

# 接続損失を低減した低曲げ損失光ファイバ

光電子技術研究所 池田真拳\*1・松尾昌一郎\*1・姫野邦治\*2・原田光一\*3

## Low Bending Loss Optical Fiber with Reduced Splice Loss

M. Ikeda, S. Matsuo, K. Himeno & K. Harada

FTTH (Fiber To The Home) の進展にともない、より小さな曲げ径で敷設や余長収納可能な光ファイバが求められている。しかしながら、従来のSMF (Single-Mode Fiber) の構造で曲げ損失を低減可能な設計を採ると、大幅に接続損失が増加してしまう。われわれは、新たにトレンチ型屈折率分布を採用することで、曲げ損失を低減しつつ接続損失を抑制可能な光ファイバを開発した。試作したファイバのうち許容曲げ半径7.5mmに設計したファイバの1,310nmにおけるSMFとの接続損失は0.32dBであり、従来の低曲げ損失ファイバの約半分の接続損失を実現した。

With the development of FTTH (Fiber To The Home), an optical fiber with a reduced allowable bending radius for indoor wiring and storage is requested. SMF (Single-Mode Fiber) with a reduced bending loss using a conventional step index profile, however, shows a significant splice-loss increase. We developed a new type of a low bending loss SMF with splice loss suppressed employing a trench type index profile. One of the experimental fibers, which was designed to have a minimum allowable bending radius of 7.5 mm, realized a splice loss of 0.32 dB at 1,310 nm in case the fiber is spliced with a normal SMF. The splice loss is about a half of the splice loss of the conventional low bending loss SMF.

### 1. ま え が き

最近、ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) をはじめとするいわゆるブロードバンドアクセスの普及はめざましいものがある。ブロードバンドアクセスの普及は、ホームページや電子メールといった従来型のインターネット利用にとどまらず、より広帯域を必要とするストリーミングによる映像コンテンツの配信等への進展を加速すると考えられている。そこで、今後は家庭への光ファイバの普及、いわゆるFTTHが進むものと思われる。

光ファイバをオフィスや家庭内へ敷設するに際しては、光ファイバの曲げ特性および接続特性が重要となる。余長ファイバの収納のコンパクト化および配線における曲げ曲率の低減といった観点から、光ファイバの曲げ特性の重要性が指摘されており<sup>1)</sup>、FTTHの進展にともない改めてその重要性がクローズアップされている。また、配線作業を平易化するうえで、単純な接続条件で融着接続が可能であること、低損失メカニカルスプライスが可能であることは非常に重要である。

現在最も多く用いられているSMFの許容曲げ半径は30mmであり、屋内や構内の配線用光ファイバとしては、許容曲げ半径が大きいとの指摘がある。このような声にこたえるため、当社は許容曲げ半径をSMFの半分の15mmにまで低減したFutureGuide<sup>®</sup>-SR15をリリースしている。

しかしながら、一般家庭内での光ファイバの取り扱いを平易にするという観点からは、さらなる許容曲げ半径の低減が重要である。このような屋内配線向けの低曲げ損失光ファイバの要求に対し、ホーリーファイバを用いた検討も報告されている<sup>2)3)</sup>。

以上述べたような背景から、今回トレンチ型の屈折率分布を採用することにより、SMFとの接続損失を低減した低曲げ損失光ファイバの開発を行ったので報告する。

### 2. 開 発 目 標

ITU-T (International Telecommunication Union-Telecommunication Standard Sector) では、PON (Passive Optical Network) システムに用いる光ファイバの伝送波長域として、図1に示す1,260nmから1,625nmにわたる波長領域が定義されている<sup>4)</sup>。さらに、線路監視波長として1,650nmまでの使用も想定されている。このため、

