

シリコン光導波路との結合に適した細径コア光ファイバ

先端技術総合研究所 平川 圭祐¹・小田 拓弥¹・市井 健太郎²・愛川 和彦³

Small Core Diameter Fibers for Silicon Optical Waveguides

K. Hirakawa, T. Oda, K. Ichii, and K. Aikawa

光通信用デバイスの小型化・高集積化に貢献する技術としてシリコンフォトニクスが注目されている。シリコン導波路のスポットサイズは光ファイバに比べて非常に小さく、スポットサイズの不整合による結合損失が課題である。我々は、シリコン導波路と汎用光ファイバの間に挿入するMFD 4 μm の細径コアファイバの開発を行った。本ファイバを用いることにより、シリコン導波路との結合効率を改善しつつ、汎用光ファイバとの接続において 0.2 dBを下回る低損失な接続を実現した。

Silicon photonics technology has been attracting much attention in recent years for optical communication devices due to its advantages of reduced size and high-density integration. Silicon waveguides have the spot size which is even smaller than that of conventional single-mode fiber (CSMF), so there is a subject of the high coupling losses between silicon waveguides and CSMFs. We have developed single-mode fibers which have 4- μm mode field diameter for the field matching with silicon photonic devices. These fibers are expected to improve coupling losses with silicon waveguides and splice losses with CSMF. Also we have demonstrated that developed fibers can be connected to CSMFs with low splice losses less than 0.2 dB.

1. ま え が き

シリコン光導波路に代表される微細光回路形成技術は、光通信容量の大容量化とともに光通信用デバイスの集積化に寄与する技術として大きな期待が寄せられている。シリコンフォトニクスの研究においては、光変調器、光検出器、光スイッチなど、様々な機能をもつ超小型デバイスが実現されている¹⁾。さらに近年では、汎用シングルモードファイバ (Conventional Single-Mode Fiber, 以下、CSMFと記す) への光結合を低損失化するために、シリコン光導波路にスポットサイズコンバータ (Spot Size Converter, 以下、SSCと記す) を形成する技術が提案されている^{2), 3), 4)}。SSCにより 1 μm 以下のスポットサイズを数 μm まで拡大することが可能となる。しかし、CSMFと同じ 10 μm 程度までスポットサイズを拡大すると、シリコン光導波路におけるSSCの占有率が高くなることによる集積効率の低下や、SSCの挿入損失が課題となる。そこで、シリコン光導波路内でのスポットサイズは 4 μm 程度までの拡大にとどめ、MFDが 4 μm の光ファイバに結合させたのち、CSMFとの融着接続部で損失を下げる手法が考えられている^{5), 6)}。この理由は次のとおりである。シリコン光導波路と光ファイバの結合はMFDのミスマツ

チがあると大きな接続損失が発生する。一方で、光ファイバ同士の融着接続の場合、加熱条件を最適化すれば小MFDファイバ側のコアが拡大され、接続損失を下げるができる。そのため、トータルの接続損失を低減することが可能となる。

今回我々は、MFDが 4 μm である細径コアシングルモードファイバ (以下、細径コアSMFと記す) および細径コア偏波保持型光ファイバ (Polarization Maintaining Fiber: PMF, 以下、細径コアPMFと記す) の試作を行った。さらに、細径コアSMFにおいては、TEC技術^{7), 8)}を用いてCSMFとの接続損失を低減する検討を行ったので報告する。

2. 開発した光ファイバの設計

ステップインデックス型の屈折率分布において、コア直径 d 、コアとクラッドの比屈折率差 Δ を変えてMFDを計算した結果を図 1 に示す。CSMFの Δ が 0.3%程度であるのに対し、MFDを 4 μm とするためには Δ を 2%まで高くする必要があることがわかる。 $\Delta = 2\%$ 付近を拡大したものを図 2 に示す。これらの計算結果から、MFDを 4 μm とするために、 $\Delta = 2.2\%$ 、 $d = 3 \mu\text{m}$ のコアを設計値とした。

