

超低分散スロープ型ノンゼロ分散シフトファイバ FutureGuide™-USS

光電子技術研究所 松尾昌一郎*1・姫野邦治*2・原田光一*3
光デバイス事業推進室 竹島由将*4

Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber with Ultra Small Dispersion Slope FutureGuide™-USS

S. Matsuo, Y. Takeshima, K. Himeno & K. Harada

SバンドからLバンドにわたる高密度波長多重伝送 (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) に対応したノンゼロ分散シフトファイバを開発した。本ファイバの分散スロープは、従来のノンゼロ分散シフトファイバの半分以下であり、広い波長範囲にわたり波長分散が小さい。このため、メトロコアネットワークにおいて分散補償器なしで1波あたり10Gbit/sのDWDM伝送が可能になる。さらに、通常シングルモード光ファイバ用の分散補償ファイバを用いた分散補償が可能であり、将来の40Gbit/s伝送への拡張に対応したファイバである。

A new type of non-zero dispersion-shifted fiber (NZ-DSF) that is suitable for dense wavelength division multiplexing (DWDM) transmission over S-band to L-band is presented. The chromatic dispersion slope of the fiber is less than a half of that of a conventional NZ-DSF and the chromatic dispersion variation of the fiber over the bands is very small. This feature realizes DWDM transmission of 10Gb/s without any dispersion compensation in the metro-core network. Moreover, the fiber accommodates upgrade to 40 Gb/s transmission if the fiber is coupled with the slope compensating dispersion compensation fiber designed for the conventional single mode fiber.

1. ま え が き

インターネットをはじめとするデータ通信トラフィックは急激に拡大し、いまや音声通信トラフィックを超えるようになってきた。この通信需要の拡大を支えてきたのが、光増幅器を用いた高密度波長多重通信 (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) 技術である。従来、DWDMシステムの導入は、陸上幹線システムや海底系システムのような長距離および超長距離システムを中心に行われてきた。このようなシステム向けのファイバとしてノンゼロ分散シフトファイバ (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber, NZ-DSF) が開発されている。表1に代表的なNZ-DSFの特性を示す。A_{eff}拡大型は、非線形光学効果が問題となりうる比較的長距離の伝送システムに適している。また、低スロープ型は、A_{eff}拡大型に比べてLバンドにおいても小さな波長分散値をとることが特徴であり、CバンドからLバンドにわたる伝送に適して

いる。当社は、A_{eff}拡大型のFutureGuide™-LA、低スロープ型のFutureGuide™-SSを商品化してきた。

一方、ユーザサイドのアクセス系においては、ADSL

表1 現行NZ-DSFの典型値
Typical value of conventional NZ-DSFs

タイプ		A _{eff} 拡大型	低分散スロープ型
当社商品名		FutureGuide™-LA	FutureGuide™-SS
伝送損失	1,550nm	0.22dB/km	0.22dB/km
実効コア断面積 (A _{eff})	1,550nm	70 μm ² (Typical)	50 μm ² (Typical)
波長分散値 (Dispersion)	1,550nm	4.2ps/nm/km (Typical)	4.4ps/nm/km (Typical)
	1,530 ~ 1,565nm	+ 2.0 ~ + 6.0ps/nm/km	+ 2.6 ~ + 6.0ps/nm/km
	1,565 ~ 1,625nm	+ 4.5 ~ + 11.2ps/nm/km	+ 4.0 ~ + 8.6ps/nm/km
分散スロープ	1,550nm	0.09ps/nm ² /km	0.05ps/nm ² /km
RDS	1,550nm	0.0207nm ⁻¹ (Typical)	0.0107nm ⁻¹ (Typical)
A _{eff} × Dispersion	1,550nm	294 μm ² ps/nm/km (Typical)	220 μm ² ps/nm/km (Typical)

*1 光プロセス研究部
*2 光プロセス研究部グループ長
*3 光プロセス研究部長
*4 光応用製品部

(Asymmetric Digital Subscriber Line) の急激な普及により通信量の拡大が始まっている。さらに、光アクセスも普及の兆しを見せており、図 1 のような光通信ネットワークを考えた場合、トラフィックの集中するメトロエリアの通信量の拡大が予想される。このような通信量拡大の要求に対して、従来は長距離系に対して用いられてきた WDM 技術のメトロエリアへの適用が提案されている。ユーザよりのアクセス系およびメトロアクセス系と呼ばれるレイヤでは、コストや低速通信における拡張性を重視した、CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) の適用が有力視されている。一方、メトロコアネットワークでは、さらなるトラフィックの集中に対応すべく、DWDM 方式の適用が必要であると考えられる。

