



大容量伝送に適した低ロス低非線形純シリカコアファイバ

山本 義典*・平野 正晃・佐々木 隆

Low-Loss and Low-Nonlinearity Pure-Silica-Core Fibers for Large Capacity Transmissions — by Yoshinori Yamamoto, Masaaki Hirano and Takashi Sasaki — 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). Although there would be several techniques to improve the OSNR, the use of low-loss and low-nonlinearity fibers would be one of the most straightforward and effective solutions.

In this paper, we present newly-developed low-loss and low-nonlinearity pure-silica-core fibers (PSCFs) for both submarine and terrestrial long-haul transmission systems. Considering the fiber characteristics, Z-PLUS Fiber® LL with a loss of 0.162 dB/km and Z++ with a large effective area (A_{eff}) of $130 \mu\text{m}^2$ are best suited for large-capacity and ultra-long-haul submarine systems, as they will improve the OSNR by about 3 dB compared to the standard single mode fiber (SSMF). Meanwhile, PureAdvance®-80 and PureAdvance®-110 with a loss of 0.17 dB/km and an A_{eff} of 80 and $110 \mu\text{m}^2$ respectively are most advantageous for long-haul terrestrial systems due to their capabilities of long span length or long transmission reach compared to the SSMF.

Keywords: pure-silica-core fiber, low loss, large effective area

1. 緒言

スマートフォンなどの爆発的な普及に伴って今後も増加し続けるインターネットトラフィックを支えるため、光通信システムにはさらなる大容量化が求められている。多値変調技術を含むデジタルコヒーレント通信技術は容量拡大のための有効な手段であるが、光ファイバのコアあたりの通信容量を拡大するには、より高い光信号対雑音比(OSNR)が要求される⁽¹⁾。このような背景から、OSNRを改善するためのいくつかの手法が提案されているが、その中でも光ファイバの低ロス化と低非線形化は、最も直接的かつ効果的なOSNR改善手法の一つと考えられる⁽²⁾。

純シリカコアファイバ (PSCF) ^{*1} は、本質的に伝送ロスが低いファイバとして知られており⁽³⁾、低ロス低非線形ファイバとして有望である。当社のPSCF開発は1980年代にまで遡り⁽⁴⁾、今日でも最低ロスの世界記録を有するPSCF⁽⁵⁾など、継続して開発と提案を行っている^{(6)~(9)}。実際、当社のPSCF製品Z Fiber™およびZ-PLUS Fiber®は、特に低ロスが求められる海底システムにおいて、長年の供給実績を有している。しかしながら、さらなる大容量伝送を実現するためには、PSCFのさらなる低ロス化および低非線形化が強く求められている。また、この動向は海底システムに限られたものでなく、陸上幹線系システムにおいても、大容量化のニーズが高まるにつれ、低ロス・低非線形性によるOSNR改善が重要度を増しつつある。

本稿では、大容量伝送における光ファイバへの要求が既に低ロス・低非線形性に変貌しつつあることを示した後、ロス、非線形性をさらに低減したPSCFとして、低ロスZ-PLUS Fiber®およびZ++を紹介する。また、陸上幹線系用PSCFとして開発したPureAdvance®-80とPureAdvance®-110も紹介する。さらに、これら低ロス低非線形PSCFがOSNR改善に与えるインパクトを定量的に述べ、中継器間隔、伝送可能距離の延伸といった陸上幹線系システムにおいて期待されるメリットを報告する。

2. 低ロス低非線形ファイバによるOSNR改善

低ロス低非線形ファイバへの要求が急速に高まる契機となったのが、近年のデジタルコヒーレント受信技術の急速な進展である。従来、光ファイバ中で信号光波形の線形歪を引き起こす波長分散や偏波モード分散は、分散シフトファイバ (DSF) や非零分散シフトファイバ (NZDSF)、または分散補償ファイバ (DCF) を用いて伝送路中で抑制するのが主流であった。しかし、デジタルコヒーレント通信では、信号光波形の線形歪は送受信機内のデジタル信号処理で等化することが可能となった。これにより光ファイバへの最大の要求はOSNR改善、すなわち、低ロスと低非線形性へと大きく変貌した。

