

3 コアネットワークの大容量化を目指す研究開発

3 R&D of Optical Fiber Transmission to Increase the Capacity in Core Network

3-1 空間分割多重通信技術概要

3-1 Summary of Space-division Multiplexing Fiber Transmission

淡路祥成

Yoshinari AWAJI

既存の光ファイバ通信インフラの容量限界を打破するための新たな多重技術の研究開発状況を俯瞰する。

State-of-the-art R&D of SDM in order to overcome physical limit of conventional optical fiber communication infrastructures is overviewed.

1 光ファイバ伝送の容量機器と空間分割多重

現在の光ネットワークは階層化されており、都市圏ではメトロネットワーク、全国規模ではコアネットワークを介して大規模な情報が流通している。これらのネットワークにインターネットトラフィックの主要部分が収容されているため、その全体的な傾向を反映した性能向上が求められている。つまり、現在も年率数10%で増加し続けるインターネットトラフィックに対応するための継続的な能力向上が不可欠である。

これまでの光通信では、利用可能な光の帯域が非常に大きいにもかかわらず、情報を生成する電子機器の速度が電子回路によって律速されてしまうため、様々な種類の多重化技術を用いてそれらの情報信号を束ねて大容量化し、遠方に伝送するのが常であった。光パルスのタイミングをずらすことで複数の時間スロットを時間軸上に並べた、時分割多重 (Optical Time-Division Multiplexing: OTDM) は最初期の多重化技術である。その後、光の波長を識別する技術及びそれらを一括で増幅する技術の登場に伴い、それぞれ異なる信号を収容した複数の波長を同時に伝送する波長分割多重 (Wavelength-Division Multiplexing: WDM) は、利用可能な帯域の大幅な増加によって、インターネットの情報爆発を下支えした。さらに、光ファイバ中の光の振動方向 (偏波) を用いて多重化を行う偏波分割多重 (Polarization-Division Multiplexing: PDM) は上記の多重技術をほぼ2倍に容量拡大することが可能である。WDMが普及した後は、デジタルコヒーレント受信技術が開発されたことにより、かつてのコヒーレ

ント変調方式が見直され、1シンボル (パルス) あたり複数のビットを表現可能な多値変調方式が台頭しつつあった。これらの多重化方式はそれぞれ直交しており、併用することで伝送容量を増加させることが可能である (図1)。

しかしながら、既存の光ファイバそのものに物理的な限界があるのではないかと懸念が、昨今の国際的な共通の関心事である [1]。その傍証として、既存の標準光ファイバ (SSMF) を用いた伝送容量記録は、概ね150テラビット毎秒あたりでとどまっている [2] (図2)。

これらは主として光ファイバの非線形性によるものと考えられているが、非線形性による悪影響は、情報容量の増加に伴い、光ファイバに挿入される光パワーの増大によって、より大きく顕在化する。このような制限に対して、単純にファイバの敷設数を増やすとい

