

# 広帯域低モード分散を実現する 2モード光ファイバ

光電子技術研究所 丸山 遼<sup>1</sup>・桑木 伸夫<sup>2</sup>・松尾 昌一郎<sup>3</sup>・佐藤 公紀<sup>4</sup>

## Two-Mode Optical Fibers with Low Mode Dispersion in a Wide Band

R. Maruyama, N. Kuwaki, S. Matsuo, and K. Sato

次世代大容量伝送システムとして、複数のモードを伝搬する Few-Mode Fiber (FMF) を用いたモード分割多重 (Mode Division Multiplexing ; MDM) 伝送が近年注目されている。モード結合に起因する信号劣化を補償するために MIMO を適用した場合、その信号処理量を軽減するためには、低モード分散を有する FMF を適用する必要がある。そこで当社では、広波長範囲において低モード分散を実現する 2モード光ファイバ (TMF) の最適設計法を明らかにし、それを基に作製した TMF が所望の特性を満足することを確認した。

Recently, mode division multiplexing transmission systems in Few-Mode Optical Fiber (FMF) have attracted considerable attention for the next generation transmission system. When MIMO is applied to suppress signal degradation due to mode coupling, a FMF with low mode dispersion is required reduce to MIMO complexity. In this paper, we describe the optimum design process for Two-Mode Optical Fibers (TMF) and confirm that the fabricated TMFs satisfy intended characteristics.

### 1. ま え が き

光伝送技術は過去 30 年間、時分割多重技術、光増幅技術、波長分割多重 (WDM) 技術、デジタルコヒーレント技術の発展により飛躍的な成長を遂げ、これらの技術を駆使した光ファイバ 1 本あたりの総伝送容量は 100 Tbps 級を達成している<sup>1)</sup>。一方、トラヒック量は年率数%以上で増加しており<sup>2)</sup>、将来的には Pbps 級クラスの大容量伝送が必要であると考えられている。ところが、さらなる大容量化を目指した場合、シングルモード光ファイバ (SMF) を用いた既存の伝送システムではファイバビュース、非線形光学効果の観点から早晚限界に達すると予想される<sup>3)</sup>。この限界を打破するためには、システムだけでなく伝送路である光ファイバの革新的な技術開発が必須であり、現在、複数のモードを伝搬する Few-Mode 光ファイバ (FMF) を用いたモード分割多重 (MDM) 伝送<sup>4)~11)</sup>と 1 本の光ファイバに複数のコアを有する Multi-Core 光ファイバを用いた空間分割多重伝送<sup>12) 13)</sup>が注目を集めている。われわれは、前者の FMF に着目し、これまで開発を進めてきた。本稿では、FMF の重要な特性の一つであるモード分散を低減した光ファイバの最適設計法および作製結果について報告する。

### 2. モード分割多重 (MDM) 伝送

図 1 に MDM 伝送の概略を示す。伝搬モード毎に信号を載せ、モード合波デバイス (MUX), FMF, モード分波デバイス (DeMUX) を介して、それぞれの信号を得る。ただし、FMF, MUX, DeMUX 中ではモード結合が生じるため、受信側では信号が混同し、S/N 比が劣化する。このモード結合起因の信号劣化を回避する手段として、二つの方式が提案されている。一つは、モード結合を抑制した FMF, MUX, DeMUX を用いた方法である<sup>11) 14)</sup>。ただし、MDM 伝送では WDM 伝送との併用が前提となるため、広波長範囲で高いモード消光比を有する MUX, DeMUX を実現することが必須であり、大きな課題となる。もう一つは、モード間結合をある程度許容し、受信側で信号を復元する方法である。信号の復元には、無線通信において既に実用化されている MIMO を適用することが検討されており、MIMO を用いた伝送実験について近年多数の報告がなされている<sup>4)~9)</sup>。MIMO 伝送の場合、モード結合を許容できる一方で、FMF のモード分散 (本稿では、モード間群遅延時間差 (DMD) と記載する) を低減することが必須となる。なぜならば、MIMO の信号処理演算量は DMD が大きいほど増加するためである<sup>15) 16)</sup>。さらに、前述の通り、MDM 伝送では WDM 伝送との併用が前提であり、DMD は波長依存性を有しているため、使用波長帯全域において DMD を低減することが要求される。

われわれは、MIMO 伝送用の FMF に照準を絞り、低

1 光ファイバ技術研究部

2 光ファイバ技術研究部光電研副所長 博士 (工学)

3 光ファイバ技術研究部部長 博士 (工学)

4 エネルギー・情報通信事業部 事業部長

略語・専門用語	正式表記	説明
MIMO	Multiple-Input-Multiple-Output	複数の送信機で同時に異なるデータを送信し、受信時に合成することで広帯域を実現する伝送技術。
C band, L band		通信波長帯として用いられる波長帯域。C bandは波長1530～1565 nm, L bandは波長1565～1625 nmを指す。
$A_{\text{eff}}$	Effective Core Area	実効コア断面積 ファイバ中を伝搬する光の電界分布の広がりを示す指標のひとつ。主に、非線形光学現象の起こりにくさを示すときに用いられる。
LPモード	Linearly Polarized Mode	弱導波近似の基で成立する、縮退したモードをまとめて表現したモード概念。 LP <sub>01</sub> を基本モード, LP <sub>11</sub> モードを第一高次モード, LP <sub>21</sub> モードを第二高次モードと呼ぶ。
NFP測定	Near Field Pattern Measurement	ニアフィールドパターン測定 ファイバ出射端における近視野像。各モードによって電界分布が異なるため、近視野像より伝搬しているモードを判断できる。
C-OFDR	Coherent-Optical Frequency Domain Reflectometry	光周波数領域反射測定 強度変調光を入射させ、その変調周波数を掃引し、反射光成分の振幅と位相からファイバ中の状態を評価する技術