また、本ファイバの適用先は光トランシーバなどの小型光デバイスが考えられる。これらのデバイスは低背化・小型化といった要求があることから、小径曲げに対して高い信頼性が要求される。光ファイバの小径曲げによる

1 光通信研究部

2 光通信研究部グループ長

3 光通信研究部部長 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
MFD	Mode Field Diameter	光ファイバ中を伝搬する光の電界分布の広がり直径として表現したもの。
SSC	Spot Size Converter	シリコン光回路への入出力光のスポットサイズ（光が閉じ込められている領域の直径）をファイバのMFDに合わせるため、光導波路の入出力部断面形状を変換するデバイス。
TEC	Thermally-diffused Expanded Core	光ファイバに熱を与えることにより、コアに添加されているドーパントをクラッドに熱拡散させることで、コアを拡大させる技術。
シリコンフォトニクス	Silicon Photonics	シリコン基板上に高屈折率差導波路や各種光機能を持つ素子を作製する技術。
光ファイバの融着接続	-	光ファイバの端面の軸合わせを行った後に、高電圧アーク放電により光ファイバの端面を溶かして接続を行う接続方法。
偏波クロストーク	Polarization cross talk	偏波保持光ファイバにおける、直交する二つのモード間での結合度合い。 例えば、入力端で一方のモードに励振された光パワーが、出力端で他方のモードに漏れ出している光パワー。

屈曲時に生じるひずみを低減するため、クラッド径は一般的な光ファイバの 125 μm よりも細い 80 μm とした。

ファイバの使用長が短いことが想定されるため、伝送損失が挿入損失に与える影響は小さい。

3. ファイバの作製結果

3.1 試作ファイバの光学特性評価

前項で示した設計をもとに、細径コア SMF、細径コア PMF を作製した。各特性項目の測定結果を表 1 に、屈折率分布を図 3 にそれぞれ示す。細径コア SMF、細径コア PMF いずれも目標値を満たしていることが確認された。また、得られた屈折率分布についても、設計に近い結果となっている。伝送損失については、CSMF に比べて高い値を示しているが、本ファイバの適用先においては

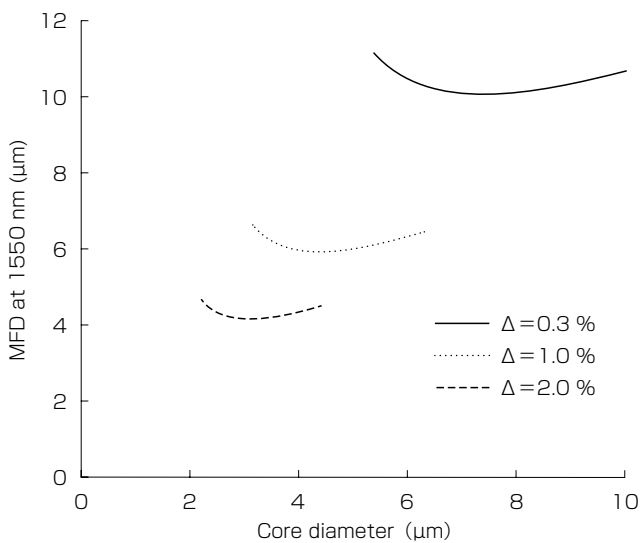


図1 コア直径 d 、コア比屈折率差 Δ と MFD の関係
Fig. 1. Relation between fiber parameter (d and Δ) and MFD.

