



陸上幹線ネットワーク向け低損失光ファイバ PureAdvance

Low-Loss Optical Fibers for Terrestrial Long-Haul Networks, PureAdvance

山本 義典*
Yoshinori Yamamoto

長谷川 健美
Takemi Hasegawa

長田 尚理
Naomichi Osada

陸上幹線ネットワークにおける大容量伝送を支えるため、ITU-T G.654.E 勧告に準拠する低損失・低非線形光ファイバ PureAdvance を開発し、供給を行っている。PureAdvance は、陸上伝送路で実運用可能なケーブル化が可能、接続損失が低い、ラマン増幅を適用可能といった、実際に陸上伝送路として敷設する際に要求される実用的な性能を有する。また、PureAdvance を用いた伝送システムは、従来の光ファイバを用いた伝送システムに比べて高い伝送性能を有することから、PureAdvance は、幹線伝送網を始め、データセンタ間伝送や、海底システム陸揚局～データセンタ間伝送などの陸上伝送路に最適な光ファイバである。

We have developed "PureAdvance," a low-loss and low-nonlinearity pure silica core fiber complying with ITU-T G.654.E, and started supplying it for terrestrial long-haul networks. The excellent practicality of PureAdvance, including reliable terrestrial cabling, low splice loss, and stable Raman amplification, have been demonstrated for actual deployment as terrestrial links. Transmission systems using PureAdvance exhibit higher transmission performance than those with SSMF or NZDSF, making PureAdvance ideal as a transmission medium to support long-haul, high-capacity terrestrial applications including telecom trunk lines, datacenter interconnection, and transmission lines between submarine landing stations and datacenters.

キーワード：光ファイバ、純シリカコアファイバ、低損失、陸上幹線伝送路、ITU-T G.654.E

1. 緒言

5G サービスの導入や、多様なインターネットコンテンツの利用増加、リモートワークの普及などにより、世界中の通信トラフィック需要は指数関数的な増加を続けている。この需要増に対応するため、大容量の光信号を長距離に亘って効率的に伝送できる、高性能な光ファイバへのニーズがますます強いものとなっている。

このニーズに応えるべく、当社は、ITU-T G.654.E^{(1)*1} に準拠する低損失光ファイバ PureAdvance を開発し、陸上幹線伝送路向けに供給を行っている。光伝送システムの大容量化には光信号対雑音比 (OSNR) の向上が必要であるが、本ファイバは伝送損失および非線形性が低いことから効率的に OSNR を向上することができる。この利点から、本ファイバの用途として以下が挙げられる。

- 陸上幹線系光通信ネットワーク
- 大陸横断などの長距離伝送システム
- データセンタ間接続
- 海底光ケーブルシステムの陸揚局と、内陸にあるデータセンタとの接続
- 遠隔地との無中継接続
- 量子暗号通信用の伝送路
- その他、低損失が必要な光通信伝送路

一方、本ファイバを実際の陸上伝送路に導入するには、陸上伝送路で実運用可能なケーブル化が可能であること、光ファイバ間の接続損失が低いこと、ラマン増幅を適用可能であることも要求される。

本稿では、PureAdvance が優れた伝送性能を有しつつ、これら陸上伝送路に適用するための実用上の要求特性も満たすことを示す。加えて、本ファイバ導入によって期待されるシステムメリットを述べる。

2. PureAdvance のファイバ特性

本ファイバの屈折率分布の概略図とファイバ特性を図1と表1にそれぞれ示す。本ファイバの大きな特長は、伝送損失が低いことと、実効断面積 (A_{eff}) が大きく非線形性が低いことである。OSNR は一般に、光ファイバの損失を補償する光増幅器で発生する増幅器雑音と、光ファイバ中の非線形光学現象によって生じる非線形雑音の二つの雑音に支配されるため、光ファイバの伝送損失および非線形性を低く抑えることは、OSNR を向上させる最も効果的な手段の一つである。

