

**TTC標準**  
Standard

JT-G654

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

Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical  
fibre and cable

第1版

2018年5月24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.654 (2016/11) 和訳>.....	5
概要.....	5
キーワード.....	5
1. 規定範囲.....	6
2. 参照.....	6
3. 定義.....	6
3.1 他で定義された用語.....	6
3.2 本標準で定義される用語.....	6
4. 略語.....	6
5. 慣例.....	7
6. ファイバの特性.....	7
6.1 モードフィールド径.....	7
6.2 クラッド径.....	7
6.3 コア偏心量.....	7
6.4 非円率.....	7
6.4.1 モードフィールド非円率.....	7
6.4.2 クラッド非円率.....	7
6.5 カットオフ波長.....	7
6.6 マクロベンド損失.....	8
6.7 ファイバの材料特性.....	9
6.7.1 ファイバ材料.....	9
6.7.2 保護材料.....	9
6.7.3 プルーフストレスレベル.....	9
6.8 屈折率分布.....	9
6.9 波長分散の長手依存性.....	9
6.10 波長分散.....	9
7. ケーブルの特性.....	10
7.1 損失係数.....	10
7.2 偏波モード分散係数.....	10
8. 規格表.....	10
付録 I システム設計に用いる光ファイバケーブルリンクに関する情報.....	17
I.1 損失.....	17
I.2 波長分散.....	17
I.3 群遅延時間差 (DGD).....	18
I.4 典型値.....	18
I.5 非線形係数.....	19
I.6 統計的手法の一例.....	19
参考文献.....	21

## <参考>

### 1. 国際勧告との関係

本技術仕様は、ITU-T 勧告 G.654 (11/2016) 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

#### 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	2018年5月24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

なし。

### 6. 標準作成部門

光ファイバ伝送専門委員会

## <G.654 (2016/11) 和訳>

### 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

#### 概要

TTC 標準 JT-G654 は、ゼロ分散波長が 1 300 nm の周辺であり、低損失かつカットオフ波長が 1 550 nm 波長帯であるシングルモード光ファイバ及びケーブルの幾何学的 (構造) 、機械的、及び伝送の特性について記述する。

本標準には、100 Gbit/s 超デジタルコヒーレント陸上ネットワーク用をサポートするための光信号対雑音比の大幅な改善を目的とした JT-G654.E カテゴリを含んでいる。本標準は、2016 年に改訂された ITU-T G.654 を和訳したものである。

#### キーワード

光ファイバ及びケーブル、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、大モードフィールド径、長距離伝送

## 1. 規定範囲

本標準は、ゼロ分散波長が 1 300 nm 付近であり、低損失かつカットオフ波長が 1 550 nm 帯で、1 530～1 625 nm 波長領域での利用に最適化されたシングルモード光ファイバ及びケーブルについて記述する。

低損失カットオフシフトシングルモードファイバ (CSF) は、光増幅器を利用する基幹系陸上及び海底ネットワーク等の長距離伝送システムに適している。本標準では、CSF の幾何学的、光学 (損失、カットオフ波長、波長分散及び偏波モード分散 (PMD) 等)、伝送、機械に関する特性を規定している。

1 625 nm までの波長帯を用いた伝送をサポートするために特性が規定されている。幾何学的、光学、伝送、機械に関するパラメータは以下の 3 つのカテゴリに記載される。

- 「ファイバの特性」は、ケーブル化及び敷設によって変化しないものである。
- 「ケーブルの特性」は、製造出荷時のケーブルに対して規定される。
- 「リンクの特性」は、測定、モデリングなどに基づくシステムインターフェースパラメータの算出に使用する、接続されたケーブルの特性の事である。「リンクの特性」及びシステム設計の情報は付録 I に記載する。

本標準及び 8 章の規格表に見られる異なる特性カテゴリは以下の関連する ITU-T システム勧告をサポートしている。

- [b-ITU-T G.696.1];
- [b-ITU-T G.957].

本勧告において使われる用語の意味及び種々の特性の測定方法において適用されるガイドラインは、[ITU-T G.650.1] と [ITU T G.650.2] で示される。パラメータの定義、ファイバの試験方法、及び関連した値を含むファイバの特性は研究や経験によって改善される。

## 2. 参照

以下の ITU-T 勧告およ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。すべての勧告およ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、以下の勧告およ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.650.1] Recommendation ITU-T G.650.1 (2010), Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable.

[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.

[ISO 80000-1] ISO 80000-1:2009, Quantities and units – Part 1: General.

## 3. 定義

### 3.1 他で定義された用語

本標準では、[ITU-T G.650.1] と [ITU T G.650.2] で示す用語を使用する。

### 3.2 本標準で定義される用語

なし。

## 4. 略語

本標準は以下の略語と頭文字を使用する。

CSF	Cut-off Shifted Fibre	カットオフシフトファイバ
DGD	Differential Group Delay	群遅延時間差
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	高密度波長分割多重
MFD	Mode Field Diameter	モードフィールド径
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio	光信号対雑音比
PMD	Polarization Mode Dispersion	偏波モード分散
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波長分割多重

## 5. 慣例

標準への適合性を評価する際、数値は規格値の表で示された桁の数に近似される。一般的な四捨五入が使われ、それは [ISO 80000-1] の付録 B、ルール B において記述される。有効数字の桁を超えた最初の桁だけが、四捨五入を決定する際に使われる。

