

光ファイバとは？

光ファイバとは、“光を導く細い繊維”という意味であり、光が伝搬する“コア”と呼ばれる部分と、その周辺を覆う同心円状の“クラッド”と呼ばれる部分の2種類の透明な誘電体（ガラスやプラスチックのように導電性のない物質）から構成されています。クラッドの屈折率をコアのそれよりも少し（0.2～3%）小さくすることにより、光の全反射現象を利用して、光信号をコアの中に閉じこめて伝送するものです。

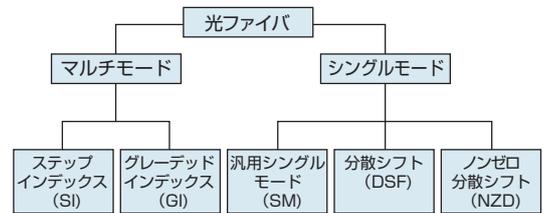
光ファイバは、髪の毛ほどに細いといわれていますが、これは、最も一般的な光ファイバでクラッドの外径が125 μm （0.125mm）であり、光を伝えるコアは、数～数十 μm （ μm は10⁻³mm）とさらに細いことをいうものです。これらの値は、必要とする伝送特性や機械特性などから考慮して決められるもので、光ファイバは優れた伝送特性に加え、細くて軽いといった特長を兼ね備えています。



光ファイバの種類

光ファイバ中での光の伝搬の仕方には幾通りかあり、それぞれをモードといいます。複数のモードを通す光ファイバをマルチモード（多モード）光ファイバ（Multi Mode optical fiber：MM）といいます。その中でもコア内の屈折率分布が一樣である光ファイバをステップインデックス（SI）型光ファイバといい、コア内の屈折率分布がゆるやかに変化した光ファイバをグレーデッドインデックス（GI）型光ファイバといいます。インデックスとは屈折率（refractive index）を指しています。

コア径を小さくしていくと伝搬できるモードが減っていき、ついには基本モードだけが残ります。このように一つのモードのみを通す光ファイバをシングルモード（単一モード）光ファイバ（Single Mode optical fiber：SM）といいます。



マルチモードファイバ

●ステップインデックス型マルチモード光ファイバ (SI)

コアの屈折率分布が一樣であり伝送帯域が他のファイバに比べて低く、一般の情報通信用途には用いられていません。現在ではコア径を200 μm と大きくし、受発光モジュールと接続しやすくした(安価にした) 100m程度のデータ通信や、レーザー光のデリバリーケーブルなどの光パワー伝送などに用いられています。

●グレーデッドインデックス型マルチモード光ファイバ (GI)

コアの中心の屈折率が高く、外側に向かってゆるやかに低くなるようにコアの屈折率分布を調整したマルチモード光ファイバです。コアの中心近くを進む光より、コアの外側近くで全反射して進む光は伝搬距離が長くなりますが、伝搬速度が屈折率に反比例する特性を利用し、屈折率分布を最適化して、全モードの伝搬時間を同一に近づけることで光信号のモード分散を小さくしたものです。標準的なコア径は、50 μm （日本で主流）、または、62.5 μm （北米で主流）であり、シングルモードファイバより伝送損失が大きいですが、対応するネットワーク機器が安価なためLANなどの短距離での通信用途として活用されています。

シングルモードファイバ

●汎用シングルモード光ファイバ (SM)

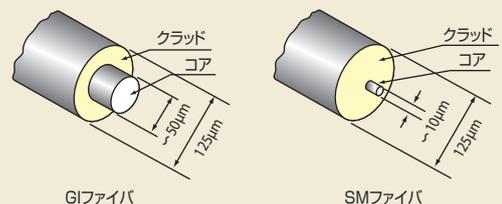
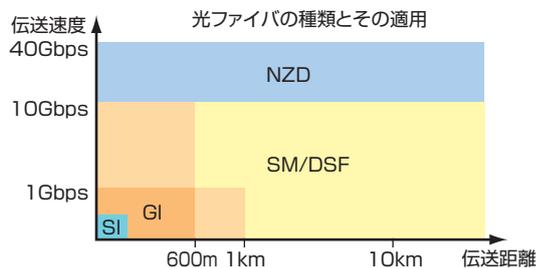
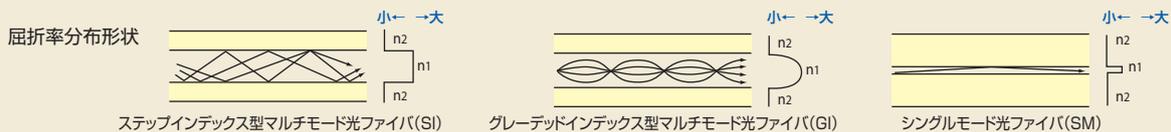
コア径を小さくし、基本モードしか通らなくした光ファイバです。波長1.31 μm での波長分散がゼロとなるように設計されたもので、1.31 μm での伝送特性に優れています。単一モードなので、モード分散による光信号の歪みはありません。そのため、高速・大容量のシステム・幹線網に適しています。

