

## 3-2 空間多重光伝送技術

### 3-2 *Space Division Multiplexing Transmission Technology*

#### 3-2-1 革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発

#### ～ペタビット級空間多重光ファイバの実用化・大容量化技術～

#### 3-2-1 *R&D of Innovative Optical Fiber and Communication Technology*

#### — *Ultra Large Capacity Transmission Technology Around Peta bit/s* —

森田逸郎

Itsuro MORITA

既存光ファイバの容量限界を打破する技術として、2013年からの5年間、NICT委託研究プロジェクト「革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発 (i-FREE<sup>2</sup>)」において、ペタビット級の伝送性能を有するマルチコアファイバに関する研究開発を実施した。本稿では、本研究開発の概要を述べるとともに、その代表的な成果として、モード多重伝送技術を併用することにより10ペタビット級の潜在的伝送能力を有することを実証した伝送実験を紹介する。

We had conducted research on multi-core fiber with a potential capacity over Peta bit/s in a NICT consigned research project, “R&D of Innovative Optical Fiber and Communication Technology,” from 2013 to 2018. In this paper, we review the project and describe a transmission experiment using multi-core multi-mode fiber to demonstrate a feasibility of 10 Peta bit/s transmission as one of major achievements in the project.

## 1 まえがき

年率40%に達する勢いで増大する通信トラフィックを支える光ファイバ通信の伝送容量は、たゆまぬ技術開発により堅調に増加してきたが、従来光ファイバでは、その入力光パワー限界などの物理的制約がもたらす容量枯渇の可能性が指摘されている。この容量枯渇問題を未然に回避するべく、マルチコアファイバを中心とした空間分割多重技術(Space Division Multiplexing: SDM)の研究分野開拓に我が国が先鞭をつけてきた。

SDMに関する最初の委託研究プロジェクトとして、2010～2012年度には「革新的光ファイバ技術の研究開発 (i-FREE) [1]」が実施された。本プロジェクトでは、既存光ファイバの制限要因をクリアする「革新的光ファイバ」に関しての基礎研究が行われ、マルチコアファイバの設計及び製造方法と並行して、その性能評価方法が研究開発され、全く新しい伝送媒体を実現するための要素技術の探索的研究が行われた。

i-FREEに引き続き、2011～2015年度には、「革新的光通信インフラの研究開発 (i-ACTION) [2]」が実施された。本プロジェクトでは、マルチコアファイバ光

伝送システムを実現するために必要となる、マルチコアファイバ用光増幅技術、マルチコアファイバ用接続技術、超多値伝送技術の研究開発が行われ、マルチコアファイバ/光増幅器を用いた大洋横断級の長距離伝送も実証された [3][4]。

これら2つの委託研究プロジェクトに引き続き、「革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発 (i-FREE<sup>2</sup>) [5][6]」が2013～2017年度に実施された。本プロジェクトでは、先行プロジェクトの優位性・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、基幹系光伝送システム等の中・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・高信頼化を推進すること及びマルチコア・マルチモードファイバの実用性の可否を技術的に検討することを目的に実施された。本委託研究プロジェクトは、2つの課題で構成されており、本稿では、そのうちの、KDDI総合研究所、古河電気工業、住友電気工業、東北大学により実施された「ペタビット級空間多重光ファイバの実用化・大容量化技術 [5]」の概要及び主要成果を紹介する。

## 2 ペタビット級空間多重光ファイバの実用化・大容量化技術の研究開発

NICT 委託研究課題「ペタビット級空間多重光ファイバの実用化・大容量化技術」では、以下の4つの小課題について研究開発を行った。

- ① 大容量マルチコアファイバ伝送技術 (KDDI 総合研究所)
- ② マルチコアファイバのコア密度拡大・母材大型化・高速測定技術 (古河電気工業)
- ③ マルチコアファイバの高信頼化・高精度化とモード多重技術応用 (住友電気工業)
- ④ 大容量マルチコアファイバの性能評価技術 (東北大学)

