

大容量伝送用マルチコアファイバ

国立大学法人 北海道大学 小柴正則¹・齊藤晋聖²
光電子技術研究所 佐々木雄佑³・安間淑通³・竹永勝宏³・松尾昌一郎⁴

Multicore Fiber for Large Capacity Transmission

M. Koshiha, K. Saitoh, Y. Sasaki, Y. Amma, K. Takenaga, and S. Matsuo

光通信の伝送容量を飛躍的に拡大するための技術として、マルチコアファイバを用いた空間多重技術の研究開発が世界中で活発化している。マルチコアファイバの設計においては、低クロストークと高密度コア配置の両立が求められている。本稿では、高密度コア配置が可能として多数のマルチコアファイバに採用された六方最密配置に内在する課題を明らかにし、その課題を解決するために提案した二種ピッチ配置と単リング配置について説明する。単リング配置を用いた 12 コアファイバにより、初めてファイバ 1 本あたり 1 Pb/s を超える大容量伝送が実現した。

As a key technology significantly increasing the capacity of optical transmission, space-division multiplexing using multicore fibers has been attracting worldwide interest. Hexagonal close-packed structure has been widely used for multicore fibers as it allows high core package density; however there are other critical requirements that need to be satisfied (e.g., low crosstalk). In this paper, we first highlight issues with the hexagonal close-packed structure. We then review our two proposals -- two-pitch layout and one-ring layout -- to overcome these issues. Our 12-core fiber with one-ring layout contributed to the world's first demonstration of transmission capacity exceeding 1 Pb/s per fiber.

1. ま え が き

インターネットの普及をきっかけとして、世界の通信トラフィックは 10 年で 100 倍という爆発的な勢いで増大を続けてきた。映像配信やスマートフォンの普及に伴い、通信トラフィックは今後も増大が続くことが予想される。光ファイバ通信システムは、これらの通信トラフィックのバックボーンである。光通信の伝送容量は TDM, WDM, デジタルコヒーレントなどの技術により拡大を続け、爆発的に拡大した通信トラフィックを支えてきた。しかし、光ファイバに投入可能な光パワー入力の限界などから、既存の光ファイバ 1 本当たりの伝送容量は 100 Tb/s 程度が限界であるといわれている¹⁾。この伝送容量の壁を打ち破るための光伝送技術として、マルチコアファイバや数モードファイバを用いた空間多重技術が期待されている。最近ではマルチコアファイバを用いることで 1 Pb/s (1000 Tb/s) を超える容量を実現した伝送実験が報告されており、空間多重技術のポテンシャルが実証されつつある²⁾。

本稿では、当社が提案した新規構造のマルチコアファイバ

について紹介する。まず、空間多重技術の概要および当社のこれまでの取り組みについて紹介したのち、マルチコアファイバに主だって採用されている六方最密配置に内在する課題を示す。それを解決するために我々が考案した二種ピッチ配置と単リング配置の特長、特性について説明する。

2. 空間多重技術と当社の取り組み

図 1 に通信用シングルモードファイバの模式図を示す。通信用シングルモードファイバは、直径 125 μm のクラッド内に、直径 9 μm 程度のコア 1 つを有する。

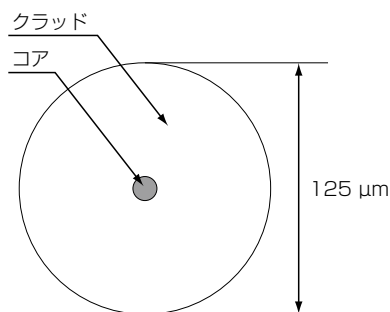


図 1 通信用シングルモードファイバの断面
Fig. 1. Schematic cross section of a conventional single-mode fiber.

