

平成15年度 成果報告書

平成15年度 地域新生コンソーシアム研究開発事業

「WDM 光通信用偏波面保存形光デバイスの開発」

成果報告書

平成16年3月

沖縄総合事務局

株式会社 トロピカルテクノセンター

目次

要約

英文要約

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1.2 成果概要	2
1.3 事業化に向けた取組み（今後の展望）	3
1.4 研究体制	5
1.5 研究実施場所一覧表	9
1.6 工業所有権等の取得状況	10
1.7 对外発表等の状況	10
1.8 当該プロジェクト連絡窓口	10

第2章 偏波面保存形光アドロップマルチプレクサ(OADM)の研究・開発

第1節 序論	12
1.1 本研究の背景と目的	12
1.2 本研究の概要	13
第2節 工学の基本原則	13
2.1 緒言	13
2.2 偏光の概念	13
2.3 偏波面保存光ファイバ	16
2.4 光ファイバカプラ	17
2.5 光ファイバカプラの理論解析モデル	19
2.6 ファイバブラッググレーティング(FBG)	22
2.7 光アドロップマルチプレクサ(OADM)	25
2.8 結言	27
第3節 光ファイバカプラの偏光・分光特性	27
3.1 緒言	27
3.2 測定系	27
3.3 測定方法	28
3.3.1 分光特性	28
3.3.2 偏光特性	28
3.4 測定結果	30
3.4.1 分光特性	30
3.4.2 偏光特性	30
3.5 考察	36

3.5.1	分光特性	36
3.5.2	偏光特性	36
3.6	結言	37
第4節	FBGの作製及び評価	38
4.1	緒言	38
4.2	作製方法	38
4.2.1	位相マスク法	38
4.2.2	二光干渉法	38
4.3	作製系	39
4.4	測定方法	42
4.4.1	反射ピーク波長 λ_B , 半値幅 , 反射率 R	42
4.4.2	温度特性	42
4.5	測定結果	42
4.5.1	反射ピーク波長 λ_B , 半値幅 , 反射率 R	42
4.5.2	温度特性	43
4.6	考察	50
4.6.1	反射ピーク波長 λ_B , 半値幅 , 反射率 R	50
4.6.2	温度特性	51
4.7	結言	51
第5節	OADMの作製及び評価	51
5.1	緒言	51
5.2	作製	52
5.3	測定方法	53
5.3.1	Add・Drop特性	53
5.3.2	クロストーク	56
5.4	測定結果	56
5.4.1	Add・Drop特性	56
5.4.2	クロストーク	56
5.5	考察	67
5.5.1	Add・Drop特性	67
5.5.2	クロストーク	68
5.6	結言	68
第6節	結論	69
	参考文献	70

第3章	PMD エミュレータに関する研究・開発	
第1節	序論	71
1.1	研究の背景と目的	71
1.2	本研究の概要	72
第2節	偏波モード分散	73
2.1	緒言	73
2.2	偏光特性	73
2.3	偏波モード分散の原理	75
2.4	モード結合	75
2.5	偏波面保存光ファイバ	77
2.6	偏波モード分散測定法の分類	78
2.7	結言	79
第3節	PMD エミュレータ	79
3.1	緒言	79
3.2	PMD エミュレータの原理	80
3.3	固定アナライザ法	80
3.4	接続された2本の偏波面保存光ファイバの偏波モード分散	82
3.5	固定アナライザ法によるシミュレーション	84
3.6	結言	84
第4節	シミュレーションソフトの評価	85
4.1	緒言	85
4.2	測定及びシミュレーション解析結果	85
4.3	比較検討	87
4.4	結言	88
第5節	偏波モード分散(PMD)エミュレータの作製	88
5.1	緒言	88
5.2	PMD 接続回数特性の解析結果	88
5.3	PMD エミュレータの作製結果	89
5.4	比較検討	90
5.5	結言	91
参考文献		102
第4章	全体総括	103
4.1	全体総括	103
4.2	今後の課題	104

和文要約

「WDM（波長多重）光通信用偏波面保存形デバイスの開発」は、FBG（ファイバ・ブラッグ・グレーティング）に関する研究開発と、光カプラに関する開発・製造技術の確立に大きく大別できる。この二つの研究開発を組み合わせ最終目標のOADM（光アドドロップマルチプレクサ）デバイスが開発できる。またこの二つを組み合わせる際に使用するのがスプライスである。これらの個々の研究開発・製造技術確立の状況を以下にまとめる。

FBG に関係する研究開発は FBG 製造システムの機材選定、FBG 製造システムの研究開発、FBG 特性理論と実験、FBG 実験及び考察で平成 14 年度の報告書で詳しく報告した。FBG を製作する方法は、紫外レーザの干渉縞を光ファイバに照射することにより、コアの屈折率変化を誘起させ、これによるブラッグ反射の原理で特定波長の光を反射させるものである。紫外レーザの干渉縞を製作する方法には現在二つの方法が実用化されている。

一つはフェーズマスク法と呼ばれ位相格子のマスクを用いて干渉縞を形成する。もう一つは二光束干渉法であり、ビームスプリッタにより 2 つに分離させた紫外レーザをミラーにより反射させその交差部分に干渉縞を形成するものである。

フェーズマスク法は、再現性、量産性に優れているが、反射波長の異なる FBG を製作するには、各々のマスクが必要になり高コストになる。二光束干渉法は反射ミラーの角度調整を行うことにより干渉縞の周期を調整でき、反射波長の選択が可能である。

本研究プロジェクトでは、研究開発用途として波長選択の自由度が高い二光束干渉法を採用することとした。レーザはコヒーレンシーが優れているコヒーレント社（Innova90C Fred）のアルゴンイオンレーザを採用した。干渉縞の周期選択は資料台とシリンドリカルレンズの位置調整とミラーの角度調整をステージコントローラを介してパソコン制御させる方式として採用した。

FBG 製造システムは、機材検討から FBG 製造システムの具体的設計を行い、システムの製作、試運転を行った。

アルゴンレーザの第二高調波（244nm）を用いて、二光束干渉を行わせブラック反射波長 1550nm を得ることができた。各々のミラー角度は関係式で得られた数値とほぼ同じであった。パソコン制御システムも所定の動作を確認し、実験場所の琉球大学工学部波平研究室に設置した。

光カプラに関する開発・製造技術の確立は光波の合分波に使われる 3 dB カプラ、波長を分離する光合分波カプラ（WDM 形）、波長依存性の少ない合分波に使われる広帯域カプラ（WIC 形）の製造条件の確立、パッケージ、信頼性の試験等を行い実用に供する光カプラとして開発してきた。

平成 15 年度は、偏波面保存形光合分波器（OADM:Optical Add-Drop Multiplexer; アド・ドロップ・マルチプレクサ）と、偏波モード分散（PMD: Polarization Mode Dispersion）エミュレータ（Emulator）の研究・開発を行う。

偏波面保存形光合分波器（OADM）は、偏波面保存形光ファイバカプラと 2 台の偏波面保

存形 FBG を偏波面保存形光ファイバ融着機でスプライスして、マツハツェンダ形 OADM を作成し、その伝送特性を評価する。

PMD エミュレータは、40 Gbit/s 以上の高速光伝送ネットワークで必要となるもので、それは偏波面保存光ファイバ(PMF:Polarization Maintaining Fiber)の偏波面の主軸がランダムになるように接続しながら、実際の敷設された光ファイバ伝送路の PMD をシミュレートするものである。

そのために、シミュレーション ソフトを用いて、PMF の値、長さ及び接続角度を変えてランダムな PMD 分布であるマクスウェル(Maxwell)分布になる最適条件を求めている。

次に、10本の PMF をランダム接続した PMD エミュレータを試作し、理論と実験結果を比較検討している。

最後に、本地域新生コンソーシアム研究開発事業は、経済産業省のサポートに基づき実施できたもので、感謝する。

英文要約

Abstract

This report introduces the R&D project named “Development of polarization maintaining fiber devices for WDM(Wavelength Division Multiplexing) optical communications”. The main target of this project is to develop an optical add-drop multiplexer (OADM) device which is necessary for dense WDM (DWDM) system. There are two key technologies for OADM, such as the fabrication of fiber Bragg grating (FBG) and the polarization maintaining (PM) fiber coupler. Moreover, OADM can be constructed by splicing the FBG and PM fiber coupler. Hence, the development and fabrication of the above two key devices are of great importance and that are summarized as follows.

FBG is described as the fabrication system selection (chap.2), development of fabrication system (chap.3), fiber coupler fabrication (chap.4), FBG theory and experiment (chap.5), and discussions (chap.6) respectively.

The Bragg resonator consists of many parallel weak reflectors, or a periodic variation of reflectivity. One may also think of it in terms of propagation constant variation, or better in terms of refractive index variation. A Fiber Bragg Grating (FBG) consists of a fiber segment whose index of refraction varies periodically along its core length. This periodic variation is formed by exposing the germano-silicate core of the fiber to an intense ultraviolet (UV) optical interference pattern with a period equal to the periodicity of the grating to be formed.

Altering the refractive index by exposure to intense light is a property of germanium-doped silicate known as photosensitivity. When the fiber is exposed to an intense UV periodic uniform pattern, structural periodic defects are formed, and thus a permanent variation of the refractive index with intended periodicity occurs. The periodic variation of the grating is made by producing an interference pattern.

Light propagating through the fiber will be reflected at certain wavelength when the fiber core is periodically changed with the high-and low-refractive-index regions along the fiber. This is accomplished by photosensitive effect- exposing the optical fiber to the interference pattern of ultraviolet (UV) light with a wavelength. Practically, two methods are applicable to obtain the interference pattern. One is known as the phase mask method in which a phase mask is utilized to obtain the interference pattern. Another method is called double beams interference method where a grating is obtained by splitting a UV laser beam and recombining it onto the fiber to form a standing wave.

Though the phase mask method has owns merits in reliability and much production, masks with different kinds of periods are necessary to have various wavelengths

reflected, however. Conversely, in double beam interference method, a grating of the required wavelength can be obtained simply by making minute adjustments to the angle of the mirror. To get more freedom in R&D, the later method has been selected. However, this method needs very high coherency of light that can be obtained from Argon laser. Accordingly, the Argon laser, provided by Coherent Corp, with computer controlling system has been properly setup in Dr. Namihira ' s Lab. at the University of the Ryukyus, where further experiment and fabrication will be carried out.

Here, the Bragg reflection wavelengths of 1550nm and 1310nm will be generated by using the second harmonic generation (SHG) wave of 244 nm wavelength by Argon laser.

For the development of PM fiber coupler, the fabrication condition, package and reliable characteristics of 3 dB coupler, WDM coupler as well as the wavelength independent coupler (WIC) have been confirmed already.

The FBG fabrication system has been decided and pre-experiment has been completed. The necessary conditions for the development and experiment of Mach-Zehnder circuit have also been prepared.

Polarization maintaining type OADM (Optical Add-Drop Multiplexer) are consist of Polarization maintaining fiber type coupler and two polarization maintaining type FBGs using polarization maintaining fiber fusion splicer as a Mach-Zhender intrferometer type OADM.

PMD emulator will be required over 40 Gbit/s higher data transmission speed. The PMD emulator is fabricated by fusion splicing with random principal polarization angles between 10 polarization maintaining fibers (PMFs). Also, it can be applicable to emulate PMD characteristics as a real optical fiber cable transmission line under real circumference condition as temperature, cable elongation and some external stress variations.

Using PMD random mode coupling simulation soft, optimum parameters of Maxwellian PMD distribution, principal are obtained with changing the polarization angles of PMFs, PMF ' s PMD values and PMF ' s length, respectively.

It is found that the simulation soft results are in well agreement with the experimental results of PMD emulator.

This work is supported by the local new consortium project of Ministry of Economy - Trade and Industry of Japanese Government.

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標

本研究開発は具体的に以下の特定分野に対する研究開発を行う。

[WDM 光通信用偏波面保存形光デバイスの開発]

本研究開発事業では、伝送損失が小さく商用化が進んでいるパンダ形ファイバを用いて、偏波面保存形光合分波器（OADM：アド・ドロップ・マルチプレクサ）の開発と製品化を進め、高密度波長多重（DWDM）光通信に不可欠な光デバイスの低価格化とその普及を図る。

今日、データトラフィック量の増大、FTTH の進行などに対応して、高速大容量光通信のニーズはますます高まっており、DWDM（高密度波長多重）技術による WDM(波長多重) 光ファイバ通信が伸展しつつある。

DWDM に不可欠の光デバイスとして OADM があり、その代表的なものとして AWG があるが製造コストがかなり高く、製品も高価格である。光通信の一般家庭への普及を図るうえで、OADM などの高機能光デバイスの低価格化は必須の条件である。

光通信で用いられる合分波光デバイスは使用する光ファイバにより、光の偏波面保存形と非保存形に分かれる。通常の SM(シングルモード)光ファイバは非保存形であり、PANDA(パンダ)ファイバは保存形である。今回の研究の最重要テーマは、偏波保存形デバイスであるが、非保存形の検討を基礎として進め、最後に偏波面保存形で光デバイスを構築する。

具体的には、第1段階として非偏波面保存形光ファイバを用いた光カブラをマッハチェンダ回路に構成し、FBG 加工を施し、低損失の合分波器について開発する。この開発に関しては、SM カブラの製造技術の確立が重要である。SM カブラは、光パワーを分ける 3 dB 形、波長を分ける WDM 形、波長依存性の無い広帯域（WIC）形がある。これらの製造技術確立を沖縄フォトンクス(株)に担当させた。FBG 作製システムについては、FBG 特性理論、FBG 製造システムを琉球大学工学部波平研究室、及び(株)オプテルが担当し、アルゴンレーザの高調波（SHG）紫外光を使用して干渉を起こさせる方式の調査、検討を行い装置の製作を行った。

第2段階の偏波面保存形光デバイスは、パンダファイバをすべて用いた光デバイスとなる。光カブラ、FBG、スプライス（接続）も光波の偏光特性を考慮しなければならない。パンダ光カブラを製作し光学特性を正しく評価するための評価システムは、光カブラを製作する上で重要なものである。この評価システムの測定理論、装置製作は琉球大学工学部波平研究室、及び(株)オプテルが担当した。

パンダ形光カブラの作製は、沖縄フォトンクス(株)が担当し、その評価については、琉球大学工学部波平研究室が担当した。これらの光デバイスを組み合わせ、偏波保存形 OADM の試作開発が行える。FBG の理論解析、実験、評価は琉球大学工学部波平研究室が主体となって進めた。

光デバイスの形態、パッケージ、商品設計は沖縄フォトンクス(株)が担当することとした。非偏波面保存形、偏波面保存形 OADM は波長 1.55 μm 帯でパンダ光カブラをマッハチェンダ

回路構成に組む方式で、FBG をその中間にスプライスする。入出力は SC コネクタ用アダプタで行う。

OADM を構成するため、光カプラ、FBG をスプライスにより永久融着接続する。パンダ形光ファイバの接続は、偏波面を保存するため、応力付与部の位置を正確に合わせる必要がある。それができるスプライサが現在市販されておりそれをリースした。この偏波面保存形融着装置は、応力付与部の角度位置を任意に設定できることから、PDM エミュレータの試作検討が可能になり、研究テーマに追加することにした。

平成 15 年度は、「偏波面保存形 OADM 及び PMD エミュレータ」の研究・開発を行った。

1.2 成果概要

「WDM 光通信用偏波面保存形デバイスの開発」は、FBG に関する研究開発と、光カプラに関する開発、製造技術の確立に大きく大別できる。この二つの研究開発を組み合わせ最終目標の OADM デバイスが開発できる。またこの二つを組み合わせる際に使用するのがスプライスである。これらの個々の研究開発、製造技術確立の状況を以下にまとめる。

FBG に関係する研究開発は FBG 製造システム機材選定、FBG 製造システムの研究開発、FBG 特性理論と実験、FBG 実験及び考察で平成 14 年度の報告書で詳しく報告した。

FBG を製作する方法は、紫外線の干渉縞を光ファイバに照射することにより、コアの屈折率変化を誘起させ、これによるブラッグ反射の原理で特定波長の光を反射させるものである。紫外線の干渉縞を製作する方法には現在二つの方法が実用化されている。一つはフェーズマスク法と呼ばれ位相格子のマスクを用いて干渉縞を形成する。もう一つは二光束干渉法であり、ビームスプリッタにより 2 つに分離させた紫外線をミラーにより反射させその交差部に干渉縞を形成するものである。

フェーズマスク法は再現性、量産性に優れているが、反射波長の異なる FBG を製作するには、各々のマスクが必要になり高コストになる。二光束干渉法は反射ミラーの角度調整を行うことにより干渉縞の周期を調整でき、反射波長の選択が可能である。研究開発用途として波長選択の自由度が高い二光束干渉法を採用することとした。レーザはコヒーレンシーが優れているコヒーレント社 Innova90C Fred アルゴンイオンレーザを採用した。干渉縞の周期選択は資料台とシリンドリカルレンズの位置調整とミラーの角度調整をステージコントローラを介してパソコン制御させる方式として採用した。

機材検討から FBG 製造システムの具体的設計を行い、システムの製作、試運転を行った。アルゴンレーザの第二高調波 (244nm) を用いて、二光束干渉を行わせブラック反射波長 1550nm と 1310nm を得ることができた。各々のミラー角度は関係式で得られた数値とほぼ同じであった。パソコン制御システムも所定の動作を確認し、実験場所の琉球大学工学部波平研究室に納入できた。今後 FBG デバイスに関して本格的な実験・試作開発がこの装置を用いて進められる。

光カプラに関する開発・製造技術の確立は光波の分配・結合に使われる 3 dB カプラ、波

長を分離する光合分波カプラ（WDM 形）、波長依存性の少ない分配・結合に使われる広帯域カプラ（WIC 形）の製造条件の確立、パッケージ、信頼性の試験等を行い実用に供する光カプラとして完成してきた。

平成 15 年度は、偏波面保存形光合分波器（OADM:Optical Add-Drop Multiplexer; アド・ドロップ・マルチプレクサ）と、偏波モード分散(PMD:Polarization Mode Dispersion)エミュレータ(Emulator)の研究・開発を行う。

偏波面保存形光合分波器（OADM）は、偏波面保存形光ファイバカプラと 2 台の偏波面保存形 FBG を偏波面保存形光ファイバ融着機でスプライスして、マツハツェンダ形 OADM を作成し、その伝送特性を評価する。

PMD エミュレータは、40 Gbit/s 以上の高速光伝送ネットワークで必要となるもので、それは偏波面保存光ファイバ(PMF:Polarization Maintaining Fiber)の偏波面の主軸がランダムになるように接続しながら、実際の敷設された光ファイバ伝送路の PMD をシミュレートするものである。

そのために、シミュレーション ソフトを用いて、PMF の値、長さ及び接続角度を変えてランダムな PMD 分布であるマクスウェル(Maxwell)分布になる最適条件を求めている。

次に、10 本の PMF をランダム接続した PMD エミュレータを試作し、理論と実験結果を比較検討している。

商品化については、本報告に OADM 及び PMD エミュレータのパッケージ形状の概観写真を示す。FBG 実験・開発研究の結果をフィードバックしながらよりよい光デバイスの設計・試作を進める。

1.3 事業化に向けた取組み（今後の展望）

通信速度の高速化や通信容量の大容量化が進み WDM、DWDM などの波長多重光伝送システムが実用化に向け進んでいる。WDM 光通信用偏波面保存形光デバイスの開発の成果を商品化して、光通信の高速多重化に貢献して行きたい。

まず、この研究開発から、FBG 製造技術、装置、理論解析をもとに FBG 単独での商品化も考えられるので、市場ニーズを捉え企画立案して行きたい。FGB 付光センサとして応用していることより、それらの調査研究も今後計画してゆきたい。

またパンダ形光カプラは、単独で光デバイス部品としてのニーズがあり光関連デバイスメーカーと OADM 以外の試作開発や部品供給メーカーとして製造、販路拡大を計って行きたい。

今回のテーマである OADM は非偏波面保存形、偏波面保存形の 2 つの研究成果が期待できる。

これらの実験成果から、よりコンパクトな光デバイスとして企画立案しているのが製造メーカーの責任であると位置付けている。またスプライス技術の応用として PMD エミュレータが試作・開発できることが分かり、計画にプラスされたことは喜ばしい限りである。一連の研究開発を早急に進め、光デバイス商品の開発に拍車をかけて行きたい。

FBG 製造システム及びパンダ光カブラ評価システムは、偏波面保存形光デバイスの製造、評価用の重要な設備として活躍するものと思われる。

特に評価システムは、従来から試作開発を進めてきた実績を集約してシステム化したものであり、今後偏波面保存形光デバイスの標準の測定システムとして確立をさせていきたい。

1.4 研究体制

1.4.1 研究組織及び管理体制

(1) 研究組織

取りまとめ部門 管理法人 株式会社 トロピカルテクノセンター 総括研究代表者 波平 宜敬 副総括研究代表者 笹野 直成
--

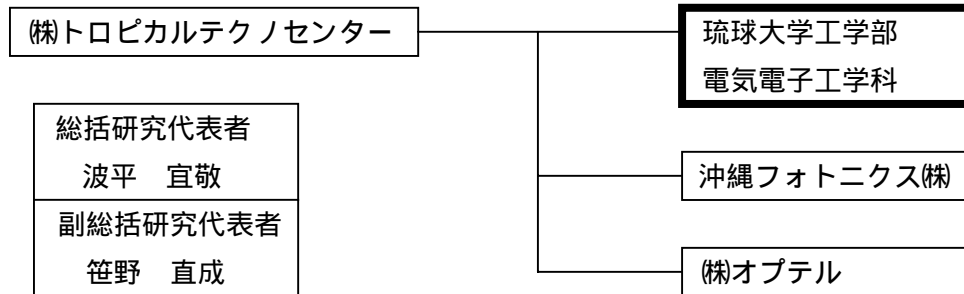
研究開発項目	詳細項目	研究機関
偏波面保存形 OADM の研究・開発	FBG 作製装置の改良・試作	(株) オプテル 琉球大学波平研究室
	パンダカブラの評価装置 の改良・評価	(株) オプテル 琉球大学波平研究室
	パンダカブラの試作	沖縄フォトニクス(株)
	パンダカブラの評価	琉球大学波平研究室
	偏波面保存形 OADM の試作・評価	琉球大学波平研究室


PMDエミュレータ の研究・開発	PMD エミュレータの理論 解析	琉球大学波平研究室
	PMD エミュレータのシミ ュレーションソフト評価	琉球大学波平研究室
	PMD エミュレータ試作	琉球大学波平研究室
	PMD エミュレータ評価	琉球大学波平研究室

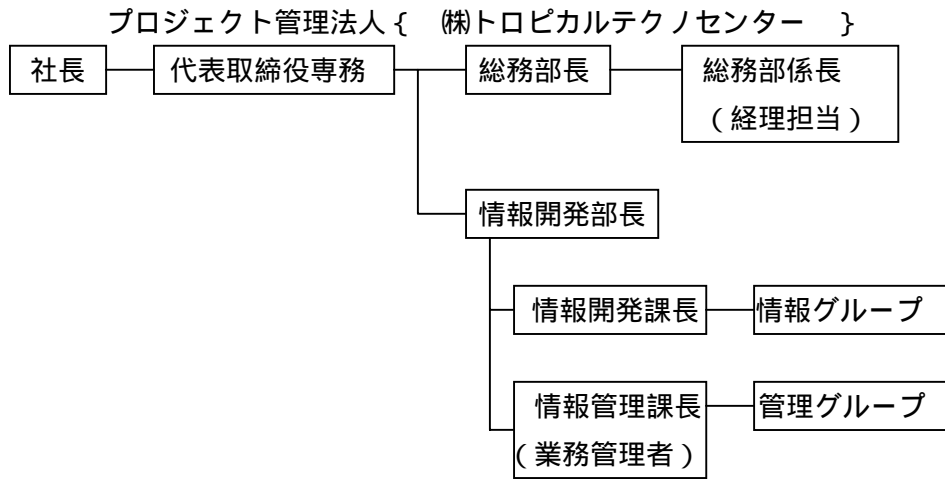
生産ラインの設計・試行 パッケージング、商品化企画	沖縄フォトニクス(株)
総合調査研究	(株)トロピカルテクノセンター

(2) 管理体制

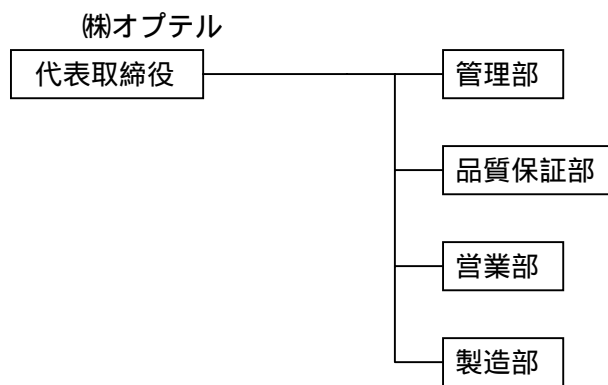
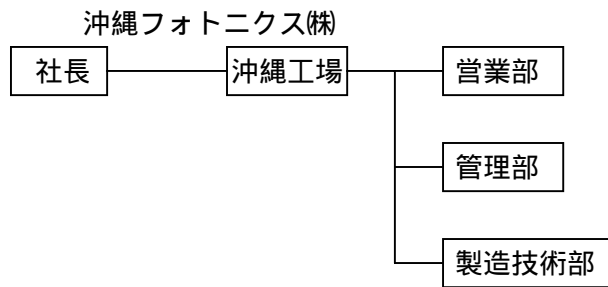
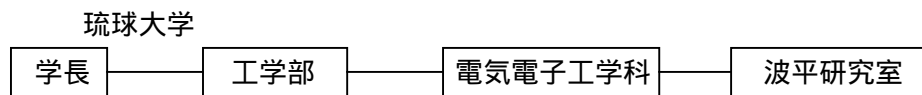
プロジェクト管理法人 (株) トロピカルテクノセンター



 主たる研究実施場所を示す。



(再委託先)



1.4.2 研究者氏名及び人員

(1) 管理法人

(株)トロピカルテクノセンター

(4)名

氏名	所属及び役職	研究項目
村山 剛	情報開発部部長	総合調査研究
平良正也	情報開発部情報開発課課長	総合調査研究
大城政人	情報開発部主任	総合調査研究
知念正和	情報開発部主事	総合調査研究

(2) 再委託先

{ 琉球大学工学部電気電子工学科 }

(3)名

氏名	所属及び役職	研究項目
波平宜敬	琉球大学工学部 教授	、
鄒 念育	琉球大学工学部 助手	、
Dr.Rashid Mohd ABDUR	外国人客員研究員	、

{ 沖縄フォトニクス(株) }

(4)名

氏名	所属及び役職	研究項目
奥 茂治	代表取締役	、
笹野直成	工場長	、
亀田 隆	製造部 主任	、
浦添朝有	製造部 主任	、

{ (株)オプテル }

(1)名

氏名	所属及び役職	研究項目
岡久守一	取締役	

(2) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

検討委員会

(6)名

氏名	所属及び役職
リーダー 波平宜敬	琉球大学 工学部電気電子工学科 教授
サブリーダー 笹野直成	沖縄フォトニクス(株) 工場長
岡久守一	(株)オプテル 取締役
奥 茂治	沖縄フォトニクス(株) 代表取締役
村山 剛	(株)トロピカルテクノセンター 情報管理部長
アドバイザー 今井正明	室蘭工業大学 工学部電気電子工学科 教授

1.5 研究場所一覧表

研究機関名	住所	電話番号
(株)トロピカルテクノセンター	沖縄県具志川市字州崎 5-1	098-982-1100 (代)
琉球大学工学部電気電子工学科 工学部 3号館 401号室	沖縄県中頭郡西原町千原 1番地	098-895-8700
沖縄フォトニクス(株)	沖縄県具志川市州崎 12-59	098-921-2700
(株) オプテル	東京都墨田区大平 4-8-4 第2 荒川ビル	03-5637-3307

1.6 工業所有権等の取得状況

特願 2004-28863 (特許出願公開番号)

「光ファイバ及び光ファイバカブラの偏光特性評価措置及び特性測定方法」

岡久守一(#1)、井上善文(#1)、波平宜敬(#2)

(#1) ㈱オプテル、 (#2) 琉球大学工学部

1.7 対外発表の状況

電子情報通信学会 光ファイバ応用技術(OFT)研究会 OFT2002-103, pp.5-10, 2003.

タイトル [偏波面保存ファイバカブラの偏光・分光特性自動測定システム]

発表者 波平 宜敬 琉球大学 工学部

岡久 守一 ㈱ オプテル

他

1.8 当該プロジェクト連絡窓口

管理法人 ㈱トロピカルテクノセンター

情報開発部 インテグレートグループ

主事(技術) 知念 正和 TEL 098-982-1100(代) FAX 098-982-1101

第2章 偏波面保存形光合分波器(OADM)の研究・開発

第1節 序論

1.1 本研究の背景と目的

近年，インターネットの普及により，さらなるネットワークの容量の増大が求められている．この要求に応えるため，WDM (Wavelength Division Multiplexing : 波長分割多重) 通信方式の導入が進められてきた^[1]．

WDM とは，光の波長を分割し異なる搬送波を使い，複数の信号を同時に伝送 (多重化) することにより，一本で複数の光ファイバのように扱える伝送方式である^[2]．

大容量伝送のコストを下げるためには，従来光信号を電気信号に変換した後に行っていた多くの処理を光信号のままで行う必要がある．これを実現するためのキーデバイスの1つとして，波長多重化された光信号から任意の波長を分波・合波する，OADM(Optical Add Drop Multiplexer)が挙げられる．多重化された光信号に対して，伝送先ごとに波長を割り振ることで，OADM を用いて任意の波長を自由に Add・Drop することが可能となる^[3]．OADM において，代表的なものに AWG(Arrayed Waveguide Grating)があるが製造コストが高く，製品も非常に高価である．そのため，光通信の一般家庭への普及を図るうえで，より低価格の OADM の開発が求められている．

本研究では，偏波面保存光ファイバを用いて光ファイバカプラとファイバブラッググレーティング(FBG)を組み合わせた偏波面保存形 OADM の開発を目指すことを目的としている．そのため，本研究は光ファイバカプラに関する研究と FBG に関する研究とに大きく大別できる．この2つの研究を組み合わせ、最終目標である OADM デバイスの開発を目指す．

光ファイバカプラとは，2本の光ファイバを並列させ接した状態で一体化延伸して双円錐状のテーパを形成したもので，光を合波・分波する機能を持つ．作製法には何種類があるが，2本のファイバを平行に並べ張力を加えながら加熱，融着する融着延伸法が最も容易に作製できるため，一般的によく用いられる方法である^[4]．

一方，ファイバブラッググレーティング(FBG)とは，光ファイバのコアに周期的な屈折率変化を形成させ，ブラッグ反射の原理で特定の波長を反射させる光ファイバ形デバイスである^[5]．

コアの屈折率変化は紫外線レーザーを照射することにより起こり，紫外線の干渉パターンにより FBG が作製でき，現在2つの作製法が実用化されている．

一つは位相マスク法と呼ばれるもので，位相格子のマスクを用いて干渉縞を形成するものである．この方法は，再現性，量産性に優れているが，反射波長の異なる FBG を製作するには，各々の位相マスクが必要なためコストが高くなる．

もう一つは二光束干渉法と呼ばれるもので，ビームスプリッタにより紫外線レーザーを二つに分け，ミラーで反射させ交差部分を光ファイバにあて，コアに周期的な屈折率変化を与える．この方法はミラーの角度調整で，反射波長を選択することが可能である^[2]．

本研究では、研究開発用途として波長選択の自由度の高い二光束干渉法を採用することとした。

以上のことをふまえて、本研究では光ファイバカプラ、FBG の研究をそれぞれ進め、最終的にこれらを組み合わせて OADM の作製・評価及び考察を行った。

1.2 本研究の概要

第 2 節では、光学の基本原則について述べている。

第 3 節では、光ファイバカプラの偏光・分光特性の測定を行い、考察を述べている。

第 4 節では、ファイバブラッググレーティング(FBG)の作製および評価について述べている。

第 5 節では、作製した OADM の評価を行い、考察を述べている。

第 6 節では、第 3 節、第 4 節及び第 5 節についての結論を述べている。

第 7 節では、第 3 節、第 4 節及び第 5 節についての今後の課題について述べている。

第 2 節 光学の基本原則

2.1 緒言

本章では、本研究を進めていくうえで理解しておくべき基礎知識、各光ファイバ形デバイスの性質について述べる。まず、偏光の概念及び、偏波面保存光ファイバについて述べる。次に、光ファイバ形デバイスである光ファイバカプラ、ファイバブラッググレーティング(FBG)について述べ、最後に、これらの光ファイバ形デバイスを組み合わせた OADM について説明する。

2.2 偏光の概念^[6,7]

振動方向と進行方向が一致する縦波では、光波の性質は方向によって特別な性質を示すことはない。しかし、振動方向が進行方向と垂直である横波では、進行方向のまわりに一様な性質を示さないことがある。光（電磁波）の電界ベクトルは、進行方向に対して垂直に振動する横波であるから偏りの現象がある。電界ベクトルの振動方向（偏光面）が規則的なものを偏光といい、ランダムな場合を無偏光という。レーザから放射される光は偏光している光である。一方、太陽光のような自然光は、異なった方向で電界がランダムに変化しているため、無偏光である。自然光でも、偏光子を通せば偏光光となる、

平面波を例に考える。Z 軸方向に伝搬している光波は、 $Z=Z_0$ において伝搬方向に垂直な平面上でみると、電界は次式のように示される。

$$E_x = A_x \cos(\omega t - \phi_x) \quad (2.1)$$

$$E_y = A_y \cos(\omega t - \phi_y) \quad (2.2)$$

ϕ_x および ϕ_y は、 $Z=Z_0$ におけるそれぞれの光波の位相である。これらが $Z=Z_0$ 面内でベクトル的に重ね合わされる。その結果、合成電界のベクトルの先端は、次式の軌跡に従って動く。

$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2 - \frac{2E_x E_y}{A_x A_y} \cos \Delta\phi = \sin^2 \Delta\phi \quad (2.3)$$

ただし、 $\Delta\phi = \phi_x - \phi_y$ は 2 つの光波の位相差である。振幅 A_x, A_y および位相差 $\Delta\phi = 0$ 、あるいは $\Delta\phi = \pi$ の場合、合成電界は $\tan \theta = -A_y/A_x$ で与えられる一定な方向で振動することになり、直線偏光となる。

$A_x=A_y=A$ 、 $\Delta\phi = \pi/2$ 、あるいは $-2\pi/3$ の場合、 $E_x^2+E_y^2=A^2$ と、合成電界の先端は半径 A の円上を時間と共に動いて振動の方向が変わるので、円偏光となる。

$\Delta\phi = \pi/2$ のとき、振動方向は左回り（左旋回円偏光）に、 $\Delta\phi = -\pi/2$ のとき右回り（右旋回円偏光）となる。

一般に、 $A_x \neq A_y = A$ 、 $\Delta\phi \neq 0$ の場合、合成電界の先端は上式のように時間と共に楕円上を動いて、振動方向が変わる（楕円偏光）。

$$E_x = A_x \cos(\omega t - \phi_x)$$

$$E_y = A_y \cos(\omega t - \phi_y)$$

$$\Delta \phi = \phi_x - \phi_y$$

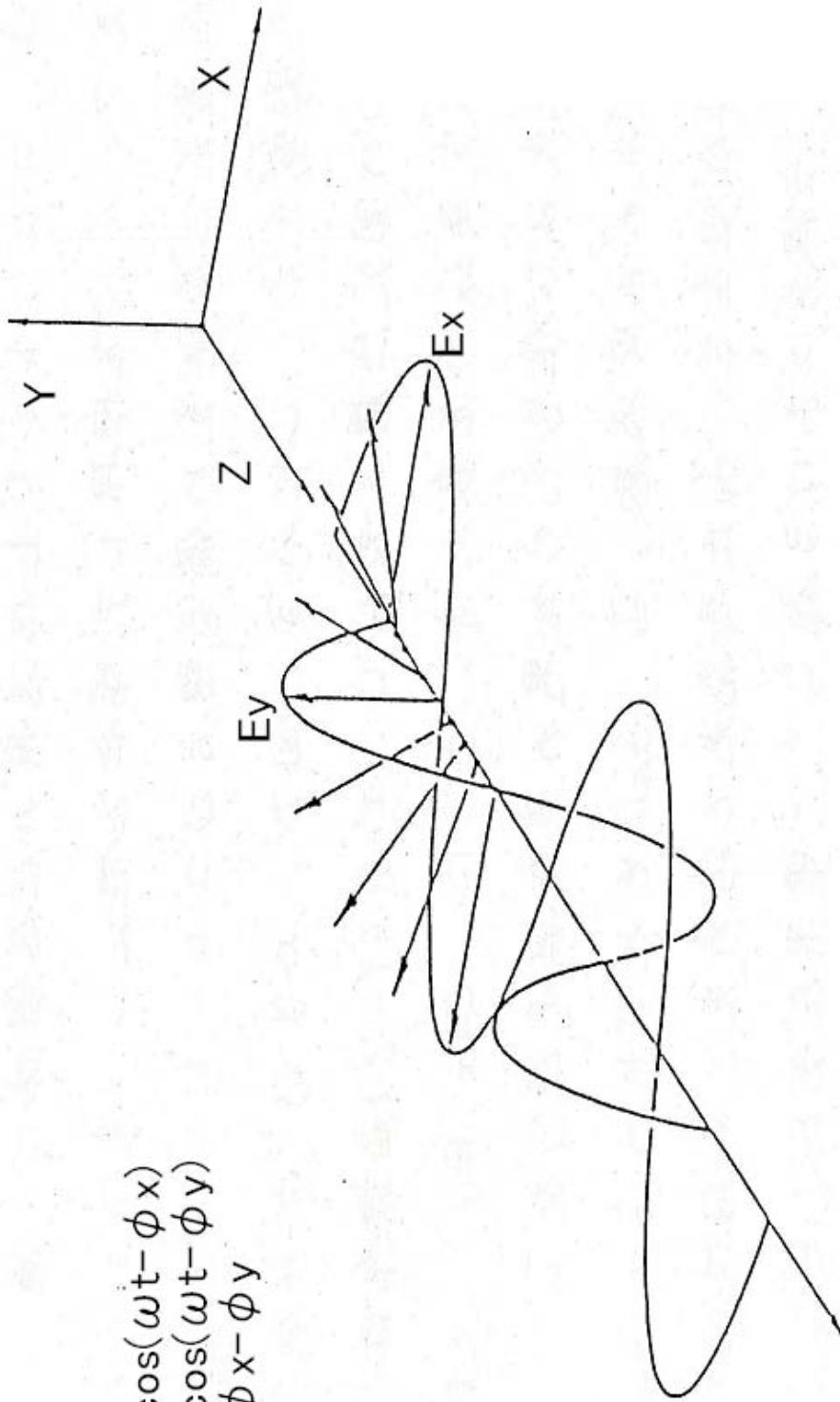


図2.1 平面波の電界ベクトルの振動

2.3 偏波面保存光ファイバ^[4,6,9]

