

《OTDRの基礎技術①》 光測定器の種類とOTDR測定原理

アンリツ株式会社 計測器営業本部 営業推進部 新名 康代

私たちの生活に不可欠なものとなっているブロードバンドサービス。この快適な情報化社会を実現するため日本のF T T H（Fiber to the Home）化を始めとし、携帯電話のバックボーンなどあらゆる通信線路で光ファイバが用いられ、光通信ネットワークの測定需要はますます増えています。

この連載では、光ファイバ／光通信ネットワークの測定作業に威力を発揮するO T D R（Optical Time Domain Reflectometer：光パルス試験器）について、その使い方、使用時の注意、便利な測定機能などを織り交えながらご説明していききたいと思います。

第1回は光測定器の種類とO T D Rの測定原理についてご紹介します。

1. 光測定器の種類

光ファイバ／光通信ネットワークの測定というと、大きく分けて3種類の測定器を使用します。ひとつは、光ファイバ全体の損失を測定できる光源と光パワーメータです。これは一番基本的な測定手法で、対象となる線路が通じているかどうかを容易に確認することができます。最近では、光源と光パワーメータを一筐体にした光ロステストという便利な測定器も登場しています。次に障害が発生しそうな状態や、障害の発生箇所を検知するO T D Rです。O T D Rは光ファイバの長さ、途中の接続損失、反射などを知ることができる測定器です。最後に、近年大容量データ伝送技術のひとつとして使われている波長多重通信において、

波長やその波長ごとのパワーを測定できる光スペクトラムアナライザです。

アンリツでは、図1のように、基本となる光源、光パワーメータ、光ロステストのほか、最新のF T T Hに対応するO T D R、各種測定モードにより、効率的な作業を実現する光スペクトラムアナライザなどをそろえています。

2. 光源／光パワーメータによる測定手法とOTDRの違い

現状、光ファイバや光通信ネットワークの測定に使われることが多いのは、前章で紹介した光源／光パワーメータとO T D Rです。光源／光パワーメータを使った光線路の全損失測定方法では、両端に測定器を接続して測定します。この方法では、光源から出した光のパワーが、どの程度光パワーメータに届くかを見ることによって、その光ファイバ心線全体の損失を測定します。これに対して、光ファイバの中継状態まで知ることができる測定器がO T D Rです。O T D Rを使えば、片端からの接続で光ファイバの中継の状況、例えば光ファイバの全長、接続点の数、位置、損失、反射などを知ることができます。この測定原理については第4章でご説明します。

3. OTDRの使い方

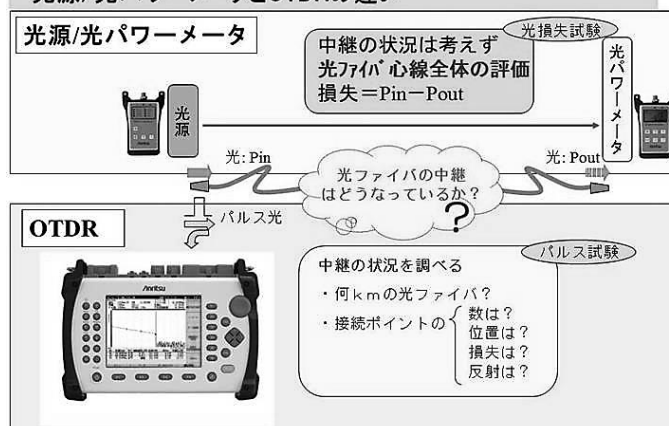
この便利な測定器、O T D Rが使われる場面として、大きく分けて2つあります。それは、光ケーブル

