

## JT-G650.1

# シングルモード光ファイバ及び ケーブルの線形特性の定義及び試験方法

Definitions and test methods for linear, deterministic  
attributes of single-mode fibre and cable

第2版

2022年5月19日制定

一般社団法人  
情報通信技術委員会

THE TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY COMMITTEE

本書は、一般社団法人情報通信技術委員会が著作権を保有しています。  
内容の一部又は全部を一般社団法人情報通信技術委員会の許諾を得ることなく複製、転載、  
改変、転用及びネットワーク上での送信、配布を行うことを禁止します。

## 目 次

<参考> .....	5
<G.650.1 (2020/10) 和訳> .....	6
1. 規定範囲.....	7
2. 参照.....	7
3. 定義.....	8
3.1 一般的な定義.....	8
3.2 機械的特性.....	8
3.3 ガラスの幾何学的特性 .....	8
3.4 光学特性.....	9
3.5 その他.....	11
4. 略語.....	12
5. 慣例.....	12
6. 試験方法.....	13
6.1 モードフィールド径の試験方法 .....	13
6.2 クラッド径、コア偏心率及びクラッド非円率の試験方法.....	20
6.3 カットオフ波長の試験方法 .....	30
6.4 損失の試験方法.....	38
6.5 波長分散の試験方法 .....	50
6.6 マクロバンド損失の試験方法 .....	54
6.7 スクリーニング(プルーフ)試験方法.....	56
付属文書A 波長分散近似 .....	61
A.1 概要.....	61
A.2 近似式及び係数の定義 .....	61
A.3 近似の手順.....	62
付録I カットオフ波長補間法.....	63
I.1 限定負誤差法.....	63
I.2 最小二乗法.....	64
I.3 例.....	65
付録II 後方散乱光を用いた波長分散の長手方向均一性の試験方法 .....	66
II.1 概要.....	66
II.2 試験装置 .....	66
II.3 測定手順.....	67
II.4 結果の表示 .....	70
付録III マトリックスモデルの例 .....	71
III.1 JT-G652.D及びJT-G654.E光ファイバの特性行列の例 .....	71
III.2 予測波長とモデリング誤差の関係の例.....	73
付録IV 短尺光ファイバケーブル(ジャンパ)におけるコヒーレントMPIの試験法 .....	75
IV.1 第1試験法：狭帯域ECL/PM法.....	75
IV.2 第2試験法：広帯域LED/OSA法 .....	79
IV.3 第3試験法：光ファイバ伸張法 .....	81
付録V 波長分散測定のための干渉法 .....	84

V.1 概要.....	84
V.2 試験装置.....	84
参考文献.....	88

## <参考>

### 1. 国際勧告との関係

本技術仕様は、ITU-T 勧告 G.650.1(2020/10)に準拠したものである。

### 2. 上記国際勧告等との相違

#### 2.1 追加項目

なし

#### 2.2 削除項目

なし

#### 2.3 変更項目

なし

#### 2.4 章立ての相違

なし。第2版の改定により、項番号(6.1.2～6.1.4、6.2.2～6.2.4、6.4.2～6.4.4、6.5.2、Annex A、Appendix I～V)を追記した。これにより、ITU-T 勧告 G.650.1(2020/10)との相違はない。

#### 2.5 その他

なし

### 3. 改版の履歴

版数	制定日	改版内容
第1版	2021年5月20日	制定
第2版	2022年5月19日	改定

### 4. 工業所有権

本標準に関わる「工業所有権等の実施に係る確認書」の提出状況は、TTC ホームページを参照

### 5. その他

#### 5.1 参照する勧告、標準など

「2章 参照」を参照

### 6. 標準作成部門

光ファイバ伝送専門委員会

## <G.650.1 (2020/10) 和訳>

### シングルモード光ファイバ及びケーブルの特性

#### 概要

TTC 標準 JT-G650.1 には、シングルモード光ファイバ及びケーブルの線形特性の定義が含まれている。また、これらの特性を評価するための基準試験方法及び代替試験方法を含む。

これらの試験方法は、主にシングルモード光ファイバとケーブルの線形特性を対象とし、製品試験における決定論的特性評価に適している。試験方法のいくつかは、個別の光学部品の特性評価に使用することもできる。

#### キーワード

決定論的特性、線形特性、シングルモード光ファイバの特性評価

## 1. 規定範囲

本標準は、主として[JIT-G652]、[ITU-T G.653]、[JT-G654]、[ITU-T G.655]、[ITU-T G.656]及び[JIT-G657]に記述されているシングルモード光ファイバ及びケーブルの線形特性の定義と試験方法を記述し、製品試験における決定論的特性評価に利用できる。

これらの定義及び試験方法は、[ITU-T G.651.1]に規定されているようなマルチモード光ファイバには適さない。試験方法の中には、[ITU-T G.671]に記載されているような個別の光学部品の特性評価に使用できるものもある。[ITU T G.650.2]には、統計的な特性及び非線形特性の定義と試験方法が含まれている。

## 2. 参照

以下の ITU-T 勧告及びその他の参考文献は、本標準内で参照され、本標準を構成する規定を含んでいる。本標準の発行時は、記載の版数が最新です。すべての勧告及び他の参考文献は改訂されることがある。したがって、本標準の読者には、以下の勧告及び他の参考文献の最新版を適用すべきか確認することを勧める。現時点で有効な ITU-T 勧告のリストは定期的に発行されている。本標準に記載の文献の参照は、独立した文献として、その勧告の状態を示すものではない。

- [ITU-T G.650.2] Recommendation ITU-T G.650.2 (2015), Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fibre and cable.
- [ITU-T G.651.1] Recommendation ITU-T G.651.1 (2018), Characteristics of a 50/125 µm multimode graded index optical fibre cable for the optical access network.
- [JT-G652] JT-G652 (2018), シングルモード光ファイバ及びケーブルの諸特性
- [ITU-T G.653] Recommendation ITU-T G.653 (2010), Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.
- [JT-G654] JT -G.654 (2020), カットオフシフトシングルモード光ファイバ及びケーブルの諸特性
- [ITU-T G.655] Recommendation ITU-T G.655 (2009), Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.
- [ITU-T G.656] Recommendation ITU-T G.656 (2010), Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport.
- [JT-G657] JT -G.657 (2016), 低曲げ損失シングルモード光ファイバ及びケーブルの諸特性
- [ITU-T G.671] Recommendation ITU-T G.671 (2019), Transmission characteristics of optical components and subsystems.
- [IEC 60793-1-1] IEC 60793-1-1 (2017), Optical fibres – Part 1-1: Measurement methods and test procedures – General and guidance.
- [IEC 60793-1-30] IEC 60793-1-30 (2010), Optical fibres – Part 1-30: Measurement methods and test procedures – Fibre proof test.
- [IEC 60793-1-42] IEC 60793-1-42 (2013), Optical fibres – Part 1-42: Measurement methods and test procedures – Chromatic dispersion. (Annex C, Differential phase shift test method.)

- [IEC 60793-1-44] IEC 60793-1-44 (2011), Optical fibres – Part 1-44: Measurement methods and test procedures – Cut-off wavelength.
- [IEC 60793-1-45] IEC 60793-1-45 (2017), Optical fibres – Part 1-45: Measurement methods and test procedures – Mode field diameter.
- [IEC 60793-1-46] IEC 60793-1-46 (2001), Optical fibres – Part 1-46: Measurement methods and test procedures – Monitoring of changes in optical transmittance.
- [IEC 60793-1-47] IEC 60793-1-47 (2017), Optical fibres – Part 1-47: Measurement methods and test procedures – Macrobending loss.
- [IEC 61745] IEC 61745 (2017), End-face image analysis procedure for the calibration of optical fibre geometry test sets.
- [IEC 61746-1] IEC 61746-1 (2009), Calibration of optical time-domain reflectometers (OTDR) – Part 1: OTDR for single mode fibres.

### 3. 定義

本標準は以下の用語を定義している。

#### 3.1 一般的な定義

**3.1.1 代替試験方法 (ATM) :** 光ファイバ又は光ファイバケーブルの規格に定められた特性を、この特性の定義に準ずる手順で試験する方法であって、再現性があり、基準試験方法及びに対する代替として定められた試験方法。

**3.1.2 クラッドモード除去器 :** クラッドモードから放射モードへの変換を促進する装置。

**3.1.3 モードフィルタ :** ある特定の一つ以上のモードを選択又は除去するもの。

**3.1.4 基準試験方法 (RTM) :** 光ファイバ又は光ファイバケーブルの規格に定められた特性を、定義に従って厳密に測定する方法であって、正確で再現性があり、基準として定められた試験方法。

**3.1.5 屈折率分布 :** 光ファイバ断面内の直径方向に沿った屈折率の分布。

#### 3.2 機械的特性

**3.2.1 プルーフトレレベル :** プルーフトレレベルとは、全長の光ファイバが規定された短時間の間に受ける張力又はひずみであり、プルーフトレ (強度試験) の試験条件である。これは、光ファイバ全長に沿って連続的に試験される。

**3.2.2 疲労係数 :** 疲労係数  $n$  は、実験に基づいた、光ファイバに加えられた応力の亀裂成長依存性に関する無次元数である。周囲温度、湿度、その他の環境条件に依存する。

疲労係数には静的疲労係数と動的疲労係数がある。

静的疲労係数  $n_s$  は、印加応力と破断時間、それぞれの対数の傾きの逆数で求められる。動的疲労係数  $n_d$  は、破断応力と応力負荷速度、それぞれの対数の傾き  $1/(n_d + 1)$  で求められる。

注記:  $n$  は整数である必要はない。

#### 3.3 ガラスの幾何学的特性

**3.3.1 クラッド :** 光ファイバ断面におけるガラスの最も外側の領域。

**3.3.2 クラッド中心**：クラッド領域の外周を最も良く近似する円の中心。

注記:最適な近似方法を指定する必要がある。

**3.3.3 クラッド径**：クラッドの中心を定義する円の直径。

**3.3.4 クラッド径偏差**：クラッド径の実際の値と公称値との差。

**3.3.5 クラッド非円率**：クラッド公差領域で定義された 2 つの円の直径の差を、クラッド径に対する百分率で表した値。

**3.3.6 クラッド公差領域**：光ファイバの断面で、クラッド領域の外周に外接する円と、その外接円と同心でクラッド領域に内接する最大の円との間の領域

**3.3.7 コア中心**：コア中心は、光ファイバのカットオフ波長より上及び/又は下の波長を用いて、光ファイバの中心領域から放射されるニアフィールドパターンにおける一定レベルの点を最もよく近似する円の中心。

注記 1：上記の一定レベルは、最大ニアフィールドパターンの 5% から 50% の間で選択される。

注記 2：通常、コア中心はモードフィールド中心の近似値を表す。

**3.3.8 コア偏心量**：コア中心とクラッド中心との距離。

### 3.4 光学特性

#### 3.4.1 モードフィールドの定義

**3.4.1.1 モードフィールド**：モードフィールドは光ファイバ断面内を LP<sub>01</sub> モードで伝搬する光の空間的な強度分布の広がりを表す数値。

**3.4.1.2 モードフィールド中心**：モードフィールド中心は、光ファイバ断面内を伝搬する光の空間的な強度分布の重心の位置。

注記 1：重心は  $r_c$  にあり、位置ベクトル  $r$  の正規化された重み付け積分である。

$$r_c = \frac{\iint_{Area} rI(r)dA}{\iint_{Area} I(r)dA} \quad (3-1)$$

注記 2：定義された重心の位置と空間強度分布の最大値の位置との対応関係については、さらに検討が必要である。

**3.4.1.3 モードフィールド同心度誤差**：モードフィールド中心とクラッド中心との距離。

**3.4.1.4 モードフィールド径**：モードフィールド径 (MFD)  $2w$  は、光ファイバ断面におけるモードの電界強度の横方向の広がりの尺度を表し、ファーフィールド電解強度分布  $F^2(\theta)$  から、次式によって定義される。

ここで、ファーフィールド角  $\theta$  は光ファイバ軸からの放射角を表す。

$$2w = \frac{\lambda}{\pi} \left[ \frac{2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} F^2(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} F^2(\theta) \sin^3 \theta \cos \theta d\theta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-2)$$

**3.4.1.5 モードフィールドの非円率**：検取目的のためにモードフィールドの非円率を測定することは一般的には不要であるため、モードフィールドの非円率の定義は不要である。

#### 3.4.2 波長分散の定義

**3.4.2.1 波長分散**：入射された光パルスが群速度の違いによって、出射端で生じる光ファイバ内での光パルスの広がり。

**3.4.2.2 波長分散係数**：単位波長の変化による単位ファイバ長に対する光パルスの群遅延の変化。従って、波長分散係数は、 $D(\lambda)=d\tau/d\lambda$ となる。単位は ps/(nm×km)で表す。

**3.4.2.3 波長分散スロープ**：波長分散係数対波長曲線の勾配。波長分散スロープは  $S(\lambda)=dD/d\lambda$ と定義される。

**3.4.2.4 群遅延**：光パルスが単位長の光ファイバを進むのに要する時間。波長の関数としての群遅延は  $\tau(\lambda)$ で表される。単位は ps/km で表す

**3.4.2.5 波長分散の長さ方向の均一性**：光ファイバ又はケーブルの長さ方向における波長分散係数の変化。

**3.4.2.6 ゼロ分散スロープ**：ゼロ分散波長における波長分散スロープ。

**3.4.2.7 ゼロ分散波長**：波長分散係数がゼロとなる波長。

**3.4.3 カットオフ波長**：理論上のカットオフ波長は、シングルモード光ファイバ内で基本モードが伝搬できる最短波長である。この特性は光ファイバの屈折率分布から計算できる。理論的カットオフ波長以下の波長ではいくつかのモードが伝搬し、光ファイバはもはやシングルモード伝搬状態ではなくマルチモード伝搬状態である。

光ファイバでは、マルチモード伝搬状態からシングルモード伝搬状態への変化は、特定の波長ではなく、ある範囲の波長にわたって緩やかに生じる。したがって、通信ネットワークにおける光ファイバ性能を決定するためには、光ファイバが動作しているときの理論的なカットオフ波長は、シングルモード性能に対する実際の閾値波長よりも有用性が低い。したがって、以下に定義されているカットオフ波長と呼ばれるより実効的なパラメータを、シングルモード光ファイバ仕様に導入するものとする：

カットオフ波長は、光ファイバに入射された高次モードを含む全パワーと基本モードのパワーとの比が 0.1 dB 以下となる波長と定義される。この定義によれば、全モードが等しく励起されている場合、二次 (LP<sub>11</sub>) モードは、基本 (LP<sub>01</sub>) モードより 19.3 dB 大きい損失が生じる。

カットオフ波長は、光ファイバの長さや曲がり、及びひずみ状態に依存するため、測定されたカットオフ波長の値は、測定された光ファイバの敷設状態、長さ及びケーブル化されているか否かで異なる。したがって、定義されているカットオフ波長には、ケーブルカットオフ波長とファイバカットオフ波長の2種類がある。

**ケーブルカットオフ波長  $\lambda_{cc}$**  — 両端から 1 m のケーブル構造を取り去った全長 22 m の光ファイバケーブルを用い、両端 1 m の光ファイバ部を半径 40 mm に巻いた状態で測定したカットオフ波長。代替測定法として 22 m の光ファイバを用い全体を半径 140 mm 以上に巻き、両端を半径 40 mm に巻いた状態で測定する方法もある。

**ファイバカットオフ波長  $\lambda_c$**  — ファイバカットオフ波長は、短い長さのケーブル化されていない一次被覆光ファイバで測定される。

モードノイズと分散ペナルティを回避するために、最短ケーブル長(余長を含む)のカットオフ波長  $\lambda_{cc}$  は、想定される最短システム波長  $\lambda_s$  よりも短くすることが望ましい。

$$\lambda_{cc} < \lambda_s \quad (3-3)$$

これにより、各ケーブルピース長がシングルモード伝搬状態になる。不完全な接続部は、何らかの高次 (LP<sub>11</sub>) モードのパワーを生成する。シングルモード光ファイバは、通常、短距離(敷設状況に応じて数メートル程度)は高次モードが伝搬する。したがって、光ファイバが次の接続部に到達する前に LP<sub>11</sub> モードを減衰させるのに十分な距離を確保するために、接続部間での最小距離を指定する必要がある。最短ケーブルピース長で式(3-3)が満たされると、それより長いすべてのケーブルピース長で式(3-3)が満たされ、シングルモード伝搬が

実現できる。

光ファイバのカットオフ波長とモードフィールド径を組み合わせ、光ファイバの曲げ損失特性を推定することができる。長いファイバカットオフ波長と小さいモードフィールド径により、曲げ損失耐性が高い光ファイバが得られる。このためファイバカットオフ波長 $\lambda_c$ は、システムの伝送波長よりも長波長に設定される場合がある。すべての実際の敷設技術及びケーブル設計は、システムの伝送波長以下のケーブルカットオフ波長を保証する必要がある。

ケーブルカットオフ波長 $\lambda_{cc}$ の規定は、シングルモード伝搬を保証するためのより直接的な方法であるため、ファイバカットオフ波長 $\lambda_c$ の規定よりも、 $\lambda_{cc}$ を規定することが望ましい。しかし、 $\lambda_{cc}$ での規定が困難なケース（例えば、ピッグテール、ジャンパケーブルのような単心ケーブル、又は $\lambda_{cc}$ の試験方法(RTM)とは著しく異なる敷設状況の場合)では、 $\lambda_c$ での規定が適切である。これらは[JIT-G.652]、[ITU T G.653]、[JIT-G.654]、[ITU-T G.655]、[ITU-T G.656]、及び[JIT-G.657]で説明されている。

注記：短い(通常 10m 未満)光ファイバのシングルモード伝搬は、マルチパス干渉(MPI)を評価することでさらに調査できる。MPIの一般的な情報は[b-ITU-T G.Sup.47]の6.1項に記載されており、コヒーレントMPI試験方法は本標準の付録IVに記載されている。

**3.4.4 損失：**距離Lだけ離れた2つの断面1と2の間の波長 $\lambda$ における光ファイバの損失 $A(\lambda)$ は、次式で定義される。

$$A(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \text{ (dB)} \quad (3-4)$$

ここで、 $P_1(\lambda)$ は波長 $\lambda$ で断面1を通過する光パワーであり、 $P_2(\lambda)$ は波長 $\lambda$ での断面2を通過する光パワーである。

均一な光ファイバの場合、光ファイバの長さに依存しない単位長あたりの損失又は損失係数を定義できる。

$$a(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} \text{ (dB/unit length)} \quad (3-5)$$

**3.4.5 マクロベンド損失：**マクロベンド損失は、光ファイバのマクロベンド性能を評価するために、異なる曲げ半径、ターン数及び特定の波長の下での損失値である。結果は次式のようにdB単位で表す。

$$Loss(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{str}}{P_{bend}} \right) \quad (3-6)$$

ここで、 $P_{str}$ は曲げが無い状態で測定された出射光パワー、 $P_{bend}$ は曲げが与えられた状態で測定した出射光パワーである。

## 3.5 その他

**3.3.1 一次被覆：**クラッド表面の完全性を維持し、必要最小限の保護(例えば、250  $\mu\text{m}$ の保護被覆)を行うために、線引きプロセス中又はその後に光ファイバクラッドに塗布される被覆材料の層。

**3.3.2 二次被覆：**追加の必要な保護を与えるため、又は特定の構造内に光ファイバと一緒に配置するために、単心もしくは複数の一次被覆光ファイバの上に塗布される一つ又は複数の被覆材料の層(例えば、900  $\mu\text{m}$ 「バッファ」コーティング、「タイトジャケット」、又はリボンコーティング)。

## 4. 略語

本標準は以下の略語と頭文字を使用する。

ATM	Alternative Test Method	代替試験方法
CCD	Charge Coupled Device	電荷結合素子
DGD	Differential Group Delay	群遅延時間差
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	高密度波長分割多重
ECL	External Cavity Laser	外部共振器レーザ
EELED	Edge Emitting Light Emitting Diode	端面発光ダイオード
FS	Fibre Stretching	光ファイバストレッチ
FSR	Free Spectral Range	自由スペクトル範囲
FWHM	Full Width at Half Maximum	半値全幅
HOM	High-Order Mode	高次モード
LD	Laser Diode	レーザダイオード
LED	Light Emitting Diode	発光ダイオード
MFCE	Mode Field Concentricity Error	モードフィールド偏心率
MFD	Mode Field Diameter	モードフィールド径
MPI	Multipath Interference	マルチパス干渉
NA	Numerical Apertures	開口数
Nd YAG	Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet	ネオジウムイットリウムアルミニウムガーネット
NFP	Near-Field Pattern	ニアフィールドパターン
OSA	Optical Spectrum Analyser	光スペクトルアナライザ
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer	光パルス試験器
PM	Power Meter	パワーメータ
RIN	Relative Intensity Noise	相対強度ノイズ
RTM	Reference Test Method	基準試験方法
TBD	To Be Determined	未定
TEM	Transverse Electromagnetic Mode	横方向電磁モード
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波長分割多重
WTL	Wavelength Tunable Laser	波長可変レーザ

## 5. 慣例

特に指定のない限り [IEC 60793-1-1] に従って大気条件の標準範囲を用いる。

## 6. 試験方法

基準試験法 (RTM)と代替試験法 (ATM)は、通常の製品受入検査を目的とする試験に利用可能である。しかしながら、ATM を使用して何らかの乖離が生じた場合には、厳密な測定結果を得るための試験法としての RTM を使用することが推奨される。

注記：試験装置及び手順は、試験方法の基本的な特徴のみを記載している。詳細な計測を行う装置には、安定性、ノイズ除去、信号対雑音比などを確保するために必要なすべての措置が組み込まれるものとする。

### 6.1 モードフィールド径の試験方法

#### 6.1.1 基準試験方法：ファーフィールド走査法

##### 6.1.1.1 概要

モードフィールド径は、3.4.1.4 項にて定義されるファーフィールド電界強度分布  $F^2(\theta)$  を用いて決定される。式 3-2 の積分範囲は 0 から  $\pi/2$  であるが、この表記は、引数の上限値において積分値は切り捨てられることを意味している。引数  $\theta$  が最大値  $\pi/2$  の時、被積分関数は 0 になる。この積分値の切り捨てによって生じるモードフィールド径の相対誤差については、6.1.1.2.6 項に記載する。

##### 6.1.1.2 試験装置

試験装置の概略図を図 1 に示す。

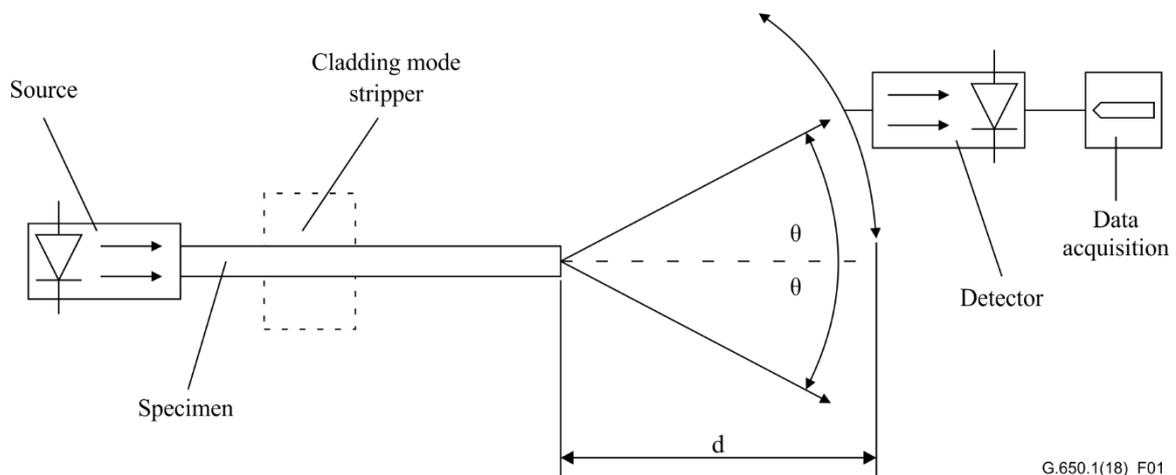


図 1 ファーフィールド走査法の試験装置構成

##### 6.1.1.2.1 光源

光源は、測定を完了するのに十分長い時間にわたって、位置、強度及び波長が安定していなければならない。光源の波長は、高次の導波モードが励振されないように選択することが望ましい。スペクトル線幅 (FWHM) は 10nm 以下とする。

##### 6.1.1.2.2 変調

受信器での信号対雑音比を改善するために、慣例的に試験光源を変調する。そのような手法を採用する場

合、検出器は光源の変調周波数に同期した信号処理システムに接続することが望ましい。検出システムは、実効的に線形な感度を有する必要がある。

#### 6.1.1.2.3 試験光の励振条件

試験光源の励振機構は、基本モード(LP<sub>01</sub>)を十分に励振するように設定されなければならない。例えば、以下のような励振状態が考えられる。

- a) 光ファイバとの直接結合
- b) 適切な光学系を介した励振

高次モードが伝搬しないようにすることが望ましい。高次モードを除去するため、適切な半径の曲げ、又はモードフィルタを利用することが必要である。たとえば、ほとんどの ITU-T G.65x 光ファイバでは、半径が 30mm の 1 回曲げで十分なモードフィルタが実現できる。一部の JT-G.657 光ファイバでは、より小さい半径の曲げ、複数回の曲げ、又はより長いサンプル長を適用することで、高次モードを除去できる。

#### 6.1.1.2.4 クラッドモード除去器

クラッドモードの伝搬及び検出を防止する必要がある。

#### 6.1.1.2.5 試験体

試験体は、短い光ファイバとする。モードストリップを使用している場合は、モードストリップに挿入される光ファイバから一次被覆を除去する。光ファイバの端部はゴミの付着がなく滑らかで、光ファイバ軸に垂直であり、その角度は 1° 以内であることが推奨される。

#### 6.1.1.2.6 走査装置

ファーフールド電界強度分布を走査する機構を使用する。(例えば、ピンホール開口を有する走査型光検出器又は走査型ピグテール付き光検出器)。検出器は光ファイバ端から少なくとも 10mm 離すことが望ましく、検出器の有効受光領域はファーフールドにおいて過度に大きな角度になるべきではない。これは、光ファイバ端から  $40wb/\lambda$  を超える距離に検出器を配置することによって保証することができる。ここで、 $2w$  は被測定光ファイバの予想モードフィールド径であり、 $b$  は検出器の有効受光領域の直径である。

測定装置のダイナミックレンジは 50 dB 以上が望ましい。これは、最大走査半角 20° や 25° より大きい場合に相当し、JT-G.652 及び ITU T G.653 光ファイバをそれぞれ測定対象とする角度である。

注記 1：ダイナミックレンジ(又は最大走査半角)要件を劣化させると、測定誤差を生じる。たとえば、これらの値について ITU-T G.652 光ファイバの場合に 30 dB と 12.5°、ITU-T G.653 光ファイバの場合に 40 dB 及び 20° にそれぞれ制限する場合、モードフィールド径 (MFD) に対して 1% を超える相対誤差が生じる可能性がある。

注記 2：JT-G654 光ファイバの場合は、ITU-T G.652 光ファイバの場合と同じ事項について考慮すること。

#### 6.1.1.2.7 光検出器

適切な検出器を用いる。検出器は線形な感度特性を有していなければならない。

#### 6.1.1.2.8 増幅器

信号レベルを増加させるためには増幅器の使用が望ましい。

#### 6.1.1.2.9 データ収集

測定した信号レベルを記録し、適切に処理するものとする。

#### 6.1.1.3 測定手順

光ファイバ入射端を入射光軸に調整し、光ファイバの出力端を出力側装置に合わせる。

以下の手順に従って測定する:0.5°以下の固定ステップで検出器を走査する。ファーフィールド電界強度分布  $F^2(\theta)$ を測定し、式 3-2 からモードフィールド径を計算する。

#### 6.1.1.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする:

- a) 試験装置の構成、測定システムのダイナミックレンジ、処理アルゴリズム、及び使用した走査装置の説明(走査角度を含む)
- b) 試験光の励振条件
- c) 光源の波長とスペクトル線幅FWHM
- d) 被測定光ファイバの識別と長さ
- e) クラッドモード除去器の種類
- f) 高次モードフィルタの説明
- g) 検出器の種類と寸法
- h) 被測定サンプルの温度及び環境条件(必要に応じて)
- i) 確度と再現性の指標
- j) モードフィールド径

### 6.1.2 第1の代替試験方法:開口数可変法 (VA 法)

#### 6.1.2.1 概要

モードフィールド径は、開口数の伝達関数  $a(x)$  で表される。 $(x=D \cdot \tan\theta)$  は開口半径、 $D$  は開口とファイバ間距離:

$$2w = (\lambda / \pi D) \left[ \int_0^{\infty} a(x) \frac{x}{(x^2 + D^2)^2} dx \right]^{-1/2} \quad (6-1)$$

式 3-2 と式 6-1 の数学的等価性は、微小角度  $\theta$  の近似において有効である。この近似の下で、式 6-1 は式 3-2 を積分することで導かれる。

## 6.1.2.2 試験装置

### 6.1.2.2.1 光源(6.1.1.2.1 項を参照)

### 6.1.2.2.2 変調(6.1.1.2.2 項を参照)

### 6.1.2.2.3 試験光の励振条件(6.1.1.2.3 項を参照)

### 6.1.2.2.4 クラッドモード除去器(6.1.1.2.4 項を参照)

### 6.1.2.2.5 試験体(6.1.1.2.5 項を参照)

### 6.1.2.2.6 開口装置

開口数が 0.02 から 0.25 まで([ITU-T G.653]、[ITU-T G.655]及び[ITU-T G.656])に準ずる光ファイバにおいては 0.4 までの範囲で、12 水準以上の開口で走査する機構を有する。開口部を透過した光は検出器上に集光される。

注記 - 集光に用いる光学系の開口数 (NA) は、測定結果に影響を与えないよう十分大きくする必要がある。

### 6.1.2.2.7 検出器(6.1.1.2.7 項を参照)

### 6.1.2.2.8 増幅器(6.1.1.2.8 項を参照)

### 6.1.2.2.9 データ収集(6.1.1.2.9 項を参照)

## 6.1.2.3 測定手順

光ファイバの試験光入射端を光源の光軸に合わせ、光ファイバの出射端を適切な出力装置に合わせるものとする。

以下の手順に従うものとする:各開口で透過出力  $P(x)$  を測定し、開口数の伝達関数  $a(x)$ を以下のとおり求める:

$$a(x) = 1 - \frac{P(x)}{P_{\max}} \quad (6-2)$$

ここで、 $P_{\max}$  は最大の開口を透過するパワーであり、 $x$  は開口半径である。モードフィールド径は、式 6-1 から計算される。

## 6.1.2.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする:

- a) 試験装置の構成、測定システムのダイナミックレンジ、処理アルゴリズム、及び使用する開口部の説明(NAを含む)
- b) 試験光の励振条件
- c) 光源の波長とスペクトル線幅FWHM
- d) 被測定光ファイバの識別と長さ
- e) クラッドモード除去器の種類