1 国立大学法人北海道大学キャリアセンター長

2 国立大学法人北海道大学大学院情報科学研究科教授

3 光ファイバ技術研究部

4 光ファイバ技術研究部部長 博士 (工学)

略語・専門用語リスト 略語・専門用語	正式表記	説明
TDM	Time Division Multiplexing	時間分割多重。 複数の異なる信号に時間差を設けて伝送する方式。 伝送容量を拡大する方策のひとつ。
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波長分割多重。 複数の異なる波長の光信号を同時にのせる伝送方式。 伝送容量を拡大する方策のひとつ。
デジタルコヒーレント	Digital Coherent	コヒーレント検波と高速なデジタル信号処理を用いて、 光高速通信時に発生するひずみを補正する技術で、 ファイバの伝送容量を大きく向上させることができる。
クロストーク	Crosstalk	マルチコアファイバにおけるクロストークは、コアからコアへの光の漏洩である。情報伝送する際は、 信号へのノイズ増大による伝送品質劣化の要因となるので、 できるだけ小さくすることが望ましい。
MFD	Mode Field Diameter	モードフィールド径。 ファイバ中を伝搬する光の電界分布の広がりを示す指標のひとつ。 接続損失評価の指標となる。
A_{eff}	Effective Core Area	実効コア断面積。 ファイバ中を伝搬する光の電界分布の広がりを示す指標のひとつ。 主として非線形現象の起こりにくさを示すときに用いられる。
PDM	Polarization Division Multiplexing	偏波分割多重。 シングルモードファイバを伝搬する光は、偏波と呼ばれる2つの振動方向を持つ。それぞれの偏波に情報を載せて伝搬させることで、 2倍の多重度になる。
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	直角位相振幅変調。 振幅変調と位相変調を組み合わせた多値変調の一つ。 32 QAMでは、信号光1シンボルあたり5 bitの伝送が可能となる。
周波数利用効率	Spectral Efficiency	帯域あたりにどれだけ多くの情報量を送ることができるかの指標の一つ。

コア内を伝搬するモードは1つ（つまり、シングルモード）であるため、光ファイバ内の信号伝送路は1つだけであり、クラッド内で信号伝搬に使っている割合は、断面積比でわずか0.5%程度である。空間多重技術とは、光ファイバ内に信号伝送路を複数持たせ、空間をより有効に活用する新しい多重技術である。空間多重技術を実現するための伝送媒体として、マルチコアファイバと数モードファイバが提案されている。マルチコアファイバは、通常のシングルモードファイバには1つしかないコアをクラッド内に複数配置させたファイバである。それぞれのコアに異なる光信号を伝送させることで、ファイバ1本あたりの伝送容量をコアの数だけ増やすことができる。また、数モードファイバは、1つのコア内に複数のモードが伝搬可能なファイバである。それぞれのモードに別の信号を載せることで、モード数分の伝送容量拡大が可能になる。つまり、マルチコアファイバでは複数のコアを、数モードファイバでは複数のモードをそれぞれ伝送路として活用することで、信号の空間的な多重を実現している。

われわれは空間多重技術の可能性に着目し、数モードファイバ、マルチコアファイバの双方について開発を進

めている。数モードファイバにおいては、屈折率分布を最適化することにより、広い帯域でモード多重伝送に最適なファイバが実現可能であることを明らかにした³⁾。マルチコアファイバにおいては、伝送品質劣化の要因となるクロストークの抑制に着目した取り組みを行い、図2のようなトレンチ構造を各コアに付加することで、コアとコアの間隔を大きくせずにもクロストークの抑制が可能となることを示した⁴⁾。

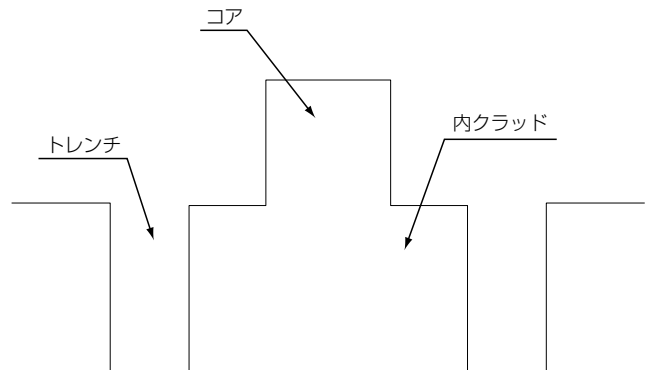


図2 トレンチ構造
Fig. 2. Schematic profile of trench structure.