アンリツの提案するソリューション

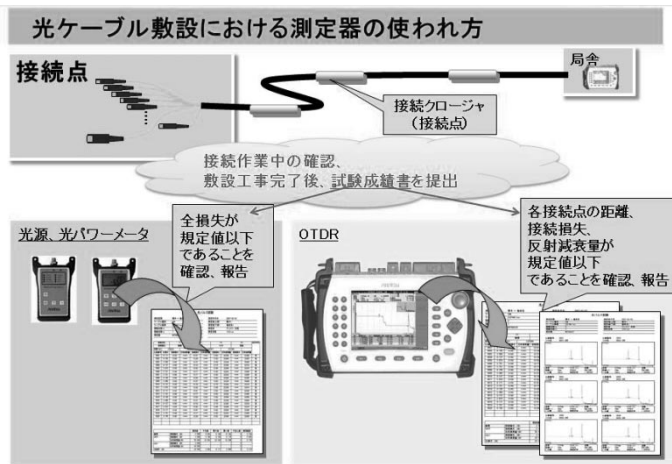


<図1>

光源／光パワーメータとOTDRの違い



<図2>



<図3>

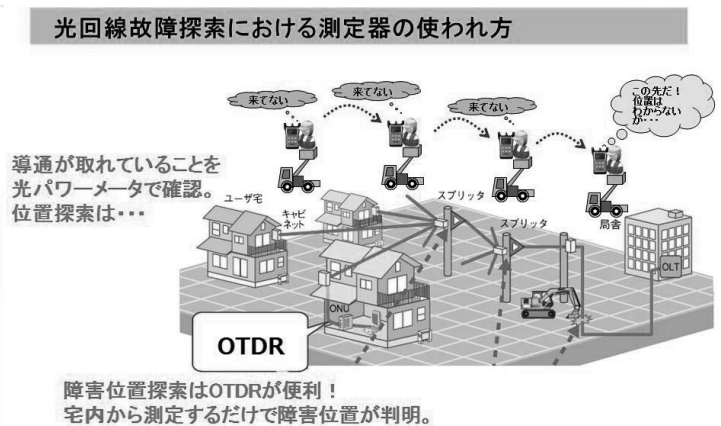
の敷設時と光回線の故障発生時です。図3のように光ケーブル敷設時には、光ファイバ接続作業中の確認、敷設工事完了後の試験成績書の作成などに使われます。回線に通信障害が発生したときには、図4のように、OTDRを使って宅内から測定することで、簡単に故障位置が判明するので早期復旧が可能です。このとき、光源／光パワーメータでは導通がとれているかの確認はできますが、故障位置までは知ることができません。

4. OTDRの測定原理と波形の見方

OTDRでは、光ファイバの片端に接続するだけで、その全体の接続状況や距離を知ることができます。これは、OTDRから送り出すパルス信号と、光ファイバの性質に由来する不純物等の散乱現象を、利用して計測しています。

光ファイバはご存知のように、ガラスでできた非常に細い線路です。どのくらい細いかというと、光が通る場所（コア）はシングルモードファイバで $10\mu\text{m}$ （1mmの1/100）と髪の毛以下です。この部分に損失がないかを知るためにOTDRは、自身から送り出した光パルス信号が光ファイバ内で散乱して戻ってくる光の量から損失を、時間差から距離を測定しています。

OTDRで測定できるものを正確に挙げると、①コネクタ接続点の反射減衰量および損失量、②融着接続点の損失量、③全長および接続箇所などの位置、です。反射減衰量とは、コネクタ接続では避けられないもので接続状態の良・不良を判断する指標になります。一方、損失量は、その言葉通り通信パワーの損失を表わします。光ファイバは急なカーブで曲げられたり、押しつぶされたりすることでコアを通る光が漏れ

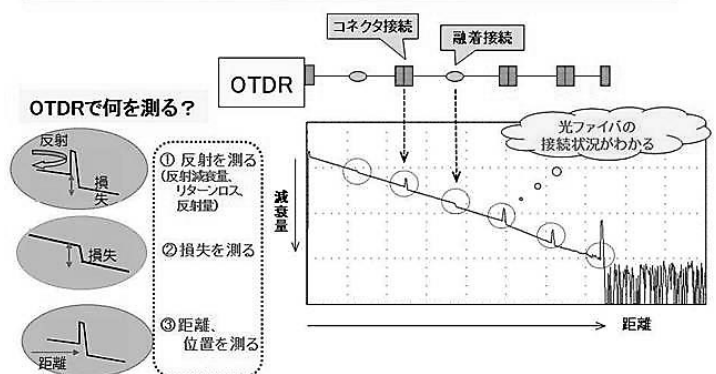


<図4>

て通信不良になります。この損失量が大きいということは接続点の接続不良のほか、線路への圧迫状態を疑う必要があります。クロージャ内で光ファイバを挟み込んでしまうなど、はじめは小さな損失値でも時を経て突然断線するというケースもありますので、経年変化という観点からも注意が必要です。