- f) 高次モードフィルタの説明
- g) 検出器の種類と寸法
- h) 被測定サンプルの温度及び環境条件(必要に応じて)
- i) 確度と再現性の指標
- j) モードフィールド径

### 6.1.3 第2の代替試験方法：ニアフィールド走査法

#### 6.1.3.1 概要

モードフィールド径は、ニアフィールド強度分布  $f^2(r)$  ( $r$  は半径座標) から決定される。

$$2w = 2 \left[ \frac{\int_0^{\infty} r f^2(r) dr}{\int_0^{\infty} r \left[ \frac{df(r)}{dr} \right]^2 dr} \right]^{1/2} \quad (6-3)$$

式 3-2 と式 6-3 の数学的等価性は、微小角度  $\theta$  の近似において有効である。この近似では、ニアフィールドパターン  $f(r)$  とファーフィールドパターン  $F(\theta)$  はハンケル対を形成する。ハンケル変換によって、式 3-2 から式 6-3 の導出、又はその逆が可能である。

#### 6.1.3.2 試験装置

##### 6.1.3.2.1 光源(6.1.1.2.1 項を参照)

##### 6.1.3.2.2 変調(6.1.1.2.2 項を参照)

##### 6.1.3.2.3 光源の励振条件(6.1.1.2.3 項を参照)

##### 6.1.3.2.4 クラッドモード除去器(6.1.1.2.4 項を参照)

##### 6.1.3.2.5 試験体(6.1.1.2.5 項を参照)

#### 6.1.3.2.6 走査装置

拡大光学系(例えば顕微鏡対物レンズ)を用いて、光ファイバのニアフィールド像を拡大し、走査検出器(例えば、ピンホール開口を有する走査型光検出器又は走査型ピグテール光検出器)の平面上に焦点を合わせるものとする。開口数及び倍率は、所望の空間分解能に適合するように選択するものとする。光学系の倍率は、走査範囲で断面方向の長さが既知である試料を走査することによって校正される。

##### 6.1.3.2.7 検出器(6.1.1.2.7 項を参照)

##### 6.1.3.2.8 増幅器(6.1.1.2.8 項を参照)

##### 6.1.3.2.9 データ収集(6.1.1.2.9 項を参照)

### 6.1.3.3 測定手順

光ファイバの試験光入射端を光源の光軸に合わせ、光ファイバの出射端を適切な出力装置に合わせるものとする。

以下の手順に従うものとする:光ファイバのニアフィールドを拡大光学系によって拡大し、検出器の平面上に焦点を合わせる。焦点ぼけ画像の走査による寸法誤差を低減するために、焦点合わせは最大精度で行わなければならない。ニアフィールド強度分布  $f^2(\mathbf{r})$  をスキャンし、モードフィールド径を式 6-3 から計算する。あるいは、ハンケル変換を用いてニアフィールド強度分布をファーフィールドに変換し、その結果得られる変換されたファーフィールド  $F^2(\theta)$  を用いて、式 3-2 からモードフィールド径を計算することができる。

注記-光ファイバ端面における半径方向座標  $r$  と像面における走査型検出器の半径方向座標  $Mr$  とを区別すること。ここで  $M$  は倍率である。

### 6.1.3.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする:

- a) 試験装置の構成、測定システムのダイナミックレンジ、処理アルゴリズム、及び使用する拡大光学系と走査装置
- b) 試験光の励振条件
- c) 光源の波長とスペクトル線幅FWHM
- d) 被測定光ファイバの識別と長さ
- e) クラッドモード除去器の種類
- f) 高次モードフィルタの説明
- g) 開口の拡大率
- h) 検出器の種類と寸法
- i) サンプルの温度及び環境条件(必要に応じて)
- j) 確度と再現性の指標
- k) モードフィールド径

## 6.1.4 第3の代替試験方法:双方向後方散乱法

### 6.1.4.1 概要

モードフィールド径は、既知のモードフィールド径を有するデッドゾーン光ファイバとの融着接続点をまたがる双方向後方散乱光の差から決定できる。

$$w_s = w_d 10^{\frac{g(L_d - L_s) + f}{20}} \quad (6-4)$$

ここで、

$w_d$  はデッドゾーン光ファイバのモードフィールド径

$w_s$  は被測定光ファイバのモードフィールド径

$L_d$  はデッドゾーン光ファイバ側から測定したときの融着接続点での後方散乱光(dB)の変化

$L_s$  は被測定光ファイバ側から測定したときの融着接続点での後方散乱光(dB)の変化

$g$  は波長と光ファイバ設計に依存する調整係数

$f$  は波長と光ファイバ設計に依存する調整係数

#### 6.1.4.2 試験装置

これらは 6.4.2.2 項と同様であり、以下の追加要件がある。

図 2 に光スイッチを用いた装置の概略図を示す。このような装置の使用は任意である。

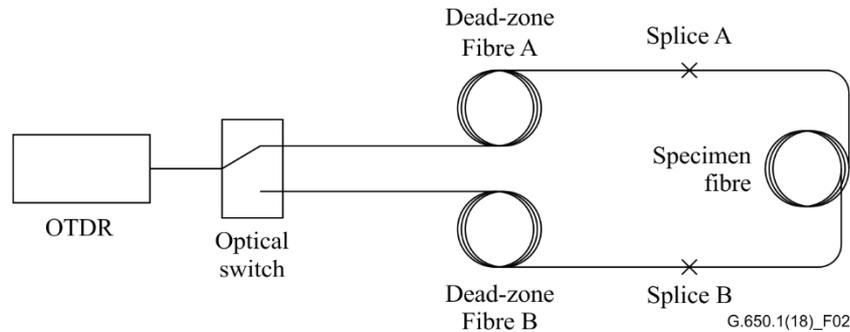


図 2-光スイッチを用いた双方向後方散乱法の概略図

光時間領域反射計の光源の波長線幅は、2nm以下とする。1310nmから1550nmでの測定の場合、2nmのシフトは約0.02 $\mu$ mの誤差をもたらす。

デッドゾーン光ファイバは、被測定光ファイバとの融着接続又はバットジョイントによるデッドゾーン領域を含まないように十分な長さがあるものとする。デッドゾーン光ファイバの MFD は、RTM 又は第 1 又は第 2 の代替試験方法のいずれかで測定が必要な各波長について測定するものとする。デッドゾーン光ファイバは、通常、被測定光ファイバと同じ設計である。

融着接続又はバットジョイントは、結果が影響を受けないように、測定が完了するまで十分に安定しているものとする。バットジョイントを使用する場合は、反射を最小限に抑えるために屈折率整合剤の使用を推奨する。

#### 6.1.4.3 測定手順

この手順は 2 つに分かれている。1 つ目は、調整係数  $g$  と  $f$  がわかっている所定の光ファイバと波長に対する手順である。2 つ目は、与えられた光ファイバタイプと波長に対する条件を確認する手順である。条件を確認する手順には、公称値から外れた OTDR 波長の補正を可能にする調整係数  $g$  及び  $f$  の正確な計算が含まれる。 $g$  と  $f$  が未知で正確な決定が不可能な場合には、公称値をそれぞれ 1 と 0 と仮定することができる。

##### 6.1.4.3.1 所定の波長における光ファイバの測定

- 光がデッドゾーン光ファイバ A から被測定光ファイバに入射するように光ファイバを調整する。(図 2 に示すように、接続点 A 側から被測定光ファイバに OTDR の試験光を入射する)。
- 反射を避けて、接続点(図 2 に示すように接続点 A)での後方散乱光の変化を測定し、値を  $L_d$  として記録する。
- 光が被測定光ファイバ側からデッドゾーン光ファイバ A に入射するように光ファイバを調整する。(OTDR の試験光は図 2 の接続点 B を通過して被測定光ファイバに入射した後に接続点 A を通過する)
- 反射を避けて、接続点(図 2 に示すように接続点 A)での後方散乱光の変化を測定し、値を  $L_s$  として記録する。
- 式 6-4 に従ってモードフィールド径を計算する。

#### 6.1.4.3.2 光ファイバ種別、設計、及び波長に依存する調整係数の決定

- a) 測定する種別と設計の被測定光ファイバを選択し、被測定光ファイバの種別及び設計のモードフィールド径の範囲を求めるため、参照試験方法又は第1又は第2の代替試験方法のいずれかを用いてモードフィールド径 $w_s$ を所望の波長で測定する。
- b) 6.1.4.3.1項のa)からd)の手順を実行して、接続点における後方散乱光の変化 $L_d$ 及び $L_s$ を測定する。
- c) 各光ファイバに対して $20 \log_{10} \left( \frac{w_s}{w_d} \right)$ を計算し、 $(L_d - L_s)$ に対して線形回帰を行い、 $g$  (傾き) 及び $f$  (切片)を決定する。
- d)  $g$ 及び $f$ を決定した最初の光ファイバとは異なる2つ目の被測定光ファイバを選択し、参照試験方法又は第1又は第2の代替試験方法のいずれかを用いて所望の波長でモードフィールド径を測定する。
- e) c)で求めた $g$ 及び $f$ の値を用いて6.1.4.3.1項の手順を実行し、モードフィールド径 $w_s$ を決定する。参照試験方法又は第1又は第2の代替試験方法で測定した値との差を求める。
- f) 平均差 (バイアス) 及び差の標準偏差( $\sigma_d$ )を用いて、同等性が証明されたかどうかを判断する。
- g) 許容可能な同等性の尺度は、同等性レベル $B$ を計算することによって得ることができる。ここで、 $B = |\text{bias}| + 2\sigma_d / \sqrt{n}$  ( $n$ は試験体の数)。 $B$ の典型的な上限は $0.1 \mu\text{m}$ である。
- h)  $B$ が上限を超える場合は、融着接続やバットジョイントの改良など、手順の調整が推奨される。

#### 6.1.4.4 結果の表示

測定した各光ファイバについて、以下の詳細を記載するものとする:

- a) 公称波長
  - b) モードフィールド径
  - c) 光ファイバの識別
- 利用可能な情報:
- a) 装置の説明
  - b) 各光ファイバ種別、設計、波長に依存する調整係数のデータ
  - c) 確度と再現性の指標

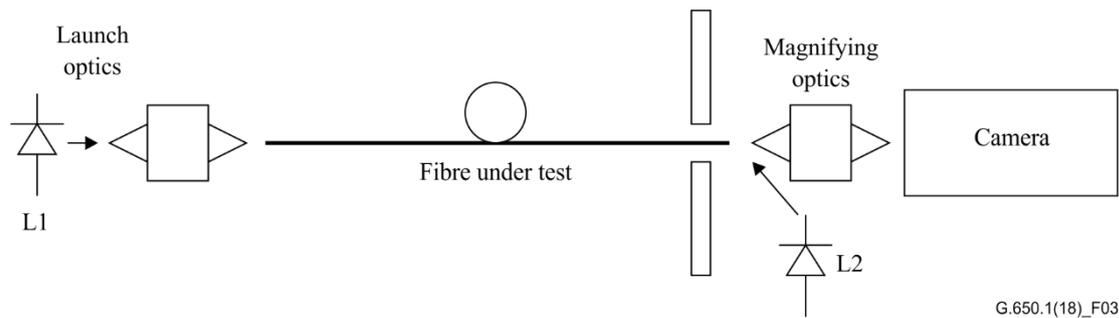
### 6.2 クラッド径、コア偏心率及びクラッド非円率の試験方法

#### 6.2.1 基準試験方法：ニアフィールド画像法

##### 6.2.1.1 概要

ガラスの幾何学的パラメータは、3.3.3 項、3.3.5 項及び3.3.8 項の定義に従って、ニアフィールド強度パターンから決定される。

##### 6.2.1.2 試験装置



G.650.1(18)\_F03

図3 試験装置構成

#### 6.2.1.2.1 光源

コアに入射する試験光の光源 L1 は、測定手順を完了するのに十分長い時間にわたって、光強度が調節可能で位置が安定したものを選択するものとする。光ファイバのカットオフ波長より長波長及び/又は短波長を使用してもよい。同様の特性を有する第2の光源 L2 を用いてクラッドを照射するものとする。

#### 6.2.1.2.2 試験光の励振条件

試験光入射に用いる光学系は、光源が角度的及び空間的に光ファイバを均一に覆うように配置するものとする。出力端において、クラッドを均一に照射するものとする。

注記—光源 L1 の励振条件は、光ファイバの出力端において回転対称の空間電界分布を形成するようなものでなければならない。

#### 6.2.1.2.3 クラッドモード除去器

クラッドモード光は、入力端の近くで試験体から除去するものとする。被測定光ファイバがガラスよりも高い屈折率を有する一次被覆を有する場合、この被覆はクラッドモード除去器として作用する。

#### 6.2.1.2.4 試験体

試験体は、短い長さの光ファイバとする。光ファイバの端部はゴミの付着がなく滑らかで、光ファイバ軸に対して垂直であるものとする。

#### 6.2.1.2.5 拡大光学系

拡大光学系は、試験体出力のニアフィールド強度パターンを拡大し、検出器の平面上に焦点を合わせる光学系(例えば顕微鏡対物レンズ)から成るものとする。開口数及びそれによる光学系の分解能は、要求される測定精度に適合するものとし、0.3 以上とする。倍率は、所望の解像度に適合するように選択し、記録するものとする。

#### 6.2.1.2.6 検出器

CCD ビデオカメラ、走査型ビジコン、又はその他のパターン/強度認識装置を使用して、ニアフィールド強度パターン画像の拡大出力を検出し、ビデオモニタに送信するものとする。ビデオデジタルは、さらな

るコンピュータ解析のために画像のデジタル化を行う。ビデオシステムは、校正後、測定の不確実性が必要以上に大きくならないように、十分に線形応答するものとする。

#### 6.2.1.2.7 ビデオ画像モニタ

検出された画像を表示するためにビデオ画像モニタを使用するものとする。モニタ上のスクリーンは、典型的には、オペレータが試験体の画像を中心に配置するのを補助するために、十字線のようなパターンを示す。コンピュータ制御された位置合わせ及び/又は焦点合わせを使用することができる。

#### 6.2.1.2.8 データシステム

測定、データ取得及び計算は、コンピュータを使用して実行される。プリンタは、情報及び測定結果のハードコピーを出力する。

### 6.2.1.3 測定手順

#### 6.2.1.3.1 校正

校正は[IEC 61745]の手順による。

#### 6.2.1.3.2 測定

準備された試験体は、規定された励振条件を満たすために入力端で位置調整されるものとする。出力端のニアフィールド強度パターン画像に焦点を合わせ、モニタ中央に配置するものとする。入力端におけるコア画像の輝度及び出力端におけるクラッド画像の輝度は、特定の試験装置について確立された内部基準に従って調整するものとする。

出力面のデジタル化されたビデオ画像を記録し、クラッド画像エッジとコア画像エッジを表す点を決定し、エッジテーブルにいずれも記録するものとする。ニアフィールド強度パターン画像における境界の決定は以下の通りである。

コア画像境界：この境界は、最大ニアフィールドパターン強度の 5% から 50% の間で選択される。

クラッド画像境界：ラッド境界を決定するために、クラッドの照明方法に応じて異なる方法を使用することができる。実際に使用する方法は、校正に使用する方法と同一とする。

#### 6.2.1.3.3 計算

コアとクラッドのエッジの生データに対して、実際のエッジの最適な推定値を決定するために数学的な近似を適用して滑らかにフィッティングする。次に、これらの滑らかな数学的近似を円形状にフィッティングさせて、各エッジ境界の理想的な円形状からの 1 次偏差を含む幾何学的特性を決定する。これらの値と数学的に算出されたエッジを使用して、次のようにパラメータを決定する。

- $X_{co}$ 、 $Y_{co}$  ( $\mu\text{m}$ ) フィッティングコア中心
- $R_{cl}$  ( $\mu\text{m}$ ) フィッティングクラッド半径
- $X_{cl}$ 、 $Y_{cl}$  ( $\mu\text{m}$ ) フィッティングクラッド中心
- $R_{mincl}$  (最小単位) $\mu\text{m}$ ) クラッドの端から中心までの最短距離

- $R_{\max cl} (\mu m)$  クラッドのエッジから中心までの最長距離
- クラッド直径  $(\mu m) = 2R_{cl}$
- クラッド非円率 (%) =  $100(R_{\max cl} - R_{\min cl}) / R_{cl}$
- コア偏心率  $(\mu m) = [(X_{cl} - X_{co})^2 + (Y_{cl} - Y_{co})^2]^{1/2}$

エッジを表現するために使用される滑らかな数学的近似は、楕円形以上の曲率変化をフィッティングする必要もある。非楕円形の場合は、角度毎の半径をフィッティングする前に、おおよそ推定された中心に対する極座標データに変換できる。

能動的にフィルタリングしたデータ、又は数学的に近似したデータから光ファイバのへき開損傷に該当する生データを削除することは許容される。使用するフィッティング曲線、試験装置、へき開方法及びデータ抽出アルゴリズムの相互作用により、クラッド測定結果は影響を受ける。

#### 6.2.1.4 結果の表示

各測定について、以下の詳細を提示するものとする:

- a) 光ファイバの識別
- b) パラメータ:クラッド径、クラッド非円率、及びコア偏心率。

利用可能な情報:

- a) 試験装置の構成
- b) 試験光の励振条件;
- c) スペクトル特性;
- d) 倍率;
- e) 検出器の種類と寸法;
- f) 校正データを含む精度及び再現性の表示。

### 6.2.2 第1の代替試験方法: 屈折ニアフィールド法

#### 6.2.2.1 概要

屈折ニアフィールド法は、光ファイバ全体（コア及びクラッド）の屈折率分布を直接測定する。光ファイバの幾何学的特性は、適切なアルゴリズムを用いて屈折率分布から得ることができる。

#### 6.2.2.2 試験装置

本測定法の概略図を図4に示す。本測定では、光ファイバ端面を横切ってビーム光の焦点スポットを走査する。入射光学系は、光ファイバの開口数を完全に覆うように配置される。光ファイバ測定端は、クラッドよりわずかに高い屈折率の液体に浸漬される。ビーム光の一部は被測定光ファイバへと導かれ、残りは光ファイバの外側に中空円錐状に放射される。屈折光のみが検出器に到達するよう、ディスクをコア軸上に配置する。

光学的分解能、すなわち、光ファイバの幾何構造の細部を解像する能力は、光の焦点スポットのサイズによって決まる。これは、フォーカスレンズの開口数及びディスクのサイズの両方に依存する。しかしながら、ステップモータシステムのステップサイズ、あるいはアナログ駆動装置の位置監視精度によっては、これよりもはるかに良い精度で、急峻な特徴を持つ位置を解像することができる。

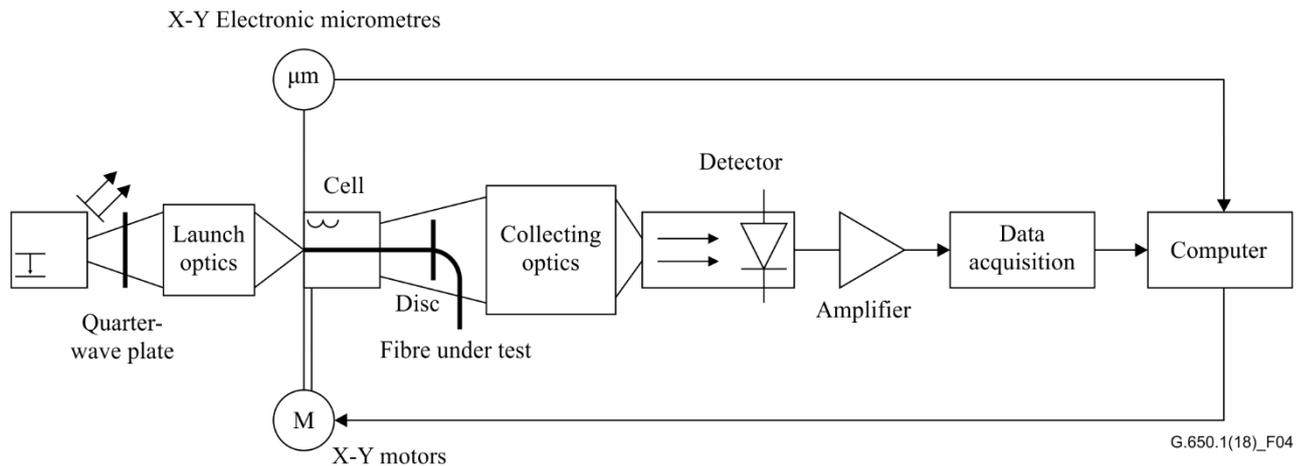


図 4 - 屈折ニアフィールド法の試験装置構成

#### 6.2.2.2.1 光源

光源は、HeNe レーザなど TEM<sub>00</sub> モードでパワー約 1 mW の安定なレーザが望ましい。空気-ガラス界面における光の反射率は角度と偏波に強く依存するため、1/4 波長板を挿入してビーム光を直線偏光から円偏光に変換する。

#### 6.2.2.2.2 励振条件

励振光学系は光ファイバの開口数を完全に覆うように配置し、平坦な光ファイバ端面にビーム光の焦点を合わせる。ビーム光の光軸は、光ファイバ軸の 1° 以内とすることが望ましい。装置の分解能は焦点スポットのサイズによって決まるため、分解能を最大にするためには焦点スポットサイズをできるだけ小さく、例えば 1.0μm 未満とすることが望ましい。この装置は、光ファイバ断面全体に亘って焦点スポットの走査が可能である。

#### 6.2.2.2.3 測定セル

測定セル内には、光ファイバのクラッドの屈折率よりもわずかに高い屈折率の液体を含む。測定セルの位置は、コンピュータ駆動の X-Y モータによって制御し、X-Y マイクロメータによって検出する。

#### 6.2.2.2.4 検出

屈折光は、適切な集光系によって集光し、全ての屈折光が集光されるような適切な方法で検出器に導く。ディスクの必要なサイズと中心軸に沿った位置は、計算により決定する。

#### 6.2.2.2.5 データ取得

測定された強度分布を、走査技術及び仕様要件に従って、適切な形態で記録、処理及び表示する。コンピュータを用いて X-Y モータを駆動し、セルの X-Y 位置及びそれに対応するパワーレベルを記録し、測定データを処理する。

#### 6.2.2.3 手順

試験装置構成の概略図(図 4)を参照。

##### 6.2.2.3.1 被測定光ファイバの準備

光ファイバの長さは 2m 以下とする。

液体セルに浸す部分の光ファイバの一次被覆を除去するものとする。

光ファイバの端面はゴミの付着が無く、平滑で、光ファイバ軸に対して垂直なものとする。

#### 6.2.2.3.2 装置校正

装置の校正は、液体セルから光ファイバを取り出した状態で行う。測定中、光円錐の角度は光ファイバへの入力点における屈折率（すなわち、ディスクを通過する光パワーの変化）によって変化する。光ファイバを取り出し、液体の屈折率とセルの厚さが既知であるときに、この角度変化は、ディスクを光軸に沿って移動させることで算出することができる。ディスクを予め決まった複数の位置に移動させることによって、相対屈折率の分布を作成することができる。屈折率の絶対値は、測定波長及び温度におけるクラッド又は液体の屈折率が正確に分かっている場合に限り求めることができる。

より簡便には、既知で一定の屈折率を持つ細いロッド、又は、それぞれの屈折率が極めて正確に知られているマルチモード・マルチステップファイバによって校正することもできる。後者の技術は、試験装置の線形性を確認するのにも有用である。この点においては、液体セル内の液体温度を制御することもまた有用である。

#### 6.2.2.3.3 ラスタースキャン

被測定光ファイバの入射端を液体セル中に浸漬し、ビーム光を光ファイバ端面の中心に合わせるとともに集光する。

ディスクは円錐光の中央に置く。ディスクを通過する屈折モードを集光して検出器に焦点を合わせる。

焦点レーザスポットを光ファイバ端面にわたって走査することで、光ファイバ屈折率の二次元分布を直接得る。この分布から幾何学的特性を計算する。

#### 6.2.2.3.4 幾何学的特性

屈折率のラスタースキャンを実行し、コア、クラッドそれぞれの平均屈折率の中間値と屈折率が一致するコア-クラッド界面の点を結ぶことで、コアの輪郭を得る。同様に、クラッドと屈折率整合液体との界面においてクラッドの輪郭も得ることができる。3.3 項に記載の幾何学的特性を、コアとクラッドとの輪郭データから解析する。屈折率分布測定により、コア偏心量を求める。

#### 6.2.2.4 結果の表示

以下の詳細を表示するものとする：

- a) 試験装置の配置と、使用する走査技術の識別
- b) 光ファイバの識別
- c) クラッド径
- d) コア偏心量
- e) クラッド非円率
- f) コア径(必要に応じて)
- g) 光ファイバ全体のラスタースキャン(必要に応じて)
- h) 確度と再現性の指標
- i) サンプル温度及び環境条件(必要に応じて)

## 6.2.3 第2の代替試験方法: サイドビュー法

### 6.2.3.1 概要

サイドビュー法はシングルモード光ファイバに適用され、光ファイバ内部で屈折した光の強度分布を測定することにより幾何学的パラメータ(コア偏心量、クラッド径、クラッド非円率)を求める。

### 6.2.3.2 試験装置

試験装置の概略図を図5に示す。

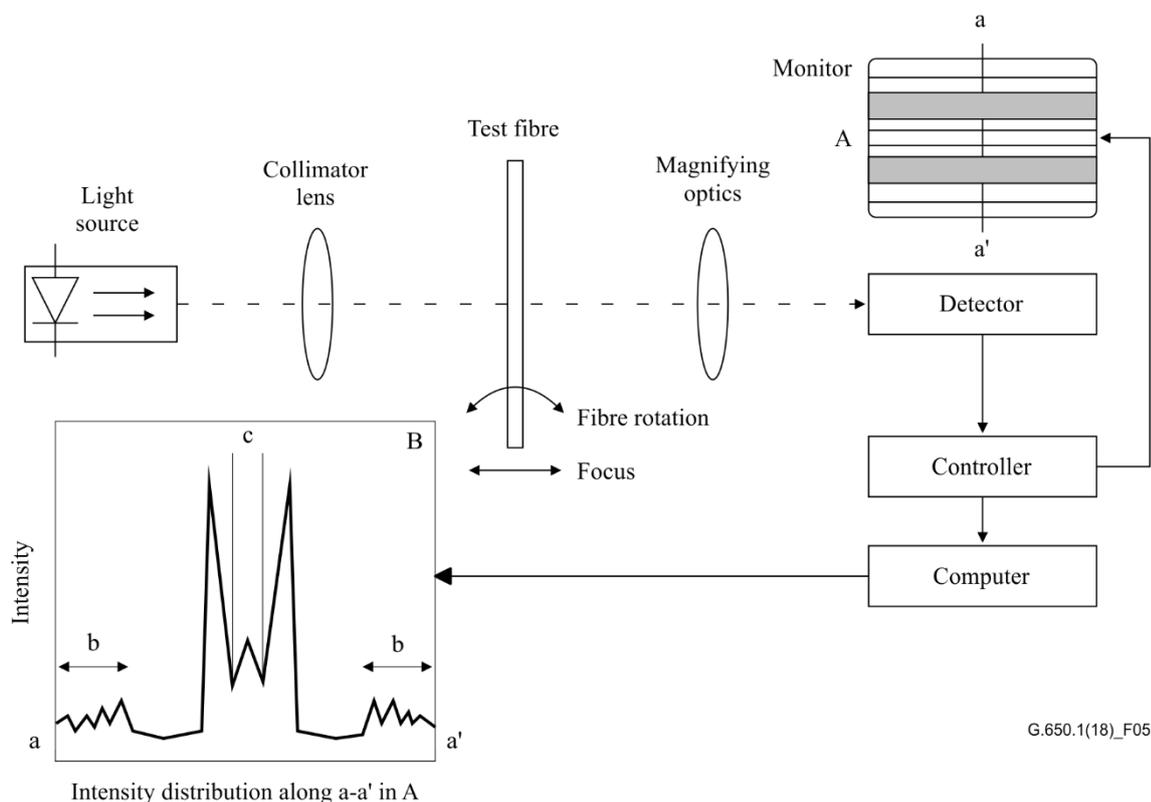


図5-サイドビュー測定系の概略図

#### 6.2.3.2.1 光源

出力光はコリメートされており、強度を調節することが可能で、かつ、測定を完了するのに十分な長さの時間にわたって位置、強度、波長が安定していなければならない。発光ダイオード(LED)のような安定した高強度の光源を使用してもよい。

#### 6.2.3.2.2 試験体

試験体は短い長さのシングルモード光ファイバとする。光ファイバの測定部分の一次被覆を除去するものとする。測定中に光ファイバ表面にゴミの付着がないようにする。

#### 6.2.3.2.3 拡大光学系

拡大光学系は、光ファイバ内部の屈折光の強度分布を走査検出器の平面上に拡大する光学系(例えば顕微鏡対物レンズ)で構成するものとする。観察平面は光ファイバ軸から一定の距離に設定するものとする。倍率は所望の空間分解能に合うように選択し、記録するものとする。

#### 6.2.3.2.4 検出器

光ファイバ軸に垂直な線に沿った観察平面内の拡大強度分布を測定するため、適切な検出器を使用するものとする。ビジコン又は電荷結合素子を使用することができる。検出器は、要求される測定範囲内で線形な特性を有していなければならない。検出器の分解能は、所望の空間分解能に適合していなければならない。

#### 6.2.3.2.5 データ処理

強度分布の解析には、適切なソフトウェアを備えたコンピュータを使用するものとする。

### 6.2.3.3 測定手順

#### 6.2.3.3.1 装置校正

装置校正のため、予め寸法が適切な精度で判っている試料の長さを走査することにより、拡大光学系の倍率を測定するものとする。この倍率を記録するものとする。

#### 6.2.3.3.2 測定

被測定光ファイバをサンプルホルダに固定し、測定系に設置する。光ファイバは、光ファイバ軸が測定系の光軸に垂直になるように調節する。

光ファイバ軸と観察平面との距離を一定に保ちながら光ファイバをその軸の周りに回転させることによって、光ファイバ軸に垂直な線(図 5 の A の a-a')に沿った観察平面内の強度分布を、異なる観察方向について記録する(B として示す)。クラッド径と光ファイバの中心位置は、拡大像における径方向強度分布 (B の b として示す) の対称性を解析することにより決定する。コアの中心位置は、収束光(c として示す)の強度分布を解析することによって決定する。光ファイバの中心位置とコアの中心位置との間の距離が、コア偏心量の公称測定値に対応する。