3. 六方最密配置マルチコアファイバの課題

六方最密配置は円状のコアを最も密に隙間無く並べることが出来る配置であり、マルチコアファイバの配置として最も一般的である。特に、ファイバの中心に一つのコア（中心コア）、それを取り囲むよう6つのコア（外側コア）を正六角形の頂点上に配した図3(a)のような7コアのマルチコアファイバは、これまでに多数報告されてきた^{5) 6) 7)}。また、6つの外側コアのさらに外側に12個のコアを並べることにより、図3(b)のような19コアファイバも実現可能である。しかし、この配置を用いたマルチコアファイバでは、以下に説明する3つの課題がある。

3.1 中心コアのカットオフ波長の長波長化

トレンチ構造は、クロストークの抑制およびコアの高密度配置に有効である。しかしながら、トレンチ構造を有するコアを六方最密配置したマルチコアファイバにおいては、コア間距離が過度に近接すると、中心コアのカットオフ波長が急激に長波長化する現象が見られる^{4) 5)}。これは中心コアを伝搬する高次モードが、外側コアのトレンチ構造によりさらに閉じ込められていくからであると考えられる。カットオフ波長が通信使用波長帯よりも長くなると、通信帯でのシングルモード伝送が保証できなくなり好ましくない。一般的にはクロストークの悪化がコア間距離を制限する要因であるが、トレンチ構造を有する場合は、カットオフ波長の長波長化がコア間距離を制限する要因になる場合がある。

3.2 コア数選択の硬直性

伝送用マルチコアファイバの伝送容量を拡大するため、限られたクラッド断面により多くのコアを収容することが求められる。しかし、各コアでの伝送品質を保つためには、クロストークの抑制および低い伝搬損失が求められる。トレンチ構造を用いた場合でも、過小なコア間距離はクロストークの増大を起す。また、外側コア

から被覆までの厚さ（Outer Cladding Thickness, 以下 T_c と記す）が薄くなると、外側コアの伝搬損失が中心コアよりも大きくなるという現象がみられるようになる。これは、外側コアの光の一部が高屈折率の保護被覆層にしみだすようになるために起こる現象である。所望の光学特性が得られる設計、つまり、コア間距離と T_c の大きさを保った設計を行った場合、マルチコアファイバのファイバ直径は通常のシングルモードファイバのファイバ直径である $125 \mu\text{m}$ より太くなる場合が多い。

ファイバ直径の太径化は、光ファイバに機械的強度の観点から許容される曲げ直径の増大につながる。光ファイバは、ケーブル内や接続部付近で想定される曲げに対して、十分な信頼性を有することが求められる。図4は、光ファイバを直径 30 mm と 60 mm に曲げた時の破断確率のファイバ直径依存性を示している⁸⁾。光ファイバのスクリーニングレベルを 1% 、巻き回数を 100 回として、 20 年後の破断確率を推定した。直径 30 mm という曲げは、アクセス系や構内系に広く用いられている光ファイバの許容曲げ径であり⁹⁾、標準的なシングルモードファイバ（ファイバ直径 = $125 \mu\text{m}$ ）では厳しい条件の 1 つである。この場合の破断確率である 10^{-7} をマルチコアファイバの信頼性の目安として考えてみる。マルチコアファイバを基幹系として用いることを想定すると、最も曲げ径が小さくなるのはクロージャへの収容部となり、そこでの曲げ直径としては 60 mm 程度が想定される。曲げ直径 60 mm において破断確率が 10^{-7} になるファイバ直径は $230 \mu\text{m}$ となる。コアの A_{eff} が波長 1550 nm で $80 \mu\text{m}^2$ 程度の場合、 T_c は $30 \mu\text{m}$ 必要とされる¹⁰⁾。例えば、コア間距離 $40 \mu\text{m}$ 、 T_c $30 \mu\text{m}$ を想定すると、6つの外側コアが1層配置された7コアファイバではファイバ直径が $140 \mu\text{m}$ となる。収容コア数を8つ以上に増やす場合、6つの外側コアのさらに外側の2層目にコアを配置せざるを得なくなり、そのファイバ直径は信頼性上限に近い $220 \mu\text{m}$ に達す

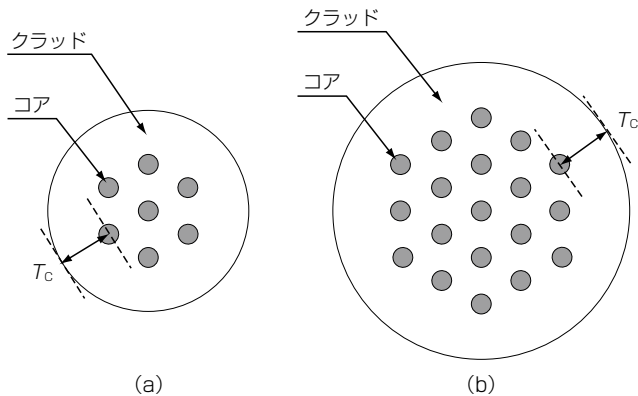


図3 六方最密配置を用いたマルチコアファイバ
(a) 7コアファイバ (b) 19コアファイバ
Fig. 3. Multicore fibers with hexagonal close-packed structure;
(a) Seven-core fiber, and (b) 19-core fiber.

