

## 1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

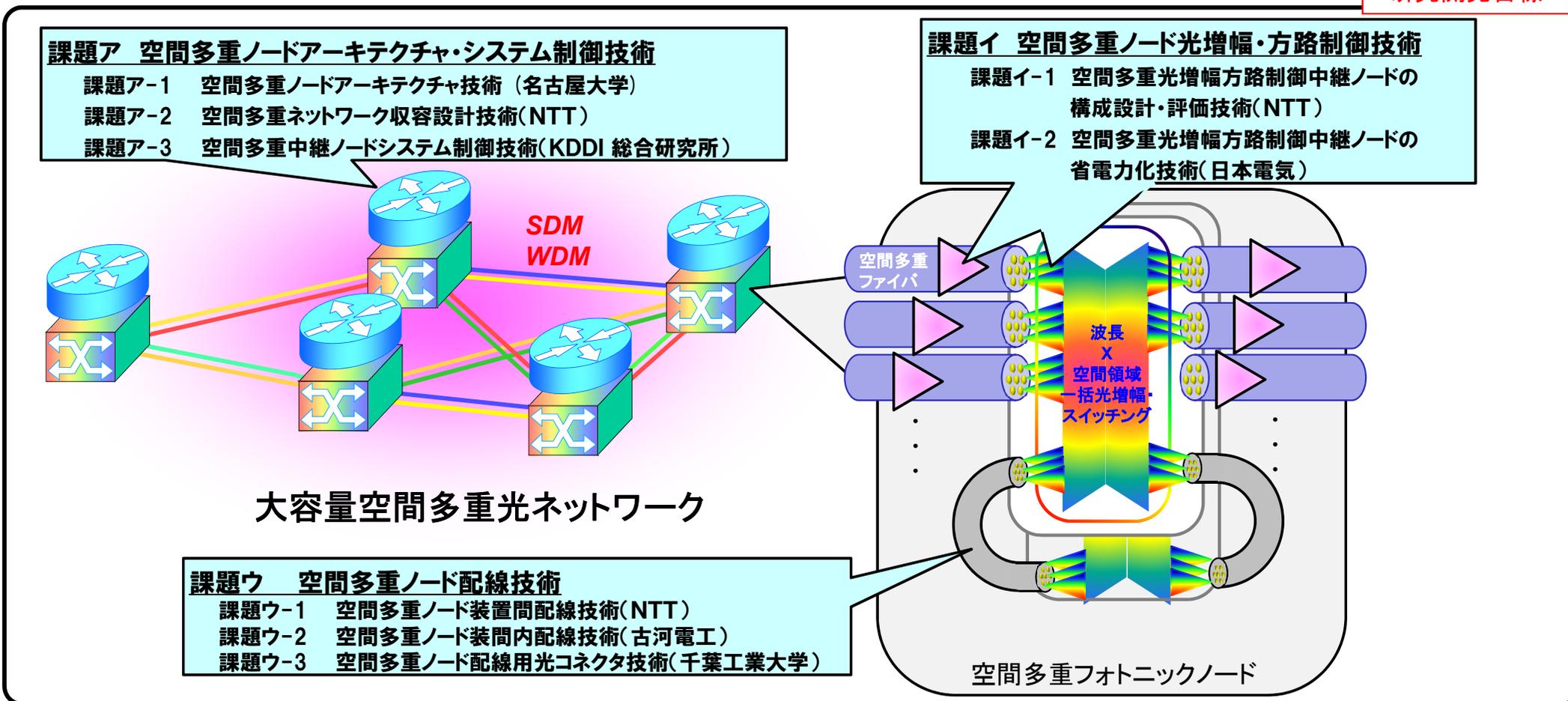
- ◆ 課題名 : 空間多重フォトニックノード基盤技術の研究開発
- ◆ 副題 : 空間多重光通信技術を適用したスケーラブルフォトニックノードの研究
- ◆ 実施機関 : 日本電信電話(株)、国立大学法人名古屋大学、(株)KDDI総合研究所、日本電気(株)、古河電気工業(株)、学校法人千葉工業大学
- ◆ 研究開発期間: 平成28年度～平成32年度(5年間)
- ◆ 研究開発予算: 総額450百万円(平成29年度150百万円)

