



# 再構成可能なインフラのためのスケーラブル・フレキシブル光通信技術の研究開発 —Horizon 2020 EU-Japan SAFARI プロジェクト—



日本電信電話株式会社 NTT 未来ねっと研究所  
インベティブフォトニックネットワークセンタ センタ長 上席特別研究員

みやもと ゆたか  
宮本 裕

## 1. 概要

2014年に総務省とEC (European Commission) からの支援をうけた日欧共同研究プロジェクト：再構成可能なインフラのためのスケーラブル・フレキシブル光通信技術の研究開発（以下SAFARIプロジェクト）が提案・採択され、3か年にわたる研究プロジェクトが開始された。SAFARIプロジェクトでは、日本と欧州の5つの主要な研究機関が協力し、現在の光ネットワークの約100倍以上の伝送容量となる1Pbit/s以上、伝送距離1000km以上の柔軟な拡張性をもつ大容量光コアネットワークの実現に向け、各社がマルチコアファイバ (MCF) に対応可能な各要素技術とそのネットワーク資源を柔軟に活用するための制御技術を分担、確立する。それら複数の要素技術を連携させることでPbit/s級空間多重光ネットワークテストベッドを構築し、トラヒックエンジニアリング等のネットワーク制御実験を行うことによりその有用性をグローバルな枠組みで実証する。本稿では、SAFARIプロジェクトで得られた最新の成果を紹介する。

## 2. はじめに

2020年に向けた将来の通信サービスとして、自動運転に代表される広帯域、低遅延サービス等の実現に向けた5Gモバイルネットワーク技術の精力的な検討が進んでいる。また、IoT (Internet of Things) 技術の進展により、より多様性のある端末がネットワークに接続され、通信ネットワークは私たちの身近な社会基盤として空気のようになくてはならないインフラとして、より重要性が高まっていくと考えられる。これまでネットワークの大容量化・高度化を支えてきた光通信・ネットワークでは、これまで、もっぱら1本の光ファイバに光の通り道 (コア) が1つで、かつ導波モード1つになるよう設計されたシングルモードファイバ (SMF) が、基本の伝送媒体として用いられ、様々な伝送基盤技術の変遷を通して30年で約5桁近い (2年で2倍) 大容量化が実現されてきた。近年実用化された主要な光通信基盤技術であるデジタルコヒーレント技術は、大容量光通信にデジタル信号処理技術を積極的に導入することで、1波長当たりチャンネル容量100Gbit/s以上の長距離伝送を実現する。1本の光ファイバに100チャンネル以上のデジタルコヒーレント光信号を多

重し一括光増幅中継伝送する波長多重伝送システムにより、既存のSMFを用いた10Tbit/s級の大容量光ネットワークが実用化されている。また、最近では、偏波多重16値振幅位相変調 (QAM: Quadrature Amplitude Modulation) 技術を基本としたデジタルコヒーレント技術により、更に2倍以上の高効率伝送が実現可能となり、1チャンネル400Gbit/s、ファイバ当たり20Tbit/s級の大容量データセンタ間光ネットワークが実用化された。研究段階では、64値QAM信号を用いて1本のSMFで100Tbit/s以上の大容量伝送実験が実証されている<sup>[1]</sup>。

しかしながら、これまでのSMFを用いた光通信システムでは、SMFの物理的な性能限界により、従来と同じ中継距離を保ちつつ100Tbit/s以上の大容量化を実現することが困難になってきている。SMF伝送容量の物理的な制限要因としては、光ファイバ通信に固有の光非線形効果により周波数利用効率の向上の制限が生じることや、保守者や通信システムに対する安全を確保するための許容光入力パワの制限に起因する。これらの制限要因を回避しさらなる大容量光通信を実現する将来基盤技術として、近年、空間多重 (SDM: Space Division Multiplexing) 光通信技術が注目されている<sup>[2]</sup>。SDM光通信技術では、1本のファイバに複数のコアを有するマルチコアファイバ (MCF) 等を用いたコア多重や、複数の伝搬モードに異なる信号を多重して伝送するモード多重を用いて、SMFの物理限界容量を超える大容量光通信を実現する。従来MCF等を用いたコア多重に関する主要な研究機関は日本国内に限られており、本技術分野がグローバルな研究開発の潮流として認知されるための具体的な施策が求められていた。即ち、SDM光通信を用いた将来の大容量光ネットワークに必要な要素技術とその柔軟な制御技術の実現性を示し、国際的な連携成果として分かりやすいユースケースを通してその有用性をグローバルに実証・発信していく必要性があった。

