

## 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試験方法

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

第1版

2021年5月20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> .....	4
<G.650.1 (2018/3) 和訳> .....	5
1. 規定範囲 .....	6
2. 参照 .....	6
3. 定義 .....	7
3.1 一般的な定義 .....	7
3.2 機械的特性 .....	7
3.3 ガラスの幾何学的特性 .....	7
3.4 光学特性 .....	8
3.5 その他 .....	10
4. 略語 .....	11
5. 慣例 .....	11
6. 試験方法 .....	11
6.1 モードフィールド径の試験方法 .....	12
6.1.1 基準試験方法：ファーフィールド走査法 .....	12
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 .....	14
6.2.1 基準試験方法：ニアフィールド画像法 .....	14
6.3 カットオフ波長の試験方法 .....	17
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 .....	17
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 .....	22
6.4 損失の試験方法 .....	24
6.4.1 基準試験法:カットバック法 .....	24
6.5 波長分散の試験方法 .....	27
6.5.1 基準試験法：位相法 .....	27
6.6 マクロバンド損失の試験方法 .....	29
6.6.1 基準試験方法：光ファイバ曲げ法 .....	29
6.7 スクリーニング(プルーフ)試験方法 .....	32
6.7.1 基準試験方法：長手方向の応力印加法 .....	32
参考文献 .....	37

## <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。ただし、一部の項番号については、将来、追記する予定である。

### 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

以下の項番号については、2021 年度以降に順次追加する予定。

- ・ 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

#### 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

### 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 ホームページでご覧になれます。

### 5. その他

#### 5.1 参照する勧告、標準など

「2章 参考」を参照

### 6. 標準作成部門

光ファイバ伝送専門委員会

## 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[JT-G652]、[ITU-T G.653]、[JT-G654]、[ITU-T G.655]、[ITU-T G.656]及び[JT-G657]に記載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) :** 光ファイバまた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 プルーフテストレベル :** プルーフテストレベルとは、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またはひずみであり、プルーフテスト（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**：光ファイバまた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て、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、または $\lambda_{cc}$ 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]、[JT-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また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、線引きプロセス中また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、または特定の構造内に光ファイバを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また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」、また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	パワーメーター
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。

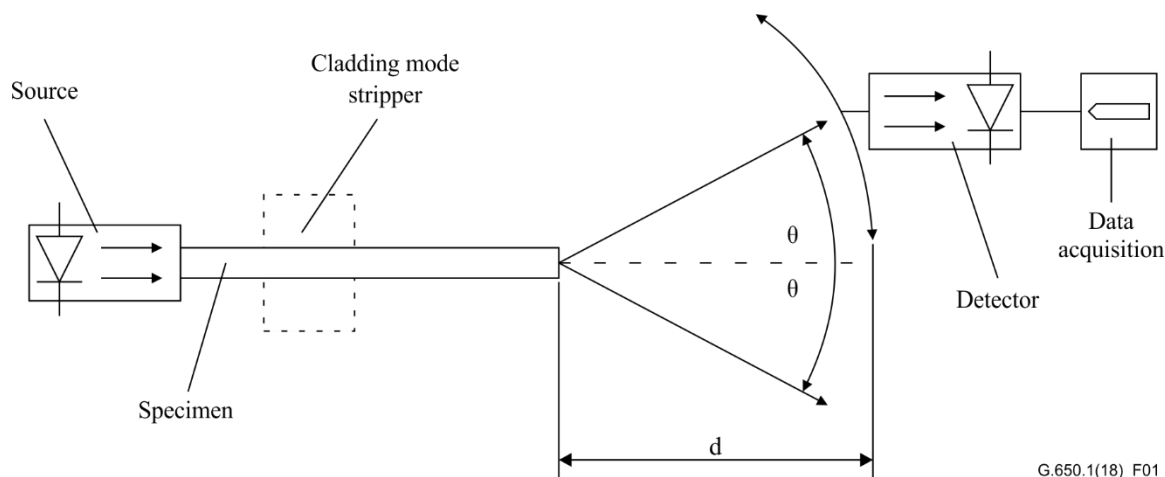


図 1 ファーフィールド走査法の試験装置構成

#### 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、また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、また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  $1^\circ$  以内であることが推奨される。

#### 6.1.1.2.6 走査装置

ファーフィ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また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ィ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  $20^\circ$  や  $25^\circ$  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(または最大走査半角)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  $12.5^\circ$ 、ITU-T G.653 光ファイバの場合に 40 dB 及び  $20^\circ$  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

