

超低分散スロープNZ-DSFの開発

Development of Non-zero DSF with Ultra-low Dispersion Slope

熊野尚美*
Naomi Kumano

武笠和則*
Kazunori Mukasa

坂野操*2
Misao Sakano

森平英也*3
Hideya Moridaira

概要 次世代の陸上用伝送路光ファイバとして、広い信号波長帯域実現とラマン増幅の適用を考慮して、分散スロープを従来の低分散スロープ型のノンゼロ分散シフトファイバ (Non-zero Dispersion Shifted Fiber; NZ-DSF) の半分以下とした、新型NZ-DSFを開発した。

一般に分散スロープの低減は実効コア断面積 (A_{eff}) の縮小を伴うが、WDM伝送に障害となる非線形現象を回避するためには逆に A_{eff} の拡大が要求される。本研究では、プロファイルの最適化により、 A_{eff} を従来のDSFと同程度の $45 \mu\text{m}^2$ に維持しつつ分散スロープを $0.020 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ まで低減することに成功した。また、分散スロープを低減したことによりゼロ分散波長が短波長側にシフトし、伝送帯域が拡大しただけでなく、ラマン増幅の適用を考慮した場合でも励起波長帯域での四光波混合 (Four Wave Mixing; FWM) 発生を抑制することができるようになった。

また、試作したNZ-DSFの特性での伝送シミュレーターによる 10 Gb/s 伝送のパフォーマンスを確認し、更なる高速伝送も考慮した分散補償器の適用の検討も行った。

1. はじめに

高速大容量WDM伝送技術の発展に伴い、伝送路となる光ファイバには、非線形性の低減と共に分散の波長平坦性が要求されるようになり、様々なタイプの光ファイバが提案されている。海底等の長距離伝送路においては、例えばSMFと線路型逆分散特性ファイバ (Reverse Dispersion Fiber; RDF) から構成された分散マネジメント線路が提案されている¹⁾。このような分散マネジメント線路では、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の広い範囲でトータルの分散を低く抑えることが可能となる。しかし、陸上のような短距離の伝送路においては、分散マネジメント線路の採用は敷設上困難である。そこで、陸上伝送路用ファイバとして、1本で線路を構成できるノンゼロ分散シフトファイバ (Non-zero Dispersion Shifted Fiber; NZ-DSF) が注目されており、研究開発が活発に行われている^{2)~6)}。

また近年、光増幅器の広帯域化が盛んに検討されており、それによって伝送路においても従来のC-band帯 ($1530\text{-}1565 \text{ nm}$) だけではなく、L-band帯 ($1565\text{-}1620 \text{ nm}$)、S-band帯 ($1460\text{-}1530 \text{ nm}$) も含めた広い波長領域での分散設計が要求されている。また、波長多重に伴う4光波混合 (Four Wave Mixing; FWM) や、ハイパワー入力による信号波形の歪みの原因となる自己位相変調 (Self Phase Modulation; SPM) や相互位相変調 (Cross Phase Modulation; XPM) 等の非線形現象の抑制、

回避も必要となってくる。更に、ラマン増幅器の実用化も進んでいることから、従来NZ-DSFを伝送路とした場合に問題となっていたラマン励起帯域の制限を緩和することも求められている。

本研究においては、ラマン増幅器適合性も考慮し、伝送帯域の拡大を目指し、分散スロープを低減することに重点をおいたNZ-DSFの開発を目的とした。一般に分散スロープの低減は実効コア断面積 (A_{eff}) の縮小を伴うが、非線形現象を抑制するには、逆に A_{eff} を拡大する必要がある。今回我々は、プロファイルの最適化により、 A_{eff} を従来のDSFと同程度の $45 \mu\text{m}^2$ に維持しつつ分散スロープを低減すること目標とした。本論文では、ファイバ設計と試作結果、更に伝送シミュレーターによるパフォーマンス確認、分散補償器の適用の検討までを報告する。

2. 低分散スロープ型NZ-DSFの開発

これまで提案されている代表的なNZ-DSFを表1に示す。表中のファイバ#Aは、波長 1550 nm における分散値を比較的大きくしゼロ分散波長を短波長側にシフトさせたことを特徴としており、ファイバ#Bは A_{eff} を拡大していることを特徴としている。更に、ファイバ#Cは分散スロープが他に比べて小さいことを特徴としている。

