

# 周波数領域干渉を用いた 新しい複屈折率差、偏波モード分散評価法の開発

山中正樹<sup>\*1</sup>・若木守明<sup>\*2</sup>・西澤紘一<sup>\*3</sup>・大塚喜弘<sup>\*4</sup>・波平宜敬<sup>\*5</sup>

## Development of Novel Characterization Method to Evaluate Modal Birefringence and Polarization Mode Dispersion Based on Optical Frequency Domain Interferometry

by

Masaki YAMANAKA, Moriaki WAKAKI, Koichi NISHIZAWA,  
Yoshihiro OHTSUKA and Yoshinori NAMIHIRA

(Received on Mar. 26, 2002, accepted on July 10, 2002)

### Abstract

This paper reports a new characterization method to evaluate Modal Birefringence (MB) and Polarization Mode Dispersion (PMD) based on optical frequency domain interferometry using a Super Luminescent Diode (SLD). A SLD covering an optical wavelength range between 1400 and 1650 [nm] was used. Interference at every single frequency component in a SLD spectrum produces the so-called channeled spectrum, which is modulated in frequency by MB and PMD. A channeled spectrum was measured to evaluate MB and PMD. Typical Polarization Maintaining optical Fibers (PMF) and Isolator were measured as a function of optical wavelength. The comparison among different PMD measurement methods such as the Fixed Analyzer method, Interferometric Air path type method, Jones Matrix Eigenanalysis method and Random Polarization Modulation Phase Shift method was carried out using PMF. As a result, almost same results were obtained.

**Keywords:** Modal birefringence, Polarization mode dispersion, Optical frequency domain interferometry, Isolator, Polarization maintaining fiber

### 1. 緒言

超高速大容量光通信システムにおいて、高密度波長多重化(Dense Wavelength Division Multiplexing: DWDM)や高速伝送化(large bit rate: 40Gbps)に伴い、光パルス信号の広がりを生じる光通信デバイスの分散特性についての計測及び制御は重要な課題となっている。分散特性の一つとして、偏波モード分散(Polarization Mode Dispersion: PMD)がある。PMDとは、光通信デバイスの材料、構造及び熱、張力、圧力といった応力により発生したモード複屈折(Modal Birefringence: MB)によって生じる、直交した二つの偏波モード間の群遅延時間差(Differential Group Delay: DGD)である。PMD測定は、大きく分けて時間領域によるものと周波数領域によるものがある。前者には干渉法、後者は固定アナライザ法、偏光解析法(ポアンカレ球法、ジョンズマトリックス法、偏波状態法)等がある<sup>1)~8), 19)</sup>。しかし、これらの方針では PMD の要因である MB との関係が不明確であり、測定光学系が複雑で、測定系の調整が難しく、再現性が悪い等の問題点がある。

本研究では、光周波数領域干渉法(Optical Frequency Domain Interferometry: OFDI)を用いた新しい MB 及び PMD 測定法を提案している。本報告では、その原理を説明し、それを用いた実験方法を述べ、測定結果について検討を加えた。

### 2. 測定原理

#### 2.1 モード複屈折率差の測定原理

一対の偏光子間に複屈折性を示す試料を挟み一方から広帯域光源からの光を照射する(Fig.1)。透過光の分光スペクトルは、試料の複屈折量に依存した形の変調をうける(Fig.2)<sup>20)</sup>。平行ニコルまたは、直交ニコルの間に複屈折素子を挟み、複屈折素子の主軸から 45[deg.]の角度で光波を入射した場合に得られる直交偏波モード間の干渉スペクトル(チャネルスペクトル)は、周波数に依存した形で以下の式で与えられる<sup>13)~18)</sup>。

$$S(\omega) = \frac{1}{2} \{ S_x(\omega) + S_y(\omega) + 2|r(\omega)|\sqrt{S_x(\omega)S_y(\omega)} \times \cos \left( \frac{\omega}{c} \Delta N(\omega) L \right) \}. \quad (1)$$

