



WHITE PAPER (Oct. 31, 2022)

空間多重光ネットワーク・ノード技術の研究開発：PHUJINプロジェクト

1. はじめに

我が国では、2020年3月に第5世代移動無線サービスが開始され、サービスエリアが順次拡大されている状況である。その一方で、その次の世代(Beyond 5Gあるいは6G)に向けての研究開発が、早くも世界各国で始まっている。我が国においても、2021年に国立研究開発法人情報通信研究機(NICT)によるBeyond 5G研究開発促進事業が開始され、官民挙げての研究開発が進んでいる。

Beyond 5G通信サービスは、これが発生する膨大なトラフィックを全国規模で経済的に転送するための光ファイバ通信基盤を抜きにしては成り立たない。NICTにおいても「Beyond 5G 超大容量無線通信を支える空間多重光ネットワーク・ノード技術の研究開発」を委託研究基幹課題として設定している。本稿で紹介するPHUJINプロジェクトは、国立大学法人香川大学、株式会社KDDI総合研究所、日本電気株式会社、santec株式会社、古河電気工業株式会社の産学連携チームが提案した研究開発計画が採択され、2021年8月にスタートした研究開発プロジェクト(採択番号00201)^{1), 2)}であり、副題として「経済性と転送性能に優れた空間多重光ネットワーク基盤技術の研究開発」を掲げている。プロジェクト名のPHUJINは、“Photonic network research project toward beyond 5G era fully utilizing space and wavelength dimensions by joint industry-academia-government innovation driven team”の略称であり、風を司る神、風神にあやかり、「光で超大容量データフローを自在に操りBeyond 5Gを支える」をコンセプトに名付けられた。

本稿の構成は次の通りである。まず、第2章では研究開

発の背景とPHUJINプロジェクトが採用する階層化光ネットワークについて説明する。続いて第3章では、PHUJINプロジェクトの枠組みと取り組む課題とアプローチを説明する。第4章では5つの研究開発項目とその成果を簡単に紹介する。なお、研究開発項目が多岐にわたるため、技術内容の詳細については、本稿の参考文献ならびにPHUJINプロジェクトウェブサイト²⁾の発刊リストに記載の各論文を参照いただきたい。

2. 研究開発の背景

2.1 光通信技術が直面する課題

インターネットトラフィックの量は依然として指数関数的な伸びを示している。例えば、2010年頃の商用光ファイバリンク容量を8.8 Tb/s(100 Gb/s × 88 波長)とし、年率30%で必要なリンク容量が増加すると仮定すると、Beyond 5G通信サービスの商用導入が予想される2030年前後には、これを支える光ファイバリンクには1 Pb/s級の容量が必要となると見積もられる。指数関数的な需要の著しい伸びに光リンク容量増加の歩調を合わせるために、これまで用いられてきたアプローチは、波長分割多重(WDM)に基づく並列化とデジタル信号処理とコヒーレント受信技術に基づく周波数利用の高効率化であった。しかし、以下に示すように、いずれの技術も原理的な限界に到達しつつある。波長多重技術は、例え実用的な光増幅技術が開発されたとしても単一モードファイバ(SMF)の低損失波長帯域(~20 THz)により、今後、大幅な容量増加は見込めない。デジタルコヒーレント技術の進歩により向上した周波数利用効率は非線形シャノン限界に肉薄するレベルに達し

