

# 空間チャネルを活用した新たな光ファイバ基盤技術

現在の光通信ネットワークをつないでいるシングルモードファイバ (SMF) は、100 Tbit/s程度が実現可能な伝送容量の上限と考えられています。このSMFの通信容量限界を打破するために、1本のファイバに複数の空間チャネルを有するマルチコアファイバ・マルチモードファイバといった空間多重用光ファイバが検討されています。本稿では、空間多重用光ファイバの最新動向を紹介いたします。

さかもと たいじ もり たかよし  
坂本 泰志 / 森 崇嘉

まつい たかし やまもと たかし  
松井 隆 / 山本 貴司

なかじま かずひで  
中島 和秀

NTTアクセスサービスシステム研究所

## シングルモードファイバの容量制限

100 Tbit/s程度で顕在化すると予想される従来のシングルモードファイバ (SMF) の容量限界を打破するために、光ファイバのさらなる進化が求められています。これまで、光通信システムの伝送容量は、低損失かつ広帯域な特性を有するSMFを基盤とし、送受信技術の発展により増加してきました。特に、複数の波長の信号を同時に伝送する波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 伝送技術により、光通信システムの伝送容量は飛躍的に増加しました。一方で、利用できる波長帯域は、光増幅器の増幅帯域や光ファイバの低損失帯域などにより制限されているため、近年では、いかに帯域を効率良く利用して伝送するかの検討が行われています。多値位相変調信号を用いたデジタルコヒーレント伝送による周波数利用効率の改善がその一例であり、QAM (Quadrature Amplitude Modulation) などの信号変調方式が利用されています。しかしながら、周波数利用効率を大幅に向上させるためには非常に高い信号対雑音比が求められ、SMFを用いた通信シ

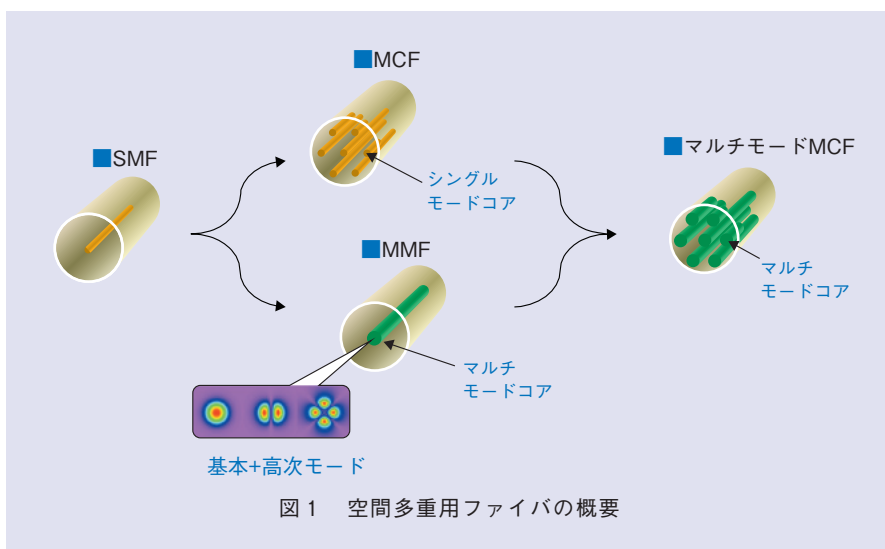
ステムの大容量化は、ファイバ1本当たり100 Tbit/s程度で頭打ちになると予想されています。年率30~50%で増加するインターネットトラフィックを数十年にわたり収容するためには、今後さらなる伝送容量の拡大が必要であり、WDMに次ぐ新たな多重方式を実現可能な空間多重用光ファイバが盛んに検討されています。

本稿では、光ファイバ技術の観点から、大容量伝送を実現する空間多重用光ファイバの動向を紹介いたします。

## 空間多重用光ファイバ最新動向

空間分割多重とは、波長分割多重と

同様に独立した伝送パスを複数用いて信号を並列伝送する方式ですが、波長ではなく空間的に異なる伝送チャネルを用いることが特徴です。例えば、複数本のSMFを用いて並列伝送する方式も空間分割多重技術の一種といえますが、本稿では特に、ファイバ1本当りに複数の空間チャネルを有する空間多重用ファイバについて最新動向を解説します。提案されている空間多重用ファイバの概要を図1に示します。SMFは、ファイバ断面に光が伝搬するコアを1つだけ有していますが、マルチコアファイバ (MCF) は、断面に複数のコアを有していることが特徴



