



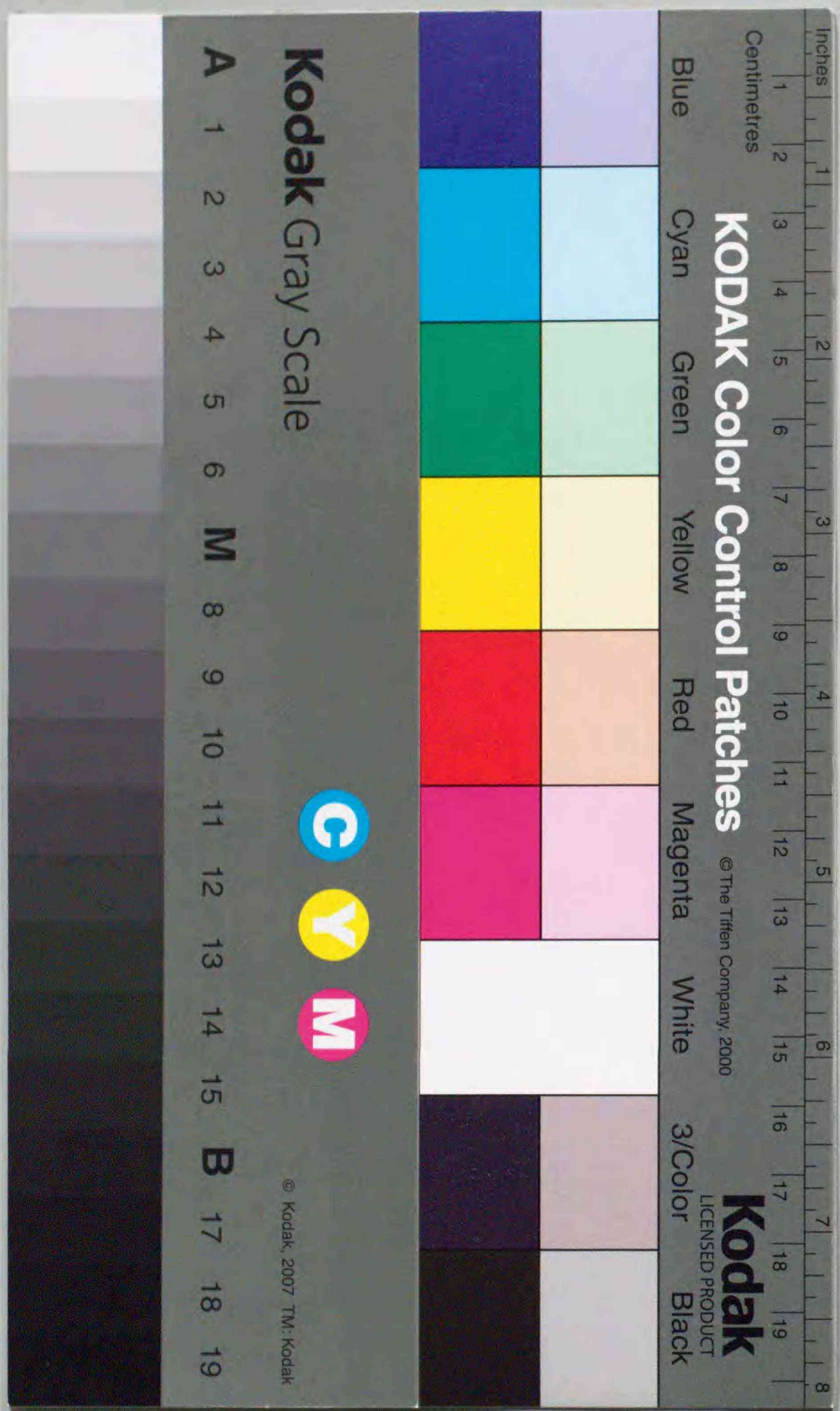
HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	加入者光線路構成技術の研究
Author(s)	川瀬, 正明
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第3996号
Issue Date	1991-12-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3058643
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49720
Type	doctoral thesis
File Information	000000245513.pdf



加入者光線路構成技術の研究

川瀬正明



①

加入者光線路構成技術の研究

川 瀬 正 明

目 次

第1章 序論	1
1.1 まえがき	1
1.2 加入者光線路の研究経緯	1
1.3 研究の目的と本論文の構成	4
第2章 加入者光線路の構成と設計	9
2.1 まえがき	9
2.2 加入者光線路の特徴と要求条件	9
2.2.1 線路構成法	9
2.2.2 光ファイバケーブル	11
2.2.3 光ファイバ接続	11
2.2.4 光ファイバケーブル接続クロージャ/ キャビネット類	11
2.2.5 線路保守	13
2.3 加入者光線路構成法	13
2.3.1 光ファイバの配線形態	13
2.3.2 ループ配線の特徴	13
2.3.3 ケーブル後分岐工法	15
2.3.4 融着接続とコネクタの適用方法	15
2.4 加入者光線路設計	18
2.4.1 損失設計	18
2.4.2 信頼性の考え方	19
2.5 加入者光ファイバケーブルの基本構造と設計条件	20
2.5.1 加入者光ファイバケーブルの基本構造	20
2.5.2 加入者光ファイバケーブルの心数系列	23
2.5.3 加入者光ファイバケーブルの設計条件	25
2.6 光ファイバ接続技術	25
2.6.1 コネクタ接続技術	25

2.6.2 融着接続技術	2 7
2.7 まとめ	2 8
第3章 簡易構造光ファイバケーブルの設計	3 0
3.1 まえがき	3 0
3.2 ケーブル構造	3 0
3.3 ケーブル構造設計	3 2
3.3.1 光ファイバ心線への余長付与	3 2
3.3.2 光ファイバ余長による損失増	3 8
3.3.3 低温時の損失増	4 0
3.3.4 抗張力体の設計	4 2
3.3.5 幾何学的制限	4 3
3.3.6 設計例	4 3
3.4 試作検討結果	4 5
3.4.1 試作ケーブル構造	4 5
3.4.2 試作ケーブルの特性	4 5
3.5 まとめ	5 1
第4章 シングルモード光ファイバ加入者線路の構成	5 3
4.1 まえがき	5 3
4.2 設計条件	5 3
4.3 SM型光ファイバの基本特性	5 4
4.3.1 伝送特性	5 4
4.3.2 SM型光ファイバの曲げ特性	5 6
4.3.3 SM型光ファイバの接続特性	5 6
4.4 SM型光ファイバのハンドリング特性	5 7
4.4.1 光ファイバの収容状況	5 8
4.4.2 伝送損失変動の原因	5 8
4.5 光ファイバパラメータの設計	6 2
4.5.1 SM型光ファイバ線路損失と分散	6 2
4.5.2 光ファイバの曲げ特性	6 2
4.5.3 光ファイバパラメータの設計領域	6 3

4.6 高密度SM型光ファイバケーブルの設計	6 5
4.6.1 光ファイバテープの構造	6 5
4.6.2 高密度ケーブル構造設計	6 5
4.6.3 防水ケーブル構造設計	7 1
4.6.4 試作SM型防水光ファイバケーブルの特性	7 1
4.7 SM型加入者光線路の現場建設線路の特性	7 4
4.7.1 現場建設線路の概要	7 4
4.7.2 ケーブル損失	7 4
4.7.3 接続損失	7 4
4.7.4 線路損失	7 4
4.7.5 その他の区間の線路損失調査結果	7 7
4.8 まとめ	8 0
第5章 分散シフトシングルモード光ファイバの検討	8 1
5.1 まえがき	8 1
5.2 光ファイバ線路損失	8 1
5.2.1 線路構成と損失要因	8 2
5.2.2 光ファイバ損失	8 3
5.2.3 接続損失	8 4
5.2.4 線路損失	8 4
5.3 光ファイバパラメータの許容範囲	8 5
5.3.1 1.55 μm 帯で使用する場合	8 5
5.3.2 1.3 μm 帯で使用する場合	9 0
5.3.3 波長多重の場合	9 0
5.4 光ファイバの伝送帯域	9 3
5.5 まとめ	9 4
第6章 非ガス保守加入者光線路の構成	9 7
6.1 まえがき	9 7
6.2 加入者光線路の基本構成	9 8
6.2.1 線路構成	9 8

6.2.2 信頼性設計	9 8
6.3 浸水による光ファイバ特性の変化	1 0 0
6.3.1 光ファイバの破断確率	1 0 2
6.3.2 光ファイバおよび接続部の損失変化	1 0 2
6.4 浸水検知センサの設計	1 0 6
6.4.1 基本構造	1 0 6
6.4.2 損失発生量に対する設計	1 0 7
6.4.3 センサ部の信頼性設計	1 0 7
6.4.4 試作浸水センサの特性	1 0 9
6.5 非ガス光線路の構成	1 0 9
6.5.1 線路構成	1 0 9
6.5.2 防水ケーブル	1 1 1
6.5.3 浸水センサの設置法	1 1 1
6.5.4 非ガス光線路の信頼性	1 1 1
6.6 まとめ	1 1 3
第7章 結論	1 1 4
謝辞	1 1 6
参考文献	1 1 8

第1章 序論

1.1 まえがき

広帯域 I S D N に代表される情報化社会の到来にむけて、情報通信のインフラストラクチャである伝送媒体は従来とは桁違いの能力が要求される。近代の有線通信の発展の経緯は、金属導体を媒体とし、裸線から絶縁被覆ペア線そして同軸ケーブルと、低損失化と広帯域化の歴史であった。さらに低損失、広帯域化するため、より大口径のケーブルやミリ波導波管の研究も行われていたが、建設作業性や製造性の面から限界は見えていた。

一方、光通信は1966年にK. C. Kao がそれまで損失が大きくてイメージスコープが主用途と考えられていた光ファイバで低損失化の可能性があることを理論的に示し⁽¹⁻¹⁾、1970年にはF. P. Kapron等が20dB/km の光ファイバを発表⁽¹⁻²⁾ するにおよんで光ファイバを媒体とした光通信の研究が本格化した。

光ファイバの特徴は低損失、広帯域といった基本的な伝送特性の他、細径、軽量、無誘導といった長所がある。一方、実用的な伝送路を構成するためにはその接続、保護技術が従来の金属導体に比べて高度な技術が必要になる。このため、各種構造の心線、ケーブル構造設計や、融着接続機、コネクタ技術の研究開発がなされてきた。

本論文は光ファイバの加入者系への導入に関する光ファイバケーブル、線路構成を中心とした研究結果をまとめたものであり、本章では加入者光ファイバ線路に関する研究経緯と本研究の位置付け、論文の構成について述べる。

1.2 加入者光線路の研究経緯

光ファイバはその優れた特徴から極めて多方面での用途がある。また光ファイバの種類も材料面からガラスファイバとプラスチックファイバに、伝送モードの面からシングルモードファイバとマルチモードファイバに分類され、さらにファイバの屈折率分布形状等、多種類の光ファイバが開発・実用化されてきている。光ファイバの特徴とその適用の整理を図 1-1に、光ファイバの種類と主な用途を表1-1 に示す。

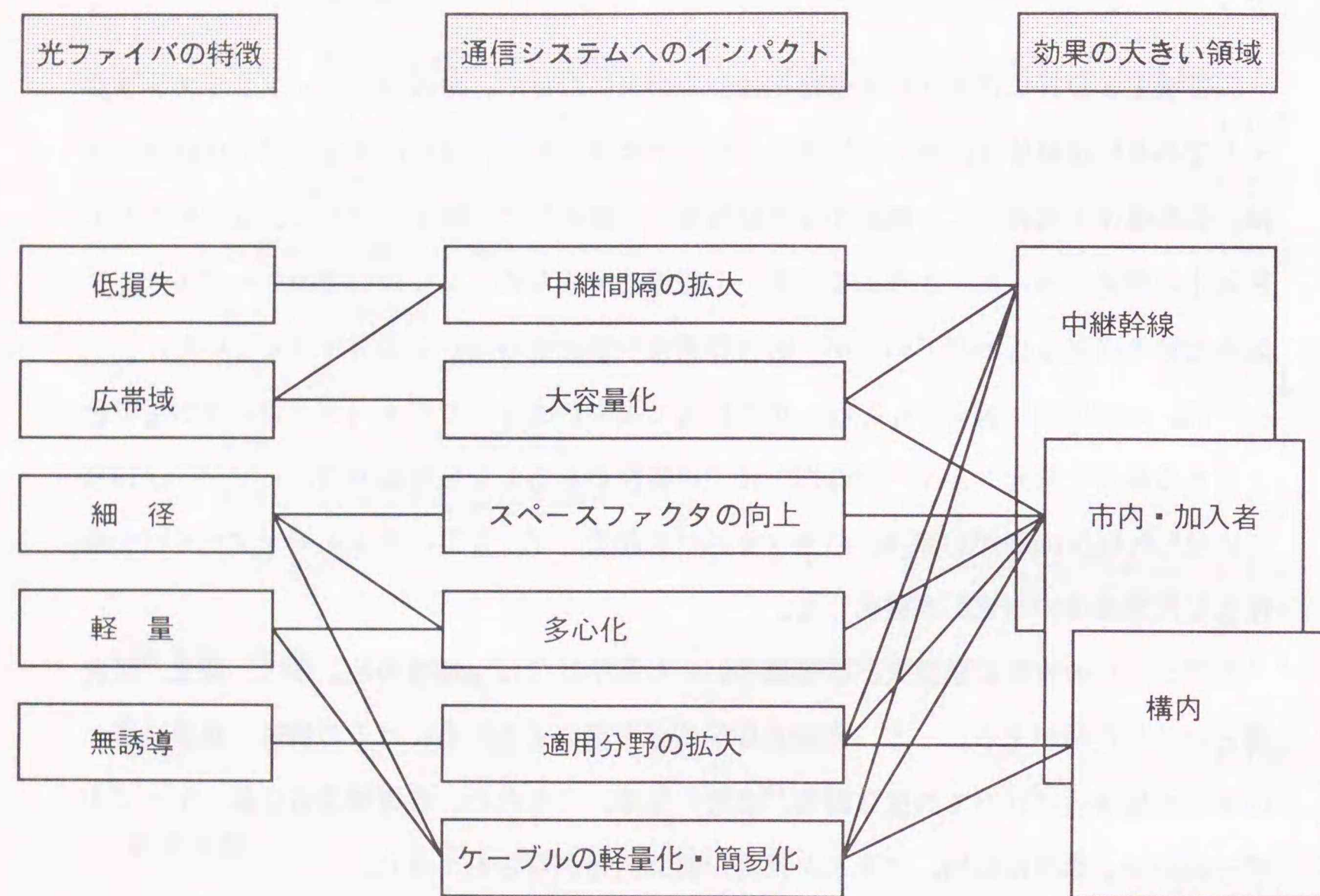


図1-1 光ファイバの特徴と適用分野

表1-1 光ファイバの種類と主な用途

材料による分類	材料組成	伝搬モードによる分類	特 徴				主な用途
			損失	帯域	強度	接続性	
石英系光ファイバ	SiO ₂ +ドーパント (Ge, F 等)	シングルモード	◎	◎	◎	△	公衆通信および構内システム等に広く使われる
		マルチモード	◎	○	◎	○	
プラスチッククラッド光ファイバ	コア: SiO ₂ クラッド: シリコン樹脂	マルチモード	○	△	○	○	比較的短距離の通信に使われる
多成分ガラス光ファイバ	ソーダ石灰ガラス, ほうけい酸ガラス等	マルチモード	△	△	△	○	同上
プラスチック光ファイバ	各種プラスチック	マルチモード	×	×	△	◎	曲げやすく, 接続容易なため, LAN, ハーネスに使われる

光ファイバは公衆通信の用途としては先ず線路構成がシンプルで建設後の変更が少ない中継幹線系から導入が開始された。中継幹線系では当初同軸ケーブルとの置き換えの観点から50心以下のケーブルが開発され⁽¹⁻³⁾、ケーブルへのファイバ収納密度や接続作業性等はあまり問題にならなかった。このため光ファイバを保護し、取扱の基本単位である心線は1本単位で保護被覆されたもので、接続も1本毎にいかに低損失に接続するかが開発の主題であった。

一方加入者系では光ファイバが直接ユーザに配線されるため、多心高密度のケーブルが必要なことや配線替え等建設後のアクセスが多いこと、経済性が大きなウエイトを占めること等、中継幹線系とは異なった要求条件を解決する必要があり、心線構造も複数の光ファイバを一括して保護被覆したテープ型光ファイバが開発され、近年では中継幹線系も含めてテープ型光ファイバはNTTの光ファイバケーブルの基本構造となっている⁽¹⁻⁴⁾。

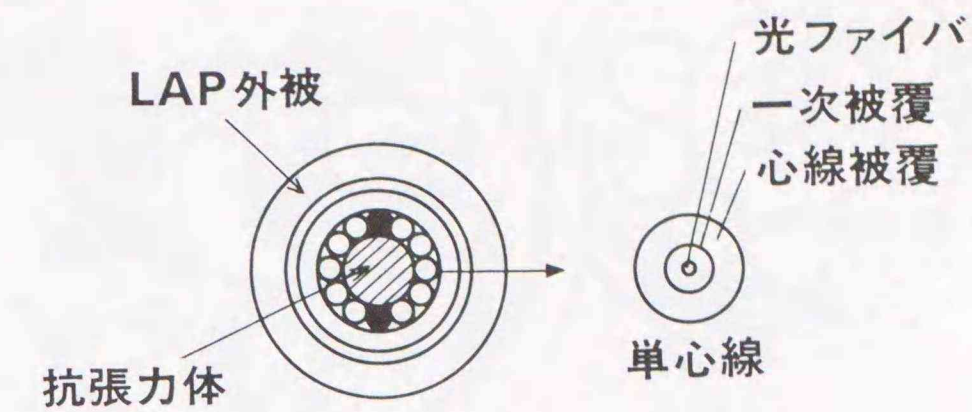
加入者系への光ファイバの導入は1983年に映像伝送等の専用線として開始され、当初は少心の中継幹線用ケーブルを基本に開発が行われた。加入者系の現場環境における最初の実験は1980年に横須賀電気通信研究所と横須賀統制電話中継所の間で行われた。対向す

る2点間を結ぶ専用線の形態の実験だったが、架空に開放型の接続キャビネットを設け、屋外線を分岐接続する等、加入者特有の線路形態で実験が行われた⁽¹⁻⁵⁾。その後、1983年に行われたINSモデルシステムの実験では市役所、集合住宅(社宅)、一戸建て住宅とあらゆる形態の加入者宅への引込みが行われ、加入者一戸一戸にファイバが引き込まれる、いわゆるF T T H (Fiber To The Home)の先駆けの実験となった⁽¹⁻⁶⁾。加入者光線路システムを構成するための基本要素技術であるケーブルと接続技術も、モデルシステムにおいて初めてテープ型光ファイバを用いた200心の高密度ケーブルと5心テープを一括接続する融着およびコネクタ接続技術が適用された。1985年にはさらに多心化と加入者への簡易引き落としを目的とした配線ケーブル等の適用実験をねらいとする複合光加入者システムの実験が東京都内と勝田市において行われ、スロットにテープファイバを収容した600心ケーブルまでの技術を確立した⁽¹⁻⁷⁾。これらの実験では接続の容易さからモードフィールド径の大きいマルチモードグレーデッド型光ファイバ(以下G I型光ファイバ)が用いられていたが、その後接続技術や製造技術の進展に伴い、究極的な経済性が見込まれ、かつ中継系との統一も図れるシングルモード型光ファイバ(以下S M型光ファイバ)の適用にむけた研究が行われ、1988年からS M型光ファイバによる加入者光線路システムの構築が開始された⁽¹⁻⁸⁾。横須賀地区における実験、モデルシステムの実験、複合光加入者システムの実験で用いられた代表的なケーブル構造を図1-2、1-3、1-4に示す。

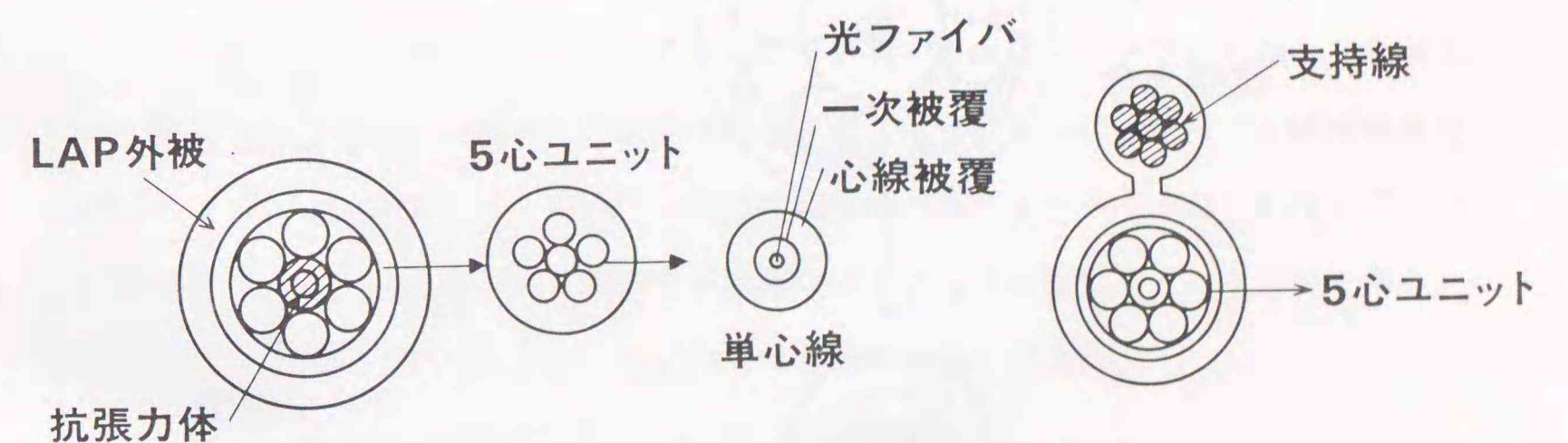
一方、線路の保守は金属導体の地下ケーブルでは湿気や浸水が直ちに絶縁劣化等の特性低下に結びつくため、ケーブル内に乾燥空気を充填し、常時そのガス圧を監視するガス保守方式がとられてきた。光ファイバは特性上、絶縁劣化等の直ちに劣化する要因が無いことから、開発当初から非ガス保守方式の可能性が議論されてきたが、浸水の影響の明確化が不十分であったため、金属導体ケーブルと同じガス保守方式が適用されてきた。その後、浸水による機械的強度の劣化特性や損失特性への影響が解明され、浸水検知システムを始めとする試験システム高度化の研究とあわせてガス保守と同等の信頼性を有する非ガス保守が可能となり、1989年から非ガス保守による光加入者線路の構築が開始されている⁽¹⁻⁹⁾。

1.3 研究の目的と本論文の構成

前節で述べた様にN T Tでは1980年から加入者系の実験を開始し、研究を本格化してい



(a) 単心線層撚形10心ケーブル

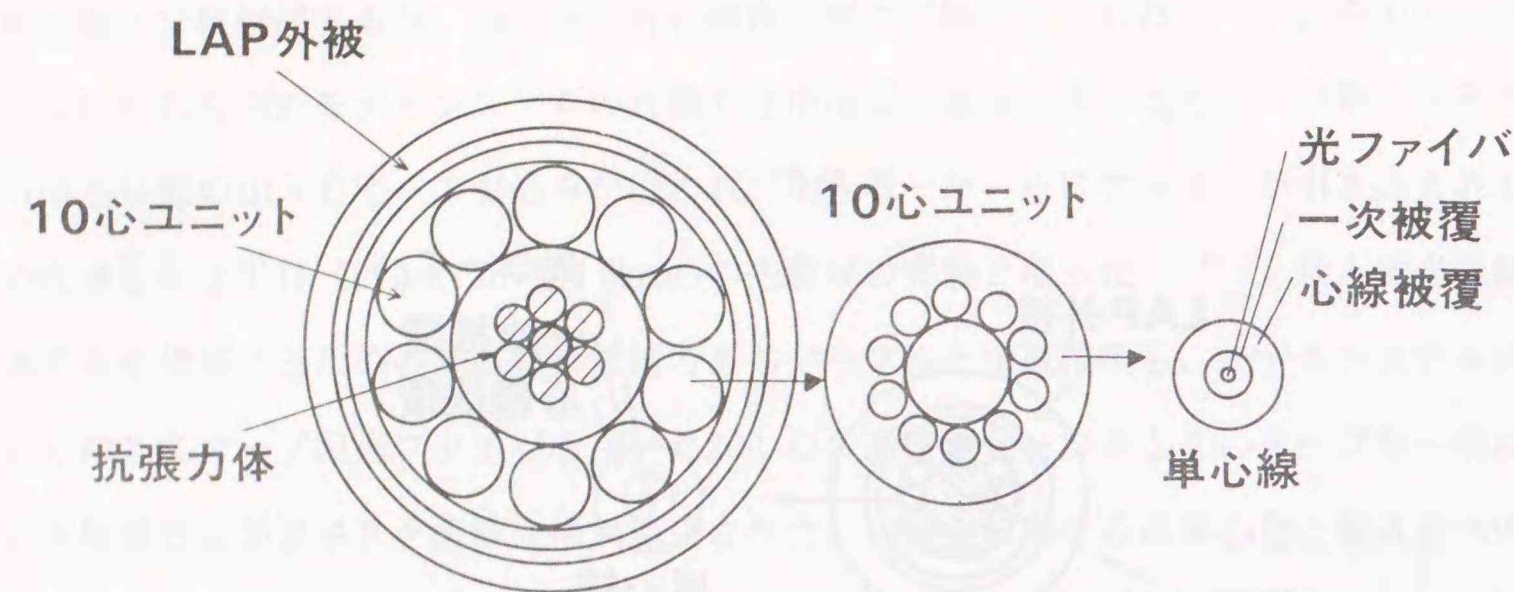


丸形ケーブル

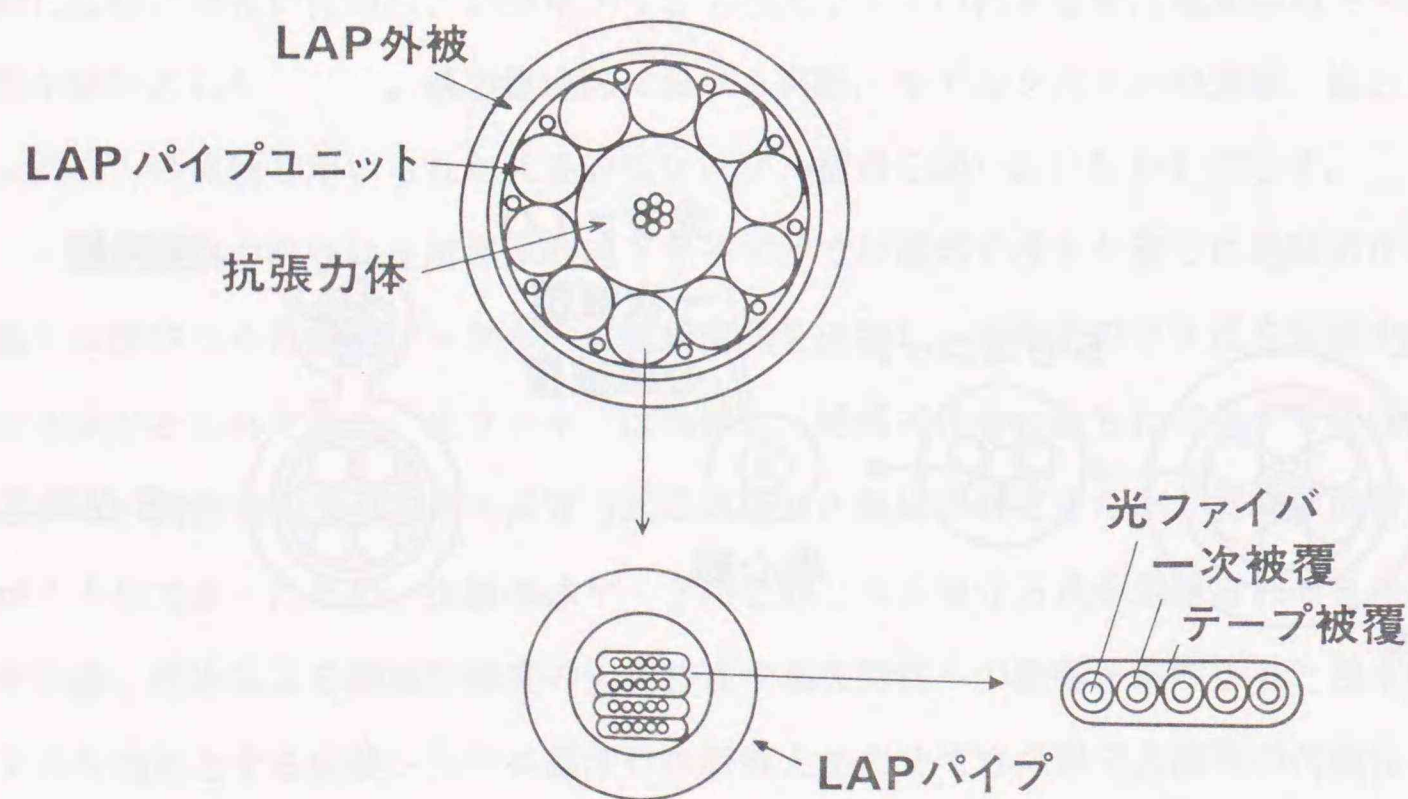
S S型(自己支持型)ケーブル

(b) 単心線ユニット集合形30心ケーブル

図 1-2 横須賀地区実験ケーブル



(a) 単心線10心ユニット集合形100心ケーブル



(a) LAPパイプユニット形高密度200心ケーブル

図 1-3 INSモデル実験ケーブル

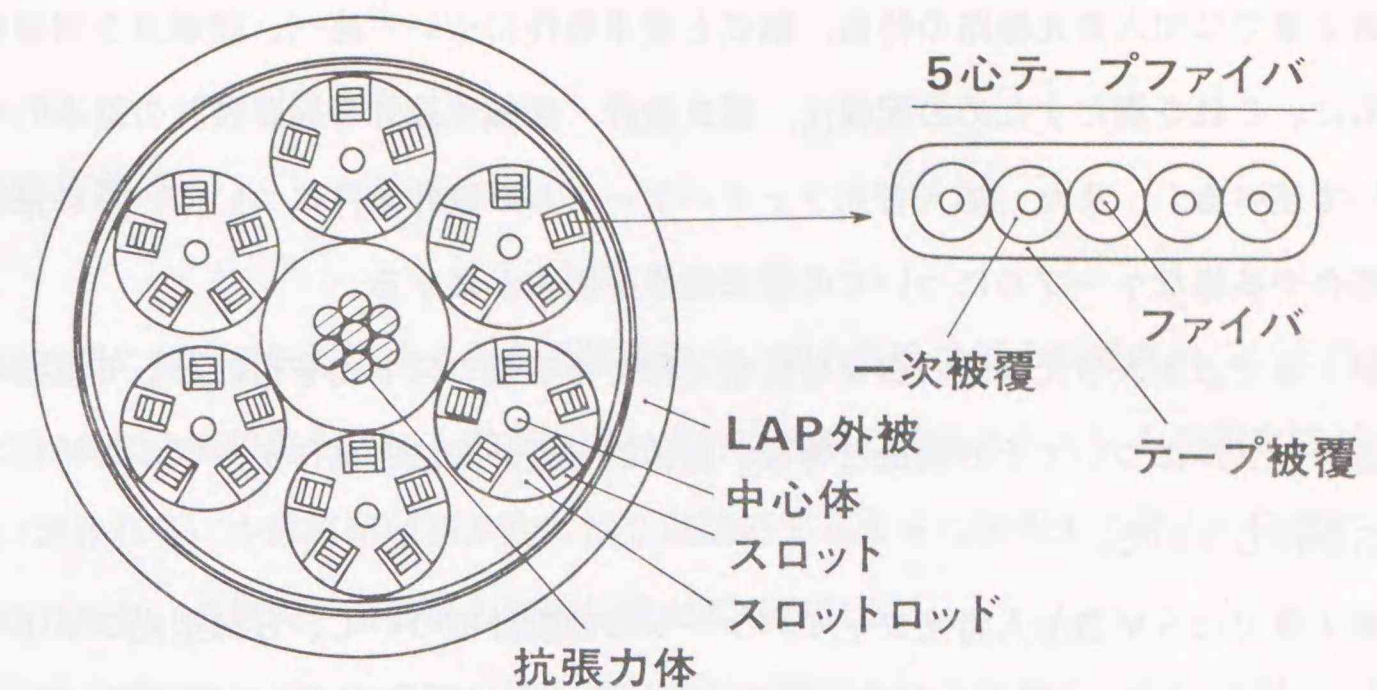


図 1-4 複合システム実験ケーブル

る。著者は1981年から1989年まで加入者光線路の研究・実用化グループに在籍し、本論文はこの間のケーブル設計、加入者光線路構成、非ガス保守技術に関して行った研究成果をまとめたものであり、作業性、経済性、信頼性に優れ、きたるべきISDN時代のインフラストラクチャとしての加入者光線路構成技術を確立することを目的としたものである。本論文は以下の7章より構成され、主な内容は以下のとおりである。

第1章 序論

第2章 加入者光線路の構成と設計

第3章 簡易構造光ファイバケーブルの設計

第4章 シングルモード光ファイバ加入者線路の構成

第5章 分散シフトシングルモード光ファイバの検討

第6章 非ガス保守加入者光線路の構成

第7章 結論

第1章では光ファイバの研究の歴史的な経緯とNTTにおける加入者光線路の研究経緯を述べ、研究の背景と位置付けを明確にし、本研究の目的と論文の構成を述べる。

第2章では加入者光線路の特徴、構成と要求条件について述べ、問題点を明確化するとともに、これを満たすための配線法、損失設計、信頼性設計等線路設計の基本的な手法について述べる。また、加入者光ファイバケーブルの設計条件について、特に接続技術との整合や多様なケーブルについての要求条件を明らかにする。

第3章では加入者光線路の重要な要求条件である低コスト化を目的として提案した簡易構造ケーブルについてその構造と特徴、具体的な設計方法と試作ケーブルの特性について明らかにしている。

第4章ではSM型加入者光ファイバケーブルの設計について、SM型光ファイバの基本特性と加入者への適用に関する問題点を明確にし、それを解決するための光ファイバパラメータの設計法とスロット型光ファイバケーブルによる高密度ケーブルの設計法を明らかにする。また、現場環境における実験的検討結果も示す。

第5章では近年、大容量長距離中継系に導入が開始されている分散シフトファイバについて、分散シフトファイバによる中継、加入を統一した光線路構成の可能性を探るため、分散シフトファイバの加入者系への適用可能性について検討し、接続損失に対する要求条件とパラメータの許容範囲について定量的に明らかにしている。

第6章では光加入者線路の保守方式について、光ファイバの劣化要因と信頼性について検討し、非ガス化のための課題を明確にするとともに、非ガス化を実現するための浸水検知技術とその適用による非ガス保守線路構成法を明らかにする。

第7章では本論文全体の結論とまとめを述べる。

第2章 加入者光線路の構成と設計

2.1 まえがき

公衆通信網における伝送媒体である通信線路は、加入者交換機の設置されている局から加入者までの加入者線路と、加入者交換機や市外交換機の設置されている局間を結ぶ中継線路に分類される。中継線路は基本的には2点間のまとまった情報を効率よく伝達することが目的であり、低損失、広帯域の極限技術が要求される。

一方、加入者線路は局から多数の加入者へ網状に展開される線路をいかに効率よく構成するかが課題であり、要求条件も中継線路とは大きく異なる。

加入者光線路を構成する主要素は光ファイバケーブルと接続部であり、網状に線路網を展開するためには極めて多様な、かつ様々な使用環境に適した構成要素が必要になる。

本章では、加入者光線路の特徴、要求条件、構成法と設計法、および加入者光ファイバケーブル・接続部の基本構造と設計条件について述べる。

2.2 加入者光線路の特徴と要求条件

加入者光線路の特徴は局から加入者宅まで個別の配線を要求されることであり、各種のケーブルをはじめとして極めて多様な構成要素技術が必要となる。また加入者の移動に応じて建設や接続替え等の工事が発生するため、線路を建設した後も線路に容易にアクセスできる構成にしなければならない。局から加入者までのガス保守の場合の線路構成モデルを図2-1に示す。また、要求される機能をピックアップしたモデルを図2-2に示す。このような線路構成を実現するための各要素技術に対する要求条件を以下に述べる。

2.2.1 線路構成法

(1) 加入者の変動に迅速に対応できるように融通性のあること。このためには光ファイバ心数等設備に冗長性のあることや、どこの地点でも容易にアクセスできる構成および部品、施工技術が要求される。

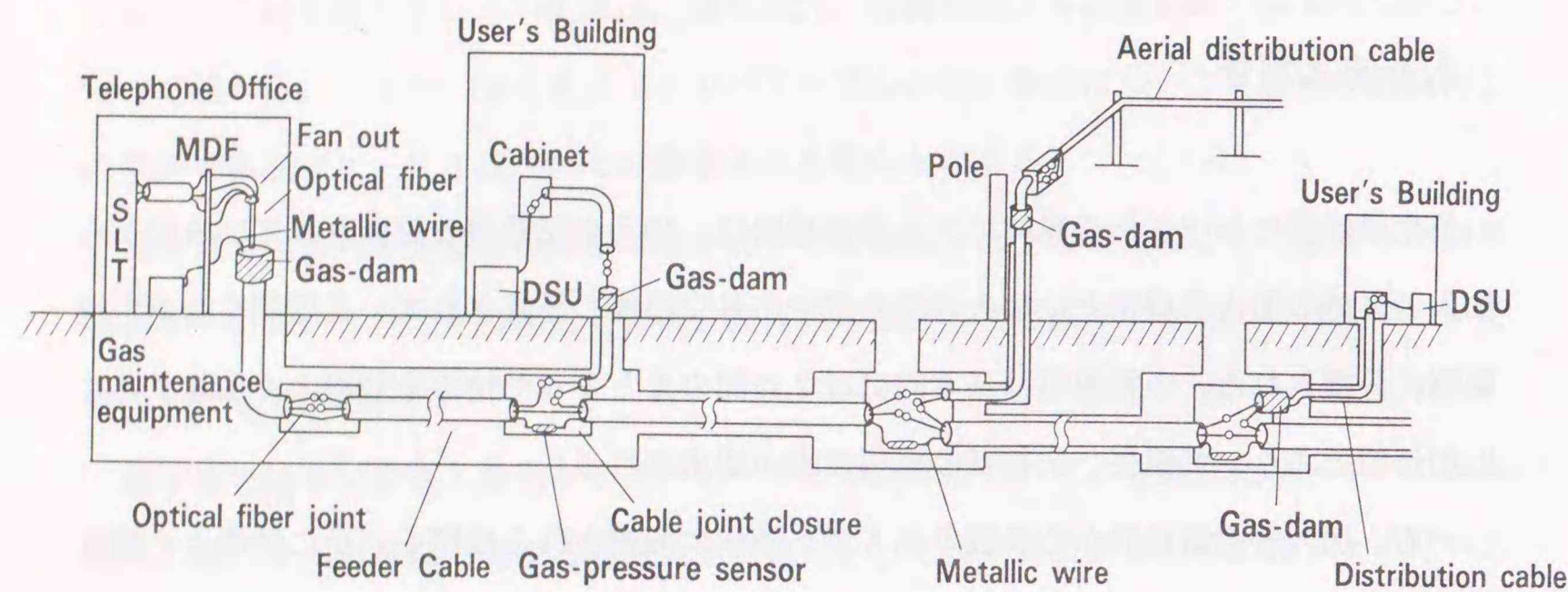


図2-1 光加入者線路構成モデル（ガス保守）

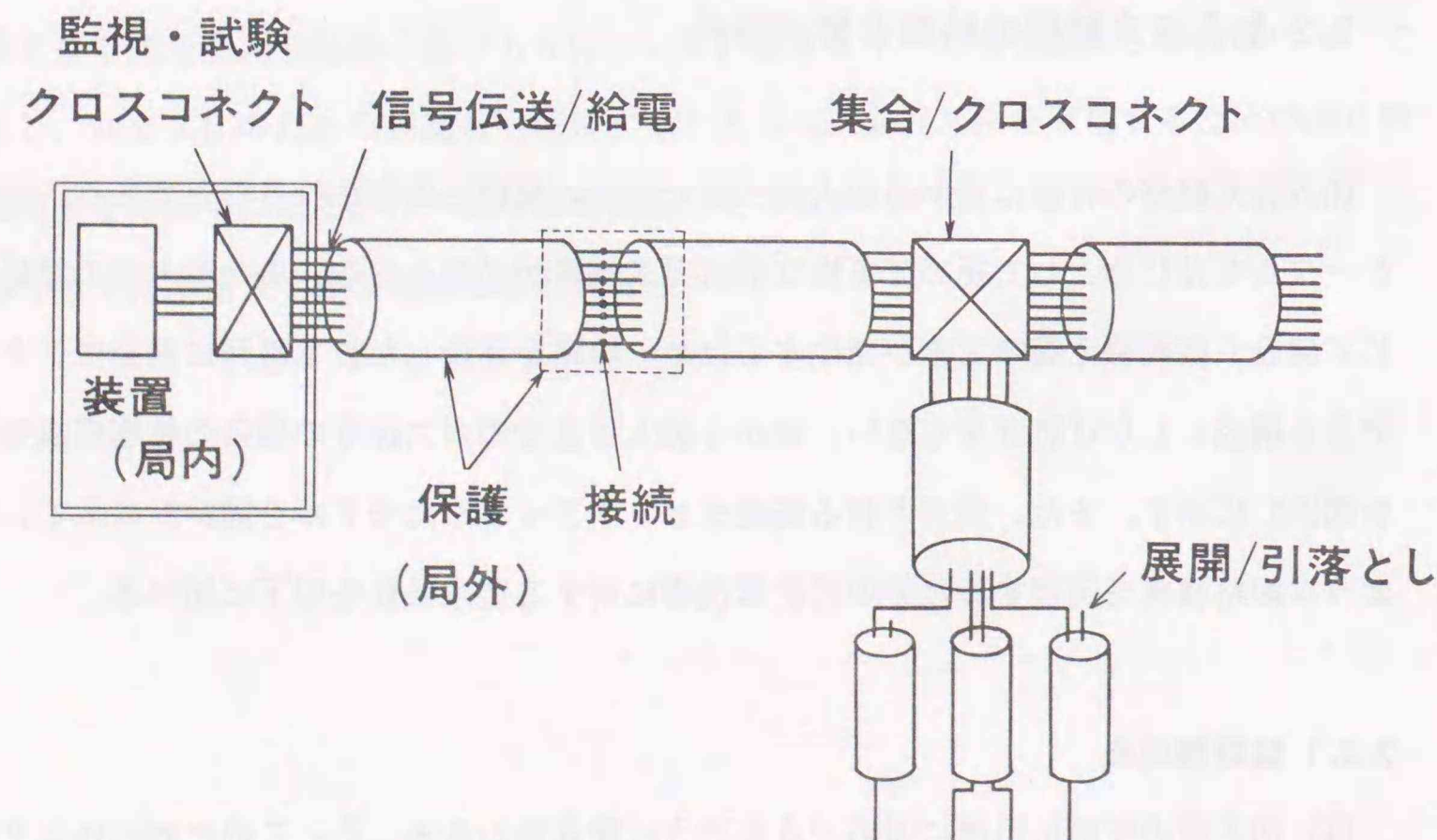


図2-2 加入者線路に必要な機能

(2) 低コストな線路構成であること。構成部品や建設コストのみではなく、地下管路や電柱、マンホール等の基盤設備の効率的な利用や、保守運用コストを総合したトータルコストの観点から低コストな線路構成が要求される。

(3) 高い信頼性を維持できる線路構成であること。個別の構成部品の高信頼化のほか、異常が起こっても短時間で復旧できる線路構成が要求される。

これらの要求条件を考慮した加入者光線路構成法について2.3節で詳述する。

2.2.2 光ファイバケーブル

(1) 使用環境、目的に応じて多様なケーブルが要求される。加入者光ファイバケーブルの種類は、適用場所で局内、局外、構内（屋内）に分類され、さらに幹線（き線）／配線、架空／地下、ガス保守／非ガス保守等の分類で多種類のケーブルが必要である。

各種ケーブルの特徴、必要条件については2.5節で述べる。

(2) 低コストで十分な信頼性を満足すること。十分な信頼性とは機械的な強度劣化の無いことその他、伝送特性の短期的、長期的な変動の無いことであり、このために、種々のケーブル構造の提案、設計がなされている。加入者光ファイバケーブルの構造設計法と特性については第3章と第4章で詳述する。

2.2.3 光ファイバ接続

- (1) 接続損失が小さく、反射減衰量大きいこと。
- (2) 小型、低コストで十分な信頼性を満足すること。特性変動が小さいこと。
- (3) 接続替えが容易に行えるよう接続部の切離し、再接続が容易なこと。

具体的な接続技術については2.6節で述べる。

2.2.4 光ファイバケーブル接続クロージャ／キャビネット類

光ファイバ接続部および接続余長を収容し、保護するため、線路の途中でケーブル間の接続・保護の機能を有するものがクロージャで、ビル内等でボックス型のものをキャビネットと呼んでいる。これらの要求条件は以下の通りである。

- (1) クロージャはケーブル外被と同様の機械的強度と防水性を有すること。
- (2) クロージャ／キャビネットは高密度にファイバ接続部を収容し、保護するとともに、必要に応じて個々のファイバにアクセス出来ること。

NTTで適用しているクロージャおよびキャビネットの代表的な構造を図2-3, 2-4に示す。接続余長はファイバへのアクセスが容易に出来るようにシートに分割収容されている。

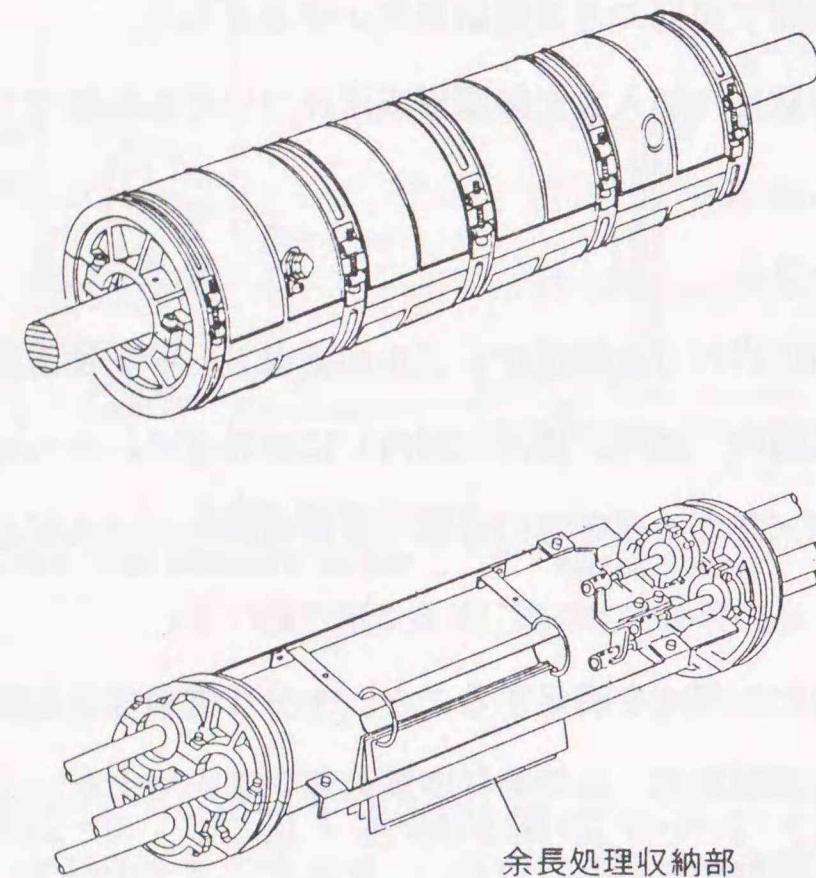


図2-3 クロージャの構造

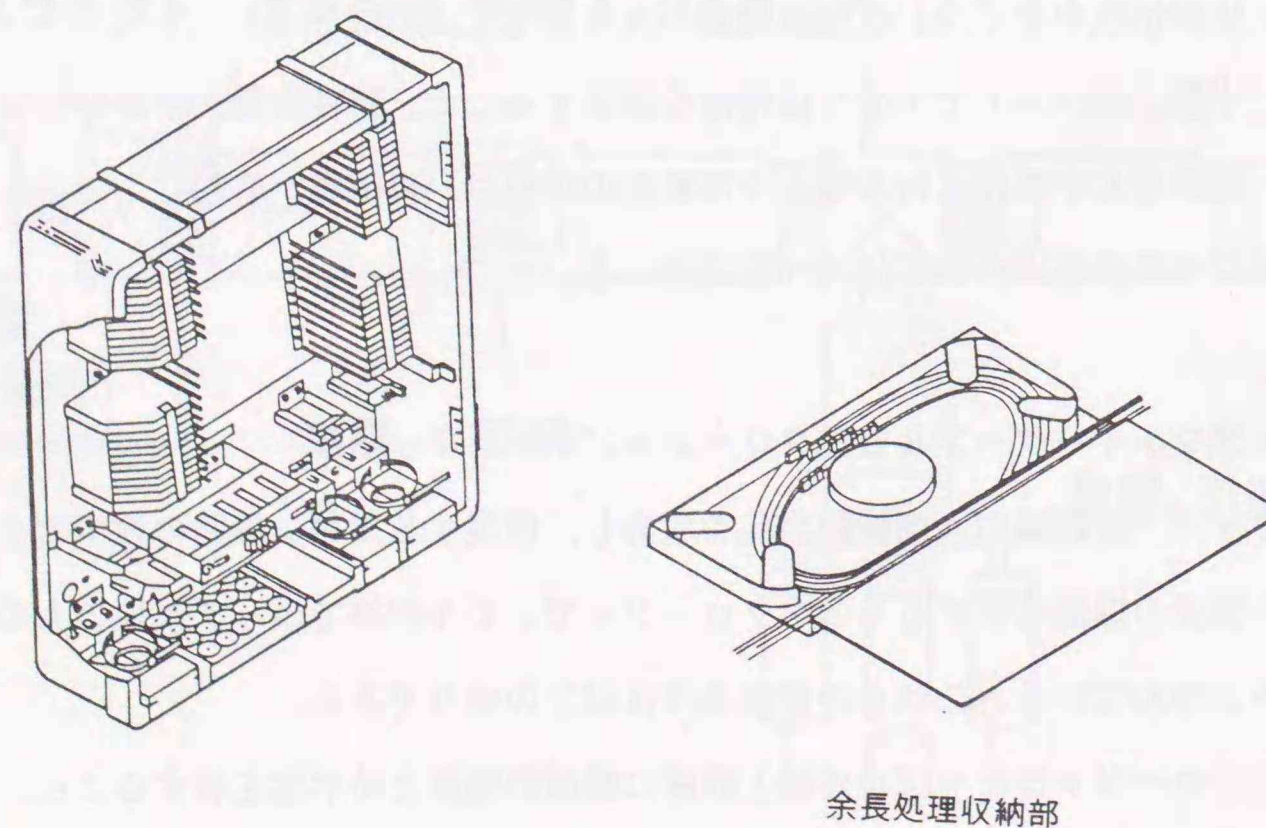


図2-4 キャビネットの構造

2.2.5 線路保守

- (1) 何らかの異常が発生したときに、伝送特性に劣化が発生するまえに対応がとれること。この機能を予防保全と言う。
- (2) 線路の状態の監視・試験が容易なこと。このためには線路構成がシンプルであることと、自動監視・試験ツールが要求される。
- (3) 異常時に速やかに原状復帰ができること。このためには応急ケーブル、応急接続等構成部品での対応と、ルート切替等線路構成上の対応が考えられる。

2.3 加入者光線路構成法⁽²⁻¹⁾

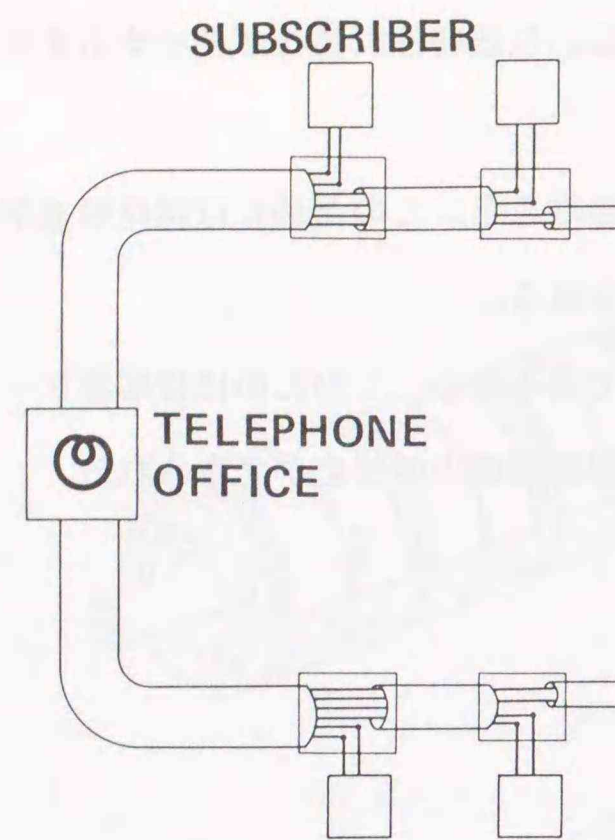
2.3.1 光ファイバの配線形態

従来のメタリック加入者線路では、平面状に分布する加入者に配線するため、局から遠方に行くにしたがいケーブルの分岐接続を繰り返して、ケーブル対数が通減していた。このような配線法を通減スター配線という。また、ビル内や大学構内等の限定されたエリアではメタリックや光ファイバを端末に共通に配線し、多重化された信号を各端末に同時に流し、各端末は信号の宛先を判断して情報の授受を行うループ配線またはバス配線が一般的に適用されている。

