

# MDFを用いた分散マネージメント線路

## Dispersion Managed Transmission Lines with Medial Dispersion Fiber

武笠和則\*

Kazunori Mukasa

八木 健\*

Takeshi Yagi

小倉邦男\*

Kunio Kokura

概要 10 Gb/s伝送が実用化されていくのに伴い、研究ベースでは40 Gb/s信号を用いた伝送実験の検討が始まっている。長距離の40 Gb/s伝送を行うための伝送路には、低損失や低非線形性、分散フラットネスといった従来から要求されている特性だけでなく、低累積分散や低PMDといった新たな特性が要求される。今回、それらの要求にこたえるべく、NZ-DSFとSMF(RDF)の中間の分散値を有する中間分散ファイバ(Medial Dispersion Fiber; MDF)を開発したので報告する。

### 1. はじめに

近年のマルチメディアサービスの進展により、インターネットに代表される通信トラフィックの増大は進み続けており、ネットワークの大容量化への要求はますます加速するものと予想される。1990年代初頭の光ファイバ増幅器の実用化を契機とした光ファイバ通信システムの高速度大容量化は、伝送速度10 Gb/sシステムの実用化として結実してきている。現在、大陸横断のような長距離大容量伝送方式としても、10 Gb/sベースのWDM伝送の実用化が検討されており、例えば、ECOC'1999(1999年9月、ニース)では、内藤らの1 Tb/s × 10,000 km伝送<sup>1)</sup>が発表されている。これらのTb/sレベルの長距離伝送システムに対応するために、かねてより様々なタイプの伝送路が提案されてきた。

例えば、1.55 μmで微少分散を有する分散シフトファイバ(NZ-DSF)が検討されてきたが、 $A_{\text{eff}}$ が50 μm<sup>2</sup>程度と小さいことから、自己位相変調(Self Phase Modulation: SPM)や相互位相変調(Cross Phase Modulation: XPM)による波形のひずみが問題とされてきた。SPMやXPMによる波形のひずみ( $\phi_{\text{NL}}$ )は、以下の式で表される。

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

$n_2 / A_{\text{eff}}$ ; 非線形定数

$n_2$ ; 非線形屈折率

$A_{\text{eff}}$ ; 実効コア断面積

$L_{\text{eff}}$ ; 実効長

$P$ ; 入力光パワー

そこで、非線形現象を抑制するためにNZ-DSFの $A_{\text{eff}}$ を拡大する検討がなされてきたが、分散傾きの平坦化との両立が難しいことが問題となっていた。また、NZ-DSFのような分散の小さいファイバでは、零分散を避けているとは言え、広帯域伝送を考えた場合にはFWM現象が無視できないと言う問題もあった。

そこで当社では、非常に低非線形で低損失な1.31 μm零分散SMF(以下SMF)を用いて1.55 μm帯WDM伝送を行うために、SMFの分散、及び分散スロープを補償するファイバとして、モジュールとして用いられるDCF(Dispersion Compensating Fiber, 分散補償ファイバ)と線路型のRDF®(Reverse Dispersion Fiber, 逆分散ファイバ)を開発してきた。特に、RDFはDCFに比べ低非線形、低損失、低PMDという特徴を持ち、このRDFとSMFを組み合わせた分散マネージメント線路を用いて長距離大容量伝送の実験が数多くなされ<sup>2), 3)</sup>、非常に良好な伝送特性であることが報告されている<sup>4), 5)</sup>。

一方、最近の学会レベルではマルチTbit/s伝送実験の発表の中で、より高速の40 Gbit/sの検討が主流となりつつある。例えばECOC'2000(2000年9月、ミュンヘン)では、伊藤らのSMF + RDFを用いた6.4 Tb/s(40 Gb/s × 160 ch) × 186 km<sup>6)</sup>、S. BigoらのTera-Light(分散 + 8 ps/nm/km, Slope + 0.057 ps/nm<sup>2</sup>/km, 伝送損失0.205 dB/km)を用いた5.1 Tb/s(40 Gb/s × 128 ch) × 300 km<sup>7)</sup>、A. FarbertらのConventional NZ-DSFを用いた7 Tb/s(40 Gb/s × 176 ch) × 50 km伝送<sup>8)</sup>などが発表されている。