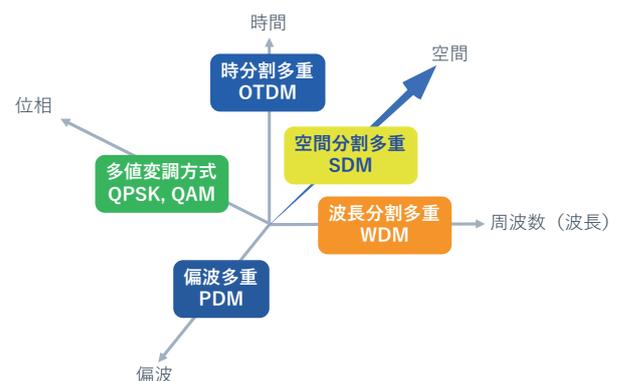


図1 光通信における多重化方式

3 コアネットワークの大容量化を目指す研究開発

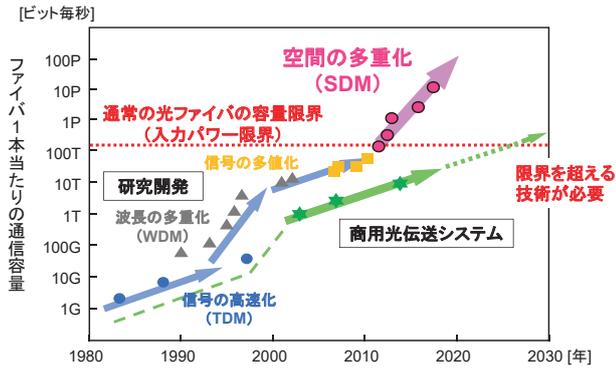


図2 ファイバ伝送容量の推移

う考え方ももちろんあり得るが、実際問題としてみると、ファイバケーブルを納める洞道や管路の断面積にも制限があり、新たな設備の長距離にわたる増設には莫大な工事コストがかかるため、必ずしも容易ではない。設備の増強と並行して、光ファイバそのものにも新たな技術革新が求められている。

NICT では近い将来起き得る、既存光ファイバの容量の逼迫という問題に対して、長期的な取組を視野に、2008年に産学官連携による課題整理のための「光通信インフラの飛躍的な高度化に関する研究会」を組織して、包括的な検討を開始した。「光通信インフラの飛躍的な高度化」の英語名はEXtremely Advanced Transmission であり、頭文字を連ねて、通称EXAT研究会と称し、国内外に向けて光ファイバ通信の容量危機を打破するためのイニシアチブを発信し続けている（なお、EXAT研究会は2010年より電子情報通信学会傘下の研究会に活動の母体を移している）。

EXAT研究会での検討の結果、抜本的に光通信インフラの容量を増大させるための、以下の3つの技術開発の方向性が示された。

- マルチコアファイバ (MCF: Multi Core Fiber)
SSMF がクラッド内に1つのコア (光信号の通り道) しか持たないのに対して、同一クラッド内に複数のコアを設けることによって、伝送容量を増やすことが可能。高度な製造技術を要し、量産性などが



図3 EXAT Initiative の目標：3M技術

課題となる。

- マルチモード制御

マルチモードファイバそのものは古くからあるが、新技術によってマルチモードの活用の可能性が広がっている。SSMFにおける光の伝搬モード(横モード)は最低次の基本モードに制限されており、このため、コアの直径は10 μm以下の非常に狭い領域に光パワーが集中する。コア径を拡大することで、最低次以外の高次モードが伝搬可能となるが、これらの横モードは分離が困難であり、さらにそれぞれ伝搬速度が異なるためモード分散により光信号のパルスが広がってしまい、高速変調には適さないとされてきた。

昨今の技術革新により、複数のモードが分離可能となり、それぞれ異なる高速変調を付与することができるようになった。さらに、コア径を拡大することで非線形性の影響を大幅に低減できる可能性がある。複数モードの伝搬特性の制御及びモード分離の光学系・信号処理などが課題となる。

- 多値 (マルチレベル) 変調

前述したように、光の振幅や位相などを精密に制御し、1シンボル(パルス)あたり複数のビットを表現することができるようになった。周波数利用効率、ひいては伝送容量を抜本的に向上することが可能。反面、雑音に敏感であり、多値度と伝送距離を両立することが課題となる。

2 空間分割多重技術で世界をリードする 産学官連携の取組

これら三種の技術の頭をとって3M技術或いは、Triple-multi techと称し、EXATイニシアチブの象徴的なスローガンとしている。EXAT研究会発足時点で、多値変調技術に関してはある程度先行的研究がなされていたことから、NICTでは更なる発展的研究を奨励しつつ、特にマルチコアファイバ、マルチモード制御を重点課題として「高度通信・放送研究開発委託研究」(以下、NICT委託研究)の枠組みで2010年から研究開発を開始した。マルチコアファイバやマルチモードファイバは、それまで単一コア・単一モードでしか利用されていなかった光ファイバの伝搬モードを、複数多重化することで伝送容量の拡大を図る未来の伝送媒体である。このことにより、光ファイバの伝搬モードは空間的な自由度を新たに得ることから、これらを総称して空間分割多重 (Space-Division Multiplexing: SDM) と呼んでいる。

【革新的光ファイバ技術の研究開発】(2010～2012年度：課題146)