偏波面保存光ファイバとは、偏波面を保存しながら光を伝送させる光ファイバである。

通常のシングルモード光ファイバは、X 偏波モード（X 方向に偏波しているモード）と Y 偏波モード（Y 方向に偏波しているモード）の互いに直交する二つのモードが伝搬できる。この二つのモードは同じ伝搬定数 で特定されるため、光ファイバ中を伝搬する光波の位相が伝わる速さ、信号が伝わる速さ（群速度）、光強度分布などで区別することができない。そのため、二つのモードが伝搬しているにもかかわらず、シングルモード光ファイバと呼ばれている。また、通常のシングルモード光ファイバに X 偏波モードのみ入射しても、光ファイバ中のモード変換により、エネルギーの一部が X 偏波から Y 偏波へ変換されるため、偏波面保存能力が弱い。

これに対し、偏波面保存光ファイバはコアに意図的に応力を付与させることにより、X 方向と Y 方向において異方性を持たせ、X 偏波モードの伝搬定数 x と Y 偏波の伝搬定数 y が互いに異なる値となる。これにより二つのモードを区別できるようになる。この二つのモードの伝搬定数差 が大きいほど、偏波モード間のエネルギー変換が抑えられ、偏波面保存能力を高くなる。

現在、最も広く利用されている偏波面保存光ファイバに PANDA(Polarization maintaining AND Absorption reducing Fiber)ファイバと呼ばれるものがある。図 2.1 にその断面図を示す。

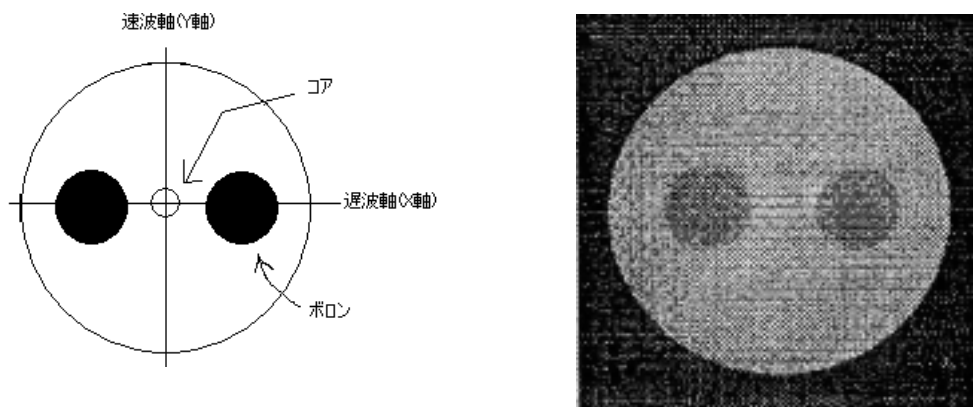


図 2.2 PANDA ファイバの断面図

この光ファイバは、製造過程でシリカガラスより熱膨張率の大きいボロン (B_2O_3) をコアの両脇に挿入しており、高温でファイバ状に線引きされた後、常温に冷却されると、応力付与部が収縮しようとしてコア部分に対して応力が加わる。そのためコアの X 方向に引

張応力が加わり、Y方向には圧縮応力が加わるため、光弾性効果によりX方向とY方向で屈折率が異なり、偏波面が保存される。

2.4 光ファイバカブラ^[4,6]

光ファイバカブラは、2本の光ファイバを並列させ接した状態で、加熱、溶融、一体化延伸して双円錐状のテーパを形成したものである。テーパ部ではコア径が小さくなっているため、互いの光ファイバ間にモード結合が起こり光パワーを分岐させる。これにより、1つの入射端から光信号を入射し、複数の出射端に分岐・分配する機能と、逆に複数の入射端に光信号を入射し、1つの出射端に出射する機能を有する光分岐結合器となる。どちらの出射端にどれくらいの強さの光を分岐するかを表す分岐比は任意に選択可能である。図 2.2 に光ファイバカブラの概略図を示す。

光ファイバカブラには、ある波長の光を任意の分岐比に分岐する分岐結合光ファイバカブラの他に、WDM 光ファイバカブラ、広帯域光ファイバカブラ、PBS(Polarization Beam Splitter)光ファイバカブラがある。

WDM 光ファイバカブラとは、1つの入射端から2つの波長の光を入射し、2つの出射端からそれぞれ異なる波長の光が出射される(分波)、逆に2つの入射端からそれぞれ異なる波長を入射し、1つの出射端から2つの波長が出射される(合波)合波・分波機能を有する光ファイバカブラである。

広帯域光ファイバカブラとは、ある波長帯域で一定の分岐比を保つ光ファイバカブラである。

PBS 光ファイバカブラとは、ある波長においてX偏波とY偏波をそれぞれ別のポートに出射する偏光分離結合光ファイバカブラである。

今回の測定では、シングルモード光ファイバ及び偏波面保存光ファイバを用いた分岐結合光ファイバカブラの2種類の光ファイバカブラの測定を行った。

偏波面保存光ファイバカブラには、PANDA ファイバを用いており図 2.3 のようにPANDAの目(ボロン)の方向が一致するように構成されている。

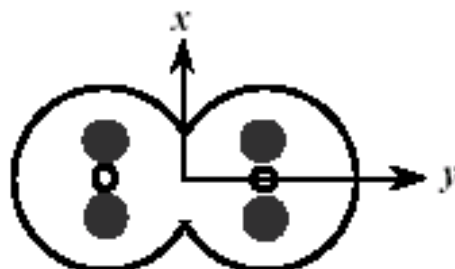


図 2.3 PANDA ファイバカブラの断面図

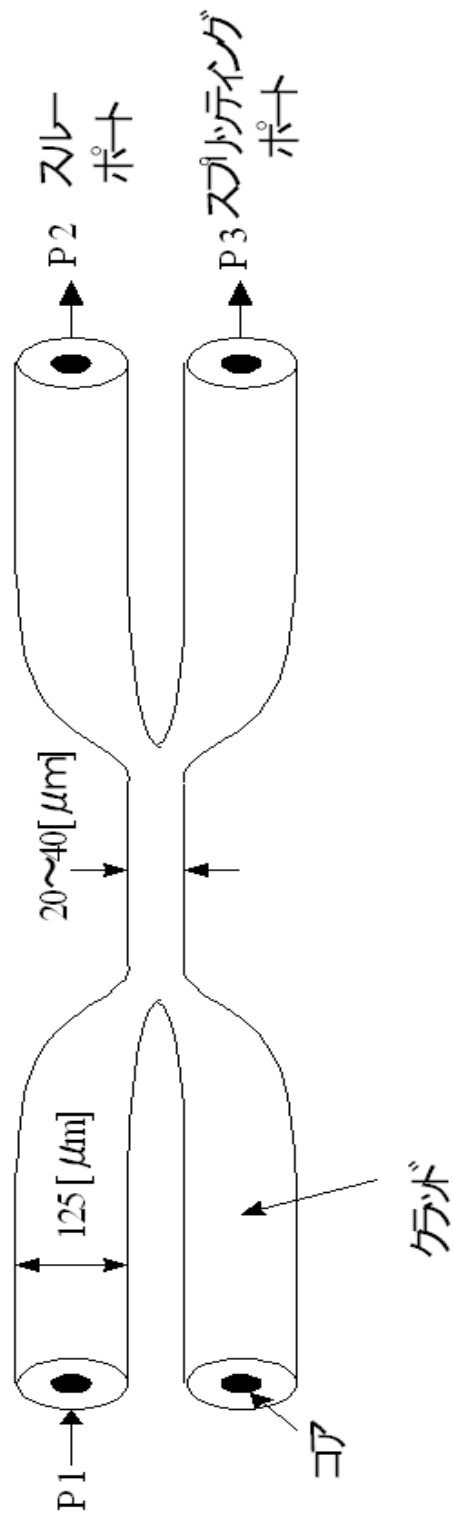


図2.4 光ファイバカプラ

2.5 光ファイバカブラの理論解析モデル^[6,11,12]

光ファイバカブラの偏光特性を考えるために，光ファイバカブラを等価的位相対と仮定して取り扱い，ジョーンズ行列で表す。

空間の Z 軸方向に伝搬する平面波のある Z の位置の偏光状態は，X 成分および Y 成分の複素振幅を成分とする 2 行の複素列ベクトルで表される．このベクトルを規格化したものをジョーンズベクトルという．

電界ベクトルが X 軸方向に対し，角度 θ の方向の直線偏光，右回りおよび左回り円偏光をそれぞれジョーンズベクトルで表すと

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ j/\sqrt{2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ -j/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

となる．規格化条件は，

$$|E_x|^2 + |E_y|^2 = 1 \quad (2.5)$$

ジョーンズ行列に用いる座標系を図 2.5 に示す．添え字の 0 は入射端における任意に定められた直角座標を示す．

図 2.5 に示すように X_0 軸と Y_0 軸を決め，直線偏光は角度 θ_0 の傾きで入射する．ここでは速軸と X_0 軸のなす角度 (Circular rotation) は，光ファイバカブラを旋光子と見なしたときの旋光の角度 (Retardation) は，光ファイバカブラの入射端から出射端に生じる直交位相差をそれぞれ表す．ここで，解析モデルになる等価的位相体というのは，直交位相差を経て，直交二成分の位相差が生じ，方位 だけ回転して出てくるものである．

はじめに，各々の素子行列を求める．次に，方位 θ_0 の傾きと直交位相差 δ をもつ直線位相子 $R(\theta_0, \delta)$ 及び旋光子 $T(\delta)$ の合成行列を求める．この合成行列が等価的位相体の素子行列となる．

まず，直線位相子 $R(\theta_0, \delta)$ を求めると，次の行列式となる．

$$\begin{aligned}
R(\theta, \phi) &= T(\phi)R(\theta, 0)T(-\phi) \\
&= \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\frac{\theta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\theta}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos(2\phi)e^{j\frac{\theta}{2}} + \sin(2\phi)e^{-j\frac{\theta}{2}} & 2j \sin \phi \cos \phi \sin \frac{\theta}{2} \\ 2j \sin \phi \cos \phi \sin \frac{\theta}{2} & \cos(2\phi)e^{j\frac{\theta}{2}} + \sin(2\phi)e^{-j\frac{\theta}{2}} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

ただし,

$$T(\Omega) = \begin{bmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

従って, ジョーンズ行列 J は次のようになる.

$$\begin{aligned}
J &= T(\Omega)R(\theta, \phi) \\
&= \begin{bmatrix} A & -B^* \\ B & -A^* \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

ただし,

$$A = \cos(\theta/2) \cos \Omega + j \sin(\theta/2) \cos(2\phi + \Omega) \tag{2.9}$$

$$B = \cos(\theta/2) \sin \Omega + j \sin(\theta/2) \sin(2\phi + \Omega) \tag{2.10}$$

光学素子に任意の偏光を入力した場合の入射光の電界成分 (E_{x0}, E_{y0}) と出射光の電界成分 (E_x, E_y) の関係はジョーンズ行列を用いて, 次式で表される.

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} E_{x0} \\ E_{y0} \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

ここで, 図 2.5 に示したように X_0 軸に θ_0 の角度で直線偏光を入射すると, 各々の電界成分は時間と周波数の項をもった関数で表すことができる.

$$E_{x0} = \cos \theta_0 \cdot e^{j\omega t} \quad (2.12)$$

$$E_{y0} = \sin \theta_0 \cdot e^{j\omega t} \quad (2.13)$$

ただし, ω : 角周波数

t : 時間

これを式(2.11)に代入して, E_x, E_y の実部を取り, 時間項 t を消去すると, 次式が得られる.

$$\left(\frac{E_x}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{a_2}\right)^2 + 2\frac{E_x E_y}{a_1 a_2} \cos \delta_0 = \sin 2\delta_0 \quad (2.14)$$

$$a_1 = \left\{ \cos^2(\phi/2) \cos^2(\theta_0 + \Omega) + \sin^2(\phi/2) \cos^2(2\phi + \Omega - \theta_0) \right\}^{1/2} \quad (2.15)$$

$$a_2 = \left\{ \cos^2(\phi/2) \sin^2(\theta_0 + \Omega) + \sin^2(\phi/2) \sin^2(2\phi + \Omega - \theta_0) \right\}^{1/2} \quad (2.16)$$

$$\cos \delta_0 = \frac{\cos^2(\phi/2) \sin\{2(\theta_0 + \Omega)\} + \sin^2(\phi/2) \sin\{2(2\phi + \Omega - \theta_0)\}}{2a_1 a_2} \quad (2.17)$$

式(2.14)は直線偏光が楕円偏光に変化したことを示している. この楕円偏光の基本軸は一般に X, Y 軸に変化しない. 楕円の長, 短軸の比(b/a)と, 長軸と X 軸とのなす角 (偏光方位角) は,

$$\pm \frac{b}{a} = \frac{\sin\{\Psi - (2\phi + \Omega - \theta_0)\}}{\cos\{\Psi - (\theta_0 + \Omega)\}} \tan \frac{\phi}{2} \quad (2.18)$$

$$\tan 2\Psi = \frac{\sin\{2(\theta_0 + \Omega)\} + \tan^2(\phi/2) \sin\{2(2\phi + \Omega - \theta_0)\}}{\cos\{2(\theta_0 + \Omega)\} + \tan^2(\phi/2) \cos\{2(2\phi + \Omega - \theta_0)\}} \quad (2.19)$$

$$\Psi = \phi + \Omega + (1/2) \tan^{-1} \left[\tan\{2(\theta_0 - \phi)\} \cos \phi \right] \quad (2.20)$$

偏光状態 P_s は,

$$\begin{aligned}
 P_S &= \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \\
 &= \frac{1 - (b/a)^2}{1 + (b/a)^2} = \left[1 - \sin^2 \theta_0 \sin^2 \{2(\theta_0 - \phi)\} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

と求められる。

式(2.20)及び式(2.21)より，光ファイバカプラの理論的な解析を行うことができる。

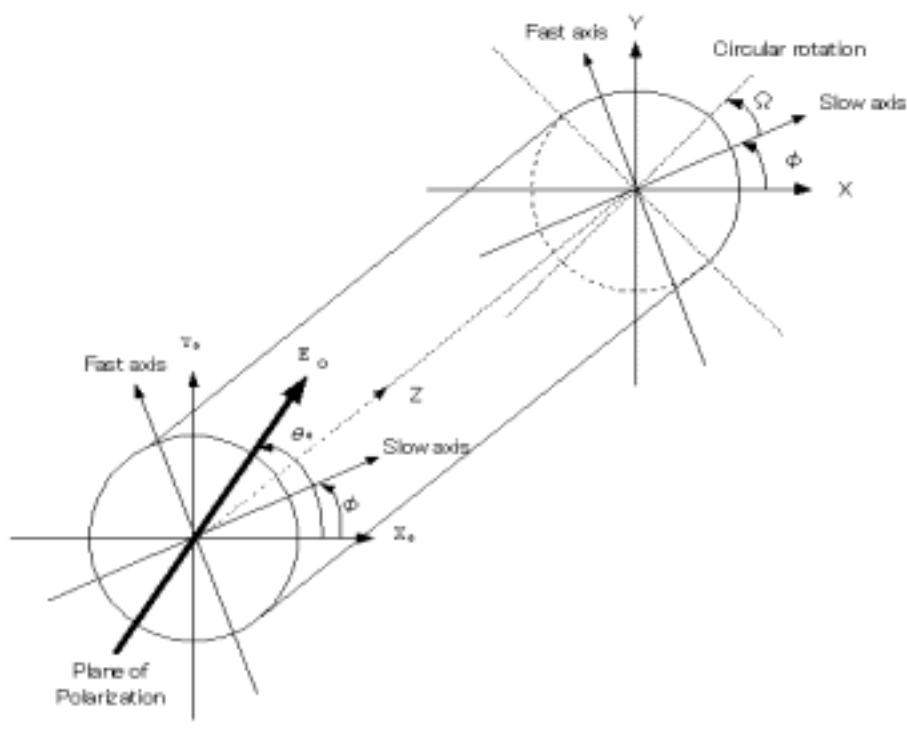


図 2.5 光ファイバカプラの解析に用いる座標系

2.6 ファイブラッググレーティング(FBG)^[2,3,5]

ファイブラッググレーティング(FBG)は，光ファイバのコア部分にブラッグ回折格子を形成したもので，特定の波長の光のみを反射する特性をもつ光ファイバ形デバイスである．FBG の性質として，低損失，光ファイバとの結合特性が良好であること，及び優れた反射特性から，反射光フィルタのほかに，波長制御素子，光センサ素子，分散補償素子としても広く利用されている．

コアにゲルマニウム(GeO₂)をドープした光ファイバに紫外光を照射するとコア部分の屈折率が大きくなる．これを光誘起屈折率変化という．FBG のブラッグ回折格子は，光誘起屈折率変化を用いて，光ファイバ上に形成される．また，光ファイバに水素充填を施すこ

とにより光誘起屈折率変化を向上させることができる。なお、FBG の作製方法については、第 4 節で述べる。

FBG の反射波長 λ_B とグレーティングの周期 Λ には次式の関係が成り立つ。

$$\lambda_B = 2 N_{eff} \Lambda \quad (2.22)$$

ただし、 N_{eff} はグレーティング部コアの実効屈折率である。

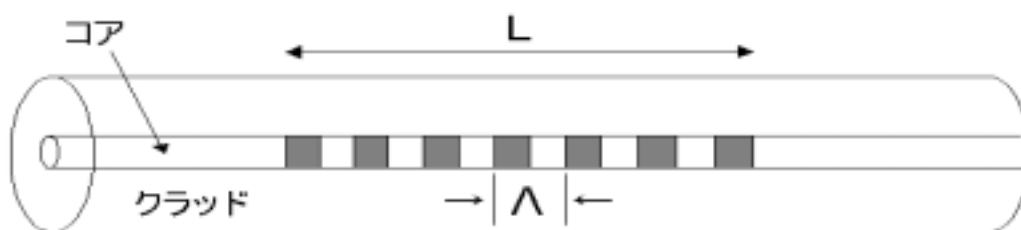


図 2.6 FBG のモデル

FBG の特性は、結合理論を用いることにより解析できる。入射波 A と回折波 B のモード結合方程式は、

$$\frac{dA}{dz} = -j\Omega \exp[j2 \beta z] B \quad (2.23)$$

$$\frac{dB}{dz} = j\Omega \exp[-j2 \beta z] A \quad (2.24)$$

となる。入射波、回折波は z 軸方向に関してそれぞれ前進、後進する波である。Ω は結合係数、β は次式で定義されている。

$$\beta = \beta - (\pi / \Lambda) \quad (2.25)$$

β は伝搬定数、Λ はグレーティングの周期である。グレーティング長を L として、式(2.25)を解き、境界条件 A(0)=1, B(L)=0 から A(z), B(z)を求めると、

2 - 2 0 のとき

$$A(z) = \frac{-\{ \beta \sinh[S(z-L)] + jS \cosh[S(z-L)] \}}{\beta \sinh(SL) - jS \cosh(SL)} \exp(j \beta z) \quad (2.26)$$

$$B(z) = \frac{\Omega \sinh[S(z-L)]}{\beta \sinh(SL) - jS \cosh(SL)} \exp(-j \beta z) \quad (2.27)$$

ただし,

$$S = (\Omega^2 - \beta^2)^{1/2} \quad (2.28)$$

2. $\beta^2 < 0$ のとき

$$A(z) = \frac{-\{\beta \sinh[Q(z-L)] + jQ \cosh[Q(z-L)]\}}{\beta \sinh(QL) - jQ \cosh(QL)} \exp(j \beta z) \quad (2.29)$$

$$B(z) = \frac{\Omega \sinh[S(z-L)]}{\beta \sinh(QL) - jQ \cosh(QL)} \exp(-j \beta z) \quad (2.30)$$

ただし,

$$Q = (\beta^2 - \Omega^2)^{1/2} = jS \quad (2.31)$$

グレーティングの反射率 R は,

$$R = \left| \frac{B(0)}{A(0)} \right|^2 \quad (2.32)$$

で与えられる。したがって波長 λ における反射率 $R(L, \lambda)$ は式(2.26)~(2.31)より次式で与えられる。

$$R(L, \lambda) = \begin{cases} \frac{\Omega^2 \sinh^2(SL)}{\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)} & (\Omega^2 - \beta^2 \geq 0) \\ \frac{\Omega^2 \sinh^2(SL)}{\beta^2 - \Omega^2 \cosh^2(SL)} & (\Omega^2 - \beta^2 < 0) \end{cases} \quad (2.33)$$

式(2.36)を用いて, 反射率の波長特性を求めることができる。また, 反射光スペクトルの帯域幅 $\Delta \lambda_B$ は,

$$\Delta \lambda_B = \left\{ \lambda_B^2 / (\pi N_{eff} L) \right\} \sqrt{\pi^2 + (\pi n L / \lambda_B)^2} \quad (2.34)$$

また, 反射波長 λ_B の反射率 R_B は,

$$R_B = \tanh^2(\pi L \cdot n \eta / \lambda_B) \quad (2.35)$$

で表せる。 R_B はコアに含まれる伝搬光の割合， $n \eta$ は屈折率変調幅を示す。

式(2.37)より，FBG の反射率はグレーティング長 L および屈折率変調幅 $n \eta$ に依存することがわかる。一般に，グレーティング長 L が数 cm 程度で，反射率がほぼ 100%程度 of FBG の作製が可能とされている。

2.7 OADM (光アドドロップマルチプレクサ) [2,13]

OADM(光アドドロップマルチプレクサ)とは，光を合波・分波する機能を有する，WDM 光通信に不可欠な光デバイスである。

OADM のなかで最も代表的なものとして AWG がある。AWG とは，平面光波回路(PLC: Planer Lightwave Circuit)と呼ばれる石英ガラス光導波路により，回折格子を形成したものである。2つの幅広いマルチモード導波路であるスラブ導波路，および長さの異なる多数のシングルモード導波路であるアレイ導波路から構成される。光はスラブ導波路で回折により広がって，アレイ導波路に入る。アレイ導波路は，長さが L ずつ異なるので，その出力端では波長に依存した位相差が生じる。第2のスラブ導波路では，光は多重干渉により同位相条件が成り立つ(互いに強め合う)出力導波路に結合するので，合波・分波することができる。AWG の特徴として，非常に広帯域で高密度な光合分波器が1つの AWG で実現できる，石英でできているため，光ファイバとの整合性・接続性がよい，温度依存性が小さくできるといった利点がある。一方で，製造コストが非常に高いという欠点がある。

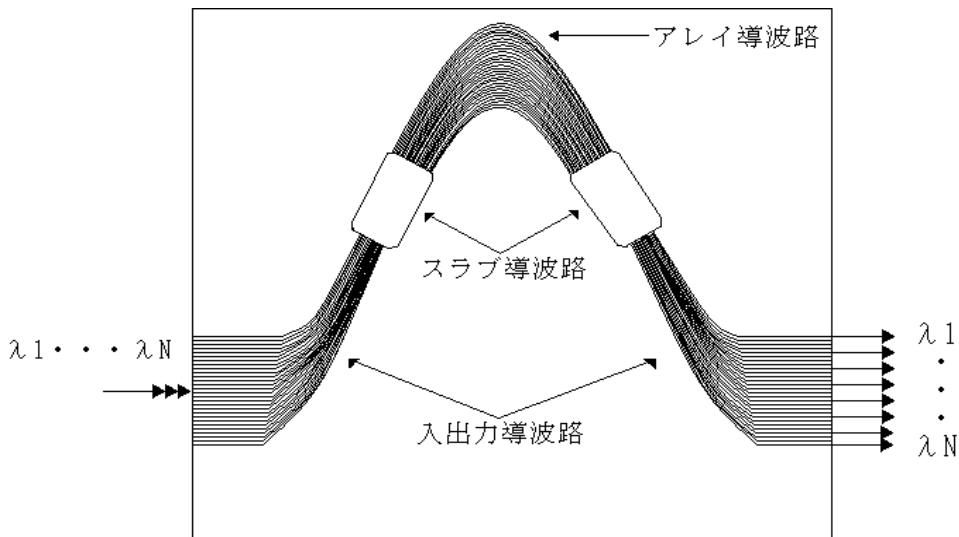


図 2.7 AWG

AWG に代わる新しい OADM として、FBG の応用が注目されている。FBG のブラッグ反射を利用して、特定のチャンネルのみを分岐したり挿入したりするものである。例えば、図 2.8 のように 2 つの光サーキュレータと FBG を組み合わせた OADM が開発されている。FBG の反射波長 λ_B の信号は IN ポートから Drop ポートに落とされ、また、Add ポートからの信号 λ_B は FBG で反射され、OUT ポートの線路に付加される。

本研究では、光サーキュレータの代わりに光ファイバカプラを用いて、より低コストの OADM の開発を目指した。さらに、PANDA ファイバを用いることにより、偏波面保存形 OADM の作製及び評価を行った。その概略図を図 2.9 に示す。分岐比 50:50 の分岐結合光ファイバカプラ 2 つと同特性の 2 本の FBG により、マッハツェンダ形に構成されている。IN ポートより光を入力し、光ファイバカプラによって分波された後、2 本の FBG 対により FBG 反射波長 λ_B の信号のみ反射される。そして、光ファイバカプラによって合波され、Drop ポートより落とされる。また、Add ポートからの信号 λ_B は光ファイバカプラによって分波された後、FBG により反射され、さらに光ファイバカプラにより合波されて OUT ポートに付加される。

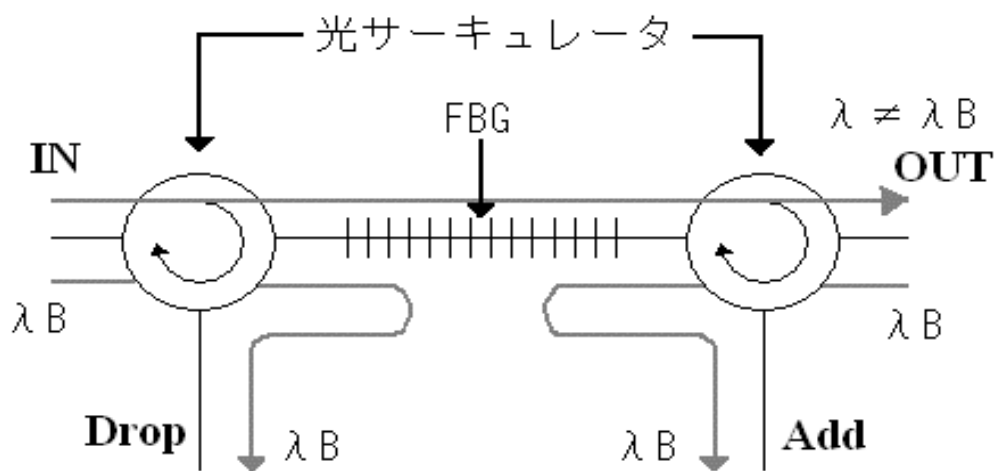


図 2.8 光サーキュレータと FBG による OADM

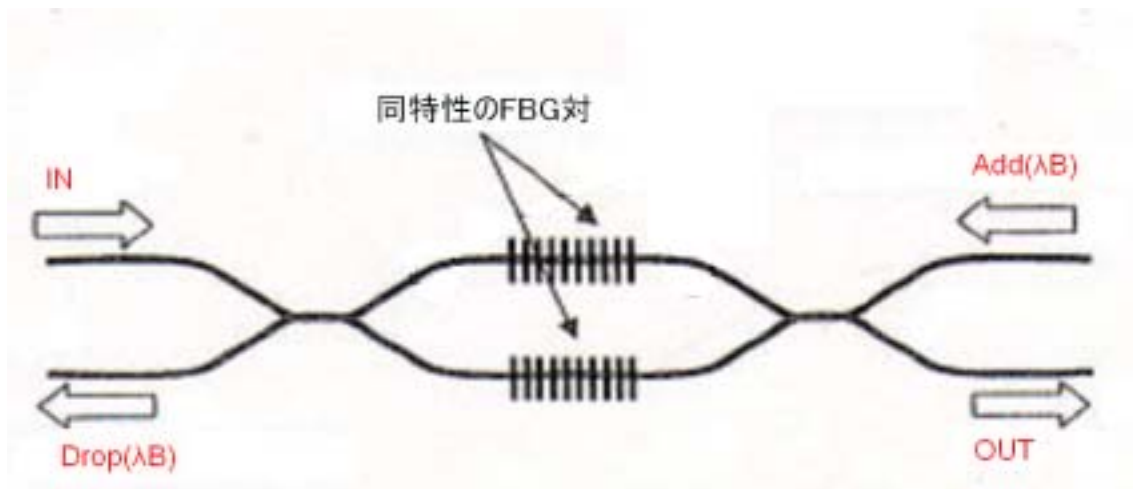


図 2.9 マッハツェンダ形 OADM

2.8 結言

偏光の概念，偏波面保存光ファイバといった本研究においての基本的事項を交えながら，本研究のキーワードとなる光ファイバ形デバイスである光ファイバカプラ，FBG について説明した．最後に，本研究の最終的な目標である光ファイバカプラ，FBG による OADM の構成について述べた．

第 3 節 光ファイバカプラの偏光・分光特性の測定

3.1 緒言

光ファイバカプラ，FBG を組み合わせた OADM の開発を目指すうえで，光ファイバカプラの分光特性を知ることは重要である．さらに，偏波面保存形 OADM では，偏光特性も重要となってくる．

本節では，光ファイバカプラの測定に用いた偏光・分光特性評価装置の概要，偏光および分光特性の測定方法について述べる．また，シングルモード光ファイバカプラ及び偏波面保存光ファイバカプラの偏光・分光特性の測定を行い，結果及び考察について述べる．

3.2 測定系^[8,10]

測定には，偏光・分光特性評価装置を用いた．図 3.3 にその概略図を示し，写真 3.1 にその概観を示す．光源にはハロゲンランプ（100W）を使用しており，広帯域な測定が可能である．一方，測定装置の構成上，出力光が微弱なため光検出には液体窒素冷却の Ge-フォト

ディテクタを使用し、感度を向上させている。分光器からの出射光は、無偏光状態なので偏光子を通すことにより偏光子の結晶軸と同方向の光のみ通過させる。モノクロメータのスリットを全開にし、設定波長に合わせ、スルーポートでの光強度が最大になるように偏光子を回転させ、この状態の入射偏光角度を 0° と定める。波長依存性は、偏光子を固定したままモノクロメータにより波長を掃引させ、一方、入射方位角依存性は設定波長に固定したまま偏光子を回転させ、スルーポートおよびスプリッティングモード（クロスポート）の光強度を測定する。

3.3 測定方法^[8,10]

3.3.1 分光特性

分岐比：

分岐比 CR とは、スルーポート及びクロスポートに分岐する光の割合を示すものである。出射端での光パワーをそれぞれ P_t 、 P_c とすると、分岐比 CR は次式で求められる。

$$CR = \frac{P_c}{P_t + P_c} \times 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

一般に、分岐結合タイプの光ファイバカプラは 3dB カプラ、10dB カプラなどのように呼ばれることがあるが、これは挿入損失による呼び方である。

挿入損失とは、1つの入射ポートから1つの出射ポートへの光量比であり、定義式を次式に示す。

$$\text{挿入損失} = -10 \log(P_i / P_o) \quad [\text{dB}] \quad (3.2)$$

P_i は入力光、 P_o は出力光である。つまり、挿入損失 3 dB の光ファイバカプラは分岐比が 50 : 50、また 10dB であれば分岐比は、90 : 10 となる。

3.3.2 偏光特性

偏光状態：

偏光状態 P_s とは、出射端における偏光の状態を表すパラメータである。 $P_s=0$ のとき円偏光、 $P_s=1$ のとき直線偏光、 $0 < P_s < 1$ では楕円偏光を意味する（図 3.2）。

偏光状態 P_s は、検光子を回転させ出射端における偏光を、4つの方位角 $= -45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ での光強度をそれぞれ測定することにより、次式で求められる。ここで、 P_s は

X 軸からの角度である .

$$P_s = \frac{\sqrt{\{I(0^\circ) - I(90^\circ)\}^2 + \{I(45^\circ) - I(-45^\circ)\}^2}}{I(0^\circ) + I(90^\circ)} \quad (3.3)$$



図 3.1 偏光状態 P_s

偏光方位角 :

偏光方位角 とは , 出射端における X 軸と楕円偏光の長軸とのなす角 , または Y 軸と短軸とのなす角である(図 3.3) . 偏光状態 P_s と同様に測定し , 次式により求められる .

$$\Psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\{I(45^\circ) - I(-45^\circ)\}}{\{I(0^\circ) - I(90^\circ)\}} \quad (3.4)$$

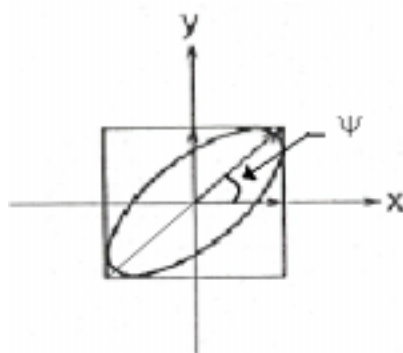


図 3.2 偏光方位角

クロストーク :

クロストークは初期状態にセットした後 , 以下の手順で測定を行う .

X 偏波を入射させ , 検光子も slow 軸 (X 軸) に合わせ光強度を測定する [P_{xx}] .

X 偏波を入射させ，検光子を fast 軸（Y 軸）に合わせ光強度を測定する $[P_{xy}]$ 。
 Y 偏波を入射させ，検光子を slow 軸（X 軸）に合わせ光強度を測定する $[P_{yx}]$ 。
 Y 偏波を入射させ，検光子も fast 軸（Y 軸）に合わせ光強度を測定する $[P_{yy}]$ 。
 この測定より，次式によりクロストークを算出する。

$$C_{xy} = 10 \log \frac{P_{xy}}{P_{xx}} \quad [\text{dB}] \quad (3.5)$$

$$C_{yx} = 10 \log \frac{P_{yx}}{P_{yy}} \quad [\text{dB}] \quad (3.6)$$

3.4 測定結果

3.4.1 分光特性

- (1) シングルモード光ファイバカブラの分岐比の波長依存性（図 3.4）
- (2) 偏波面保存光ファイバカブラ分岐比の波長依存性（図 3.5）

3.4.2 偏光特性

- (1) シングルモード光ファイバカブラ

偏光状態の入射方位角特性(図 3.6)

偏光方位角の入射方位角特性(図 3.7)

- (2) 偏波面保存光ファイバカブラ

クロストークの波長依存性(図 3.8)

偏光状態の入射方位角特性(図 3.9)

偏光方位角の入射方位角特性(図 3.10)

測定サンプル

シングルモード光ファイバカブラ：挿入損失 3[dB]，使用波長 1310[nm]

偏波面保存光ファイバカブラ：挿入損失 10[dB]，使用波長 1550[nm]

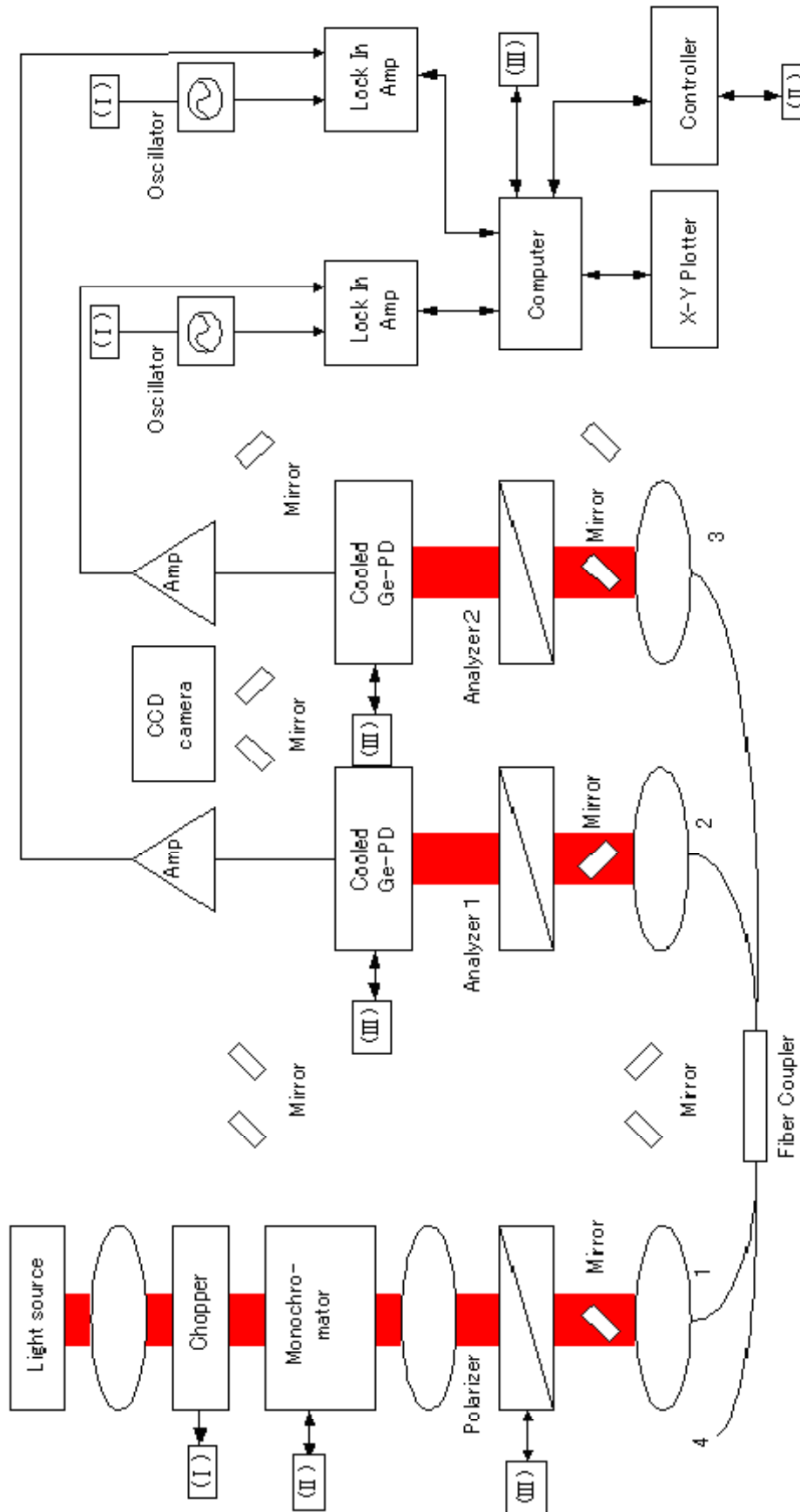


图3.3 偏光・分光特性評価装置



写真 3.1 光ファイバカプラ偏光・分光評価システムの概観

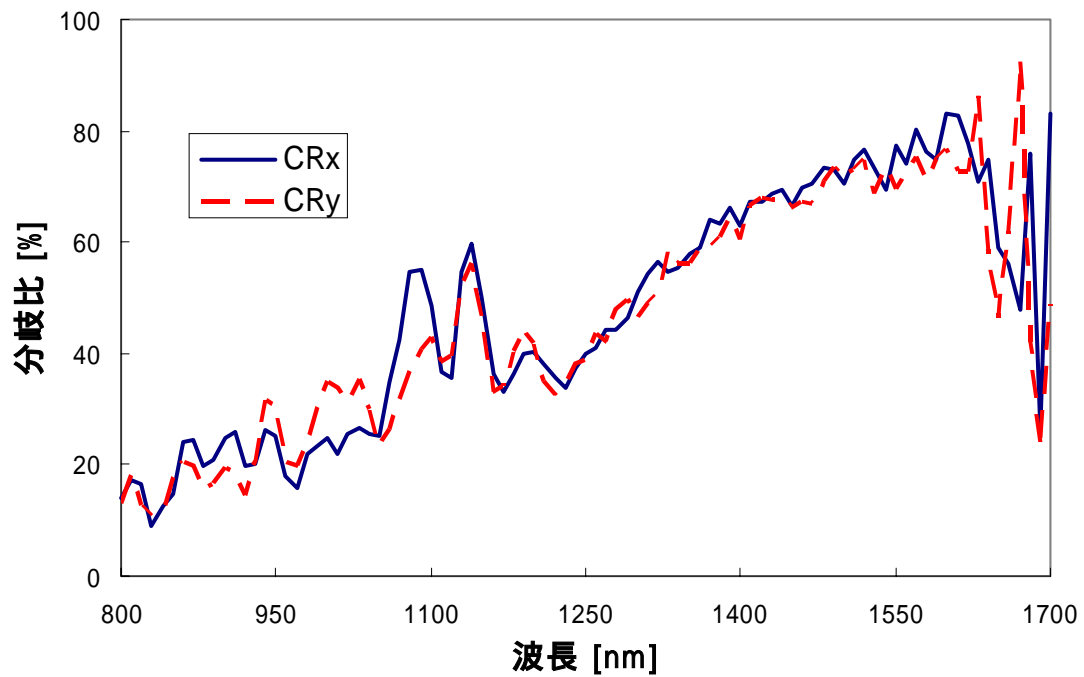


図3.4 シングルモード光ファイバカプラの分岐比(波長依存性)

