

## 1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆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
- ◆実施機関 : 日本電信電話(株)、名古屋大学、(株)KDDI総合研究所、日本電気(株)、古河電気工業(株)、千葉工業大学
- ◆研究開発期間 : 2016 (平成28) 年度～2020 (令和2) 年度 (5年間)
- ◆研究開発予算 : 総額750百万円 (令和元年度 150百万円)

## 2. 研究開発の目標

将来の10 Pbit/s超にスケール可能なノードスループットを有する大規模フォトニックノードシステムの実現に向けて、ノードのスイッチング規模、実装密度の観点から物理的な限界を打破する空間多重フォトニックノード基盤技術として、次の三つの要素技術を確立する。

①空間多重ノードアーキテクチャ・システム制御技術、②空間多重ノード光増幅・方路制御技術、③空間多重ノード配線技術

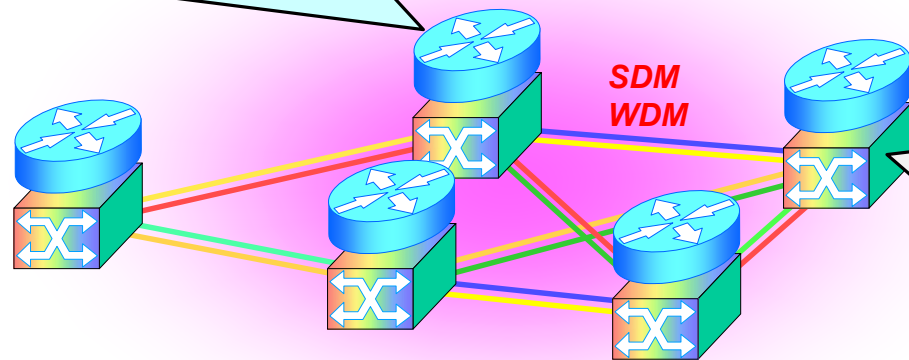
研究開発目標

### 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

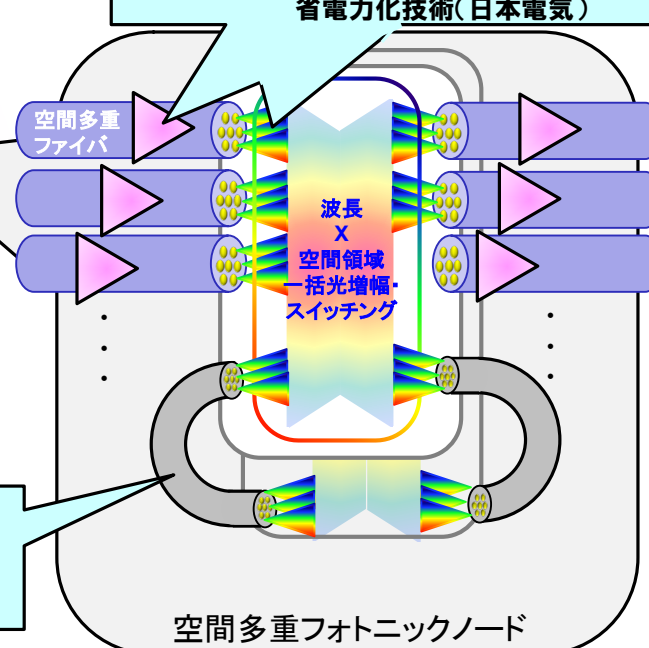
- 課題ア-1 空間多重ノードアーキテクチャ技術 (名古屋大学)
- 課題ア-2 空間多重ネットワーク収容設計技術(NTT)
- 課題ア-3 空間多重中継ノードシステム制御技術(KDDI 総合研究所)

### 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(NTT)
- 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)



大容量空間多重光ネットワーク



### 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(NTT)
- 課題ウ-2 空間多重ノード装置内配線技術(古河電工)
- 課題ウ-3 空間多重ノード配線用光コネクタ技術(千葉工業大学)

研究開発成果: 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

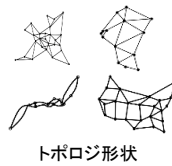
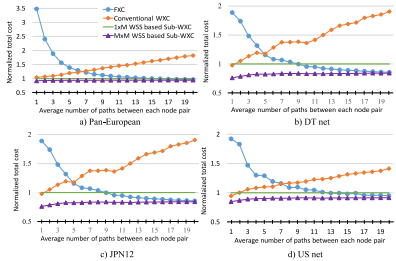
課題ア-1 空間多重ノードアーキテクチャ技術