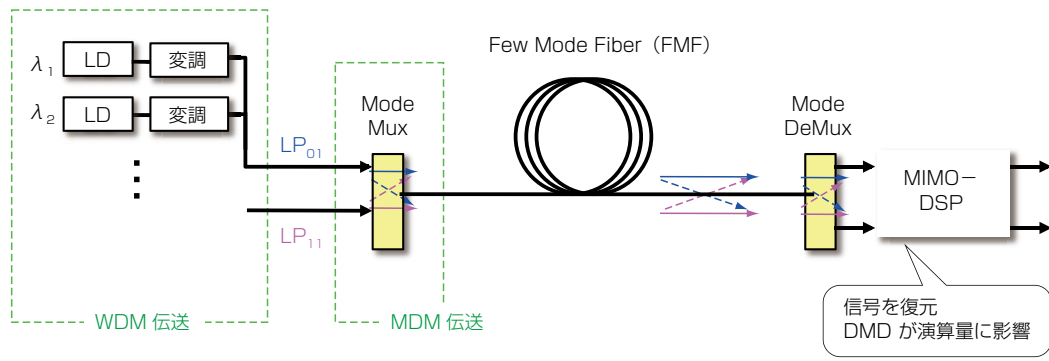


図1 モード分割多重 (MDM) 伝送システム (MIMOを用いた場合)  
Fig. 1. Mode division multiplexing transmission system (with MIMO).

DMDを有する2モード光ファイバ (TMF) の開発を進めてきた。低DMDを有するTMFを実現するにあたり、単一のTMFで達成する方法と複数のTMFを組み合わせる補償伝送路を構築する方法の2つのアプローチが考えられる (図2)。本稿では、これら2つの方法の光ファイバの最適設計法および試作結果について報告する。

### 3. 低DMDを有する2モード光ファイバ (TMF)

#### 3.1 単一光ファイバ伝送路

##### 3.1.1 設計

低DMD化に有効であることが知られているグレーデッドインデックス (GI) 型屈折率分布<sup>17)~19)</sup>を基本に光ファイバ構造の最適化を行った (GI型TMF)。GI型光ファイバの屈折率分布は以下の式で表される。

$$n(r) = \begin{cases} n_1 [1 - 2\Delta(r/a)^\alpha]^{1/2} & 0 \leq r \leq a \\ n_2 & r > a \end{cases} \quad \dots (式 1)$$

$\Delta$  は比屈折率差を表し、次式で定義されている。

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 \quad \dots (式 2)$$

ここで、 $n_1$  と  $n_2$  はコアとクラッドの屈折率、 $r$  は光ファイバの中心からの距離、 $a$  はコア半径、 $\alpha$  は屈折率分布の形状係数である。最適化を行うにあたり、1) C bandの中心波長である波長 1550 nmにおけるDMDの目標値を 0 ps/km、さらに、TMFではSMFと同様、 $A_{\text{eff}}$ の拡大化や曲げ損失耐性も要求されるため、2) LP<sub>01</sub>モードの $A_{\text{eff}}$ を 150  $\mu\text{m}^2$  以上、3) ケーブル化時の等価的な曲げ半径 40 mmにおけるLP<sub>11</sub>モードの曲げ損失を 0.01 dB/km

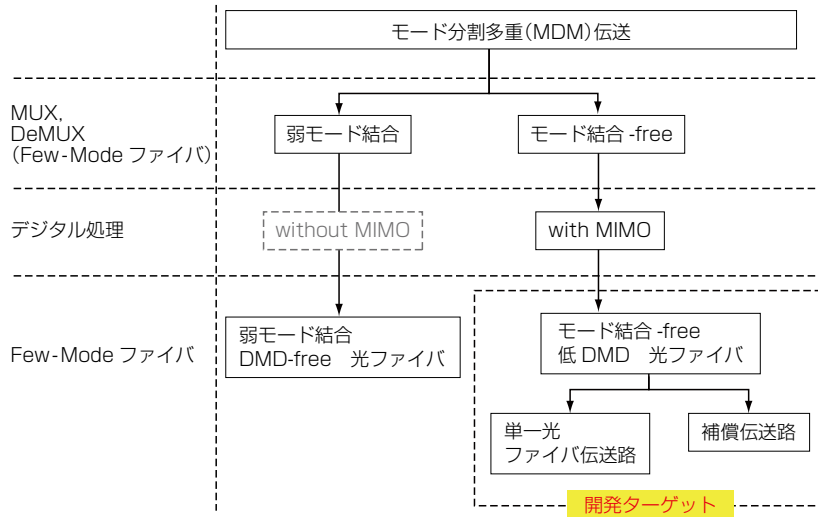


図2 MDM伝送に適用されるFMFの分類  
Fig. 2. Classification of FMF applied to MDM transmission systems.