## 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



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

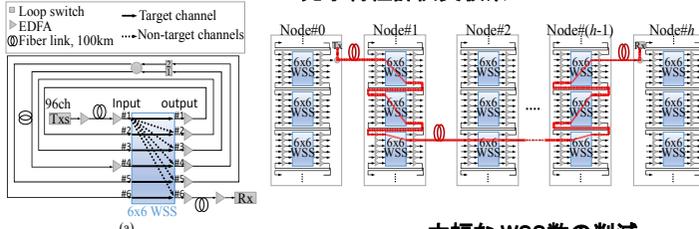
(国立大学法人名古屋大学)

主な研究開発成果

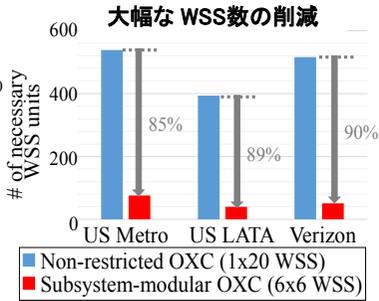
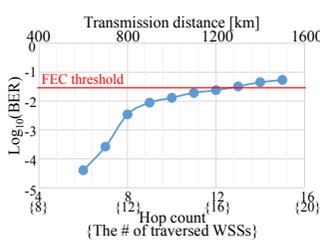
- ① MxM WSSを適用した、コンパクトでスケラブルなOXCのフィージビリティを検証
- ② ファイバロスコネクと波長パスクロスコネクの効果

① 6x6 WSSを適用したサブシステムモジュラーOXCのフィージビリティを検証

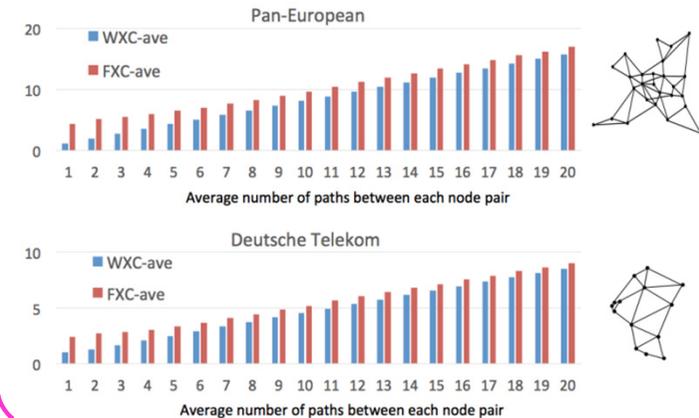
光学特性評価実験系



12 hop (16 WSS), 1200 km 伝送



② ファイバロスコネクと波長パスクロスコネクの平均所要ファイバ数の評価結果



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 ネットワーク収容設計方式の検討および評価

① ネットワーク収容設計方式の検討および評価

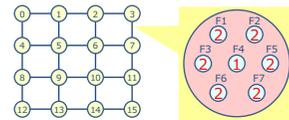
1. 収容設計方式の検討

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方式の実現に向け、光パス収容設計方式と評価モデル/手法について検討

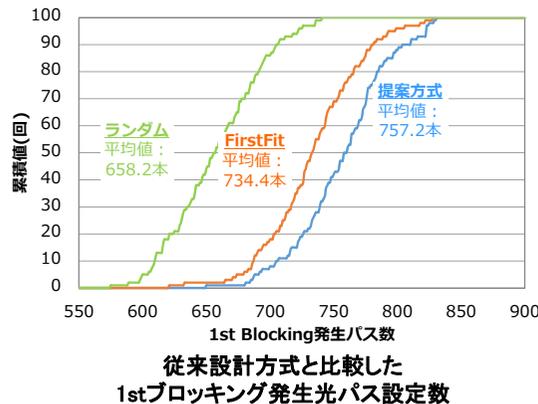
2. 収容設計方式の評価

光パス収容設計基本方式に関しては、伝送路となるマルチコアファイバのコア選択アルゴリズムの特性について各種ネットワークポロジを用いて、光パス収容の1st Blocking発生光パス設定数、1st Blocking抑圧効果の評価

