

新構造光ファイバの接続技術に関する研究

2015 年 1 月

齊藤 浩太郎

(千葉大学審査学位論文)
新構造光ファイバの接続技術に関する研究
2015年1月

齊藤 浩太郎

目次

第1章	序論	1
1.1	NW サービスの高速化と新構造光ファイバ	1
1.2	従来光ファイバの接続損失要因と現状の光ネットワークにおける接続技術	3
1.3	本研究の内容と構成	9
第2章	固形状の屈折率整合剤の光ファイバの撓みを用いた接続技術への影響とその長期信頼性	12
2.1	はじめに	12
2.2	光ファイバの撓みに対する押圧力と曲げ損失	14
2.2.1	撓みのモデル	14
2.2.2	押圧力と曲げ損失特性	15
2.2.3	硬さと撓み幅の接続損失への影響	21
2.3	長期信頼性	24
2.3.1	長期信頼性試験方法	24
2.3.2	環境試験特性	25
2.3.3	加速劣化試験特性	26
2.3.4	長期寿命推定	30
2.4	まとめ	35
第3章	空孔アシストファイバの接続技術	36
3.1	はじめに	36
3.2	モード結合による損失	37
3.2.1	損失モデル	37
3.2.2	接続パラメータの設計	43
3.2.3	実験による検証	49
3.3	まとめ	55
第4章	マルチコアファイバの接続技術	56
4.1	はじめに	56
4.2	回転軸調心コネクタの基本構造	57
4.3	マルチコアファイバ接続の基本特性	61
4.4	V溝およびピンの寸法精度の影響	66
4.5	まとめ	72

第5章 結論	73
付録 新たな現場組立接続技術	75
6.1 はじめに	75
6.2 被覆付接続技術	76
6.3 被覆付接続技術の開発	78
6.3.1 被覆の特徴	78
6.3.2 被覆付き切断技術	79
6.3.3 被覆除去技術	82
6.3.4 被覆付きメカニカルスプライス特性	84
6.4 まとめ	87
参考文献	88
発表論文一覧	93
謝辞	97

第1章 序論

1.1 NWサービスの高速化と新構造光ファイバ

近年のブロードバンドインターネットサービスの需要増に伴い、光ネットワークには高速・大容量化、高信頼性が求められている。現在、光ファイバ伝送路をユーザー宅まで敷設する Fiber to the home (FTTH)を発展させることで、ユーザー宅で最大 1Gbit/s の高速なインターネットを実現している。今後、様々な光サービスが展開されることが予想され、FTTH の更なる普及が必要となってくる。さらに、全国の都市間を結ぶ中継網においては各ユーザー宅での高速なインターネットを支えるために超大容量伝送の実現が求められる。FTTH の更なる普及や超大容量伝送の実現のために、より高性能な伝送特性を持つ光ファイバが要求される。

現状の光ネットワークではシングルモード光ファイバ(SMF)が用いられている。図 1.1 に模式図を示す。SMF は直径 125 μm 程度の同心円状のガラス材料のクラッドと、直径が 10 μm 程度の屈折率がクラッドに比べ、0.3%程度僅かに高いコアで構成される。光はコアとクラッドの境界面において全反射を繰り返しながら伝搬する。光ファイバが曲げられると、全反射の臨界角以上の角度となる光が放射されるため損失となる。そのため、光ネットワークでは、ユーザーがオンタイムで利用している光ファイバが存在している中で、光ファイバの取扱い作業を行わなければならないので、光ファイバを曲げないように慎重に取り扱わなければならない。また、光ファイバの敷設の観点では、例えば、ユーザー宅で、許容値以上の曲げ半径で光ファイバを敷設しなければならないので、設置スキルや配線スペースの確保が必要とされる。

光ファイバの敷設・配線作業や保守・運用性を向上させることは、FTTH の更なる普及に期待できる。近年、光ファイバの取扱い性を向上させるために、光ファイバを曲げても光が漏れにくい低曲げ損失ファイバ(BIF)の研究が活発に行われている[1.1-1.4]。その中でも空孔アシストファイバ (HAF)は設計の自由度の高さから活発に研究がされている。図 1.2 に HAF の模式図を示す。HAF は光ファイバのコア周辺に複数の空孔を設けることで、光の閉じ込め効果を飛躍的に高め、曲げ損失を大幅に低減できる。空孔の位置や大きさを適

切に設計製造することで、低曲げ損失特性と国際規格 International Telecommunication Union's Telecommunication Standardization Sector(ITU-T) G.652 に準拠した SMF との互換性を両立できることが報告されている[1.5]。この優れた特性を利用して一部のアクセスネットワークでは実用化されており、今後、HAF の適用領域拡大が期待される[1.6, 1.7]。

一方、中継網における超大容量伝送に向けて、空間多重伝送は期待されている[1.8]。これまで、時分割多重方式、波長多重方式、多値変調方式によって伝送容量は飛躍的に拡大されている。しかしながら、ハイパワーの光強度の導波によるファイバの破壊などにより、汎用 SMF の通信容量限界は 100Tbit/s 程度である[1.9]。汎用 SMF の通信容量限界を打破するため、図 1.3 に示すように、1 本の光ファイバに複数のコアを有するマルチコアファイバ(MCF)は空間多重伝送媒体として近年活発に検討されている[1.10]。また、MCF は 1 本の光ファイバに複数のコアを有することで直接的に空間利用効率を向上させることができるので、限られた場所での光配線や光配線の輻輳にも効果が期待できる。

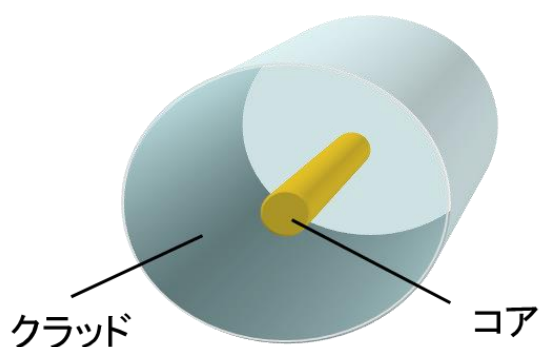


図 1.1 シングルモード光ファイバの模式図

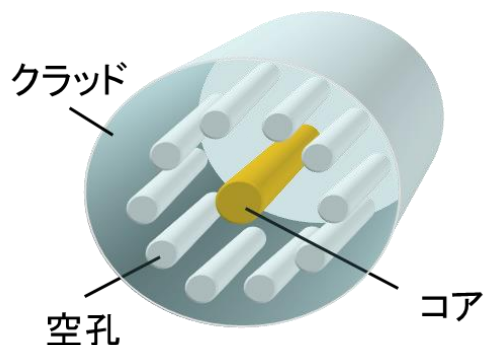


図 1.2 空孔アシスト光ファイバの模式図

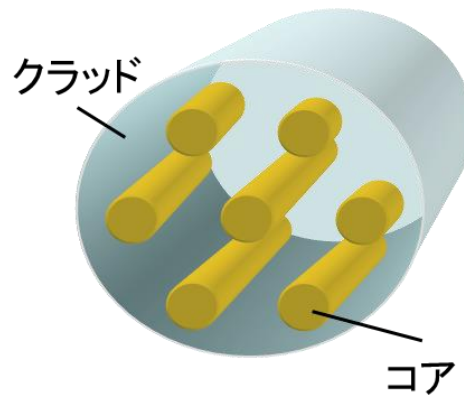


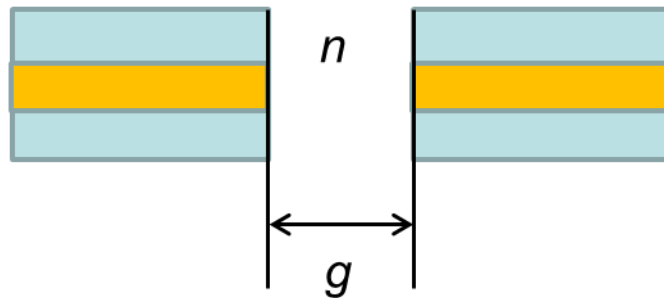
図 1.3 マルチコア光ファイバの模式図

1.2 従来光ファイバの接続損失要因と現状の光ネットワークにおける接続技術

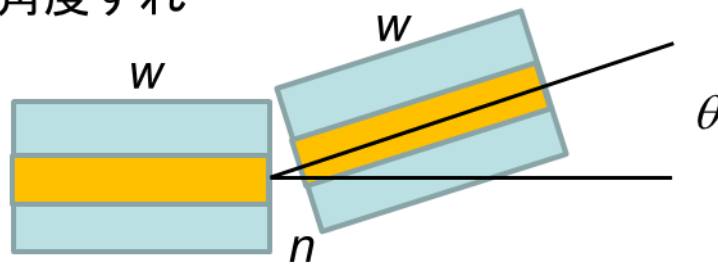
高性能な伝送特性を持つ HAF や MCF を光ネットワークに適用するためには、光ファイバ同士を繋げる接続技術は必要不可欠な技術である。まずは、現状の光ファイバネットワークにおいて使用されている SMF の接続技術について説明する。

光ネットワーク以前に使用されていたメタルのネットワークにおいては、メタル心線を接触させるだけで電子が流れるので、接続方法は特に問題とならない。一方、光ファイバの接続は、髪の毛程の細さの直径 $10\ \mu\text{m}$ 程度のコア部の端面同士を高精度に一致させなければ、接続損失が増大し通信を行なうことが出来ない。接続損失を低減するために、その損失要因を最小化した接続技術が光ネットワークでは使用されている。SMF 同士の接続損失の要因は、ファイバ端面間隔、ファイバの傾き角度ずれ、軸ずれに分類することができる[1.11]。SMF の光の電磁界分布をガウス分布に近似した場合、光ファイバ断面における光の分布の広がりを表すモードフィールド半径 w を用いて、それぞれの要因の接続損失は記述できる。図 1.4 に損失要因の模式図を示す。

(a) 端面間隔 w



(b) 傾き角度ずれ



(c) 軸ずれ

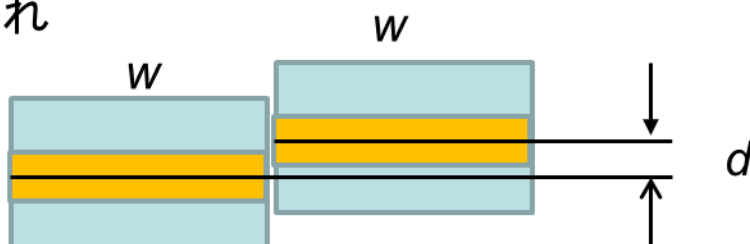


図 1.4 接続損失要因の模式図

(a) ファイバ端面間隔損失

ファイバ端面間に屈折率 n で満たされた間隔 g がある場合の接続損失 α_g (dB) は式(1.1)のように表せる。ここで、 λ は波長である。

$$\alpha_g = -10 \log \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda g}{2\pi n w^2} \right)^2} \right] \quad \text{式 (1.1)}$$

(b) 傾き角度ずれ

光ファイバのコアの軸が θ 傾いている場合の接続損失 α_θ (dB) は式(1.2)のように表せる。

$$\alpha_\theta = -10 \log \left\{ \exp \left[- \left(\frac{\pi n w \theta}{\lambda} \right)^2 \right] \right\} \quad \text{式 (1.2)}$$

(c) 軸ずれ

光ファイバのコアの軸が d ずれている場合の接続損失 α_d (dB) は式(1.3)のように表せる。

$$\alpha_d = -10 \log \left\{ \exp \left[- \left(\frac{d}{w} \right)^2 \right] \right\} \quad \text{式 (1.3)}$$

以上のように SMF の接続損失の一般式は表されており、これらの式を用いると、例えば、接続損失を 0.1 dB 程度にするには、端面間隔、傾き角度ずれ、軸ずれのそれぞれの場合に同時に、10 μm 、0.1 度、0.1 μm オーダーの高精度な調心が要求される。

光ファイバの接続技術は非常に高精度な調心技術が必要とされるが、光ネットワークを構築するためには、このような高精度な調心を、作業環境の安定した建物内だけでなく、マンホールの中や電柱の上などといった屋外作業環境下で達成されなければならない。さらに、屋外の温湿度等の様々な環境変化に対しても安定した光学特性を維持しなければならない。このような要求を実現する光接続技術が現在、光ネットワークでは用いられている。

図 1.5 に現状の光ネットワークにおける接続技術を示す。光ネットワークは、局舎で光の送受信を行なう光加入者線終端装置(OTL)、ユーザー宅で光の送受信を行なう光加入者線ネットワーク装置(ONU)、局舎からユーザー宅または局舎間までの地下と架空に敷設された

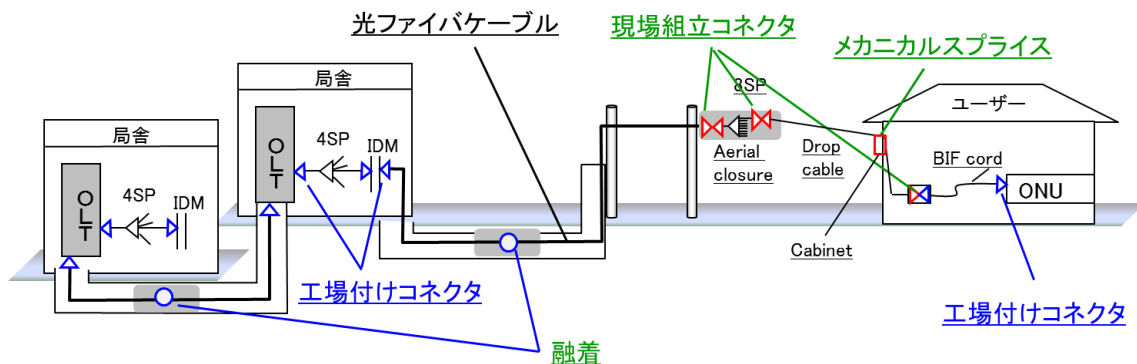


図 1.5 現状の光ネットワークにおける接続技術

光ファイバケーブルで構成されている。これら局舎からユーザー宅まで、または局舎間の光ファイバケーブルを繋ぐためには接続技術が必要となる。

接続技術は大別すると、融着接続、コネクタ接続、メカニカルスプライスに分けられる。図 1.6 に各種接続技術の模式図を示す。融着接続は、図 1.6(a)に示すように、光ファイバ端面を電極棒間のアーク放電により溶融させて接続させる方法である[1.12]。ファイバが確実につながるため、光学特性は優れるが着脱することが出来ない。また、高価な融着接続器と電源が必要になる。主に再接続をあまり考慮しなくてよく信頼性が求められる地下区間の光ケーブルの接続に使用されている。

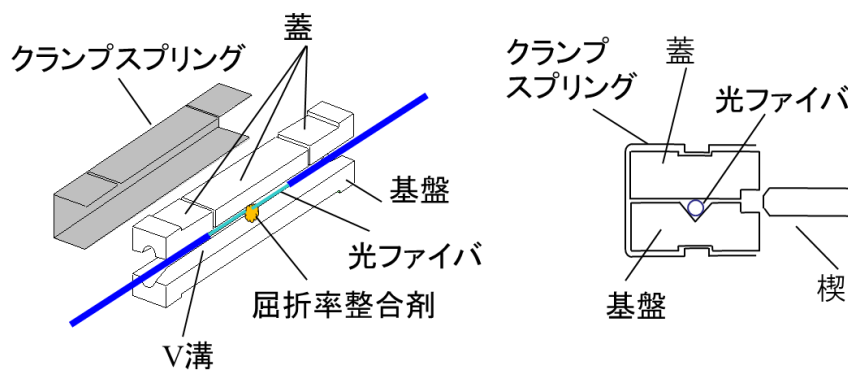
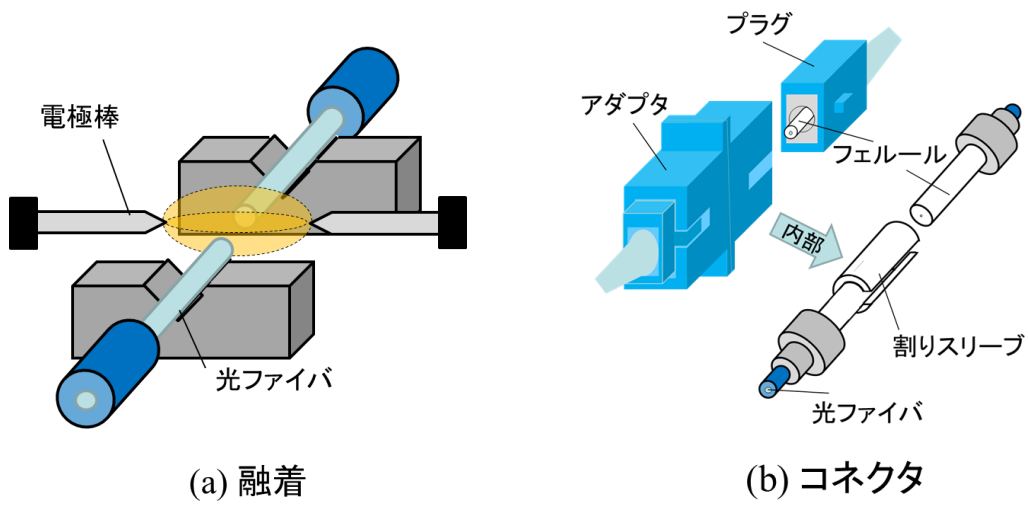
コネクタは光ファイバの先端に取り付けられたコネクタ同士を突合せて接続する方法である[1.13–1.15]。光コネクタの一例として、図 1.6(b)に単心の光コネクタの模式図を示す。フェルール同士を割スリーブをガイドにして高精度に突き合わせることで、フェールの中心に接着固定された光ファイバが高精度に調心される。突合せは着脱機能を持ったコネクタプラグとアダプタを用いて行われるため、着脱が可能となる。コネクタを作製する際、接着、研磨工程を必要とするため、予め工場で作成されたものを使用する。接続作業はコネクタプラグをアダプタに差し込むだけなので、接続スキルが不要で簡易である。主に、着脱が頻繁に行われる局舎や宅内の光ケーブルの接続に使用されている。

メカニカルスプライスはファイバ同士を V 溝で突合せて固定する接続方法である[1.16]。図 1.6(c)にメカニカルスプライスの模式図を示す。メカニカルスプライスは、V 溝のある基盤、蓋、クランプスプリングで構成される。接続作業工程は、まず、楔を蓋と基盤の間に、次に光ファイバを V 溝に沿って挿入し、対向するファイバ同士を突き合わせてから、

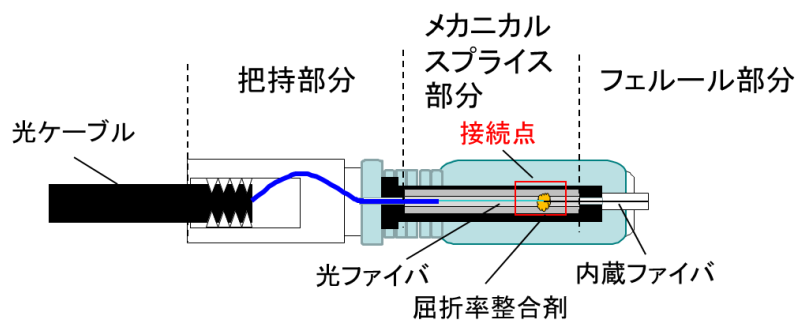
楔を抜き、光ファイバの把持固定を行なう。ここで、光ファイバ端面と空気層によるフレネル反射による接続特性の劣化を防ぐために、ゲル状の屈折率整合剤が用いられる。電源を必要とせず、工具が融着接続器に比べて安いことから、屋外の光キャビネット等で使用されている。

また、コネクタは工場作成が一般的だが、FTTH の普及に伴って、着脱も可能でコネクタの組立作業が簡易な接続技術として、メカニカルスプライスとコネクタを組み合わせた現場組立コネクタが架空や宅内の光ケーブルの接続に多用されている[1.17, 1.18]。図 1.6(d) に現場組立コネクタの模式図を示す。現場組立コネクタは内蔵ファイバのあるフェルール部分、メカニカルスプライス部分、把持部分で構成される。切断された光ファイバの先端はメカニカルスプライス部分において内蔵ファイバに突き合わされ接続される。また、光ケーブルの外被は把持部分において固定され、光ファイバを撓ませておくことで、光ケーブルの温度変化による光ファイバの引張による破断を防いでいる。

このように、光ネットワークは、接続箇所に応じて最適な接続技術が用いられ構成されている。



(c) メカニカルスプライス



(d) 現場組立コネクタ

図 1.6 各種接続技術の模式図

1.3 本研究の内容と構成

汎用 SMF を用いた光ネットワークは、SMF の接続損失の要因である、ファイバ端面間隔、ファイバの傾き角度ずれ、軸ずれの 3 つの損失要因を最小化する接続技術を適用することで、光ネットワークを構築する事ができている。

一方、HAF は空孔構造により導波状態が決定されるので、空孔の状態の変化により損失が生じるという HAF 特有の問題を抱える。このため HAF の接続において SMF の接続技術をそのまま利用することは難しい。例えば、メカニカルスプライスにおいて接続端面からの屈折率整合剤などの異物の浸入が光の導波状態に影響を及ぼし、損失が生じる。

また、MCF は光ファイバの中心以外にコアがあるため、MCF がファイバ長手方向を回転軸として回転すると、対向する中心以外のコア同士で、軸ずれが生じるため、MCF 特有の損失が生じ、SMF の接続技術をそのまま適用することは難しい。例えば、コネクタ接続において、フェルール長手方向を中心軸として MCF が回転すると損失が生じる。

このように、HAF や MCF などの従来の SMF とは導波構造の異なる新構造光ファイバの接続において、新構造ファイバ特有の接続損失が生じるので、その接続損失要因を分析し、新構造ファイバ特有の接続損失を低減することが重要となる。本研究は、これらの接続損失要因を解決できる新構造ファイバに適した接続方法を考案する事を目的とする。本論文の構成は図 1.7 のようになっており、各章の要約を以下に示す。

第 1 章は、序論であり、本研究の背景、新構造ファイバの特徴、従来光ファイバの損失要因と現状の光ネットワークにおける接続技術について述べた。

第 2 章では、HAF を接続するために必要となる固形状の屈折率整合剤の光ファイバの撓みを利用した接続技術への影響とその長期信頼性について述べる。HAF をメカニカルスプライスを用いて接続する際、屈折率整合剤の空孔への浸入を抑えるために、固形状の屈折率整合剤を適用する必要がある。固形状の屈折率整合剤は硬さを持っているため、ファイバの撓みを利用した押圧力が不足すると屈折率整合剤が潰れずに、端面間隔に依存した接続損失の増加が懸念される。撓みを維持した接続状態では、撓みによる曲げ損失の増加も懸念される。そこで、撓みによる押圧力と曲げ損失特性を実験的に検証し、硬さを持った屈折率整合剤を潰しつつ、曲げ損失を低減する光ファイバの撓みの条件を導出する。また、固形状の屈折率整合剤を用いた接続部の長期信頼性を国際規格による試験と高温環境による加速劣化試験を評価することで明らかにする。

第3章では、HAFのメカニカルスプライスに必要となる固形状の屈折率整合剤の設計条件について述べる。HAFを従来のメカニカルスプライスを用いて接続すると、ゲル状の屈折率整合剤はHAFの空孔へ浸入する。屈折率整合剤はコアと同程度の屈折率を持っているので、平行導波路となり、コアを導波していた光が屈折率整合剤部分に移行し損失となる。そこで、固形状の屈折率整合剤を用いることで、低損失化を図る。さらに、HAFの様々な空孔構造においても、低接続損失特性を実現するために、接続損失に対するHAFの構造パラメータと屈折率整合剤の設計条件である屈折率、屈折率温度係数、空孔への屈折率整合剤の浸入長さの関係を、理論的、実験的に明らかにする。

第4章では、MCFのコネクタ接続に必須である外力が接続点に作用しない構造とファイバ長手方向を軸とした回転角度の高精度な調心を両立したコネクタについて述べる。光コネクタは、外力が光ファイバの接続点に作用しないようにするために、プラグハウジングとアダプタの嵌合部分から、フェルールと割りスリーブの嵌合部分に隙間を持たせることで、フェルール部分をプラグ部分から独立させるフロート構造を採用している。この隙間があるために、ファイバ長手方向を中心軸とし、MCFが回転し、軸ずれが起き、接続損失が増大する。そこで、フェルールと割りスリーブ部分に回転抑制機構を設け、フロート構造と回転調心を両立する。具体的には、V溝付フェルールとピン付割りスリーブを適用することで、フェールの回転角度ずれを制御したMCFコネクタを実現する。

第5章では、これまでの章の結論として、本研究で得られた結果をまとめる。

また、付録として、FTTHの更なる普及に貢献する光ファイバの被覆が付いたまま接続作業を行なう被覆付き接続技術について述べる。現状の現場組立作業は、光ファイバの被覆の除去、清掃、切断、突合せ接続といった工程になるが、誤った現場接続作業に起因して故障が発生する事例が挙げられている。例えば、被覆の除去時に光ファイバのガラス側面に傷を付け、経年的に破断するケースがある。そこで、作業者が光ファイバのガラス部分を一切取り扱う必要のない接続技術を提案する。この手法に必須である被覆が付いたままの光ファイバの切断技術と被覆除去技術を明らかにし、被覆付き接続技術を実現する。

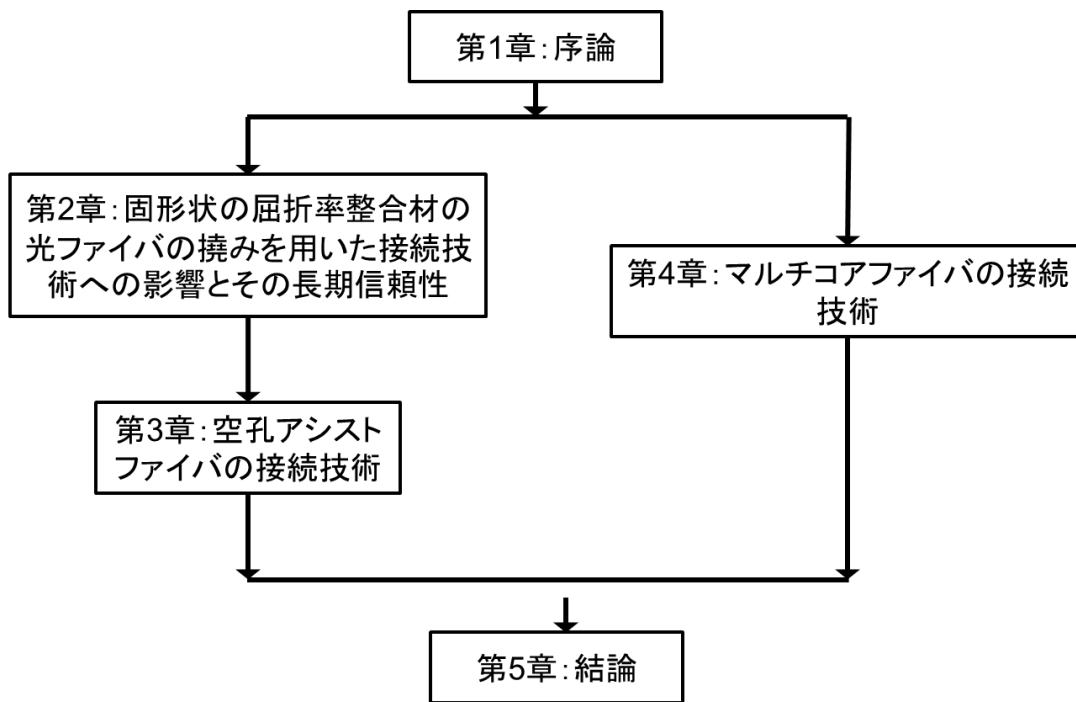


図 1.7 本論文の構成

第 2 章 固形状の屈折率整合剤の光ファイバの 撓みを用いた接続技術への影響と その長期信頼性

2.1 はじめに

現在、低曲げ損失特性を生かして、HAF は光ネットワークの局舎や宅内など一部の区間では適用されている[1.6, 1.7]。適用形態としては、予め HAF 両端を SMF で融着し空孔を封止し、SMF として端末処理する形態や、融着器の放電により空孔を封止した形態でコネクタ化した形態などがある。今後、HAF の適用領域を拡大するためには、融着やコネクタの形態だけでなく、現場で簡易に接続できるメカニカルプライス技術も必要である。メカニカルプライスにおいて屈折率整合剤は必要不可欠なものである。屈折率整合剤は接続点におけるファイバ間の屈折率をファイバと同程度にすることで、フレネル反射による損失と反射減衰量の劣化を防ぐ。

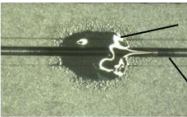
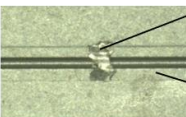
表 2.1 にこれまでの現場組立接続に利用されているゲル状の屈折率整合剤と HAF の現場組立接続に必要な固形状の屈折率整合剤の特徴を示す。

ゲル状の屈折率整合剤の材料はシリコン化合物である。現場組立接続物品として 20 年以上も使用されており、長期使用の実績や材料の光学的安定性が確認されている[2.1, 2.2]。また、接続物品への組み込みは塗布するだけで簡単に行なえる。しかしながら、HAF を接続する場合、空孔に整合剤が浸入してしまい、損失が増大するため、HAF には使用できない[2.3]。

一方、固形状の屈折率整合剤の材料はアクリル樹脂である。流動性がないため、SMF だけでなく HAF にも適用可能である。しかしながら、硬さを持った固形状の屈折率整合剤が、光ファイバの撓みを利用した接続技術に及ぼす影響は不明確である。また、十分な環境試験特性とゲル状で得られている接続物品としての長期の使用実績がなく、長期信頼性の担保は十分でない。

本章では、固形状の屈折率整合剤の光ファイバの撓みを利用した接続技術への影響を明らかにする。まず、固形状の屈折率整合剤の撓みを用いた接続技術に対する課題と撓みのモデルについて説明する。続いて、ファイバの撓みによって得られる押圧力と曲げ損失を実験的に明らかにする。その結果、良好な接続特性を実現する光ファイバの撓みと整合剤の硬さの条件を導出する。また、固形状の屈折率整合剤を用いた接続部の長期信頼性を環境試験と高温環境による加速劣化試験を評価することで明らかにする。環境試験では国際規格である International Electrotechnical Commission (IEC)に準拠した試験を行ない、光学特性を確認する。加速劣化試験は、整合剤単体のみとファイバが接続された状態の整合剤に対し、140℃の高温環境の加速劣化を行なう。また、光学特性を維持できなくなる寿命を精度よく推定するために、通常の使用方法とは異なるが、ファイバを接続する前の整合剤に対し、110、130、140℃の高温の加速劣化を行ない、繰り返し挿抜の光学特性を評価する。その結果、アレニウスモデルを用いて寿命を推定し、接続部における固形状の屈折率整合剤は長期信頼性を有することを明らかにする。

表 2.1 屈折率整合剤の特徴

	ゲル状の屈折率整合剤	固形状の屈折率整合剤
材料	シリコン化合物	アクリル樹脂
外観		
特長	<ul style="list-style-type: none"> ・接続物品への20年以上の使用実績 ・接続物品への組込みの容易さ 	<ul style="list-style-type: none"> ・SMFのみでなくHAFへも適用可能
課題	<ul style="list-style-type: none"> ・HAFへは適用できない 	<ul style="list-style-type: none"> ・撓みを用いた接続への影響が不明確 ・長期信頼性が確認されていない

2.2 光ファイバの撓みに対する押圧力と曲げ損失

2.2.1 撓みのモデル

固形状の屈折率整合剤を適用する場合、押圧力の不足により光ファイバ端面の間隔が増加し、接続特性が劣化する可能性が考えられる。また、光ファイバの撓みを保持した状態で接続するため、撓みによる曲げ損失の増加についても考慮する必要がある。まず、光ファイバの撓みに対する押圧力と曲げ損失特性について実験的に検証した。

図 2.1 に光ファイバの撓みのモデルを示す。本実験では、撓みを用いた接続技術として外被把持型メカニカルスプライスを用いた。撓みによる押圧力 $P(N)$ を得た光ファイバは、メカニカルスプライスの機構を利用し屈折率整合剤を介して把持固定された光ファイバと接続される。本検討では、調心部材と把持部材の間隔を撓み幅 $L(mm)$ 、 L の領域内に撓んだ状態で把持されている光ファイバの全長を撓み長 $L_f(mm)$ として定義する。押圧力 P は式 (2.1) のように示される [2.4, 2.5]。

$$P = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad \text{式 (2.1)}$$

ここで、 E はガラスのヤング率、 I は断面 2 次モーメントである。また、空孔の有無に依存しない端面間隔に起因する損失について検討するので、SMF を用いて実験を行なった。

