

次世代通信用マルチコア光ファイバ

Multi-Core Optical Fibers for Next-Generation Communications

林 哲也*
Tetsuya Hayashi

中西 哲也
Tetsuya Nakanishi

現行のシングルモード光ファイバ (SMF) 伝送技術に基づく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、空間分割多重 (SDM) 用に様々なタイプのマルチコア光ファイバ (MCF) の研究開発を進めており、研究開発の黎明期から、コア間クロストークなどMCF特有の光学特性の挙動や発生メカニズムの解明や、それを踏まえての用途に応じた実用的なMCFの提案などを行ってきた。本稿では、これまでに当社が行ってきたMCF研究開発の取り組みについて紹介する。

Communication systems based on conventional single-mode optical fiber transmission technologies may face a “capacity crunch” in the near future. To address this, Sumitomo Electric Industries, Ltd. has been conducting the research and development (R&D) on various types of the multi-core fibers (MCFs) for the space-division multiplexed (SDM) transmission. Since the very beginning of the SDM R&D, we have continuously contributed both to revealing the behavior and characteristics of the optical properties—such as inter-core crosstalk— of MCFs, and to proposing various MCFs for practical applications. This paper reviews our MCF R&D history.

キーワード：空間分割多重、SDM、マルチコア光ファイバ、MCF

1. 緒 言

増え続ける通信容量需要に応えるために、近年、光ファイバ通信の分野において、空間分割多重 (SDM) 技術の研究が盛んに行われており、様々な種類の光ファイバの提案がなされている⁽¹⁾。様々な種類のSDM伝送用ファイバの中でも、マルチコア光ファイバ (MCF) は最も代表的なファイバの一種である。本稿では、レーザー学会学術講演会 (2018年1月24~26日開催) における空間分割多重関連のシンポジウム招待講演⁽²⁾をベースとしつつ内容を拡張し、MCF特有の設計パラメータや、当社におけるMCF研究開発の取り組みを紹介する。

2. MCF特有の設計パラメータ

図1に示すように、MCFは1つの共通のクラッドの中に複数のコアを有する光ファイバである。通常の1コアファイバ

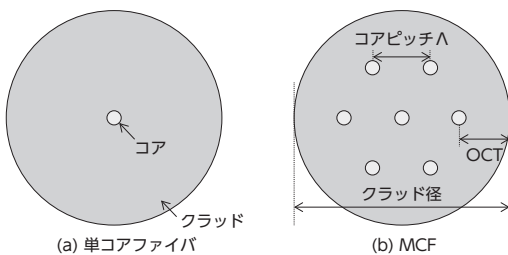


図1 光ファイバ断面模式図

においては、コア設計のみに自由度があり、コアは125μm径のクラッドの中心に配置されるが、MCFにおいては、コア設計のみならず、コア数、コア配置、外周クラッド厚 (OCT：最外コアの中心とクラッド・被覆界面との最短距離)、そしてクラッド径を含めて、光学的/機械的特性の観点から最適化がなされる。望ましい特性は、用途によって異なるため、望ましいファイバ設計もまた用途によって異なる。

2-1 クロストーク関連パラメータ

コア数・コア配置において、コアピッチΛは、ファイバ断面積内のコア密度を高めるためには小さい方が望ましいが、コア間のクロストーク (XT) を抑えたい場合は、一定の大きさを取る必要がある⁽³⁾。研究開発の当初においては、MCFのXTは単純なモード結合方程式で予測できると考えられていたが⁽⁴⁾、我々はMCFの試作評価を通じて、ファイバ曲げの影響により、この予測が成り立たないことを発見し、ファイバの曲げや捻じれの影響を考慮に入れたモード結合方程式を用いることで実際のMCFのXTを良く予測できることを示した⁽⁵⁾ (同時期にFiniらも理論検討により同様の発見を行い、若干先行して発表している^{(6),(7)})。