## 6. ファイバの特性

本章では、製造メーカーにとって最小限で必須であるファイバの諸特性だけが勧告される。数値に対する範囲または制限は、8 章の表に示される。ケーブル製造や敷設は、これら数値のうちケーブル化されたカットオフ波長と PMD に重大な影響を及ぼす場合もあるが、勧告された特性は、個々のファイバ、ドラム巻のケーブル中のファイバ、敷設されたケーブルのファイバに等しく適用する。

### 6.1 モードフィールド径

標準値と標準値の公差の両方に関し、1 550 nm において規定される。規定された標準値は 8 章で述べられる範囲内ではなければならない。規定された公差は 8 章で述べられる値を超えてはならない。標準からの偏差は公差を超えてはならない。

### 6.2 クラッド径

クラッド径の標準値は 125  $\mu\text{m}$  である。公差は 8 章で記載されており、そこから逸脱してはならない。クラッド径の標準値からの偏差は定義された公差を逸脱してはならない。

### 6.3 コア偏心量

コア偏心量は 8 章で述べられた値を超えてはならない。

### 6.4 非円率

#### 6.4.1 モードフィールド非円率

実質的には、標準的な円形モードフィールド形状を持つファイバのモードフィールド非円率は、信号伝搬や接続には影響がない程度に、十分に小さい。従って、モードフィールド非円率の勧告値は必要がないと考えられる。検収目的のために、モードフィールド非円率を測定する事は、一般的には不要である。

#### 6.4.2 クラッド非円率

クラッド非円率は 8 章で述べられる値を超えてはならない。

### 6.5 カットオフ波長

2つのタイプのカットオフ波長が区別される。

- a) ケーブルカットオフ波長  $\lambda_{cc}$
- b) ファイバカットオフ波長  $\lambda_c$

注 1 - 特定の海底ケーブルアプリケーションにおいて、異なるケーブルカットオフ波長の値が要求される場合がある。

$\lambda_c$  と  $\lambda_{cc}$  の測定値の相関は、ファイバとケーブル設計、テスト条件に依存する。一般的には  $\lambda_{cc} < \lambda_c$  だが、汎用的かつ定量的な関係は簡単には求められない。

接続されたケーブルの中で最も短いケーブルが、最も短い使用波長におけるシングルモード伝搬を保証する事が最も重要であり、以下の条件を満たす必要がある。

- 1)  $\lambda_c$  を 1 600 nm 以下とする。ただし、 $\lambda_c$  は 1 350 nm 以上とする。
- 2)  $\lambda_{cc}$  を 1 530 nm 以下とする。

注 2 - 上記の規定法により 1 550 nm 帯のシングルモード伝送が担保される。1 550 nm 以下の波長帯を利用する WDM 伝送に対しては、1 550 nm と利用波長の下限との差を上記の規定値から差し引いて規定する必要がある。

上記の 2 つの規定は同時に規定される必要はなく、 $\lambda_{cc}$  の規定が望ましい（ケーブルシステムにおけるシングルモード動作を補償する直接的な方法であるため）。 $\lambda_{cc}$  での規定が困難であるケース、例えば、ジャンパケーブルや  $\lambda_{cc}$  で規定される敷設状況とは大きく異なる場合には、 $\lambda_c$  での規定が適切となる場合がある。

利用者が 2) のように  $\lambda_{cc}$  を規定することを選択した場合、 $\lambda_c$  が 1 600 nm を超える場合があることに注意する必要がある。

利用者が 1) のように  $\lambda_c$  で規定することを選択した場合、 $\lambda_{cc}$  の規定は不要である。

利用者が  $\lambda_{cc}$  を規定することを選択した場合、 $\lambda_c$  が最も短い使用波長よりも長くなる場合があるが、ケーブル製造や敷設によって、最小ケーブルピース長における  $\lambda_{cc}$  は最も短い使用波長より短くなり、シングルモード伝搬が保証される。

利用者が  $\lambda_{cc}$  を規定することを選択した場合、認証試験は  $\lambda_{cc}$  が要求を満足していることを確認することで十分である。

$\lambda_{cc}$  は 8 章で述べられた値を超えてはならない。

## 6.6 マクロバンド損失

マクロバンド損失は、波長、曲げ半径、及びその半径のマンドレルへのターン数で変化する。マクロバンド損失は、特定された波長、曲げ半径、ターン数に対して 8 章の最大値を超えてはならない。

注 1 - 認証試験は、この必要条件を保証する必要がある。

注 2 - 勧告でのターン数は、典型的なリピータスパン中で発生する大凡のターン数と一致する。勧告での半径は、静疲労破断を起こさない、長期敷設される実用的なシステムで広く受け入れられた最小曲げ半径に等しい。

注 3 - もし実用的な理由の為に、規格よりも少ないターン数で測定を行う場合、40 ターン以上であって、ターン数に比例した損失増加となっていることが必要である。

注 4 - マクロバンド損失規格は、実用的なシングルモードファイバの敷設に対するものである。ケーブル化シングルモード光ファイバの撚合に関連した曲げ径による損失特性への影響は、ケーブル化ファイバの損失仕様値に含まれる。

注 5 - ルーチンテストである場合には、正確さと測定の簡略化のために、小さな曲げ径による数回のターンが使用されても良い。この場合、曲げ直径、ターン数、最大許容曲げ損失は、勧告テスト条件での最大許容曲げ損失と相関するように選定されなくてはならない。



