

# 選択励振法による長距離伝送路の特性改善

## Long-haul Transmission Fibers with Novel Optical Properties Based on Restrict Mode Excitation Method

今村勝徳\*  
Katsunori Imamura

武笠和則\*  
Kazunori Mukasa

杉崎隆一\*  
Ryuichi Sugizaki

八木 健\*  
Takeshi Yagi

**概要** 各種長距離伝送路に関して、選択励振 (restrict mode excitation : RME) 法を用いた特性改善の検討を実施した結果、次の成果を得た。(1) MDFの後段ファイバであるN-MDFにおいて、低分散スロープ特性を維持したままAeffを50  $\mu\text{m}^2$ 以上に拡大することに成功し、伝送路の等価Aeffを74  $\mu\text{m}^2$ へと拡大することができた。(2) 海底NZ-DSFにおいて、分散スロープを $-0.009$  ps/nm<sup>2</sup>/kmとしながらAeffを50  $\mu\text{m}^2$ 以上に拡大することに成功し、分散等化スパン(SMF)と組み合わせた伝送路において、端局DCFを追加せずとも、超40 Gb/s-WDM伝送に対応する分散フラット特性を実現することができた。(3) 陸上NZ-DSFにおいて、65  $\mu\text{m}^2$ の大Aeff特性と0.02 ps/nm<sup>2</sup>/kmの超低分散スロープ特性を同時に実現し、将来の広帯域WDM伝送に適した特性を得ることができた。また、高次モードの影響の有無について検証を行ない、パルス光伝搬実験並びにBER測定により、問題のないことが確認された。

### 1. はじめに

長距離光通信においては、伝送容量の拡大、伝送距離の拡大、信号品質の確保などの課題を解決すべく研究開発が積極的に進められている。その根幹を担う伝送用ファイバには、シングルモード伝送可能なことに加え、低非線形性、分散平坦性、低損失特性などの様々な特性が求められるが、これらの特性の間には常にトレードオフの関係が存在するため、それらのバランスを考慮しながらファイバ設計を行う必要がある。これまで、屈折率プロファイルの最適化により特性改善が進められてきたが、そのようなアプローチによる特性改善も限界を迎えつつあり、その限界を超えるような更なる特性改善のためには、従来と異なる新たな発想でのファイバ設計が必要とされている。

今回、従来のファイバ設計の大きな制限要因であったカットオフ波長の設計限界を大幅に緩和しながら、かつ実質的なシングルモード伝送が実現可能である新手法を見出し、その手法を用いて各種長距離伝送路についての特性改善検討を行い、良好な結果が得られたので報告する。

### 2. 選択励振法

カットオフ波長は、Aeff、分散、分散スロープ、曲げ損失などの各特性と並びファイバの重要な特性である。これらの特性の間にはトレードオフの関係があるため、カットオフ波長の制限を緩和することができれば、他の特性を向上できることが見込まれる。一方、カットオフ波長が長波長にシフトしたファイ

バでは使用波長域において高次モードが存在するようになるため、伝送品質への影響が懸念される。ほとんどの高次モードはコアの外側に分布する傾向があるが、一部の高次モードはコア中心部にも存在する。しかし、ファイバ設計を最適化し、コア中心部の高次モードを実質的に無視できる状態になれば、コアの中心にシングルモード光を入射することにより、実効的なシングルモード動作を実現することが可能となる。このようなファイバの設計手法を、選択励振法と呼ぶ。

以下に、選択励振法を各種長距離伝送路に適用した場合の、ファイバ設計並びに試作結果について述べる。

### 3. 各種長距離伝送路に適したファイバの設計と試作結果

#### 3.1 MDFの特性改善

MDF (medial dispersion fiber)<sup>1)</sup> は正分散のP-MDF (positive dispersion MDF) と負分散のN-MDF (negative dispersion MDF) で構成される分散マネジメント伝送路である。分散マネジメント伝送路として最初に提案されたSMF-RDF<sup>2)</sup>を用いることにより非線形現象を効果的に抑制しながら広帯域のWDM伝送を実現できたが、MDFでは更に高速伝送時に問題となる伝送路中での累積分散を低く抑えることを実現し、海底高速伝送用分散マネジメント伝送路として、その高い伝送能力が報告されている<sup>3)</sup>。MDFの典型的特性を表1に示す。