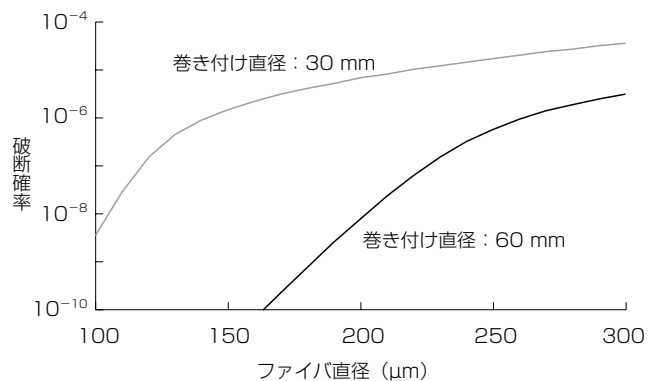


図4 光ファイバの破断確率のファイバ直径依存性
Fig. 4. Rupture probability of an optical fiber as a function of fiber diameter.

る。信頼性の観点からは、ファイバ直径は可能な限り細いことが望ましい。図5は、六方最密配置におけるファイバ直径と収容可能コア数の関係を示したものである。ファイバ直径として180 μm, 200 μmが許容されたにしても、収容可能なコア数はファイバ直径が140 μmの場合と同じ7つのままである。つまり、六方最密配置は、ファイバ径に応じた柔軟なコア数の選択という点で問題があることがわかる。

3.3 最悪クロストーク

マルチコアファイバのコアは、複数のコアに隣接している。このため、実効的なクロストークは、隣接するコア数、およびその励振状態に影響を受ける。すべてのコアが均一に励振されたときのあるコアへのクロストーク (XT_{worst} [dB]) は、以下の式(1)のように表される。

$$XT_{worst} = XT + 10 \log n \quad (1)$$

ここで、 XT [dB] は隣接する2コアの間のクロストーク、 n は隣接コアの数である。式(1)は n が増えるほど XT_{worst} も大きくなることを意味する。 XT_{worst} と XT の差分を ΔXT とすると ΔXT は式(1)から式(2)のように表される。

$$\Delta XT = XT_{worst} - XT = 10 \log n \quad (2)$$

六方最密配置の7コアファイバにおいて、外側コアでは隣接するコア数が3つであるのに対し、中心コアでは隣接するコア数が6つとなる(図3(a))。3つのコアからクロストークを受ける外側コアの ΔXT は4.8 dBであるのに対し、6つのコアからクロストークを受ける中心コアの ΔXT は7.8 dBにもなることが、それぞれ式(2)より求まる。中心コアの ΔXT を補うためにはコア間距離を3 μm程度大きくする必要がある。3 μmというコア間距離の増大は、できるだけ細かいクラッド内に複数のコアを詰め込むというマルチコアファイバの設計に大きなインパクトを与える。

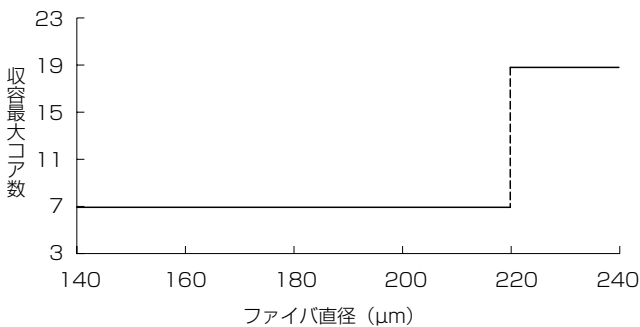


図5 六方最密配置におけるファイバ直径と収容最大コア数の関係

Fig. 5. Relationship of fiber diameter and maximum containable core number in hexagonal close-packed structure.

