■5 群(通信・放送) - 2 編(光アクセス線路・伝送技術)

# 3章 光ファイバ

(執筆者:中島和秀,大橋正治) [2016年7月 受領]

本章では,現在の光通信ネットワークで使用されている光ファイバについて説明する.

3-1 節の光ファイバの特徴では、光ファイバの分類と基本的な光の導波構造について説明 すると同時に、多様な光ファイバの製造方法について概説する.また、光ファイバの基本的 な光学特性や機械特性についても記述する.

3-2 節の光ファイバの伝送特性試験方法では、シングルモード光ファイバの伝送特性を規 定する上で不可欠となる、光損失、遮断波長、モードフィールド径、波長分散、並びに偏波 モード分散の試験法について説明する.また、マルチモード光ファイバに特有かつ重要な伝 送特性である、モード間群遅延差の試験法について記述する.

3-3 節の光ファイバの標準化規格では、二つの主要な国際標準化団体である ITU-T (Telecommunication standardization sector, International telecommunication union),及び IEC (International electrotechnical commission)の関係について説明し、現在存在するシングルモ ード光ファイバ,及びマルチモード光ファイバの国際規格について紹介する.

最後に,3-4 節の空間分割多重伝送用光ファイバでは,近年盛んに検討が進められている 光ファイバ技術として,同一クラッド内に複数のコアを有するマルチコア光ファイバ技術や, コア中の伝搬モードを多重伝送チャネルとして利用するマルチモード光ファイバ技術につい て紹介する.

## 【本章の構成】

本章では、光ファイバの特徴(3-1節)、光ファイバの伝送特性試験方法(3-2節)、光ファ イバの標準化規格(3-3節)について述べる.

## ■5 群-2 編-3 章

# 3-1 光ファイバの特徴

# 3-1-1 光ファイバとは

(執筆者:大橋正治) [2015年5月 受領]

光ファイバは髪の毛のように細く柔軟な繊維状の伝送媒体である.光ファイバは、図3・1(a) に示すような断面構造と、図3・1(b)に示すような屈折率分布を有している.光ファイバは、主 に光が伝搬するコア部分とその周りのクラッド部分から構成されている.



**図**3・1 光ファイバの断面図と屈折率分布 (a)断面図 (b)屈折率分布

コアの部分はクラッドの部分より屈折率が高くなっており、スネルの法則により光がコア 中を伝搬する.石英系光ファイバの構成材料は、二酸化ケイ素(SiO<sub>2</sub>)が主成分で、添加物 として二酸化ゲルマニウム(GeO<sub>2</sub>)、フッ素(F)が用いられている.純石英にGeO<sub>2</sub>を添加 すると、純石英より屈折率を高くすることができ、また、純石英にFを添加することにより 屈折率を低くすることができる.GeO<sub>2</sub>ドープコア光ファイバは、コアの部分は、GeO<sub>2</sub>が添 加された石英ガラスで、クラッド部が純石英ガラスで構成されている.一方、純石英コア光 ファイバは、コア部が純石英で、クラッドはFが添加された石英ガラスから構成される.

一方,光ファイバ構成材料としてコア及びクラッドともにプラスチック材料を用いたプラ スチック光ファイバもある.コアはポリメタクリル酸メチル樹脂(PMMA: Polymethyl metacrylate),ポリスチレン,ポリカーボネート,含重水素化ポリマー,フッ素系ポリマー, シリコン系ポリマー,ノルボルネン系ポリマーなどが検討されているが,実際に使用されて いるのは PMMAで,耐熱性を要求される場合はポリカーボネートの使用が試みられている. またクラッドはフッ素系ポリマーが一般に使用されている.

通信用として使用されている石英系光ファイバの外径は、国際電気通信連合電気通信標準 化部門(ITU-T: International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector) で  $125 \mu m$  と標準が定められている<sup>1)</sup>.図  $3 \cdot 1(b)$ に示すように、コアの屈折率を $n_1$ 、クラッドの屈折率を $n_2$ としたとき、光ファイバの比屈折率差 $\Delta$ は次式で定義され、パーセント [%] 表示が用いられる.

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \tag{3.1}$$

光ファイバの製造工程は、コアとクラッドからなる導波構造を有する光ファイバと相似な スート母材を作成する工程と、スート母材を透明化して透明ガラス母材の作製工程とこの母 材を線引きして光ファイバとする紡糸工程の三つの工程からなる.代表的なスート母材作製 方法としては、次に示すような気相法で、MCVD 法(Modified Chemical Vapor Deposition Method)<sup>2)</sup>, OVD 法(Outside Vapor Deposition Method)<sup>3)</sup>, PCVD 法(Plasma Chemical Vapor Deposition Method)<sup>4)</sup>, VAD 法(Vapor-phase Axial Deposition Method)<sup>5)</sup> などがある.VAD 法は、ほかの製造法と比べて大型な母材の製造が可能であり量産化に適した製法であり、ま た、低損失化に必要不可欠な脱水が容易な製造法でもある.

図3・2に示す VAD 法を用いて多孔質母材(スート母材)をつくることができる. ほかの気 相法も同様である. 原料供給系より搬送される原料気体(SiCl4, GeCl4)は、酸水素のバーナ の炎の中へ導かれ、バーナ燃焼部で

などの火炎加水分解を受け、石英系ガラスの微粒子(スート)が形成される. この微粒子が 出発棒に堆積し、多孔質母材を形成する. ガラス微粒子は軸方向に堆積するので、このスー トの成長速度に合わせて出発棒を回転させながら引き上げて作製する. 作製された多孔質母 材(スート母材)は、0.1~1µm 程度の空隙をもった網目構造をしている. このスート母材を 電気炉の中に入れ、温度を上げていくと、融解燃結が進み、体積が収縮し母材中の空隙がつ ぶれ、最終的に完全な透明ガラス体となり、光ファイバ母材が作製される.



図 3 · 2 VAD 法の原理図

次に、この光ファイバ母材 (プリフォーム) から外径が約 125µm の光ファイバを作製する ために、図 3・3 に示すような線引き装置で線引きする.線引き装置は、母材送り部、加熱炉 外径測定器、引き出し用のキャプスタン(巻き上げ装置)、巻き取り装置及びコーティング装 置から構成されており、コンピュータで制御されている.母材は、約2000℃に加熱されたカ ーボン炉に送り込まれ、加熱され、約数 100m/分の線速で光ファイバ状に引かれる.加熱炉 から引き出された裸の光ファイバは、外径が測定され所定の外径になるように温度及び引っ 張り速度が制御され、コーティング装置により光ファイバ表面に被覆が施される.