分散スロープ低減型NZ-DSFであるファイバ#Cに注目すると、 A_{eff} は $55 \mu\text{m}^2$ を確保しているが、分散スロープ低減は $0.045 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ にとどまっている。また、ゼロ分散波長がラマン励起帯域にあることから、分布ラマン増幅を用いた伝送路には特にファイバ#Bや#Cは適さないことが指摘されている (図1参照)。

* ファイナルフォトニクス研究所 WF チーム

*2 ファイナルフォトニクス研究所 光伝送サブシステム開発部

*3 知的財産部

表 1 各種 NZ-DSF
Various types of NZ-DSF

	分散値 @1550 nm ps/nm/km	分散スロープ @1550 nm ps/nm ² /km	A_{eff} @1550 nm μm^2	伝送損失 @1550 nm dB/km
#A	8	0.07	65	<0.21
#B	5	0.09	72	<0.21
#C	5	0.045	55	<0.21

表 2 試作 NZ-DSF の特性例
Characteristics of fabricated NZ-DSFs

伝送特性 @1550	#1	#2	#3	目標
分散値 (ps/nm/km)	4.2	4.9	5.7	4 ~ 8
分散スロープ (ps/nm ² /km)	0.016	0.020	0.029	<0.020
MFD (μm)	7.5	7.6	8.0	
A_{eff} (μm^2)	43	45	48	>45
λ_c (nm)	1156	1273	1446	<1460
λ_0 (nm)	1396	1387	1393	<1430
伝送損失 (dB/km)	0.216	0.218	0.207	
曲げロス 20 mm ϕ (dB/m)	4.0	1.0	0.5	<1
PMD (ps/km ^{1/2})	0.026	0.027	0.048	

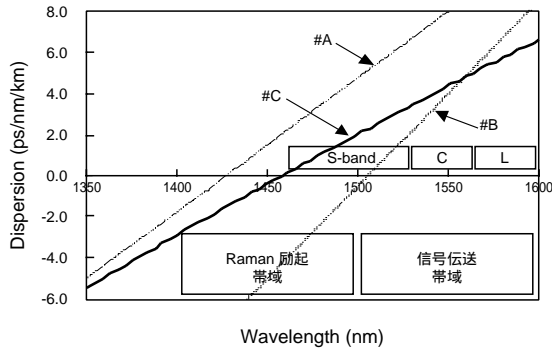


図 1 各種 NZ-DSF の波長分散特性
Chromatic dispersion of various NZ-DSFs

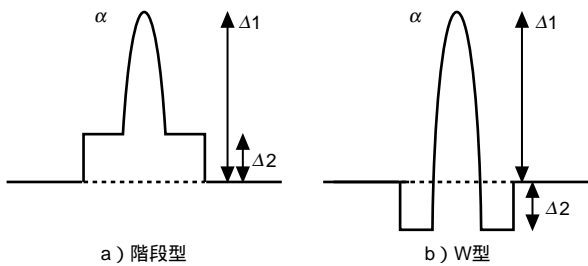


図 2 2層構造プロファイル
2-layered index profile

本研究においては、分散スロープを表 1 ファイバ #C の半分以下の値である 0.020 ps/nm²/km まで低減し、 A_{eff} は従来の DSF と同程度の 45 μm^2 を維持することを目標とした。また、分布ラマン増幅を用いた伝送路にも適応可能なファイバとするため、ゼロ分散波長は 1430 nm より短波長になることを目標とした⁷⁻¹⁰⁾。本論文においては、NZ-DSF の設計・試作結果のみならず、分布ラマン増幅器を適用したシステムモデルを検討し、その伝送路として試作した NZ-DSF の伝送特性を用いたシミュレーションを行った結果もあわせて報告する。

3. 超低分散スロープ型 NZ-DSF の設計

分散スロープを低減した NZ-DSF のプロファイルを検討するにあたり、我々はまず 2 層構造の階段型プロファイルの見直しを行った (図 2-a)。2 層構造の階段型プロファイルは製造が容易であり、従来から伝送路用ファイバとしてよく検討されてきたプロファイルである。電界分布形状は Gaussian に近く、他のファイバとの接続性も良い。階段型プロファイルの各々のパラメータを細かく変化させてシミュレーションを行った結果、このプロファイルでは分散スロープは 0.06 ps/nm²/km までし