以下では、各小課題の概要と主要成果について述べる。

### 2.1 大容量マルチコアファイバ伝送技術

本小課題では、モード間の結合を最小限に抑圧した弱結合モード多重伝送システムの伝送性能を評価し、実用的なモード多重伝送技術を確認すること及び、モード多重伝送技術をマルチコアファイバに適用したマルチコア・マルチモードファイバを用いたマルチペタビット級の潜在的伝送性能を実証することを目標に研究開発を実施した。

弱結合モード多重システムに関しては、損失及びクロストークを低減可能なマッハツェンダ干渉計型モード多重分離器を考案・開発し、その有効性を確認した。さらに、C帯及びL帯において25 GHz間隔で波長多重した336チャンネルの偏波多重四相位相変調(QPSK)信号(伝送速度:76.5 Gbit/s)を10モード多重し、48 kmの伝送実験を行った。伝送路中でのモード結合の制御を行わない強結合モード多重伝送では、10モード多重伝送のためには $20 \times 20$ のMIMO信号処理が必要になるが、弱結合モード多重伝送方式を用いることにより、 $2 \times 2$ もしくは $4 \times 4$ のMIMO信号処理のみを用いて、257 Tbit/sの大容量伝送が可能であることを実証した[7]。

さらに、他の小課題の成果も活用してマルチコア・マルチモードファイバを用いた大容量伝送実験を実施し、マルチペタビット級の潜在的伝送性能を実証した。本伝送実験の詳細については次章で述べる。

### 2.2 マルチコアファイバのコア密度拡大・母材大型化・高速測定技術

本小課題では、マルチコアファイバのコア密度拡大を達成し、単一モードを用いたマルチペタビット級伝送が可能な100 km級マルチコアファイバの実現及び

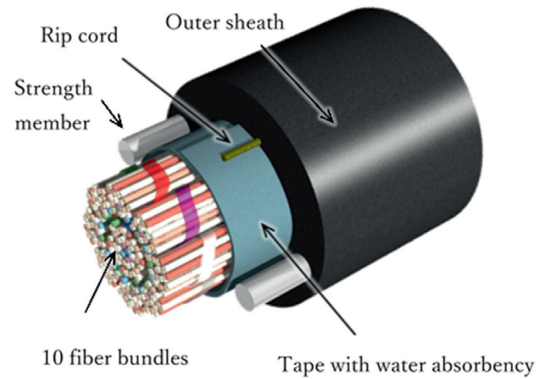


図1 試作した超高密度ケーブル [8]

母材大型化、高速測定技術の開発を通じて、マルチコアファイバの実用化への道筋を立てることを目標に研究開発を実施した。

マルチコアファイバのコア密度拡大技術に関しては、高コア密度かつ実用的なマルチコアファイバの設計を確認し、100 km級ファイバの実現性を確認するとともに、高コア密度を維持しつつ実用性を重視したクラッド径125  $\mu\text{m}$ ファイバを収容した1,000コア相当のケーブル試作を行い、8.4 コア/ $\text{mm}^2$ の空間密度の達成見通しを得た(図1)[8]。

マルチコアファイバ母材の大型化技術に関しては、外付け法、一体化線引法、異形管法の3種の手法の検討を行い、穿孔法をベースとした一体化線引が精度的には最良であることを明らかにし、コア位置ずれ1.5  $\mu\text{m}$ を実現した。さらに、本製法の改善可能箇所を調査し、0.5  $\mu\text{m}$ の位置精度が得られる見通しも得た。

マルチコアファイバの高速測定技術に関しては、ファンアウトを活用した測定法について19コアまでの検証を行い、高速化と十分な精度が得られることを確認した。さらに、マルチコアファイバに重要なスキャー測定技術も確立した。