## 3. 本研究の目的と各機関の役割

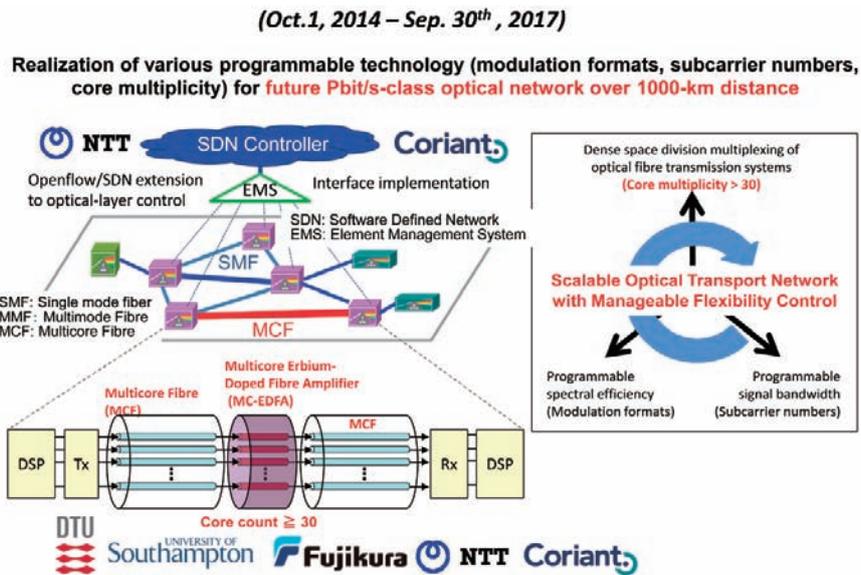
SAFARIプロジェクトでは、上記した背景を元に、既存SMFシステムとの親和性を考慮し、1) SDM光通信に適したSoftware Defined Network (SDN) 制御機能拡張の提

案ならびに実証、2) 400Gbit/s超絶適変調QAMデジタルコヒーレント技術を適用可能な1000km以上の長距離化  
3) Pbit/s級(従来の約100倍)の大容量化といった有用性を端的に示すためのユースケースを確立し、国際的な枠組みでその有用性をテストベッド構築・実証することを目標とした<sup>[3]</sup>。NTTとデンマーク工科大学がそれぞれ日本とヨーロッパの共同幹事社となり、図1に示す国際的な研究プロジェクトを提案し、日欧連携総務省委託研究(SAFARI: 2014.10 ~ 2017.9)の下で本分野の異なる技術領域での強みを有した産学連携の国際連携パートナーシップ(EUパートナー: デンマーク工科大(EU幹事社)、サウサンプトン大、コリアント社(伝送システムベンダ)、日本パートナー: NTT、フジクラ(ファイバベンダ))を構築した。本枠組みを活用し、各機関の要素技術を結集・構成したテストベッド

