

時間領域 OCT による光ファイバ断線の
高感度検出と解析

2019 年 7 月

千葉大学大学院融合科学研究科
情報科学専攻画像マテリアルコース
田中雅之

(千葉大学審査学位論文)

時間領域 OCT による光ファイバ断線の
高感度検出と解析

2019 年 7 月

千葉大学大学院融合科学研究科
情報科学専攻画像マテリアルコース

田中雅之

第1章	序論	1
第2章	従来の光ファイバ断線検出方法	3
2-1	バックリフレクションメータ	3
2-2	TD-OCT を用いたリフレクトメータ	11
2-3	OTDR	11
2-4	OFDR	11
2-5	まとめ	11
第3章	光ファイバ断線の原因と特徴	12
3-1	光ファイバの製造工程と断線の危険性	12
3-2	光ファイバの接続方法と断線の危険性	23
3-3	光デバイスの断線検出	29
3-4	光ファイバ断線の特徴	30
3-5	まとめ	37
第4章	光ファイバ断線検出における TD-OCT の優位点	39
4-1	OCT の原理	39
4-2	OCT の種類	45
4-3	TD-OCT の優位点	47
第5章	高感度光ファイバ断線検出器の開発	48
5-1	回転型 TD-OCT	48
5-2	光ファイバ断線検出器の装置構成	52
5-3	反射減衰量の絶対値化	59
第6章	光ファイバ断線の解析	69
6-1	光ファイバ断線のシミュレーション	69
6-2	シミュレーションサンプルの作製	71
6-3	光ファイバ断線における反射減衰量の理論式	76
6-4	シミュレーション実験の結果	77
6-5	考察	78
6-6	まとめ	79
第7章	研究の発展	80
第8章	結論	86
付録		87
謝辞		96
参考文献		97

第1章 序論

1970年、アメリカのコーニング社が通信用光ファイバを実用化したと発表して以来、光ファイバは目覚ましく発展し、さまざまな分野で利用されるようになった⁽¹⁾。携帯電話片手に世界のどこにいても大容量通信が可能となり、また、医療、センサ等、通信分野以外にも利用されるようになった。しかしながら、光ファイバはガラスを主成分としている点では当時と変わっておらず、断線する懸念は依然として存在している。しかも、光ファイバを利用した製品ならびにシステムの多くはキーパーツととなっている場合が多く、光ファイバが断線した場合、性能が著しく低下し、通信障害のような重大事故につながる懸念を持っている。光ファイバ断線は最も避けるべき不具合である。光ファイバはこれまでの進歩により断線の危険性はかなり低くなった。しかし、光ファイバを用いた光コネクタならびに光デバイスでは断線の危険性は低くなっていない。

光ファイバ断線は光ファイバがあるポイントで脆性破壊を起こしてしまう現象であり、挿入損失ならびに反射減衰量が大きくなる特徴を持つ。光ファイバの断線検査はこの特徴を利用し、挿入損失及び反射減衰量測定機が用いられてきた⁽²⁾。ここでの反射減衰量の測定値ならびに挿入損失の測定値は光路全体の積算値であり、この場合、光路全体の積算値より断線部の値が十分大きくない限り、断線部と区別することができず、発見は困難となる。また、反射減衰量の測定機はPD(Photo Diode)及び電子回路によるノイズ処理の性能に制限され、一般的に-75 dBである。それ以下となる反射減衰量の断線があった場合には、これもまた、発見困難である。よって、確実な断線を発見するためには以下の性能が必要となる。

- 1) 位置情報を持つ反射減衰量測定
- 2) 断線を確実に発見できる感度

これらの要求性能を満足する為、本研究では低コヒーレンス干渉計であるOCT(Optical Coherence Tomography)に着目した。OCTは高感度であると同時に位置情報を得ることができ、光ファイバの断線検出に適していると考えた。OCTには大きく分けてFD(Fourier Domain)-OCT, TD(Time-Domain)-OCTに分類される⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。いずれの方式も要求性能を満たせる可能性をもっているが、光ファイバの断線検出は例えば光コネクタ内部の断線を検出する時、20mm程度の長さをもっており、長深度が要求される。その観点からTD-OCTが適している⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。

TD-OCTを用いた高感度な反射減衰量測定機はこれまで横河電機⁽⁹⁾とHP⁽¹⁰⁾の2社が製造販売を行っていた(現在はいずれのメーカーにおいても生産は中止されている)。その当時の両社における反射減衰量感度ならびに精度は各社独自の基準を設けているため両者を単純に比較はできないが、総じてファイバ断線の検出として十分な議論がされていない。

本研究はTD-OCTを用いて高感度の絶対値化された反射減衰量測定機を開発し、光ファイバ断線の検出ならびに解析を行うことを目的とする。また、本研究の対象は光ファイバ単体ならびに光デバイスを対象としているが、研究の中心は最もスタンダードで

あるシングルモードファイバを用いた光デバイス（光コネクタ）について行った。光デバイス（光コネクタ）を中心に議論した理由は光ファイバ単体より光デバイスの方が断線の危険性が高いことと光デバイスの中でも光コネクタを選択した理由は単純構造でありながら、光デバイス共通の議論として研究を進められることによる。

第2章：従来の光ファイバ断線の検出方法について調査し、光ファイバ断線検出を目的とした場合の研究課題を明確にする。

第3章：光ファイバ断線について、光ファイバの材料と検査方法含む製造工程、さらに経時変化から光ファイバ断線の特徴及び危険性を考察し、研究課題を明確にする。

第4章：OCTについて述べる。OCTの原理、種類からTD-OCTの優位点を述べる。

第5章：光ファイバ断線検出器の開発について述べる。回転機構型TD-OCTの原理と装置の構成を述べ、反射減衰量の絶対値化の手法について説明する。

第6章：光ファイバ断線検出器を用いて、光ファイバ断線の解析を行った結果を述べる。光ファイバ断線の特徴から光コネクタを用いたシミュレーション実験を行い、理論値と実験値の比較研究を行った。

第7章：本研究の展開を述べ、その一例として光ファイバの曲がり解析について述べる。

第8章：結論

第2章 従来の光ファイバ断線検出方法

これまで光ファイバ断線の検出は以下の4つの方法が取られている。

- 1)バックリフレクションメータ
- 2)TD-OCTを用いたリフレクトメータ
- 3)OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)
- 4)OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry)

2-1 バックリフレクションメータ

バックリフレクションメータは光ファイバ断線検出の目的として最も多くのユーザーが用いてきた方法である。安価であるとともに、光デバイスの IL (Insertion Loss 挿入損失)及び RL (Return Loss 反射減衰量)の検査が断線検査と同時に行えることが理由として挙げられる。

一例として、Fig.2-1 に株式会社オプトゲート製バックリフレクションメータを示す(仕様は表 2-1 参照)⁽²⁾。本方法は“断線を引き起した光ファイバは断線部でファイバがお互いに離れてしまい、 IL (挿入損失), RL (反射減衰量)が増加してしまう”ことを前提に光ファイバ断線の検出を行っている。



Fig.2-1 バックリフレクションメータ

表 2-1 オプトゲート製バックレフレクションメータの仕様

分類	項目	仕様
IL 測定	波長	$\lambda = 1310/1550 \text{ nm}$
	測定レンジ	+3~-80 dBm
	測定精度	0.25 dB
	出力安定性	0.05 dB/h(@25°C)
RL 測定 *1	波長	$\lambda = 1310/1550 \text{ nm}$
	測定レンジ	0~-75 dB
	測定精度	1 dB
その他	AC 電源	AC 100~240 V
	使用温度範囲	-5~55 °C
	サイズ(取手部除く)	260×265×140 mm
	重量	3 kg

*1: RL 反射減衰量はプラス表示で行う場合もあるが、本論文ではマイナス表示する。
 理由は過去に販売されているバックリフレクションメータ及び TD-OCT を用いたリフレクトメータが同様の定義を行っていることによる。

2-1-1 IL による検出方法

IL 測定はレファレンス IL_{ref} を基準とし、DUT (Device Under Test) を接続した時の IL を測定したものである。

まず、レファレンス IL_{ref} を測定する。バックリフレクションメータ内部に構成されている LD 光源から出射した光はカプラを介して SM 光出力端から出力パワー P_0 で出射される。出射した光はマスターコードを介し、パワーメータに光入力パワー P_{ref} が入射される。Fig.2-2 参照。レファレンス IL_{ref} は (2-1)式で求められる。マスターコードの DUT 接続に使用するコネクタは基準コネクタと呼び、JIS C5961⁽¹¹⁾で規定されたコネクタである。

$$IL_{ref} = -10 \log \left(\frac{P_{ref}}{P_0} \right) \quad (2-1)$$

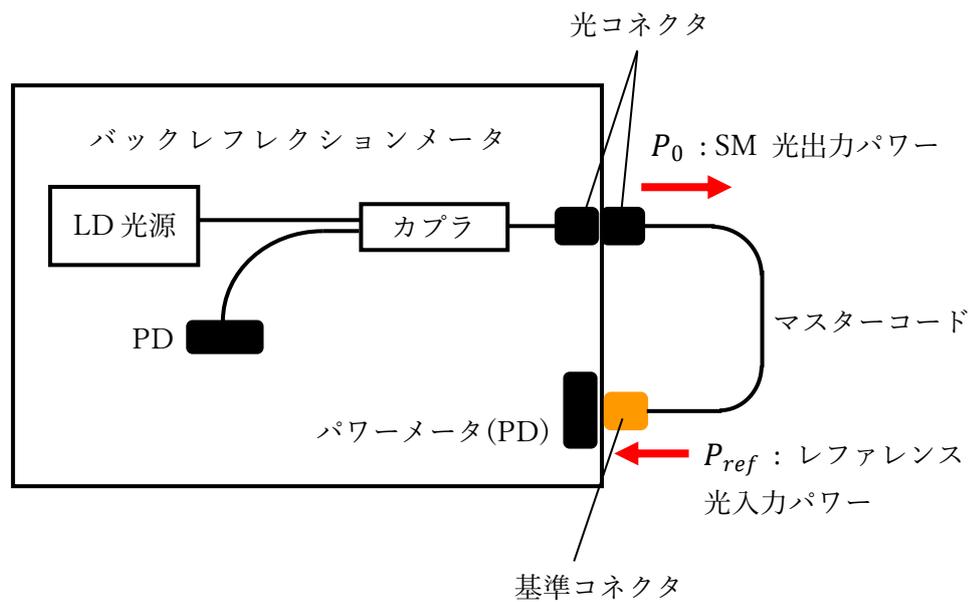


Fig.2-2 IL (Insertion Loss)のレファレンス測定

次に、基準コネクタに DUT(被測定物)を接続し、DUT のIL を測定する。その値からレファレンス値 IL_{ref} を減算し、IL を求める((2-2)式参照)。Fig.2-3 参照。

この IL は以下の 2つの検査を兼ねている。

1)DUT のコネクタ A の接続損失

DUT のコネクタ B は PC 接続されていない為、接続損失は無視できる。また、コネクタ間のファイバ損失はファイバの仕様が 0.2 dB/km であり、通常この部分の長さは 1 m 程度のため無視できる。よって、(2-2)式で求められる IL はコネクタ A の接続損失になる。

2)DUT 全体の断線検査

1)がコネクタ A の接続損失になるためにはファイバ及びコネクタ A, B が何かしらによる特別な損失が無いと仮定した場合である。これらに大きな損失がある場合には断線が疑われる。

$$IL = -10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) - IL_{ref} \quad (2-2)$$

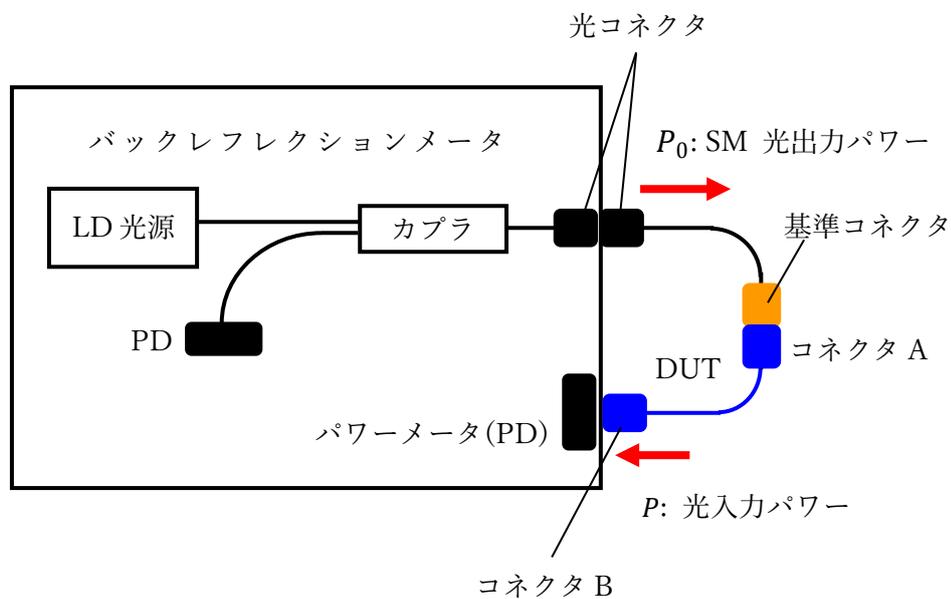


Fig.2-3 IL (Insertion Loss) 測定

2-1-2 RL による検出方法

RL の測定は Fig.2-4 のようにバックリフレクションメータ内部に構成されている光源から出射された光はカプラを介して SM 光出力端から出射される。この出力パワーを P_0 とする。レファレンスを取る為、マスターコードを接続して、解放端には全光パワーを反射する全反射マスタを接続し、再度カプラを介して PD に入射されたパワーを R_{ref} とする。ここでの PD はバックリフレクションメータの前面パネルに取り付けてあるパワーメータ(PD)とは異なり、内部に設けられている。

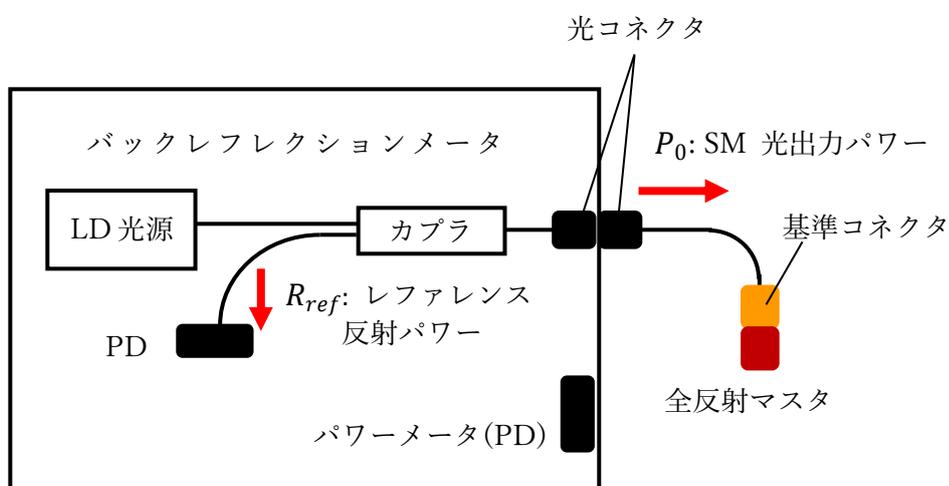


Fig.2-4 RL (Return Loss) レファレンス測定

次に Fig.2-5 のようにマスターコードに DUT を接続し、反射パワーを測定する。RL は(2-3)式により求められる。

このRL は以下の2つの検査を兼ねている。

1)DUT のコネクタ A の反射減衰量

DUT のコネクタ B は無反射処理をしているので反射減衰量は測定していない。また、ファイバ間の反射減衰量は無視できるほど小さい。よって、(2-3)式で求められるRL はコネクタ A の反射減衰量になる。

2)DUT 全体の断線検査

1)がコネクタ A の反射減衰量になるためにはファイバ及びコネクタ A, B が何かしらによる特別な反射が無いと仮定した場合である。これらに大きな反射がある場合には断線が疑われる。

$$RL = -10 \log \left(\frac{R}{R_{ref}} \right) \quad (2-3)$$

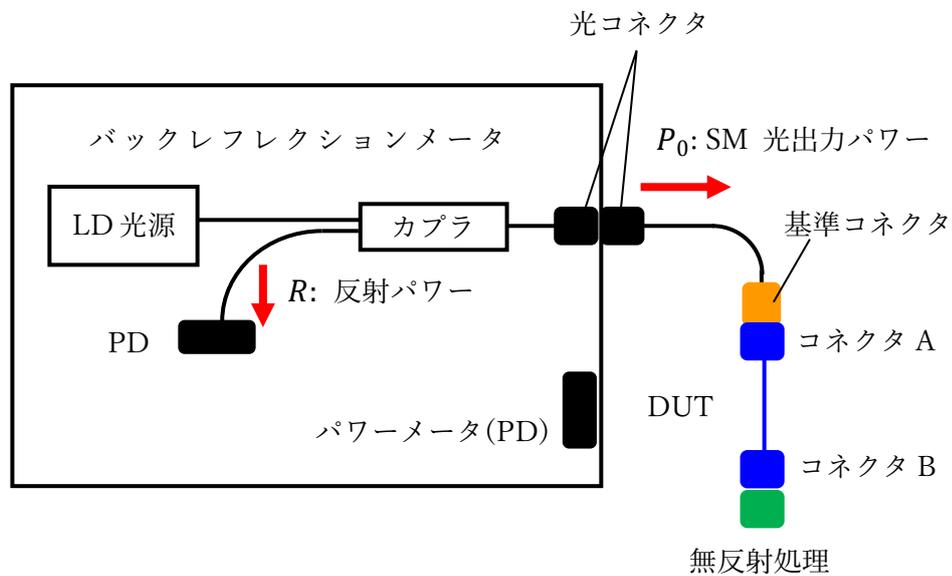


Fig.2-5 RL(Return Loss) 測定

2-1-3 バックリフレクションメータによる光ファイバ断線の検出の問題点

バックリフレクションメータは IL , RL いずれの場合も光路上の値の積算値を表示している。よって、 IL , RL による検出方法では断線によって発生する値がコネクタによって発生する値より十分大きくなければ切り分けが難しい。

2-2 TD-OCT を用いたリフレクトメータ

バックリフレクションメータによる光ファイバ断線検出の問題点を解決する為、TD-OCT を用いた反射減衰量測定機が開発された。これまで、TD-OCT を用いた反射減衰量測定機は横河電機（日本）と HP（USA）の 2 社が製造販売を行っていた。しかしながら、現在はいずれのメーカーにおいても生産は中止されている。理由はその後の需要予測とコストが合わなかったためと推測される。表 2-2 にその会社の仕様を比較する。その仕様の中でファイバ断線に関する項目として重要な反射減衰量感度及び誤差について考察する。

反射減衰量の誤差は横河電機製 AQ7410B では-14.7 dB 一点のみで仕様化されており、その誤差は±2.0 dB である。HP 製 8504B では-75 dB までは±5 dB である。また、HP ではファイバの状態(フォーミング)による偏波状態の変化が干渉強度に影響を与えてしまう為、再度校正しなければならない。感度においては横河電機製 AQ7410B では ASE 光源を使用した AQ7414 との組み合わせでは-90 dB までの感度があるが、誤差は仕様化されていない。HP 製 8504B では-80 dB までの感度があるが-75 dB までしか仕様化されていない。各社、測定レンジ及び誤差の定義は独自であり性能の比較は難しい。特に高感度では仕様化されていない。これらの理由は TD-OCT の高感度測定においてノイズ処理及び受光感度の解決が難しかったためと考える。

表 2-2 TD-OCT を用いたリフレクトメータの仕様比較

会社名	横河電機		HP
型番	AQ7410B+AQ7413	AQ7410B+AQ7414	8504B
波長	1310±50 nm 1550±40 nm	1560±20 nm	1308±30 nm 1550±30 nm
適合ファイバ	SMF(10/125 μm)	SMF(10/125 μm)	SMF(9/125 μm)
距離レンジ	0～2000 mm(空气中)	0～2000 mm(空气中)	0～400 mm(空气中)
空間分解能	20 μm	65 μm	
掃引速度	36 mm/sec(1310nm) 43 mm/sec (1550nm)	43 mm/sec	18 mm/sec(1300nm) 21 mm/sec (1550nm)
測定レンジ	平均化回数 10 回以上 -10～-85 dB(1310nm) -10～-80 dB(1550nm) 専用ファイバ使用	-10～-90 dB(1550nm) 専用ファイバ使用 反射減衰量-50 dB 以上の 終端	-10～-80 dB(1310nm) -10～-80 dB(1550nm)
レベル測定確度 (誤差)	±2.0 dB 平均化回数 10 回以上 -14.7 dB 時の繰返し精度	±2.0 dB 平均化回数 10 回以上 -14.7 dB 時の繰返し精度	±2 dB(10～60 dB) ±5 dB(75 dB)
寸法	制御部約 425×222×450 干渉部約 425×177×450	制御部約 425×222×450 干渉部約 425×177×450	370×460×570 mm
重量	45.5 kg	45.5 kg	35 kg
その他	測定機に接続されている 光ファイバは校正後にフ ォーミングを変えても再 度校正は必要無。	測定機に接続されている 光ファイバは校正後にフ ォーミングを変えても再 度校正は必要無。	測定機に接続されてい る光ファイバは校正後 にフォーミングを変え ると再度校正が必要。

2-3 OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)

長尺の光ファイバの検査に使用される。製造時の光ファイバ、光ケーブルの検査及び敷設後の保守用として用いられている。OTDR はパルス光を入射し、反射または後方散乱光を遅延時間とともに測定し、それにより障害点ならびに損失を測定する。その仕様はイベントデッドゾーン 0.7 m ならびに反射減衰量感度は-40 dB 程度であり、光デバイスのような小さな測定物の断線検出には不向きである⁽¹²⁾。イベントデッドゾーンとは2つのイベントを区別するための最小距離をいう。

2-4 OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry)

OFDR は光パルスではなく変調光掃引を入射し、OTDR の欠点であるイベントデッドゾーン並びに反射減衰量感度を解決策としたものである。深度方向の情報を得るために逆フーリエ変換を行っている。OTDR と比較し、仕様上、反射減衰量感度は-120 dB とされているが、誤差は明らかになっていないため実際に測定できているかどうかは不明である。また、逆フーリエ変換処理による非線形が否めないこと、ピーク波形が裾の広がる形状となっていること及びイベントとは無関係なノイズが多数見られることにより、イベントとノイズを区別することは困難な場合がある。さらに反射減衰量感度が必要な光デバイスでは断線を検出できない⁽¹³⁾。

2-5 まとめ

以上の結果から、光ファイバ断線を検出する目的では TD-OCT を用いたリフレクトメータが最適であると考えられる。しかしながら、これまでの装置では以下の点は十分ではない。

- 1)反射減衰量感度
- 2)反射減衰量誤差

第3章 光ファイバ断線の原因と特徴

3-1 光ファイバの製造工程と断線の危険性

光ファイバは高純度なガラスまたはプラスチックを繊維状に形成したものである。構成は光が導通するコアとその周囲には屈折率をコアより小さくしたクラッドがあり、その特徴は屈折率差を利用し光を全反射させ、信号を伝送するものである。主な特徴は空間伝送と比較し伝送路を自由に変えられること、また、外的要因を受けにくいことが挙げられ、特に光通信の分野で大きく利用され発展してきた。

3-1-1 光ファイバの種類

光ファイバの種類には伝搬するモード数により大きく2種類挙げられる。マルチモードファイバ(Multi-Mode Fiber: MMF)とシングルモードファイバ(Single-Mode Fiber: SMF)である。光ファイバの伝搬モードはコアに入射される入射光とクラッド面から反射する反射光と干渉した特定の電界分布によって分けられる。伝搬モード数は(3-1)式により表される。波長とコア屈折率とクラッド屈折率が決まれば伝搬モードの数はコア径によって求められる⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾。

$$N \cong \frac{2d}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3-1)$$

d : コア径

n_1 : コアの屈折率

n_2 : クラッドの屈折率

λ_0 : 使用波長

マルチモードファイバは文字通り複数のモードを伝搬する光ファイバであり、シングルモードファイバは単一モードのみを伝搬する光ファイバである。

マルチモードファイバにはコアの屈折率分布によって2種類あり、屈折率分布が一様であるSI型(ステップインデックス)、屈折率を円周上に外側に向かって緩やかに分布させたGI型(グレートインデックス)がある。GI型はパルスの広がるSI型の欠点を改良し、伝送帯域を広くするために開発された。それらの特徴を表3-1にまとめた。