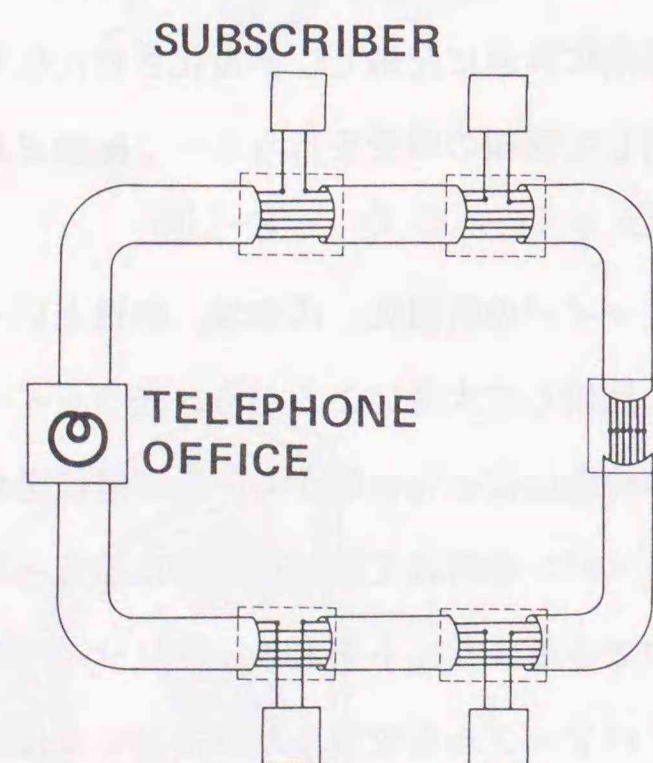
一方、光加入者線路では、光ファイバの低損失、広帯域、軽量といった特徴と、接続損失および接続時間がメタリックに比較して大きいことから、光ファイバの特徴を活かした配線法が望ましい。光ファイバの特徴は伝送特性面から、長距離伝送が可能なこと、物理的な軽量・細径という面からは長スパンの布設工事が可能になることである。長スパンケーブルの布設は接続点数を減少できるメリットもあり、光ファイバの特徴を活かすための配線法として、個々の光ファイバケーブルをできるだけ接続せずに長スパン布設できる配線法が望ましい。このような配線法として、光ファイバ心数が一定でケーブルをループ状に建設する無通減ループ配線がある。心数通減スター配線、無通減ループ配線の概念図を図2-5に示す。

2.3.2 ループ配線の特徴

従来のスター配線は各ケーブルのルートが独立しているため、引き落とし点より局側でケーブル断線事故があると全断となり、信頼性を高めるための異ルート引込みもしにく



(a) 心数通減スター網



(b) 心数無通減ループ網

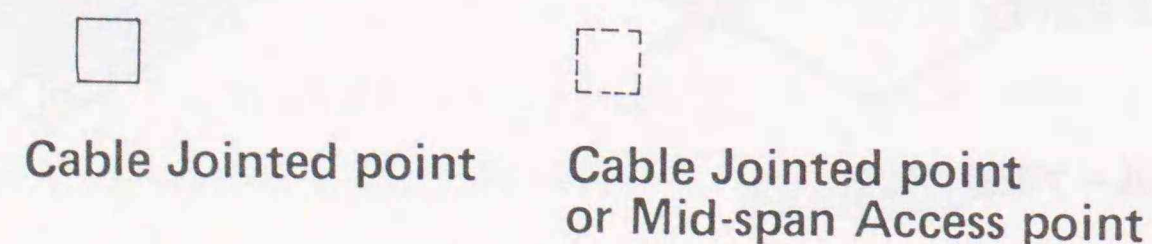


図2-5 線路網構成

い状況にあった。また、効率的な配線のため心数を通減しているので心線の融通性も十分ではなかった。

一方、無通減ループ配線では、引き落とし点には常に局から2方向のケーブルがきているため、2ルート化のための特別な措置が不要なこと、ケーブル断線事故があっても50%は故障にならないこと、また余裕のある心線により、迅速な復旧ができること、引き落とし点でケーブル2本のなかから心線を選択できるため、需要変動に対して融通性が大きいこと等の特徴がある。欠点としては、通減スター配線に比べて心線総延長が長く、コストアップになること、ループ状に線路設備を接続する必要がある等主に経済性の面でペナルティがある。ループ、スター配線の比較を表2-1に示す。光加入者線路のように需要予測が困難な場合は、需要変動耐力の面や、2ルート化の要求が今後高まることを考慮すれば、無通減ループ配線は経済的にもメリットとなりうる。これらの比較は需要密度、ユーザ状況等の個別の状況で大きく異なるため、ループ配線の適用エリアの選定、具体的な網設計法が今後の課題である。

表2-1 ループ/スター構成の比較

項目 構成	需要変動 対応	多ルート 化	接続間隔	ファイバ 総延長
無通減ループ	○	◎	○	△
通減スター	△	△	△	○

2.3.3 ケーブル後分岐工法

長尺ケーブルを布設し、無通減ループ配線を実現するためには布設後のケーブルから容易に分岐接続ができなければならない。このためには、ケーブル引き通し部における外被接続部の新設、短余長接続が必要で、適応したケーブル構造、損失変動の小さいファイバパラメータ設計、小型で成功率の高い接続機器が必要である。ケーブル引き通し部からの中間後分岐・引落の概念を図2-6に、具体的な外被接続部の新設方法を図2-7に示す。光ファイバパラメータ、接続技術については第4章および2.6節で述べる。

2.3.4 融着接続とコネクタの適用方法

加入者光線路の接続は、接続替の可能なコネクタ接続が適している。しかし、コネク

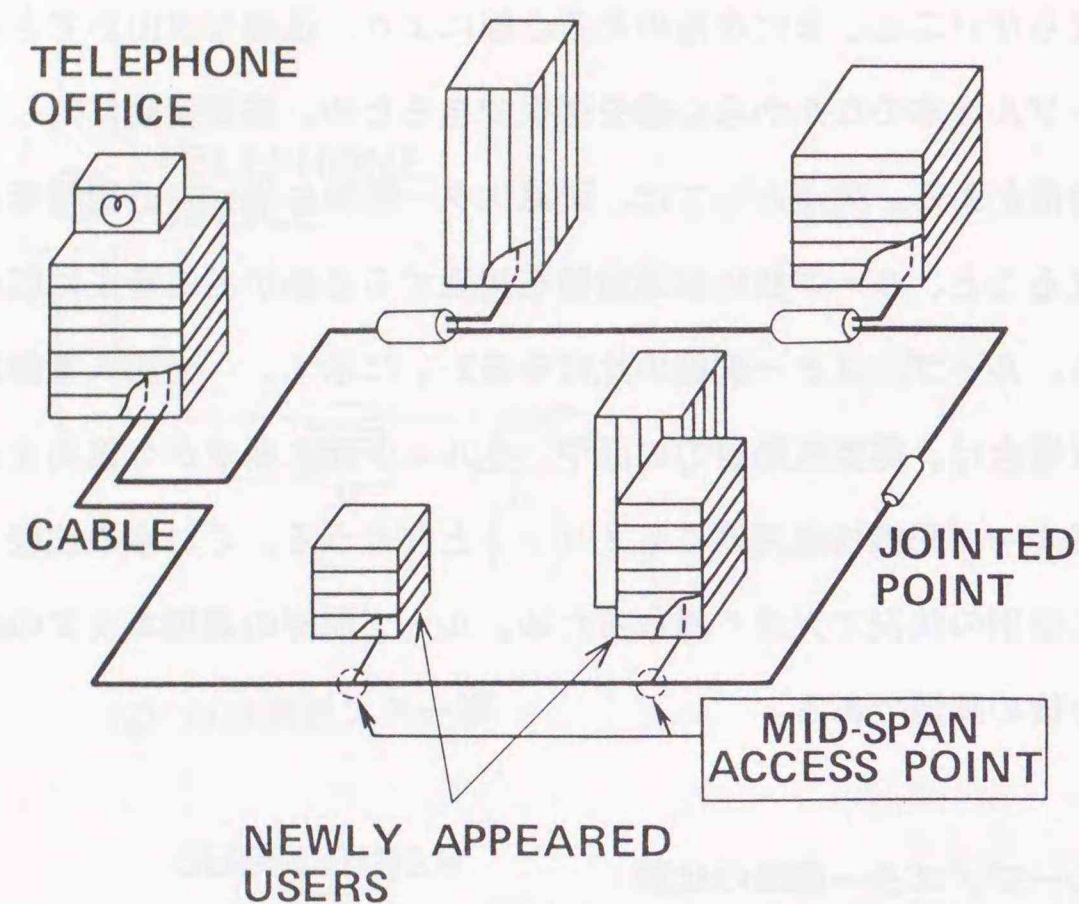


図2-6 中間後分岐・引落の概念

タ接続は融着接続に比べて現場での組立にスキルと時間がかかること、接続損失が大きい等の欠点がある。このため、あらかじめ工場でケーブル端末にコネクタをとりつけ、現場ではコネクタの嵌合のみを行うことが望ましい。しかし、現状技術ではコネクタ端末は管路を通過できるサイズより大きいので、ケーブルの片側のみにコネクタをとりつけ、現場では1か所おきにコネクタ付けと融着接続をおこなう。また、後分岐のような現場作業も融着接続が適用される。さらに、特に遠隔加入者で損失制限が問題になる場合には融着接続が主に用いられる。将来的には、多心一括コネクタによるコネクタ収容部の小型化、接続損失の低減、コネクタの現場付けを可能とするツールの開発により、加入者光線路のほとんどの接続点はコネクタ接続になる。

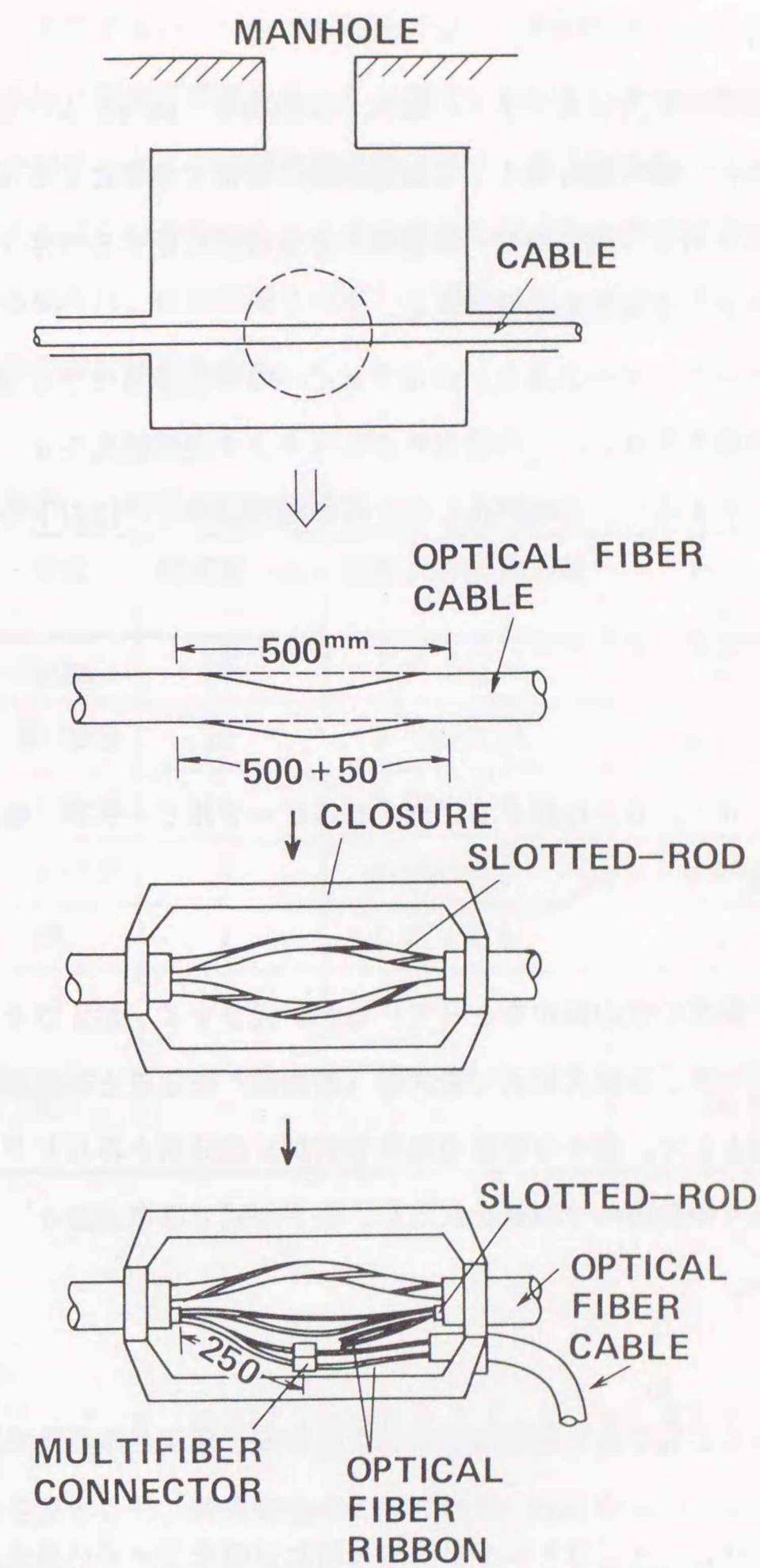


図2-7 後分岐工法

2.4 加入者光線路設計

2.4.1 損失設計

光加入者線路の損失は光ファイバ損失、接続損失、局内および宅内の固定損失の和で表される。さらに、損失設計値としては建設後の道路工事等によるルート変更（以下支障移転という）にともなう損失増や、障害時の応急復旧に要するコネクタ接続点の増加による損失増のマーヅンを見込む必要がある。

光ファイバケーブルピース長 ℓ_n の光ファイバの単位長当たりの損失を α_{fn} 、1カ所当たりの融着接続損失を α_s 、1カ所当たりのコネクタ接続損失を α_c 、長さに依存しない固定損失を α_0 とすると、全線路長 L 当たりの線路損失 α_L は以下の式で表される。

$$\alpha_L = \sum_{n=1}^{n_f} \alpha_{fn} \ell_n + \alpha_s n_s + \alpha_c n_c + \alpha_0 \quad (2-1)$$

ただし、 n_f 、 n_s 、 n_c は長さ L に含まれるケーブルピース数、融着接続点数およびコネクタ接続点数

この式は各損失要素の値の総和をとっているが、光ファイバおよびその接続損失は現状では数値に偏差があり、各損失要素の最大値（最悪値）をとると過剰設計になるため、実用的な損失設計値として、個々の要素の損失分布が正規分布とみなし⁽²⁻²⁾、損失の平均値は式(2-1)の各々の数値の平均値を代入し、以下の式で標準偏差 σ' を計算して線路損失の計算値とする。

$$\sigma' = \left[\sum_{n=1}^{n_f} (\sigma_{fn} \ell_n)^2 + n_s \sigma_s^2 + n_c \sigma_c^2 \right]^{1/2} \quad (2-2)$$

ただし、 σ_{fn} 、 σ_s 、 σ_c はそれぞれ単位長当たりの光ファイバ損失、1接続あたりの融着接続損失、コネクタ損失の標準偏差である。

ここで、線路損失設計の保証を90%値とすれば、線路損失設計値 α_{L90} は以下の式で与えられる。

$$\alpha_{L90} = \alpha_{Lm} + 1.28 \sigma' \quad (2-3)$$

ここで α_{Lm} は式(2-1)においてそれぞれの損失の平均値で計算した線路の平均損失値である。この損失設計の有効性は4.7節で述べるように現場建設線路で確認している。また、マーヅンは適用環境等で変動するが、1～2dB程度の値が一般的である。

現在の各損失数値の代表値と損失計算例を表2-2に示す。ただし、マーヅンは含んでいない。現状では損失の平均値 μ とともに標準偏差の大きさ、すなわち値のばらつきの影響が大きい。特にコネクタはばらつきをいかに小さくするかが今後の課題である。この計算で損失が要求値を上回る場合は、接続間隔をのばして接続点数を減少する、コネクタ接続を融着接続に変更する等の設計変更を行う。

表2-2 線路損失の計算例（線路長20kmの場合）

項目	単位	構成数 n	損失計算基礎数値 $\mu \pm \sigma$	$n \mu \pm \sqrt{n} \sigma$
ケーブル損失	dB/km	20	0.4 ± 0.05	8 ± 0.22
多心融着接続損失	dB/接続	10	0.15 ± 0.15	1.5 ± 0.47
多心コネクタ損失	dB/接続	10	0.35 ± 0.3	3.5 ± 0.95
単心コネクタ損失	dB/接続	1	0.25 ± 0.2	0.25 ± 0.2
構内／宅内損失	dB	1	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1
線路損失 ($\sum n \mu \pm \sigma'$)	dB	—	—	13.45 ± 1.11
線路損失(90%値) $\sum n \mu + 1.28 \sigma'$	dB	—	—	14.87

2.4.2 信頼性の考え方

線路の信頼性は個別要素の故障率と障害発生時の復旧時間の積で評価される。光加入者線路ではループ配線を基本とし、障害発生時の復旧時間の短縮をはかっている。

加入者線路における故障は土木工事や交通事故の外部要因による事故が多いことから個別要素の故障率はこれらの故障要因と整合のとれた値にしてコスト低減をはかることが現実的である。この観点から、現在は従来のメタリック線路と同レベル以下の故障率を目安に設計している。

2.5 加入者光ファイバケーブルの基本構造と設計条件⁽²⁻³⁾

2.5.1 加入者光ファイバケーブルの基本構造

加入者光ファイバケーブルの種類とその概要を表2-3 に示す。局外のき線ケーブルは多心高密度であることが設計のポイントであり、架空ケーブルでは吊り線と一体型の自己支持形ケーブル、構内では難燃性外被構造等、それぞれの適用領域にあったケーブル設計が必要になる。

光ファイバケーブルの構成要素とその機能は以下の通りである。

(1) 光ファイバ素線

外径125 μm のガラスファイバにプラスチック被覆を施した、光ファイバケーブルの最も基本となる単位で被覆外径は 250 μm が一般的である。

(2) 光ファイバ心線

光ファイバ素線に二次被覆を施したもので、接続等の取扱の最小単位である。一心ずつ被覆した単心線⁽²⁻⁴⁾、複数本まとめて被覆した一括被覆心線がある⁽²⁻⁵⁾ ⁽²⁻⁶⁾ ⁽²⁻⁷⁾。心線構造の種類を図 2-8 に示す。また、光ファイバ心線の多心化の経緯を図2-9 に示す。加入者光線路では多心の光ファイバの識別性や、一括接続のし易さから光ファイバテープを採用している。

(3) テンションメンバ

張力に対抗して光ファイバに加わる伸び歪を抑えるもので綱線、FRP、アラミド繊維(ケブラー)等が用いられる。テンションメンバの配置位置はケーブル中心の構造と、外被に分散して埋め込まれる構造⁽²⁻⁸⁾がある。代表的な構造を図2-10に示す。

(4) 光ファイバ心線集合構造

光ファイバ心線をケーブルに集合する構造として、直接燃あわせて光ファイバユニットを構成し、クッション層により保護したものと、スロット内に保護して集合する構造がある⁽²⁻⁹⁾ ⁽²⁻¹⁰⁾。代表的な構造を図2-10に示した。

(5) 外被

ケーブル外部からの衝撃や浸水を防ぐため、2 ～3mm 厚さのPEまたはPVC で被覆する。局外ケーブルでは透湿を防ぎ、機械的強度を高めるため、アルミニウムとPEの複合層のLAP(Laminated Aluminum PE)外被が用いられる。

(6) 介在対

工事の連絡回線や、ガス保守時のセンサへの給電、信号線として数対のメタリック線がケーブル内に配置される。

表2-3 加入者光ファイバケーブルの種類と概要

種 類		概 要	心線数
局 内 系	局内光ファイバケーブル	線路設備と局内設備の分界点である光ファイバ成端架から局内装置まで、または局内装置間で用いられる。補強された光ファイバコード(2mm ϕ)をPE被覆綱線の周囲に集合し、難燃PE外被を施したケーブル。	2 心 } 32 心
	(防水) 光ファイバケーブル	地下、架空に一般的に用いられるケーブルで、光ファイバテープをスロットに収容した構造のケーブル。ガス保守区間では空隙のあるエアコアタイプが、非ガス保守区間では防水材(吸水材)を充填した防水ケーブルが用いられる。	8 心 } 1000心
局 外 系	成端用光ファイバケーブル	局内およびユーザビル内の成端架に局外からのケーブルを成端するために用いる。片端をコードとし、コード固定部を有するケーブル(ケーブル部は通常の光ファイバケーブルと同構造)。	8 心 } 1000心
	ガス隔壁付き光ファイバケーブル	ガス保守区間の端等に用いられ、片端にガス止めのための隔壁が付いているケーブル(ケーブル部は通常の光ファイバケーブルと同構造)。	8 心 } 1000心
	自己支持型光ファイバケーブル	架空線路に用いる。吊り線を用いずに架渉できるように支持線と一体化したケーブル(ケーブル部は通常の光ファイバケーブルと同構造)。	8 心 } 100心
	光屋外線	加入者宅への架空引き込みに用いる。PVC被覆した綱線の周りに2本の光ファイバを巻き付けた構造である。	2 心
構 内 系	構内光ファイバケーブル	構内光配線キャビネット間等、構内の配線に用いる。少心は層構造、多心ではユニット構造、スロット構造である。	8 心 } 200心
	構内フラット光ファイバケーブル	オフィスのアンダーカーペットに使用されるケーブルで、厚さ2mm 以下のフラットな構造のケーブル。	2 心
	構内光ターミネーションケーブル	構内光配線キャビネットから端末機器までの配線に用いるケーブル。	2 心
	光屋内線	構内光配線キャビネットから宅内装置の近くまでの屋内配線に用いるケーブル。	2 心

心線構造例	タイト被覆心線	光ファイバテープ	ルースチューブ
特徴	○1心単位でのハンドリング、接続が容易 ○耐側圧、曲げ特性設計が容易	○高密度・多心化に適する ○多心一括接続性に優れる	○高密度・多心化に適する ○1心単位での接続が容易

図2-8 光ファイバ心線構造

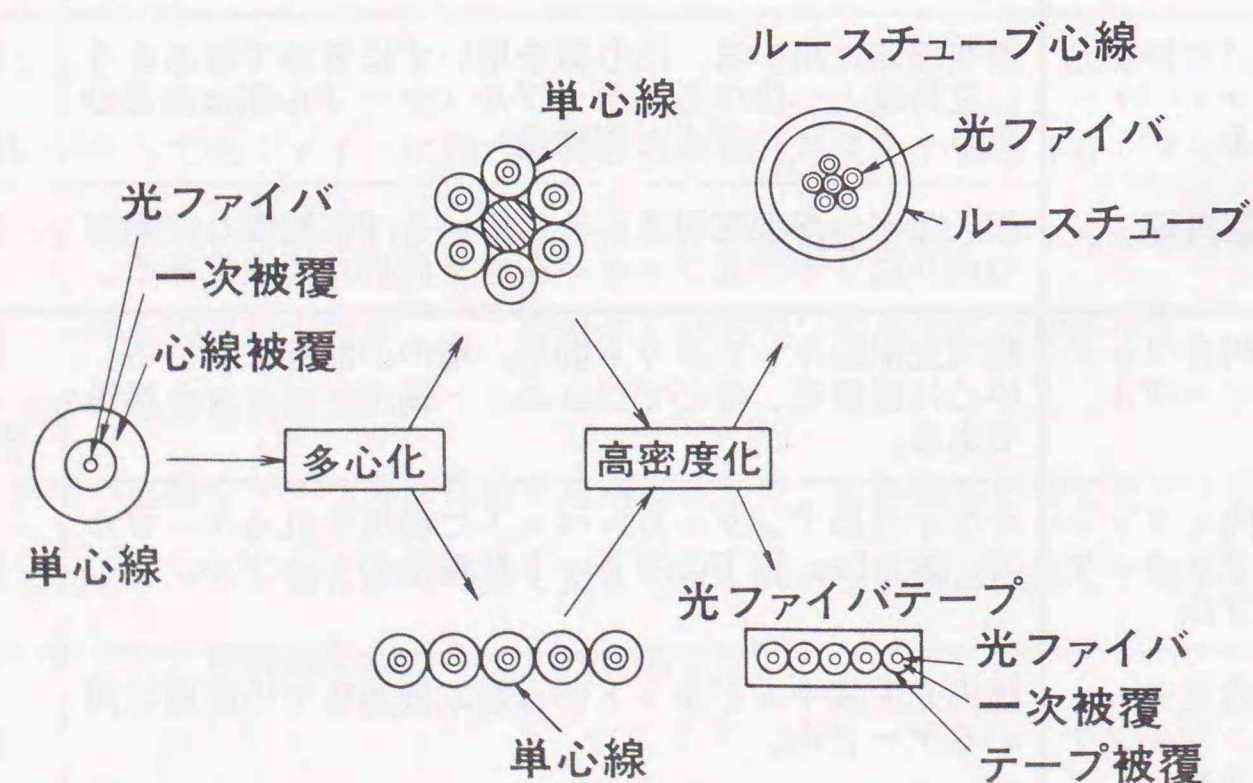


図2-9 高密度光ファイバユニット設計の考え方

基本構造	ストランド形	チューブ形	スロット形
抗張力体	中心 or 分散	外被埋め込み	中心 or 分散
特徴	○ケーブル構造が簡易 ○メタルケーブルと同様の製造が可能	○高密度性に優れる ○外被強度が高い	○側圧等機械強度大 ○高密度・多心化に適する

図2-10 光ファイバケーブル構造

2.5.2 加入者光ファイバケーブルの心数系列

加入者光線路の設計にあたっては、一定期間将来までの需要見込みによって、建設するケーブルの心数を決定している。

このため、ケーブルの心数系列の設定は、単位期間当りの需要発生数および需要見込みによる心数決定の精度と同程度とすればよい。心数系列が細かすぎると、(1)ケーブル種類が増加し、コスト面および設備管理の面から好ましくない。(2)集合時の単位を必要以上に小さくすることになり、製造コスト面から不利、などの問題を生ずる。また、心数系列が粗すぎると、需要見込以上の過度の心数をもつケーブルを建設することとなり、最適設計が困難になる。

いま、需要の発生分布がポアソン分布に従うと仮定すれば、需要見込数 m に対し、標準偏差 $\sigma = \sqrt{m}$ となり設備信頼度を現在の加入者線路におけるFD配線法⁽²⁻¹¹⁾と同様に90%とすれば、必要となるケーブル心数 N は次式で示される。

$$N = m + 1.28 \sqrt{m} \quad (2-4)$$

ここで、心数偏差 $\delta = 1.28 \sqrt{m}$ は需要変動に対応するものであるから、ケーブル心数のステップをこれ以上小さい値にとる必要はない。需要見込み心数 N と δ の関係を図2-11に示す。この結果から100心以下のケーブルでは数心～10心程度のステップ、100心以上のケーブルでは10～30心程度のステップの心数系列とすれば良いことがわかる。

一方、テープ型光ファイバのような一括被覆心線の心数は、多いほど一括製造によるコストダウンや一括接続のメリットがでるが、上記の検討より一括被覆心数は少心ケーブルでは数心以下にする必要がある。中継系ではシステム当たりの必要ファイバ数が2心であるので、中継系と統一したケーブル構造とするためSM型光ファイバケーブルでは4心テープを基本に設計する事とした。また、多心ケーブル用には4心テープの2倍の8心テープを基本に設計する。

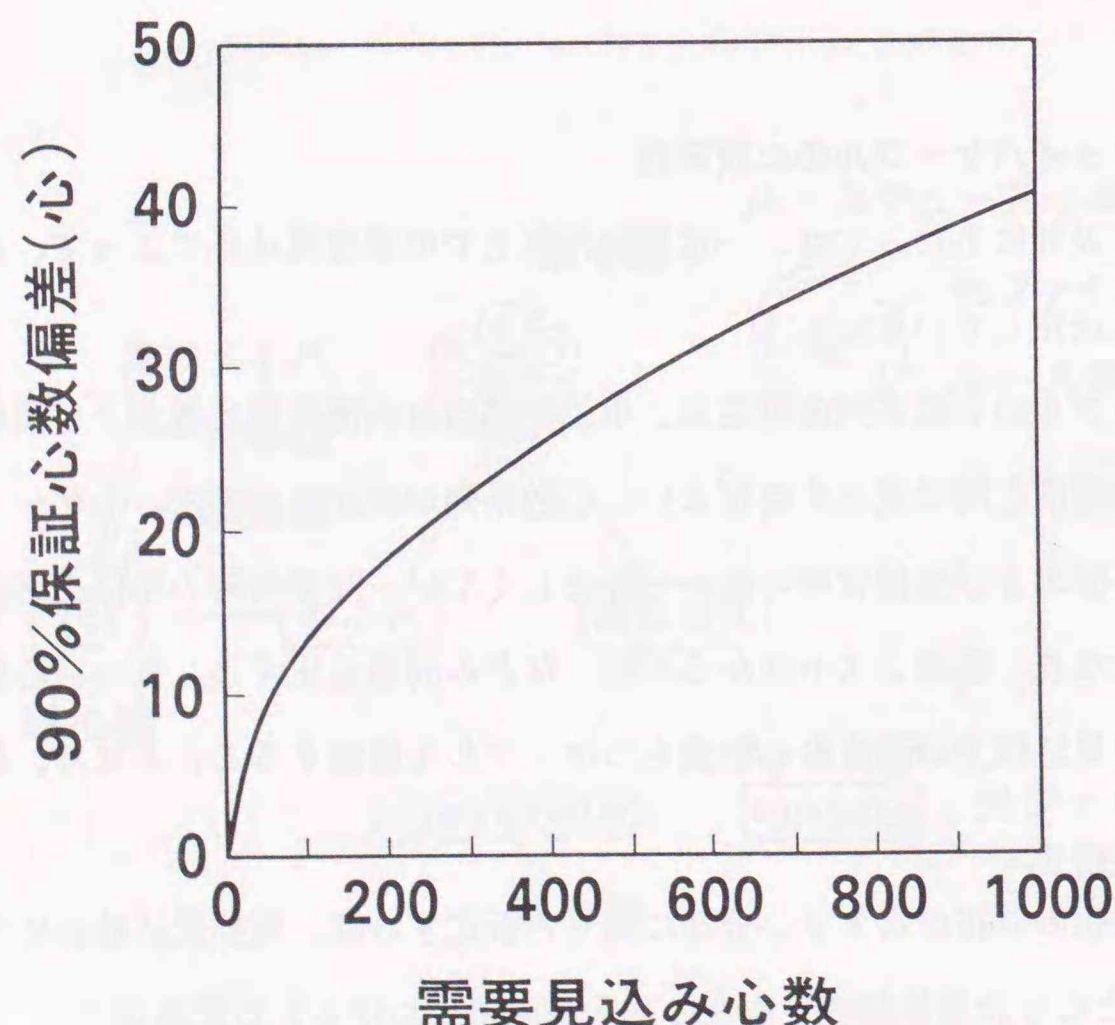


図2-11 需要見込み心数と偏差

2.5.3 加入者光ファイバケーブルの設計条件

加入者光ファイバケーブルの使用環境で特徴的なのは架空区間であり、強風雪地域等多様な環境条件を考慮する必要がある。国内の標準的な地域を考慮した適用環境とケーブル設計条件の一例を表2-4に示す。

表2-4 ケーブル設計条件

環境・ 使用条件	適用領域	地 下	架 空
布設、架渉条件	最大張力 使用金車	ケーブル1km 自重 R 600金車	最大張力 使用金車 100kg R 250金車
温度変化		0～40° C	(-40) -20 ～60° C
曲げ半径		6Dもしくは100mm の大なる値	同 左
側 圧		100kg/5cm	同 左
風 圧		—	甲種風圧荷重地域 20kg/m ² 丙種風圧荷重地域 14kg/m ²

2.6 光ファイバ接続技術

2.6.1 コネクタ接続技術

加入者線路のように建設後も接続替えを行うにはコネクタ接続が適している。コネクタ接続は光ファイバ端面をネジやスプリング等で密着させ、メカニカルに接続するもので、金属、セラミック、プラスチック等で形成されるフェルールを軸合わせする^{(2-12) (2-13)}。反射特性の改善のために、端面の種々の研磨方法が開発されているが⁽²⁻¹⁴⁾、線路内では着脱回数が少ないことから整合材により、経済的な解決が図られている。

代表的なコネクタの例を図2-12に示す。NTTでは機械的な接続替えが可能なMT (Mechanical Transferable) コネクタが加入者光線路に適用されている^{(2-15) (2-16)}。その構造を図2-13に示す。成形加工の可能なプラスチックコネクタで小型・低コストであり、サブミクロンオーダーの精密加工により、SM型光ファイバに対して平均接続損失0.35dBを実現している。

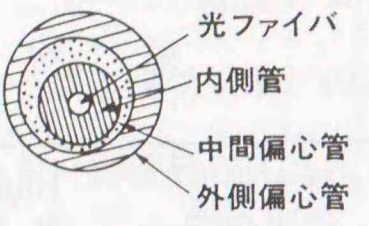
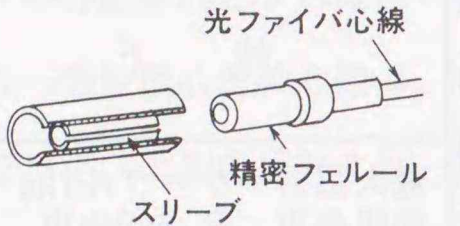
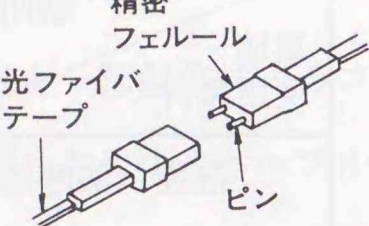
接続心数	単	心	多	心
軸 合 せ	調	無 調 心	無 調 心	無 調 心
コ	(例) 2重偏心形：2重に偏心した管を回転させて軸を合せる	(例) 精密フェルールスリーブ形：中心にファイバ穴を有する精密フェルールをスリーブに挿入して外形を合せる	(例) ピン嵌（かん）合形：位置合せ用のピンを有する精密フェルールでファイバ位置を合せる	
ネ				
ク	光ファイバ 内側管 中間偏心管 外側偏心管	光ファイバ心線 精密フェルール スリーブ	精密フェルール 光ファイバテープ ピン	
タ				

図2-12 コネクタ構造例

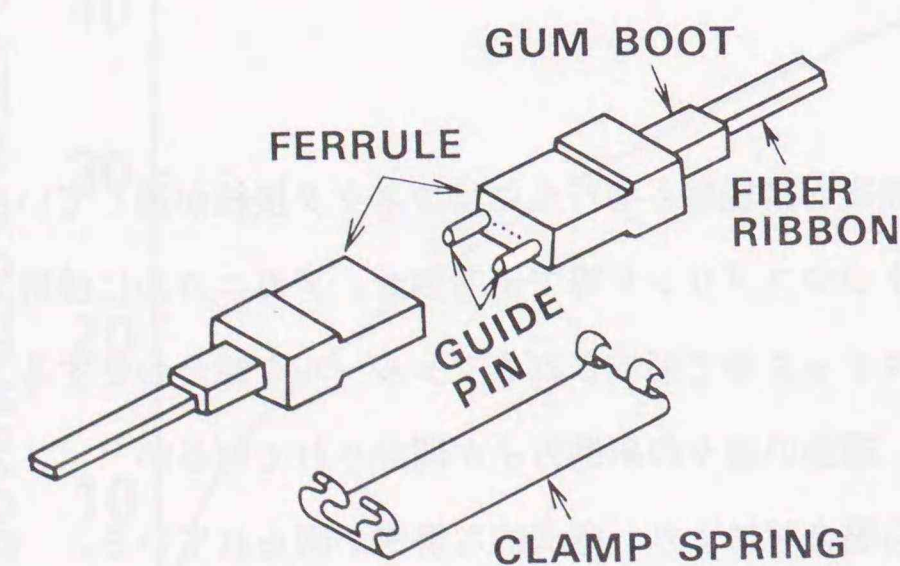


図2-13 MTコネクタ

2.6.2 融着接続技術

低損失な接続方法として、融着接続方法がある。電極間の放電加熱により光ファイバを溶融して接続するもので、溶融したファイバの表面張力による軸調心効果やコア直視による軸調心⁽²⁻¹⁷⁾により、0.1 dB以下の極めて低損失な接続が可能である。また、現場で短余長で接続するための装置の開発も進んでいる⁽²⁻¹⁵⁾。後分岐接続時の必要余長を求めるため検討した融着接続のやり直し回数と成功率を図2-14に示す。この結果から、接続に必要な余長は最低10 cmで、さらに小型の融着接続機により、接続機へのとりまわし余長の短尺化を図って合計20cm以上の余長があれば現場接続が可能である。12X15X15cmの小型融着接続機の形状を図2-15に示す。

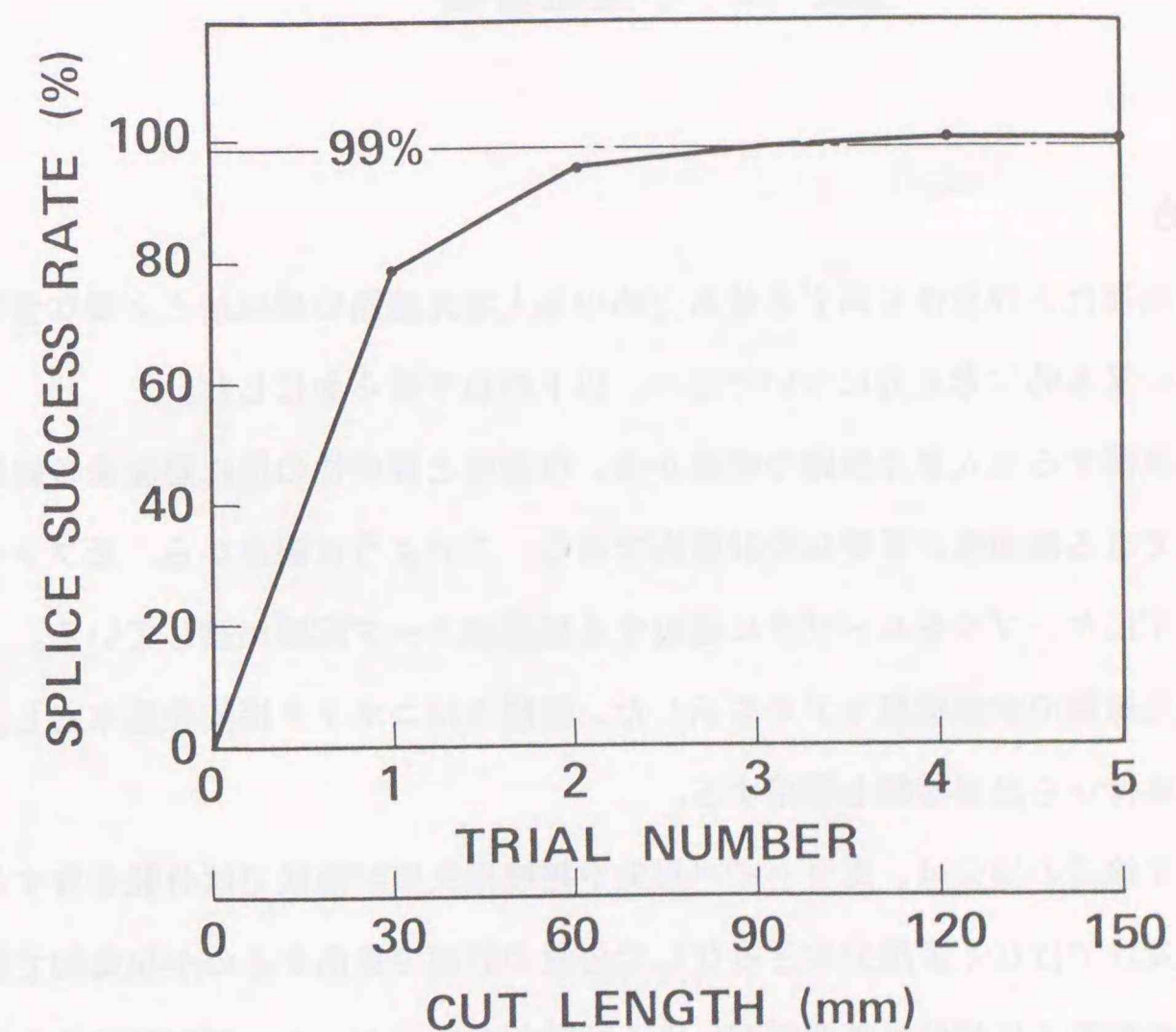


図2-14 融着接続回数と所要余長

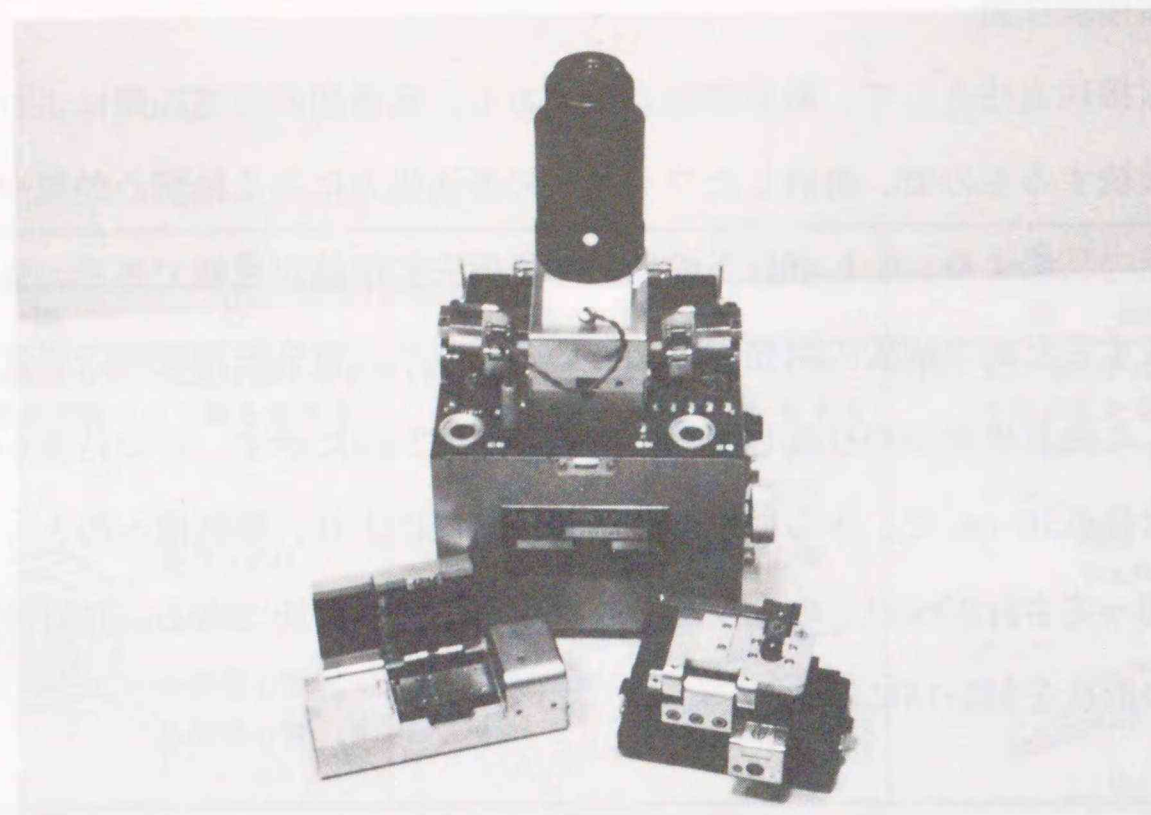


図2-15 小型融着機

2.7 まとめ

信頼性・融通性と経済性を両立させるための加入者光線路の構成法と必要な要素技術の特徴・設計の基本的な考え方について述べ、以下の点を明らかにした。

- (1) 網状に展開する加入者光線路の特徴から、信頼性と経済性の他に建設後の線路に容易にアクセスできる融通性が重要な設計要因である。このような観点から、光ファイバの心数を通減せずにケーブルをループ状に建設する無通減ループ配線が適している。
- (2) 加入者光線路の設備構成モデルを示した。接続点はコネクタ接続を基本とし、後分岐や建設上の条件から融着接続も併用する。
- (3) 加入者光線路の損失は、光ファイバ損失や接続損失値が現状では分散を有することから、最悪値設計ではなく正規分布とみなした分散の計算で算出するのが現実的である。
- (4) 加入者光線路の信頼性は外部要因による故障が多いこと、ループ配線により、障害復旧時間が短縮できることなどから個別要素の信頼性はメタリック線路と同等に考えて設計する。

- (5) 加入者光ファイバケーブルの基本構造、心数単位、設計条件を述べ、SM型光ファイバケーブルの基本要素であるテープ型一括被覆心線では心数単位を4心または8心として設計する。

第3章 簡易構造光ファイバケーブルの設計

3.1 まえがき

将来全ての加入者に光ファイバケーブルを配線するためには、光ファイバケーブルをはじめとする光線路構成物品の価格低減が必須条件である。

従来、光ファイバケーブルは光ファイバ心線に加わる張力、側圧、曲げ等の影響を緩和するため撚り構造を採用していた⁽³⁻¹⁾。そのためにケーブルを製造するには、大型の撚り集合機が必要となるばかりではなく、撚りのため製造速度を上げることが難しく、価格の低減を困難にする一要因となっていた。そこで、加入者線路へ適用する光ファイバケーブルとして、構造の簡素化とそれに伴う製造工程の簡略化によるコスト低減をねらいとした新しい構造の光ファイバケーブル（以下SP (Single Process)ケーブル）を提案し、構造設計を検討した。^{(3-2) (3-3) (3-4)}

SPケーブルは、

- ① 光ファイバ心線が抗張力体および外被から独立した構造である。
- ② 余長（光ファイバ心線長とケーブル長の差）が制御できる。
- ③ 撚り工程を含まず、製造工程の簡略化が図れる。

等の特徴を有しており、構造の簡易化とそれに伴うケーブルの細径化、軽量化により、建設性及び経済性の向上が図れる。

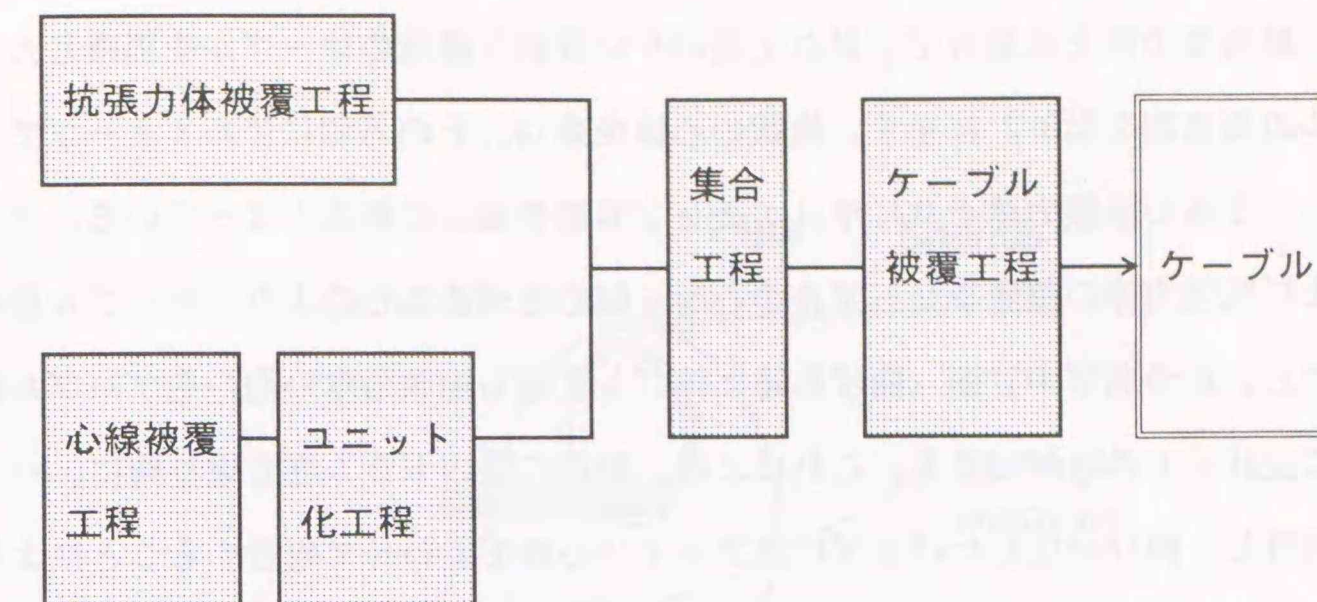
本章では、SPケーブルについて、光ファイバの余長制御性、余長に起因する曲がり損失を理論的に検討するとともに、試作ケーブルによる実験的検討から、その構造設計法を明らかにしている。

3.2 ケーブル構造

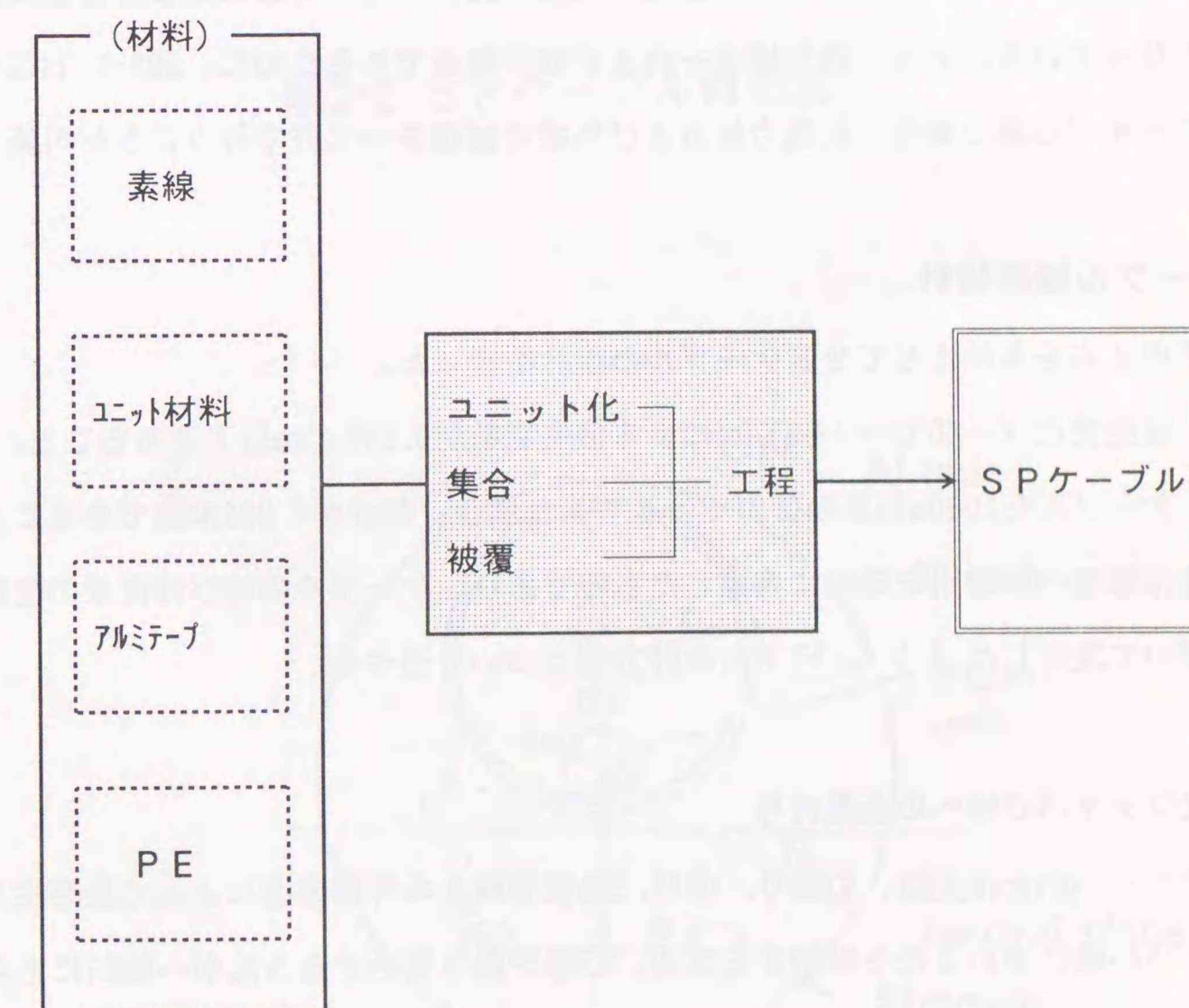
図3-1 (a)に従来のユニット型ケーブルの製造工程の概略を示す。従来のケーブルは張力、側圧、曲げ等の影響を緩和するため撚り構造を採用しており、そのために

