

# RDFを用いた分散マネージメント線路

## Dispersion Managed Transmission Line with Reverse Dispersion Fiber

武笠和則<sup>\*</sup>  
Kazunori Mukasa

杉崎隆一<sup>\*</sup>  
Ryuichi Sugizaki

速水修平<sup>\*2</sup>  
Syuhei Hayami

伊勢 聡<sup>\*2</sup>  
Satoru Ise

**概要** 長距離で大容量のWDM伝送を可能とする次世代の伝送路として、当社は既存のシングルモード光ファイバ(SMF)と、それと全く逆の波長分散特性を持つ逆分散ファイバ(RDF; Reverse Dispersion Fiber)を組み合わせた線路を提案している。今回、屈折率プロファイルの最適化を行い、低非線形・低損失・低PMDを維持しつつ、広い波長範囲にわたって線路の分散をほぼ完全にフラットにできるRDFを開発した。更に、現行のタイト構造の海底ユニットを試作し、実用上問題のない良好な特性を確認している。

### 1. はじめに

近年、長距離海底通信では大容量WDM伝送システムの導入が本格化し、これに用いる伝送路として様々な構造の分散シフトファイバが提案され、かつ実用化されて来た。ただ、それらの分散シフトファイバでも、広い波長範囲にわたる分散フラット化や、非線形抑制のための $A_{\text{eff}}$ 拡大において、将来の大容量化に対応できるほどの特性改良は実現できていない。

一方、3～4年前から、1300 nm用SMFの陸上既存線路のアップグレードを目的として、分散補償ファイバモジュール(DCFM)を使用した1550 nmのWDM伝送が始まっている。これに用いられるDCFでは、広い波長範囲で分散をほぼ完全に相殺できる分散スロープ補償タイプが、既に商用化されている。ただ、DCFは中継局内に設置されるため、モジュールのコンパクト化への強い要求から、短尺で大きな分散量を得るための設計がなされる。具体的には、コアの屈折率差( $\Delta$ )を極端に高くしたファイバ構造を採用することで、負の大きな分散を実現している。反面、Geを高ドーピングするため、伝送損失が高い、非線形性が大きい、PMD(偏波分散)の劣化が起こりやすいなど、いくつかの欠点も併せ持つことになる。このため、モジュール用のDCFを分散マネージメント線路としてそのまま用いた場合、SMFと組み合わせることで分散フラットな線路は容易に実現できるが、線路全体での伝送損失が従来の分散シフトファイバに比べて大幅に高くなる。更に、DCFが持つ高非線形性による信号光の入力制限や、高PMDによる波形劣化など、大容量WDM伝送におけるいくつかの障害も同時に生ずる。

そこで、我々は、上記の問題を解決すべく屈折率プロファイルの検討を進め、低損失・低非線形・低PMDであると同時に、ほぼ完全に分散フラットな線路を実現する、線路用として最適化された逆分散ファイバ(RDF)を開発した<sup>1)~2)</sup>。本報告では、RDFのプロファイル設計、伝送特性、WDM伝送実験、及び実用化に向けたユニット試作結果などを述べる。

### 2. RDFの設計

大容量WDM伝送を考えた場合、線路の波長分散を広い波長範囲にわたって小さくすることが必要になる。RDFは、シングルモード光ファイバと接続することで分散マネージメント線路を構成しているために、その単体の特性より伝送路トータルの分散特性と分散スロープ特性が重要となる。伝送路トータルでの分散平坦性を評価するために以下の式で定義される分散補償率という基準が一般的に使用されている。

$$\begin{aligned} \text{分散補償率}(\%) &= \frac{\text{Slope}_{\text{RDF}}}{\text{Slope}_{\text{SMF}}} / \frac{\text{Dispersion}_{\text{RDF}}}{\text{Dispersion}_{\text{SMF}}} \times 100 \\ &= \frac{\text{DPS}_{\text{RDF}}}{\text{DPS}_{\text{SMF}}} \times 100 \end{aligned}$$

$$\text{DPS}(\text{nm}) = \frac{\text{Dispersion}}{\text{Slope}}$$

分散補償率が100%に近いほど、広帯域で零分散な伝送路の実現が可能となる。また、RDFとSMFのDPSが一致したときのみ分散補償率が100%となるため、ファイバ単体の分散スロープ補償能力を示す指標としてDPSも広く使用されている。

