

はんだリフロー耐性を有するシリコンフォトニクスへの 低損失結合用光ファイバ

光応用技術R&Dセンター 小田 拓弥¹・平川 圭祐¹・市井 健太郎²・愛川 和彦³
光ファイバ事業部 林 和幸⁴・宮地 正己⁵

Reflow-Solderable Optical Fibers for Low Loss Coupling to Silicon Photonics

T. Oda, K. Hirakawa, K. Ichii, K. Aikawa, K. Hayashi, and M. Miyachi

シリコンフォトニクスは小型・高機能かつ低コストな光導波路デバイスとして注目を集めている。実用化に向けた課題として、シリコン光導波路と標準光ファイバとのスポットサイズ不整合による接続損失の低下があげられる。我々は両者を低損失につなぐための、シングルモード型および偏波保持型の2種類のスポットサイズ変換光ファイバを開発してきた。今回、光ファイバ構造の最適化により標準光ファイバとの融着損失を0.1 dBまで改善した。さらに、高温耐性を有する被覆を適用することではんだリフローに対応可能となった。

Silicon photonics is the attractive device by its advantages in compactness, high functionality, and low cost fabrication. One of the challenges is the optical coupling loss due to the spot size mismatching between silicon waveguides and standard optical fibers. We have developed the bridging fibers between them to reduce the coupling loss. This article reports the improvements in their splice losses with standard optical fibers to 0.1 dB by optimizing fiber structure. Moreover, they show reflow-soldering compatibility by applying high-temperature resistant coating.

1. ま え が き

情報社会はクラウド・データセンタ・AI・IoTなど様々な技術の進展により拡大の一途をたどっており、トラフィック増加に対応するために光通信ネットワークも進化を続けてきた。光信号処理をつかさどる光導波路デバイスが目覚ましい発展を遂げているが、特に近年は性能・コストの両面で従来のデバイスを凌駕するシリコンフォトニクス (Silicon Photonics, 以下SiPhと記す) に注目が集まっており、光トランシーバへの適用に向けた開発が加速している。光トランシーバは小型化・低消費電力化が絶えず求められている。この要求を満たすために、はんだリフローにより光トランシーバを基板に直接実装する構想が近年報告されている^{1),2)}。このコンセプトでは、デバイスと接続された光ファイバにもはんだリフローの熱が複数回加わることが想定されており、高耐熱な光ファイバが求められる。

SiPhの課題の1つとして、光ファイバとの接続があげ

られる。SiPhはシリコンを光導波路として用いることで強い光閉じ込め効果を有し、スポットサイズは1 μm以下となる。シリコン光導波路と標準光ファイバとを低損失に光結合するために、シリコン光導波路にSpot Size Converter (SSC) を形成してスポットサイズを拡大する手法が取られる。しかしながら、SSCによりスポットサイズを標準光ファイバと同じ10 μm程度まで拡大するには設計・製造上の課題が多い。そこで、図1に示すようにSSCによるスポットサイズ拡大は4 μm程度として^{3),4)}、

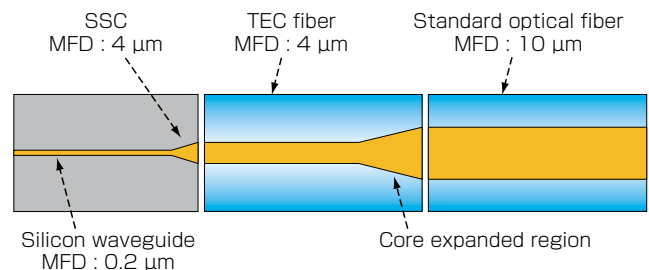


図1 TECファイバを用いたシリコンフォトニックデバイスとの光接続構造。MFDの値は波長1550 nmにおける概算値

Fig. 1. Optical coupling structure for SiPh using TEC fiber. The MFDs are approximate values at a wavelength of 1550 nm.