図5をご覧ください。OTDRの測定画面では、縦軸が減衰量（通信パワー）、横軸が距離を示しています。波形が隆起している箇所がコネクタ接続で反射が起こっているところであり、接続箇所の前後のパワーの差が損失量です。融着接続では反射はないので微量の損失のみ測定することになります。この測定画面を見て実際の線路がどのような中継になっているかイメージできるようになることがOTDRを使う大事なポイントです。

OTDR波形とファイバの接続状況の関連



<図5>

今回は、《OTDRの基礎技術②》測定条件の設定と測定時の注意点です。

《OTDRの基礎技術②》 測定条件の設定と測定時の注意点

アンリツ株式会社 計測器営業本部 営業推進部 新名 康代

前稿、『《OTDRの基礎技術① INIP News Vol. 9》 光測定器の種類とOTDR測定原理』では、光ファイバ／光通信ネットワークの測定に関連する測定器を全般的にご紹介しました。今回は、その中でも使われることの多いOTDR (Optical Time Domain Reflectometer；光パルス試験器)の取り扱い方法に触れていきたいと思います。

1. OTDRの測定条件の設定項目

いざ光ファイバ／光通信ネットワークの測定のためにOTDRを使おうという段階で重要になるのは、測定条件の設定です。これは測定器全般に言えることですが、早く正確に測定できるかどうかは、この測定条件の設定にかかっているといっても過言ではありません。

OTDRの測定条件には主に、波長、距離レンジ、パルス幅、IOR (Index Of Reference)、平均化回数／時間という項目があります。それぞれの項目の意味と各パラメータの決め方についてご説明していきます。

2. 測定波長の設定

通信で使われる波長は図1のように各種あり、それぞれ伝送距離や伝送レート、使用場所によって使い分けていますので、測定時には正しい波長を設定することが重要です。

理解を深めていただくために通信波長の種類について見ていきましょう。通信で使われる波長は、通信光源となるLD (レーザーダイオード)が開発された時代背景と光ファイバ伝送損失の波長特性に関係があります。かつて、光通信が始まったころには850nmの光源しかなく、光ファイバはGI (グレイテッドインデックス型)と呼ばれるファイバを使っていました。GIファイバは光を伝送するコアの直径が50 μ mと広く、850nmの波長で測定したときの伝送損失は1 kmあたり3～4 dB程度でした。3～4 dB/kmの損失ということは、1 km伝送すると信号レベルが半分以下に減衰してしまうという、非常に大きな損失が発生していることに

なります。ここが光技術の第1歩であり、ゆえに850nmは「第1の窓」と呼ばれます。

その後、「第2の窓」と呼ばれる1300nm帯の光源が開発され、ファイバの種類もコア径が10 μ mと狭いSM (シングルモード)ファイバが用いられるようになりました。このとき、通信波長はGIファイバで1300nm、SMファイバで1310nmが使われました。伝送損失をみても、SMファイバでは1/10の0.4dB/kmと低損失になり、これにより伝送距離が10倍伸ばせることとなりました。その後、ファイバの理論的限界である「第三の窓」と呼ばれる1550nm帯の光源が開発され、伝送損失が更に半分の0.2dB/km程度になったため、伝送距離を1310nmのさらに2倍伸ばせる超長距離伝送が可能となりました。

このように、時代を経て波長の種類が増えたわけですが、短波長が使われなくなったかというところではありません。光源の価格が長波長になるほど高価になることから今日でも用途に応じて使われています。850nmや1300nmの波長は、もともとGIファイバが使用されていた回線やデータセンタ内などの短距離の用途で使用されています。一方、SMファイバでは短距離から中距離の通信で1310nmが使用され、幹線網のような長距離は伝送損失の最も小さい1550nmが使用されます。また、FTTHの通信をみると上り下りの対向で1310nm、1490nm、1550nmの3つの波長を使って波長多重で通信が行われています。保守分野では、ファイバの異常個所の探索に、曲げによる損失が大きく出る特性をもつ1550nmが使われることが多いです。

2. 距離レンジ・パルス幅の設定

距離レンジは、測定しようとするファイバの全長より長いもので、かつ一番近いレンジを選択します。距離レンジとは測定する距離範囲を決めるものなので、ファイバ長より短いレンジを選択してしまうと終端部分が測定できなくなります。逆に、長すぎる距離レンジを選択してしまうと、画面に対して測定結果の表示が小さくなり解析するのに時間がかかってしまいます。