本ファイバは、図1に示す通り、光パワーの大部分が通るコアを純シリカとすることで、低い伝送損失を実現している。当社は30年以上に亘って低損失純シリカコア光ファイバ (PSCF) の開発と量産を行い、主に海底光ケーブル向けに製品供給してきた実績がある。最近でも、低伝送損失の世界記録である0.1419dB/kmの実現⁽²⁾や、極低損失0.144dB/kmのPSCFの量産化に成功しており⁽³⁾、これら低損失PSCF技術を適用することで、最大0.17dB/km、典型値0.162dB/kmという低伝送損失を実現した。

表1の通り、PureAdvance として A_{eff} の異なる3種類の

表1 PureAdvanceの光ファイバ特性

	PureBand (比較例, SSMF)	PureAdvance-80		PureAdvance-110	PureAdvance-125
ITU-T勧告	G.652.D	G.652.B	G.654.C	G.654.E	G.654.E
MFD@1310nm	9.2±0.4μm	Typ. 9.0μm	-	-	-
MFD@1550nm	Typ. 10.3μm	Typ. 10.0μm	Typ. 10.3μm	Typ. 11.5μm	Typ. 12.4μm
A _{eff} @1550nm	Typ. 80μm ²	Typ. 80μm ²	Typ. 80μm ²	Typ. 110μm ²	Typ. 130μm ²
伝送損失 @1310nm	Max. 0.35dB/km	Max. 0.31dB/km	-	-	-
伝送損失 @1550nm	Max. 0.20dB/km	Max. 0.17dB/km Typ. 0.164dB/km	Max. 0.17dB/km Typ. 0.164dB/km	Max. 0.17dB/km Typ. 0.162dB/km	Max. 0.17dB/km Typ. 0.162dB/km
ケーブルカットオフ波長	Max. 1260nm	Max. 1260nm	Max. 1530nm	Max. 1530nm	Max. 1530nm

光ファイバをラインナップしている。PureAdvance-80は標準的なシングルモードファイバ (SSMF) と同等のモードフィールド径 (MFD) を有している。一方、ITU-T G.654.Eに準拠するPureAdvance-110と-125は、A_{eff}を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光ファイバである。なお、A_{eff}が大きいと曲げ損失が増大する懸念があるが、図1に示すディプレストクラッド型屈折率分布⁽⁴⁾を用いることで、A_{eff}を110, 130μm²に拡大しつつ、SSMFよりも低いまたは同等の曲げ損失を実現している。

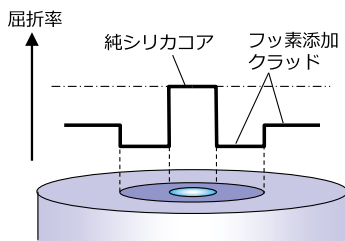


図1 PureAdvanceの屈折率分布の概略図

3. PureAdvanceの陸上伝送路への適用

3-1 陸上伝送路に要求される光ファイバ特性

一般的な陸上幹線伝送路は、図2に示す通り、送信機 (TX)、光ケーブル、中継器、再生中継機、受信機 (RX) から構成される。このような陸上幹線伝送路に用いる光ファイバへの実用的な要求特性として、次の3つが挙げられる。

- 陸上伝送路で実運用可能なケーブル化
- 同種ファイバ間、および、SSMFや海底ファイバとの低い接続損失
- ラマン増幅を適用可能であること

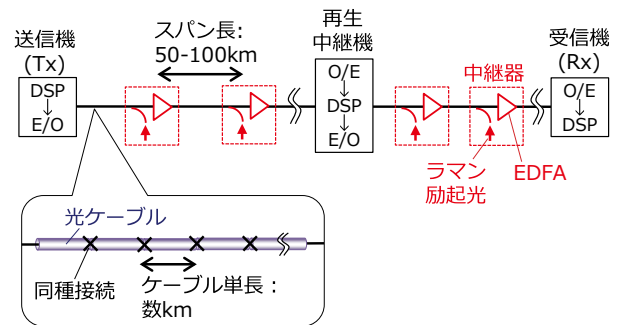
本章では、PureAdvanceについて、これら実用的な陸上幹線伝送路用ファイバとしての要求特性を評価する。

