

# 長距離伝送に適した低損失大 $A_{\text{eff}}$ 光ファイバ

光ファイバ事業部 長 洲 勝 文<sup>1</sup>・山 城 健 司<sup>2</sup>・中 込 久 幸<sup>2</sup>  
佐 藤 達 哉<sup>2</sup>・松 尾 昌 一 郎<sup>3</sup>

## Low Attenuation and Large $A_{\text{eff}}$ Optical Fiber for Long-Haul Transmission

K. Nagasu, K. Yamashiro, H. Nakagome, T. Sato, and S. Matsuo

長距離幹線系を中心に大容量伝送を可能にするデジタルコヒーレント技術の普及が進んでいる。デジタルコヒーレント技術を用いたシステムで要求される光信号対雑音比 (OSNR) の改善を可能にする光ファイバとしてITU-TからG.654.Eカテゴリ<sup>1)</sup>が勧告されている。今回、当社ではITU-T G.654.Eに準拠したFutureGuide<sup>®</sup>-HSC-110 とFutureGuide<sup>®</sup>-HSC-125 を開発した。本開発品は低い伝送損失と大きな実効コア断面積 ( $A_{\text{eff}}$ ) を有しており、HSC-110 は高密度でケーブルに実装できること、HSC-125 は高い光ファイバ性能指数 (FOM) を持つことを特長としている。両光ファイバともマクロバンドおよびマイクロバンドによる損失が低いことから、幅広い構造のケーブルに適用可能である。

Digital coherent technology, which enables large-capacity transmission, has been commercialized especially in long-haul system. ITU-T recommends G.654.E category<sup>1)</sup> as an optical fiber capable of improving OSNR that is required for the digital coherent system. We have developed FutureGuide<sup>®</sup>-HSC-110 and FutureGuide<sup>®</sup>-HSC-125 in compliance with ITU-T G.654.E. The products have low attenuation and large  $A_{\text{eff}}$ , and features that HSC-110 can be packed in a cable with high density, and HSC-125 have a high figure of merit (FOM). Both optical fibers have low macro- and micro-bending losses, so they can be applied to cables of various structures.

### 1. ま え が き

近年の急激なデータトラフィックの増加にともない、長距離大容量伝送が可能なデジタルコヒーレント技術の普及が進んでいる。デジタルコヒーレント技術は、超高速デジタル信号処理を光ファイバ通信方式に取り入れることにより光伝送性能を飛躍的に向上させる技術である。本技術に基づく高ビットレートシステムでは高い光信号対雑音比 (OSNR) と低非線形歪みが求められるため、伝送線路である光ファイバには低い伝送損失と大きな実効コア断面積 ( $A_{\text{eff}}$ ) を持つことが要求されている。100 Gbit/s超デジタルコヒーレント陸上ネットワークに適した光ファイバとして、ITU-T よりG.654.Eカテゴリが 2016 年に勧告化されている。

一方、デジタルコヒーレント技術による大容量化にあわせ、より経済的かつ効率的に光ファイバ通信網を構築することを目的に光ケーブルの高密度化が進んでいる。

ITU-T G.654.Eに準拠した光ファイバにおいても光ケーブルの高密度化の要求は増加すると見込まれている。

今回、ITU-T G.654.Eに準拠した光ファイバFutureGuide<sup>®</sup>-HSC-110 (以下HSC-110) とFutureGuide<sup>®</sup>-HSC-125 (以下HSC-125) を開発した。HSC-110 は曲げ損失が低く高密度ケーブル化に適しており、HSC-125 は $A_{\text{eff}}$ が大きくOSNR改善を重視した光ファイバである。さらに本ファイバは、 $A_{\text{eff}}$ の拡大にともなうマクロバンド、マイクロバンド特性の劣化を抑え、光ファイバを識別しやすくするリングマークも適用可能な設計となっているため、幹線系で期待される多心ケーブルに最適な特性を有している。

