

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認する。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・省電力化技術の確認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認する。産学官連携により、それぞれの強みをも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認を目指す。

(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>  
国立大学法人東海国立大学機構 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2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(国立大学法人東海国立大学機構 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	34	6
	外国出願	32	9
外部発表等	研究論文	15	1
	その他研究発表	226	26
	標準化提案・採択	4	1
	プレスリリース・報道	3	0
	展示会	10	1
	受賞・表彰	13	4

(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 (国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学)

【目標】

MCF を含む複数の光リンクを接続するスループットが従来の 100 倍以上となる 10 Pbit/s 超まで拡張可能なフォトニックノードアーキテクチャの機能配備とその構成要素技術を明らかにし、その核となる部分の原理実証を、課題イ、ウの成果を踏まえた連携実験を通して行う。目標とするフォトニックノードの属性としては、スループットが 10 Pbit/s 超、隣接ノード数 (方路数) 8 程度まで接続可能であること、マルチ/シングルコアファイバを収容可能であること、小規模から大規模までモジュール的に増設可能であること、各種の変調形式、信号帯域、グリッド幅をサポートできること、を想定する。

【実施内容と成果】

- ①サブシステムモジュラ OXC 構成およびファイバクロスコネクタ構成のスループット 10 Pbit/s 超のフォトニックノードへのスケーラビリティを実証した。さらに、ほぼ無制限のスケーラビリティを達成する新たなノードアーキテクチャを提案した。
- ②トランスポンダをバンクに分散して収容する構成によりスケーラビリティを確保する、新たな信号終端部の提案を行った。
- ③ネットワーク全体を模擬した大規模数値シミュレーションを行い、上記項目①で提案した各種フォトニックノードアーキテクチャおよび②のスケーラブル信号終端部の合理性およびコスト特性を明確化した。課題イとの連携により 6×6 WSS を用いたプロトタイプでの実験を行い、フィジビリティを示した。
- ④コア間クロストークを考慮したマルチコアファイバネットワークの動的制御法の提案と有効性の実証を行った。コア間クロストークと周波数領域でのフラグメントのトレードオフを効率的に解決するため、機械学習 (強化学習) に基づいた価値評価と学習を行っている。

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】

10 Pbit/s 超のスループットを可能とする方路数 8 以上の空間多重ノードから構成される空間多重ネットワークにおいて、コア数 10 以上の MCF を対象としたネットワーク収容設計技術の機能要件を明確にし、その要件に基づくネットワーク収容設計方式を提案するとともに、その原理確認を実施する。また、ネットワーク収容設計技術の検討に必要な空間多重ノード特性も明確にする。他の課題の研究成果を組み合わせた環境における連携検証を通して、空間領域上の自由度を考慮したネットワーク収容設計技術の実現可能性を明らかにする。

#### 【実施内容と成果】

- ①方路数 8 以上、コア数 10 以上の SDM ネットワークに適用可能な空間多重ネットワーク向け光パス収容設計方式の提案とその特性評価を完了した。
- ②本光パス収容設計方式と空間多重ノードを構成するマルチコア光増幅器の連携制御による 19 コアマルチコア光増幅器の省電力特性を最適化する設計手法の提案と基本特性の評価および省電力効果を実証した。
- ③光パス収容設計方式の検討に必要な空間多重ノードの光学特性評価を完了した。
- ④空間多重ノードのコンセプト実証構成の提案とその構築、および提案した空間多重ノード構成を用いた課題間連携実験を達成した。

#### 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】

課題イ-2 等と連携し試作された中継ノードや、空間多重ノードの光学特性を考慮して、10 段中継後の利得平坦性が、課題イで実現する中継ノード 1 台当たりの空間ならびに波長域での利得平坦性の 2 倍以下（ $\pm 3$  dB 以内）に低減可能であることを明らかにする。

##### 【実施内容と成果】

- ①課題イが実現する利得平坦性（ $\pm 1.5$  dB）の 2 倍である  $\pm 3$  dB（6 dB）以内の利得平坦性を、目標の 10 中継後を超える 12 中継後にて実証した。
- ②マルチコアファイバのコア間で生じる信号雑音比（SNR）の差異に起因する信号品質 Q 値偏差を低減する伝送方式を提案し、0.1 dB 以内に Q 値偏差を低減可能であることを、マルチコアファイバおよびマルチコア光増幅器で構成した 192 km 伝送路にて実証した。さらに SDM/WDM チャンネル間においても Q 値偏差補償可能であることを確認した。