分散マネージメント伝送路の特徴は、広帯域な分散補償特性にあるため、RDFの設計はSMFと組み合わせることで分散補償率が100%になること、言い換えるとDPSがSMFと一致することを

<sup>\*</sup> 光ファイバ事業部 ファイバ開発センター

<sup>\*2</sup> 光ファイバ事業部 千葉ファイバ製造部 技術課

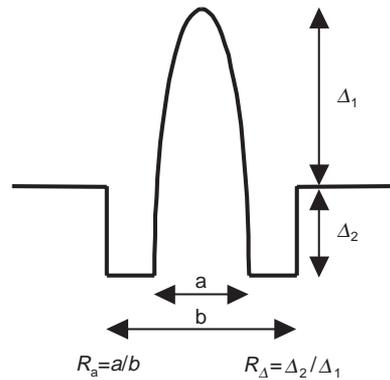


図1 W型プロファイル  
Profile of W-shape

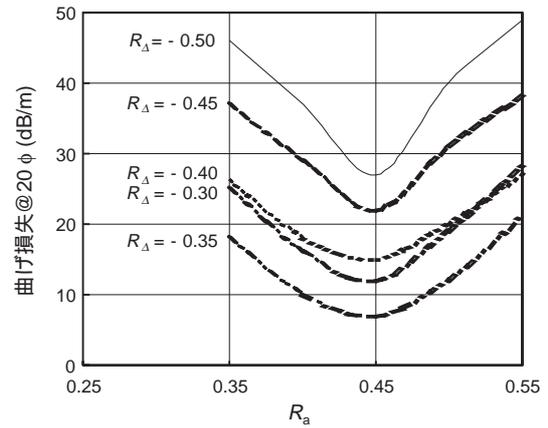


図3 RₐとR\_Δに対する曲げ損失の関係  
Relationship between bending loss and Rₐ and R\_Δ

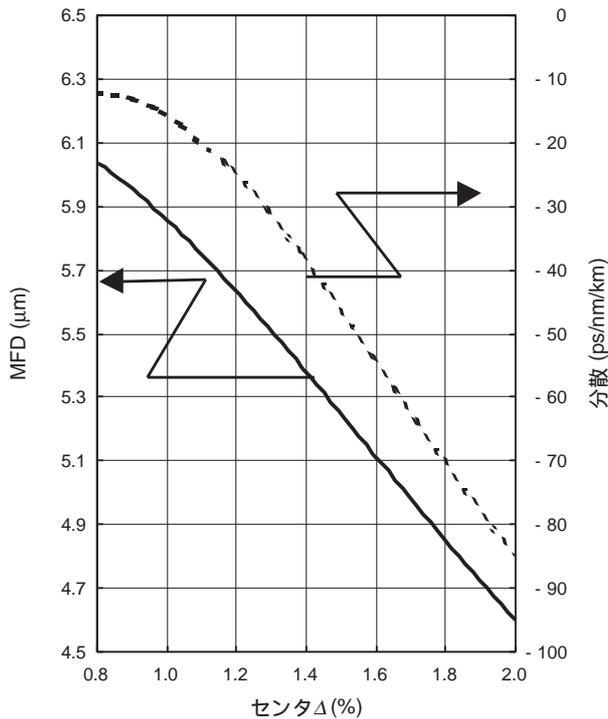


図2 センターの比屈折率差と分散, MFDの関係  
Relationship of dispersion, MFD and center relative refractive index difference

