



Title	光ファイバネットワークにおける屋外設置パッシブコンポーネントの信頼性に関する研究
Author(s)	渡邊, ひろし
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第12646号
Issue Date	2017-03-23
DOI	10.14943/doctoral.k12646
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/65803
Type	theses (doctoral)
File Information	Hiroshi_Watanabe.pdf



[Instructions for use](#)

光ファイバネットワークにおける
屋外設置パッシブコンポーネントの
信頼性に関する研究

Study on the reliability of passive components installed
in outside optical fiber networks

北海道大学大学院
情報科学研究科
メディアネットワーク専攻
79165025

渡邊 ひろし

目次

1章 序論	
1-1 光ファイバネットワーク伸展の歴史	1
1-2 光ファイバネットワーク伸展における課題	5
1-3 本論文の目的	6
1-4 本論文の内容, 及び構成	6
2章 屋外設置 PON 用光スプリッタの信頼性	
2-1 序論	10
2-2 屋外環境で使用する PON 用 PLC 型光スプリッタ	12
2-2-1 はじめに	12
2-2-2 PON 用の屋外設置光スプリッタに求められる故障率	12
2-2-2-1 パッシブコンポーネントの累積故障率の上限	12
2-2-2-2 屋外設置光スプリッタの累積故障率の上限	13
2-2-3 PLC 型光スプリッタ	14
2-2-3-1 PLC 型光スプリッタの構成	14
2-2-3-2 PLC 型光スプリッタの光学特性	14
2-2-3-3 PLC 型光スプリッタの屋外環境での信頼性	16
2-2-4 PLC 型光スプリッタの故障率推定	17
2-2-4-1 加速劣化試験方法	17
2-2-4-2 PLC 型光スプリッタの加速劣化試験結果と故障率推定	17
2-2-4-3 評価サンプルの故障率の差分分析	25
2-2-5 まとめ	27
2-3 架空光クロージャ用のスプリッタモジュールの設計・試作と信頼性	27
2-3-1 はじめに	27
2-3-2 スプリッタモジュールの設計と試作	28
2-3-3 スプリッタモジュールの光学特性	30
2-3-4 スプリッタモジュールの温湿度特性	31
2-3-5 スプリッタモジュールの屋外環境下の信頼性	33
2-3-6 PON 用光線路設計のシミュレーション	35
2-3-7 まとめ	37
2-4 架空光クロージャ用の小型スプリッタモジュールの設計・試作と信頼性評価	37
2-4-1 はじめに	37
2-4-2 小型スプリッタモジュールの設計	38

2-4-3	小型スプリッタモジュール向け R15 仕様光ファイバの PLC 型光スプリッタ	39
2-4-3-1	R15 仕様光ファイバの PLC 型光スプリッタの構造	40
2-4-3-2	R15 仕様光ファイバの PLC 型光スプリッタの光学特性	40
2-4-3-3	R15 仕様光ファイバの PLC 型光スプリッタの温湿度特性	41
2-3-3-4	R15 仕様光ファイバの PLC 型光スプリッタの屋外環境下での信頼性	41
2-4-4	小型スプリッタモジュールの試作	42
2-4-5	小型スプリッタモジュールの特性	44
2-4-5-1	小型スプリッタモジュールの光学特性	44
2-4-5-2	小型スプリッタモジュールの温湿度特性	45
2-4-5-3	小型スプリッタモジュールの機械特性	46
2-4-5-4	小型スプリッタモジュールの耐候性	47
2-4-5-5	小型スプリッタモジュールの屋外環境下での信頼性	48
2-4-6	まとめ	49
2-5	結論	50
3	3 章 現場組立型光接続技術の信頼性向上	
3-1	序論	51
3-2	突合せ点に間隙を有する光ファイバ接続部の光学特性劣化の分析と対策	54
3-2-1	突合せ点に間隙を有する光ファイバ接続部の光学特性劣化の分析	54
3-2-1-1	はじめに	54
3-2-1-2	突合せ点に間隙を有する光接続部の光学特性	55
3-2-1-3	評価したメカニカルスプライス	57
3-2-1-4	検証方法	58
3-2-1-5	初期光学特性とヒートサイクル試験結果	58
3-2-1-6	考察	63
3-2-1-7	まとめ	65
3-2-2	固形屈折率整合材を用いた新たな光ファイバ接続方法	65
3-2-2-1	はじめに	65
3-2-2-2	固形屈折率整合材を用いた新たな光ファイバ接続方法の原理	66
3-2-2-3	新たな光ファイバ接続の設計	67
3-2-2-3-1	固形整合材の光軸上の幅算出	67
3-2-2-3-2	固形接合材の傾きの算出	68
3-2-2-4	実験と結果	69
3-2-2-4-1	光学特性実験	70
3-2-2-4-2	温度サイクル試験	73
3-2-2-5	まとめ	74

3-3	カット不良端面使用時の光ファイバ突合せ点の光学特性劣化の分析と対策	75
3-3-1	カット不良端面使用時の光ファイバ突合せ点の光学特性劣化の分析	75
3-3-1-1	はじめに	75
3-3-1-2	光ファイバのカット不良端面	75
3-3-1-3	光ファイバのカット不良端面による接続状態	76
3-3-1-4	検証方法	77
3-3-1-5	検証結果	78
3-3-1-6	考察	80
3-3-1-7	まとめ	82
3-3-2	ファブリ・ペロー干渉計の原理を利用した光ファイバ端面の検査技術	83
3-3-2-1	はじめに	83
3-3-2-2	提案する光ファイバ端面の検査技術の原理	83
3-3-2-3	検査システム的设计と構造	85
3-3-2-3-1	ファイバステージ的设计	85
3-3-2-3-2	ファイバステージの試作	87
3-3-2-4	端面検査システムでの実験	88
3-3-2-5	まとめ	92
3-4	結論	92
4	新たな光線路切替技術のためのパッシブコンポーネントの信頼性	
4-1	序論	93
4-2	無瞬断切替技術に最適な冗長化構成用光カプラの検討	95
4-2-1	はじめに	95
4-2-2	無瞬断切替技術と冗長化構成用光カプラ	95
4-2-3	光カプラの分岐比的设计方法	97
4-2-4	分岐比選定のシミュレーション	99
4-2-5	無瞬断切替装置による実験	100
4-2-6	リスク分析手法による分岐比の評価	102
4-2-7	まとめ	105
4-3	信頼性と経済合理性に基づいたパッシブコンポーネントの選択手法	105
4-3-1	はじめに	105
4-3-2	パッシブコンポーネントのトータルコスト比較の手法	106
4-3-2-1	パッシブコンポーネントの累積故障率	106
4-3-2-2	パッシブコンポーネントのトータルコスト比較	108
4-3-3	トータルコスト比較のシミュレーション	112

4-3-4	リスク分析手法に基づくトータルコスト比較	117
4-3-5	まとめ	121
4-4	結論	121
5章 結論		
5-1	各章のまとめ	123
5-2	今後の展望	124
参考文献		125
研究業績一覧		135
謝辞		138

1 章 序論

1-1 光ファイバネットワーク伸展の歴史

インターネットは日常生活の様々なシーンで利用され、今日では教育、商取引など多岐のサービスに活用されている。このインターネットを支える通信基盤として光ファイバによるネットワークが日本国内では広く普及してきた。

光ファイバは、同軸ケーブルに代わる次の伝送媒体として、1970年代から研究開発が進展してきた[1-1]。光ファイバによる国内の商用サービスは、1981年12月にグレードインデックス型(GI型: Graded Index 型)光ファイバを用いた中継伝送用光ファイバシステムが日本電信電話会社により導入された[1-2]。その後、1980年代から90年代にかけて、GI型より高帯域な伝送特性を持つシングルモード型(SM型: Single Mode 型)光ファイバを用いた、加入者用の地下光ファイバケーブルと架空光ファイバケーブルの研究開発が行われた[1-3]-[1-5]。2000年前後からインターネットの普及とともに、加入者向け高速データ通信として、アナログ電話用のメタル回線を利用するADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)方式による通信サービスが国内では普及し始めた[1-5]。ADSL方式によるサービスよりやや遅れて、2000年12月に光ファイバによる戸建加入者向けの高速度データ通信として、光スプリッタを利用するPON (Passive Optical Network)方式を利用した通信サービスが国内で開始された[1-6]。当初はATM技術による、下り通信速度が最大622 MbpsのB-PON (Broadband-PON)方式 [1-6]が用いられた。次に上り・下りの通信速度が最大1 GbpsのGE-PON(Gigabit Ether-PON)方式が、戸建て住宅向けやマンション向けの光ファイバによる通信サービスとして広く用いられるようになった[1-7]。

図1-1に2001年3月から2016年3月までの日本国内の光加入者の年毎の推移を示す[1-8]。光加入者は年々増加しており、2016年3月には2787万加入に達している。1年間の増加数に着目すると、2006年3月までの年間増加数が初めて200万加入を超え、2013年3月まで光加入数は年間200万加入以上の増加が継続している。それ以降は現在に至るまで光加入者数の増加は年間200万加入未満となり、増加のペースは鈍化している。光ファイバネットワークの伸展の段階は、光加入者の年毎の増加数に併せて、黎明期、普及拡大期、安定成長期の3段階に分類できる[1-9]。それぞれの段階で光ファイバネットワーク構築に向けて、光線路設備(通信ビルから加入者宅までの間のパッシブな光設備)で様々な取組が存在した。

光ファイバネットワークの黎明期では、通信サービスを安価に提供するために設備構築費用の低減が求められた。

光ファイバによる加入者向けの通信方式には、図1-2に示すように通信ビル内の局内装置と光加入者宅の加入者宅内装置を結ぶ方式として、シングルスター(SS: Single Star)、アクティブダブルスター(ADS: Active Double Star)、パッシブダブルスター(PDS: Passive Double Star)、の3種類の方式がある[1-10]。図1-2(a)に示すSS方式は、通信ビルと加入

者の各々の通信装置を光ファイバで1対1で通信する方式である。この方式は加入者数増加で設備が増えると設備構築費用が増大するが、高速な通信が要求されるビジネス用途の通信サービスには向いている。図1-2(b)に示すADS方式は、通信ビルと加入者の通信装置間に設置される多重化装置にて、信号を多重化し、1対多で通信する方式である。通信ビルの通信装置と多重化装置間は光信号で多重化し、加入者装置と多重化装置間は電気信号で通信し、CT/RT (Central Terminal/Remote Terminal) システムとして、電話等の低速のサービスに適用された[1-10]。図1-2(c)に示すPDS方式は、PON方式ともいわれ、通信ビルと加入者の各々の通信装置間に光を合分波する光スプリッタを配置して光信号を分岐し、1対多で通信する方式である。戸建向け等の多数の加入者に通信サービスを提供する場合には、設備を複数の加入者装置で共用するために、SS方式より設備構築費用の面で有利な方式である。またADS方式より高速な通信が実現可能である。このため、PON方式による光ファイバネットワーク構築が広く普及した。

このPON方式による通信サービス提供では、光加入者のONUに距離的により近い位置に光スプリッタを配置することで、設置に必要な光ファイバ長を短縮可能である。これにより設備構築費用が低減可能であるため、図1-3に示すように通信ビルと加入者宅(戸建)との中間の屋外の架空区間のPON用光スプリッタが設置された[1-6]。

光ファイバネットワークの普及拡大期では、増大する通信サービスへの需要に応えるために、施工時間の短縮が必要となった。この施工時間の短縮のため、光ファイバを地下区間から架空区間へと立上る、き線点まで予め光化しておくことで、需要への即応を可能とした。このき線点までの光化がNTTでは2005年3月末で、東日本エリアで83%、西日本エリアで84%に達しており、日本国内の大部分に光ファイバが先行配線されていた[1-11]。このため施工時間の短縮化には、き線点より下部の架空区間での光ファイバ接続の施工性向上が求められた。光ファイバネットワーク構築では、図1-4に示すように通信ビルのOLTから加入者のONUまでの光ファイバが様々な方法で接続される。光接続技術として通信ビル内ではSC/MU光コネクタ[1-12][1-13]が、屋外では融着接続が用いられていた[1-14]。普及拡大期には加入者宅に近い架空設備で、より簡単に光ファイバを接続するために、現場で作成できるメカニカルスプライス[1-15]が導入された。その後、メカニカルスプライスの機構を内蔵した現場組立コネクタ[1-16]が使用されるようになり、施工時間の短縮が実現された。

光ファイバネットワークが安定成長期となった今日では、通信サービスが教育、商取引、遠隔医療など多岐のサービスに活用されている。通信サービスの途絶は今後益々許容されなくなり、光ファイバネットワークは、繋がり続けることが重要となる。このためネットワークの設備故障だけに留まらず、道路工事や橋の架替え等に伴って通信ルートが変更となる支障移転工事での通信サービス断の抑制を目指した、新たな光線路切替技術が検討された[1-17]。図1-5(a)に示すように支障移転工事では、現用ルートを一旦切断して新設ルートに新たに接続するため、通信断が発生する。このため、図1-5(b)に示すように新たな光線

路切替技術として、新たな通信に影響を与えず、2台の光カプラにより迂回ルートを構成し、通信をバイパスして通信ルートを切替える、無瞬断切替技術が研究されている[1-17][1-18].

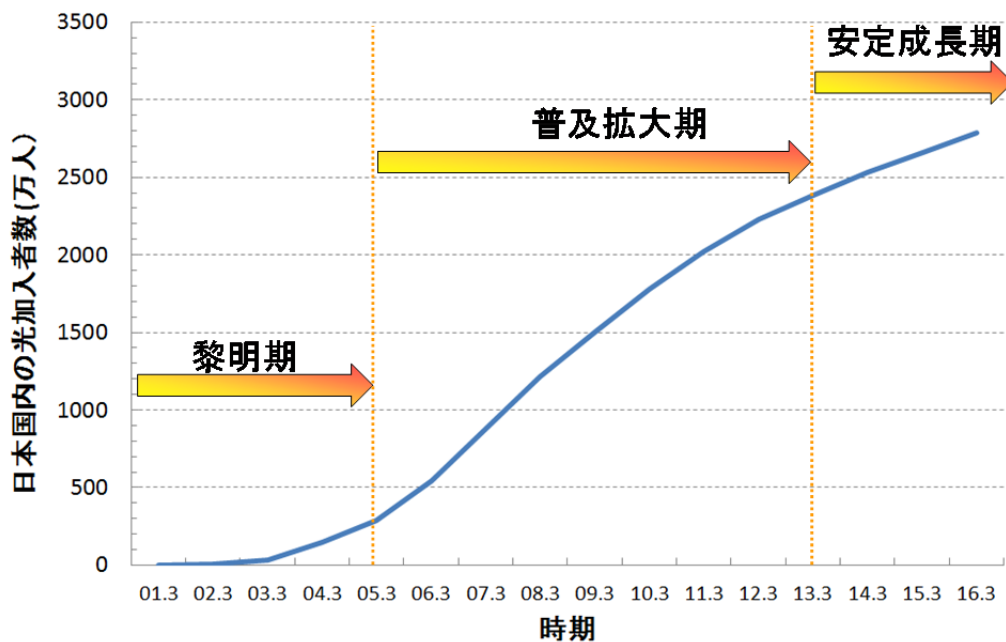
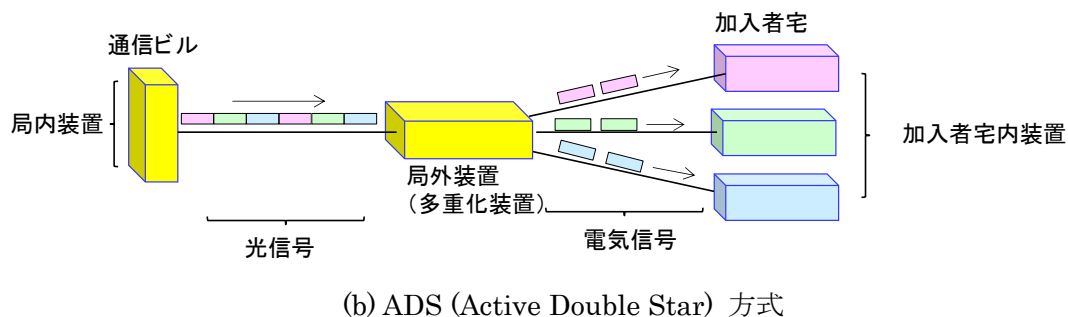
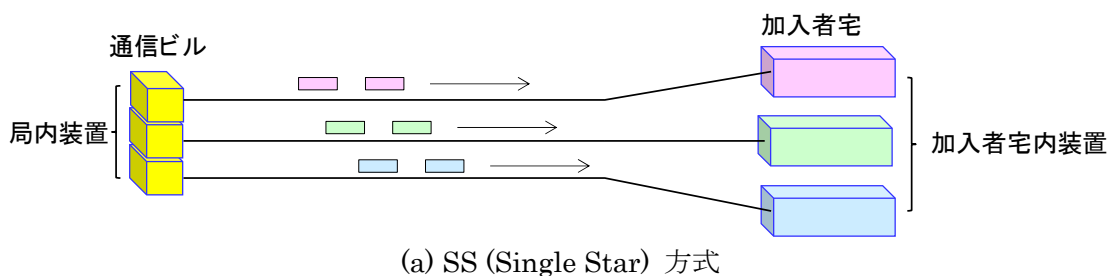
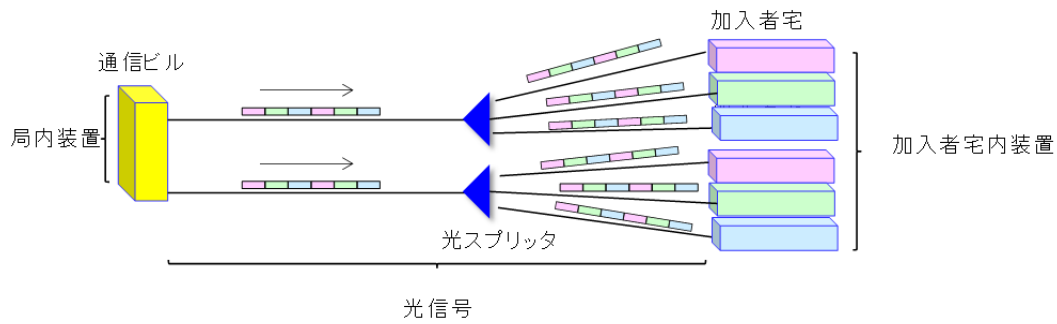


図 1-1 日本国内の光加入者数の変遷





(c) PDS (Passive Double Star) 方式

図 1-2 光ファイバによる加入者向けの通信方式

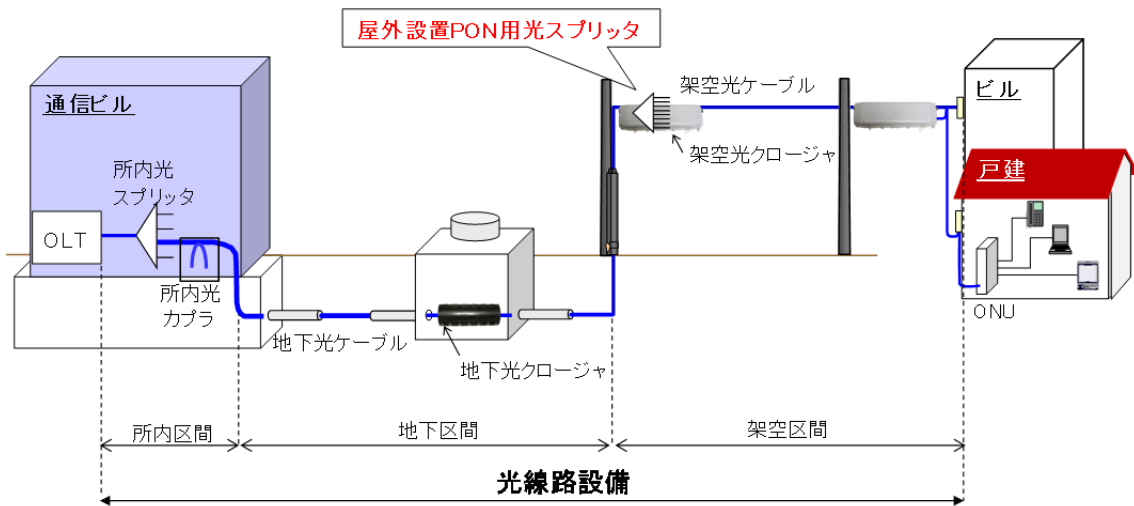


図 1-3 光線路設備での屋外設置 PON 用光スプリッタ

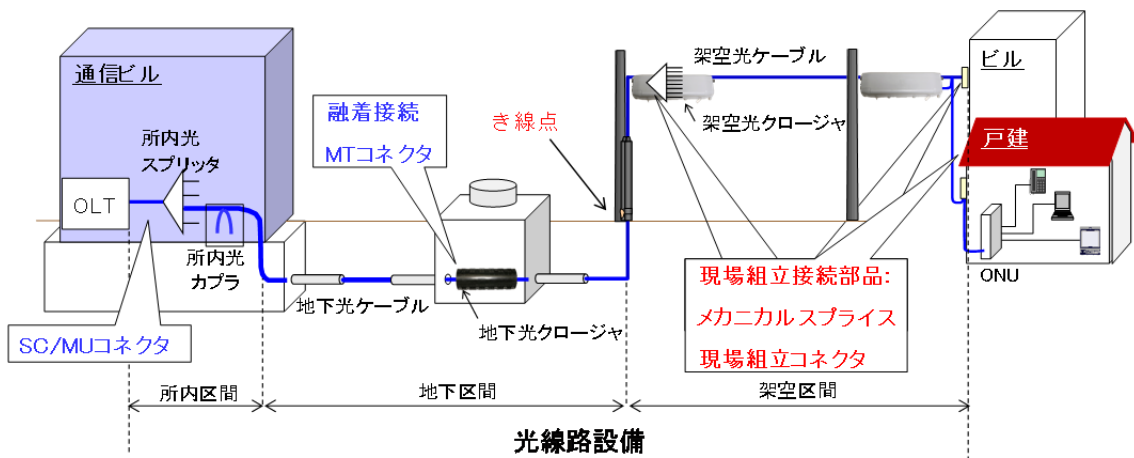


図 1-4 光線路設備で用いられる現場組立接続技術

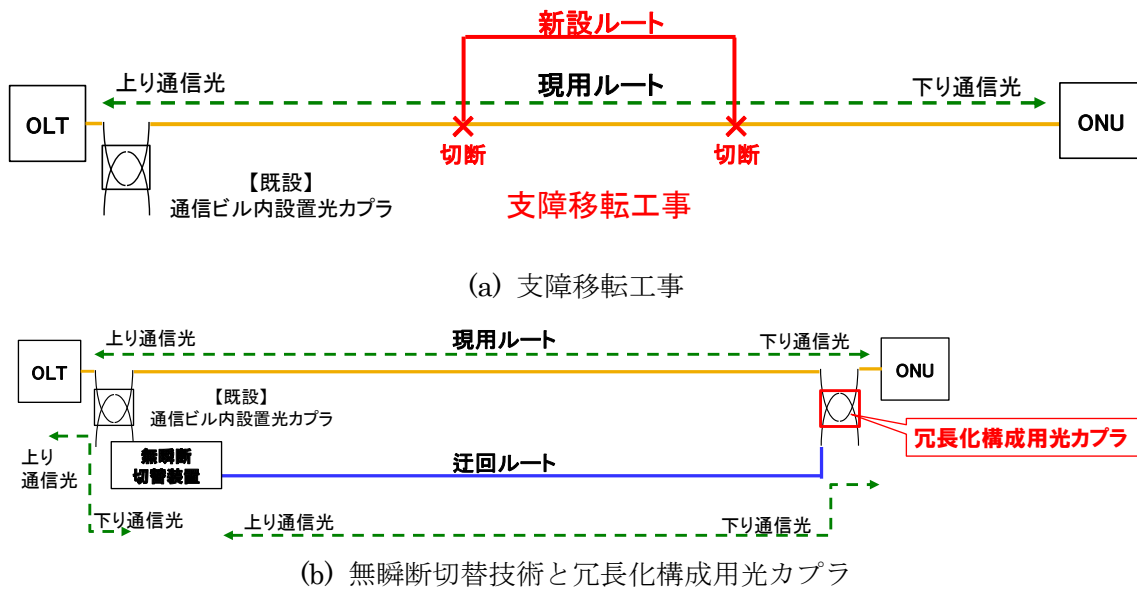


図 1-5 支障移転工事と無瞬断切替技術

1-2 光ファイバネットワーク伸展における課題

光ファイバネットワークの伸展に併せて、黎明期、普及拡大期、のそれぞれの段階で、①設備構築費用低減に向けた PON 方式の導入に向けた取組、②設備構築の効率化に向けた光ファイバ接続の施工性向上への取組、がなされた。また現在の安定成長期では、③支障移転時の通信断低減に向けた新たな光線路切替技術の実現への取組、が継続されている。しかし各段階の取組の遂行にあたって、課題も存在した。以下、各段階の課題①～③を説明する。

①PON 方式の導入に向けた課題

設備構築費用を低減するため、PON 方式が採用された結果、光スプリッタが屋外に設置された。光スプリッタ用のデバイスとしては、ファイバ溶融型の光カプラに比べて、広い波長範囲で光スペクトルの変動が小さく、出力ポート間の損失変動も小さい PLC (planar lightwave circuit)型光スプリッタの研究が続けられてきた[1-19]。PLC 型光スプリッタを屋外に設置される架空光クロージャに設置するため、その筐体のサイズを既存のメカニカルスプライスと同等のサイズに小型化した PLC 型光スプリッタ(筐体寸法 4 x 4 x 40 mm)の適用が検討された [1-20] [1-21]。しかし、この小型化した PLC 型光スプリッタは、屋外で使用された実績も無く、長期的な信頼性が明らかではなかった。このため PON 方式の導入には、屋外環境下の高温、高湿度等の様々なストレスへの耐久性を持った屋外設置 PON 用光スプリッタの実現が課題であった。

②光ファイバ接続の施工性向上に向けた課題

設備構築の効率化のため、光ファイバ接続の施工性向上を可能とするメカニカルスプライスや現場組立コネクタといった現場組立型接続技術が普及してきた。これらの技術は、現場で施工できる容易さの反面、施工品質が安定しなかった。メカニカルスプライスでは、では実際に、10 dBを超える接続損失の変動が発生する事象が報告されていた[1-22]。また、現場組立コネクタでも、設置後一定期間経過後に、故障が発生する事象が確認された[1-23]。光ファイバ接続の施工性向上にはメカニカルスプライスや現場組立コネクタの故障原因の分析とその対策技術の確立が課題であった。

③新たな光線路切替技術の実現に向けた課題

支障移転工事の際にも、通信サービス提供中に通信断の発生を抑制する新たな光線路切替技術が検討され、通信断が全く発生しない無瞬断切替技術の取組がなされてきた。これまでに、無瞬断切替技術実現に必要な要素技術について確立されている。この無瞬断切替技術は、光ファイバネットワークの信頼性を向上させることに貢献できる技術である。しかし、この無瞬断切替技術を実際の光ファイバネットワークへの適用のためには、新たに屋外に設置する冗長化構成用光カプラが必要となる。この冗長化構成用光カプラはこれまで検討されておらず、光ファイバネットワークの信頼性向上に見合った冗長化構成用光カプラを実現することが課題であった。

1-3 本論文の目的

本論文では、光ファイバネットワークにおける、屋外に設置されたパッシブコンポーネント(屋外設置 PON 用光スプリッタ、現場組立型光接続部品、冗長化構成用光カプラ)の信頼性に関する課題解決を目的とする。

1-4 本論文の内容、及び構成

本論文は、5章から構成され、その各章の位置づけを、図 1-6 に示す。

第2章では、屋外設置 PON 用光スプリッタの実現に向けて信頼性を研究テーマとして、PLC 型光スプリッタの信頼性検証と故障率推定、及び設計・試作したスプリッタモジュールの屋外環境下での信頼性を明らかにする。

PON 方式をできるだけ安価に提供するため、屋外に PON 用光スプリッタを設置する必要が生じた。光スプリッタは、屋外の既存の架空光クロージャに設置可能なように筐体サイズを小型化した、シリカガラス製の光導波路による PLC(Planar Light Circuit)型光スプリッタの使用が検討された。しかし、この PLC 型光スプリッタは、当時広く使用された実績に乏しく、屋外環境下での信頼性や故障率が明らかでなかった。このため、光スプリッタに求められる故障率を明確にすべく、典型的な PON 用の光線路設備を想定して、設備全体の故障率から光スプリッタに要求される故障率を算出する。また PLC 型光スプリッタは、

湿熱による光学劣化の影響が大きいことに着目し、加速劣化試験を実施した結果から、PLC型光スプリッタの故障率を算出する。評価した PLC 型光スプリッタの故障率は、要求される故障率を十分に下回ったことから、屋外環境下で使用する光スプリッタとして十分な信頼性を有することを示す。

また光加入者の急増に従って、より迅速な設備構築を可能とする設備形態が必要となった。このため、屋外の架空光クロージャに収納可能で、光コネクタ機能を有するモジュール化した光スプリッタ（スプリッタモジュール）が必要となった。屋外環境下で使用するスプリッタモジュールには先行事例がなく、その信頼性評価項目も明らかでなかった。このため、光クロージャ用スプリッタモジュールを設計・試作し、屋外環境下での信頼性評価として、耐候性、機械特性、温湿度特性の試験項目を設定した。これらの試験を実施し、試験前後の光学特性変動が十分小さかったことから、屋外環境での様々なストレスに対して十分な信頼性を有することを示す。

第 3 章では、信頼性の高い現場組立型光接続技術の確立に向けて、現場組立型光接続技術での故障発生メカニズム分析と対策技術について述べる。

現場組立型光接続技術の実現形態であるメカニカルスプライスや現場組立コネクタは、フィールドで組立可能な光接続技術であって、光ファイバ同士が屈折率接合材を介して突合される機構が特徴である。これらは施工不良により、突合せ点の間隙がある場合に、施工直後は～1dB 程度の接続損失が、後日 10 dB 以上に増加し、通信断を引起す故障が確認されていた。このため、突合せ点に隙間のあるメカニカルスプライスを用い、ヒートサイクル試験時の接続損失と反射減衰量を同時に測定し、両者の相関関係から突合せ点の状態を推定する新たな解析法で、屈折率整合材に空気が混入する損失変動メカニズムを明らかにする。この施工時の間隙の発生低減のため、施工不良が組立時に識別可能なように、一定以上の間隙では現状より大きな接続損失が発生する新たな光接続機構について説明する。この光接続機構は、ゲル状の固形整合材を用い、その固形整合材を突合せ点の光軸に対して斜め方向に配置する機構である。固形整合材の厚み以上の間隙では、突合せ点の軸ずれにより 10 dB 以上の損失が発生し、厚み以下の間隙では、固形整合材の効果で、温度変化に対しても大きな損失が発生しない特徴を持つ。この試作品の光学特性を検証し、所望の特性を満たすことを確認したことで、間隙発生の低減に資する技術であることを明らかにする。

またファイバ端面にカット不良端面が用いられた場合にも、施工後、一定期間経過後に故障に至るケースがあった。このため、カット不良のあるサンプルを用いて、ヒートサイクル試験での検証結果により故障発生メカニズムを明らかにする。このカット不良の発生防止には、現場組立コネクタ組立時にファイバ端面の確認が必要である。従来、カット不良の発生防止には、定期的にファイバカット端面を融着接続機のモニターで確認することが推奨されていた。しかし実際の屋外の施工時でも適用可能な簡便な確認方法が求められた。このため、被測定ファイバ端面に正常なファイバ端面を近接させ、ファブリ・ペロー干渉

状態を作り出し、2波長の反射減衰量の測定値からカット端面の良否を判定する試験方法を考案した。この試験方法を実現する試作機で、様々な形状のファイバカット端面の良否の判定が可能であることを説明し、提案した試験方法はカット不良の防止に資する技術であることを明らかにする。

第4章では、通信サービス提供中に通信断の発生を抑制する新たな光線路切替技術を、実際のネットワークへ適用するためのパッシブコンポーネントの実現とその信頼性をテーマとして、無瞬断切替技術で新たに追加される冗長化構成用光カプラの実現と、設備追加に伴う設備構築コスト及び運用コストの評価方法について示す。

光線路設備では、道路の拡幅工事等の支障移転で通信断が不可避な場合がある。この通信断回避のため、通信経路に2個の光カプラと現用・迂回ルートを設け、両光路長を完全に二重化し、順次ルートを切替える無瞬断切替技術が研究されてきた。この無瞬断切替技術は、冗長化構成用に2台の光カプラを新たに設置して、現用ルートと迂回ルートを設ける。更に迂回ルート側を流れる通信の遅延量を可変にして、現用ルートと迂回ルートの遅延量を一致させ、完全に通信を2重化にすることで無瞬断で現用ルートと迂回ルートを切替える技術である。この無瞬断切替技術では、通信可能な距離を極力長延化するため、光カプラの最適な分岐比を明確にする必要があったが、これまで未検討であった。このため、現用・迂回ルートのパワーバジェットの算出に基づき、光カプラの最適な分岐比を導く設計手法を提案し、シミュレーションと実験で提案手法の有効性を示す。更には通信装置の光出力や受光感度の変動の影響を考慮し、リスク分析手法を用いて最適な分岐比を決定する際の影響を定量的に明らかにする。

また無瞬断切替技術のように光線路設備に新たなパッシブコンポーネントを追加する場合には、通信事業者にとって、パッシブコンポーネントと光線路設備の信頼性を担保しつつ、設備の設置費用と故障時の修理費用の合計であるトータルコストを抑制する経済合理性の追求が必要である。このような経済合理性の検討には、パッシブコンポーネントの故障率と価格に基づいたトータルコスト評価は不可欠であるが、従来検討されてこなかった。このため、複数のパッシブコンポーネントの中から、故障率と価格を基に、トータルコストを算出し比較することで、コストミニマムとなるパッシブコンポーネントを選択する手法を提案する。さらにリスク分析手法を導入することで、故障率や価格の変動の影響を定量化する。以上より、このトータルコストの観点から、最適なパッシブコンポーネントを選択する提案手法の有効性を明らかにする。

第5章では、本研究のまとめを述べる。

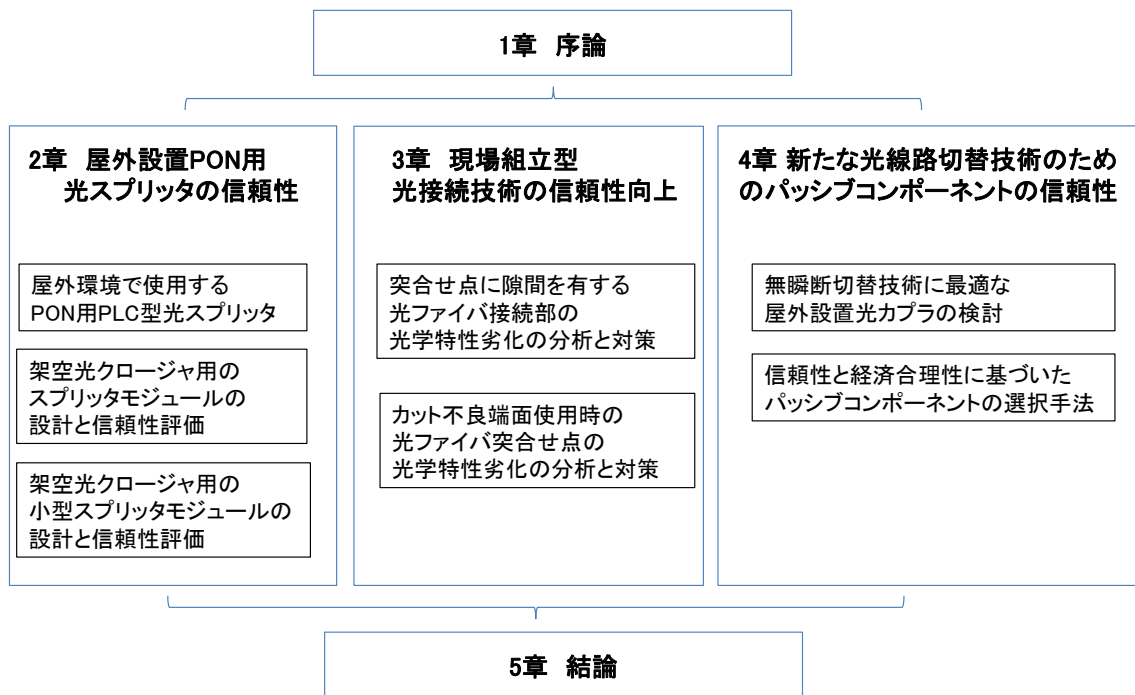


図 1-6 本論文の構成

2章 屋外設置 PON 用光スプリッタの信頼性

2-1 序論

光ファイバによる高速データ通信サービスを提供する加入者システムの1つが GE-PON (gigabit Ethernet passive optical network)である[2-1]。より加入者に近い場所に光スプリッタを設置して光ケーブルの敷設量を抑制して経済的に設備構築するために、所内に4分岐光スプリッタ、屋外の架空光クロージャ内に8分岐光スプリッタを設置する形態が実施されるようになった[2-2]。図2-1にPONの典型的な設備構成を示す。

光スプリッタは、ファイバ溶融型の光カップラ[2-3]より PLC(planar lightwave circuit)型光スプリッタが、広い波長範囲で光スペクトルの変動が小さく、出力ポート間の損失が小さいことから研究が続けられてきた[2-4]。屋外での使用を想定して、温湿度特性や機械特性を有する PLC 型スプリッタ(筐体寸法 7 x 8 x 80 mm)が研究されてきた[2-5]。

しかし屋外に設置される架空光クロージャに、PLC 型光スプリッタの筐体が既存の融着スリーブやメカニカルスプライスと同等の大きさに小型化した光スプリッタの適用が検討されるようになった[2-6][2-7]。図2-2に PLC 型光スプリッタの外観と内部構造を示す。この小型された PLC 型光スプリッタは、PON 用光スプリッタとしての光学特性や屋外環境下での信頼性の検証も未確認で、広く使用された実績も無かった。

商用の通信サービスで使用される通信波長は、図2-3に示すように、ITU-T G.983.3で規定されている。1.31 μm 波長帯から、1.55 μm 波長帯までが規定されており、更に、1.65 μm は、試験波長帯として規定されている[2-8]。従って、PON 用光スプリッタは、1.31 μm 帯から 1.55 μm 帯まで、もしくは 1.65 μm 帯までの波長帯での光学特性の検証が必要となる。また、PON 用光スプリッタの光損失や光損失均一性などの光学特性は、ITU-T G.671で規定されている[2-9]。従って、この PLC 型光スプリッタもこれらの規格に従った検証が必要となる。

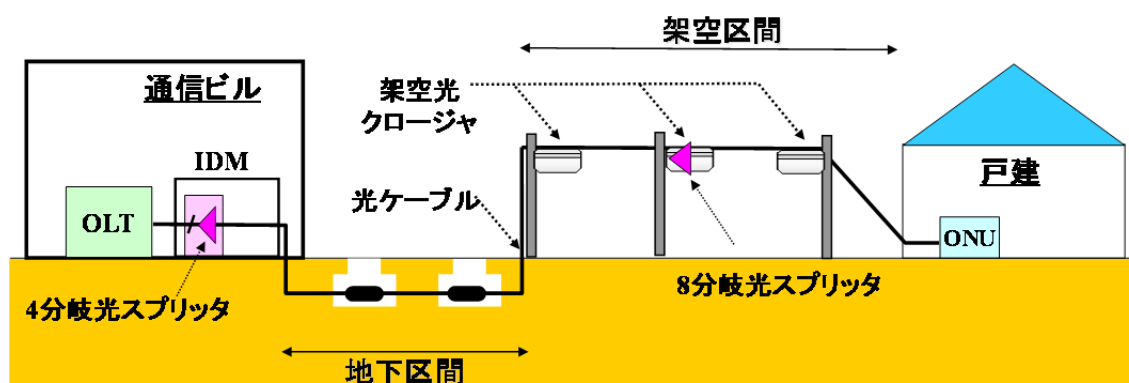
光線路設備の屋外の構成は、厳しい環境で長期間使用されることが想定されるため、その信頼性の検証は重要である。このため屋外環境下に設置される PON 用光スプリッタにも温湿度特性、環境特性、機械特性といった信頼性試験に関して ITU-T L.37 で規定されている[2-10]。従って、PLC 型光スプリッタもこれらの規格に従った検証が必要となる。更には、長期的な信頼性を明らかにして、故障発生頻度を推定するため、PLC 型光スプリッタの故障率を明らかにする必要があるが、PON 用光スプリッタに要求される故障率も議論されてこなかった。

光加入者の増加とともに、光線路設備全般の設置には施工性の向上が求められるようになった。PLC 型光スプリッタは架空光クロージャで、光接続のためメカニカルスプライスで接続を行い、架空光クロージャ内のトレイにファイバ心線を収納する必要がある[2-6][2-7]。この接続作業やファイバ心線収納作業を柱上で行うのは時間を要するため、急増する光加入者向けの設備構築の需要に対応すべく、通信事業者はより短時間で光線路設備を

構築することが求められた。このため、ファイバ収納作業や光接続作業を容易にする新たな構造の光スプリッタが必要であった[2-11]。従って、光コネクタ具備した光スプリッタのモジュール化が検討されるようになった。

また更に光加入者増加とそれに伴う設備量の増加に伴い、既存の架空光クロージャに搭載できるモジュール化した光スプリッタ数を増設して、設備の効率化を図る必要が発生した。具体的には、従来の4台から8台へ搭載数を増加させる必要が生じた[2-12]。このため、モジュール化した光スプリッタを更に小型化する必要が生じた。また小型化したスプリッタモジュールにも、PON用スプリッタとして十分な光学特性と屋外環境下で十分な信頼性が必要である。

本章の2-2では、架空光クロージャに設置されるPON用のPLC型光スプリッタの光学特性と信頼性特性を評価した結果を述べる。またPLC型光スプリッタの故障率を評価した結果を述べる。2-3では、架空光クロージャへの施工性を容易にするため、設計・試作したスプリッタモジュールの構造と光学特性・信頼性の評価結果について述べる。2-4では、架空光クロージャへ搭載するスプリッタモジュールの数量を倍増するため、筐体を小型化したスプリッタモジュールの構造と光学特性・信頼性の評価結果について述べる。



OLT: Optical Line Terminal, ONU: Optical Network Unit, IDM: Integrated Distribution Module

図 2-1 PON システムの典型的な設備構成例

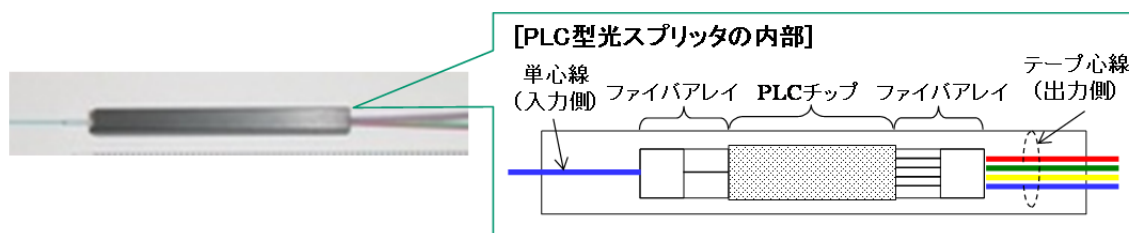


図 2-2 PLC 型光スプリッタの内部構造

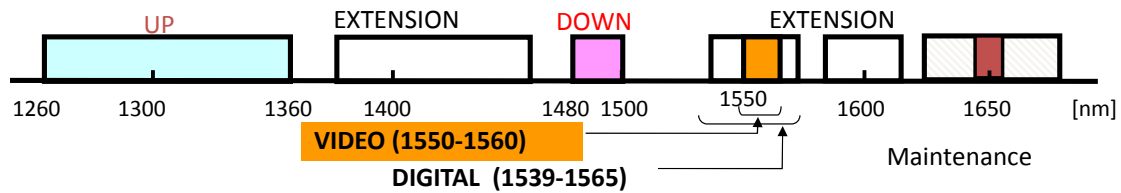


図 2-3 使用波長帯の割当(ITU-T G.983.3[2-8]より)

2-2 屋外環境で使用する PON 用 PLC 型光スプリッタ

2-2-1 はじめに

2-2 では、光線路設備全体の故障率から PON 用屋外設置光スプリッタに要求される故障率について述べる。次に PLC 型光スプリッタの光学特性と屋外環境下での信頼性特性について述べる。また PLC 型光スプリッタの加速劣化試験による故障率の推定結果について説明する。

2-2-2 PON 用の屋外設置光スプリッタに求められる故障率

2-2-2-1 パッシブコンポーネントの累積故障率の上限

通信事業者は、高い信頼性を有する光線路設備を構築するために、設備設計時に光線路設備全体の故障率を評価する必要がある。図 2-4 に PON の典型的な光線路設備の構成を示す。OLT (Optical Line Terminal) から 1 台の ONU (Optical Line Unit) までは、システムとして直列系とみなすことができる。このため、光線路設備全体の累積故障率 F_{total} について以下の式が成り立つ。

$$F_{total} = 1 - (1 - F_1) \cdot (1 - F_2) \cdots (1 - F_n) \cong \sum_{i=1}^n F_i \quad (2-1)$$

尚、 F_i は光線路設備の中の任意のパッシブコンポーネント i の累積故障率である。もしネットワークサービス品質(SLA: Service Level Agreement)を担保するため、光線路設備の累積故障率の上限値が F_{total_max} と規定されていて、特定のパッシブコンポーネント k 以外の累積故障率が既知の場合には、パッシブコンポーネント k の累積故障率の上限値 F_{k_max} が以下のように成り立つ。

$$F_{k_max} = F_{total_max} - \sum_{i=1}^{k-1} F_i - \sum_{i=k+1}^n F_i \quad (2-2)$$

累積故障率が F_{k_max} を超過するパッシブコンポーネント k は、SLA を満足できないため、この光線路設備に設置することはできない。以上のように、ネットワークのサービス品質を担保することができる、パッシブコンポーネント k の累積故障率の上限値を、式(2-2)か

ら導くことが可能である。

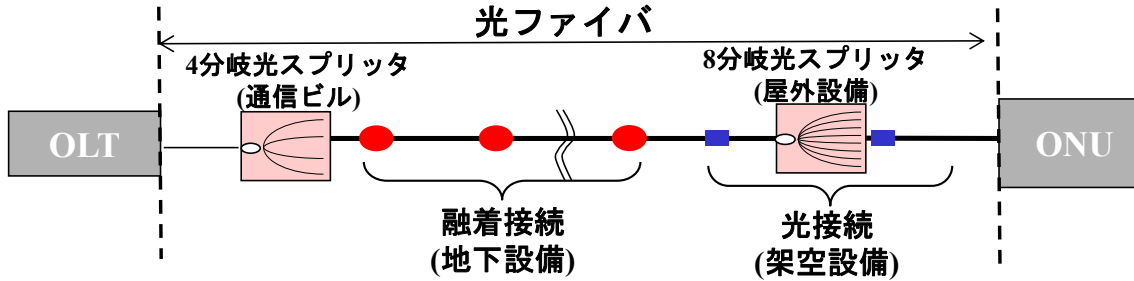


図 2-4 典型的な PON の光線路設備構成

2-2-2-2 屋外設置光スプリッタの累積故障率の上限

次に PON 用の光線路設備に設置する 8 分岐光スプリッタの累積故障率の上限値を算出する。OLT から ONU までの光ファイバ長は、国内の光アクセスネットワークの平均線路長なのである 2.2km とした[2-13]。また設備の運用期間を 20 年とした。表 2-1 に図 2-4 の PON 用の光線路設備の構成に従い累積故障率の算出に用いた、故障率と設備数のパラメータを示す。OLT から ONU までは光ファイバケーブル[2-14] で接続されているが、その経路上に、通信ビル内に設置される 4 分岐光スプリッタ、地下区間に融着接続[2-15]、架空区間に 8 分岐光スプリッタと光接続[2-16]が設置されている。まず、光アクセスネットワークの OLT と ONU を除いた光線路設備のみの故障率の上限値として、固定電話用の線路設備と同等な値として、64FIT/km と想定した[2-17]。

これにより 8 分岐光スプリッタの累積故障率の上限値 F_{8sp_max} は式(2-2)と表 2-1 から以下のように導きだせる。

$$F_{8sp_max} = F_{total_max} - F_{fiber} - F_{fusion} - F_{optical\ connection} - F_{4sp} \quad (2-3)$$

ここで、4 分岐光スプリッタについては屋内の安定した温湿度環境で使用されるため、実効上 $F_{4sp} \approx 0$ として計算すると、式(2-3)と表 2-1 より、 F_{8sp_max} の値は、0.025 となる。またこの値より、8 分岐光スプリッタの故障率の最大値 λ_{8sp_max} は、140 FIT となる。以上のように、得られた 8 分岐光スプリッタの累積故障率の最大値 F_{8sp_max} と故障率の最大値 λ_{8sp_max} が、固定電話用の線路設備と同等の品質を想定した場合の、PON の屋外設置用の 8 分岐光スプリッタに要求される累積故障率となる。

表 2-1 PON の光線路設備の累積故障率算出のためのパッシブコンポーネントの構成数と故障率に関するパラメータ

項目	光ファイバ	融着接続	光接続	4分岐光スプリッタ	光線路設備全体
故障率に関するパラメータ	1×10^{-2} [FIT/km/fiber] [2-14]	1×10^{-5} @ 20 year [2-15]	0.1 FIT [2-16]	0 FIT (通信ビル内)	64 [FIT/km] [2-17]
数量	2.2 [km]	3	2	1	2.2 [km]
累積故障率 $F_k(T)$ (T=20年)	F_{fiber} $= 3.9 \times 10^{-6}$	F_{fusion} $= 3 \times 10^{-5}$	$F_{optical\ connection}$ $= 3 \times 10^{-5}$	F_{4sp} $= 0$	F_{total_max} $= 2.5 \times 10^{-2}$

2-2-3 PLC 型光スプリッタ

2-2-3-1 PLC 型光スプリッタの構造

図 2-5 に評価した PLC 型 8 分岐光スプリッタを示す。この光スプリッタはシリカ製の PLC チップを内蔵している。また 2 枚の 4 心テープを重ねた $127 \mu\text{m}$ ピッチのファイバアレイを用いて構成にすることで、筐体寸法の小型に寄与している [2-18]。筐体の寸法は 幅、高さ、長さがそれぞれ 4 mm, 4 mm, 42 mm であった。



図 2-5 PLC 型 8 分岐光スプリッタ

2-2-3-2 PLC 型光スプリッタの光学特性

従来の光通信で使用される通信波長は、 $1.31 \mu\text{m}$ から $1.55 \mu\text{m}$ の波長帯である。広く使用されている GE-PON の通信波長は、下り波長が $1.31 \mu\text{m}$ 、上り波長が $1.49 \mu\text{m}$ である。また映像用通信波長として $1.55 \mu\text{m}$ が使用されている [2-19]。それゆえ PON システムでは、それゆえ $1.31 \mu\text{m}$ から $1.55 \mu\text{m}$ で実効上使用される。また $1.65 \mu\text{m}$ は、試験波長帯として規定されている [2-8]。このため PON 用の光スプリッタのスペクトルは $1.3 \mu\text{m}$ から $1.65 \mu\text{m}$ まで評価される必要がある。

PON 用の光スプリッタとしてとして適した PLC 型光スプリッタの光学特性の波長 $1.31/1.55 \mu\text{m}$ の挿入損失を測定した。

表 2-2 に、PLC 型 8 分岐光スプリッタの光学特性を示す。挿入損失の波長 1.31 及び 1.55 μm の平均値は、9.61 dB と 9.70 dB であり、最大値は各々 10.13 dB であった。最大値が波長 1.31 及び 1.55 μm での PON 用の 8 分岐光スプリッタの挿入損失は ITU-T 規格値の 10.5 dB よりも小さい[2-9]。このため PON 用光スプリッタとして十分な挿入損失値を有していることが分かる。反射減衰量の波長 1.31 及び 1.55 μm の平均値は 58.69, 及び 57.93 dB であり、最小値は、各々 57.67, 及び 57.10 dB であった。最小値が、波長 1.31 及び 1.55 μm の 8 分岐光スプリッタの反射減衰量の ITU-T 規格値 55 dB より大きい[2-9]。このため、PON 用光スプリッタとして十分な反射減衰量の特性を有している。偏波依存性損失(PDL)の波長 1.31 及び 1.55 μm の平均値は、0.03 dB, 0.05 dB であり、最大値は、各々 0.07, 0.10 dB であった。最大値が、波長 1.31, 及び 1.55 μm での PON 用の 8 分岐光スプリッタの PDL の ITU-T 規格値 0.25dB より小さい[2-9]。よって PON 用光スプリッタとして十分な PDL の特性を有している。

図 2-6 は、PLC 型光スプリッタの光スペクトルの一例を示す。波長 1.2 ~1.7 μm のスペクトルの波長特性は均一であり、波長範囲 WR2 [2-9] で規定されている 1260 から 1360 nm と、1480 から 1660 nm の波長の損失均一性 (Uniformity) は、0.82 dB であった。PON 用光スプリッタの損失均一性の ITU-T 規格値は 1.3dB 以下[2-9]であるので、このスペクトル PON 用光スプリッタとして十分な波長均一性を有していることが分かる。

以上の光学特性は、ITU-T 勧告 G.671 の基準を満たすため、したがって、これらの PLC 型光スプリッタは、PON 用光スプリッタとして十分な光学特性をもつことが分かる。

表 2-2 PLC 型 8 分岐光スプリッタの光学特性の結果

項目	波長 (μm)	測定結果				ITU-T G.671 基準値 (dB)
		サンプル数	平均 (dB)	最大値 (dB)	最小値 (dB)	
挿入損失	1.31	280	9.61	10.13	9.24	≤ 10.5
	1.55		9.70	10.13	9.23	
反射減衰量	1.31	35	58.69	60.20	57.60	≥ 55
	1.55		57.93	58.90	57.10	
偏波依存性損失	1.31	280	0.03	0.07	0.01	≤ 0.25
	1.55		0.05	0.10	0.01	

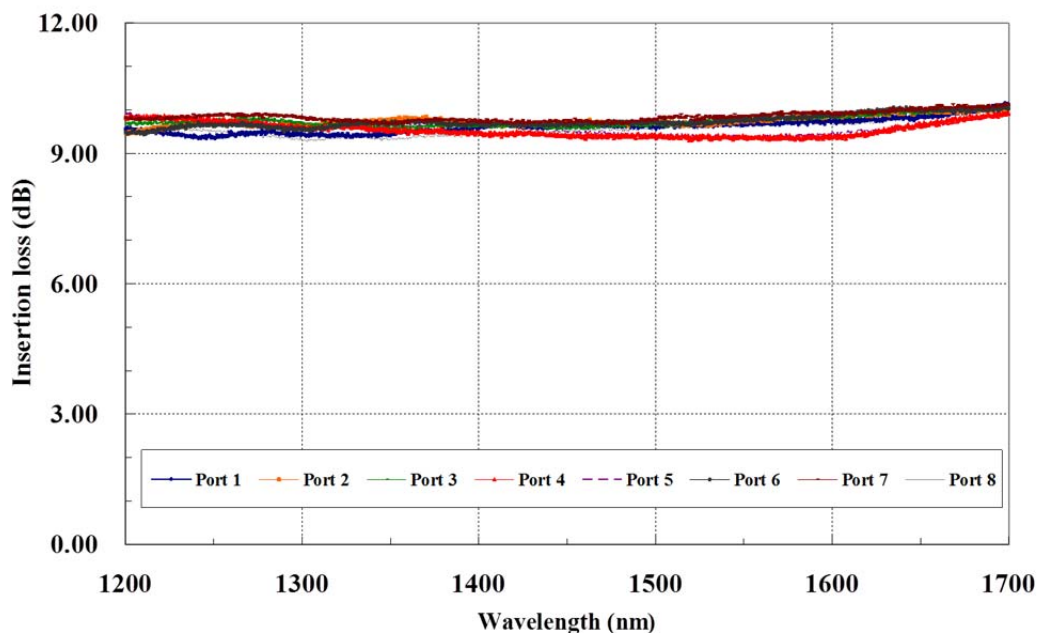


図 2-6 PLC 型 8 分岐光スプリッタの光スペクトルの例

2-2-3-3 PLC 型光スプリッタの屋外環境下での信頼性

屋外に設置されるパッシブコンポーネントの光学特性は、温度変化による挿入損失の変動が小さいことが望ましい。PON 用光スプリッタの屋外環境下での使用環境条件として、摂氏 $-40\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ が推奨されている [2-10]。したがって、屋外設置される PLC 型光スプリッタの温湿度に関する信頼性特性は、温度変化、低温および高温、高湿の観点から検討する必要がある。