で、空間的に異なる複数のコアを用いて信号を並列伝送することができます。マルチモードファイバ(MMF)は、コアが従来のSMFのコアと比較して大きく、同一コア内で複数のモードと呼ばれる伝搬状態が存在しています。各伝搬モード\*1は独立した伝送チャネルとして扱うことができるため、モードの数だけ複数の信号を多重して送受信することができます。近年では、マルチモードコアが複数配置されたマルチモードMCFが提案されています<sup>(1)~(5)</sup>。

空間多重用光ファイバの設計にあたり考慮すべきパラメータは主に次の3つです。

- ・空間チャネル数
- ・各空間チャネルの光学特性
- ・光ファイバの機械的信頼性

空間チャネル数が多ければ多いほど並列して伝送可能な信号の数が増え、それぞれの空間チャネルの損失などの光学特性が優れていれば、伝送容量を拡大することができます。また、光学特性のみならず、光ファイバの機械的信頼性も重要なパラメータの一つです。機械的信頼性とは、ファイバの伸

びや曲りを起因としたファイバが物理的に破断する確率を表し、安定した通信インフラを提供するためには重要な指標です。一般には、ファイバ直径が太くなると信頼性が劣化するため、ファイバ直径の上限を従来のSMF(断面の直径: 125  $\mu\text{m}$ )と同等の機械的信頼性を実現可能な250  $\mu\text{m}$ とし<sup>(1)</sup>、限られたファイバ断面空間により多数の空間チャネルを実現することをめざしています。特に、30以上の空間チャネルを有するファイバをDSDM(Dense Space Division Multiplexing)用ファイバと定義しています<sup>(3)</sup>。以降、それぞれの空間多重用光ファイバにおけるファイバ設計技術と最新の動向を紹介いたします。

### マルチコアファイバ技術

これまで報告されたMCFのコア数とファイバ直径の関係を図2に示します。報告されているMCFの多くがSMFよりも大きなファイバ直径を有しています。これは、多数のコアを配置するためにファイバ断面を拡大していく必要があるためです。しかしながら、機械的信頼性の観点からファイバ

直径の拡大には限界があり、より高密度にコアを配置することが求められています。配置できるコア数を制限するパラメータの1つに、コア間クロストークが挙げられます。それぞれのコアを伝搬する信号間で混信が発生しないようにするためには、ファイバ断面においてコア間の距離を所定の値以上としなければなりません。

提案されているMCFの断面の例を図3に示します。コアの配置法としては、三角格子<sup>(6)~(8)</sup>、円環<sup>(9),(10)</sup>、正方形格子形状<sup>(11)</sup>が検討されており、これらを組み合わせた特殊なコア配置<sup>(12),(13)</sup>も提案されています。各コアの屈折率分布には、クロストーク低減に有効なコアが低屈折率層で囲まれたトレンチアシスト型が採用されています。ほかに、複数種類のコアを用いたクロストークの低減方法も提案されています。同種のコア間では、伝搬するモードの特性が同じであるため、互いにクロストークしやすい性質がありますが、隣接コアの屈折率分布を変えることで伝搬モードの特性差が生じ、クロストークしにくくなります。NTTが日欧連携委託研究(SAFARI)の支援の下で検討評価したMCF(図2赤丸)では、トレンチアシストコアを用いた正方形格子状異種コア配置を適用することにより、ファイバ直径250  $\mu\text{m}$ 以下の断面に32コアを配置することに成功しています。クロストークのほかにも、波長分散や遮断波長などの光学特性も重要であり、従来のSMFの国際標準に完全に適合し、ファイバ直径もSMFと同じ125  $\mu\text{m}$ であるMCF設計技術についても検討されています。