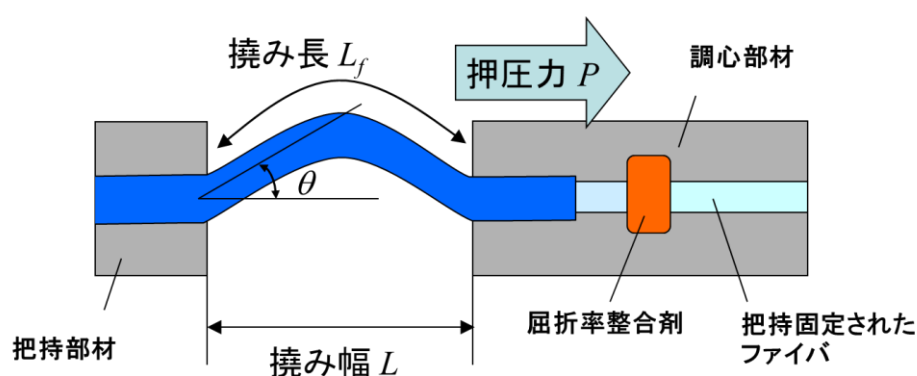


図 2.1 光ファイバの撓みのモデル

2.2.2 押圧力と曲げ損失特性

始めに、撓み幅 L と押圧力 P の関係について、撓み長 L_f をパラメータとして検討を行った。図 2.2 に撓み幅と押圧力の関係を示す。図中のプロットは測定値を示し、□、△、○ 及び × は、それぞれ L_f が 26.25、22.25、18.25、及び 14.25 の時の測定結果を示す。実線は各 L_f で L が最大の時の測定値を、撓みによる押圧力モデルの式(2.1)により近似した結果を示す。また、破線は実線に対し押圧力が 10%低くなる境界を示す。図 2.2 より撓み幅 L を短くすると押圧力 P が増加することが分かる。また、撓み長 L_f が一定の場合、撓み幅 L の減少に伴い実線からの乖離が増加することが分かる。これは、前述のモデル式では、図 2.1 に記載した撓み曲線の接線と軸線のなす撓み角 θ が十分小さいことを前提としている点に起因する。図 2.2 中の破線より左側の実験条件では、撓み角 θ が数十度以上に増大し、近似条件を十分に満たすことが出来なかったためと考えられる。従って、本検討において、モデルと同等の押圧力を得るためには、各撓み長 L_f に対する撓み幅 L を一定以上に設定する必要が生じることとなる。そこで今回、モデルの押圧力から 10%低くなる範囲内なら必要な押圧力が得られると仮定し、各撓み長に対する撓み幅の下限値 L_p を求めた。図 2.3 に結果を示す。図のプロットが下限値、一点鎖線は、プロットに対する近似直線を示す。ここで、実線は撓み幅と撓み長が等しい時で、撓み始める境界を表す。図の実線と一点鎖線で囲まれた領域においてモデル通りに必要な押圧力が得られる。

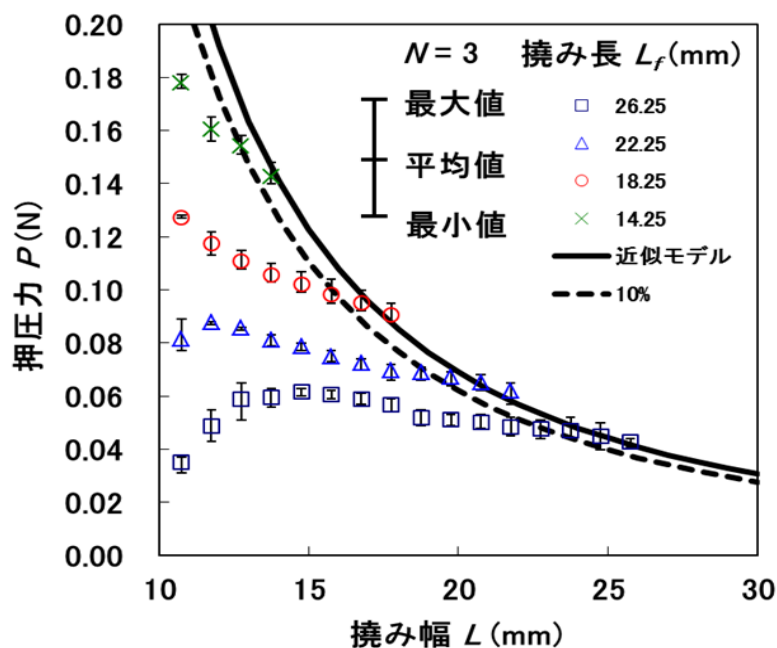


図 2.2 撓み幅と押圧力の関係

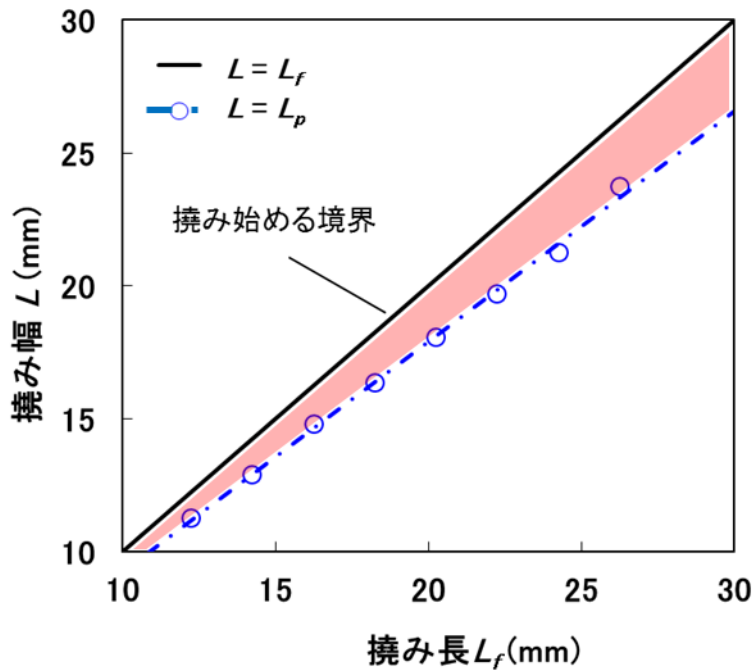


図 2.3 モデルの押圧力から誤差 10%以内の各撓み長に対する撓み幅の範囲

また、光ファイバの撓みを維持した接続機構では、撓み長 L_f を一定にして撓み幅 L を短くすると、光ファイバの曲げ損失も増大する。図 2.4 に波長 1550 nm における撓み幅 L と曲げ損失の関係を、撓み長 L_f をパラメータとして示す。図中の□、△、及び○は、それぞれ撓み長 L_f が 26.25、22.25、及び 18.25 の時の測定結果を示す。また、3 本の実線は、各測定結果の平均値に対する近似特性を示している。尚、ドロップケーブルには ITU-T 勧告 G.657 [2.6] のカテゴリ A1 の特性を満たす光ファイバを用いている。図 2.4 より、撓み幅 L の減少に伴い曲げ損失が増大し、測定結果のバラつきも大きくなることが分かる。また、撓み長 L_f が短いほど、撓み幅 L の減少に対する曲げ損失の増加量が大きくなることが分かる。従って、各撓み長 L_f に対する撓み幅 L の下限は曲げ損失特性によっても制限されることが分かる。そこで、許容できる曲げ損失を 0.1 dB と仮定し、曲げ損失が 0.1 dB 以下となる各撓み長 L_f に対する撓み幅 L の下限値 L_b を導出した。図 2.5 に結果を示す。図のプロットが下限値、破線がプロットに対する近似直線を示す。図の実線と破線で囲まれた領域において曲げ損失を 0.1 dB 以下に低減できる。

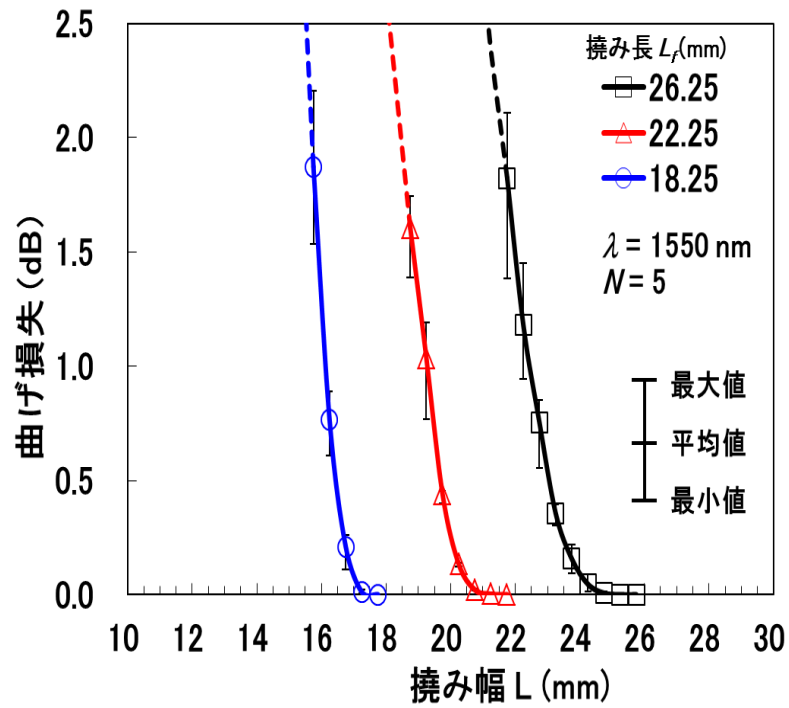


図 2.4 撓み幅と曲げ損失の関係

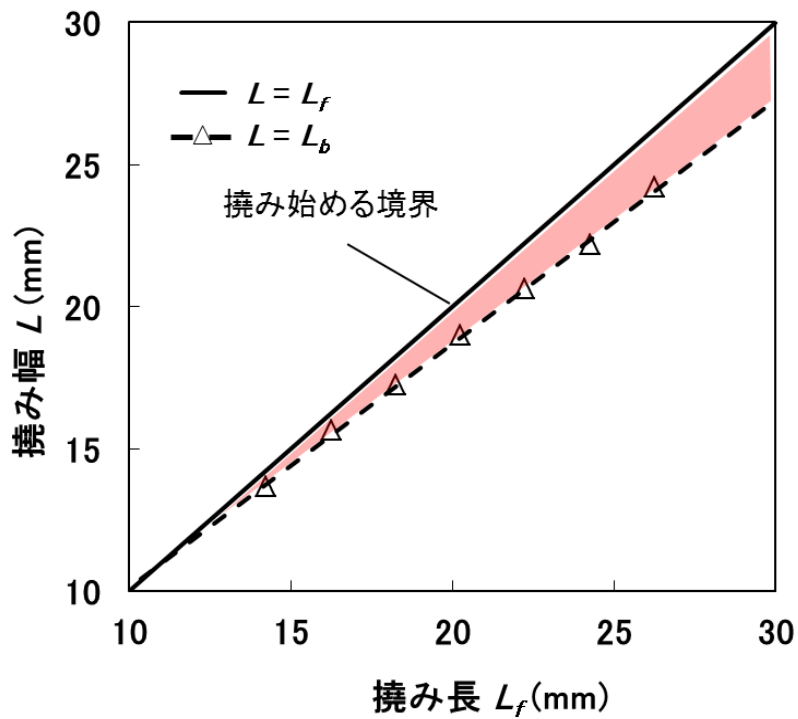


図 2.5 曲げ損失が 0.1 dB 以内の各撓み長に対する撓み幅の範囲

続いて、温度変化によって撓み幅が変化し、曲げ損失の変動が起きる懸念があるため、ヒートサイクル特性を評価した。図 2.6 に波長(a)1310 および(b)1550 nm における Telcordia GR-326 のヒートサイクル結果を示す。図の実線、破線、及び点線は(撓み長 L_f , 撓み幅 L) = (26.25, 25.75)、(22.25, 21.75)、(18.25, 17.75)における測定値を表す。図 2.4 より、これらの撓みの条件下では、曲げ損失はほぼ 0 dB である。各撓み幅 L に対して、損失変動量は 0.1 dB 以下であり、良好な特性が得られている。一方で、(撓み長 L_f , 撓み幅 L) = (18.25, 17.75)の場合、波長 1550 nm では低温時に損失が増加していることが分かる。これは低温時に部材の収縮等により光ファイバが撓み、曲げ損失が発生したためと考えられる。今回の測定例における損失増加量は 0.04 dB であり、図 2.4 における $L_f = 18.25$ 、 $L = 17.75$ の時の曲げ損失の結果より、0.2 mm 程度の撓み幅 L の減少が生じたと考えられる。従って、撓みの許容範囲には温度による部材収縮も考慮する必要がある。仮に部材収縮等による撓み幅 L の減少量を 0.5 mm とすると、曲げ損失による撓み幅の下限值 L_b は図 2.5 の点線よりも 0.5 mm 長くなる。

図 2.7 に押圧力による撓み幅の下限值 L_p 及び曲げ損失による撓み幅の下限值 L_b をパラメータとした撓み長 L_f と撓み幅 L の関係を示す。図 2.7 より、 L_b は L_p より長く、曲げ損失による L の最小値の制限がより顕著であることが分かる。また、 L_f の許容範囲、即ち図 2.7 の実線と破線の間隔は、 L と伴に減少することが分かる。仮に、ヒートサイクル試験の結果を元に、撓み幅に 0.5 mm の余裕を持たせ、撓み長にも 0.5 mm のカット誤差を考慮すると曲げ損失が 0.1 dB 以下となる範囲は赤の点線と実線に囲まれた領域となる。次に、モデルと同等の押圧力が得られ、初期特性において曲げ損失を低減している条件内にある 3 種類の L_f と L の組合せ(図 2.7 中の■印)に着目し、硬さの異なる固形状の屈折率整合剤が接続損失に及ぼす影響を確認した。 (L_f, L) の組合せは、それぞれ、(26.25, 25.75)、(22.25, 21.75)、(18.25, 17.75)であった。

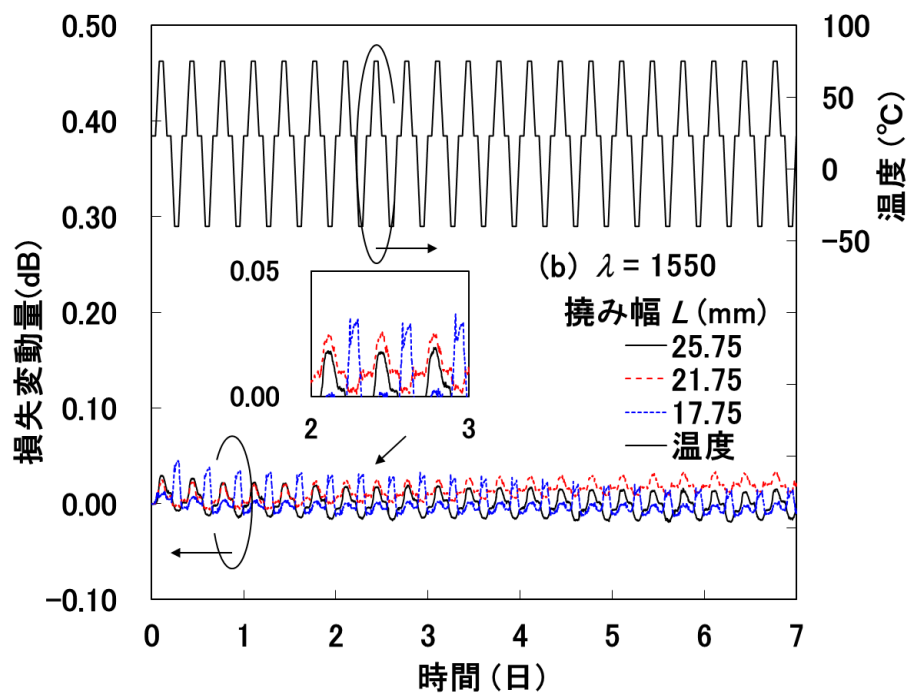
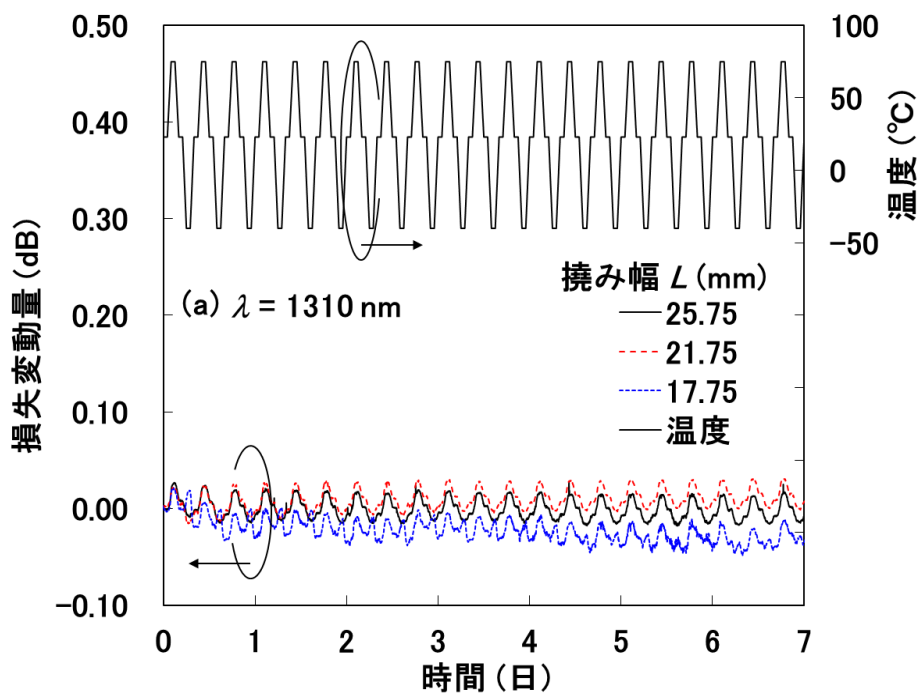


図 2.6 ヒートサイクル特性

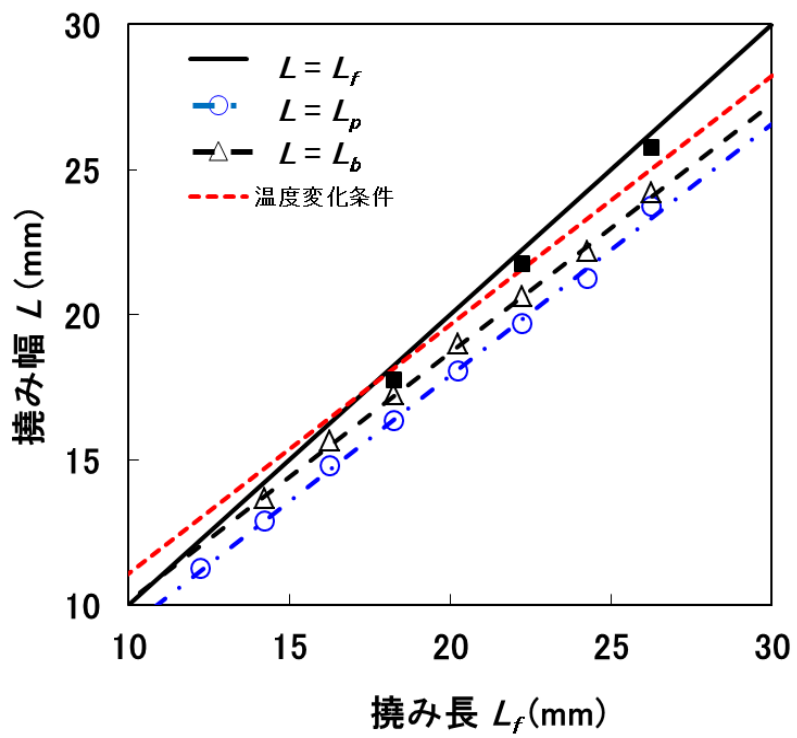


図 2.7 撓み長と撓み幅の関係

2.2.3 硬さと撓み幅の接続損失への影響

図 2.8 に撓み幅 L と波長 1550 nm における固形状の屈折率整合剤を用いた外被把持型メカニカルスプライスの接続損失の関係を示す。図の□、△、及び×は、固形状の屈折率整合剤の硬さがショア E 硬度で 17、9、及び 7 の時の結果である。ここで、固形状の屈折率整合剤はメカニカルスプライス上で約 150 μm の厚さを有した。図 2.8 より、 L 及び L_f の組合せの最適化により曲げ損失の発生を抑圧しているにも関わらず、 L の増加に伴い接続損失並びに測定結果のバラつきが増大していることが分かる。これは、 L の増加に伴い押圧力が減少し、固形状の屈折率整合剤の硬度と厚みに依存した端面間隔が発生しているためであると考えられる。

図 2.9 に光ファイバ端面間隔と波長 1550 nm における接続損失の関係を示す。図 2.9 の (a)、(b)、及び(c)は、 (L_f, L) が (26.25, 25.75), (22.25, 21.75), 及び (18.25, 17.75) の時の結果である。また、図の実線は理論値を表し[1.11]、□、△、及び×のプロットは、それぞれ固形状の屈折率整合剤の硬さがショア E 硬度で 17、9、及び 7 の時の測定値を表す[2.7]。図 2.9 から、測定及び計算結果は良く一致しており、 L と伴に端面間隔が増大することが分かる。また、撓み幅の増大とともに端面間隔は増大している。さらに硬さの一番柔らかいショア E7 の時、撓み幅によらず、端面間隔は抑制され接続損失は低損失となっている。以上より、撓み幅 L が長い場合、押圧力が足りずに端面間隔に依存した損失が生じることが分かった。

続いて、許容できる接続損失を 0.4 dB とした場合、図 2.8 の結果より、各整合剤の硬さに応じて接続損失が 0.4dB 以下となる撓み幅の最大値 L_{max} を求めた。ここで、各整合剤の硬さにおける接続損失の最大値の近似曲線と接続損失が 0.4 dB の交点の撓み幅を L_{max} とした。図 2.10 は最大撓み幅 L_{max} と硬さの関係を示す。図のプロットが各整合剤の硬さに対する撓み幅の最大値を示し、実線が $1/L^2$ で近似した結果である[2.7, 2.8]。図の実線以下の領域の硬さと撓み幅において 0.4 dB 以下の接続損失となる。

以上より、撓みモデル通りに所望の押圧力が得られ、ヒートサイクルによる部材の収縮も考慮した曲げ損失を低減した撓み幅と撓み長の条件を実験的に導出した。また、硬さの異なる固形状の屈折率整合剤を適用した外被把持型のメカニカルスプライスを用いて、接続損失を 0.4 dB 以下にする整合剤の硬さと光ファイバの撓みの条件を導出した。

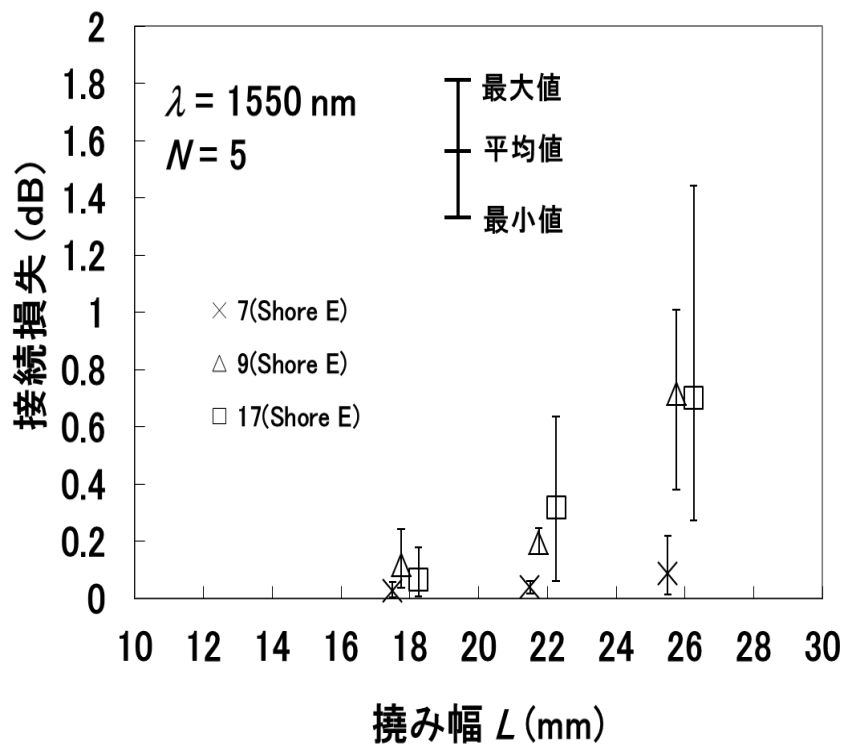


図 2.8 撓み幅と接続損失の関係

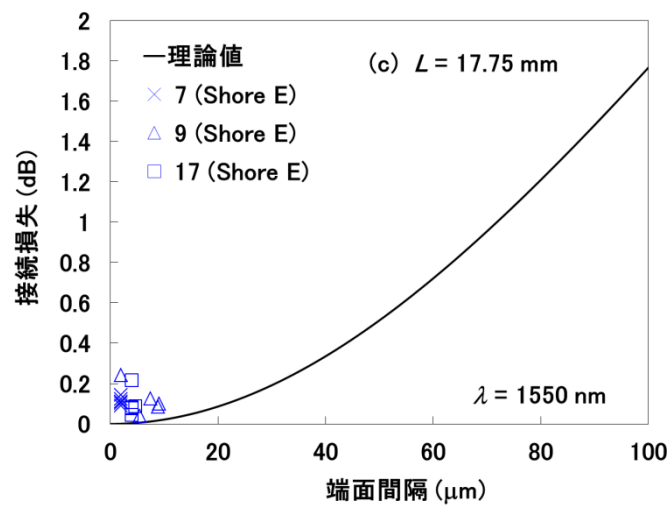
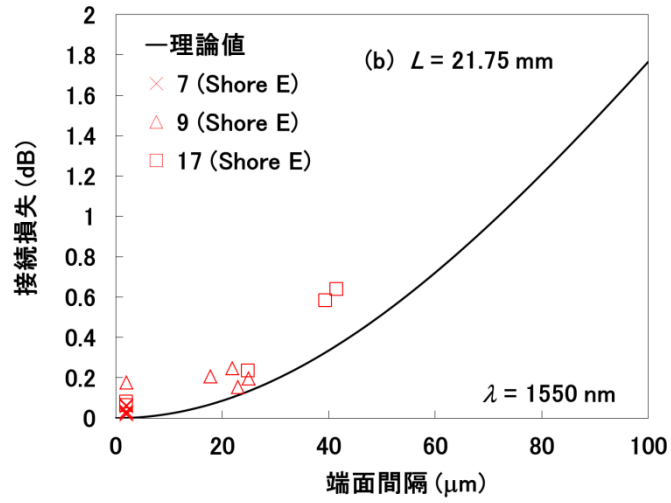
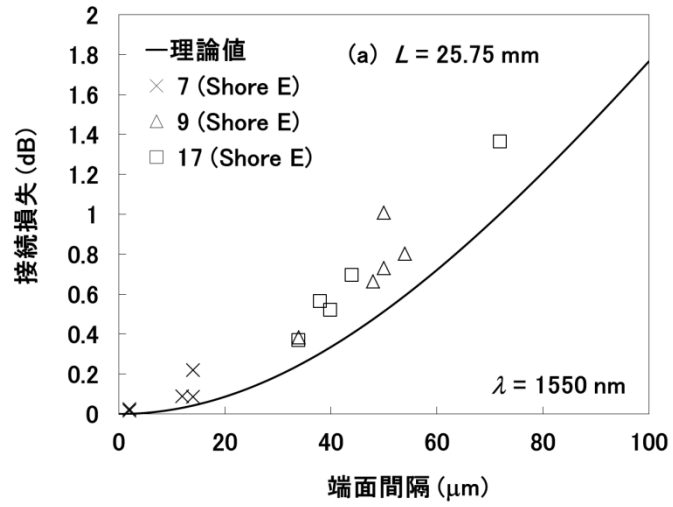


図 2.9 端面間隔と接続損失の関係

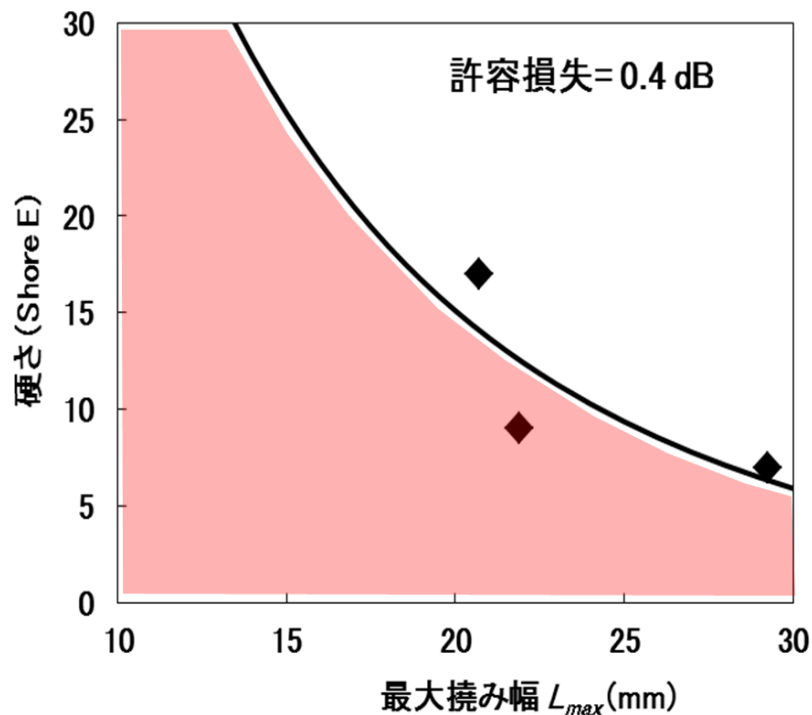


図 2.10 接続損失を 0.4 dB 以下とする最大撓み幅と硬さの関係

2.3 長期信頼性

2.3.1 長期信頼性試験方法

接続部において、接続損失や反射減衰量の光学特性は重要である。実用化のためには、初期特性だけでなく、長期的に光学特性が安定している必要がある。長期的な光学特性の信頼性評価には、規格に示された負荷環境において光学特性が基準値以内であるかを判断する環境試験[2.9]と規格試験より厳しい負荷を与え物品を故障させることで通常使用環境下での寿命を予測する加速劣化試験[2.10, 2.11]がある。そこで、これら環境試験と加速劣化試験を行ない、接続部における固形状の屈折率整合剤の長期信頼性を確認する。

2.3.2 環境試験特性

固形状の屈折率整合剤を用いて SMF を接続し、IEC に準拠した環境試験を実施した。測定には、現場組立コネクタを用いた。表 2.2 に環境試験結果を示す。環境試験条件は、以下のようになる。

温度サイクル試験: -40 °C ~ 70 °C / 6 時間 × 10 サイクル,

温湿度サイクル試験: -10 °C ~ 65 °C, 93 %RH @ 65 °C / 24 時間 × 10 サイクル,

高温試験: 70 °C × 240 時間,

低温試験: -40 °C × 240 時間,

高温&温湿度&温度サイクル試験: -85 °C × 336 時間 & 60 °C, 95%RH × 336 時間 & -40 °C ~ 75 °C / 8 時間 × 42 サイクル,

塩水噴霧試験: 35 °C, 5% × 24 時間。

全てのサンプルにおいて、最大損失変動量は定めた基準値以内であった。以上より、環境試験において安定した接続特性であることを確認した。

表 2.2 環境試験結果

試験	条件	基準値(dB)	サンプル番号	最大値(dB)
温度サイクル試験	-40°C~70°C/6 時間 × 10 サイクル	≤0.3	12	0.04
温湿度サイクル試験	-10°C~65°C, 93 %RH @ 65°C/24 時間 × 10 サイクル	≤0.3	12	0.05
高温試験	70°C × 240 時間	≤0.2	12	0.05
低温試験	-40°C × 240 時間	≤0.3	12	0.04
高温&温湿度&温度サイクル試験	-85°C × 336 時間 & 60°C, 95%RH × 336 時間 & -40°C~75°C/8 時間 × 42 サイクル	≤0.3	12	0.11
塩水噴霧試験	35°C, 5% × 24 時間	≤0.2	10	0.02

2.3.3 加速劣化試験特性

屈折率整合剤と同じ役割を果たす光学接着剤が利用された PLC の加速劣化試験で用いられていた加熱による加速劣化試験を行なった[2.10, 2.11]。図 2.11 に、加速劣化を行なうサンプルの状態と工程を示す。加速劣化させるサンプルの状態としては、整合剤のみのサンプルと整合剤を介して接続されている状態のサンプルの 2 種類である。整合剤のみのサンプルは、接続物品に適用される整合剤自体の物性の安定性を確認するために用意した。接続されている状態のサンプルは、環境試験と同様に、現場で使用を開始してからの寿命を推定するために用意した。工程として、2 種類のサンプルをそれぞれ加熱槽に入れ、一定時間加熱した後、取り出し、それぞれ物性及び光学特性を測定した。整合剤のみのサンプルの場合、加熱温度は 140 °C で、測定した物性は、波長 1310 nm における透過率、波長 589nm における屈折率、硬さ[2.7]、及び接着力[2.12]であった。接続した状態のサンプルの場合、加熱温度は 110、130、及び 140°C で、測定した光学特性は、接続損失と反射減衰量であった。

図 2.12 に(a)透過率 at 1310 nm、(b)屈折率 at 589 nm、(c)硬さ(shoreE)、及び(d)粘着力(N/25 mm)の結果を示す。粘着力に若干の劣化はあるものの、特に顕著な変化はなく、140°Cの高温において安定したものであることが確認できた。

図 2.13 に 110、130、及び 140°Cにおける(a) 接続損失と(b) 反射減衰量の結果を示す。接続損失が 0.5 dB 以上、反射減衰量が 40 dB 以下を故障とした。110、130、及び 140°Cの 30 日間の加速劣化環境において、接続損失、反射減衰量、共に許容値以内で、故障が生じなかった。整合剤単体では接着力に若干の劣化はあったが、接続時にファイバが整合剤にしっかりと密着した状態になり、整合剤にファイバから押圧力が掛かっている状態なので、ファイバに整合剤が密着した状態が保たれて光学特性の劣化がなかったと考えられる。