ファイバが半径 R_b の曲げを付与されている場合、光ファイバの屈折率分布は図2のように、曲げの外側の光路で長くなることを屈折率の傾きとして等価的に表すことができ、コア m を基準としたとき、コア n の等価的な n_{eff} ($n_{\text{eq},n}$) は

$$n_{\text{eq},n} \approx n_{\text{eff},c,n} \frac{D_{nm} \cos \theta_{nm}}{R_b} \dots\dots\dots (1)$$

と表すことができる。ここで、 D_{nm} はコア n とコア m の中心間距離、 $n_{\text{eff},c,n}$ はコア n の本来の実効屈折率、 θ_{nm} は曲げ半径方向に対するコア m からコア n への角度である。まっすぐなMCFであれば、コア間で実効屈折率 $n_{\text{eff},c}$ が異なれば位相整合が生じず（光の波の進むスピードが一致せず）、コア間のXTは抑制されるが、曲がったMCFでは R_b が R_{pk} ：

$$R_{pk} \approx D_{nm} n_{\text{eff},c,n} / |n_{\text{eff},c,n} - n_{\text{eff},c,m}| \quad \dots\dots\dots (2)$$

以下になると、 $n_{\text{eq},n}$ と $n_{\text{eq},m}$ が一致する場合がありますXTが劣化する⁽⁵⁾。図3はMCFに一定の曲げと捻じれが付与されている場合のXT（図中のCoupled power）をシミュレーションで計算した結果であるが、 $n_{\text{eq},n}$ と $n_{\text{eq},m}$ が一致する

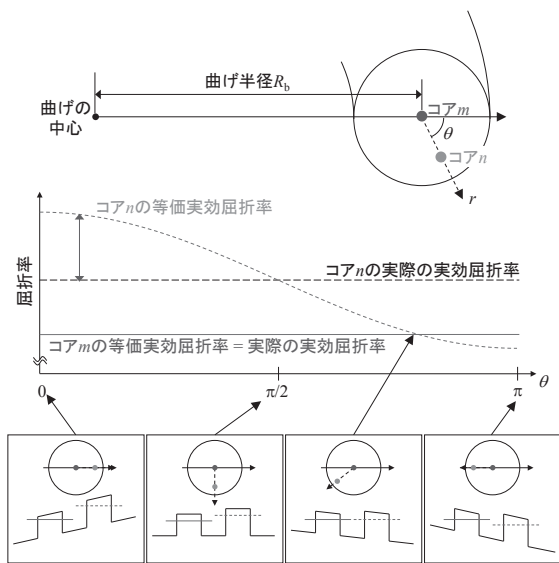


図2 曲げと捻じれの影響を受けたMCFの等価屈折率
 (上段) MCFの曲げに関連するパラメータ、(中段) 2つのコアの等価的な実効屈折率、(下段) 2つのコアの位置関係と等価屈折率分布（コアをまたぐ直線は等価的な実効屈折率の高さを表す）