以下<sup>20)</sup>、の3項目を設計の目標値とした。なお、曲げ損失は一般的に高次モードほど大きいので、LP<sub>11</sub>モードのみを評価対象とした。図3に波長1550nmにおける $\alpha$ 、 $\Delta$ をパラメータとした場合の規格化周波数 $T$ に対するDMDの計算結果を示す。DMD ( $\Delta\tau$ )は以下の式で定義する。

$$\Delta\tau = 1/v_{g11} - 1/v_{g01} \dots\dots\dots (式 3)$$

ここで、 $v_{g11}$  および  $v_{g01}$  はLP<sub>11</sub>モード、LP<sub>01</sub>モードの群速度をそれぞれ示す。  
また、 $T$ は以下の式で定義する。

$$T = kan_1\sqrt{2\Delta} / A \dots\dots\dots (式 4)$$

ここで、 $k (=2\pi/\lambda)$  は波数、 $A$ は屈折率分布の形状によって決定する定数を示す。LP<sub>21</sub>モードのカットオフ周波数は $T=4.5$ 付近に存在することから、2モード伝搬領域である $T < 4.5$ の範囲において設計を行った。図3より、DMDは $\Delta$ にほとんど影響されないことがわかる。また、 $\alpha \geq 2.2$ のとき、2モード伝搬領域内でDMDが0となる解が存在し、さらに、 $\alpha$ が小さくなるほどDMD=0近傍のDMDの $T$ に対する傾きは小さくなる。これは、言い換えれば、波長に対するDMDの傾きが小さくなることを意味している。図4に、波長1550nmにおいてDMD=0 ps/kmになるように $T$ を調整したときの $\Delta$ に対するLP<sub>01</sub>モードの $A_{eff}$ の計算結果を示す。図4中の設計目標値を満たす領域の中心の光ファイバパラメータ(☆)を設計値とした。

3. 1. 2 試作結果

上述の最適設計にしたがって、4.8kmのTMFを作製した。DMDは干渉法を用いて測定した<sup>21)22)</sup>。測定結果より、

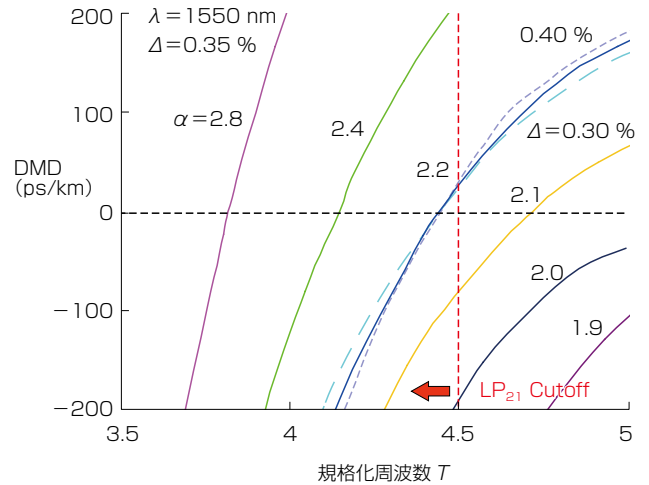


図3 GI型TMFの規格化周波数に対するDMD特性  
Fig. 3. DMD characteristics of GI-TMF as a function of  $T$  at the various  $\alpha$  and  $\Delta$ .

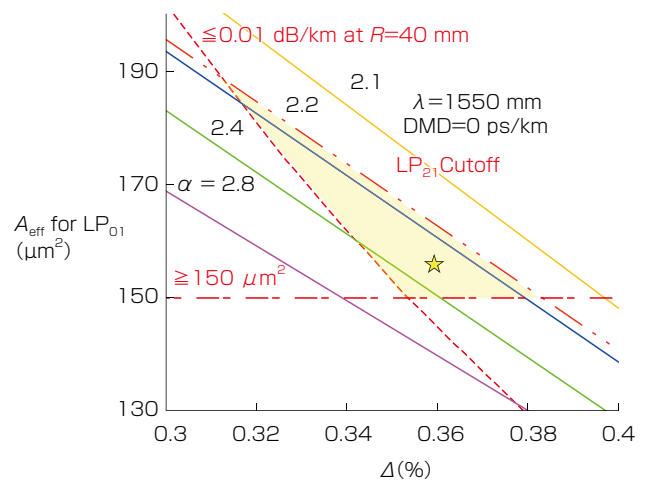


図4 設計目標領域  
Fig. 4. The region satisfying the requirements.

DMD=0 ps/kmを得る波長は 1554 nmであり、設計通りの値を得たことを確認した。また、C bandにおいてDMD $\leq\pm 36$  ps/kmであった。表 1 に波長 1550 nmにおける他の特性を示す。LP<sub>01</sub>モードの特性は実測値、曲げ損失以外のLP<sub>11</sub>モードの特性は実測屈折率分布を用いて計算した値である。なお、LP<sub>01</sub>モードの特性はLP<sub>11</sub>モードのみが減衰する曲げを加えて評価した。カットオフ波長測定およびNFP測定（図 5）より、C bandにおいてLP<sub>01</sub> およびLP<sub>11</sub>モードのみが伝搬することを確認した。A<sub>eff</sub>については、LP<sub>01</sub>モードは約 150  $\mu\text{m}^2$ 、LP<sub>11</sub>モードは200  $\mu\text{m}^2$  以上の値を得た。R=40 mmにおけるLP<sub>11</sub>モードの曲げ損失は、R=15, 17, 20 および 30 mmの実測値を用いて外挿して算出したところ、0.10 dB/kmと見積られ、設計目標よりやや大きい値となった。これは、作製したTMFの $\Delta$ が設計値よりも低くなったことが原因だと考えられる。

表1 試作したGI型TMFの波長1550 nmにおける光学特性  
Table 1. Optical properties of fabricated GI-TMF at 1550 nm.

