

1. 研究課題・実施機関・研究開発期間・研究開発予算

- ◆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(佐藤健一)、(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(長瀬亮)
- ◆研究開発期間: 平成28年度～平成32年度(5年間)
- ◆研究開発予算: 総額 450百万円(平成28年度 150百万円)

2. 研究開発の目標

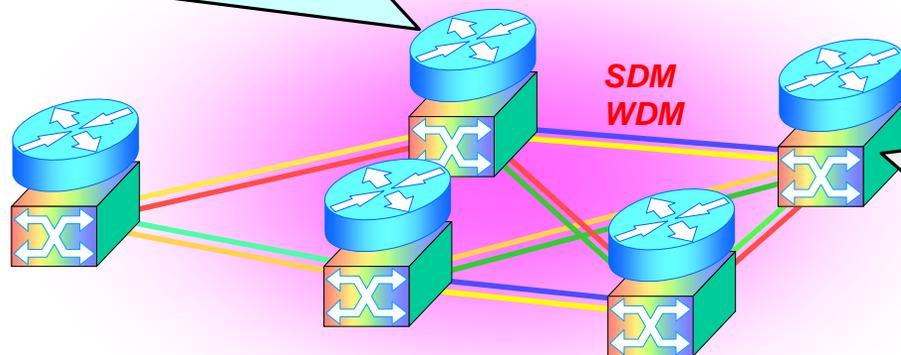
将来の10 Pbit/s超にスケール可能なノードスループットを有する大規模フォトニックノードシステムの実現に向けて、ノードのスイッチング規模、実装密度の観点から物理的な限界を打破する空間多重フォトニックノード基盤技術として、次の3つの要素技術を確立する。

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

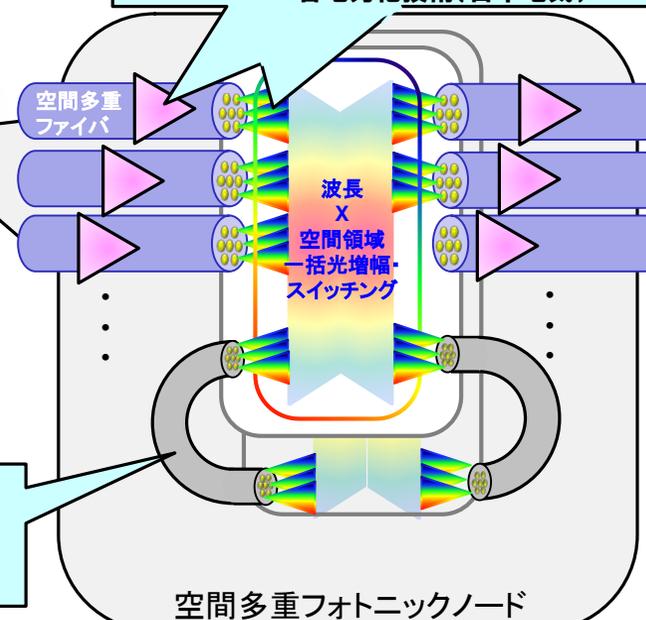
- 課題ア-1 空間多重ノードアーキテクチャ技術 (名古屋大学)
- 課題ア-2 空間多重ネットワーク収容設計技術(NTT)
- 課題ア-3 空間多重中継ノードシステム制御技術(KDDI 総合研究所)



大容量空間多重光ネットワーク

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)



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

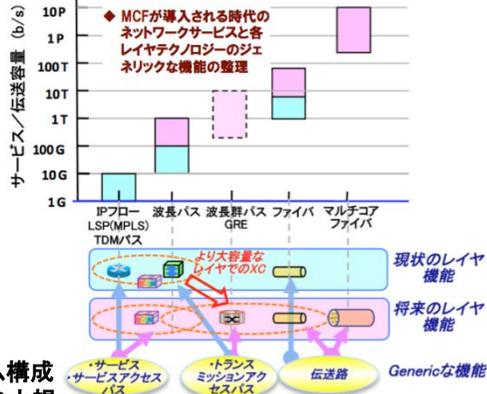
(国立大学法人名古屋大学)