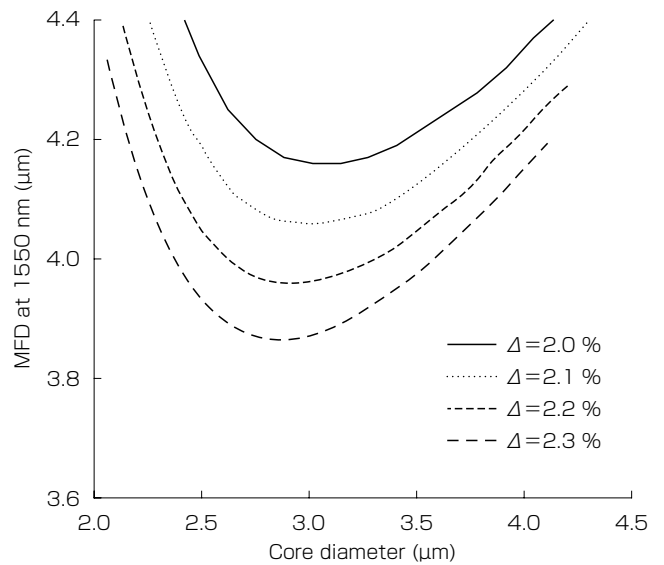


図2 $\Delta = 2\%$ 付近における、コア直径と MFD の関係
Fig. 2. Relation between core diameter and MFD around $\Delta = 2\%$.

表1 細径コア SMF、PMF の特性
Table 1. Properties of the fabricated fibers.

項目	単位	目標値	波長：1550 nm	
			細径コア SMF	細径コア PMF
クラッド径	μm	80.0	80.4	79.8
MFD	μm	4.0	4.0	4.1
カットオフ波長	μm	≤ 1.53	1.24	1.31
伝送損失	dB/km	≤ 30	11	2
偏波クロストーク	dB	≤ -30	-	-35

3. 2 細径コアPMFの曲げ特性

曲げ半径を変化させた際の偏波クロストーク特性の測定結果を図4に示す。偏波クロストークは曲げ半径が小さくなるにつれ劣化がみられるが、曲げ半径3 mmにおいて-25 dB以下を維持している。一方、曲げ損失は曲げ半径5 mmの曲げを10ターン付与しても0.1 dB以下の損失であった。以上のことから、小曲げ径が加わる環境下においても十分な光学特性を有しているといえる。

また、本ファイバはクラッド径を一般的な125 μm よりも細い80 μm としている。クラッド径を変えることによるファイバの機械寿命の計算例を図5に示す。クラッド径80 μm では、クラッド径125 μm の光ファイバにおける曲げ半径7.5 mm相当の機械信頼性を曲げ半径5 mmで満たしていることがわかる。これらの結果から、今回試作した細径コアPMFは曲げ半径5 mm程度の小曲げ径において、十分な光学特性、機械信頼性を有しているといえる。

4. CSMFとの接続損失改善の検討

4. 1 接続損失評価用ファイバ

SSCを搭載したシリコンチップとの結合部は、今回開発した細径コアSMFを空間結合させることで結合損失を大きく低減させることが期待される。一方で、細径コアSMFとCSMF（波長1550 nmにおけるMFD: 10.6 μm ）との接続部におけるMFD不整合を改善するには、融着時の加熱によってコアに添加されているドーパントをクラッド側に熱拡散させ、MFDを拡大させるTEC技術が有効である。

今回我々は、熱拡散を促進させるためにGe-P-Fを共添加したインナークラッド構造を採用した⁸⁾。各ドーパント

の役割について説明する。GeはCSMFのコアにも添加されており、屈折率を上げる働きがある。PはGe同様に屈折率を上げるほか、コアに添加されているGeの拡散速度を高める働きがあると考えられている。Fは屈折率を下げるドーパントであり、Pと同様、コアに添加されているGeの拡散速度を高める。インナークラッドにはGe-P-Fを共添加したSiO₂、アウトークラッドは何も添加していないSiO₂から成り、インナークラッドとアウトークラッドの屈折率が同じとなるように添加量を調整している。そのため、GeとPの添加量が多いほどFの添加量も多くなる。本検討では、クラッドのドーパント濃度が異なる2種の細径コアSMF（SMF-A, SMF-B）および比較用にインナークラッドのないSMF（SMF-Ref.）を試作し、融着特性の評