表 2-3 は、PLC 型 8 分岐光スプリッタに実施した 3 種類の信頼性試験の結果を示す。温度サイクル試験 ($+85\sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4.5 時間/サイクル, 500 サイクル) での、試験前後での最大の損失変化は、 1.31 と $1.55\text{ }\mu\text{m}$ の波長で各々 0.19 と 0.14 dB であった。低温試験 ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 5000 時間) での、試験前後での最大の損失変化は、 1.31 と $1.55\text{ }\mu\text{m}$ の波長で最大の損失変化は、 0.27 dB だった。また、高温高湿試験 ($85\text{ }^{\circ}\text{C}$, $85\%\text{RH}$, 5000 時間) での、試験前後での最大の損失変化は、 1.31 と $1.55\text{ }\mu\text{m}$ の波長で最大の損失変化は、各々 0.17 と 0.12 dB であった。ITU-T 勧告 L.37 での、これら 3 種類の試験の PLC 型 8 分岐光スプリッタの損失の変化量の基準値は、いずれも 0.3dB 未満である [2-10]。したがって、これらの PLC 型 8 分岐光スプリッタは、屋外環境下を想定した温度サイクル、低温、高温高湿度に対して十分な信頼性を持っていることが分かった。

表 2-3 PLC 型 8 分岐光スプリッタの信頼性試験結果

試験項目	試験条件	評価数	波長 [μm]	最大損失 変動 [dB]
温度サイクル	-40~85°C, 500cyc. 4.5h/cycle	24	1.31	0.19
			1.55	0.14
低温	-40°C, 5000h	24	1.31	0.27
			1.55	0.27
高温高湿	85°C, 85%RH, 5000h	24	1.31	0.17
			1.55	0.12

2-2-4 PLC 型光スプリッタの故障率推定

2-2-4-1 加速劣化試験方法

屋外環境下で長期間使用された場合の故障発生頻度を推定するために、加速劣化試験によって 8 分岐光スプリッタの故障率を推定した。加速劣化試験は、HAST (highly accelerated stress test) チャンバを用いて、様々な温湿度条件で実施した。加速劣化試験では、8 分岐光スプリッタの全出力ポートの損失変動を試験中に継続的に測定し、損失変動が 0.5 dB を超過した時点を故障に至った時間として判定した。

通常の HAST チャンバは、内部の空気圧を保つため、HAST チャンバ内部から外部へ光ファイバを導通するための通孔口は設けられていない。このため継続的に光損失変動を測定することは困難である。それゆえ、HAST チャンバの側壁に直径 1.8 mm の通孔口を設けて、測定対象の PLC 型光スプリッタの入力・出力光ファイバを通孔口から通過させた。加速劣化試験中は、HAST チャンバ内部の圧力を保つために、通孔口はエポキシ性接着剤で封止した。予備実験として、この通孔口にファイバのみを通した状態で、130°C、90%RH の条件で加速劣化試験を実施したところ、損失変動は、0.05 dB 以下の値しか確認されなかった。この値は、故障と判断する 0.5 dB 以上の変動量より十分小さい値である。以上より、HAST チャンバに通孔口を設けて継続的に光スプリッタの損失変動値を計測することが可能であると判断した。

2-2-4-2 PLC 型光スプリッタの加速劣化試験結果と故障率推定

PLC 型 8 分岐光スプリッタの故障率を評価するため、加速劣化試験を用いて故障率推定する方法が報告されており [2-20]、同様の方法を用いて故障率を評価した。前節で評価した PLC 型 8 分岐光スプリッタ (サンプル C) に加えて、同一形状 (4mm x 4mm x 40mm) の 2 種類の市販品の PLC 型 8 分岐光スプリッタのサンプル A, B を比較のために評価した。測定波長は、1.31 μm で実施している。

表 2-4 に、PLC 型光スプリッタ(サンプル A, B, C)の加速劣化試験条件、評価サンプル数、故障数、試験時間を示す。また図 2-7 に試験条件 130°C、90%RH でのサンプル C の

加速劣化での損失変動測定結果を示す。図 2-7 では、全ポート中 1 番ポートが最初に損失変動が 0.5 dB を超えた 260 時間を故障した時間と判定した。図 2-7 ではまた、1 番、5 番ポートの光損失の増加が他のポートよりも大きかったことを示す。これは、2 枚の 4 心テーパーファイバの 127 μm ピッチの光ファイバアレイの構造を有しており、1 番および 5 番ポートの光ファイバは、4 心ファイバのうち最も端に位置している。このため、加速劣化試験で PLC チップと光ファイバアレイが加速劣化試験で剥離する場合には、他のポートものよりも先に損失増加の影響が大きくなるためと推定される。

次に PLC 型光スプリッタの故障率推定について説明する。PLC 型光スプリッタの故障率分布はワイブル分布に従う [2-20]。図 2-8 (a), (b) および (c) は、サンプル A, B, C の加速劣化試験における、累積故障率 $F(t)$ のワイブルプロットを示す。ワイブル分布の形状パラメータ m は、図 2-8 (a), (b) および (c) に示すように、図中の各プロットの直線から導き出される。

次に図 2-8 (a), (b) および (c) から Median life(平均寿命) ξ が求められる。Median life(平均寿命) ξ は、累積故障率 $F(T) = 0.5$ から導き出される時間である。また、PLC 型光スプリッタの Median life(平均寿命) ξ は以下のように表現される

$$\xi = c \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \frac{1}{(RH)^n} \quad (2-4)$$

c は積分係数であり、 E は温度加速係数であり、 k はボルツマン定数であり、 T は温度 [K] であり、 RH は相対湿度であり、 n は湿度加速係数である [2-20]。

温度加速係数 E を求めるため、図 2-9 (a) (b) (c) に Median life(平均寿命) のアレニウスプロットを示す。サンプル A, B, および C は試料の温度加速係数 E は、図 2-9 (a) (b) (c) の近似線の傾きから 0.90, 0.82, 2.43 eV のように導出される。

湿度加速係数 n を求めるため、図 2-10 (a), (b) および (c) の Median life(平均寿命) の対数プロットと相対湿度の関係を示す。サンプル A, B, および C の湿度加速係数 n は、図中の近似線の傾きから 7.31, 1.85 および 2.59 と導出される。

表 2-5 に以上の評価より得られた、サンプル A, B, および C の形状パラメータ m , 温度加速係数 E は、湿度加速係数 n を示す。形状パラメータ m は、図 2-8 から導き出される平均値である。

ワイブル分布の累積故障率 $F(t)$ と Median life(平均寿命) ξ は以下のように表現される。

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (2-5)$$

$$\xi = \eta(\ln 2)^{\frac{1}{m}} \quad (2-6)$$

η はスケールパラメータである [2-20]。それゆえ、累積故障率 $F(t)$ は式(2-5), (2-6)から、以下のように導かれる。

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t^m}{\xi^m}\right) \quad (2-7).$$

式(2-4)と(2-7)と表 2-5 より、3種類の PLC 型光スプリッタの累積故障率を推定した。図 2-11 に、45°C、100%RH での 3種類の PLC 型光スプリッタの加速劣化試験結果から計算された累積故障率と、2-2-2 で示した運用期間 20 年までの 8 分岐光スプリッタの累積故障率の上限を示す。日本国内での架空クロージャ内部の年間の最も厳しい温湿度測定結果の 1 例として、45°C、100%RH を観測したため、累積故障率の算出にはこの温度湿度の値を用いて算出した。サンプル C の累積故障率は、運用期間 20 年でも目標の累積故障率の上限より十分低いことが分かる。したがって、これらの PLC 型光スプリッタを使用する光線路設備は、固定電話用の線路設備と同等の品質を保つことが可能となる。

表 2-4 PLC 型 8 分岐光スプリッタの加速劣化試験結果 (サンプル A, B, C)

試験条件	サンプル A			サンプル B			サンプル C		
	サンプル数	故障数	試験時間 (時間)	サンプル数	故障数	試験時間 (時間)	サンプル数	故障数	試験時間 (時間)
130°C 100%RH	---	---	---	---	---	---	5	5	500
130°C 90%RH	---	---	---	5	5	1000	5	4	1000
130°C 75%RH	---	---	---	10	10	700	10	5	700
120°C 90%RH	---	---	---	5	5	3500	5	3	3500
110°C 90%RH	5	5	800	7	7	1400	13	0	1400
110°C 85%RH	5	4	800	---	---	---	---	---	---
85°C 85%RH	6	5	5000	---	---	---	---	---	---

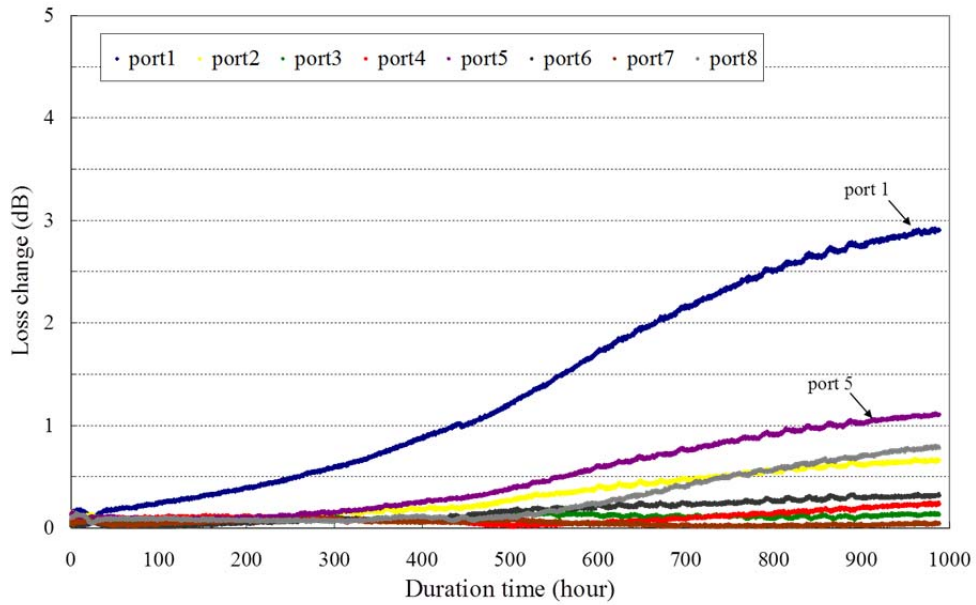
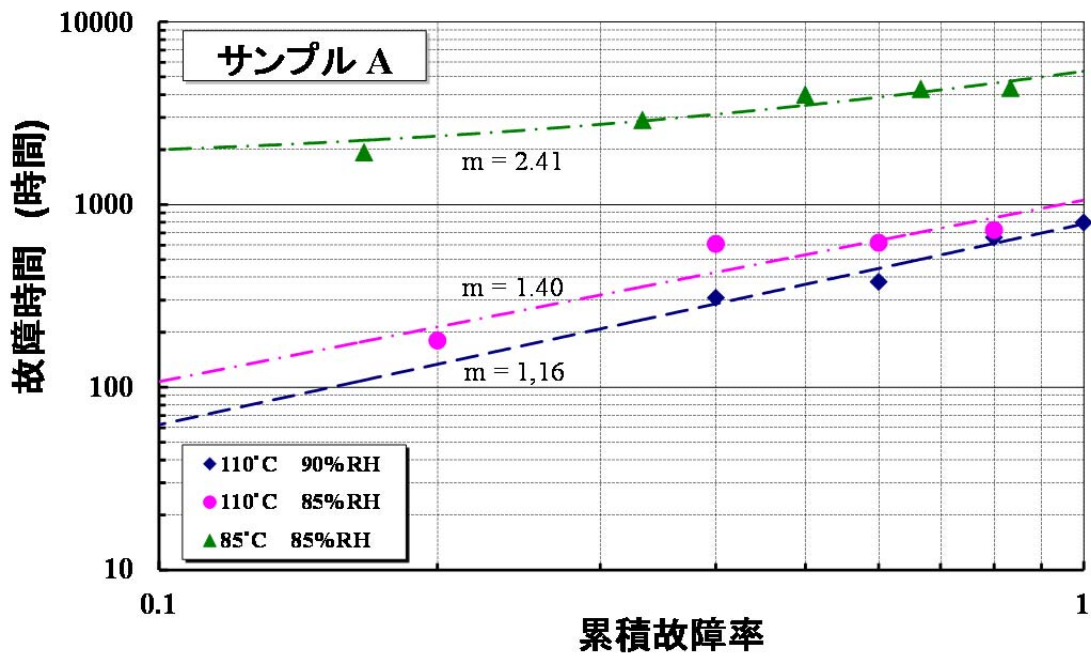
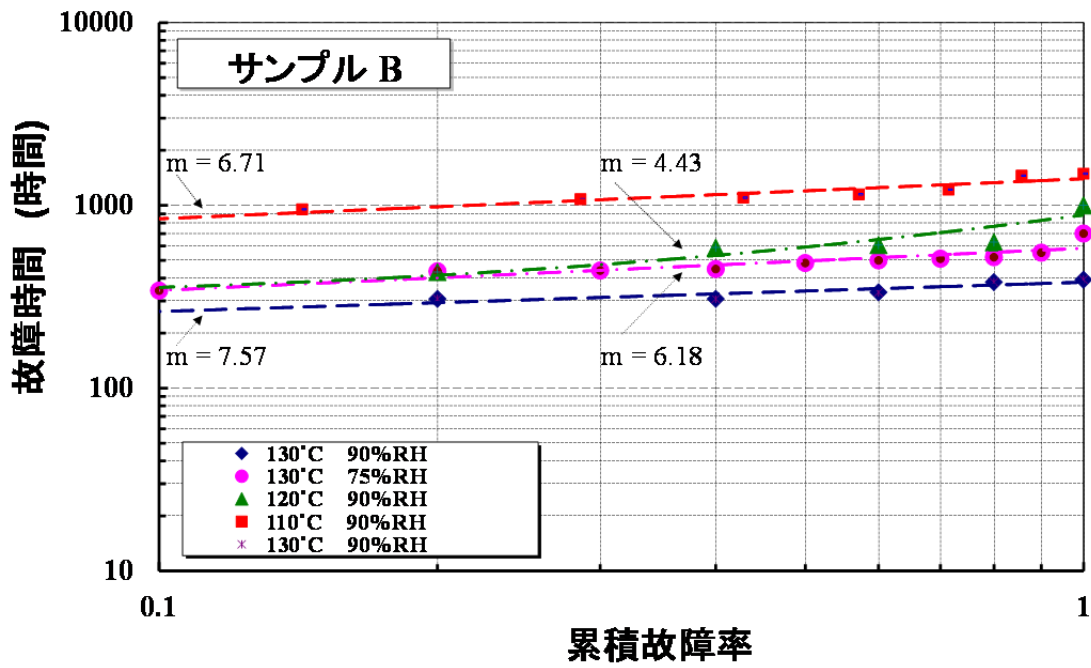


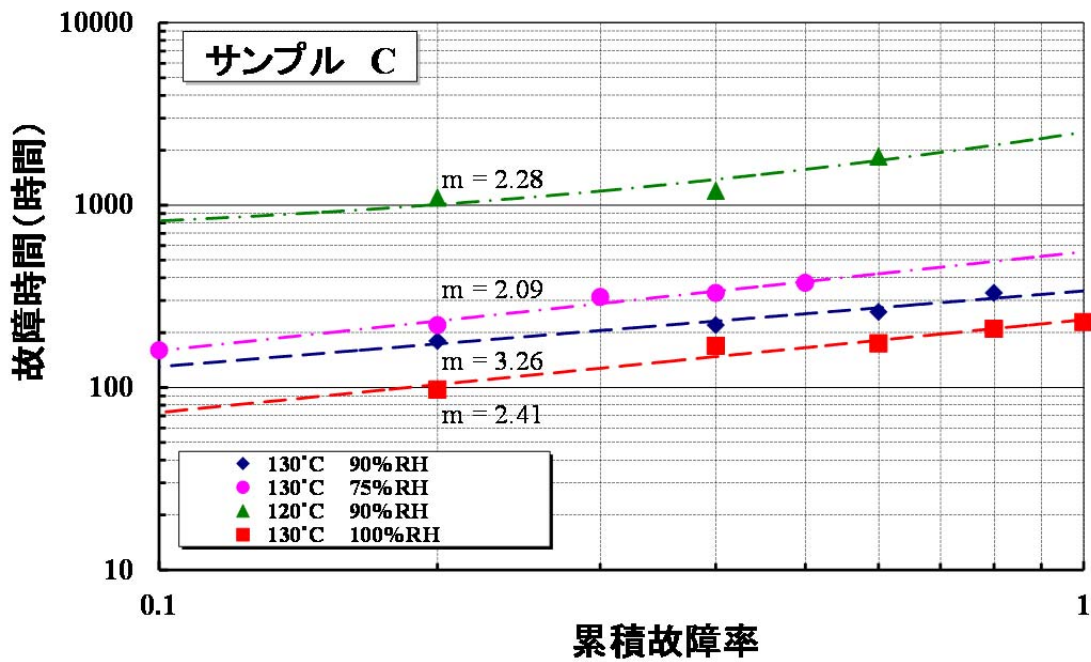
図 2-7 加速劣化試験結果例(サンプル C, 130°C, 90%RH 波長 1.31 μ m)



(a) サンプル A

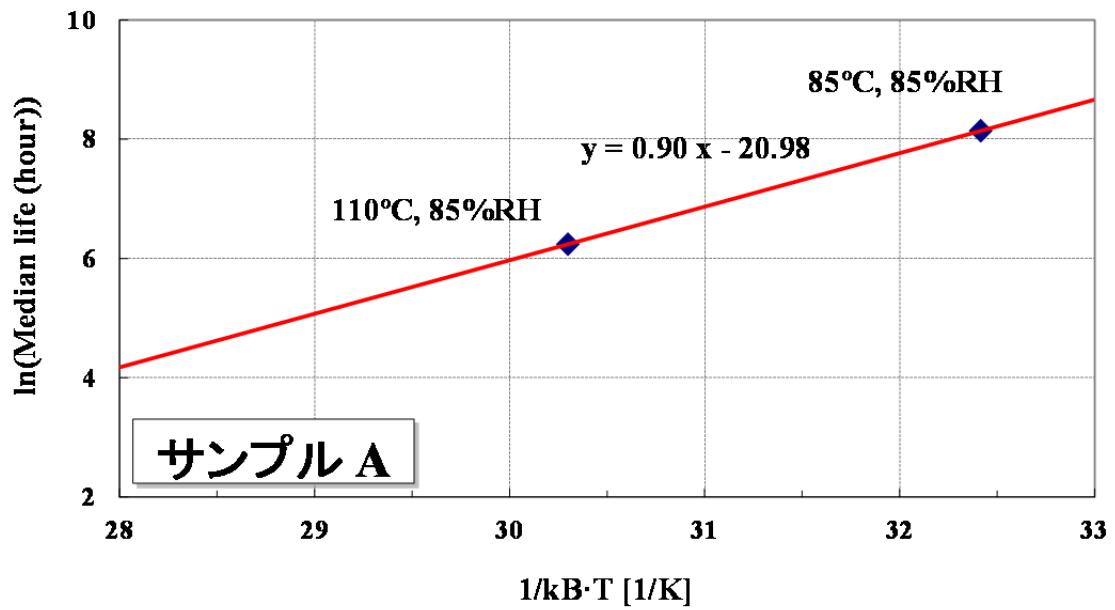


(b) サンプル B

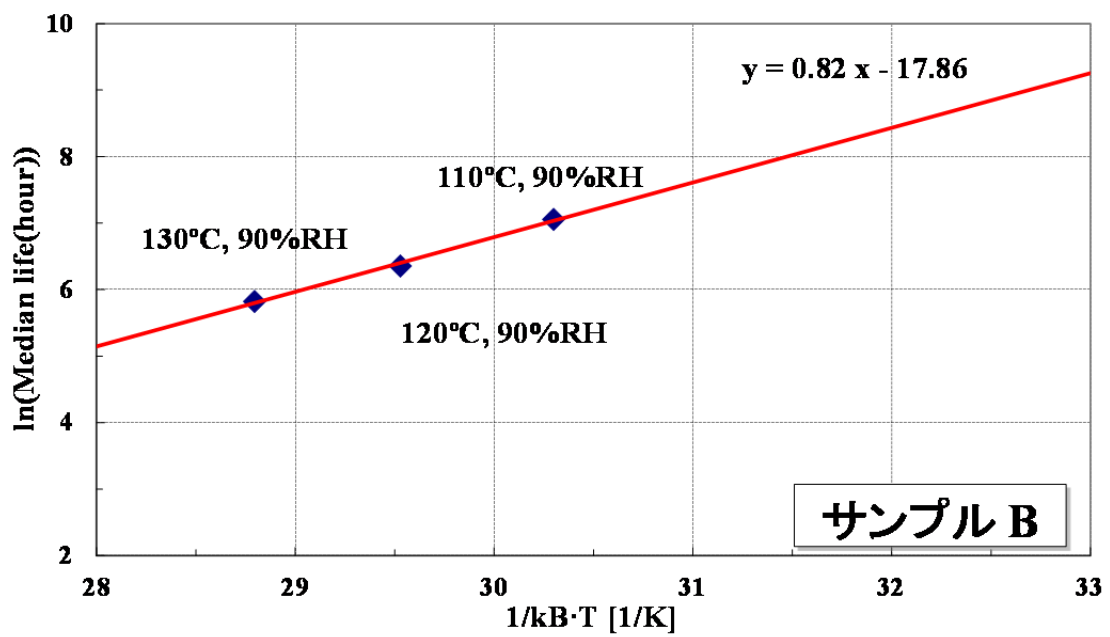


(c) サンプル C

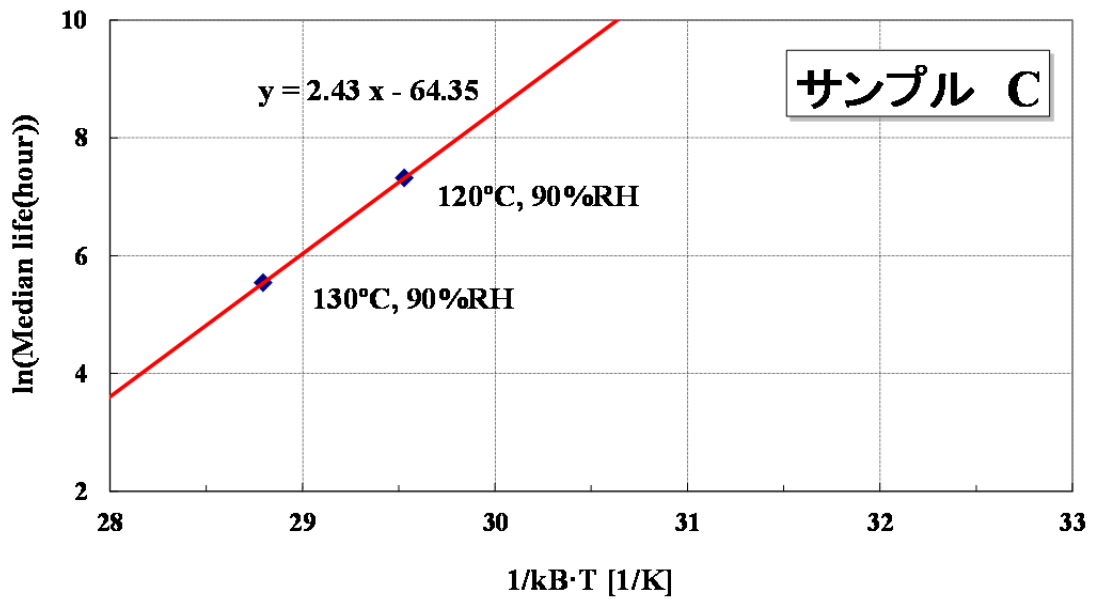
図 2-8 加速劣化試験での累積故障時間のワイブルプロット



(a) サンプル A (85%RH),

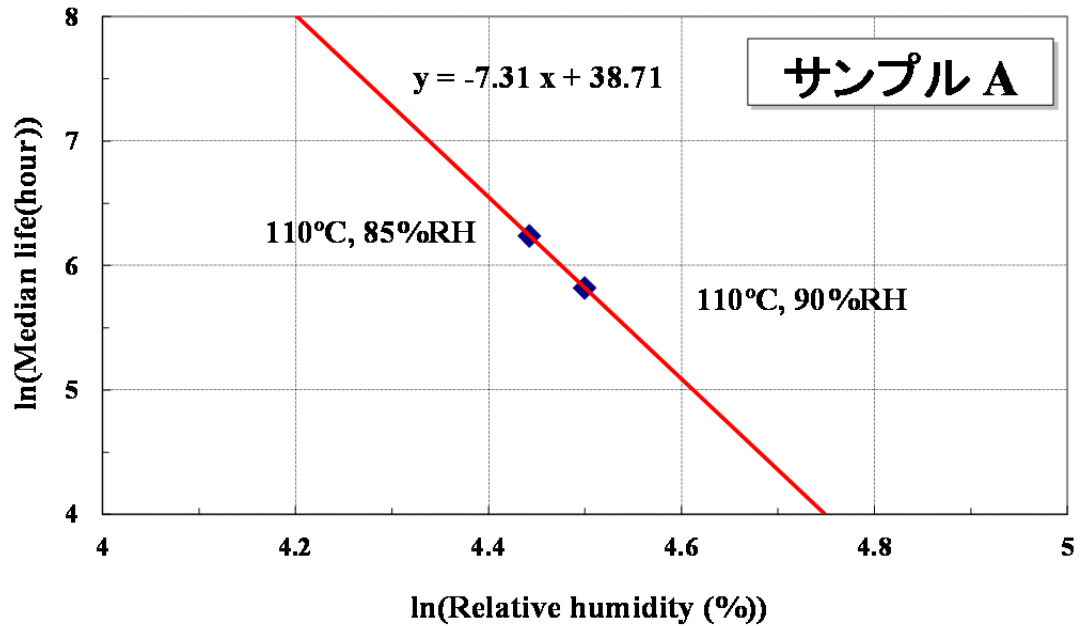


(b) サンプル B (90%RH),

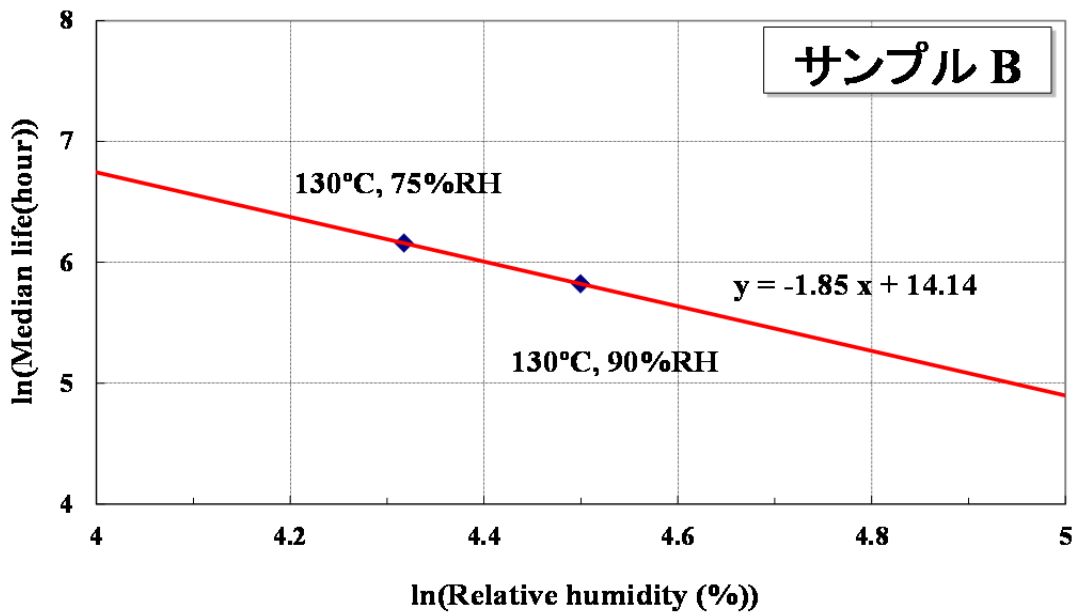


(c) サンプル C (90%RH)

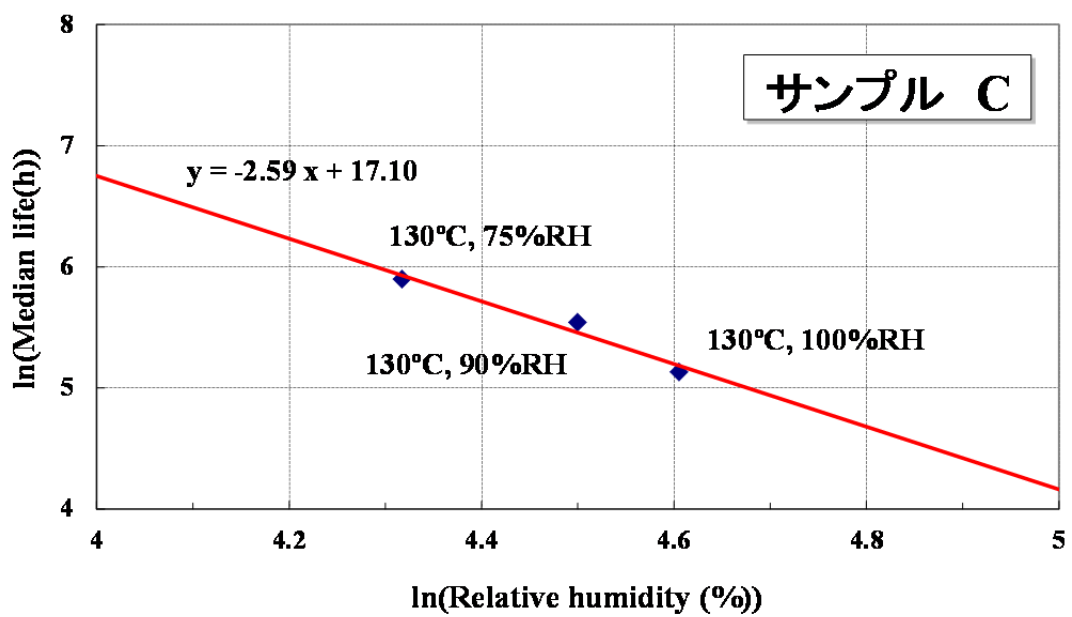
図 2-9 Median life(平均寿命)のアレニウスプロット



(a) サンプル A (110°C)



(b) サンプル B (130°C)



(c) サンプル C (130°C)

図 2-10 Median life(平均寿命)の対数プロットと相対湿度の関係

表 2-5 サンプル A, B, C の形状パラメータ m , 温度加速係数 E , 湿度加速係数 n の結果

	形状パラメータ m	温度加速係数 E [eV]	湿度加速係数 n
サンプル A	1.66	0.90	7.31
サンプル B	6.22	0.82	1.85
サンプル C	2.51	2.43	2.59

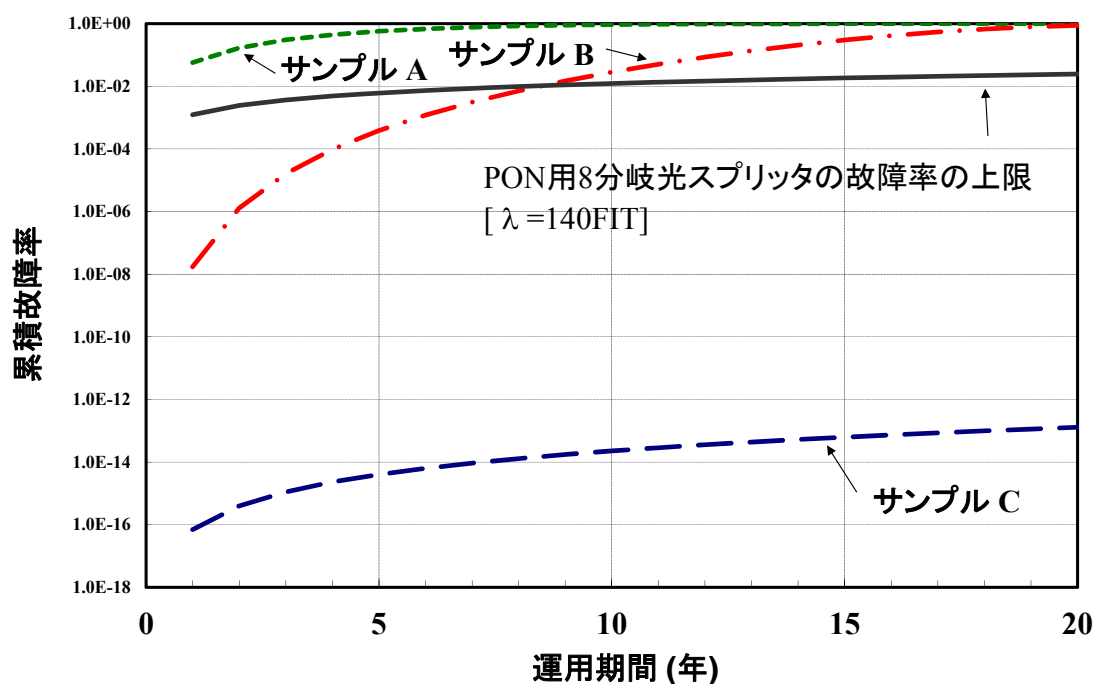


図 2-11 PLC 型 8 分岐光スプリッタの累積故障率の結果(45°C, 100%RH)

2-2-4-3 評価サンプルの故障率の差分分析

サンプル A, B, C の故障率の差異の原因を明らかにするため, 高温高湿試験 (85°C, 85%RH 5000 時間) 前後の特性を比較することで解明を試みた. サンプル A, B, C は, 図 2-2 に示すように PLC チップとファイバアレイで構成されているが, PLC チップと PLC チップとファイバアレイの間の接着材には各々違いがある.

PLC チップとファイバアレイには, 2 種類の故障メカニズムが報告されている[2-21]. この故障メカニズムは, PLC チップとファイバアレイ間の剥離, または位置ずれである. 剥離が発生する場合は PLC チップとファイバアレイの間に空気が入り込むことで反射減衰量が劣化し, 位置ずれが発生する場合は PLC チップの導波路とファイバアレイ上の光ファイバの光軸の位置ずれが発生するため挿入損失が増加する傾向がある.

最初に PLC チップとファイバアレイの間の反射量を高分解能リフレクトメータ(OLCR; optical low coherence reflectometry)にて測定した。図 2-12 に、サンプル A, B, C は、高温高湿試験の前後での反射減衰量の変化を示す。サンプル A は、10 dB 以上、サンプル B, C は 5 dB 以下の変化が確認された。

表 2-6 に、サンプル A, B, C の高温高湿試験の前後での光損失増加の結果を示す。サンプル A, B, C の最大の損失変動の結果は、測定波長 1.31 と 1.55 μm での変動は 5.2 dB と 12.8 dB, 0.42 dB と 0.59 dB, 及び 0.14 dB と 0.07 dB であった。

サンプル A の反射減衰量の変動と損失変動は大きいため、PLC チップとファイバアレイの剥離が発生したと想定される。高温高湿試験により、サンプル A の PLC チップとファイバアレイの間の接着剤の劣化が発生したと考えられる。一方、サンプル B と C では、試験前後での反射減衰量の変動が小さく、ファイバアレイの剥離は発生していないと考えられる。それゆえ、サンプル B と C で使用された接着剤はサンプル A の接着剤と比較して湿熱への耐性が良いと考えられる。

更に損失変動の結果を詳細に調べるため、サンプル B と C の高温高湿試験前後の波長 1.26 μm から 1.66 μm の光スペクトルの比較を行った。尚、8 出力のポートすべての評価を行った。サンプル B の試験前後の損失増加量は 0.3 dB 以上であり、波長が長波長側になるに従って大きくなる傾向が確認され、1.6 μm では最大 0.8dB の損失増加が確認された。一方、サンプル C の損失変動の増加量は、1.26 μm から 1.66 μm まで、0.3 dB 以下に留まった。また波長による顕著な変動量は確認されなかった。サンプル B 及び C の挿入損失の変動は、高温保存試験により PLC チップとファイバアレイの位置ずれの差に起因すると考えられる。試験後のサンプル C の軸ずれ量は、サンプル B の軸ずれ量よりも小さかったと考えられる。PLC チップとファイバアレイ間の接着剤が高温保存試験中に軟化することで、PLC チップとファイバアレイの位置ずれが発生するが、サンプル C の軸ずれ量はサンプル B の軸ずれ量より小さかったことから、湿熱に対してサンプル C の接着剤は、サンプル B の接着剤よりも優れていたことが明らかになった。

また、シリカガラスに他の物質がドーパされている場合に、高温により長波長側の光学特性が劣化することが一般的に知られている[2-22]。このため、PLC チップに他の物質がドーパされている場合には、光損失も高温により長波長側で増加しうる。このため、サンプル B の PLC チップの光学特性も高温により長波長側で光損失が増加した可能性がある。

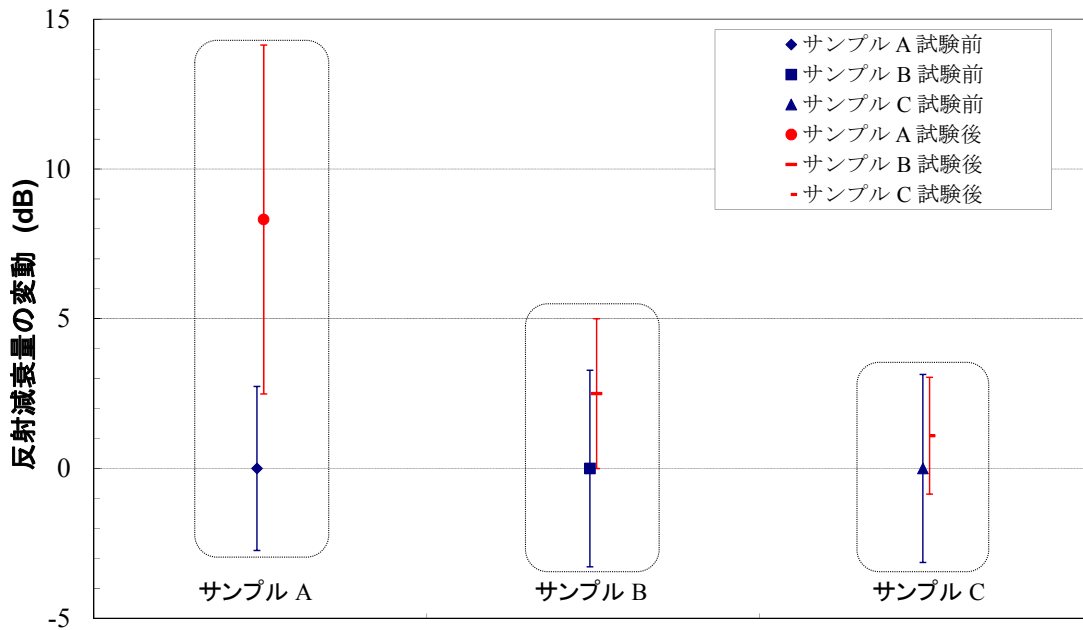


図 2-12 高温高湿試験(85°C85%RH)前後でのサンプル A, B, C の反射減衰量の変化

表 2-6 高温高湿試験前後での挿入損失変動結果

	波長	サンプル A	サンプル B	サンプル C
損失変動 (dB)	1.31 μm	≤ 5.2	≤ 0.42	≤ 0.14
	1.55 μm	≤ 12.8	≤ 0.59	≤ 0.07

2-2-5 まとめ

PON 用の屋外設置光スプリッタに要求される累積故障率を明らかにした。また PLC 型光スプリッタの PON 用途の光学特性と屋外環境下での信頼性を評価して、いずれも十分な特性を有することを明らかにした。加速劣化試験により PLC 型光スプリッタの累積故障率を算出した。その結果、評価した PLC 型光スプリッタは PON 用光スプリッタに要求される累積故障率を十分に下回っていたことを確認した。

2-3 架空光クロージャ用のスプリッタモジュールの設計・試作と信頼性評価

2-3-1 はじめに

2-3 では、施工性向上のため、架空光クロージャ向けに設計・試作した PON 用のスプリッタモジュールについて説明する。また PON 用の光スプリッタとして要求される光学特性と温湿度特性、さらに屋外環境下で信頼性の評価結果を説明する。

2-3-2 スプリッタモジュールの設計・試作

架空光クロージャ設置用として施工性を向上した新しいスプリッタモジュールを設計・試作した。

表 2-7 に従来品の PLC 型光スプリッタとスプリッタモジュールの施工性の比較を示す。従来の PLC 型光スプリッタは、メカニカルスプライスで接続が必要であった。また光ファイバの素線の余長は、トレイに収納する必要があった。施工性向上のため、スプリッタモジュールの光接続は、入出力側ともプラグ・ソケットタイプの光コネクタを具備し、この光コネクタは現場付け可能な架空用コネクタと相互接続が可能な形状とした[2-24]。また光ファイバ芯線は、予め本体に収納された形状とし、本体外部の芯線は光コード化された形状とした。

図 2-13 に試作した 8 分岐スプリッタモジュールの外観を示す。また表 2-8 に 8 分岐スプリッタモジュールの機能・用途・構造を示す。スプリッタモジュールの構成は、大きく 3 つの部分に大別される。モジュール本体部分は PLC 型光スプリッタを内蔵した構造になっており、大きさ 94 x 122 x 5 (L x W x H [mm]) である。尚、2-2 で説明した PLC 型光スプリッタ (サンプル C) を使用している。その他、入出力光ファイバ芯線を単心毎にコード化した光コード部分、さらに入出力光ファイバコード端に具備された光コネクタ部分に大別される。このスプリッタモジュールは架空光クロージャの内部トレイに設置可能な形状になっている[2-23]。

以上の構造により、光接続作業と収納作業が簡略化され、従来の PLC 型光スプリッタと比較して、スプリッタモジュールは、架空光クロージャに設置する時間が 46 分から 17 分に短縮された[2-23]。これにより、架空光クロージャの施工性が向上し、光線路設備の迅速な構築に寄与できる。また通信サービス変更等により光スプリッタ下部側の接続の切替が必要な際にも、従来の PLC 型光スプリッタでメカニカルスプライス使用していた場合のように、切替・接続の度に光スプリッタの光ファイバの芯線を切り縮める必要が無い。このため芯線の切り縮めによる切替回数の制限が無くなり、設置後の運用性の向上にも寄与できる。

表 2-7 PLC 型光スプリッタとスプリッタモジュールの施工性の比較

	PLC 型光スプリッタ	スプリッタモジュール
光接続	メカニカルスプライスによる接続	プラグ・ソケットタイプのコネクタ接続
光ファイバ素線の余長収納	光ファイバ素線は架空クロージャのトレイに施工時に収納	光ファイバ素線部分は、予めスプリッタモジュール筐体内部に収納

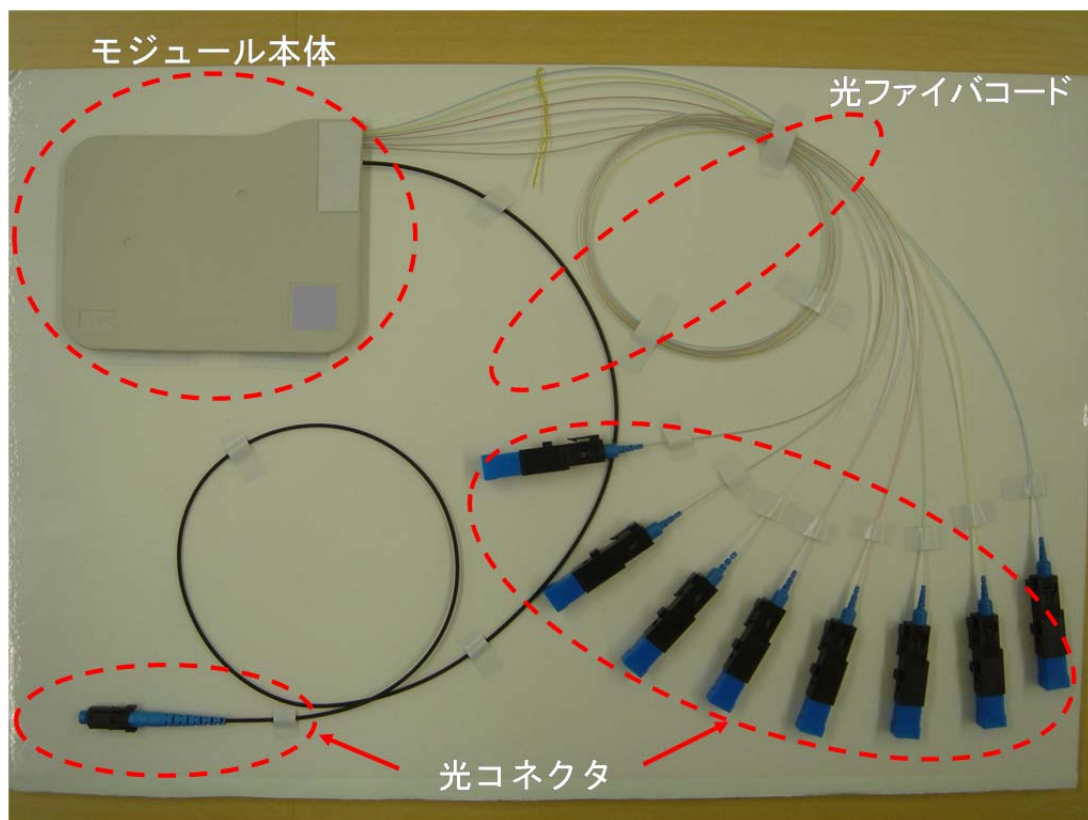


図 2-13 8分岐スプリッタモジュールの外観

表 2-8 8分岐スプリッタモジュールの機能・用途・構造

項目	内容
機能	PON 用 8 分岐光スプリッタ
用途	屋外の架空光クロージャ内に設置
寸法	94 x 122 x 5 (縦 x 横 x 厚さ: mm)
光ファイバコード	入力側：直径 1.7 mm (1 本) 出力側：直径 0.9 mm (8 本)
光コネクタ	入力側：プラグタイプの光コネクタ (1 心) 出力側：ソケットタイプの光コネクタ (8 心)

2-3-3 スプリッタモジュールの光学特性

前述のように光サービスでの通信波長は、 $1.31\sim 1.55\mu\text{m}$ が主に使用されている[2-8]. このため PON 用の光スプリッタも少なくとも使用波長帯の両端の波長である $1.31/1.55\mu\text{m}$ での光学特性を評価する必要がある.

またこのスプリッタモジュールのように屋外で使用されるパッシブコンポーネントは、安定したデータ通信・映像配信のサービスを実現するため、屋外環境での温度変化に対して損失変動が抑制されている必要がある. 屋外用の光スプリッタの使用環境条件は、 $-40^{\circ}\text{C}\sim 75^{\circ}\text{C}$ で規定されているので[2-10], 屋外設置用の光スプリッタの温湿度特性として、上記の温度範囲での損失変動を検証する必要がある.

PON 用光スプリッタとして光学特性を評価するため、スプリッタモジュールの波長 $1.31/1.55\mu\text{m}$ での挿入損失値を測定した.

図 2-14 にスプリッタモジュールの挿入損失の分布を示す. 波長 $1.31\mu\text{m}$, $1.55\mu\text{m}$ の平均値及び最大値は、各々 9.78 dB , 9.78 dB , 及び 10.27 dB , 10.18 dB であった. これらの値は、モジュール内部の 8 分岐光スプリッタと入出力光コード端の光コネクタ接続点 1 箇所での挿入損失を含んだ値にも関わらず、PON 用 8 分岐光スプリッタの挿入損失値の国際規格 (10.5 dB 注: コネクタ接続を含まない値) 以下の値であった[2-9].

図 2-15 に、8 分岐スプリッタモジュールの光スペクトルの例を示す. 光スペクトルは、波長 $1.2\sim 1.7\mu\text{m}$ の範囲で平滑であって、波長 $1260\text{nm}\sim 1360\text{nm}$, 及び $1480\text{nm}\sim 1660\text{nm}$ の範囲で、損失均一性 (Uniformity) は、 1.08 dB であった. この値は、ITU-T の 8 分岐光スプリッタの一様性の規格値 1.3 dB より小さい.

従って、このスプリッタモジュールは、挿入損失と損失均一性に関して、PON 用光スプリッタとして十分な光学特性を有しているが確認できた.