但し、 $S_x(\omega)$ 、 $S_y(\omega)$ は X 偏波、Y 偏波光スペクトル、 $r(\omega)$ は光学系に依存した干渉効率、 $\Delta N(\omega)$ は MB、L は複屈折素子

\* 1 工学研究科光工学専攻博士課程前期

\* 2 工学部応用理学科光工学専攻教授

\* 3 職業能力開発総合大学校教授

\* 4 北海道大学名譽教授

\* 5 琉球大学工学部教授

の長さである。

上記式(1)において余弦関数(Fig.3)が X、Y 偏波光の干渉項となる。干渉項は式(1)を整理すると以下の式で与えられる。

$$\cos\left(\frac{\omega}{c} \Delta N(\omega)L\right) = \frac{2S(\omega) - Sx(\omega) - Sy(\omega)}{2|r(\omega)|\sqrt{Sx(\omega)Sy(\omega)}}. \quad (2)$$

上記式(2)より、MB を与える  $\Delta N(\omega)$  は以下の式で与えられる<sup>16)~18)</sup>。

$$\Delta N(\omega) = \frac{c}{\omega L} \cos^{-1}\left(\frac{2S(\omega) - Sx(\omega) - Sy(\omega)}{2|r(\omega)|\sqrt{Sx(\omega)Sy(\omega)}}\right). \quad (3)$$

また、MB はチャネルスペクトルの変調周期を  $\omega_p$  とすると、

$$\Delta N = \frac{2\pi c}{\omega_p L}. \quad (4)$$

となり、 $\omega/c = 2\pi/\lambda$  の関係を用いると、

$$\Delta N = \frac{\lambda^2}{\lambda_p L}. \quad (5)$$

となる。但し、 $\lambda_p$ ：波長領域の変調周期である。

## 2.2 PMD の測定原理

伝搬定数差を  $\Delta B(\omega)$  とすると、伝送距離 L に渡る DGD  $\Delta \tau(\omega)$  は以下の式で与えられる<sup>16)~18)</sup>。

$$\Delta \tau(\omega) = L \left( \frac{d\Delta B(\omega)}{d\omega} \right). \quad (6)$$

上記の式(6)において、 $\Delta B(\omega) = \omega \cdot \Delta N(\omega)/c$  とおくと、 $\Delta \tau(\omega)$  は以下の式で与えられる。

$$\Delta \tau(\omega) = L \left( \frac{d\Delta B(\omega)}{d\omega} \right) = \frac{L}{c} \left( \Delta N(\omega) + \omega \frac{d\Delta N(\omega)}{d\omega} \right). \quad (7)$$

上記の式(7)において、MB が周波数に依存しなければ  $d\Delta N(\omega)/d\omega = 0$  となり、 $\Delta \tau(\omega)$  は以下の式で与えられる。

$$\Delta \tau(\omega) = \frac{L \Delta N(\omega)}{c}. \quad (8)$$

MB が周波数(波長)に依存している場合は式(7)、依存していない場合は式(8)を用いて PMD を評価する。

従来の PMD 測定法の幾つかは、常に  $d\Delta N(\omega)/d\omega = 0$  として PMD を評価している。本論では、それに代わる評価法として、第一に MB を評価し、次に PMD を評価する手法を提案している。

## 3. 実験

### 3.1 実験方法

広帯域光源に Super Luminescent Diode (SLD:  $\nu = 195$ [THz])、偏光子、検光子にはグラントムソングリズムを用いた。

2 章でも述べたように、偏光子、複屈折素子を透過した光スペクトルは、検光子により X 偏波、Y 偏波、チャネルスペクトルと選択され、マルチモード光ファイバー(MMF: コア径:50[μm])に入射する。MMF で導光された後、光スペクトラムアナライザ(ADVANTEST Q8381a)を用いて各々の光スペクトルを測定する。測定した光スペクトルを式(3)に代入し MB を求める。また、求めた MB から、式(7)または(8)を用い PMD を評価した。

