

## 2-2 実環境下における空間多重光ファイバを用いた光スイッチングの実証

### 2-2 *Optical Switching Demonstrations on Field-deployed SDM Fiber Networks*

古川 英昭

FURUKAWA Hideaki

増大を続けるデータ通信トラヒックに持続的に対応するために、大量のデータ通信を将来にわたって支える大容量光ネットワークの構築が急務となっている。近年、マルチコア光ファイバなどを用いたポイントツーポイントの空間多重伝送技術が進展しているが、複数のポイントを接続するネットワーク化が期待されている。我々は、空間多重光ネットワークを実現するために、光ネットワークの交差点や分歧点において光信号の経路を切り替える光交換ノード技術の研究開発を行っている。本稿では、最近我々が取り組んだ、実環境下に敷設された標準外径の結合型マルチコア光ファイバやマルチモードファイバ、光交換ノードから構成される光ネットワークテストベッドの構築と、試作した光スイッチによるスイッチング実証実験について紹介する。

To cope with the ever-increasing data traffic, the construction of a large-capacity optical network that supports a large amount of data traffic for the future is an urgent issue. In recent years, point-to-point transmission technology based on spatial division multiplexing (SDM) has been progressing, and further networking that connects a plurality of points is expected. To realize SDM-based optical networks, we are researching and developing optical switching node technology that switches optical signal paths at branch points of optical networks. In this paper, we describe the construction of an optical network testbed that we have recently worked on, which consists of standard cladding diameter SDM optical fibers such as a coupled multi-core fiber and a multi-mode fiber, and optical switching nodes that have been deployed in a real environment. In addition, we present the switching demonstration experiment.

#### 1 まえがき

現在、第5世代モバイル通信システム(5G)の普及やデジタル・トランスフォーメーション(DX)の推進等により、ネットワーク上の通信トラヒックは国内外で年率数10%の割合で増大を続けている。Beyond 5G以降の膨大な通信トラヒックに対応するため、多数の利用者が接続する有線・無線アクセス網や多量のデータを扱うデータセンタ網のデータを収容するコア・メトロ領域の光ネットワークの容量増大が重要な課題となっている。

近年、既存の波長多重分割多重(WDM: Wavelength division multiplexing)をベースとする光ネットワークの容量限界を超えるために、マルチコア光ファイバやマルチモード光ファイバを用いた空間分割多重(SDM: Space division multiplexing)技術[1]の研究が進められており、10 Pbpsを超える伝送容量のポテンシャルが示

されている[2][3]。また、標準型シングルモード光ファイバと同じクラッド径(ここでは標準外径と呼ぶ)のマルチコア光ファイバやマルチモード光ファイバの研究開発も活発に取り組まれており、1 Pbpsを超える伝送実験がなされている[4]~[6]。標準外径のマルチコア光ファイバやマルチモード光ファイバは、既存の光ファイバやケーブルの製造技術、コネクタなど既存の周辺技術が活用できるため、早期の実用化が期待される。

光ネットワークの交差点や分歧点では光交換ノードという装置が設置され、光信号の宛先に応じて光信号が通る経路を切り替えるスイッチング動作が行われる。SDMベースの光ネットワークにおいても、ポイントツーポイントの伝送技術に加え、光交換ノード技術の開発が不可欠である。これまでに、マルチコア光ファイバやマルチモード光ファイバを用いた光交換ノードや光スイッチング技術の研究開発が行われてきた[7]~[9]。2019年には、ファイバあたり1 Pbpsの光交換

ノードが世界で初めて実証され、ペタビット級光ネットワークの実現の可能性が示された[10]。一方、これらの光スイッチング実験は実験室環境下で行われており、これまで実環境下の光ネットワークにおける光スイッチング実証は行われていなかった。実用化を見据えた場合、実環境下での光ネットワークの動作実証は必要不可欠である。

最近、我々は、標準外径のマルチコア光ファイバやマルチモード光ファイバに対応した光スイッチを開発し、実環境下に設置された光ファイバケーブルと光交換ノードから構成されるSDMベースの実環境光ネットワークテストベッドを構築し、世界で初めて実環境下での波長ごとの光スイッチング実験を実証した[11][12]。本成果は、Beyond 5G以降の多様な情報サービスをサポートする大容量光ネットワークの構築技術を大きく前進させるものである。本稿では、開発した光スイッチや実環境光ネットワークテストベッドにおける実証実験の詳細について紹介する。