### 2. 長距離伝送に求められる光ファイバの特性

光ファイバを通る光信号は、送信側から遠く離れるほど減衰していき、受信感度を下回ると信号として認識することができない。そのため光信号を長距離にわたって伝送するには、光信号パワーとノイズの比であるOSNRの低下を抑えることが重要となる。デジタルコヒーレント技術を用いた多値変調方式では、従来の強度変調方式に比べて高

1 光ファイバ開発部グループ長

2 光ファイバ開発部

3 光ファイバ開発部部長 (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
ITU-T	International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector	国際電気通信連合電気通信標準化部門。世界規模で電気通信を標準化することを目的として勧告を作成する国連機関
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio	光信号対雑音比。光信号強度と雑音強度の比
$A_{\text{eff}}$	Effective Core Area	実効コア断面積。光ファイバ中を伝搬する光信号パワーの実効的な広さ
FOM	Figure Of Merit	光ファイバ性能指数。伝送損失、 $A_{\text{eff}}$ 、非線形屈折率から算出したOSNRの改善量
マクロバンド損失		曲げ損失の一つ。半径数 mm から数 10 mm に光ファイバを曲げたときに生じる損失
マイクロバンド損失		曲げ損失の一つ。光ファイバが微小な凹凸面から側圧を受けたときに生じる損失
IEC	International Electrotechnical Commission	国際電気標準会議
Oバンド		光通信波長帯のひとつ。Original-bandの略で波長は1260～1360 nm
Cバンド		光通信波長帯のひとつ。Conventional-bandの略で波長は1530～1565 nm
Lバンド		光通信波長帯のひとつ。Long-wavelength-bandの略で波長は1565～1625 nm
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
MFD	Mode Field Diameter	光ファイバ中を伝搬する光信号パワー分布の直径

いOSNRが要求されている。

OSNRは、送信側で入射する光信号パワーを高めること、光信号パワーの減衰を抑制することで改善できる。光信号パワーを高めると光ファイバのガラス中で発生する非線形効果による信号波形の歪み（非線形歪み）が問題になる。非線形歪みは光強度によってガラスの屈折率が変化するKerr効果によるものであり、式1で表される。

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{\text{eff}}} \quad (\text{式1})$$

ここで、 $n$ は屈折率、 $n_0$ は線形屈折率、 $n_2$ は非線形屈折率、 $P$ は光信号パワーである。式1より非線形歪みを抑えるためには、光ファイバの非線形屈折率を低減すること、 $A_{\text{eff}}$ を拡大し光信号パワー密度を低下させることが有効であることがわかる。また、光信号パワーの減衰を抑制するには光ファイバの伝送損失を低減することが有効である。

光ファイバの特性に由来するOSNRの改善効果を定量的に表現する指標として光ファイバ性能指数（FOM）が知

られており、式2から求めることができる<sup>2)</sup>。

$$FOM(\text{dB}) = 10 \log \left( \frac{A_{\text{eff}}}{n_2} \cdot \frac{n_{2\text{-ref}}}{A_{\text{eff-ref}}} \right) - (\alpha - \alpha_{\text{ref}}) \cdot L - 10 \log \left( \frac{L_{\text{eff}}}{L_{\text{eff-ref}}} \right) \quad (\text{式2})$$

ここで、 $\alpha$ は伝送損失（dB/km）、 $L$ はスパン長（中継器間隔、km）、 $L_{\text{eff}}$ は式3で定義された実効長（km）である。

$$L_{\text{eff}} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (\text{式3})$$

ref 付きの $n_{2\text{-ref}}$ 、 $A_{\text{eff-ref}}$ 、 $\alpha_{\text{ref}}$ 、 $L_{\text{eff-ref}}$ は基準とする光ファイバの非線形屈折率、実効コア断面積、伝送損失、実効長である。式2からも、低い非線形屈折率、大きな $A_{\text{eff}}$ 、低い伝送損失はOSNRの改善に寄与することがわかる。