図 6 に示す通り、実験的に得られたモードフィールド偏心量(3.3.7 項の注記 2 参照)を回転角の関数としてプロットし、正弦関数でフィッティングする。実際のコア偏心量は、正弦関数の最大振幅と、光ファイバの円筒構造によって生じるレンズ効果に関する拡大係数との積として計算される。クラッド径は各回転角において測定された光ファイバ直径の平均値として評価され、最大及び最小の光ファイバ直径から定義に従ってクラッド非円率を決定する。

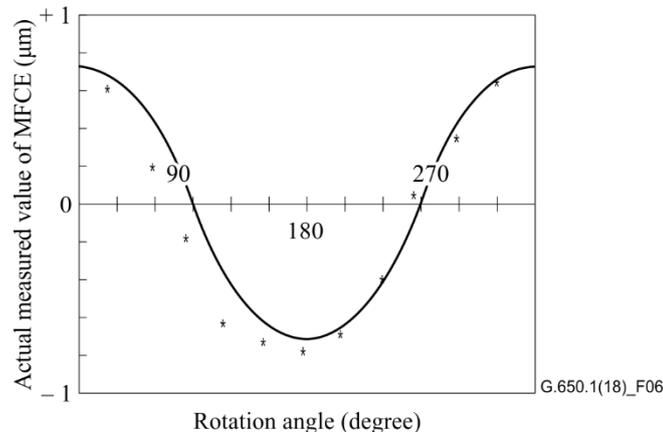


図 6-回転角に対するモードフィールド偏心量の測定値

#### 6.2.3.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする:

- a) 試験装置の構成
- b) 光ファイバの識別
- c) 光源のスペクトル特性
- d) 再現性と確度の指標
- e) 回転角に対する公称コア偏心量のプロット
- f) コア偏心量、クラッド径、クラッド非円率
- g) サンプル温度及び環境条件(必要に応じて)

## 6.2.4 第3の代替試験方法：透過ニアフィールド法

### 6.2.4.1 概要

幾何学的パラメータは3.3.3項、3.3.5項及び3.3.8項の定義に従ってニアフィールドパターンから決定される。モードフィールド同心度はコア同心度の良い近似となるので、本方法によってコア偏心量を評価することができる。

### 6.2.4.2 試験装置

試験装置の概略図を図7に示す。

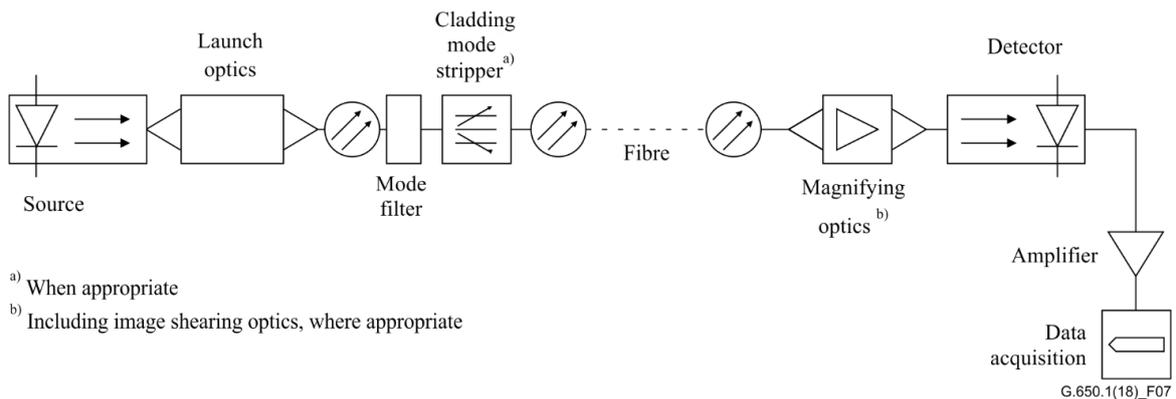


図7-透過ニアフィールド法の試験装置構成

#### 6.2.4.2.1 光源

コアに入射する光源として、公称 1310 nm ([JT-G652]の光ファイバの場合) 又は 1550 nm ([ITU-T G.653] 及び [JT-G654]の光ファイバの場合)の光源を使用するものとする。光源は強度を調節することができ、測定手順を完了するのに十分な長さの時間に亘って位置、強度、波長が安定しているものとする。この光源のスペクトル特性は、マルチモード動作を排除するように選択するのが望ましい。必要に応じて、同様の特性を有する第2の光源をクラッドに入射するために使用することができる。第2の光源のスペクトル特性によって、像の焦点ずれが生じてはならない。

#### 6.2.4.2.2 入射条件

試験光入射に用いる光学系は、オーバーフィル条件を満たし光ファイバの平坦な入射端面に均質なビーム光の焦点を合わせる。

#### 6.2.4.2.3 モードフィルタ

測定では、測定波長での単一モード動作を保証する必要がある。このような場合、LP<sub>11</sub>モードを除去する

ために曲げを加えても良い。

#### 6.2.4.2.4 クラッドモード除去器

クラッド内を伝搬する光パワーを除去するため、適切なクラッドモード除去器を使用するものとする。クラッドの幾何学的特性のみを測定する場合には、クラッドモード除去器は使用しない。

#### 6.2.4.2.5 試験体

試験体は、短い光ファイバとする。光ファイバの端面はゴミの付着がなく滑らかで、光ファイバ軸に対して垂直であるものとする。

#### 6.2.4.2.6 拡大光学系

拡大光学系は、被測定光ファイバ出射端のニアフィールドを拡大し、それを走査検出器の平面上に焦点を合わせるための光学系(例えば顕微鏡対物レンズ)で構成されるものとする。開口数つまり光学系の分解能は、要求される測定精度に適合するものとし、0.3 以上とする。倍率は所望の空間分解能に適合するように選択し、記録するものとする。

#### 6.2.4.2.7 検出器

透過ニアフィールド強度パターンの各位置の強度を測定するため適切な検出器を使用するものとする。例えば、次のいずれかを使用することができる。

- a) ピンホールアパーチャ付き走査型光検出器
- b) 固定ピンホールアパーチャ付き走査ミラー及び光検出器
- c) 走査型ビジコン、電荷結合素子、又は他のパターン/強度認識素子

検出器は、測定する強度の範囲にわたって線形な挙動を示す(又は線形化されている)ものとする。

#### 6.2.4.2.8 増幅器

信号レベルを増加させるために増幅器を使用してもよい。増幅器の帯域幅は、使用する走査の種類に応じて選択するものとする。機械的又は光学的システムで光ファイバ出射端を走査する場合、慣習的に光源を変調する。このような手順を採用する場合、増幅器は光源の変調周波数と同期することが望ましい。

#### 6.2.4.2.9 データ取得

測定された強度分布は、走査方法及び仕様要件に従って、適切な形式で記録、処理及び表示することができる。

### 6.2.4.3 測定手順

#### 6.2.4.3.1 装置校正

装置校正のため、予め寸法が適切な精度で判っている試験体の画像を走査することにより、拡大光学系の倍率を測定するものとする。

この倍率を記録するものとする。

#### 6.2.4.3.2 測定

光ファイバの入射端を入射光軸に調整し、光ファイバの出射端を拡大光学系の光軸に合わせる。透過ニアフィールドを測定するため、仕様要求に従って、光ファイバ出射端の焦点画像を検出器で走査するものとする。

る。焦点ぼけ画像の走査による寸法誤差を低減するために、焦点合わせは最大精度で行うものとする。必要な幾何学的パラメータを定義に従って計算する。

境界を判定して幾何学的パラメータを計算するためのアルゴリズムは検討中である。

#### 6.2.4.4 結果の表示

以下の詳細を表示するものとする：

- a) 試験装置の構成と、使用する走査方法の識別
- b) 入射条件
- c) 光源のスペクトル特性
- d) 光ファイバの識別と長さ
- e) モードフィルタの種類(使用する場合)
- f) 拡大光学系の倍率
- g) 走査検出器の種類と寸法
- h) サンプルの温度及び環境条件(必要に応じて)
- i) 確度と再現性の指標
- j) クラッド径、クラッド非円率、コア偏心量などの寸法パラメータの結果

### 6.3 カットオフ波長の試験方法

#### 6.3.1 一次被覆光ファイバのファイバカットオフ波長( $\lambda_c$ )に関する基準試験方法：透過パワー法

##### 6.3.1.1 概要

シングルモード光ファイバのカットオフ波長測定は、特定の波長を超える波長で実効的なシングルモード動作を保証することを目的としている。

カットオフ波長の測定には透過パワー法を使用するものとする。透過パワー法では、規定の条件下で、短い長さの被測定光ファイバにおける透過光パワーの波長変動を測定し、参照透過光パワーと比較する。ここで、参照透過光パワーを得るには、次の2つの方法がある。

- a) 被測定光ファイバに小さな半径の曲げを付与する、又は
- b) 長さ 1-2m のマルチモード光ファイバを用いる

注記 1：通常、光ファイバの一次被覆はカットオフ波長に影響しない。しかし、二次被覆された光ファイバでは、一次被覆光ファイバよりもカットオフ波長が有意に短くなることもある。

二次被覆の種類が既知で、カットオフ波長に有意な影響を及ぼさないことが確認されている場合には、二次被覆光ファイバに対して測定してもよい。ただし、二次被覆が適切に塗布されていることを条件とする。

##### 6.3.1.2 試験装置

###### 6.3.1.2.1 光源

光源は、線幅(FWHM)が 10nm 以下であり、測定を完了するのに十分な時間にわたって位置、強度及び波長が安定しており、十分な波長範囲にわたって作動することができるものでなくてはならない。

#### 6.3.1.2.2 変調

受信器での信号対雑音比を改善するために、慣例的に試験光源を変調する。そのような手法を採用する場合、検出器は光源の変調周波数に同期した信号処理システムに接続することが望ましい。検出システムは、実効的に線形な感度を有する必要がある。

#### 6.3.1.2.3 励振条件

光源の励振条件は、LP<sub>01</sub>モードとLP<sub>11</sub>モードの両方が十分にかつ均一に励振されるように設定されなければならない。例えば、適切な励振条件として以下のものが挙げられる。

- a) マルチモード光ファイバを接続する、又は
- b) 大スポット径-大NAを持つ適切な光学系を介して励振する。

#### 6.3.1.2.4 クラッドモード除去器

クラッドモード除去器は、クラッドモードから放射モードへの変換を促進する装置である。その結果、クラッドモードを光ファイバから除去することができる。LP<sub>11</sub>モードの伝搬に影響を与えないように注意することが望ましい。

#### 6.3.1.2.5 検出器

適切な光検出器を用いて、被測定光ファイバの全ての出射光を受光する。スペクトル応答は光源のスペクトル特性と相関を有していることが望ましい。光検出器は均一で、線形な感度特性を有していなければならない。

### 6.3.1.3 試験手順

#### 6.3.1.3.1 標準試験サンプル

測定は、長さ2mの光ファイバで行う。光ファイバは、半径140mmの円に一周巻いた状態、又は、接線で接続された二つの半径140mmの半円に一周巻いた状態（スプリットマンドレル構成）で試験装置に設置する。光ファイバの残りの部分には、実質的に外部応力が加わらないようにする。ただし、測定結果に有意な変化を与えない大きな半径の曲げは許容される。カットオフ波長予測値付近の十分に広い波長範囲において、 $\lambda$ に対する出力パワー $P_1(\lambda)$ を記録する。

図8に示すスプリット・マンドレル構成では、下側の半円形マンドレルを移動させることで被測定光ファイバの緩みを取ることが出来るので、入射端及び受信端の光学系を移動させたり、光ファイバサンプルを置く際に張力をかける必要が無い。

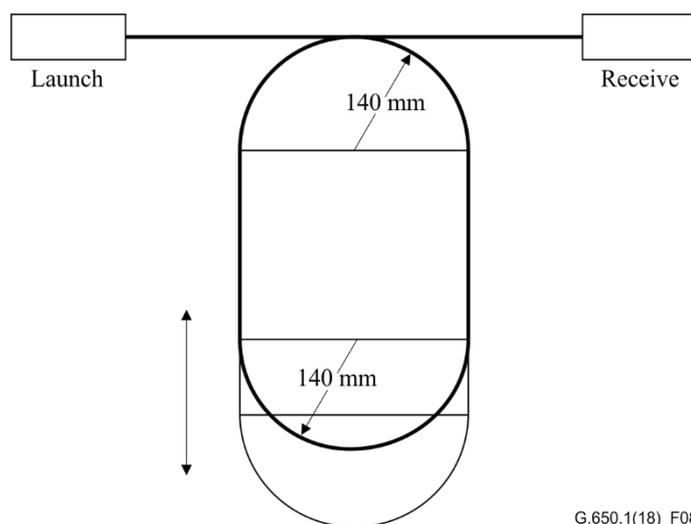


図 8 スプリット・マンドレル構成でカットオフ波長測定を行う際の被測定光ファイバ配置

### 6.3.1.3.2 参照サンプルでの透過光パワーの測定

a) 又は b) のいずれかの方法を用いることができる。

a) 被測定光ファイバを用い、LP<sub>11</sub> モードを除去するために小さな径で 1 周以上巻いた状態で、励振条件を固定したまま所定の波長範囲に亘って出射光パワー  $P_2(\lambda)$  を測定する。曲げ半径は、二次モードを十分に減衰させるよう小さくしなければいけないが、長波長で基本モードのマクロバンド損失の影響が生じないように予め決定する。ほとんどの ITU-T G.65x 光ファイバでは、半径は典型的に 10~30 mm である。一方、注記 2 に記載の通り、一部の JT-G657 光ファイバでは、半径を非常に小さくする必要があり、この試験手順は適用できない場合がある。

b) 長さ 1-2m のマルチモード光ファイバを用いて、所定の波長範囲に亘って出力光パワー  $P_3(\lambda)$  を測定する。  
注記 1：漏洩モードによって、参照用マルチモード光ファイバの伝送スペクトルにリップルが生じて測定結果に影響を及ぼす可能性がある。測定光がマルチモード光ファイバのコア径及び NA の 70% のみを満たすように励振条件を制限するか、あるいは、適切なモードフィルタを用いることで、リップルの発生を抑制することができる。

注記 2：一部の JT-G657 光ファイバでは、光ファイバの曲げ損失の影響を受けにくいため、方法 a) は適切でない場合がある。これらの光ファイバでは方法 b) が基準試験方法として推奨される。

### 6.3.1.3.3 計算

参照用サンプルの出射光パワーに対する被測定光ファイバの減衰量は下式で表される。

$$a(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)} \quad (6-5)$$

ここで、 $i=2$  又は  $3$  は、6.3.1.3.2 項の方法 a) 又は b) にそれぞれ対応する。

長波長領域で直線近似ができると仮定すると、基本モードからの高次モードの偏差は次式で表すことができる。

$$\Delta a(\lambda) = a(\lambda) - (A_u + B_u \lambda) \quad (6-6)$$

$A_u$  と  $B_u$  は、高次モードが急速に減衰する波長領域(遷移領域)よりも長波長において、 $(A_u + B_u \lambda)$  が波長に対する減衰量を近似するように決定される。図 9a 及び 10a に示す通り、方法 a) においては  $A_u$  と  $B_u$  は 0 となる場合もある。

注記：6.3.1.3.2 項の方法 a) では、光ファイバを小さな径に曲げることで、カットオフ波長  $\lambda_c$  より数十 nm 短い波長より長波長において基本モードを除くすべてのモードを除去する。 $\lambda_c$  より数百 nm 以上長い波長では、基本モードも小径曲げによって著しく減衰することがある。 $a(\lambda)$  は、LP<sub>11</sub> モードのパワーを含む全ての出射光パワーと、基本モードパワーとの対数比に等しい。各モードが 6.3.1.2.3 項に従って均一に励起されている場合、dB 単位の LP<sub>11</sub> モードの減衰量  $A(\lambda)$  は次式で表される。

$$A(\lambda) = 10 \log \left[ \left( \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} - 1 \right) / 2 \right] \quad (6-7)$$

#### 6.3.1.3.4 カットオフ波長の決定

遷移領域では、高次モードパワーは波長が長くなるに従い減少する。ファイバカットオフ波長  $\lambda_c$  は、基本モードパワーに対する高次モードパワーの割合  $\Delta a(\lambda)$  が 0.1dB となる波長として定義される。

図 9b 及び図 10b は、カットオフ波長付近に時々現れる「ハンプ」を示す。ハンプが無い場合(図 9a 及び図 10a)、 $\lambda_c$  はアルゴリズムなしで正確に決定することができる。ハンプがある場合には、精度を向上させるために、次式に基づくフィッティングアルゴリズムを必要に応じて使用することができる。このようなアルゴリズムの例は付録 I に記載する。

$$\gamma(\lambda) = 10 \log \left[ - \frac{10}{A} \log \left( \frac{10^{\Delta a(\lambda)/10} - 1}{\rho} \right) \right] \quad (6-8)$$

$$A = 10 \log \left[ \rho / (10^{0.01} - 1) \right] \quad (6-9)$$

特に指定が無い場合は  $\rho = 2$  とする。 (6-10)

遷移領域の波長に対して

$$A_t + B_t \lambda = -Y(\lambda) \quad (6-11)$$

が成り立つ場合、 $\lambda_c$  は次式で表される。

$$\lambda_c = - \frac{A_t}{B_t} \quad (6-12)$$

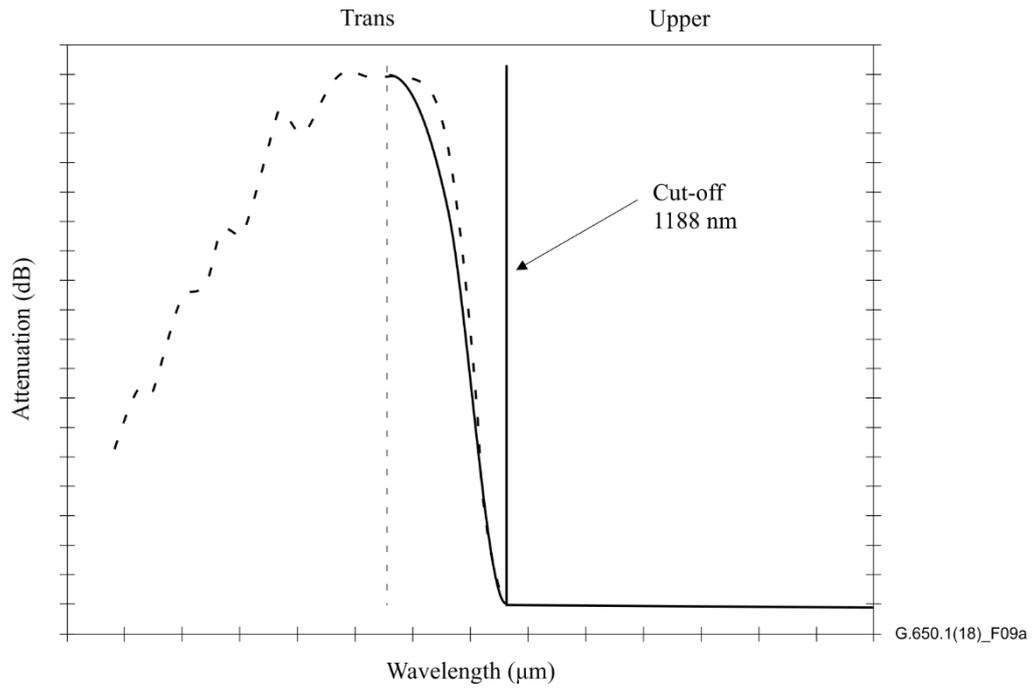


図 9 a シングルモード参照法によるカットオフ波長の測定結果例

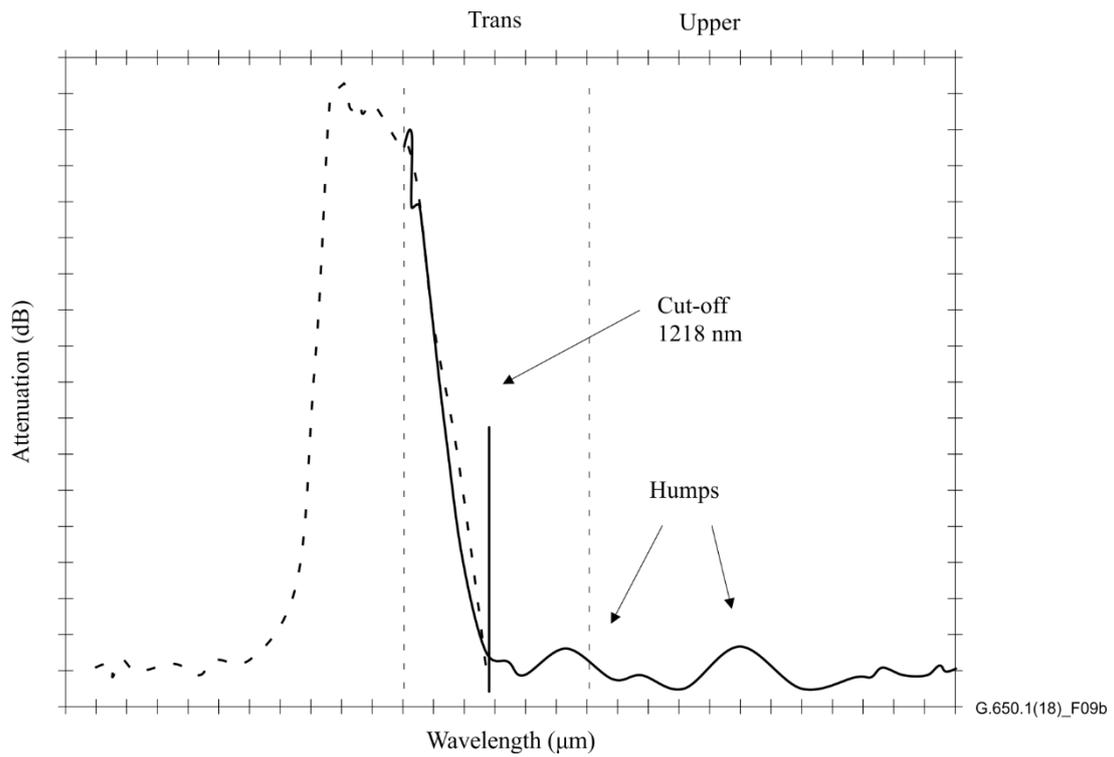


図 9 b シングルモード参照法によるカットオフ波長の測定結果例。ハンブのある場合

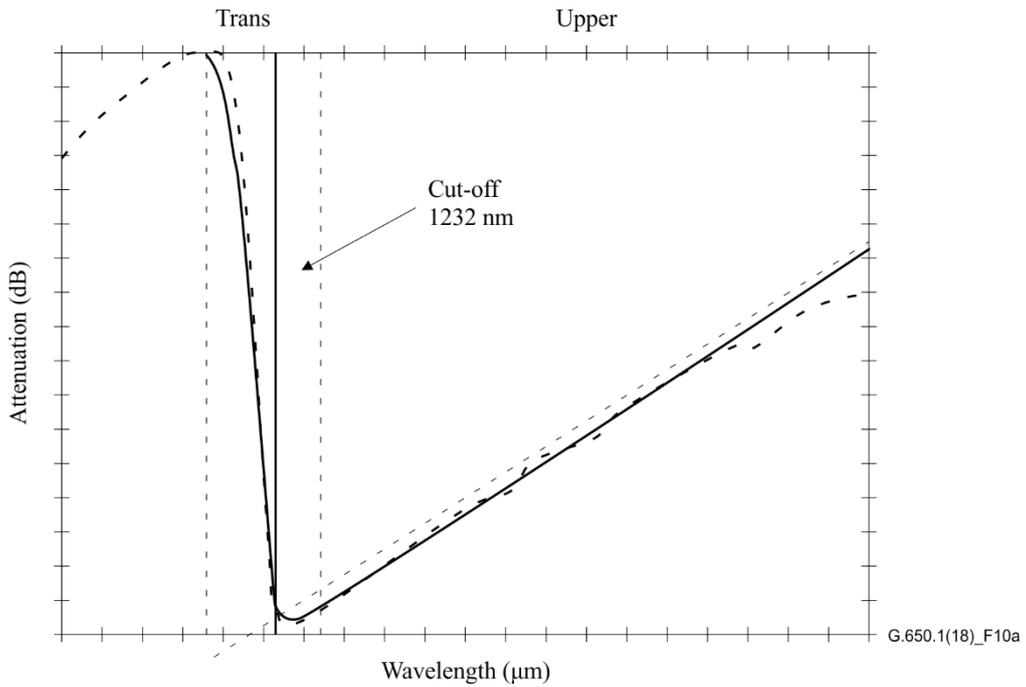


図 10 a マルチモード参照法によるカットオフ波長の測定結果例

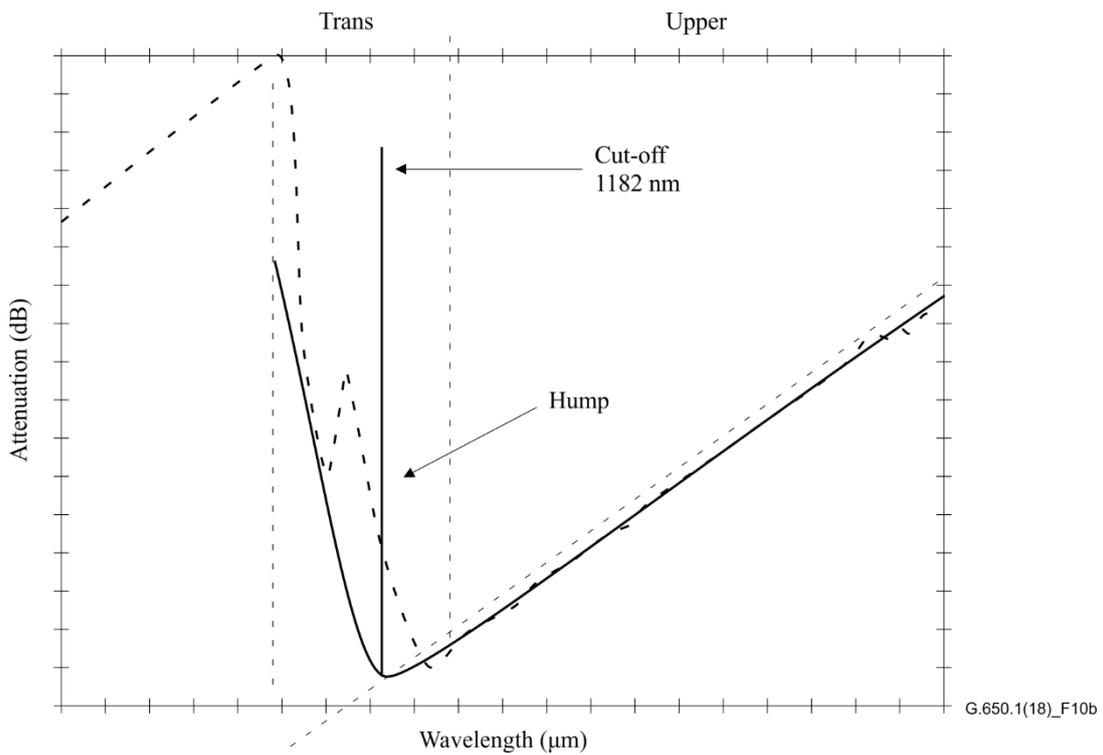


図 10 b マルチモード参照法によるカットオフ波長の測定結果例。ハンブのある場合。

注記：被測定光ファイバの LP<sub>11</sub> モードの減衰量はカットオフ波長において 19.3 dB となる。

#### 6.3.1.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする：

- a) 試験装置の構成；
- b) 励振条件；

- c) 参照サンプルの種類;
- d) 被測定サンプルの温度及び環境条件 (必要に応じて);
- e) 被測定光ファイバの識別;
- f) 測定波長範囲;
- g) ファイバカットオフ波長;
- h)  $a(\lambda)$ の波形 (必要に応じて);
- i) 補間法 (使用する場合)。

### 6.3.2 ケーブルカットオフ波長( $\lambda_{cc}$ )の基準試験方法：透過パワー法

#### 6.3.2.1 概要

ケーブルカットオフ波長測定は、ケーブル化されたシングルモード光ファイバにおいて、屋外設備における最低ケーブル長を想定した敷設条件で実施され、特定の波長を超える波長において実効的にシングルモード動作を保証することを目的としている。

透過パワー法では、規定の条件下で、被測定光ファイバケーブルの透過光パワーの波長依存性を測定し、参照透過光パワーと比較する。参照透過光パワーを得るには、次の2つの方法がある。

- a) ケーブル化された被測定光ファイバに小さな半径の曲げを付与する;
- b) 長さ 1-2m のマルチモード光ファイバを用いる。

#### 6.3.2.2 試験装置

##### 6.3.2.2.1 光源(6.3.1.2.1 項を参照)

##### 6.3.2.2.2 変調(6.3.1.2.2 項を参照)

##### 6.3.2.2.3 励振条件(6.3.1.2.3 項を参照)

##### 6.3.2.2.4 クラッドモード除去器(6.3.1.2.4 項を参照)

##### 6.3.2.2.5 光検出器(6.3.1.2.5 項を参照)

#### 6.3.2.3 測定手順

##### 6.3.2.3.1 標準試験サンプル

ケーブルカットオフ波長測定は、長さ 22m のケーブル内のシングルモード光ファイバで行う。被測定ケーブルの両端各 1m は光ファイバをケーブルから露出し、中間の 20m のケーブル部分には測定値に影響を与えないような小さい径の曲げが加わらないようにして設置する。接続部分の影響を想定して、両端の露出させた光ファイバには半径  $X=40\text{mm}$  で一周の曲げを付与する(図 11)。露出させた光ファイバが二次被覆されている場合はそのままの状態とする。測定結果に有意な変化を与えない大きな半径の曲げは許容される。カットオフ波長予測値付近の十分に広い範囲において、 $\lambda$  に対する出力パワー  $P1(\lambda)$  を記録する。

あるいは、ケーブル化されていないシングルモード光ファイバを測定して、ケーブル化された光ファイバを測定して得られるのと一致した  $\lambda_{cc}$  が得られることを確認してもよい。

図 12 に示す通り、22m の光ファイバは、中間部の 20m が半径  $r \geq 140\text{mm}$  で緩く巻かれた状態で測定装置に設置され、光ファイバの両端は半径  $X=40\text{mm}$  で一周巻かれた状態で測定する。

ケーブル化された光ファイバとケーブル化されていない光ファイバとで測定された  $\lambda_{cc}$  の値の相関は、ケーブル設計に依存するが、一般に、ケーブル化されていない光ファイバで測定された  $\lambda_{cc}$  はケーブル化された

光ファイバで測定された値よりも長くなる。

注記 1：光ファイバケーブルを巻くのは敷設条件を模擬することを目的としている。

注記 2：両端にそれぞれ半径  $X = 40 \text{ mm}$  の曲げ一周を付与する代わりに、片端に半径  $X=40 \text{ mm}$  の曲げを二周付与しても良い。