(国立大学法人名古屋大学)

主な研究開発成果:

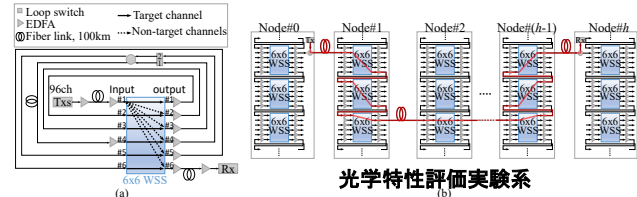
- ①ファイバロスコネクと波長パスクロスコネクの経済性評価
- ②NxN WSSを適用したOXCのfeasibility検証(課題イ-1と連携)
- ③スケーラブルな信号挿入/分離部の提案と性能評価

①ファイバロスコネクと波長パスクロスコネクの経済性評価



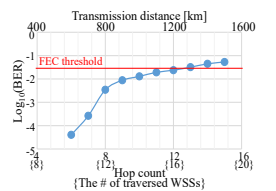
トポロジ形状

② 6x6 WSSで構成されたサブシステムモジュラOXCのfeasibility検証

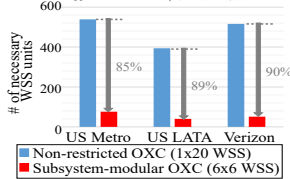


光学特性評価実験系

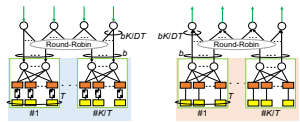
12 hop (16 WSS), 1200 km 伝送



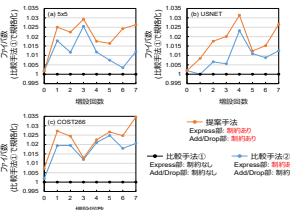
大幅な WSS 数の削減



③スケーラブルな信号挿入/分離部の提案と性能評価



コンパクトかつスケーラブルな信号挿入/分離部を提案し、スケーラブルなクロスコネクとあわせての性能評価を実施した。



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)

主な研究開発成果:

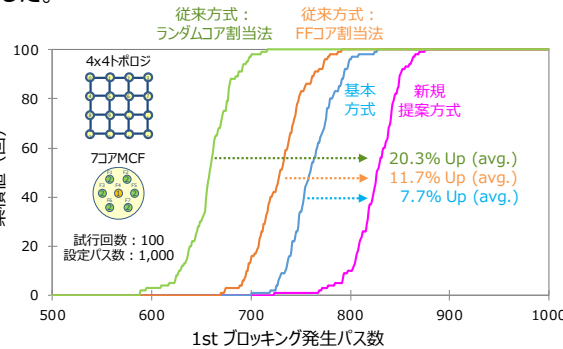
- ①SDMネットワーク収容設計空間多重ノード連携方式の提案
- ②収容設計基本方式/空間多重ノード連携方式の比較評価
- ③空間多重ノード実現構成の検討と特性の評価

①SDMネットワーク収容設計光ノード連携方式の提案

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に対し、SDM光ノードの省電力化を目指した、コア経路割り当てと利用波長数を平準化するパス設計方式を提案した。

②収容設計基本方式/光ノード連携方式の比較評価

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抑圧効果を比較し、その特性を示した。



従来方式と基本方式と比較した1stブロッキング発生光パス設定数 @ 7コアMCFから成る4x4トポロジ

③空間多重ノード実現構成の検討と特性の評価

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

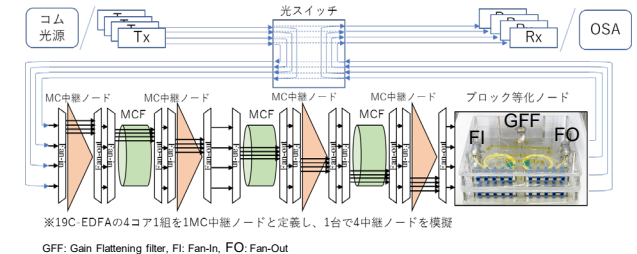
(株式会社KDDI総合研究所)