現在、通信分野ではSMFが圧倒的に多く利用されている。SMFは伝送帯域がMMFと比較し広いこと、また、伝送損失が小さく長距離伝送に向いていることが長所である。しかしながら、 $\lambda=1.31 \mu\text{m}$ ならびに $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 帯レーザの価格が高いことと、そのコアが小さいために接続およびそれらに利用される光デバイスの開発が技術的に高いことが問題であった。近年、技術の進歩によりそれらが解決され、最も一般的に利用されるようになった。

表 3-1 光ファイバの種類

品種(伝送モード)		特徴
MMF	SI 型	SI(ステップインデックス)型MMF(マルチモードファイバ)ではコア内の光はクラッドで反射されながら進む。高角で入射した光は低角で入射した光より同じファイバ長を進むのに反射回数が多いため多く時間がかかり、その結果、前後のパルスが重なってしまう為、大容量の通信には不向き。最近ではセンサ用途のファイバに使用されている。
	GI 型	GI(グレートインデックス)型 MMF(マルチモードファイバ)はパルスが広がる SI 型 MMF の欠点を改良した光ファイバ。コアの屈折率が一様ではなく、中心が高く外側に行くほど低い。中心に近いほど光の進む距離は短い、屈折率が高い為進む速度が遅い。逆に、外側にいくほど進む距離は長い、屈折率が低いので進む速度が速い。この結果、何れの進み方をすする光も同じファイバ長をほぼ同時間で進み、パルス光の広がりを抑える。
SMF		SMF(シングルモードファイバ)は MMF 型よりコア径が小さい構造であり、通信線路として最も一般的に使われている光ファイバである。コア径が十分小さい時、光の進み方は直線だけになる。従って、SI,GI のような光路長の違いによるパルスの広がりがなく、大容量通信が可能である。

通信用途では $\lambda=1.2\sim 1.6\ \mu\text{m}$ の波長が使用され、光ファイバは主に石英ファイバが用いられている。近年、光ファイバは通信以外にも用いられるようになり、フッ化物ファイバ、カルコゲナイドファイバが開発され、 $\lambda=0.3\sim 9\ \mu\text{m}$ まで伝送可能となった (Fig.3-1 参照)。

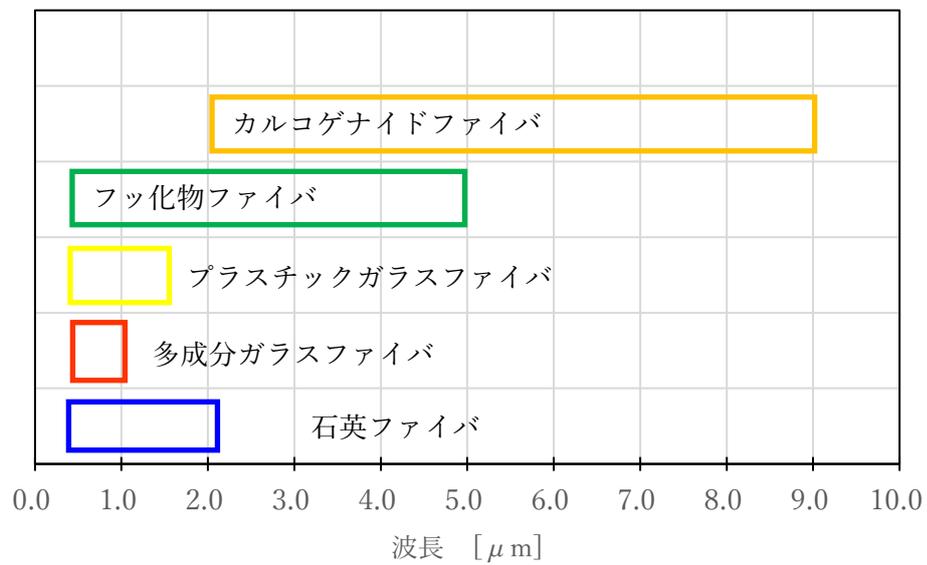


Fig.3-1 光ファイバの材料と伝送波長

3-1-2 光ファイバの構造

現在、最も一般的な通信用途のファイバ構造を Fig.3-2 に示す。コア径はシングルモードで $\phi 10 \mu\text{m}$ 、マルチモードでは使用地域によって異なり、主に日本では $\phi 50 \mu\text{m}$ 、欧米では $\phi 62.5 \mu\text{m}$ が一般的である。近年は $\phi 50 \mu\text{m}$ に統一されつつある。

クラッド径はいずれのモードも $\phi 125 \mu\text{m}$ である。その外側に保護被覆があり $\phi 250 \mu\text{m}$ が一般的である。保護被覆は高速で製造する目的で UV 硬化型樹脂が使用されている。現在では 1,000 m/min 以上の線速で線引きされている。

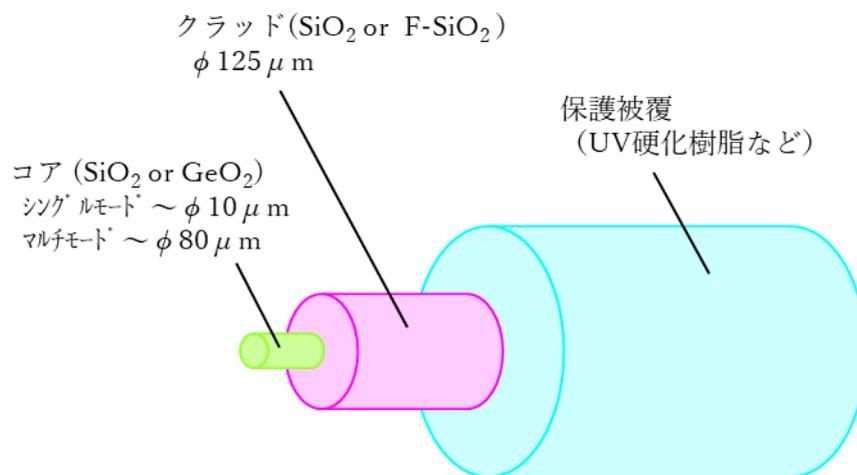


Fig.3-2 光ファイバの構造

通信用途の SMF のコアには一般的にゲルマニウムがドーピングされており、クラッドは石英ガラスであるものが一般的である。それによって、コアとクラッドの屈折率差を形成している。シングルモードファイバの屈折率分布を Fig.3-3 に示す。クラッドよりコアの方が高い屈折率となる。

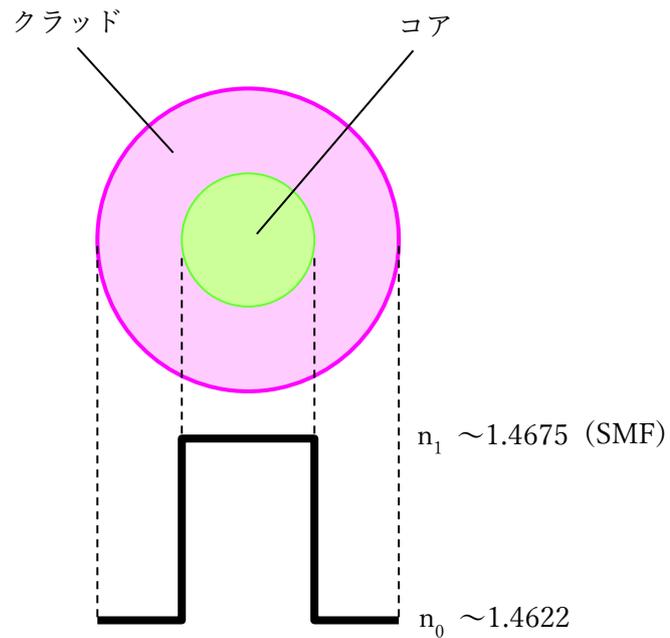


Fig. 3-3 屈折率分布

光ファイバが全反射を繰り返す原理は Fig.3-4 に示す(3-2)式のスネルの法則に従い、“光は屈折率の異なる物質の界面で曲がる。”を利用し導波路を実現している。また、入射角と反射角の関係図は Fig.3-5 に示す。光ファイバのコアでは(c)の全反射の状態である。(a)の入射角ではコアに閉じ込められない。また、(b)臨界角は特に指標として、NA(開口数)と呼ばれている (Fig.3-6,(3-3)式参照)。

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3-2)$$

n_1 : 入射側の屈折率

θ_1 : 入射角

n_2 : 屈折側の屈折率

θ_2 : 屈折角

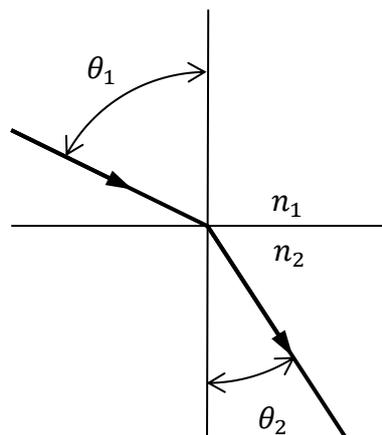
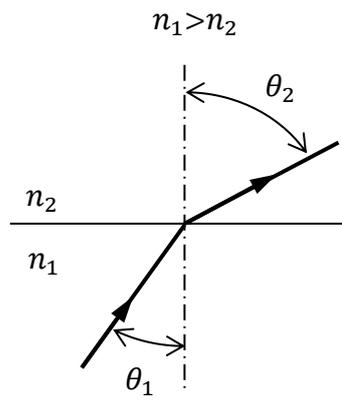
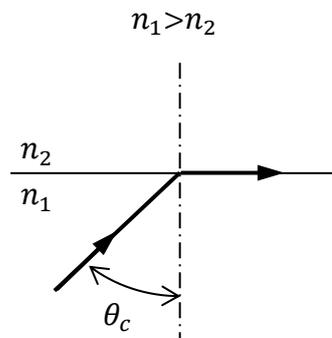


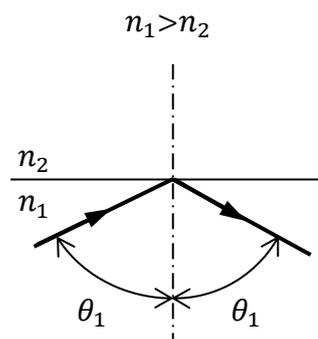
Fig. 3-4 スネルの法則



(a)屈折



(b)臨界角



(c)全反射

Fig. 3-5 入射角と反射角の関係図

$$NA = \sin \theta_{max} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (3-3)$$

$$\theta_{max} = \phi_c$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

ϕ_c : 臨界角

n_1 : コアの屈折率

n_2 : クラッドの屈折率

Δ : 比屈折率差

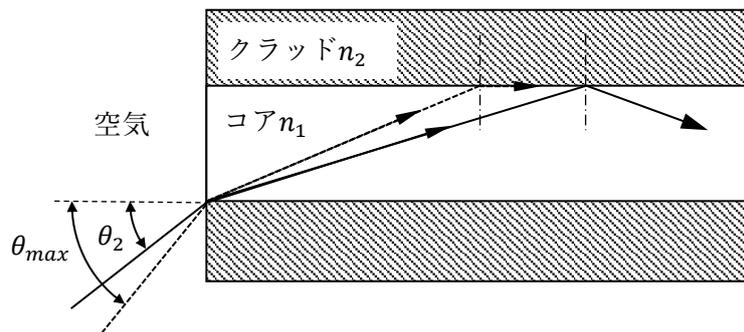


Fig. 3-6 NA (開口数 Numerical Aperture)

3-1-3 光ファイバの製造工程

光ファイバの製造工程は主に 2 工程である。プリフォーム工程→線引き工程である。

プリフォーム工程はプリフォーム(母材)と呼ばれる光ファイバの元となる大きなガラスの塊を製造する工程である。この時、コアとクラッドの寸法比率及び屈折率差は既に円筒状の長手方向に形成されている。

製造方法は大きく分けて MCVD(Modified Chemical Vapor Deposition), VAD(Vapor-phase Axial Deposition)法が挙げられる。VAD 法は Fig.3-7 に示すように円柱状のスタートプリフォームを軸方向及び外側に向かって成長させる製法である。これに対し、Fig.3-8 のように MCVD 法が石英管の内壁から中心部に向かって成長させる製造方法である。通信用途では同一設計のファイバを大量に製造するため、大型母材の製造が可能な VAD 法が一般的である。一方、特殊用途のファイバは小型母材を得意とする MCVD 法が選択される。バーナに SiCl_4 と GeCl_4 , 燃料となる H_2 , O_2 を同時に気体にしてスタートプリフォームに吹き付けると化学反応が起こり SiO_2 , GeO_2 が堆積する。

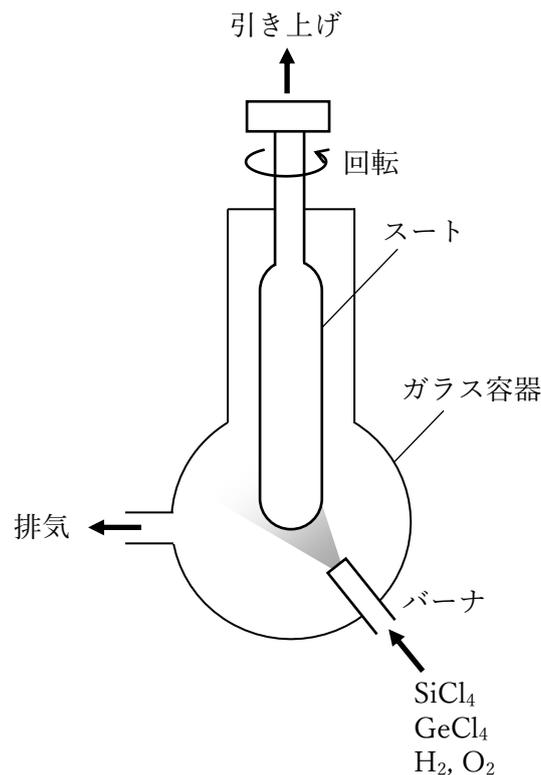


Fig. 3-7 VAD 法 (プリフォーム工程)

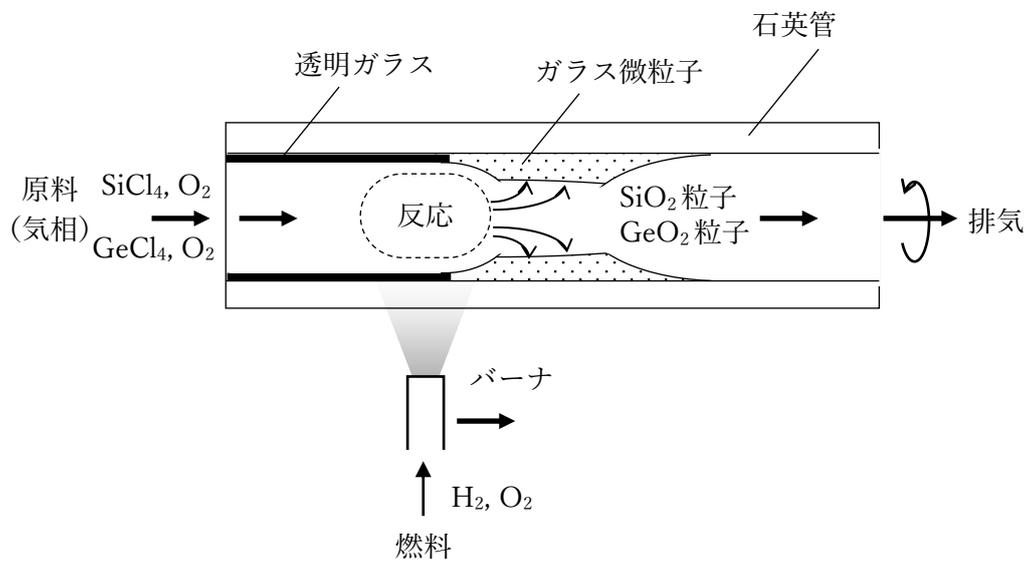


Fig. 3-8 MCVD 法 (プリフォーム工程)

線引き工程はプリフォームを電気加熱炉にて約 2,000 °C に加熱し、熔融状態にしたプリフォームを外径が $\phi 125 \mu\text{m}$ となるように線速を制御しながら、保護被覆を被せ、巻き取る工程である (Fig.3-9 参照)。

表面に傷がつくと光ファイバの強度を著しく劣化させてしまうため、溶解した状態から UV 樹脂で保護被覆されるまで、傷をつけずに被覆することが重要である。仮に傷をつけてしまったとしても、スクリーニングと呼ばれる光ファイバに荷重を掛け、ある強度より弱い部分を破断させて除去している。一般的に 1% プルーフと 2% プルーフがある。海底線のような高い強度保証が必要な製品は 2% プルーフが選択される場合が多い。

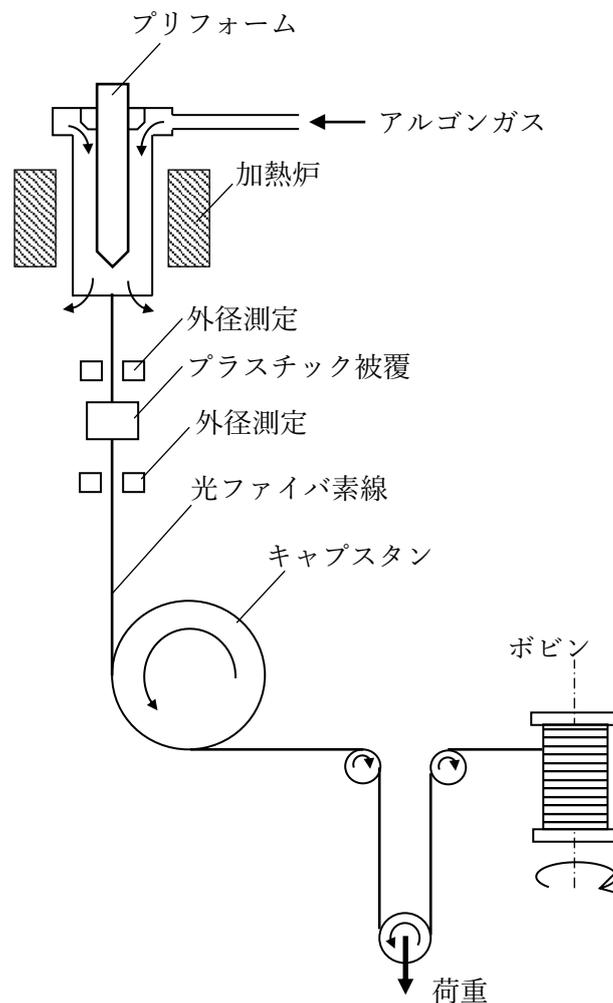


Fig. 3-9 線引き工程

3-2 光ファイバの接続方法と断線の危険性

3-2-1 光ファイバの接続方法

光ファイバの接続方法は4種類ある。それぞれのメリット・デメリットにより、使い分けられる(表3-2参照)。構造上の信頼性は融着が最も高く、コネクタ、メカニカルスプライス、空間という順となる。また、製造上の信頼性は光ファイバの被覆を剥く工程がキーポイントとなるが、いずれの接続方法においてもその工程は必要であり、信頼性はその工程に左右される。

表3-2 光ファイバの接続方法

接続名	接続方法	メリット	デメリット
融着	光ファイバの先端を高温で溶かし、互いに融着させて接続する方法	・低損失 ・低反射減衰量 ・信頼性が高い	着脱が不可能
空間	空間に出射された光をレンズにより屈折させ他のファイバに入射させる方法	・光ファイバ同士の接続が難しい場合に用いられる	・製造工程が比較的複雑 ・高コスト
メカニカルスプライス	鏡面にカットされた面同士を簡易的なV溝を用いて調心し、接続する方法	・低コスト	・信頼性が低い
コネクタ	規格化されたハウジングを用いて接続される方法	・着脱が可能 ・信頼性が高い	・融着に比べ、損失が大きい。

3-2-2 光コネクタ

光ファイバを接続する場合、反射減衰量 (RL : Return Loss) が小さく、挿入損失 (IL : Insertion Loss) が小さいことが理想である。シングルモードファイバの場合には、マルチモードファイバと比較しコア径が小さいため高い調心精度が要求される。反射減衰量ならびに挿入損失を増加させる要因は、①軸ずれ、②軸の傾き、③ギャップ、④コア径差、⑤NA 差、⑥フレネル反射が挙げられるが、①、②、③、⑥が主要因となる。

①、②を解決し精度よく接続する方法は Fig.3-10 に示すファイバを中心部に固定したフェルルール同士を弾性のある割りスリーブでフェルルールの外径を基準として整列し、突き当てする方法で実現している。③、⑥は PC(Physical Contact)接続により実現している。Fig.3-11 に示す PC 接続は互いにバネによる押圧力で互いに押付け合い、フェルルール端面を弾性変形させることによって接続を安定させている。Fig.3-12 は代表的な光コネクタである FC コネクタの構造である。

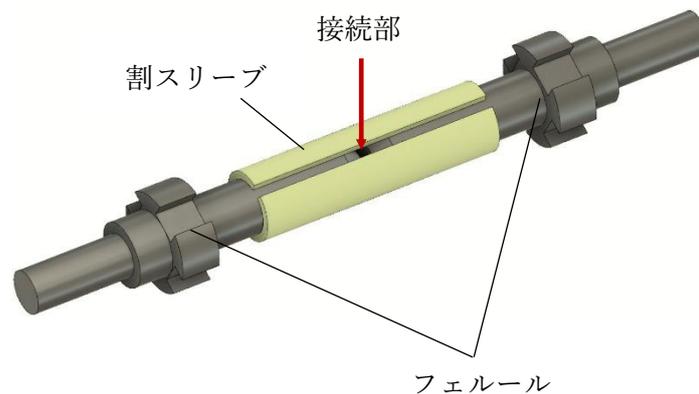


Fig. 3-10 光コネクタの整列機構

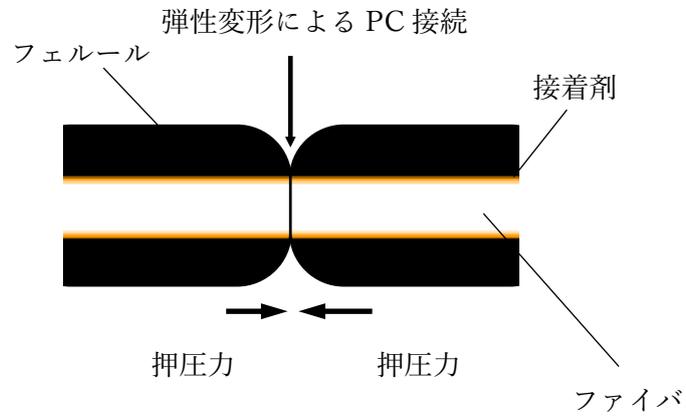


Fig. 3-11 光コネクタの PC 接続

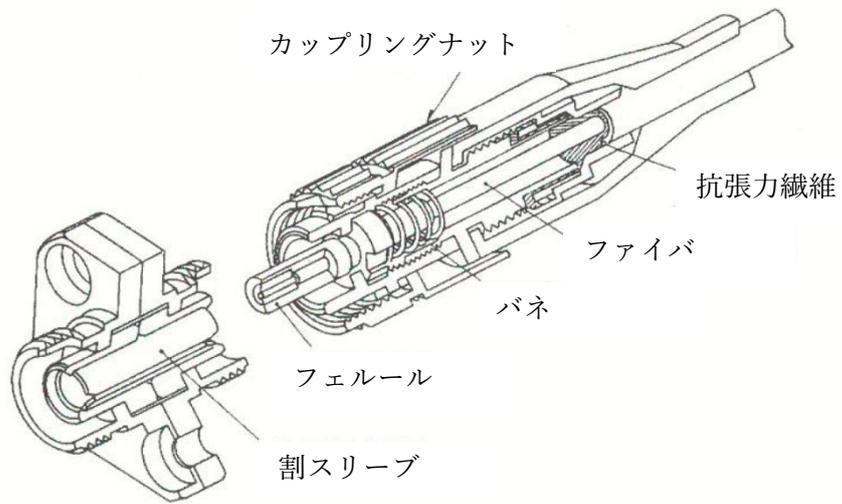


Fig. 3-12 FC コネクタ構造

光コネクタはその用途に応じて数種類が存在する。着脱が容易にできるワンタッチ着脱型、しっかり固定できるねじ込み型、また、小型で高密度を目的としてフェルール径をφ2.5 mmからφ1.25 mmに小さくしたもの、さらに複数本の光ファイバ接続を可能とした多心コネクタに分類される(表 3-3 参照)。