従来型MDFでは50 km スパンにおける伝送路の等価Aeffは63  $\mu\text{m}^2$ とある程度非線形性を抑制できているものの、将来の伝送容量拡大に対応するためには、伝送路の更なる低非線形化

\* 研究開発本部 ファイバテルフォトリクス研究所

が必要となることが予想される。伝送路への入力光パワーが増大するに伴い、Aeffの比較的小さいN-MDFにおける非線形効果の発生が問題となることが予想されるため、N-MDFのAeff拡大が伝送路全体の低非線形化の有効な手段であると考えられる。

表1 MDFの典型的特性 (@1550 nm)  
Typical properties of MDFs.

Fiber type		P-MDF	N-MDF	Total
分散	ps/nm/km	13	-13	0
分散スロープ	ps/nm <sup>2</sup> /km	0.07	-0.07	0
Aeff	μm <sup>2</sup>	95	32	63*
損失	dB/km	0.190	0.220	0.205

\* ) 50 km スパンにおける等価 Aeff

3.1.1 ファイバ設計

N-MDFの分散と曲げ損失特性を固定したときのAeff, 分散スロープ及びカットオフ波長の関係を図1に示す。ファイバの設計は、図2に示した屈折率プロファイルを用いて行った。Aeff, 分散スロープ及びカットオフ波長の間にはトレードオフの関係があり、カットオフ波長を長波長にシフトすることにより、分散スロープを維持したままAeffを拡大することが可能であることが分かる(図1)。

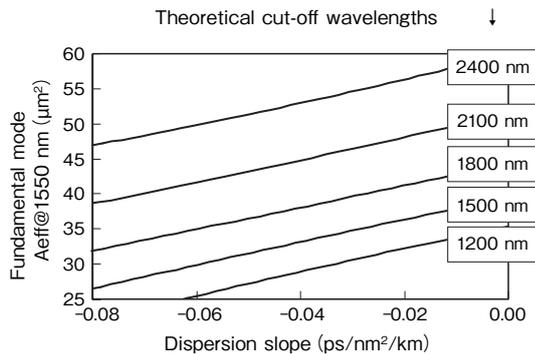


図1 分散スロープと Aeff の関係  
Relationship between dispersion slope and Aeff.

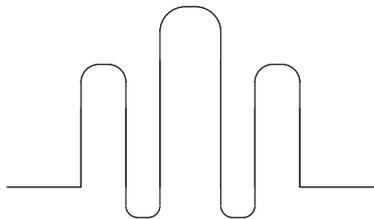


図2 設計プロファイル  
Designed profile.

一方で、前段にP-MDFを接続して使用されるN-MDFでは、シングルモード光が常にコアの中心に入射されることから、前述のように、カットオフ波長が長波長にシフトした設計であっても、実質的なシングルモード伝送が可能であると考えられる。カットオフ波長を長波長にシフトした場合の、1550 nm にお

る設計ファイバ中の各モードのフィールド分布を図3に、前段のP-MDFから光を入射した場合の各モードへの入射光の結合効率を表2に示す。高次モードのうちLP11とLP21はコアの外側部分にフィールドを有しているため、コア中心に光を入射した場合、励振される割合は極めて小さい。また、コア中心にフィールドを有するLP02に関しても、基底モード(LP01)と比較して結合効率が十分小さいことから、LP02が励振される割合も小さく、実質的にシングルモード励振が可能となる。