次にパルス幅についてですが、これは測定するファイバの全損失と近接する接続点をいかに細かく分析するかの兼ね合いで最適な値を選択します。図2をご覧ください。この図は、途中で近接する接続が2箇所あるファイバを測定したときの例です。点線はパルス幅が1000nsのときの例で、ファイバの終端部分まで波形を観測することができています。しかし、途中のコネクタ接続点を見てみると、最初のコネクタのところは反射が出ているので接続地点が何m離れているかがわかりますが、後ろのコネクタ接続の反射については、手前の反射が広がって重なってしまい接続点の距離を識別することができないという問題が発生します。

このような場合は、実線のようにパルス幅を狭くすると、接続点で発生する反射によって見えなくなる距離 (デッドゾーン)の広がりを抑えることができ、後ろの接続点をク

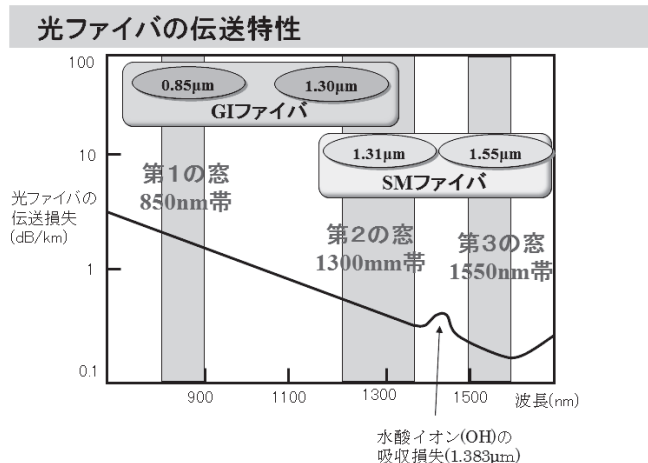
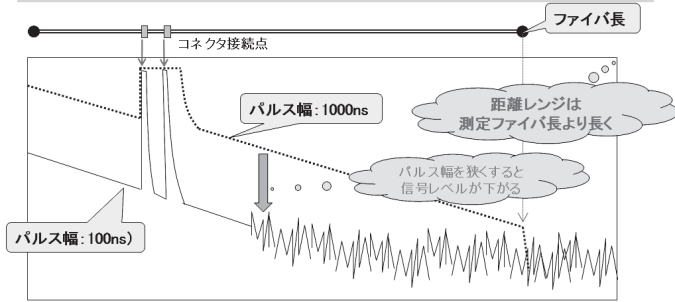


図1

測定条件(パルス幅によるデッドゾーン、測定可能距離の関係)



パルス幅を広くする → 測定可能距離がのびるが、近接コネクタ接続点が識別できない。
 パルス幅を狭くする → 近接コネクタ接続点は識別できるが、測定可能距離がのびない。
 線路の状況に合わせて、適切なパルス幅を設定する必要があります

図2

リアに識別できるようになります。しかし、波形をよく見てみると後ろの波形がノイズに埋もれて、1000nsのパルス幅のときには観測できていたファイバの終端部分を観測できなくなっています。これはファイバに送り込むパルス幅を狭めた事により入射パワーが減少したため、ファイバから戻ってくる後方散乱光と呼ばれるパワーも減少するためです。それにより波形レベルが下がって遠方の波形がノイズに埋もれてしまっているのです。

OTDRから送り出すパルス幅はそれ相当の長さの広がりが発生させるので、パルス幅に応じてデッドゾーンも変わってきます。このように、パルス幅は測定できる損失の幅(ダイナミックレンジ)と接続点で見えなくなる距離デッドゾーンがトレードオフの関係になります。そのため、一概にこの長さのときはこのパルス幅を使うということはいえず、このような特性があることを考慮して、線路の状況に合わせて最適なパルス幅を設定することが重要です。

3. IORの設定

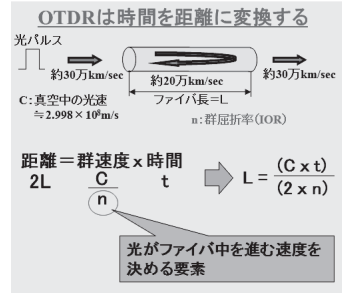
IORはIndex Of Referenceの略で、測定するファイバの群屈折率のことです。群屈折率は光ファイバ内における光の伝播速度と真空中の光の伝播速度の比を表しています。前稿、『＜OTDRの基礎技術①＞光測定器の種類とOTDR測定原理』でご説明したように、OTDRは自身で出した光がファイバを通過して戻ってくる時間を演算で距離に変換しています。この時間を距離に変換するときの係数として図3のようにIORが使われています。そのため、もし測定作業時にIORを指定された場合には、その値を用いて測定しないと距離が正しくない場合がありますので注意が必要です。また、経年変化などを見る比較測定においてはIORの値が同じでないと距離が変わってしまい、混乱を招くことにもなるので注意が必要です。IORは波長ごとに異なる場合がありますので波長ごとに確認する必要があります。アンリツのOTDR、アクセスマスタでは波長ごとのIORをデフォルトとして設定しておりますので、特に測定時にIORの指定がなくても測定作業ができる特徴があります。

