

長距離伝送に適した結合型マルチコア光ファイバ

Coupled Multi-Core Optical Fiber for Long-Haul Transmission

林 哲也*
Tetsuya Hayashi

田村 欣章
Yoshiaki Tamura

長谷川 健美
Takemi Hasegawa

中西 哲也
Tetsuya Nakanishi

樽 稔樹
Toshiki Taru

現行のシングルモード光ファイバ (SMF) 伝送技術に基づく長距離伝送システムの伝送容量は、近い将来限界を迎えることが予測される。当社ではこの伝送容量限界を打破する次世代の光ファイバとして、直径125 μm のガラスクラッドに4つの純シリカコアを内蔵した結合型マルチコア光ファイバ (MCF) を開発し、従来の記録を大幅に更新する低空間モード分散 (SMD) と、既報のMCFの中で最も低い伝送損失を実現した。低SMD特性は受信信号のデジタル信号処理計算負荷の大幅な低減に、低伝送損失特性はコアごとの伝送容量拡大に、標準ファイバと同等のクラッド直径は高い機械的信頼性の実現に、それぞれ寄与する。また、開発したMCFが、同等の伝送損失と実効断面積を持つSMFより優れた伝送特性を持つことも実験で確認されている。本開発成果は、結合型MCFが、超長距離伝送システムにも導入可能なレベルの信頼性と性能を兼ね備えた光ファイバであることを示すものである。

Sumitomo Electric Industries, Ltd. has developed a 125- μm -cladding coupled four-core fiber achieving the lowest spatial mode dispersion (SMD) and attenuation among optical fibers for space-division multiplexed transmission. The standard 125- μm -diameter cladding offers a high mechanical reliability equivalent to field-proven standard fibers. The low SMD reduces the computational complexity of multiple-input-multiple-output (MIMO) digital signal processing. The low transmission loss comparable to that of conventional ultra-low-loss fibers contributes to an increase in the transmission capacity without sacrificing the per-core capacity. Furthermore, this coupled multi-core fiber (MCF) was experimentally confirmed to outperform the equivalent single-mode fiber (SMF) in transmission characteristics. The present results demonstrate that the coupled MCF is suited for ultra-long-haul transmission systems.

キーワード：空間分割多重、SDM、結合型マルチコア光ファイバ、MCF、モード分散

1. 緒言

シングルモード光ファイバ (SMF) の伝送容量は、研究においては、100Tbit/s/fiberの理論限界に達しており^{(1),(2)}、伝送容量の限界を打破する手段として、空間分割多重化 (SDM) が盛んに研究されている⁽³⁾。一方で実用システムにおいては、太平洋横断海底伝送システムの伝送容量は図1で示すように指数関数に増加しており、2018年には1本のケーブルで144Tbit/sの双方向伝送が可能となるシステムの運用が予定されている⁽⁴⁾。図1のトレンドから2025年には数Pbit/sの伝送システムが必要となると予測できる。

このような大容量伝送の実現には、ケーブルあたりのファイバ数や1ファイバあたりの伝送容量を増やす必要がある。しかしながら、海底ケーブルにおいては、芯数の増加によりケーブルの径が大きくなると敷設船への積み込み容量の制限から敷設コストの増加が懸念され、また、海底用のルースチューブケーブルにおいては、被覆色などの外観によるファイバの識別・同定も多芯化の大きな課題となり、大幅な多芯化は難しい。また、大洋横断の様な長距離伝送においてファイバ1本当たりの伝送容量の改善にも限界がある。最新の低損失・低非線形SMFを使った伝送実験の結

果^{(2),(5),(6)} (図2参照) は、超長距離伝送時のSMF伝送システム容量の原理的限界を示唆している。このため、大洋横断級の海底伝送システムにおいて、SMF伝送システムでは伝送容量需要を満たせない事態が今後10年で現実化する可能性が十分にある。SDMファイバは従来のケーブル構造の変更が不要で、単純に空間チャンネル数を増やすことがで

