

短距離光インターコネク트에適した 125 μ mクラッド8コアファイバ

125- μ m-Cladding Eight-Core Fiber for Short-Reach Optical Interconnects

林 哲也*
Tetsuya Hayashi

中西 哲也
Tetsuya Nakanishi

島川 修
Osamu Shimakawa

佐藤 文昭
Fumiaki Sato

樽 稔樹
Toshiki Taru

佐々木 隆
Takashi Sasaki

スーパーコンピュータの計算並列化やデータセンターの処理データ量の増大に伴う短距離インターコネクでの通信データ量増大に対応するため、大容量のデータを高密度に伝送する光インターコネク技術の研究開発が盛んに行われている。今回当社は、光インターコネク트에適したマルチコア光ファイバ (MCF) を開発した。本MCFは、標準的な外径125 μ mのガラスクラッドの中に、1310nm付近の波長帯において汎用シングルモードファイバと同等の光学特性を有するコアを8つ内蔵し、同時にコア間クロストークの抑圧を実現している。標準的なクラッド径の採用により、汎用光ファイバと同等の機械的信頼性を実現可能であり、また、汎用光ファイバ向けのケーブル化技術などの様々な関連技術を活用可能である。本MCFを用いて試作した高密度MCFケーブルは実使用模擬環境下においても良好な光学特性を実現した。

To cope with the growing data traffic in the short-reach interconnects used for parallel processing in supercomputers and data centers, optical interconnect technologies for broadband high-density transmission are intensively researched and developed. Sumitomo Electric Industries, Ltd. developed, for the first time, a multi-core optical fiber (MCF) that has eight cores compatible to the standard single-mode fiber in O-band with low inter-core crosstalk in the standard 125- μ m-diameter glass cladding. The developed MCF is suitable for the short-reach interconnects and enables low-distortion signal transmission in O-band. The standard 125- μ m cladding provides high mechanical reliability equivalent to the standard optical fibers and enables the use of conventional technologies in cabling and so on. A high-density fiber optic interconnect cable fabricated with the 12 pieces of the developed MCF realized good optical properties and robustness against the mechanical and thermal stresses.

キーワード：空間分割多重、SDM、マルチコア光ファイバ、MCF、光ファイバケーブル

1. 緒言

光インターコネク^{*1}分野では、高帯域・高密度なパラレル伝送技術への需要が高まっており、様々な伝送媒体や接続技術が提案されている。超短距離用途 (< 100m) 向けには、クラッド径125 μ mやそれ以下のマルチモードファイバ (MMF) を用いた高密度コネクタ、マルチモードコアを用いたマルチコアファイバ (MCF) と面発光レーザ (VCSEL) アレイ・フォトダイオード (PD) アレイによる空間分割多重 (SDM) 伝送など、MMFベースの技術が多く報告されている。高帯域・高密度化への需要は、大規模データセンター等の~500mから10km超の短~中距離の伝送系でも高まっており、モード分散^{*2}によるパルス広がりを抑えられ伝送距離と伝送容量を両立できる汎用シングルモードファイバ (SMF) を伝送媒体とし、波長分割多重 (WDM) を行う規格や^{(1)~(4)}、ファイバリボン等でパラレル伝送を行う規格⁽⁵⁾などが公開されている。最近では短~中距離用途向けに、各コアがシングルモードのMCFを用いたSDMも検討されている⁽⁶⁾。しかしながら、「8コア以上の内蔵」、「汎用SMFと同等の光学特性」、「クラッド径

125 μ m]、「コア間クロストーク (XT) がわずか1km伝送後で、-30dB以下」を、すべて同時に実現したMCFは、これまで報告されてこなかった^{(6)~(9)}。これは、コア間隔の短縮、XTの抑圧、被覆 (クラッドモード抑圧のために高屈折率) への漏洩ロスの抑圧、そして、モードフィールド径 MFD (あるいは実効断面積 A_{eff}) の拡大の間には、原理的なトレードオフがあったためである。