今回は、主としてメトロコアネットワークにおける DWDM システム向けに開発を行った FutureGuide™-USS (Ultra Small Slope) の特徴、特性について報告を行う¹⁾²⁾。

2. メトロコア向け光ファイバへの要求特性

メトロコアネットワークでの DWDM 伝送を考えた場合、伝送用の光ファイバは、下記の特性を満足していることが重要であると考えられる。

(1) 広帯域伝送への対応：Sバンドへの対応

ビットレート、波長間隔を維持した上で、伝送容量を拡大するには、使用可能な波長帯域を広げることが必要

である。そこで、これまでの Cバンド (1,530-1,565nm)、Lバンド (1,565-1,625nm) に加えて、Sバンド (1,460-1,530nm) の利用に向けた光源などの検討が近年進められている。しかしながら、図 2 に示すように従来型の NZ-DSF の零分散波長は Sバンド内にあり、Sバンドでの DWDM 伝送には適していない。従って、今後の広帯域伝送に対応したファイバとして、Sバンドにおいて四光波混合 (Four-Wave Mixing, FWM) 発生 の十分な抑制が可能となる +2.0ps/nm/km 以上の波長分散をもつファイバが必要となる。

(2) 広帯域伝送への対応 - Lバンドでの波長分散の抑制

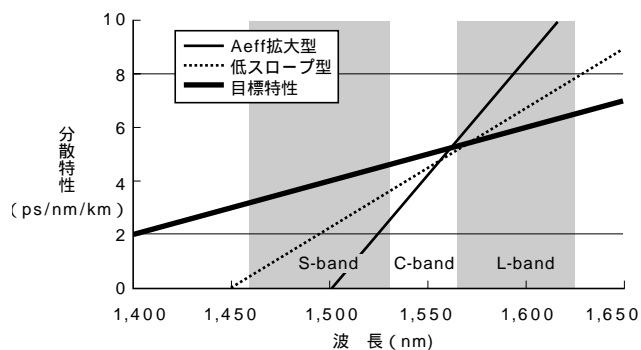
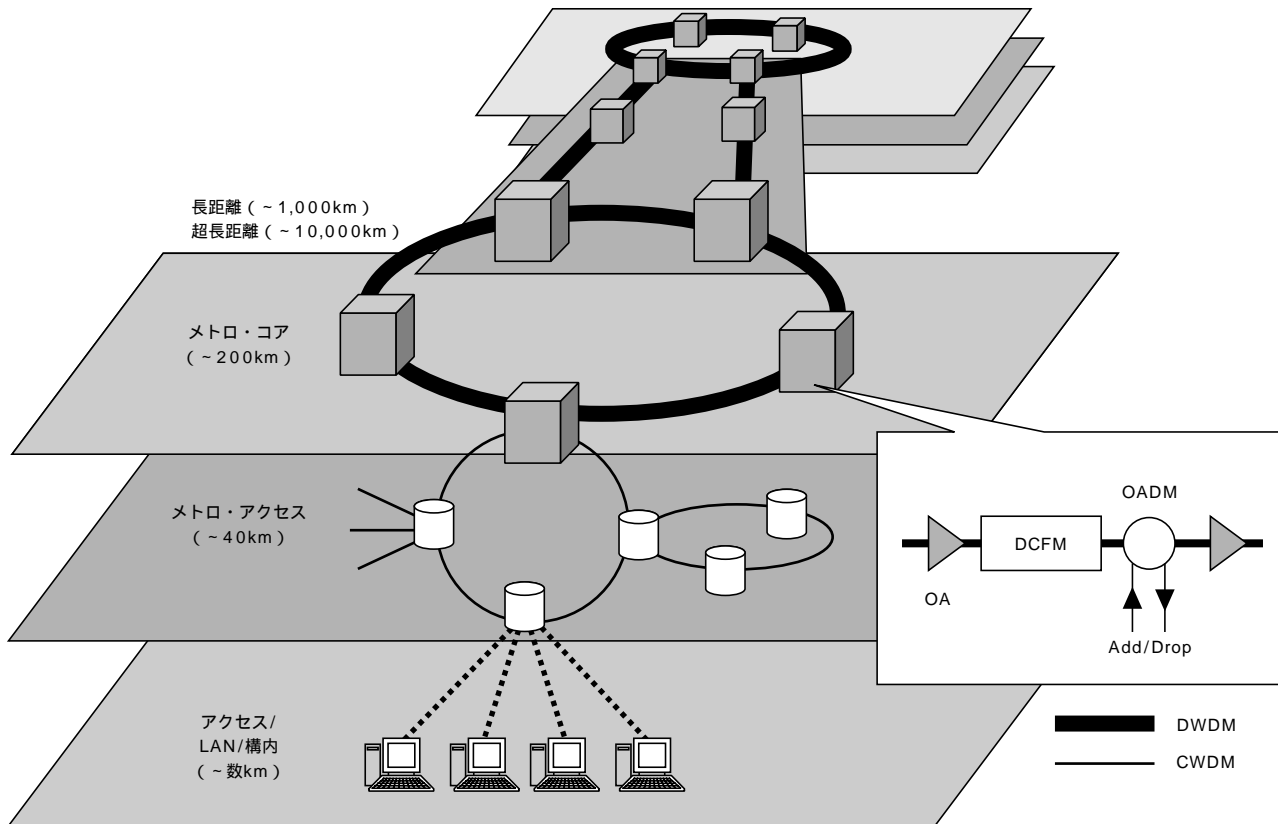