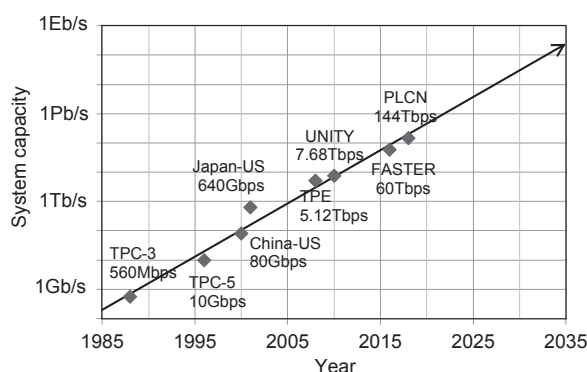


図1 太平洋横断海底光ファイバ通信系の伝送容量推移

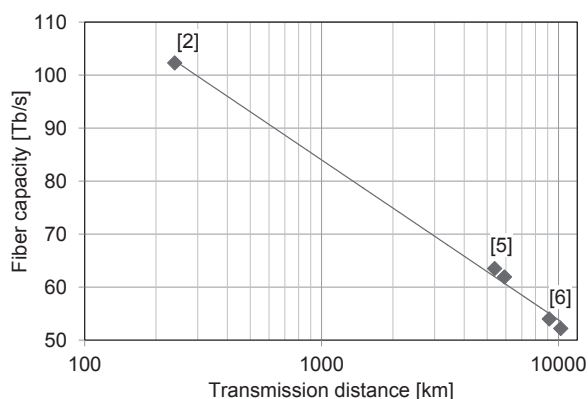


図2 OFC/ECOC^{*1}で報告されたSMFを用いた伝送実験の伝送容量と距離の関係⁽⁸⁾

きることから、従来のSMF伝送システムの伝送容量限界打破の有効な解決策の候補である。

超長距離海底のシステムにおいてSDMファイバを使用するためには、

- ・光信号対雑音比改善のために、伝送損失低減
- ・機械的信頼性維持のために、従来ファイバと同じ125 μm のガラス外径での高い空間モード密度実現
- ・デジタル信号処理 (DSP) 計算負荷を抑制のための空間モード間群遅延差 (空間モード分散SMD) 低減

を実現する必要がある。

本報告では、汎用ファイバと同じガラス外径125 μm の中に、実効断面積 (A_{eff}) 112 μm^2 の純シリカコアを4つ内蔵した結合型マルチコアファイバ (C-MCF) を試作した結果^{(7), (8)}について紹介する。作製したC-MCFのSMDは、波長1520~1580nmにおいて $3.14 \pm 0.17 \text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ 、全コア平均の伝送損失は波長1550nmで0.158dB/kmと低い値を実現した。これらの値は、本稿執筆時点において (2017年5月)、これまでに報告されたSDMファイバの中で、最も低い記録値である。また、伝送損失やコアモード A_{eff} が同等のSMFと比較して、開発したC-MCFが非線形雑音の低減によるとみられる優れた伝送特性を有することも実験的に確認されている⁽⁹⁾。

2. ファイバ設計

様々な種類のSDMファイバが提案されているが、代表的なものは、非結合型マルチコアファイバ (MCF)、数モードファイバ (FMF: Few-mode fiber)、結合型MCF (C-MCF) がある。それぞれのファイバの構造と対応する伝送システムの模式図を図3に示す。非結合型MCFは、コア間隔を離してコア間クロストーク (XT) を抑えることで、信号を複数のコアで独立に伝送させることから、従来のSMF伝送システムの受信器をそのまま使用することがで

きる。FMFは、ひとつのコアの中の複数のモード (光の通り道) を利用して、複数の信号を伝送するが、モード間でのXTの抑圧は困難であり、受信側でXT補償のための信号処理 (MIMO DSP) を行う必要がある。C-MCFは、XTが生じることを許容しMIMO DSPを行うことを前提にコア間隔を狭めて高いコア密度を実現したファイバである。