\*1 光プロセス研究部

\*2 光プロセス研究部グループ長

\*3 光プロセス研究部部長

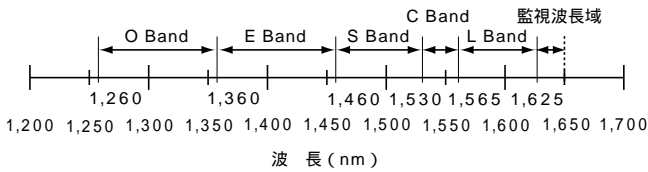


図1 光通信システムに用いられる伝送帯域  
Wavelength band used in optical transmission systems

表1 FutureGuide®-SM, SR15の特性  
Characteristics of FutureGuide®-SM and SR15

| 項目  | FutureGuide®-SM          | FutureGuide®-SR15     |
|---|--------------------------|-----------------------|
| 伝送損失 (dB/km)                                | @1,310nm<br>0.40以下       | 0.40以下                |
|   | @1,550nm<br>0.26以下(90%値) | 0.30以下                |
| モードフィールド径 (μm)<br>@1,310nm                  | 9.2 ± 0.7                | 8.6 ± 0.4             |
| クラッド径 (μm)                                  | 125 ± 1                  | 125 ± 0.7             |
| ケーブルカットオフ波長 (nm)                            | 1,260以下                  | 1,260以下               |
| 波長分散 ps/nm/km @1,550nm                      | + 18以下                   | + 18以下                |
| 零分散波長 (nm)                                  | 1,300 ~ 1,324            | 1,300 ~ 1,324         |
| 分散スロープ (ps/nm <sup>2</sup> /km)<br>@1,550nm | 0.093以下                  | 0.093以下               |
| 曲げ損失 (dB) @1,550nm                          | -                        | 0.5以下<br>(30mm×10ターン) |
| 許容曲げ半径 (mm)                                 | -                        | 15以上                  |

宅内配線用光ファイバでは、1,310nmと1,550nmはもちろんのこと1,260nmから1,650nmを使用波長帯として想定する必要があります。また、室内において短尺で使用されることを考慮すると、ファイバカットオフ波長を1,250nm以下に規定する必要があります。さらに、最長波長で最も曲げ損失が大きくなるため、許容曲げ半径を規定する波長を1,650nmにする必要がある。本報告では、想定される曲げ半径に10回巻いたとき、1,650nmにおける曲げ損失が0.5dB以下となる半径を許容曲げ半径として定義した。

表1にFutureGuide®-SMおよびFutureGuide®-SR15の特性を示す。今回は、FutureGuide®-SR15の許容曲げ半径の半分である7.5mm、7.5mmとFutureGuide®-SR15の間である10mmを許容曲げ半径の目標とした。さらに、SMFとの接続特性の関係について検討し、従来型の低曲げ損失ファイバより接続損失を低減することを目標とした。

### 3. 屈折率分布の検討

本検討に用いた屈折率分布（プロファイル）を図2に示す。一般に光ファイバの曲げ損失を低減するには、コア/クラッドの比屈折率差を高くすることが有効である。しかし、の上昇はMFD (Mode Field Diameter) の縮小を招き、接続損失の増加は避けられない。そこで、フィールドの裾野に屈折率の低下した溝を有するトレンチ型プロファイル (b) を用いると、フィールド裾位置での実効屈折率とクラッドの屈折率との差を大きくすることが可能となるため、単峰型プロファイル (a) に比べて曲げ損失の低減が期待できる。