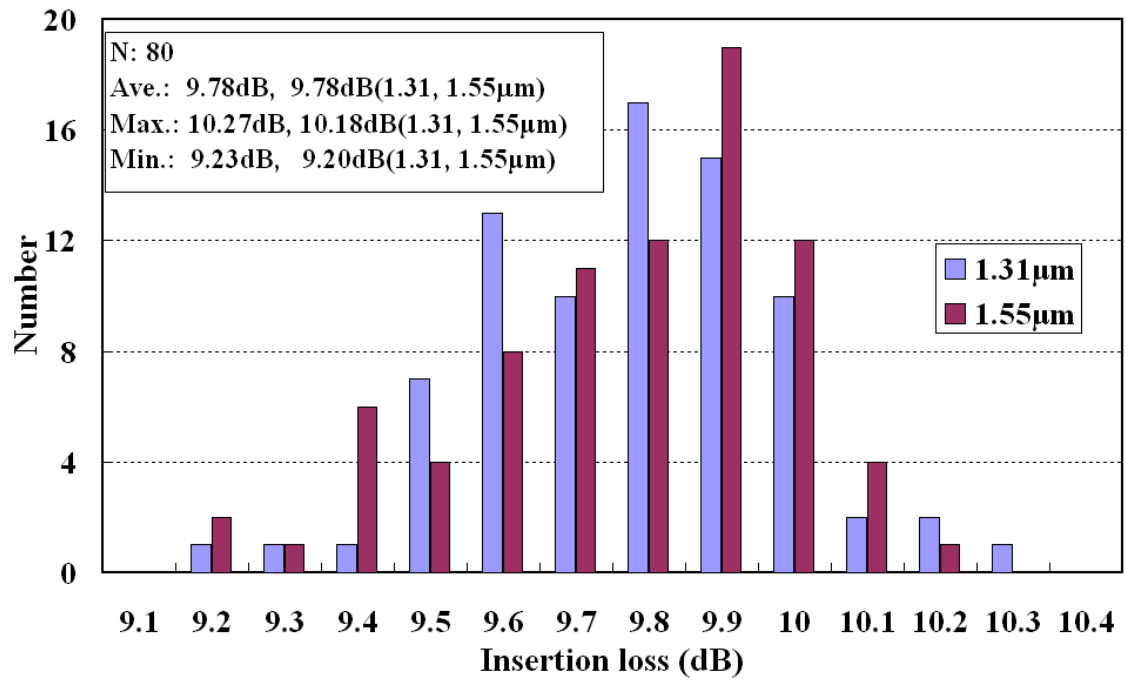


図 2-14 スプリッタモジュールの挿入損失の分布(1.31/1.55 μ m)

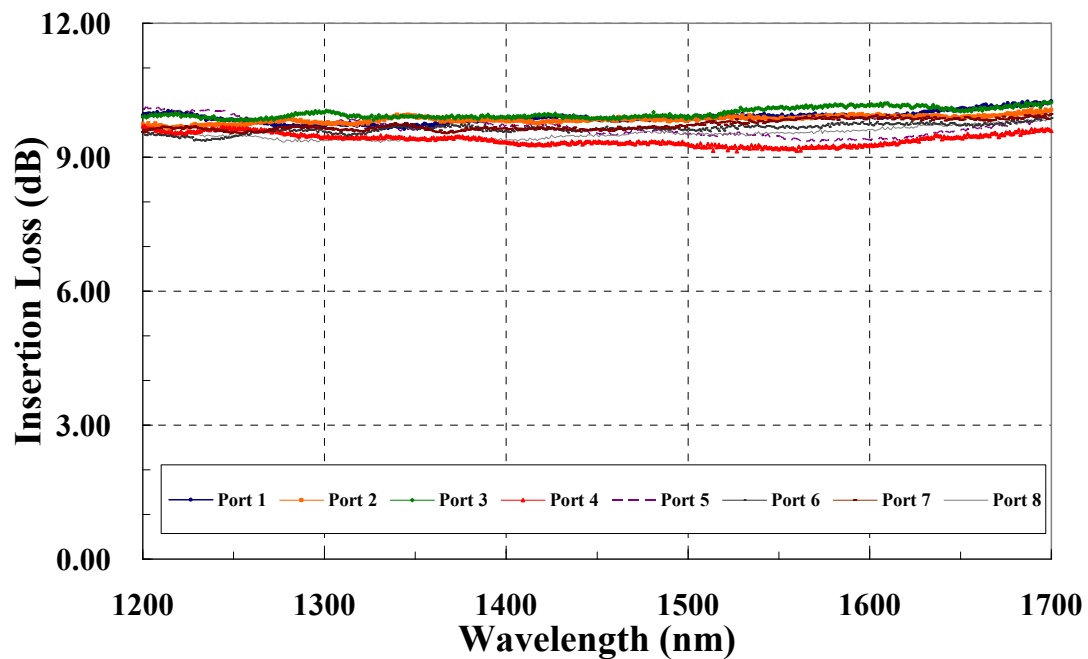


図 2-15 スプリッタモジュールの光スペクトルの例

2-3-4 スプリッタモジュールの温湿度特性

屋外での温度変化によるスプリッタモジュールへの特性変化を評価するため、温湿度サイクル試験 (-40~75°C, 10~80%RH, 8h/cycle, 42cycles) を実施した。図 2-16 に評価結

果を示す。測定波長 $1.31\ \mu\text{m}$ 、及び $1.55\ \mu\text{m}$ での試験途中の変動量（2ヶ所の光コネクタの接続点を含む）の最大値は各々 0.30dB 、 0.23dB であり、良好な試験結果であった。

スプリッタモジュールの損失変動には、PLC 型光スプリッタ、光コネクタ、光コードを ITU-T L.37 の基準値の $0.3\ \text{dB}$ 以下であった[2-10]。他のパッシブコンポーネントの例として、MT コネクタの温度サイクル試験($-40 \sim 70\ ^\circ\text{C}$ 、8時間/サイクル、10サイクル)で $0.3\ \text{dB}$ 以下であった事例が挙げられる[2-25]。従って挿入損失の変動量は同程度であるため屋外設備として十分な温湿度特性を有していることが分かる。

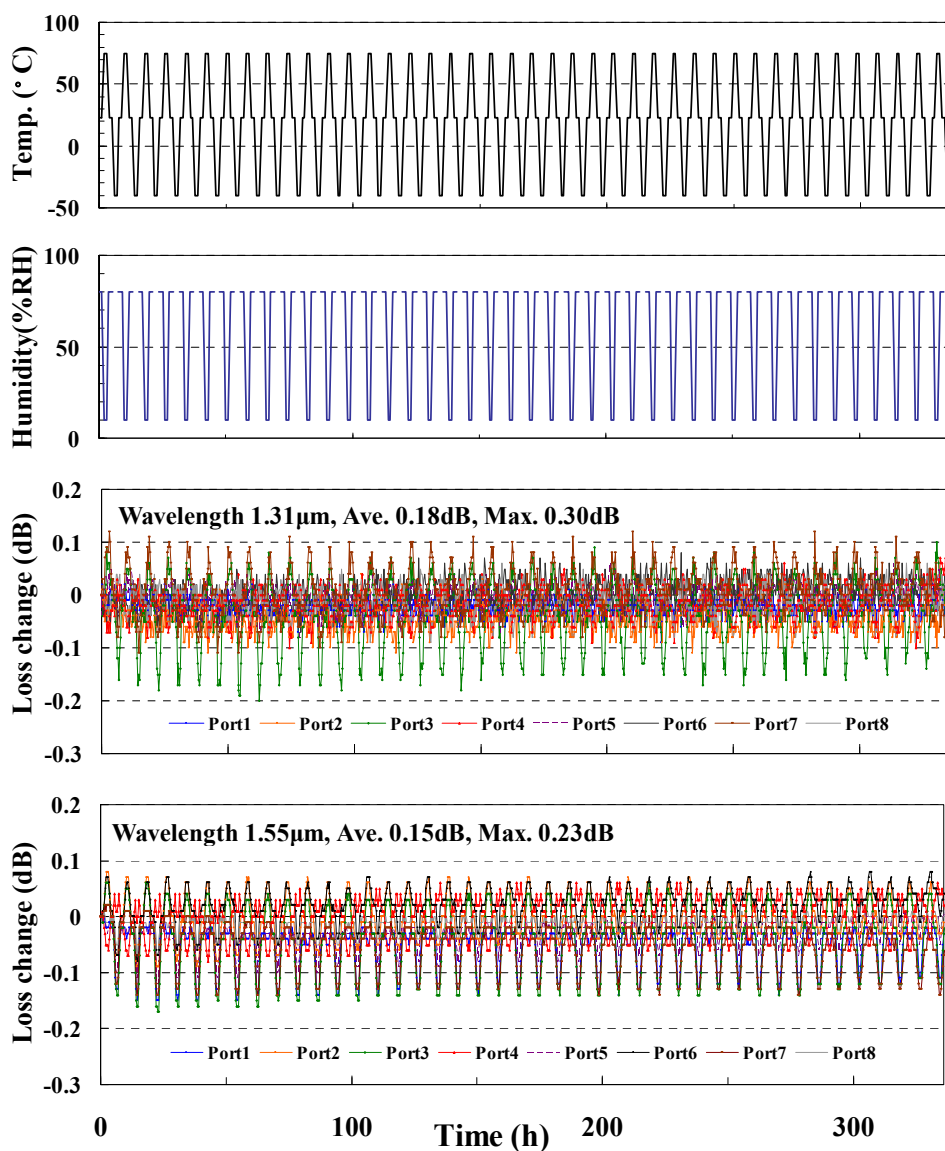


図 2-16 スプリッタモジュールの温湿度特性の例（波長 $1.31/1.55\ \mu\text{m}$ ）
（温湿度条件： $-40 \sim 75\ ^\circ\text{C}$ 、8 hours/cycle、42 cycles）

2-3-5 スプリッタモジュールの屋外環境下の信頼性

2-2 では、PLC 型光スプリッタが十分な信頼性を有することを示した。スプリッタモジュールに具備された新しい光コネクタの長期信頼性として、高温試験(85°C, 336 時間)、高温高湿試験(60°C, 95%RH, 336 時間)、ヒートサイクル試験 (-40°C~75°C, 8 時間/1 サイクル, 計 42 サイクル) で、波長 1.31/1.55 μm で損失変動が 0.3 dB 以下であることが報告されている[2-23]。それゆえ、光コネクタと光コード部分を含んだ、スプリッタモジュール全体の信頼性を検証した。

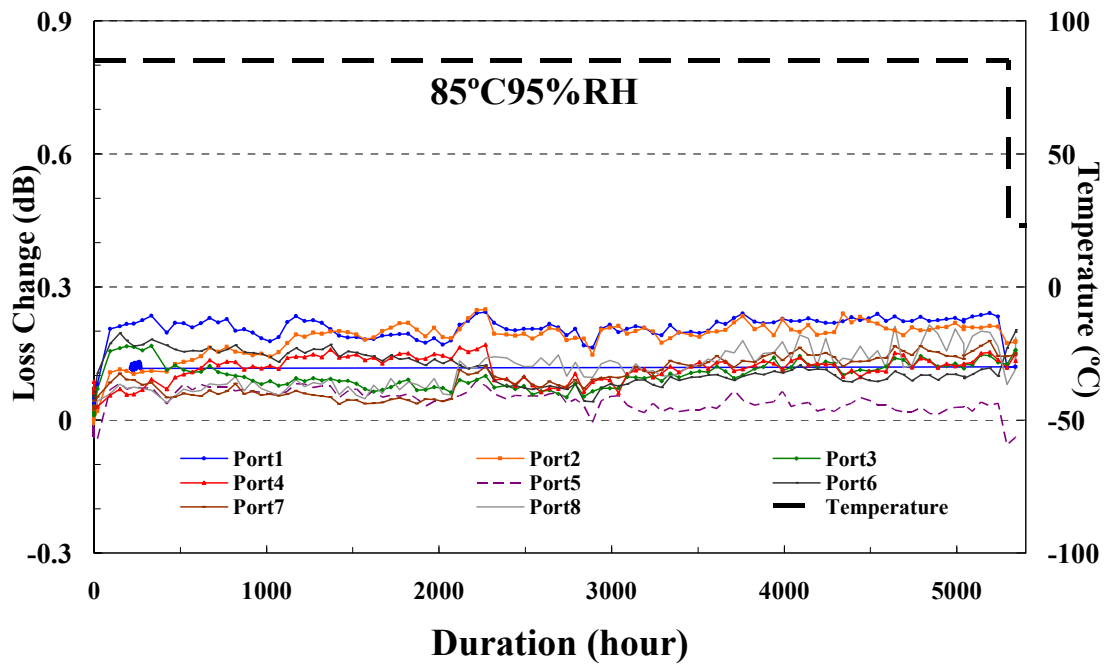
表 2-11 に、8 分岐スプリッタモジュールの 3 種類の信頼性評価の結果を示す。温度サイクル試験(-40°C~85°C, 4.5 時間/1 サイクル, 500 サイクル)の試験前後の最大の損失変動値は、波長 1.31 μm , 1.55 μm でそれぞれ 0.22 dB, 0.29 dB であった。また低温試験(-40°C, 4000 時間)の最大の損失変動値は、波長 1.31 μm , 1.55 μm でそれぞれ 0.23 dB, 0.31 dB であった。また高温高湿試験(85°C, 95%RH, 5300 時間)の最大損失変動値は、波長 1.31 μm , 1.55 μm でそれぞれ、0.30 dB, 0.28 dB であった。いずれの試験でも試験後に、スプリッタモジュールのモジュール本体や光ファイバコード、光コネクタに損傷は確認されなかった。

高温高湿試験については、より詳細に光スプリッタモジュールへの影響を調べるため、試験中の損失変動を継続的に測定した。図 2-17 (a)(b)にそれぞれ、波長 1.31 μm , 1.55 μm で 5300 時間を継続して、測定した結果の例を示す。8 出力ポートの損失変動は、試験中も 0.3 dB 以下であった。また図 2-18 は高温高湿試験の損失変動の分布を示す。波長 1.31 μm , 1.55 μm で損失変動の平均値は、0.10dB 以下であった。従って、このスプリッタモジュールは、屋外環境下を想定した高温高湿に十分な耐久性を有していることが分かる。

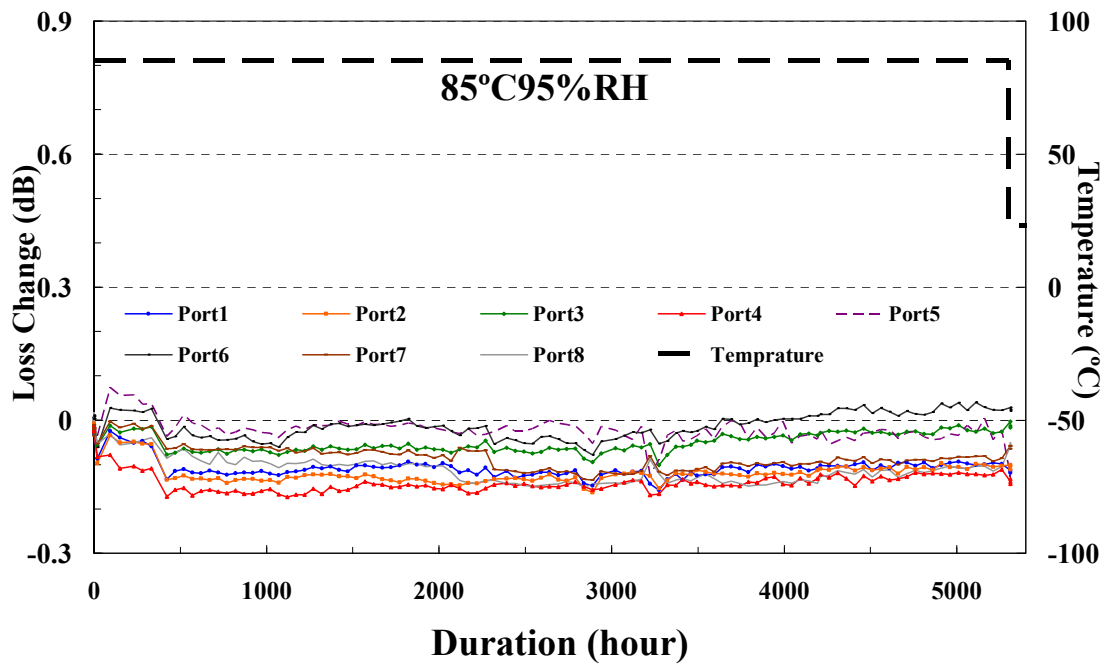
屋外環境下の PON 用の 8 分岐光スプリッタの 3 種類の信頼性試験の ITU-T での基準は、光分岐部のみで、損失変動の最大値が、0.3dB の規定がある[2-10]。ここで評価したスプリッタモジュールは、内蔵された PLC 型光スプリッタに加え、光コネクタ、光コード部も含めて、損失変動が 0.3 dB を超えていない。従って、このスプリッタモジュールは、温度変化、低温、高温高湿に対して十分な信頼性を有していることが分かる。

表 2-11 8 分岐スプリッタモジュールの信頼性試験結果

試験項目	試験条件	サンプル数	波長 [μm]	最大損失 変動 [dB]
温度サイクル	-40~85°C, 500cyc. 4.5h/cycle	40	1.31	0.22
			1.55	0.29
低温	-40°C, 4000h	40	1.31	0.23
			1.55	0.31
高温高湿	85°C, 95%RH, 5300h	40	1.31	0.30
			1.55	0.28



(a) 波長 1.31 μm での結果



(b) 波長 1.55 μm での結果

図 2-17 スプリッタモジュールの高温高湿試験結果(85°C 95%RH 5300 時間)

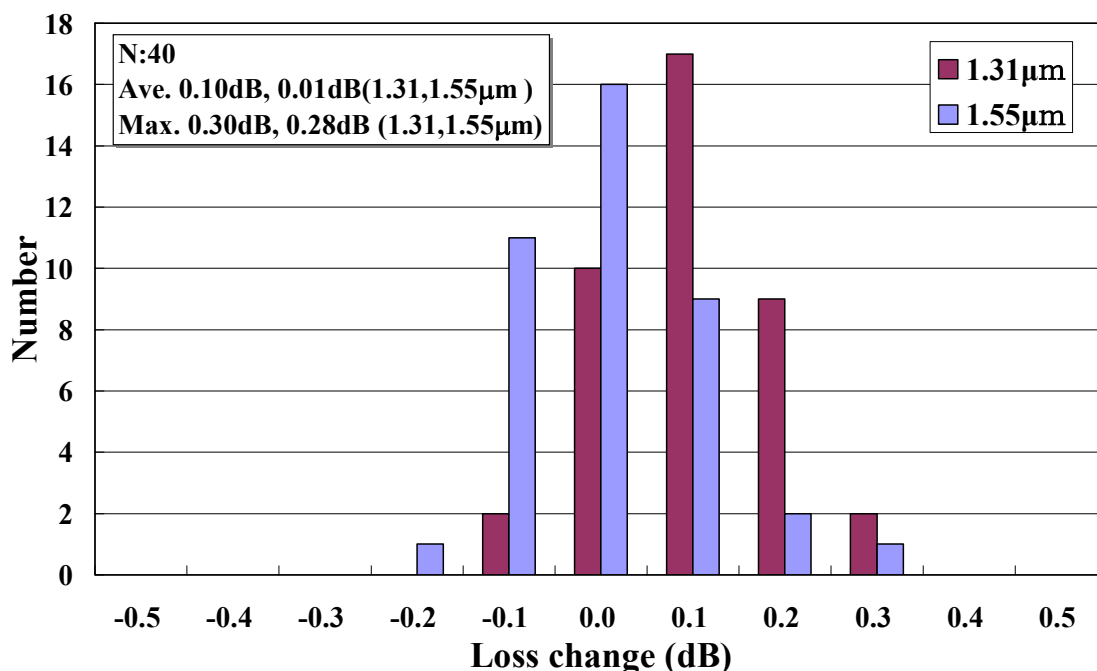


図 2-18 高温高湿試験の損失変動結果の分布 (85°C 95 %RH, 5300 hours)

2-3-6 PON 用光線路設計のシミュレーション

設計・試作したスプリッタモジュールを使用する PON 用の光線路を想定し、光線路損失をシミュレーションすることで前述した挿入損失値、および温湿度サイクルの変動値の妥当性を評価した。以下のその評価内容を説明する。

GE-PON の規格には、上り信号 (波長 1.31 μ m) と下り信号 (波長 1.49 μ m) また各々伝送距離 10km , 20km の合計 4 種類の規格 (1000BASE-PX10-U/D, 1000BASE-PX-20-U/D) が存在する[2-26]。このうち上り信号 (波長 1.31 μ m) で伝送距離 10km の場合について以下考察する。この規格での OLT と ONU 間のパワーバジェットは 23 dB であった。

次に光線路損失を見積もった結果を示す。前提条件として図 2-19 に示すような光線路全体で 32 分岐の PON 用光線路設備を想定した。GE-PON の OLT から ONU までの全光線路長を最大の 10.0km とし、そのうち 9.0km を地下区間として 1.0km 置きに融着接続とし、架空の 1.0km の区間に計 2 箇所メカニカルスプライスによる接続がなされているものとする。また 8 分岐のスプリッタモジュールは架空区間の端から 0.5km の位置に設置されているものとする。

この光線路の全損失値 L_{total} は以下の式(2-8)で表される。

$$L_{total} = L_{4sp} + L_{under} + L_{con_f} + L_{air} + L_{8sp} + L_{con_m} + \Delta L_{env} \quad (2-8),$$

この式で、 L_{4sp} は所内 4 分岐スプリッタの損失値、 L_{under} は地下光ケーブル (9.0 km)

の損失値, L_{con_f} は地下光ケーブル区間の融着接続 (9箇所) の合計の損失値, L_{air} は架空ケーブル (計 1.0 km) の損失値, L_{8sp} はスプリッタモジュール (8分岐) の損失値, L_{con_f} は架空ケーブル区間のメカニカルスプライスによる接続 (2箇所) の損失値, ΔL_{env} はスプリッタモジュールの温度変化による損失変動値である。

表 2-12 に光線路設備の構成品である, 所内 4 分岐スプリッタ [2-27], 光ケーブル [2-28], 融着接続 [2-29], スプリッタモジュール, メカニカルスプライス [2-30] の損失値を示す。尚, スプリッタモジュール (8 分岐) の損失値は, 前述の波長 $1.31 \mu\text{m}$ の挿入測定 の最大値の 10.27 dB とした。

表 2-13 に, 表 2-12 の値を基に計算した各光線路区間の損失値を示す。尚, ΔL_{env} のスプリッタモジュールの温度変化による損失変動値は, 前述の損失変動値の波長 $1.31 \mu\text{m}$ の最大値より, 最大 0.30 dB とした。

図 2-20 に式 (2-8) と表 2-13 から導かれる, 線路損失値と光線路長 の関係を示す。光線路の全損失値 L_{total} は 22.17dB (温度変化による変動無し) であり, 損失変動 ΔL_{env} の 0.3dB を加えても, 22.47dB となる。よって, いずれの値も GE-PON のパワーバジェット 23dB を下回る。

以上のように規格上で光線路長が最長となる 10km の PON 用光線路を想定した場合でも, このスプリッタモジュールは PON 用スプリッタとして, 挿入損失値および温湿度変動に関する十分な特性を有することが確認できた。

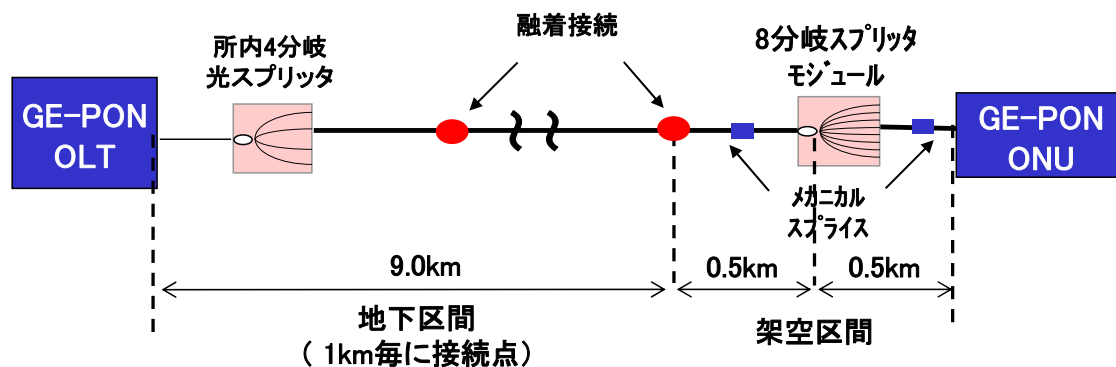


図 2-19 PON 用光線路設備 (光線路長 10km)

表 2-12 光線路設備の構成品の損失値 (波長 $1.31 \mu\text{m}$)

種別	所内 4 分岐 スプリッタ	光ケーブル	融着接続	8 分岐スプリッタ モジュール	メカニカル スプライス
光損失値	7.3 dB [2-27]	0.35 dB/km [2-28]	0.1 dB [2-29]	10.27 dB	0.1 dB [2-30]

表 2-13 各線路区間の損失値 (波長 1.31 μ m)

項目	L_{4sp}	L_{under}	L_{con_f}	L_{8sp}	L_{air}	L_{con_f}	ΔL_{env}
光損失値 [dB]	7.3	3.15	0.9	10.27	0.35	0.2	0.3

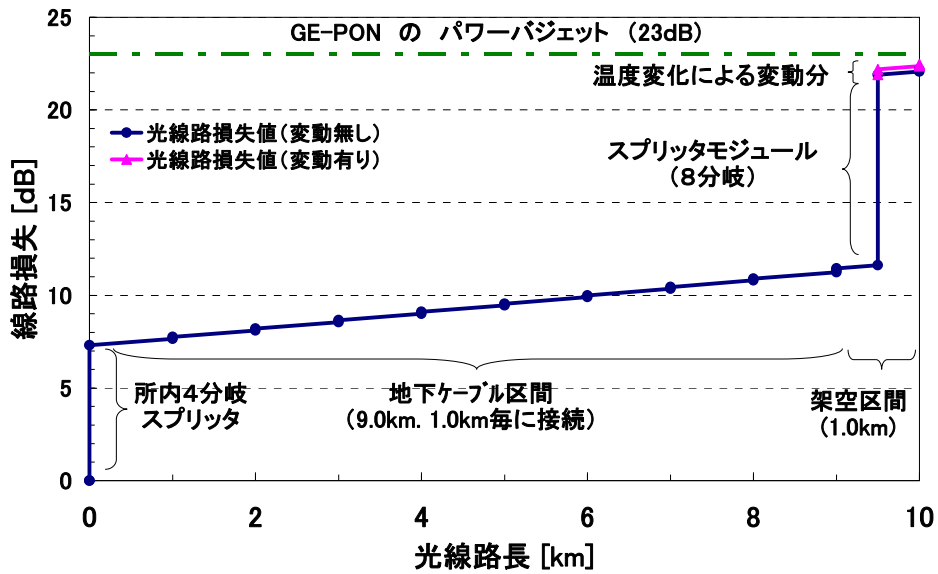


図 2-20 光線路損失シミュレーション結果

2-3-7 まとめ

架空光クロージャへの光スプリッタの設置を簡素化するため、ソケットタイプとプラグタイプの光コネクタを具備し、光心線を光コード化した架空光クロージャ向けの新たな光スプリッタモジュールを設計・試作した。このスプリッタモジュールは、光学特性結果や光線路シミュレーションの結果より、屋外に使用する PON 用の光スプリッタとして、十分な光学特性と環境特性を有していることを示した。また、温度サイクル、低温、高温高湿試験の信頼性試験を実施し、このスプリッタモジュールが屋外環境下での十分な信頼性を有していることを示した。

2-4 架空光クロージャ用の小型スプリッタモジュールの設計・試作と信頼性評価

2-4-1 はじめに

2-4 では、従来のスプリッタモジュールより、面積比で半分のスプリッタモジュールについて説明する。この小型スプリッタモジュールのために使用した ITU-T G.657.A1 に準拠した光ファイバ (推奨される最小曲げ半径 15 mm) の PLC 型光スプリッタの光学特性と信頼

性の評価結果について説明する。また試作した小型スプリッタモジュールの構造と、光学特性、温湿度特性、機械特性、耐環境特性、屋外環境下での信頼性試験の結果について述べる。

2-4-2 小型スプリッタモジュールの設計

光加入者数の増加に対応するため、架空光クロージャに搭載できる光スプリッタの数量を増加する必要が生じた。このため、従来の架空光クロージャのトレイに従来のスプリッタモジュールを2倍の4個収納する必要が生じた[2-12]。このため、新たなスプリッタモジュールの設計を行った。

光スプリッタなどのパッシブコンポーネント収納するモジュールの大きさに影響を与える要因の1つに、光ファイバの余長部分を収納する際の光ファイバの曲げ半径の寸法が挙げられる。このため、スプリッタモジュールの構造を設計するために、モジュールに収納する光スプリッタモジュールの曲げ半径に依存するモジュール大きさを見積もった。図2-21にPLC型光スプリッタを収納したスプリッタモジュールの内部構造を示す。過度の曲げ損失の発生を避けるため、スプリッタモジュール内に任意の曲げ半径 r で収納する空間が必要である。また、モジュール内に、PLC型光スプリッタの筐体を収容するスペースと光ファイバの保持するための溝も必要である。PLC型スプリッタの筐体長 L は、42 mm であり、光ファイバを収納する溝の幅 d は、6 mm と見積もった。光ファイバコードの端を固定するスペースは、モジュールの端に設ける。光ファイバコードの端を固定するスペースの長さ h は、40 mm と見積もった。従って、モジュール外部の横方向の必要な長さ x は、以下のように表される。

$$x = h + L + r + d \quad (2-9)$$

また、モジュールの縦の必要な長さ y は次のように表される。

$$y = 2d + 2r \quad (2-10)$$

スプリッタモジュールに必要な面積 S は、式(2-9)(2-10)から、以下のように表される。

$$S = (h + L + r + d) \cdot (2d + 2r) \quad (2-11)$$

従来のモジュールトレイの大きさ(248 mm x 88 mm)とスプリッタモジュールの式(2-11)から、従来のモジュールトレイに収納可能なスプリッタモジュールの数量を見積もった。図2-22に光ファイバの曲げ半径と従来のトレイへのスプリッタモジュールの収納可能数とスプリッタモジュールの面積の関係を示す。従来のトレイに4個のスプリッタモジュールを収納するためには、曲げ半径が16 mm以下に抑える必要がある。このため、IUT-T G.657.A1で規定され[2-31]、曲げ半径が15mmの光ファイバで実現可能なことが分かる。また従来のトレイの寸法には、曲げ半径30mmで規定されたIUT-T G.652[2-32]の光ファイバでは、2個の収納に留まることが分かる。従って、IUT-T G.657.A1に準拠した光ファイバ(以下R15仕様光ファイバ、と称す)を用いたPLC型光スプリッタを用いて検討を行った。

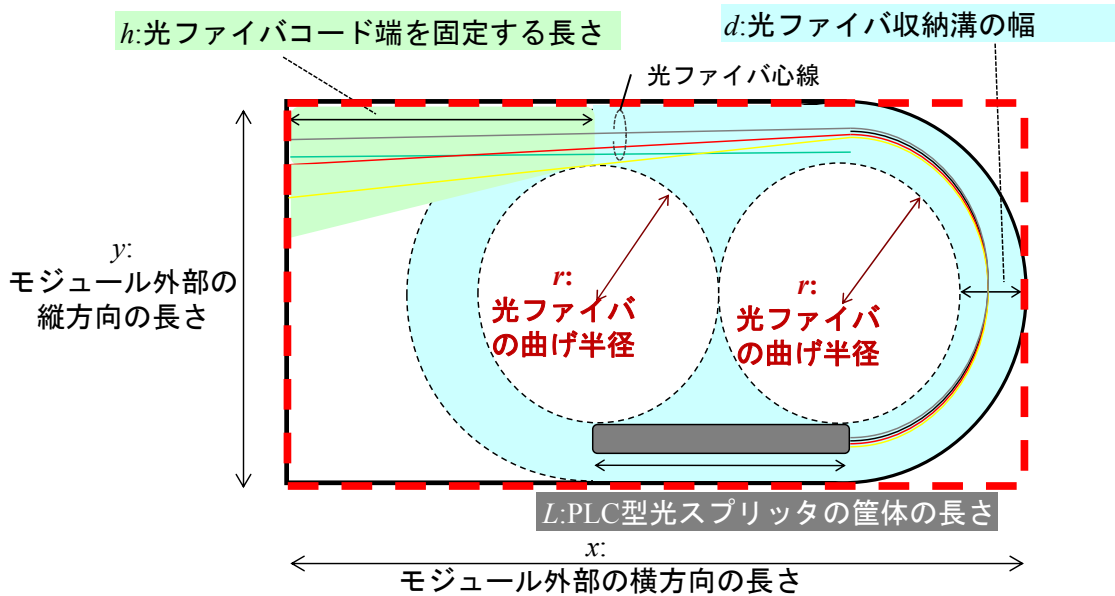


図 2-21 スプリッタモジュールの内部構造

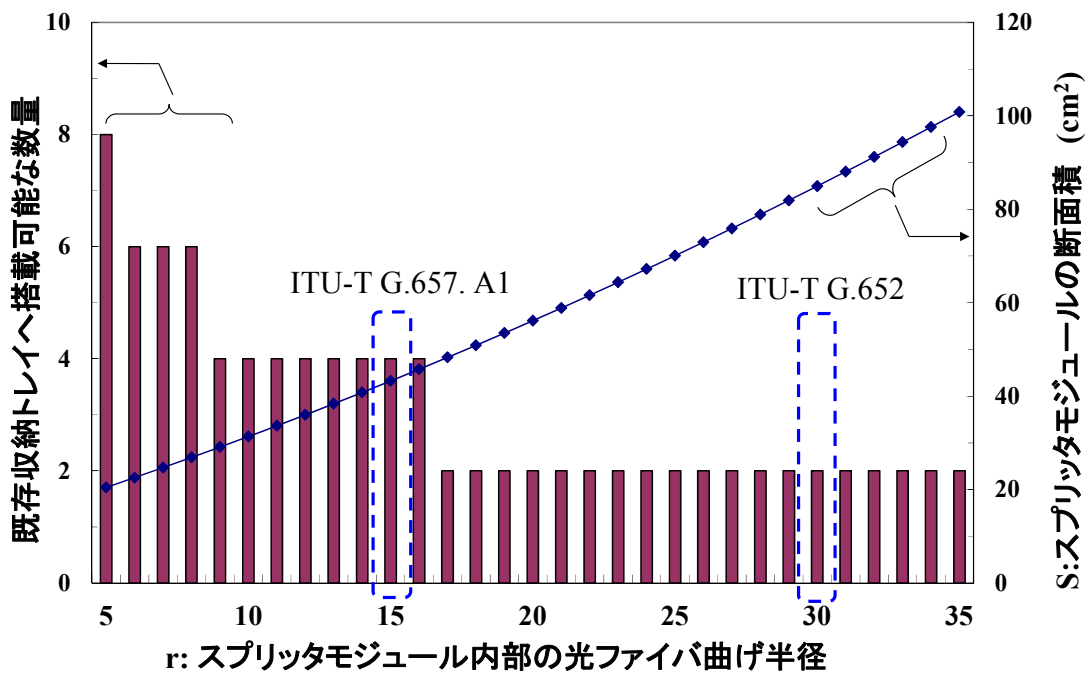


図 2-22 スプリッタモジュール内の光ファイバの曲げ半径と既存収納トレイへの搭載可能数とスプリッタモジュールの断面積の関係

2-4-3 小型スプリッタモジュール向け R15 仕様光ファイバの PLC 型光スプリッタ

小型スプリッタモジュールのために、光ファイバの曲げ半径は、15 mm の PLC 型光スプリッタが必要である。このため、ITU-T G.657.A1 に準拠した R15 仕様の光ファイバを用い

た PLC 型 8 分岐光スプリッタを評価した。

2-4-3-1 R15 仕様光ファイバの PLC 型光スプリッタの構造

R15 仕様光ファイバを用いた PLC 型 8 分岐光スプリッタを設計，試作した。光スプリッタは，シリカガラスの PLC チップと， $127\mu\text{m}$ ピッチのファイバアレイ[2-18]，2 枚の 4 心ファイバ心線で構成される。PLC 型光スプリッタの筐体の，高さ，幅，長さは，4 mm，4 mm，42 mm である。

2-4-3-2 R15 仕様光ファイバの PLC 型光スプリッタの光学特性

R15 仕様光ファイバを用いた PLC 型 8 分岐光スプリッタの光学特性を測定した。日本で広く用いられている，GE-PON の通信波長は，上り波長は $1.31\mu\text{m}$ ，下り波長は $1.49\mu\text{m}$ であり，映像用の下り波長は， $1.55\mu\text{m}$ である[2-19]。それ故，PON 用のパッシブコンポーネントの光学特性は，少なくとも波長 $1.31\mu\text{m}$ から $1.55\mu\text{m}$ で評価される必要がある。

表 2-14 に，この PLC 型光スプリッタの光学特性の評価結果を示す。波長 $1.31\mu\text{m}$ と波長 $1.55\mu\text{m}$ の平均挿入損失は，それぞれ 9.70 dB と 9.72 dB で，最大挿入損失は，9.92 dB と 9.93 dB であった。これらの挿入損失の値は，PON 用の 8 分岐光スプリッタの ITU-T の，波長 $1.31\mu\text{m}$ と波長 $1.55\mu\text{m}$ の挿入損失の規格値 10.5 dB と比較して，十分に低い[2-9]。

反射減衰量は，いずれも 60 dB 以上の値であった。この値は，PON 用の 8 分岐光スプリッタの ITU-T の，波長 $1.31\mu\text{m}$ と波長 $1.55\mu\text{m}$ の反射減衰量の規格値 55 dB と比較して大きな値である[2-9]。

偏波依存性損失 (PDL) は，波長 $1.31\mu\text{m}$ と波長 $1.55\mu\text{m}$ の平均値は，それぞれ 0.07 dB と 0.05 dB で，最大値は，0.13 dB と 0.10 dB であった。これらの値は，PON 用の 8 分岐光スプリッタの ITU-T の，波長 $1.31\mu\text{m}$ と波長 $1.55\mu\text{m}$ の 0.25dB より小さい値であった[2-9]。

波長レンジ WR1，即ち 1260 nm～1360 nm，及び 1480 nm～1625 nm での損失均一性の平均値は，0.69 dB であった。また最大値は，0.82 dB であった。この値は，PON 用の 8 分岐光スプリッタの ITU-T の WR1 規格値の 1.0 dB より小さい値であった[2-9]。また，波長レンジ WR2，即ち 1260 nm～1360 nm，及び 1480 nm～1660 nm での損失均一性の平均値は，0.75 dB であった。また，最大値は，0.93 dB であった。この値は，PON 用の 8 分岐光スプリッタの ITU-T の WR2 規格値の 1.3 dB より小さい値であった[2-9]。

従って，この R15 仕様光ファイバを用いた PLC 型光スプリッタの光学特性は，PON 用光スプリッタとして，ITU-T G.671 に準拠する十分な光学特性を有していることが分かる。

表 2-14 R15 仕様光ファイバを用いた PLC 型光スプリッタの光学特性

	波長	評価数	平均値 [dB]	最大値 [dB]	ITU-T G.671 基準値 [dB]
挿入損失	1.31 μ m	80	9.70	9.92	≤ 10.5
	1.55 μ m	80	9.72	9.93	≤ 10.5
反射減衰量	1.31 μ m	10	≥ 60	≥ 60	≥ 55
	1.55 μ m	10	≥ 60	≥ 60	≥ 55
偏波依存性損失	1.31 μ m	80	0.07	0.13	≤ 0.25
	1.55 μ m	80	0.05	0.10	≤ 0.25
波長均一性	WR1*)	10	0.69	0.82	≤ 1.0
	WR2**)	10	0.75	0.93	≤ 1.3

*) WR1:1260-1360nm & 1480-1625nm
 **) WR2:1260-1360nm & 1480-1660nm

2-4-3-3 R15 仕様光ファイバの PLC 型光スプリッタの温室度特性

R15 仕様光ファイバを用いた PLC 型光スプリッタの温湿度サイクル試験を行った。8 分岐の光スプリッタのすべての出力の損失変動を測定した。表 2-15 に、温湿度サイクル試験の結果を示す。波長、1.31 μ m と 1.55 μ m での平均損失変動は、0.10 dB と 0.09 dB であった。また、最大の損失変動は、0.18 dB と 0.24 dB であった。ITU-T L.37 での光スプリッタの損失変動の規格値は、0.3 dB 以下と規定されている[2-10]。従って、この PLC 型光スプリッタは、十分な温湿度特性を有していることが分かる。

表 2-15 R15 仕様光ファイバの PLC 型 8 分岐光スプリッタの温湿度サイクル試験結果

試験	試験条件	評価数	波長 [μ m]	損失変動値 (試験前後、及び試験中)		ITU-T L.37 基準値 [dB]
				平均 [dB]	最大 [dB]	
温湿度サイクル	-40 to+75°C, 10 to 80%RH 42 cycles. 8h/cycle	24	1.31	0.10	0.18	0.3
			1.55	0.09	0.24	0.3

2-4-3-4 R15 仕様光ファイバの PLC 型光スプリッタの屋外環境下での信頼性

屋外で使用される光スプリッタは、屋外環境下で十分な信頼性を有していることが求められる [2-5],[2-33]。従って、R15 仕様光ファイバの PLC 型光スプリッタの信頼性について検証した。

表 2-16 に R15 仕様光ファイバを用いた PLC 型 8 分岐光スプリッタの 3 種類の信頼性試

験の結果を示す。温度サイクル試験(-40℃～85℃, 4.5 時間/サイクル, 500 サイクル)は, 試験前後での損失変動は, 波長 1.31 μm と 1.55 μm で, 平均値が各々, 0.06 dB と 0.04 dB であった。また最大値は, 各々, 0.18 dB, 0.14 dB であった。低温試験(-40℃, 5000 時間)は, 試験前後での損失変動は, 波長 1.31 μm と 1.55 μm で, 平均値が各々, 0.19 dB, と 0.10 dB であった。また, 最大値は, 0.27 dB と 0.24 dB であった。高温高湿試験(85℃, 85%RH, 5000 時間)は, 試験前後での損失変動は, 波長 1.31 μm と 1.55 μm で, 平均値が各々, 0.09 dB, 0.05 dB であった。また, 最大値は, 各々 0.26 dB, 0.13 dB であった。

この 3 種類の試験での試験前後の損失変動は, 0.3 dB 以下であり, この値は PON 用光スプリッタの屋外環境試験の規格 ITU-T L.37 に準拠している[2-10]。従って, R15 仕様光ファイバを用いた PLC 型光スプリッタは十分な屋外環境特性を有していることが確認できた。

表 2-16 R15 仕様光ファイバを用い PLC 型 8 分岐光スプリッタの信頼試験結果

試験項目	試験条件	評価数	波長 [μm]	損失変動 (試験前後)		ITU-T L.37 基準値 [dB]
				平均値 [dB]	最大値 [dB]	
温度サイクル	-40 to +85°C, 500 cyc. 4.5h/cycle	24	1.31	0.06	0.18	0.3
			1.55	0.04	0.14	0.3
低温	-40°C, 5000h	24	1.31	0.19	0.27	0.3
			1.55	0.10	0.24	0.3
高温高湿	85°C, 85%RH, 5000h	24	1.31	0.09	0.26	0.3
			1.55	0.05	0.13	0.3

2-4-4 小型スプリッタモジュールの試作

R15 仕様光ファイバを用いた PLC 型 8 分岐光スプリッタを用いて, 小型スプリッタモジュールを試作した。図 2-23 に小型 8 分岐スプリッタモジュールを示す。このスプリッタモジュールは, 筐体に R15 仕様光ファイバを用いた PLC 型光スプリッタ, 光ファイバコード, 及び光コネクタで構成されている。

表 2-17 に, 小型スプリッタモジュールの機能・用途・構造を示す。このモジュールには, R15 仕様光ファイバを用いた PLC 型 8 分岐光スプリッタを含んでいる。筐体は, 42 mm x 103 mm x 5mm の大きさであった。入力側の光コードは, 直径 1.7 mm であり, 出力側の光コードは, 直径 0.9 mm であった。入力側の光コネクタは, プラグタイプの光コネクタで, 出力側の光コネクタはソケットタイプの光コネクタである。これらの光コネクタは, 架空光クロージャに使用される光コネクタのインターフェースと同一である[2-24]。図 2-24 に従来にモジュールトレイに, 小型スプリッタモジュールが 4 個収納された状態を示す。そ

れゆえ、試作した新しいモジュールは、架空クロージャの収容を効率的な使用に貢献できる。

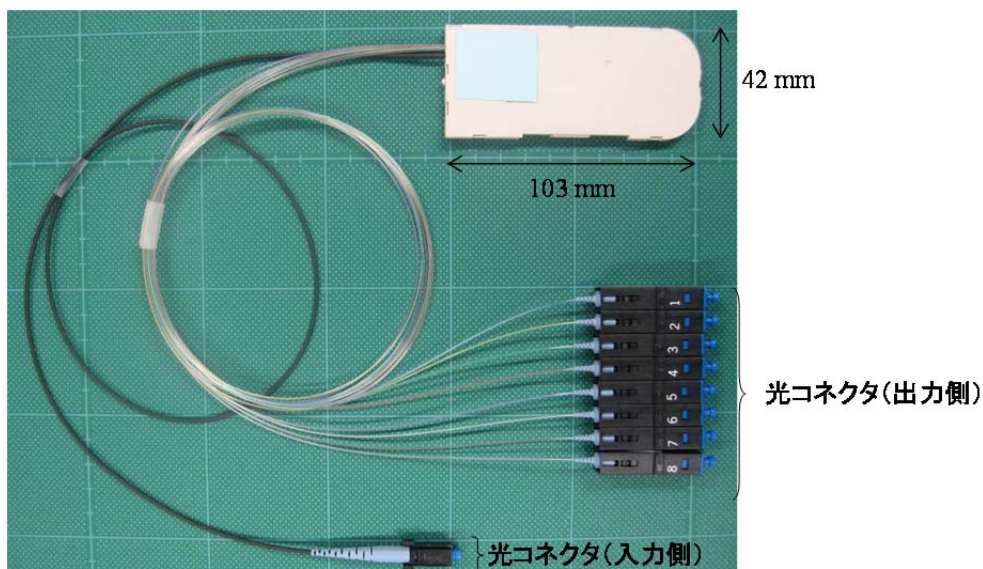


図 2-23 小型スプリッタモジュール

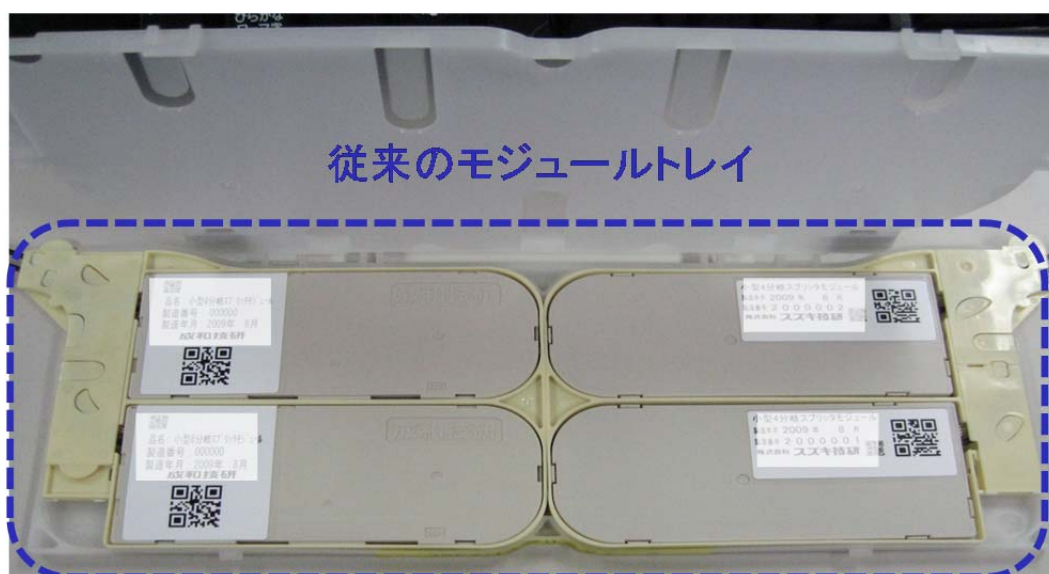


図 2-24 既存のトレイへの小型スプリッタモジュールの収容形態

表 2-17 小型 8 分岐スプリッタモジュールの機能・用途・構造

項目	内容
機能	PON 用 8 分岐光スプリッタ
用途	屋外の架空光クロージャ内に設置
寸法	42 x 103 x 5 (縦 x 横 x 厚さ: mm)
光ファイバコード	入力側：直径 1.7 mm (1 本) 出力側：直径 0.9 mm (8 本)
コネクタ	入力側：プラグタイプの光コネクタ (1 心) 出力側：ソケットタイプの光コネクタ (8 心)

2-4-5 小型スプリッタモジュールの特性

小型スプリッタモジュールは PLC 型光スプリッタ、光コネクタ、光コードのパッシブコンポーネントから構成される。光コネクタも具備したモジュールとしての評価のための規格は存在しない。しかしながら、PON 用で、かつ屋外設置用のスプリッタモジュールであるため、PON 用光スプリッタの光学特性の規格 ITU-T G.671[2-9]、と屋外設置用光スプリッタの規格 ITU-T L.37[2-10]の試験項目と規格値に準拠した評価を実施した。

2-4-5-1 小型スプリッタモジュールの光学特性

小型スプリッタモジュールの PON 用のパッシブデバイスとしての適性を確認するために、波長 1.31 μm 、1.55 μm での挿入損失を測定した。この測定では、入力・出力両方の光コネクタ分の接続損失を含めている。

図 2-25 に、小型スプリッタモジュールの損失変動の分布を示す。波長 1.31 μm 、1.55 μm での平均挿入損失値は、各々、9.84 dB と 9.81 dB であり、最大値は 10.70 dB と 10.45 dB であった。この挿入損失には、筐体内部の PLC 型光スプリッタと 2 個の光コネクタ分の損失が含まれている。図 2-26 に小型スプリッタモジュールの光スペクトルの例を示す。そのスペクトル結果は、波長 1200 nm から 1700 nm の範囲で、平滑であり、波長均一性は、WR2 (1260-1360 nm & 1480-1660 nm) で 0.70 dB であった。この値は、PON 用の 8 分岐光スプリッタの ITU-T の WR2 規格値の 1.3 dB より小さい値であった[2-9]。従って、小型スプリッタモジュールの光学特性は、PON 用のパッシブコンポーネントとして、十分な特性を有している。

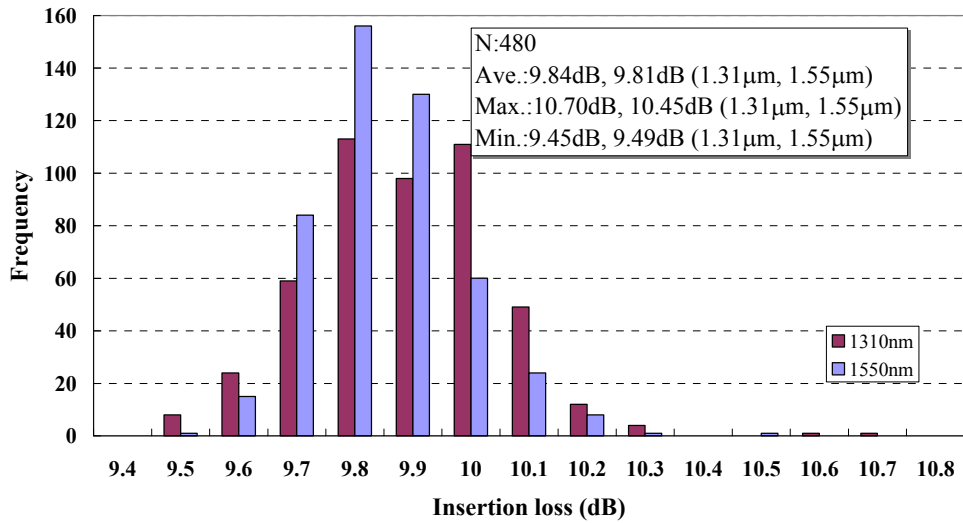


図 2-25 小型スプリッタモジュールの挿入損失の分布

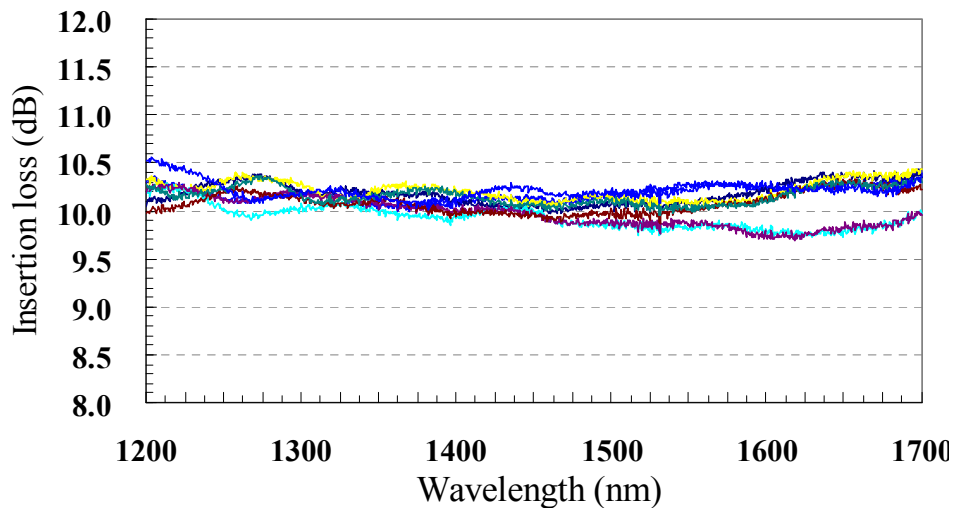


図 2-26 小型スプリッタモジュールの光スペクトルの例

2-4-5-2 小型スプリッタモジュールの温湿度特性

小型スプリッタモジュールを屋外で使用で温度変化を想定した温湿度特性を評価した。屋外に適用される PON 用光スプリッタの使用環境条件は、 -40°C ～ 75°C で規定されている [2-10]。従って、小型スプリッタモジュールの温度変化に関する環境条件も同一の温度変化条件で評価せねばならない。表 2-18 に温湿度サイクル試験($-40\sim 75^{\circ}\text{C}$, 10～80%RH, 8時間/サイクル, 42 サイクル)での、光コネクタも含めた小型スプリッタモジュールの損失変動結果を示す。波長 $1.31\mu\text{m}$ と $1.55\mu\text{m}$ での試験中の平均損失変動は、それぞれ 0.12 dB と 0.08 dB であった。また最大の損失変動は、0.27 と 0.17dB であった。また、図 2-27 に温湿度サイクル試験の損失変動の測定結果例を示す。この測定結果例では、試験前後、及び

試験中の最大変動量が 0.08 dB であった。小型スプリッタモジュールの温湿度サイクル試験の損失変動値は、筐体内部の PLC 型光スプリッタと接続点 2ヶ所を含めて、0.27 dB 以下であった。この値は、屋外 PON 光スプリッタの規格値 0.3 dB を下回る値であった[2-10]。従って、小型スプリッタモジュールは、十分な温湿度特性を有することが確認された。

表 2-18 小型スプリッタモジュールの温湿度サイクル試験結果

試験	試験条件	評価数	波長 [μm]	損失変動値 (試験前後、及び試験中)		ITU-T L.37 基準値 [dB]
				平均 [dB]	最大 [dB]	
温湿度サイクル	-40 to+75°C, 10 to 80%RH 42 cycles. 8h/cycle	48	1.31	0.12	0.27	0.3
			1.55	0.08	0.17	0.3

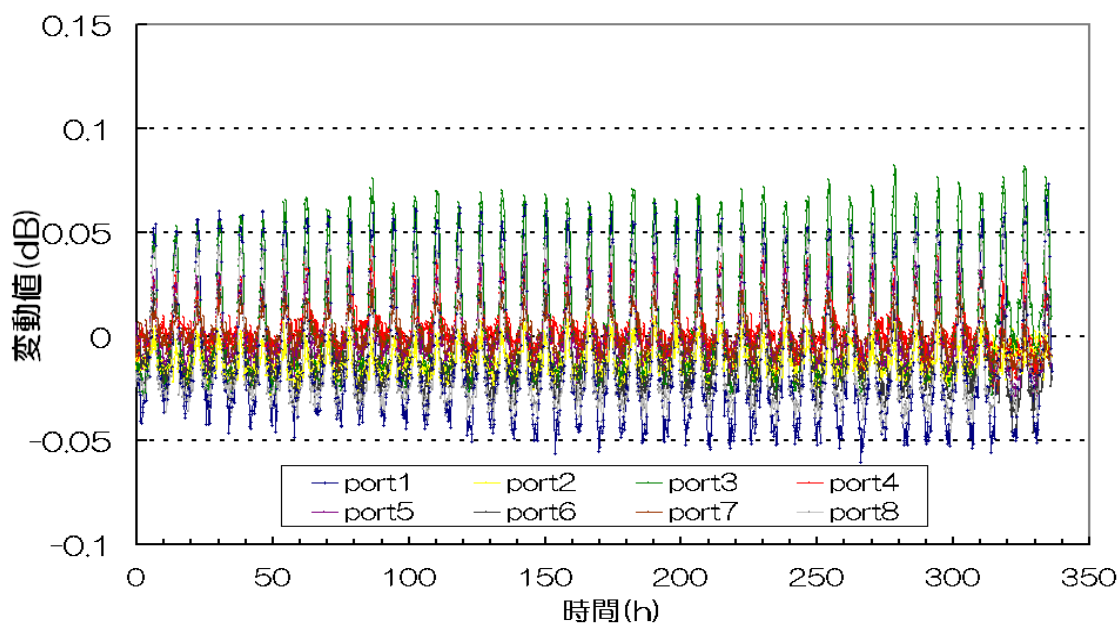


図 2-27 小型スプリッタモジュールの温湿度サイクル試験結果例

2-4-5-3 小型スプリッタモジュールの機械特性

表 2-19 に、小型スプリッタモジュールの 6 種類の機械特性の結果を示す。

振動試験 (10~55 Hz) では、波長 1.31 μm, と 1.55 μm での損失変動の平均値は、各々 0.04 dB と 0.02 dB であった。また損失変動の最大値は、0.11 dB と 0.06 dB であった。

振動試験(20~2000 Hz)では、波長 1.31 μm, と 1.55 μm での損失変動の平均値は、各々 0.04 dB と 0.02 dB であった。また損失変動の最大値は、0.10 dB と 0.05 dB であった。

衝撃試験 (500 G) では、波長 1.31 μm 、と 1.55 μm での損失変動の平均値は、各々 0.02 dB と 0.01 dB であった。また、損失変動の最大値は、いずれも 0.08 dB であった。

引張試験(5 N) では、波長 1.31 μm 、と 1.55 μm での損失変動の平均値は、いずれも 0.00 dB であった。また損失変動の最大値は、いずれも 0.01 dB であった。

90° 曲げ試験(2.5 N)では、波長 1.31 μm 、と 1.55 μm での損失変動の平均値は、いずれも 0.01 dB であった。また損失変動の最大値は、0.04 dB と 0.03 dB であった。

これらの 6 種類の損失変動の最大値は、0.11 dB であった。またいずれの試験でも、試験後に筐体の損傷等は確認されていない。ITU-T L.37 の機械特性の損失変動の規格値が最大 0.2 dB である [2-10]。従って、小型スプリッタモジュールは機械特性試験に対して十分な特性を有していることが確認された。

表 2-19 小型スプリッタモジュールの機械特性試験の結果

試験	試験条件	評価数	波長 (μm)	平均値 (dB)	最大値 (dB)
振動	10 - 55Hz, 4 min/cycle, 20 min. per axis, 3 axes, 1.52 mm	48	1.31	0.04	0.11
			1.55	0.02	0.06
振動	20 - 2000 Hz, 20 G, 4 min./cycle, 4 cycles in each for each orientation	48	1.31	0.04	0.10
			1.55	0.02	0.05
衝撃	500 G, 1 ms, 5 impacts per direction, 3 axes	48	1.31	0.02	0.08
			1.55	0.01	0.08
衝撃	1000 G, 0.5 ms, 8 impacts per direction, 3 axes	48	1.31	0.01	0.07
			1.55	0.01	0.08
引張	5 N, 400 $\mu\text{m/s}$, 1 min	48	1.31	0.00	0.01
			1.55	0.00	0.01
90° 曲げ	2.5 N, 90°, 5 s	48	1.31	0.01	0.04
			1.55	0.01	0.03

2-4-5-4 小型スプリッタモジュールの耐候性試験

表 2-20 に、小型スプリッタモジュールの 3 種類の耐候性試験の結果を示す。

塩水噴霧試験では、波長 1.31 μm 、と 1.55 μm での損失変動の平均値は、いずれも 0.06 dB であった。また、また損失変動の最大値は、各々 0.19 dB と 0.15 dB であった。

浸水試験では、波長 1.31 μm 、と 1.55 μm での試験前後、試験中の損失変動の平均値は、0.05 dB と 0.03 dB であった。また、最大損失変動は、各々 0.10 dB と 0.07 dB であった。

紫外線照射試験 (200 時間) では、波長 1.31 μm 、と 1.55 μm での損失変動の平均値は、各々 0.08 dB と 0.07 dB であった。また最大値は、各々、0.18 dB と 0.15 dB であった。