主な研究開発成果

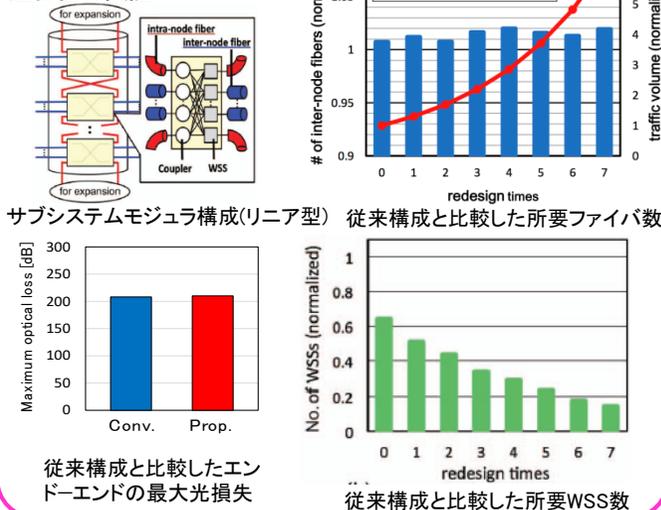
- ①ネットワークサービスと各種レイヤ技術の検討
- ②サブシステム構成波長XCノードの大規模ネットワークへの適合性の実証

ネットワークサービスとレイヤテクノロジーの進化

①ネットワークサービスと各種レイヤ技術の検討



②サブシステム構成波長XCノードの大規模ネットワークへの適合性の実証



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)

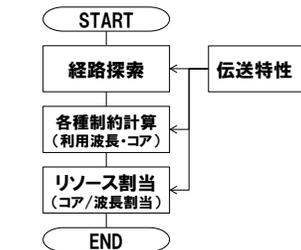
主な研究開発成果

- ①収容設計技術の機能要件の検討
 - 収容設計基本方式の検討
 - ベンチトップ型スイッチ光学系のクロストーク特性評価

①収容設計技術の機能要件の検討

①-1. 収容設計基本方式の検討

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/方路/波長を最大限に活用するネットワーク収容設計技術のネットワーク収容設計方式の実現に向けて、収容設計方式の機能要件の検討を行い、伝送特性を考慮した収容設計基本方式の予備検討を実施した。



収容設計基本方式の概略図

①-2. ベンチトップ型スイッチ光学系のクロストーク特性評価

空間多重ノード内の多方路制御要素技術であるベンチトップ型スイッチ光学系の光学特性評価のための実験系を構築した。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の明確化に向け、光信号入力時のクロストーク特性を評価した。



光学特性評価実験系

課題ア-3 空間多重中継ノードシステム制御技術

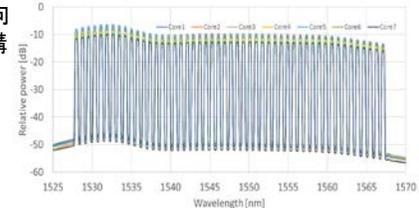
(株式会社KDDI総合研究所)

主な研究開発成果

- ①簡易中継ノードの構築及びコア間利得偏差の調査
- ②複数段の中継ノードを考慮したブロック等化ノードの1次設計
- ③クラッド励起マルチコアEDFAを用いた長距離伝送実験

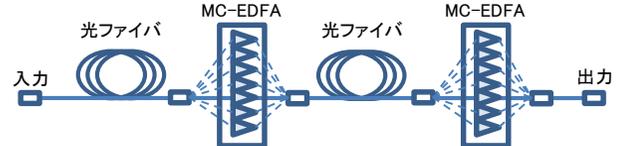
①簡易中継ノードの構築及びコア間利得偏差の調査

偏差補償量の把握に向け、簡易中継ノードを構築してコア間利得偏差の調査し、波長毎のコア間利得偏差を確認



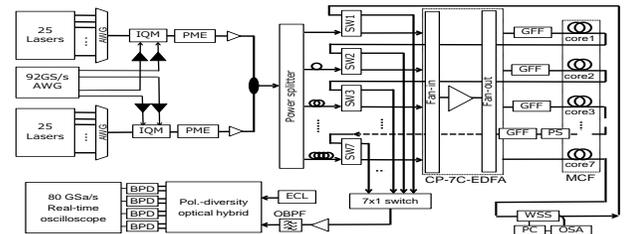
②複数段の中継ノードを考慮したブロック等化ノードの1次設計

簡易中継ノード2台を用いて複数段の中継ノード(2台)を用いて2スパン中継する構成を構築し、ブロック等化ノードの1次設計を実施



③クラッド励起マルチコアEDFAを用いた長距離伝送実験

クラッド励起により生じる利得偏差をコア毎・中継器毎に補償した7コアEDFAを用いて50 x 256 Gbit/s 空間光多重伝送実験を実施し、5,040km伝送可能であることを確認