表 3-3 光コネクタの種類

コネクタ名	コネクタ形状	アダプタ形状	特徴
FC			単心コネクタ フェルール径φ2.5 mm ねじ込み固定
SC			単心コネクタ フェルール径φ2.5 mm ワンタッチ着脱
LC			単心コネクタ フェルール径φ1.25 mm ワンタッチ着脱
MU			単心コネクタ フェルール径φ1.25 mm ワンタッチ着脱
MT-RJ			多心コネクタ(2心) miniMT フェルール ワンタッチ着脱
MPO			多心コネクタ miniMT フェルール ワンタッチ着脱

コネクタ先端の3次元形状は光コネクタ接続の挿入損失及び反射減衰量を下げることが主な目的である。この形状は端面の研磨によって形成され、研磨種は表 3-4 に示す PC(Physical contact), SPC(Super Physical contact), APC(Angled physical contact)の3種類がある。PC, SPC が端面を凸状に研磨していることに対し、APC は斜め凸状に研磨している。反射減衰量性能は APC が最も高い。

表 3-4 光コネクタの研磨種

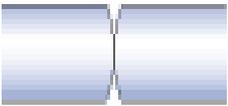
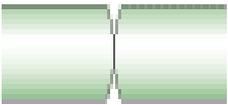
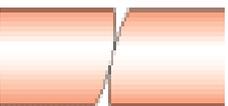
研磨種類	端面形状	反射減衰量	特長
PC 研磨 (Physical Contact)		<-25 dB	フェルルール先端を凸球面状に研磨し、光ファイバ同士を、隙間無く接続するための研磨方法。整合材無しで接続可能。
SPC 研磨 (Super PC)		<-40 dB	低反射研磨を行い、PC 研磨より反射特性を向上させたもの。標準的な研磨方法。AdPC, UPC 等の呼び方もある。
APC 研磨 (Angled PC)		<-60 dB	フェルルール先端を斜め凸球面状に研磨し、より SPC 研磨より反射特性を向上させたもの。

Fig.3-13 は一般的な光コネクタの製造工程である。まず、光ファイバの被覆を剥き、アルコールを湿らせたベンコットでファイバ表面から被覆カスをふき取り、フェルールに通して接着固定する。その後、先端を研磨し、コネクタ組立を行って完成となる。

ここで、光ファイバ断線の観点で最も重要な工程は光ファイバ被覆剥き工程である。光ファイバは脆性材料であり、表面の欠陥は極端に強度を劣化させる。被覆剥き工具には主に金属の刃物を用いており、表面の欠陥を 100%発生させることなく加工することは難しい。

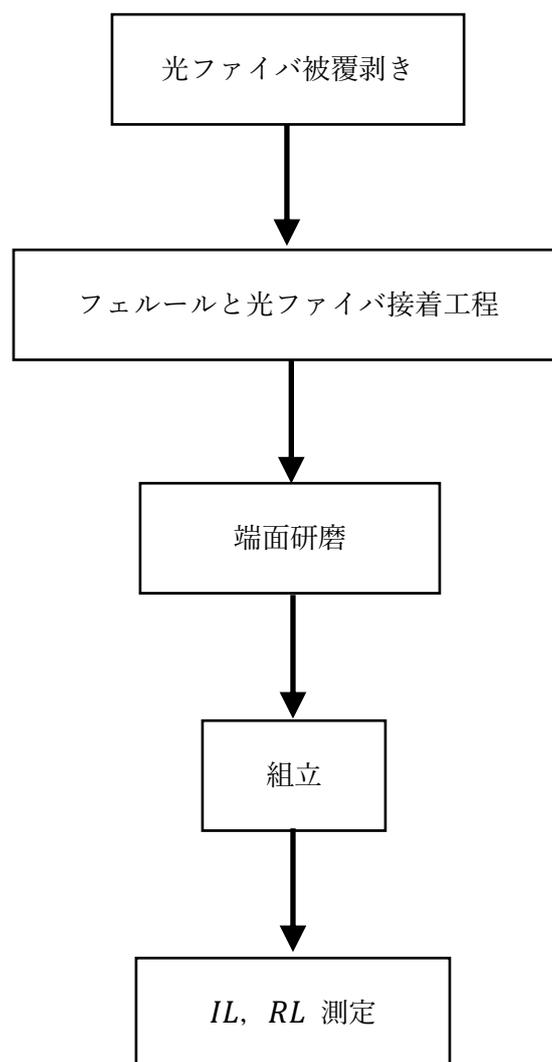


Fig. 3-13 光コネクタの製造工程

3-3 光デバイスの断線検出

光ファイバを使った光デバイスは光スイッチ、光カップラ、光スプリッタ、3ポートデバイス、サーキュレータ、光源、PD(Photo Diode)が挙げられ、多種多様である。Fig.3-14 は例として PD の構造図を示す。光ファイバに入力された光信号は PD チップで受光し、電気信号に変換される。一般的に光デバイスの断線検査は通常 *IL*, *RL* により行っているが、PD の構造では検査することができない。詳しくは 3-6 章で述べる。

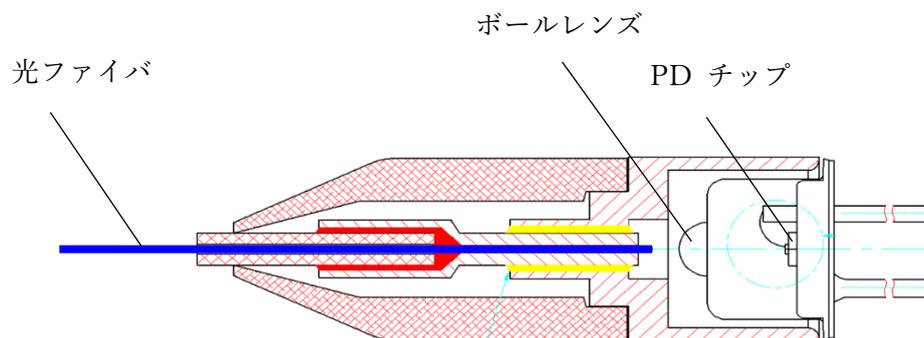


Fig. 3-14 PD 構造

3-4 光ファイバ断線の特徴

3-4-1 ガラスの割れ方

一般的にガラスは、割れやすい、脆いというイメージがあるが(Fig.3-15 参照)、光ファイバのように髪の毛ほどに細く、かつ、十分な保護を施すと曲げたり引っ張ったりしても破断しにくく、イメージよりはるかに強い。理論的にガラスは典型的な脆性材料であるため、弾性的な変形が難しい材料である。グリフィス(Griffith)はイングリス(Ingris)による応力解析から、き裂進展で形成される2つの新生面を生成するのに必要なエネルギーは、き裂が開口するために必要なエネルギーに等しいとし、外に仕事はされないものと仮定した。(3-4)式のグリフィスの式は脆性材料の“切り欠き敏感性”を表すものである。この式から脆性材料の表面上の欠陥はその強度を著しく低下させることがわかる(17)-(18)。

$$\sigma_F = 2\sqrt{(E\gamma/\pi c)} \quad (3-4)$$

σ_F : 破壊応力(強度)

γ : 材料の表面エネルギー

E : ヤング率

c : 初期欠陥の長さ

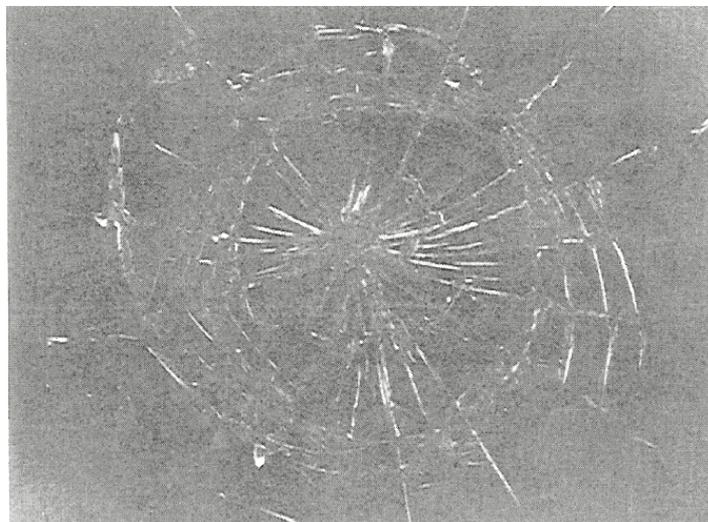


Fig. 3-15 一般的なガラスの割れ方

(出典 : V.D.Frechette 編集 脆性材料破断解析マニュアル)

3-4-2 光ファイバの断線

光ファイバは 1970 年、アメリカのコーニング社が通信用光ファイバの実用化を発表して以来、伝送路は脆性材料であるガラスが使用されており、その特徴は透明度が高く安定材料である反面、表面上の欠陥により強度の著しい劣化を起こす欠点がある。

しかし、光ファイバを利用した製品ならびにシステムの多くはキーパーツとなっている場合が多く、光ファイバ断線は最も避けるべき不具合である。

一般的な光ファイバの引張強度はクラッド径 $\phi 125 \mu\text{m}$ の光ファイバでは引張強度 6 kgf 程度を有する。しかしながら、表面に欠陥がある光ファイバは極端に引張強度を劣化させ、光ファイバ断線確率を上げてしまう。そのため、十分に表面上の欠陥を取り除いた上、保護被覆を施し、さらに、仮に欠陥を発生させてしまった場合でも 1% の伸びを 1 秒加えて、弱い部分を破断させて取り除く“スクリーニング”を行い、断線確率を下げている。さらに昨今では被覆は密着性の良い一様に被覆ができるような材料が開発され安定したものが得られるようになった。

光ファイバの荷重特性を統計的に表した代表的なワイブル分布を Fig.3-16 に示す。ワイブル分布は光ファイバを 10 m ごとに切り分け、1,000 本ほどのサンプルを用意する。これらに荷重をかけ、光ファイバが破断した時の荷重を取り、累積分布にすればワイブル分布となる。荷重約 6 kgf まではほとんど破断しないが、低い確率で 1 kgf 以下でも破断する。原因は脆性材料の大きな特徴である表面上の欠陥が進行し破断してしまうことが挙げられる⁽¹⁹⁾⁻⁽²³⁾。

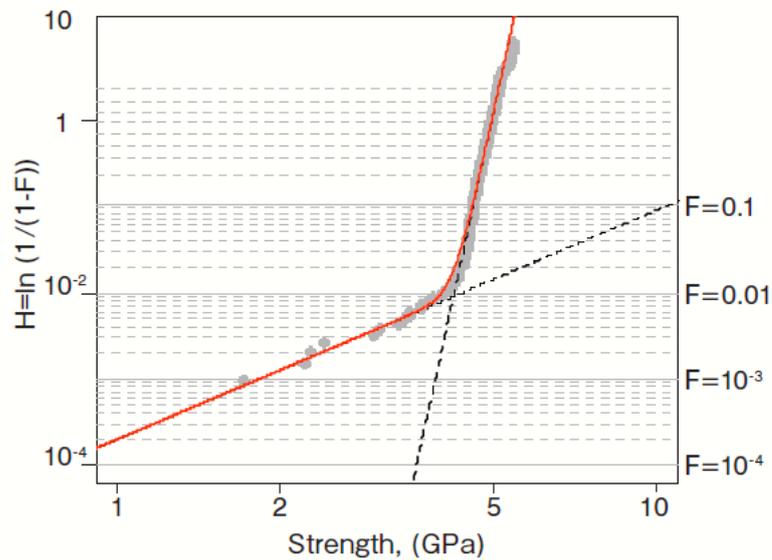


図3 1,960本の光ファイバに対する引張り試験結果のワイブルプロット
Weibull plot of the fatigue test of the 1,960 fibers.

Fig.3-16 ワイブル分布

(出典：光ファイバの機械的強度に関する信頼性寿命予測，古河電工
時報第 130 号，(2012))

3-4-3 光コネクタの断線

Fig.3-17 は光コネクタ内部で発見された光ファイバ断線の光ファイバ断線部を取出し SEM 写真撮影したものである。ファイバ種は SMF、印加電圧は 15KV、拡大倍率×500 である。

(a)は光ファイバ断線の方の端面を側面から撮影したものであり、(b)はもう一方の端面を側面から撮影したものである。(c)は(b)を正面から撮影したものである。

(a),(b)の観察の結果、赤の矢印で示した部分が一致している。全面の一致については(c)の写真より、解体時に一部欠けてしまっている部分があるため確認できなかった。

光ファイバ断線の観察の結果、以下の2点が確認された。

- 1) 表面は鏡面状
- 2) 角度をもっている形状

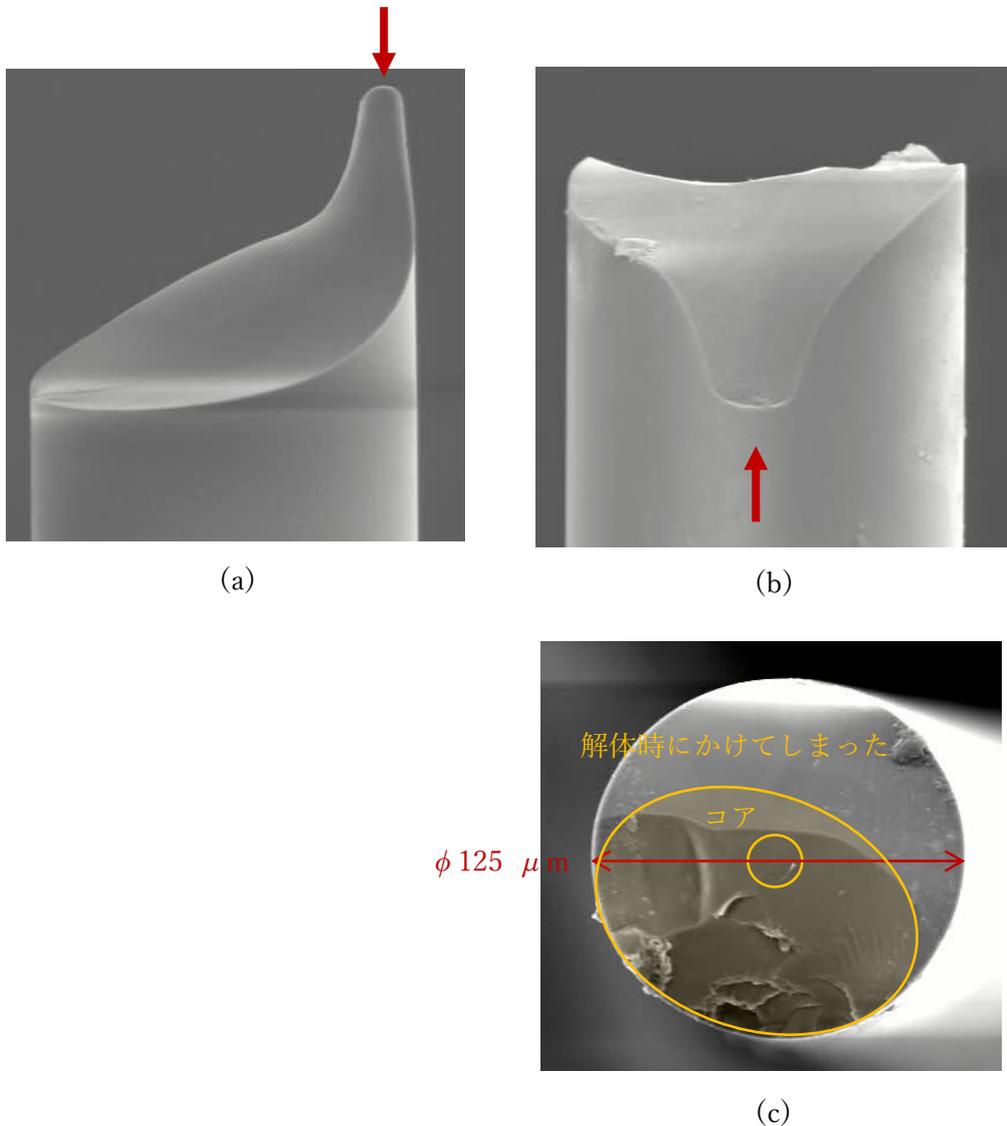


Fig.3-17 光コネクタ内部で発生した光ファイバ断線部の SEM 写真観察

光ファイバ断線が確認された光コネクタについて温度サイクル試験を行った。温度サイクル試験は一般的に長期信頼性を確認するためのものであるが、本研究ではフィールドで長時間経過した時の IL 及び RL の挙動を確認する為に行った。

DUT(Device Under Test 試験サンプル)の選択は断線のある光コネクタが良品として判断されフィールドで使用された時の挙動を確認する為、SC/SPC コネクタがバックリフレクションメータによる通常の IL 検査において良品と判断され、OCCR(第4章にて詳細に述べる)の検査で断線が確認されたものとした。発見時の RL は-69.7 dB, IL は 0.23 dB であった。一般的な光コネクタの規格は $IL < 0.5$ dB, $RL > 40$ dB である。

Fig.3-18 に示すように恒温槽の中には DUT(Device Under Test 試験サンプル)のみが入り、レファレンスコードは光源の時間的変化ならびに各試験の為に使用されている光デバイスの時間的変化をキャンセルするために恒温槽に入れずに測定、両社の測定値の差を取る。レファレンスコードの測定は試験サンプルの測定とほぼ同一のタイミングで一定時間ごとに連続測定される。また、試験サンプルとレファレンスコードの光路切り替えは光スイッチによって行われる。温度サイクルの温度範囲は光コネクタで最も一般的な規格である Telcordia GR326⁽²⁴⁾を参照し、-40~85 °Cで行った。波長 $\lambda = 1310$ nm, 恒温槽は ESPEC 製 PSL-2K, IL モニタリングシステムには JDS 製 OCETS(この中には光源、光スイッチ、パワーメータが含まれる)を使用した。

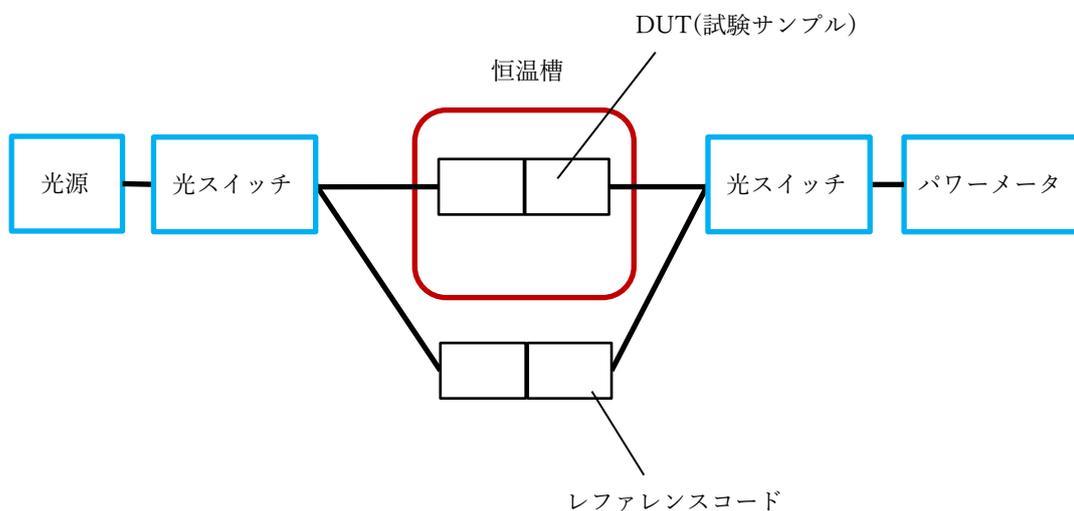


Fig.3-18 温度サイクル試験の光結線図

Fig.3-19 は温度サイクル試験の ΔIL モニターの結果である。 ΔIL は初期の IL 測定値 IL_0 の値を 0 として n 番目の測定値 IL_n との差である ((3-5)式参照)。その結果、約 100 h 経過(27 cycle 目)した時点から ΔIL が約 20 dB 急激に増加した。その後、 ΔIL は 10~20 dB 付近をふらつき、0 dB 近傍に回復することはなかった。

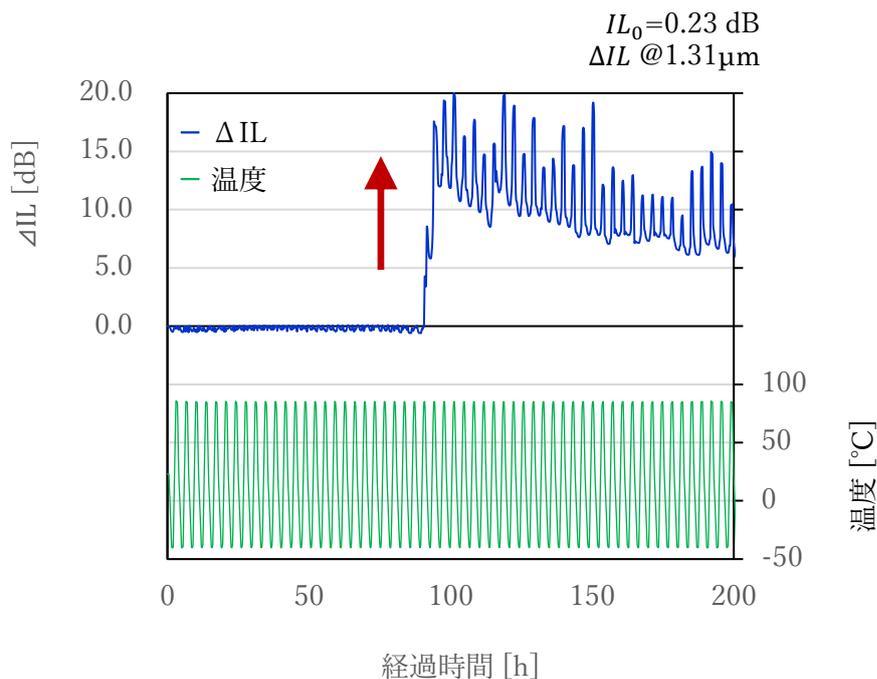


Fig.3-19 光ファイバ断線部の温度サイクル試験結果 (ΔIL)

$$\Delta IL = IL_0 - IL_n \quad (3-5)$$

ΔIL : IL 変動値

IL_0 : 初期の IL 測定値

IL_n : n 番目の IL 測定値

Fig.3-20 は温度サイクル試験の ΔRL モニターの結果である。 ΔRL は初期の RL 測定値 RL_0 の値を 0 として n 番目の測定値 RL_n との差である((3-6)式参照)。その結果、約 100 h 経過(27 cycle 目)した時点から ΔRL が約 30 dB 急激に増加した。その後、 ΔRL は 10~30 dB 付近をふらつき、0 dB 近傍に回復することはなかった。この傾向は ΔIL の結果とも一致する。