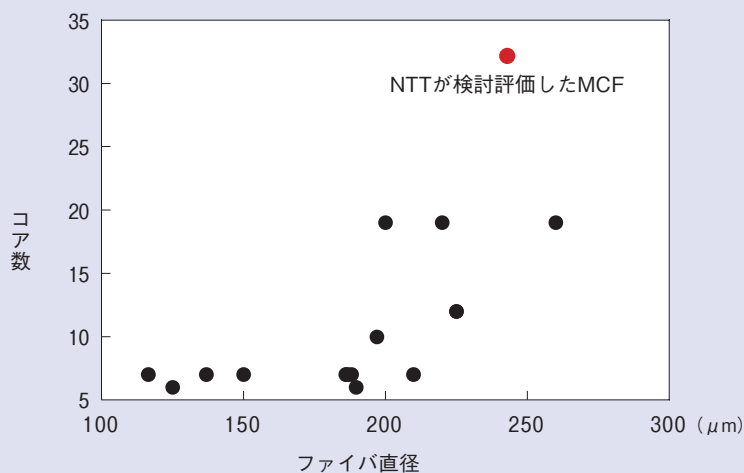
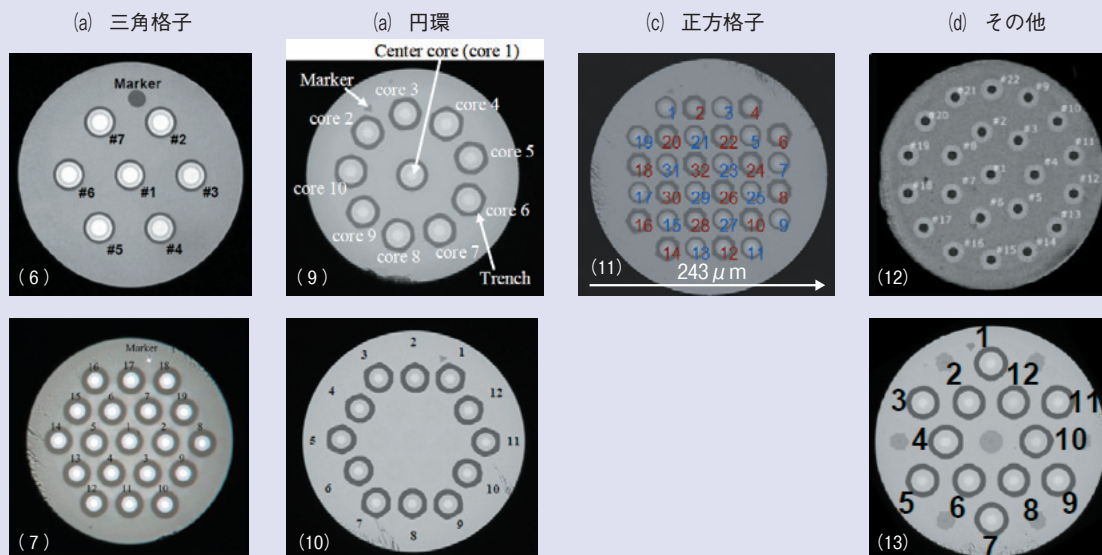


図2 MCFのコア数とファイバ直径の関係

\*1 伝搬モード：ファイバのコア領域を伝搬する光の伝搬状態により規定されるもの。SMFでは一種類のモードのみが伝搬可能。



※括弧の数字は参考文献を示しています

図3 提案されているMCFの断面図

### マルチモードファイバ技術

MCFと同様に、モード数を増加させることで空間チャンネル数を拡大していくことが可能です。同一コア内に複数の伝搬モードが存在するMMFにおいては、モード間のクロストークに対する対処とモード間群速度差設計が重要となります。MCFと異なり、同一コア内を伝搬するモード間は、接続点やファイバの曲りなどによって容易にクロストークが発生してしまいます。そこで、受信端で信号処理を行うことでクロストークを補償する光MIMO (Multiple Input Multiple Output) 信号処理<sup>\*2</sup>が提案されています。しかしながら、モード間群遅延差 (DMD)<sup>\*3</sup>が大きいと、受信端での信号処理負荷が大きくなってしまいます。そこで、DMDが低い光ファイバの設計が検討されています。