我々は、伝送帯域をOバンド (1260-1360nm) に最適化することで、短距離伝送に適した各コアが汎用SMF相当の特性をもつ8コアファイバを、クラッド径125 μ mで実現し、また、試作MCFを12本内蔵する外径3mmの光ファイバケーブル (コード) を試作し、13.6コア/mm²という極めて高いケーブルコア密度を実現した^{(10)~(12)}。本稿では、これらの研究について報告する。

2. 設計目標

本研究では、(A) 8コア内蔵、(B) 汎用SMF相当の光学特性、および、(C) 汎用光ファイバと同等の125 μ mのク

ラッド径を、同時に達成することを目標とした。本節では、それぞれの項目の重要性についてまとめる。

2-1 8コア内蔵

MCFの短距離伝送への適用を考えた際に、(MCFとの入出力を除いて) 従来技術そのまま使用できるということは、MCF伝送系の実現コストを低減する上で重要である。例えば、MCF伝送系専用、変調方式やシンボルレート、空間チャンネル数がカスタマイズされた送受信機は、コストの上昇要因となりえる。このような観点からすると、8つのコアを内蔵することで、従来技術による25Gbit/s送受信機技術を用いて、100-Gbit/s/λの信号を1本のファイバで双方向に伝送することができるMCFは、汎用SMF 8本を用いて、100-Gbit/s/λの双方向伝送を実現する既存の伝送規格⁽⁵⁾とも整合するため実用上非常に望ましい。

2-2 汎用SMF同等の光学特性

送受信機のMCF専用カスタマイズ部分を少なくするという観点では、SMFを用いた短距離伝送の各種規格^{(1)~(5)}が汎用SMFを伝送用ファイバとして規定していることに鑑みると、MCFのコアは汎用SMF同等の特性を有することが望ましい。

多くのSMF短距離伝送規格が伝送波長帯域としてOバンド(1260~1360nm)を用いているが^{(1)~(3), (5)}、その理由のひとつは、汎用SMFのOバンドにおける低波長分散^{*2}特性が伝送で生じる信号の歪を抑圧し、送受信機における電氣的分散補償を不要とすることが挙げられる。補償回路の省略は送受信機コストの抑制のみならず、信号の遅延の抑制の面でも有益となる。

2-3 標準的な125μmのクラッド径

MCFの研究開発事例の多くは、各コアの光学特性を維持しながらコア数を増やすために、標準的な125μmのクラッド径よりも大きなクラッド径を許容している^{(6), (7)}。このとき懸念されるのが機械的信頼性の悪化である。様々なクラッド径を有する光ファイバの曲げ半径と破断確率の関係について、文献(13)、(14)に基づき計算した例を図1に示す。クラッド径が大きくなると、破断確率も大きくなり、特に曲げ半径の小さな領域で破断確率が急激に悪化する閾値的な曲げ半径も大きくなるが見て取れる。

長距離大容量伝送系においては、光ファイバの最小曲げ半径を規定し敷設状況をコントロールすることで破断確率の悪化に対処することも可能であるが、短距離伝送系においてそのような運用を行うことは、運用効率の著しい低下を招きかねず、また、太く硬いファイバはハンドリング性も悪化する。その点、標準的な125μmクラッドの光ファイバは、既に短距離光インターコネクットの領域で使用され機械的信頼性も実証されている⁽¹⁵⁾。

また、標準的なクラッド径を用いることで、コネクタ化やケーブル化などにおいても、信頼性が高くコスト競争力のある成熟した技術を、そのまま、あるいは、わずかな最適化のみでMCFに適用することも可能となる。

