

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^{†1} みやもと ゆたか^{†2}

中島 和秀 / 宮本 裕

のさか ひでゆき^{†3} いしかわ みつてる^{†4}

野坂 秀之 / 石川 光映

NTTアクセスサービスシステム研究所^{†1}

NTT未来ねっと研究所^{†2}

NTT先端集積デバイス研究所^{†3}

NTTデバイスイノベーションセンタ^{†4}

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⁽¹⁾。本稿では、SDM伝送用の光ファイバ技術と、毎秒テラ（10¹²）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。

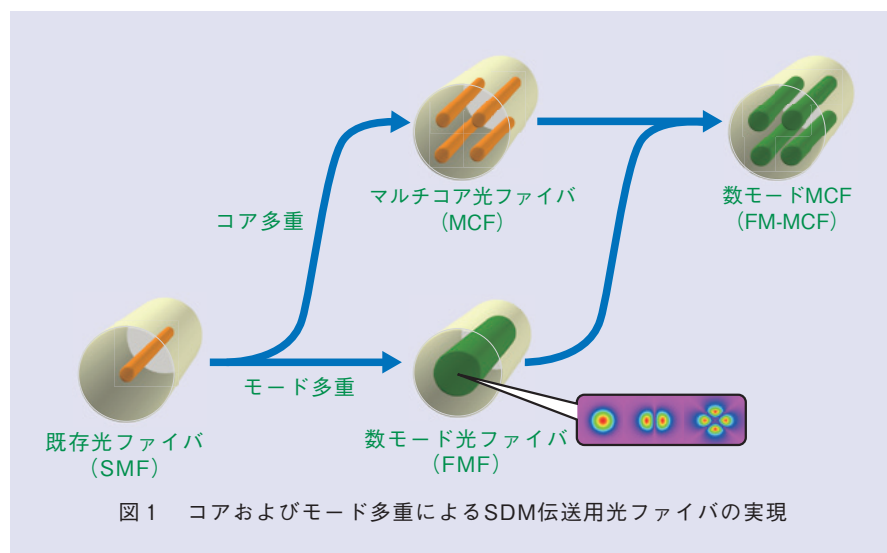
SDM光ファイバ技術

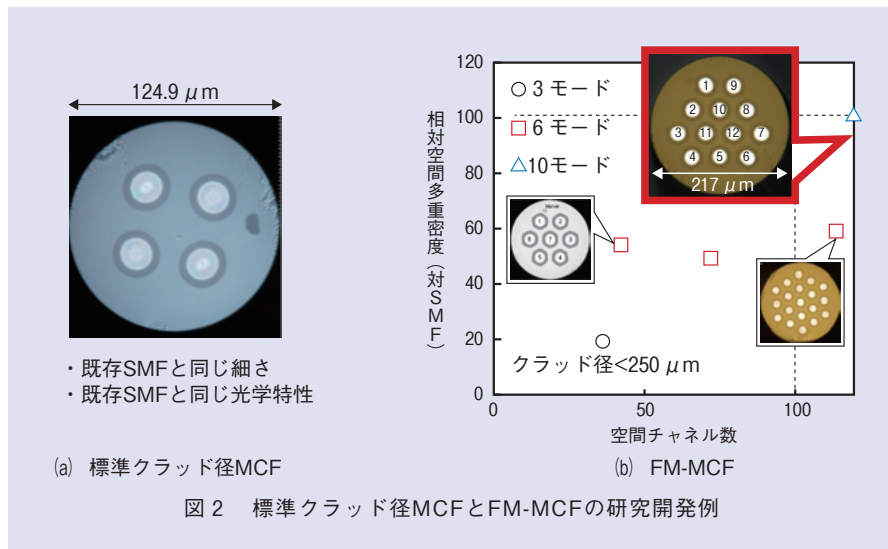
図1に示すように、既存のSMFの容量限界を超えるためのSDM光ファイバは、コアおよびモード（光の種類）数を複数化することで実現でき、一般に、コア多重を用いるタイプをマルチコア光ファイバ（MCF: Multi-Core