か小さくならず、目標値を得ることが困難であることがわかった。つぎに、階段型同様、広く用いられているプロファイルの一つとして W 型のプロファイル (図 2-b) についても同様に検討したが、やはり分散スロープ低減は困難であることがわかった。

ここまでの検討から、2 層構造プロファイルでは目標を達するのが困難であることがわかったため、つぎに、より複雑な構造となる 3 層構造プロファイルでの検討を行った。このプロファイルを用いれば、分散スロープを目標の 0.020 ps/nm²/km まで低減できることがわかった。ただし、分散スロープを低減すると、 A_{eff} も縮小してしまったり、カットオフ波長が長波長側へシフトしてしまう等、他の特性が劣化してしまう傾向が強かった。そこで、 Δ やその形状である α 定数、径比等、各々のパラメータを細かく見直し再設計を行い、分散、分散スロープ、 A_{eff} 、カットオフ波長、曲げ損失等の諸特性の目標値をバランスよく満たすものを最適解とした。

4. 伝送特性

上記の設計に従い、実際に試作を行った。シミュレーション結果に従ったプロファイル範囲で、合成条件や線引条件を最適化し、低損失、低 PMD の線路として用いることのできる超低分散スロープ型の NZ-DSF が完成した。試作をした NZ-DSF の特性を表 2 に示す。

表において、分散、分散スロープ、MFD (モードフィールド径)、 A_{eff} (実効コア断面積)、伝送損失は波長 1550 nm での値であり、 λ_c は長さ 2 m でのカットオフ波長、 λ_0 はゼロ分散波長、曲げ損失は波長 1550 nm に対する直径 20 mm での曲げ損失の値、PMD は偏波モード分散の値である。表 2 において、#1 は分散スロープが 0.016 ps/nm²/km であり目標値を満たすが、 A_{eff} が 43 μm^2 とやや小さくなっている。一方 #3 は、 A_{eff} が 48 μm^2 であり目標値を満たすが分散スロープが 0.029 ps/nm²/km とやや大きくなっている。#2 は分散スロープ 0.020 ps/nm²/km、 A_{eff} 45 μm^2 であり、目標を満たしている。#1、#2、#3 とともに、分散スロープを低減したことでゼロ分散波長 λ_0 が 1430 nm 以下の短波長側へシフトした。また、カットオフ波長 λ_c 、曲げ損失、PMD 等他の特性も良好な値となった。

5. 超低分散スロープ型NZ-DSFの波長分散特性及びラマン増幅特性

前節までの試作から得られた分散スロープ低減の効果を見るために、波長1550 nmでの分散値が5 ps/nm/km程度と等しいもので、分散スロープが異なる3種類のNZ-DSFを比較した。(図3参照) 試作結果として、分散スロープが0.020 ps/nm²/kmであり、かつ A_{eff} 45 μm^2 を維持できている表2の#2のファイバを選択した。比較の対象として、 A_{eff} 拡大型のNZ-DSFである表1 #B(分散スロープ0.090 ps/nm²/km, A_{eff} 72 μm^2)と、分散スロープ低減型NZ-DSFである表1 #C(分散スロープ0.045 ps/nm²/km, A_{eff} 55 μm^2)の分散カーブを重ねて示す。C-band帯において、3つのNZ-DSFは同様の分散特性を示す。一方、L-band帯においては超低分散スロープを実現した試作結果#2が最も累積分散を抑制できている。

また、図中灰色で示した範囲(以下“グレーゾーン”と呼ぶことにする)は、分散の絶対値が ± 2 以下となり、四光波混合(FWM)の発生効率が高いとされている領域である。このグレーゾーンに分散カーブがさしかかる波長を点線で示すと、分散スロープの大きな#B, #C, #2の順に点線が短波長側へ(左側へ)シフトしており、試作結果#2においてはS-band帯域でもFWMの干渉を回避できることがわかる。

以上より、分散スロープを低減したことで、分散の波長平坦性を実現し、長波長側の累積分散を低く抑えることができ、かつ、FWM発生を回避可能な帯域が短波長側へ広がり、結果と