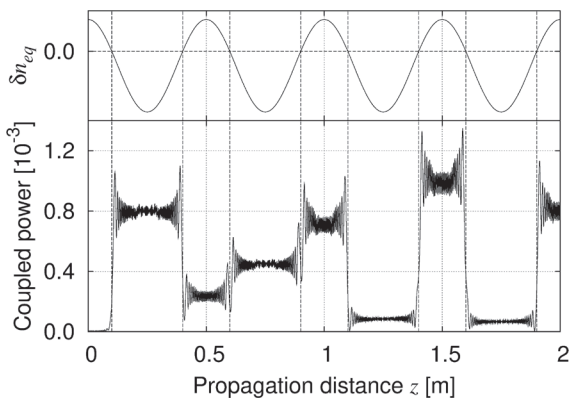


図3 MCFのXT（図中Coupled power）へのファイバ曲率（ $1/R_b$ ）とコア間伝搬定数不整合（ δn_{eq} ）の影響⁽⁵⁾

（ $\delta n_{\text{eq}} = n_{\text{eq},n} - n_{\text{eq},m}$ が0になる）位置（位相整合点）で、急激なXT変化が生じ、他の位置では支配的ではない小さな振動のような変化しか起こらないことがわかる。これは、 $\delta n_{\text{eq}} = 0$ で位相整合が起こり、それ以外の場所では位相整合が抑制されるためである。図4は、実験と計算の結果から、XTが実際に R_{pk} を閾値として値が大きく変わることがわかる（ $R_b \leq R_{pk}$ では曲げと捻じれに起因する位相整合が起こり、 $R_b > R_{pk}$ ではそれが起こらない）。

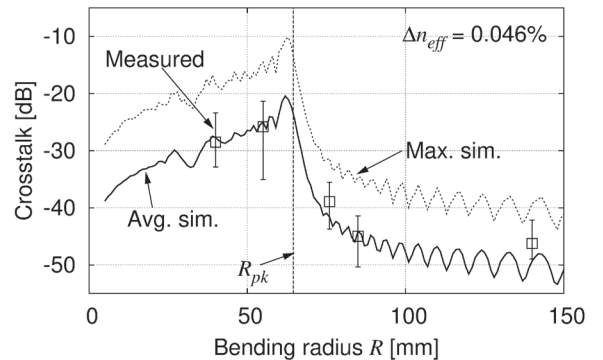


図4 MCFのXTへのファイバ曲率（ $1/R_b$ ）とコア間伝搬定数不整合（ $\Delta\beta_c$ ）の影響⁽⁵⁾

図3のようなランダムな変化を、強度ではなく複素振幅で考えると、XTが十分小さい場合、

$$A_{n,N} \approx -j \sum_{l=1}^N K_{nm,l} \exp[-j\phi_{\text{md},l}] A_{m,l} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表される離散的なランダムウォークに近似することができる⁽⁸⁾。ここで、 $A_{m,l}$ は l 番目の位相整合点におけるコア m の複素振幅を表し、 $K_{nm,l}$ は l 番目の位相整合点でのコア m からコア n への離散的な結合の係数であり、 $\phi_{\text{md},l}$ は位相整合点間での位相ずれのランダムさを織り込むためのランダム変数である。この式を基にすると中心極限定理により、XTの複素振幅成分の確率分布は正規（ガウス）分布状になる。XTの強度成分は、2つの直交偏波それぞれの複素振幅の同相成分と直交成分（合計4成分）の強度の和であるので、XTの強度での確率分布は自由度4のカイ二乗分布になる⁽⁸⁾。図5にXTの確率論的振る舞いについての模式図を示す。ランダムな振る舞いをする、ある波長・ある時点におけるXT X の統計平均 μ_x （図5中のアンサンブル平均）が、XTの時間平均や波長平均にほぼ等しく、通常MCFの文献でXTの値としてでてくるのは μ_x の値である。信号により変調された信号光のスペクトルがフラットな形状を持つとき、光の瞬間周波数は光速に信号光帯域内で高速に変動していると考えられるので、信号広帯域が十分広ければ、XTの成分の複素振幅はガウス雑音として振る舞い、

光増幅器での自然放出光 (ASE) 雑音やガウス分布でモデル化される非線形干渉雑音と同様の雑音として扱うことができる⁽⁹⁾。このことは、後にRademacherらにより詳しく調べられ、信号光帯域とコア間群遅延差の積が一定の値以上であれば、信号光のスペクトルがフラットになる直交振幅 (QAM) 変調などの変調方式においては、平均値一定のガウス雑音と見做せることがシミュレーションと実験から確認されている⁽¹⁰⁾。