まず、両屈折率分布における  $n_1$  を変化させて想定され

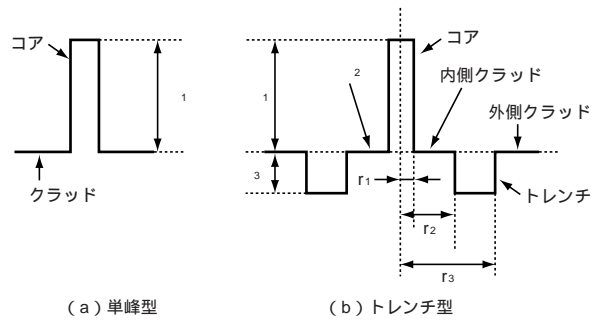


図2 シミュレーションに用いた屈折率分布  
Index profiles used in the simulation

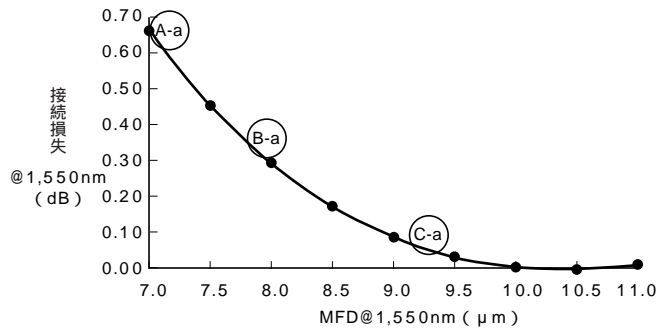


図3 通常SMFとの接続損失MFD依存性  
MFD dependence of splice loss with SMF

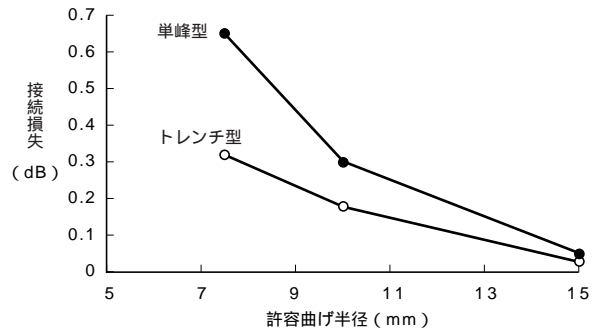


図4 SMFとの接続損失の許容曲げ半径依存性  
Allowable bending radius dependence of splice loss with SMF

る許容曲げ半径を示すプロファイル構造をシミュレーションにより求め、1,550nmにおけるMFDを算出した。その際、目標のファイバカットオフ波長は1,220nmに設定した。また、許容曲げ半径が7.5mm、10mm、15mmになるファイバ構造をA-a, b, B-a, b, C-a, bと定義した。

単峰型プロファイルの場合、それぞれの許容曲げ半径を満たすプロファイル構造を有するファイバのMFDは、MFD (A-a) = 7.1 μm, MFD (B-a) = 7.8 μm, MFD (C-a) = 9.3 μmであった。一方、トレンチ型プロファイルでは、MFD (A-b) = 7.8 μm, MFD (B-b) = 8.5 μm, MFD (C-b) = 9.8 μmとなった。ただし、トレンチ型プロファイルにおいて、 $n_2 = 0.00\%$ ,  $n_3 = -0.25\%$ ,  $r_2/r_1 = 3.5$ ,  $r_3/r_1 = 5.5$ とした。

次に、対象ファイバとSMFとの接続損失を求めた。MFDの異なる2つの光ファイバを接続する場合、フィー

ルドとしてガウス分布を仮定すると、両ファイバのフィールドの不整合による電力透過係数Tはそれぞれ各ファイバのMFDを  $\mu_{1,2}$  として、以下の式により求められる<sup>5)</sup>。

$$T = \left( \frac{2 \mu_1 \mu_2}{\mu_1^2 + \mu_2^2} \right)^2$$

本式を用いて、一方のファイバのMFDをSMFの10.4  $\mu\text{m}$ と固定し、他方のファイバのMFDを変化させた場合の接続損失MFD依存性を図3に示す。

先に求めたMFDと図3より、単峰型プロファイルのファイバとSMFとの接続損失Lは、L(A-a)=0.65dB、L(B-b)=0.30dB、L(C-a)=0.05dBとなった。また、トレンチ型プロファイルのファイバとSMFとの接続損失Lは、L(A-b)=0.32dB、L(B-b)=0.18dB、L(C-b)=0.03dBになった。

以上の結果より、単峰型とトレンチ型それぞれについて許容曲げ半径とSMFとの接続損失の関係を図4に示す。トレンチ型を採用することで許容曲げ半径を保ちつつSMFとの接続損失を低減できることがわかった。

### 4. 試作結果

#### 4.1 試作ファイバの光学特性と接続特性の評価

前項で示した結果を元にトレンチ型プロファイルA-b~C-bの各設計についてそれぞれ試作を行った。各特性項目の測定結果を表2に、同種ファイバおよびSMFとの融着接続損失を表3に示す。なお、融着接続では当社製融着接続