ガラスの非線形屈折率は添加物の濃度によって違っており、例えば、シリカガラスはゲルマニウム（Ge）の濃度が高いほど非線形屈折率は上昇することが知られている<sup>3)</sup>。したがって、Geをコアに添加した汎用光ファイバは、コ

アに純粋なシリカガラスを用いた光ファイバよりも高い非線形屈折率を持つ。図 1 にGe添加コア光ファイバとシリカコア光ファイバの違いについて屈折率分布を使って示す。横軸は半径、縦軸は屈折率である。Ge添加コア光ファイバではコアにGeを添加して屈折率差を設けているのに対し、シリカコア光ファイバではクラッドにフッ素 (F) を添加することで屈折率差を設けていることを特徴とする。汎用のGe添加コア光ファイバに対するシリカコア光ファイバの非線形屈折率は 96%程度と違いはわずかであるため、シリカコア光ファイバを用いることによるFOMの改善は 0.19 dB程度にとどまる。

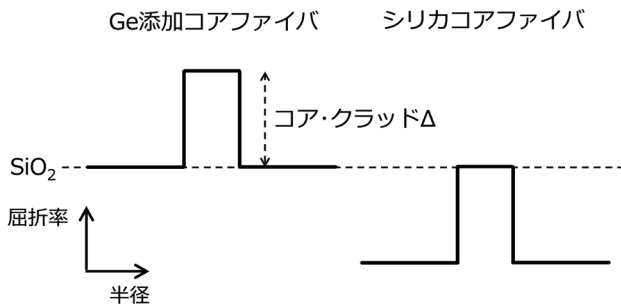


図 1 Ge添加コアファイバとシリカコアファイバの屈折率の概念図

Fig. 1. Schematic refractive index of Ge-doped core fiber and silica core fiber.

FOMを大幅に改善させるには、伝送損失の低減および $A_{\text{eff}}$ の拡大が有効である。図 2 に伝送損失と $A_{\text{eff}}$ によるFOMの改善効果を示す。FOMの基準には、汎用光ファイバであるFutureGuide®-LWP (LWP) の波長 1550 nmにおける伝送損失 (0.183 dB/km) および $A_{\text{eff}}$  ( $80 \mu\text{m}^2$ ) を用い、スパン長は 80 kmとした。0.17 dB/kmを下回る伝送損失を有する光ファイバでは、LWPと同じ $A_{\text{eff}}$ であっても 1.0 dBを超えるFOMの改善が期待できる。さらに、 $A_{\text{eff}}$ を  $110 \mu\text{m}^2$ 以上に拡大した光ファイバの場合は 3 dB前後のFOMの改善となることがわかる。

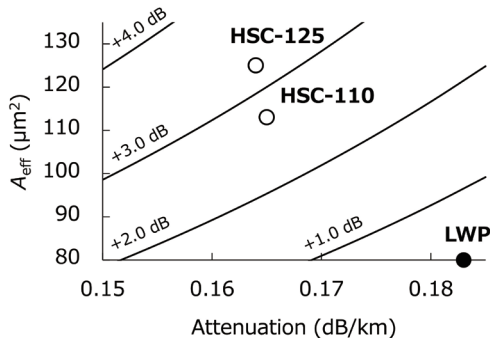


図 2 伝送損失と $A_{\text{eff}}$ のFOMの改善効果

Fig. 2. Influence of attenuation and  $A_{\text{eff}}$  on the FOM.