●分散シフトシングルモード光ファイバ (DSF)

石英系シングルモード光ファイバの伝送損失が波長1.55 μm 帯で最小であることを生かして大容量・高速度での通信を行うため、波長分散も1.55 μm 帯で最小になるように屈折率分布形状を変え、ゼロ分散波長を1.55 μm 帯にシフトさせた長距離伝送用の光ファイバです。

●ノンゼロ分散シフトシングルモード光ファイバ (NZD)

ゼロ分散波長を1.55 μm 帯から少し外にシフトさせ、波長分散の傾きを抑えることで、広帯域での安定した伝送を可能とした光ファイバです。大容量波長分割多重 (WDM) 長距離伝送や、メトロ、地域などの長距離ネットワークに適しています。

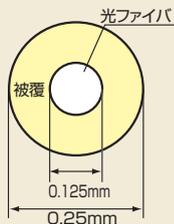


光ファイバ心線

光ファイバは線引きされる際に、保護のための被覆が施されます。これを光ファイバ素線といて、光ファイバの基本単位となります。素線のままでは保護が十分ではないため、さらに保護被覆を施します。この状態を心線といい、以下の3種類に大別できます。

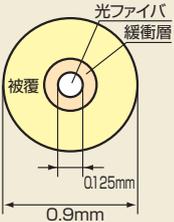
●0.25mm光ファイバ素線 (UV心線)

光ファイバの上に紫外線硬化型樹脂 (UV樹脂) を被覆し、250 μ m (0.25mm) の外径としたものです。



●0.9mm光ファイバ心線

光ファイバの上にプラスチック樹脂 (ポリアミドなど) を被覆し、0.9mmの外径としたものです。光ファイバ素線と比較すると強く、取り扱い性に優れており、主に光コードや、SLタイプおよびMLタイプのLAN用少心ケーブルに使用されています。



●テープ心線

0.25mm光ファイバ素線を平行に並べて、紫外線硬化型樹脂 (UV樹脂) を一括被覆したものです。この心線は溝の中に納めてケーブルを構成する (テープスロット構造) のためのもので、これにより高密度な光ファイバ実装を可能にします。通常2心、4心、8心タイプがあり、テープ心線を一括で融着接続できる融着機を用いることにより、作業時間の大幅な短縮が可能です。



光ファイバケーブルの偏波モード分散 (PMD)

長距離伝送に用いられるシングルモード型光ファイバケーブルにおいて、製造時の構造などにより光ファイバ中の直交偏波モード成分間に伝搬時間差が発生する現象を偏波モード分散 (PMD) と呼びます。

ただし、PMDはケーブルの状態によってランダムに変動するため、PMDの分布確率を考慮に入れた指標としてPMD₀が用いられています。

ITU-Tでは、光ファイバケーブルのPMD₀として以下の値を推奨しています。

	標準仕様 光ファイバケーブル	低PMD 光ファイバケーブル
PMD ₀	0.5ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ITU-T G.652A/C 準拠	0.2ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ITU-T G.652B/D 準拠

光ファイバケーブルの最適設計によりPMD₀を0.2ps/ $\sqrt{\text{km}}$ 以下となるように管理することで将来の超高速通信 (100Gbps) への拡張が可能になります。

光ファイバ接続についての基礎知識

1. 光ファイバ接続技術とは、大まかに分けると下記の通り分類されます。

①永久接続

a. 融着接続

b. メカニカルスプライスによる接続

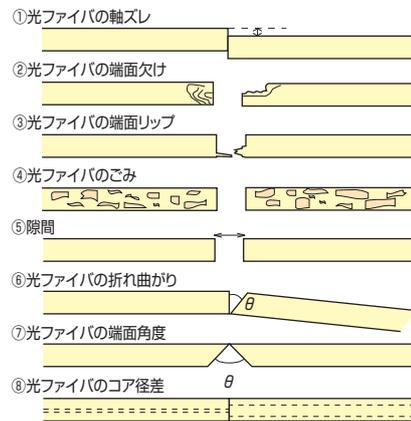
②繰り返しの着脱可能な方法

a. コネクタ接続

②のコネクタ接続は、光サービスの運用や、保守での切り替えが必要な接続点で主に使用され、それ以外は通常①の永久接続が適用されます。

2. 光ファイバ接続での損失発生

光ファイバ同士を突き合わせ、接続する場合、双方の光ファイバのコアの部分を正確に対向させ、完全に接続する必要があります。これが完全でない場合、一方の光ファイバコアから出射された光の一部が他方の光ファイバコアに入射できず、クラッド内に放射され、これが接続損失となります。接続損失要因は以下の通りです。