#### 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】

10 Pbit/s 超のスループットを可能とする空間多重ノードとして、方路数 8 以上、コア数 10 以上、方路数コア数積 150 以上、所望帯域が 10 THz 以上の空間多重ノード構成技術、マルチコア光増幅・多方路制御技術を検討して、課題イ-2 との連携により、所望帯域内の利得ばらつき制御精度が  $\pm 1.5$  dB を可能とする利得制御技術の実現可能性を示す。10 Pbit/s 超のスループットの空間多重ノードの部分構成（一部方路、一部帯域）による実験検証を実施することによって、ノード構成技術、多方路制御技術、利得性制御技術の有効性を示し、10 Pbit/s 超のスループットの実現可能性を実証する。

##### 【実施内容と成果】

- ①2-f 型および 4-f 型の M 連  $1 \times M$  波長選択スイッチ（WSS）の基本原理の確認および光学設計検討。スループット 10 Pbit/s 超を実現可能なノード構成となる  $6 \times 6$  規模および  $10 \times 10$  規模の WXC を構築。
- ②2-f 型および 4-f 型光学構成の WSS の組合せにより光配線の劇的な簡略化構成を提案。課題ウ-2 における小型多心コネクタの採用により、配線部のさらなる超小型を実現。
- ③同じ光学構成で光チャンネルモニタ機能および OSNR モニタ機能などを実装できることを実証。
- ④  $M \times M$  WSS を用いたサブシステムモジュラ OXC の連携実験により目標性能である利得ばらつき  $\pm 1.5$  dB とスループット 10 Pbit/s 超の実現可能性を実証（課題間連携実験）。

## 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】

10 Pbit/s 超のノードスループットにスケール可能な光増幅器の省電力化技術を確立する。省電力化に適した励起光源と光増幅媒体の組合せで構成される光増幅モジュール構成技術の開発、および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とともに、光損失を緩和した高効率利得平坦化技術を開発する。これらの技術を備えた光増幅器の省電力効果検証を行うとともに、課題イ-1 と連携し、空間多重フォトニックノードに配備される光増幅器の電力に換算して 25 % の削減とばらつき±1.5 dB 以内の利得平坦化を可能とする基盤技術を確立する。

### 【実施内容と成果】

- ①省電力増幅モジュール構成技術、および、光増幅モジュール省電力化制御技術の検討においてハイブリッド励起+コア共有方式を適用し、最終目標である 25 % の省電力化を確認した。
- ②クラッド一括励起方式の改良（ターボクラッド励起技術）により、さらなる省電力化の可能性を示した。
- ③光パス収容設計（課題ア-2）とマルチコア光増幅器の連携制御による 19 コア光増幅器の省電力効果の実証を完了した。
- ④高効率利得平坦化技術の検討において、課題イ-1 との連携により、最終目標である±1.5 dB 以内の利得平坦化の実証を完了した。
- ⑤課題間連携検証を完了した。

## 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】

将来の標準 MCF の方向性を見据え、クラッド径 125  $\mu\text{m}$  の MCF を対象とし、既存の多心コネクタと同等の特性を有する 20 コア超まで拡張可能な一括接続技術を実現する。また、既存の SMF をベースとしたフォトニックノードから空間多重フォトニックノードへのマイグレーションとその拡張性を勘案し、多心 SMF と MCF、異種 MCF 同士など多様な接続形態を実現する。さらに、標準 MCF および単心 MCF コネクタ技術の標準化に向けたマイルストーンを策定し、具体的な標準化提案に繋げる。

#### 【実施内容と成果】

- ①多心 MCF 一括接続多心コネクタに関し、最終目標で掲げた 20 コア超一括接続および所望の光学特性を達成。
- ②当初計画に加え、課題ウ-1 および課題ウ-2 で作製したコネクタの相互接続実験を実施し、同社間接続の最終目標を満足する異社間接続を世界で初めて実証。
- ③多層平面石英導波路 (PLC) および 3 次元導波路技術を活用し、SMF - MCF および異種 MCF 接続デバイスを実証、異種 MCF 接続では、当初計画に加えて着脱性も実証。
- ④課題ウ-1、2、3 の要素技術により課題間連携実験に適用する 4 コアファイバ伝送路の構築・評価を完了。
- ⑤ITU-T SG15 において、空間分割多重伝送用光ファイバに関する新規技術レポートの作成を課題 203 との連携で実施し、2022 年文書制定に向けた作業開始を合意。