以上より、整合剤のみとファイバが接続されているサンプルの 2 種類について加速劣化試験を行なったが、故障モードが発生せず寿命推定は出来なかった。しかしながら、140°Cという規格試験をはるかに上回る苛酷な環境下においても特性の劣化が見られなかったことから、材料及び接続した状態においても高い信頼性であると考えられる。

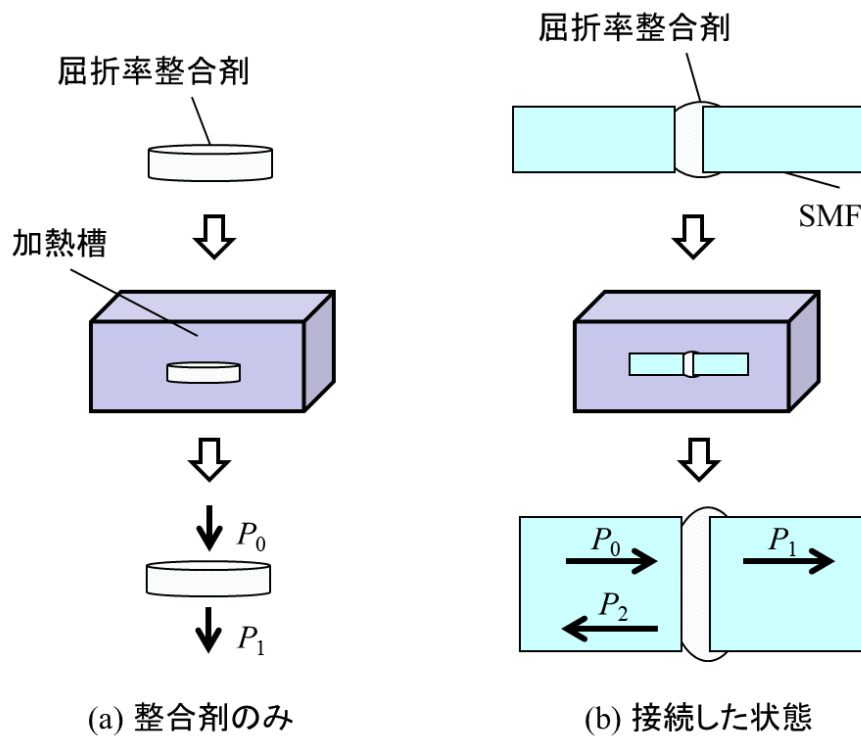


図 2.11 加速劣化試験のサンプルの状態と工程

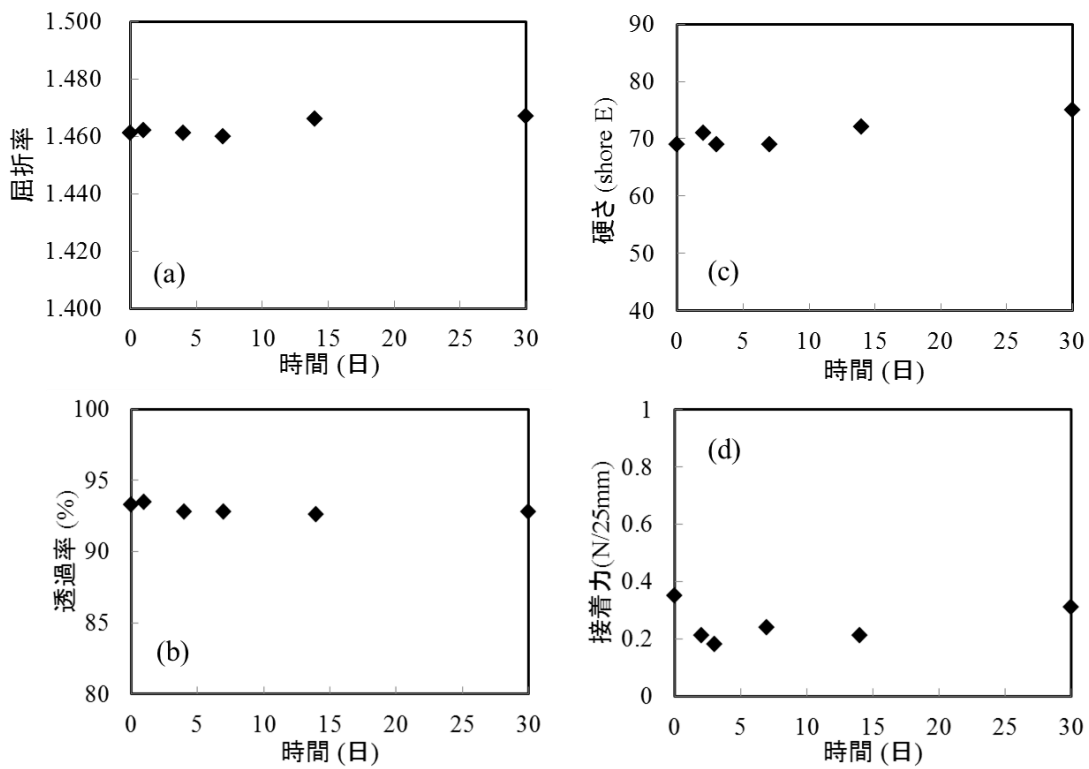


図 2.12 (a)透過率、(b)屈折率、(c)硬さ、及び(d)粘着力の測定結果

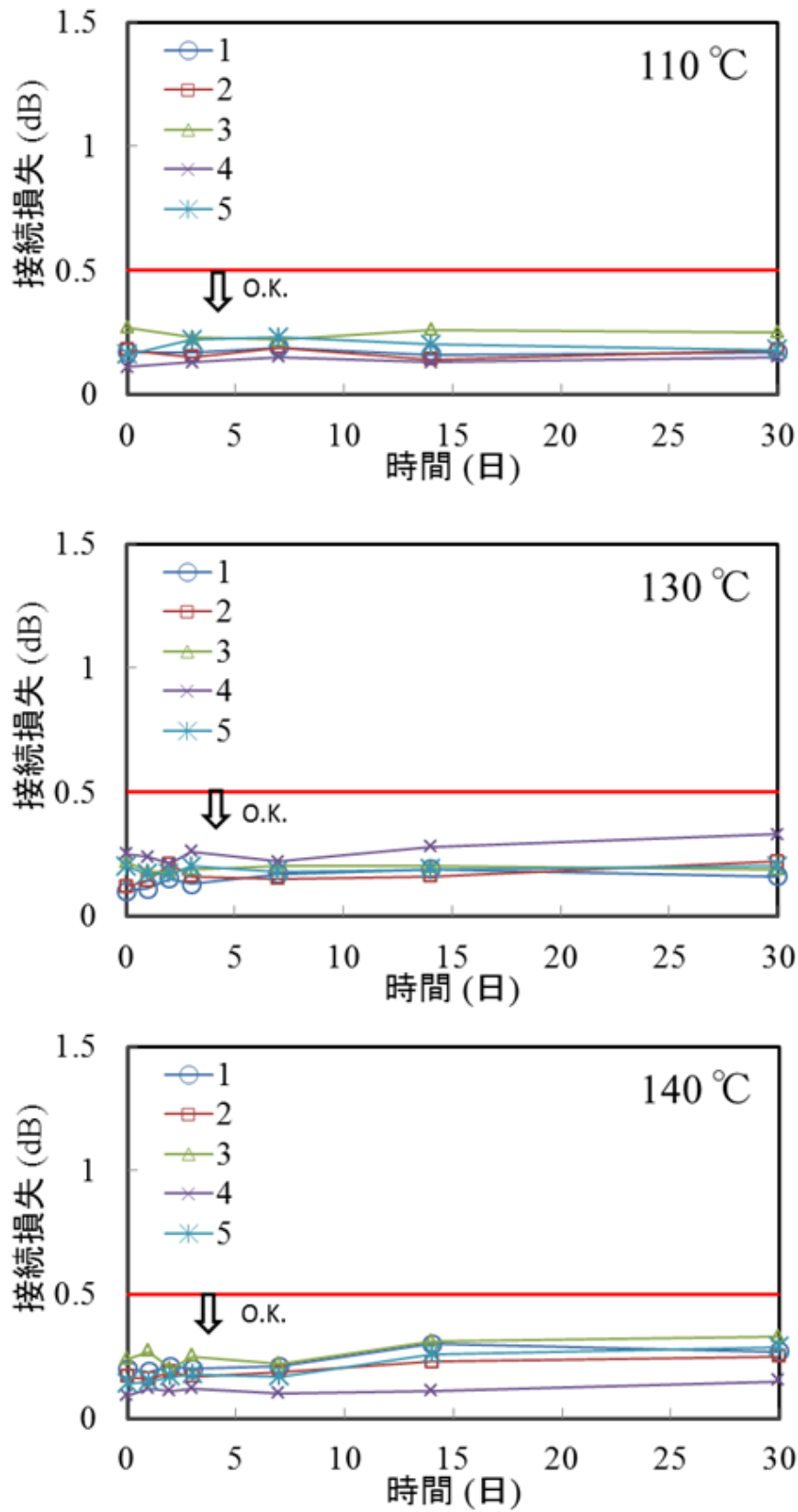


図 2.13(a) 110、130、及び 140°Cにおける接続損失の測定結果

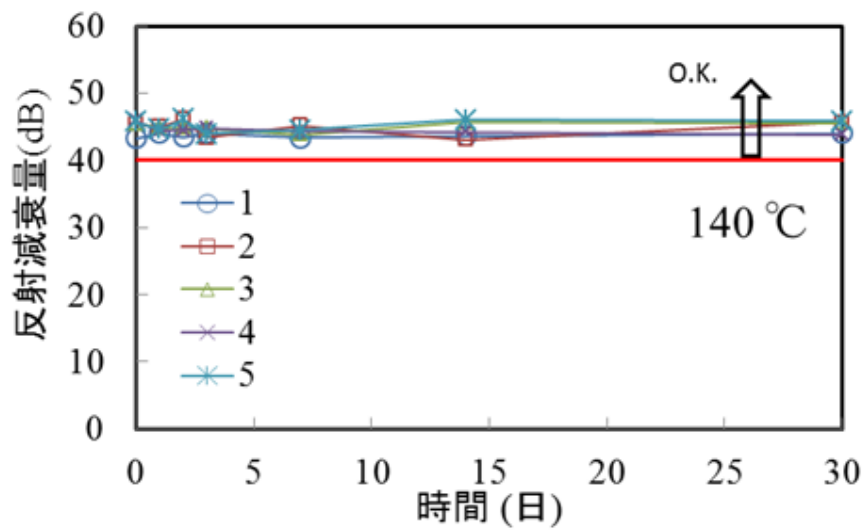
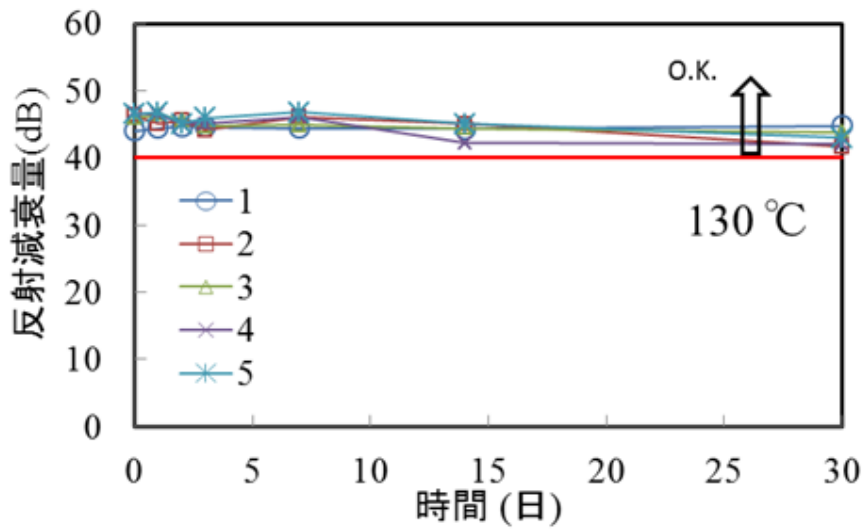
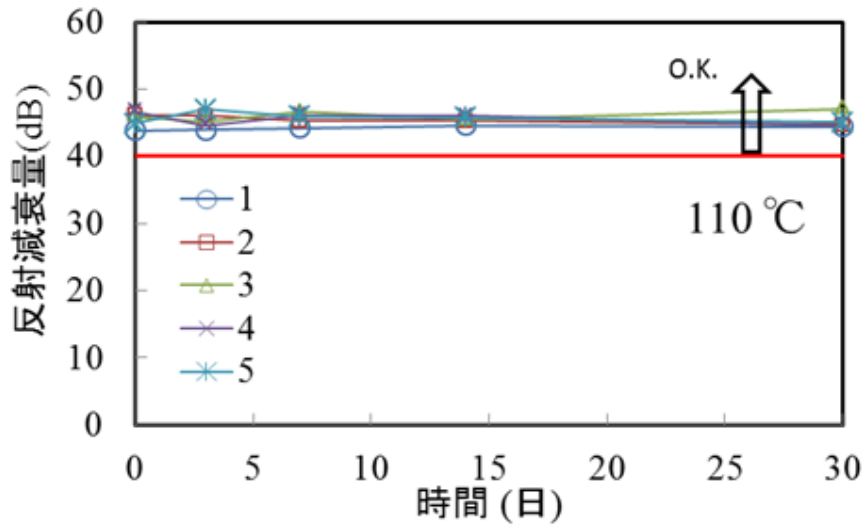


図 2.13(b) 110、130、及び 140°Cにおける反射減衰量の測定結果

2.3.4 長期寿命推定

通常の使用形態を模擬した加速劣化試験では、劣化が起きず、寿命推定をすることが出来なかった。そこで、故障モードを確認するために、通常の使用形態でない状態で加速劣化試験を行ない、寿命推定を行なった。図 2.14 に寿命推定のために加速劣化を行なうサンプルの状態と流れを示す。接続する前のファイバに整合剤がついた状態で加熱による加速劣化を行なった後に、接続し光学特性を評価する。加熱温度は 110、130、及び 140℃で、測定した光学特性は、接続損失と反射減衰量である。また、各測定時間につき、5 個のサンプルに対し評価した。整合剤自体の接着力が落ち、ファイバを挿入する際の僅かな押圧力では、整合剤とファイバの密着が十分に行われない可能性があると予想した。また、密着性の劣化は、繰返し挿抜を行なうことでより顕著に現れると考え、通常このような使用形態もないが、一度接続し光学特性を評価した後に、挿入したファイバを抜き、再びファイバを挿入し接続を行ない光学特性を評価する繰返しの挿抜試験も行なった。

図 2.15 に 110、130、及び 140℃における 1 回目接続時の(a)接続損失と(b)反射減衰量の結果を示す。接続損失が 0.5 dB 以上、反射減衰量が 40 dB 以下の場合を故障とした。110、及び 130℃の場合、30 日経過しても安定した光学特性であることを確認できるが、140℃の場合、接続損失と反射減衰量とも、時間の経過とともに、故障の発生数が増加していることが分かる。

図 2.16 に加速劣化時間に対する、繰返し挿抜の接続特性が許容値内のコネクタのサンプル数を示す。温度が高くなるほど、許容値内のコネクタ数が減少していることが分かることから、繰返しの挿抜により、整合剤自体の接着力が落ち、整合剤とファイバの密着性が劣化していることが考えられる。

故障モードが確認できたので、各温度において 5 個全てのサンプルが許容値以内の経過日数の最大値を寿命として、アレニウスモデルに基づいて寿命を推定した。式(2.2)にアレニウスモデルによる寿命推定式を示す。

$$\tau = Ae^{E/KT} \quad \text{式(2.2)}$$

ここで、 τ は寿命、 A は定数、 E は活性化エネルギー、 K はボルツマン定数 T は絶対温度である。

110℃の場合は、60 日経過しても、劣化は見られなかったが、より厳しく寿命を予測するた

めに、今回は仮に 60 日を寿命とした。

図 2.17 に寿命のアレニウスプロットを示す。図のプロットは、各温度における寿命を、実線はアレニウスモデルに従って直線近似した結果である。温度が低くなるほど、寿命が長くなることが分かる。110℃における寿命のプロットは、直線よりも低い値であり、実際は更に長い寿命であることが推測される。例えば、この結果を利用すると 60℃の温度環境下においても、約 68 年間は少なくとも故障が発生しないことが分かった。

以上より、通常の使用形態では劣化が見られなかったため、通常使用の形態とは異なるが、劣化しやすいサンプル状態を意図的に作成した。その結果、繰返し挿抜により、故障が発生することが分かった。これは、繰返し挿抜により、整合剤自体の接着力が落ち、整合剤とファイバの密着性が劣化したためと考えられる。しかしながら、最悪のケースを意図的に作成しても、例えば、60℃の温度環境下において約 68 年持つことが予想され、実使用環境下において全く問題がなく、長期信頼性が十分あることを確認した。

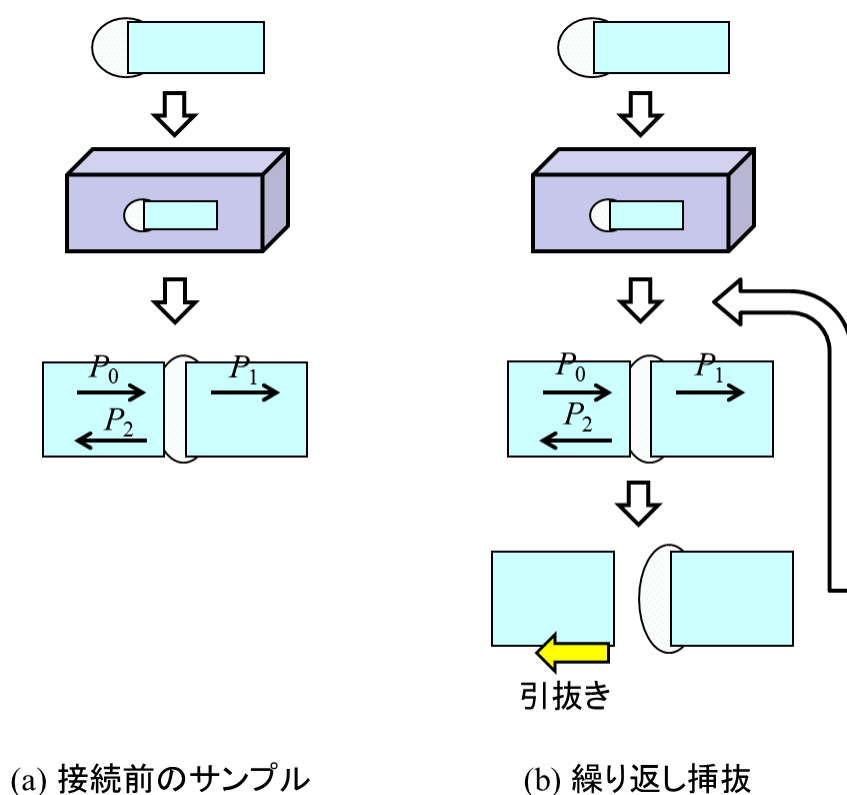


図 2.14 寿命推定のために加速劣化を行なうサンプルの状態と工程

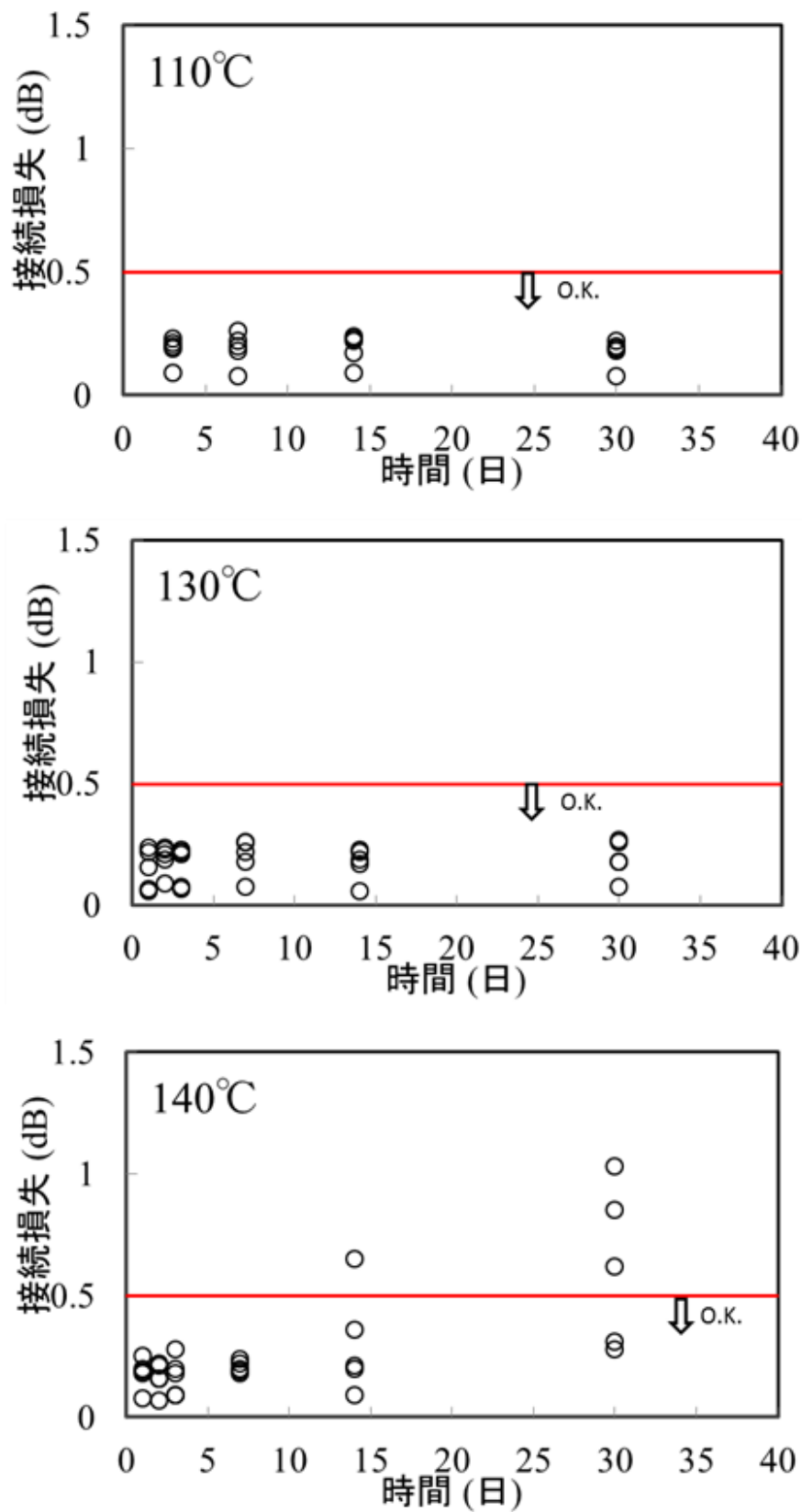


図 2.15 (a) 接続前サンプルの加速劣化による接続損失の測定結果

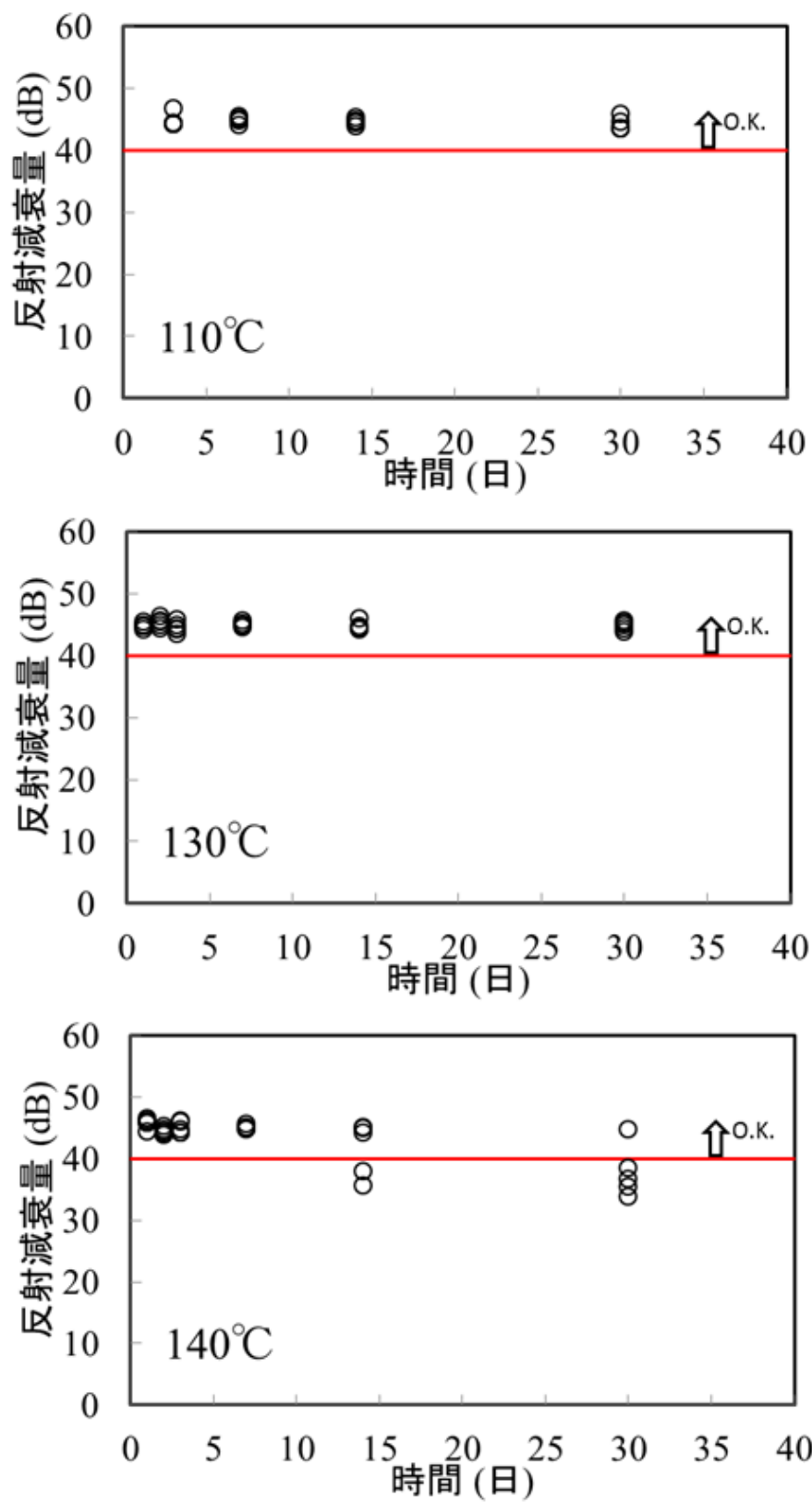


図 2.15 (b) 接続前サンプルの加速劣化による反射減衰量の測定結果

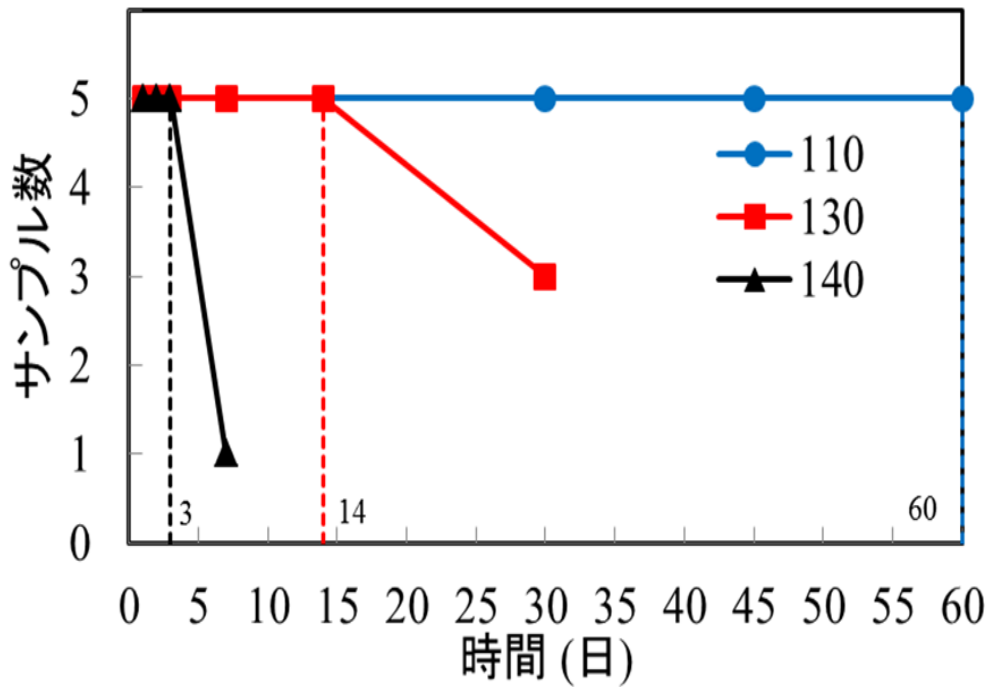


図 2.16 繰返し挿抜特性

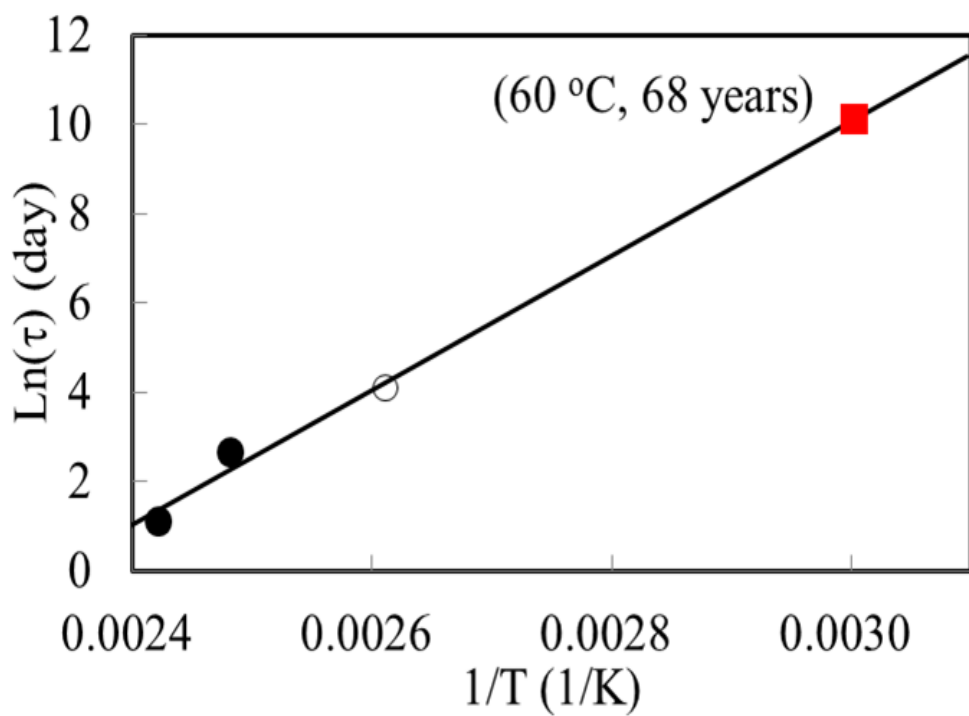


図 2.17 寿命のアレニウスプロット

2.4 まとめ

光ファイバの撓みを用いた接続技術に対し、固形状の屈折率整合剤を適用する場合の光ファイバの撓みや固形状の屈折率整合剤の硬さという接続の条件を検討した。本実験では光ファイバの撓みを用いた接続技術として外被把持型のメカニカルスプライスを用いた。まず、撓みモデル通りに所望の押圧力が得られ、曲げ損失を低減した撓み幅と撓み長の条件を実験的に導出した。さらにこの撓みの条件は、温度変化を考慮すると、低温時に部材の収縮により生じる曲げ損失に、より制限されることを明らかにした。続いて、3種類の硬さの固形状の屈折率整合剤を用いた外被把持型のメカニカルスプライスに対し、撓み幅を変化させながら、接続特性を評価した。その結果、接続損失を 0.4 dB 以下にする整合剤の硬さと光ファイバの撓みの条件を導出した。

接続部における固形状の屈折率整合剤に対し、環境試験と加速劣化試験を行なうことで長期信頼性を明らかにした。環境試験において、IEC に準拠した規格試験を行ない、安定した光学特性であることを明らかにした。加速劣化試験において、規格試験を遥かに超える 140°C の高温環境下においても、整合剤単体のみの安定性だけでなく、整合剤を通してファイバが接続された状態に対して、接続損失 0.5 dB 以下、反射減衰量 40 dB 以下の安定した光学特性が維持できることを確認した。続いて、故障モードを発生させ寿命を精度よく推定するために、通常の使用方法とは異なるが、ファイバを接続させる前の整合剤に対し、110、130、及び 140°C の高温の加速劣化を行なった。その結果、繰り返し挿抜を行なうと故障モードが発生し、アレニウスモデルを利用することで、60°C の環境下において 68 年近く、光学特性を維持できることを明らかにした。以上より、固形状の屈折率整合剤を用いた接続物品が実用化に向けて優れた長期信頼性があることを明らかにした。

