価する。再試作した多心 MT コネクタの各種光学特性を評価し、中間目標に掲げた光学特性を達成するための構造・コネクタ作製法を明確化する。
- ② PLC 型 SMF-MCF 接続デバイスの評価結果を考慮し、光学特性の向上・MCF コア数の拡大を目的とした SMF-MCF 接続デバイスの再設計・再試作を行う。

【実施内容と成果】

- ① 10 コア超 MCF 一括接続コネクタの設計・試作および評価
10 コア超一括接続コネクタの実現に向けて、8 心 4 コアファイバ MT コネクタを試作し、前年度構築した MCF 回転調心機構および MT コネクタ組立方式により、32 コアで 2 dB 以下の中間目標に掲げた接続損失を実現した（平均値 0.6 dB、最悪値 1.8 dB）。ただし、反射減衰量 -35 dB 以下に至らなかったため、端面形状と PC 接続に必要な押圧力の関係を検証した。
- ② SMF-MCF 接続デバイスの設計・試作および評価
検討した PLC 型 SMF-MCF 接続デバイスについて、幾何学的な構造精度と接続損失の関係を計算し、PLC 型デバイスのコア数拡張性の検証を行った。しかし PLC 方式では縦方向に 3 以上の層数を実現することが困難であると考えられるため、来年度以降は三次元導波路技術を用いた着脱可能な接続デバイスについて検討を行うこととした。

課題ウ-2 空間多重ノード装置内配線技術（古河電気工業株式会社）

【目標】

前年度に確定したインタフェース条件に沿った物品の具体的な作製を行い、必要に応じてファイバには高密度配線に適したテープ化を行うことにより内部配線を完成させ、多心コネクタで 2 dB 以下の接続損失を実現させる。さらには増幅器内で必要とされるファンアウト部の高パワー耐性を向上させ、空間多重増幅器の性能向上検討に着手する。

【実施内容と成果】

① 多心マルチコアコネクタの特性改善

接続損失偏差低減のためフェルール金型の改良を行った。さらには、反射減衰量の確保のため、研磨条件を改善した。試作した MT コネクタ間の接続特性を評価し、接続損失平均 0.22 dB、最大 0.73 dB、全コアにおいて反射減衰量 45 dB 以上を確認した。

② マルチコアファンアウトの開発

平成 28 年度に作製した 4 コアファンアウトの特性安定性確認のための再現実験を行った。試作したファンアウトの接続ロスは、部材寸法誤差から想定されるロスの計算結果と良く一致することを確認した。さらに、増幅器内での使用を鑑みて、ハイパワー耐性の評価を行った。ファンアウトとマルチコアファイバの接続にポンプ光を通光し 26.8 dBm までロス劣化がないことを確認した。

③ 小型多心配線部材の特性改善

平成 28 年度に作製した課題イで検討される増幅器やスイッチに最適な小型多心コネクタ、およびそのファイバの寸法精度向上のため金型改良を行った。また、反射減衰量確保のため、研磨条件を改善した。試作したコネクタ間の接続特性を評価し、接続損失平均 0.23 dB、最大 0.66 dB、反射減衰量 40 dB 以上を確認した。

課題ウ-3 空間多重ノード配線用光コネクタ技術（学校法人千葉工業大学）

【目標】

平成 29 年度は、両端 MCF コネクタ付きパッチコードの機械的特性および信頼性に関する評価を行い、IEC 61755-1 Grade C/2 を満足するとともに、あらゆる評価項目について IEC 61753-1 における Category U の要求条件を満足することを確認する。また、伝送実験のデモで使用する複数ベンダによる長尺 MCF 同士のコネクタ接続を実施する。

【実施内容と成果】

① 平成 29 年度は、外径 125 μm 4 コア MCF に光コネクタを取り付け、複数ベンダによる長距離伝送実験に提供するとともに、ランダム接続損失および反射減衰量測定によって IEC 61755-1 Grade C/2 を満足できることを確認した。また、MCF 同士の接続に限定し、ファイバ両端のプラグ構造を互いに変えることにより、プラグ構成部品を減らした MCF 用 SC 形光コネクタおよびその組立装置を試作した。

② SMF より原理的に条件が厳しくなる MCF の PC 接続の信頼性を確保するため、接続時フェルール端面および割りスリーブの微小変形を FEM 解析する手法を確立して実験により検証し、その結果を国際会議および研究論文として発表した。

③ また、国際標準化に向け IEC TC86/SC86B において各国委員と意見交換を行った上、平成 29 年 10 月に開催された SC86B プレナリ会合において議題に上げ、平成 30 年 4 月の中間会合において MCF 関連標準化方針に関するプレゼンを行うことに決まった。今後具体的な提案内容について検討を進める。

課題全体（課題 170 との連携実験）

【目標】

平成 25 年度に開始された「革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発」の成果を積極的に活用し、本課題の要素技術との連携施策を通して本研究推進を加速する。

【実施内容と成果】

先行課題 170 と本課題 188 の要素技術を連携させることにより、4コア光増幅中継系を用いたC帯 118 Tbit/s – 300 km 超光増幅中継伝送実験に成功し、関係各社連名で報道発表を行うとともに、国際会議 OECC 2017 のポストデッドライン論文に投稿・採択された。4コア光増幅中継系は、ノード損失を模擬した利得等化 WSS フィルタを内蔵した3中継 300 km 長のマルチコア光増幅中継実験系をベースに設計（課題ア）し、課題 170 で試作開発した 100 km 超の標準外径 4 コアファイバ技術と、本課題 188 で試作開発した7コアクラッドー括励起光ファイバ増幅中継器（課題イ）、4 コア光コネクタ（課題ウ）を適用し、NICT 光ネットワーク研究所平成 24 年度補正整備施設において構築した。