主な研究開発成果:

- ①10段以上の中継ノードを考慮したブロック等化ノードの評価・設計指針策定用周回伝送実験系の構築
- ②信号雑音比(SNR)をコア間・波長間で均等化する手法のマルチコアファイバ(MCF)中継伝送における実証

①10段以上の中継ノードを考慮したブロック等化ノードの評価・設計指針策定系の構築

独立した4コアのパスを具備する周回伝送実験系を構築し、ブロック等化ノードの評価および設計指針へのフィードバック



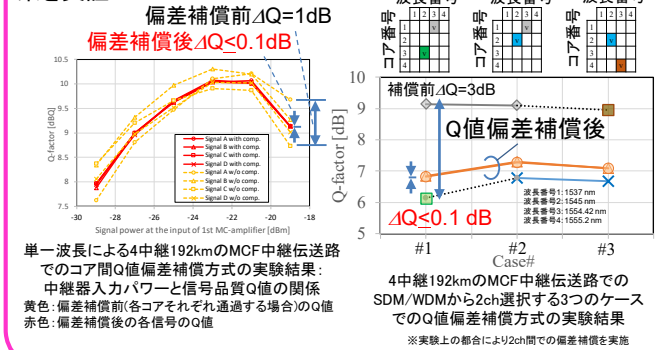
※19C-EDFAの4コア1組を1MC中継ノードと定義し、1台で4中継ノードを模擬

GFF: Gain Flattening filter, FI: Fan-In, FO: Fan-Out

ブロック等化ノードの評価・設計指針策定用周回伝送系図

②信号雑音比(SNR)をコア間・波長間(SDM/WDMチャネル間で均等化する手法のマルチコアファイバ(MCF)中継伝送路における実証

4中継ノードを通過する192kmのMCF中継伝送路においてSDM/WDMチャネル間Q値偏差(最大3dB)を0.1dB以下に低減する効果を実証



※実験上の都合により2ch間での偏差補償を実施

研究開発成果: 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

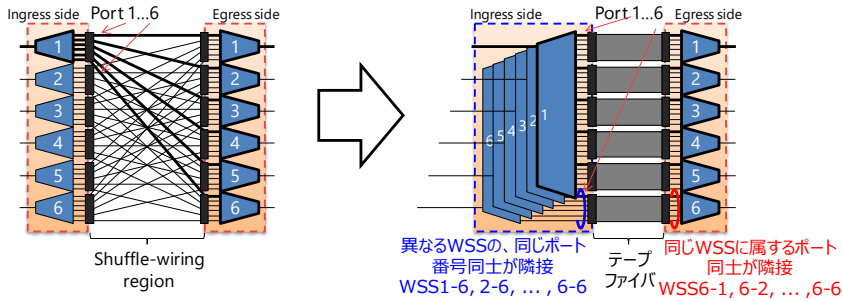
(日本電信電話株式会社)

主な研究開発成果:

- ①SDMノードの構成として、Ingress sideとEgress sideを非対称とした新しい構成によってノード内配線を大幅に簡略化できる構成を提案した。
- ②SPOC技術による多連WSS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ることで①における簡略化光配線SDMノードを実現できることを示した。さらに、課題ウとの連携により、NxN WSS内配線部のさらなる簡略化見通しを得た。

①ノード内光配線の簡略化構成

IngressとEgressに用いるNxN WSSの構成を同じにするのではなく、異なる構成のNxN WSSを適用することでメッシュ配線を排除した接続を簡略としたSDMノードの構成を提案した。

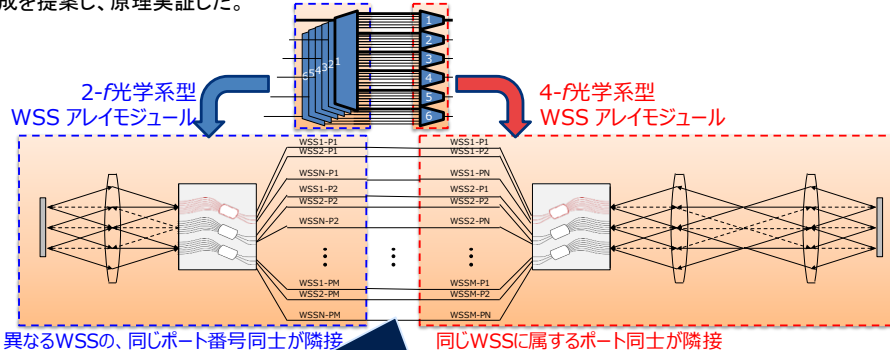


従来配線(シャッフル配線)