しかし、いずれの発表においてもまだ短距離の実験に終わっており、40 Gbit/s以上の高速伝送の長距離化の難しさを伺わせる。高速伝送を阻む一つの要因として、伝送路の累積分散がある<sup>9)</sup>。図1は文献<sup>9)</sup>を参考に、各種の変調形式における伝送速度と許容分散量の関係の一例を図式化したものである。変調方式によって異なるが、分散許容値は伝送速度の2乗に反比例して小さくなる。例えば、NRZ 40 Gbit/sの信号に対する許容分散量は約100 ps/nmとなっており、高速伝送時における伝送

\* ファイナルフォトニクス研究所 WFチーム

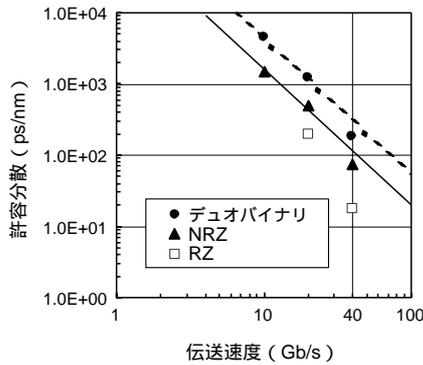


図1 伝送速度と許容分散の関係(文献<sup>9)</sup>)  
Relationship between bit-rate and allowable dispersion<sup>9)</sup>

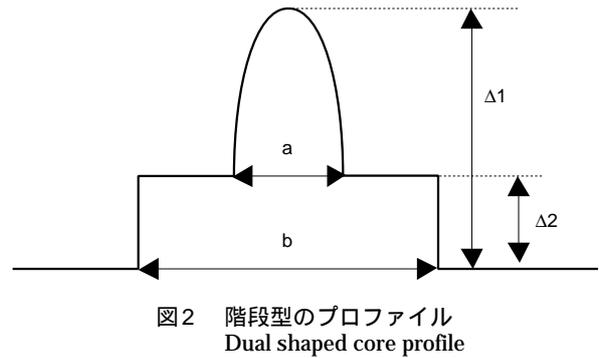


図2 階段型のプロファイル  
Dual shaped core profile

路の累積分散の制限が極めて厳しいことがわかる。

今回我々は、この累積分散に着目し、新しい分散マネジメント線路としてSMFとNZ-DSFの中間の分散値を有する正分散ファイバ(P-MDF)と負分散ファイバ(N-MDF)を組み合わせた線路を開発した。

本論文において、以下にこのMDFの設計と試作結果について述べることにする。

## 2. MDFの開発

### 2.1 設計思想

現在、様々なタイプのSMF, RDFが実用化の段階にあるが、MDFは、P-MDFとN-MDFの組み合わせで累積分散を抑制し、さらなる高速信号の長距離伝送に対応することを目標としている。よって、P-MDF, N-MDF共に、SMFやRDFよりも分散値が小さくなるように設計を行った。こうすることで、お互いを組み合わせたときに、1スパンの最大累積分散値を抑制することが可能である。また、おのおのを組み合わせ、トータル分散をフラット化出来るように、お互いの分散スロープを打ち消しあうような設計を行った。更に、他の特性も、従来の分散マネジメント線路と比べて劣化しないように最適化を行った。

### 2.2 P-MDFの開発

まず、新型分散マネジメント伝送路の前段ファイバとして、正の中間分散を有するファイバ(P-MDF)を開発した。従来のSMFは単純な1層構造を有しており、1.55 μm帯で16 ~ 20 ps/nm/km程度の分散と80 μm<sup>2</sup>程度のA<sub>eff</sub>を有している。このプロファイルで更なるA<sub>eff</sub>の拡大と中間分散を両立しようとすると、曲げ損失の増大が起こり、ケーブル化時に障害が起こる。そこで、階段型プロファイル(図2)を選択し、屈折率分布を最適化することで、従来のSMFより分散の絶対値が小さく、かつA<sub>eff</sub>を拡大した正分散ファイバを検討した。ただし、分散値がNZ-DSF(2 ~ 8 ps/nm/km)程度まで小さくなってしまうと、FWM発生の可能性があるため、NZ-DSFよりは、分散が大きくなるように設計をした。

一般的に、曲げ損失はセンタコアの比屈折率差(Δ1)に大きく依存するので、曲げ損失特性の劣化を抑えるため、センタコアは従来のSMFとほぼ同様の比屈折率差(Δ1 = 約0.4%)

表1 試作P-MDFの特性例(1550 nm)  
Characteristics of P-MDF (1550 nm)

