



陸上光伝送システム用超低損失 ITU-T G.654.E ファイバ “PureAdvance”

Ultra-Low Loss ITU-T G.654.E Fiber “PureAdvance” for
Terrestrial Optical Transmission Systems

山本 義典*
Yoshinori Yamamoto

平野 正晃
Masaaki Hirano

当社のPureAdvanceは、0.17 dB/km以下の低伝送損失、および、実効断面積110~125 μm^2 の拡大されたコアを有し、陸上幹線光伝送システムに適したITU-T G.654.Eに準拠する光ファイバである。今回、その伝送損失の0.16 dB/km以下（典型値0.156 dB/km）への低減に成功し、商用出荷を開始した。この超低損失化により、陸上幹線光伝送路における伝送特性をさらに改善し、400 Gb/s超といった高速光伝送も可能となる。本光ファイバは、陸上幹線系通信網における大容量光通信の実現に貢献すると期待される。

PureAdvance is an optical fiber that exhibits low attenuation of 0.17 dB/km or lower and an enlarged effective core area of 110-125 μm^2 . This fiber is fully compliant with ITU-T G.654.E, and suitable for terrestrial long-haul optical transmission systems. Sumitomo Electric Industries, Ltd. has improved the attenuation of PureAdvance to 0.16 dB/km or lower (typically 0.156 dB/km), and started the commercial supply. With this ultra-low attenuation, transmission performance of terrestrial long-haul optical links can be further improved, enabling high-speed optical transmission at 400 Gb/s and beyond. This fiber will contribute to the realization of high-capacity optical communication in terrestrial long-haul networks.

キーワード：光ファイバ、G.654.E、低損失、純シリカコア光ファイバ

1. 緒 言

IoTやAIを活用したサービスや、デジタルトランスフォーメーション（DX）などの進展に伴い、データトラフィックは指数関数的な増加を続けている。このトラフィックを支えるデジタル基盤として、幹線系光通信網は社会に不可欠なライフラインとなっており、今後もさらなる大容量化が求められている。

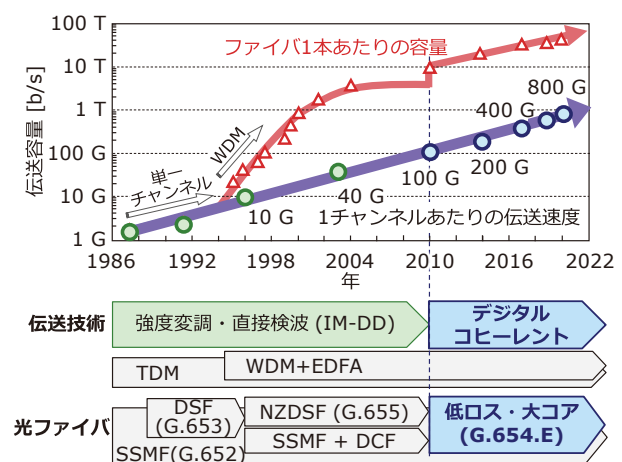
当社は、陸上光伝送システム向けに超低損失ITU-T G.654.E^{(1)*1}ファイバPureAdvanceの製品化と商用供給を行っており⁽²⁾、陸上幹線網における大容量伝送の経済的な実現に貢献している。本稿では、低伝送損失および拡大コアを特長とするG.654.Eファイバが陸上幹線用光ファイバとして注目されるようになった背景を概説した後、当社の超低損失G.654.EファイバPureAdvanceについて、0.16 dB/km以下への低損失化を含む技術進捗を述べる。さらに、PureAdvanceの導入により期待されるシステムメリットを議論する。

2. 長距離大容量デジタルコヒーレント伝送に適したG.654.Eファイバ

まず、陸上幹線用光ファイバとしてG.654.Eファイバが注目されるようになった背景を述べる。

図1には、商用化された長距離光伝送システムの伝送容量の進展と、主に用いられた伝送技術および光ファイバの変遷を示す。2000年代以前、40 Gb/s以下のシステムでは、伝送方式として強度変調・直接検波（IM-DD）方式が

主に採用されてきた。IM-DD方式における長距離化の制限要因の一つが、光ファイバの波長分散であった。IM-DD方式では光パルスの点灯/消灯を切り替えることでデジタル情報を伝送させるが、波長分散によって光パルスに生じる歪が伝送距離とともに累積し、光パルスの点灯/消灯を判別できなくなってしまうためである。そこで、波長分散を小さく抑えた、ITU-T G.655に準拠するNZDSFが10~40 Gb/sの陸上幹線網に多く用いられた。しかしながら、