4. 六方最密配置の課題を解決するための新規配置

前述の六方最密配置の課題を解決する配置として、図6に示すような二種ピッチ配置と単リング配置を我々は提案した。表1に、六方最密配置、二種ピッチ配置、単リング配置の特徴を簡単にまとめている。

4.1 二種ピッチ配置の特徴

二種ピッチ配置は、中心コアと外側コア間の距離 (Λ_{in}) が外側コア間距離 (Λ_{out}) よりも大きいことを特徴としている。収容コア数を m とすると、 Λ_{out} から Λ_{in} は幾何学的に式(3)のように定まる。

$$\Lambda_{in} = \frac{\Lambda_{out}}{2 \sin[\pi/(m-1)]} \quad (3)$$

10コア配置において Λ_{out} を40 μmとした場合、式(3)から Λ_{in} は58.5 μmとなる。コア間距離が大きいほどクロストークは小さくなる。 $\Lambda_{in} > \Lambda_{out}$ であることから、外側コア-中心コア間クロストーク (XT_{io}) は、外側コア-外側コア間クロストーク (XT_{oo}) と比べて小さい。すべてのコアで光伝送を行ったとしても、中心コアへのクロストークの総和は XT_{oo} と比べても小さくすることができるので、中心コアの伝送品質の劣化が起こらない。

また、外側コアが環状に配置されるので、収容するコア数をファイバ直径に応じて選択可能である。たとえばファイバ直径200 μm程度で、 Λ_{out} が40 μm、 T_c が40 μmの10コアファイバを実現できる。

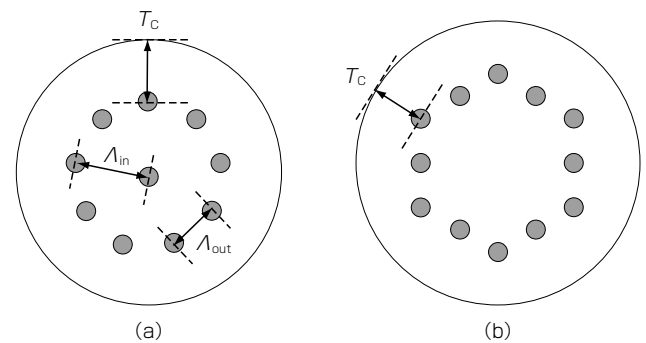


図6 新しく提案したマルチコアファイバの配置 (a) 二種ピッチ配置 (b) 単リング配置

Fig. 6. Newly proposed layouts to overcome the issues of hexagonal close-packed structure; (a) Two-pitch layout, and (b) One-ring layout.

表1 各構造の特徴の比較

Table 1. Comparison of the layouts of multicore fiber.

課題	六方最密配置	二種ピッチ配置	単リング配置
カットオフ波長	×	×	○
コア数選択	×	○	○
クロストーク	×	○	○

しかし、二種ピッチ配置においても中心コアは外側コアに取り囲まれているため、トレンチ構造を有する場合、 A_{in} を小さくしたときの中心コアのカットオフ波長の長波長化という課題は依然として残る¹¹⁾。

4. 2 単リング配置の特徴

単リング配置は六方最密配置の3つすべての課題を解決できる配置である。

単リング配置では、中心コアがないため、コア間距離を小さくしてもカットオフ波長の長波長化が起きない。つまり、コア間距離はクロストークのみに制約される。また、コアを環状に配置した配置であることから、ファイバ径に応じてコア数を柔軟に設定できる。さらに、いずれのコアにおいても隣接するコアの数が2であるため、 ΔXT はすべてのコアで3 dBとなり、均一かつ六方最密配置よりも小さな値とすることが可能である。つまり、ある XT_{worst} が得られるようにマルチコアファイバを設計した場合、単リング配置のコア間距離は六方最密配置よりも小さくできることを意味している。例えば、ケーブルカットオフ波長を1.53 μm 、巻き直径を310 mm、波長1.55 μm における A_{eff} を80 μm^2 、100 km伝搬後 XT_{worst} を-47 dBと設定すると、六方最密配置ではコア間距離が40 μm 必要なのに対し、単リング配置ではコア間距離を36.5 μm まで小さくすることが可能である¹²⁾。図7に、単リング配置における最大コア数