光ファイバの低ロス化と低非線形化による OSNR 改善の様子を図1に示す。受信端における OSNR は信号光出力パワーとノイズレベルとの比で表わされるが、光ファイバの低ロス化は、同じ入射光パワーに対して出射光パワーを向上させることができるため、直接的に OSNR 改善につながる。一方、入射光パワーの上限を制限しているのが、光ファイバ中の非線形効果である。すなわち、高パワーの信号光を伝搬させると、非線形効果の一つである光カー効果により、自己位相変調 (SPM)、相互位相変調 (XPM)、四光波混合 (FWM) などの非線形現象が生じて信号劣化を引き起こしてしまう。そのため、光ファイバの非線形性を低減して入射光パワーの許容値を増加させることもまた OSNR 改善に寄与する。

低ロス低非線形ファイバへの期待は、最先端の大容量・長距離伝送技術が議論される学会報告において特に如実に表れている。光通信関連の最大の国際学会の一つである

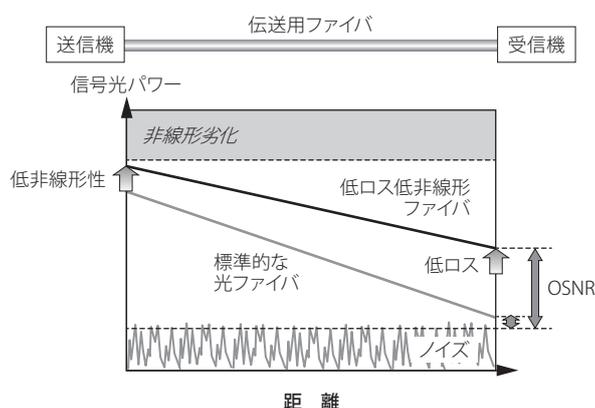


図1 光ファイバの低ロス化と低非線形化による OSNR 改善効果

OFC/NFOEC2012において報告された大容量 (1 チャネルあたりの伝送速度 100Gb/s 超)・長距離 (伝送距離 1,000km 超) 伝送実験に用いられた光ファイバは、全て低ロス低非線形ファイバであった⁽¹⁰⁾。

3. 低ロス低非線形 PSCF のファイバ特性

3-1 低ロス低非線形 PSCF 表1には、当社の低ロス低非線形 PSCF のラインナップと、波長 1550nm における特性典型値を示す。当社が以前から海底システム用途に製造・販売してきた Z Fiber™、Z-PLUS Fiber®に加えて、今回我々は Z-PLUS Fiber®の伝送ロスさらに低減した Z-PLUS Fiber® LL、および、実効断面積 (Aeff)*2 を 130μm² まで拡大して非線形性を大きく低減した Z++ の開発に成功した。

また、我々は陸上幹線系用途への PSCF 技術の展開を念頭に、PureAdvance®-80 と PureAdvance®-110 の開発にも成功した。PureAdvance®-80 は、汎用シングルモードファイバ (SSMF) の国際標準である ITU-T G.652 に準拠しており、SSMF との互換性を有しながら伝送ロスが低いメリットを有する。PureAdvance®-110 は Aeff を 110μm² に拡大して非線形性も低減しており、より長距離大容量伝送に適したファイバである。

次節以降に、これら低ロス低非線形ファイバの実現を可能にした、低ロス化、低非線形化の技術を紹介する。

3-2 低ロス化技術 一般に、波長 1550nm における光ファイバの伝送ロス成分のうち、ガラスの乱雑な構造が凍結される際の揺らぎに起因するレイリー散乱損失がその約 80% を占める。従って、光ファイバの伝送ロスを低減するには、レイリー散乱をいかに低減するかが鍵となる。レイリー散乱は、ガラスへの添加物の組成揺らぎに起因する成分と、ガラスの密度揺らぎに起因する成分からなる。前者に対しては、信号光パワーの大部分が伝搬するコア部