注記 3：6.3.2 項に記載したケーブル化された光ファイバ及びケーブル化されていない光ファイバを用いた測定は、IEC60793-1-44 の付属文書 B 及び付属文書 A にそれぞれ記載されている。

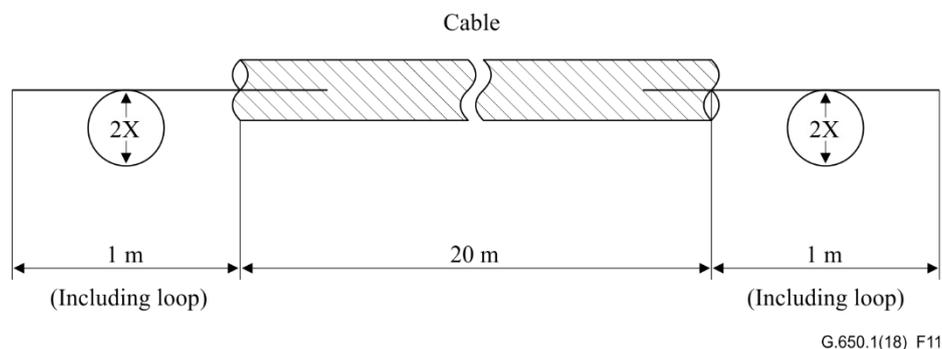


図11 ケーブル化された光ファイバの $\lambda_{cc}$ 測定における設置条件

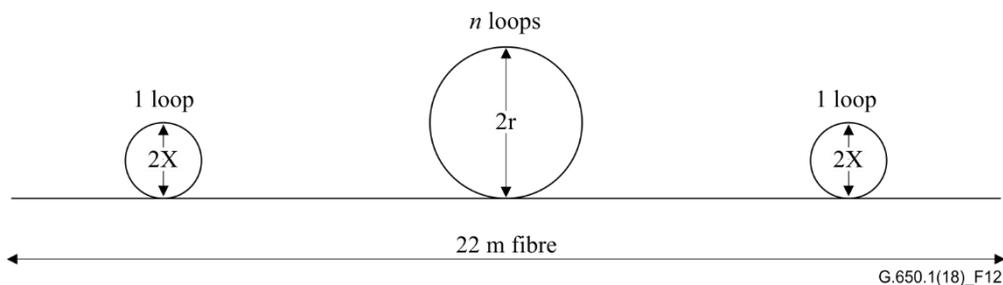


図12 ケーブル化されていない光ファイバの $\lambda_{cc}$ 測定における設置条件

### 6.3.2.3.2 参照サンプルでの透過光パワーの測定 (6.3.1.3.2 項を参照)

#### 6.3.2.3.3 計算

透過光パワー $P_1(\lambda)$ と $P_i(\lambda)$ との対数比は、次式で計算することが出来る。

$$R(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)} \quad (6-13)$$

ここで、 $i=2$  又は  $3$  は、6.3.1.3.2 項の方法 a) 又は b) に対応する。

#### 6.3.2.3.4 ケーブルカットオフ波長の決定

ケーブルカットオフ波長 $\lambda_{cc}$ を決定するための計算及び方法は、6.3.1.3.3 項及び 6.3.1.3.4 項に記載したファイバカットオフ波長の決定方法と同じである。

#### 6.3.2.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする。

- a) 試験装置の構成
- b) 励振条件
- c) 参照サンプルの種類
- d) 被測定サンプルの温度及び環境条件 (必要に応じて)
- e) 光ファイバ及びケーブルの識別
- f) 測定波長範囲
- g) ケーブルカットオフ波長
- h)  $R(\lambda)$  の波形 (必要に応じて)
- i) 光ファイバの曲げ半径 (ケーブル化されていない光ファイバで測定する場合)

#### 6.4 損失の試験方法

光ファイバの損失測定は、個々の光ファイバの減衰量を導出し、複数の光ファイバが接続された全長の減衰量を、各光ファイバの減衰量の和として決定できるようにする手段を提供することを目的としている。

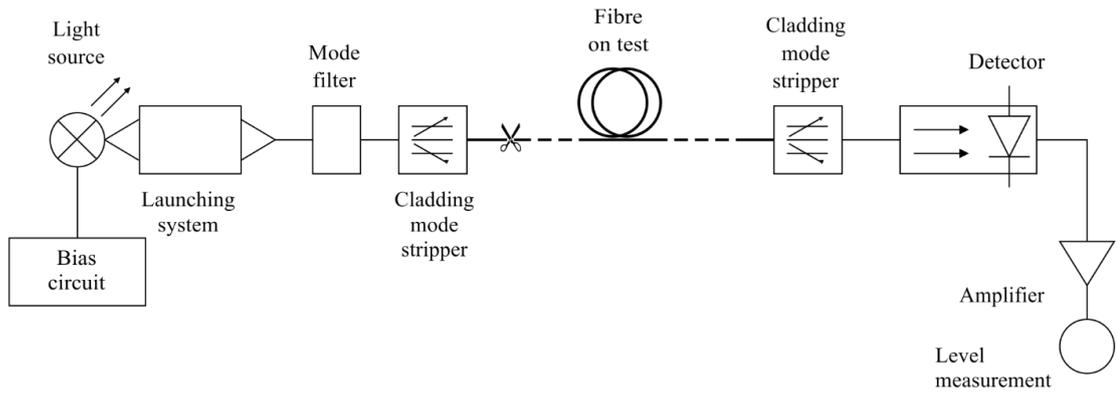
##### 6.4.1 基準試験法:カットバック法

###### 6.4.1.1 概要

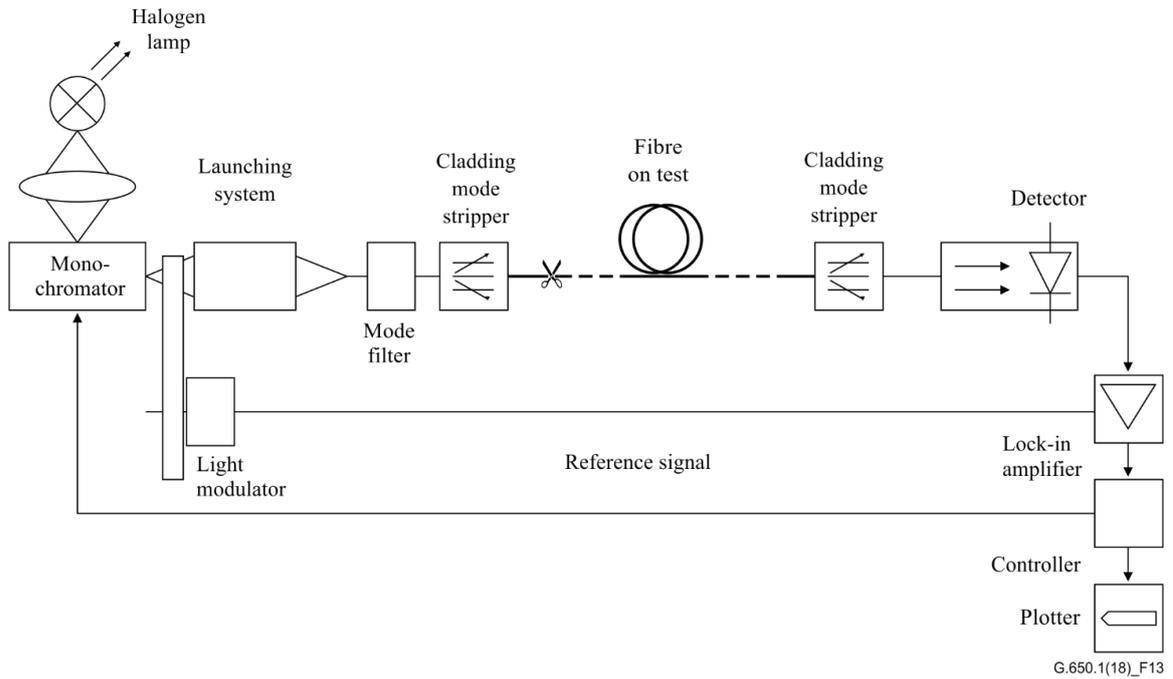
カットバック法は、減衰量の定義、即ち同一励振条件における光ファイバの2地点間の光強度、それぞれ  $P_1$  及び  $P_2$  を直接評価する試験法である。 $P_2$  は光ファイバの遠端で検出される光強度、 $P_1$  は光ファイバの励振点近傍の切断点で検出される光強度を表す。

###### 6.4.1.2 試験装置

測定は、1つ又は複数の波長で、あるいは、特定範囲の波長におけるスペクトル応答として行われる。特定波長の損失、又は損失スペクトルを得るのに好適な試験装置の構成例を図13に示す。



a) 特定波長における損失試験方法



b) 損失スペクトルの試験方法

G.650.1(18)\_F13

図 13 カットバック法

#### 6.4.1.2.1 光源

ランプ、レーザ又は発光ダイオードなど、適切な試験光源を使用するものとする。試験光源の選択は、測定の種類によって異なる。試験光源は、測定を完了するのに十分長い時間にわたって、位置、強度及び波長が安定していなければならない。スペクトル線幅 (FWHM) は、光ファイバのスペクトル減衰の特徴よりも狭くなるように規定する。

#### 6.4.1.2.2 変調

受光器での信号対雑音比を改善するために、慣例的に試験光源を変調する。そのような手法を採用する場合、受光器は光源の変調周波数に同期した信号処理システムに接続することが望ましい。受光システムは、実効的に線形な感度を有することが望ましい。

#### 6.4.1.2.3 励振条件

試験光源の励振機構は、基本モードを十分に励起するように設定されなければならない。例えば、以下のよう  
な励振状態が考えられる。

- a) 光ファイバとの直接結合;
- b) 適切な光学系を介した励振。

#### 6.4.1.2.4 モードフィルタ

高次モードはカットバック長を超えて伝搬しないように注意しなければならない。このような場合、曲げ部  
を設定して高次モードを除去する必要がある。たとえば、ほとんどの ITU-T G.65x 光ファイバでは、半径が  
30 mm の 1 回曲げで十分なモードフィルタが実現できる。一部の JT-G.657 光ファイバでは、より小さい半径  
の曲げ、複数回の曲げ、又はより長いサンプル長を適用することで、高次モードを除去できる。

#### 6.4.1.2.5 クラッドモード除去器

クラッドモード除去器は、クラッドモードから放射モードへの変換を促進する。その結果、光ファイバから  
クラッドモードが除去できる。

#### 6.4.1.2.6 光検出器

適切な受光器を使用して、光ファイバから照射されるすべての放射光を受光する。スペクトル応答は試験光  
源のスペクトル特性と相関を有することが望ましい。受光器は均一で、線形の感度特性を有していなければ  
ならない。

### 6.4.1.3 試験手順

#### 6.4.1.3.1 被測定光ファイバの準備

光ファイバ端は、ゴミなどの付着がなく、滑らかで、光ファイバの伝搬軸に対して実質的に垂直であるもの  
とする。光ファイバ素線の測定は、ドラム上で光ファイバに余計な張力が掛からない状態で実施するものと  
する。すなわち、ドラム表面によって微小曲げによる損失増加が生じない状態で実施する。

#### 6.4.1.3.2 手順

- 1) 被測定光ファイバを測定装置に設置する。出力光強度  $P_2$  を記録する。
- 2) 励振条件を保持したまま、被測定光ファイバをカットバック長に切断する (例えば、励振点から 2 メー  
トルの地点で切断する)。必要に応じてクラッドモード除去器を再設定し、カットバック長における出力  
光強度  $P_1$  を記録する。
- 3)  $P_1$  と  $P_2$  が測定された 2 地点間の光ファイバの減衰量は、定義式 3-4 と 3-5 から  $P_1$  と  $P_2$  を使用して計算  
できる。

#### 6.4.1.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする

- a) 試験光源の種別、波長、及び線幅 (FWHM) を含む試験装置の構成

- b) 被測定光ファイバの識別
- c) サンプルの長さ
- d) 高次モードフィルタの詳細
- e) サンプルの dB 表記の損失量
- f) dB/km 表記の損失係数
- g) 測定精度と再現性の指標
- h) 被測定サンプルの温度及び環境条件(必要に応じて)

## 6.4.2 第 1 の代替試験法:後方散乱光法

### 6.4.2.1 概要

双方向後方散乱測定によるシングルモード光ファイバの損失係数の試験方法について述べる。この方法は、損失の均一性、光学的連続性、物理的不連続点、融着損失、及び光ファイバの条長の確認に適用できる。

単方向後方散乱測定は、特定の場合に採用できる。例えば、ケーブル化された光ファイバの後方散乱勾配の変動の検証などである。

(シングルモード光ファイバ用)後方散乱光法の装置の校正手順は、[IEC 61746-1]に記載されている。

### 6.4.2.2 試験装置

#### 6.4.2.2.1 一般的な考慮事項

後方散乱光信号の信号レベルは標準的には微弱で、雑音レベルに近い。したがって、信号対雑音比及びダイナミック測定レンジを改善するために、検出された信号の信号処理と高出力光源を併用するのが通例である。さらに、分解能とダイナミックレンジの関係を最適化するために、パルス幅の調整が必要になる場合がある。

高次モードが伝搬しないように注意しなければならない。

装置の一例を図 14a に示す。

#### 6.4.2.2.2 光源

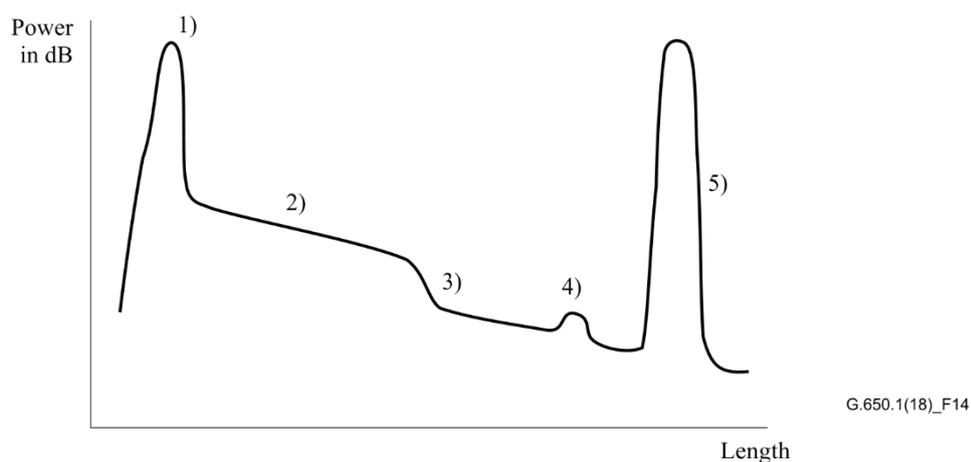
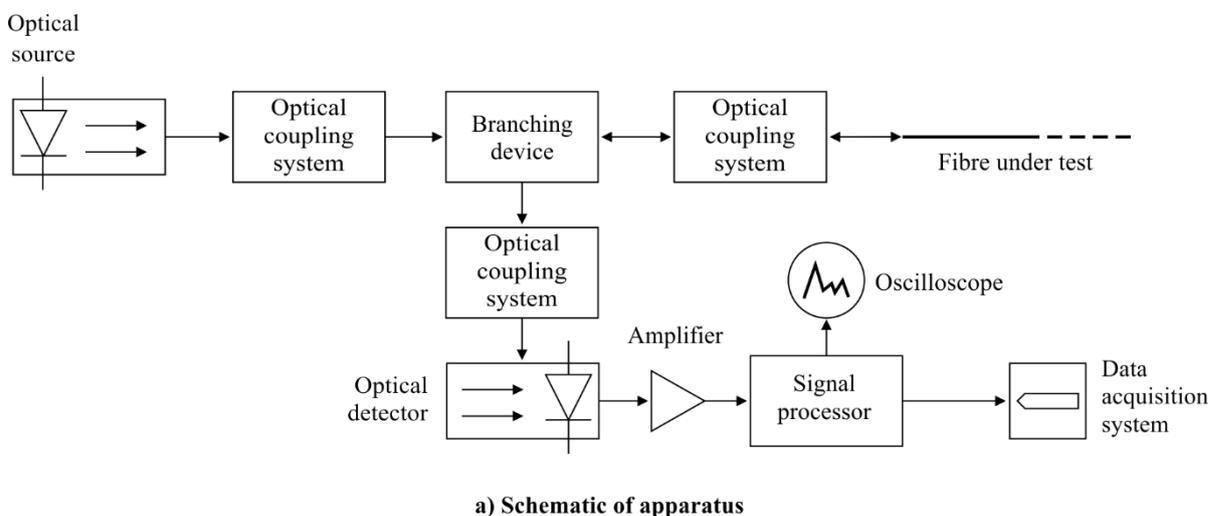
安定した適切な波長の高出力光源を使用し、それらを記録する。パルス幅とパルス繰返し周波数は、必要な解像度及び光ファイバの条長と整合していることが望ましい。

#### 6.4.2.2.3 光カップリングシステム

被測定光ファイバ、分岐デバイス、又は光検出器にビームを効率的に結合するための光学系を使用しなければならない。フレネル反射を減らすために、屈折率整合材などのさまざまな方策を講じても良い。

#### 6.4.2.2.4 分岐デバイス

光源と検出器の直接結合を避けながら、光源からの光を光ファイバに結合し、後方散乱光を検出器に結合するには、分岐デバイスが必要である。偏光に依存する特性を持つデバイスの使用は避ける。



b) Example of a unidirectional backscattering loss curve

図 14:後方散乱光法

#### 6.4.2.2.5 光検出器

可能な限り、最大の後方散乱光パワーを受信するために、検出器を使用しなければならない。検出器の応答は、検出された信号のレベルと波長の互換性がなければならない。損失測定には、実質的に線形の検出器応答が要求される。

#### 6.4.2.2.6 増幅器

信号レベルが信号処理の面で適切になるように、適切な増幅器が光検出器に後続される必要がある。増幅器の帯域幅については、時間分解能とノイズ低減の間のトレードオフを考慮することが望ましい。

#### 6.4.2.2.7 信号処理装置

信号対雑音比を改善し、二つの単方向後方散乱損失曲線から損失曲線を計算し、検出システムで対数応答を提供できる信号処理装置が必要である。後方散乱光トレースを直接表示するためのオシロスコープと、測

定結果を保存するためのデータ取得システムを信号処理装置に接続することができる。

#### 6.4.2.2.8 クラッドモード除去器

6.4.1.2.5 項参照。

#### 6.4.2.2.9 光ファイバのサンプル構成

いくつかの光ファイバ構成に置かれた（たとえば、適切な出荷ドラム上で、ケーブル化された光ファイバとして、あるいは基準試験方法の要求に従ったような）光ファイバを使用して測定を行ってもよい。

#### 6.4.2.3 測定手順

- a) 被測定光ファイバを光カップリングシステムに接続する。
- b) 光ファイバの両端から一つずつ、二つの単方向後方散乱損失曲線を測定する。図14bは、このような単方向曲線の例を示している。各後方散乱損失曲線は、カップリングデバイス及び分岐デバイスと光ファイバの端に反射があるため、曲線の両端部分（図14bの部分1）及び5）を参照）を避けながら、信号処理装置によって分析され、対数目盛で記録される。
- c) 後方散乱損失曲線の両端間の時間間隔 $T_f$ と光ファイバの群遅延指数 $N$ から、光ファイバの長さ $L_f$ の数値を次の式で求める。

$$L_f = c \cdot T_f / N \quad (c: \text{真空中の光速})$$

- d) 以下に概説する手順に従って、二つの測定及び記録された単方向後方散乱損失曲線を使用して、双方向後方散乱損失曲線を取得する。  
a(x)とb(z)を、dBで示される二つの単方向後方散乱損失曲線を表す関数とする。xとzは、それぞれの入射点に最も近い光ファイバ端からの距離である。双方向後方散乱損失曲線は次の式で与えられる。

$$y(x) = \frac{a(x) - b(L_f - x)}{2} \quad (6-14)$$

- e) 以下に概説する手順に従って、両端間の光ファイバ損失係数を取得する。端部位置 $x_0$ 及び $x_1$  ( $x_0 < x_1$ ) で定義される光ファイバセグメントの損失係数 $A(x_0, x_1)$ は、次の式で与えられる。

$$A(x_0, x_1) = \frac{y(x_0) - y(x_1)}{x_1 - x_0} \quad (6-15)$$

この式は、 $x_0$ と $x_1$ の間のデータの最小二乗線形近似によって評価してもよい。両端間の光ファイバ損失係数は、データポイントが端部位置にできるだけ近くなるようにして、式6-15と同じ方法で決定する。ただし、これらのポイントは、デッドゾーン領域と端部反射領域の外側にある必要がある（図14b、領域1）及び5）を参照）。

#### 6.4.2.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする。

- a) 試験装置構成
- b) 使用した信号処理の種類
- c) 試験日
- d) 試験片の識別情報と長さ

- e) パルス幅
- f) 試験波長
- g) 両端間の光ファイバ損失係数 (dB/km);
- h) 双方向後方散乱損失曲線

注記- 単方向後方散乱測定は関数 $a(x)$ のみで取得される。記録された単方向後方散乱損失曲線（図14b）の完全な分析は、損失測定とは別に、後方散乱法を使用して、次のような多くの現象を監視できることを示している。

- 1) 光ファイバの入力端の分岐デバイス及びカップリングデバイスで発生する反射
- 2) 不変の後方散乱勾配の領域
- 3) 局所的な欠陥、融着、又はカップリングによる不連続性
- 4) 長手方向の後方散乱勾配の変化
- 5) 光ファイバの出力端での変動
- 6) (たとえば温度による) 損失変化

### 6.4.3 第2の代替試験方法：挿入損失法

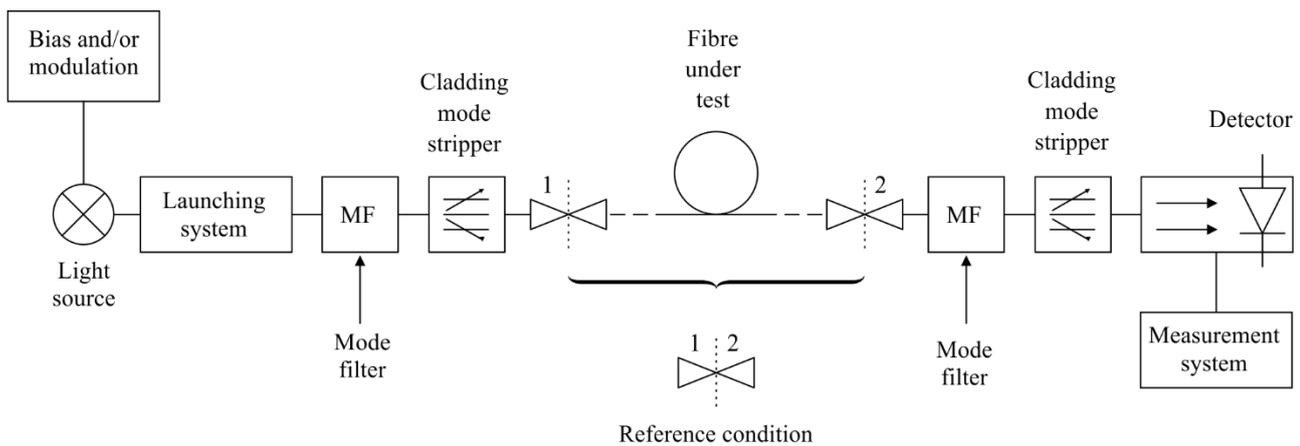
#### 6.4.3.1 概要

挿入損失法は、(リファレンス条件として)事前に相互接続されていた発振装置と受信装置の間への被測定光ファイバの挿入によって生じる光パワー損失の評価から成り立つ。そのため、パワー $P_1$ 及び $P_2$ は、カットバック法よりも複雑な方法で評価される。したがって、この方法は、工場出荷時の光ファイバ及び光ケーブルの条長での測定には向いていない。

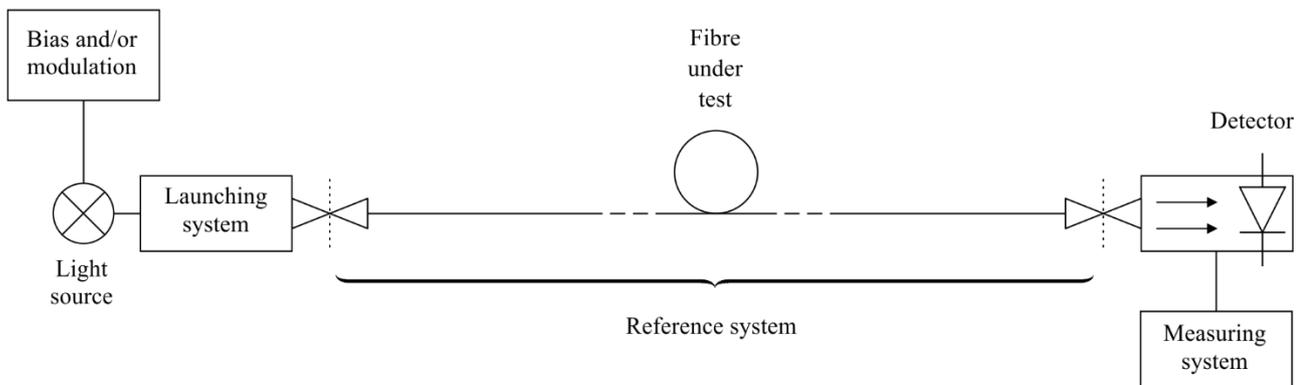
挿入損失法はカットバック法よりも精度が落ちるが、被測定光ファイバ、及び両端に固定されるセミコネクタに対して非破壊でできる利点がある。したがって、特に現場での使用に適しており、主に両端にコネクタが取り付けられている光ファイバケーブルへの使用を目的としている。

この手法では、次の二つのオプションが考えられる（図15を参照）。つまり、以下に概説するように、これらは発振装置と受信装置の本質が異なる。オプションa)とb)の中間的な測定条件も可能であり、6.4.3.2項の注2で説明されている。

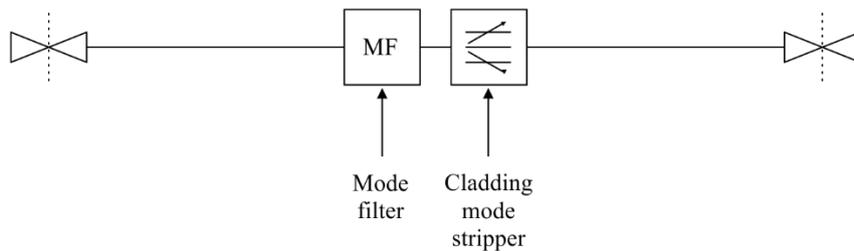
オプションa)では、被測定光ファイバに取り付けられている可能性のあるセミコネクタの品質（及び一般には、使用する相互接続デバイスの品質）が結果に影響する。一方、オプションb)では、この影響はほぼ除外される。結果として、オプションb)は一般に確度が高く、光ファイバのみの実際の損失が必要な場合にはより適している。逆に、被測定光ファイバ部分にセミコネクタが取り付けられており、他の要素と縦列接続する必要がある場合、オプションa)からの結果は、公称損失からのセミコネクタの偏差を考慮するので、より意味がある。



Option a)



Reference system



Option b)

G.650.1(18)\_F15

図 15-挿入損失法の一般的な構成

### 6.4.3.2 試験装置

試験装置の概略図を図 15 に示す。測定は、一つ又は複数の波長で行うことができる。若しくは、ある範囲の波長にわたってスペクトル応答が必要になる場合もある。

#### 6.4.3.2.1 光源

ランプ、レーザ、発光ダイオードなど、光強度が安定した適切な光源を使用しなければならない。広帯域光源を使用する場合は、波長選択デバイスを使用することが望ましい（あるいは、このデバイスを検出器の前に挿入することもできる）。いずれの場合も、（波長選択デバイスを考慮に入れて）光源の公称波長を知る必要がある。

スペクトル幅（FWHM）は、光ファイバのスペクトル損失のあらゆる特徴と比較して狭くすることが望ま

しい。

#### 6.4.3.2.2 変調

6.4.1.2.2 項を参照。

#### 6.4.3.2.3 励振条件

##### オプションa) の場合

光源は、被測定光ファイバと同じ公称特性を持ち、モードフィルタとクラッドモード除去器を備えた短尺のシングルモード光ファイバに結合される（以下を参照）。

上記のシングルモード光ファイバは、結合損失を最小限に抑えるように非常に精密な結合デバイスを使用して被測定光ファイバに結合され、意味のある結果を保証する。被測定光ファイバにセミコネクタが装備されている場合は、互換性のある高品質のセミコネクタを入射光ファイバに取り付けなければならない。

##### オプションb) の場合

光源は、光ファイバの入力端面での入射スポットが、被測定光ファイバのモードフィールド径と（それに対応する）ファーフィールド領域内でほぼ均一なニアフィールド強度とファーフィールド強度を持つような方法で、適切な光学系を介して被測定光ファイバに結合される。

この系では、レンズと光ファイバ調心器を使用できる。あるいは、被測定光ファイバに接続されたステップインデックスマルチモード光ファイバに光を入射してもよい。

これは、被測定光ファイバを終端するデバイスと互換性のある任意の結合デバイス又はセミコネクタを使用して実現する。

#### 6.4.3.2.4 基準系(オプションbのみ)

図 15 の Reference system に示すように、被測定光ファイバと同じ公称特性を持つ短尺のシングルモード光ファイバで構成される。光ファイバには、モードフィルタとクラッドモード除去器が装備される。両方のデバイスは、基本モードで損失を引き起こしてはならない。

#### 6.4.3.2.5 モードフィルタ

モードフィルタは、基本モードのみを光ファイバに伝搬させるものでなければならない。これは、光ファイバの適切な曲げ条件によって実現できる。たとえば、ほとんどの ITU-T G.65x 光ファイバでは、光ファイバを半径 30 mm で 1 回転曲げれば、一般的には十分である。一部の JT-G657 光ファイバでは、半径を小さくする、複数の曲げを使用する、あるいはサンプルの長さを長くすることで、高次の伝搬モードを除去することができる。

#### 6.4.3.2.6 クラッドモード除去器

クラッドモードの放射モードへの変換を促進するようにクラッドモード除去器を使用するのが望ましい。光ファイバ自体がクラッドモードを伝搬しない場合は、このデバイスは必要ない。

#### 6.4.3.2.7 光検出

光検出器のスペクトル応答は、光源のスペクトル特性と互換性がなければならない。そのためには、線形な感度特性が必要である。

##### オプションa) の場合

光検出器は、被測定光ファイバと同じ公称特性を持つシングルモード光ファイバに接続される。光ファイ

バには、モードフィルタとクラッドモード除去器を装備するのが望ましい。

被測定光ファイバとの結合は、6.4.3.2.3 項のオプション a) に示した励振条件で行われる。

#### オプション b) の場合

被測定光ファイバ端は、光検出器の前に配置される。

光ファイバから出るすべての光を受光するように、適切な光検出器を使用する必要がある。光検出器は空間的に均一でなければならない。

あるいは、光検出器はステップインデックスマルチモード光ファイバに接続される。この光ファイバは、被測定光ファイバを終端するデバイスと互換性のある任意のカップリングデバイス又はセミコネクタによって、被測定光ファイバに結合される。