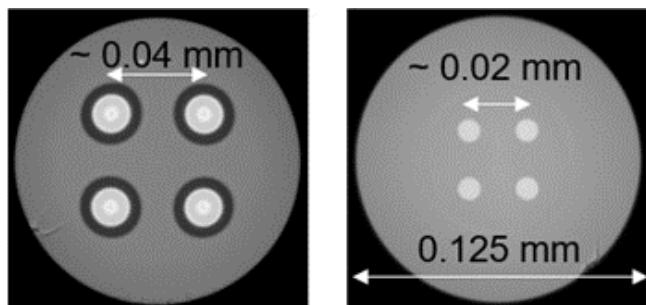


図1 非結合型4コア光ファイバ(左)と結合型4コア光ファイバ(右)の断面比較

## 実環境下での結合型マルチコア光ファイバの光スイッチング実験

マルチコア光ファイバには非結合型、結合型と呼ばれる二種類の光ファイバが存在する。一般的な非結合型マルチコア光ファイバは、コア間の間隔を十分に取り(コア中心の間隔0.04 mm程度)、リング状に屈折率を下げる構造などを用いて、コアからコアへの光信号の漏れによる信号干渉を抑えることにより、各コアを独立した導波路として扱う(図1左)。一方、結合型マルチコア光ファイバはコア間隔を狭め(コア中心の間隔0.02 mm程度)、複数のコアを結合した一体の導波路として扱う(図1右)。結合型マルチコア光ファイバ伝送は、コア間の信号干渉を受信時のMIMOデジタル信号処理により除去する必要があるが、標準外径の大きさのままコア数をより増やすことができ、伝送容量を上げることが可能である。また、マルチモード光ファイバ伝送と比較すると、空間モード分散(各信号の到達時間の差)が小さいことから、MIMO信号処理の負荷を抑えられるメリットがあり、長距離伝送に適している。

一方、マルチコア光ファイバの各コアの信号を多重化した空間多重信号の光スイッチングにおいては、非結合型ではコア単位での光スイッチングが可能であるが、結合型では各コアが結合して信号が伝搬するためこれが不可能である。このため、各コアにおける波長多重信号の光スイッチングにより、波長単位での経路切替えを行うことになる。今回、我々は標準外径の結合型4コア光ファイバに対応した光スイッチを、市販の波長選択スイッチをベースに独自に開発した[11]。