この結果は“光ファイバ内部に断線を持つ製品は初期では良品と判断されたものであっても、突然、使用できなくなる”危険性があることを示唆している。

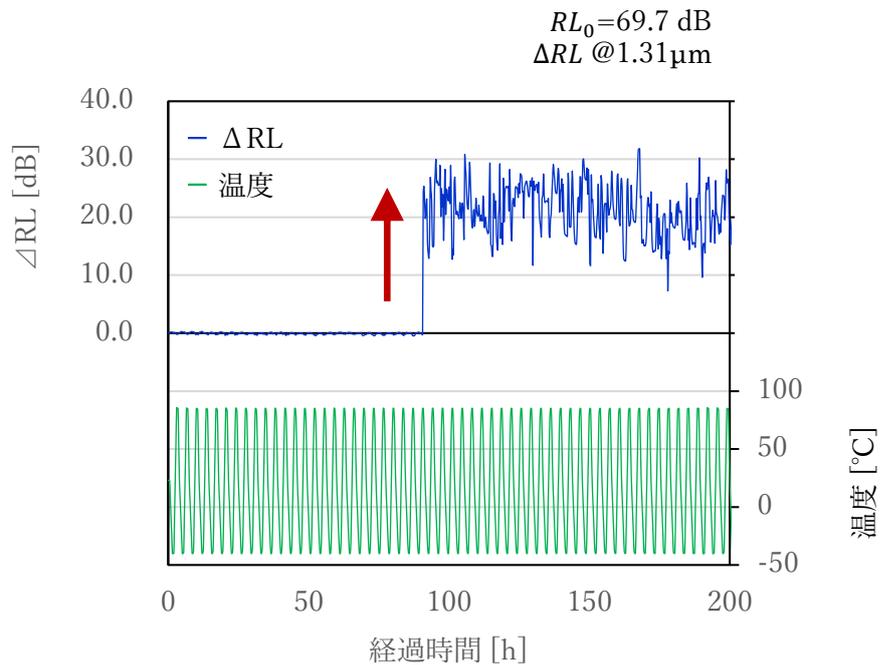


Fig.3-20 光ファイバ断線部の温度サイクル試験結果 (RL)

$$\Delta RL = RL_0 - RL_n \quad (3-6)$$

ΔRL : RL 変動値

RL_0 : 初期の RL 測定値

RL_n : n 番目の RL 測定値

3-5. まとめ

光ファイバはガラスでできた脆性材料であり、微小な欠陥により寿命を著しく低下させてしまう特徴がある。寿命は光ファイバの断線を表す。光ファイバはこれまでの技術の進歩により、微小な欠陥を排除させ、破断の危険性はかなり低くなった⁽²⁵⁾⁻⁽²⁶⁾。しかしながら、光コネクタならびに光デバイスに至っては光ファイバの被覆を剥いてガラス部分が剥き出しになる工程があり、その際に発生させてしまう欠陥は排除に至っていない⁽²⁷⁾⁻⁽³⁰⁾。

光ファイバ断線面は SEM 写真観察の結果、鏡面であり、ある角度を持っていた。

また、光ファイバ断線部の温度サイクル試験結果から、断線のある光デバイスは経過時間のある時点で急激に IL , RL が増加することが確認された。ここで、 IL と RL の温度に対する挙動の違いが確認された。 IL の測定値は多重反射の影響を無視できるほど大きいことに対し、 RL はその値が小さいため、多重反射の影響を受けてしまう為と考える。

急激に IL , RL が増加した要因を考察した。Fig.3-21(a)に示すように断線直後は断線したファイバ同士が離れていない為、 IL , RL とともに小さいが、ファイバとコネクタは接着剤で固定されている為、時間経過の中で伸縮を繰り返し、(b)のようにお互い離れてしまい、 IL , RL とともに増加したと考えた。(a)の状態では IL , RL とともに小さく、 RL に至っては微小な RL のため、また、断線の端面に角度がある場合、これまでの断線検出方法では発見できないほど微小なものがあると考えられる。この現象のことを本論文では“隠れ断線”と呼び、以下のように定義した。

隠れ断線とは“断線直後はファイバ同士のギャップが小さく IL , RL とともに微小であるため発見が難しいが、時間経過により断線したファイバ同士のギャップが大きくなり IL , RL とともに増加してしまう”現象のことをいう。

よって、光ファイバ断線の解析は以下について検討が必要と考える。

- 1)光ファイバ断線の端面角度による反射減衰量
- 2)光ファイバ断線の時間経過による反射減衰量

第4章 光ファイバ断線検出における TD-OCT の優位点

4-1 OCT の原理

光学的干渉断層計 OCT(Optical Coherence Tomography) の原理は、超音波診断装置に類似する。ただし、OCTでは音波のかわりに近赤外線低干渉ビーム (Super Luminescent Diode: SLD $\lambda = 1310\text{nm}$) を探査波に用いる (Fig.4-1参照)。OCT 内部のSLD で発振した低干渉ビームはビームスプリッタでふたつに分かれる。ひとつは参照鏡に向かい、反射して戻ってくる。これが参照光 (コントロール波) である。もうひとつは、測定光としてDUTに進入する。測定光はDUTの各層で反射して、それぞれ時間の遅れを伴った異なる強度の反射光として戻ってくる。反射光と参照光はビームスプリッタで再び合流し、検知器に入る。赤外線低干渉ビームは波であるので、反射光と参照光が重なると、干渉現象がおこる。これにより、反射光の強度と時間的ずれが検知される。この情報を空間的位置関係に換算することで、断層像が得られる。OCT の垂直方向の解像度は $10\sim 20\mu\text{m}$ である⁽⁴⁾。

SLD を含む低干渉光のスペクトルは (4-1) 式に示す光のスペクトル $S(\nu)$ [パワースペクトル密度という] の形を取り、ガウス型となる。

$$S(\nu) = \frac{2\sqrt{\ln 2 / \pi}}{\Delta\nu} \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right)^2\right] \quad (4-1)$$

ここで、 ν は光の周波数 ($=c/\lambda$)、 ν_0 、 $\Delta\nu$ は入射光の中心周波数およびスペクトル幅である。指数部前の定数項は今後のコヒーレンス長等の定義において計算を簡略化するための形をとっている。今、(4-1)式で表される光の干渉を考える。Fig.4-1に示す干渉計において受光される強度 I_d は(4-2)式で表される。

$$I_d = \langle |E_d|^2 \rangle = 0.5(I_r + I_s') + \text{Re}\{\langle E_r^*(t + \tau)E_s'(t) \rangle\} \quad (4-2)$$

ここで、 I_r 、 I_s はそれぞれ参照光路および計測光路からの反射光強度、 E_r 、 E_s は反射光複素振幅である。ダッシュ (') は計測サンプルによって変化を受けたことを示す。< > は時間的な平均を示す。干渉光成分 $\langle E_r^*(t+\tau)E_s'(t) \rangle$ は相互コヒーレンス関数として定義され、複素数同士の内積を時間平均で表した形となる。

例えば、単一波長光源による干渉であれば、この値は $2\sqrt{I_r I_s} \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} n(I_r - I_s) \right]$ の形であらわされる^(3,5,31)。

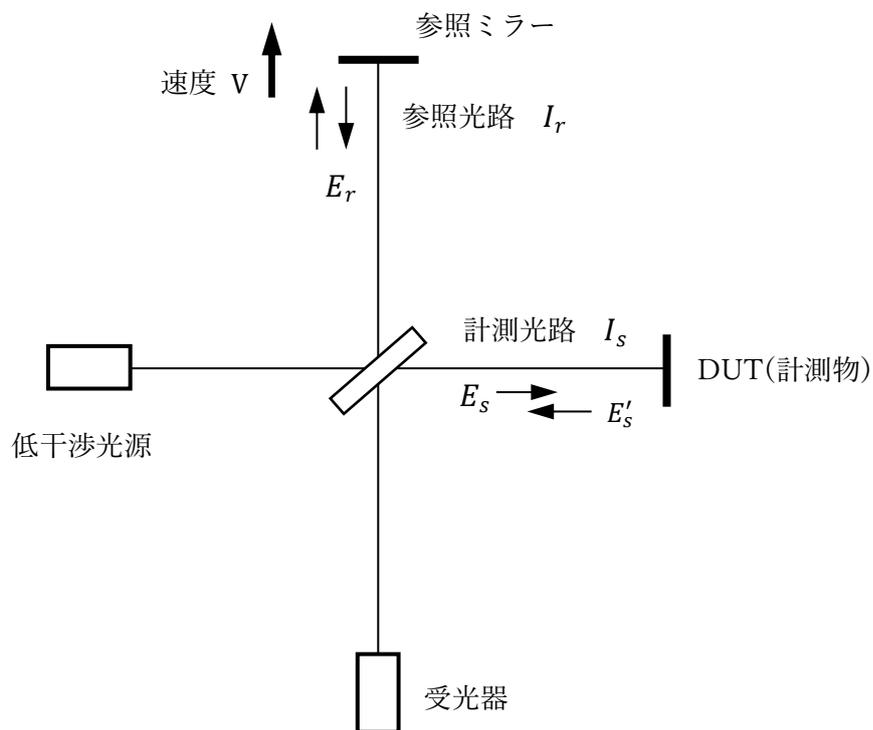


Fig.4-1 低コヒーレンス干渉計

計測サンプルが理想的なミラー（反射率1）と想定した場合の（4-1）式で表されるガウススペクトル光を干渉させた際の干渉光成分 $|G(\nu)|$ を求める。干渉光成分 $|G(\nu)|$ は、先の単一波長光源による干渉の計算を拡張し、スペクトルおよび強度が異なる無数の光の重ね合わされたものとしてイメージできる。つまり、（4-3）式となる。

$$G(\tau) = \int_0^{\infty} S(\nu) \exp(-j2\pi\nu\tau) d\nu \quad (4-3)$$

以下、（4-3）式に（4-1）式を代入する。

$$G(\tau) = \int_0^{\infty} \frac{2\sqrt{\ln 2 / \pi}}{\Delta\nu} \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right)^2\right] \exp(-j2\pi\nu\tau) d\nu$$

$$G(\tau) = \int_0^{\infty} \frac{2\sqrt{\ln 2 / \pi}}{\Delta\nu} \exp\left[-\pi \left(\frac{\nu - \nu_0}{\frac{\Delta\nu}{2\sqrt{\ln 2 / \pi}}}\right)^2\right] \exp(-j2\pi\nu\tau) d\nu$$

以下を置き換えて代入する。

$$\frac{2\sqrt{\ln 2 / \pi}}{\Delta\nu} (\nu - \nu_0) = f$$

$$\frac{2\sqrt{\ln 2 / \pi}}{\Delta\nu} d\nu = df$$

$$\begin{aligned}
G(\tau) &= \int_0^{\infty} \exp[-\pi f^2] \exp\left(-j2\pi\left(\nu_0 + \frac{\Delta\nu}{2\sqrt{\ln 2/\pi}}f\right)\tau\right) df \\
&= \exp(-j2\pi\nu_0\tau) \int_0^{\infty} \exp[-\pi f^2] \exp\left(-j2\pi\frac{\Delta\nu}{2\sqrt{\ln 2/\pi}}f\tau\right) df
\end{aligned}$$

さらに以下を置き換えて代入する。

$$\frac{\Delta\nu}{2\sqrt{\ln 2/\pi}}\tau = t$$

$$\begin{aligned}
G(\tau) &= \exp\left(-j2\pi\nu_0\frac{2\sqrt{\ln 2/\pi}}{\Delta\nu}t\right) \int_0^{\infty} \exp[-\pi f^2] \exp(-j2\pi ft) df \\
&= \exp\left(-j2\pi\nu_0\frac{2\sqrt{\ln 2/\pi}}{\Delta\nu}t\right) \exp[-\pi t^2] \\
&= \exp(-j2\pi\nu_0\tau) \exp\left[-\pi\left(\frac{\Delta\nu\tau}{2\sqrt{\ln 2/\pi}}\right)^2\right]
\end{aligned}$$

(4-4)式が得られる。

$$G(\tau) = \exp\left[-\left(\frac{\pi\Delta\nu\tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right] \exp(-j2\pi\nu_0\tau) \quad (4-4)$$

τ は光が干渉する際の時間差であり、 $\tau = (L_s - L_r)/c$ である。 L_s は L_r を基準として、 $L_s = L_r - VT$ は参照ミラー移動速度 V 、時間 T として表せば、速度に依存したものとなる。

$$\tau = \frac{V}{c}T$$

(4-4) 式は、ガウス型のスペクトル分布をもつ光源は紡錘型の干渉波形（インターフェログラム）となり、その強度は速度に依存して指数関数的な減衰をすることを表している。ガウス型のパワースペクトル分布は低コヒーレンス光源に関わらず、LED、レーザ等でも適用できる。つまり、理想的な単一波長光源で無い限り速度に依存して干渉光強度が減衰することを表す。

インターフェログラムは光源の可干渉性を示すものであり、その干渉する距離（可干渉距離）は光源のスペクトル幅に依存する。光源のスペクトル幅は理想的な単一波長光源から出射した光がその一定の周波数を維持する時間 Δt に直接依存した量として解釈でき、以下の関係を持つ。

$$\Delta t \cdot \Delta f \approx 1$$

この可干渉距離をコヒーレンス長 l_c として表す。これは Fig.4-1 の干渉計において干渉光の可視度(Visibility)がとなる時の光路差 $\Delta L (= L_r - L_s)$ で定義される。

$$Visibility = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

つまり、干渉光の項を表した (4-4) 式において、 $|G(v)| = 1/2$ となる時の光路差となり、以下のようなになる。

$$\exp \left[- \left(\frac{\pi \Delta v}{2\sqrt{\ln 2}} \cdot \frac{l_c}{c} \right)^2 \right] = \frac{1}{2}$$

$$l_c = \frac{2c \cdot \ln 2}{\pi \Delta v}$$

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta k}{k}$$

$$l_c = \frac{2\ln 2c}{\pi\Delta\nu} = \frac{2\ln 2\lambda_0^2}{\pi\Delta\lambda} = \frac{4\ln 2}{\Delta k} \approx 0.44 \frac{c}{\Delta\nu} \quad (4-5)$$

コヒーレンス長は光源スペクトル幅に依存し、(4-5)式で表される。ここで、 c は光速、 λ_0 は中心波長、 $\Delta\lambda$ と $\Delta\nu$ は光源のスペクトル幅、及び振動数幅を表す。これは層分解能を示す値となり、コヒーレンス長以下では層を分解できず1点からの反射と認識される。

4-2 OCTの種類

さまざまなイメージング技術の比較を、横軸を深度、縦軸を分解能にとり、Fig.4-2に示す。光ファイバの断線検出を目的とした場合、深度は数10 mm、分解能では数10 μm が必要と考える。一般的なOCTは深度が10 mm以下であるが、本手法の光路可変機構を用いたTD-OCTであれば、本研究で求める10~20mmの測定領域が可能となる。

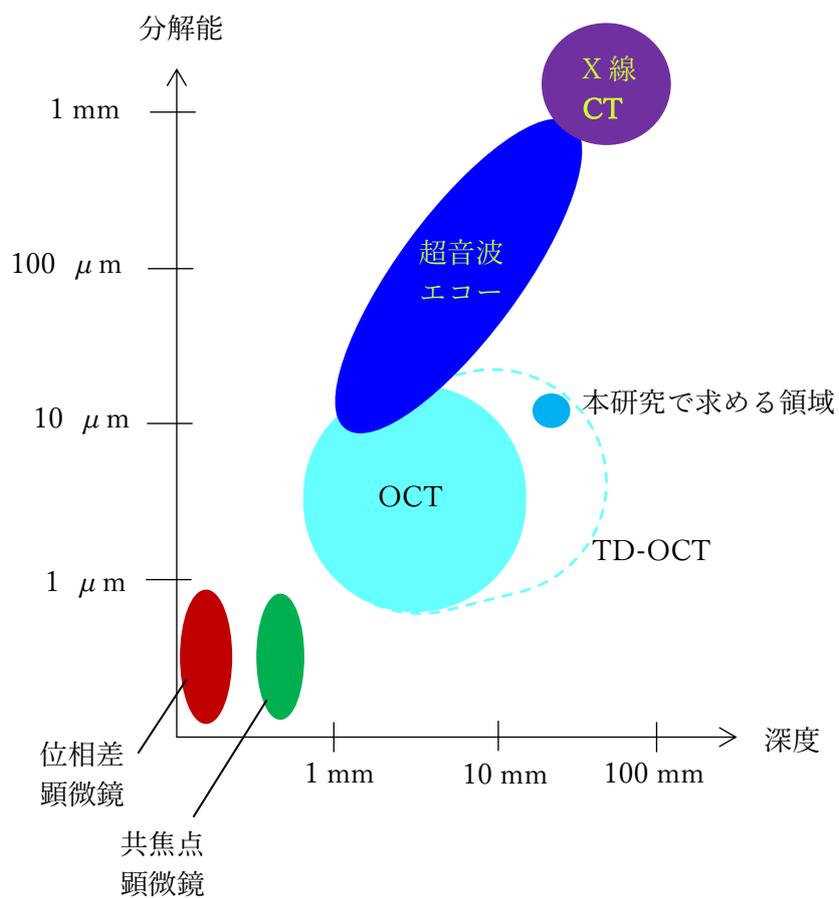


Fig.4-2 イメージ技術の比較

OCTの種類を Fig.4-3 に示す。大きく分けて TD (Time Domain)-OCT と FD (Fourier Domain)-OCT に分類され、さらに FD-OCT は SD (Spectrum Domain)-OCT と SS (Swept Source)-OCT に分類される。TD-OCT は参照ミラーを動かしてスキャンを行う。FD-OCT はミラーを掃引する代わりにフーリエ変換により深さ情報を得る。SD-OCT は、信号を回折格子とアレイディテクタで分光し、得られたスペクトルをフーリエ変換することで深さ情報を得る。SS-OCT は波長掃引光源を用い、得られたスペクトルをフーリエ変換することで深さ情報を得る。

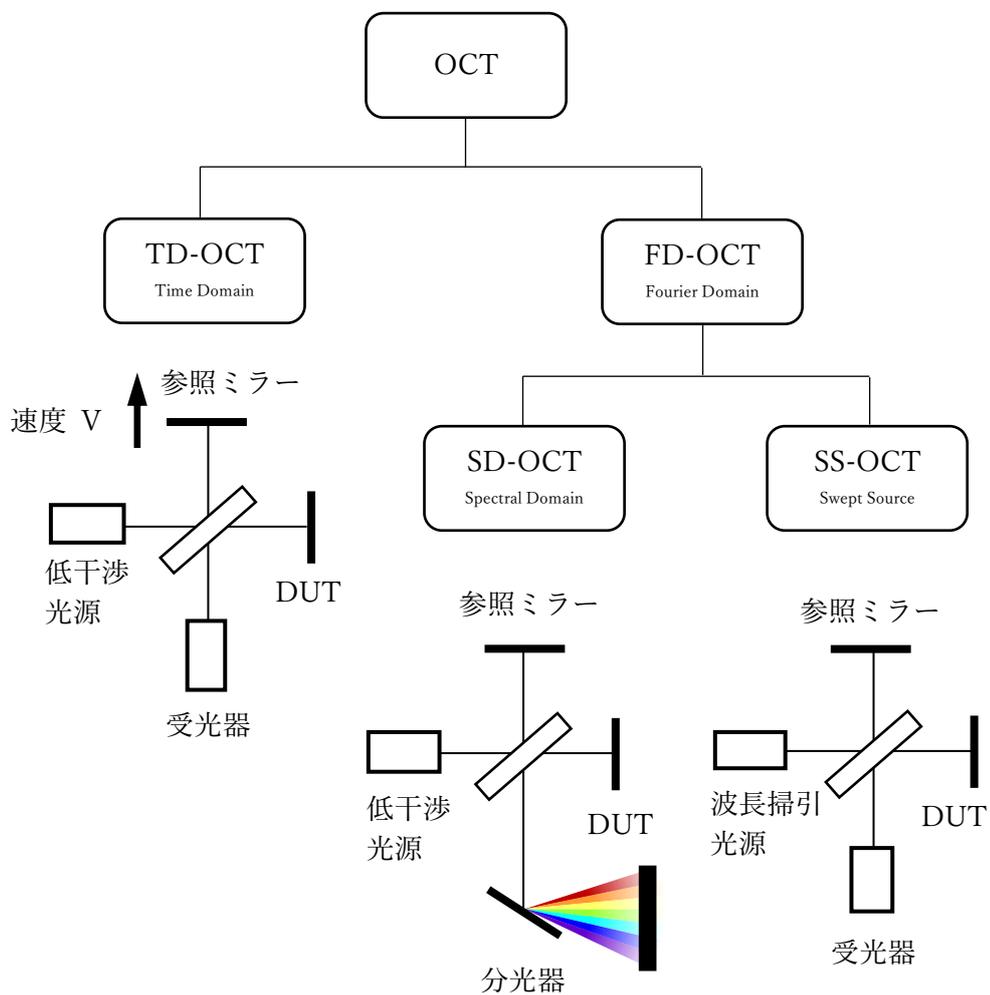


Fig.4-3 OCTの種類

4-3 TD-OCT の優位点

表 4-1 に OCT 方式による長短所を示す。本研究で求める仕様は深度が深く直線性が高いことである⁽³²⁾。その点では TD-OCT が最も適当であると考ええる。一般的に FD-OCT, (SS-OCT) のダイナミックレンジが 120 dB であることに対し、TD-OCT は 50 dB 程度である。しかしながら、FD-OCT は FFT を使用し有限のバンド幅で干渉波形を再構成することに対し、TD-OCT は測定波形をそのまま使用するため、TD-OCT は高い直線性を得ることができる。

表 4-1 OCT 方式による長短所

OCT 方式	TD-OCT	SD-OCT	SS-OCT
走査方式	機械的走査	分光走査	光源波長走査
計測速度	低速	高速	高速
ダイナミックレンジ	低	高	高
深度	長	短	短
直線性	高	低	低

また、本研究で求める断線検出機は高感度検出であること、また、解体すること無しに断線の状態を解析することであるため、測定値の真の値(絶対値化)が必要であり、かつ、高感度な RL 測定が必要である^(6,7,8,33)。

よって、TD-OCT を選択し、以下の課題を解決する。

1) 深度 20 mm

光デバイスにおいて光ファイバの被覆を剥く部分を検査する為には深度 20mm が必要である。

2) 絶対値化された RL 測定値の高感度化

第 2 章の結果から、光ファイバ断線を検出する目的では TD-OCT を用いたリフレクトメータが最適であると考えた。しかしながら、これまでの装置では反射減衰量感度及び反射減衰量誤差の点は十分ではなかったため、高感度検出が必要である。具体的な必要感度に関しては 6 章で述べる。

第5章 高感度光ファイバ断線検出器の開発

5-1 回転機構型 TD-OCT

TD-OCT の深度方向を得る方式は回転機構型、レール可動型がある。

回転機構型 TD-OCT は Fig.5-1 のように回転リフレクタを動かし、その光路長変化によって、干渉が起こる試料の深度情報を得る⁽³⁴⁾⁻⁽³⁷⁾。また、光路長可変機構は回転するリフレクタと固定ミラーで構成され、疑似的に線形な光路長変化を与える。回転半径は計測範囲、回転速度は走査数に影響を与える⁽³⁸⁾⁻⁽⁴²⁾。単純構造である為、小型で持ち運び可能であること、振動等の機械的影響に強いこと、また、開発コストが小さい点等の優位性を生む。

レール可動型はレール上でリフレクタを直線状に動かし深度情報を得る。立ち上がり立ち下りの制御、繰返し測定時の位置ずれ制御にノウハウが必要である為、比較的深度が深い仕様時には小型で優位であるが、本研究で必要な 20mm であれば回転機構型の方が有利である。

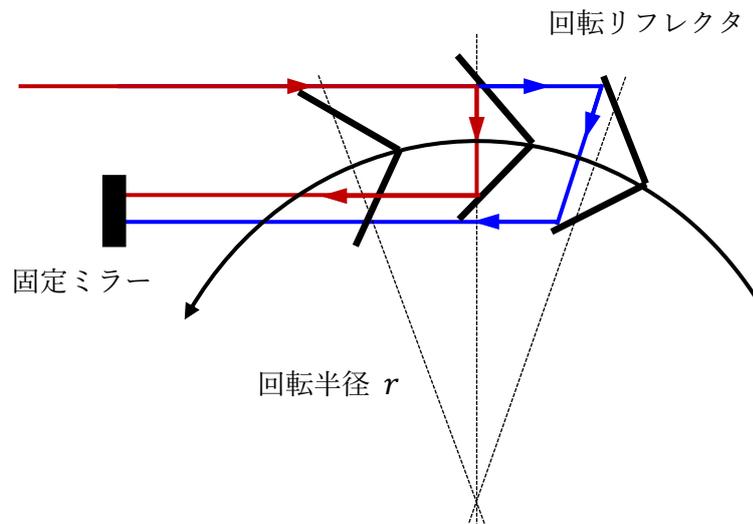


Fig.5-1 回転機構型 TD-OCT

その際の光路長変化の式は(5-1)式で表される。

$$\begin{aligned}l_{ALL} &= l_1 + l_2 + (l_1 - l_4) - 2s \\ &= 2l_1 + l_2(1 - \sin 2\theta) - 2s\end{aligned}\tag{5-1}$$