3-2 陸上伝送路での実運用に適したケーブル化

陸上伝送路用の光ケーブルでは、海底光ケーブルに比べてより多心の光ファイバが高密度に収納される。また、管

路、地中、あるいは架空線上など、様々な環境に敷設される。そのため、陸上伝送路に適した実運用可能なケーブル化が課題となるが、我々は、PureAdvanceが陸上用ケーブルにおいても良好なケーブル特性と信頼性を有することを確認している。一例として、日本国内で広く一般的に使用されている4心テープスロット型ケーブル構造 (図3) で200心のPureAdvance-110のケーブル化を行い、ケーブル化後も典型値0.17dB/km以下の低伝送損失と優れた信頼性を確認した⁽⁵⁾。本ケーブルは、陸上幹線伝送路向けに供給されている。

また、文献 (6)、(7) では、当社PureAdvance-110を含め複数のファイバメーカで製造されたA_{eff} = 110~130μm²のG.654.E光ファイバを用いて作製した96心および64心のルースチューブ型ケーブルを中国国内の管路および架空



[DSP: デジタル信号処理、E/O: 電気・光変換
O/E: 光・電気変換、EDFA: エルビウム添加ファイバ増幅器]

図2 陸上幹線光伝送路の概略図

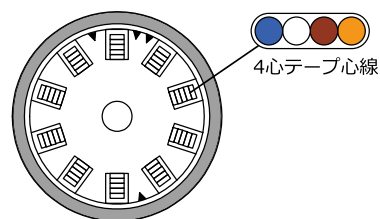


図3 PureAdvance-110を用いた4心テープスロット型200心ケーブルの構造

線上にそれぞれ敷設し、良好な特性を確認した結果が報告されている⁽⁶⁾。敷設されたケーブルにおいて400Gb/s波長分割多重 (WDM) 伝送評価も行われ、伝送距離430km、150kmに亘って良好な伝送性能を示すことも実証されている⁽⁷⁾。

3-3 同種および異種ファイバ間接続特性

(1) 光ファイバ接続損失

陸上伝送路では、ケーブル単長が1~数km程度に制限されるため、伝送路中には同種光ファイバ間の接続が多く存在する。また、光ファイバはスパン両端で中継器と接続されるが、中継器のピグテールには多くの場合SSMFが用いられるため、SSMFとの接続も存在する。あるいは、海底陸揚局に接続する場合には海底用光ファイバと直接接続されることもある。従って、同種ファイバ間、および、SSMFや海底用光ファイバとの異種ファイバ間の接続損失を低く抑えることもまた要求される。

光ファイバの接続損失 α_{sp} [dB]は、接続する光ファイバ間の角度ずれが無視できるほど小さいとき、以下の式で表すことができる⁽⁸⁾。

$$\alpha_{sp}[\text{dB}] = -10\log\left\{\left(\frac{2\cdot\text{MFD}_1\cdot\text{MFD}_2}{\text{MFD}_1^2+\text{MFD}_2^2}\right)^2 \cdot \exp\left[-\frac{8d^2}{\text{MFD}_1^2+\text{MFD}_2^2}\right]\right\} \dots (1)$$

ここで、dは光ファイバ間の軸ずれ量 [μm]、MFD₁とMFD₂は各ファイバのMFD [μm]である。式(1)より、同種ファイバ間で接続する場合 (MFD₁=MFD₂) には光ファイバ間の軸ずれとMFDの影響が支配的である一方、異種ファイバ間の接続の場合 (MFD₁≠MFD₂) には、MFDの差 (MFD不整合) が大きいほど接続損失が大きくなる。

(2) 同種ファイバ接続損失

図4は、分散シフトファイバ (DSF)、SSMF、PureAdvance-110の同種接続損失の測定結果を示す⁽⁹⁾。接続は市販のコア直視型融着接続機を用いて行い、20回の接続を行ったときの平均、最大、最小の接続損失を示している。また、式(1)においてd=0.3μmとした計算結果も破線で示す。図4の通り、MFDが大きいほど同じ軸ずれ量に対して接続損失を小さく抑えることができ、PureAdvance-110