4. 平均化回数/時間の設定

次に平均化の回数または時間についてご説明します。

測定条件(IOR:群屈折率と距離の関係)

群屈折率: 光ファイバ内における光パルスの伝播速度と真空中の伝播速度の比



例) IORの入力値と距離の誤差
 (50kmファイバ測定例)
 $L = (C \times t) / (2 \times n)$ $t = 500\mu s$
 $n = 1.500000$ の場合 $L = 50000m$
 $n = 1.499000$ では $L = 50033m$
 $\Delta n = 0.001$ 誤差 $\Delta L = 33m$

正確なn値の入力により正しい距離が得られます。

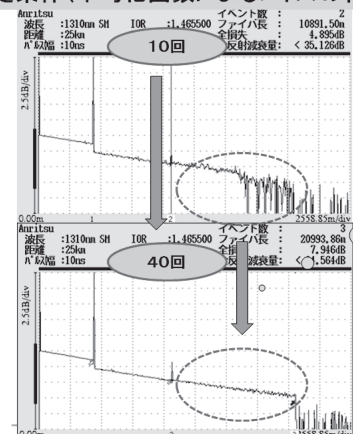
図3

OTDRで観測する信号は非常に微弱なので、ノイズに埋もれた中から信号成分を抽出するために平均化という処理を行います。これはノイズがランダムのため平均化するとノイズ成分が圧縮され信号成分だけが残るという原理を利用しています。実際には、平均化1回の測定波形やリアルタイムモードで測定した波形についても、表示するまでに1000回程度の平均化処理をOTDR内部で行ってノイズを圧縮しています。しかし、それでもノイズが多い場合には波形を掃引しながら平均化処理が必要となります。

平均化する目安としては測定する回線の損失の幅が大きい場合は平均化を多く、小さい場合は少なく、というのが基本です。もちろん平均化を多くすることは測定時間が長くなってしまいうことなので適切な値が求められます。アンリツのOTDR、アクセスマスタには、測定時において“終了”というボタンがあり、設定した平均化が多くても波形を見ながらこれなら大丈夫という状態になったら“終了”ボタンで測定を終了させることができます。このようなOTDRの便利機能なども活用して、測定作業の正確性と効率性の両方を満たしていくことが重要になります。

次回は、『＜OTDRの基礎技術③＞OTDR波形の解析方法』です。

測定条件(平均化回数によるノイズの相違)



平均化回数を増やすことによってノイズが小さくなる(圧縮される)

図4

《OTDRの基礎技術③》 OTDR波形の解析方法

アンリツ株式会社 計測器営業本部 営業推進部 新名 康代

前稿、『《OTDRの基礎技術② INIP News Vol.10》測定条件の設定と測定時の注意点』では、OTDR (Optical Time Domain Reflectometer ; 光パルス試験器) の測定条件の意味と設定方法をご紹介しました。今回は、正しい測定方法と測定して得られた波形の解析方法に触れていきたいと思います。

1. OTDRで測定できる内容

前稿までの復習になりますが、OTDRで測定できる対象は距離、損失、反射減衰量です。また、これらをもとにファイバの伝送損失、全反射減衰量も測定できます。図1のOTDR波形例をご覧ください。コネクタ接続点ではフレネル反射と呼ばれる立ち上がり波形が発生し、ここまでの位置が接続点までの距離、レベル差が接続損失、立ち上がりの大きさが反射減衰量として測定できます。融着接続点では反射が発生しないので、反射減衰量は測定できませんが、距離と接続損失は同様に測定できます。そして、波形が終わっているところがファイバ全体の接続距離となります。