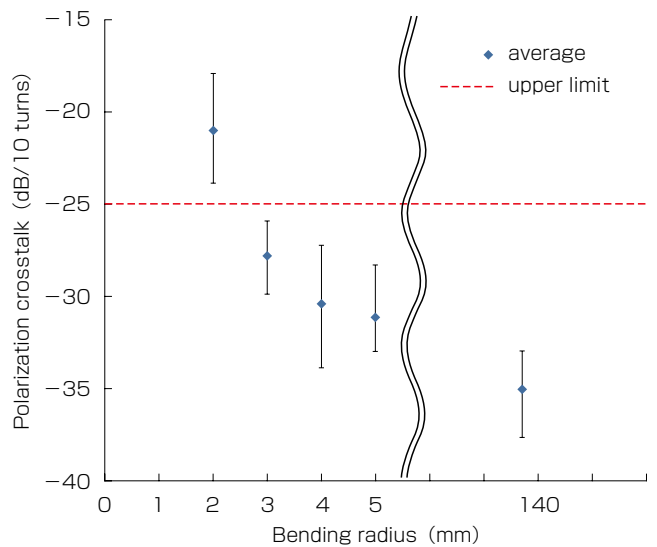


図4 偏波クロストークの曲げ半径依存性
Fig. 4. Measured bending polarization crosstalk at 1550 nm as a function of bending radius.

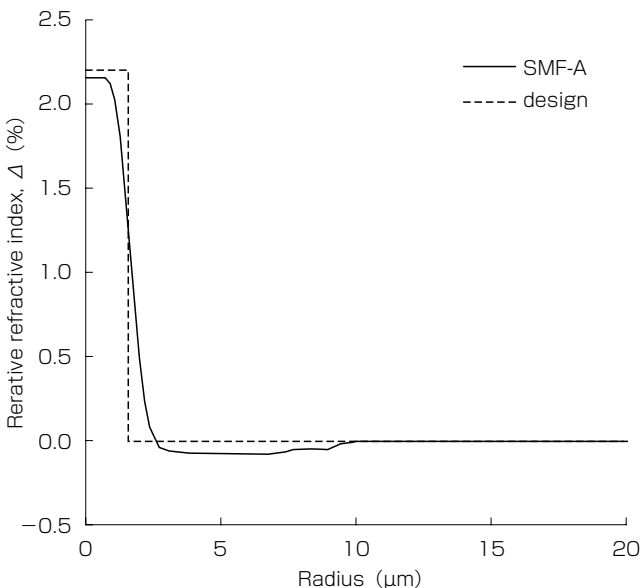


図3 試作ファイバの屈折率分布
Fig. 3. Refractive index profiles of design and SMF-A.

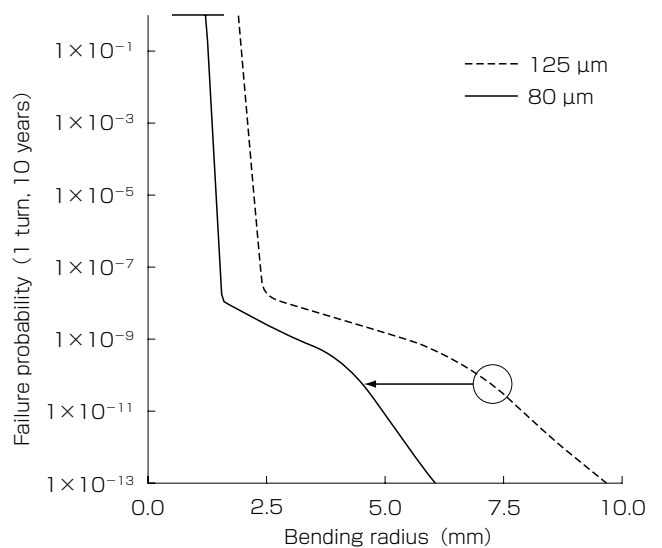


図5 曲げ半径に対する10年後のファイバの破断確率
Fig. 5. Failure probability after 10 years under the condition of the 1 turn bending.