図 2 従来型 NZ-DSF の分散特性および目標特性
Dispersion characteristics of conventional NZ-DSFs and newly developed fiber



OA : Optical Amplifier, DCFM : Dispersion Compensation Fiber Module, OADM : Optical Add-Drop Multiplexer

図 1 光通信ネットワークの概念図
Architecture of optical transmission network

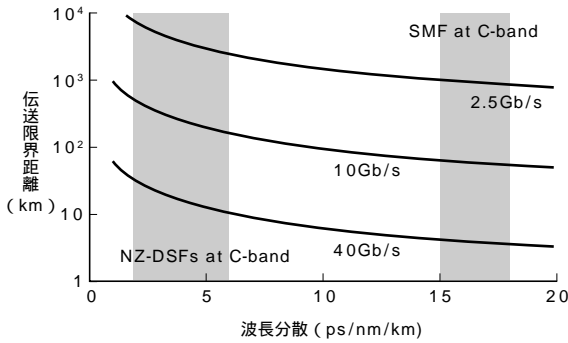


図3 伝送限界距離の伝送速度依存性
Chromatic dispersion limit for transmission distance
as a function of bit rate

現在用いられているDWDM伝送システムの1波あたりの伝送速度は、2.5、10Gb/sが一般的である。図3は、伝送限界距離の波長分散、伝送速度依存性を示している¹⁾。2.5Gb/sのシステムでは、16,000ps/nmの累積分散が許容され、1,550nmにおいて+17 ps/nm/km程度の波長分散値を持つ通常シングルモードファイバ（SMF）を用いた線路でも1,000km程度の伝送が可能である。しかしながら、現在主流となりつつある10Gb/sのシステムでは、許容累積分散値は1,000ps/nm程度となり、SMFによる伝送では60 km程度が限界となる。一方、1,550nmにおける波長分散値が4～5ps/nm/km程度のNZ-DSFでは、10Gb/sでも約250kmの伝送が可能である。SMFでも適切な分散補償ファイバと組み合わせることにより10Gb/s伝送を行うことは可能であるが、分散補償ファイバの持つ損失を補償する光増幅器のコストや線路設計の柔軟性の観点からは、補償ファイバを必要としない伝送ファイバが好ましい。つまり、Lバンドにおける波長分散値をできるだけ小さな範囲に抑え、10Gb/sのシステムでもSバンドからLバンドにわたり分散補償なしで伝送可能なファイバが好ましい。

(1)とあわせて考えると、SバンドからLバンドにわたり波長分散値はできるだけ狭い範囲に制御されていることが必要である。つまり、図2に示したように小さな分散スロープをもつファイバが必要となる³⁾。