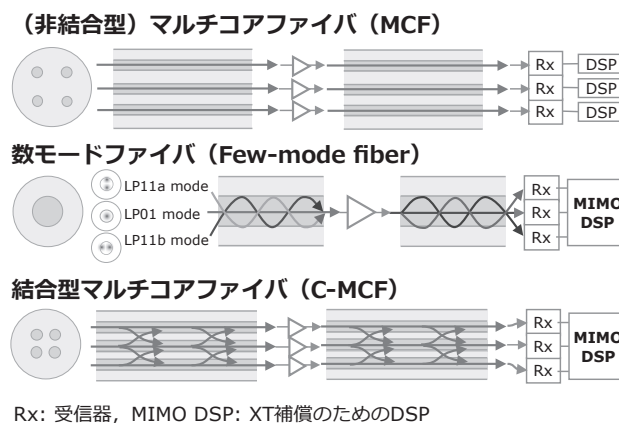


図3 代表的なSDMファイバと、対応する伝送システムの模式図

これらのなかで、我々は、C-MCFを採用して、低損失と低SMDの実現を目指すこととした。C-MCFは非結合型MCF^{(10), (11)}と比較してより高い空間チャンネル密度を達成できる。非結合型MCFではXT抑制のためにコア間隔を大きくする必要があり、ガラスクラッド径も大きくなる傾向があるため、機械的信頼性の再検証が必要になるが、C-MCFは汎用ファイバ同等の直径125 μm のクラッドに多くのコアを内蔵することができる。さらに、C-MCFでは、ランダムなモード結合により、SMD^{(11), (12)}やモード依存損失・利得 (MDL・MDG)⁽¹³⁾、非線形効果^{(14), (15)}の蓄積を抑えることができる。これは、伝送特性の向上や、XT補償のためのMIMO DSPの計算負荷低減の観点から、極めて重要な好ましい特性である。また、C-MCFにおけるランダムなモード結合^{(11), (12)}は、単純なステップインデックス型の純シリカコアでのSMD抑制を可能とし、極低損失SMF^{(16)~(19)}で実現されているのと同様の極低損失の実現を期待できる。この点も、SMD低減のためにGe添加による精密な屈折率分布制御が必要で極低損失化が困難なFMFと比較して有利な点となる。

そこで我々は、 A_{eff} が112 μm^2 の極低損失な純シリカコアSMF (Z-PLUS Fiber ULL^{(16), (17)}) の設計を基に、C-MCFの設計を実施した。C-MCFの各コアを同一構造とし、コア配置は正格子状にした。コア間隔 Λ は、ランダム結合を促進する様にシミュレーション結果から20 μm とし、ファイバ外径は汎用ファイバと同じ125 μm とした。

3. 試作結果

表1に作製したC-MCFの光学特性を示す。また、写真1にファイバの断面写真、図4に平均伝送損失スペクトルを示す。実際のクラッド径は125 μm で、 Λ は19.5~19.8 μm であった。伝送損失の測定は、カットバック法と後方散乱法⁽²⁰⁾の双方で実施した。コアモードは1mも導波しないうちに完全に混ざるため、測定された伝送損失の値は、伝送損失のモード平均値に当たる。

カットバック法で測定した平均伝送損失の最低値は、1550nmにおいて0.158dB/kmと過去に報告のあるMCFの(C-MCFの0.177dB/km⁽¹¹⁾、非結合MCFの0.168dB/

