



極低損失純シリカコアファイバ

Ultra Low-loss Pure Silica Core Fiber

川口 雄揮*

Yuki Kawaguchi

田村 欣章

Yoshiaki Tamura

春名 徹也

Tetsuya Haruna

山本 義典

Yoshinori Yamamoto

平野 正晃

Masaaki Hirano

指数関数的に増加するインターネットトラフィックを支えるため、デジタルコヒーレント通信技術を活用した大容量伝送システムが実用化されている。このような伝送システムでの課題は、光信号対雑音比 (OSNR) の改善である。このため、伝送用光ファイバには伝送損失の低減ならびに実効断面積 (Aeff) の拡大が要求されている。本報告では、波長1550 nmにおける伝送損失が0.149 dB/kmと、従来の世界記録を11年ぶりに更新する純シリカコアファイバ(PSCF)の試作結果について述べる。さらに、累積25,000 kmでの平均の伝送損失が0.154 dB/kmという極低損失を有するZ-PLUS Fiber® ULL (Aeff=112 μm²) およびZ-PLUS Fiber® 130 ULL (Aeff=130 μm²) の開発に成功したので、その結果を紹介する。これらの光ファイバ性能指数は、今まで報告されてきた光ファイバのなかで最良値を有しており、長距離・大容量のデジタルコヒーレントシステムに最適な光ファイバであると考えている。

To keep up with the exponential growth of demand for broadband Internet traffic, large capacity transmission systems with digital coherent technologies have started operation recently. The major challenge in such systems is to improve optical signal-to-noise ratio (OSNR). In order to improve the OSNR, optical fibers with low transmission loss and large effective area (Aeff) are strongly demanded. This paper reports a pure-silica-core fiber (PSCF) with the record-low loss of 0.149 dB/km, which is the first fiber having a loss less than 0.150 dB/km at 1550 nm. The paper also describes our development of Z-PLUS Fiber® ULL (Aeff=112 μm²) and Z-PLUS Fiber® 130 ULL (Aeff=130 μm²), both of which have an extremely low transmission loss, average loss of 0.154 dB/km. Exhibiting the highest fiber figure-of-merit, they will be suitable for high capacity and long haul transmission systems using digital coherent technologies.

キーワード：純シリカコアファイバ、低損失、実効断面積拡大、光ファイバ性能指数

1. 緒言

爆発的なスマートフォンの普及や、クラウドネットワークの進展に伴ってインターネットトラフィックは指数関数的な増加を続けている。これを支えるため、光通信システムにはさらなる大容量化が求められており、デジタルコヒーレント技術*1を用いた100 Gb/s×100チャンネルなどの大容量光伝送システムが、10,000kmに達する大陸間の海底伝送路においても導入されている。このような超長距離、大容量伝送における最大の課題は、通信システムの光信号対雑音比 (Optical Signal-to-Noise Ratio: OSNR) の改善である。このため、伝送用ファイバには伝送損失および非線形性の低減が求められており、これまでに様々な低損失・低非線形ファイバが提案されてきた^{(1)~(3)}。その中でも、純シリカコアファイバ (Pure silica core fiber: PSCF)^{*2}は、本質的に伝送損失が低い光ファイバとして知られており、低損失、低非線形ファイバとして有望である。当社では、1980年代にPSCFの商用化に成功し、以降も継続して開発と提案を行っている。図1に、1980年代から現在までの波長1550 nmにおけるPSCFの低損失化の進展を中空のプロットで示す。1986年には0.154 dB/km⁽⁴⁾、2002年には0.150 dB/km⁽⁵⁾という極低損失PSCFの開発に成功した。図1には、当社PSCF製品の低損失化の進展も合わせて中実のプロットで

示す。当社では、1988年には0.170 dB/kmのZ Fiber®、2002年には0.168 dB/kmのZ-PLUS Fiber®、2011年には0.162 dB/kmのZ-PLUS Fiber® LLをリリースした。これらのPSCF製品は、海底システムにおいて長年の供給実績を有している。