### 6.4.3.3 測定手順

#### 6.4.3.3.1 被測定光ファイバの準備

6.4.1.3.1 項を参照。

光ファイバにコネクタが取り付けられている場合は、適切なクリーニング手順が必要である。

#### 6.4.3.3.2 手順

1) 測定波長を選択した後、最初に、パワー $P_1$ を次の方法で測定する。

##### オプション a) の場合

入射系の光ファイバを、受光系の光ファイバに接続する。次に、受光パワー $P_1$ を記録する。

##### オプション b) の場合

基準系を、入射系と受光系の間に接続する。次に、受光パワー $P_1$ を記録する。

2) 続いて、被測定光ファイバを入射系と受光系の間に接続する。次に、受光パワー $P_2$ を記録する。

3) 最後に、光ファイバ部分の損失  $A$  を次の方法で計算する。

##### オプション a) の場合

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} + C_r - C_1 - C_2 \text{ (dB)} \quad (6-16 \text{ a})$$

ここで、 $C_r$ 、 $C_1$ 、及び  $C_2$  は、それぞれ、基準条件、被測定光ファイバの入力及び出力における公称平均融着損失 (dB 単位) である。

##### オプション b) の場合

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \text{ (dB)} \quad (6-16 \text{ b})$$

注記 1- オプション b) の使用は、被測定光ファイバが基本モード以外のモードを受光側へ伝搬させないことを前提としている。

注記 2- 光ファイバ損失測定は、オプション a) の入射系とオプション b) の受光系、又はその逆を使用するハイブリッド試験装置構成でも可能である。

$P_1$  の測定手順は、どちらの場合も上記のオプション a) の手順と同様である。基準系は必要なく、入射系は受光系に直接接続されている。

どちらの場合も、光ファイバ部分の損失は次のように計算できる。

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} - C_a \text{ (dB)} \quad (6-17)$$

ここで、 $C_a$ は、被測定光ファイバと、オプション a) に属する試験装置構成（入射又は受光系）のその部分との間の公称平均融着損失（dB 単位）である。

注記 3- オプション a) はセミコネクタの挙動を評価する内在的な能力を持つが、この評価が必要な場合にいつでもそれを用いなければならないことを意味するものではない。

代替方法として、セミコネクタの評価が必要な端面であっても、予めシングルモード光コードを被試験光ファイバに接続して、オプション b)の装置構成を使用することが可能である。この場合、光ファイバからコードのコネクタまでの公称損失は、測定損失から差し引かれる。

実際に使用する試験装置は、利用可能な計測装置、制御装置及び接続デバイスを考慮して、誤差の原因を最小限に抑えるように選択することが望ましい。両方のセミコネクタを評価する必要がある場合は、通常、ハイブリッド装置構成（a-入射、b-受光）と受光側のコードを使用するのが最善の解決策である。

#### 6.4.3.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする。

- a) 測定に使用される光源の種類、光源波長、スペクトル幅（FWHM）、及びオプション a) 又は b) を含む試験装置構成
- b) 光ファイバの識別情報
- c) 光ファイバ部分の長さと同端面の条件（セミコネクタの有無）
- d) 高次モードフィルタの情報
- e) dB で表される測定対象部分の損失
- f) dB / km で表される損失係数
- g) 測定精度と測定再現性に関する情報（接続損失の再現性を適切に考慮しなければならない）
- h) サンプルの温度と環境条件（必要に応じて）

### 6.4.4 第 3 の代替試験法：損失波長特性推定法

#### 6.4.4.1 全般

波長スペクトル全体に対する光ファイバ損失波長係数は、行列  $M$  とベクトル  $v$  を用いて計算する。ベクトルは少数（三つから五つまで）の指定した波長（例えば、1310 nm、1360 nm、1380 nm、1410 nm、1550 nm、及び/又は 1625 nm）で測定した損失係数からなる。

損失波長モデルの一つの方法では、光ファイバ又は光ケーブルの供給者は製品に固有の特性を表す行列を提示しなければならない、損失波長特性を表すベクトル  $w$  は、 $M$  と  $v$  から計算される。

$$w = M \cdot v$$

別の方法として、製品に固有の行列の代わりに汎用行列を使用する場合、予測方程式が次の式になるように、供給者は補正率ベクトルを提示しなければならない。

$$W = w + e$$

ここに、

$W$  は、修正されたベクトル

$w$  は、 $w = M \cdot v$

$e$  は、補正率ベクトル

である。

汎用行列は、多数の光ファイバ、設計及び供給者（通常同一種類の光ファイバの供給者）に適用できる特性行列であり、個別規格又は受渡当事者間の協定による。個々の供給者は、自社の製品をこれと比較し、差

を補正率ベクトル  $e$  によって解消する。

#### 6.4.4.2 試験装置

この方法は、あらかじめ規定した値を使用して計算するため、特定の装置は不要となる。推奨される試験方法（6.4.1 項、カットバック法、6.4.2 項、後方散乱光法、6.4.3 項、挿入損失法）のいずれかを使用して、計算に用いる測定値を得ることができる。

損失の直接測定はこの方法よりも優先されるので、この方法と矛盾する場合がある。

#### 6.4.4.3 計算手順

波長スペクトル全体に対する光ファイバの損失係数は、 $w = M \cdot v$  から計算できる。ベクトル  $v$  には、少数（三つから五つまで）の予測波長（例えば、1310 nm、1360 nm、1380 nm、1410 nm、1550 nm、及び/又は 1625 nm）で測定された損失係数が含まれ、それはすでに述べた損失試験方法のうち一つで測定される。行列  $M$  にベクトル  $v$  を掛けると、別のベクトル  $w$  が生成され、このベクトルには、多くの波長（例えば、1240 nm ~ 1600 nm の 10 nm の波長間隔）での予測損失係数となる。

行列  $M$  は次のようになる。

A11	A12	.....	A1n
A21	A22	.....	A2n
	“		“
	“		”
	“		”
Am1	Am2	.....	Amn

ここに、 $m$  は損失係数を推定しなければならない波長数であり、 $n$  は指定する波長数である。付録 III にこのような行列の一例が示されている。

各波長における実際損失係数と予測損失係数との標準偏差は、規定波長範囲内の 0.xx dB/km 未満とする。追加波長範囲が規定すれば、異なる許容範囲 0.yy dB/km が必要になることがある。(xx) と (yy) の値及び波長範囲は、受渡当事者間の協定による。

光ファイバ供給者が指定した行列  $M$  を用いて推定する場合は、補正ベクトル  $e$  は不要となる。

$M$  及び  $e$  の要素は統計基準によって達成されるため、ベクトル  $w$  の要素は統計的要素とみなす。予測損失係数の確度を求めるために、光ファイバ供給者は、実際損失係数と予測損失係数との差の標準偏差を含むベクトルを  $M$  及び/又は  $e$  とともに提供する（6.4.4.4 項を参照）。

注記 1- この行列の使用を容易にするために、光ファイバを指定した波長で定期的に測定するのが望ましい。指定する波長数は、広範囲の波長で動作する光ファイバ（1260 nm ~ 1625 nm でモデル化された JT-G652 光ファイバなど）の場合、3 ~ 5 であることが望ましく、確度が十分に達成できれば、より少ないほうが望ましい。十分に狭い波長範囲でモデル化する必要がある場合（1530 nm ~ 1625 nm でモデル化された JT-G654 光ファイバなど）は、予測に用いる波長は 2 波長が適切な場合がある。すべての場合において、厳密な測定と比較して十分な確度を示すことにより、予測に用いる波長の選択の適合性を検証するのが望ましい。

注記 2- このモデルは、ケーブル付きでない光ファイバの損失を対象とする。光ケーブル及び環境の影響を対象とするには、追加のベクトルを  $w$  に加える。

#### 6.4.4.4 結果の表示

損失係数の測定に使用する試験方法において報告する項目に加えて、以下の項目を報告する。

a) 予想損失及び対応波長

- b) 測定損失値を得るために使用した方法（要求に応じて）
- c) 損失波長特性を予測するために使用した行列、又は汎用行列を用いた場合は補正率ベクトル（要求に応じて）
- d) 行列の展開中に得られた実際損失係数と予測損失係数との差の標準偏差を含むベクトル（要求に応じて）

## 6.5 波長分散の試験方法

波長分散は波長によって変化する。いくつかの試験法では、波長の関数として群遅延を測定し、このデータの波長微分として、波長分散及び分散スロープを導出する。ほとんどの場合、波長微分のプロセスは、測定データを数学モデルで近似してから行われる。基準試験法以外の試験法には、所望の波長における波長分散を直接測定できるものもある。

光ファイバのいくつかのカテゴリでは、波長分散の波長依存性が特定の数式モデルで規定されている。このような場合、個々の数式モデルは関連する光ファイバ勧告で規定されている。他の光ファイバカテゴリでは、特定の波長、もしくは指定された波長範囲内で、波長分散が規定の数値範囲となるように指定される。後者の場合には、指定された波長範囲外の波長で波長分散の直接測定や群遅延の測定を行い、近似関数を用いて指定された波長範囲の波長分散や群遅延を導出することができる。

付属文書 A に、波長分散の近似に関する一般的な説明を記述し、任意の試験法又は光ファイバカテゴリに使用可能ないくつかの近似方程式を示す。

付録 V に、干渉法による波長分散の試験法を示す。

### 6.5.1 基準試験法：位相法

#### 6.5.1.1 概要

光ファイバの波長分散係数は、既知の長さの光ファイバを伝搬する際に様々な波長が受ける相対的な群遅延を測定することにより導出される。

正弦波変調信号の位相シフトを検出し、記録し、処理することにより、周波数領域で群遅延を測定する。波長分散は、特定波長で、又はある波長範囲にわたって測定することができる。

注記:微分位相法は、[IEC 60793-1-42]の付属文書 C に記載されている。

#### 6.5.1.2 試験装置

試験装置の概略図を図 16 に示す。

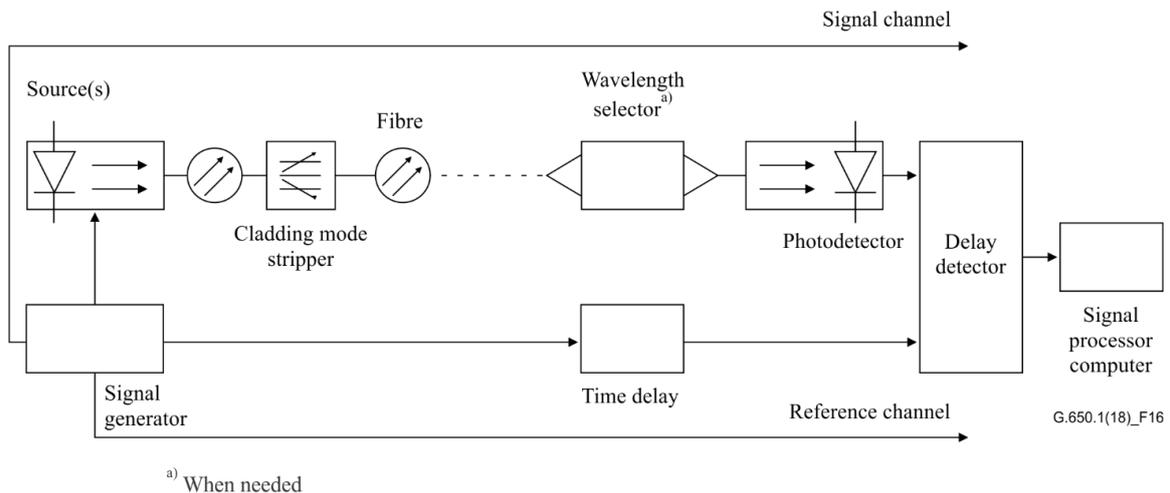


図 16 試験装置の典型的な構成

#### 6.5.1.2.1 光源

試験光源は、測定を完了するのに十分な時間にわたって、位置、強度及び波長が安定しているものとする。測定の波長範囲に応じて、レーザダイオード(レーザダイオードアレイ)、波長可変レーザダイオード(WTL) (例えば、外部共振器レーザ(ECL))、LED 又は広帯域光源(例えば、ラマンファイバを有する Nd:YAG レーザ)を使用することができる。

いずれの場合も、変調信号は群遅延測定において十分な時間分解能を保証するようなものでなければならない。

#### 6.4.1.2.2 波長の選択

波長セレクタとモニタは、群遅延を測定する波長を選択し、モニタするために使用される。波長セレクタとしては、光源の種類や測定装置に応じて、光スイッチ、モノクロメータ、分散素子、光フィルタ、光カップラ、コネクタ等を用いることができる。この選択は、異なる波長の光源に対して電氣的駆動信号を切り替えることによって行うことができる。

波長モニタリングは、光ファイバカップラ及び波長計によって行うことができる。波長セレクタ及びモニタは、被測定光ファイバの入力端又は出力端のいずれかで使用することができる。

測定データを数学的に近似する場合、少なくとも一つの測定データは、ゼロ分散波長 $\lambda_0$ から 100 nm 以内にななければならない。

#### 6.5.1.2.3 光検出器

被測定光ファイバ、参照光ファイバ又は光分割器等からの出力光は、測定に適切な信号対雑音比及び時間分解能を有する光検出器に結合される。光検出器の後には、必要に応じて低雑音増幅器が接続される。

#### 6.5.1.2.4 参照チャネル

参照チャネルは、電気信号又は光信号で構成できる。適切な遅延時間発生器を参照チャネルに挿入する場合がある。被測定光ファイバ自体を参照チャネルとして使用する場合もある。

#### 6.5.1.2.5 遅延検出器

遅延検出器は、参照信号と被測定光ファイバ信号との間の位相シフトを測定する。ベクトル電圧計を使用することができる。

#### 6.5.1.2.6 信号プロセッサ

測定波形におけるノイズ及び/又はジッタを低減するために、信号プロセッサを利用する場合がある。必要に応じて、装置制御、データ取得、及びデータの数値演算の目的でデジタルコンピュータを使用する場合がある。

#### 6.5.1.3 試験手順

被測定光ファイバは、波長セレクタ又は光分割器等を介して試験光源及び光検出器に適切に結合される。必要に応じて、試験光源の波長遅延の校正を行う。波長分解能と信号レベルは適切に調整されなければならない。被測定光ファイバを参照チャンネルとして使用しない場合、被測定光ファイバの温度は測定の間十分に安定していなければならない。

動作波長における参照信号と被測定信号との間の位相シフトは、遅延検出器によって測定される。動作波長での波長分散係数を得るために変調の種類に適したデータ処理を用いる。必要に応じて、波長に対する群遅延のスペクトル走査を行い、測定値から近似曲線を導出することができる。

群遅延時間は、対応する位相シフト $\phi$ を用いて、 $\tau = \phi / (2\pi f)$ で求められる。ここで、 $f$ は変調周波数を示す。

#### 6.5.1.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする

- a) 試験装置の構成
- b) 使用した変調の種類
- c) 試験光源の特性
- d) 光ファイバの識別と長さ
- e) 波長セレクタの特性(もしあれば)
- f) 光検出器の種類
- g) 遅延検出器の特性
- h) 相対群遅延データ又は波長分散データの近似に使用したモデル、及び近似に使用した波長範囲
- i) 近似波長範囲における各波長の波長分散係数の値
- j) 被測定サンプルの温度及び環境条件(必要に応じて)

### 6.5.2 代替試験方法:パルス法

#### 6.5.2.1 概要

光ファイバの波長分散係数は、既知の長さの光ファイバを伝搬する際に様々な波長が受ける相対的な群遅延を測定することにより導出される。

様々な波長のパルスによって生じる遅延を検出し、記録し、処理することにより、時間領域で群遅延を測

定する。

波長分散は、特定波長で、又はある波長範囲にわたって測定することができる。

### 6.5.2.2 試験装置

試験装置の概略図を図 16 に示す。

#### 6.5.2.2.1 光源

試験光源は、測定を完了するのに十分な時間にわたって、位置、強度及び波長が安定しているものとする。測定の波長範囲に応じて、レーザダイオード(レーザダイオードアレイ)、波長可変レーザダイオード(WTL)(例えば、外部共振器レーザ(ECL)) 又は広帯域光源(例えば、ラマンファイバを有する Nd:YAG レーザ)を使用することができる。

いずれの場合も、変調信号は群遅延測定において十分な時間分解能を保証するようなものでなければならない。

#### 6.5.2.2.2 波長の選択

波長セレクタとモニタは、群遅延を測定する波長を選択し、モニタするために使用される。波長セレクタとしては、光源の種類や測定装置に応じて、光スイッチ、モノクロメータ、分散素子、光フィルタ、光カップラ、コネクタ等を用いることができる。この選択は、異なる波長の光源に対して電氣的駆動信号を切り替えることによって行うことができる。

波長モニタリングは、光ファイバカップラ及び波長計によって行うことができる。波長セレクタ及びモニタは、被測定光ファイバの入力端又は出力端のいずれかで使用することができる。

測定データを数学的に近似する場合、少なくとも一つの測定データは、ゼロ分散波長 $\lambda_0$ から 100 nm 以内になければならない。

#### 6.5.2.2.3 光検出器

被測定光ファイバ、参照光ファイバ又は光分割器等からの出力光は、測定に適切な信号対雑音比及び時間分解能を有する光検出器に結合される。光検出器の後には、必要に応じて低雑音増幅器が接続される。

#### 6.5.2.2.4 参照チャネル

参照チャネルは、電気信号又は光信号で構成できる。適切な遅延時間発生器を参照チャネルに挿入する場合がある。被測定光ファイバ自体を参照チャネルとして使用する場合もある。

#### 6.5.2.2.5 遅延検出器

遅延検出器は、参照信号と被測定光ファイバ信号との間の遅延時間を測定する。高速オシロスコープ又はサンプリングオシロスコープを使用することができる。

#### 6.5.2.2.6 信号プロセッサ

測定波形におけるノイズ及び/又はジッタを低減するために、信号プロセッサを利用する場合がある。必要に応じて、装置制御、データ取得、及びデータの数値演算の目的でデジタルコンピュータを使用する場合がある。

### 6.5.2.3 測定手順

被測定光ファイバは、波長セレクタ又は光分割器等を介して試験光源及び光検出器に適切に結合される。

必要に応じて、試験光源の波長遅延の校正を行う。波長分解能と信号レベルは適切に調整されなければならない。被測定光ファイバを参照チャネルとして使用しない場合、被測定光ファイバの温度は測定の間十分に安定していなければならない。

動作波長における参照信号と被測定光ファイバ信号との間の時間遅延は、遅延検出器によって測定される。動作波長での波長分散係数を得るために変調の種類に適したデータ処理を用いる。必要に応じて、波長に対する群遅延のスペクトル走査を行い、測定値から近似曲線を導出することができる。

#### 6.5.2.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする

- a) 試験装置の構成
- b) 使用した変調の種類
- c) 試験光源の特性
- d) 光ファイバの識別と長さ
- e) 波長セレクタの特性(もしあれば)
- f) 光検出器の種類
- g) 遅延検出器の特性
- h) 相対群遅延データ又は波長分散データの近似に使用したモデル、及び近似に使用した波長範囲
- i) 近似波長範囲における各波長の波長分散係数の値
- j) 被測定サンプルの温度及び環境条件(必要に応じて)

### 6.6 マクロバンド損失の試験方法

#### 6.6.1 基準試験方法：光ファイバ曲げ法

##### 6.6.1.1 概要

マクロバンド損失測定は、シングルモード光ファイバにおいてのマクロバンド特性を評価するために、異なる曲げ半径下の損失値を提供することを目的としている。

注記：「曲げ半径」とは光ファイバを曲げることができる適切な円形物(例えば、平坦な表面のマンドレル又はガイド溝)の半径と定義する。

##### 6.6.1.2 測定条件

###### 6.6.1.2.1 サンプル長

試験体は、詳細な仕様に規定されている光ファイバであり、その長さは既知とする。特に、信号／雑音比(S/N)が最適化されていれば、損失測定用のサンプル長は、測定系のセッティング、言い換えると、曲げ半径(R)とターン数によって決定され、それ以上の光ファイバ長は測定結果に影響しない。

###### 6.6.1.2.2 ターン数

ターン数は、[JT-G652]、[ITU-T G.653]、[JT-G654]、[ITU-T G.655]、[ITU-T G.656]、[JT-G657]に記載されている値を参考にすることが望ましい。

シングルモード光ファイバでは、損失はターン数と共に直線的に増加する。

半径に応じて、以下の方法で、ターン数を選択しなければならない。

- a) 損失増加が測定系の検出限界以下の場合；例えば、低曲げ損失型光ファイバのように、必要に応じて、仕様書の要求よりも多いターン数で試験を実施し、規定した数で線形の正規化を行って良い。
- b) 損失増加が測定系の非線形領域の発現より低い場合；曲げ半径 5～10 mm の範囲で曲げられている間は、5～10 ターン以上でないことが望ましい。

#### 6.6.1.2.3 曲げ半径

曲げ半径の値は、該当する [JT-G652]、[ITU-T G.653]、[JT-G654]、[ITU-T G.655]、[ITU-T G.656]、及び [JT-G657] を参照しなければならない。マクロバンド損失は半径が減少すると指数関数的に増加することを考慮することが望ましい。

注記：マクロバンド損失と半径の関係は [IEC 60793-1-47]の附則 A を参照のこと。

#### 6.6.1.2.4 測定波長

[JT-G652]、[ITU-T G.653]、[JT-G654]、[ITU-T G.655]、[ITU-T G.656]、及び [JT-G657] を参照して、測定波長は 1550 nm 又は 1625 nm としなければならない。マクロバンド損失は波長ともに指数関数的に増加することを考慮することが望ましい。

注記 1：シングルモード光ファイバにおいて、光学的な曲げ損失は波長とともに増加するため、想定される最も長い使用波長、すなわち 1550 nm 又は 1625 nm、の曲げ損失仕様を考慮すればよい。もし必要ならば、顧客供給間の協定によって、より短波あるいは長波の仕様を規定してもよい。

注記 2：マクロバンド損失と測定波長のさらなる情報は、[IEC 60793-1-47]の附則 A を参照のこと。

注記 3：シングルモード光ファイバにおいて、様々な実効的な曲げにおける近似的な曲げ損失の波長依存性について、さらなる情報は、[IEC 60793-1-47]の附則 E を参照のこと。

#### 6.6.1.3 試験装置

試験装置は曲げ治具と損失測定装置から構成される。

##### 6.6.1.3.1 曲げ治具

曲げ治具は仕様書に記載された半径で曲げたサンプルを保持するために使われる。平滑なマンドレル、もしくは、平坦な表面のガイド溝が適用可能である。曲げ半径の実測値が必須のため、半径 15 mm 以下の場合には最大公差±0.1 mm、あるいは、より半径が大きい場合は最大公差±0.5 mm～1.0 mm が好ましい(小さい半径では公差が厳しくなるため、より高い測定感度が求められる)。

試験は、大気中で適切な支持物(マンドレル)に巻き付けて完全な 1 ターン(360 度巻き)を形成するか、もしくは、大気中で適切な支持物などに巻き付け U 字ターン(180 度巻き)を形成するかのいずれかの形態でのサンプルで実施できる；この 2 つの条件によって、試験に使われる光ファイバ長は異なり、完全な 1 ターンあたりの光ファイバ長は U 字ターン 1 箇所あたりの光ファイバ長の 2 倍である。ここで、用語「コイル(coil)」は 1 ターンのことを意味し、1 つの「コイル」は 2 つの連続した「U 字ターン」によって作られる。このことは、サンプル長(ターン数)の結果を正規化するときを考慮することが望ましい。

##### 6.6.1.3.2 損失測定装置

損失測定装置は、伝送パワーによる光損失モニタ法([IEC 60793-1-46]の方法 A)、もしくは、カットバック法(6.4.1 項)のいずれかを使用し、被測定光ファイバに適した励振条件を具備する。

#### 6.6.1.4 測定手順

被測定光ファイバの入射端及び出射端において、光ファイバ軸に垂直で平坦な端面を用意する。光ファイバが過度にねじれないように注意し、光ファイバを治具にゆるく巻き付ける。測定のためのターン数、曲げ半径、及び波長については、次の段落で説明する。

光パワーは、次の2つの方法で測定できる。

- a) 伝送パワーによる光損失モニタ法：直線状態から曲げ状態へ変化したときの光ファイバの損失増加を測定する。
- b) カットバック法：曲げ状態での光ファイバの全損失を測定する。曲げによって誘発された損失を決定するために、光ファイバの固有の損失に対して補正することが望ましい。

マンドレルに巻かれていない光ファイバ部分及び基準カットバック部分には、測定結果に重大な影響を与える曲げが起こらないようにする。マンドレルに巻かれていない光ファイバは、曲げ半径 140 mm 以上の束とするのがよい。

(マクロベンド損失を発生しない)大きな半径のマンドレルから必要な半径のマンドレルに巻き直すこともできる。この場合、マクロベンド損失は、(光ファイバの固有の損失を補正することなく)、伝送パワーによる光損失モニタ法を用いて直接決定する。

測定中は光ファイバ部分にねじれを与えないように注意しなければならない。このねじれは測定結果に影響を与える可能性がある。

注記：クラッド／被覆の界面、もしくは、被覆／空気の界面での放射モードの反射に起因するウィスパーリングギャラリーモードがマクロベンド損失測定に影響を与える可能性がある。例えば、干渉を減少するために、適切な屈折率を有する液体に浸された状態で、複数回巻かれた光ファイバの束や、被覆された又は被覆を除去した光ファイバの束を使っても良い。

#### 6.6.1.5 計算

計算結果の単位は dB で報告され、以下の式で与えられる。

$$Loss(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{str}}{P_{bend}} \right) \quad (6-18)$$

ここで、 $P_{str}$  は曲げがない状態での被測定光ファイバ出射光パワーであり、 $P_{bend}$  は曲げを与えた状態での被測定光ファイバ出射光パワーである。

#### 6.6.1.6 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする：

- a) 試験装置構成；
- b) 被測定光ファイバの識別；
- c) 被測定光ファイバの長さ；
- d) 曲げ半径；
- e) ターン数；
- f) 使用波長；
- g) マクロベンド損失 (dB) 又は (dB/ターン)。

### 6.7 スクリーニング(ブルーフ)試験方法

#### 6.7.1 基準試験方法：長手方向の応力印加法

##### 6.6.1.1 概要

- a) この試験方法では、光ファイバの全長について、一時的に引張荷重を加える手順について説明する。

試験前の光ファイバは試験によっていくつかの短尺光ファイバに分割してもよく、それぞれの短尺光ファイバはスクリーニング(プルーフ)試験に合格したとみなされる。参考になる背景は[b-IEC/TR 62048]に示されている。

- b) スクリーニング(プルーフ)試験は光ファイバの製造工程中、つまり、光ファイバの線引き工程及び被覆工程の一部としてオンライン、若しくは試験工程の一部としてオフライン、で行われる。破断率(単位長さ当たりの破断回数)は統計的に予測できる。
- c) 保管やスクリーニング(プルーフ)試験は標準大気条件(温度 23±5°C、相対湿度 50±20%)によって実施する。スクリーニング(プルーフ)試験前の保管時間については検討中である。
- d) 本測定では、応力 $\sigma$ あるいはひずみ $\epsilon$ が用いられる。これらは次の式の関係がある。

$$\sigma = E_0(1 + c_s \epsilon) \epsilon \quad (6-19)$$

ここで、 $E_0$ は応力がゼロの状態での弾性係数(ヤング率)、 $c_s$ はパラメータ(3から6の範囲の典型値を有する係数)である。 $E_0$ と $c_s$ の典型値は必要に応じ検討する。

- e) 光ファイバのひずみは印加張力  $T$  から次のように計算される。:

$$\sigma = \frac{(1 - F)T}{\pi a^2} \quad (6-20)$$

ここで、 $2a$ はガラス製光ファイバの直径、 $F$ は被覆により生じる張力(試料光ファイバにかかる張力)の割合である。 $F$  は次の式で示される。

$$F = \frac{\sum_{j=1}^n E_j A_j}{E_g \pi a^2 + \sum_{j=1}^n E_j A_j} \quad (6-21)$$

ここで、 $n$ は被覆層の数である。

ここで、 $E_j$  は  $j$  番目の被覆層の弾性係数(ヤング率)である。

ここで、 $A_j$  は  $j$  番目の被覆層の公称断面積である。

ここで、 $E_g$  はガラス製光ファイバの弾性係数(ヤング率)である。

注記 1：被覆材の弾性係数(ヤング率)は製造業者によって典型値として規定される

注記 2：ひずみを制御するプレーキキャプスタン型スクリーニング (プルーフ) 試験装置の場合には、被覆材の補正方法は適用できない。

#### 6.7.1.1.1 スクリーニング (プルーフ) 試験パラメータ

- a) プルーフ応力  $\sigma_p$  は、光ファイバの残存部分長を検査するために規定される。図 17 に、プルーフ試験の間、印加される応力  $\sigma_a$  を示す。また同図には、載荷時間 (荷重時間)  $t_i$ 、除荷時間 (開放時間)  $t_o$ 、及び負荷時間 (安定時間)  $t_d$  を示す。この引張荷重は、可能な限り短い時間で印加され、典型的には 1 秒より非常に短い、が、ガラスのプルーフ応力を実証するのに十分に長く印加しなければならない。
- b) 印加応力は常に規定されたプルーフ応力を超えなければならない除荷時間は、除荷時の損傷の制御を目的として使用者と製造業者の間で合意された最大値未満で制御しなければならない。