図3•3 光ファイバ線引きの原理図

通信用に用いられる光ファイバの特性は、ITU-T あるいは国際電気標準会議(IEC: International Electrotechnical Commission)で標準が決められており、多くの種類の光ファイバ が標準化されている。光ファイバの種類としては、伝搬可能なモード数により分類され、シ ングルモード光ファイバあるいはマルチモード光ファイバと呼ばれている。伝搬可能なモー ドが一つの場合がシングルモード光ファイバで、二つ以上のモードが伝搬する光ファイバを マルチモード光ファイバと呼ばれている。シングルモード光ファイバのコア直径は、約8~ 10 µm であり、マルチモード光ファイバの場合には、50 µm あるいは 62.5 µm である。

シングルモード光ファイバを規定する基本パラメータは、カットオフ波長んとモードフィ ールド径 2w で定められている.カットオフ波長は、伝搬可能なモードが一つとなる下限波 長を表しており、カットオフ波長以上の波長で用いるとシングルモード動作を保証できる. 一方、モードフィールド径は、界分布の広がりを表すパラメータであり、接続損失、実効断 面積などを評価する場合にも用いられている.モードフィールド径 2w は、次式で定義され ている<sup>9</sup>.

$$2w = \frac{\lambda}{\pi} \left[ 2 \frac{\int_{0}^{\pi/2} F^{2}(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_{0}^{\pi/2} F^{2}(\theta) \sin^{3} \theta \cos \theta d\theta} \right]^{1/2}$$
(3.4)

ここで,  $F(\theta)$ は, 遠視野界 (FFP : Far Field Pattern) を表す.  $\theta$ は, 光ファイバ軸からの放射 角を表している. この二つの光ファイバパラメータを選択すると、屈折率分布に係らず、許容線路損失を満 足するパラメータの領域がほぼ等しくなる<sup>7)</sup>.したがって、現在の国際標準における基本パ ラメータは、文献 7)の検討結果が反映され、カットオフ波長とモードフィールド径によって 決められている.

シングルモード光ファイバには、光ファイバにパルスを伝搬させたときの出射端でのパル スの広がりを表す色分散特性(波長分散特性)の異なる光ファイバがある。色分散特性は、 屈折率分布を制御することによって、光の伝搬速度を制御し、変化させることができる。現 在までに、分散特性を制御した種々の屈折率分布の光ファイバが研究開発されてきている。 主に、使用されている分散制御ファイバとしては、1550 nm 帯にゼロ分散波長をシフトした 分散シフトファイバ、1550 nm 帯の信号波長帯の分散値が非ゼロのノンゼロ分散シフト光フ ァイバが通信用に用いられている<sup>8)9</sup>。

一方、マルチモード光ファイバは、コア径と次式で記述できる開口数(NA: Numerical Aperture)で規定されている。開口数は、マルチモード光ファイバの入射できる最大入射角 度 $\theta_{max}$ を表し、伝搬モード数に対応した値であり、次式で定義されている。

$$NA = \sin \theta_{\max} = n_1 \sqrt{2\Delta} \tag{3.5}$$

光ファイバは,外的な環境に対してガラス表面を保護するために,被覆がかけられている. 石英系光ファイバの場合には,ガラスの弱点である機械的な強度を補強し,光ファイバ接続 の際の光ファイバの取扱いを容易にするために,光ファイバに被覆を施す必要がある.その 役割は,①光ファイバ表面での傷発生の防止,②側圧に対する緩和,③不要モードの除去, ④取扱い性の向上にある.

石英系光ファイバは、図 3・4 に示すような、光ファイバに1 層の被覆がかけられた素線、 2 層以上の被覆がかけられた心線や複数の素線が並べられて被覆がかけられたテープ心線も ある.



図 3・4 光ファイバの構造 (a)素線, (b)心線, (c)テープ

光ファイバは,屋内外で使用されるため,光ファイバ心線あるいはテープ心線にシースと 呼ばれる保護被覆を施した光ファイバケーブルにして用いられる.光ファイバケーブルには, 色々な種類の構造のものがある<sup>10)-12)</sup>.

石英系光ファイバの特徴は、同軸ケーブルに比べて、低損失でかつ広帯域な伝送路を構築

することができる.光ファイバは,外径が約0.1 mm と非常に細く,しかも主に石英からつ くられているので銅の重さの約1/4 である.また,電磁誘導及び電波干渉などの問題がない という特徴を有している.一方、プラスチック光ファイバは,コア径が太いため,プラスチ ック光ファイバどうしの接続やプラスチック光ファイバと機器との接続が比較的容易である. また,比重が小さく軽量であるなどの特徴がある.ただし,石英系光ファイバと比べて、長 距離伝送用ではなく LAN 用に用いられている.

# 3-1-2 光ファイバの分類と構造

(執筆者:中島和秀) [2015年5月 受領]

光ファイバは、材料もしくは伝送特性により大別することができる.材料については、大 きく石英ガラス光ファイバ、多成分ガラス光ファイバ、並びにプラスチック光ファイバの3 種類に分類することができる.現在の公衆光通信網では、石英ガラス光ファイバが用いられ ている.一方、伝送特性による分類については、光ファイバが導波可能な伝搬モードの数に より、シングルモード光ファイバ (SMF: Single-mode fiber) とマルチモード光ファイバ (MMF: Multi-mode fiber) に大別することができる.

光ファイバは屈折率が均一なクラッドと、クラッドの中央に配置されたクラッドよりも高 い屈折率を有するコアとにより構成され、コアとクラッドの間の屈折率差を利用した光の全 反射により信号を導波する.光ファイバの伝送特性は断面内の半径方向における屈折率分布 により制御できる.図3・5に光ファイバの屈折率分布の一例を示す.最もシンプルな屈折率 分布は図3・5(a)に示すステップ型で,屈折率が高い矩形のコアと屈折率が低いクラッドによ り構成される.一般に、クラッドは純石英ガラスにより構成され、コアの屈折率は純石英ガ ラスにゲルマニウム等を添加することにより向上できる.また、図3・5(b)及び(c)に示す階段 型及びセグメント型の屈折率分布では、コア内に多層の屈折率変化を有する.例えば、分散 シフト光ファイバでは、このコア内の多層の屈折率変化を適切に制御することにより、波長 分散がちょうどゼロとなる波長を1310 nm 帯よりも長波長側にシフトさせている。そのほか にも、クラッドよりも低い屈折率領域を有する、図3・5(d)のW型や図3・5(e)のトレンチ型な ども利用されている.低屈折率層は、それより内側の領域への光の閉じ込めを強める作用が あり、例えば、光ファイバの曲げ損失特性の改善手段として利用することがきる.一般に、 純石英ガラスにフッ素などを添加することにより屈折率を低減することが可能となる.