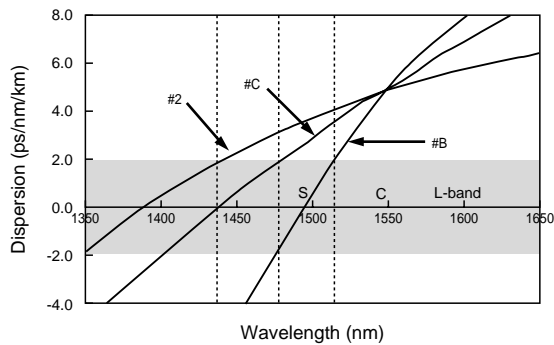


図3 波長分散特性の比較
Comparison of dispersion curves of various NZ-DSFs

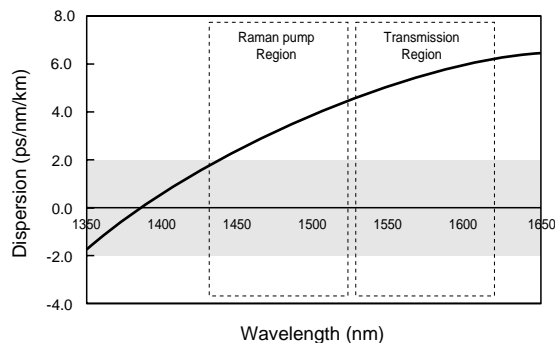


図4 伝送帯域とラマン励起帯域における分散特性
Chromatic dispersion in transmission region and Raman pump region

して伝送可能な帯域がS, C, L-bandすべての帯域に拡大されたことが確認できた。

つぎに、NZ-DSFのラマン増幅器適合性について述べる。ラマン増幅器は集中ラマン型と分布ラマン型の2種類があり、どちらも光通信において重要な技術の一つとなっている。特に、分布ラマン増幅を用いた大容量伝送実験による成果が盛んに報告されており、分布ラマン増幅の有用性が注目を集めている。一方、NZ-DSFの一部は、ゼロ分散波長(λ_0)の影響により分布ラマン増幅を用いた伝送路には適さないことが指摘され始めている。このため、最近の分布ラマン増幅を用いた実験報告には伝送路にSMFを用いたものが多い^{(11), (12)}。

周知のとおり、ラマン増幅を用いて例えば1530-1620 nm (C + L-band)の信号伝送帯域を増幅させる際は、1430-1520 nmに励起光を入力する必要がある。図4に示すように、試作結果#2(表2)の場合、信号帯域はもちろん、ラマン増幅の励起帯域においても分散カーブがグレーゾーンにかかることが無いため、励起光のFWMによる干渉を回避できる。

更に、図5に励起波長1420 nmでのラマン利得係数の測定結果を示す。一般にラマン利得係数は A_{eff} に反比例するため、 A_{eff} の大きなSMF ($A_{eff} = 80 \mu\text{m}^2$)は A_{eff} の小さな従来のDSF ($A_{eff} = 45 \mu\text{m}^2$)よりラマン利得係数が小さい。試作したNZ-DSF #2 ($A_{eff} = 45 \mu\text{m}^2$)は、表1 #CのNZ-DSF ($A_{eff} = 55 \mu\text{m}^2$)と比較しても、かなり大きなラマン利得係数が得られており、従来のDSF並みの高効率なラマン増幅特性が期待できる。

6. 分布ラマン増幅を用いた伝送シミュレーション

本研究において、超低分散スロープを目指して試作したNZ-DSF(表2 #2)と、分散スロープ低減型NZ-DSFである表1 #Cのファイバ特性を比較するだけでなく、実際NZ-DSFを使用したシステムでの伝送特性はどのように違ってくるのか、伝送シミュレーターを用いて比較、検討した。

図6に示すような分布ラマン増幅器を適用したシステムでの伝送シミュレーションを行った。システムモデルは10 Gbit/s, 8チャンネル, 50 GHz間隔のNRZ信号で、ファイバは80 km \times 3スパン、分散補償なし、伝送損失はすべて分布ラマン増幅で補償することとした。伝送路としてのファイバを、超低分散スロープNZ-DSFである試作#2(表2)にした場合と、分散スロープ低減型NZ-DSF #C(表1)にした場合の、C-band伝送及びL-band伝送での最悪チャンネルのBER(最小値)を比