私たちは、DMDの低減とコア当りのモード数の拡大の両立を図るため、トレンチアシスト型グレーデッドコア

構造を検討しています<sup>(14)</sup> (図4 (a))。コアの屈折率は中心から徐々に低くなっており、その形状を精密に制御することでDMDを制御することができます。また、トレンチ構造を最適化することにより、伝搬する全モードがSMFと同等の光学特性 (曲げ損失等) となるよう設計可能です。さらに、図4 (b) に示す2種のファイバ (正/負DMDファイバ) を組み合わせるDMD補償伝送路を提案しています。従来のSMF伝送路で用いられている波長分散補償の概念をDMDに適用することで、伝送路構成によりDMDを柔軟に制御することができます<sup>(15)</sup>。

提案されているMMFのモード数とDMDの関係を図5に示します。NTTは、最大10モードが伝搬可能かつ100 ps/km以下のDMDを有する光ファイバを実現しています。現在、最大で15モードが伝搬可能な光ファイバが提案されています<sup>(16)</sup>、他機関と比較して私たちの設計ファイバはC帯およびL帯までの広波長域にわたって低

DMD特性が得られるよう設計されており、WDM技術と親和性の高いファイバの実現に成功しています。ほかにも、伝搬する高次のモードの低非線形性を利用して長距離伝送を実現する選択モード励振伝送についても検討されており、高次モードの利点を活かしたさまざまなMMF利用法が検討されています。

### マルチモードMCF技術

マルチコアまたはマルチモード技術それぞれでは、現在のところ数十の空間チャンネルの実現にとどまっていますが、今後の爆発的なトラフィックの増加に対応するためには、さらに多くの空間チャンネルが必要となります。そこで、マルチモードとマルチコア技術を融合したマルチモードマルチコア構造

\*2 MIMO信号処理：複数の送受信機で伝送される複数の信号を一括して演算処理することにより、モード間のクロストーク等を補償する信号処理。

\*3 モード間群遅延差：各モードは伝搬群速度が異なり、モード間の群遅延 (単位長さ当りの伝搬時間) の差。

が検討されています。例えば、 $m$ モードコアが $n$ 個存在する場合、計 $m \times n$ の空間チャネルを得ることができます。これまで報告されたシングルモードまたはマルチモードMCFのファイバ直径と空間モード数の関係を図6に示します。シングルモードMCFと比較して、非常に多い空間モード数を得ることができ、ファイバ1本当たり100を超える空間チャネルを有する光ファイバが提案されています<sup>(1), (4), (5)</sup>。私たちの実現したファイバは、直径250  $\mu\text{m}$ 以下のファイバ断面に6モード伝搬可能なコアを19コア配置することでファイバ1本当たり114の空間チャネルを配置し、従来SMFと同等の機械的信頼性を実現と同時に世界で最高密度である超大容量伝送光ファイバを実現することに成功しています<sup>(1)</sup>。提案されているマルチモードMCFの損失とDMDの関係を図7に示します。NTT報告のマルチモードMCF（赤丸）は、先に述べたトレンチアシスト型グレーデッドコア構造によるDMD設計技術をマルチコア構造に適用しており、低DMD特性を有するマルチモードMCFの実現に成功しています<sup>(1)~(3)</sup>。また、損失に関してもすべての空間チャネルでSMFと同等の値を実現しており、機械的信頼性を維持しつつSMFの100倍以上の伝送性能を有する、世界トップレベルの空間多重光ファイバを実現しています。

### 今後の展開

本稿では、複数の空間チャネルを有する空間多重ファイバの設計技術および最新の動向と、NTTの検討内容および成果について紹介しました。今後は、2020年代後半でのペタビット級伝送システムの導入に向けて、各種周辺技術を含む要素技術の確立や空間