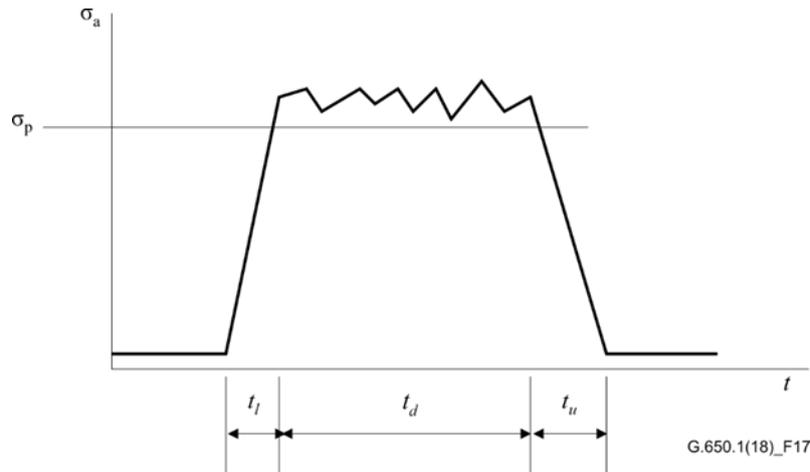


図 17 スクリーニング(プルーフ)試験間の応力  $s$  と時間  $t$

## 6.7.1.2 試験装置

### 6.7.1.2.1 操作手順の要求事項

- 送出し及び巻取りにおいて、光ファイバにかかる応力は、典型的には、プルーフ応力の 10% を超えることがないようにする(図 17 参照)。
- 载荷領域では、光ファイバの応力は低い応力からプルーフ応力まで増加する。この载荷時間は  $t_l$  で示される。
- プルーフ試験領域では、印加プルーフ応力  $\sigma_a$  は規定されたプルーフ応力  $\sigma_p$  よりも大きい値で維持される。
- 除荷領域では、光ファイバの応力は印加プルーフ応力から低い応力まで減少する。この光ファイバの除荷時間は  $t_u$  で示される。
- この除荷時間は使用者と製造業者の間で合意された最大値未満で制御しなければならない。プロセス速度の変更、又はキャプスタンの設計によって、この除荷時間は変えることができる。
- キャプスタンや他のプーリはそれらが被測定光ファイバに過度の損傷を誘発しないことを保証するよう設計され、操作されなければならない。そのキャプスタンはすべりに起因する損傷を誘発することなく、その印加応力を維持する能力があるようにしなければならない。

### 6.7.1.2.2 プルーフ試験装置

試験装置は、いくつかの実行可能な装置設計があるが、それらすべては指定した一般的な要求事項と共に、光ファイバの耐久度を測定するために必要な基本的な機能を実現する。光ファイバの被覆材の損傷を防ぐような設計が望ましい。

次の 2 種類の装置が使用される。

- ブレーキキャプスタン型装置
- おもり型装置

いずれの装置も、光ファイバの線引き工程内(オンライン、被覆された光ファイバのみ)、又は、別工程(オフライン)で使ってもよい。

注記：オンラインスクリーニングは、オフラインスクリーニングとは異なる挙動を示すため、それを考慮することが望ましい。

#### a) ブレーキキャプスタン型装置 (図 18)

光ファイバは一定、かつ、低い張力で送り出す。プルーフ試験の後の巻取りもまた一定の張力で行われる。送出し及び巻取り張力は調整可能である。

プルーフ試験の負荷は、ブレーキキャプスタンと駆動キャプスタンの間に速度差を生じさせることで、

ブレーキキャプスタンと駆動キャプスタンの間にある光ファイバに印加される。2本のベルトはキャプスタンでのすべりを防止するために使われる。ある設計では、要求されたブローフ試験の負荷を実現するために、高精度の張力ゲージが光ファイバの負荷を測定し、速度差を制御することができる(ようにしている)。負荷のレベル及び装置を通過する光ファイバ速度は独立に設定できる。別の設計では、2つのキャプスタンの速度差は、張力測定なしに、指定された光ファイバの負荷に従って、直接的に設定し、制御することができる。

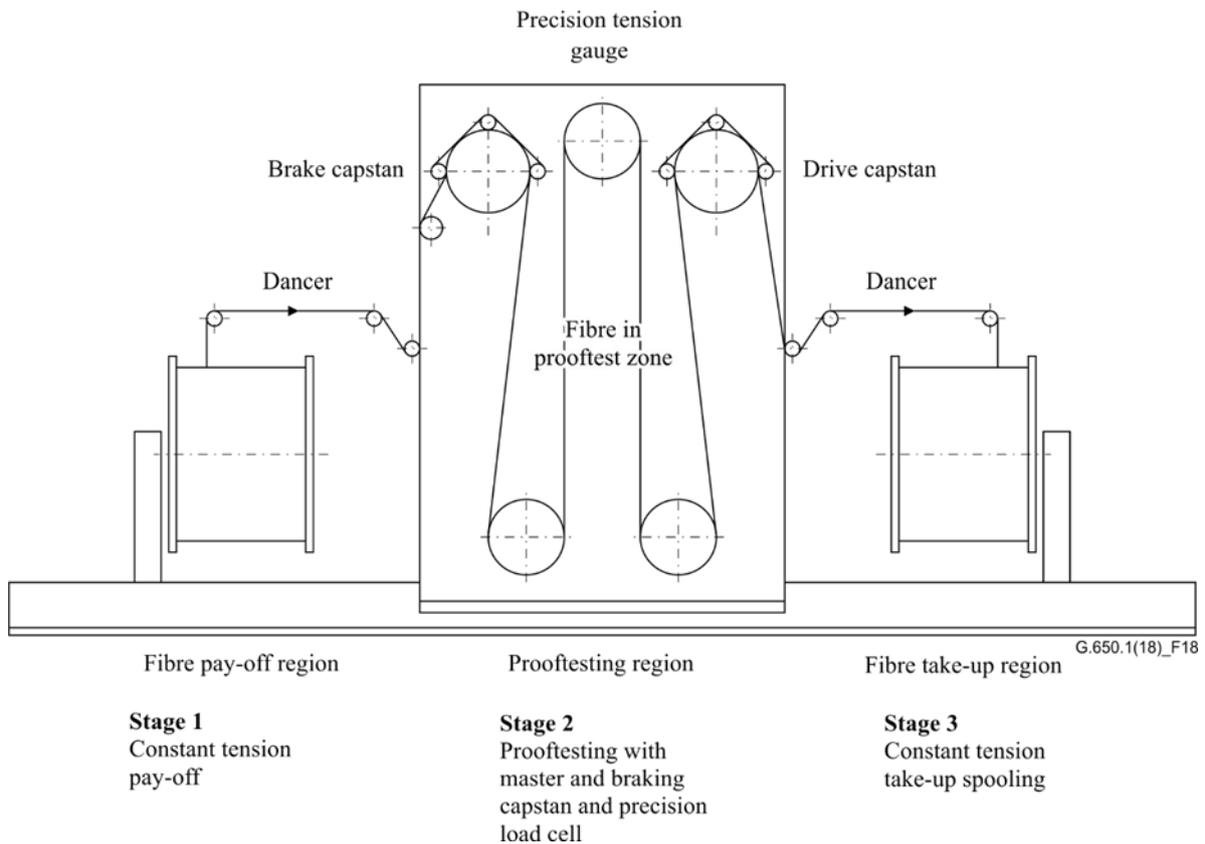


図 18 ブレーキキャプスタン型ブローフ試験装置の典型的な構成

**b) おもり型装置 (図 19)**

光ファイバに加わる張力を最小限にして装置を通過させるため、送しダンサと巻取りダンサのプーリは十分に軽い。送しキャプスタンと巻取りキャプスタンはお互いに同期している。キャプスタンベルトはキャプスタンでのすべりを防止するが、光ファイバへの応力、又は光ファイバ被覆の損傷を与えない。光ファイバにブローフ応力を加えるために、おもりダンサのプーリのシャフトに取り付けられた荷重アームにおもりが取り付けられる。もし必要であれば、オプションのプーリを追加しブローフ応力の印加長を延長できる。

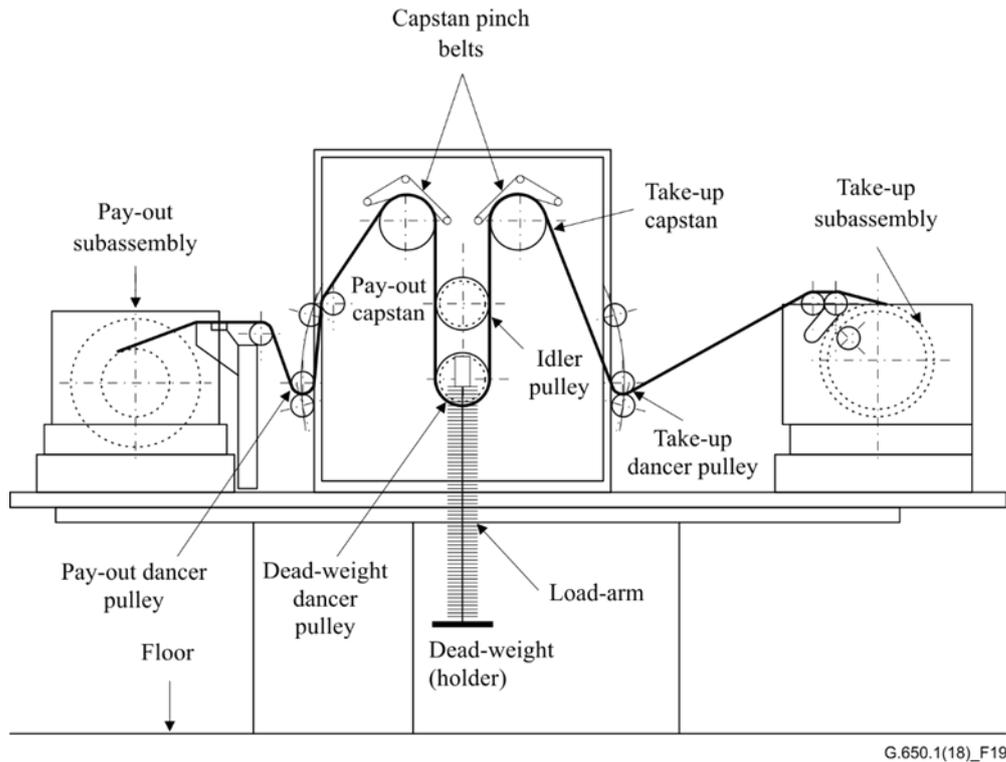


図 19 おもり型プルーフ試験装置(の典型的な構成)

### 6.7.1.3 測定手順

#### 6.7.1.3.1 サンプル

- a) 試験サンプルは、光ファイバの全長ですべての要求事項(すなわち、最大除荷時間)に合致しなければならない。最大除荷時間に合致しない光ファイバ端部の短い部分は、許容される長さ(典型的に 25 m から 50 m)が表示されなければならない。
- b) スクリーニング(プルーフ)試験は、光ファイバの完全な破断によって確認されなければならない。確認方法には目視検査と OTDR 測定がある。破断領域の除去後、残存した光ファイバ長がプルーフ試験を通過したとみなされる。

#### 6.7.1.3.1 計算

装置が張力で校正されている場合、応力は式 6-20 によって計算される。ひずみは式 6-19 より得てもよい。

#### 6.7.1.3.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする。

- a) 装置の概要説明
- b) 被測定光ファイバの識別
- c) 平均印加プルーフ応力
- d) 最大除荷時間
- e) 滞留時間
- f) 端部の許容される長さ

## 付属文書 A 波長分散近似

(この付属文書は、本標準に必須の構成要素である)

### A.1 概要

波長分散測定により、波長の関数として波長分散値又は群遅延値のいずれかが直接測定される。このデータの波長微分として、波長分散値及び分散スロープは得られる。ほとんどの場合、波長微分のプロセスは、測定データを数学モデルで近似してから行われる。

本付属資料では、一般的な波長分散近似について示し、複数の標準的な近似式の概要を述べる。注記一分散スロープ特性が規定となる要求事項ではない場合でも、通常は分散調整を容易にするために製造業者から典型値が提供される。

### A.2 近似式及び係数の定義

近似に用いる数学モデルの一般的な表記を表 A.1 に示す。多項式が一般的であり、同様の規則でさらに高次の多項式に拡張できる。

分散スロープに対応する近似式を表 A.2 に示す。

3 項セルマイヤ及び 2 次多項モデルによる、ゼロ分散波長及びゼロ分散波長における分散スロープの近似式を表 A.3 に示す。

表 A.1- 近似式及び近似係数の定義

近似式	群遅延	波長分散係数
3項セルマイヤ	$A + B \cdot \lambda^2 + C \cdot \lambda^{-2}$	$2 \cdot B \cdot \lambda - 2 \cdot C \cdot \lambda^{-3}$
5項セルマイヤ	$A + B \cdot \lambda^2 + C \cdot \lambda^{-2} + D \cdot \lambda^4 + E \cdot \lambda^{-4}$	$2 \cdot B \cdot \lambda - 2 \cdot C \cdot \lambda^{-3} + 4 \cdot D \cdot \lambda^3 - 4 \cdot E \cdot \lambda^{-5}$
2次多項式	$A + B \cdot \lambda + C \cdot \lambda^2$	$B + 2 \cdot C \cdot \lambda$
3次多項式	$A + B \cdot \lambda + C \cdot \lambda^2 + D \cdot \lambda^3$	$B + 2 \cdot C \cdot \lambda + 3 \cdot D \cdot \lambda^2$
4次多項式	$A + B \cdot \lambda + C \cdot \lambda^2 + D \cdot \lambda^3 + E \cdot \lambda^4$	$B + 2 \cdot C \cdot \lambda + 3 \cdot D \cdot \lambda^2 + 4 \cdot E \cdot \lambda^3$

表 A.2- 波長分散スロープの近似式

近似式	波長分散スロープ
3項セルマイヤ	$2 \cdot B + 6 \cdot C \cdot \lambda^{-4}$
5項セルマイヤ	$2 \cdot B + 6 \cdot C \cdot \lambda^{-4} + 12 \cdot D \cdot \lambda^2 + 20 \cdot E \cdot \lambda^{-6}$
2次多項式	$2 \cdot C$
3次多項式	$2 \cdot C + 6 \cdot D \cdot \lambda$
4次多項式	$2 \cdot C + 6 \cdot D \cdot \lambda + 12 \cdot E \cdot \lambda^2$

表 A.3- ゼロ分散波長及びゼロ分散スロープの近似式

近似式	ゼロ分散波長	ゼロ分散スロープ
3項セルマイヤ	$(C/B)^{1/4}$	8B
2次多項式	$-B/(2C)$	2C

### A.3 近似の手順

確実に数値近似を行うため、最小二乗法による回帰計算を行う前に、横軸（波長）を狭い範囲の値に座標変換することが望ましい。回帰計算の後、波長微分を行う前に、近似式の係数を元の波長スケールに逆変換する必要がある。

近似問題を解くために、適切な最小二乗法の回帰計算法を選ぶことが望ましい。その方法は、群遅延若しくは波長分散値の測定時に発生する雑音又はその他の誤差に対して安定であることが望ましい(例えば、[b-Press] を参照)。入力データによって、群遅延又はその微分である分散の近似式が用いられる。近似に用いるデータ数は十分多くすることが望ましい。近似の次数とデータ数とが同程度の場合は、正確な結果が得られない。

群遅延データを近似する場合、波長分散データは、近似によって得られる係数を使って、表 A.1 の波長分散係数の数式から算出できる。近似を行った範囲外への外挿は、範囲外の点で非物理的な振る舞いをする可能性があるため、注意深く行うことが望ましい。

波長分散スロープは、近似によって得られる係数を使って、表 A.2 の数式から算出できる。

## 付録 I カットオフ波長補間法

(この付録は、本標準の必須の構成要素ではない)

本付録は、6.3.1.3.4 項の式 6-11 における係数  $A_i$  及び  $B_i$  を決定する方法を示す。限定負誤差法及び最小二乗法について、それぞれ I.1 項及び I.2 項に記載する。I.3 項には、カットオフ波長補間法の一例を示す。

### I.1 限定負誤差法

このアルゴリズムは、遷移構造 (ハンプ) は期待される理想的な曲線からの正の偏差を持つデータ点で構成されるという観測から導かれたものである。補間の手順は、LP<sub>11</sub> 遷移領域の理論モデルと、そのモデルへのデータフィッティング法に基づいている。6 つの手順がある。

最初の 2 つの手順で、LP<sub>01</sub> 領域すなわち長波長領域を決定する。次の 2 つの手順で、LP<sub>11</sub> の減衰量が増加し始める遷移領域を決定する。5 番目の手順では、理論モデルに従ってこの領域の特性を評価する。最後の手順で、評価したパラメータからカットオフ波長  $\lambda_c$  を計算する。

#### 手順 1 – 長波長領域の決定

##### 領域の下側波長

マルチモード参照法の場合:

傾きが最大となる波長、すなわち、 $a(\lambda) - a(\lambda + 0.01)$  が最大となる波長を求める。傾きが最大となる波長より長い波長のうち、減衰量が最小となる波長が、領域の下側波長である。

曲げ参照法の場合、次の手順によってマルチモード参照法の手順を模擬する。

減衰量が最大となる波長を求める。減衰量が最大となる波長より長い波長のうち、次の関数が最小となる波長が、領域の下側波長である。

$$a(\lambda) - 8 + 8\lambda \quad (\lambda \text{ in } \mu\text{m})$$

##### 領域の上側波長

領域の下側波長に 0.15  $\mu\text{m}$  を加えた波長とする。

#### 手順 2 – 長波長領域における減衰曲線 $a(\lambda)$ の特性を、波長 $\lambda$ に対する線形方程式として評価する

$$a(\lambda) \cong A_u + B_u \lambda \quad (\text{I-1})$$

以下の方法を推奨する。

曲げ参照法:

$B_u = 0$  と設定し、

$A_u = (\text{長波長領域における減衰量の中央値})$  と設定する。

マルチモード参照法:

長波長領域における誤差の絶対値の和が最小になり、かつ、全ての誤差が負でなくなるように  $A_u$  と  $B_u$  を決定する。長波長領域における誤差の中央値を求め、 $A_u$  に加える。

長波長領域において、最も負に大きい誤差  $E$  を決定する。

$$E = \min[a(\lambda) - A_u - B_u \lambda] \quad (\text{I-2})$$

#### 手順 3 – 遷移領域の上側波長を求める

手順 1 で決定した長波長領域の上側波長から始めて、減衰量が手順 2 で決定した直線より 0.1dB 大きい最大の波長を決定する。この値に 10nm を加えた値を遷移領域の上側波長に設定する。

#### 手順 4 - 遷移領域の下側波長を求める

遷移領域の下側波長を決定するには様々な方法がある。以下に例を示す。

$$\Delta a(\lambda) = a(\lambda) - A_u - B_u(\lambda) \quad (\text{I-3})$$

とする。

a) 手順3で決定した遷移領域の上側波長から始めて、 $\Delta a(\lambda)$ が極大となり、かつ、この極大値と次の(長波長側の)極小値との差が最大となる波長を求める。

b) 遷移領域の上側波長よりも短い波長で、

$\Delta a(\lambda)$  が2 dBより大きく、かつ、

b1)  $\Delta a(\lambda)$ が極大値となる、又は

b2)  $\Delta a(\lambda) - \Delta a(\lambda + 0.01)$ が極大値となる

最大の波長を求める。

#### 手順 5 - モデルと誤差に関する制約の下で遷移領域の特性を評価する

モデルとして、変換の線形回帰を用いる。誤差に関する制約として、近似直線の逆変換によって手順 2 の E より小さな負の減衰量誤差が生じないように負の回帰誤差を調整する。誤差に関する制約の下でデータをフィッティングするため、シンプレックス線形計画法を用いても良い。

誤差の絶対値の和が最小となり、かつ、誤差が $v(\lambda)$ より小さくならないように 6.3.1.3.4 項の式 6-11 における  $A_t$  及び  $B_t$  を求める。ここで、 $v(\lambda)$  は手順 2 における E の関数として、以下の通り与えられる。:

$$w(\lambda) = 10 \frac{\Delta a(\lambda) - E}{10} \quad (\text{I-4})$$

$$z(\lambda) = 10 \log \left[ -\frac{10}{A} \log \left( \frac{w(\lambda) - 1}{\rho} \right) \right] \quad (\text{I-5})$$

$$v(\lambda) = Y(\lambda) - z(\lambda) \quad (\text{I-6})$$

#### 手順 6 - 遷移の傾きを評価し、カットオフ波長 $\lambda_c$ を計算する

$B_t$  が小さな負の値、例えば -1 から -0.1 の間の値より大きい場合、遷移領域の上側波長を 10 nm だけ短くして手順 5 を繰り返す。

それ以外の場合は、次式で  $\lambda_c$  を計算する。

$$\lambda_c = -\frac{A_t}{B_t} \quad (\text{I-7})$$

### 1.2 最小二乗法

このアルゴリズムは、遷移領域に時々見られる構造が理想曲線の周辺の干渉効果によって生じているという仮定に基づく。

数学モデルは、限定負誤差法で用いられるものと同じである。

手順 1 - 限定負誤差法と同様。

手順 2 - 限定負誤差法と同様。ただし、式 (I-2) の E は不要である。

手順 3 – 限定負誤差法と同様。

手順 4 – 限定負誤差法と同様。

手順 5 – 遷移領域の特性を評価する。

モデルとして、変換の最小二乗最適近似を用いる。

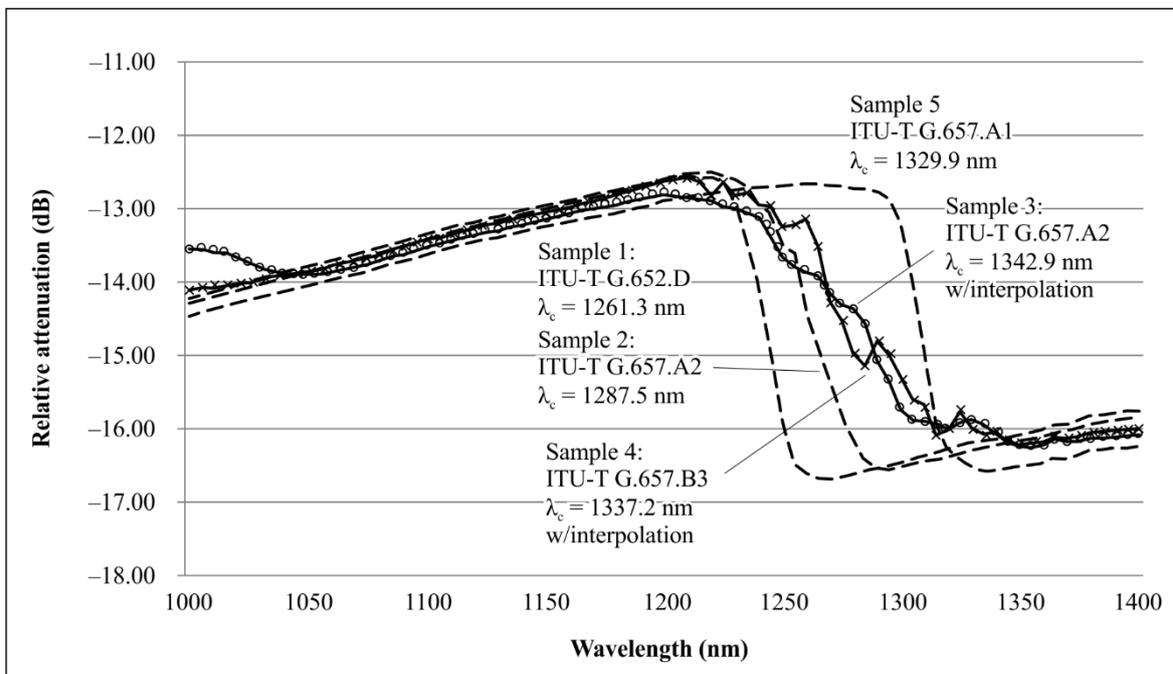
式 6-8、6-9、6-10 及び下式を用いて、誤差の二乗和が最小となるように 6.3.1.3.4 項の式 6-11 における  $A_i$  及び  $B_i$  を求める。

$$W(\lambda) = 10^{\Delta a(\lambda)/10} \quad (\text{I-8})$$

手順 6 – 限定負誤差法と同様。

### I.3 例

図 I.1 に、いくつかの光ファイバサンプルのカットオフ波形の例を示す。長波長領域に不要なハンプや過度のノイズが存在しない場合は、補間法を用いることなくカットオフ波長の正確な値を決定することができる(図 I.1 のサンプル 1、2、5)。一方、補間法はカットオフ波長を決定し、精度を改善するのに役立つこともある(図 I.1 のサンプル 3、4)。



G.650.1(18)\_Fl.1

図 I.1 – 光ファイバサンプルのカットオフ波長の補間

## 付録Ⅱ 後方散乱光を用いた波長分散の長手方向均一性の試験方法

(この付録は、本標準に必須の構成要素ではない)

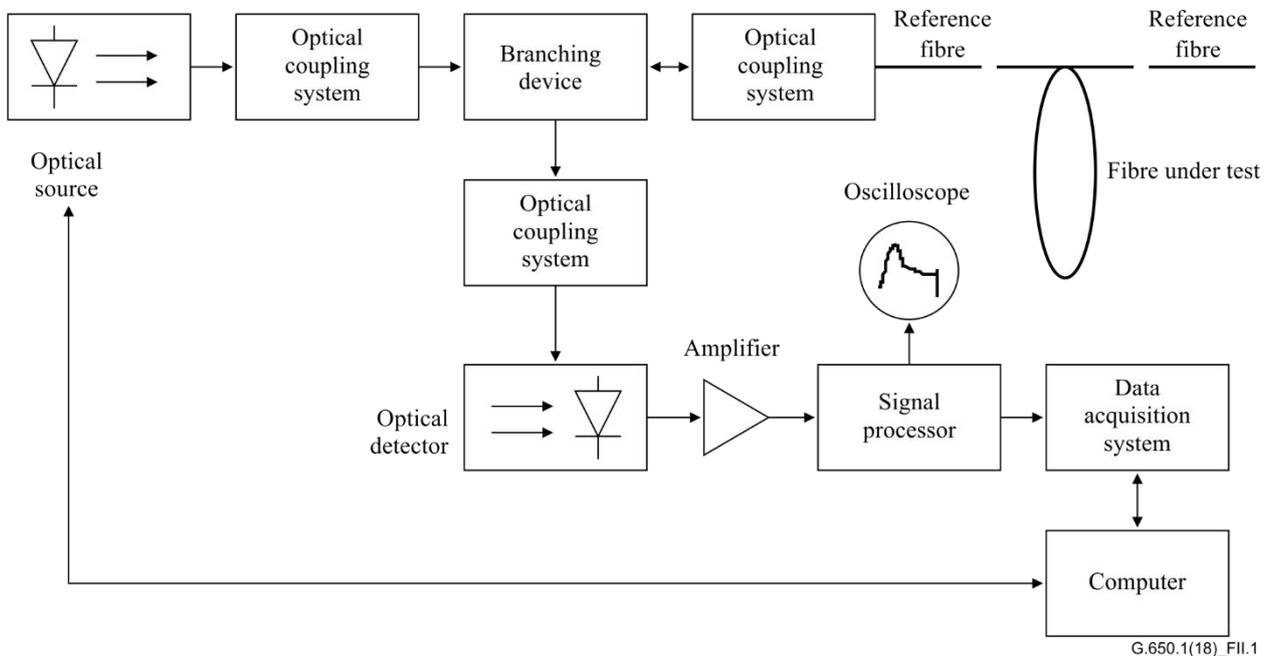
### Ⅱ.1 概要

双方向後方散乱光を用いたシングルモード光ファイバの波長分散の長手方向均一性を決定するための試験方法について述べる。この方法は、導波路の均一性と材料分散を個別に評価できる。さらに、この方法はモードフィールド径の測定に使用できる。後方散乱光法の装置の校正手順は、[IEC 61746-1]に記載されている。

### Ⅱ.2 試験装置

#### Ⅱ.2.1-一般的な考慮事項(6.4.2.2.1 項を参照)

装置の一例を図Ⅱ.1に示す。



図Ⅱ.1 波長分散均一性測定装置の概略図

#### Ⅱ.2.2 光源(6.4.2.2.2 項を参照)

#### Ⅱ.2.3 光カップリングシステム(6.4.2.2.3 項を参照)

#### Ⅱ.2.4 分岐デバイス(6.4.2.2.4 項を参照)

#### Ⅱ.2.5 光検出器(6.4.2.2.5 項を参照)

#### Ⅱ.2.6 増幅器(6.4.2.2.6 項を参照)

## II.2.7 信号処理装置(6.4.2.2.7 項を参照)

## II.2.8 クラッドモード除去器(6.4.2.2.8 項を参照)

## II.2.9 参照用光ファイバ

参照用光ファイバの屈折率分布は、被測定光ファイバの屈折率分布と類似しているものとし、その長さは良好な長手方向の均一性を維持するよう制限されるが、後方散乱光測定の入射側のデッドゾーン領域より長いものとされる。さらに、参照用光ファイバのモードフィールド径は波長の関数として測定される。この参照用光ファイバを用いて後方散乱光測定からモードフィールド径の絶対値と比屈折率差が推定される。

## II.3 測定手順

- 被測定光ファイバの両端に参照用光ファイバを接続する。
  - 被測定光ファイバを光カップリングシステムに接続する。
  - 6.4.2.3項b)を参照。
  - 6.4.2.3項c)を参照。
- e) 以下に概説する手順に従って、測定及び記録された2つの単方向後方散乱損失曲線から、構造不整損失曲線を取得する。

$S_1(x)$ と $S_2(z)$ をdBで示される2つの単方向後方散乱損失曲線を表す関数とする。 $x$ と $z$ は、それぞれの入射点に最も近い光ファイバ端からの距離であり、 $L = x + z$ である。構造不整損失曲線は、次の式で与えられる。

$$I(x, z) = \frac{S_1(x, \lambda) + S_2(L - x, \lambda)}{2} \quad (\text{II-1})$$

- f) 以下に概説する手順に従って、参照用光ファイバの位置 $x_0$ における構造不整損失で正規化した規格化構造不整損失を取得する。

$$\begin{aligned} I_n(x, \lambda) &= I(x, \lambda) - I(x_0, \lambda) \\ &= 20 \log \left\{ \frac{W(x_0, \lambda)}{W(x, \lambda)} \right\} + 10 \log \left[ \left\{ \frac{1 + 0.62\Delta(x)}{1 + 0.62\Delta(x_0)} \right\} \left\{ \frac{50 - \Delta(x)}{50 - \Delta(x_0)} \right\} \right] \\ &= 20 \log \left\{ \frac{W(x_0, \lambda)}{W(x, \lambda)} \right\} + k \end{aligned} \quad (\text{II-2})$$

ここで、係数 $k$ は次のように定義される。

$$k = 10 \log \left[ \left\{ \frac{1 + 0.62\Delta(x)}{1 + 0.62\Delta(x_0)} \right\} \left\{ \frac{50 - \Delta(x)}{50 - \Delta(x_0)} \right\} \right] \quad (\text{II-3})$$

- g) 以下に概説する手順に従って、モードフィールド径分布  $2W(x, \lambda)$  を取得する。  
参照用光ファイバの位置  $x_0$  におけるモードフィールド径を  $2W(x_0, \lambda)$  とする。モードフィールド径分布

は、次の式で与えられる。

$$2W(x, \lambda) = 2W(x_0, \lambda) \cdot 10^{\frac{-I_n(x, \lambda) + k}{20}} \quad (\text{II-4})$$

参照用光ファイバと被測定光ファイバの屈折率分布と比屈折率差が同じである場合、係数 $k=0$ とする。

参照用光ファイバと被測定光ファイバの比屈折率差が同じでない場合、式II-3及び事前に評価した被測定光ファイバの位置 $x$ におけるモードフィールド径を用いて係数 $k$ を決定する。