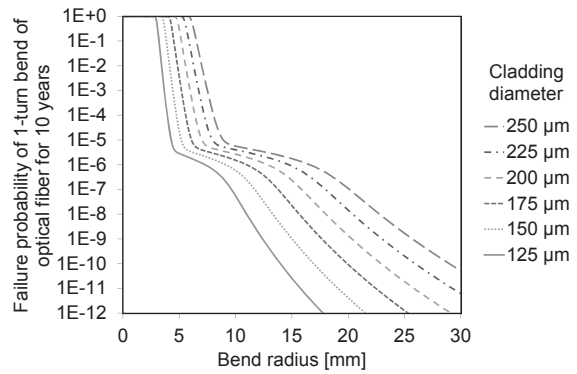


図1 光ファイバの曲げによる破断確率の曲げ半径とクラッド径への依存性の例⁽¹¹⁾

3. ファイバ設計

125μmクラッド8コアファイバの設計は、コア間の光学特性を揃えられる同一コア型で行った。Oバンドにおける、コアへの強い閉じ込めと、シングルモード動作、低波長分散、接続ロス低減可能なMFDを、同時に実現するためにトレンチアシスト(TA)型のコア屈折率分布を採用した。図2に設計した屈折率分布を示す。設計上の光学特性は、汎用SMF相当のMFD 8.6μm(波長1310nm)、ケーブルカットオフ波長 λ_{cc} 1200nm、零分散波長 λ_0 1312nmとした。

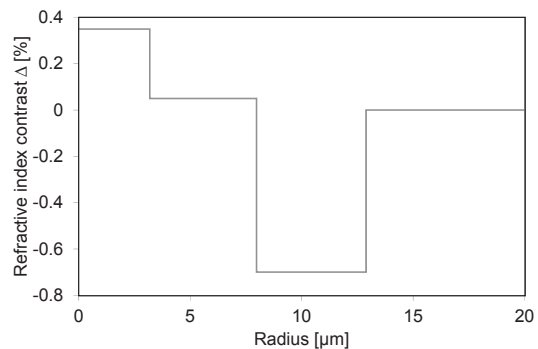


図2 設計したMCFコアの屈折率分布⁽¹¹⁾

コア配置は、図3に示すように等間隔に円環状に配置した。この配置により他コアからの損動の影響も含めて、各コアの光学特性をより同一に近づけることができる。同時に、他コアに囲まれてしまうコアがないことで、(グレーティングカップラ、VCSEL、PDなどによる)光学チップ表面からファイバへの結合に際して、すべてのコアへアクセスが容易になる。

直径125μmのクラッドに、設計したコアを8コア内蔵

可能か調べるため、コアピッチ（隣接コア中心間隔） D 、外周クラッド厚 d （コア中心とクラッド/被覆界面の間の最短距離）、コア間XT、被覆への漏洩損失の関係を、図3のようにコアを配置した場合について、文献(16)～(18)に基づき計算したところ（曲げ半径 R_b 1mを仮定）、10km伝搬後のXT -40dB以下と漏洩損失0.1dB/km以下を両立する、 d または D は、波長1490nmや1550nmでは存在しないことがわかった。しかしながら、波長1310nmでは、 d が22 μm 付近（すなわち D が31 μm 付近で、漏洩損失0.01dB/km以下と隣接コア間XT -40dB以下を実現可能であることがわかった。

この結果から、伝送波長帯をOバンドに最適化することで、汎用SMF相当の光学特性を持つ8つのコアを直径125 μm のクラッドに内蔵することができる。本研究では、 $d=22.0\mu\text{m}$ ($D=31.0\mu\text{m}$) を選択した。このとき、漏洩損失は、波長1310nmで、約0.01dB/kmと予測されるが、伝送距離数km以下の短距離通信においては、十分に低い値と言える。