光ファイバ中の屈折率変化を実現する手段として、空孔(空気)を用いた光ファイバも実 現されている.**表 3・1**に空孔構造を有する光ファイバの構造例について、従来の光ファイバ (充実構造光ファイバ)との比較により示す.充実構造光ファイバは,純石英ガラスに材料 添加を行うことにより屈折率を制御する.これに対し,空孔アシスト光ファイバは,充実構 造光ファイバと同様に材料添加により形成したコアの周囲に数個の空孔を有する.空孔アシ スト光ファイバは,等価的には図 3・5(e)に示したトレンチ型の屈折率分布を有するとみなせ る.しかし,一般的な材料添加により得られる屈折率差は 1%以下であるのに対して,空孔 部では屈折率を"1"まで低減できるため,屈折率差を数%から 10%程度まで拡大すること が可能となる.このため,空孔アシスト光ファイバでは,従来の光ファイバでは得られなか った波長分散特性を実現したり<sup>13)</sup>,空孔で囲まれる内部への光の閉じ込めを強めたりする ことが可能となる<sup>14)</sup>.さらに,フォトニック結晶光ファイバは,屈折率が均一なクラッドと, 周期的に配置された数 10 個の空孔により構成される.フォトニック結晶ファイバでは複数の 空孔が配置された領域の屈折率が実効的に低下し,中央の空孔がない領域が実効的なコアと して動作する.フォトニック結晶光ファイバでは,特定の空孔構造条件を満たすことで,シ ングルモード波長帯域を無限に拡大できることが知られている<sup>15)</sup>.ほかにも,コア自身を空 孔により形成するフォトニックバンドギャップファイバ<sup>10</sup>が存在するが,ブラッグ反射を 導波原理として用いるためここでは割愛する.

光ファイバ	充実構造 光ファイバ	空孔アシスト 光ファイバ	フォトニック結晶 光ファイバ
屈折率制御	材料添加	材料添加 + 空孔構造	空孔構造
断面構造		添加 の の の の の の の ク ラ	A 0000 000000 000000 000000 000000 000000
等価 屈折率分布		ŢſŢ	

表3・1 充実構造光ファイバと空孔構造光ファイバの構造例

# 3-1-3 光ファイバの特性

(執筆者:中島和秀) [2015年5月 受領]

SMF 及び MMF の区分にかかわらず,光損失は光ファイバの最も基本的な特性であるとい える.信号光波長における光損失は,光の信号対雑音比に直接的に影響を及ぼす.また,遮 断波長とモードフィールド径 (MFD: Mode-field diameter) は SMF で特に重要な基本パラメー タとなる.遮断波長はシングルモード動作可能な波長範囲を規定する.MFD は光が実効的に 伝搬する領域の直径を表すものであり,SMF の接続損失を推定するうえで重要なパラメータ となる.なお,特に光の非線形特性について議論する場合には,MFD の代わりに実効コア断 面積 A<sub>eff</sub> (Effective area)を用いる場合がある.一般に,光の電界分布がガウス分布により近 似できる場合, A<sub>eff</sub>は MFD を直径とする円の面積として概算できる.

さらに、光パルス信号の伝送特性について検討する場合には、特に光ファイバ中の分散特

性が重要となる. SMF 中の分散特性は,波長分散と偏波モード分散 (PMD: Polarization mode dispersion) に大別でき,波長分散は波長間の, PMD は直交する 2 偏波モード間の伝搬時間 の違いにより発生する.一方,複数の伝搬モードが存在する場合,モード間の伝搬速度の違いにより,光パルス信号の劣化が生じ伝送帯域が制限される.このため, MMF ではモード 間群遅延差が伝送特性に影響を与える重要なパラメータとなる.本章 3-2 節では,上記の光損失,遮断波長, MFD,波長分散,偏波モード分散,及びモード間群遅延差の試験法について概説する.

上記は光ファイバの光学特性に関するものあるが、主に信頼性の観点からは光ファイバの 機械強度特性が重要となる.石英ガラス光ファイバの破断確率は、スクリーニング試験の結 果を用い Power law theory<sup>17</sup>)<sup>18)</sup>により評価できる.図3・6 は光ファイバの破断確率と曲 げ半径の関係に対する計算例である.図中の黒、赤、及び青の実線は、それぞれスクリーニ ング試験のプルーフ歪量を1%、1.5%、及び2%とした場合の計算結果を示す.なお、計算 では曲げ回数を1回とし、20年の使用時間を仮定した.光ファイバの機械強度特性は、図3・ 6 中で曲げ半径が概ね5 mm以上の低強度領域と、5 mm以下の高強度領域とに分けて考える ことができる.一般に、光ファイバの信頼性は、スクリーニング試験により機械強度特性が 脆弱な部分をあらかじめ取り除くことにより向上できる.図3・6 に示すように、スクリーニ ング試験の効果はプルーフ歪量を増加することにより向上できる.一方、曲げ半径が数 mm まで縮小されると、光ファイバの機械強度特性はガラスの固有特性により決定されることと なり、スクリーニング試験の効果は失われ破断確率は急激に増大する.現在の光ファイバは、 その製造工程で1~2%のプルーフ歪が適用されており、一般的な最小許容曲げ半径は30 mm とされているので、その20年使用後の破断確率は10<sup>-14</sup>以下であり、十分小さいことが確認 できる.



図3・6 光ファイバの破断確率と曲げ半径の関係

## ■5 群-2 編-3 章

# 3-2 光ファイバの伝送特性試験方法

### 3-2-1 伝送特性試験項目

(執筆者:中島和秀) [2015年5月 受領]

光ファイバの最も重要な伝送特性は光損失であり、線形領域における光信号の入出力強度 の関係を直接的に表わす指標となる.シングルモード光ファイバの国際規格は,遮断波長(通 信波長)と波長分散により分類されている.また,モードフィールド径(MFD: Mode field diameter)は光ファイバ間の接続損失の考察に不可欠なパラメータである.したがって、シン グルモード光ファイバの伝送特性を分類するには,遮断波長,波長分散,MFDの3点を把握 することが重要となる.さらに,伝送速度が10 Gbit/s以上の高速光伝送システムでは,偏波 モード分散(PMD: Polarization mode dispersion)によるパルス広がりの影響も無視できない. 一方,マルチモード光ファイバの高速化では,モード間群遅延差(DMGD: Differential modal group delay)の低減とその特性評価が重要となる.以下では,光損失,遮断波長,MFD,波 長分散,PMD,並びにDMGDの試験方法について説明する.