伝送損失を下げるためには、前述のシリカコア構造が有効である。光ファイバの伝送損失の原因の 8 割を占めるレイリー散乱は、ガラスネットワーク構造の不均一を起因とする密度揺らぎとGeやFなどの添加物を起因とする濃度揺らぎによって引き起こされる。シリカコア光ファイバは、濃度揺らぎの原因となるGeやFをコアに含有していないため、Ge添加コア光ファイバに比べて低い伝送損失を実現可能である。

$A_{\text{eff}}$ を拡大するためには、コアとクラッド間の屈折率差 ( $\Delta$ ) を低下させ、コア径を拡大することが必要である。しかしながら、低 $\Delta$ 構造ではコアへの光の閉じ込めが弱くなるため、マクロバンドやマイクロバンド特性の劣化が設計上のトレードオフとなる。ケーブル中の光ファイバはある程度の曲げや側圧を受けるため、幅広い構造のケーブルに適用できるようにするにはマクロバンドやマイクロバンド損失の過度の劣化を抑える必要がある。

### 3. 本開発品の基本特性

上記の光ファイバへの要求特性をふまえ、当社ではITU-T G.654.Eに準拠した長距離伝送用の 2 種類の光ファイバ (HSC-110, HSC-125) を開発した。本開発品の主な光学特性を表 1 に示す。比較としてG.654.Eの規格およびLWPの特性値をあわせて示す。シリカコア構造の採用により、波長 1550 nmにおける伝送損失はHSC-110 で 0.165 dB/km, HSC-125で0.164 dB/kmと、LWPに比べ約 0.02 dB/km低い値となっている。また、波長 1550 nmにおける $A_{\text{eff}}$ は、HSC-110 では  $113 \mu\text{m}^2$ , HSC-125 では  $125 \mu\text{m}^2$  とLWPの $A_{\text{eff}}$ よりも 40%から 50%大きい。伝送損失と $A_{\text{eff}}$ から算出されるFOMの改善量は、図 2 に示すようにHSC-110 で 2.7 dB, HSC-125 で 3.2 dBであり、FOMの改善という観点ではHSC-125の方が優れている。

一方、HSC-110 はHSC-125 よりも優れたマクロバンドやマイクロバンド特性を有しており、実装密度の高いケーブルに適用可能である。以下にマクロバンドやマイクロバンド損失という観点で、HSC-110, HSC-125の特長を説明する。

曲げ損失には、数 mmから数10 mmの半径で光ファイバを曲げたときに生じるマクロバンド損失と、光ファイバが微小な凹凸面から側圧を受けたときに生じるマイクロバンド損失があるが、ケーブル実装時の損失増加を抑制するためには両方の曲げ損失を低減する必要がある。

本開発品のマクロバンド損失は、表 1 記載のようにITU-T G.654.Eの要求特性 (半径 30 mm 100 ターン巻き 1625 nmの損失増加が 0.1 dB以下) を満足しているのはも

表1 HSC-110, HSC-125の光学特性一覧

Table 1. Optical characteristics of HSC-110, HSC-125.

項目	条件	HSC-110	HSC-125	G.654.E規格	LWP	単位
伝送損失	1550 nm	0.165	0.164	≤ 0.23	0.183	dB/km
	1625 nm	0.180	0.180	-	0.196	dB/km
MFD	1550 nm	11.7	12.3	11.5-12.5 Tolerance ±0.7	10.5	μm
$A_{\text{eff}}$	1550 nm	113	125	-	80	μm <sup>2</sup>
ケーブルカットオフ波長	-	≤ 1530	≤ 1520	≤ 1530	≤ 1260	nm
マクロバンド損失	R= 30 mm 100 turns 1625 nm	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	dB
波長分散	1550 nm	21	21	17-23	17	ps/(nm·km)
波長分散スロープ	1550 nm	0.060	0.060	0.050-0.070	-	ps/(nm <sup>2</sup> ·km)