特性	Mode	GI-TMF
A <sub>eff</sub> ( $\mu\text{m}^2$ )	LP <sub>01</sub>	149.3
	LP <sub>11</sub> *	201.2
ファイバカットオフ波長 (nm)	LP <sub>21</sub>	1495
	LP <sub>11</sub> *	2315
伝送損失 (dB/km)	LP <sub>01</sub>	0.196
	LP <sub>11</sub>	0.10
曲げ損失 (R = 40 mm) (dB/km)	LP <sub>01</sub>	0.00
	LP <sub>11</sub>	0.10
波長分散 (ps/km/nm)	LP <sub>01</sub>	20.9
	LP <sub>11</sub> *	19.3

\*計算値

3. 2 補償伝送路

図 6 に補償伝送路の概念図を示す。光ファイバ (p) および光ファイバ (n) のDMD, 光ファイバ長をそれぞれ $\Delta\tau_p (> 0)$ ,  $L_p$ ,  $\Delta\tau_n (< 0)$ ,  $L_n$ と表す。補償伝送路のDMD,  $\Delta\tau_{total}$ は、

$$\Delta\tau_{total} = (\Delta\tau_p \cdot L_p) + (\Delta\tau_n \cdot L_n) \dots\dots\dots(式 5)$$

となる。このとき、 $\Delta\tau_{total}$ がゼロになる条件は、

$$|\Delta\tau_p| : |\Delta\tau_n| = L_n : L_p \dots\dots\dots(式 6)$$

であり、式 (6) が成り立つように光ファイバ長を調整すれば良い。補償伝送路では、製造誤差によるDMD変化を光ファイバ長で調整できるため、製造マージンが単一光ファイバ方式より広がる利点がある。

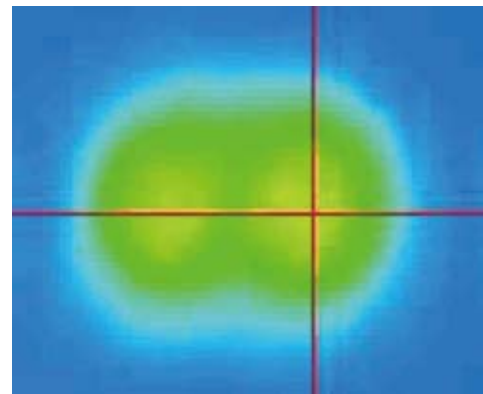


図5 作製したGI型TMFのNFP測定結果  
Fig. 5. Measured NFP at the end of fabricated GI-TMF.

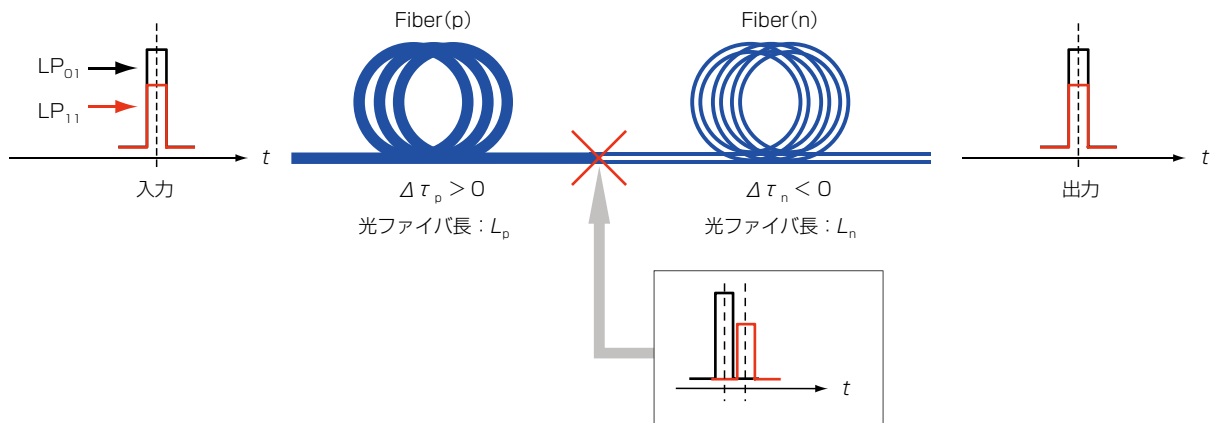


図6 補償伝送路の概念図  
Fig. 6. Conceptual diagram of DMD compensating optical transmission path.