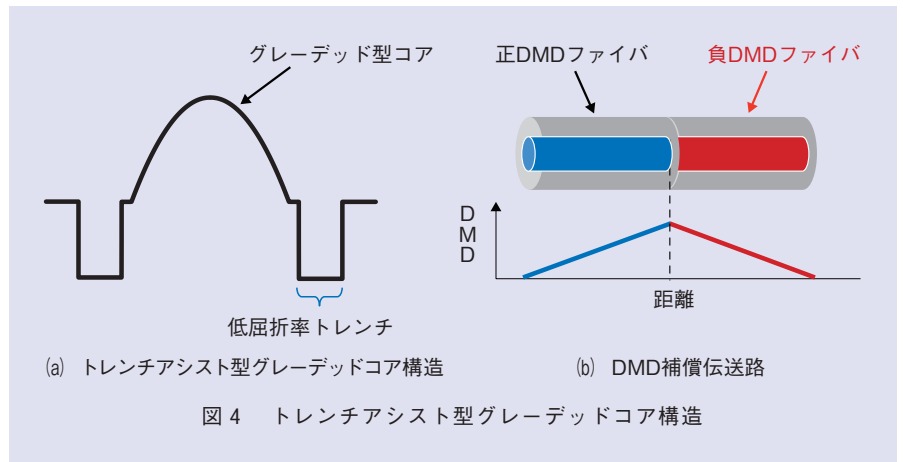
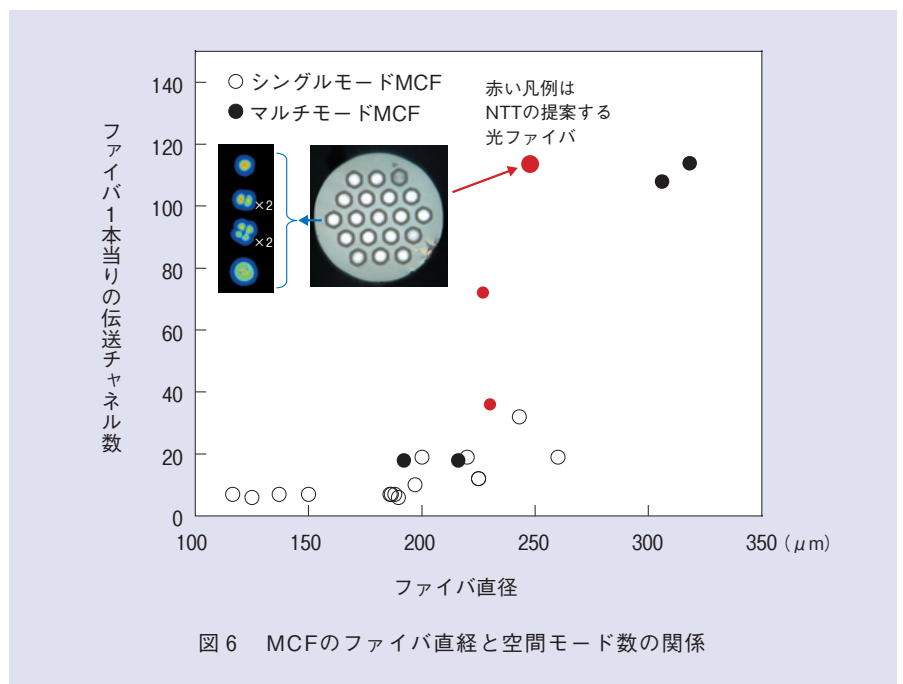
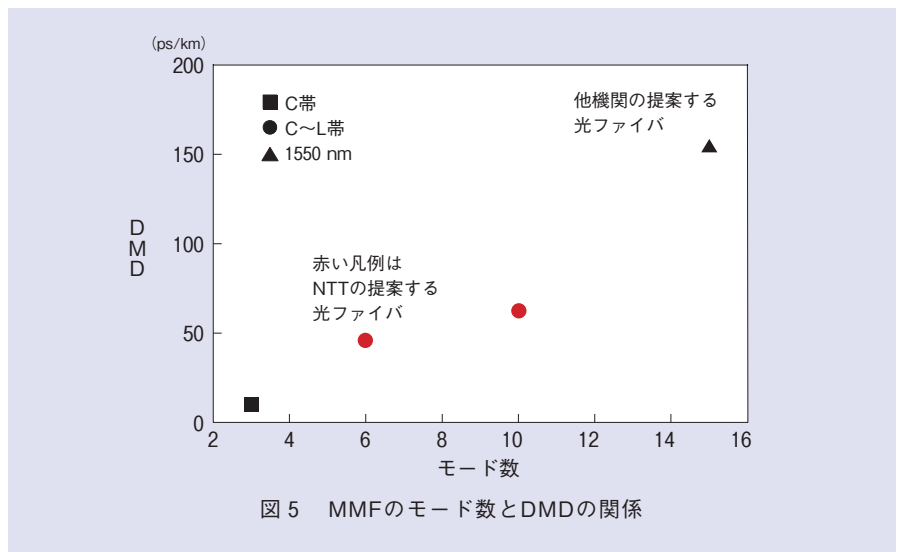


