

## ■5 群(通信・放送) - 2 編(光アクセス線路・伝送技術)

# 6 章 光線路保守技術

(執筆著者：泉田史，倉嶋利雄) [2017 年 12 月 受領]

### 【概要】

光線路保守技術は、通信サービスを提供する基盤設備を試験・監視・保守する技術である。1980 年代の光ファイバケーブルによる通信網の整備に始まり、1990 年代の幹線中継系光線路の長延化とともに、光線路保守技術は発展してきた。光ファイバケーブルの布設状態、光接続状態、クロージャの収納状態などを確認する試験技術は、幹線中継系光線路を高信頼に構築する技術として不可欠である。当初、光ファイバケーブルはガス保守システムを使用して、メタリックケーブル並の高信頼性を確保していたが、長延化された光ファイバケーブルには適用できず、光ファイバケーブルの非ガス化とともに浸水検知をする遠隔監視技術が導入された [本編 4 章 4-1-2 光ファイバケーブルの非ガス保守化技術と高密度化技術 参照]。この浸水検知機能を含む光線路試験監視システムが幹線系の光線路の保守システムとして使われてきた。

2000 年代となりアクセス系の FTTH サービスが普及し、光線路の効率的な建設・保守・運用技術が一層重要となった。この FTTH を支えるアクセス系の保守運用技術には、光線路の建設後の保守・運用にかかわる種々の技術があり、実際の運用ケースに合わせた解説を 6-1 節で述べる。FTTH の契約者数が多くなり、建設から保守運用を効率よく行う必要があり、実際に現場で使用される光線路試験システムの構成に基づきながら、必要な機能と実現手段を、6-2 節で述べる。また、これらの世界に先駆けて研究開発された光線路保守技術は、国際標準化機関 ITU において国際標準規格として提案されている。6-3 節ではその光線路保守技術の規格化状況を概説する。

光ファイバの状態を遠隔で監視する OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) は、検波方式を高機能化することで監視できる領域を拡大することができる。更に、OTDR で測定する後方散乱光の中のブリルアン散乱やラマン散乱に着目することで、歪や温度などの分布測定が光ファイバ長手方向にわたって可能となり、実際の応用システムとして使用されている。アクセス系光線路の保守技術にとどまらず、種々のアプリケーションが期待される。6-4 節では、これら高機能化・高機能化した OTDR 技術について解説する。

### 【本章の構成】

本章では、アクセス系光線路の保守運用技術を基礎から解説し (6-1 節)、実際に使われている光線路試験システムについて説明する (6-2 節)。次に、国際標準化機関 ITU で規格化されている光線路保守技術について解説し (6-3 節)、光線路保守技術の中の OTDR に関する高機能化・高機能化についても解説する (6-4 節)。

## ■5 群 - 2 編 - 6 章

### 6-1 アクセス系光線路の保守運用技術

(執筆者：榎本圭高) [2015年5月 受領]

#### 6-1-1 光線路の保守運用方法

アクセス系光線路の保守運用技術は、本編1章図1・1に示す光線路の構築後、配線線路でサービスを提供する開通工事や切替工事、更に故障修理や予防保全といった保守作業に必要な<sup>1),2)</sup>。図6・1に示すアクセス系光線路の保守運用に必要な技術と手段を説明する。

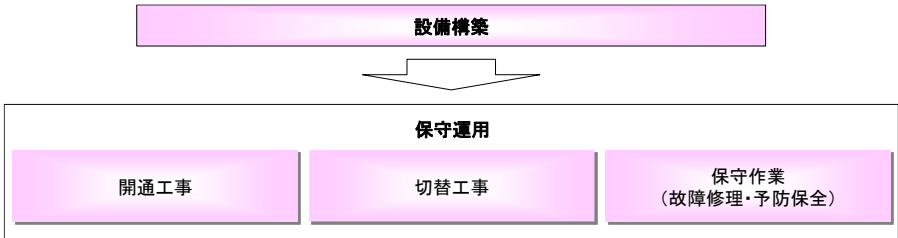


図 6・1 アクセス系光線路の保守運用

#### (1) 開通工事

光サービスを提供する工事を開通工事と呼ぶ。図6・2で開通工事を説明する。サービス開通依頼の受付時、オペレーションセンターでどの光設備でサービス提供するか割付（選定）をする。次に、選定結果に従い、通信設備ビル内で光伝送装置から所外光ファイバケーブルが成端されている光配線架まで光配線工事を行う。所外では該当光ファイバを確認するため光心線対照を行い、光クロージャと光スプリッタを取り付け、光クロージャから宅内まで配線し、ONUを取り付け、正しく工事ができたか通信設備ビルから試験する。なお、光スプリッタが既に取り付けられている場合、光クロージャ及び光スプリッタ取り付け作業は省略される。

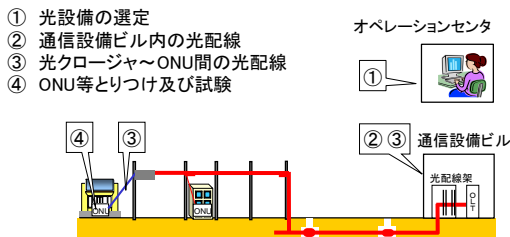


図 6・2 開通工事

#### (2) 切替工事

道路の拡張工事や橋の架け替え工事に伴い、光ファイバケーブルのルート変更する工事を支障移転工事と呼ぶ。また、管路や電柱等基盤設備の有効活用を目的とした多心光ファイバ

ケーブルへ集約する工事を收容替えと呼ぶ。これら支障移転工事や收容替えを総称して切替工事といわれる<sup>3)</sup>。図 6・3 で切替工事を説明する。移転先の光ファイバケーブルを敷設後、移転元及び移転先の光ファイバを特定し、該当心線の切断及び移転先の光ファイバと接続する心線切替を行い、正しく接続されたか通信設備ビルから試験を行う。サービス提供中の光ファイバは切替後に、サービスの正常性確認を行うこともある。

- ① 移転先の光ケーブル工事
- ② 移転元, 移転先の光心線の特定
- ③ 心線切替 (移転元光ファイバ切断⇒移転先へ接続)
- ④ 光ファイバ試験

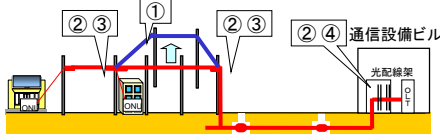


図 6・3 切替工事

### (3) 保守作業

保守作業は、大きく分けて「故障修理」と「予防保全」がある。図 6・4 で故障修理を説明する。故障修理は、故障申告時に、故障箇所を特定 (故障切分け) し、修理を行い、正しく修理されたか試験を行う。故障切分けは、光伝送装置の OSS (Operation Support System) で光伝送装置間が通信できるか判別し、通信できない場合は通信設備ビルから光パルス試験でどの設備で故障しているか検出する。光線路区間が故障の場合、作業者を故障箇所に派遣し、現地で故障した設備を特定 (光心線対照) 後、再接続や張替えを行い、正しく修理されたか通信設備ビルから試験を行う。

- ① 故障切分け
- ② 故障箇所の特定 (光ファイバ故障時)
- ③ 故障心線の特定及び修理
- ④ 修理した故障心線の試験

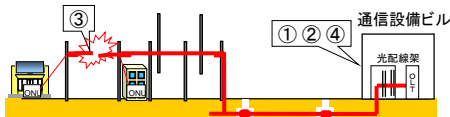


図 6・4 故障修理

予防保全は、定期的に光ファイバケーブルの試験を行い、異常検出時に修理を行う。特に地下光クロージャ内部が長期間浸水すると、光ファイバの光損失増加や機械的強度が低下し、故障の原因となりやすいため、浸水検出時は速やかな改修が必要である [4 章 4-1-4 光ファイバケーブル定期試験を参照]。地下光クロージャ内では通信用とは別の光ファイバ心線 (保守用心線) に「浸水検知モジュール」を取り付ける。図 6・5 を用いて説明する。浸水検知モジュールは光ファイバを上下から挟み込む構造で、地下光クロージャ内に浸水した場合、浸水検知モジュール内の膨張材が水に反応して膨らみ、光ファイバに曲げ損失を与える。OTDR で保守用心線を定期的に測定することで、各地下光クロージャの浸水の有無を監視できる<sup>4)</sup>。

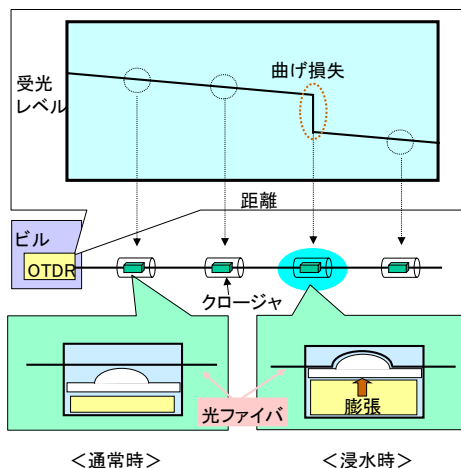


図 6・5 予防保全

設備構築・保守運用に必要な試験方法を表 6・1 に示す。試験に使用する測定器は光源 (LS : Light Source)、光パワーメータ、OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) である。これら測定器を用いて、「光損失試験」、「光パルス試験」、「光心線対照」、「レベルモニタ」と各保守運用に必要な試験を行う。