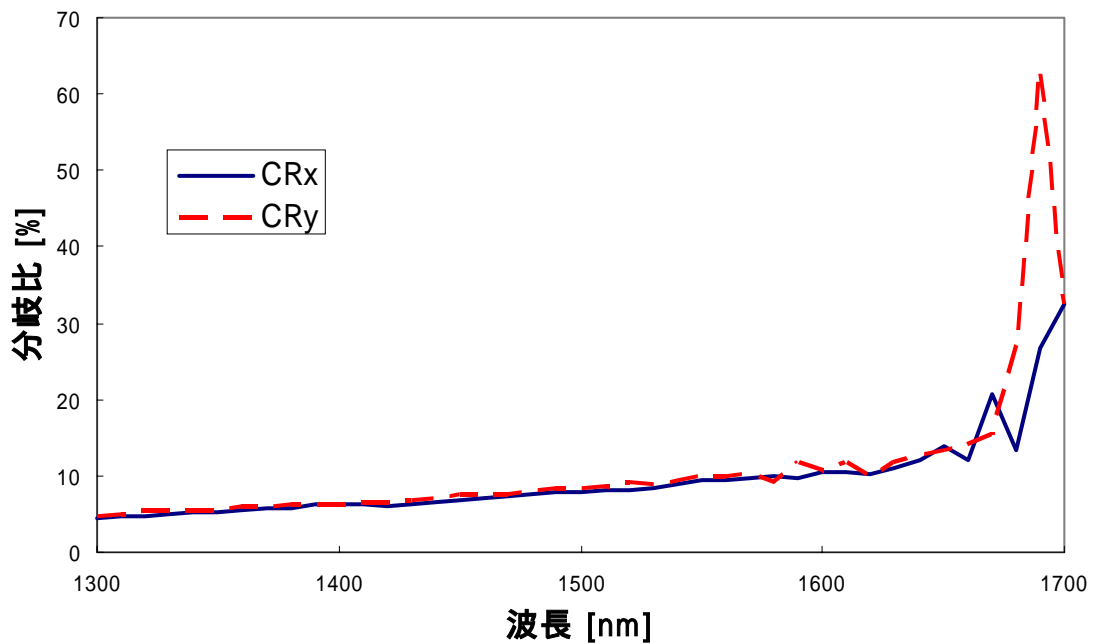


図3.5 偏波面保存光ファイバの分岐比(波長依存性)

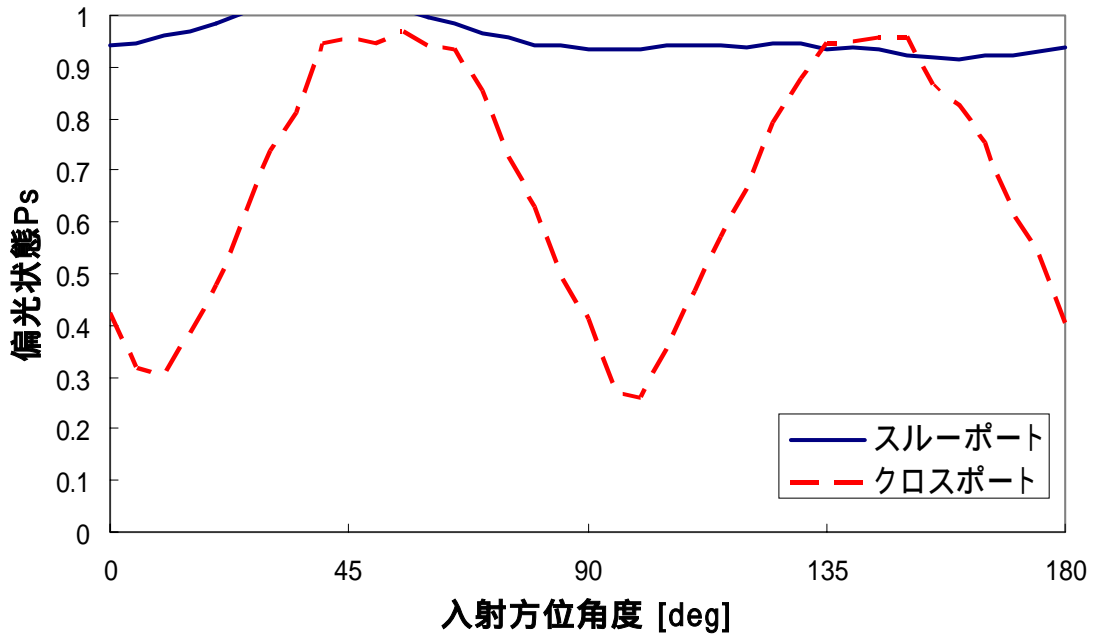


図3.6 シングルモード光ファイバカプラの偏光状態Ps
(入射方位角特性)

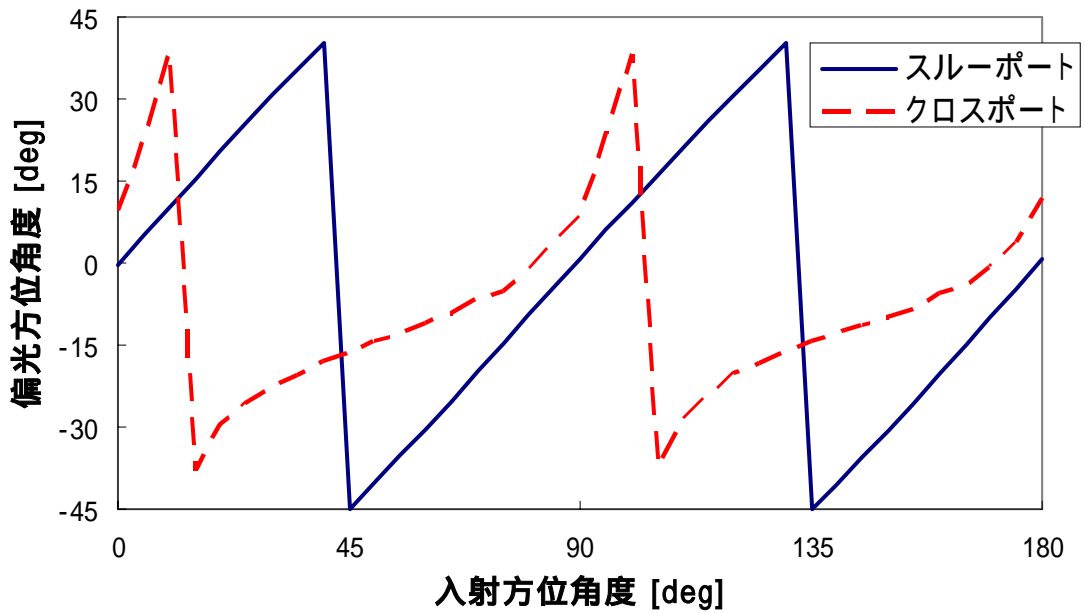


図3.7 シングルモード光ファイバカプラの偏光方位角
(入射方位角特性)

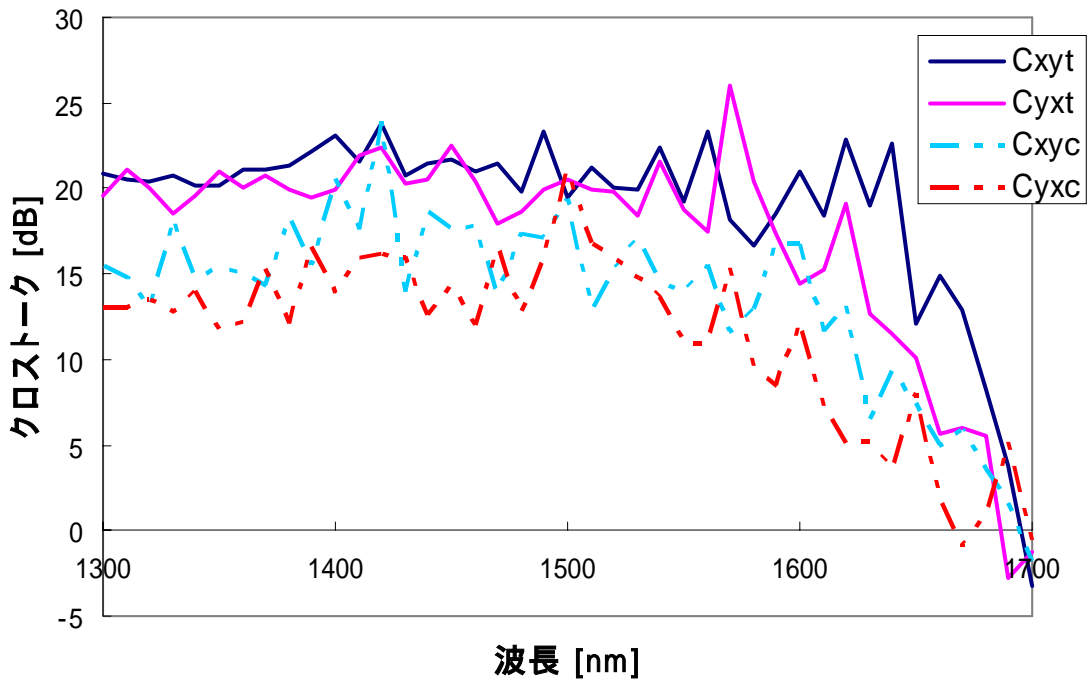


図3.8 偏波面保存光ファイバカプラのクロストーク(波長依存性)

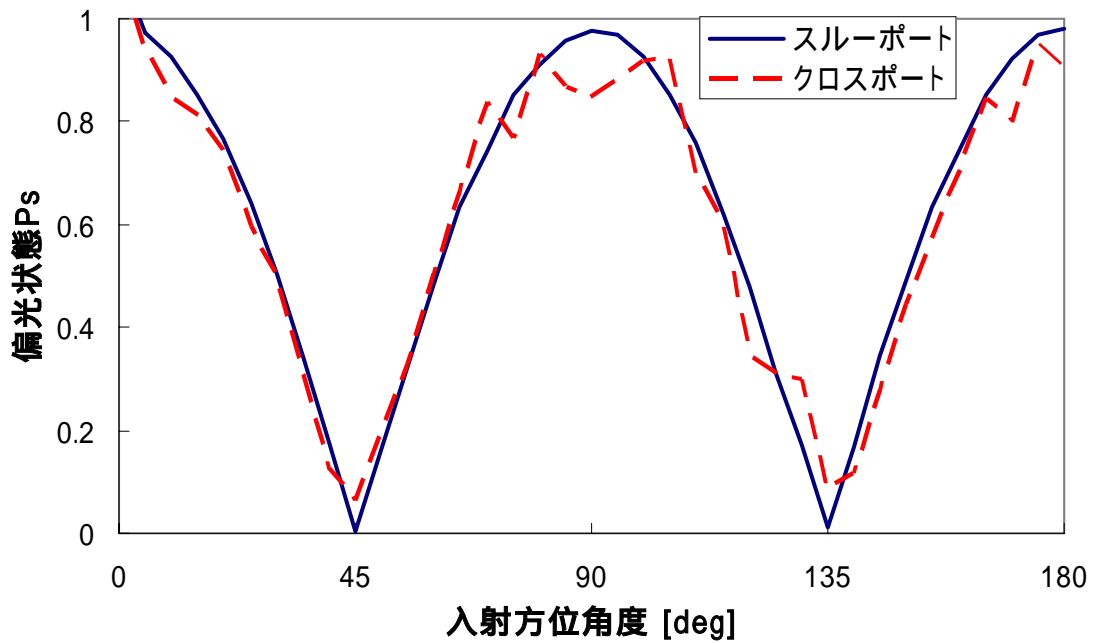


図3.9 偏波面保存光ファイバカプラの偏光状態Ps (入射方位角特性)

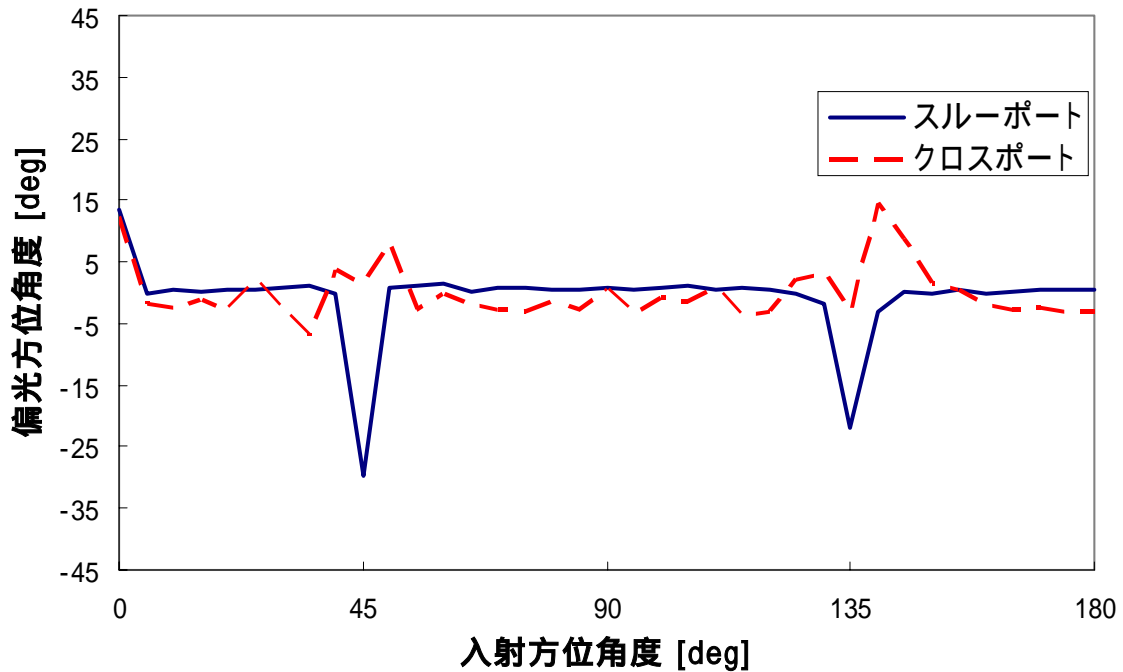


図3.10 偏波面保存光ファイバカプラの偏光方位角
(入射方位角特性)

3.5 考察

3.5.1 分光特性

シングルモード光ファイバカプラの測定結果について考察する． CR_x , CR_y はそれぞれ X 偏波, Y 偏波の分岐比である．図 3.4 を見ると, CR_x , CR_y はともに似た波長依存性を示しており, 使用波長の 1310[nm]では, 約 50[%]となっているのが分かる．これにより, 挿入損失は 3[dB]であることが確認できた．

次に, 偏波面保存光ファイバカプラの測定結果について考察する．こちらも CR_x , CR_y ともに似た波長依存性を示しており, 使用波長の 1550[nm]では, 約 10[%]となっているのが分かる．これにより, 挿入損失は 10[dB]であることが確認できた．

3.5.2 偏光特性

シングルモード光ファイバカプラの測定結果について考察する．図 3.6 の偏光状態 P_s の入射方位角特性を見ると, スルーポート側では, ほぼ $P_s = 1$ 付近で多少変動しているのが分かる．理想的なシングルモード光ファイバはコアが真円なため, 直線偏光を入射すると偏光状態が常に維持され, $P_s = 1$ で一定となると考えられる．しかし, 実際は製造上の問

題やその他の応力，外乱などにより偏光状態が多少変動したと思われる．一方，クロスポート側でははっきりと偏光状態に変化が見られたため，なんらかの応力が加わっているのではないかと考えられる．図 3.7 の偏光方位角 の入射方位角特性では，スルーポート側では入射方位角が $0^\circ \sim 45^\circ$ の範囲では入射方位角と偏光方位角が比例関係のように見られる．図 3.7 から分かるように，スルーポート側では偏光状態が直線偏光に近い状態であるため，入射方位角と偏光方位角がほぼ等しい関係になったと考えられる．しかし，式(3.4)から分かるように，偏光方位角 は \tan のインバースを $1/2$ 倍したもので， の取りうる範囲は $-45^\circ < < 45^\circ$ となる．そのためこのような特性を示したと考えられる．一方，クロスポート側ではスルーポート側と似たような特性を示しているが，図 3.6 と同様に特性に乱れがある．このこともクロスポート側に何らかの応力が加わっているためではないかと思われる．

次に，偏波面保存光ファイバカブラの測定結果について考察する．図 3.8 のクロストークの波長依存性で， C_{xyt} ， C_{xyc} といった添え字 t 及び c はそれぞれスルーポート，クロスポートを表している．使用波長である $1550[\text{nm}]$ において，スルーポート側では C_{xy} ， C_{yx} ともに約 $20[\text{dB}]$ 以上，クロスポート側でも C_{xy} ， C_{yx} ともに約 $15[\text{dB}]$ 以上あることが分かる． $20[\text{dB}]$ は 100 分の 1 であるので高い偏波面保存能力を持っていることが確認できた．

図 3.9 の偏光状態 P_s は，スルーポートでは入射方位角に対し規則的な変化が見られる．PANDA ファイバの目の方向(X 軸)に等しい 0° ， 180° ，また，それに直交する(Y 軸) 90° では $P_s = 1$ ，つまり直線偏光を示しているのが分かる．

また， 45° ， 135° では $P_s = 0$ ，円偏光を示している．これにより，偏波面保存光ファイバにはコアに意図的に応力が加わっており，X 軸と Y 軸で複屈折が生じていることが確認できた．また，X 軸に等しい 0° ， 180° ，Y 軸に等しい 90° で直線偏光が維持されているのが確認できた．一方，クロスポート側ではスルーポート側と似た特性を示しているが，多少の特性の乱れが見られた．図 3.10 の偏光方位角 は，スルーポート側の入射方位角が 45° ， 135° のときのみ変化があるものの，スルーポート，クロスポートともにほとんど依存性は見られなかった．

シングルモード光ファイバカブラ，偏波面保存光ファイバカブラの偏光特性は互いに異なる特性を示すことが分かった．また，両カブラともに，スルーポートに対してクロスポートの特性の劣化が見られた．

3.6 結言

分光特性の測定により，測定したシングルモード光ファイバカブラは，使用波長 $=1310\text{nm}$ において分岐比が $50:50$ ，偏波面保存光ファイバカブラは，使用波長 $=1550\text{nm}$ において分岐比は $10:90$ であることが確認できた．また，偏光特性の測定により，シングルモード光ファイバカブラと偏波面保存光ファイバカブラは異なる特性を示すことが分か

った．さらに，両カプラともスルーポートに対して，クロスポートに偏光特性の劣化が見られた．

第4節 ファイバ・ブラッグ・グレーティング(FBG)の作製および評価

4.1 緒言

本節では，FBG の作製方法である位相マスク法及び二光束干渉法の作製方法，二光束干渉法の作製系について述べる．さらに，二光束干渉法により作製した FBG 及び住友社の FBG の反射波長，反射率，半値幅の各特性，温度特性の測定を行い，評価する．

4.2 作製方法^[5]

4.2.1 位相マスク法

位相マスクとは，石英基盤上に FBG の 2 倍の周期の回折格子を形成したものである．位相マスクによる FBG の作製方法を図 4.1 に示す．波長 248nm の KrF エキシマレーザを，位相マスクを通して光ファイバに照射する．これにより，±1 次回折光による干渉パターンが光ファイバのコアに形成される．位相マスクの回折格子の周期 Λ_{MASK} と FBG の回折格子の周期 Λ_{FBG} には，次のような関係がある^[5]．

$$\Lambda_{MASK} = 2\Lambda_{FBG} \quad (4.1)$$

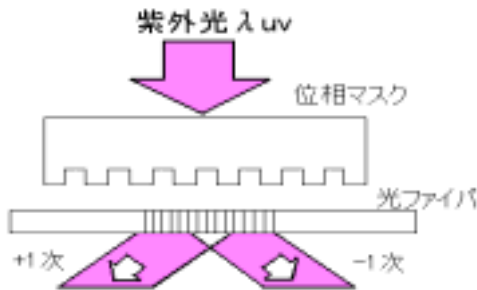


図 4.1 位相マスク法

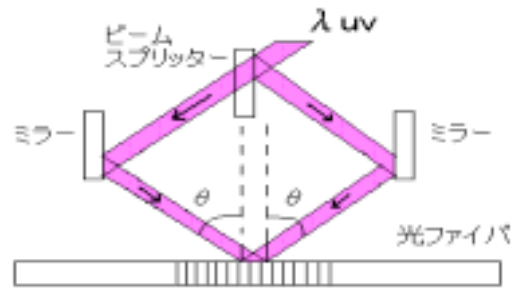


図 4.2 二光束干渉法

4.2.2 二光束干渉法

二光束干渉法とは，光ファイバに紫外線レーザを二方向から照射し，光の干渉によりコアに周期的な屈折率変化を与える．光源にはコヒーレンスの高いレーザが必要であるが，レーザの入射角 変えることで任意の反射波長の FBG を作製できるため，位相マスク法に比べ作製の自由度は高い．FBG の周期 と入射角 は次式のような関係がある．

$$\Lambda = \frac{\lambda_{uv}}{2 \sin \theta} \quad (4.2)$$

ここで、 λ_{uv} は紫外線レーザーの波長(244nm)である。

4.3 作製系

本研究では、FBG の作製において波長選択の自由度の高い二光束干渉法を採用することとした。図 4.3 にその作製システムを示す。写真 4.1 に、FBG 作製システムの概観を示し、写真 4.2 に、二光束干渉法により生じる 2 つの紫外光ビームの様子を示す。

二光束干渉法には、高いコヒーレンシーが要求されるため光源にはアルゴンレーザーを用いた。アルゴンレーザーの第二次高調波(波長 244nm)を出力し、光ファイバに照射する。

今回、シングルモード光ファイバ(SMF)の反射波長 $\lambda_B=1550\text{nm}$ の FBG の作製を試みた。なお、入射角 θ は式(2.22)に実効屈折率 $N_{eff}=1.45$ 、 $\lambda_B=1550\text{nm}$ 、式(4.2)に $\lambda_{uv}=244\text{nm}$ を代入することにより、 $\theta=13.19^\circ$ となる。

作製時の室温は 26℃であった。

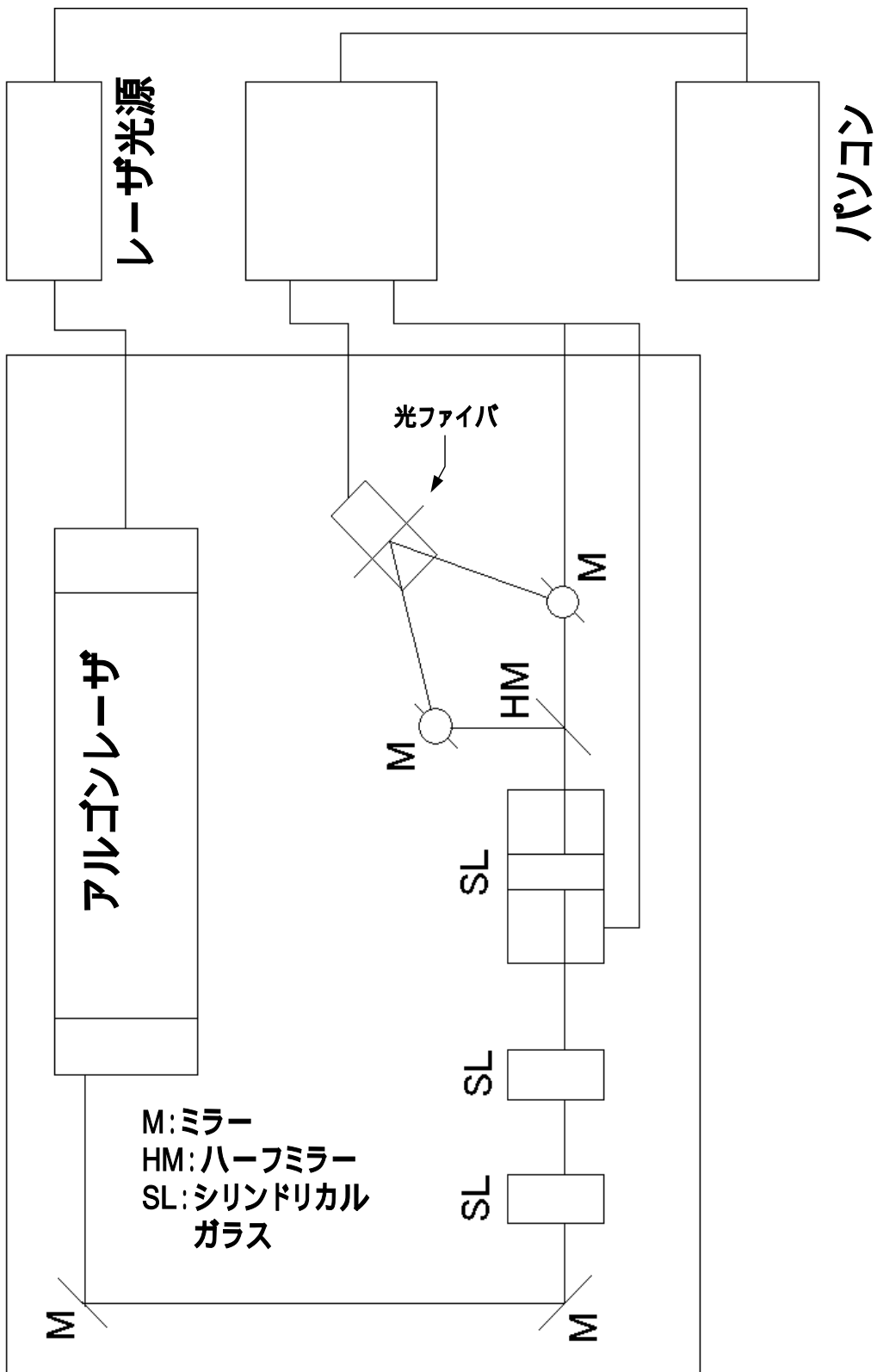


図4.3 二光束干渉法によるFBG作製システム



写真 4.1 F B G 作製システムの概観

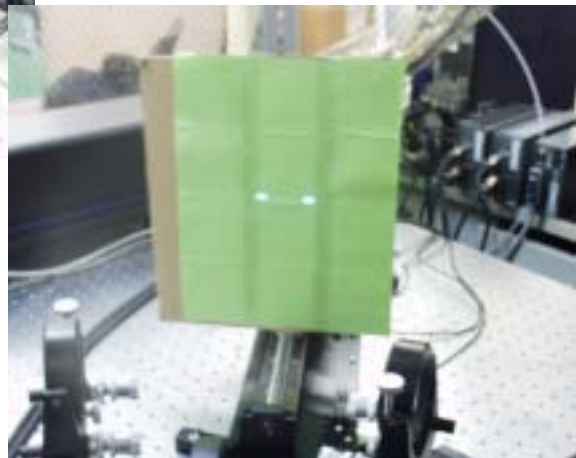


写真 4.2 二光束干渉法により生じる 2 つの紫外光ビームの様子

4.4 測定方法

4.4.1 反射ピーク波長 λ_B , 半値幅 $\Delta\lambda$, 反射率 R

図 4.3 の作製系により作製した FBG 2 本(FBG1 ,FBG2)および、住友社から提供していただいた測定サンプル(S-FBG1~S-FBG7)の計 9 本の SMF タイプの FBG の各特性の測定を行った。測定系を図 4.5 に示す。まず、入射光を測定するため、ASE 光源とサーキュレータを接続し、サーキュレータの FBG 側の部分をスペクトラムアナライザに接続して入射光を測定する。その後、図 4.5 のように接続し、反射光を測定する。

半値幅 $\Delta\lambda$ とは、反射ピーク波長 λ_B における光パワーの 1/2 の値における波長幅のことである。反射率 R は次式により求める。

$$R = \frac{\text{反射光}}{\text{入射光}} \times 100 \quad [\%] \quad (4.3)$$

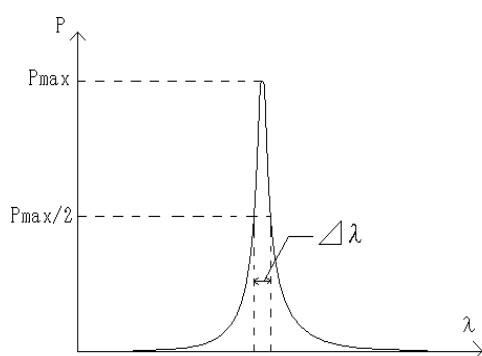


図 4.4 半値幅

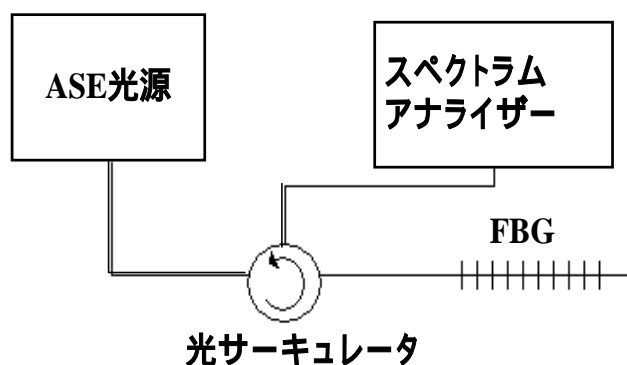


図 4.5 FBG の測定系

測定時の室温は 26 °C である。

4.4.2 温度特性

図 4.5 において、FBG 部分を恒温槽に入れて S-FBG1 の反射ピーク波長 λ_B , 半値幅 $\Delta\lambda$, 反射率 R の温度特性の測定を行う。

4.5 測定結果

4.5.1 反射ピーク波長 λ_B , 半値幅 $\Delta\lambda$, 反射率 R

測定した FBG の反射ピーク波長 λ_B , 半値幅 $\Delta\lambda$, 反射率 R を表 4.1 に示す。

図 4.6~図 4.14 に各 FBG の反射光をそれぞれ示す。

4.5.2 温度特性(S-FBG1)

表 4.2 に S-FBG1 の反射ピーク波長 λ_B , 反射率 R , 半値幅 $\Delta\lambda$ の温度特性を示す . また , 図 4.15 , 図 4.16 および図 4.12 に , 反射ピーク波長 λ_B , 半値幅 $\Delta\lambda$, 反射率 R の温度特性をそれぞれ示す .

表 4.1 各 FBG の諸特性

	反射ピーク波長 λ_B [nm]	反射率R [%]	半値幅 $\Delta\lambda$ [nm]
FBG1	1551.456	29.15	1.087
FBG2	1539.202	76.34	0.672
S-FBG1	1552.810	80.58	0.589
S-FBG2	1553.221	69.96	0.545
S-FBG3	1553.352	70.81	0.574
S-FBG4	1553.337	71.42	0.564
S-FBG5	1549.175	68.33	0.581
S-FBG6	1549.276	76.44	0.644
S-FBG7	1549.392	72.44	0.686