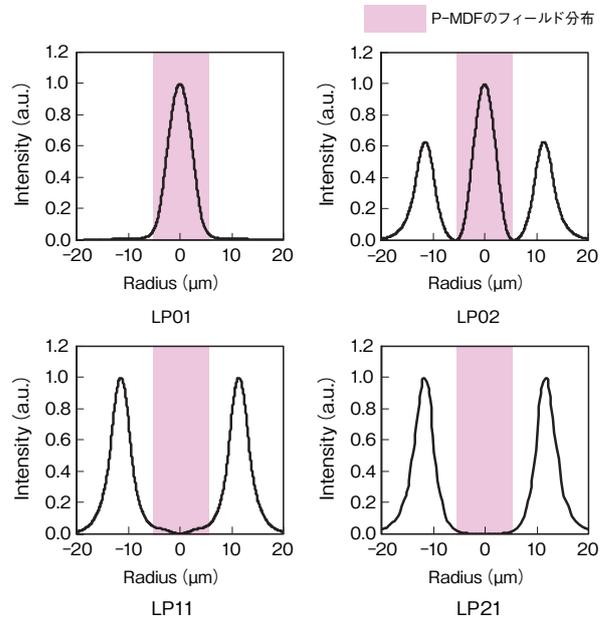


図3 フィールド分布  
Field distributions of each mode.

表2 P-MDFからの結合効率 (@1550 nm)  
Coupling efficiencies from P-MDF (@ 1550 nm).

LP01	LP02	LP11	LP21
0.92	0.08	3.3E-32	1.8E-35

3.1.2 ファイバ試作

上記の設計結果に基づき実際に試作を行った。試作したファイバ(#1)の特性、並びに#1とP-MDFを組み合わせて使用した場合の伝送路全体の特性を表3に示す。N-MDFにおいて選択励振法を用いることにより、低分散スロープ特性を維持したままAeffを50 μm<sup>2</sup>以上に拡大することに成功した。伝送路の等価Aeffに関しても従来の63 μm<sup>2</sup>から74 μm<sup>2</sup>へと大幅に改善された。

表3 試作ファイバ特性と伝送路特性 (@1550 nm)  
Properties of fabricated fiber and transmission line.

Fiber type		#1	Total**
分散	ps/nm/km	-16.7	0
分散スロープ	ps/nm <sup>2</sup> /km	-0.07	0.01
Aeff	μm <sup>2</sup>	52.6	74*
損失	dB/km	0.288	0.233

\* ) 50 km スパンにおける等価 Aeff

\*\* ) P-MDF と組み合わせたときの伝送路特性

### 3.2 海底NZ-DSFの特性改善

海底長距離伝送路では、負の微小分散(約-3 ps/nm/km@1550 nm)を有するNZ-DSFを用いたシステムが広く普及している。海底NZ-DSFとして、非線形現象の抑制を重視したAeff拡大型のNZ-DSF (Aeff=75 μm<sup>2</sup>, 分散スロープ=0.12 ps/nm<sup>2</sup>/km@1550 nm)と、波長多重特性を重視した低分散スロープ型のNZ-DSF (分散スロープ=0.05 ps/nm<sup>2</sup>/km, Aeff=50 μm<sup>2</sup>@1550 nm)が提案されており、システムの要求に応じて、これらのNZ-DSFのどちらか一方、あるいは両者を組み合わせた伝送路構成が使用されている<sup>4)</sup>。NZ-DSF伝送路では、数スパン毎にSMFを用いて分散補償が行われているが、NZ-DSFもSMFも1.55 μm帯において正の分散スロープを有しており、長距離伝送後には伝送帯域の端で大きな残留分散が発生してしまう(図4)ため、大洋横断クラスの伝送距離においては、WDM伝送可能な波長範囲は限られている。近年、RZ-DPSKなどの変調フォーマットの進展により、10 Gb/s程度の伝送速度までであれば、残留分散がある程度残っていたとしても良好な伝送特性を得ることが可能であることが明らかになってきているが<sup>5), 6)</sup>、40 Gb/sを超える伝送速度においては、この残留分散スロープの影響が顕著になり、十分な伝送品質を維持することができない<sup>5)</sup>。残留分散スロープの影響を避けるために、端局で波長毎に分散補償を行う方法も検討されているが、膨大な数の分散補償器が必要になるという問題がある。