ここで、 $l_1 \sim l_4$ は以下のように表される。

$$l_1 = (r + s) \sin \theta - \frac{(r + s)(1 - \cos \theta)}{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right)}$$

$$l_2 = \frac{l_3}{\cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right)}$$

$$l_3 = 2s + \frac{(r + s)(1 - \cos \theta)}{\sin\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right)}$$

$$l_4 = l_2 \sin(2\theta)$$

ここで θ は回転角 $^{\circ}$, r は回転半径 mm, s は回転半径からのシフト量 mm を表す。
 Fig.5-2 に $l_1 \sim l_4$ の光学的な配置を示す。固定ミラーで反射させることではその時の光路を戻す構成をとることで、疑似的な線形走査となる。

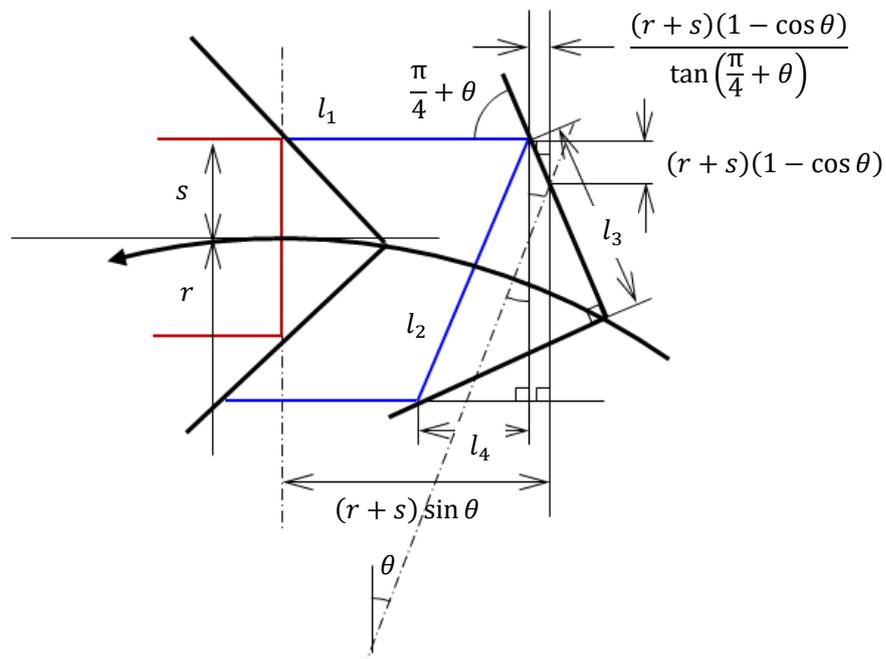


Fig.5-2 光路長可変機構による光路長変化の導出

Fig.5-3 は本研究の回転機構型 TD-OCT に使用した回転半径 $r = 20$ mm, 回転半径からのシフト量 $s = 3.5$ mm によるリフレクタ回転角と光路長の関係である。 $\pm 20^\circ$ の範囲では光路長変化量は 25.3 mm であり、十分本研究の要求仕様である深度 20mm を満足できる。

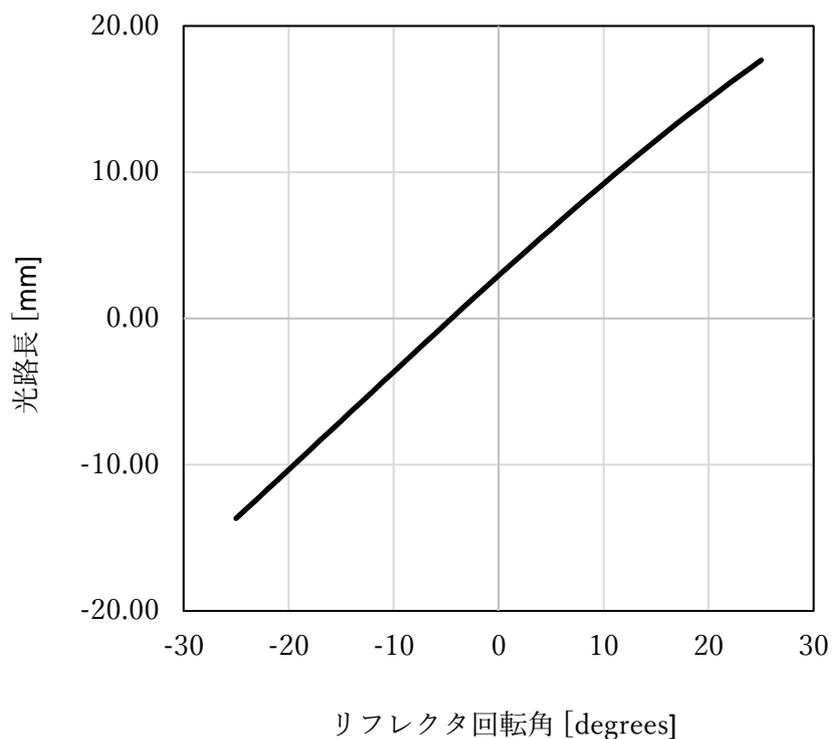


Fig.5-3 リフレクタ回転角と光路長の関係

5-2 装置構成

回転機構型は回転半径と回転速度を自由に変更できる疑似的な線形走査機構で、小型で持ち運び可能であること、振動等の機械的影響に強いこと、また、開発コストが小さい点等の優位性を生む。光路長可変機構は回転するリフレクタと固定ミラーで構成され、疑似的に線形な光路長変化を与える。

Fig.5-4 に本研究で採用した回転機構型 TD-OCT(OCCR : Optical Coherence Component Reflectometer)の装置構成を示す。

本装置は本来、光ファイバの断線検査目的であるが、今回は装置の精度評価の目的の為、測定ヘッドを変え、Fig.5-4 に示す構成とした。光学系は光ファイバカプラによって干渉計を構成している。

本装置仕様を表 5-1 に示す。SLD(Super Luminescent Diode)は $\lambda = 1.31 \pm 0.02 \mu\text{m}$ 、測定感度を向上させるため 10 mW の出力のものを選択した。温度 10~40 °C に対応する安定性を得る為、ペルチェ素子による温度制御付のものを使用している。光路長可変機構の回転リフレクタは測定長 20 mm を確保する為、半径 20 mm のものとした。また、回転速度はドップラーシフトによる感度の低下を考慮し、1.1 秒/回転とした。これは回転するリフレクタから反射した光はドップラーシフトを受ける。このドップラーシフトは参照光のみに影響する為、測定光の波長のずれが起こり、干渉強度が弱くなる。また、回転ぶれの補正を行う為、測定開始にトリガーを設けた。

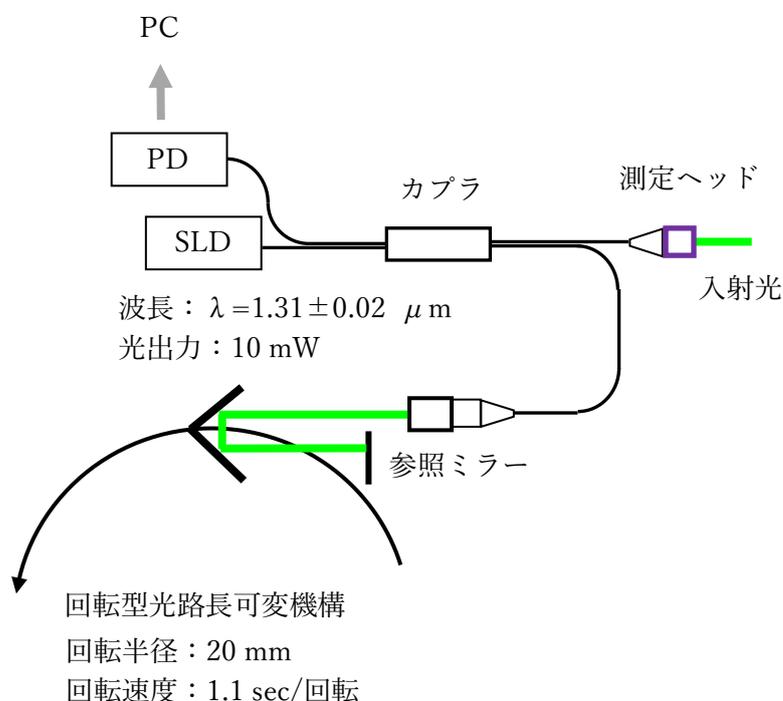


Fig.5-4 回転機構型 TD-OCT

表 5-1 OCCR の仕様.

項目	仕様
波長	$\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ $\Delta \lambda = 0.04 \mu\text{m}$
ファイバ	SMF (10/125)
深度	0~20 mm
距離分解能	1.25 μm
<i>RL</i>	-10~-100 dB
<i>RL</i> 精度	+/-3 dB
測定時間	3 seconds
動作温度	10~40 °C
サイズ	431×89×350 mm
重量	6 kg

Fig.5-5 に受光回路の構成をブロック図で示す。本装置は RL 測定感度 -100 dB を満足する為、受光信号の増幅、ノイズ処理を考慮した。受光信号の増幅は広範囲の受光信号に対応するために受光増幅の利得構成を4段とした。また、ノイズ処理は、PD の差動受光、バンドパスフィルタ、絶対値回路、ローパスフィルタ、AD 変換を組み込んでいる。

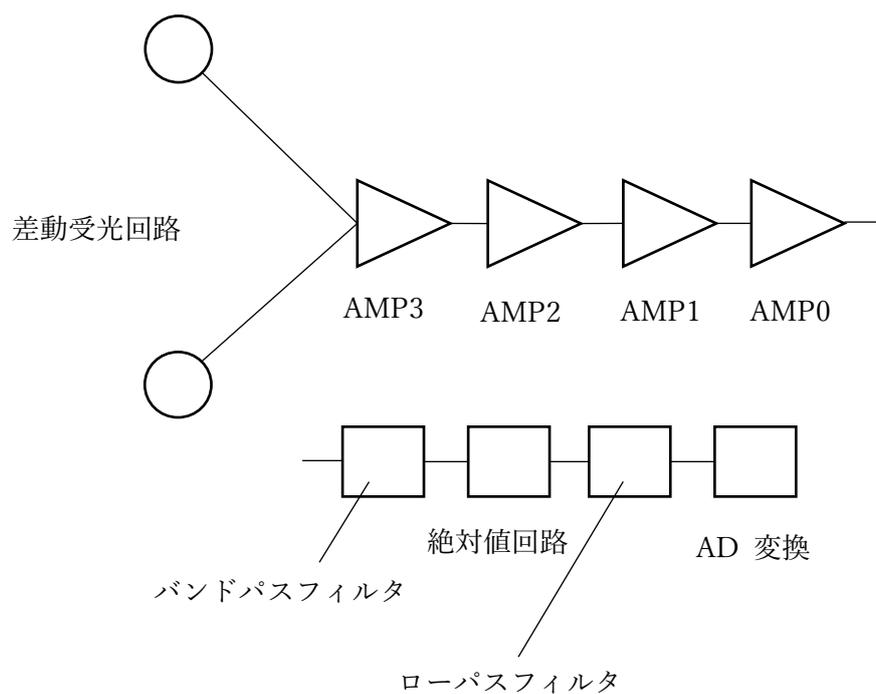


Fig.5-5 受光回路ブロック図

AMP の利得範囲は、1 段目 AMP3 では RL-10~-40 dB, 2 段目 AMP3+AMP2 では-30 ~ -60 dB , 3 段目 AMP3+AMP2+AMP1 では -50 ~ -80 dB , 4 段目 AMP3+AMP2+AMP1+AMP0 では-70~-100 dB としている。各 AMP は 30 dB の受光増幅を持ち、となりあう AMP は計測値を合わせ直線性の向上を目的として、10 dB の重なりを持たせた (表 5-2 参照)。

表 5-2 AMP 段数による利得範囲

AMP	利得範囲
AMP3	-10~-40 dB
AMP3+AMP2	-30~-60 dB
AMP3+AMP2+AMP1	-50~-80 dB
AMP3+AMP2+AMP1+AMP0	-70~-100 dB

Fig.5-6 は OCCR 本体(前面)の外観である。本装置は反射減衰量測定機である。サイズは 431×89×350 mm、重量は約 6 kg であり、機能を限定した持ち運び可能なモバイル機能が搭載されており、PC 無しで測定することも可能である。Fig.5-4 で示した構成から測定ヘッド及び解析 PC 以外は Fig.5-6 の装置内に組み入れられる。測定ヘッドから取り入れられる入射光は入射光口から光ファイバを通じて装置内に取り入れられる。対応コネクタは FC/APC である。

入射光口には OCCR マスターコードが接続される。OCCR マスターコードは接続点が測定 0 mm 位置となるようにファイバ長が調整されているものであり、接続点のコネクタはマスタコネクタである。マスタコネクタの詳細は 2-1-1 項参照。マスタコネクタは DUT(測定対象物)の反射減衰量の値をより精度よく測定するために使用されている。接続点から 20 mm の範囲が測定される。

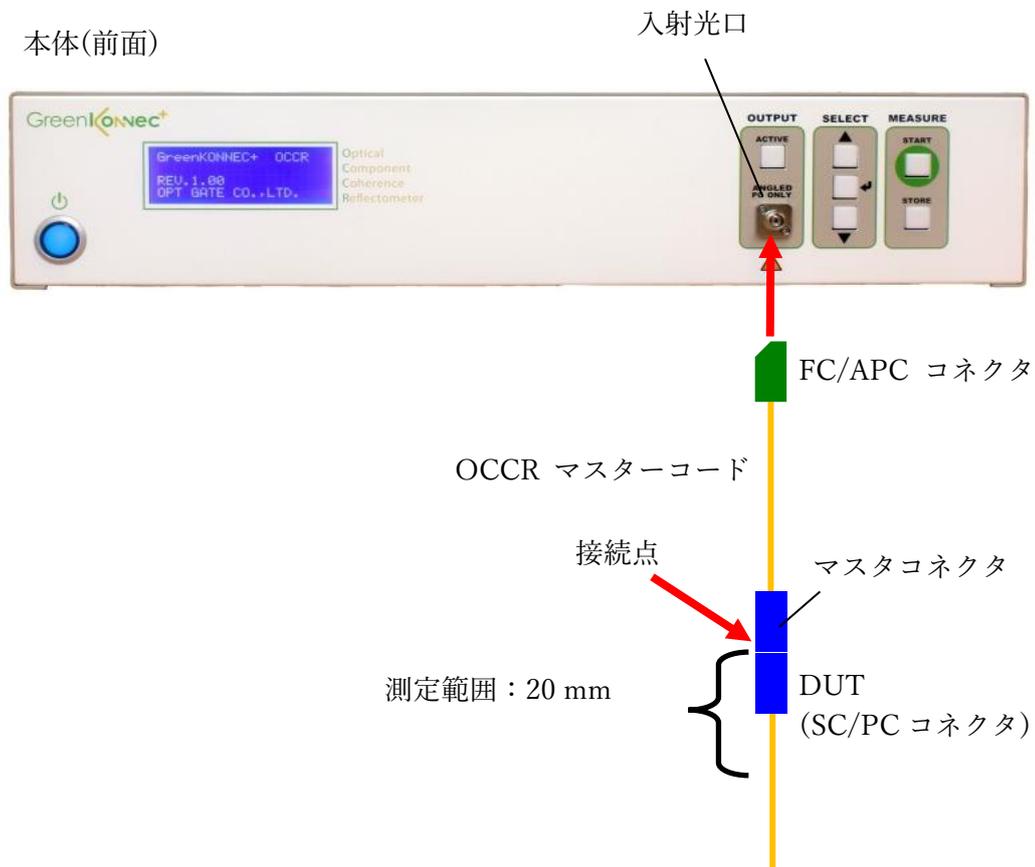


Fig.5-6 OCCR の外観と測定結線図

Fig.5-7 は OCCR の測定画面である。Fig.5-6 のように DUT を接続し、測定開始ボタンをクリックすると測定が開始され、測定結果が横軸に距離、縦軸に反射減衰量のグラフが表示される。反射減衰量のしきい値を設定することにより、合否判定を表示することができる。また、解析ボタンをクリックすることにより測定結果画面の拡大、縮小ができ、またポイントごとの距離と反射減衰量を表示することが可能である。合格の場合には接続点の反射減衰量のみが表示され、不合格の場合には接続点の他、不合格点の反射減衰量が表示される。操作ボタンは初期値のキャリブレーション、測定レンジ、しきい値等の設定を行うボタンである。



Fig.5-7 測定画面

Fig.5-8 は光コネクタ内部で断線が発生しているサンプルの OCCR 測定結果の波形である。測定結果は横軸に接続点からの距離(0~20 mm), 縦軸に反射減衰量(-10~-110 dB)をグラフ上で表示できる。その他、反射減衰量にしきい値を設定し、しきい値を超えた値の有無で合否判定でき、複数検出された場合は最大 6 点まで表示できる。

また、解析ボタンにより、拡大, 縮小さらに Data 保存を行うことができる。ノイズレベルは平均化回数1回で最大約-105 dB であり、-100 dB の信号を確認することができる。



Fig.5-8 測定画面拡大

5-3 反射減衰量の絶対値化

国家標準⁽⁴³⁾⁻⁽⁴⁴⁾とトレーサビリティの取れた反射減衰量の校正を-10~-100 dB まで行う。しかしながら、国家標準とトレーサビリティが取れた反射基準機に-100 dB までカバーできるものは存在しない為、国家標準とトレースできない-50~-100 dB 以下の範囲においては、-50 dB まで校正の取れた可変減衰器を往復で2回通過させることにより、-10~-100 dB の範囲までカバーすることとした。以下に校正手順を示す。

校正手順

1)光可変減衰器の直線性評価

校正の取れたパワーメータを用いて光可変減衰器の値の相関を確認する。

2)反射減衰量校正値に対する可変減衰量 a の設定

校正の取れたパワーメータで測定される測定値が-14.7 dB となるように可変減衰器を調整する。

3)本装置への反射減衰量校正値の値付

4)本装置直線性の確認

5)AMP ごとの補正

以降で各手順に伴う詳細を示す。

5-3-1 光可変減衰器の直線性評価

Fig.5-9 に光可変減衰器の直線性評価の光結線図を示す。LD 光源から出力された光は光可変減衰器を通じてパワーメータに入射される。光可変減衰器の設定値によるパワーメータでの測定値を取り、設定値と測定値の直線性を確認する。これは光可変減衰器の透過率を評価している。本測定の実験目的は反射減衰量の基準を確認するためである。パワーメータは校正が行われているものを使用している。



Fig.5-9 光可変減衰器の直線性評価の光結線図

Fig.5-10 に測定結果を示す。測定値の表示はプラス表示であるが、実際には設定値、測定値ともにマイナスである。設定値 0 dB でキャリブレーションを行い、設定値 0.5 dB ステップで 50.0 dB まで測定を行った。

設定値 50 dB までの確認となっているが、次項に述べる反射減衰量の測定が光可変減衰器を往復で通過することを考慮すると 50 dB までの確認を行うことで 100 dB までの直線性の確認をカバーできる。測定は光源及びパワーメータの安定性を考慮し、電源を入れてから 30 分経過したのちに測定を開始した。測定結果は 1 回の測定結果であるが線形性の指標である相関係数 $r=0.9999995$ であり十分な直線性を得られた。

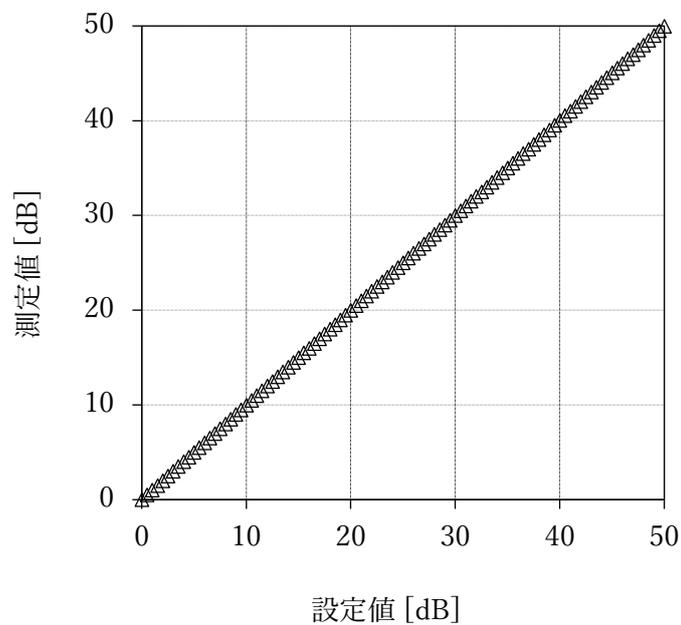


Fig.5-10 光可変減衰器の直線性評価結果

5-3-2 反射減衰量校正値に対する可変減衰量 a の設定

Fig.5-11 に反射減衰量校正値の測定系を示す。

ここでの目的は基準の反射減衰量となる光学系を作る為である。Fig.5-11 においてバックリフレクションメータで測定される反射減衰量が基準値であった場合、バックリフレクションメータを本研究で開発する測定機に換え、同じ値で測定される時、基準値と同じ値を測定したことになる。本手法の本項ではバックリフレクションメータが基準値となる光可変減衰器の値 a を得る。

本研究での基準値は光ファイバの使用環境では必然的に使用される光コネクタの端面を解放した時の反射減衰量 -14.7 dB を用いた((5-2)式参照)。この値は通信業界では基準値として広く用いられ、JIS C61300-3-6:2011 で校正値として使用されている。その理由は光ファイバから空気に出射する時の反射減衰量は -14.7 dB であり、光コネクタ端面を利用すれば容易に作る事ができる為である。

$$RL = -10 \log \left(\frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \right) \quad (5-2)$$

n:光ファイバコアの屈折率



Fig.5-11 反射減衰量校正値測定系

5-3-3 本装置へ反射減衰量校正値の値付

Fig.5-12 は Fig.5-11 の反射減衰量校正値測定系において、光可変減衰器の設定値を a にし、バックリフレクションメータを OCCR に変えた系である。この時に OCCR で測定される反射減衰量を -14.7 dB に値付けする。

ここで反射ミラーの反射率を r 、光可変減衰器の設定値 a (減衰率)としたの時の反射ミラーから反射した反射減衰量の測定結果 RL は、光可変減衰器の設定値 a (減衰率)の影響を受ける。