## 3-2-2 光損失

(執筆者:中島和秀) [2015年5月 受領]

光損失の測定方法には、カットバック法、双方向 OTDR (Optical time domain reflectometry) 法、並びに挿入法の3種類がある<sup>19)</sup>.**図**3・7に各試験方法の概要を示す.図3・7(a)に示すカ ットバック法では、被測定光ファイバ全長の透過光強度を測定したあとに、高次モード除去 部を含む入射端近傍で切断し測定した光強度を参照値として光損失を導出する.一般に、測 定光と光ファイバの結合部では、わずかな入射軸や角度ズレなどにより、基本モードのみな らず高次モードも励振される可能性があり、例えシングルモード光ファイバであっても励振 された高次モードが微小区間に渡って伝搬し、光学特性の評価結果に影響を及ぼすことがあ る.このため、汎用的な SMF では、基本モードよりも高次モードの方が曲げによる漏えいが 大きい特徴を利用し、被測定光ファイバの入射端に半径 30 mm の曲げを付与することで高次 モードの除去を行う.カットバック法は、高次モード除去部を含む測定光の励振条件を容易 に固定できるため、最も汎用的な試験方法として用いられている.

双方向 OTDR 法では,図3.7(b)に示すように被測定光ファイバの両端から OTDR 測定を行う.OTDR は,光ファイバ中で発生し後方(OTDR の入射側)に散乱される光強度の距離方向の分布特性を測定する装置であり,図3.7(b)中に示したように,測定 A 及び B に相当する二つの光強度分布(単位:dB)を得ることができる.ここで,OTDR で測定される後方散乱光は,コア構造に起因する成分と損失に起因する成分を含んでおり,測定 A 及び B の対応する距離における差分を取り平均化することで,損失成分のみを抽出することができる.この抽出された損失成分の傾きを求めることにより,測定波長における光損失を知ることができる.

図3·7(c)に示した挿入法では、参照点1及び2を直接接続して測定した光強度を基準とし、 二つの参照点の間に被測定光ファイバを挿入したときの光強度の変化を測定することにより 光損失を評価する.



図3・7 光損失の試験方法

## 3-2-3 遮断波長

(執筆者:中島和秀) [2015年5月 受領]

SMFの遮断波長は高次モードの有無に伴う透過光強度の変化を測定して評価する<sup>19</sup>. 図 3・8 に遮断波長の試験法の概念図を示す。一般に、測定系は白色光源とモノクロメータによ り構成されるが、受光部に光スペクトラムアナライザを用いることもでき、波長分解能は数 nm 程度で十分である.はじめに,長さ2mの被測定光ファイバを用意し,半径140mm(高 次モードの曲げ損失が無視できる十分に大きな半径)の曲げを1回付与して透過光強度の波 長依存性 P<sub>1</sub>(λ)を測定する.ちなみに,光ファイバケーブルの遮断波長は長さ22 m で規定す る.次に,図3・8(a)もしくは(b)に示した,シングルモードもしくはマルチモード参照法によ り参照透過光強度 P<sub>B</sub>(λ)を測定する.シングルモード参照法では、被測定光ファイバに半径 R が 10~30mm の曲げを数回付与して P<sub>R</sub>(λ)を測定する. このとき, 曲げ付与部では高次モー ド成分が漏えいし、*P<sub>R</sub>*(*λ*)は基本モードに対応した透過光強度成分として測定される.なお、 与える曲げ半径及び回数は測定する光ファイバの曲げ耐性に依存する.汎用的な SMF では半 径 30mm の曲げを1回付与すれば十分であるのに対し、曲げ損失特性を改善した低曲げ損失 SMFでは、より小さな曲げ半径で複数の曲げを付与する必要が生じる.ここで、式(3・6)に示 すように、 $P_1(\lambda)$ と  $P_k(\lambda)$ の比率として光強度 $\alpha(\lambda)$ を求めると、シングルモード参照法では図 3・8 右上部に示したような波形を得ることができる. なお,式(3・6)で P<sub>1</sub>(λ)と P<sub>8</sub>(λ)の単位は mW, α(λ)の単位は dB である. この時,光強度αが増大する領域は高次モードが伝搬可能な

領域を表し、遮断波長 $\lambda_c$  は光強度 $\alpha$ の立ち上がる波長として評価できる. マルチモード参照 法では、図 3・8(b)に示すように、長さ 1~2m の MMF を接続して  $P_R(\lambda)$ を測定する. このため、 マルチモード参照法では、励振された基本モードと高次モードの和として  $P_R(\lambda)$ が得られる. シングルモード参照法の場合と同様に、式(3・6)により光強度 $\alpha(\lambda)$ を求めると、マルチモード 参照法では図 3・8 右下部に示したような波形を得ることができる. このとき、遮断波長 $\lambda_c$ は 基本モード成分に対し、高次モード成分が 0.1dB 増加した(高次モード成分の損失が 19.3dB となる)波長として定義されている.

$$\alpha(\lambda) = 10 \log\left\{\frac{P_{1}(\lambda)}{P_{R}(\lambda)}\right\}$$
(3.6)

上述したように、曲げ損失特性を改善した低曲げ損失光ファイバでは、シングルモード参照法による遮断波長の測定において曲げ付与条件の検討が必要となり、測定波形から遮断波 長を検出することが困難となる場合がある.このため、低曲げ損失光ファイバではマルチモ ード参照法を用いることが推奨される.しかし、マルチモード参照法でも、特に光ファイバ の長さが短尺である場合には、図 3・8(b)に示したような波長特性の明確な変化が得られない 場合がある.このような場合、被測定光ファイバの出射端において、多光路干渉(MPI: Multi path interference)による光強度揺らぎを測定することにより、被測定光ファイバ中に残留す る高次モード成分の影響を定量化できる<sup>20)</sup>.



図3・8 遮断波長の試験方法

図 3・9 に MPI 試験法の概念図を示す. MPI 試験法では, 波長領域もしくは時間領域におけ る受光強度の揺らぎを検出する. 光源からの光は偏波スクランブラを介して被測定光ファイ バに入射される. 被測定光ファイバの出射端では, モード間干渉による受光強度揺らぎを波 長領域, もしくは時間領域で検出する. 被測定光ファイバの両端には長さ5 m の通常の SMF を接続し、各接続点におけるモード間の結合比率が1:1となるようにオフセットを与えるこ とで MPI の最悪値が評価できる.使用する光源と受光部の組合せにより、ECL/PM (External cavity laser/Power meter)法と LED/OSA (Light emitting diode/Optical spectrum analyzer)法の二 つの試験法がある.ECL/PM 法では狭線幅の波長可変光源を用い、波長を 0.1 nm 以下のステ ップで掃引させながら各波長の光強度をサンプリングする.LED/OSA 法では広帯域光源を用 い、光スペクトラムアナライザで所望の波長領域における透過光強度を 0.1 nm 以下の分解能 で測定する.さらに、各波長の透過光強度を異なる偏波状態で測定することにより、図 3・9 下段に示すように波長軸上の最大及び最小の光強度変化を抽出できる.このときの受光強度 差の最大値ΔP を式(3・7)に代入することにより、被測定光ファイバ中の MPI を評価できる. ー般に、MPI は光伝送システムのパワーペナルティと関係を有することが知られており<sup>21)</sup>、 被測定光ファイバ中の MPI を測定することにより、残留する高次モード成分が光伝送システ ムに及ぼす影響を考察することができる.