検討した設計方式であるコア選択アルゴリズムは、従来のFirstFitによるコア選択と比較して、光パスの1st Blocking発生を遅らせる効果があることを確認



評価トポロジとコア構造



課題ア-3 空間多重中継ノードシステム制御技術

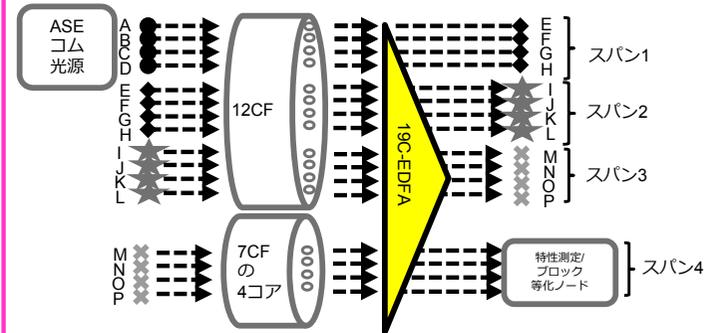
(株式会社KDDI総合研究所)

主な研究開発成果

- ① 複数段中継ノード用ブロック等化ノードの調査・設計・作成
- ② 信号雑音比(SNR)をコア間で均等化する手法の実証

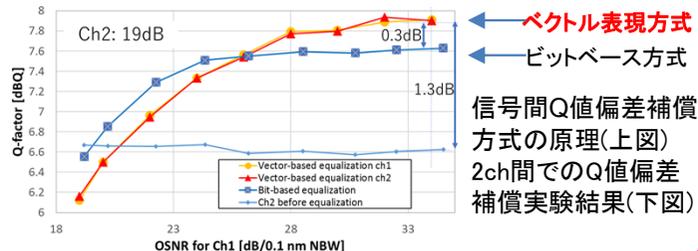
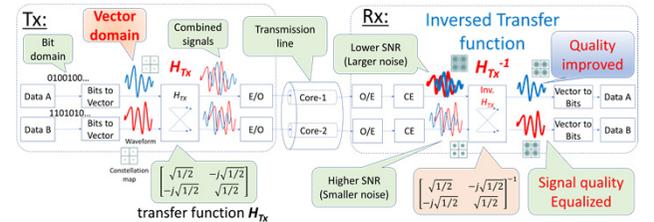
① 複数段中継ノード用ブロック等化ノードの調査・設計・作成

簡易中継ノード5段中継後のコア間利得偏差を補償するための1~4中継評価系構築とブロック等化ノードの作製及び評価



② 信号雑音比(SNR)をコア間で均等化する手法の検討

信号のベクトル表現の時点でチャンネル間のエラーベクトルを均等化させることにより、Q値偏差補償し、Q値が低いチャンネルの品質を改善する方法を実施。補償後Q値偏差0.1dB未満を確認



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

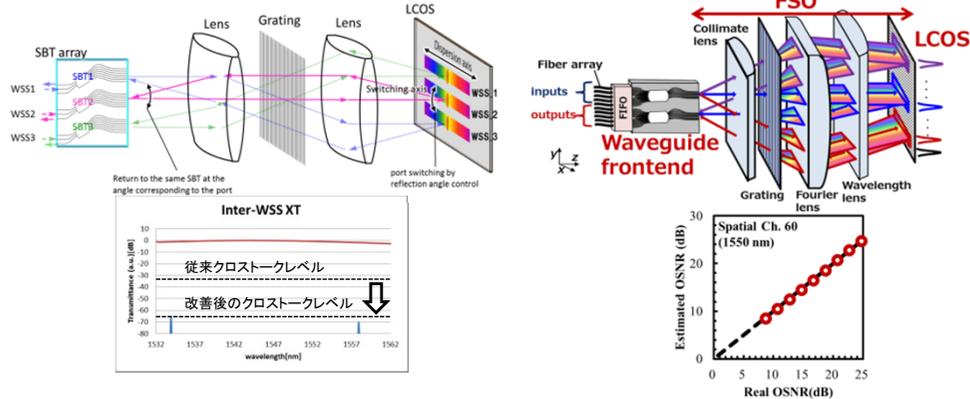
(日本電信電話株式会社)