提案配線(シャッフルレス配線)

②NxN WSS内配線の簡略化

シャッフルレス配線の実現手段として、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る構成を提案し、原理実証した。



異なるWSSの、同じポート番号同士が隣接      同じWSSに属するポート同士が隣接

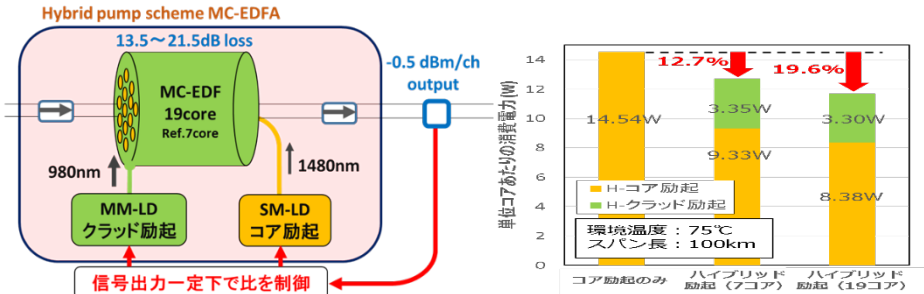
接続部に課題ウの小型多芯コネクタを採用することで接続部のさらなる小型化が可能

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)

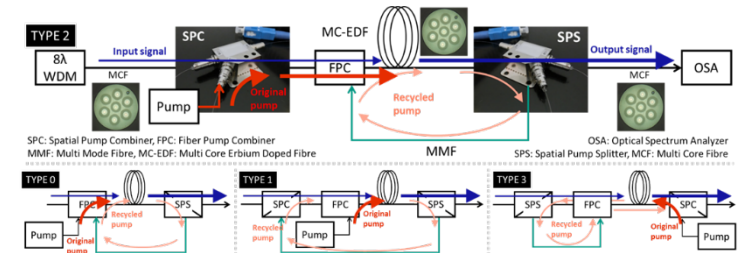
主な研究開発成果:

- ①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。
- ②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、ターボクラッド無しとの比較において3.5dBの増幅効率向上を確認した。
- ③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。

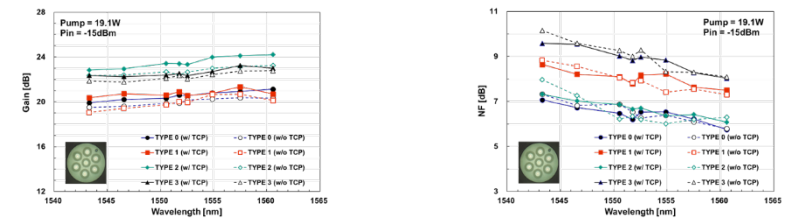


試作した省電力増幅モジュール (19コア)

増幅モジュールの実験検証結果 (19コア)



TCP方式の構成 (TYPE 0~TYPE 3)



増幅特性結果: Gain (TYPE 0~TYPE 3)

増幅特性結果: NF (TYPE 0~TYPE 3)

研究開発成果: 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

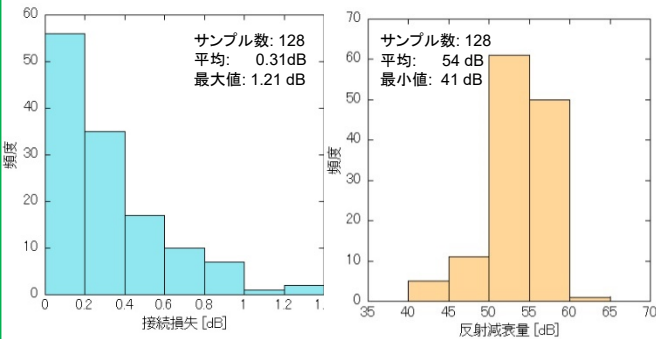
(日本電信電話株式会社)

主な研究開発成果:

