

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 : 日本電信電話株式会社、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
- ◆研究開発期間 : 平成28 (2016) 年度から令和2 (2020) 年度 (5年間)
- ◆研究開発予算 : 総額750百万円 (令和2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

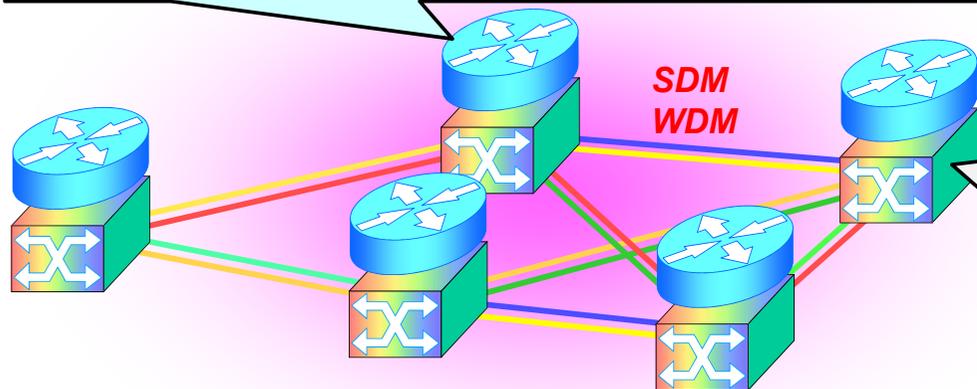
研究開発目標

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

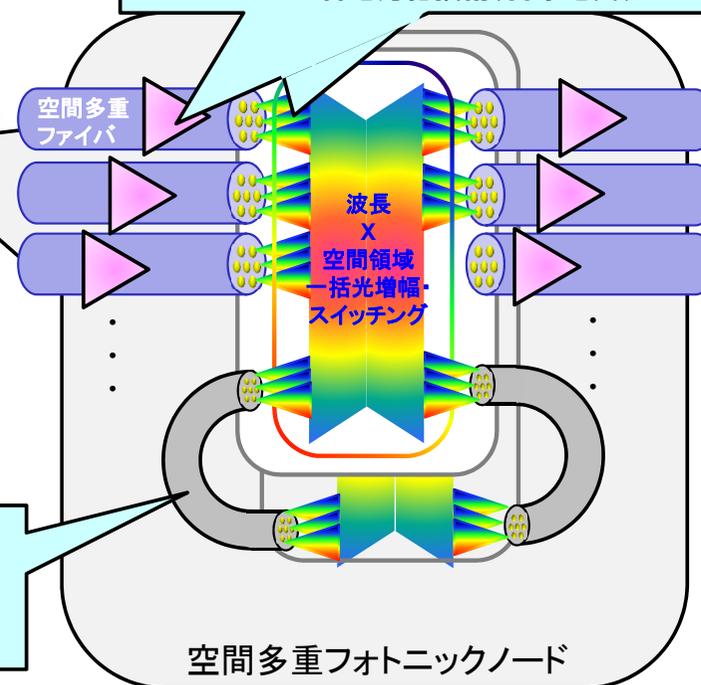
- 課題ア-1 空間多重ノードアーキテクチャ技術 (名古屋大学)
- 課題ア-2 空間多重ネットワーク収容設計技術(NTT)
- 課題ア-3 空間多重中継ノードシステム制御技術(KDDI 総合研究所)

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



空間多重フォトニックノード

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)

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

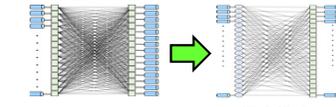
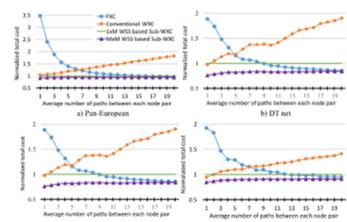
課題ア-1 空間多重ノードアーキテクチャ技術

(国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学)

主な研究開発成果:

- ①スループットが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、およびほぼ無制限のスケ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
- ②スケラブルな信号終端部の提案
- ③実現性と有効性を数値シミュレーションならびに連携実験により実証(課題イ-1と連携)
- ④機械学習を用い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