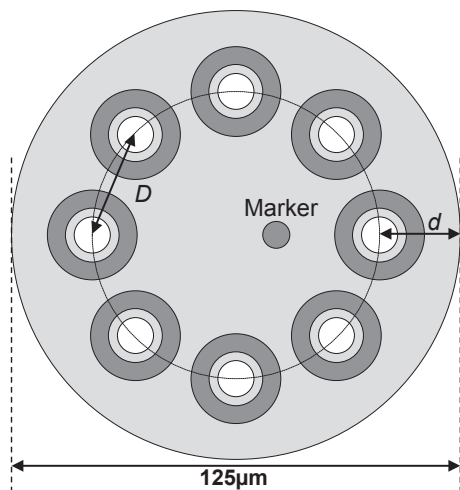


図3 設計MCFの断面図⁽¹¹⁾（濃度の濃い部分は屈折率が低い）

4. 125 μm クラッド8コアファイバ試作結果

設計に基づき、8コアファイバの試作を行った。図4に断面図を示す。コアピッチ D は、単純で回転対称性の高い円環配置により、設計31.0 μm に対して30.8~31.3 μm と $\pm 0.3\mu\text{m}$ の範囲で高精度に制御することができた。外周クラッド厚 d は設計通り約22 μm であった。図5に示すように、長波長帯における被覆への漏洩損失が、伝送損失スペクトルに反映されている。しかしながら、Oバンドにおける伝送帯域の窓は、設計通りに確かに開かれている。図6に波長1310nmにおける13.14km伝搬後のXTを、MCFを半径約8cmのポビン巻状態で測定した結果を示

す。測定には、中心波長1308nmで3dB帯域が約32nmのスーパールミネセントダイオード（SLD）を光源として用いて、受光パワーの時間平均を測定値としてとることで、XTの波長平均（XTの統計的平均の近似となる⁽¹⁹⁾）をとった。隣接コア間のXTの測定値の平均は、13.14km伝搬後で-53.7dB（1km伝搬後に換算すると-64.9dB）であった。各コアにおけるOバンドでの光学特性と、 λ_{cc} を表1に示す。示された値は、Oバンドにおいては、ITU-T G.652に相当する値であることがわかる。