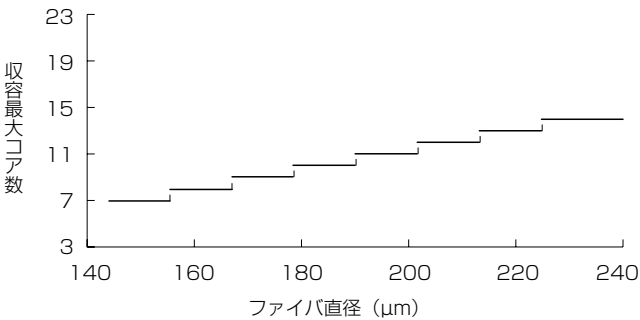


図7 単リング配置におけるファイバ直径と収容最大コア数の関係

Fig. 7. Relationship of fiber diameter and maximum containable core number in one-ring layout.

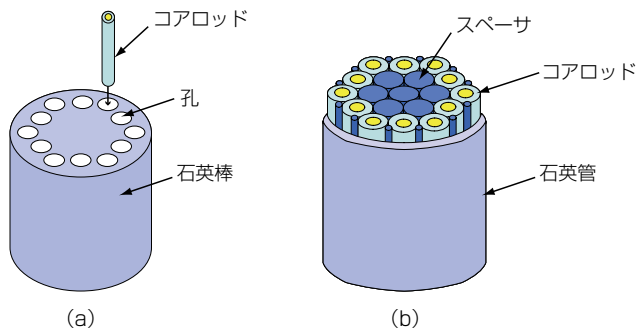


図8 マルチコアファイバの作製方法 (a) 孔開法 (b) スタック&ドロウ法

Fig. 8. Fabrication processes of multicore fiber (a) Drilling process, and (b) Stack and draw process.

とファイバ直径の関係を示す。 T_c は30 μm に設定した。図7から単リング配置を用いることで、ファイバ直径200 μm 程度で12個のコアを収容できることがわかる。

5. 単リング配置を用いた12コアファイバの試作結果

マルチコアファイバの作製方法としては、図8のように孔開法とスタック&ドロウ法の2つがある。孔開法は、石英棒に孔開用ドリルを用いて軸方向に孔を開け、そこにコアロッドをそれぞれ詰め込み、紡糸する方法である。スタック&ドロウ法は、空間を埋めるためのスペーサとともにコアロッドを石英管に詰め込み、紡糸する方法である。今回の試作では、スタック&ドロウ法を用いたプリフォームの大型化を行い、長尺かつ低損失なマルチコアファイバを作製した¹³⁾。

図9に試作した素線の断面写真、表2に寸法および光学測定結果の平均値を示す。すべてのコアで、波長1550 nmにおける A_{eff} が標準的なシングルモードファイバと同程度の80 μm^2 程度であった。ケーブルカットオフ波長(λ_{cc})も1530 nmを下回り、一般的な通信に用いられる1530 nm以上の波長帯でシングルモード動作することが確認された。

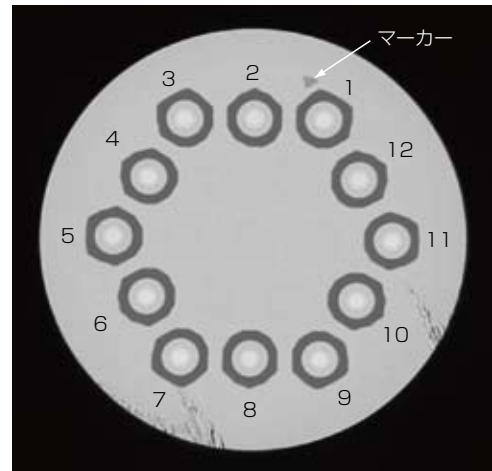


図9 試作した単リング配置12コアファイバの素線断面写真

Fig. 9. A cross-section of fabricated 12-core fiber with one-ring layout.

表2 作製した12コアファイバの測定結果 Table 2. Measurement results of the fabricated 12-core fiber.