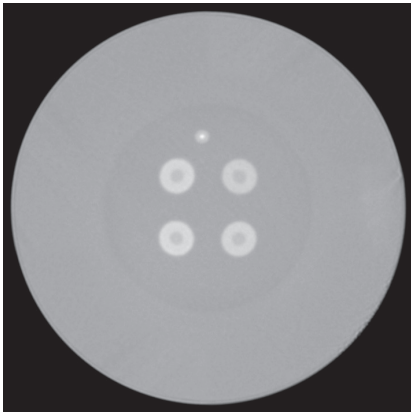


写真1 試作したC-MCFの断面写真⁽⁷⁾

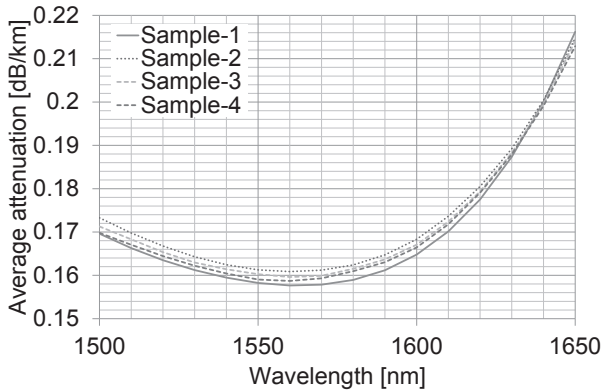


図4 試作C-MCFの平均伝送損失スペクトル⁽⁸⁾

km⁽²¹⁾)より低く、極低損失SMFの値(0.142~0.154dB/km^{(16)~(19)})に迫る値となった。サンプル1とサンプル2でカットバック法と後方散乱法の伝送損失に差異がみられる理由は、出射端近傍の局所的な過剰損失によるものと推測する。

ケーブルカットオフ波長(λ_{cc})はマルチモード参照法⁽²⁰⁾で測定した。コアの基底モードに相当する4つの固有モードよりも高次のモードの λ_{cc} の測定値は1480nm以下であった。

波長分散(CD)のモード平均は、一般的な変調位相シフト法⁽²²⁾を使用して測定した。CD測定では、所定の1コアに測定光の入出力を行うことでランダムモード結合を活用して全モードの平均値を測定し、設計値と良く整合していることを確認した。 $R_b = 15\text{mm}$ での曲げ損失は、1550nmにおいて0.1dB/turn未満であった。強くランダムなモード結合により、 A_{eff} は測定ができず、評価方法の開発が必要である。しかしながら、他の特性の測定値と設計値が良く整合していることから、 A_{eff} についても設計と整合するものと考えている。

4. 空間モード分散測定

前述の通り、クロストーク補償のDSP計算負荷を抑制するには空間モード分散(SMD)低減が重要である。試作した結合型MCFの実際のSMDを調べるために、文献(23)にならい、偏波モード分散(PMD)測定におけるフーリエ解析を用いた固定アナライザ法⁽²⁴⁾に類似の方法を用いて、波長1520~1580nmの範囲でSMDを測定した。測定法の詳細は文献(8)を参照されたい。

測定により、図5に示すようなDGD(モード間群遅延差) $\Delta\tau$ の確率分布が得られる。DGD分布がガウス分布状であることから、ランダムなモード結合が起こっていることが確認できる。SMDの定義は、PMD同様に⁽²⁴⁾、DGD分布の2次モーメントすなわちインパルスレスポンスの自己相関関数の標準偏差 σ_R として定義した(σ_R は、インパルスレスポンスの標準偏差 σ_I の2倍である⁽²⁵⁾)。

測定されたSMD $\langle\Delta\tau\rangle$ と、ファイバ長とSMDの関係を、表2と図6にそれぞれ示す。SMDの測定値は、SMD係数6.1ps/ $\sqrt{\text{km}}$ (サンプル1~4から $(\sum\sigma_R^2)/(\sum L)$ ^{1/2}で計算)を仮定したファイバ長の平方根に比例する増加曲線と良く一致する。

表1 試作C-MCFの波長1550nmにおける光学特性測定値⁽⁸⁾

Sample	ファイバ長 [km]	平均伝送損失 [dB/km]		λ_{cc} [nm]	CD [ps/(nm \cdot km)]	CD slope [ps/(nm 2 \cdot km)]	曲げ損失 [dB/turn] at $R_b = 15\text{mm}$
		カットバック法	後方散乱法				
サンプル1	17.3	0.158	0.157	1469	20.1	0.061	0.064
サンプル2	24.2	0.161	0.159	1468	20.1	0.063	0.069
サンプル3	30.1	0.160	0.160	1472	20.1	0.061	0.046
サンプル4	41.2	0.159	0.159	1473	20.0	0.060	0.058