表1 当社低ロス低非線形 PSCF の波長 1550nm における特性典型値

用途	汎用 (参考)	海底			陸上幹線系	
製品名	PureBand®	Z Fiber™	Z-PLUS Fiber®	Z++	PureAdvance®-80	PureAdvance®-110
ITU-T 勧告	G.652.D	G.654.C	G.654.B	G.654.B	G.652.B	G.654.B
屈折率分布	ステップ型 GeO ₂ -SiO ₂	ステップ型	ディプレストクラッド型	ディプレストクラッド型	ステップ型	ディプレストクラッド型 SiO ₂ F-SiO ₂
伝送損失 [dB/km]	0.19	0.170	0.168 (標準) 0.162 (LL)	0.162	0.17	0.168
Aeff [μm ²]	80	78	112	130	80	110
n ₂ [× 10 ⁻²⁰ m ² /W]	2.34	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
分散 [ps/nm/km]	17	18.5	20.5	20.5	16	20.5

に添加物を含まないPSCFが低ロス化に最も有利である。Ge添加コアを用いたSSMFのレイリー散乱が0.94dB/km/μm⁴、波長1550nmにおける典型的な伝送ロスが0.19dB/kmであるのに対して、Z-PLUS Fiber®のレイリー散乱は0.84dB/km/μm⁴、伝送ロスが0.168dB/kmであった。今回我々はガラス密度揺らぎを低減することにも成功し、量産レベルで伝送ロスを0.162dB/km（レイリー散乱0.80dB/km/μm⁴）まで低減したZ-PLUS Fiber® LLの製造も可能とした。図2には、Z-PLUS Fiber®の伝送ロススペクトルを示す。

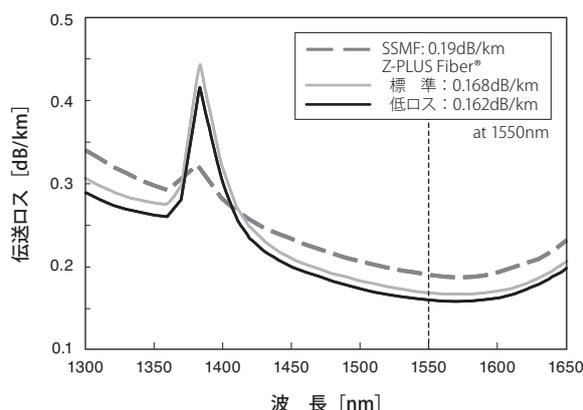


図2 Z-PLUS Fiber®の伝送ロススペクトル

3-3 低非線形化技術 光ファイバの非線形性の大きさを示す非線形係数 γ [1/W/km]は、非線形屈折率を n_2 [m²/W]、実効断面積を A_{eff} [μm²]、波長を λ [nm]として、下式で表わされる。

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{eff}} \dots\dots\dots (1)$$

従って、非線形性の低減のためには、 n_2 を低減して非線形の強さそのものを低減すること、および、 A_{eff} を拡大して伝搬光のパワー密度を低減することが有効である。 n_2 はコアの材料によって決まり、PSCFの n_2 はSSMFより約9%低いことが知られている⁽¹¹⁾。そのため、PSCFは非線形性の低減においても有利と言える。

次に A_{eff} の拡大であるが、一般に A_{eff} を拡大すると伝搬光のコアへの閉じ込めが弱くなり、曲げ損失（マクロバンドロスおよびマイクロバンドロス）の悪化を伴うため、上手く曲げ損失を低く抑える工夫が必要となる。光ファイバを小径に曲げた時に生じるマクロバンドロスを改善するため、Z-PLUS Fiber®、Z++、PureAdvance®-110にはディプレストクラッド型屈折率分布⁽⁶⁾を採用している。

一方のマイクロバンドロスは、ケーブル化時のファイバ

の微小な変形によって生じるものである。我々は、従来よりもヤング率の低いプライマリ被覆を採用し、被覆のクッション性を高めることで、マイクロバンドロスの改善を図った⁽⁸⁾。図3には、マイクロバンドロスの測定結果を示す。ここで、マイクロバンドロスは巻き張力80gのワイヤーメッシュボビン試験⁽¹²⁾により評価した。図3より、 A_{eff} の拡大とともにマイクロバンドロスは増大するが、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分かる。従来被覆を用いたZ-PLUS Fiber®は海底システムで長年の実績があるが、低ヤング率プライマリ被覆を用いることで、これと同等のマイクロバンドロスを維持したまま A_{eff} を130μm²まで拡大したZ++の開発に成功している⁽⁸⁾。