今後、さらなる大容量伝送を実現するためには、PSCFのさらなる低損失化および低非線形化が強く求められている。本稿では、波長1550 nmでの伝送損失が0.149 dB/kmと、従来の低伝送損失の世界記録であった0.150 dB/kmを

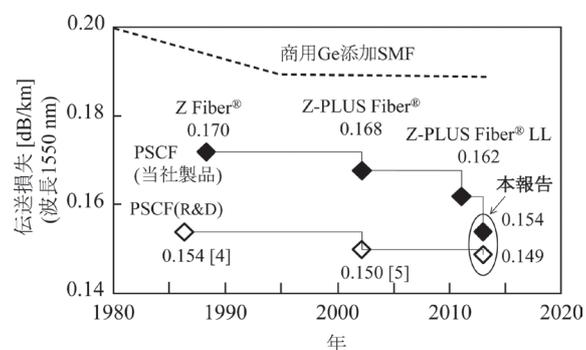


図1 PSCFの低損失化の進展

11年ぶりに更新する極低損失を持つPSCFの実現に成功した結果を述べる。加えて、ファイバパラメータがOSNR改善に与える効果を定量的に計算する光ファイバ性能指数 (Figure of Merit: FOM) ^{(6)~(9)} を用いて、実用的な海底長距離伝送路においては、伝送損失はより低く、実効断面積 (Aeff) ^{*3} は110~140 μm²の範囲にあるファイバが最適であることを明らかにする。この検討結果を基に、Aeffを112、130 μm²となるよう、PSCFを設計し、それぞれZ-PLUS Fiber[®] ULL (Z+ULL)、Z-PLUS Fiber[®] 130 ULL (Z+130 ULL) として製品化に成功した。これらは、累計の試作ファイバ長25,000 kmの平均伝送損失が0.154 dB/kmと極めて低い伝送損失特性を有し、高い信頼性および耐久性を有することを確認している。

2. 極低損失PSCFの試作結果

光ファイバの伝送損失を低減するためには、波長1550 nmにおける伝送損失のおよそ80%を占めるレイリー散乱損失を低減することが最も重要である。レイリー散乱損失は、ガラス材料の微小な揺らぎを原因とするが、信号光パワーが伝搬するコア部を添加物を含まない純シリカとすることで、ガラスの組成揺らぎをなくすることができる。我々は、加えてガラスの密度揺らぎを低減することで、レイリー散乱損失をさらに低減し、波長1550 nmにおける伝送損失が0.149 dB/kmと初めて0.150 dB/kmを下回る極低伝送損失の実現に成功した。図2および表1に、極低損失PSCFならびに汎用シングルモードファイバ (SMF) の伝送損失スペクトルと光学特性を示す。極低損失PSCFでは、非線形性を低減するためAeffを135 μm²に拡大している。さらに、相互位相変調 (XPM)、四光波混合 (FWM) などの非線形性を改善するためには、波長分散は大きい方が良いが、PSCFの分散はシリカ材料分散22 ps/(nm・km) にほぼ近い21 ps/(nm・km) まで大きくなっている。Aeff拡大ファイバでは曲げ損失による伝送損失の増加が懸念されるが、20 kmのファイバを直径170 mmの胴径を有するポビンに巻いた状態で測定

したが、曲げ損失などによる損失増加は見られていない。また表1に示すように、曲げ損失は、W型構造とすることで汎用SMFと同等以下に抑えられている。

表1 波長1550 nmでの試作したPSCFの光学特性

	極低損失 PSCF	汎用 SMF
伝送損失 [dB/km]	0.149	0.186
Aeff [μm ²]	135	80
分散 [ps/(nm・km)]	21	17
分散スロープ [ps/(nm ² ・km)]	0.061	0.059
曲げ損失 (R=10mm) [dB/m]	4	7