①・③サブシステムモジュラOXC構成の150×150を超えるノード次数へのスケラビリティと経済性を評価



フルメッシュ **提案構成**

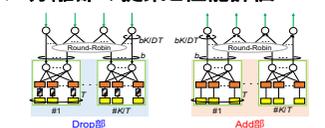
- デバイス使用率に対する内部結線制御の閾値を適正化:フルメッシュ構成からの性能低下はおおむね2%程度
- 内部結線の最適化を行いつつ設備増設を繰り返すことで、優れたルーティング性能を維持しながらほぼ無制限のスケラビリティを実現

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に関して、ネットワーク全体での所要コストを積算し、通信需要およびネットワーク規模ごとにアーキテクチャ間の優劣を明確化

④機械学習を用いたマルチコアファイバネットワークの動的制御法

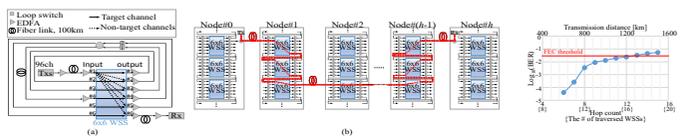
光パスが経路するコアごとに、クロストークの影響および周波数フラグメントの状況を表現する追加パラメータを導入し、これらパラメータを入力とするニューラルネットワークで適正な経路コアおよび割当周波数を判定する手法を開発し、優位性を確認

②・③スケラブルな信号挿入/分離部の提案と性能評価



提案信号終端部を上記スケラブルOXCと組み合わせて性能評価を実施。定期的な設備増設シナリオでの有効性を確認

③連携: 6×6 WSSで構成された提案ノードのフィジビリティ検証



光学特性評価実験系 12 hop (16 WSS)、1200 km 伝送

課題ア-2 空間多重ネットワーク収容設計技術

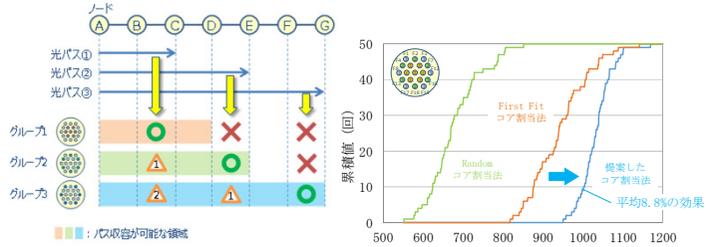
(日本電信電話株式会社)

主な研究開発成果:

- ①SDMネットワーク向け光パス収容設計方式の提案と評価
- ②光パス収容設計による19コア光増幅器の省電力効果の実証
- ③成果②の検討に必要な空間多重ノード光学特性評価を完了
- ④空間多重ノードのコンセプト実証構成の提案と動作実証

①SDMネットワーク向け光パス収容設計方式の提案と評価

光パス収容設計方式として、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と、SDM光ノードの省電力化を目指した、波長コア割当時の利用波長数を平準化するパス設計方式を提案し、その特性を示した。



1stブロッキング発生パス数の評価(パス設定順序50試行の累積値)

提案したコア割当方式(基本方式)の概要

- : /コア収容可能な領域
- : パスを優先的に配置
- ×: /コア収容不可
- △: /コアブロックが発生した際に使用可能
- △内の数字はその優先順位(1が7コア中心の52利用)

②光パス収容設計による19コア光増幅器の省電力効果の実証

光パス収容設計方式と、課題イ-2のマルチコア光増幅器の省電力化技術を連携制御し、19コア光増幅器の省電力効果を実証した。

④空間多重ノード構成のコンセプト実証構成の提案と動作実証

他課題のこれまでの成果を総合的に組み入れたノード/ネットワーク/制御関連のコンセプト構成を実現し、課題間連携実験により動作実証した。

課題ア-3 空間多重中継ノードシステム制御技術

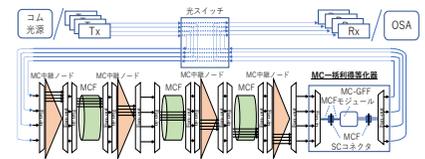
(株式会社KDDI総合研究所)

主な研究開発成果:

- ①課題イが実現する利得平坦性(±1.5 dB)の2倍である±3 dB(6 dB)以内の利得平坦性を、最終目標の10中継ノード後を超える12中継ノード後にて実証
- ②マルチコアファイバ(MCF)のコア間で生じる信号品質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実証