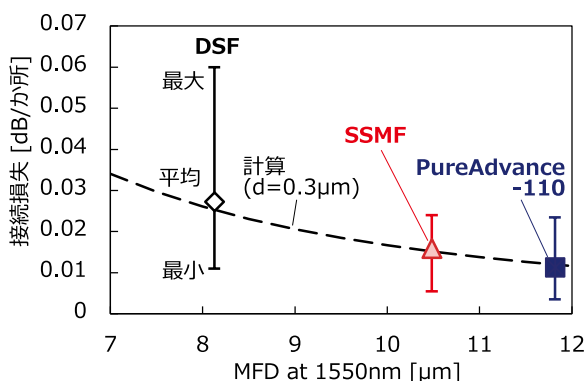


図4 同種ファイバ間の接続損失

の平均接続損失は0.011dBと、SSMF、DSFに比べてそれぞれ0.005、0.018dB小さい。この差はさほど大きくないようにも見えるが、例えばスパン長100kmの伝送路の1km毎 (99か所) に同種接続がある場合を仮定すると、SSMF、DSFとの1スパン当たりトータル接続損失の差はそれぞれ0.5、1.8dBと比較的大きな差となる。

(3) SSMF、海底用光ファイバとの異種接続損失

表2に、PureAdvanceと、SSMFおよび海底用光ファイバとの接続損失について、式(1)でd=0.3μmとして計算した値を示す。SSMFとの接続損失については、PureAdvance-80および-110では0.1dB以下の小さな値に抑えられる。一方、海底ケーブルにはA_{eff} 80~150μm²の光ファイバが用いられるが、PureAdvance-110は、いずれの海底用光ファイバともMFD不整合を比較的小さな値に抑えており、0.1dB以下の低い損失で接続することができる。

表2 PureAdvanceと、SSMFおよび海底用光ファイバとの接続損失

	PureBand (SSMF)	Pure Advance-80	Pure Advance-110	Pure Advance-125	
MFD (Typ.) [μm]	10.3	10.3	11.5	12.4	
A _{eff} (Typ.) [μm ²]	80	80	110	130	
融着損失 [dB]	汎用 SMF	0.02	0.02	0.07	0.16
	海底ファイバ 80μm ²	0.02	0.02	0.07	0.16
	110μm ²	0.07	0.07	0.02	0.04
	130μm ²	0.16	0.16	0.04	0.02
	150μm ²	0.28	0.28	0.09	0.03

3-4 ラマン増幅の適用

(1) ラマン利得係数

中継器では、減衰した信号光パワーを増幅するため主にエルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) が用いられるが、陸上幹線伝送路では、伝送性能改善と伝送距離延伸のためしばしば補助的にラマン増幅が用いられる。そのため、ラマン増幅を適用可能であることも陸上幹線用光ファイバには求められる。

ラマン増幅は光ファイバ中に励起光を伝搬させたときに生じる誘導ラマン散乱を利用した光増幅であり、その利得G_{Raman} [dB]は下式で表される。

$$G_{Raman}[\text{dB}] = 10\log\left[\exp\left(\frac{g_R}{A_{eff}} \cdot P_{pump} \cdot L_{eff}\right)\right] \dots (2)$$

ここで、g_R/A_{eff} [1/W/km]はラマン利得係数、P_{pump} [W]は励起光パワーである。L_{eff} [km]は実効長であり、L_{eff} = (1-exp[α_p · L]) / α_p (α_p: 励起光波長における伝送損失

[1/km]、L：スパン長 [km] で表される。

一般に、ラマン増幅の励起光波長は1450nm付近であり、PureAdvanceのケーブルカットオフ波長 (λ_{cc} 、最大1530nm) より短いマルチモード領域であることがあり得る。そこで本節では、PureAdvanceへのラマン増幅の適用可能性を確認するため、 λ_{cc} より短い波長の励起光を通光したときのラマン増幅利得とその変動を実験的に評価する。

