

# IOWN構想特集— ネットワーク—

IOWN

オールフォトニクス・ネットワーク

ネットワーク技術

大容量光伝送

超低遅延

本特集では、これまでの情報通信システムを変革し、現状のICTの限界を超えた新たな情報通信基盤の実現をめざして検討を進めているIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想における「オールフォトニクス・ネットワーク」に関する研究開発の取り組みを紹介する。

なお、「オールフォトニクス・ネットワーク」におけるデバイス関連技術の取り組みについては、今後の特集号で紹介する。



# オールフォトニクス・

## ■ IOWN構想に基づくオールフォトニクス・ネットワーク関連技術の取り組み

10

IOWN構想の3つの構成要素のうち、オールフォトニクス・ネットワークについて、その実現に向けて取り組んでいる関連技術を紹介する。

## ■ 超大容量光通信技術

12

新たな光ファイバ技術と高速光伝送技術の融合により、現在の光ファイバの100倍以上のポテンシャルを有する新たな光伝送基盤の実現に向けた取り組みについて紹介する。

## ■ アナログRoFを活用した多様な高周波数帯無線システムの効率的収容

15

複数の高周波数帯無線システム間で無線設備を共用可能とするシステム構成と、その要素技術である遠隔ビームフォーミング技術について紹介する。

## ■ オールフォトニクス・ネットワークを支える光フルメッシュネットワーク構成技術

18

超高臨場感サービス等の提供を支える多様かつ大容量なコンテンツの超低遅延伝送を実現する光フルメッシュネットワークのコンセプトと、その実現に必要な技術を紹介する。

## ■ オールフォトニクス・ネットワークを支えるネットワーク設計技術

22

光フルメッシュネットワークのネットワークの管理・制御の高度化に向けた要素技術として、膨大な数の光パスを効率的に収容するためのアーキテクチャ、トポロジ設計、波長設計技術について紹介する。

# IOWN構想に基づくオールフォトリクス・ネットワーク関連技術の取り組み

社会のデジタル化の急速な進展に伴い、近い将来さまざまな課題が顕在化してくることが想定されます。その中で、NTTはIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想を提唱し、パートナーの方々とともに新たなイノベーションを起こすべく多様な研究開発を進めています。本稿では、IOWN構想の3つの構成要素のうち、オールフォトリクス・ネットワークについて、その実現に向けて取り組んでいる関連技術を紹介し

いとう あらた  
伊藤 新

NTT情報ネットワーク総合研究所 所長

## はじめに

この十数年の間、インターネットの進展やスマートフォンの普及などが社会のあり方を大きく変え、いまや私たちが生活していくうえで必須の存在となっています。インターネットを利用することで生活環境は劇的に変化し、スマートフォン上で展開されるさまざまなサービスにより、プライベートだけでなくビジネスシーンを含めて私たちの生活や働き方は日々進化しています。またIoT (Internet of Things) の進展により、インターネットに接続される各種デバイスは爆発的に増えており、それに伴いインターネット上を流れるデータ量も急激に増加しています。これらに起因して、既存の情報通信システムの伝送能力と処理能力双方の限界や、IT関連機器のエネルギー消費量の増大などが大きな課題となりつつあります。さらに近年、情報処理産業の発展を支えてきたムーアの法則について今後の持続性に関する懸念が指摘されています。ムーアの法則は、「同じ面積当りの集積回路上のトランジスタ数は18カ月ごとに倍になる」というものですが、既存のトランジスタサイズは数 nm (ナノメートル) 単位まで

微細化が進んでおり、発熱の問題や製造上の物理限界が近づいています。

## What's IOWN

このような中、NTTではこれまでの情報通信システムを変革し、従来技術の限界および消費電力の壁を超えてネットワークの大幅なポテンシャル向上をもたらす革新的な情報処理基盤の実現をめざすIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想<sup>(1)</sup>を提唱し、さまざまなパートナーとともに活動を開始しています<sup>(2)</sup>。「エレクトロニクスからフォトリクスへ」そして結果としてもたらされる「デジタルからナチュラルへ」という2つの大きな変革により、環境に優しい持続的な成長、究極の安心・安全の提供、多様性に富んだ個と全体の最適化をめざしています。

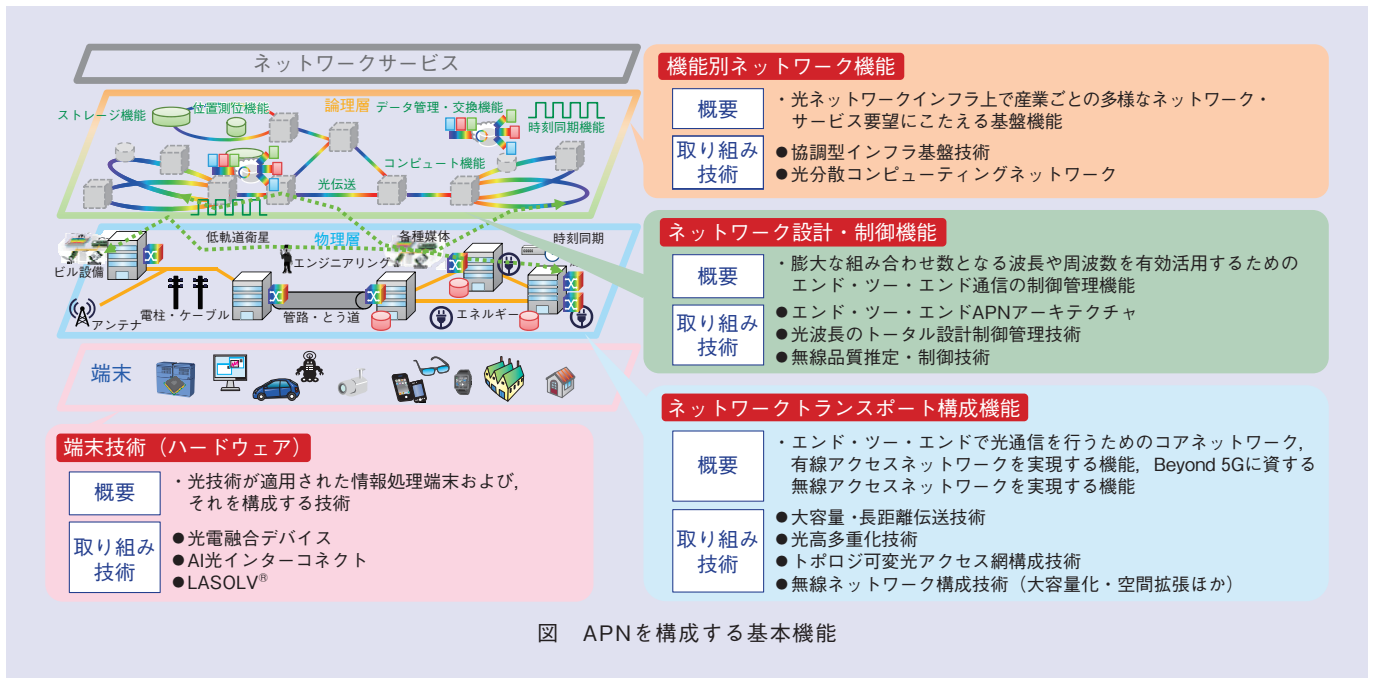
IOWNは、①オールフォトリクス・ネットワーク (APN: All Photonics Network)、②コグニティブ・ファウンデーション (CF: Cognitive Foundation)、③デジタルツインコンピューティング (DTC: Digital Twin Computing) の3つの要素で構成されます。本特集ではそのうち、情報処理基盤のポテンシャルを大幅に向上させる基本

的な要素であるAPNにおけるネットワーク関連技術について主な取り組みを紹介し

## What's APN

APNは、ネットワークに接続されるあらゆるデバイスを対象として、すべての情報伝送と中継処理をフォトリクススペースへ転換することで光の広帯域性・柔軟性を十分に活用し、端末・ユーザ・サービスごとに、多地点間にフルメッシュ接続された光パスを波長単位で提供するネットワークです。現在の通信システムでは、網内において複数回の光信号と電気信号の変換が必要ですが、APNでは電気信号を用いることなく光信号だけで通信を確立することを最終的なターゲットとしています。

APNでは情報ごとに異なる波長を割り当てることから、例えば8K120Pのような高精細なコンテンツを大量に送りながら、自動運転や遠隔手術などミッションクリティカルな通信を同時かつ超低遅延に提供することが可能となります。ベストエフォートのインターネット回線で提供されるサービスとは異なり、IOWNでは大容量かつ帯域保証された超低遅延サービスの提供が実現されます。



APNを構成する基本機能は4つに整理されます(図)。第1は、エンド・ツー・エンドで高速・高品質のデータ転送を行うための光フルメッシュネットワークおよび無線アクセスネットワークを実現する「ネットワークトランスポート構成機能」です。第2は、それらのネットワークを構築・運用する際に必要となる膨大な数の波長や周波数を効率的に収容するための「ネットワーク設計・制御機能」です。そして第3は、ネットワークリソースやコンピューティングリソースなどのICTリソースを最適に組み合わせ、さまざまなサービス要件を満たす専用環境を提供する「機能別ネットワーク機能」です。