海底NZ-DSF伝送路において、伝送路中での分散、分散スロープの同時補償を実現するためには、NZ-DSFの分散スロープが負であり、かつ分散と分散スロープの比であるDPS (= dispersion/dispersion slope)がSMFと同程度であることが必要となる。しかし、分散スロープとAeffの間にはトレードオフの関係があるため、低分散スロープ特性と大Aeff特性の両立は困難であった。一方、海底NZ-DSFには、送信器や増幅器からSMFを介して光が入射されるため、MDFの場合と同様、選択励振法による特性改善が可能であると考えられる。そこで、海底NZ-DSFの設計に選択励振法を適用し、伝送路の特性改善を試みた。

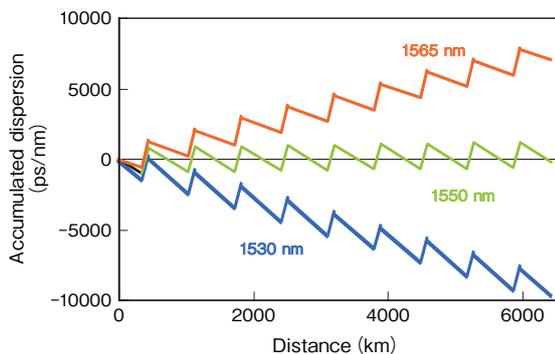


図4 従来の海底NZ-DSF分散マップ  
Conventional dispersion map of submarine NZ-DSFs.

#### 3.2.1 ファイバ設計

海底NZ-DSFの分散スロープを最適な値(≒-0.015 ps/nm<sup>2</sup>/km)に設定した場合の、Aeffとカットオフ波長の関係を図5に示す。カットオフ波長を2200 nm程度にまでシフトすること

で、Aeffを従来の低分散スロープ型NZ-DSFと同程度(≒50 μm<sup>2</sup>)にまで拡大可能であることが示された。

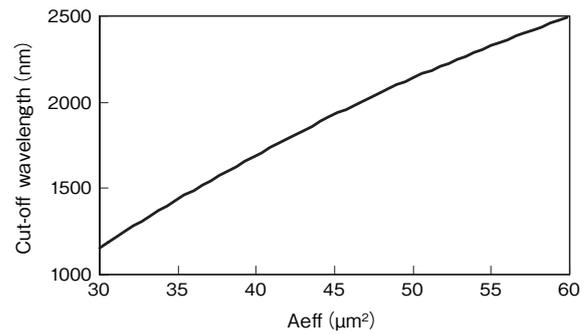


図5 Aeffとカットオフ波長の関係  
Relationship between Aeff and cut-off wavelength.

#### 3.2.2 ファイバ試作

上記の設計解に基づいて実際にファイバの試作を行った。試作したファイバ(#2)の特性を表4に示す。分散スロープを-0.009 ps/nm<sup>2</sup>/kmとしながら、Aeffを50 μm<sup>2</sup>以上に拡大することに成功した。SMFと、試作したNZ-DSFの波長分散特性、並びにNZ-DSFスパンと分散等化スパン(SMF)を接続した後のトータルの波長分散特性を図6に示す。SMFと同程度のDPSが実現されていることから、伝送路中での分散、分散スロープの同時補償が実現され、端局DCFを追加せずとも、超40 Gb/s-WDM伝送に対応しうる分散フラット特性が実現されている。

表4 ファイバ特性比較(@1550 nm)  
Properties of conventional and fabricated submarine NZ-DSFs (@1550 nm).