## 6.7 ファイバの材料特性

### 6.7.1 ファイバ材料

ファイバを構成する物質は示されねばならない。

注 - 異なる物質のファイバの融着接続において、注意が必要である場合がある。実験からは、異なる高純度な石英ガラスファイバを接続する際に、十分な接続損失と強度が得られると考えられている。

### 6.7.2 保護材料

プライマリコーティングに使われる材料の物理的、化学的特性と、(もし必要であれば) プライマリコーティングの除去方法は示されるべきである。シングルジャケットファイバの場合においては、同様の表示を与えなければならない。

### 6.7.3 プルーフストレスレベル

特定のプルーフストレス $\sigma_p$ は8章で示される最小値以上でなければならない。

注 - 機械的パラメータの定義は [ITU-T G.650.1] の 3.2 節及び 6.7 節に含まれている。

## 6.8 屈折率分布

ファイバの屈折率分布は、一般的には開示の必要は無い。

## 6.9 波長分散の長手依存性

検討中。

注 - ある波長において、局所的な波長分散値は長尺での測定値とは異なる場合がある。高密度波長分割多重 (DWDM) システムにおいて、動作波長に近い波長で値が小さくなる場合、四光波混合によって他の WDM 動作波長 (動作以外の波長の場合もある) に光パワーの伝搬を誘発しうる。四光波混合の大きさは、その波長分散係数、波長分散スロープ、動作波長、光パワー、四光波混合の起こる距離、の絶対値の関数である。

1 550 nm 領域における DWDM の動作にとっては、JT-G654 ファイバの波長分散は、四光波混合が発生しない程に十分大きい。従って、波長分散の一様性は伝送上の問題とはならない。

## 6.10 波長分散

測定した群遅延若しくは波長に対する波長分散係数は、[ITU-T G.650.1] の Annex A で定める適切な数式によって算出される。(未測定波長に対しては、分散値の内挿法のガイダンス [ITU-T G.650.1] の 6.5 節参照)。規格表には、波長 1 550 nm における波長分散係数の最大値  $D_{1550\max}$  が規定されており、これを超えてはいけない。また、波長 1 550 nm における波長分散の最小値  $D_{1550\min}$  と最大値  $D_{1550\max}$  が規定されている場合は、その範囲に入っていないといけない。波長 1 550 nm における分散スロープの最大値  $S_{1550\max}$  を超えてはいけない。また、波長 1 550 nm における分散スロープの最小値  $S_{1550\min}$  と最大値  $S_{1550\max}$  が規定されている場合は、その範囲に入っていないといけない。

近似精度の要求条件によっては、1 550 nm 帯における 35 nm 以下の波長帯域においては、二次方程式近似を利用することが可能である。C~L 波長帯においては、5 項セルマイヤ方程式若しくは、4 次多項の適用が望ましい。1 310 nm 帯における二次方程式の適用はできない。

注 - ルーチンベースで波長分散係数を測定する必要は無い。

JT-G654.E カテゴリの波長分散特性は、波長 1 530 ~ 1 625 nm における波長分散係数  $D(\lambda)$  の最大値・最小値が規定されている。本規格により、分散補償伝送路における正確なシステム的设计が可能となる。ここでは、[ITU-T G.650.1] の表 A.1 に記載の群遅延の二次方程式近似が適用され、 $D(\lambda)$  の規格範囲は以下の不等式で表される。

$$D_{1550\min} + S_{1550\min}(\lambda - 1550) \leq D(\lambda) \leq D_{1550\max} + S_{1550\max}(\lambda - 1550), \quad (6-1)$$

ここで、 $D_{1550\min}$ 、 $D_{1550\max}$ 、 $S_{1550\min}$ 、及び  $S_{1550\max}$  は 8 章の表 5 の規格表で示されている。

## 7. ケーブルの特性

6 章において述べられたファイバの幾何学的、光学的特性はケーブル製造プロセスによって殆ど影響を受けないため、この章では、製造されたケーブルにおけるファイバの伝送特性に主に関連する勧告を示す。

環境及びテスト条件が主要部分であり、それらは試験方法のためのガイドラインにおいて記述される。

### 7.1 損失係数

損失係数は 1 530～1 625 nm において、一つまたは複数の波長での最大値で示される。光ファイバケーブルの損失係数値は 8 章で示される値を超えてはならない。

注 1 - 損失係数の最小値は製造工程、ファイバ組成・設計及びケーブル構造に依存するが、1 550 nm において 0.15 dB/km～0.19 dB/km が達成されている。

注 2 - 損失係数は、いくつか (3 から 4) の予測波長での測定を基礎とした損失波長特性の計算結果から導出しても良い。この手順は [ITU T G.650.1] の 6.4.4 項に示され、例は [ITU T G.650.1] の付録 III に記載されている。

注 3 - [b-ITU-T G.973] に記載の遠隔励起光増幅器を有する海底システムに対しては、励起波長における損失係数の規定がなされる場合がある。

### 7.2 偏波モード分散係数

ケーブル化されたファイバの偏波モード分散は、個別のファイバでは無く、統計的に規定されねばならない。必要条件は、ケーブル情報から計算されたリンクの条件のみに関係する。統計仕様の測定基準は本節に示される。計算方法は [b-IEC/TR 61282-3] で示され、[ITU-T G.650.2] の付録 IV で要約されている。