図 3 • 9 MPI の試験法

# 3-2-4 モードフィールド径

(執筆者:中島和秀) [2015年5月 受領]

モードフィールド径 (MFD: Mode field diameter) は、ファーフィールド分布 (FFP: Far field pattern) 掃引法、ニアフィールド分布 (NFP: Near field pattern) 掃引法、バリアブルアパーチャ (VA: Variable aperture) 法の3種類の試験法により測定できる<sup>19)</sup>. 図3·10 に MFD 試験 法の概念図を示す.図3·10(a)に示すように、被測定光ファイバの出射端を中心とする同心円上の受光強度  $F^2(\theta)$ を測定することにより、同図右側に示したような FFP を測定できる. $F^2(\theta)$ 

を式(3・8)に代入することにより,測定波長 $\lambda$ における MFD (2W) が得られる. FFP 法は最も 汎用的な MFD の試験法で,汎用的な SMF では±30 度の受光角度内における  $F^2(\theta)$ を, 30dB 以上の受光ダイナミックレンジで測定することにより十分な評価精度が得られる.

$$2W = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{2\int_{0}^{\pi/2} F^{2}(\theta)\sin(\theta)\cos(\theta)d\theta}{\int_{0}^{\pi/2} F^{2}(\theta)\sin^{3}(\theta)\cos(\theta)d\theta}}$$
(3.8)

図 3·10 (b)に示すように、VA 法では被測定光ファイバからの出射光を可変開口を介して受 光する.このとき、開口角 $\theta$  における受光強度  $P(\theta)$ を最大受光強度  $P_{Max}$ で規格化すると、図 3·10 (b)右側に示すような規格化受光強度  $P(\theta)/P_{Max}$ の開口依存性を求めることができる.こ こで、 $a(\theta) = 1 - P(\theta)/P_{Max}$ とし、 $a(\theta)$ を式(3·9)に代入することにより、測定波長 $\lambda$ における MFD (2W) が得られる.



図 3・10 MFD の試験法

NFP 法では,図 3・10(c)に示すように,被測定光ファイバからの出射光を光学系を介して赤 外カメラなどで受光する.NFP 法では図 3・10(c)右側に示すように,被測定光ファイバの半径 方向の電界強度分布を直接的に評価でき,かつ2次元の光強度分布も容易に観察することが できるが,評価精度が受光素子の分解能により制限されやすいという特徴も有する.ここで, 測定された電界強度分布を f(r)とすると、Petermann II による MFD の定義式<sup>22)</sup> に則り,被 測定光ファイバの波長λにおける MFD (2W) は,式(3·10)により与えられる. なお,いずれ の試験法においても,被測定光ファイバの励振側に,図 3·7 の光損失の試験法に示した高次 モード除去部を設定することが望ましい点を留意されたい.

$$2W = 2\sqrt{\frac{2\int\limits_{0}^{\infty} f^{2}(r)rdr}{\int\limits_{0}^{\infty} \left\{\frac{df(r)}{dr}\right\}^{2}rdr}}$$
(3.10)

ここで紹介した FFP 法, VA 法, NFP 法は互いに相関関係を有し,特に光ファイバの電界 分布がガウス分布として記述できる場合には,式(3・8)~式(3・10)により得られる MFD の値は 完全に一致する.また,VA 法は FFP の積分量として考えることができ,開口角 $\theta$ が十分小 さい範囲であれば(一般的な単一モード光ファイバではこの仮定が十分に成り立つ), $F(\theta$ ) とf(r)はハンケル変換(または逆ハンケル変換)により精度良く置換できる.なお,3種の試 験方法の相関については文献 23) を, $F(\theta$ )とf(r)の変換については文献 24) を参照された い.

このほかにも,双方向から測定した OTDR 波形を用いて被測定光ファイバの MFD を評価 する技術<sup>25</sup>)・<sup>20</sup> もある.図 3・7(b)では,双方向 OTDR 波形の差分により損失成分を抽出で きることを述べたが,MFD 測定では,双方向 OTDR 波形を加算しコア構造に起因する成分 を抽出できることに着目する.なお,双方向 OTDR 法による MFD 測定の詳細については文 献を参照されたい.

## 3-2-5 波長分散

(執筆者:松井 隆) [2015年6月 受領]

波長分散は一般的に, 群遅延を波長の関数として測定し, 測定結果の波長微分を行うこと で得られる. 波長分散を得るには測定データから単純に微分を行うほか, 後述するセルマイ ヤの多項式による近似を行うことにより計算精度を高めることができる.

波長分散の測定法には、位相法、時間領域法、差分位相シフト法、干渉法の4種類がある<sup>27)</sup>.位相法は、正弦変調された異なる2波長間の位相差を測定し、位相差を群遅延に変換することで測定を行う.時間領域法では多波長光源を用いて光パルスを伝送し、受光した 光パルス間の遅延差を得ることで群遅延を測定する.差分位相シフト法では、ある波長にお ける位相と近接する異なる波長における位相を比較することで、2波長間の群遅延差を測定 する.干渉法はSMFを対象に短いサンプル長で測定する方法であり、被測定サンプルと、既 知の群遅延を有する参照経路とでマッハツェンダ干渉計を形成することにより、群遅延の波 長依存性を測定する.

ここでは位相法による波長分散測定方法について詳述する. 図 3・11 に位相法による波長分 散の測定系を示す.光源は測定を行う波長帯に対応する波長可変光源, LED, または ASE 光 源等の広帯域光源を用いる.光源から出射される光波は,信号発生器から入力される所定の 周波数の正弦波によって変調され,被測定光ファイバに入射される.ここで変調周波数は対 象とする光ファイバの種別及び光ファイバ長に応じて設定する必要がある.被測定光ファイ バを伝搬した光信号は受光器により電気信号に変換され、位相計に入力される. 位相計では 受光器から入力された信号と,信号発生器から入力される参照信号とを比較することにより、 入力信号と出力信号の位相差を得る. 測定では、まず最初に、参照用光ファイバ(通常は短 尺の SMF コード)を用いて参照用の位相差 \u03cbm(\u03cbm(\u03cbm))を得る. 次に被測定光ファイバを接続し、 出力信号の位相差 \u03cbm(\u03cbm))を得る. これら二つの位相差を用いて、群遅延τ(\u03cbm))は

$$\tau(\lambda) = \left[\phi_{out}(\lambda) - \phi_{in}(\lambda)\right] \frac{10^6}{360 fL}$$
(3.11)

で求められる.ここで群遅延 $\tau(\lambda)$ は ps/km で与えられ, f, L はそれぞれ変調周波数 [MHz] 及び光ファイバ長 [km] である.