第3章 空孔アシストファイバの接続技術

3.1 はじめに

HAF の適用領域拡大を目指す場合、HAF の現場接続技術の開発は不可欠となる。しかしながら、HAF をメカニカルスプライスや現場組立コネクタなどの現場接続技術で接続を行なう場合、接続特性が時間の経過と共に、大きく劣化する[3.1]。図 3.1 に HAF 同士をメカニカルスプライスで接続した際の模式図を示す。接続時にゲル状の屈折率整合剤が、HAF の空孔内に浸入する。屈折率整合剤の屈折率はコアと同程度であるため、屈折率整合剤は疑似的な導波路となり、平行導波路が形成される。平行導波路において、モード結合によってコアを導波していた光の一部が屈折率整合剤に移行し、屈折率整合剤の末端で損失となる。そこで、固形状の屈折率整合剤を適用し、空孔への屈折率整合剤の浸入の抑制が試みられた[3.2]。しかしながら、HAF の空孔構造とメカニカルスプライスにおける接続条件との関係は、不明確であり、任意の HAF の構造に対して対応できるメカニカルスプライス技術は確立されていない。

本章では、任意の HAF の構造に対し接続することのできるメカニカルスプライスの条件を示す。まず、HAF のメカニカルスプライス特性は、モード結合理論で表されることを示す。HAF の構造パラメータである規格化周波数、空孔占有率と、メカニカルスプライスの接続条件である屈折率整合剤の空孔への浸入長さ、屈折率との関係を明らかにする。また、屈折率整合剤の屈折率はモード結合による損失だけでなく、反射減衰量にも影響を与えるため、良好な接続損失と反射減衰量が得られる屈折率整合剤の屈折率と屈折率温度係数の関係を示す。これらの結果を用いて、汎用 SMF と同等の接続特性を得るメカニカルスプライスの実現を示す。

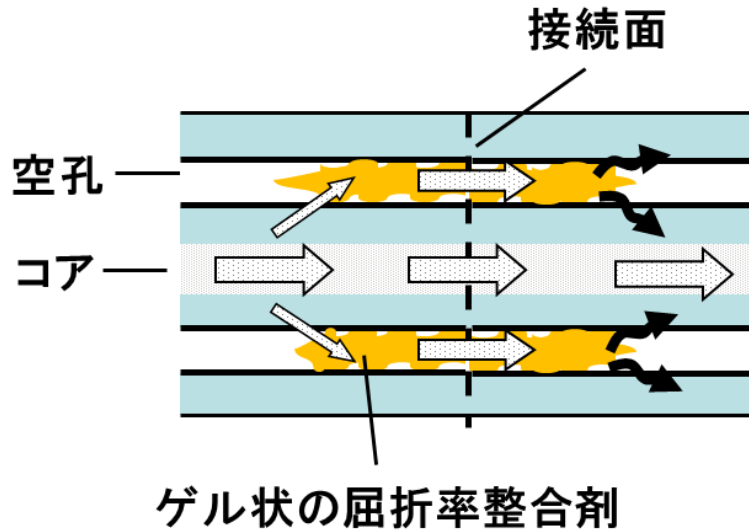


図 3.1 HAF 同士をメカニカルスプライスで接続した際の模式図

3.2 モード結合による損失

3.2.1 損失モデル

図 3.2 に本検討に用いた HAF の断面構造と接続部の模式図を示す。本検討の HAF は、半径が a で比屈折率差が Δ のステップ型のコアと、コア中心からの距離が R の円周上に外接する、直径 d の N 個の空孔を有するものとした。ここで、比屈折率差 Δ はコアの屈折率 n_1 とクラッドの屈折率 n_0 を用いて、 $\Delta = (n_1^2 - n_0^2) / 2n_1^2$ で定義される。また、空孔が内接、及び外接する円で囲まれるリング状の領域において、空孔が占める面積割合を、空孔占有率 S とし、式(3.1)で定義した[1.5]。

$$S \equiv \frac{N \cdot \pi \cdot (d/2)^2}{\pi(R+d)^2 - \pi R^2} \quad \text{式(3.1)}$$

本検討では、ファイバ接続点の N 個の空孔の比屈折率差が長さ z に亘り Δ_r に変化するものと仮定した。また、 Δ_r のコアの比屈折率差 Δ に対する比率を、相対比屈折率差を R_Δ とし、式(3.2)で定義した。

$$R_\Delta = \Delta_r / \Delta \quad \text{式(3.2)}$$

従って、 $R_\Delta > 0$ となる場合、接続点に形成された非対称平行導波路間のモード結合による損失が、HAF 固有の損失増加要因になると考えられる[3.1]-[3.5]。

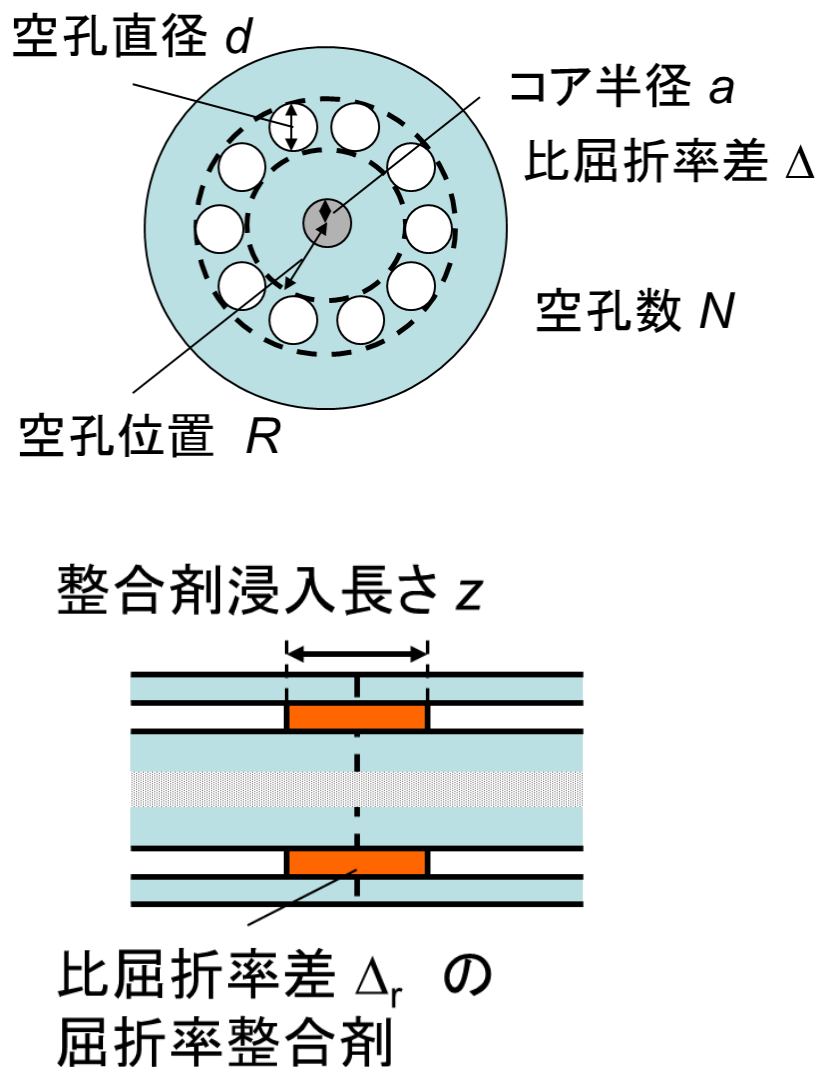


図 3.2 本検討に用いた HAF の断面構造と接続部の模式図

図 3.3 に平行導波路の模式図を示す。また、この平行導波路におけるモード結合方程式を式(3.3)のように表せる[3.6, 3.7]。

$$\frac{da_1}{dz} + i\beta_1 a_1 = -iNa_2 C_{12}$$

$$\frac{da_2}{dz} + i\beta_2 a_2 = -i(a_1 C_{21} + 2a_2 C_{22})$$

式(3.3)

ここで、 a_i は導波路 i の電界振幅、 β_i は導波路 i の伝搬定数、 z はファイバ長手方向の距離、添え字の 1 はコア部、2 は屈折率整合剤のある空孔部を表す。モード結合係数 C_{ij} は、式(3.4)のように表せ、 ω は角周波数、 ϵ_0 は真空の誘電率、 n は平行導波路全体の屈折率分布、 n_j は導波路 j だけが存在する時の屈折率分布、 E_i は導波路 i の電界ベクトル、 H_i は導波路 i の磁界ベクトルを表す。

$$C_{ij} = \frac{\omega \epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} (n^2 - n_j^2) E_i^* E_j dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (E_i^* \times H_j + E_j \times H_i^*) dx dy}$$

式(3.4)

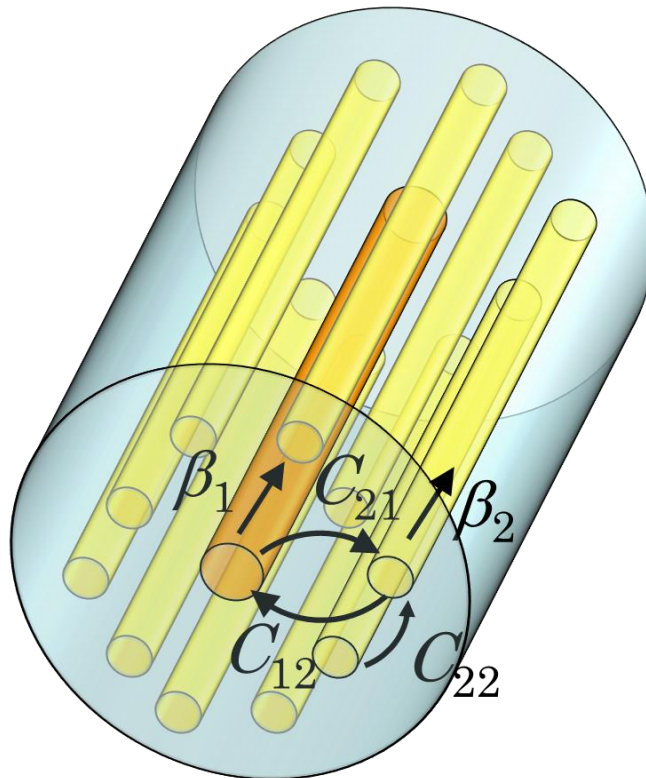


図 3.3 整合剤の浸入した HAF における平行導波路の模式図

式(3.3)の解を得るために、 $a_i = A_i \exp(-i\beta z)$ 、 $A_i = B_i \exp(-i\lambda z)$ と置くと固有方程式(3.5)が得られる。ここで、 $\beta = \beta_1 + \beta_2$ である。

$$\begin{vmatrix} \beta_1 - \beta - \lambda & NC_{12} \\ C_{21} & \beta_2 - \beta - \lambda + 2C_{22} \end{vmatrix} = 0 \quad \text{式(3.5)}$$

式(3.5)を解くと、式(3.6)で表される固有値が得られる。

$$\lambda_{\pm} = C_{22} \pm C \quad \text{式(3.6)}$$

$$C = \sqrt{NC_{12}C_{21} + \left(C_{22} + \frac{\beta_2 - \beta_1}{2}\right)^2}$$

また、固有値に対応する固有ベクトルは式(3.7)で表される。

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix}_{\pm} = \begin{pmatrix} \frac{-NC_{12}}{\beta_1 - \beta_2 - C_{22} \mp C} \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{式(3.7)}$$

$A_i(z)$ は固有ベクトルの線形結合により、式(3.8)で表される。

$$\begin{bmatrix} A_1(z) \\ A_2(z) \end{bmatrix} = c_1 \exp(-i\lambda_+ z) \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix}_+ + c_2 \exp(-i\lambda_- z) \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix}_- \quad \text{式(3.8)}$$

$z=0$ において、 $A_i(z)$ をそれぞれ、 $A_1(0)$ 、 $A_2(0)$ とすると、 c_1 、 c_2 は消去でき、以下の式(3.9)が得られる。

$$\begin{bmatrix} A_1(z) \\ A_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a+b & Nc \\ c & a-b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1(0) \\ A_2(0) \end{bmatrix} \quad \text{式(3.9)}$$

$$\begin{aligned}
a &= \cos(C_{22}z) \cos(Cz) \\
&+ i \left[-\cos(Cz) \sin(C_{22}z) + \frac{1}{C} \left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2} - C_{22} \right) \sin(Cz) \cos(C_{22}z) \right] \\
b &= \frac{1}{C} \left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2} - C_{22} \right) \sin(Cz) \sin(C_{22}z) \\
c &= \frac{C_{21}}{C} \sin(C_{22}z) \sin(Cz) + i \left[\frac{C_{21}}{C} \cos(C_{22}z) \sin(Cz) \right]
\end{aligned}$$

入射端での光がコア部分である導波路 1 のみに入射されるので、 $A_1(0) \neq 0, A_2(0) = 0$ となり、距離 z 伝搬後のそれぞれの導波路での光パワは、式(3.10)で表せる。

$$P_1(z) = \left| \frac{A_1(z)}{A_1(0)} \right|^2 = 1 - NP_2(z) = 1 - N \frac{C_{21}^2}{C^2} \sin^2(Cz) \quad \text{式(3.10)}$$

$$P_2(z) = \left| \frac{A_2(z)}{A_1(0)} \right|^2 = \frac{C_{21}^2}{C^2} \sin^2(Cz)$$

式(3.10)より、モード結合による損失 α (dB) は、式(3.11)のように表せる。

$$\alpha = -10 \log \{P_1(z)\} = -10 \log \left(1 - N \frac{C_{21}^2}{C^2} \sin^2(Cz) \right) \quad \text{式(3.11)}$$

また、モード結合による損失を定性的に理解するために、図 3.4 にコアと一つの整合剤部分のみの平行導波路の屈折率分布と電界分布の模式図を示す。平行導波路全体の屈折率分布は(a)のように表されるので、 $n^2 \cdot m^2$ は整合剤部分の導波路内で $m^2 \cdot n^2$ の値を持ち、それ以外の部分では零である。したがって、コアから整合剤部分への光の移行割合を表す C_{21} を求める場合、(b)に示されるように、整合剤部分における E_1 と E_2 の重なり積分を行なう

ことで C_{21} が得られる。また、 C_{12} を求める場合も同様に、(c) に示されたコア部分における E_1 と E_2 の重なり積分を行なうことで C_{12} が得られる。このモード結合係数の値が小さいほど、光の移行割合が小さいことを示し、その値は、導波路構造に依存する。例えば、整合剤の屈折率が低くなると、 $n_2^2 - n_0^2$ の絶対値自体が低くなる上に整合剤部分の E_2 も小さくなるため、モード結合係数は小さくなる。従って、コアから整合剤部分へ移行する光パワーは少なくなり、モード結合による損失は小さくなる。このようにモード結合による損失は、コアと整合剤部分の伝搬定数差以外にも、導波路構造によって決定されるモード結合係数に大きく依存するため、以降、導波路構造とモード結合による損失の関係を求める。

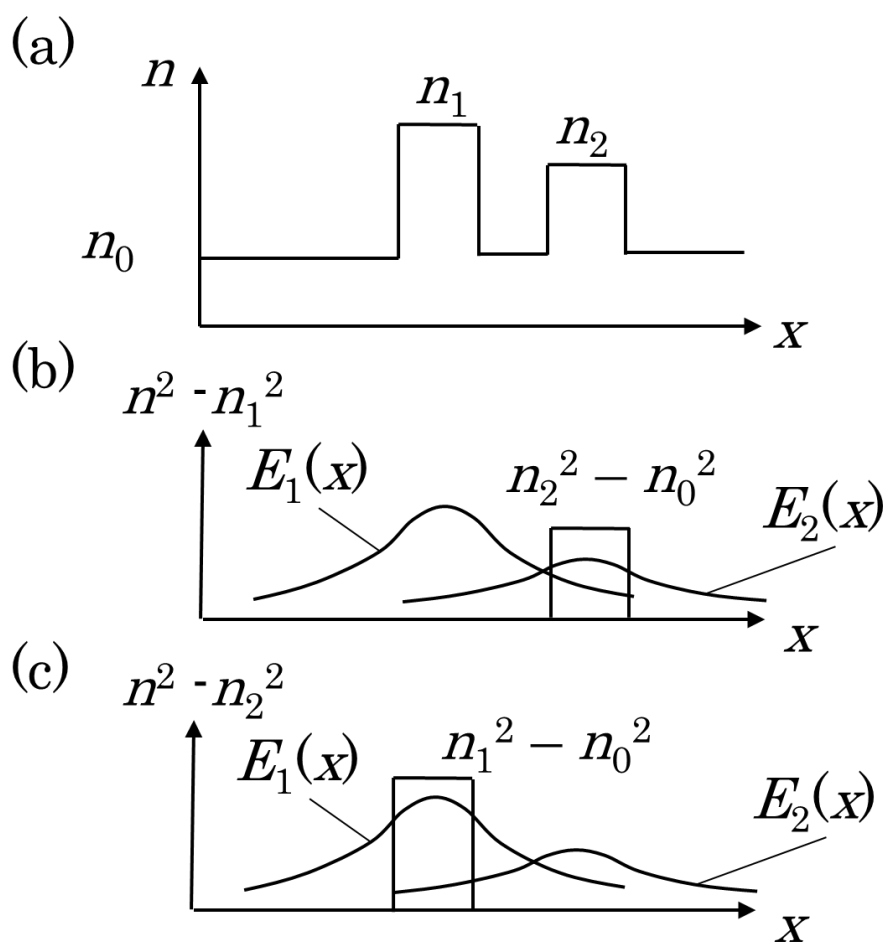


図 3.4 コアと整合剤部分の平行導波路の屈折率分布と電界分布の模式図

まず、モード結合による損失モデルの検証を行なった。図 3.5 に波長 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ における整合剤浸入長さ z と接続損失の関係を示す。なお、 $a = 3.8 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $R/a = 2.5$ 、 $S = 0.49$ 、 $\Delta = 0.31\%$ 、 $\Delta_r = 0.45\%$ とした。図中の実線及びプロットは、それぞれ計算及び測定結果を示す。図 3.5 より計算結果と測定結果の傾向は良く一致していることが確認できる。なお、測定結果における損失増加は、主に軸ずれに起因する接続損失成分であると考えられる。測定結果に対し、最小 2 乗近似を行なうと約平均 0.1 dB の軸ずれ損失が存在するものと類推される。

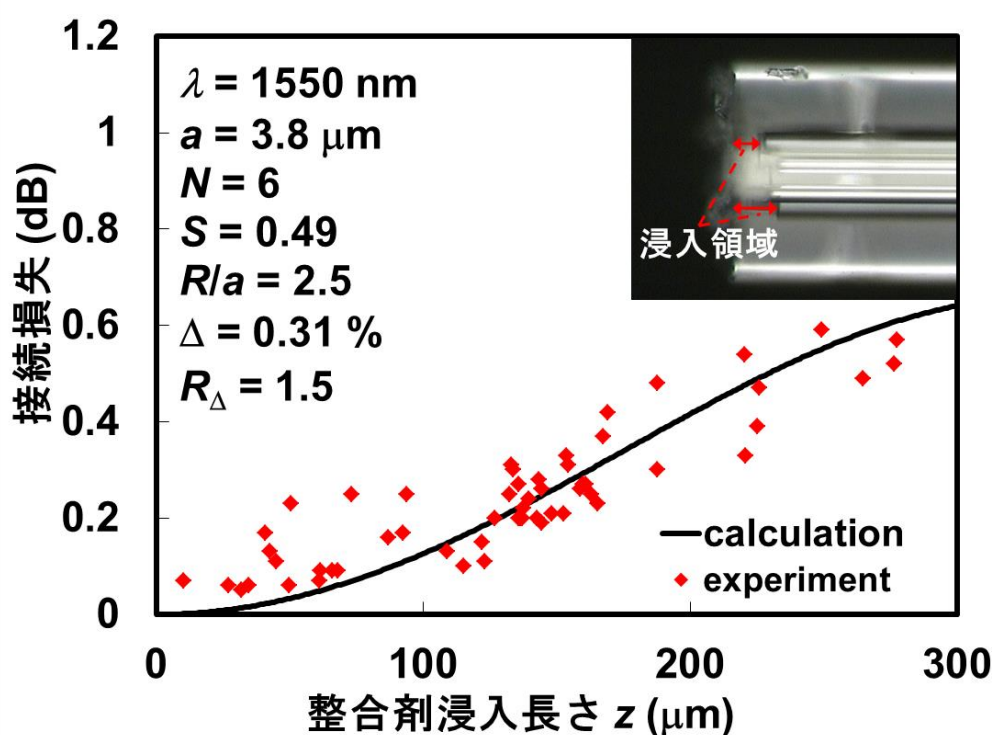


図 3.5 整合剤浸入長さ と 接続損失 の 関係

3.2.2 接続パラメータの設計

まず、モード結合損失 α の波長依存性を確認した。図 3.6 に波長 λ とモード結合損失 α の関係を示す。コア半径 a 、空孔数 N 、規格化空孔位置 R/a 、コアの比屈折率差 Δ は、それぞれ $3.8 \text{ }\mu\text{m}$ 、6、0.49、2.5、0.31%とした。整合剤の浸入長さ z と相対比屈折率差 R_{Δ} は、それ

ぞれ 100 μm 、1 とした。図 3.6 より、波長の増加とともにモード結合損失が増加していることが分かる。これは、コアを導波している光と空孔に浸入した屈折率整合剤を導波している光の電界分布の重なりが波長が長くなる程、大きくなるためである。以後、伝送波長として最も波長の長い 1625 nm で議論する。

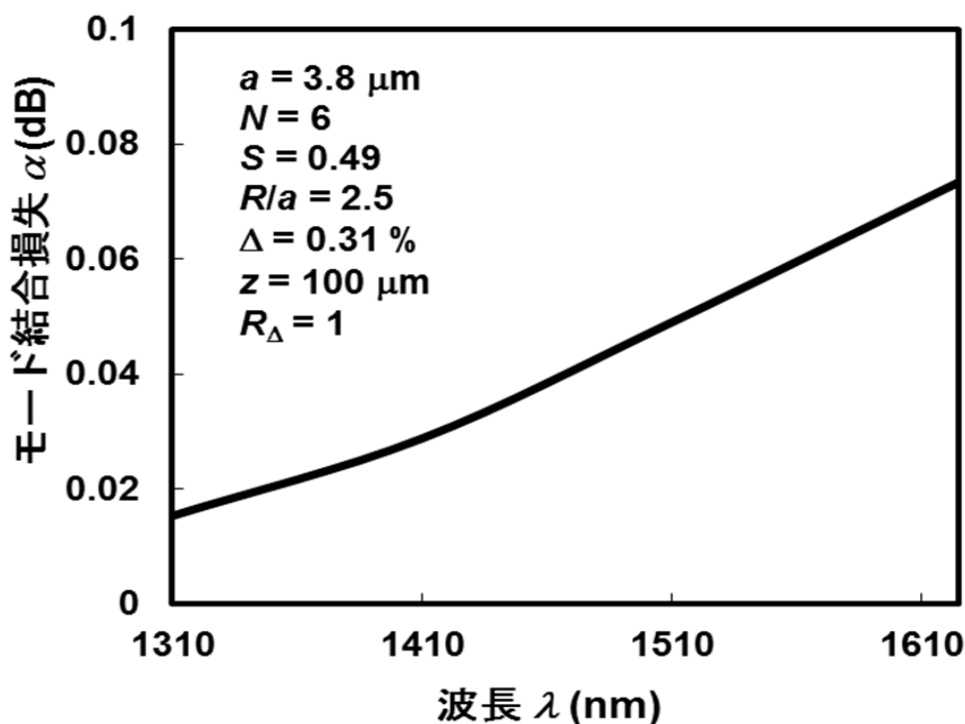


図 3.6 波長とモード結合損失の関係

HAF に空孔が存在しない場合、 a 、 Δ 、及びモードフィールド径(MFD)の関係は、規格化周波数 V により記述できる[1.11]。ここで、規格化周波数 V は、式(3.12)で定義される。

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta} \quad \text{式(3.12)}$$

そこで、 V 値とモード結合損失の関係について検討を行なった。図 3.7 に $\lambda = 1625 \text{ nm}$ 、 $S = 0.5$ 、 $R/a = 2$ 、 $z = 100 \mu\text{m}$ 、 $R_{\Delta} = 1$ における V 値と損失 α の関係を示す。図中の実線、破線、及び点線は、空孔が存在しない状態における波長 1310 nm の MFD を、それぞれ 8、9、及び 10 μm とした時の結果を表す。 V 値もしくは MFD の減少に伴い、損失は増加する傾向

にあることが分かる。一般的に HAF の MFD は R/a と関係し、 $R/a \geq 2$ において、MFD の縮小率は 10% 以下となる[1.2]。MFD の縮小率が 10%以下の条件下では、SMF と HAF の接続時に生じる MFD 不整合損失を低減できる。そこで以下では、一般的な SMF の MFD を考慮し、MFD = 9 μm と設定し、コア構造により決定される V 値に着目して検討を行なうこととした。

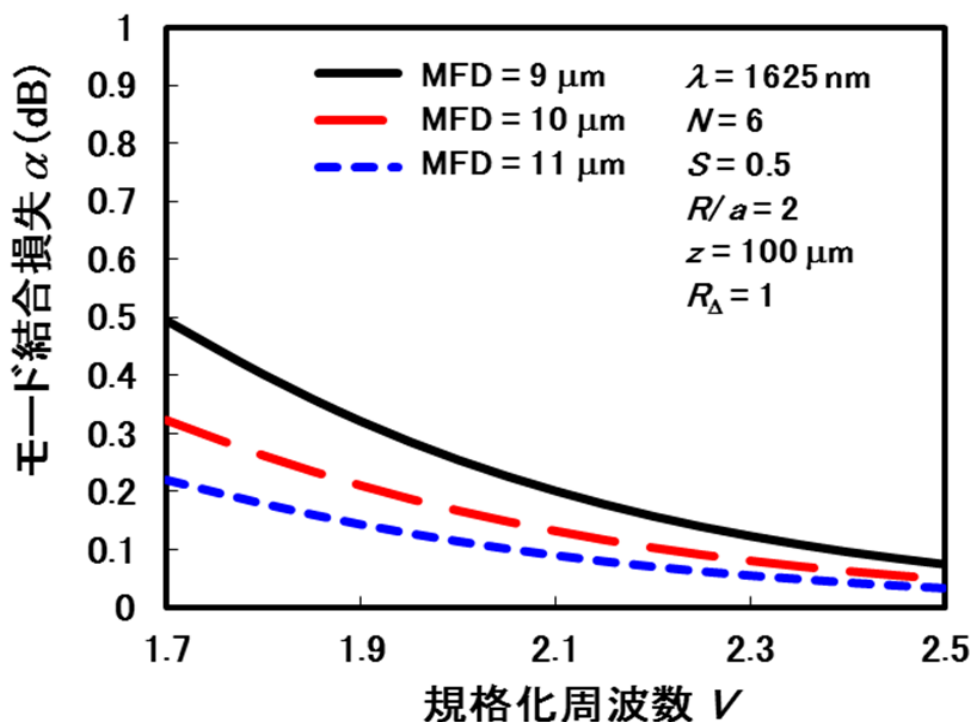


図 3.7 規格化周波数とモード結合損失の関係

図 3.8 に $\lambda = 1625 \text{ nm}$ 、 $R/a = 2$ 、MFD = 9 μm 、 $z = 100 \mu\text{m}$ 、 $R_{\Delta} = 1$ における空孔占有率 S とモード結合損失 α の関係を示す。図中の実線、破線、及び点線は、規格化周波数 V を 2、2.2、及び 2.5 とした時の結果を表す。図 3.8 より損失は S の変化に伴い周期的に変化することが分かる。これは、 S の変化は空孔径の変化を表しており、空孔径の変化が伝搬定数の変化を起し、モード結合係数を変化させたためと考えられる。そこで、各 V 値において損失が最大となる空孔占有率 S を S_{max} として定義して、モード結合損失の最悪値を検討する。例えば、 $V = 2.2$ の場合、 S_{max} は 0.6 であり、モード結合損失の最悪値は 0.18 dB である。

モード結合による損失増加を 0.05 dB 以下とする屈折率整合剤の許容浸入長さ Z_{max} について検討を行なった。図 3.9 に $\lambda = 1625$ nm、 $a = 0.05$ dB、 $S = S_{max}$ 、 $MFD = 9$ μ m、 $R_{\Delta} = 1$ における V 値と許容浸入長さ Z_{max} の関係を示す。図中の実線、破線、及び点線は空孔数が 6、8、10 の時の結果を表す。図中の 1 点鎖線、2 点鎖線は $N = 6$ において、規格化空孔位置 R/a を 2.5、及び 3 とした時の結果を表す。図のそれぞれの線以下の領域において、モード結合による損失増加を 0.05 dB 以下とすることが可能となる。図より、 V と R/a が減少するにつれて、 Z_{max} は減少している。また、 Z_{max} はほとんど空孔数に依存していないことが分かる。これらの結果より、所望の HAF の V 値と R/a に対して、図 3.9 によりメカニカルプライスの実現に必要な屈折率整合剤の許容浸入長さを導出することが可能となる。

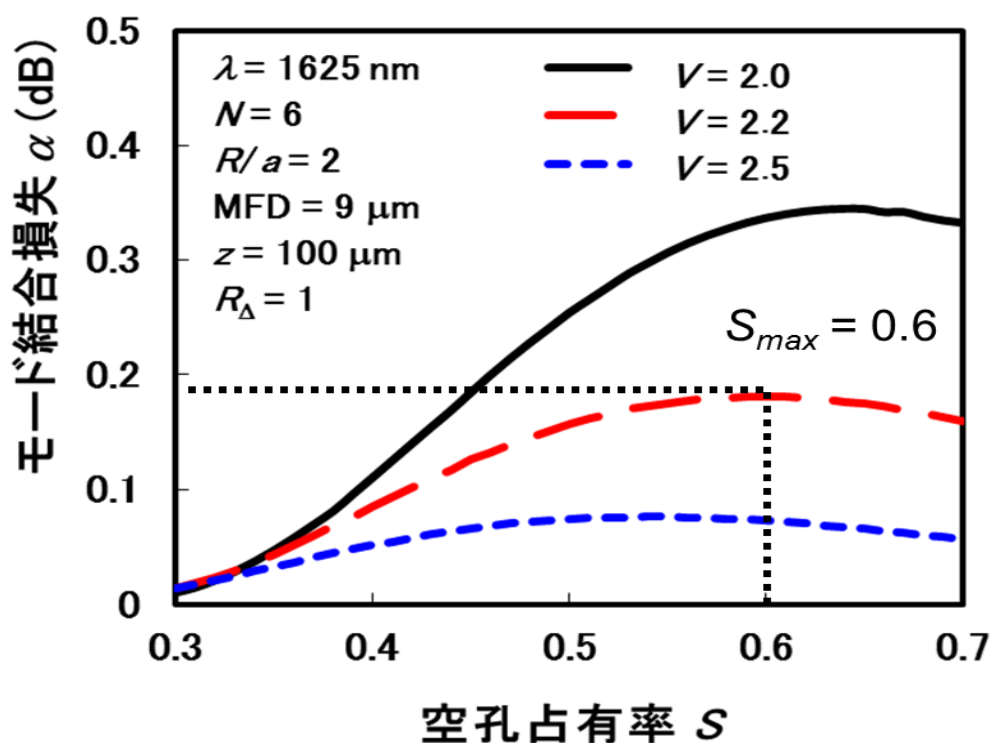


図 3.8 空孔占有率とモード結合損失の関係

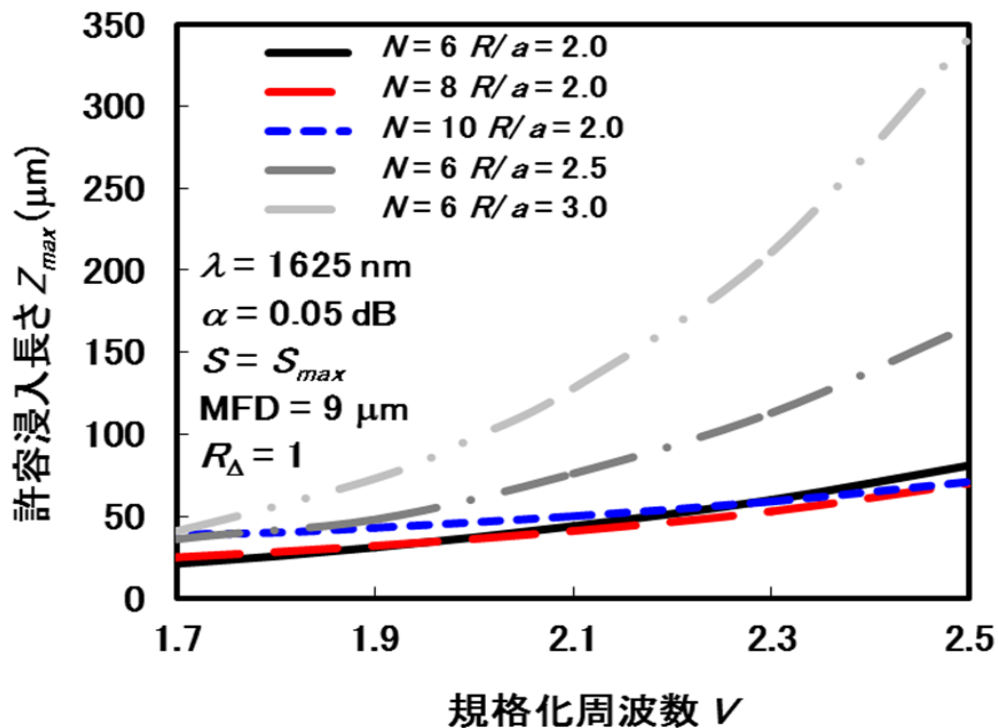


図 3.9 規格化周波数と許容浸入長さの関係

続いて、規格化周波数 V と規格化空孔位置 R/a に対する相対屈折率差 R_{Δ} と許容浸入長さ Z_{max} の関係を検討した。図 3.10 に $\lambda=1625$ nm における、 R_{Δ} と Z_{max} の関係を示す。図の実線、破線、及び点線は、それぞれ、($V=1.7, R/a=2.0$), ($V=2.1, R/a=2.0$), ($V=2.1, R/a=2.5$)の時の結果である。 $R_{\Delta}=0$ は整合剤の屈折率が、クラッドと等しいことを表している。図 3.10 において、 R_{Δ} と Z_{max} をそれぞれの線より左側の領域に設定することで、モード結合損失 α を 0.05 dB 以下に低減できる。図より、 V や R/a が減少するほど、同じ R_{Δ} において Z_{max} は減少している。また R_{Δ} を減少させることで Z_{max} を増大させることができる。 Z_{max} を 20 μm 以下に制御することは難しいが、 R_{Δ} が 0.3 以下の時、 $V \geq 1.7$ 、 $R/a \geq 2$ の HAF の構造に対して、 Z_{max} は 100 μm まで増大させることができる。ここで、 $V = 1.7$ は SMF の曲げ損失と単一モード条件を考えると V の最小の条件である。