(1)心線被覆工程からケーブル被覆工程まで5工程を経なければならず、連続工程で製造できない。

(2)ユニット化工程及び集合工程で撚り工程があるため、製造速度を上げることが難しい。



(a) ユニット型ケーブル工程



(b) SPケーブル工程

図3-1 光ファイバケーブルの製造工程

等の問題がありケーブルの低価格化を阻む要因となっていた。

そこで、経済性の向上に向けて、撚り工程のない簡易な構造のケーブルを提案した。このケーブルの概念図を図3-2 に示す。複数の心線を束ね、その外側にアルミテープでパイプを形成し、2本の抗張力体と共にポリエチレン外被を施した構造となっている。アルミパイプおよび抗張力体の位置をケーブル中心から偏心させることにより、ケーブル曲げ方向を一定にし、かつ曲げ中立面（曲げた時に伸びも圧縮も加わらない面）をケーブル断面内で任意に設計することができる。これにより、製造の際のドラム巻き取り時に、パイプに伸びを付与し、伸びの生じたパイプに光ファイバ心線を添わせて収容することにより、ケーブルを延線した際、ケーブル内の光ファイバ心線に余長が付与される。この余長はケーブル構造とドラム胴径により決定されるため、余長の制御が可能である。さらに光ファイバ心線が抗張力体及び外被から独立した構造となっているため、ケーブルの布設または架渉の際にケーブルに課せられる張力、側圧が光ファイバ心線に直接影響を及ぼさない構造となっている。また、撚り構造を含まず簡易構造であるために、図3-1 (b)に示すように光ファイバ心線の集合、抗張力体および外被の被覆を一工程で行うことが可能である。

3.3 ケーブル構造設計

以下の2点を条件としてSPケーブルの設計を行った。

(i) 温度変化 ($-40^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$) による損失変動が 0.1dB/km 以下であること。

(ii) ケーブルを 1000m 自重の張力でけん引した場合、伸びが 0.2% 未満であること。

温度特性は架空への適用を条件に考慮したものであり、ケーブルの伸びは従来の信頼性設計に基づいて設定した⁽³⁻⁵⁾。以下に設計方法について述べる。

3.3.1 光ファイバ心線への余長付与

光ファイバケーブルは、引張り、曲げ、温度等種々の外部要因によって歪を生じる。光ファイバ心線に加わる歪を抑制するため、心線を撚り集合する方法が一般的にとられているが、本構造のケーブルは撚り集合しないので、光ファイバにあらかじめ余長を与える必要がある。以下に光ファイバ心線の余長を付与するための設計方法について述べる。

(1) 曲げモーメント

SPケーブルの断面図を図3-3 に示す。このケーブルはアルミパイプ及び抗張力体の

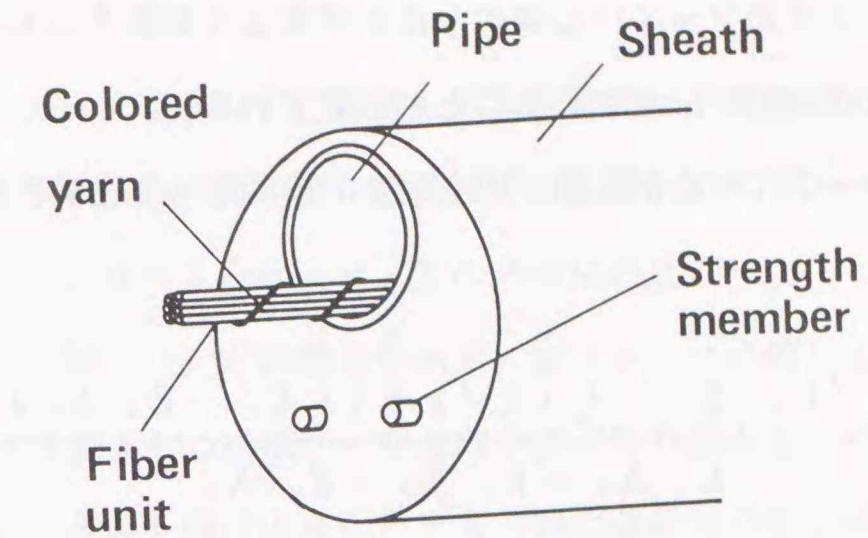


図3-2 SPケーブル概念図

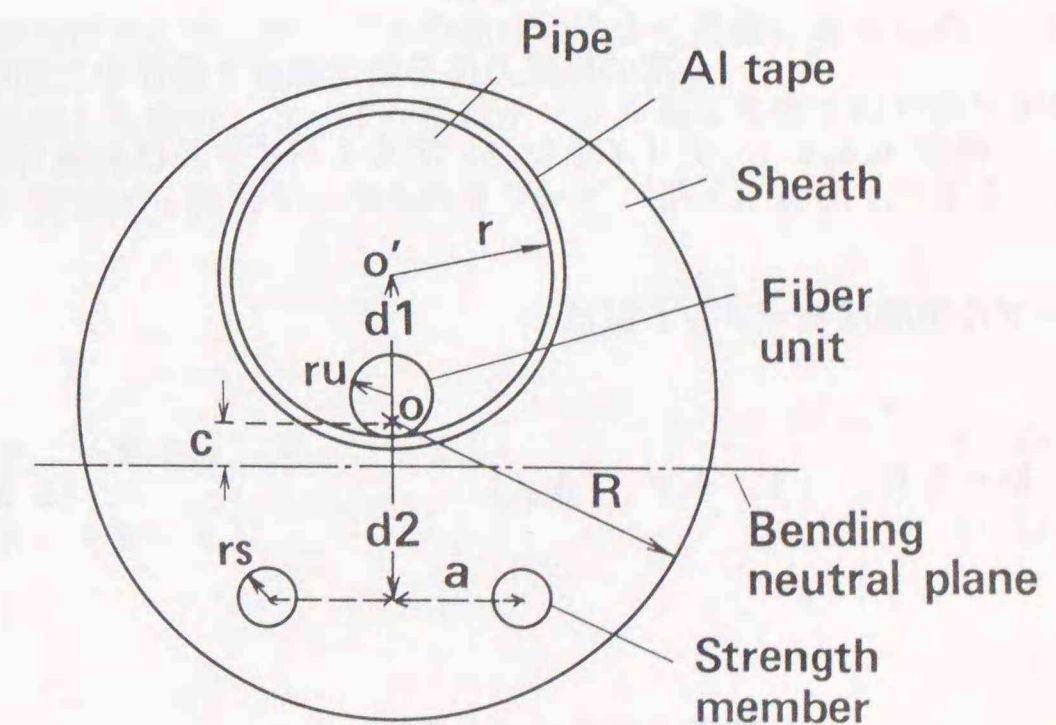


図3-3 SPケーブル断面図

位置が偏心しており、ケーブルの曲げ中立面をケーブル断面内で任意に設定することができ。そのために、ドラム巻きすることによってパイプに伸びを与え、そこに光ファイバ心線を収容することにより、光ファイバ心線の余長を制御することが可能である。このようにケーブル構造により光ファイバ心線の余長を精度よく制御するためには、ドラムに巻きつけられる際の曲げ方向が一定であることが必要である。

図3-3 においてケーブル中心から曲げ中立面までの距離を c とすれば、 c は次式で表せる。

$$c = \frac{(d_2 A_s (E_s - E_p) + (\pi (r + t)^2 E_p - E_a A_a)) d_1}{E_s A_s + E_p A_p + E_a A_a} \cos \theta \quad (3-1)$$

ただし

E : ヤング率

A : 断面積

d_1 : ケーブル中心 O とパイプの中心 O' との距離

d_2 : ケーブル中心 O と 2 本の抗張力体を結ぶ線分までの距離

r : アルミパイプ内半径

t : アルミパイプ厚

θ : 2 本の抗張力体を結ぶ線分と曲げ中立面の角度

添字 p, a, s : ポリエチレン、アルミパイプ及び抗張力体

またケーブルの曲げモーメント M は

$$M = \sum E_n (I_n + y_n^2 A_n) \quad (3-2)$$

ただし

I : 断面 2 次モーメント

y : ケーブルを構成する各部材の中心と曲げ中心点までの距離

n : ケーブルを構成する各部材

ケーブル中心から c の距離にある曲げ中心を通り 2 本の抗張力体を結ぶ線分に θ の角度を

持つ曲げ中立面を考えると次式が成立する。

$$M = E_p I_p + E_a I_a + E_s I_s \quad (3-3)$$

ただし、各断面 2 次モーメントは、付録(1)に示す計算式により与えられる。図3-4に、ケーブル中心 O と 2 本の抗張力体を結ぶ線分までの距離 d_2 をパラメータとして、2 本の抗張力体間の距離 $2a$ と、 $\theta = 0$ と $\theta = \pi/2$ の時の M の比

$M_r = M(\pi/2) / M(0)$ との関係を示す。光ファイバ心線長を精度よく制御してケーブルに余長を付与するためには $\theta = 0$ 方向を曲げ中立面としたケーブル構造が望ましい。ケーブルが $\theta = 0$ 方向を曲げ中立面とする方向に曲がりやすい構造にするためには、図3-4 において M_r が 1 以上になるように、抗張力体の間隔 $2a$ 及び d_2 を設定しなければならない。また 2 本の抗張力体の間隔をパラメータとして、 M_r が 1 以上になる抗張力体半径 r_s と d_2 の関係を図3-5 に示す。図の直線の斜線側が設計領域であり、その領域内に r_s と d_2 を設定する必要がある。

(2) 余長率

図3-6 に光ファイバ長の関係を示す。図3-6 (a)のようにケーブルが一定方向に曲げられて巻かれている場合、ファイバ心線の位置は、アルミパイプの内面に沿っている。その位置はケーブル曲げ方向に対して、ケーブルの曲げ中心より外側にあるために、図3-6 (b)のようにケーブルを延線した場合、ファイバ長はケーブル長より長くなり余長が発生する。図3-6 において、360 度曲げられたケーブルの光ファイバ長 ℓ_f 及びケーブル長 ℓ_c は次式で表される。

$$\ell_f = 2\pi (R_d + R + d_1 + r_u - r) \quad (3-4)$$

$$\ell_c = 2\pi (R_d + R - c) \quad (3-5)$$

ただし

R_d : ケーブル曲げ半径

R : ケーブル外半径

d_1 : ケーブル中心 O とパイプの中心 O' との距離

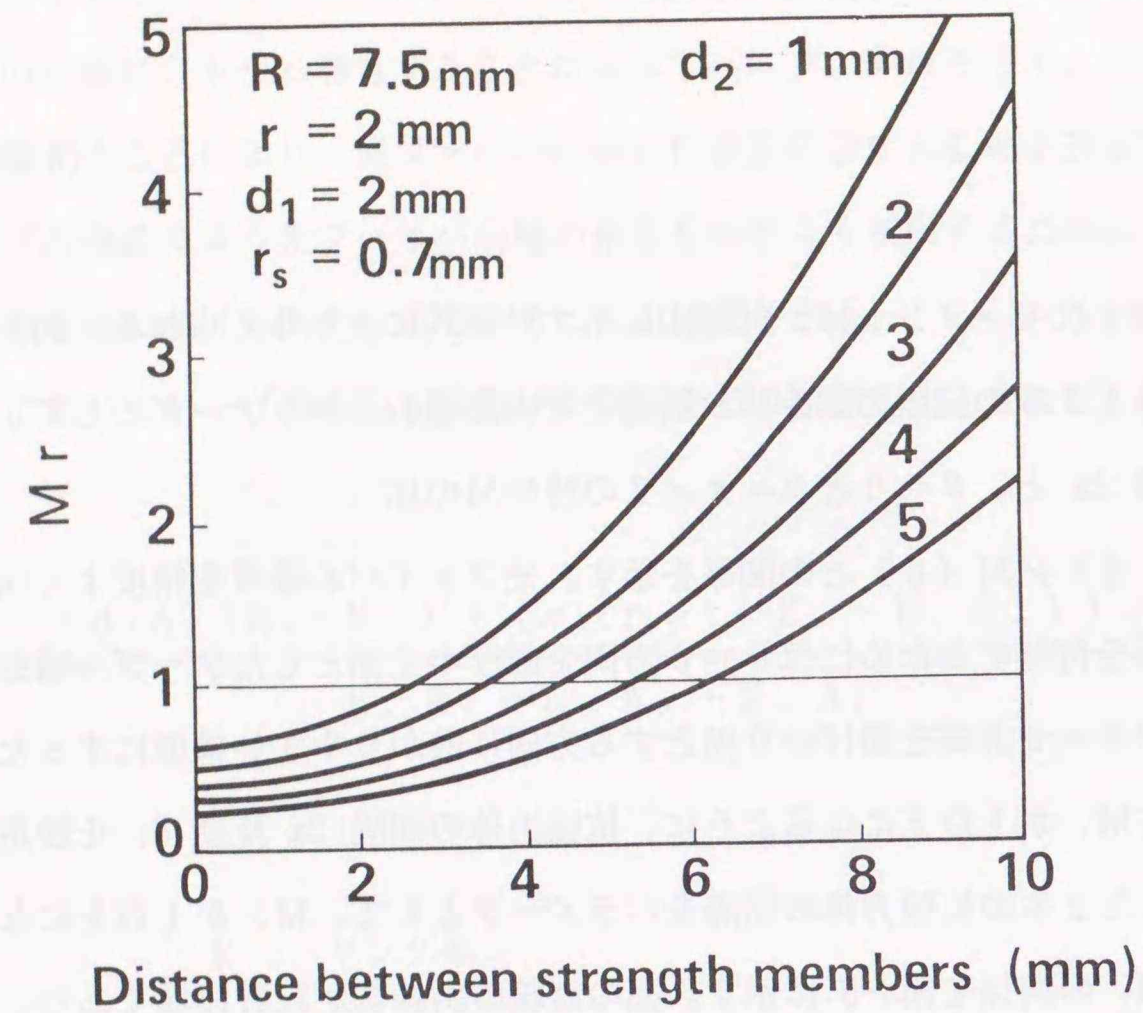


図3-4 抗張力体間隔とモーメントの関係

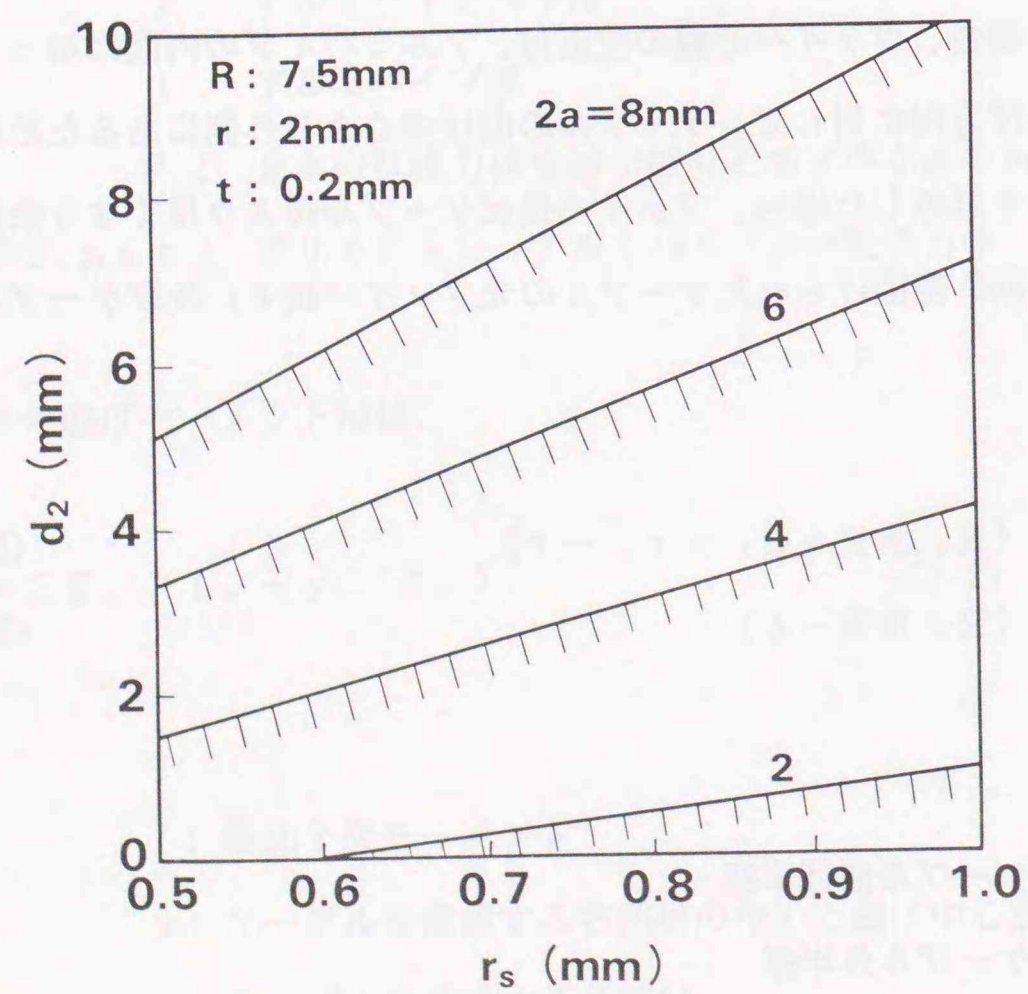
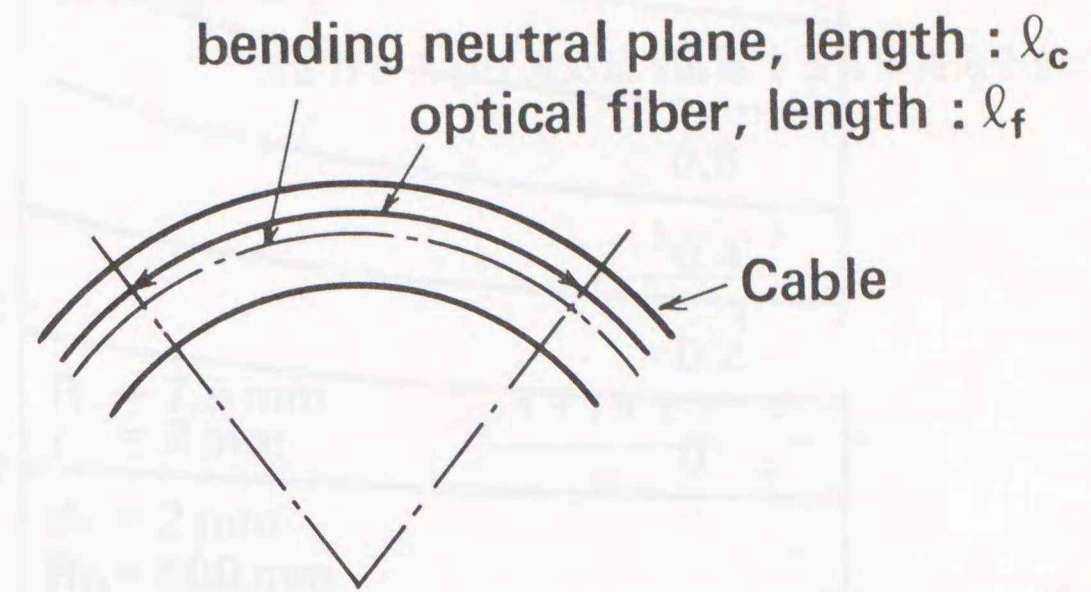
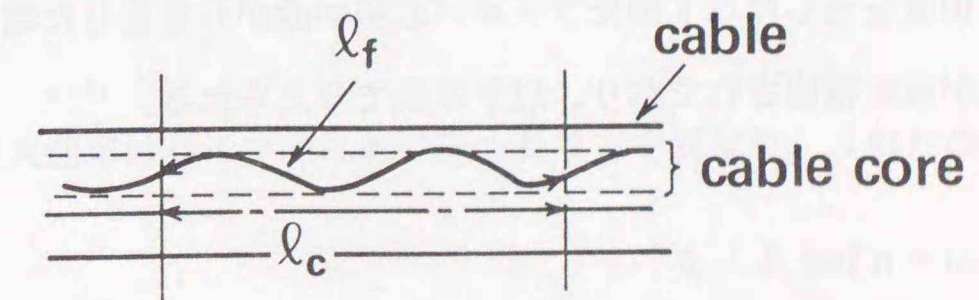


図3-5 モーメントの比を決める r_s / d_2 の関係



(a) 曲げ状態



(b) 直線状態

図3-6 余長の説明

r : パイプ内半径

r_0 : 光ファイバユニット半径

ケーブル内に収容された光ファイバ心線とケーブルの長さの差（余長）をケーブル長当たりで表した値を余長率 ε とすると ε は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\ell_f - \ell_c}{\ell_c} \\ &= \frac{c - r + d_1 + r_0}{R - c + R_d}\end{aligned}\quad (3-6)$$

図3-7 に一例として、余長率をパラメータとした場合の r_s と d_2 の関係を計算した結果を示す。余長率は抗張力体の太さ r_s よりも、 d_2 つまりケーブル抗張力体の位置に依存することが分かる。

3.3.2 光ファイバ余長による損失増

SPケーブルは前項で述べたように、余長をケーブルの抗張力体の位置等で制御することが可能である。しかし過度の余長を光ファイバに与えると、パイプ内で光ファイバ心線に曲がりが生じて、損失増を起こす可能性がある。従って余長率による損失変化を明確にする必要がある。

パイプ内で自由度を有したGI型光ファイバ心線が曲がりを生じた場合の損失増加 α (dB) の実験式が既に報告されており、以下の式で与えられる。⁽³⁻⁸⁾

$$\alpha = (m + n \log L) \rho^2 \quad (3-7)$$

ここで L : ケーブル長 (m)

ρ : 曲がりの最大曲率 (mm^{-1})

m : 定数で 2.4 ~ 6.0

n : 定数で 1.4 ~ 5.0

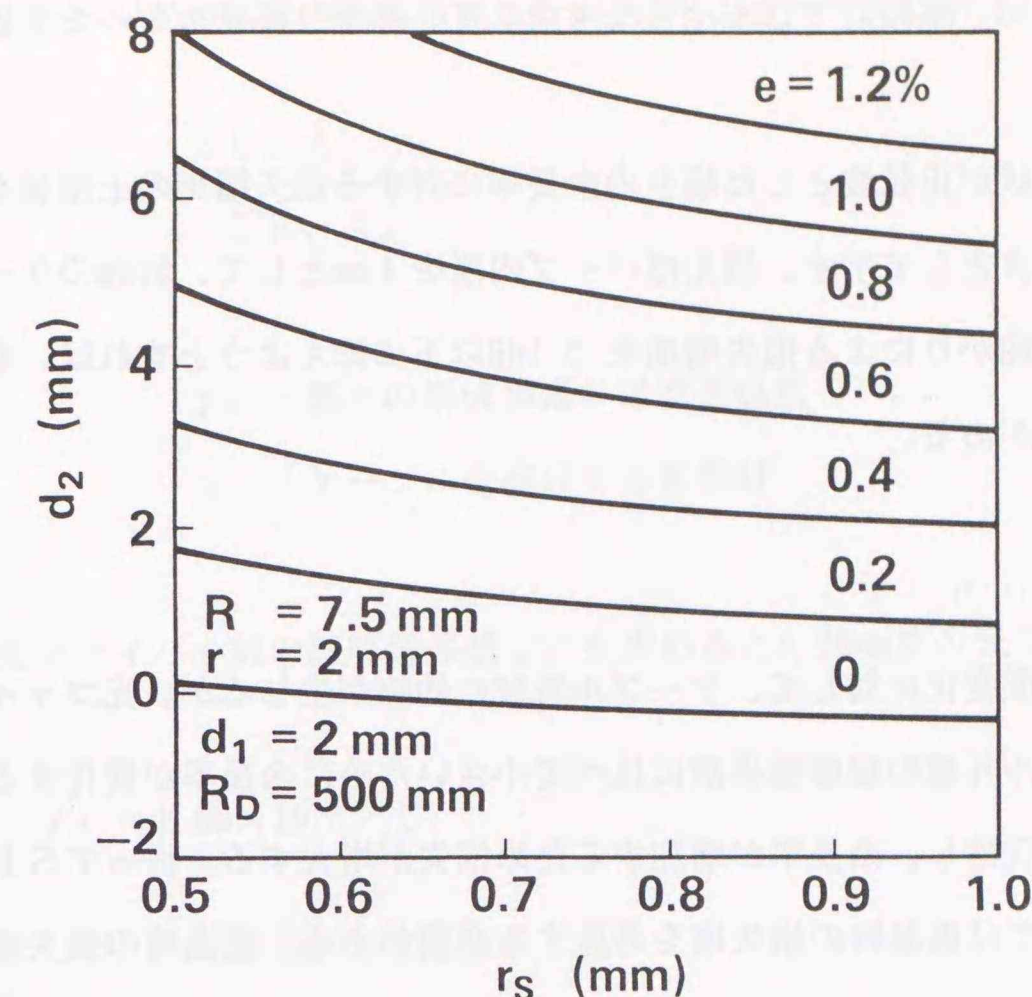


図3-7 余長と d_2 、 r_s の関係

従って曲がりによる損失増加は以下の式の範囲で与えられる。

$$\rho^2 \cdot (24 + 14 \cdot \log L) < \alpha < \rho^2 \cdot (60 + 50 \cdot \log L) \quad (3-8)$$

ここで曲がりの最大曲率はパイプ内におけるうねり方で異なり、うねりの形状がらせんの場合は

$$\rho = \frac{2\varepsilon}{r_0} \quad (r_0 = r - r_u) \quad (3-9)$$

正弦波の場合は

$$\rho = \frac{4\varepsilon}{r_0} \quad (r_0 = r - r_u) \quad (3-10)$$

ここで ε はケーブル余長率。

うねりの形状がらせんの場合は、正弦波の場合と比較して同一の余長率で最大曲率が小さく、損失増加は小さい。本設計では安全性を考慮して、曲がり形状モデルを正弦波と仮定する。

図3-8 に曲がりの形状が正弦波とした場合の余長率に対する損失増加の上限値をパイプ内径 (2r) をパラメータとして示す。例えばパイプ内径を 4 mm として、500m のケーブルに対し光ファイバ心線の曲がりによる損失増加を 0.1dB 以下に抑えようとすれば、余長率は 0.8% 以下にする必要がある。

3.3.3 低温時の損失増⁽³⁻⁷⁾

SP ケーブルは温度変化に対して、ケーブル外被に伸縮が生じるが、光ファイバ心線の線膨張係数がケーブル外被の線膨張係数に比べて小さいために余長率が変化する。低温側ではケーブル外被が収縮し、余長率が増加するため損失が増大する。従って SP ケーブルの構造設計にあたっては低温時の損失増を考慮する必要がある。低温時の損失増はケー

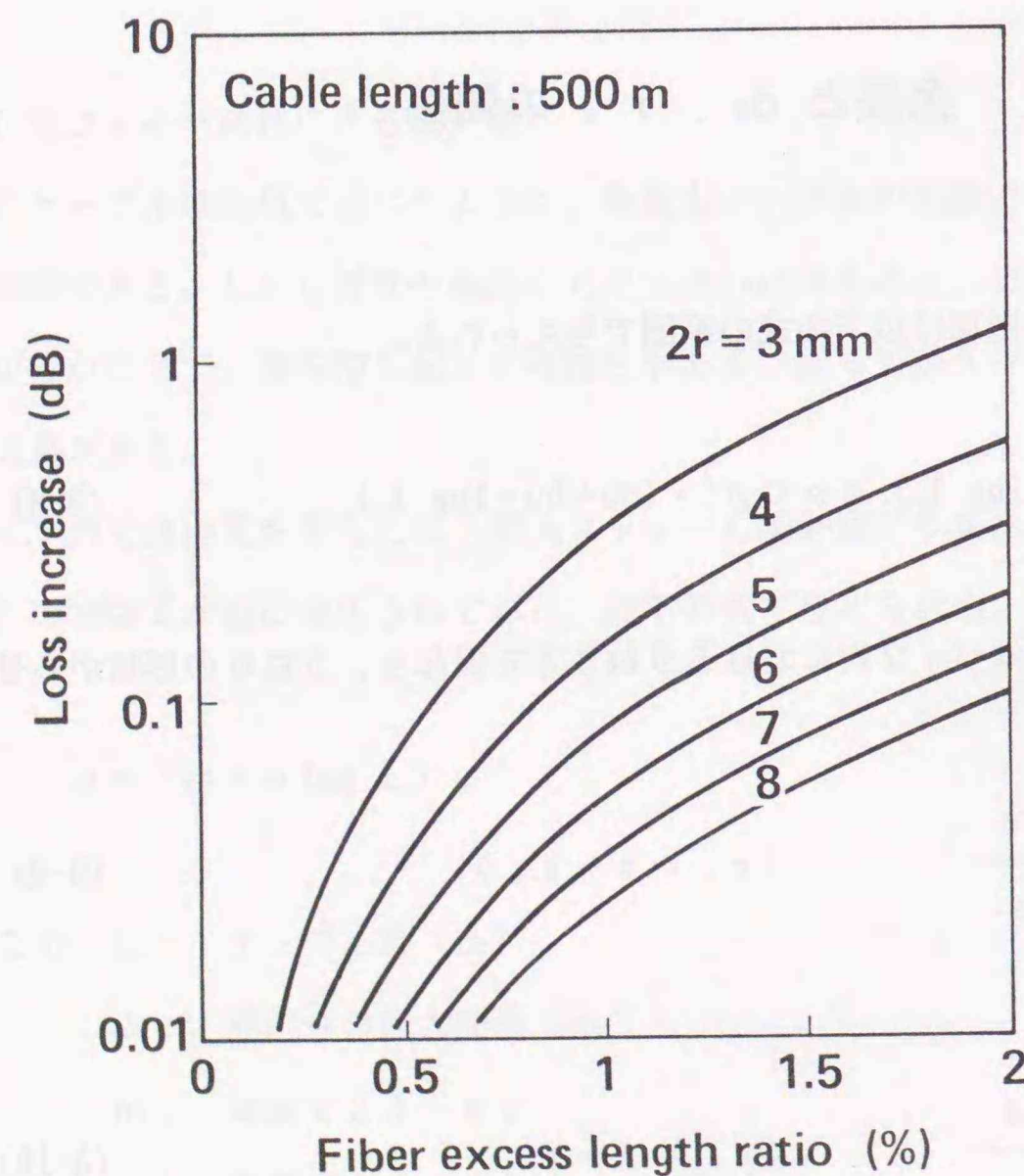


図 3-8 余長率と損失増

ブル外被及び光ファイバ心線の線膨張係数を求めることにより推定できる。

まず SP ケーブル本体の線膨張係数 γ_c は以下の式で与えられる。

$$\gamma_c = \frac{\sum E_n A_n \gamma_n}{\sum E_n A_n} \quad (3-11)$$

ただし γ_n : 個々の構成要素の線膨張係数
 n : ケーブルを構成する各部材

次に光ファイバ心線の線膨張係数 γ_f を求めると 0.25mm ϕ の光ファイバ心線は

$$\gamma_f = 1.89 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (3-12)$$

となる。

温度 T における余長率 ε_T は、近似的に次式で表される。

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{20} - (\gamma_c - \gamma_f) \cdot \Delta T \quad (3-13)$$

ただし ε_{20} : 常温 (20°C) における余長率

ΔT : 温度変化量 (常温 (20°C) からの温度変化量)

式 (3-8) 及び式 (3-13) より温度変化による曲げ損失による損失変化 $\Delta \alpha$ は

$$\frac{4 \varepsilon_T^2}{r_0^2} (24 + 14 \cdot \log L) < \Delta \alpha < \frac{4 \varepsilon_T^2}{r_0^2} (60 + 50 \cdot \log L) \quad (3-14)$$

の範囲で表される。

式 (3-14) において損失変化は ε / r_0 の 2 乗に比例することがわかる。そこで余長率を r_0 で規格化した規格化余長率 ε / r_0 (mm⁻¹) と最大損失増の関係の計算結果を図3-9 に示す。 図中20°Cは常温でケーブルを延線した時の損失増を示している。図3-9 から損

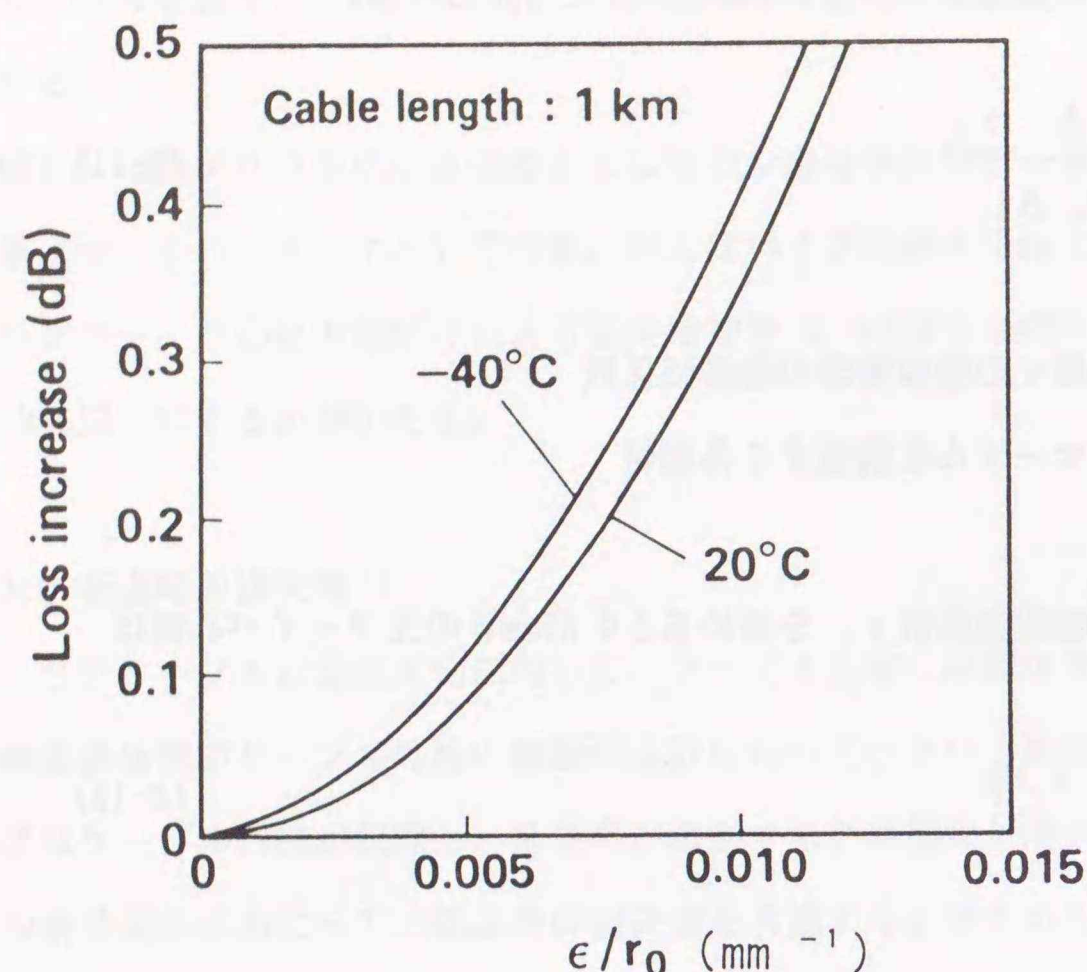


図 3-9 規格化余長率と損失増

失増を 0.1dB以下とするためには、 ϵ / r_0 を $0.005(\text{mm}^{-1})$ 以下にする必要がある。

3.3.4 抗張力体の設計

図3-2 および図3-3 で明らかなように S P ケーブルの抗張力体は、安定した余長を挿入するために 2 本の単心の抗張力体を使用している。抗張力体の径と光ファイバ余長及びそれによる損失増については前項で述べたところであるが、その他に抗張力体を設計する場合には布設時等に生じるケーブルの伸び歪みを 0.2%以下に抑える必要がある。

ケーブルの単位重量 W は

$$W = \sum (\eta_n A_n) \quad (3-15)$$

ただし η : 各部材の密度

またケーブル布設時に許される張力を T とすれば、 T はケーブル単位重量 W と最大布設

長 L の積で表すことができる。そこで布設時にケーブルに生じた伸び歪 β は以下の式を満足しなければならない。

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{T}{\sum E_n A_n} \\ &= \frac{\sum \eta_n A_n}{\sum E_n A_n} L \leq 0.2\% \end{aligned} \quad (3-16)$$

図3-10に抗張力体径とケーブルの伸びとの関係を示す。ケーブルが 1 Km 自重対応つまり L が 1000m の時にケーブルの伸びを 0.2%以下に抑えるためには、抗張力体径は 1.4mm 以上必要である。同様に 500m 自重対応では 0.8mm 以上必要である。

3.3.5 幾何学的制限

S P ケーブルの各部の寸法設計を行うに当たっては、以上述べてきた制限の他に、各構成部材の寸法がケーブル外径を越えてはならないため、以下の制限を受ける。

$$d_1 + r + t + t_p < R \quad (3-17)$$

$$r_s + (a^2 + d^2)^{1/2} + t_p < R \quad (3-18)$$

ただし t_p : 最低外被厚

3.3.6 設計例

前節までの結果に基づいて r_s と d_2 に着目したケーブルの設計チャートを図 3-11 に示す。図において、

- ①は布設時等に光ファイバ心線に張力が加わらない領域 ($\epsilon \geq 0.002$)
- ②は、余長による損失増加が 0.05dB/500m 以下になる領域 ($\epsilon \leq 0.006$)
- ③は、幾何学的に制限される領域 (式 (3-17) 及び (3-18))
- ④は、モーメントより制限される領域 (図3-5)
- ⑤は、布設張力等による抗張力体の径が制限される領域 (式 (3-16))

である。

この各制限を全て満たす領域が、 r_s 及び d_2 の設計領域であり、ハッチングで示した。

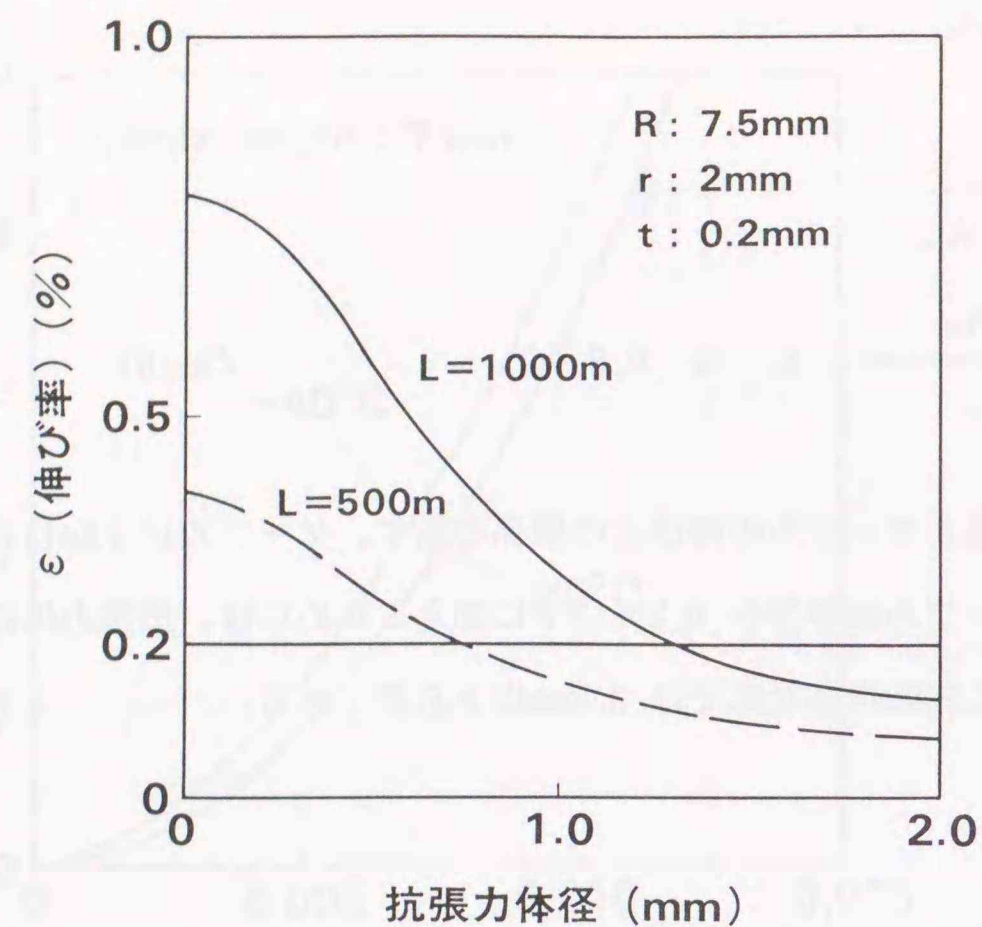


図3-10 抗張力体径とケーブル伸び

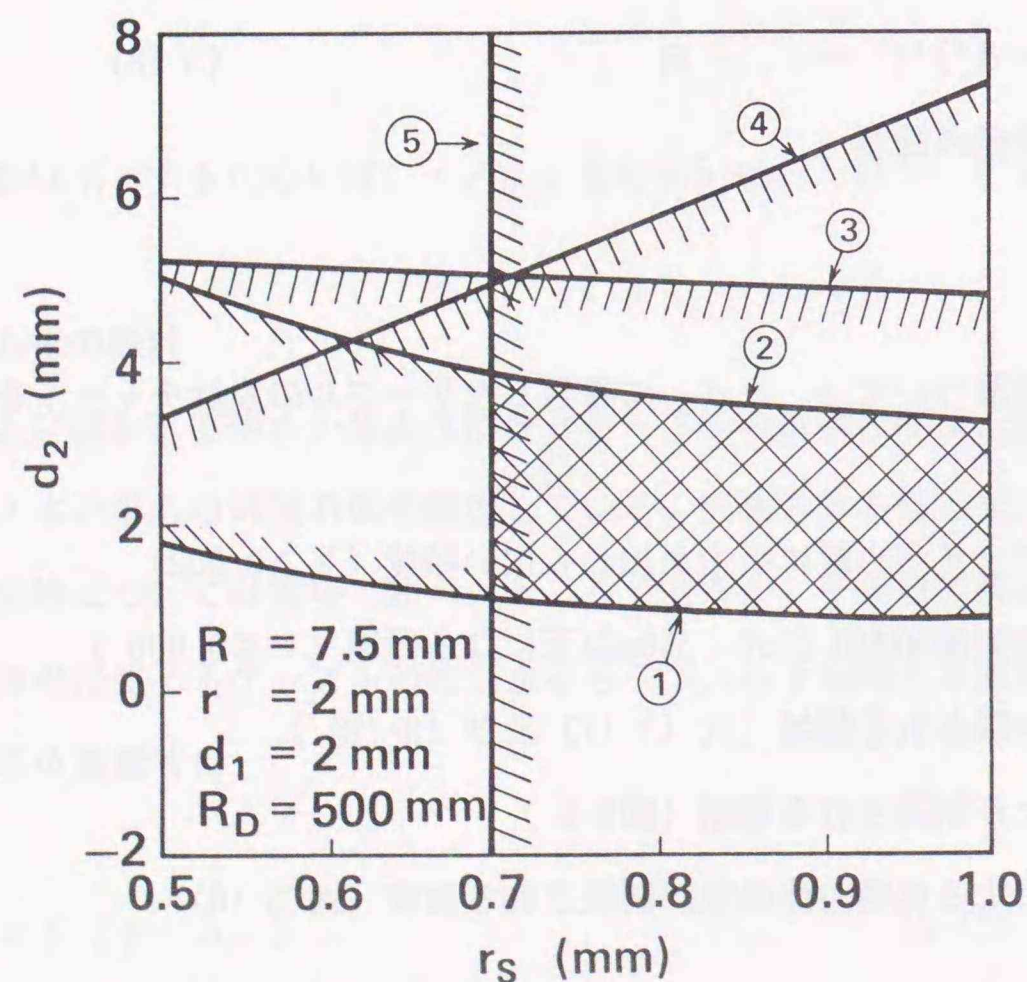


図3-11 SPケーブルの設計領域

3.4 試作検討結果

前節で述べた設計法に基づいて試作したSPケーブルの諸特性について述べる。

3.4.1 試作ケーブル構造

試作したSPケーブルの構造寸法を表3-1に示す。

表3-1 SPケーブル試作一覧表

No.	心線	心数	余長率 %	R mm	r mm	d ₁ mm	d ₂ mm	a mm	r _s mm	重量 g/m
①	単心	10	0.15	7.2	2.3	2.1	3.2	5.3	0.75	154
②	単心	20	0.20	7.2	2.1	2.3	1.1	4.8	0.75	160
③	単心	20	0.15	7.4	3.3	1.6	3.1	4.6	0.80	147
④	単心	60	0.50	7.3	3.2	1.4	2.9	4.4	0.70	147
⑤	テープ	20	0.14	7.3	3.4	0.9	4.2	2.3	0.80	161

注) 単心 : 外径0.25mmφの単心光ファイバ心線

テープ : 外径0.25mmφの単心光ファイバ心線を5心集合した光ファイバテープ

ここで使用した光ファイバ心線は、コア径50μm、光ファイバ径125μm、比屈折率差1%のGI型光ファイバにUV樹脂を被覆し、外径0.25mmとしたものである。余長率は、製造時に1000mmの胴径のドラムに巻き取ったケーブルを延線した時に付与される値である。

3.4.2 試作ケーブルの特性

表3-2に主な機械特性の測定条件を示す。

(1) 工程間損失変化

表3-3にGI型光ファイバ心線を收容したSPケーブルの工程間損失変化を示す。

各ケーブルとも一工程で製造されるため、心線時とケーブル化後の1000mmの胴径を有するドラムに巻かれた状態での損失変化を示した。測定波長は1.3μmである。ケーブル化後損失が増加しているものがあるが、この原因として、ケーブルに余長を挿入しようとする場合、ケーブル巻き取り時に心線長がケーブル長より長く必要となり、心線がラップ内を滑りケーブルに挿入されるが、ラップ面の摩擦係数が小さければ心線はスムーズに巻き込

表3-2 機械特性の測定条件

機械特性	測定条件
温度特性	温度 : $-30^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ケーブル長 : 78m
引張特性	張力 : $0 \sim 250\text{kg}$ ケーブル長 : 20m
曲げ特性	曲げ径 : 100mm, 200mm 曲げ角度 : 180° 曲げ回数:10 回
側圧特性	加圧荷重 : $0 \sim 250\text{kg}$ 加圧幅 : 50mm
しごき特性	張力 : 200kg 曲げ径 : 250mm

表3-3 試作ケーブル工程間損失変化

No.	心線	心数	余長率(%)	r (mm)	損失変化(dB/km)
①	単心	10	0.15	2.3	0.16
②	単心	20	0.20	2.1	1.17
③	単心	20	0.15	3.3	2.18
④	単心	60	0.50	3.2	0.30
⑤	テープ	20	0.14	2.8	0.10

測定波長 : $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$
損失変化 : 測定 5 心の平均値

まれ損失の増加が少ないのに対し、摩擦係数が大きい場合は心線に伸びが加わり、それがドラムに巻きとられる際に側圧となり、損失増加が発生することが確認されている。No. 5 のケーブルのようにテープ心線を使用した場合は、心線被覆厚が厚いために単心線の場合と比べて側圧に強く、損失増加が少ないことも明らかである。以上に基づいて工程間損失変動を小さくするためには以下の対策をとれば良いことが明らかになった。

- (a) パイプと心線の摩擦係数を小さくし心線に大きな張力が加わらないこと。
- (b) 心線の移動量を極力少なくすること。
- (c) 側圧に強い心線（被覆厚が厚い心線……テープ心線等）を使用すること。

なお、各ケーブルともケーブル延線後の損失増加量は、式(3-8)で推定できる範囲内であった。

(2) 余長率

試作ケーブルについて巻き取りドラム径を変化させて余長率の測定を行った。測定法は以下の通りである。

- ①ケーブルの片端に光ファイバ心線を一括固定し、他端をフリーにした約50mのSPケーブルをケーブルドラムに巻き付ける。
- ②フリーにしたケーブル端の光ファイバ心線を一括仮固定した後ケーブルを延長し、仮固定端を開放後光ファイバ心線を引き出して余長を測定する。

各ケーブル毎の巻き取りドラム径と余長率の関係の測定結果と式(3-6)により求めた計算値の関係を図3-12に示す。図より、No. 4を除いてはコア半径、心線種別に関係なく計算値と測定値が良く一致し、式(3-6)が適用できることが明らかである。またNo. 4のSPケーブルについては、コア径が小さい60心ケーブルで高密度設計になっているために、心線がパイプとの摩擦により多く引き込まれたことに起因している。

(3) 光ファイバ余長による損失

本項目以下の試験は、工程間損失変化のなかったNo. 1の試作ケーブルについて行ったものである。まず、余長率を変化させて損失変化の測定を行った。端末を折り返し接続したSPケーブル(40m)の片端の光ファイバ心線とケーブル外被を固定後、ドラム径150mm, 200mm, 500mmのドラムに心線にバックテンションをかけた状態で巻き取り、巻き終わりを仮固定する。これを延線して、余長がある状態で出射光レベルを測定し、その後仮固定した心線を開放し余長を引き出し、その時の出射光レベルから損失変化を測定した。

式(3-8)から求めた計算値と測定値を図3-13に示す。余長による損失増は式(3-8)の範囲内に含まれている。

(4) 温度特性

光ファイバ心線の余長の曲がりに起因する損失の温度依存性を測定した。試験長78mで光ファイバ心線4心を折り返した後ケーブルを恒温室に延線し、温度を $-30 \sim 60^{\circ}\text{C}$ と変化させて $1.3 \mu\text{m}$ の波長で損失変化を測定した。なおケーブル内の光ファイバ心線余長率は 20°C において0.15%の2通りとしその結果を図3-14に示す。斜線部が式(3-14)による計算値を示している。実測値は計算値と一致しており温度変化による損失変化は式(3-14)により推定できることがわかる。光ファイバの歪も位相法⁽³⁻⁸⁾で同時に測定した。ケー