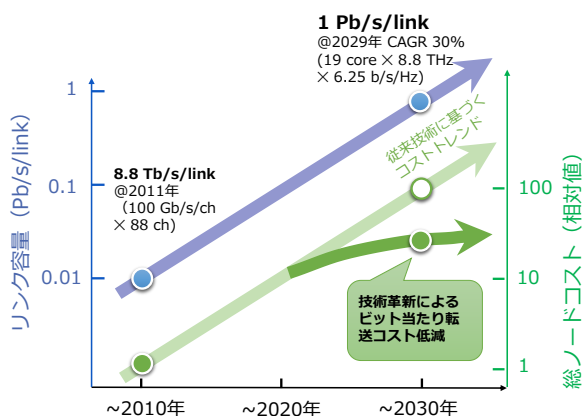


図 1. 光リンクと光ノードの技術トレンド

ており、これ以上の向上の余地は少ない。

2.2 空間分割多重導入の必要性

Beyond 5G 通信サービスの商用導入が予想される 2030 年前後に必要とされる 1 Pb/s 級の容量を達成するには、WDM とは別の次元の並列化技術、すなわち空間分割多重 (SDM) 技術を導入することが唯一の解決策であることが、光ファイバ通信分野の研究コミュニティの共通認識となっている。例えば、実用的な光増幅技術が確立している C バンドと L バンドの周波数帯域を 8.8 THz とし、周波数利用効率 6.25 b/s/Hz の DP-16QAM 変調フォーマットを採用すると、1 Pb/s の光リンクは 19 本の SMF を用いて構築することができる (図 1)。

一方、光ファイバの空間利用効率と作業性 (コネクタ接続や融着接続、ファイバ取り回しなど) 等の向上を目的に、新構造の SDM ファイバとそれを用いた伝送技術がこの 10 年間で急速に進展している。中でも非結合マルチコアファイバ⁵⁾ (MCF) は、コア間のクロストーク (XT) が実用上無視できるように設計されており、空間多重分離器 (FIFO) を用いて MCF の各コアを対応する SMF に変換することで、SMF を用いた従来の伝送技術がそのまま利用できるという特長がある。非結合 MCF 技術を用いれば、19 本の SMF によるリンク容量は、例えば、19 コアファイバ (19-CF) 1 本や、4 コアファイバ (4-CF) 5 本を用いて提供することができる。

現在、非結合 MCF の経済性の確保と信頼性の検証、

コネクタや FIFO、光増幅技術を含む周辺技術の整備など、実用化に向けた精力的な研究開発が各所で進められている。特に、従来の SMF とクラッド径が等しく信頼性に懸念がない 4-CF は、空間的な制約が厳しい海底光ケーブルシステムに最初に導入されるとの期待が高まっている。Beyond 5G 時代の光リンクが従来の SMF (あるいは細径化 SMF) を複数束ねた平行 SMF で構築されるか、非結合 MCF で構築されるかは、現時点では定かではない。しかし、これまで述べたように、従来のトラフィックの伸び率が今後も続くとするれば、2030 年前後以降の光ノード間は、(その実現方法が何であれ) 複数の単一モードコアで構築されるということに疑問の余地はない。

2.3 光ネットワーク階層化のアプローチ

それでは、光リンクが複数の単一モードコア (MCF あるいは平行 SMF) からなる将来の光ネットワークとその光ノードはどのようなアーキテクチャであるべきであろうか? この間に答えるため、多重化技術とノード技術の発展の歴史を振り返ってみたい。

2000 年前後に WDM 伝送技術が導入 (第一の並列化) されると、ノード装置である IP ルータ間や同期デジタル階梯 (SDH) クロスコネクタ間を結ぶ WDM 伝送装置における多量の光-電気-光変換器 (トランスポンダ) コストと設置スペースの増加が大きな問題となった。これを解決したのが、WDM レイヤにおける専用のノード装置 ROADM (再構築可能光分岐挿入装置) による IP ルータ/SDH クロスコネクタのバイパス (慣例に従って光バイパスと呼ぶ) の導入である。ROADM は、波長クロスコネクタ (WXC) と呼ばれ、WDM レイヤの多重化単位である波長の分離・グルーピング・多重機能を提供する光ノード装置である。ROADM/WXC は現在、世界中に広く導入され、光ネットワークの大容量化と経済化に貢献している。

SDM 技術が光リンクに適用されると、WDM 技術の場合と類似の問題が、光ノードにおいて発生すると予想される。図 2 を用いてその理由を説明する。トラフィックの増大に伴い光ノード間には次第に複数の SMF が設置されるが、これを収容するためには WXC を積層化していく必要がある。従って、現状の WXC に基づく WDM ネットワークアーキテクチャを踏襲する限り、例えば平行 SMF を MCF に置き