以上より、モード結合損失を低減させるためには、 R_{Δ} を減少させることが Z_{max} の増大に有効であることが分かった。

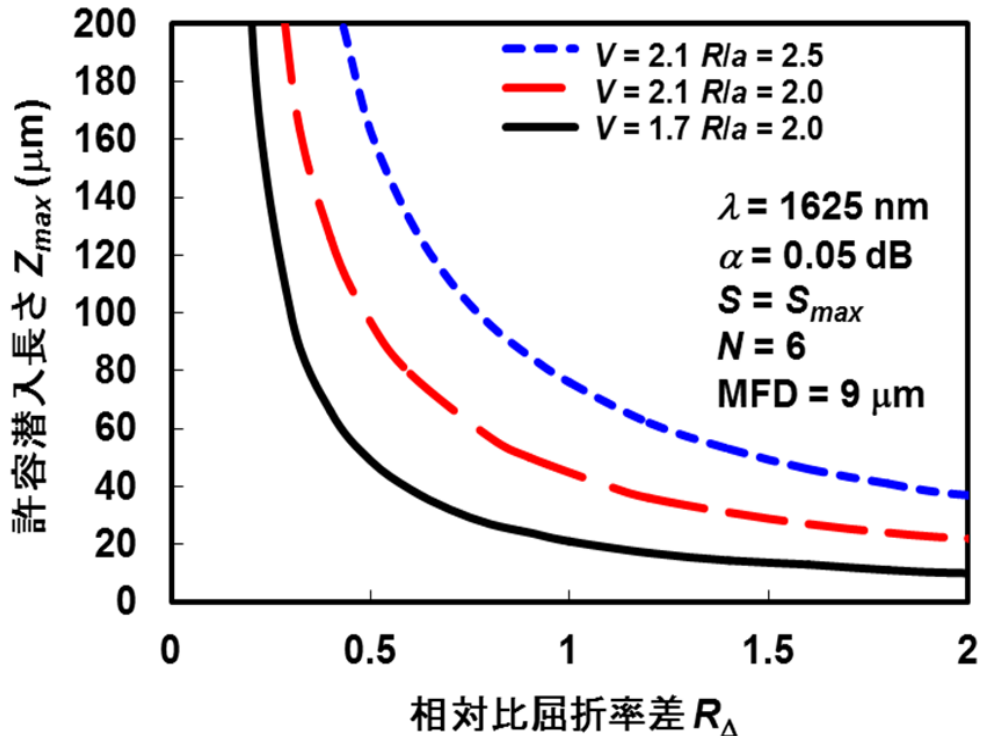


図 3.10 相対比屈折率差と許容浸入長さの関係

一方、相対比屈折率差 R_{Δ} を低減させることは整合剤の屈折率を下げることを意味し、モード結合損失だけでなく反射減衰量にも影響を与える。さらに整合剤の屈折率はマイナスの温度依存性を持つ。そのため、 R_{Δ} を低くした場合、高温時において反射減衰量の劣化が懸念される。そこで、良好な反射減衰量特性も実現するために、整合剤の屈折率と温度係数の関係について検討した。図 3.11 に $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 、 -40 から 75°C の温度範囲において、反射減衰量が 40 dB 以上となる R_{Δ} と屈折率の温度係数 dn/dT の関係を示す。ここでは、フレネル反射を元に計算した[3.8]。図中の実線及び破線は 75°C 及び -40°C において反射減衰量が 40dB となる境界を示しており、実線と破線で囲まれた領域において反射減衰量が 40dB 以上となる。図より、良好な反射減衰量特性を得るためには、 R_{Δ} と dn/dT を実線と破線で囲まれた領域内に設定する必要があるため、 R_{Δ} を減少させるにつれて dn/dT を増大させなければならない。

以上より、 $V \geq 1.7$ 、 $R/a \geq 2$ の構造の HAF のモード結合損失を、 S によらず 0.05dB 以下にするには、 R_{Δ} を 0.3 以下にし、さらに反射減衰量を 40dB 以上にするためには、 R_{Δ} と dn/dT を図 3.11 の領域内に設定する必要があることが分かった。

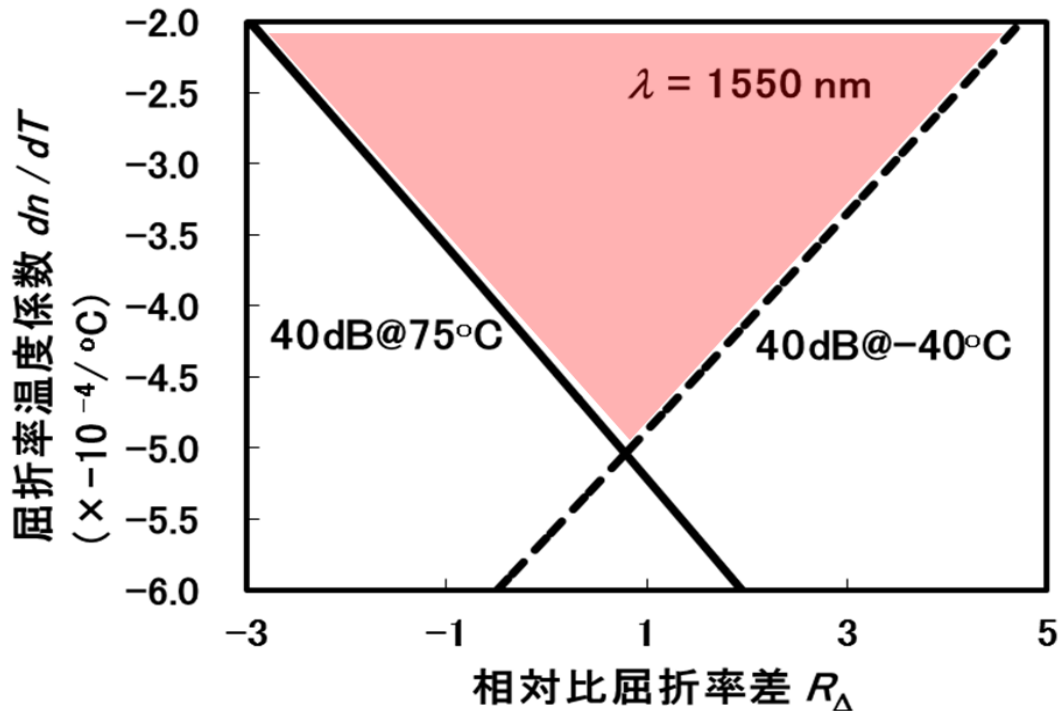


図 3.11 反射減衰量が 40 dB 以上となる
相対比屈折率差と屈折率の温度係数の関係

3.2.3 実験による検証

図 3.10 の R_{Δ} と Z_{max} の条件の妥当性について検証した。始めに、2 種類の固形状の整合剤を用意し、HAF 同士をメカニカルスプライスで接続し、整合剤の浸入長さで接続損失を測定した。2 種類の整合剤の R_{Δ} は常温でそれぞれ 0 と 1.6 である。なお、実験に用いた HAF の V 、 S 、 R/a 、 N および波長 1310 nm の MFD はそれぞれ、2.1、0.49、2.5、6 および $9 \mu\text{m}$ であった。表 3.1 に $\lambda = 1625 \text{ nm}$ における接続損失、図 3.12 に R_{Δ} と Z の測定結果を示す。サンプル数は 20 で、平均浸入長さは $50 \mu\text{m}$ 程度であった。従って、図 3.12 よ

り、#1 及び#2 の整合剤を用いた場合のモード結合損失は、それぞれ 0.05 dB 未満及び 0.05 dB 程度になると推定できる。表 3.1 に示すように、#1 及び#2 の平均接続損失は、それぞれ 0.09 及び 0.14 dB であった。ここで、#1 を用いて通常の SMF 同士を接続した場合の接続損失は平均 0.07 dB であった。従って、HAF 接続の SMF 接続に対する損失の増加分は、整合剤#1 と#2 を用いた場合で、それぞれ 0.02 及び 0.07 dB となる。この結果は、図 3.12 から推定された特性と良く一致していることが確認できる。以上より、 R_{Δ} と Z_{max} の条件の妥当性を確認した。

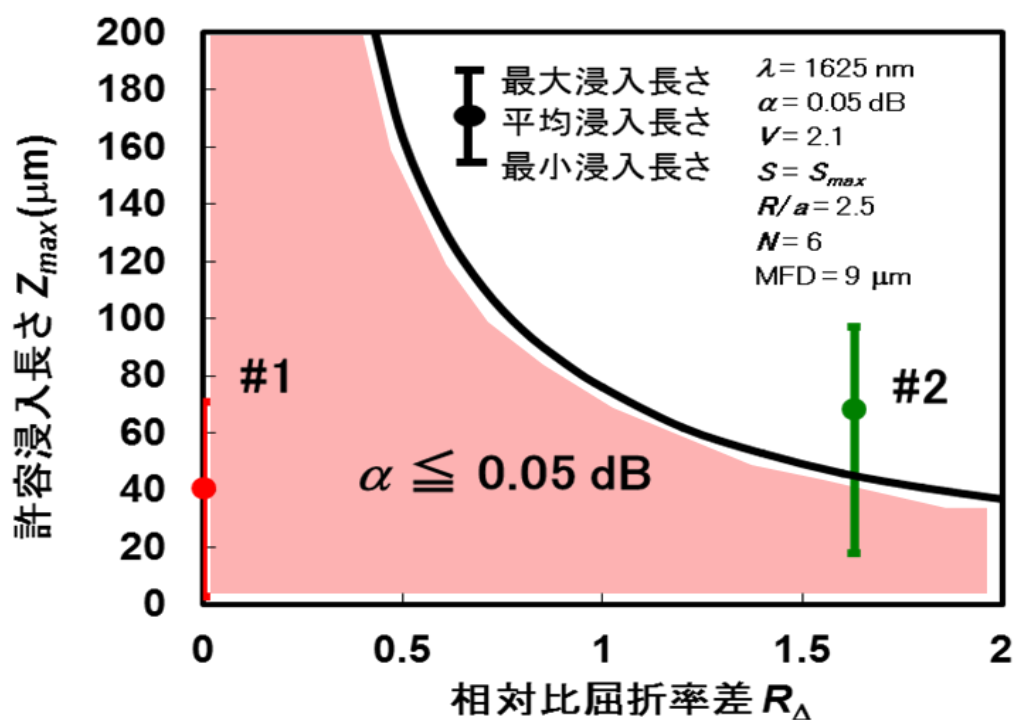


図 3.12 測定した相対比屈折率差と整合剤浸入長さ

表 3.1 測定した相対比屈折率差、整合剤浸入長さ、及び接続損失

	#1 for SMF-SMF	#1 for HAF-HAF	#2 for HAF-HAF
相対比屈折率差 R_{Δ}	0	0	1.6
平均浸入長さ (μm)	/		
平均損失 (dB)	0.07	0.09	0.14

Sample number : 20

λ : 1625 nm

図 3.11 の妥当性を調べるために、整合剤#1 に加え、図 3.13 に示すように R_{Δ} が -2 である整合剤#3 を用いて実験を行なった。なお、整合剤#1 並びに#3 の温度係数はともに -4.0×10^{-4} であった。図 3.14 に $\lambda = 1550 \text{ nm}$ における反射減衰量の温度特性を示す。図の点線、破線は#1、#3 の計算値を、■及び▲は測定値を示す。図 3.14 より、整合剤#1 を用いた場合の 75°C における反射減衰量は 40.6 dB であった。一方、整合剤#3 を用いた場合、計算値からも推測されるように、反射減衰量は 37.8 dB に劣化していることが分かる。この結果は図 3.11 から推測される結果と良く一致していることが確認できる。

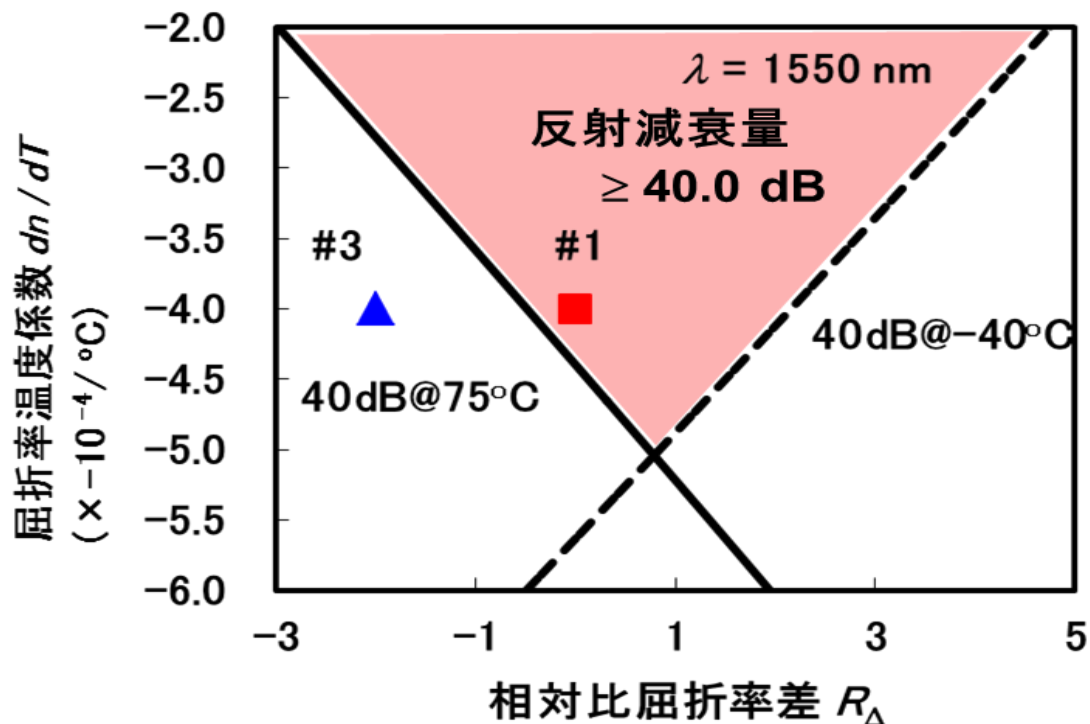


図 3.13 実験に使用したサンプルの特性

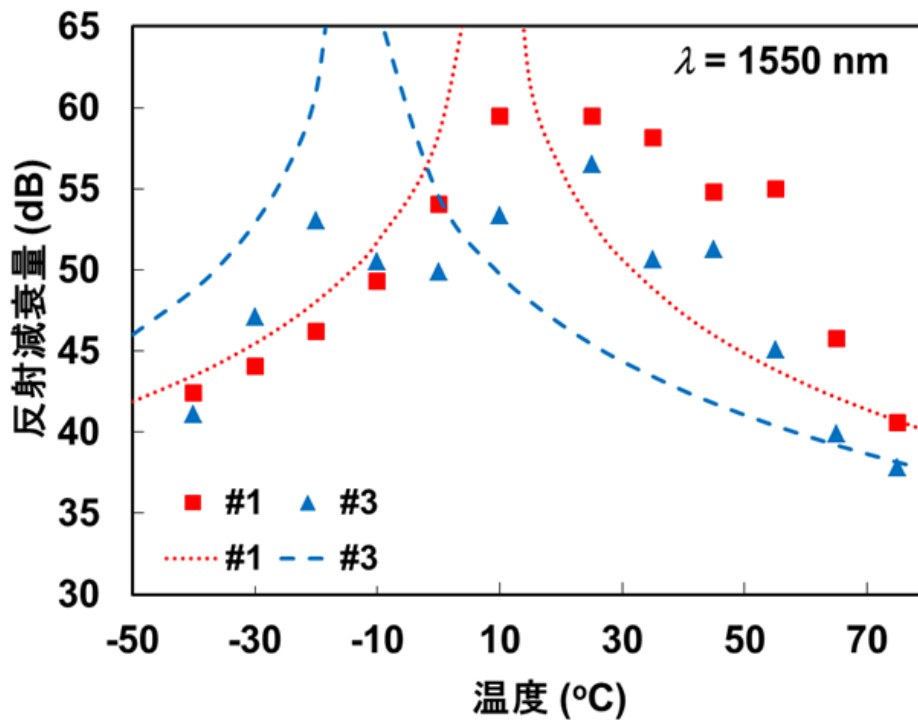


図 3.14 反射減衰量の温度特性

最後に、整合剤#1 を用いてメカニカルスプライス特性を測定した。表 3.2 及び表 3.3 に接続損失と反射減衰量を示す。サンプル数は 20 である。表 3.2 より SMF 同士、SMF と HAF、および HAF 同士の波長 1310、1550 nm における平均接続損失は、それぞれ(0.10 dB、0.08 dB)、(0.07 dB、0.08 dB)および(0.06 dB、0.08 dB)であった。

表 3.3 より SMF 同士、SMF と HAF、および HAF 同士の波長 1310、1550 nm における平均反射減衰量は、それぞれ(57.0 dB、58.8 dB)、(57.0 dB、58.2 dB)、および (58.2 dB、59.2 dB)であった。

以上より、適切な R_{Δ} と dn/dT を設定した固形状の屈折率整合剤を用いることで、SMF 接続と同程度の接続特性を実現できることを確認した。

図 3.15 に Telcordia GR-326 に準拠したヒートサイクル特性の結果を示す。損失変動量はファイバの種類によらず、0.05 dB 以下と安定した特性であることを確認できる。

表 3.2 メカニカルスプライスにおける同種及び異種ファイバ間の
接続損失

		SMF-SMF	SMF-HAF	HAF-HAF
1310 nm	Avg. (dB)	0.10	0.07	0.06
	Max. (dB)	0.15	0.14	0.13
	Min. (dB)	0.04	0.03	0.00
1550 nm	Avg. (dB)	0.08	0.08	0.08
	Max. (dB)	0.15	0.14	0.14
	Min. (dB)	0.04	0.04	0.01

Sample numbers : 20

表 3.3 メカニカルスプライスにおける同種及び異種ファイバ間の
反射減衰量

		SMF-SMF	SMF-HAF	HAF-HAF
1310 nm	Avg. (dB)	57.0	57.0	58.2
	Max. (dB)	65.0	62.0	62.7
	Min. (dB)	51.3	53.4	51.9
1550 nm	Avg. (dB)	58.8	58.2	59.2
	Max. (dB)	65.0	65.0	65.0
	Min. (dB)	51.3	52.6	53.9

Sample numbers : 20

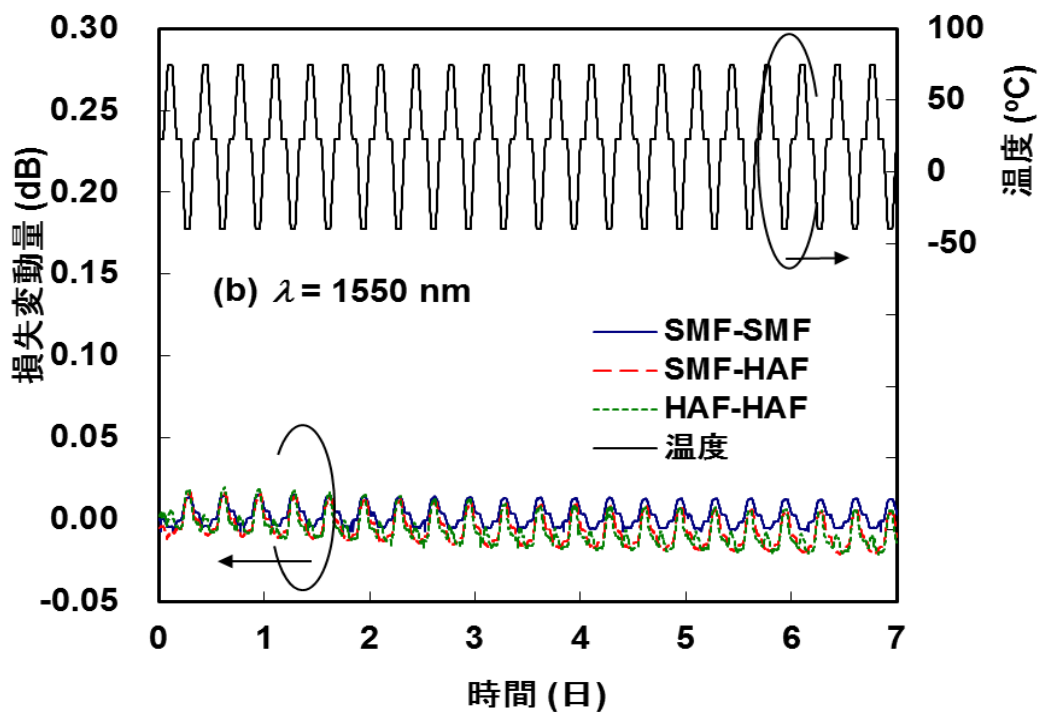
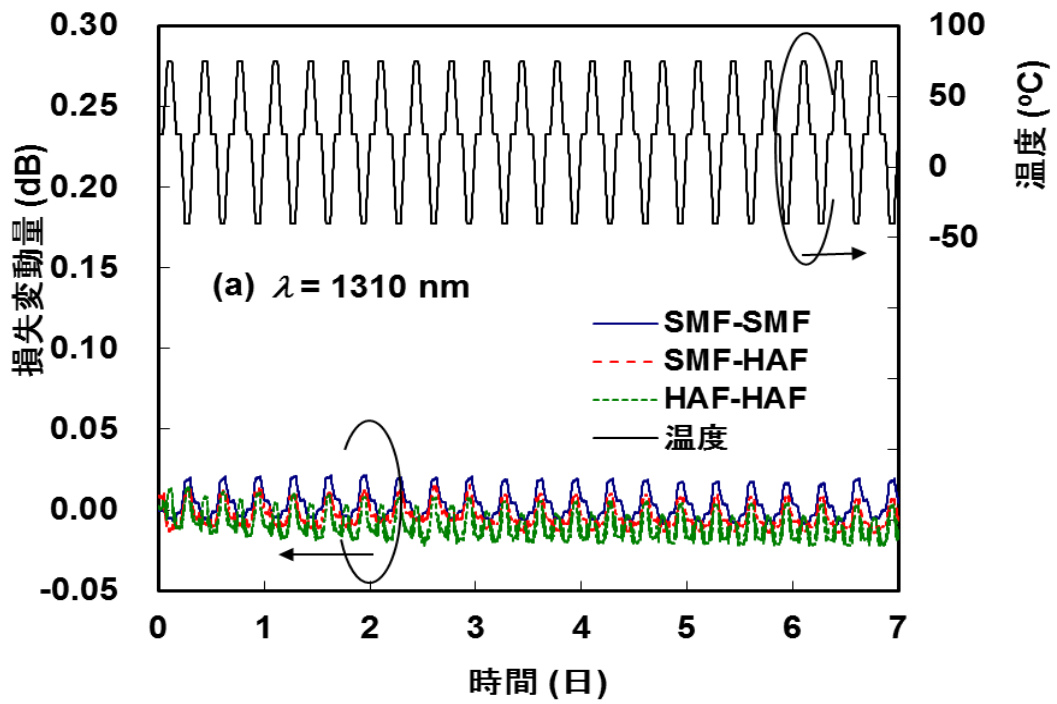


図 3.15 ヒートサイクル特性

3.3 まとめ

HAF のメカニカルスプライス特性を理論的、実験的に検討した。HAF のメカニカルスプライス固有の損失に対し、モード結合方程式を適用した。HAF の構造パラメータである規格化空孔位置、空孔占有率、規格化周波数を考慮することで、任意の HAF の構造におけるモード結合損失を明らかにした。その結果、固形状の屈折率整合剤を用いたメカニカルスプライスにおいて、モード結合損失を 0.05 dB 以下とする整合剤の空孔への浸入長さと屈折率の条件を導出した。さらに、40 dB 以上の反射減衰量を維持できる屈折率と屈折率の温度係数の条件を導出した。これらのメカニカルスプライスの条件の妥当性を実験で確認し、適切な屈折率と温度係数を持った固形状の屈折率整合剤を利用することで、SMF 接続と同等の HAF 接続を初期特性とヒートサイクル特性において実現できることを明らかにした。これらの結果が単一モードかつ低曲げ損失特性を両立した HAF の適用領域を拡げることを可能にする。

第4章 マルチコアファイバの接続技術

4.1 はじめに

MCF の伝送路への適用には光コネクタ技術の確立は不可欠である[4.1]。一般に、光コネクタでは、外力が光ファイバの接続点に作用しないようにするために、図 4.1 に示すように、プラグハウジングとアダプタの嵌合部分から、フェルールと割りスリーブの嵌合部分に隙間を持たせることで、フェルール部分をプラグ部分から独立させるフロート構造が必要である[4.2]。さらに MCF は光ファイバの中心以外にコアがあるため、MCF コネクタはフェルール長手方向を中心軸とした軸回りの回転角度を高精度に調心する必要がある[4.3 - 4.6]。図 4.2 に示すように、回転角度ずれは対向するコア同士で軸ずれ損失を招く。さらに、MCF のクラッド中心からコア位置までの距離が増加するほど、回転による軸ずれ量が増加するため、より高精度な調心が必要となる。

本章では、外力が光ファイバの接続点に作用しない構造を担保したまま、回転角度を高精度に調心するコネクタの検討について説明する。提案コネクタは V 溝付きフェルールとピン付き割スリーブを採用し、プラグやアダプタの隙間によって生じる回転の影響を無くす。まず、これまでの MCF コネクタの検討例と課題について説明し、それを解決する新しい MCF コネクタの構造と特長を説明する。続いて、提案コネクタの接続特性をコア位置の観点から実験的に示す。さらに V 溝とピンの寸法精度の影響を明らかにする。これらの結果より、提案コネクタは任意コア配置の MCF に対し、低接続損失を実現できることを示す。

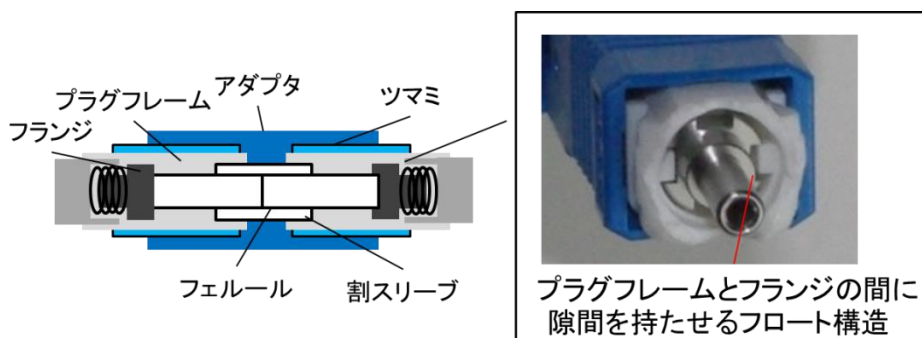


図 4.1 SC コネクタの模式図

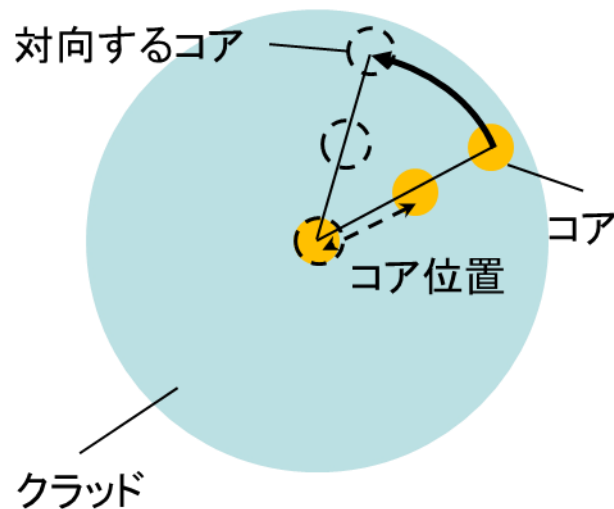


図 4.2 回転による軸ずれ損失モデル

4.2 回転軸調心コネクタの基本構造

まず、MCF コネクタのこれまでの検討例と課題について説明する。通常、フロート構造を維持したまま、MCF を接続する場合、隙間があるためにフェルールが回転してしまい、回転角度の調心をすることが出来ない。島川らは、図 4.3 に示すように、プラグハウジング内のプラグフレームとフェルールと一体化されているフランジとの隙間を低減することにより、プラグハウジングに対するフェールの位置決め精度を向上し、コア位置 $45\ \mu\text{m}$ の 7 コア MCF の SC コネクタを実現している[4.5]。しかし、プラグハウジング内の隙間を低減すると、プラグハウジングに作用した外力がフェルール部分に伝わり、割りスリーブを変形させ接続特性の低下を招く。隙間を低減させずにフロート構造を維持するために、長瀬らは、プラグハウジング内でオルダムカップリング構造を採用したコア位置 $55\ \mu\text{m}$ の 7 コア MCF の MU コネクタを実現している[4.6]。オルダムカップリング構造とは、図 4.4 の模式図に示すように、プラグフレームとフランジの間に中間部材を設け、フランジと中間部材、中間部材とプラグフレームの間の 1 軸方向のみにしか動かない構造である。しかし、オルダムカップリング構造を用いた場合にも、MCF 中のコアのファイバ中心からの距離が増加した場合、プラグハウジングの構成部材の要求精度は増大する。さらに、これらの方法は、プラグに対するフェールの位置精度の向上であり、アダプタとプラグとの嵌合部分の影響は解決することができない。

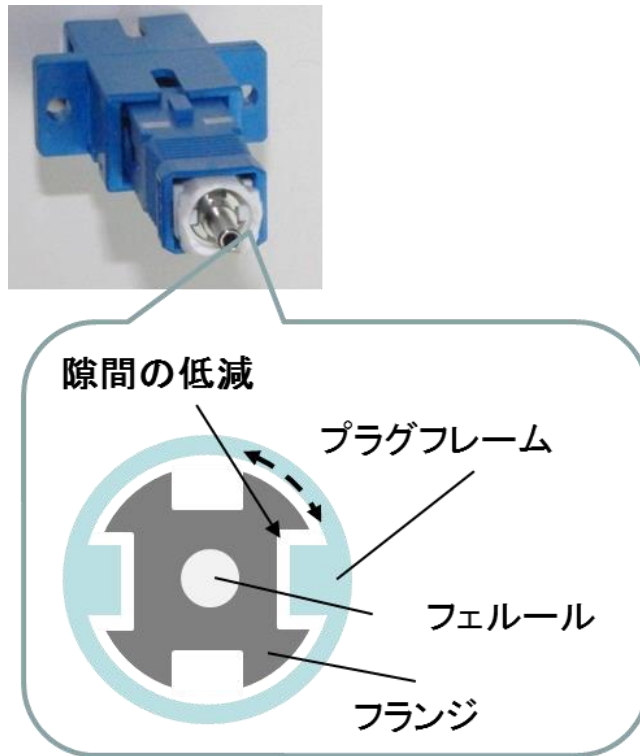


図 4.3 隙間低減による回転抑制の模式図

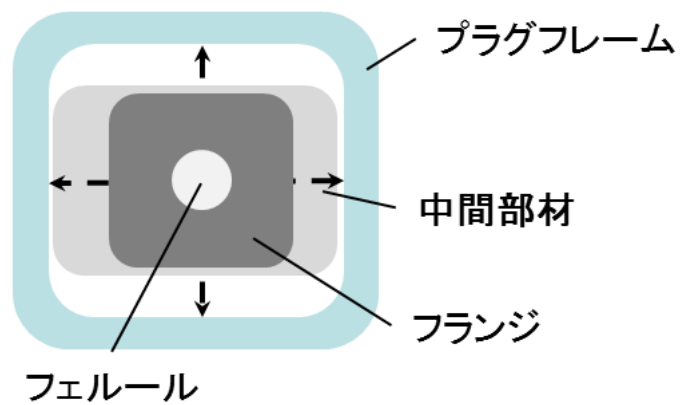


図 4.4 中間部材による回転抑制の模式図

そこで、我々はアダプタに対しフェルールを直接調心を行なうコネクタを作製した[4.7]。図 4.5 に本コネクタのフェルールと割りスリーブの模式図を示す。フェルールに V 溝が切っており、割りスリーブにピンがある。接続時にピンと V 溝が嵌合する事で、フェルール回転角度の調心が可能となる。また、現行のコネクタと同等のフェルール、割りスリーブ、及びプラグハウジングを用いることにより、単一コア光ファイバの接続と等価な接続中心軸の位置決め精度と、フロート構造を維持できると考えられる。