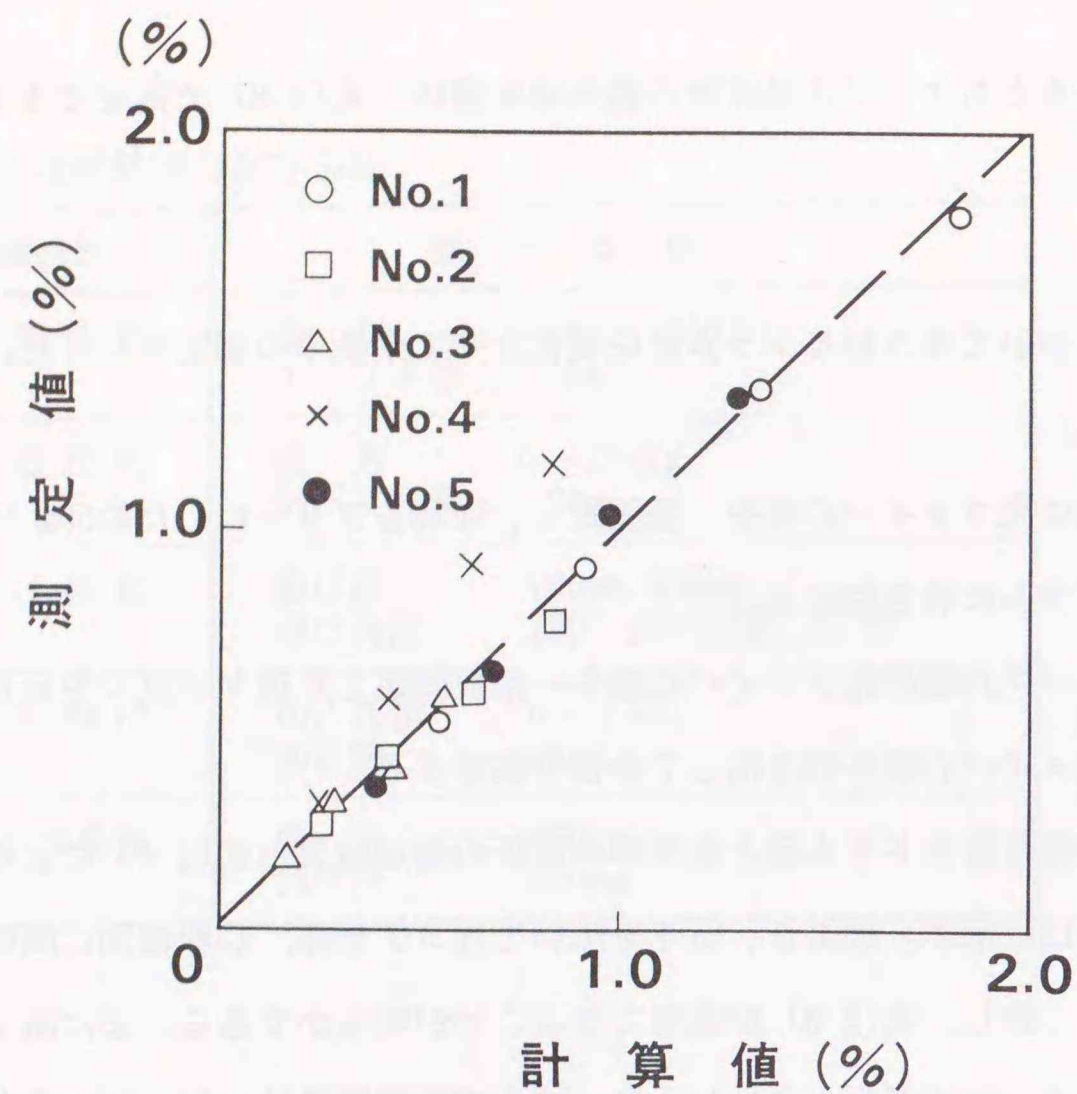


図3-12 余長率の測定結果

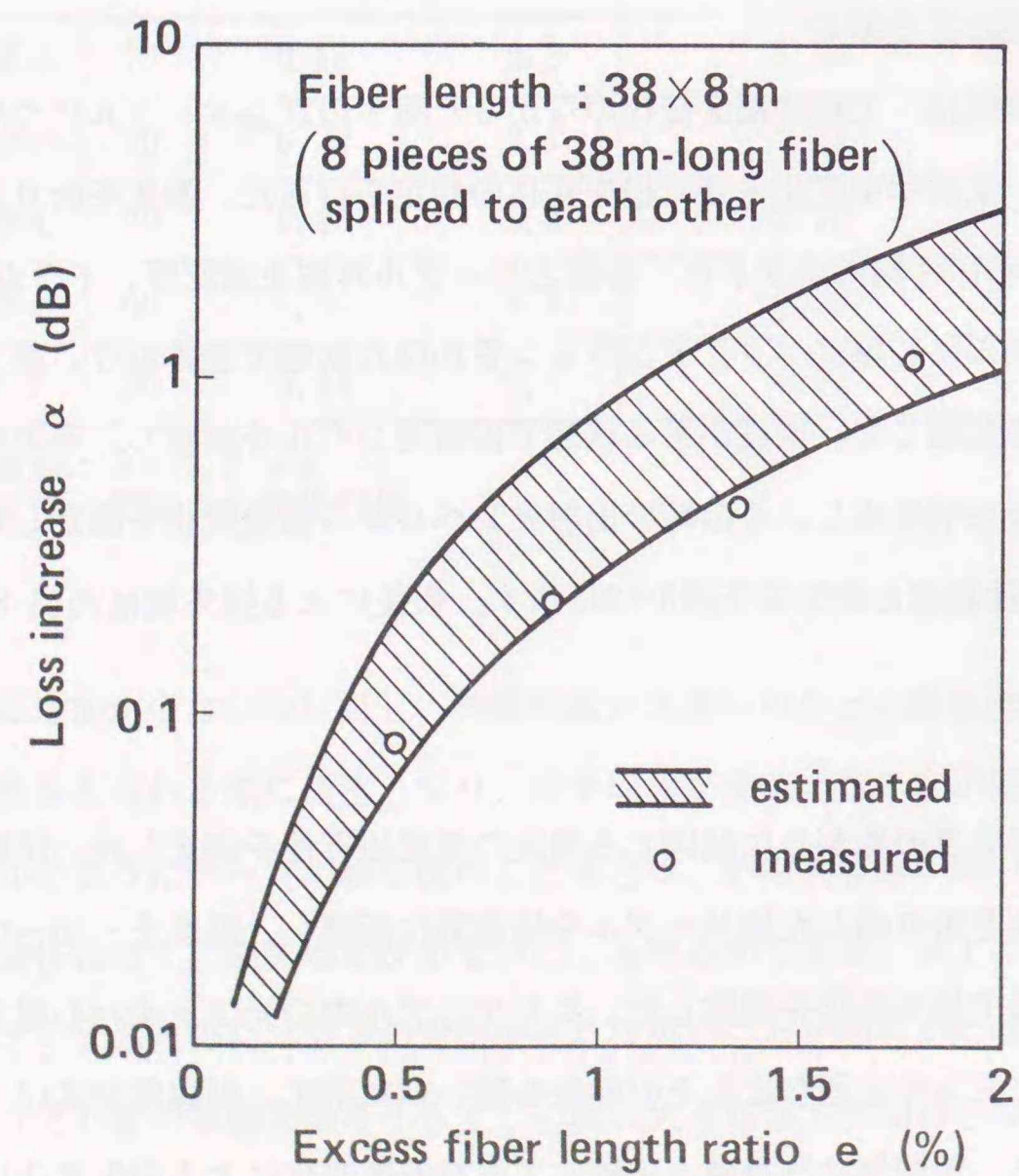


図3-13 余長による損失増の測定結果

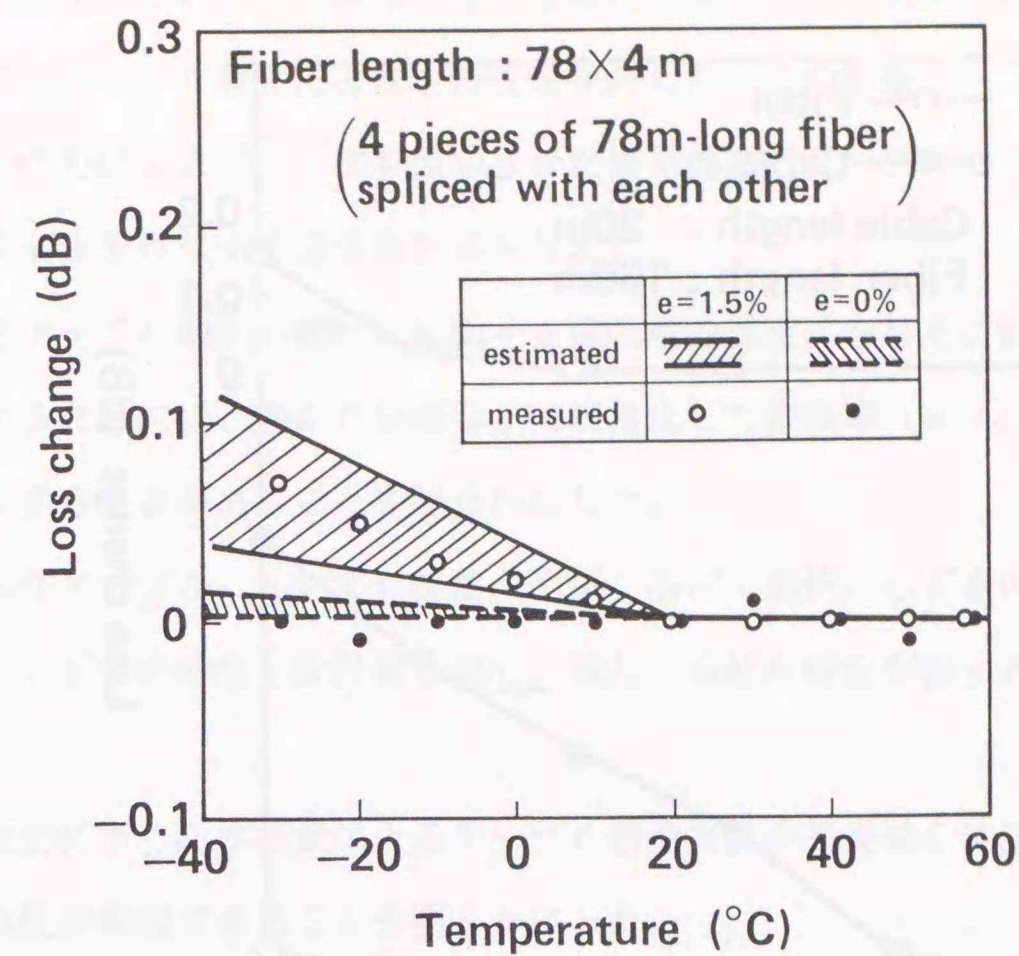


図3-14 温度特性

ブルの伸縮量は、40℃の温度変化でケーブル外被が0.08%、単心線は0.01%の伸縮が計算される。実測した心線の歪は0.03%近傍であることから、摩擦等により光ファイバ心線はケーブル外被に一部拘束されて伸縮していると考えられる。

(5) 引張特性

試験長20mで光ファイバ心線2心折り返しとし、1.3μmの波長で張力を0～250kgの範囲で変化させ損失変化、心線の伸び、ケーブルの伸び歪を測定した。結果を図3-15に示す。0.2%ケーブル外被が伸びてもファイバの伸びおよび損失変化はみられず、良好な特性が得られた。

(6) 曲げ特性

試験長6mで光ファイバ心線2心折り返しとし、曲げ方向を抗張力体を結ぶ線分に対し垂直な2方向で曲げ角180度、10回曲げとして1.3μmにおける損失変化、心線の伸び及びケーブルの伸び歪を測定した。いずれの場合も損失変化は発生せず、曲げ径100mm程

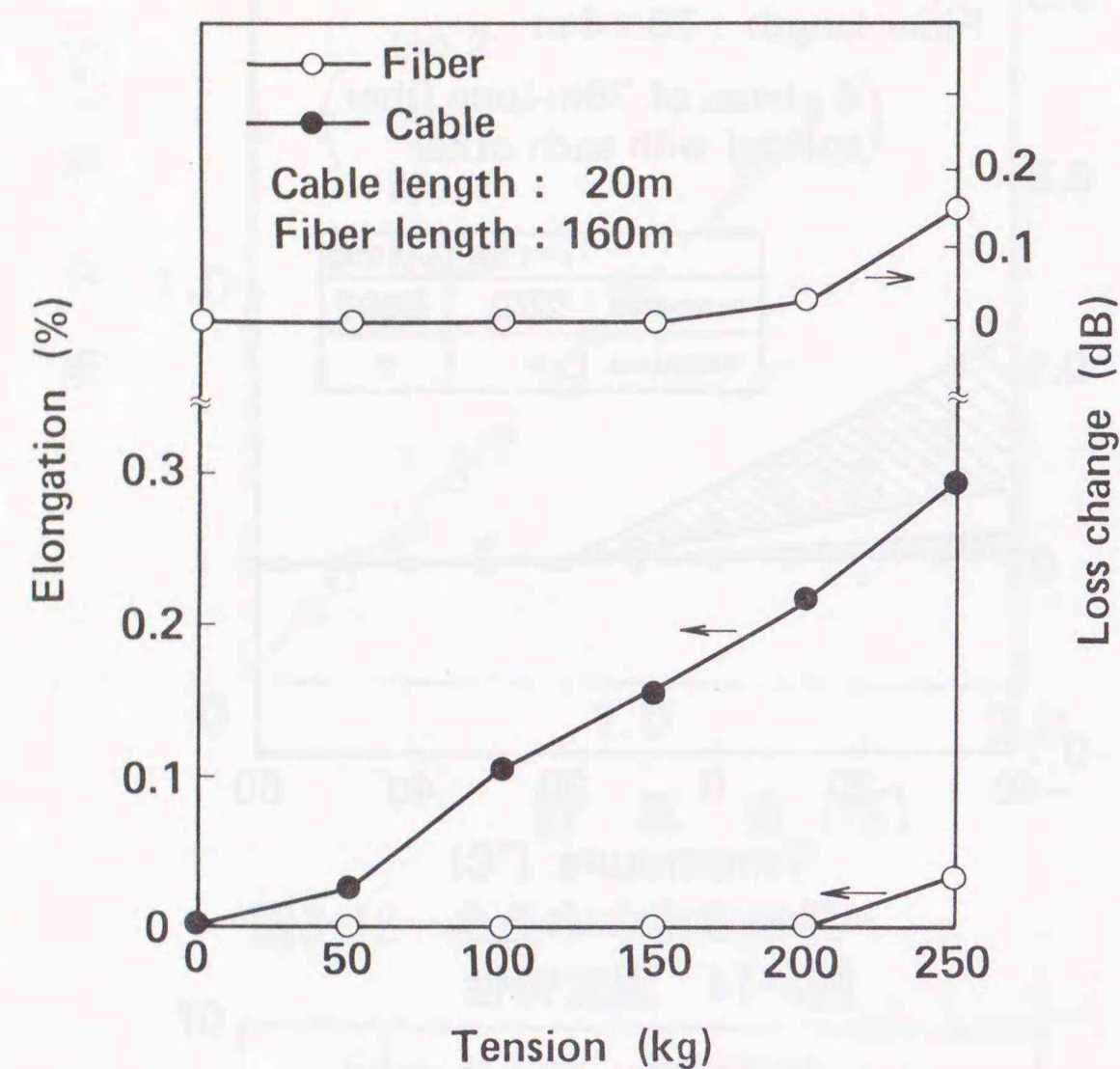


図3-15 引張特性

度でも問題ないことが明らかになった。

(7)側圧特性

光ファイバ心線2心折り返しとし、加圧幅50mmで加圧荷重を0～250kgまで変化させて波長1.3μmでの損失変化、及びケーブルの外被偏平量の測定を行った。加圧方向は2本の抗張力体に対し、垂直方向とした。250kg/50mmで約4mmの偏平量が発生したが、損失変化はみられず良好な結果であった。

(8)しごき特性

試験長50mで光ファイバ心線2心折り返しとし、200kgの張力を加えてしごき試験を行い、波長1.3μmでの損失変化、心線の伸び歪を測定した。引き通し工具は半径250mmのものを使用した。損失に変動はなく、良好な結果が得られた。

3.5 まとめ

構造の簡素化とそれに伴う製造工程の簡略化によるコスト低減をねらいとした新構造のSPケーブルについて設計法と基本特性を検討した。その結果、

- (1) 抗張力体およびパイプを偏心させた簡易構造のケーブルについて、光ファイバに所要余長を付与する構造設計式を与えた。
- (2) 光ファイバ余長の曲げに起因する損失増の推定式を与え、損失増を0.1dB/km以下にするためには、曲がり振幅 r_0 で規格化した余長率(ε/r_0)を $0.005(\text{mm}^{-1})$ 以下にする必要があることを明らかにした。
- (3) 試作ケーブルについて、温度、引張、曲げ、側圧、しごきの各特性を評価した結果、いずれの特性も設計値と良く一致し、良好な特性が得られることを確認した。

以上の検討により、本提案によるケーブル構造設計の妥当性を確認するとともに、実用上良好な特性が実現できることを明らかにした。

付録(1) 断面 2 次モーメントの計算

各部の断面 2 次モーメントを図 A により求めると以下ようになる。

$$I_p = \frac{\pi}{64} R^4 - \frac{\pi}{64} (r+t)^4 - 2 \left(\frac{\pi}{64} \right) r_s^4 + R^2 \pi R^2$$

$$- Y_1^2 \pi (r+t)^2 - Y_{s1}^2 \pi r_s^2 - (Y_{s2} \cos \theta)^2 \pi r_s^2$$

$$I_a = \frac{\pi}{64} \{ (r+t)^4 - r^4 \} + Y_1^2 \{ (r+t)^2 - r^2 \}$$

$$I_s = 2 \left(\frac{\pi}{64} \right) r_s^4 + \pi r_s^2 (Y_{s1} \cos \theta + Y_{s2} \cos \theta)$$

また Y_1, Y_{s1}, Y_{s2} は

$$Y_1 = d_1 \cos \theta$$

$$Y_{s1} = d_2 + a \tan \theta$$

$$Y_{s2} = d_2 - a \tan \theta$$

である。

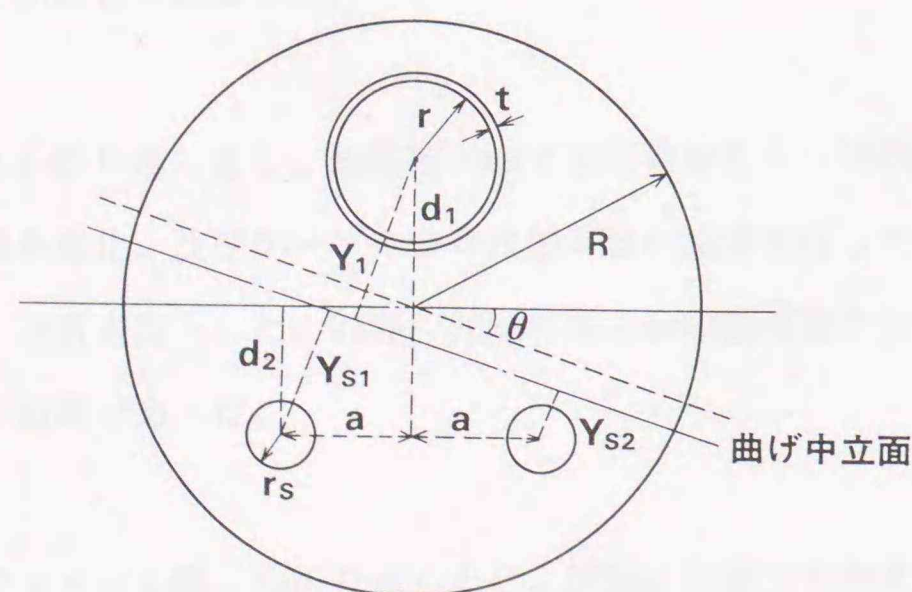


図 A 断面 2 次モーメントの計算モデル

第 4 章 シングルモード光ファイバ加入者線路の構成

4.1 まえがき

加入者光線路は接続点が多いため、コア径が大きく、接続の容易な G I 型光ファイバが加入者用の光ファイバとして当初検討され、導入された。しかし、高精細テレビ (HDTV) 等の将来の広帯域 I SDN サービスに対して G I 型光ファイバでは帯域特性が不十分なことから、中継系は SM 型光ファイバに統一されているため、中継と加入者で 2 種類のケーブルとなることから加入者系へも SM 型光ファイバの導入が期待されていた。

接続特性の改善のためには、コアの軸合わせのいらない簡易な接続を可能にするため、コア偏心量を小さくすることが必要条件であったが、全合成 VAD 技術の開発⁽⁴⁻¹⁾により、極めて偏心の小さい光ファイバ製造法が確立したこと、高精度な接続技術が確立されたことから加入者系への SM 型光ファイバの導入が可能となった。

本章では加入者系へ SM 型光ファイバケーブルを導入するための必要条件、光ファイバパラメータ、ケーブル設計に関する研究結果を述べる。

4.2 設計条件

加入者系への SM 型光ファイバの導入の目的は、加入者伝送路として優れた性能を有することの他に、中継系と加入者系の光ファイバケーブル技術の統一にある。従って、加入者光ファイバケーブルとしての要求条件の他、中継系との整合をとった設計が必要である。

この観点から、以下の設計条件のもとに研究を進めた。

- (1) 光ファイバパラメータは $1.3 \mu\text{m}$ 零分散の標準ファイバ (中継用光ファイバ⁽⁴⁻²⁾) とコンパチビリティを有すること。
- (2) 加入者伝送方式として有力な波長 $1.3 \mu\text{m}$ および $1.55 \mu\text{m}$ の波長多重伝送が可能のように、 $1.55 \mu\text{m}$ の伝送も可能なこと⁽⁴⁻³⁾。
- (3) 加入者特有の建設後の接続替え等のアクセスに耐えるように、ハンドリング時の曲げ特性に優れること。

(4) 中継系は1システム2本の光ファイバを用いるので、心線/ユニットの単位は偶数であること。

以上の条件に基づいてSM型加入者光ファイバケーブルの設計を行った。

4.3 SM型光ファイバの基本特性

4.3.1 伝送特性

SM型光ファイバの伝送特性は、伝送損失特性と、波長分散特性（伝送帯域特性）で決定される。図4-1に一般的なSM型光ファイバの損失波長依存性を示す。コアにGeをドープして屈折率分布を制御する一般的なSM型光ファイバにおいては、波長 $1.3\mu\text{m}$ において 0.4dB/km 、波長 $1.55\mu\text{m}$ で 0.2dB/km の損失が平均的な数値である。

これらの伝送損失値はSM型光ファイバのパラメータであるモードフィールド径(MFD)、カットオフ波長等にはほとんど依存しない。

一方、波長分散特性は光ファイバパラメータに大きく依存することが知られており、その値は式(4-1)により計算することができる。⁽⁴⁻⁴⁾

$$\sigma = \frac{1}{c\lambda} \left[\frac{kdN_2}{dk} + k \frac{d(N_1 - N_2)}{dk} \frac{d(Vb)}{dV} + (N_1 - N_2) \frac{Vd^2(Vb)}{dV^2} \right] \quad (4-1)$$

ここで、 $N_i = n_i + k \frac{dn_i}{dk}$

$$b = [(\beta/k)^2 - n_2^2]$$

$$V = akn_1 \sqrt{2\Delta}$$

である。 a はコア半径、 Δ は比屈折率差、 n_1 および n_2 は、それぞれコアおよびクラッドの屈折率を表す。また、 V は規格化周波数、 b は規格化伝搬定数、 k は波数、 λ は波長、 c は光速である。 N_1 および N_2 はそれぞれ、コアおよびクラッドでの群屈折率を表す。

式(4-1)を用いて、光ファイバのモードフィールド径、実効カットオフ波長と波長分散値の関係を計算した結果を図4-2に示す。

中継線路において用いられるSM型光ファイバの波長分散値は 3.5ps/km/nm 以下であることが要求される。また、一般的な $1.3\mu\text{m}$ 帯域のLD（レーザダイオード）光源の中心波長の偏差は $1.285 \sim 1.330\mu\text{m}$ であるので、光ファイバパラメータは図4-2に示した

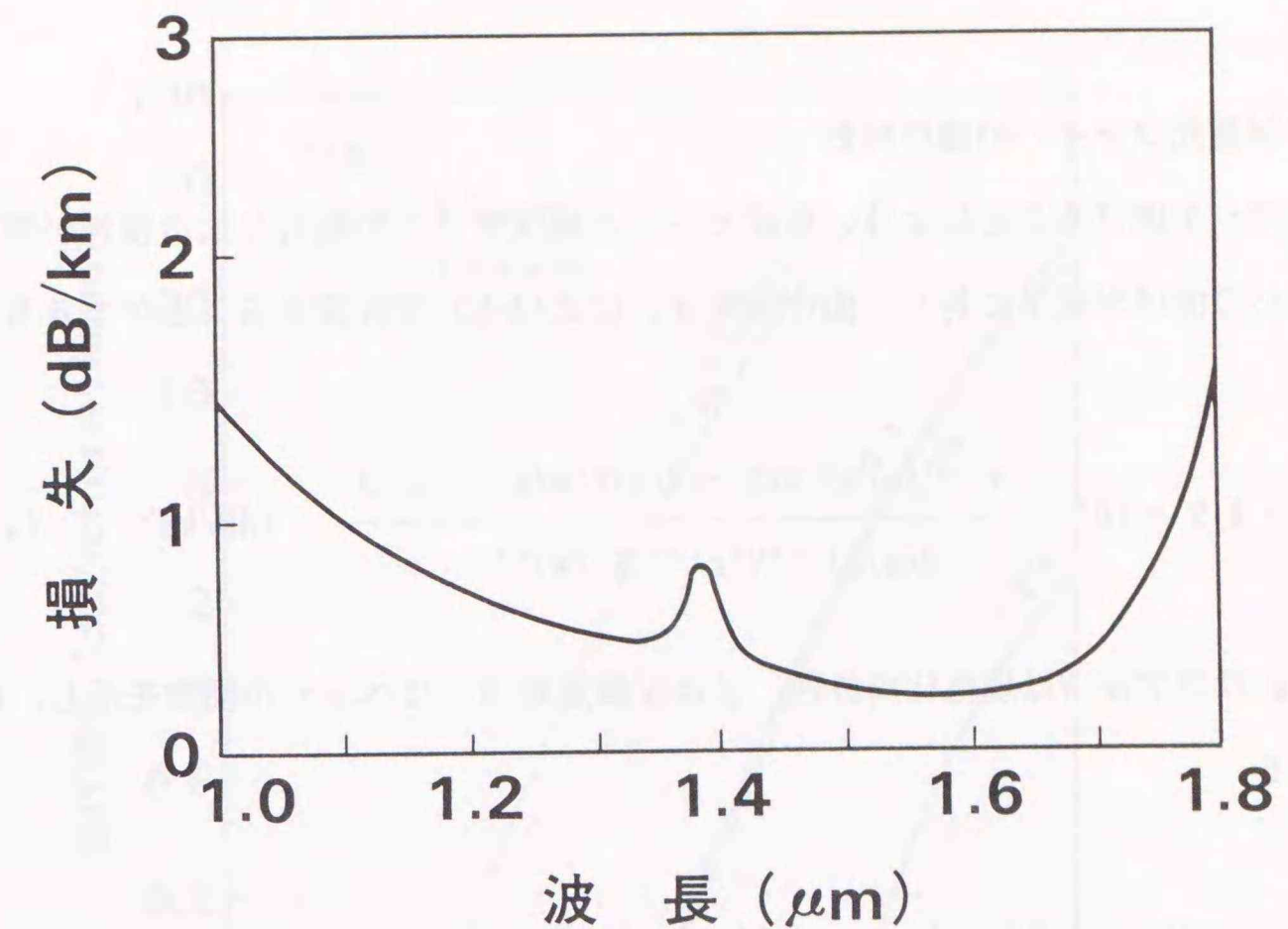


図4-1 SM型光ファイバの損失波長特性例

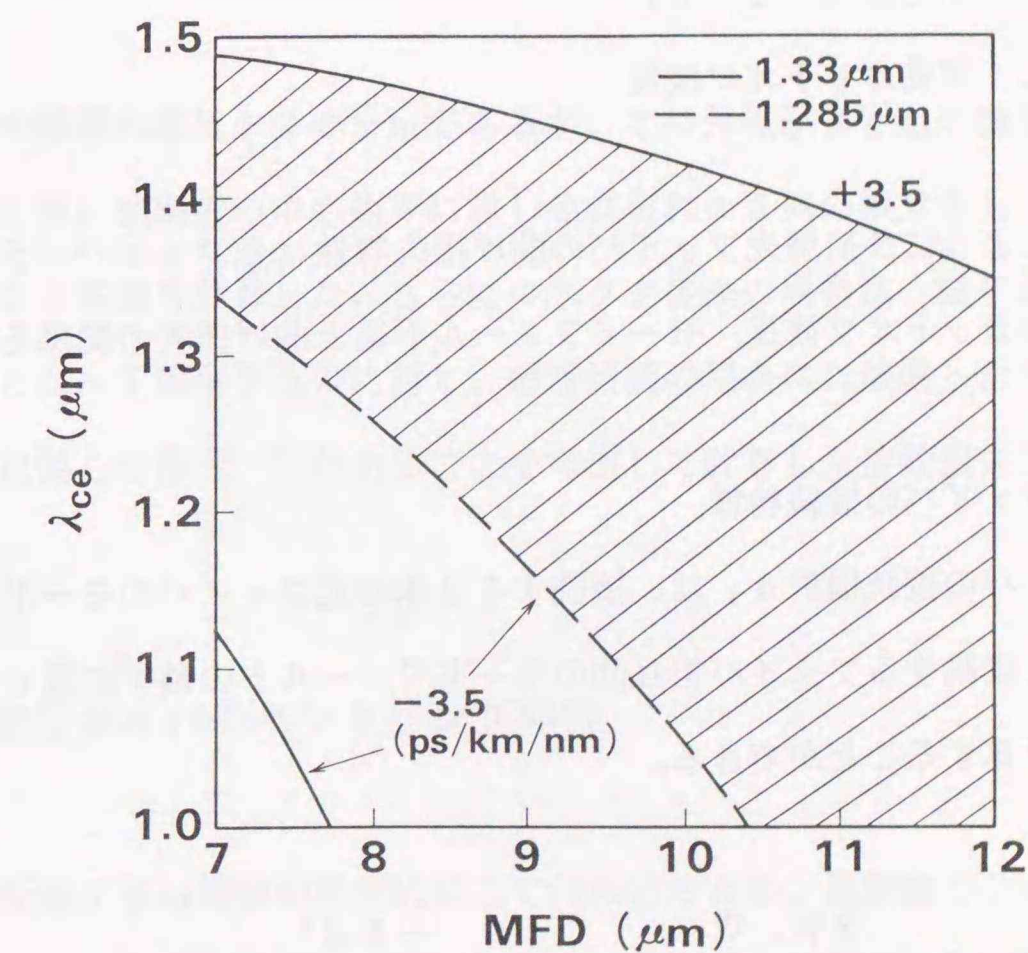


図4-2 ファイバパラメータと波長分散

ハッチングの領域内に設定しなければならない。

4.3.2 SM型光ファイバの曲げ特性

光ファイバを曲げることにより、導波モードと漏洩モードが結合し伝送損失が増加する。

光ファイバの曲げ半径 r に対し、曲げ損失 α_b は式(4-2) で計算することができる⁽⁴⁻⁵⁾

。

$$\alpha_b = 4.3 \times 10^3 \frac{\pi^{1/2} (u/a)^2 \exp(-(2/3)r(w/a)^3/\beta^2)}{2(w/a)^{3/2} V^2 r^{1/2} (K_1(w))^2} \quad (\text{dB/km}) \quad (4-2)$$

ただし、 a はコア径、 V は規格化周波数、 β は伝搬定数、 K_1 はベッセル関数を示し、以下の関係である。

$$u = a(k^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}, \quad w = a(\beta^2 - k^2 n_2^2)^{1/2}$$

$$V = 2.405 \cdot C \cdot \lambda_{ce} / \lambda$$

$$\beta = ((w/a)^2 + k^2 n_1^2)^{1/2}$$

ただし、 n : 屈折率

C : 補正定数 (~ 1.2)

λ_{ce} : 実効カットオフ波長

式(4-2) に示したようにSM型光ファイバの曲げ損失特性は光ファイバパラメータに大きく依存する。実効カットオフ波長、モードフィールド径と曲げ損失の関係を図4-3 に示す。

4.3.3 SM型光ファイバの接続特性

SM型光ファイバの接続損失 α_j は、接続する2本の光ファイバのモードフィールド径

(W_1 、 W_2) と接続するファイバ相互間のモードフィールドの軸ずれ量 d に大きく依存

し、式(4-3) で計算することができる。⁽⁴⁻⁶⁾

$$\alpha_j = -10 \log \left[\frac{2 W_1 W_2}{W_1^2 + W_2^2} \cdot \exp \left(\frac{-8 d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \right] \quad (4-3)$$

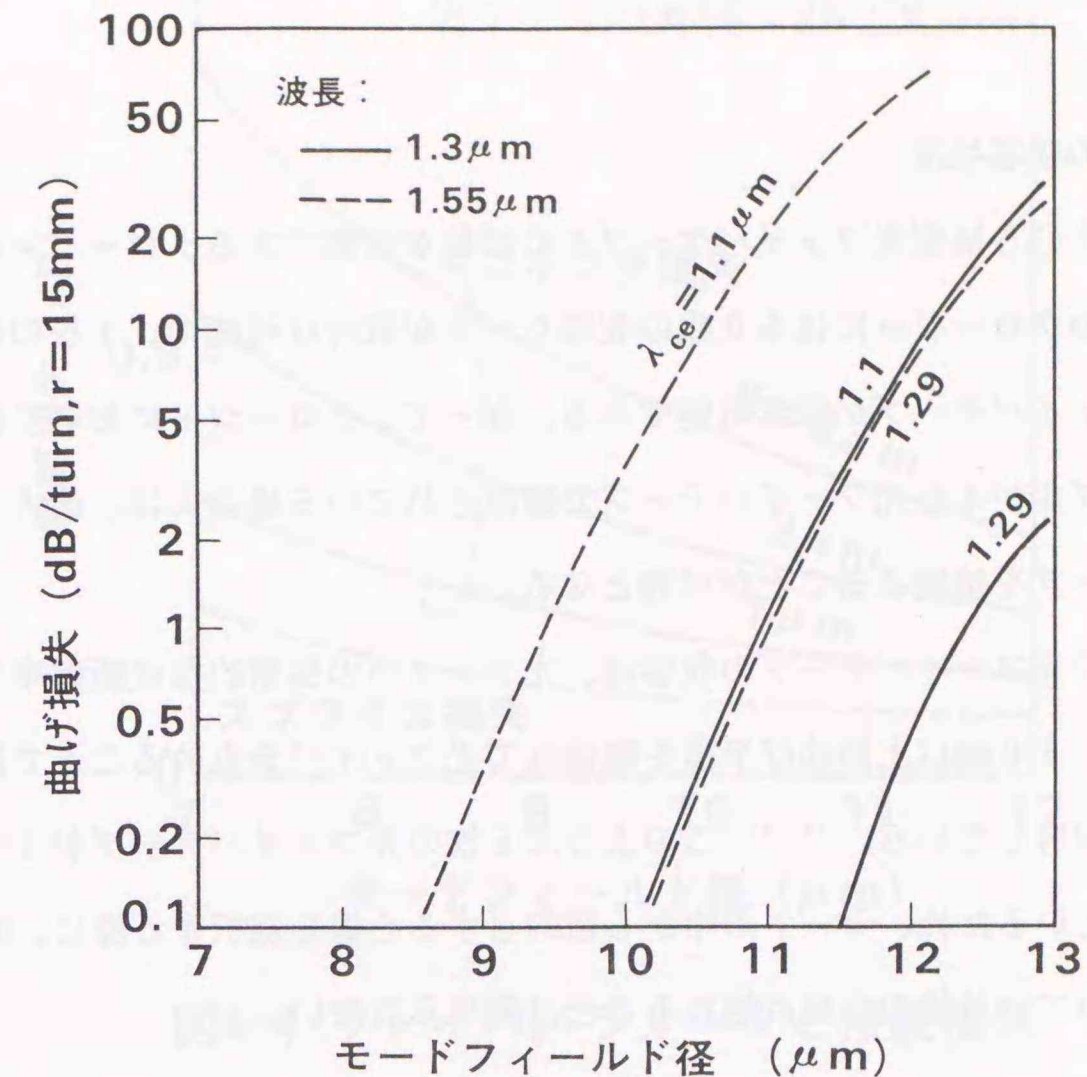


図4-3 SM型光ファイバの曲げ損失

光ファイバの標準外径は $125 \mu\text{m}$ であるが、この外径が $X \mu\text{m}$ の偏差をもっていると仮定し、 W_1 と W_2 が両者の中心値 W に対しそれぞれ $\pm 5\%$ の誤差をもっていると仮定して接続損失の 50% 値を計算した。さらにコネクタ接続の場合は、軸ずれ量がそのまま接続後も軸ずれとなって残留するのに対し、融着接続の場合には溶融したファイバの表面張力によって自己調心効果⁽⁴⁻⁷⁾ があることを考慮して計算した接続損失の値を図4-4 に示す。

4.4 SM型光ファイバのハンドリング特性

加入者への配線工事は需要の発生に応じて行われるため、建設後のケーブルの分岐点から新たに発生した加入者への配線工事が行われる際には、通常の場合、当該分岐点には既に使用されている回線が収容されている。このような配線工事においては、現在使用されている回線（以下現用回線）に触れることは避けられない。本節では光ファイバパラメー

タの設計要因として、クロージャ内に収容されている現用回線をハンドリングした時に生じる伝送損失の変動特性を明らかにする。

4.4.1 光ファイバの収容状況

図 4-5に1000心SM型光ファイバケーブルの接続が可能であるクロージャの余長処理部を示す。1つのクロージャには50枚の収容シートが取付け可能で、1枚の収容シートには5枚の光ファイバテープが収容可能である。従って、クロージャにおいて接続される光ファイバケーブルが4心光ファイバテープで構成されている場合には、最大1000心の光ファイバテープを接続することが可能となる。

各収容シートへの光ファイバテープの収容は、光ファイバの長期的な破断確率を一定値以下とするために、30mm以上の曲げ半径を確保して光ファイバを丸めることで接続時に必要とした余長を収容している。⁽⁴⁻⁸⁾ このように5枚の光ファイバテープが1つの収容シートに収容されているため、シートの中から目的とする心線を選択する際に、同一の収容シートに収容されている他の心線に触れることは避けられない。

4.4.2 伝送損失変動の原因⁽⁴⁻⁹⁾

1000心の接続点を収容したクロージャを実験室内に再現し、波長1.55 μ mで伝送損失の変動を測定した。実験の結果、伝送損失の変動要因は大きく次の2つに分けられることがわかった。

- ①通常作業中に発生するもの
- ②アクシデント的に発生するもの

ここでの通常作業とは光ファイバ心線を収容シートから取り出し、丸められた心線を解き、また丸め直し、収容シートに収め直す一連の作業のことである。一方、アクシデント的な発生要因とは、上記の一連の作業中に生じる事故的な要因で、心線をクロージャ内の部品にひっかけたり、接続部を取り落として宙吊りの状態になる場合である。ここでは、まず通常作業中に生じる伝送損失の増加量について分析し、次にアクシデント的な発生要因についての検討を行う。

(1) 通常作業上の伝送損失変動

一連の作業を次の4つの工程に分類して伝送損失の変動特性を測定し、損失の発生状況の検討を行った。

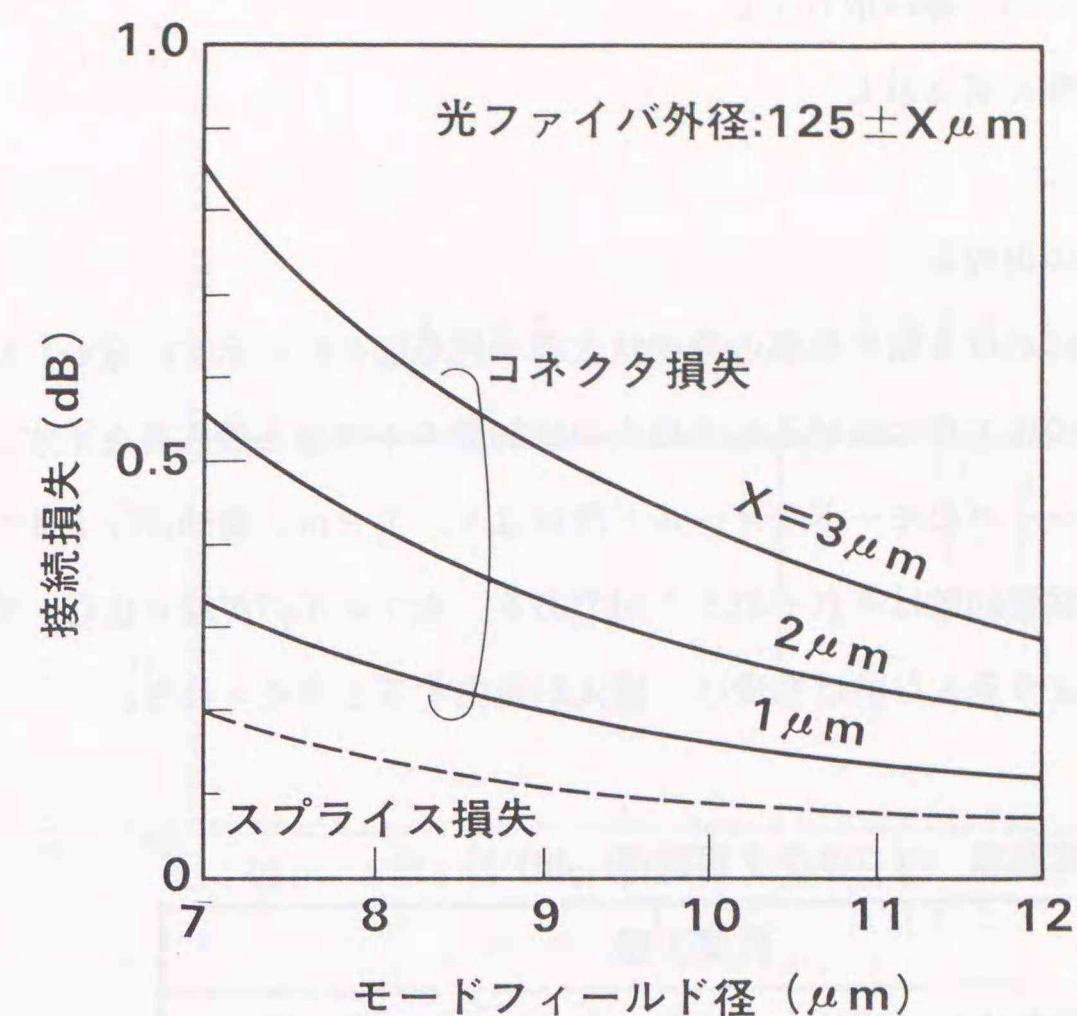


図4-4 ファイバパラメータと接続損失

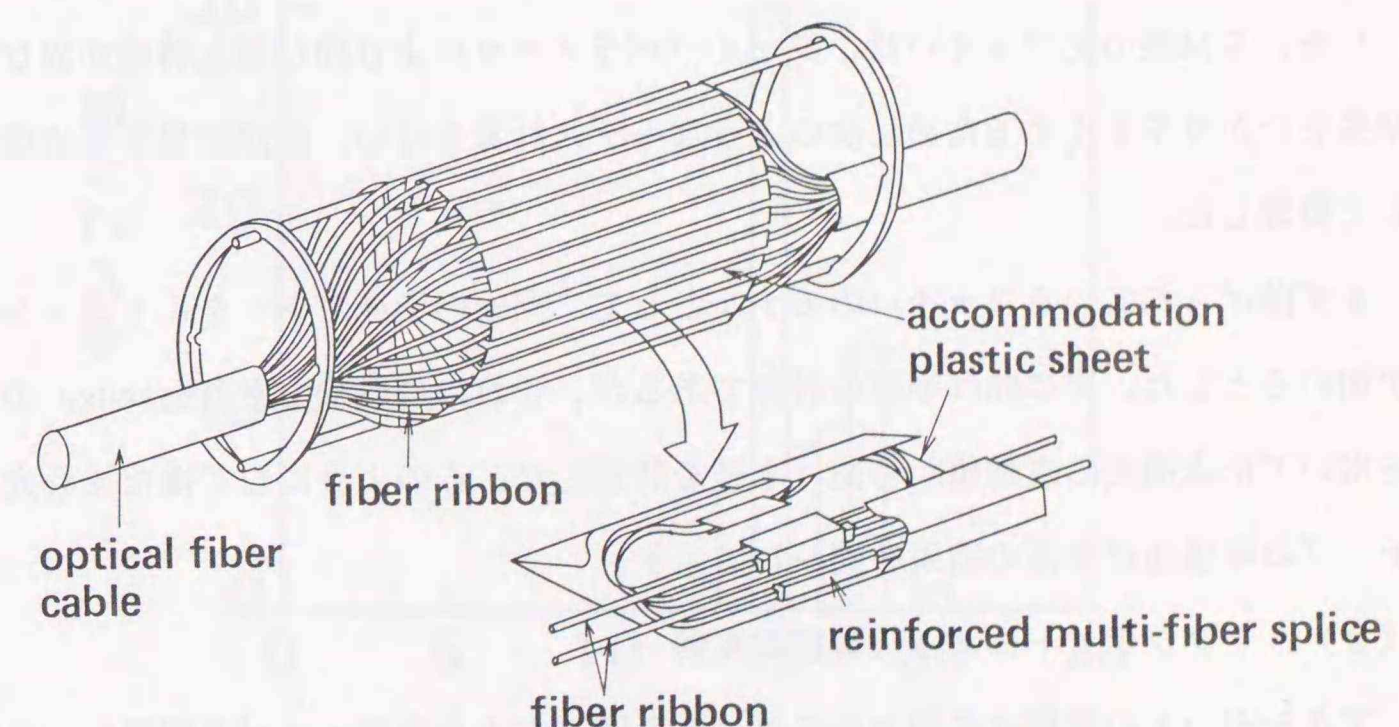


図4-5 クロージャの余長処理部

(A) 収容シートからの心線の取り出し

(B) 丸められた心線の解き放し

(C) 心線の丸め直し

(D) 収容シートへの再収容

これら一連の作業における損失変動の発生状況の一例を図4-6 に示す。表4-1 に後述する対策を施した場合の各工程における伝送損失の増加量の平均値と最大値を示す。測定に使用したSM型光ファイバのモードフィールド直径は $9.7\mu\text{m}$ 、実効カットオフ波長は $1.2\mu\text{m}$ であり、試験回数はそれぞれ50回である。光ファイバが取り出し、丸め直し工程で作業者の指により過大な曲げを受け、損失が発生すると考えられる。

表4-1 工程別の損失変動量 (コネクタ接続部, dB)

測定波長	作業工程					
	取り出し→解放		丸め		収納	
	平均値	最大値	平均値	最大値	平均値	最大値
$1.3\mu\text{m}$	0.14	0.18	0.15	0.18	0.12	0.18
$1.55\mu\text{m}$	0.47	1.95	0.46	1.65	0.44	0.90

なお、SM型の光ファイバは、ファイバパラメータにより曲げ損失特性が異なるので、結果をわかりやすくするために次のようなモデル計算を行い、測定結果を等価曲げ半径として整理した。

まず曲げられているファイバのモデルとして、同一の半径でトータル1ターン分の曲げが加わるとした。次に曲げ半径の計算であるが、これには既知であるMarcuse の式⁽⁴⁻⁵⁾を用いて伝送損失の変動値から曲げ半径を計算した。このようにして得た4心光ファイバテープの等価曲げ半径の結果を図4-7 に示す。

(2) アクシデントによる伝送損失変動

アクシデントの形態は多様であるが、数百回におよぶ光ファイバの収容シートへの収容実験を通して、①クロージャ部品への引っ掛けおよび②接続部の取り落としの2点に集約されることがわかった。①について、クロージャ内の各種部品を取り出して、熟練作業者が光ファイバを引っ掛ける実験を行い損失変動量を測定した。この結果、熟練した作業者が光ファイバを引っ掛けたことを意識する程度の力では伝送損失の変動がほとんど発生し

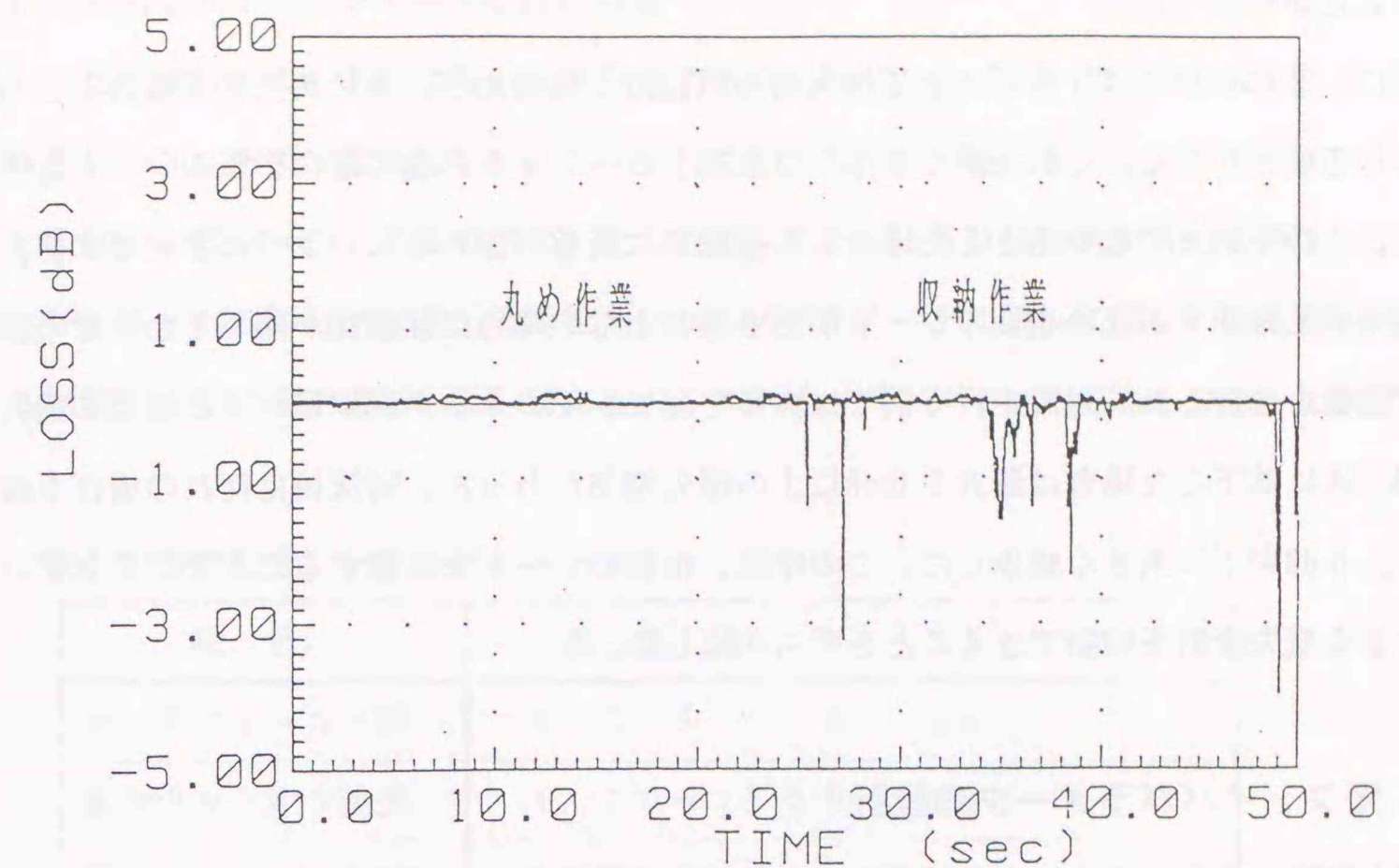


図4-6 余長処理時の損失変動例

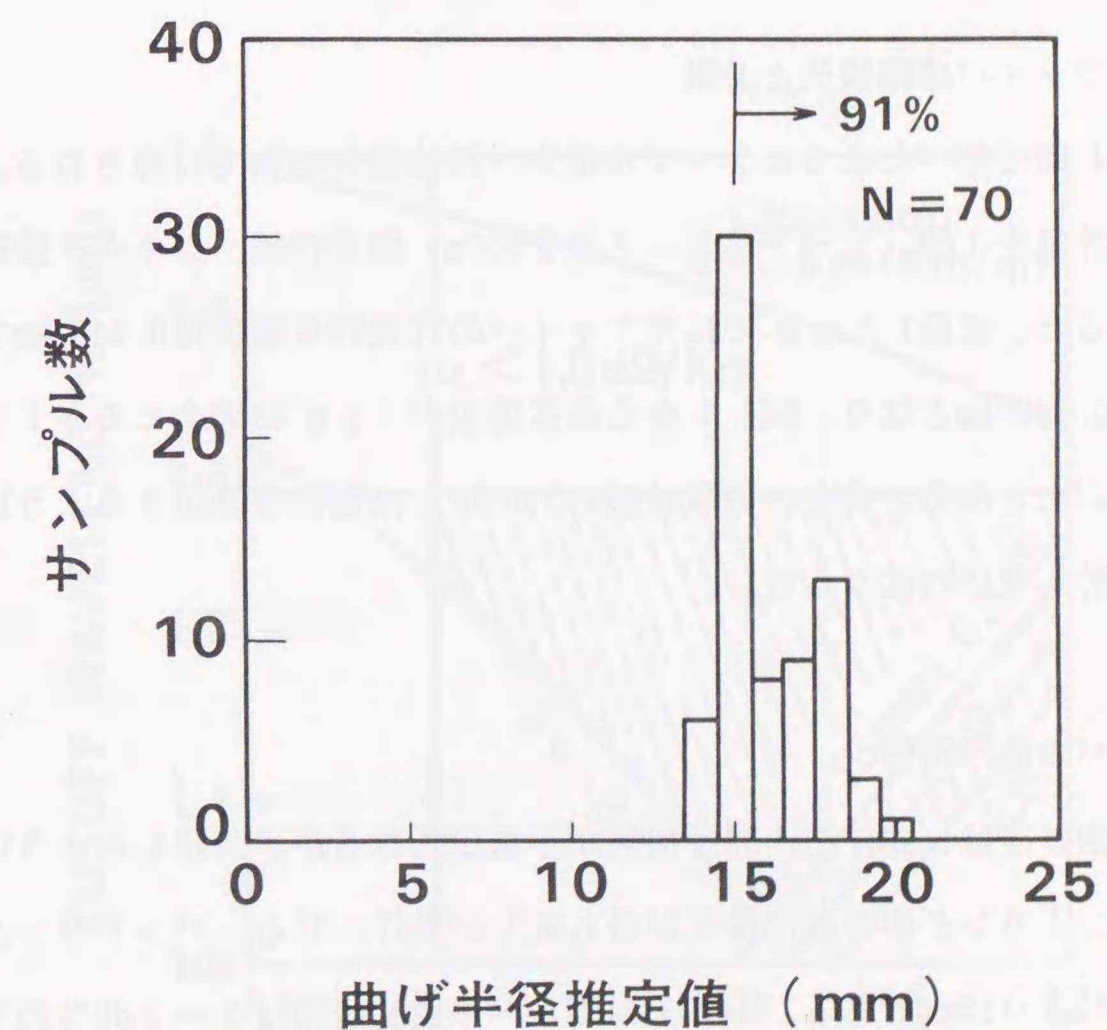


図4-7 余長処理時の等価曲げ半径

ないことがわかった。

次に、②については、落下による損失増の原因は2種類あり、床に衝突する場合と宙吊りになる場合がある。これを防止するには接続クロージャと床面の間に布製のシートを配置し、心線を誤って取り落とした場合にも接続部に衝撃が加わらないようにすればよい。この効果を確認するため布製のシートがある場合とない場合に接続部が落下したときの損失変動量を測定した。対策を行う前では波長 $1.55\mu\text{m}$ でコネクタ部が宙づりの場合に最大2dB、床に落下した場合は最大20dB以上の損失増加があった。対策後は何れの場合も最大0.5dB以下に大きく減少した。この結果、布製のシートを設置することでアクシデントによる損失変動を抑制できることを明らかにした。