「既存の標準光ファイバの物理的限界を突破し、5～10年後にペタビット級光通信を実現するため、現在の光ファイバの限界を定めている制限要因をクリアする「革新的光ファイバ」に関する基礎研究(探索的研究)を行うことを目的とする」ことが本プロジェクトの趣旨である。

マルチコアファイバやマルチモードファイバはそれ以前から存在していたが、抜本的な伝送容量拡大という目的に向けて、次世代の光通信インフラを担う信頼性の高い新型ファイバ技術の探索を行うことが重要である。通信キャリア、国内主要ファイバメーカー、大学からなる研究チームが発足し、実に様々な光ファイバの設計・試作・評価が行われた。現在のマルチコアファイバの基礎的技術の多くは、本プロジェクトが発端となって研究が進展している。

また、本プロジェクトから派生したマルチコアファイバを用い、NICT自らが世界で初めてファイバ1本あたり100テラビット毎秒を超える伝送記録を樹立している[3]。

【革新的光通信インフラの研究開発】(2011～2015年度：課題150)

「今後10年間で既存の光通信インフラから3桁以上の情報容量の向上を実現するため、マルチコアファイバ用増幅技術、マルチコアファイバ用接続技術、超多重伝送技術の研究開発を行うことを目的とする」、本プロジェクトは課題146に遅れること1年後に開始された。

課題146ではファイバの設計には特段制限を設けずに新型ファイバの研究開発を進めていたが、その多くはマルチコアファイバに関するものであり、従来にならぬ光ファイバを製造してもそのままでは光通信システムを構築できない。課題150では、特にマルチコアファイバに焦点を当て、マルチコアファイバ同士あるいはSSMFとの接続技術の研究、マルチコアでの増幅技術の研究、そしてそれらを用いて伝送システムを構築するとともに、マルチモードの活用まで視野を広げて、伝送特性評価を行うマルチコア・マルチモード伝送技

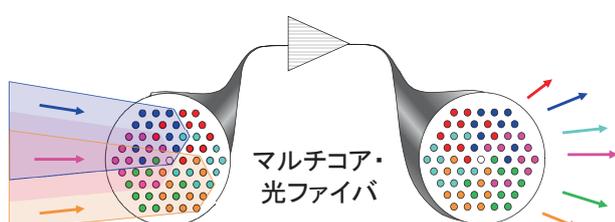
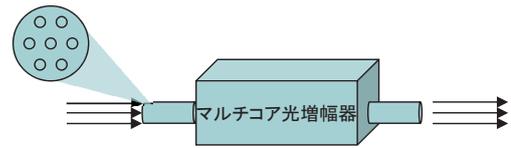
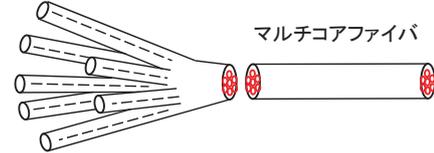


図4 NICT委託研究「革新的光ファイバ技術の研究開発」(課題146)概要

(1) マルチコアファイバ用増幅器



(2) ファンアウトカプラ



(3) モード多重伝送概念図(マルチモードファイバ)

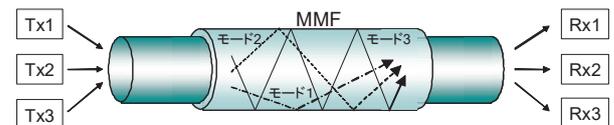


図5 NICT委託研究「革新的光通信インフラの研究開発」(課題150)概要

術の研究、の3本の柱で構成されている。

本プロジェクト中に、更なる伝送容量拡大に成功し、ファイバ1本あたり1ペタビット毎秒を超える伝送記録[4]、及び容量・距離積で1エクサビット毎秒・kmを超える伝送記録が達成された[5][6]。

【革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発】(2013～2017年度：課題170)

「(先行NICT委託研究の)優位性・知見を継承するとともに、実用化・標準化に向けた研究開発を加速し、基幹系等の中・長距離伝送に使用可能なマルチコアファイバ設計指針の確立・高信頼化の推進が第一の課題である。また、その一環としてマルチコアマルチモードファイバ(学会等ではSDM光ファイバなどと呼ばれることもある)の実用性の可否を技術的に検討することが第二の課題である」という位置づけの下に、課題146の後継として開始されたのが本プロジェクトである。