最大の目標とした。DCFにおいて、図1に示すようなW型のプロファイルは構造が比較的単純で、製造性が高く、かつ、100%に近い分散補償率を達成できるプロファイルとして盛んに検討されている<sup>3)~5)</sup>。そこで、RDFにもW型のプロファイルを選択し、最適化を行った。

W型プロファイルのパラメータを最適化することにより高い分散補償性能を達成することは十分可能である。しかし、高速大容量伝送を考えた場合には、分散補償特性と同時に非線形現象による波形劣化を抑制することが極めて重要である。非線形現象の1つである四光波混合 (Four Wave Mixing: FWM) は、局所分散の小さいところで顕著であり、特にファイバの零分散近傍では、大きな影響を与える。しかしSMFやDCFのようなファイバは、大きな局所分散を持つことからFWMに関しては有利である。

しかしながら、従来のDCFはその構造上、MFD (モードフィールド径) が小さくセンタコアのΔ値が大きいため、自己位

相変調 (Self Phase Modulation: SPM) や相互位相変調 (Cross Phase Modulation: XPM) による波形の歪みを受けやすい。これは線路としての使用を考えた場合には大きな障害となる。SPMやXPMによる波形の歪み ( $\phi_{NL}$ ) は、以下の式で表される。

$$\phi_{NL} = (n_2/A_{eff}) \times L_{eff} \times (P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n)$$

$n_2/A_{eff}$ ; 非線形定数  
 $n_2$ ; 非線形屈折率  
 $A_{eff}$ ; 実効コア断面積  
 $L_{eff}$ ; 実効長  
 $P$ ; 入力光パワー

この式から  $A_{eff}$  (MFDの2乗に比例) を大きくすることや、 $n_2$  (おおむね、センタコアのΔ値が大きくなるに従って大きくなっていく) を小さくすることが波形の歪みの抑制に有効であることがわかる。

RDFは、プロファイルを最適化することで、非線形性を減じるように設計されている。特にセンタのΔ値 ( $\Delta_1$ ) が非線形特性に大きな影響を与える。 $\Delta_1$ とMFDの関係を図2に示す。

図2の結果から  $\Delta_1$ を1.0~1.2%程度と低めの値に設定することにより、MFDは拡大し、非線形屈折率が低下し、低非線形性が達成されることがわかる。しかし、一般的に  $\Delta_1$ を小さくすると曲げ損失が増大するので、センタコアの形状や、 $R_a$ や  $R_\Delta$ を最適化することにより、高補償率を維持しながら、曲げ損失が大きくないように設計した。分散補償率を100%にして、 $R_a$ と  $R_\Delta$ を変化させたときの曲げ損失特性の変化を図3に示す。

### 3. ファイバ特性

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、合成条件や線引き条件を最適なところに設定することによりRDFを作製した。作製したRDFの特性を表1に示す。表に示すように、非常に高い分散補償率を維持しながら、低損失、低PMDが達成されていることが分かる。また、最も注目した非線形性に関しても、非線形定数が  $12.4 \times 10^{-10}$  (1/W)程度であり、従来のDCFと比べて6割程度の低非線形化が図られている。

表1 試作RDFの特性例  
Characteristics of prototype RDF

RDF諸元	特性例
クラッド径 (μm)	125.0 ± 1.0
クラッド非円率 (%)	0.1
コア偏芯 (μm)	0.1
伝送損失 (dB/km) @ 1550 nm	0.24
分散 (ps/nm/km) @ 1550 nm	- 20 ± 5.0
DPS (nm) @ 1550 nm	350
分散補償率 (%) @ 1550 nm	94
λc (nm)	820
MFD (μm) @ 1550 nm	5.6
A <sub>eff</sub> (μm <sup>2</sup> ) @ 1550 nm	24
非線形定数 (1/W)	12.4 × 10 <sup>-10</sup>
20 φ曲げ (dB/m) @ 1550 nm	10
PMD (ps/ km)	0.07
スクリーニングレベル	>1.0 %