また、上記機能を実現する装置・端末を構成するための核となる技術として、データ量あたりの低消費電力化・低遅延化を実現する光電融合デバイスをはじめとする「端末技術」が必須となります。

### APN実現に向けたネットワーク関連技術

APN実現のために、現在NTTではさまざまな研究開発を行っています。本特集では、その中でキー技術となる特徴的な4つのトピックスについて取り組みを紹介します。

新たな光伝送基盤に関する取り組みとして、波長分割多重と空間分割多重を組み合わせることでバックボーンネットワークの大容量化をめざす最先端デバイス・部材に関する超大容量光通信技術(トピック1)を取り上げます。ネットワークトランスポート構成機能に関連する取り組みとしては、無線部分の大容量化や無線エリア展開の自由度向上に向けた検討(トピック2)、およびトランスポート機能の大容量化や低遅延化を実現する光フルメッシュネットワーク構成技術(トピック3)を紹介します。最後に、ネットワーク設計・制御機能に関連する取り組みとして、大量の光パスをAPNに効率的に収容するためのネットワーク設計技

術の検討(トピック4)を紹介します。

#### 参考文献

- 1) <https://www.ntt.co.jp/news2019/1905/190509b.html>
- 2) <https://www.ntt.co.jp/news2019/1910/191031a.html>
- 3) 伊藤:“NTT R&Dフォーラム2019特別セッション 2030 (Beyond2020) を見据えた革新的ネットワーク,” NTT技術ジャーナル, Vol.32, No.1, pp.22-25, 2020.



伊藤 新

従来技術の限界や消費電力の壁を超えた革新的な情報処理基盤をめざしたIOWN構想、その構成要素であるオールフォトニクス・ネットワークの実現に向けた取り組みを鋭意進めています。

#### ◆問い合わせ先

NTT情報ネットワーク総合研究所  
企画部  
TEL 0422-59-2033  
FAX 0422-59-5600  
E-mail injousen-pb@hco.ntt.co.jp

# 超大容量光通信技術

指数関数的に増え続けるデータ通信需要に持続的かつ経済的にこたえていくため、既存光ファイバの容量限界を克服する空間分割多重伝送用の新たな光ファイバ技術、並びに現在の1波長当りのチャンネル速度を1桁以上拡大するテラビット級の高速光伝送技術の研究を進めています。新たな光ファイバ技術と高速光伝送技術の融合により、現在の光ファイバの100倍以上のポテンシャルを有する新たな光伝送基盤の実現をめざします。

なかじま かずひで<sup>†1</sup> みやもと ゆたか<sup>†2</sup>

中島 和秀 / 宮本 裕

のさか ひでゆき<sup>†3</sup> いしかわ みつてる<sup>†4</sup>

野坂 秀之 / 石川 光映

NTTアクセスサービスシステム研究所<sup>†1</sup>

NTT未来ねっと研究所<sup>†2</sup>

NTT先端集積デバイス研究所<sup>†3</sup>

NTTデバイスイノベーションセンタ<sup>†4</sup>

## 背景

データ通信容量は年率数10%の割合で増加し続けており、5G（第5世代移動通信システム）やIoT（Internet of Things）の本格導入に伴い今後も指数関数的に増大していくと考えられます。2020年代の後半には現在利用している光ファイバ（SMF: Single-Mode Fiber）の容量限界が顕在化すると懸念されており、従来の波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）に加え、新たに空間分割多重（SDM: Space Division Multiplexing）を併用することで、現在の容量限界を克服しようとする研究を推進しています<sup>(1)</sup>。本稿では、SDM伝送用の光ファイバ技術と、毎秒テラ（10<sup>12</sup>）ビットにおよぶ高速光伝送技術を用いた、超大容量伝送技術の研究について紹介します。

## SDM光ファイバ技術

図1に示すように、既存のSMFの容量限界を超えるためのSDM光ファイバは、コアおよびモード（光の種類）数を複数化することで実現でき、一般に、コア多重を用いるタイプをマルチコア光ファイバ（MCF: Multi-Core

Fiber）、モード多重を利用するタイプを数モード光ファイバ（FMF: Few-Mode Fiber）と呼びます。さらに、N個のコアとM個のモードを併用した数モード・マルチコア光ファイバ（FM-MCF）では、光ファイバ1心の伝送容量をN×M倍にまで拡張できると考えられます。

図2(a)の断面写真に示すように、既存SMFと同じ細さ（直径125 μm）で製造可能な標準クラッド径内に4つのコアを持つMCFを実現しました。直径を既存SMFと等しくしたことにより、現在のケーブル・コネクタ技術の流用が容易になるだけでなく、本

MCFの各コアは既存SMFとの完全互換を有するため、現用光伝送システムとの整合性も向上でき、実用的であると考えられます。実際に、各々のコアの光学的な性能を既存のSMFと同一としつつ、コア間の漏れ込み（クロストーク）を十分に低減した100 km長の4コアファイバを共通の仕様でマルチベンダで試作し、毎秒100テラビット以上の伝送容量を300 km以上にわたり光増幅中継伝送する原理実験に成功しています<sup>(2)</sup>。NTT R&Dフォーラム2019では、これらの技術をベースとした4コアファイバを用いた動態展示を行いました。

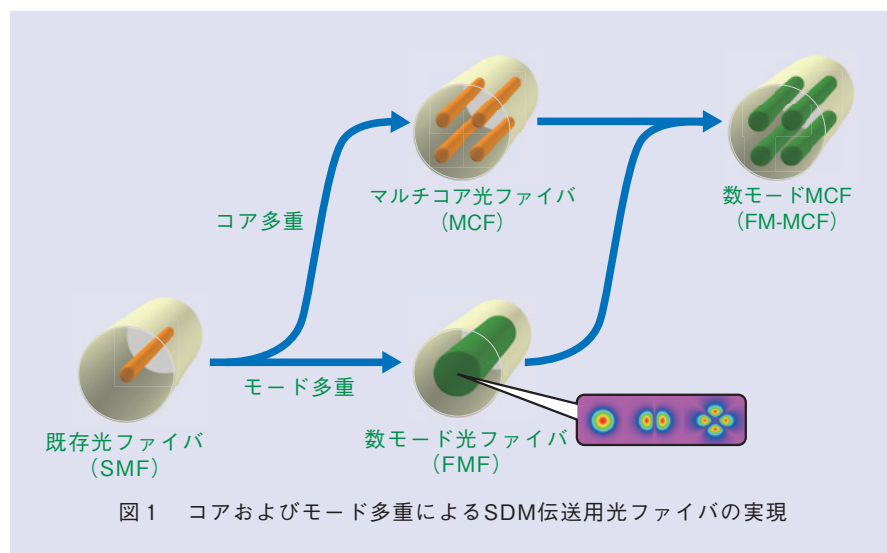
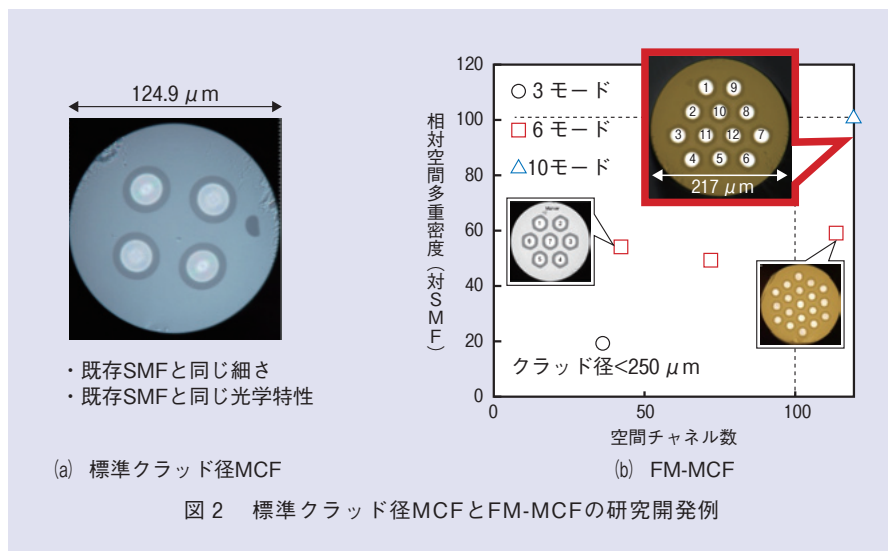