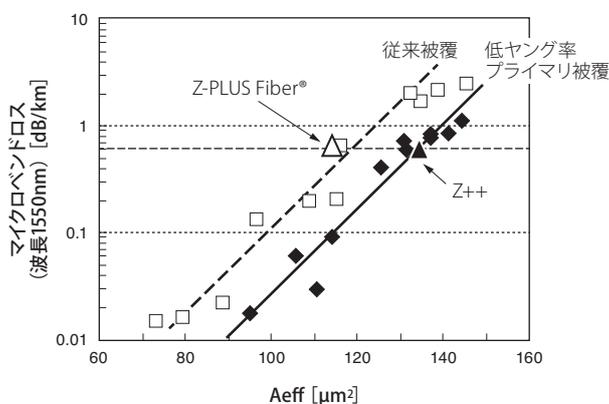


図3 低ヤング率プライマリ被覆および従来被覆を用いたファイバのマイクロバンドロス測定結果

3-4 当社低ロス低非線形PSCFを用いた長距離大容量伝送実験 長距離大容量デジタルコヒーレント伝送における、当社低ロス低非線形PSCFの優れた性能は、多くのシステムベンダによって行われた伝送実験を通して実証されている。表2には、当社低ロス低非線形PSCFを用いた最近の長距離大容量デジタルコヒーレント伝送実験の例を示す。商用化が始まった100Gb/s偏波多重QPSK伝送方式において7,000km以上の超長距離伝送に成功した⁽¹³⁾、⁽¹⁴⁾他、100Gb/s無中継伝送で最長距離となる462km伝送も報告されている⁽¹⁵⁾。また、次世代伝送方式の主流と目される偏波多重16QAM方式においても、陸上幹線系への適用可能性を示した距離1,200km以上の伝送⁽¹⁶⁾、⁽¹⁷⁾や、無中継伝送での容量・伝送距離の積を更新した例⁽¹⁸⁾も報告されている。さらには、将来の大容量伝送技術として研究が進められるsuperchannel信号伝送⁽¹⁹⁾など、いずれも高い伝送性能を示す実験において、当社PSCFが用いられている。

表2 当社低ロス低非線形PSCFを用いた、最近の長距離大容量デジタルコヒーレント伝送実験

文献	使用ファイバ	実験内容
(13)	Z-PLUS Fiber®	155ch × 100Gb/s DP-QPSK 7,200km 伝送
(14)	Z++	11ch × 112Gb/s DP-QPSK 8,500km 伝送
(15)	Z++	4ch × 100Gb/s DP-QPSK 462km 無中継伝送
(16)	Z++	16ch × 224Gb/s DP-16QAM 1,280km 伝送
(17)	Z++	5ch × 448Gb/s dual-carrier DP-16QAM 1,230km 伝送
(18)	Z++	80ch × 224Gb/s DP-16QAM 240km 無中継伝送
(19)	Z-PLUS Fiber®	1Tb/s-Superchannel (10ch × 120G-DP-QPSK) 10,000km 伝送

4. 低ロス低非線形PSCFの融着接続特性

これまでに述べた通り、A_{eff}の拡大は非線形性を低減する観点からOSNR改善に有効であるが、その一方で、A_{eff}が大きいとSSMFとのモードフィールド径(MFD)不整合が大きくなり、SSMFとの接続損失が増大してしまう。現実の伝送システムでは、ファイバは伝送路の両端で光増幅器や光伝送機器と接続されるが、ほとんどの場合これら機器のピグテールにはSSMFが用いられる。従って、SSMFとの接続損失が大きすぎると結果的にシステム全体のOSNRが劣化してしまうため、SSMFとの融着接続特性も重要なファイバ特性の一つと言える。

図4には、低ロス低非線形PSCFとSSMF(A_{eff} = 80μm²)との融着接続損失を示す。丸印とエラーバーは、一般的な単心融着機でSSMF用融着条件を用いた実験結果であり、20回の平均値と最大値、最小値を示す。また、実線はMFD不整合を元にした計算結果を示す。図4から分