4.5 光ファイバパラメータの設計⁽⁴⁻¹⁰⁾

以上説明してきたように、SM型光ファイバの接続損失、曲げ損失は光ファイバパラメータに大きく依存する。SM型光ファイバの仕様を代表するモードフィールド径(MFD)とカットオフ波長をパラメータにとって以下に具体的な設計法を述べる。

4.5.1 SM型光ファイバ線路損失と分散

線路損失は2.4節で述べたようにケーブル損失、接続損失の和で計算される。線路1km当たりの損失設計値を1dB、ケーブルピース長を500m、融着接続、コネクタ接続それぞれ1カ所おきとすると、波長 $1.3\mu\text{m}$ では光ファイバの代表的な損失は0.4dB/kmであるから、許容接続損失は0.6dB/kmとなり、図4-4から外径偏差が $2\mu\text{m}$ の場合にモードフィールド直径は $8.2\mu\text{m}$ 以上となる。また、分散は図4-2に示した範囲を満足するようにファイバパラメータを設計しなければならない。

4.5.2 光ファイバの曲げ特性

光ファイバの曲げ径は、曲げ歪、曲げ損失から決定されるが、前述したように後分岐時の光ファイバハンドリング中の曲げ損失が最も厳しい条件になる。ハンドリング中の最小曲げ半径は図4-7より15mmである。システムのレベル変動耐力は1~2dBなので、半径15mmに対し、許容曲げ損失1dBとなるよう設計すれば良い。

4.5.3 光ファイバパラメータの設計領域

以上の検討から、加入者用のSM型光ファイバのパラメータを決定できる。

波長 $1.3\mu\text{m}$ および波長 $1.55\mu\text{m}$ それぞれに要求条件を満足するファイバパラメータを図4-8、図4-9のハッチング部で示す。加入者光システムはWDM伝送が有望であり、 1.3 および $1.55\mu\text{m}$ のWDM伝送が可能な光ファイバパラメータは図4-8、図4-9の両者を満足する範囲であり、その結果を図4-10に示す。ファイバパラメータの規格を表4-2に示す。

表4-2 SM型光ファイバパラメータ

項目	規格値
モードフィールド径	$9.5 \pm 1.0 \mu\text{m}$
実効カットオフ波長	$1.10 \sim 1.29 \mu\text{m}$
外径	$125 \pm 2 \text{mm}$
曲げ損失特性	$r = 15 \text{mm}$ 、波長 $1.55 \mu\text{m}$ で1dB以下

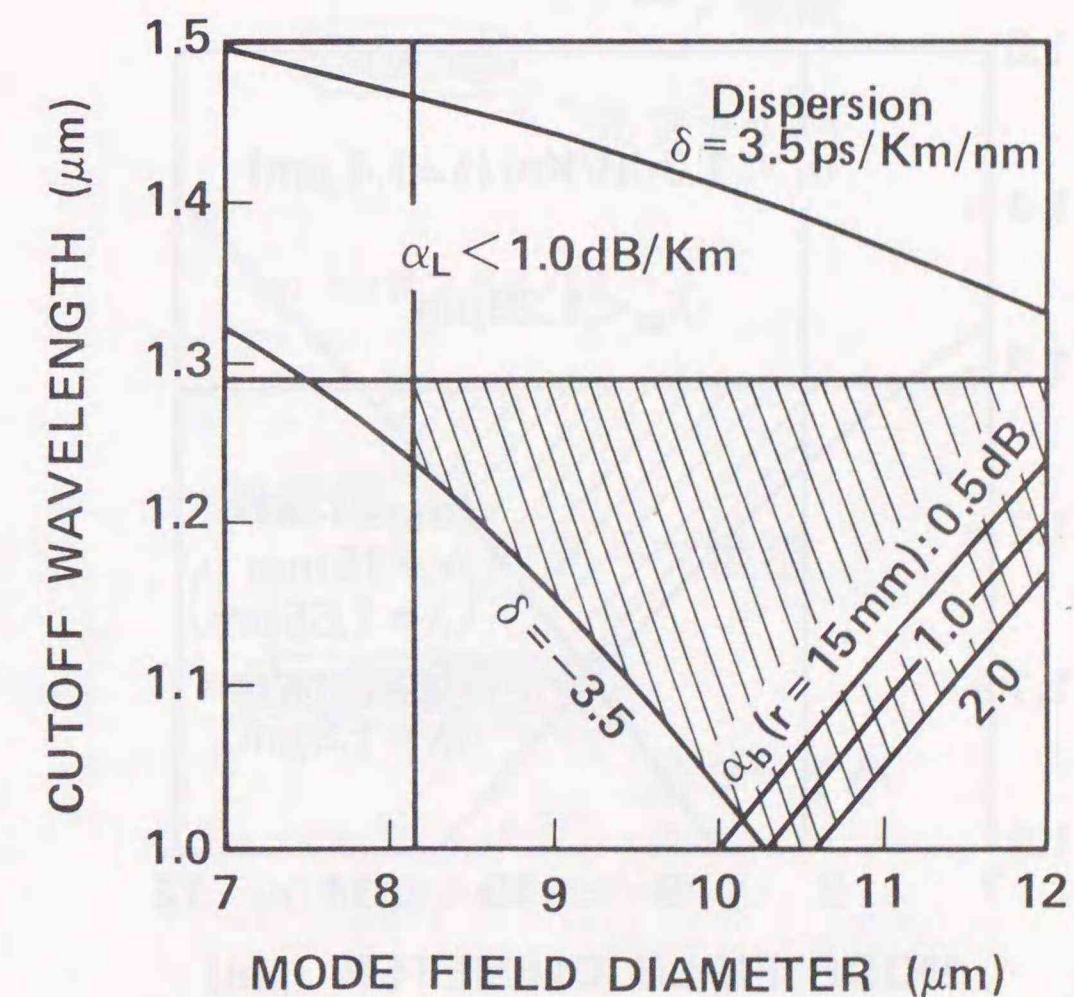


図4-8 $1.3\mu\text{m}$ 帯の設計領域

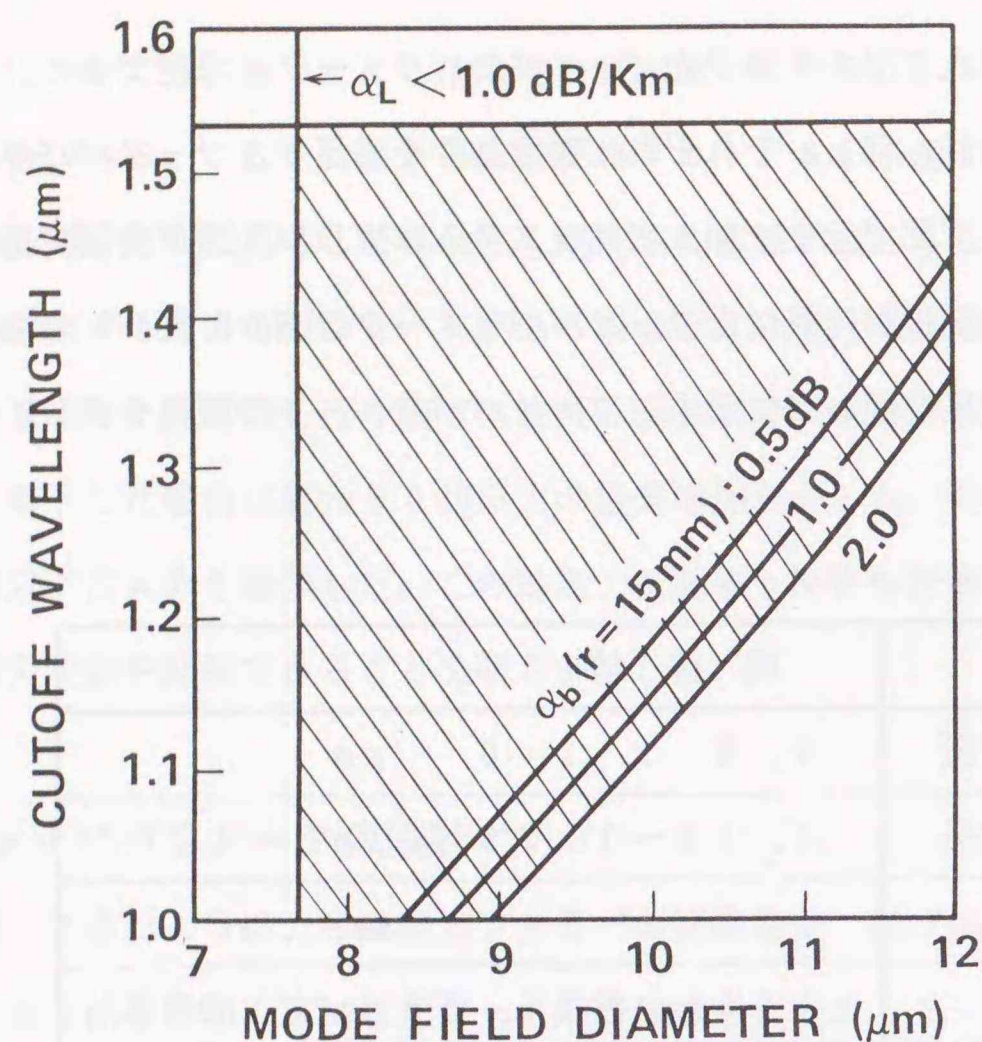


図4-9 1.55 μm 帯の設計領域

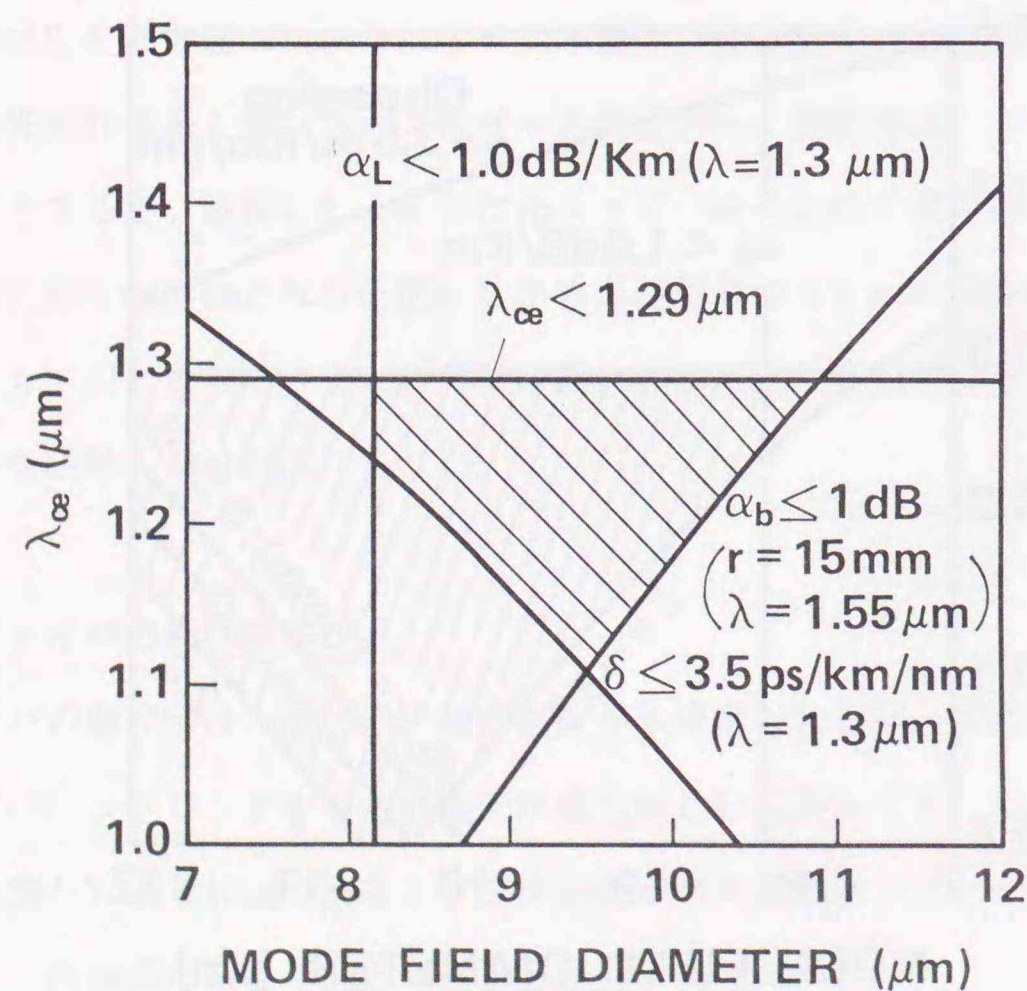


図4-10 1.3/1.55 μm WDM の設計領域

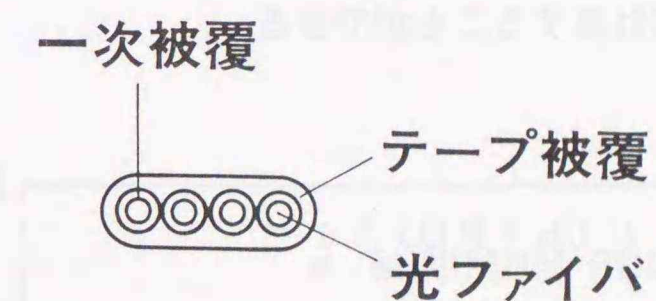
4.6 高密度SM型光ファイバケーブルの設計⁽⁴⁻¹¹⁾

4.6.1 光ファイバテープの構造

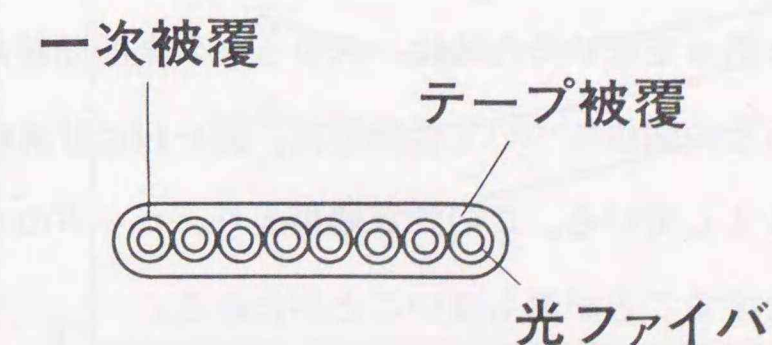
光ファイバテープは第2章で述べたように、4心、8心の2種類を基本とする。テープ構造は高密度化と高速製造のため、UV樹脂で薄膜被覆したもので、構造を図4-11に示す。8心テープは簡易な工具で容易に4心ずつに分割できる。⁽⁴⁻¹²⁾

4.6.2 高密度ケーブル構造設計

多心ケーブルでは、建設工事を容易にし、かつ地下設備を有効に利用するため、高密度ケーブル構造設計が重要であり、以下に光ファイバテープをスロットロッドに積層して収容することを前提とした高密度設計法について述べる。本節ではまず、高密度に光ファイバテープを収容できるスロットロッドの構成法について述べ、次にケーブルを細径で構成



(a) 4心光ファイバテープ



(b) 8心光ファイバテープ

図4-11 光ファイバテープ構造

するためのスロットロッドの撚り合わせについて述べる。

図4-12はスロットの全断面積がロッドの断面積に占める割合を計算するための計算モデルである。計算を単純化するために、隣合うスロットの底の部分は接触していることを条件とした。図において、 a はスロットの幅、 b はスロットの深さ、点 O はロッドの中心、点 P はスロットの底部の中心であり、 QO はロッドの半径である。スロットの数が n であるとき、角度 θ は次式で計算できる。

$$\theta = \frac{\pi}{n} \quad (4-4)$$

また、 PO の長さは次式で計算することができる。

$$PO = \frac{a}{2 \tan \theta} \quad (4-5)$$

ロッドの半径 QO は次式で計算することができる。

$$QO = \left(\left(\frac{a}{2} \right)^2 + (b + PO)^2 \right)^{1/2} \quad (4-6)$$

式(4-6)を用いて、 b/a の最適値を求めるために、 $a \times b = 1$ としてロッドの半径を計算した。計算結果を図4-13に示す。ロッドの半径は、 n の値によって若干の違いはあるものの、 b/a が約1のときに最小となっていることがわかる。さらに、ロッドの半径を最小にするためのスロット数 n を求めるために、スロットの全断面積がロッドの断面積に占める割合とスロット数 n との関係について計算した。図4-14に計算結果を示す。ここでは、図4-13より $b/a = 1$ としている。この計算結果より、ロッドの半径を細くするためにはスロットの数 n は5とすることが最も良いことがわかる。

つぎに、ケーブル径を細くするために中心部材の周囲に撚り合わせるスロットロッドの数 n_r の最適値について検討した。図4-15に、計算モデルを示す。 r_r はスロットロッドの半径、 r_c は中心部材の半径であり、隣接するスロットロッドは相互に接触しているとす。角度 α は次式で計算することができる。

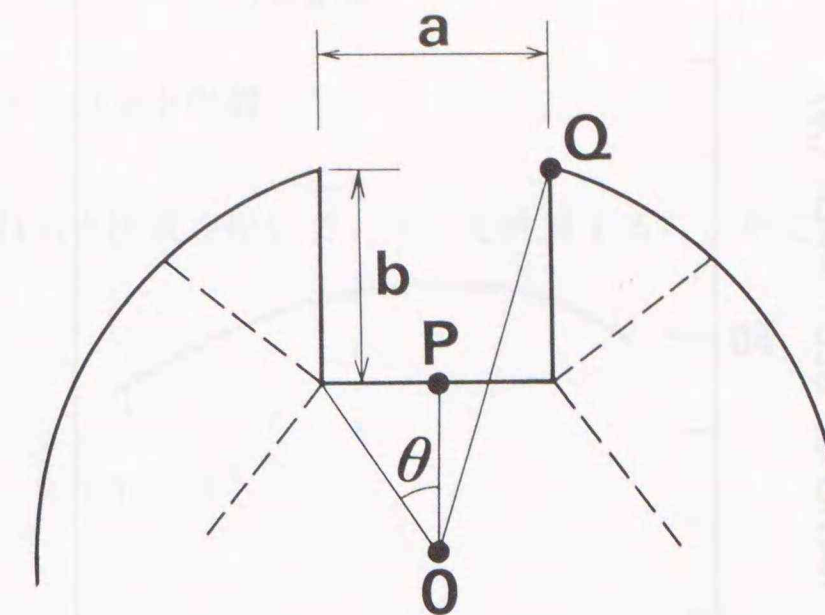


図4-12 スロット断面積の計算モデル

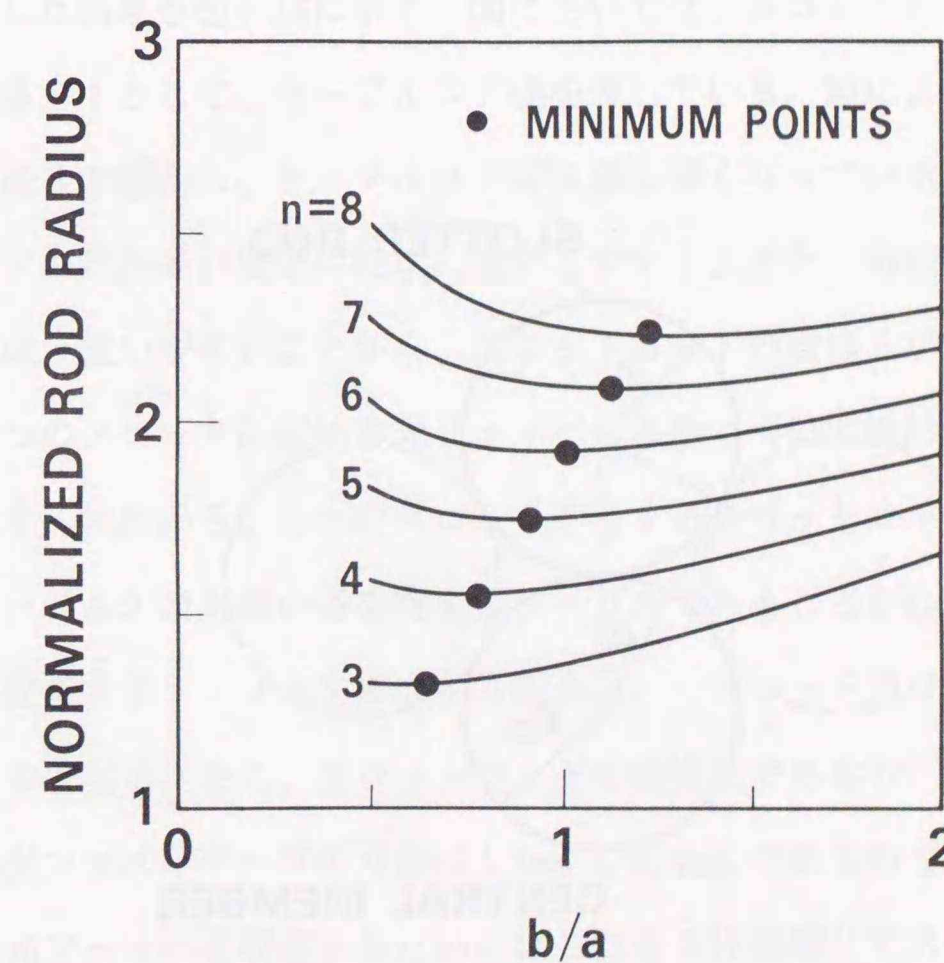


図4-13 スロット断面形状とスロットロッド半径

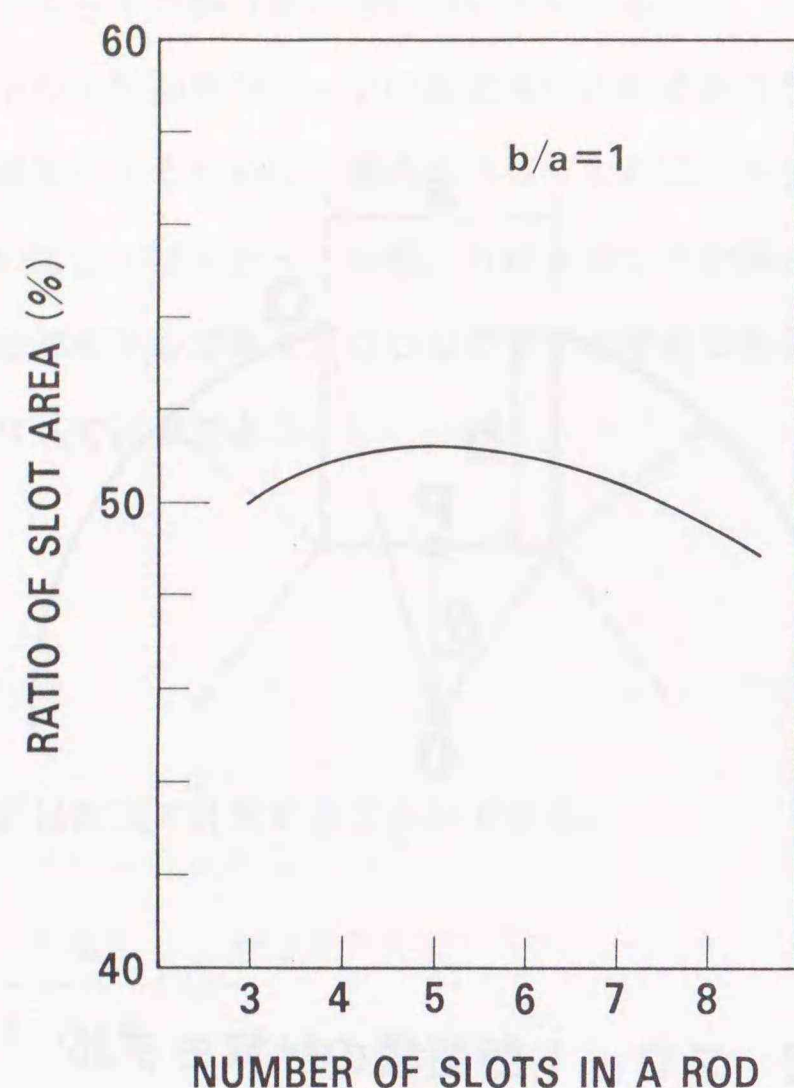


図4-14 スロット数とスロット面積比

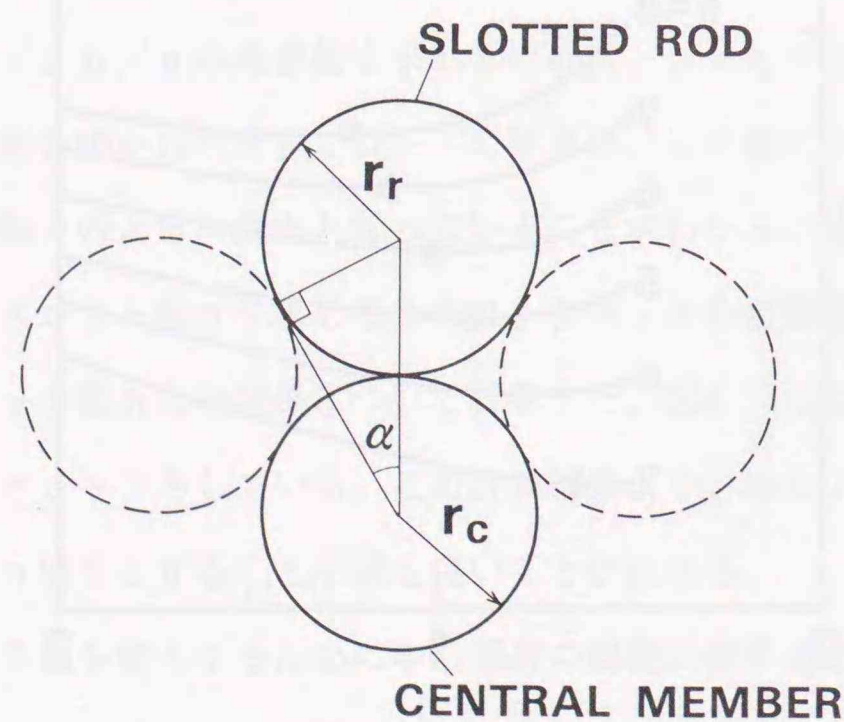


図4-15 ケーブルコア径の計算モデル

$$\alpha = \frac{\pi}{n_r} \quad (4-7)$$

ただし、 n_r はスロットロッドの数

r_r と n_r が与えられると次式を用いて、 r_c を計算することができる。

$$r_c = r_r \cdot \frac{1}{\sin(\alpha)} - 1 \quad (4-8)$$

ケーブルコア径（外被を除いた部分のケーブルの直径）は次式で計算することができる。

$$c_d = 2(r_c + 2r_r) \quad (4-9)$$

スロットロッドに収容できるファイバの心数が、スロットロッドの断面積に比例すると仮定し、同数のファイバを収容する条件でケーブルコア径 c_d とスロットロッド数 n_r との関係を実験した結果を図4-16に示す。図においては、スロットロッド数が6のときのケーブルコア径を1として、ケーブルコア径を表している。図によれば、スロットロッド数が4ないしは5の場合に、ケーブルコア径は最も細くなっている。製造過程においては、スロットロッドの数が多きほど円柱状に成形しやすく、また、布設においてはケーブル断面が丸い方が取り扱いやすいことから、スロットロッドの数は5が適当である。

最後に、1つのスロットに収める光ファイバの本数について検討する。今までのスロットロッドに関する検討から、5つのスロットを有するスロットロッドを5本撚り合わせて構成されるケーブルが最も細い径を有するケーブルであることがわかった。従って1000心を収容するケーブルを構成する場合に、一スロット当りに収容する光ファイバの本数は40本となる。また、スロットロッドの縦横比である b/a は1に近いことが望ましい。8心光ファイバテープの寸法は2.1mm x 0.4mm であるので、正方形に最も近く、かつ40本の光ファイバを収容するためにはこれを5枚積層してスロットに収容することが最も有効である。図4-17に以上の議論より構成された1000心光ファイバケーブルの断面図を示す。ケーブルの直径は約40mmである。

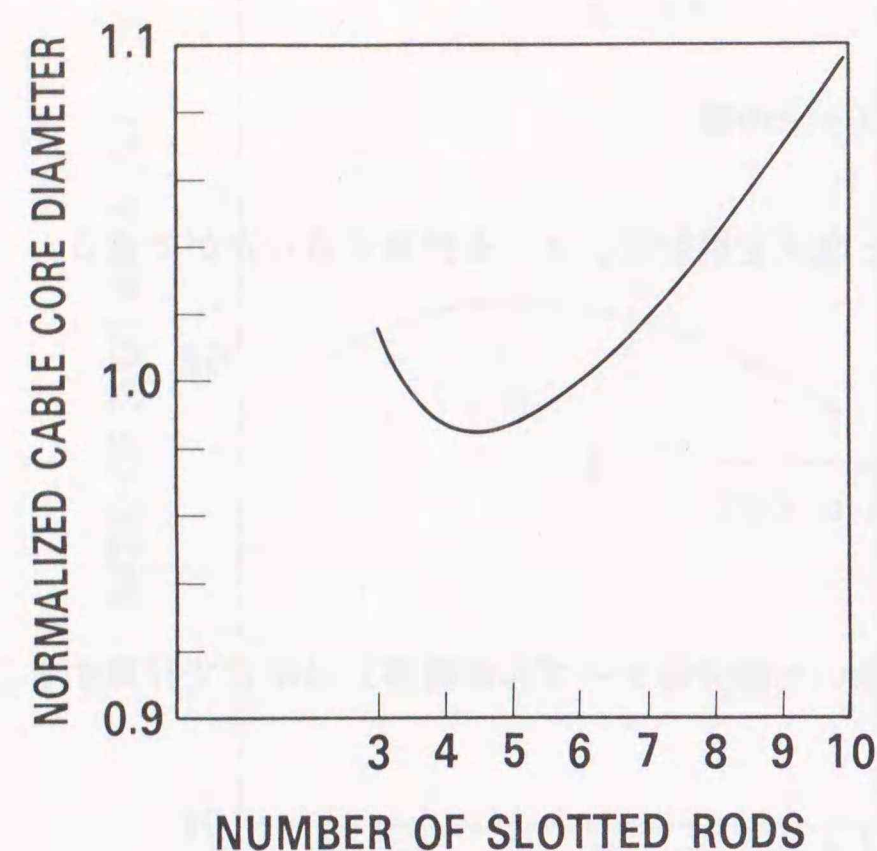


図4-16 スロットロッド数とケーブルコア径

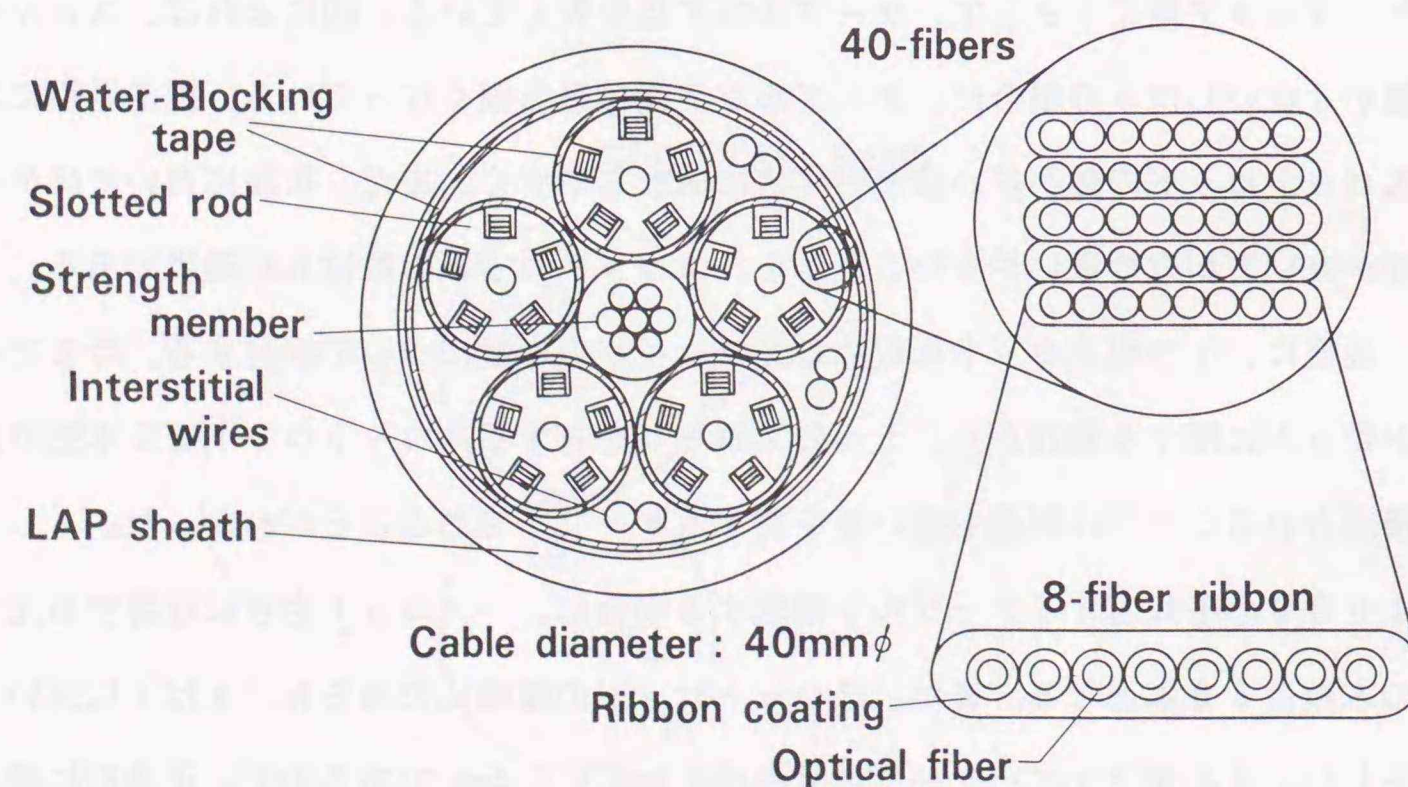


図4-17 1000心光ファイバケーブルの構造

4.6.3 防水ケーブル構造設計

防水ケーブルにはジェリー充填型⁽⁴⁻¹³⁾と防水テープを用いたドライ型⁽⁴⁻¹⁴⁾がある。ジェリーケーブルは粘着性の充填材のため接続作業性に欠点があり、これを解決するため、防水テープを用いた構造を検討した。防水テープは布等のベースに水溶性の接着材と吸水パウダから構成され、浸水時にパウダが吸水膨張するとともにベースから脱落し、ケーブル内の空隙を充填してダムを構成し浸水を一定長で抑止できる。このケーブル構造では浸水時以外は全く通常のケーブルと同等の取扱が可能であり、接続作業性も優れている。

4.6.4 試作SM型防水光ファイバケーブルの特性

以上に述べた設計法に基づいて、1000心SM型光ファイバケーブルを試作し、ケーブルに要求される諸特性に関する試験を行った。このケーブルに収容したSM型光ファイバは、本章で検討したパラメータ設計に基づくものである。また、ケーブル直径は40mmφ、ケーブルの重量は1.4kg/mである。

図4-18に温度特性の測定結果を示す。-30～+60℃の温度範囲において、伝送損失の変動はほとんど検知されず、良好な特性を示した。

図4-19にしごき試験の実験系を示す。この試験は、ケーブルの布設状況を模擬したものである。しごき試験を行った結果、試験中、試験後ともに伝送損失の変動はみられず、良好な特性を示した。

図4-20に引張試験の結果を示す。光ファイバの伸び歪は位相法により測定した。光ファイバケーブルにおける光ファイバの強度保証法⁽⁴⁻¹⁵⁾によれば、布設時には光ファイバに0.2%迄の伸び歪が加わることが許容されることから、このケーブルは1000kgfの張力で布設することが可能である。図4-21に防水特性試験の実験系を示す。この試験法により、浸水長さを測定したところ3m以下であった。浸水長が3m程度であれば浸水時の凍結による損失増加量は無視できる範囲である。

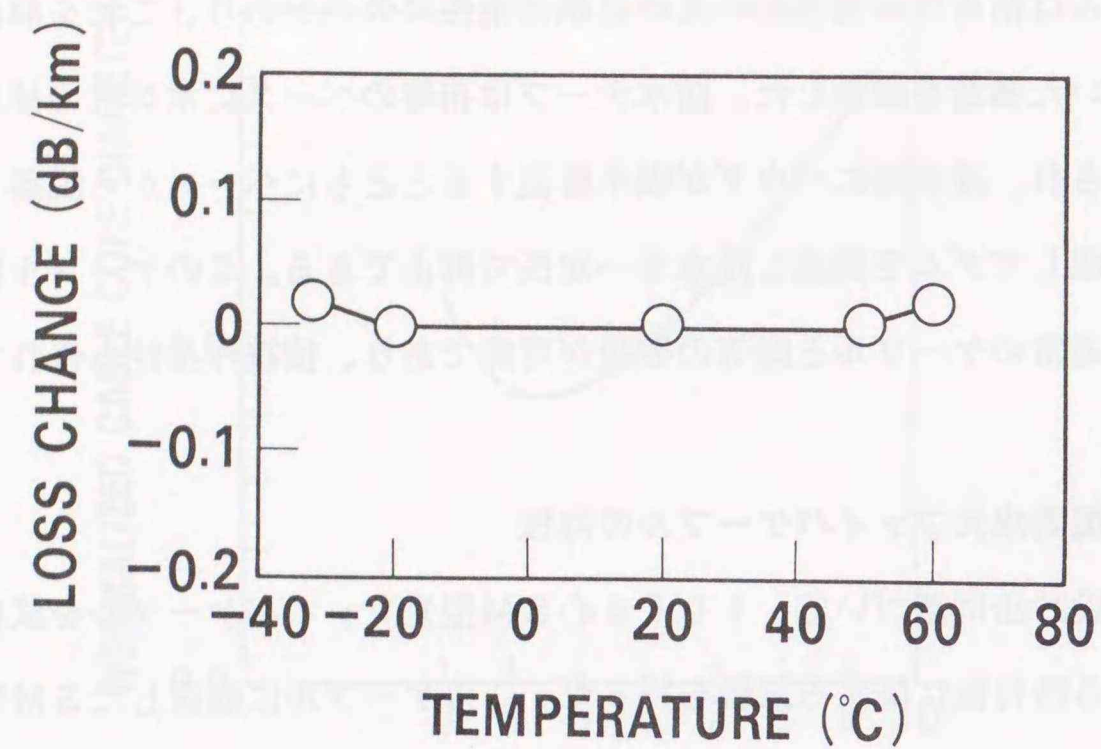


図4-18 温度特性

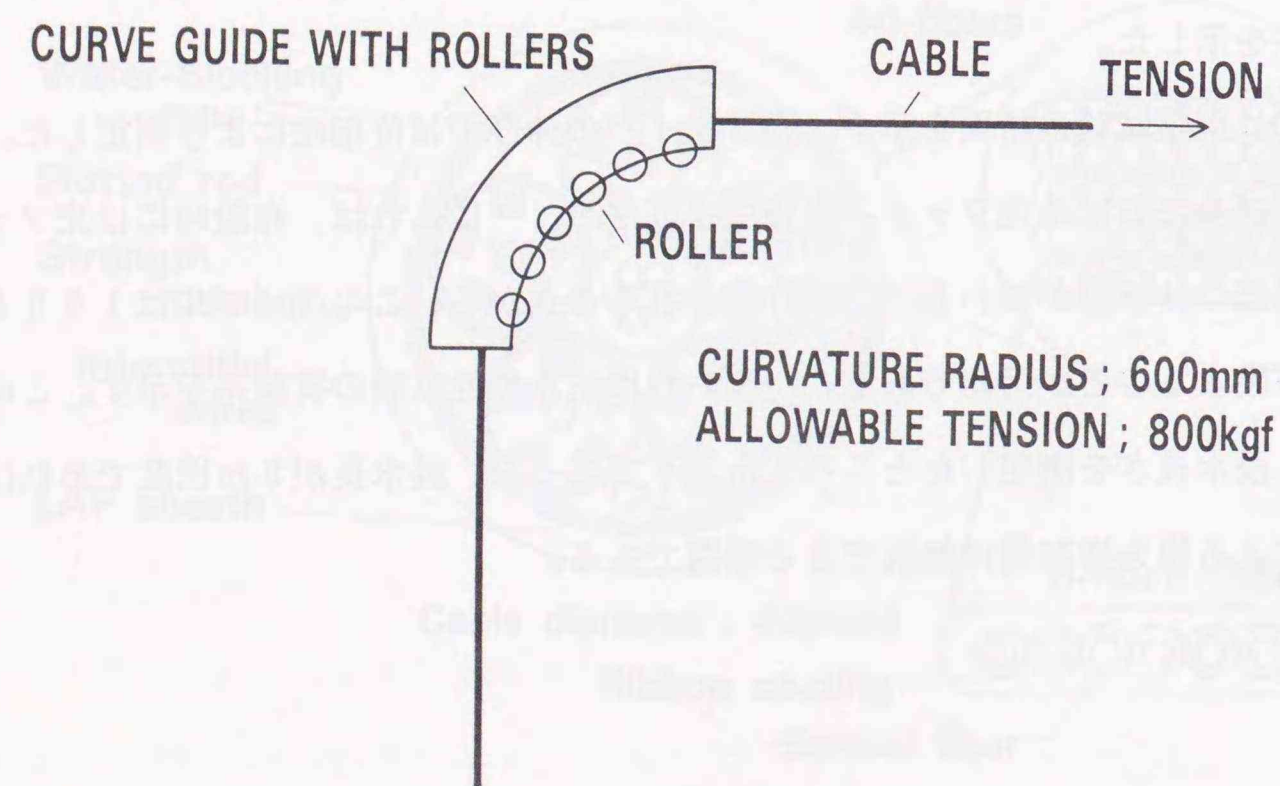


図4-19 しごき試験方法

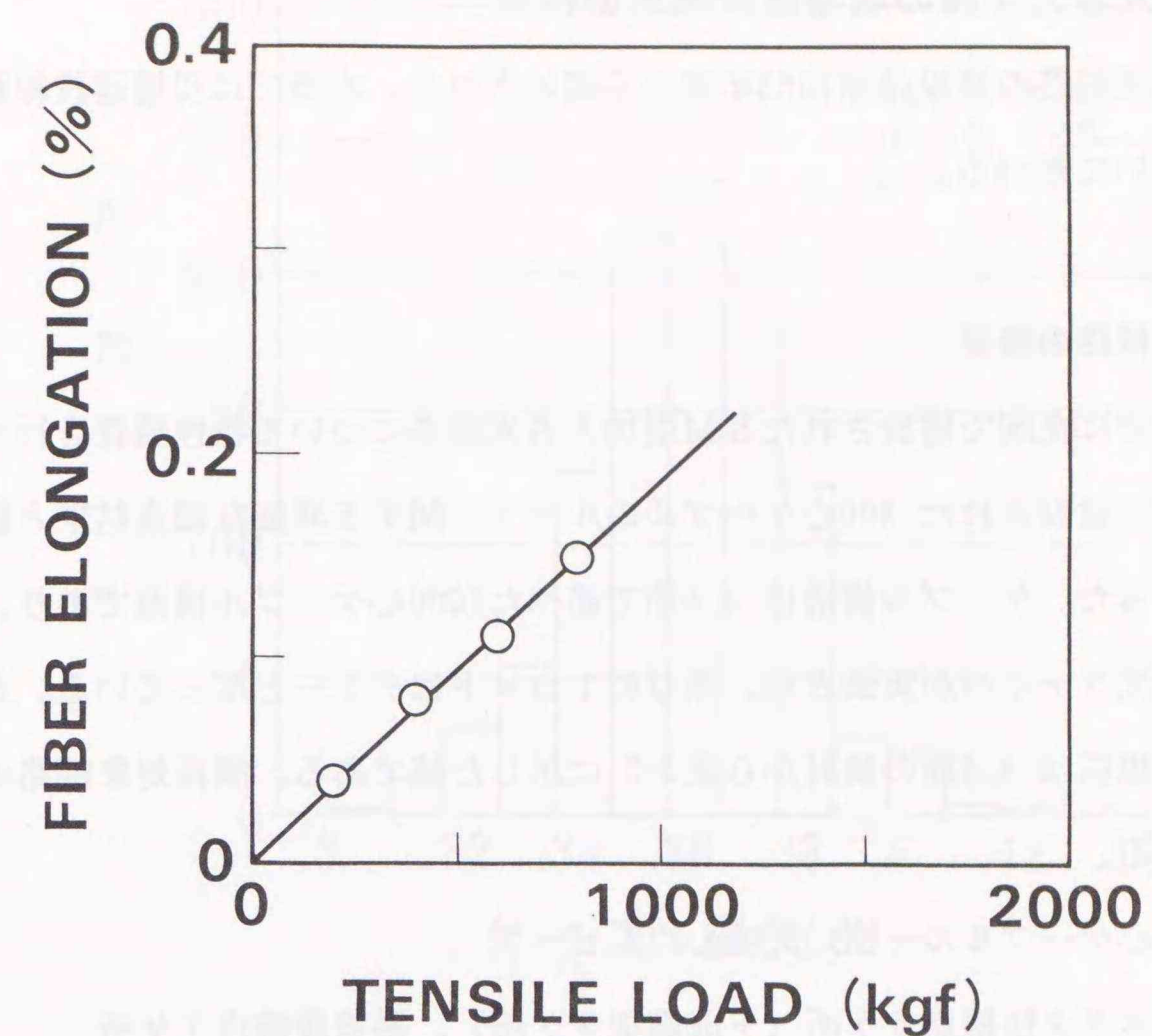


図4-20 引張特性

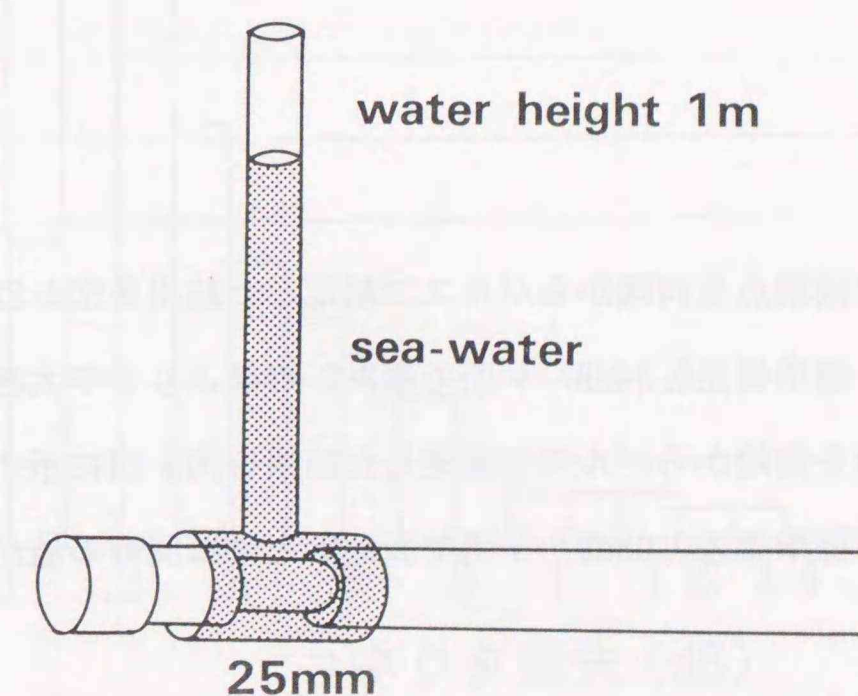


図4-21 防水特性試験方法

4.7 SM型加入者光線路の現場建設線路の特性⁽⁴⁻¹⁶⁾

SM型加入者光線路の建設は昭和63年度から開始された。本節では現場建設線路の特性調査の結果について述べる。

4.7.1 現場建設線路の概要

平成元年末までに全国で建設されたSM型加入者光線路について特性調査を行った。このうち、千葉県で建設された800心ケーブルのルートに関する詳細な調査結果と設計値との比較検討を行った。ケーブル構造は4.6節で述べた1000心ケーブル構造であり、4スロットロッドに光ファイバが実装され、残りの1ロッドはダミーとなっている。光ファイバのパラメータ規格は4.5節の検討から表4-2に示した値である。調査対象線路の概要は以下の通りである。

- ・線路長 800 心ケーブルループ, 5.9km, 13 ピース
- ・接続点 MTコネクタ接続点 5 ケ所 (+成端架 2 ケ所)、融着接続点 7 ケ所

なお、融着接続点のうち2ケ所は新たに開発した全自動融着接続機⁽⁴⁻¹⁷⁾により接続されている。

4.7.2 ケーブル損失

各ピースごとにケーブル単体の損失をパルス試験で測定した。測定結果を図4-22に示す。波長 $1.3\mu\text{m}$ で平均値0.36dB/km, 標準偏差0.02dB/km でいずれも表2-2 の値より小さな値が得られた。

4.7.3 接続損失

3ケ所のMTコネクタ接続点を両端からパルスで測定した結果を図4-23に示す。平均値0.40dB/ケ所, 標準偏差0.34dB/ケ所で表2-2 の値よりやや大きい値が得られた。