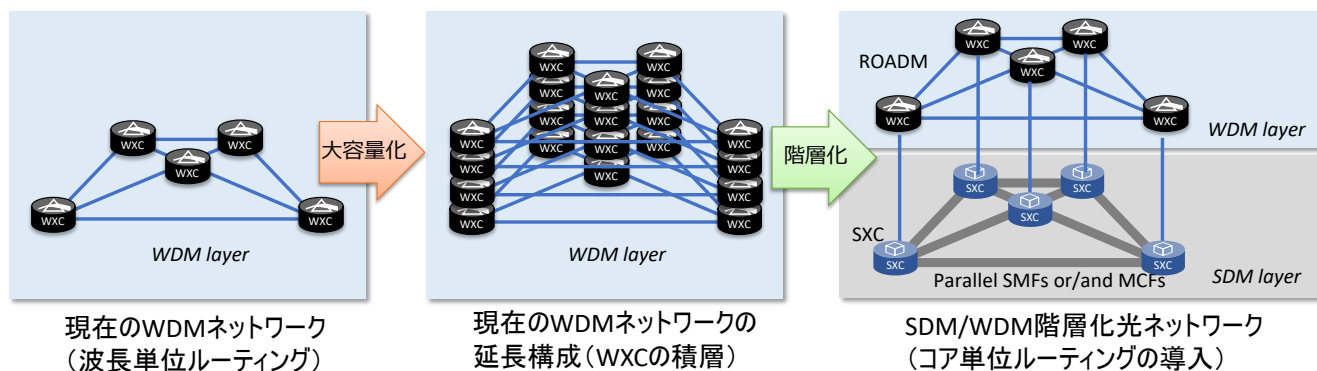


図 2. SDM レイヤの導入による光ネットワークの階層化

換えたとしても、2.1 節のグラフ (図 1) に示すようにノードコストはトラフィック量に比例して増加し、経済的にスケールしない。これを解決するためには、ビットあたりの転送コストを低減する何らかの技術革新が必要である。

WDM 導入の際の歴史に学べば、新たな多重化技術 (SDM、第二の並列化) に基づく光ネットワークのスケラビリティを確保しつつ経済化を図るには、従来の光レイヤを WDM レイヤと新たに定義する SDM レイヤに階層的に分離し、SDM レイヤには、そのメディアチャネルである空間チャネル (SCh) を分離・グルーミング・多重する空間チャネルクロスコネク (SXC) を配置することが合理的であると考えられる。この考えに基づき、新しい光ネットワークアーキテクチャ (空間チャネルネットワーク: SCN) が提案された³⁾。

SCN アーキテクチャの主要な利点は 2 つある。第一に、SXC は大きな粒度 (コア単位) でルーティングするのでビット当たりの転送コスト低く、従ってノードコスト低減可能である。第二に、SXC は過剰損失が非常に小さく低損失であるので、WXC をバイパス (今後、これを空間バイパスと呼ぶ) する光信号の転送距離を延伸することができ、再生中継コストを低減可能である。今後、同一対地間のトラフィック総量が単一モードコアの提供による容量に近づくにつれ、波長単位ではなくコア単位にルーティングする SXC の経済的合理性と運用上の利便性が顕著になると期待される。PHUJIN プロジェクトは、SDM/WDM 階層型光ネットワークアーキテクチャを採用している

なお、ここで、SCN アーキテクチャは「将来の光リンクが

MCF で構築されるか、パラレル SMF で構築されるかに関わらず」、超大容量で経済的な光ネットワークの実現に有効であることを強調しておきたい。

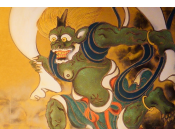
3. プロジェクトの枠組み

3.1 将来光ネットワークの要求条件

Beyond 5G 時代の光ネットワークに求められる 5 つ要求条件を以下に示し、その内容を説明する。

1. 拡張性に優れ、超大容量トラフィックを収容できること
2. ビット当たり転送コストの低減により、大容量性と経済性を両立可能であること
3. 現在の WDM ベース光 NW における物理的転送性能の維持あるいは向上が可能であること
4. 物理転送性能を損なうことなく高度な監視および運用が可能なこと
5. 非対称トラフィックを柔軟かつ効率的に収容可能なこと