### 2.3 マルチコアファイバの高信頼化・高精度化とモード多重技術応用

本小課題では、実用的なマルチコアファイバが満たすべき構造や光学特性の明確化、マルチコアファイバにモード多重伝送を適用するマルチコア・マルチモードファイバの試作・検証及びマルチコアファイバ間の接続損失を低減するためのコア配列高精度化技術の確立を目標として研究開発を実施した。

高信頼マルチコアファイバの開発に関しては、ルース型のマルチコアファイバケーブルを試作し、機械試験・光学特性さらに伝送特性に何ら問題が生じないことを明らかにした。

マルチコア・マルチモードファイバの開発では、

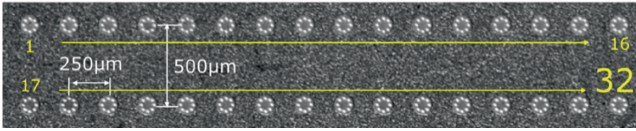


図2 256 コアコネクタの端面写真 [9]

6モード19コアファイバの設計・試作を行い、共同受託機関と連携してその伝送特性の評価を行うとともに、マルチコア・マルチモードファイバの実効断面積の測定方法を考案・実証した。

マルチコアファイバのコア配列高精度化技術の開発に関しては、測定誤差、線引き起因の誤差、母材作成時に生じる誤差などの要因を洗い出し、その低減手法を明らかにし、±0.5 μm以下のコア間隔の誤差を実現した。また、マルチコアファイバ多条コネクタを開発し、96コアコネクタ及び256コアコネクタにおいて、1 dB以下の挿入損失を実現するとともに、全コアでのフィジカルコンタクト接続を達成し、世界最高コア密度の光コネクタを実現した(図2) [9]。

### 2.4 大容量マルチコアファイバの性能評価技術

本小課題では、マルチモードファイバにおけるモード間の結合の大きさとその長手方向分布の一括測定が可能なモード結合評価技術の確立及び、マルチコアファイバにおける超多値光信号(多値度64～256)の

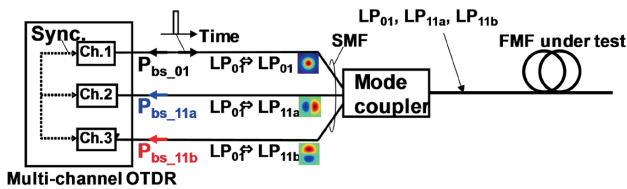


図3 モード結合量の長手分布特性の測定系 [10]

伝送特性の評価を通じたペタビット級大容量伝送の実現可能性の明確化を目標に研究開発を実施した。

モード結合評価技術としては、マルチチャンネルOTDRを用いてマルチモードファイバ中のモード結合量の長手方向の分布を測定する手法を新たに提案し、LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>の3モードに対するクロストークの測定技術を確立する [10] とともに、マルチモードファイバとマルチコアファイバの両方に対応したモード結合測定装置を開発した(図3)。

マルチコア・マルチモードファイバの超多値伝送とその特性評価に関しては、256値以上の超多値直交振幅変調(QAM)伝送に適した、低非線形性かつ低クロストーク特性を有する19コア単一モードファイバを古河電気工業と協力して開発し [11]、本ファイバを用いてC帯及びL帯において10 GHz間隔で波長多重した965チャンネルの偏波多重256 QAM信号(伝送速度:120 Gbit/s)を31 km伝送し、2.2 Pbit/sの超大容量伝送の可能性を実証した。

## 3 マルチコア・マルチモードファイバを用いた10.16 Pbit/s 伝送実験

各小課題の成果を最大限に活用し、マルチコア・マルチモードファイバの10ペタビット級の潜在的伝送能力を有することを実証するための伝送実験を実施した [12]。

図4に伝送実験系を示す。実験では、C帯及びL帯において12.5 GHz間隔で波長多重した739チャンネルの光信号を用いた。光信号の変調方式としては、12 Gbaudの偏波多重64 QAM又は16 QAMを用いた。送受信器で用いた光増幅器の利得不足などにより、739チャンネルのうち、最短波長及び最長波長周辺の