図1 コアおよびモード多重によるSDM伝送用光ファイバの実現



次に、マルチコアファイバの各コアをマルチモードとしたFM-MCFを伝送路とすることで、将来的に空間多重度を100倍以上に拡大できる可能性についての研究例を図2(b)に示します。横軸がコア数×モード数で得られる空間チャンネル数を、縦軸が既存SMFを基準とした相対的な空間多重密度を表します。図中の丸、四角、および三角のプロットは、各コアで伝搬可能なモード数を表し、それぞれ3、6、および10モードに対応します。これまでに、6モードを使用した検討例として、42(7コア×6モード)、および114(19コア×6モード)の空間チャンネル数を実現しました<sup>(3)</sup>。しかし、これらのFM-MCFにおける相対密度は既存SMFの約50倍強にとどまっていた。そこで私たちは、1コアのモード数を10に拡張し、12コア×10モードで世界最高の120の空間チャンネル数を実現すると同時に、相対密度も100を上回る特性を実現しました<sup>(4)</sup>。これは、コア多重とモード多重のベストミックスにより、空間多重数と空間

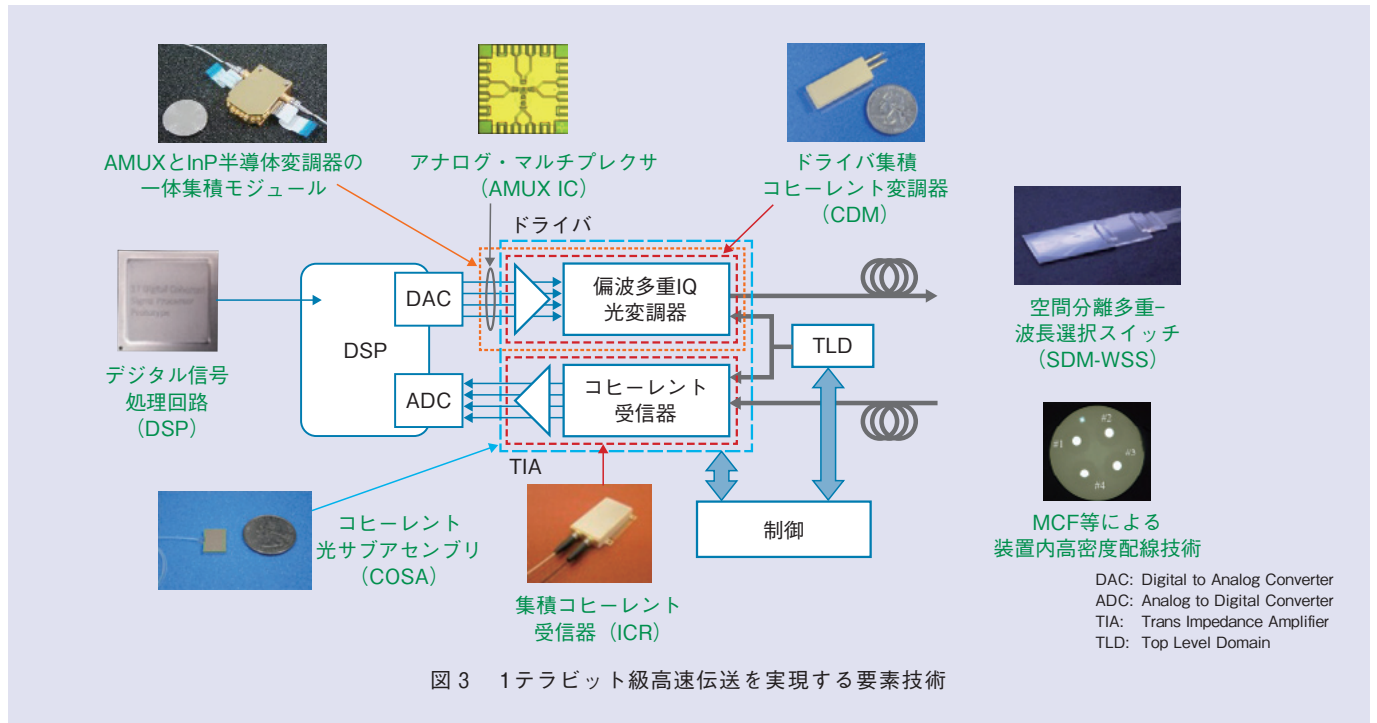
利用効率の両面で、既存SMFの100倍のポテンシャルが実現できることを世界で初めて実証した研究成果です。上述したFM-MCFシステムの実現に向けては、FM-MCFの直径を既存SMFの約1.5倍程度(200 $\mu$ m前後)に拡大する必要があり、太径光ファイバに対応可能な製造性の向上やケーブル化に向けた技術検討が必要です。また、モード多重された信号を受信側で安定にモード分離する大規模デジタル信号処理の技術検討も合わせて進めていきます。

### テラビット級高速光伝送技術

光通信の大容量化を経済的に実現するには、1波長当りのチャンネル容量を拡大することが重要となり、シンボル速度の高速化や高次多値デジタル変復調技術の適用が不可欠となります。1テラビット級光伝送に必要な超高速光送受信部の要素技術を図3に示します。超高速光送受信部は、主として超高速デジタル信号処理回路(DSP-ASIC: Digital Signal Processor-

Application Specific Integrated Circuit)、光信号と電気信号の変換を行う超高速光フロントエンド回路から構成されます。現在、チャンネル容量600 Gbit/sまで動作するデジタル信号処理技術や、ドライバ集積コヒーレント変調器(CDM: Coherent Driver Modulator)と集積コヒーレント受信器(ICR: Integrated Coherent Receiver)から構成される光フロントエンド回路が実用段階にあります。また、最近、これらの要素技術を用いたフィールド環境下での長距離伝送実験に成功しています<sup>(5)</sup>。一方、データセンタインターコネクションやメトロネットワーク等に向けては、光送受信回路の小型化・低電力化が求められています。超高速光フロントエンド回路技術の飛躍的な小型化の実現に向け、波長可変光源を除くすべての光回路を1つのチップに集積したコヒーレント光サブアセンブリ(COSA: Coherent Optical SubAssembly)の研究開発を進めています。

さらに、1波長当り1 Tbit/s容量を超える高速チャンネル伝送の実現に向けての研究開発も進めています<sup>(6)</sup>。最近では、光フロントエンド回路技術の新しい光・電子集積化構成のアプローチをとることで、既存のSMFを用いて、1波長当り1 Tbit/s容量の長距離波長多重伝送実験に世界で初めて成功しています。また100 GHz超の帯域を有するアナログ・マルチプレクサ集積回路(AMUX IC: Analog Multiplexer Integrated Circuit)と広帯域InP半導体変調器を一体モジュールに集積することで、世界最高速のチャンネル容量1.3 Tbit/s伝送にも成功しました。こ



これらの要素技術は、前述したシングルモードのコアを持つMCFにおいても、そのまま伝送することが可能です。

将来の大容量かつ柔軟性の高い光ネットワークのためには、空間および波長領域で多重された信号光の選択切替を実現する、空間多重-波長選択光スイッチ (SDM-WSS: SDM-Wavelength Selective Switch) 集積技術、高効率波長変換技術、およびMCF等を用いた装置内高密度配線技術等の要素技術群のさらなる発展が期待されており、今後も研究開発を加速していきます<sup>(1), (7)</sup>。

### 今後の展望

今後は、標準クラッド径MCFおよびその周辺技術の確立を進めると同時に、テラビット級高速光伝送技術により、既存SMFの100倍超のポテンシャルを有する超大容量光伝送基盤の実現

をめざします。

### 参考文献

- (1) 特集：“将来の大容量光ネットワークを支える空間多重光通信技術の最先端,” NTT技術ジャーナル, Vol.29, No.3, pp.6-36, 2017.
- (2) <https://www.ntt.co.jp/news2017/1708/170808b.html>
- (3) T. Sakamoto, K. Saitoh, S. Saitoh, K. Shibahara, M. Wada, Y. Abe, A. Urushibara, K. Takenaga, T. Mizuno, T. Matsui, K. Aikawa, Y. Miyamoto, and K. Nakajima: “High Spatial Density Six-mode Seven-core Fibre for Repeated Dense SDM Transmission,” Proc. of ECOC2017, ThPDDA.6, Copenhagen, Denmark, Sept. 2017.
- (4) T. Sakamoto, K. Saitoh, S. Saitoh, Y. Abe, K. Takenaga, A. Urushibara, M. Wada, T. Matsui, K. Aikawa, and K. Nakajima: “120 Spatial Channel Few-mode Multi-core Fibre with Relative Core Multiplicity Factor Exceeding 100,” Proc. of ECOC2018, We3E.5, Roma, Italy, Sept. 2018.
- (5) <https://www.ntt.co.jp/news2019/1906/190619a.html>
- (6) <https://www.ntt.co.jp/news2019/1903/190307a.html>
- (7) 特集：“将来の大容量通信インフラを支える超高速通信技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.31, No.3, pp.10-31, 2019.