主な研究開発成果

- ①空間多重多方路制御ノード構成用のスイッチデバイスのクロストーク低減技術の検討および多アレイ光信号雑音比測定装置の基礎検討
- ②マルチコア光増幅器利得制御基礎特性評価

①空間多重多方路制御ノード構成用のスイッチデバイスのクロストーク低減技術の検討

前年度確認した空間多重ノードにおける性能制限要因であるスイッチデバイスのクロストーク低減を図る光学をベンチトップ上に構成し、低クロストーク動作を確認した。また、同光学系を光学モジュールに集積した。また、多数の信号が入力される空間多重ノードにおいて、複数の信号品質を計測する多アレイ光信号雑音比測定装置の基本光学系を構築し、100ch超の信号一括計測の動作を確認した。

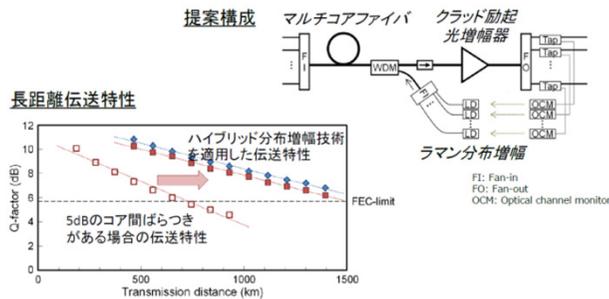


低クロストーク空間多重ノード用波長選択スイッチ 光学系およびクロストーク性能

多アレイ光信号雑音比測定装置の構成及び測定例

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制評価

クラッド励起のマルチコア光増幅器とラマン分布増幅からなるハイブリッド分布増幅技術を提案し、コア間の損失ばらつきを補償できることを確認した。

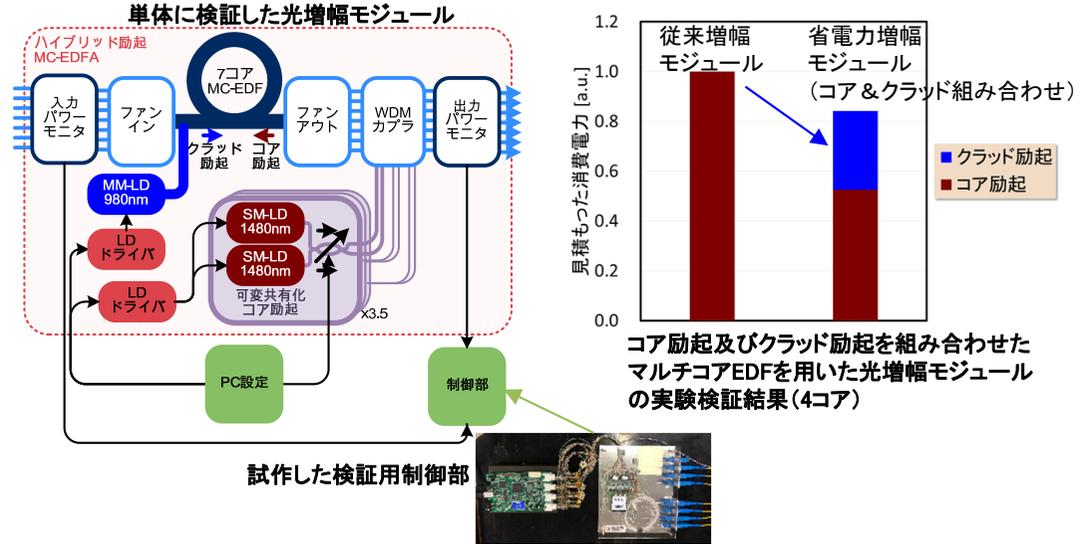


課題イ-2 空間多重光増幅方路制御中継ノードの省電力化技術

(日本電気株式会社)