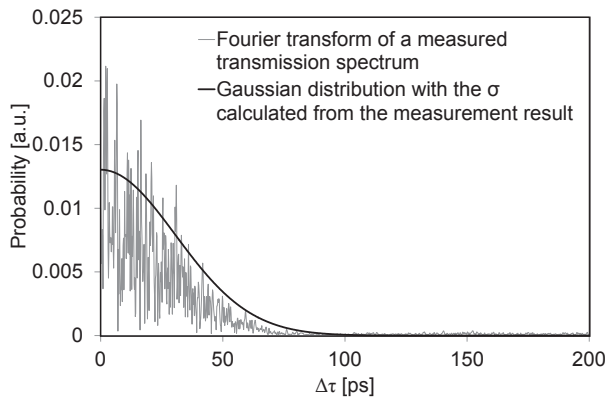


図5 測定したDGD分布の例⁽⁸⁾

表2 試作C-MCFのSMD⁽⁸⁾

Sample	ファイバ長 [km]	SMD [ps]*	SMD係数 [ps/√km]*
サンプル0	2.975	12.05 ± 0.31	7.99 ± 0.18
サンプル1	17.31	26.05 ± 0.48	6.26 ± 0.12
サンプル2	24.24	32.28 ± 0.50	6.56 ± 0.10
サンプル3	30.06	33.41 ± 0.02	6.09 ± 0.00
サンプル4	41.22	36.67 ± 0.52	5.71 ± 0.08

*半径140mmのポビン巻状態で測定。波長レンジは1520-1580nm。数値は、測定値の平均値 ± 標準誤差。

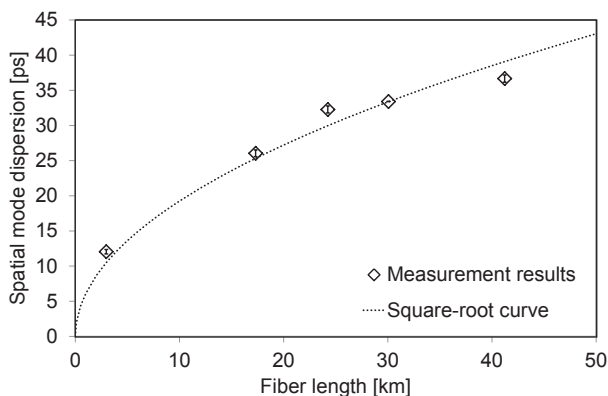


図6 試作したC-MCFのSMD⁽⁸⁾
(エラーバー：各コアでの測定の標準誤差)

次に、サンプル4から1kmを分割し、ファイバ曲げ半径 R_b へのSMDの依存性を調査した。実験では8cm、14cm、31cmの R_b で測定をおこなった。結果を表3と図7に示す。SMDはファイバの曲率 ($1/R_b$) に対して、良く比例している。 $R_b = 31$ cmの時のSMDは 3.14 ± 0.17 ps/√kmまで抑制された。

3.14 ± 0.17 ps/√kmというSMDの値は、数十km以上の長距離伝送において、これまでに報告されたSDMファイバの最も低い値⁽¹²⁾に比べても約1/10の値であり (MIMO

表3 試作C-MCFのSMDへの曲げ半径の影響⁽⁸⁾

曲げ半径 [cm]	ファイバ長 [km]	SMD [ps]*
8	1.00	15.05 ± 0.11
14	1.00	8.55 ± 0.21
31	1.00	3.14 ± 0.17

*波長レンジは1520-1580 nm。数値は、測定値の平均値 ± 標準誤差。

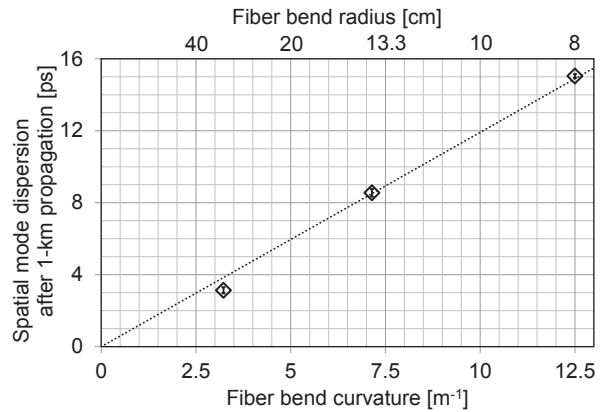


図7 試作C-MCF 1kmサンプルで測定したファイバ曲率とSMDの関係⁽⁸⁾ (エラーバー：各コアでの測定の標準誤差、直線：原点を通る回帰直線)