表2 各正分散ファイバの特性  
Characteristics of positive dispersion fibers

名前	分散 (ps/nm/km)	DPS (nm)	損失 (dB/km)	A <sub>eff</sub> (μm <sup>2</sup> )
SMF	16.6	286	0.195	75
CSF	18.5	308	0.189	83
FF	18.5	330	0.172	73

λ=1550 nm

表3 線路全体での特性  
Characteristics of transmission lines

	平均損失 (dB/km)	分散Slope (ps/nm <sup>2</sup> /km)
SMF + RDF	0.213	0.005
CSF + RDF	0.210	0.003
FF + RDF	0.201	0.001
DSF	0.215	0.070
低スロープDSF	0.220	0.035

λ=1550 nm

#### 4. RDF を用いた光伝送路の構成

RDFの最大の特徴は正分散ファイバと組み合わせてトータルで分散がフラットな線路を達成できることである。このためRDFのパフォーマンスは伝送路全体での特性で決まるということになる。そこで、当社の通常シングルモードファイバ(SMF)、Ge-dopedカットオフシフトシングルモードファイバ(CSF)と、Fully Fluorine dopedファイバ(FF)を用いて、トータルの伝送路特性を評価した。

今回、RDFのペアファイバとして用いた正分散ファイバの各々の簡単な特性を表2に示す。

各々のファイバとRDFを最適長で接続した場合の、平均損失、及び分散スロープ特性を表3に示す。表3に示されている

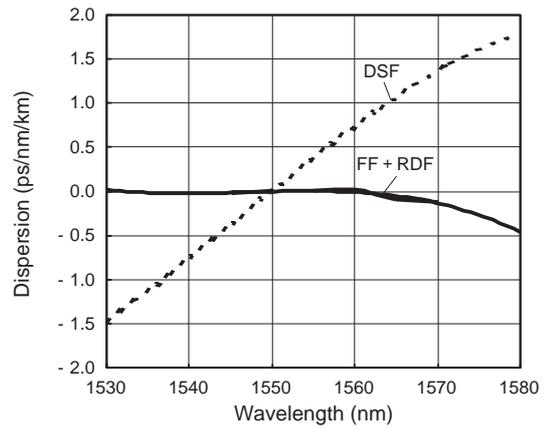


図4 通常DSFとFF + RDFの分散特性の比較  
Dispersion characteristics of SMF+RDF and DSF

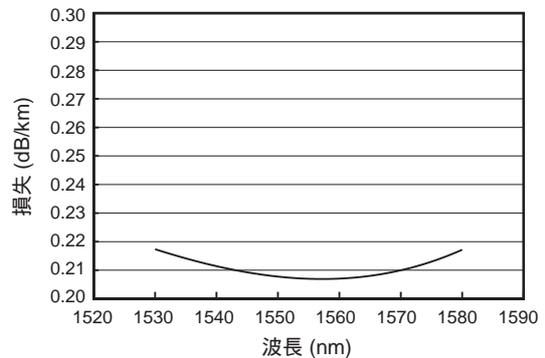


図5 FF + RDFの波長損失特性  
Attenuation spectrum of FF+RDF

ように各線路で、非常に低損失で分散フラットな特性が得られていることが分かる。従来のDSFが0.07 ps/nm<sup>2</sup>/km程度、最近盛んに検討されている分散スロープを低減したDSFでも0.03 ~ 0.04 ps/nm<sup>2</sup>/km程度であることを考えると、正分散ファイバ+RDF線路で、1桁小さい分散スロープの値が得られていることは、特筆すべき事項である。

FF + RDF線路の波長分散特性を従来DSFの波長分散特性と合わせて図4に示す。このような特筆すべき分散平坦性から、この伝送路は広帯域WDM伝送に非常に適した線路と言える。長波長帯において、多少、負のスロープを持つ傾向が見受けられるが、実使用上問題のないレベルである。また、例えば、正の分散スロープを持つファイバを分散補償器として用いることで、長波長域でも完全な分散の波長平坦性が得られ、C、L両バンドを用いたWDM伝送も可能である<sup>6)</sup>。