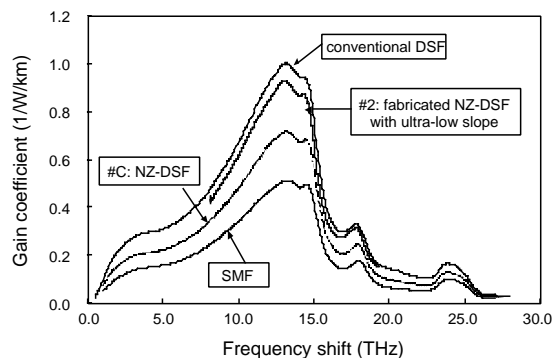


図5 ラマン利得係数の比較
Raman gain coefficient of various fibers

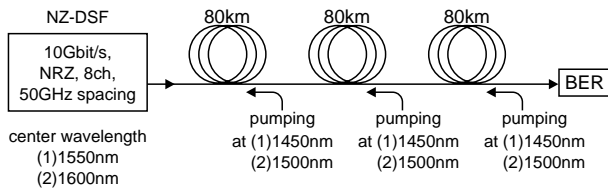


図6 伝送シミュレーションのシステムモデル
Configuration of the system model

表3 最悪チャンネルにおける BER (最小値)
Minimum BER at the worst channel

	C-band(@1550)	L-band(@1600)
Low-slope type NZ-DSF #C (Table 1)	10^{-18}	10^{-5}
Fabricated NZ-DSF #2 (Table 2)	10^{-17}	10^{-9}

較した。

シミュレーションではまず、ファイバに入射する NRZ 信号のパワーを一定とし、試作 NZ-DSF #2 (表 2) 及び #C (表 1) の各ファイバのロスに完全補償するのに十分なラマン励起光パワーの条件を探した。信号波長 1550 nm (C-band) の場合、超低分散スロープ型 NZ-DSF である試作 #2 を伝送路としたシステムでは、低分散スロープ型 NZ-DSF #C を伝送路としたシステムの 64% のパワーで足りることがわかった。信号波長 1600 nm (L-band) の場合に必要のパワーも、#2 は #C の 65% であった。このように、分布ラマン増幅で伝送損失を完全に補償する励起光パワーは、ラマン利得の大きな試作 NZ-DSF では小さくすむことが確認できた。

表 3 に、最悪チャンネルにおける BER の最小値を C-band 伝送、L-band 伝送それぞれについて示す。C-band 伝送においては、#2、#C とともに良好な BER を得た。しかし L-band においては、試作 NZ-DSF #2 のほうが良好な BER を示すことがわかった。

図 7 に、L-band 伝送での受光パワーに対する BER の関係を示す。試作 NZ-DSF #2 では、L-band での累積分散を抑制したことにより低分散スロープ型 NZ-DSF #C に比べて L-band における伝送特性が改善できており、BER で 10^{-9} を実現している。

よって試作 NZ-DSF #2 は、分散補償なしでも、分布ラマン増幅を用いた C-band、L-band での 10Gbit/s 伝送が可能であると考えられる。

7. 更なる高速伝送に向けた分散補償器の適用

前節まででは、前提として分散補償器を必要としない、NZ-DSF 単体での伝送に関して述べてきた。しかし、40 Gbit/s 伝送に代表されるような更なる高速伝送を考慮した場合、伝送路における分散トレランスはトータル 60 ps/nm 程度に制御する必要があり、長距離を単一ファイバで構成することは FWM 抑制の観点から不可能である。このため NZ-DSF の分散を補償する分散補償器が必要となってくる^{13), 14)}。

まずは、SMF 用の補償器である DCF で、各種 NZ-DSF を補償した場合のそれぞれの補償率を表 4 に示す。今回試作した

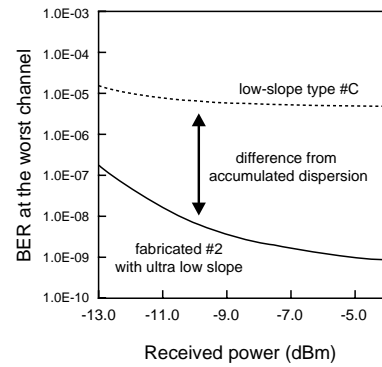


図7 L-band帯における BER
BER at L-band

表4 各種伝送路の分散補償率の比較
Dispersion compensation for various transmission fibers

	Compensating Rate with DCF @1550	Compensation (Design of DSCF)
SMF	100%	easy ↑ ↓ difficult
Fabricated NZ-DSF with ultra low slope #2 (Table 2)	82%	
Low-slope type NZ-DSF #C (Table 1)	35%	
Large- A_{eff} NZ-DSF #B (Table 1)	20%	