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

- ①空間多重ノード構成の検討、多方路制御ノード構成技術の検討およびスイッチデバイスを用いたコア間・波長間の利得平坦化の基礎検討
- ②ハイブリッド構成マルチコア光増幅器の静的利得制御評価

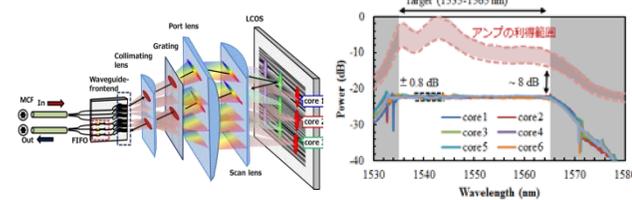
①空間多重ノード構成の検討、多方路制御スイッチ光学系を用いたコア間・波長間の利得平坦化の基礎検討

空間多重ノードの物理構成を検討し、スイッチ動作を確認した。また、ノードの物理構成に応じたクロストーク影響の検討を行い、クロストーク低減のための構成を提案した。

多方路制御の要素技術としてスイッチ光学系を光学定盤上のベンチトップに構築し、基礎特性の評価および課題抽出を行い、重要な指標であるクロストークに関して性能評価を行った。さらに、スイッチデバイスを用いたコア間・波長間の利得平坦化の基礎検討を実施した。



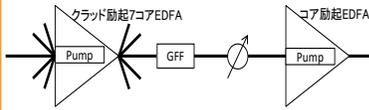
ベンチトップに構築したスイッチ光学系



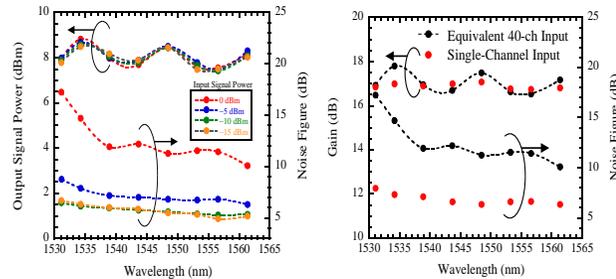
スイッチ光学系を用いたコア間・波長間利得平坦化

②ハイブリッド構成マルチコア光増幅器の静的利得制御評価

前段クラッド励起、後段コア励起のハイブリッド構成のマルチコア光増幅器について、入力レベル変化やチャンネルadd/dropに対する利得変化を評価し、0.8 dB以下の利得変化で利得制御ができることを明らかにした。



ハイブリッド構成



入力レベル変化に対する利得制御性

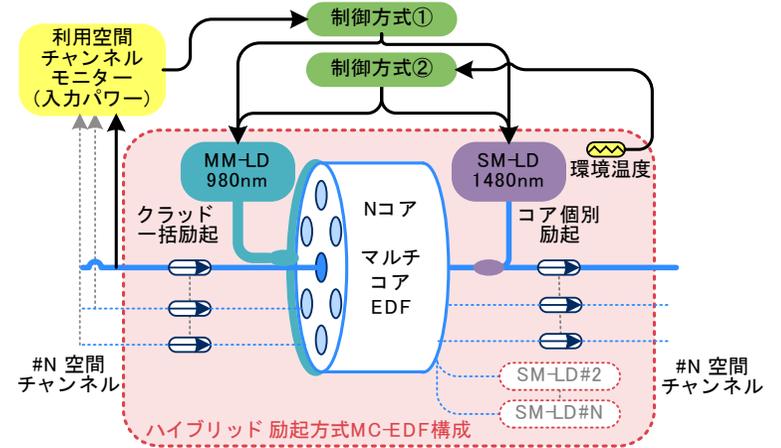
チャンネルadd/dropに対する利得制御性

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

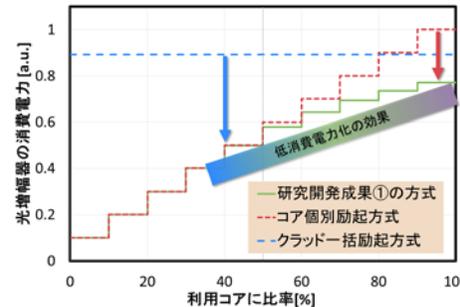
(日本電気株式会社)