図5に、 λ_{cc} がG.654.E勧告の上限付近の1530nmであるPureAdvance-110と、比較例として $\lambda_{cc} = 1160\text{nm}$ であるSSMF (各50km) におけるラマン利得係数 g_R/A_{eff} の測定結果を示す⁽¹⁰⁾。ここで励起光波長は1430nmであった。図5において、PureAdvance-110のラマン利得係数測定結果はSSMFの63%程度 (0.25/0.40) であったが、これはコア材質で決まる g_R が小さい効果 (純シリカコア： $2.8 \times 10^{-20}\text{m/W}$ 、SMF： $3.2 \times 10^{-20}\text{m/W}$ 。 $2.8/3.2=87\%$) と、基底モードの A_{eff} が大きい効果 ($112\mu\text{m}^2/82\mu\text{m}^2 = 137\%$) によるもの ($87\%/137%=63\%$) であり、励起光の高次モード化による利得減少はないことを確認した。

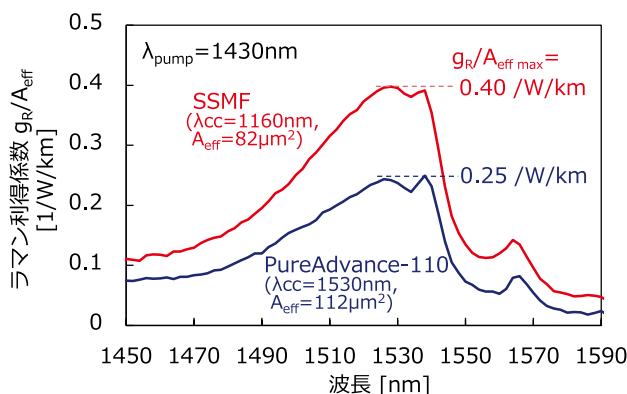


図5 ラマン利得係数の測定結果

(2) ラマン増幅利得の変動

次に、 $\lambda_{cc} = 1405\text{nm}$ のPureAdvance-110、 λ_{cc} は1531nmとG.654.E上限以上だが他の特性はPureAdvance-110に相当するファイバ (“PSCF-1531”と表記)、および、SSMF ($\lambda_{cc} = 1238\text{nm}$) 各50kmに対して、波長1455nmの励起光を通光したときのラマン増幅利得の変動量 (30分間の最大値-最小値) を評価した。測定系を図6 (a) に示す。ここでは、高次モードが発生しやすい極端な敷設環境を想定して、励起光入射端付近の2m離れた2箇所でき図的にコア軸をオフセットさせた融着を行った。融着損失はいずれも約1dB/箇所であった。ラマン利得変動の測定結果を図6 (b) に示す⁽¹⁰⁾。PSCF-1531におけるラマン利得変動はSSMFに比べて僅かに大きい、オフセット融着を加えた極端に厳しい敷設環境においても

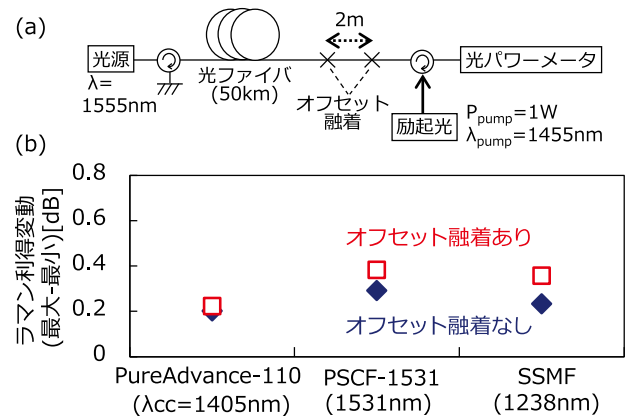


図6 ラマン利得変動の (a) 測定系と (b) 測定結果

0.4dB以下と小さい。

また、文献 (11) では $\lambda_{cc} = 1530\text{nm}$ 付近のG.654.E光ファイバ150kmに対して、オフセット融着のある状態でラマン増幅を行いながら400Gb/s WDM信号を伝送させた結果が報告されている。ここでは、環境温度も-10~+40°Cの間で変化させたが、その状態でも長時間に亘って安定にエラーフリー伝送できることが実証されており⁽¹¹⁾、極端に厳しい敷設環境においても、ラマン増幅利得の変動は無視できるほど小さいと考えられる。