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)
4 光応用製造技術部
5 光応用製造技術部グループ長

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モード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。
シリコンフォトンクス	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。
融着接続	Fusion splicing	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 crosstalk	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。

光ファイバ側にもスポットサイズ変換部を設ける手法が用いられることがある。ここでは、Mode Field Diameter (MFD) が 4 μm の細径コア光ファイバを SSC と標準光ファイバの間に介在させている。この光ファイバは Thermally-diffused Expanded Core (TEC) ファイバであり、標準光ファイバとの融着接続時の熱でコア中の Ge が拡散して MFD が拡大し、両光ファイバ間の融着損失を低減することができる⁵⁾。この接続構成において、融着損失の低減は重要な要素である。図 2 に TEC ファイバの内部構造を示す。コアの周囲に Ge, P, F の 3 種類のドーパントを共添加したインナークラッド層を有している。このインナークラッド層にはコア中の Ge の熱拡散を促進する効果があり、インナークラッド層の無い光ファイバに比べて短時間で低損失な融着接続が可能となる。われわれは、シングルモード型 TEC ファイバ (Single-Mode Fiber : SMF。以下、TEC-SMF と記す) に加えて、デジタルコヒーレント通信で必要な偏光制御が可能である偏波保持型 TEC ファイバ (Polarization Maintaining Fiber : PMF。以下、TEC-PMF と記す) を開発してきた。特に TEC-PMF においては、標準的な偏波保持ファイバとの融着損失が 0.6 dB 程度であり、TEC-SMF と標準的な SMF との融着損失である 0.1 dB に比べて高いという課題があった⁶⁾。われわれは、はんだリフローが可能であり、かつ標準

光ファイバと低損失に融着接続が可能な TEC ファイバを開発した。TEC-PMF の光ファイバ構造の最適化により、高い偏波保持特性と低融着損失が両立する条件を見出した。また、耐熱被覆の適用により複数回のはんだリフロープロセスに耐えられることを確認した。

2. TEC ファイバの試作および評価

表 1 に試作した TEC ファイバの特性を示す。TEC-PMF は後述するように、最適な光ファイバ構造について調査するために 3 水準のサンプルを作製した。これらの試作サンプルはすべて伝送損失が標準光ファイバと比べて高い。これは、インナークラッド層に添加したドーパントが原因であると考えられる。しかし、TEC ファイバは最長でも数メートル程度での使用を想定しており、挿入損失値としては非常に小さく実用上の問題は生じないと考えられる。

試作した TEC ファイバと標準光ファイバとの融着損失を評価した。図 3 に実験系を示す。光源に標準光ファイバを接続してリファレンスパワーを測定した後に、TEC ファイバをパワーメータ側に配置し、標準光ファイバとともにアーク放電をしながら両者の融着損失の時間変化を

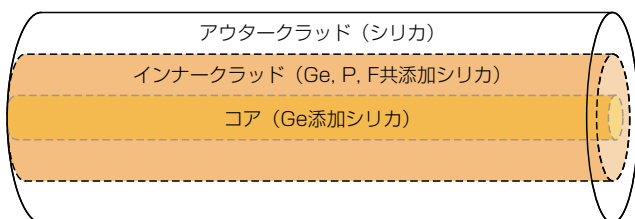


図2 TECファイバの内部構造
Fig. 2. Internal structure of TEC fiber.

表1 試作したTECファイバの諸特性
Table 1. Typical properties of TEC fiber samples.

		¹ 波長 : 1550 nm			
項目	単位	SMF-A	PMF-A	PMF-B	PMF-C
光ファイバタイプ	-	TEC-SMF	TEC-PMF	TEC-PMF	TEC-PMF
クラッド外径	μm	125	125	125	125
MFD ¹	μm	4.0	4.2	4.0	4.1
カットオフ波長	nm	1170	1310	1230	1200
伝送損失 ¹	dB/km	26	14	27	17

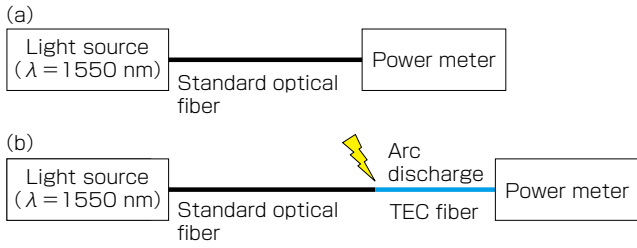


図3 TECファイバの融着損失評価系. (a) リファレンスパワー測定 (b) 放電中の融着損失測定
Fig. 3. Evaluation setup for splice loss of TEC fiber, (a) Reference power measurement (b) Splice loss measurement during arc discharge.