### 3.2 評価

原理実証実験として、2 章で述べた MB 及び PMD 測定原理に基づき、偏波面保持光ファイバ(Polarization Maintaining Fiber: PMF)を測定した。PMF は光ファイバ内部の複屈折性が高く、偏波モード結合が無い事よりテストサンプルとして用いた。比較のために、従来の PMD 測定法の中で最も簡易である固定アナライザ法(Fixed Analyzer method: FA)<sup>1), 3)~5), 19)</sup>、最も精度の高い空間干渉法(Interferometric Air Path type method: INT-A)<sup>1)~2), 19)</sup>、国際電気通信連合電気通信標準化部門(International Telecommunication Union- Telecommunication Standardization Sector: ITU-T)で標準測定法として勧告化されたジョーンズマトリックス法(Jones Matrix Eigenanalysis method: JME)<sup>7), 19)</sup>、PMD の定義により近い偏光変調位相シフト法(Polarization Modulation Phase Shift method: PMPS)<sup>19)</sup>を用いて PMD の測定を行った。MB については、評価が可能な測定法が OFDI、INT-A のみであり、この 2 種類で評価を行った。

PMF の PMD は長さに比例する事がよく知られている<sup>19)</sup>。同一サンプルで長さが異なる PMF (1.085、2.112、3.140、4.225、5.252[m]) をテストサンプルとして OFDI で測定を行った。

また、旋光性を有する場合のテストサンプルとして、モード結合が弱い Isolator の評価を OFDI で行った。

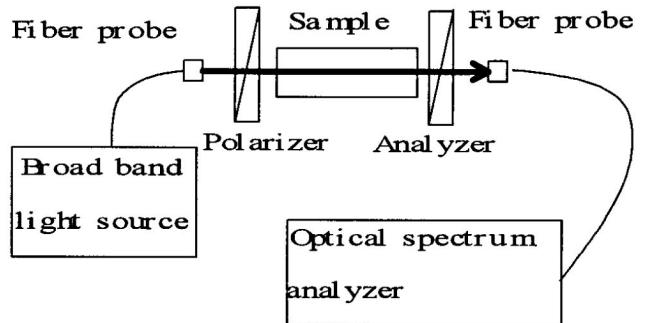


Fig.1 Schematic diagram of two mode interference method in optical frequency domain.

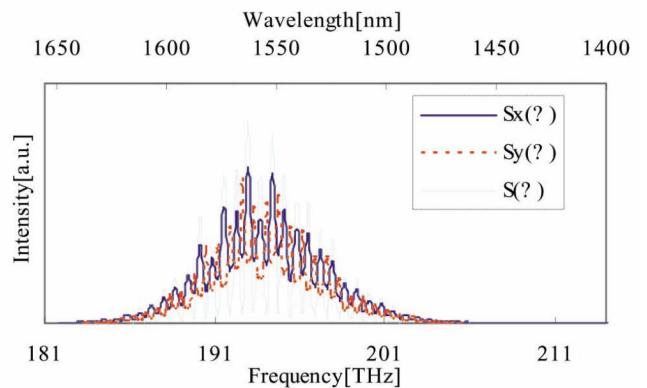


Fig.2 Typical channeled spectrum  $S(\omega)$ .  $Sx(\omega)$  and  $Sy(\omega)$  show the spectra of x and y polarized light, and  $S(\omega)$  shows the interference spectrum between these modes.

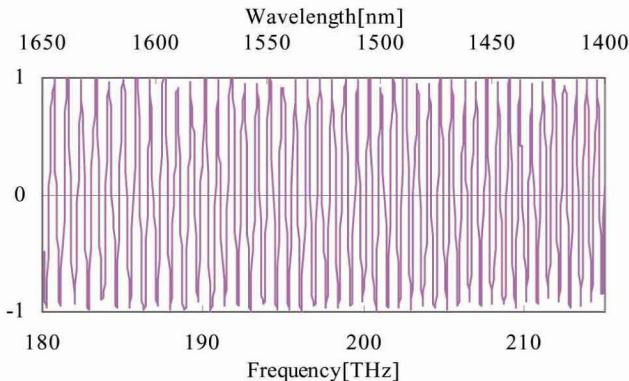


Fig.3 Cosine function of PMF.