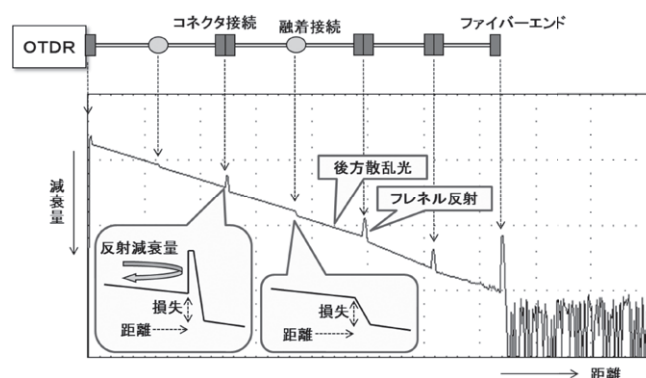


図1 OTDRで測定できる内容

2. 利得現象と正しい接続損失測定方法

接続損失の正しい測定方法を身につけるには利得現象の理解が不可欠です。利得現象を理解するにあたって、はじめにOTDRが測定している光の正体について復習していきましょう。図2をご覧ください。OTDRから出射されたパルス光は、ファイバを伝播する間、ファイバ内の不純物等にあたってレイリー散乱と呼ばれる散乱を発生させます。この散乱光のうち入射側に戻ってくる光を後方散乱光と呼びます。OTDRではこの後方散乱光が戻ってくる時間を距離に換算、さらに戻ってくる光のパワーを損失として算出して波

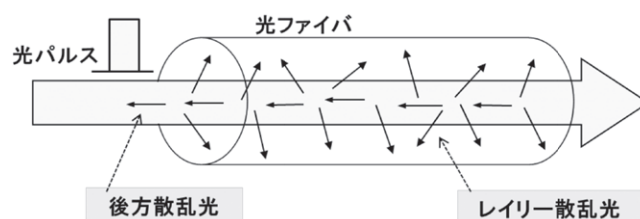


図2 OTDRが測定する光の正体

形表示します。

このようにOTDRでは実際に透過した光を測定しているのではなく、後方散乱光を測定して損失として表示しています。これは損失と後方散乱光が比例関係にあることを利用しています。正確に言えばOTDRは損失を推定しているという表現の方が正しいことになります。

このような測定原理により、後方散乱光の係数が違うファイバを接続すると、測定する方向によって損失が異なるケースが発生します。このようなケースは利得現象と呼ばれ、図3のように後ろ側が上がるような波形になります。図3において、ファイバA側から測定すると、ファイバの後方散乱係数が小さいファイバA区間ではレベルが低く、係数が大きいファイバB区間ではレベルが高くなり、利得現象が発生します。逆に、ファイバB側から測定すると、ファイバB区間が高く、ファイバA区間が低くなり、後方散乱光係数の差によって損失差が発生します。このようなケースを考慮するため、OTDRで正確に接続損失を測定するためには両方向から測定して、それぞれの値を平均化するという方法が用いられます。

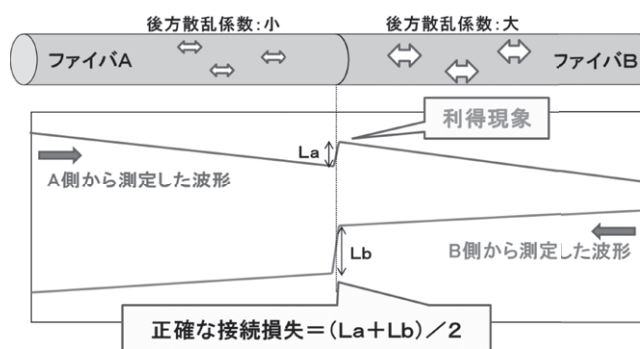


図3 利得現象とOTDRでの正確な接続損失測定方法

3. 距離の読みとり方

図4をご覧ください。接続点までの距離を読みとるには、コネクタ接続の場合はフレネル反射が立ち上がる手前に、融着接続の場合は段差が発生する手前にカーソルを合わせます。