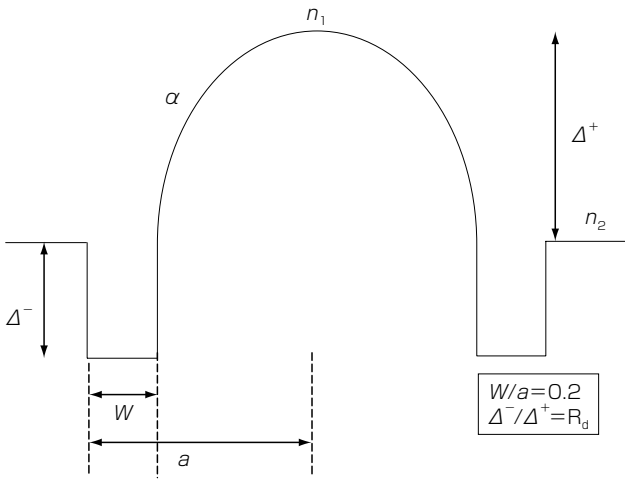


図7 屈折率分布  
Fig. 7. Refractive index profile.

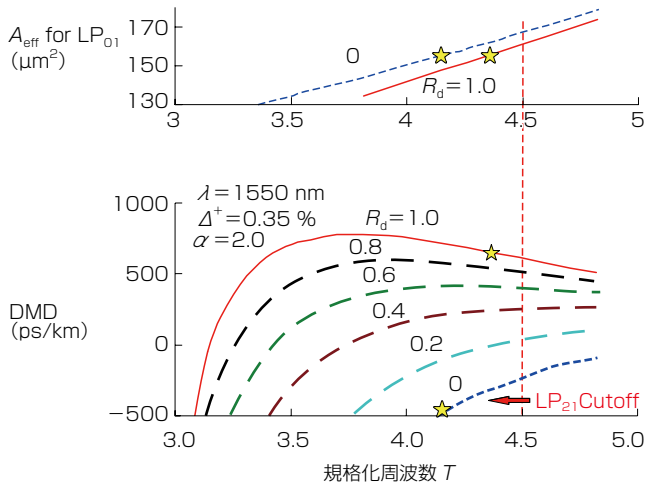


図8 トレンチ付GI型TMFの規格化周波数に対するDMD特性および $A_{\text{eff}}$   
Fig. 8. DMD and  $A_{\text{eff}}$  characteristics of GI Type TMF with trench.

### 3. 2. 1 設計

まず、設計に先立ち屈折率分布形状の予備検討を行った結果、GI型を有するコアの外周にトレンチ層を付与した場合、トレンチ層の屈折率を変化させることでLP<sub>21</sub>モードのカットオフ周波数に影響を与えることなくDMD特性のみを調整できることがわかった。そこで、本検討では図7に示した屈折率分布を用いることにし、コア半径 $a$ に対するトレンチ領域の幅 $W$ の比率 $W/a$ を一定(0.2)の条件の下、他のパラメータの最適化を行った。設計目標値は、1) C+L bandにおいて5 ps/km以下のDMD、 $A_{\text{eff}}$ と曲げ損失については、3. 1. 1の2)と3)の値を目標値とした。

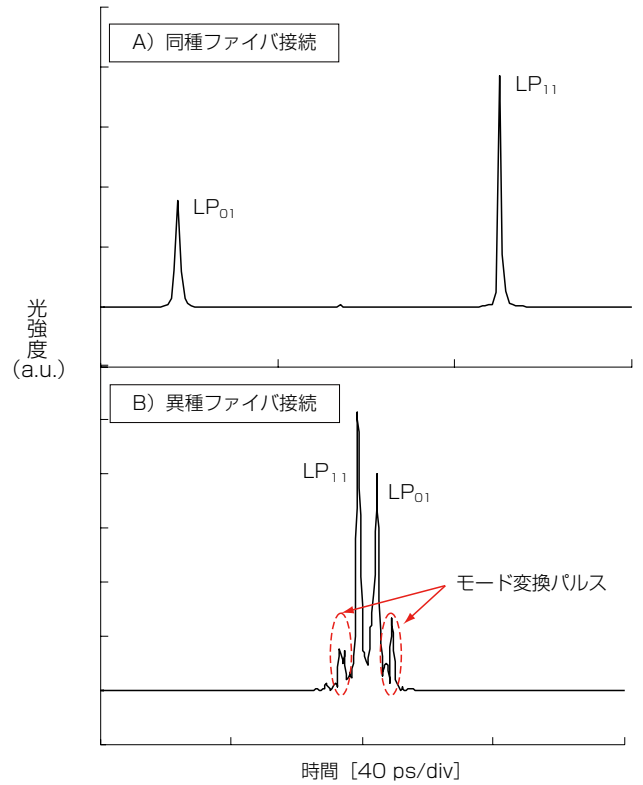


図9 同種TMFおよび異種TMFを接続したときのインパルス応答波形  
Fig. 9. The Impulse response signals connecting to A) the same of TMF types and B) different TMF types.