TDM: 時分割多重, WDM: 波長分割多重, EDFA: エルビウム添加工率ファイバ増幅器, SSMF: 標準的なシングルモードファイバ, DSF: 分散シフトファイバ, NZDSF: ノンゼロ分散シフトファイバ, DCF: 分散補償ファイバ
※括弧内は各光ファイバが準拠するITU-T勧告

図1 伝送容量の進展と、伝送技術および光ファイバの変遷

100 Gb/s以上の高速信号では小さなパルス歪が信号品質に大きな影響を与えるため、IM-DD方式では長距離伝送の実現は技術的・経済的に困難であった。

一方、2010年代から導入されたデジタルコヒーレント方式では、光の強度と位相を用いてデジタル情報を伝送させるが、受信端で光信号を電気信号に変換した後にデジタル信号処理 (DSP) による信号等化を行う。波長分散による光パルス歪はDSPによって補正することができるため、100 Gb/s以上の高速信号でも長距離伝送が可能となった。

デジタルコヒーレント方式での大容量化を実現するための最大の課題は、光信号対雑音比 (OSNR)^{*2}の改善である。例えば、100 Gb/sから200 Gb/sに光信号を2倍に高速化する場合、同じOSNRでは理論的に伝送可能距離は約1/5に短くなってしまい、同じ距離を伝送させるには約7 dBのOSNR改善が必要となる (図2)。

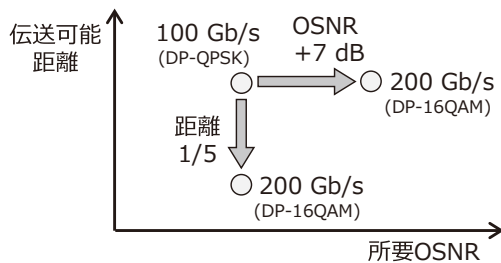


図2 高速化に伴う伝送可能距離の短縮と所要 OSNRの上昇

このような経緯から、光ファイバへの要求も大きく変化することとなった。すなわち、かつてのIM-DD方式では波長分散の抑制が求められていたのに対して、デジタルコヒーレント方式ではOSNR改善が最大の要求となった。OSNR改善のために光ファイバに求められるのが、低損失とコア径拡大である。低損失化により出射光パワーを向上できること、および、コア径拡大により光ファイバの非線形性を低減することで入射光パワー許容値を向上できることの双方の効果により、効果的にOSNR改善することができるた

めである (図3)。この理由から、低損失・拡大コアを特長とするITU-T G.654.Eファイバには、長距離・大容量デジタルコヒーレント伝送に最も適した光ファイバとして大きな注目が集まっている。

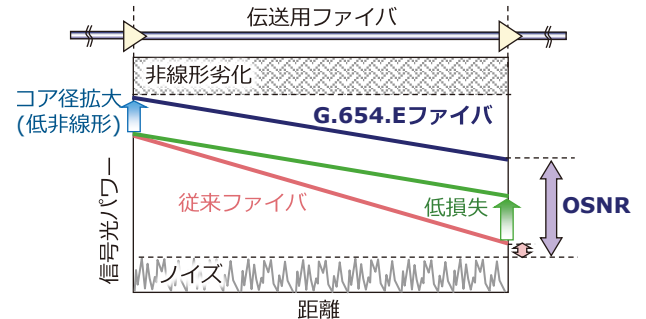


図3 低損失・コア径拡大G.654.EファイバによるOSNRの改善

3. G.654.EファイバPureAdvance

当社は極低損失光ファイバのパイオニアであり、純シリカコア光ファイバ (PSCF)^{*3}であるZ FiberおよびZ-PLUS Fiberを30年以上に亘り継続的に開発し⁽³⁾、主に海底ケーブル用に商用供給をしてきた⁽⁴⁾。近年では、低伝送損失の世界記録である0.1419 dB/kmの実現⁽⁵⁾や、商用製品として世界で最も低い伝送損失0.144 dB/kmを有するZ-PLUS Fiber 150の量産化⁽⁶⁾に成功している。

これら極低損失PSCF技術を適用することで、当社は陸上用低損失光ファイバPureAdvanceをいち早く開発し、100Gb/s以上の信号を伝送する陸上幹線伝送路向けに製品供給を行ってきた。表1に、ITU-T G.654.Eに準拠するPureAdvance-110とPureAdvance-125、および、SSMFと同等のコア径を有しG.652.BまたはG.654.Cに準拠するPureAdvance-80の光学特性をまとめた⁽⁷⁾。継続的な開発により、0.17 dB/km以下 (典型値0.162 dB/km) であったPureAdvance-110、-125の伝送損失を、0.16 dB/km以下 (0.156 dB/km) に改善し (図4)、2022年より商用出荷を開始した。我々の知る限り、これは陸上用光ファ