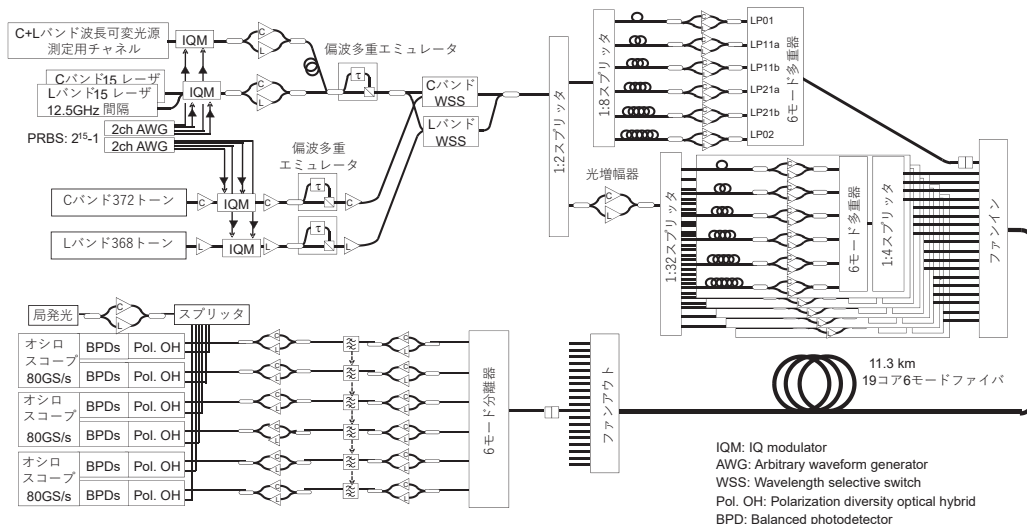


図4 10.16 Pbit/s 伝送実験系

### 3 コアネットワークの大容量化を目指す研究開発

67チャンネルは十分な信号対雑音比が確保できなかったため、64 QAM 信号ではなく 16 QAM 信号とした。生成した波長多重信号は、光スプリッタにより分岐して 19 コアファイバの各コアへ入力する信号光とした。各コア用の信号光は更に光スプリッタで分岐した後、適切な光遅延線を挿入して信号間の相関を無くしてモード多重器に入力した。モード多重器では、6つの LP<sub>01</sub> モード (基底モード) の信号を LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>、LP<sub>02</sub>、LP<sub>21a</sub>、LP<sub>21b</sub> の 6つのモードに変換し多重した。

伝送実験には、長さが 11.3 km の 19 コア 6 モードファイバを用いた。図 5 に断面写真及び屈折率プロファイルを示す。コア直径は 18.4 μm、コア間隔は約 51 μm、クラッド直径は 267 μm である。19 コア 6 モードファイバの入出力端は、Fan-in デバイス及び Fan-out デバイスを介して 19 本の 6 モードファイバと接続した。

伝送後の空間多重信号は、空間多重過程と同様の方法で Fan-out デバイス及び 6 モード分離器にて個々のコアとモードに空間分離した。モード分離器により分離された LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>、LP<sub>21a</sub>、LP<sub>21b</sub>、LP<sub>02</sub> に相当する 6つの光信号は、6 台の光バンドパスフィルタによりそれぞれ 1 波長の光信号に分離した後、6 台のデジタルコヒーレント受信器によりヘテロダイン受信した。取得した信号は、モード間遅延差やモード間クロストークを補償するため、オフラインにて MIMO 信号処理を施した後、符号誤り率を測定し、最終的には信号品質を表す Q 値に換算した。このような測定を、波長、コアを変えながら行い、6 モード × 739 波長 × 19 コア = 84,246 チャンネルの信号特性を評価した。このような大量の信号特性評価を効率的に実施するため、光源波長、波長選択用光バンドパスフィルタの中心波長の設定のほか、データ取得やデジタル信号処理も自動化し、可能な限り測定を自動化を図った。