図8に波長1550 nmにおける規格化周波数 $T$ に対するDMD特性および $A_{\text{eff}}$ の計算結果を示す。コア中心の比屈折率差 $\Delta^+$ に対するトレンチの比屈折率差 $\Delta^-$ の比率 $R_d$ が0.4以下のとき、DMDは $T$ の増加に伴って大きくなる。一方、 $R_d \geq 0.6$ のとき、DMDの $T$ に対する傾きの符号が2モード伝搬領域内で逆転することがわかる。さらに、 $R_d \geq 0.6$ のトレンチ構造を有する屈折率分布(TMFP)と $R_d = 0$ のトレンチ構造無しの屈折率分布(TMFN)は、規格化周波数 $T$ が $4.0 \leq T \leq 4.5$ の領域においてDMDとDMDの $T$ に対する傾きの両方の符号が互いに逆となることがわかる。DMDおよびDMDの $T$ に対する傾きの符号が互いに逆の場合、それらを接続した補償伝送路は広波長範囲においてDMDを低減できることが期待できる。ところで、補償伝送路の $A_{\text{eff}}$ については2)の目標値に加えて、構成するTMFの $A_{\text{eff}}$ を同等に設計する必要がある。なぜなら、 $A_{\text{eff}}$ が大きく異なる場合、接続点においてモード変換が発生する可能性があり、モード変換を起因として発生したパルスはノイズ成分となるためである。図9に同種TMFおよび異種TMFを接続したときのインパルス応答波形の一例をそれぞれ示す。同種TMFではモード変換パルスが観察されないのに対し、異種TMFではモード変換パルスが発生していることがわか

る。TMF (p) と TMF (n) は、図 8 より  $T$  値、すなわち、 $\Delta^+$  および  $a$  を調整することで、DMD と DMD の  $T$  に対する傾きの符号を互いに逆であるように維持しつつ、LP<sub>01</sub>モードの  $A_{\text{eff}}$  を  $150 \mu\text{m}^2$  以上、且つ、同等に設計することが可能であり、モード変換パルスを抑制できることが期待できる。以上の計算結果より、TMF (p) と TMF (n) の各パラメータを最適化した。図 8 中に設計値としたパラメータ (☆) をそれぞれ示す。

3. 2. 2 試作結果

上述の設計に基づき、TMF (p) および TMF (n) をそれぞれ作製した。DMD は、C-OFDR を用いて評価した<sup>23)</sup><sup>24)</sup>。被測定光ファイバには TMF (p) および TMF (n) の両端から 70 m を切り出し、合計 4 サンプルを選定した。図 10 に各波長に対する TMF (p) および TMF (n) の DMD 測定値を示す。白抜きおよび塗りつぶしの点は、各 TMF の両端の測定結果である。TMF (p) および TMF (n) とともに、両端の測定結果は良い一致を示しており、この測定結果は全長での DMD 値と見なすことができると考えられる。さらに、図 10 より、TMF (p) と TMF (n) は DMD だけでなく波長に対する DMD の傾きの符号も逆であり、設計どおりの特性を有することがわかった。表 2 に波長 1550 nm における 2 本の TMF の諸元を示す。2 本の TMF の LP<sub>01</sub>モードの  $A_{\text{eff}}$  は  $150 \mu\text{m}^2$  以上、且つ、1.3% 以内の誤差で一致した。また、カットオフ波長測定および NFP 測定より、C+L band において LP<sub>01</sub>モードおよび LP<sub>11</sub>モードのみが伝搬することを確認した。LP<sub>11</sub>モードの曲げ損失は  $R=40 \text{ mm}$  において、TMF (p) では  $0.15 \text{ dB/km}$ 、TMF (n) では  $0.38 \text{ dB/km}$  であった。これは、単一光ファイバと同様、 $\Delta^+$  が設計値よりも低くなったことが原因だと考えられ、その補正は容易であると考えられる。

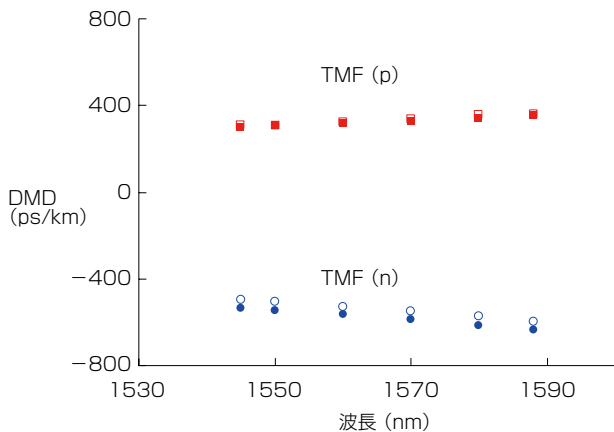


図 10 波長に対する DMD 実測値

Fig. 10. Measured DMD as a function of wavelength.

3. 2. 3 DMD 補償実験

TMF (p) と TMF (n) を接続し、DMD 補償伝送路を構築した。図 10 の結果より、TMF (p) と TMF (n) の光ファイバ長比率を最適にした場合、DMD は数 ps/km 以下となることが予想される。しかしながら、C-OFDR を用いた本測定系では数 ps/km 以下の DMD を評価することは難しい。そこで、光ファイバ長比率を大きくずらした場合の DMD を測定し、得られた結果を内挿することで最適光ファイバ長比率のときの DMD を評価した。TMF (p) の光ファイバ長  $L_p$  は固定し、TMF (n) の光ファイバ長  $L_n$  を変えて DMD をそれぞれ測定した。この際、各融着点は変化しておらず、TMF (n) の光ファイバ長のみを変えた。図 11 に各  $r_L (=L_n/L_p)$  の各波長に対する DMD 測定値を示す。破線は TMF (p) および TMF (n) 単体における DMD 測定値と光ファイバ長を式 (5) に代入して計算した値である。実測値と計算値は良い一致を示していることがわかる。また、 $r_L$  が約 0.5 に近づくにつれて、

表 2 波長 1550 nm における試作した TMF (p) および TMF (n) の諸元

Table 2. Optical characteristics of TMF (p) and TMF (n) at 1550 nm.