λ_{cc} より短波長のラマン励起光の一部が高次モードとして伝搬してしまう場合、高次モードの A_{eff} は基底モードのそれに比べて大きいためラマン増幅利得が意図せず減少してしまうことや、あるいは、高次モードとの干渉により利得が変動してしまうことが懸念として考えられたが、本節で述べた実験結果から、その影響は実用的には無視できるほど小さいことが確認された。これより、PureAdvanceはラマン増幅を問題なく適用可能であると考えられる。

(3) EDFA/ラマン増幅システムにおける伝送性能

さらに、EDFAとラマン増幅を併用した伝送システムにおけるPureAdvanceの伝送性能として、伝送可能距離を定量的に見積もった。

EDFA/ラマン増幅システムにおける伝送可能距離は、ガウシアンノイズモデル⁽¹²⁾を拡張して、EDFAの増幅器雑音、非線形雑音、および、ラマン増幅による雑音が線形に加算されると仮定することで計算ができる^{(13),(14)}。図7には、スパン長100kmの伝送路において200Gb/s WDM信号を伝送する場合を想定し、SSMF、ノンゼロDSF (NZDSF)、PureAdvanceについて、EDFAとラマン増幅を併用する場合、EDFAのみで増幅する場合の伝送可能距離の計算結果を示す。ここでは、光ケーブル4km毎に同種ファイバ接続が含まれるとし、スパン両端ではSSMFピグテールとの接続損失を考慮した。ラマン励起光はパワー500mW、波長1450nmとした。

EDFAのみの増幅の場合、PureAdvance-80は低伝送損

失の効果により SSMF に比べて 1.4 倍の長距離化が可能と見積られる。さらに、PureAdvance-110 と -125 では、低非線形性の効果によりさらに長距離化が可能であり、SSMF の 1.9~2.1 倍の長距離伝送が可能と見込まれる。

さらに、EDFA/ラマン増幅の場合、SSMF (EDFA のみ) に対して、PureAdvance-110 では伝送距離を 3.9 倍に延伸することが可能と見積られる。図 5 より PureAdvance-110 のラマン増幅利得は SSMF に比べて低いが、同時にラマン増幅による雑音も低く抑えられるため、効果的に伝送距離を延伸することができる。一方、より A_{eff} の大きい PureAdvance-125 では、ラマン増幅利得がさらに減少するため、伝送距離の改善量は PureAdvance-110 に比べて僅かであり、その差は 1.03 倍程度と予測される。

以上、本章で述べた、陸上伝送路に適したケーブル化、同種ファイバ間および SSMF や海底ファイバとの低損失接続、EDFA/ラマン増幅システムでの高い伝送性能から、PureAdvance-110 が陸上幹線ネットワーク用途に最も実用的で優れた光ファイバと考えられる。

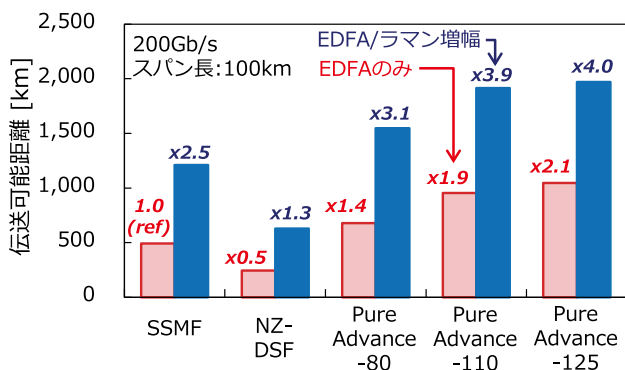


図 7 PureAdvance の伝送可能距離

4. PureAdvance によるシステムメリット

本章では、3つの用途例において、PureAdvance-110 の伝送可能距離をガウシアンノイズモデルを元に計算^{(12)~(14)}することで、本ファイバ導入によるシステムメリットを述べる。