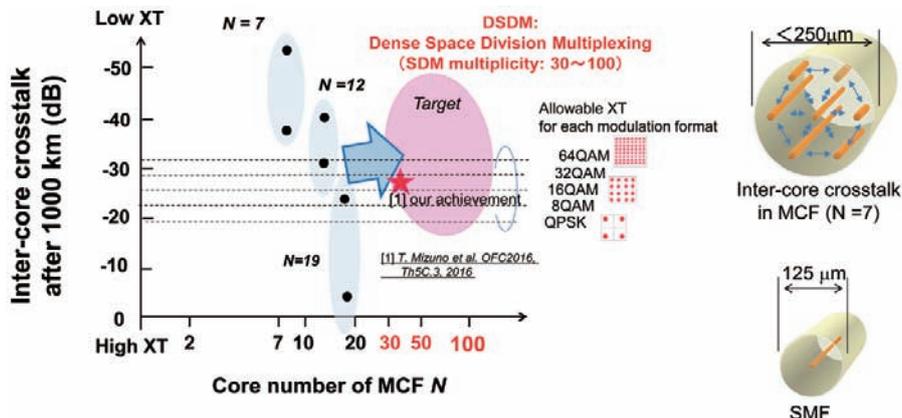
(SAFARIテストベッド)を構築し、既存のSMFを用いたシステムから将来のMCFを含む空間多重光通信システムへ柔軟な移行、並びに、将来のPbit/s級光ネットワークにおける高速光チャンネル適変調制御等を実現する複数のユースケースの実現性を検証した(図1)。

#### 4. 1Pbit/s級長距離伝送を実現する高密度空間多重マルチコアファイバ光増幅中継技術

通常のSMFでは、クラッド径125 $\mu\text{m}$ のクラッドに1つのコアを有し、コア径約10 $\mu\text{m}$ に全ての光信号が閉じ込められながら伝搬する。MCFでは、1つのクラッド内のコア数を増やすことで、コア当たりの光パワー密度を一定に保ちつつ、光ファイバへの入力信号パワーを向上する。このためSMFの物理限界を回避しつつ1本のファイバの伝送容量を



■図1. SAFARIプロジェクトの概要



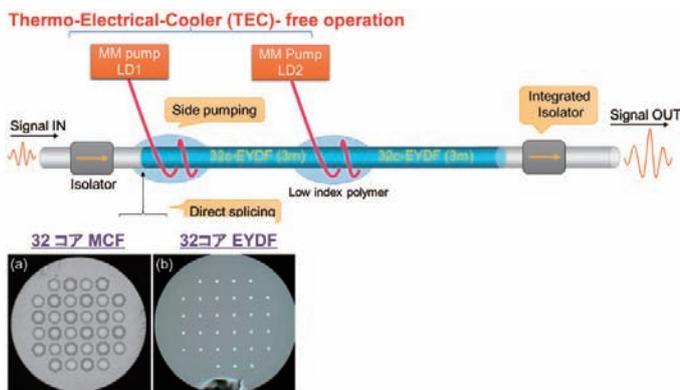
■図2. 30コア多重以上の高密度空間多重の課題とプロジェクト目標



コア数分だけ拡大することができる。しかしながら、光ファイバの機械的信頼性を確保するためには、MCFに許されるクラッド径は、最大でもSMFの約2倍の $250\mu\text{m}$ 以下にする必要がある。このため一定のクラッド径制限下で、MCFのコア数を20以上に増加した場合（空間多重度20）、コア間の光信号の漏れ込み（コア間クロストーク：以下コア間XT）が顕在化してしまうトレードオフがあった（図2）<sup>[4]</sup>。特に、波長多重システムで周波数利用効率向上に向け、1波長当たりの光信号を変調する多値QAM信号の多値数を上げた場合は、XTによる多値QAM信号の伝送品質劣化が顕在化し、本研究プロジェクト開始時点では、空間多重度20以上のMCFやMC光増幅器の実現が困難であった。

SAFARIプロジェクトでは、日欧トップレベルの研究機関の要素技術を結集することで、MCF中継伝送路のコア間XTを大幅に低減し、コア多重度を30以上に拡大ことに成功した（図3）。まず、MCFのコア間XTの低減には、各コアの光信号閉じ込めを強化するためのトレンチ型の屈折率プロファイルや、屈折率がわずかに異なる複数種類のコ