出射パワー P_0 は反射ミラーに入射する前に設定値 a による影響を受け、さらに反射ミラーから反射したパワーは再度設定値 a による影響を受ける。よって、この場合の反射は (5-3)式になる。

$$RL = -\log(ra^2) \quad (5-3)$$

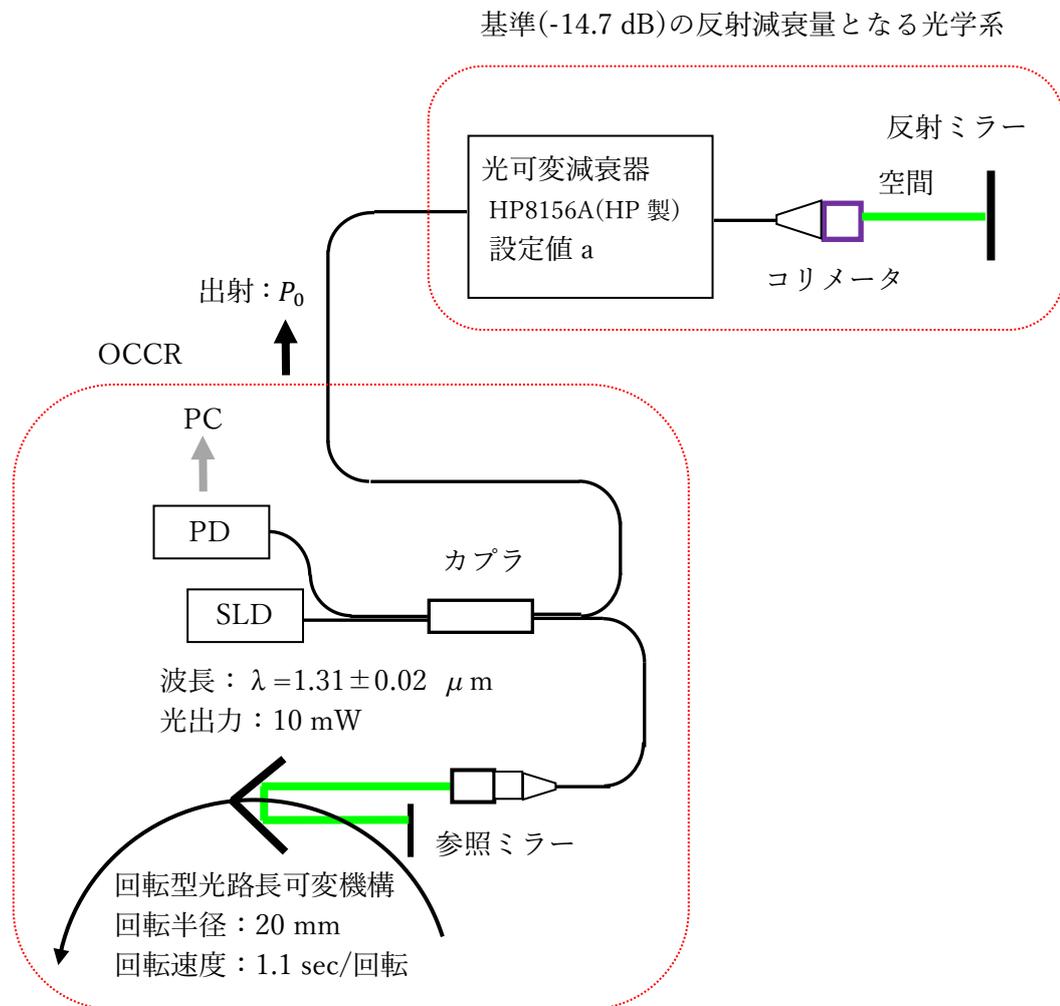


Fig.5-12 反射減衰量-14.7 dB を本装置に値付けする構成

5-3-4 本装置直線性の確認

Fig.5-13 に 5-3-3 項で-14.7 dB の反射減衰量を値付けされた OCCR を用いて-100 dB まで測定した結果を示す。本グラフも設定値, 測定値ともにマイナスであるが表示はプラスで表している。

反射減衰量の設定値を 10 dB より 1 dB ずつ可変し、反射減衰量の測定を行った結果である。3 回の反射減衰量測定の平均値である。その結果、測定値に誤差が生じた。その誤差について原因を考察する。

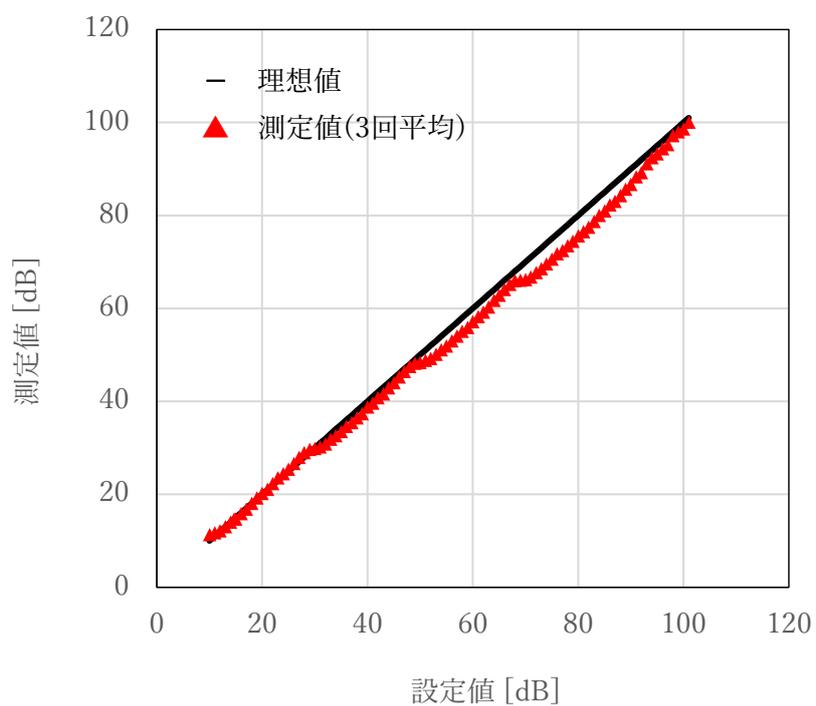
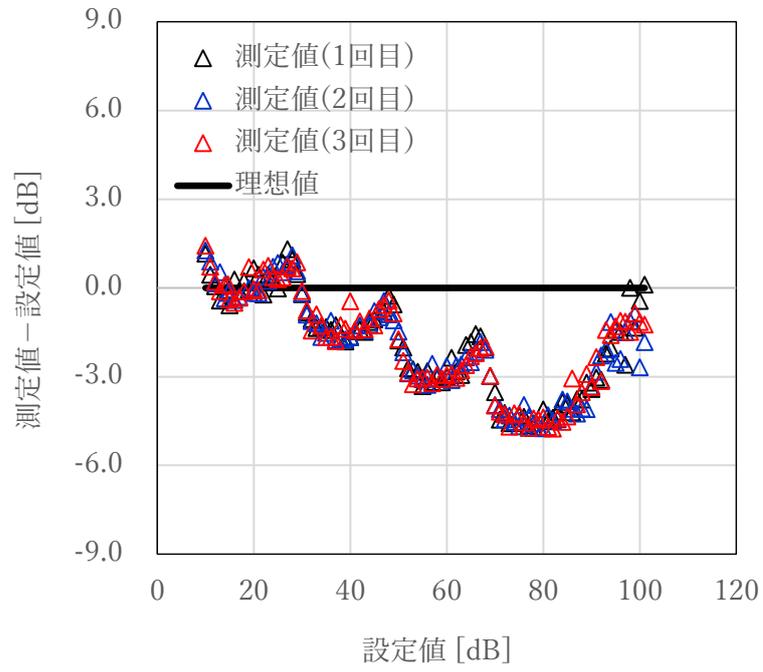


Fig.5-13 OCCR 測定結果の理想値との誤差

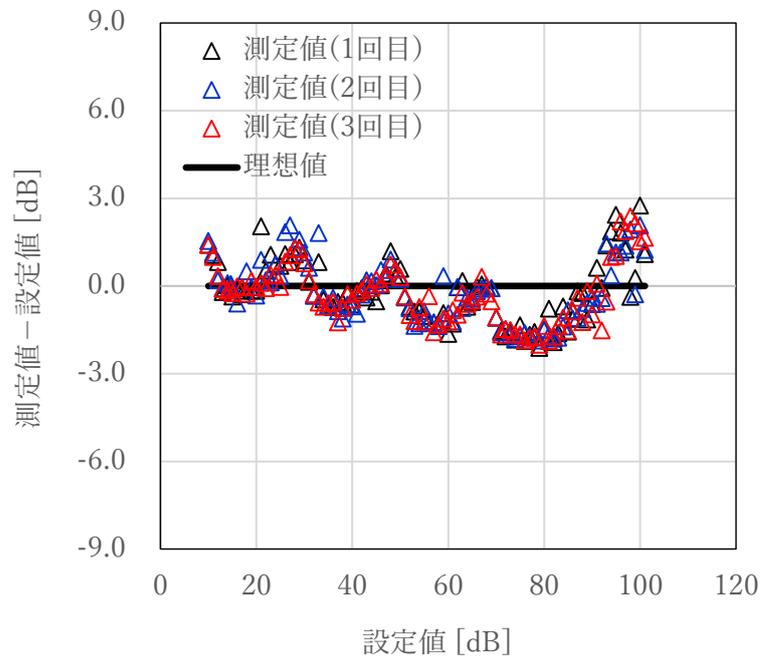
Fig.5-14(a)は設定値と測定値の誤差を拡大表示できるようにするため、Fig.5-13 の横軸を測定値-設定値の差分として、表示したものである。Fig.5-14(a)の結果から、測定値-設定値と理想値との差は4つの塊になっている傾向が確認できる。これは電子回路のAMPの段数ならびにそれに対応する反射減衰量の範囲と一致している。また、各塊内では一度下がり、その後直線的に上昇する傾向がある。その傾向は4つ全てに共通しており、絶対値回路のリニアリティの特性と類似していることから、絶対値回路による線形性のずれが要因と考えられる。このAMP毎に誤差が生じた原因はAMP感度の合わせ目の設定が各装置固有のものであり、装置毎に補正値を設定していく必要があるためである。

OCCRの直線性を向上させる為には、装置ごとにAMPの段毎に補正値を設定することが有効である。表5-3にAMP段数ごとの補正値を示す。Fig.5-14(b)にAMPごとの補正値を行った後の反射測定値-設定値の差分と設定値の結果を示す。3回測定の結果全てが ± 3 dB以下の範囲内となった。AMPごとの補正値は各装置固有の値である為、1例であるが、AMP3は基準として補正無、AMP3+AMP2は-0.65 dB、AMP3+AMP2+AMP1は-1.60 dB、AMP3+AMP2+AMP1+AMP0は-2.96 dBの補正を行った。

ここで、測定回数毎に測定値に差が生じる理由は電子回路で生じるノイズ誤差によるものと考えられる。



(a)補正前



(b)補正後

Fig.5-14 OCCR の測定値誤差

表 5-3 AMP 段数ごとの補正值

AMP	利得範囲 dB	補正值 dB
AMP3	-10~-40	0
AMP3+AMP2	-30~-60	0.65
AMP3+AMP2+AMP1	-50~-80	1.6
AMP3+AMP2+AMP1+AMP0	-70~-100	2.96

標準偏差 : 1.679 dB

5-3-5 まとめ

本研究の結果、 $-10\sim-100$ dB の反射減衰量範囲において ± 3 dB の誤差で絶対測定を可能とした回転機構型 TD-OCT 方式による光ファイバ断線検出器 (OCCR) を開発した。以下は 4-3 項で述べた本研究の開発目標である。

- 1) 深度 20 mm は目標を達成した。
- 2) 絶対値化された RL 測定値の高感度化については 2 章で述べた“これまでの TD-OCT を用いたリフレクトメータ”の誤差及び感度が不十分であることを改善し、性能を向上させた。この結果、断線検出に対し十分であるかどうかは次章で述べる。

第6章 光ファイバ断線の解析

6-1 光ファイバ断線のシミュレーション

3章で述べた光ファイバ断線の反射減衰量は以下の2点によるものと推測した。

- 1) 光ファイバ断線部の端面角度
- 2) 光ファイバ断線発生からの経過時間(断線した光ファイバ同士の距離)

光ファイバ断線における反射減衰量のシミュレーションをFC/APCコネクタを用いて行った(Fig.6-1 参照)。FC/APCコネクタは端面に角度を有したコネクタである。規格化されたFC/APCコネクタの端面角度は $\theta_b = 8^\circ$ である。

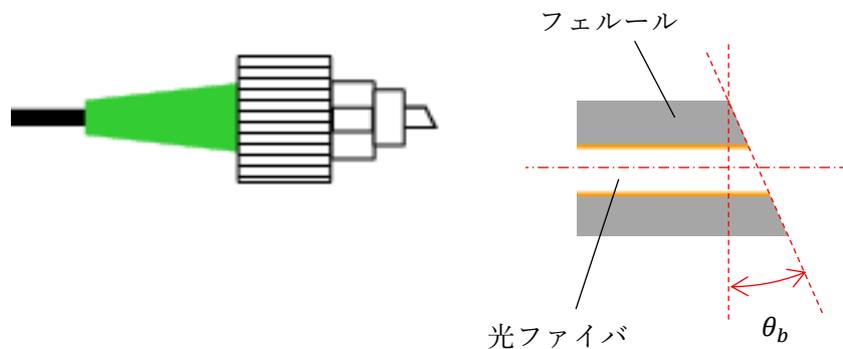
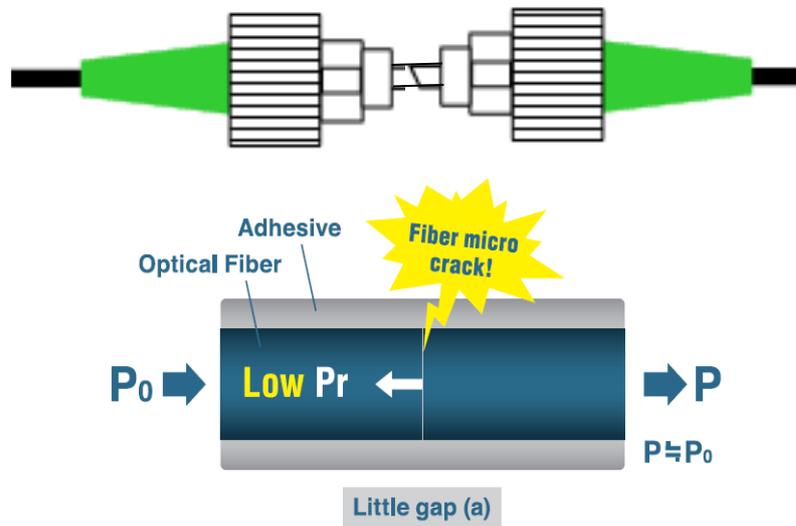
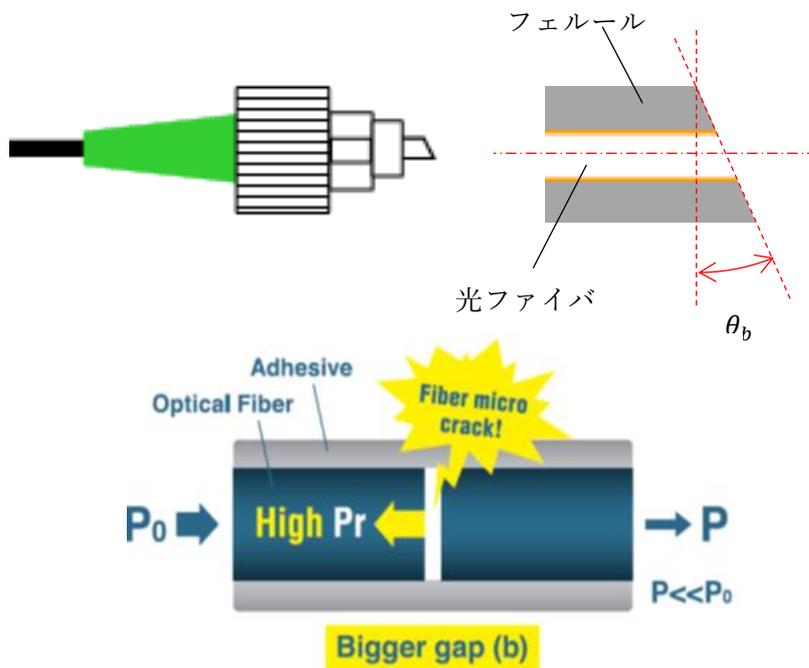


Fig.6-1 FC/APC コネクタ

光ファイバ断線が発生してからの経過時間シミュレーション(断線した光ファイバ同士の距離)は Fig.6-2 のように、光ファイバ断線直後では光ファイバ同士が離れていない状態をシミュレーションするため光コネクタを接続させた。光ファイバ断線から時間が経過し、光ファイバ断線同士がお互いの反射光の影響を無視できる距離まで離れた状態(多重干渉の影響が無い)のシミュレーションは光コネクタ端面を解放させた。



(a) 光ファイバ断線直後のシミュレーション



(b) 光ファイバ断線からお互いの反射光の影響が無視できる距離まで離れた状態シミュレーション

Fig.6-2 光ファイバ断線発生からの経過時間によるシミュレーション

6-2 シミュレーションサンプル作製

Fig.6-2 に示すように光コネクタの端面角度 θ_b を光ファイバ断線の端面角度と仮定し、 $0\sim 15^\circ$ 範囲で 14 種サンプルを作製した。

FC/APC コネクタサンプルのフェルールを Fig.6-3 に示す研磨治具にセットする。セットするフェルールはあらかじめファイバと接着固定されているものである。研磨は Fig.6-4 に示す精工技研製 OFL-15A 研磨機にて行った。仕様は表 6-1 参照。所定位置に研磨治具をセットし、スタートボタンを押すと研磨治具は下降し、設定する加重が研磨治具に掛かるまで下降する。その後、研磨シートがセットされたターンテーブルが設定された時間回転し、先端を研磨する。研磨シートは粗いものから細かいものまで順に研磨シートを変える。今回使用した研磨砥粒径は $9\ \mu\text{m}\rightarrow 3\ \mu\text{m}\rightarrow 1\ \mu\text{m}\rightarrow 0.02\ \mu\text{m}$ の 4 工程である。研磨シートの研磨砥粒は $9\ \mu\text{m}\sim 1\ \mu\text{m}$ まではダイヤモンド、最終の $0.02\ \mu\text{m}$ はシリカである。研磨角度はフェルールセット角度が研磨機のターンテーブルに対し、 θ_b 傾けて加工することによって得ている。1 治具あたり 12 ヶ所セットできるため、12 ヶ所研磨角度を変えて θ_b の異なる 12 種類のサンプルを作製した。この 12 種のサンプルの他、 θ_b が $0, 8^\circ$ に関しては標準的に治具がある為、そちらを使用した。

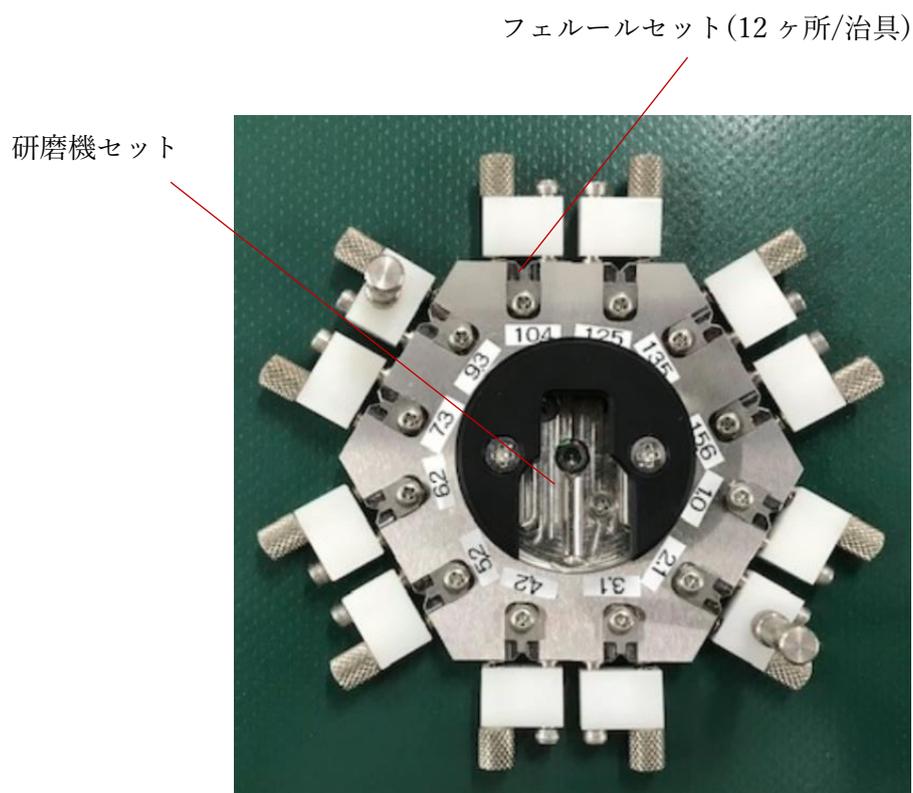


Fig.6-3 研磨角度を変えた研磨治具



研磨治具

ターンテーブル
(研磨シートセット)

下降

Fig.6-4 精工技研製研磨機：OFL-15A

表 6-1 精工技研製研磨機 OFL-15A の仕様

種類	量産用途
加圧法	サーボモータ（自動加圧制御）
最大研磨端子数	24
工程数	5（最大）
登録可能プログラム数	15
回転速度	公転：100-280 rpm
寸法	240×390×510 mm
重量	30 kg
電源	100/115/220/240 VAC, 50-60 Hz
用途	ϕ 2.5 mm PC, APC ϕ 1.25 mm PC, APC MT, mini-MT, Fiber Array

サンプルの角度測定は Fig.6-5 に示す端面 3 次元計測器 DORC 社の ZX-1micro PMS+ にて測定した。干渉を用いた光コネクタ専用の 3 次元形状測定機である。光コネクタ先端の曲率半径、ファイバ凹み量、研磨頂点ずれ、端面角度を一度に測定することができる。表 6-2 に仕様一覧を示す。



Fig.6-5 端面 3 次元計測器 DORC 社 ZX-1 micro PMS+

表-6-2 DORC 社 ZX-1 micro PMS+の仕様.

項目	仕様
曲率半径 mm	3~FLAT
曲率偏心 μm	0~500
ファイバ凹み量	± 6 (白色光源使用時)
端面角度 $^{\circ}$	0~15
測定ファイバ	SMF/MMF
キャリブレーション	自動
寸法	85(W) \times 280(D) \times 85(H) mm
重量	3 kg

再現性(1σ)

項目	繰返し 100 回	着脱 50 回
曲率半径 mm	0.05 以下	0.15 以下
曲率偏心 μm	0.2 以下	1.0 以下
ファイバ凹み量 nm	1.0 以下	1.5 以下
端面角度 deg	0.005 以下	0.015 以下

6-3 端面角度による反射減衰量理論値

光ファイバ断線間のギャップが大きい場合の反射減衰量 RL_{gap} は(6-1)式となる(付録 1 参照)。

$$RL_{gap} = RL_0 \exp \left[- \left(\frac{2\theta_b}{\theta_e} \right)^2 \right] \quad (6-1)$$

$$RL_0 = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$$

$$\theta_e = \frac{\lambda_0}{\pi n \omega_0}$$

RL_0 : θ_b が 0 の時の RL

λ_0 : 波長

n : コアの屈折率

ω_0 : モードフィールド半径

光ファイバ断線間のギャップが小さい場合には多重反射の影響を考慮し、反射減衰量 RL は RL_{gap} と多重反射による反射減衰量 RL_{multi} との和になる。

多重反射の理論式は屈折率 n の板は空気、空気の部分は光ファイバコアの屈折率となる為、補正を加え、(6-2)式を得る(付録 2 参照)。光ファイバ間のギャップ長 g は $0.004 \mu\text{m}$ とした。根拠はファイバ端面の表面粗さを測定したところ $Ra=0.002 \mu\text{m}$ であった為、その値を 2 倍した値をギャップ長とした。研磨砥粒 $0.02 \mu\text{m}$ にて研磨した端面の表面粗さが $0.002 \mu\text{m}$ と小さくなる理由は、研磨シートは指定径の砥粒を接着剤でシートの上に塗布しているため、砥粒の大部分が接着剤に埋もれ、研磨による傷は砥粒より小さいサイズになるためと考える。

$$RL_{multi} = \frac{4R_{gap} \sin^2(\delta/2)}{(1 - R_{gap})^2 + 4R_{gap} \sin^2(\delta/2)} \quad (6-2)$$

$$R_{gap} = \frac{(1-n)^2}{(1+n)^2}$$

$$\delta = \frac{4\pi g \cos \theta_b \cos\{\sin^{-1}(n \sin \theta_b)\}}{\lambda_0}$$

g : ファイバ断線間のギャップ

R_{gap} : 真空中からコアに入射する際の反射率

6-4 シミュレーション実験の結果

Fig.6-6 はシミュレーション実験の結果である。

線は理論値を表し、△点は測定値を表す。黒字は Fig.6-2 の(b)で示した“光ファイバ断線からお互いの反射光の影響が無視できる距離まで離れた状態、つまり、断線間のギャップ大(b)のシミュレーション結果であり、青字は Fig.6-2 の(a)で示した光ファイバ断線直後、つまり断線間のギャップ小(a)のシミュレーション結果である。

断線間のギャップ大小問わず端面角度が 8° までは反射減衰量の理論値と実験値はほぼ一致し、また、 8° を超えてから実験値は理論値から離れ、 $-90\sim-100$ dB の範囲でほぼ一定となった。

