

採 択 番 号 : 18801
研究開発課題名 : 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で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 (2016) 年度から令和 2 (2020) 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 750 百万円 (令和元年度 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、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	28	4
	外国出願	22	9
外部発表等	研究論文	14	3
	その他研究発表	200	52
	標準化提案	2	2
	プレスリリース・報道	3	0
	展示会	9	4
	受賞・表彰	8	2

(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】

令和元年度は、10 Pbit/s 以上を達成しうるスケーラブルノードの実現で重要となる信号挿入／分離部に、フレキシビリティと効率性を具備させる上で生じる課題の解決を目指す。想定するノード全体の構成のネットワーク全体へのインパクトを評価し、同時に当該構成を実現するデバイスの特性評価を行う。また、ノードへの効率的な信号の挿入／分離方式の検討を開始する。

・スケーラブル信号挿入／分離部の検討 (4月～9月)

平成 30 年度に検討した、大規模ノードに適用可能でかつ効率的な信号の挿入／分離方式について、クロスコネク部分とあわせノード全体をスケーラブルなものとするための方式を評価する。

・スケーラブル信号挿入／分離部を導入した大規模ノード構成に関するネットワーク的な評価 (10月～3月)

これまで開発してきた各種ノード構成に関して、スケーラブル信号挿入／分離部を導入した際の経済性を明らかにすべくネットワーク的な評価を開始する。特にスケーラブルな特性を具備するクロスコネク部分と組み合わせた場合の相互接続最適化手法を検討する。

【実施内容と成果】

令和元年度は、スケーラブルノードの実現で重要となる信号挿入／分離部に、フレキシビリティと効率性を具備させるための検討を継続して実施した。本課題で想定するスケーラブルなノードでは、そもそもルーティングに一定の制約が課されている一方で、信号挿入／分離部側もコンパクトかつスケーラブルなものとしつつ、同様のルーティング制約を課した場合に、それらの相乗効果がどの程度であるか、あるいはアルゴリズム側の改良により抑制可能かどうかを正確に計る必要があった。そこで、これまで検討してきたスケーラブルなクロスコネク部分と、スケーラブルな信号挿入／分離部とを Round-Robin 方式で接続し、極力均一な結合を行った上で、性能評価を行った。理想的な条件下での性能を得るため、ルーティングに制約はないがハードウェア規模の観点からは実現不可能なクロスコネク部分・信号挿入／分離部を仮想的に構成し、ネットワーク全体を模擬した数値シミュレーションにより比較を行った。この検討のため、これまで研究を進めてきた、クロスコネク部分のルーティング制約のみに注目したネットワーク設計アルゴリズムを改良し、スケーラブルな信号挿入／分離部におけるルーティング制約も加味したアルゴリズムを開発している。以上を踏まえた上で、さまざまなトポロジでの数値シミュレーションを実施した。収容すべき通信トラフィック量と、各光ファイバの残余容量との兼ね合いで相

対的な性能指標（ネットワーク内の光ファイバ数）は変動するものの、ともにスケーラブルな構造を持つクロスコネクト部と信号挿入／分離部を組み合わせた場合において、性能劣化は最大3%程度に抑えられることが明らかになった。また、空間多重ネットワークにおける機械学習ベースのネットワーク設計・制御アルゴリズムの開発にも着手した。

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】

令和元年度は、提案した各種ネットワーク収容設計方式に対する比較評価を実施する。また、平成30年度までに実施したネットワーク収容設計技術に必要な空間多重ノード特性の明確化についても継続して実施する。フォトリソノード構成要素技術等の他課題の技術を鑑みたネットワーク収容設計方式の検討／評価を行い、令和2年度の連携検証に向けた原理確認をする（4月～3月）。

令和2年度の連携検証向けの連携検証用ツールを検討する（9月～3月）。

【実施内容と成果】

平成30年度まで提案してきた、波長ブロッキングの発生を遅らせネットワークリソース全体を効率的に利用するコア割当方式（基本方式）に対し、SDM光ノードの省電力化を目指した、コア経路割当と利用波長数を平準化するパス設計方式を新たに追加提案した。追加提案した光ノード連携方式の評価として、これまで提案してきた基本方式に対して、伝送路となるマルチコアファイバのコア割当アルゴリズムの特性について、評価用のモデルネットワークトポロジを用いて、光パス収容の1st Blocking発生光パス設定数と1st Blocking抑圧効果を比較評価し明確化した。平成30年度までに提案した基本方式と比較して、7コアMCFから成る4×4トポロジにてパス設定順序を100通りシミュレーションした結果、光パスの1st Blocking発生を遅らせる効果は平均7.7%程度あることを示した。