課題146では可能性を広げる探索的研究を行い、連携する課題150においてその極限的な伝送能力がつまびらかとなってきた。課題170においては実用化に向けた重要な課題である、量産性や信頼性、標準化戦略などが主要な目標とされた。すなわち、「ファイバ当たりペタビット級の潜在的伝送能力」と「基幹系適用(100km級)を想定していること」の二大条件が課されることとなった。

また、先行する課題150にて基礎検討を行ったマルチモード伝送方式についても、本格的な研究が開始され、マルチコアファイバとマルチモードを融合した研究開発も大幅に進展した。

3 コアネットワークの大容量化を目指す研究開発

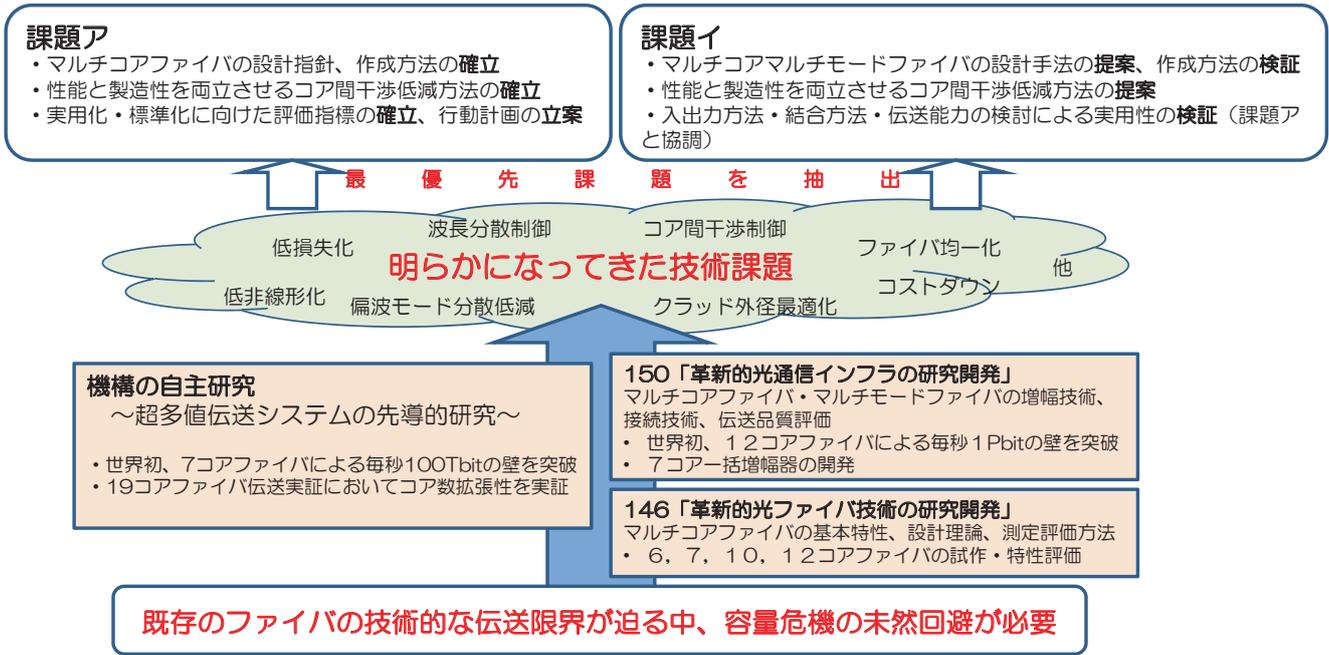


図6 NICT 委託研究「革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発」(課題170) 概要

本プロジェクト中に、マルチモード・マルチコアファイバを用いた、ファイバ1本あたり10ペタビット毎秒を超える伝送記録が達成された[7]。

【空間多重フォトニックノード基盤技術の研究開発】 (2016～2020年度：課題188)

これまでの委託研究は、ファイバ1本あたりの伝送能力を高めることに注力していたが、それらの潜在能力が概ね見えてきた段階で、次に光ファイバネットワークを構成するための基盤技術の研究が求められる。