製造メーカは、M 個のケーブル部の結合で定義される光ファイバケーブルリンクの PMD 係数の統計上の上限である、リンク設計 PMD 値 ( $PMD_Q$ ) を提供せねばならない。上限値は、小さな確率水準 Q に関して定められる。Q とは、ケーブルを連結した際の PMD が  $PMD_Q$  を上回る可能性の事である。8 章で示される M 値及び Q 値に対して、 $PMD_Q$  の値は 8 章で示される最大の PMD 係数を超えてはならない。

ケーブル化されていないファイバの測定及び仕様は必要であるが、ケーブル化されたファイバの仕様を保証するには十分ではない。ケーブル化されていないファイバでの最大のリンク設計値は、ケーブル化ファイバにおける規定値以下でなければならない。ケーブル化ファイバに対するケーブル化されていないファイバの PMD 値の比率は、ケーブル化されていないファイバのモード結合条件に依存するのと同様に、ケーブルの構造やプロセスに依存する。[ITU-T G.650.2] は、ケーブル化されていないファイバの PMD 測定に際して、偏波モード結合が小さくなるように、大きな直径のポピンに低張力で巻き付けることを推奨している。

PMD 係数値の分布は、時間と波長でランダムに変わる群遅延時間差 (DGD) の統計的変動の範囲にほぼ等しいと解釈する事が出来る。PMD 係数の分布が光ファイバケーブルに対して規定されれば、等価的な DGD の変動範囲が決定される。リンク DGD 分布の範囲のための測定基準と値は、付録 I で示される。

注 1 -  $PMD_Q$  は、さまざまなタイプのケーブルに対して計算される。そしてそれらは、PMD のサンプル値を使用して通常計算されるべきである。このサンプルは類似した構造のケーブルから取られる。

注 2 -  $PMD_Q$  仕様は、ジャンパケーブル、インドアケーブル、ドロップケーブル等のショートリンクケーブルには適用されるべきではない。

## 8. 規格表

表 1～5 は、本標準の目的を満たすファイバカテゴリの為に、規格値を要約するものである。これらのカ

テゴリは、主に MFD、波長分散係数及び PMD によって区別されたものである。伝送距離及びビットレートに対する PMD の要求条件の関係は、本標準の付録 I で示される。

表 1 (JT-G654.A ファイバの特性) は、カットオフシフトシングルモードファイバのベースカテゴリーである。本カテゴリーは、[b-ITU-T G.691]、[b-ITU T G.692]、[b-ITU-T G.957] 及び [b-ITU-T G.977] で示される波長 1 550 nm を利用するシステムに適している。

表 2 (JT-G654.B ファイバの特性) は、[b-ITU-T G.691]、[b-ITU T G.692]、[b-ITU-T G.957]、[b-ITU-T G.977] 及び [b-ITU-T G.959.1] で示される波長 1 550 nm を利用する基幹系システムに適している。本カテゴリーは、[b-ITU-T G.973] に記載の遠隔励起光増幅器を有する無中継海底システム及び、[b-ITU-T G.977] に記載の光増幅器を有する海底中継システム等の、より長距離及び大容量 WDM 伝送システムに適用することが可能である。

表 3 (JT-G654.C ファイバの特性) は、JT-G654.A ファイバと類似しているが、[b-ITU-T G.959.1] に記載の高ビットレート・長距離伝送システムをサポートするために低い PMD 規格を有している。

表 4 (JT-G654.D ファイバの特性) は、JT-G654.B ファイバと類似しているが、マクロバンド損失規定が異なり、光信号対雑音比を改善するために、低い損失係数及び大きな MFD を規定している。本カテゴリーは、[b-ITU-T G.973]、[b ITU T G.973.1]、[b-ITU-T G.973.2] 及び [b-ITU-T G.977] に記載の高ビットレート海底システムに適用可能である。

表 5 (JT-G654.E ファイバの特性) は、JT-G654.B ファイバと類似しているが、100 Gbit/s システムなどの高ビットレートコヒーレント伝送システムにおいて、OSNR を改善するための陸上ケーブルとして、JT-G652.D ファイバと同じマクロバンド損失、狭い MFD 範囲及び波長 1 530～1 625 nm の波長帯における波長分散の最大・最小値を規定している。

表1 - JT-G654.A ファイバの特性

ファイバ規格			
規格	詳細	値	単位
モードフィールド径	波長	1 550	nm
	標準値の範囲	9.5-10.5	μm
	公差	±0.7	μm
クラッド径	標準	125	μm
	公差	±1	μm
コア偏心率	最大	0.8	μm
クラッド非円率	最大	2.0	%
ケーブルカットオフ波長	最大	1 530	nm
マクロバンド損失	半径	30	mm
	ターン数	100	
	1 625 nmでの最大	0.50	dB
ブルーフストレス	最小	0.69	GPa
波長分散パラメータ	$D_{1\ 550\max}$	20	ps/(nm · km)
	$S_{1\ 550\max}$	0.070	ps/(nm <sup>2</sup> · km)
ファイバPMD係数	最大	(注2)	
ケーブル規格			
規格	詳細	値	単位
損失係数 (注1)	1 550 nmでの最大	0.22	dB/km
PMD係数 (注2)	$M$	20	cables
	$Q$	0.01	%
	最大PMD <sub>Q</sub>	0.5	ps/km <sup>1/2</sup>
<p>注1 - この表で述べられる損失係数値は、短いケーブル (例えばジャンパケーブル、インドアケーブル、ドロップケーブル) には適用してはならない。例えば [b-IEC 60794-2-11] は、インドアケーブルの損失係数として1.0 dB/km以下を許容している。</p> <p>注2 - 7.2節により、ケーブル化されていないファイバの最大PMD<sub>Q</sub>値は、ケーブルPMD<sub>Q</sub>における基本要件をサポートするために明記される。</p>			