①マルチコア一括ブロック等化ノードの検討

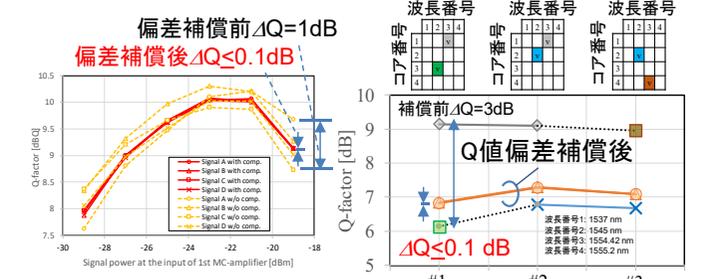
MCFとMC中継ノードにより構成された独立4コアパス周回伝送系を用いてブロック等化ノードによる利得等化特性を評価し、最終目標の10中継ノード後を超える12中継ノード後にて最終目標の6 dB以内を達成



ブロック等化ノードの周回伝送系図

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実証

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



単一波長による4中継192 kmのMCF中継伝送路でのコア間Q値偏差補償方式の実験結果: 中継器入力パワーと信号品質Q値の関係

黄色: 偏差補償前(各コアそれぞれ通過する場合)のQ値
赤色: 偏差補償後の各信号のQ値

4中継192 kmのMCF中継伝送路でのSDM/WDMから2 ch選択する3つのケースでのQ値偏差補償方式の実験結果

※実験上の都合により2 ch間での偏差補償を実施

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

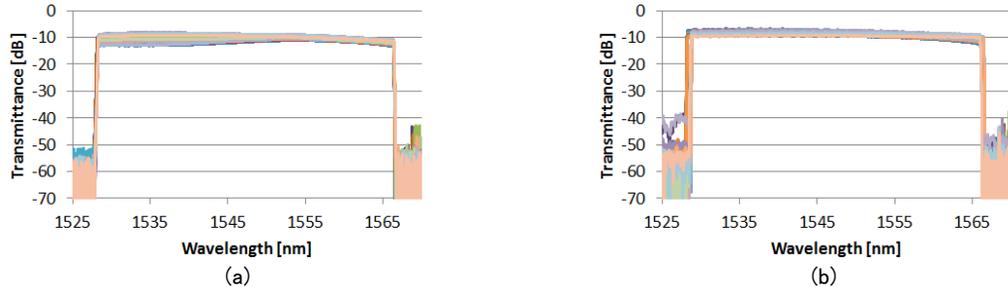
(日本電信電話株式会社)

主な研究開発成果:

- ① 2-f型および4-f型のM連1×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。これらをもとにモジュール化を進め、6×6規模および10×10規模のWXCを構築完了。
- ② 2-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×M WSSを用いたサブシステムモジュラーOXCの連携実験による実証。

① WXCの構成要素であるN連1×N WSSアレイを構築

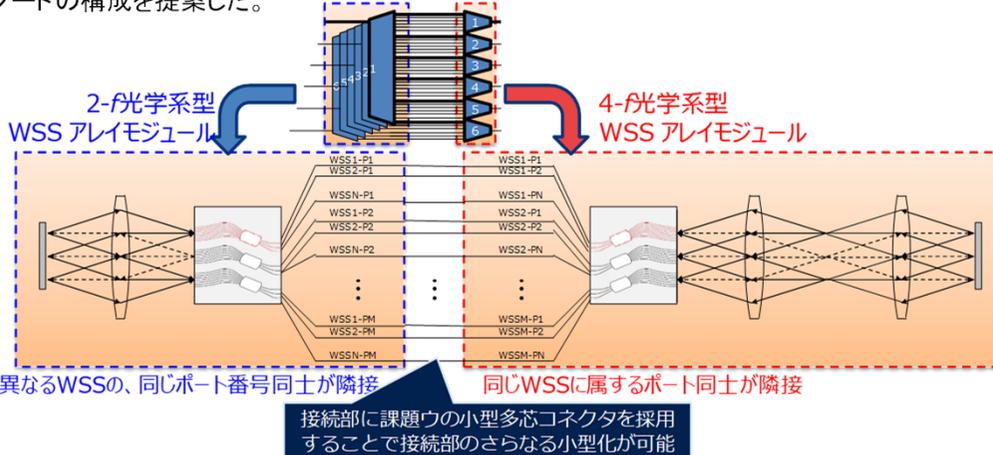
光学系の入出力部にPLCを用いた構成技術(spatial and planar optical circuit:SPOC)によって2種類(2-f型 および 4-f型)のN連1×N WSSアレイモジュールの製造を完遂し良好な特性を得た。