計算負荷を1/10にできることに相当する)、大幅な記録の更新である。

測定結果に基づき計算すると、SMDが 6.1 ps/√kmの場合は、10,000kmの伝送後のSMDが 6.1×10^2 psとなり、 3.14 ps/√kmの場合は 3.14×10^2 psとなることが予想される。これはMIMOの計算負荷抑制に十分な低SMDといえる。25GBaudシンボルレート (50GHzのサンプリング周波数) を仮定し、試作C-MCF 10,000kmを伝送したときに、MIMO DSPでインパルスレスポンスのほとんどのパワーをカバーするために必要なタップ数^{*2}を、 6.1 ps/√kmの場合と 3.14 ps/√kmの場合について計算した結果を表4に示す。10,000km伝送後でも、MIMO DSPに必要なタップ数は、計算負荷低減の上で十分現実的なレベルに抑圧できている。

表4 試作C-MCFを用いた10,000km伝送後に、MIMO DSPに必要なタップ数⁽⁸⁾

タップのカバー区間	カバーするパワーの比率	必要タップ数	
		SMD 6.1ps/√kmの場合	SMD 3.14ps/√kmの場合
$\pm 2\sigma_t = 2\sigma_R$	~0.95	61	32
$\pm 4\sigma_t = 4\sigma_R$	~0.99994	1.2×10^2	63
$\pm 6\sigma_t = 6\sigma_R$	~0.99999998	1.8×10^2	95

5. 結 言

純シリカコアを内蔵する結合型4コアファイバを開発し、SMD $3.14 \pm 0.17 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ (波長1520~1580nm) と、平均伝送損失0.158dB/km (波長1550nm) を実現し、SDM用ファイバでの低SMD記録・低伝送損失記録を更新した。

最新の海底用SMFに迫る低伝送損失により、空間チャンネル当たりの伝送容量を落とすことなく、空間チャンネル数を増やすことができる。本結合型MCFを用いることで、伝送損失やコアモード A_{eff} が同等のSMFと比較して、結合型MCFにおいては非線形雑音を低減できることが初めて実験的に確認され、報告されている⁽⁹⁾。

本研究結果は、ケーブル断面積に制約のある長距離海底伝送システムへのC-MCFの適用性が非常に高いことを示している。今後のMIMO DSP分野の研究の進展に伴い、C-MCFは大容量長距離伝送システムにおける次世代のファイバの現実的な候補となりえる。

・Z-PLUS Fiberは、住友電気工業(株)の商標、または登録商標です。

用語集

※1 OFC/ECOC

Optical Fiber Communication Conference (OFC) は、毎年3月に米国で開催される世界最大の光ファイバ通信分野の国際会議であり、European Conference on Optical Communication (ECOC) は、毎年9月に欧州で開催される欧州最大の光ファイバ通信分野の国際会議。光ファイバ通信分野における2大国際会議である。

※2 タップ数

デジタル信号処理における信号復元のための等化フィルタにおいて、時系列信号を復元する際に、1シンボルを復元するために参照する受信信号のシンボル数のことをタップ数という。

参 考 文 献

- (1) R.-J. Essiambre and R. W. Tkach, "Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 5, pp. 1035-1055 (May 2012)
- (2) A. Sano et al., "102.3-Tb/s (224 x 548-Gb/s) C- and extended L-band all-Raman transmission over 240 km using PDM-64QAM single carrier FDM with digital pilot tone," in *Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, 2012, p. PDP5C.3
- (3) P. J. Winzer, "Scaling Optical Fiber Networks: Challenges and Solutions," *Opt. Photonics News*, vol. 29, no. 3, pp. 28-35 (Mar. 2015)
- (4) U. Hölzle, "A Ubiquitous Cloud Requires a Transparent Network," presented at the Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), Los Angeles, 2017, p. Plenary Talk