表 6・1 設備構築・保守運用に必要な試験方法

試験方法	評価項目	測定器	設備構築	開通工事	切替工事	保守作業	
						故障修理	予防保全
光損失試験	光ファイバ区間の損失	光源 (LS) 光パワーメータ		○			
光パルス試験	接続部の損失・反射	OTDR	○	○	○	○	○
光心線対照	光ファイバの特定	光源 (LS) 光パワーメータ	○	○	○	○	
レベルモニタ	OLT・ONUの通信光レベル	光パワーメータ		○		○	

### 6-1-2 光パルス試験器 (OTDR)

光パルス試験器 (OTDR : Optical Time Domain Reflectometer) とは、光ファイバの長手方向の光損失分布を求める測定器である。図 6・6 を用いて OTDR の測定原理を説明する<sup>5)</sup>。測定対象の光ファイバ内にパルス光を入射すると、光ファイバのコア内の微小な屈折率のゆらぎでレイリー散乱が生じる。また、コネクタ接続等、屈折率が異なる境界面では急峻な屈折率の違いでフレネル反射が生じる。これらレイリー散乱やフレネル反射の一部が、後方散乱光

として入射側に戻ってくる。この後方散乱光レベルの変化を時間領域で測定し、光パルスを入射してから後方散乱光が戻って来る遅延時間を、入射端からの距離に変換することで、光ファイバの長手方向の光損失分布が求まる。

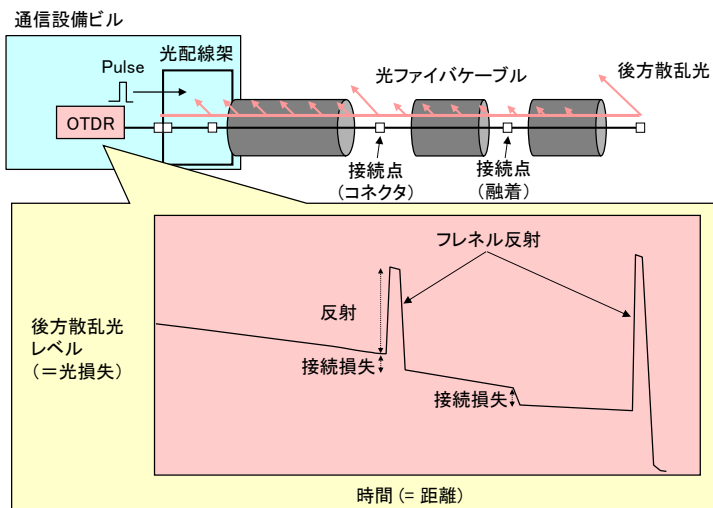


図 6・6 OTDR の測定原理

### 6-1-3 光心線対照器

光ファイバケーブルの建設や保守を行う際、光ファイバ心線の誤切断や誤接続の回避が必要である。そこで、該当する光ファイバであるかどうかを確認するため、光心線対照器を用いて、光ファイバ心線の対照を行う<sup>9)</sup>。

光心線対照器を用いた心線対照方法を図 6・7 で説明する。まず、送信部を用いて通信設備ビルから対照したい光ファイバに、通信波長より長波長でかつ変調した対照光を挿入する。現在、通信で 1550 nm が使われること多いため、最近では 1650 nm の光源が心線対照用として使われている。次に、通信に影響を与えない程度に受信部の曲げ部で光ファイバを曲げる。すると、光ファイバから対照光が漏えいするため、漏えい光の有無で該当光ファイバであるかどうかを判定することができる。

光心線対照器は、光パワーメータ機能を内蔵したタイプもあり、OLT からの通信光のレベルを通信設備ビル及び宅内で光パワーメータを用いて測定することができる<sup>7)</sup>。



図 6・7 光心線対照方法

#### 6-1-4 光通話器

光ファイバケーブルの保守運用では、複数の場所で連絡を取りながら作業を行う場合がある。そのような場合、連絡用の打合せ回線を確保する必要があり、光ファイバケーブルの空き心線を使用した光通話器が用いられる。図 6・8 に示す光通話器の場合、光送受信部(本体)間を 1 心の光ファイバで約 10 km 離れた区間で、ヘッドセットを用いて通話を行うことができる<sup>8)</sup>。携帯電話の普及に伴い、光通話器を使用する機会が少なくなっているが、山間部やマンホール・とう道等、電波が届かない場所では使われている。

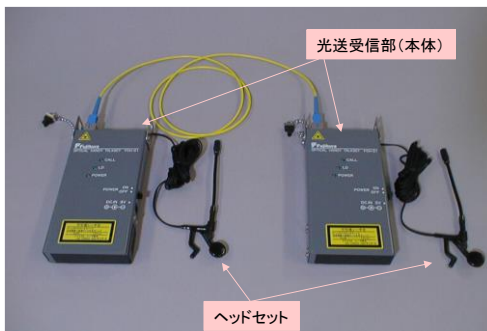


図 6・8 光通話器の外観

## ■5 群 - 2 編 - 6 章

## 6-2 光線路試験システム

(執筆者：榎本圭高) [2015年5月 受領]

光線路試験システムは、各設備構築から保守運用を効率的に行うため、開発・導入されている<sup>9)</sup>。表 6・2 に光線路試験システムに必要な機能を示す<sup>10)11)</sup>。光ファイバケーブルのメンテナンス機能として光線路の遠隔・自動試験やインサービスタ試験及び故障設備切分け・探索が必要である。

表 6・2 光線路試験システムに必要な機能

大項目	小項目	要求条件
メンテナンス	試験機能	光線路の遠隔・自動試験
	監視機能	インサービスタ試験
		故障設備切分け及び探索

## 6-2-1 基本構成

光線路試験システムの基本構成を図 6・9 に、外観を図 6・10 に示す<sup>10), 11)</sup>。保守拠点のオペレータが操作端末から試験を命令すると、試験用通信ネットワークを経由して、光ファイバの情報をもつデータベースサーバを参照して、光試験装置 (OTM : Optical Testing Module) が該当光ファイバの測定を実施し、試験結果を操作端末に表示する。OTM には OTDR、心線対照用光源、光パワーメータ等各種光測定機能を有しており、IDM-A 内に設置している。

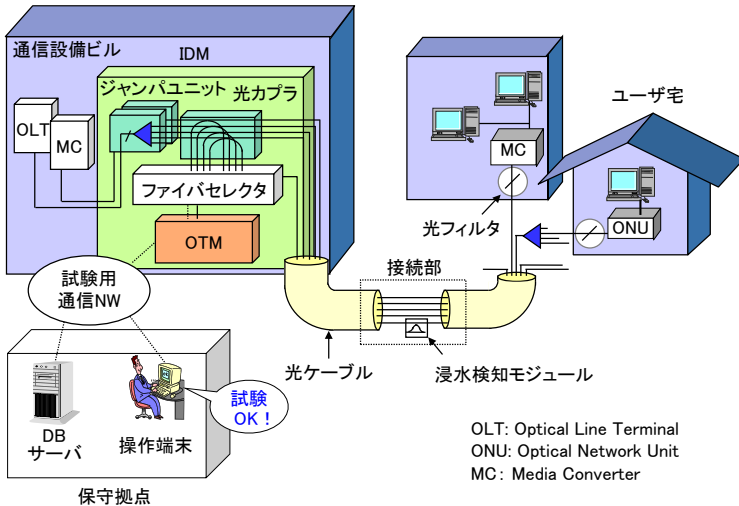


図 6・9 光線路試験システムの構成

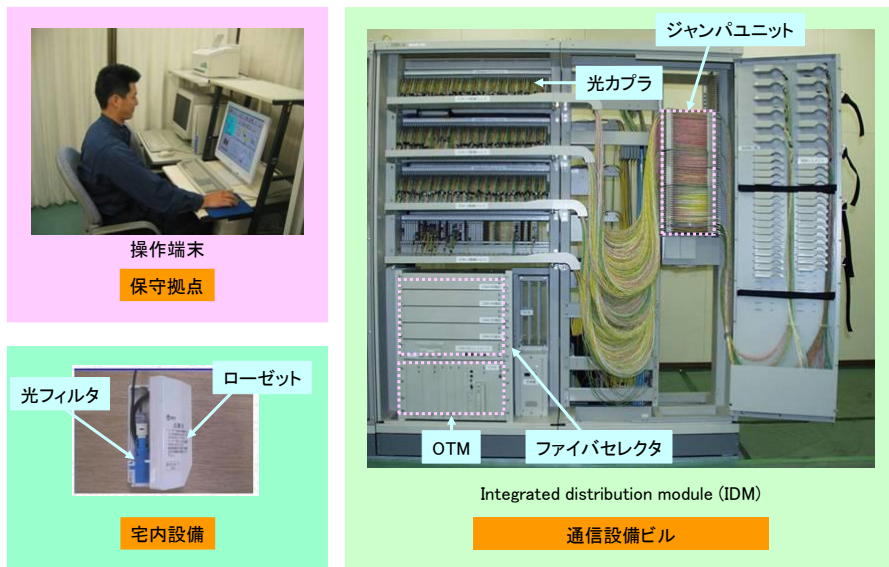


図 6・10 光線路試験システムの外観

試験を行う際、OTM からの試験光はファイバセクタ (FS : Fiber Selector) と呼ばれる光スイッチを用いて目的の光ファイバに接続され、光カプラを介して光ファイバ内に挿入される。また、宅内の光伝送装置 (ONU や MC) の直前に、試験光の波長を遮断し、通信サービスに利用する波長を透過する光フィルタが組み込まれており、光フィルタが OTM からの試験光が ONU や MC に達するのを防ぐため、通信に影響を与えることなくインサービス試験を行うことができる。