表2 - JT-G654.B ファイバの特性

ファイバ規格			
規格	詳細	値	単位
モードフィールド径	波長	1 550	nm
	標準値の範囲	9.5–13.0	μm
	公差	±0.7	μm
クラッド径	標準	125	μm
	公差	±1	μm
コア偏心率	最大	0.8	μm
クラッド非円率	最大	2.0	%
ケーブルカットオフ波長	最大	1 530	nm
マクロバンド損失	半径	30	mm
	ターン数	100	
	1 625 nmでの最大	0.50	dB
ブルーフストレス	最小	0.69	GPa
波長分散パラメータ	$D_{1\ 550\max}$	22	ps/(nm · km)
	$S_{1\ 550\max}$	0.070	ps/(nm <sup>2</sup> · km)
ファイバPMD係数	最大	(注2)	
ケーブル規格			
規格	詳細	値	単位
損失係数 (注1)	1 550 nmでの最大	0.22	dB/km
PMD係数 (注2)	$M$	20	cables
	$Q$	0.01	%
	最大PMD <sub>Q</sub>	0.20	ps/km <sup>1/2</sup>
<p>注1 - この表で述べられる損失係数値は、短いケーブル (例えばジャンパケーブル、インドアケーブル、ドロップケーブル) には適用してはならない。例えば [b-IEC 60794-2-11] は、インドアケーブルの損失係数として1.0 dB/km以下を許容している。</p> <p>注2 - 7.2節により、ケーブル化されていないファイバの最大PMD<sub>Q</sub>値は、ケーブルPMD<sub>Q</sub>における基本 requirements をサポートするために明記される。</p>			

表3 - JT-G654.C ファイバの特性

ファイバ規格			
規格	詳細	値	単位
モードフィールド径	波長	1 550	nm
	標準値の範囲	9.5–10.5	μm
	公差	±0.7	μm
クラッド径	標準	125	μm
	公差	±1	μm
コア偏心量	最大	0.8	μm
クラッド非円率	最大	2.0	%
ケーブルカットオフ波長	最大	1 530	nm
マクロバンド損失	半径	30	mm
	ターン数	100	
	1625 nmでの最大	0.50	dB
ブルーフストレス	最小	0.69	GPa
波長分散パラメータ	$D_1 550_{max}$	20	ps/(nm · km)
	$S_1 550_{max}$	0.070	ps/(nm <sup>2</sup> · km)
ファイバPMD係数	最大	(注2)	
ケーブル規格			
規格	詳細	値	単位
損失係数 (注1)	1550 nmでの最大	0.22	dB/km
PMD係数 (注2)	$M$	20	cables
	$Q$	0.01	%
	最大PMD <sub>Q</sub>	0.20	ps/km <sup>1/2</sup>
<p>注1 - この表で述べられる損失係数値は、短いケーブル (例えばジャンパケーブル、インドアケーブル、ドロップケーブル) には適用してはならない。例えば [b-IEC 60794-2-11] は、インドアケーブルの損失係数として1.0 dB/km以下を許容している。</p> <p>注2 - 7.2節により、ケーブル化されていないファイバの最大PMD<sub>Q</sub>値は、ケーブルPMD<sub>Q</sub>における基本 requirements をサポートするために明記される。</p>			

表4 - JT-G654.D ファイバの特性

ファイバ規格			
規格	詳細	値	単位
モードフィールド径	波長	1 550	nm
	標準値の範囲	11.5–15.0	μm
	公差	±0.7	μm
クラッド径	標準	125	μm
	公差	±1	μm
コア偏心量	最大	0.8	μm
クラッド非円率	最大	2.0	%
ケーブルカットオフ波長	最大	1 530	nm
マクロバンド損失 (注4)	半径	今後規定予定	mm
	ターン数	今後規定予定	
	1 550 nmでの最大	今後規定予定	dB
	半径	30	mm
	ターン数	100	
	1 625 nmでの最大	2.0	dB
ブルーフストレス (注2)	最小	0.69	GPa
波長分散パラメータ	$D_{1\ 550\max}$	23	ps/(nm · km)
	$S_{1\ 550\max}$	0.070	ps/(nm <sup>2</sup> · km)
ファイバPMD係数	最大	(注3)	
ケーブル規格			
規格	詳細	値	単位
損失係数 (注1)	1 550nmでの最大	0.20	dB/km
PMD係数 (注3)	$M$	20	cables
	$Q$	0.01	%
	最大PMD <sub>Q</sub>	0.20	ps/km <sup>1/2</sup>
<p>注1 - この表で述べられる損失係数値は、短いケーブル (例えばジャンパケーブル、インドアケーブル、ドロップケーブル) には適用してはならない。例えば [b-IEC 60794-2-11] は、インドアケーブルの損失係数として1.0 dB/km以下を許容している。</p> <p>注2 - 適用するシステムの要求条件により、より高いブルーフストレスが求められる場合がある。</p> <p>注3 - 7.2節により、ケーブル化されていないファイバの最大PMD<sub>Q</sub>値は、ケーブルPMD<sub>Q</sub>における基本要求进行をサポートするために明記される。</p> <p>注4 - 波長1550 nmにおけるマクロバンド損失の規定が有用となるシステムがあるため、今後、本波長における曲げ半径、ターン数、マクロバンド損失が規定される予定である。</p>			