(左から) 中島 和秀/ 宮本 裕/  
野坂 秀之/ 石川 光映

既存技術の限界を打破するマルチコア光ファイバ技術と、テラビット級の高速光伝送技術の確立により、現在から将来にわたる社会インフラを持続的に支える超大容量光伝送基盤を実現します。

### ◆問い合わせ先

NTTアクセスサービスシステム研究所  
 アクセス設備プロジェクト  
 先端媒体グループ  
 TEL 029-868-6442  
 FAX 029-868-6440  
 E-mail kazuhide.nakajima.gr@hco.ntt.co.jp

# アナログRoFを活用した 多様な高周波数帯無線システムの効率的収容

高周波数帯無線システムでは大容量無線伝送が可能となりますが、無線基地局を高密度に展開する必要があり、多様化するニーズにこたえるため無線システム数も増加することを想定すると、設置すべき無線基地局数は爆発的に増加すると想定されます。NTTアクセスサービスシステム研究所では、無線基地局数や運用稼働の抜本的な削減のため、アナログRoF (Radio-over-Fiber) を活用し、複数の高周波数帯無線システム間で無線設備を共用可能とするシステム構成を提案しています。本稿では、提案するシステム構成の詳細と、その要素技術である遠隔ビームフォーミング技術について紹介します。

いとう こうた すが みずき  
伊藤 耕大 /菅 瑞紀  
しらと ゆうし きた なおき  
白戸 裕史 /北 直樹  
おにざわ たけし  
鬼沢 武

NTTアクセスサービスシステム研究所

## 背景

無線伝送容量のさらなる拡大のためには、広い帯域幅を確保できるミリ波<sup>\*1</sup>などの高周波数帯の電波を利用することが効果的です。しかし、電波は高周波数になるほど伝搬距離が短くなるため、高周波数帯無線システムで広いエリアをカバーするためには、無線基地局を高密度に設置する必要があります。また、従来は無線システムごとに無線基地局を設置する必要がありました。そのため、多様化するニーズに伴って高周波数帯無線システムが多様化していくと、膨大な数の無線基地局が設置されることになってしまいます。

そこで、設置すべき無線基地局数や運用稼働の抜本削減を目的とし、複数

の無線システムが無線基地局を共用できるようなシステム構成を提案しています。

本稿では、提案するシステム構成と、このシステム構成で高周波数帯無線システムを収容するとき必須となる遠隔ビームフォーミング技術について紹介します。

## アナログRoFによる 機能分離・張出局簡易化

アナログRoF (Radio-over-Fiber)<sup>\*2</sup>とは、光信号を無線信号で強度変調し、無線信号のかたちをした光信号を光ファイバ伝送する技術で、伝送した光信号をO/E (Optical-to-Electrical) 変換<sup>\*3</sup>するのみで元の無線信号を取り出すことができます (図1)。

このアナログRoFを適用することで、従来の無線基地局の機能を集約局 (信号処理部) と張出局 (アンテナ部) に分離することができます (図2)。従来の無線基地局は、アンテナ・増幅器・E/O、O/E変換・信号処理という機能を持っていました。アナログRoFを適用して信号処理機能を集約局

- \*1 ミリ波：波長が1~10 mmと非常に短い電波のことです。周波数は30~300 GHzになります。
- \*2 RoF：無線信号の波形情報を光ファイバ伝送する技術です。アナログRoFは波形をそのままアナログ信号として、デジタルRoFは波形をデジタル信号に変換してから光ファイバ伝送します。アナログRoFは、デジタルRoFに比べ、A/D (Analogue-to-Digital)、D/A (Digital-to-Analogue) 変換が不要で、必要な光伝送帯域も狭くて済むというメリットがあります。
- \*3 O/E変換：光信号を電気信号に変換することで、一般にフォトダイオードが用いられます。

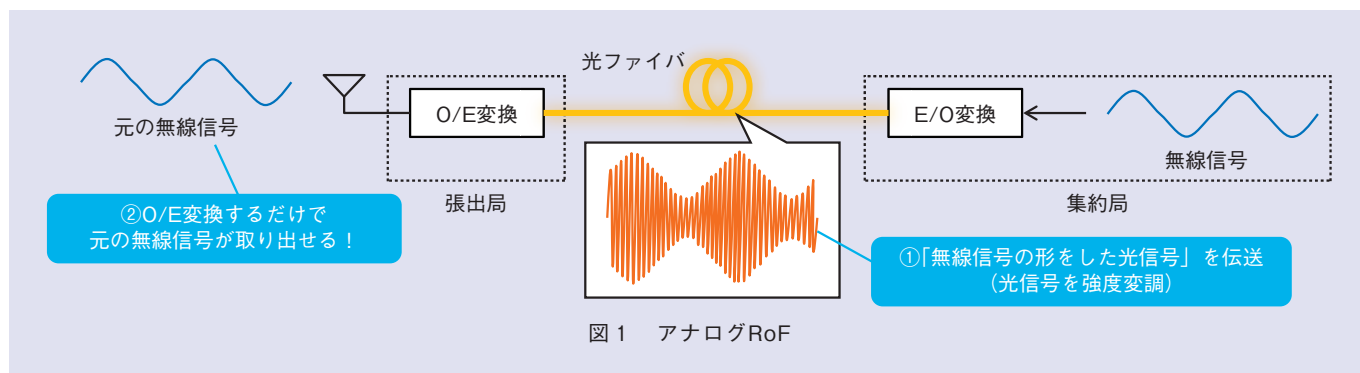


図1 アナログRoF



に集約することで、張出局の機能簡易化が可能になります。これにより、張出局の小型化・低消費電力化による設置性や経済性の向上が期待できます。

また、無線システム依存の信号処理機能を集約局に集約することで、張出局には無線システムに依存しない共通機能のみを残すことができます。そのため、アンテナや増幅器の対応する周波数の範囲であれば、複数の無線システム間で張出局を共用することが可能になります。

さらに、無線システムの新設や更改などの対応も、集約局側のオペレーションのみで行うことができるようになります。効率的な無線システムの展開・

運用が可能になります。

これらにより、無線基地局数や運用稼働・コストの抜本的な削減が期待できます。

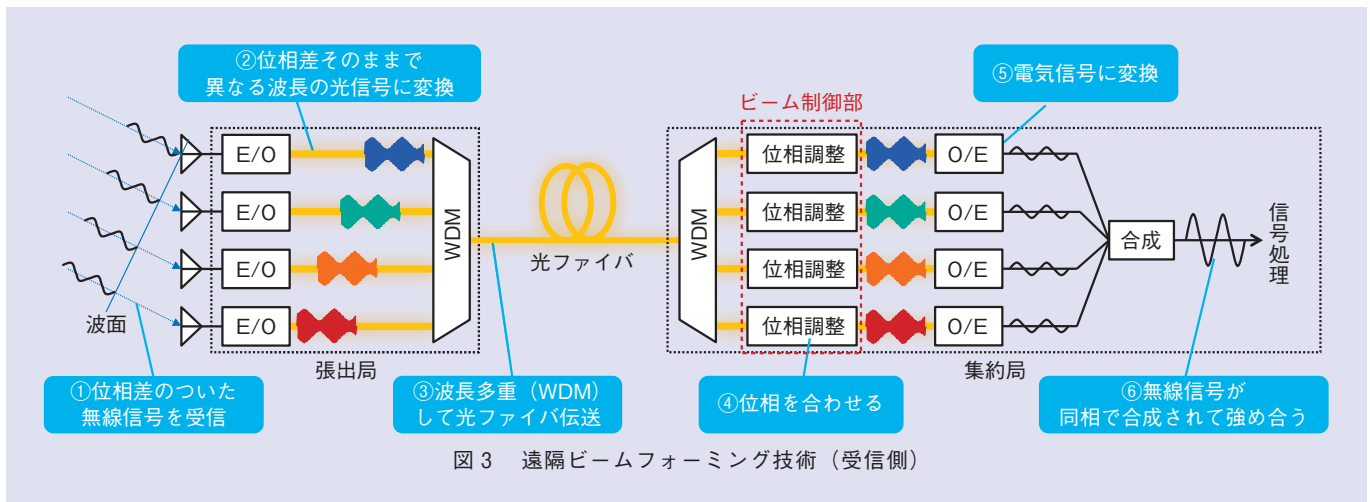
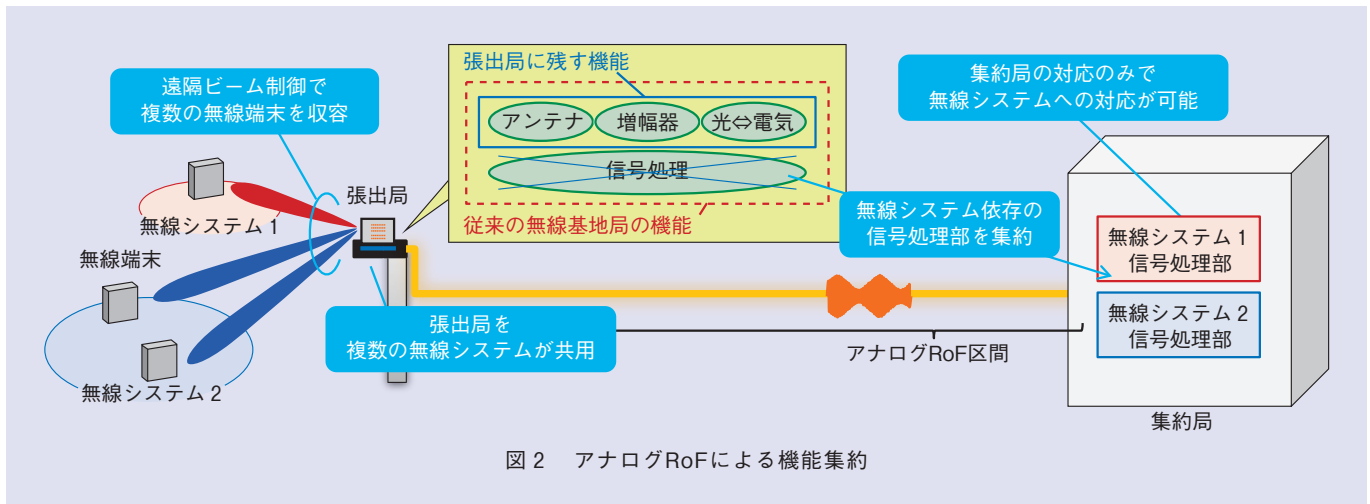
### 遠隔ビームフォーミング技術