### 6-2-2 インサービス試験方法

インサービス試験の原理を説明する。光伝送装置として、OLT-ONU を例に説明する。インサービス試験を実現するため、OLT と ONU 間の光ファイバに試験光を挿入するため光カプラが必要となる。また、OTM からの試験光が OLT や ONU へ入射することないように、試験光を遮断する光フィルタを挿入する必要がある。図 6・11 にインサービス試験を行う際の光カプラ及び光フィルタ挿入位置を示す。光カプラ及び光フィルタに求められる条件は、OLT 及び ONU 間に不必要な光損失を与えないとともに、OLT や ONU に入射しても信号対雑音比 (S/N 比) の劣化が無視できるレベルに OTM からの試験光を抑制する必要がある。加えて、OLT や ONU からの通信光が OTM に入射しても正常に測定できる必要がある。

そこで、波長無依存性の光カプラを使用し、通信光を透過し、試験光を遮断する光フィルタを OLT 及び ONU の直前にそれぞれ取り付け。ONU 側に取り付けられている光フィルタ F1-1 は、通信光が透過し、OTM からの試験光が S/N 比を無視できるレベルにまで下げる機能が必要となる。また、OLT 側に取り付けられている光フィルタ F1-2 も同様に通信光が透過し、OTM からの試験光が光ファイバケーブル内のコネクタ等で反射して OLT 側に戻り、S/N



比を無視できるレベルにまで下げる機能が必要となる。光フィルタ F2 は、OTM で正常に測定するため試験光を透過し、通信光を遮断する特性が必要になる<sup>10), 12)</sup>。

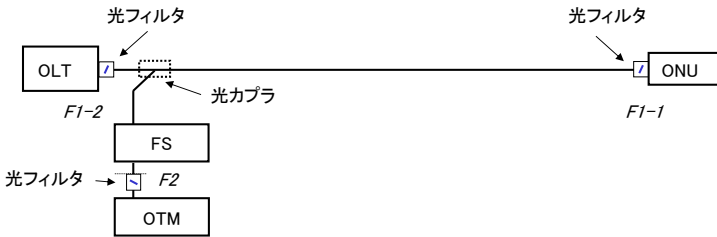


図 6・11 インサーブス試験の基本構成

### 6-2-3 故障切分け試験方法

図 6・12 に故障切分け試験の基本フローを示す。まず、OLT と ONU 間の通信状態を確認し、OLT と ONU 間の通信が正常か切分けを行う。次に、通信設備ビル内の OLT からの通信光レベルを確認し、所内設備ビルが故障しているか切分けを行う。次に、所外光配線設備が故障しているか、ONU が故障しているか切分けを行う。

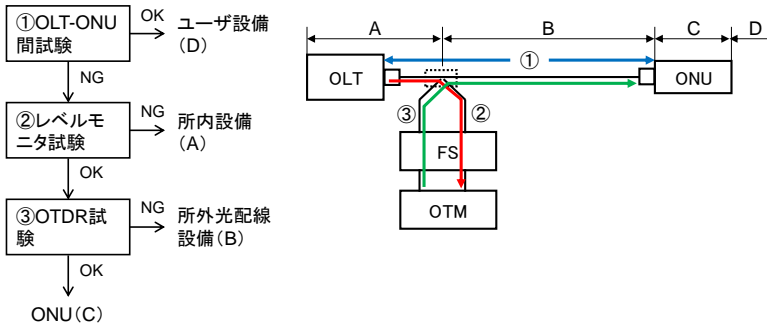


図 6・12 故障切分け試験の基本フロー

所外光配線区間の故障切分け試験方法の原理を図 6・13 に示す。前述した ONU の直前に取り付けられた光フィルタ F1-1 は、試験光を遮断する機能に加え、試験光のみ反射する機能を持たせる。光フィルタ F1-1 は、ファイバブラックグレーティングをコネクタのフェルル内に実装することで、簡易に実現することができる。一方光フィルタ F1-2 は光フィルタ間で多重反射が発生し、測定に影響を与えないように、試験波長で反射しないようにする必要がある<sup>13)</sup>。ONU 前に取り付けられた光フィルタ F1-1 の反射量をサービス開通時にあらかじめ OTDR で測定し、反射位置及び反射量を保存しておく。故障発生時に該当心線を再度測定し、光フィルタからの反射位置や反射量の変動から光ファイバ区間で故障しているか判定することが

できる<sup>10), 14)</sup>.

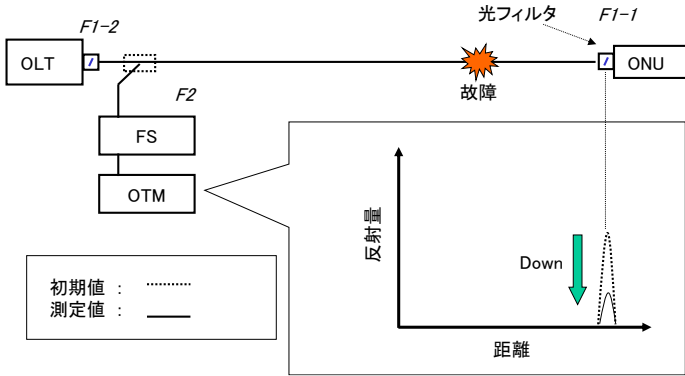


図 6・13 所外光設備故障切分けの基本構成

## ■5 群 - 2 編 - 6 章

## 6-3 光線路保守技術の標準規格

(執筆者：荒木則幸) [2017 年 8 月 受領]

光線路保守技術の国際標準は ITU-T (Telecommunication standardization sector, International telecommunication union) 及び IEC (International electrotechnical commission) により規格化されている。光線路保守の要求条件については、主に ITU-T Study Group 6 (SG6) 「屋外設備」で勧告が作成されてきたが、2009 年に ITU-T SG6 が Study Group 15 (SG15) 「光トランスポート・アクセス・ホームネットワーク」に合併されたことにより、現在 (2013-2016 年会期) は、ITU-T SG15 の第 2 作業部会 (WP2) の課題 17 「光ファイバケーブル網の保守運用」において勧告作成が行われている。日本は世界でいち早く FTTH の展開を開始し、光ケーブル網の保守運用ノウハウ、光線路試験において技術的な優位性を確保していたことから、本課題のレポートを担当し、継続的に光線路保守技術の ITU-T 勧告作成を主導してきた。表 6・3 に ITU-T における光線路保守技術に関連する勧告<sup>15)</sup>の一覧を示す。

表 6・3 ITU-T における光線路保守技術に関連する勧告群

勧告番号	勧告タイトル (原題)
L.25	光ファイバケーブル網の保守運用 (Optical fibre cable network maintenance)
L.40	光線路保守支援システム (Optical fibre outside plant maintenance support, monitoring and testing system)
L.41	光線路の保守波長 (Maintenance wavelength on fibres carrying signals)
L.53	光アクセス網の保守基準 (Optical fibre maintenance criteria for access networks)
L.66	インサービス試験基準 (Optical fibre cable maintenance criteria for in-service fibre testing in access networks)
L.68	ハイパワー線路用光線路保守支援システム (Optical fibre cable maintenance support, monitoring and testing system for optical fibre cable networks carrying high total optical power)
L.85	光ファイバ心線対照 (Optical fibre identification for the maintenance of optical access networks)
L.93	中継系光線路保守支援システム (Optical fibre cable maintenance support, monitoring and testing systems for optical fibre trunk networks)

勧告 L.25 は光ファイバケーブル網の保守運用に関する総則文書であり、用語の定義や保守機能及び要求条件が記述されている。L.25 に記載されている各関連勧告の文書体系を図 6・13 に示す<sup>16)</sup>。勧告 L.40 は L.25 で規定されている保守運用機能を実現するための光線路試験システムの要求条件が規定されており、試験機能、測定方法や光線路試験システムと他オペレーションシステム等とのインターフェース等について記述されている。また、勧告 L.53 では Passive optical network (PON) における分岐型光網やリング網に対する保守運用の要求条件が記述されている。

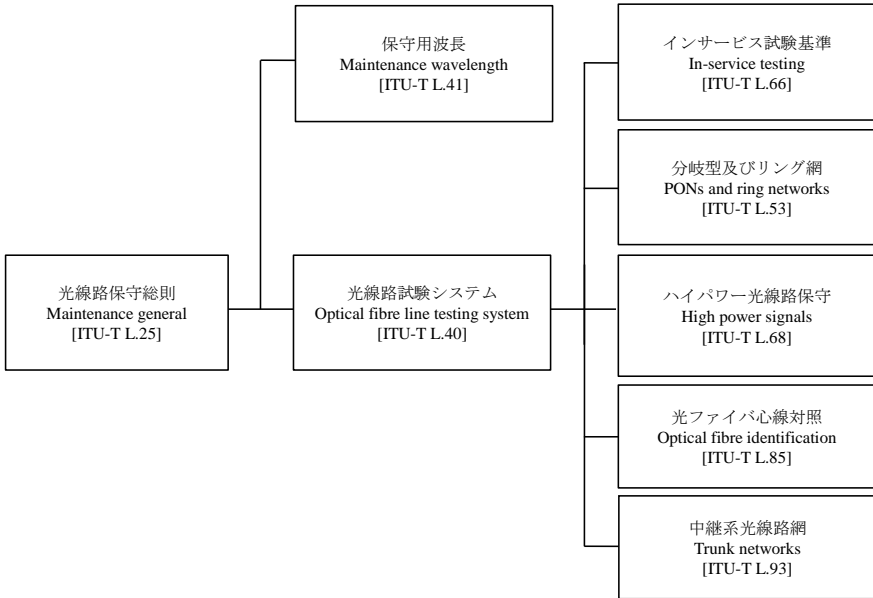


図 6・14 光ファイバケーブル網保守運用に関連する勧告の体系図

勧告 L.41 は光ファイバケーブル網の保守用波長帯を規定している。表 6・4 に示すように、通信波長帯に応じて場合分けされており、通信光で使用していない波長帯を保守用波長として用いることを許容している。現在、G-PON 等の光アクセスシステム においては、O-band から L-band (1260 – 1625 nm) までを通信波長帯として使用するため、1650 nm 帯が汎用的な保守用波長と考えられる。勧告 L.66 は現用回線の光線路のインサービスタ試験基準を規定しており、インサービスタ試験時に通信波長に影響を及ぼさないための試験光及び試験光遮断フィルタの設計方法等が示されている。インサービスタ試験のセットアップの一例を図 6・15 に示す<sup>17)</sup>。試験光を合波するための光カプラ及び試験光遮断フィルタを用いたインサービスタ試験の設備構成が示されている。なお、IEC では光線路保守用デバイスとして、OTDR 試験光反射器<sup>18)</sup>などが標準化されている。