## 6.2 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

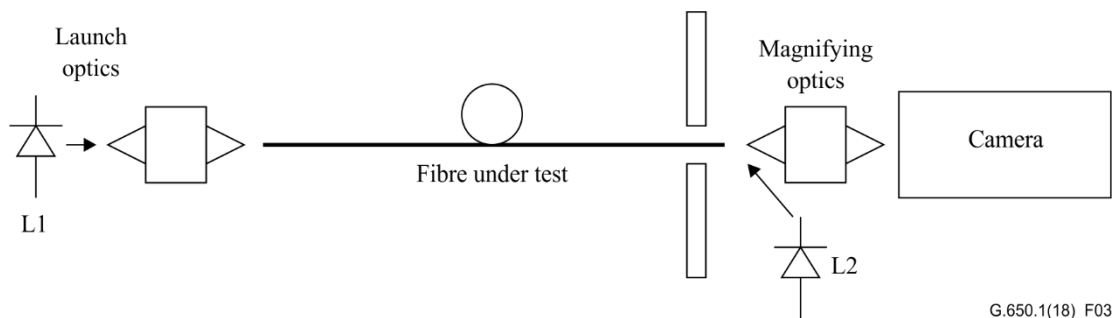


図3 試験装置構成

#### 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/また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、また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。ビデオデジタイザは、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、測定の不確か率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/また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
- $R_{maxcl}$  ( $\mu\text{m}$ ) 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 ( $\mu\text{m}$ )  $=2R_{cl}$
- クラッド非円率 (%)  $=100(R_{maxcl}-R_{mincl})/R_{cl}$
- コア偏心率 ( $\mu\text{m}$ )  $=[(X_{cl}-X_{co})^2+(Y_{cl}-Y_{co})^2]^{1/2}$

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、また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。

### 6.3 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、または
- 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、 $\lambda$ 線幅(FWHM)が 10 nm 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、または
- 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、または、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。

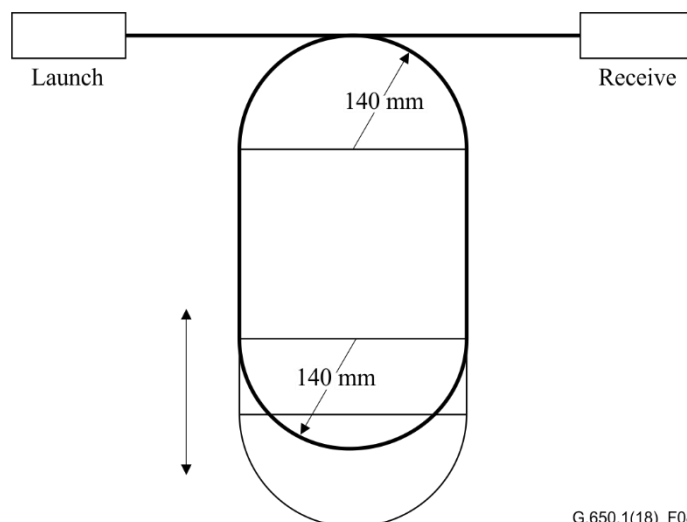


図8 スプリット・マンドレル構成でカットオフ波長測定を行う際の被測定光ファイバ配置

### 6.3.1.3.2 参照サンプルでの透過光パワーの測定

a) または 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<sub>2</sub>(λ)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<sub>3</sub>(λ)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 または 3 は、6.3.1.3.2 項の方法 a) または 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<sub>u</sub> と B<sub>u</sub> 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<sub>u</sub>+B<sub>u</sub>λ)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<sub>u</sub> と B<sub>u</sub> 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λ<sub>c</sub>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。λ<sub>c</sub>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(λ) 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(λ)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。