図3・11 位相シフト法による波長分散の測定系

前述のとおり,波長分散測定では群遅延の波長依存性を測定し,微分計算を行うことにより波長分散及び分散スロープを得る.測定精度を高めるため群遅延の波長依存性を所定の関数で近似を行い,近似係数を求める.近似曲線には多項式関数のほか,セルマイヤの多項式 も用いられる.例えば5項のセルマイヤの多項式の場合,群遅延τ(λ),波長分散 D(λ)及び分散スロープ S(λ)は

$$\tau(\lambda) = A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2} + D\lambda^4 + E\lambda^{-4}$$
(3.12)

$$D(\lambda) = 2B\lambda - 2C\lambda^{-3} + 4D\lambda^3 - 4E\lambda^{-5}$$
(3.13)

$$S(\lambda) = 2B + 6C\lambda^{-4} + 12D\lambda^{2} + 20E\lambda^{-6}$$
(3.14)

により近似できる. 群遅延の測定結果を式(3・11)によりフィッティングを行い,近似係数 A ~ E を求める. SMF など,石英の材料分散と類似する波長分散特性を有する光ファイバには, セルマイヤの多項式による近似が用いられる.

図 3・12 に SMF の波長分散の測定例を示す. 図中のシンボルは群遅延の測定結果であり, 2本の実線はそれぞれ式(3・12),式(3・13)で示した 5項のセルマイヤの多項式を用いた近似曲 線である. 図 3・12 より測定に用いた SMF の零分散波長および零分散スロープはそれぞれ, 1 312 nm 及び 0.086 ps/nm<sup>2</sup>・km であり,波長 1 550 nm の波長分散は 17 ps/nm・km と求められ る.



図3・12 波長分散の測定結果例

# 3-2-6 偏波モード分散

(執筆者:松井 隆) [2015年6月 受領]

PMD (Polarization Mode Dispersion) を測定するために様々な方法が提案されているが,その方法は大別して固定アナライザ法,ストークス法,干渉法に分類される<sup>28)</sup>. 図 3・13 に各測定方法の測定系を示す.いずれの方法においても,光源は特定または複数の偏光状態(SOP: State of polarization) に制御されている必要があり,また一定の波長帯(例えば 50~200 nm) にわたり光波を入射する必要がある.一方で光源の波長特性,観測する物理現象,解析手法において大きく異なる.



図 3・13 PMD の測定系

固定アナライザ法は狭帯域の光波に対する応答を所定の波長帯にわたり計測する方法である<sup>29)</sup>. 光源は一つまたは複数の SOP における直線偏波となっており,出力側には固定の偏 光子を設置することで,個々の SOP に対する出力光パワー変動を検出する.得られた出力光 パワー変動の波長特性に対し,ピーク数のカウント,フーリエ変換またはコサインフーリエ 変換を行うことで PMD を得る. ストークス法でも同様に一つまたは複数の SOP における直線偏波の光波を入射し, 所定の 波長帯にわたり測定を行うが, ストークス法では個々の測定波長における出力光のストーク スベクトルを得る<sup>30</sup>. 得られたストークスベクトル  $s(\omega)$ と PMD ベクトル $\Omega(\omega)$ 及び偏波モ ード間群遅延差 (DGD: Differential group delay)  $\tau(\omega)$ には次式の関係がある.

$$\frac{ds(\omega)}{d\omega} = \Omega(\omega) \times s(\omega) \tag{3.15}$$

$$\left|\tau(\omega)\right| = \left|\Omega(\omega)\right| \tag{3.16}$$

PMD は得られた DGD の波長平均を行うことにより得られる.

干渉法は直線偏波の広帯域光源を用い、被測定光ファイバの出射光を偏光子を通したあと に干渉計に入射することによって測定する<sup>31)</sup>.PMDは干渉波形の包絡線によって得られる.

### 3-2-7 モード間群遅延差

(執筆者:松井 隆) [2015年6月 受領]

モード間群遅延差 (DMGD: Differential Modal Group Delay) は MMF におけるモード特性を 評価する手法である<sup>32)</sup>.DMGD 測定は直接的に MMF の伝送帯域を与えるものではないが, レーザの実用的な出射ビーム径等様々な励振条件に対する帯域特性を推定することに有効で あり,特に高速通信用 MMF の評価に用いられる.

図 3・14に DMGD 測定における励振部及び測定結果の概念図を示す. DMGD 測定では通常, 被測定 MMF の入射端に対し, SMF をオフセットを与えながら突き当てて,光パルスを入射 し,出射される光パルスの波形とオフセット量の関係から DMGD を測定する.一般的に入 射点が中心から離れるほど高次のモードが励振され,光ファイバにおけるモードごとの群速 度は高次のモードほど遅くなる.したがって DMGD 測定では SMF を MMF の中心軸に対し て動かしながら光パルスを測定し,最も早い光パルスと最も遅い光パルスの群遅延差が DMGD となる.なお DMGD を得る際には,各パルスのピーク値に対して 25%の値となる遅 延量を用いる.



図 3・14 DMGD 測定の概念図

また一部の高速通信向け MMF 評価では、レーザのビーム出射径を考慮し、全モード励振 ではなく限定モード励振に対応した実効モード帯域(EMB: Effective modal bandwidth)が用 いられる場合がある.特に EMBc はオフセット量に対して重み付けを行うことで EMB を与 えるものとして広く利用されており, DMGD の測定結果 U(r,t)と重み付け係数 W(r)を用いて 次式により計算される.

$$P_o(t) = \sum W(r)U(r,t) \tag{3.17}$$

$$H_F(f) = FT(P_o(t))/FT(R(t))$$
(3.18)

ここで FT はフーリエ変換を表し, R(t)は入射パルス波形である. なお W(r)はアプリケーションやレーザの特性により異なり, W(0)=0 中心から若干ずれた位置にピークを有するものが広く用いられている<sup>33)</sup>.

# ■5 群-2 編-3 章

# 3-3 光ファイバの標準化規格

### 3-3-1 SMFの標準化規格

(執筆者:中島和秀) [2015年5月 受領]

光ファイバの国際標準は ITU-T (Telecommunication standardization sector, International telecommunication union) 及び IEC (International electrotechnical commission) により規格化されている. ITU-T ではネットワークオペレータの要求条件に基づき公共通信網で使用する光ファイバの相互接続標準について検討を行うのに対し, IEC では光ファイバ関連製品の商取引のための国際規格を規定する. ITU-T では 1980 年代にマルチモード光ファイバ (MMF: Multi-mode fiber) とシングルモード光ファイバ (SMF: Single-mode fiber) の両勧告を制定した.公共通信網では専ら SMF が使用される背景を受け, SMF の国際規格は ITU-T が主導し, MMF の国際規格は, IEC が主導している. なお, MMF の標準規格については本章 3-3-2 項で詳細を述べる.