6.1.4.3.2 項 c) に記載の方法で調整係数 $f$ 及び $g$ が与えられる場合、モードフィールド径分布は次の式で与えられる。

$$2W(x, \lambda) = 2W(x_0, \lambda) \cdot 10^{\frac{-g \cdot I_n(x, \lambda) + f}{20}} \quad (\text{II-5})$$

被測定光ファイバの比屈折率差が未知の場合、被測定光ファイバの位置 $x$ におけるモードフィールド径は、参照用光ファイバの第2の位置 $x_1$ を考慮した次の式で与えられる。

$$2W(x, \lambda) = 2W(x_0, \lambda) \cdot \left[ \frac{2W(x_1, \lambda)}{2W(x_0, \lambda)} \right]^{\frac{I(x, \lambda) - I(x_0, \lambda)}{I(x_1, \lambda) - I(x_0, \lambda)}} \quad (\text{II-6})$$

- h) 2つ以上の異なる波長に対して上記の手順を繰り返す。  
 i) 上記で得られたモードフィールド半径 $W(x, \lambda)$ を用いて、式II-7を満足する係数 $g_0$ 、 $g_1$ 及び $g_2$ を取得する。

$$W(x, \lambda) = g_0(x) + g_1(x)\lambda^{1.5} + g_2(x)\lambda^6 \quad (3\text{波長以上}) \quad (\text{II-7})$$

もしくは、

$$W(x, \lambda) = g_0(x) + g_1(x)\lambda^{1.5} \quad (2\text{波長以上}) \quad (\text{II-8})$$

この式は、データ $W(x, \lambda_i)$  ( $i = 1, \dots, n$ )の最小二乗線形近似によって評価しても良い。

- j) 以下に概説する手順に従って、導波路分散分布 $D_w(x, \lambda)$  (ps/nm × km)を取得する。

$$D_w(x, \lambda) = \frac{\lambda}{2\pi^2 c n W(x, \lambda)^2} \left\{ 1 - \frac{2\lambda}{W(x, \lambda)} \left( \frac{3}{2} g_1(x)\lambda^{0.5} + 6g_2(x)\lambda^5 \right) \right\} \quad (3\text{波長以上}) \quad (\text{II-9})$$

もしくは、

$$D_w(x, \lambda) = \frac{\lambda}{2\pi^2 c n W(x, \lambda)^2} \left\{ 1 - \frac{3g_1(x)\lambda^{1.5}}{W(x, \lambda)} \right\} \quad (2\text{波長以上}) \quad (\text{II-10})$$

ここで、 $c$ 及び $n$ は、それぞれ、光速(m/s)及びコアの最大屈折率を表す。

- k) 以下に概説する手順に従って、比屈折率差分布 $\Delta(x)$  (%)を取得する。

参照用光ファイバと被測定光ファイバが同じ屈折率分布を持つ場合、モードフィールド径 $2W(x_0, \lambda)$ 、コア直径 $2a(x_0)$ 及びカットオフ波長 $\lambda_c(x_0)$ を用いて、次の式を満たす参照用光ファイバの係数 $c_0$ 、 $c_1$ 及び $c_2$ を取得する。

$$\frac{W(x_0, \lambda)}{a(x_0)} = c_0 + c_1 \left\{ \frac{\lambda}{\lambda_c(x_0)} \right\}^{1.5} + c_2 \left\{ \frac{\lambda}{\lambda_c(x_0)} \right\}^6 \quad (\text{II-11})$$

上記の係数 $c_0$ 、 $c_1$ 及び $c_2$ を用いてカットオフ波長 $\lambda_c$ の関数として、2つの波長( $\lambda_1$ 及び $\lambda_2$ )におけるモードフィールド径の比 $R_W$ を計算する。

$$R_W \equiv \frac{2W(\lambda_1)}{2W(\lambda_2)} = \frac{c_0 + c_1 \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_c} \right)^{1.5} + c_2 \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_c} \right)^6}{c_0 + c_1 \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_c} \right)^{1.5} + c_2 \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_c} \right)^6} \quad (\text{II-12})$$

2つの波長におけるモードフィールド径の比 $R_W$ とカットオフ波長 $\lambda_c$ との間の近似関数を決定する。

測定されたモードフィールド径分布の比に上記の近似関数を適用することによって、カットオフ波長分布 $\lambda_c(x)$ を取得する。

モードフィールド径分布 $2W(x)$ とカットオフ波長分布 $\lambda_c(x)$ を式II-11に代入することによって、コア径分布 $2a(x)$ を取得する。

式II-13を用いて比屈折率差分布 $\Delta(x)$  (%)を取得する。

$$\Delta(x) = \left\{ \frac{a(x_0)}{a(x)} \right\}^2 \left\{ \frac{\lambda_c(x)}{\lambda_c(x_0)} \right\}^2 \Delta(x_0) \quad (\text{II-13})$$

代替的に、参照用光ファイバの位置 $x_0$ における比屈折率差から式II-14を用いて比屈折率差 $\Delta(x)$  (%)を取得する。

$$\Delta(x) = \frac{1}{0.62} \left[ \left\{ 1 + 0.62 \Delta(x_0) \right\} \cdot 10^{\frac{I_n(x, \lambda) - 20 \log \left\{ \frac{2W(x_0, \lambda)}{2W(x, \lambda)} \right\}}{10}} - 1 \right] \quad (\text{II-14})$$

- 1) 上記の比屈折率差分布 $\Delta(x)$ を用いて、材料分散分布 $D_m(x, \lambda)$  (ps/nm × km)を取得する。

ここで、材料分散の近似関数は波長と比屈折率差の関数として得られる。

材料分散 $D_m(\lambda)$ は式II-15及びII-16を用いて推定することができる。

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (\text{II-15})$$

$$n^2(\lambda) - 1 = \sum_{i=1}^k \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - A_i^2} \quad (\text{II-16})$$

ここで、 $A_i$ 及び $B_i$ は、セルマイヤ係数であり、比屈折率差 $\Delta$ に対応するドーパント濃度の関数としての両係数 $A_i$ 及び $B_i$ は、[b-Kobayashi]と[b-Fleming]に記載されている。

比屈折率差 $\Delta$ に対する材料分散の推定関数 $D_m(\lambda)$ は、式II-15及びII-16を用いて計算する。

比屈折率差 $\Delta$ に対する材料分散は、次のように取得する。

$$D_m(\lambda) = m_1(\lambda) + h \cdot \Delta \cdot m_2(\lambda) \quad (\text{II-17})$$

ここで、 $h$ は定数である。

式II-18に基づいて、波長分散分布 $D(x, \lambda)$  (ps/nm × km)を取得する。

$$D(x, \lambda) = D_m(x, \lambda) + D_w(x, \lambda) \quad (\text{II-18})$$

#### II.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする。

- a) 試験装置構成
- b) 使用される信号処理の種類
- c) パルス幅
- d) 試験波長
- e) モードフィールド径分布 ( $\mu\text{m}$ )
- f) 波長分散分布 (ps/nm × km)

### 付録 III マトリックスモデルの例

(この付録は、本標準に必須の構成要素ではない)

#### III.1 JT-G652.D 及び JT-G654.E 光ファイバの特性行列の例

表 III.1 及び表 III.2 は、それぞれ JT-G652.D 及び JT-G654.E 光ファイバの特性行列の例を示している。これらは説明のみを目的としていることに注意されたい。2 つの特性行列は、異なる製造業者とオペレータにより提供された複数の製品（ケーブル及びケーブル化されていない光ファイバを含む）から得られた。これらは、6.4.4.3 項に記載されているように、個々の製品の損失スペクトルモデリングに直接使用することはできない。JT-G652.D 光ファイバの特性行列の例は、 $m \times n = 74 \times 4$  行列で構成されており、予測波長として 1310 nm、1380 nm、1550 nm 及び 1625 nm を用いて、1260 nm～1625 nm（5 nm ステップ）の範囲にわたる損失スペクトルをモデル化する。JT-G654.E 光ファイバの特性行列の例は、 $m \times n = 20 \times 3$  行列で構成されており、予測波長として 1530 nm、1550 nm、及び 1625 nm を用いて、1530 nm～1625 nm（5 nm ステップ）の範囲にわたる損失スペクトルをモデル化する。

注記：ITU-T 勧告 G.650.1 の 2018 年版付録 III には、JT-G652 光ファイバの特性行列 M の例が、損失スペクトルモデリングの参考文献[b-Hanson]とともに記載されている。

表 III.1 JT-G652.D 光ファイバの特性行列 M の例

出力波長 ( $\mu\text{m}$ )	予測波長			
	1310 nm	1380 nm	1550 nm	1625 nm
1.260	0.6960	0.0823	1.1801	-0.4553
1.265	0.6601	0.0873	1.2351	-0.4841
1.270	0.6815	0.0849	1.1405	-0.4564
1.275	0.7494	0.0725	0.9681	-0.4174
1.280	0.8298	0.0499	0.7616	-0.3510
1.285	0.8963	0.0323	0.5790	-0.2921
1.290	0.9790	0.0264	0.3474	-0.2278
1.295	1.0316	0.0181	0.1906	-0.1804
1.300	1.0376	0.0089	0.0597	-0.0803
1.305	1.0435	0.0067	0.0078	-0.0622
1.310	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.315	0.9992	0.0151	-0.0225	-0.0203
1.320	0.9710	0.0272	-0.0186	-0.0176
1.325	0.9340	0.0311	-0.0049	0.0026
1.330	0.9073	0.0399	-0.0040	0.0111
1.335	0.8947	0.0446	-0.0316	0.0300
1.340	0.8888	0.0496	-0.0587	0.0369
1.345	0.8956	0.0492	-0.1067	0.0516
1.350	0.8975	0.0559	-0.1732	0.0810
1.355	0.8901	0.0662	-0.2167	0.1002
1.360	0.8498	0.0936	-0.2092	0.1021
1.365	0.7607	0.1536	-0.2255	0.1636
1.370	0.5826	0.3307	-0.2123	0.1807
1.375	0.4058	0.6565	-0.4301	0.2178
1.380	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
1.385	0.1657	0.9779	-0.3568	0.0821

出力波長 ( $\mu\text{m}$ )	予測波長			
	1310 nm	1380 nm	1550 nm	1625 nm
1.390	0.2357	0.8394	-0.2813	0.0664
1.395	0.2346	0.6712	-0.0876	0.0949
1.400	0.2375	0.5442	0.0184	0.1433
1.405	0.2629	0.4332	0.1022	0.1570
1.410	0.3040	0.3485	0.1133	0.1787
1.415	0.3361	0.2725	0.1339	0.1956
1.420	0.3652	0.2130	0.1338	0.2148
1.425	0.3961	0.1704	0.1380	0.2033
1.430	0.4235	0.1398	0.1356	0.1876
1.435	0.4261	0.1267	0.1357	0.1851
1.440	0.4377	0.1072	0.1375	0.1767
1.445	0.4539	0.0735	0.1527	0.1700
1.450	0.4638	0.0604	0.1518	0.1595
1.455	0.4564	0.0464	0.1867	0.1450
1.460	0.4439	0.0381	0.2081	0.1434
1.465	0.4260	0.0290	0.2524	0.1306
1.470	0.4102	0.0234	0.2807	0.1249
1.475	0.3919	0.0174	0.3238	0.1108
1.480	0.3632	0.0186	0.3814	0.0894
1.485	0.3405	0.0133	0.4164	0.0896
1.490	0.3073	0.0115	0.4868	0.0684
1.495	0.2852	0.0045	0.5629	0.0325
1.500	0.2616	-0.0008	0.6257	0.0093
1.505	0.2371	-0.0016	0.6729	-0.0040
1.510	0.2070	-0.0024	0.7227	-0.0106
1.515	0.1718	0.0032	0.7609	-0.0073
1.520	0.1361	0.0078	0.8172	-0.0181
1.525	0.1140	0.0044	0.8320	0.0004
1.530	0.0913	0.0087	0.8628	-0.0059
1.535	0.0711	0.0120	0.8793	-0.0007
1.540	0.0537	0.0072	0.9427	-0.0317
1.545	0.0325	0.0047	0.9495	-0.0061
1.550	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
1.555	0.0057	0.0011	0.9308	0.0506
1.560	0.0063	-0.0020	0.8803	0.0983
1.565	0.0073	-0.0020	0.8099	0.1607
1.570	0.0036	-0.0076	0.7811	0.2001
1.575	-0.0042	-0.0148	0.7276	0.2730
1.580	-0.0013	-0.0102	0.6393	0.3451
1.585	-0.0113	-0.0118	0.6090	0.3935
1.590	-0.0099	-0.0182	0.5410	0.4675
1.595	-0.0128	-0.0257	0.5053	0.5210
1.600	-0.0117	-0.0201	0.4481	0.5706
1.605	-0.0137	-0.0231	0.4044	0.6269
1.610	-0.0056	-0.0195	0.2859	0.7294
1.615	0.0002	-0.0113	0.1872	0.8124

出力波長 ( $\mu\text{m}$ )	予測波長			
	1310 nm	1380 nm	1550 nm	1625 nm
1.620	-0.0054	-0.0049	0.1404	0.8686
1.625	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表 III.2 JT-G654.E 光ファイバの特性行列 M の例

出力波長 ( $\mu\text{m}$ )	予測波長		
	1530 nm	1550 nm	1625 nm
1.530	1.0000	0.0000	0.0000
1.535	0.6707	0.3387	-0.0078
1.540	0.3970	0.6170	-0.0119
1.545	0.1898	0.8217	-0.0103
1.550	0.0000	1.0000	0.0000
1.555	-0.1212	1.1046	0.0144
1.560	-0.2274	1.1837	0.0389
1.565	-0.3031	1.2222	0.0730
1.570	-0.3727	1.2526	0.1101
1.575	-0.4223	1.2519	0.1577
1.580	-0.4474	1.2197	0.2128
1.585	-0.4394	1.1501	0.2724
1.590	-0.3896	1.0346	0.3363
1.595	-0.3643	0.9329	0.4122
1.600	-0.3391	0.8255	0.4948
1.605	-0.2768	0.6782	0.5810
1.610	-0.1897	0.5015	0.6726
1.615	-0.1207	0.3338	0.7747
1.620	-0.0667	0.1766	0.8834
1.625	0.0000	0.0000	1.0000

### III.2 予測波長とモデリング誤差の関係の例

図III.1及び図III.2は、予測波長の数毎にモデリング誤差の波長依存性を示す。図III.1はJT-G652.Dに、図III.2はJT-G654.E光ファイバにそれぞれ対応する。図III.1において、実線、破線及び点線は、それぞれ予測波長が（1310、1380、1550、1625 nm）、（1310、1380、1550 nm）及び（1310、1550、1625 nm）に設定された場合に得られた結果を示す。図III.2の実線及び破線は、それぞれ予測波長を（1530、1550、1625 nm）及び（1550、1625 nm）に設定された場合に得られた結果を示す。これらの例は、モデリング誤差と予測波長の選択との関係の理解を容易にする。モデリング誤差の絶対値は、異なる製造業者及びオペレータから提供された複数のサンプル（ケーブルを含む）を使用したため、あまり意味を持たない。これらの例は、次のことを示している。

- 目的のモデリング範囲を適切にカバーする最短及び最長の予測波長を選択すること

- モデリング誤差を減らすために、損失波長依存性の観点から特徴的な波長を予測波長として選択すること

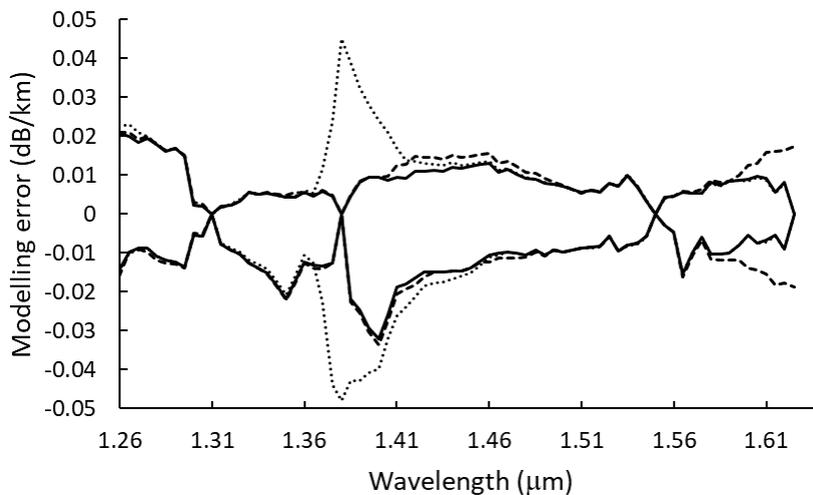


図 III.1 JT-G652.D 光ファイバのモデリング誤差の波長依存性の例

実線、破線及び点線は、それぞれ予測波長を（1310、1380、1550、1625 nm）、（1310、1380、1550 nm）及び（1310、1550、1625 nm）に設定した場合に得られた結果を示す。

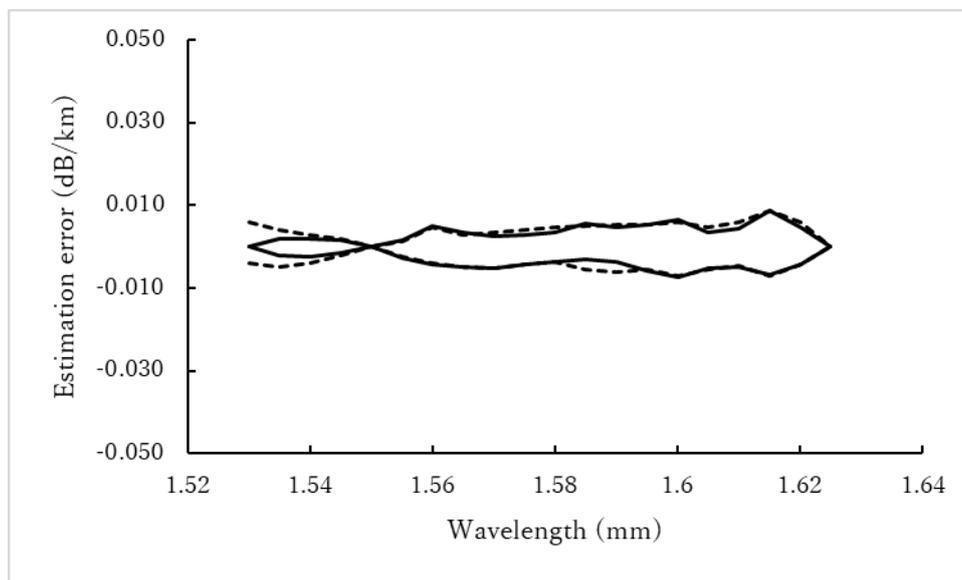


図 III.2 JT-G654.E 光ファイバの推定誤差の波長依存性

実線と破線は、それぞれ3波長参照モデルと2波長参照モデルに対応する。

## 付録 IV 短尺光ファイバケーブル(ジャンパ)におけるコヒーレント MPI の試験法

(この付録は、本標準に必須の構成要素ではない)

コヒーレント多光路干渉 (MPI) の測定は、短尺光ファイバケーブル(通常 10 m 未満)の低雑音性を確認するために行われる。本試験法は[JIT-G657]光ファイバに特に関連する。[JIT-G657]光ファイバは多様な高次モード(HOM)成分をコアモードと共に伝搬し、高次モード除去が困難となる傾向を有する。MPI は波長の関数として測定され、特に最短使用波長での MPI に注意が必要となる。MPI は、ケーブル長と、ケーブル両端の接続(コネクタ)損失の両方と関連する。したがって、製造者は MPI を定量的に把握する必要がある。また、ケーブルの設置形態にも留意が必要である。一般的に、MPI は直線状態のケーブルで最大となるが、「共振波長」では HOM が大幅に減衰し MPI が非常に小さく観測される。より現実的な設置形態で評価されることが好ましく、このような状態はケーブルの曲げ状態を制御することで得られる。

MPI の測定には三つの方法がある。第 1 の試験法は「狭帯域 ECL/PM 法」で、外部共振器レーザ(ECL)とパワーメータ(PM)を使用する。非常に正確な測定が行える反面、測定時間が長く測定波長範囲に制約を受ける。第二の試験法は「広帯域 LED/OSA 法」で、広帯域光源(端面発光レーザダイオード(EELED)など)と光スペクトラムアナライザ(OSA)を用いる。この方法は一般に雑音耐性が低いが、光ファイバの全伝送帯域で MPI 測定を行える。第 3 の試験法は、実際の送信機のような固定波長光源を使用し、伸張によってジャンパの長さを可変することで MPI を誘起する。このため、「ファイバストレッチ法」又は「FS 法」と呼ばれる。この方法には次の利点がある。

- 1) 低コストな光源が利用できること
- 2) 実際のトランシーバを使用して想定するシステムの MPI を評価できること
- 3) 不必要な波長依存性を除去できること

ただし欠点として、測定系がより複雑であること、張力印加を行うため直線以外の状態で測定できないことが挙げられる。

### IV.1 第 1 試験法：狭帯域 ECL/PM 法

#### IV.1.1 概要

狭帯域 ECL/PM 法では、ジャンパ出力端の光パワーを波長の関数として観測する。基本(LP<sub>01</sub>)モードと HOM 間の干渉は、ある波長範囲における最大と最小の受光強度として観測される。入力のパラ状態を可変して、真の最大/最小強度が検出されるようにする。

#### IV.1.2 試験装置

図 IV.1 に、第 1 の試験法の構成図を示す。

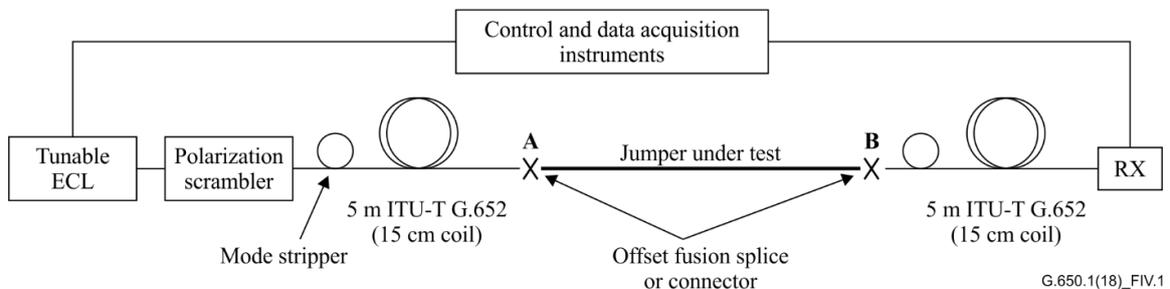


図 IV.1 狭帯域 ECL/PM 法の構成図。ここで、受信機(Rx)は、パワーメータ、又は受光素子とオシロスコープのペアにより構成される。

#### IV.1.2.1 光源

線幅が 200 kHz 未満、最短波長(通常は 1260 nm)における出力が-4 dBm 以上で、100 nm 程度の波長可変範囲を有する、波長可変外部共振器レーザ(ECL)が推奨される。出力強度の安定性は、試験時間にわたって 0.01 dB 未満、かつ被測定ジャンパの干渉パターン(自由スペクトル範囲(FSR))をサンプリングするために必要な波長範囲(典型的に 2 nm 程度)にわたって 0.05 dB 未満であることが好ましい。レーザの RIN(相対強度ノイズ)は、10~500 MHz の範囲で-145 dBm/Hz 未満であることが好ましい。ECL 単独の MPI が-55 dB 未満であることを予め測定しておくことが良い。出力光は、斜め研磨コネクタを備えた標準のシングルモード光ファイバ(JT-G652 光ファイバ)を介して受光することが好ましい。

#### IV.1.2.2 偏波スクランブラ

接続点におけるモード間結合は偏波依存性を有するため、受光強度は十分にランダムな偏波状態で測定されなければならない。偏波状態は、偏波コントローラ(手動又は電動)又は偏波スクランブラを使用して可変できる。偏波コントローラの場合、各測定波長で少なくとも 100 以上のランダムな偏光状態を考慮する必要がある(したがって、手動の偏波コントローラは推奨されない)。偏波スクランブラを使用する場合には、スクランプリング速度(ポアンカレ球上の観測点の移動速度(degree/s)、又はスクランプリング装置構成部品の最高周波数)に留意しなければならない。受光強度測定は、偏波状態の実質的な変化時間よりも短い時間間隔で行われなければならない。パワーメータは通常、約 0.1~20 ms の測定時間を必要とする。したがって、スクランプリング周波数は、パワーメータの平均化時間に応じて 1~0.005 kHz 以下に設定する必要がある。受光素子あるいは OSA を使用する場合(IV.1.2.4 参照)、スクランプリング速度は実質的に制約を受けない。偏波スクランブラの接続には斜め研磨コネクタを用いることが好ましい。ECL と偏波スクランブラを接続した状態の MPI は一般的に-50 dB 未満であり、予め評価しておくことを推奨する。また、ポアンカレ球上にランダムに分布した偏光状態が得られることを確認しておく必要がある。

#### IV.1.2.3 モード除去

基本(LP<sub>01</sub>)モード以外を除去するためには、励振側のシングルモード光ファイバに適切な直径の曲げ(ループ)を付与する必要がある。別の方法として、十分長い(数百メートル)JT-G652 光ファイバを使用して、HOM を十分に減衰させることができる。

#### IV.1.2.4 光受光器

出力光は、パワーメータ、又は受光素子とオシロスコープの組み合わせによって受光する。パワーメータの平均化時間は、偏波スクランブラの可変時間よりも十分短く設定する。測定する受光強度の範囲で十分な線形応答を有し、測定感度は測定波長の全域で校正されなければならない。パワーメータの内蔵ソフトウェアにより、最大最小値、もしくは受光強度の時間変動を取得できる場合がある。この場合、各測定波長で 100 以上の受光強度を収集する必要がある。

受光素子とオシロスコープの組合せは、非常に高いスクランプリング周波数の使用を可能にする(つまり、測定時間を短縮できる)。より強い光強度で測定することで受信器雑音を最小化できる(ただし、当該光強度レベルで受光素子の直線性を確認する必要がある)。オシロスコープの垂直軸のオフセット量とスケールを調整して読み取り波形を最大化する。平均化は行わない。偏波スクランプリング速度に応じて波形のサンプリングレートを調整し、サンプル数(記録長)を最大にする。時間軸を調整して、単トリガーで収集したデータから最大及び最小電圧を識別する。もしくは、複数トリガーのデータを高速に収集して、一連のデータにおける電圧の極値を抽出する。オシロスコープのデータ取得は、ECL 波長掃引と同期しなければならない。

### IV.1.3 測定手順

#### IV.1.3.1 被測定光ファイバの用意

短尺の被測定ケーブル(光ファイバ)がコネクタを具備する場合、端面が適切に清掃されていることを確認する。被測定ケーブルを所望の長さに調整し、両端をコネクタ化、もしくは融着接続が行える状態にする。

#### IV.1.3.2 ベースライン測定

本手順では、使用する測定系で測定可能な最小 MPI を特定する。また、ここで取得する平均透過強度は、IV.1.3.5 に規定する波長による光源出力強度の波長ゆらぎを除去するのに有用である。

被測定ケーブルを測定系に挿入する前に、図 IV.1 の偏波スクランブラと受信機(Rx)を、長さ 10 m の JT-G652 光ファイバ、又は 2 本の長さ 5 m のコネクタ付き JT-G652 光ファイバのいずれかで接続して、ベースラインを測定する。JT-G652 光ファイバの両端には斜め研磨コネクタを使用する。概ね $\pm 3$  nm の範囲にわたり波長掃引を行う。波長掃引は、被測定ケーブルで想定される干渉縞を観測するのに十分狭い波長間隔で実施する(繰り返し測定が必要な場合や、0.02 nm などの小さな波長間隔を使用する場合もある)。各波長における最小、最大、平均受光強度を、100 以上のランダム化された偏波状態で取得する。干渉パターン of 自由スペクトル範囲(FSR)を観測するのに十分な広さの波長掃引を行う。被測定ケーブルを接続する前には FSR が分からないため、被測定ケーブルの測定を行った後にベースラインの再測定が必要な場合がある。

#### IV.1.3.3 被測定ケーブル(光ファイバ)の挿入

接続された 2 本の長さ 5 m の JT-G652 光ファイバの中央のコネクタを外すか、長さ 10 m の JT-G652 光ファイバの中央を切断して、被測定ケーブル(光ファイバ)を図 IV.1 の点 A と点 B の間に挿入し、両端の融着もしくはコネクタ接続の損失を調べる。意図的な軸ズレ融着は、所望の接続損失を得るために有用である。また、軸ズレコネクタを使用することもできる。JT-G652 光ファイバ及び被測定光ファイバの、波長 1310nm における MFD が  $9.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$  の場合、 $1 \sim 2 \mu\text{m}$  の軸ズレは 0.5~1dB の接続損失に相当する(接続損失は実際に測定して確認する必要がある)。長さ 5 m の JT-G652 光ファイバ内、及び被測定ケーブル内における LP<sub>01</sub> モードの電力割合は、各々の接続点で決定される。高次モードの除去にはモードフィルタの設定と調整が必要な場合がある(注記参照)。一般に最悪 MPI は直線状態で得られるため、被測定ケーブルを直線状に設置しても構わない。被測定ケーブル中に、小さな半径の曲げ部を複数含む構成も同様に試験することが好ましい。

注記: 各接続点での LP<sub>01</sub> モードの損失が不明確な場合、本測定により得られた MPI 値は不確実なものとなる。LP<sub>01</sub> モードの損失を正確に把握するためには、高次モードを除去する必要がある。ここでは、JT-G657 光ファイバにおけるモード除去について補足する。一部の JT-G657.A 光ファイバは、適切な半径の曲げを付与することでモード除去が行える(ただし、曲げ半径は LP<sub>01</sub> モードを減衰させるほど小さくしてはならない)。被測定対象が JT-G657.A 光ファイバの場合、曲げによるモード除去を使用して被測定対象の出力光強度を観測しながら最初の接続を行う。最初の接続に問題がなければ、再び曲げによるモード除去を使用して 2 か所目の接続を行い、長さ 5 m の JT-G652 光ファイバジャンパを介した出力光強度から、2 か所の接続点の総損失を確認する。

一部の JT-G657.A 光ファイバと、すべての JT-G657.B 光ファイバは、曲げ付与によるモード除去ができない。しかしこれらの光ファイバは、たとえ直線状態であったとしても、光ファイバ中の伝搬により HOM が減衰する。光ファイバの種類によっては、HOM の減衰に数百 m の光ファイバ長が必要になる。この場合、最初の軸ズレ接続は、長さ 5 m の JT-G652 光ファイバと、所望のジャンパファイバのスプールとの間で行う。スプール伝搬後の LP<sub>01</sub> 成分が所望の損失量になるように、接続点の軸ズレ量を調整する(これは、励振用 JT-G652 光ファイバを調心接続した時の光強度を個別に測定することにより行う)。ジャンパファイバ・スプールを所望の被測定長にカットバックし、長さ 5 m の JT-G652 光ファイバにコネクタ又は融着接続する。この第 2 の接続点の損失は、LP<sub>01</sub> モード励振時の受信器(Rx)における受光強度から、第 1 の接続点損失を引いた値として決定できる。