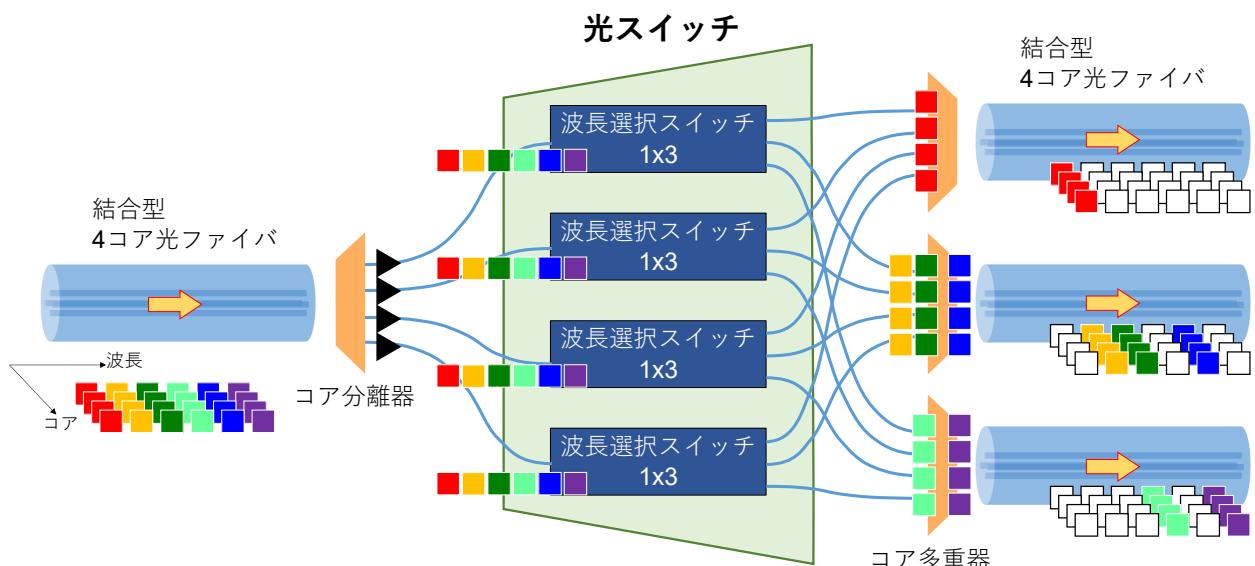


図2 結合型4コア光ファイバ対応光スイッチ(1入力3出力)の構成

結合型4コア光ファイバに対応した光スイッチは、3方路への切替えを想定し、1入力3出力(1×3)の波長選択スイッチ4台から構成されている(図2)。この光スイッチ4台で光交換ノードを構成した。

2019年6月に、イタリアの国立ラクイラ大学と住友電気工業株式会社が共同で、世界初の実環境におけるマルチコア光ファイバケーブルの実環境テストベッドをラクイラ市に敷設した。現在、標準外径の非結合型や結合型の4コア光ファイバ、15モード光ファイバを含む光ファイバケーブルが敷設されている。NICTは、ラクイラ大学との共同研究契約に基づいて、2019年より実環境テストベッドを用いた共同実験を実施している。イタリア・ラクイラ市内の実環境テストベッドに本実験では、ラクイラ大学内に設置した空間・波長多重信号に対応する光送受信器及び光交換ノード、ラクイラ市内に敷設された結合型4コア光ファイバ

(62.9 km)などから光ネットワークを構築し、メッシュ状の光ネットワークを模擬した(図3)。

本実験の光送信側では、波長多重光源を用いて、波長1,550 nm帯の6種の波長のレーザ出力を波長多重器により合波した。次に、偏波多重変調器により、多波長光に対し偏波多重64QAM変調を一括で行い、4分岐後の遅延線を用いて擬似的に異なる4つの信号系列とした。4コア多重器により各信号を結合型4コア光ファイバの各コアに結合し、12 Tbps(6波長多重、4空間多重、500 Gbps/波長チャネル)の多重信号を生成した。この結合型4コア光ファイバで伝送させた後、光交換ノードにおける光スイッチにより波長ごとに経路を切り替えた。光受信側では、4コア分離器により4コア光ファイバの各コアの出力を4つに分離し、コヒーレント受信器で電気信号に変換した。また、デジタル信号処理(MIMO処理)により、ファイバ伝搬中のコア間信号干渉を除去し受信した。これらは、一旦データを蓄積した後に処理を行うオフライン処理となる。

図4は、実環境テストベッドに構築した光スイッチ機能を備えた結合型4コア光ファイバネットワークのノード構成を示している。ネットワークノードのEast、West、Northの各ポートに1入力3出力(又は3入力1出力)の光スイッチが配置されており、実環境下に敷設された長さの異なる結合型4コア光ファイバ(62.3 km、6.3 km)又は非結合型4コア光ファイバ(6.3 km)に接続されている。図5に示すように、全波長の挿入・分岐、全波長の通過、一部波長の挿入・分岐等の19種のスイッチングパターンを試行した。ここでは、一部のスイッチングパターン(①～⑤)の内容を紹介する(⑥～