特性		TMF (p)	TMF (n)
ファイバ長 (m)		5750	7800
$A_{\text{eff}}$ ( $\mu\text{m}^2$ )	LP <sub>01</sub>	150.9	152.8
	LP <sub>11</sub> *	212.1	220.3
ファイバカットオフ波長 (nm)	LP <sub>21</sub>	1510	1497
	LP <sub>11</sub> *	2285	2305
伝送損失 (dB/km)	LP <sub>01</sub>	0.206	0.203
曲げ損失 at $R = 40 \text{ mm}$ (dB/km)	LP <sub>01</sub>	< 0.00	< 0.00
	LP <sub>11</sub>	0.15	0.38
波長分散 (ps/km/nm)	LP <sub>01</sub>	20.5	20.3
	LP <sub>11</sub> *	20.0	19.0

\*計算値

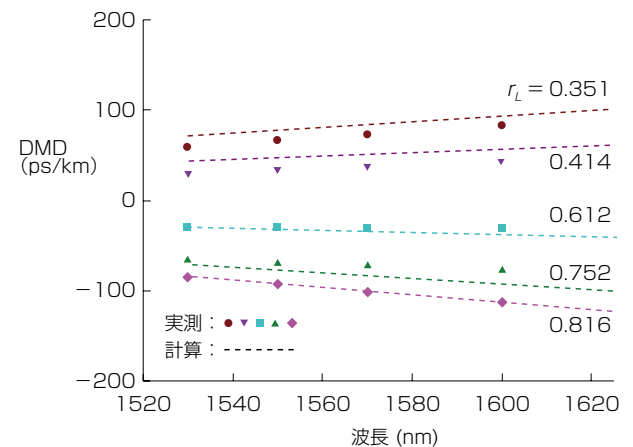


図 11 各ファイバ長比率  $r_L$  の各波長に対する DMD 実測値と計算値

Fig. 11. Measured and calculated DMDs as a function of wavelength at the various  $r_L$ .

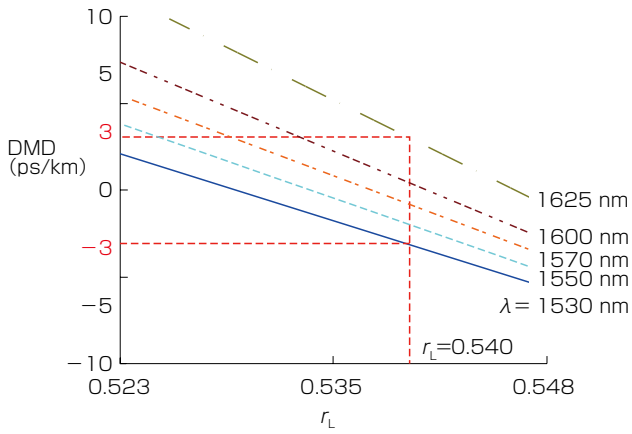


図12 内挿直線より算出した補償伝送路の最小DMD値  
Fig. 12. Minimum DMD of compensating transmission path by interpolation.

表3 FMFのDMD値の比較  
Table 3. Comparison of DMDs by laboratories.

光伝送路	組織	モード数 (LPモード)	DMD (ps/km)
単一光ファイバ	Fujikura <sup>22)</sup>	2	≤ 36 at C band
	OFS <sup>19)</sup>	2	≤ 76 at 1550 nm
	Alcatel-Lucent (米) OFS <sup>5)</sup>	2	≤ 27 at C band
	NEC America Corning <sup>8)</sup>	2	≤ 80 at C band
補償伝送路	Fujikura <sup>25)</sup>	2	≤ 3 at C + L band
	NTT <sup>7)</sup>	2	≤ 5.4 at C + L band
	Alcatel-Lucent (米) OFS <sup>6)</sup>	2	≤ 3.3 at C band
	Corning <sup>9)</sup>	4	≤ 6.0 at C band (LP <sub>01,11</sub> モードのみ)

DMD値と波長に対するDMDの傾きはゼロに近づくことがわかる。図12に波長1530, 1550, 1570, 1600および1625 nmにおける $r_L$ とDMDの関係を示す。なお、波長1625 nmにおけるDMD値は計算値を示している。図11より、 $r_L=0.540$ のとき、補償伝送路のDMDはC+L band全域において±3 ps/km以内と見積もられることがわかった。

#### 4. MIMO伝送の展望

単一光ファイバ伝送路ではC bandにおいて±36 ps/km以内、補償伝送路ではC+L bandにおいて±3 ps/km以内を達成した。表3に他の組織の報告結果を示す。単一光ファイバ伝送路、補償伝送路どちらにおいても、当社のDMD値は世界最高クラスを達成している。ただし、単一光ファイバ伝送路では数ps/kmオーダーのDMD値には達しておらず、DMDの更なる低減が必要である。一方、補償伝送路ではDMD低減、製造マージンの観点ではアドバンテージが高いことがわかったが、3. 2. 1で述べたように、接続点において発生するモード変換量を可能な限