- ①20コア超MCF一括接続コネクタの作製および評価
- ②異種MCF接続デバイスの作製及び評価

①20コア超MCF一括接続コネクタの作製および評価

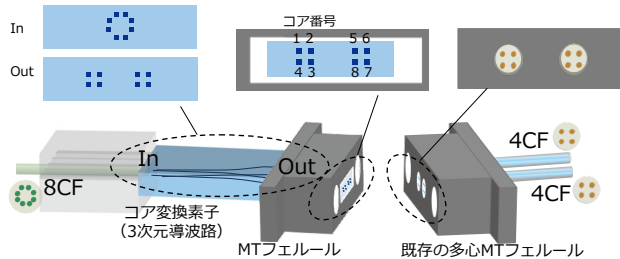
ファイバ突き出し量の検討により、20コア超一括接続において最終目標(損失1.5 dB以下、反射減衰量 40 dB以上、クロストーク -40 dB以下)を達成。



多心MCFコネクタのランダム接続の光学特性

②異種MCF接続デバイスの作製及び評価

異種MCF接続デバイスの試作に着手。三次元導波路を用いた着脱可能な8CF-4CF×2変換デバイスを作製し、光の導通を確認。導波路とMCF間に生じたかん合時の軸ずれが主な特性劣化要因であることを確認。



3次元導波路を用いた4/8コアファイバ変換器の概要

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)

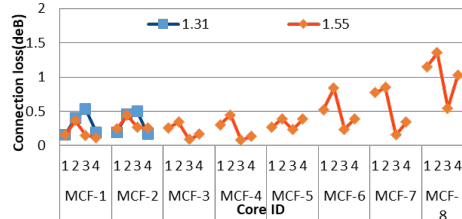
主な研究開発成果:

- ①課題ウ-1 との相互接続試験実施
- ②ハイブリッド励起を想定した高パワーに入力試験合格
- ③小型24心コネクタ実現

①多心マルチコアコネクタの特性改善

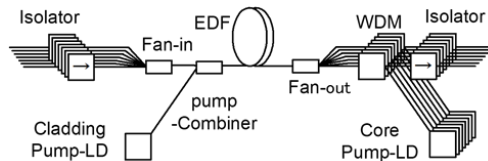
課題ウ-1との相互接続試験を実施

挿入損失1.5 dB以下 反射減衰量 -40 dB以下



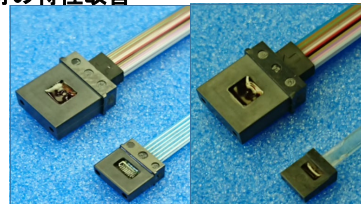
②マルチコアファイバファンアウトの開発

ハイブリッド励起を仮定した最大パワー入力を推定し、ファンアウトの最大許容入力値を規定。実証試験にて問題ないことを確認



③小型多心配線部材の特性改善

125μm、80μm両ク ラッド径のファイバ に適した24心フェ ルール構造を実現



125μmファイバ 小型MT 80μmファイバ 小型MT

課題ウ-3 空間多重ノード配線用光コネクタ技術

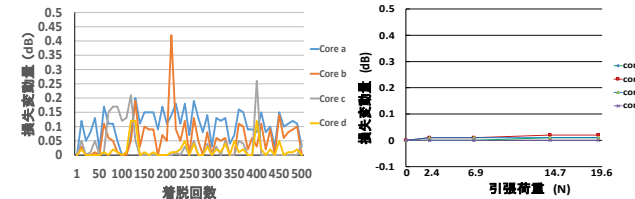
(学校法人千葉工業大学)

主な研究開発成果:

- ①4コアMCF用SC形光コネクタの機械的特性評価
  - 繰り返しかん合試験 500回の着脱で損失変動 < 0.2 dB
  - 通光左右曲げ引張り試験 19.6 Nで損失変動 < 0.2 dB
- ②MCFコネクタ反射減衰量測定法標準化開発開始

①4コアMCF用SC形光コネクタ

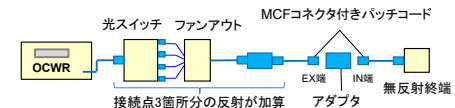
結合時にオルダム・カップリング機構を構成する簡易構造 MCF用SC形光コネクタを、4コアMCF入りφ1.7 mmコードの両端に取り付け、繰り返しかん合試験(IEC 61300-2-2)および通光左右曲げ引張り試験(IEC 61300-2-51)を実施し、いずれも接続損失0.2 dB以下であることを確認。