表1 PureAdvanceの光ファイバ特性

	PureBand (比較例, SSMF)	PureAdvance-80	PureAdvance-110	PureAdvance-125	ITU-T G.654.E 勧告
ITU-T勧告	G.652.D	G.654.C/G.652.B	G.654.E	G.654.E	G.654.E
モードフィールド径 (MFD) @1550nm	Typ. 10.3 μm	Typ. 10.1 μm	Typ. 11.7 μm	Typ. 12.5 μm	11.5-12.5 μm ±0.7 μm
実効断面積 (A _{eff}) @1550nm	Typ. 80 μm ²	Typ. 85 μm ²	Typ. 110 μm ²	Typ. 125 μm ²	-
伝送損失 @1550nm	≤ 0.20 dB/km Typ. 0.19 dB/km	≤ 0.17 dB/km Typ. 0.165 dB/km	≤ 0.16 dB/km Typ. 0.156 dB/km	≤ 0.16 dB/km Typ. 0.156 dB/km	≤ 0.23 dB/km (ケーブル)
ケーブルカットオフ波長	≤ 1260 nm	≤ 1520 nm (G.654.C) ≤ 1260 nm (G.652.B)	≤ 1520 nm	≤ 1520 nm	≤ 1530 nm

イバとして世界で最も低い伝送損失である。図5には、改善前後それぞれファイバ長10万km以上での伝送損失の分布を示す。改善後（本報告）の平均伝送損失は0.156 dB/kmであり、また、標準偏差（σ）も0.001 dB/kmと小さく、量産性に優れることも確認した。

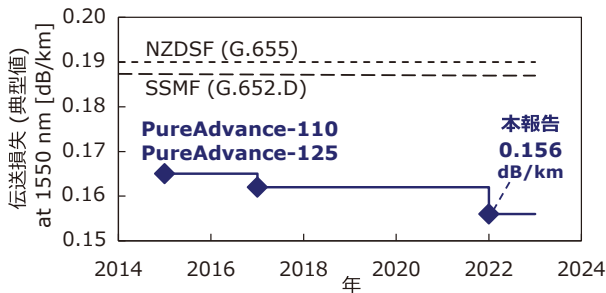


図4 PureAdvanceの伝送損失低減の進展

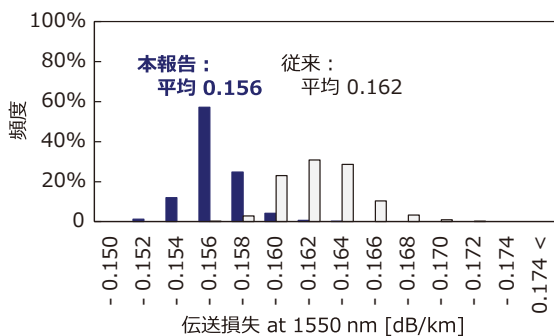


図5 PureAdvance-110, -125の伝送損失の分布

一方、実際の陸上伝送路ではケーブル単長は数km程度であるため、数km毎に同種光ファイバ間の接続が存在する。加えて、光ファイバは中継局内でEDFAなどの光ファイバ機器のピグテールであるSSMFと接続される。そのため、同種光ファイバ間およびSSMFとの接続損失が低いことも重要となる。表2にはPureAdvanceの典型的な接続損失を示す。ここでは、融着接続時の光ファイバ間のコア軸ずれ量を0.3 μmと仮定した計算値⁽⁸⁾である。表2より、同

表2 PureAdvanceの典型的な接続損失

	Pure Band (比較例)	Pure Advance -80	Pure Advance -110	Pure Advance -125
MFD (典型値)	10.3 μm	10.1 μm	11.7 μm	12.5 μm
同種ファイバ間の接続損失	0.01 dB	0.01 dB	0.01 dB	0.01 dB
SSMF (G.652.D) との接続損失	0.01 dB	0.02 dB	0.08 dB	0.16 dB

種接続損失はSSMF同士と同等の低い値に抑えられる。一方、SSMFとの接続損失は、MFD不整合のためにSSMF同士の接続損失に比べると僅かに高いが、PureAdvance-110では0.1 dB以下の十分低い損失で接続することが可能である。