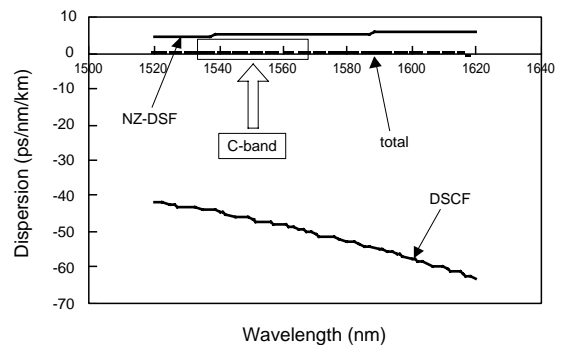


図8 DSCFによるNZ-DSFの分散補償
Optimized design of NZ-DSF+DSCF

NZ-DSF #2 (表 2) は DCF での補償率が NZ-DSF の中で一番大きく、補償器の設計が容易であるといえる。

実際に、今回試作した NZ-DSF #2 の分散スロープを最適に補償する分散スロープ補償ファイバ (DSCF) の設計を行った結果、波長 1550 nm での補償率は 100% となった。図 8 に、今回試作した NZ-DSF #2 と、その NZ-DSF を最適に補償する DSCF、及び補償後の伝送路全体の平均分散を示す。

図 8 において、補償後の伝送路全体の平均分散値 (図中では "total" として表示) が C-band 帯全域にわたってほぼゼロであることがわかる。この部分の縦軸のスケールを拡大して表示したものが図 9 のグラフである。図 9 において、C-band 帯においては補償後の平均分散が $-0.05 \sim 0$ ps/nm/km 以内に収まっている。したがって、今回試作した NZ-DSF #2 と、最適設計された DSCF とで構成される伝送路で C-band での 40 Gbit/s 伝送が可能であると考えられる。

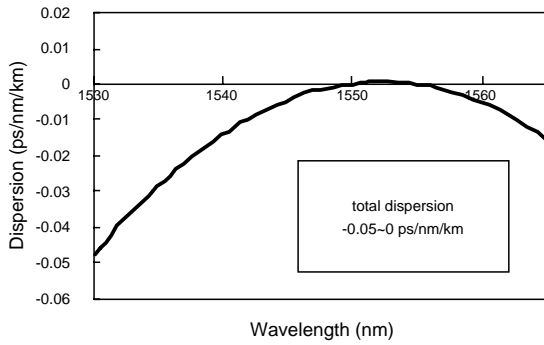


図9 補償後のトータルの分散特性
Total dispersion at C-band

8. おわりに

今回、次世代の陸上伝送路として、超低分散スロープを有する NZ-DSF の開発を検討した。分散スロープ低減を最優先課題とし、既存の分散スロープ低減型 NZ-DSF の分散スロープ $0.045 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ より小さな $0.020 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ を実現することを目標とした。いくつかのプロファイルを検討し、シミュレーションによる最適パラメータの絞り込みを行い、試作をした結果、 $A_{\text{eff}} 45 \mu\text{m}^2$ を維持し分散スロープを $0.020 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ まで低減することができた。分散スロープを低減したことで、長波長帯域における累積分散を抑制し、かつ、ゼロ分散波長が短波長側へシフトしたことで FWM 発生を回避できる波長帯域が短波長側へ広がり、広い帯域において伝送が可能となった。

つぎに、ラマン増幅器との適合性も検討した。ゼロ分散波長が短波長側へシフトしたことから、これまで問題となっていたラマン励起光による FWM 発生による干渉を回避することができるようになった。また、 A_{eff} を $45 \mu\text{m}^2$ にしたことから、高効率なラマン増幅が期待できることを確認した。