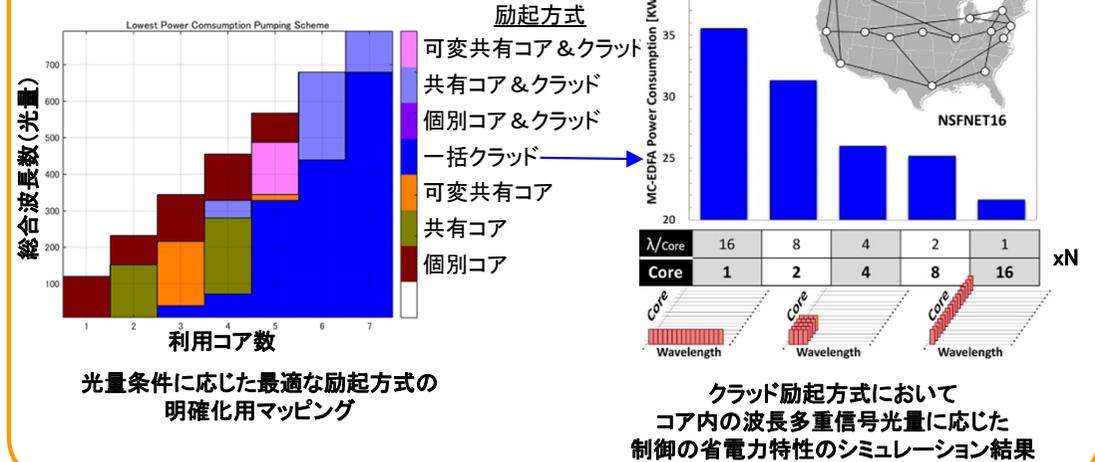
主な研究開発成果

- ①コア励起及びクラッド励起を組み合わせたマルチコアEDFを用いた光増幅モジュールの単体動作検証として、4コアマルチコアファイバを用いた実験検証により省電力化の可能性を示した。
- ②光増幅モジュール省電力化制御技術について、検証用制御部を試作し実証実験を行うとともに、光量条件に応じた最適な励起方式を明確化した。



試作した検証用制御部

コア励起及びクラッド励起を組み合わせたマルチコアEDFを用いた光増幅モジュールの実験検証結果(4コア)



光量条件に応じた最適な励起方式の明確化用マッピング

クラッド励起方式においてコア内の波長多重信号光量に応じた制御の省電力特性のシミュレーション結果

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

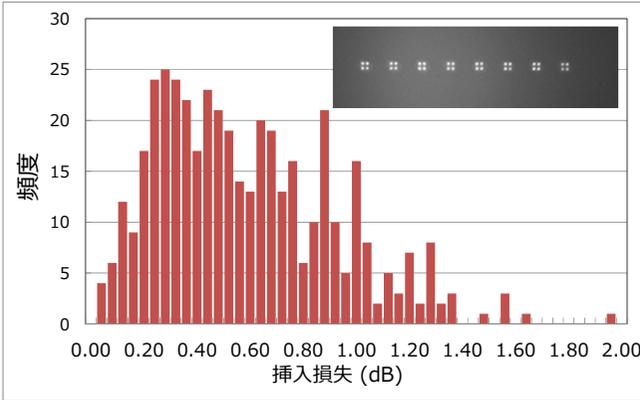
(日本電信電話株式会社)

主な研究開発成果

- ①10コア超MCF一括接続コネクタの作成及び評価
- ②PLC型SMF-MCF接続デバイスのコア数拡張性検証

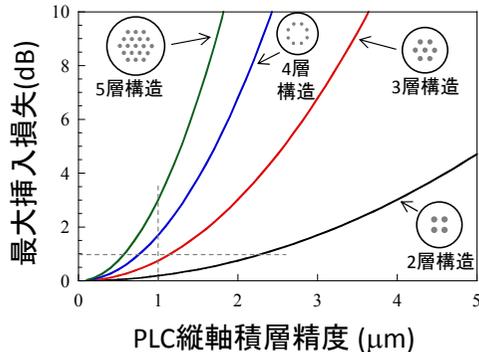
①10コア超MCF一括接続コネクタの作製方式の提案の及び原理検証

10コア超一括接続コネクタの実現に向けて、8心4コアファイバMTコネクタを試作し、32コアで2dB以下の中間目標で掲げた接続損失を実現した(平均値0.6 dB、最悪値1.9 dB)。



②PLC型SMF-MCF接続デバイスの設計・試作

PLCデバイスでは積層方向に軸ズレが累積されるため、挿入損失も急激に増大する。8コアに対応する4層構造で1dB以下の挿入損失を実現するには1μm未満の積層精度が必要となる。