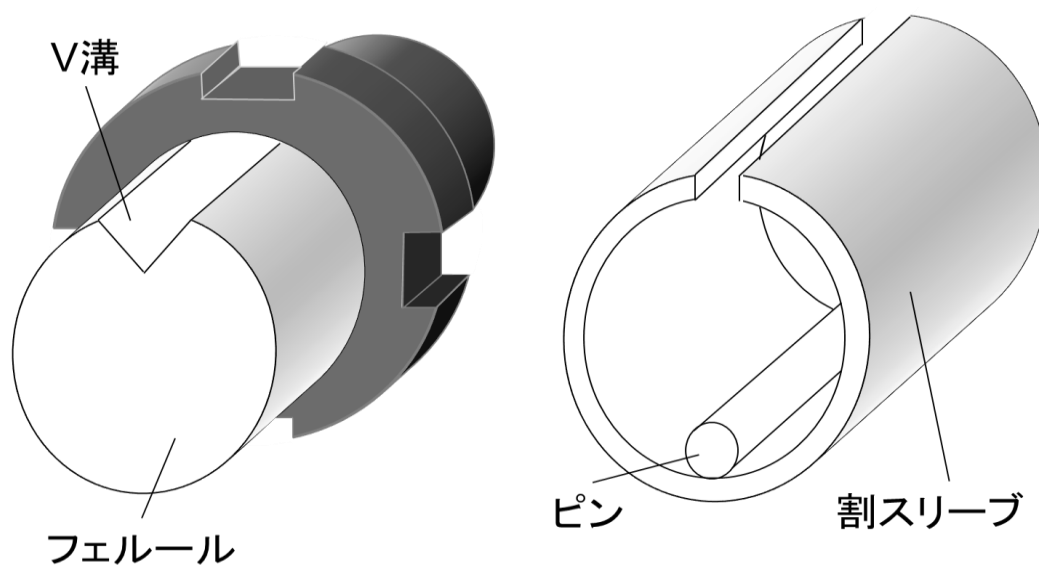


図 4.5 提案コネクタの模式図

図 4.6 に現行のコネクタにおけるプラグハウジング内の隙間の断面模式図を示す。半径 d 、角度 α の位置に、隙間 d が垂直方向にある。この時、プラグハウジング内のプラグフレームとフェルールに一体化しているフランジの間に隙間があるために、フェルールが回転する。フェルールが回転するとフェールの中心に接着固定されている MCF も回転し、中心からコア位置が遠いほど、軸ずれによる損失が大きくなる。図 4.7 に現行の SC コネクタを参考に、 $d = 2 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 10^\circ$ におけるファイバ中心からのコア位置と隙間 d によってフェルールが回転した時の接続損失の関係を示す。ここで、MFD 及び、コネクタ化された時のコアの偏心量は、それぞれ $9.0 \mu\text{m}$ 及び $1.0 \mu\text{m}$ とした。図の黒の実線、破線、及び点線は $d = 0.005$ 、 0.01 、及び 0.1 mm における計算結果である。 $d = 0.1 \text{ mm}$ は、現行の SC コネクタの一例である。赤の太線は本コネクタを用いた場合の結果である。現行のコネクタの場合、中心からのコア位置が増加するにつれて接続損失は大幅に増加するので、接続損失を低減するためには、 d を減少させなければならない。例えば、接続損失を 0.5 dB 以下にするには、コア位置 $50 \mu\text{m}$ の場合は 0.01 mm 以下で、コア位置が $80 \mu\text{m}$ の場合 0.005 mm 以下で d を制御する必要が生じる。一方、提案コネクタを用いた場合、フェルールと割りスリーブの嵌合部分において、回転角度の調心を行なうので、 d の影響はなく、接続損失はフェルールに対するファイバの位置決め精度及び V 溝とピンの寸法精度にのみ依存することとなる。従って、十分なファイバの位置決め精度及び V 溝とピンの寸法精度が得られれば、接続損失のコア位置に対する依存性は解消され、フェルールと割りスリーブの調心精度が接続損失の支配要因になると考えられる。

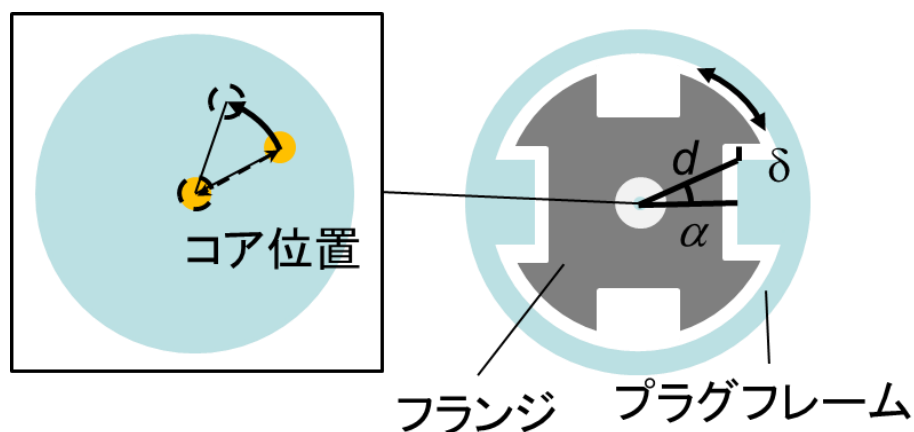


図 4.6 現行のコネクタにおけるプラグハウジング内の隙間の断面模式図

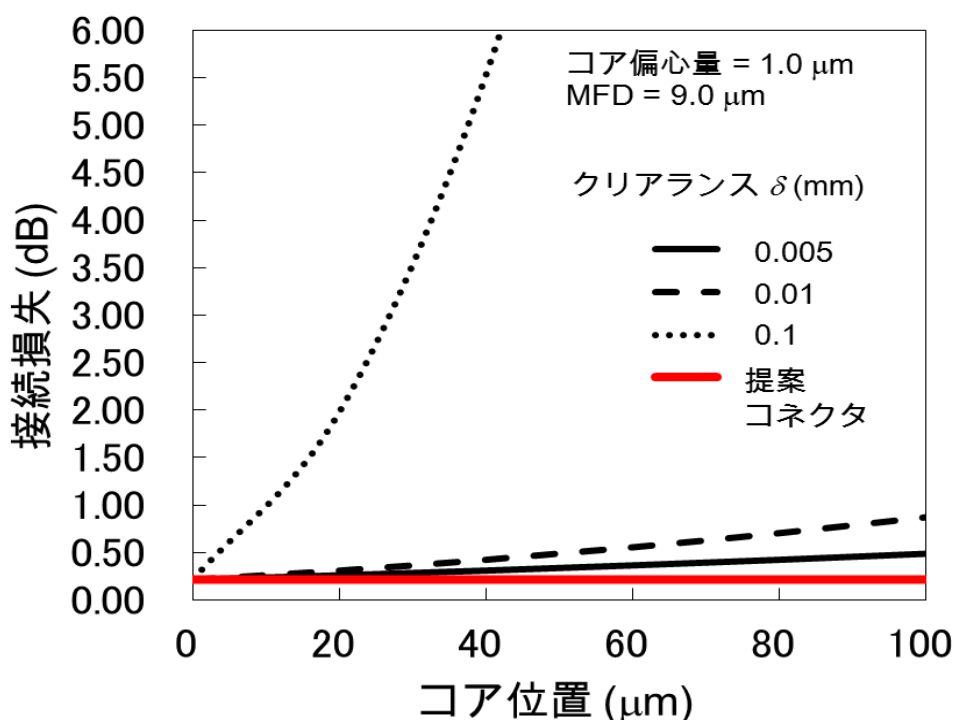


図 4.7 ファイバ中心からのコア位置と
隙間によってフェルールが回転した時の接続損失の関係

4.3 マルチコアファイバ接続の基本特性

本コネクタの特性を確認するために、コア位置の異なる 3 コアファイバ(3CF)を用意し、フェルールに接着固定し接続特性を評価した。図 4.8 にフェルールと 3CF の断面の模式図を示す。3CF のクラッド径は 240 μm 、中心コア#0 と外周コア#1 との間隔は 40 μm 、中心コア#0 と外周コア#2 の間隔は 80 μm であった。波長 1550 nm におけるコア#0、#1、及び#2 の MFD は約 9.0 μm であった。コア#2 が V 溝に一番近くなるように接着固定し、現行のコネクタ部品を用いて SC タイプの 3CF コネクタを作成した。図 4.9 は作成した 3CF の SC コネクタの写真である。V 溝付きフェルールとピン付き割スリーブ以外は従来のコネクタ部品を用いた。また、ピン径は 500 μm で、V 溝はピンが嵌合するように切削された。

図 4.10 に接続損失の測定系を示す。分離されている複数の SMF を MCF に結合する Fan-in デバイスを用いて、波長 1550 nm におけるそれぞれのコアの接続損失を測定した。

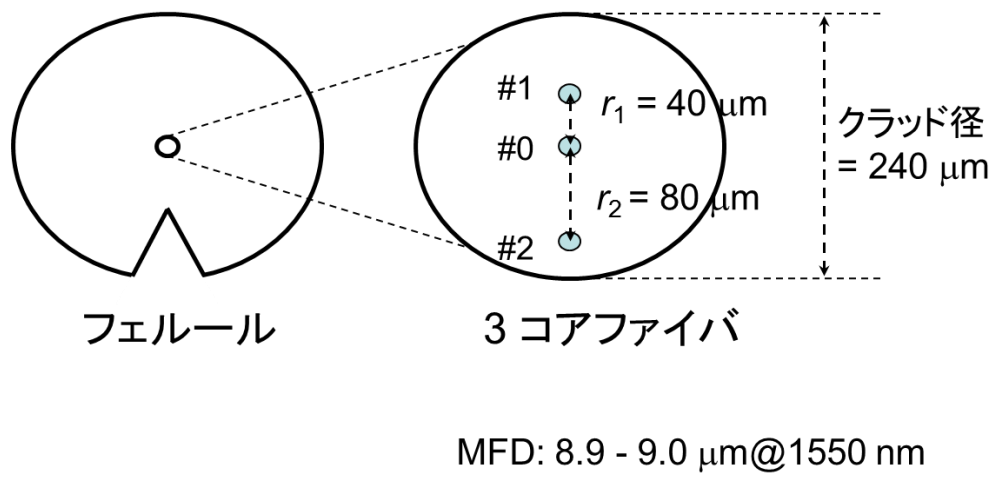


図 4.8 フェルールと 3CF の断面の模式図

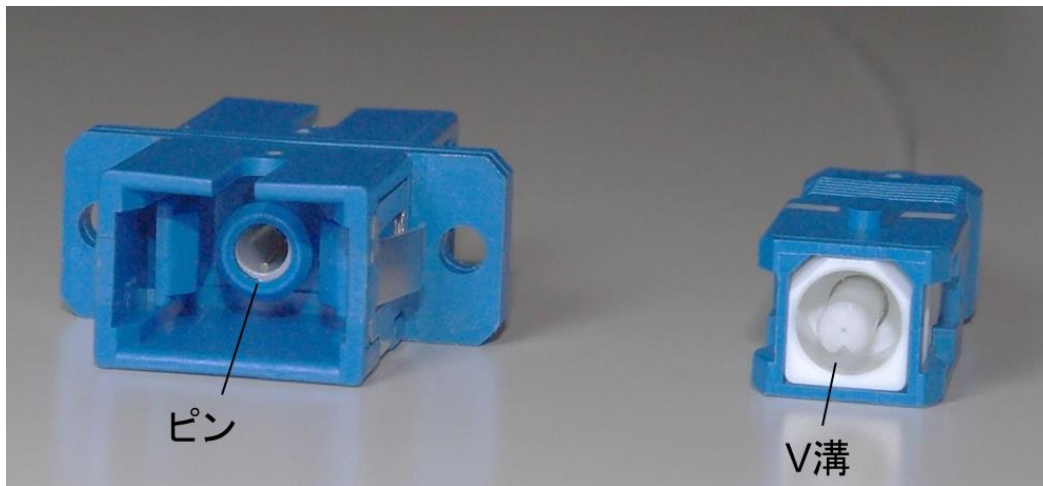


図 4.9 作成した 3CF の SC コネクタの写真

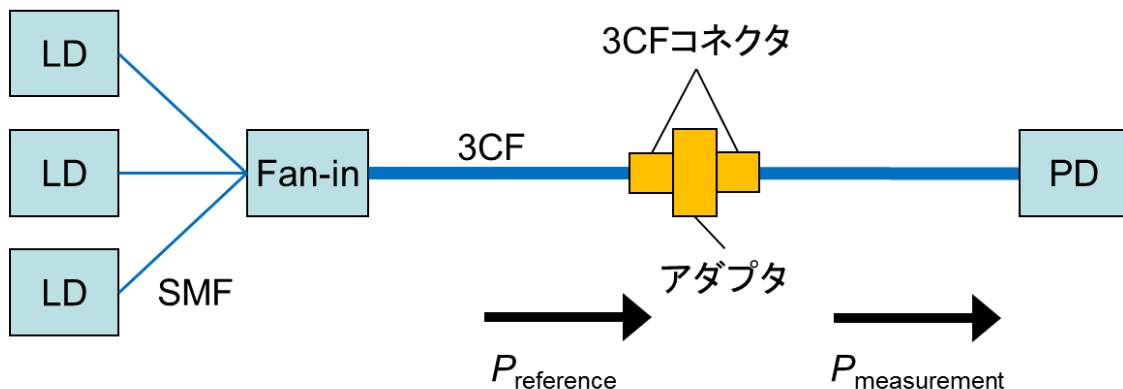


図 4.10 接続損失の測定系

図 4.11 に接続損失の測定結果を示す。1 ペアのコネクタに対し、30 回の着脱を行なった。図の○及び△はピン付き及びピンなしの割りスリーブを用いた時の結果である。図 4.11 よりピンなしの場合、接続損失はコア位置が中心から離れるにつれ増加することが分かる。80 μm のコア位置では 14 dB 程度まで接続損失は増加している。一方、ピンありの場合、最大接続損失は 0.5 dB 以下で、バラつきも 0.1 dB 以下であった。

図 4.12 に中心コアと外周コアの接続損失の関係を示す。図 4.12(a)及び(b)はそれぞれピンなし及びピンありの時の結果を表す。図の○及び△は、それぞれコア#0 とコア#1 及びコア#0 とコア#2 の接続損失の関係を表している。図 4.12 より、ピンなし及びピンありの中心コアの接続損失のバラつきは同程度であることが分かる。また、図 4.12 (a)より、ピンなしの場合、外周コアの#1 及び#2 の接続損失は 0.1 から 13.5 dB 程度までバラつきが大きく、中心コアの接続損失との相関はみられない。一方、図 4.12 (b)より、ピンありの場合、外周コア#1 及び#2 の接続損失は、中心コアの接続損失と高い相関を示し、バラつきも中心コアと同程度であることが分かる。これはピンありのコネクタの場合、垂直方向と水平方向の軸ずれが支配的であり、軸ずれのバラつきがピンなしのコネクタと同程度であるためと考えられる。これらの結果より、コア位置 80 μm の MCF においても提案コネクタでは回転角度ずれがほぼゼロに抑制されていることを確認した。

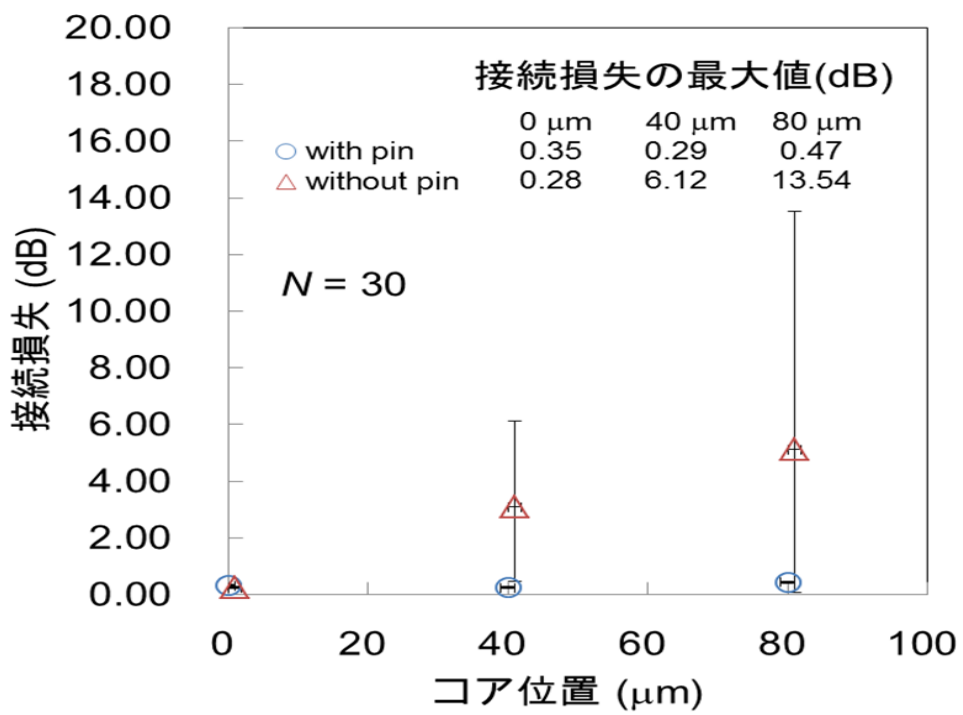


図 4.11 接続損失の測定結果

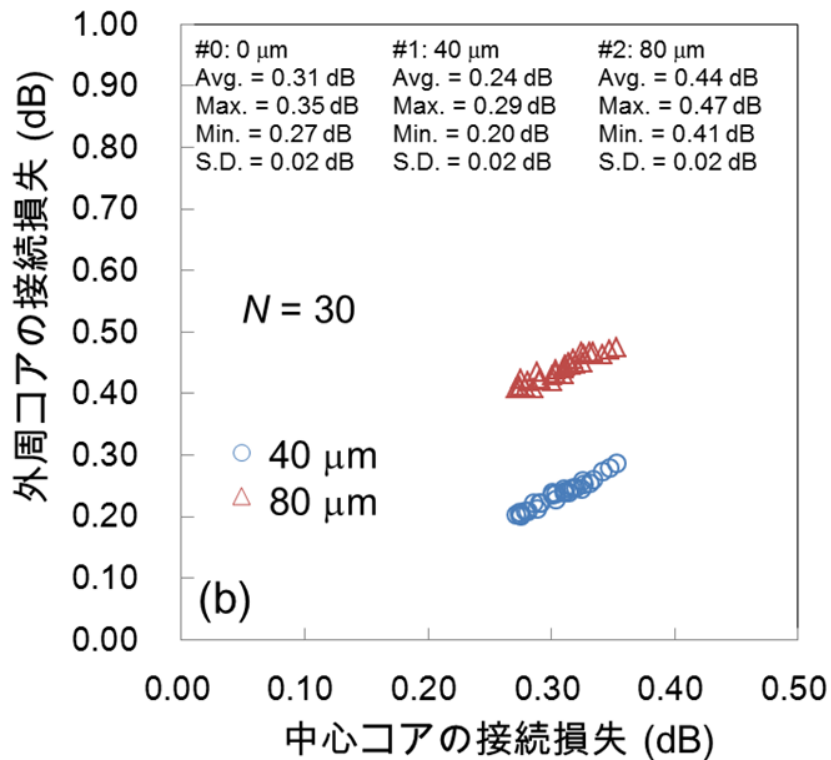
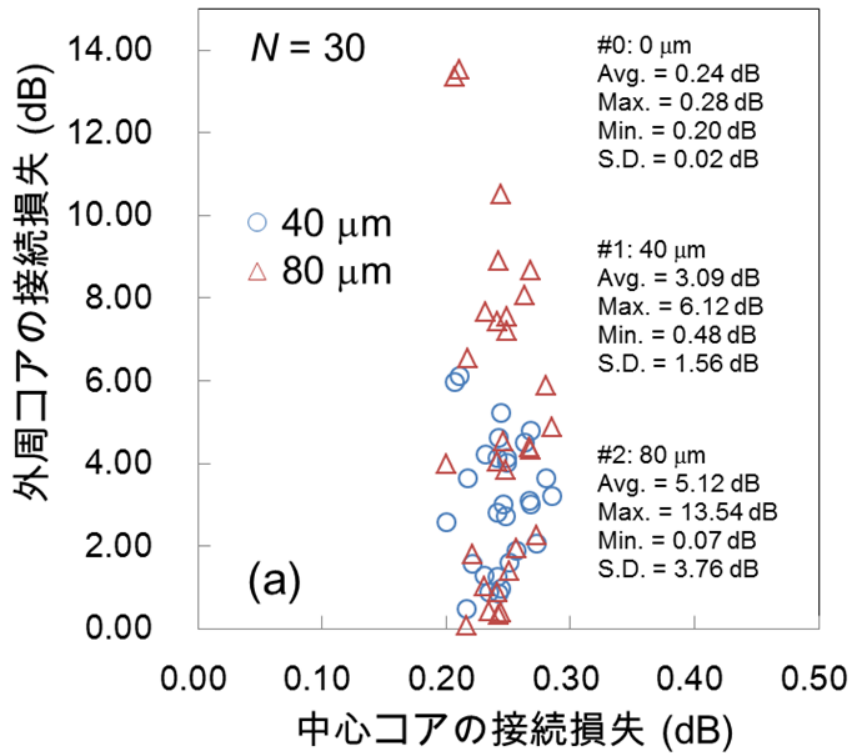


図 4.12 中心コアと外周コアの接続損失
(a) ピンなし、(b) ピンあり

4.4 V溝およびピンの寸法精度の影響

続いて、ピンとV溝の寸法精度が接続特性に与える影響を確認した。図4.13に検討モデルを示す。2つのシンプルな場合を仮定した。図4.13(a)では、太いピンもしくは浅いV溝のために生じる直線方向の軸ずれ $+\Delta h$ を、(b)では、細いピンもしくは深いV溝のために生じる回転方向の軸ずれ $-\Delta h$ を仮定した。

図4.14に Δh と接続損失の関係を示す。図の実線、破線、点線は、コア位置が0、40、80 μm の場合における計算結果を表す。ここで、本来コネクタ持つ軸ずれ損失として、ピンなしの中心コアの平均接続損失から0.24 dBを加算した。図の◆、■、▲のプロットは、コア位置が0、40、80 μm の場合における測定結果を表す。 $\Delta h = 0$ における測定結果はピン径が500 μm の時の結果である。計算結果より、 Δh がプラスの場合、コア位置に依存せず、損失は急激に増加している。 Δh がマイナスの場合、中心コアの損失は Δh に依存しないが、外側のコア程、損失が増加している。測定結果より、中心コアの損失はほとんど Δh に対する依存性はないが、 $\Delta h = 0$ の時だけ、ピンなしの損失に比べ増加している。これは、直線方向の軸ずれがV溝もしくはピンの寸法精度に依存しているためであり、この状況は Δh がプラスの場合に対応する。コア位置40 μm の場合、計算値からの推定通り、損失は Δh の減少に伴って増加している。コア位置80 μm の場合、損失は Δh の減少に伴って減少している。これは、図4.13におけるモデル以外の損失要因があったためと考えられる。例えば、V溝のフェルール長手方向に対する切削の平行性のずれから、フェルールが捻じれた状態が起きたことも考えられる。しかしながら、損失の絶対値が小さいことから、この要因による影響は少ないと考えられる。また、損失の偏差は Δh の減少に伴って増加していることから、回転による影響が生じていると考えられる。

以上より、隙間を0に設計する場合、寸法誤差から直線方向の軸ずれを引き起こし、大きな損失増加を招く可能性があることが分かる。一方、隙間を増大させる場合、回転によって損失の偏差が増大することが確認できる。

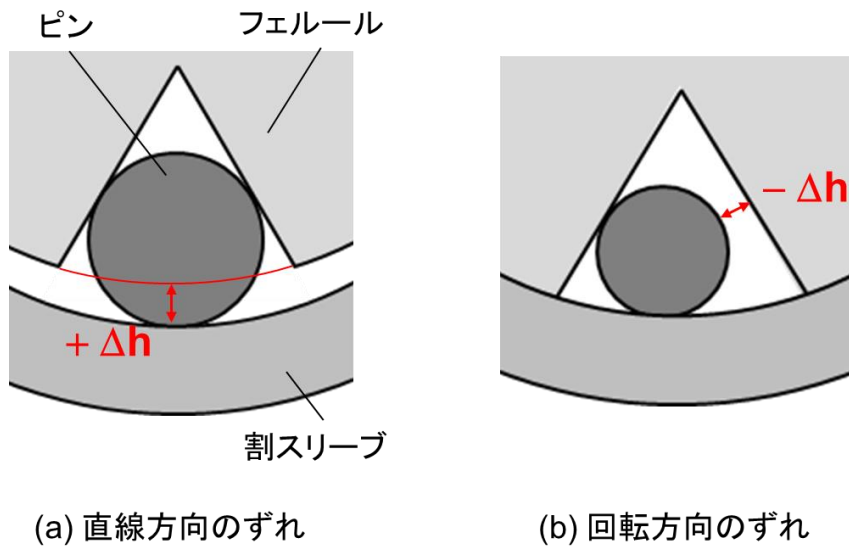


図 4.13 ずれのモデル

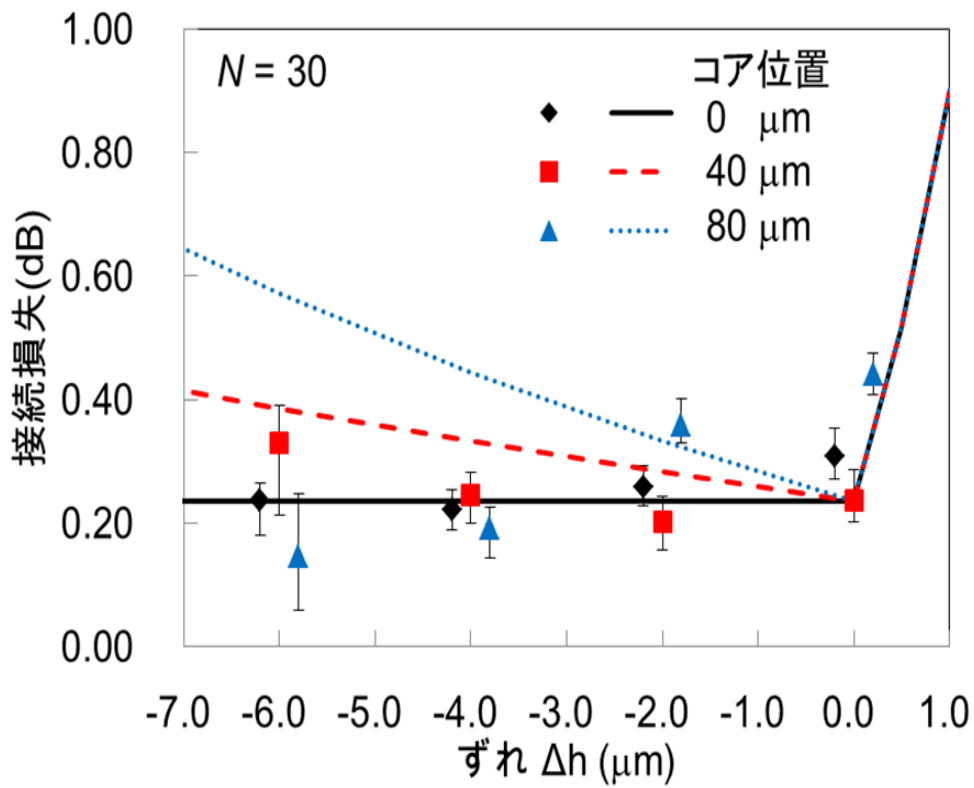


図 4.14 ずれと接続損失の関係

上記の考察を確かめるために、4つのコネクタを作製し、1組あたり15回の6組のランダム接続を行なった。ここで、 Δh が0、-2、及び-4に対応するピン径500、498、及び496 μm のピンを用いて測定した。図4.15に(a) $\Delta h = 0$ 、(b) $\Delta h = -2$ 、及び(c) $\Delta h = -4 \mu\text{m}$ の場合の接続損失のヒストグラムを示す。表4.1に結果をまとめる。 $\Delta h = 0 \mu\text{m}$ の時、損失と偏差は $\Delta h = -2 \mu\text{m}$ に比べて増加している。これは、V溝とピンの間の隙間を0に設計した場合に生じやすい、プラスの Δh の影響を受けているためと考えられる。 $\Delta h = -4 \mu\text{m}$ の時、外側のコア程、損失の偏差が大きくなっている。これは、 Δh の減少による回転の影響を受けていると考えられる。そして、 $\Delta h = -2 \mu\text{m}$ の時は、全てのコア位置において、損失と偏差が低減されていることが分かる。以上より、V溝とピンの寸法精度の影響を低減するには、適切な隙間を設定することが重要であることが分かった。例えば、V溝とピンの寸法精度が $\pm 1 \mu\text{m}$ の場合、 $\Delta h = -2 \mu\text{m}$ に設定することが望ましい。

表 4.1 ずれに対するランダム接続損失

	$\Delta h = -4 \mu\text{m}$			$\Delta h = -2 \mu\text{m}$			$\Delta h = 0 \mu\text{m}$		
	#0: 0 μm	#1: 40 μm	#2: 80 μm	#0: 0 μm	#1: 40 μm	#2: 80 μm	#0: 0 μm	#1: 40 μm	#2: 80 μm
Avg. (dB)	0.25	0.23	0.36	0.24	0.20	0.32	0.25	0.21	0.39
Max. (dB)	0.45	0.54	0.75	0.35	0.35	0.40	0.47	0.53	0.62
Min. (dB)	0.11	0.05	0.12	0.05	0.06	0.23	0.08	0.03	0.23
Std. (dB)	0.07	0.11	0.19	0.06	0.08	0.04	0.09	0.11	0.08

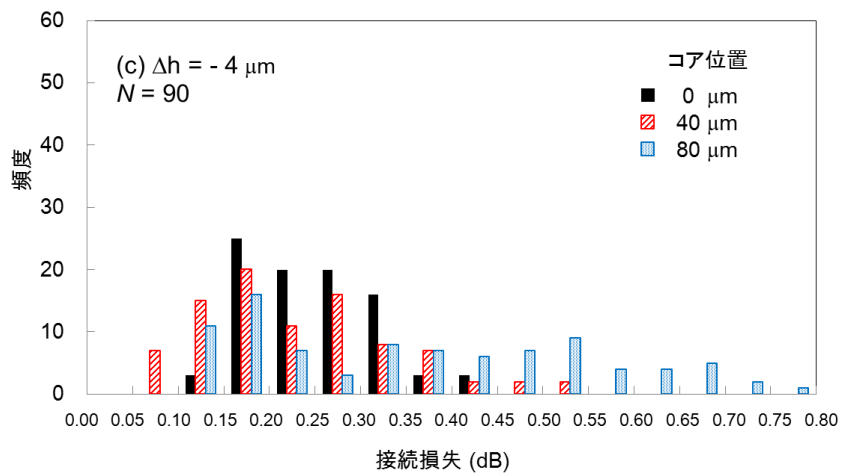
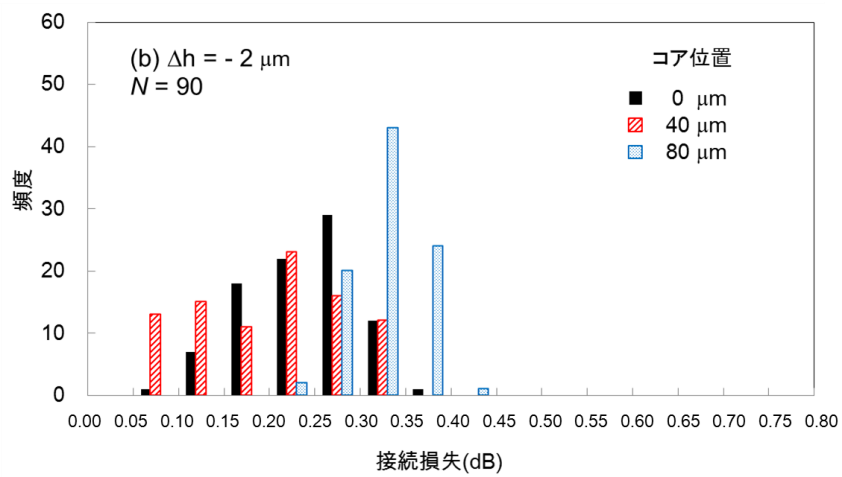
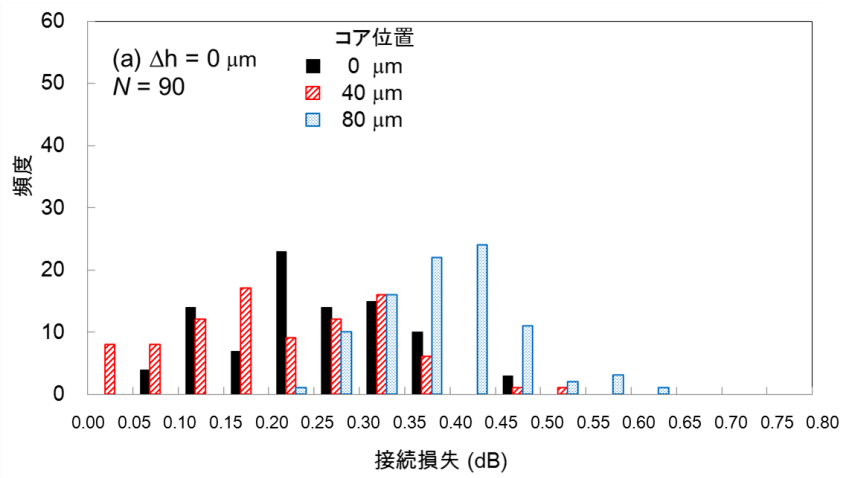