価を行った。

試作したSMFのクラッドドーパント濃度の測定結果を表2に示す。測定はElectron Probe Micro Analyzerを用いた。なお、Fは軽元素であり精度よく定量化することが難しいため、Ge、P濃度と添加領域の屈折率から求めた推定値を示している。

4. 2 接続損失の測定方法

細径コアSMFとCSMFとの融着接続には、フジクラ製融着接続機FSM-100P+を用いた。この融着接続機は電極棒からアーク放電を加えて2本のファイバの先端を溶解して接続する。放電パワー及び放電時間を調整することで、融着接続だけでなく、Geの熱拡散にも適用することができる。

次に、TEC融着部の損失評価手順について説明する。まず、光源とパワーメータをCSMFで接続して光強度 P_0 を測定する。その後、CSMFの1か所を切断して細径コアSMFを2m挿入し、両端を同条件で接続して光強度 P_1 を測定する。融着接続1か所あたりの接続損失をAとすると、 $A=(P_0-P_1)/2$ で求めることができる。

4. 3 放電パワーが融着特性に与える影響

図6は、種々の放電パワーにおける、CSMFとSMF-Bとの接続損失の放電時間による変化を示している。図中の放電パワーの値は規格化されており、数字が小さいほど放電パワーが低いことを示している。一例として、CSMF同士の融着時で一般的に用いられる放電パワーは、STD±0となる。放電パワーがSTD-100の場合のプロットをみると、放電開始とともに損失は4dBから徐々に低下し、およそ80秒の放電時に最小値となる0.7dBを示した。その後は時間経過とともに損失が徐々に増加

表2 細径コアSMFのインナークラッド組成
Table 2. Composition of inner cladding.

項目	単位	SMF-A	SMF-B	SMF-ref.
Ge濃度	wt. %	2.8	0.9	0
P濃度	wt. %	0.9	0.6	0
F濃度	wt. %	1.2	0.5	0

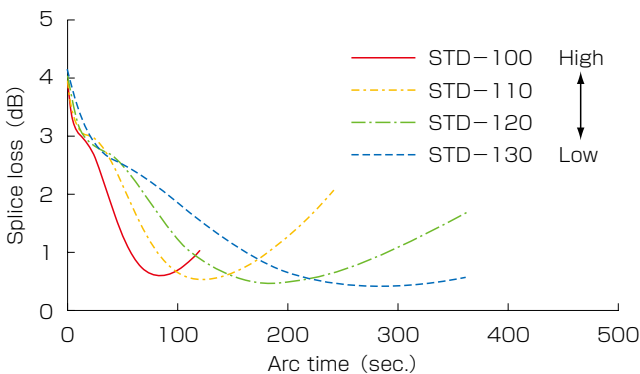


図6 SMF-Bにおける接続損失の放電条件依存性
Fig. 6. Arc power and arc time dependence of splice loss using SMF-B.

していった。

また、放電パワー毎の違いについて注目すると、放電パワーが低いほど最低損失が低下し、その代わりに長時間の放電が必要であることが確認された。パワーがSTD-100とSTD-130の比較をすると、最低損失は0.7dBと0.4dB、最低損失に到達するまでの時間はそれぞれ80秒と240秒であった。よって、接続損失を低減するには、より低い放電パワーで長時間加熱することが効果的であるといえる。

4. 4 融着特性のクラッド組成依存性

図7にSMF-A、SMF-Bにおける最小接続損失と、最小接続損失を得るのに必要な放電時間を示す。この図において、インナークラッド部のドーパント濃度が高いSMF-Aのほうが、より短時間で低損失な接続を実現できることがわかる。SMF-Aにおいて適切な放電条件を用いることで、0.2dBを下回る良好な接続損失が得られた。