表2 試作結果  
Measurement results of fabricated fibers

| 項目                                       |          | A-b      | B-b      | C-b   |      |
|--|----------|----------|----------|-------|------|
| 伝送損失 (dB/km) @1,550nm                    |          | 0.22     | 0.22     | 0.21  |      |
| モードフィールド径 ( $\mu\text{m}$ )              | @1,310nm | 7.1      | 7.4      | 8.2   |      |
|  | @1,550nm | 8.0      | 8.5      | 9.5   |      |
| ファイバカットオフ波長 (nm)                         |          | 1,230    | 1,180    | 1,220 |      |
| 波長分散 (ps/nm/km) @1,550nm                 |          | 13.03    | 11.30    | 14.03 |      |
| 分散スロープ (ps/nm <sup>2</sup> /km) @1,550nm |          | 0.057    | 0.061    | 0.064 |      |
| 曲げ損失 (dB)                                | r=10mm,  | @1,550nm | 0.02     | 0.09  | 0.49 |
|  |          | 10回      | @1,650nm | 0.15  | 0.36 |
|  | r=7.5mm, | @1,550nm | 0.05     | 0.14  | 0.64 |
|  |          | 10回      | @1,650nm | 0.21  | 0.72 |

表3 融着接続特性  
Splice loss by fusion splice

| 項目      |               | A-b  | B-b   | C-b   |       |
|---------|---------------|------|-------|-------|-------|
| 1,310nm | SMF-Trench    | 接続損失 | 0.32  | 0.24  | 0.09  |
|         |               | 標準偏差 | 0.005 | 0.020 | 0.001 |
|         | Trench-Trench | 接続損失 | 0.03  | 0.02  | 0.01  |
|         |               | 標準偏差 | 0.003 | 0.002 | 0.001 |
| 1,550nm | SMF-Trench    | 接続損失 | 0.27  | 0.18  | 0.05  |
|         |               | 標準偏差 | 0.004 | 0.017 | 0.002 |
|         | Trench-Trench | 接続損失 | 0.03  | 0.04  | 0.02  |
|         |               | 標準偏差 | 0.002 | 0.022 | 0.001 |

n=10 (Bのみ30)

SMF-Trench : SMFとの接続  
Trench-Trench : トレンチ型同種接続

器FSM-40Fを用い、作業現場での操作の複雑化を避けるため、通常のSMF用の接続条件を変更することなく用いた。

試作した光ファイバとSMFについて、曲げ半径7.5mmで10回巻いた場合と曲げ半径10mmで10回巻いた場合の曲げ損失の波長依存性を図5, 6にそれぞれ示す。

#### 4.1.1 A-bの曲げ特性と接続特性

設計A-bのファイバでは、図5に示すとおり、使用波長域すべてにおいて曲げ半径7.5mmでの曲げ損失を0.5dB以下に抑制できた。SMFとの接続損失は波長1,310nmにおいて0.32dB、1,550nmにおいて0.27dBであった。同種接続は通常SMFの同種接続と等しい損失レベルであった。したがって、設計A-bのファイバでは、SMFとの接続損失はやや高いものの、従来の単峰型の接続損失と比べると約半分に低減されており、許容曲げ半径7.5mmを達成した。

#### 4.1.2 B-bの曲げ特性と接続特性

設計B-bのファイバでは、図6に示すとおり、使用波長域すべてにおいて曲げ半径10mmでの曲げ損失を0.5dB以下に抑制できた。SMFとの接続損失は1,310nmにおいて0.24dB、1,550nmにおいて0.18dBであった。同種接続は通常SMFの同種接続と等しい損失レベルであった。したがって、設計B-bのファイバでは、SMFとの接続損失を実用的な範囲に抑えつつ許容曲げ半径10mmを達成した。

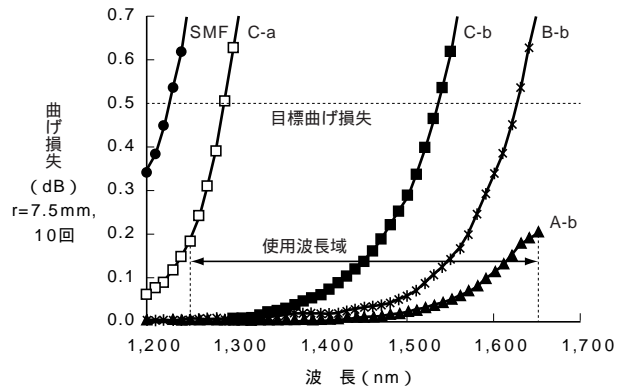


図5 曲げ損失波長依存性 (曲げ半径7.5mm)  
Wavelength dependence of bending loss (radius=7.5mm)