分散の波長平坦性と同時に、損失の波長平坦性も極めて重要な事項である。FF + RDFの波長損失特性を図5に示す。波長損失特性に関しても、分散と同様に非常に平坦な特性が得られている。

つづいて、非線形性について考えてみたい。RDFが短尺で用いる従来のDCFと比して60%程度の低非線形化が図られたとはいえ、RDFの非線形定数は通常SMFに比べ、まだ1桁大きい数値となっている。これは、負の分散スロープを得るために用いているW型のプロファイルが、SMFのようなプロファイルと比べると、MFDの拡大が非常に難しいプロファイルだからである。

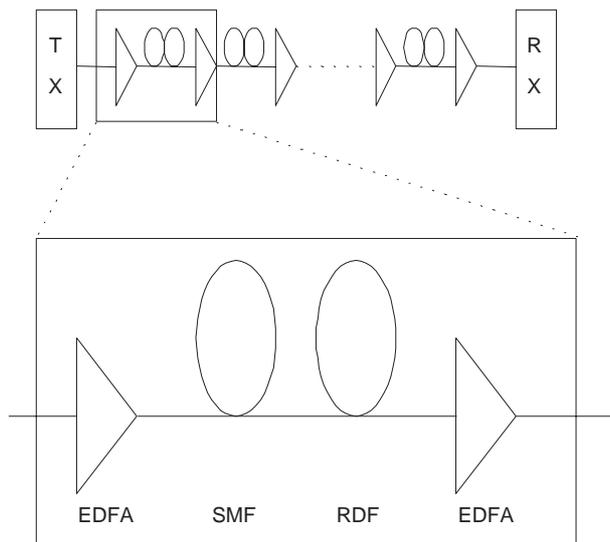


図6 SMFとRDFから構成されるWDM伝送用システムの例  
WDM transmission line consisted of SMF and RDF

表4 正分散ファイバとRDFの接続特性  
Fusion splice loss between RDF and positive dispersion fibers

	改善前 (dB)	改善後 (dB)
SMF	0.70	0.20
CSF	0.73	0.23
FF	0.65	0.17

図6に、SMFとRDFを組み合わせた伝送路の例を示す。SMFは非常に低非線形性ファイバなので、これを有効に活用するためには、図6のようにEDF増幅直後の高パワーが入射される前段に置くのが望ましい。第2章でも述べたように、非線形性による波形ひずみの起こりやすさは入力される光パワーに比例する。光の強度は、当然、光増幅器の直後が一番強く、その後、前段のファイバ（この系の場合は、SMF）の伝送損失により指数関数的に減少する。その後、後段のファイバに、減衰した光が入力されるため、SMFに比べて非線形性の高いRDFでも非線形現象による波形劣化が起こりにくくなる。

更に、前述のような異種のファイバから構成される系を考える際に、もう1つ注意しなくてはならないのは、接続特性である。RDFの最大の特徴は $\Delta_1$ を小さくして、従来のDCFよりもMFDを拡大しているところであるが、RDFのMFDは通常SMFに比べた場合は、まだ1/2程度である。そこで、SMFとRDFの接続特性は1つの重要な課題である。通常の融着方法により、SMFとRDFの融着を行った場合には、融着損失は、0.8～1.0 dBにもなる。そこで、融着条件の最適化により、接続損失を低減する検討を行った。具体的には、熱によるGe層の拡散を用いた特殊な融着方法を用いることにより最適化を行った。表4に最適化前後での各種正分散ファイバとの融着接続損失を示す。融着条件の最適化を行うことで、どの正分散ファイバとRDFの組合せでも0.30 dB以下の低い損失で融着接続可能なことを確認した。