Fiber type		Conventional	#2
分散	ps/nm/km	-3	-3.1
分散スロープ	ps/nm <sup>2</sup> /km	0.05	-0.009
DPS	nm	-60	344
残留分散スロープ*	ps/nm <sup>2</sup> /km	0.07	0.00
Aeff	μm <sup>2</sup>	50	52.4
損失	dB/km	0.195	0.202
PMD	ps/km <sup>1/2</sup>	-	0.02
曲げ損失**	dB/m	5	9

\*) SMFによる分散等化後の残留分散スロープ

\*\* ) φ 20 mmおける曲げ損失

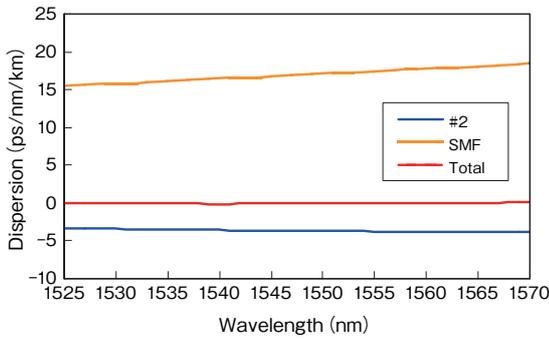


図6 波長分散特性  
Dispersion properties.

### 3.3 陸上NZ-DSFの特性改善

次に、選択励振法の適用による、陸上長距離伝送路の特性改善について検討を行った。

陸上長距離伝送路として広く用いられているNZ-DSFは、1550 nm帯で正の微小分散を持つファイバである。このファイバにより、四光波混合 (four wave mixing: FWM) による非線形劣化を避けつつ、分散による信号波形劣化が効果的に抑制できる。また、分散値が低いことから、分散補償に必要なDCF長もSMFと比較して短くできるという特長も有する。これまでに提案された陸上NZ-DSFとして、低非線形性に優れた大Aeff型NZ-DSFと、分散平坦性に優れた超低分散スロープ (ULS) 型NZ-DSFが知られている (表5)<sup>7, 8)</sup>。大Aeff型NZ-DSFは高パワー入力が必要とされる長距離の伝送システムに適しており、ULS型NZ-DSFは分散平坦性を有することから広帯域WDM伝送に適している。将来の更なる伝送容量の拡大のためには、これらの伝送路の長所を同時に満たす特性が実現されることが望ましい。しかし、分散スロープとAeffの間にはトレードオフの関係があり、低非線形性と分散平坦性の両方を同時に満たそうとするとカットオフ波長が使用波長以上になってしまうことから、ファイバ特性の改善には限界があった。

表5 従来NZ-DSFの典型的特性 (@1550 nm)  
Optical properties of conventional NZ-DSFs (@ 1550 nm).

Fiber type		大Aeff	ULS
分散	ps/nm/km	5	5
分散スロープ	ps/nm <sup>2</sup> /km	0.09	0.02
Aeff	μm <sup>2</sup>	72	45
損失	dB/km	0.195	0.200

#### 3.3.1 ファイバ設計

表5に示した2種類の陸上NZ-DSFの長所を同時に満たすべく、ファイバの設計を行った (表6)。カットオフ波長を長波長側にシフトさせながら、プロファイルパラメータを最適化することにより、72 μm<sup>2</sup>の大きなAeffを維持しながら分散スロープを0.018 ps/nm<sup>2</sup>/kmへと低減することのできる設計解が得られ、広帯域にわたる分散平坦性を実現することができた。更に、分散と分散スロープの比であるDPSもSMFとほぼ等しい値に設計されていることから、40 Gb/sを超える高速伝送のために

分散補償を行う場合でも、現在普及している標準SMF用のDCF<sup>9)</sup> (表6)を適用することが可能であるというメリットも有している。

表6 選択励振法により設計した陸上NZ-DSFと標準SMF用DCFの特性 (@1550 nm)  
Optical properties of designed terrestrial NZ-DSF and DCF for standard SMF (@1550 nm).