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

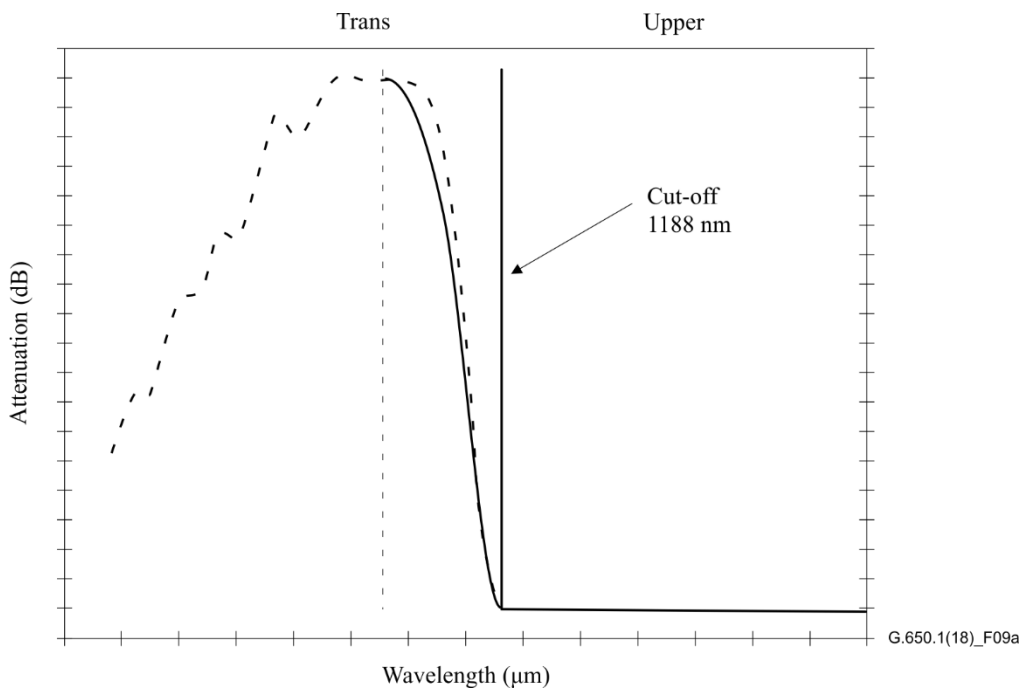


図 9 a シングルモード参照法によるカットオフ波長の測定結果例

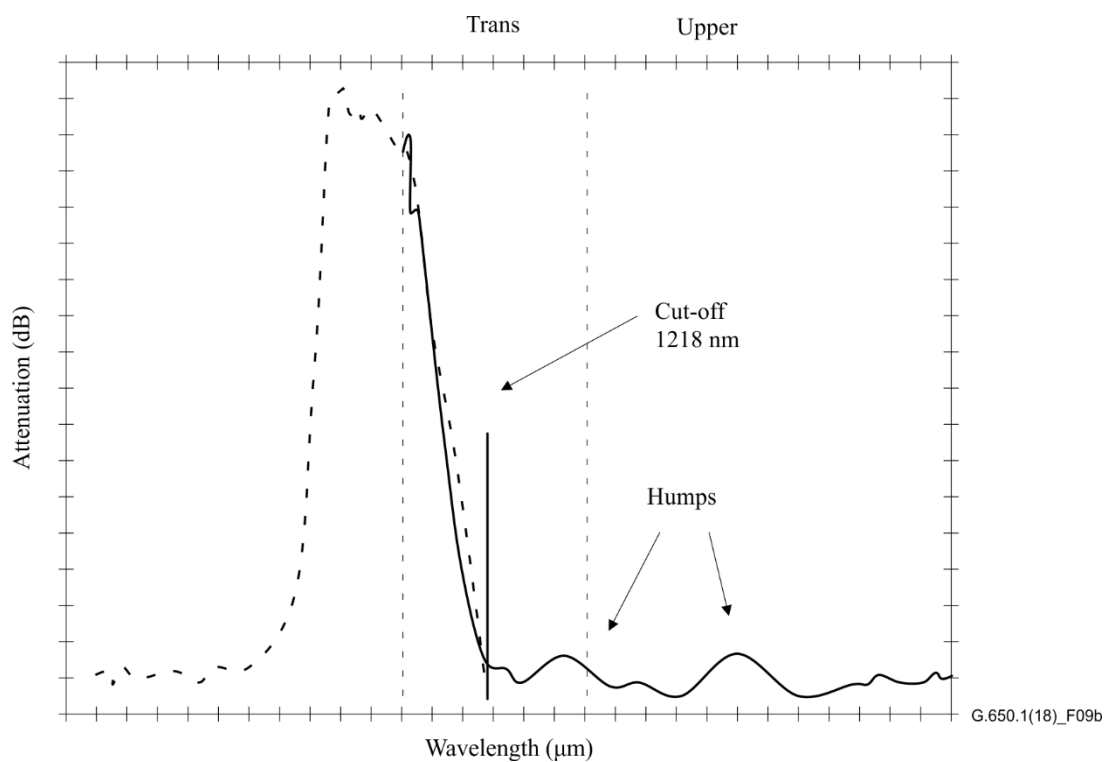


図 9 b シングルモード参照法によるカットオフ波長の測定結果例。ハンブのある場合

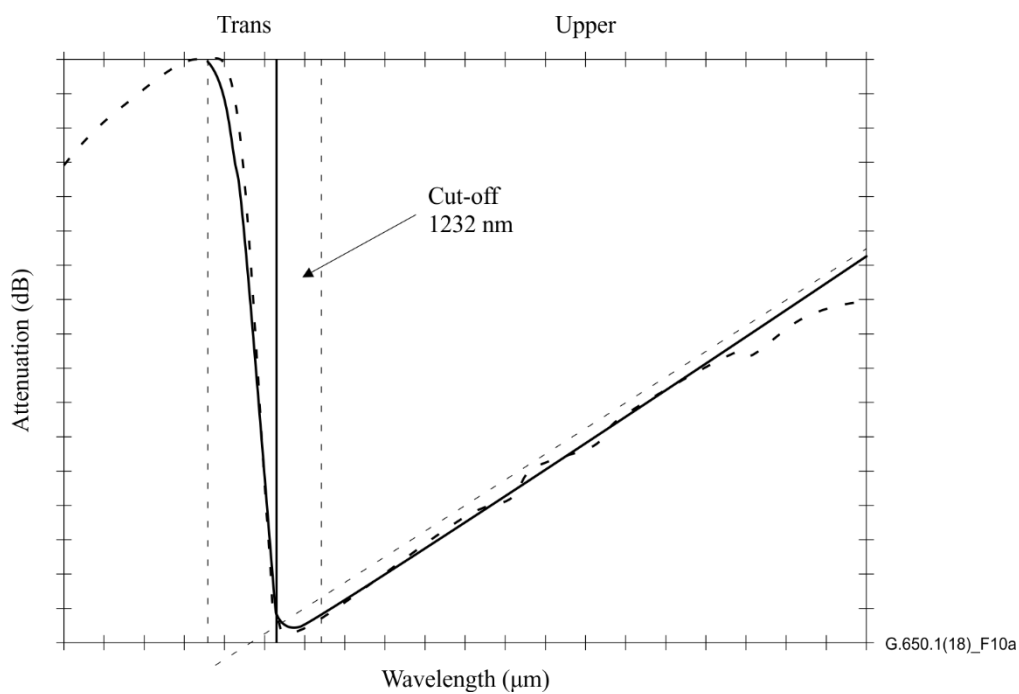