要求条件 1 と 2 は第1章で詳しく説明した主要な要求条件である。要求条件 3 は、SDM/WDM 階層化光クロスコネク装置に特有の要求条件である。WXC で波長グルーミングされる波長チャネル (WCh、WDM レイヤのメディアチャネル) に収容されている光信号は、WXC の 1 回通過に加えて SXC を 2 度通過による光信号帯雑音比 (OSNR) 劣化を被る。一方、経路上の WXC を SXC により空間バイパ



スする WCh に收容された光信号は、SXC の挿入損失が WXC のそれよりも小さければ、OSNR 劣化をより小さくできる。波長グルーミングされる光信号の伝送距離の短縮が実用上無視できる程度になるように抑え、空間バイパスされる光信号の伝送距離延伸を最大化するよう、SXC の挿入損失を小さくする工夫が必要になる。

要求条件 3 は、MCF 光中継システムにおいても重要である。MCF 光中継システムにおいては、MCF ベースのエルビウム添加ファイバ(MC-EDF)の各コアに励起光を可能な限り低損失で注入することが伝送距離を延伸する上で有効である。そのための技術は、要求条件 4 の物理転送性能を損なうことのない高度な監視の実現にも関連する重要な技術である。

最後に、要求条件 5 は、光ファイバ資源のより効率的な利用に関する条件である。光アクセス系を除く基幹系や海底系の光ネットワークにおいては、伝送方向に関わらず一定の伝送速度(例えば 100 Gb/s)が採用されている。これは、アクセス系におけるデータ流量の非対称性が基幹系や海底系の光ネットワークにおいては統計多重効果により平滑化されると期待されているからである。しかし、今日のインターネットにおけるデータ流量の非対称性が、基幹系や海底系においても少なからず存在することが報告されており、来たるべき Beyond 5G 時代には、クラウドコンピューティングの一層の発展により、非対称性は一層増加する可能性がある。このような状況下では、容量以下のデータが流れる方向における未使用ファイバ資源の無駄使いは、特にケーブル内ファイバ收容スペースの制約が厳しい海底系において、見過ごすことができない問題として顕在化することが予想される。

3.2 プロジェクトの目的と目標

PHUJIN プロジェクトの目的は、Beyond 5G 通信サービスが発生する膨大なデータを転送するための、経済的かつ転送性能に優れた超大容量光ネットワークの実現技術を確認することである。これらの実現技術には、前記 5 つの要求条件に応える技術が含まれる。また、その数値目標は、1 Pb/s 級リンク容量が必要となる 2030 年前後の状況において、転送コスト 50%以上の削減と転送距離 50%以上の延伸化が可能なる空間多重(SDM)光ネットワーク技術

の実現性を実証することである。

3.3 産官学連携の垂直統合的な研究体制

前記の目的と目標を達成するため、PHUJIN プロジェクトは、MCF 配線や空間光スイッチなどのデバイスレベルの課題から、SXC や MCF 光増幅器などの装置レベル、性能監視やネットワーク收容設計・経済性評価などネットワークレベルの課題まで、ファイバベンダー(古河電工)、モジュールベンダー(santec)、装置ベンダー(NEC)、通信キャリア(KDDI 総合研究所)、アカデミア(香川大学)が垂直統合的な研究開発体制を構築して、5 つの研究開発項目に取り組む(図 3)。各研究開発項目の内容については、次の第4章で説明する。

4. 研究開発項目

4.1 SDM 光ネットワーク・ノード設計技術

香川大学が担当する本研究開発項目においては、モジュラリティに優れた SXC⁴⁾(図 3(a))と WXC を階層的に配置した階層化光クロスコネクタ(HOXC)の設計と、SXC の構成要素であるコア選択スイッチ⁵⁾(CSS)(図 3(a))の高度化(ポート当たりコア数増大、集積化など)のためのプリプロトタイプング、SDM/WDM 階層化光ネットワークの経済性評価を行う。また、受託各者と連携して、各研究開発項目の試作機を相互接続した SDM/WDM 階層化光ネットワークテストベッドの設計、構築、評価を行う。