り抑制することが今後の課題である。それぞれのアプローチにおいて、課題を克服する光ファイバ設計の改良が今後のキーポイントとなると考えている。

#### 5. むすび

MIMOを用いたMDM伝送に適用可能な広波長範囲で低DMDを有するTMFについて、単一光ファイバ伝送路と補償伝送路の2つのアプローチの最適設計法を明らかにした。また、設計に基づいて作製したこれら2つの伝送路は、世界トップクラスのDMD値を達成した。今後は、単一光ファイバ伝送路では更なる低DMD化、補償伝送路では接続点におけるモード変換量の評価に取り組んでいく。

#### 参考文献

- 1) D. Qian, *et al.*, "101.7-Tb/s (370×294-Gb/s) PMD-128QAM-OFDM Transmission Over 3×55-km SSMF using Pilot-based Phase Noise Mitigation," OFC/NFOEC 2011, PDP B5, 2011
- 2) Cisco VNI Mobile, 2012, "http://www.cisco.com/web/JP/solution/isp/ipngn/literature/pdf/white\_paper\_c11-520862.pdf" Cisco
- 3) T. Morioka, "New Generation Optical Infrastructure Technologies: "EXAT Initiative" Towards 2020 and Beyond," OECC 2009, FT4, 2009
- 4) V.A.J.M. Sleiffer, *et al.*, "73.7 Tb/s (96×3×256-Gb/s) mode-division multiplexed DP-16QAM transmission with inline MM-EDFA," ECOC2012 PDP Th3.C.4, 2012
- 5) R. Ryf *et al.*, "Mode-Division Multiplexing Over 96 km of Few-mode Fiber using Coherent 6×6 MIMO processing," J. Lightwave Technol., vol.30, no.4, pp. 521-531, 2012
- 6) S. Randel, *et al.*, "Mode-Multiplexed 6×20-GbD QPSK Transmission over 1200-km DGD-Compensated Few-Mode Fiber," OFC/NFOEC2012, PDP5C.5, 2012
- 7) T. Sakamoto, *et al.*, "Differential mode delay managed transmission line for wide-band WDM-MIMO system," OFC/NFOEC 2012, OM2D.1, 2012
- 8) N. Bai *et al.*, "Mode-Division Multiplexed Transmission with Inline Few-Mode Fiber Amplifier," Optics Express, vol.20, no.3, pp. 2668-2680, 2012
- 9) M. Li, *et al.*, "Low Delay and Large Effective Area Few-Mode Fibers for Mode-Division Multiplexing," OECC2012, 5C3-2, 2012
- 10) C. Koebele, *et al.*, "40 km Transmission of Few Mode Division Multiplexed Data Streams at 100Gb/s with MIMO-DSP Complexity," ECOC 2011 PDP Th.13.C.3, 2011
- 11) N. Hanzawa, *et al.*, "Asymmetric Parallel Waveguide with Mode Conversion for Mode and Wavelength Divi-

- sion Multiplexing Transmission,” OFC/NFOEC 2012, OTu1I.4, 2012
- 12) H. Takara, *et al.*, “1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency,” ECOC 2012, PDP, Th.3.C.1, 2012
  - 13) M. Mazurczyk, *et al.*, “30 Tb/s Transmission over 6,630 km Using 16QAM Signals at 6.1 bits/s/Hz Spectral Efficiency,” ECOC 2012, PDP, Th.3.C.2, 2012
  - 14) M. Bigot-Astruc, *et al.*, “Design and Fabrication of Weakly-Coupled Few-Modes Fibers,” IEEE Summer Topicals 2012, TuC1.1, 2012
  - 15) B. Inan, *et al.*, “Equalizer Complexity of Mode Division Multiplexed Coherent Receivers” OFC/NFOEC 2012, OW3D.4, 2012
  - 16) 中澤ほか, 「2モードファイバでのモード分割多重伝送におけるMIMO信号処理の要求演算量」, 信学技報, OFT2012-36, 2012
  - 17) 大越ほか, 光ファイバ, オーム社, pp.182-4, 1989
  - 18) K. Kitayama, *et al.*, “Structural Optimization for Two-Mode Fiber : Theory and Experiment,” J. Quantum Electronics, vol.QE-17, no.6, 1981
  - 19) L. Grüner-Nielsen, *et al.*, “Few Mode Transmission Fiber with Low DGD, low Mode Coupling and Low Loss,” OFC2012 PDP, 5A.1, 2012
  - 20) M. Ohashi, *et al.*, “Bend-optimized dispersion-shifted step-shaped-index (SSI) fibres,” Electron. Lett., vol.22, pp.1285-1286, 1986
  - 21) N. Shibata, *et al.*, “Spatial Technique for Measuring Modal Delay Differences in a Dual-Mode Optical Fiber,” Appl. Opt., 19, 1489-1492, 1980
  - 22) R. Maruyama, *et al.*, “Novel Two-Mode Optical Fiber with Low DMD and Large  $A_{\text{eff}}$  for MIMO Processing,” OECC 2012, PDP2-3, 2012
  - 23) R. Maruyama, *et al.*, “Mode Dispersion Compensating Optical Transmission Line Composed of Two-Mode Optical Fibers,” OFC/NFOEC 2012, JW2A.3, 2012.
  - 24) 丸山ほか : 「C-OFDRを用いた2モード光ファイバの群遅延時間差測定」, 2012年信学総大, B-10-24, 2012
  - 25) R. Maruyama, *et al.*, “DMD Free Transmission Line Composed of TMFs with Large Effective Area for MIMO Processing,” ECOC 2012, Tu.1.F, 2012