表5 - JT-G654.E ファイバの特性

ファイバ規格			
規格	詳細	値	単位
モードフィールド径	波長	1 550	nm
	標準値の範囲	11.5–12.5	μm
	公差	±0.7	μm
クラッド径	標準	125	μm
	公差	±1	μm
コア偏心量	最大	0.8	μm
クラッド非円率	最大	2.0	%
ケーブルカットオフ波長	最大	1 530	nm
マクロバンド損失	半径	30	mm
	ターン数	100	
	1 625 nmでの最大	0.1	dB
ブルーフストレス	最小	0.69	GPa
波長分散パラメータ (注1)	$D_{1\ 550\max}$	23	ps/(nm · km)
	$D_{1\ 550\min}$	17	ps/(nm · km)
	$S_{1\ 550\max}$	0.070	ps/(nm <sup>2</sup> · km)
	$S_{1\ 550\min}$	0.050	ps/(nm <sup>2</sup> · km)
ファイバPMD係数	最大	(注3)	
ケーブル規格			
規格	詳細	値	単位
損失係数 (注2)	1 550 nmでの最大	0.23	dB/km
PMD係数 (注3)	$M$	20	cables
	$Q$	0.01	%
	最大PMD <sub>Q</sub>	0.20	ps/km <sup>1/2</sup>
<p>注1 - 波長帯1 530～1 625 nmにおいて、波長λにおける波長分散係数D(λ)は、式6-1によって規定される。</p> <p>注2 - この表で述べられる損失係数値は、短いケーブル (例えばジャンパケーブル、インドアケーブル、ドロップケーブル) には適用してはならない。例えば [b-IEC 60794-2-11] は、インドアケーブルの損失係数として1.0 dB/km以下を許容している。</p> <p>注3 - 7.2節により、ケーブル化されていないファイバの最大PMD<sub>Q</sub>値は、ケーブルPMD<sub>Q</sub>における基本 requirements をサポートするために明記される。</p>			



## 付録 I

### システム設計に用いる光ファイバケーブルリンクに関する情報

(この付録は本標準に必須の構成要素ではない)

光ファイバの波長分散、偏波モード分散、伝送損失、および非線形性による伝送制限は、「最悪値」および「統計値」を用いたシステム設計で推定できる。これらのシステム設計は [b-ITU-T G-Sup.39] の 9 章、および 10 章に記述されている。最悪値設計は最大値と最小値を使用した決定論的な手法であり、少数の部品と光ファイバケーブルからなる伝送システムに対して有用である。一方、多数の光ファイバケーブルを含むリンクの場合、その伝送特性は、個々のケーブル長での決定論的な特性だけでなく、連結によるリンクの統計性が考慮されていなくてはならない。光ファイバケーブルに対する要求事項は、6 章、および 7 章に記述されている。

光ファイバケーブルの伝送特性は一定の確率分布をもち、最も経済的なシステム設計を行う際に利用できる。付録 I は様々なパラメータが統計的性質を有することを念頭に読むことが好ましい。

「リンクの特性」、例えば末端間の伝送損失、波長分散、偏波モード分散あるいは非線形性は、光ファイバケーブル以外の要因からも影響を受ける。例えば、接続部、受動的な部品そして敷設などの影響が考えられるが、これらの要因は本標準では規定されていない。伝送損失と波長分散に関する統計的な「リンクの特性」の推定のために、光ファイバリンクの典型値を I.4 節に記載する。システム設計に必要なリンクパラメータの推定は、測定やモデリングなどにに基づき実施される。

#### I.1 損失

リンクの平均損失  $A$  は、以下の式で与えられる。

$$A = \alpha L + \alpha_s x + \alpha_{con} y \quad (I-1)$$

ここで

$\alpha$	リンク内のケーブルの平均損失係数
$\alpha_s$	平均接続損失
$x$	リンク内の接続数
$\alpha_{con}$	コネクタの平均損失
$y$	リンク内のコネクタ数 (既知である場合)
$L$	リンクの長さ

将来のケーブル構成の変更 (接続点の増加、ケーブル余長、経年変化、環境温度の変動など) を勘案し、適切なマージンを設定する必要がある。式 (I-1) には装置のコネクタ損失は含まれていない。I.5 節は光ファイバリンクの損失係数の典型値を示す。実際のシステム設計に使用する損失の割当量には、これらのパラメータの統計的な変動分を考慮する必要がある。

#### I.2 波長分散

ps/nm で表わされる波長分散はケーブルの波長分散係数から計算できる。その際、波長分散はケーブル長に比例するものとし、波長分散係数の符号に留意する (6.10 節参照)。

本標準の光ファイバが 1 550 nm 帯での伝送に使用される場合、なんらかの分散補償が施されることが多い。この時のシステム設計ではリンクの平均分散が使用される。1 550 nm 帯の波長分散は、波長に対する線形性を仮定することで特定でき、波長 1 550 nm における波長分散係数と波長分散スロープ係数を用いて記述できる。