図4 トレンチアシスト型グレーデッドコア構造





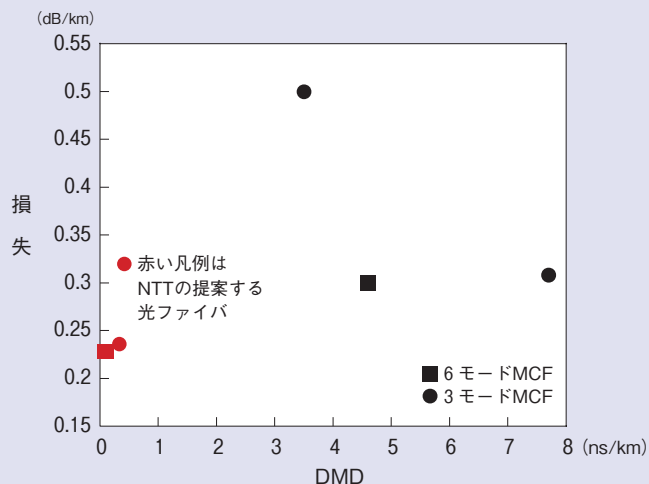


図7 マルチモードMCFの損失とDMDの関係

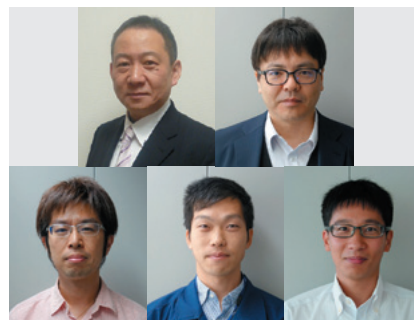
多重用光ファイバの標準化を見据えた研究開発を推進していきます。

■参考文献

- (1) T. Sakamoto, T. Matsui, K. Saitoh, S. Saitoh, K. Takenaga, T. Mizuno, Y. Abe, K. Shibahara, Y. Tobita, S. Matsuo, K. Aikawa, S. Aozasa, K. Nakajima, and Y. Miyamoto: "Low-loss and low-DMD few-mode multi-core fiber with highest core multiplicity factor," Proc. of OFC 2016, Th5A.2, Anaheim, U.S.A., March 2016.
- (2) T. Sakamoto, T. Matsui, K. Saitoh, S. Saitoh, K. Takenaga, S. Matsuo, Y. Tobita, N. Hanzawa, K. Nakajima, and F. Yamamoto: "Few-mode multi-core fibre with highest core multiplicity factor," Proc. of ECOC 2015, We.1.4.3, Valencia, Spain, Sept. 2015.
- (3) K. Shibahara, T. Mizuno, H. Takara, A. Sano, H. Kawakami, D. Lee, Y. Miyamoto, H. Ono, M. Oguma, Y. Abe, T. Kobayashi, T. Matsui, R. Fukumoto, Y. Amma, T. Hosokawa, S. Matsuo, K. Saito, H. Nasu, and T. Morioka: "Dense SDM (12-core x 3-mode) transmission over 527 km with 33.2-ns mode-dispersion employing low-complexity parallel MIMO frequency-domain equalization," Proc. of OFC 2015, Th5C.3, Los Angeles, U.S.A., March 2015.
- (4) K. Igarashi, D. Souma, Y. Wakayama, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, T. Tsuritani, I. Morita, and M. Suzuki: "114 space-division-multiplexed transmission over 9.8-km weakly-coupled-6-mode uncoupled-19-core fibers," Proc. of OFC 2015, Th5C.4, Los Angeles, U.S.A., March 2015.
- (5) J. Sakaguchi, W. Klaus, J.-M. D. Mendinueta, B. J. Puttnam, R. S. Luis, Y. Awaji, N. Wada, T. Hayashi, T. Nakanishi, T. Watanabe, Y. Kokubun, T. Takahata, and T. Kobayashi: "Realizing a 36-core, 3-mode fiber with 108 spatial channels," Proc. of OFC 2015, Th5C.2, Los Angeles, U.S.A., March 2015.
- (6) T. Hayashi, T. Taru, O. Shimakawa, T. Sasaki, and E. Sasaoka: "Uncoupled multi-core fiber enhancing signal-to-noise ratio," Opt. Express, Vol. 20, No.26, pp. B94-B103, 2012.
- (7) J. Sakaguchi, B. J. Puttnam, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa, R. Sugisaki, T. Kobayashi, and M. Watanabe: "305 Tb/s space division multiplexed transmission using homogeneous 19-core fiber," J. Lightw. Technol., Vol.31, No.4, pp. 554-562, 2013.
- (8) K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa, and R. Sugizaki: "Multi core fiber with large Aeff of 140 μm<sup>2</sup> and low crosstalk," Proc. of ECOC 2012, Mo.1.F.2, Amsterdam, Netherland, Sept. 2012.