極低損失PSCFの屈折率分布は、図3に示すように、わずかにフッ素 (F) を添加した中心コア部と、その周囲の純SiO₂ ガラスからなるリング型コア部と、さらにその周囲のクラッド部としてW型構造を有するFを添加したSiO₂ ガラスからなる。リング型コアにすることで、同一AeffでもMFDを小さくできるため、汎用SMFとの異種ファイバ間の接続損失を小さくすることができる⁽¹⁾。図4にAeffの異なるステップ型およびリング型コアファイバと汎用SMFとの融着接続損失の測定結果を示す。リング型コアは、確かにステップ型コアに比べて汎用SMFとの接続損失が低く、例えばAeff = 130 μm²では1箇所あたり0.02 dB程度接続損失を低減できる。

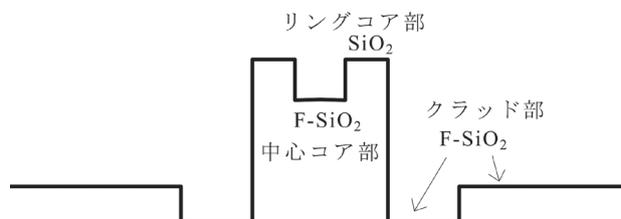


図3 PSCFの屈折率分布

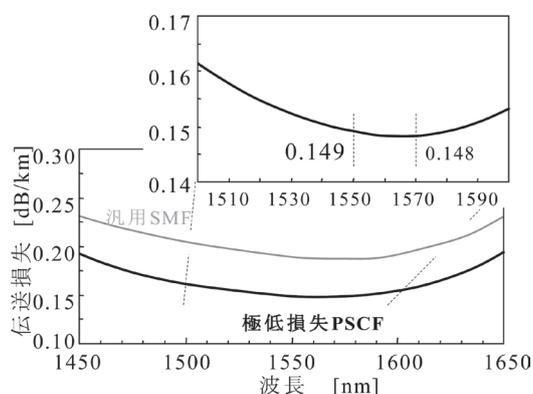


図2 極低損失PSCFと汎用SMFの伝送損失スペクトル

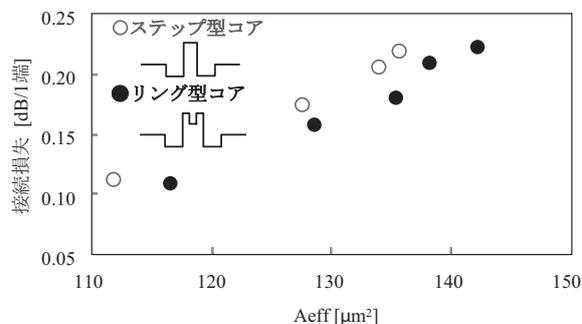


図4 汎用SMFとの異種ファイバ間の接続損失のAeff依存性

3. ファイバFOMを用いたファイバ設計

システム性能指数を示すQ値や伝送距離を光ファイバの光学特性から予測することが可能となれば、長距離・大容量伝送に最も適切な光学特性をもつ光ファイバを選択することが可能となる。そこで、**図5**に示すような伝送用ファイバ、中継器（エルビウム添加ファイバ増幅器：EDFA）、および伝送用ファイバとEDFAの接続損失からなるデジタルコヒーレント伝送路を想定した際のファイバ性能指数（ファイバFOM）を解析的に算出した^{(7)~(9)}。使用する略語を**表2**にまとめる。信号光、ASEノイズ、非線形ノイズがいずれもガウシアン分布に従い、互いに干渉しないとすると、OSNRは**式(1)**で表すことができる⁽⁶⁾。

表2 略語一覧

略語	単位	説明
α	dB/km	ファイバ伝送損失
α_l	1/km	ファイバ伝送損失 $\alpha_l = \frac{\alpha}{10} \ln 10$
α_{span}	dB	スパンロス
L_{eff}	km	実効長 ($= [1 - \exp(-\alpha_l L)] / \alpha_l$)
n_2	m ² /W	非線形屈折率
γ	1/W/km	非線形係数 ($= (2\pi/\lambda) \times (n_2/A_{eff})$)
D	ps/(nm·km)	波長分散
α_{sp}	dB	中継器とファイバとの接続損失 $\alpha_{sp} = 10 \log_{10} A_{sp}$
A_{sp}	-	中継器とファイバとの接続損失 (線形)
L	km	スパン長 (中継器間隔)
D_T	km	総伝送距離
N_s		スパン数
P_{ch}	W	信号光1チャンネルあたりのスパンへの入力信号光パワー
p_{ASE}	W	中継器1台あたりで発生するノイズのパワー
p_{NLI}	W	1スパンで発生する非線形ノイズのパワー