(a) 2-f型 および (b) 4-f型 光学構成による6連1×6 WSSアレイの評価結果

② ノード内光配線簡略化構成の提案と実証

IngressとEgressに用いるN×N WSSの構成を同じにするのではなく、異なる光学構成のN連1×N WSSアレイを適用することで、メッシュ配線を排除し、光接続を抜本的に簡略化したSDMノードの構成を提案した。



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

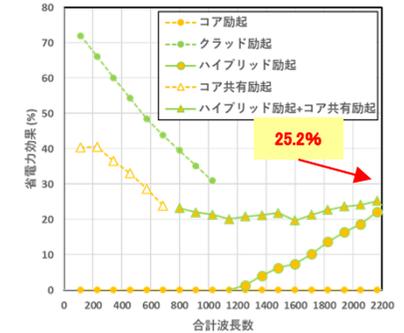
(日本電気株式会社)

主な研究開発成果:

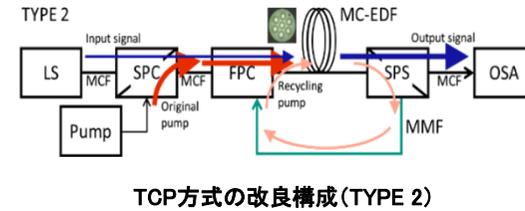
- ① 省電力増幅モジュール構成技術、および光増幅モジュール省電力化制御技術の検討においてハイブリッド励起+コア共有方式を適用し、最終目標である25%の省電力化を達成した。
- ② クラッド励起方式の改良(ターボクラッド励起技術)により、さらなる省電力化の可能性を示した(従来比 3.9 dB改善)。
- ③ 光パス収容設計(課題ア-2)とマルチコア光増幅器の連携制御による19コア光増幅器の省電力効果の実証を完了した。
- ④ 効率利得平坦化技術の検討において、課題イ-1との連携により、最終目標である±1.5 dB以内の利得平坦化の実証を完了した。
- ⑤ 課題間連携検証を完了した。



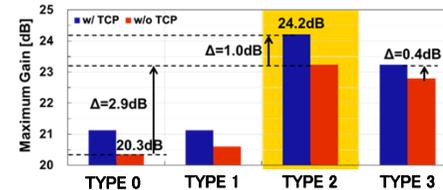
試作した省電力光増幅モジュールと評価系(19コア)



光増幅モジュールの省電力検証結果(19コア)



TCP方式の改良構成(TYPE 2)



各構成における増幅特性結果(TYPE 0 ~ TYPE 3)

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:

- ①、②最終目標の光学特性を有する20コア超MCF一括接続コネクタの実現と課題間でのコネクタ相互接続性の実証
- ③SMF-MCFおよび異種MCF接続デバイスの実証
- ④課題ウ-1、2、3の要素技術により課題間連携実験適用の4コアファイバ伝送路の構築・実現
- ⑤SDMファイバ標準化に向けた新規技術レポート作成合意 (ITU-T SG15)

①、②20コア超MCF一括接続コネクタの作製および評価

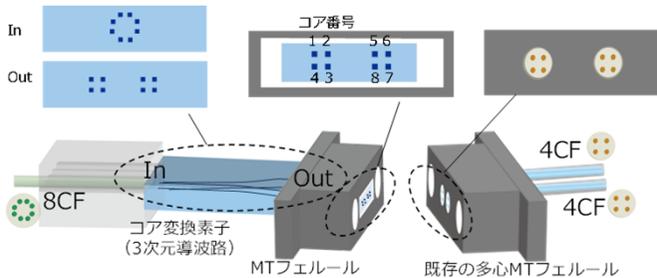
コネクタ内のMCF回転調心・固定およびフェルール内ファイバ非固定コネクタ構造を検討し、20コア超一括接続において最終目標(損失1.5 dB以下、反射減衰量 40 dB以上、クロストーク -40 dB以下)を達成。

多心MCF一括接続コネクタの最終目標値と達成値

項目	最終目標値	達成値
一括接続コア数	20コア以上	32コア
接続損失(1310 nm)	1.5 dB以下	1.21 dB以下
反射減衰量(1550 nm)	40 dB以上	41 dB以上
クロストーク(1625 nm)	-40 dB以下	-48 dB以下