伝搬距離の短い高周波数帯無線システムでは、ビームフォーミング\*4が必須となります。従来の無線基地局は、信号処理部にこのビームフォーミング機能を持っていました。アナログRoFによる機能分離・張出局簡易化を行った場合、信号処理機能を持たない張出局のビームフォーミングをどう行うかが課題となります。そこで、張出局が形成するビームを集約局で遠隔に制御

することができる遠隔ビームフォーミング技術を提案し<sup>(1),(2)</sup>、検討を進めてきました。

提案する遠隔ビームフォーミング技術について受信側を例に説明します(図3)。複数のアンテナ素子を持つ張出局に無線信号が到来すると、各アンテナ素子は位相差のついた無線信号を受信します。この位相差を保持したまま、各アンテナ素子で受信した無線信

\*4 ビームフォーミング：複数のアンテナ素子を並べたアレイアンテナを利用し、指向性を電氣的に制御する技術です。各アンテナ素子が送受信する電波の位相を制御することで、特定方向に向かう電波を強めて送信したり(送信ビーム)、特定方向から到来する電波を強めて受信したり(受信ビーム)することができます。



携しながら実用化に向けた検討を進めていきます。

■参考文献

- (1) K. Ito, M. Suga, Y. Shirato, N. Kita, and T. Onizawa: "A novel centralized beamforming scheme for radio-over-fiber systems with fixed wavelength allocation," IEICE Communications Express, Vol.8, No.12, pp.584-589, 2019.
- (2) M. Suga, K. Ito, Y. Shirato, N. Kita, and T. Onizawa: "Fiber Length Estimation Method for Beamforming at millimeter Wave Band RoF-FWA System," IEICE Communications Express, Vol.8, No.11, pp.428-433, 2019.
- (3) T. Nagayama, K. Furuya, S. Akiba, J. Hirokawa, and M. Ando: "Millimeter-wave antenna beam forming by radio-over-fiber with 1.3 μm light source and variable delay line," OECC and PGC2017, pp. 1-2, Singapore, July-Aug. 2017.
- (4) M. Tadokoro, T. Taniguchi, and N. Sakurai: "Optically-controlled beam forming technique for 60 GHz-ROF system using dispersion of optical fiber and DFWM," OFC/NFOEC 2007, pp. 1-3, Anaheim, U.S.A., March 2007.
- (5) S. Akiba, M. Oishi, Y. Nishikawa, K. Minoguchi, J. Hirokawa, and M. Ando: "Photonic architecture for beam forming of RF phased array antenna," OFC 2014, pp. 1-3, San Francisco, U.S.A., March, 2014.



(左から) 北 直樹/ 菅 瑞紀/  
伊藤 耕大/ 白戸 裕史/  
鬼沢 武

通信トラフィックの増加に対応するため、高周波数帯無線システムの必要性は高まってくると考えています。その導入を簡単に・低コストで行えるよう、さらなる研究開発に取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTTアクセスサービスシステム研究所  
無線エントランスプロジェクト  
基幹方式グループ  
TEL 046-859-3366  
FAX 046-859-4311  
E-mail ekig-p-ml@hco.ntt.co.jp



図4 展示の様子

号をそれぞれ異なる波長の光信号に変換し、波長多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) して集約局まで光ファイバ伝送します。集約局では、波長多重された信号を波長ごとに分波し、これらの光信号の位相を合わせ、O/E変換して合成します。すると、元の無線信号が位相の合った状態で合成されて強め合い、無線信号の到来方向に受信ビームを形成することができます。図3では光信号に対して位相調整を行っています。O/E変換した後の電気信号に対して位相調整を行い合成することも可能です。また、送信ビームの形成も同じ原理で行うことが可能です。このとき、張出局は受けた信号のO/E, E/O変換をしているだけで、一切の制御を必要としていません。

従来の遠隔ビームフォーミング技術としては、各アンテナ素子に別々の光ファイバ (マルチコアファイバの場合は別々のコア) を割り当てる方式<sup>(3)</sup>や、波長分散<sup>\*5</sup>を利用し、各アンテナ素子に割り当てる波長を変えることでビー

ム方向を切り替える方式<sup>(4),(5)</sup>がありました。提案する遠隔ビームフォーミング技術は、各アンテナ素子に割り当てる波長を固定することで従来技術の課題を克服し、①使用する光ファイバ数 (コア数) は1本のみ、②光ファイバの距離情報が必要でない、③張出局の光フィルタの制御が不要、④高周波数帯・長距離光ファイバを適用しても無線信号の形式に制約がない、といったメリットを持っています。

この遠隔ビームフォーミング技術により、高周波数帯無線システムの通信品質確保はもちろん、張出局が複数の無線端末を空間多重 (SDM: Space Division Multiplexing) して同時に収容することも可能になります。さらに、ビーム方向を遠隔で制御できるので、張出局の設置時に物理的にアンテナ方向を調整する必要もありません。

NTT R&Dフォーラム2019では、受信系の遠隔ビームフォーミング技術を動態デモで紹介しました (図4)。

今後の展望

今後は、遠隔ビームフォーミング技術の改良により波長利用率向上をめざすとともに、光通信の研究部とも連

\*5 波長分散: 光ファイバ中を伝搬する光の速度が波長によって異なるため、伝搬時間に差が生じる現象です。光ファイバの屈折率が波長依存性を持つために起こります。

# オールフォトリクス・ネットワークを支える 光フルメッシュネットワーク構成技術

かわはら ひろき<sup>†1</sup> せき たけし<sup>†1</sup> すだ さちお<sup>†1</sup>  
河原 光貴 /関 剛志 /須田 祥生

なかがわ まさひろ<sup>†1</sup> まえだ ひでき<sup>†1</sup> もちだ やすひろ<sup>†2</sup>  
中川 雅弘 /前田 英樹 /持田 康弘

つきしま ゆきお<sup>†2</sup> しらい だいすけ<sup>†2</sup> やまぐち たかひろ<sup>†2</sup>  
築島 幸男 /白井 大介 /山口 高弘

いしづか みか<sup>†3</sup> かねこ やすはる<sup>†3</sup> こしぢ こうじゅん<sup>†3</sup>  
石塚 美加 /金子 康晴 /越地 弘順

ほんだ かづあき<sup>†4</sup> かない たくや<sup>†4</sup> はら かずたか<sup>†4</sup>  
本田 一暁 /金井 拓也 /原 一貴

かねこ しん<sup>†4</sup>  
金子 慎

NTTネットワークサービスシステム研究所<sup>†1</sup>  
NTT未来ねっと研究所<sup>†2</sup>  
NTTネットワーク基盤技術研究所<sup>†3</sup>  
NTTアクセスサービスシステム研究所<sup>†4</sup>

本稿では、超高臨場感サービス等の提供を支える多様かつ大容量なコンテンツの超低遅延な伝送を実現する光フルメッシュネットワークのコンセプトと、その実現に必要な技術を紹介し、また、光フルメッシュネットワークのコンセプトを具現化した、大容量光伝送システムにおける8K非圧縮映像伝送のデモンストラーションを紹介します。