図 10 a マルチモード参照法によるカットオフ波長の測定結果例

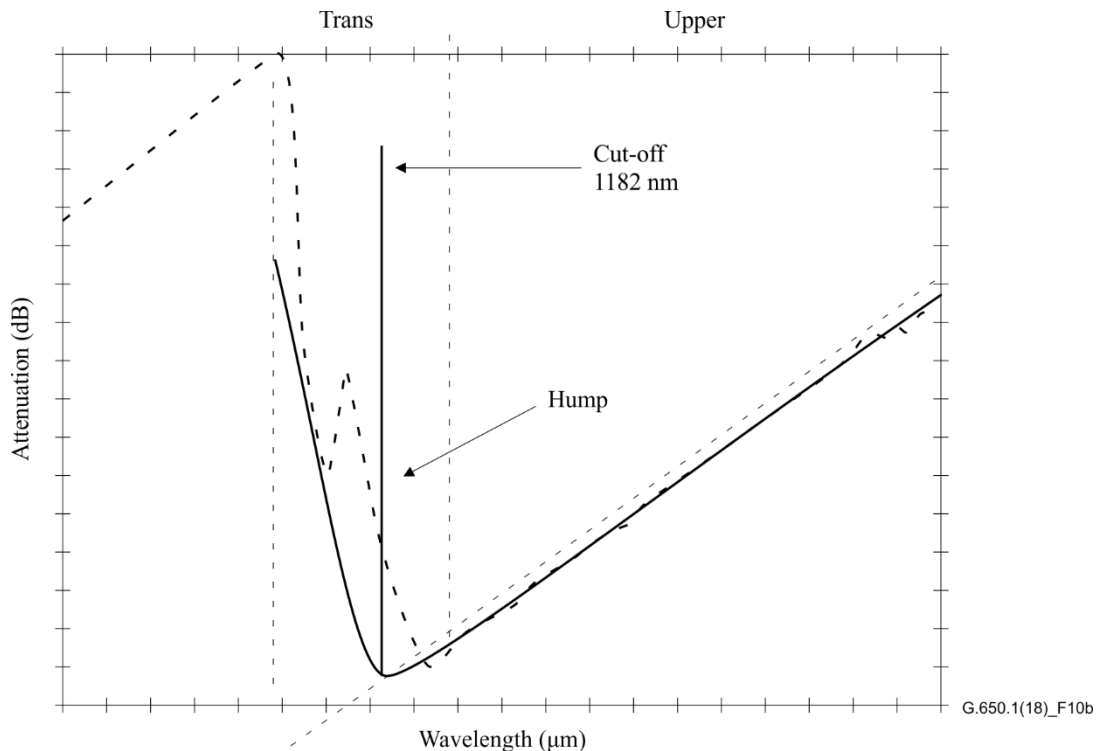


図 10 b マルチモード参照法によるカットオフ波長の測定結果例。ハンブのある場合。

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 の附則 B 及び附則 A にそれぞれ記載されている。

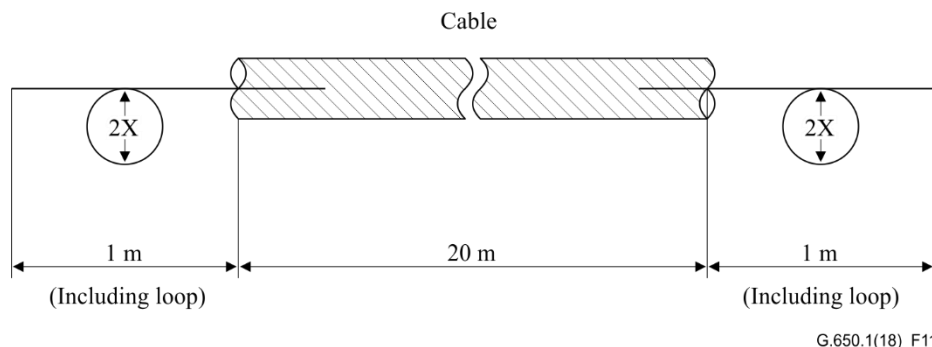


図11 ケーブル化された光ファイバの $\lambda_{cc}$ 測定における設置条件

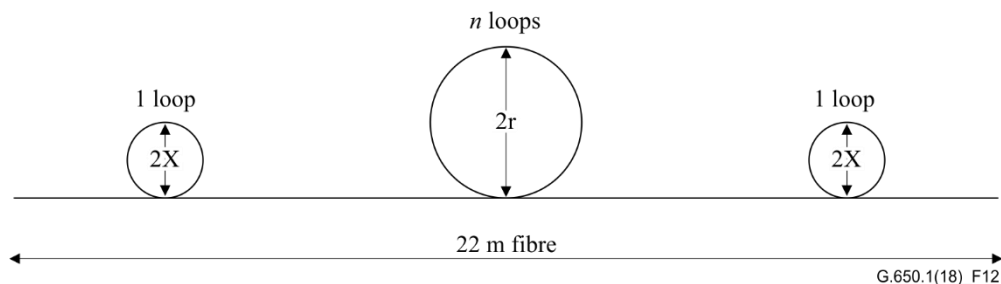


図12 ケーブル化されていない光ファイバの $\lambda_{cc}$ 測定における設置条件

### 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、 $i=2$  または  $3$  は、6.3.1.3.2 項の方法 a) または 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