コア間距離 (μm)	36.8
T_c (μm)	39.3
ファイバ直径 (μm)	225.0
ファイバ長 (m)	52.5
伝搬損失 (dB/km)	0.199
λ_{cc} (μm)	1.47
A_{eff} (μm ²)	80.7

試作したファイバの 100 km 伝搬時の隣接コア間クロストークを図 10 に示す。測定波長を 1550 nm と 1625 nm、巻き直径を 310 mm とした。奇数コアを励振し、それに隣接する偶数コアからの漏洩光のパワーを評価して隣接コア間クロストークを求めた。条長 52 km での測定結果と電力結合理論を用いて、100 km 伝搬後のクロストークを推定した¹⁴⁾。コア番号は図 9 に対応する。波長 1550 nm での平均値は -44 dB、1625 nm では -36 dB であった。全コア励振時の XT_{worst} は、1550 nm で -40 dB 以下、1625 nm では -30 dB 以下となると予想され、大容量伝送に十分な特性を有していることがわかった。

今回試作した 12 コアファイバと過去に報告されたマルチコアファイバについて、コア数と XT_{worst} の関係を図 11 にまとめた。過去に報告されたマルチコアファイバにおいては、コア数が 8 以上では XT_{worst} が -20 dB 程度と大きく、 XT_{worst} が低いものはコア数が 7 つだけである。単リング構造を用いることで初めて、多コアと低クロストークの両立が可能になったことがわかる。

試作したファイバは、2012 年秋に報告されたファイバ 1 本あたり 1 Pb/s を超える容量を初めて達成した伝送実験に使用された¹⁵⁾。本実験は、日本電信電話株式会社、

北海道大学、デンマーク工科大学と当社の共同研究により行われた。PDM と 32QAM を用いて 456 Gb/s の信号を生成し、それを 222 の波長で多重して 101 Tb/s にする。この信号を 12 のコアそれぞれに伝送させることで、1.01 Pb/s の伝送容量を 91.4 b/s/Hz の高い周波数利用効率で達成している。図 12 に、今まで学会等で報告されたファイバ 1 本あたりの伝送容量の推移とそれに使われた代表的な技術を示す。既存のシングルモードファイバを用いた伝送実験では、デジタルコヒーレント等を用いても 100 Tb/s 付近で伝送容量拡大が停滞している。これに対し、マルチコアファイバを用いた伝送実験では、2011 年春に 109 Tb/s を達成したことが報告されてから 1 年半で 10 倍の伝送容量の拡大を実現した。マルチコアファイバを用いた空間多重技術には、これからも光通信システムの大容量化を実現していく可能性がある。

6. むすび

六方最密配置を採用したマルチコアファイバにおいて、中心コアのカットオフ波長の長波長化、選択可能なコア数の制限、隣接するコアの数が多中心コアにおけるクロストークの劣化の 3 つの課題があることを説明した。

3 つすべての課題を解決する配置として新しく単リング配置を提案し、52 km のファイバを作製した。このファイバは、225 μm のファイバ直径で 12 個のコアを収容し、波長 1625 nm において、全てのコアを用いて光伝送とした最悪時のクロストークでも 100 km で -30 dB 以下という低クロストークを実現できることがわかった。さらに、このファイバを用いて、1 Pb/s を超える伝送が初めて実現された。

謝 辞

本研究の一部は、独立行政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の一環としてなされたものである。

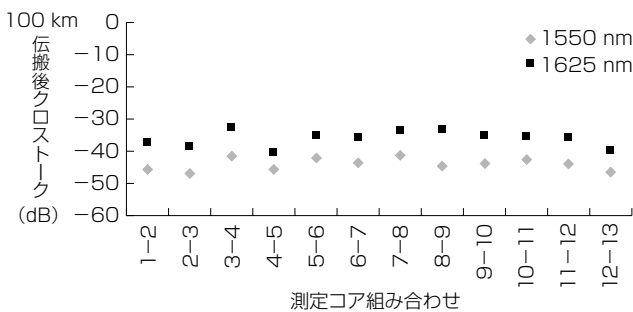


図 10 100 km 伝搬後クロストーク推定結果
Fig. 10. 100-km crosstalk estimated from measured results.