本プロジェクトでは、「ルーティングノードの大容量化・高機能化・省電力化を実現し、既存の光通信インフラから2桁以上高い10ペタビット毎秒級のノードスループットの向上を実現する将来の大容量空間多重光ルーティングノードの実現に向け、空間多重フォトニックノードアーキテクチャ・システム制御技術、空間多重ノード光増幅・方路制御技術、空間多重配線技術に関する要素技術の研究開発を行う」との目標が掲げられた。

本稿時点で、まだプロジェクト期間の途上であるが、これまでの際だった成果としては、課題170と連携で行った、標準外径マルチコアファイバでの相互接続及びフルSDM伝送による100テラビット毎秒の達成が挙げられる[8]。標準外径とは、SSMFと同じクラッド径125μmのことであり、既存の製造設備の一部を流用してテープ芯線やケーブル化が可能であり、最も実用化・標準化に近い位置づけのマルチコアファイバである。統一スペックの下、複数のファイバメーカーによって作製されたマルチコアファイバを入れ違いに

空間多重フォトニックノード (スループット～10 Pbps 級)

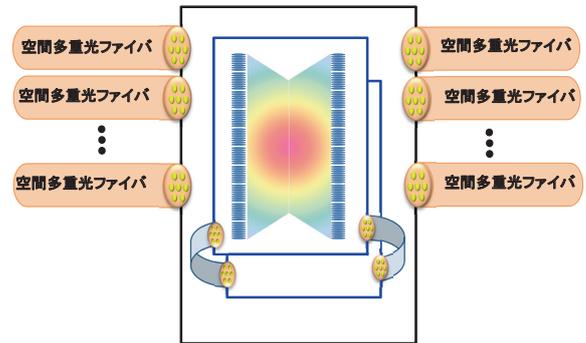


図7 NICT 委託研究「空間多重フォトニックノード基盤技術の研究開発」(課題188) 概要

接続し、それらに対応したマルチコア増幅器及びマルチコア接続技術を組み合わせた、言わば全てがSDM対応のコンポーネントで構成された伝送システムの実証に成功した。

【マルチコアファイバの実用化加速に向けた研究開発】 (2018～2022年度：課題203)

前述の標準外径という選択肢は、主として課題170における標準化戦略の検討から生まれたものであり、早期実用化に最も近いと考えられている。これを受けて、国際的競争が激化する中で、我が国がマルチコアファイバの実用化・商用化への先鞭をつけるべく開始されるのが本プロジェクトである。本稿時点では公募の段階であるが、「MCFの商用導入を容易にするためには、クラッド直径として既存商用ファイバの標準外