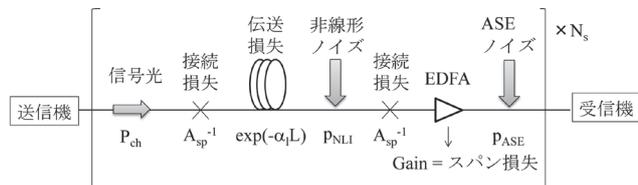


図5 検討に用いたブロックダイアグラム

$$OSNR = \frac{P_{ch}}{P_{ASE} + P_{NLI}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

これより、Q値を最大化する最適入力信号光パワー P_{opt} およびQ値の最大値 Q_{max} は**次式(2)**および**(3)**で表すことができる^{(8),(9)}。

$$P_{opt} [\text{dBm}] = -\frac{10}{3} \log(\gamma^2 L_{eff} |D|^{-1}) + \frac{1}{3} \alpha L + \frac{4}{3} \alpha_{sp} + C_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_{max} [\text{dB}] = -\frac{10}{3} \log(\gamma^2 L_{eff} |D|^{-1}) - \frac{2}{3} \alpha L - \frac{2}{3} \alpha_{sp} + 10 \log(L) - 10 \log(D_T) + C_2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 C_1, C_2 はファイバの光学特性には無依存の係数であり、送受信機のback-to-back特性やEDFAの雑音指数、変調方式や信号チャンネル数などシステムに依存するパラメータである。したがって同一の伝送システム構成では、 C_1, C_2 はある決まった値となる。**式(3)**から、光ファイバの伝送特性のみを抜き出した**式(4)**を光ファイバFOMとして定義する。

$$FOM [\text{dB}] = -\frac{10}{3} \log(\gamma^2 L_{eff} |D|^{-1}) - \frac{2}{3} \alpha L + 10 \log(L) - \frac{2}{3} \alpha_{sp} \quad \dots\dots (4)$$

式(2)、**(3)** および **(4)** を用いると、 P_{opt} 及び Q_{max} は各々**次式(5)** および **(6)** で表すことができる。

$$P_{opt} [\text{dBm}] = FOM - \alpha_{span} - 10 \log(L) + C_1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_{max} [\text{dB}] = FOM - 10 \log(D_T) + C_2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

一方、陸上端局から海底のEDFAへ供給できる電力の制約から、海底システムにおいて実際に用いられるEDFAのトータル出力光パワーは+16~+18 dBm程度が上限とされている。このため、100チャンネルWDM伝送を想定すると1チャンネルあたりのEDFA出力は-2 dBm/ch程度に制限される。したがって、実際に用いられる入力信号光パワーは P_{opt} より小さくなる場合がある。実際の P_{ch} が $r \times P_{opt}$ の時のQ値(Q_R)は、**次式(7)**で表すことができる^{(8),(9)}。

$$Q_R = Q_{max} + 10 \log\{3r/(r^3 + 2)\} = FOM_R - 10 \log(D_T) + C_2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 FOM_R は任意の P_{ch} の時のFOMであり、**次式(8)**で表すことができる。

$$FOM_R = FOM + 10 \log\{3r/(r^3 + 2)\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(4)、**(8)**より $FOM \cdot FOM_R$ はファイバの光学特性とスパン長、入力信号光パワーによって決定されるパラメータであり、**式(6)**、**(7)**より、同じシステム構成で高い $FOM \cdot FOM_R$ を持つファイバを用いたときのQ値または伝送距離の改善量を容易に予測することができる。もしくは、**式(4)**より、 $FOM \cdot FOM_R$ の高いファイバでは同じQ値と伝送距離に対してスパン長の延長が可能である。例えば1 dBの FOM_R