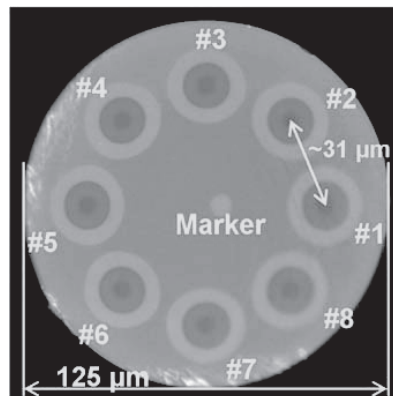


図4 試作MCFの断面図^{(10), (11)}

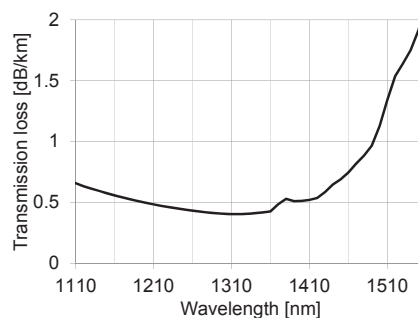


図5 試作MCFの伝送損失スペクトルの全コア平均^{(10), (11)}

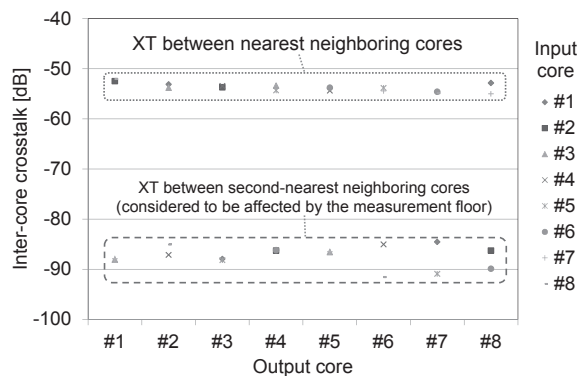


図6 試作MCFの13.14km伝搬後の波長1.31 μm におけるコア間XT^{(10), (11)}

表1 試作したMCFの各コアの光学特性^{(10)、(11)}

	伝送損失 [dB/km]	λ_{cc} [nm]	MFD [μm]	λ_0 [nm]	曲げ損失 [dB/turn] (R=3mm)
λ [nm]	1310	n/a	1310	n/a	1310
#1	0.346	1238	8.5	1317.7	0.034
#2	0.397	1231	8.3	1320.0	0.027
#3	0.394	1228	8.3	1320.2	0.031
#4	0.388	1226	8.4	1319.8	0.023
#5	0.386	1225	8.5	1319.6	0.027
#6	0.389	1217	8.3	1319.7	0.032
#7	0.395	1229	8.3	1317.6	0.027
#8	0.412	1236	8.4	1317.9	0.028
ITU-T G.652	≤ 0.5	≤ 1260	8.6-9.5 ± 0.6	1300- 1324	n/a

5. MCFケーブル試作と実使用環境模擬評価

試作したMCFを用いて、長さ1.11kmの超高密度ケーブルの試作も行った。ケーブル断面の模式図を図7(a)に、試作ケーブルの外観写真を図7(b、c)に示す。ケーブルは、外径3mmの中に12本の8コアファイバを内蔵しているため、合計で96コアを内蔵し、コア密度は13.6コア/mm²に達する。これは、通信用光ファイバケーブルの分野で報告されてきた中で最も高いコア密度(6コア/mm²⁽²⁰⁾)の倍以上となる値である(2016年5月時点)。また、標準的な125 μm のクラッド径のMCFのおかげで、現行の光ファイバケーブル製品の製造設備に一切の手を加えることなくケーブルを試作することができ、また、汎用のフェールを用いてSCコネクタ実装を行うことができた。ケーブル化後のMCFの伝送損失、及び、XTの測定も行ったが、ケーブル化に起因する有意な劣化は見られなかった。

次に、試作したMCFケーブルの耐環境特性の評価を行った。表2に試験項目と条件を示す。測定波長が1.31 μm

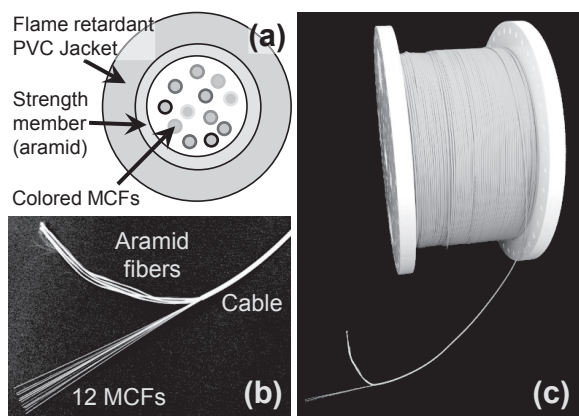


図7 試作したMCFケーブル^{(10)、(11)}
(a) 断面模式図、(b、c) 実際のケーブルの外観

であること以外は、インターコネク用光ファイバケーブルの試験方法と条件を定めるTelcordia GR-409⁽²¹⁾を参照した。MCFへの入出力には、低XTのファンイン/ファンアウト(FIFO)デバイスを用いた。図8に示すように、ケーブルの一方の端で2本のMCFにFIFOを接続し、ケーブルの他方の端で2本のMCFをコネクタ接続することにより、1.11kmのケーブル中を合計2.22km往復した光の測定を行った。ロス変動とXT変動の測定結果も表2にまとめる。ロス変動とXT変動ともに非常に小さく、信号伝送品質の劣化を十分抑制できるレベルと考えられる。

これらの結果を踏まえると、試作したMCFケーブルが、実使用環境を想定した上でも短距離インターコネク用途に適した十分な光学特性を実現しているということが確認できた。