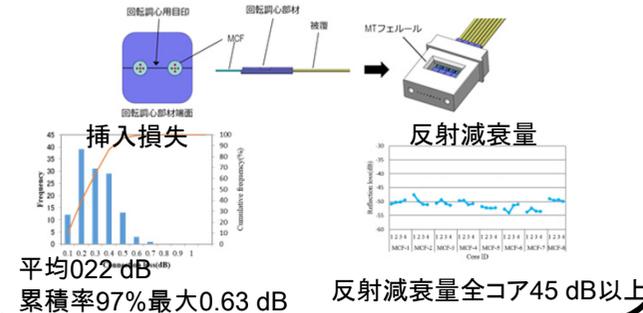
課題ウ-2 空間多重ノード装置内配線技術

(古河電気工業株式会社)

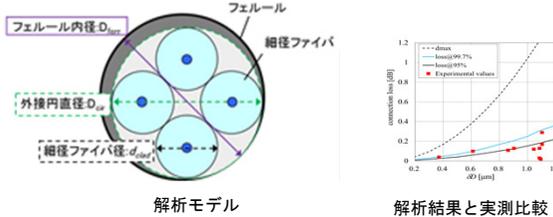
主な研究開発成果

- ①多心マルチコアコネクタの特性改善
- 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特性改善

①多心マルチコアコネクタの特性改善



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

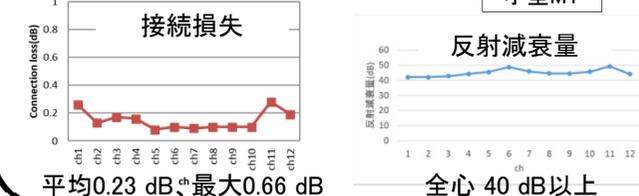


発生するコア位置ずれ量のシミュレーション解析・再現実験実施  
⇒実測値と比較し製造条件の妥当性を確認

③小型多心配線部材の特性改善

<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 μm)
- ・接続方式: MUハウジング



課題ウ-3 空間多重ノード配線用光コネクタ技術

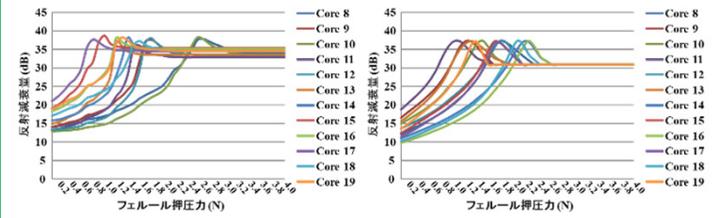
(学校法人千葉工業大学)

主な研究開発成果

- ①MCF光コネクタPC接続端面微小変形の解析手法の確立
- ②割りスリーブ微小変形の解析手法の確立

①MCF光コネクタ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微小変形のFEM解析手法を確立した。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(a))と、FEM解析によって求めた結果(図1(b))をほぼ一致させることができた。



(a) 実測値 (b) FEM解析結果

図1 19コアMCFの外周コアが接触する押圧力

②割りスリーブ微小変形の解析手法の確立

MCFコネクタの接続信頼性を確保するためにはフェルール押圧力と割りスリーブ保持力を最適化する必要があるため、割りスリーブの微小変形に関するFEM解析手法を確立した。フェルール端面を斜めに研磨するAPCコネクタの接続損失が変動する現象に着目し、スリーブの割り方向と接続損失増加分の関係について実測値とFEM解析値を比較した結果、図2に示すように同じ傾向が得られることを確認した。

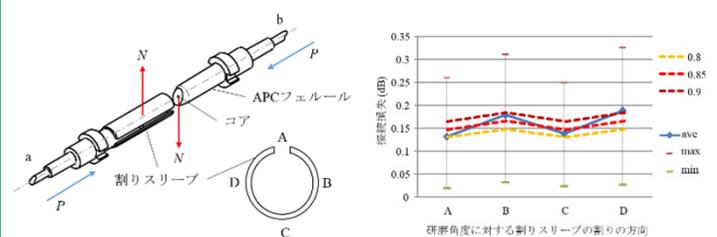


図2 APCコネクタの割りスリーブの向きと接続損失変動量

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	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	12 (6)	5 (3)	6 (3)	91 (60)	3 (3)	4 (1)	0 (0)

(1) 学会発表

1-1) 課題全体成果(課題170との連携)

・T. Matsui, et al, “118.5 Tbit/s Transmission over 316 km-Long Multi-Core Fiber with Standard Cladding Diameter”, in Proc. OECC2017, PDP-2, 2017.