③SMF-MCFおよび異種MCF接続デバイスの実現

- ・PLC技術を用いた8心4コアMCFと32心SMFを一括して接続可能なデバイスのコンセプトを実証
- ・3次元導波路書き込み技術を活用した着脱可能な2心4コアMCFと1心8コアMCFの接続デバイスのコンセプトを実証



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

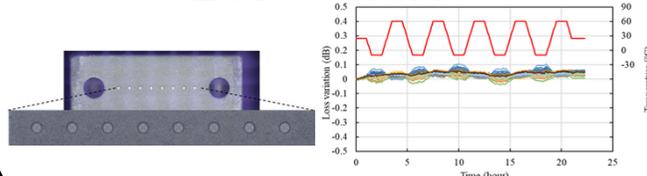
(古河電気工業株式会社)

主な研究開発成果:

- ①マルチコア8 MTを損失 < 0.85 dBにて実現
- ②線路用、ノード内に適用される各種ファンアウトの特性実証
- ③小型24心コネクタ実現
- ④マルチコア8 MTのウ-1との相互接続での特性確保
- ⑤課題イ-1と共同でWSS配線部の超小型化実現

①多心マルチコアコネクタの特性改善

MT形8心×4コアMCFコネクタを実現
 損失 < 0.85 dB、反射減衰量 < -45 dB、XT < -46 dB
 -10 ~ 60°Cの温度範囲にて損失変動 < ±0.11 dB



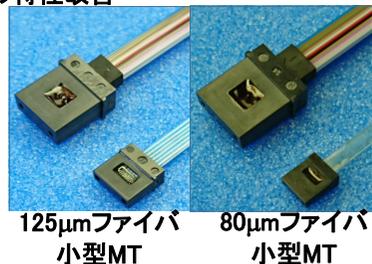
②マルチコアファイバファンアウトの開発

製造性の良い4コアMCFファンアウトを提案。0.5 dB以下の挿入損失



③小型多心配線部材の特性改善

125 μm、80 μm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



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形光コネクタの開発
- ②MCFコネクタ設計手法の確立
- ③MCFコネクタ接続特性測定法標準化開発を開始 (IEC TC86/SC86B)

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形光コネクタを開発し(図1)、ランダム接続損失0.5 dB以下(97%) (図2)、反射減衰量45 dB以上、透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。

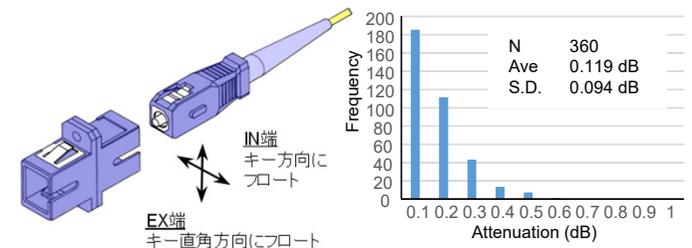


図1 MCF用SC形光コネクタ

図2 ランダム接続損失

②MCFコネクタ設計手法の確立

光コネクタ光学互換標準策定に必要な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フェルール端面の微小変形のFEM解析手法を確立し(図3)、MCFの規格が定めれば光学互換標準を提案できる準備を整えた。

③MCF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の項目を加えたCD文書が回覧された。

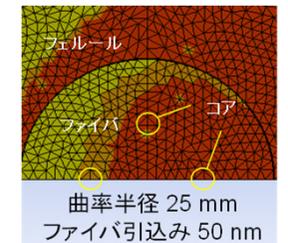


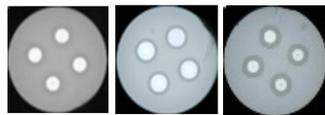
図3 4コアMCF端面のPC接続時微小変形解析例

他課題との連携実験

本課題188と課題170の連携

標準クラッド径4コアMCF(課題170成果)を用いたマルチベンダ間の相互接続伝送路の構築・伝送評価に対して、課題188における成果であるMCFコネクタ・MCFファンアウト・MCF光増幅器技術を活用し、118 Tb/s - 300 km超えるSDM光増幅中継伝送実験を実施(OECC Postdeadline 論文採択・受託社合同で報道発表)。