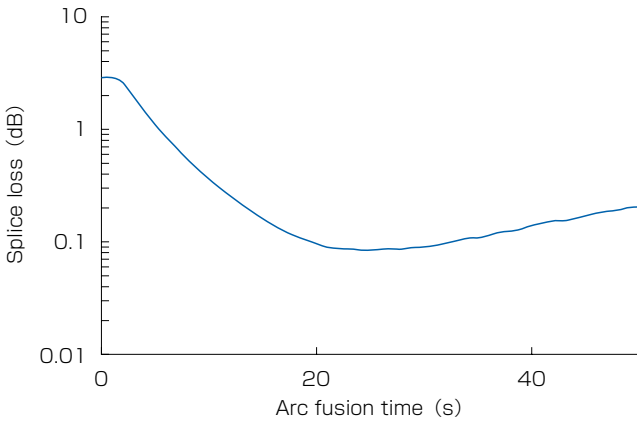


図4 SMF-Aのアーカ放電中の融着損失推移
Fig. 4. Splice loss transition of SMF-A during arc discharging.

調査した. 図4はSMF-Aと, 被融着光ファイバとして FutureGuide®-SR15 (波長 1550 nmにおけるMFDが 9.5 μm)を融着接続した際の, 融着損失の放電時間による推移の一例を示す. 融着損失は放電開始前の約 3 dBから徐々に減少し, 放電開始から 25秒で最小値である 0.1 dBに達した. この現象は, SMF-Aのコアがアーカ放電により徐々に熱拡散していき, 被融着光ファイバとのMFD不整合が解消していったと解釈できる. また, 図5は同様の実験を 20回実施したときの最小融着損失のヒストグラムを示す. 融着損失は 0.10 ± 0.02 dBという非常に安定した値を示した.

次に, TEC-PMFの融着損失の評価について記す. 偏波保持ファイバは図6(a)に示すように応力付与部 (Stress Applying Part, 以下SAPと記す)を有しているが, インナークラッド層と共存させるために寸法上の制約が生じる. この制約により, 融着損失と偏波保持特性にトレードオフの関係が生じると考えられ, 最適な光ファイバ構造を調査するためにパラメータの異なる 3水準のTEC-PMFを作製した. 図6(a)に示しているインナークラッド直径・SAPの直径・SAP間の距離の 3つの構造パラメータを連動して変化させた. 図6(b)は, 各水準のTEC-PMFにおける各パラメータの相対的な変化の度合

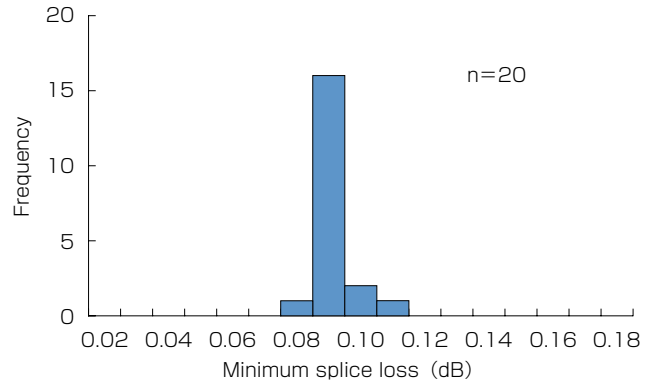


図5 SMF-Aの最小融着損失測定結果
Fig. 5. Measurement result of the minimum splice loss of SMF-A.

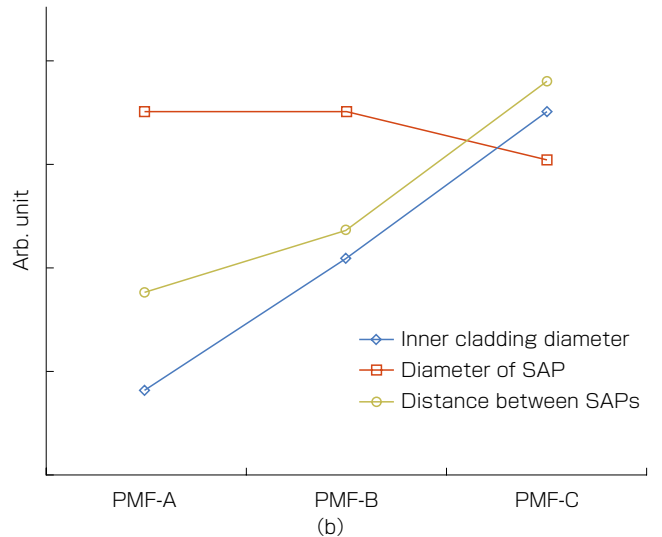
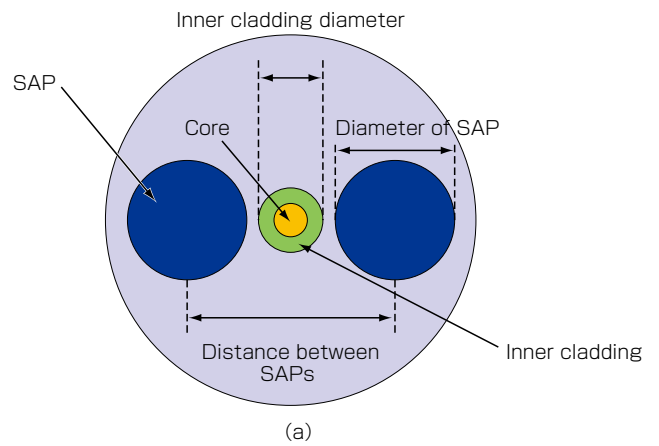