表 6・4 現用回線に対する保守用波長帯

	1310 nm帯	1550 nm帯	1625 nm帯	1650 nm帯
Case 1	現用	不使用または保守用	不使用または保守用	不使用または保守用
Case 2	不使用または保守用	現用	不使用または保守用	不使用または保守用
Case 3	現用	現用	不使用または保守用	不使用または保守用
Case 4	現用または不使用	現用	現用	不使用または保守用

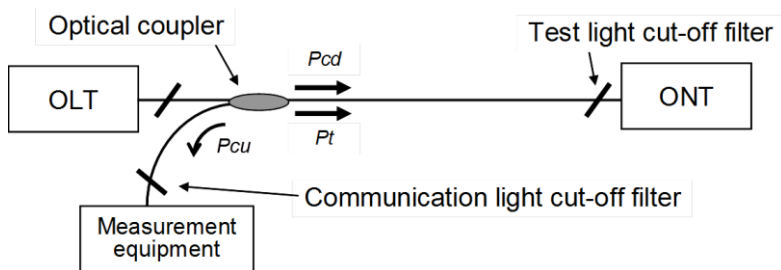


図 6・15 インサービス試験のセットアップの一例

## ■5 群 - 2 編 - 6 章

## 6-4 光線路保守技術の高性能化・高機能化

(執筆者：泉田史)[2017年12月 受領]

OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) は、本章の 6-1-2 で述べているように、光アクセス線路を保守運用するための光パルス試験を実施する測定器であり、広く使用されている。

図 6・16 に OTDR の構成を示す。試験光ファイバに光パルスを入射し、後方散乱光が入射端に戻ってくる遅延時間（入射端からの長さに相当する）を横軸に、後方散乱光の強度を縦軸に表示する装置である。主な後方散乱光はレイリー散乱光とフレネル反射光であるが、入射した光パルスの波長（光周波数）の前後に、微弱ではあるが、センシング応用が可能であるブリルアン散乱光やラマン散乱光も含まれる。

本節では、光アクセス線路の保守運用技術にとどまらず、多種多様な分野で応用できる高性能・高機能な OTDR 技術について解説する。6-4-1 では、後方散乱光の振幅を高感度に検波する高性能な C-OTDR (Coherent detection OTDR) について、6-4-2 と 6-4-3 では、後方散乱光に含まれるブリルアン散乱光とラマン散乱光に着目し、歪や温度の分布測定ができる高機能な B-OTDR (Brillouin OTDR) と R-OTDR (Raman OTDR) について、それぞれ測定原理と応用例を述べる。

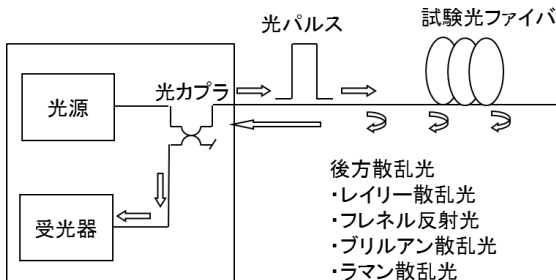


図 6・16 OTDR の構成と後方散乱光

## 6-4-1 C-OTDR

(執筆者：泉田史) [2017年12月 受領]

### (1) はじめに

C-OTDR (Coherent detection OTDR) は、受信系にコヒーレント検波方式を用いた OTDR であり<sup>19)</sup>、受信感度はショット雑音限界まで改善できる<sup>20)</sup>。低雑音で飽和出力特性に優れた 1.55  $\mu\text{m}$  帯の光ファイバ増幅器である EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) を組み込むことで、C-OTDR のダイナミックレンジ (測定可能距離) は飛躍的に向上させることができる<sup>21)</sup>。SWDR (Single Way Dynamic Range) が 40 dB を越える高性能な C-OTDR<sup>22), 23)</sup> は、主に幹線中継系線路や海底中継線路の監視システムに導入されている<sup>24), 25)</sup>。また、応用面では、後方散乱光に含まれるレイリー散乱光の波形を測定することで、被試験光ファイバの長手方向に分布する微細な温度変化や歪を測定するセンサ応用も報告されている<sup>26), 27), 28)</sup>。

本項では高ダイナミックレンジな C-OTDR とその実用例について解説する。

### (2) C-OTDR の測定原理

図 6・17 に C-OTDR の基本的な構成図を示す。非同期の自己ヘテロダイン検波方式の C-OTDR に EDFA をポストアンプとして組み合わせた構成である。狭線幅光源は、線幅 10 kHz 以下の外部共振器付き DFB-LD である。3dB 光カップラ (FC1) で、信号光とローカル光に分け、信号光はパルス駆動した音響光学スイッチ (AO-SW1) でパルス化し、EDFA で光増幅する。AO-SW2 は AO-SW1 と同期してパルス駆動させるので、信号光パルスを通過させるとともに、EDFA で発生する ASE (Amplified Spontaneous Emission) を信号光パルスの通過時間以外は遮断する。このため、ASE による雑音増加を軽減できる。信号光パルスの光周波数は、AO-SW のドライブ周波数の合計分の  $\nu_A$  だけ音響光学効果によりシフトする。この信号光パルスは FC2 を介して試験光ファイバに入射され、後方散乱光  $E_b(t) \cdot \exp(j2\pi(\nu + \nu_A)t)$  は、先に分けたローカル光  $E_{LO} \cdot \exp(j2\pi\nu t)$  と FC3 で合波され、コヒーレント受光器で受信される。受信した信号電流は  $E_{LO}^2 + E_b(t)^2 + 2E_{LO} \cdot E_b(t) \cos(2\pi\nu_A t)$  に比例する。後段の電気処理部で、 $\nu_A$  の中間周波数信号をベースバンド信号に変換し、直流成分  $E_{LO}^2 + E_b(t)^2$  を遮断する。非同期検波であるので、このベースバンド信号を 2 乗加算すると  $2E_{LO}^2 + E_b(t)^2$  となる。真空中の光速を  $c$ 、光ファイバ中の群屈折率を  $n$  とすると、遅延時間  $t$  は、光ファイバの入り口からの距離  $z = ct/(2n)$  に換算でき、光ファイバ長手方向  $z$  に分布する後方散乱光パワ  $E_b(t)^2$  を表示できる。通常の OTDR では、縦軸は片道の損失に換算するので、デシベル換算の際に 1/2 をかけて、 $5 \text{Log}(E_b(t)^2)$  [dB] とする。この表示で得られる OTDR のダイナミックレンジが SWDR である。

図 6・18 に 10 km のシングルモード光ファイバを測定した例を示す。簡単のため、EDFA と AO-SW2 は取り除いて C-OTDR を構成している。信号光のパルス幅は 1  $\mu\text{s}$  であり、パルスの繰り返し周期は 1 ms である。横軸は 20  $\mu\text{s}/\text{div}$  であり、距離に換算すると、2 km/div (簡単のため  $c=3 \times 10^8$  m/s,  $n=1.5$  とした) に相当する。

図 6・19(a) は加算回数が 1 回の場合であり、後方散乱光の干渉効果によるフェージング雑音が顕著に現れている<sup>29)</sup>。(b) は加算回数が 1000 回であり、測定時間は約 1 s である。平均化により SNR が改善され、10 km の光ファイバの後方散乱光が OTDR 波形として表示されている。この OTDR 波形上の振幅の揺らぎは、C-OTDR 特有の雑音であり、光源の光周波数を変化さ

せて平均化することで、実用レベルまで低減可能である<sup>30),31)</sup>。その一方で、この雑音利用して、歪と温度の分布測定するセンサ応用も可能である<sup>26),27),28)</sup>。