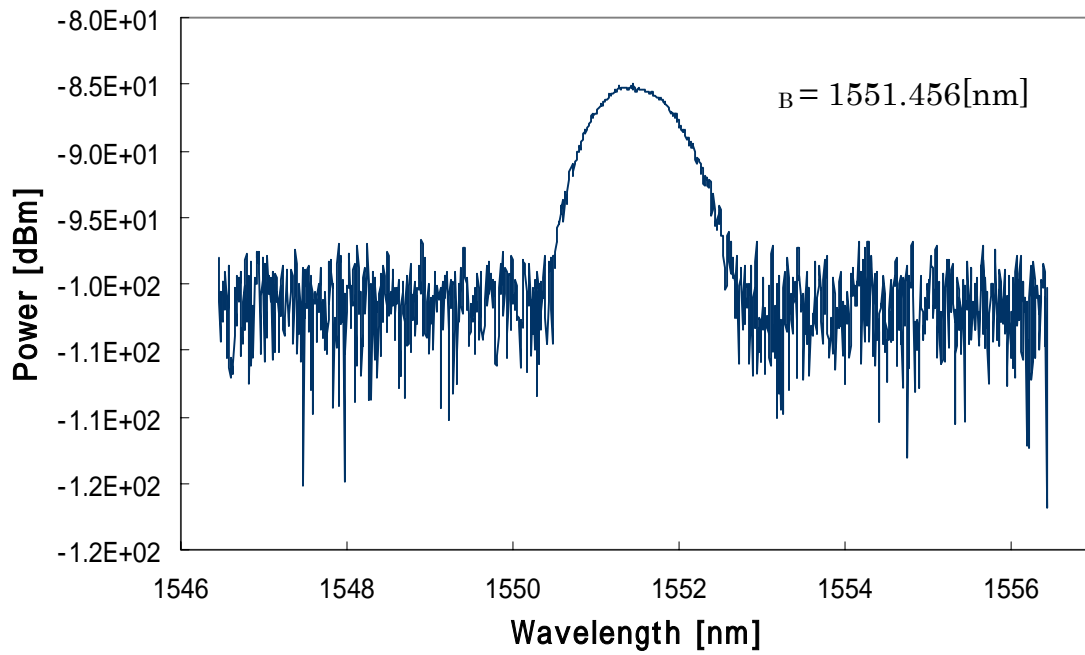


図 4.6 FBG1 の反射光

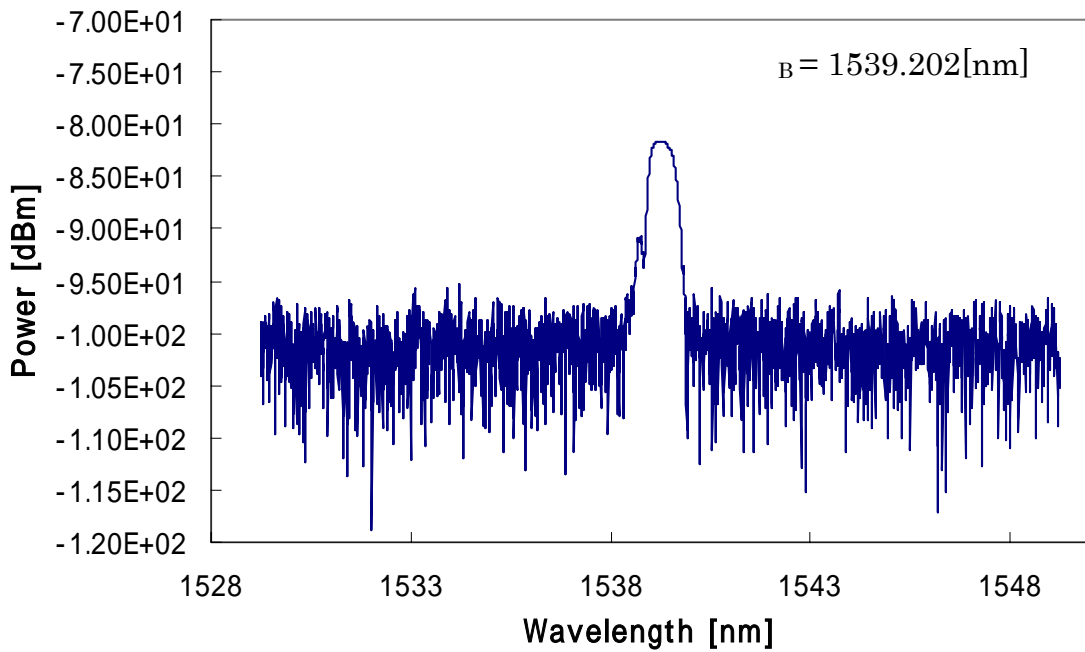


図 4.7 FBG2 の反射光

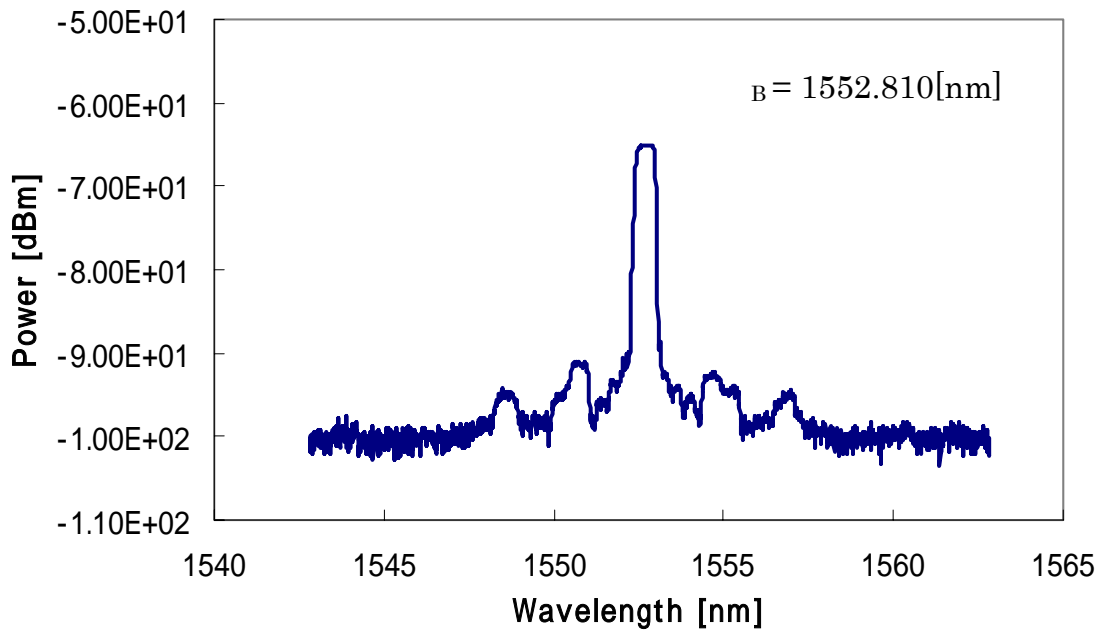


図 4.8 S-FBG1 の反射光

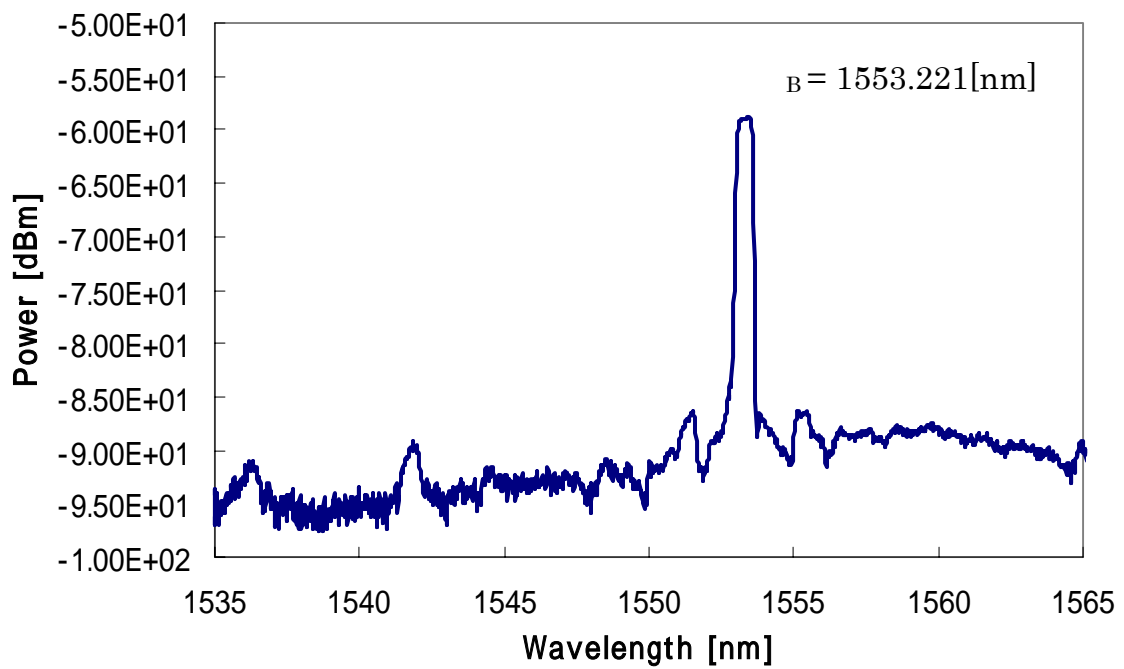


図 4.9 S-FBG2 の反射光

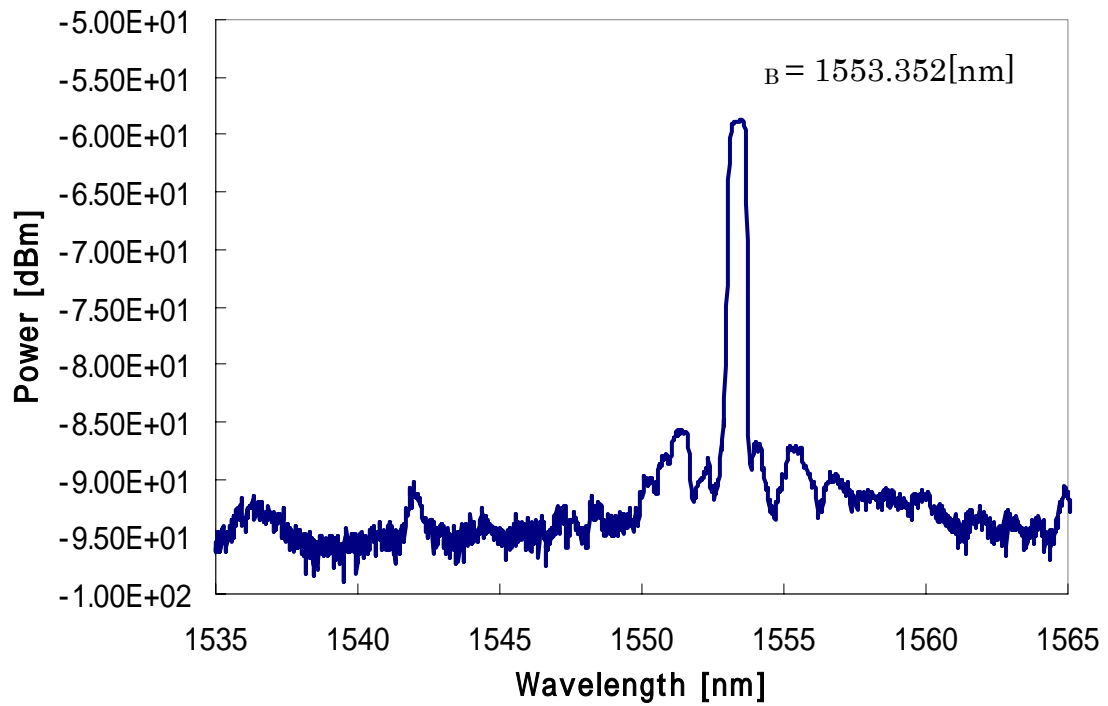


図 4.10 S-FBG3 の反射光

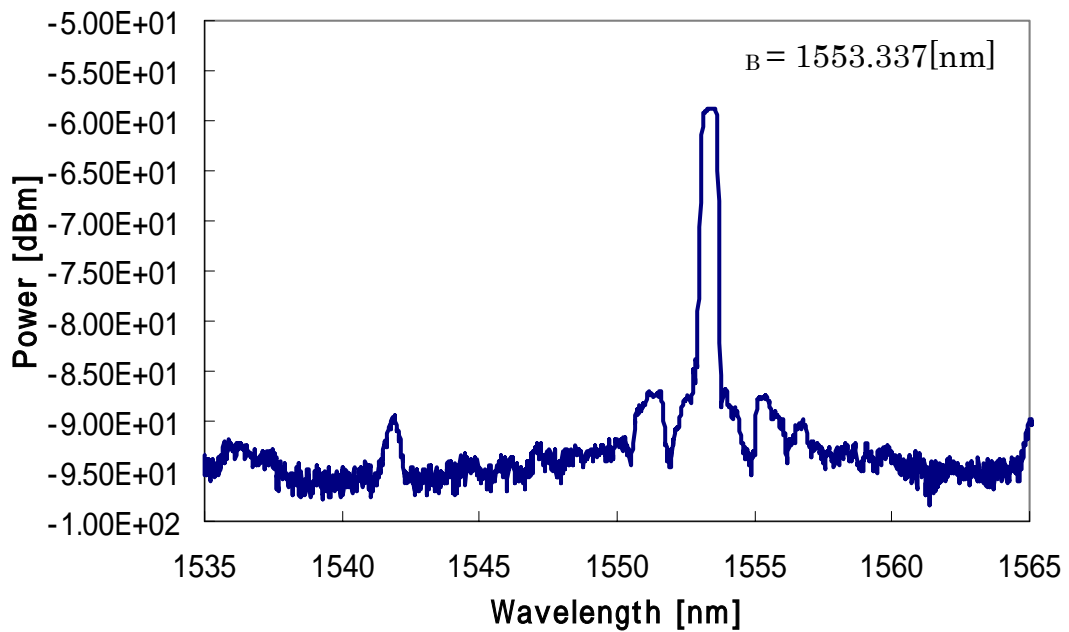


図 4.11 S-FBG4 の反射光

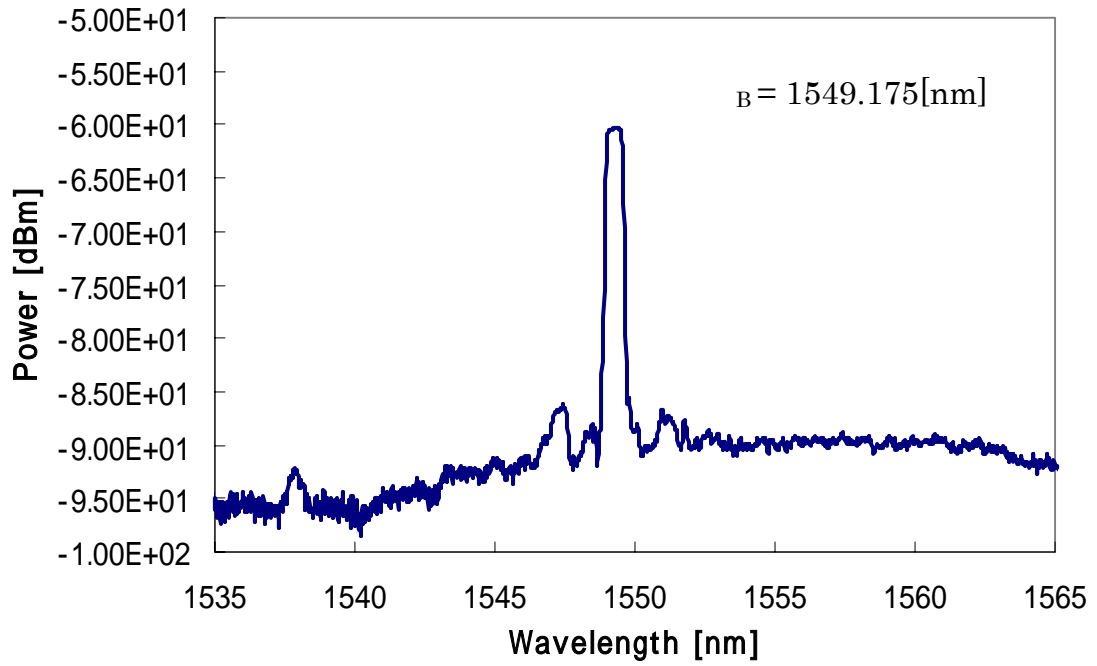


図 4.12 S-FBG5 の反射光

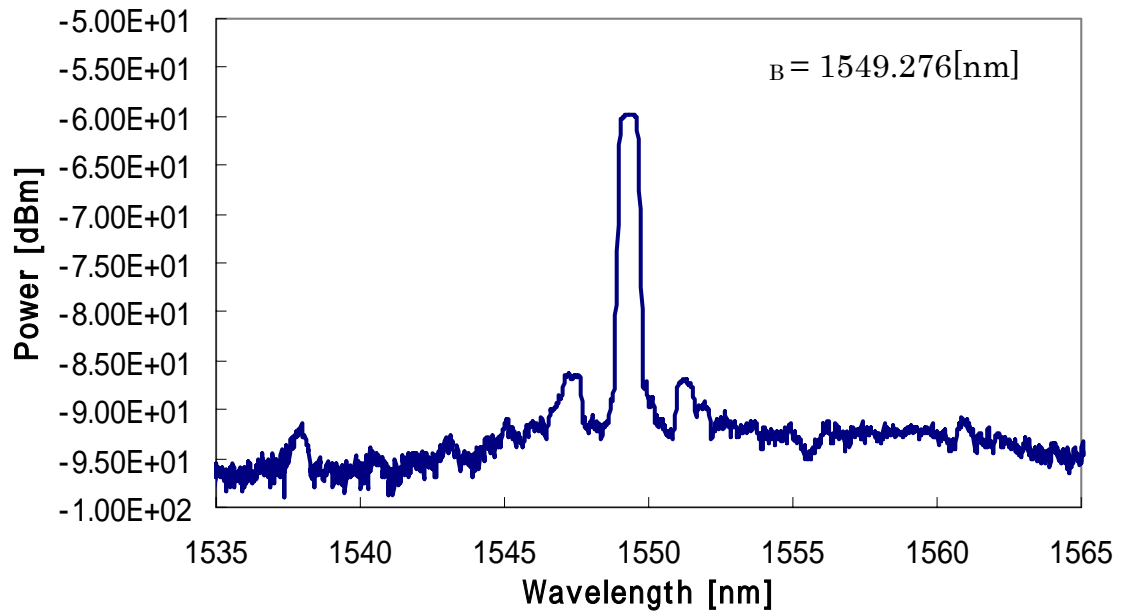


図 4.13 S-FBG6 の反射光

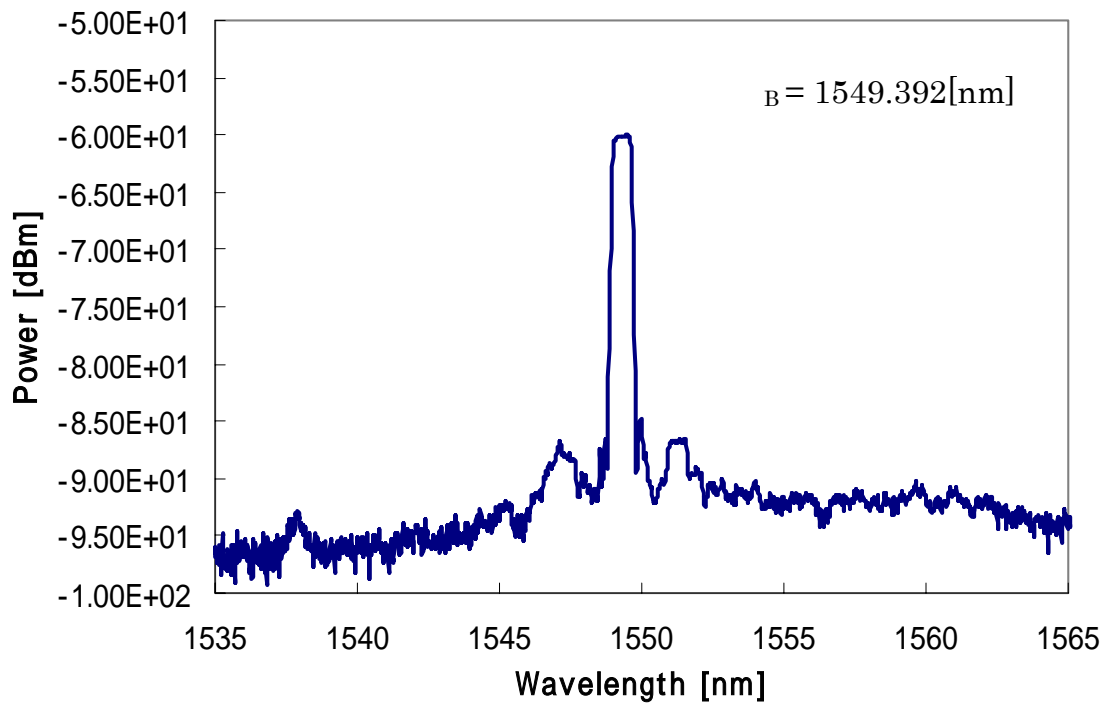


図 4.14 S-FBG7 の反射光

表 4.2 S-FBG1 の反射ピーク波長 B , 反射率 R , 半値幅 の温度特性

温度 []	反射ピーク波長 B [nm]	反射率 R [%]	半値幅 [nm]
1.33	1552.320	72.948	0.580
10.33	1552.434	85.317	0.580
20.04	1552.549	80.581	0.581
31.11	1552.879	87.723	0.589
40.04	1552.969	87.109	0.581
50.11	1553.090	81.47	0.581
60.30	1553.206	82.59	0,581

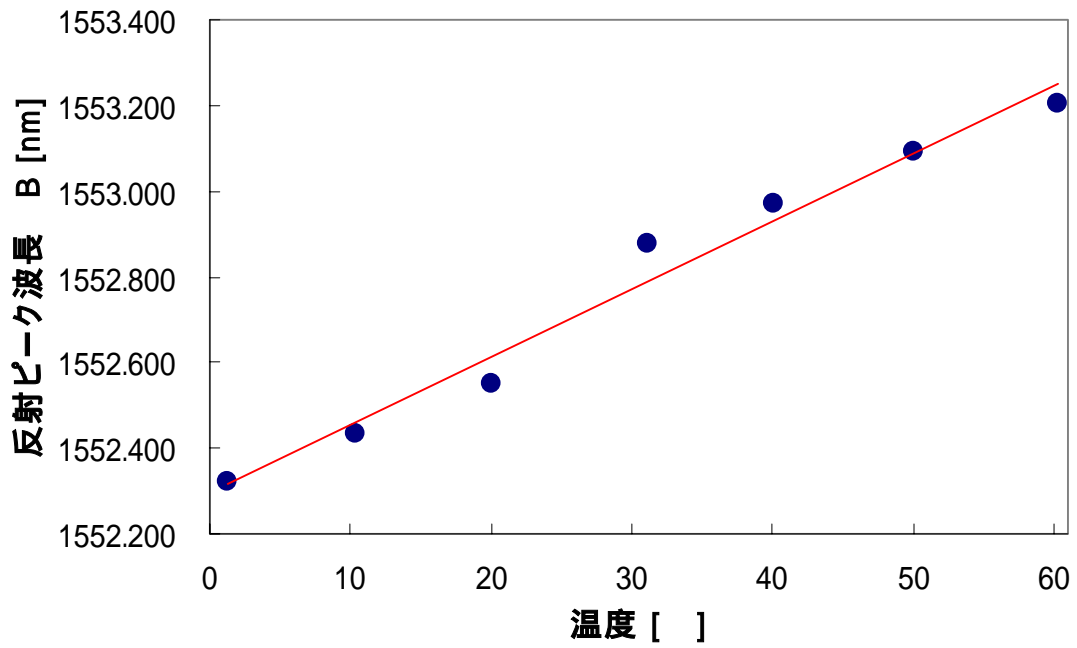


図 4.15 反射ピーク波長 B の温度特性

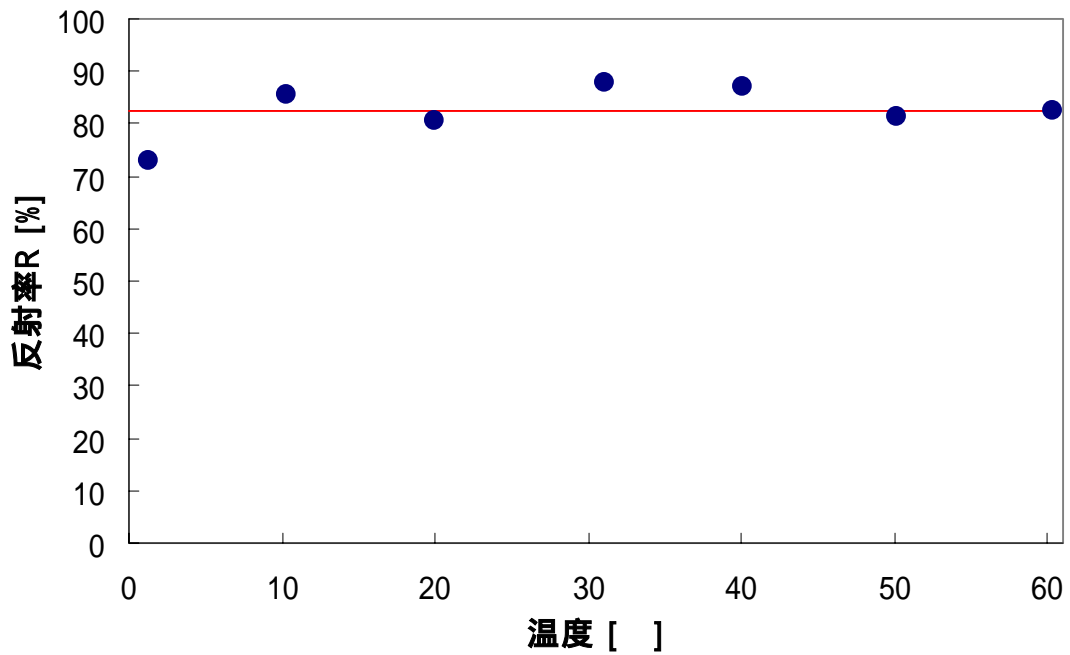


図 4.16 反射率 R の温度特性

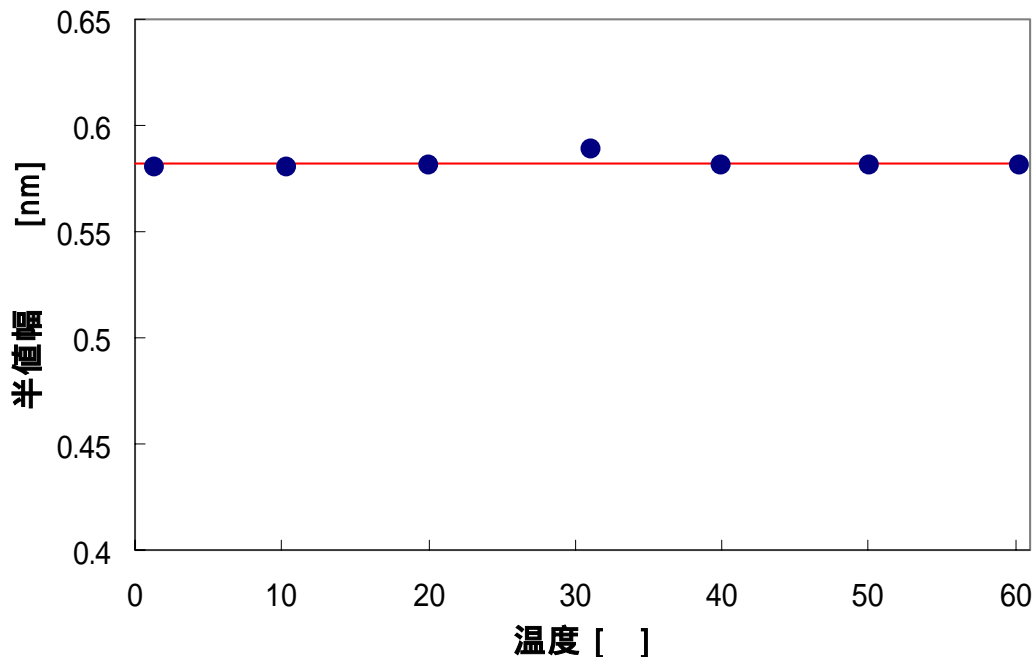


図 4.17 半値幅 の温度特性

4.6 考察

4.6.1 反射ピーク波長 λ_B , 半値幅 $\Delta\lambda$, 反射率 R

FBG1 の反射特性では, 表 4.1 より, 反射ピーク波長は $\lambda_B=1551.456\text{nm}$ となった. 今回の作製では, 反射波長を 1550nm に設定し作製を試みたが, ほぼ設定値に近い値となった. しかし, 反射率は $R=29.15\%$ と低く, 半値幅は $\Delta\lambda=1.087\text{nm}$ と大きくなり, よい結果は得られなかった. 図 4.6 を見ても, 反射光の山が幅広となっていることが分かる. おそらく, FBG 部分の回折格子がうまく形成できていなかったためと思われる. 光ファイバコアの光誘起屈折率変化は, 紫外線の照射のパワーが大きいほど, 照射時間が長いほど大きく変化する. そのため, FBG1 の作製では, 入射角は, $\theta=13.19^\circ$ にほぼ近い値で設定できた一方で, 照射パワーあるいは照射時間が不足していたのではないかとと思われる.

図 4.7 の FBG2 の反射光を見ると, 図 4.6 に比べ反射光の山は細く鋭くなっていることが確認できる. また, 表 4.1 より, 反射率 $R=76.34\%$, 半値幅 $\Delta\lambda=0.672\text{nm}$ と, FBG2 に比べ大幅によくなった. しかし, 反射ピーク波長 $\lambda_B=1539.202$ となり, 設定値の 1550nm から大きくずれた. $\lambda_B=1539.202\text{nm}$ の場合, 入射角は, 式(2.22)および式(4.2)より $\theta=13.29^\circ$ となり, 設定値よりも 0.1° ずれたことになる. つまり, 入射角が 0.1° ずれただけで, 反射ピーク波長は 10nm 程度もずれることになる.

S-FBG1 ~ S-FBG7 の特性を見ると, S-FBG1 の反射率が約 80% で高い値を示し, それ以

外では、約 70%程度の反射率を示した。また、半値幅も 0.5~0.7nm 程度でそれほど差はなかった。特に、S-FBG2~S-FBG4 の反射波長 λ_B は約 1549nm、S-FBG5~S-FBG7 では約 1553nm と、それぞれ非常に近い特性を示した。そのため、S-FBG2~S-FBG4、S-FBG5~S-FBG7 は位相マスク法によって、それぞれ同一の位相マスクで作製された FBG ではないかと考えられる。

4.6.2 温度特性(S-FBG1)

表 4.2 及び図 4.15 の反射ピーク波長 λ_B の温度特性を見ると、温度が上昇するとともに、反射ピーク波長 λ_B も長くなっているのが分かる。このことより、FBG のブラッグ反射波長には温度依存性があることが分かる。温度が上昇すると、熱膨張により光ファイバが膨張し、FBG 部分の回折格子の周期が大きくなる。そのため、ブラッグ反射波長が長くなったと考えられる。一方、表 4.2、図 4.16、図 4.17 より、反射率 R 及び半値幅 $\Delta\lambda$ は、温度依存性がないことが確認できた。

4.7 結言

FBG1 は、反射波長は設定値に近いが、反射率、半値幅の特性がよくなかった。一方、FBG2 は反射率、半値幅の特性はよいが、反射波長が設定値と大きくずれた。そのため、二光束干渉法は、レーザの出力パワーはもちろんのこと、特に、入射角 θ を決定するミラーの精密な角度調整が要求されることが分かった。また、S-FBG1~S-FBG7 は、半値幅にそれほど差はなく、特に、S-FBG2~S-FBG4、S-FBG5~S-FBG7 はそれぞれほぼ等しい反射波長を示しているため、位相マスク法によって作製されたものと考えられる。また、S-FBG1 の温度特性の測定より、反射ピーク波長 λ_B には温度依存性があり、反射率 R、半値幅 $\Delta\lambda$ は温度依存性がないことが確認できた。

第 5 節 OADM の作製及び評価

5.1 緒言

本節では、第 3 節で述べた光ファイバカプラ、第 4 節で述べた FBG を組み合わせ、シングルモード光ファイバ及び PANDA ファイバによる OADM を作製し、評価を行う。評価として、作製した各 OADM の Add・Drop 特性の測定により、Add、Drop 合分波器としての機能を確認する。また、偏波面保存光ファイバタイプの OADM のクロストークの測定を行い、偏波面保存能力の高さを見る。

5.2 作製

シングルモード光ファイバ(SMF),偏波面保存光ファイバ(PMF)による分岐結合光ファイバカプラと,反射波長約 1550nm の SMF の FBG および PMF の FBG をそれぞれ融着し, SMF タイプ, PMF タイプの 1FBG 形(図 5.1), マッハツェンダ形(図 5.2)の計 4 パターンの OADM の作製を行った.

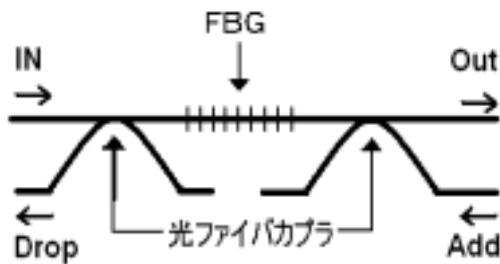


図 5.1 1FBG 形

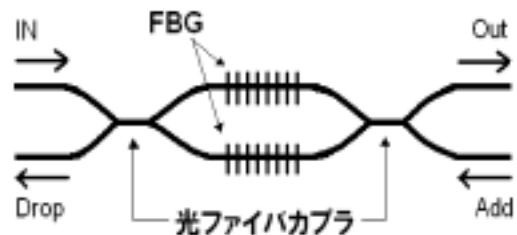


図 5.2 マッハツェンダ形

偏波面保存光ファイバには PANDA ファイバを使用しており,光ファイバカプラと FBG を融着する際,図 5.3 のように PANDA の目が一致するように融着接続する.



図 5.3 PANDA ファイバの融着

OADM の作製に用いた光ファイバカプラおよび FBG を以下に示す.

(1) SMF-1 FBG 形

光ファイバカプラ:シングルモード光ファイバカプラ(分岐比 50:50)2 個

FBG:S-FBG5(第 4 節 FBG の作製及び評価 参照)

(2) SMF-マッハツェンダ形

光ファイバカプラ:シングルモード光ファイバカプラ(分岐比 50:50)2 個

FBG:S-FBG3, S-FBG4(第 4 節 FBG の作製及び評価 参照)

(3) PMF-1 FBG 形

光ファイバカプラ：偏波面保存光ファイバ(PANDA ファイバ)カプラ (分岐比 50 : 50) 2 個
FBG : PANDA ファイバ形 FBG (反射波長 $\lambda_B=1550.04\text{nm}$, 反射率 $R=99.92\%$, 半値幅
=0.47)

(4) PMF-マツハツェンダ形

光ファイバカプラ：偏波面保存光ファイバ(PANDA ファイバ)カプラ (分岐比 50 : 50) 2 個
FBG : PANDA ファイバ形 FBG (反射波長 $\lambda_B=1550.04\text{nm}$, 反射率 $R=99.92\%$, 半値幅
=0.47)
PANDA ファイバ形 FBG (反射波長 $\lambda_B=1550.08\text{nm}$, 反射率 $R=99.51\%$, 半値幅
=0.27)

5.3 測定方法

5.3.1 Add・Drop 特性

図 5.4 に測定系を示す．なお，FBG のブラッグ反射により IN ポートおよび Add ポートから光源への戻り光を防ぐため，光源と OADM の間に光アイソレータを接続する．以下の手順により，Add，Drop 特性の測定を行う．写真 5.1 に、偏波面保存形 OADM の試作器を示し、写真 5.2 に、偏波面保存形 OADM の試作器の概観の様子を示す。

(1) 入射光

ASE 光源側の光アイソレータを光スペクトラムアナライザに接続し，入射光を測定する．

(2) Drop 光

IN ポートより ASE 光源からの光を入射し，Drop ポートを光スペクトラムアナライザに接続し，Drop 光を測定する．

(3) 透過光

OUT ポートを光スペクトラムアナライザに接続し，透過光を測定する．

(4) 透過 + Add 光

Add ポートより，1550nm の光を入力し，OUT ポートからの透過 + Add 光を測定する．

(5) 反射率 R_D

入射光，Drop 光より，入射光に対しての Drop 光の反射率 R_D を次式により求める．

$$R_D = \frac{\text{Drop光}}{\text{入射光}} \times 100 \quad [\%] \quad (5.1)$$

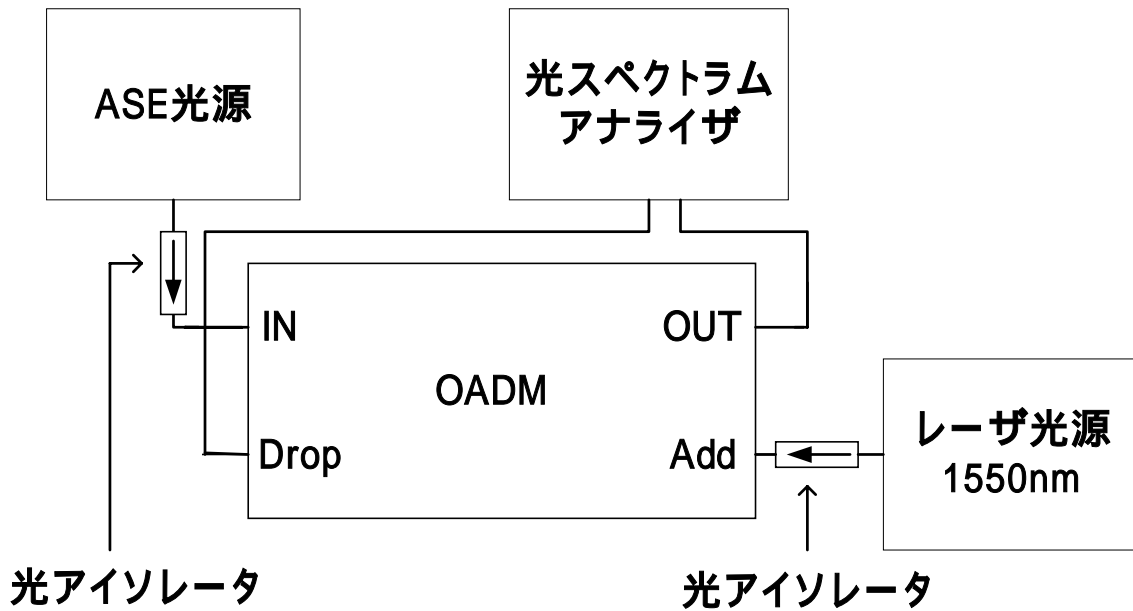


図 5.4 OADM の Add . Drop 測定系

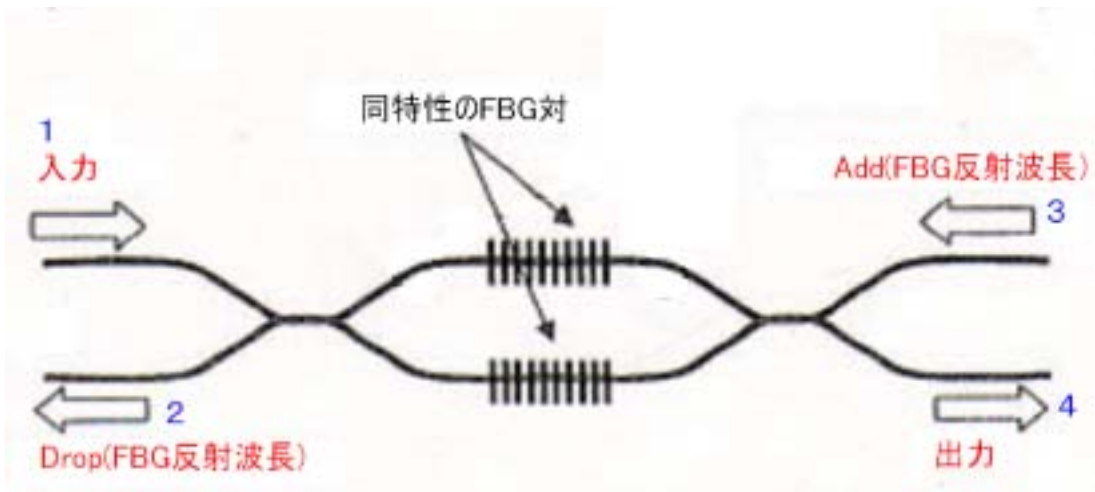


図 2.9 マッハツエンダ形 OADM

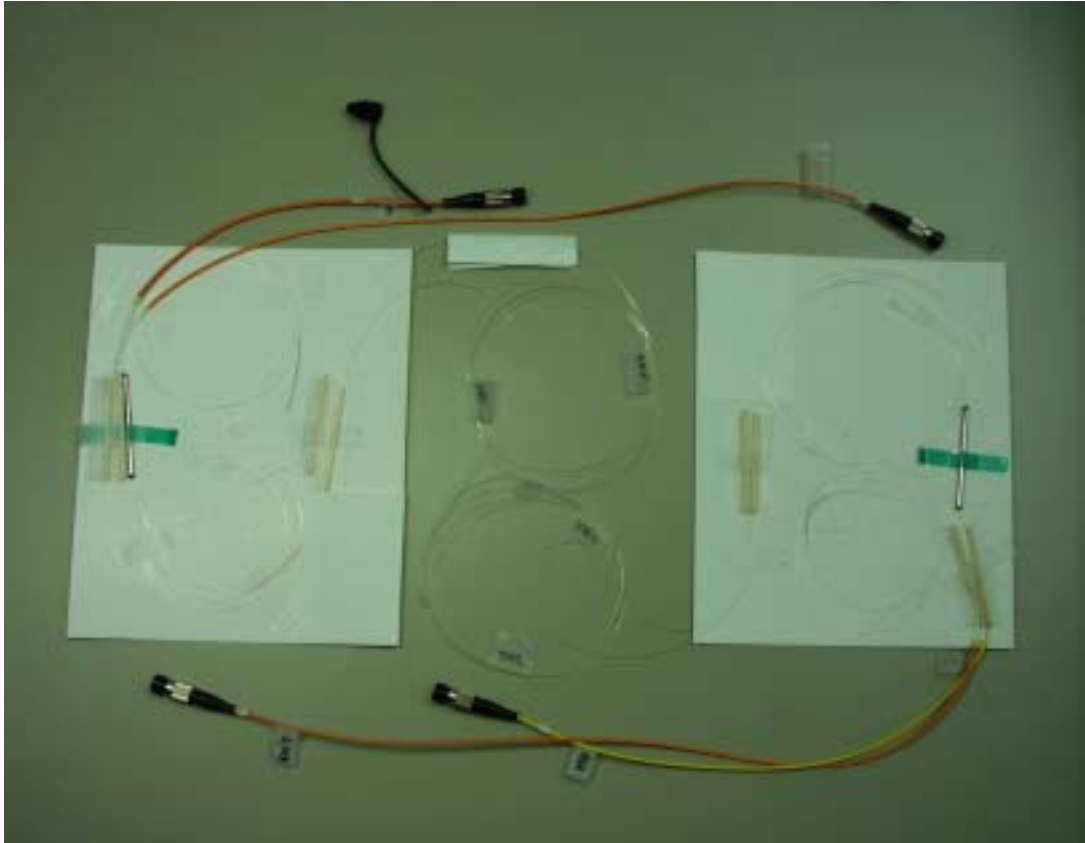


写真 5.1 偏波面保存形 OADM の試作器



写真 5.2 偏波面保存形 OADM の試作器の概観

5.3.2 クロストーク

PMFの1FBG形,マツハツェンダ形のOADMのクロストークの測定を行う。測定には,第3節 光ファイバカプラの偏光・分光特性で用いた偏光分光特性評価装置を使用した。評価装置の入力側にINポート,出力側(Analyzer1)にDropポートを接続し測定を行い,式(3.3)および式(3.4)によりクロストークを算出する。

5.4 測定結果

5.4.1 Add・Drop 特性

表 5.1 に各 OADM の反射率 R_D を示す。

表 5.2 に各 OADM の Drop 波長 λ_D , 透過波長 λ_T , Add 波長 λ_A

図 5.5 ~ 図 5.7 に SMF-1 FBG 形の測定結果を示す。

図 5.8 ~ 図 5.10 に SMF-マツハツェンダ形の測定結果を示す。

図 5.11 ~ 図 5.13 に PMF-1 FBG 形の測定結果を示す。

図 5.14 ~ 図 5.16 に PMF-マツハツェンダ形の測定結果を示す。

5.4.2 クロストーク

図 5.17 ~ 図 5.19 に PMF-1 FBG 形の測定結果を示す。

図 5.20 ~ 図 5.22 に PMF-マツハツェンダ形の測定結果を示す。

表 5.3 に PMF-1 FBG 形および PMF-マツハツェンダ形のクロストークの値を示す。

表 5.1 各 OADM の反射率 R_D

	入力光 [mW]	反射光 [mW]	反射率 R_D [%]
SMF-1FBG形	3.43E-07	8.25E-08	24.04
SMF-マツハツェンダ形	4.66E-07	1.70E-07	36.59
PMF-1FBG形	1.06E-05	1.89E-06	17.93
PMF-マツハツェンダ形	4.93E-06	1.32E-06	26.80