#### 4.結果および考察

##### 4.1 測定系の評価

OFDI では、測定した光スペクトルの変調周期より MB 及び PMD の評価を行っている。そのため、光スペクトルの変調周期が時間の経過とともに変化しなければ、測定再現性は良好であると考えられる。

OFDI の再現性の確認を行った。室内を一定の状態に保ち 12 時間測定を行った。Fig.4 に測定結果を示す。上は測定開始直後のチャネルスペクトル、下は 12 時間経過後のチャネルスペクトルを示している。また、二つの波形の相違を評価するために相関係数を用いた。その結果、相関係数 0.99 となった。

相関係数より、光スペクトラムアナライザで得られたチャネルスペクトルは、測定開始から 12 時間経過しても安定して観測されていると考えられる。これより、OFDI による測定再現性は良いと考えられる。

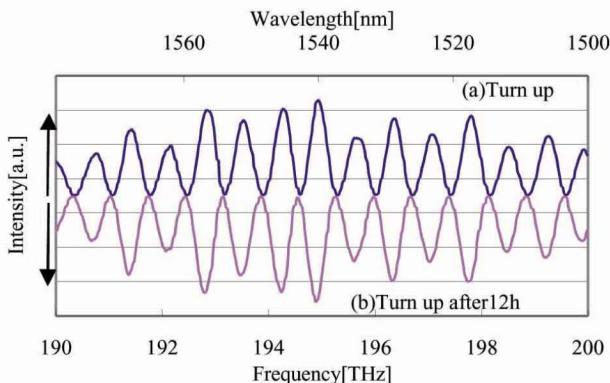


Fig.4 Reproducibility characterization of channeled spectrum: (a) turn up, (b) turn up after 12h.

##### 4.1 PMF の評価結果

Fig.5 に OFDI による PMF の MB 評価結果を示す。得られた MB は、周波数（波長）に対してほとんど変化せず、約 180 ~ 210[THZ] の領域において  $MB \approx 4.31 \times 10^4$  となった。この結果、 $d\Delta N(\omega)/d\omega = 0$  として式(8)を用いて PMF の PMD 評価を行った。

得られた PMD は、約 180 ~ 210[THZ] の領域において  $PMD = 1.581[\text{ps}]$  となった。

Table 1 に比較のために用いた各種 PMD 測定法による PMF の評価結果を示す。

MB の値は OFDI、INT-A の各測定法による測定結果は相互に一致した。また、PMD の値も OFDI、FA、INT-A、JME の各測定法による測定結果も相互に一致した。このことより、モード結合が無く、MB が明らかで波長依存が無いテストサンプルに対しては、OFDI は既存測定法と同程度の測定が可能であると考えられる。

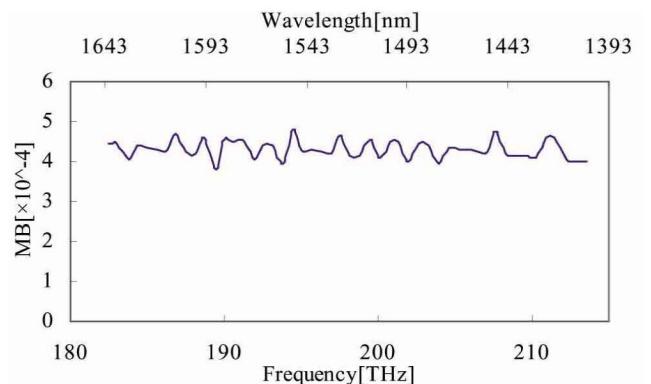


Fig.5 MB of PMF by using OFDI.

Table 1 Comparison among different PMD measurement methods.

	OFDI	FA	INT-A	JME	RPMPS
MB[\times 10 <sup>-4</sup> ]	4.31	×	4.26	×	×
PMD[ps]	1.581	1.577	1.562	1.593	1.596

×: Not evaluated.