3. 融着接続の種類と原理

融着接続方式は以下の2種類に分類されます。

①固定V溝によるクラッド調心

②コア調心方式

調心方式

固定V溝によるクラッド調心

固定V溝外径調心方式 (イメージ図)

- 光ファイバをV溝に設置して光ファイバの外表面を基準にして合わせる方式。コアとクラッドが同心であることを前提とする。
- 光ファイバ熔融軟化すると表面張力により光ファイバ外表面が一致する。

- ①V溝に光ファイバをセット
- ②予加熱融着 (先が丸くなる)
- ③表面張力効果により外表面一致
- ④融着接続

コア位置を計測して、V溝を駆動し、ファイバを調心する

駆動V溝コア調心方式 (イメージ図)

- 光ファイバの側面からクラッドを通してコアの位置を観察して軸合わせする方式。
- 加熱熔融部が光ファイバの突き合わせ部の狭い箇所限定される狭域放電を利用し、表面張力による外表面一致を行わない。

- ①V溝に光ファイバをセット
- ②コアの軸スレが無い位置に調心
- ③予加熱融着 (先が丸くなる)
- ④融着接続

線路設計の基本

1. ルート選定

ルートを選定するにあたり、コストパフォーマンスから見て工事費も含め、最適なものを選定する必要があります。光ケーブルの接続箇所、分岐数、回線のセキュリティ、既設設備の利用、メンテナンス性、布設工事の難易度などを考慮し、バランス良くコスト比較をする必要があります。

チェック項目

一般的にチェック項目としては以下のものがあげられます。これらの点を勘案しながらルートを選定をしますと、コスト的に見て比較的妥当な線路設計となります。

1 光ケーブルの太さ・心数はどれくらいか。

光ケーブルの心数は現段階の必要数だけではなく、将来の需要増の分も見込んで、決定する必要があります。システム機器の方は世代交代も激しく、個別のバージョンアップも可能ですが、線路を張り替えるのは大変なので、現状G心線ならばSM心線をとように将来対応の心線を複合することも検討する必要があります。

光ケーブルの太さは心数が決まれば必然的に決まります。

2 光ケーブルの接続箇所・分岐数はどれくらいか。

接続箇所はケーブルの分岐場所を基本として、後は条長とメンテナンス性により決めます。

3 回線のセキュリティをどのレベルで考えるか。

一般的には光ファイバを使用するようなシステムは、多重化度が高く、多くのデータを搬送するものが多いため、セキュリティにはかなり気を配る必要があります。そういった意味で2重ルートにする必要があるかどうか検討対象になります。しかし、低コスト性とは相反する問題であり、その妥協点をどこに置くかがポイントでもあります。

セキュリティ	地中管路単独布設>トラフ・ダクト>架空
低コスト性	地中管路単独布設<トラフ・ダクト<架空

4 トラフ、ダクト、管路、電柱など既設のもので利用できるものがあるか。

既設の設備をできるだけ利用することによって工事費を節約します。場合によっては、ルート長が長くなっても、既設の設備を利用の方が安いこともあります。

5 メンテナンス性はどうか。

光ファイバケーブルもメンテナンスが必要ですので、その作業時に苦勞をしないように、接続箇所の位置などを考える必要があります。

6 布設工事の難易度はどの程度か。

架空、地中、宅内など、場所によって布設工事の難易度は変化しますが、可能な限り楽な場所を選ぶことが大切です。

2. 伝送損失配分

一般的には以下の方法で伝送損失配分を行います。

$$a_T = a_0 \times (\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \dots + \ell_{n+1}) + (a_1 \times n) + (a_2 \times m)$$

a_T : 区間伝送損失 (dB)
 a_0 : ケーブルの伝送損失 (dB/km)
 a_1 : 融着接続損失
 a_2 : コネクタの結合損失
 ℓ : ケーブルの長さ (km)
 n : 融着接続数 (箇所)
 m : コネクタ接続数 (箇所)

* G1型ファイバの場合は上記の他にシステム結合損失として数dB程度マージンを取ってください。

3. 条長決定

基本的には接続箇所数を減らすために、ケーブル条長は長い方が良いのですが、布設工事の難易度により決定します。

一般的には1kmを基準にして、条件の悪い所は短めに設計します。クロージャなど接続部のメンテナンス性も勘案する必要があります。

4. ケーブル選定方法

概略のケーブル選定方法については、布設環境によってケーブルを使い分けるのが賢明です。

① 地中管路・屋外ダクトの場合	標準型ケーブル (WB4TME、SLタイプ)
② 架空布設の場合	SZ型ケーブル (WB4TSZE) 自己支持型ケーブル (SSW、SSDタイプ)
③ 直接埋設の場合	外装付きケーブル (MAZEタイプ)