主な研究開発成果

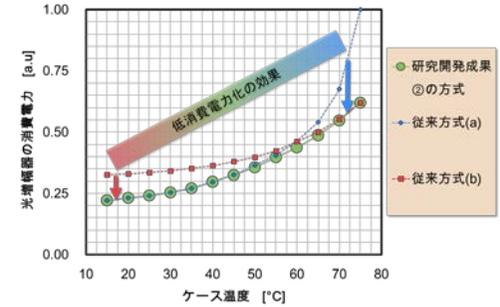
- ①実装を想定した10コアマルチコアEDF構成において、利用コア比率に応じた励起光源電力配分の最適化により省電力化が可能なることを数値シミュレーションにより示した。
- ②保有する7コアマルチコアEDFにおいて、外部温度に対応した励起光源電力配分の最適化により省電力化が可能なることを実験的に示した。



省電力光増幅モジュールの構成及びその制御方法



方式①における省電力化の検討結果 (数値シミュレーション)



方式②における省電力化の検討結果 (実験値)

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

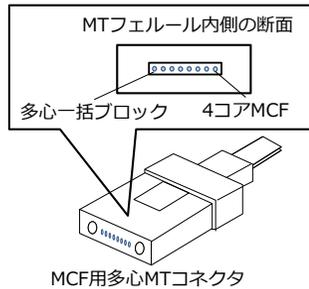
(日本電信電話株式会社)

主な研究開発成果

- ①10コア超MCF一括接続コネクタの作製方式の提案の及び原理検証
- ②PLC型SMF-MCF接続デバイスの設計・試作

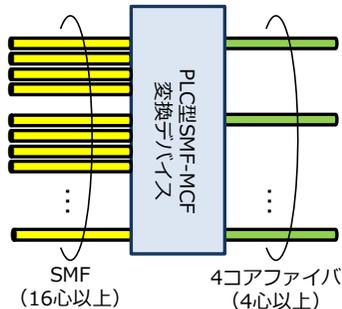
①10コア超MCF一括接続コネクタの作製方式の提案の及び原理検証

10コア超一括接続の実現に向けて、4コアファイバが一括接続可能なMTコネクタ構造の設計と試作を行った。また、MCFの回転調心方式及び制御機構の検討・構築を行い、125 μ mクラッド4コアファイバ用一括接続多心コネクタの作製を実施し、作製した多心コネクタにおいて光の導通を確認した。



②PLC型SMF-MCF接続デバイスの設計・試作

SMF-MCF間接続デバイスとして、石英系導波路(PLC)方式を選定し、4心以上の125 μ mクラッド4コアファイバを一括してSMFに分離可能なデバイスの設計及び試作を行った。



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)

主な研究開発成果

- ①多心マルチコアコネクタの開発
- ②マルチコアファイバファンアウトの開発
- ③小型多心配線部材の設計

①多心マルチコアコネクタの開発

調心部材を用いたMCF回転調心方法を採用

- ・MCF回転調心精度 $\pm 1^\circ$ 以内
- ・接続損失0.85 dB以下

②マルチコアファイバファンアウトの開発

寸法拘束型ファンアウト製造条件の検討

発生するコア位置ずれ量のシミュレーション解析
⇒実測値と比較し製造条件の妥当性を確認

③小型多心配線部材の設計

<小型MTの設計・標準MTとの比較>

- ・外寸法: 各部約1/2
- ・ファイバ間隔: 1/2(125 μ m)
- ・接続方式: MUハウジング

ファイバ穴径: 80 μ m
ファイバピッチ: 125 μ m
標準MT
小型MT

接続損失0.7 dB以下

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

- ・MCF光コネクタを用いたPC接続端面微小変形の解析

MCF光コネクタを用いたPC接続端面微小変形の解析

MCFコネクタにおけるPC接続の信頼性を確保するため、フェルール押圧力によって生ずる接続端面の微小変形について解析した。ファイバ引込みを有する19コアMCFフェルールを突き合わせて押圧力をかけ、コア同士が接触する力を測定した結果(図1)と、有限要素解析によって各コアが接触するために必要な力を計算した結果(表1)を比較したところ、平均値は近いが、コア毎には一致しなかった。

今回のシミュレーションでは双方のフェルールが対称である前提のため、今後は実験サンプルと同じく非対称の場合について解析を続ける予定である。

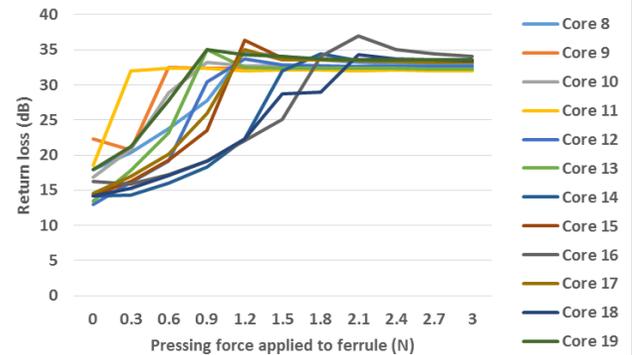


図1 19コアMCFの外周コアが接触する押圧力(実測値)