## はじめに

NTT研究所では、超高精細映像情報に加えて、触覚や聴覚といった五感情報を含む多様なコンテンツをリアルタイムに共有し、時空間の壁を越えた超高臨場感サービス<sup>(1)</sup>の提供をめざしています。しかし、このようなサービスを多くの人に利用していただくためには、多様かつ大容量なコンテンツを低遅延で伝送できるネットワークが必要になります。このようなネットワークを提供するため、IOWN構想<sup>(2)</sup>の一環として、フォトリクス技術をベースにした革新的ネットワークであるオールフォトリクス・ネットワーク(APN)の実現をめざしています。NTTネットワークサービスシステム研究所、NTT未来ねっと研究所、NTTネットワーク基盤技術研究所、NTTアクセスサービスシステム研究所では、APNのトランスポート機能の大容量化、低遅延

化を実現する光フルメッシュネットワークの検討に取り組んでいます。

## 光フルメッシュネットワークのコンセプト

従来のネットワークでは、送信したいコンテンツをネットワークに収容する際、通信回線容量による制約でデータ圧縮処理が必要であったり、IPプロトコルによるルーティング制御のためIPパケットに変換したり、多重・スイッチ制御のためイーサネットフレームに収容していました。これにより、データ圧縮による遅延や、パケットの待ち合わせ処理で発生する遅延が発生、従来の端末間通信における遅延の支配的要因となっていました。

一方、図1に示す光フルメッシュネットワークは、光バックボーンネットワークおよび光アクセスネットワークを、パケット変換や多重・スイッチ制御といった電気処理を極小化した

フォトリックゲートウェイ(Photonic GW)と呼ぶ光ノードで中継し、サービスごとに光パスをエンド・ツー・エンドで提供します。これにより、データ圧縮時の遅延やパケットの待ち合わせ処理における遅延が解消され、大容量かつ超低遅延なネットワークを提供できます。

## 光フルメッシュネットワーク構成技術

光フルメッシュネットワークの実現に向け、以下の3つの技術を中心とした光フルメッシュネットワーク構成技術を検討しています。

(1) 1Pbit/s級の超大容量光伝送システム構成技術

1Pbit/s級のシステム容量を有する超大容量光伝送システムの実現をめざし、光チャネル高速化技術、複数の波長帯における波長多重信号伝送を行うマルチバンド伝送技術、マルチコア

ファイバ等の新規光ファイバ上で光信号伝送させる空間多重伝送技術，を組み合わせたシステム構成技術の検討を進めています。このようなシステム構成技術を支えるデバイス技術の詳細は，本特集記事『超大容量光通信技術』を参照してください。

(2) IP非依存で伝送するプロトコルフリーメディア伝送基盤技術  
非圧縮映像・音声，さらには五感情報や感情に至るあらゆるメディア情報を，プロトコルやインターフェース種別やフォーマットを意識させないエレ

メントリーストリームとして，IP非依存で伝送する検討を進めています。SDI (Serial Digital Interface)/HDMI (High-Definition Multimedia Interface) ケーブルを流れる4K/8K高精細映像信号，MADI (Multichannel Audio Digital Interface)/AES (Audio Engineering Society) ケーブルを流れる音声信号，ストレージ/メモリとネットワークインターフェース間を流れるPCI (Peripheral Component Interconnect) バス信号などを光信号に直取し，メディアの伝送路をオール光化して，IP

による経路制御（ルーチング）を必要としない光のパスでエンド・ツー・エンドを直接結ぶことで，大容量かつ超低遅延なメディア伝送を実現します。手始めに，同軸ケーブルを用いて非圧縮映像・音声を伝送するSDIを光パスに収容するインターフェース技術の開発を進めています。SDIは放送局内の設備の配線で使用されていますが，本技術ではユーザに伝送プロトコルや経路制御を意識させることなく，局内の配線を行うような感覚で，遠隔地との接続を提供できるようになると考えてい

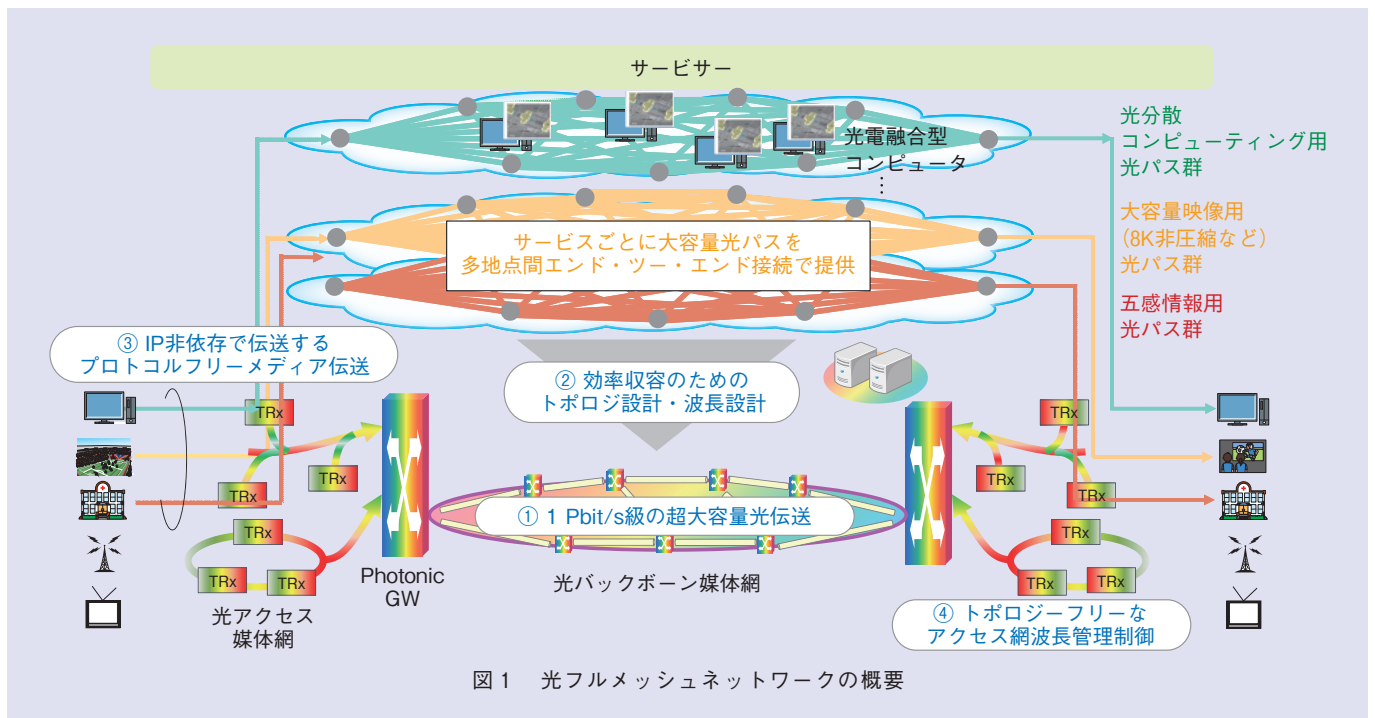


図1 光フルメッシュネットワークの概要

ます。現在、スポーツ等のイベントを放送局外から中継する場合には、編集スタッフ・編集機材を積んだOBVAN（中継車）のイベント会場への派遣が必要ですが、本技術によって、イベント会場から放送局までの光の直通パスで素材映像を伝送しながらオンライン編集を行うといったような効率的な制作ワークフロー（リモートプロダクション）の現実味が増すことになるでしょう。そのような、これまでにないアプリケーションの開拓をめざします。

### (3) トポロジフリーなアクセス系 波長管理制御技術

あらゆるユーザ装置にエンド・ツー・エンドで光パスを提供するAPNを実現するために、ユーザ装置が送受信する波長を光パスごとに遠隔管理制御することが必要となります。これに対して、アクセス面とローカルフルメッシュ面を接続するPhotonic GWの主要機能の1つとして、アクセス面の波長管理制御の検討を進めています。伝送媒体を共有する光パス間で波長の重複が生じないように、Photonic GWは、波長の割当を行う上位のシステムと連携して各々のユーザ装置へ波長を払い出し、ユーザ装置に対する波長制御指示、常時波長監視を行います。ユーザ装置は、Photonic

GWから通知される波長制御指示に従って、光トランシーバの波長を設定します。Photonic GWからユーザ装置への波長制御指示の方法として、ユーザ信号と干渉しない低周波数帯に管理制御信号をAMCC（Auxiliary Management and Control Channel）として重畳して同一波長で通知することを検討しています。AMCCを用いることにより、通信プロトコルや光変調方式、さらにはネットワークポロジに依存せずに、どんなユーザ装置でも光ファイバに接続すればすぐにつながる光ネットワークの実現をめざします。

### デモンストレーション：大容量光伝送システムにおける8K非圧縮映像伝送

私たちは、これらの技術に基づき、光フルメッシュネットワークの有効性を示すデモンストレーションを実施しました。まず、光フルメッシュネットワークを支える大容量光伝送システムとして、ファイバ1本当たり0.24 Pbit/sのシステム容量（現行商用システムの約30倍のシステム容量）を有する伝送実験系を構築しました。本システムの実現にあたり、光チャネル高速化技術として600 Gbit/s/λ光信号をリアルタイムに送受信可能な世界最先端のトランスポンダを試作しました。また、図