ちろんであるが、低曲げ損失光ファイバの勧告である ITU-T G.657.A1<sup>4)</sup> を満足するものとなっている。ITU-T G.657 では、かざられたスペースにおける取り扱い性や曲げ損失特性の最適化を支援する目的に半径 15 mm以下の小径での損失が規定されており、その規格のひとつがITU-T G.657.A1である。図 3にHSC-110, HSC-125およびLWPの半径 10 mm, 15 mmにおけるマクロバンド損失を示す。図中の点線は、ITU-T G.657.A1の上限規格である。今回開発した光ファイバは、LWPよりも低いマクロバンド損失を有しITU-T G.657.A1規格を十分に満たすことがわかる。また、 $A_{\text{eff}}$ を小さめに抑えた設計であるため、HSC-110 のマクロバンド損失はHSC-125 よりもさらに小さく抑えられている。本開発品の $A_{\text{eff}}$ がLWPよりも大きいにも関わらず小さなマクロバンド損失となっているのは、本開発品のケーブルカットオフ波長がLWPよりも長いことに起因する。汎用的なLWPはOバンド以上でのシングルモード伝送を担保するため 1260 nm以下のカットオフ波長が求められるのに対して、長距離伝送にフォーカスしたG.654.Eでは伝送損失が低いCバンド以上でのシングルモード伝送を想定しているため、LWPよりも長いカットオフ波長が許容される。

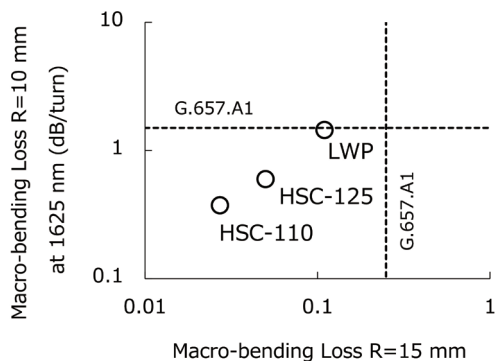


図3 半径10mm, 15mmでのマクロバンド損失

Fig. 3. Macro-bending losses at a bending radius of 10 mm and 15 mm.

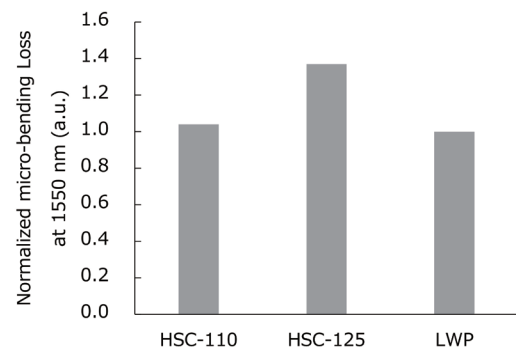


図4 HSC-110, HSC-125のマクロバンド損失

Fig. 4. Micro-bending losses of HSC-110, HSC-125.

図 4 にマイクロバンド損失の比較を示す。マイクロバンド損失は、IEC TR 62221<sup>5)</sup> method B準拠のサンドペーパー巻き (SP) 試験にて評価した。SP試験では、360 グリッドのサンドペーパーが巻かれた直径 400 mmのボビンに、張力 100 gfで光ファイバを巻いたときに生じる損失増加量を測定する。マイクロバンド損失は、 $A_{\text{eff}}$ が大きくなるにつれて急激に大きくなる傾向を持つ。しかし、本開発品はLWPに比べて約 40%以上も $A_{\text{eff}}$ を拡大しているにも関わらず、同程度のマイクロバンド特性を維持していることがわかる。このような優れたマイクロバンド特性は、LWPよりも柔らかい被覆材を採用することにより実現されたものである。

以上のように本開発品は、 $A_{\text{eff}}$ が大きいのにも関わらず汎用のLWP光ファイバと同等以上の低いマクロバンド損失、マイクロバンド損失を持っているため、幅広いケーブルに適用可能である。これまでに当社はテープスロットケーブル内において優れた特性となることを報告している<sup>6), 7)</sup>。HSC-110 については、マクロバンド、マイクロバンドによる損失が特に低いので、実装密度の高いケーブル内での使用に適している。

#### 4. リングマーク適用時の伝送損失

高密度ケーブルのような多心ケーブルでは、複数種のリングマークと色を組み合わせることで光ファイバを識別しやすくしている。例えば図 5 のように、リングマーク無しから 3 重までリングマーク数を変えれば 4 本の光ファイバの識別が可能であり、さらに各々 13 色に着色した場合は 52 本の光ファイバの識別が可能となる。