(a) 繰り返しかん合試験結果 (b) 通光左右曲げ引張り試験結果

②MCFコネクタ関連標準化の推進

IEC TC86/SC86B 会合においてMCFコネクタ反射減衰量測定法に関する標準化の開始が合意されたため、ファンアウトの損失と反射からMCFコネクタ1接続点の反射減衰量を推定する手法を開発。



Port	Measured Return loss by OCWR $RL_0$ (dB)	Fan-out return loss $RL_f$ (dB)	Fan-out Insertion loss $IL$ (dB)	Calculated return loss of MCF connection point $RL$ (dB)	Measured return loss by OTDR
Core 1	49.2	50.3	2.74	51.5	51.9
Core 2	49.5	51.6	2.54	51.3	51.5
Core 3	49.9	50.7	2.56	52.6	51.3
Core 4	48.1	50.1	1.06	51.1	51.3

あらかじめ測定した光スイッチとファンアウトの挿入損失と反射減衰量の値を用いることにより、MCFコネクタ1接続点の反射減衰量の推定が可能。

$$RL = -10 \log \left( 10^{-\frac{RL_0}{10}} - 10^{-\frac{RL_f - IL}{10}} \right)$$

4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

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

※成果数は累計件数、( )内は当該年度の件数です。

(1) 主な学会発表・標準化活動

- ・H. Hasegawa and K. Sato, "Switching Granularity and Intra-node Interconnection Optimization for Large Scale Optical Nodes," in Proc. OECC/PSC2019, WA2-4.
- ・K. Matsumoto et al., "Experimental Demonstration of a SDM Node with Low Power Consumption MC-EDFA and SPOC-Based WSS Arrays," in Proc. OECC/PSC2019, WB1-2.
- ・H. Takahashi et al., "First Experimental Demonstration of Core-to-Core Q-Difference Compensation in SDM Transmission Systems," in Proc. ECOC2019, P40.
- ・K. Seno et al., "6×6 Wavelength Cross Connect with 2-f and 4-f Optical Systems for SDM Photonic Nodes," in Proc. OECC/PSC2019, WE1-1.
- ・H. Takeshita et al., "Configurations of Pump Injection and Reinjection for Improved Amplification Efficiency of Turbo Cladding Pumped MC-EDFA," in Proc. ECOC2019, W.1.C.3.
- ・K. Kawasaki et al., "Design for four-fiber fan-out with square lattice structure," IWCS2019, 8-5
- ・K. Imaizumi et al., "SC-type Multicore Fiber Connector with Simplified Structure," IWCS2019, 8-1.
- ・Multicore fibre connector standardization (マルチコアファイバコネクタの評価方法に関する提案), IEC TC86/SC86B/WG4 (2019年4月)
- ・Proposal on new Technical Report for "Optical fibre and cable for space division multiplexing transmission", ITU-T SG15 第5会合 (2020年2月)

(2) 受賞

- ・今泉可津貴, 電子情報通信学会 光ファイバ応用技術研究会 (OFT), 学生ポスター奨励賞 (2019年5月受賞)
- ・H. Takahashi, D. Soma, T. Tsuritani, The 45th European Conference on Optical Communication (ECOC2019), Best ePoster paper (2019年9月受賞)

(3) 展示会

- 国際会議、シンポジウム等において、パネルおよび静態展示を実施
- ・5th International Symposium on Extremely Advanced Transmission Technologies (EXAT) 2019 (2019年5月、三重県伊勢市)
  - ・NICTオープンハウス2019 (2019年6月、東京都小金井市)
  - ・24th OptoElectronics and Communications Conference/International Conference on Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC) 2019 (2019年7月、福岡県福岡市)
  - ・第33回光通信システムシンポジウム (2019年12月、静岡県三島市)

5. 今後の研究開発計画

最終年度(令和2年度)においては、課題連携実験を実施し、各課題で検討してきた以下の要素技術を適用した空間多重フォトニックノードの主要機能部を構成しその動作検証により、最終目標であるノードスループット10Pbps級のスケラビリティ実現性のための要素技術の妥当性を検証する。

・【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