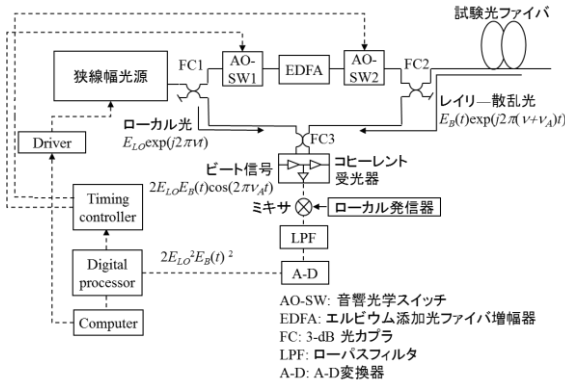


図 6・18 C-OTDR の構成

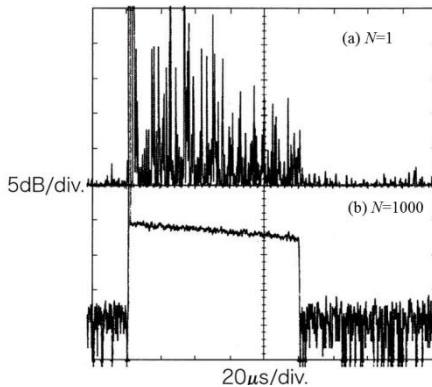


図 6・19 C-OTDR 波形

(a) N=1 回加算処理, (b) N=1000 加算処理

### (3) C-OTDR の受信感度とダイナミックレンジ拡大

表 6・5 に、C-OTDR で受信する信号の 2 乗平均電流を各種雑音に分類して示す。C-OTDR の後方散乱光パワは、信号光  $P_S(=E_S(t)^2)$  とローカル光  $P_L(=E_{LO}^2)$  のビート信号の 2 乗平均電流  $\langle i_s^2 \rangle$  は  $2P_S P_L (\eta e/h\nu)^2$  で表される。雑音の 2 乗平均電流  $\langle i_N^2 \rangle$  は、コヒーレント受光器の熱雑音  $\langle i_{th}^2 \rangle$ 、各種ショット雑音  $\langle i_{shot}^2 \rangle$ 、各種ビート雑音  $\langle i_{beat}^2 \rangle$  の総和となる。SNR を信号と雑音の 2 乗平均電流の比で定義すると  $\langle i_s^2 \rangle / \langle i_N^2 \rangle$  となる。十分大きなローカル光である場合、ローカル光のショット雑音  $2eP_L(\eta e/h\nu)B$  が全雑音  $\langle i_N^2 \rangle$  に対して支配的となる。SNR=1 となる光パワを最小受信感度とすると、 $h\nu B/\eta$  となる。例えば、パルス幅  $1 \mu s$  (距離分解能 100 m) の場



合、信号帯域は  $B=1$  MHz (ヘテロダイン検波は2倍にする) となり、PDの量子効率  $\eta=0.8$ 、光周波数  $\nu=194$  THz (波長  $1.55 \mu\text{m}$  に相当)、偏波面の不整合による受信感度の劣化分を  $3$  dB とすると、最小受光感度は約  $-92$  dBm となる。通常の直接検波 OTDR の最小受光感度は約  $-72$  dBm であり、 $20$  dB 以上の感度の改善ができる<sup>20)</sup>。

表 6・5 C-OTDR の受信信号と雑音

受信信号	各種要因	C-OTDR	With Post EDFA	With In-line EDFA
信号光 $\langle i_s^2 \rangle$		$2P_S P_{LO} \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right)^2$	$g \left[ 2P_S P_{LO} \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right)^2 \right]$	$g^2 \left[ 2P_S P_{LO} \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right)^2 \right]$
熱雑音 $\langle i_{th}^2 \rangle$		$\frac{4Fk_B T}{R_L} B$	←	←
ショット雑音 $\langle i_{shot}^2 \rangle$	暗電流	$2e i_d B$	←	←
	ローカル光	$2e P_{LO} \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right) B$	←	←
	信号光	$2e P_S \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right) B$	$g \left[ 2e P_S \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right) B \right]$	$g^2 \left[ 2e P_S \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right) B \right]$
	ASE		$4e P_{APO} \Delta\nu \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right) B$	$4e P_{AI} \Delta\nu \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right) B$
ビート雑音 $\langle i_{beat}^2 \rangle$	ローカル光と ASE		$4P_{APO} P_{LO} \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right)^2 B$	$4P_{AI} P_{LO} \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right)^2 B$
	信号光と ASE		$4P_{APO} g P_S \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right)^2 B$	$4P_{AI} g^2 P_S \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right)^2 B$
	ASE-ASE		$4P_{APO}^2 \Delta\nu \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right)^2 B$	$4P_{AI}^2 \Delta\nu \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right)^2 B$
備考				
$\eta$ : PD の量子効率		$k_B$ : ボルツマン定数		$i_d$ : PD の暗電流
$e$ : 電荷		$T$ : 絶対温度		$g$ : EDFA の光増幅率
$h$ : プランク定数		$F$ : 受光器の NF (Noise Figure)		$\Delta\nu$ : EDFA の帯域
$\nu$ : 光周波数		$R_L$ : 受光器の負荷抵抗		(光学フィルタによる)

図 6・17 の構成のように EDFA をポストアンプとして組み合わせる場合、信号光は光増幅率  $g$  だけ増幅される。その一方で EDFA からの ASE に起因するショット雑音とビート雑音  $\langle i_{beat}^2 \rangle$  が発生する。受光器で受信される ASE の単位周波数当たりの光パワーを  $P_{APO}$  とすると、ASE とローカル光とのビート雑音は  $4P_{APO} P_L (\eta e/h\nu)^2 B$  となる。EDFA のゲインが  $30$  dB 程度であれば、ローカル光のショット雑音の方が大きく、全雑音  $\langle i_N^2 \rangle$  で支配的になる<sup>21)</sup>。

インラインアンプとして EDFA を組み合わせる場合は、図 6・18 において FC2 と試験光ファイバの間に EDFA を配置する。双方向で光増幅するため、この EDFA には光アイソレータ

は含まれていない。順方向では、信号光パルスを増幅し、逆方向では、後方散乱光を増幅する。トータル光増幅率は  $g^2$  となる。その一方で、EDFA からの ASE が直接受光器に入るので、ASE とローカル光とのビート雑音  $4P_{Ai}P_L(\eta e/h\nu)^2 B$  が大きくなる。そこで、ASE 雑音は小さく抑え、往復分の増幅率を活かした最適設計をすると、C-OTDR の SNR として改善する領域がある<sup>21)</sup>。

図 6・20 に、大きなゲインのポストアンプ EDFA と小ゲインのインラインアンプ EDFA を組み合わせて SNR の改善効果を最適化した C-OTDR の測定例を示す。信号光パルスはパルスパワと波形に依存した非線形光学効果による制限を考慮している<sup>23)</sup>。パルス幅 10  $\mu$ s で、加算回数は  $2^{18}$  回である。SWDR は約 48 dB であり、EDFA を組み合わせた高性能な C-OTDR が示されている。海底用の光線路には 0.2 dB/km 以下の低損失な光ファイバが使用されているため、この SWDR は 240 km 以上の測定可能距離に相当する。両端から測定する場合は、400 km 以上の無中継光ファイバ区間を監視・試験ができることになる。

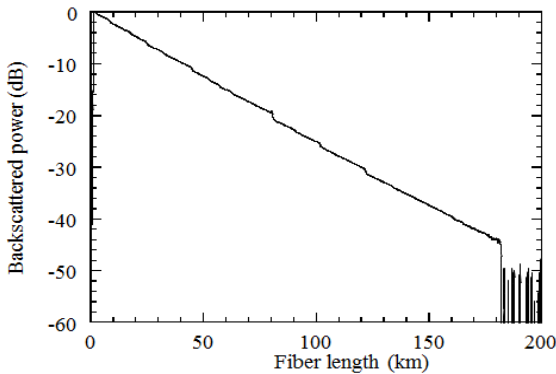


図 6・20 高性能 C-OTDR

#### (4) 海底光線路への実用例

日本列島の周りの離島と本島を結ぶ通信区間は、主に、中継器を海底に設置せず、両側の端局のみで経済的にシステム構成されている。遠隔励起 EDFA と分布ラマン光増幅器を組み合わせた無中継光伝送システムも導入されている<sup>32)</sup>。図 6・21 に、沖縄～宮古島の商用回線を模擬した光線路を C-OTDR で測定した結果を示す。全長約 340 km の試験光ファイバの約 258 km のところに EDF (Erbium Doped Fiber) を配置し、対向の端局から信号光と波長多重して 1.48  $\mu$ m 帯の励起光を入力し、遠隔励起の EDFA を構成する。C-OTDR 波形上に約 19 dB のゲインが確認できる。この励起光は、EDA までの 82 km 区間の光ファイバで分布ラマン増幅の励起光としても機能し、約 9 dB のゲインが確認できる。通常の OTDR に光学フィルタを組み合わせる構成では、OTDR 波形に各光増幅器からの影響で全区間測定できないが、C-OTDR はコヒーレント検波の特徴である狭帯域のフィルタリングにより、各光増幅器からの雑音の影響を小さくできるため、片側から全区間を測定できている<sup>33)</sup>。

海外と結ぶ通信区間にも、その光線路区間を試験監視するために C-OTDR が用いられている

る<sup>34),35)</sup>。光増幅器を IR 中継器として用いた光増幅中継伝送システムに C-OTDR を適用する場合、インラインアンプのモデル相当する。EDFA で複数回増幅された後方散乱光が受信されるので、EDFA からの ASE 雑音が、C-OTDR の受信感度を劣化させる。通常の海底光増幅伝送システムでは、受信する ASE のパワ密度は-140 dBm/Hz 程度であるので<sup>36)</sup>、表 6・5 のローカル光のショット雑音よりも大きく、ASE とローカル光のビート雑音が全雑音に対して支配的となる。したがって、C-OTDR で監視できる区間は、海底光増幅中継伝送システムのリピータ間隔と EDFA ゲイン設定等に依存するので、伝送システムと試験監視システムのトータルな設計が必要となる。実用例として、約 900 km の沖縄～鹿児島島の商用回線を測定した結果も報告されている<sup>36)</sup>。