Fiber type		設計	DCF <sup>9)</sup>
分散	ps/nm/km	5	-120
分散スロープ	ps/nm <sup>2</sup> /km	0.018	-0.43
DPS	nm	282	280
Aeff	μm <sup>2</sup>	72	21

#### 3.3.2 ファイバ試作

設計結果に基づいてファイバの試作を行った。試作したファイバ (#3及び#4)の特性を表7に示す。いずれの試作ファイバにおいても、従来の大Aeff型NZ-DSFと同等のAeffと、従来のULS型NZ-DSFと同等の分散スロープを同時に実現することに成功した。C+Lバンドにおいて良好な分散平坦性が得られており (図7)、DPSも設計に近い値が得られていることから、標準SMF用DCFを用いて分散補償を行った後の残留分散もC+Lバンドにおいて小さくすることが可能となっている (図7)。波長損失特性、並びにフィールド分布に関しても、高次モードの影響の影響を受けない良好な測定結果が得られた (図8)。

表7 試作ファイバの特性 (@1550 nm)  
Optical properties of fabricated fibers (@1550 nm).

Fiber type		#3	#4
分散	ps/nm/km	6.2	5.7
分散スロープ	ps/nm <sup>2</sup> /km	0.024	0.018
DPS	nm	258	317
Aeff	μm <sup>2</sup>	65.2	65.4
PMD	ps/km <sup>1/2</sup>	0.01	0.02
曲げ*)	dB/m	2.2	2.6

\*) φ 32 mm おける曲げ損失

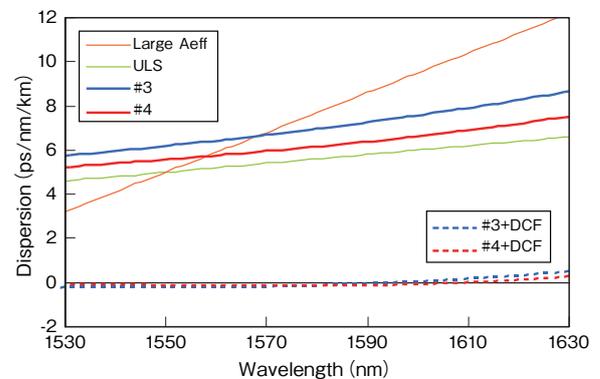


図7 波長分散特性  
Dispersion properties of the NZ-DSFs.

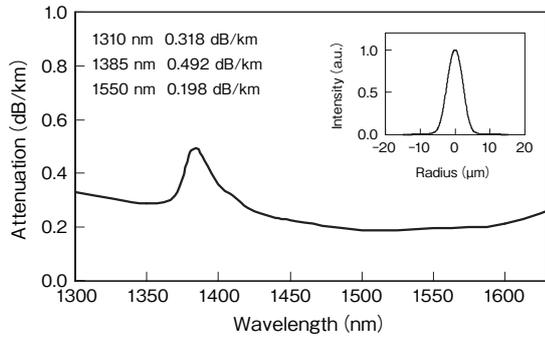


図8 #4の波長損失特性(挿入図:#3のニアフィールドパターン) Attenuation spectrum of #4 (@ 1550 nm). The inset is near-field pattern of #3.

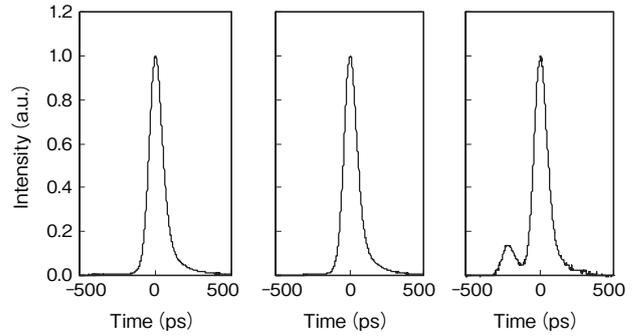


図10 パルス波形(左:入射パルス, 中央:軸合わせ接続時の出射パルス, 右:オフセット励振時の出射パルス) Pulse experiment results. (Left: Input pulse, Center: Output pulse under straight launch condition, Right: Output pulse under 10 μm offset launch condition)