表 5.2 各 OADM の Drop 波長 λ_D , 透過波長 λ_T , Add 波長 λ_A

	Drop波長 λ_D [nm]	透過波長 λ_T [nm]	Add波長 λ_A [nm]
SMF-1FBG形	1549.416	1549.445	1549.337
SMF-マツハツェンダ形	1553.609	1553.544	1553.530
PMF-1FBG形	1550.006	1549.773	1550.004
PMF-マツハツェンダ形	1549.996	1549.996	1549.949

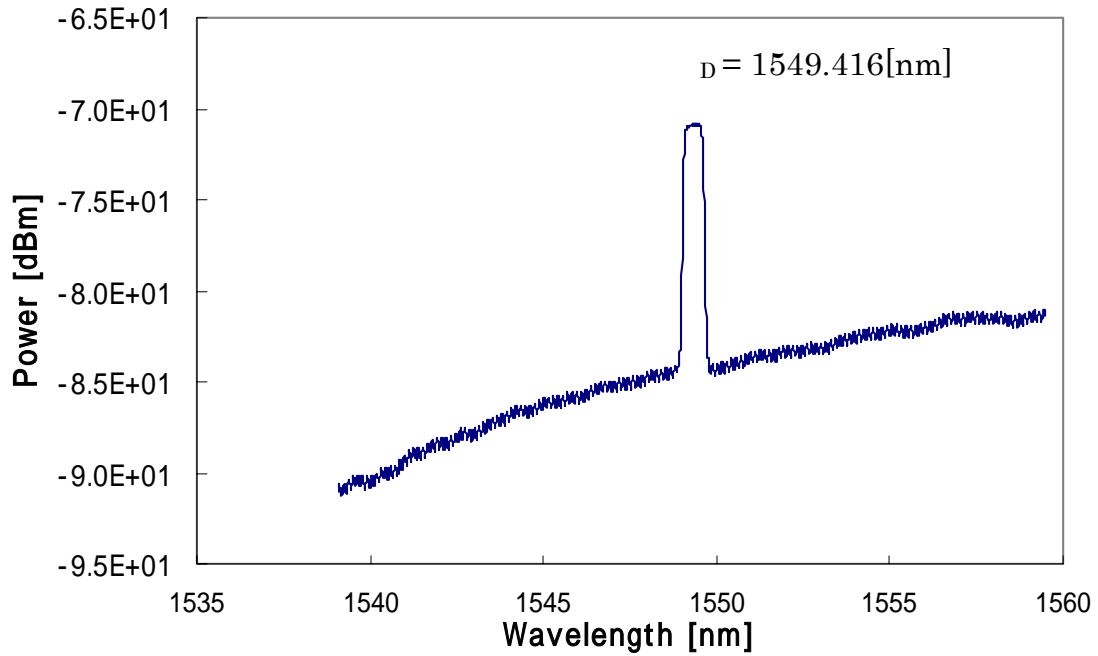


図 5.5 SMF-1 FBG 形の Drop 光

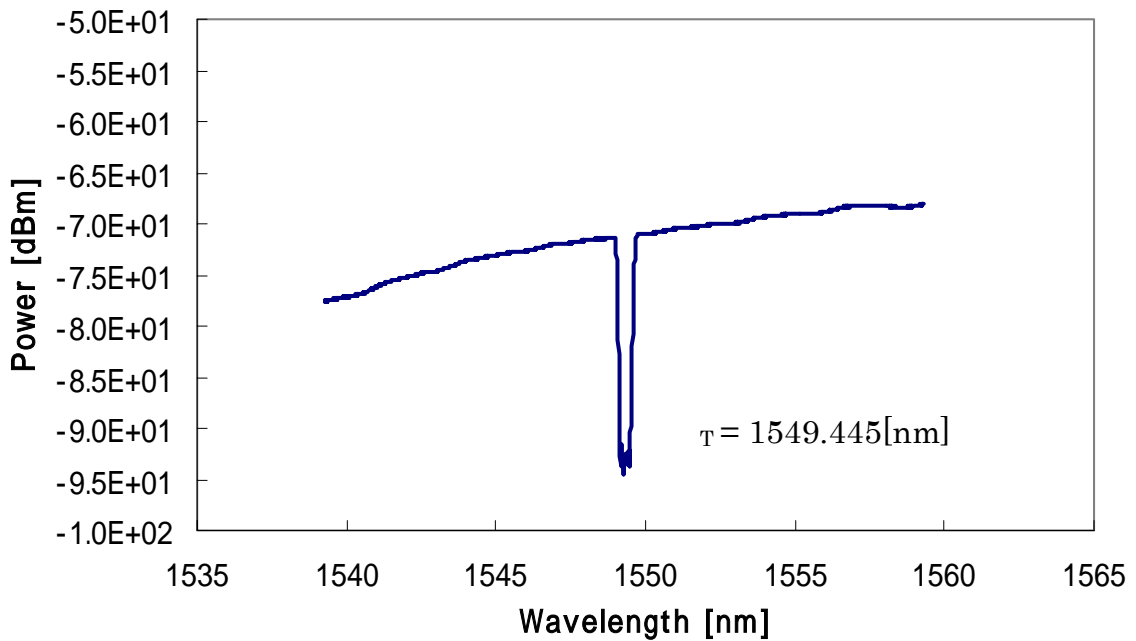


図 5.6 SMF-1 FBG 形の透過光

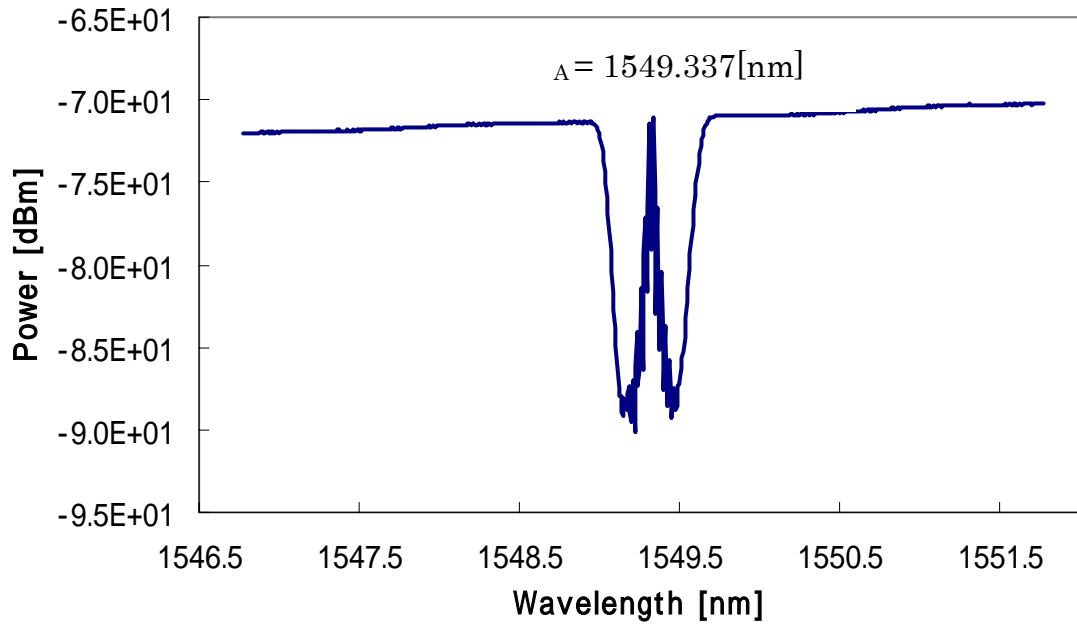


図 5.7 SMF-1 FBG 形の Add+透過光

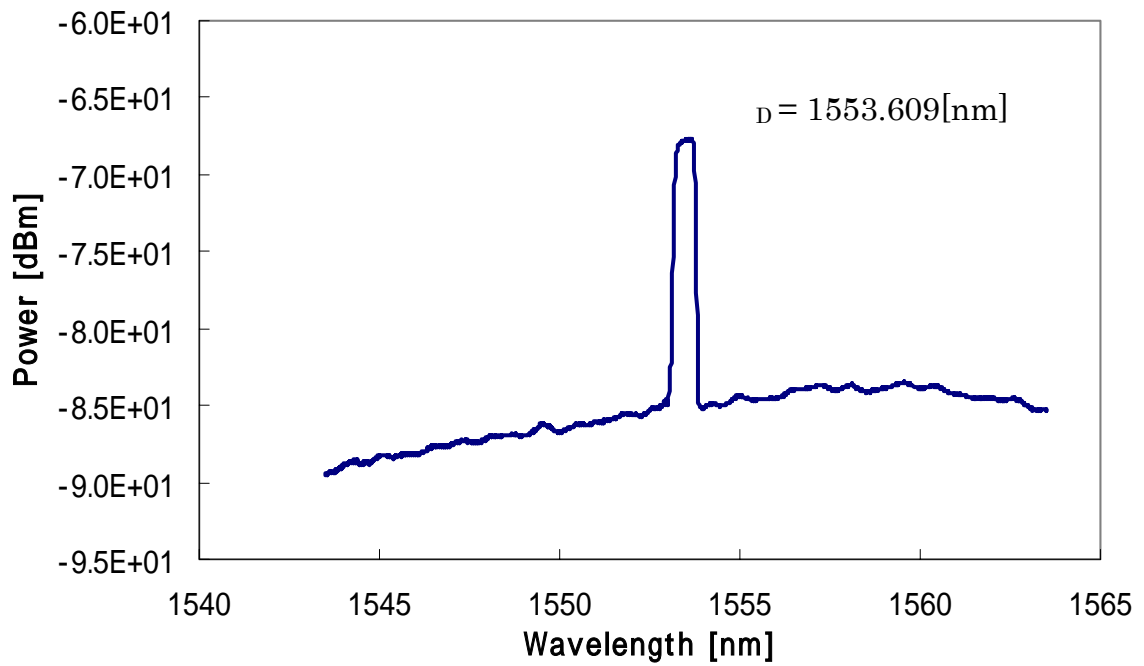


図 5.8 SMF-マツハツェンダ形の Drop 光

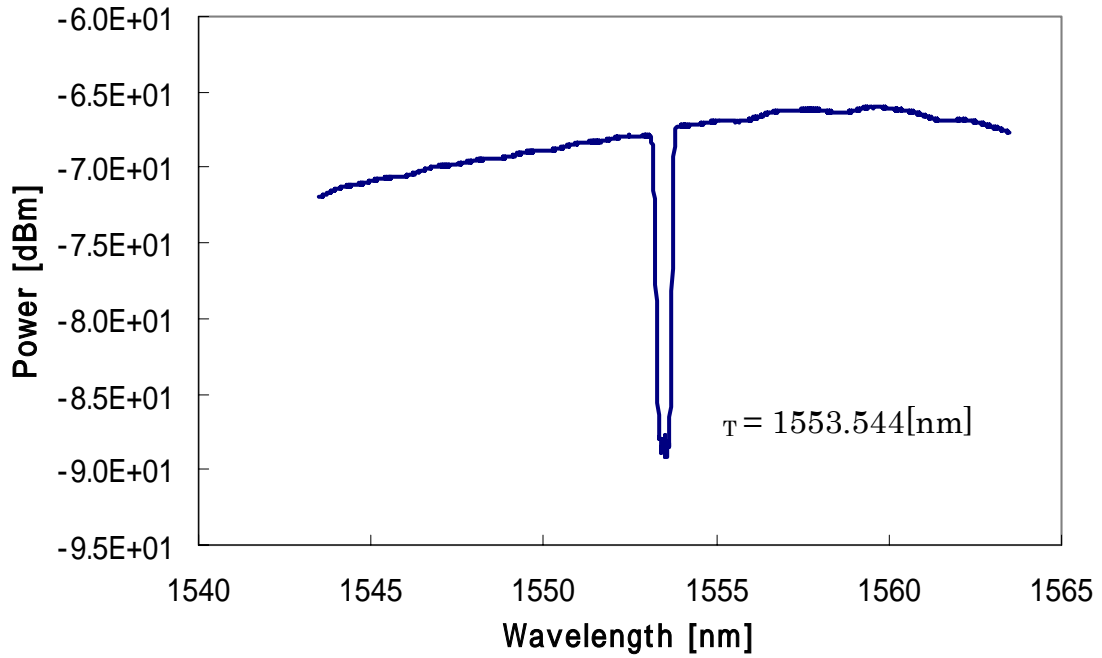


図 5.9 SMF-マッハツェンダ形の透過光

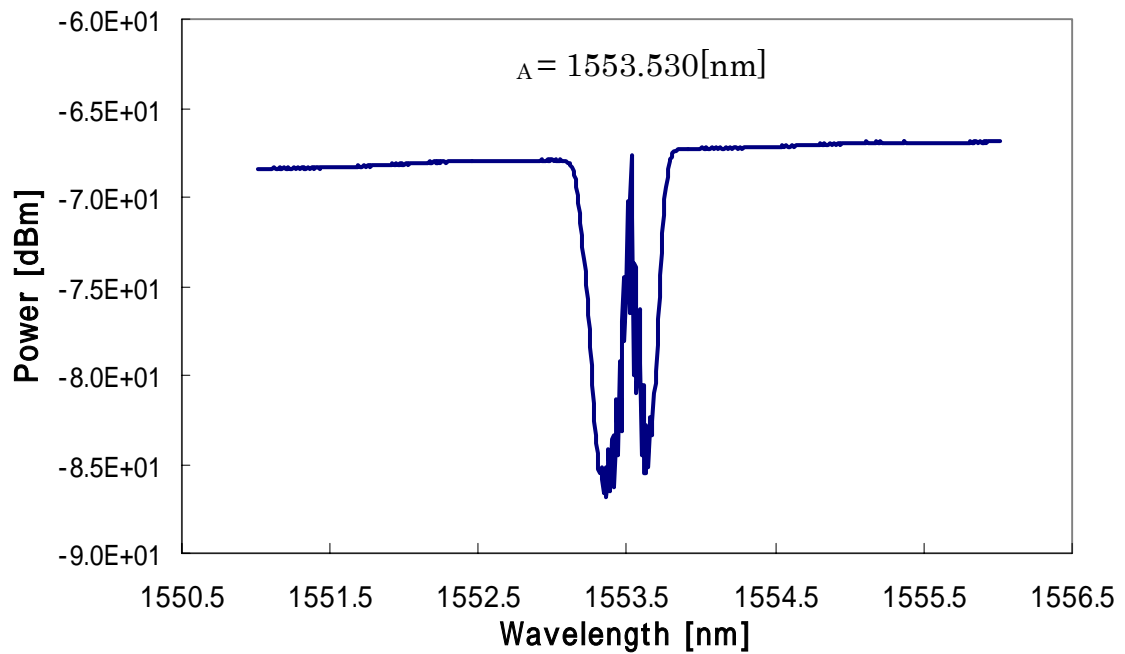


図 5.10 SMF-マッハツェンダ形の Add+透過光

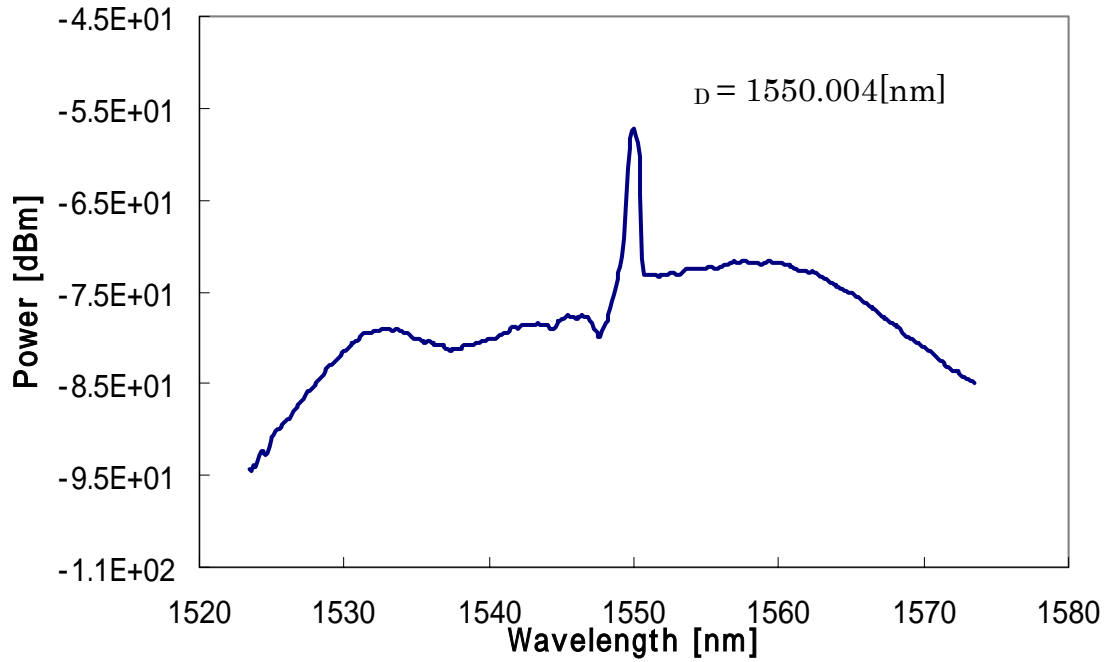


図 5.11 PMF-1FBG 形の Drop 光

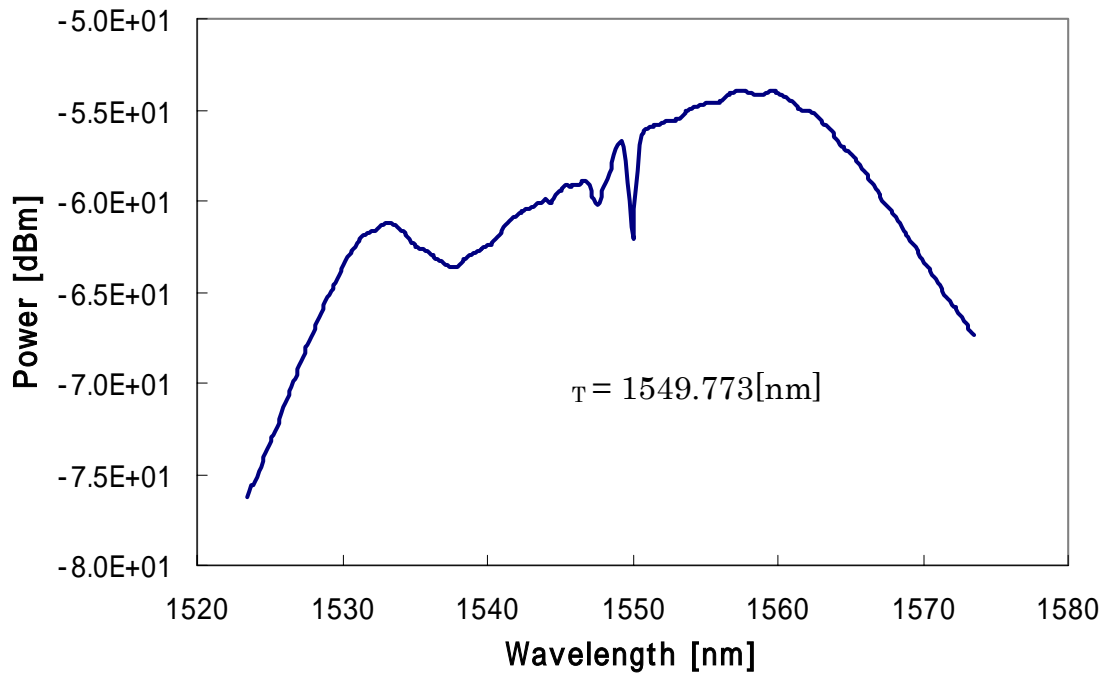


図 5.12 PMF-1 FBG 形の透過光

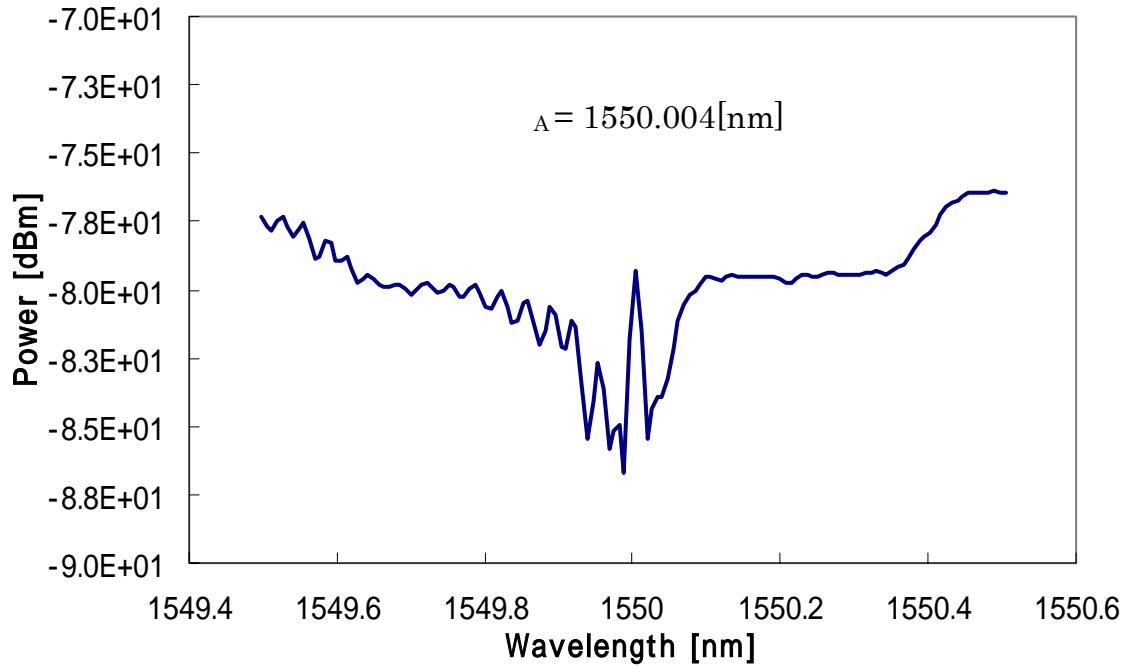


図 5.13 PMF-1 FBG 形の Add+透過光

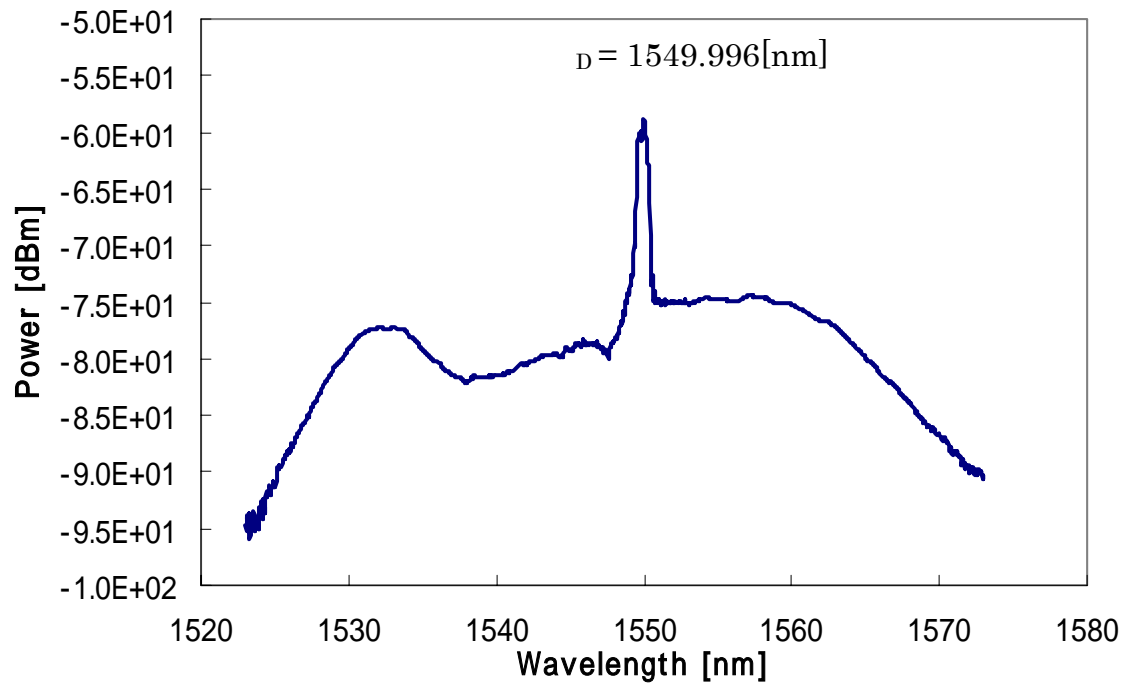


図 5.14 PMF-マッハツェンダ形の Drop 光

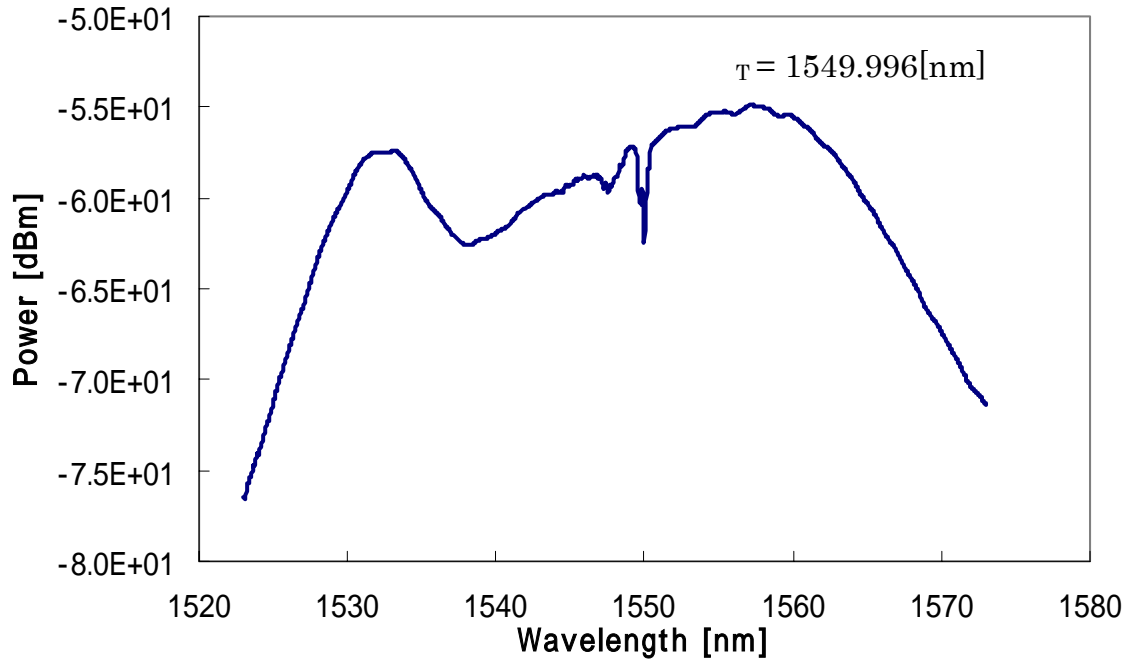


図 5.15 PMF-マッハツェンダ形の透過光

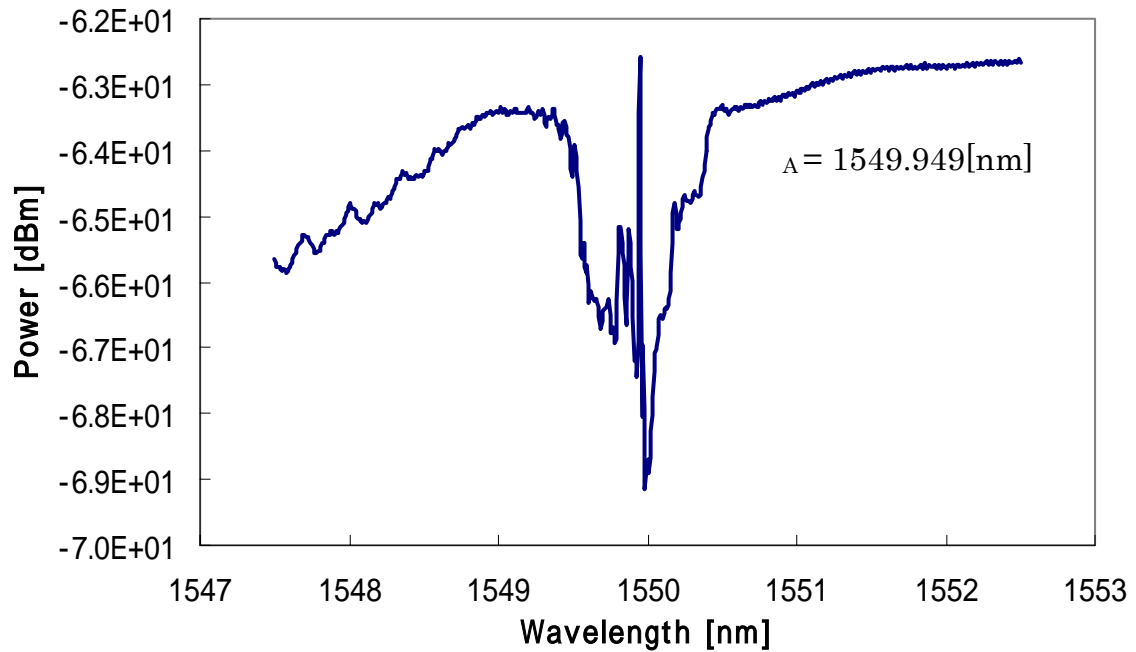


図 5.16 PMF-マッハツェンダ形の Add+透過光

表 5.3 PMF-1 FBG 形および PMF-マツハツェンダ形のクロストーク値(波長 =1548nm)