【課題170】MCF相互接続伝送路の構築

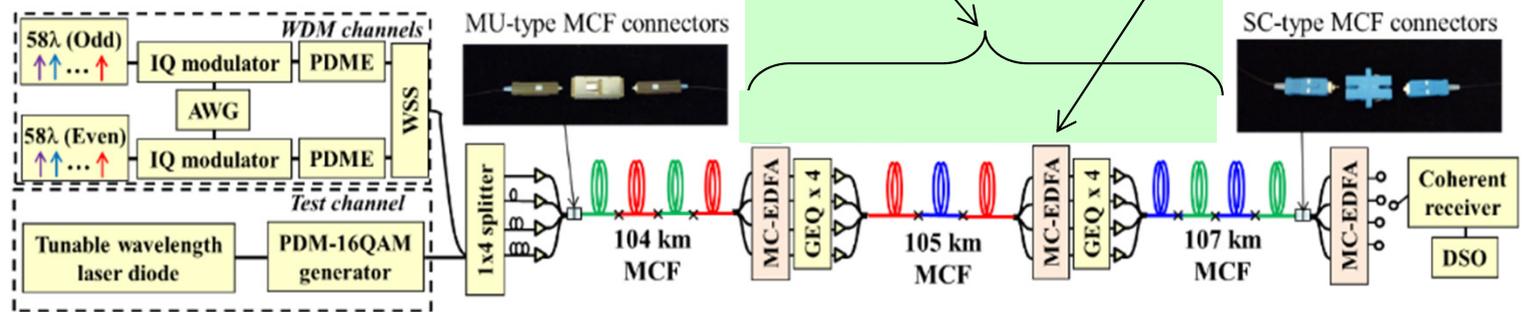


【課題188】省電力MCF増幅器



【課題188】FIFO技術

【課題188】MCF単心コネクタ技術



(2017年8月8日 報道発表)

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～

日本電信電話株式会社、株式会社KDDI総合研究所、住友電気工業株式会社、株式会社フジクラ
古河電気工業株式会社、日本電気株式会社、学校法人千葉工業大学

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・採択	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
34 (6)	32 (9)	15 (1)	226 (26)	4 (1)	3 (0)	10 (1)	13 (4)

※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

- Y. Wang, et al., “Resource Assignment based on Core-State Value Evaluation to Handle Crosstalk and Spectrum Fragments in SDM Elastic Optical Networks,” in Proc. OECC2020.
- H. Takahashi et al., “First Experimental Demonstration of Cross-SDM/WDM Q-difference Compensation at Multicore Fiber Transmission,” in Proc. OFC2020, Th3H.6.
- K. Seno et al., “Wavelength Selective Switching Technology for SDM Photonic Nodes Based on SPOC Platform,” in Proc. PSC2020, PsTh2F.2 (Invited).
- K. Kawasaki et al., “Design for four-fiber fan-out with square lattice structure,” IWCS2019, 8-5.
- 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. Imaizumi et al., “SC-type Multicore Fiber Connector with Simplified Structure,” IWCS2019, 8-1.

(2) 主な標準化活動

- IEC 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)および反射減衰量(IEC 61300-3-6)測定法AnnexにMCFの項目を加えることが合意され、前者についてはCD文書が回覧された。
- ITU-T SG15第5会合において、将来におけるSDMファイバの標準化を見据えた新規技術レポートの作成提案を行い、作業開始を合意した(エディタ担務)。

(3) 主な受賞・表彰

- OECC2020 Best Student Paper Award受賞: Yang WANG. et al., Proc OECC2020, 2020.
- ECOC2019, Best ePoster Award 受賞: H. Takahashi et al., Proc. ECOC2019, paper P40. 2019.
- 2019年度 電子情報通信学会 論文賞/IEICE Best Paper Award, 竹下仁士, IEICE TRANSACTIONS on Communications, Vol.E102-B, No.8, pp.1579-1589, 2020.
- IWCS2018, Outstanding Poster Paper, R. Sugizaki et al., Proc OWCS2018, 2018.
- 2018年度 工業標準化事業表彰 経済産業大臣賞 長瀬亮 我が国工業標準化の発展に関する貢献。

(4) 主な報道発表および展示会出展

- 報道発表(2017/8/8) 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～
- 展示会 5th International Symposium on Extremely Advanced Transmission Technologies (EXAT) 2019 (2019年5月、三重県伊勢市)
- 展示会 International Conference on Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC) 2019 (2019年7月、福岡県福岡市)

5. 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