#### 4. シングルモード伝送特性の確認

選択励振法の適用により, 各種長距離伝送路の特性改善を実現することが可能となったが, いずれもカットオフ波長が長波長にシフトした設計であることから, 高次モードの影響を受けていないことが重要な構成要件となる。そこで, シングルモード伝送特性について確認を行った。

試作した陸上NZ-DSF (#3)を用いて確認を行った結果を示すが, 他の試作ファイバにおいても同様の結果が得られることを確認している。

##### 4.1 パルス光伝搬実験

SMFから試作ファイバに光を入射したときの, 高次モード伝搬の有無について調べるために, パルス光伝搬実験を行った。図9に示した実験系を用いて, 繰り返し周波数300 MHzでパルス化したDFB-LDの光をファイバに入射し, 出射光のパルス波形を観測した。図10に入射パルスの波形, SMFと#3(ファイバ長30 m)の中心軸を合わせて光を入射した場合の出射パルス波形, 並びにSMFの入射軸を#3の中心から10 μmオフセットさせた場合の出射パルス波形を示す。波形はすべてピーク強度で規格化している。オフセット励振を行った場合, 高次モードが伝搬することによるパルス波形のひずみが観測されたが, 中心軸を合わせた場合には入射パルスと同様の出射パルス波形が観測され, 基底モードのみが選択的に励振されていることが確認された。また, ファイバ長500 m伝搬後の出射パルス波形にも高次モード伝搬によるひずみは生じないことも, 併せて確認を行った。

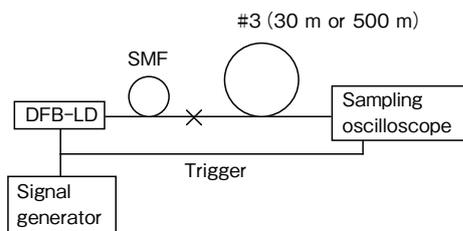


図9 パルス光伝搬実験系 Experimental setup for pulse experiment.

##### 4.2 BER測定

パルス光伝搬実験により, 伝送後に高次モードが残存しないことが確認されたが, 伝送中のモード干渉などによる伝送特性への影響の有無についても確認を行う必要があると考え, ビット誤り率(bit error rate:BER)の測定を行った。図11に示した測定系を用いて, 10 Gb/s-NRZ信号を, SMFを介して試作ファイバ(#3)に入射し, SMFと#3の中心軸を合わせて接続した場合と, 10 μmのオフセットを加えた場合とで, パワーペナルティ増大の様子を観測した。図12にBER測定結果を示す。ファイバ長が30 mの場合, 中心軸を合わせた場合にはback-to-backからのパワーペナルティは観測されなかったのに対し, オフセットを加えた場合には大きなパワーペナルティが生じ, パルス光伝搬実験と同様, 中心軸を合わせて入射することにより基底モードの選択励振が可能となっていることが示された。一方, ファイバ長を500 mまで伸長した場合にも, 中心軸を合わせた状態でパワーペナルティの増大は観測されず, 比較的長い距離の伝送時にもパワーペナルティのない伝送を実現可能であることが確認された。

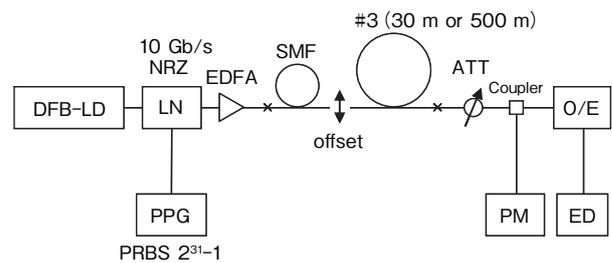


図11 BER測定実験系 Experimental setup for BER measurement.