	Cxy [dB]	Cyx [dB]
PMF-1FBG形	20.67	22.72
PMF-マツハツェンダ形	19.18	16.02

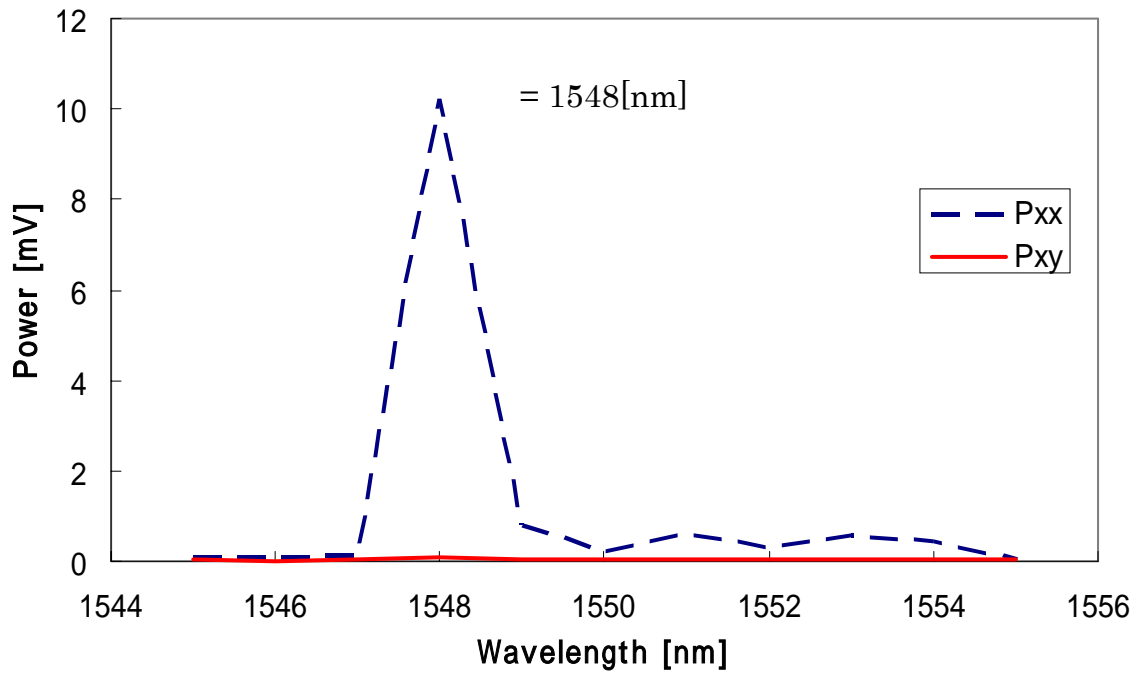


図 5.17 PMF-1FBG 形の Pxx , Pxy

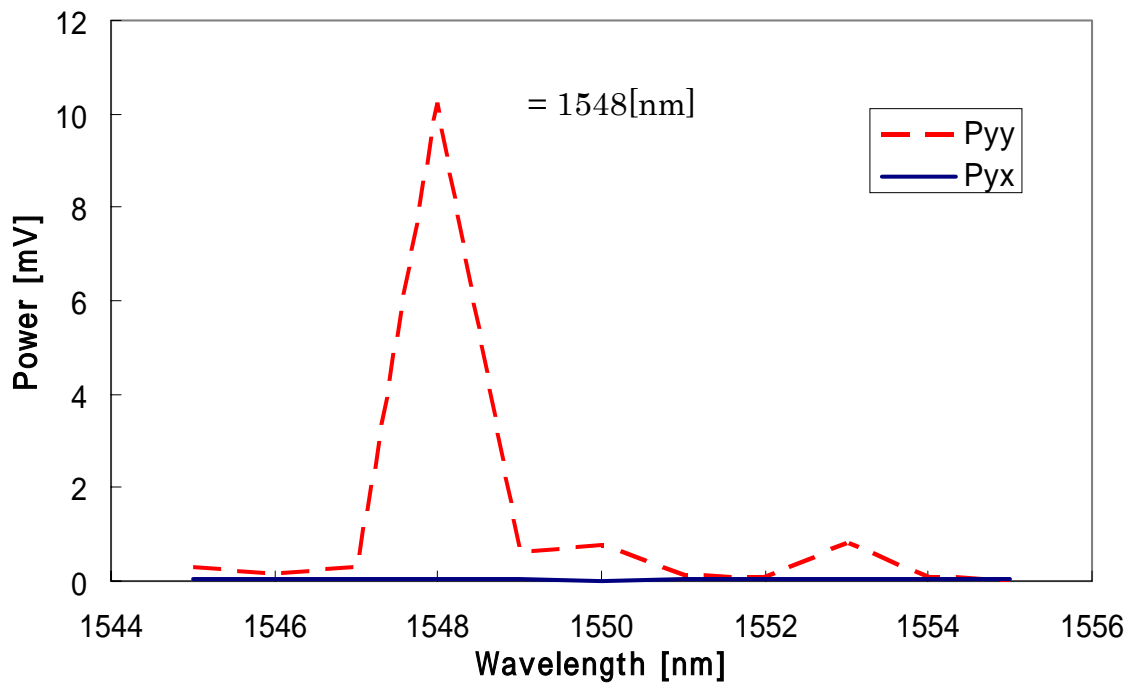


図 5.18 PMF-1FBG 形の Pyy , Pyx

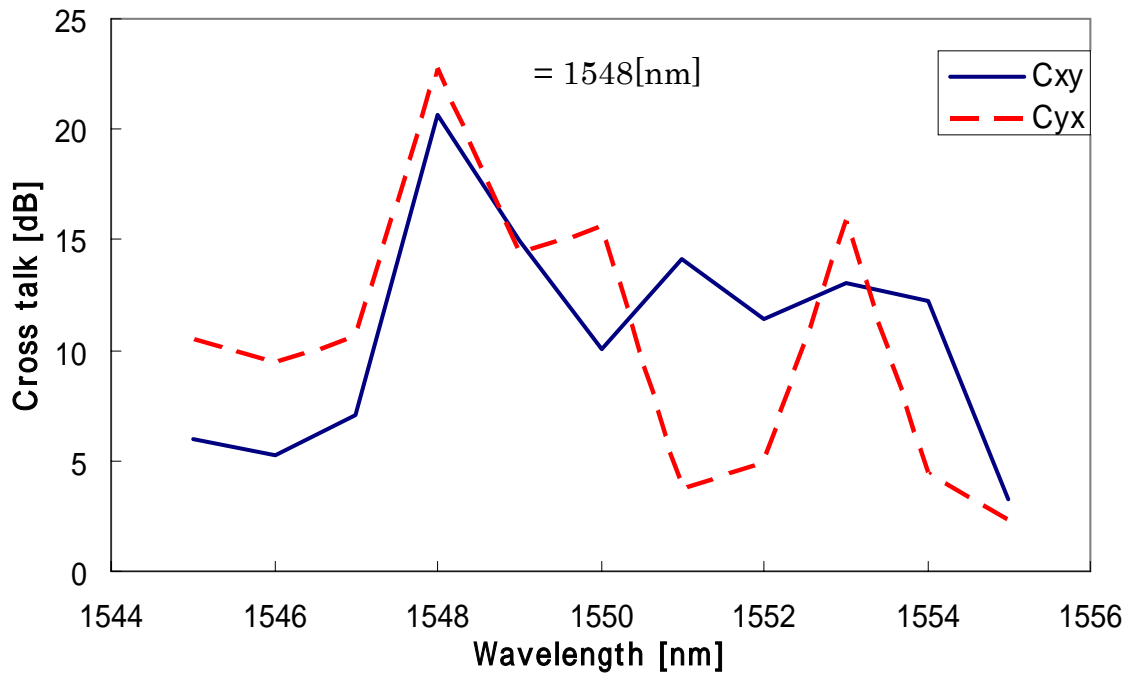


図 5.19 PMF-1FBG 形のクロストーク

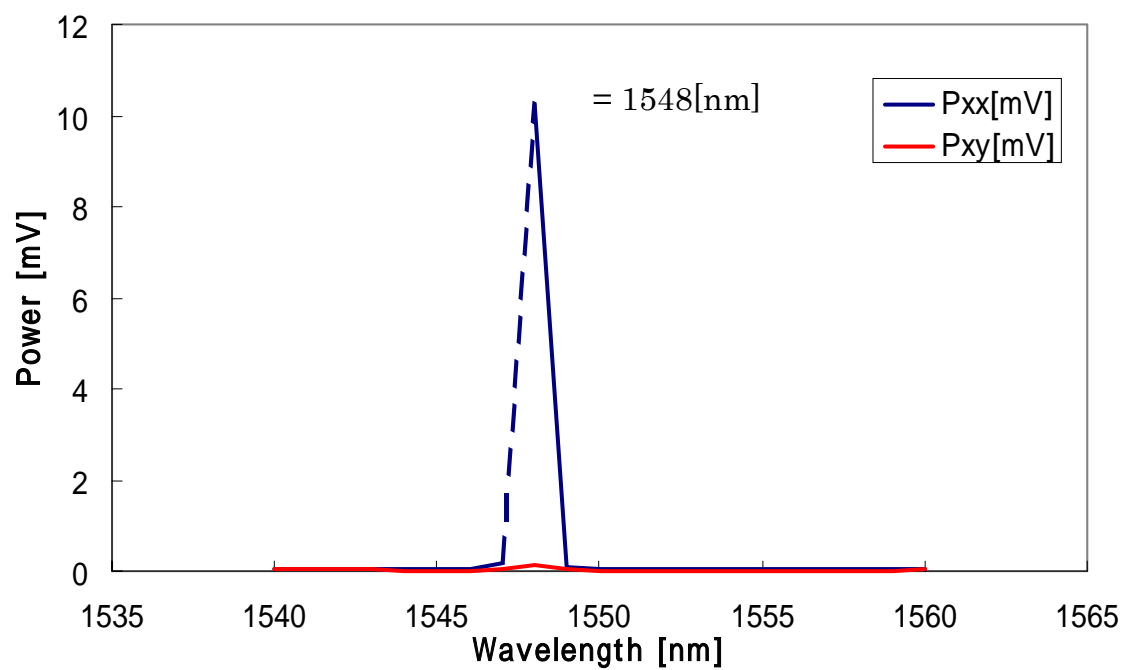


図 5.20 PMF-マツハツェンダ形の P_{xx} , P_{xy}

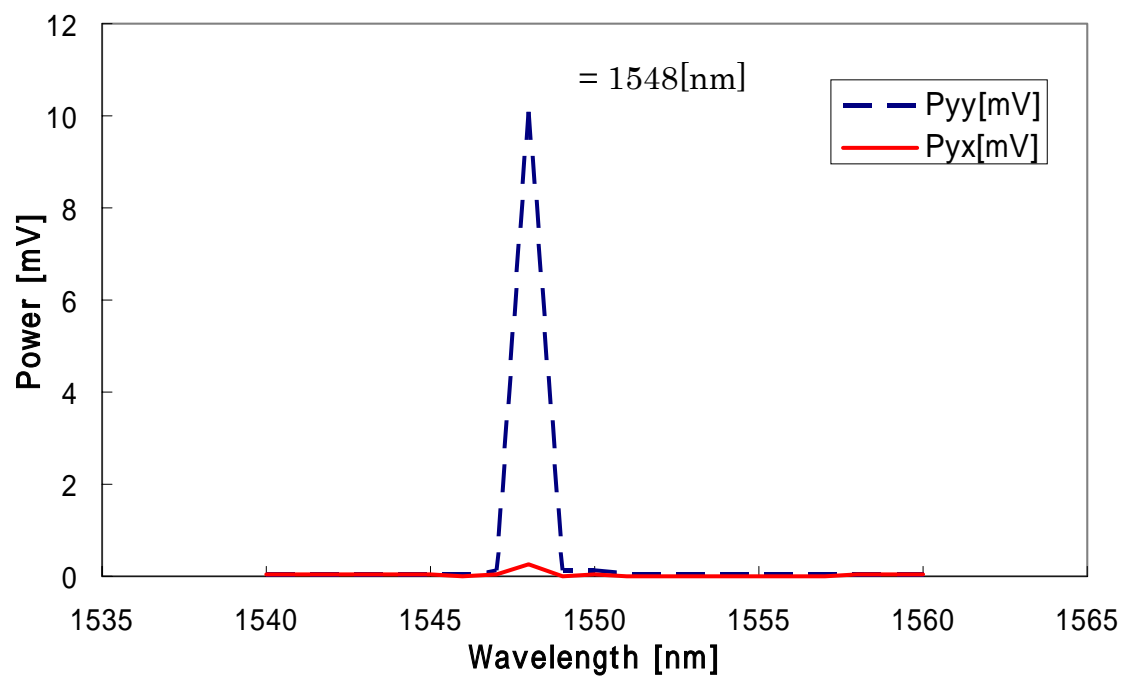


図 5.21 PMF-マツハツェンダ形の P_{yy} , P_{yx}

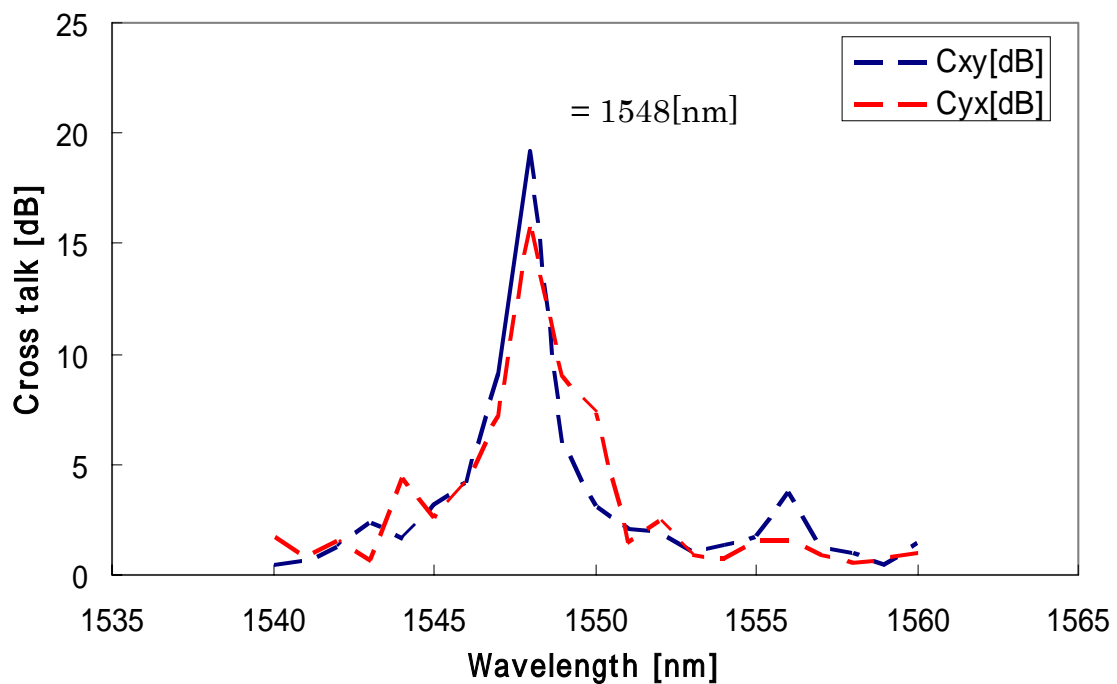


図 5.22 PMF-マツハツエンダ形のクロストーク

5.5 考察

5.5.1 Add・Drop 特性

図 5.5 の SMF-1 FBG 形の Drop 光を見ると、FBG のブラッグ反射により、約 1553nm の光が Drop されていることが分かる。また、図 5.6 の透過光では、ブラッグ反射波長の部分のみが透過せず、谷のようになっているのが確認できる。さらに、Add ポートよりブラッグ反射波長を入力することにより、図 5.7 の Add+透過光では谷の部分に山ができ、Add されていることが分かる。しかし、Drop によりできた谷は完全には埋まっていない。これは、FBG の半値幅よりも Add 光の半値幅が小さいためである。また、SMF-マツハツエンダ形、PMF-1 FBG 形および PMF-マツハツエンダ形においても同様な Add・Drop 特性が得られた。これにより、作製した 4 パターンの OADM 全てに Add・Drop 合分波機能があることが確認できた。

表 5.1 の各 OADM の反射率 R_D を見ると、SMF タイプ、PMF タイプともに 1 FBG 形よりもマツハツエンダ形のほうが反射率は高い。図 5.1 を見ても分かるように、1 FBG 形は、IN より光を入力すると光ファイバカプラにより、50:50 に分波され、入力光の 50% が FBG に反射される。反射された光は、さらに光ファイバカプラにより 50:50 に分波され、結果的に Drop からの光は入力光の 25% まで低下する。一方、図 5.2 に示すマツハツエンダ形では

2本のFBGを用いているため、光ファイバにより50:50に分波された光がそれぞれFBGにより反射され、さらに光ファイバカプラによりそれぞれ分波されるため、Dropからは入力50%の光が得られる。このことより、光の損失の点で見れば、マツハツェンダ形が優れているといえる。ただし、実際には1FBG形、マツハツェンダ形ともに、光ファイバカプラとFBGの融着部分の損失や、FBGの反射率、コネクタ部分の損失などの要因があるため、入力に対するDropにおける反射率はさらに低くなる。

マツハツェンダ形は、光ファイバカプラにより分波された光が、さらに光ファイバカプラにより合波されるため、マツハツェンダ部分(2つの光ファイバカプラの間)の長さが重要となると思われる。何故なら、長さが変わると、光路長が変わるため、合波する際、位相差が生じる問題がでてくる。例えば、波長 $\lambda=1550\text{nm}$ の場合、半波長分の 725nm の差があると互いの波の山と谷がちょうど打ち消しあってしまう。しかし、作製において長さを波長レベルで一致させることは不可能である。今回の測定では位相差の影響を確認するまでに至っていない。厳密に位相差も考える場合はマツハツェンダ部に屈折率制御による位相(光路長)調整が必要となると考えられる。また、マツハツェンダ形の場合、同特性のFBGを用いないと反射波長がずれてしまう。そのため、作製の容易さ、コストの低さの点で見れば、1FBG形が優れていると考えられる。

5.5.2 クロストーク

図5.17のPMF-1FBG形の P_{xx} および P_{yy} を見ると、波長 $\lambda=1548\text{nm}$ のみ P_{xx} の値が出力されていることが分かる。しかし、 P_{xy} ではほとんど光は出力されていない。一方、図5.18では、 $\lambda=1548\text{nm}$ のみに P_{yy} が出力され、 P_{yx} は、ほとんど光は出力されていない。つまり、 P_{xx} 、 P_{yy} ではFBGの反射波長が出力されるが、入力した偏波に直交する P_{xy} 、 P_{yx} ではほとんど光は出力されていないことが分かる。そして、クロストークは C_{xy} 、 C_{yx} とも20dB以上あるため、PMF-1FBG形は偏波面保存能力があるといえる。

一方、PMF-マツハツェンダ形もPMF-1FBG形と同様な特性を示している。また、クロストークも C_{xy} 、 C_{yx} ともに15dB以上はあるため、こちらも偏波面保存能力を持っているといえる。

しかし、PMFタイプのOADMの作製に用いたPANDA型FBGは、反射波長は約1550nmであったが、クロストークの測定では波長 $\lambda=1548\text{nm}$ で反射光が出力された。これは、測定に用いた偏光・分光特性評価装置の光源の波長のふり幅が1nmずつと粗く、精度に問題があるためと考えられる。

5.6 結言

作製したOADMは、光ファイバカプラ、FBGの性質を兼ね備え、Add・Drop合分波器

の機能をもっていることが確認できた。1 FBG 形は、マッハツェンダ形に比べ光の損失が大きいという欠点があることが分かった。一方で、1 FBG 形のほうが、マッハツェンダ形よりも作製が容易であり、コストも低くなると考えられる。

また、PANDA ファイバを用いた OADM を作製したところ、高いクロストーク値が得られ、偏波面保存形 OADM が実現できた。

第 6 節 結論

第 3 節では、シングルモード光ファイバカプラおよび偏波面保存光ファイバカプラの偏光・分光特性の測定を行い、それぞれの分岐比、偏光特性の違いが確認できた。測定したシングルモード光ファイバカプラの分岐比は 50 : 50、偏波面保存光ファイバカプラの分岐比は 10 : 90 であった。また、偏光特性では、偏光状態、偏光方位角ともシングルモード光ファイバカプラ、偏波面保存光ファイバカプラでは全く異なる特性が得られた。これは、偏波面保存光ファイバでは、コアに応力を付与しているためである。また、両カプラともスルーポートに対して、クロスポートに特性の劣化が見られた。

第 4 節では、FBG の作製および評価を行った。作製法には二光束干渉法を採用し、反射波長 $\lambda_B=1550\text{nm}$ に設定して作製を試みた。作製した 2 本の FBG は、FBG1 では、反射波長は設定値に近いが、反射率 R 、半値幅 $\Delta\lambda$ はよくなかった。FBG2 は、反射率 R 、半値幅 $\Delta\lambda$ はよい結果が得られたが、反射波長が大きすぎた。FBG の作製には、紫外線レーザーの出力パワー、照射時間により反射率、半値幅の良し悪しが変わってくると考えられる。さらに、二光束干渉法では、入射角を決定するミラーの精密な角度調整が非常に重要であることが分かった。また、温度特性の測定により、反射ピーク波長 λ_B は温度依存性があることが確認できた。温度上昇によって光ファイバが膨張し、FBG 部分の回折格子の周期が大きくなるためブラッグ反射波長が長くなったと考えられる。一方、反射率 R 、半値幅 $\Delta\lambda$ には温度依存性がないことが分かった。

第 5 節では、光ファイバカプラ、FBG を組み合わせた OADM の作製を試みた。作製には、シングルモード光ファイバ、偏波面保存光ファイバ (PANDA ファイバ) により、1 FBG 形、マッハツェンダ形の計 4 パターンの OADM を作製し、評価を行った。各 OADM とも、光ファイバカプラ、FBG の性質を兼ね備え、Add・Drop 合分波機能持っていることが確認できた。また、1 FBG に比べマッハツェンダ形の方が光の損失が少ないことが分かった。今回の測定では確認できなかったが、マッハツェンダ形は構造上、マッハツェンダ部の長さの差による位相差が問題となってくると考えられる。厳密に位相差も考慮して作製するには、マッハツェンダ形の長さを一致させることは不可能なので、屈折率制御による位相調整が必要となると考えられる。そのため、作製の容易さ、コスト面では 1 FBG が優れていると考えられる。また、第 4 節の FBG の温度特性の結果より、FBG の反射波長には温度依存性があるため、温度変化によって Add・Drop できる波長が変化してしまうと考えられる。

参考文献

- [1] 佐藤,他:「次世代分岐・挿入型 WDM 用グレーティングデバイス」,工学技術研究誌, 2002 .
- [2] 山下 真司 著:「光ファイバ通信のしくみがわかる本」,技術評論社,2002 ,
- [3] 香川,塚田,米田:「メトロ・アクセスにおける OADM」,古河電工時報 第 111 号, 2003 .
- [4] 三木 哲也,須藤 昭一 編:「光通信ハンドブック」,オプトロニクス社,2002 .
- [5] 川上 彰二郎,白石 和男,大橋 正治 共著:「光ファイバとファイバ形デバイス」,培風館,1996 .
- [6] 中山 亮:「光ファイバカプラの偏光・分光特性」,琉球大学工学部電気電子工学科卒業論文,2002 .
- [7] オプトロニクス社編集部:「速解 光サイエンス辞典」,オプトロニクス社,1998 .
- [8] Y. Namihira, et al.,: "Incident polarization angle and temperature dependence of polarization and spectral response characteristics in optical fiber couplers," Applied Optics, Vol.30, No.9, pp.1062-1069,1991 .
- [9] 波平,工藤,虫明:「光ファイバの機械的圧力の影響」,電子通信学会論文誌, IECE'77,Vol.60-C, No.7,pp.391-398,1977 .
- [10] 波平,他:「偏波保存光ファイバカプラの偏光・分光特性自動測定システム」,電子情報通信学会,光ファイバ応用技術研究会 技術報告 OFT2002-103 .
- [11] 川澤 俊夫:「光ファイバカップラの偏光・分光に関する基礎研究」,日本大学工学部電気電子工学科卒業論文,1987 .
- [12] 栖原 敏明 著:「光波工学」,コロナ社,1998 .
- [13] 大田,他:“ WDM システム用光ファイバグレーティングの開発 ”,古河電工時報 第 104 号,1999 .

第3章 PMD エミュレータに関する研究・開発

第1節 序論

1.1 研究の目的と背景

インターネットの爆発的な普及により、通信の中身は音声からデータトラフィックへと移行しつつある。このような高度情報化社会の到来に伴い、光ファイバを媒体とした光情報通信の発展は目覚ましいものがある。現在実用化されている太平洋横断光海底ケーブルシステムでは第3太平洋横断光海底ケーブルシステム(TPC-3)、第4太平洋横断光海底ケーブルシステム(TPC-4)及び第5太平洋横断光海底ケーブルネットワーク(TCN-5CN)がある。第3太平洋横断光海底ケーブルシステム(TPC-3)、第4太平洋横断光海底ケーブルシステム(TPC-4)は、光パルス信号をいったん電気信号に変換し、増幅、波形の整形、光パルスのリタイミングを行った後に再び新たな光パルス信号を伝送する再生増幅中継システムである。このような再生増幅中継システムにおいては、光パルス信号の劣化は各中継器間のみを考えれば十分であり、その主な原因は、各波長によって速度が異なるために発生する波長分散にあると考えることができた^[1]。

しかし、2000年から運用が開始された第5太平洋横断光海底ケーブルネットワークでは、国際通信の需要増大に対処するため、従来の再生増幅システムを使わず、エルビウム(Er)をドープした光ファイバ増幅器(EDFA: Er-Doped Fiber Amplifier)を用いた光直接増幅方式を用いている。光直接増幅方式では、再生増幅方式とは異なり、光パルス信号を電気信号に変換せずに増幅するため、光パルス信号の雑音や分散の影響によるパルス広がりを取り除くことができず、超長距離伝送に伴い、雑音成分も増幅しながら累積されていく。

このような光パルスの広がり原因として、波長分散(CD: Chromatic Dispersion)、変異依存性損失(PDL: Polarization Dependent Loss)、非線形現象(NL: Nonlinear Effects)、偏波モード分散(PMD: Polarization Mode Dispersion)等がある。これらの解決策としては、分散シフト光ファイバ(DSF: Dispersion Shifted Fiber)の使用や、入射偏光状態を高速変調する等が考えられるが、偏波モード分散は、他の要因に比べ、その補償が困難であるため、今後の超長距離伝送において、その特性を決定する重要なパラメータになると考えられる。

通常のシングルモード光ファイバ(SMF: Single Mode optical Fiber)では、直交する2つの偏波モード間において偏波モード結合(パワー交換)が発生する。

本研究では、調心機能を有する融着機を用いて、任意角度で偏波面保存光ファイバ(PMF: Polarization Maintaining optical Fiber)の融着を行い、擬似的に偏波モード結合を発生させ、モード結合のある場合の偏波モード分散について、実験的、及び理論的に検討を行い、偏波面保存光ファイバ(PMF)を用いて、目標である偏波モード分散(PMD)値を持つPMDエミュレータを作製する。

1.2 本研究の概要

第2節では、主に偏波モード分散 (PMD) について簡潔に記す。まず、偏光特性について述べる。次に、PMD の原理、モード結合、偏波面保存光ファイバ (PMF) について述べ、最後に、偏波モード分散測定法の種類について紹介する。

第3節では、PMD エミュレータの原理について述べる。また、今回用いる固定アナライザ法 (FA 法 : Fixed Analyzer Method) についても述べ、接続された光ファイバにおける PMD についても述べる。さらに、FA 法を用いたシミュレーションについても述べる。

第4節では、PMF を融着点 1 点、もしくは 2 点で、接続角度 0° 、 30° 、 60° でそれぞれ融着し、FA 法を用いて測定を行う。また、シミュレーションソフトを用いて、シミュレーションを行い、測定結果とシミュレーション解析結果をそれぞれ比較・検討し、シミュレーションソフトの評価を行う。

第5節では、融着点を 9 点、19 点、29 点、39 点、49 点とそれぞれ変化させて行き、それぞれの接続角度をランダムに変化させ、シミュレーションソフトを用い、多数回シミュレーションを行い解析結果を比較・検討する。また、これらの結果から、ある任意の PMD 値を持つ PMD エミュレータを作製する。

第6節 結論では、本論文の結論を述べる。

第7節では、本論文において今後の課題について述べる。

第2節 偏波モード分散 (PMD)

2.1 緒言

本節では主に偏波モード分散 (PMD: Polarization Mode Dispersion) について簡潔に記す。まず、偏光特性について述べる。次に、PMD の原理、モード結合、偏波面保存光ファイバ (PMF: Polarization Maintaining optical Fiber) について述べ、最後に、偏波モード分散測定法の種類について述べる。

2.2 偏光特性^[2]

光の振動方向は伝搬方向に対して垂直であり、この振動によって偏りを持った光を偏光という。偏光はそれ以上簡単な成分に分けることができない。偏光はまた、物質の性質を調べるための道具でもある。

z 軸方向に伝搬する光の電界を x 成分と y 成分に分けて表す。

$$\begin{aligned} E_x &= a_x \cos(\omega t - \beta z + \theta_x) \\ E_y &= a_y \cos(\omega t - \beta z + \theta_y) \end{aligned} \quad (2.1)$$

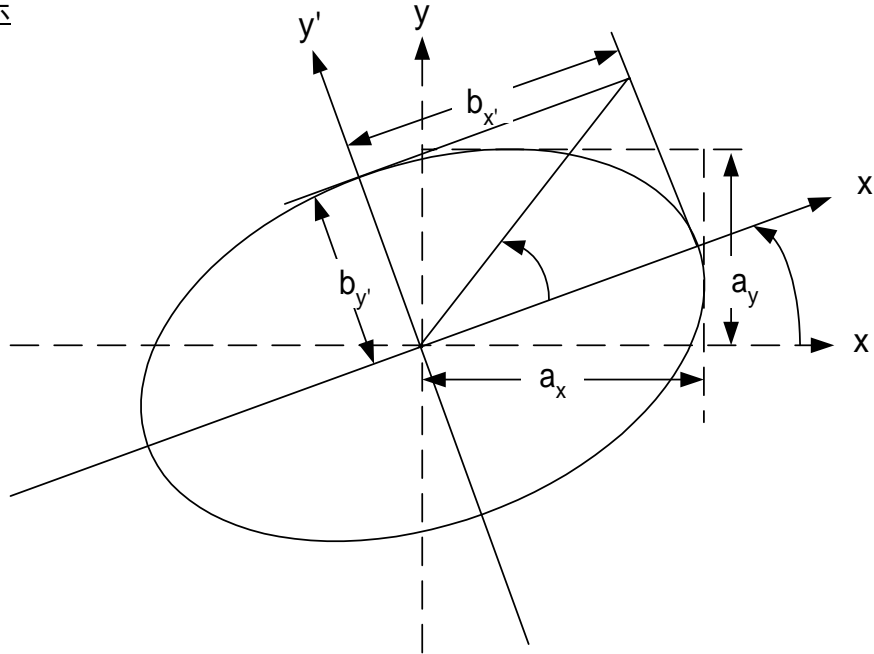
位相差 $\theta = \theta_y - \theta_x \quad (-\pi < \theta \leq \pi)$

(a : 最大振幅, z : 位置, ω : 角周波数, t : 時間, β : 伝搬定数, θ : 位相角)

電界ベクトルの方向は、 E_x , E_y 成分の合成方向となる。光が進むにつれて E_x , E_y 成分の相互の位置関係により、光波の電界成分の振動方向がどのような幾何学的図形を描くかによって、直線偏光、円偏光、楕円偏光に分けることができる (図 2.1 参照)。

$$\begin{aligned} \theta = 0, \pi & \quad \text{のとき, 直線偏光になる} \\ a_x = a_y, \theta = -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} & \quad \text{のとき, 楕円偏光になる} \\ & \quad \text{上記以外するとき, 楕円偏光になる。} \end{aligned}$$

楕円表示



$\left\{ \begin{array}{l} \phi: \text{楕円偏光の長軸の } x \text{ 軸からの傾き角} \\ \chi: \text{楕円率角} \end{array} \right.$

楕円率 $\tan \chi = \frac{b_{y'}}{b_{x'}}$

= 0 のとき, 直線偏光

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 \leq \chi \leq \frac{\pi}{4} \end{array} \right.$$

= $\pi/4$ のとき, 円偏光

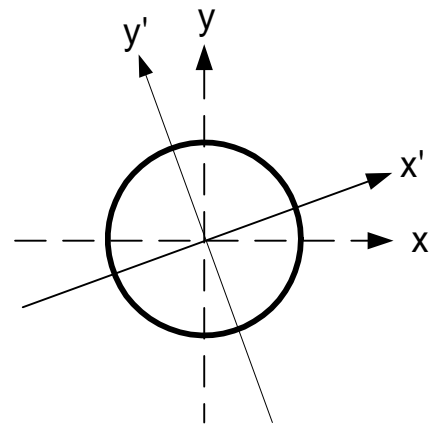
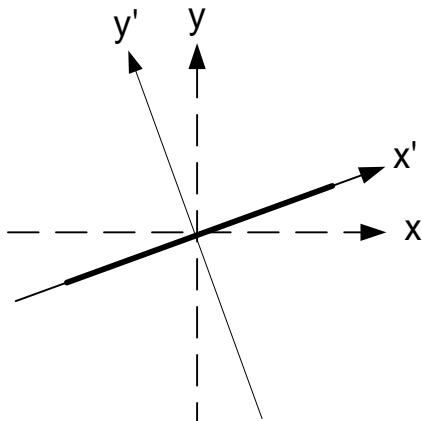


図 2.1 偏光特性の楕円表示

2.3 偏波モード分散の原理

光パルス信号の広がり（分散）などの雑音発生の大きな原因の 1 つとして、偏波モード分散（PMD）がある。シングルモード光ファイバ（SMF：Single Mode optical Fiber）においては、その軸対象性のため、直交する 2 方向に 2 つの偏波モードが存在する。光ファイバのコアが理想的な真円であり材料的にも均質である場合には、これら 2 つのモード間の群遅延差は生じない。しかしながら、実際の光ファイバではごくわずかではあるがコアが楕円化しているか、あるいは、種々の応力（側圧、曲げ、ねじれ、張力、および温度変化による熱応力など）を受けたりして、2 つのモード間に遅延差が生じる。これを PMD という（図 2.2）。この光ファイバにおける PMD は、光増幅器を用いた高密度光多重（DWDM：Dense Wavelength Division Multiplexing）伝送システム及び長距離光増幅中継海底ケーブルシステムなどにおいて、伝送距離を制限する重要な問題となるため PMD の高精度測定技術が必要となる。

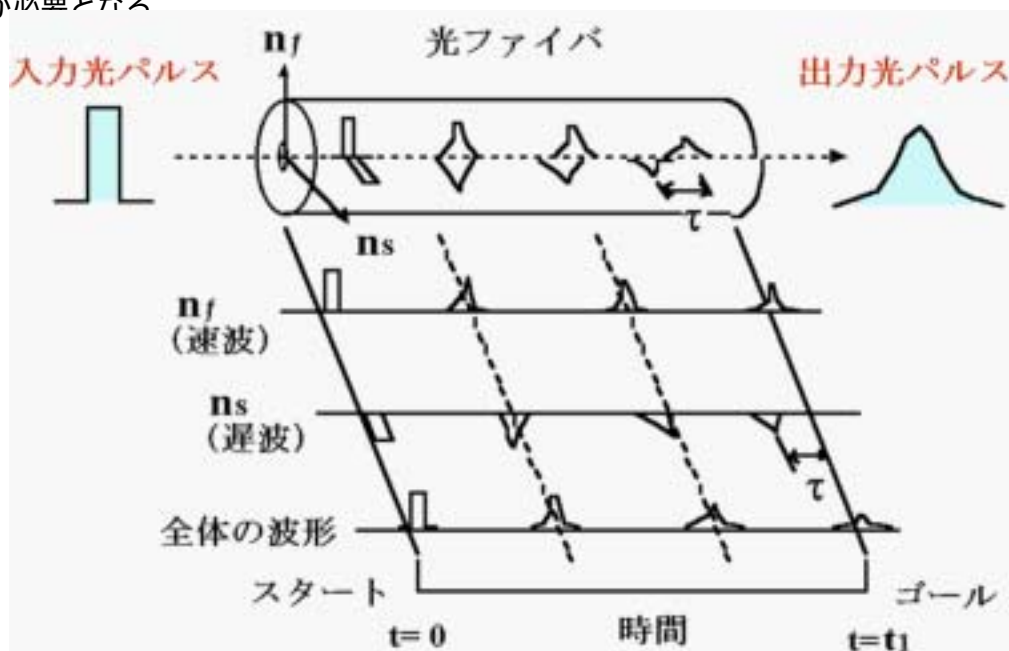


図 2.2 偏波モード分散の概念図

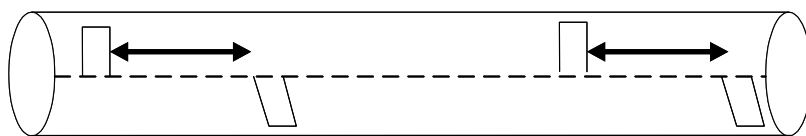
2.4 モード結合

偏波モード分散（PMD）測定における劣化要因の 1 つにモード結合がある（図 2.3 参照）。シングルモード光ファイバ（SMF）の断面は、理想的には真円であるが、実際にはきれいな真円ではない。この微小な歪みなどにより x モードと y モード間でパワー（光パワー）が頻繁に交換される。その他にも、光ファイバに応力が加わったり、風などにより揺らされたりなどの外乱によってもモード結合は発生する。図 2.4 にモード結合が有る場合と無い場合の固定アナライザ（FA 法）での測定結果例を示す。図 2.4（a）はモード結合が無い場合、波形の乱れもなくほぼ綺麗な正弦波状になっているのに対し、図 2.4（b）はモード結

合があるため波形に乱れが生じている．このような問題を解決するために作られた光ファイバを偏波面保存光ファイバ（PMF）という．以下で，PMF について詳しく述べることにする．

PMF

モード結合なし



SMF

モード結合あり

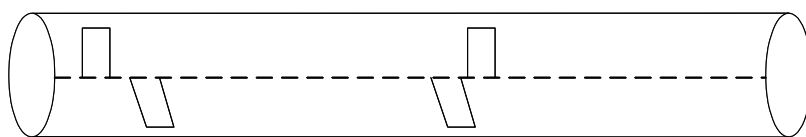


図 2.3 モード結合

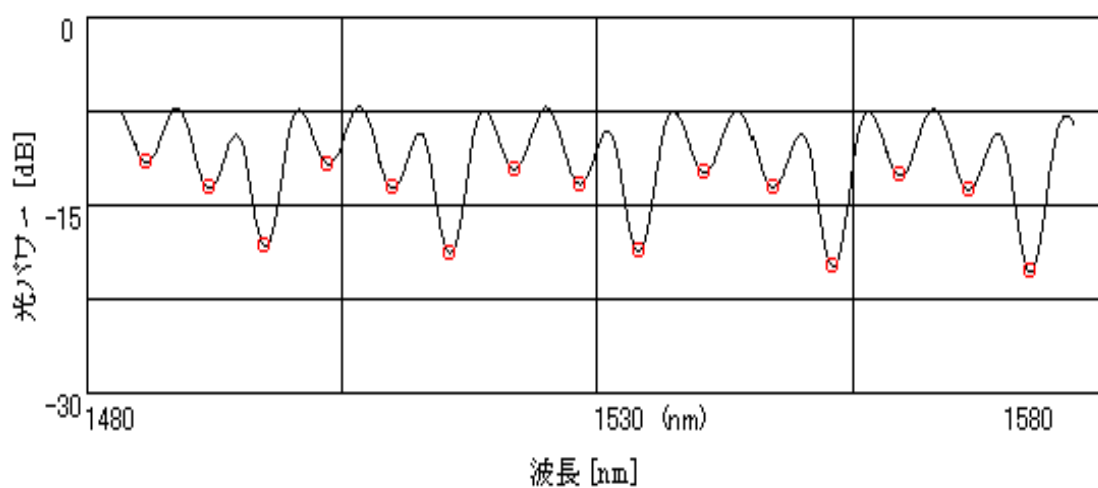
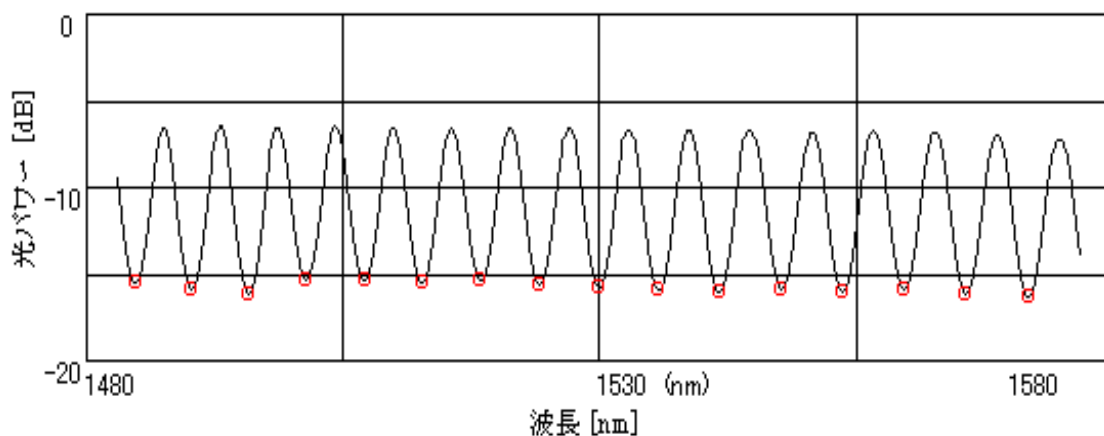


図 2.4 モード結合の有無の測定結果例

2.5 偏波面保存光ファイバ (PMF) [3]

偏波面保存光ファイバ (PMF) において複屈折率を発生させる方法としては、コア断面形状に異方性を持たせることで構造複屈折を大きくする、あるいは、コアに加わる応力に異方性を持たせることで応力複屈折を大きくすることが考えられ、それぞれの方法に対応した各種の PMF 構造が提案されている (図 2.5) [4]。ちなみに複屈折とは、物質が偏向方向によって異なる屈折率をもつ現象のことである。図 2.5 は (a) 楕円コア光ファイバ、(b) サイドピット及びサイドトンネル光ファイバ、(c) PANDA 光ファイバ、(d) Bow-Tie 光ファイバ、(e) 楕円ジャケットファイバとそれぞれ呼ばれるものである。図 2.5 (a) は、コアを楕円化することによって、図 2.5 (b) は、コアの両脇にクラッドよりもさらに低屈折率の部分あるいは空気穴 (図 2.5(b)の黒い部分) を設けることによって、 HE_{11^x} モードと HE_{11^y} モードの伝搬定数差を生じさせるもので、屈折率分布型に属する。これに対して、図 2.5 (c)、(d) および (e) は、応力型に属し、熱膨張係数が石英より 1 桁程度大きいガラス (図 2.5(c)、(d)、(e)の黒い部分) がコアに周囲に配置されている。線引き後に光ファイバが冷却する過程で、熱膨張係数の大きいガラス (応力付与部と呼ばれる) は強く収縮するので、コアに大きな応力 (あるいはひずみ) を発生させる。一般的には、 x 軸方向に大きな張力が発生し、 y 軸方向には圧縮力が発生する。応力を受けたガラスの屈折率は光弾性効果により変化する。 x 軸方向にのみ応力付与部がある場合、あるいは応力付与部の大きさが x 軸と y 軸方向で異なる場合、コア内の応力の大きさも異なり、結果的に HE_{11^x} モードと HE_{11^y} モードの感じるコアの屈折率自身が異なることになる。これによって、両偏波モード間の伝搬定数に差が生じることになる。ここでは、PMF の代表的なものである PANDA ファイバ (PANDA: Polarization-maintaining AND Absorption-reducing optical Fiber) について、構造と原理を説明する。

図 2.5 (c) は PANDA ファイバの断面図である。PANDA ファイバはコア、クラッド、応力付与部から構成される。コア、クラッド部分は基本的にシングルモード光ファイバ (SMF) と同様であり、コア部分の屈折率分布は使用波長でシングルモードとなる様に設定される。コア両脇の応力付与部はボロン等の熱膨張率が大きな元素が石英ガラスに添加されているため、純石英のクラッド部分よりも熱膨張率が大きくなっている。このため、光ファイバ線引時に高温となった PMF が常温まで冷却されると、応力付与部が収縮しようとして、コアの部分に対して引張応力が加わる。この結果、応力複屈折率が発生する。複屈折率の大きさは応力付与部へのボロン添加濃度、応力付与部の直径、応力付与部の間隔等によって変化するが、概ね 10^{-4} のオーダーであり、通常の SMF よりも 2 桁以上大きい値となっている。なお、PMF を使用した光部品を表 2.1 に示す。

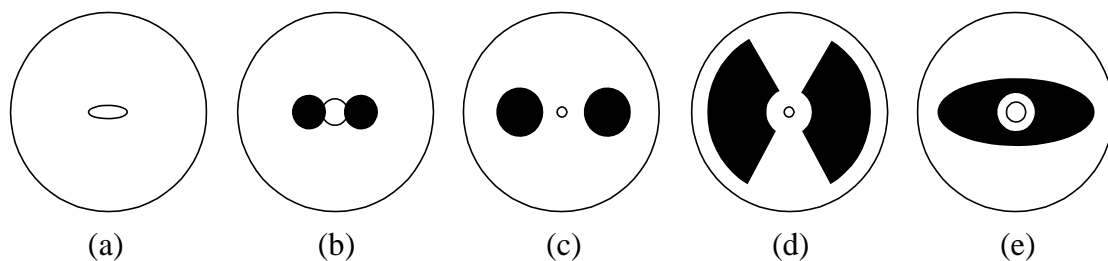


図 2.5 各種偏波面保存光ファイバ

表 2.1 PMF を使用した光部品

光部品名	機能
偏波保持光ファイバカップラ	直線偏波状態を保ったまま, 光の分岐/合流を行う
偏波分離/合成器	入射光を直交する偏波状態に分類する. もしくは, 直交する偏波状態の光を合成する.
ファイバ偏光子	任意の偏波状態の光から直線偏波の光のみを取り出す.
ファイバデポラライザ	偏光した光を無偏光状態にする.

2.6 偏波モード分散測定法の分類

偏波モード分散 (PMD) の測定法は, 時間領域での測定と, 周波数領域での測定の 2 種類に分類できる^[1,5]. 時間領域での測定では光ファイバ内を伝搬する x 軸と y 軸 (速軸と遅軸) の偏波を分離し, その群遅延時間差から偏波モード分散を求めている. 時間領域での測定法として, 干渉法がある. それに対して周波数領域での測定は, 入射光の波長変化による出力光の偏光状態の偏波モード分散を求めるが, 解析する光波の状態が光パワーか偏光状態かによって, さらに分類される. 光パワーの変化による測定法として, 固定アナライザ法 (FA 法: Fixed Analyzer Method) がある. 偏光状態としては, 偏光状態の解析法の違いにより, ジョーンズマトリックス (JME: Jones Matrix Eigenanalysis Method) 法, 偏光状態 (SOP: State of Polarization Method) 法に分類される (表 2.2). 本研究では FA 法を用いて測定, シミュレーションを行う. FA 法, それを用いたシミュレーションの原理についてはそれぞれ第 3 節で詳しく述べる.