次にPureAdvanceの伝送性能を評価するため、ファイバ性能指数^{(9),(10)}を用いて計算した200 Gb/s信号の伝送可能距離を図6に示す。伝送可能距離は、用いる送受信機や光増幅器の性能、中継器間隔、ケーブルの接続点数や敷設条件などによっても異なるが、一例として図6では、超低損失と拡大コアを持つPureAdvance-110は、SSMF、NZDSFに対してOSNRをそれぞれ+3.2 dB、+6.2 dB改善することができ、SSMFに比べて2.1倍、NZDSFに比べて4.2倍の大幅な伝送距離延伸が可能という計算結果が得られた。また、PureAdvance-125は、PureAdvance-110に比べてさらに1.04倍程度の長距離化が可能となる。

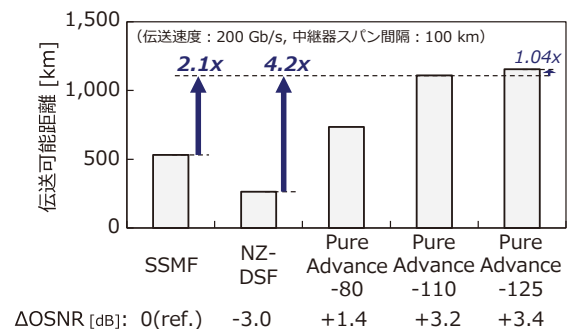


図6 PureAdvanceにおける200 Gb/s 伝送可能距離

4. PureAdvanceによるシステムメリット

PureAdvanceの導入により、伝送システムのコスト削減や、大容量伝送へのアップグレード可能性が期待される。本章では、全長1,200 kmの陸上伝送路をモデルに、2つのケースに対してファイバ性能指数を用いて伝送可能距離を計算することでPureAdvanceによるシステムメリットを検討する。

4-1 ケース1：200 Gb/s伝送システムにおける中継器台数の削減

長距離光伝送路では、光ファイバ伝送で減衰した光信号を増幅するため中継器（EDFA）が数十kmおきに配置される。この中継器の台数を削減することは、それ自体のコストに加えて、設置のための建屋や電力、設備管理も削減可能となるため、コストおよびカーボンフットプリントの削減など大きな利点がある。

200 Gb/s信号伝送における中継器間隔を (a) NZDSF、(b) SSMF、(c) PureAdvance-110について計算した結果を図7に示す。まずNZDSFは、中継器間隔を40 km以下に

短縮しても760 km以上を伝送させることができず、1,200 km伝送の実現は経済的に困難であると推測される。次にSSMFでは、中継器間隔を55km（中継器台数は21台）とすることで1,200 km伝送が可能と見積られる。一方、PureAdvance-110は、超低損失と拡大コアの効果により中継器間隔を95 kmに延伸でき、中継器台数を12台にまで削減することができる。

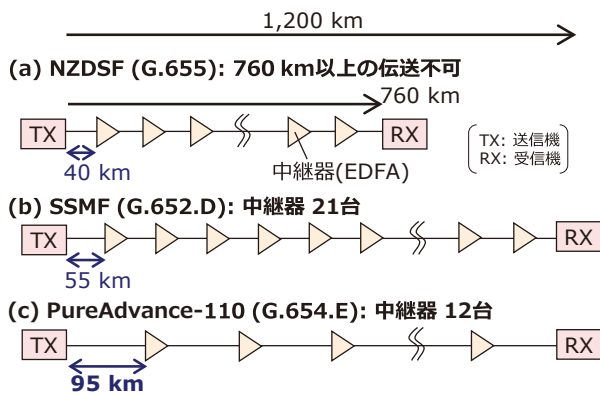


図7 200 Gb/s伝送における中継器台数の削減

4-2 ケース2：400 Gb/sへのアップグレード

光信号を400 Gb/sに高速化する場合、図2で示した通り伝送可能距離は著しく短くなるため、再生中継局を挿入して劣化信号の再生が必要となる。再生中継局には、各信号チャンネルに1台ずつ再生中継器^{*4}が設置されるため、再生中継局を1か所でも減らすことができれば、システム全体のコストや消費電力を大幅に削減することができる。