アを隣接コアとして配置する異種コアMCF構造を採用し、コア間XT特性を大幅に向上した<sup>[5]</sup>。この結果、空間多重度30以上のMCFを用いた長距離伝送の実現に道が拓かれ、異種コアMCFのコアの種類を2～4種類とすることで最大37コアまで世界最高の高密度空間多重MCFを実現できることを確認した。特に図3に示したように、コア配置を正方格子配置とした32コアMCFでは、2種類のコアで全ての最近接のコア同士の屈折率を互いに異なるコアとすることができ、クロストーク特性と製造性が共に向上する。このためテストベッド構築には32コアMCFの50km以上の長尺ファイバを試作し適用した。次に、マルチコア（MC）光増幅器の実現に向けては、MC構造の光増幅用ファイバとして、一般的なC帯における励起効率向上が可能なEr/Yb添加マルチコアファイバ（EYDF）を適用した。また、従来の各コアを個別に個々に励起する方式から1つの励起レーザーで32コアをクラッド一括励起する方式を採用した。図4に記載したように、2段構成のクラッド一括励起とすることで低雑音・高出力特性を両立したMC光増幅器が実現でき、大幅な小型化を達成するとともに、60%以上の低電力化の見通しが得られた<sup>[6]</sup>。本32コアMCFを用いた光中継伝送路では、1Pbit/s超の伝送容量を従来報告の半分以下の信号帯域（4THz@C帯）で4倍の200kmにわたる光中継伝送実験に初めて成功するとともに、1000km以上の長距離化の実現性を示した<sup>[7] [8]</sup>

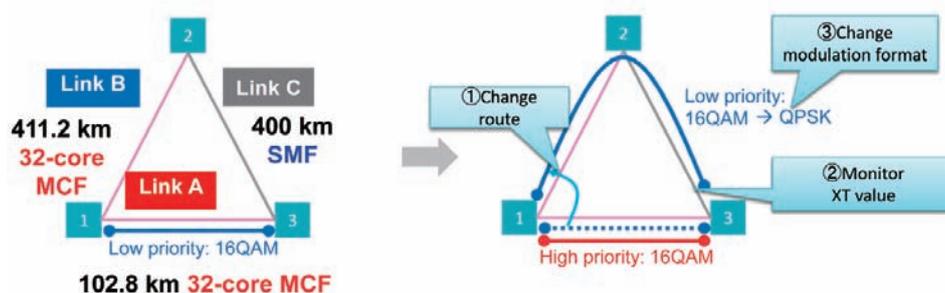


■ 図3. 高密度MCFとクラッド励起一括光増幅技術

## 5. 適応変調400Gbit/s級光チャンネルを用いた32コア光ネットワークテストベッド実験

MCFをトランスポートネットワークで有効に使うためには、コア間で発生するクロストークを考慮した光パスの制御が

- MCFs are partially deployed in the process of upgrade from SMF to MCF
- When low priority channel is preempted by high priority channel:
  - Change route of low priority channel if necessary to make room for high priority channel
  - Change modulation format of low priority channel if XT is too high for the same format



■ 図4. クロストークマネジメントを考慮したトラフィック制御実証



必要となる。このため、MCFを含む光増幅中継リンクにおいて経路のコア間クロストークをモニタし、トラヒックの優先度に応じてSDN制御により経路や変調方式を切り替える適応制御方式を考案した。本方式を、日欧パートナー各社と連携してミュンヘン・コリアント社に構築したSAFARIテストベッドに実装し、その有用性を実証した(図4)<sup>[9]</sup>。SAFARIテストベッドは、1つのSMF光増幅中継リンク、クロストーク量の異なる2つのMCF光増幅中継リンク、及び3方路商用ROADM (Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer) 光ノードから構成される3ノードシステムとした。ネットワークの要求によって、優先度の高い光パスを設定する際、伝送後の光信号のSNR、コア間クロストーク等をインサーブスで監視し、利用可能なネットワークリソース(コア、信号波長、ルート)の再配置・設定を行った。モニタしたSNRとコア間XT値に基づいて、光信号に適用可能なQAM変調方式の多値数を適応的に設定し、光パスを確立した。これらの制御では、空間多重光通信に適した機能拡張を実施したSDN制御プラットフォームを適用し、プログラマブルなチャンネル容量可変400Gbit/s級光パス制御を実験実証した。