##### 4.2 長さの異なる PMF の評価結果

Fig.6 ~ 10 に長さの異なる PMF の MB 評価結果を示す。得られた MB の値は、PMF の長さに依存しない事が分かった。また、PMF 長が長くなるほどノイズが大きくなっていくのが分かった。これは、光スペクトラムアナライザの分解能が変調周期に追随出来ず、測定精度が低下したためだと考えられる。

得られた MB の値は周波数が高くなるほど MB が小さくなつたので、式(7)を用いて PMD の評価を行った。

Fig.11 に PMF の長さと MB 及び PMD の関係を示す。得られた PMD の値は、長さに比例している事が分かる。また、PMD の測定値に最小二乗法を用いた線形フィッティングを行ったところ、 $PMD = 1.302L - 0.02340$  を得る事が出来た。但し、L は PMF の長さである。比例定数より、テストサンプルとして用いた PMF の PMD は、約 180 ~ 210[THZ] の領域において  $PMD = 1.3[\text{ps}/\text{m}]$  となった。

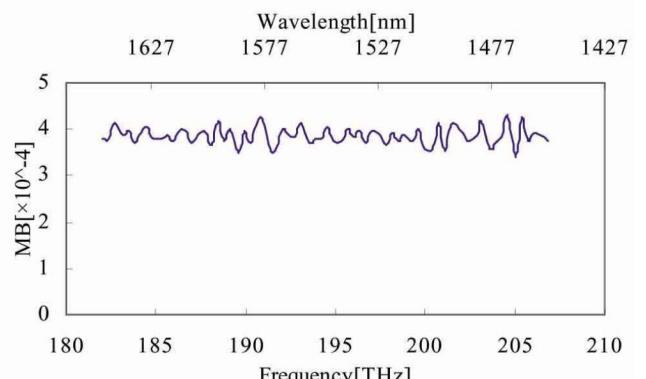


Fig.6 MB of PMF with length of 1.085[m].

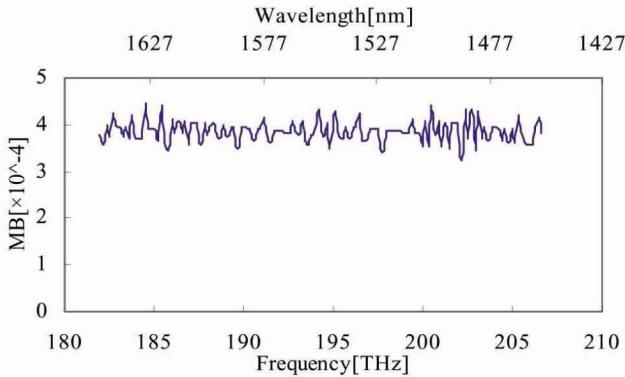


Fig.7 MB of PMF with length of 2.112[m].

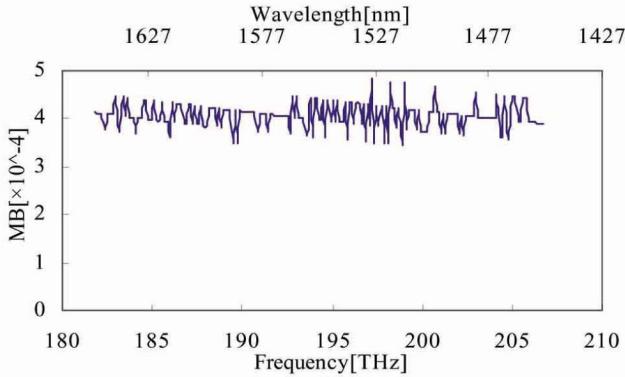


Fig.8 MB of PMF with length of 3.140[m].