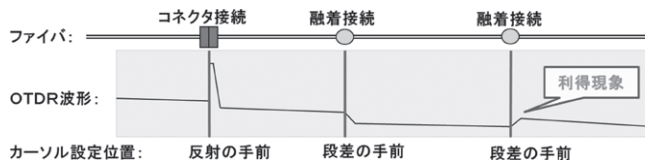


図4 距離測定でのカーソル設置位置

4. 損失測定の方法とLSA/2PAの解析原理

ある区間の全体の損失を測定するには図5に示すように測定したい区間の両端にマーカを2つ設置して全体の損失を測定します。このときの解析方法は2PAと呼ばれます。

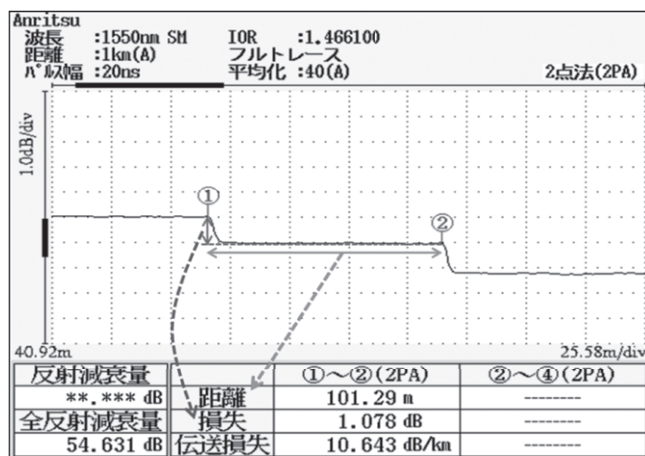


図5 2点間の距離と損失の測定方法

一方、ファイバの伝送損失を測定する場合は、フレネル反射などの影響を受けない後方散乱光の区間にマーカを設置してLSAという解析方法で測定すると、ノイズの影響を軽減して測定できます。LSA (Least Square Approximation) は最小二乗法を意味し、図6に示すように指定した2点間のデータで近似直線を作成し、その近似直線上でのレベル差を測定することで、波形上のノイズの影響を軽減します。図6のような波形では、単純に2点間のレベル差を測定する2PAでは、マーカをおく位置によってノイズの影響を受け測定値

がばらついてしまいます。LSA使用時の注意点は、フレネル反射や接続損失を含む区間でLSAを用いると、これらの反射や損失を含んだ近似直線で計算するので、異常な損失値が表示される点です。このような接続を含む区間では2PAで測定します。

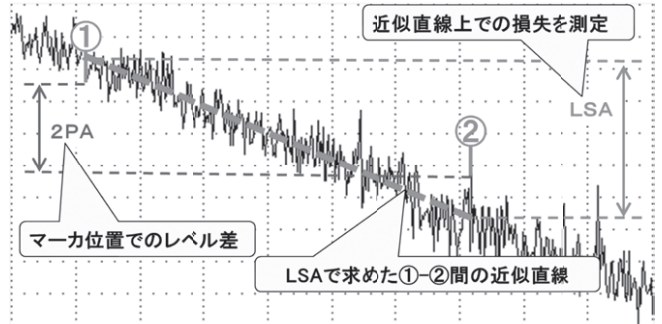


図6 LSAと2PAの解析原理

5. 接続損失の解析原理

図7に示すように、接続損失の解析では4つのマーカを使います。何故2つのマーカでレベル差を測定しないのかというと、接続点ではパルス幅に応じて観測できないデッドゾーンという区間が発生するためです。このデッドゾーン区間分の損失を差し引くために①②マーカで手前のファイバの傾斜、③④マーカで後側のファイバの傾斜を求めて、②でのレベル差を求める方法を用いています。反射の前後2点間のレベル差を測定しても損失値は求められますが、図7でわかるように余分な損失を含んだ値になりますので、注意が必要です。

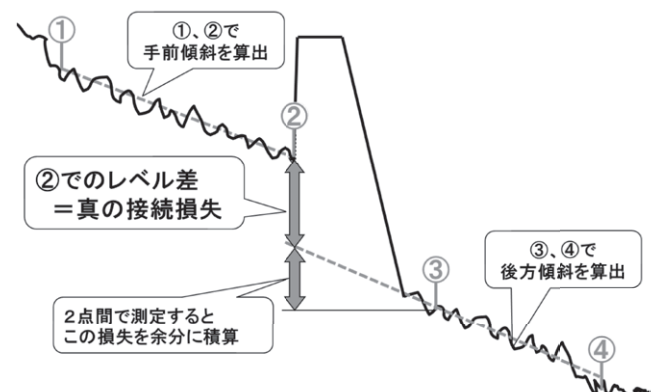


図7 接続損失の解析原理

次回は、《OTDRの基礎技術④》反射減衰量の解析原理とイベントテーブルとオートサーチの使い方です。