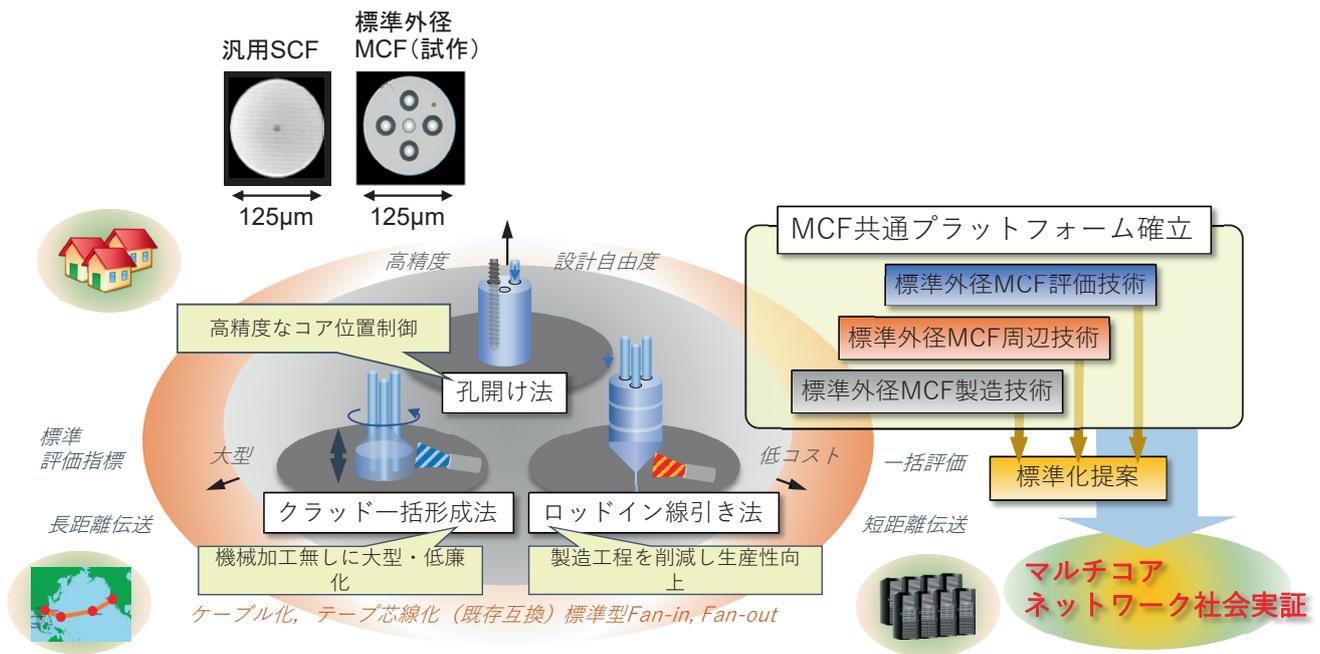


図8 NICT 委託研究「マルチコアファイバの実用化加速に向けた研究開発」(課題 203) 概要

径 125 μm を採用することが重要であることから、先行委託研究(課題 170)で有望とされた複数の MCF 製造法について比較検証し、MCF 製造性・信頼性の向上を目指す「標準外径 MCF 製造技術に関する研究開発」を行う。さらに標準外径 MCF に対応した周辺技術や評価技術の確立を目指すため、「標準外径 MCF 周辺技術及び評価技術に関する研究開発」を行う。」ことを目標に掲げている。

3 空間分割多重の先鋭的研究で世界のトップを走る NICT の研究開発

NICT 委託研究では、産学官連携による実用化に向けた研究を主体に行っている一方、NICT 自ら取り組む研究においては、より先端的・先鋭的な目標に挑戦している。

- ファイバ 1 本あたり 109 テラビット毎秒(世界記録) [3]
- 世界初の伝送用 19 コアファイバ、ファイバ 1 本あたり 305 テラビット毎秒(世界記録) [9]
- 世界初の 19 コア一括 EDFA (光増幅器) [10]
- 19 コアファイバを用いた自己ホモダイン伝送 [11]
- 36 コア 3 モードファイバ伝送(コア数世界記録) [12]
- ファイバ 1 本あたり 2 ペタビット毎秒(世界記録) [13]
- 1,000 km 超での数モードファイバによる 159 テラビット毎秒伝送(世界記録) [14]
- 世界初のマルチコアファイバを用いた軌道角運動

量多重によるデータ伝送 [15]

- 39 コア 3 モードファイバ双方向伝送 [16]
- SSMF と被覆外径互換の 3 モード 4 コアファイバによるペタビット伝送 [17]

4 まとめ

SSMF に基づく陸上幹線系や、光増幅による海底ケーブルシステムなど、現代の主要な光ネットワークの伝送設備は、いずれもそのキー技術の研究開発開始から 15 年程度で実用化導入を果たしている。SDM 技術に関して同様の外挿が可能であれば、SDM 研究元年を委託研究課題 146 が開始された 2010 年と置き、およそ 2025 年頃に実用化に至るのではないかと期待される。くしくもそれは、現在の商用システム上で容量危機の影響が顕在化すると予測される時期と重なっており、NICT ひいては日本の技術開発が誠に時宜を得たものであることを祈りたい。

【参考文献】

- 1 Emmanuel B. Desurvire, "Capacity Demand and Technology Challenges for Lightwave Systems in the Next Two Decades," J. Lightwave Technol. 24, 4697-4710 (2006).
- 2 F. Hamaoka, K. Minoguchi, T. Sasai, A. Matsushita, M. Nakamura, S. Okamoto, E. Yamazaki, and Y. Kisaka, "150.3-Tb/s Ultra-Wideband (S, C, and L bands) Single-Mode Fibre Transmission over 40-km Using >519Gb/s/ λ PDM-128QAM Signals," ECOC2018, Mo4G.1.
- 3 J. Sakaguchi, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, T. Hayashi, T. Taru, T. Kobayashi, and M. Watanabe, "109-Tb/s (7 \times 97 \times 172-Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber," OFC2011, PDPB6.
- 4 H. Takara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, Y. Goto, K. Tsujikawa,