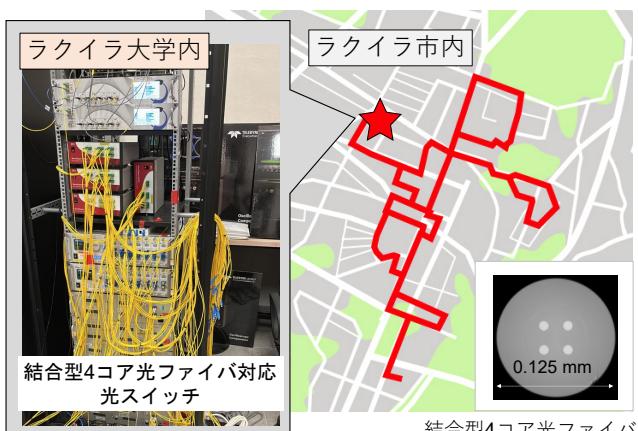


図3 イタリア・ラクイラ市内の実環境テストベッドに構築した結合型4コア光ファイバネットワーク

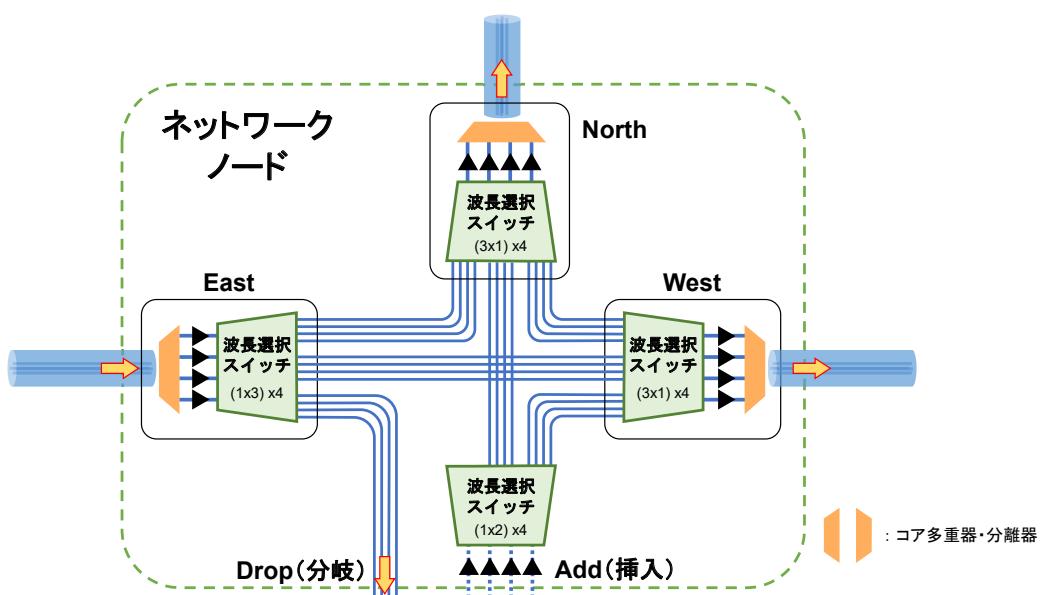


図4 実環境テストベッドに構築した結合型4コア光ファイバネットワークのノード構成

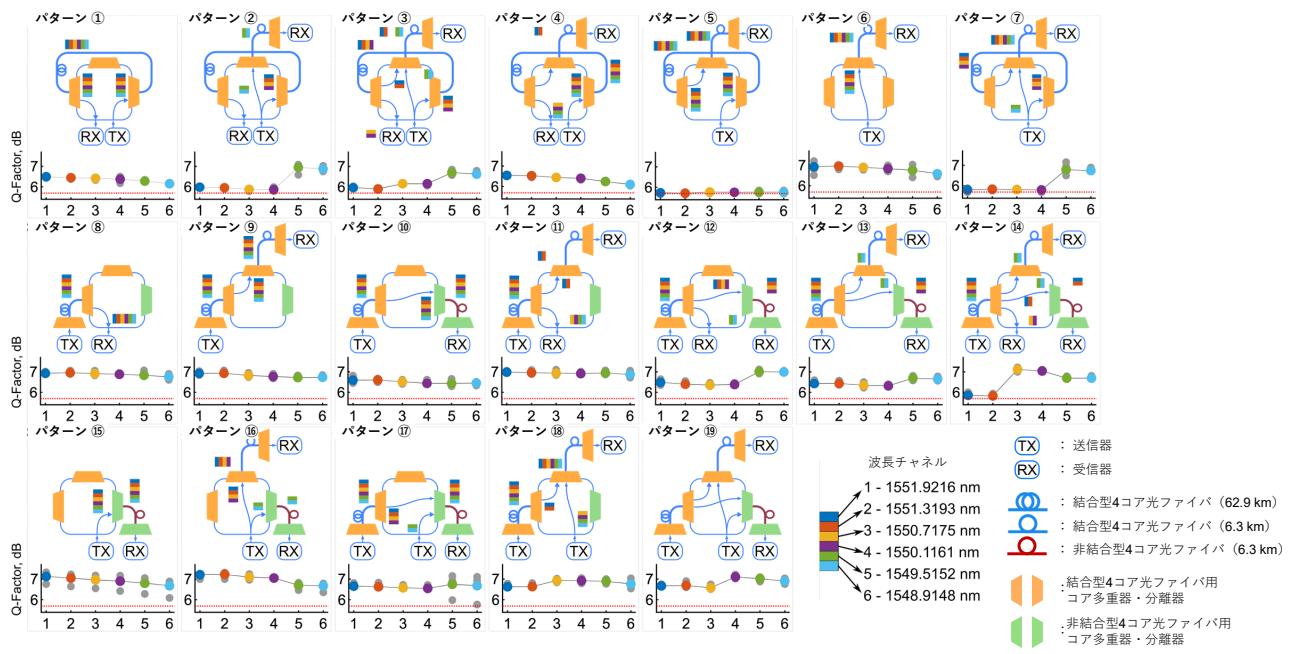


図5 19種のスイッチングパターンとスイッチング後の信号品質 (Q-Factor)

⑯のパターンは文献[11]を参照されたい)。

パターン① 全波長を West ポートから結合型4コア光ファイバ(62.9 km)へ挿入。伝送後、East ポートで分岐。

パターン② 一部波長を West ポートと North ポートからそれぞれ結合型4コア光ファイバ(62.9 km)と結合型4コア光ファイバ(6.3 km)へ挿入。それぞれ伝送後、次ポートで分岐。

パターン③ パターン②の結合型4コア光ファイバ(62.9 km)伝送後、East ポートで一部波長を North ポートへスイッチ(合波した波長を結合型4コア光ファイバ(6.3 km)伝送後、次ポートで分岐)、残りの波長を分岐。

パターン④ 全波長を West ポートから結合型4コア光ファイバ(62.9 km)へ挿入。伝送後、East ポートで一部波長を North ポートへスイッチ(結合型4コア光ファイバ(6.3 km)伝送後、次ポートで分岐)、残りの波長を分岐。

パターン⑤ 全波長を West ポートから結合型4コア光ファイバ(62.9 km)へ挿入。伝送後、East ポートで全波長を North ポートへスイッチ。結合型4コア光ファイバ(6.3 km)伝送後、次ポートで分岐。