さらに、平成30年度の連携実験結果より、空間多重ノードの光学特性を推定し、空間多重ノードのノード実現構成を具体的に設計した。他課題のこれまでの成果を総合的に組み入れ、令和2年度の連携実験に向けたノード／ネットワーク／制御関連の実現構成を明確化した。

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】

令和元年度は、（1）6中継ノード以上を有するマルチコアファイバ伝送路においてブロック等化を設計・評価するための伝送実験系を構築する。また、（2）信号雑音比（SNR）をコア間で均等化する手法検討としてクロストークに対する本伝送方式の耐性についての評価、また4コア独立パスのマルチコアファイバ伝送路での本伝送方式の性能を確認する。

【実施内容と成果】

（1）では1周回に4中継ノードを有する独立4コアパス周回伝送実験系を構築し、作製したブロック等化ノードを挿入して3周（12中継ノード）通過後の利得特性を取得した。これにより10中継ノード以上通過する場合の利得等化特性の設計指針を得ることができた。また、（2）では局所的に発生するクロストークの影響について計算機シミュレーションにて評価した。また、独立4コアパス中継伝送路実験系を構築してQ値偏差補償伝送方式を適用し、中継伝送後においても、SDM/WDM信号間のQ値偏差を0.1 dB以内に低減できることを実証した。

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】

令和元年度は、平成 30 年度に実施した多方路制御技術に関する要素技術の検討結果を設計に反映し、結合実験に向けた検証を行う（4 月～9 月）。さらに、課題ウと連携し、ノード内配線技術を用いた空間多重方路制御ノードの構成を検討する（4 月～3 月）。

【実施内容と成果】

- 中間目標で掲げた空間多重ノードにおける多方路制御技術に関する検討に関して、波長多重ノードの Ingress side と Egress side の WSS 接続構成を非対称とした新しい構成によって、ノード内光配線を大幅に簡略化できる構成を提案した。
- 多方路制御技術に関する要素技術として多連 WSS アレイモジュール技術を検討し、異なる二つの光学系を採用した WSS アレイモジュールを組み合わせによる簡略化光配線空間多重ノードの具体的構成を検証した。また、この簡略化光配線設計を反映した WSS アレイモジュールの試作を進め、実際にこのノード構成の特性を評価した。
- さらに、課題ウとの連携により、WSS アレイモジュール間に小型多心コネクタを採用することで接続点数や配線本数を削減可能な構成を検討し、さらなる簡略化見通しを得た。

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】

令和元年度までに開発した、①省電力光増幅モジュール構成技術、②光増幅モジュール省電力化制御技術、③高効率利得平坦化技術について結合試験を行う。さらに、②光増幅モジュール省電力化制御を実装した①省電力光増幅モジュールに対し、③高効率利得平坦化制御系を結合させて動作検証を行う（4 月～3 月）。

【実施内容と成果】

令和元年度は、省電力光増幅モジュール構成技術に関し、7 コアに比較して増幅効率向上が期待される 19 コア光増幅器の試作および初期評価を完了するとともに、7 コアに比較しハイブリッド動作において 6.9 %の電力削減効果を確認した。また、ターボクラッド方式に関し、回生効率の改良試作および性能評価を完了し、ターボクラッドなしとの比較において 3.5 dB の増幅効率向上を確認した。さらに、高効率利得平坦化技術に関し、省電力光モジュールとの結合および性能検証を完了した。

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】

MCF 一括接続 MT コネクタ技術に関し、MT コネクタ構造の再検討（ファイバ突出し量や研磨条件の最適化）を行い、20 コア超の MCF 一括接続コネクタを実際に試作・評価し、令和元年度中における最終目標の実現性を明らかにすると同時に、最終年度に向け、特性改善およびコア数拡張に向けた課題を改めて抽出する。また、コネクタの信頼性評価を目的とした環境試験（温度サイクル試験および着脱試験）を実施し、コネクタの耐環境性能を評価する。また、課題ウ-1 および課題ウ-2 で作製したコネクタで相互接続試験を行い、光学特性を評価する。接続方式の検討について、異種 MCF 接続デバイスの設計および試作・評価を実施し、光学特性の評価を実施する。