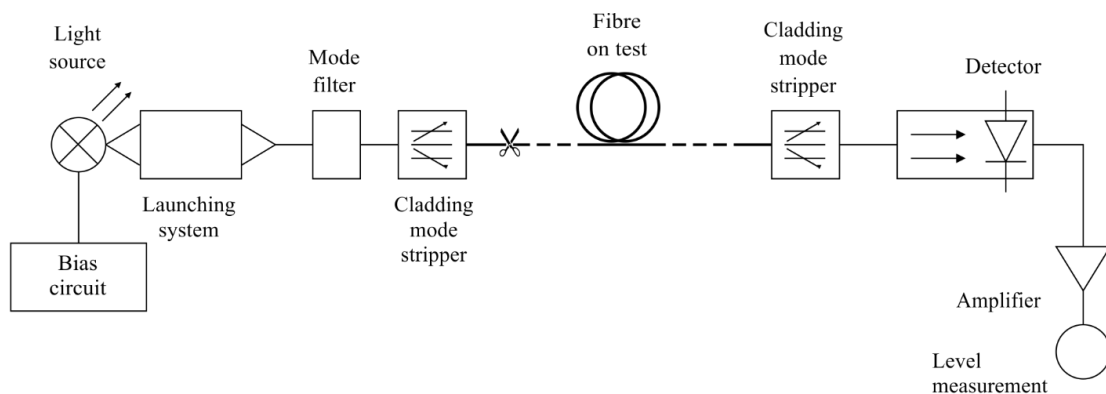
#### 6.4.1.1 概要

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。

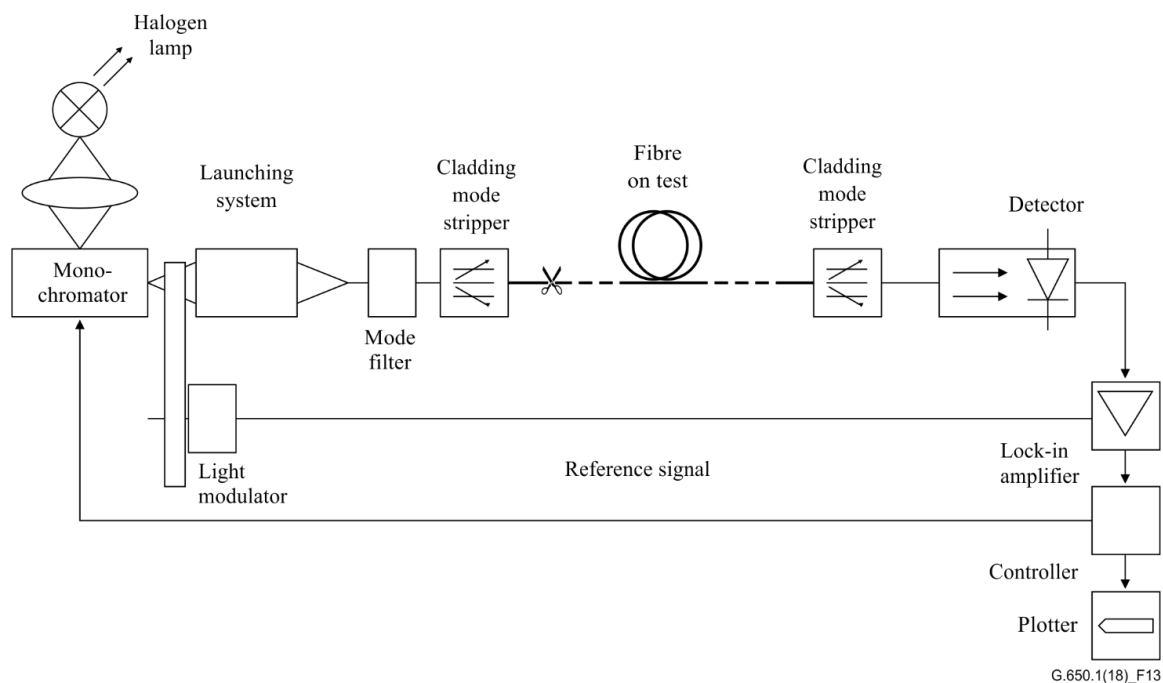
#### 6.4.1.2 試験装置



測定は、1 つまたは複数の波長で、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、または損失スペクトルを得るのに最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

図 13 カットバック法

#### 6.4.1.2.1 光源

ランプ、レーザまた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、測定のタイプによって異なる。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、また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)

## 6.5 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。

附則 A に、波長分散の近似に関する一般的な説明を記述し、任意の試験法また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、また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]の附則 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。

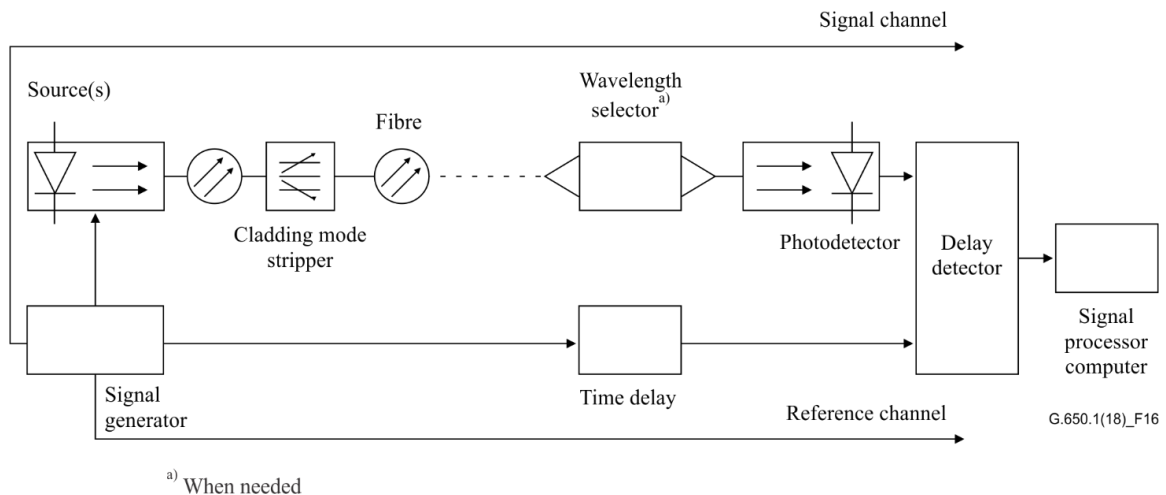


図 16 試験装置の典型的な構成

### 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 または広帯域光源(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

波長セレクトとモニタは、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。波長選択器としては、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気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、光ファイバカプラ及び波長計によって行うことができる。波長セレクト及びモニタは、被測定光ファイバの入力端また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 10 から 100 nm 以内になければならない。