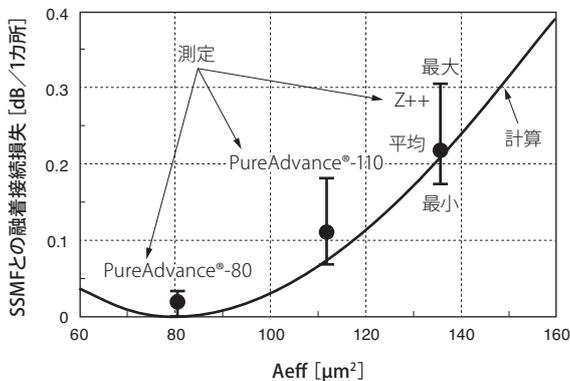


図4 PSCFとSSMFとの融着接続損失

かる通り、A_{eff}が大きいくほどMFD不整合による接続損失が大きくなり、PureAdvance®-110では0.1dB程度、Z++では0.2dB程度の接続損失が見込まれる。一方、A_{eff}を150μm²以上にまで拡大すると接続損失は0.3dBを越えると推測される。A_{eff}を過度に拡大するとケーブル化ロス増や収納部での曲げ損失が懸念されることから、A_{eff}は110~130μm²程度が適切と考えられる。

5. 低ロス低非線形PSCFの推定メリット

5-1 OSNR改善量 デジタルコヒーレント伝送における低ロス低非線形ファイバの性能は、OSNR改善量として定量的に表すことができる。文献(20)では、ある伝送システム、ファイバにおいて得られる最大のOSNR(OSNR_{max})が理論的に導出されており、スパン両端でのSSMFとの接続損失も考慮に入れるとOSNR_{max}は次式で書き直すことができる。

$$OSNR_{max} [dB] = \frac{10}{3} \log(|D| \times L_{eff}) - \frac{20}{3} \log(\gamma \times L_{eff}) - \frac{2}{3} \alpha L - \frac{2}{3} \alpha_{sp} - 10 \log(N_s) + C \dots \dots \dots (2)$$

ここで、D [ps/nm/km]は波長分散、L_{eff} [km]は実効長、α [dB/km]はファイバロス、L [km]はスパン長(中継器間隔)、α_{sp} [dB/カ所]はSSMFとの接続損失、N_sは中継スパン数、Cはファイバに依存しない定数である。(2)式の右辺第1~5項は順に、大波長分散、低非線形性、低ロス、低接続損失の効果、中継器ASEノイズ累積の影響を示す。なお、波長分散は、信号チャンネル間の位相整合を抑制して非線形劣化を低減する観点から、むしろ大きい方が好ましいと考えられる。(2)式より、伝送距離1,500km、スパン長80kmの伝送システムにおけるSSMF(α = 0.19dB/km、D = 17ps/nm/km、A_{eff} = 80μm²、n₂ = 2.34 × 10⁻²⁰m²/W)に対するOSNR改善量を、伝送ロスとA_{eff}に対する等高線で示したのが図5である。ここでは、

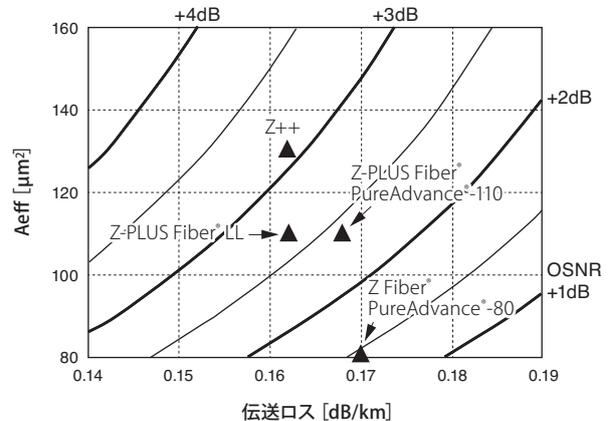


図5 スパン長80kmにおけるSSMF対比のOSNR改善量

分散は21ps/nm/km、 n_2 は $2.2 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$ に固定している。図5より、低ロス、大 A_{eff} の両方がOSNR改善に有効であり、SSMFに対して、Z-PLUS Fiber® LLで2.7dB、Z++で3.1dBのOSNR改善が見込まれる。