表 2.2 各種偏波モード分散測定法の分類

	時間領域		周波数領域			
	空間形 干渉法	光ファイバ 形 干渉法	パワー	偏光状態		
			固定アナライザ法	偏光状態 法	ポアンカレ球法	ジョーンズマトリク ス法
光源部	広帯域光源		広帯域光源	波長可変光 源	波長可変光源	波長可変光源
光受光部	マイケルソン干渉計		光スペクトラムアナライ ザ	ストークスアナライザ (偏光解析器)		ポラリメータ
測定範囲	0.002 ~ 15 [ps]	0.15 ~ 10 [ps]	0.05 ~ 10 [ps]	0.025 ~ 20 [ps]	0.05 ~ 20 [ps]	0.01 ~ 10 [ps]

2.7 結言

偏波モード分散 (PMD) について簡潔に述べた。また、偏光特性について述べ、PMD の原理、モード結合及び、偏波面保存光ファイバ (PMF) についても述べた。最後に、偏波モード分散測定法の種類についても述べた。

次節では、今回用いた固定アナライザ法 (FA 法) について詳しく述べ、また、接続された光ファイバの PMD についても述べる。さらに、PMD エミュレータと、それを作製するために用いるシミュレーションソフトについても、次節で述べることにする。

第3節 PMD エミュレータ

3.1 緒言

本節では、主に PMD エミュレータについて述べる。まず、PMD エミュレータの原理について述べる。次に、本研究で用いた固定アナライザ (FA: Fixed Analyzer Method) 法について述べる。そして、接続された光ファイバの偏波モード分散 (PMD) についても述べ、最後に、エミュレータを作製するための FA 法を用いたシミュレーションについて述べる。

3.2 PMD エミュレータの原理

超長距離伝送などに用いられる光ファイバは非常に長いため、その光ファイバの諸特性を測定するのは困難である。そこで、現在では、その光ファイバの偏波モード分散 (PMD: Polarization Mode Dispersion) 値と同じ値を短い光ファイバで擬似的に実現させて、それを測定する事で伝送に用いられている光ファイバの諸特性を得ようという試みが行われている。このように、非常に長い光ファイバと同値の偏波モード分散を、擬似的に短い光ファイバで実現させた、この短い光ファイバを PMD エミュレータと言う。ちなみに、エミュレータとは、あるシステム上で他の OS や CPU の機能を再現し、その OS(CPU)向けのアプリケーションソフトを動作させるソフトウェア全般の事である。動詞のエミュレート (emulate) は「競い合う」、「模倣する」という意味を持っていて、一般的にエミュレータというと、パソコン上でゲーム機や OS を動作させるものが有名だが、今回は PMD エミュレータということで、PMD 値を擬似的に実現させたものとする。また、PMD エミュレータは、以上で述べた用途の他に、偏波モード分散 (PMD) 補償器として用いられることもある。

本研究では、前者で述べた用途のための PMD エミュレータを作成する事にする。作成方法は、以下に示すシミュレーションにより解析を行い、そのデータをもとに、偏波面保存光ファイバ (PMF) を用い、任意の角度で融着することにより、擬似的に目標である偏波モード分散 (PMD) 値を実現させる (以下の図 3.2 参照)。

3.3 固定アナライザ法^[1]

図 3.1 に固定アナライザ法 (FA 法) の測定系を示す。測定法には、広帯域光源と光スペクトラムアナライザを用いる方法と、波長可変光源と光パワーメータを用いる方法の 2 種類がある。いずれも入射光の波長変化に伴う出射光の偏光状態の変化を光強度の変化として見るものであるが、本研究では、の測定手法により測定を行った。

の測定法は、光源からの光は、ポラライザ、 $1/4$ ($1/4$ 波長板)、 $1/2$ ($1/2$ 波長板) を通って、任意の偏光状態となり、測定試料の出射端では、アナライザを通して、光スペクトラムアナライザで受光される。入射光による出射端における偏光状態の周期的変化を光強度の変化として測定する。先ほどのアナライザを 90° 回転させることで、位相が $1/2$ ずれた波形を観測している。周波数領域での偏波モード分散は、偏光状態の 1 周期分の変化に相当する周波数幅の逆数で定義されている。

$$\tau = \frac{1}{\Delta f_{2\pi}} = \frac{1}{2} \frac{1}{\Delta f_{\pi}} = N \frac{1}{\Delta f_n} \quad (3.1)$$

- 但し f_2 : 光状態の 1 周期分の変化に相当する周波数幅
 f : 偏光状態の 1/2 周期分の変化に相当する周波数幅
 f_n : 偏光状態の N 周期分の変化に相当する周波数幅

また, f を Δf を用いて表すと次のようになる.

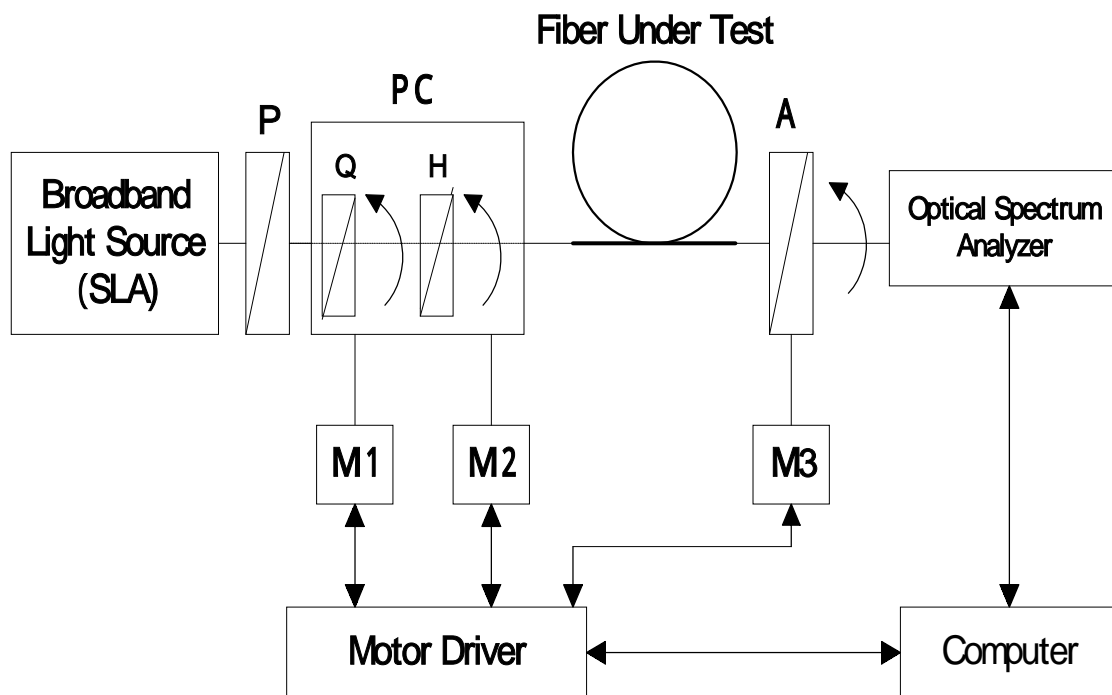
$$\Delta f = f_n - f_1 = \frac{c}{\lambda_n} - \frac{c}{\lambda_1} = c \frac{\lambda_1 - \lambda_n}{\lambda_1 \lambda_n} \quad (3.2)$$

アナライザが 0° , 90° のときの波形を観測しているので, 隣り合う谷と谷は, 偏光状態の 1/2 周期分の変化に相当する. 光パワーの変動の谷の波長と谷の数 (偏光状態の周波数 + 1) より, モード分散 τ は, 次式によって算出される.

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{1}{f_n} = \frac{1}{2cN} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i \lambda_{i+1}}{\lambda_{i+1} \lambda_i} \quad (3.3)$$

- 但し $N = n - 1$
 N : 偏光状態の周波数
 n : 谷の数
 λ_i : i 番目の谷の波長
 c : 光速

固定アナライザ法 (FA 法) は, 入射光の偏光状態によって偏波モード分散の値が変化するため, 本装置では入射側の波長板の組み合わせを変え, 4 種類の入射偏光状態における偏波モード分散の平均値を測定値として採用している. 表 3 - 1 に示すように, モータ M_1 , M_2 , M_3 によって, 波長板の組み合わせを変える.



P:Polarizer
 A:Analyzer
 Q:Quarter waveplate($\lambda/4$ 波長板)
 H:Half waveplate($\lambda/2$ 波長板)
 M:Motor
 PC:Polarization Controller

図 3.1 固定アナライザ (FA) 法の測定系

3.4 接続された 2 本の偏波面保存光ファイバの偏波モード分散

偏波面保存光ファイバ (PMF) は上でも説明したように、コアを楕円化させたり応力を付与することにより x 軸、及び y 軸のモード間の伝搬定数差 $\beta_x - \beta_y$ を大きくした光ファイバであり、2 つのモードは結合することなく伝搬する。しかし、この PMF を任意の角度ずらして融着することにより、融着部では接続角度に依存した偏光モード結合が発生すると考えられる。

図 3.2 に示すように n 本の PMF が接続されているとする。n 本目の光ファイバ出射端での電界ベクトル E_n は次式の行列によって表される^[6]。

$$E_n = D_n * R_{n-1} * E_{n-1} \quad (3.4)$$

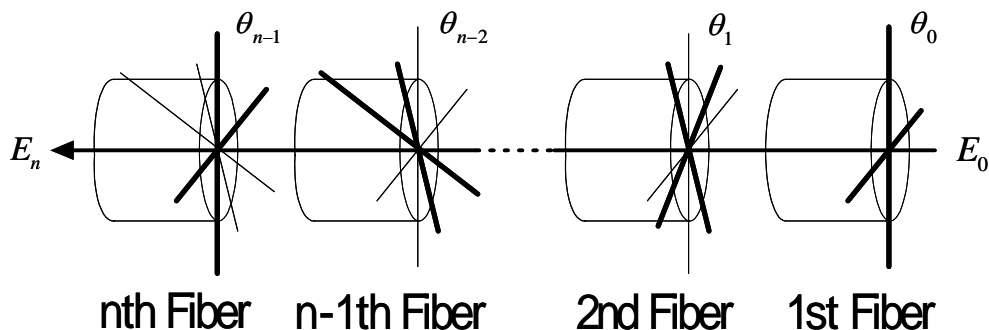
なお, (2.2) 式中の D_n , 及び R_{n-1} は, それぞれ n 番目の光ファイバの遅延行列, 及び n 番目と $n-1$ 番目の光ファイバ間の回転行列を表すものであり, 次式 (2.3), 及び (2.4) によって表される.

$$D_n = \begin{pmatrix} \exp[-j\omega(\tau_n/2)] & 0 \\ 0 & \exp[-j\omega(-\tau_n/2)] \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

但し ω : 角周波数
 τ_n : n 番目の光ファイバの偏波モード分散

$$R_{n-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{n-1} & \sin \theta_{n-1} \\ -\sin \theta_{n-1} & \cos \theta_{n-1} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

但し θ_{n-1} : n 番目と $n-1$ 番目の光ファイバの接続角度



n 番目の光ファイバ出力端での電界

$$E_n = D_n * R_{n-1} * E_{n-1}$$

D_n : 遅延行列

R_{n-1} : 回転行列

図 3.2 接続された光ファイバにおける電界

3.5 固定アナライザ法によるシミュレーション

固定アナライザ法 (FA 法) をモデルとしたシミュレーションは、第 2 節の式 (3.4) ~ 式 (3.6) を用い、入射光の波長を変化させることにより可能となる。今回の解析では、1450[nm] ~ 1650[nm] の 200[nm] とした。また、試料からの出射光のベクトル E_{out} を $E_{out} = (E_x, E_y)$ とすると、偏光軸を θ だけ傾けたアナライザからの出力 I_{out} は次式で表される [7]。

$$I_{out} = \left| E_x \cos \theta + E_y \sin \theta \right|^2 \quad (3.7)$$

今回の解析では、アナライザは主軸に対して 45° 傾いているものとした。なお、試料への入射光 E_0 の偏光状態を式 (3.5) に示す。1 番目の試料には角度 $\theta_0 = 0^\circ$ で入射するものとした。

$$E_0 = \begin{pmatrix} \exp(j\omega t) \\ \exp(j\omega t) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

3.5 結言

PMD エミュレータの原理について述べた。また、今回測定に用いた固定アナライザ法 (FA 法) についても述べ、さらに、接続された光ファイバの偏波モード分散 (PMD) と、PMD エミュレータを作製するために用いた、FA 法を用いたシミュレーションソフトの原理についても述べた。

次節では、FA 法を用い測定を行い、シミュレーションソフトの評価を行う。

第4節 シミュレーションソフトの評価

4.1 緒言

本節では、第3節で述べた固定アナライザ (FA: Fixed Analyzer Method) 法を用いたシミュレーションの評価を行う事を目的とする。本研究では、0.3, 0.7[m]の偏波面保存光ファイバ (PMF: Polarization Maintaining optical Fiber) を2本用意し、これらを接続角度 0° 、 30° 及び 60° で接続した時のシミュレーション解析結果と測定結果を比較し、さらに、0.3[m] 2本と0.4[m]の計3本のPMFを、接続箇所2箇所、接続角度 0° 、 30° 及び 60° でそれぞれ接続した時のシミュレーション解析結果と測定結果を比較・検討する。なお、今回は、偏波モード分散 (PMD: Polarization Mode Dispersion) の値が $1.34[\text{ps/m}]$ のPMFを用いた。

4.2 測定及びシミュレーション解析結果

表4.1, 図4.1に測定及び解析結果を示す。表4.1より、融着点1点 (偏波面保存光ファイバ2本接続) の場合の、接続角度 0° 、 30° 、 60° で接続した時の解析結果と測定結果を見比べると、多少誤差はあるもののほとんど近い値が得られている。但し、本研究では、1本目の光ファイバを0.3[m]、2本目を0.7[m]とし、光ファイバの全長を1[m]とした。

また、融着点2点 (偏波面保存光ファイバ3本接続) の場合の接続角度の表し方が0 - 30となっているが、これは1本目の光ファイバと2本目の光ファイバを接続した接続角度が 0° で、2本目と3本目を接続した接続角度が 30° である事を示している。なお、本研究は、1本目の光ファイバを0.3[m]、2本目の光ファイバを0.4[m]、3本目の光ファイバを0.3[m]とし、光ファイバの全長を1[m]とした。これら接続角度各々の時の測定結果と解析結果を見比べてみると、融着点1点の時と同様、多少の誤差は見られるもののほとんど近い値を得られていることが確認できる。

表4.1を図4.1に示すように、シミュレーション解析結果と測定結果の比較としてまとめてみると、図4.1からも、以上で述べたように、どの接続角度でも、解析結果と測定結果はほぼ近い値が得られている事が確認できる。

表 4.1 測定結果とシミュレーション解析結果

		PMD [ps]	
融着点	接続角度 [°]	解析結果	測定結果
1	0	1.34	1.34
	30	1.22	1.19
	60	0.98	0.91
2	0-0	1.27	1.27
	0-30	1.14	1.20
	0-60	0.85	0.84
	30-0	1.23	1.22
	30-30	1.27	1.22
	30-60	1.04	1.01
	60-0	0.97	0.94
	60-30	0.73	0.78
	60-60	0.88	0.88

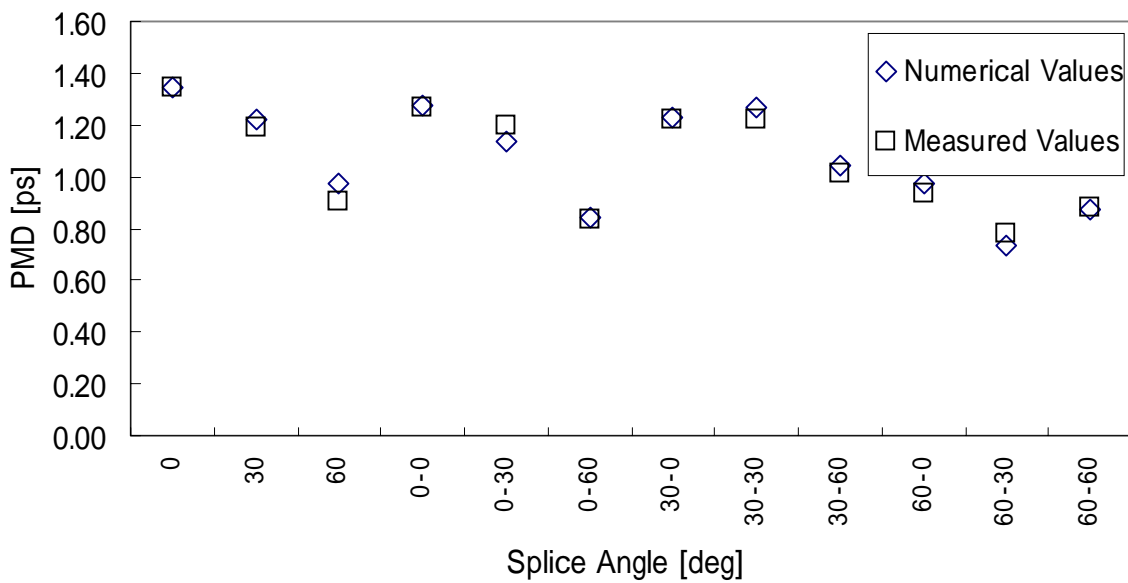


図 4.1 測定結果とシミュレーション解析結果の比較

4.3 比較・検討

偏波面保存光ファイバ (PMF) を 2 本, もしくは 3 本用いて, 任意の角度で各々接続し, その時の偏波モード分散 (PMD) 測定を, 固定アナライザ (FA: Fixed Analyzer Method) 法とそれを用いたシミュレーションにより, 測定及び解析を行った. 表 4.1 より, 1 点融着 (PMF2 本接続) の場合を見てみると, 接続角度各々において, シミュレーション解析結果と測定結果は, 微小の誤差があるものの, ほぼ近い値が得られている. この微小の誤差の原因として, 接続誤差と, 測定誤差が考えられる.

本研究では, 例えば, PMF2 本接続して測定を行う場合, まず接続角度を 0° で融着して測定を行った後, 接続した光ファイバをもう 1 度切り離し, 次に接続角度を 30° にして融着し, というように, 同じ光ファイバを用いて測定を行ったため, 何度も切り離しているうちに, 光ファイバ自体の長さが元の長さよりも短くなってしまった事が考えられる. また, 今回測定では, PMF の 1 つである PANDA 光ファイバ (PANDA: Polarization-maintaining AND Absorption-reducing) を用いたが, PANDA 光ファイバはコアの両脇にボロンが注入されているため, 接続する際にそれも合わせるように接続を行わなければならない. そのため, 30° で融着しても, 実際には 32° など, 接続角度に多少の誤差を含んで融着されてしまう. そのため, それが測定結果で微小の誤差として生じてしまったとも考えることができる. 更に, 測定では, PMF を任意の接続角度で融着した後, この融着した光ファイバの両端に, 光コネクタを接続するため, その接続部分の PMD も含まれてしまい, それが誤差として生じたとも考えられる.

表 4.1 より, 2 点融着 (PMF 3 本接続) の場合についても見てみると, 1 点融着と同じように, 微小の誤差はあるものの, ほぼ近い値が得られている. この微小の誤差の原因もまた, 以上の, 1 点融着時の微小の誤差の原因として述べたものと同じものだと考えることができる.

図 4.1 は, 表 4.1 をグラフにしたものである. この図からもわかる通り, 各々の接続角度で, 接続した時のシミュレーション解析結果の PMD 値と, 測定結果の PMD 値はほぼ重なっていることがわかる. 接続角度 60° の 1 点融着の場合と, $0^\circ - 0^\circ$ の 2 点融着の場合が最もシミュレーション解析結果と測定結果の誤差が大きいが, この誤差も表 4.1 からわかる通り, ほとんど $0.07[\text{ps}]$ 程度であり, 微小なので, ほとんど同値が得られたと考えても良いと言える. その他の点は, 誤差が $0 \sim 0.05[\text{ps}]$ 程度なので, ほとんど同値が得られている. これらの結果から, シミュレーション解析結果と測定結果は比較的良く一致することが確認できた. よって, 次節では, このシミュレーションソフト^[7]を用い, 接続角度をランダムに変化させ, 多数回シミュレーションを行い, その結果を比較・検討する事にする. さらに, このシミュレーションを用いて, 任意の PMD 値を持つ PMD エミュレータを作製し評価を行う.

4.4 結言

固定アナライザ法 (FA 法) を用いて測定を行い, FA 法を用いたシミュレーションの評価を行った. 融着点 1 点の場合と 2 点の場合において, 接続角度を 0° , 30° , 60° でそれぞれ接続した場合の測定結果とシミュレーション解析結果は, 比較的良く一致したことがわかった.

次節では, このシミュレーションソフトを用い, 接続角度をランダムに変化させ, 多数回シミュレーションを行い, その結果を比較・検討し, さらに, そのシミュレーション解析結果を用いて, 任意の PMD 値を持つ PMD エミュレータを作製し評価を行うことにする.

第 5 節 PMD エミュレータの作製

5.1 緒言

本節では, 第 3 節で述べた固定アナライザ (FA: Fixed Analyzer Method) 法を用いたシミュレーションソフトを用い, 融着点を 9 点, 19 点, 29 点, 39 点, 49 点とそれぞれ変化させて行き, それぞれの接続角度をランダムに変化させ, 多数回シミュレーションを行い解析結果を比較・検討する. また, シミュレーション解析結果より, 目標の偏波モード分散 (PMD: Polarization Mode Dispersion) 値を持つ PMD エミュレータを作製する. 本研究では, 9 点融着で PMD 値が約 $0.61[\text{ps/m}]$ を持つ PMD エミュレータを作製することにする. また, エミュレータの長さは全長 $2[\text{m}]$ とし, 偏波面保存光ファイバ (PMF: Polarization Maintaining optical Fiber) を $0.2[\text{m}]$ ずつ, 10 本融着したものとする.

5.2 PMD 接続回数特性の解析結果

図 5.1~5.9 に, 融着点 9 点, 19 点, 29 点, 39 点, 49 点時の各々において, 多数回シミュレーションを行った時の偏波モード分散 (PMD) 特性をそれぞれ示す. 横軸が PMD 値となり, 縦軸はその PMD 値が得られた回数となっている. 本研究は, PMD 特性が Maxwell 分布となるかどうかを, それぞれの場合で比較し, 検討を行う. また, 本研究で用いる Maxwell 分布の近似式を式 (5.1) に示す. また, 図 5.10~図 5.14 に, 上で述べた融着点各々においてのシミュレーション解析結果例を示す.

$$y = Ax^2 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.1)$$

但し, A: 任意定数

: (x について) の標準偏差

図 5.1 は融着点 9 点の偏波面保存光ファイバ (PMF) 10 本融着時の 500 回分の PMD 回数特性である。この解析結果は Maxwell 分布と全く異なった分布となった。そこで、シミュレーション回数を増やし、1000 回行った時の PMD 回数特性が図 5.2 である。しかし、PMD 値を得た回数が各々増えただけで図 5.2 も図 5.1 とほぼ変わらず似た分布を示した。そこで、さらにシミュレーション回数を増やし、2000 回行った PMD 特性が図 5.3 である。しかし、これもまた図 5.2 の時と同様、PMD 値を得た接続回数が各々増えただけで図 5.1、図 5.2 とほぼ変わらず似た分布となった。次に、融着点数を 19 点に増やし、2000 回シミュレーションを行った時の PMD 回数特性を図 5.4 に示す。この解析結果は、図 5.1 ~ 図 5.3 とは違い、わずかではあるが、目的である Maxwell 分布に近い分布となった。そこで、シミュレーション回数を増やし、3000 回行った時の PMD 回数特性を図 5.5 に示す。これもまた、わずかだが図 5.4 よりも Maxwell 分布に近い分布となった。このようにして、融着点を 29 点、39 点、49 点と増やしていき、各々 3000 回シミュレーションを行った時の PMD 回数特性を図 5.6 ~ 図 5.8 に示す。融着点が 29 点より 39 点、39 点より 49 点の方が、PMD 回数特性はより Maxwell 分布に近い分布になった。また、融着点数 49 点において、5000 回シミュレーションを行った時の PMD 回数特性を図 5.9 に示す。これもまた、図 5.8 よりはずかには Maxwell 分布に近い分布となった。なお、図 5.5 ~ 図 5.9 において、式 (5.1) の Maxwell 分布の近似式を用いて近似曲線を引くことにする。但し、式 (5.1) の A の値は任意に与えるものとする。また、図 5.1 ~ 図 5.3 より、9 点融着時には PMD 値は約 0.9[ps] の値を最も多く取ることがわかり、図 5.4 ~ 5.5 より、19 点融着時には約 0.5[ps]、図 5.6 ~ 5.7 より、29 点融着時には約 0.7[ps]、39 点融着時には約 0.8[ps]、図 5.8 ~ 5.9 より、49 点融着時には約 1.4[ps] の値を、それぞれ最も多く取る事がわかった。図 5.10 ~ 図 5.14 においては、融着点を増やしていくと、PMD の分布がより複雑になっていくのが分かった。

5.3 PMD エミュレータの作製結果

本研究では、偏波面保存光ファイバ (PMF) を 9 点融着した時の PMD 値である、約 1.21[ps] (0.61[ps/m]) を持つ PMD エミュレータを作製する。PMD エミュレータの全長は約 2[m] であり、今回は PMD 値 1.51[ps/m] の PMF を利用する。作製した PMD エミュレータを固定アナライザ法 (FA 法) を用いて測定し、解析結果と比較し検討を行う。

写真 5.1 に、PMD エミュレータの試作器を示し、写真 5.2 に、PMD エミュレータの試作器の概観の様子を示す。

試作した PMD エミュレータの測定結果は、1.20[ps] となった。これは、今回の目標値でもある 1.21[ps] と比較しても比較的近い値が得られた。ここで、測定結果と解析結果の例を図 5.16 及び、図 5.17 に示す。

5.4 比較・検討

まず、図 5.1～図 5.3 において、融着点が 9 点の場合、シミュレーション回数を 500, 1000, 2000 回と増やしていった時の分布を見てみると、各偏波モード分散 (PMD) 値を得た回数が増えただけで、分布の概形に変化はほとんど見られなかった。図 5.4 及び図 5.5 において、融着点が 19 点の場合、図 5.4, 図 5.5 はいずれも、図 5.1～図 5.3 に比べてわずかではあるが Maxwell 分布に近い分布となっている。そこで、図 5.5 より式 (5.1) を用い、Maxwell 近似曲線にフィッティングすると、かなりのばらつきはあるが、図 5.1～図 5.3 よりは明らかに Maxwell 分布に近い分布になっていることが分かる。また、図 5.6～図 5.9 も同様に Maxwell 近似曲線比較してみると、29 点よりは 39 点、39 点よりは 49 点の方がより Maxwell 分布に近い分布を取ることが分かる。また、図 5.8 と図 5.9 を見比べると、シミュレーション回数を増やすとより Maxwell 分布に近い分布を取ることとわかる。以上の事より、融着点を増やしていき、シミュレーション回数を増やしていくとより Maxwell 分布に近い分布を得られると考えることができる。これは、融着点が増えると、モード結合が頻繁に発生するため、より PMD 値がランダムに変化するためだと考えられる。また、回数を増やすと Maxwell 分布と近い分布が得られるのは、シミュレーションを 1 回行う度に接続角度をランダムに与えるため、PMD 値がよりランダム変化し、たくさんの PMD 値を得ることができるためだと考えられる。

次に、図 5.10～図 5.14 についても見ていくと、融着点が増えると、PMD 分布が複雑になってくるのが分かる。これは、上でも述べたように、モード結合の発生が関係してくると考えられる。第 2 節でも述べたように、通常、PMF はモード結合の発生を防ぐために作られた光ファイバなので、モード結合は発生しない。しかし、PMF2 本を任意の接続角度で接続すると、この接続した光ファイバ内ではモード結合が発生するようになる。よって接続点をどんどん増やしていくと、光ファイバの長手方向でモード結合が発生することになる。その結果として、図 5.10～図 5.14 のように、分布がどんどん複雑な分布になっていっているものと考えられる。ちなみに、今回 PMD エミュレータを作製するにあたり、ある PMD 値を持つことができるのは、各融着点で任意の角度でそれぞれ融着し、擬似的にモード結合を発生させているためである。

最後に、今回作製した PMD エミュレータについて述べる。今回は、5.1, 5.2 節でも説明したが、PMD 値 1.51[ps/m]の PMF0.2[m]を 10 本用い、これらを任意の角度で接続することにより、約 1.21[ps]の PMD 値を持つ、全長 2[m]の PMD エミュレータを作製した。ここで、図 5.16, 図 5.17 は波長帯域が異なるため波形の比較はできないが、固定アナライザ (FA) 法の場合、第 3 節の式 (3.3) より、分布の谷の数で PMD 値が決まるので、波長帯域が異なっても PMD 値自体の比較はできる。測定結果の PMD 値とシミュレーション解析結果の PMD 値を比べると、多少誤差はあるもののほぼ近い値が得られていることがわかる。この微小の誤差の原因として、第 4 節の 4.3 節であげた接続誤差が考えられる。今回 0.2[m]の PMF を準備したが、融着する際、接続面を平らにするため、微小の長さだけ切ら

なければならない。これを 10 本の PMF 全部に行ったため、測定と解析の結果に微小の誤差が生じたと考えられる。また、接続角度も、第 4 節で述べたが、今回用いた PMF は、PANDA ファイバと呼ばれるもの（図 2.4 参照）で、コアの両脇部分にボロンが注入されており、融着の際、このボロンも合わさないといけないため、接続角度が微小にずれて接続されてしまった事も原因の 1 つと考えられる。また、測定を行うため、PMD エミュレータの両端にコネクタを接続したため、光コネクタ部分の PMD 値も含まれてしまったことも誤差の原因挙げられる。

5.5 結言

固定アナライザ (FA) 法を用いたシミュレーションソフトを用い、融着点を 9 点、19 点、29 点、39 点、49 点とそれぞれ変化させて行き、それぞれの接続角度をランダムに変化させ、多数回シミュレーションを行った解析結果を比較・検討した。また、シミュレーション解析結果より、9 点融着時の PMD 値である、約 1.21[ps]の偏波モード分散 (PMD) 値を持つ PMD エミュレータを、全長 2[m]で作製し、これを測定し、比較・検討を行った。

第 1 節では研究背景として、光ファイバ増幅器 (EDFA) に出現により、光ファイバ伝送システムが大きく進展したが、EDFA を使用した光増幅中継伝送システムでは光パルス波形を整形せず、長距離に渡って伝送するため、信号の歪みの累積が問題になると述べ、その原因の一つとして偏波モード分散があると述べた。

第 2 節では、主に偏波モード分散 (PMD) について簡潔に記した。まず、偏光特性について述べた。また、モード結合についても、PMD 測定に及ぼす影響を踏まえて述べ、さらに、モード結合の発生を防ぐために作られた偏波面保存光ファイバ (PMF) についても述べた。最後に、PMD 測定法の分類についても述べた。

第 3 節では、本研究の最終目的でもある、PMD エミュレータについて述べた。また、今回測定で使用した固定アナライザ法 (FA 法) についても述べた。さらに、接続された光ファイバの PMD についても簡潔に述べ、最後に、PMD エミュレータの作製に使用したシミュレーションソフトの原理についても述べた。

第 4 節では、PMF を 2 本用意し、これらを接続角度 0° 、 30° 、 60° でそれぞれ融着した時の測定結果とシミュレーション解析結果を比較・検討し、シミュレーションソフトの評価を行った。その結果、微小の誤差はあるものの、測定結果とシミュレーション解析結果は比較的良く一致することが確認できた。

第 5 節では、シミュレーションソフトを用い、接続角度をランダムに変化させ、融着点を 9 点、19 点、29 点、39 点、49 点と増やしていき、多数回シミュレーションを行い、その結果を比較・検討した。その結果、融着点を増やしていき、且つ、シミュレーション回数を増やすと、PMD 回数特性はより Maxwell 分布に近づくことがわかった。また、9 点融着時に最も回数が多く得られた、PMD 値約 0.91[ps]を持つ PMD エミュレータを PMF を 10 本融着することで作製した。

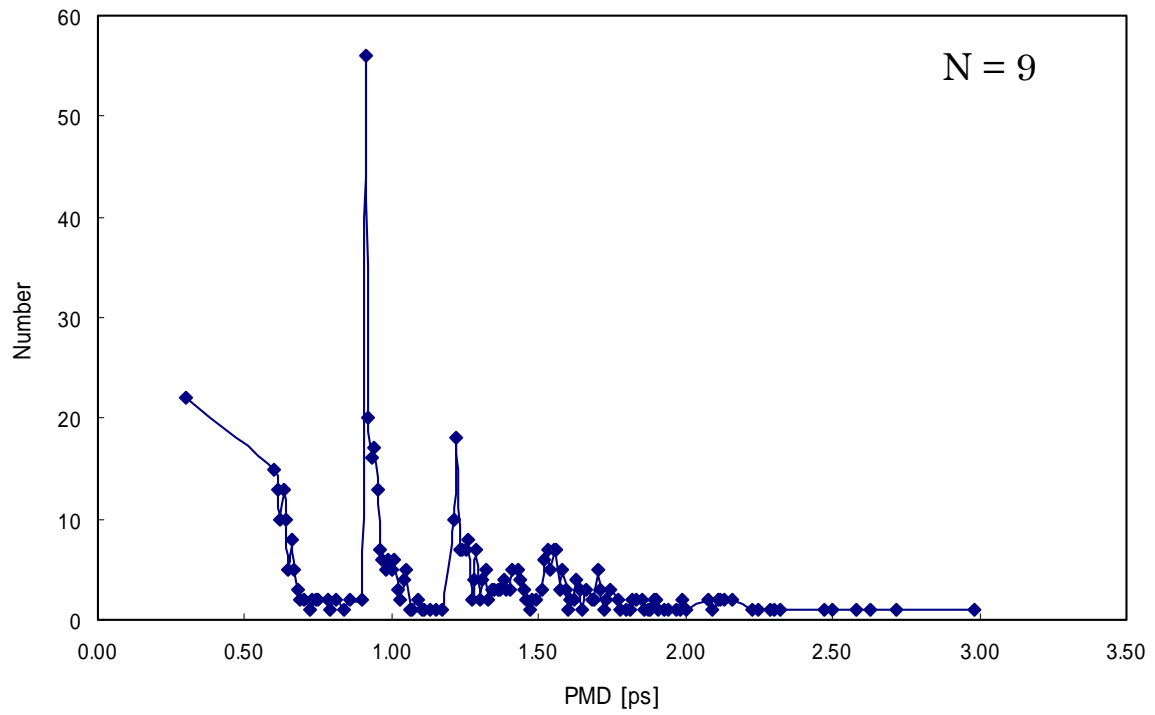


図 5.1 9点融着時の PMD 回数特性 (500 回分)

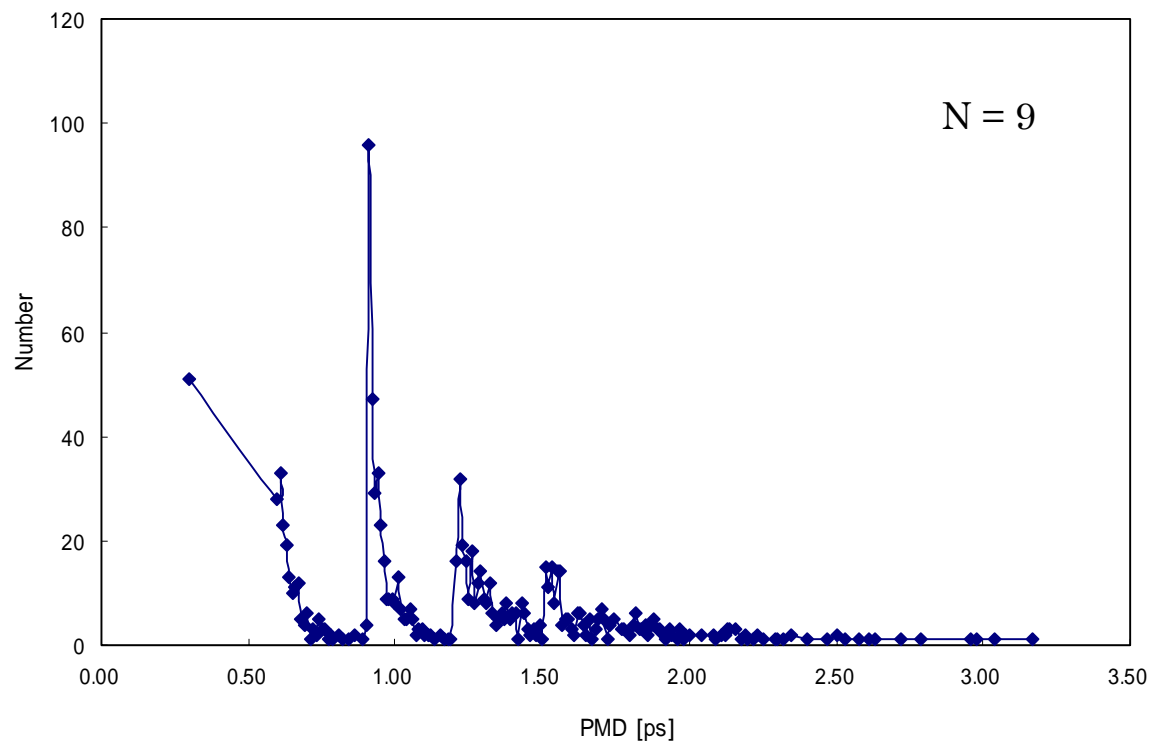


図 5.2 9点融着時の PMD 回数特性 (1000 回分)

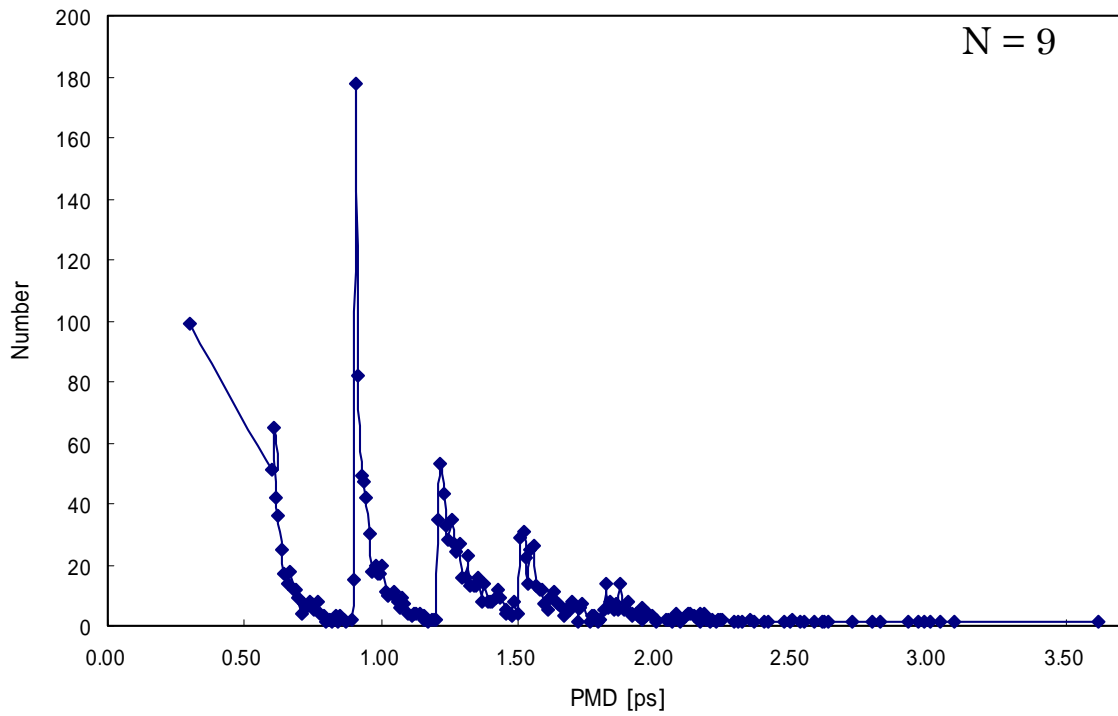


図 5.3 9点融着時の PMD 回数特性 (2000 回分)