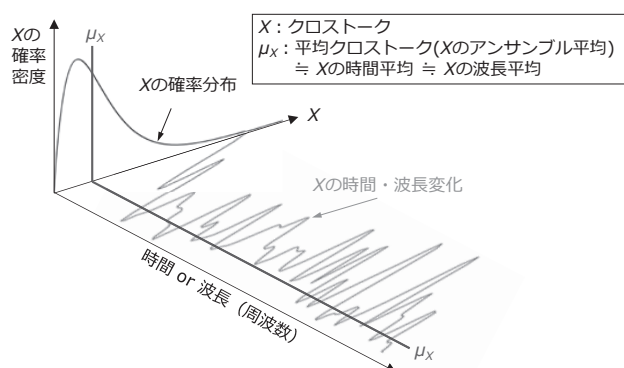


図5 MCFのXTの確率論的振る舞いと統計的パラメータを説明する模式図⁽⁹⁾

XTの平均値 μ_X は、構造の等しいコアを持つ同種コア型MCFではファイバの長さ L と曲げ半径 R_b に比例し⁽⁸⁾、

$$\mu_X \approx \kappa_{nm}^2 \frac{2R_b L}{\beta_{c,n} D_{nm}} = \kappa_{nm}^2 \frac{\lambda R_b L}{\pi n_{\text{eff},c,n} D_{nm}} \dots\dots\dots (4)$$

この式で表せることを明らかにしている。本式は極めて簡単かつ正確にXTの予測を行うことができることから、様々なグループでMCFの研究開発に広く用いられている。

また、マイクロバンドなどのXTの影響についても、実験的・理論的に調べ、報告をしている⁽¹¹⁾。

2-2 外周クラッド厚と被覆漏洩損失

外周クラッド厚 (OCT: 最外周コア中心と被覆の最短距離) は、クラッド・被覆界面に近い外周コアの光学特性を良好に保つうえで重要なパラメータである。光ファイバの被覆は、コアから漏洩した光がクラッドモードを伝搬しないように、高い屈折率に設定されているが、コアが被覆に近すぎると、コアの光が被覆の漏洩モードに結合してしまい、外周コアの損失が大きくなるので、これを抑えるために十分大きなOCTを取る必要がある⁽¹²⁾。

2-3 クラッド径

これらを踏まえたうえで、多数のコアを内蔵しようとすると、クラッド径を大きくする必要が生じてくる。多くの超大容量SDM伝送実験が、クラッド径が標準ファイバの125 μm よりも太い200~300 μm 程度のSDMファイバを

用いて報告されている^{(13)~(16)}。クラッド径を太くすることでファイバ1本当当たりの伝送容量を拡大できる一方で、デメリットもある。主要なデメリットは、機械的信頼性の低下と生産効率の低下である。機械的信頼性に関しては、ファイバを曲げた際にガラスに加わる歪が大きくなるために、破断する確率が高くなる。また、単純にファイバ長さ当たりの材料体積が増加することによる生産効率への影響も考えられるため、クラッド径を太くしないで済むのであれば、その方が望ましい。

3. 当社提案・試作のMCF代表例

MCFの光学特性を正確に予測することで、用途や目的に応じて様々なMCFを設計・試作・提案してきた。表1に当社が提案したMCFや、共同研究にて当社が試作を行ったMCFの代表例を示す。各MCFの特徴などを以下で説明する。

3-1 非結合型MCF

非結合型MCFは、コア間XTを抑制したMCFであり、各コアを独立した伝送チャネルとして取り扱うことができるので、従来のSMF用の送受信機をそのまま適用できる点が大きなメリットとなる。