1-2) 各課題ごとの成果

- ・佐藤他, “Algorithm for raising OXC port count to meet traffic growth at minimum-cost” IEEE/OSA JOCN 招待論文
- ・R. Hashimoto et al., “First demonstration of subsystem-modular optical cross-connect using single-module 6x6 WSS,” ECOC 2017, Tu2F.2, Highly ranked paper, Short-listed for the best student paper award.
- ・H. Kawahara, et al., “First investigation and reduction of inter-WSS crosstalk in multiple-arrayed WSSs for large-scale optical node”, in Proc. OECC2017, 3-2K-2
- ・H. Takahashi, “Experimental demonstration of signal quality equalization in vector domain to mitigate core-to-core Q-difference for SDM transmission,” in Proc. ECOC2017, P1.SC3.54.
- ・K. Yamaguchi, et al., “Integrated Wavelength Selective Switch Array for Space Division Multiplexed Network with Ultra-Low Inter-Spatial Channel Crosstalk,” OFC2018, Th1J.3, San Diego.
- ・T. Mizuno et al., “Hybrid Cladding-pumped EDFA/Raman for SDM Transmission Systems Using Core-by-core Gain Control Scheme,” ECOC2017, M.1.E.3, Gothenburg, Sweden.
- ・E. Le Taillandier de Gabory et al., “Transmission of 256Gb/s PM-16QAM Signal through 7-Core MCF and MC-EDFA with Common Cladding and Variable Shared Core Pumping for Reduction of Power Consumption”, in Proc. ECOC2017, M.1.E.2
- ・H. Takeshita et. al., “Reduction of the Power Consumption in a WDM/SDM Network by using Cladding Pump Scheme MC-EDFA with Impairment Aware Least Wavelength Bandwidth Routing” in Proc. OFC2018, M3J.5
- ・Y. Abe, “Multicore fiber connection technology for Space Division Multiplexing transmission,” NGON Europe, Agenda Day 2 17:30, 2017.
- ・K. Kawasaki, et. al., “MCF To Single Core Fiber Conversion Utilizing Mini-MT Connector”, OECC2017, P3-130

※成果数は累計件数、( )内は当該年度の件数です。

- ・K. Sakaime et al, “Microscopic deformation analysis of PC connector endfaces using multicore fiber,” ECOC2017, P1.SC1.7.
- ・境目他, “光コネクタ用割りスリーブの微小変形解析” エレクトロニクス実装学会誌, Vol.21, No.2, pp.160-165, 2018.

(2) 表彰

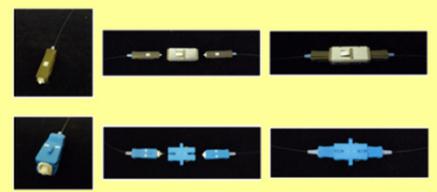
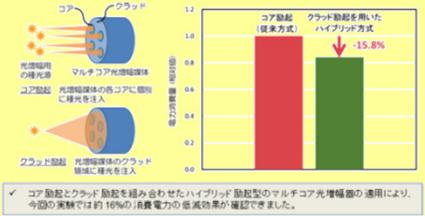
- ・山上修平,平成28年度電子情報通信学会東海支部学生研究奨励賞,電子情報通信学会東海支部
- ・Ryota Hashimoto, Highly ranked paper, Short-listed for the best student paper awards, ECOC 2017

(3) 展示会

- ・第31回光通信システム(OCS)シンポジウム(2017年12月、静岡県三島市)でパネル展示(H29)
- ・The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition(OFC2017) (Mar. 2017, Los Angeles, California, USA)でパネル展示

(4) 報道発表

・報道発表(課題170との連携成果)「現在と同じ細さの光ファイバで世界最大の伝送容量を実現～既存光ファイバの標準技術を有効活用してマルチコア光ファイバの実用化を加速～」



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 μm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。