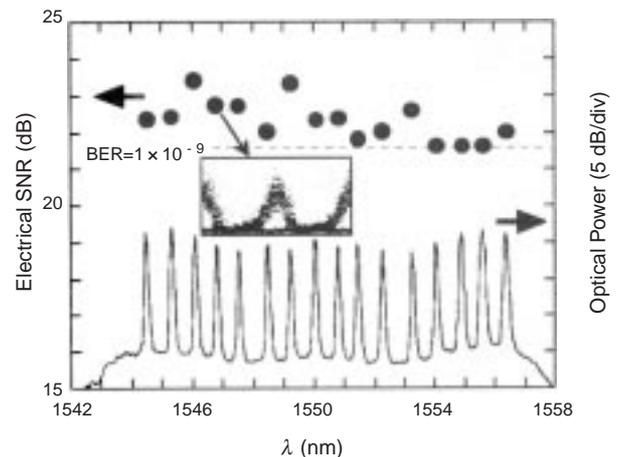


図7 SMFとRDFを用いた10 Gb/s × 16波 × 9412 km 伝送後の光スペクトラム<sup>8)</sup>  
Optical spectrum of 10 Gb/s × 16ch × 9412 km WDM transmission with SMF and RDF<sup>8)</sup>

上記のような正分散ファイバとRDFを組み合わせた線路を用いて種々の伝送実験が行われており、WDM、TDMの両面において、非常に優れた伝送特性が報告されており、将来の高速大容量伝送路として、大変有望な線路であることが示されている<sup>7)～9)</sup>。

WDM伝送実験の一例を図7に示すが、長距離にわたり、高速大容量伝送が可能であることが示されている。

## 5. ユニット特性

これまで述べてきたようにRDFは線路型の分散補償ファイバなので、ケーブル化後の特性が従来の海底ケーブルと比して同等レベルであることが要求される。そこで、現在国内で使用されている海底ケーブル用タイト構造のユニットを試作し、その特性を評価した。

評価に使用したファイバの被覆径は、現在海底線で採用されている $\phi$  400  $\mu$ mとし、外径 $\phi$  2.55 mmの8心ユニットを試作した。このときのユニット断面図を図8に示す。

今回の試作では、RDFは表1に示した代表的特性を持つファイバを使用した。RDF単体のユニット特性調査に主眼を置いたため、各心線には単一のRDFを用いた。

ユニット化の前後において、各心線とも伝送損失、分散特性PMDなどすべての項目において特性変化は発生しなかった。使用環境の変化における特性の変動を確認するためRDFユニットの環境試験として温度損失特性を評価するとともに、側圧試験、水圧試験を実施した<sup>10)</sup>。各試験条件及び結果を表5に示す。評価したすべての項目において通常海底ユニットと同等の特性が得られている。温度損失特性を図9に示す。通常海底ユニットと同様に低温で損失減少、高温で損失増大の挙動が見られ、変化したレベルも通常品と同等である。この結果により、RDFが海底ケーブル用のファイバとして十分使用可能であることが示された。

また、詳細については割愛させて頂くが、海底用ケーブル以外にもRDFを用いたテープスロットケーブル、及びルーズチューブケーブルについても試作を行い、良好な特性であることも、併せて確認している<sup>11)</sup>。

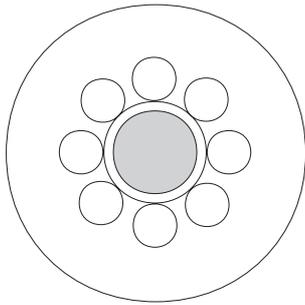


図8 ユニット断面図  
Structure of the RDF unit

表5 RDFユニットの環境試験結果  
Results of environmental test on RDF unit

項目	試験条件	損失変動
温度特性	-20 ~ +50	< ±0.004 dB
側圧特性	0 ~ 50 N/cm	< ±0.002 dB
水圧特性	0 ~ 10 MPa/cm <sup>2</sup>	< ±0.01 dB

## 6. おわりに

W型のプロファイルを最適化することにより、SMFと組み合わせて用いる低非線形で低損失、低PMDのRDFを開発した。また、RDFをSMF等の正分散ファイバと組み合わせることで、非常に分散フラットで、低損失な伝送路を構成できることが確認できた。この伝送路を用いた伝送系で、長距離大容量伝送の実験が数多く行われており、非常に良好な伝送特性であることが報告されている。