2ケ所の融着接続点を両端からパルスで測定した結果を図4-24に示す。平均値0.08dB/ケ所, 標準偏差0.08dB/ケ所で表2-2 とほぼ同等の値が得られた。

4.7.4 線路損失

局の成端架に接続されるコネクタから構内の成端キャビネットに終端されるコネクタの

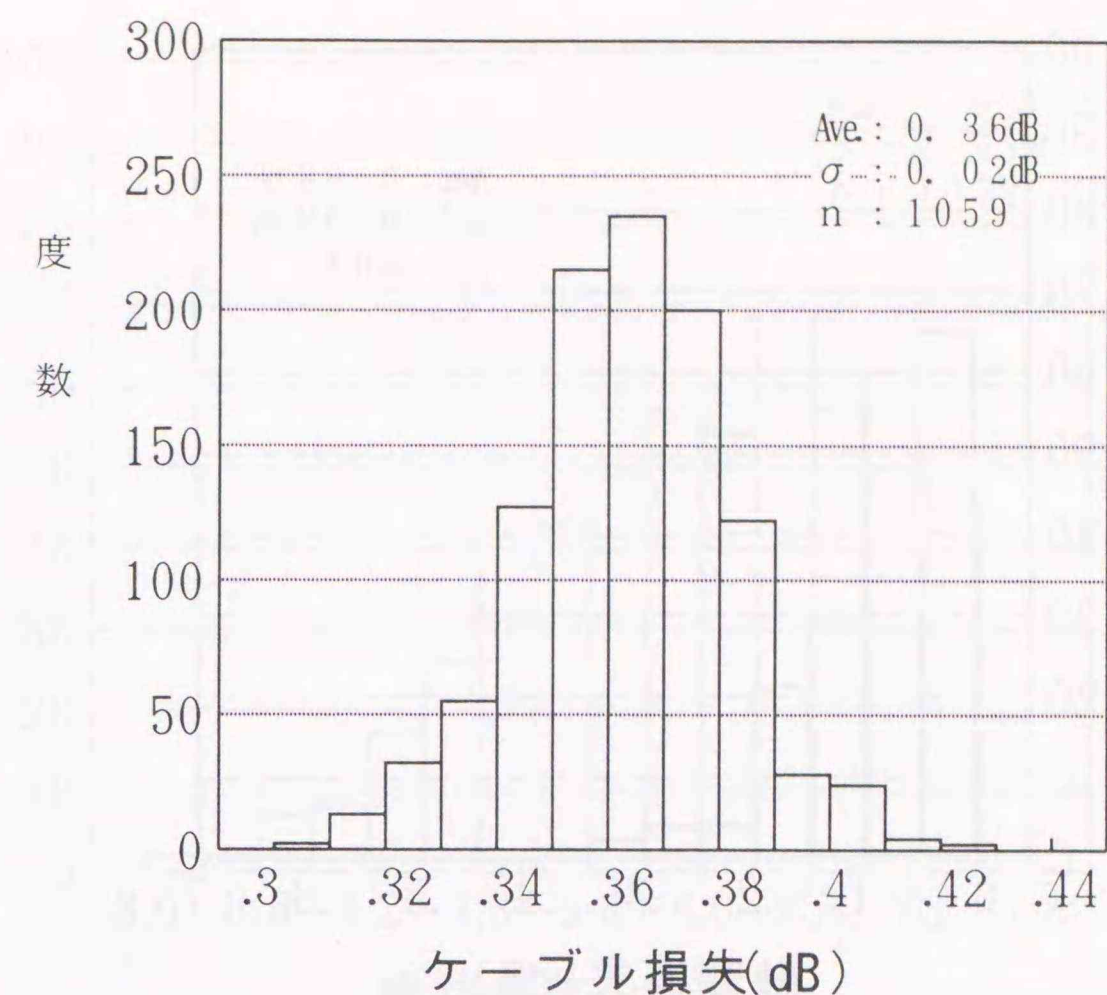


図4-22 ケーブル損失

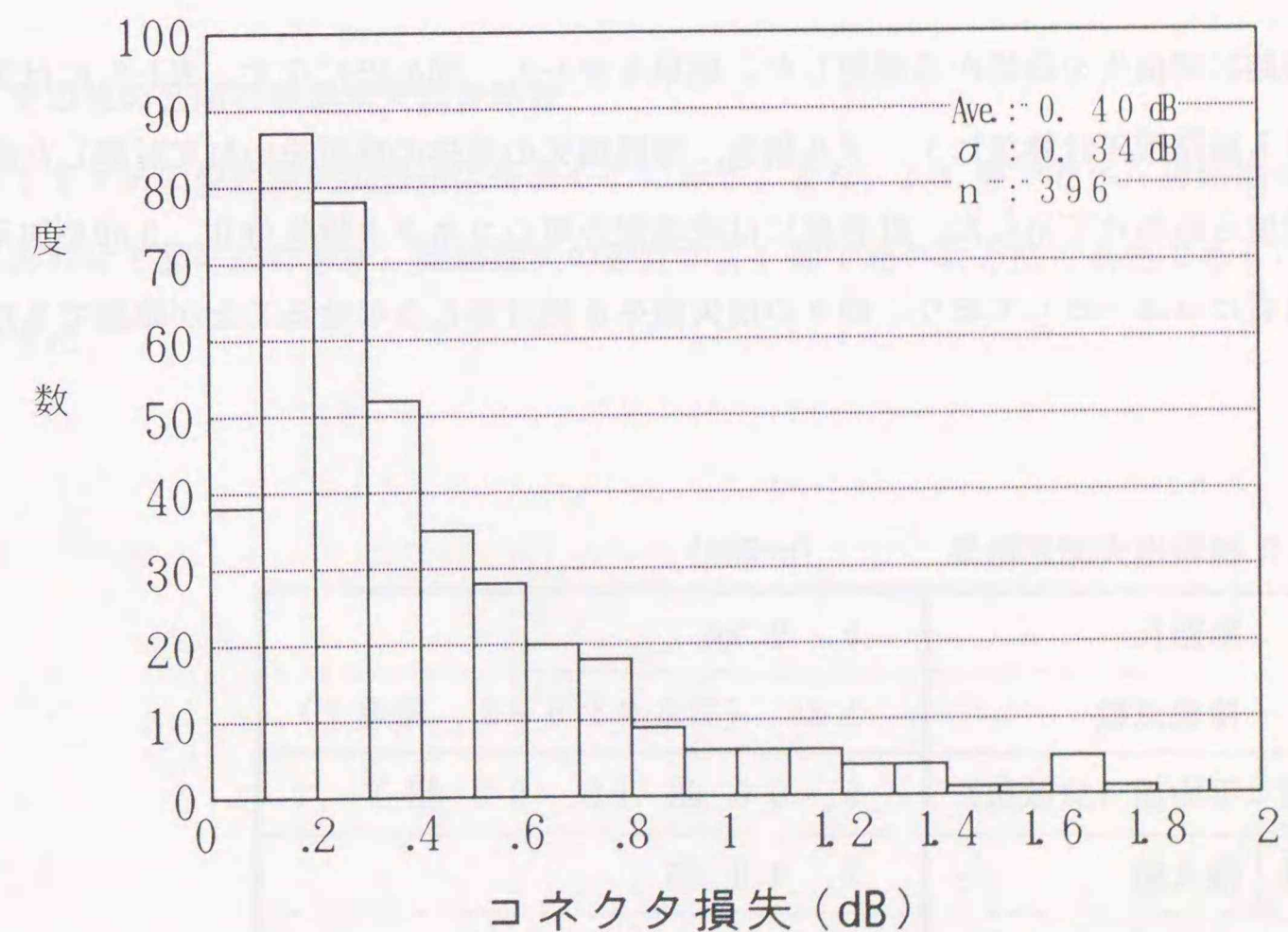


図4-23 コネクタ損失

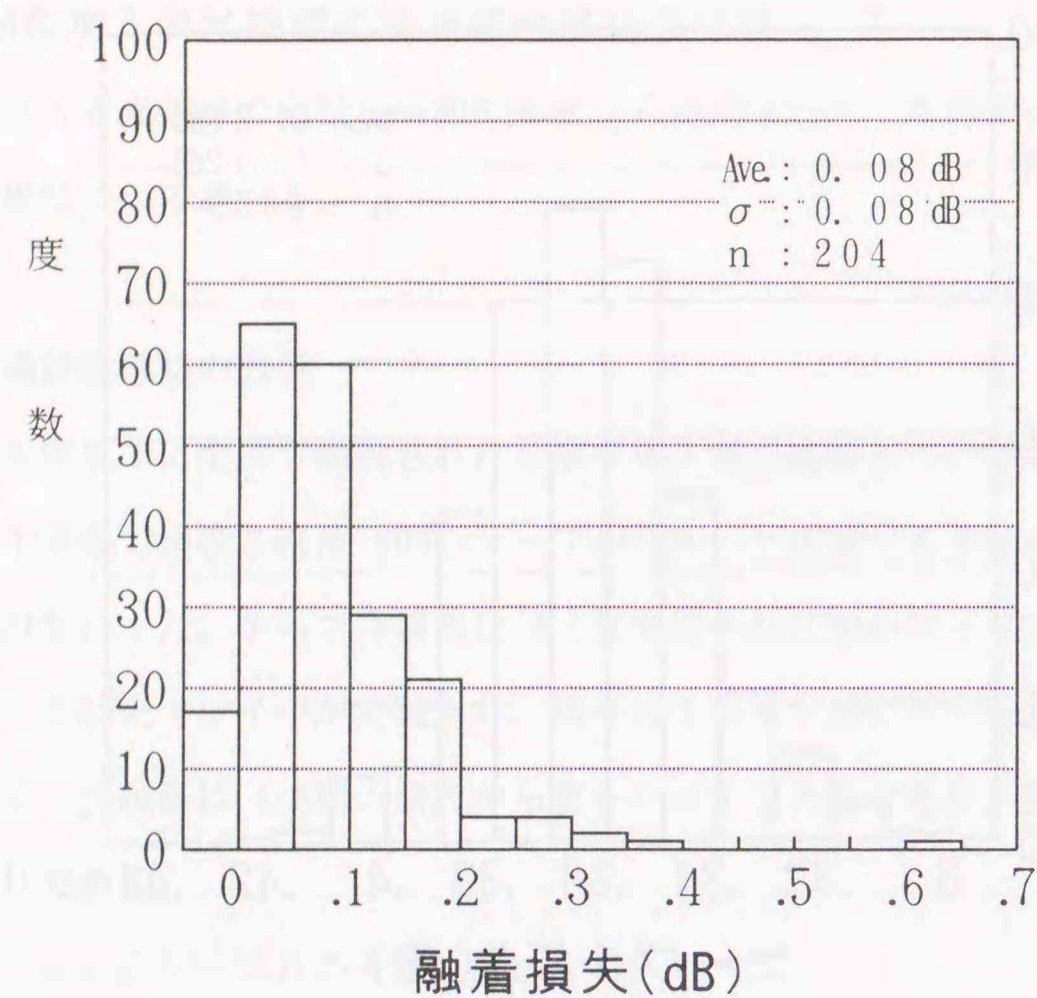


図4-24 融着接続損失

間の線路区間損失を両端から測定した。結果を表4-3，図4-25に示す。表4-3 には第2章における線路損失計算法にケーブル損失，接続損失の単体の数値をいれて計算した線路損失の数値もあわせて示した。計算値には成端架の単心コネクタ損失分0.3 dBを加えてある。両者はほぼ一致しており、個々の損失値を正規分布とみなせることが確認できた。

表4-3 線路損失測定結果 (n=536)

線路長		5.9 km
接続点数		12 (コネクタ5+2, 融着7)
測定値	平均値 (分散値)	5.96 dB (0.93 dB)
	最大値	7.40 dB
計算値 (分散値)		5.78 (0.97 dB)

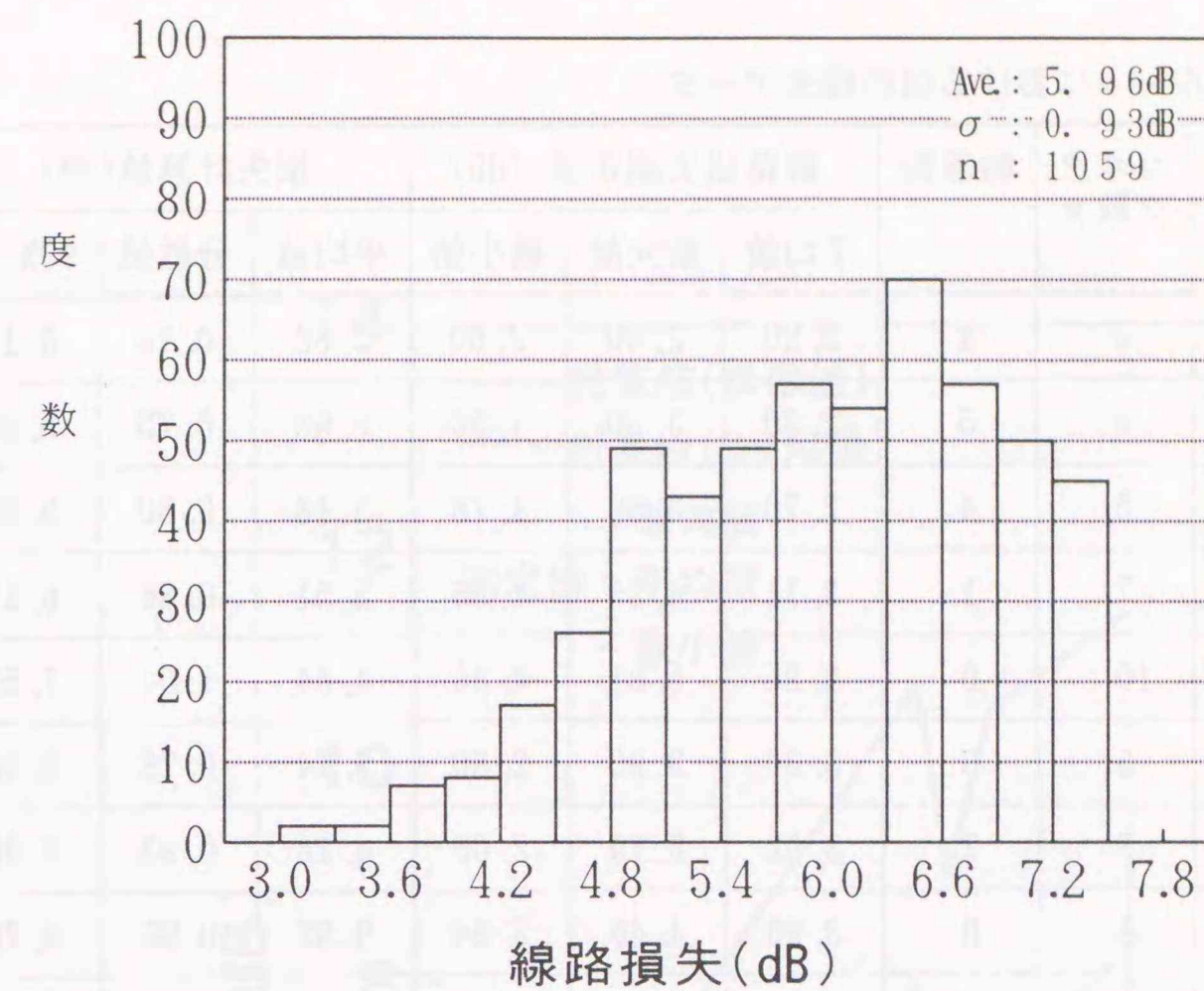


図4-25 線路損失

4.7.5 その他の区間の線路損失調査結果

全国12ヶ所の線路損失調査結果を表4-4に示す。また、2.4節で述べた線路損失計算結果とあわせて図4-26に示す。線路損失の設計が2.4節で述べた方法で妥当であることが確認できた。

表4-4 12ルートにおける線路損失データ

No.	線路長 (km)	コネク タ数*	融着数	線路損失測定値 (dB)			損失計算値 (dB)		
				平均値	最大値	最小値	平均値	分散値	99% 値
1	1.3	4	4	3.20	3.40	2.60	2.82	0.74	5.11
2	1.32	4	5	2.20	3.30	1.50	2.98	0.75	5.30
3	1.33	5	4	2.70	3.80	1.70	3.18	0.80	5.65
4	1.53	7	1	3.11	4.36	1.35	3.51	0.86	6.17
5	1.6	10	0	5.25	5.81	4.30	4.44	1.0	7.53
6	1.61	5	3	3.30	3.90	2.80	3.14	0.78	5.55
7	1.94	8	2	3.92	5.79	2.05	4.18	0.93	7.05
8	2.05	8	0	3.96	4.46	3.34	3.92	0.90	6.70
9	5.3	12	4	7.0	7.94	5.78	7.22	1.13	10.7
10	5.9	7	7	5.96	7.40	3.22	6.16	0.94	9.06
11	6.8	8	10	5.40	6.20	4.70	7.32	1.02	10.5
12	11.0	6	12	7.60	9.60	5.20	8.60	0.96	11.6

(注) *成端架の2個を加えてある

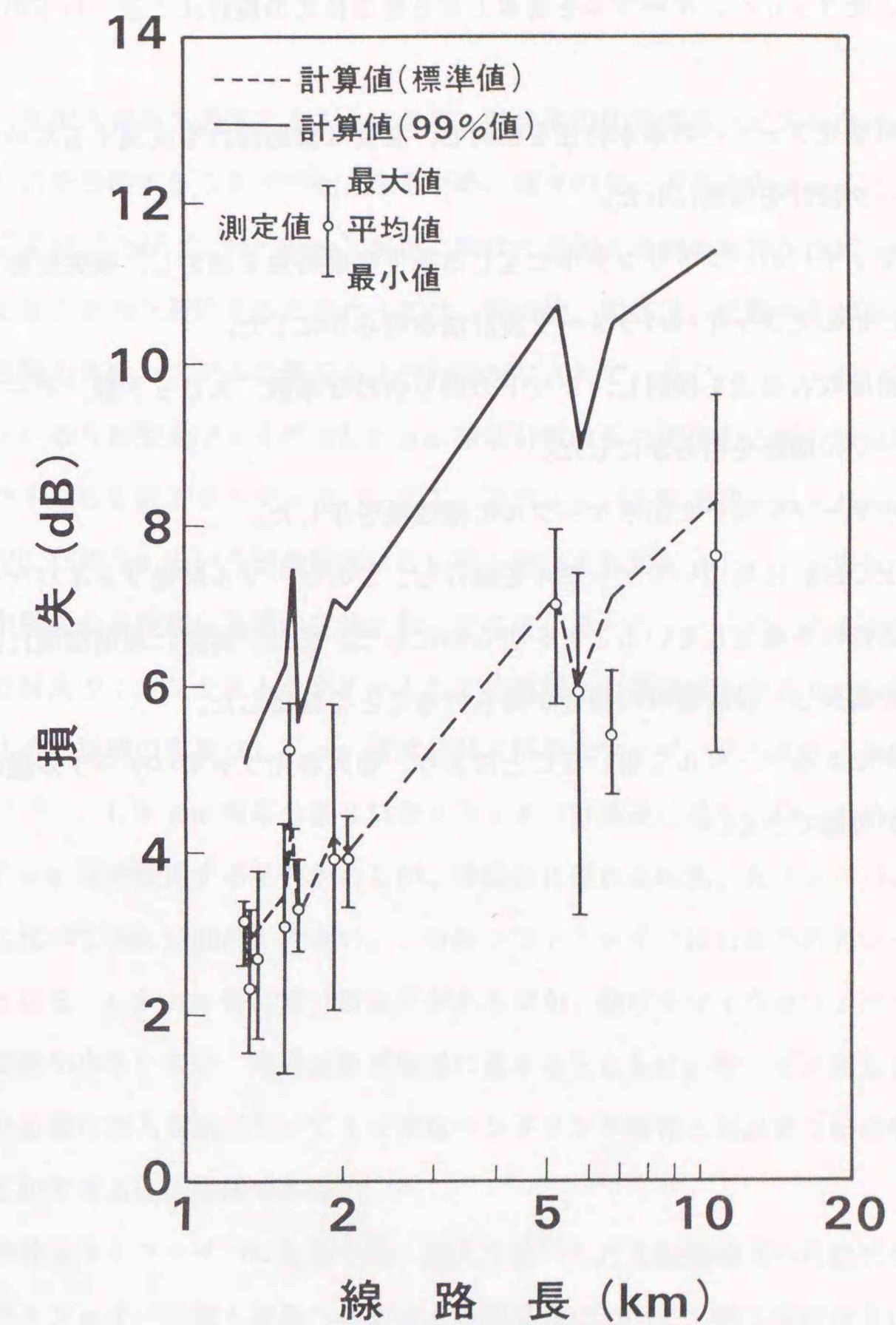


図4-26 12ルートの線路損失

4.8 まとめ

SM型光ファイバケーブルを用いた加入者光線路について、要求条件を明らかにするとともに、光ファイバ、ケーブルを基本とする要素技術の設計法を述べ以下の点を明らかにした。

- (1) SM型光ファイバの基本特性を検討し、必要な線路設計を実現するための光ファイバパラメータ設計を可能にした。
- (2) 光ファイバのハンドリング中に生じる損失変動特性を検討し、損失変動を一定値以下にするための光ファイバパラメータ設計法を明らかにした。
- (3) 高密度収容構造を検討し、ロッドの撚り合わせ本数、スロット数、テープ収容数等高密度ケーブル構造を明らかにした。
- (4) 防水テープを用いた防水ケーブルの構成法を示した。
- (5) 以上の設計に基づいてケーブルを試作し、このケーブルが光ファイバケーブルに要求される諸特性を満足していることを明らかにした。また、実際に現場環境に建設した線路の特性を調査し、設計通りの特性が得られることを確認した。

本研究によるケーブルを用いることにより、加入者光ファイバケーブル網の幹線ルート
の構築が可能である。

第5章 分散シフトシングルモード光ファイバの検討

5.1 まえがき

光ファイバを加入者系へ適用することにより、映像等の広帯域サービスを含めた各種の多様なサービスを提供することが可能となるため、個々の加入者まで光ファイバを配線するためのFTTH(Fiber To The Home) 実現に向けた光加入者網の検討が進められている。光ファイバを加入者網へ適用するに当たっては、経済性、即応性、信頼性等が要求され、世界各国で各種の実験システムの建設および計画がなされている^{(5-1) (5-2) (5-3)}。現在使用されているSM型光ファイバは $1.3\ \mu\text{m}$ 帯零分散波長の標準形と零分散波長を $1.55\ \mu\text{m}$ 帯にシフトした分散シフトファイバがある。光ファイバの製造技術もきわめて向上し、 $1.55\ \mu\text{m}$ で 0.15dB/km という理論限界に近い値も発表されており⁽⁵⁻⁴⁾、分散シフトファイバは中継系の長距離伝送路の主流になってきている⁽⁵⁻⁵⁾。一方、FTTHの伝送媒体としては将来のインフラストラクチャとして広帯域かつ低コストであり、分散シフトファイバに比べて接続の容易な $1.3\ \mu\text{m}$ 帯零分散SM型光ファイバが当初から検討されてきている⁽⁵⁻⁶⁾。 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯零分散SM型光ファイバは高速伝送を行なうためには零分散波長の $1.3\ \mu\text{m}$ 帯で使用する必要があるが、接続性に優れる反面、光ファイバの損失は $1.5\ \mu\text{m}$ 帯に比べて約 0.15dB/km 大きい。分散シフトファイバは石英系の光ファイバで損失が最小となる $1.5\ \mu\text{m}$ 帯に零分散波長があるほか、曲げやマイクロベンディング等に対する損失変動が小さいので、高速長距離伝送に適するとともに、サービス開始後の分岐や接続替えの必要な加入者系においても安定なハンドリング特性と高品質な伝送特性を両立させることができる伝送媒体である。

本章では分散シフトファイバによる中継、加入を統一した光線路構成の可能性を探るため、分散シフトファイバの加入者系への適用上の問題点について、特に接続損失に対する要求条件とパラメータの許容範囲の観点から定量的に検討した結果を述べる。⁽⁵⁻⁷⁾

5.2 光ファイバ線路損失

検討の条件として、局から加入者への伝送速度を 2.4Gb/s 以下、線路長を最大 20km とし、

伝送損失および伝送帯域の両方に着目してファイバパラメータを設計する。また、光源波長としては $1.3\ \mu\text{m}$ 帯および $1.55\ \mu\text{m}$ 帯の両波長帯を考えることにし、 1.3 及び $1.55\ \mu\text{m}$ 帯での波長多重方式の適用についても検討する。

5.2.1 線路構成と損失要因

SM型光ファイバを規定するファイバパラメータとしては、モードフィールド直径 $2W$ 、シングルモード波長領域を決定する第一高次モードの実効カットオフ波長 λ_c 、外径および屈折率分布等がある。これらのうち $2W$ および λ_c は伝送特性を直接決定する基本構造パラメータであり、中継系での中継区間の全損失を最小とするファイバパラメータの設計法⁽⁵⁻⁸⁾が採用されている。ここではこの設計法を適用するために、加入者線路を構成した場合の個々の損失要因について検討する。加入者系の線路モデルを図5-1のように仮定する。 L_1 および L_2 はそれぞれ地下および架空区間の距離を示す。加入系ではサービス開始後も分岐やルート変更などの接続替えがあるため、これらに容易に対応でき、現場での接続工事も簡易なコネクタで統一することが理想的である。しかしながら現状では管路に両端コネクタ付きケーブルを布設する方法が確立されてない。また、両端コネク

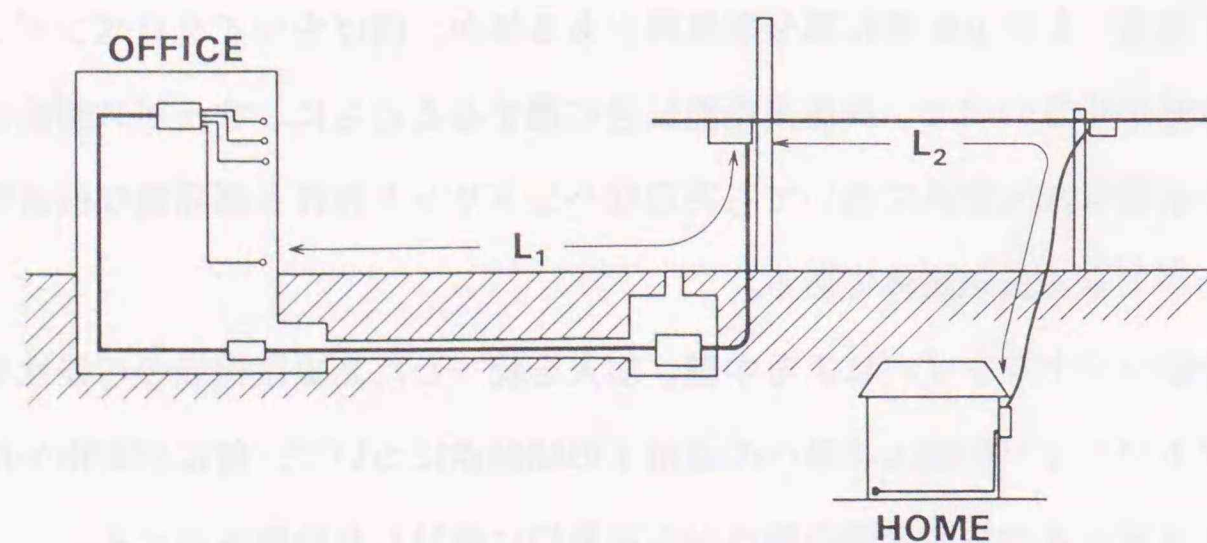


図5-1 線路モデル

タ付きケーブルを布設する場合、ケーブル接続点での余長部分の長さを正確に決める必要があるため、ケーブルの長さや布設長を精度よく測定することが必要となる。従ってここでは、地下区間では片端コネクタ付きケーブルにより融着およびコネクタ接続がそれぞれ半々、架空区間ではケーブルピース長が比較的短いことから両端コネクタ付きケーブルにより全てコネクタ接続としている。また、接続点間隔は地下および架空でそれぞれ ℓ_1 および ℓ_2 とする。

このように仮定するとコネクタおよび融着接続点数は以下のようになる。

$$\text{コネクタ部分} : M_1 = \left(\frac{L_1}{2\ell_1} + 1 \right) + \left(\frac{L_2}{\ell_2} + 1 \right) \quad (5-1)$$

$$\text{融着部分} : M_2 = \frac{L_1}{2\ell_1} \quad (5-2)$$

加入者系での特徴は、光ファイバケーブル単長が短く接続点の個数が多いため、線路損失全体に含まれる接続損失の割合が大きいことである。以下個々の損失要因について考察する。

5.2.2 光ファイバ損失

光ファイバの損失の主要因はレーリ散乱損失である。レーリ散乱損失は、通常の GeO_2 ドープコアファイバではドープ量の増大に従って大きくなる。また、フィールド分布の広がりによっても左右される。ステップ形光ファイバにおいて、 GeO_2 ドープ量とレーリ散乱係数 A_R の関係は定数項とコアの比屈折率差 Δ に比例する項の和として次式で表わせることが実験的に確かめられている。⁽⁵⁻⁹⁾

$$A_R = A + B\Delta \quad (5-3)$$

レーリ散乱損失 α_R は光ファイバ全体にわたり電磁界パワと各部分でのレーリ散乱係数の重ね合わせとして次式で評価できる。

$$\alpha_R = \frac{1}{\lambda^4} \frac{\int \phi^2 A_R(r) r dr}{\int \phi^2 r dr} \quad (5-4)$$

また、他の損失としては、構造不整合損失 α_i 、ケーブル化および余長処理部での過剰損失 α_{b1} 、 α_{b2} 等がある。ケーブル化および余長処理部での過剰損失は、一様曲げ損失で評価している。⁽⁵⁻⁸⁾ ケーブル化での過剰損失は、ケーブル化工程で等価的に一定半径の一様曲りがケーブル全体に生じているものと仮定し、等価曲げ半径を $R=4\text{cm}$ として評価している。余長処理部では、長さ80cm、曲げ半径3cm として α_{b2} を評価している。

表5-1 に損失要因とその代表値を示した。ファイバ損失の $\lambda=1.55\text{ }\mu\text{m}$ での代表値は、現状の中継系に導入されている光ファイバの値であり、比較的容易に達成できる。

5.2.3 接続損失

接続には、上記で述べたように融着およびコネクタ接続がある。加入系での接続はおもにコネクタによる接続である。接続損失 α_j の要因として支配的な

(1)軸ずれ (2)界分布不整合

に着目して融着およびコネクタ接続損失の評価を行なっている。

5.2.4 線路損失

電話局から加入者までの線路損失 α_T は、上記で述べた個々の損失の和で与えられる次式で表わせる。

$$\alpha_T = (\alpha_R + \alpha_i + \alpha_{b1})(L_1 + L_2) + \alpha_{b2} + \alpha_j + \alpha_0 \quad (5-5)$$

表5-1 光ファイバ損失要因

損失要因	代表値 (1.55 μm)
レーリ散乱損失 $(0.8+0.8\Delta)/\lambda^4$	0.2 dB/km
構造不整合損失	0.02 dB/km
曲げ損失 (余長処理部) $R=3\text{cm}$, $L=80\text{cm}$	—
接続損失 融着接続 軸ずれ 0.6 μm コネクタ 軸ずれ 1.0 μm	0.1 dB 0.3 dB
固定損失	1.0 dB
線路長	2.0 km

ここで、 α_0 は、支障移転やケーブル、光源などの経時劣化およびシステム設計上の損失マージンであり、固定損失である。

5.3 光ファイバパラメータの許容範囲

設計に用いた分散シフトファイバの形状は図5-2 に示すようなセンタコア径とサイドコア径の比 $R_s=0.4$ 、サイドコアとセンタコアの屈折率差の比 $R\Delta=0.2$ でセンタコアの形状が二乗分布の代表的な階段形分散シフトファイバである。ファイバパラメータの設計にあたっては、局と加入者宅との区間全線路損失の許容範囲内でパラメータ偏差を設計する必要がある。そこで、基本パラメータ $2W$ と λ_c に対して全線路損失を求め、許容線路損失を満足するファイバパラメータの領域を選択する。

5.3.1 1.55 μm 帯で使用する場合

加入者系のモデルを図5-1 のように仮定し、 $L_1=18.8\text{km}$ 、 $L_2=1.2\text{km}$ 、 $\ell_1=1\text{km}$ および $\ell_2=0.6\text{km}$ とした。図5-3 に、(5-5) 式を用いて計算した場合の線路長 20km に対する 1.5 μm での全線路損失を Δ に対して示す。ここでの全線路損失は固定損失を含んでいない。図には全線路損失、接続損失、ファイバ損失、および曲げ損失の個々の値を Δ に対してそれぞれ示す。実線および破線は、実効カットオフ波長 λ_c がそれぞれ 1.3 μm および 1.0 μm の場合である。図より全線路損失を最小とする比屈折率差 Δ が存在し、その値は λ_c が大きいほど増加するのがわかる。融着およびコネクタ接続での接続損失の評価に関しては現状の接続技術を考慮して、それぞれ軸ずれ量を 0.6 μm および 1.0 μm と仮定した。⁽⁵⁻¹⁰⁾ 図 5-3より、 α_T が Δ の小さいところで急激に増加するのは主に曲げ損失の影響であり、 Δ の大きい方での α_T の立ち上がりは接続損失の影響である。ファイバの損失は Δ の大きくなるに従って増加しているのがわかる。また、実効カットオフ波長が大きくなるほど光ファイバ固有の損失は大きくなる。これは λ_c が大きくなるほどフィールド分布が狭まり、コアに閉じ込められているパワが増加するためにレーリ散乱損失が増加するからである。しかし、線路損失に占める個々の損失要因の割合はファイバ固有の損失より、むしろ接続損失の方が大きい。次に1.55 μm で線路長 20km、2.4Gb/s 以下の伝送方式に対する光ファイバパラメータの設計を行なう。一中継区間の許容線路損失 α_T を25dBとし、局、加入者およびその他のシステム設計上の固定損失 α_0 を10dBとすると、

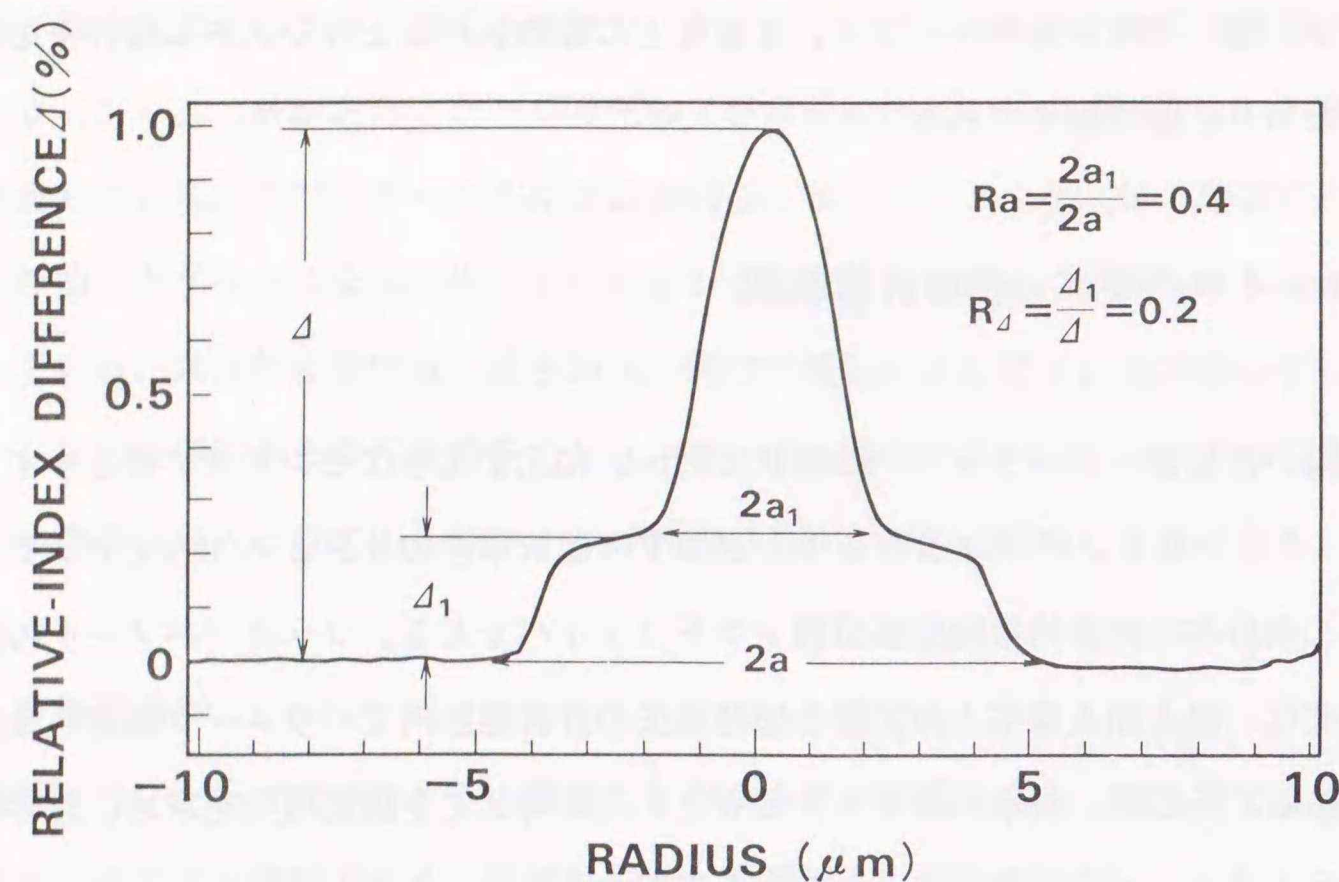


図5-2 分散シフトファイバの屈折率分布

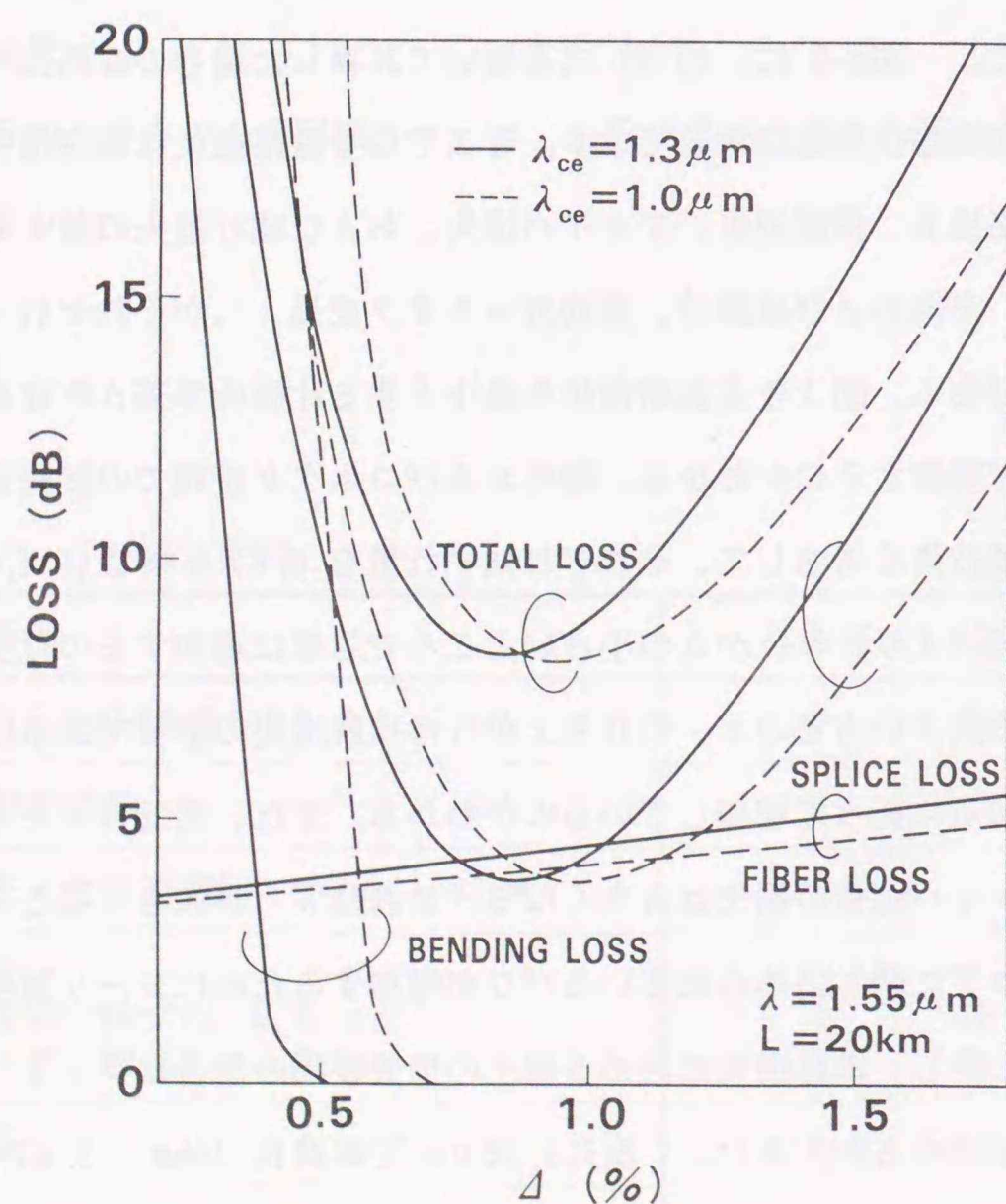


図5-3 1.55 μm における損失と Δ の関係

線路損失は15dBとなる。(5-5)式を用いて線路損失が15dB以内を満足する範囲を計算した結果を図5-4(a)および(b)に実線で示す。固定損失としては支障移転やケーブル、光源の経時劣化による損失マージンおよびシステム上のマージン等が含まれている。現状では約8dB～10dBが考慮されているので、ここでは10dBを仮定している。

図5-4(a)には Δ と λ_{ce} に対する等損失曲線を示した。図5-4(b)には、 $2W$ と λ_{ce} に対する等損失曲線を示した。線路損失が許容値となる Δ と λ_{ce} は、図5-3に示したような Δ と損失との関係を λ_{ce} に対して求めることにより得られる。また、図5-4(a)の Δ と λ_{ce} の関係より $2W$ を求めると図5-4(b)の $2W$ と λ_{ce} の関係が得られる。また許容線路損失を20dBとした場合の等損失曲線を図5-4(a)および(b)に破線で示す。この図において、許容線路損失を満足するパラメータの範囲は2本の曲線で囲まれた領域である。図5-4(b)に許容線路損失が25dBを満足する領域をハッチングで示す。図5-4(b)のハッチングの領域と表5-2に示す中継系のファイバ（実際に中継系の伝送路で用いられている分散シフトファイバ）の規格値とを比較すると許容損失を満足するモードフィールド径の範囲が約6～11 μm となるため図5-4(b)の方がパラメータの許容範囲が广くなる。

また、許容線路損失を20dBにしてもファイバパラメータの領域は中継系より広い。このことは加入者系で使用するファイバとしては中継系ファイバの規格値からはずれたファイバに対して使用可能であることを示している。

以上の検討結果より、 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 帯での分散シフトファイバの加入者系への導入は、十分可能性があると言える。

表5-2 分散シフト光ファイバの規格値

ファイバパラメータ	規格値
モードフィールド径	$8 \pm 0.8 \mu\text{m}$
カットオフ波長	使用波長以下
分散 ($\lambda = 1.525 \sim 1.575 \mu\text{m}$)	$\pm 3.5 \text{ ps/km/nm}$ 以内

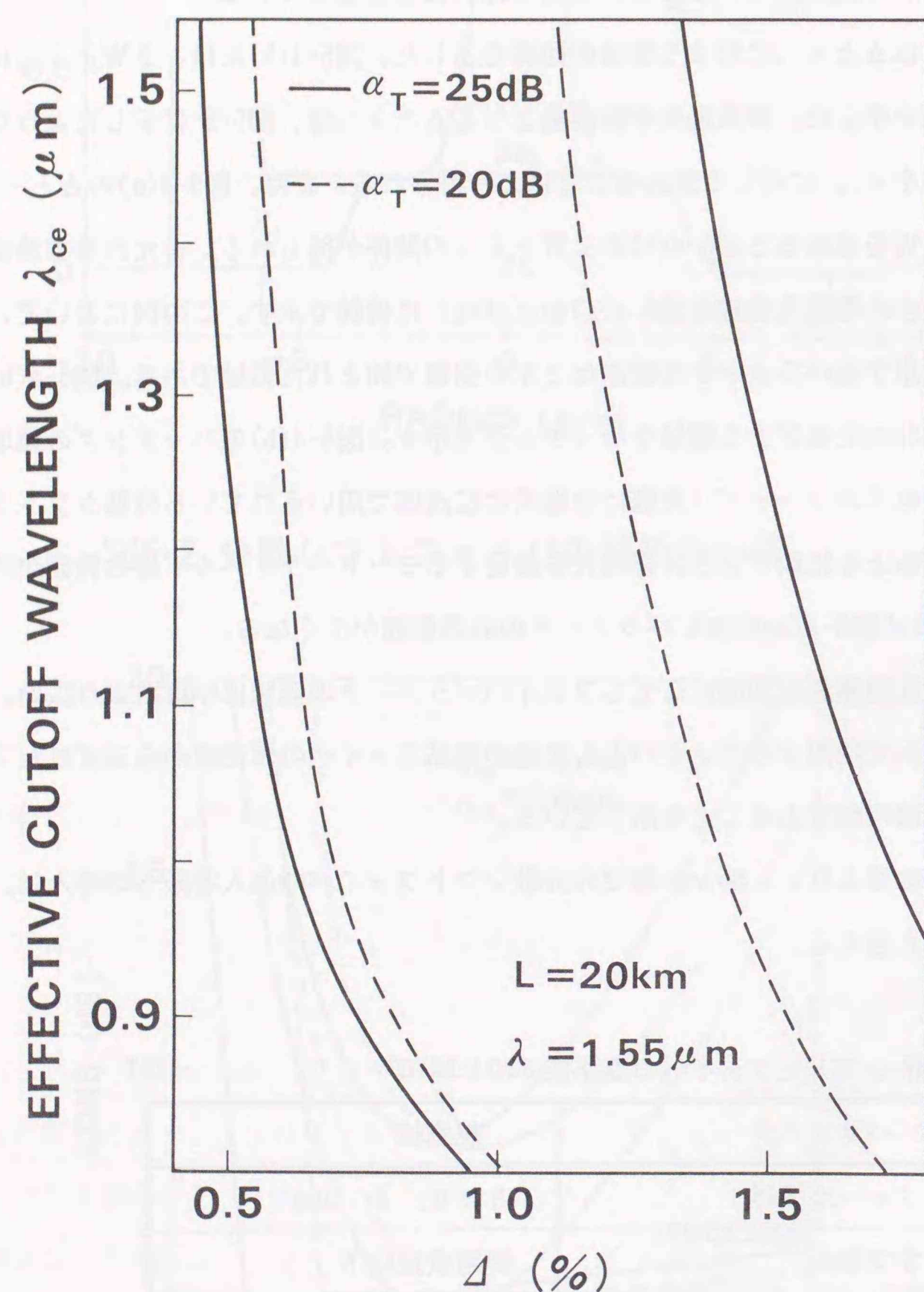


図5-4(a) $1.55\mu\text{m}$ における (Δ , λ_{ce}) に対する等損失曲線

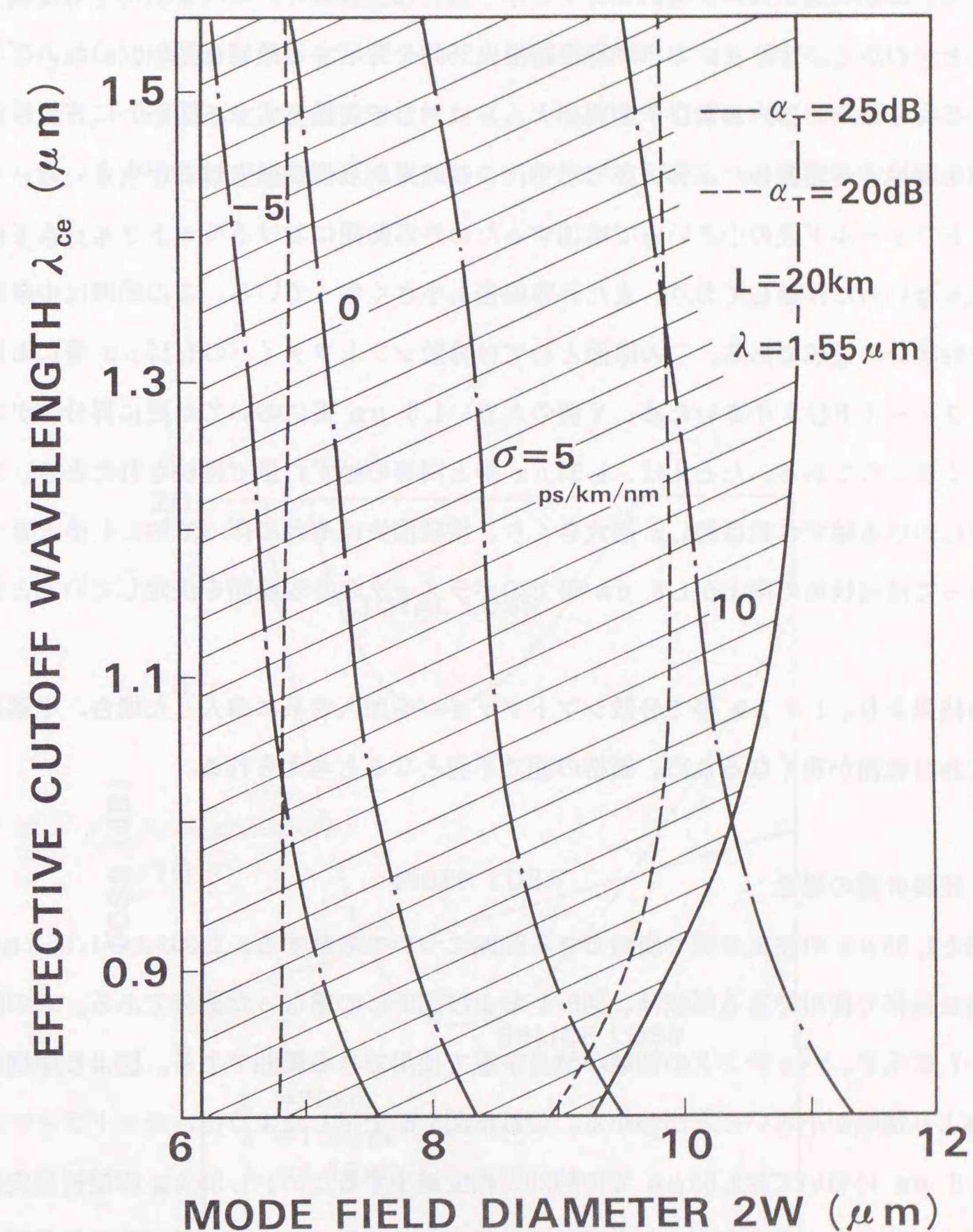


図5-4(b) $1.55\mu\text{m}$ における ($2W$, λ_{ce}) に対する等損失, 等分散曲線

5.3.2 1.3 μm 帯で使用する場合

図5-5 に全線路損失および各損失を Δ に対して示す。1.3 μm 帯での使用の場合、曲げ損失はほとんど問題がない。図より、ファイバ損失と接続損失が1.55 μm 帯の場合より大きいことがわかる。1.3 μm で、許容線路損失25dBを満足する領域を図5-6(a)および(b)にそれぞれ(Δ , λ_{ce}) および($2W$, λ_{ce}) に対して実線で示す。図5-6 に許容線路損失25dBを満足する範囲をハッチングで示す。この結果から接続損失は Δ が大きい方、つまりモードフィールド径の小さい方で増加するため許容範囲におけるモードフィールド径の中心は大きい方に移動しており、また許容偏差も小さくなっている。この範囲は中継系の規格の約半分の領域である。この原因としては分散シフトファイバの1.55 μm 帯におけるモードフィールド径が小さいため、V値の大きい1.3 μm 帯においては更に界分布がコアに集中するからである。たとえば、1.55 μm 帯と同等の軸ずれ量で接続されたとき、1.3 μm 帯における軸ずれ量は約1.2 倍大きくなり、接続損失はそれに伴って約1.4 倍大きくなる。従って接続技術の向上が1.3 μm 帯でのパラメータの許容範囲を決定していると言える。

以上の結果より、1.3 μm 帯で分散シフトファイバを加入者系に導入した場合、中継系に比べて許容範囲が狭くなるため、価格の面で不利となると考えられる。

5.3.3 波長多重の場合

1.3と1.55 μm の波長多重で使用できる範囲について考察する。1.3および1.55 μm 帯での両波長帯で使用できる領域は、図5-4 および図5-6 の重なった部分である。この結果を図5-7 に示す。ハッチングの領域が波長多重で使用できる範囲である。図より中継系の規格より領域が小さいことがわかる。これは図5-6 で示したように、モードフィールド径が1.3 μm においては1.55 μm での約20%程度減少するため、1.55 μm の接続損失に比べて約1.6 倍大きくなるからである。この結果より、分散シフトファイバを波長多重で使えるかどうかは接続損失、特にコネクタ接続技術に依存すると考えられる。そこでコネクタ接続損失が融着の場合と同じレベルになった場合について検討した。すなわち、コネクタ損失が軸ずれ量 0.6 μm で評価できると仮定する。この場合について1.3 μm での線路損失を評価し、等損失曲線を求めると図5-7 の破線で示したようになる。図よりこの場合においては波長多重としてのパラメータの許容偏差はほとんど中継系の $2W$ と λ_{ce} の

範囲をカバーすることができる。従って、コネクタ技術を融着接続技術と同レベルに向上すれば分散シフトファイバを1.3 および1.55 μm 帯での波長多重に使用することは可能となる。また、この場合においても本検討結果からわかるように中継系のパラメータの許容範囲より広いため、コストの低減が可能である。また、コネクタ接続の接続損失を減少させるためには接続部分でのモードフィールド径を局部的に大きくすることにより減少できる⁽⁵⁻¹¹⁾。このような方法が実用化されると、接続損失の値を大幅に減少することができるため、上記で計算した許容範囲より更に広がり、加入者系への適用範囲が拡大できると考えられる。