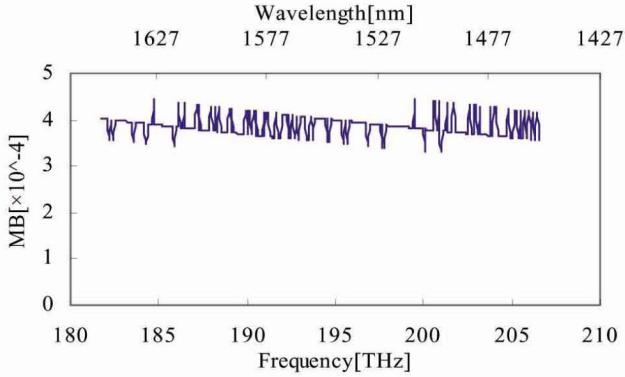


Fig.9 MB of PMF with length of 4.225[m].

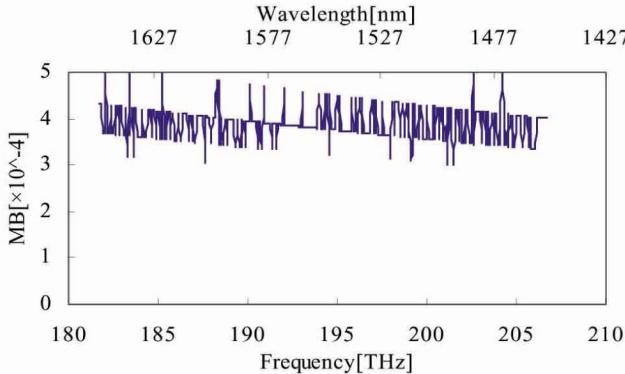


Fig.10 MB of PMF with length of 5.252[m].

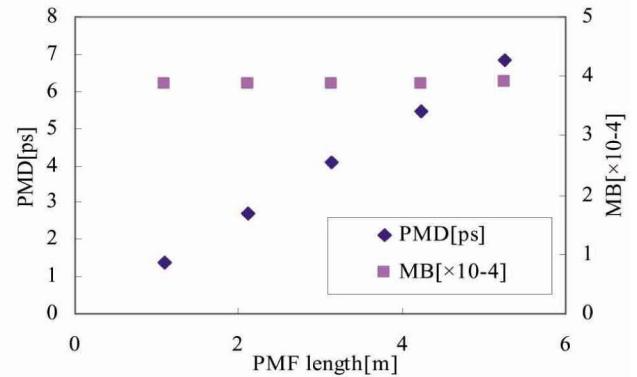


Fig.11 Length dependence of MB and PMD of PMF.

#### 4.3 測定精度の検討

OFDI の測定精度は、光スペクトラムアナライザの分解能に強く依存する。そこで、MB の測定精度の検討を行った。

モード複屈折率差の測定精度は式(5)より

$$\left| \frac{\delta \Delta N}{\Delta N} \right| = 2 \left| \frac{\delta \lambda}{\lambda} \right| + \left| \frac{\delta \lambda p}{\lambda p} \right| + \left| \frac{\delta L}{L} \right|. \quad (9)$$

で表すことが出来る。

上記式(9)より、MB は光スペクトラムアナライザの波長分解能に強く依存している事が分かる。

4.2 章で評価した PMF について、測定精度の検討を行った。

Table2 に測定精度を示す。但し、 $\lambda$  は 1550[nm]、分解能は 0.1[nm]、とし、 $L$  はミリメータまでの測定感度を有するとした。

PMF の長さが長くなればなるほど、MB の測定精度が低下している事が分かる。これは、光スペクトラムアナライザの分解能がチャネルスペクトルの変調周期に対して十分でないためである。

今回用いた光スペクトラムアナライザの最小分解能が 0.1[nm]なので、これ以上の評価は行うことが出来なかった。変調周期に対して十分な分解能を設定すれば測定精度は向上し、ノイズも低減すると考えられる。

Table 2 Length dependence of measurement accuracy.