海底ケーブルとしての使用を仮定してRDFのユニット特性についての確認を行い、良好な特性であることを確認した。

### 参考文献

- 1) K. Mukasa, Y. Akasaka, Y. Suzuki and T. Kamiya, Novel network fiber to manage dispersion at 1.55  $\mu\text{m}$  with combination of 1.3  $\mu\text{m}$  zero dispersion single mode fiber, Proceeding of ECOC'97, (1997), MO3C-127
- 2) 武笠和則 赤坂洋一 鈴木好久, 低非線形線路型DFCFの開発, 1997年電子情報通信学会ソサイエティ大会(1997), C-3-76
- 3) Y. Akasaka, R. Sugizaki, A. Umeda, I. Oshima and K. Kokura, Dispersion-compensating fiber with W-shaped index profile, OFC'95 Technical Digest, (1995) ThH3

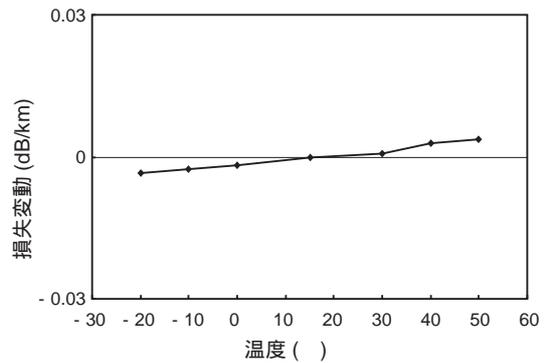


図9 RDFユニットの温度損失特性  
Temperature vs. loss characteristics of RDF unit

- 4) R. Sugizaki, Y. Akasaka, S. Arai, K. Furukawa, Y. Suzuki, T. Kamiya and H. Hondo, High-reliability dispersion compensator using negative slope DCF, IWCS'96, (1996) pp.888-891
- 5) Y. Akasaka, R. Sugizaki and T. Kamiya, Dispersion compensating technique of 1300nm zero-dispersion SM fiber to get flat dispersion at 1550nm range, Proceeding of ECOC'95, (1995) We.B.2.4
- 6) K. Fukuchi, M. Kakui, A. Sasaki, T. Ito, Y. Inada, T. Tsuzaki, T. Shitomi, K. Fujii, S. Shikii, H. Sugahara, A. Hasegawa, 1.1-Tb/s (55 x 20-Gb/s) dense WDM soliton transmission over 3,020-km widely-dispersion-managed transmission line employing 1.55/1.58- $\mu\text{m}$  hybrid repeaters, Proceeding of ECOC'99 (1999) PD2-10
- 7) K. Yonenaga, A. Matsuura, S. Kuwahara, M. Yoneyama, Y. Miyamoto and K. Hagimoto, Dispersion-compensation-free 40 Gbit/s x 4-channel WDM transmission experiment using zero-dispersion-flattened transmission line, OFC'98 Technical Digest (1998), PD20
- 8) 村上 誠, 前田英樹, 今井崇雅, ファイバ高次分散マネージメントによる16 x 10Gb/s長距離波長多重伝送, 1998年電子情報通信学会ソサイエティ大会(1998), B-10-167
- 9) T. Yamamoto, E. Yoshida, K.R. Tamura and M. Nakazawa, Single-channel 640 Gbit/s TDM transmission over 100 km, Proceeding of ECOC'99 (1999) We C1.4
- 10) 大山 昇 桑原守二 監修, 光海底ケーブル通信, KEC (1991), 81
- 11) M. Morimoto, I. Kobayashi, H. Hiramatsu, K. Mukasa, R. Sugizaki, Y. Suzuki, Y. Kamikura, Development of Dispersion Compensation Cable Using Reverse Dispersion Fiber, Proceedings of APCC/OECC'99 (1999) C6.8 pp.1590-1593