5-2 低ロス低非線形PSCFによる伝送距離延伸メリット (2) 式の OSNR_{max} は、伝送可能距離と直接関連付けることができる。すなわち、同じ伝送システムでファイバのみを変更する場合、ファイバの伝送ロス、 A_{eff} 、分散、SSMFとの接続ロスが分かれば、伝送距離の延伸量を容易に推測することが(2)式より可能となる。そこで、陸上幹線システムにPureAdvance®-80、-110を導入した際のスパン長延伸、伝送距離延伸の効果を(2)式を用いて定量的に見積もった。ここで、陸上伝送路に敷設されるケーブルの単長は一般に数kmであり、現実の陸上伝送路には多くのケーブル接続点が存在する。従って、陸上システムに対して試算を行う場合には、ケーブル接続による損失増加も考慮に入れる必要がある。例えば文献(21)では、ロスが20.8dB/79.1km (0.26dB/km)である既設ファイバ伝送路が報告されている。今日のSSMFの典型的なファイバロスは0.19dB/kmであるので、ここでは、いずれのファイバもケーブル敷設後には伝送ロスが+0.07dB/km増加すると仮定して試算を行った。

図6には、SSMF、NZDSF ($\alpha = 0.20 \text{dB/km}$ 、 $D = 4.0 \text{ps/nm/km}$ 、 $A_{\text{eff}} = 70 \mu\text{m}^2$ 、 $n_2 = 2.36 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$)、PureAdvance®-80、-110において、100Gb/s 偏波多重QPSK信号を1,500km伝送させるのに必要なスパン長の試算結果を示す。ここで、受信Q値は11dBで一定とし、分布ラマン増幅によるOSNR改善量は全ファイバで+2dBとして、分布ラマン増幅有り、無しの両方のケースを試算した。図6より、SSMFのスパン長は分布ラマン増幅を用いて98kmであるのに対して、PureAdvance®-110では分布ラマン増幅を用いなくても102kmまで延伸できることが分かる。さらに分布ラマン増幅も併用すれば、スパン長を119kmにまで延伸することも可能と見込まれる。これ

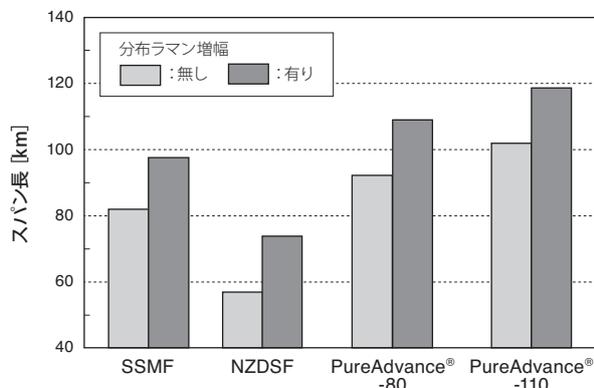


図6 100Gb/s 偏波多重QPSK信号を1,500km伝送させるのに必要なスパン長

は、SSMF対比で21km、NZDSF対比では44kmものスパン長延伸が可能であることを示している。

同様に図7には、100Gb/s 偏波多重QPSK信号に対して、各ファイバにおいてスパン長を80kmに固定したときの伝送可能距離を示す。PureAdvance®-110では、分布ラマン増幅無しで2,600km以上、分布ラマン増幅有りで4,200km以上の長距離伝送が可能であり、SSMF対比で1.7倍、NZDSF対比で3.4倍もの伝送距離延伸が見込まれる。これらの結果より、PureAdvance®-110は陸上幹線システムにおけるスパン長の延伸、伝送距離の延伸に極めて有望と考えられる。