4-1 用途例 1：超長距離 100Gb/s 伝送システムにおける中継器台数の削減

例えば大陸横断など、伝送距離 5,000km、EDFA のみで増幅される超長距離光伝送路において 100Gb/s の WDM 信号を伝送させる場合を考える。図 8 に示す通り、SSMF の場合、全てのスパン長を 80km (すなわち中継器台数は 62 台) にすることで、5,000km の距離をエラーフリーで伝送できると計算された。これに対し、PureAdvance-110 では、低伝送損失と低非線形性の効果により、このうちの 8 台の中継器をスキップ (8スパンの長さを 160km に延伸)

しても、同等の信号品質を保つことができると見積られる。中継器台数を削減できることで、中継器自体のコストを低減するのに加えて、供給電力や設置する建屋の管理コストも削減が可能と期待される。

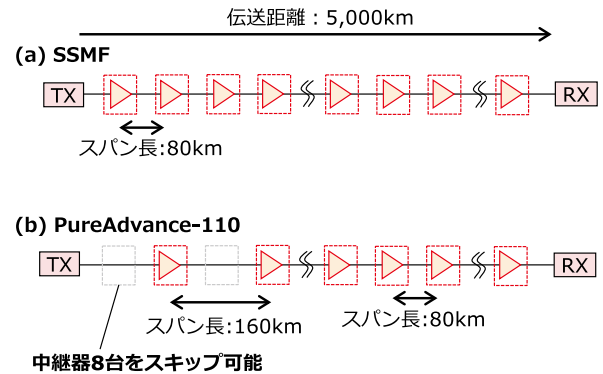


図 8 用途例 1：超長距離 100Gb/s 伝送システム (伝送距離：5,000km, 中継器：EDFA のみ)

4-2 用途例 2：400Gb/s 伝送システムにおける再生中継機台数削減

図 9 では、より高速な 400Gb/s WDM 信号を 1,200km 離れた都市間で伝送させるケースを考える。伝送速度の向上と伝送距離はトレードオフの関係にあり、SSMF での伝送可能距離は 430km に留まると見積られた。すなわち、SSMF で総距離 1,200km を伝送するには 2 台の再生中継機が必要となる。一方、PureAdvance-110 は伝送可能距離を 650km に延伸することが可能と見積られる。これにより、再生中継機の台数を 1 台削減することができるため、再生中継機のコストと消費電力の削減が可能である。また、再生中継にかかる伝送遅延も低減することができる。

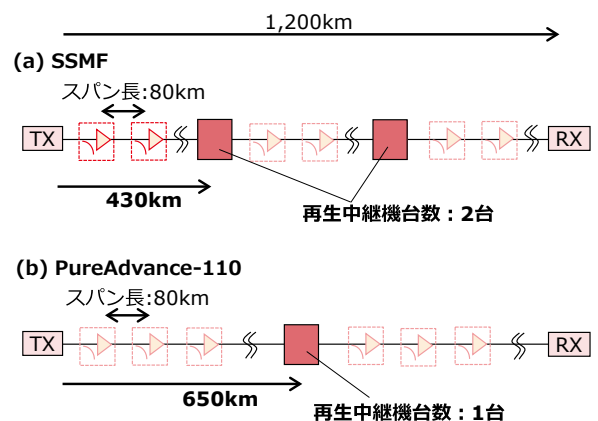


図 9 用途例 2：400Gb/s 伝送システムにおける再生中継機台数削減 (伝送距離：1,200km, 中継器：EDFA/ラマン増幅)

4-3 用途例3：海底光ケーブルシステム陸揚局での再生中継機省略

従来、海底光ケーブルシステムは陸揚局で終端され、再生中継を行った後で陸上ネットワークに繋ぐことがほとんどであった。しかし最近では、陸揚局での再生中継を省略し、内陸にあるデータセンタまでシームレスに繋ぐというニーズが増えている。