### 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、電気信号また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 シグナルプロセッサ

測定波形におけるノイズ及びまた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、波長選択器また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較正を行う。波長分解能と信号レベルは適切に調整される。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。

#### 6.5.1.3 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) 相対群遅延データまた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ける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またはガイド溝)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 または 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 または 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

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、被覆されたまた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) マクロバンド損失 (dB) または (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(ブルーフ)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(ブルーフ)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(ブルーフ)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(ブルーフ)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：ひずみを制御するブ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、载荷時間（荷重時間） $t_l$ 、除荷時間（開放時間） $t_u$ 、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。

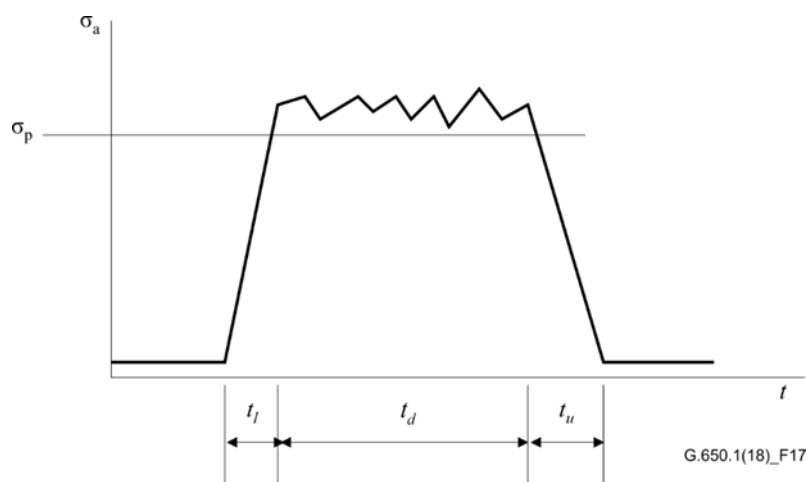


図 17 スクリーニング(プルーフ)試験間の応力  $s$  と時間  $t$

#### 6.7.1.2 試験装置

##### 6.7.1.2.1 操作手順の要求事項

- a) 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)。
- b) 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。
- c) 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。
- d) 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。
- e) 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。
- f) 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、要求されたプル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。