以上の三種類の耐候性試験の損失変動の最大は、0.19 dB であった。ITU-T L.37 の耐環境特性 (塩水噴霧、浸水試験) の損失変動の規格値が最大 0.2 dB である [2-10]。従って、小型スプリッタモジュールは十分な対候性を有していることが分かる。

表 2-20 小型スプリッタモジュールの耐候性試験結果

試験	試験条件	評価数	波長 (μm)	平均値 (dB)	最大値 (dB)
塩水噴霧	35°C, NaCl 5% 168 hours	48	1.31	0.06	0.19
			1.55	0.06	0.15
浸水	43°C, pH5.5 168 hours	48	1.31	0.05	0.10
			1.55	0.03	0.07
紫外線照射	300-400 nm, 50 W/m ² 200 hours	48	1.31	0.08	0.18
			1.55	0.07	0.15

2-4-5-5 小型スプリッタモジュールの屋外環境下での信頼性

2-4-3 では、R15 仕様の光ファイバを用いた PLC 型光スプリッタが長期的な信頼性を有することを示した。従って、光接続コネクタと光コードを含めた、複合のパッシブコンポーネントとしての小型スプリッタモジュールとしての信頼性を検証した

表 2-21 に小型スプリッタモジュールの 3 種類の信頼性試験の結果を示す。温度サイクル試験 (-40 °C ~ 85 °C, 4.5 時間/サイクル, 500 サイクル) は、試験前後での損失変動は、波長 1.31 μm と 1.55 μm で、平均値が各々、0.12 dB と 0.10 dB であった。また最大値は、各々、0.31 dB, 0.32 dB であった。低温試験 (-40°C, 2000 時間) は、試験前後での損失変動は、波長 1.31 μm と 1.55 μm で、平均値がいずれも、0.07 dB であった。また、最大値は、0.31 dB と 0.23 dB であった。高温高湿試験 (85 °C, 85 %RH, 2000 時間) は、試験前後で

の損失変動は、波長 1.31 μm と 1.55 μm で、平均値が各々、0.04 dB, 0.03 dB であった。また、最大値は、各々0.12 dB, 0.10 dB であった。

この 3 種類の試験での試験前後の損失変動は、0.32 dB 以下であり、この値は PON 用光スプリッタの屋外環境試験の規格 ITU-T L.37 [2-20]の 0.3 dB とほぼ同等であった。従って、小型スプリッタモジュールは十分な屋外環境特性を有している。

表 2-21 小型スプリッタモジュールの信頼性試験結果

試験	試験条件	評価数	波長 [μm]	損失変動 (試験前後)		ITU-T L.37 基準値 [dB]
				平均値 [dB]	最大値 [dB]	
温度サイクル	-40 to +85°C, 500 cyc. 4.5h/cycle	48	1.31	0.12	0.31	0.3
			1.55	0.10	0.32	0.3
低温	-40°C, 2000h	48	1.31	0.07	0.31	0.3
			1.55	0.07	0.23	0.3
高温高湿	85°C, 85%RH, 2000h	48	1.31	0.04	0.12	0.3
			1.55	0.03	0.10	0.3

2-4-6 まとめ

架空光クロージャへの光スプリッタの搭載数を増加させるため、小型スプリッタモジュールを設計・試作した。PLC 型光スプリッタに、ITU-T G.657.A1 に準拠した光ファイバを用いることでモジュールの筐体を低減した。このモジュールの筐体内の曲げ半径は最小で 15 mm としている。このモジュール筐体の小型により、従来の架空光クロージャのトレイに搭載していたスプリッタモジュール数が 2 台から 4 台の 2 倍になった。

この小型スプリッタモジュール向けの ITU-T G.657.A1 に準拠した光ファイバの PLC 型光スプリッタの屋外設備としての光学特性と信頼性を評価した。この PLC 型光スプリッタの光学特性は、ITU-T G.671 に規定された PON 用光スプリッタとして十分な光学特性を有することを確認した、また ITU-T L.37 に規定された試験結果より、PON 用光スプリッタの十分な屋外環境特性を有していることを確認した。

小型スプリッタモジュールとして、光学特性を評価した結果、PON 用スプリッタとして十分な特性を有することを確認した。また、機械特性試験、対候性試験の結果も良好であった。更に屋外環境を想定した信頼性試験を実施し、試験前後の損失変動が小さかったことから、十分な特性を有していることを確認した。

以上より、この小型スプリッタモジュールの小型化により、PON 用の光線路設備構築の効率化に寄与できる。また、PON 用の光スプリッタとして十分な光学特性を有している。また、屋外環境下で使用に耐えうる十分な信頼性を有していることを確認した。

2-5 結論

2-2 では、架空光クロージャに設置される PLC 型光スプリッタの PON 用の光学特性と屋外環境下での信頼性特性を評価した結果を述べた。また加速劣化試験による故障率推定の結果、確認した PLC 型光スプリッタは屋外設置の PON 用光スプリッタとして十分な信頼性を有することが確認できた。2-3 では、架空光クロージャへの施工性を容易にするため、設計・試作したスプリッタモジュールについて説明した。このスプリッタモジュールは、PON 用光スプリッタとして十分な光学特性と屋外設置の PON 用光スプリッタとして十分な信頼性を有することを説明した。2-4 では、架空光クロージャへ搭載するスプリッタの数を倍増するため、ITU-T G.657.A1 に準拠した、可能な曲げ半径が 15mm の仕様の光ファイバを用いて設計・試作した小型スプリッタモジュールについて述べた。またこの小型スプリッタモジュールは、PON 用光スプリッタとして十分な光学特性と屋外設置の PON 用光スプリッタとして十分な信頼性を有することを説明した。

3 章 現場組立型光接続技術の信頼性向上

3-1 序論

光線路設備では、光ファイバが通信ビルの所内装置(OLT)から所外の地下ケーブル、架空ケーブルを経由し、最終的に各加入者宅に設置された宅内装置(ONU)へ接続される。図 3-1 に示すように、こうした光線路設備を構成するために、設備の位置に応じて様々な光接続技術が使用されている。通信ビル内では、SC コネクタ[3-1]や MU コネクタ[3-2]といった、フェルール同士を突合せて弾性変形させ光ファイバを接続する光コネクタが使用されている。地下区間では、ファイバを溶融して一体化する融着接続[3-3]や屈折率整合材を介して光ファイバ同士を突合せる MT コネクタ[3-4] [3-5]が用いられている。また架空区間やビル・構内では現場で組立て可能で、ファイバ同士を V 溝に沿わせて直線方向に配置して、コアが一致するように突合せて、屈折率整合材を介して光の反射を抑えるメカニカルスプライスが使用されている[3-6] [3-7]。また同じく現場で組立て可能で、メカニカルスプライスの機構を内蔵した、コネクタ形状の現場組立コネクタが広く用いられている[3-8] [3-9] [3-10]。

メカニカルスプライスは現場で組立可能な光接続技術であり、屋外の光線路設備で広く使用されている。メカニカルスプライスは、図 3-2 (a) に示すように、ファイバ被覆を剥いで、カットしたファイバ端面同士を V 溝上で突合せてクランプで固定する構成をとる。通常、正しい施工で光ファイバを接続した場合、光ファイバの両端面は突合された状態で接続される。光ファイバのカット面が完全に平坦ではないため、端面間にサブミクロンの非常に狭い間隙ができる。この非常に狭い間隙を光ファイバのコアと同等の屈折率を有する屈折率整合材が満たすことで光の反射を低減している。

しかしフィールドに設置して一定期間使用後に、10 dB 以上の接続損失変動が発生する事例が報告されている[3-11]。この故障事例では、光ファイバ同士の突合せが不十分で、突合せ点に間隙があり、温度変化がある場合に損失変動が発生したと推測されている。しかしメカニカルスプライスでどの程度の間隙で、どの程度の温度変化がある場合に、10 dB 以上の接続損失変動が発生するのか明らかではない。

またこの事例には故障修理の際に大きく 2 つの問題点がある、1 点目は、光ファイバの接続直後では接続損失が低く、正常に通信サービスが利用できるため、光接続を組立てた作業者がすぐに施工の誤りに気付くことができないという点である。2 点目は、時間経過(温度変化)に伴って接続損失の増加(故障)と減少(自然回復)を繰り返すという点である。これらの問題点は、故障修理の際に故障箇所の特特定が難しく、故障発生から回復までに時間を要することを意味している。従って、光ファイバの端面間に大きな間隙を発生させない対策が突合せ点の間隙故障の故障低減に向けて重要となる。

また現場組立コネクタは現場で組立可能な光接続技術であり、屋外や宅内・構内の光線路設備で広く使用されている。現場組立コネクタには、様々な種類があるが、図 3-2 (b)

に示すように、基本的な構造は同一であり、内蔵ファイバと挿入された裸ファイバを突き合わせる構造が特徴である。また組立方法としては以下の手順①～⑤となる。

手順①：ドロップ光ファイバなどの外被を除去。

手順②：メカニカルストリッパなどの工具を用いて光ファイバ心線の UV 被覆を除去。

手順③：ファイバカッタを用いて、裸ファイバ心線をカット。

手順④：適正な長さに処理された光ファイバ心線を現場組立コネクタ内部のメカニカルスプライス機構に挿入し、内蔵ファイバと突き合わせる。

手順⑤：光ファイバを突き合せた状態でくさびの抜去などを行い、光ファイバ心線を固定。

現場組立コネクタでも、フィールドに設置して一定期間使用後に故障が発生する事例が報告されている[3-12]。図 3-3 に現場組立コネクタの故障原因のサンプル調査した結果を示す。1 番目の“心線の傷”の事例は、組立時の手順①や手順②で、ニッパやメカニカルストリッパ等の工具の不適切な使用により光ファイバにキズを付け、後日断線に至る事例である。この事例には、工具を適切な使用が故障低減に不可欠である。また現場組立コネクタの組立過程で、被覆除去したファイバ部分の傷の有無を検査する技術が研究されている[3-13]。2 番目の“コネクタ内部の破損”の事例は、現場組立コネクタの挿抜時に隣接したコネクタの誤った方向に力が加わり破損する事例である。隣接したコネクタに不用意に力を加えることの無いようにコネクタを挿抜するなどの運用上の注意が不可欠である。3 番目の“心線の長さ違い”の事例と 5 番目の“突合せ不良”の事例は、メカニカルスプライスでの事例と同様に、現場組立コネクタ内部の突合せ点で間隙が発生して、後日大きな損失変動を引起す事例である。このため、損失変動の発生の分析と突合せ点での間隙への対策が必要である。4 番目の“カット不良”の事例は、手順③のファイバ切断の際に、カッタの刃が摩耗している場合や、衝撃が加えられたようなファイバカッタなど、メンテナンスが十分にされていないファイバカッタを用いるカット不良端面は発生する。カット不良端面とは、光ファイバのカット端面が、光ファイバの長手方向の軸に対して垂直な平面ではない場合や、端面形状が平滑ではなく、不均一で歪んでいる形状を指す。

メカニカルスプライスの突合せ点で、カット不良端面が使用された場合、正常なカット端面が用いられた場合より大きな接続損失となることは確認されている[3-14]。しかしカット不良端面が用いられた現場組立コネクタが、通信断を引起すほどの大きな損失変動をどのようにして引起すのか、そのメカニズムは明らかでなかった。

また、メカニカルスプライスや現場組立コネクタで、正常なファイバカット端面を使用することは光学特性の悪化を防止するうえで重要であると考えられる。ファイバカット時のファイバカット端面の確認は、融着接続の場合には、融着接続機に具備された CCD カメラとビデオモニタによって、通常自動的に行われている[3-15]。このため、使用しているフ

ファイバ切断の正常性を確認するため、切断した光ファイバの端面を便宜的に融着接続器等の端面のモニタで確認して、正常・異常の判定に利用されている場合もある[3-11].

しかしながら、メカニカルスプライスや現場組立コネクタについては、屋外で組み立てられる場合が大半で、融着接続より簡易に光接続を行うことを目的とした技術であるため、組立時のファイバカット後に、ファイバカット端面を確認することは通常行われていない。よって、ファイバカット端面をより簡易で確認でき、更に屋外でも使用できる検査方法の確立が求められた。

一般的にファイバ端面を検査する典型的な方法を以下に記す。光ファイバ端面の角度やファイバ端面とフェルル端面のファイバの軸方向との角度ずれを検査するには、回転している光ファイバコネクタから光の出射パターンを観測することで測定される[3-16][3-17]. 斜め研磨されたフェルル端面角度は He-Ne レーザを使って、回転するフェルル端面の反射スポットを観察することで測定される[3-18]. しかしこれらの方法では光ファイバ端面全体を正確に観測することはできない。また光コネクタの3次元の形状は走査型白色干渉法により測定される[3-19]. 光ファイバや光コネクタ端面の観察には、サブミクロンの精度が必要である。しかしながら、この測定方法の測定装置は、一般的に複雑な構成で高価である。光ファイバ端面の形状観察には、小型の光学顕微鏡を適用する方法もあるが、レンズの倍率や端面を観測する角度や端面とレンズの配置を注意深く設定する必要がある。以上の技術は各々優位な点があり、実用化されている技術もある。しかしながら、現場組立コネクタの光ファイバ端面を測定するには、他のアプローチも検討する必要がある。

3章では、現場組立型接続技術の信頼性向上について述べる。3-2では、メカニカルスプライス機構でのファイバの突合せ点で間隙がある場合の光学特性劣化のメカニズムの分析と対策について説明する。3-3では、メカニカルスプライス機構でのファイバの突合せ点でカット不良端面が使用された場合の光学特性劣化のメカニズムの分析と対策について説明する。

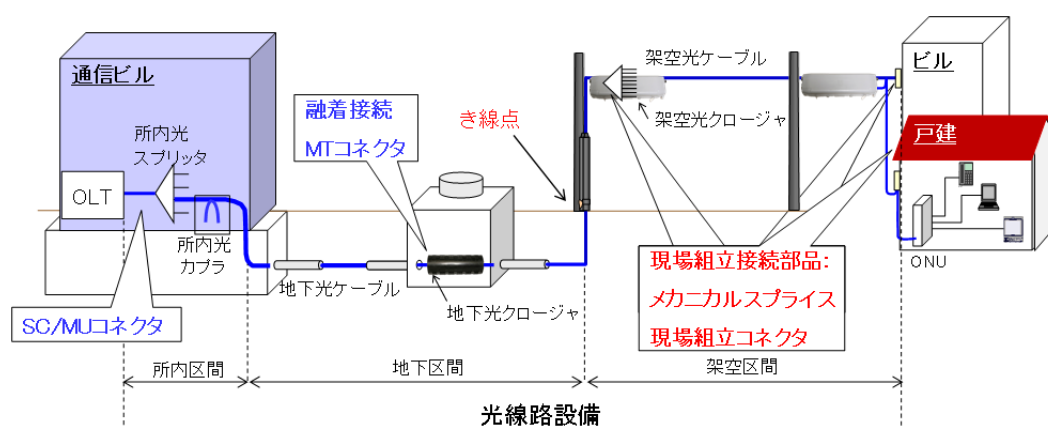
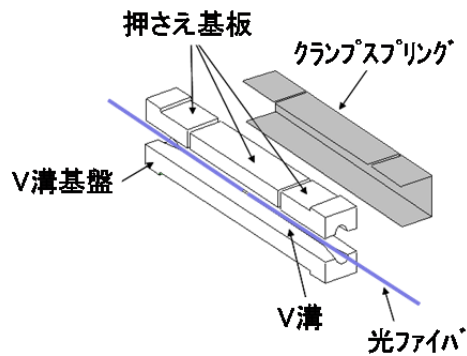
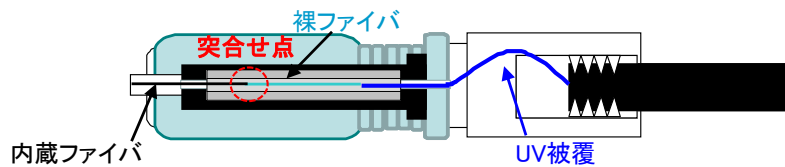


図 3-1 光線路設備での光接続



(a) メカニカルスプライス



(b) 現場組立コネクタ

図 3-2 現場組立型接続のパッシブコンポーネントの構成

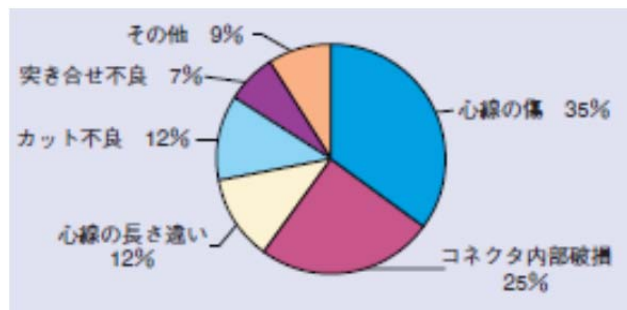


図 3-3 現場組立コネクタの故障原因

(出典：NTT 技術ジャーナル 現場組立コネクタにおけるトラブル事例と対策より [3-11])

3-2 突合せ点に間隙を有する光ファイバ接続部の光学特性劣化の分析と対策

3-2-1 突合せ点に間隙を有する光ファイバ接続部の光学特性劣化の分析

3-2-1-1 はじめに

3-2-1 では、フィールドで故障となったメカニカルスプライスで、突合せ点に間隙のあるサンプルを用いて、光学特性の劣化状態を調査した内容を説明する。損失増加により故障発生したサンプルを用いて、故障発生当日の気温の変化に準じた温度変化を実験的に加えた。その接続損失と反射減衰量の測定した結果を述べる。また接続損失と反射減衰量の値

から、損失変動時の突合せ点の従来のジェル状の屈折率整合材の状態を推測したので、併せて説明する。

3-2-1-2. 突合せ点に間隙がある接続点の光学特性

メカニカルスプライスなどの突合せ点で間隙がある光ファイバ接続点で、接続損失が 10 dB 超となる状態を推定する、間隙での屈折率整合材の状態の検討のために、接続損失と反射減衰量の値に着目した。図 3-4 に示すように接続損失と反射減衰量の値の大小から、間隙とオイル状の屈折率整合材が、4 つ状態が推定される。尚、ここでは、突合せ点の間隙の距離が最大で 100 μm 程度を想定した。また、メカニカルスプライス内部の V 溝上に光ファイバが設置されているため、突合せ点での光ファイバの端面間の間隙の距離のみ考慮し、光ファイバ同士の軸連れや角度ずれの影響を考慮していない。

光ファイバ間に間隙がある場合、端面間の距離に応じた接続損失 α を以下に示す[3-20]。

$$\alpha = -10 \log \left(\frac{1}{1+A^2} \right) \quad (3-1)$$

$$A(S) = \frac{\lambda S}{2\pi n w^2} \quad (3-2)$$

尚、 S は間隙量、 λ は波長、 n は屈折率整合材、または空気の屈折率、 w はモードフィールド径である。図 3-5 に、間隙が屈折率整合材で充填された場合と空気の場合の接続損失値を示す。コア及び屈折率整合材の屈折率 1.454、波長 1.31 μm 、モードフィールド径 9.5 μm を用いて算出した。突合せ点の間隙の距離が、屈折率整合材が充填された状態では 100 μm であっても、接続損失は 1.5 dB であり、屈折率整合材がなく空気の場合には 2.6 dB である。両者の状態では、10 dB 以上の接続損失が発生することは無い。従って、突合せ点の距離が同程度の場合、10 dB を超えるような接続損失が発生する場合は、ファイバ端面間に屈折率整合材と空気が混在して、光が端面間で散乱して接続損失が大きくなる状態であると考えられる。

反射減衰量 γ は、以下の式で表される[3-20]。但し、 n_0 はコアの屈折率である。

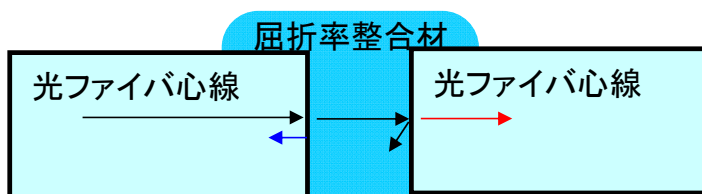
$$\gamma = -10 \log(R_0) \quad (3-3)$$

$$R_0 = \left(\frac{n_0 - n}{n_0 + n} \right)^2 \quad (3-4)$$

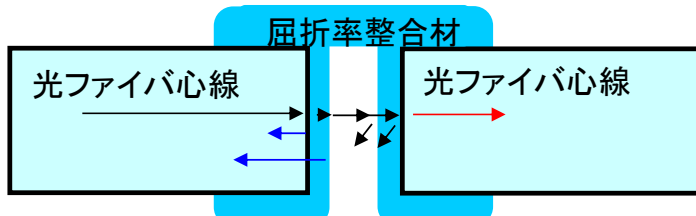
光ファイバ端面が屈折率整合材と接している場合は、反射減衰量が 40 dB 以上の値となる[3-21]。屈折率整合材が流出し、突合せ点で光ファイバ端面や屈折率整合材と空気が接すると、屈折率の差から大きな反射が発生し、反射減衰量が 14.7dB に低下する。

図 3-4 の状態 a は接続損失が小さく(数 dB 程度)、反射減衰量が大きい(40 dB 程度)場合であり、突合せ点の間隙に屈折率整合材が充填されている状態である。状態 b は、接続損失が小さく、反射減衰量が小さい場合で、突合せ点の両方のファイバ端面から屈折率整合

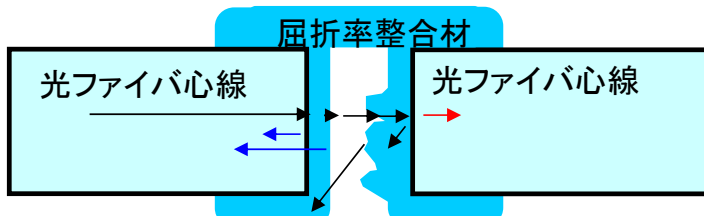
材が流出した状態である。状態 c は、接続損失は大きく(10 dB 以上)、反射減衰量が小さい場合であり、片方のファイバ端面からは屈折率整合材が流出し、突合せ点の間隙で屈折率整合材と空気が混在し、屈折率整合材と空気の界面で光が散乱した状態である。状態 d は、接続損失は大きく、反射減衰量は大きい場合であり、突合せ点の間隙に屈折率整合材と空気が混在し、屈折率整合材と空気の界面で光が散乱した状態である。



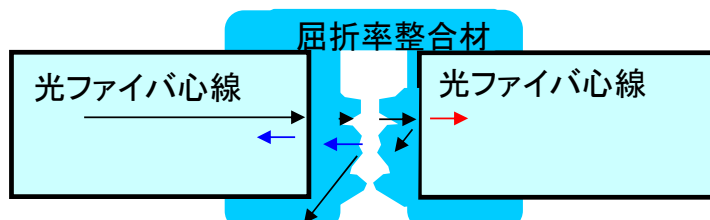
(a) 状態 a: 接続損失: 小、反射減衰量: 大
屈折率整合材が間隙に充填された状態



(b) 状態 b: 接続損失: 小、反射減衰量: 小
屈折率整合材が間隙から流出した状態



(c) 状態 c: 接続損失: 大、反射減衰量: 小
屈折率整合材と空気の混在状態(1)



(d) 状態 d: 接続損失: 大、反射減衰量: 大
屈折率整合材と空気の混在状態(2)

図 3-4 間隙のある接続点の光学特性状態

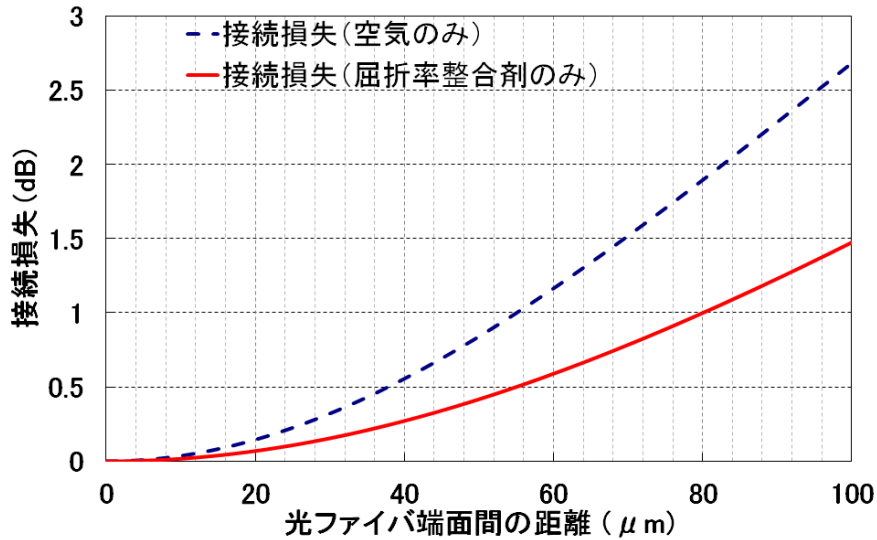


図 3-5 間隙のある突合せ点の接続損失
(コア屈折率 1.454, 波長 1.31 μm, モードフィールド径 9.5 μm で算出)

3-2-1-3. 評価したメカニカルスプライス

実際にフィールドで使用され、突合せ点に間隙のあり故障で撤去されたメカニカルスプライスを用いて評価した。使用した 3 個の 4 心メカニカルスプライスの設置されていた光線路設備の構成を図 3-6 に示す。該当のメカニカルスプライスは架空光クロージャに設置されており、一定期間使用されていた。故障発生日時や場所はいずれも異なるが、発生場所近傍の故障当日のそれぞれの気温は、気象庁の地上気象観測データによると最低気温で -7.2℃と最高気温が -0.7℃であった。

いずれの 4 心メカニカルスプライスも 1 心の回線で通信回線断が発生したため、故障切分けの結果、該当のメカニカルスプライスを撤去し、新たに光接続を行って故障が復旧している。一般に PON システムが適用される通信設備の実際の OLT から ONU までの光線路損失はパワーバジェットより小さいため、光接続の通常の接続損失値より 10 dB 程度増加して、はじめて通信断を引き起こす場合がある[3-22]。この故障事例でも、該当のメカニカルスプライスでも、10 dB 以上の損失増加が発生した可能性がある。

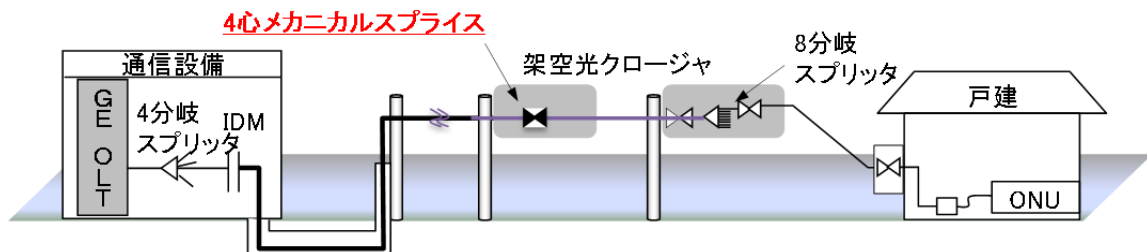


図 3-6 メカニカルスプライスが設置された光線路設備の構成

3-2-1-4. 検証方法

最初に撤去したメカニカルプライスの初期光学特性として接続損失と反射減衰量を測定した。次に温度変化による影響を検証するため、図 3-7 に示す測定系を用いて、ヒートサイクル試験を実施し、 $1.31\ \mu\text{m}$ と $155\ \mu\text{m}$ の測定波長で接続損失と反射減衰量を連続的に測定した。

ヒートサイクル試験では、フィールドでの損失増加発生時の気温を考慮して、 $-10\sim 0\ ^\circ\text{C}$ の試験条件のヒートサイクル試験を実施した。また、この $10\ ^\circ\text{C}$ の温度変化に要する時間の差を検証するため、1 時間、6 時間の 2 種類の試験条件で評価した。また気温の絶対値による光学特性劣化の差を評価するために、 $0\sim 10\ ^\circ\text{C}$ の範囲の試験条件のヒートサイクル試験も実施した。更にメカニカルプライスのヒートサイクル試験で広く用いられる試験条件 $-40\ ^\circ\text{C}\sim +70\ ^\circ\text{C}$ 、6 時間サイクルの 10 サイクル[3-23]も併せて実施した。尚、ヒートサイクル試験後にそれぞれのメカニカルプライスを解体して、突合せ点の間隙の距離を計測した。

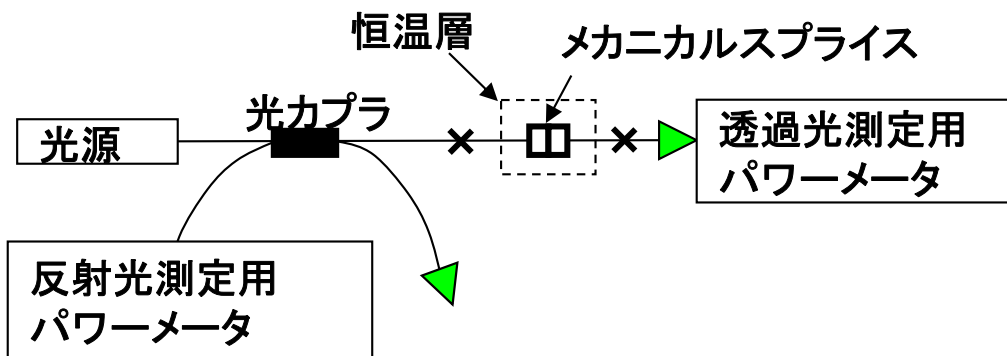


図 3-7 ヒートサイクル試験の測定系

3-2-1-5. 初期光学特性とヒートサイクル試験結果

表 3-1(a)(b) に 12 心線の接続部の初期光学特性とヒートサイクル試験の結果を示す。ヒートサイクル試験後に解体して確認した突合せ点の間隙の距離は、 $10\ \mu\text{m}$ 以下から最大 $41\ \mu\text{m}$ までであった。

初期光学特性では、12 心中 1 心で、接続損失 23.1dB 、反射減衰量 20dB (測定波長 $1.31\ \mu\text{m}$) の光学特性劣化が確認された (サンプル No.1#3, 突合せ点の間隙の距離 $20\ \mu\text{m}$)。他の 11 心は、正常なメカニカルプライスの光学特性と差がなかった。

試験条件①の $-10\sim 0\ ^\circ\text{C}$ で $\Delta 10\ ^\circ\text{C}/1$ 時間のヒートサイクル試験では、4 心線で 10dB 以上の接続損失や 30dB 未満の反射減衰量の低下の光学特性の劣化が測定された。図 3-8 に波長 $1.31\ \mu\text{m}$ で測定された特徴的な振舞いを示す接続損失と反射減衰量のグラフを示す。サンプル No.1#1 の測定結果では、接続損失(最大 0.09dB)、反射減衰量(最小 40dB)とも正常な値であった、No.2#3 の測定結果では、温度変化時に最大 20.8dB まで接続損失が増加

し、反射減衰量が 14 dB まで低下している。サンプル No.3 #4 は、接続損失は最大 8.1 dB となったが、反射減衰量は 40 dB 以上を推移している。

試験条件②の-10~0℃で△10℃/6 時間でのヒートサイクル試験では、3 心線で 10 dB 以上の接続損失や 30 dB 未満の反射減衰量の低下の光学特性の劣化が測定された。

試験条件③の 0~10 °Cで△10℃/1 時間でのヒートサイクル試験では、2 心線で 10 dB 以上の接続損失や 30 dB 未満の反射減衰量の低下の光学特性の劣化が測定された。

試験条件④の-40 °C~+70 °Cのヒートサイクル試験では、8 心線で 10 dB 以上の接続損失や 30 dB 未満の反射減衰量の光学特性の劣化が測定された。図 3-9 に波長 1.31 μm で測定された特徴的な接続損失と反射減衰量のグラフを示す。No.2 #3 の測定結果では、温度変化時に最大 40 dB まで接続損失が増加し、反射減衰量は 14 dB まで低下している。サンプル No.3 #4 は、接続損失は最大 38 dB まで増加しているが、反射減衰量は 39 dB 以上を推移している。

図 3-10 にメカニカルスプライスを解体した際の突合せ点の状態(サンプル No.2)を示す。突合せ点で間隙と屈折率整合材が確認された。尚、突合せ点のカット端面はいずれも正常な端面であった。

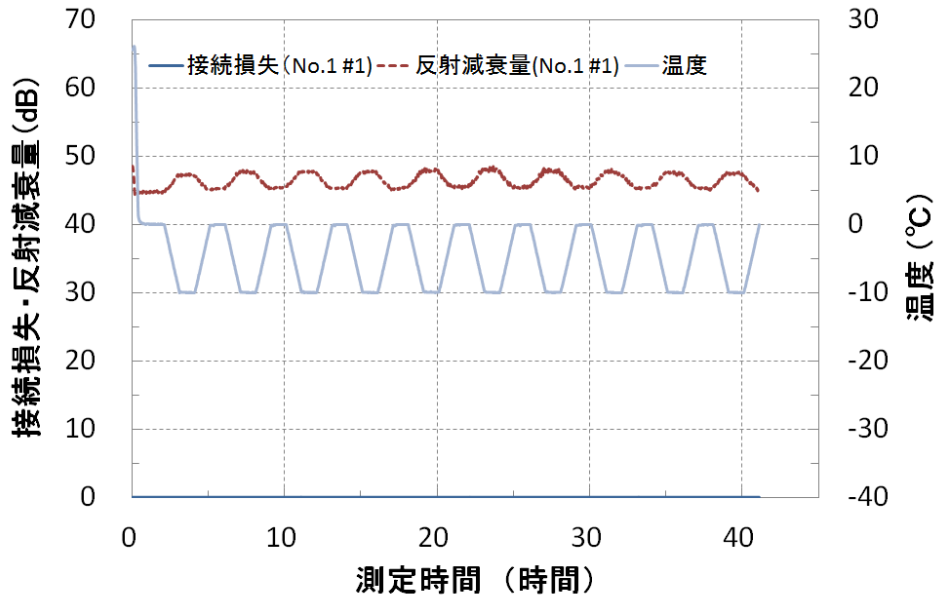
表 3-1 初期光学特性とヒートサイクル試験結果

(a) 試験条件①, 試験条件②

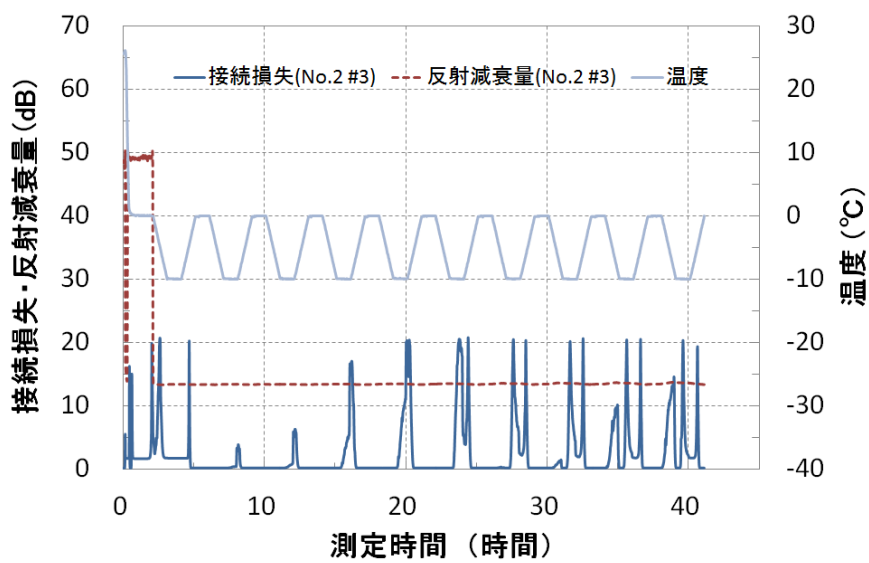
サンプル No	心線番号	端面間の隙間の距離 (μm)	光学特性調査 測定波長 1.31 μm		ヒートサイクル試験 上段: 接続損失の最大値(dB)、下段: 反射減衰量の最低値(dB)			
					試験条件①		試験条件②	
			接続損失 (dB)	反射減衰量 (dB)	-10℃~0℃			
					△10℃/1時間 10サイクル (40h)		△10℃/6時間 3サイクル (42h)	
		1.31 μm	1.55 μm	1.31 μm	1.55 μm	1.31 μm	1.55 μm	
1	#1	10 μm以下	0.03	47	0.09 44	0.07 40	0.11 41	0.07 42
	#2	10 μm以下	0.07	54	0.11 46	0.12 40	0.12 52	0.12 43
	#3	15	0.13	51	0.28 39	0.25 45	0.29 47	0.25 41
	#4	20	23.1	20	30.7 36	35.8 32	0.36 46	0.28 41
2	#1	11	0.17	50	0.34 40	0.28 45	0.36 44	0.29 39
	#2	24	0.09	50	10.5 20	12.0 20	0.36 44	0.36 43
	#3	17	0.12	54	20.8 14	34.3 18	1.99 16	1.80 14
	#4	13	0.15	52	19.2 29	11.8 29	1.79 27	1.50 28
3	#1	36	0.22	50	0.35 41	0.32 41	0.37 45	0.32 46
	#2	39	0.40	54	0.76 43	0.75 42	0.77 48	0.75 40
	#3	32	0.19	58	0.09 45	0.38 40	0.08 49	0.32 42
	#4	41	0.33	56	8.1 43	8.1 43	22.8 47	21.8 39

(b) 試験条件③, 試験条件④

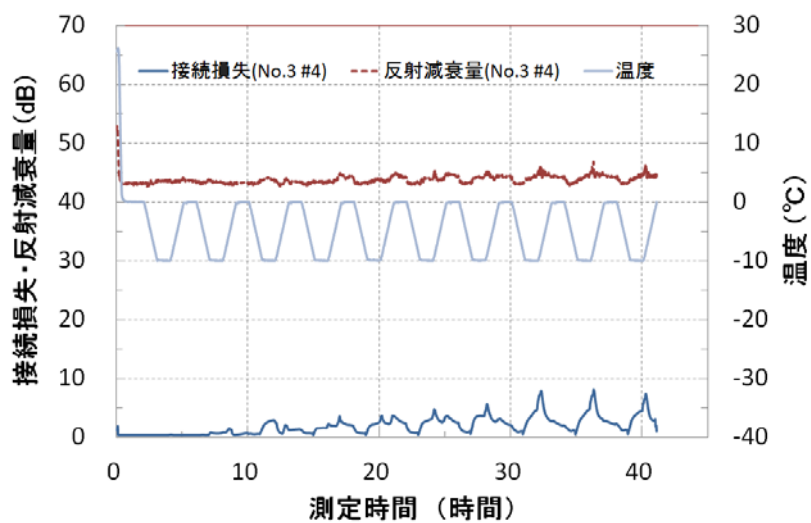
サンプル No	心線 番号	端面間の 隙間の距離 (μm)	光学特性調査 測定波長 $1.31\ \mu\text{m}$		ヒートサイクル試験 上段: 接続損失の最大値 (dB)、下段: 反射減衰量の最低値			
					試験条件③		試験条件④	
			接続損失 (dB)	反射減衰量 (dB)	$0^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$		$-40^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$	
					$\Delta 10^{\circ}\text{C}/1\text{時間}$ 10サイクル (40h)		$\Delta 110^{\circ}\text{C}/1.5\text{時間}$ 10サイクル (60h)	
		$1.31\ \mu\text{m}$	$1.55\ \mu\text{m}$	$1.31\ \mu\text{m}$	$1.55\ \mu\text{m}$			
1	#1	$10\ \mu\text{m}$ 以下	0.03	47	0.12 41	0.06 44	0.14 38	0.08 34
	#2	$10\ \mu\text{m}$ 以下	0.07	54	0.12 50	0.12 45	0.15 39	0.12 36
	#3	15	0.13	51	0.29 46	0.24 45	19.8 21	15.7 21
	#4	20	23.1	20	0.37 45	0.28 43	29.3 29	43.2 27
2	#1	11	0.17	50	0.36 48	0.28 40	0.39 38	0.36 36
	#2	24	0.09	50	0.36 48	0.35 49	13.3 20	33.2 20
	#3	17	0.12	54	1.79 25	1.68 15	39.8 15	38.1 15
	#4	13	0.15	52	21.7 29	12.0 25	20.1 19	14.8 18
3	#1	36	0.22	50	0.37 44	0.32 46	0.40 39	0.3 39
	#2	39	0.40	54	0.78 47	0.75 42	42.7 19	38.7 19
	#3	32	0.19	58	0.10 49	0.38 43	41.5 19	37.6 19
	#4	41	0.33	56	6.8 49	6.9 41	38.2 39	30.8 39



(a) サンプル No.1 #1



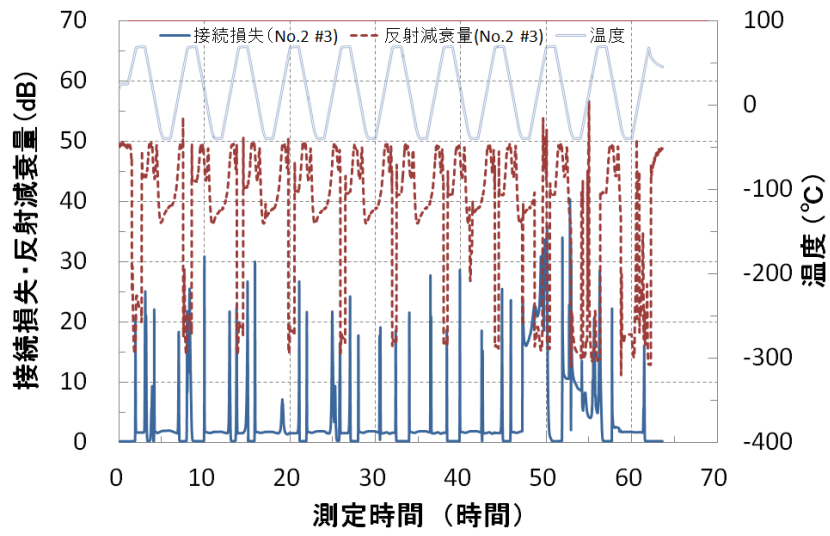
(b) サンプル No.2 #3



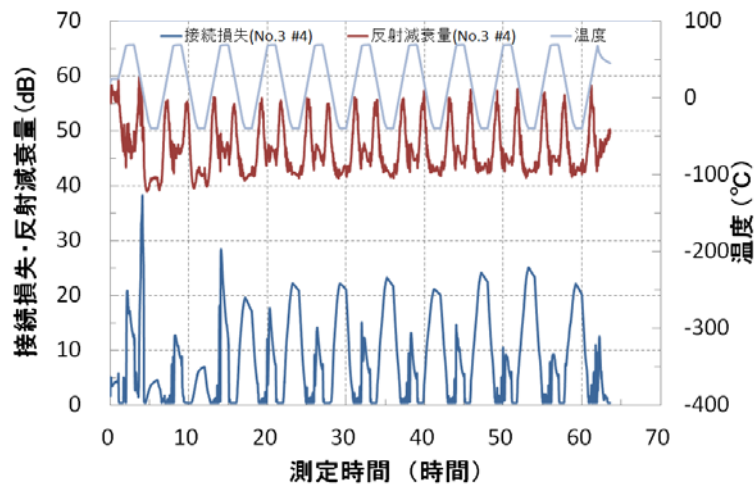
(c) サンプル No.3 #4

図 3-8 ヒートサイクル試験結果

(試験条件① -10~0°C, $\Delta 10^\circ\text{C}/1$ 時間, 波長 $1.31\ \mu\text{m}$)



(a) サンプル No.2 #3



(b) サンプル No.3 #4

図 3-9 ヒートサイクル試験結果

(試験条件④) -40~70°C, 1cycle/6h, 10 cycles, 波長 1.31 μm)

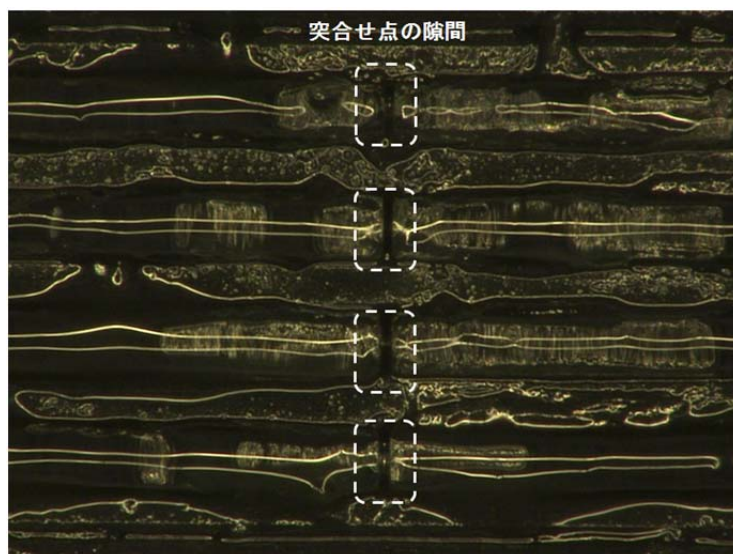


図 3-10 突合せ点の状態 (サンプル No.2 上から順に#1~#4)

3-2-1-6. 考察

検証結果から考察を行った。実際にフィールドで故障が確認された 3 個のサンプルを用いて評価したが、初期測定で光学特性の劣化が確認されたものは、1 個 (1 心) のみであった。しかし温度勾配の $-10^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ の試験条件①もしくは試験条件②で 3 サンプルとも 20 dB を超える接続損失が確認されている。

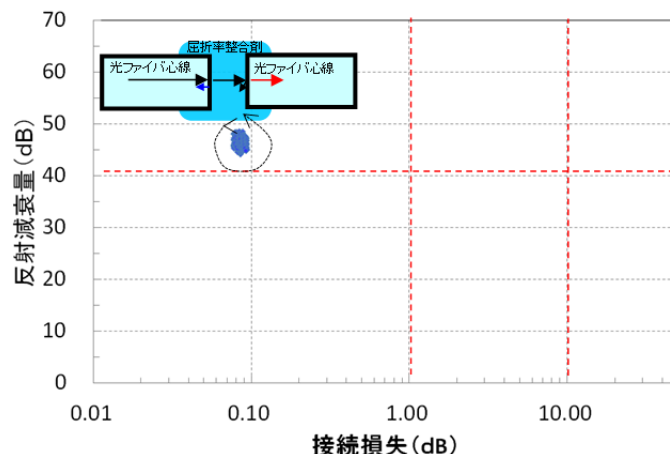
今回の検証では、 $-10^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ の試験条件で、温度勾配が $\triangle 10^{\circ}\text{C}/1$ 時間の試験条件①と $\triangle 10^{\circ}\text{C}/6$ 時間の試験条件②を比較した場合、光学特性が劣化(10 dB 以上の接続損失、もしくは 30 dB 未満の反射減衰量)した心線数は、温度勾配が急な試験条件①のほうが多かった。またヒートサイクルの温度範囲 $0^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ の試験条件③でも $-10^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ の試験条件①と同様に、光学特性が劣化した心線が確認された。従って、この光学特性劣化は温度の絶対値によらずに温度変化によって引起されたと考えられる。更に今回の実施した試験条件のなかで、温度勾配がもっとも急で、温度範囲が他の試験条件より大きい試験条件④では、最も多い 8 心線で光学特性の劣化が確認されている。端面間の間隙の距離が $11\mu\text{m}$ 以下の 3 心線では光学特性の劣化は確認されなかった。

次に突合せ点の状態を分析するため、ヒートサイクル試験の結果のうち、特徴的な状態のものを、図 3-11 にヒートサイクル試験結果の散布図を示す。散布図は、横軸に接続損失の値と縦軸に反射減衰量の値をとり、1 分毎の測定値を点としてプロットした。なお、反射減衰量には、一般的な光コネクタの反射減衰量の閾値として用いられる 40 dB を、接続損失としては 1 dB と、非常に大きな接続損失である 10 dB を閾値として表示した。併せて、想定されるメカニカルスプライス内部の突合せ点の推定される状態も図示する。

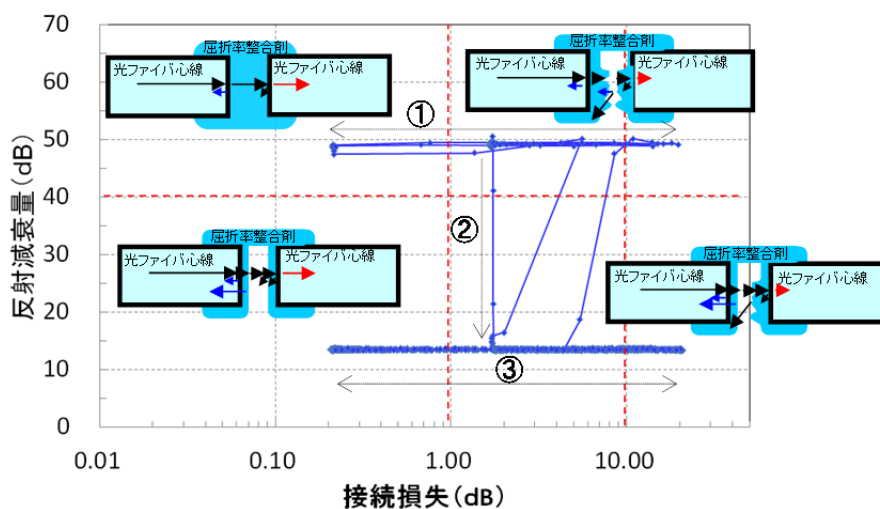
図 3-11 (a)に示す、試験条件① ($-10\sim 0^{\circ}\text{C}$, $\triangle 10^{\circ}\text{C}/1$ 時間) のヒートサイクル試験では、接続損失と反射減衰量の変動はほぼ無かった。両者の値から図 3-4 の状態 a の間隙に屈折

率整合材が充填している状態であると推定される。図 3-11 (b) の試験条件① ($-10\sim 0^{\circ}\text{C}$, $\triangle 10^{\circ}\text{C}/1$ 時間) のヒートサイクル試験では、接続損失は 0.2 dB から 10 dB 以上まで試験期間中に周期的に変動する一方で、反射減衰量は、当初の 50 dB 程度から試験開始後 2 時間を経過した時点で 14 dB 程度まで低下している。これは突合せ点に屈折率整合材が充填された図 3-4 の状態 a から状態 d に交互に遷移した後、屈折率整合材が流出した状態となり、状態 b と状態 c に交互に遷移したと考えられる。図 3-11 (c) の試験条件④ ($-40\sim 70^{\circ}\text{C}$, $\triangle 110^{\circ}\text{C}/1.5$ 時間) のヒートサイクル試験では、接続損失が 0.4 dB から最大 40 dB 程度まで、周期的に変動を繰り返している。反射減衰量は、概ね 40 dB 以上で推移している。このため、突合せ点に屈折率整合材が充填された図 3-4 の状態 a と空気と整合材が混在した図 3-4 の状態 d を交互に遷移したものと推定される。

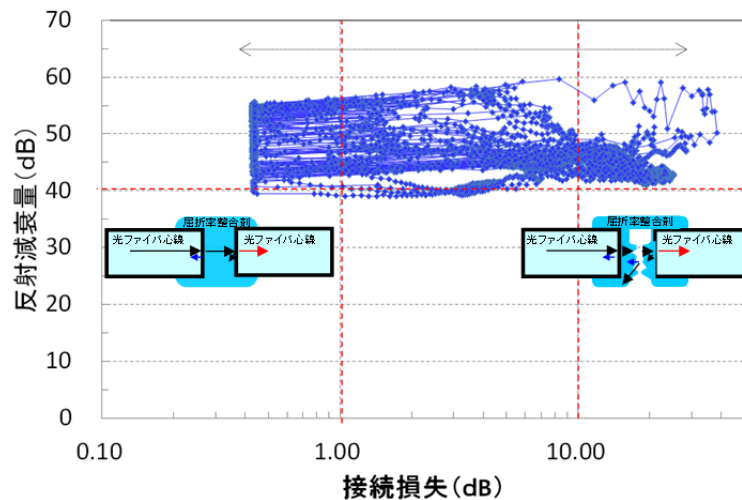
以上より、大きな損失変動が確認された突合せ点に間隙があるサンプルは、空気と整合材の混在状態に移行することで発生していると推定される。



(a) サンプル No.1 #1 (試験条件①- $10\sim 0^{\circ}\text{C}$, $\triangle 10^{\circ}\text{C}/1$ 時間)



(b) サンプル No.2 #3 (試験条件①- $10\sim 0^{\circ}\text{C}$, $\triangle 10^{\circ}\text{C}/1$ 時間)



(c) サンプル No.3 #4 (試験条件④-40~70°C, Δ 110°C/1.5 時間)

図 3-11 接続損失, 反射減衰量の値とファイバの突合せ点の状態
(測定波長 1.31 μ m)

3-2-1-7. まとめ

突合せ点に間隙を有するメカニカルスプライスを用いて, 光学特性劣化の検証を行った。フィールドで故障となったメカニカルスプライスを使用して, 故障発生日の気温変化に準じた-10 °C~0 °Cの温度範囲の試験条件でヒートサイクル試験を行い, 温度変化が 10°C/6時間の緩やかに変動する場合でも接続損失が最大で 20 dB 以上に達することを確認した。また-40 °C~70 °Cの温度範囲の試験条件でのヒートサイクル試験では, 突合せ点に間隙がある 12 心のうち, 8 心で接続損失が 10 dB 以上に増加, もしくは反射減衰量が 30 dB 以下に低下することを確認した。更にヒートサイクル時の接続損失と反射減衰量の値を散布図に表示する分析手法により, 突合せ点での屈折率整合材の状態を推定し, 大きな接続損失が発生する場合は突合せ点に空気と屈折率整合材が混在状態となっていると推定した。

3-2-2 固形屈折率整合材を用いた新しい光ファイバ接続方法

3-2-2-1 はじめに

3-3-2 では, ゲル状の固形屈折率整合材 (以下, 固形整合材) を用いた新たな光ファイバ接続方法を提案・検証したので説明する。この固形整合材は, 押せば光ファイバが入り込む特性を有する。この接続方法は, 光ファイバの端面間に大きな間隙がある(異常な接続)場合, 必ず高い接続損失が発生する。これにより, 施工者が直ちに異常な接続に気付くことが特徴の接続方法である。また, 光ファイバ端面間の間隙の大きさが特定の幅以下となった(正常な接続)場合, 間隙の幅に応じた比較的低い接続損失となり, その接続損失の低い状態がヒートサイクル試験を実施しても維持し続けることを確認したので説明する。

3-2-2-2 固形屈折率整合材を用いた新たな光ファイバ接続方法の原理

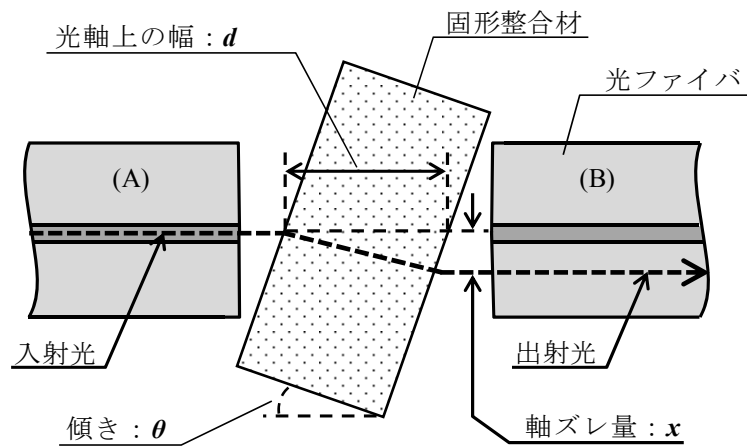
以下 2 点が提案する光ファイバ接続方法のポイントである。

- ① 屈折率整合材は、光ファイバのコアと同等の屈折率を有し、かつ弾力性のある固形樹脂を用いる。
- ② “特定の幅”を持つ固形整合材を、向い合う 2 つの光ファイバ端面の中間に配置し、かつ光ファイバの光軸に対して“特定の角度”傾けて配置する。

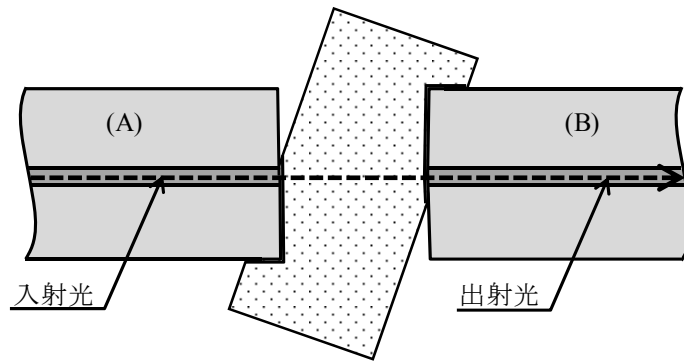
屈折率整合材に固形樹脂を使用することで、従来のオイル状の屈折率整合材であったように、屈折率整合材が流動し空気と屈折率整合材が混合することはなく、光ファイバの接続状態が変化しなくなることが期待できる。

図 3-12 (a)および(b)に提案する接続方法の原理を示す。図 3-12 (a)に示すように、どちらか一方でも光ファイバの端面が整合材に接触していない状態(光ファイバの端面間に大きな間隙がある状態)であれば、入射光は固形整合材の境界面で屈折し、軸ずれが生じるため高い接続損失が発生する。一方、図 3-12 (b)に示すように、両光ファイバの端面が固形整合材に接触している状態(光ファイバ端面間の間隙が特定の幅以下の状態)では、入射光は固形整合材の内部を直進する。よって接続損失は、図 3-12 (a)の状態に比べて非常に低くなる。

光ファイバの端面間に発生する間隙の幅に応じて接続損失に大きな差が生じることで、作業者は光ファイバ接続直後に施工の誤りに気付くことができる。さらに、接続し直すことで光ファイバの端面間に大きな間隙が発生することを未然に防止することが可能となる。



(a) 光ファイバが固形整合材に接触していない状態



(b) 光ファイバが固形整合材の境界面に接触した状態

図 3-12 提案する接続方法の原理

3-2-2-3 新たな光ファイバ接続の設計

前述したポイントを踏まえて、以下の順序に従い各種パラメータを算出した。

- I. 光ファイバ端面間の間隙が特定の幅以下の場合に発生する低い接続損失値を設定し、固形整合材の光軸上の幅 d を決定する。
- II. 光ファイバ端面間の間隙が特定の幅以上の場合に発生する高い接続損失値を設定し、光ファイバの光軸に対する固形整合材の傾き θ を決定する。

3-2-2-3-1 固形整合材の光軸上の幅算出

図 3-12 (b) に示すように、光ファイバの端面間の間隙が特定の幅以下となり、固形整合材で満たされた状態を考える。これは、間隙の幅と固形整合材の幅が一致することを意味する。この場合、入射光は固形整合材内を直進するため、発生する接続損失は間隙の影響を考慮して算出すればよい。また、メカニカルスプライス機構を用いた光ファイバ接続を想定しているため、間隙の影響のみ考慮し、軸ズレや角度ズレの影響については無視する。Marcuse の理論[3-20]を基に、間隙の影響のみ考慮した接続損失は式(3-1)で表される。図

3-13に式(3-1)から算出される接続損失と固形整合材の光軸上の幅 d (=間隙の幅)の関係を示す。波長 λ , 固形整合材の屈折率 n , モードフィールド径 w は, 各々 $1.31\ \mu\text{m}$, 1.46 , $4.75\ \mu\text{m}$ の値を用いた。

ここで, 間隙が特定の幅以下の場合に発生する接続損失の目標値は, メカニカルスプライスで一般的に要求される $0.5\ \text{dB}$ 以下の接続損失と同等であることが望ましい。従って図 3-13 から, 接続損失が $0.5\ \text{dB}$ 以下となるのは幅 d が $60\ \mu\text{m}$ 以下であることがわかる。しかしながら, 幅 d を $60\ \mu\text{m}$ とした場合, 固形整合材自体が非常に小さくなるため, 検証の際の実験での取り扱いが困難になることが想定された。そこで, 実験の取扱を考慮して固形整合材の光軸上の幅 d を $60\ \mu\text{m}$ の 2 倍の $120\ \mu\text{m}$ として試作を行った。尚, この時発生する接続損失は約 $2\ \text{dB}$ となる。

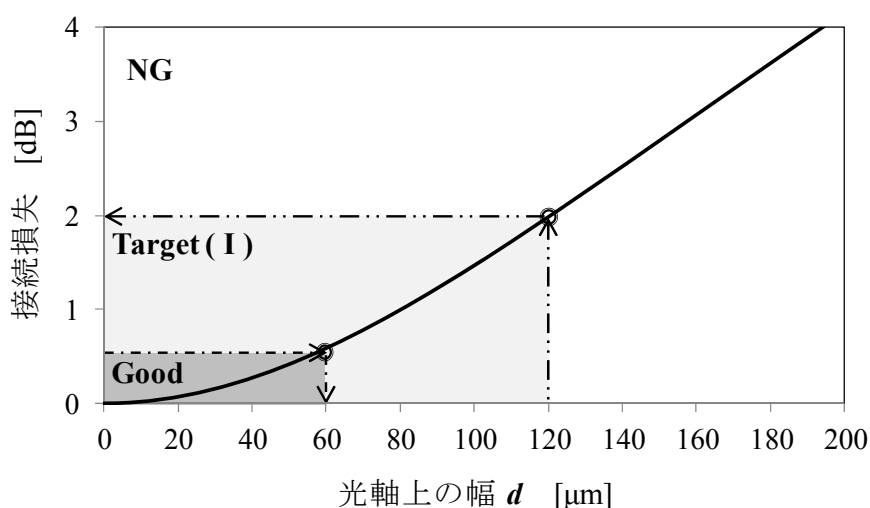


図 3-13 接続損失と光軸上の幅 d の関係

3-2-2-3-2. 固形接合材の傾きの算出

図 3-12(a) に示すように, 光ファイバの端面間の間隙が特定の幅以上となり, 入射光が固形整合材の境界面で屈折している状態を考える。光の経路に着目すると, 固形整合材の向かい合う境界面が平行であれば, 入射光と出射光が軸ズレの位置関係にあることがわかる。従って, 固形整合材を θ だけ傾けたときに発生する軸ズレ量から接続損失を算出すればよい。また, モデルを単純化するために間隙や角度ズレの影響については無視することとした。Marcuse の理論[3-20]を基に, 軸ズレの影響のみ考慮した接続損失は式(3-5)で表される。

$$\alpha = -10 \log \left[\exp(C^2) \right] \quad (3-5)$$

$$C(x) = \frac{x}{w} \quad (3-6)$$

尚, x は軸ずれ量である. 傾き θ から幾何学的求められる x を式(3-5)に代入し接続損失を算出した. 図 3-14 に固形整合材の幅 d を $120\mu\text{m}$ とした場合に, 式(3-5)から算出される接続損失と固形整合材の傾き θ の関係を示す.