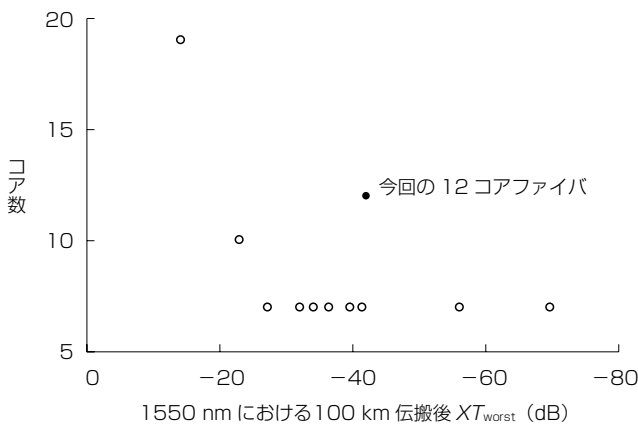


図 11 今回試作した 12 コアファイバと既報のファイバにおける 100 km 伝搬後 XT_{worst} とコア数の比較
Fig. 11. Comparison between 100-km XT_{worst} at 1550 nm and core number of the fabricated 12-core fiber and reported multicore fibers.

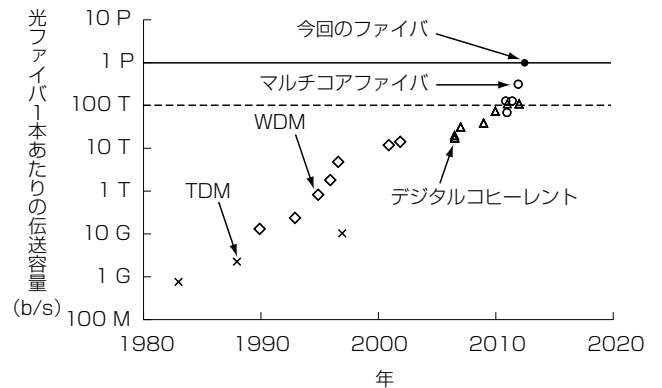


図 12 光ファイバ 1 本あたりの伝送容量の推移
Fig. 12. Development of transmission capacity per fiber.

参 考 文 献

- 1) T. Morioka: "New generation optical infrastructure technologies: "EXAT initiative" towards 2020 and beyond," OECC 2009, FT4, 2009
- 2) H. Takara, et al.: "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency," ECOC 2012, Th.3.C.1, 2012
- 3) 丸山ほか:「広帯域低モード分散を実現する2モード光ファイバ」, フジクラ技報, 第124号, pp. 7-14, 2013
- 4) 竹永ほか:「空間多重伝送用マルチコアファイバ」, フジクラ技報, 第121号, pp. 1-7, 2012
- 5) K. Takenaga, et al.: "Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber," OFC/NFOEC 2011, OWJ4, 2011
- 6) K. Takenaga, et al.: "A large effective area multi-core fibre with an optimized cladding thickness," ECOC2011, Mo.1.LeCervin.2, 2011
- 7) H. Takara, et al.: "1000-km 7-core fiber transmission of 10x 96-Gb/s PDM-16QAM using Raman amplification with 6.5 W per fiber," Opt. Express, Vol. 20, No. 9, pp. 10100-10105, 2012
- 8) S. Matsuo, et al.: "Large-effective-area ten-core fiber with cladding diameter of about 200 μ m," Opt. Letters, Vol. 36, pp. 4626-4628, 2011
- 9) 市井ほか:「曲げ損失を低減した低OH-SMF (FutureGuide[®]-SR15E) の特性」, 信学技報, Vol. 104, No. 341, pp. 1-4, 2004
- 10) K. Saitoh, et. al.: "Crosstalk and core density in uncoupled multi-core fibers," IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 24, No. 21, pp. 1898-1901, 2012
- 11) Y. Sasaki, et. al.: "Large-effective-area uncoupled 10-core fiber with two-pitch layout," OFC/NFOEC 2012, OM2D, 2012
- 12) S. Matsuo, et al.: "12-core fiber with one ring structure for extremely large capacity transmission," Opt. Express, Vol. 20, No. 27, pp. 28398-28408, 2012
- 13) I. Ishida, et al.: "Possibility of stack and draw process as fabrication technology for multi-core Fiber," OFC/NFOEC 2013, OTu2G, 2013
- 14) K. Takenaga, et al.: "An investigation on crosstalk in multi-core fibers by introducing random fluctuation along longitudinal direction," IEICE Trans. Commun., Vol. E94-B, No. 2, pp. 409-416, 2011
- 15) 「マルチコアファイバによる伝送容量世界記録達成」, フジクラ技報, 第124号, p. 50, 2013