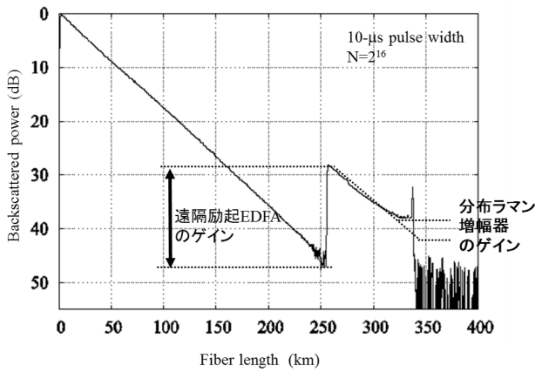


図 6・21 遠隔励起 EDFA と分布ラマン増幅器を含む光線路の C-OTDR 測定波形

#### (5) C-OTDR のセンサ応用例

C-OTDR はさらに高機能なアプリケーションがある。後方散乱光の中には、レイリー散乱光よりも 20 dB 程度微弱なブリルアン散乱光が含まれている。このブリルアン散乱光の光周波数は、光ファイバに分布する歪みや温度に対して線形な関係がある<sup>37)</sup>。C-OTDR に LN 位相変調器を用いた光周波数シフタを組み合わせる簡単な変更で、ブリルアン散乱光のみを受信し、歪みや温度の分布測定することが可能である<sup>38)</sup>。B-OTDR (Brillouin OTDR) と呼ばれ、光ファイバの歪み測定は、光ファイバケーブルの信頼性評価方法として用いられている。B-OTDR の測定原理と応用例については本章 6-4-3 B-OTDR を参照されたい。

#### (6) まとめ

高性能な C-OTDR の基本的な構成と原理、実用例について説明した。レイリー散乱光波形からのセンサ応用<sup>28)</sup>は研究段階にあるが、実用レベルへの進展を期待する。

### 6-4-2 R-OTDR

(執筆著者：足立正二) [2015 年 6 月 受領]

ラマン散乱光を利用した分布型温度センサ (DTS : distributed temperature sensor) は光ファイバセンサの中でも歴史が古く、その特長 (長距離にわたる分布測定, 防爆, 耐腐食性, 耐誘導性など) を生かして、プラント分野やオイル・ガス分野など多くの産業分野で使われている。ここでは、時間領域光反射計測法 (OTDR : optical time domain reflectometry) を用いた R-OTDR (Raman OTDR) の原理, 性能例を解説し、また、主にプラント分野での安全・安心を目指した適用例について紹介する。

光ファイバに光を入射すると光ファイバ内で散乱が生ずる。散乱光はその発生メカニズムにより、レイリー散乱光, ブリュアン散乱光, ラマン散乱光に分けられる。R-OTDR は、これら散乱光の中でラマン散乱光の強度が温度に依存する原理を用いて温度測定を行う。入射光として光パルスを用い後方ラマン散乱光を時間軸でサンプリングし、光パルスが入射してから特定の位置で生じた散乱光が受光部に達するまでの時間を知ることで、光ファイバの長手方向に沿った温度分布を測定することができる。R-OTDR の構成例及びラマン散乱光の強度変化の様子を図 6・22 に示す。

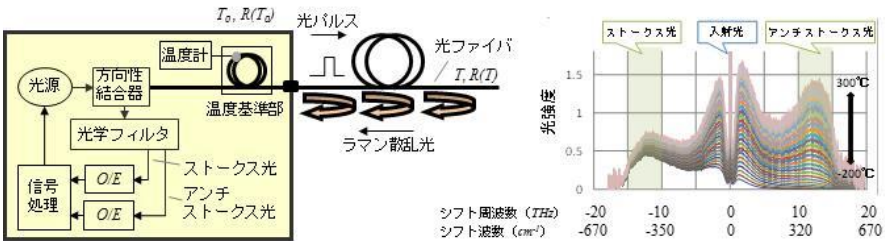


図 6・22 R-OTDR の構成例及びラマン散乱光の強度変化

入射光が励起された熱振動を吸収し再発光する光をアンチストークス光, 入射光が構成物質に吸収され熱振動を励起した後再発光する光をストークス光と呼ぶ。アンチストークス光強度  $I_{as}$  及びストークス光強度  $I_{st}$  は、 $\nu_0$  を入射光の波数、 $\Delta \nu$  をラマンシフト波数とすると以下のように表される。

$$I_{as} \propto (\nu_0 + \Delta \nu)^4 \cdot n(\Delta \nu, T)$$

$$I_{st} \propto (\nu_0 - \Delta \nu)^4 \cdot (1 + n(\Delta \nu, T))$$

ここで、 $T$  は絶対温度、 $n$  は光学フォノンの数でボーズアインシュタイン分布に従う。ラマンシフト波数は光ファイバを構成するガラスの分子構造により決まる。温度校正のための温度基準部の温度を  $T_0$  とすると、アンチストークス光強度とストークス光強度の比  $R(T)$  から、被測定点の温度  $T$  は、

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{hc\Delta \nu} \cdot \ln \frac{R(T)}{R(T_0)}$$

となり、温度基準部の絶対温度  $T_0$  と温度基準部及び被測定点でのアンチストークス光とストークス光の強度比  $R(T_0)$ 、 $R(T)$  がわかれば求めることができる。ここで、 $h$  はプランク定数、 $c$  は光速、 $k$  はボルツマン定数である<sup>39)</sup>。しかし、実際の使用においては、強度変化を利用する ROTDR は光ファイバや接続点の特性に敏感なため、温度校正には十分な配慮が必要となる<sup>40)</sup>。

R-OTDR は用途に応じて様々な製品が市販されている。代表的な性能例を表 6・6 に示す。測定長、測定時間、サンプリング間隔、温度分解能、空間分解能といった代表的な性能以外にも、耐環境性、消費電力、上位システムとの親和性、セキュリティなども実際の使用では重要となる。また、ラマン散乱光は極めて微弱なため主にはマルチモード光ファイバを対象にしていたが、既設のシングルモード光ファイバに対応した測定器も開発されている。

表 6・6 代表的な R-OTDR の性能例

適合光ファイバ	マルチモード光ファイバ		シングルモード光ファイバ
-	短・中距離	長距離	-
測定長	6km	40km	30km
サンプリング間隔	0.1m - 1m	1m - 2m	2m
温度分解能	0.5℃ (1km レンズ, 1m サンプルング, 1m 空間分解能, 10秒測定) 0.7℃ (6km レンズ, 1m サンプルング, 1m 空間分解能, 10分測定)	0.8℃ (40km レンズ, 2m サンプルング, 4m 空間分解能, 30分測定)	2℃ (30km レンズ, 2m サンプルング, 8m 空間分解能, 10分測定)
空間分解能	1m	2m - 4m	8m

R-OTDR が適用可能な注目される分野としては、

- ①産業プラントや設備 (製鉄所, 製油所, 火力・水力・原子力発電所, ベルトコンベア, タービン, ボイラーなど),
- ②産業インフラ (パイプライン, ガス配管, タンク, 電力ケーブル, 鉄道など),
- ③資源エネルギー開発 (オイル・ガス, 地熱発電, 風力発電, 太陽光 (熱) 発電, 超電導ケーブルなど)

などがあげられる。産業プラントにおけるサイト安全, 設備診断への適用例としては、アンモニアパイプライン漏れ検知, LNG タンク・パイプライン漏れ検知, 石炭・紙チップ搬送コンベアの火災検知, ケーブルラック等の異常温度監視, 炉の表面温度 (耐火レンガ消耗) 監視, 電力ケーブル温度監視, 乾燥炉の温度監視, 冷蔵倉庫の温度管理, 空調システムの省エネルギー化など用途範囲は広い<sup>41)</sup>。

一方、標準化活動も活発に進められている。主に海底での資源開発に用いる光ファイバ技術に関する審議を行っている SEAFOM (subsea fiber optic monitoring group) は、分布型光ファイバ温度センサに関する業界標準を 2010 年に制定した。また、国際電気標準会議 (IEC: international electrotechnical commission) の IEC/TC86/SC86/WG2 (ファイバオプティクス/光能動部品/光ファイバセンサ) 部門において、IEC61757-3-1 “Fibre Optic Sensors Part 3-1: Temperature measurement – Distributed sensing” に関する審議が進められている。

### 6-4-3 B-OTDR

(執筆者：倉嶋利雄) [2018年6月 受領]

#### (1) はじめに

B-OTDR (Brillouin - Optical Time Domain Reflectometer)<sup>42)</sup> は、通信用シングルモード光ファイバ (以後、“光ファイバ”と表す) の長さ方向に局所的に生じている、伸びひずみ (以後、“ひずみ”と表す) 分布を測定することを目的として開発された、光ファイバひずみ分布測定器である。光ファイバに生じるひずみは、光ファイバの主要な破断要因<sup>43)</sup>であり、光ファイバの破断は、光伝送システム全体の信頼性に大きな影響を与える。光ファイバの強度保証理論<sup>43)</sup>によれば、光ファイバの破断確率は、光ファイバの最大ひずみによって決定されるため、光ファイバケーブルの製造、光通信線路の建設・保守・運用の各々の段階で、光ファイバのひずみを正確に評価することは、光通信線路の長期信頼性を保証するうえで重要である。