ここで, 間隙が特定の幅以上の場合(大きな間隙が発生した場合)に発生する接続損失の目標値を 20dB とする. これは, 伝送装置間(OLT~ONU)の光線路損失が許容損失(パワーバジェット)を超えて確実に通信断となる接続損失を想定している. 図 3-14 から, 接続損失が 20dB 以上発生するのは, 傾き θ が 15.1° 以上であることがわかる. そこで, 試作では固形整合材の傾き θ を 16° とした.

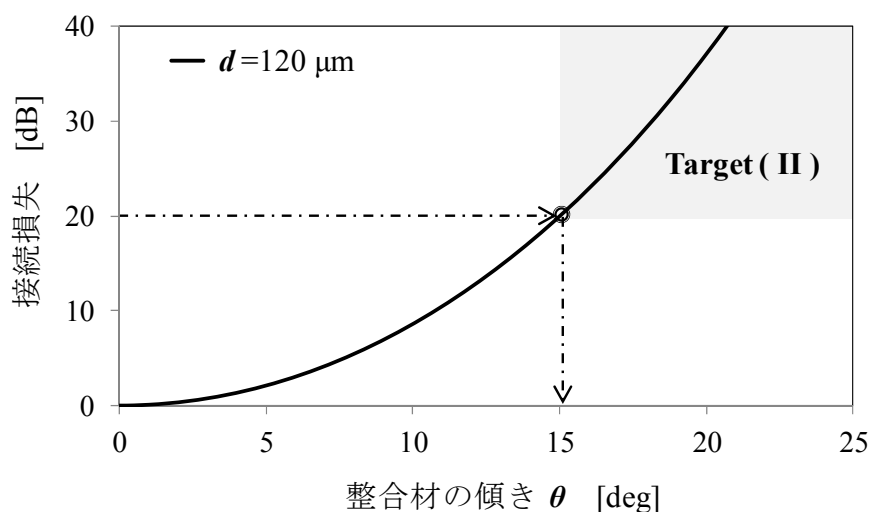
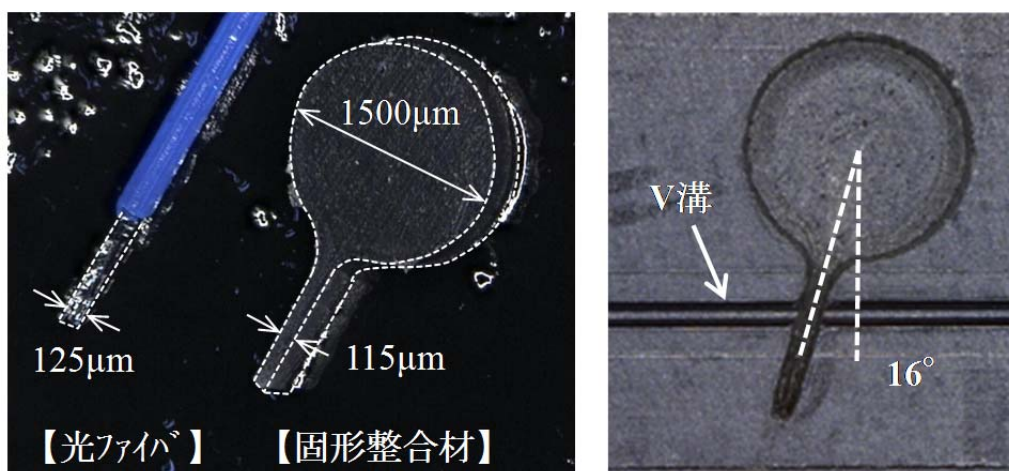


図 3-14 接続損失と固形整合材の傾き θ の関係

3-2-2-4. 実験と結果

本提案方法を用いた光ファイバ接続の光学特性と温度サイクル特性を確認した. 実験は固形整合材を試作し, 加工したメカニカルスプライス内にこれを配置して行った. 図 3-15 に試作した固形整合材と加工した V 溝基盤を示す. 固形整合材には, 屈折率が 1.46 のシリコン樹脂を採用している. また, 図 3-15 (a)に示すように, 実験時の取扱いを容易にするため, 直径約 1.5mm の円形の把持部を設けてピンセットによる把持が可能な構造とした. 尚, 固形整合材を 16° 傾けて配置した際に光軸上の幅が $120\mu\text{m}$ となるように, 固形整合材の幅は $115\mu\text{m}$ としている. V 溝基盤については, 固形整合材をメカニカルスプライス内に安定的に配置するため, 光ファイバの接続位置に溝を設けた. 図 3-15 (b)に示すように, V 溝基盤上の溝は固形整合材と同形状であり, かつ光ファイバの光軸に対して固形整合材が 16° 傾くように加工した. この溝の中に固形整合材を固定して各種実験を行った.

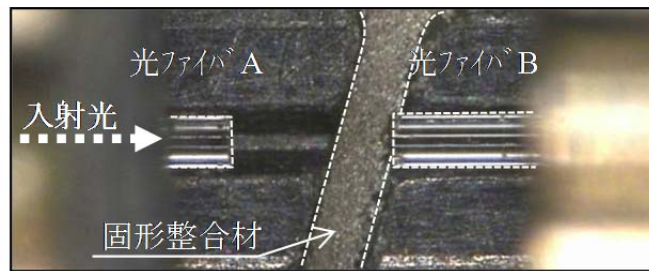


(a) 固形整合材 (b) V溝基盤加工

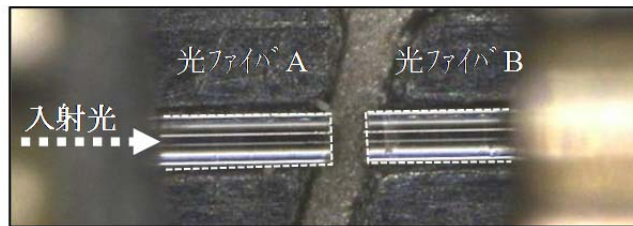
図 3-15 固形整合材および V 溝基盤加工

3-2-2-4-1 光学特性試験

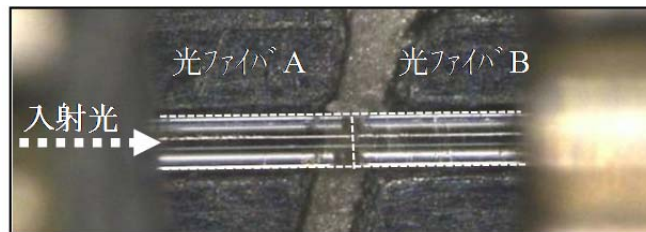
光ファイバの端面が固形整合材の境界面に接触する前後の光学特性の挙動を確認した。図 3-16 にメカニカルプライス内部の状況例を示す。光ファイバ B は常に固形整合材の境界面に接触させた状態とし、光ファイバ A を徐々に光ファイバ B (固形整合材) に近づけて端面間の距離(間隙の幅)を変化させた。また、波長 $1.31\mu\text{m}$ と $1.55\mu\text{m}$ の光を光ファイバ A から入射させ、光ファイバの端面間の距離を変化させる毎に接続損失および反射減衰量を測定した。図 3-16 (a) に光ファイバ A が固形整合材に接触していない状態(大きな間隙)を示す。図 3-16 (b) に光ファイバ A が固形整合材に接触している状態を示す。図 3-16 (c) に光ファイバ A が光ファイバ B に近接し、両端面間の非常に狭い間隙が固形整合材で満たされた状態を示す。



(a) 光ファイバ A が固形整合材に接触していない状態



(b) 光ファイバ A が固形整合材の境界面に接触した状態



(c) 光ファイバ A が光ファイバ B に近接し、両端面間の間隙を固形整合材が満たした状態

図 3-16 メカニカルスプライス内部の状況

図 3-17, 図 3-18 にそれぞれ波長 $1.31 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ の接続損失および反射減衰量の結果を示す. 図 3-17 から光ファイバ A が固形整合材に接触する前は, 常に 20 dB 以上の接続損失が発生した. しかし, 光ファイバ A が固形整合材に接触すると, 接続損失は $2.5 \text{ dB}/2.3 \text{ dB}$ ($1.31 \mu\text{m}/1.55 \mu\text{m}$) まで低下した. さらに, 光ファイバ A が光ファイバ B に近接し, 両端面間の非常に狭い間隙を固形整合材が満たした状態では, 接続損失は $0.1 \text{ dB}/0.1 \text{ dB}$ ($1.31 \mu\text{m}/1.55 \mu\text{m}$) まで低下した. 以上の測定結果は, 前述した目標値とほぼ一致していることがわかる.

図 3-18 から, 光ファイバ A が固形整合材に接触する前は, 反射減衰量が約 14 dB を推移したことがわかる. しかし, 光ファイバ A が固形整合材に接触すると, 反射減衰量は $51.7 \text{ dB}/48.6 \text{ dB}$ ($1.31 \mu\text{m}/1.55 \mu\text{m}$) まで増加した. さらに, 光ファイバ A, B の両端面間の非常に狭い間隙を固形整合材が満たした状態では, 反射減衰量は $53.4 \text{ dB}/45.5 \text{ dB}$ ($1.31 \mu\text{m}/1.55 \mu\text{m}$) となった. 以上の測定結果より, 反射減衰量についても光ファイバが固形整合材に接触する前後で値が大きく変化することがわかる. これは, 光ファイバが固形整合材に接触していない状態では, 入射光が空気中を進むため, 反射減衰量は空気とのフレネル

反射値(14.7dB)となり, 固形整合材に接触することで反射が抑えられ反射減衰量が大きくなったと考えられる.

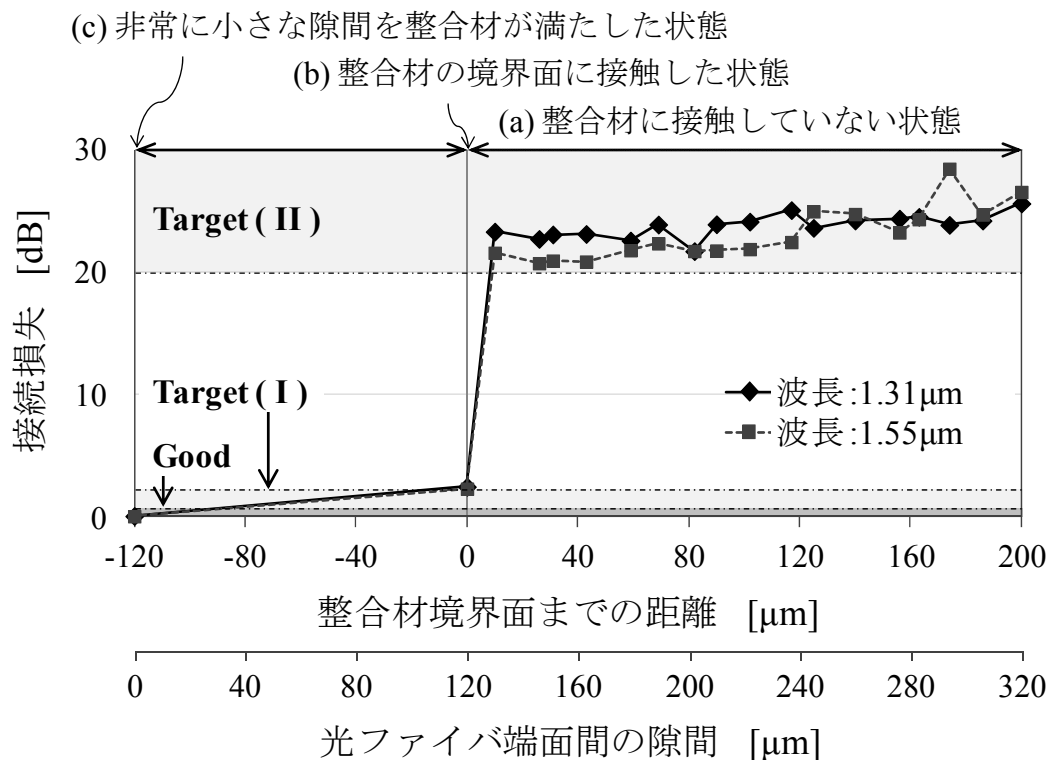


図 3-17 接続損失の結果

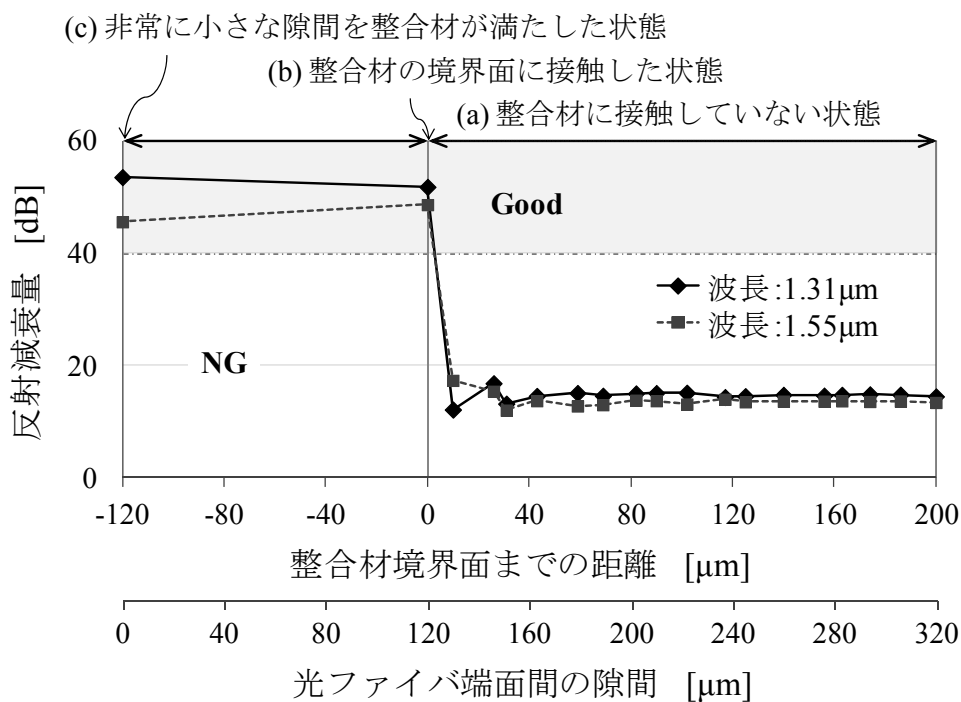


図 3-18 反射減衰量の結果

3-2-2-4-2 温度サイクル試験

本提案方法を用いて $100\ \mu\text{m}$ 程度の間隙のある光ファイバ接続を作成し、温度変化に伴う損失変動および反射減衰量の変動を確認した。サンプルは、固形整合材を用いて作成したメカニカルスプライスのほかに、通常のシリコンオイルの屈折率整合材を用いたメカニカルスプライスで $100\ \mu\text{m}$ 程度の間隙を作成したサンプルも準備した。屋外環境下における温度サイクル特性を検証するため、ヒートサイクル試験（試験条件： $-40\sim+70^\circ\text{C}$, 10 cycles, 6 h/cycle）を実施した[3-23]。

図 3-19, 図 3-20 に波長 $1.31\ \mu\text{m}$ における接続損失の変動量と反射減衰量の結果を示す。尚、図中に示しているシリコンオイルを用いた光ファイバ接続は、間隙が約 $100\ \mu\text{m}$ であり、接続損失の初期値は $2.51\ \text{dB}$ であった。また、固形整合材を用いた光ファイバ接続は、間隙が約 $90\ \mu\text{m}$ であり、接続損失の初期値は $3.17\ \text{dB}$ であった。ここで接続損失の初期値に着目すると、シリコンオイルを用いたサンプルに比べ、固形整合材を用いたサンプルの値が高くなっていることがわかる。これは、光ファイバを押え基盤で固定する際に、V 溝基盤上に加工した溝の中で固形整合材が変形し、その影響で光ファイバに軸ズレや角度ズレが生じたためではないかと考えられる。

図 3-19 より、固形整合材を用いた光ファイバ接続は、接続損失の変動量が最大で $0.4\ \text{dB}$ となった。これは、固形整合材が温度変化による光ファイバの収縮を追従し、常に光ファイバの端面と整合材の境界面が接触した状態を保持していたためではないかと考えられる。一方、シリコンオイルの屈折率整合材を用いた光ファイバ接続は、接続損失の変動量が最大で $3.8\ \text{dB}$ となり、固形整合材に比べて大きな変動となった。これは、温度変化に伴いシリコンオイルの屈折率整合材が間隙内で流動し、空気と混在したためではないかと考えられる。

図 3-20 より、反射減衰量は、シリコンオイルの屈折率整合材、固形整合材どちらの光ファイバ接続も常に $38\ \text{dB}$ 以上となった。固形整合材を用いた光ファイバ接続は、接続損失の変動量と同様に、固形整合材が温度変化による光ファイバの収縮を追従し、常に光ファイバの端面が固形整合材の境界面に接触していたため、反射が抑えられ反射減衰量の著しい低下は発生しなかったと考えられる。一方、シリコンオイルの屈折率整合材を用いた光ファイバ接続は、温度変化によって整合材と空気が混在したものの、整合材と空気の境界面で光が乱反射し、接続損失は劣化した。反射減衰量の著しい低下は発生しなかったと考えられる。

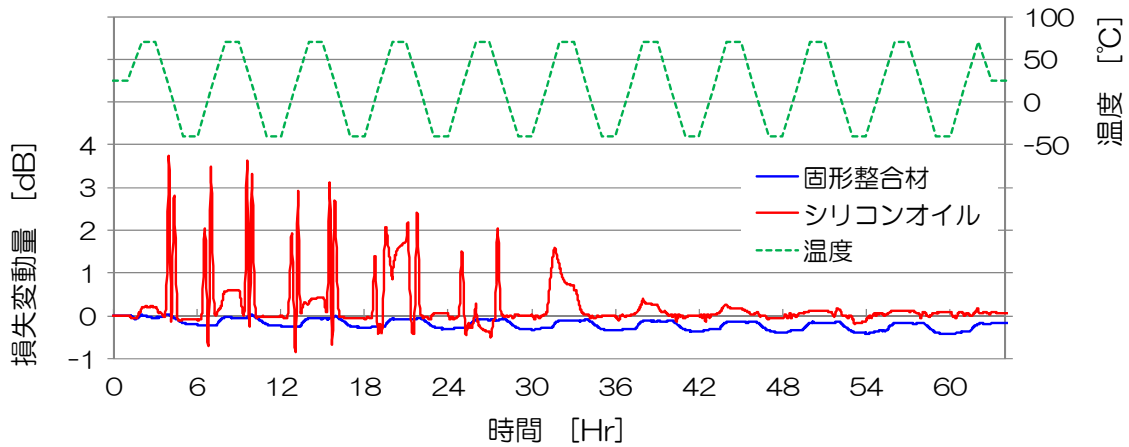


図 3-19 ヒートサイクル試験結果 (損失変動)

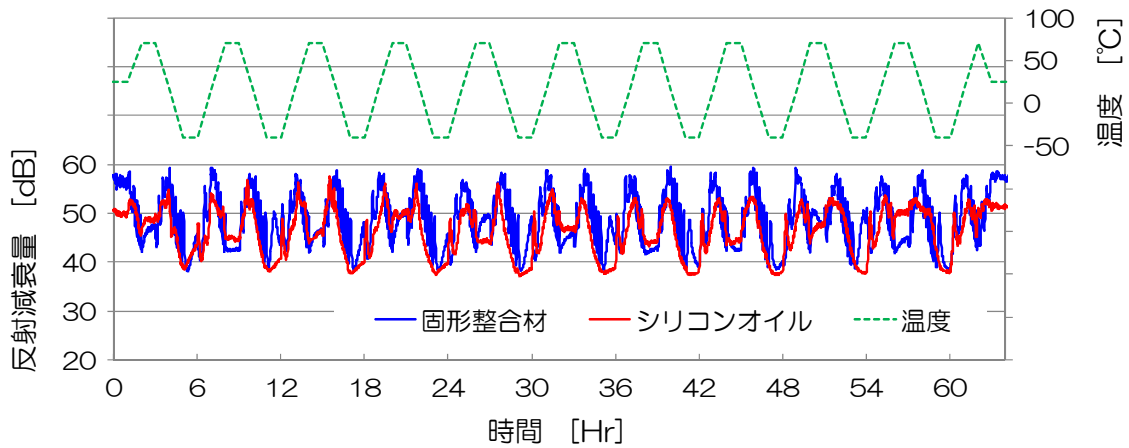


図 3-20 ヒートサイクル試験 (反射減衰量)

3-2-2-5 まとめ

屈折率整合材として、固形のシリコン樹脂を用いた新しい光ファイバ接続方法を提案した。実験より、光ファイバの端面間に $120\mu\text{m}$ 以上の大きな間隙がある場合、接続損失は常に 20 dB 以上の発生することを確認した。また、間隙の幅が $120\mu\text{m}$ 以下になると、接続損失は約 2 dB まで低下した。反射減衰量についても、光ファイバの端面が固形整合材に接触する前後で約 14 dB から 50 dB 以上に大きく値が変化することを確認した。

さらに、 $120\mu\text{m}$ 以下の間隙を持った光ファイバ接続において、ヒートサイクル試験を実施したところ、固形整合材を用いた光ファイバ接続では接続損失の変動量が最大で 0.4 dB となり、従来のシリコンオイルを用いた接続と比較しても十分に小さな変動であることを確認した。また、反射減衰量は常に 38 dB 以上となることを確認した。

提案した光ファイバ接続方法を用いることで、作業者は接続直後に誤った施工に気付くことができ、ただちに再接続し直すことでファイバ端面間の大きな間隙に起因する故障を未然に防止することが期待できる。

3-3 カット不良端面使用時の光ファイバ突合せ点の光学特性劣化の分析と対策

3-3-1 カット不良端面使用時の光ファイバ突合せ点の光学特性劣化の分析

3-3-1-1 はじめに

3-3-1では、カット不良端面を用いた現場組立コネクタのサンプルを作成し、そのサンプルの光学特性の劣化状態をヒートサイクル試験で再現することで検証した。その分析結果を説明する。

3-3-1-2. 光ファイバのカット不良端面

メカニカルスプライスや現場組立コネクタにおける故障の事例として、突合せ点でカット不良端面が用いられていることが挙げられる。カット不良端面は、ファイバカッタに何らかの問題があると、ファイバ端面は平滑でなくなり、ファイバ軸に対して垂直な端面ではなくなる。図 3-21 に SEM (Scanning Electron Microscope) で撮影したファイバカット端面のカット正常とカット不良な場合の例を示す。

図 3-22 に光ファイバに曲げ折ることでファイバを切断する場合の手順を示す[3-24]。

手順① 2ヶ所のファイバクランプで光ファイバ心線を固定する。

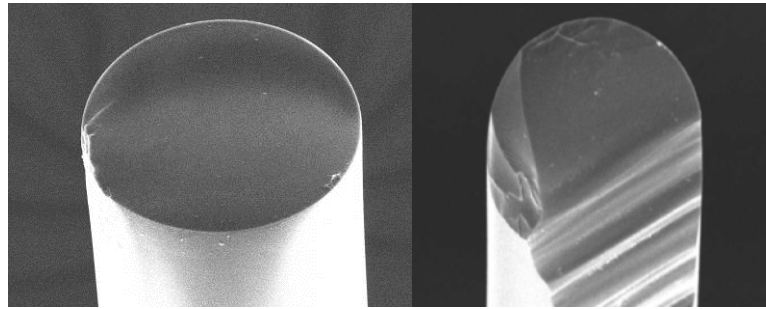
手順② 切断刃をスライドさせ、光ファイバ心線に初期傷をつける。

手順③ 傷をつけた逆側からマクラと呼ばれる切断ボタンで光ファイバを押し曲げて、適切な曲げ半径を与えることで、光ファイバをカットする。

このうち、手順①では、2つのクランプ固定することで、光ファイバに適切な張力が与えられる。手順②では、光ファイバの軸に垂直に適切な大きさの傷が与えられる。これらは、正常なファイバカット面を生成するために重要である。ファイバカッタが適切に扱われないと、カット不良を生成する原因となる。こういったカット不良の原因としては、主に以下の2種類が考えられる。

原因① ファイバカッタを落としたり、ぶついたりして、ファイバクランプやマクラの位置がずれてしまい、光ファイバを押し下げる適正な距離に狂いが生じ、カット不良となる。

原因② 初期傷を入れる切断刃に欠損、摩耗があったため、カット不良となる。



(a) 正常なカット端面 (b) カット不良端面

図 3-21. 光ファイバカット端面の例

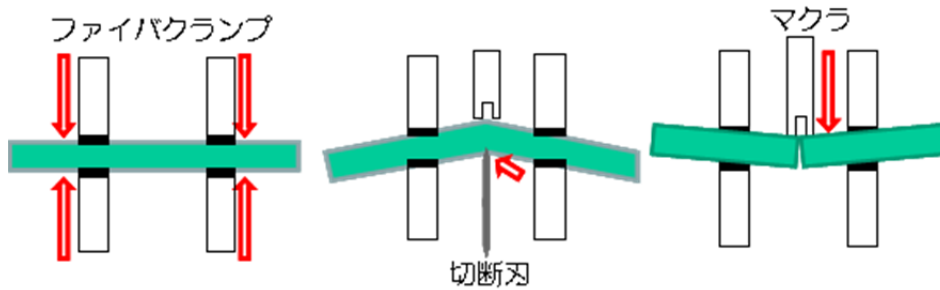


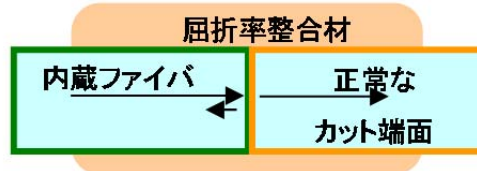
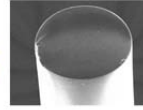
図 3-22 ファイバカッタの切断原理

3-3-1-3. 光ファイバのカット不良端面による接続状態

前節で説明したように、ファイバカッタに問題が無ければ、ファイバカッタの端面は正常となる。しかしファイバカッタに何らかの異常があれば、光ファイバの端面が正常にカットされない。

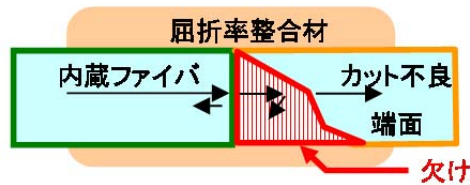
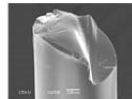
図 3-23 (a)と(b)に現場組立コネクタでのファイバカット端面と屈折率整合材の正常・異常な接続状態を示す。現場組立コネクタでは、片側のカット端面は予め内蔵されているため、常に正常なカット端面である。図 3-23 (a)は、正常なカット端面を用いた正常な接続の状態である。図 3-23 (b)は、正常なカット端面と異常なカット不良端面による異常な接続の状態である。正常な接続状態では、カット端面間にごく僅かな間隙があり、その間隙は屈折率整合材で満たされている。異常な接続状態では、正常で平滑なカット端面と異常な欠けのあるカット不良端面の間に大きな間隙がある。この間隙は、屈折率整合材で満たされているが、間隙が大きいため光学特性に影響を与える可能性がある。

正常なカット端面



(a) 正常なカット端面による突合せ点

カット不良端面



(b) 異常なカット不良端面による突合せ点

図 3-23 現場組立コネクタでのファイバ突合せ点の接続状態

3-3-1-4. 検証方法

検証用サンプルとしては、図 3-24 に示すようにメカニカルスプライス機構を内部に有する現場組立コネクタを使用した。現場組立コネクタは、突合せ点の一方の光ファイバは予め正常なカット端面のファイバ（内蔵ファイバ）が使用されているため、もう一方側の光ファイバを、正常端面、カット不良端面を使用して評価した。

検証用サンプルとして、カット不良端面を用いた現場組立コネクタを 25 個作成した。このカット不良端面はファイバ切断時にファイバカッターのマクラの高さを不適切な高さに調整することにより作成した。カット不良端面の欠けの大きさは、長手方向に約 30~200 μm であった。比較として正常なカット端面のサンプル 5 個を作成した。

作成したサンプルについて、図 3-7 に示す実験系にて、ヒートサイクル試験（試験条件：-40°C~+70°C，6 時間サイクルの 10 サイクル）を実施した[3-23]。測定した波長は、1.55 μm にて実施した。

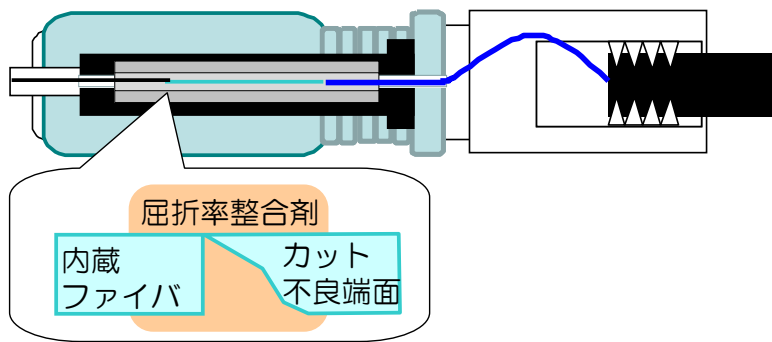


図 3-24 検証用サンプル

3-3-1-5. 検証結果

評価した現場組立コネクタの正常な接続の室温での初期状態は接続損失が 0.7 dB 以下、ヒートサイクル試験中の損失変動量は 0.3 dB 以下を目安とした。同様に正常な接続の反射減衰量は、室温での初期状態は 40dB 以上、ヒートサイクル試験中は 35 dB 以上を目安とした。

各サンプルにて、ヒートサイクル試験を行った。正常なカット端面を用いたサンプルによる測定結果の一例を図 3-25 に示す。カット不良端面を用いた実験結果では、2 種類の傾向の試験結果が確認された。それぞれカット不良端面①②を用いたサンプルによる測定結果の一例を図 3-26、図 3-27 に示す。二重破線が温度変化、実線が接続損失、破線が反射減衰量の変化を示している。

図 3-25 に示す正常なカット端面を用いたサンプルでは、初期の接続損失は、0.3 dB 以下でヒートサイクル試験中の接続損失の変動量は、0.1dB 以下であった。ヒートサイクル試験中の反射減衰量は 40 dB 以上であった。

図 3-26 に示すカット不良端面①のサンプルでは、初期の接続損失とヒートサイクル試験の損失変動は 0.4 dB と 0.5 dB であった。また反射減衰量のヒートサイクル試験中に 40 dB 以上であった。この結果は、正常な接続状態とほぼ同等であった。

図 3-27 に示すカット不良端面②のサンプルでは、初期の接続損失は、1.0 dB で、損失変動は 40 dB 以上で最大で 43 dB まで、温度変化と合わせて変動している。反射減衰量は 30 dB 以下で最低 28 dB まで低下している。接続損失と反射減衰量は高温と低温の温度サイクルに合わせて周期的に変動している。この光学特性は大変不安定であり、カット不良端面②の反射減衰量はカット不良端面①より悪化するという特徴も確認された。

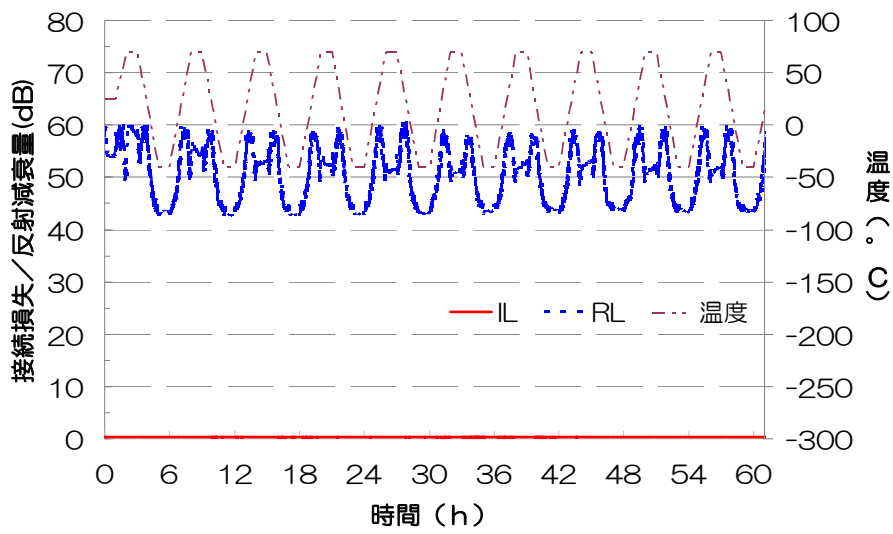


図 3-25 ヒートサイクル試験結果 (正常なカット端面)

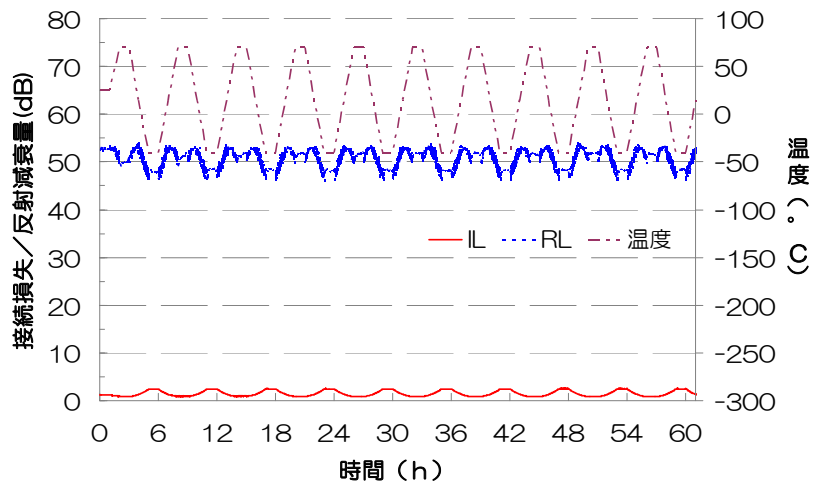


図 3-26 ヒートサイクル試験結果 (カット不良端面①)

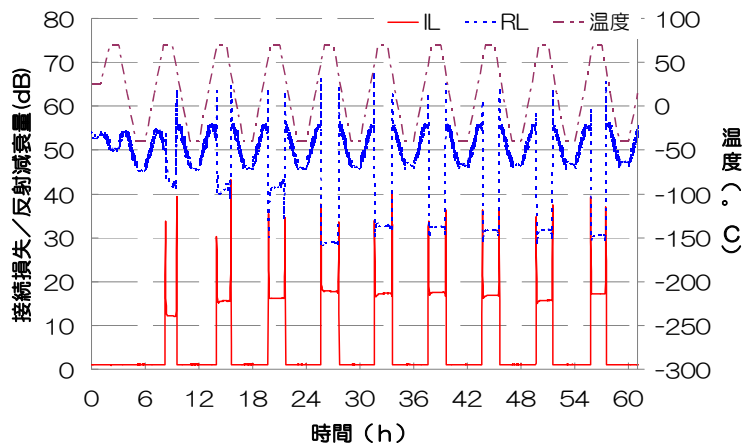


図 3-27 ヒートサイクル試験結果 (カット不良端面②)

3-3-1-6. 考察

ヒートサイクル試験中の正常・異常な接続点を顕微鏡で直接観察できれば、接続点での間隙と屈折率整合材の状態を解明できる。しかし、所有する実験装置やサンプルでは接続点の状態を観察することは困難であった。従って、ヒートサイクル試験中の接続損失と反射減衰量の値を散布図にプロットして、接続点での間隙と屈折率整合材の状態を推定した。

ヒートサイクル試験結果を 1 分毎に横軸に接続損失、縦軸に反射減衰量をプロットした散布図を、図 3-28 に正常なカット端面のサンプルの結果を、図 3-29, 3-30 にカット不良端面①②のサンプルの結果を示す。あわせて、現場組立コネクタ内部のメカニカルスプライス機構部にて、内蔵ファイバと突き合わせた光ファイバのカット端面についても図示する。図中の矢印は、ヒートサイクル試験の温度変化に変化を示す。併せて、図 3-29, 3-30 では低温 (-40°C : L)、室温 (20°C : R)、高温 (70°C : H) の温度条件も併せて示す。

図 3-28 に示す正常なカット端面のサンプルでのヒートサイクル試験結果では、接続損失はほぼ一定で、反射減衰量のみ、僅かに変動していた。接続損失がほぼ一定なのは、損失増加の原因となる軸ずれ、角度ずれ、間隙が無いことを示している。一方、反射減衰量の変動は屈折率整合材の屈折率が温度変化に追従して変化していることが原因だと考えられる [3-26]。これは反射減衰量がコアと屈折率整合材の屈折率差に依存するためである。

図 3-29 のカット不良端面でのヒートサイクル試験結果では、反射減衰量は僅かな変動であり、図 3-28 と同様に屈折率整合材の屈折率が温度変化に追従して変化していることが原因だと考えられる。一方、接続損失の変動は、正常なカット端面での試験結果と比べ、接続損失が 0.6 dB 程度増加している。これは、正常なカット端面とカット不良端面の間には、屈折率整合材が充填された状態であって、温度変化に伴い、微小な角度ずれ、または軸ずれが発生していることに起因すると考えられる。カット不良端面①の特性は、カット正常端面とほぼ同様に安定している。

図 3-30 のカット不良端面②でのヒートサイクル試験結果では、接続損失も反射減衰量も大きく変動しており、温度変化に併せて周期的に変動している。初期の光学特性は、接続損失が 1dB 以下で反射減衰量が 40dB 以上であったが、ヒートサイクル試験中に接続損失は増加し、反射減衰量は低下して、最悪値は、高温時に接続損失が 43dB で反射減衰量が 28dB に変化している。これらと異なる損失変動の挙動のサンプルもあり、周期的な変動を起さずに接続損失が高いまま、反射減衰量が低いまま留まるサンプルもあった。

接続損失と反射減衰量の大きな変化は、突合せ点の間隙に部分的に空気が混在することによる。突合せ点の間隙は完全にカット不良端面の影響で完全に屈折率整合材で満たされている訳ではなく、屈折率整合材と空気が混在した状態であった。屈折率整合材と空気の境界面は不均一になりうる。突合せ点を透過する光は境界面で不規則に散乱するため、接続損失は著しく悪化する。間隙が屈折率整合材で満たされていれば、光学特性は著しく悪化することはないが、空気と屈折率整合材と混在状態であれば、光学特性は劣化する。接続点は、温度変化に併せて状態が変化する。この結果、カット不良端面②のサンプルのように接続損失が 40dB 以上、反射減衰量が 30dB 以下となりうる。カット不良端面①②のサンプルの光学特性の差を明確に説明するのは困難ではあるが、カット不良端面の欠けの部分の形状や大きさ、間隙での屈折率整合材の状態が両者の違いに寄与していると考えられる。従って、現場組立コネクタの突合せ点にカット不良端面を用いると光学特性が大きく劣化しうることを示している。

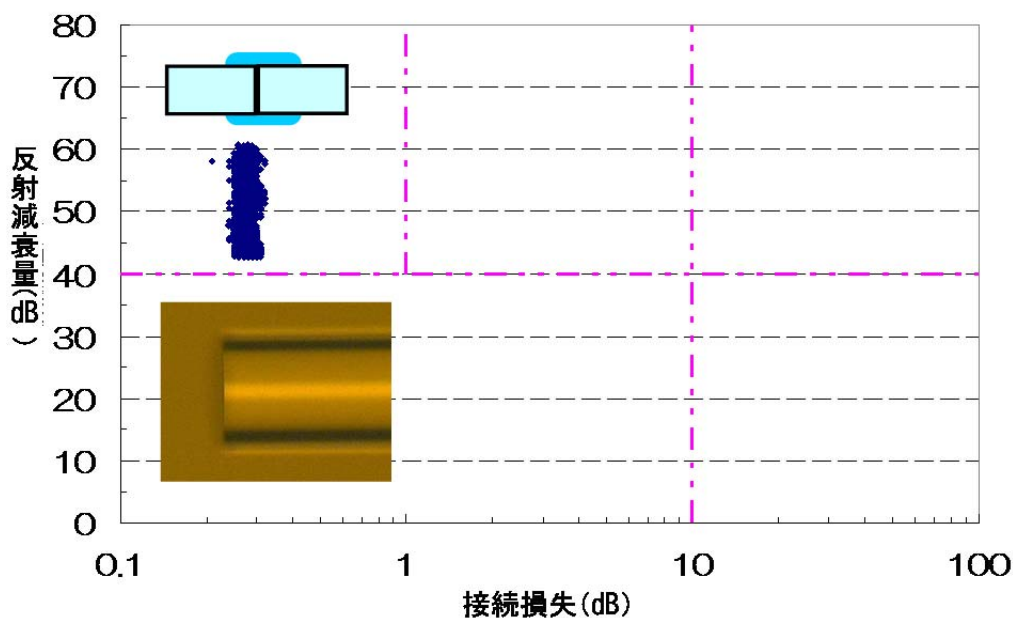


図 3-28 ヒートサイクル試験結果の散布図（正常なカット端面）

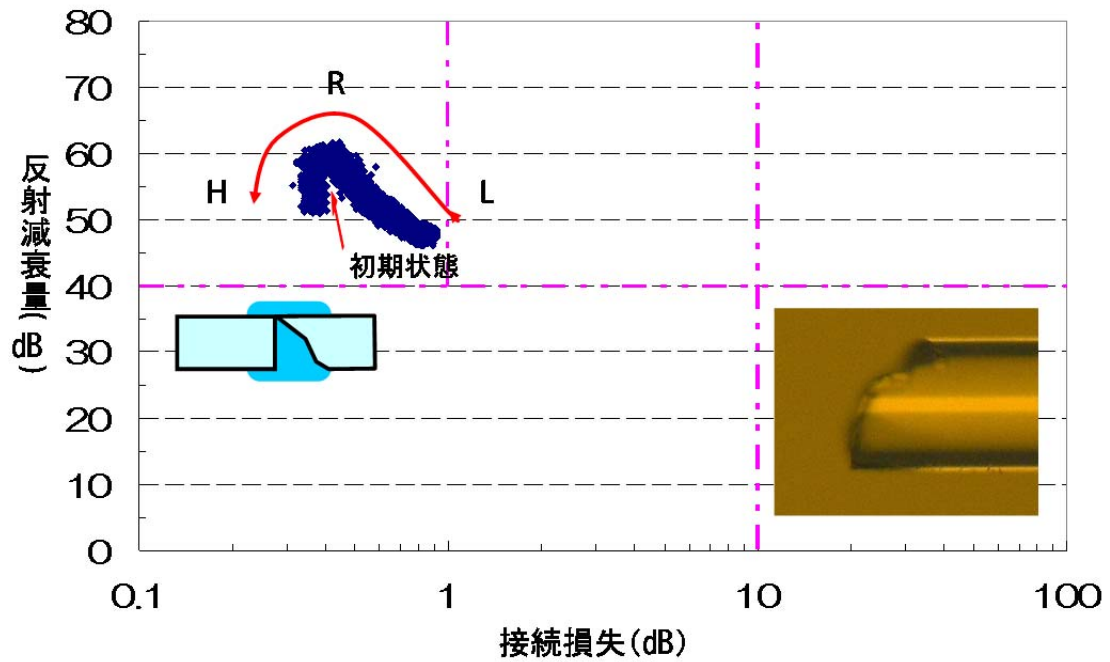


図 3-29 ヒートサイクル試験結果の散布図 (カット不良端面①)

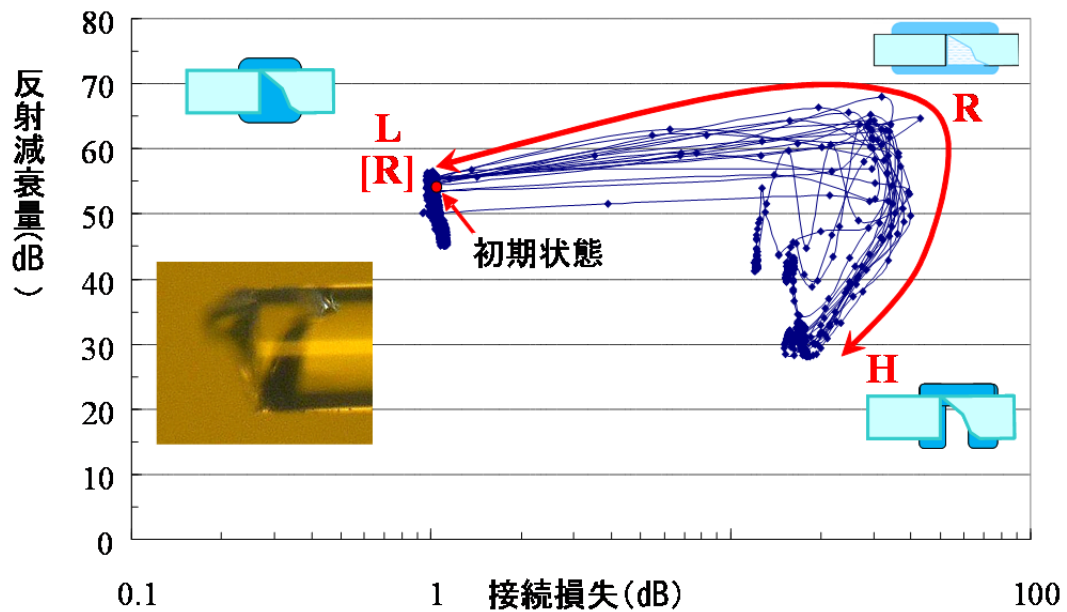


図 3-30 ヒートサイクル試験結果の散布図 (カット不良端面②)

3-3-1-7. まとめ

カット不良端面を使用した現場組立コネクタを用いて、ヒートサイクル試験時の光学特性劣化の分析を行った。その結果、カット不良端面による 40 dB 以上の大きな損失増加は、ファイバ突合せ点で空気と屈折率整合材の混在状態によって引き起こされている可能性が

高いことを明らかにした。

3-3-2 ファブリ・ペロー干渉計の原理を利用した光ファイバ端面の検査技術

3-3-2-1 はじめに

3-2-2 では、ファブリ・ペロー干渉計の原理を用いて、2 波長の反射減衰量の値から光ファイバ端面の形状を判定する検査技術を提案する。提案した検査技術を実現する試作システムについて説明し、複数の形状のファイバカット端面を評価した結果について述べる。

3-3-2-2. 提案する光ファイバ端面の検査技術の原理

図 3-31 に 3-2-2 で提案する、ファイバ端面検査のための計測用・被検査用ファイバの基本的な構成図を示す。図 3-31 (a), (b) はそれぞれ計測用の平滑な光ファイバ端面と、被検査対象であるカット不良端面、もしくは正常端面を近接させた状態を示している。入射光出力(P_i もしくは P_i') と反射光出力(P_r もしくは P_r') の比率は各々の接続状態で測定可能である。2 つの接続状態とも一定の間隙長 S を設けて近接させた状態である。フレネル反射 R_0 はファイバ端面と空気の屈折率の違いにより発生する。図 3-31 (a) の場合、カット不良端面で反射光は散乱するため、反射率 P_r/P_i は計測用ファイバのファイバ端面のフレネル反射率 R_0 で決まる。フレネル反射率 R_0 は式(3-4)によって決まる。

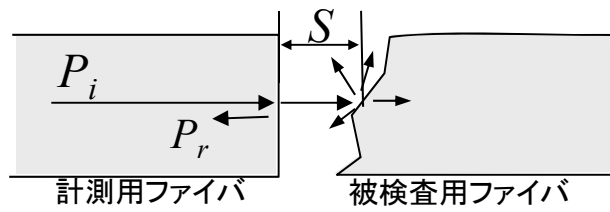
図 3-31 (b) の場合は、正常な端面間で多重反射が発生する。この間隙で発生する多重反射光は互いに干渉しあい、ファブリ・ペロー干渉計のように振る舞う [3-25] [3-26]。ファブリ・ペロー干渉計のモデルを基に反射率 R を計算すると以下の式で表わされる。

$$R = \frac{4R_0 \sin^2(2\pi mS/\lambda)}{(1-R_0)^2 + 4R_0 \sin^2(2\pi mS/\lambda)} \quad (3-7)$$