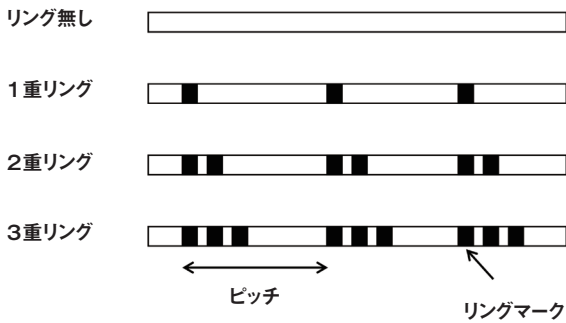


図 5 リングマークのパターン

Fig. 5. Ring mark pattern.

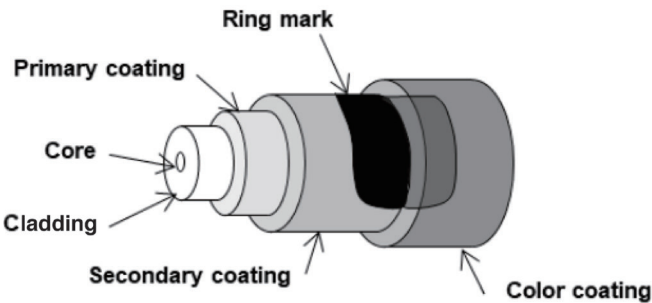


図 6 リングマークの模式図

Fig. 6. Schematic diagram of the ring-marked optical fiber.

表 2 リングマーク条件と伝送損失増分

Table 2. Ring mark condition and loss increase.

ピッチ	マーク数	伝送損失増分 @1550 nm (dB/km)
200 mm	1 重	0.000
200 mm	2 重	0.000
200 mm	3 重	0.001

リングマークは図 6 のようにセカンダリ被覆層上に印刷された厚さ数  $\mu\text{m}$  のインク層であるため、ケーブル内では光ファイバのリングマーク凹凸による側圧が周期的に印加されることとなる。マイクロバンドという観点では通常の光ファイバよりも厳しい構造となるが、リングマークの付与による損失の増加は実用上望ましくない。本開発品の中でマイクロバンド損失が比較的大きい HSC-125 にリングマークを付与したときの損失の変化を表 2 に示す。ここでは、200 mm ピッチで 1 重～3 重のリングマーク加工

を行い、ポビンに巻いた状態で波長 1550 nm における伝送損失増分を評価した。マイクロバンド損失に最も厳しい条件である 3 重リングにおいても、損失増加はほとんど無いことがわかる。また、図 7 に示すように、3 重のリングマークの有無による損失波長特性は、Cバンドのみならず Lバンドにおいてもほとんど差が無い。したがって、本開発品はリングマークが必要になるような幹線用多心ケーブルにも適用可能である。

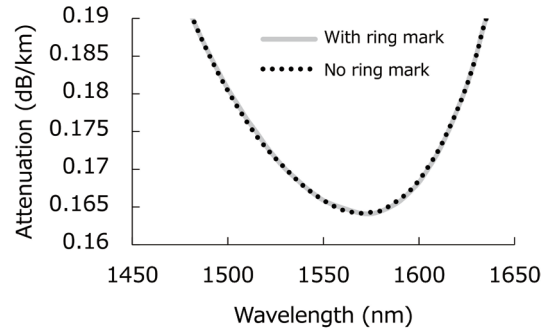


図 7 リングマーク有り光ファイバの損失波長特性

Fig. 7. Attenuation spectra of ring marked optical fiber.