400 Gb/s信号の伝送可能距離を計算した結果を図8に示す。ここで、SSMFとPureAdvance-110の中継器間隔は80 kmとし、NZDSFは前節と同様に伝送可能距離が著しく短くなるため、67 kmと短い中継器間隔を想定した。

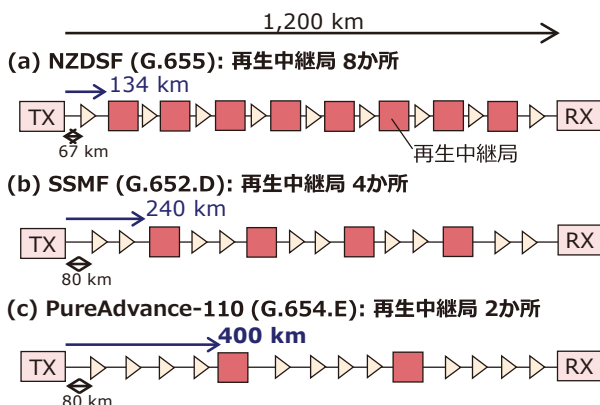


図8 400 Gb/s伝送における再生中継局数の削減

図8より、NZDSF、SSMFの伝送可能距離はそれぞれ134 km、240 kmと見積られる。従って、1,200 km伝送にはそれぞれ8、4か所の再生中継局が必要となる。一方、PureAdvance-110は400 kmの伝送が可能であり、再生中継局数を2か所まで削減することができる。このため、NZDSFやSSMFに比べてシステムコストの大幅な削減および消費電力の低減が可能となる。

5. 結 言

G.654.EファイバPureAdvanceは、超低損失、拡大コアといった優れた性能を有することから、400 Gb/sなどの長距離デジタルコヒーレント光伝送に最も適した光ファイバであり、陸上幹線光伝送システムの大容量化の経済的な実現に貢献すると考えられる。

当社は今後も超低損失光ファイバの技術開発と量産化を進め、社会の要請に応える製品を提供していく。

用語集

※1 ITU-T G.654.E

ITU-T (国際電気通信連合 電気通信標準化部門) は、ICTインフラに関する国際標準として勧告を作成する国連機関。G.654.Eは、100 Gb/s以上のデジタルコヒーレントシステムをサポートするための陸上用カットオフシフト光ファイバケーブルについてのITU-T勧告。

※2 光信号対雑音比 (OSNR)

光信号強度と光雑音強度との比。OSNRが低いと信号の識別が困難になるため、目標の信号品質を得るにはOSNRが高いことが望ましい。特に、高速伝送ではより高いOSNRが求められる。

※3 純シリカコアファイバ (PSCF)

純シリカ (SiO₂) からなるコアを持つ光ファイバ。SSMFやNZDSFがGeO₂添加コアを持つのに対して、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、本質的に低損失性に優れている。

※4 再生中継器

伝送により品質が劣化した光信号を電気信号に変換して信号処理により再生した後、再び光信号に変換して送出する装置。再生中継局に設置される再生中継器の台数は、WDM信号の波長数×光ファイバ心数となる。

* PureAdvance、Z Fiber、Z-PLUS Fiber、PureBandは住友電気工業(株)の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) Recommendation ITU-T G.654 (2020)
- (2) 住友電気工業㈱プレスリリース (2018年5月22日)
<https://sei.co.jp/company/press/2018/05/prs046.html>
- (3) 金森、「光ファイバ50年史」、SEIテクニカルレビュー、第197号、pp.10-16 (2020)
- (4) 住友電気工業㈱光ファイバ製品ウェブサイト (極低損失海底ファイバ Z Fiber シリーズ)
<https://global-sei.com/fttx/optical-fibers/z-fiber/>
- (5) Y. Tamura, H. Sakuma, M. Suzuki, Y. Yamamoto, K. Shimada, Y. Honma, K. Sohma, T. Fujii, and T. Hasegawa, "Lowest-Ever 0.1419-dB/km Loss Optical Fiber," OFC2017, Th5D.1 (2017)
- (6) 住友電気工業㈱プレスリリース (2020年12月18日)
<https://sei.co.jp/company/press/2020/12/prs125.html>
- (7) 住友電気工業㈱光ファイバ製品ウェブサイト (極低損失陸上幹線ファイバ PureAdvance シリーズ)
<https://global-sei.com/fttx/optical-fibers/pureadvance/>
- (8) D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splices," Bell Sys. Tech. J., Vol. 56, No. 5, pp.703-718 (1977)
- (9) P. Poggiolini, "The GN Model of Non-Linear Propagation in Uncompensated Coherent Optical Systems," J. Lightwave Technol., vol.30, No.24, pp.3857-3879 (2012)
- (10) T. Hasegawa, Y. Yamamoto, and M. Hirano, "Optimal fiber design for large capacity long haul coherent transmission," Optics Express, Vol.25, No.2, pp.706-712 (2017)

執 筆 者

山本 義典* : 光通信事業部 主席
2015年度 櫻井健二郎氏記念賞受賞



平野 正晃 : 光通信事業部 グループ長
2015年度 櫻井健二郎氏記念賞受賞



*主執筆者