図6 TEC-PMFの構造パラメータ (a) 概要図 (b) 各サンプルにおける構造パラメータの変化度合い
Fig. 6. Structural parameters of TEC-PMF (a) Overview diagram (b) Degree of change in structural parameters for each sample.

いを示す. 例えば, PMF-Aは最もSAPの径が大きくSAP間の距離も近接しているため, コアにより大きな複屈折を与えて偏波保持特性が向上する. 一方で, インナークラッド直径が最も小さいため, コアが熱拡散する領域が

制限されて十分にMFDを拡大できず、融着損失が高くなってしまいます。PMF-Cは対称的に、インナークラッド直径が大きいため融着損失の低下が期待できる反面、SAP径が縮小しSAP間の距離も遠ざかるため、偏波保持特性が悪化する。我々は、TEC-PMFの目標特性を、SiPhデバイスへの適用を踏まえて融着損失を0.3 dB以下、偏波クロストークを-25 dB以下と定め、最適な光ファイバ構造について調査した。実験にあたり、小曲げ径での使用を想定して、偏波クロストークはTEC-PMFに対して曲げ半径5 mmで10回の曲げを加えた状態で測定した。また、TEC-PMFに対する被融着光ファイバとしてSM15-PS（波長1550 nmにおけるMFDが10.5 μm ）との融着損失を測定した。図7に各TEC-PMFの測定結果を示す。上述のように融着損失と偏波クロストークにトレードオフの関係が見られた。そして、PMF-Bが両者の目標特性を満たす構造であることがわかった。

さらに被融着光ファイバとしてSM15-PSに加えて、より曲げに強いBISM15-PX（波長1550 nmにおけるMFDが9.0 μm ）も使い、両者とPMF-Bとの融着特性の比較を行った。図8に示すように、被融着光ファイバによって最小融着損失が変わるといった結果が得られた。この結果から、BISM15-PXに対してはPMF-Bのコア熱拡散によりMFDが整合して融着損失が低くなり、SM15-PSに対してはMFDの不整合が残ったために融着損失が高くなったと考えられる。すなわち、PMF-Bは融着接続時の熱拡散によりMFDが9 μm 程度まで拡大したと推定される。PMF-Bのインナークラッド直径を広げることでSM15-PSとのさらなる低損失な融着接続も可能ではあるが、連動してSAPの縮径による偏波保持特性の劣化が懸念される。偏波クロストークはコネクタ化やファイバレイへの実装時に側圧による劣化が起り、十分なマージンを有していることが重要である。そのため、低融着損失かつ高い偏波保持特性を維持するためには、PMF-Bの設計が適当であり、BISM15-PXとの組み合わせでの使用が適している。

3. はんだリフロー試験結果

光ファイバをはんだリフローに対応させるためには、耐熱性が要求される。TECファイバはリフロー熱印加時に2点の特性変化に注意する必要がある。1点目は、コアの熱拡散によるTECファイバおよび融着接続点の光学特性の変化である。2点目は、被覆材が熱ダメージを受けることによる機械的信頼性の劣化である。一般的な被覆材の耐熱温度は85 $^{\circ}\text{C}$ であり今回の用途には適しておらず、被覆材の変更が必要と考えた。今回、われわれは150～200 $^{\circ}\text{C}$ の高温環境下で実績のあるアクリレート樹脂⁷⁾の適用を検討した。鉛フリーはんだのリフローピーク温度は図9に示すように、本被覆材の想定使用範囲よりも高温領域の260 $^{\circ}\text{C}$ 程度である。そこで、アクリレート樹脂を被覆材としたTECファイバを用いて、はんだリフローによる光学特性および機械的信頼性の変化を調査した。