$L[m]$	$\lambda p[nm]$	accuracy[%]
1.085	5.2	2.0
2.112	2.6	3.9
3.14	1.8	5.6
4.225	1.2	8.4
5.252	1.0	10

#### 4.4 Isolator の評価結果

Fig.12 に OFDI による Isolator の MB 評価結果を示す。2 次関数でフィッティングをした結果、 $\Delta N(\omega) = (-3.676 \times 10^{-2} \nu^2 + 14.43 \nu - 1409) \times 10^{-4}$  を得ることが出来た。

MB が周波数に依存しているので、PMD 評価には式(7)を用いた。その結果、 $PMD = (-3.680 \times 10^{-2} \nu^2 + 9.630 \nu - 470.1) \times 0.04[\text{ps}]$  を得る事が出来た。

例えば、 $\nu = 200[\text{THz}]$  のときは、 $\Delta N(\omega) = 6.600 \times 10^{-4}$ 、 $PMD = 0.6440[\text{ps}]$  となる。

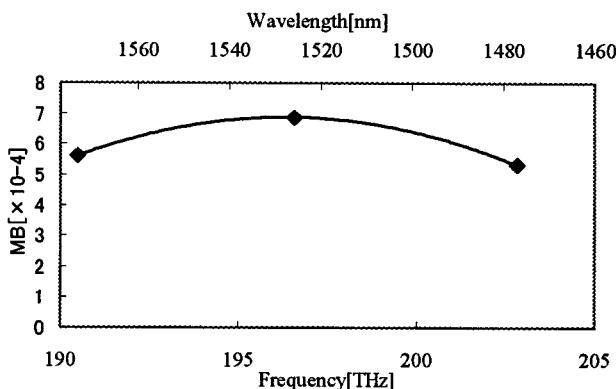


Fig.12 MB of Isolator by using OFDI .

## 5.まとめ

OFDIによるMB及びPMD測定法を提案し、その測定系の原理、構成及び測定結果を示した。モード結合が無く、MBが明らかなPMFをテストサンプルとして、従来のPMD測定法の中で最も簡素であるFA、測定精度が最も高いINT-A、ITU-Tで勧告化された基準試験法であるJME法との比較を行った。その結果、MBに波長依存が無い場合、OFDIは既存測定法と同程度の測定が可能である事が分かった。今後、MBに波長依存を有するテストサンプルに関しては既存測定法との比較評価を行い、本論で提案するPMD評価法の検討をさらに行う必要がある。

OFDIでは、偏波モード結合が無く、複屈折性及び旋光性を有する光通信部品についてMB及びPMDの測定が可能であり、波長依存性の測定も可能であることが明らかになった。

光スペクトラムアナライザのような分光器を必要とするものの、その他には機械的な可動部が無いため、測定時間の短縮化及び装置の信頼性確保などにおいて有効である。測定精度は光スペクトラムアナライザの分解能に強く依存する事が示された。

偏波モード結合を有する光信用部品(長尺及び短尺のSMF、セルフォックレンズ等)でのMB及びPMDの測定を行い、偏波モード結合を有する場合の測定法について検討を行うことが今後の課題である。また、光通信部品に限らず、光学結晶の評価法への適用も今後検討したい。

2章の測定原理で示したように、複屈折素子のMB及び長さを選択する事により、任意の周期の周波数変調を得る事が可能である。複屈折素子に電気光学効果を持つ材料を用いれば、調整可能範囲の広い周波数変調が得ることが出来る。また、光ファイバ増幅器または半導体光増幅器と組み合わせれば、多波長レーザーとして応用できる。今後は周波数変調光源としての応用も幅広く検討していく予定である。

**謝辞** 本研究を進めるにあたり、ご指導をいただきました東海大学工学部光学工学科 故横田英嗣教授、終始有益な御助言をいただいている東海大学工学部光学工学科 渋谷猛久講師に心から深謝いたします。アジレント・テクノロジー、アンリツ、応用光電研究室、日本板硝子より実験装置の一部及びサンプルに便宜をいただいており感謝致します。