1 550 nm での波長分散係数  $D_{1550}$  と波長分散スロープ係数  $S_{1550}$  の典型値は表 I.1 に記載されている。これらの数値とリンク長さ  $L_{Link}$  を使用して、リンクの波長分散の典型値  $D_{Link}$  は式 (I-2) で計算できる。

$$D_{\text{Link}}(\lambda) = L_{\text{Link}} [D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550)] \quad (\text{ps/nm}) \quad (\text{I-2})$$

### 1.3 群遅延時間差 (DGD)

群遅延時間差 (DGD) とは、特定の波長の、特定の時点における二つの偏波モードの到着時間の差である。DGD は光ファイバケーブルの長手方向でランダムに変動する。そのため、DGD の波長平均である偏波モード分散は本質的に統計値であり、一定の長さあるいは連結された複数の光ファイバケーブルのリンクについて考える場合、偏波モード分散の影響は統計的リンク設計により考慮しなければならない。特定の偏波モード分散係数をもつリンクにおいて、DGD は時間と波長に対しランダムに変化し、その変化はマクスウェル分布に従う。このマクスウェル分布は、リンクの偏波モード分散係数とリンクの長さの二乗根との積で表されるパラメータを用いて記述できる。特定の時点と波長における偏波モード分散がシステムに及ぼす影響は、その時点と波長における DGD に依存する。DGD に対するシステム要求と許容範囲、即ち偏波モード分散係数に対するシステム要求と許容範囲は [b-IEC/TR 61282-3] に記載されており、[ITU-T G.650.2] の付録 IV にその要約が記述されている。DGD の許容範囲の導出では以下の 4 種類のパラメータを考慮する。

注 - 光ファイバケーブル以外の構成要素による影響は [b-IEC/TR 61282-3] に記述されている。

参照リンク長さ  $L_{\text{Ref}}$  : 最大 DGD と確率分布を検討するリンクの全長。より長いリンクに対しては、DGD の最大値に  $L_{\text{Ref}}$  に対する実際の長さ  $L$  の比率の 2 乗根  $\sqrt{L/L_{\text{Ref}}}$  を乗じる。

典型的なケーブル長の最大値  $L_c$  : リンク内の典型的な個々のケーブルが  $L_c$  よりも短いこと、あるいは偏波モード分散係数の分布を決定する際に測定したケーブル長が  $L_c$  よりも短いことをもって最大値であることを保証する。

最大群遅延時間差  $DGD_{\text{max}}$  : システム設計に使用する DGD の値。

最大確率  $P_F$  : 実際の DGD が  $DGD_{\text{max}}$  を超える確率。

### 1.4 典型値

I.1 節と I.2 節で述べた損失係数と波長分散係数の海底および陸上システムにおける典型値を、表 I.1 および I.2 にそれぞれ示す。I.3 節で述べた最大 DGD のガイドラインを表 I.3 に示す。表 I.3 の最大 DGD はリンク内のあらゆる構成要素が含まれることを前提としている。

表 I.1 - 海底システムにおけるリンクの損失係数と波長分散係数の典型値

リンク係数		典型値
損失係数 (注)	1 550 nm	0.25 dB/km
	1 625 nm	今後、規定予定
波長分散係数	$D_{1550}$	今後、規定予定
	$S_{1550}$	今後、規定予定
注 - [b-ITU-T G.957] および [b-ITU-T G.691] で使用されているリンク損失係数に対応する。		

表 I.2 - 陸上システムにおけるリンクの損失係数と波長分散係数の典型値

リンク係数		典型値
損失係数 (注)	波長	代表的リンク値
	1 550 nm	今後、規定予定
	1 625 nm	今後、規定予定
波長分散係数	$D_{1550}$	今後、規定予定
	$S_{1550}$	今後、規定予定

注 - [b-ITU-T G.957] および [b-ITU-T G.691] で使用されているリンク損失係数に対応する。

表 I.3 - 群遅延時間差 DGD

統計的偏波モード分散の最大値 最大 PMDQ (ps/km <sup>1/2</sup> )	リンク長さ (km)	最大 DGD (ps)	伝送速度
規格なし			≤ 2.5 Gbit/s
0.5	400	25.0	10 Gbit/s
	40	19.0 (注)	10 Gbit/s
	2	7.5	40 Gbit/s
0.20	3000	19.0	10 Gbit/s
	80	7.0	40 Gbit/s
0.10	> 4000	12.0	10 Gbit/s
	400	5.0	40 Gbit/s

注 - 10 Gbit Ethernet システムにも適用可能。

注 - 0.10 ps/km<sup>1/2</sup>かつ> 4 000 km の条件以外では 10 km のケーブル長と 6.5 × 10<sup>-8</sup> の確率レベルを仮定。

### 1.5 非線形係数

非線形性による伝送特性の劣化は波長分散と非線形係数  $n_2/A_{\text{eff}}$  ( $n_2$  は非線形屈折率、 $A_{\text{eff}}$  は実効断面積) の相互作用により生じる ([b-ITU-T G.663] および [ITU-T G.650.2] 参照)。典型値はシステムの設定により異なり、非線形係数の規格値と標準測定法は定められていない。