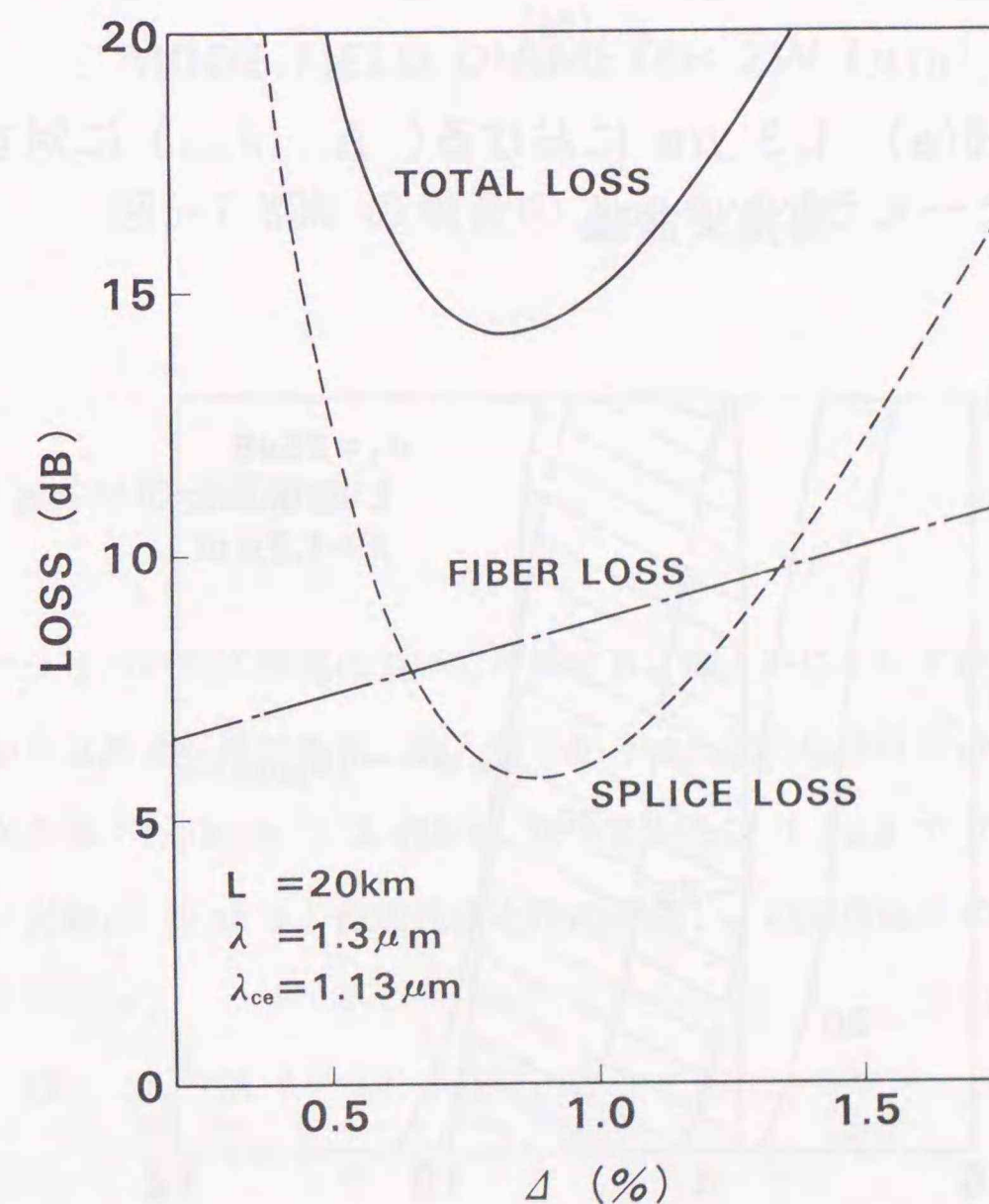


図5-5 1.3 μm における損失と Δ の関係

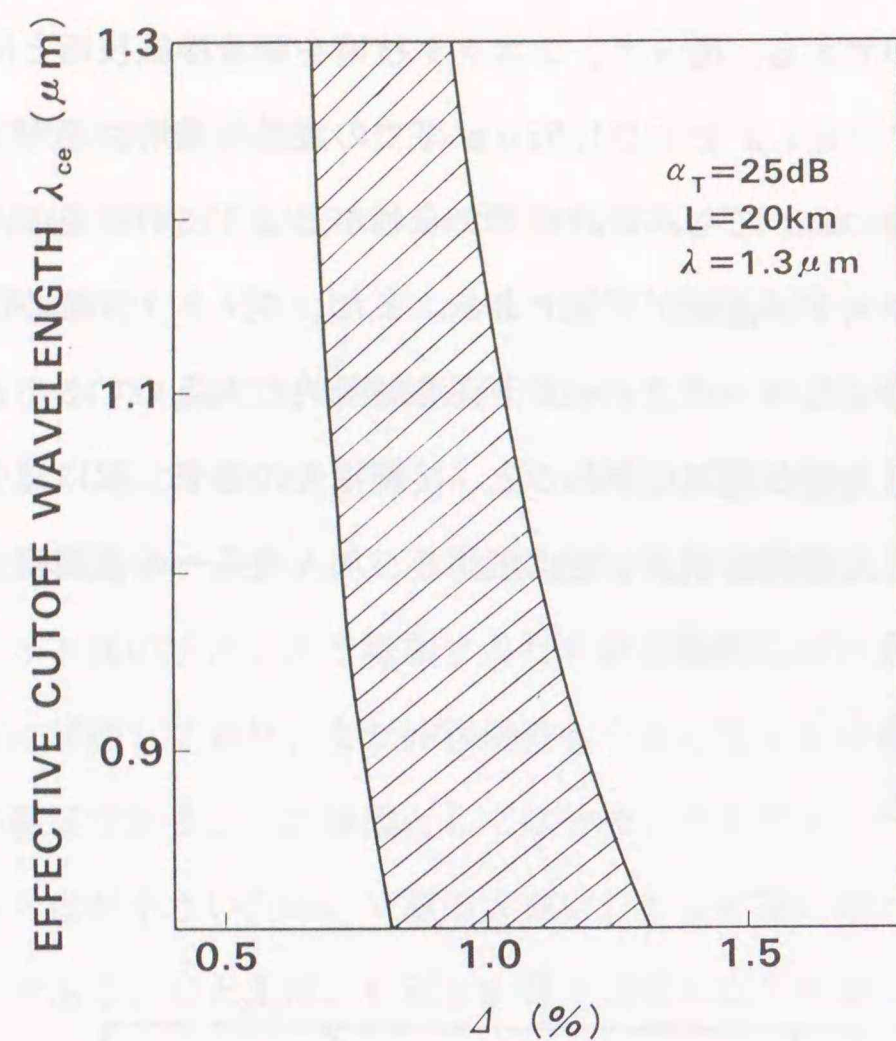


図5-6(a) 1.3 μm における(Δ、λ_{ce}) に対する
等損失曲線

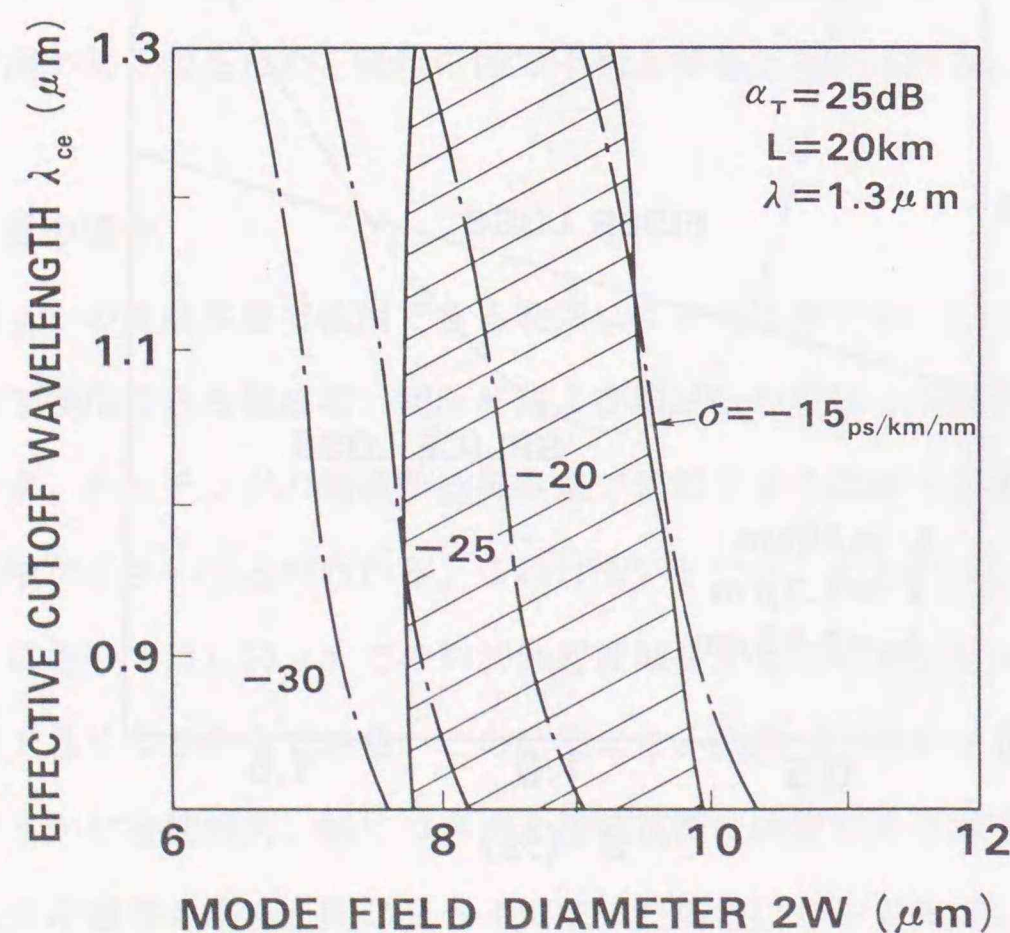


図5-6(b) 1.3 μm における(2W、λ_{ce}) に対する
等損失, 等分散曲線

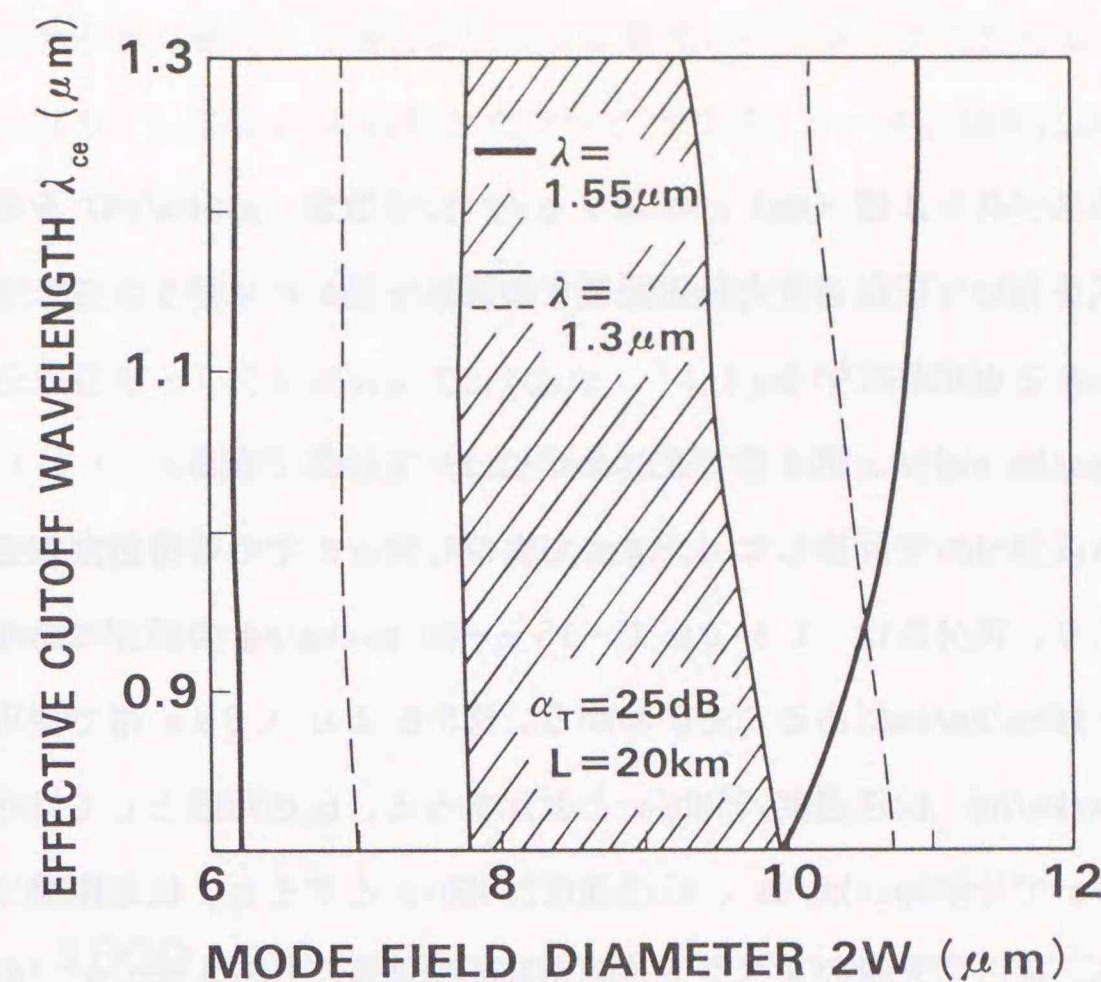


図5-7 WDM の場合のファイバパラメータ

5.4 光ファイバの伝送帯域

次に光ファイバの伝送帯域について考察する。加入系において波長多重する場合、一般的には局からは高速伝送であり、加入者宅からは比較的低速な伝送が考えられている。ここでは局からは 1.55 μm で 2.4Gb/s、加入者からは 1.3 μm で 155Mb/s の伝送をすると仮定する。文献(5-12)より、伝送速度と伝送距離 L_R の関係は次式で与えられる。

$$L_R = \frac{G_L}{\alpha} = \frac{31.4 - 10 \log f_0}{\alpha} \quad (5-6)$$

ここで、 G_L は受信系利得の限界値、 α は線路損失 (dB/km)、 f_0 は伝送速度を表わす。式 (5-6) は、損失制限による限界を与える式である。また、LD のモード分配雑音制限による伝送速度と伝送距離との関係は次式で表わせる。

$$f \cdot L_R \leq \frac{350}{w \sigma} \quad (5-7)$$

ここで、 w は光源のスペクトル幅 (nm)、 σ はファイバの分散値 (ps/km/nm)を表わす。
(5-6) および(5-7) 式を用いて伝送速度と伝送距離との関係を図5-8 に示す。ここでは光源のスペクトル幅を4nm と仮定している。

波長 λ での分散値 σ (ps/km/nm)は、第4章で述べた式(4-1) で計算できる。

図5-4(b)と図5-6(b)に式(4-1) で計算した 1.3 μm および1.55 μm での等分散曲線を一点鎖線で示す。この図より、色分散は 1.3 μm で-15~-30 ps/km/nm の範囲にあり、1.55 μm では-5~-10ps/km/nmにあることがわかる。図5-8 より 1.3 μm 帯で使用する場合、分散値を-30ps/km/nm、伝送速度155Mb/s と仮定すると、伝送距離としては約18km となる。また 1.55 μm で分散5ps/km/nm、伝送速度2.4Gb/s とすると、伝送距離は約7kmとなるのがわかる。従って光源のスペクトル幅が4nm の場合、1.3/1.55 μm での波長多重は伝送距離20kmでは不可能となる。伝送速度および伝送距離を固定し、ファイバの分散値と光源のスペクトル幅の関係を計算した結果を図5-9(a), (b)に示す。図5-9(a)および(b) は、それぞれ 1.5 μm および 1.3 μm での計算結果である。図から波長多重する場合の光源のスペクトル幅は、1.55 μm で1.9nm 以下、1.3 μm では、3.7nm以下にすることにより可能である。光源のスペクトル幅を上記の数値にすることは現状では比較的容易であるが、加入者系へ導入するに当たっては価格と光源の性能との関係について十分検討する必要がある。

5.5 まとめ

分散シフトファイバの加入者網への適用可能性について検討した。加入者網で1.55 μm 帯および 1.3 μm と1.55 μm 帯での波長多重する場合について、分散シフトファイバの損失特性および帯域特性について考察し、許容できるファイバパラメータの領域について検討した。その結果以下のことを明らかにした。

(1)1.55 μm 帯でのみ使用する場合、モードフィールド径、実効カットオフ波長の許容偏差は中継系のパラメータの偏差より広く、将来的にはコストの低減が可能であることがわ

かった。

(2) 波長多重で使用する場合、1.3 μm 帯でのパラメータの許容偏差は中継系の規格の約50%となり、1.55 μm 帯に設計したファイバのパラメータの偏差に比べて狭くなる。この原因としてはコネクタ損失が 1.5 μm に比べて大きくなるためであり、コネクタ技術が現状の融着接続と同レベル、つまり軸ずれ量を 0.6 μm 以下に抑えることにより可能となる。また伝送速度として1.55 μm で2.4Gb/s、1.3 μm で155Mb/s を考えた場合、使用する光源のスペクトル幅は 1.3 μm では3.7nm 以下、1.55 μm では1.9nm 以下のものが必要である。従って分散シフトファイバの導入に当たってはレーザの性能と価格の関係について十分検討すべきである。

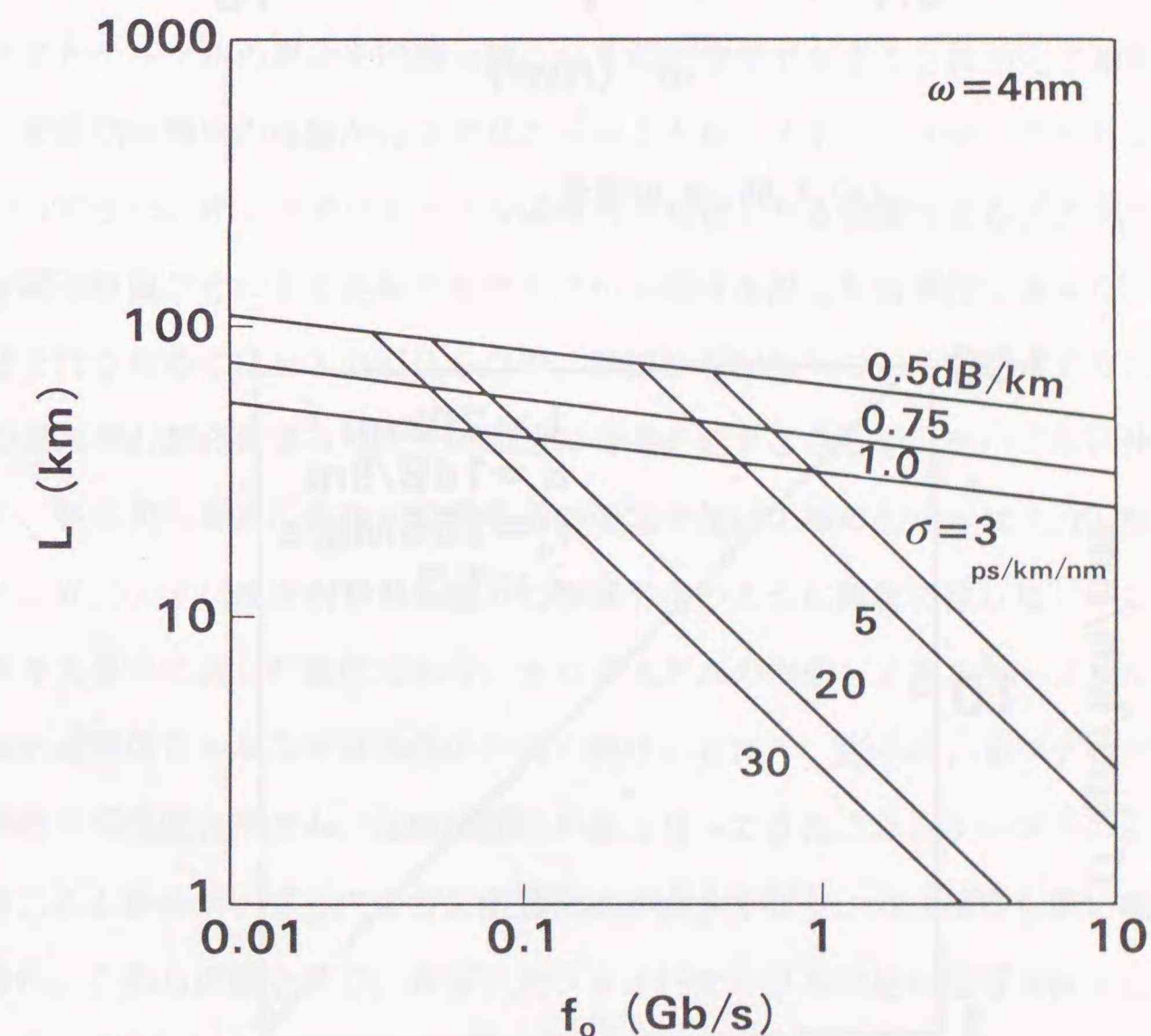
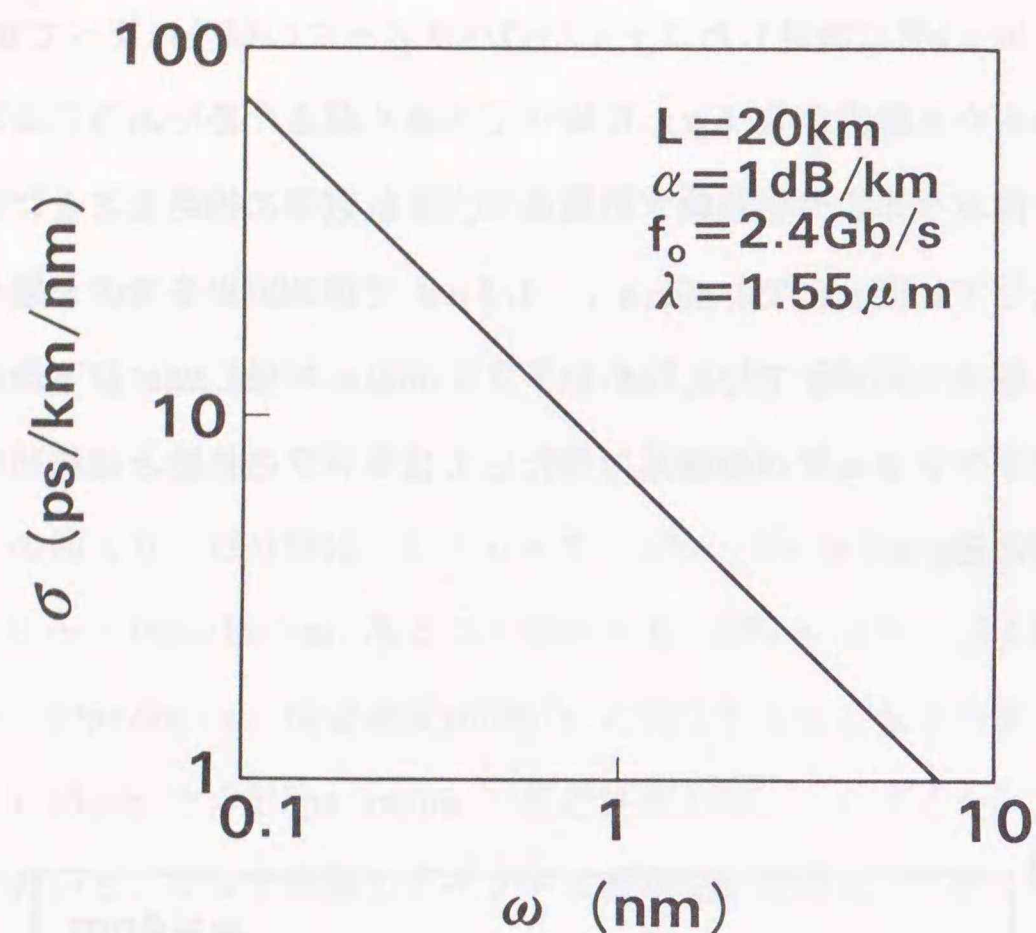
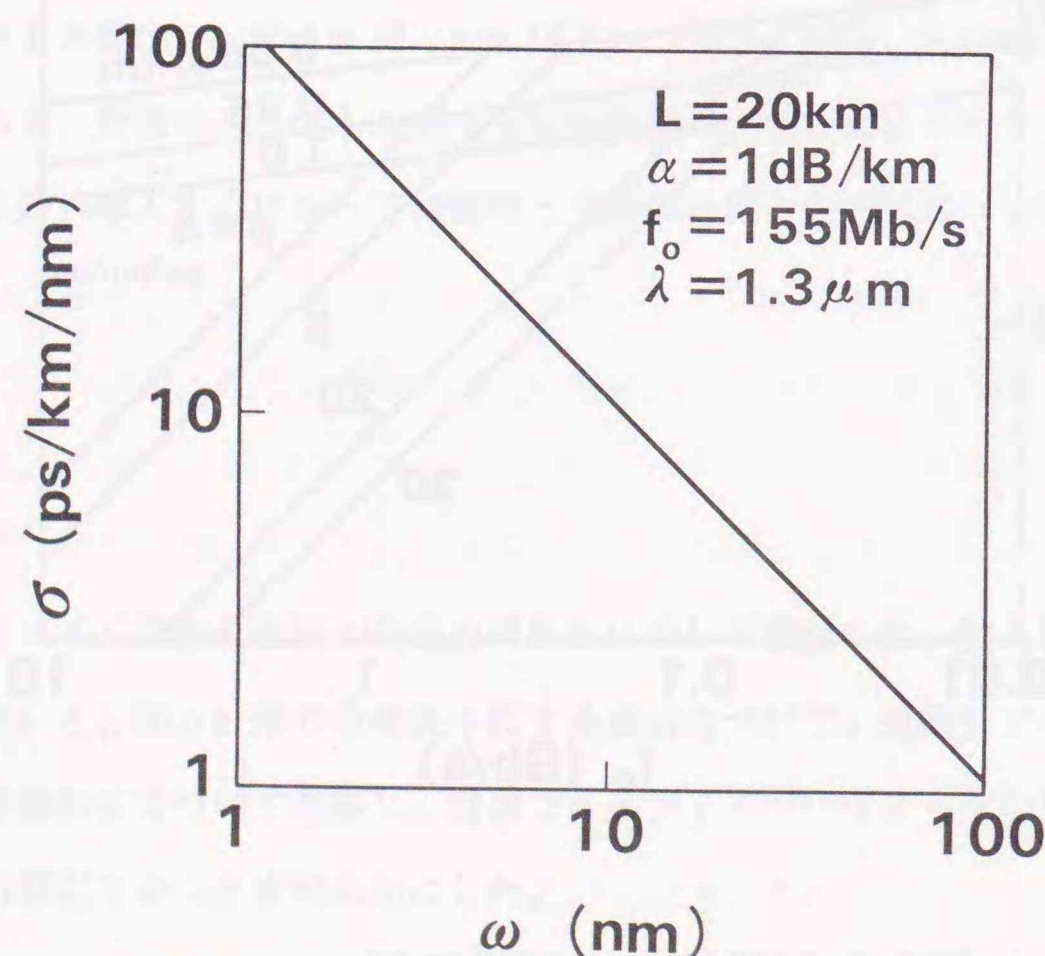


図5-8 伝送速度と伝送距離



(a) 1.55 μm の場合



(b) 1.3 μm の場合

図5-9 光源のスペクトル幅と分散値との関係

第6章 非ガス保守加入者光線路の構成

6.1 まえがき

従来、光ファイバケーブルの保守は地下ケーブルでは基本的に従来のメタルケーブルと同様のガス保守が用いられてきた。ガス保守は常時ケーブルおよび接続部内に乾燥空気を一定圧で印加するもので、乾燥状態に維持するとともに、ケーブル外被や接続部に異常を生じて内圧により湿気や水の侵入を防げること、接続部に圧力センサを設置し、圧力を常時監視することにより、異常時のガスもれを検知して、大きな障害に至るまえに修理できる特長があった。特にメタルケーブルの場合、浸水が絶縁劣化等直ちに障害となるため、線路の信頼性維持のうえで有力な手段であった。一方、光ファイバケーブルについても布設されたケーブルの異常を回線故障になる前に検知できることに加えて開発当初は光ファイバの長期信頼性の保証が完全でなかったことからメタリックケーブルと同様にガス保守を行ってきた。光ファイバケーブルの導入当初は主たる設備であるメタルケーブルのガス保守関連設備がそのまま使用できたことから保守運用上も効率的であった。しかし、ガス保守を行うためにはビルの引込み口や、幹線から配線へのたちあげ点でガスを封止するためのガスダムが必要であり、その加工に時間を要することや、ケーブルに比べて太くなるため、特に加入者系において設置場所の選定や建設工事の面からは欠点となっていた。また、光ファイバは浸水しても直ちに絶縁劣化のような障害になりにくいことから基本的に非ガス保守に適した媒体であり、またガスダムの作成もメタルケーブルに比べて高度な技術が必要なことから非ガス化の検討を続けてきた。さらに、光ファイバケーブル、伝送機器の高性能化が進み、線路区間長が長くなってきたこと、ケーブルの高密度化が進んできたことからケーブル内のガス流動抵抗が大きくなり、ガス保守し難い線路構成となってきた。これらの観点から、非ガス光ファイバケーブルを用いてガス保守と同等の信頼性を有する非ガス加入者光線路の構成法を検討した。

本章ではまず浸水による光線路構成要素への影響を明らかにし、ガス保守の代替手段として浸水センサによる線路構成について信頼性の観点からの設計法を示すとともに、浸水センサの設計、評価結果を述べ、信頼性の高い非ガス加入者光線路を構成できることを明らかにした。

6.2 加入者光線路の基本構成

6.2.1 線路構成

現在の加入者光線路の基本構成は図2-1 に示した。地下部分は雨水や地下水により、ケーブルやクロージャが水没し、土木工事等によりケーブル外被が損傷したり、クロージャのシールが不完全な場合には浸水の危険があるため、地下部分には乾燥空気が圧入され、ガス保守されている。ガス保守のためには、ガスケーブルと配線ケーブルの間でガス封止の必要があり、架空たちあげ点やビル引込み点にガスダムが設置される。ガス保守用の圧力センサは地下接続クロージャ内に設置され、銅線（介在対）2 対で保守局に設置されているガス圧遠隔監視装置に接続されている⁽⁶⁻¹⁾。ガス圧監視を正確に行うためにはケーブルのガス流動抵抗を一定値以下に設計する必要がある、細径のガス保守用ケーブルにはガス流動用のパイプまたは溝が設けられている。

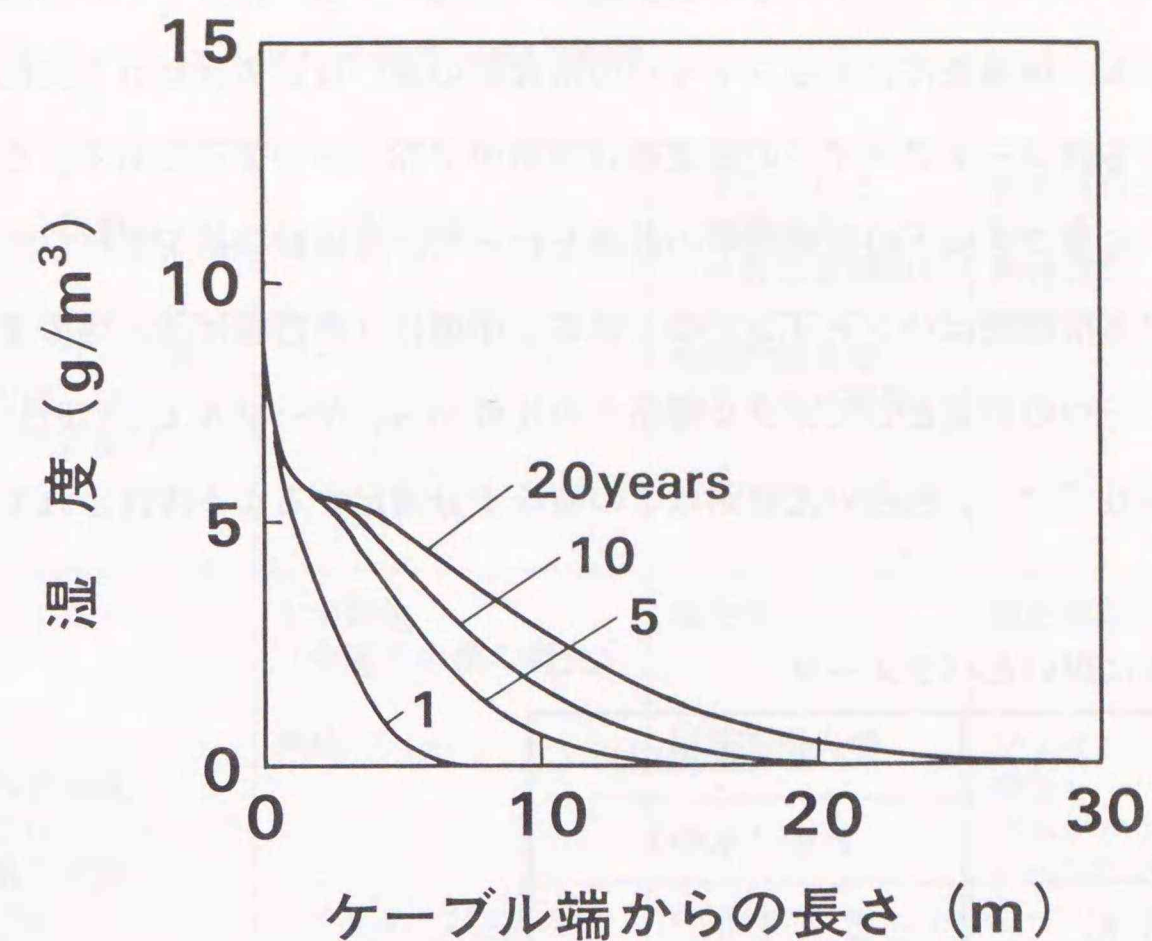
一方、架空線路の接続部は加入者への引き落としが日常的にあるので、開閉が容易な構造にするため、気密構造にはなっていない。このためケーブル端面に水圧が加わることはないが、空気中の湿気にはさらされる。しかし、通常の架空区間で湿気がケーブルの長手方向に透湿・蓄水する量は図6-1 に示す様に極めて小さく⁽⁶⁻²⁾、従来のメタルケーブルでもガス保守は行われていない。従って以下で検討する非ガス保守も地下線路のみを対象とした。

6.2.2 信頼性設計

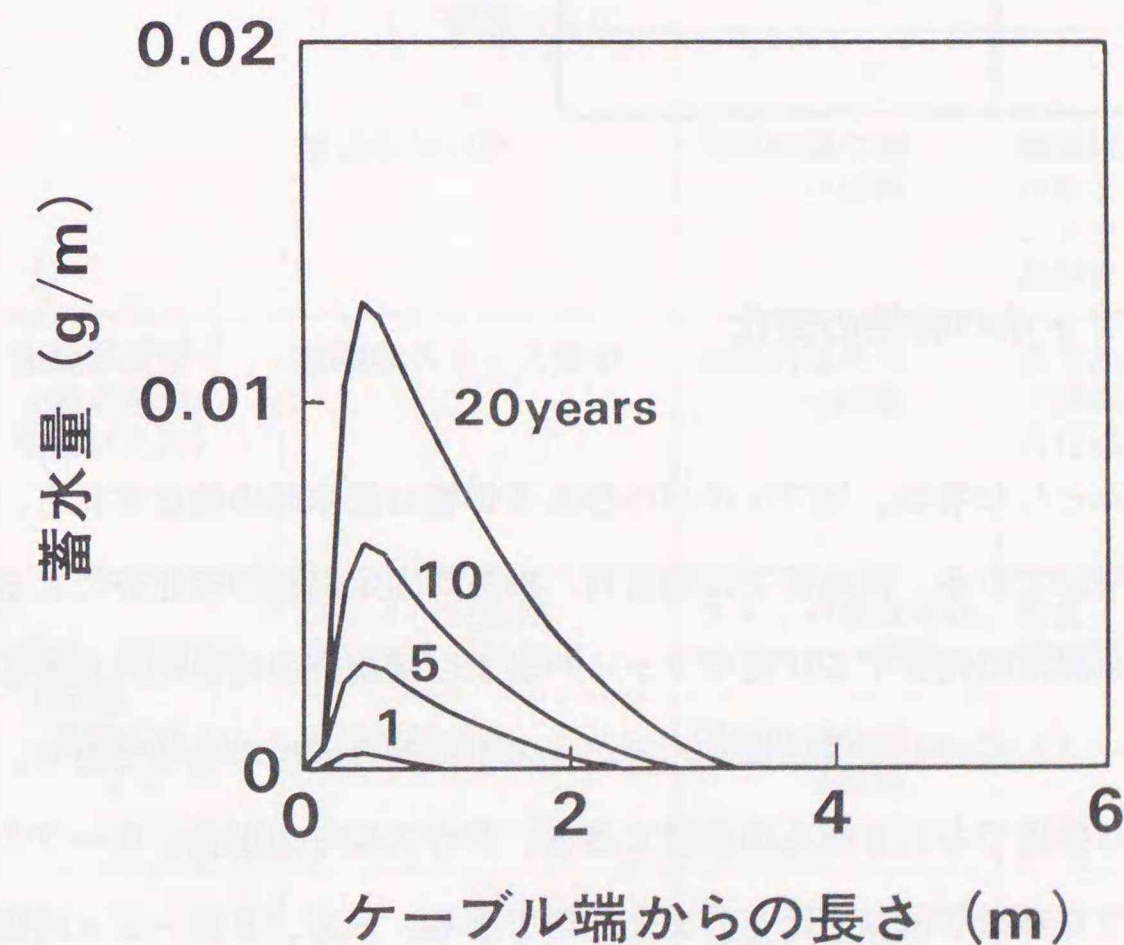
光ファイバは脆性材料であるため、歪設計による信頼性の保証が必要である。光ファイバケーブルの信頼性設計の手法としてスクリーニング試験と歪設計に基づく方法⁽⁶⁻³⁾が一般的であり、光ファイバの破断率 F は以下の式で示される。

$$F = 1 - \exp \left(N_p \cdot L \cdot \left(1 - \left(1 + \left(\delta_a / \delta_p \right)^n \right) \times \left(t_a / t_p \right)^{m / (n-2)} \right) \right) \quad (6-1)$$

ここで、 L はファイバ長さ (m)、 δ_a はファイバに加わる歪で使用環境によって定まる値、 δ_p はスクリーニング歪、 t_a はファイバに歪が印加されている時間 (秒)、 t_p はスクリ



(a) ケーブル内透湿水分量の分布



(b) ケーブル内蓄水量の分布

図6-1 ケーブル内水分、蓄水量の計算結果
(いずれも単心線ユニット集合ケーブル)

ーニング時間、 N_p はスクリーニング中の破断確率 (回/m)、 m はワイブル分布定数、 n は疲労係数である。環境条件によるファイバの信頼性の違いは疲労係数 n で支配され、現在用いられているUVコートファイバの測定値は空気中で23、水中で20である。その他の係数は文献(6-3)に基づき以下の破断確率の計算を行った。各係数の値を表6-1に示す。光線路に要求される信頼性はハンドリングのし易さ、小型化(許容曲げ径)等の兼ね合いで決められるが、一つの目安としてメタル線路との比較から、ケーブルで 27Fit/心・km の値が示されており⁽⁶⁻⁴⁾、現在の光線路はこの値を十分満足するよう設計されている。

表6-1 計算に用いたパラメータ

n	23 (空气中)
	20 (水中)
N_p (回/m)	5×10^{-5}
δ_p	5×10^{-3}
t_p (秒)	1
m	3

6.3 浸水による光ファイバ特性の変化

非ガス保守システムとした場合、光ファイバへ与える影響は浸水時の強度劣化と、水素ガス発生による損失増加である。接続部では接着材、機械的固定部品の劣化等による損失増が考えられる。浸水異常の発生する状況やファイバおよび接続部の特性にあたる影響を表6-2に示す。ケーブル外被の損傷はほとんどが土木工事等外因性のものであり、ガス保守のためには小さな損傷でも引き換えが必要である。非ガス保守の場合、ケーブル内部に外力が至らないような軽微な損傷ではそのまま使用できる。一方、クロージャは現場で組立作業を行うこと、加入者線路では分岐や引き落とし工事で現場でアクセスする頻度が多く、作業ミスによる異常発生をあらかじめ考慮しておく必要がある。強度面ではクロージャ内における接続余長処理部は歪特性から曲げ半径を30mmに設定しており⁽⁶⁻⁵⁾、強度劣化の観点から主要な評価項目である。

表6-2 光ファイバケーブル・接続部の劣化要因

1 次要因	2 次要因	直接要因	予想される故障状況 (⇒最悪値現象)	特性劣化データによる特性推定	対策
管路折損, 変形, 固定具破損等	ケーブル圧壊, 引張, 座屈 (異常曲げ)	ファイバストレス	局部的損失増 ⇒ファイバ破断	——	○損失定期監視 ○将来は歪を直接監視の可能性有 (文献6-13)
	外被破損 クロージャ組立不良 ↓ 浸水	水素発生 (金属その他の腐食)	損失増	損失要因明確化	○ケーブルは対策確立済
凍結		局部的損失増	ファイバは損失増なし コネクタで最大 1 ～2dB の変化	○外被接続は浸水を検知し, 一定期間内に処理	
施工不良		ファイバ表面のクラック成長加速	ファイバ強度劣化 ⇒ファイバ破断	常温では大きな劣化なし 余長処理部は長期間では劣化有	○防水ケーブルの適用 ○外被接続は浸水を検知し, 一定期間内に処理
		ファイバ被覆材劣化			
		接続部材劣化	局部的損失増 ⇒破断	融着接続補強部は耐水性あり, コネクタ金属部品腐食劣化	○外被接続は浸水を検知し, 一定期間内に処理
	接続部異常 (組立不良, 接着材不良)	接続部ストレス集中	局部的損失増 ⇒破断	正常品にくらべて浸水による劣化速度大	○損失定期監視 ○外被接続は浸水を検知し, 一定期間内に処理
環境劣化	透湿, 結露等 (多湿, 温度変化大)	ファイバ表面のクラック成長加速	ファイバ強度劣化 ⇒ファイバ破断	常温, 湿気程度では問題なし	○防水ケーブルの適用
		接続部材劣化	局部的損失増 ⇒破断		○乾燥材の設置および浸水を検知, 処理
外部工事, 事故等			ケーブル, ファイバ破断	——	——

(注) —は状況が多様でケーブルレベルの予防対策が困難な項目を示す

6.3.1 光ファイバの破断確率

ファイバ歪と破断確率の関係は式(6-1)で示した。ケーブル部の破断確率の計算結果を図6-2に示す。ケーブル布設後のファイバの残留歪(δ_0)を0.17%⁽⁶⁻⁶⁾として計算した。現実の線路では、防水ケーブルを用いることにより浸水長は3m以下で全長にわたって浸水することはない。1km当たり1ヶ所(3m)の浸水が発生しても、ケーブル部分の破断確率の変化は図6-2に示すように極めて小さい。また、クロージャ内の余長処理部の浸水期間と破断確率の計算結果を図6-3に示す。ファイバに加わる歪 δ_0 はクロージャ内の曲げ歪によって決まり、曲げ半径は30mmである。一定期間浸水後、乾燥した場合の破断確率を破線から実線へ移行している曲線で示した。また標準的な加入者線路(2km、架空・地下接続点各5ヶ所)においてケーブル部、接続部1ヶ所ずつ浸水した時の信頼性を図6-4に示す。クロージャ部の浸水期間が長くなると破断確率は増加するが3ヶ月の浸水に対して10年後の破断確率に与える影響は1心当たり 10^{-5} 以下である。したがって接続部の浸水期間を一定期間内に制限できれば実用上問題のない非ガス線路を構成できる。浸水期間を制限するためには浸水検知を行う必要があり、ノンメタリック化が可能で構造も簡単な光ファイバを用いた浸水センサについて6.4節でのべる。

6.3.2 光ファイバおよび接続部の損失変化

浸水による損失変化は浸水ケーブル部およびクロージャ内における水素ガス発生による損失増加と心線接続部(コネクタ、融着接続部)の劣化が考えられる。水素ガスの発生は金属の酸化反応に伴うものであり、特に現在のケーブル構造ではLAP外被のアルミが大きな発生要因である。この解決策として、ノンメタリック化を図る、酸化しにくい銅等の材料を用いる、アルミ表面をコーティングして露出面をなくす等の対策がある。図6-5にケーブル外被をパラメータにとった浸水時の損失波長特性を示す。測定条件は長さ300mのケーブルの端面から加圧ポンプで水を注入し、十分浸水させた後、温度60°Cの恒温槽内に収容し、1か月後に測定したものである。ケーブルA、Bとも光ファイバテープをスロットコアに収容した100心ケーブルで、ケーブルAはガス保守ケーブルで使われていたアルミ表面がむきだしのLAP外被構造であり、ケーブルBはアルミ表面にプラスチックコーティングをしたLAP外被構造である。プラスチックコーティングをしたLAP材料は、アルミ表面がむきだしのLAP材料に比べて水素発生量の測定値は1/1000程度であり、損失増加量

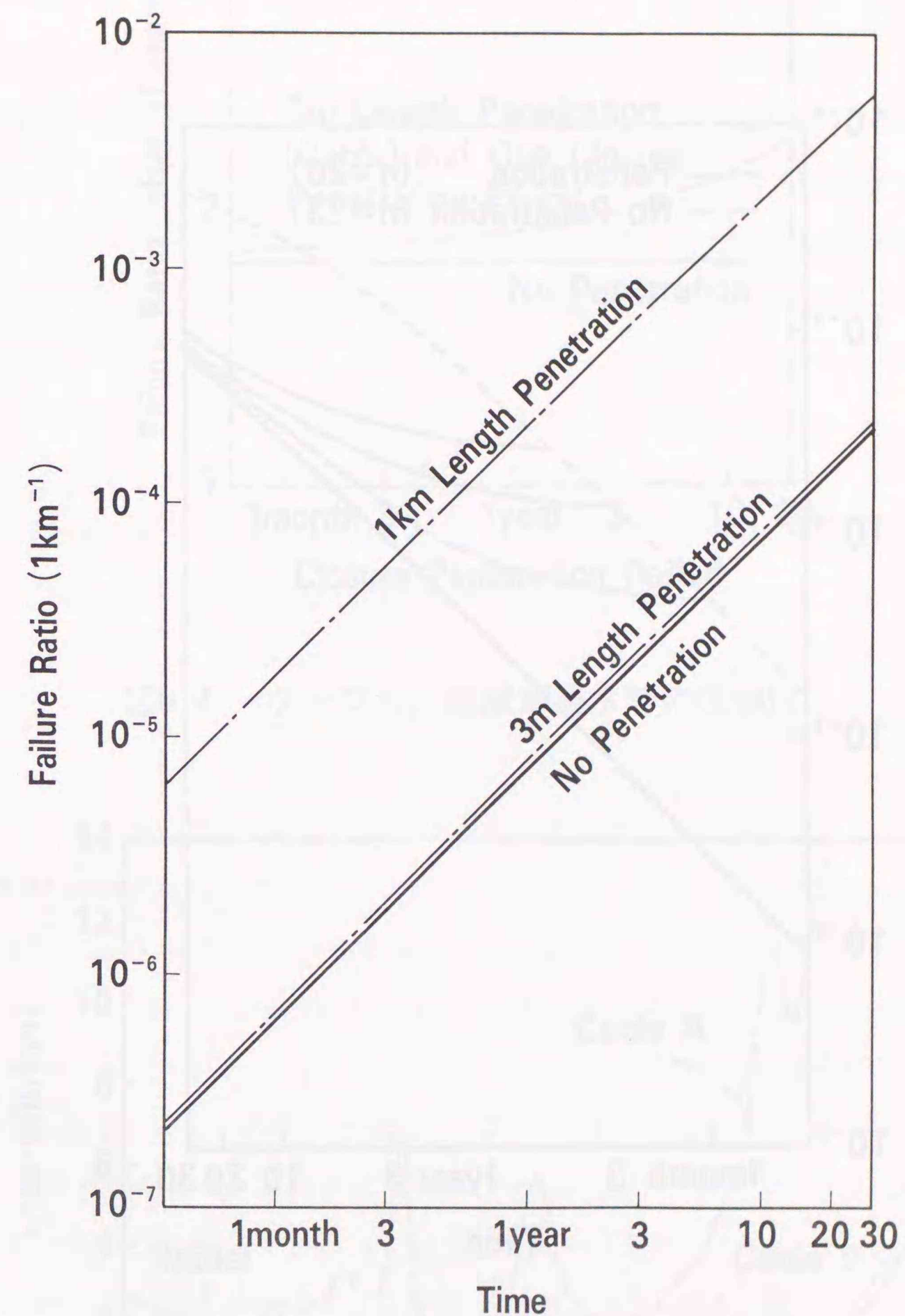


図6-2 ケーブル部の破断確率

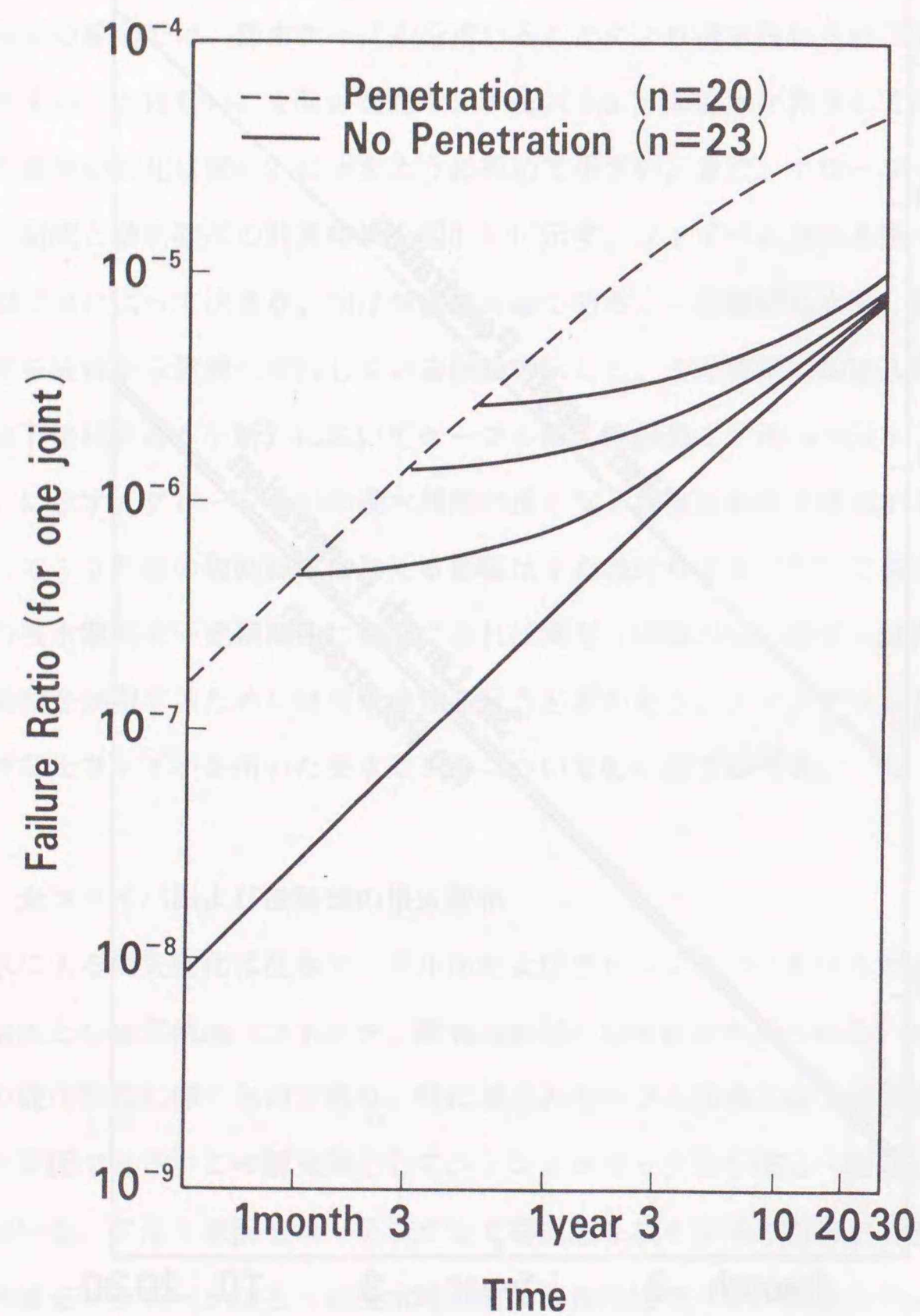


図6-3 クロージャ部の浸水期間と破断確率

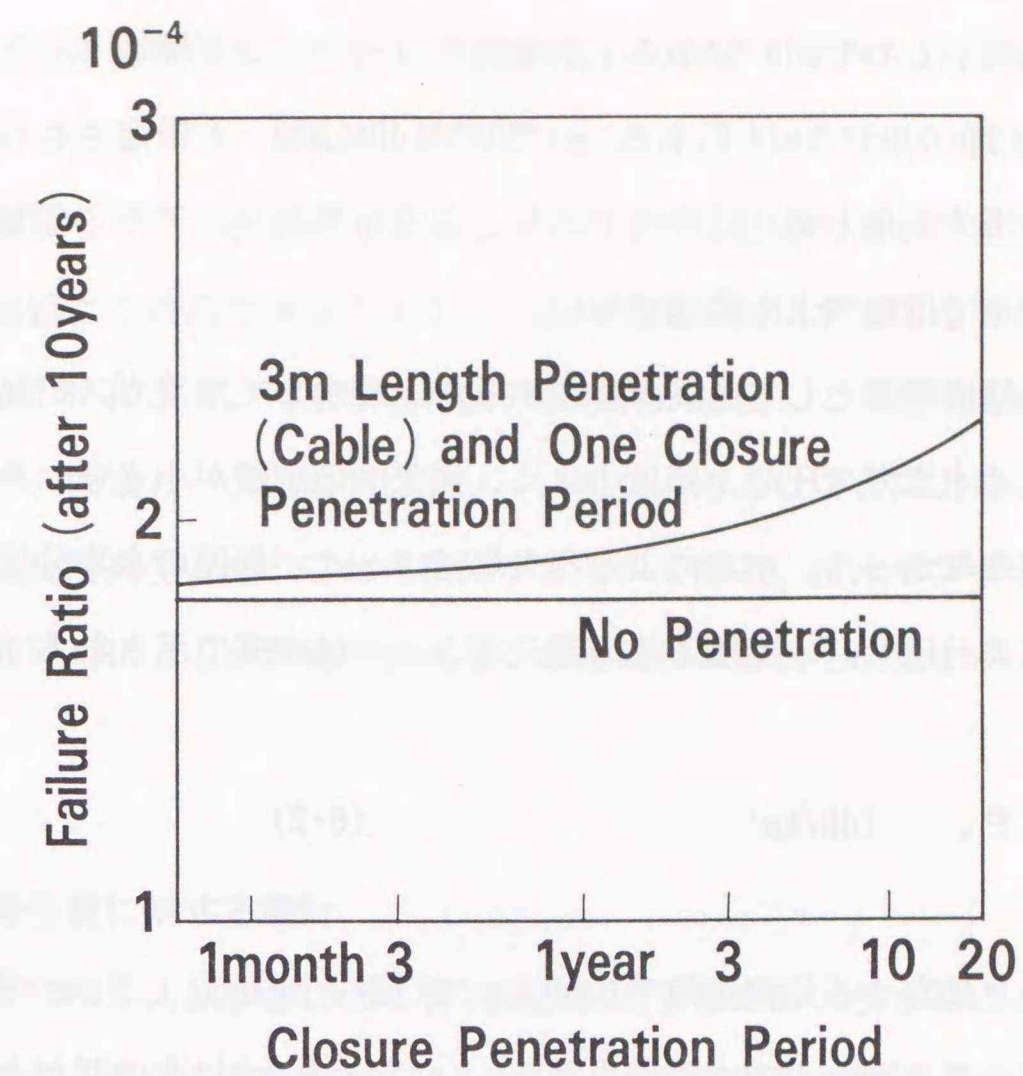


図6-4 ケーブル、接続部浸水時の信頼性

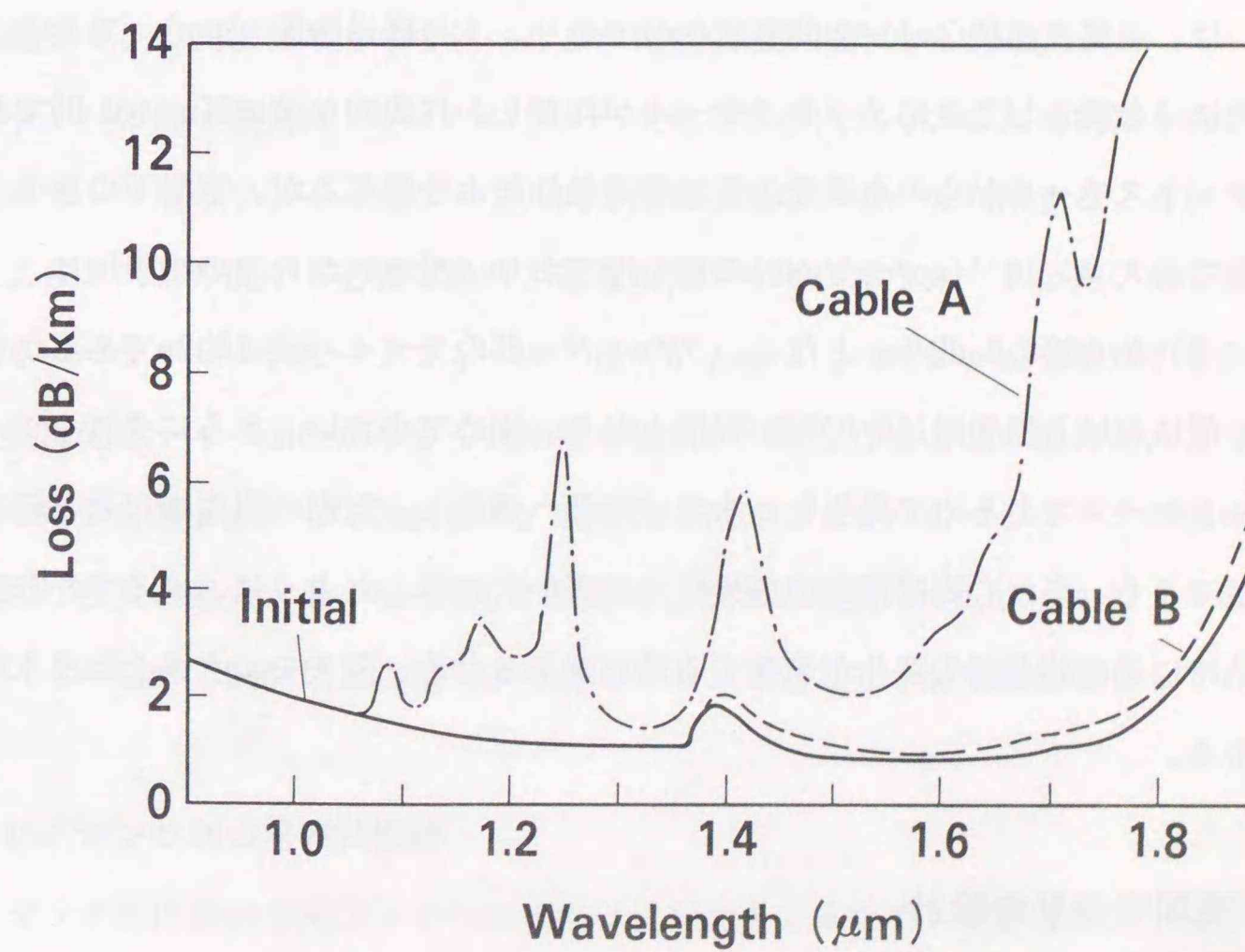


図6-5 浸水時の損失波長特性

は水素発生量に比例するので図6-5 から1か月後のコーティング構造 LAPケーブルの損失増は波長 $1.55\mu\text{m}$ で 0.002dB/km 以下、 $1.3\mu\text{m}$ で 0.001dB/km 以下と推定される。図6-5におけるケーブルBの損失変化も測定精度内であり、この結果から、アルミ表面を被覆することにより、LAP構造で信頼性上の問題はない。