次にSMF-AのTEC融着部の軸方向における屈折率分布の変化を図8に示す。図中の2本の縦線内の領域は、Ge-P-Fを共添加したインナークラッドである。また、グラフの凡例の『Axial position』は、CSMFとSMF-Aの融着境界からどの程度離れた距離であることを表しており、『Axial position 60 μm』の場合、融着境界からSMF-A側に60 μm離れた位置で測定した屈折率分布であることを示す。図8から、接続境界部に近いほど屈折率分布が拡大している様子がわかる。図9に、測定した屈折率分布を用いてMFDを推定した結果を示す。MFD 4 μmのファイバがTECによりおよそMFD 9 μmまで拡大していることがわかる。また、SMFとの接続境界部ではMFDが十分に拡大しきれていないことがわかる。MFDの急激な変化は接続損失の要因になりうるため、今後接続損失を更に低減するためには接続境界部のMFDをCSMF程度

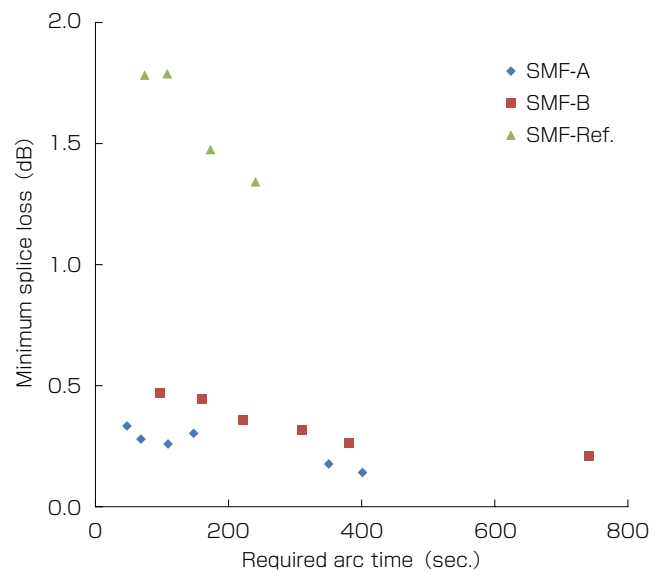


図7 クラッド組成の異なるファイバでの融着特性
Fig. 7. Inner cladding composition dependence of splice losses.

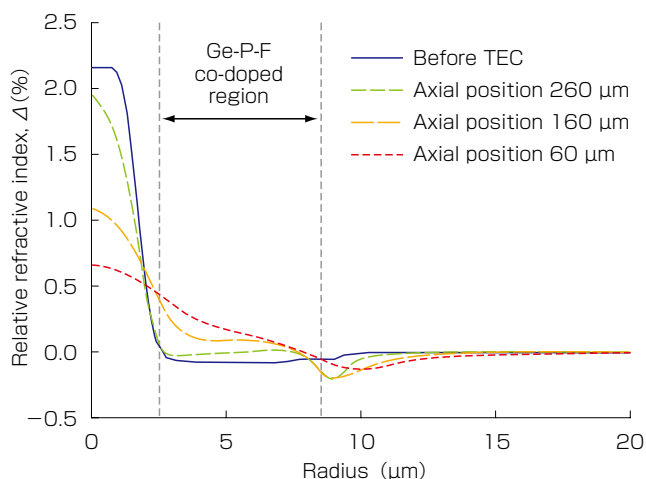


図8 屈折率分布の拡大の様子

Fig. 8. Shape of expanding refractive index profile.

まで拡大させ、MFD分布が軸方向でなだらかな変化となるように、スイープ放電を導入するなど、融着条件の適正化が必要であると考えられる。

5. む す び

シリコン光導波路との結合効率を向上するためにMFDが4 μmである細径コアSMFおよび細径コアPMFの開発を行った。また、CSMFとMFD 4 μmファイバを低損失で融着するための検討として、クラッドの一部をGe-P-F共添加SiO₂を採用した細径コアSMFを作製し、接続損失0.2 dBを下回る良好な接続特性が得られることを確認した。また、クラッドのドーパント濃度が高いほどより短時間で低い接続損失が得られることを確認した。TECの促進にドーパント濃度が影響していると考えられる。今後の課題は、TECをPMFに適用することと、TEC処理の短時間化の2点が挙げられる。