現在までに、CSS パッケージ試作で得られた現実的な CSS コストモデルに基づき、予備系なしの階層化光 NW の構築コストのシミュレーションを実施し、従来方式に比べて 50%以上コスト削減可能性の見通しを得た⁶⁾。また、SXC の高度化(大容量・高機能・高性能)に向け、19-CF CSS と 5-CF×3 CSS⁷⁾のプリプロトタイプングと評価・フィードバックを実施し、CSS の多コア化、低クロストーク化、出力光パワー制御⁸⁾についての見通しを得ている。

4.2 SDM 光ネットワークシステム技術

SDM 光ネットワークの実用化に向けては、伝送容量の拡大だけでなく、SDM 光ノードに接続されるリンクにおける

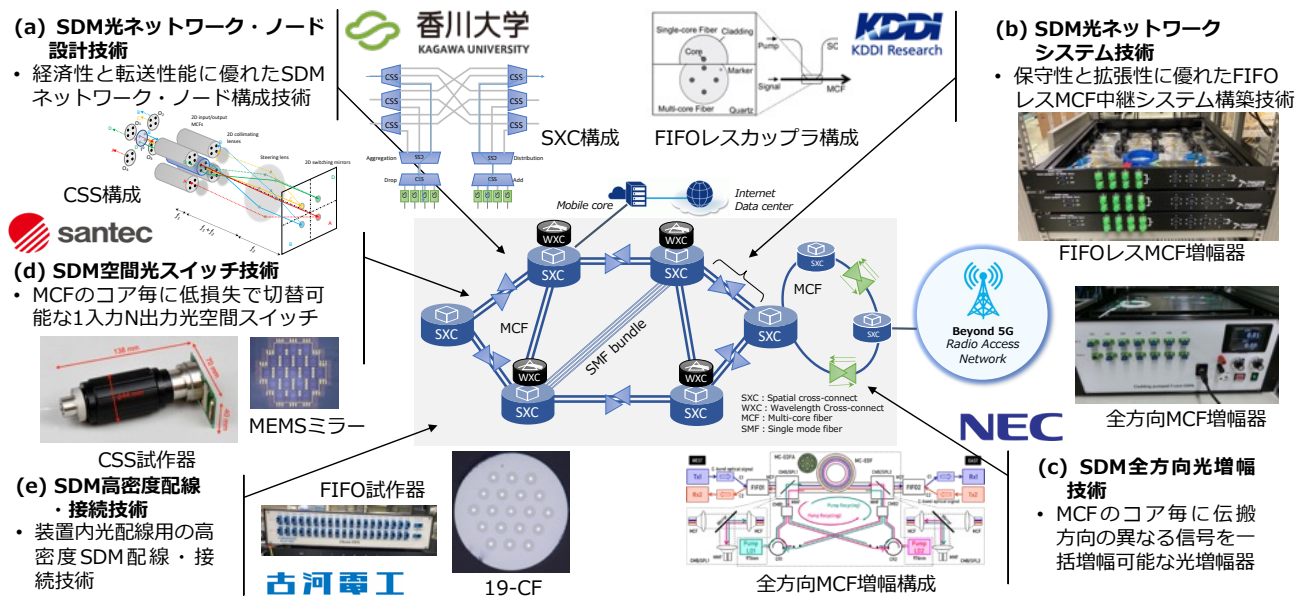


図 3. PHUJIN プロジェクトで取り組む 5 つの研究開発項目

監視および運用に係る要件を満たす新規技術開発が求められている。SDM 光ネットワークのリンクにおける、従来のマルチコア光増幅器では、光信号や監視用信号を入出力するため、また、利得(励起光パワー)を制御するために、FIFO デバイスが必須であった。しかし、FIFO の過剰損失は、消費電力や伝送性能に影響するという課題がある。