- (5) J.-X. Cai et al., "64QAM Based Coded Modulation Transmission over Transoceanic Distance with > 60 Tb/s Capacity," in *Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, 2015, p. Th5C.8
- (6) J. X. Cai et al., "54 Tb/s transmission over 9,150 km with optimized hybrid Raman-EDFA amplification and coded modulation," in *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC)*, Cannes, 2014, p. PD.3.3
- (7) T. Hayashi et al., "125- μm -cladding Coupled Multi-core Fiber with Ultra-low Loss of 0.158 dB/km and Record-low Spatial Mode Dispersion of 6.1 ps/km^{1/2}," in *Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, 2016, p. Th5A.1
- (8) T. Hayashi et al., "Record-Low Spatial Mode Dispersion and Ultra-Low Loss Coupled Multi-Core Fiber for Ultra-Long-Haul Transmission," *J. Lightw. Technol.*, vol. 35, no. 3, pp. 450-457 (Feb. 2017)
- (9) R. Ryf et al., "Long-distance transmission over coupled-core multicore fiber," in *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC)*, Düsseldorf, 2016, p. Th.3.C.3.
- (10) S. Randel et al., "MIMO-based Signal Processing of Spatially Multiplexed 112-Gb/s PDM-QPSK Signals using Strongly-Coupled 3-Core Fiber," in *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC)*, Geneva, 2011, p. Tu.5.B.1
- (11) T. Hayashi et al., "Coupled-core multi-core fibers: High-spatial-density optical transmission fibers with low differential modal properties," in *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC)*, Valencia, 2015, p. We.1.4.1
- (12) R. Ryf et al., "Space-Division Multiplexed Transmission over 4200 km 3-Core Microstructured Fiber," in *Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, 2012, p. PDP5C.2
- (13) K.-P. Ho and J. M. Kahn, "Mode-dependent loss and gain: statistics and effect on mode-division multiplexing," *Opt. Express*, vol. 19, no. 17, pp. 16612-16635 (Aug. 2011)
- (14) G. P. Agrawal et al., "Nonlinear Performance of SDM Systems Designed with Multimode or Multicore Fibers," in *Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, 2013, p. OM3I.6
- (15) C. Antonelli et al., "Modeling of Nonlinear Propagation in Space-Division Multiplexed Fiber-Optic Transmission," *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 36-54, Jan. 2016.
- (16) M. Hirano et al., "Record Low Loss, Record High FOM Optical Fiber with Manufacturable Process," in *Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, 2013, p. PDP5A.7
- (17) 川口雄揮 ほか, 「極低損失純シリカコアファイバ」、SEIテクニカルレビューno. 186, pp. 45-50 (Jan. 2015)
- (18) H. Yamaguchi et al., "Ultra-low Loss and Large Aeff Pure-silica Core Fiber Advances," in *SubOptics*, Dubai, 2016, p. EC07
- (19) Y. Tamura et al., "Lowest-Ever 0.1419-dB/km Loss Optical Fiber," in *Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, 2017, p. Th5D.1
- (20) ITU-T G.650.1, "Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable." (Jul. 2010)
- (21) T. Hayashi et al., "Uncoupled multi-core fiber enhancing signal-to-noise ratio," *Opt. Express*, vol. 20, no. 26, pp. B94-B103 (Nov. 2012)
- (22) B. Costa et al., "Phase shift technique for the measurement of chromatic dispersion in optical fibers using LED's," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, no. 10, pp. 1509-1515 (1982)
- (23) T. Sakamoto et al., "Fiber twisting and bending induced adiabatic/nonadiabatic super-mode transition in coupled multi-core fiber," *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 4, pp. 1228-1237 (Feb. 2016)
- (24) ITU-T G.650.2, "Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fibre and cable." (Aug. 2015)
- (25) N. Gisin et al., "Definitions and measurements of polarization mode dispersion: interferometric versus fixed analyzer methods," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, no. 6, pp. 730-732 (Jun. 1994)

執筆者

林 哲也* : 光通信研究所 主査
博士 (工学)



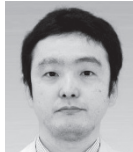
田村 欣章 : 光通信研究所 主査



長谷川 健美 : 光通信研究所 グループ長



中西 哲也 : 光通信研究所 グループ長



樽 稔樹 : 新規事業マーケティング部 主席



*主執筆者

OFC2016における本稿関連発表⁷⁾に対して、米国光学会 (OSA) よりOFC 2017において、The Tingye Li Innovation Prizeを受賞。