図 6 に、中心コアにおける各波長・各モードの Q 値特性及び伝送後の光スペクトラムを示す。ほかの 18 コアについても同様の測定を行った。今回の伝送実験では、冗長度の異なる 3 種類の誤り訂正符号 (冗長度 12.75 % [13]、20 % [14]、25.5 % [15]) を適用し、信号の伝送特性に応じて最適な誤り訂正符号を選択することを想定した。その結果、全 84,246 チャンネルについて、図中に点線で示した誤り訂正後に 10<sup>-15</sup> 以下の

誤り率を達成した。図 6 に、中心コアにおける各波長・各モードの Q 値特性及び伝送後の光スペクトラムを示す。ほかの 18 コアについても同様の測定を行った。今回の伝送実験では、冗長度の異なる 3 種類の誤り訂正符号 (冗長度 12.75 % [13]、20 % [14]、25.5 % [15]) を適用し、信号の伝送特性に応じて最適な誤り訂正符号を選択することを想定した。その結果、全 84,246 チャンネルについて、図中に点線で示した誤り訂正後に 10<sup>-15</sup> 以下の

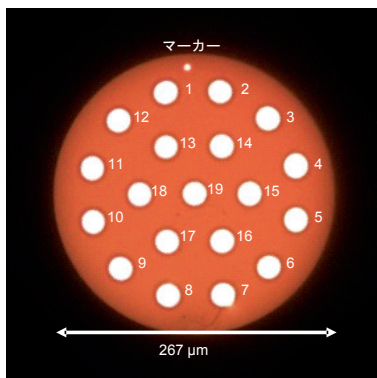


図 5 19 コア 6 モードファイバの断面と屈折率分布

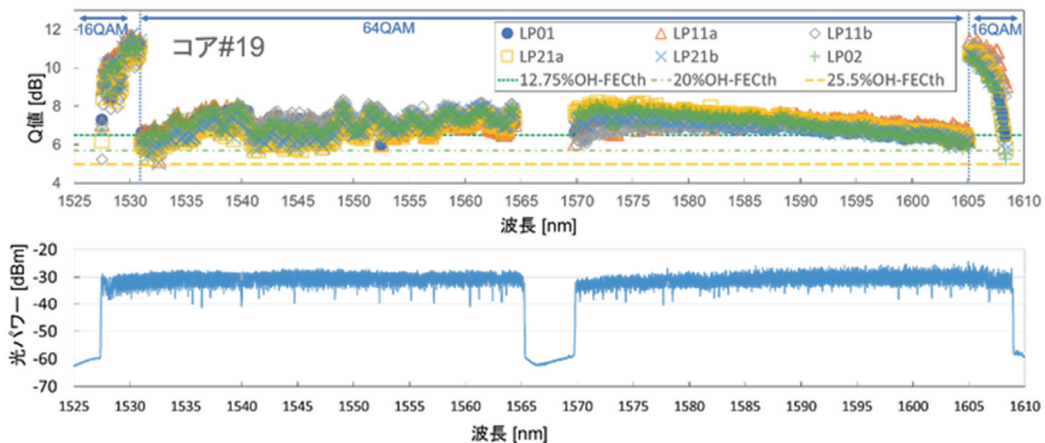


図 6 中心コアにおける各波長・各モードの伝送特性及び伝送後光スペクトル

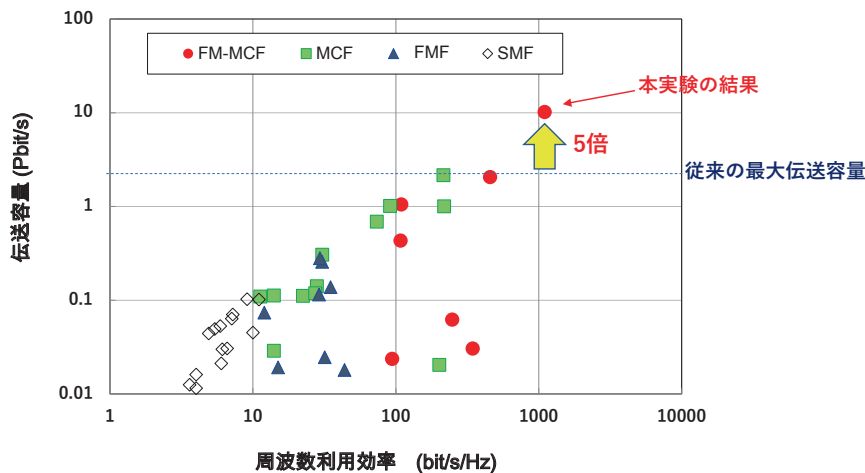


図7 代表的な大容量伝送実験における周波数利用効率と伝送容量

符号誤り率を得るために必要なしきい値を上回るQ値が得られ、ファイバ1芯あたり10.16 Pbit/sの伝送容量と周波数利用効率1099.9 bit/s/Hzを達成できることを確認した。本結果は、図7に示すとおり、従来の最大伝送容量を5倍以上に更新するものであり、光通信の伝送速度も「京(10ペタビット/秒)」の時代がやってきたことを示している。