表2 機械特性・温度特性試験のまとめ

試験項目	試験方法	ロス変動 [dB/通過]	XT変動 [dB]
引張り	Telcordia GR-409-CORE 30 N, 3 m, 30分	< 0.1	-0.1~0.2
捻じり	Telcordia GR-409-CORE $\pm 180^\circ / 30 \text{ cm}$ 10回	< 0.1	-0.3~0.2
繰り返す 曲げ	Telcordia GR-409-CORE $R_b = 25 \text{ mm} \times 6$ 巻き 25回	< 0.1	-0.1~0.2
側圧	Telcordia GR-409-CORE 98 N/25 mm	< 0.1	-0.2~0.1
衝撃	Telcordia GR-409-CORE 0.74 N \cdot m, 3回	< 0.1	0.0~0.1
高低温 曲げ	Telcordia GR-409-CORE $R_b = 25 \text{ mm} \times 10$ 巻き 0 $^\circ\text{C}/60^\circ\text{C}$	< 0.1	-0.3~0.2
温度 サイクル	Telcordia GR-409-CORE 0~70 $^\circ\text{C}$, 2サイクル	< 0.1 dB/km	-0.4~0.5

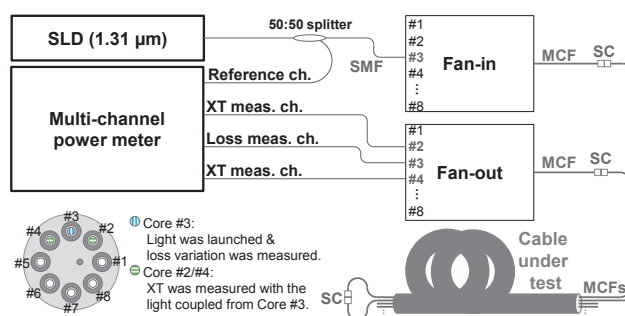


図8 MCFのロス/XT変動の測定系⁽¹²⁾

6. 結 言

トレンチアシスト型コアを用いて、伝送帯域をOバンドに最適化することにより、標準的な直径125 μm のクラッドに、短距離伝送に適した8つのコアを内蔵するMCFを

開発した。試作したMCFのコアは、8.6 μm 前後のMFDを持ち、コア間XTは1km伝搬後で約-60dB（波長1310nm）、 λ_{cc} は1260nm以下、 λ_0 は1300~1324nmであった。試作したMCFを用いて、更に外径3mmで12本のMCFを内蔵するケーブルの試作も行った。試作MCFが標準的な125 μm のクラッド径を有することで、既存のケーブル化技術をそのまま用いることができ、光学特性の劣化なくケーブル化できた。ケーブルのコア密度や伝送容量の更なる向上は、既存の超高密度SMFケーブル化技術を用いて、本MCFをケーブル化することで容易に達成できると考えられる。

7. 謝 辞

この研究の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究／革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発の一環としてなされたものである。

用語集

※1 インターコネク

複数のチップ・サーバー・サーバーラック・データセンターなどの間での相互接続。

※2 分散（モード分散／波長分散）

モードや波長によって光の進む速さが異なること。分散があると光信号の中に速く進む成分と遅く進む成分がうまれ、波形が歪む。伝送距離が延びるほど分散が蓄積し、これを光学的あるいは電氣的に補償する必要が生じる。