図 4.15 ランダム接続損失のヒストグラム

続いて、反射減衰量を測定した。図 4.16 に測定系を示す。Fan-in デバイス自体の反射特性の影響を除去するために、3CF の各コアに順番に SMF を融着し、反射減衰量を測定した。着脱回数は 30 回である。図 4.17 に反射減衰量のヒストグラムを示す。コア位置によらず、50 dB 以上の反射減衰量であることから、全てのコアでフィジカルコンタクトしていることが確認できる。

図 4.18 に Telcordia GR-326 に準拠したヒートサイクル特性を示す。図中の実線、破線、及び点線はコア位置が 0、40、および 80 μm の時の波長 1550 nm における測定結果を示す。図より損失変動量はコア位置に依らず、0.05 dB 以下であることから、回転方向の調心が温度変化に対しても安定していることが分かる。

以上より、寸法精度を考慮した V 溝付きフェルルールとピン付き割スリーブを用いることで、提案した MCF コネクタは低接続損失かつ高い再現性を実現することを明らかにした。

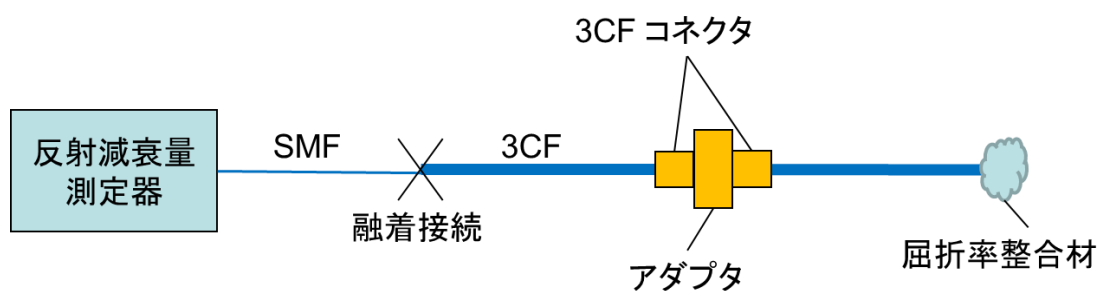


図 4.16 反射減衰量の測定系

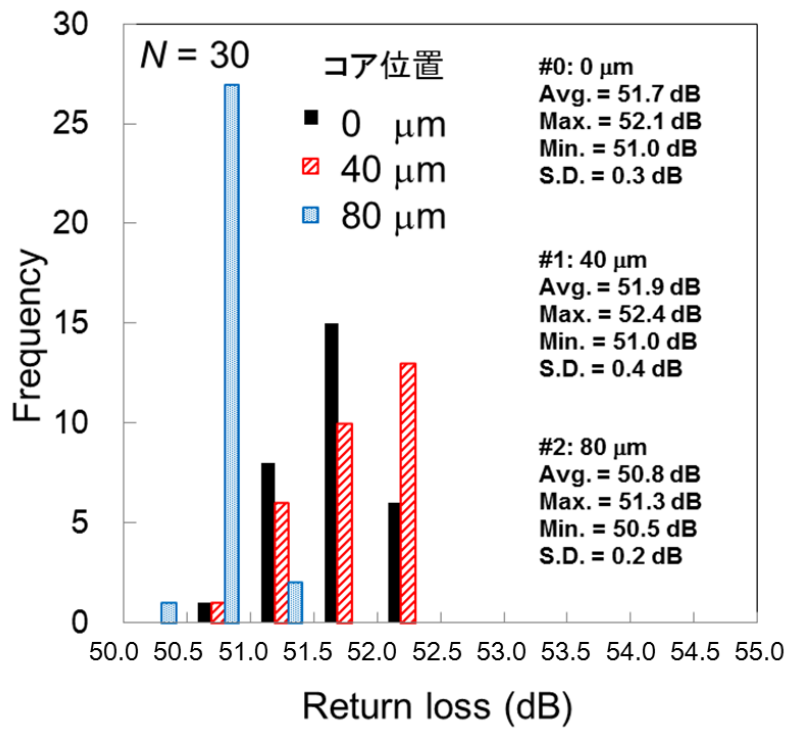


図 4.17 反射減衰量のヒストグラム

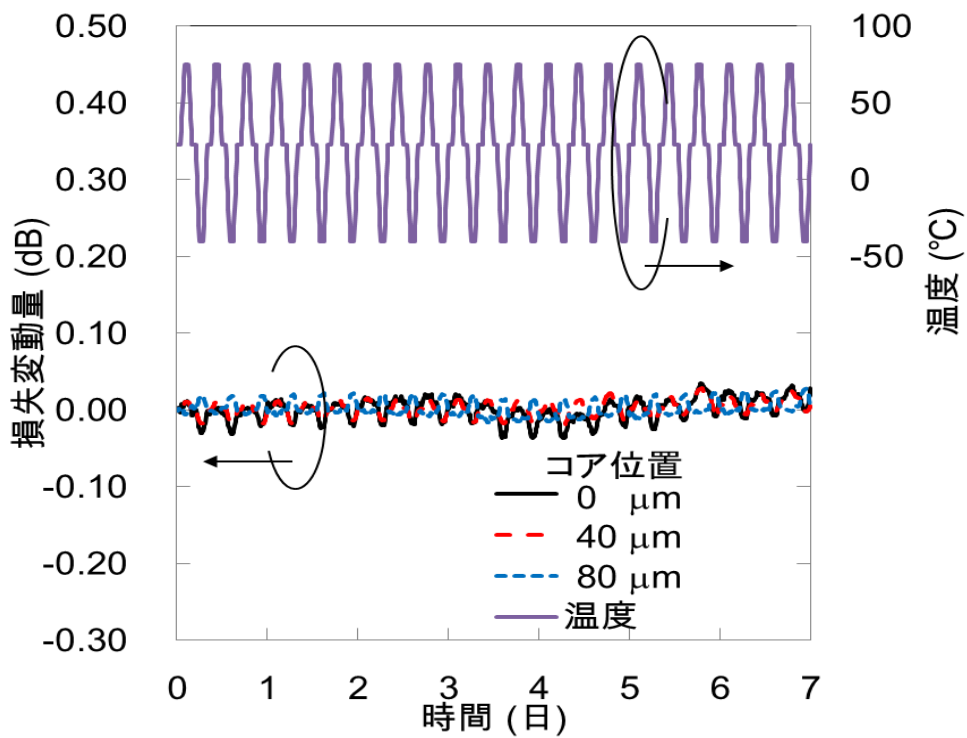


図 4.18 ヒートサイクル特性

4.5 まとめ

V溝付きフェルールとピン付き割スリーブを用いたMCFコネクタを提案した。提案コネクタはフェルールをスリーブへ挿入する際にV溝をピンに沿って嵌合させることで、高精度な回転角度の調心を可能にした。その結果、フェルールとスリーブの嵌合部分でMCFのコアを全ての調心軸に対し直接調心するので、フロート構造を維持し、プラグやアダプタのコネクタ部材の寸法精度を不要にした。コア位置80 μmのMCFを0.5dB以下の損失で接続できることを確認した。V溝とピンの寸法精度を考慮することで、より安定な接続特性を実現した。また、温度変化に対しても安定して低い接続損失を維持できることを確認した。本提案コネクタは、フェルールと割スリーブを用いる様々な種類のコネクタに簡単に適用でき、任意のコア配置のMCFに対応することが可能である。

第5章 結論

本研究では、FTTHの更なる普及と将来の超大容量伝送の実現に向けて、HAFとMCFなどの新構造の光ファイバの接続技術を示した。HAFやMCFなどの従来のSMFとは導波構造の異なる新構造光ファイバの接続において、新構造ファイバ特有の接続損失要因を明らかにし、それを低減する接続技術を提案した。以下に本研究の成果を要約する。

第1章では、本研究の背景、新構造ファイバの特徴、従来光ファイバの損失要因と現状の光ネットワークにおける接続技術を示した。

第2章では、HAFを接続するために必要となる固形状の屈折率整合剤の光ファイバの撓みを利用した接続技術への影響とその長期信頼性を明らかにした。

- (1) 撓みモデル通りに所望の押圧力が得られ、曲げ損失を低減した撓み幅と撓み長の条件を実験的に導出した。さらにこの撓みの条件は、温度変化を考慮すると、低温時に部材の収縮により生じる曲げ損失に、より制限されることを明らかにした。
- (2) 接続損失を0.4dB以下にする整合剤の硬さと光ファイバの撓みの条件を導出した。
- (3) 環境試験において、IECに準拠した規格試験を行ない、安定した光学特性であることを明らかにした。
- (4) 加速劣化試験において、規格試験を遥かに超える140°Cの高温環境下においても、整合剤単体のみの安定した特性だけでなく、整合剤を通してファイバが接続された状態に対して、接続損失0.5dB以下、反射減衰量40dB以下の安定した光学特性が維持できることを確認した。
- (5) ファイバを接続させる前の整合剤に対し、110、130、及び140°Cの高温の加速劣化を行なった。その結果、繰り返し挿抜を行なうと故障モードが発生し、アレニウスモデルを利用し、60°Cの環境下において68年近く、光学特性を維持できることを明らかにした。

第3章では、HAFのメカニカルスプライスに必要な固形状の屈折率整合剤の設計条件を明らかにした。

- (1) 固形状の屈折率整合剤を用いたメカニカルスプライスにおいて、モード結合損失を0.05dB以下とする整合剤の空孔への浸入長さや屈折率の条件を導出した。さらに、40

dB以上の反射減衰量を維持できる屈折率と屈折率の温度係数の条件を導出した。

- (2) 適切な屈折率と温度係数を持った固形状の屈折率整合剤を利用することで、SMF接続と同等のHAF接続を初期特性とヒートサイクル特性において実現できることを明らかにした。

第4章では、MCFのコネクタ接続に必須である外力が接続点に作用しない構造とファイバ長手方向を軸とした回転角度の高精度な調心を両立したコネクタを示した。

- (1) フェルールをスリーブへ挿入する際にV溝をピンに沿って嵌合させることで、高精度な回転角度の調心を可能にした。その結果、フェルールとスリーブの嵌合部分でMCFのコアを全ての調心軸に対し直接調心するので、フロート構造を維持し、プラグやアダプタのコネクタ部材の寸法精度を不要にした。
- (2) コア位置80 μm のMCFを0.5 dB以下の損失で接続できることを示した。
- (3) V溝とピンの寸法精度を考慮することで、より安定な接続特性を実現した。
- (4) 温度変化に対しても安定して低い接続損失を維持できることを示した。

これまで述べたように、HAFやMCFなどの従来のSMFとは導波構造の異なる新構造光ファイバの接続において、新構造ファイバ特有の接続損失要因を明らかにし、その損失を低減する接続技術を確立することは、新構造ファイバのネットワークへの適用に大変重要である。HAFを接続するための固形状の屈折率整合剤を用いた接続技術を確立したが、2014年7月から、宅内における現場組立ターミネーションとして使用が開始され、実用化に寄与している。また、MCFコネクタは、積極的な研究がされている中、シンプルな構成で、圧倒的な調心精度を有していることから、今後のMCFコネクタへの幅広い適用に期待がされる。本研究は、新構造光ファイバを用いた次世代のネットワークの構築に期待できる。

付録 新たな現場組立接続技術

6.1 はじめに

FTTH の普及に伴い、メカニカルスプライスや現場組立コネクタなどの現場組立接続技術が多用されている。現場組立コネクタは、現場でケーブル長さを自由に变化できるため、様々な現場環境に対応することができる。しかしながら、現場作業者は被覆除去・アルコール清掃時などにガラス部分である裸ファイバを取り扱う必要があるため、接続作業を正しく注意深く行わなければならない。例えば、裸ファイバを取り扱う時に、ガラス表面に傷をつけてしまう場合がある。その場合、設置後すぐにはではなく、時間が経過した後、光ファイバが断線してしまい、現場組立コネクタの故障につながることもある。そのため、現場組立コネクタの故障リスクの低減のためには、裸ファイバを取り扱う必要のない接続方法が求められる。

上記の故障リスク削減を目的に、我々は、被覆付き光ファイバ接続技術に取り組んでいる[6.1]。これまでの検討では、80 μm クラッド径の 125 μm 被覆径の細径の 80/125 μm の被覆付き光ファイバを対象に、被覆付き光ファイバを直接カットし、キャピラリーの中で位置合わせし、被覆付き光ファイバの直接接続が確認されている[6.2, 6.3]。しかしながら、この方法で、125/250 μm の被覆付き光ファイバに適用する場合は、被覆層厚が大きくなることで、偏心が大きくなり、軸ずれによる損失が増大する。そのため、125/250 μm の被覆付き光ファイバを対象とした低損失な被覆付き光ファイバ接続技術が求められていた。

本章は、125/250 μm の被覆付き光ファイバを対象とした新しい被覆付き光ファイバ接続技術を提案する[6.1]。さらに、本接続技術は、 -10°C ~ 40°C の作業温度環境下で、低損失接続ができる技術を目指す。その技術実現のために、まず、被覆付き光ファイバの被覆除去力の温度依存性を実験で明らかにする。次に、本接続技術の 2 つのキー技術である、被覆付き光ファイバの切断技術と接続部品内での被覆除去技術について詳細に述べる。その後、それらの技術を取り入れたメカニカルスプライスを試作し、 -10°C ~ 40°C の作業環境下で組立実験を実施し、その性能を確認する。

6.2 被覆付接続技術

現場組立接続技術のための新たな被覆付接続技術を提案する。図 6.1 に従来技術、これまでの技術、及び今回の技術の接続作業工程を示す。従来技術では、①メカニカルストリッパーでの被覆除去、②エタノールをついたコットンでの裸ファイバの清掃、③カッターでの切断、④接続物品内での突合せ接続の工程を経て、接続される。この時、現場作業者が誤った接続作業を行なうと接続特性が劣化する。特に、裸ファイバは慎重に取り扱わないとファイバに傷を付け破断させる恐れがある。一方、これまでの技術では、①被覆が付いたままファイバの切断、②接続物品での被覆が付いたままでの突合せ接続になる。新たな技術では、①被覆がついたままファイバの切断、②接続物品内への挿入時の押圧力による自動的な被覆の除去と裸ファイバの突合せ接続になる。そのため、被覆付の接続技術の場合、作業者は裸ファイバを取り扱わないので、作業の簡易化と破断リスクの削減に繋がる。

しかしながら、これまでの技術では、課題が残されていた。表 6.1 に各接続技術の特徴を示す。現場組立接続技術が適用されている領域では、クラッド径が 125 μm 、被覆径が 250 μm の 125/250 μm ファイバが使用されている[6.4]。これまでの技術では細径の 80/125 μm の SMF に対しては調心することができたが、125/250 μm には適用することは出来ない。それは、被覆層厚が大きくなることで、偏心が大きくなり、軸ずれによる損失が増大するためである。一方、新たな技術では調心を裸ファイバに対して行なうため、裸ファイバを取り扱うことなく 125/250 μm の SMF を接続することができる。

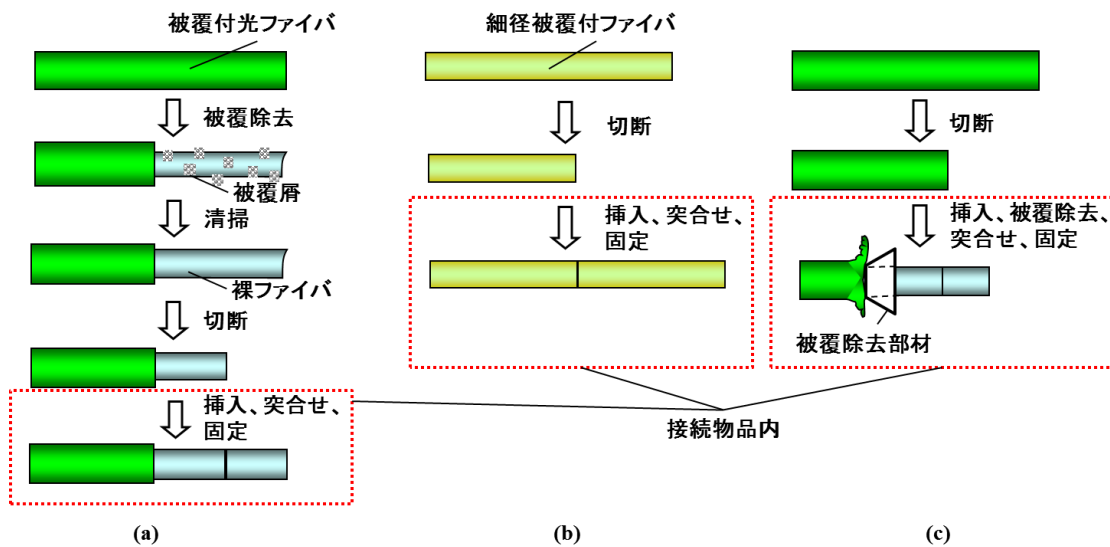


図 6.1 光接続の作業工程;(a)従来技術、(b)これまでの技術、(c) 本提案技術

表 6.1 接続技術の比較

	従来技術	これまでの技術	新たな技術
ファイバ	125/250 μm SMF (MMF)	80/125 μm SMF (MMF)	125/250 μm SMF (MMF)
切断	曲げ曲げ方式	曲げ方式	引張方式
除去	メカニカルストリッパ	除去不要	被覆除去部材
調心	V溝での裸ファイバの調心	キャピラリーでの被覆付きファイバの調心	V溝での被覆が除去された裸ファイバの調心
接続作業工程	被覆除去 清掃 切断 挿入 固定	切断 挿入 固定	切断 挿入 固定
利点	様々な環境下の光配線に適している	簡単で信頼性の高い接続作業	簡単で信頼性の高い接続作業
課題	スキルを必要とする接続作業	125/250 μm SMFへ適用困難	—

6.3 被覆付接続技術の開発

6.3.1 被覆の特徴

被覆付接続は、屋外作業環境下で行われるため、 -10°C から 40°C の広い温度環境下で、接続が達成されなければならない。まず、被覆の硬さの温度依存性を確認した。 -10 、 20 、及び 40°C の作業温度環境下で、通常使用されているメカニカルストリッパーを用いて、被覆を除去し、被覆除去力を測定した[6.5]。図 6.2 及び図 6.3 に測定系と被覆除去力の測定結果を示す。ここで、 20°C における被覆除去力の平均値で被覆除去力を割ったものを規格化被覆除去力と定義した。図 6.3 より温度が低くなるほど、除去力が増加していることが分かる。また、 20°C の場合の被覆除去力の平均値は、 40°C の場合が 0.7 倍、 -10°C の場合が 1.5 倍であった。このため、被覆の硬さの温度依存性によって、被覆付の切断や除去に影響を与える可能性がある。

被覆付接続技術の実現には、広い作業環境下において変化する被覆の硬さ等の状態にも対応して、被覆付のまま切断する技術と接続物品内での被覆除去技術の確立が必要となる。

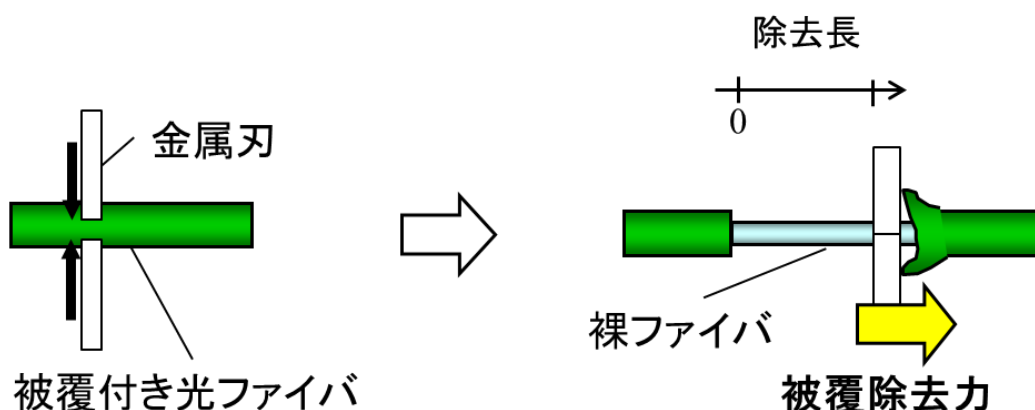


図 6.2 被覆除去の測定系

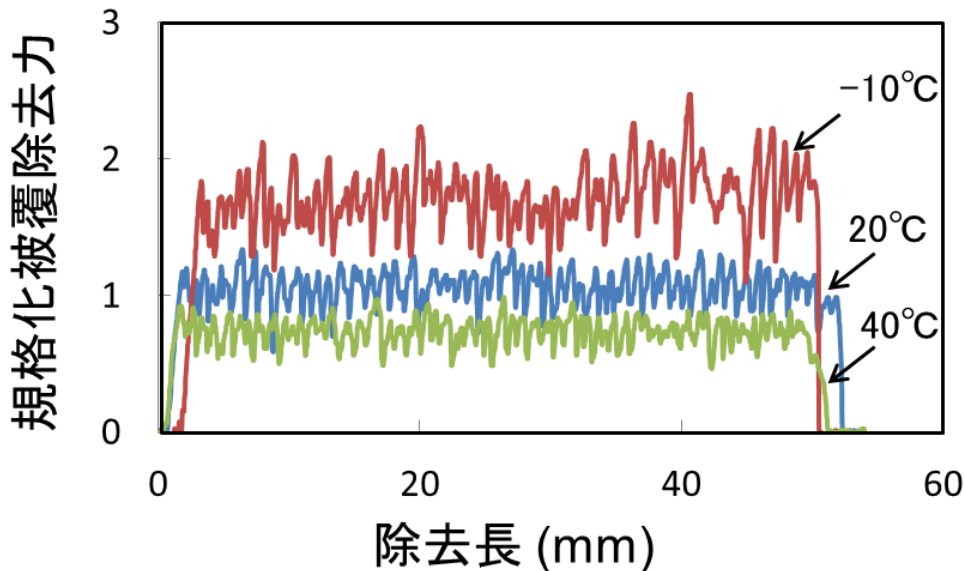


図 6.3 被覆除去力の測定結果

6.3.2 被覆付き切断技術

まず、良好な接続特性を実現する光ファイバの切断面について説明する。図 6.4 は被覆付光ファイバの様々な切断面の状態を示す。4つの状態がある。砕けは完全に不均一な端面であり、ハックルと傷は一部不均一な端面である。ミラー端面は完全に均一で平らである。このミラー端面が接続には必要であり、このミラー端面を得る切断技術を検討する。

ファイバの切断には、曲げ方式と引張方式の2種類ある。図 6.5 に(a)曲げ方式と(b)引張方式の切断工程を示す。曲げ方式では、①クランプでのファイバの把持、②刃のスライドによる加傷、③傷と反対側からの枕による押し曲げ、これらの結果、ファイバは切断される。引張方式では、①クランプによるファイバの把持、②引張によるファイバへの応力付与、③刃のファイバへの垂直な加傷、これらの結果、ファイバは切断される。

続いて、これら2つの方式を用いて、カッターを試作した。図 6.6 に(a)曲げ方式のカッター、(b)引張方式のカッターの写真を示す。曲げ方式のカッターのサイズは、6.0×9.0×6.0 cm、引張方式は、10.5×14.0×10.5 cmであった。これらのカッターを用いて、-10、20、及び40℃において被覆付きファイバを切断し、端面を観察した。表 6.2 に成功した端面の割

合を示す。ここで、成功端面はミラー端面の場合である。曲げ方式では、20 °C において、ミラー端面は得られているが、-10 や 40 °C において悪い端面が形成された。一方、引張方式では、全ての温度において、ミラー端面が得られた。これは、曲げ方式の場合、温度の変化に伴い被覆の硬さが変わり、適切な傷の深さで加傷されなくても押し曲げられてしまうために、ミラー端面が得られなかったと考えられる。引張方式の場合、予め引張応力が加えられているので、刃が垂直にファイバに入ることで、適切な傷の深さになったところで、自動的に切断されたと考えられる。

以上より、切断技術において、引張方式は被覆の硬さに依存しないため、広範囲の温度範囲で被覆付きファイバを切断するのに適していることが分かった。

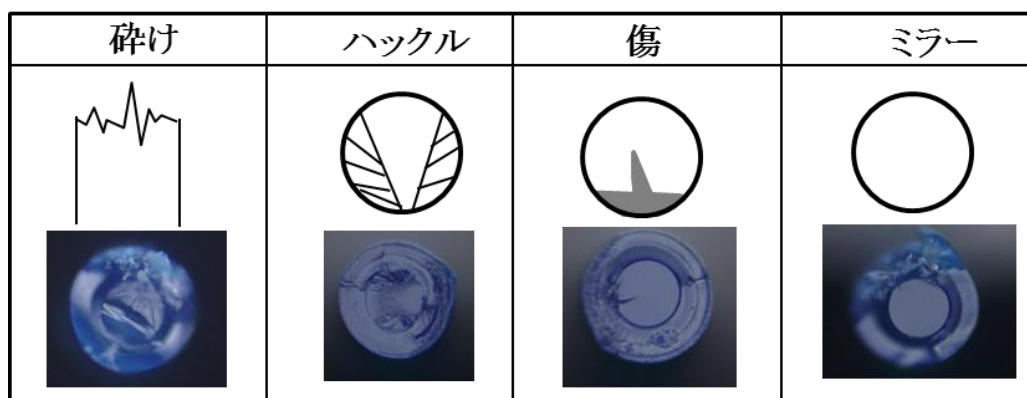


図 6.4 被覆付きファイバの切断面

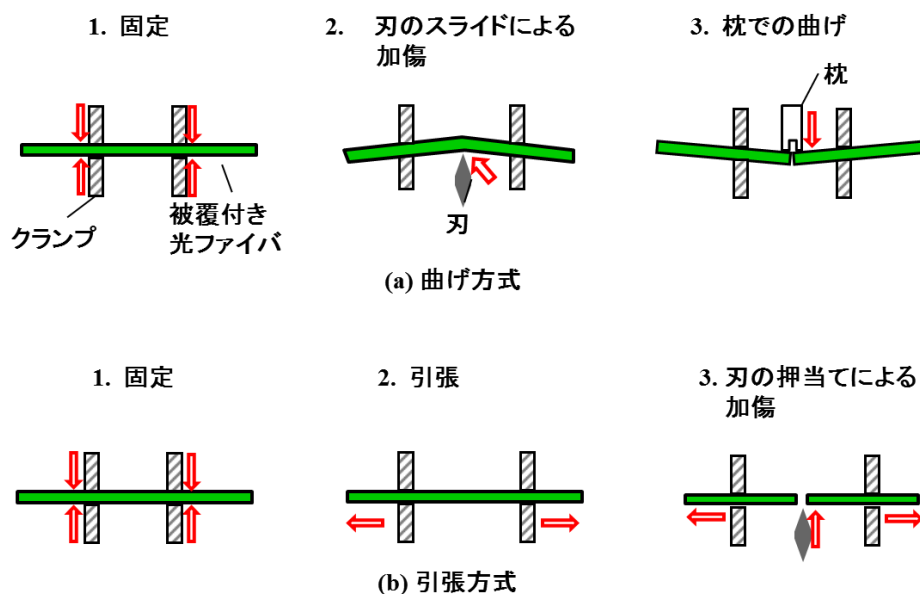
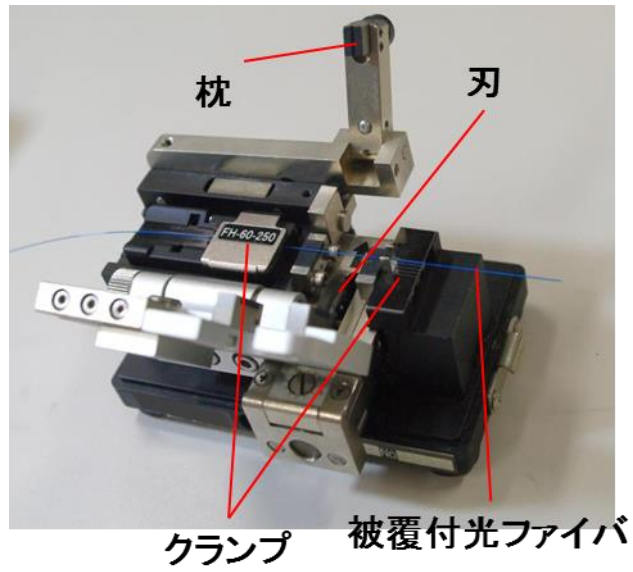


図 6.5 被覆付きファイバの切断方法 (a)曲げ方式、(b) 引張方式



(a) 曲げ方式のカッター



(b) 引張方式のカッター

図 6.6 試作した被覆付き光ファイバカッターの外観
(a) 曲げ方式、(b) 引張方式

表 6.2 被覆付き光ファイバ切断の成功率

温度	-10 °C	20 °C	40 °C
曲げ方式	60%	100%	60%
引張方式	100%	100%	100%

6.3.3 被覆除去技術

現状の現場組立作業において、作業者は、接続物品の外で、メカニカルストリッパーを用いて被覆を除去する。提案技術では、図 6.7 に示すように、接続物品の中に、被覆除去部材とファイバガイドを組み込み、ファイバ挿入時の押圧力によって、被覆を除去する。接続物品内で効率よく被覆を除去するためには、2 つの重要な要素がある。1 つ目は、ファイバガイドを利用することで、被覆除去に十分な押圧力を得ることである。2 つ目は、被覆除去部材部分での被覆除去に必要な力を低減させることである。

まず、十分な押圧力を得る方法について説明する。被覆は、接続物品にファイバを挿入する際に除去される。この挿入により被覆を除去する押圧力を得る。押圧力はファイバの撓み幅によって制限されるので、ファイバが撓み過ぎないようにガイドを利用する。図 6.8 は撓みによる押圧力の計算値である。この結果を利用し、被覆除去に必要な押圧力が得られるように、撓み幅を設定する。例えば、低温時に除去するのに 10 N 必要な場合は、撓み幅を 1.8 mm 以下に設定する。

次に、被覆除去力を低減させる方法について説明する。被覆除去部材の形状は重要となる。表 6.3 に異なる被覆除去部材の模式図と被覆除去力の一例を示す。20 °C において通常の被覆除去方法にあたるメカニカルストリッパー、円筒、円錐形状の被覆除去力を測定した。ここで、被覆除去力の最大値を円錐形状の被覆除去力の最大値で割ったものを規格化被覆除去力とした。表より、円筒形の被覆除去部材はメカニカルストリッパーと同程度である。円錐形状は円筒形状のおよそ 1/4 の除去力である。これは、被覆が円錐の側面で引き伸ばされ、ファイバの半径方向にも力が働いたためと考えられる。

以上より、適切な撓み幅を設定することで被覆除去に十分な押圧力を得て、円錐形状の被覆除去部材を用いることで、被覆除去力を低減させることが出来る。その結果、効果的に被覆を除去できると考えられる。