これまで、長距離伝送用途向けには、

- (a) 極低XT MCF: C+L帯に対応し、クラッド径150 μm の中に7コアを内蔵しつつ、10,000km伝送後でもXTを-30dB (10^{-3})以下に抑えられるMCFを実証している⁽⁶⁾。各コア周囲に屈折率のトレンチを設け、カットオフ波長 $\lambda_{c,c}$ も可能な限り長波長化して、各コアへの光の閉じ込めを高めて、極めて低いXTを実現。本MCFを用いて情報通信研究機構 (NICT) が行った伝送実験により、世界で初めて光ファイバ1本当当たり100Tbit/sを超える伝送容量を達成した⁽¹⁷⁾。
- (b) 高OSNR MCF: 長距離伝送時のASE雑音や非線形干渉 (NLI) 雑音を考慮すると、各コアの光信号対雑音比 (OSNR) を向上させるためには、XTを抑えることに特化するのではなく、実効断面積 A_{eff} の拡大・XTの抑圧・コア密度のバランスをとること (非線形雑音・XTをバランスよく抑えること) が重要と示した⁽¹⁸⁾。
- (c) 高SSE MCF: 空間周波数利用効率 (SSE: ファイバ断面積当たりの総周波数利用効率 (SE)) について考えると、高 Δ 小径のコアを用いてコアへの閉じ込めを強めて、 Λ を小さくしてコア密度を高めることが望ましい。コアの高 Δ 化/小径化により非線形性が劣化しても、SEは A_{eff} に対数比例なので、線形比例するコア数が増える効果の方が大きいのである^{(19),(20)}。この設計思想は、各コアでのSEを小さくしコア数を増やすことで使用電力当たりの伝送容量を最大化するSDM伝送手法⁽²¹⁾にも親和性を有すると言える。

表1 代表的なMCFの報告例

	Ref.	コア数	コア配置	クラッド径 [μm]	λ_{cc} [μm]	MFD [μm]	A_{eff} [μm ²]	XT [/km]	波長 帯域	想定 用途	特徴	
非 結 合 型	(a)	(8)	7	六方格子	150	≤ 1.51	9.8 ^a	80 ^a	6.0×10^{-9b}	C~L	長距離	極低XT
	(b)	(18)	7	六方格子	188	≤ 1.47	12.2 ^a	124 ^a	8.0×10^{-7b}	C~L	長距離	高OSNR
	(c)	(19)、(20)	31	六方格子	225	~ 1.47	n/a	57 ^a	9.3×10^{-7a}	C~L	長距離	高SSE
	(d)	(22)、(23)	4	正方格子	125	≤ 1.19	8.6 ^c	n/a	5.0×10^{-5b}	O~L	中長距離	標準外径+全波長帯域
	(e)	(24)	8	円環	125	≤ 1.24	8.4 ^c	n/a	3.2×10^{-7c}	O	短距離	標準外径+8コア
	(f)	(25)	8	2×4矩形格子	180	≤ 1.20	8.4 ^c	n/a	$\leq 6.3 \times 10^{-5a}$	O~C	短距離	SiフォトニクスTRx実装
	(g)	(26)	4	1×4直列	98×200	≤ 1.34	9.7 ^a	n/a	3.0×10^{-4a}	C~L	短距離	非円形クラッド
	Ref.	コア数	コア配置	クラッド径 [μm]	λ_{cc} [μm]	MFD [μm]	A_{eff} [μm ²]	SMD [ps/√km]	波長 帯域	想定 用途	特徴	
結 合 型	(h)	(27)	3	正三角格子	125	~ 1.35	n/a	129a	≤ 30	S~L	長距離	4200km MIMO伝送、 実時間MIMO伝送を実現。
	(i)	(28)	4	正方格子	125	≤ 1.47	n/a	112 a	3.1	C~L	長距離	SDMファイバの低SMD と低ロス記録を更新。 10,000km伝送実現。

波長 a) 1550nm、b) 1625nm、c) 1310nmでの値。

(d) 125μmクラッドO~L帯用4コアファイバ：通常光通信に用いられる全波長帯域(O/E/S/C/L帯：1260~1625nm)で汎用SMFと同等の光学特性を実現しつつ、標準外径(クラッド径125μm)に4コアを内蔵したMCFで、日本電信電話(株)(NTT)により提案⁽²²⁾。共通仕様に基づいて、当社、(株)フジクラ、古河電気工業(株)の3社が試作したMCFを相互接続した伝送実験結果を、NTTを筆頭に前記3社ほかの連名で発表している⁽²³⁾。