工 事

1. 布設工事

注意事項

1 運搬

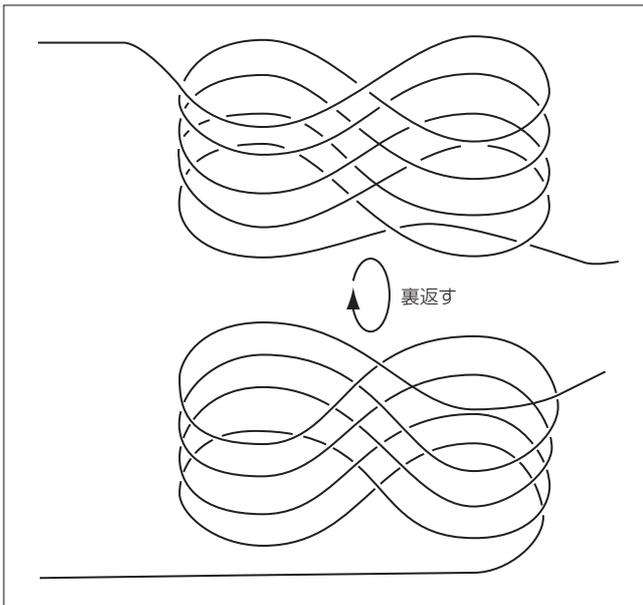
光ファイバケーブルは、通常の通信ケーブルと同様に取り扱えます。ただし、積下し時にトラックの荷台などからつき落とすなどの乱暴な取り扱いは避けてください。また、ドラムを転がす場合は、側面板に印刷されている回転方向を守ってください。

2 保管

光ファイバケーブルは、通常の通信ケーブルと同様に取り扱えます。ただし、湿気の進入を防ぐため、ケーブルの両端にキャップをして密封してください。

3 最大許容張力および許容曲げ半径

光ファイバケーブルは最大許容張力および許容曲げ半径が規定されています。必ず規格値を守ってください。将来、ケーブルの寿命に重大な影響をおよぼす可能性があります。1回の布設では最大許容張力を守れない場合は、両端振り分け布設してください。この場合は下図の8の字取りを使用し、ケーブルに捻じりが入らないように注意してください。



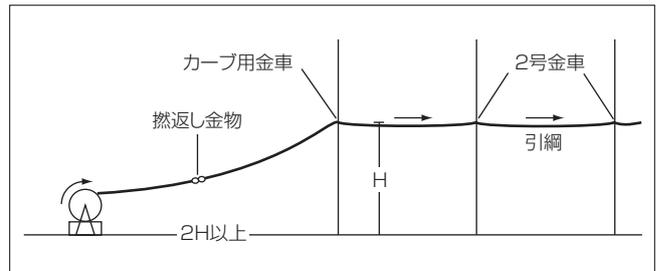
4 引綱

引綱はロープ、ワイヤなど何でも良いですが、ケーブルに捻じりが入らないように撚り返し金物を必ずつけ、引張端を付けた上で布設速度は20m/分以下で行ってください。

架空布設

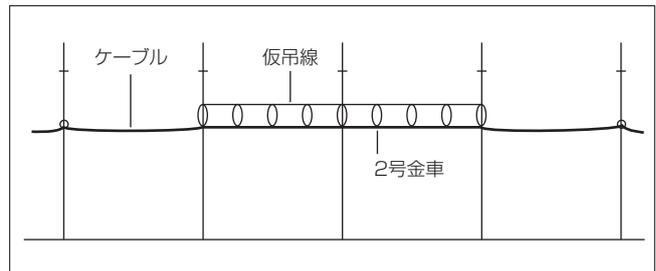
1 通常の布設

下図のように電柱ごとに金車をかけて引綱を通し、ウィンチまたは人力で引くのが一般的です。



2 電柱間に障害物がある場合

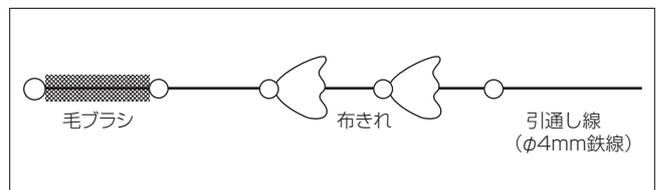
電柱間に障害物がある場合は、下図のように電柱間に仮にロープなどを延線し2号金車を適当な間隔に取り付け、ケーブルの弛みを防止します。また、高圧引下線、低圧線、電話線などの障害物がある場合は防護管などにより保護します。