2に示すように、生成された600 Gbit/s/λ光信号をC帯とL帯という2つの伝送波長帯に最大100波長分を高密度波長多重により配置しました。さらに、4つのコアを有するマルチコアファイバを試作し、すべてのコアを用いて波長多重信号を伝送させる空間多重伝送技術を適用しました。これらのキー技術の組み合わせにより、大容量光伝送システムを実現しています。

この光伝送システム上で、600 Gbit/s/λの光パスに8K映像コンテンツを収容して伝送しました。大容量光パスを利用することにより、8K映像のリアルタイム非圧縮伝送が可能になりました。比較のために同じ光パスに収容した8Kの圧縮映像と比べて、画質劣化なくおよそ30分の1の低遅延性を示しました。非圧縮で伝送された8K映像 **図3**（右）は、圧縮映像よりも高品質・低遅延であることを示しています。IP非依存のメディア伝送技術の研究開発を進めることによってさらなる低遅延化が可能であると考えています。

### 今後の展望

本稿では、多様かつ大容量なコンテンツの超低遅延な伝送を実現する光フルメッシュネットワークのコンセプトと必要な技術を紹介しました。光フルメッシュネットワークは、例えば、金

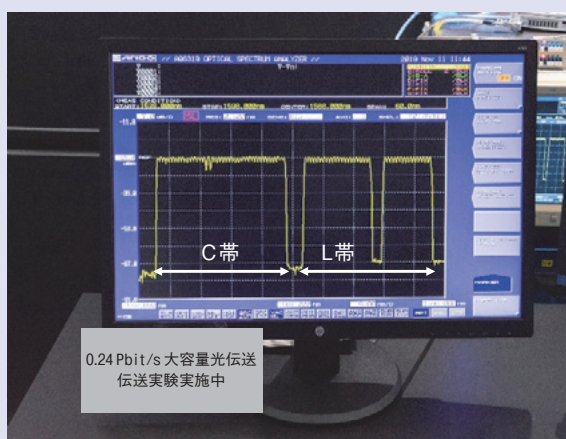


図2 大容量伝送システムの光スペクトル



図3 8K映像コンテンツの伝送結果

技術の早期の確立をめざしています。

■参考文献

- (1) 阿久津・南・日高：“超高臨場感通信技術 Kirari! Beyond 2020,” NTT技術ジャーナル, Vol.30, No.10, pp.12-15, 2018.
- (2) [https://www.ntt.co.jp/RD/techtrend/pdf/NTT\\_TRFSW\\_D.pdf](https://www.ntt.co.jp/RD/techtrend/pdf/NTT_TRFSW_D.pdf)



(上段左から) 前田/ 河原/ 須田/ 関/ 中川/  
 築島/ 白井/ 山口/ 持田  
 (下段左から) 石塚/ 越地/ 金子/ 金井/  
 原/ 金子/ 本田

光フルメッシュネットワークの実現に必要な要素技術を実用化のレベルまで磨き上げるだけでなく、多くのユーザにどのように新たな価値を提供できるのかも併せて考え続けていきたいと思っています。

◆問い合わせ先

NTTネットワークサービスシステム研究所  
 ネットワーク伝送基盤プロジェクト  
 TEL 0422-59-6721  
 FAX 0422-59-4656  
 E-mail hiroki.kawahara@hco.ntt.co.jp

融系、医療系などの、低遅延性が求められるネットワークに対する適用が考えられ、これにより、帯域や遅延に律

速されないストレスフリーな通信を提供できます。今後、適用領域におけるネットワーク要件を考慮しつつ、要素

# オールフォトニクス・ネットワークを支える ネットワーク設計技術

本稿では、光フルメッシュネットワークのネットワークの管理・制御の高度化に向けた要素技術として、膨大な数の光パスを効率的に収容するためのアーキテクチャ、トポロジ設計、波長設計技術について紹介します。また、これらの技術を適用したシミュレーションのデモンストレーションを紹介します。

いづか み か かね こ やすはる  
石塚 美加 / 金子 康晴

こしち こうじゅん せ と さぶろう  
越地 弘順 / 瀬戸 三郎

やすかわ せいしょう  
安川 正祥

NTTネットワーク基盤技術研究所

## はじめに

NTTネットワーク基盤技術研究所では、オールフォトニクス・ネットワーク（APN）の実現に向けたネットワーク設計技術の検討に取り組んでいます。

現状のネットワークでは、複数のユーザやサービスが、1つの光パスを共有しているのに対し、APNでは、ユーザやサービスごとに光パスを割り当てることで高品質・低遅延を実現しています。ユーザやサービスごとに光パスを割り当てるといことは、膨大な数の光パスが波長を要求することを意味しています。しかし、大規模ネットワークにおいて波長を効率的に割り当てるのは難しいことが知られています<sup>(1)</sup>。

そこで、私たちは、さまざまな最適化手法を組み合わせることにより、膨大な数の光パスを効率的にネットワークに収容することを可能にするネットワーク設計技術の検討を進めています。

## 光フルメッシュネットワークの設計の課題

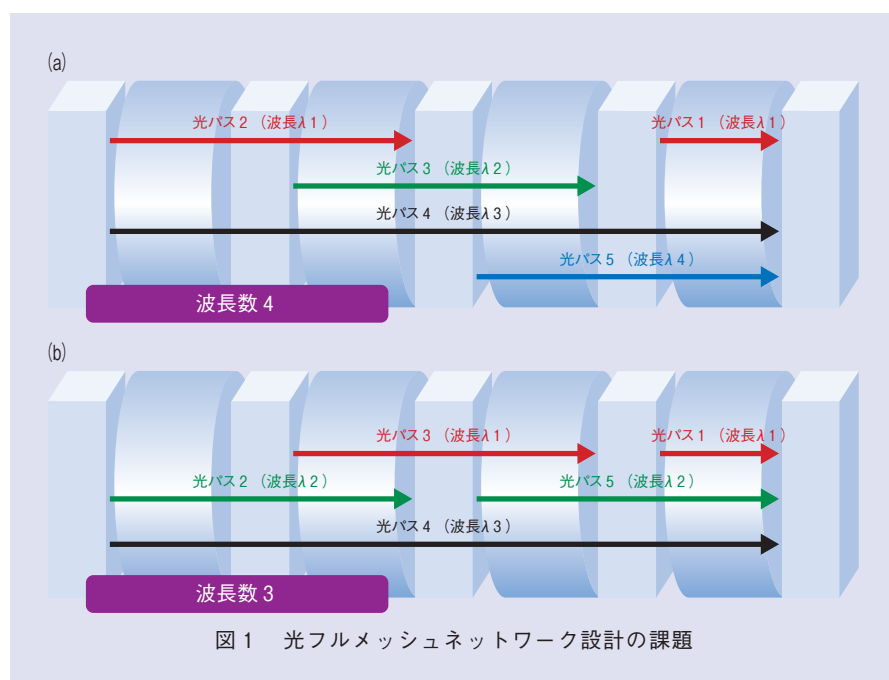
光パスに対して波長を割り当てる際には、エンド・ツー・エンドで同一の波長を割り当てる必要があります。ま

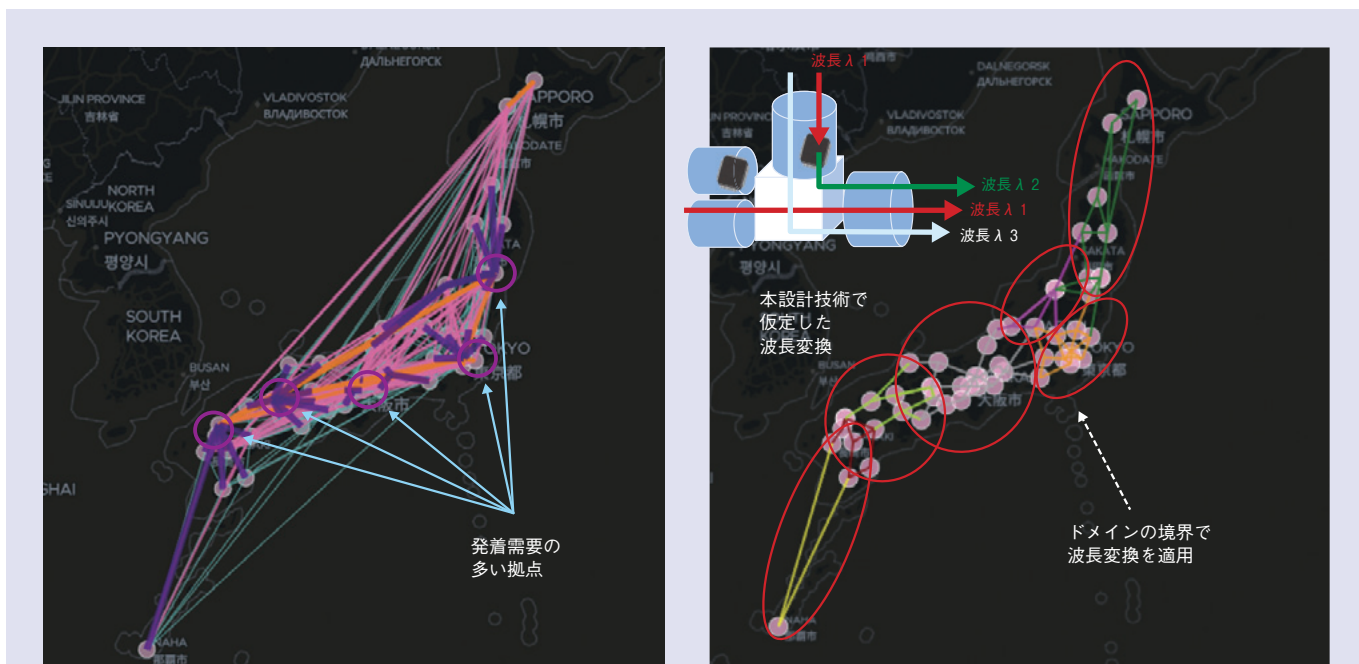
た、同一リンクの中では、1つの波長は1つの光パスにのみ割り当てられます。例えば、図1 (a)において、光パス#3に対して波長を割り当てる際に、リンクAでは波長#1は未使用ですが、リンクBでは使用しているため、リンクAの波長#1は未使用のまま、波長#2を割り当てることになります。このように、光パスに対して波長を逐次割り当てていくと波長のフラグメント化が発生します。しかし、波長の割り当てを図1 (b)のようにする

