

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

2016 (平成 28) 年度から 2020 (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 750 百万円 (平成 30 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	24	10
	外国出願	11	5
外部発表	研究論文	11	5
	その他研究発表	147	55
	プレスリリース・報道	3	0
	展示会	5	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30年度は、ノードの実現に必要なノード構成機能の評価、ならびに各種デバイスを含む評価を行う。必要に応じて、デバイスの部分試作と光伝送特性の評価を行う。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。以下の項目に重点を置く。

- 各種のノード構成に関するネットワーク的な評価(4月~12月)：前年度に検討を開始した、各種のノード構成に関して、コストを含むネットワーク的な評価を詳細に行う。ノード構成としては、波長クロスコネクト/ファイバクロスコネクトを含み、波長クロスコネクトに関しては各種構成を評価する。なお、中間目標時点(9月)までに、複数のネットワークモデルに対してコストを含む評価を実施し、提案ノード構成の有効性を検証し、中間目標を達成する。
- ノードへの効率的な信号の挿入/分離方式の検討(8月~3月)：ノードへの効率的な信号の挿入/分離方式について、大規模ノードに適用可能な方式を各種評価する。まずは、静的なトラフィックにおけるファイバリソース、あるいはダイナミックなトラフィックにおけるブロッキング特性などを評価する。

【実施内容と成果】

平成30年度は、NxNWSSを用いたサブシステム構成、および光ファイバクロスコネクトを用いた構成を中心に、各種ノード構成についての性能解析を行った。一般的な指標である、同一の通信トラフィックを収容するのに要する共通資源、すなわちネットワーク内の光ファイバの本数のみならず、ノードの構成デバイスの差異まで考慮した解析を行った。この際、各種文献から構成デバイスの想定コストを抽出し、これをもとにネットワーク全体でのコストを推定する式を導いている。ヨーロッパ全域に代表される大規模ネットワークと、一般的な国家レベルのネットワークとしてのドイツおよび日本国内のネットワークにおいて、それぞれ通信トラフィックを変化した際のノード構成間の優劣について評価を行った。この評価を通じ、理想的なルーティング能力を備えるが、ハードウェアコスト面では非現実的となる従来型ノードを仮定した場合に得られる最小の光ファイバ数と、ほぼ同等の光ファイバ数を達成するサブシステムクロスコネクト構成が、広いパラメータ領域で優位を示すことが明らかになった。一方、波長選択性を有しないものの、構造が単純化される可能性がある光ファイバクロスコネクト構成については、リンク長が短くノー

ドのコストが相対的に大きくなる領域において、特にトラフィックの大きい状況で優位となることを示している。

一方、光信号の挿入／分離方式を複数検討し、おのこの方式の制約および利点を明らかにした。ネットワーク全域でのファイバ使用効率、あるいはブロッキング特性に関する解析を、従来型ノードと併せ実施している。

#### 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】

平成 30 年度は、基本方式の原理確認を行い、中間目標を達成する予定（4 月～9 月）。前年度までに検討したネットワーク収容設計技術を基にその拡張方式を検討し、設計方式の評価を引き続き実施する。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を評価する（4 月～3 月）。

##### 【実施内容と成果】

###### ・ネットワーク収容設計方式の検討と評価

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の基本方式の原理確認評価を実施し、従来方式より光パス収容効果が高いことを示した。特に、光パス収容設計の基本方式に関しては、本設計手法をクロストーク積算値により伝送可能距離を判定する方式を追加検討し、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 発生パス数、1st Blocking 抑圧効果を明確化した。光パスの 1st Blocking 発生を遅らせる効果は、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 6%程度の効果があることを明らかにした。また、光パス収容設計の拡張方式として、冗長パス経路を考慮した収容設計を評価し、その効果を明らかにした。