管路布設

1 線通し

引通し線を鉄線に置き換えた後、下図のような清掃具を取り付け、管路内を引通して清掃してください。その後、引綱に置き換えて布設をします。



2 張力の計算方法

a. 直線水平部の布設

直線水平ルートに先端引きで布設する場合の張力Tは、ケーブルと管路などの摩擦係数およびケーブル自重から、次の式で求められます。

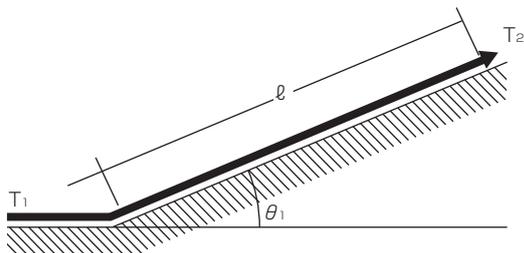
$$T = 9.8 \mu W \ell$$

T : (N)
 W : 1m当りのケーブル質量 (kg/m)
 ℓ : 布設長 (m)
 μ : ケーブルと管路間の摩擦係数
 (通常は0.5として計算します)

b. 直線傾斜部の布設

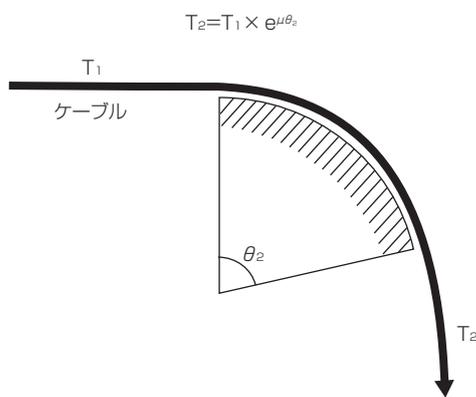
直線傾斜ルートに先端引きで布設する場合の張力Tは、ケーブルと管路などの摩擦係数およびケーブル自重から、次の式で求められます。

上り坂の場合
 $T = 9.8W \ell (\mu \cos \theta_1 + \sin \theta_1)$
 θ : ルートの傾斜角度 (ラジアン)
 下り坂の場合
 $T = 9.8W \ell (\mu \cos \theta_1 - \sin \theta_1)$



c. 水平曲線部への布設

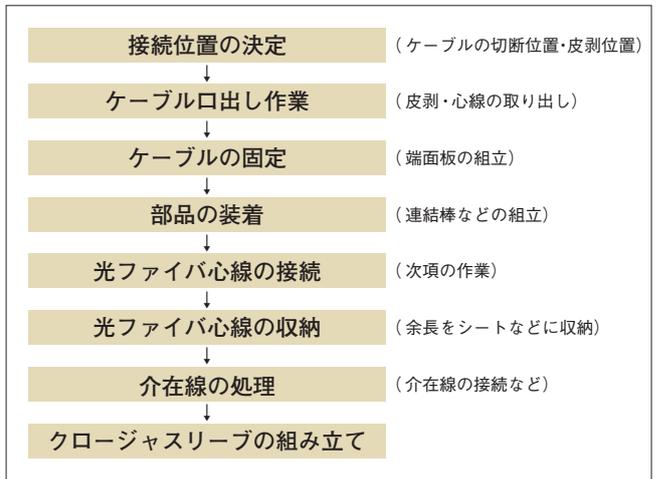
水平曲線ルートに先端引きで布設する場合の屈曲部前後の張力T₁とT₂との間には、次の関係があります。



2. 接続工事

接続クロージャ

ケーブルを接続するには一般的にクロージャを使用します。一般的な手順は以下の通りです。細かい点はクロージャの種類によって異なりますので、それぞれの製品の組立工法書を参照ください。



■クロージャの防塵防水特性

防塵防水特性に関する保護等級について、「JIS C 0920」に規定されるIPコードで表示しています。

表示方法 IP□□ 表示例：IPX7 (防水性7等級の場合)
 水の浸入に対する保護等級 (防水性)
 外来固形物に対する保護等級 (防塵性)
 規定を省略する場合は「X」とします。

水の浸入に対する保護等級 (防水性)

保護等級	内容
0級	特に保護がされていない
1級	鉛直から落ちてくる水滴による有害な影響がない (防滴I形)
2級	鉛直から15度の範囲で落ちてくる水滴による有害な影響がない (防滴II形)
3級	鉛直から60度の範囲で落ちてくる水滴による有害な影響がない (防雨形)
4級	あらゆる方向からの飛まつによる有害な影響がない (防まつ形)
5級	あらゆる方向からの噴流水による有害な影響がない (防噴流形)
6級	あらゆる方向からの強い噴流水による有害な影響がない (耐水形)
7級	一時的に一定水圧の条件に水没しても内部に浸水することがない (防浸形)
8級	継続的に水没しても内部に浸水することがない (水中形)

外来固形物に対する保護等級 (防塵性)

保護等級	内容
0級	特に保護がされていない
1級	直径50mm以上の固形物が中に入らない (握りこぼし程度を想定)
2級	直径12.5mm以上の固形物が中に入らない (指程度を想定)
3級	直径2.5mm以上のワイヤーや固形物が中に入らない
4級	直径1mm以上のワイヤーや固形物が中に入らない
5級	有害な影響が発生するほどの粉塵が中に入らない (防塵形)
6級	粉塵が中に入らない (耐塵形)