の改善によりスパン長を10 km延長することができる。スパン長の延長は、海底超長距離システムにおいては高価な中継器の数を削減、つまりシステムコストの改善につながるため、重要視されている。

図6にスパン長Lが (a) 80 kmおよび (b) 100 kmのときのファイバの伝送損失とAeffに対するFOM_R・FOM_Rの等高線をそれぞれ点線と実線で示す。ここではD=+21 ps/nm/km、n₂=2.2×10⁻²⁰ m²/WであるPSCFを仮定し、EDFAとの接続損失(α_{sp})はPSCFと汎用シングルモードファイバ(SMF)とのモードフィールド径(MFD)の不整合から算出した値を用いた^{(1)、(10)}。EDFAの出力制限を-2 dBm/chとした際、式(2)よりP_{opt}が-2 dBm/chを超える時はP_{ch}は-2 dBm/chで一定として式(8)からFOM_Rを算出し、P_{opt}が-2 dBm/chを超えない場合、P_{ch}=P_{opt}(r=1)として式(4)からFOM_Rを計算した。また、100 Gb/s DP-QPSK DWDM伝送実験⁽¹¹⁾の結果からC₁を-6.6 dBm/chとした^{(8)、(9)}。さらに、2章で示した極低損失PSCFのAeffならびに伝送損失の点を中実点で示し、これまでに報告されているファイバ^{(1)~(3)、(5)}を中空点で示す。

図6から明らかなように、FOM_Rの改善量は主にファイバの伝送損失の低減に依存している。一方、Aeffについては、スパン長80 kmではAeffが120~140 μm²、スパン長100 kmでは110~130 μm²が最適であると考えられる。このよう

に、Aeffについてはスパン長によって、最適な範囲が異なることがわかった。

4. 極低伝送損失PSCFの量産製造性の検証

4-1 極低伝送損失PSCFの量産試作

極低損失PSCFの量産製造性を検証するため、累積ファイバ長25,000 kmの試作を行った。ここでは、Aeffが112 μm²のZ-PLUS Fiber[®] ULLおよび130 μm²のZ-PLUS Fiber[®] 130 ULLの2種類のファイバを試作した。表3に、それぞれの極低損失PSCFの平均的な光学特性を示す。図7に、伝送損失の分布を示す。平均伝送損失は0.154 dB/kmと非常に低損失であることを確認した。さらに、伝送損失の分布形状はほぼ正規分布に従っており、標準偏差(σ)は0.002 dB/km未満と十分に小さいことを確認した。またAeff、波長分散、分散スロープについても高い安定性を有していることを確認した。

表3 25,000 km試作したPSCFの波長1550 nmにおける平均的な光学特性

	Z-PLUS Fiber [®] ULL	Z-PLUS Fiber [®] 130 ULL
伝送損失[dB/km]	0.154	0.154
Aeff [μm ²]	112	130
波長分散 [ps/(nm·km)]	20.6	20.7
分散スロープ [ps/(nm ² ·km)]	0.061	0.061