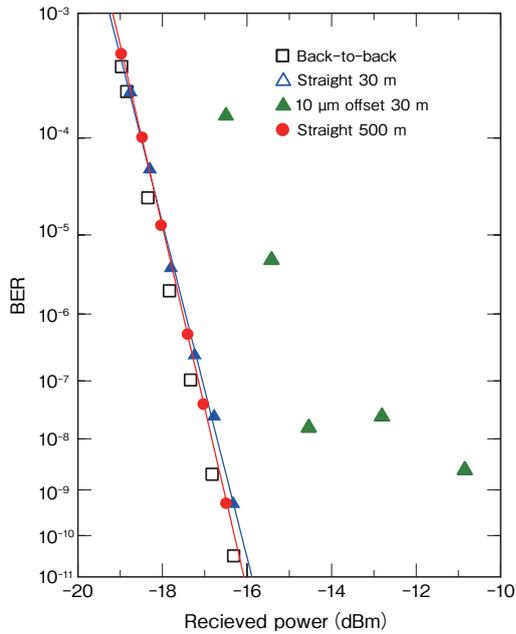


図12 BER測定結果  
BER measurement results.

### 5. おわりに

各種長距離伝送路に関して、選択励振(restrict mode excitation)法を用いた特性改善検討を実施した。MDFの後段ファイバであるN-MDFにおいて、低分散スロープ特性を維持したままAeffを50 μm<sup>2</sup>以上に拡大することに成功し、伝送路の等価Aeffを従来の63 μm<sup>2</sup>から74 μm<sup>2</sup>へと拡大することができた。海底NZ-DSFにおいて、分散スロープを-0.009 ps/nm<sup>2</sup>/kmとしながらAeffを50 μm<sup>2</sup>以上に拡大することに成功し、分散等化スパン(SMF)と組み合わせた伝送路において、端局DCFを追加せずとも、超40 Gb/s-WDM伝送に対応する分散フラット特性を実現することができた。陸上NZ-DSF

において、65 μm<sup>2</sup>の大Aeff特性と0.02 ps/nm<sup>2</sup>/kmの超低分散スロープ特性を同時に実現し、将来の広帯域WDM伝送に適した特性を得ることができた。高次モードの影響の有無について検証を行ない、パルス光伝搬実験並びにBER測定により、問題のないことが確認された。

以上の検討により、選択励振法の適用は将来の高速大容量伝送システムに適した伝送路開発に有用であることが示された。

### 参考文献

- 1) K. Mukasa et al.: "Wide-Band Dispersion Management Transmission Line with Medial Dispersion Fiber (MDF)," ECOC2000, (2000), 2-4-2.
- 2) K. Mukasa et al.: "Novel network fiber to manage dispersion at 1.55 μm with combination of 1.3 μm zero dispersion single mode fiber," ECOC1997, (1997), MO3C-127.
- 3) Y. Inada et al.: "Error-free transmission over 6000 km of 50 × 42.8 Gb/s, FEC-coded CS-RZ WDM signal in EDFA and medial-dispersion MDF systems," ECOC2004, (2004), Th3.5.4.
- 4) M. Suzuki et al.: "Dispersion-managed high-capacity ultra-long-haul transmission," J. Lightwave technol., **21** (2003), 916.
- 5) J. X. Cai et al.: "Transmission of 40-Gb/s WDM Signals Over Transoceanic Distance Using Conventional NZ-DSF With Receiver Dispersion Slope Compensation," J. Lightwave technol., **24** (2006), 191.
- 6) J. X. Cai et al.: "RZ-DPSK Field Trial over 13,100 km of Installed Non Slope-Matched Submarine Fibers," OFC2004, (2004), PDP34.
- 7) Y. Liu et al.: "Single-mode dispersion-shifted fibers with large effective area for amplified systems," IOOC1995, (1995), PD. 2-9.
- 8) N. Kumano et al.: "Novel NZ-DSF with Ultra-low Dispersion Slope Lower than 0.020 ps/nm<sup>2</sup>/km," ECOC2001, (2001), PDA.15.
- 9) L. Gruner-Nielsen et al.: "Dispersion-Compensating Fibers," J. Lightwave Technol., **23** (2005), 3566.