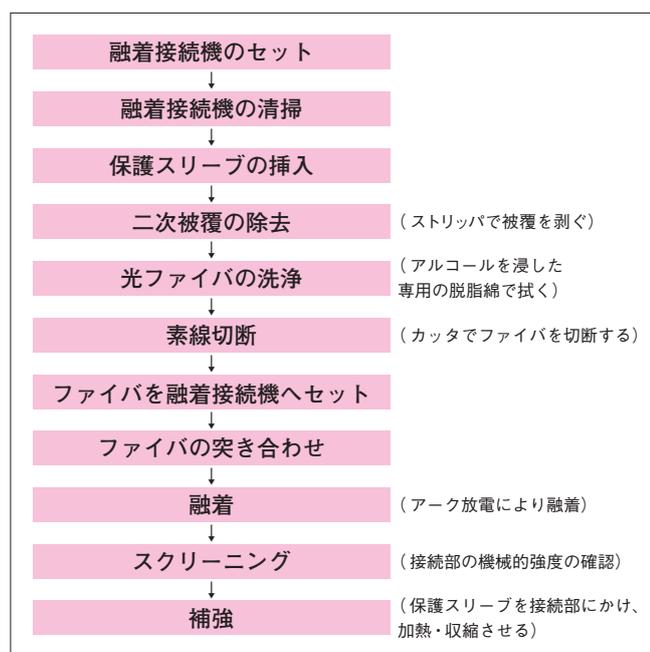
コネクタ接続

光ファイバを光機器と接続する場合、もしくは光ファイバ同士を容易に切り離せる状態で接続する場合はコネクタを使用します。コネクタには用途によって色々種類がありますので、使い分けてください。一般的には、コネクタの現場付け作業は困難なため、工場付けした光コードと光ケーブル側心線とを融着接続し、成端箱に収めます。

融着接続(前記フローの光ファイバ心線の接続の部分)

光ファイバ心線の接続には通常、融着法を使用します。これは融着接続機でアーク放電を起こし、ガラスを融かし接着するものです。融着部分はガラスがむき出しになり、機械的強度が弱くなっているためその保護のために保護スリーブをかけます。融着接続機はその用途別に色々なものがありますので、使い分けてください。

融着機について詳しくは、P.6~9をご参照ください。



光ファイバ洗浄前の注意事項

- 純度が低いアルコールを使うと水分が光ファイバ上に残ります。
- 普通の脱脂綿ですと紙塵が光ファイバ上に残るので専用の脱脂綿(ベンコット)を使います。
- 洗浄は、光ファイバの軸上に平行に脱脂綿を3~4回移動させて行います。このとき、「キュッ、キュッ」と音が出るくらい拭いてください。ただし光ファイバを曲げながら、洗浄すると簡単に折れてしまいますので注意が必要です。
- テープ心線の場合、心線同士が重なっている場合があるので、光ファイバの先端を指で弾いて、ばらします。先端以外の部分に触ると、指の脂がファイバに付着して、接続の品質に悪影響を与えるので注意が必要です。
- 一度使用した脱脂綿は再利用せず、光ファイバの洗浄にはその都度新しい脱脂綿を使ってください。

- 【使うもの】
- 純度99%以上の工業用アルコールと塵が出にくい専用の脱脂綿



■光ファイバ融着接続機と工具のメンテナンス

光ファイバ融着接続機や工具は非常に精密な機械です。小さな汚れにも影響を受けてしまうので、清掃を実施するなどのメンテナンスが必要です。トラブルが発生した時に処置をするのではなく、トラブルの発生を予防するために日常的なメンテナンスを実施することが重要です。

ここでは融着接続機や工具の具体的なメンテナンス方法をご紹介します。

●V溝の清掃

ファイバガイドに加工された溝は断面から見るとV字型になっているのでV溝と呼ばれています。V溝に汚れが付着すると光ファイバの軸がずれてしまい、軸ズレエラーが発生したり接続損失が悪化します。V溝の清掃は綿棒にアルコールをつけて行います。光ファイバを押さえるクランプの接地面も同時に清掃してください。予め前処理をした光ファイバの端面を使用するとより効果的です。



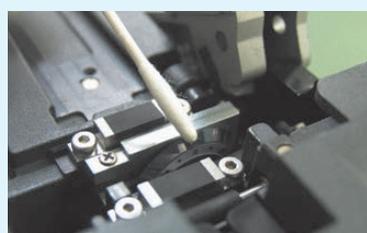
●ミラー、レンズの清掃

風防の内側などにあるミラーは、CCDカメラに向かって照射しているLEDランプの光を反射させています。繰り返し融着接続をしていると、放電の熱や溶けた光ファイバの成分がミラーを徐々に汚していきます。ミラーやレンズが汚れていると、画面に異物が映ったり、暗くボヤけたりして画像処理が正しく行えません。ミラーやレンズは脱脂綿や綿棒にアルコールをつけて清掃してください。