(3) 高速伝送への対応 - 分散補償特性

伝送容量拡大およびシステムコスト低減を目的として、より高速な40Gb/sシステムの検討が行われている。40Gb/sシステムでは、累積分散の限界値は約60ps/nm/kmと非常に小さくなる。前述のように小さな波長分散値に制御されたNZ-DSFといえども、分散補償なしでは10数kmが伝送限界となり、分散、分散スロープ補償ファイバ（Slope Compensating Dispersion Compensation Fiber, SC-DCF）との組み合わせが必須となる。分散スロープ補償の指標としては、RDS（Relative Dispersion Slope）と呼ばれるパラメータが用いられる。RDSは、(分散スロープ) / (波長分散) で定義されるパラメータであり、伝送用ファイバとSC-DCFのRDSが一致することは、分散と分散スロープを同時に補償できることを示している。つま

り、伝送用ファイバの分散を広範囲に補償するには、RDSが一致したSC-DCFを用いる必要がある。しかしながら、表1に示したようにNZ-DSFのRDSは0.01～0.02nm⁻¹程度であり、SMFの0.0033nm⁻¹とは大きく異なった値を示す。このためNZ-DSFの分散補償には、それぞれに最適化したSC-DCFを設計する必要がある。さらに、NZ-DSFのようにRDSの大きなファイバを補償するSC-DCFは設計、製造の点で困難さをともなうことが知られている⁴⁾⁵⁾。

つまり、分散補償の観点からは、RDSはより小さいほうが有利である。さらに、現在最も広く用いられているSMFと同じRDSをもつファイバであれば、SMF用のSC-DCFの流用が可能であり、コスト的に有利である。

(4) 非線形光学効果抑制

メトロコアネットワークの線路長は最大でも200km程度と言われており、長距離の基幹系に比べると、ファイバの非線形光学効果の影響は少ないと考えられる。しかしながら、40Gb/sのような高速伝送時には、1波あたりのパワーを大きくする必要があるので、非線形光学効果の小さなファイバのほうが好ましい。DWDM伝送時において問題になる代表的な非線形光学効果はFWMである。FWMの発生効率率は、(A_{eff} × Dispersion)⁻²に比例することが知られている⁶⁾。つまり、DWDM伝送用のファイバとしては、(A_{eff} × Dispersion)を大きく設定することが必要になる。

以上の点を考慮に入れると、下記の特性をもつファイバがメトロコアネットワークにおけるDWDM伝送用ファイバとして有効であると考えられる。

低分散スロープ

波長分散 20 ps/nm/km at Sバンド：従来NZ-DSFのCバンドと同程度

波長分散 8.0 ps/nm/km at Lバンド：低スロープ型NZ-DSFと同程度

SMFと同程度のRDS

SMF用分散補償ファイバの利用

低スロープ型NZ-DSFと同程度の (A_{eff} × Dispersion)

FWMによる波形劣化の抑制

3. 試作結果

前節で示した目標光学特性を満足するように屈折率分布を設計し、ファイバの試作、評価を行った。試作したファイバの測定結果を表2に示す。波長分散値は、1,550nmにおいて+5.65ps/nm/km、スロープは0.018ps/nm²/km、RDSは0.0032 nm⁻¹であり、ほぼ設計どおりの値が得られた。波長分散特性の典型的な例を図4に示す。波長分散はSバンドからLバンドにわたり+3.2～+6.3ps/nm/kmとなり、従来のNZ-DSFに比べて非常に狭い範囲に制御できていることが確認できた。また、A_{eff}は45.3 μm²と従来のNZ-DSFよりも小さいが、A_{eff} × Dispersionは256 μm²ps/nm/kmと、従来の低スロープ型NZ-DSFと同程度の値が得られているため、FWM抑制の観点からも問題ないことが確認できた。さらに図5は、典型的な損失

表 2 試作結果

Measurement results of fabricated fiber

項 目	測定結果
伝送損失	0.202dB/km
ケーブルカットオフ波長	1.33 μm
実効コア断面積 (A_{eff})	45.3 μm^2
波長分散値 (Dispersion)	5.65ps/nm/km
分散スロープ	0.018ps/nm ² /km
RDS	0.0032nm ⁻¹
$A_{\text{eff}} \times \text{Dispersion}$	256 $\mu\text{m}^2\text{ps/nm/km}$
マクロ曲げ損失	3.3dB/m at 20
偏波モード分散	0.03ps/ $\sqrt{\text{km}}$