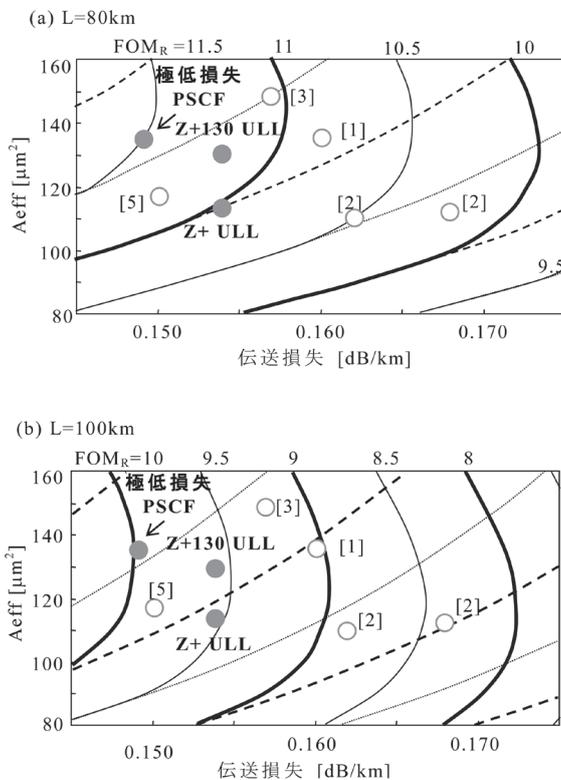


図6 (a)スパン長80 km、(b)100 kmとしたときの伝送損失とAeffに対するFOM_Rの等高線

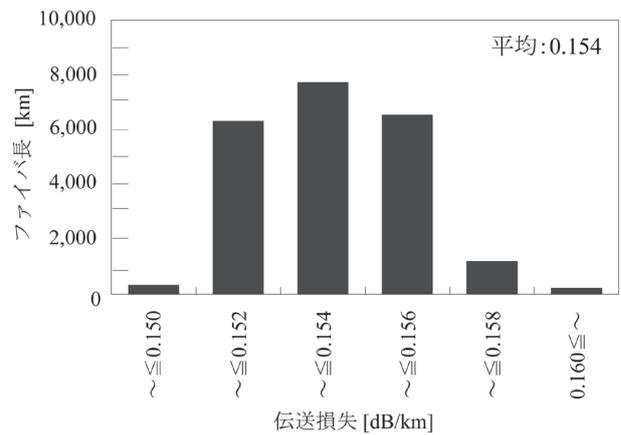


図7 累積長25,000 kmの伝送損失分布

4-2 マイクロバンドロス特性

一般的に、Aeffを拡大したファイバではマイクロバンドロス*4が増加することが知られており、マイクロバンドロスの低減が海底ケーブルシステムへの実導入における重要な課

題と言える。そこで我々は、良好なマイクロバンドロス特性を実現するために低ヤング率のプライマリ被覆を採用した⁽¹²⁾。低ヤング率のプライマリ被覆を用いたファイバと、従来のプライマリ被覆を用いたファイバの波長1550 nmにおけるマイクロバンドロスのAeff依存性を図8に示す。ここで、マイクロバンドロスは巻き付け張力が80 gfのワイヤメッシュボビン試験⁽¹³⁾により評価を行った。図8に示すように、低ヤング率プライマリ被覆では従来被覆に比べてマイクロバンドロスを大幅に低減できることがわかった。海底ケーブルとして長年の使用実績がある従来被覆を用いたZ-PLUS Fiber®と、低ヤング率プライマリ被覆を用いたZ+130 ULLは同等のマイクロバンドロス特性を有しており、海底ケーブルとして実用に耐えるものと考えている。

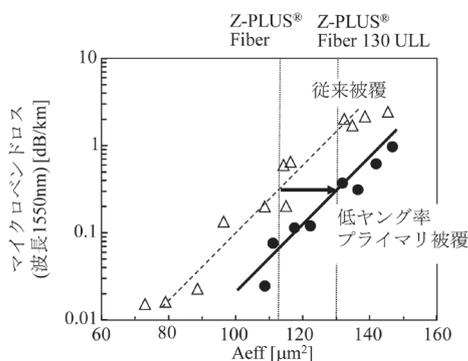


図8 低ヤング率プライマリ被覆および従来被覆を用いたファイバのマイクロバンドロス特性

4-3 極低伝送損失PSCFの耐環境性と強度特性

耐環境性および機械強度を評価するため、国際規格IEC60793-2-50に基づき評価した。高温高湿試験、高温試験、温度サイクル試験、浸水試験、強度試験、耐応力腐食性試験、ファイバ曲がり評価試験、プルーフ試験を実施したが、全試験において、良好な特性を示し、海底ケーブル用光