図5に19種のスイッチングパターン時のスイッチング後の受信信号品質(品質係数Q値:Q-Factor)を示している。いずれのスイッチングパターンにおいても、光スイッチング後に、全波長チャネルで復調に問題ない信号品質を保っており、スイッチング後に正しく受

信できることを確認した。これにより、光交換ノードに要求される基本的なスイッチ機能を全て実証した。

### 3 実環境下でのマルチモード光ファイバの光スイッチング実験

光ファイバのコアの中を光信号が伝搬する際に、光はコアとクラッドの境界で全反射を繰り返しながら、様々な振動状態で進行する。この振動状態の違いが伝搬モードである。マルチモード光ファイバはコア径が大きく、一つのコア内に複数の伝搬モードが存在するため、異なる伝搬モードを多重化して並列通信を行う。ただし、マルチモード光ファイバの伝搬中や、入出力、接続時に、モード多重信号の伝搬モード間での信号干渉が発生するため、受信器でMIMO処理による干渉の除去が必要となる。さらに、伝搬モードの異なる信号では、受信器に届くまでの時間差が生じるため、ファイバの最適化や負荷の大きいMIMO処理が必要である。一方で、マルチコア光ファイバとマルチモードを組み合わせることで、多数の空間光チャネルを生成して大容量伝送が可能となる。

複数の伝搬モードを多重化した空間多重信号の光スイッチングにおいては、複数の伝搬モード間で結合しているため、伝搬モードごとにスイッチングする場合、光交換ノードごとにMIMO処理等でモード分離を行う必要があるため、非効率となる。そのため、結合型マルチコア光ファイバの光スイッチングと同様に、空間多重信号に対して波長単位での経路切替えを行うことになる。これまで、実験室環境では10モード以下の