更に、分布ラマン増幅器を適用したシステムモデルを使って、試作した超低分散スロープ型 NZ-DSF と既存の低分散スロープ型 NZ-DSF を伝送路として伝送シミュレーターを用いた比較検討を行った。その結果、既存の低分散スロープ型 NZ-DSF は、特に L-band において BER が劣化するのに対し、試作した超低分散スロープ型 NZ-DSF は分散補償なしでも、C-band、L-band での 10 Gbit/s 伝送が可能であることがわかった。

また、更なる高速伝送に向けた分散補償器の適用も検討した。SMF 用補償器である DCF でも 82% の補償が可能で、 100% 補償をする専用の補償器の設計も容易であることを確認した。

参考文献

- 1) K. Mukasa, R. Sugizaki, T. Yagi, Y. Suzuki and K. Kokura; Wide-band Dispersion Management Transmission Line with Medial Dispersion Fiber (MDF), Proceeding of ECOC'00, 2-4-2, 2000.
- 2) Y. Liu, W. B. Mattingly, D. K. Smith, C. E. Lacy, J. A. Cline, and E. M. De Liso; Design and fabrication of locally dispersion-flattened large effective area fibers, Proceeding of ECOC'98, pp37-38, 1998.
- 3) D. W. Peckham, A. F. Judy, R. B. Kummer; Reduced dispersion slope, non-zero dispersion fiber, Proceeding of ECOC'98, pp. 139-140, 1998.
- 4) S. Bigo, S. Gauchard, S. Borne, P. Bousselet, P. Poignant, L. Lorcy, A. Bertaina et al; 1.5Terabit/s WDM transmission of 150 channels at 10Gbit/s over $4 \times 100 \text{ km}$ of TeraLightTM fiber, Proceeding of ECOC'99, PD2-9, 1999.
- 5) 大石敏弘, 久保祐二, 横山佳生, 加藤孝利, 吉田元秀, 大西正志, 牧尾喜憲; 超広帯域伝送用分散シフトファイバ, 2000年電子情報通信学会総合大会 C-3-44, 2000.
- 6) 朽網 寛, 松尾昌一郎, 大沢 誠, 原田光一, 高橋浩一; Ultra Wave-SS ファイバの陸上用特性評価結果, 2001年電子情報通信学会総合大会 C-3-28, 2001.
- 7) 熊野尚美, 武笠和則, 八木 健; ノンゼロ分散シフトファイバの分散スロープ低減に向けての検討, 2001年電子情報通信学会総合大会 C-3-27, 2001.
- 8) 熊野尚美, 武笠和則, 杉崎隆一, 八木 健; 超低分散スロープ型 ノンゼロ分散シフトファイバと分散スロープ補償ファイバ (DSCF) による広帯域伝送路に関する検討 2001年光通信システム研究会 OCS 2001-32, 2001.
- 9) 熊野尚美, 武笠和則, 八木 健; 超低分散スロープ型 ノンゼロ分散シフトファイバの低非線形化の検討, 2001年電子情報通信学会 2001年ソサイエティ大会 C-3-107, 2001.
- 10) N. Kumano, K. Mukasa, M. Sakano, H. Moridaira, T. Yagi and K. Kokura; Novel NZ-DSF with Ultra-low Dispersion Slope Lower than $0.020 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$, ECOC'01 PD. A. 1-5, 2001.
- 11) W. S. Lee, Y. Zhu, B. Shaw, D. Watley, C. Scabill, J. Homan, C. Fluder, M. Jones and A. Hadjifotiou; 2.56Tb/s capacity, 0.8b/Hz.s DWDM transmission over 120km NDSF using polarization-bit-interleaved 80Gb/s OTDM signal, OFC'01 Technical Digest, TuU1, 2001.
- 12) M. Gunkel, F. Kuppers, J. Berger, U. Feiste, R. Ludwig, C. Schubert, C. Schmidt, H. G. Weber; 40Gb/s RZ unrepeated Transmission over 252km SMF using Raman Amplification, OFC'01 Technical Digest, TuU3, 2001.
- 13) Yann Frignac and Sebastien Bigo; Numerical optimization of residual dispersion in dispersion-managed systems at 40 Gbit/s, OFC'00 Technical Digest, TuD3, 2000.
- 14) R. Sugizaki, K. Mukasa, A. Umeda and Y. Suzuki; Dispersion slope compensating fibers for L-band WDM systems using NZ-DSF, OFC'00 Technical Digest, TuG4, 2000.