#### 5. 接続損失を考慮した伝送特性

長距離伝送システムでは、光ケーブル同士の接続および中継器との接続が繰り返されることから、その伝送特性は接続損失も含めて評価することが適切である。想定される接続損失として、ケーブル敷設時の同種光ファイバの接続に加えて、中継器内での汎用光ファイバとの接続を考慮する必要がある。接続損失は以下の式 4 で算出できることが知られている<sup>8)</sup>。

$$SpliceLoss(dB) = -10 \log \left[ \left( \frac{2w_1w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right)^2 \exp \left( \frac{-2d^2}{w_1^2 + w_2^2} \right) \right] \quad (\text{式 4})$$

ここで  $2w_1$ ,  $2w_2$  は光ファイバの MFD,  $d$  は軸ずれ量である。図 8 に式 4 から求めた汎用光ファイバと MFD の異なる光ファイバの接続損失を実線で示す。接続する光ファイバ同士の MFD 差が大きくなるほど接続損失が高くなるため、中継器内の汎用光ファイバとの接続損失は同種光ファイバの接続に比べて高くなることが想定される。

図 9 に開発した光ファイバと汎用光ファイバの異種接続損失を、図 10 に開発した光ファイバの同種接続損失を示す。接続に用いた融着接続器は FSM-70S、接続条件は通常 SM 条件で 30 回試験を実施した。波長 1550 nm における接続損失は HSC-110 と汎用光ファイバ間で最大 0.08 dB、HSC-125 と汎用光ファイバ間では 0.10 dB と図 8 の計算値とほぼ同等の結果であった。一方、同種接続の最大値はい

ずれも0.01 dB以下であった。

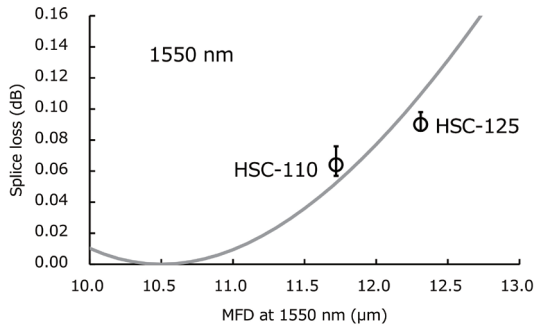


図8 汎用光ファイバとMFDの異なる光ファイバの接続損失計算値および汎用光ファイバとHSC-110, HSC-125との接続損失の実測値

Fig. 8. Calculated splice losses as functions of MFDs and measured splice losses between conventional optical fiber and HSC-110, HSC-125.

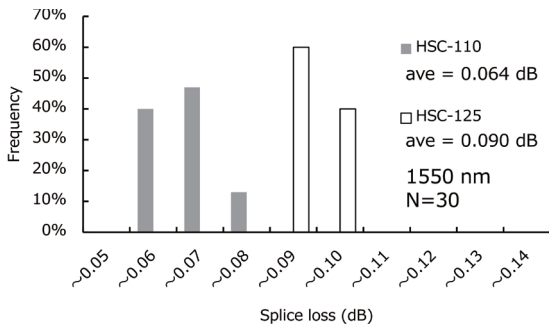


図9 汎用SMファイバとHSC-110, HSC-125の異種接続損失  
Fig. 9. Heterogeneous splice losses between conventional optical fiber and HSC-110, HSC-125.

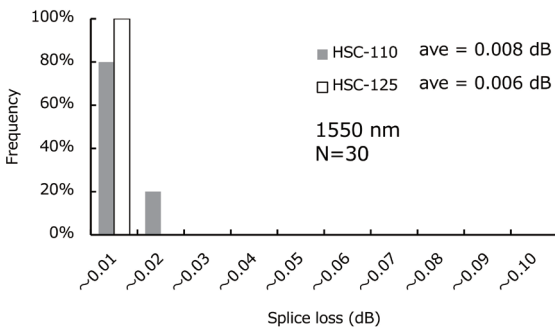


図10 HSC-110, HSC-125の同種接続損失

Fig. 10. Homogeneous splice losses of HSC-110, HSC-125.  
接続損失が伝送性能に与える影響を評価するために、図11のようなスパン長80 kmの伝送路モデルを仮定し、FOMを算出した。ここでは、2 kmごとのケーブル接続点で同種光ファイバの接続、両端の中継器で汎用光ファイバ