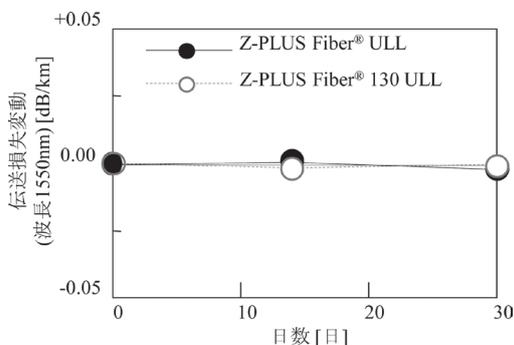


図9 高温高湿試験の結果 (温度:85℃、湿度:85%)

ファイバとして十分な信頼性と耐久性を有することを確認した。一例として、図9に温度85℃、湿度85%、30日間の高温高湿試験の結果を示すが、Z+ ULL、Z+ 130 ULL共に、有意な伝送損失の変動は観察されなかった。

海底用ケーブルのような厳しい環境下でファイバを用いる場合、長期信頼性として、耐水素特性が優れていることも重要である。そこで、耐水素特性を検証するため、海底ケーブルの実環境よりも厳しい条件での加速劣化試験として室温(23℃)、水素分圧:0.01 atmの雰囲気下に4000時間曝露した後の伝送損失の変化を測定した。結果を図10に示す。Cバンドの信号波長帯を含む1400~1600 nmにおいて有意な伝送損失の増加がなく、優れた耐水素特性を有することを確認した。

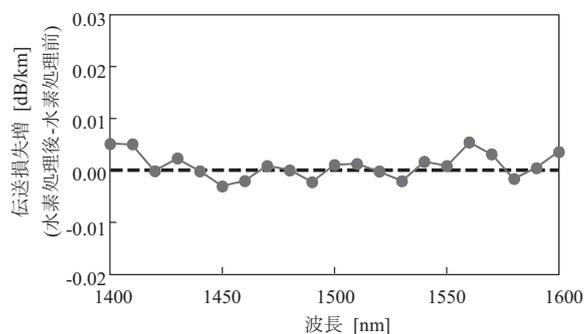


図10 耐水素特性の評価結果 (室温、水素分圧:0.01 atm、時間:4000 h)

5. 結 言

リングコア型屈折率プロファイルを有するAeff拡大PSCFを試作し、波長1550 nmにおける世界記録を更新する0.149 dB/kmの極低損失の実現に成功した。さらに本PSCFは、長距離システムに対して最適化したAeffを有しており、これまでの報告で最も高い性能指数を有する光ファイバである。さらに、累積ファイバ長25,000 kmの試作を実施し、平均0.154 dB/kmと極めて低い伝送損失を有することを確認した。また、十分な耐環境特性と機械強度も有しており、これら結果は、0.15 dB/km級の極低伝送損失を有するファイバの実用が可能となったことを意味する。今回開発したZ-PLUS Fiber® ULLおよびZ-PLUS Fiber® 130 ULLは、海底伝送システムにおいてさらなる高品質伝送の実現に貢献できるものと強く期待されている。

用語集

※1 デジタルコヒーレント技術

光の強度および位相を用いた通信方式であり、受信端で光信号を電気信号に変換し、信号処理を行う。従来の強度のみを用いた直接検波方式では、光信号が歪むと信号の判別ができなくなるが、デジタルコヒーレント通信方式では電気処理によって歪みを等化できる。そのため直接検波方式と比較して大容量通信が可能である。

※2 純シリカコアファイバ (PSCF)

純シリカ (SiO₂) のコアを持つ光ファイバ。クラッドには屈折率を下げるためにフッ素 (F) が添加されている。信号光パワーの大部分が伝搬するコアに添加物を含まないことから、GeO₂添加コア、純シリカクラッドを持つ汎用的なシングルモードファイバに比べて、低損失性、低非線形性など優れた性能を持つ。

※3 実効断面積 (Aeff)

光ファイバ中を伝搬する光パワー分布の広がりを表すパラメータ。Aeffが大きいほど伝搬光のパワー密度が低減し、非線形効果を抑制することができる。

※4 マイクロベンドロス

光ファイバをケーブル化した際、光ファイバに外部から応力がかかり、微小に曲がるために光信号パワーの一部が漏えいすることにより生じる損失。Aeff拡大ファイバでは、光パワー分布が広がっているため、マイクロベンドロスが増加する傾向にある。