●光ファイバカッター切断刃の清掃

光ファイバカッターの切断刃に汚れが付着していると、切断不良の原因となります。綿棒にアルコールをつけて切断刃を清掃してください。切断刃が磨耗して使用できなくなった場合は、止めネジを緩めて回転させてください。切断刃には番号が表記されていて数字が1つ大きい方へ回転させて止めネジを締めて固定します。また光ファイバカッターは精密な工具ですので落下などに注意して使用してください。



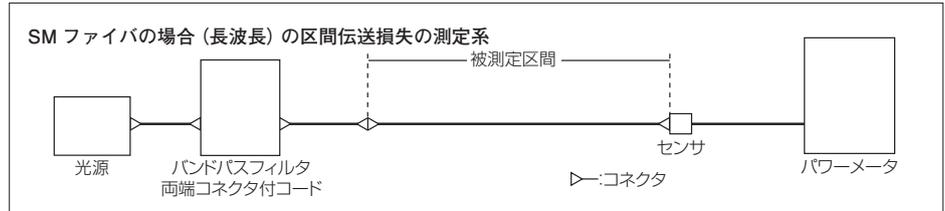
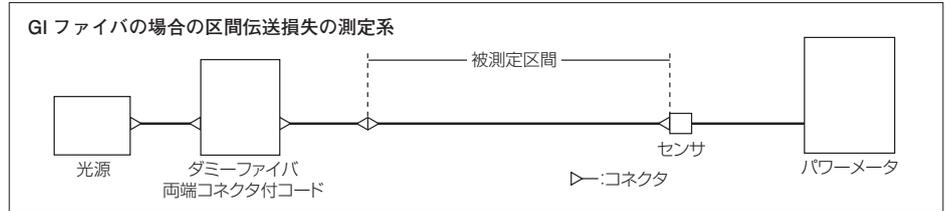
3. 測定

光ファイバ線路が正常に接続されたかどうかを保証するために、通常、以下の測定試験のどちらか、もしくは両方を行います。メタルケーブルにおける断線・混線試験、絶縁抵抗試験に相当するものです。

光源・パワーメータによる試験

光ファイバ線路の端から端までどの程度の伝送損失があるかを測定するもので、この測定によりケーブル損失および接続工事の良否を判定します。

一般的には右図のような測定系を使用します。



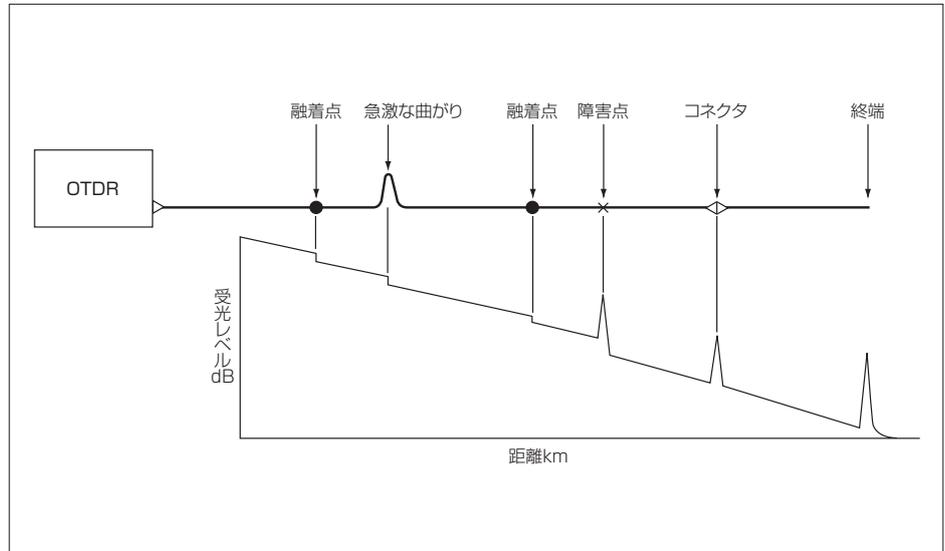
パルス試験（OTDR）

1 原理

光ファイバの片端からパルスを入れると、パルスは散乱・吸収による損失で強度を減じながらファイバの長手方向に伝わっていきますが、その一方でレーリー散乱・破断点や光ファイバの出口側の鏡面効果などの原因で反射されて次々に入口側に返ってきます。この戻りパルス光を測定し、データを平均化してブラウン管に表示させます。この波形観測により、接続損失、伝送損失、線路長、障害位置などがわかります。

2 測定例

線路の測定例を右図に示します。



保 守

1. 予防保全

光ファイバケーブルを使うシステム（かなりの高速のLANなど）は、通常その伝送データ量が多いので、障害が起きた時の被害は相当なものと予想されます。したがって、その保守は日常から気を配っておく必要があります。

光ファイバケーブルの日常保守としては、線路監視システム、ガス保守・警報線などの保守システムの活用に加え、定期点検として巡視・測定などを行ってその記録を採ると共に、必要に応じて整備を行う必要があります。