## 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】

空間多重技術を活用し、1 方路あたり 20 コアの信号を接続損失 1.5 dB 以下、クロストーク -40 dB 以下で一括接続にてノードへ入力可能とする装置内配線を構築する。MCF を用いた伝送路と単一コアファイバベースの各種部品との一括接続可能なインタフェースを明らかにするとともに、ノード内の構成要素である増幅器、スイッチ等の配線/接続の最適化を行い、小スペースかつ高パワー耐性の高い光配線技術を示す。

### 【実施内容と成果】

- ①多心マルチコアコネクタ技術開発において、4 コア 8 心（32 コア）を接続損失 1.5 dB 以下、クロストーク -40 dB 以下での一括接続を実現。
- ②ファンアウト技術として、接続損失 0.5 dB 以下で伝送路と各種部品との接続可能な 4 コア用ファンアウト技術完成させるとともに、ノード内増幅器からの高パワーに対して 19 コアファンアウトの耐性を確認。課題間連携実験に適用する 4 コアファイバ伝送路に 4 コア FI/FO を提供。
- ③省スペース化に適した単心ファイバ用小型多心コネクタ技術を確立し、24 心一括コネクタにて 1 dB 以下の損失での接続を実現した。
- ④多心マルチコアコネクタ技術①について、当初計画に加えて、課題ウ-1、2 間で作製したコネクタの相互接続試験を実施し、同社間接続と同等の性能最終目標を満足する損失・反射減衰量特性を実現。
- ⑤単心ファイバ用小型多心コネクタ技術③を、課題イ-1 で開発した多連 1×N WSS モジュール技術と組み合わせて光配線の劇的な簡略化構成し、配線部のさらなる超小型化を実現。

## 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】

空間多重信号伝送を行う MCF 等による架間配線に使用できる光コネクタ接続技術を開発する。ランダム接続損失 0.5 dB 以下（97 %）の接続特性および通信ネットワークにおける実使用に耐える機械的耐性や信頼性を確保できる光コネクタインタフェースを実現し、標準化の道筋を付けることにより相互接続インタフェースとして確立する。

### 【実施内容と成果】

- ①空間多重信号伝送を行う MCF 等による架間配線に適する単心系光コネクタとして、結合時にオルダム・カップリング機構を構成する簡易構造 MCF 用 SC 形光コネクタを開発した。ランダム接続損失 0.5 dB 以下（97 %）、反射減衰量 45 dB 以上、通光左右曲げ引張り試験等の機械的特性および耐環境特性を確認し、通信ネットワークでの使用に耐える性能を有することを示した。課題間連携実験に適用する 4 コアファイバ伝送路に 4 コア MCF 用 SC 形光コネクタを提供。
- ②長期信頼性に影響する光コネクタ光学互換標準策定に必要となるフェルール端面形状の許容範囲を求めるため、ファイバ引込みや頂点ずれを有する 4 コア MCF フェルール端面微小変形の FEM 解析手法を確立し、MCF の規格が定まれば光学互換標準を提案できる準備を整えた。
- ③IEC TC86/SC86B 会合において MCF コネクタ接続特性測定法に関する標準化開発を提案した。接続損失（IEC 61300-3-4）測定法 Annex に MCF の項目を加えることが了承され、2021 年 2 月に CD 文書が回覧された。反射減衰量（IEC 61300-3-6）測定法についても同様の変更が合意されているが、文書作成担当のカナダから回覧待ちである。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

最終年度（令和 2 年度）において、課題連携実験の実施を通して、各課題で検討・確立した以下の要素技術については、ITU-T、IEC において開始した空間多重光通信技術の国際標準化を All Japan で推進するとともに、今後の Beyond 5G 時代のインフラを支えるための基盤技術として実用化に向け、アプリケーション領域に応じた最適設計を進める。

【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】

- ア-1) 空間多重ノードアーキテクチャ技術
- ア-2) 空間多重ネットワーク収容設計技術
- ア-3) 空間多重中継ノードシステム制御技術

【課題イ 空間多重ノード光増幅・方路制御技術】

- 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
- 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

【課題ウ 空間多重ノード配線技術】

- ウ-1) 空間多重ノード装置間配線技術
- ウ-2) 空間多重ノード装置内配線技術
- ウ-3) 空間多重ノード配線用光コネクタ技術