図10では、150Gb/s の光信号が、太平洋横断級の伝送距離10,000km、スパン長80km、伝送損失0.152 dB/km、 A_{eff} 130 μm^2 の海底光ケーブルを伝送した後、陸揚局から120km内陸にあるデータセンタまでSSMFまたはPureAdvance-110の陸上ケーブルで伝送させる場合を考える。海底ケーブル伝搬で信号は既に大きく劣化しているため、SSMFでは95kmしか伝送できないと計算される。そのため、120km内陸のデータセンタまで信号を伝送するには、陸揚局で一旦再生中継を行う必要がある。一方、PureAdvance-110では、再生中継無しに120km内陸にあるデータセンタまで伝送可能と見込まれる。これにより、国際的なデータセンタ間でシームレスな接続ができるため、システムコストと遅延の低減が可能となる。

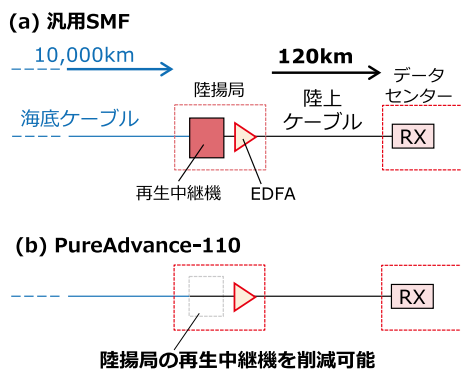


図10 用途例3：海底陸揚局～DC間伝送
(150Gb/s, 海底ケーブル：10,000km, 80kmスパン
陸上ケーブル：120km無中継)

5. 結 言

陸上幹線系ネットワーク向け低損失光ファイバPureAdvanceを開発し、供給を行っている。本ファイバは高い伝送性能を有するとともに、陸上伝送路に適したケーブル化が可能、接続損失が低い、ラマン増幅の適用が可能、といった優れた性能を有しており、実用的な陸上幹線伝送路に適した光ファイバである。また、本ファイバを用いた伝送システムでは伝送装置の台数を削減することが可能であり、システムコストの低減が可能と期待される。

当社は今後も低損失光ファイバ技術の開発と量産技術の開発を進め、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はカットオフシフトファイバケーブルに関するITU-T勧告であり、そのサブカテゴリの一つであるG.654.Eは、陸上システムにおける100Gb/sおよび100Gbw/s超デジタルコヒーレントシステムをサポートするための光ファイバケーブルについての勧告。

・PureAdvance、PureBandは住友電気工業㈱の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) Recommendation ITU-T G.654 (2020)
- (2) 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)
- (3) 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>
- (4) 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 (1999)
- (5) 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>
- (6) S. Shen, G. Wang, Y. He, S. Wang, and C. Zhang, "G.654 Fibre and Cable Evaluation for Terrestrial High Bitrate Transport Application," IWCS2016, pp.470-475 (2016)
- (7) S. Shen, G. Wang, H. Wang, Y. He, S. Wang, C. Zhang, C. Zhao, J. Li, and H. Chen, "G.654.E Fibre Deployment in Terrestrial Transport System," OFC2017, M3G.4 (2017)
- (8) D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splices," Bell Sys. Tech. J., Vol. 56, No. 5, pp. 703-718 (1977)
- (9) Y. Kawaguchi, Y. Yamamoto, M. Hirano, and T. Sasaki, "Low Similar Splice Loss of Aeff-Enlarged Pure-Silica-Core Fiber," OECC2013, ThS3-6 (2013)
- (10) Y. Yamamoto, T. Hasegawa, Y. Aoshima, and K. Ohtsuka, "Practical consideration on Raman amplification for G.654.E fibers," IWCS2018, 6-7 (2018)
- (11) 伊藤、関、川崎、前田、「コア拡大低損失光ファイバへのラマン増幅適用評価」、2021年電子情報通信学会総合大会、B-10-28 (2021)
- (12) 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)
- (13) 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)
- (14) Y. Yamamoto, M. Hirano, S. Oda, Y. Aoki, K. Sone, and J. C. Rasmussen, "Impact of Fiber Loss and Aeff on OSNR Improvement for Hybrid-Raman/EDFA Amplified Systems," OECC2015, JWeA.53 (2015)

執 筆 者

山本 義典* : 光通信研究所 主席
2015年度 櫻井健二郎氏記念賞受賞



長谷川 健美 : 光通信研究所 グループ長



長田 尚理 : 光通信事業部 主席



*主執筆者