などの各種特徴を持ったMCFを提案・試作してきた。

また、主に短距離伝送用途向けには、

(e) 125μmクラッドO帯用8コアファイバ：強度変調直接検波に適した低波長分散のO帯(1260~1360nm)で汎用SMFと同等の光学特性を実現しつつ、標準外径(クラッド径125μm)への8コア内蔵を実現した⁽²⁴⁾。O帯伝送に最適化されているが、標準外径に汎用SMF相当のコアを内蔵したMCFとしては、これまでの最高密度を記録しており、本MCFを活用して、96コアMPOコネクタ(8コア×12MCF)や256コアMTコネクタ(8コア×32MCF)も試作し⁽²⁹⁾、将来的な超高密度実装へのスケーラビリティも実証。

(f) 2×4コア配置MCF：Luxtera, Inc.と協調してシリコンフォトニクスチップの表面結合用グレーティングカップラとMCFのコアの配置の最適化を行い、シリコンフォトニクスチップにMCFが直接接続され実際に動作するMCF用トランシーバ(TRx)モジュールとそれを用いたMCF伝送リンクを同社と共同で初めて実現した⁽²⁵⁾。

(g) 非円形クラッドMCF：シリコンフォトニクスチップとのエッジ結合時の接続性を考慮した直列コア配置、および、ファイバ同士の接続時の調心を容易と

する非円形クラッドを実現した⁽²⁶⁾。

などの特徴を持ったMCFを提案しており、今後の実用化に向けた価値提案を進めている。

3-2 結合型MCF

コア間のXTをMIMO DSP^{*1}によって補償することを前提として、コア間のランダム結合を許容(あるいはむしろ促進)した種類のMCFを(ランダム)結合型MCFと呼ぶ。結合型MCFは、非結合型MCFよりも高いコア密度を簡単なコア構造で実現でき、更にはランダム結合により、非線形性、モード間群遅延差(空間モード分散SMD)、モード依存損失/利得を低減できるというメリットもあり、長距離のPoint-to-pointの通信用の光ファイバとして期待を集めている。当社では、Nokia Bell Labs(旧Bell Laboratories, Alcatel-Lucent USA, Inc.)との共同研究により結合型MCFの研究に着手し、近年においては独自のファイバ開発・提案も進めている。

結合型MCFにおいては、モード間でのランダムな結合がどのようなメカニズムで起こり、どのようにSMDを低減することができるかが、MIMO DSPの計算負荷を低減するうえで重要であるが、結合型MCFのモード結合においても、「非結合型MCFのXT同様に曲げと捻じれが大きな役割を果たすこと」と「捻じれレート(単位長さ当たりの捻じれ回数)が大きいほど、モード結合長を短くでき、SMDを低減できること」を明らかにした⁽³⁰⁾。また、ファイバの意図せぬ捻じれをWiener過程(捻じれレートが白色ガウス雑音)と仮定して、ファイバの伝達行列を計算することで、実際のファイバのSMDを良く再現する結果が得られることを明らかにしている⁽³¹⁾(このランダム捻じれモデルは、藤沢らによる非結合型MCFのXT計算モデルにも採用され⁽³²⁾、その有効性を示している)。

これまでに報告してきた代表的な結合型MCFは、基本的には標準の125μmクラッドで実現しており、

- (h) 初の完全なランダム結合型MCF実現例⁽²⁷⁾。4,200 kmの超長距離での光ファイバ通信へのMIMOの適用性を実証すると共に、初の実時間MIMO SDM光ファイバ伝送も実現⁽³³⁾。
- (i) SDM用ファイバとしての記録を更新する低損失・低SMDを実現したMCF⁽²⁸⁾。伝送距離10,000kmにわたり、同等の損失と A_{eff} を持つSMFよりも非線形雑音を低減した伝送が可能であることを実証⁽³⁴⁾。