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⁽²⁾。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。





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⁽³⁾。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⁽⁴⁾。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

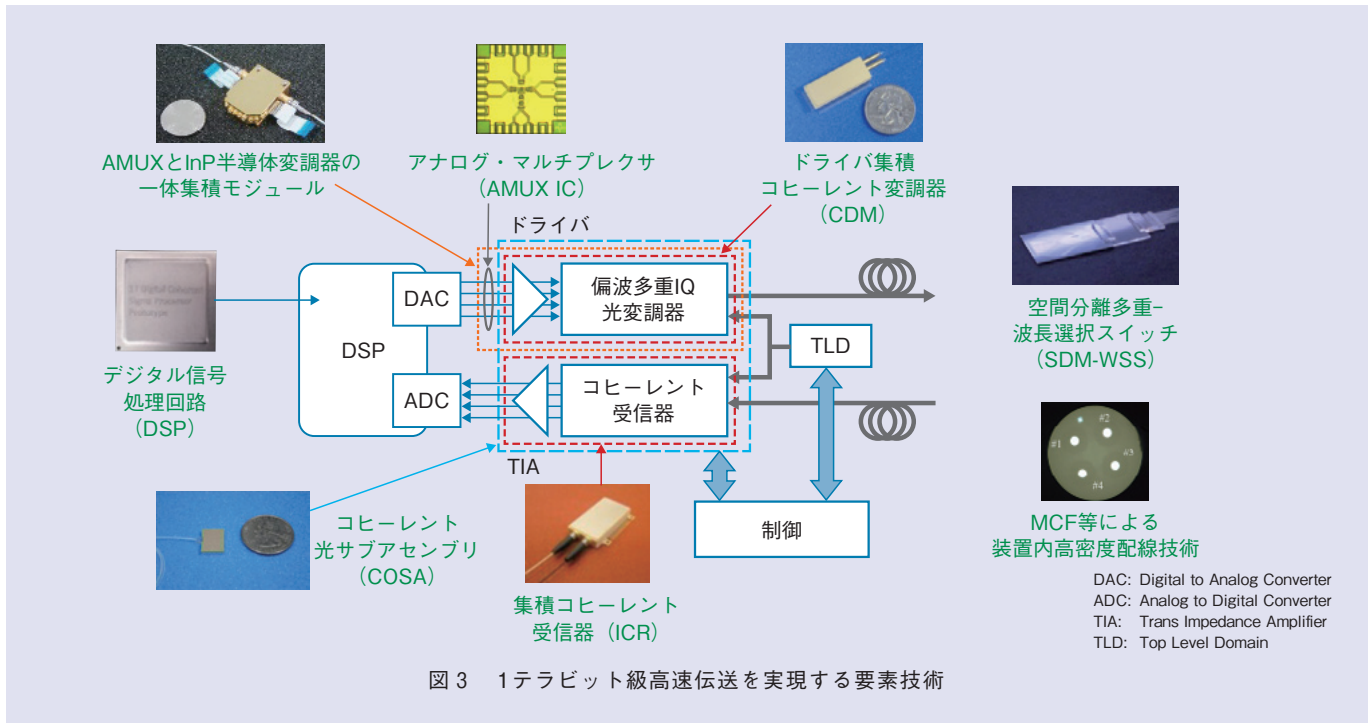
利用効率の両面で、既存SMFの100倍のポテンシャルが実現できることを世界で初めて実証した研究成果です。上述したFM-MCFシステムの実現に向けては、FM-MCFの直径を既存SMFの約1.5倍程度(200 μ m前後)に拡大する必要があり、太径光ファイバに対応可能な製造性の向上やケーブル化に向けた技術検討が必要です。また、モード多重された信号を受信側で安定にモード分離する大規模デジタル信号処理の技術検討も合わせて進めていきます。

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⁽⁵⁾。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⁽⁶⁾。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^{(1), (7)}。

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, ThPDP.A.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