## 6. おわりに

本稿では、SMFの物理的な伝送限界を超えて、従来の100倍以上のPbit/s級伝送容量を柔軟に伝送するために、SAFARIプロジェクトで提案・検証した高密度空間多重光通信技術に関する最新の成果を紹介した。本技術のグローバルな普及に向けて、従来のSMFを用いた光ネットワークからMCFを用いたPbit/s級空間多重光ネットワークへ推移する際の両ファイバが混在したネットワークを考察し、幾つかの具体的なユースケースを提案した。また、空間多重数が30を超える、Pbit/s級空間多重光ネットワークを実現するためのMCF技術、MC一括光増幅技術等の要素技術の実現性を示した。従来のSMFと共に、開発した32コアファイバ・32コアMC光増幅中継器を適用し、商用ROADM光ノードと接続することで、3ノード・1000km級の空間多重光通信テストベッドを構築した。本テストベッドにおいて、設定経路における着信信号のコア間XT・光SNRをインサーブスで監視し、伝送可能なデジタルコヒーレントQAM光信号の多値数を動的に制御可能なSDN制御プラットフォームを構成した。本構成を用いて、ネットワークへの要求(必要なリンク容量・伝送距離)に応じて、柔軟にリンクパラメータ可変し光パスを確立するトラヒックエンジニアリング制御実

験に成功した。今後、SAFARIプロジェクトで検証した種々の要素技術が、既存のSMFやデジタルコヒーレント伝送技術と親和性を取りつつ、今後のスケーラブルな大容量光ネットワーク基盤技術として発展していくことが期待される。

## 謝辞

本研究の一部は、総務省ならびに欧州委員会による戦略的情報通信研究開発推進事業(国際連携型研究開発) Horizon 2020 EU-Japan SAFARIプロジェクト「再構成可能なインフラのためのスケーラブル・フレキシブル光通信技術の研究開発」の成果を用いている。

また、SAFARIプロジェクトメンバ各位に感謝する。

## 参考文献

- [1] 宮本裕 他、“大容量光ネットワークの進化を支える空間多重光通信技術,” *NTT技術ジャーナル* vol.29, no.3, pp.8-12, 2017.
- [2] T. Morioka: “New Generation optical infrastructure technologies: EXAT initiative towards 2020 and beyond,” in *Proc. OECC2009*, FT4, (2009)
- [3] <http://www.ict-safari.eu/>
- [4] Y. Miyamoto “Crosstalk-managed multi-core fiber transmission with the capacities beyond 1 Pbit/s,” in *Proc. APC2013*, paper AF3D.2, 2013.
- [5] Y. Sasaki et al., “Crosstalk-managed heterogeneous single-mode 32-core fibre,” in *Proc. ECOC2016*, paper W.2.B.2. 2016.
- [6] S. Jain et al., “Improved cladding-pumped 32-core multicore fiber amplifiers,” in *Proc. ECOC2017*, paper Th.2.D.2. 2017.
- [7] T. Mizuno et al, “Long-haul Dense Space Division Multiplexed Transmission over Low-crosstalk Heterogeneous 32-core Transmission Line Using Partial Recirculating Loop System,” *IEEE J. of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 3, pp.488-498, Feb. 1, 2017.
- [8] T. Kobayashi, et al, “1-Pb/s (32 SDM/46 WDM/768 Gb/s) C-band Dense SDM Transmission over 205.6-km of Single-mode Heterogeneous Multi-core Fiber using 96-Gbaud PDM-16QAM Channels,” in *Proc. OFC2017*, Postdeadline paper, Th5B.1, 2017.
- [9] T. Tanaka et al., “Demonstration of Single-Mode Multicore Fiber Transport Network With Crosstalk-Aware In-Service Optical Path Control,” *IEEE Journal of Lightwave Technol.*, vol. 36, no.7, pp.1451-1457, 2018.