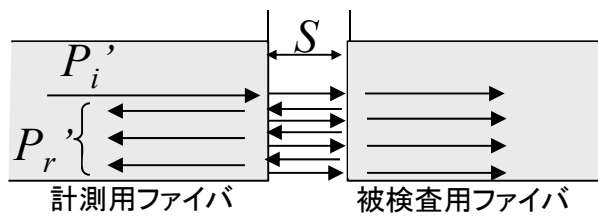
尚、 S 、 λ はそれぞれファイバ端面間隙長と波長を示す。反射減衰量は反射率の対数をとることで導かれたため、式(3-7)よりファイバ端面間隙長と波長に依存することが分かる。

図 3-32 に式(3-4)、(3-7)から計算されるカット不良端面と正常端面の反射減衰量を示す。 n_0 、 n は及び S は、各々 1.454、1.0、及び $40 \mu\text{m}$ を用いた。カット不良端面の反射減衰量の値は、波長に依らず 14.7 dB である。一方、正常端面の反射減衰量は波長に依存して大きく変動する。ファブリ・ペロー干渉計の効果により反射減衰量は最小で ~ 8.7 dB の値をとる。また、波長 1.31、及び $1.55 \mu\text{m}$ の場合の反射減衰量の値は 21.7、及び 9.4 dB になる。

以上より、ファイバ端面の状態を検査するため、図 3-31 のように計測用・被検査用ファイバ端面を近接させ、反射減衰量を任意の 2 波長で測定する。表 3-2 に示すように 2 波長とも 14.7 dB にほぼ等しければ、カット不良端面と判断できる。一方、1 波長でも 14.7 dB と異なれば、正常端面と判断できる。



(a) カット不良端面



(b) 正常端面

図 3-31 計測用・被検査用ファイバの構成図

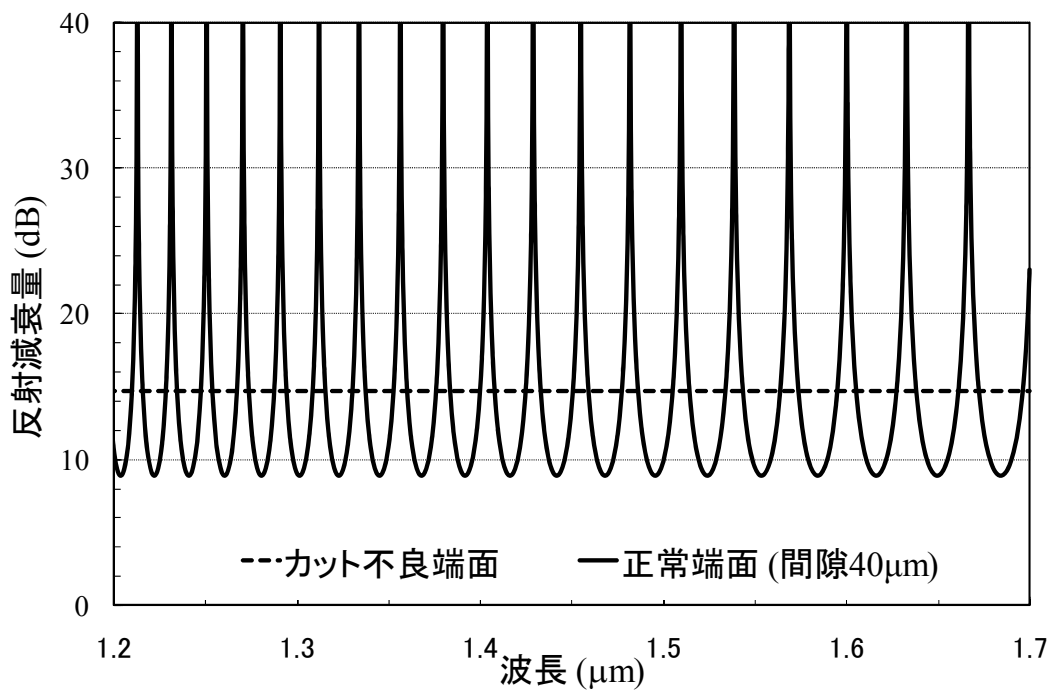


図 3-32 カット不良端面・正常端面の反射減衰量

表 3-2 反射減衰量とファイバ端面形状の関係

パターン	反射減衰量	端面形状
1	$\approx 14.7\text{dB}$ (波長 λ_1 and λ_2)	カット不良端面
2	$\neq 14.7\text{dB}$ (波長 λ_1 or λ_2)	正常端面

3-3-2-3. 検査システムの設計と構造

前述した検査技術の原理に基づいて、図 3-33 に示すような端面検査システムを設計した。このシステムは、2 種類の異なる波長の光源、光検出器、2 台の光合波器、制御装置、更にファイバステージから構成される。ファイバステージが、計測用ファイバ端面と被検査用ファイバ端面でファブリ・ペロー干渉計を創り出すため、この端面検査システムにおいて、最も重要な構成部品となる。その他の構成部品は既存の物品を利用することが可能である。従って、我々は端面検査システムを実現できる、新しいファイバステージを設計・試作した。

3-3-2-3-1. ファイバステージの設計

この検査技術の検討では、簡易に検査が可能で、屋外環境でも適用可能な技術の確立を目的とした。従って、ファイバステージについては可搬でき、操作に電力を必要としない形態が望ましいと考えた。また計測用・被検査用ファイバとも、通常のシングルモードファイバの使用を想定し設計した。

図 3-34 下図にファイバステージ内で、ファイバ端面間の間隙を保持して、2 本のファイバを配置した状態を示す。配置される 2 本のファイバは各々のファイバの軸に平行に配置される必要がある。被検査用ファイバの端面が正常端面の場合、ファブリ・ペロー干渉状態を創り出す必要がある。もし 2 本のファイバの軸ずれが大きいと、非検査用ファイバの端面から反射された光が検査用ファイバのコアから外れて受光できなくなり、結果として正確なファイバ端面の評価ができなくなる可能性がある。

図 3-34 上図に被検査用ファイバの端面を示す。計測用ファイバのコアから放射された光は、被検査用ファイバの端面で反射し、再び計測用ファイバに入射する。被検査ファイバ端面上の入射光のスポットの直径は、計測用ファイバ端面のコアの直径と同程度である。それゆえ、1 回の反射減衰量の測定でカット不良端面か正常端面かの判定が可能な領域は、コア直径相当の領域に限定される。ファイバ端面の状態を全て確認するには、測定範囲を順次移動させて、ファイバ端面全体(ファイバ外径相当)を走査する必要がある。従って、走査可能な移動距離は、ファイバ外径の $125\mu\text{m}$ 以上である必要がある。一方、ファイバの端面を漏れなく検査するために、測定範囲を順次移動させる際の最小移動距離は、1 回の測定で評価可能な領域の大きさ以下である必要がある。すなわちファイバのコアの直径である、 $10\mu\text{m}$ 以下の最小移動距離が必要となる。

次にファイバ端面間の間隙長について言及する。もし間隙長が大きすぎれば、計測用ファイバからのコアから出射された光が空間伝搬中に放射されるため、反射された光が再び計測用ファイバのコアに入射する際の結合損失が大きくなる。このため、ファイバ端面間の空間伝搬時の放射損失も考慮し、反射減衰量の間隙長依存性を計算した。正常端面同士が近接されたファブリ・ペロー干渉計のモデルを基に、式(3-7)と同様に反射率 R' を計算した結果を以下に示す[3-27]。

$$R' = \frac{(1 - A)^2 R_0 + 4AR_0 \sin^2(2\pi mS/\lambda)}{(1 - AR_0)^2 + 4AR_0 \sin^2(2\pi mS/\lambda)} \quad (3-8)$$

尚、 A は間隙長 S の空气中伝搬時の減衰率である。ファイバ端面間の空気間隙 S の伝搬時の減衰率は Marcuse の式によると以下のように表わされる[3-20]。

$$A = \frac{4\pi^2 n^2 w^4}{4\pi^2 n^2 w^4 + \lambda^2 S^2} \quad (3-9)$$

尚、 w は検査用光ファイバのモードフィールド半径である。図 3-35 に式(3-8)、(3-9)から計算された端面間の損失を考慮した反射減衰量を示す。波長 λ とモードフィールド半径 w は、各々 1.31 、 $4.75 \mu\text{m}$ の値を用いた。図より反射減衰量は間隙長が増加するに従って、変動量が徐々に小さくなり 14.7 dB に漸近していることが分かる。我々の実験では、測定精度を考慮し反射減衰量が 14.7 から 15.7 dB までの 1.0 dB の範囲をファイバ端面がカット不良であると判定した。もし間隙長が増加し、正常端面時の反射減衰量の値が $14.7 \sim 15.7 \text{ dB}$ に近づくと、カット不良か正常端面かを正確に判定することが困難になる。判定の誤りを回避するため、カット不良と判断する範囲 ($14.7 \sim 15.7 \text{ dB}$) の 10 倍の変動量の反射減衰量をとる間隙距離を求めた。その結果、図 3-35 に示すように、反射減衰量の変動量 10 dB ($11 \sim 21 \text{ dB}$) に相当する間隙距離は $90 \mu\text{m}$ 以下の領域であった。従って、我々は検査用ファイバと被検査用ファイバの端面間距離の目標値を $90 \mu\text{m}$ 以下に設定した。

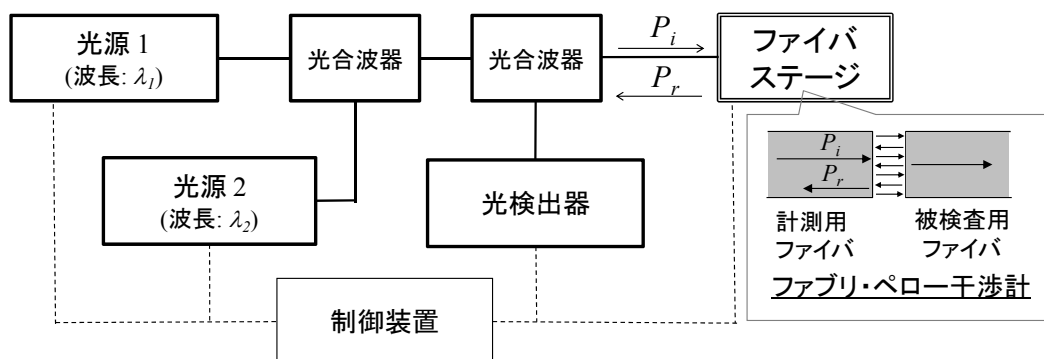


図 3-33 端面検査システムの構成

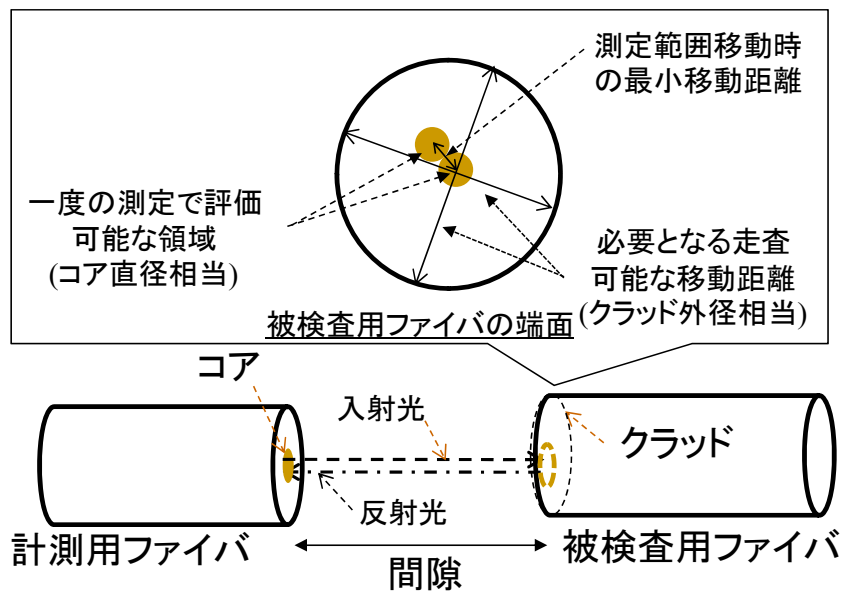


図 3-34 ファイバステージ上の計測・被検査用ファイバ

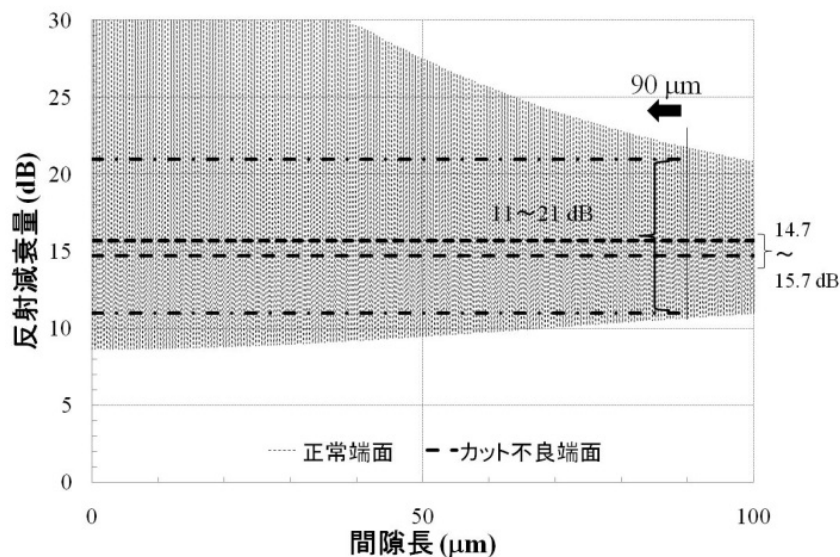


図 3-35 端面間の損失を考慮した反射減衰量

3-3-2-3-2. ファイバステージの試作

図 3-36 に試作したファイバステージを示す。試作ファイバステージの大きさは、90 x 100 x 110 mm であり、十分可搬可能な大きさであった。また 2 本のファイバの固定のために V 溝を具備しており、V 溝に固定する 2 つのファイバ端面でファブリ・ペロー干渉状態を創り出す。この 2 個の V 溝は 1 個の V 溝であったものを、2 分割したものである。同一の V 溝を使用したのは、V 溝に配置される 2 本のファイバを並行にし、角度ずれを抑制する効果を狙ったためである。図 3-36 に示す 2 個の V 溝のうち、左側の V 溝のみがファイバ軸

に垂直な、X、Y 軸方向に微動可能とした。X、Y 軸方向とも V 溝の微動の最小移動距離は $10\ \mu\text{m}$ に設計した。また、V 溝の最大移動可能範囲は、ファイバ端面全体を走査できるように、X、Y 軸方向ともファイバクラッド外径を上回る $250\ \mu\text{m}$ に設計した。図 3-36 に示す 2 つのレバーのうち、左側のレバーが Y 軸方向、右側のレバーが X 軸方向に V 溝を操作可能である。電力は不要のため、操作は手動で簡易に行える。ファイバ端面間の調整はこの評価では顕微鏡を用いて行い、端面間の距離が $90\ \mu\text{m}$ 以下になるように配置して実験を行った。

3-3-2-4. 端面検査システムでの実験

図 3-37 に試作したファイバステージを利用した端面検査システムを示す。構成は、波長 $1.31/1.55\ \mu\text{m}$ レーザ、光パワーメータ、2 分岐カプラ、及び前節で述べた試作ファイバステージである。実験では、波長 1.31 と $1.55\ \mu\text{m}$ で反射減衰量を測定することで、1 区画毎のファイバ端面がカット正常かカット不良端面の判定をした。更に試作ファイバステージで測定範囲を順次移動させ、ファイバ端面全体を評価した。

この端面検査システムにより、表 3-3 に示すファイバ端面を評価した。正常端面の他に、ハックル型、及びリップ型のファイバカット端面で各々の凸型、凹型の端面を持つサンプルを評価した。また、表 3-3 には、ハックル型、リップ型、サンプルの作成方法を記している。通常ファイバを切断する手順は以下の通りである。ファイバカッターの刃でファイバにキズを入れ、ファイバのキズを入れた側と逆側から適切な曲げ径を加えて切断する。一方、ファイバの切断が不適切でカット不良端面となる場合は、ファイバの刃圧が不適切であるか[3-24]、切断時のファイバの曲げ径が適切な値から外れていることによる[3-28]。検証のために切断時の曲げ径を適切な状態から意図的にずらすことでハックル型・リップ型のサンプルを作成した。また、評価したサンプルのファイバ端面を走査型電子顕微鏡(SEM)で確認し、端面検査システムによる評価結果と比較した。

図 3-38 にサンプル A の端面検査システムで評価した結果(左図)と SEM により確認された結果(中図及び右図)を示す。今回の実験では、反射減衰量の測定値が、1 波長でも $14.7\sim 15.7\text{dB}$ の範囲から外れた区画を平滑面と判定し、左図に示すように塗りつぶした区画で表記した。尚、測定の際の計測用と被検査用ファイバ端面間の長さは $40\ \mu\text{m}$ であった。端面検査システムではファイバ端面の平滑な部分はほぼ円形をなしており、その直径は $140\ \mu\text{m}$ であり、通常ファイバの直径の $125\ \mu\text{m}$ とほぼ一致していた。よって正常端面であると判断される。SEM 確認された画像からもファイバ端面は円形で平滑であって、正常端面であることが分かる。従って、端面検査システム及び、SEM による結果は、正常端面と判断された点、及びファイバ端面の形状が円形である点で一致している。

図 3-39~図 3-42 にサンプル B~E を端面検査システムで評価した結果(各々左図)と SEM により評価した結果(各々中図及び右図)を示す。測定した時の計測用と被検査用ファイバ端面間の距離は、各々の 50 , 50 , 80 , 及び $30\ \mu\text{m}$ であった。端面検査システムの

結果は、いずれのサンプルも平滑な部分の形状が半円状の形状であり、更に半円の縁の一部に欠けがある形状となっているのが確認された。このため、いずれもカット不良端面であると判定される。一方、SEMによる画像からも、すべてカット不良端面であることが分かる。またファイバ端面は半円状に平滑であるが、ファイバ端面の縁の部分が欠けていることが確認された。よって、サンプル B~E についても端面検査システム、及び SEM での評価の結果は、カット不良端面であると確認された点で一致した。

提案した端面検査システムで用いた、試作ファイバステージは、小型のため可搬性が高く、操作も手動で容易である。それゆえ、この試作ファイバステージは、屋外でも十分に実用に耐えうるものに発展可能であると考えられる。また端面検査システムの他の構成品である、1.31/1.55 μm 波長の光源、光パワーメータ、2分岐カプラについても、比較的容易に入手可能である。このため、提案した検査技術は、今後ファイバ端面を安価かつ容易に検査できる実用化技術に繋がると期待できる。

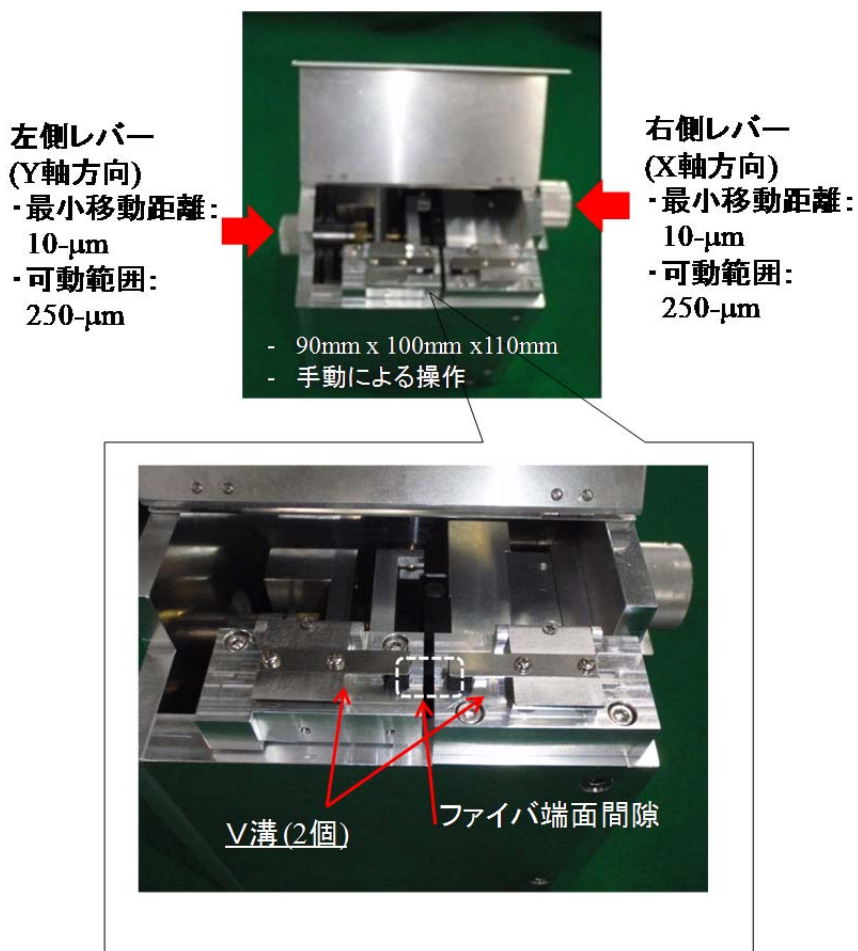


図 3-36 試作したファイバステージ

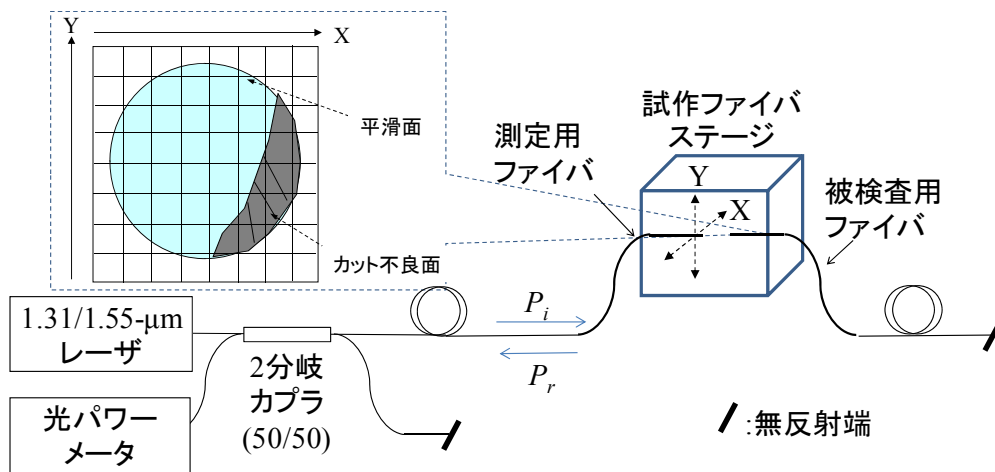


図 3-37 試作ファイバステージによる端面検査システム

表 3-3 評価サンプル

	正常端面	カット不良端面 (ハックル)	カット不良端面 (リップ)
サンプル	サンプルA	サンプルB (凸型) サンプルC (凹型)	サンプルD (凸型) サンプルE (凹型)
具体例			
作成方法	初期キズ 張力 張力 R_1 最適な曲げ径	初期キズ 張力 張力 R_2 大きすぎる曲げ径	初期キズ 張力 張力 R_3 小さすぎる曲げ径

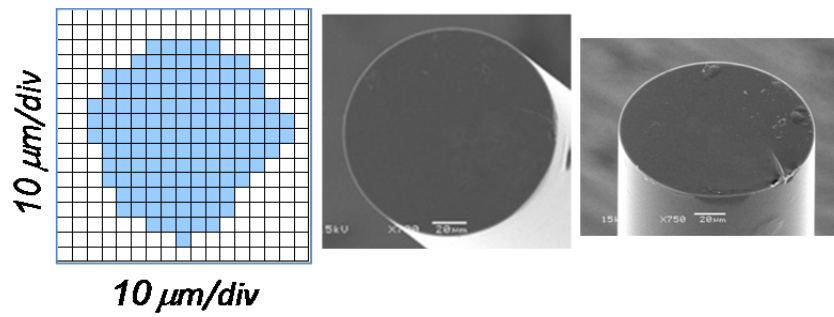


図 3-38. 正常なカット端面の実験結果 (サンプル A)

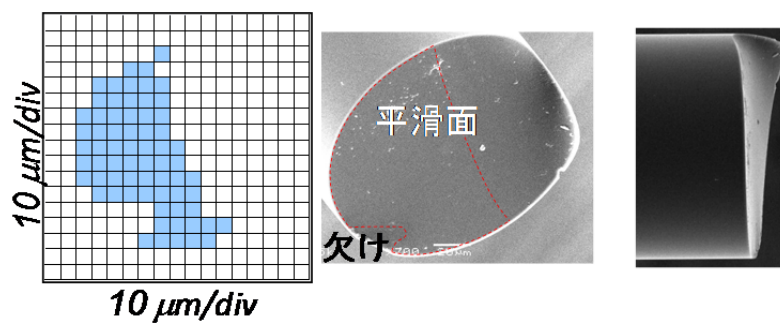


図 3-39 カット不良端面の実験結果 (サンプル B)

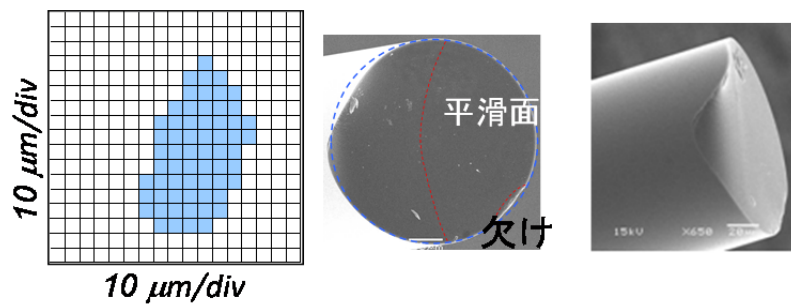


図 3-40 カット不良端面の実験結果 (サンプル C)

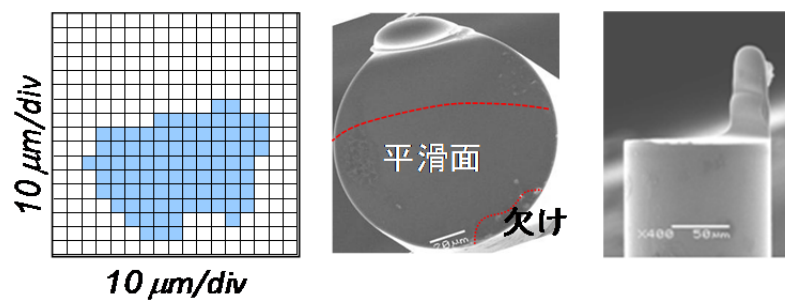


図 3-41 カット不良端面の実験結果 (サンプル D)

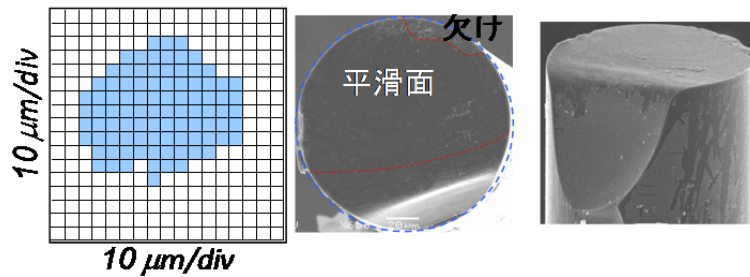


図 3-42 カット不良端面の実験結果 (サンプル E)

3-3-2-5. まとめ

ファブリ・ペロー干渉計の原理を用いた新しい光ファイバ端面検査技術を提案した。検査対象のファイバ端面に平滑なファイバ端面を近接させて 2 波長で反射減衰量を測定し、測定値が 14.7 dB に等しいか否かで、検査したファイバ端面がカット不良端面、正常端面かの判定を行う検査技術の原理を示した。また、提案技術を実現する、端面検査システムについて提示した。そのシステムで使用するための、新たなファイバステージについて設計・試作した。更にファイバカッターでのファイバ切断時に、適切な曲げ半径から意図的にずらすことで、複数の形状のカット不良端面を作成し、端面検査システムで評価した。その評価結果を SEM による画像と比較し、正常端面、及びカット不良端面を正しく判定できることが確認できた。これにより提案した新たなファイバ端面検査技術の有効性を示すことができた。

3-4 結論

本章では、メカニカルスプライスや現場組立コネクタの現場組立接続技術での故障原因である、突合せ点の間隙による光学特性劣化の分析と、その対策として固形屈折率整合材を用いた新たな光ファイバ接続方法について述べた。また同じく故障原因であるカット不良端面が用いられた突合せ点の光学特性劣化の分析と、その対策としてファブリ・ペロー干渉計の原理を利用した光ファイバ端面の検査技術について述べた。

4 章 新たな光線路切替技術のためのパッシブコンポーネントの信頼性

4-1 序論

光ファイバネットワークは、社会インフラとしての重要性が一層向上しており、インターネット上での一方向の情報発信に留まらず、商取引、教育、遠隔医療などの双方向通信のサービスにも利用されるようになった。このため、光ファイバネットワークでの通信サービスの途絶は今後益々許容されなくなり、光ファイバネットワークの信頼性を更に向上させることが必要である。

通信サービスの途絶は設備故障だけに留まらず、道路工事や橋の架替え等にもともなって平行して敷設されている光ケーブルのルートが変更となる、支障移転工事により発生する場合もある。しかし、この支障移転工事は計画的に実施されるものであるため、ネットワークに予め様々な機能を付加しておくことで、通信サービス提供中に通信断の発生を極力抑制することが可能となる。

通信断発生の抑制のため、通信装置に切替機能を持たせて、通信ルートを冗長化することで通信断時間を抑制する技術[4-1]も実現されている。しかし切替機能を持たない通信装置も多数存在するため、あらゆる通信サービスに対応できない。また伝送媒体の光ケーブルのみを高速に機械的に切替えることを目的としたシステム（光 CATS : Cable Transfer Splicing System）が提案されている[4-2] [4-3]。このシステムは 35 ms 以下の切替時間で現用ルートを新ルートへ切替えることが可能であった。しかし、このシステムは課題が 2 点あった。1 点目は、機械的に切替え可能なコネクタしか使用できない点である。2 点目は、切替の際に通信断が発生する点である。これらの問題を解決するため、完全に無瞬断で通信ルートを切替える無瞬断切替技術が検討されている[4-4]–[4-6]。この技術は、2 台の光カプラを介する現用ルートと迂回ルートを設けて、両方のルートの光路長を完全に一致させることで完全に無瞬断で切替を実現することをコンセプトとしている。当初は光媒体のみを利用して両ルートの光路長を調整させていたが[4-4]、切替時間の短縮のため、光電変換の機能により両ルートの光路長の調整を実現させている[4-5][4-6]。この無瞬断切替技術の実現のためには、この技術に適した光カプラが新たに必要となる。

これまで光ファイバネットワークでの 2 分岐の光カプラの適用として、試験光挿入用途が検討されてきた[4-7] [4-8]。また複数の通信サービスを適用するため WDM(Wavelength Division Multiplexing)カプラで検討はされてきた[4-9] [4-10]。しかし無瞬断切替技術に適用するような、通信を 2 重化するシステムでの、最適な光カプラの検討はこれまでなされてこなかった。無瞬断切替技術では光カプラを介して現用・迂回ルートが同時に通信するので、使用する通信装置の光源出力や受光感度を考慮し、光カプラの分岐比を決定する必要があるが、これまで未検討であった。

次に光ファイバネットワークの信頼性を更に高めるために、前述の光カプラのような新たなパッシブコンポーネント追加する場合には、ネットワークの構成部品が増加することで

ネットワーク全体の信頼性への影響を検討する必要がある。

光ファイバネットワークによる、戸建向け的高速データ通信が開始されて以降、日本国内では B-PON(Broadband Passive Optical Network)から GE-PON(Gigabit Ethernet Passive Optical Network)へと光アクセスシステムは進化し、通信速度も向上した[4-11][4-12]。この更改の過程で、通信ビル内やユーザ宅内に設置される通信装置は更改された。しかし通信ビル内の OLT(Optical Line Terminal)からユーザ宅内の ONU(Optical Network Unit)間のパッシブな設備である光線路設備は継続して使用され、PON のトポロジが使用され続けている[4-11]。また光線路設備を構成する光ケーブルや光接続部品も引き続き使用されている。今後の市場導入が検討されている新たな光アクセスシステムの 10 GE-PON でも、光線路設備のトポロジは PON が用いられるため[4-13]、光線路設備は通信ビル内やユーザ宅内に設置される通信装置より長期間運用される。以上のように光線路設備は、一定期間運用されてきたことで、一定の信頼性が保障されてきた。また今後とも長期間使用されることを想定して、故障発生が低い状態のまま維持運用することが不可欠である。

これまでに光線路設備を構成する、メカニカルスプライス[4-14]、現場組立コネクタ[4-15]、光スプリッタ[4-16]などのパッシブコンポーネントはそれぞれ単体で、使用環境を想定した様々なストレス（湿熱・温度変化）に対する特性の検証や加速劣化試験による故障率の推定に関する研究がなされてきた。しかし既存のネットワークに新たなパッシブコンポーネントを追加する場合は、ネットワーク全体の信頼性の低下が懸念されるため、追加する光カプラ単体での信頼性だけでなく、光ファイバネットワークの全体の信頼性の双方を考慮した評価方法が必要である。

また、光線路設備全体の長期間運用する場合には、設備構築に関わるコストの経済合理性の追求も重要である。パッシブコンポーネントに新たに追加する場合に発生する構築費用(CAPEX)だけでなく、将来の運用期間中の故障発生時の修理費用(OPEX)も想定し、両者の和のトータルコスト評価が必要となる。この理由として、図 4-1 に示すように、故障発生を抑制するには、品質の良い部品で設備構築が必要だが、品質の良い部品は一般に単価が高く、設備構築費用(CAPEX)が高くなる懸念がある。一方で品質は劣るが単価の安い部品を用いて設備構築した場合、設備構築費用が抑制できるが、運用期間中に故障修理費用(OPEX)が増加する懸念があるためである。このため、新たにパッシブコンポーネントに追加する場合に同機能をもつ製品で価格と故障率が異なる製品と比較し取捨選択して、設備を維持運用することがトータルコストを評価して、コストミニマムな製品を選択する手法の確立が課題となる。

これまでに光アクセスシステムで複数のサービス提供を前提に PON システム構築で、最適な分岐数をコストシミュレーションにより模索する研究が行われている[4-17]。また複数の光アクセスシステムを信頼性とコストから、もしくは構築コストと運用コストの双方から優劣を論じる研究も行われている [4-18][4-19]。しかしながら、様々なパッシブコンポ

ーネットの中から、パッシブコンポーネントと光線路設備全体の信頼性とパッシブコンポーネント追加に伴いトータルコストを最小化する定量的に方法は、これまで議論されてこなかった。

本章では、ネットワークの信頼性向上に向けた新たな線路切替技術導入のためのパッシブコンポーネントの信頼性について検討する。4-2 では、無瞬断切替技術で使用される最適な分岐比の冗長化構成用光カプラについて述べる。4-3 では、光線路設備に新たなパッシブコンポーネントを追加することを想定した、経済合理性評価に基づく信頼性の検討結果について述べる。

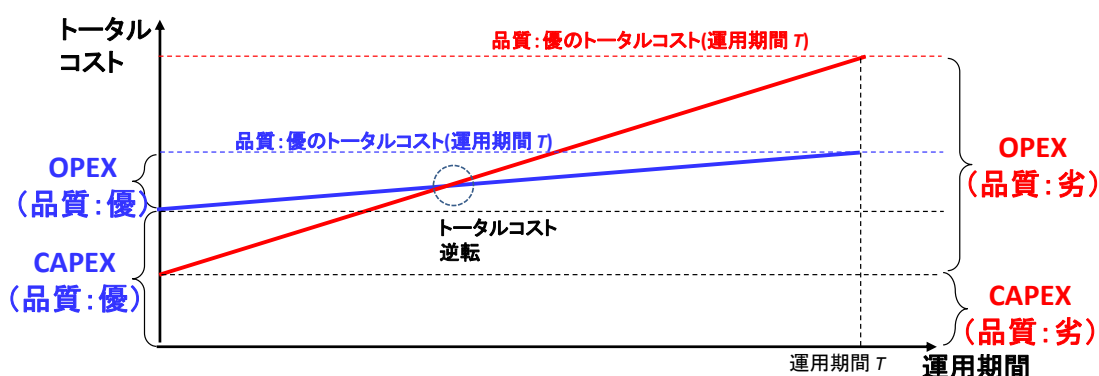


図 4-1 品質の異なるパッシブコンポーネントの運用期間中のトータルコスト

4-2 無瞬断切替技術に最適な冗長化構成用光カプラの検討

4-2-1 はじめに

4-2 では無瞬断切替技術で屋外に設置する、光カプラの最適な分岐比についての設計手法を明示し、その設計手法に基づいた最適な分岐比のシミュレーションを実施し、実験検証した結果を述べる。またリスク分析手法により、光伝送装置の光出力値や受信感度等の各パラメータの変動が、光カプラの最適な分岐比に与える影響について考察したので併せて述べる。

4-2-2 無瞬断切替技術と冗長化構成用光カプラ

図 4-2 に無瞬断切替技術の切替手順を示す[4-5][4-6]。この技術では SS 方式の光伝送システムへの適用を前提にしている。

手順 1 として、対向する伝送装置 (OLT と ONU) の光線路間の現用ルートで通信された状態を想定する。但し、現用ルートには、予め光カプラ 2 個を設置されていることが必要である。

手順 2 では、2 個の光カプラに迂回ルートと無瞬断切替装置を設置する。これまでは現用ルートのみで通信された状態であるが、現用ルートと迂回ルートの光路長を、無瞬断切替

装置の光路長調整機能により完全に同一長にする。その後、迂回ルート側でも OLT から無瞬断切替装置を介して ONU まで通信を行い、現用ルートと迂回ルートで通信を完全に 2 重化にする。

手順 3 では、現用ルートを切断し、迂回ルートのみで通信させている間に、新設ルートを接続し、手順 2 と同様に新設ルートと迂回ルートの光路長を同一長にして、通信を完全に二重化にする。

手順 4 では、迂回ルートを切断し、無瞬断切替装置を除去して新設ルートのみでの通信に切替える。

以上に記した手順 1~4 で、通信を途絶させることなく、現用ルートから新設ルートに無瞬断で切替えることが可能となる。

この無瞬断切替装置を用いた切替手順では ONU と OLT または無瞬断切替装置（リピータとして機能）が、光カプラの異なるブランチを通して、現用ルート・迂回ルートを同時に、もしくは片方のみ通信することが特徴である。ここで OLT に近い光カプラは、通信ビル内に既設の光カプラの使用を想定している[4-7]。一方、ONU に近い光カプラは、新たに屋外に設置が必要となる。

この技術の適用範囲を拡大する上で、切替前後や切替中に通信可能な距離を可能な限り長くすることが重要となる。通信距離を可能な限り長くするためには、光伝送装置間や伝送装置と無瞬断切替装置の間の光出力と受光感度の差であるパワーバジェットと光カプラの損失値の差の光線路損失を大きくすることが必要である。このため、現用ルート側に与える光カプラの損失はできる限り小さくする必要がある。しかし、光カプラの現用ルート側と迂回ルート側の損失はトレードオフなので、現用ルート側の損失を小さくし過ぎると迂回ルート側の損失が大きくなり過ぎる恐れがある。この光線路の許容される損失値を現用ルートと迂回ルート両方で最大の損失値とする光カプラの分岐比を導く設計方法を述べる。

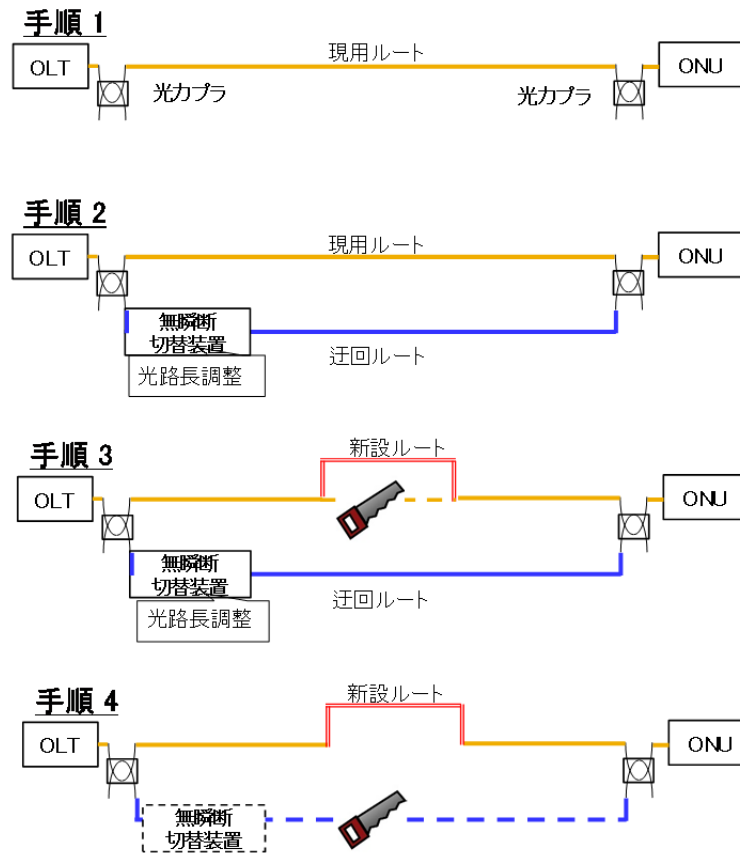


図 4-2 無瞬断切替技術の切替手順

4-2-3 光カプラの分岐比の設計方法

図 4-3 に無瞬断切替技術を適用したシステム構成を示す。OLT 側に設置する所内光カプラは、通信ビル内に試験光挿入用に既設されている場合がある、分岐比が 8 : 2 の光カプラの使用を前提とした[4-7]。また無瞬断切替装置は通信ビル内の所内光カプラ近傍の設置を前提としている。以下の 4 つの手順で ONU 側の冗長化構成用光カプラの、現用ルートと迂回ルート両方で光線路損失を最大とする分岐比を設計する方法を述べる。

Step1 分岐比に基づく光カプラの光損失値算出

分岐比が $\alpha : \beta$ の 2 分岐の冗長化構成用光カプラの現用ルート側と迂回ルート側の光損失を各々 $L_{coupler_outside}(\alpha)$, $L_{coupler_outside}(\beta)$, とした場合、以下の式が成立つ。

$$L_{coupler_outside}(\alpha) = -10\log(\alpha) + L_{excess} \quad (4-1)$$

$$L_{coupler_outside}(\beta) = -10\log(\beta) + L_{excess} \quad (4-2)$$

但し, L_{excess} は光カプラの過剰損, $\alpha + \beta = 1$, とする. また, この光カプラの損失値は波長に依存せず, 一定の値を有する特性のものを前提とする [4-20].

Step2 現用・迂回ルートの光線路損失

現用ルートの上り通信光の波長での光線路損失 (所内光カプラと冗長化構成用光カプラ間の光損失) を $L_{upstream}$ とする. またこの現用ルートの上り通信光波長での光線路損失の許容最大値 $L_{upstream_max}$ は ONU の光出力 P_{out_ONU} と OLT の受光感度 P_{rev_OLT} の差から所内光カプラの損失値 $L_{coupler_co}$ と冗長化構成用光カプラの現用ルート側の損失値 $L_{coupler_outside}(\alpha)$ を引いた値となる. よって以下の式が成立つ.

$$0 < L_{upstream} < L_{upstream_max} \quad (4-3)$$

$$L_{upstream_max} = P_{out_ONU} - P_{rev_OLT} - L_{coupler_co} - L_{coupler_outside}(\alpha) \quad (4-4)$$

同様に迂回ルートの上り通信光波長の光線路損失を $L'_{upstream}$ とする. またこの迂回ルートの上り通信光波長の光線路損失の許容最大値 $L'_{upstream_max}$, は ONU 光出力 P_{out_ONU} と無瞬断切替装置の受光感度 P_{rev_rep} の差から冗長化構成用光カプラの迂回ルート側の損失値 $L_{coupler_outside}(\beta)$ を引いた値となる. よって以下の式が成立つ.

$$0 < L'_{upstream} < L'_{upstream_max} \quad (4-5)$$

$$L'_{upstream_max} = P_{out_ONU} - P_{rev_rep} - L_{coupler_outside}(\beta) \quad (4-6)$$

また現用ルートと迂回ルートの下り通信光波長の光線路損失 $L_{downstream}$, $L'_{downstream}$ も式 (4-3), (4-4), (4-5), (4-6) と同様に以下の式が成立つ.

$$0 < L_{downstream} < L_{downstream_max} \quad (4-7)$$

$$L_{downstream_max} = P_{out_OLT} - P_{rev_ONU} - L_{coupler_co} - L_{coupler_outside}(\alpha) \quad (4-8)$$

$$0 < L'_{downstream} < L'_{downstream_max} \quad (4-9)$$

$$L'_{downstream_max} = P_{out_rep} - P_{rev_ONU} - L_{coupler_outside}(\beta) \quad (4-10)$$

但し, $L_{downstream_max}$ は現用ルートの下り通信光波長での光線路損失の許容最大値, P_{out_OLT} は OLT の光出力, P_{rev_ONU} は ONU の受光感度, $L'_{downstream_max}$ は迂回ルートの下り通信光波長での光線路損失の許容最大値, P_{out_rep} は無瞬断切替装置の光出力である.

Step3 迂回・現用ルートの光線路損失の許容最大値の比較

無瞬断切替技術を適用したシステムでは, 最初に現用ルートのみで通信されていて, 現用ルートから迂回ルートに切り替わった後も必ず通信可能でなければならない. このため, 上り下りの通信光波長とも, 現用ルートの光線路損失の許容最大値より, 迂回ルートの光線路損失の許容最大値が同等以上である必要がある. もし現用ルートの光線路損失の許容最大値が迂回ルートの光線路損失の許容最大値を上回った場合には, 光線路損失の値によ

っては、迂回ルートに切替わった場合に通信断となる可能性があるためである。よって、以下の式が成立せねばならない。

$$L_{upstream_max} \leq L'_{upstream_max} \quad (4-11)$$

$$L_{downstream_max} \leq L'_{downstream_max} \quad (4-12)$$

Step4 光線路損失の許容最大値を最大にする分岐比選定

式(4-1)～(4-12)の条件を満たす範囲のうち、各々の上り下りの通信光で、現用・迂回ルートでの光線路損失の許容最大値のうち、最大となる分岐比を選定する。

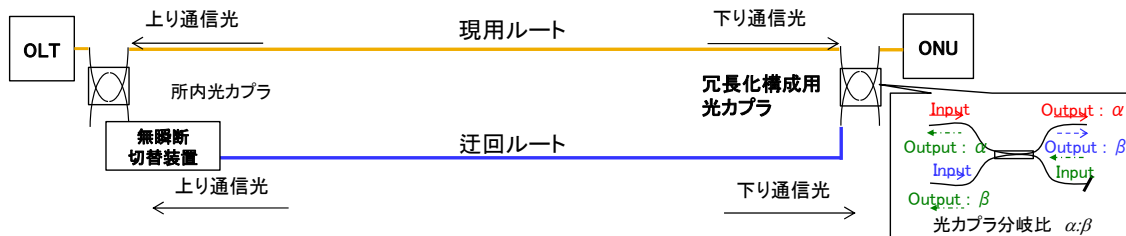


図 4-3 無瞬断切替技術を適用したシステム構成

4-2-4 分岐比選定のシミュレーション

前述した光カプラの分岐比の設計方法に基づいて、シミュレーションを実施した。OLT と ONU は、IEEE 802.3ah に準拠し、伝送速度は 1.25 Gbps で、信号光波長は、1.31/1.49 μm とした[4-21]。また ONU、OLT、無瞬断切替装置の光出力と受光感度、また所内光カプラの損失値、冗長化構成用光カプラの過剰損の各パラメータは、表 4-1 に示す典型値を用いた。

図 4-4 に分岐比選定のためのシミュレーション結果を示す。まず上り通信波長 1.31 μm に着目すると、現用ルートと迂回ルートの光線路損失の許容最大値は式(4-4)、(4-6)から計算される曲線が分岐比 0.80 で交差している。また式(4-11)から、迂回ルートの光線路損失の許容最大値が現用ルートのそれより大きくなる必要があるため、分岐比は 0.80 以下が条件となる。一方、下り通信波長 1.49 μm の場合は、現用ルートと迂回ルートの光線路損失の許容最大値は式(4-8)、(4-10)から計算される曲線が分岐比 0.65 で交差している。また式(12)から、分岐比は 0.65 以下が条件となる。よって上り通信光、下り通信光の条件を合わせると分岐比 0.65 以下が条件となるが、この条件で現用・迂回ルートの上り下り通信光での光線路損失が最大になる分岐比は、0.65 となる。

表 4-1 シミュレーションのパラメータ

OLT受光感度	OLT光出力	ONU受光感度	ONU光出力
$P_{rev\ OLT}$	$P_{out\ OLT}$	$P_{rev\ ONU}$	$P_{out\ ONU}$
-28.7 dBm	-2.4 dBm	-29.1 dBm	-3.1 dBm

無瞬断切替装置の受光感度	無瞬断切替装置の出力	所内光カプラの損失	冗長化構成用光カプラの過剰損
$P_{rev\ rep}$	$P_{out\ rep}$	$L_{coupler\ co}$	$L_{excess\ out}$
-31.1 dBm	-1.4 dBm	1.2 dB	0.5 dB

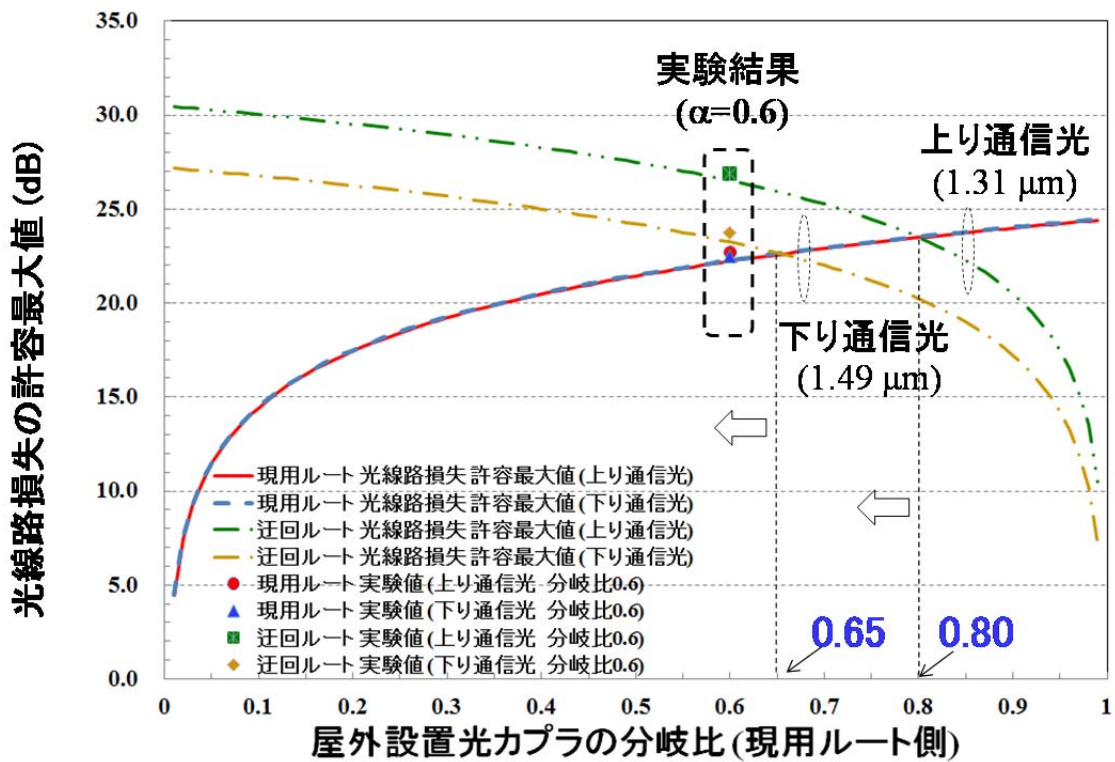


図 4-4 分岐比選定のためのシミュレーション結果と実験結果

4-2-5. 無瞬断切替装置による実験

前述の分岐比の設計方法の有効性を確認するため、図 4-5 に示す光カプラ分岐比検証の実験系で通信可能な光線路損失値をビットエラーレート(BER) 測定にて評価した。上りと下りの通信光を分離して独立して評価するために、1.31/1.49 μm の通信光を合分波する WDM (Wavelength Division Multiplexing) カプラを 2 台用いる。また冗長化構成用光カプラとして分岐比 0.6 の光カプラを用いて、可変光アッテネータ(ATT)で光線路損失を加えて、OLT~ONU または、OLT~無瞬断切替装置の上り下りの 4 通りのビットエラーレ

ト(BER) 測定を実施した。なお、測定には、Spirent 社製のフレームロス測定装置[4-22]を使用している。

図 4-6 に、上り通信光の ONU と無瞬断切替装置との間の光線路損失と BER の測定結果の関係を示す。この図より $BER=10^{-12}$ となる線路損失値が光線路損失の許容最大値として見積ると、26.89 dB と見積もれる。表 2 に以上のようにこの見積られた 4 種類の光線路損失の許容最大値のシミュレーション値と実験値を示す。また図 4-4 に測定結果をプロットした。いずれの場合もシミュレーションより損失値から 0.2~0.5 dB 大きい結果となることを確認した。以上より、シミュレーション結果と実験結果が一致したことで、光カプラの分岐比の設計手法が有効であることが確認された。

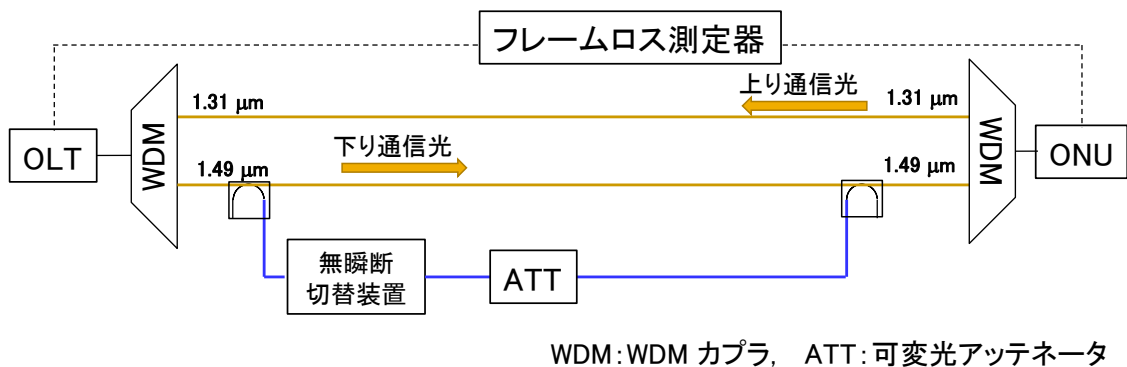


図 4-5 光カプラ分岐比検証の実験系（迂回ルート（下り通信光）を評価する場合）

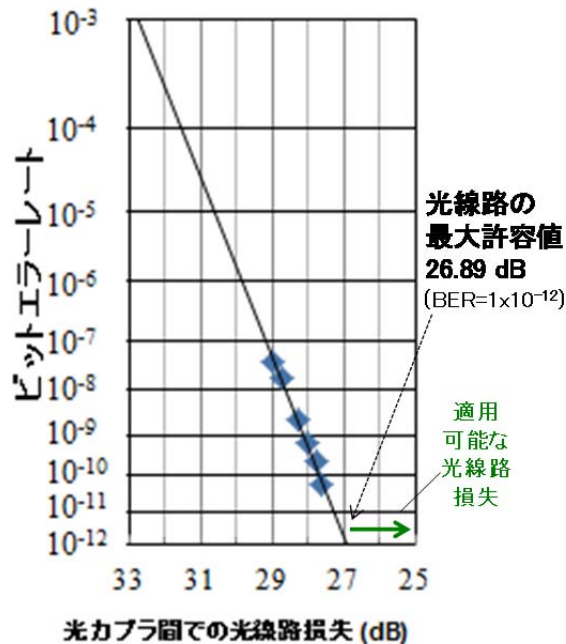


図 4-6 上り通信光の迂回ルートでの光線路損失値とビットエラーレートの関係

表 4-2 光線路損失の許容最大値のシミュレーション値と実験値の比較(分岐比 0.6)