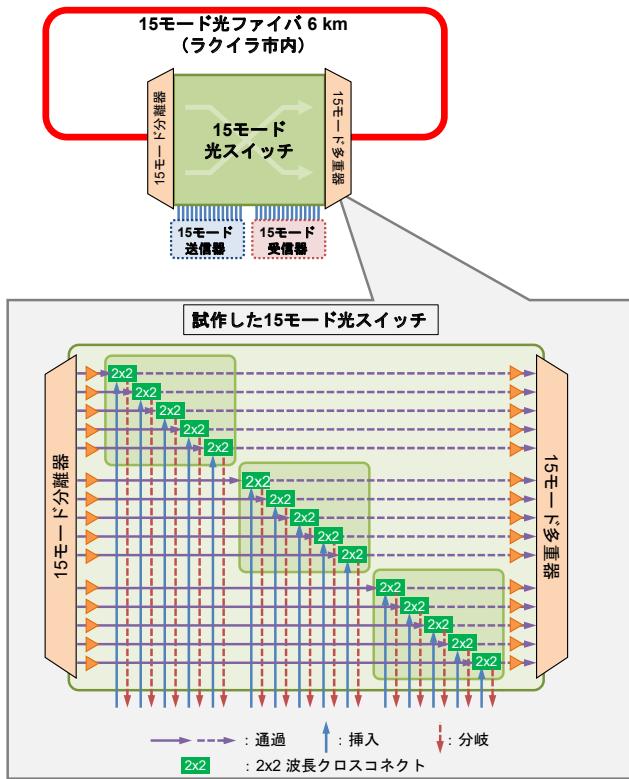


図 6 実環境テストベッドに構築した 15 モード光ファイバネットワークの構成

空間多重信号光スイッチングの報告はあるものの、更なるモード数の拡大や実環境下での実証が課題であった。今回我々は、実環境下において 15 モード多重信号のモードごとの伝搬特性を評価し、48.8 km までの伝送を実証するとともに、15 モード多重信号の波長ごとの光スイッチング実験に世界で初めて成功した [12]。

図 6 は、今回実環境テストベッドに構築した 15 モード光ファイバネットワークの構成を示している。送信器、光スイッチ及び受信器が、ラクイラ市内に敷設された 15 モード光ファイバに接続されている。15 モード送信器では、6 台の外部共振器レーザを使用し、偏波多重 IQ 変調器により、6 波長多重の偏波多重 16 QAM 信号 (50 Gbaud) を生成する。これを 15 分岐し、15 モード多重 (分離) 器 (MPLC: Multi Plane Light Converter) に通すことにより、15 モード多重信号 (30 Tbps = 5 Tbps × 6 波長) を生成する。15 モード光スイッチでは、6 波長・15 モード多重信号は、入力部の 15 モード分離器によりモード分離される。各信号 (波長多重信号) は、2 × 2 の波長クロスコネクト (WXC: Wavelength Cross-connect) により、経路を隣接ノード (通過) 又は自ノード (分岐) に切り替えられる。通過する波長は、出力部の 15 モード多重器により、再び 15 モード多重信号に変換され、15 モード光ファイバを通して隣接ノードへ送信される。分岐する波長は、モード多重信号に変換されることなく、自ノード