- (9) S. Matsuo, K. Takenaga, Y. Arakawa, Y. Sasaki, S. Tanigawa, K. Saitoh, and M. Koshiba: "Large-effective-area ten-core fiber with cladding diameter of about 200 μm," Opt. Lett., Vol.36, No.23, pp.4626-4628, 2011.
- (10) S. Matsuo, Y. Sasaki, T. Akamatsu, I. Ishida, K. Takenaga, K. Okuyama, K. Saitoh, and M. Koshiba: "12-core fiber with one ring structure for extremely large capacity transmission," Opt. Express, Vol.20, No.27, pp.28398-28408, 2012.
- (11) T. Mizuno, K. Shibahara, H. Ono, Y. Abe, Y. Miyamoto, F. Ye, T. Morioka, Y. Sasaki, Y. Amma, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Aikawa, K. Saitoh, Y. Jung, D. J. Richardson, K. Pulverer, M. Bohn, and M. Yamada: "32-core dense SDM unidirectional transmission of PDM-16QAM signals over 1600 km using crosstalk-managed single-mode heterogeneous multicore transmission line," Proc. of OFC 2016, Th5C, Anaheim, U.S.A., March 2016.
- (12) B. J. Puttnam, R. S. Luis, W. Klaus, J. Sakaguchi, J.-M. D. Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tamura, T. Hayashi, M. Hirano, and J. Marcianti: "2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous

single-mode multi-core fiber and wideband optical comb," Proc. of ECOC 2015, Valencia, Spain, Sept. 2015.

- (13) T. Kobayashi, H. Takara, A. Sano, T. Mizuno, H. Kawakami, Y. Miyamoto, K. Hiraga, Y. Abe, H. Ono, M. Wada, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Yamada, H. Masuda, and T. Morioka: "2 x 344 Tb/s propagation-direction interleaved transmission over 1500-km MCF enhanced by multicarrier full electric-field digital back-propagation," Proc. of ECOC 2013, PD3-e-4, London, U.K., Sept. 2013.
- (14) T. Mori, T. Sakamoto, M. Wada, T. Yamamoto, and F. Yamamoto: "Few-mode fibers supporting more than two LP modes for mode-division-multiplexed transmission with MIMO DSP," J. Lightw. Technol., Vol.32, No.14, pp.2468-2479, 2014.
- (15) T. Sakamoto, T. Mori, T. Yamamoto, and S. Tomita: "Differential Mode Delay Managed Transmission Line for WDM-MIMO System Using Multi-Step Index Fiber," J. Lightw. Technol., Vol.30, No.17, pp.2783-2787, 2012.
- (16) P. Sillard, D. Molin, M. Bigot-Astruc, K. de Jongh, and F. Achten: "Low-differential-mode-group-delay 9-LP-mode fiber," Proc. of OFC 2015, M2C.2, Los Angeles, U.S.A., March 2015.



(上段左から) 中島 和秀/ 山本 貴司  
(下段左から) 松井 隆/ 森 崇嘉/  
坂本 泰志

将来の超大容量光通信システムを支える空間多重用光ファイバの研究開発を推進します。

◆問い合わせ先

NTTアクセスサービスシステム研究所  
アクセスメディアプロジェクト  
TEL 029-868-6074  
FAX 029-868-6440  
E-mail sakamoto.taiji@lab.ntt.co.jp