いずれの場合も、LP<sub>01</sub>モードの損失は干渉パターンのFSR(概ね±3nm)をカバーする範囲で評価しなければならず、この波長範囲の平均が接続損失となる。ここで、被測定ケーブルの両端の接続損失は同等であることが好ましい。これは、2か所の接続損失の和が一定の場合、個々の接続損失が等価の時にMPIの最悪値が得られるためである。

#### IV.1.3.4 被測定ケーブル(光ファイバ)の測定

IV.1.3.2の測定手順に従う。被測定ケーブル(光ファイバ)を含む状態で、波長掃引範囲が、受光強度の正弦波状のFSR、数周期分を十分に包含することを確認する。また、波長掃引の間隔が受光強度パターンを分解するのに十分小さいことを確認する。

#### IV.1.3.5 計算

必須ではないが、被測定ケーブルで測定された最大及び最小受光強度から、ベースライン平均受光強度を差し引いておく方が良い。これにより、光源の波長による光強度変動を補正できる。MPIを計算するため、波長に対して補正した最大及び最小受光強度を、FSR以上の波長範囲で移動平均処理を行う。各移動平均幅における最大及び最小受光強度を用い、式IV-1で各移動平均の中心波長におけるMPIを算出する。

$$MPI(dB) = 20 \log \left[ \frac{10^{PR/20} - 1}{10^{PR/20} + 1} \right] \quad (IV-1)$$

ここで、PRは検出された最大及び最小受光強度の差を表す(dB単位)。受光素子とオシロスコープの組み合わせを用いる場合、出力データは光強度ではなく、電圧であることに留意されたい。受光素子の十分な直線性が得られる場合、電圧VをdB = 10log(V)に変換することで、式IV-1を利用できる。ただし、予め暗電流の補正を行う必要がある。ベースラインから直接計算したMPIが十分に低いことを確認する。

#### IV.1.3.6 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする:

- a) 試験装置の構成
- b) 光源特性
- c) 偏波スクランプリング速度
- d) 被測定サンプルの識別(ケーブル/光ファイバ)、長さ、挿入損失、及び接続損失
- e) 挿入/接続損失の測定法
- f) 被測定ケーブルの設置状態
- g) 受信機特性(信号取得時間を含む)
- h) MPIの波長依存性
- i) 複数サンプルの評価を行った場合、カットオフ波長とMPIの相関を図示できる

## IV.2 第2試験法：広帯域 LED/OSA 法

### IV.2.1 概要

広帯域 LED/OSA 法は、被測定ジャンパの出力光強度を波長の関数として測定する。基本(LP<sub>01</sub>)モードと HOM 間の干渉は、測定波長範囲における最大及び最小受光強度として観測される。真の極値(受光強度変化)が検出されるように入力の偏波状態を可変する。

### IV.2.2 試験装置

図 IV.2 に、第 2 の試験法の構成図を示す。

#### IV.2.2.1 光源

ピークパワー密度-40 dBm/nm 超、安定性±0.03 dB/15 分未満で、所望の波長範囲(通常 1260~1625 nm)を有する広帯域光源(通常、LED)を使用する。光源の安定性は、第 1 試験法で使用する ECL ほど良くないことに留意されたい。これにより、測定可能な最小 MPI が制限される。広帯域光源自身の MPI を測定することは有用であり、通常、全波長帯域にわたって-40 dB 未満であることが推奨される。出力は JT-G652 光ファイバを介して取り扱う。可能であれば、斜め研磨コネクタを使用する。

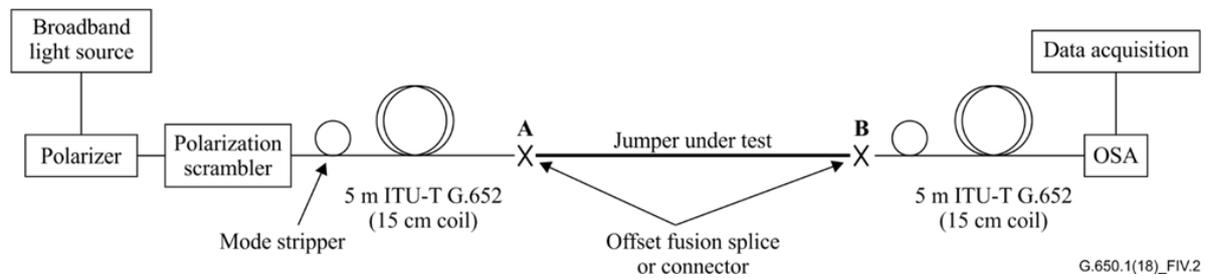


図 IV.2-広帯域 LED/OSA 法の構成図。

広帯域光源が内部偏光子を有する場合、外部偏光子は不要。

#### IV.2.2.2 偏波スクランブラ

接続点の結合は偏波状態に依存するため、OSA 測定は十分なランダム偏光を入力して行わなければならない。偏波状態は、偏波コントローラ(手動又は電動)又は偏波スクランブラを使用して可変できる。偏波コントローラの場合、各測定波長で少なくとも 100 以上のランダムな偏光状態を考慮する必要がある(したがって、手動の偏波コントローラは推奨されない)。偏波スクランブラを使用する場合には、スクランプリング速度(ポアンカレ球上の観測点の移動速度(degree/s)、又はスクランプリング装置構成部品の最高周波数)に留意しなければならない。各波長の OSA 測定は、偏波状態の実質的な変化時間よりも短い時間間隔で行われなければならない。測定波長数、掃引速度、及び受光感度を調整し、OSA のデータ取得時間を偏波スクランブラの速度に合わせて調整する。低速の偏波スクランプリングにのみ対応可能であることに留意されたい。偏波スクランブラは斜め研磨コネクタを介して接続する。LED と偏波スクランブラのみの組み合わせにおける MPI を予め確認することを推奨する。

#### IV.2.2.3 モード除去

IV.1.2.3 参照。

#### IV.2.2.4 光受光機

OSA の測定波長数と掃引時間は、各波長における測定時間が偏波スクランプリング速度の逆数よりも十分に短く(10 分の 1 以下程度に)なるように設定されなければならない。これは、各波長における偏波依存性の平

均化を防ぐために必要である。垂直軸のスケールは受光信号が最大に拡大されるように設定する。もし可能なら、OSA の最大及び最小受光強度の取得機能を用いて測定を行う。波長分解能は 0.1 nm 以下で、測定波長点数は FSR の干渉縞を観測するのに十分でなければならない。

## **IV.2.3 測定手順**

### **IV.2.3.1 被測定光ファイバの用意**

IV.1.3.1 を参照。

### **IV.2.3.2 ベースライン測定**

測定系に被測定ケーブルを接続する前に、図 IV.2 の偏波スクランブラと OSA を 10 m の JT-G652 光ファイバで接続してベースライン応答を測定する。OSA で適切な波長点数、波長掃引速度、波長分解能、垂直軸スケールを設定し、平均化処理を適用しながらベースライン応答を測定する。基準 MPI データが必要な場合は、最大値と最小値も測定する。後で、LED 光源出力の波長依存性を除去するため、平均化処理した受光強度の波長特性を保存する。

### **IV.2.3.3 被測定ケーブル(光ファイバ)の挿入**

IV.1.3.3 を参照。

### **IV.2.3.4 被測定ケーブル(光ファイバ)の測定**

OSA が最大及び最小受光強度の取得機能を有する場合、OSA を最大受光強度取得モードにする。100 以上の入力偏波状態に対して、各波長における最大受光強度を取得、保存する。同様に最小受光強度の波長依存性を取得、保存する(一部の OSA は、最大及び最小受光強度を同時に測定できる)。最大及び最小受光強度の測定結果から、IV.2.3.2 で取得したベースライン特性を減算し、2 つの波長依存性を出力する。

OSA が最大及び最小受光強度の測定機能を有さない場合、計算機制御等により、100 回以上の波長掃引データを取得する。計算機処理により、各波長の最大値と最小値を抽出する。ベースライン特性の減算は、OSA 測定時に実施しても、最大値と最小値の抽出処理の際に実施しても構わない。

### **IV.2.3.5 計算**

IV.1.3.5 参照。

### **IV.2.3.6 結果の提示**

IV.1.3.6 参照。

### IV.3 第3試験法：光ファイバ伸張法

#### IV.3.1 概要

ファイバ伸張法は、被測定光ファイバ内のLP<sub>01</sub>モードとHOM間の干渉による出力光強度が、被測定光ファイバ内を伝搬する光位相差により周期的に変化することを利用する。この光学位相差は、他の2つの試験法で述べたように波長に依存すると同時に、被測定光ファイバのファイバ長にも比例する。光ファイバの長さは光ファイバ自身を引っ張ることで簡単に可変できる。この場合、光ファイバの長さが変化することにより、出力光強度の最大及び最小値が測定される。入力の偏波状態を可変することで、真の最大・最小値が検出されるようにする。一般的な光ファイバは2 nm程度のFSRを有し、この場合、光ファイバを2~4 mm程度引っ張る必要がある。これは、2 mの光ファイバでは約10<sup>-3</sup>程度の伸びひずみに相当し、ブルーテストで印可する伸びひずみより十分小さい。より大きなFSRを有する光ファイバには、より大きな歪みを印可する必要がある。このため、光ファイバ伸張法は、緩衝構造やジャケット構造を有する被測定光ファイバの試験には適さない。

#### IV.3.2 試験装置

第3の試験法の構成を図IV.3に示す。測定光源には、波長可変光源、もしくは送信器が利用できる。偏波スクランブラにより偏波を可変する。反射光を最小限に抑えるため、斜め研磨コネクタを使用する。光源側の融着点は固定ステージに、他方の融着点は可動ステージに取り付ける。

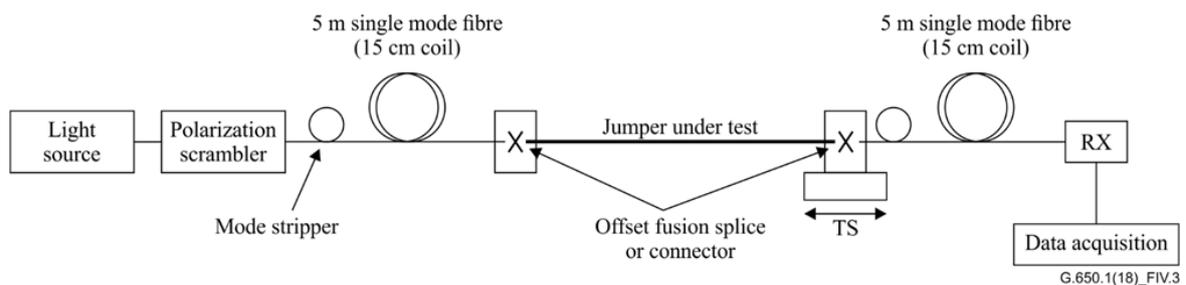


図 IV.3 光ファイバ伸張法の構成図。TS は可動ステージを表す。受信機(Rx)は、光パワーメータ又は受光素子とオシロスコープの組合せで構成される。

##### IV.3.2.1 光源

波長可変光源を使用する場合、光源の特性はIV.1.2.1に記載した仕様に適合しなければならない。代わりに光送信器を使用してもよい。いずれの場合も、測定に要する数分間にわたって、波長及び出力が安定していることを確認する。実際のシステムで使用する光送信器が利用できる場合、より適切なMPIの評価結果を得ることができる。

IV.1.2.1に記載した波長可変光源と同等の光学特性を有する送信器(例えば、DFB光源を用いた送信器)を使用する場合、測定結果は実質的に光源の特性に依存しない。一方、測定結果は送信器の特性に依存する(例えば、ファブリペロー光源を用いた送信器などが使用される)。

##### IV.3.2.2 測定系の設定

###### IV.3.2.2.1 偏波スクランブラ

最悪条件の評価を行うため、十分にランダム偏波状態を入射した時の出力光強度を測定しなければならない。偏波状態は、偏波コントローラ(手動又は電動)、もしくは偏波スクランブラを使用して制御する。なお、偏波コントローラや偏波スクランブラは斜め研磨コネクタで接続することが好ましい。偏波スクランブラを使用する場合には、スクランプリング速度(ポアンカレ球上の観測点の移動速度(degree/s)、又はスクランプリング装置構成部品の最高周波数)に留意しなければならない。光受光強度の測定が偏波変動による影響を受け

ないよう、偏波スクランプリング速度は十分低速に設定しなければならない。言い換えると、偏波スクランプリングによって誘発される出力光強度の変化が、光パワーメータの積算時間内で平均化されることを回避するために、光パワーメータで検知可能な偏波変動を偏波スクランブラが生成する時間を、光パワーメータの積算時間よりも長く設定しなければならない。例えば、100 ms の光パワーメータ積算時間に対応する偏波スクランプリング周波数は 5 Hz で、これは偏波状態変動が 200 ms 間隔で生じることに相当する。

#### IV.3.2.2.2 可動ステージ

偏波スクランプリングをオフにした状態でモード干渉の周期を確認し、可動ステージの伸張長さを決定する。可動ステージの伸張長さは、モード干渉周期(2 周期以上が好ましい)を観測するのに必要な下限と、光ファイバに印加可能な引っ張り歪みの上限との間で設定される。長さ 2 m のサンプルの場合、可動ステージの伸張長さの下限は 2 mm 程度、上限は 20 mm 程度となる。光ファイバの長さ変動によって引き起こされる受光強度の変化が、光パワーメータの積算時間によって平均化されることを回避するため、モード干渉の山/谷が生成される時間が光パワーメータの積算時間よりも十分長くなるよう、可動ステージの移動速度を十分遅く設定しなければならない。例えば、0.2 mm/s の移動速度は、1 周期分のモード干渉(1 mm の伸張長さに相当)を 5 秒で観測することに相当し、光パワーメータの積算時間 100 ms よりも十分に長い。

#### IV.3.2.2.3 サンプリング周波数

光パワーメータの積算時間、偏波スクランプリング速度、可動ステージの移動量と移動速度に基づき、光パワーメータのデータ取得間隔(サンプリング周波数)を決定する。被測定光ファイバの伸張で得られる干渉周期の山/谷の明確な変化が観測できるよう、サンプリング周波数は十分高い周波数に設定しなければならない。各干渉周期内で 25 点以上の測定点を収集するようにする。しかし、各測定点において十分ランダムな偏光状態が測定されるよう、各測定点間の測定間隔(時間)は光パワーメータの積算時間よりも十分長く設定されなければならない。すなわち、前節までに例示した設定条件の場合、200 ms 以上の測定間隔が必要となる。

#### IV.3.2.2.4 測定回数

入射偏光状態及び被測定光ファイバ内を伝搬するモード間の位相差が十分にランダムな状態で、光受光強度が十分な回数測定された場合に、信頼性の高い MPI 評価ができる。前節までに例示した設定条件の場合、4 周期分の干渉パターンの取得に必要な可動ステージの伸張長さは 4 mm で、100 回分の光受光強度を測定するのに 20 秒を要する。MPI 評価結果の信頼性を確保するには、この測定を少なくとも 20 回繰り返すことが推奨される。これにより、入射偏波状態及びモード間の位相差が異なる状態で、合計 2000 回の出力光強度測定を 400 秒で行い、20 回分の MPI 評価結果を得ることができる。本評価結果から導出される MPI の平均値及び標準偏差を考慮することにより、MPI によるペナルティを統計的に推定可能となる。

#### IV.3.2.2.5 手動偏波スクランブラの使用

手動スクランブラを使用する場合、光源と偏波スクランブラのみで構成される実験系において、ポアンカレ球上の全体にランダムに分布した偏波状態が得られることを事前に確認する必要がある。この場合、光ファイバの伸張が行われている間、偏波状態を連続的に可変するのではなく、可動ステージの移動と偏波状態の手動による可変を交互に繰り返すことが推奨される。可動ステージの設置条件を 20 点とし、各可動ステージの設置条件で 100 回分の出力光強度を、20 種類の偏波状態で測定する場合、合計 2000 回の出力光強度の測定結果から、各可動ステージの設置条件における MPI を算出できる。

#### IV.3.2.3 モード除去

IV.1.2.3 参照。

#### IV.3.2.4 光受信機

IV.1.2.4 参照。

### IV.3.3 測定手順

#### IV.3.3.1 被測定光ファイバの用意

本試験法では、両端が軸ズレ融着接続されたケーブル化されていない光ファイバジャンパを使用する。通常、サンプル長は 2m で、各接続点の損失は個別に定量化されていなければならない(IV.1.3.3 参照)。

#### IV.3.3.2 ベースライン測定

被測定光ファイバを測定系に組み込む前に、図 IV.3 の偏波スクランブラと受信器(Rx)を長さ 10m の JT-G652 光ファイバで接続し、接続損失(融着及びコネクタ)に影響を与えないよう、長さ 2m 分の JT-G652 光ファイバを伸張して、ベースライン応答を測定する。

#### IV.3.3.3 短尺被測定光ファイバの挿入

紙テープ等を用いて可動ステージに、被測定光ファイバを設置する。融着点の両側で光ファイバの約 10cm の区間を固定して融着点を保護し、被測定光ファイバを曲がり等がないように直線状にする。ステージ間の光ファイバ長(通常約 2m)は、たわみが無いよう、わずかに張力がかかった状態にする。

#### IV.3.3.4 短尺被測定光ファイバの測定

光源と偏波スクランブラを駆動し、可動ステージを微量ずつ移動させる。可動ステージの各設置状態で、出力光強度を可動ステージの移動量とともに記録する。可動ステージの移動範囲は、被測定光ファイバにおいて、2回分の FSR (出力光強度の最大/最小が検出される領域)を観測できるよう設定されなければならない。可動ステージの最大移動位置から、原点方向に可動ステージを戻すことにより、より多くのデータを取得できる。この手順を、各光ファイバ長(可動ステージの設置位置)で 100 種類以上の十分な偏波状態がサンプリングされるまで続ける。必要に応じ、光源波長も可変させて測定を行う。

#### IV.3.3.5 計算

すべての光ファイバ伸張状態及び偏波状態における出力光強度の最大及び最小値を測定し、以下に再掲する式 IV-1 により MPI を算出する。

$$MPI(dB) = 20 \log \left[ \frac{10^{PR/20} - 1}{10^{PR/20} + 1} \right] \quad (IV-1)$$

ここで PR は、最大及び最小出力光強度の差分を表す(dB 単位)。受光素子とオシロスコープの組合せを用いる場合、出力データは光強度ではなく電圧であることに留意する。受光素子の直線性が保証されている場合、電圧 V を  $10 \log(V)$  により dB 単位に変換することにより、式 IV-1 をそのまま使用できる。ただし、予め暗電流補正を行う必要がある。また、ベースライン応答から算出される MPI 値が十分小さいことを確認する。

#### IV.3.3.6 結果の提示

IV.1.3.6 参照。

## 付録 V 波長分散測定のための干渉法

(この付録は、本標準に必須の構成要素ではない)

### V.1 概要

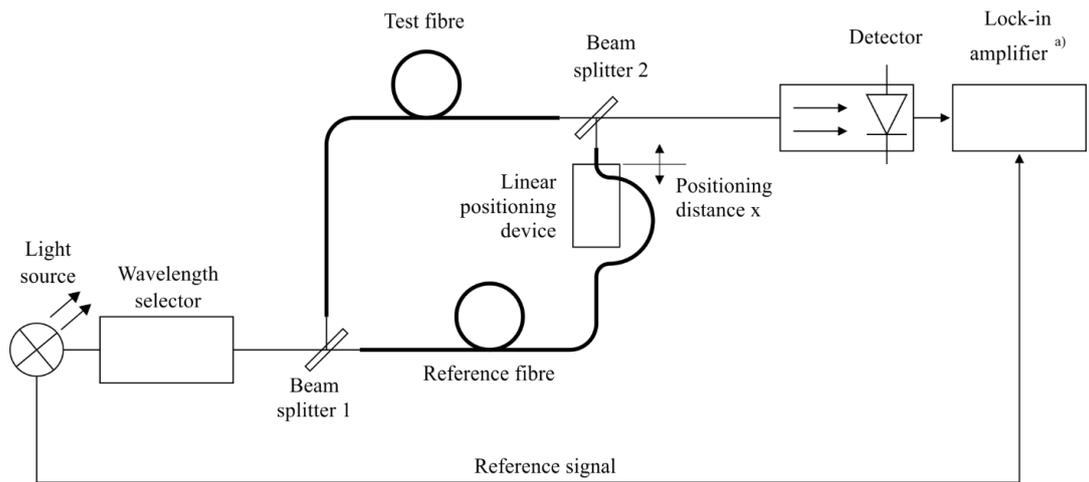
干渉法では、短い光ファイバ片(数メートル)を使用して波長分散を測定できる。この方法は、光ファイバ長手方向の波長分散均一性を測定できる。さらに、波長分散に対する温度変化やマクロバンド損失のような全体的又は局所的な影影を試験することが可能である。

干渉法では、被測定光ファイバと参照光経路との間の波長依存遅延時間をマッハツェンダー干渉計で測定する。参照光経路は、空間光学系か既知の群遅延を有する単一モード光ファイバである。

干渉法で長さ  $m$  の被測定光ファイバから得られた波長分散値を長い光ファイバに外挿する際には、光ファイバの長さ方向の均一性が仮定されることに留意すべきである。この仮定はすべての場合に適用できるとは限らない。

### V.2 試験装置

参照光ファイバ及び参照空間光学系を用いた試験装置の概略図を図 V.1 及び図 V.2 にそれぞれ示す。



<sup>a)</sup> When needed

図 V.1- 参照光ファイバを用いた試験装置の概略図

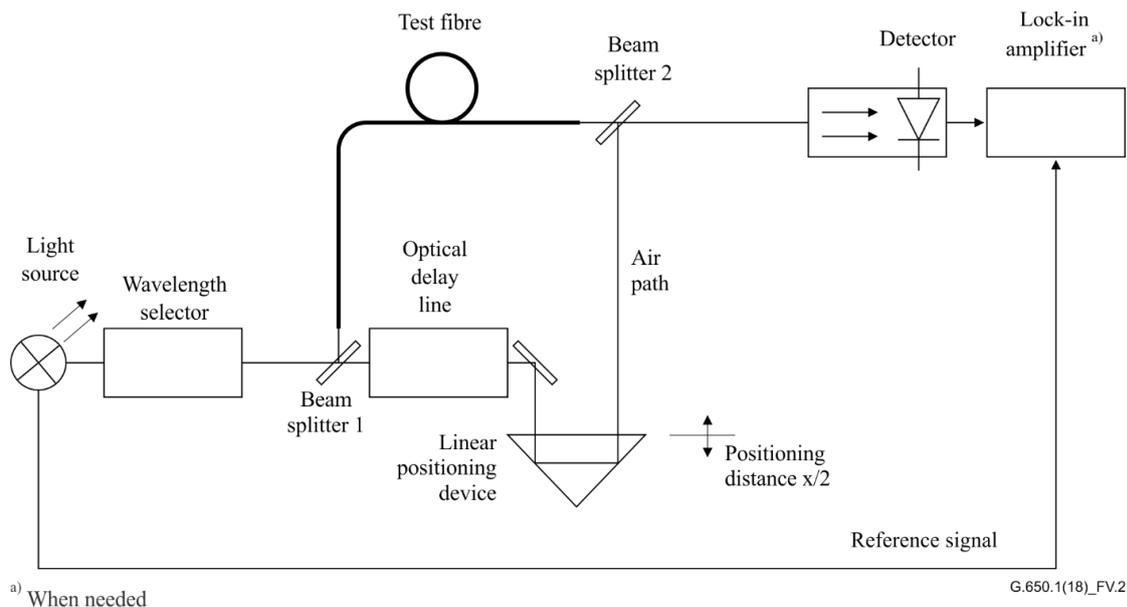


図 V.2- 参照空間光学系を用いた試験装置の概略図

### V.2.1 光源

光源は、測定手順を完了するのに十分長い時間、位置、強度及び波長が安定していなければならない。光源は、例えば、ラマンファイバを備えた YAG レーザ、又はランプ及び LED 光源等の適切なものを使用しなければならない。ロックインアンプの適用のためには、低周波数変調(50 から 500Hz)を備えた光源で十分である。

### V.2.2 波長セレクタ

波長セレクタは、群遅延を測定する波長を選択するために使用される。光源及び測定システムのタイプに応じて、モノクロメータ、光干渉フィルタ、又は他の波長セレクタを使用することができる。波長セレクタは、被測定光ファイバの入力端又は出力端のいずれかに使用すればよい。

光源のスペクトル幅は波長分散測定精度によって制約され、2~10nm 程度とする。

データを数学的にフィッティングする場合、少なくとも一つのデータ点は、 $\lambda_0$  から 100 nm 以内になければならない。

### V.2.3 光検出器

光検出器は、波長分散を決定しなければならない波長範囲において十分な感度を有していなければならない。必要であれば、例えばトランスインピーダンス回路で受信信号を増幅することができる。

### V.2.4 試験装置

干渉パターンの記録には、ロックインアンプを用いてもよい。干渉計の 2 つの経路の光路長差は、参照光経路内に設置した線形位置決め装置で調整される。位置決め装置は、直線運動の精度、均一性、安定性に注意する。光路長の変化は、20mm から 100mm の範囲であり、約  $2\mu\text{m}$  の精度で位置決めしなければならない。

### V.2.5 試験体

試験体には素線及びケーブル化された単一モード光ファイバを使用できる。試験体の長さは 1m から 10m の範囲とする。長さの精度は約  $\pm 1\text{mm}$  とする。光ファイバ端面の準備は、適切な注意を払って行う。

## V.2.6 データ処理

干渉パターンの解析には、適切なソフトウェアを備えたコンピュータを使用する。

## V.3 測定手順

- 1) 被測定光ファイバを試験装置に設置する(図V.1及びV.2)。端面の位置決めは、3次元微動台を操作し、検出器の受光パワーを最適化することで行われる。クラッドモードによる誤差を生じさせないようにする。
- 2) 群遅延の決定は、異なる波長に対して、2つの干渉計光経路の光路長を参照光経路内の線形位置決め装置を調整して行われる。波長 $\lambda_i$ に対する干渉縞の最大位置 $x_i$ と波長 $\lambda_0$  (図V.3)に対する $x_0$ との差は、参照光経路と試験光経路の群遅延差 $\Delta\tau_g(\lambda_i)$ を以下の通り決定する。

$$\Delta\tau_g(\lambda_i) = \frac{x_0 - x_i}{c_0} \quad (V-1)$$

ここで、 $c_0$ は真空中の光速である。試験体の群遅延は、 $\Delta\tau_g(\lambda_i)$  と参照光経路の群遅延の和である。これを被測定光ファイバ長で除算すると、単位長さあたりの群遅延差 $\tau(\lambda)$ が得られる。

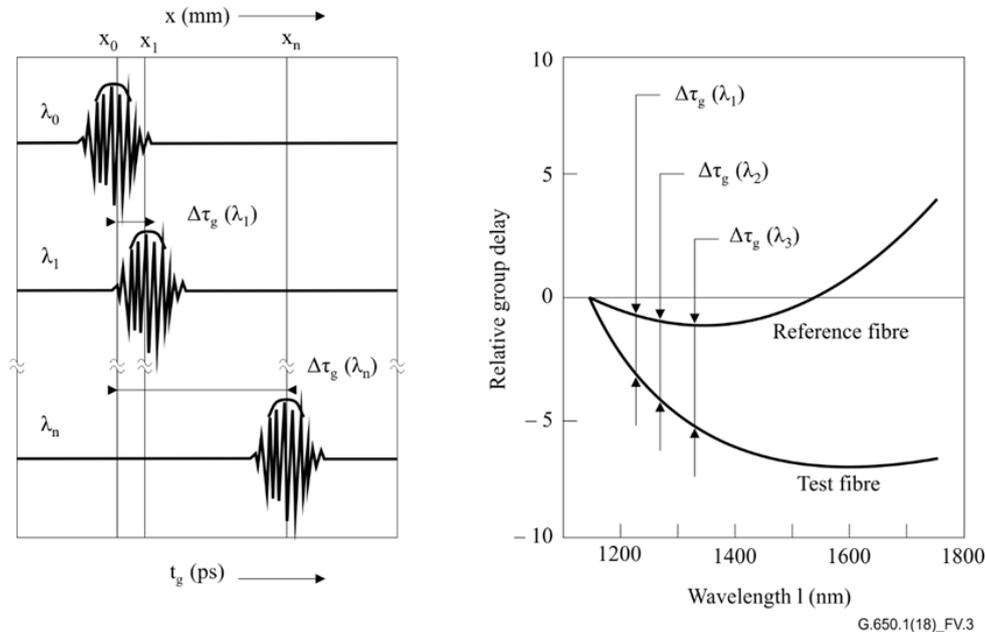


図 V.3-群遅延の決定方法

## V.4 結果の表示

以下の詳細を記載するものとする:

- a) 試験装置の構成
- b) 光源の特性
- c) 被測定光ファイバの識別と長さ
- d) 波長セレクタの特性(必要に応じて)
- e) 光検出器の種類
- f) 相対群遅延データ又は波長分散データのフィッティングに使用した近似モデル、及び波長範囲

- g) 各フィッティング波長範囲に対する係数の値
- h) 試験体の温度及び環境条件(必要に応じて)

## 参考文献

- [b-ITU-T G.Sup.47] ITU-T G-series Recommendations – Supplement 47 (2012), General aspects of optical fibres and cables.
- [b-IEC 60793-1-20] IEC 60793-1-20 (2014), Optical fibres – Part 1-20: Measurement methods and test procedures – Fibre geometry.
- [b-IEC/TR 62048] IEC/TR 62048 (2014), Optical fibres – Reliability – Power law theory.
- [b-IEC/TR 62547] IEC/TR 62547 (2013), Guidelines for the measurement of high-power damage sensitivity of single-mode fibres to bends – Guidance for the interpretation of results.
- [b-Fleming] Fleming, J.W. (1978), Material dispersion in lightguide glasses, *Electron. Lett.*, Vol. 14, No. 11, pp. 326-328.
- [b-Hanson] Hanson T.A. (1991), Spectral Attenuation Modelling with Matrix Models, Conference Digest NPL Optical Fibre Measurement Conference (OFMC'91), pp. 8-11, York, United Kingdom.
- [b-Kobayashi] Kobayashi S. et al (1977), Refractive-index dispersion of doped fused silica, *IOOC 1977*, pp. 309-312.
- [b-Press] Press, William H. (1993), *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, 2nd edition.