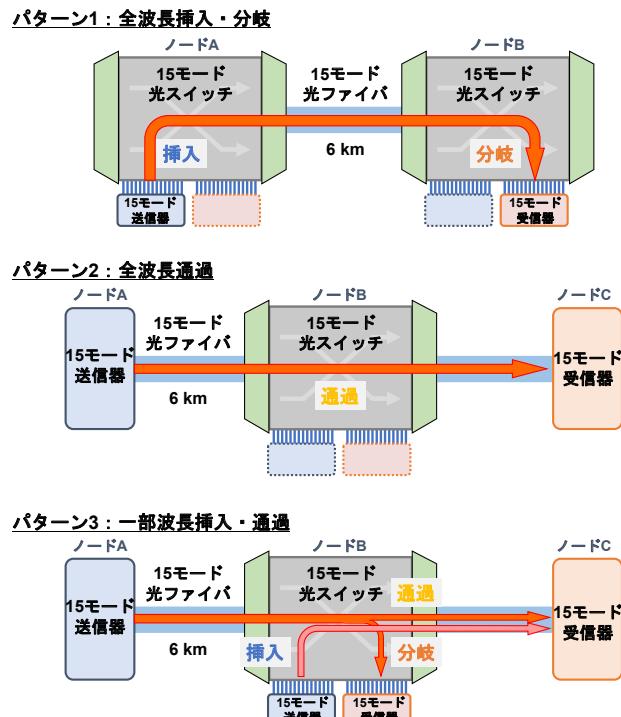


図 7 15 モード光スイッチの動作実証パターン

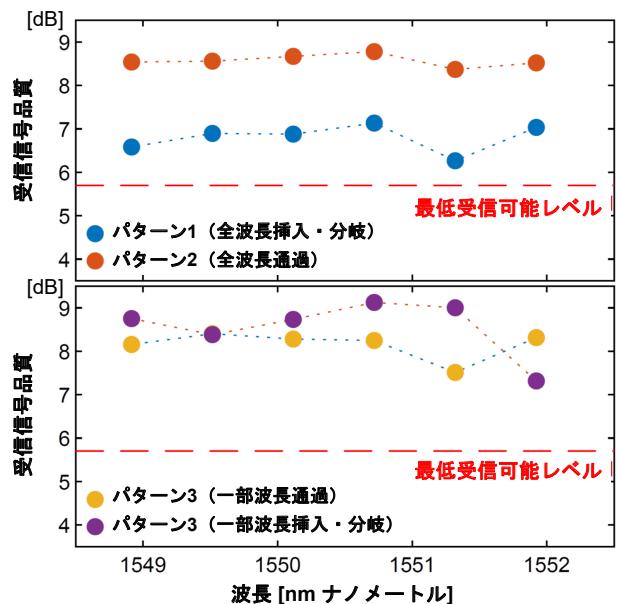


図 8 各光スイッチング後の受信信号品質

で処理される。今回、市販の  $4 \times 16$  波長選択スイッチを 3 台使用し、制御プログラムを改良することにより、効率的に 15 台の  $2 \times 2$  WXC として構成している。15 モード受信器では、入力部に 15 モード分離器を持ち、モード分離された 3 モード (群) ごとに処理される。波長選択フィルタにより処理する波長を選択し、コヒーレント受信器で受信後、MIMO 処理により信号を復調する。

今回、48.8 km (8 周回) までの伝送と、全波長の挿入・

## 2 次世代情報通信インフラを創る光ファイバ通信技術

分岐、全波長の通過、一部波長の挿入・分岐等の3種のスイッチングパターンを試行した(図7)。光スイッチングの動作実証パターン1～3の内容を紹介する。

パターン1: (ノードAからネットワークへの)15モードの全波長挿入

(ネットワークからノードBへの)15モードの全波長分岐

パターン2: (ノードAからノードCへの)15モードの全波長通過

パターン3: (ノードAからノードCへの)15モードの一部波長通過

(ノードAからノードBへの)15モードの一部波長分岐

(ノードBからノードCへの)15モードの一部波長挿入

図8に光スイッチング後の受信信号品質(品質係数Q値:Q-Factor)を示す。それぞれのパターンで各波長の15モードの平均値を示している。いずれも、光スイッチング後の受信信号品質が最低受信可能レベル(FEC閾値)を上回っており、15モード多重信号を復調できることを示している。

## 4 結論

結合型マルチコア光ファイバは、長距離・大容量伝送に優れる新しい伝送媒体として期待されており、本実証では、実環境下において、製造が容易な標準外径の結合型4コア光ファイバを流れる大容量データを光のままその方路を自在に切り替えることに成功しており、長距離・大容量光ネットワークの構築技術が大きく前進した。また、標準外径マルチモード光ファイバを用いたモード多重信号の伝送及び光スイッチングも実環境下において安定して行えることを実証し、モード多重通信の研究を加速させた。モード多重通信とマルチコア光ファイバを組み合わせることで、多量の空間チャネルによる超大容量光ネットワークの構築が期待される。これらの成果は、Beyond 5G後の様々な情報通信サービスをサポートするバックボーン通信システムの実現につながる重要な一歩である。

### 【参考文献】

- 1 B. J. Putnam, G. Rademacher, and R. S. Luis, "Space-division multiplexing for optical fiber communications," *Optica*, vol.8, no.9, pp.1186-1203, Sept. 2021.
- 2 D. Soma, Y. Wakayama, S. Beppu, S. Sumita, T. Tsuritani, T. Hayashi, T. Nagashima, M. Suzuki, H. Takahashi, K. Igarashi, I. Morita, and M. Suzuki, "10.16 Peta-bit/s Dense SDM/WDM transmission over Low-DMD 6-Mode 19-Core Fibre across C+L Band," *Proc. the 43rd European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC2017)*,

Th.PDP.A.1, Sept. 2017.