そこで、KDDI 総合研究所が担当する本研究開発項目においては、FIFO なしにマルチコア光信号を各コア独立に増幅可能、かつ、FIFO なしにマルチコア光増幅器を含むリンクの状態を監視可能な光デバイス(図 3(b))を開発し、FIFO レスなマルチコア光中継システムの設計法を開発する。

これまでに、FIFO レス MCF 光中継器の一次試作を完了し、従来 MCF 光中継器と同程度の特性が得られることを確認した。中継器のモニタポートを含めてスパン損失を、FIFO ありの場合と比較して 1.5 dB 低減(FIFO の 2 セット分程度の損失低減)可能な見通しを得た⁹⁾(図 3(b))。

4.3 SDM 全方向光増幅技術

MCF 利用の SDM 光ネットワークでは、光ファイバが複数コアを有し、そのすべてのコアの光信号の伝搬方向が必ずしも同一とは限らない。例えば、コア間クロストーク削

減によって伝送性能を向上させたり、上り下りで変動する通信トラフィックを柔軟に収容したりするため、同一 MCF 内でコア毎に伝搬方向を切り替えるといった柔軟な機能が期待できる。しかしながら、従来光増幅器は伝搬方向切り替えに対応していないため、このような SDM 光ネットワークならではの柔軟性を実現する上で妨げになる。

NEC が担当する本研究開発項目においては、従来光増幅器構成や配置をベースに、入力 MCF のコア毎に伝搬方向が変わったとしても期待する信号利得が得られる構成を明らかにし、コア毎に伝搬方向を設定可能な全方向 SDM 光増幅器を開発する。

現在までに、励起方式として前方および後方励起の両方を使用する双方向励起とし、MCF 入出力に対して対称な構成(図 3(c))とすることで、信号伝送方向に依存しない光利得・雑音指数を実現できる見込みが得られている。また、双方向クラッド励起の実現により、従来の前方クラッド励起マルチコア光増幅器に比べて利得が改善可能なことを明らかにした^{10), 11)}。

4.4 SDM 空間光スイッチ技術

現在実用化されている WDM ノードにおいては、大規模な $N \times M$ マトリクススイッチ、及びアドドロップ機能を担う

WSS が用いられている。マトリクススイッチは装置故障によるサービス中断を避けるために冗長配備する必要があり、WSS も高機能であるが故に故障率が高く、いずれも経済性を損なう要因となっている。

santec が担当する本研究開発項目においては、従来の光スイッチの機構とは異なるシンプルな構成で MCF 内のコア毎に低損失で切り替え可能な信頼性の高い光スイッチ (CSS) を実現する。また、光スイッチ性能を監視・制御するための大規模光パワーモニタについても研究開発し、SDM 光ネットワークの高性能化と高い信頼性を両立する。

これまでに、全長 138 mm、直径 44 mm の円筒形 CSS を試作し、低損失性 (最大 4.5 dB) を確認した¹²⁾ (図 3(d))。また、全長 35 mm、直径 9 mm のコアセレクタ (CS) を試作し、光損失 1 dB 以下の見通しを得ている。さらに、これらの CSS と CS の試作機を 19 インチケースに搭載し、USB 経由での遠隔操作が可能であることを確認している。

4.5 SDM 高密度配線・接続技術

従来の装置内配線技術では、デバイスとの接続性も考慮して単一コアファイバを用いたテープ心線を使用することを想定しており、幅広の配線用テープ心線が装置内での配線自由度を制約している。

古河電工が担当する研究開発項目においては、装置内配線に適した MCF、接続部材の最適化によりマルチコア化された各光デバイスへの直接接続を含めた小型配線技術を確立し、ノード内配線の高密度化を実現する。具体的には、デバイスのマルチコア化と協調して配線部材もマルチコア化し、接続部の小型化と配線時の光ファイバの柔軟性を向上させる。加えて、ノード内増幅器配線の最適化により、光増幅器の小型化にも取り組む。