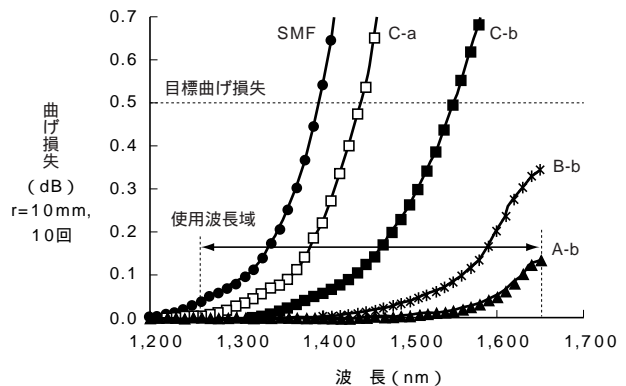


図6 曲げ損失波長依存性 (曲げ半径10mm)  
Wavelength dependence of bending loss (radius=10mm)

### 4.1.3 C-bの曲げ特性と接続特性

設計C-bのファイバでは、図6に示すとおり許容曲げ半径が10mm以上になることがわかった。そこで許容曲げ半径を別途調べたところ、単峰型と同じ15mmであり、そのときの曲げ損失も0.2dB程度とほぼ同等であった。

SMFとの接続損失は1,310nmにおいて0.09dB、1,550nmにおいて0.05dBであった。同種接続は通常SMFの同種接続と等しい損失レベルであった。

C-aとC-bの曲げ損失波長特性の差に着目すると、曲げ半径10mmの場合を示した図6における両者の曲げ損失差より、曲げ半径7.5mmの場合を示した図5における両者の

曲げ損失差が大きくなっていることがわかる。したがって、トレンチ型では、曲げ半径に対する曲げ損失の増加が抑制されることが予想される。

本現象を確認するため、シミュレーションにより、トレンチ型プロファイルと単峰型プロファイルに対して、曲げ損失の曲げ半径依存性を調べた。このとき、設計C-bと同じく、波長1,550nmにおけるMFDは9.5 $\mu$ mとした。結果を図7に示す。トレンチ型プロファイルでは、曲げ半径に対する曲げ損失の増加が抑制されることがわかる。このことからトレンチ型光ファイバはファイバ敷設時に許容曲げ径を下回る小さな曲げが一部に入ってしまうも損失増加を抑制できるため、取り扱いを容易にできる利点を有するといえる。

### 4.2 メカニカルスプライスの特性

室内配線作業では融着接続のほかにメカニカルスプライスも考えられる。そこで設計C-bのファイバについてSMFとの接続、同種ファイバの接続をメカニカルスプライスで行い、波長1,310nmおよび1,550nmにおける接続損失を測定した。結果を融着接続と比較して図8、9に示す。なお、メカニカルスプライスは当社製FMSECEZ-KIT025-00を用いた。