などの報告をしている。

3-3 非結合型フューモードMCF

非結合型MCFの一種で、各コアがシングルモード動作するのではなく多モード動作し、コアごとにモード多重伝送を行うタイプのファイバをフューモード (FM: Few-mode) MCFと呼ぶ。当社では、NICTおよび横浜国立大学と共同で各コアが3モード動作する36コアファイバ (合計108モード) の発表を行っており⁽¹³⁾、また、(株)KDDI総合研究所 (旧(株)KDDI研究所) 向けに各コア6モード動作の19コアファイバ^{(15)、(16)、(35)} の試作を行ってきた。最新の成果では、長距離通信に用いられるC+Lバンド (1530~1625nm) 全帯域にわたり使用可能な6モード19コアファイバを試作し、KDDI総合研究所で行われた伝送実験にて、遂に光ファイバ1本当たり10Pbit/sを超える伝送容量を実現するに至っている。

4. 結 言

増加を続ける通信容量需要に応えるために、当社ではMCFの研究開発を進めており、設計・製造・評価の基盤技術を確認し、様々な用途に応じたMCFの価値提案を行っている。今後さらに、通信用途でのMCF実用化を目指し、製造技術の向上や周辺技術の開発を続けていく。

5. 謝 辞

本研究の着手を奨励して頂いた情報通信研究機構の淡路祥成氏に深謝の意を表する。

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「革新的光ファイバ技術の研究開発」または「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 MIMO DSP

MIMOとはMultiple-input-multiple-output (多入力多出力) の略で、DSPはDigital signal processing (デジタル信号処理) の略。複数空間チャンネルを持つ伝送系における空間チャンネル間クロストークをMIMO DSPにより補償し、クロストークが起こる前の信号を復元することができる。

参 考 文 献

- (1) P. J. Winzer, "Scaling Optical Fiber Networks: Challenges and Solutions," *Opt. Photonics News*, vol. 29, no. 3, pp. 28-35 (Mar. 2015)
- (2) 林哲也、中西哲也、「伝送用マルチコア光ファイバの研究開発」、レーザー学会学術講演会年次大会講演予稿集、京都 (2018)
- (3) 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
- (4) M. Koshihara et al., "Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle," *IEICE Electron. Express*, vol. 6, no. 2, pp. 98-103 (Jan. 2009)
- (5) T. Hayashi et al., "Crosstalk variation of multi-core fibre due to fibre bend," in *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC)*, Torino, 2010, p. We.8.F.6
- (6) J. M. Fini et al., "Low cross-talk design of multi-core fibers," in *Conf. Lasers and Electro-Opt. (CLEO)*, 2010, p. CTuAA3
- (7) J. M. Fini et al., "Statistics of crosstalk in bent multicore fibers," *Opt. Express*, vol. 18, no. 14, pp. 15122-15129 (Jun. 2010)
- (8) 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)
- (9) T. Hayashi et al., "Behavior of Inter-Core Crosstalk as a Noise and Its Effect on Q-Factor in Multi-Core Fiber," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E97.B, no. 5, pp. 936-944 (May 2014)
- (10) G. Rademacher et al., "Crosstalk dynamics in multi-core fibers," *Opt. Express*, OE, vol. 25, no. 10, pp. 12020-12028 (May 2017)
- (11) 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)
- (12) T. Hayashi, "Multi-core fiber for high-capacity spatially-multiplexed transmission," Ph.D. Thesis, Hokkaido University, Sapporo, Japan (2013)
- (13) J. Sakaguchi et al., "Large spatial channel (36-core x 3 mode) heterogeneous few-mode multi-core fiber," *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 93-103 (Jan. 2016)
- (14) B. J. Puttnam et al., "2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb," in *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC)*, 2015, p. PDP.3.1
- (15) D. Soma et al., "2.05 peta-bit/s super-Nyquist-WDM SDM transmission using 9.8-km 6-mode 19-core fiber in full C band," in *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC)*, Valencia, 2015, p. PDP.3.2
- (16) D. Soma et al., "10.16 Peta-bit/s Dense SDM/WDM transmission over Low-DMD 6-Mode 19-Core Fibre across C+L Band," in *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC)*, Gothenburg, 2017, p. Th.PDP.A.1
- (17) J. Sakaguchi et al., "109-Tb/s (7x97x172-Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber," in *Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, 2011, p. PDPB6
- (18) T. Hayashi et al., "Uncoupled multi-core fiber enhancing signal-to-noise ratio," *Opt. Express*, vol. 20, no. 26, pp. B94-B103 (Nov. 2012)
- (19) T. Hayashi and T. Sasaki, "Design strategy of uncoupled multicore fiber enabling high spatial capacity transmission," in *IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series*, Waikoloa, HI, 2013, p. MC2.4
- (20) T. Nakanishi et al., "Spatial-spectral-efficiency-enhanced multi-core fiber," in *Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, Los Angeles, 2015, p. Th3C.3
- (21) O. V. Sinkin et al., "Maximum Optical Power Efficiency in SDM-Based Optical Communication Systems," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 13, pp. 1075-1077 (Jul. 2017)
- (22) T. Matsui et al., "Design of 125 μm cladding multi-core fiber with full-band compatibility to conventional single-mode fiber," in *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC)*, Valencia, 2015, p. We.1.4.5
- (23) T. Matsui et al., "118.5 Tbit/s Transmission over 316 km-Long Multi-Core Fiber with Standard Cladding Diameter," in *OptoElectron. Commun. Conf. (OECC)*, Singapore (2017)