## 4 まとめ

委託研究プロジェクト「革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発(i-FREE<sup>2</sup>)～ペタビット級空間多重光ファイバの実用化・大容量化技術～」では、マルチコアファイバの実用化に向けた多くの成果が得られるとともに、マルチモード伝送技術を併用することによる超大容量伝送の可能性も示された。

2016年度には「空間多重フォトニックノード基盤技術の研究開発(SDM-PN)[16]」が開始され、SDM技術を活用したフォトニックノードアーキテクチャ・システム制御技術、ノード光増幅・方路制御技術、配線技術の研究開発を通じて、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、従来より2桁以上高い10 Pbit/s級のノードスループットを有する大容量空間多重光ルーティングノードの実現を目標とした検討が進められている。本研究開発では、ポイントポイントの伝送容量の拡大から、面的なネットワークへと検討対象が拡大されている。

さらに、2018年度には、SDM技術の具体的な適用領域として長距離海底ケーブルシステムを想定した、総務省の委託研究プロジェクト「マルチコア大容量伝送システム技術に関する研究開発[17]」も開始された。

このようなSDM技術の検討の拡大と深化を通じ、その実用化へ少しずつ近づいていくことが期待される。

## 謝辞

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～ペタビット級空間多重光ファイバの実用化・大容量化技術～」を共同で実施した古河電気工業、住友電気工業、東北大学、KDDI 総合研究所の関係者に深く感謝をいたします。