光線路損失の 許容最大値(dB)	現用ルート 上り通信光 1.31 μm	迂回ルート 上り通信光 1.31 μm	現用ルート 下り通信光 1.49 μm	迂回ルート 下り通信光 1.49 μm
シミュレーション値	22.23	26.52	22.28	23.25
実験値	22.74	26.89	22.50	23.77

4-2-6. リスク分析手法による分岐比の評価

前節でのシミュレーションでは、光線路損失の許容最大値となる分岐比の算出に表 4-1 に示したパラメータに典型値を用いた。しかし、この無瞬断切替技術を光ファイバネットワークに適用することを想定した場合、これらのパラメータは、実際には典型値ではなく様々な値に変動することが想定される。このように変動した場合でも、上り、下りの通信光波長とも、式(4-11)、(4-12)に示したように現用ルートの光線路損失の許容最大値より、迂回ルートの光線路損失の許容最大値が同等以上である必要がある。このため、経営工学で用いられるリスク分析の手法を適用した[4-23]。上り、下りの通信光波長の迂回ルートと現用ルートの光線路損失の許容最大値の差 $\Delta L_{upstream_max}$ 、 $\Delta L_{downstream_max}$ を各々評価した。

$$\Delta L_{upstream_max} = L'_{upstream_max} - L_{upstream_max} \quad (4-13)$$

$$\Delta L_{downstream_max} = L'_{downstream_max} - L_{downstream_max} \quad (4-14)$$

表 4-1 に示した各パラメータの値を中心値として、表 4-3 に示すように OLT, ONU, 無瞬断切替装置の光源の出力は ± 1.5 dB, 受光感度は ± 2.5 dB, の範囲で正規分布で変動すると仮定した。尚, OLT, ONU, 無瞬断切替装置の光出力と受光感度の変動量は、市販の光デバイスの最大値と最小値のカタログ値を根拠とした[4-24]。また所内光カプラの損失値の変動量は光カプラの損失値の統計データにより ± 0.5 dB と仮定した[4-7]。

この範囲内で、ランダムに各パラメータの値を変化させ、分岐比 0.65 での式(4-13)、(4-14)により迂回ルートと現用ルートの光線路損失の許容最大値の差の頻度を表すモンテカルロシミュレーションを実施した。尚、サンプル数 10 万回で実施している。図 4-7 (a)に上り通信光の迂回ルートと現用ルートの光線路損失の許容最大値の差の分布を示す。この場合は、正の値をとる確率は 100%である従って、常に迂回ルートの光線路損失の許容最大値が現用ルートのそれより大きいことが分かる。一方、図 4-6(b) に下り通信光の迂回ルートと現用ルートの光線路損失の許容最大値の差の分布を示す。正の値をとる確率は、51.4%である。従って、現用ルートの光線路損失の許容最大値が迂回ルートのそれより大きくなるリスクがあることわかる。

次に分岐比 0.65 の場合と同様に、図 4-8 に分岐比 0.41 から 0.70 まで、式(4-14)により下

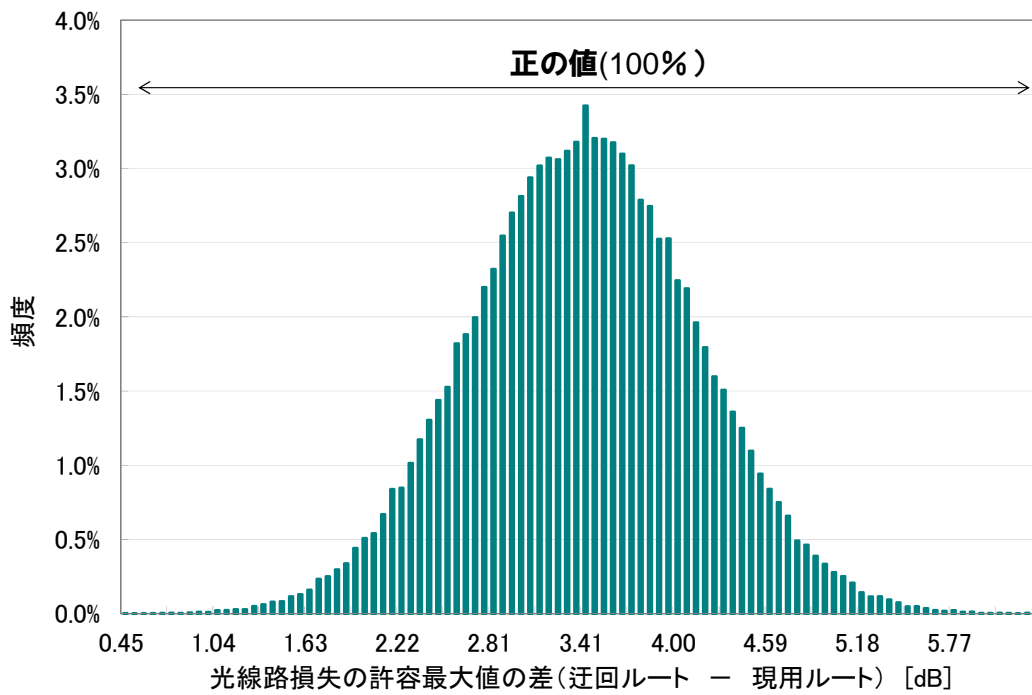
り通信光の迂回ルートと現用ルートの光線路損失の許容最大値の差が正となる確率をモンテカルロシミュレーションで評価してプロットした結果を示す。この結果、分岐比が小さいほど、迂回ルートの光線路損失の許容最大値が現用ルートのそれより大きくなることが分かる。この正負の割合のばらつきを正規分布とみなした場合、 3σ (99.7%)、 2σ (95.7%)、 1σ (69.6%)に相当する分岐比は、順に 0.47、0.54、0.62 に相当する。従って、各パラメータの変動があっても、迂回ルート現用ルートの損失よりほぼ 100%に近く大きいなるためには、分岐比 0.47 が必要となる。

以上のように、分岐比に応じた、リスク（迂回ルートの光線路損失の許容最大値が現用ルートの光線路損失の許容最大値より大きくなる割合）の定量化が可能となる。このように、リスク分析評価の手法を適用することで、各パラメータの値の不確実性を考慮した実効性のある分岐比の決定が可能となる。

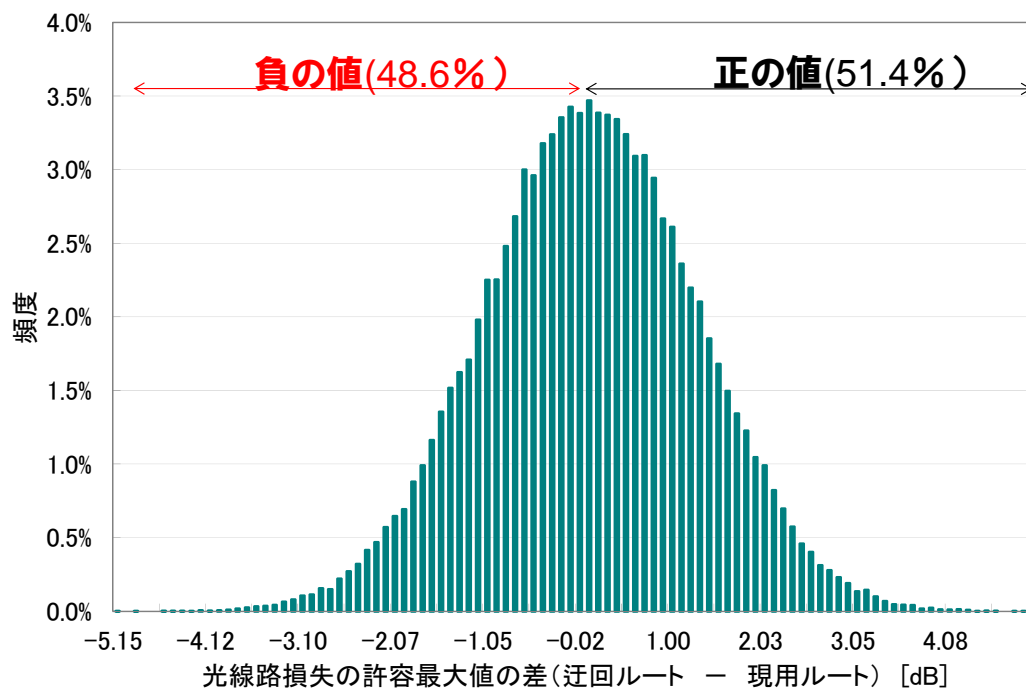
表 4-3 リスク分析手法のためのパラメータの変動範囲

OLT受光感度	OLT光出力	ONU受光感度	ONU光出力
P_{rev_OLT}	P_{out_OLT}	P_{rev_ONU}	P_{out_ONU}
$-28.7 \pm 1.5\text{dBm}$	$-2.4 \pm 2.5 \text{ dBm}$	$-29.1 \pm 1.5 \text{ dBm}$	$-3.1 \pm 2.5 \text{ dBm}$

無瞬断切替装置の受光感度	無瞬断切替装置の出力	所内光カプラの損失
P_{rev_rep}	P_{out_rep}	$L_{coupler_co}$
$-31.1 \pm 1.5 \text{ dBm}$	$-1.4 \pm 2.5 \text{ dBm}$	$1.2 \pm 0.5 \text{ dB}$



(a) 上り通信波長の場合



(b) 下り通信波長の場合

図 4-7 モンテカルロシミュレーションによる迂回ルートと現用ルートの光線路損失の許容最大値の差の分布 (分岐比 0.65)

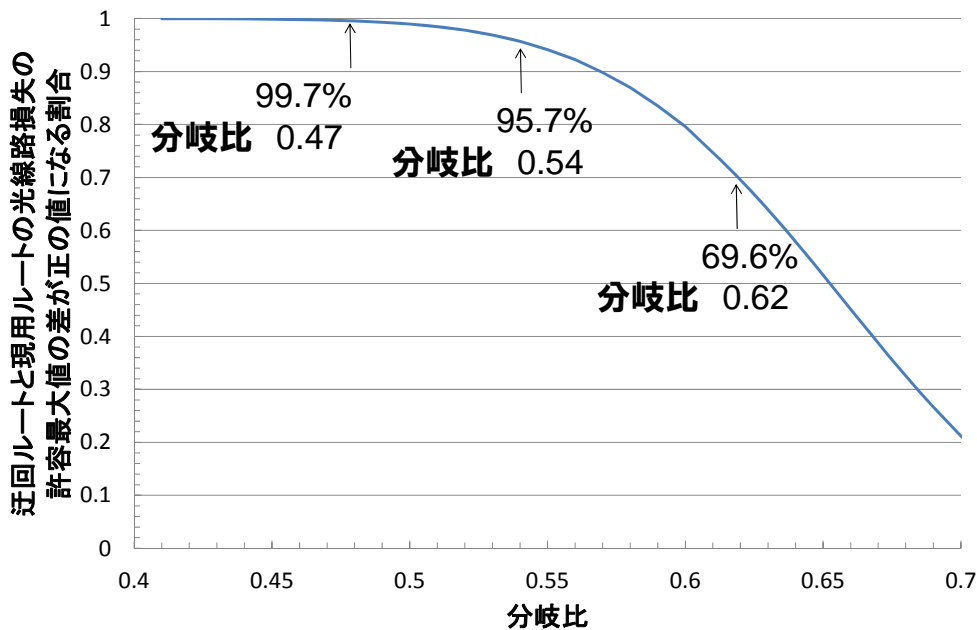


図 4-8 迂回ルートと現用ルートの線路損失の差が正になる確率

4-2-7. まとめ

無瞬断切替技術に使用する光カップラで、現用ルートと迂回ルートのパワーバジェットから、光カップラ間の光線路に許容される線路損失を最大にする分岐比を導く手法を明示した。またこの分岐比の設計法に基づいたシミュレーション結果と実験がほぼ一致したことで、算分岐比を導く手法の有効性を確認できた。また不確実性分析の手法により、伝送装置の光出力値や受信感度等の各パラメータの変動が最適な分岐比の決定に与える影響を評価できた。

4-3 信頼性と経済合理性に基づいたパッシブコンポーネントの選択手法

4-3-1 はじめに

4-3 では、光線路設備として許容できるサービス品質を保ちつつ、トータルコストの最小化を実現できるパッシブコンポーネントの選択手法を提案し、その有効性を明らかにすることを目的とする。4-3-2 では、光線路設備全体の故障率、設備数、運用期間を基に、パッシブコンポーネントに求められる累積故障率の上限値と下限値の算出方法を述べる。また複数のパッシブコンポーネントの選択肢の中から、価格と故障率に基づき、トータルコストを比較して最適な選択を行う手法を提案する。4-3-3 では、光カップラを具体例として、トータルコストを最小化する物品を選択するシミュレーションを提示して、提案手法の有効性を述べる。4-3-4 では、トータルコスト比較にリスク分析手法を導入して、価格、故障率、の変動がトータルコスト比較の結果に与える影響について言及する。

4-3-2 パッシブコンポーネントのトータルコスト比較の手法

4-3-2では、パッシブな設備である光線路設備で、使用されるパッシブコンポーネントで、故障率と価格が異なる 2 種類のトータルコスト比較するため、トータルコストのモデル化と比較手法について述べる。

4-3-2-1 パッシブコンポーネントの累積故障率

通信事業者が信頼性の高い光線路設備を一定期間運用するために必要となる、パッシブコンポーネントの累積故障率の上限値と下限値について言及する。

図 4-9(a)に PON の光線路設備の一般的な構成を示す。OLT から通信ビル内に設置される光線路を試験するための所内光カプラを介して、同じく通信ビル内に設置される 4 分岐光スプリッタから屋外には地下光ケーブルに接続される。地下光ケーブルは一定間隔で融着接続で光ケーブルが相互に接続される。さらに地下から地上へ出る光ケーブルに接続され、架空光ケーブルへと繋がり、屋外設置の 8 分岐光スプリッタへ接続される。架空光ケーブルは現場組立型光接続部品にて相互に接続される。更に加入者宅内に配置された 1 つの ONU に接続される構成となる。図 4-9 (b)にこの光線路設備の構成をモデル化した構成を示す。ネットワーク中の l 種類のパッシブコンポーネント i で構成され、パッシブコンポーネント i は、 n_i 個含まれるものとする。また 1 個の ONU から 1 個の OLT に着目すると、 l 種類のパッシブコンポーネントは、冗長構成はとっていないため、1 個の直列系システムとみなすことができる[4-16]。またパッシブコンポーネント i ($1 \leq i \leq l$) の 1 個あたりの設置してからの時刻 0 から時刻 t での累積の故障確率を、累積故障率を $F_i(t)$ とすると[4-25]、この光線路設備の累積故障率 $F_{total}(t)$ について、以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} F_{total}(t) &= 1 - (1 - F_1(t))^{n_1} (1 - F_2(t))^{n_2} \dots (1 - F_l(t))^{n_l} \\ &= 1 - \prod_{i=1}^l (1 - F_i(t))^{n_i} \end{aligned} \quad (4-15)$$

実際の光線路設備では $F_i(t)$ は 1 に対して十分小さい値をとる ($F_i(t) \ll 1$) ため、累乗の項は 0 と近似できる。このため式(4-15)は以下の式のように変形できる。

$$F_{total}(t) \cong \sum_{i=1}^l n_i \cdot F_i(t) \quad (4-16)$$

式(4-16)より、OLT からある 1 個の ONU までの光線路設備の累積故障率 $F_{total}(t)$ はパッシブコンポーネントの累積故障率 $F_i(t)$ の総和で求められることが分かる。

次に通信事業者がユーザに提供する通信サービスの品質担保の点から、OLT から 1 個の ONU までの故障発生を抑制するため、光線路設備の累積故障率 $F_{total}(t)$ の上限値が $F_{total_max}(t)$ と規定すると、以下の式が成立せねばならない。

$$F_{total}(t) \leq F_{total_max}(t) \quad (4-17)$$

また既存の光線路に新たなパッシブコンポーネントを導入する場合などのように、パッシブコンポーネント k 以外のコンポーネントで使用実績があり、累積故障率が既知である場

合を仮定する。式(4-16), (4-17) より以下の式が成立つ。

$$\sum_{i=1}^{k-1} n_i \cdot F_i(t) + n_k \cdot F_k(t) + \sum_{i=k+1}^l n_i \cdot F_i(t) \leq F_{total_max}(t) \quad (4-18)$$

式(4-18)からパッシブコンポーネント k の累積故障率 $F_k(t)$ を求めると以下が成立つ。

$$F_k(t) \leq \frac{1}{n_k} \left(F_{total_max}(t) - \sum_{i=1}^{k-1} n_i \cdot F_i(t) - \sum_{i=k+1}^l n_i \cdot F_i(t) \right) \quad (4-19)$$

式(4-19)からパッシブコンポーネント k の累積故障率の上限値 $F_{k_max}(t)$ を以下のように定義する。

$$F_{k_max}(t) = \frac{1}{n_k} \left(F_{total_max}(t) - \sum_{i=1}^{k-1} n_i \cdot F_i(t) - \sum_{i=k+1}^l n_i \cdot F_i(t) \right) \quad (4-20)$$

式(4-20)から光線路設備の累積故障率の上限値が規定され、かつパッシブコンポーネント k 以外のパッシブコンポーネントの累積故障率が既知であるならば、特定のパッシブコンポーネント k の累積故障率の上限値が導かれることが分かる。

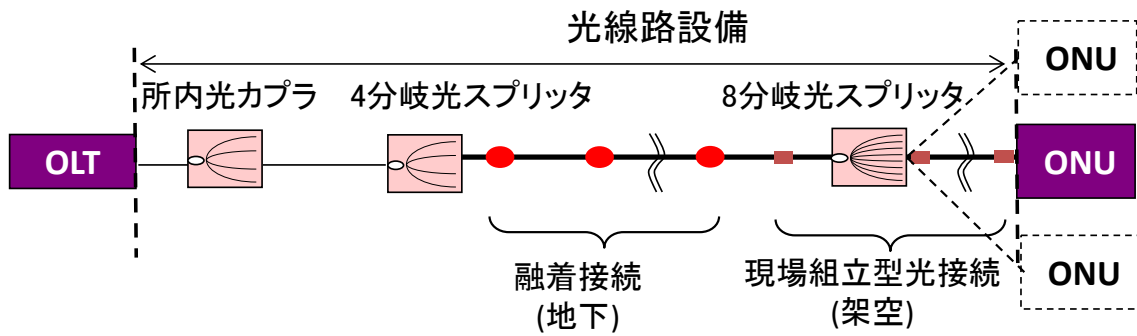
次にパッシブコンポーネント k の故障発生数について説明する。ある通信事業者が、特定のパッシブコンポーネント k を特定の地域の線路設備内に N_k 個設置したと仮定する。尚、設置後の運用期間を T_k とする。運用期間 T_k でのパッシブコンポーネント k の故障発生数 $Z_k(T_k)$ は、以下が成立つ。

$$Z_k(T_k) = N_k \cdot F_k(T_k) \quad (4-21)$$

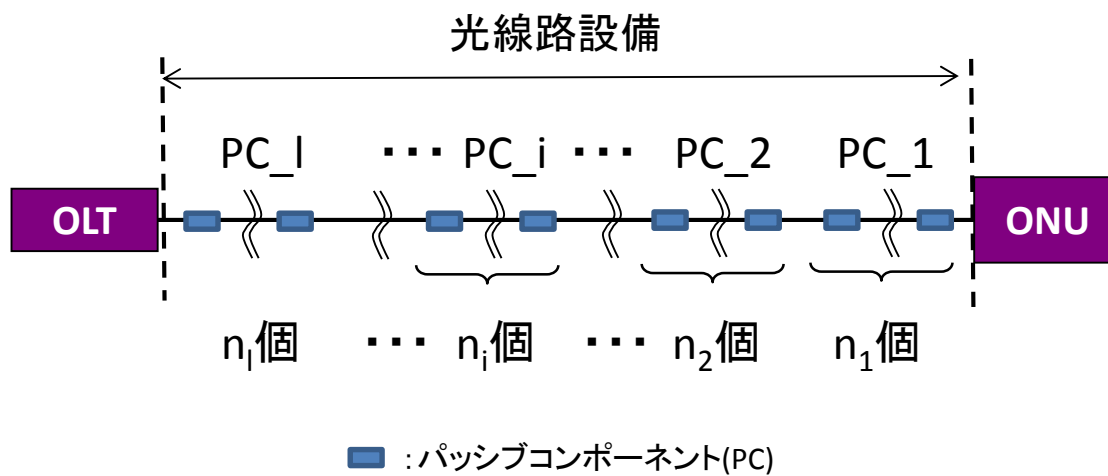
仮に N_k 個のパッシブコンポーネント k が、運用期間 T_k での累積故障数 $Z_k(T_k)$ が 1 個未満となる場合、故障発生による修理の費用が発生しなくなる。このため運用期間 T_k で故障発生数 $Z_k(T_k)$ が 1 となる累積故障率を $F_{k_min}(T_k)$ とすると、以下が成立つ。

$$F_{k_min}(T_k) = \frac{1}{N_k} \quad (4-22)$$

パッシブコンポーネント k の累積故障率 $F_k(T_k)$ が式(8)で示す $F_{k_min}(T_k)$ 以下になるならば、運用期間中に故障が発生せず、修理費用が発生しない。従って、この $F_{k_min}(T_k)$ が運用期間 T_k でのパッシブコンポーネント k の累積故障率の下限となる。



(a) PON の設備構成例



(b) 光線路設備のモデル化

図 4-9 光線路設備の構成

4-3-2-2 パッシブコンポーネントのトータルコスト比較

パッシブコンポーネント k を N_k 個設置し運用期間 T_k (年) の間の累積故障数 $Y_k(T_k)$, を算出する. 故障発生後には, 交換修理して同一のパッシブコンポーネントを設置する. 尚, 以下では, 議論を簡潔にするため 1 年単位で計算し, その年に発生した故障は, 翌年に初めに交換修理し新たに設置し, 初年度に設置した N_k 個を保っていく前提とする.

時間 t [year] での累積故障数を $Y_k(t)$ とした場合, 図 4-10 に示すようにパッシブコンポーネントの累積故障数 $Y_k(0)$, $Y_k(1)$, と $Y_k(2)$ は以下が成立つ.

$$Y_k(0) = 0 \quad (4-23)$$

$$Y_k(1) = N_k \cdot F_k(1) \quad (4-24)$$

$$Y_k(2) = N_k \cdot F_k(2) + (Y_k(1) - Y_k(0)) \cdot F_k(1) \quad (4-25)$$

運用期間 2 年ででの累積故障数を示す式(4-25)の第 1 項は, 初年度に設置した N_k 個が 2 年で故障する個数, 第 2 項は, 設置 1 年後に修理したものが, 2 年で故障する個数である. 同様に運用期間 T_k (年) 後の累積故障数 $Y_k(T_k)$, は以下のように表される.

$$\begin{aligned}
Y_k(T_k) &= N_k \cdot F_k(T_k) + (Y_k(1) - Y_k(0)) \cdot F_k(T_k - 1) + \dots + (Y_k(T_k - 2) - Y_k(T_k - 3)) \cdot F_k(2) + (Y_k(T_k - 1) - Y_k(T_k - 2)) \cdot F_k(1) \\
&= N_k \cdot F_k(T_k) + \sum_{t=1}^{T_k-1} (Y_k(T_k - t) - Y_k(T_k - t - 1)) \cdot F_k(t)
\end{aligned}
\tag{4-26}$$

尚, t は整数, である. 式(4-26)の右辺の第 1 項は, 最初に設置したパッシブコンポーネントの N_k 個の運用期間 T_k (年)の故障数, 第 2 項は 1 年後に故障修理に新たに設置した分の運用期間 $(T_k - 1)$ 年後の累積故障数, また最終項は $(T_k - 1)$ 年後に新たに設置した分の 1 年後の故障数である.

式(4-23)~(4-26)を用いることで運用期間 T_k [year]の累積故障数 $Y_k(T_k)$, が算出可能となる.

次にパッシブコンポーネント k のトータルコストを算出する. 1 個あたりの物品価格を p_k , 構築時の設置費用を s_k , 故障発生時の故障切分けと交換に関わる修理費用を m_k とする. また初年度に N_k 個を設置し, 運用期間 T_k で発生した故障は逐次修理した場合, パッシブコンポーネント k のトータルコスト $w_k(T_k)$ は以下の通りである.

$$w_k(T_k) = N_k \cdot (p_k + s_k) + Y_k(T_k) \cdot (p_k + m_k) \tag{4-27}$$

尚, 式(4-27)の第 1 項が構築時の設置費用 (CAPEX), 第 2 項が故障発生時の修理費用 (OPEX) に該当する.

次にパッシブコンポーネント k で同一機能ではあるが価格と故障率の異なる 2 種類の製品 k_A と k_B を想定して, 累積故障率と各々のトータルコストを比較して, 優位となる条件を説明する.

k_A と k_B の価格と累積故障率は, 各々 p_{k_A} , p_{k_B} , と $F_{k_A}(t)$, $F_{k_B}(t)$ であるとする. また k_A の価格は, k_B の価格より大きいことを前提とする. また, 設置コストを s_k , 交換修理コストを m_k については, 両者とも同一機能のパッシブコンポーネント k であるため同一とする. 図 4-11 に, 運用期間 T_k での価格 p_k と累積故障率 $F_k(T_k)$ で k_A は k_B のトータルコストを比較し, 優位となる条件を示す. 累積故障率 $F_{k_A}(T_k)$ と $F_{k_{min}}(T_k)$ の大小から, 図 4-11 (a) (b) の 2 通りに分類される.

図 4-11 (a) に k_A の累積故障率 $F_{k_A}(T_k)$ が $F_{k_{min}}(T_k) < F_{k_A}(T_k) < F_{k_{max}}(T_k)$ である場合を示す. この条件では運用期間 T_k で, k_A の故障は発生する. 領域 1 の k_B の累積故障率 $F_{k_B}(T_k)$ が $F_{k_{max}}(T_k)$ より大きい場合は, 光線路設備でのサービス品質を保てないため, 常に k_B を用いることができずに k_A が用いられる. 領域 2 の, k_B の累積故障率 $F_{k_B}(T_k)$ が $F_{k_A}(T_k)$ より大きい場合, 以下の条件による. k_A より, k_B が有利となる場合, k_A のトータルコストは k_B のトータルコストより大きくなるので, 式(4-27)から下記の式が成立つ.

$$N_k \cdot (p_{k_A} + s_k) + Y_{k_A}(T_k) \cdot (p_{k_A} + m_k) > N_k \cdot (p_{k_B} + s_k) + Y_{k_B}(T_k) \cdot (p_{k_B} + m_k) \tag{4-28}$$

次に式(4-28)をより簡易な形態に変形するため, k_A と k_B の価格の比, 及び k_B の価格と修理費用を以下のように定義する.

$$\alpha_k = \frac{p_{k_A}}{p_{k_B}} \quad (\alpha_k > 1) \quad (4-29)$$

$$\beta_k = \frac{m_k}{p_{k_B}} \quad (4-30)$$

式(4-29), (4-30)を用いて, この式(4-28)を展開すると以下の式が成立つ.

$$\beta_k < -\frac{N_k + Y_{k_A}(T_k)}{Y_{k_A}(T_k) - Y_{k_B}(T_k)} \alpha_k + \frac{N_k + Y_{k_B}(T_k)}{Y_{k_A}(T_k) - Y_{k_B}(T_k)} \quad (4-31)$$

この式(4-31)により, 図 4-11 の領域 2 では, パッシブコンポーネント設置数 N_k , 運用期間 T_k の k_A と k_B の累積故障数 $Y_{k_A}(T_k)$, $Y_{k_B}(T_k)$, 価格・費用に関するパラメータの α_k , β_k で k_A と k_B のいずれが優位か決定できる. 領域 3 の累積故障率 $F_{k_B}(T_k)$ が $F_{k_A}(T_k)$ より小さい場合は, k_B は k_A より価格が低いため構築費用が小さく, また累積故障数が小さいため修理費用も小さくなる. よってトータルコストが常に小さくなるため, 常に k_B が優位となる.

次に図 4-11 (b) に k_A の累積故障率 $F_{k_A}(T_k)$ が $F_{k_A}(T_k) < F_{k_min}(T_k)$ である場合を示す. この場合は, 運用期間中 T_k で k_A の故障は発生しない.

領域 4 の, k_B の累積故障率 $F_{k_B}(T_k)$ が $F_{k_max}(T_k)$ より大きい場合は, 領域 1 と同様に常に k_B を用いることができず k_A が用いられる. 領域 5 の, k_B の累積故障率 $F_{k_B}(T_k)$ が $F_{k_min}(T_k)$ より大きい場合は, 以下の条件による. k_A ではなく, k_B が有利となる場合, k_A のトータルコストは k_B のトータルコストより大きくなるので, 式(4-27)から下記の式が成立つ.

$$N_k \cdot (p_{k_A} + s_k) > N_k \cdot (p_{k_B} + s_k) + Y_{k_B}(T_k) \cdot (p_{k_B} + m_k) \quad (4-32)$$

式(4-29), (4-30)を用いて, この式(4-32)を展開すると, 以下の式が成立つ.

$$\beta_k < \frac{N_k}{Y_{k_B}(T_k)} \alpha_k - \frac{N_k + Y_{k_B}(T_k)}{Y_{k_B}(T_k)} \quad (4-33)$$

この式(4-33)により, 図 4-11 (b) の領域 5 では, パッシブコンポーネント設置数 N_k , 運用期間 T_k の k_B の累積故障数 $Y_{k_A}(T_k)$, $Y_{k_B}(T_k)$, 価格・費用に関するパラメータの α_k , β_k で k_A と k_B のいずれが優位か決定できる. 領域 6 の, 累積積故障率 $F_{k_B}(T_k)$ が $F_{k_min}(T_k)$ より小さい場合は, 価格が低いため構築費用が小さく, 故障が発生しないため修理費用も発生しない. よってトータルコストが常に小さくなるため, 常に k_B が優位となる.

表 4-4 に以上に説明した, 領域 1 ~ 6 までの累積故障率とトータルコストの比較によるパッシブコンポーネント k_A と k_B の優位となる条件の一覧を示す.

以上のように, パッシブコンポーネント k について, 2 個以上の選択肢が存在する場合には, 各々の累積故障率の大小を比較することから, トータルコストがより小さくなる製品を選択することが可能となる. 式(4-20), (4-22)で示した光線路設備の構成と運用期間から決定される累積故障値の閾値に基づいて, 2 個のパッシブコンポーネントの価格と累積故障率から, トータルコストのどちらが優位になるかを示した. また表 4-4 に示すように, 2 個

のパッシブコンポーネントの比較する場合、パッシブコンポーネントの設置数と累積故障数、物品価格と修理コストから、両者の優劣を決定できることが分かる。また3製品以上の製品から選択が必要となる場合も想定されるが、以上述べたように2個毎のトータルコストを比較していくことで、最終的に最もトータルコストが安いものを選択することが可能となる。

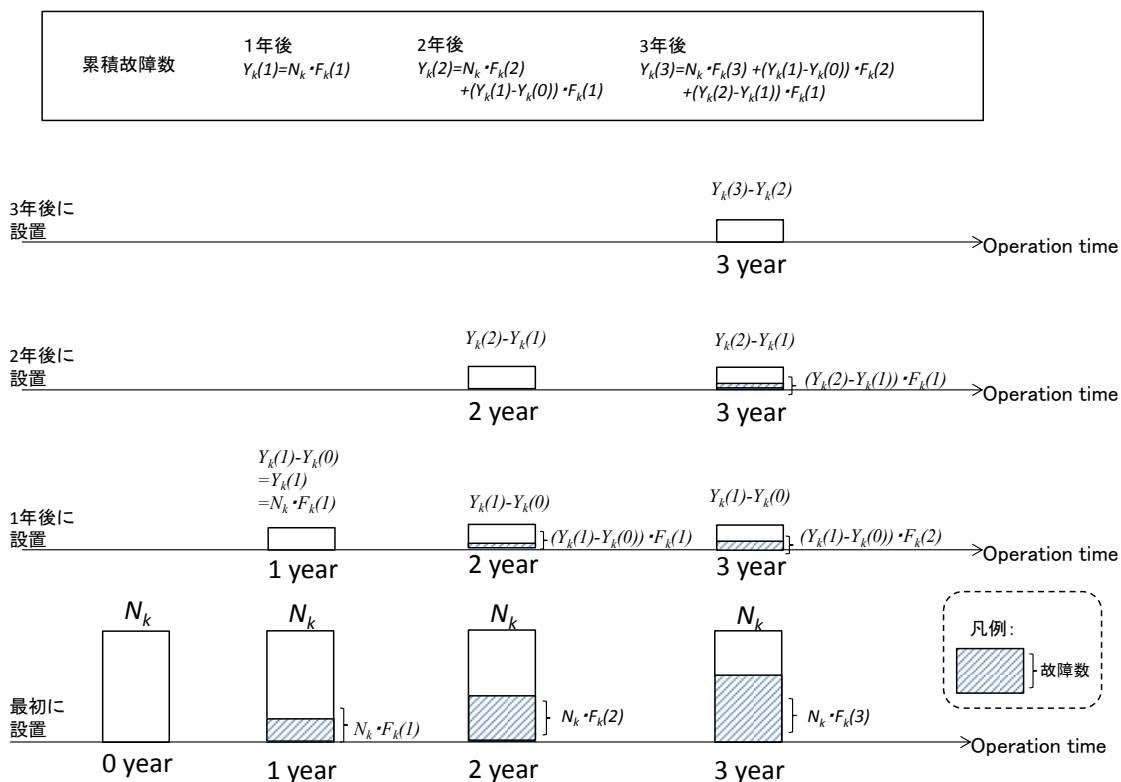


図 4-10 累積故障数の変動

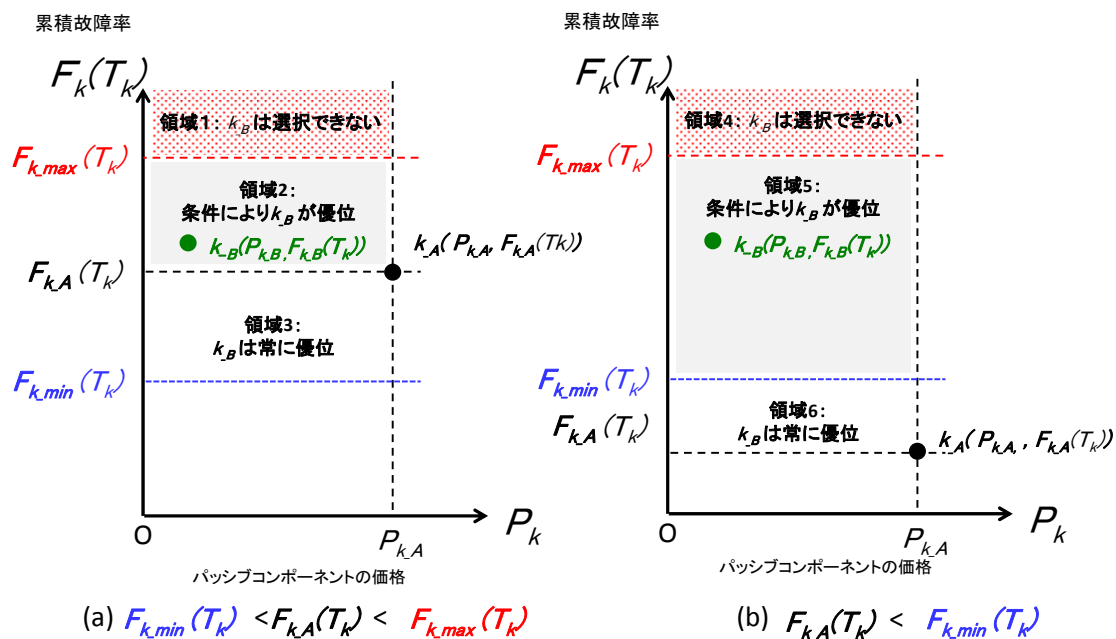


図 4-11 累積故障率とトータルコストの比較によるパッシブコンポーネントの優位となる条件

表 4-4 累積故障率とトータルコストの比較によるパッシブコンポーネントの k_A と k_B の優位となる条件

	トータルコストが優位となる パッシブコンポーネント		トータルコストが優位となる パッシブコンポーネント
領域1	k_A	領域4	k_A
領域2	式(4-31)が成立つ条件では、 k_B	領域5	式(4-33)が成立つ条件では、 k_B
領域3	k_B	領域6	k_B

4-3-3 トータルコスト比較のシミュレーション

先に提案したパッシブコンポーネントのトータルコストが安価となる提案手法を用いて、今後、新たに設置される可能性がある光カプラに関する、具体的なシミュレーションを行う。実際の通信サービスでは、道路工事等に通信ルート変更に伴い、通信ルートを変更する支障移転工事が行われ、通信サービスが停止する場合がある。このような通信サービスの停止を解消し、光ファイバネットワークの信頼性向上を図るため、支障移転工事の際に通信サービス停止を発生させない、無瞬断切替技術の検討が行われている[4-27]。この無瞬断切替技術では、切替作業時の2ルート化を確保するために、光線路設備内に光カプラを新たに設置する必要がある[4-27] [4-28]。この光カプラを新たに設置する事例を例にとり、光線路設備の信頼性を担保しつつ、トータルコストを比較して安価な物品を選択するための具体的なシミュレーションを以下に示す。

図 4-12 に無瞬断切替技術を適用するための光線路設備の構成を示す。構成は、シングルスター構成であって、冗長化構成用の光カプラは新たに設置する必要がある。この冗長化構成用に最適な光カプラを前節の提案手法を用いて、トータルコストを比較して選択するシミュレーションを行う。

表 4-5 に光線路設備を構成するパッシブコンポーネントの故障率と数量を示す。光線路部分のみの累積故障率の上限値の算出のパラメータとして、固定電話の線路分と同等な故障率 λ_{total_max} を 64 FIT/km を想定した[4-29]。また光ファイバ長は、日本の光線路長の平均値の 2.2 km と仮定した[4-30]。光線路設備の構成では、光ファイバの破断確率を光ファイバ故障率 λ_{fiber} とし、その値は $1 \times 10^{-2} \text{ FIT/km/fiber}$ [4-31]とした。融着接続の故障率 λ_{fusion} は、 $5.7 \times 10^{-2} \text{ FIT}$ とした[4-32]。一方、所内に設置する所内光カプラ $\lambda_{coupler_CO}$ は屋内の安定した温湿度環境で使用される。このため所内光カプラの故障率は十分に低いと想定されるため、光ファイバと同等で故障率は、 $1 \times 10^{-2} \text{ FIT}$ と仮定する。光コネクタの故障率 $\lambda_{connect}$ は、 0.1 FIT とする [4-33]。尚、パッシブコンポーネント故障率 $\lambda_k(t)$ [FIT] と累積故障率 $F_k(t)$ の関係は以下の式のように求められる[4-25]。

$$F_k(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda(t') dt'\right) \quad (4-34)$$

表 4-5 に各パッシブコンポーネントの故障率から式(4-34)により運用期間 20 年での累積故障率を算出したものを示す。冗長化構成用の光カプラの累積故障率の上限値 $F_{coupler_max}$ は式(4-20)から以下のように導きだせる。

$$F_{coupler_max}(t) = \frac{1}{n_{coupler}} \left(F_{total_max}(t) - n_{fiber} \cdot F_{fiber}(t) - n_{fusion} \cdot F_{fusion}(t) - n_{coupler_CO} \cdot F_{coupler_CO}(t) - n_{connect} \cdot F_{connect}(t) \right) \quad (4-35)$$

尚、 $n_{coupler}$ は 1 である。

表 4-6 にシミュレーションのため仮定した運用期間と設置数のパラメータ値を示す。冗長化構成用の光カプラの運用期間 $T_{coupler}$ は光線路設備の典型的な運用期間を想定し、20 年とする[4-16]。また、冗長化構成用の光カプラの設置数 $N_{coupler}$ を初年度に 1 万個設置すると仮定する。この結果、式(4-35)より 20 年経過後の冗長化構成用の光カプラの累積故障率の最大値 $F_{coupler_max}$ の値は、0.024 となる。一方、累積故障率の下限の閾値 $F_{coupler_min}$ は冗長化構成用の光カプラの設置数 $N_{coupler}$ より、式(4-22)から 0.0001 となる。

表 4-7 に本シミュレーションで比較のために用いる冗長化構成用の 2 種類の光カプラの価格と故障率を示す。冗長化構成用の光カプラ $Coupler_A$ の価格と故障率は 5000 [yen] と 16 FIT とする [4-34]。尚、1 [ドル] は 100 [yen] と換算し (以下、同様)、MTTR (Mean Time To Repair) は 6 [hour] とした。一方、 $Coupler_B$ の価格と故障率は 3000 [yen] と 50 FIT とする [4-16]。式(4-34)より、20 年経過後の冗長化構成用の光カプラ $Coupler_A$ と $Coupler_B$ の累積故障率は、0.0028 と 0.0087 であった。また図 4-13 に運用期間の 1 年～20 年での 2 種類の冗長化構成用の光カプラの累積故障率とその上限値と下限値を示す。両

者とも累積故障率 $F_{coupler_max}$ と $F_{coupler_min}$ の間の値をとるため、両者とも運用期間の故障が発生する状態である。従って、両者のトータルコストの比較は、図 4-11 の領域 2 に該当する。従って、表 4-4 より式(4-31)に従って、冗長化構成用の光カプラ $Coupler_A$ と $Coupler_B$ のトータルコストの比較を行う。

表 4-8 にトータルコスト比較のパラメータとして仮定した、冗長化構成用の光カプラの修理に要する費用 $m_{coupler}$ と設置に要する費用を示す。光線路設備でのパッシブコンポーネントの修理には、保守要員が故障発生個所に移動し、故障位置を探索し発見して、該当のパッシブコンポーネントを撤去して、新たに設置するという作業手順をとる[4-16]。また、光線路上の故障位置の探索には、OTDR が用いられる場合もある[4-35]。以上のように光パッシブコンポーネントの修理費用は、保守要員の稼働費が大きな割合を占める。光線路の故障発生での MTTR (Mean Time to Repair) の 6 [hours] を修理に要する時間とする [4-16]。光関連作業での稼働費は、5200 [yen/hour] であるため[4-36]、修理費用は、その積算で 31200 [yen] とした。また、運用期間 $T_{coupler}$ 20 年で、冗長化構成用の光カプラ $Coupler_A$ と $Coupler_B$ の累積故障数 $Y_{coupler_A}(T_{coupler})$ と $Y_{coupler_B}(T_{coupler})$ は、式(4-26)から、28 個、88 個になる。

図 4-14 に式(4-31) と運用期間 $T_{coupler}$ 20 年で、28 個、88 個により求められる $\alpha_{coupler}$ と $\beta_{coupler}$ の関係を示す。式 (4-31) より、 $\alpha_{coupler}$ と $\beta_{coupler}$ の値が、図 4-14 の直線より下側(小さい)の領域であれば、 $Coupler_B$ のトータルコストのほうが低くなる領域であり、反対に上側(大きい)の領域であれば、 $Coupler_A$ のトータルコストのほうが安価となる領域となる。また $\alpha_{coupler}$ と $\beta_{coupler}$ が直線上に乗る場合には、 $Coupler_A$ と $Coupler_B$ のトータルコストが等しくなる。

想定したパラメータでは、 $\alpha_{coupler}$ と $\beta_{coupler}$ が、図 4-14 の直線より下側の領域中の点(1.67, 10.4)のとなる。このため、 $Coupler_B$ が $Coupler_A$ より、運用期間 20 年を想定した場合にトータルコストが図 4-14 の $\alpha_{coupler}$ と $\beta_{coupler}$ の関係からも低くなることが明らかである。また $Coupler_A$ が、もし価格のみを下げるのが可能で、 $Coupler_B$ と運用期間 20 年でトータルコストを同等にするために、 $\alpha_{coupler}$ の値が 1.07 になった場合には、図 4-14 で直線上の点(1.07, 10.4)となるので、運用期間 20 年での、 $Coupler_A$ と $Coupler_B$ のトータルコストが一致し、両者の優劣はないという結果になる。この価格を低減した際の $Coupler_A$ の価格は式(4-29)を用いると、3204 [yen] となる。この価格 3204 [yen] の冗長化構成用の光カプラを、 $Coupler_A'$ と定義する。

図 4-14 の結果を検証するため、図 4-15 に式(4-27)から算出した運用期間とトータルコスト、及び故障数を算出した結果を示す。尚、表 4-8 で示したように光カプラの 1 個あたりの建設コストを 1000[yen] と仮定して算出している。運用開始後は、冗長化構成用の光カプラ $Coupler_A$ は $Coupler_B$ に対して、運用期間中は、常にトータルコストが高くなるのが分かる。このため、冗長化構成用の光カプラ $Coupler_A$ と $Coupler_B$ を比較した場合は、 $Coupler_B$ を選択すべきであることが分かる。また $Coupler_A'$ について、同様に式(4-27)

で運用期間 20 年間のトータルコストを計算した結果を示す。運用期間 20 年目で、*Coupler_A*'と *Coupler_B*のトータルコストが同一になることが分かる。このように $\alpha_{coupler}$ と $\beta_{coupler}$ の関係を用いることで、トータルコストの優劣が判明するだけでなく、故障率と価格が異なる 2 種類のパッシブコンポーネントがあった場合に、トータルコストを同一にするために目標となる価格を導くことが可能となる。

以上のように、2 種類の冗長化構成用の光カプラの例を用いて、前節で提案した手法に従って、パッシブな設備である光線路設備の一定の信頼性を担保しつつ、トータルコストを最小化する製品の選択可能なことを明示した。以上より、提案した手法の有効性を示すことができた。

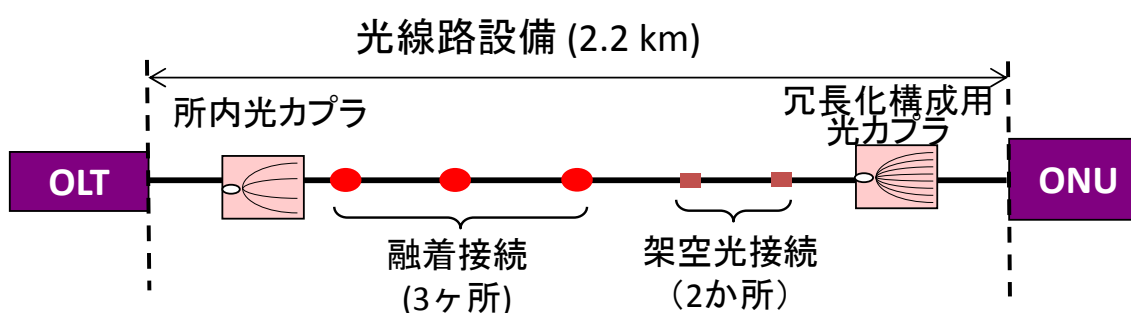


図 4-12 シミュレーションのための光線路設備構成

表 4-5 光線路設備を構成するパッシブコンポーネント

項目	光線路設備全体	光ファイバ	所内光カプラ	光コネクタ	融着接続
故障率	$\lambda_{total_max} = 64$ [FIT/km]	$\lambda_{fiber} = 1 \times 10^{-2}$ [FIT/km/fiber]	$\lambda_{coupler_CO} = 1 \times 10^{-2}$ [FIT]	$\lambda_{connect} = 0.1$ [FIT]	$\lambda_{fusion} = 5.7 \times 10^{-2}$ [FIT]
数量	$n_{total} = 2.2$ [km]	$n_{fiber} = 2.2$ [km]	$n_{coupler_CO} = 1$	$n_{connect} = 2$	$n_{fusion} = 3$
累積故障率 (運用期間 20年)	F_{total_max} $= 2.5 \times 10^{-2}$	F_{fiber} $= 3.9 \times 10^{-6}$	$F_{coupler_CO}$ $= 1.7 \times 10^{-6}$	$F_{connect}$ $= 3.5 \times 10^{-5}$	F_{fusion} $= 3.0 \times 10^{-5}$

表 4-6 冗長化構成用の光カプラの運用期間と設置数

運用期間 [year]	設置台数 [台]
$T_{coupler} = 20$	$N_{coupler} = 10000$

表 4-7 比較する冗長化構成用光カプラの故障率と価格

種類	<i>Coupler_A</i>	<i>Coupler_B</i>
故障率 [FIT]	$\lambda_{coupler_A} = 16$	$\lambda_{coupler_B} = 50$
価格 [yen]	$p_{coupler_A} = 5000$	$p_{coupler_B} = 3000$

表 4-8 光カプラの修理コストと設置コスト

修理費用 [yen]	設置費用 [yen]
$m_{coupler} = 31200$	$s_{coupler} = 1000$

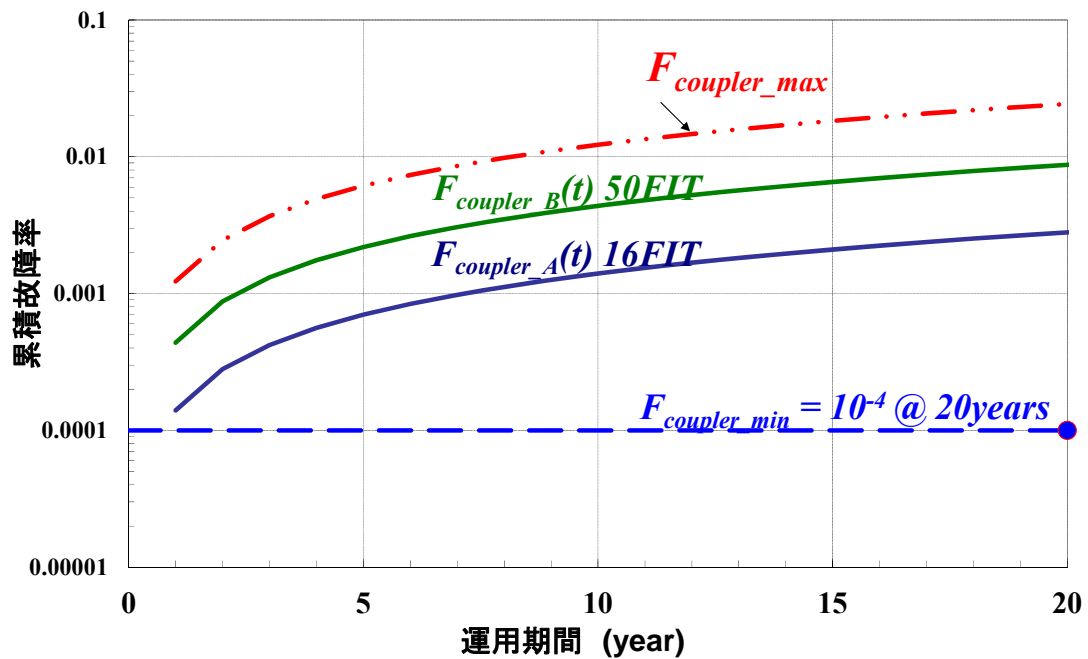


図 4-13 冗長化構成用光カプラの運用期間と累積故障率

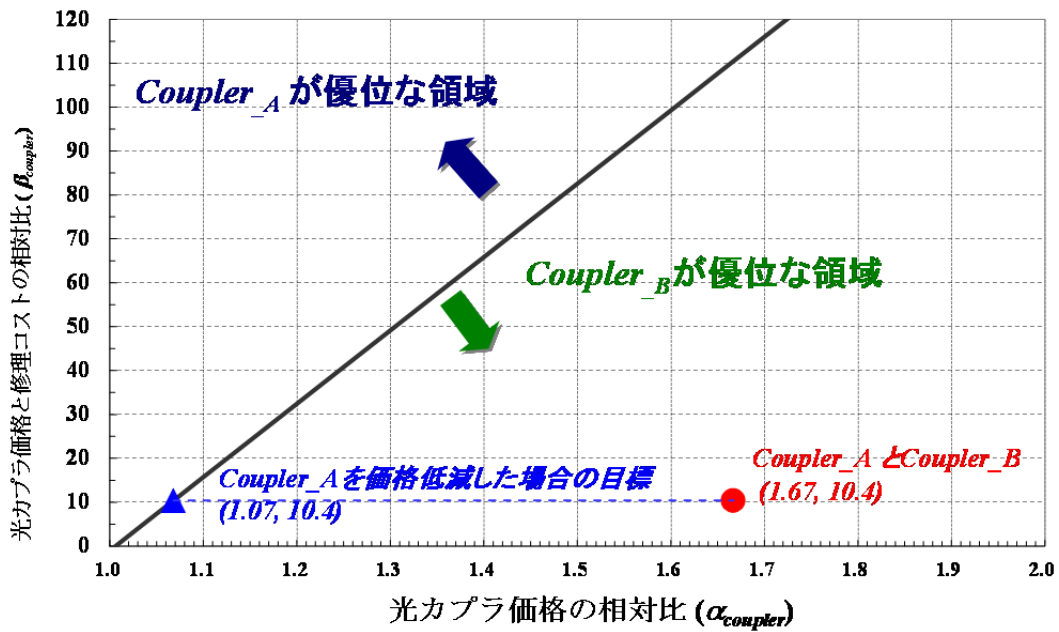


図 4-14 冗長化構成用光カプラのトータルコスト比較 (運用期間 20 年)