## 参考文献

- 1) Y.Namihira and J.Maeda: "Comparison of various polarization mode dispersion measurements methods in optical fibers" Electron. Lett. 28 (1992) 2265 - 2266.
- 2) K.Mochizuki, Y.Namihira and H.Wakabayashi: "Polarization mode dispersion measurements in long single mode fibers" Electron. Lett. 17 (1981) 153.
- 3) C.D.Pooler: "Measurement of polarization -mode dispersion in single-mode fibers with random mode coupling" Opt. Lett. 17 (1989) 523 - 525.
- 4) N.S.Bergano, C.D.Pooler and R.E.Wagner: "Investigation of Polarization Dispersion in Long Lengths of Single-Mode Fiber Using Multilongitudinal Mode Lasers" J.Lightwave Technol. 5 (1987) 1618 - 1622.
- 5) C.D.Pooler and D.L.Favin: "Polarization-Mode Dispersion Measurements Based on Transmission Spectra Through a Polarizer" J.Lightwave Technol. 12 (1994) 917 - 929.
- 6) X.D.Gao and D.D.Meyerhofer: "Frequency-domain interferometer for measurement of the polarization mode dispersion in single - mode optical fibers" Opt. Lett. 19 (1994) 1837 - 1839.
- 7) B.L.Heffner: "Automated Measurement of Polarization Mode Dispersion Using Jones Matrix Eigenanalysis" IEEE Phot. Tech. Lett. 4 (1992) 1066 - 1069.
- 8) P.Oberon: "Interferometric Polarization Mode Dispersion Measurement with Femtosecond Sensitivity" J.Lightwave Technol. 15 (1997) 1852 - 1857.
- 9) A.Khomenko, M.Shlyagin, S.Miridonov and D.Tentori: "Wavelength-scanning technique for distributed fiber-optic sensors" Opt. Lett. 18 (1993) 2065 - 2067.
- 10) M.Shlyagin, A.Khomenko and D.Tentori: "Remote measurement of mode-coupling coefficients in birefringent fiber" Opt. Lett. 19 (1994) 913 - 915.
- 11) M.G.Shlyagin, A.V.Khomenko and D.Tentori: "Birefringence dispersion measurement in optical fibers by wavelength scanning" Opt. Lett. 20 (1995) 869 - 871.
- 12) H.Arimoto and Y.Ohtsuka: "Measurements of the complex degree of spectral coherence by use of a wave - front - field interferometer" Opt. Lett. 22 (1997) 958 - 960.
- 13) S.Tanaka, N.Hasegawa, and Y.Ohtsuka, "Quasi-distributed fiber-optic sensor based on spectral polarimetry" Optical Fiber Sensors We3-37 (1996) 320 - 323.
- 14) Y.Ohtsuka, F.Nagaoka and S.Tanaka, "White-light Frequency-Domain Interferometry Using a Kosters Prism" Opt. Rev.5 (1998) 21 - 26.
- 15) K.Nishizawa and Y.Ohtsuka, "Dispersion Measurements of Modal Birefringence for Birefringent Singlemode Fibers with Whitelight Channeled Spectrum Interferometry" Optical Fiber Sensors P2-22 (1999) 494 - 498.
- 16) M.Yamanaka, M.Wakaki, K.Nishizawa, Y.Ohtsuka: "Measurement of Polarization Maintaining Optical Fiber by using SLD Channeled Spectrum Interferometry" 8<sup>th</sup> Microoptics Conference (2001) 146 - 149.

- 17) Yoshihiro Ohtsuka and Syumei Tokuyama: "Measurement of Key Parameters for Birefringence Single-Mode Optical Fibers by Optical Frequency-Domain Interferometry" Opt. Rev. 8 (2001) 153 – 155.
- 18) Yoshihiro Ohtsuka: "Optical Frequency Dependent Modal Birefringence and Polarization Mode Dispersion of Birefringence Single-Mode Optical Fibers over a Broadband Optical Wavelength Range" Opt. Rev. 8 (2001) 498 – 499.
- 19) Dennis Derickson et al.: *Fiber optic Test and Measurement* (Prentice Hall PTR 1999) 487 - 518.
- 20) M.Born and E.Wolf: *Principle of Optics* (Pergamon, Oxford, 1991).