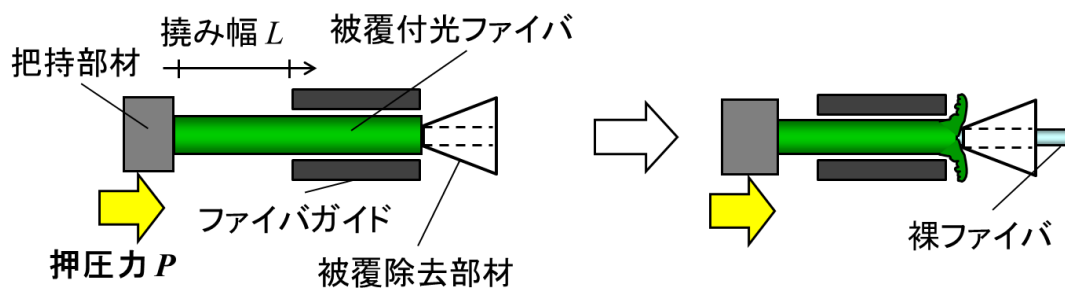


図 6.7 被覆除去部材による被覆除去の模式図

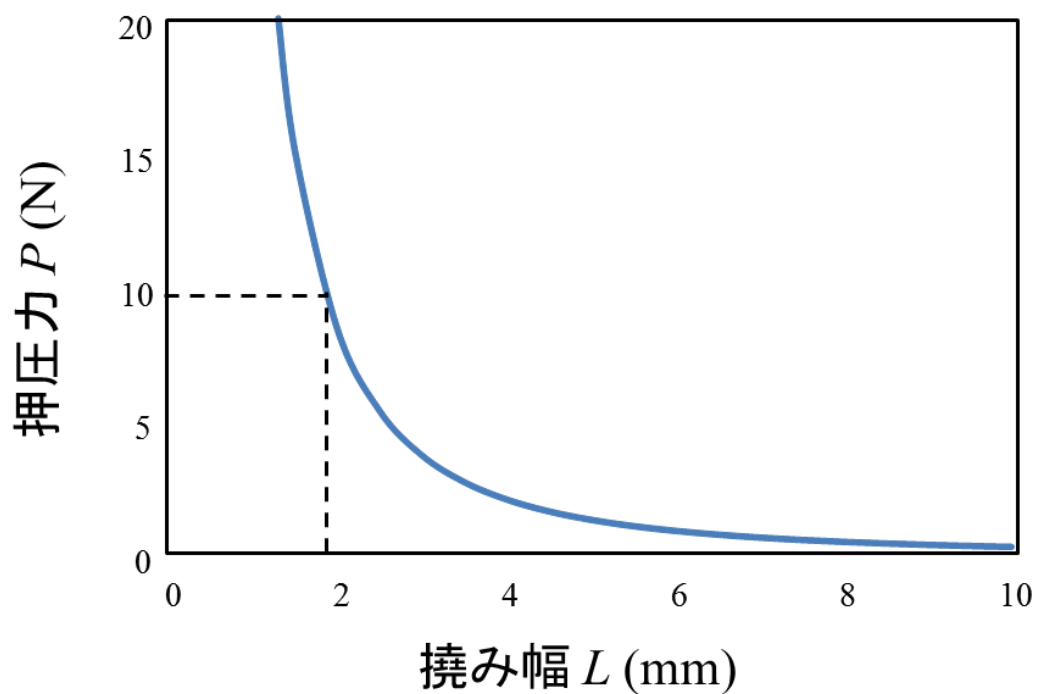
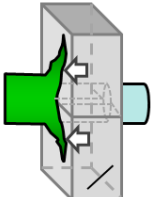
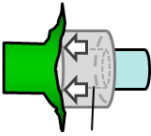
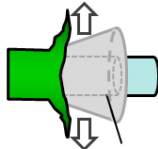


図 6.8 計算による押圧力

表 6.3 被覆除去技術における除去部材の形状と被覆除去力

除去方法	メカニカル ストリッパー (従来の 除去方法)	円筒形の 被覆除去部材	円錐形の 被覆除去部材
形状	 メカニカルストリッパー	 円筒形の 被覆除去部材	 円錐形の 被覆除去部材
規格化 被覆除去力	4.2	4.1	1.0

6.3.4 被覆付きメカニカルスプライス特性

上記で述べた提案技術を用いて、125/250 μm の被覆付き光ファイバ用のメカニカルスプライスを試作した。図 6.9 に試作したメカニカルスプライスの構造を示す。被覆除去部材以外は従来のメカニカルスプライスと同じ構造である。続いて、-10、20、及び 40 $^{\circ}\text{C}$ の作業温度環境下で、メカニカルスプライスを組立て、波長 1310 nm における接続損失と反射減衰量を測定した。各温度において、18 サンプルずつの測定であった。図 3.12 に結果を示す。全ての温度において、接続損失は 0.11 dB 以下であり、反射減衰量は 50 dB 以上であった。以上より、我々の 125/250 μm の被覆付き接続技術は、広い温度範囲において、被覆付き切断と被覆除去を実現し、良好な接続特性を得ることができた。

また、ヒートサイクル特性も確認した。-10、20、及び 40 $^{\circ}\text{C}$ の作業温度環境下で組み立てたメカニカルスプライスに対し、各温度において 6 つのサンプルの特性を評価した。図 3.13 に Telcordia GR-326 に基づいたヒートサイクルの結果を示す。全てのサンプルにおいて、損失変動量は 0.1 dB 以下であった。以上より、-40 から 75 $^{\circ}\text{C}$ の温度変化に対しても安定した接続特性を維持できることを示した。

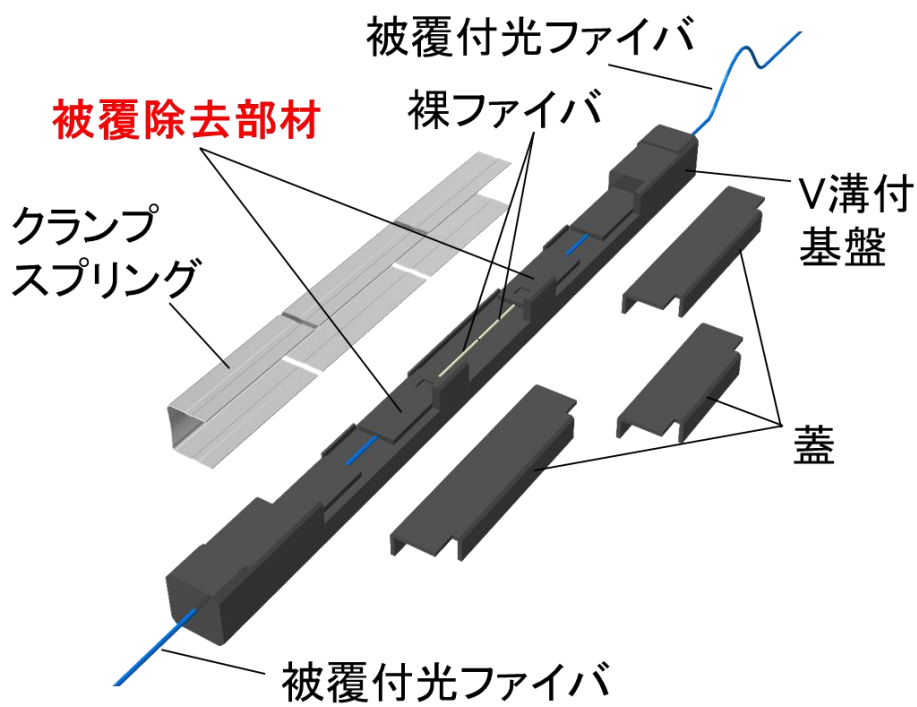


図 6.9 試作した被覆付メカニカルスプライスの構造

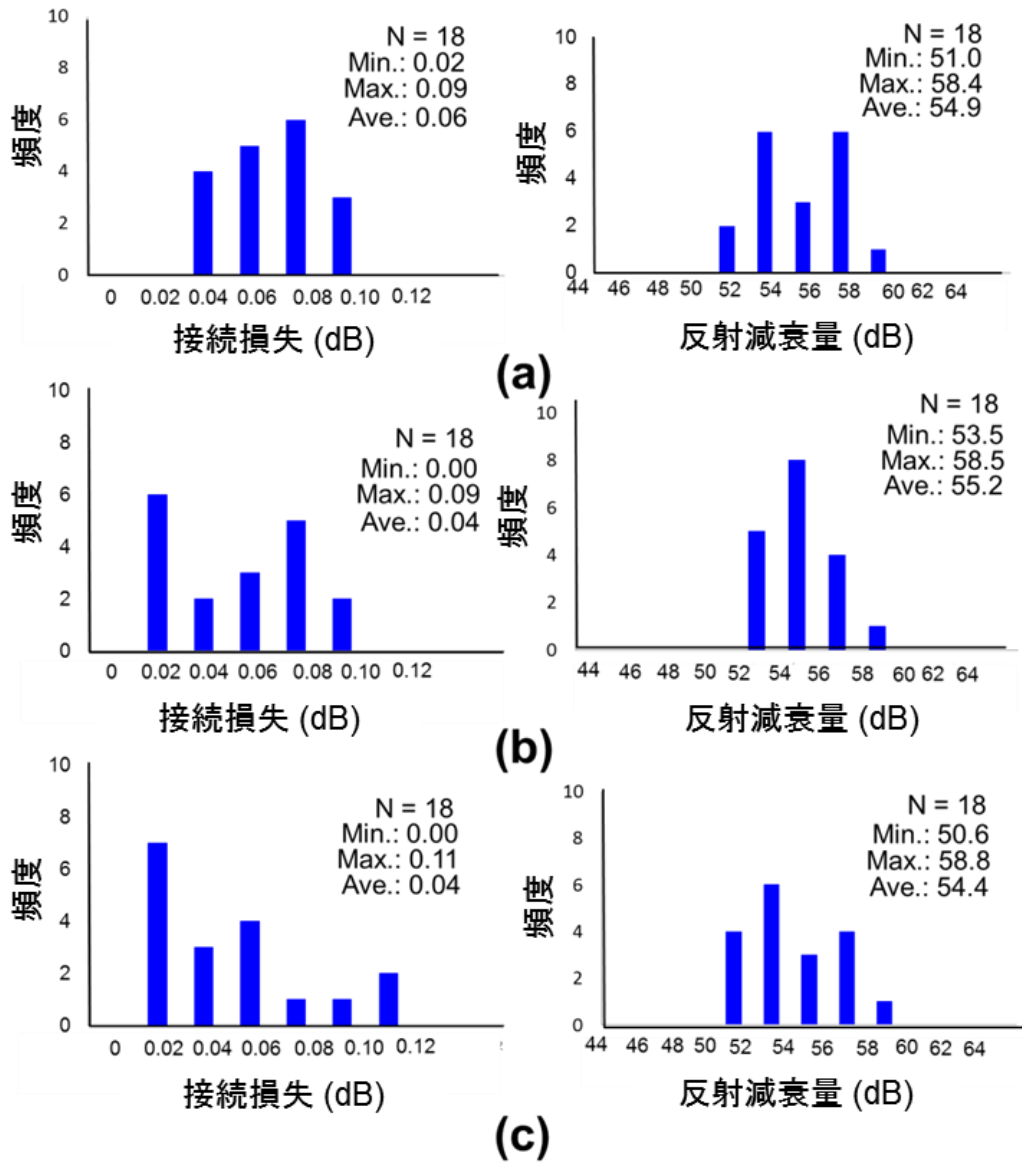


図 6.10 (a) -10 °C、(b) 20 °C、及び (c) 40 °C で組立てられたメカニカルスプライスの接続損失と反射減衰量

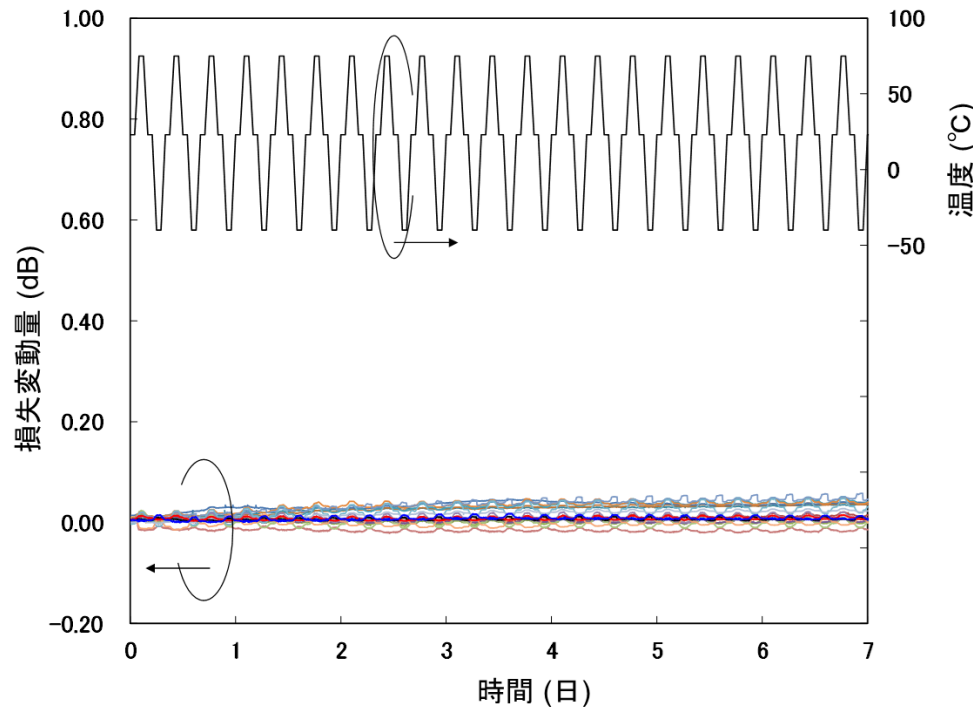


図 6.11 ヒートサイクル特性

6.4 まとめ

裸ファイバを取り扱う必要のない 125/250 μm 被覆付き光ファイバの新たな現場接続技術を提案した。提案技術は、 -10 から 40 $^{\circ}\text{C}$ の広い作業温度範囲において、低接続損失を実現した。被覆付き光ファイバ接続技術において、被覆付き切断技術と被覆除去技術という 2 つのキー技術を開発した。被覆付き切断技術において、予め引張応力を付与しながら刃をファイバに垂直に入れる引張方式を適用することで、 -10 から 40 $^{\circ}\text{C}$ の広い作業温度範囲で、ミラー端面を実現した。また、被覆除去技術において、接続物品内で効果的に被覆を除去するために、十分な押圧力を得つつ被覆除去力を低減させる技術を検討した。十分な押圧力を得るために撓み幅を制御し、被覆除去力を低減させるために、円錐状の形状の被覆除去部材を採用した。これらの技術に基づいて試作したメカニカルスプライスは、 -10 から 40 $^{\circ}\text{C}$ の広い作業温度範囲での組立で、 0.11 dB 以下の低い接続損失と 50 dB 以上の高い反射減衰量を実現した。さらに、 -40 から 75 $^{\circ}\text{C}$ の温度変化に対しても安定した接続特性を維持できることを示した。

参考文献

第 1 章

- [1.1] K. Himeno, S. Matsuo, N. Guan, and A. Wada, "Low-bending-loss single-mode fibers for fiber-to-the-home," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 23, No. 11, pp. 3494-3499, 2005.
- [1.2] K. Ieda, K. Nakajima, T. Matsui, I. Sankawa, T. Shitaba, S. Ikeda, K. Tajima, K. Shiraki, S. Tomita, and T. Haibara, "Characteristics of bending loss optimized hole assisted fiber," *Opt. Fiber Technol.*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-9, 2008.
- [1.3] M. J. Li, P. Tandon, D. C. Bookbinder, S. R. Binckham, M. A. McDermott, R. B. Desorcie, D. A. Nolan, J. J. Johnson, K. A. Lewis, and J. J. Englebert, "Ultra-low bending loss single-mode fiber for FTTH", *IEEE J. Lightw. Technol.*, vol.27, no.3, pp.376-382, 2009.
- [1.4] L-A. de Montmorillon, F. Gooijer, N. Montaigne, S. Geerings, D.Boivin, L. Provost, and P. Sillard, "All-solid G.652.D fiber with ultra low bend losses down to 5 mm bend radius," *Proc. of OFC '09, OTuL3*, 2009.
- [1.5] K. Nakajima, T. Shimizu, C. Fukai, T. Kurashima, and M. Shimizu, "Single-mode hole-assisted fiber with low bending loss characteristics," in *Proceedings of 58th International Wire and Cable Symposium (IWCS)*, pp. 264-269, 2009.
- [1.6] S. Aozasa, Y. Enomoto, H. Oohashi, and Y. Azuma, "Highly Reliable Optical Fiber Distribution Facilities in Central Office Employing Single-mode Hole-assisted Fiber Cord," in *Proc. IWCS'10*, pp. 126-132, 2010.
- [1.7] K. Kuramoto, H. Minami, M. Ida, T. Shimizu, A. Daido, Y. Aoyagi, and K. Takamizawa, "Flexible optical wiring technology for existing buildings," in *Proc. IWCS'12*, pp. 513-516, 2012.
- [1.8] P. J. Winzer, "Optical networking beyond WDM," *IEEE Photon. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 647-651, 2012.

- [1.9] T. Morioka, Y. Awaji, R. Ryf, P. J. Winzer, D. Richardson, and F. Poletti, “Enhancing optical communications with brand new fibers,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 2, pp. s31-s42, Feb. 2012.
- [1.10] K. Nakajima, Y. Goto, and S. Tomita, “Recent Progress on Multi-Core Fiber,” in *Proc. OECC2012*, 5C1-5 2012.
- [1.11] D. Marcuse, “Loss analysis of single-mode fiber splices,” *Bell Syst. Tech. J.* 56 (5), pp. 703–718, 1977.
- [1.12] 畠山, 土屋, “放電による光ファイバ融着接続,” 電子情報通信学会技術報告, OQE76-27, 1976.
- [1.13] R. Nagase, E. Sugita, S. Iwano, K. Kanayama, and Y. Ando, “Miniature optical connector with small zirconia ferrule,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, No. 11, pp. 1045–1047, 1991.
- [1.14] E. Sugita, R. Nagase, K. Kanayama, and T. Shintaku, “SC-type single-mode optical fiber connectors,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 7, pp. 1689–1696, 1989.
- [1.15] T. Satake, S. Nagasawa, and R. Arioka, “A new type of a demountable plastic molded single mode multifiber connector,” *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4, pp. 1232–1236, 1986.
- [1.16] M. Takaya, T. Katagiri, S. Nagasawa, Y. Murakami, and S. Hatano, “Design and Development of Optical Fiber Joining Techniques for Efficient Construction of Aerial Distribution Cable Systems,” *IEEE Transaction on Advanced Packing*, Vol. 23, No. 1, pp. 36-41, 2000.
- [1.17] T. Nakajima, K. Terakawa, M. Toyonaga, and M. Kama, “Development of optical connector to achieve large-scale optical network construction,” *Proc. of the 55th IWCS*, pp. 439–443, 2006.
- [1.18] K. Hogari, R. Nagase, and K. Takamizawa, “Optical connector technologies for optical access networks,” *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E93-C, No. 7, pp. 1172–1179, 2010.

第2章

- [2.1] H. Aoyama, H. Tanaka, Y. Hoshino, and Y. Oda, “Optical Wiring Technology for Home Networks for a Service-ready and Low-Cost FTTH Service,” NTT Technical Review, Vol. 3, no. 4, pp. 33–37, 2005.
- [2.2] I. Sankawa, T. Satake, N. Kashima, and S. Nagasawa, “Fresnel Reflection Reducing Methods for Optical Fiber Connector with Index Matching Material,” IEICE, B 67(12), p1423-1430, 1984.
- [2.3] K. Saito, R. Koyama, Y. Abe, K. Nakajima, and T. Kurashima, “Optimum mechanical splice conditions for fiber with hole-assisted structure,” in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), NThB5, 2010.
- [2.4] 小林, 浅川, 平山, 阿部, 肥田, 小湊, 郷, 河合, 住田, “光ボード実装用ファイバマネージメント技術の検討,” 信学論, Vol. J84-C, No. 9, pp. 774-783, 2001.
- [2.5] 岩谷, 岡田, 川島, 吹田, 中山, 平野, 福井, 村上, 「基礎材料力学」, 初版, 槇書店, 1996.
- [2.6] ITU-T Recommendation G.657, 2009.
- [2.7] Y. Ando, M. Usui, N. Sato, and K. Katsura, “Multiport optical bare-fiber connector for parallel optical interconnect module,” IEICE Trans. Electron., Vol. E82-C, No. 1, pp. 72-80, 1999.
- [2.8] JIS K 6253, 2012.
- [2.9] IEC 60874-1 Fibre optic interconnecting devices and passive components - Connectors for optical fibres and cables - Part 1: Generic specification, 2011.
- [2.10] H. Hanafusa, S. Sumida, and N. Takato, “long-term reliability of silica-base planar lightwave circuit devices,” Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 531, pp. 349-358, 1998.
- [2.11] H. Watanabe, N. Araki, and H. Fujimoto, “Highly Reliable PON Optical Splitters for Optical Access Networks in Outside Environments,” IEICE TRANS. Electron. , Vol. E93-C, No.7, pp.1180-1190, 2010.
- [2.12] JIS Z 0237, 2009.

第3章

- [3.1] 小山, 齊藤, 阿部, 星島, “空孔アシストファイバ用メカニカルスプライスにおける損失要因,” 信ソ大, B-13-16, 2008.
- [3.2] Y. Abe, T. Hoshijima, T. Matsui, and S. Tomita, “Optical characteristics and reliability of mechanical splice utilizing solid refractive index matching material for hole-assisted fiber connection,” *Photon. Technol. Lett.*, Vol. 21, No. 4, pp. 194-196, 2009.
- [3.3] 阿部, 星島, 富田, “空孔アシストファイバのメカニカルスプライスの開発,” 信ソ大, B-13-5, 2007.
- [3.4] 齊藤, 小山, 阿部, 中島, 倉嶋, “空孔アシストファイバのメカニカルスプライス損失に関する考察,” 信ソ大, B-13-17, 2009.
- [3.5] 齊藤, 小山, 阿部, 中島, 倉嶋, “メカニカルスプライスの屈折率整合剤に関する考察,” 信ソ大, B-13-5, 2010.
- [3.6] D. B. Mortimore and J. W. Arkwright, “Monolithic wavelength-flattened 1x7 single-mode fused fiber couplers: theory, fabrication, and analysis,” *Appl. Opt.*, Vol. 30, No. 6, pp. 650-659, 1991.
- [3.7] 岡本, 「光導波路の基礎」, 初版, コロナ社, 1992.
- [3.8] M. Born and E. Wolf, “Principles of optics,” Pergamon, New York, 1985.

第4章

- [4.1] N. Suzuki, Y. Iwahara, M. Saruwatari, and K. Nawata, “Ceramic capillary connector for 1.3 μm single-mode fibres,” *Electron. Lett.*, vol. 15, no. 25, pp. 809-811, 1979.
- [4.2] P. J. Winzer, “Spatial Multiplexing: The Next Frontier in Network Capacity Scaling,” in *Proc. of ECOC 2013, We.1.D.1*, 2013.
- [4.3] O. Shimakawa, M. Shiozaki, T. Sano, and A. Inoue, “Pluggable Fan-Out Realizing Physical-Contact and Low Coupling Loss for Multi-Core Fiber,” in *Proc. OFC2013, OM3I.2*, 2013.
- [4.4] K. Watanabe, T. Saito, K. Imamura and M. Shiino, “Development of fiber bundle type fan-out for multicore fiber,” in *Proc. OECC2012, 5C1-2* 2012.

- [4.5] 島川, 荒生, 佐野, 井上, “マルチコアファイバとファンアウトのコネクタ接続,” 信学技報, OFT2012-71, pp. 11-15, 2013.
- [4.6] R. Nagase, K. Sakaime, K. Watanabe and T. Saito, “MU-type multi-core fiber connector,” in Proc. 61st, IWCS, pp. 823-827, 2012.
- [4.7] K. Saito, T. Matsui, K. Nakajima, and T. Kurashima, “Multi-Core Fiber Connector with Precise Rotational Angle Alignment,” in Proc. OECC2014, TH10B-3, 2014.

付録

- [6.1] M. Kihara, T. Shimizu, K. Saito, H. Izumita, and T. Kurashima, “Novel field installable splicing technique for 250 μm diameter coated optical fiber connections,” Proc. of the 62th IWCS, pp. 77–82, 2013.
- [6.2] H. Son, M. Kihara, and S. Tomita, “New easily assembled mechanical splicer for direct coated fiber connection without stripping and cleaning,” Proc. of ECOC 2007, P008, 2007.
- [6.3] M. Kihara, R. Koyama, Y. Abe, H. Son, M. Kobayashi, and S. Tomita, “Novel field installable optical fiber splice and connector for optical access networks,” Optical Fiber Technol., vol. 19, pp. 269–278, 2013.
- [6.4] IEC 60793-2-50, Product specifications – sectional specification for class B single-mode fibers, 2012.
- [6.5] IEC 60793-1-32, Measurement methods and test procedures - Coating strippability, 2010.

発表論文一覧

学術論文誌

- [1] K. Saito, R. Koyama, Y. Abe, K. Nakajima, and T. Kurashima., “Mechanical splice characteristics of hole-assisted fiber,” *J. Lightw. Technol.* , Vol. 30, No. 2, pp. 267-272, 2012.
- [2] K. Saito, M. Numata, K. Nakajima, and T. Kurashima., “Field assembly splice technique with solid refractive index matching material,” *J. Lightw. Technol.* , Vol. 32, No. 2, pp. 344-348, 2014.
- [3] K. Saito, M. Kihara, T. Shimizu, K. Yoneda, and T. Kurashima, “High reliability solid refractive index matching materials for field installable connections in FTTH network,” to be published in *Opt. Fiber Technol.*
- [4] K. Saito, T. Matsui, K. Nakajima, and T. Kurashima, “Multi-core fiber connector using V-groove ferrule,” to be published in *Opt. Fiber Technol.*
- [5] K. Saito, M. Kihara, T. Shimizu, and T. Kurashima, “Novel field installable splicing technique for 250 μm diameter coated optical fiber direct connection without handling bare optical fiber,” to be published in *Opt. Fiber Technol.*
- [6] K. Nakajima, K. Saito, Y. Yamada, K. Kurokawa, T. Shimizu, C. Fukai, and T. Matsui, “Holey fibers for low bend loss,” *Nanophotonics*. Vol 2, Issue 5-6, pp. 341–353, 2013.

国際会議

- [1] K. Saito, R. Koyama, Y. Abe, K. Nakajima, and T. Kurashima, “Optimum mechanical splice conditions for fiber with hole-assisted structure,” in *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), NThB5*, 2010.
- [2] K. Saito, R. Koyama, Y. Abe, K. Nakajima, M. Takaya, and T. Kurashima, “Splice Characteristics of Hole-assisted Bending-loss Insensitive Fiber,” *Proc. of the 59th IWCS*, pp. 133–138, 2010.

- [3] K. Saito, K. Nakajima, M. Kihara, and T. Kurashima, "Optimization of Field Assembly Splice Technique with Solid Refractive Index Matching Material," Proc. of the 62th IWCS, pp. 58–63, 2013.
- [4] M. Kihara, T. Shimizu, K. Saito, H. Izumita, and T. Kurashima, "Novel field installable splicing technique for 250 μm diameter coated optical fiber connections," Proc. of the 62th IWCS, pp. 77–82, 2013.
- [5] K. Saito, T. Matsui, K. Nakajima, and T. Kurashima, "Multi-Core Fiber Connector with Precise Rotational Angle Alignment," in Proc. OECC2014, TH10B-3, 2014.
- [6] K. Saito, M. Kihara, T. Shimizu, and T. Kurashima, "Development of Coated Optical Fiber Direct Connection with Cost-Effective Cleaving and Novel Coating Removal Techniques," Proc. of the 63th IWCS, 2-5, 2014.

研究会

- [1] 小山, 齊藤, 阿部, 星島, 富田, "空孔アシストファイバのメカニカルスプライスにおける損失特性," 信学技報, OFT2008-82, pp. 55-58, 2009.
- [2] 齊藤, 小山, 阿部, 中島, 倉嶋, "空孔アシストファイバにおけるメカニカルスプライス損失特性," 信学技報, OFT2009-43, pp. 47-50, 2009.
- [3] 齊藤, 小山, 中島, 倉嶋, "空孔アシストファイバの接続特性," 信学技報, OFT2010-79, pp. 83-87, 2011.
- [4] 齊藤, 中島, 倉嶋, "低曲げ損失光ファイバの適用効果に関する一考察," 信学技報, OFT2011-87, pp. 69-72, 2012.
- [5] 齊藤, 中島, 倉嶋, "固形状屈折率整合剤を用いた外被把持型メカニカルスプライスの損失特性," 信学技報, OFT2012-27, pp. 45-48, 2012.
- [6] 齊藤, 松井, 中島, 倉嶋, "V 溝付フェルールとピン付割りスリーブを適用したマルチコアファイバコネクタ," 信学技報, OFT2013-66, pp. 63-66, 2014.

国内学会

- [1] 齊藤, 小山, 木原, "PCF カプラの波長依存性に関する理論的検討," 信総大, B-13-20, 2008.

- [2] 木原, 阿部, 小山, 齊藤, 富田, “簡易な現場組立光ファイバコネクタ技術の基礎検討,” 信総大, B-13-13, 2008.
- [3] 小山, 齊藤, 木原, 富田, “被覆付き光ファイバ心線の切断技術の検討,” 信総大, B-13-15, 2008.
- [4] 齊藤, 小山, 阿部, 星嶋, “齊藤, 小山, 阿部, 中島, 倉嶋, “空孔アシストファイバにおけるメカニカルスプライスの損失,” 信ソ大, B-13-17, 2008.
- [5] 小山, 齊藤, 阿部, 星嶋, “空孔アシストファイバ用メカニカルスプライスにおける損失要因,” 信ソ大, B-13-16, 2008.
- [6] 齊藤, 小山, 阿部, 中島, 倉嶋, “空孔アシストファイバのメカニカルスプライス損失に関する考察,” 信ソ大, B-13-17, 2009.
- [7] 齊藤, 小山, 阿部, 中島, 倉嶋, “メカニカルスプライスの屈折率整合剤に関する考察,” 信総大, B-13-5, 2010.
- [8] 齊藤, 小山, 中島, 倉嶋, “固形状屈折率整合剤を用いた光ファイバ接続に関する考察,” 信ソ大, B13-14, 2010.
- [9] 齊藤, 小山, 中島, 倉嶋, “空孔アシストファイバの MFD 不整合損失に関する考察,” 信総大, B13-22, 2011.
- [10] 齊藤, 中島, 倉嶋, “低曲げ損失ファイバの適用効果に関する一考察,” 信ソ大, B13-29, 2011.
- [11] 齊藤, 小山, 中島, 倉嶋, “固形状屈折率整合剤を適用した現場組立コネクタの損失特性,” 信総大, B13-6, 2012.
- [12] 齊藤, 中島, 倉嶋, “固形状屈折率整合剤を適用した外被把持型メカニカルスプライスの接続損失特性,” 信ソ大, B13-25, 2012.
- [13] 齊藤, 沼田, 中島, 倉嶋, “固形状の屈折率整合剤を適用した外被把持型メカニカルスプライスの接続損失特性,” 信総大, B13-1, 2013.
- [14] 齊藤, 深井, 中島, “外被把持型メカニカルスプライスを用いたケーブル接続における MPI 特性,” 信ソ大, B13-24, 2013.
- [15] 木原, 清水, 齊藤, 泉田, 倉嶋, “被覆付き光ファイバ接続技術の基礎検討,” 信ソ大, B13-22, 2013.
- [16] 齊藤, 五藤, 中島, 倉嶋, “結合型マルチコアファイバの実効的なモードフィールド径に関する考察,” 信総大, B13-13, 2014.

[17] 齊藤, 木原, 清水, 倉嶋, “被覆付き光ファイバ接続技術における被覆除去に関する考察,” 信ソ大, B13-42, 2014.

謝辞

本論文をまとめるに当たり、懇切なご指導とご高配を賜った千葉大学大学院 融合科学研究科 立田光廣 教授に心から深く感謝の意を表します。

また、千葉大学大学院 融合科学研究科 尾松孝茂 教授、千葉大学大学院 理学研究科 倉澤治樹 教授、芝浦工業大学大学院 理工学研究科 加島宜雄 教授には、ご多忙の中、審査委員を引き受けてくださり、有益なご討論、ご指示を頂きました。厚く感謝の意を表します。

本研究は日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所において行なわれたものであり、研究の機会を頂いた日本電信電話株式会社 篠原弘道 代表取締役副社長 (元 NTT アクセスサービスシステム研究所 所長)、NTT インフラネット株式会社 作久田浩司 代表取締役社長 (元 NTT アクセスサービスシステム研究所 所長)、池野通建株式会社 作山裕樹 代表取締役社長 (元 NTT アクセスサービスシステム研究所 所長)、一般社団法人情報通信エンジニアリング協会 久保園浩明 専務理事 (元 NTT アクセスサービスシステム研究所 所長)、NTT アクセスサービスシステム研究所 天野 博史 所長、NTT アドバンステクノロジー株式会社 清水正利 プロジェクト推進部門長 (元アクセスメディアプロジェクト マネージャ)、早稲田大学大学院 情報生産システム研究科 坪川信 教授 (元アクセスメディアプロジェクト マネージャ)、NTT アドバンステクノロジー株式会社 富田茂 ビジネスユニット長 (元アクセスメディアプロジェクト マネージャ)、NTT アドバンステクノロジー株式会社 東裕司 主幹担当部長 (元アクセスメディアプロジェクト マネージャ)、NTT アクセスサービスシステム研究所 アクセスメディアプロジェクト 白木和之 マネージャに深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり、NTT アクセスサービスシステム研究所 中島和秀 主幹研究員、木原満 主任研究員には、テーマの選定をはじめ、ファイバの設計、接続に関する理論モデルの立て方から実験系の構築まで直接ご指導を頂き、多大なるご助言とご討論を賜りましたことに深く感謝致します。また、NTT アクセスサービスシステム研究所 倉嶋利雄 媒体応用グループリーダーには有益なご助言、ご討論とともに本論文をまとめる機会をいただきましたことに深く感謝致します。また、泉田史 主幹研究員、松井隆 主任研究

員、深井千里 研究員、五藤幸弘 研究員、山口雄樹 開発員、先端技術総合研究所 デバイスイノベーションセンタ 阿部宜輝 主任研究員、研究企画部門 清水智弥 担当課長、東日本電信電話株式会社 星嶋徹也 担当課長（元媒体応用グループ 主任研究員）、西日本電信電話株式会社 小山良 主査（元媒体応用グループ 研究員）、日本コムシス株式会社 沼田誠 社員(元媒体応用グループ 開発員)に深く感謝致します。

最後に、本研究の遂行並びに論文執筆に多大なるご協力をいただきました皆様に深く感謝致します。