2. 障害復旧

万一、回線障害が発生した時は、障害が機器側か線路側か、コネクタ部で切り分けて確認します。機器側であれば、モジュールの取替えなどを行います。線路側であれば、測定の項で述べたパルス試験を行い、概略の障害位置を割り出し、その部分の外観などを観察し障害位置を特定して、ケーブルの取替え・割り入れなどで復旧します。

迅速な復旧を行うため、回線重要度によっては、復旧用の予備品を常備することも必要です。

■光測定器OTDRでの接続損失はなぜ両方向からの測定が必要なのですか？

図1は一方向から測定したOTDRの波形画面の一例で、(1)が融着接続点、(2)、(3)はコネクタ接続の反射点です。(1)のdBの段差は、融着接続した箇所での光パワーの損失となりますが、この段差には融着接続損失以外に後方散乱光の差が含まれています。この後方散乱光の差は、接続される光ファイバ自身がある強さの後方散乱光を持っており、接続部でその差が現れたものです。これらは同一メーカーの光ファイバでも製造ロットにより異なるもので、必ず生じるものです。

したがって、後方散乱光の差をE、融着接続損失をTとすると、(1)の段差Mは

$$M \text{ (dB)} = T + E$$

となり、融着接続損失Tを得るために、後方散乱光の差Eを除く必要があることが判ります。

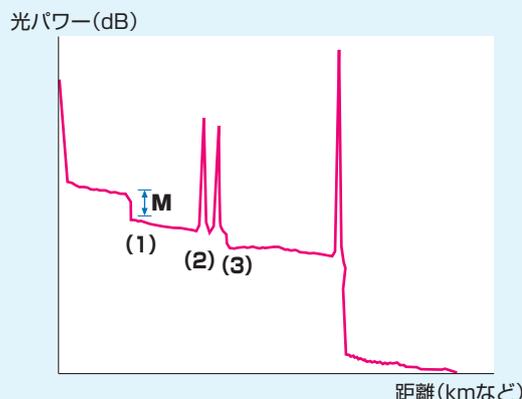


図1：OTDRの波形

次に実際の計算方法を説明していきます。接続された各光ファイバの後方散乱光の強さをNo.1、No.2、大きさをNo.1 < No.2とすると、図2の関係が成り立つことが判ります。

後方散乱光の強さ No.1 < No.2

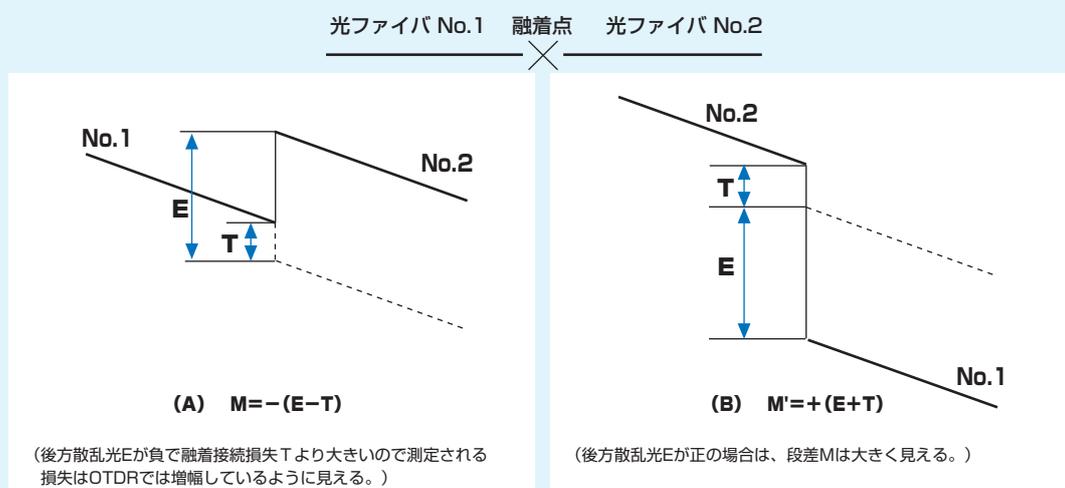


図2：後方散乱光の強さがNo.1 < No.2の場合（OTDRは常に左側のファイバ端に接続されています。）

●まとめ

図2より融着接続損失Tを得るためにMとM'の平均を取れば良いことが判ります。つまりOTDRで光ファイバ接続部の損失を両方向から測定しないと、本当の融着接続損失は得られないこととなります。（後方散乱光の差Eは、両方向から測定されたとき、正負が逆ですが大きさが同じなので、平均化すると相殺されます。また、後方散乱光の強さがNo.1 > No.2の場合でも、考え方は同じです。）

$$\text{接続損失} = \frac{(\text{段差 } M + \text{段差 } M')}{2} \text{ (dB)}$$