参 考 文 献

- 1) N. Ishikura, K. Goi, H. Zhu, M. Illarionov, H. Ishihara, A. Oka, T. Oda, K. Masuko, T. Ori, K. Ogawa, Y. Yoshida, K. Kitayama, T. Liow, X. Tu, G. Lo, D. Kwong, "Transmission Characteristics of 32-Gbaud PDM IQ Monolithic Silicon Modulator Operating with 2-VPPD Drive Voltage," Proc. 42nd European Conference on Optical Communications, no.W.2.E.4, pp. 601-603, Sept. 2016.
- 2) J. H. Schmid, P. Cheben, M. Rahim, S. Wang, D. Xu, M. Vachon, S. Janz, J. Lapointe, Y. Painchaud, M. Picard, M. Poulin and M. Guy, "Subwavelength gratings for broadband and polarization independent fiber-chip coupling with -0.4 dB efficiency," Proc. 2016 Optical Fiber Com-

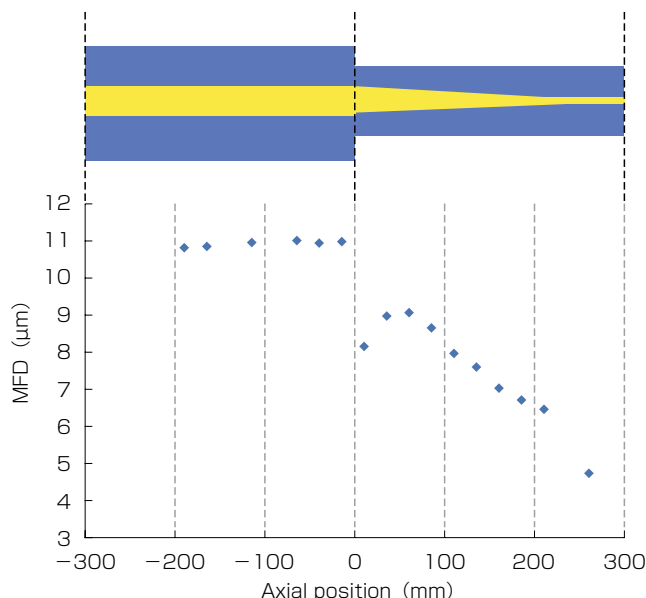


図9 MFDの軸方向分布

Fig. 9. MFD distribution of spliced fiber.

munications Conference and Exhibition, no.M2I.4, Mar. 2016.

- 3) J. Wang, Y. Xuan, C. Lee, B. Niu, L. Liu, G. N. Liu and M. Qi, "Low-loss and misalignment-tolerant fiber-to-chip edge coupler based on double-tip inverse tapers," Proc. 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, no.M2I.6, Mar. 2016.
- 4) T. Shoji, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, and H. Morita, "Low loss mode size converter from 0.3 μm square Si wire waveguides to singlemode fibres," Electron. Lett. 38, pp. 1669-1670, Dec. 2002.
- 5) 田島彰雄, 柳町成行, 中村滋, 竹下仁士, 樋野智之, 福知清, "小型・低損失Si光スイッチモジュールを用いたCDC-ROADM向けトランスポンダ集約スイッチシステム", 電子情報通信学会技術研究報告, OCS2015-20, pp.49-54, Jun. 2015.
- 6) 平川圭祐, 市井健太郎, 後藤龍一郎, 愛川和彦, "Si光導波路との結合に適したMFD4.0 μmTECファイバ", 2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-10-14, Sep. 2016.
- 7) K. Shiraishi, T. Yanagi, S. Kawakami, "Light- Propagation Characteristica in Thermally Diffused Expanded Core Fibers" J. Lightwave Technol., 11 (1993), pp.1584-1591, Oct. 1993.
- 8) M. Ikeda, M. Nakayama, K. Himeno, M. Ohtsuka, M. Ohashi, D. Tanaka, "Optical Fiber And Optical Fiber Coupler, Erbium-Doped Optical Fiber Amplifier, And Optical Waveguide Using The Same," US Patent No. 7, 346, 258 B2, Mar. 2008.