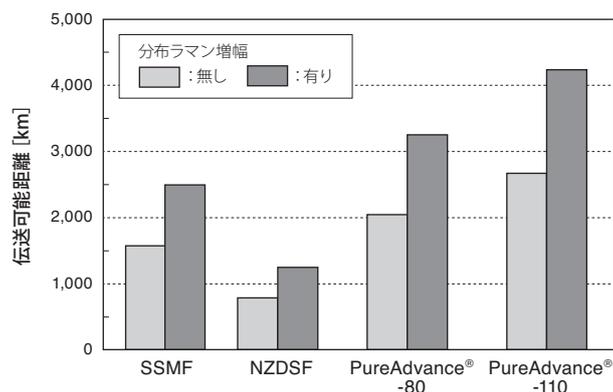


図7 スパン長80km、100Gb/s 偏波多重QPSK信号の伝送可能距離

6. 結 言

デジタルコヒーレント受信技術を用いた大容量伝送システムに適したファイバとして、当社で開発した低ロス低非線形PSCFを紹介し、そのOSNR改善量を定量的に示した。さらに、中継器間隔の延伸、伝送可能距離の延伸といった期待メリットを紹介した。低ロス低非線形PSCFは、海底、陸上幹線系いずれのシステムにおいても今後の長距離大容量伝送の根幹を支える伝送用ファイバとして最も有望と考えられる。

※1 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、低ロス、低非線形性などの面で優れた性能を持つ。

※2 Aeff

実効断面積。光ファイバ中を伝搬する光パワー分布の拡がりを表すパラメータ。モードフィールド径 (MFD) との間に $A_{\text{eff}} = \kappa \pi (\text{MFD}/2)^2$ の関係がある ($\kappa = 0.9 \sim 1.1$: ファイバ種によって異なる係数)。Aeffが大きいほど伝搬光のパワー密度を低減し、非線形効果を抑制することができる。

参考文献

- (1) D. van den Borne, V. Sleiffer, M. S. Alfiad, S. L. Jansen, "Towards 400G and beyond: how to design the next generation of ultra-high capacity transmission systems," OECC2011, 7B4_1 (July, 2011)
- (2) Y. Yamamoto, M. Hirano and T. Sasaki, "A New Class of Optical Fiber to Support Large Capacity Transmission," OFC/NFOEC2011, OWA6 (Mar. 2011)
- (3) Y. Chigusa, Y. Yamamoto, T. Yokokawa, T. Sasaki, T. Taru, M. Hirano, M. Kakui, M. Onishi, and E. Sasaoka, "Low-Loss Pure-Silica-Core Fibers and Their Possible Impact on Transmission Systems," J. Lightwave Technol, vol.23, no.11, pp.3541-3550 (Nov. 2005)
- (4) H. Kanamori, H. Yokota, G. Tanaka, M. Watanabe, Y. Ishiguro, I. Yoshida, T. Kakii, S. Itoh, Y. Asano, and S. Tanaka, "Transmission Characteristics and Reliability of Pure-Silica-Core Single-Mode Fibers," 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, "Ultralow-loss (0.1484 dB/km) pure silica core single mode fibres and extension of transmission distance," Electron. Lett., vol.38, no.20, pp.1168-1169 (2002)
- (6) T. Kato, M. Hirano, M. Onishi and M. Nishimura, "Ultra-low nonlinearity low-loss pure silica core fibre for long-haul WDM transmission," Electron. Lett., vol.35, no.19, pp.1615-1617 (Sept. 1999)
- (7) Y. Yamamoto, T. Sasaki, T. Taru, M. Hirano, S. Ishikawa, M. Onishi, E. Sasaoka, and Y. Chigusa, "Water-free pure-silica-core fibre and its stability against hydrogen ageing," Electron. Lett. vol.40, no.22, pp.1401-1403 (Oct. 2004)
- (8) Y. Yamamoto, M. Hirano, K. Kuwahara, and T. Sasaki, "OSNR-Enhancing Pure-Silica-Core Fiber with Large Effective Area and Low Attenuation," OFC/NFOEC2010, OTu12 (Mar. 2010)
- (9) M. Hirano, Y. Yamamoto, Y. Tamura, T. Haruna and T. Sasaki, "Aeff-enlarged Pure-Silica-Core Fiber having Ring-Core Profile," OFC/NFOEC2012, OTh4I.2 (Mar. 2012)
- (10) 例えば T. Kobayashi, A. Sano, A. Matsuura, Y. Miyamoto and K. Ishihara, "Nonlinear tolerant long-haul WDM transmission over 1200km using 538Gb/s/ch PDM-64QAM SC-FDM signals with pilot tone," OFC/NFOEC2012, OM2A.5 (Mar.2012)