さらに空間多重ノード特性評価用備品類を用いて、マルチコア伝送路を含めた空間多重ノード構成を検討した。また、多連 WSS とマルチコア光増幅器から成る空間多重ノードを構成し、WDM 光を複数ポートに入力し、空間多重ノードの光学特性・光増幅特性を明らかにした。

#### 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】

本年度は①ブロック等化ノード性能評価において、設計した各種ブロック等化ノードの性能評価と、中間目標である課題イで実現する中継ノード 1 台あたりの利得平坦性の 2 倍以下(±3 dB)に低減可能なシステム制御技術の確立を行う。また②信号雑音比(SNR)をコア間で均等化する手法の検討において、4 信号間での均等化を実証する。

##### 【実施内容と成果】

①ブロック等化ノード性能評価では、ブロック等化を挿入する中継段数評価のため 1、2、4 段ごと用のブロック等化ノードを作製して評価した結果、いずれのブロック等化段数においても5段中継ノード通過後の利得平坦度は、課題イの目標値の2倍以内(±3 dB)であることを確認した。また、②信号雑音比をコア間で均等化する手法では、4信号間で均等化可能にする伝達関数の設計方法を提案し、シミュレーションおよび実験により、4コア中1コアの信号雑音比が劣後している条件下においては、信号品質 Q 値の偏差が 0.1 dB 以下に低減すること、および劣後信号の Q 値が最大 2.5 dB 改善することを実証した。

## 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】

平成 30 年度は、コアごと・波長ごとに調整可能な透過強度変調技術を検討し、中間目標にて掲げる利得制御技術を実現する（4 月～9 月）。平成 29 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試作を実施し、実験検証を通じた多方路制御技術の原理確認を行う（4 月～3 月）。

平成 29 年度に実施した多方路制御技術の設計検討を基に試作した実機を用い、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検証を行う（8 月～3 月）。

#### 【実施内容と成果】

- 中間目標で掲げた伝送特性を考慮した波長多重ノード構成の検討に関して、WSS 間クロストークを低減した 4-f 光学系型多連 WSS を組み合わせて 6x6 WSS を実現した。
- 課題であったスイッチモジュール間の複雑なシャッフル配線を簡略化する新たなスイッチ設計手法を提案し、さらに課題ウの小型多心配線技術を適用することで、中間目標で掲げた多方路スイッチ構成の検討に関して、NxN WSS 内配線を大幅に簡略化できる見通しを得た。
- 低クロストーク型多連 6x6 WSS を組み合わせて、中間目標で掲げたコア間・波長間のばらつきを抑圧する利得制御技術の原理確認を実施した。

### 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】

平成 30 年度は、省電力光増幅モジュールと光増幅モジュール省電力化制御とを結合させて動作検証を行うとともに、高効率利得平坦化制御の試作を行う。省電力光増幅モジュールと光増幅モジュール省電力化制御とを結合させた試作を実施し、提案要素技術の妥当性を検証することで、中間目標を達成する予定（4 月～9 月）。

#### 【実施内容と成果】

平成 30 年度は、省電力光増幅モジュールと光増幅モジュール省電力化制御とを結合させて動作検証を行った。具体的には、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 を組み合わせて開発したモジュールに、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など、励起光源電力を効率的に制御する方式を統合させ、統合させた省電力光増幅モジュールと光増幅モジュール省電力化制御により省電力効果検証を行った。検証の結果、最大容量に当たる条件において、コア共有化およびクラッド励起のハイブリッド方式（H-SCP）を用いて、20.3 % の電力削減を確認した。さらに省電力化を高めるため、19 コア MC-EDF の試作を完了した。

また、高効率利得平坦化制御の試作を行った。具体的には、光損失を緩和するコア間利得平坦化に加え、波長帯域内での利得プロファイルを調整する方式に関する、平坦化制御部の試作を完了した。