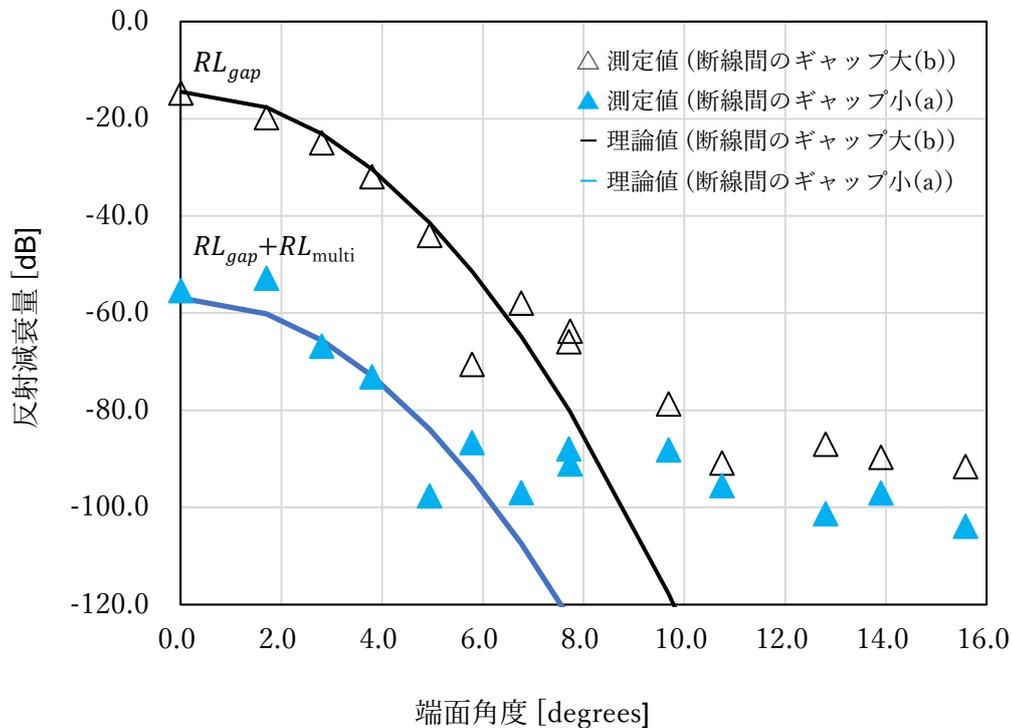


Fig. 6-6 シミュレーション結果
(端面研磨最終仕上げシートの粒径: $0.02 \mu\text{m}$)

6-5 考察

光コネクタ端面角度 θ_b が 8° を超えてから測定値と理論値がずれはじめることについて考察を行った。Fig.6-7 に光コネクタ端面の最終仕上げシートの研磨砥粒径を $1\mu\text{m}$ で研磨した場合の光ファイバ断線のシミュレーション結果を示す。最終仕上げシートが $1\mu\text{m}$ と $0.02\mu\text{m}$ 両者の実験結果を比較すると、 $\theta_b=8^\circ$ 以下では断線間のギャップが大きい場合 (RL_{gap})、両者に差が無いが、ギャップが小さい場合 ($RL_{gap} + RL_{multi}$) は $1\mu\text{m}$ 研磨の反射減衰量が 20 dB 増加し、 8° 以上においては両者ともに 20 dB の増加を維持したままほぼ一定となった。

この現象を考察するとコネクタ端面からの反射減衰量は屈折率差による反射減衰量と端面における散乱光による反射減衰量の和であると推測される。散乱光は反射点から放射状に広がるため、端面の角度による影響を受けない。また、端面の状態が粗い状態であれば散乱光は強くなると予測され、その差が 20dB の増加に表れているものと考えられる。

また、 RL_{gap} における $\theta_b < 8^\circ$ では表面の粗さによる差は確認されなかった。これは端面からの反射減衰量が散乱光の強度より屈折率による反射減衰量の強度の方が大きいことを示している。 $\theta_b > 8^\circ$ では屈折率による影響が小さくなり散乱光の影響が大きくなった為、一定値を示す傾向が表れてきたことを示していると考えられる。

また、 8° 付近で反射減衰量の傾向が変わる理由は NA が影響していると考えられる。シングルモードの $NA=0.12$ であり、角度では 6° となる。実験値での値は 8° 以下でありこの値とよく一致する。

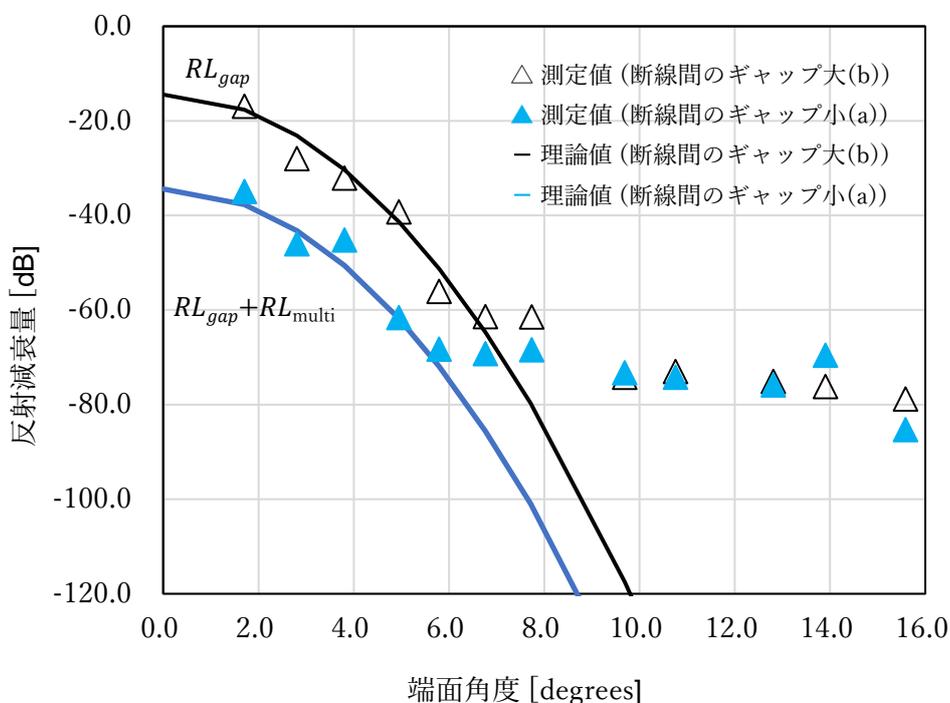


Fig. 6-7 シミュレーション結果
(端面研磨最終仕上げシートの粒径: $1\mu\text{m}$)

6-6 まとめ

光ファイバ断線のシミュレーションを行った結果、以下のことが確認された。

- 1) 光ファイバ断線端からの反射減衰量は屈折率差による反射減衰量と端面における散乱光による反射減衰量の和である。
- 2) 屈折率による反射減衰量より散乱光による反射減衰量の影響が強くなる光ファイバ断線の端面角度の変化点は NA による。
- 3) 光ファイバ断線の反射減衰量は-100 dB 以下である。
- 4) 反射減衰量の測定によって光ファイバ断線の解析は可能であるが、時間経過による反射減衰量の変化は予測するしかない。
- 5) 隠れ断線の存在を確認することができた。

第7章 研究の発展

7-1 光ファイバの曲がり解析

本研究で開発した OCCR を用いて光ファイバの曲がり解析を行った。

7-1-1 実験方法

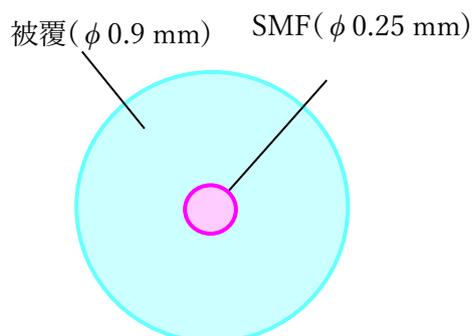
光ファイバを指定の直径の棒に1周巻き付けて、OCCRにて反射減衰量の波形を確認した。

OCCRについて本研究では深度(測定長)20 mmの装置について述べてきたが、その後の研究で深度(測定長 1200 mm)の装置が開発されている。その装置をOCCR Apexと呼ぶ。本項では測定部分が光コネクタ(測定開始点)から離れた部分にあるため、測定長が長いOCCR Apexを選択した。また、OCCR Apexは $\lambda=1.31 \mu\text{m}$ の他、 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ の測定が可能である。(表7-1参照)。

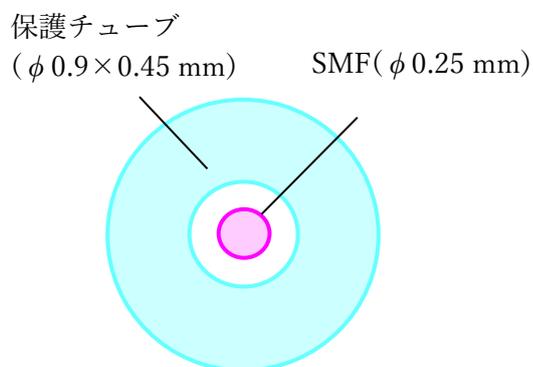
表7-1 OCCR Apex仕様

項目	仕様
波長	$\lambda=1.31 \mu\text{m}$ $\Delta\lambda=0.04 \mu\text{m}$ $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ $\Delta\lambda=0.04 \mu\text{m}$
ファイバ	SMF (10/125)
深度	0~1200 mm
距離分解能	1.25 μm
RL	-10~-100 dB
RL 精度	+/-3 dB(-10~-95 dB) +/-5 dB(-95~-100 dB)
動作温度	10~40 °C
サイズ	431×133×490 mm
重量	16 kg

実験に用いる光ファイバは SMF $\phi 0.9$ のタイトバッファとルースチューブ 2 種類を選択した。タイトバッファは $\phi 0.25$ mm の保護を $\phi 0.9$ mm のサイズにタイト被覆したものである。製造には大型の押出機が必要であり、また、頭出しに調整用の光ファイバが必要となるため、大量生産に向いている。ルースチューブは $\phi 0.9 \times 0.45$ mm のチューブに $\phi 0.25$ の光ファイバを線通したものである。ルースチューブはあらかじめ製造しており、特殊仕様の光ファイバを保護するためチューブに手作業で線通しすることによって保護する。よって、主に少量多品種に向いている。



(a)タイトバッファ



(b)ルースチューブ

Fig.7-1 $\phi 0.9$ SMF 構造

Fig.7-2 は光ファイバの曲げ実験を行っている様子である。指定された直径の金属棒を準備し、測定サンプルの光コネクタに曲げの影響を与えない部分の光ファイバを指定された直径の金属棒に1周巻き付け、OCCR Apexにて反射減衰量測定を行った。

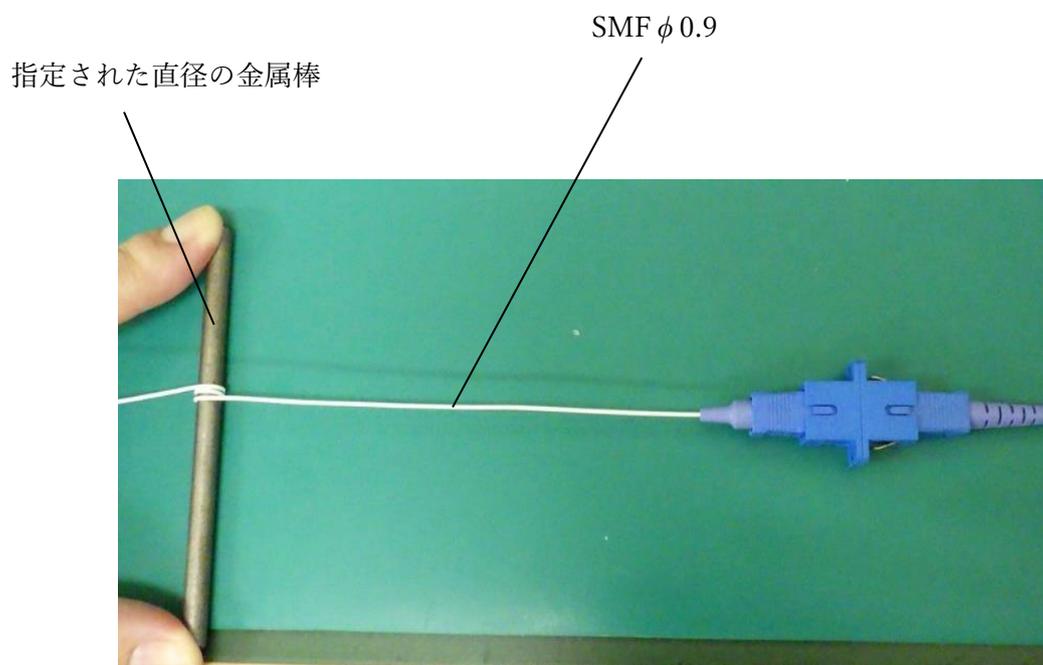
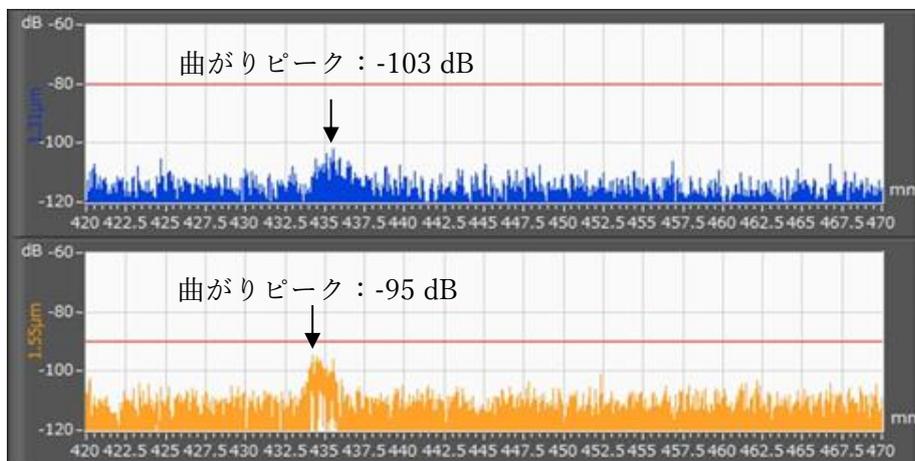


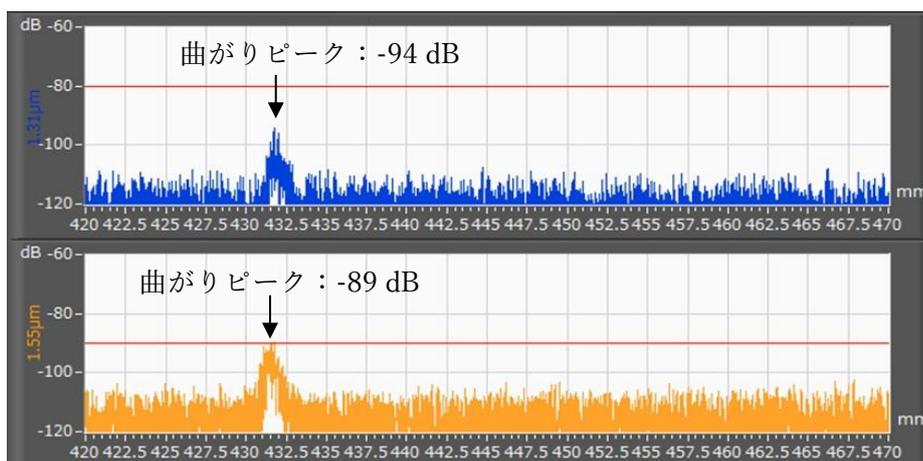
Fig.7-2 光ファイバの曲げ実験の様子

7-1-2 実験結果

Fig.7-3 は SMF $\phi 0.9$ タイトバッファについて曲げ実験を行った時の OCCR 波形である。曲げ直径 5mm, 2.4mm では波形が得られたが、6 mm では波形が確認されなかった。



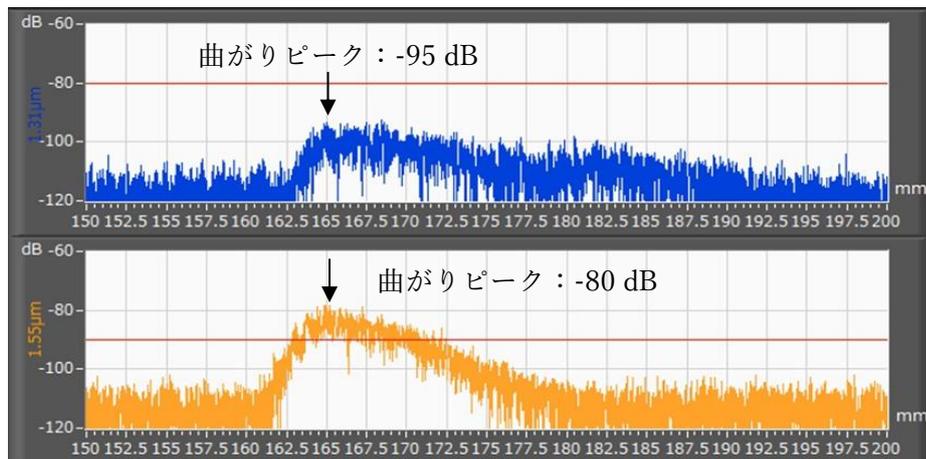
(a) 曲げ直径 5 mm



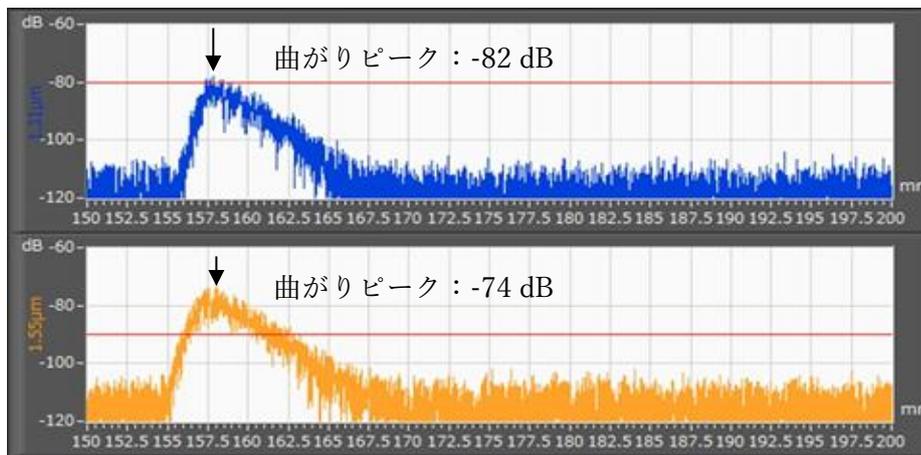
(b) 曲げ直径 2.4 mm

Fig.7-3 SMF $\phi 0.9$ タイトバッファを曲げた時の OCCR 波形

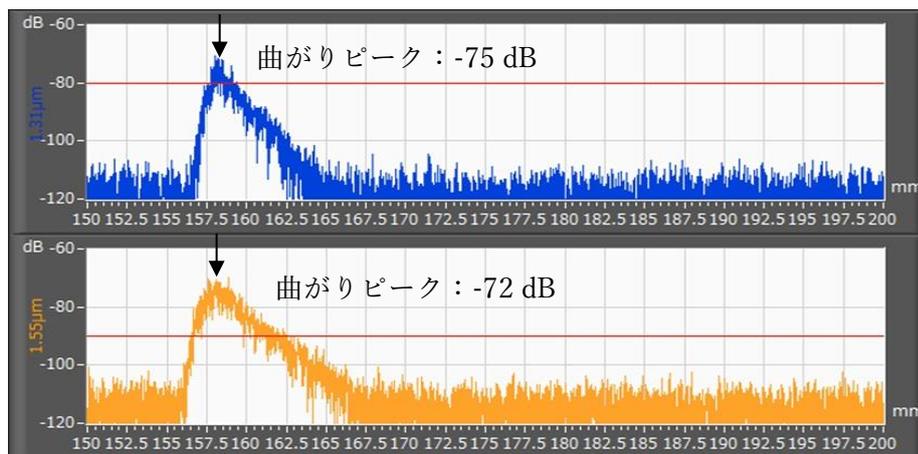
Fig. 7-4 は SMF ϕ 0.9 ルースチューブについて曲げ実験を行った時の OCCR 波形である。



(a) 曲げ直径 8 mm



(b) 曲げ直径 5 mm



(c) 曲げ直径 2.4 mm

Fig. 7-4 SMF ϕ 0.9 ルースチューブを曲げた時の OCCR 波形

7-1-3 考察

光ファイバの曲げ直径と反射減衰量ピークの特徴を Fig. 7-5 に示す。傾向として曲げ直径が大きくなるに従い反射減衰量ピークが小さくなっていることとピーク後の傾斜が緩やかになっていることが挙げられる。

反射減衰量を測定することによって光ファイバの曲げを推測することは可能であると考える。また、OCCR 波形から曲げ半径が大きくなるに従い、曲げによる波形幅が大きくなる傾向があるが、波長によって異なる値を取る。この傾向についてさらなる研究が必要であると考えられる。

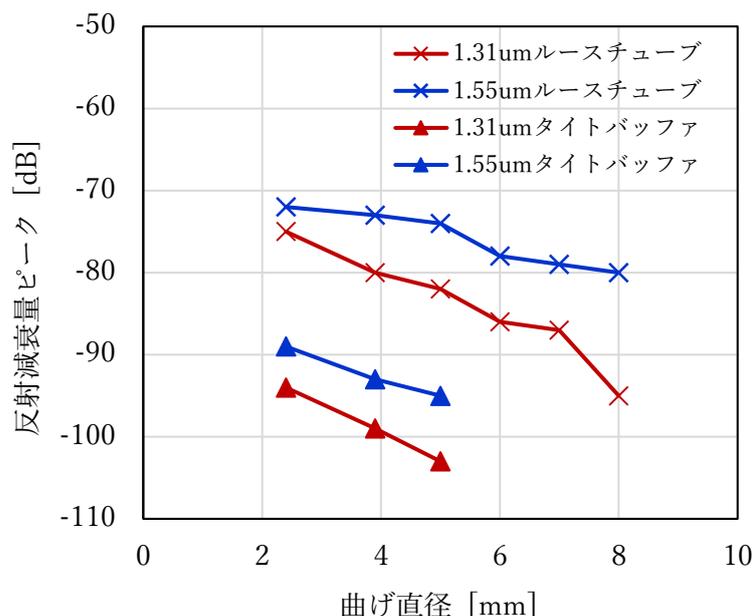


Fig. 7-5 光ファイバの曲げ直径と反射減衰量ピーク

7-2.その他の手法の展開

本研究によって確立された反射減衰量が高感度かつ絶対値測定（誤差が小さい）ならびにそれをを用いた解析によってさまざまな応用が可能となった。過去における TD-OCT を用いたリフレクトメータがメーカーによって独自の仕様定義を用いていたが、共通になることによって通信業界では共通の規格を用いることができるようになる。また、複雑な光デバイスの内部における各パーツの寸法値が測定できるため光デバイスの開発及び検査に新たな指標ができ、技術の発展に貢献できる。さらにミラーを用いて直線ではない経路は、物理的な寸法値測定では測定が煩雑であることに對し、本装置では 1 度に測定することが可能となる。

医療業界では共通の指標を持ったファントムの作成が可能となり、OCT 測定の基準を与えることが可能となる。

その他、多層膜フィルターの厚み測定、成型品の寸法測定等、広範囲にわたり応用範囲が広がることが期待できる。

第8章 結論

本研究の結果、回転機構型 TD-OCT を用いて、-10~-100 dB の反射減衰量範囲において、 ± 3 dB の誤差で絶対測定を行う光ファイバ断線検出機(反射減衰量測定機)を開発することができた。この結果、これまでわからなかった光ファイバの隠れ断線の存在を捉えることができた。

また、それを用いての光ファイバ断線の解析の結果、光ファイバ断線端面からの反射減衰量は屈折率差による反射減衰量と散乱による反射減衰量の和であることがわかった。屈折率差による反射減衰量は光ファイバ断線の端面角度と経過時間が影響し、散乱光は放射状に拡散するため、端面角度、経過時間は反射減衰量に影響を与えない。その変化点は NA であり、本研究では 6° であった。また、その時の反射減衰量は -100 dB であり、-100 dB の検出が可能であれば光ファイバ断線を検出できることがわかった。