- (11) T. Kato, Y. Suetsugu, and M. Nishimura, "Estimation of nonlinear refractive index in various silica-based glasses for optical fibers," Opt. Lett. vol.20, no.22, pp.279-2281 (Nov. 1995)
- (12) J. F. Libert, J. L. Lang, and L. Chesnoy, "The New 160 Gigabit WDM Challenge for Submarine Cable Systems," Proc. IWCS1998, pp. 375-384 (Nov. 1998)
- (13) M. Salsi, H. Mardoyan, P. Tran, C. Koebele, E. G. Charlet, S. Bigo, "155x100Gbit/s coherent PDM-QPSK transmission over 7,200km," Proc. ECOC2009, PD2.5 (Sept. 2009)
- (14) V. A. J. M. Sleiffer, D. van den Borne, M. Kuschnerov, V. Veljanovski, M. Hirano, Y. Yamamoto, T. Sasaki, S. L. Jansen, and H. de Waardt, "A comparison between SSMF and large-Aeff Pure-Silica core fiber for Ultra Long-Haul 100G transmission," ECOC2011, Mo.2.B.6 (Sept. 2011)
- (15) H. Bissessur, P. Bousselet, D. Mongardien, G. Boissy, J. Lestrade, "4 x 100Gb/s Unrepeated Transmission over 462km Using Coherent PDM-QPSK Format and Real-Time Processing," ECOC2011, Tu.3.B.3 (Sept. 2011)
- (16) S. Oda, T. Tanimura, T. Hoshida, Y. Akiyama, H. Nakashima, K. Sone, Y. Aoki, W. Yan, Z. Tao, L. Dou, L. Li, J. C. Rasmussen, Y. Yamamoto, and T. Sasaki, "Experimental Investigation on Nonlinear Distortions with Perturbation Back-Propagation Algorithm in 224 Gb/s DP-16QAM Transmission," OFC/NFOEC2012, OM3A.2 (Mar. 2012)
- (17) V. A. J. M. Sleiffer, D. van den Borne, V. Veljanovski, M. Kuschnerov, M. Hirano, Y. Yamamoto, T. Sasaki, S. L. Jansen, and H. de Waardt, "Transmission of 448-Gb/s Dual-Carrier POLMUX-16QAM Over 1230 km with 5 Flexi-Grid ROADMs Passes," OFC/NFOEC2012, OW4C.3 (Mar.2012)
- (18) S. Oda, T. Tanimura, Y. Cao, T. Hoshida, Y. Akiyama, H. Nakashima, C. Ohshima, K. Sone, Y. Aoki, M. Yan, Z. Tao, J. C. Rasmussen, Y. Yamamoto, and T. Sasaki, "80 x 224 Gb/s Unrepeated Transmission over 240 km of Large-Aeff Pure Silica Core Fibre without Remote Optical Pre-amplifier," ECOC2011, Th.13.C.7 (Sept. 2011)
- (19) E. Torrenco, R. Cigliutti, G. Bosco, G. Gavioli, A. Alaimo, A. Carena, V. Curri, F. Forghieri, S. Piciaccia, M. Belmonte, A. Brinciotti, A. La Porta, S. Abrate, P. Poggiolini, "Transoceanic PM-QPSK Terabit Superchannel Transmission Experiments at Baud-Rate Subcarrier Spacing," ECOC2011, We.7.C.2 (Sept.2011)
- (20) 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 (Mar. 2013)
- (21) T. J. Xia, G. A. Wellbrock, Y-K. Huang, E. Ip, M-F. Huang, Y. Shao, T. Wang, Y. Aono, T. Tajima, S. Murakami, and M. Cvijetic, "Field Experiment with Mixed Line-Rate Transmission (112-Gb/s, 450-Gb/s, and 1.15-Tb/s) over 3,560 km of Installed Fiber Using Filterless Coherent Receiver and EDFAs Only," OFC/NFOEC2011, PDP A3 (Mar. 2011)

執筆 者

山本 義典*: 光通信研究所 主査



平野 正晃 : 光通信研究所 主席

佐々木 隆 : 光通信研究所 グループ長

*主執筆 者