P-MDF諸元	特性例
クラッド径(μm)	125.0
伝送損失(dB/km) @1550 nm	0.19
分散(ps/nm/km) @1550 nm	14.5
Slope(ps/nm <sup>2</sup> /km) @1550 nm	0.07
DPS(nm) @1550 nm	210
λ <sub>c</sub> (nm) @22 m	1400
A <sub>eff</sub> (μm <sup>2</sup> ) @1550 nm	100
n <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> /W) @1550 nm	2.9 × 10 <sup>-20</sup>
20 φ 曲げ(dB/m) @1550 nm	5.0
PMD(ps/km)	0.04

を選択した。その条件でシミュレーションを行い、センタコアのα分布の最適化とΔ2 = 0.1 ~ 0.2%程度の階段層(第2層)の付加によって、14 ~ 15 ps/nm/km程度の低分散と100 μm<sup>2</sup>程度の大A<sub>eff</sub>のSMFが達成できることが分かった。

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P-MDFを作製した。シミュレーションの結果を基に行った試作ファイバの結果を表1に示す。この結果より、SMFよりも小さな分散が得られていることで、分散による伝送速度の制限を緩和できる。しかし、NZ-DSFと比べると、十分大きな分散であるため、FWM発生も抑制できる。更に、A<sub>eff</sub>も100 μm<sup>2</sup>程度と、従来のSMFと比べて、拡大されており、非線形性が抑制されていることが分かる。分散スロープも0.07 ps/nm<sup>2</sup>/km以下に抑えられており、かつ伝送損失やPMD等の他の特性もすべて良好であった。

### 2.3 N-MDFの開発

つづいて、新型分散マネジメント伝送路の後段ファイバとして、負の中間分散ファイバ(N-MDF)を開発した。従来型のRDFでは、センタコア層の隣にディプレスト層を有するW型構造が用いられてきた。RDFは、このW型の構造において、限界に近い低Δ1を用いることで、分散絶対値を抑制し、極力大きなA<sub>eff</sub>(24 μm<sup>2</sup>程度)や低損失、低PMD特性を得ている。そのため、この構造をベースにして、さらなる分散の抑制とA<sub>eff</sub>の拡大を図るのは難しい。そこで、今回のN-MDFにおいては、ディプレスト層の外側に、サイドコア層を設けた

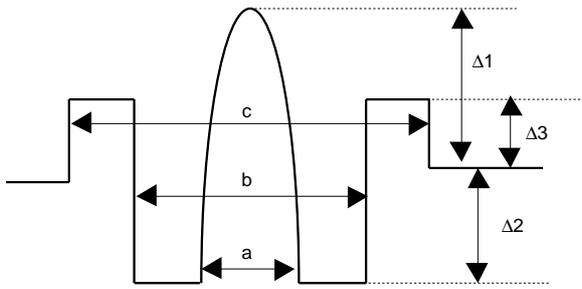


図3 W + サイドコア型のプロファイル  
W plus side-core layer profile

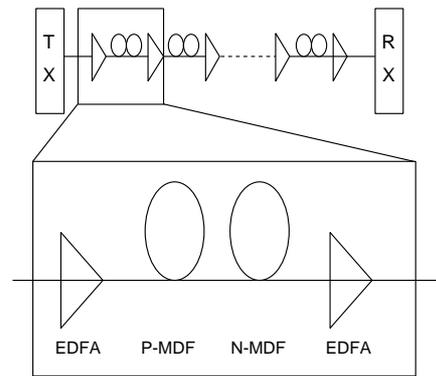


図4 P-MDFとN-MDFで構成されるシステムの例  
System example consisted of P-MDF and N-MDF

W + サイドコア型プロファイル (図3) を用い、分散の絶対値を前段ファイバとほぼ同様の約 14 ~ 15 ps/nm/km 程度に設定して、最適な負分散、負分散勾配ファイバを検討した。

一般的に、分散スローブを負にするために、センタコアのわきにディプレスト層を設けた構造では、 $A_{eff}$  の拡大が難しい。そこで、 $\Delta 1$  を RDF よりも低い値に設定することで、分散値を抑制しながら、 $A_{eff}$  の拡大を検討した。センタコアを低い値に設定することは、分散抑制や非線形性の面だけでなく、低損失や低 PMD が得られやすいという点でも、メリットがある。ただし、センタコアの  $\Delta 1$  を低くすることは、一般的に曲げ損失の増大を伴い、ケーブル化時のロス増等の深刻な問題を引き起こす可能性があるため、ディプレスト層の外側にサイドコア層を付加することで、曲げ損失の増大を抑制した。ただし、このサイドコア層が高すぎたり、厚すぎたりすると、カットオフ波長が増大するので、シングルモード条件を満たすように設計を行った。また、サイドコア層を付加しても分散補償率が劣化しないように、他のパラメーターを最適化した。