これまでに、ノード内で配線可能な MCF としてクラッド径 240 μm 、コアピッチ 40 μm の 19 コアファイバの最適化 (短尺における高次モード抑圧と低コア間クロストークの両立) (図 3(e)) を行い、研究開発項目 4 で試作する CSS 用の MCF として提供している。また、最適化したファイバのコネクタ付けおよび入出力デバイスを完成した。さらに許容曲げ半径曲げ縮小に向けてクラッド径を 188 μm 、コアピッチを 30 μm に縮小させたファイバ¹³⁾ の設計を完了するとともに FIFO の 1 次試作 (図 3(e)) を実施した。

5. まとめ

PHUJIN プロジェクトは、Beyond 5G 時代に向けて経済性と転送性能に優れた SDM 光ネットワーク基盤技術の研究開発に取り組む産学連携プロジェクトである。現在、各研究開発項目の一次試作を完了し、それらを相互接続した SDM 光ネットワークテストベッドを構築し、コンセプトの実現性を検証中である。本プロジェクトの成果が、我が国における Beyond 5G 通信サービスの早期実現と国際競争力増強の一助となることを願っている。

参考文献

- 1) https://www.nict.go.jp/collabo/commission/B5Gsokushin/B5G_00201.html
- 2) <https://phujin-project.jp>
- 3) M. Jinno, "Spatial channel network (SCN): Opportunities and challenges of introducing spatial bypass toward massive SDM era," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 11, no. 3, pp. 1-14, 2019.
- 4) M. Jinno, "Spatial channel cross-connect architectures for spatial channel networks," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 26, no. 4, 3600116, 2020.
- 5) M. Jinno, I. Urashima, T. Ishikawa, T. Kodama and Y. Uchida, "Core selective switch with low insertion loss over ultra-wide wavelength range for spatial channel networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 40, no. 6, pp. 1821-1828, 15 March 15, 2022, doi: 10.1109/JLT.2021.3131486.
- 6) K. Matsumoto and M. Jinno, "Impact of Connection Flexibility in Spatial Cross-Connect on Core Resource Utilization Efficiency and Node Cost in Spatial Channel Networks," in *Proceedings European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Tu5.43, 2022.
- 7) Y. Uchida, T. Ishikawa, I. Urashima, S. Murao, T. Kodama, Y. Sakurai, R. Sugizaki, and M. Jinno, "Core selective switch supporting 15 cores per port using bundled three 5-core fibers," in *Proceedings Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, M4J.2, 2022.
- 8) Y. Uchida, T. Ishikawa, S. Murao, I. Urashima, R. Tahara, K. Nakada, and M. Jinno, "Variable Optical Attenuation Function of Core Selective Switch and Its Impact on Inter-core Crosstalk Characteristics," in *Proceedings European Conference on Optical Communication (ECOC)*, We5.3, 2022.



- 9) Y. Wakayama, N. Yoshikane, T. Tsuritani, "FIFO-Less Core-Pumped Multicore Fibre Amplifier With Fibre Bragg Grating Based Gain Flattening Filter," in Proceedings European Conference on Optical Communication (ECOC), Th2A.5, 2022.
- 10) H. Takeshita, Y. Shimomura, S. Tateno, K. Hosokawa and Emmanuel Le Taillandier de Gabory, "Novel Bidirectional Multicore EDFA Based on Twin Turbo Cladding Pumping Using Bidirectional Pumping and Recycling," in Proceedings Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), paper TuC1-2.
- 11) H. Takeshita, Y. Shimomura, K. Hosokawa, and Emmanuel Le Taillandier de Gabory, "Improvement of the Energy Efficiency of Cladding Pumped Multicore EDFA Employing Bidirectional Pumping and Control," in Proceedings European Conference on Optical Communication (ECOC), Th2A.6, 2022.
- 12) Y. Kuno, M. Kawasugi, Y. Hotta, R. Otowa, M. Mizoguchi, F. Takahashi, Y. Sakurai, and M. Jinno, "19-core 1×8 core selective switch for spatial cross-connect," in Proceedings OptoElectronics and Communications Conference/Photonics in Switching and Computing (OECC /PSC) 2022, WE3.
- 13) Y. Matsuno, M. Takahashi, R. Sugizaki, Y. Arashitani, "Design of 19-Core Multicore Fibers for High Density Optical Wiring" in Proceedings Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), paper MC2-3.