参考文献

- (1) IEEE Std 802.3ba-2010 (Amendment to IEEE Standard 802.3-2008) (Jun. 2010)
- (2) "100G CWDM4 MSA Technical Specifications Rev 1.0," 27-Aug-2014. (Online). Available: <http://www.cwdm4-msa.org/> (Accessed: 12-Aug-2015)
- (3) "100G-CLR4 Rev. 1.5.2 -- Specification for 100 Gbit/s Coarse Wavelength Division Multiplex Optical Data Transmission," 22-Mar-2015. (Online). Available: <https://www.clr4-alliance.org/> (Accessed: 12-Aug-2015)
- (4) "OpenOptics Multi-Source Agreement," (Online). Available: <http://www.openopticsmsa.org/> (Accessed: 12-Aug-2015)
- (5) "100G PSM4 Specification Version 2.0," 15-Sep-2014. (Online). Available: <http://www.psm4.org/> (Accessed: 12-Aug-2015)
- (6) T. Pinguet et al., "Silicon Photonics Multicore Transceivers," in *Photonics Society Summer Topical Meeting Series, 2012 IEEE*, Seattle, 2012, p. WC4.1
- (7) T. Hayashi, "Multi-core optical fibers," in *Optical Fiber Telecommunications*, 6th ed., vol. A, I. P. Kaminow et al., Eds. Academic Press, 2013, pp. 321-352
- (8) T. Sakamoto et al., "Crosstalk suppressed hole-assisted 6-core fiber with cladding diameter of 125 μm ," in *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC)*, London, 2013, p. Mo.3.A.3
- (9) A. Zioliowicz et al., "Hole-assisted multicore optical fiber for next generation telecom transmission systems," *Applied Physics Letters*, vol. 105, no. 8, p. 81106 (Aug. 2014)
- (10) T. Hayashi et al., "125- μm -Cladding 8-Core Multi-Core Fiber Realizing Ultra-High-Density Cable Suitable for O-Band Short-Reach Optical Interconnects," in *Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, Los Angeles, 2015, p. Th5C.6
- (11) T. Hayashi et al., "125- μm -cladding eight-core multi-core fiber realizing ultra-high-density cable suitable for O-Band short-reach optical interconnects," *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 85-92 (Jan. 2016)
- (12) T. Hayashi et al., "Characterization of Interconnect Multi-core Fiber Cable: Mechanical/Thermal Characteristics and Inter-core Crosstalk of the Straightened Cable," in *IEEE Optical Interconnects Conference*, San Diego, 2016, p. WB4
- (13) IEC TR 62048:2014, Ed3.0, "Optical fibres - Reliability - Power law theory," IEC TR 62048:2014, Ed3.0 (Jan. 2014)
- (14) 立蔵正男、富田信夫、「光ファイバコードの機械的信頼性の理論検討」、1997信学ソ大、P.308、B-10-9
- (15) T. Volotinen et al., "Mechanical reliability of short optical fiber links in data centers," in *Int. Wire Cable Symp. (IWCS)*, Providence, RI, 2014, pp. 47-54
- (16) T. Hayashi et al., "Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber," *Opt. Express*, vol. 19, no. 17, pp. 16576-16592 (Aug. 2011)
- (17) T. Hayashi et al., "Physical interpretation of intercore crosstalk in multicore fiber: effects of macrobend, structure fluctuation, and microbend," *Opt. Express*, vol. 21, no. 5, pp. 5401-5412 (Mar. 2013)
- (18) K. Saitoh and M. Koshiba, "Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: Application to photonic crystal fibers," *J. Quantum Electron.*, vol. 38, no. 7, pp. 927-933 (2002)
- (19) T. Hayashi et al., "Characterization of Crosstalk in Ultra-Low-Crosstalk Multi-Core Fiber," *J. Lightw. Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 583-589 (Feb. 2012)
- (20) I. Ishida et al., "Multicore-fiber cable with core density of 6 cores/ mm^2 ," in *Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, San Francisco, 2014, p. W4D.3
- (21) "Generic Requirements for Indoor Fiber Optic Cable," Telcordia Technologies, GR-409-CORE, Issue 02 (Nov. 2008)

執筆者

林 哲也* : 光通信研究所 主査
博士 (工学)



中西 哲也 : 光通信研究所 主席



島川 修 : 光通信研究所 主席



佐藤 文昭 : 光通信事業部 主席



樽 稔樹 : 光通信研究所 グループ長



佐々木 隆 : Innovation Core SEI, Inc.
General Manager



*主執筆者