本研究によって確立された高感度及び高精度の反射減衰量測定はさまざまな応用が可能である。通信業界における TD-OCT の共通指標だけでなく医療業界では共通の指標を持つファントム作成を可能とし、OCT 測定の基準を与えることができる。

非接触で複数のパーツを用いている光デバイスの寸法ならびにミラーを用いて光路を曲げている光部品の寸法を非接触で測定することを可能とする。その他、多層膜フィルターの厚み測定、成型品の寸法測定等、広範囲にわたり応用が期待できる。

また、反射減衰量を測ることにより、光ファイバの曲げを検出できることが確認されている。光ファイバの曲げは光ファイバの寿命に大きく関わる。本研究は光ファイバ断線を検出することが目的であったが、曲げ半径と反射減衰量の関係を測定することができれば、光ファイバに掛かる歪みから寿命を推測でき、“断線検出”からさらに発展し、“断線予知”を行うことができる可能性がある。

付録(Appendix)

付録1 光ファイバ断線における反射減衰量の理論式

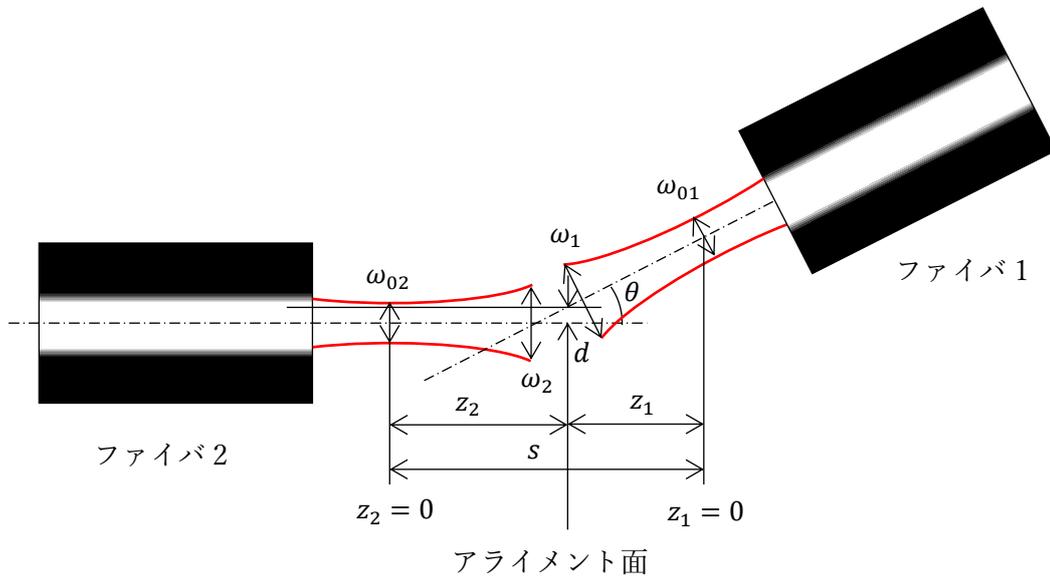


Fig.A1-1 ガウシアン光のファイバ結合

ガウシアン光のファイバ結合のチルト及びオフセット依存性から、端面の反射減衰量を考察する。

シングルモードファイバを伝搬する光としてTEM00モード、即ちガウシアン光を考える。ガウシアン光の複素振幅は(A1-1)式で記述できる⁽⁴⁵⁾⁻⁽⁴⁶⁾。

$$\psi(\omega, \kappa, x) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{1}{\sqrt{\omega}} \exp\left[-\left(\frac{x}{\omega}\right)^2 + \frac{ik\kappa x^2}{2}\right] \quad (\text{A1-1})$$

ここで、 ω はビーム径、 r は位置、 k は波数、 κ は曲率をそれぞれ表している。ビーム径及び曲率には以下の関係式が成り立つ。

$$\kappa = \frac{1}{z \left[1 + \left(\frac{k\omega_0^2}{2z} \right)^2 \right]} \quad (\text{A1-2})$$

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{2z}{k\omega_0^2} \right)^2} \quad (\text{A1-3})$$

$$\frac{1}{\omega_0^2} = \frac{1}{\omega^2} + \left(\frac{k\omega\kappa}{2} \right)^2 \quad (\text{A1-4})$$

ここで、 ω_0 はビームウェストである。ファイバ間の結合効率 τ_a は、ファイバを射出した gaussian 光の受け取り側における複素振幅 $\psi(\omega_1, \kappa_1', x)$ と、受け取り側のファイバ中を伝播する gaussian 光の複素振幅 $\psi(\omega_2, \kappa_2', x)$ との相関係数 τ_a から求められる。

$$\begin{aligned} \tau_a &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(\omega_2, \kappa_2', x) \psi(\omega_1, \kappa_1', x) dx \right|^2 \\ &= \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{\omega_2}{\omega_1} + \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 + \left(\frac{k\omega_2\kappa_1}{2} \right)^2 (\kappa_2 - \kappa_1)^2}} \end{aligned} \quad (\text{A1-5})$$

(A1-5)式は τ_a をビームサイズと曲率の関数として記述したものである。一方で、(A1-1)-(A1-3)式を用いて、 τ_a をビームウェストとファイバ間距離 $s = z_2 - z_1$ の関数として記述することができ、以下の式ようになる。

$$\tau_a = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{\omega_{02}}{\omega_{01}} + \frac{\omega_{01}}{\omega_{02}}\right)^2 + \left(\frac{2}{k\omega_{02}\omega_{01}}\right)^2 s^2}} \quad (\text{A1-6})$$

(A1-6)式から τ_a の値がファイバ間距離に依存していることが分かる。(A1-1)式ではガウスビームを x 方向のみに依存する関数として記述したが、実際には y 方向にもガウス関数状に広がりを持つ為、結合効率は(A1-7)式となる。

$$T_a = \tau_a^2 \quad (\text{A1-7})$$

次に、2ファイバ間における光軸のチルト θ とオフセット d を考慮して理論式を構築する。考える光学モデルをFig.A1-1に示す。まず、チルト θ を考慮すると、ファイバから射出した gaussian 光の複素振幅は(A1-8)式となる。

$$\psi(\omega, \kappa, x, \theta) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{1}{\sqrt{\omega}} \exp\left[-\left(\frac{x}{\omega}\right)^2 + i\left(k\theta x + \frac{k\kappa x^2}{2}\right)\right] \quad (\text{A1-8})$$

次に、(A1-5)式と同様に、相関係数 τ を求めると(A1-9)式となる。

$$\begin{aligned}\tau_a &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} \psi(\omega_2, \kappa'_2, x, 0) \psi(\omega_1, \kappa'_1, x, \theta) dx \right|^2 \\ &= \tau_a \exp \left[- \left(\frac{\theta}{\theta_e} \right)^2 \right]\end{aligned}\tag{A1-9}$$

$$\theta_e = \frac{2^{\frac{3}{2}}}{k\tau_a \sqrt{\omega_2^2 + \omega_1^2}}\tag{A1-10}$$

チルト θ は x 方向のみにあると仮定している為、 y 方向の複素振幅に対する相関係数は(A1-6)式 と等しくなる。このため、結合効率 T は(A1-11)式と求められる。

$$\begin{aligned}T &= \tau_a^2 \exp \left[- \left(\frac{\theta}{\theta_e} \right)^2 \right] \\ T &= T_a \exp \left[- \left(\frac{\theta}{\theta_e} \right)^2 \right]\end{aligned}\tag{A1-11}$$

オフセット d に関しては、以下の関係式が導かれる。

$$\tau = \tau_a \exp \left[- \left(\frac{d}{d_e} \right)^2 \right]\tag{A1-12}$$

$$T = T_a \exp \left[- \left(\frac{d}{d_e} \right)^2 \right]\tag{A1-13}$$

$$d_e = \frac{\sqrt{2}}{\tau_a \sqrt{\frac{1}{\omega_{02}^2} + \frac{1}{\omega_{01}^2}}}\tag{A1-14}$$

エアギャップ及び端面勾配を有するファイバ間の反射減衰率について考察する。
 前節で求めた結合効率をもとに、エアギャップ S 及び端面勾配 θ_b を有するファイバ間の反射減衰率を算出する⁽⁴⁷⁾。考える光学モデルをFig.A1-2に示す。この図において、各種パラメータは以下のようにおける。

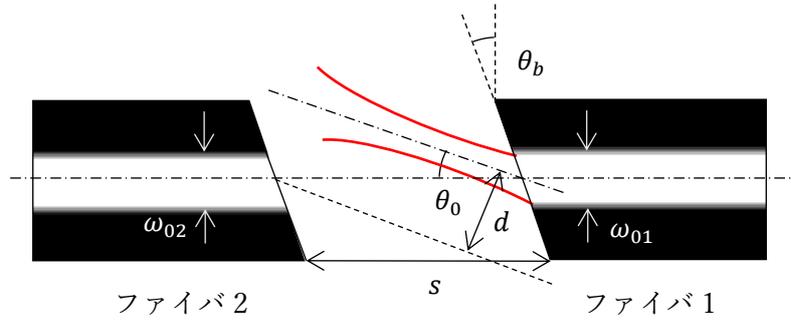


Fig.A1-2 エアギャップ及び端面勾配を有するファイバ間のモード結合

$$\theta_0 = (n - 1)\theta_b \quad (\text{A1-15})$$

$$d = S \sin \theta_0 \quad (\text{A1-16})$$

(A1-15)式は端面角度 θ_b が小さいと仮定して、スネルの法則から導いたものである。Fig.A1-7において、右側のファイバから射出された gaussian 光が左側のファイバに結合する条件は、Fig.A1-6においてオフセット d が掛かっている条件に合致する。Fig.A1-7において gaussian 光が伝播するファイバ間距離は $d = S \cos \theta_0$ であり、両ファイバのモードフィールド径が等しい ($\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_{03}$) という仮定を設けると、(A1-6)式から相関係数が求められる。

$$\tau_a = \frac{2}{\sqrt{1 + \left(\frac{S\lambda \cos \theta_0}{2\pi\omega_0^2}\right)^2}} \quad (\text{A1-17})$$

これを(A1-13)式に代入すると、結合効率は(A1-18)式となる。

$$T = \frac{1}{1 + \left(\frac{S\lambda \cos \theta_0}{2\pi\omega_0^2}\right)^2} \exp\left[-\left(\frac{S\sin \theta_0}{d_e}\right)^2\right] \quad (\text{A1-18})$$

ファイバ間距離 S が十分に小さくビームの発散が殆ど無視できる場合、 $d_e = \omega_0$ の関係が成り立ち、結合効率は(A1-19)式となる。

$$T = \frac{1}{1 + \left(\frac{S\lambda \cos \theta_0}{2\pi\omega_0^2}\right)^2} \exp\left[-\left(\frac{S\sin \theta_0}{\omega_0}\right)^2\right] \quad (\text{A1-19})$$

以上の結果を踏まえて反射減衰量について議論する。反射減衰量はファイバ1への戻り光の割合を指す。減衰の要因として考えられるのは以下の2点である。

- (1) ファイバ1 端面出射時におけるフレネル反射
- (2) ファイバ1 出射後のファイバ1・2界面での往復した成分のファイバ1への再結合

まず、(1) のフレネル反射について考える。ファイバ1 端面で反射する光は距離差 $s = 0$ 、オフセット $d = 0$ 、チルト $2\theta_b$ で入射したガウシアン光と見なす事が出来る(このとき、 $\tau_a = 0$)。このため、戻り光としての結合効率は(A1-11)式から、(A1-20)式となる。

光ファイバ端面を解放した場合の端面角度による反射減衰量 RL は(A1-20)式となる(48)。

$$RL = RL_0 \exp\left[-\left(\frac{2\theta_b}{\theta_e}\right)^2\right] \quad (\text{A1-20})$$

$$RL_0 = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (\text{A1-21})$$

$$\theta_e = \frac{\lambda_0}{\pi n \omega_0} \quad (\text{A1-22})$$

RL_0 : θ_b が0の時の RL

λ_0 : 波長

n : コアの屈折率

ω_0 : モードフィールド半径

RL_0 は垂直入射における反射率である。端面角度が小さいときは RL_0 は(A1-21)式の取り扱いで概ね問題ないが、端面角度が大きくなる場合は厳密なフレネル反射の入射角依存性を考慮する必要があると考えられる。ただし、ファイバのコア中における結合を考えている為、波長はコアの屈折率で割り、 $\lambda = \lambda_0/n$ (λ_0 : 真空中での波長) となる。

付録2 多重反射による反射減衰量の理論式

光ファイバ断線直後では断線したファイバ界面にわずかなギャップが生じる為、その間での多重反射が生じる。このため、多重反射した光が入射側のファイバに戻る効果を考慮する必要がある。ここでは、このファイバ端面間での多重反射の効果を考察する。

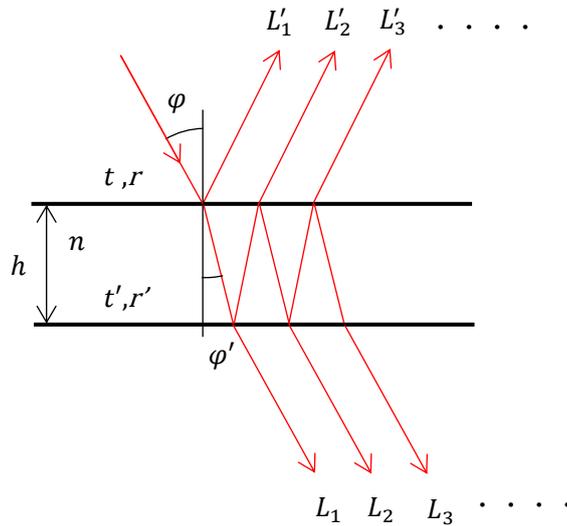


Fig.A2-1 多重反射による干渉

Fig.A2-1 の空気中に置かれた屈折率 n 、厚さ h の板の界面において繰り返される反射干渉を考える。空理から板への入射光に対して振幅透過率を t 、振幅反射率を r 、内部から空気への振幅透過率を t' 、振幅反射率を r' とする。波長 λ 、振幅 a_0 の光が角度 φ で入射する時の透過光の多光波干渉について L_1 、 L_2 、 $L_3 \dots$ の振幅は $a_0 t t'$ 、 $a_0 t t' (r'^2)$ 、 $a_0 t t' (r'^2)^2$ 、 \dots で光束の間の位相差は (A2-1) 式である。

$$\delta = \frac{4\pi n h \cos \varphi'}{\lambda} \quad (\text{A2-1})$$

これらを加え合わせた干渉波の複素振幅は(A2-2)式で与えられる。

$$a_1 = a_0 t t' + a_0 t t' r'^2 e^{i\delta} + a_0 t t' r'^4 e^{i2\delta} + a_0 t t' r'^6 e^{i3\delta} + \dots \quad (\text{A2-2})$$

ストークスの定理より、 $tt' = 1 - r^2$ 、 $r'^2 = r^2$ であり、(A2-2)式が無限等比級数であることに着目すれば(A2-3)式となる。

$$a_t = \frac{a_0(1 - r^2)}{1 - r^2 e^{i\delta}} \quad (\text{A2-3})$$

したがって干渉光強度は(A2-4)式で与えられる。

$$\begin{aligned} I_t = |a_t|^2 &= \frac{a_0^2(1 - r^2)^2}{1 + r^4 - 2r^2 \cos \delta} \\ &= \frac{a_0^2(1 - R)^2}{1 + R^2 - 2R \cos \delta} = \frac{a_0^2}{1 + \frac{4R \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}{(1 - R)^2}} \end{aligned} \quad (\text{A2-4})$$

但し、境界面での強度反射率は $R = r^2$ とする。この板への入射強度 $I_a = a_0^2$ に対する透過強度 I_t の比を取ると(A2-5)式となる。

$$\frac{I_t}{I_a} = \frac{1}{1 + \frac{4R \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}{(1 - R)^2}} \quad (\text{A2-5})$$

この板の内部および境界面での吸収がないとすれば、 $I_t + I_r = I_a$ より、入射光パワー I_a に対する反射光パワーの比は(A2-5)式より(A2-6)式となる。

$$\frac{I_t}{I_a} = \frac{I_a - I_r}{I_a} = 1 - \frac{I_r}{I_a} = \frac{\frac{4R \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}{(1 - R)^2}}{1 + \frac{4R \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}{(1 - R)^2}} = \frac{4R \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}{(1 - R^2) + 4R \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (\text{A2-6})$$

謝辞

本研究は株式会社オプトゲートにて行われ、本研究によって光ファイバ断線検出機 OCCRの商品化ならびに光ファイバ断線の解析を行うことができました。千葉大学大学院融合科学研究科の椎名達雄准教授ならびに椎名研の研究生の皆様には長きにわたり、丁寧なご指導ならびに助言を承りました。また、本博士論文をまとめるにあたり、千葉大学大学院融合科学研究科の星野勝義教授、久世宏明教授、津村徳道准教授、椎名達雄准教授から多大なるご指導、助言を承りました。心より深く感謝申し上げます。

また、忙しい業務にも関わらず、快く研究をさせて頂きました株式会社オプトゲート社員の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 三木、須藤編集「光通信技術ハンドブック」, オプトロニクス社, (2002)
- [2] オプトゲート社製バックリフレクションメータ BR-Hb001,
http://www.greenkonnct.co.jp/equipment/equipment_06.html
- [3] B. L. Danielson and C. Y. Boisrobert, “Absolute optical ranging using low coherence interferometry”, *Appl Opt*, **30**(21), (1991)
- [4] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, J. G. Fujimoto, “Optical Coherence Tomography”, *Science*, **254**, (1911)
- [5] M. E. Brezinski and J.G. Fujimoto “Optical Coherence Tomography: High-Resolution Imaging in Nontransparent Tissue”, *IEEE J Sel Top Quantum Electron.*, **5**(4), (1999)
- [6] A.D.Kersey, M.J.Marrone, M.A.Davis, “Polarisation-Insentive Fiber Optic Michelson Interferometer”, *Electronics Letters* 14th March 1991, **27**(6), (1991)
- [7] K. Takada and M. Horiguchi, Member, IEEE, “Jaggedness-Free Millimeter-Resolution Low Coherence Reflectometry”, *J Lightwave Technol*, **12**(4), (1994)
- [8] K. Takada and M. Horiguchi, Low Coherence Reflectometry Using Wavelength-Tunable Superfluorescent Fiber Source, *Electronics Letter* 8th July 1993, **29**(14), (1993)
- [9] 横河電機社 AQ7410B 高分解能リフレクトメータ仕様,
<https://www.yokogawa.com/jp-yimi/tm/Bu/AQ7410B/aq7410bspec.pdf>
- [10] Keysight(旧 HP)社 8504A 仕様
- [11] 光ファイバコネクタの試験方法, JIS C5961:2005
- [12] 横河電機製 AQ7280, OTDR (光パルス試験器) カタログ
https://cdn.tmi.yokogawa.com/BUAQ7280-01JA.jp.pdf?_ga=2.73379411.1586722159.1561361391-167798998.1537348082
- [13] LUNA 社 OBR5T-50 OPTICAL BACKSCATTER REFLECTOMETER,
<http://lunainc.com/product/reflectometers/obr-5t-50/>
- [14] 久保園著「すべてが解る光ファイバ通信」2.2.3 項, オーム社, (2012)
- [15] 石原監修「実務に役に立つ光ファイバ技術 200 のポイント」, オーム社, (1990)
- [16] 大久保著「ISDN 時代の光ファイバ技術」, 理工学社, (1989)
- [17] A.A.Griffith, The phenomena of rupture and flow in solids, *Philos. Trans. R. Soc.(London)*, Sect. A, **221**, (1921)
- [18] V.D.Frechette 編集 「脆性材料破断解析マニュアル」, 新技術開発センター, (1997)
- [19] 麻生、松藤、石川、忠隈、乙須、八木、奥, 「光ファイバの機械的強度に関する信頼性寿命予測」, 古河電工時報第 130 号, (2012)
- [20] 満永、勝山、小林、石田, 「スクリーニング試験による光ファイバ強度保証法」, 電子情報通信学会誌 B, **7**, (1983)

- [21] NTT-AT 製 OVC-21, 光ファイバ導通チェッカ
https://keytech.ntt-at.co.jp/fiberoptic/prd_0043.html
- [22] 本田, 「光ファイバ網における光分岐線路の遠隔保守監視に関する研究」, 横浜国立大学大学院工学府博士論文
- [23] 立蔵, 「厳しい環境での光ファイバ曲がり部の機械的信頼性計算法」, 電子情報通信学会論文誌 B, 6, (2011)
- [24] Generic Requirements for Single-Mode Optical Connectors and Jumper Assemblies, Telcordia GR-326-core, (2010)
- [25] M. Muraoka, H. Abe, Effect of Humidity on Small-Crack Growth in Silica Optical Fibers, *Journal of the American Ceramic Society*, **76**(6), (1993)
- [26] Dr. G. Scott Glaesemann, Optical Fiber Mechanical Reliability, Review of Research at Corning's Optical Fiber Strength Laboratory White Paper, WP8002(2017)
- [27] H. Schonhorn, Environmental influence on the fracture strength of coated glass fibers, *J. Appl. Polym. Sci.* (23), (1979)
- [28] T. T. Wang, H. N. Vazirani, H. Schonhorn, H. M. Zupko, Effects of water and moisture on strengths of optical glass(silica) fibers coated with a UV-cured epoxy acrylate, *J. Appl. Polym. Sci.* (23), (1979)
- [29] P.R.Cooper, J.S.Leach, A.B.Harding, M.A.Matthews, A fibre optic connector suitable for use in a rugged environment, *Optics & Laser Technology*, **14**, (1982)
- [30] Calvin M. Miller, Stephen C. Mettler, Ian A. White Eds., *Optical Fiber Splices and Connectors: Theory and Methods (Optical Engineering Series)*, Marcel Dekker Inc (1986)
- [31] I. Padron, *Recent Interferometry Applications in Topography and Astronomy*, Chapter 1, Intech Open (2012)
- [32] Wolfgang Drexler, James G. Fujimoto, *Optical Coherence Tomography*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2008)
- [33] 千田、青木、矢野、森, 「複合機能光低コヒーレンスリフレクトメータの開発」, ANDO 技報, April, (2001)
- [34] T. Shiina, Y. Moritani, M. Ito, and Y. Okamura, Long optical path scanning mechanism for optical coherence tomography *Appl. Opt.*, **42**, (2003)
- [35] 椎名、宮崎、本田, 「工業用ライン組込み簡易 OCT システム」, 電気学会論文誌 C, IEEJ Trans. EIS, **129**(7), (2009)
- [36] T. Yoshizawa Ed., *Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications*, Second Edition, Chapter 30, CRC press, (2015)

- [37] T. Shiina, Portable OCT and its Industrial Application Simple OCT for Industrial Use and Basic Health Care, Proceedings of 2nd International Conference on Photonics, 1(Photonics), (2014)
- [38] T. Shiina, Y. Oritani, M. Ito, and Y. Okamura, "Long-Optical-Path Scanning Mechanism for Optical Coherence Tomography", Applied Optics, **42**(19), (2003)
- [39] 尾尻、椎名, 「長深度 OCT を用いた温度と屈折率の高精度計測」, 電気学会研究会, IM-15-017, (2015)
- [40] 秋元、椎名, 「簡易 OCT による肌診断」電気学会研究会, IM-13-5, (2013)
- [41] 椎名, 「産業用 OCT 技術とその応用」O Plus E, **34**(4), (2012)
- [42] 田淵、椎名, 「ポータブル OCT による肌診断と定量評価」, 電気学会研究会, IM-14-060, (2014)
- [43] 光ファイバ接続デバイスおよび光受動部品-基本試験及び測定手順-3-6 部: 反射減衰量測定 JISC61300-3-6:2011
- [44] 光反射減衰量測定器試験方法 JISC6189:2004
- [45] B. D. Marcuse, Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices, Bell Stst. Tech. J., **56**, (1977).
- [46] W. B. Joyce and B. C. DeLoach, Alignment of Gaussian beams, Appl. Opt., **23**, (1984)
- [47] A. Benner, et al., "Low-Reactivity In-Line Variable Attenuator Utilizing Optical Fiber Tapers," J. Lightwave Tech., **8**(7), (1990).
- [48] 高橋, 「シングルモード光ファイバ用光コネクタの特性及び製造に関する研究」, 静岡大学博士論文, (1997)