メカニカルスプライスによるSMFとの接続損失および同種接続の損失は、波長1,310nm、1,550nmいずれにおい

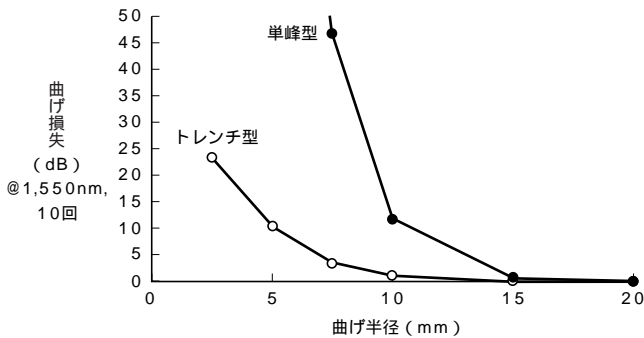


図7 曲げ損失の曲げ半径依存性  
Bending radius dependence of bending loss

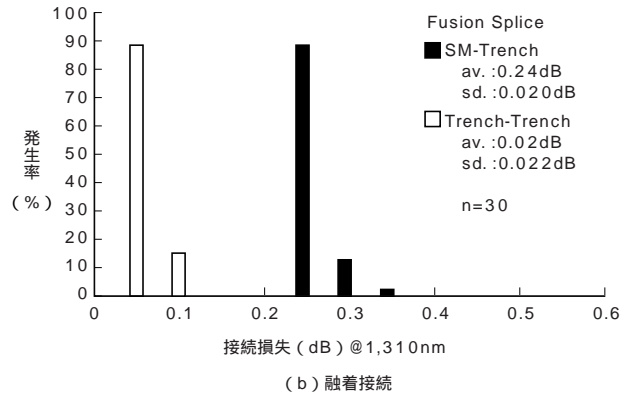
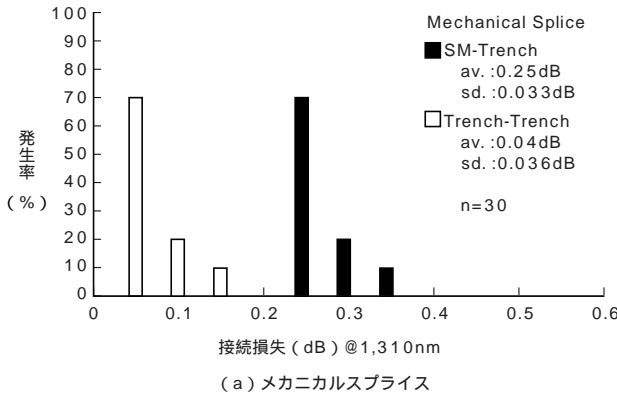


図8 メカニカルスプライスと融着接続の比較 (1,310nm)  
Comparison of mechanical splice and fusion splice losses (1,310nm)

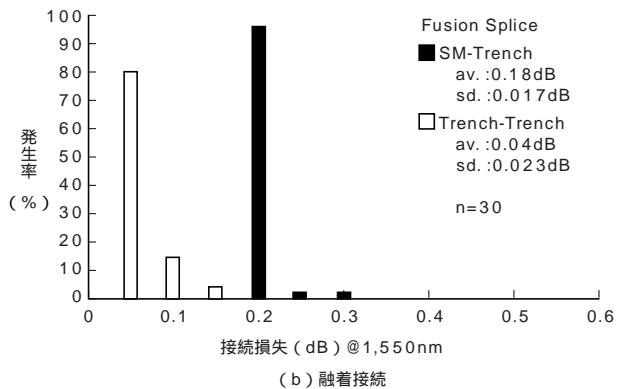
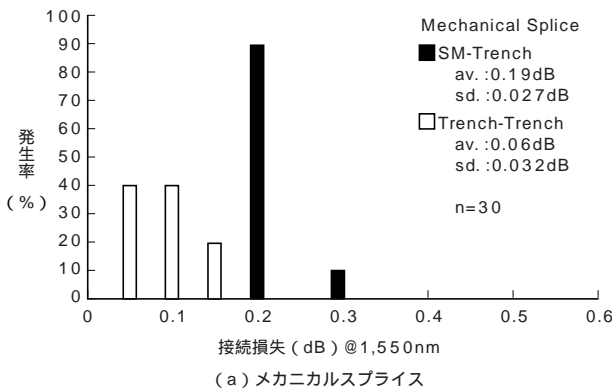


図9 メカニカルスプライスと融着接続の比較 (1,550nm)  
Comparison of mechanical splice and fusion splice losses (1,550nm)

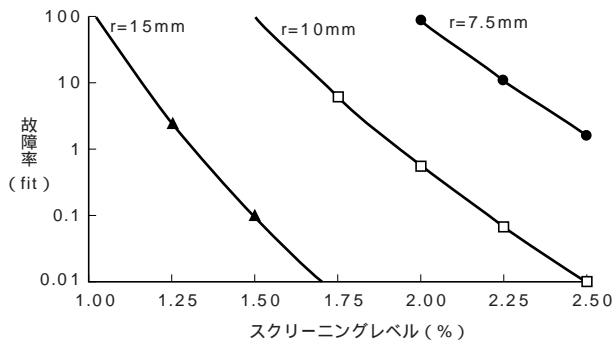


図10 スクリーニングレベルと故障率の関係

Relationship between screening level and failure rate as a function of bending radius