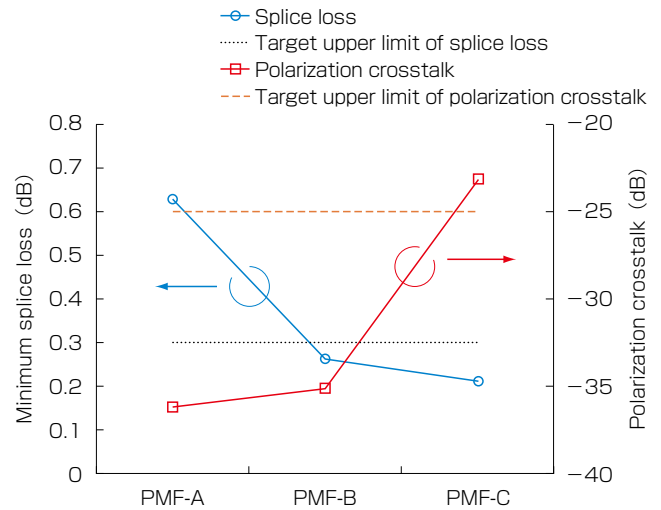


図7 TEC-PMFサンプルごとの最小融着損失と偏波クロストーク測定結果

Fig. 7. Measurement result of the minimum splice loss and polarization crosstalk for each TEC-PMF sample.

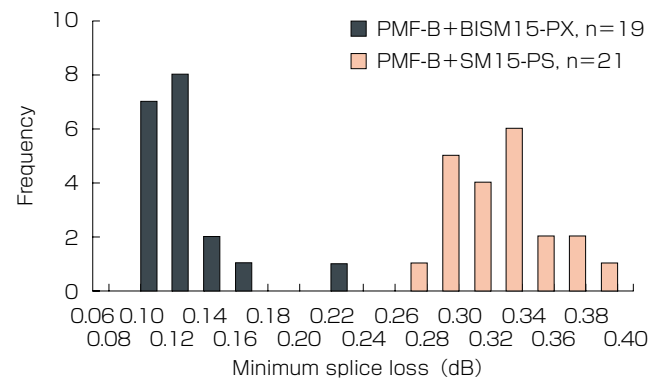


図8 PMF-Bと2種類の被融着光ファイバとの最小融着損失の比較

Fig. 8. Comparison of minimum splice losses between PMF-B and two standard PMFs.

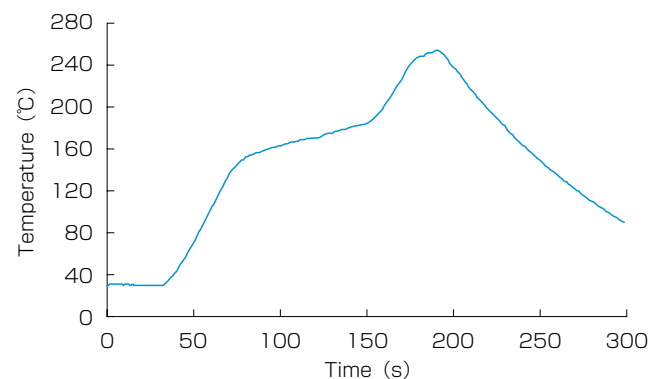


図9 典型的な鉛フリーはんだ用のリフロー温度プロファイル

Fig. 9. Typical reflow profile for lead-free solder.

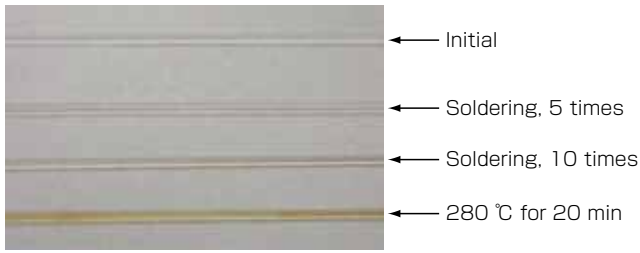


図10 熱印加前後の光ファイバ外観比較

Fig. 10. Appearance of fiber before and after heat application.