ことにより、必要となる波長数を減らすことができます。つまり、需要予測技術と組み合わせ、需要を見越した波長割当のルールを決めることにより、光パスを効率的に収容することが可能になります。

## 光フルメッシュネットワークのアーキテクチャ

先述したように、ネットワークの規模が大きくなるにつれて、エンド・ツー・エンドで効率的に波長を割り当





発着需要の多い拠点を中心にドメインを構成

図2 光フルメッシュネットワークのアーキテクチャ

てることが難しくなるとともに計算量が爆発し、最適な波長割当を計算すること自体が困難になります。そこで私たちは、波長を効率的に使用し、かつ問題の規模を削減するために、ネットワークを領域（ドメイン）に分割するアーキテクチャを採用しています（図2）。ドメインの境界では、フォトニックゲートウェイ、フォトニックエクスチェンジを配備し、これらの装置で波長変換を実施します。ドメイン分割により、必要となる波長数を減らすとともに、波長割当最適化技術が適用可能となるように問題の規模を小さくすることができます。ドメインは、需要の

発生分布に応じて、ドメイン間をわたる光パスが極力小さくなるように設定します。

### 光フルメッシュネットワークのトポロジ設計・波長設計

ドメイン内の波長資源を有効に使うためにトポロジ設計、波長最適化技術を適用します。トポロジ設計では、ドメイン内の各ファイバを経由する需要の大きさが極力均等になるような、ルート設計、追張り、新たなファイバルート追加といった手段を、カスタミナムになるように適用していきます。さらに、波長最適化にあたっては、

ドメイン内の始終点の組合せに対して、フレックスグリッド波長割当最適化の手法を適用することにより、最適な波長割当を実現します。この波長割当最適化については、量子コンピューティング（LASOLV<sup>®(2)</sup>）を適用することが可能です。

### シミュレーション結果

JPN48<sup>(3)</sup>を対象に、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 時代のサービスを想定したトラフィックモデル（県に配備されたデータセンタ間の通信、クラウド経由遠隔操作アプリケーション、法人P2P通信）を収容し



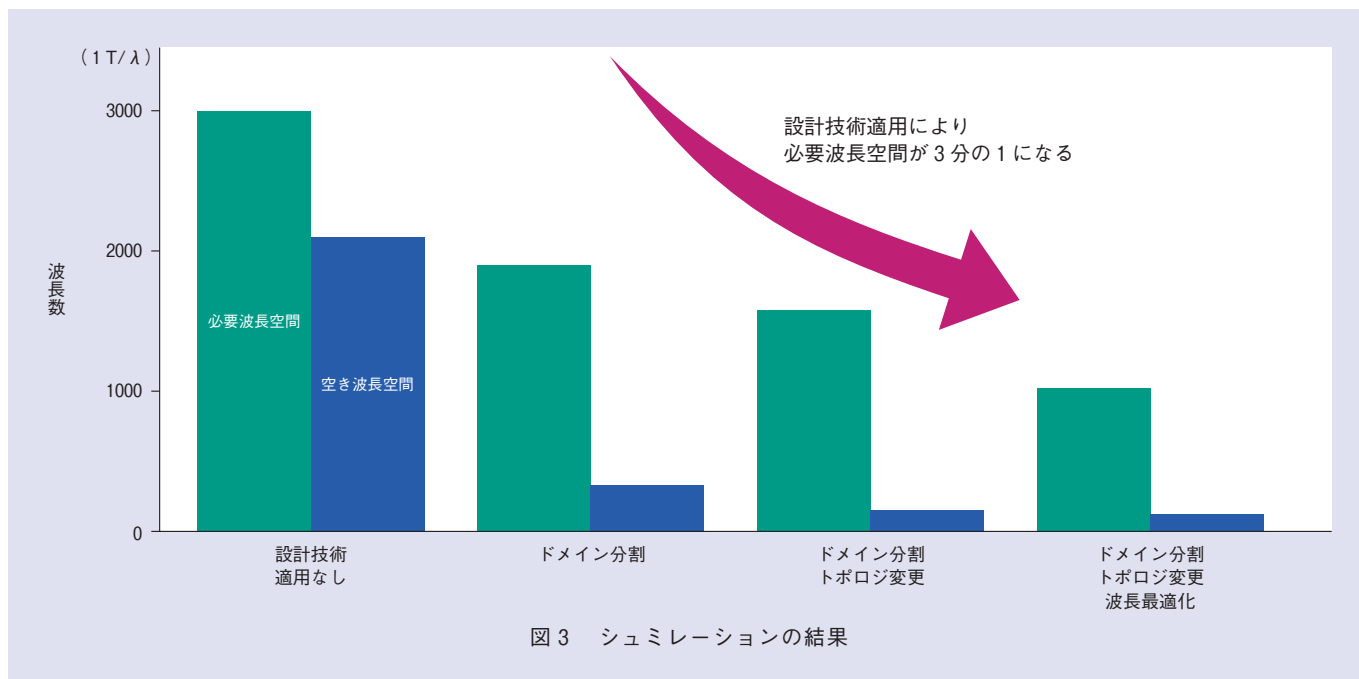


図3 シミュレーションの結果

たシミュレーションの結果を紹介します。研究所技術を適用しない場合はファイバ当たり 3 Pbit/s の容量が必要であるのに対し、研究所技術を適用することにより、ファイバ当たり 1 Pbit/s の容量で、これらのトラフィックを収容することが可能となるとともに、ファイバの利用効率が大幅に向上していることが分かります (図3)。

### 今後の展望

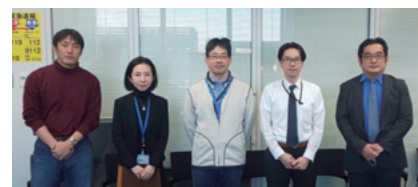
本稿では、多様かつ大量の光パスを効率的に収容するオール光フルメッシュネットワークの実現に向けた、アーキテクチャ、トポロジ設計、波長設計技術について紹介しました。

今後は、本技術をさまざまなネットワークの要件に柔軟に対応するネット

ワーク設計技術へ発展させるとともに、実フィールドへの早期展開をめざします。

### 参考文献

- (1) L. Velasco, A. Castro, M. Ruiz, and G. Junyentm: "Solving Routing and Spectrum Allocation Related Optimization Problems: From Off-Line to In-Operation Flexgrid Network Planning," *Journal of Lightwave Technology*, Vol.32, No.6, pp.2780-2795, 2014.
- (2) <https://www.ntt.co.jp/RD/product/case/case-sclab/lasolv.html>
- (3) <https://www.ieice.org/cs/pn/jpn/jpnm.html>



(左から) 瀬戸 三郎/ 石塚 美加/  
金子 康晴/ 越地 弘順/  
安川 正祥

オールフォトニクス・ネットワークを支える設計技術の開発により、IOWNが切り拓く新たな世界に貢献していきます。

### ◆問い合わせ先

NTTネットワーク基盤技術研究所  
 コグニティブファウンデーションNWプロジェクト  
 アーキテクチャ技術SEグループ  
 TEL 0422-59-3477  
 FAX 0422-59-6384  
 E-mail [mika.ishizuka.st@hco.ntt.co.jp](mailto:mika.ishizuka.st@hco.ntt.co.jp)