表3・2に SMFの国際標準を示す.これまでに,ITU-T ではG.652~G.657 まで6種類の SMF 勧告を発行している.G.652~G.657 に規定された SMF は、表 3・2 に示したように IEC60793-2-50の各カテゴリ(B1.1 など)と対応しており,ITU-T と IEC 間における光ファ イバ国際標準規格の整合性が担保されている.各 SMF 勧告は光通信システムの変遷とともに 制定されており,G.652 ファイバは1310 nm 帯にゼロ分散波長を有する SMF として制定され た.その後,通信波長帯域が伝送損失最小となる1550 nm 帯に移行し,1550 nm 帯での高速 伝送に適した分散シフト SMF (G.653)とカットオフシフト SMF (G.654)が制定された.さ らに、波長分割多重(WDM: Wavelength division multiplexing)伝送の普及に伴い,通信波長 帯域で非ゼロの波長分散を有する,ノンゼロ分散 SMF (G.655),並びに広波長域ノンゼロ分 散 SMF (G.656)が相次いで勧告化された.このように、G.652 からG.656 に至る SMF は、 使用波長帯域と波長分散特性により規格化が行われてきた経緯を有し、現在も光通信技術の 向上とともに改訂作業が継続されている.

米ファイバ種別	勧告番号及びカテゴリ		
アンティア、作生力	ITU-T	IEC	
1.3µm帯ゼロ分散SMF	G.652	60793-2-50	B1.1 B1.3
分散シフトSMF	G.653		B2
カットオフシフトSMF	G.654		B1.2
ノンゼロ分散SMF	G.655		B4
広波長域ノンゼロ分散SMF	G.656		B5
低曲げ損失SMF	G.657		B6

表3・2 シングルモード光ファイバ (SMF)の国際標準

一方で、低曲げ損失 SMF(G.657)は、Fiber to the home(FTTH)の普及を背景として勧告 化された経緯を有する.光通信技術のアクセスネットワークへの普及に際しては、光ファイ バの取扱性の向上と、それによる建設コストの低減が重要な課題となる.このため、低曲げ 損失 SMF(G.657)は、従来のG.652~G.656で勧告化された光ファイバとは異なり、適用条 件に基づき、勧告化された.

# 3-3-2 MMFの標準化規格

(執筆者:松井隆)

MMFの国際規格は IEC 60793-2 で規定されており,特に通信用途で広く使用されるグレー デッドインデックス(GI: Graded index)型石英 MMF については,ITU-T では G.650.1 として, また構内通信向けとして ISO/IEC 11801 で規定されている. **表 3・3** に MMF の規格及びカテ ゴリを示す.また図 **3・15** に MMF で用いられる屈折率分布を示す.主カテゴリとしてコア及 びクラッドの材料により区分されており,サブカテゴリとして構造パラメータや伝送特性に よって区分される.また屈折率分布はステップ型に加え,DMGD を低減できる GI 型が広く 使用されている. GI 型はコアの屈折率分布がα乗関数となっており, aが 1~3 の場合に GI 型,3 以上の場合はステップ型と定義される.なお一般的にα≈2 が使用され,屈折率分布の 精度が DMGD,すなわち伝送帯域に支配的に影響する.

コア径 50µmのGI型石英MMFは、伝送帯域により複数のサブカテゴリを有し、Ala.4(OM4) の場合光ファイバ長 300 m で 10 Gbit/s 伝送を行うことができる. 伝送帯域は DMGD 及び伝 送損失によって制限され, 原則として全モード励振で行う. ここで近年, MMF を用いた高 速通信に安価かつ集積が容易な面発光レーザ (VCSEL: Vertical cavity surface emitting Laser) が広く普及したことを背景に、高速通信向け MMF である Ala.3(OM3), Ala.4(OM4)について は限定モード励振による実効モード帯域 (EMB: Effective modal bandwidth) が認められてい る. これは VCSEL の出射ビーム径が比較的狭く、実質的に励振されるモード数が少ないこ とに起因する.

ファイバ番別	<del>ל 1</del>	帯域 (MHz·km)		
ノアイハ作生が	IEC60793-2	ISO/IEC11801	*()内はEMB	
	A1a.1	OM1,OM2	20-800	
GI型石英MMF (コア径50µm)	A1a.2	OM3	1500 (2000)	
	A1a.3	OM4	3500 (4700)	
GI型石英MMF (コア径62.5µm)	A1.b	OM1,OM2	10-800	
SI型石英MMF	A2	-	10	
プラスチッククラッド MMF	A3	-	5	
全プラスチックMMF	A4	-	1-500	

表3・3 マルチモード光ファイバ (MMF)の国際標準



データセンタにおける装置間の配線に MMF も使われるようになり, SMF と同様に,低曲 げ損失型 MMF が必要とされている<sup>34)</sup>.低曲げ損失型 MMF は通常,図 3・15 (c)に示すよう なトレンチ付与の GI 型が開発されており, IEC において規格化に向けた議論が進められてい る.低曲げ損失型 MMF ではトレンチ層による強い閉じ込め効果のため,特に伝送特性試験 において漏えいモードの伝搬が問題となる.そのため規格化議論では,低曲げ損失型 MMF の製品規格に加え,試験サンプル長等の試験条件についても併せて議論が進められている.

## ■5 群-2 編-3 章

# 3-4 空間分割多重伝送用の光ファイバ

(執筆者:中島和秀) [2015年5月 受領]

光ファイバは光通信の大容量化, 更には光通信のアクセスネットワークへの普及とともに, 開発・改良されてきた.これまで, SMFの通信帯域は無限と思われてきたが,低損失かつ光 増幅が可能な波長帯域は 10THz 強であり,仮に 10bit/Hz の周波数利用効率を仮定しても,そ の最大伝送容量は 100Tbit/s 程度に制限されることとなる.大容量光通信システムの研究開発 は,既に数 10~100Tbit/s の領域に到達しつつあり,既存の SMFを用いた将来の光通信ネッ トワークで伝送容量の枯渇が顕在化することが懸念されている<sup>35)</sup>.また,光ファイバに入 力可能な光強度を制限する要因として,ファイバフューズ<sup>36)</sup>と呼ばれる現象の存在も指摘 されている.ファイバフューズでは,光ファイバに数 W を超える光が入射された場合に,接 続点等を起点として発生したプラズマがエネルギーの供給源である光源側に向かって伝搬し, 光ファイバに物理的な損傷を与えることが知られている.このような背景から,時分割多重

(TDM: Time division multiplexing), 波長分割多重(WDM: Wavelength division multiplexing) に次ぐ新たな多重軸として,空間分割多重(SDM: Space division multiplexing)の活用が注目 されている. 光ファイバについても,図 3・16 に示すようにコアや伝搬モードを空間チャネ ルとして利用する,SDM 伝送用光ファイバの検討が進められており,今後のさらなる研究開 発が期待される.