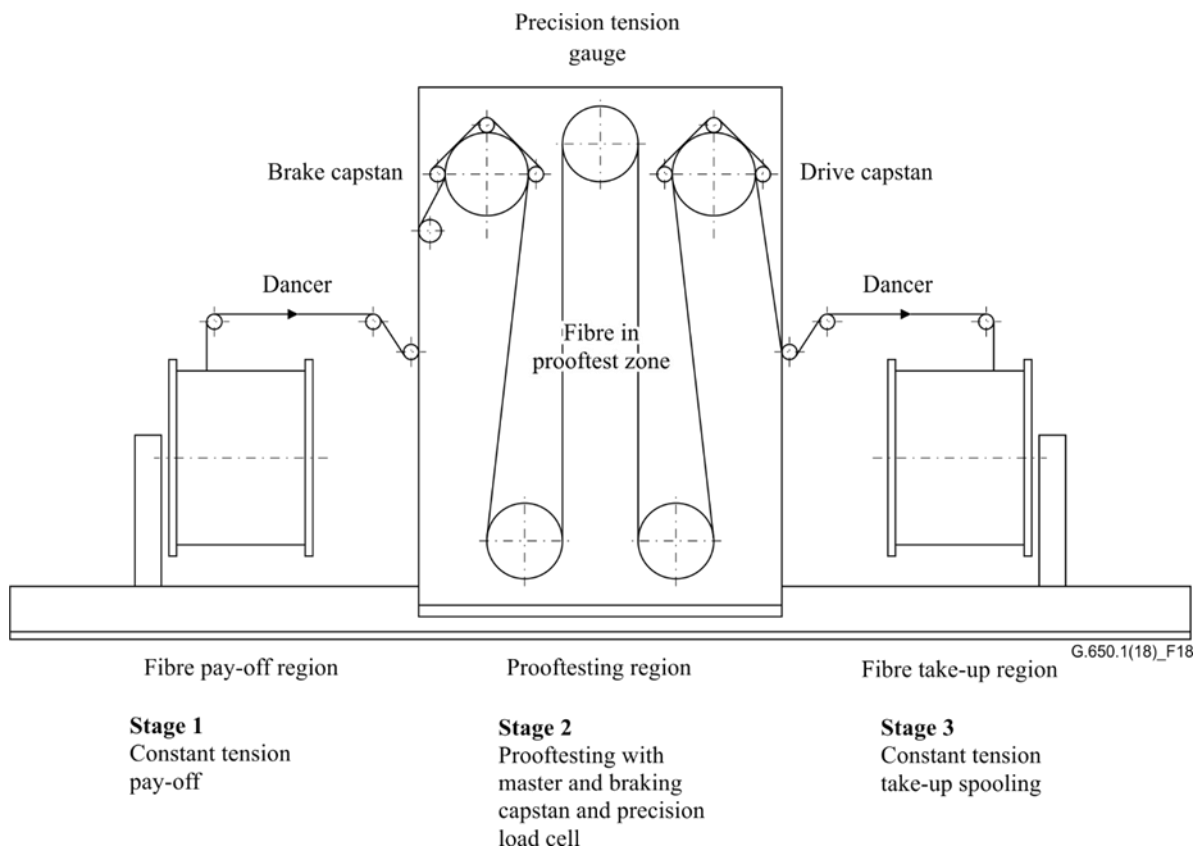


図 18 ブレーキキャプスタン型プルーフ試験装置の典型的な構成

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、送出しダンサと巻取りダンサのプーリは十分に軽い。送出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。光ファイバにプル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プルーフ応力の印加長を延長できる。

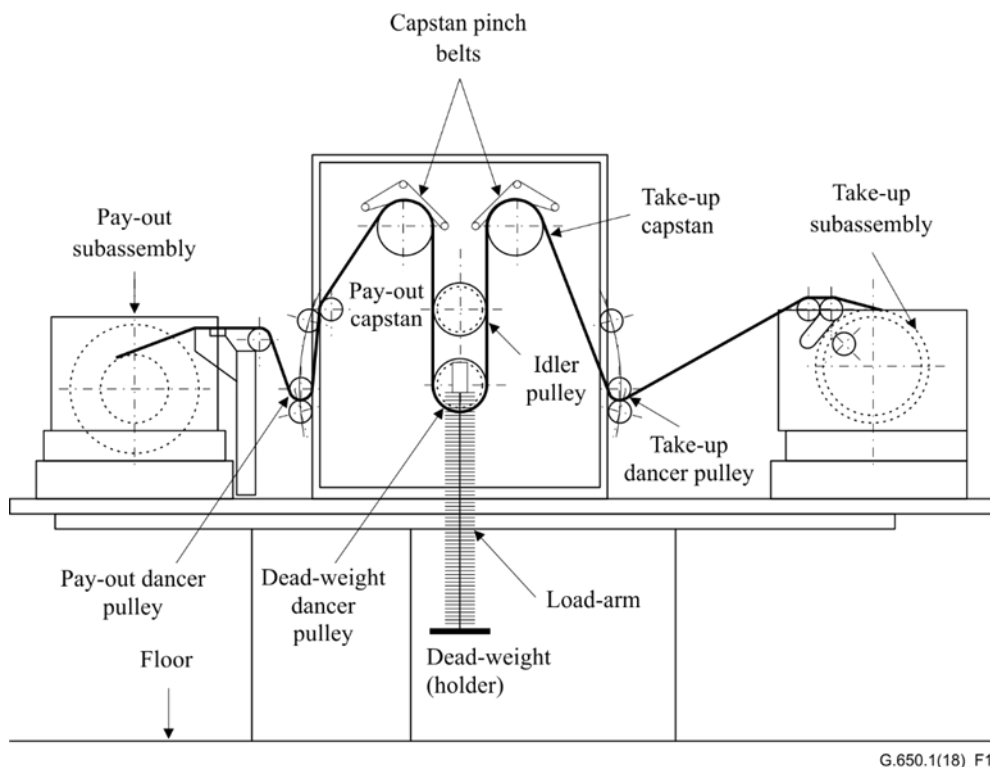


図 19 おもり型プルーフ試験装置(の典型的な構成)

### 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

## 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.