との接続があるとする。このような伝送路の伝送損失は、スパン長当たりの光ファイバ伝送損失に、接続点数分の同種光ファイバの接続損失および両端の汎用光ファイバとの接続損失を加えたものとなる。実際の伝送路で想定されるMFDの組み合わせばらつきや軸ずれの影響を考慮した接続損失を用いて算出した伝送路の伝送損失は、HSC-110では0.176 dB/km, HSC-125では0.174 dB/kmであった。一方、HSCのかわりに汎用光ファイバを使用した伝送路を仮定した場合、伝送路の伝送損失は0.192 dB/kmとなった。この汎用光ファイバを基準として式2を用いて伝送路としてのFOMの改善量を算出したところ、HSC-110で2.7 dB, HSC-125では3.2 dBとなり、接続損失考慮前のFOMである2.7 dB, 3.2 dBと同等であった。以上の結果から、実際の伝送路での接続損失を考慮しても、FOMという観点では本開発品を用いることによる伝送特性の改善が期待できる。

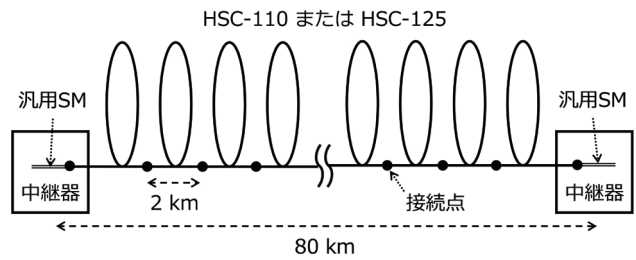


図11 接続損失込みの伝送特性評価モデル

Fig. 11. Evaluation model of transmission characteristics including splice losses.

#### 4. む す び

ITU-T G.654.Eに準拠したHSC-110とHSC-125を開発した。本光ファイバは、 $A_{\text{eff}}$ の拡大にともなうマクロバンド、マイクロバンド特性の劣化を抑え、光ファイバを識別しやすくするリングマークも適用可能な設計となっているため、幹線系で期待される多心ケーブルに最適な特性を有している。特にHSC-110は、マクロバンドおよびマイクロバンドによる損失が低いことから、当社の高密度スロットレスケーブルであるWrapping Tube Cable® (WTC)への適用を予定している。

参 考 文 献

- 1) International Telecommunications Union, "ITU-T G.654: Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable," 2020.
- 2) J.D. Downie, "112 Gb/s PM-QPSK transmission systems with reach lengths enabled by optical fibers with ultra-low loss and very large effective area," Proceedings of SPIE, Vol.8284, 828403, 2012.
- 3) 和田, 奥出, 酒井, 山内, 「石英系光ファイバ非線形屈折率の $\text{GeO}_2$ 濃度依存性」, 電子情報通信学会誌 B-I Vol. J78-B-I No.12 pp.811-817, Dec. 1995.
- 4) International Telecommunications Union, "ITU-T G.657: Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable," 2016.
- 5) International Electrotechnical Commission, "IEC/TR 62221:Optical Fibres - Measurement methods - Microbending sensitivity," 2012.
- 6) T. Nunome, K. Nagasu, T. Shoji, K. Okada, D. Sega, R. Maruyama, I. Ishida, A. Namazue, and S. Matsuo, "Low attenuation and large  $A_{\text{eff}}$  optical fibers optimized for long-haul application," Proceedings of the 65th IWCS Conference, 10-3, Oct. 2016.
- 7) D. Sega, K. Okada, R. Maruyama, K. Nagasu, H. Nakagome, T. Onodera, A. Murata, and S. Matsuo, "Low attenuation and large  $A_{\text{eff}}$  fiber with a matched-cladding profile," Proceedings of the 66th IWCS Conference, pp.638-643, Oct. 2017.
- 8) D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splice," Bell Syst. Tech. J., Vol.56, no.5, pp.703-718, 1977.