以上の設計を参考に、N-MDF も試作を行った。試作の結果を表2に示す。表2に示すように、負の中間分散を有しているだけでなく、負の分散スローブを有していることから、トータルの線路で、分散フラットネスが達成可能と思われる。また、他の特性も良好であることから、N-MDF のほうも、高速伝送路として、十分な特性を有していることが分かった。

### 3. トータル特性

分散マネジメント伝送路の特徴は、広帯域な分散フラット特性にある。P-MDF と N-MDF は逆符号の分散、分散スローブ特性を有するため、約 1:1 で組み合わせることで、広帯域なフラット特性が達成できる。

図4に、P-MDF と N-MDF を組み合わせた伝送路の例を示す。P-MDF は非常に低非線形ファイバなので、これを有効に活用するためには、図4のように EDF 増幅器の後に、P-MDF、N-MDF の順でおくのが望ましい。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、前段ファイバ (この系の場合は、P-MDF) 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 (この系の場合は、N-MDF) に減衰した光が入力されるため、P-MDF に比べて非線形性の高い N-MDF でも非線形現象による波形劣化が起こりにくいということになる。

表2 試作 N-MDF の特性例 (1550 nm)  
Characteristics of N-MDF (1550 nm)

N-MDF 諸元	特性例1	特性例2
クラッド径 ( $\mu\text{m}$ )	125.0	125.0
伝送損失 ( dB/km ) @1550 nm	0.24	0.24
分散 ( ps/nm/km ) @1550 nm	- 14.5	- 14.5
Slope ( ps/nm <sup>2</sup> /km ) @1550 nm	- 0.04	- 0.08
DPS ( nm ) @1550 nm	360	210
$\lambda_c$ ( nm ) @22 m	1350	1350
$A_{eff}$ ( $\mu\text{m}^2$ ) @1550 nm	40	35
$n_2$ ( m <sup>2</sup> /W ) @1550 nm	$3.7 \times 10^{-20}$	$3.7 \times 10^{-20}$
20 $\phi$ 曲げ ( dB/m ) @1550 nm	15	15
PMD ( ps/ km )	0.07	0.07

今回、開発した正分散ファイバと負分散ファイバを組み合わせた場合のトータルの特性に関して調査した。P-MDF と N-MDF を約 1:1 で接続した線路の、トータル特性を表3に示す。

前段ファイバは正の分散と分散スローブを有しており、後段ファイバは負の分散と分散スローブを有しているので、表3に示されているように、非常に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ブを低減した DSF でも 0.04 ps/nm<sup>2</sup>/km 程度であることを考えると、P-MDF + N-MDF 線路の分散スローブは十分小さい値といえる。

また、非線形性に関しては、前段のファイバは  $A_{eff}$  100  $\mu\text{m}^2$  程度で、後段のファイバは 35 ~ 40  $\mu\text{m}^2$  程度である。トータルの  $A_{eff}$  を NZ-DSF との比較から計算で得られる等価  $A_{eff}$  で計算すると<sup>1)</sup>、おおよそ 70  $\mu\text{m}^2$  になった。この結果より、通常の DSF 等と比べると非線形性が、かなり低減出来ることが分かる。

更に、前段のファイバは 0.19 dB/km 程度、後段のファイバは 0.24 dB/km 程度なので、トータルの伝送損失は、0.21 ~ 0.22 dB/km 程度が得られた。

P-MDF1 と N-MDF2 を組み合わせた場合の分散と損失の波長特性を図5に示す。1550 nm での分散スローブは、- 0.006 ps/nm<sup>2</sup>/km 程度と、従来の DSF より 1 ケタ小さい値が得られている。また、波長特性を見ても、分散、損失共に、1500

表3 線路全体での特性 (1550 nm)  
Characteristics of transmission lines (1550 nm)

	平均損失 (dB/km)	分散Slope (ps/nm <sup>2</sup> /km)	$A_{eff}$ (mm <sup>2</sup> )
P-MDF 1 + N-MDF 1	0.215	0.015	75*
P-MDF 1 + N-MDF 2	0.215	- 0.006	68*
DSF	0.215	0.070	50
低スロープDSF	0.220	0.040	55
$A_{eff}$ 拡大DSF	0.220	0.100	70