ても、融着接続とほぼ同等であることを確認した。

#### 4.3 信頼性

光ファイバが小さな曲げ半径で曲げられる場合、曲げられた外側表面にかかる引っ張り歪みが大きくなり、破断確率が高くなる。そこで、光ファイバが曲げ半径7.5mm、10mm、15mmに曲げられた場合の信頼性を確認するため、故障率を推定した。故障率は累積破断確率より求まる。累積破断確率は以下の式を用いて算出した<sup>6)</sup>。

$$F = 1 - \exp\left(-N_p L \frac{m}{n-2} \cdot \frac{s^n t_s}{p^n t_p}\right)$$

$$s = \frac{f_a}{E \left(\frac{d_f}{2}\right)^2} + \frac{d_f}{2r_b}$$

F ; 累積破断確率

$N_p$  ; プルーフトテストでの単位長さあたりの平均破断回数

L ; ファイバ条長

m ; 破断回数のワイブルプロットの傾き

n ; 静疲労係数

$s$  ; 使用時のファイバの伸び歪み

$f_a$  ; ファイバに加わる引っ張り張力

E ; 石英ガラスのヤング率

$d_f$  ; ファイバ外径

$r_b$  ; ファイバの曲げ半径

$p$  ; プルーフトテスト時のスクリーニングレベル

$t_s$  ; 使用時間

$t_p$  ; プルーフトテストの時間

本推定では光ファイバの曲げ部における故障率にのみ

着目した。そのため、ファイバにかかる歪みはケーブル化後に残留する歪みと曲げによる歪みのみを仮定した。巻き回数は10回とした。

以上より、曲げ半径7.5mm、10mm、15mmにおいて故障率とスクリーニングレベルの関係を求めた。結果を図10に示す。故障率を数fitにするためのスクリーニングレベルは曲げ半径が15mmの場合は1.3%、曲げ半径が10mmの場合は2.0%、曲げ半径が7.5mmの場合は2.5%であることがわかった。このように、今回開発したファイバの許容曲げ半径の範囲内であれば、曲げ半径が小さくなくてもスクリーニングテストのレベルを上げることで、同等の故障率を維持できることを確認した。

## 5. む す び

トレンチ型屈折率分布を用いることで、通常SMFとの接続損失を低減した低曲げ損失光ファイバを開発した。許容曲げ半径7.5mmのファイバにおいて、1,310nmでのSMFとの接続損失は従来型低曲げ損失ファイバの約半分である0.32dB程度を実現した。また、許容曲げ半径が10mmのファイバでは、1,310nmでのSMFとの接続損失は0.24dB程度であった。さらに、トレンチ型光ファイバでは想定以下の小さな曲げが生じても損失増加を抑制することがわかった。これらの特徴から、今回開発した低曲げ損失ファイバを用いることで、屋室内配線時の取り扱いが容易となり、余長収納をコンパクトにできるものと期待される。

## 参 考 文 献

- 1) 篠ほか：曲げに強い屋内配線用光ファイバに関する検討，2000年電子情報通信学会総合大会，B-10-29，2000
- 2) 周ほか：フォトリソ結晶ファイバの宅内、ビル内配線への適用に関する検討，電子情報通信学会技術研究報告書，OFT2002-81，pp.41-46，2002
- 3) 姚ほか：ホーリーファイバの実用化に関する一検討，電子情報通信学会技術研究報告書，OFT2002-81，pp.47-50，2002
- 4) ITU-T G983.3
- 5) D.Marcuse: Loss analysis of single-mode fiber splices, Bell Syst.Tech.J. Vol.56, No.5, p.703, May, 1977
- 6) Y.Mitsunaga, et al: Failure Prediction for Long Length Optical Fiber Based on Proof Testing, J.Appl. Phys. Vol.53, p.4853, 1992