図 3・16 SDM 伝送用光ファイバのイメージ

#### ■参考文献

- 1) ITU-T Recommendations G.65x series
- 2) J. B. MacChesney and P. B. O'Connor: "Optical fiber fabrication and resulting product", U.S. Patent 4 217 027.

- D. B. Keck and P. C. Schultz: "Method of producing optical waveguide fibers", U.S. Patent 3 711 262, Jan. 16, (1973)
- P. Geittner, D. Kuppers, and H. Lydtin: "Low-loss optical fibers prepared by plasma-activated chemical vapor deposition (CVD)", Appl. Phys. Lett., vol. 28, no. 11, pp. 645-646 (June 1976)
- T. Izawa, S. Sudo, and F. Hanawa: "Continuous fabrication process for high silica fiber perform", Trans. IECE Japan Vol. E62, p. 779 (1979)
- 6) ITU-T Recommendation G.650.1
- K. Kitayama, Y. Kato, M. Ohashi, Y. Ishida, and N. Uchida: "Design considerations for the structural optimization of a single-mode fiber", J. Lightwave Technol., vol. 1, no. 2, pp. 363-369 (1983)
- A. Bhagavatula, M. S. Spotz, and D. E. Quinn: "Uniform wave- guide dispersion segmented-core designs for dispersion-shifted single- mode fibers", in Tech. Dig. Topical Meet. Optical Fiber Communication (New Orleans. LA), Pap. MG2, pp. 20-21 (1984)
- M. Ohashi, N. Kuwaki, C. Tanaka, N. Uesugi, and Y. Negishi: "Bend-optimised dispersion-shifted step-shaped-index (SSI) fibres", Electron. Lett, vol. 22, no. 24, pp. 1285-1286 (1986)
- 10) R. D. Standley: "Fiber ribbon optical transmission line", Bell Sys. Tech. J., vol. 53, no. 6, pp. 1183-1185 (1974)
- Y. Katsuyama, S. Hatano, K. Hogari, T. Matsumoto and T. Kokubun: "Single-mode optical-fibre ribbon", Electron. Lett., vol. 21, no. 4, pp. 134-135 (1985)
- K. Hogari, Y. Yamada, and K. Toge: "Novel optical fiber cables with ultrahigh density", J. Lightwave Technol., vol. 26, no. 17, pp. 3104-3109 (2008)
- T. Hasegawa, E. Sasaoka, M. Onishi, M. Nishimura, Y. Tsuji, and M. Koshiba: "Novel hole-assisted lightguide fiber exhibiting anomalous dispersion and low loss below 1 dB/km", Proceedings of OFC, PD5 (2001)
- 14) K. Nakajima, T. Shimizu, T. Matsui, C. Fukai, T. Kurashima: "Bending-loss insensitive fiber with hole-assisted structure," IEICE Trans. Commun., Vol. E94-B, No. 3, pp. 718-724 (2011)
- T. A. Birks, J. C. Knight, and P. S. J. Russell: "Endlessly single-mode photonic crystal fiber", Opt. Lett., Vol. 22, No. 13, pp. 961-963 (1997)
- 16) R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight, T. A. Birks, P. St.J. Russell, P. J. Roberts, and D. C. Allan: "Single-mode photonic band gap guidance of light in air", Science, Vol. 285, No. 5433, pp. 1537–1539 (1999)
- Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, H. Kobayashi, and Y. Ishida: "Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing", J. Appl. Phys., Vol. 53, No. 7, 4847-4853 (1982)
- 18) 立蔵正男, 富田信夫: "光ファイバコードの機械的信頼性の理論検討",信ソ大, B-10-9 (1997)
- ITU-T Recommendation G.650.1: "Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable" (2010)
- ITU-T Recommendation G.650.1, Amd. 1, "Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable" (2012)
- H. Takahashi, K. Oda, and H. Toba: "Impact of crosstalk in an arrayed-waveguide multiplexer on N x N optical interconnection", J. Lightwave Technol., Vol. 14, No. 6, pp. 1097-1105 (1996)
- K. Petermann: "Constrants for fundamental-mode spot size for broadband dispersion-compensated single-mode fibres," Electron. Lett., Vol. 19, No. 18, pp. 712–714 (1983)
- 23) IEC 60793-1-45, "Measurement methods and test procedures Mode field diameter" (2001)
- 24) K. Hotate, and T. Okoshi: "Measurement of refractive-index profile and transmission characteristics of a single-mode optical fiber from its exit-radiation pattern," Appl/ Opt., Vol. 18, No. 19, pp. 3265-3271 (1979)
- M. S. O'Sullivan and J. Ferner: "Interpretation of SM fiber OTDR signatures", Proceedings of SPIE, Vol. 661, pp. 171–176 (1986)
- 26) A. Rossaro, M. Schiano, T. Tambosso, and D. D'Alessandro: "Spatially resolved chromatic dispersion measurement by a bidirectional OTDR technique," IEEE J. Sel. Topics Quantum Eelctron., Vol. 7, No. 3, pp. 475-483, (2001)
- IEC 60793-1-42 Edition 3.0: "Optical fibres Part 1-42: Measurement methods and test procedures chromatic dispersion" (2013)
- 28) IEC 60793-1-48 Edition 2.0: "Optical fibres Part 1-42: Measurement methods and test procedures polarization mode dispersion" (2007)

- C. D. Poole and D. L. Favin: "Polarization-mode dispersion measurement based on transmission spectra through an analyzer", J. Lightwave Technol., vol. 12, no. 6, pp. 917- 929 (1994)
- R. C. Jones, "A new calculus for the treatment of optical systems. VI. Experimental determination of the matrix", J. Opt. Soc. Am., vol. 37, pp. 110-112 (1947)
- N. Cyr, "Polarization-mode dispersion measurement: generalization of the interferometric method to any coupling regime", J. Lightwave Technol., vol. 22, no. 3, pp. 794-805 (2004)
- IEC 60793-1-49 Edition 2.0, "Optical fibres Part 1-42: Measurement methods and test procedures differential mode dispersion" (2006)
- 33) P. Pepuljugoski, S. Golowich, J. Ritger, P. Koleser, and A. Risteski: "Modeling and simulation of the next generation multimode fibre", IEEE. J. Lightwave Technol., vol. 21, no. 5, pp. 1242-1255 (2003)
- 34) D. Molin, G. Kuyt, M. Bigot-Astrue, and P. Sillard: "Recent advances in MMF technology for data networks", in the Proceedings of OFC/NFOEC2011, OWJ6 (2011)
- T. Morioka: "New generation optical infrastructure technologies: "EXAT initiative" towards 2020 and beyond," Proceedings of OECC, FT4 (2009)
- 36) R. Kashyap, and K. J. Blow: "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres," Electron. Lett., Vol. 24, No. 1, pp. 47-49 (1988)