光ファイバのひずみ分布計測技術が開発される前までは、光ファイバに生じたひずみは、パルス信号の遅延時間<sup>44)</sup>、あるいは、正弦波変調位相信号のひずみによる変化<sup>44)</sup>を測定することにより、評価されていた。これらは、光ファイバの長さ方向に局所的なひずみが分布している場合でも、光ファイバ全長における、ひずみの平均値のみしか知ることができず、分布しているひずみの大きさを正確に評価することはできなかった。また、光ファイバの長さ方向にひずみが生じても光伝送損失は変化しないため、光線路の障害点探索器である光パルス試験器 (OTDR) では、光ファイバに生じているひずみ分布を計測することはできない。

#### (2) 光ファイバの長さ方向に生じているひずみ分布の測定原理

B-OTDR は、光ファイバのブリルアン散乱光の周波数が光ファイバの長さ方向に分布しているひずみに比例して変化するという特性<sup>45-47)</sup>を利用する。光ファイバ中のブリルアン散乱は、入射光が光ファイバ媒質中を伝搬する音波 (密度ゆらぎ) と相互作用して、ドップラ効果により媒質固有の周波数だけずれて、パルス光の入射端側に後方散乱される現象である。光通信用の光ファイバでは、光源波長が 1.55  $\mu\text{m}$  の場合、約 10 GHz 低周波数側にシフトする。この周波数  $\nu_B$  はブリルアン周波数シフトと呼ばれ、下式のように表される<sup>48)</sup>。

$$\nu_B = \frac{2nV_A}{\lambda}$$

ここで、 $n$  は光ファイバの屈折率、 $V_A$  は音速 [m/s]、 $\lambda$  は入射光の波長 [m] である。また、光ファイバ中の音速  $V_A$  は、下式で表され<sup>49)</sup>、

$$V_A = \sqrt{\frac{E(1-\kappa)}{\rho(1+\kappa)(1-2\kappa)}}$$

光ファイバのヤング率  $E$  [N/m<sup>2</sup>]、密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]、ポアソン比  $\kappa$  に依存する。両式から、 $\nu_B$  を決定する  $n$ 、 $E$ 、 $\rho$  が光ファイバの長さ方向のひずみ依存するため、媒質に生じたひずみにより、音速  $V_A$  が変化し、したがって、ブリルアン周波数シフトも変化することがわかる。微弱なブリルアン散乱光を低雑音・高感度検出するため、C-OTDR [本章 6-4-1 参照] と同様に、コヒーレント検波を使用する。

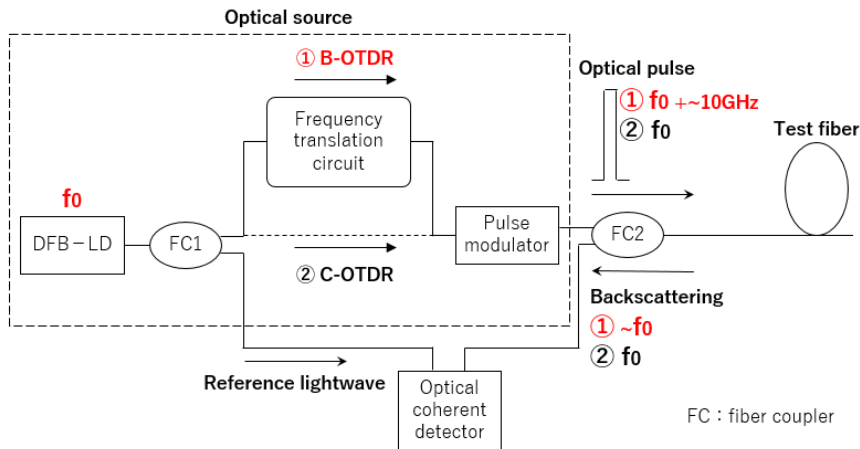


図 6・22 ひずみ・光損失統合型 OTDR (B-OTDR and C-OTDR) の構成

図 6・22 は、光ファイバ中のブリルアン散乱光を測定して、光ファイバ長さ方向のひずみ分布を測定する、①B-OTDR、及び、レイリー散乱光を測定して、光ファイバ長さ方向の損失を測定する、②C-OTDR を使い分けることができる、ひずみ・光損失統合型 OTDR(50,51)の基本構成である。B-OTDR として、利用するときの測定系を説明する。図 6・22 の①に示すように、光源 (DFB-LD、光周波数  $f_0$ ) と光合分波器 (Fiber coupler : FC1) を用いて、二つに分波する。その一つを光周波数変換器 (Frequency translation circuit) 及びパルス変調器 (Pulse modulator) を介して、被測定光ファイバ (Test fiber) に入射する試験光 (Optical pulse) とする。FC1 で分波したほかの一つの光源をコヒーレント検波に使用するための参照光 (Reference lightwave) とする。パルス光は光合分波器 FC2 を介して被測定光ファイバに入射され、光ファイバ中で散乱される後方ブリルアン散乱光を光合分波器介して、コヒーレント光受信機で受信する。前述したように、ブリルアン散乱光の周波数は、波長が  $1.55 \mu\text{m}$  の場合、入射パルス光の周波数に比べて、約  $10 \text{ GHz}$  低いため、ブリルアン散乱光と参照光の光周波数差がほぼ等しくなるように、光周波数変換器を用いて、あらかじめ、約  $10 \text{ GHz}$  高周波数側にシフトさせたパルス光 (光周波数:  $f_0 + \sim 10 \text{ GHz}$ ) を光ファイバに入射する。このような工夫を施すことにより、ブリルアン散乱光と参照光の周波数 (光周波数:  $\sim f_0$ ) がほぼ等しくなり、コヒーレント検波 (ホモダイン検波) を用いて、ブリルアン散乱光を高感度に検出することができる。同様に、光周波数変換機を用いて入射するパルス光の周波数を変化させるごとに、ブリルアン散乱光を測定して、光ファイバ長さ方向の任意の場所ごとのブリルアン散乱光の強度が最大となる周波数  $\nu_B$  を測定する。場所ごとに測定した散乱光の周波数の値を  $\nu_B$  のひずみ計数を用いて、ひずみの値に換算することにより、光ファイバの長さ方向のひずみ分布を求めることができる。

光損失分布測定 (C-OTDR) では、光ファイバ中で発生するレイリー散乱光の強度が光損失により変化するという特性を利用する。レイリー散乱光は、光ファイバガラスに本質的に存在する屈折率のゆらぎにより発生するので、ブリルアン散乱光のような光の周波数シフト

を伴わない。したがって、図 6・22 の②に示すように、光周波数変換器を使用せずにパルス光（光周波数  $f_0$ ）を光ファイバに入射して、光ファイバ中のレイリー散乱光をコヒーレント受信（ヘテロダイン検波）する。このレイリー散乱光の強度変化から損失を求めることができる。

ひずみ及び光損失の発生位置は、パルス光を光ファイバに入射してから後方散乱光が光受信部で検出されるまでの遅延時間差を測定することにより特定できる。また、距離分解能  $\delta z$  は、パルス光のパルス幅に依存する。