## 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】

平成 29 年度に試作した多心 MCF-MT コネクタの特性評価に基づき、全コアの低損失 PC 接続を実現するための組立・端面研磨条件を明らかにし、中間目標で掲げる光学特性を有するマルチコア MT コネクタを実現する（4 月～9 月）。作製した MT コネクタと課題ウ-2 で作製したコネクタで相互接続試験を行う（4 月～12 月）。また、最終目標を実現するために、接続コア数の拡大を検討し、20 コア一括接続 MT コネクタの原理検証を行う（4 月～3 月）。SMF-MCF 接続および異種 MCF 接続デバイスの検討においては、着脱可能な接続デバイスの基本設計を行う（4 月～3 月）。

#### 【実施内容と成果】

- 10 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 の回転角度を制御する多心固定ブロックを内挿し、マイクロホール内を非固定とした MT コネクタにおいて、中間目標で掲げた 10 コア超一括接続および所望の光学特性を実現した。また、作製した MT コネクタと課題ウ-2 で作製したコネクタで相互接続試験を開始し、基本特性の評価を実施した。また、最終目標を実現するために、最大 8 心の 4 コアファイバを内挿した MT コネクタの作製を実施し、20 コア一括接続 MT コネクタの実現に向けた特性の評価を実施した。

- SMF-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、3 次元導波路を包含する多心コネクタについて検討を行い、一例として 4 CF-4 SMF 変換構造で提案手法の原理実証を行った。

### 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】

平成 29 年度の段階で実現した 20 コア超の一括接続をベースに、中間目標で掲げる特性を満たすコネクタの機械特性、環境特性を確認する（4 月～9 月）。さらに、実用性の実証を行うとともに、相互接続実験にも着手するほか、増幅器の多心化に合わせて多心化対応したファンアウトの耐パワー特性確保を行うとともに、小型単心コネクタの多心化に着手する。

#### 【実施内容と成果】

- 研究開発項目ウ-2-1 多心マルチコアコネクタの開発（4 月～3 月）

課題ウ-1（NTT）と 4 コア MT コネクタ（4 心）の課題内接続互換評価を実施し、平均接続損失 0.16 dB を達成した。

- 研究開発項目ウ-2-2 マルチコアファンアウトの開発（4 月～3 月）

平成 29 年度に確認した 7 コアファンアウトハイパワー耐性の 19 コアでの確保を行い、20 dB 以上のパワー入りに耐えられることを確認した。

- 研究開発項目ウ-2-3 小型多心配線部材の開発（4 月～3 月）

課題イで検討される増幅器やスイッチに最適な、平成 29 年度に作製した小型多心コネクタの心数増加検討を実施し、24 心まで収容可能な構造を確保した。

### 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】

プラグ内に単独のオルダム・カップリング機構を持たず、接続する MCF の IN 側と EX 側にそれぞれ直交する自由度を持たせた MCF 用 SC 形光コネクタを対象に、中間目標に掲げた接続特性（損失：1 dB 以下、反射減衰量：-35 dB 以下、1 接続点あたりのクロストーク：-35 dB 以下）を実現する。また、IEC TC86/SC86B において、MCF 接続損失測定法に関する標準化プロジェクトの開始を目指す。

#### 【実施内容と成果】

φ125 μm、4 コア MCF の両端に試作した MCF 用 SC 形光コネクタを取り付けたパッチコードを 10 本作製し、IEC 61300-3-34 に規定されたランダム接続損失測定を行った結果、平均 0.16 dB、99.7%が 0.5 dB 以下となり、最終目標の Grade C を達成できることを確認した。また、同じ組合せで OCWR 法により反射減衰量を測定したところ、光 SW、ファンアウトおよび PC コネクタ 3 接続点の反射を含む値として平均 49.2 dB、最小値 46.6 dB であり、最終目標値を達成できることを確認した。

また、平成 30 年 10 月に開催された IEC TC86/SC86B 釜山会合において、MCF 接続損失測定法の標準化プロジェクトを開始することが合意された。