\*) NZ-DSFとの比較により、等価 $A_{eff}$ を用いて計算

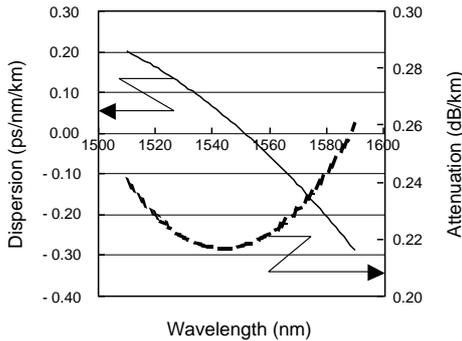


図5 MDFを組み合わせた場合のトータル特性  
Total characteristics of MDF-pair

nm ~ 1600 nmの広い帯域にわたって、非常に平坦な特性が得られていることが分かった。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。

また、累積分散特性は、図6のようになり、他の分散マネジメント線路に比べて、小さな値に抑えることが可能である。この点からも、MDF線路が高速伝送に有利であることが確認できる。

上記のようにP-MDFとN-MDFを組み合わせた線路を用いることで、WDM、TDMの両面において、非常に優れた伝送特性が期待できる。

#### 4. 低損失N-MDFの開発

このように、良好な特性が得られているが、このMDFの問題点として、N-MDFの伝送損失特性が挙げられるだろう。P-MDFが0.19 dB/km程度の低伝送損失なのに対して、N-MDFは0.24 dB/km程度と、若干高めめの値を示している。P-MDFの伝送損失を改良するという手段もあるが、後段のN-MDFに、更に強いパワーが入射されることとなり、非線形性の面から余り好ましくない。

更に、N-MDFの曲げ損失が大きめであることから、L-Band帯域での伝送損失の増加も確認される。L-Band帯の短波長側である1.58 μmの伝送損失でも、例えば、P-MDFの1.58 μmの伝送損失は、0.19 dB/kmなのに対して、N-MDFの1.58 μmの伝送損失は0.29 dB/kmと比較的、高い値であった。

そこでN-MDFの曲げ損失の目標を5 dB/m以下として、バンドエッジロスの影響をなるべく取り除くような形でプロファ

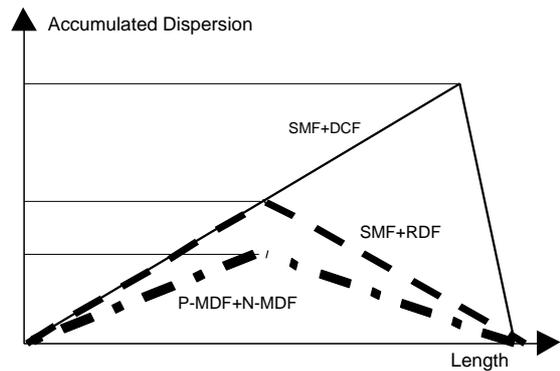


図6 各種線路の累積分散  
Accumulated dispersion of each type of link

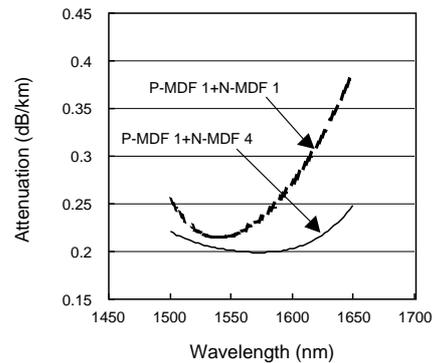


図7 新MDFを用いた伝送路の損失特性  
Attenuation spectrum of new MDF-pair

イルの再設計を行った。

新設計のN-MDFの特性を表4に示す。特性的には、No. 3は分散の補償率の点で、No. 4は $A_{eff}$ の点で、N-MDFのNo. 1、2と比べて若干特性の劣化が見られるが、それでも十分な低スロープ、低非線形特性を達成している。例えば、P-MDFとN-MDFのNo. 3を接続した場合の、1.55 μmの分散スロープは0.020 ps/nm<sup>2</sup>/km、No. 4を接続した場合のスロープは、0.005 ps/nm<sup>2</sup>/kmとなる。また、何よりも特筆すべきは、20 mm φの曲げ損失が、それぞれ7 dB/m、4 dB/mと、従来型に比べて低減されたことにより、曲げ損失の影響が取り除かれ、0.21 ~ 0.22 dB/kmという低伝送損失を達成していることである。更に、長波長側の損失増も抑制されている。1.58 μmの損失は、No. 3、4でそれぞれ、0.213 dB/km、0.227 dB/kmであり、従来型と比べて、大きく改善されている。