### 1.6 統計的手法の一例

十分なリンクのランダム性が仮定できる場合 (例えば、多数の多心ケーブルがランダムに接続されている場合)、統計的リンク設計を用いることができる。ただし、統計的なリンク設計が適用可能な範囲に関しては更なる検討が必要である。例えば、あるリンクが限定された母集団の光ファイバから製造されたケーブルで構成されている場合、ランダム性は限定されており、合理的なシステムマージンを得るためには最悪値設計が好ましい。

統計的システム設計の一般的な手法は、[b-ITU-T G-Sup.39] に記載されており、以下ではファイバあるいはケーブルパラメータの統計的な上限を導くひとつの方法を紹介する。

始めに統計分布を生成する。N 本のケーブルから構成されるリンクを考え、i 番目のケーブル長さを  $L_i$ 、そのケーブル中の特定のファイバ特性の単位長さあたりの値を  $x_i$  とする。この時、リンク全体のファイバ特性  $x_N$  は式 (I-3) で記述できる。

$$x_N = \frac{\sum_{i=1}^N L_i x_i}{\sum_{i=1}^N L_i} = \frac{1}{L_{\text{Link}}} \sum_{i=1}^N L_i x_i \quad (\text{I-3})$$

もし全てのケーブルがある値  $L_{\text{cab}}$  よりも短く、かつ連結するケーブル数の最小値が  $M = L_{\text{Link}}/L_{\text{cab}}$  で表される場合、 $L_i = L_{\text{cab}}$  として式 (I-3) の式 (I-4) で置換できる。

$$x_N \leq x_M = \frac{L_c}{L_{\text{Link}}} \sum_{i=1}^M x_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \quad (\text{I-4})$$

連結されたリンクパラメータ  $x_M$  の変動量は、平均化の効果により、個々のケーブルの特性  $x_i$  の変動量よりも小さくなる。

ひとたびファイバ特性の確率分布を生成してしまえば、連結されたリンクのファイバ特性の確率密度  $f_{\text{Link}}$

は、特段の仮定を置くことなくモンテカルロ法により導出することができる。この方法では、ファイバ特性の母集団から繰り返しサンプリングを行うことで、リンク形成のプロセスを模擬している。

十分に多いサンプルのファイバ特性を測定することで、有用な特性分布を得ることができる。このデータは連結されたリンクのファイバ特性を計算するために使用される。

計算は測定されたファイバ特性から  $M$  個の値をランダムに選択し、式 (I-4) に従ってそれらを加算していくことで実施する。計算された結果 (例えば、損失値) は、他のランダムサンプリングから導かれた結果と併せて表あるいはヒストグラム内に配置される。この計算プロセスは、十分な頻度のヒストグラムが生成されるまで繰り返される。ガウス近似などにヒストグラムの補完を行わない場合、少なくとも  $10^4$  個以上の計算結果を収集する必要がある。

中心極限定理により、リンクにおけるファイバ特性の統計値ヒストグラムは、最小二つのパラメータで記述される分布に収束する傾向にある。そのため、ヒストグラムはサンプルサイズよりも小さな確率水準の、外挿可能な分布で近似することができる。二つのパラメータは確率分布の二つの側面、即ち、中心値と中心値に対する分散を表している。

数値計算によるアプローチのみで  $10^{-3}$  の確率水準  $Q$  を得るためには、モンテカルロ法で少なくとも  $10^4$  個以上のサンプルを得る必要がある。ひとたびこの計算が完了すると、累積確率密度関数からの内挿によって損失あるいは波長分散の分布を得ることが出来る。

上に例示された手法の適用性については更なる検討を有する。

## 参考文献

- [b-ITU-T G.663] Recommendation ITU-T G.663 (2011), Application related aspects of optical amplifier devices and subsystems.
- [b-ITU-T G.691] Recommendation ITU-T G.691 (2006), Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers.
- [b-ITU-T G.692] Recommendation ITU-T G.692 (1998), Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.
- [b-ITU-T G.696.1] Recommendation ITU-T G.696.1 (2010), Longitudinally compatible intra-domain DWDM applications.
- [b-ITU-T G.957] Recommendation ITU-T G.957 (2006), Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy.
- [b-ITU-T G.959.1] Recommendation ITU-T G.959.1 (2016), Optical transport network physical layer interfaces.
- [b-ITU-T G.973] Recommendation ITU-T G.973 (2016), Characteristics of repeaterless optical fibre submarine cable systems.
- [b-ITU-T G.973.1] Recommendation ITU-T G.973.1 (2009), Longitudinally compatible DWDM applications for repeaterless optical fibre submarine cable systems.
- [b-ITU-T G.973.2] Recommendation ITU-T G.973.2 (2011), Multichannel DWDM applications with single channel optical interfaces for repeaterless optical fibre submarine cable systems.
- [b-ITU-T G.977] Recommendation ITU-T G.977 (2015), Characteristics of optically amplified optical fibre submarine cable systems.
- [b-ITU-T G-Sup.39] Supplement ITU-T G-Sup.39 (2016), Optical system design and engineering considerations.
- [b-IEC 60794-2-11] IEC 60794-2-11:2012, Optical fibre cables – Part 2-11: Indoor optical fibre cables – Detailed specification for simplex and duplex cables for use in premises cabling.
- [b-IEC/TR 61282-3] IEC/TR 61282-3:2006, Fibre optic communication system design guides – Part 3: Calculation of link polarization mode dispersion.