表1 19コアMCFの各コアが接触する押圧力の比較

	Measurement	Simulation (Offset=No)	Simulation (Offset=Yes)
Inner core (ID2~7)	0.3~0.6 N	0.3 N	1.2 N
Outer core (ID 8~19)	1.8~3.0 N	1.8 N	2.4 N

4. これまで得られた成果(特許出願や論文発表等)

	国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	プレスリリース 報道	展示会	標準化提案
空間多重フォトニックノード 基盤技術の研究開発	6 (6)	1 (1)	3 (3)	30 (30)	0 (0)	3 (3)	0 (0)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

(1) 学会発表・表彰

- 電子情報通信学会 PN研究会にて本プロジェクトの概要を紹介。宮本裕, 他, "空間多重フォトニックノード基盤技術の研究開発", 電子情報通信学会 PN研究会 (2017年11月研究会), PN2016-40
- M. Nakajima, et al., "SDM-Compatible Dynamic Gain Equalizer Using Spatial Planar Optical Circuit," in Proc. OFC2017, Tu2C.3
- 河原光貴, 他, "多連WSSを適用したSDM光ノードにおけるWSS間XTの低減方法の提案", 電子情報通信学会 2017年総合大会, B-10-56
- 佐藤他, "Algorithm for raising OXC port count to meet traffic growth at minimum-cost" IEEE/OSA JOCN 招待論文
- OFC2017において, 「Transmission of 200G PM-16QAM Signal through Hybrid Cladding and Core Pumping Scheme MC-EDFA Controlled for Reduced Power Consumption」研究成果として発表。
- 2016年ソサイエティ大会において, 「Investigations on Reduction of Power Consumption of Optical Amplification with Hybrid Pumping Scheme Multicore EDFA and Minimized Number of Lighten Cores」を研究成果として発表。
- 2017年総合大会において, 「Experimental Verification of the Reduction of Power Consumption of Hybrid Pumping Scheme MC-EDFA Controlled over Temperature Variations」を研究成果として発表。
- 境目賢義他, "MCFコネクタを用いたPC接続におけるフェルル端変形解析," 信学技報OCS2016-34(2016年8月、千歳市)
- 荒井健汰他, "MCFコネクタPC接続安定性のコア数依存性," 信学技報OFT2016-13(2016年8月、千歳市)
- 境目賢義他, "MU形マルチコアファイバコネクタにおける接続損失要因の検討," 2016年信学ソ大B-10-13(2016年9月、札幌市)
- 境目賢義他, "MU形マルチコアファイバコネクタにおける接続損失要因の検討," 信学技報OCS2016-81(2017年2月、大阪市)
- R. Nagase, "Optical connector technologies for telecommunication systems," 6th Symposium Connectors, Lemgo, Germany, Mar. 2017.
- 長瀬亮, "光コネクタ設計におけるシミュレーション技術," 2017年信学ソ大BCI-1-6(2017年3月、名古屋市)

(2) 展示会・報道発表

- 第30回光通信システム(OCS)シンポジウム(2016年12月、静岡県三島市)でパネル展示(H28)
- フォトニックネットワークシンポジウム2017でパネル展示
- The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition(OFC2017) (Mar. 2017, Los Angeles, California, USA)でパネル展示

5. 今後の研究開発計画

・【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】

ノードスループットを10Pbit/s以上に拡張可能なノードの空間多重ノードアーキテクチャ技術の検討、空間多重ネットワーク収容設計および空間多重中継ノードシステム制御技術の検討を行う。

・【課題イ 空間多重ノード光増幅・方路制御技術】

空間多重を適用した光増幅方路制御中継ノードの構成設計・評価技術を検討し、空間多重ノードの多方路制御技術と、コア間および波長間のばらつきを抑圧する利得制御技術の検討を行う。光増幅器の省電力化技術の検討を行うとともに、高効率利得平坦化技術の検討を行う。

・【課題ウ 空間多重ノード配線技術】

空間多重ノード装置間配線技術として、クラッド径125 μ mのマルチコアファイバを対象とし、既存の多心コネクタと同等の特性を有する最大20コア程度の一括接続技術を、空間多重ノード装置内配線技術として、1方路あたり最大20コア程度の信号を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、空間多重ノード配線用光コネクタ技術として、マルチコアファイバ等による架間配線に使用できる光コネクタ接続技術を検討する。