光学特性への影響を調べるために、TECファイバへ図9の熱プロファイルの複数回印加を行った。実使用環境として5回程度のはんだリフローを想定しているが、本試験ではさらに、10回のリフロー熱印加、および280℃、20分というより過酷な条件での実験も行った。図10は熱印加によるTECファイバ外観の変化を示す。熱履歴の増加に伴って被覆の黄変が進行していることがわかる。しかし、いずれの加熱条件であっても取り回しや被覆除去、融着接続などの作業性には影響がなかった。次に、表2に熱印加前後での光学特性の変化について示す。MFDおよび融着損失にはほとんど変化が見られなかった。偏波クロストークはわずかに劣化していたものの、-30 dBよりも低く実用上の問題は無いと考えられる。今回の試験条件（ピーク温度280℃）は光ファイバの融着接続時の温度（1700℃以上）に比べると遥かに低く印加時間も限られていたため、光学特性が変化するほどの影響が出なかったと考えられる。最後に、機械的信頼性の試験結果を表3に示す。本試験では、PMF-Bに280℃、20分の熱履歴を印加し、試験前後でTelcordia GR-20⁸⁾に基づく引張強度および動疲労係数を測定した。本試験は複数回のはんだリフローに比べて過酷な熱環境であるにもかかわらず、両項目においてGR-20の規格を満足した。

4. む す び

シリコンフォトニクスと標準光ファイバを低損失に接続するための特殊光ファイバにおいて、接続損失のさらなる低減、およびはんだリフロー耐性の2点の改善を行った。偏波保持型のTECファイバにおいて、光ファイバ構造の最適化により良好な偏波保持特性を維持しつつ融着損失が低減できることを確認した。また、耐熱性被覆を適用したTECファイバにおいて、複数回のはんだリフローに対して光学特性および機械的信頼性に問題がないことを確認した。

表2 熱印加前後のTECファイバサンプルの光学特性変化

Table 2. Changes in optical properties of TEC fibers before and after heat application.

¹波長：1550 nm

項目	サンプル名	試験前	リフロー 5回印加	リフロー 10回印加	280℃、 20分印加
MFD (μm)	SMF-A	4.1	4.1	4.0	4.0
	PMF-B	4.1	4.0	4.0	4.1
融着損失 (dB)	SMF-A	0.08 to 0.09	0.08	0.09	0.08 to 0.09
	PMF-B	0.11 to 0.15	0.12	0.13 to 0.15	0.13 to 0.15
偏波クロ ストーク (dB)	PMF-B	-37 to -42	-37 to -39	-36	-36 to -40

表3 PMF-Bの信頼性試験結果

Table 3. Reliability test result of PMF-B.

項目	試験前	280℃、20分印加	規格値
引張強度 (GPa)	4.82	4.56	>3.80 (Unaged) >3.03 (Aged)
動疲労係数	26.8	18.9	>18

参 考 文 献

- 1) C. Doerr et al., "Silicon photonics coherent transceiver in a ball-grid array package," Proc. OFC2017, Th5D.5, Mar. 2017.
- 2) J. S. Sutherland et al., "Glass tube ferrule for solder-reflow-compatible embedded optoelectronic interconnections," 2018 IEEE Optical Interconnects Conf., pp. 11-12, Jun. 2018.
- 3) J. Cardenas et al., "High coupling efficiency etched facet tapers in silicon waveguides," IEEE Photonics Technol. Lett., vol.26, no.23, pp. 2380-2382, 2014.
- 4) S. Nakamura et al., "Compact and low-loss 8x8 silicon photonic switch module for transponder aggregators in CDC-ROADM application," Proc. OFC2015, M2B.6, Mar. 2015.
- 5) 平川ほか：「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」, フジクラ技報, 第130号, pp. 7-11, 2017.
- 6) T. Oda et al., "Spot size converting fiber with a 4- μm mode field diameter for low-loss coupling to silicon photonic circuits," Proc. IEEE CPMT Symposium Japan, Nov. 2017.
- 7) URL:http://www.fujikura.co.jp/eng/products/optical/appliedoptics/02/2050109_12903.html, accessed Jan. 2020.
- 8) Telcordia GR-20-CORE, Generic requirements for optical fiber and optical cable, Issue 3, May 2008.