## 【参考文献】

- 1 [http://www.nict.go.jp/collabo/commission/k\\_17001.html](http://www.nict.go.jp/collabo/commission/k_17001.html) (採択番号 146ア01～05、146イ)。
- 2 [http://www.nict.go.jp/collabo/commission/k\\_17001.html](http://www.nict.go.jp/collabo/commission/k_17001.html) (採択番号 150ア01, 02、150イ01～05、150ウ01, 02)。
- 3 H. Takahashi, T. Tsuritani, E. L. T. de Gabory, T. Ito, W. R. Peng, K. Igarashi, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, I. Morita, Y. Tsuchida, Y. Mimura, K. Maeda, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, and M. Suzuki, "First demonstration of MC-EDFA-repeated SDM transmission of 40 x 128-Gbit/s PDM-QPSK signals per core over 6,160-km 7-core MCF," ECOC2012, Th.3.C.3, 2012.
- 4 K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, Y. Tsuchida, K. Maeda, M. Tadokuma, 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, PD3.E.3, 2013.
- 5 [http://www.nict.go.jp/collabo/commission/k\\_17001.html](http://www.nict.go.jp/collabo/commission/k_17001.html) (採択番号17001)。
- 6 [http://www.nict.go.jp/collabo/commission/k\\_17001.html](http://www.nict.go.jp/collabo/commission/k_17001.html) (採択番号17002)。
- 7 D. Soma, S. Beppu, Y. Wakayama, Y. Kawaguchi, K. Igarashi, and T. Tsuritani, "257-Tbit/s Partial MIMO-based 10-Mode C+L-band WDM Transmission over 48-km FMF," ECOC2017, M.2.E.3, 2017.
- 8 M. Tsukamoto, T. Miura, Y. Hoshino, T. Gonda, K. Imamura, and R. Sugizaki, "Ultra-High Density Optical Fiber Cable with Rollable Multicore Fiber Ribbon," IWCS2016, 14-3, 2016.
- 9 T. Morishima, J. Ito, T. Shimazu, H. Arao, O. Shimakawa, T. Yokochi, F. Uehara, M. Ohmura, T. Nakanishi, T. Sano, and T. Hayashi, "MCF-enabled Ultra-High-Density 256-core MT Connector and 96-core Physical-Contact MPO Connector," OFC2017, Th5D.4, 2017.
- 10 M. Nakazawa, M. Yoshida, and T. Hirooka, "Measurement of mode coupling distribution along a few-mode fiber using a synchronous multi-channel OTDR," Opt. Express 22, 31299-31309, 2014.
- 11 M. Yoshida, K. Kasai, T. Hirooka, M. Nakazawa, K. Imamura, and R. Sugizaki, "1024 QAM coherent optical transmission in 31 km-long, 19-core fiber with low crosstalk and large effective area," OECC 2017, 3-1K-2, Aug. 2017.
- 12 D. Soma, Y. Wakayama, S. Beppu, S. Sumita, T. Tsuritani, T. Hayashi, T. Nagashima, M. Suzuki, H. Takahashi, K. Igarashi, I. Morita, and

### 3 コアネットワークの大容量化を目指す研究開発

- 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, 2017.
- 13 T. Kobayashi, M. Nakamura, F. Hamaoka, K. Shibahara, T. Mizuno, A. Sano, H. Kawakami, A. Isoda, M. Nagatani, H. Yamazaki, Y. Miyamoto, Y. Amma, Y. Sasaki, K. Takenaga, K. Aikawa, K. Saitoh, Y. Jung, D. J. Richardson, K. Pulverer, M. Bohn, M. Nooruzzaman, and T. Morioka, "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," OFC, Th5B.1, 2017.
- 14 D. Chang, F. Yu, Z. Xiao, N. Stojanovic, F. N. Hauske, Y. Cai, C. Xie, L. Li, X. Xu, and Q. Xiong, "LDPC Convolutional Codes Using Layered Decoding Algorithm for High-speed Coherent Optical Transmission," OFC, OW1H.4, 2012.
- 15 K. Sugihara, Y. Miyata, T. Sugihara, K. Kubo, H. Yoshida, and W. Matsumoto, "A Spatially-coupled Type LDPC Code with an NCG of 12 dB for Optical Transmission beyond 100 Gb/s," OFC, OM2B.4, 2013.
- 16 [http://www.nict.go.jp/collabo/commission/k\\_188.html](http://www.nict.go.jp/collabo/commission/k_188.html) (採択番号18801).
- 17 [http://www.soumu.go.jp/menu\\_seisaku/ictseisaku/ictR-D/ichiran30.html](http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/ichiran30.html)



**森田逸郎** (もりた いつろう)  
(株) KDDI 総合研究所  
執行役員  
博士(工学)  
長距離光通信、光ネットワーク