1,550nmにおける測定値

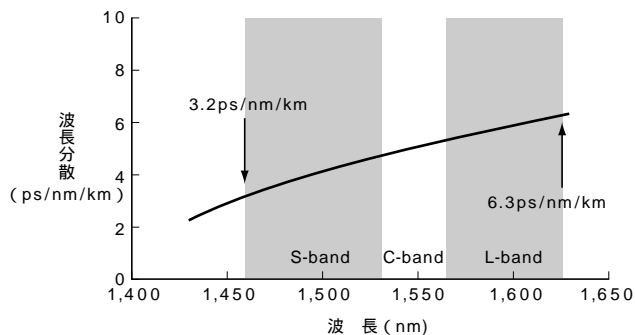


図 4 波長分散特性

Chromatic dispersion characteristics

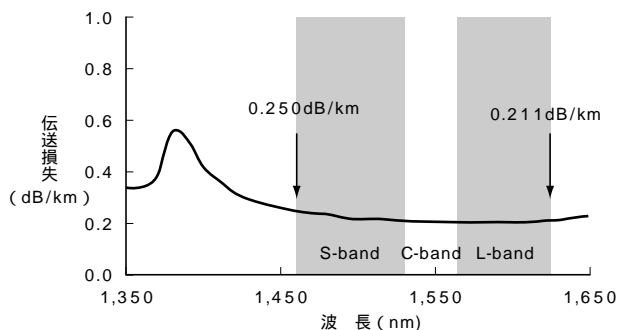


図 5 損失波長特性

Spectral attenuation

波長特性を示す．SバンドからLバンドにわたり0.25dB/km以下であり，陸上伝送用ファイバとして十分な特性を示していることが確認できた．

以上のような本ファイバの特性は，先に示した目標特性を満足しており，特別な分散補償を行うことなくSバンドからLバンドにわたり10Gb/s \times 150kmの伝送が可能である．

4. 分散補償特性

次に，40Gb/s伝送に向けた分散補償特性について評価した結果を示す．

図6は，FutureGuideTM-USS，SMFおよびSMF用のSC-DCFのRDS波長依存性を示す．FutureGuideTM-USSの

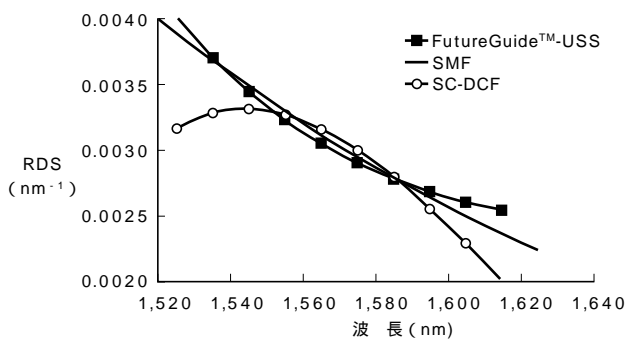


図 6 RDS波長依存性
Wavelength dependence of RDS

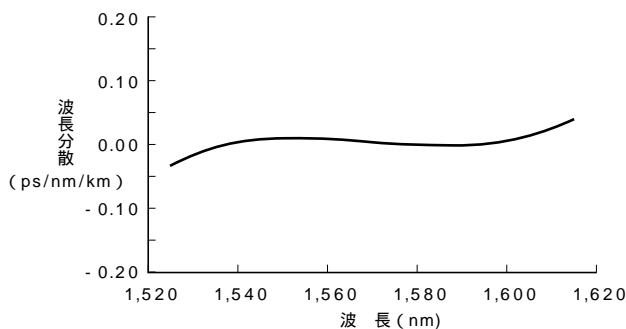


図 7 ファイバリンク分散特性
Link dispersion characteristics for a combination of FutureGuideTM-USS and SC-DCF