参考文献

- (1) M. Hirano, Y. Yamamoto, Y. Tamura, T. Haruna, and T. Sasaki, "Aeff-enlarged Pure-Silica-Core Fiber having ring core profile," OFC/NFOEC2012, OTh41.2 Los Angeles, CA, USA (Mar. 2012)
- (2) S. Ohnuki, K. Kuwahara, K. Morita, and Y. Koyano, "Further attenuation improvement of a pure silica core fiber with large effective area," SubOptic2010, THU3A03, Yokohama, Japan (May 2010)
- (3) S. Bickham, "Ultimate limit of effective area and attenuation for high data rate fibers," OFC/NFOEC2011, OWA5, Los Angeles, CA, USA (Mar. 2011)
- (4) H. Kanamori, H. Yokota, G. Tanaka, M. Watanabe, Y. Ishiguro, I. Yoshida, T. Kakii, S. Itou, Y. Asano, and S. Tanaka, "Transmission characteristics and reliability of pure-silica-core single-mode fibres," J. Lightwave Technol., vol. LT-4, no. 8, pp. 1144-1150 (Aug. 1986)
- (5) K. Nagayama, M. Kakui, M. Matsui, T. Saitoh, and Y. Chigusa, "Ultra-low-loss (0.1484dB/km) pure silica core fiber and extension of transmission distance," Electron. Lett., vol.38, no.20, pp.1168-1169 (Sep. 2002)
- (6) P. Poggiolini, "The GN model of non-linear propagation in uncompensated coherent optical systems," J. Lightwave Technol., vol.30, no.24, pp.3857-3879 (Dec. 2012)

- (7) V. Carri, A. Carena, G. Bosco, P. Poggiolini, M. Hirano, Y. Yamamoto, and F. Forghieri, "Fiber figure of merit based on maximum reach," OFC/NFOEC2013, OTh3G.2, Anaheim, CA, USA (Mar. 2013)
- (8) M. Hirano, Y. Yamamoto, V.A.J.M. Sleiffer, and T. Sasaki, "Analytical OSNR formulation validated with 100G-WDM experiments and optimal subsea fiber proposal," OFC/NFOEC2013, OTu2B.6, Anaheim, CA, USA (Mar. 2013)
- (9) 山本義典, 平野正晃, V.A.J.M. Sleiffer, 佐々木隆, 「解析的なOSNRの導出と海底伝送に適したファイバの提案」, 信学技報 vol.13, no.156, pp.23-28 (July 2013)
- (10) D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splices," Bell Syst. Tech. J., vol.56, no.5, pp.703-718 (May-June 1977)
- (11) V.A.J.M. Sleiffer, Z. Maalej, D. van den Borne, M. Kuschnerov, V. Veljanovski, M. Hirano, Y. Yamamoto, T. Sasaki, S.L. Jansen, A. Napoli, and H. de Waardt, "A comparison between SSMF and large-Aeff Pure-Silica core fiber for ultra long-haul 100G transmission," Opt. Express, vol.19, no.26, pp.B710-B715 (Dec. 2011)
- (12) S. Ohnuki, T. Kawano, M. Hirano, T. Haruna, Y. Yamamoto, and Y. Koyano, "Manufacturing of Aeff enlarged pure silica core fiber with ultra-low loss of 0.154dB/km," SubOptic2013, EC11, Paris, France (Apr. 2013)
- (13) J. F. Libert, J.L. Lang, and L. Chesnoy, "The new 160 Gigabit WDM challenge for submarine cable systems," IWCS1998, pp.375-384 (Nov. 1998)

執筆者

川口 雄揮* : 光通信研究所
情報科学博士



田村 欣章 : 光通信研究所



春名 徹也 : 光通信研究所 主査



山本 義典 : 光通信研究所 主査



平野 正晃 : 光通信研究所 グループ長



*主執筆者