P-MDF1 + N-MDF4の損失のスペクトルをP-MDF1 + N-MDF1の損失スペクトルと併せて、図7に示す。

図に示すように、今回、新たに開発したN-MDFとP-MDFを組み合わせることで、波長1500 ~ 1650 nmの範囲で損失が±0.025 dB/km以内に収まるような、広帯域にわたる低伝送損失特性が得られている。

よって、このN-MDFを用いることで、C-Band帯だけでなく、S、L-Band帯も用いた広帯域なWDM伝送が可能になると思われる。

表4 試作N-MDFの特性例(1550 nm)  
Characteristics of N-MDF (1550 nm)

N-MDF諸元	特性例3	特性例4
クラッド径(μm)	125.0	125.0
伝送損失(dB/km) @1550 nm	0.220	0.215
分散(ps/nm/km) @1550 nm	- 15.0	- 13.0
Slope(ps/nm <sup>2</sup> /km) @1550 nm	- 0.03	- 0.05
DPS(nm) @1550 nm	500	260
λ <sub>c</sub> (nm) @22 m	1350	1350
A <sub>eff</sub> (μm <sup>2</sup> ) @1550 nm	34	32
n <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> /W) @1550 nm	3.7 × 10 <sup>-20</sup>	3.7 × 10 <sup>-20</sup>
20φ曲げ(dB/m) @1550 nm	7	4
PMD(ps/km)	0.06	0.08

## 5. おわりに

プロファイルを最適化することにより、SMFとNZ-DSFの中間の分散を有するファイバ(MDF)を開発した。P-MDFをN-MDF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。また、累積分散も小さめの値に抑えることが可能で、高速伝送に有利な特性が得られた。更に、N-MDFの低損失化を行い、1500 nm ~ 1650 nmにわたるフラットな損失特性を得た。

## 参考文献

- 1) T. Naito, N. Shimojoh, T. Tanaka, H. Nakamoto, M. Doi, T. Ueki and M. Suyama; 1 Terabit/s WDM Transmission over 10,000km, Proceeding of ECOC'99(1999), PD2-1
- 2) K. Mukasa, Y. Akasaka, Y. Suzuki and T. Kamiya; Novel network fiber to manage dispersion at 1.55 μm with combination of 1.3 μm zero dispersion single mode fiber, Proceeding of ECOC'97(1997), MO3C-127
- 3) 川崎光広, 鈴木好久, 田村順一, 神谷保; 広帯域WDM伝送に適したシングルモード光ファイバ, 2000年電子情報通信学会ソサイエティ大会(2000), C-3-45
- 4) M. Murakami, T. Matsuda and T. Imai; Quarter terabit(25 × 10Gbit/s) over 9,288km WDM transmission experiment using non-linear supported RZ pulse in higher order fiber dispersion managed line, Proceeding of ECOC'98(1998), Vol.3- P77
- 5) T. Matsuda, M. Murakami and T. Imai; 340Gbit/s(34 × 10Gbit/s) WDM transmission over 8,514km using broadband gain equalization technique for transoceanic systems, Electronics Letters 24th June 1999 Vol.35 No.13(1999) pp.1090-1091
- 6) T. Ito, K. Fukuchi, K. Sekiya, D. Ogasahara, R. Ohhira, T. Ono; 6.4Tb/s(160 × 40Gb/s) WDM transmission experiment with 0.8bit/s/Hz spectral efficiency, Proceeding of ECOC'00(2000), PD-1.1
- 7) S. Bigo, A. Bertaina, Y. Frignac, S. Borne, L. Lorcy, D. Hamoir, D. Bayart, J.P. Hamaide, et al.; 5.12Tb/s(128 × 40Gbit/s) transmission over 3 × 100km of TeraLight™ Fiber, Proceeding of ECOC'00(2000), PD-1.2
- 8) A. Farbert, G. Mohs, S. Spalter, J.P. Elbers, C. Furst, A. Schopflin, E. Gottwald C. Scheerer, C. Glingener; 7Tb/s(176 × 40Gb/s) bidirectional interleaved transmission with 50GHz channel spacing, Proceeding of ECOC'00(2000), PD-1.3
- 9) 鳥羽弘, 宮本裕, 米山幹夫, 川西悟基, 山林由明; 次世代高速伝送技術, NTT R&D Vol.48 No.1(1999) pp.33-41