## ■5群 - 2編 - 6章

### 参考文献

- 1) 有居正仁, 東裕司, 榎本圭高, 鈴木勝晶, 荒木則幸, 宇留野重則, 渡邊常一: “拡大する光アクセス網を支える光媒体網運用技術”, NTT 技術ジャーナル, vol. 18, no. 12, pp.58-61 (2006年12月)
- 2) 榎本圭高, 中澤賢一, 蔵谷渉, 裕茂樹: “光線路試験システムの経済化及び光ケーブル被災状況把握への適用”, 電子情報通信学会 信学技報, vol. 112, no. 54, OFT2012-17, pp.77-82 (2012年5月)
- 3) 蔵谷渉, 榎本圭高, 中澤賢一, 藤本久: “光線路試験システムと通信モニタ技術による切替効率化の検討”, 2011年電子情報通信学会通信ソサエティ大会, B-10-8 (2011)
- 4) S. Tomita, H. Tachino, and N. Kasahara: “Water Sensor with Optical Fiber”, IEEE J. Lightwave Technol., vol. 8, no. 12, pp.1829-1832 (December 1990)
- 5) 岡田賢治, 小林郁太郎: “光ファイバの後方散乱と障害点探索”, 信学論(B), vol. J63-B, no. 2, pp.159-166 (February 1980)
- 6) 山下克也, 羽田野吉紀, 小山田弥平, 徳田正満: “曲げ法を用いた光心線対照器の結合効率”, 信学論(B), vol.J66-B, no.11, pp.1426-1427 (November 1983)
- 7) 高嶋徹, 小沼朋浩, 田端学: “新型光ファイバ心線対照器の開発”, 2005年電子情報通信学会総合大会, B-10-1 (2005)
- 8) 榎本圭高, 富田信夫, 照井博, 山田泰文, 内田直人: “ハイブリッド型光モジュールを用いた小型光通話器の設計”, 1997年電子情報通信学会総合大会, B-10-68 (1997)
- 9) 富田信夫, 佐藤紀, 中村育夫: “今, 光線路のオペレーションが変わる-AURORA&FITAS-”, NTT 技術ジャーナル, vol. 2, no. 8, pp. 10-14 (August 1990)
- 10) N. Tomita, H. Takasugi, N. Atobe, I. Nakamura, F. Takaesu, and S. Takashima: “Design and Performance of a Novel Automatic Fiber Line Testing System With OTDR for Optical Subscriber Loops”, IEEE J. Lightwave Technol., vol. 12, no. 5, pp.717-726 (May 1994)
- 11) Y. Enomoto, H. Izumita, K. Mine, S. Uruno, and N. Tomita: “Design and Performance of Novel Optical Fiber Distribution and Management System With Testing Functions in Central Office”, IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 29, issue 12, pp. 1818-1834 (June 2011)
- 12) 高杉英利, 富田信夫, 千田良一, 鈴木秀喜, 小口泰介: “光パルス試験器を用いたインサービスク線路特性試験法”, 信学論(B), vol. J76-B1, no. 3, pp. 311-320 (March 1993)
- 13) N. Honda, N. Noriyuki, H. Izumita, and M. Nakamura: “Extended Optical Fiber Line Testing System with L/U-Band Optical Coupler Employing 4-Port Circulators and Chirped Fiber Bragg Grating Filters for L-Band WDM Transmission”, IEICE TRANSACTIONS on Communications vol. E86-B, no. 5, pp.1562-1566 (May 2003)
- 14) H. Takasugi, N. Tomita, H. Suzuki, and T. Akai: “A New Fault-Identification Method Using a Dichroic Reflective Optical Filter in Optical Subscriber Loops”, IEEE J. Lightwave Technol., vol. 11, no. 2, pp.351-357 (February 1993)
- 15) ITU-T Recommendations under Study Group 15 responsibility, L-series Recommendations, [http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/index\\_sg.aspx?sg=15](http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/index_sg.aspx?sg=15)
- 16) ITU-T Recommendation L.25, “Optical fibre cable network maintenance” (2015)
- 17) ITU-T Recommendation L.66, “Optical fibre cable maintenance criteria for in-service fibre testing in access networks” (2007)
- 18) IEC 61753-042-2, “Fibre optic interconnecting devices and passive components - Performance standard - Part 042-2: Plug-pigtail-style and plug-receptacle-style of OTDR reflecting devices for category C - Controlled environments” (2014)
- 19) P. Healey and D. J. Malyon: “OTDR in single-mode fiber at 1.5 μm using heterodyne detection,” Electron. Lett., vol. 18, no. 12, pp. 862-863 (1982)
- 20) Y. Koyamada and H. Nakamoto: “High performance single mode OTDR using coherent detection and fibre amplifiers,” Electron. Lett., vol. 26, no. 9, pp. 573-574 (1990)
- 21) Y. Koyamada, H. Nakamoto and N. Ohta: “High performance coherent OTDR enhanced with erbium doped fiber amplifiers”, J. Opt. Commun., vol. 13, No. 4, pp. 127 - 133 (1992).

- 22) H. Izumita, Y. Koyamada, I. Sankawa and S. Furukawa: "Coherent optical time-domain reflectometry with a 40-dB dynamic range enhanced with employing optical fiber amplifiers", in Tech. Dig. OFC'92, WK6 (1992).
- 23) H. Izumita, Y. Koyamada, S. Furukawa and I. Sankawa: "The performance limit of coherent OTDR enhanced with optical fiber amplifiers due to optical nonlinear phenomena", J. Lightwave Technol., Vol. 12, No. 7, pp. 1230 - 1238 (1994)
- 24) Y. Horiuchi, S. Yamamoto, S. Akiba, and H. Wakabayashi, "Highly accurate fault localization over 4580 km optical amplifier system using coherent Rayleigh backscatter reflectometry," in the proc. of ECOC'93, MoC1.3, pp. 5-8 (1993)
- 25) M. Sumida, S. Furukawa, K. Tanaka, and M. Aiki, "High-accurate fault location technology using FSK-ASK probe backscattering reflectometry in optical amplifier submarine transmission systems," IEEE J. Lightwave Technol. vol. 14, no. 10, pp. 2108-2116 (1996)
- 26) 小山田弥平: "レイリー散乱を利用した光ファイバの高感度歪分布測定法の提案," 信学技報, OFT 98-23 (1998)
- 27) Y. Koyamada, M. Imahama, K. Kubota and K. Hogari: "Fiber-Optic Distributed Strain and Temperature Sensing With Very High Measurand Resolution Over Long Range Using Coherent OTDR", J. Lightwave Technol., Vol. 27, No. 9, pp. 1142 - 1146 (2009)
- 28) 東郷明雄, 飯塚裕太, 島野良介, 泉田史, 小山田弥平: "コヒーレント OTDR で取得した光ファイバ中のレイリー散乱波形に基づく高精度長距離温度分布測定," 電子情報通信学会論文誌 B Vol. J95-B No. 2 pp. 337-345 (2012)
- 29) Healey: "Fading in heterodyne OTDR," Electron. Lett., vol. 20, no. 1, pp. 30-32, 1984
- 30) H. Izumita, S. Furukawa, Y. Koyamada and I. Sankawa: "Fading Noise Reduction in Coherent OTDR", IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 4, No. 2, pp. 201 - 203 (1992)
- 31) H. Izumita, Y. Koyamada, S. Furukawa and I. Sankawa: "Stochastic amplitude fluctuation in coherent OTDR and a new technique for its reduction by stimulating synchronous optical frequency hopping", J. Lightwave Technol., Vol. 15, No. 2, pp. 267 - 278 (1997)
- 32) <http://www.ntt-west.co.jp/news/0312/031224.html>
- 33) I. Ogushi, H. Izumita, K. Tanaka and M. Nakamura: "Measurement of a 340 km optical fiber line with a remotely pumped EDFA and DRA by using a highly developed coherent detection OTDR," in the proc. of ECOC2004, Tu3.6.5, vol. 2, pp. 224-225 (2004)
- 34) S. Furukawa, K. Tanaka, Y. Koyamada and M. Sumida: "Enhanced coherent OTDR for long span optical transmission lines containing optical fiber amplifiers", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 7, No. 5, pp. 540 - 542 (1995)
- 35) T. Otani, Y. Horiuchi, T. Kawazawa, K. Goto and S. Akiba: "Fault localization of optical WDM submarine cable network using coherent optical time-domain reflectometry", IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 10, No. 7, pp. 1000 - 1002 (1998)
- 36) 角田正豊, 古川眞一, 田中郁昭, 雨宮正樹: "海底光増幅中継伝送系における故障位置探査技術の検討", 電子情報通信学会 論文誌 B-1, Vol. J78-B-1, No. 12, pp. 745 - 752 (1995)
- 37) T. Horiguchi et al.: "Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering", J. Lightwave Technol., Vol. 13, No. 7, pp. 1296-1302 (1995)
- 38) H. Izumita, T. Sato, M. Tateda and Y. Koyamada: Brillouin OTDR employing optical frequency shifter using sideband generation technique with high-speed phase modulator," IEEE Photon. Technol. Lett. vol. 8, no.12, pp. 1674-1676 (1996)
- 39) J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby and J. N. Ross : "Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector", Electron. Lett., 21, pp.569-570 (1985)
- 40) T. Fukuzawa, H. Shida, K. Oishi, N. Takeuchi, and S. Adachi : "Performance Improvements in Raman Distributed Temperature Sensor", Photonic Sensors, Vol. 3, No.4, Springer, pp.314-319 (Oct 2013)
- 41) 足立正二 : "分布型光ファイバ温度センサ (ラマン DTS) によるプラントのサイト安全、設備診断への適用", 2014 通学会ソ大, BCI-1-8 (2014-9)
- 42) Toshio Kurashima, Tsuneo Horiguchi, Hisashi Izumita, Shin-ichi Furukawa, and Yahei Koyamada: "Brillouin Optical-Fiber Time Domain Reflectometry", IEICE TRANS.COMMUN., vol.E76-B, No.4, pp.382-390 (1993)

- 43) 満永 豊, 勝山 豊, 小林敬和, 石田之則: "スクリーニング試験による光ファイバ強度保証法", 電子通信学会論文誌 vol.J66-B, No.7, pp.829-836 (1983)
- 44) Mitsuhiro Tateda, Shigeru Tanaka, and Yasuyuki Sugawara: "Thermal characteristics of phase shift in jacketed optical fibers", Appl. Opt., vol.19, No.5, pp. 770-773 (1980)
- 45) Toshio Kurasima, Tsuneo Horiguchi, and Mitsuhiro Tateda: "Tensile strain effects on Brillouin frequency shift in single-mode fibers having pure silica and GeO<sub>2</sub>-doped cores", in 7th International Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (IOOC), pp. 70-71 (1989)
- 46) Tsuneo Horiguchi, Toshiio Kurashima, and Mitsuhiro Tateda: "Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers", IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 1, No.5, pp. 107-108(1989)
- 47) 倉嶋利雄, 堀口常雄, 立田光廣: "単一モード光ファイバにおけるブリルアン周波数シフト量の応力依存性", 電子情報通信学会春季全国大会, B-644(1989).
- 48) D.Cotter: "Stimulated Brillouin scattering in monomode optical fiber", J.Opt.Comm., Vol.4, No.1, pp10-19, (1983)
- 49) D.S.P.Timoshenko and T.N.Goodier: "Theory elasticity, McGraw-Hill, New York, 1970, Chap.14.
- 50) T.Kurashima, M.Tateda, T.Horiguchi, and Y.Koyamada: "Performance Improvement of a Combined OTDR for Distributed Strain and Loss Measurement by Randomizing the Reference Light Polarization State", IEEE Photonics Technol. Lett., Vol.9, No.3, pp. 360-362 (1997)
- 51) 倉嶋利雄, 薄 知規, 田中郁昭, 岩淵 武: 歪み・損失統合型 OTDR の高性能化, 第 32 回地盤工学研究発表会, C-7, 1316, 2637-2638(1997)