- 3 G. F. Rademacher, B. J. Putnam, R. S. Luis, J. Sakaguchi, W. Klaus, T. A. Eriksson, Y. Awaji, T. Hayashi, T. Nagashima, T. Nakanishi, T. Takahata, T. Kobayashi, H. Furukawa, and N. Wada, "10.66 Peta-Bit/s Transmission over a 38-Core-Three-Mode Fiber," *Proc. the Optical Fiber Communication Conference (OFC2020)*, Th3H.1, San Diego, March 2020.
- 4 B. J. Putnam, R. S. Luis, G. F. Rademacher, Y. Awaji, and H. Furukawa, "1 Pb/s Transmission in a 125 μm diameter 4-core MCF," *Proc. the 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2022)*, no.JTh6B.1, May 2022.
- 5 G. F. Rademacher, R. S. Luis, B. J. Putnam, N. K. Fontaine, M. Mazur, H. Chen, R. Ryf, D. T. Neilson, D. Dahl, J. Carpenter, P. Sillard, F. Achten, M. Bigot, J. Sakaguchi, and H. Furukawa, "1.53 Peta-bit/s C-Band Transmission in a 55-Mode Fiber," *Proc. the 2022 European Conference on Optical Communication (ECOC2022)*, Th3C.3, Sept. 2022.
- 6 G. F. Rademacher, M. v. d. Hout, R. S. Luis, B. J. Putnam, G. D. Sciumo, T. Hayashi, A. Inoue, T. Nagashima, S. Gross, A. Ross-Adams, M. J. Withford, J. Sakaguchi, C. Antonelli, C. Okonkwo, and H. Furukawa, "Randomly Coupled 19-Core Multi-Core Fiber with Standard Cladding Diameter," *Proc. the Optical Fiber Communications Conference (OFC2023)*, Th4A.4, March 2023.
- 7 J. M. D. Mendieta, S. Shinada, Y. Hirota, R. S. Luis, H. Furukawa, and N. Wada, "83.33 Tb/s Coherent PDM-8PSK SDM-TDM Spatial Super-channel and High-speed Core-joint Switching System," *Proc. the Optical Networking and Communication Conference and Exhibition (OFC2018)*, Th3H.2, March 2018.
- 8 M. Jinno, "Spatial Channel Network (SCN): Opportunities and Challenges of Introducing Spatial Bypass Toward the Massive SDM Era," *IEEE/ Optica J. Opt. Commun. Netw.*, vol.11, no.3, pp.1-14, March 2019.
- 9 S. Sumita, S. Beppu, D. Soma, and T. Tsuritani, "Reconfigurable mode OADM demonstration in weakly-coupled 10-mode-division multiplexed network," *Proc. the 45th European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC2019)*, Sept. 2019.
- 10 R. S. Luis, B. J. Putnam, G. F. Rademacher, T. Eriksson, Y. Hirota, S. Shinada, A. R-Adams, S. Gross, M. Withford, R. Maruyama, K. Aikawa, Y. Awaji, H. Furukawa, and N. Wada, "Demonstration of a 1 Pb/s spatial channel network node," *Proc. the 45th European Conference on Optical Communication (ECOC2019)*, PD.3.5, Sept. 2019.
- 11 R. S. Luis, G. Di Sculio, G. F. Rademacher, B. J. Putnam, A. Marotta, R. Emmerich, N. Braig-Christophersen, R. Stolte, F. Graziosi, A. Mecozzi, C. Schubert, T. Hayashi, T. Nagashima, C. Antonelli, and H. Furukawa, "Colorless and Directionless ROADM for Meshed Coupled-Core Multicore Fiber Networks," *Proc. the Optical Fiber Communication Conference (OFC2023)*, Th4C.3, March 2023.
- 12 R. S. Luis, G. F. Rademacher, B. J. Putnam, G. D. Sculio, A. Marotta, R. Emmerich, N. Braig-Christophersen, R. Stolte, F. Graziosi, A. Mecozzi, C. Schubert, G. Ferri, F. Achten, P. Sillard, R. Ryf, L. Dallachiesa, S. Shinada, C. Antonelli, and H. Furukawa, "Demonstration of a Spatial Super Channel Switching SDM Network Node on a Field Deployed 15-Mode Fiber Network," *Proc. the 2022 European Conference on Optical Communication (ECOC2022)*, Th3C.5, Sept. 2022.



古川 英昭 (ふるかわ ひであき)

ネットワーク研究所  
フォトニック ICT 研究センター  
フォトニックネットワーク研究室  
博士(工学)  
フォトニックネットワーク、光情報処理  
【受賞歴】  
2015年 第47回市村学術賞 功績賞  
2013年 文部科学大臣表彰 若手科学者賞