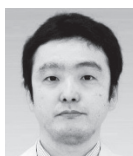
- (24) T. Hayashi et al., "125- μm -cladding eight-core multi-core fiber realizing ultra-high-density cable suitable for O-Band short-reach optical interconnects," J. Lightw. Technol., vol. 34, no. 1, pp. 85-92 (Jan. 2016)
- (25) T. Hayashi et al., "End-to-End Multi-Core Fibre Transmission Link Enabled by Silicon Photonics Transceiver with Grating Coupler Array," in Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC), Gothenburg, 2017, p. Th.2.A.4
- (26) T. Nagashima et al., "Multi-Core Fibre with Concaved Double-D Shape Cross Section," in Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC), Gothenburg, 2017, p. M.2.B.5
- (27) 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
- (28) 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)
- (29) T. Morishima et al., "MCF-enabled Ultra-High-Density 256-core MT Connector and 96-core Physical-Contact MPO Connector," in Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), 2017, p. Th5D.4
- (30) 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
- (31) T. Hayashi et al., "Effects of Core Count/Layout and Twisting Condition on Spatial Mode Dispersion in Coupled Multi-Core Fibers," in Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC), Düsseldorf, 2016, p. 559-561, paper W.2.B.5
- (32) T. Fujisawa et al., "Crosstalk Analysis of Heterogeneous Multicore Fibers Using Coupled-Mode Theory," IEEE Photonics Journal, vol. 9, no. 5, pp. 1-8 (Oct. 2017)
- (33) S. Randel et al., "First real-time coherent MIMO-DSP for six coupled mode transmission," in IEEE Photon. Conf. (IPC), Reston, 2015, pp. 1-2
- (34) R. Ryf et al., "Long-Haul Transmission over Multi-Core Fibers with Coupled Cores," in Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC), Gothenburg, 2017, p. M.2.E.1
- (35) T. Hayashi et al., "Six-Mode 19-Core Fiber With 114 Spatial Modes for Weakly-Coupled Mode-Division-Multiplexed Transmission," J. Lightw. Technol., vol. 35, no. 4, pp. 748-754 (Feb. 2017)
-

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 グループ長



*主執筆者