3 コアネットワークの大容量化を目指す研究開発

- Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshiba, and T. Morioka, "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency," ECOC2012, Th.3.C.1.
- 5 K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, Y. Tsuchida, K. Maeda, M. Tadakuma, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, and M. Suzuki, "1.03-Exabit/s-km Super-Nyquist-WDM Transmission over 7,326-km Seven-Core Fiber," ECOC2013, PD1.E.3.
- 6 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 × 344 Tb/s Propagation-direction Interleaved Transmission over 1500-km MCF Enhanced by Multicarrier Full Electric-field Digital Back-propagation," ECOC2013, PD1.E.4.
- 7 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," ECOC2017, Th. PDP.A.1.
- 8 T. Matsui et al., "118.5 Tbit/s Transmission over 316 km-Long MultiCore Fiber with Standard Cladding Diameter," in 2017 OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), Singapore, 2017, p. 10.1109/OECC.2017. 8115049.
- 9 J. Sakaguchi, B. J. Puttnam, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa, R. Sugizaki, T. Kobayashi, and M. Watanabe, "19-core fiber transmission of 19×100×172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305Tb/s," OFC2012, PDP5C.1.
- 10 J. Sakaguchi, W. Klaus, B. J. Puttnam, J.-M. D. Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tsuchida, K. Maeda, M. Tadakuma, K. Imamura, R. Sugizaki, T. Kobayashi, Y. Totori, M. Watanabe, and R. V. Jensen, "19-core MCF transmission system using EDFA with shared core pumping coupled in free-space optics," ECOC 2013, Th.1.C.6.
- 11 B. J. Puttnam, J. Delgado-Mendinueta, J. Sakaguchi, R. S. Luis, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, and T. Kawanishi, "105Tb/s Transmission System Using Low-cost, MHz Linewidth DFB Lasers Enabled by Self-Homodyne Coherent Detection and a 19-Core Fiber," OFC2013, OW11.1.
- 12 J. Sakaguchi, W. Klaus, J. M. Delgado 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," OFC2015, Th5C.2.
- 13 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. Marcianete, "2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb," ECOC2015 PDP 3-1.
- 14 G. Rademacher, R. S. Luis, B. J. Puttnam, T. A. Eriksson, E. Agrell, R. Maruyama, K. Aikawa, H. Furukawa, Y. Awaji, and N. Wada, "159 Tbit/s C+L Band Transmission over 1045 km 3-Mode Graded-Index Few-Mode Fiber," in Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2018), paper Th4C.4.
- 15 Y. Awaji, N. Wada, Y. Toda, and T. Hayashi, "World first mode/spatial division multiplexing in multi-core fiber using Laguerre-Gaussian mode," in 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper We.10.P1.55.
- 16 J. Sakaguchi, K. Werner, Y. Awaji, N. Wada, T. Hayashi, T. Nagashima, T. Nakanishi, T. Taru, T. Takahata, and T. Kobayashi, "228-spatial-channel Bi-directional data communication system enabled by 39-core 3-mode fiber," ECOC2018, Mo3G.1.
- 17 R. S. Luis, G. Rademacher, B. J. Puttnam, T. A. Eriksson, H. Furukawa, A. Ross-Adams, S. Gross, M. Withford, N. Riesen, Y. Sasaki, K. Saitoh, K. Aikawa, Y. Awaji, and N. Wada, "1.2 Pb/s Transmission Over a 160 mm Cladding, 4-Core, 3-Mode Fiber, Using 368 C+L band PDM-256-QAM Channels," ECOC2018, Th3B.3.

淡路祥成 (あわじ よしなり)

ネットワークシステム研究所
フォトリックネットワークシステム研究室
研究マネージャー
博士(工学)
フォトリックネットワーク、光増幅器、光伝送