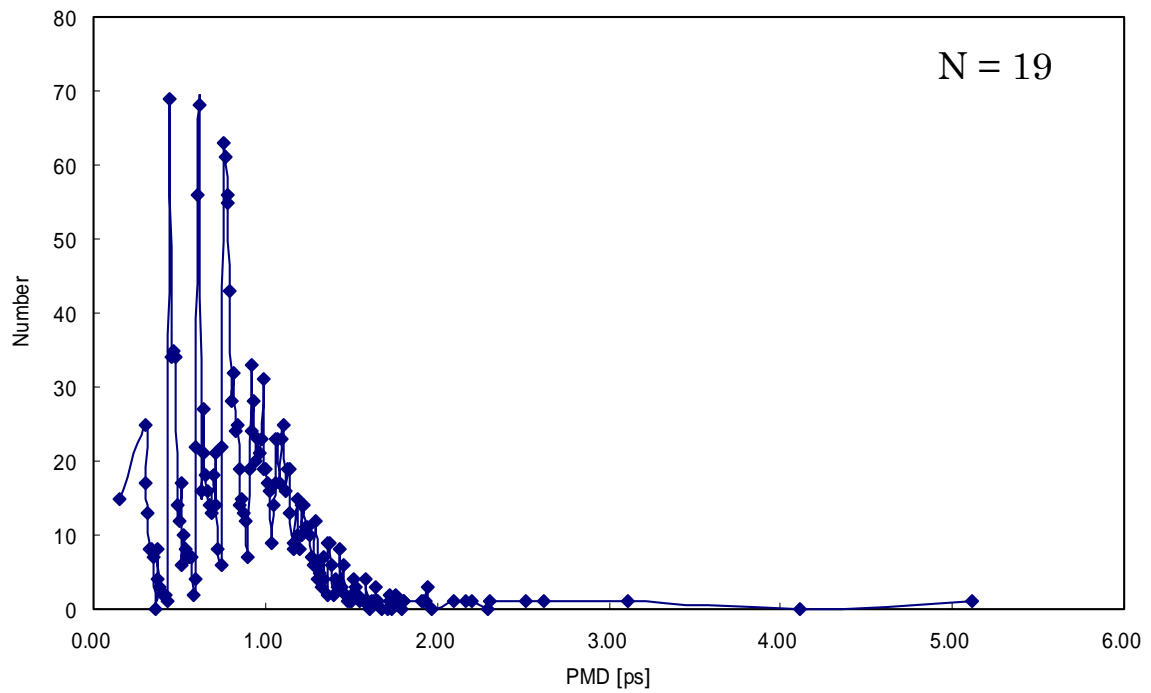


図 5.4 19点融着時の PMD 回数特性 (2000 回)

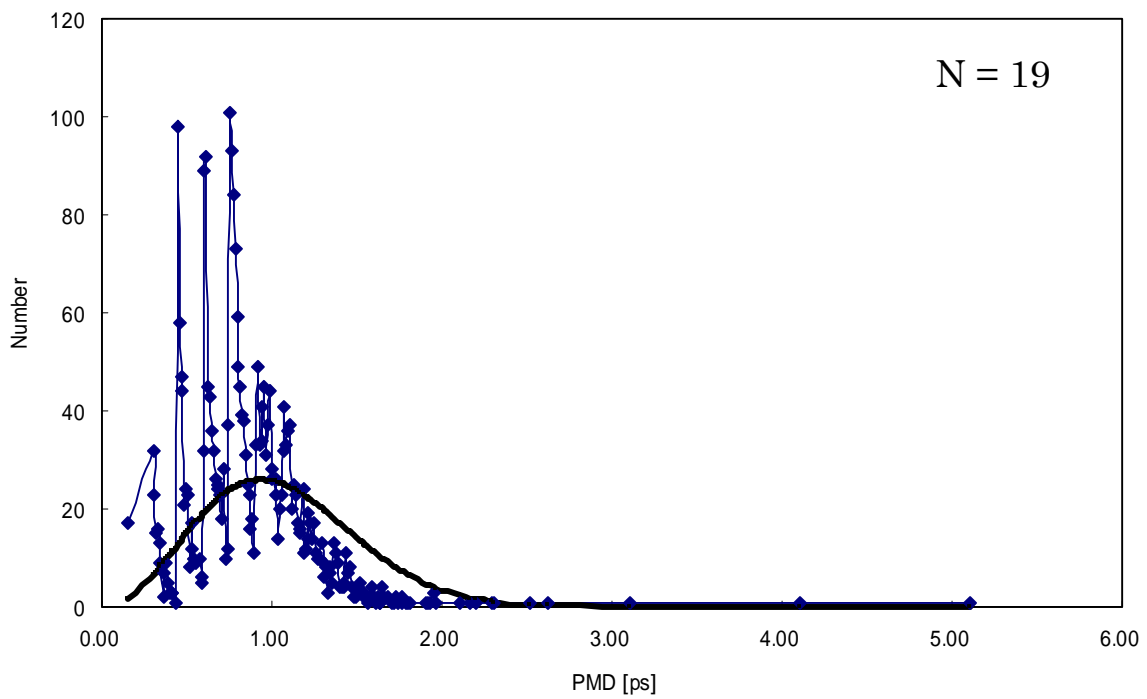


図 5.5 19 点融着時の PMD 回数特性 (3000 回分)

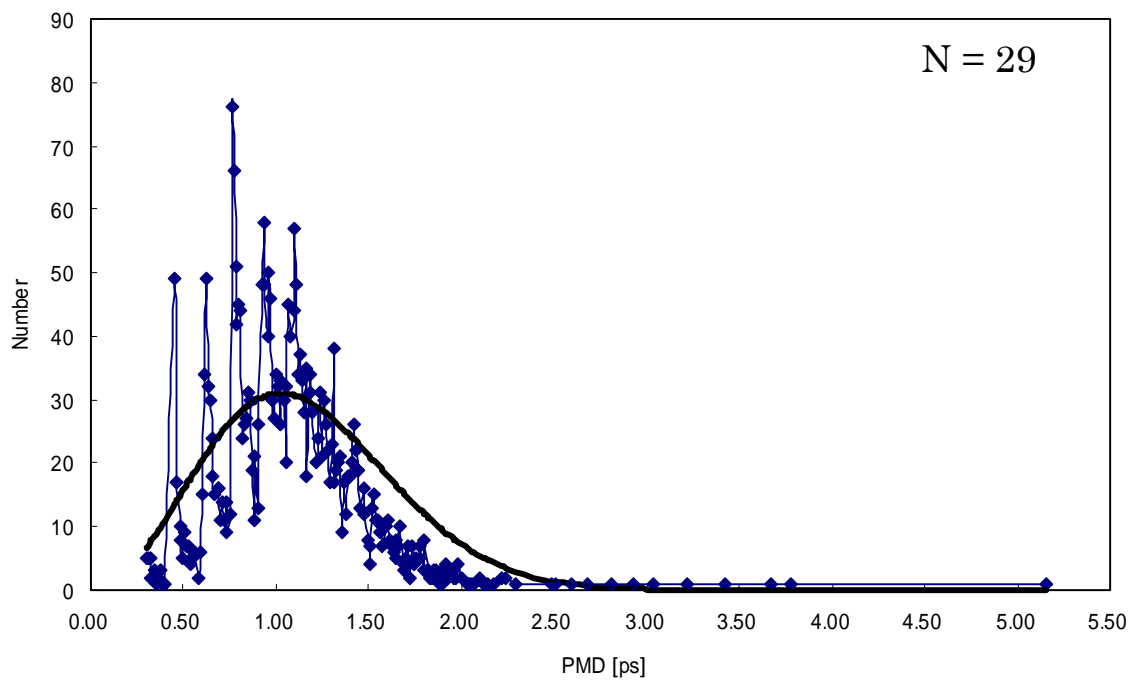


図 5.6 29 点融着時の PMD 回数特性 (3000 回分)

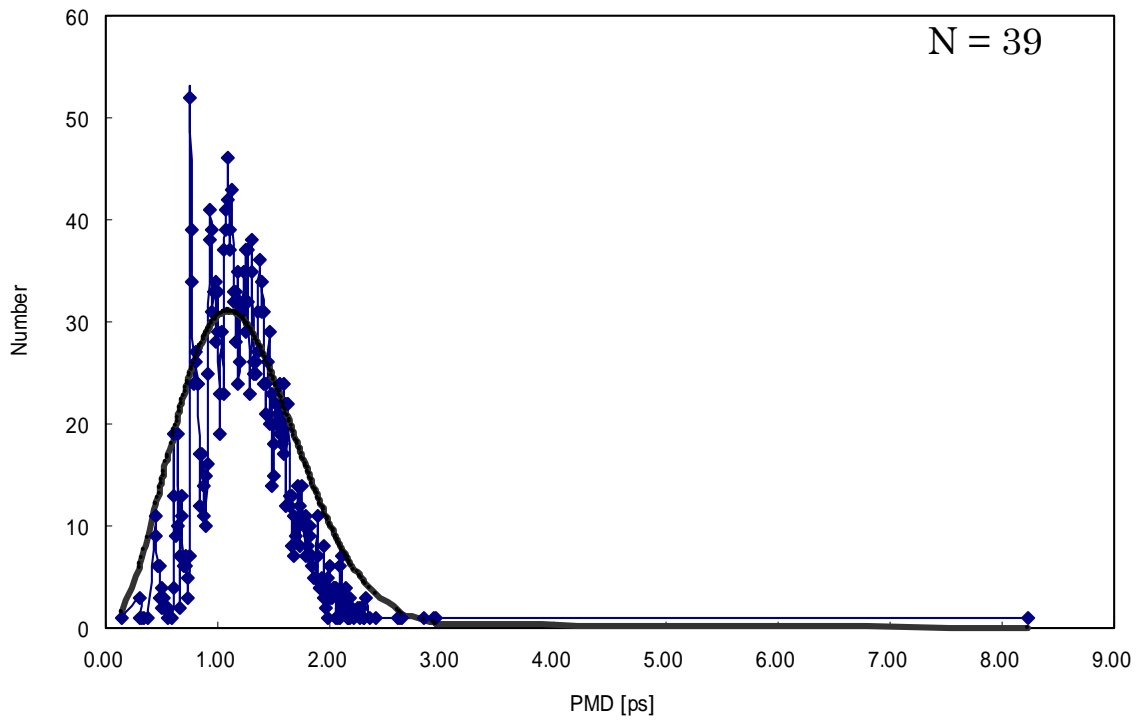


図 5.7 39 点融着時の PMD 回数特性 (3000 回分)

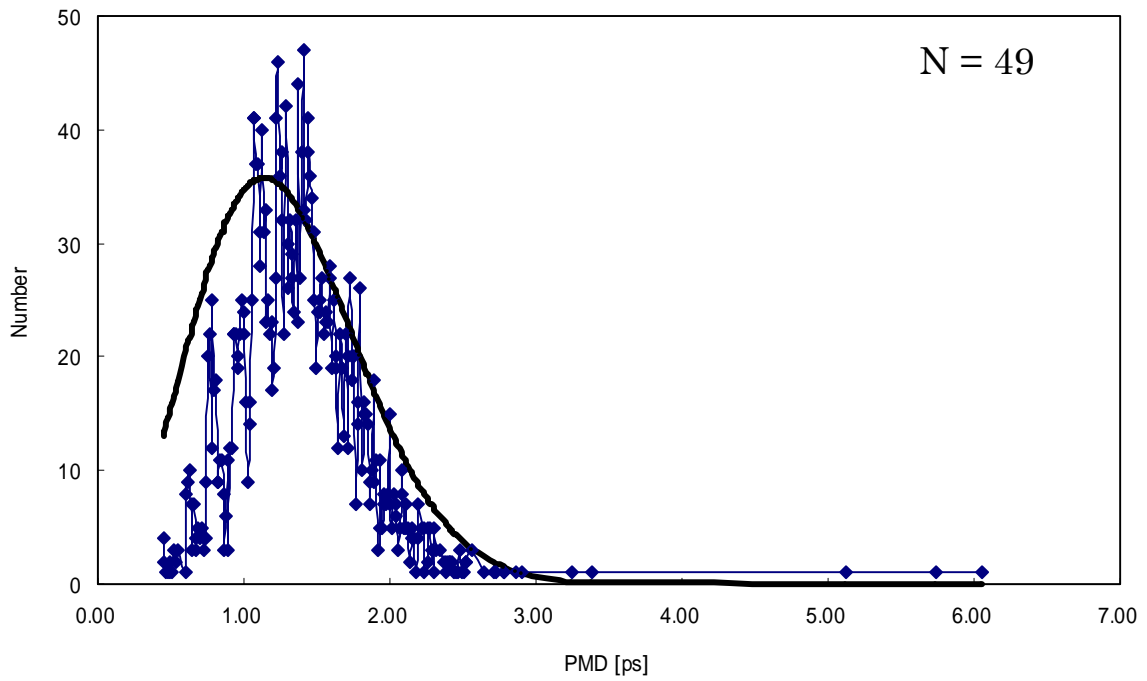


図 5.8 49 点融着時の PMD 回数特性 (3000 回分)

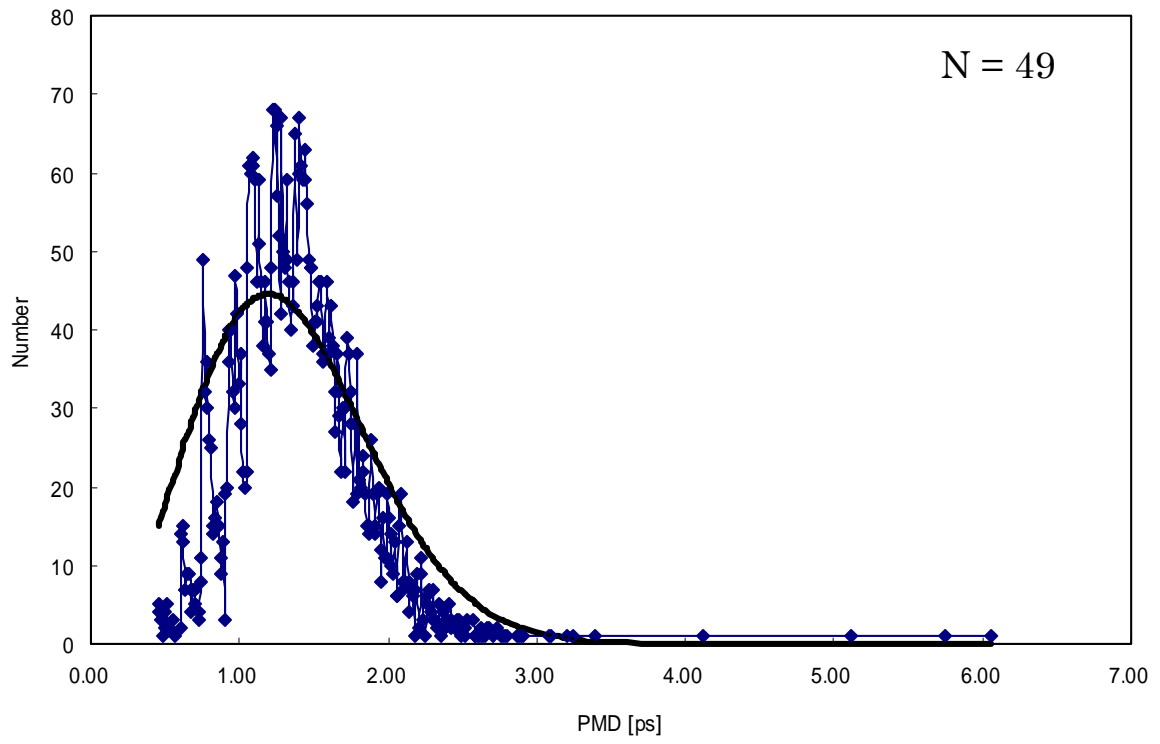


図 5.9 49 点融着時の PMD 回数特性 (5000 回分)

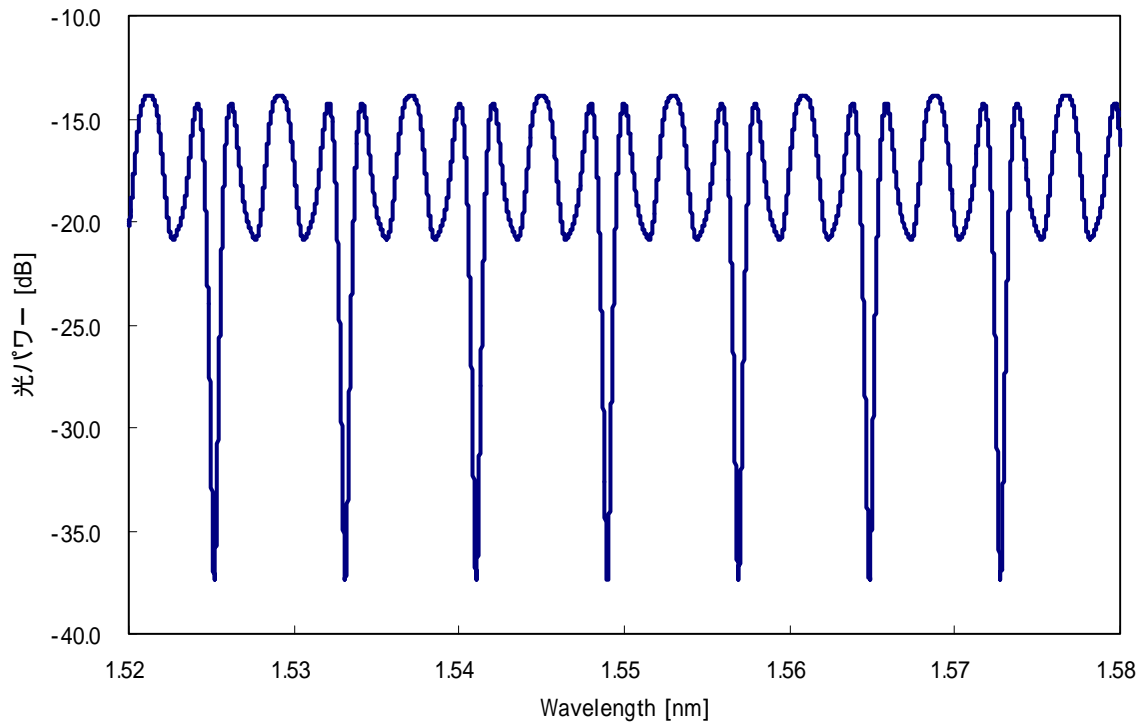


図 5.10 9点融着時のシミュレーション解析結果例 (PMD = 0.91 [ps])

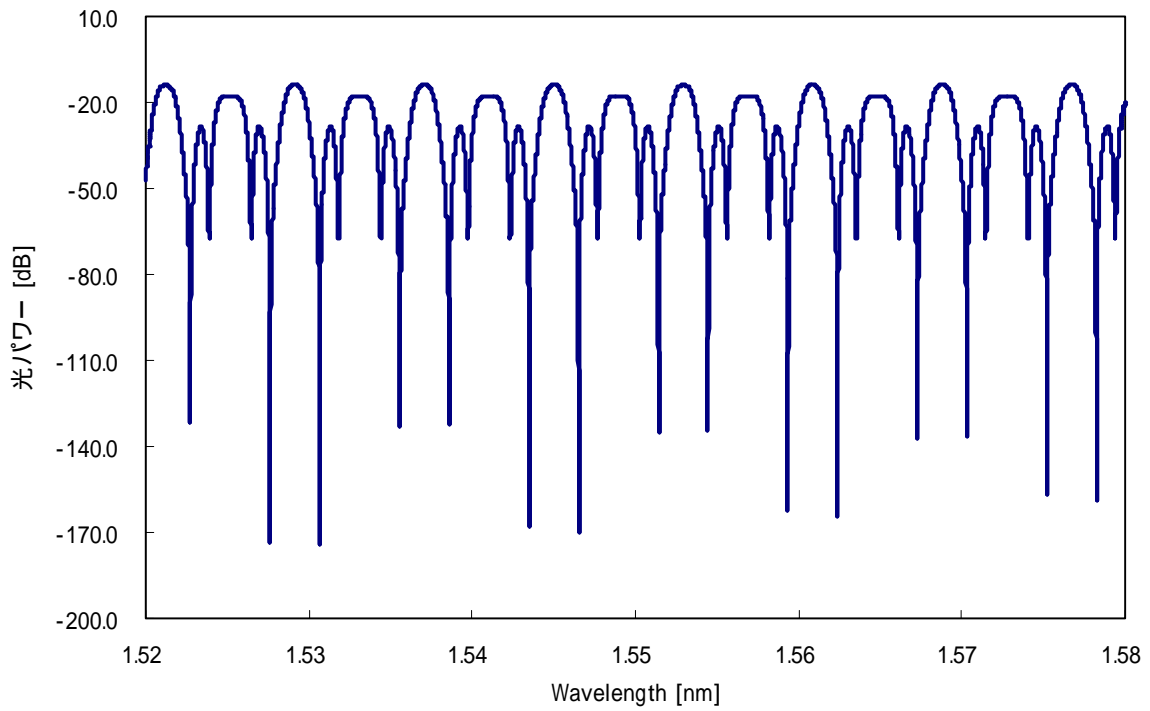


図 5.11 19点融着時のシミュレーション解析結果例 (PMD = 1.73 [ps])

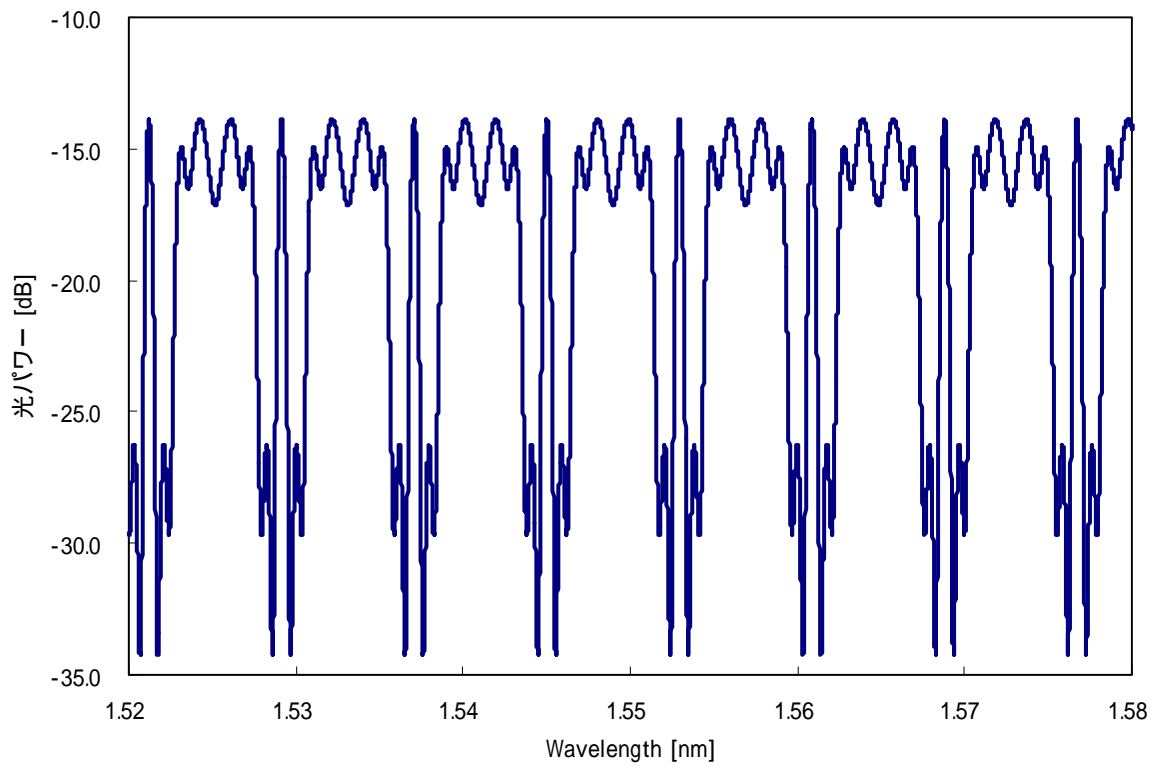


図 5.12 29 点融着時のシミュレーション解析結果 (PMD = 2.41 [ps])

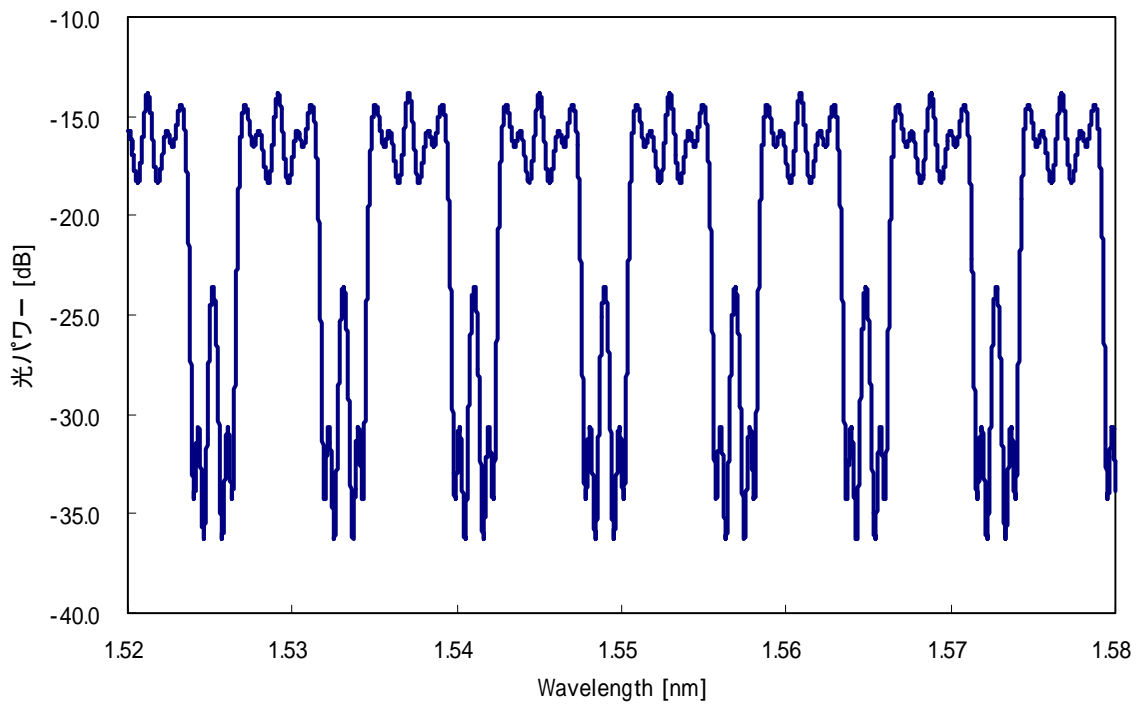


図 5.13 39 点融着時のシミュレーション解析結果 (PMD = 2.62 [ps])

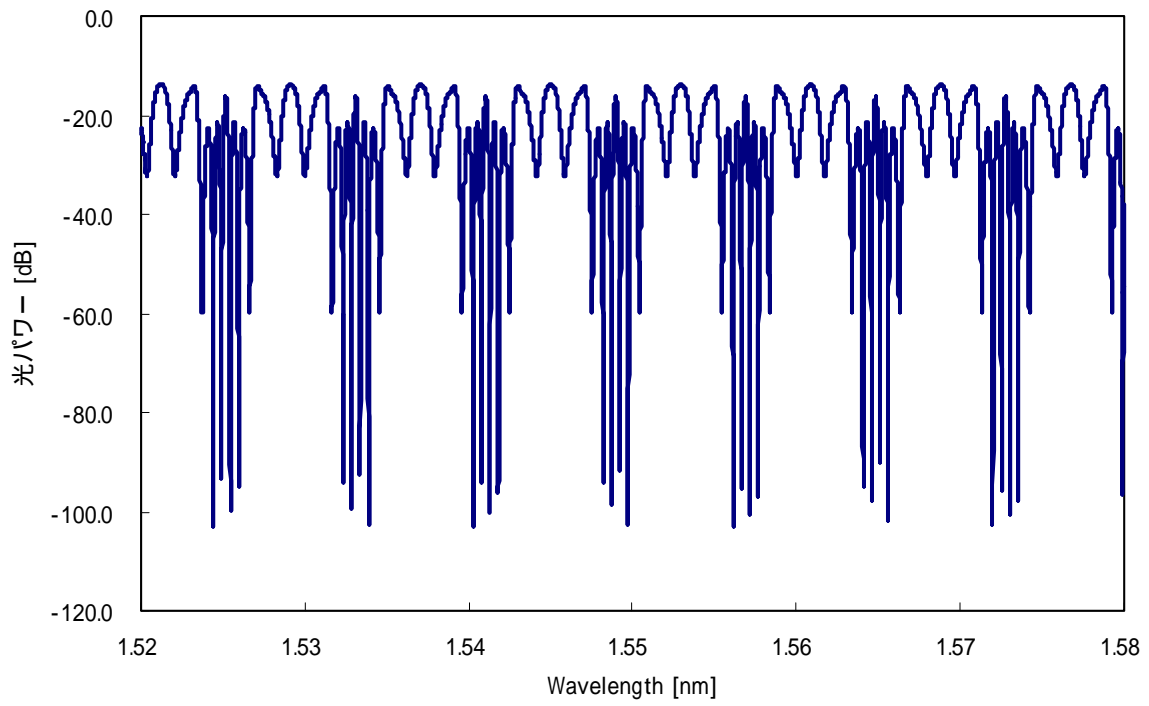


図 5.14 49 点融着時のシミュレーション解析結果 (PMD = 3.11 [ps])



写真 5.1 PMD エミュレータの試作器



写真 5.2 PMD エミュレータの試作器の概観

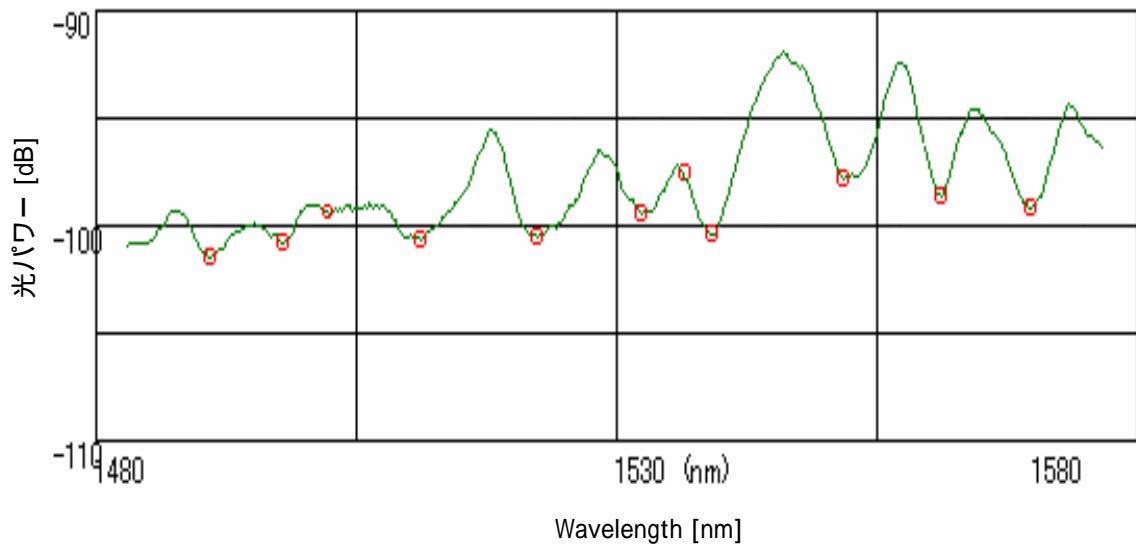


図 5.14 PMD エミュレータの測定結果例

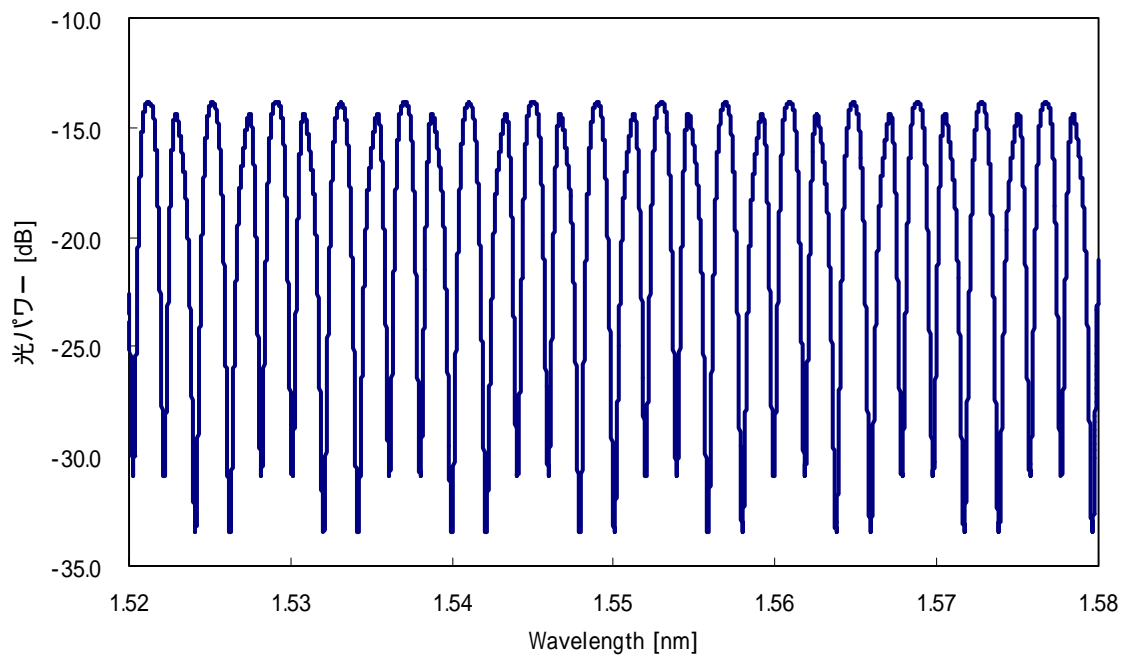


図 5.15 PMD エミュレータの解析結果例

参考文献

- [1] 波平宜敬編：「DWDM 光測定技術」, オプトロニクス社, 2001 年
URL : www.optronics.co.jp
- [2] 波平宜敬：「速解光サイエンス辞典」, オプトロニクス社, pp282-288, 1998 年
- [3] 三木哲也, 須藤昭一編：「光通信技術ハンドブック」, オプトロニクス社, pp.220-222, 2002 年
- [4] 岡本勝就：「光導波路の基礎」, コロナ社, p108, 1992 年
- [5] 藤島ほのみ：“偏波モード分散測定法に関する研究”, 1994 年, 玉川大学 (KDD 研究所, 指導教官：波平宜敬)
- [6] Y. Suetsugu, Y. Terasawa, S. Tanaka：“Effect of Fiber Splicing on Polarization Mode Dispersion”, OFMC'93
- [7] K. Mochizuki：“Degree of Polarization in Jointed Fibers : The Lyot Depolarizer”, Applied Optics, Vol.23, No.19, 1984 年

第6章 全体総括

6.1 全体総括

本研究開発事業により開発・商品化する高機能光デバイスは、いずれも低コストで経済性に優れ、波長多重(WDM:Wavelength Division Multiplexing)光通信を一層普及する上で不可欠なキーデバイスである。光情報通信が社会的に大幅に普及するためには、基本的な光デバイスの低コスト化が必須の条件である。

今日、データトラフィック量の増大、FTTH(Fiber To The Home)などの進行に対応して、高速大容量光通信のニーズはますます高まっており、DWDM(高密度波長多重)光ファイバ通信が伸展しつつある。

沖縄本島で、日本初の最大80波で1波あたり10 Gbit/sの最大800 Gbit/sのDWDM光通信のバックボーン的光ファイバリングネットワークがOTNet(株)によってH16年度に実用化される予定である。

DWDMに不可欠の光デバイスとして、光アド・ドロップ・マルチプレクサ(OADM:Optical Add Drop Multiplexer)があり、その代表的なものとしてアレイ導波路格子(AWG:Arrayed Waveguide Grating)があるが製造コストが高く、製品も高価格である。光通信の一般家庭への普及を図るうえで、OADMなどの高機能光デバイスの低価格化は必須の条件である。

光通信の普及に大きな役割を果たしているDWDM光通信には高機能光デバイスが不可欠であるが、これらのデバイスをいかに低価格で提供できるかが緊急の課題となっている。

本研究開発事業で開発しようとするデバイスは、いずれもDWDMに不可欠な高機能光デバイスであり、これを低価格で市場に供給しようとする実用的かつ実現可能な技術開発、商品開発である。

H14年度では、WDM光通信に不可欠の光デバイスとして、通常の光ファイバカブラの製造方法及び評価システムの研究・開発を行った。

光カブラに関する開発・製造技術の確立は、光波の合分波に使われる3 dBカブラ、波長を分離する光合分波カブラ(WDM形)、波長依存性の少ない合分波に使われる広帯域カブラ(WIC形)の製造条件の確立、パッケージ、信頼性の試験等を行い実用に供する光カブラとして完成することができた。

一方、ファイバブラッググレーティング(FBG:Fiber Bragg Grating)では、H14年度に、FBG製造システムを開発し、その基本特性の評価を行った。

FBG製造システムは、機材検討からFBG製造システムの具体的設計を行い、システムの製作、試運転を行った。アルゴンレーザの第二高調波(244nm)を用いて、二光束干渉を行わせブラック反射波長1550nmと1310nmを得ることができたが、各々のミラー角度の関係式で得られた数値とほぼ同じであることが確認できた。パソコン制御システムも所定の動作を確認し、今後FBGデバイスに関して本格的な実験・試作開発がこの装置を用いて進められることが確認できた。

平成15年度は、偏波面保存形光合分波器(OADM:Optical Add-Drop Multiplexer; アド・ドロップ・マルチプレクサ)と、偏波モード分散(PMD:Polarization Mode Dispersion)エミュレータ(Emulator)の研究・開発を行った。

偏波面保存形光合分波器(OADM)は、偏波面保存形光ファイバカプラと2台の偏波面保存形FBGを偏波面保存形光ファイバ融着機でスプライスして、マツハツエンダ形OADMを作成し、その伝送特性を評価した。

PMDエミュレータは、40 Gbit/s以上の高速光伝送ネットワークで必要となるもので、それは偏波面保存光ファイバ(PMF:Polarization Maintaining Fiber)の偏波面の主軸がランダムになるように接続しながら、実際の敷設された光ファイバ伝送路のPMDをシミュレートするものである。

そのために、シミュレーションソフトを用いて、PMFの値、長さ及び接続角度を変えてランダムなPMD分布であるマクスウェル(Maxwell)分布になる最適条件を求めた。

次に、10本のPMFをランダム接続したPMDエミュレータを試作し、理論と実験結果を比較検討した結果、シミュレーションの結果とPMDエミュレータ試作器のPMD測定結果と良く一致することが分かった。

6.2 今後の課題

本地域新生コンソーシアム研究開発は、偏波面保存形光ファイバカプラの製造方法及び評価システムの研究・開発及び、偏波面保存形光ファイバカプラとFBGを組み合わせた偏波面保存形OADM光デバイスの開発並びにPMDエミュレータの製品化を実施する予定であった。

しかし、偏波面保存形OADM光デバイスの開発及びPMDエミュレータの基礎的な研究・開発はほぼ完了したので、今後製品化へ向けて、信頼性試験をし、安定な伝送特性が得られるような製品にしていくことが今後の課題である。