【実施内容と成果】

- 20 コア超 MCF 一括接続コネクタの設計・試作および評価
設計・試作した多心 MCF のファイバ突出量の検討により、20 コア超一括接続において最終目標（損失 1.5 dB 以下、反射減衰量 40 dB 以上、クロストーク -40 dB 以下）を達成した。また、作製したコネクタの押圧力と反射減衰量の関係、および環境試験を実施し、令和 2 年度のコア数拡張性検証ならびに耐環境性の実証に向けての特性データを取得した。古河電工作製コネクタとの相互接続評価を行い、異社コネクタ接続において同社コネクタ接続より高い接続損失を確認し、令和 2 年度の異社間接続における損失要因の分析・損失特性改善のための基礎データを取得した。
- 異種 MCF 接続デバイスの設計・試作および評価
異種 MCF を接続可能なデバイスについて、三次元導波路を用いた着脱可能な 8 CF - 4 CF×2 変換デバイスを作製し、光の導通を確認した。また、作製したデバイスの損失評価・要因分析を行い、特に導波路のかん合時における導波路と MCF のコア間の軸ずれが大きな損失要因であることを確認した。平成 2 年度の特性改善（低損失化）に向けて、導波路と MCF のコア間の位置合わせの精度を向上する機構等を検討する。
- 空間分割多重伝送用ファイバの標準化
ITU-T SG15 第 5 会合において、将来における空間分割多重伝送用光ファイバの標準化に備え、現在の技術レベルと標準化に向けた課題を明確化するための新規技術レポートの作成提案を実施し、2022 年文書制定に向けて作業を開始することが了承された。

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】

令和元年度は、装置内での増幅器、スイッチのさらなる入出力数増大への対応に向けた技術開発を行う。平成 30 年度に増加した装置外部から入力された信号を増幅器に入力できるよう内部コネクタの心数増大を図るとともに、平成 30 年度に技術完成した高パワー耐性ファンアウトのコア数拡大に着手する。

【実施内容と成果】

- 多心マルチコアコネクタの開発
課題ウ-1（NTT）と 4 コア MT コネクタ（4 心または 8 心）の課題内接続互換評価を実施し、8 心コネクタの目標値である 1.5 dB 以下の接続損失を確認した。
- マルチコアファンアウトの開発
ハイブリッド励起を想定したファンアウトのハイパワー耐性を 19 コアファンアウトで実証し、モデル作成と実試験にて問題ないことを確認した。
- 小型多心配線部材の開発
2 種の小型 24 心コネクタの試作を実施した。80 μ m クラッドファイバを想定したタイプは平成 30 年度までの外観を踏襲し、2 段化することにより 24 心化を実現した。新規に取り組んだ 125 μ m クラッドファイバを想定したタイプの設計も完了し、フェルール作製を完了した。どちらのタイプも初期特性確認を完了し、接続損失 1.2 dB 以下を達成した。

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】

令和元年度は、外径 125 μ m、4 コア MCF 用 SC 形光コネクタについて、量産化可能な簡易構造によってランダム接続損失 0.5 dB 以下（97%）、反射減衰量 40 dB 以上の光学特性、および IEC 61753-1 Category OP に適合する機械的特性および耐環境特性を確認するとと

もに、課題ウ-2と連携しながら多心ファイバとMCFのインタフェースの最適化を行い、効率の良いシステム構築に貢献できる架間光インタフェースを完成させる。

また、MCF用光コネクタ接続損失測定法に関する規格開発を進めながら、反射減衰量測定法に関しても提案を始め、本プロジェクトで開発した光インタフェースが世界標準になるよう働きかけを続ける。

【実施内容と成果】

平成30年度に基本特性を確認した外径125 μm 、4コアMCF用SC形光コネクタをテンションメンバ入り ϕ 1.7 mmコードに取り付けた上、機械的特性として繰返しかん合試験(IEC 61300-2-2)および通光左右曲げ引張り試験(IEC 61300-2-51)を実施した。500回の着脱および90°方向に19.6 Nの荷重をかけた場合において、接続損失変動0.2 dB以下を達成し、IEC 61753-1 Category OPに適合することを確認した。また、光スイッチとファンアウトを含む系でOCWR法を用いて反射減衰量を測定する際、あらかじめ測定したファンアウト等の挿入損失と反射減衰量からMCFコネクタ1接続点の反射減衰量を推定する方法を見いだした。

MCFコネクタ関連の標準化について、令和元年10月に上海で開催されたIEC TC86/SC86B会合において、接続損失および反射減衰量規格開発プロジェクトの具体的な計画が承認され、上記測定方法を盛り込んだ規格草案を令和2年4月に開催されるIEC TC86/SC86B中間会合に提案することとなった。