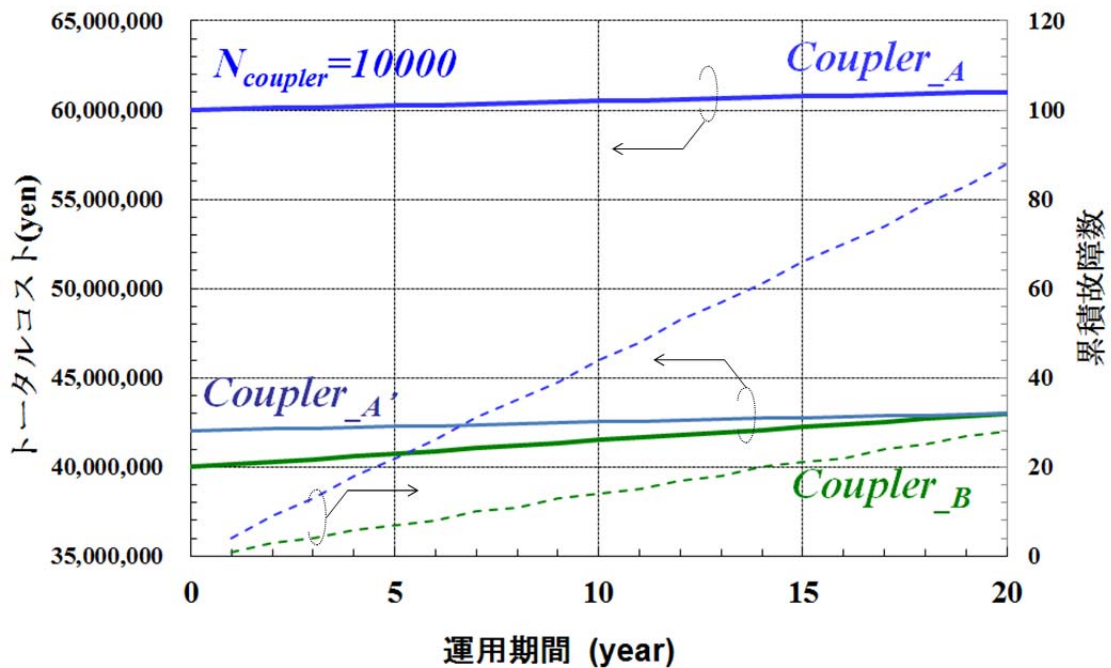


図 4-15 トータルコストと累積故障数の運用期間の依存性

4-3-4. リスク分析手法に基づくトータルコスト比較

前節までは、トータルコスト比較のため、一定値のパラメータを用いてシミュレーションを行った。しかしながら、パッシブコンポーネントの価格や交換修理コストは、運用期

間中に変動することが想定される。また通信ネットワーク装置、屋外光通信設備や屋外電気設備の故障率は、年間を通じて変動する場合があることや、また年毎に変動する場合もあることが報告されている[4-37] [4-38] [4-39]。また将来発生する費用は、厳密には現在価値に換算して積算する必要がある。このため、経営工学におけるリスク分析の手法を用いて[4-23]、複数の分野で将来における生産コストや運用コストの経済性の評価が行われている[4-40] [4-41]。このためリスク分析の手法を用いてパラメータを変動させたシミュレーションを行い、トータルコスト比較への影響を評価した。

前節では、運用期間中にパッシブコンポーネントの価格 p_k や修理費用が m_k が一定である前提で解析的に評価した。更に実態に即した検討にするため、価格や修理費用が 1 年毎に変化することを想定して、トータルコストを算出する。更に将来にかかる費用を利率分で割引いて、現在価値として積算する。

パッシブコンポーネント k を運用期間 t 年に交換修理する個数を $\Delta Y_k(T_k)$ とすると以下が成り立つ。

$$\Delta Y_k(t) = Y_k(t) - Y_k(t-1) \quad (4-36)$$

運用期間 t 年でのパッシブコンポーネントの物品価格 $p_k(t)$ 、修理費用を $m_k(t)$ 、年間の利子率を γ とすると、運用期間 T_k (年) を式(4-27)から計算すると、次式が成立つ。

$$w_k(T_k) = N_k \cdot (p_k(0) + s_k) + \sum_{t=1}^{T_k-1} \left(\frac{1}{1+\gamma} \right)^t (\Delta Y_k(t) \cdot (p_k(t) + m_k(t))) \quad (4-37)$$

右辺の第 1 項は、構築時の設置費用、第 2 項は故障発生時の修理費用を 1 年毎に利子率を考慮した現在価値に変換して積算している。また、パッシブコンポーネントの期間 t 年での物品価格 $p_k(t)$ 、修理費用を $m_k(t)$ は物価指数 η_p 、 η_m で変動すると仮定すると以下の式が成立つ。

$$p_k(t) = (1 + \eta_p)^t p_k(0) \quad (4-38)$$

$$m_k(t) = (1 + \eta_m)^t m_k(0) \quad (4-39)$$

尚、以下が成立つものとする。

$$p_k(0) = p_k \quad (4-40)$$

$$m_k(0) = m_k \quad (4-41)$$

以上の式より、物価指数や利子率を考慮し、冗長化構成用光カプラのトータルコストの運用期間 20 年を前提に、モンテカルロシミュレーションによりサンプリング数 100,000 で、シミュレーションを実施した。表 4-9 に使用したパラメータの変動範囲を示す。文献[4-39]での示すように、故障率の年間での変動が 8 倍あるとのことから、表 4-7 で示した冗長化構成用の光カプラ *Coupler_A*、*Coupler_B* の故障率を中心に、最大値を最小値の 8 倍に設定して、一様分布で変動させた。利子率 γ は、日本銀行の 30 年間 (1986 年～2015 年) の普通預金金利のデータ値を基に[4-42]、一様分布で変動させた。光カプラの物価指数 η_p は、総務省統計局の情報通信関係費の消費者物価指数データ[4-43]を基に、修理費用の物価指数 η_m は国土交通省の電気通信技術者の基準日額データ[4-44]を基に、一様分布で変動させた。

以上の条件からトータルコスト変動の頻度を算出していた。

Coupler_A と *Coupler_B* のどちらが、トータルコストで優位になるかを評価するため、式(4-37)を用いて、両者のトータルコストの差が以下の式に表される。

$$\begin{aligned}
 & W_{\text{coupler}_A}(T_{\text{coupler}}) - W_{\text{coupler}_B}(T_{\text{coupler}}) \\
 &= N_{\text{coupler}} \cdot (P_{\text{coupler}_A}(0)) + \sum_{t=1}^{T_{\text{coupler}}-1} \left(\frac{1}{1+\gamma} \right)^t (\Delta Y_{\text{coupler}_A}(t) \cdot (P_{\text{coupler}_A}(t) + m_{\text{coupler}}(t))) \\
 & - N_{\text{coupler}} \cdot (P_{\text{coupler}_B}(0)) + \sum_{t=1}^{T_{\text{coupler}}-1} \left(\frac{1}{1+\gamma} \right)^t (\Delta Y_{\text{coupler}_B}(t) \cdot (P_{\text{coupler}_B}(t) + m_{\text{coupler}}(t)))
 \end{aligned} \tag{4-42}$$

式(4-42)では、式の値が負になるほうが、各々、*Coupler_A* のトータルコストが低くなり、正の値の場合は、*Coupler_B* のトータルコストが低くなる。図 4-16 に式(4-42)を用いて、運用期間 20 年での *Coupler_A* または、から *Coupler_B* のトータルコストを減算した値をモンテカルロシミュレーションで頻度を評価した結果を示す。図 4-16 では、*Coupler_A* と *Coupler_B* のトータルコストで優位となる正の値になるのは、全体の 100 % であった。従って、今回の各パラメータの変動の範囲では、*Coupler_B* がトータルコストの点から常に優位となることが分かる。

次に *Coupler_A* と *Coupler_B* のトータルコストを比較した場合、どのパラメータがトータルコストの差への影響が大きいかを評価するため、図 4-17 に感度分析による評価を行った結果を示す。式(4-42)について各パラメータを 50 サンプルで変動させた結果、*Coupler_B* の故障率の変動の影響が最も大きく、*Coupler_B* と *Coupler_A* のトータルコストの差は、15.39 百万[yen]から 20.38 百万[yen]の影響があることが分かった。*Coupler_B* の故障率は、*Coupler_A* より大きいため、トータルコストの差に与える影響が大きいためである。この感度分析の結果から、精度の良い意思決定を行うためには、*Coupler_B* の故障率の不確実性の変動を抑制することが最も有効であることが分かる。

以上に示したように、パッシブコンポーネントのトータルコスト比較にパラメータの不確実性を考慮しても、*Coupler_B* が *Coupler_A* より常にトータルコストで優位となることがわかる。

シミュレーションにリスク分析手法を導入することで、価格と故障率が変動した場合であってもトータルコストに基づくパッシブコンポーネントの選択への影響を定量的に明らかにすることができる。

表 4-9 リスク分析のためのパラメータと変動幅

項目	<i>Coupler_A</i> 故障率 [FIT]	<i>Coupler_B</i> 故障率 [FIT]
中心値 (変動幅)	$\lambda_{coupler_A} = 16$ (3.6~28.4)	$\lambda_{coupler_B} = 50$ (11.1~88.9)
分布形状	一様分布	一様分布

項目	利率 [%/year]	光カプラの物価指数 [%/year]	修理費用の物価指数 [%/year]
中心値 (変動幅)	$\gamma = 1.5$ (0.009~7.8)	$\eta_p = -0.43$ (-2.0~1.6)	$\eta_m = 2.3$ (0.37~4.06)
分布形状	一様分布	一様分布	一様分布

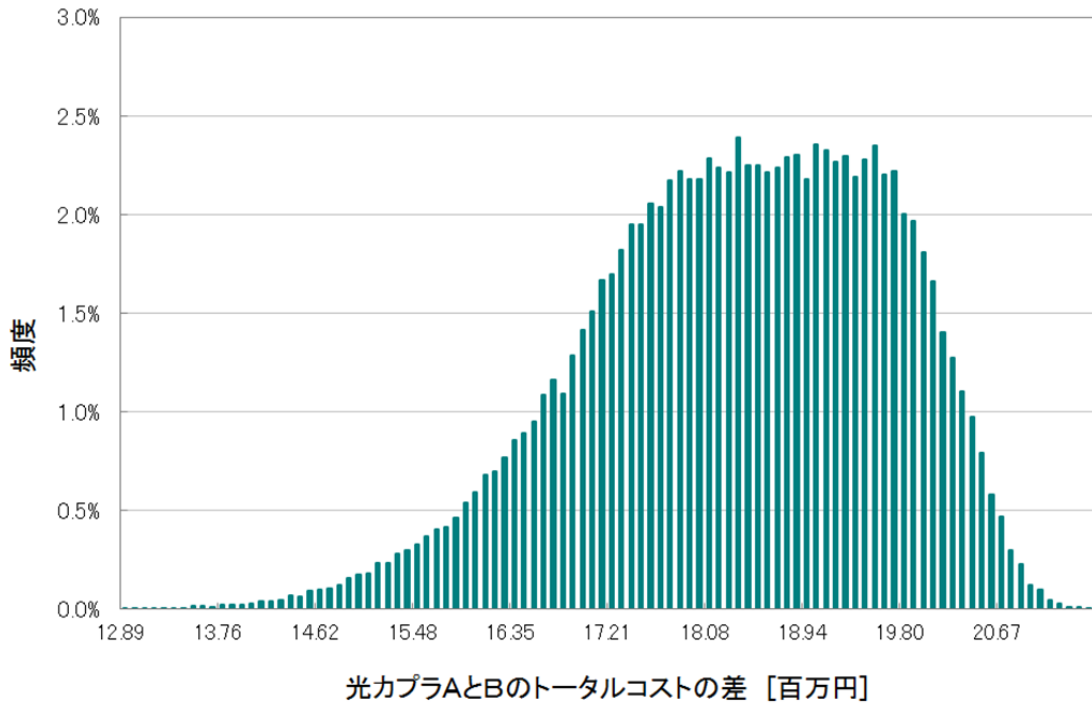


図 4-15 光カプラ A, B のトータルコスト比較 (運用期間 20 年)

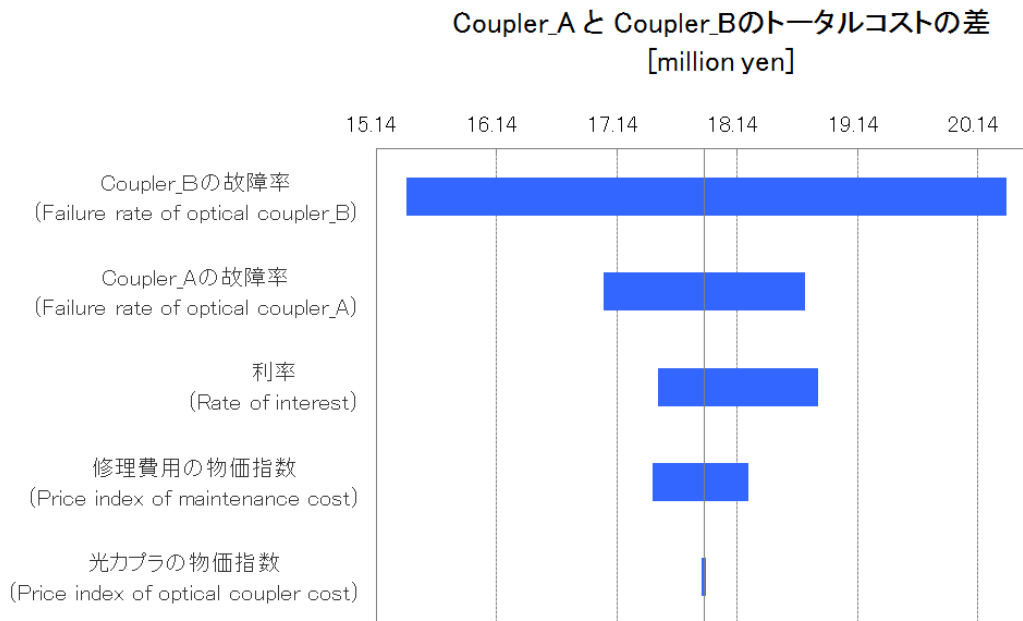


図 4-16 光カプラ_A と光カプラ_B のトータルコスト比較に対する感度分析
(運用期間 20 年)

4-3-5 まとめ

4-3 では、光線路設備全体の故障率を考慮したうえで、複数のパッシブコンポーネントから価格と故障率と運用期間に基づいてトータルコストを最小化する選択手法について提案した。また具体的な光線路設備に新たに冗長化構成用光カプラを設置する場合を想定して、2種類の光カプラの候補から、提案手法に基づいてトータルコスト比較を行い、いずれが提案した光コンポーネント選択方法として優位となるかを示した。さらにトータルコスト比較にリスク分析の手法を導入し、故障率や価格が変動する場合のトータルコスト比較に与える影響を明らかにした。これによりトータルコスト比較にリスク分析の手法が有効であることを明らかにした。

4-4 結論

4章では、光線路設備に新たなパッシブコンポーネントを追加することを想定した検討を行った。無瞬断切替技術に使用する光カプラで、光カプラ間の光線路に許容される線路損失を最大にする分岐比を導く手法を明示した。またこの設計法に基づいて、分岐比を算出し、実験とシミュレーション値がほぼ一致したことで、この設計法の有効性を確認できた。またリスク分析手法により、伝送装置の光出力値や受信感度等の各パラメータの変動が最適な分岐比の決定に与える影響を評価できた。

また、光線路設備全体の故障率を考慮したうえで、複数のパッシブコンポーネントから

価格と故障率と運用期間に基づいてトータルコストを最小化する選択手法について提案した。また具体的なシミュレーションに基づいて選択手法の有効性を示した。さらにトータルコスト比較にリスク分析手法を導入し、故障率や価格が変動する場合のトータルコスト比較に与える影響を定量化して、トータルコスト比較にリスク分析手法が有効であることを明らかにした。

第5章 結論

5-1 各章のまとめ

第1章では、本論文の研究テーマである、光ファイバネットワークの屋外設置されたパッシブコンポーネントの信頼性に関する背景と課題について述べた。

第2章では、光ファイバによるネットワーク構築の黎明期に課題であった、PON用光スプリッタの信頼性について述べた。PLC型光スプリッタが大量に屋外環境にPLC型光スプリッタが敷設されるため、長期的な信頼性を検証する必要がある。このため、屋外環境を想定した各種の信頼性試験により、その特性を確認した。またPLC型光スプリッタは、湿熱により、このため内部のPLCチップとファイバアレイの接着面が特性劣化の影響を受ける。このため加速劣化試験による寿命推定を行った。その結果、20年間の運用期間を想定しても、十分な故障率を有することを確認した。また光線路設備の設置を円滑に伸展させるため、光スプリッタの施工性向上が必要となった。このため、PLC型光スプリッタを内蔵した2種類のスプリッタモジュールの設計、試作を実施し、光学特性・長期信頼性の評価を実施した。その結果、PON用光スプリッタとして、十分な光学特性を有することと屋外環境に設置する光モジュールとして十分な特性を有することを確認した。

第3章では、光ファイバによるネットワーク構築の普及拡大期の課題であった、メカニカルスプライスや現場組立コネクタといった現場組立接続技術の故障原因と対策について述べた。これらの現場組立接続品の組立時の施工不良により、開通時には通信可能であっても、一定時間経過後に通信損失増加により故障があった。この直接的な原因に、ファイバ突合せ点の間隙（寸法10~100 μ m程度）と、ファイバ端面のカット不良の2種類あった。それぞれの原因での、通信断を引起す事象の解明とその対策に関して検討した。この故障メカニズム分析のため、実験室でのヒートサイクル試験を行い、突合せ点に空気と屈折率整合材が混在して大きな損失増加を引起していると推定した。

施工時の間隙発生の防止のため、施工時に突合せ点で一定以上の間隙が発生すると大きな接続損失が発生する、新たな光接続方法を考案した。この接続方法の試作品を作成し、所望の光学特性を満足し、温度サイクル試験でも大きな損失増加が発生しないことを確認した。カット不良端面を直接的に確認するには、ファイバ端面を確認するため融着接続機器のモニタでカット端面の確認が行われていた。しかし現場組立接続技術のためにはより簡便な検査方法が求められる。このため、被対象ファイバ端面に正常なファイバ端面を近接させ、ファブリ・ペロー干渉状態を作り出して、2波長の反射減衰量を測定することで、その測定値からカットの正常と不良を確認する検査方法を考案した。この検査方法に基づく、試作機を作成し、異なる形状をもつカット不良端面で、正確に検査できることを確認した。

第4章では、光ファイバによるネットワーク構築の安定成長期の課題として、ネットワークの信頼性向上に向けた新たな線路切替技術導入のためのパッシブコンポーネントの信

頼性について述べた。実際の光線路設備の運用にあたっては、道路の拡幅工事や橋の架替に伴う支障移転により、通信断が余儀無くされなくなるため、この解消のため無瞬断切替システムが検討されている。この無瞬断切替システムを運用する場合、適用可能な通信距離を可能な限り長くなるため、光ファイバネットワークに設置する最適な光カプラの分岐比を明確にする必要があった。このため、光カプラの分岐比特性、通信システムのパワーバジェット、更に現用ルート、迂回ルート光損失値に基づいたシミュレーションを実施し、最適な分岐比を明確化した。

更に光線路設備全体の故障率を考慮したうえで、複数のパッシブコンポーネントから価格と故障率と運用期間に基づいてトータルコストを最小化する選択手法について提案した。また具体的な光線路設備に新たに屋外設置光カプラを設置する場合を想定して、価格と故障率が異なる2種類の光カプラから、提案手法に基づいてトータルコスト比較を行い、優位となる製品を選択するシミュレーションを行い、この手法の有効性を示した。さらにトータルコスト比較にリスク分析手法を導入し、故障率や価格が変動する場合のトータルコスト比較に与える影響を明らかにした。これによりトータルコスト比較にリスク分析手法が有効であることを明らかにした。

5-2 今後の展望

光ファイバネットワークは、社会インフラとして今後も多岐のサービスに使用されることが想定される。このため、4章で述べたような、無瞬断切替技術をはじめとする、様々な光線路切替技術が必要になると考えられる。今後、無瞬断切替技術の実現に向けて、冗長化構成用光カプラを試作し、実際の光ファイバネットワークに適用することで、ネットワークの信頼性をより向上させることが必要になると考えられる。

参考文献

1章：

- [1-1] 岡田昇, 田島洋, “光ケーブル創世期の技術の変遷”, 電子情報通信学会 総合大会 BI-6-1, 2014.
- [1-2] 内田直也, “水素による光ファイバ損失増の発見と防止策の確立”, 通信ソサエティマガジン, No.25, 夏号, pp.72-79, 2013.
- [1-3] 遠藤洋平, 中川直樹, 加藤文明, 鉄谷成且, 尾本清, “光ケーブル開発の歴史”, NTT 技術ジャーナル, pp. 48-51, 2015.10.
- [1-4] 山中正義, “非ガス化光ケーブルと高密度光ケーブルの技術の変遷”, 電子情報通信学会 総合大会 BI-6-2, 2014.
- [1-5] J. Kawataka, K. Hogari, H. Hakozaki, M. Kanayama, H. Yamamoto, T. Aihara, and K. Sato, “Novel optical fiber cable for feeder and distribution sections in access network,” J. Lightwave Technology, Vol. 21, No. 3, pp. 789-796, March 2003.
- [1-6] H. Shinohara, “Broadband access in Japan: rapidly growing FTTH market,” IEEE Commun. Mag. 43, pp. 72–78, 2005.
- [1-7] H. Shinohara, “FTTH experiences in Japan [Invited]” , OSA J. of Optical Networking, Vol.6, No.6, pp. 616-623, June 2007.
- [1-8] 総務省 情報通信統計データベース.
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/new/index.html>
- [1-9] K. Shiraki, “R&D Trends in Optical Fiber and Cable Technology,” NTT Technical Review, Vol. 13, No.3, pp.1-7, March 2015.
- [1-10] NTT アクセスサービスシステム研究所, “技術基礎講座【GE-PON 技術】第1回 PON とは”, NTT 技術ジャーナル pp.71-74, 2005.8.
- [1-11] データブック NTT 西日本 アクセス網の光化.
<http://www.ntt-west.co.jp/info/databook/pdf/046.pdf>
- [1-12] E. Sugita, R. Nagase, K. Kanayama, T. Shintaku, “SC-Type Single-Mode Optical Fiber Connector”, J. Lightwave Technology, Vol. 7, No. 11, pp. 1689-1696, November 1989.
- [1-13] R. Nagase, E. Sugita, S. Iwano, K. Kanayama, Y. Ando, “Miniature Optical connector with Small Zirconia Ferrule”, IEEE Transactions Photonics Technology Letters, Vol. 3, No. 11, pp. 1045-1047, November 1991.
- [1-14] M. Matsumoto, T. Haibara, and M. Miyauchi, “Design and characteristics of reinforcement method for fusion spliced optical fiber,” J. Lightwave Technology, Vol. LT-3, No. 2, pp. 322-327, April 1985.

- [1-15] M.Takaya, T.Katagiri, S.Nagasawa, Y.Mrakami, and s.Hatano, "Design and development of optical fiber jointing techniques for efficient construction of aerial distribution cable systems", IEEE Transaction on Advanced Packaging Vol.23, no.1, pp.36-41, Feb 2000.
- [1-16] T. Nakajima, T. Terakawa, M. Toyonaga, and M. Kama, "Development of optical connector to achieve large-scale optical network construction", 55th International Wire and Cable Symposium, Inc./Focus(IWCS, 2006), pp.439-443, 2006.
- [1-17] T. Manabe, M. Inoue, H. Hirota, T. Kawano, T. Uematsu, K. Okamoto, T. Kiyokura, Y. Koshikiya, and K. Katayama, "Temporary optical coupler and dynamic delay adjustment technologies for optical cable re-routing operation support systems," proceedings of the 64th IWCS Conference, pp. 709-714, 2015.
- [1-18] 納戸 一貴, 井上 雅晶, 片山 和典, 本田 奈月, 真鍋 哲也, " サービス無瞬断におけるリングバッファを用いた遅延量調整方式の検討," 電子情報通信学会論文誌(B), vol.J99-B No.5, pp. 381-388, May 2015.
- [1-19] Y. Inoue, M. Ishii, Y. Hida, M. Yanagisawa, and E. Enomoto, "PLC Components Used in FTTH Access," NTT Tech. Rev., vol. 3. No.7, pp.22-26, 2005.
- [1-20] Y. Enomoto, K. Mine, A. Miyashita, H. Machino, H. Izumita, K. Hogari, and M. Nakamura, "Novel compact optical splitter for outside plant in access network" Proc. OECC 2002, pp. 380-381, 2002.
- [1-21] 榎本圭高, 宮下晃, 泉田史, 中村稔, "所外用 8 分岐光スプリッタの設計", 電子情報通信学会総合大会, B-10-23, 2003.
- [1-22] M. Kihara, R. Nagano, H. Izumita, M. Toyonaga, "Unusual fault detection and loss analysis in optical fiber connections with refractive index matching material", Optical Fiber Technology, 18, pp.167-175, 2012.
- [1-23] NTT 東日本 技術協力センタ, " 現場組立コネクタにおけるトラブル事例と対策", "NTT 技術ジャーナル", (社)電気通信協会, pp.48-50, vol.22 No.10, 2010.

2 章 :

- [2-1] IEEE Std 802.3ah-2004.
- [2-2] H. Shinohara, "Broadband access in Japan: rapidly growing FTTH market," IEEE Commun. Mag. 43, pp. 72-78, 2005.
- [2-3] 岩淵昌広, 岩崎とも子, 今村哲夫, "ファイバ型 WDM 光カプラ," 沖テクニカルレビュー, 第 190 号, Vol.69, No.2, pp. 88-91, 2002 年 4 月.
- [2-4] Y. Inoue, M. Ishii, Y. Hida, M. Yanagisawa, and E. Enomoto, "PLC Components

- Used in FTTH Access,” NTT Tech. Rev., vol 3. No.7, pp.22-26, 2005.
- [2-5] Y. Hibino, F. Hanawa, H. Nakagome, M. Ishii, and N. Takato, “High reliability optical splitters composed of silica-based planar lightwave circuits”, J. Lightwave Technol., Vol. 13, No. 8, pp. 1728-1735, Aug. 1995.
- [2-6] Y. Enomoto, K. Mine, A. Miyashita, H. Machino, H. Izumita, K. Hogari, and M. Nakamura, “Novel compact optical splitter for outside plant in access network” Proc. OECC 2002, pp. 380-381, 2002.
- [2-7] 榎本圭高, 宮下晃, 泉田史, 中村稔, ”所外用 8 分岐光スプリッタの設計”, 電子情報通信学会総合大会, B-10-23, 2003.
- [2-8] ITU-T Recommendation G.984.5, September 2007.
- [2-9] ITU-T Recommendation G.671, January 2009.
- [2-10] ITU-T Recommendation L.37, February 2007.
- [2-11] 栗森雅史, 棚瀬博之, 寺川邦明, 中嶋龍哉, 豊永雅信, 鎌光男, ”大量光開通工事に最適な架空光クロージャの開発”, 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-10-12, 2006.
- [2-12] 鈴木千宏, 高橋裕司, 濱岡篤, 高見沢和俊, “FTTH サービスに向けた高収容クロージャの開発”, 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-8-2, 2010.
- [2-13] Chinlon Lin, Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home, John Wiley & Sons, Ltd., pp. 1-16, 2006.
- [2-14] J. Kawataka, K. Hogari, H. Iwata, H. Hakozaki, M. Kanayama, H. Yamamoto, T. Aihara, and K. Sato, “Novel optical fiber cable for feeder and distribution sections in access network,” J. Lightwave Technol., Vol. 21, No. 3, pp. 789-796, Mar. 2003.
- [2-15] M. Matsumoto, T. Haibara, and M. Miyauchi, “Design and characteristics of reinforcement method for fusion spliced optical fiber,” J. Lightwave Technol., Vol. LT-3, No. 2, pp. 322-327, Apr. 1985.
- [2-16] K. Kanayama, Y. ANDO, S. Iwano, and R. Nagase, “Characteristics and static fatigue reliability of a zirconia alignment sleeve for optical connectors”, IEICE Trans. Electron., Vol. E77-C, No. 10, pp. 1559- 1566, Oct. 1994.
- [2-17] T. Abe, M. Hayashi, and S. Nojo, “A software tool to support the reliability design and evaluation of telecommunication networks,” IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Vol. 12, No. 2, pp. 345-354, Feb. 1994.
- [2-18] Y. Hida, T. Fukumitsu, F. Hanawa, Y. Enomoto, S. Sumida, and N. Takato, “Highly compact silica-based PLC-type 1 x 32 splitters using 127 μm -spacing output and 0.4% Δ waveguides”, Electronics Letters, Vol. 34, No. 1, pp. 75-76, 8th Jan. 1998.
- [2-19] H. Shinohara, “FTTH experiences in Japan [Invited]” , OSA J.of Optical Networking, Vol.6, No.6, pp. 616-623, June 2007.
- [2-20] H. Hanafusa, S. Sumida, and N. Takato, ”Long-term reliability of silica-based

- planar lightwave circuit devices”, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 531, pp. 349-358, 1998.
- [2-21] A. Piccirillo, G. Zaffiro, T. Tambosso and G. Gallo, “Reliability of optical branching devices”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 5, No. 5, pp. 1413-1417, Sep./Oct. 1999.
- [2-22] N. Uesugi, T. Kuwabara, Y. Koyamada, Y. Ishida, and N. Uchida, “Optical loss increase of phosphordoped silica fiber at high temperature in the long wavelength region,” *Appl. Phys. Lett.* Vol. 43, no.4, pp. 327-328, Aug. 1983.
- [2-23] M. Toyonaga, M. Awamori, H. Tanase, and M. Kama, “New aerial optical closure technologies,” Presented at the 55th International Wire and Cable Symposium, Inc./Focus (IWCS, 2006), pp. 466–469.
- [2-24] T. Nakajima, T. Terakawa, M. Toyonaga, and M. Kama, “Development of optical connector to achieve large-scale optical network construction,” Presented at the 55th International Wire and Cable Symposium, Inc./Focus (IWCS, 2006), pp. 439–443.
- [2-25] M. Takaya, S. Nagasawa, and Y. Murakami, “Single-mode multifiber connector using an injection molded MT type ferrule and a quick assembly technique”, *Opt. Engineering*, Vol. 39 No. 4, pp. 1025-1031, Apr. 2000.
- [2-26] Y. Fujimoto, “Application of Ethernet technologies to FTTH access systems,” *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E89-B,No.3 March, pp.661-667, 2006
- [2-27] Y. Koshikiya, N. Araki, H. Izumita, and F. Ito, “Cost-effective and low loss two-band video multiplexing add-in module for optical fiber distribution system in central office,” *Proc. of ECOC 2006* ,Vol.2 , pp.49–50.
- [2-28] ITU-T Supplement 39, February 2006.
- [2-29] 松本三千人, 灰原正, 勝山豊, 宮内充, 徳田正満, 谷藤忠敏, “光ファイバ融着接続部の長期信頼性の保障” ,*信学論(B)*,J67-B,5,pp.521-528, 1983.
- [2-30] M.Takaya, T. Katagiri, S.Nagasawa, Y.Murakami, S.Hatano,”Design and development of optical fiber joining techniques for efficient construction of aerial distribution cable systems”, *IEEE Transaction and advanced packaging*, Vol.23 No.1, pp36-41, 2000.
- [2-31] ITU-T Recommendation G.657, November 2009.
- [2-32] ITU-T Recommendation G.652, November 2009.
- [2-33] 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, Jul. 2010.

3章：

- [3-1] E.Sugita, R. Nagase, K. Kanayama, T. Shintaku, "SC-Type Single-Mode Optical Fiber Connector", J. Lightwave Technology, Vol. 7, No. 11, pp. 1689-1696, November 1989.
- [3-2] R. Nagase, E.Sugita, S. Iwano, K. Kanayama, Y. Ando, "Miniature Optical connector with Small Zirconia Ferrule", IEEE Transactions Photonics Technology Letters, Vol. 3, No. 11, pp. 1045-1047, November 1991.
- [3-3] M. Matsumoto, T. Haibara, and M. Miyauchi, "Design and characteristics of reinforcement method for fusion spliced optical fiber," J. Lightwave Technology, Vol. LT-3, No. 2, pp. 322-327, April 1985.
- [3-4] 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, no.8 pp.1232-1236, 1986.
- [3-5] M.Takaya, S.Nagasawa, Y.Mrakami, "Single-mode multifiber connector using an injection molded MT type ferrule and a quick assembly technique", Optical Engineering, vol. 39, No.4, Apr. pp. 1025-1031, 2000.
- [3-6] M.Takaya, T.Katagiri, S.Nagasawa, Y.Mrakami, and s.Hatano, "Design and development of optical fiber jointing techniques for efficient construction of aerial distribution cable systems", IEEE Transaction on Advanced Packaging Vol.23, no.1, pp.36-41, Feb 2000.
- [3-7] 竹内宏和, 瀬戸直, 山口義正, 中嶋長晴, "メカニカルスプライスの信頼性", 信学技報 EMD99-7, pp.13-18, 1999.
- [3-8] 小田泰男, 星野 靖彦, 田中浩, 青山浩, 鎌光男, "FTTH の即応化・経済化を実現する宅内光配線技術", 電子情報通信学会総合大会 B-10-9 2005.
- [3-9] T. Nakajima, T. Terakawa, M. Toyonaga, and M. Kama, "Development of optical connector to achieve large-scale optical network construction", 55th International Wire and Cable Symposium, Inc./Focus(IWCS, 2006),pp.439-443, 2006.
- [3-10] 荒木則幸, 古敷谷優介, 泉田史, 有居正仁, "外被把持型波長選択ターミネーション" B-10-6, 2005.
- [3-11] NTT 東日本 技術協力センタ, "現場組立コネクタにおけるトラブル事例と対策", "NTT 技術ジャーナル", (社)電気通信協会, vol.22 No.10, pp.48-50, 2010.
- [3-12] M. Kihara, R. Nagano, H.Izumita, M.Toyonaga, "Unusual fault detection and loss analysis in optical fiber connections with refractive index matching material", Optical Fiber Technology, 18, pp.167-175, 2012.
- [3-13] 木原満, 齊藤浩太郎, 深井千里, 倉嶋利雄, "光ファイバ傷の検査ツールの開発", 電

子情報通信学会ソサエティ大会, B-13-3, 2015.

[3-14] 小野瀬広志, 岩田和之, 矢島悠一, 木原満, 泉田史, “光ファイバ切断端面の違いによるメカニカルスプライス接続特性”, 信学会 総合大会 B-10-20, 2009.

[3-15] T. Tanifuji, and Y.Kato, “Realization of a low-loss splice for single mode fibers in the field using an automatic arc-fusion splicing machine,” Proc. OFC, MG3, p.14, 1983.

[3-16] V. Shah, L. Curtis, R. E. Spicer, and W. C. Young, "Accurate determination of the optical fiber endface angle by beam deflection", OFC 1995, WP13, 1995.

[3-17] IEC 61300 - 3- 26: 2002, Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 2-22: Tests - Change of temperature.

[3-18] IEC 61300-3-47:2014, Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 3-47: Examinations and measurements - End face geometry of PC/APC spherically polished ferrules using interferometry.

[3-19] P. Groot and L. Deck, “Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain”, Journal of Modern Optics, Vol. 42, No. 2, pp. 389-401,1995.

[3-20] D. Marcuse, “Loss analysis of single - mode fiber splices, “Bell Syst. Tech. J., vol.56, pp. 703-718, 1977.

[3-21] M. Kihara, S. Nagasawa, and T. Tanifuji, “Return loss characteristics of optical fiber connections,” IEEE/OSA J. Lightwave Technol. Vol.14, pp.1986-1991, Sep. 1996.

[3-22] 渡辺汎, 荒木則幸, 東裕司, “屋外環境下で高信頼性を有する PON 用光スプリッタモジュール “電子情報通信学会技術研究報告, OFT-2007-58, 2008.

[3-23] IEC 61300-2-22:2007, Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 2-22: Tests - Change of temperature.

[3-24] T. Haibara, M. Matsumoto, and M. Miyauchi, “Design and Development of an Automatic Cutting Tool for Optical Fibers,” IEEE/OSA JLT, vol 4, No. 9, pp. 1434–1439 , 1986.

[3-25] A. Yariv, Introduction to Optical Electronics. New York: Holt, Rinehart, and Winstone, 1985.

[3-26] M. Kihara, S. Tomita and T. Haibara, “Influence of Wavelength and Temperature Changes on Optical Performance of Fiber Joints with Small Gap,” IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 18, no. 20, pp. 2120–2122, 2006.

[3-27] M. Kihara, H. Watanabe, "Correction to "Investigation Into Optical Performance of Fiber Connections with Imperfect Physical Contact", IEEE/OSA J. Lightwave Technol. Vol.34, no. 15, pp.3592-3595, Aug. 2016.

[3-28] D. Gloge, P. W. Smith, D. L. Bisbee, and E. L. Chisnock, "Optical Fiber End Preparation for Low-loss Splices," The Bell Sys Tech. J., vol. 52, No. 9, pp. 1579-1588, 1973.

4章：

[4-1] M. Sakamoto, K. Araya, G. Nishio, M. Ando, M. Shinkai, T. Hisashima, K. Arai, H. Onda, H. Iwashita, M. Ogawa, O. Kurokawa, and K.Koda, "Ethernet Private Line System with World's Highest Quality (Bandwidth Gurantee, High Availability, and Low Delay)", NTT Technical Review, vol. 14, No.10, pp. 1-7, Oct.2016.

[4-2] I. Watanabe, H. Saito, H. Kobayashi and S.Takashima, "Subscriber optical fiber cable transfer splicing using mechanically transferable connectors", IEEE J. Lightwave Technol., 10(6), pp. 720-727, June, 1992.

[4-3] K. Tanaka, M. Zaima, M. Tachikura and M. Nakamura, "Downsized and enhanced optical fiber cable transfer splicing system," proceeding of 51st IWCS, pp.680-686, 2002.

[4-4] 納戸一貴, 田中郁昭, 片山和典, 真鍋哲也, 東裕司, "サービス無瞬断切替技術における光スイッチを用いた光路長調整技術の検討," 信学論 (B), vol.J96-B,no.3,pp.292-300, Mar. 2013.

[4-5] T. Manabe, M. Inoue, H. Hirota, T. Kawano, T. Uematsu, K. Okamoto, T. Kiyokura, Y. Koshikiya, and K. Katayama, "Temporary optical coupler and dynamic delay adjustment technologies for optical cable re-routing operation support systems," proceedings of the 64th IWCS Conference, pp. 709-714, 2015.

[4-6] 納戸一貴, 井上雅晶, 片山和典, 本田奈月, 真鍋哲也, "サービス無瞬断におけるリングバッファを用いた遅延量調整方式の検討," 電子情報通信学会論文誌(B), vol.J99-B No.5, pp. 381-388, May 2016.

[4-7] Y. Enomoto, H. Izumita, K. Mine, S. Uruno, and N. Tomita, "Design and performance of novel optical fiber distribution and management system with testing functions in central office," J. Lightw. Technol. Vol.29, No.12, pp.1818-1834, June 2011.

[4-8] 府川 隆, "光ファイバセンサと OTDR による広域監視システムの線路設計に関する検討", 光ファイバ応用技術研究会, pp.57-62, OFT2008-45,(2008).

[4-9] 古敷谷 優介, 荒木 則幸, 泉田 尚, 伊藤 文彦, "所内光配線マネジメントシステムにおける映像多重用 WDM スプリッタの設計," 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-10-13,

2006.

[4-10] 渡辺 汎, 榎本 圭高, 泉田 史, 有居 正仁, ” 所内用 2x2 WDM モジュールの開発”, 信学会ソサエティ学会, B-10-7, 2005.

[4-11] H. Shinohara, “Broadband access in Japan: rapidly growing FTTH market,” IEEE Commun. Mag. 43, pp. 72–78 (2005).

[4-12] H. Shinohara, “FTTH experiences in Japan [Invited]”, OSA J. of Optical Networking, Vol.6, No.6, pp. 616-623, June 2007.

[4-13] 葉玉寿弥, 吉本直人, 木村俊二, 可児淳一, “高速・低消費電力化を目指す次世代 PON 技術”, 電子情報学会通信誌, Vol. 95, No.1, pp. 62-67, 2012.

[4-14] 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, Feb. 2000.

[4-15] T. Nakajima, T. Terakawa, M. Toyonaga, and M. Kama, “Development of optical connector to achieve large-scale optical network construction,” Presented at the 55th International Wire and Cable Symposium, Inc./Focus (IWCS, 2006), pp. 439–443, 2006.

[4-16] 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, pp.1180-1190, no. 7, Jul. 2010.

[4-17] I. Sankawa, F. Yamamoto, Y. Okumura, Y. Ogura, “Cost and Quality Analysis of Passive Double-Star Optical-Access-network Facilities for Broadband Service Multiplexing,” J. Lightwave Technology, Vol.24, No.10, pp. 3625-3634, Oct, 2006.

[4-18] E. Wong, “Survival Architectures of Times and Wavelength division Multiplexed Networks: A Comparison of Reliability, Cost, and Energy Efficiency,” Mo.C3.3, ICTON 2015.

[4-19] J. Chen, L. Wosinska, C. M. Machuca, and M. Jaeger, “Cost vs. Reliability Performance Study of Fiber Access Network Architectures,” Commun. Mag., pp. 56–65, Feb. 2010.

[4-20] Y. Inoue, M. Ishii, Y. Hida, M. Yanagisawa, and E. Enomoto, “PLC Components Used in FTTH Access,” NTT Tech. Rev., vol 3. No.7, pp.22-26, 2005.

[4-21] IEEE Std 802.3ah-2004.

[4-22] Spirent Communications, “Spirent TestCenter EDM-1003B”,
http://www.spirent.com/Networks-and-Applications/LTE_Testing/~media/Datasheets/Broadband/PAB/SpirentTestCenter/STC_Series_1000-2000_GbE_Test_Modules_datasheet.ashx, referenced in February 2016.

[4-23] F.P. Boer, The Valuation of Technology, pp.237-273, John Wiley & Sons, 1999.

- [4-24] OPLINK 社の SFP の製品仕様。
<http://www.oplink.com/optoelectronics/detail/33.html>
- [4-25] 塩見 弘, “信頼性工学入門”, 改定三版, 平成 10 年, 丸善株式会社.
- [4-26] T. Manabe, M. Inoue, H. Hirota, T. Kawano, T. Uematsu, K. Okamoto, T. Kiyokura, Y. Koshikiya, and K. Katayama, “Temporary optical coupler and dynamic delay adjustment technologies for optical cable re-routing operation support systems,” proceedings of the 64th IWCS Conference, pp. 709-714, 2015.
- [4-27] H. Watanabe, K. Noto, Y. Kosikiya, T. Manabe, “Branching ratio of optical coupler for cable re-routing operation support system with no service interruption,” OECC/PS2016, WA2-11, 2016.
- [4-28] 渡辺汎, 納戸一貴, 古敷谷優介, 真鍋哲也, “無瞬断切替技術に最適な屋外設置光カプラの分岐比検討, 信学技報 OFT2016-14(2016-08), pp.15-20, 2016.
- [4-29] T. Abe, M. Hayashi, and S. Nojo, “A software tool to support the reliability design and evaluation of telecommunication networks,” IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Vol. 12, No. 2, pp. 345-354, February 1994.
- [4-30] Chinlon Lin, Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home, John Wiley & Sons, Ltd., pp.1-16, 2006.
- [4-31] J. Kawataka, K. Hogari, H. Hakozaki, M. Kanayama, H. Yamamoto, T. Aihara, and K. Sato, “Novel optical fiber cable for feeder and distribution sections in access network,” J. Lightwave Technology, Vol. 21, No. 3, pp. 789-796, March 2003.
- [4-32] M. Matsumoto, T. Haibara, and M. Miyauchi, “Design and characteristics of reinforcement method for fusion spliced optical fiber,” J. Lightwave Technology, Vol. LT-3, No. 2, pp. 322-327, April 1985.
- [4-33] K. Kanayama, Y. ANDO, S. Iwano, and R. Nagase, “Characteristics and static fatigue reliability of a zirconia alignment sleeve for optical connectors”, IEICE Trans. Electron., Vol. E77-C, No. 10, pp.1559-1566, October 1994.
- [4-34] B. Kantarci, H. T. Mouftah, “Availability and cost-constrained long-Reach Passive Optical network planning,” IEEE Trans. Reliability, vol.61 No.1 March, pp.113-124, 2012.
- [4-35] K. Suzuki, N. Arakai, A. Natsume, and Y. Kozawa, “Development of OTDR that Easily Locates a Fault in an Optical Drop Cable Below an Optical Splitter,” Presented at the 57th International Wire and Cable Symposium, Inc./Focus (IWCS, 2008), pp. 22-26, 2008.
- [4-36] M. Van der Wee, K. Casier, A. Dixit, B. Lannoo, S. Verbrugge, D. Colle, M. Pickavert, Techno-economic Evaluation of Open Access on FTTH Networks, J. OPT COMMUN NETW. VOL. 7, No. 5, MAY pp.433-444, 2015.

- [4-37] 船越裕介, 松川達哉, “装置数の増減に対応した故障率推定法”, 信学会論文誌 B, vol. J93-B, No.4 pp.681-692, 2010.
- [4-38] Itsuo Kuramoto, Yasushi Terao, Hiroyasu Honda, and Katsushi Nakayachi, “Increasing FTTH Reliability between Premise and Indoor Lines,” OWP1, OFC 2005.
- [4-39] 杉山 仁志, 島崎 克彦, “北陸地方の配電線雷故障の季節的および地域的特徴”, 電気学会論文誌 B, Vol.132, No.1, pp. 102-108, 2012.
- [4-40] 竹岡紫陽, 湊宣明, 小林冬馬, 遠藤一輝, 田口秀之, 安田大介, 米井佑輔 “極超音速ビジネスジェットの経済性評価モデル構築に関する研究”, 研究技術計画学会 年次学術大会講演要旨集, 1A07, pp. 28-33, 2014.
- [4-41] M. Waki, S. Uruno, H. Ohashi, T. Manabe, and Y. Azuma, “Optical Fiber Connection Navigation System Using Visible Light Communication in Central Office with Economic Evaluation”, IEICE TRANS. COMMUN. VOL.E95-B, No.5, pp.1633-1642, May 2012.
- [4-42] 日本銀行ホームページ.
<http://www.stat-search.boj.or.jp/index.html>
- [4-43] 総務省統計局ホームページ.
<http://www.stat.go.jp/data/cpi/index.htm>
- [4-44] 国土交通省 電気通信関係技術基準等.
<http://www.mlit.go.jp/tec/it/denki/gijyutukijyun.html>

研究業績一覧

1. 論文 (学位論文関係)

I 査読付学会誌等

- (1) Hiroshi Watanabe, Noriyuki Araki, Kyu Fujimoto, " High Reliability PON Optical Splitters for Optical Access Networks in OutSide Environments" , IEICE TRANS. ELECTRON., Vol.E93-C, No.7 July, pp.1180-1190, (2010).
- (2) Hiroshi Watanabe, Masanori Tanaka, Mitsuru Kihara, Masanobu Toyonaga, " Inspection Technique for Cleaved Optical Fiber Ends Based on Fabry-Perot Interferometer" , Journal of Lightwave Technology, Vol.30, No.8, April 15, pp.1244-1249, (2012).
- (3) Mitsuru Kihara, Yuichi Yajima, Hiroshi Watanabe, " Analyzing Deterioration in Optical Performance of fiber Connections with Refractive Index Matching Material Using Incorrectly Cleaved Fiber Ends" IEICE TRANS. COMMUN., VOL.E96-B, No.9 SEPTEMBER, pp.2206-2212, (2013).

II 査読付国際会議プロシーディング

- (1) Hiroshi Watanabe, Yuji Azuma, Yutaka Kozawa " New Optical Splitter Module with High Reliability for FTTH in Outside Environments" International Wire & Cable Symposium, 56th, pp.249-253, (2007).
- (2) Hiroshi Watanabe, Noriyuki Araki, Kyu Fujimoto, " New Small Optical Splitter Module for Optical Aerial Closure with Sufficient Reliability for OutSide Plant" , International Wire & Cable Symposium, 59th, pp.473-478, (2010).
- (3) Hiroshi Watanabe, Kazutaka Noto, Yusuke Koshikiya, Tetsuya Manabe, "Branching ratio of optical coupler for cable re-routing operation support system with no service interruption," OECC/PS2016, WA2-11, (2016).
- (4) Yuichi Yajima, Hiroshi Watanabe, Mitsuru Kihara, Masanobu Toyonaga, " Optical Performance of Field Assembly Connectors using Incorrectly Cleaved Fiber Ends" The 16th Opto-Electronics And Communications Conference, OECC 2011, pp.634-635, 2011.
- (5) Masanori Tanaka, Hiroshi Watanabe, Mitsuru Kihara, Masaaki Takaya, " New optical fiber connection method using solid refractive index matching material" , The 17th Opto-Electronics And Communications Conference, OECC 2012, pp. 194-195, 2012.
- (6) Mitsuru Kihara, Hiroshi Watanabe, Yuichi Yajima, Masanobu Toyonaga, " Inspection technique for cleaved optical fiber ends based on Fabry-Perot resonator" ,

21st International Conference on Optical Fiber Sensors, Proc. Of SPIE Vol. 7753, pp.775314-1 - 775314-4, 2011.

2. 論文 (その他)

- (1) Mitsuru Kihara, Morikazu Uchino, Masayuki Omachi, Hiroshi Watanabe, “Investigation into Optical Performance of Fiber Connections With Imperfect Physical Contact” , Journal of Lightwave Technology, Vol.31, No.6, March15, pp.967-974, (2013).
- (2) Nazuki Honda, Hiroshi Watanabe, Noriyuki Araki, and Yuji Azuma, “Facility Database-Free Maintenance System for Optical Fibre Network Combined with PON OAM Function,” ECOC2010, Mo.2.B.6, (2010).
- (3) Kazutaka Noto, Hiroshi Watanabe, Yusuke Koshikiya, Tetsuya Manabe, “ Effect of Chromatic Dispersion on Cable Rerouting Operation Support System with No Service Interruption,” OECC/PS2016, TuA4-5, (2016).
- (4) M. Kihara, H. Watanabe, ”Correction to ”Investigation Into Optical Performance of Fiber Connections with Imperfect Physical Contact”, IEEE/OSA J. Lightwave Technol. Vol.34, no. 15, pp.3592-3595, Aug. 2016.

3. 講演 (学位論文関係)

- (1) 渡辺 汎, 荒木 則幸, 東 裕司,
「屋外環境下で高信頼性を有する PON 用光スプリッタモジュール」
電子情報通信学会 信学技報 OFT2007-58, pp.45-50, 2008.
- (2) 渡辺 汎, 荒木 則幸, 東 裕司,
「故障率に基づき CAPEX と OPEX の最少化を実現する光アクセスネットワークの光機能部品選択方法」
電子情報通信学会 信学技報 OFT2008-78, pp.35-38, 2009.
- (3) 渡辺 汎, 田中 正徳, 木原 満, 豊永 雅信,
「ファブリ・ペロー干渉計の原理を利用した光ファイバ端面の検査技術」
電子情報通信学会 信学技報 OFT2011-16, pp.1-6, 2011.
- (4) 渡辺 汎, 阿部 篤史, 尾崎 道雄, 高谷 雅昭,
「突合せ点に隙間を有する光ファイバ接続部の光学特性劣化に関する検討」
電子情報通信学会 信学技報 OFT2014-51, pp.33-38, 2015.
- (5) 渡辺 汎, 納戸 一貴, 古敷谷 優介, 真鍋 哲也,
「無瞬断切替技術に最適な屋外設置光カプラの分岐比検討」
電子情報通信学会 信学技報 OFT2016-14, pp.15-20, 2016.

- (6) 矢島 悠一, 渡辺 汎, 木原 満, 豊永 雅信,
「カット不良端面が使用された光ファイバ接続部の性能劣化の分析」
電子情報通信学会 信学技報 OFT2010-62, pp.75-79, 2011.
- (7) 田中 正徳, 渡辺 汎, 木原 満, 高谷 雅昭,
「固形屈折率整合材を用いた新しい光ファイバ接続方法の提案」
電子情報通信学会 信学技報 OFT2012-26, pp.39-44, 2012.
- (8) 渡辺 汎, 荒木 則幸, 東 裕司, 小澤 裕,
「架空用光スプリッタモジュール」
電子情報通信学会 通信ソサエティ大会 p.204, 2007.
- (9) 渡辺 汎, 荒木 則幸, 東 裕司,
「高信頼性を有する架空用光スプリッタモジュール」
電子情報通信学会 総合大会 p.295, 2008.
- (10) 荒木 則幸, 渡辺 汎, 藤本 久,
「小型所外用光スプリッタモジュール」
電子情報通信学会 通信ソサエティ大会 p.228, 2011.
- (11) 田中 正徳, 渡辺 汎, 木原 満, 矢島 悠一, 高谷 雅昭,
「新しい屈折率整合材を用いた光ファイバ接続機構の提案」
電子情報通信学会 総合大会 p.324, 2012.
- (12) 田中 正徳, 渡辺 汎, 榎本 圭高, 高谷 雅昭,
「屈折率整合材を用いた光ファイバ接続の温度サイクル特性」
電子情報通信学会 総合大会 p.332, 2013.

謝辞

本研究を遂行し、論文をまとめるにあたって、懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました北海道大学大学院 情報科学研究科 メディアネットワーク専攻 真鍋哲也 客員教授（日本電信電話株式会社 アクセスサービスシステム研究所 媒体設備保守グループ グループリーダー）、には謹んで感謝の意を表します。また、貴重なご助言や多大なるご指導頂きました、山本強 教授、大鐘武雄 教授、齊藤晋聖 教授、には誠に感謝申し上げます。

本論文の2章、及び4章の内容は、日本電信電話株式会社 アクセスサービスシステム研究所にて行われたものであります。貴重な機会を与えて頂いた、天野博史 所長、山本文彦 企画部長、白木和之 プロジェクトマネージャ、をはじめ、山内修 元プロジェクトマネージャ（現：住友電工株式会社）、有居正仁 元プロジェクトマネージャ（現：株式会社 協和エクシオ）、清水正利 元プロジェクトマネージャ（現：NTTアドバンステクノロジー株式会社）、東裕司 元プロジェクトマネージャ（現：NTTアドバンステクノロジー株式会社）、小澤裕 元DP長（現：株式会社NTT東日本-南関東 担当部長）、藤本久 元DP長（現：シーキューブ株式会社）には、誠に感謝申し上げます。本研究の遂行にあたって、懇切丁寧に御指導、時に御激励頂きました、泉田史 主幹研究員、荒木則幸 主任研究員、古敷谷優介 主任研究員には、大変感謝申し上げます。納戸一貴 研究員には、共同研究者として、一緒に研究内容を議論し、実験を行って頂きました。改めて御礼申し上げます。日本電信電話株式会社 フォトニック研究所に在籍されていた、井上靖之 元主席研究員（現：NTTエレクトロニクス株式会社）、石井元速 元主任研究員（現：NTTエレクトロニクス株式会社）には、PLC型光スプリッタの特性評価に関して、大変多くのご助言を頂きました。誠に感謝申し上げます。

本論文の3章に関する内容は、東日本電信電話株式会社 サービス運営部 技術協力センターで行われたものであります。貴重な機会を与えて頂いた、鎌光男 元所長（現：NTTテレコム株式会社）、半田隆夫 元所長（現：NTTアドバンステクノロジー株式会社）、松本守彦 所長、豊永雅信 元グループリーダー（現：日本コムシス株式会社）、高谷雅昭 元グループリーダー（現：株式会社NTT東日本-南関東 担当部長）には、誠に感謝申し上げます。本テーマの遂行にあたって、懇切丁寧に御指導頂き、また時に御激励頂きました、木原満 元担当課長（現：アクセスサービス研究所 主任研究員）、榎本圭高 元担当課長（現：アクセスサービス研究所 主任研究員）、尾崎道雄 担当課長には、改めまして大変感謝申し上げます。阿部篤史 様（現：株式会社NTT東日本-北海道 主査）、矢島悠一 様（現：株式会社NTT東日本-南関東 主査）、田中正徳 様（現：株式会社NTT東日本-北海道 主査）には、共同研究者として、多くの時間を費やして一緒に議論し、実験を行って頂きました。改めて御礼申し上げます。また高谷雅昭様、木原満様、榎本圭高様には、アクセスサービスシステム研究所でもご指導頂きました。重ねて御礼申し上げます。

最後に、筆者が学部・修士課程在学時に本論文の内容へと繋がる、量子エレクトロニクス分野の研究をご指導頂きました、東京大学 清水富士夫 名誉教授、五神真 総長には、謹んで御礼を申し上げますとともに、本論文をまとめるにあたって、暖かくサポートし、精神的に支えてくれた、妻 恵子と長男 理仁、二男 敬仁、長女 珠礼には、この場を借りて感謝の意を表します。