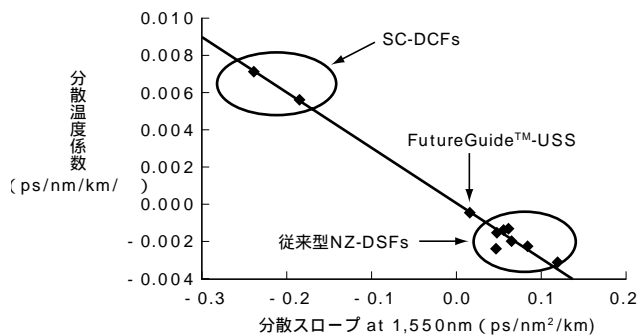


図 8 分散温度係数のスロープ依存性
Thermal coefficient of chromatic dispersion as a function of dispersion slope

RDSは，Cバンド，Lバンドにおいて，SMFおよびSMF用SC-DCFとほぼ同じ傾向を示していることが確認できる．このことは，FutureGuideTM-USSの分散，分散スロープ補償にはSMF用SC-DCFが利用できることを示している．図7は，FutureGuideTM-USSの累積分散をSMF用SC-DCFの条長を最適化して分散補償したときの分散値の波長特性を示している．この分散補償によりCバンドからLバンドにわたり残留分散値を $\pm 0.04\text{ps/nm/km}$ に抑制することが可能になる． $\pm 0.04\text{ps/nm/km}$ という残留分散は，メトロコアネットワークで想定される最大200kmの距離に対しても40Gb/s伝送を行うに十分なレベルにある．

さらに，40Gb/s伝送では前述のように許容される累積波長分散値が非常に小さいため，温度変化によるファイ

バの波長分散変動を考慮する必要がある⁷⁾。図8は、各種 NZ-DSFの波長分散温度係数の分散スロープ依存性を示す。分散スロープの絶対値が大きなファイバほど分散の温度係数の絶対値は大きくなることが確認できる。従来のNZ-DSFの波長分散の温度係数は、 $-0.0015 \sim -0.0025$ ps/nm/km/ 程度である。ここで200 kmの伝送路で100 の温度変化を想定した場合、分散の変化量は30～50ps/nmとなり、40Gb/s伝送の許容値の半分以上を占めてしまう。一方、FutureGuideTM-USSの温度係数は、 -0.0006 ps/nm/km/ であり、200km線路における100 の温度変化に対しても分散値の変化は、12ps/nm/kmと40Gb/s 伝送を行うのに十分なレベルである。このように分散の温度変動の観点からも、従来のNZ-DSFに比べて、FutureGuideTM-USSは40Gb/s伝送に適したファイバであると位置づけることができる。

5.むすび

SバンドからLバンドにわたる広帯域DWDM伝送を可能にするFutureGuideTM-USSの開発をおこなった。FutureGuideTM-USSは、広い波長範囲にわたり小さな波長分散を示し、メトロコアネットワークで想定される距離であれば分散補償器なしで1波あたり10Gb/sのDWDM伝送が可能である。さらに、FutureGuideTM-USSは、SMF用の分散補償器を用いた分散補償が可能であり、将来

の40Gb/s伝送システムへの拡張に対応したファイバである。

参 考 文 献

- 1) 竹島 ほか：RDSを最適化した低分散スロープNZ-DSF，2002年電子情報通信学会総合大会 C-3-95，2002
- 2) S. Matsuo, et al.: Ultra Low Dispersion-Slope Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber with Equivalent Relative Dispersion Slope to Conventional Single-Mode Fiber, OECC 2002, 11D1-2, 2002
- 3) N. Kumano, et al.: Novel NZ-DSF with Ultra-low Dispersion Slope Lower than 0.020 ps/nm²/km, ECOC2001, PD.A.1.5, 2001
- 4) Li M. J, et al.: Recent Progress in Fiber Dispersion Component, ECOC2001, Th.M.1.1, 2001
- 5) 清水 ほか：ノンゼロ分散シフト光ファイバ用分散補償光ファイバモジュール，2002年電子情報通信学会総合大会 C-3-99, 2002
- 6) Kaminow, et al.: Optical Fiber Telecommunication III A, Academic Press, 1997
- 7) T. Kato, et al.: Temperature Dependence of Chromatic Dispersion in Various Type of Optical Fibers, OFC2000, TuG7, 2000