クロージャ部は構成要素として金属が存在するが、浸水して水素ガスが発生しても全体の容量が大きいため水素ガス圧の上昇は小さく、損失への影響が小さいため、浸水実験では損失増は測定出来なかった。水素による損失増はファイバ周囲の水素分圧に比例し、 1km にわたって水素分圧 P_H の環境下での損失増 $\Delta\alpha_H$ は次式で示される⁽⁶⁻⁷⁾。

$$\Delta\alpha_H = K_W P_H \quad (\text{dB/km}) \quad (6-2)$$

ここで K_W は波長に依存する比例係数で $1.55\mu\text{m}$ で $K_W \approx 1.0$ 、 $1.3\mu\text{m}$ で $K_W \approx 0.5$ である。また P_H と金属表面からの水素発生量 G_H ($\text{cc/cm}^2/\text{sec}$)は次の関がある。

$$P_H = K_V G_H t \quad (6-3)$$

ここで K_V は、金属表面積(cm^2)/空間容量(cc)であり、 t は経過時間(sec)である。クロージャ内には金属として亜鉛メッキスチールが存在し、代表的な値は $K_V \approx 0.06$ である。一方亜鉛メッキスチールからの水素発生量は測定条件により異なるが、室温下の水中、多湿環境条件で最大 4×10^{-6} ($\text{cc/cm}^2/\text{sec}$)の値を得ており、浸水1か月後の損失増は式(6-2)、(6-3)から約 0.6dB/km となる。クロージャ部のファイバ長は約 2m であるから、クロージャ部における損失増は 0.001dB 程度となり、極めて小さい。さらにクロージャはプラスチックケースであるので発生した水素は外部へ透過し、実際の損失増は殆ど起こらないと推定できる。また心線接続部の損失変化は表6-2に示したように、ゆるやかな損失変化と凍結時に過渡的な損失変化が発生する恐れがあるため、損失モニタまたは浸水検知の必要がある。

6.4 浸水検知センサの設計

6.4.1 基本構造

浸水検知方法は金属導体を必要とする電気的な方法⁽⁶⁻⁸⁾や、光ファイバに曲げを発生させて検知する方法⁽⁶⁻⁹⁾がある。後者の方法は光ファイバの保守試験に使用されている光パルス試験器をそのまま適用できること、センサは極めて簡易で小型に実現できること、ノンメタル線路にも適用できることから、この方法を採用することとした。浸水センサの基本構造を図6-6に示す。浸水すると図の吸水材が膨張して一定の曲率を有する可動カーブをおしあげ、固定カーブとの間にファイバをはさみこむことにより一定の曲率の曲げを与え、曲げ損失を発生させ、これを検知するものである。浸水センサの設計は損失変動値と屈曲部の曲げ歪による破断確率の関係から屈曲部の形状を決定する。以下にその設計法を示す。

6.4.2 損失発生量に対する設計

浸水センサはパルス試験器による監視を前提とするため、浸水時にパルス試験器の検出精度以上の損失を発生しなければならない。パルス試験器の精度は測定距離(ダイナミックレンジ)によって異なるが、ダイナミックレンジが 20dB の場合、すなわち線路損失が 1dB/km とした場合の測定距離 20km の時に現状では 2dB 以上の損失変化が必要である。図6-6に示した浸水センサはカーブに添って一定の曲率で曲げられ、ファイバの曲率と曲げ損失 α の関係は第4章で述べたように式(4-2)で与えられる。

ファイバの曲げ損失はファイバパラメータ依存性が大きく、また波長にも大きく依存する。浸水センサ用のファイバはケーブル内の通常の光ファイバを利用することがケーブル構造およびコストの面から必要であり、通常の光ファイバパラメータの内、最も損失が発生しにくいパラメータ(モードフィールド径 $8.5\mu\text{m}$ 、 $\lambda_{co}=1.29\mu\text{m}$)を想定する。また、監視波長は光ファイバ損失が小さく長距離の監視が可能なことと曲げ損失が大きく、センサ感度の高い $1.55\mu\text{m}$ として設計する。現在のSM光ファイバのパラメータの規格値に対応した曲げ損失の最大、最小値を図6-7に示す。図から波長 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ で $r=5\text{mm}$ で 1dB 以上、 $r=4\text{mm}$ で 5dB 以上の損失が発生し、センサとして十分な機能を有している。

6.4.3 センサ部の信頼性設計

センサ部において光ファイバには曲げ歪が発生するため、破断確率が十分小さくなるように光ファイバの屈曲部構造、屈曲時間を設定する必要がある。曲げ歪による光ファイバの破断確率は6.2.2で述べた式(6-1)で計算できる。計算結果を図6-7に示した。

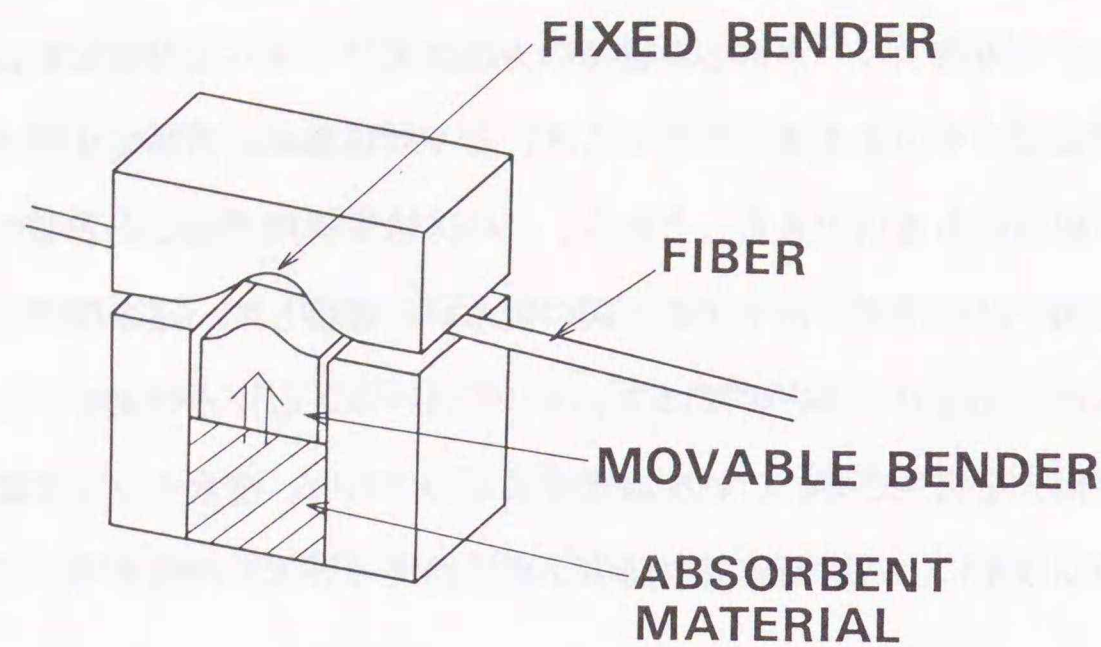


図6-6 浸水センサの構造

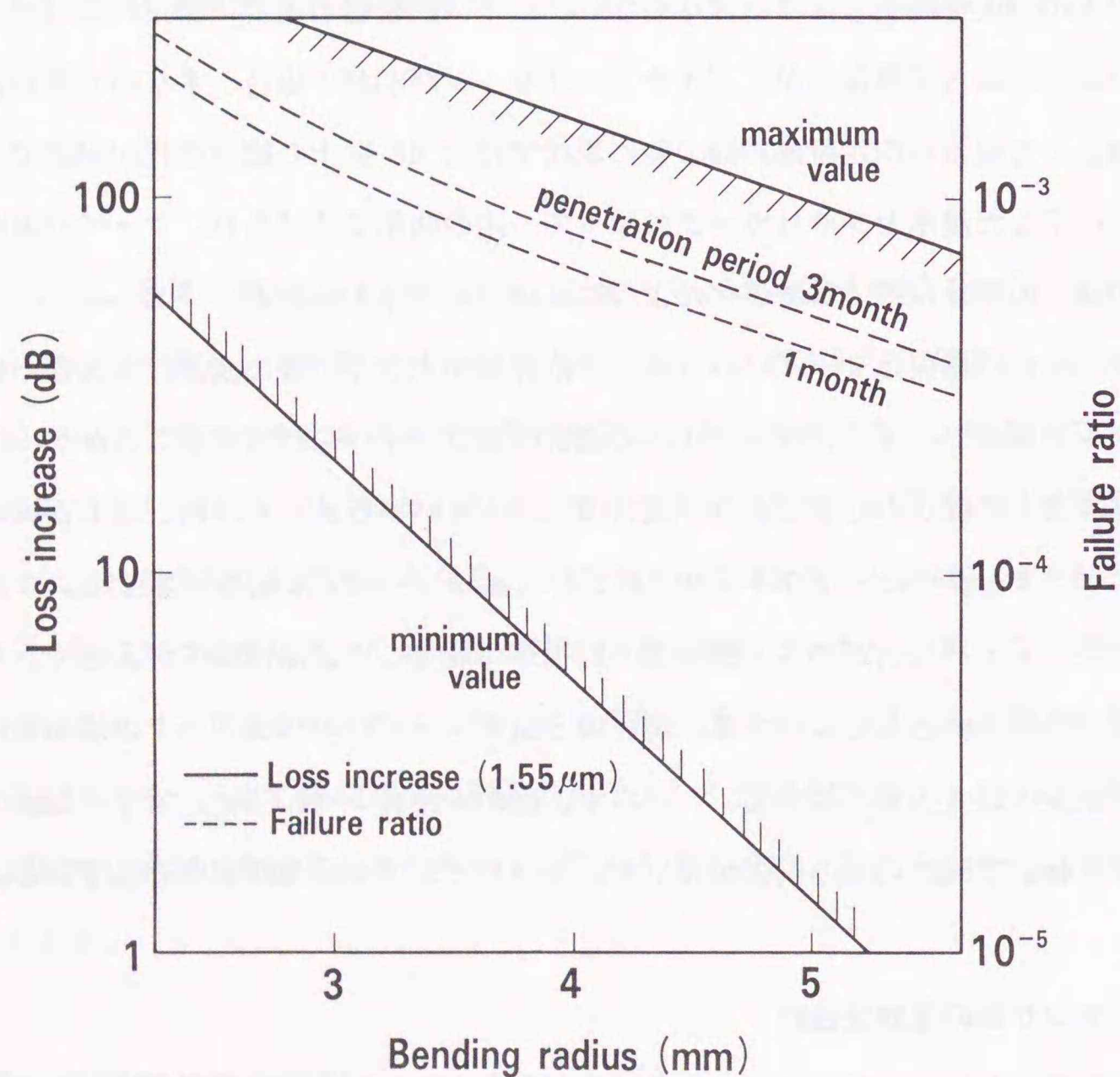


図6-7 浸水センサの設計

$r = 4\text{mm}$ で1 ~3 か月程度浸水しても破断率は0.1%以下であり、十分小さい。

6.4.4 試作浸水センサの特性

光パルス試験器の分解能2dB から $r=4\text{mm}$ として設計したセンサの浸水応答特性を測定した。測定は被覆外径0.4mm のファイバに浸水センサを装着し、波長 $1.55\mu\text{m}$ の光パワーの変化を測定した。図6-8 に損失変化の時間特性を示す。損失変化は約2時間で最大値に達し、センサの可動カーブはラッチ機構により、一旦浸水すると最大曲率を保持する構造となっているため外部から解放しない限り損失変化が継続する。

つぎに損失変化特性と設計値との比較評価をするため、10個の浸水センサを用いて最大損失変化量を測定した。光ファイバのパラメータは実用的に使用される範囲のなかでは曲げ損失の発生しにくいモードフィールド径 $8.9\mu\text{m}$ 、実効カットオフ波長 $1.27\mu\text{m}$ である。測定結果を表 6-3に示す。損失変化の測定値は設計値を満足しており、設計の妥当性が証明された。

表6-3 浸水センサの特性

発生損失設計値	2 dB 以上	
発生損失測定値 (n=10)	平均値	3.75 dB
	最大値	5.3 dB
	最小値	3.0 dB
試験ファイバ パラメータ	実効カットオフ波長	$1.27\mu\text{m}$
	モードフィールド径	$8.9\mu\text{m}$

6.5 非ガス光線路の構成⁽⁶⁻¹⁰⁾

6.5.1 線路構成

浸水センサを設置し、監視して浸水後一定期間内に排水の処理を行えば信頼性を保てることを前節で示した。非ガス線路の特徴的な構成要素は防水ケーブルと浸水センサであり、ガスダムが不要で、圧力センサの代わりに浸水センサが設置される。非ガス線路の構成を図6-9 に示す。非ガス線路の主な構成要素と保守局からの検知能力等を考慮した浸水センサの設置方法の検討および非ガス線路トータルの信頼性の検討結果を以下に示す。

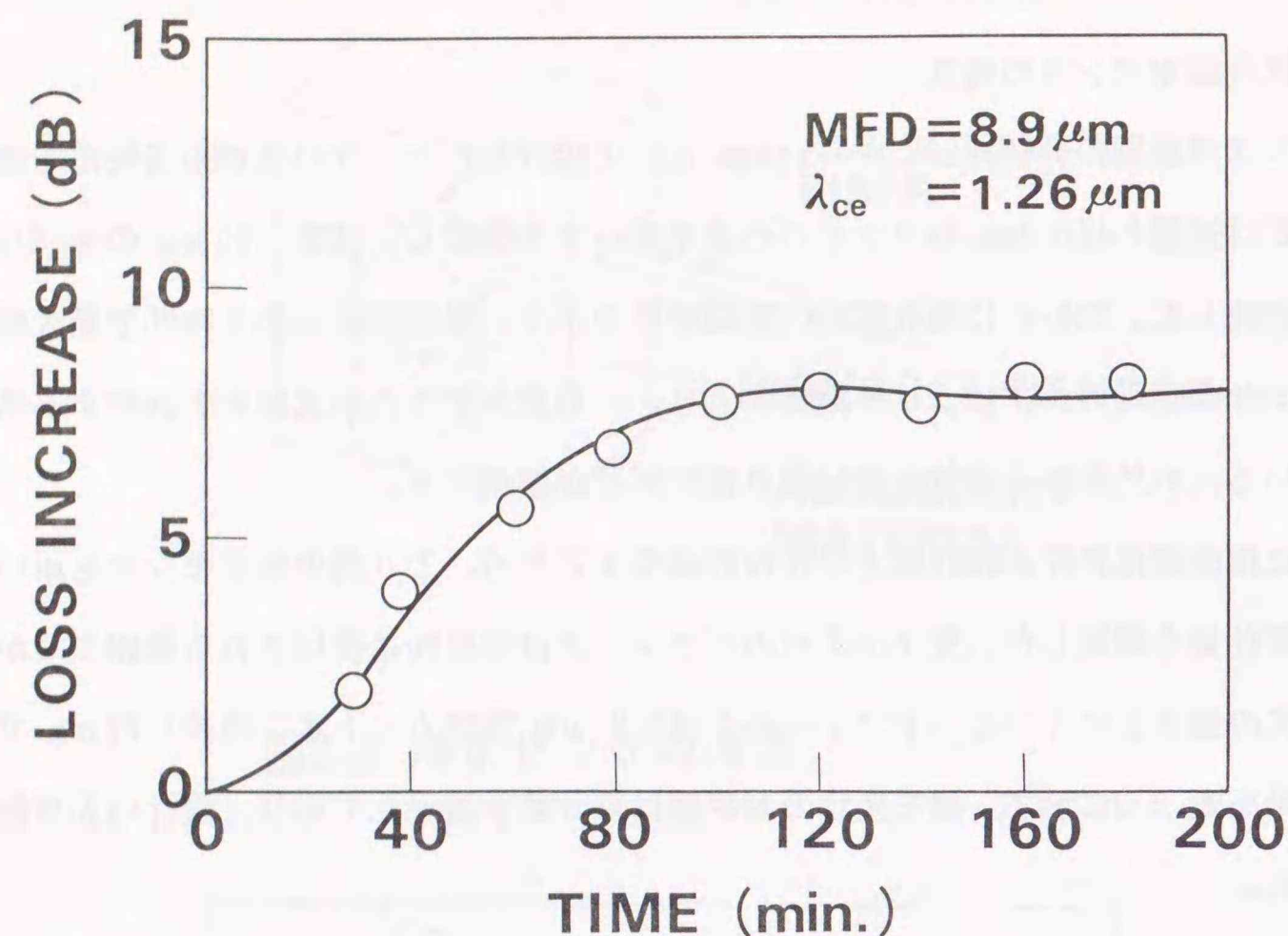


図6-8 浸水センサの特性

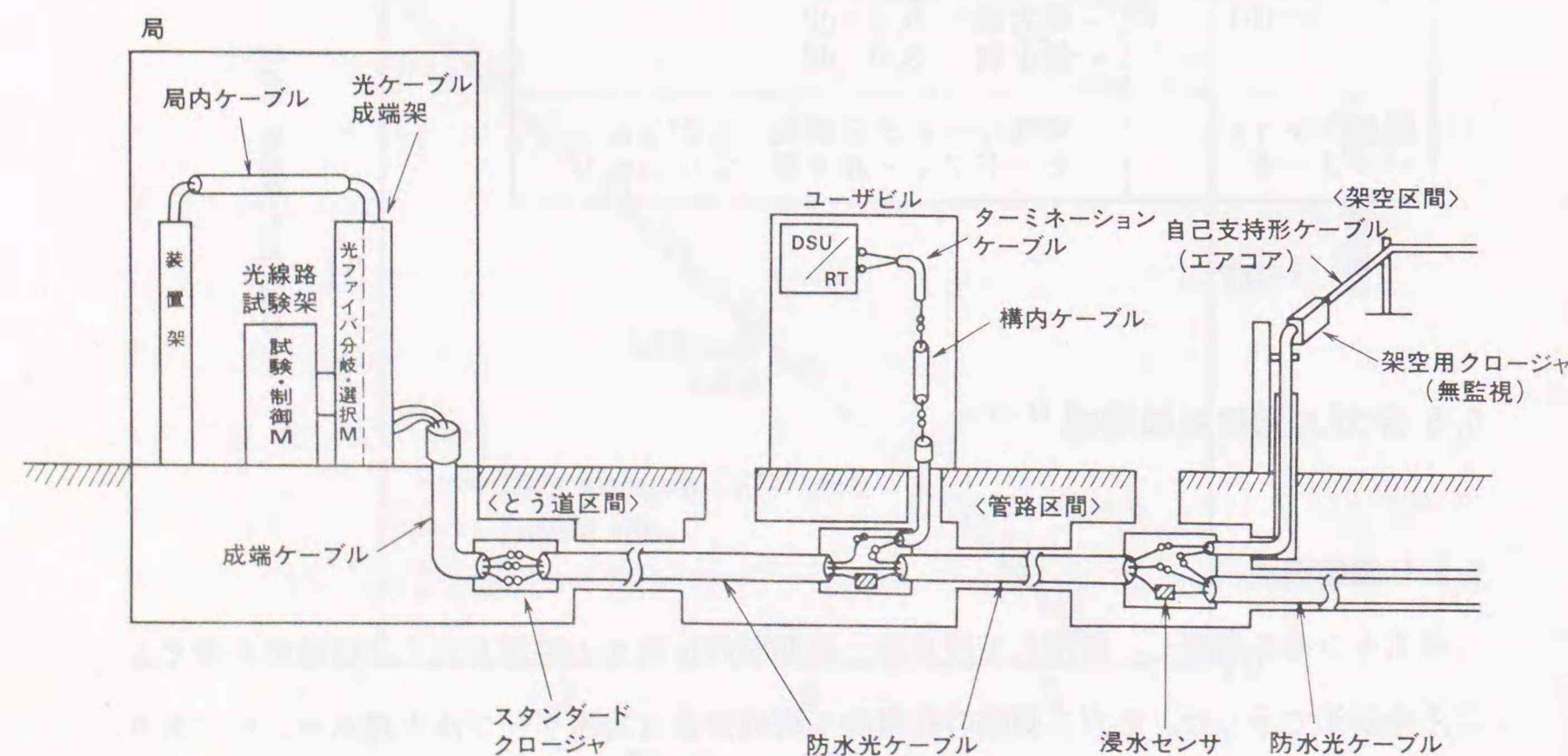


図6-9 非ガス線路の構成

6.5.2 防水ケーブル⁽⁶⁻¹¹⁾

防水ケーブルはジェリー充填型と、吸水材を充填し浸水した水により吸水材がゲル化してダムを形成し、水走りを止めるドライ型がある。ジェリーケーブルは油成分を含むため、接続作業性に欠点がある。ドライ型は吸水材技術の進歩とケーブルに適用するためのテープ化技術により、基本構造はほぼガス保守ケーブルと同等で、作業性に優れたケーブルを実現している。このため、非ガス線路用の防水ケーブルとして第4章で述べたドライ型防水ケーブルを採用することとした。

6.5.3 浸水センサの設置法

浸水センサは検知用のモニタファイバ上に連続して設置するため、分岐部分は一筆書きに心線を接続する必要がある。このため、モニタファイバはケーブルルートより大幅に長くなる可能性があり、光パルス試験器の性能に整合した配置法を設計する必要がある。検討モデルの配線形態を図6-10に示した。また浸水検知用のファイバルート長とパルス試験器の性能から検知可能な線路構成を図6-11に示す。幹線はループ状で配線ケーブルがループから分岐しているモデルにおいて分岐数とモニタファイバの損失を示している。分岐ケーブル長さは500mとした。現在の光パルス試験器のダイナミックレンジ（片端20dB, 両端測定で40dB）から、ループ長15km, 分岐数20以上まで1ループで対応できることがわかる。大都市では十分な長さであるが、さらに長距離の監視が必要な場合はモニタファイバループを増やすことにより対応できる。

6.5.4 非ガス光線路の信頼性

非ガス線路の信頼性は浸水検知センサを設置し、浸水の有無を監視することで保証できる。破断確率は図6-4に示したように接続部分の浸水期間に影響をうけるので破断確率から設定される浸水許容期間以下の周期で監視する必要がある。3ヶ月程度では信頼性の変化は小さいが浸水時の保守稼働を計画的に行うためには一定の期間を見込む必要があり、これを1か月程度見込んでも2か月程度の周期で監視すればガス保守に比べて遜色のない信頼性を確保できる。定期監視のツールとしては自動的にファイバにアクセスしてパルス試験を行う光ファイバ自動試験システム⁽⁶⁻¹²⁾が開発されており、高信頼で省力化を図れる光線路保守システムが実現できる。

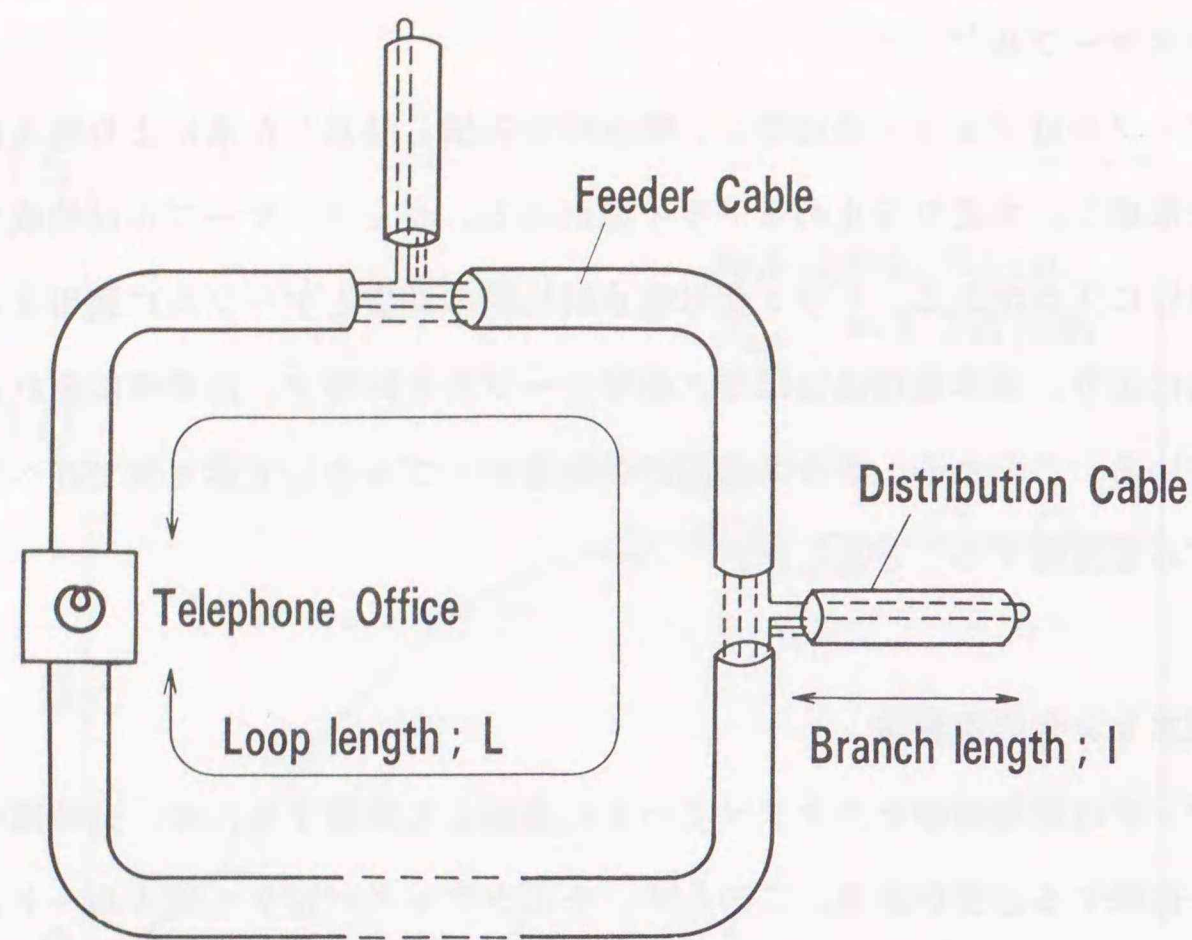


図6-10 浸水センサ設置モデル

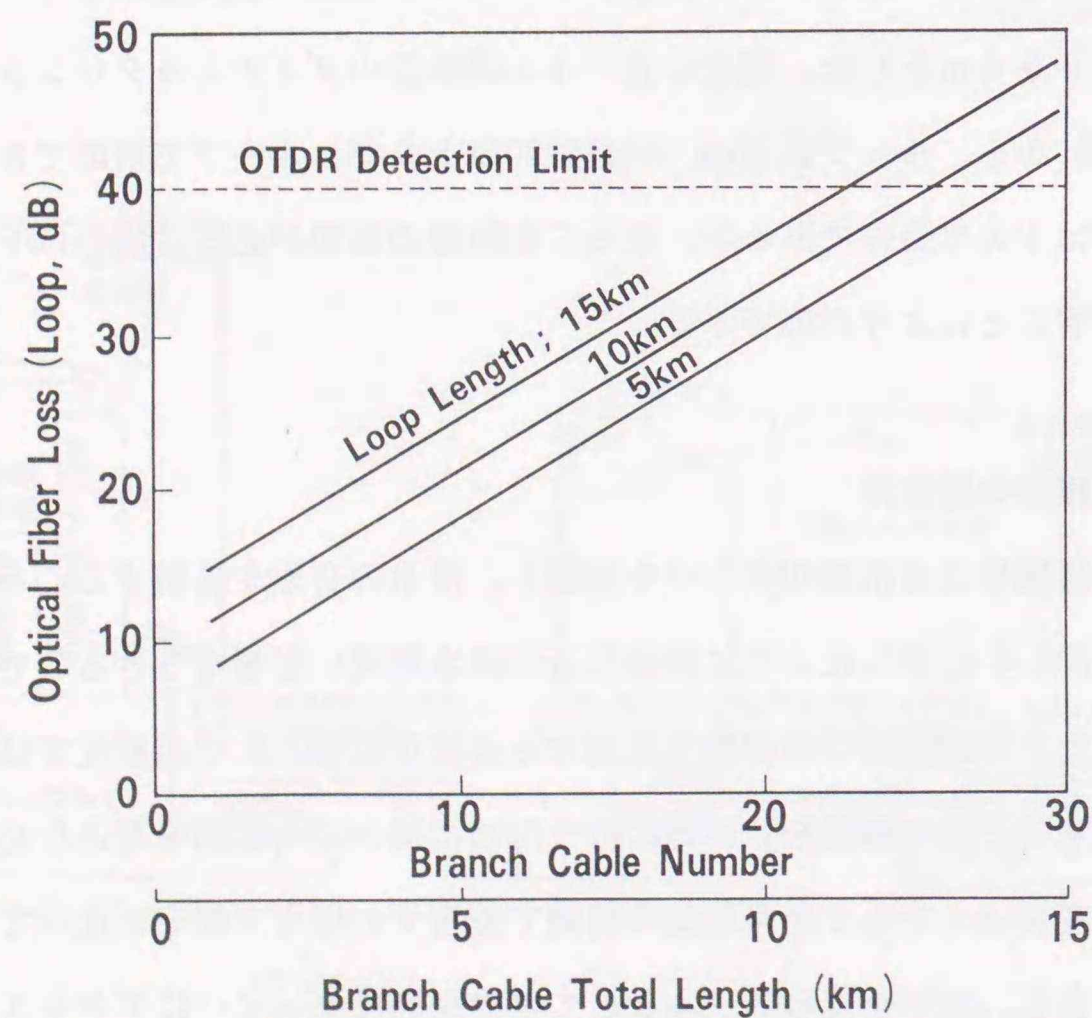


図6-11 浸水検知可能な領域

6.6 まとめ

従来のガス保守と同等の信頼性を確保できる非ガス加入者光線路構成法について述べた。まず、従来の光線路構成要素である光ファイバケーブルおよびその接続部について、非ガス化した場合に予想される信頼性劣化の要因と劣化の程度を明らかにした。つぎに非ガス線路構成として防水光ファイバケーブルと接続部の浸水監視について検討し、接続部の浸水期間を3ヶ月、パルス反射による検出分解能2dBとして浸水センサを設計し、幹線ループ距離15km、分岐ケーブル20ルート以上を1ルートのモニタファイバで監視でき、ガス保守と同等の信頼性を実現できることを明らかにした。

第7章 結論

高度情報化社会のインフラストラクチャとして光ファイバケーブルが1981年に中継幹線系に導入されてからちょうど10年になる。この間に光ファイバケーブルは長距離大容量幹線の主役になった。一方、加入者系を光化するためには経済性の要求や保守性、ハンドリング性等総合的な技術の成熟が必要である。

本研究は光加入者線路を構成するための光ファイバケーブル技術、非ガス保守システム技術に関するもので、光ファイバケーブルに関しては加入者系にSM型光ファイバを導入するためのファイバパラメータ設計法と簡易構造ケーブルおよび高密度ケーブル構造設計について述べ、また非ガス保守システムに関しては浸水による問題発生 の明確化と防水ケーブル、浸水センサを中心とする非ガス線路構成法について明らかにしたものである。

本研究の主な結論は以下のとおりである。

(1) 加入者光線路の構成の特徴は面的に広がる網構成となるため接続点が多く、さらに建設後の分岐接続等のアクセスが可能なことである。このような線路構成を効率良く実現するためにはケーブルをループ状に建設することが有効であり、また建設後の後分岐を容易にできる接続工法等の線路設備構成法を明らかにした。

(2) 加入者光線路の主要構成要素である光ファイバケーブルについて、低コスト化を可能にする簡易構造ケーブルを提案した。本ケーブルは抗張力体をケーブル断面の中心から偏心させることにより、ケーブル内の光ファイバ余長を制御できることが特徴で、このため光ファイバを撚らずに集合する簡易なケーブル構造が実現出来る。光ファイバ余長制御を中心とするケーブル設計法と試作ケーブルの特性を明らかにし、低コスト化にむけたケーブル設計の方向を示した。

(3) 広帯域ISDNサービスを提供できるオールマイティな加入者光線路を構成するため、SM型光ファイバの加入者系への導入について検討し、加入者線路に特に重要な接続特性とハンドリングの観点からのファイバパラメータ設計を行った。また加入者のき線系に用いられる8心光ファイバテープ集合の1000心高密度ケーブル設計法を明らかにした。このケーブルと一括接続技術により現場環境に建設した加入者線路の特性試験結果も

あわせて示し、設計の妥当性を検証した。

さらに、現在長距離大容量中継幹線に導入が開始されている分散シフトシングルモードファイバの加入者系への適用に関する検討をおこない、接続技術に対する要求条件とファイバパラメータの許容範囲を明らかにした。

(4) 光加入者線路の保守方法について非ガス保守の場合の問題点を検討し、非ガス化を実現するための防水ケーブル、浸水センサ等の要素部品の設計法を明らかにした。光ファイバの信頼性は防水ケーブルの適用で確保できること、接続部は吸水材によりファイバに曲げを発生する浸水センサの設置により実用上の信頼性が得られること、これらの検討をもとにして線路全体の信頼性の保証方法と浸水センサの設置法等の非ガス線路構成法を明らかにした。

本研究で得られた成果として、SM型光ファイバケーブルは1989年4月からNTTの光加入者線路に導入が開始され、1990年4月からは非ガスシステムも光線路設備の保守方式として導入されている。本技術は今まさに本格的な建設が始まろうとしているFTTHへむけた光線路構成技術の基盤となるものであり、21世紀に向けた情報インフラストラクチャを実現するキーテクノロジーとして貢献するものである。

本技術は、主として光加入者線路の構成に係わる技術であるが、今後さらに建設後の運用、管理を行うオペレーションシステム技術の開発が重要であり、構成技術とオペレーション技術が両輪となって新世代のインフラストラクチャが実現されよう。

謝辞

本研究をまとめるに際し、終始懇切なるご指導とご高配を賜った北海道大学工学部深井一郎教授に心から感謝の意を表します。

また、終始懇切なご指導と有益なご助言をいただいた北海道大学工学部本間利久教授、小柴正則教授に厚く感謝いたします。

本研究はN T T（日本電信電話株式会社、旧日本電信電話公社）茨城電気通信研究所、ネットワークシステム開発センタ、伝送システム研究所において行ったものであり、研究の機会を与えていただき、ご鞭撻いただいた福富秀雄住友電気工業株式会社専務取締役（当時線路研究部長）、加藤嘉則藤倉電線株式会社先端技術研究所長（当時線路研究部統括調査役）、小島伸哉東北工業大学教授（当時線路研究部長）、内田直也古河電気工業株式会社光技術研究所長（当時線路研究部統括調査役）ならびに本論文執筆の機会とご指導をいただいた島田慎晋伝送システム研究所長、涌井裕フィールドシステム研究開発センタ所長、石原浩志光加入者ケーブルシステム研究部長に感謝します。

本研究の推進にあたっては、旧茨城電気通信研究所線路研究部、ネットワークシステム開発センタ、伝送システム研究所およびフィールドシステム研究開発センタの諸兄にご指導とご討論をいただきました。特に、光ファイバケーブルの研究に関して坂本光技術協力センタ所長（当時光線路施設研究室長）、二瓶文博N T Tアドバンステクノロジー株式会社理事・教育人事部長（当時加入者線路研究室長）ならびに加入者光線路の開発・実用化に関して高島征二東京支社西地区統括部長（当時ネットワークシステム開発センタ担当部長）、上野谷拓也ネットワークシステム開発センタ担当部長にご指導いただきました。また、加入者光線路の構成法に関して高江州文雄関西支社設備企画部長（当時ネットワークシステム開発センタ主幹技師）、米田悦吾伝送システム研究所主幹研究員（当時ネットワークシステム開発センタ主幹技師）に、光ファイバケーブルの設計、評価に関して瀧上建也ネットワーク高度化推進本部主幹技師（当時加入者線路研究室主任研究員、ネットワークシステム開発センタ主幹技師）、篠原弘道伝送システム研究所主幹研究員（当時加入者線路研究室研究主任）、富田茂フィールドシステム研究開発センタ研究主任、横尾豊オペレーションシステム開発部主任技師（当時加入者線路研究室研究主任）、笠原伸元太田支店担当課長（当時ネットワークシステム開発センタ技師）に、高密度光ファイバ構造

設計に関して、勝山豊フィールドシステム研究開発センタ主幹研究員、秦野諭示研究開発技術本部担当部長（当時加入者線路研究室主幹研究員）に、シングルモード光ファイバに関して大橋正治フィールドシステム研究開発センタ主任研究員、堀口正治・木村隆男光エレクトロニクス研究所主幹研究員に、光ファイバ接続技術に関して小林英夫・松本三千人フィールドシステム研究開発センタ主幹研究員、長沢真二・灰原正同センタ主任研究員に、光ファイバの信頼性と非ガス化に関する研究に関して古賀広昭・満永豊同センタ主幹研究員、久木田重蔵同センタ主任研究員に有益な助言とご討論をいただいたことを感謝します。さらに、現場環境における特性調査でご指導、ご協力いただいた高政武夫氏（当時加入者線路研究室調査役）、挟間規テクニカルライティングセンタ所長（当時加入者線路研究室調査役）、高橋正幸オペレーションシステム開発部主幹技師（当時加入者線路研究室調査員）、中平瑞穂関連企業本部担当課長（当時加入者線路研究室調査員）、芦谷文博フィールドシステム研究開発センタ担当部長、伊藤卓志ネットワークシステム開発センタ主幹技師、高杉英利ネットワークシステム開発センタ技師、和田悟ネットワークシステム開発センタ社員に感謝します。

本研究はさらに数多くのN T T研究開発部門の方々、導入事業部の関連部門および試作製造で関連した各社の方々のご協力のもとになされたものであり、謹んで感謝の意を表します。

参考文献

第1章

- (1-1) K. C. Kao and G. A. Hockhan, "Dielectric-fiber surface waveguide for optical frequency", Proc. IEE, 113, pp. 1151-1158, 1966
- (1-2) F. P. Kapron, D. B. Keck and R. D. Maurer, "Radiation loss in glass optical waveguide", Appl. Phys. Lett., 17, 10, pp. 423-425, 1970
- (1-3) 石田, 勝山, 青海, "中小容量光伝送方式用光ケーブルの設計と特性", 通研実報, 30, 9, pp. 2167-2179, 1981
- (1-4) 川瀬, 秦野, 勝山, 洲上, "加入者高密度光ファイバケーブル", 通研実報, 34, 7, pp. 1111-1118, 1985
- (1-5) 二瓶, 山口, 加島, 秦野, "横須賀地区光加入者実験線路の構成と特性", 信学技法 CS81-63, 1981
- (1-6) 川瀬, 篠原, 二瓶, 高政, "加入者光ケーブルの設計と特性", 通研実報, 33, 3, pp. 517-530, 1984
- (1-7) 勝山, 国分, 久木田, 篠原, "き線・配線加入者光ファイバケーブル", 通研実報, 35, 8, pp. 763-772, 1986
- (1-8) 川瀬, 洲上, 松本, 長沢, "加入者網へのSM型光ファイバケーブルの開発", NTT 技術ジャーナル, 1, 1, pp. 73-76, 1989, 4
- (1-9) 芦谷, 川瀬, 富田, 笠原, "浸水が止まる? 非ガス保守光ファイバケーブルの開発", NTT 技術ジャーナル, 2, 8, pp. 18-21, 1990.

第2章

- (2-1) M. Kawase, T. Fuchigami, T. Haibara, S. Nagasawa and S. Takashima, "Loop-network configuration for subscriber loops and single-mode optical fiber ribbon cable technologies suitable for mid-span access", 37th IWCS, pp. 141-149, 1988.
- (2-2) Y. Ishida, C. Tanaka, K. Harada, Y. Kato, Y. Katsuyama, S. Seikai and N. Uchida, "Performance of field-installed 1.3- μ m single-mode optical cable", Appl Opt., 22, 19, pp. 3079-3083, 1983

- (2-3) M. Kawase, H. Shinohara and F. Nihei, "Design and performance of optical subscriber cables", Rev. of ECL, 32, 4, pp. 626-635, 1984
- (2-4) 石原, 徳田, 内田, 稲尾, 星川, 稲田, "光ケーブルの特性", 信学技報CS78-173, 1978
- (2-5) M. J. Buckler, et al., "Lightguide cable manufacture and Performance", Bell Syst. Tech. J., 57, 6, pp. 1745-1757, 1978
- (2-6) D. Lavrence, et al., "Recent development in mini-unit cable", 32th IWCS, pp. 301-306, 1983
- (2-7) M. Kawase, M. Tachikura, F. Nihei and H. Murata, "Mass fusion splices for high density optical fiber units", Proc. 9th ECOC, pp. 348-353, 1983.
- (2-8) P. F. Gagen, et al., "Design and performance of a crossply light guide cable sheath", 28th IWCS, pp. 391-395, 1979
- (2-9) S. Hatano, Y. Katsuyama, T. Kokubun, and K. Hogari, "Multi-hundred-fiber cable composed of optical fiber ribbons inserted tightly into slots", 28th IWCS, pp. 17-23, 1986
- (2-10) T. S. Hope, et al., "Developments in slotted core optical fiber cables", 30th IWCS, pp. 220-227, 1981
- (2-11) 斎伯, 久保田, "加入者線路の設計", 1982, 電気通信協会.
- (2-12) K. Nawata, "Multimode and single-mode fiber connectors technology", J. Quantum Electron., QE-16, 6, pp. 618-627, 1980
- (2-13) T. Satake, et al., "A new type of demountable plastic-molded single-mode multifiber connector", J. Lightwave Technol., LT-4, 8, pp. 1232-1236, 1986
- (2-14) N. Suzuki, et al., "Low insertion and high return-loss optical connectors with spherically convex-polished end", Electron. Lett., 22, 2, pp. 110-112, 1986
- (2-15) T. Haibara, S. Nagasawa, M. Matsumoto and M. Kawase, "Single-mode multifiber technique for high-density high-count subscriber cables", 37th IWCS, pp. 576-585, 1988.
- (2-16) S. Nagasawa, H. Furukawa, M. Makita and H. Murata, "Mechanically transferable single-mode multifiber connector", OEC' 89, pp. 48-49, 1989.

- (2-17) O. Kawata, et al., "Low-loss single-mode-fiber splicing technique using core direct monitoring", Electron. Lett., 19, 24, pp. 1048-1049, 1983

第3章

- (3-1) 石田, 勝山, 青海, "中小容量光伝送方式用光ケーブルの設計と特性", 通研実報, 30, 9, pp. 2167-2179, 1981.
- (3-2) H. Shinohara, M. Kawase and F. Nihei, "A New simple optical cable manufactured in a single process", Trans. IECE, E69, 4, pp. 357-359, 1986
- (3-3) M. Kawase, T. Fuchigami, H. Shinohara and F. Nihei, "A New optical fiber cable design", OEC' 86, pp. 102-103, 1986
- (3-4) M. Kawase, T. Fuchigami and F. Nihei, "Simple-structure optical fiber cables manufactured without stranding processes", J. Lightwave Technol., LT-6, 8, pp. 1280-1284, 1988
- (3-5) 満永, 勝山, 小林, 石田, "スクリーニング試験による光ファイバ強度保証法", 信学論(B), J66-B, 7, pp. 829-836, 1983
- (3-6) 秦野, 国分, 保苅, 勝山, "光ファイバテープをルースに集合したケーブルのファイバ余長の検討", 信学論(C), J69-C, 11, pp. 1422-1429, 1986
- (3-7) T. Fuchigami, Y. Yokoo, K. Ugawa and M. Kawase, "Optical loss increase of SP-optical fiber cable at low temperature", Trans. IECE, E70, 4, pp. 282-284, 1987
- (3-8) R. Kashyap and M. H. Reeve, "Single-ended fiber strain and length measurement in frequency domain", Electron. Lett., 16, pp. 689-690, 1980

第4章

- (4-1) H. Suda, S. Shibata and M. Nakahara, "High-rate fabrication of wholly synthesised fibre preforms by the multiframe VAD method using SiHCl_3 raw materials", Electron. Lett., 21, 24, pp. 1123-1124, 1985
- (4-2) 立田, 加藤, 青海, 内田, "単一モード光ファイバパラメータの設計法", 信学論(B), J65-B, 3, pp. 324-332, 1982.

- (4-3) T. Miki and I. Yamashita, "Optical subscriber loop technology trends in Japan", OFC '91, pp. 3-33, 1991.
- (4-4) M. Ohashi, K. Kitayama, Y. Ishida and Y. Negishi, "Simple approximations for chromatic dispersion in single-mode fibers with various index profiles", J. Lightwave Technol., LT-3, 1, pp. 110-115, 1985.
- (4-5) D. Marcuse, "Curvature loss formula for optical fibers", J. Opt. Soc. Am., 66, 3, pp. 216-220, 1976.
- (4-6) D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode optical fiber splice", Bell Systems T. J., 56-5, pp. 703-718, 1977.
- (4-7) I. Hatakeyama and H. Tsuchiya, "Fusion splices for single-mode optical fibers", J. Quantum Electron., QE-14, 8, pp. 614-619, 1978.
- (4-8) N. Tomita, H. Kobayashi, M. Shimizu and J. Takagi, "A new high-density fiber organizer for optical cable", J. Lightwave Technol., LT-4, 8, pp. 1223-1227, 1988
- (4-9) 富田, 首藤, "加入者系接続点における光ファイバハンドリング時の損失変動", 信学論(B), J74-B-I, 2, pp. 144-150, 1991.
- (4-10) M. Kawase, T. Fuchigami, M. Matsumoto, S. Nagasawa, S. Tomita and S. Takashima, "Subscriber single-mode optical ribbon cable technologies suitable for midspan access", J. Lightwave Technol., 7, 11, pp. 1675-1681, 1989.
- (4-11) S. Tomita, F. Ashiya and M. Kawase, "1000-fiber water-blocking cable", Trans. IECE, E73, 9, pp. 1511-1516, 1990.
- (4-12) 川瀬, 淵上, 松本, 長沢, "加入者網へのSM型光ファイバケーブルの開発", NTT技術ジャーナル, 1, 1, pp. 73-76, 1989.
- (4-13) 篠原, 川瀬, 久木田, 秦野, "ジェリー入り光ケーブルの伝送特性の改善", 信学論(B), J67-B, 4, pp. 465-466, 1984.
- (4-14) S. Kukita, T. Nakai, A. Hayashi and H. Koga, "Design and performance of optical fiber cable using water-absorbent polymer", J. Lightwave Technol., 7, 4, pp. 740-746, 1989.
- (4-15) Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, H. Kobayashi and Y. Ishida, "Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing", J. Applied Physics, 52, 7, pp. 4847-4853, 1983.

(4-16)和田, 富田, 川瀬, “加入者SM型光ファイバケーブルの伝送特性の調査結果”,
1989信学秋期全大 No. B-407, 1989.

(4-17)M. Matsumoto, T. Haibara and M. Kawase, “Fully automatic mass-fusion splicer
for single mode optical fiber ribbon”, 38th IWCS, pp. 225-232, 1989.

第5章

(5-1) G. D. Khoe and A. Dieleman, “TTOSS: An integrated subscriber system for
direct and coherent detection,” IEEE J. Lightwave Technol., LT-5, pp. 778-
784, 1986.

(5-2) J. R. Stern, J. W. Balance, D. W. Faulkner, S. Hornung, D. B. Payne, and K. Oakley,
“Passive optical local networks for telephony applications and beyond”,
Electron. Lett., 23, pp. 1255-1257, 1987.

(5-3) H. Kobrinski, R. M. Bulley, M. S. Goodman, M. P. Vecchi, C. A. Brackett, L. Curtis,
and J. L. Gimlett, “Demodulation of high capacity in the LAMBDANET
architecture: A multiwave length optical network,” Electron. Lett.,
23, pp. 824-826, 1987.

(5-4) H. Yokota, H. Kanamori, Y. Ishiguro, G. Tanaka, S. Tanaka, H. Takada, M. Watanabe,
S. Suzuki and K. Yano, “Ultra-low-loss pure silica core single-mode fiber
and transmission experiment”, OFC' 86, pp. PD3-1-PD3-8, 1986.

(5-5) K. Uema, K. Sato, S. Takashima and H. Kasai, “Commercial introduction results
of 1.55 μm dispersion-shifted fiber submarine cable”, 37th IWCS',
pp. 315-320, 1988.

(5-6) S. Seikai, K. Kitayama, N. Uesugi, and Y. Kato, “Design consideration
single-mode fiber subscriber cables”, IEEE J. Lightwave Technol., LT-4,
pp. 1005-1009, 1986.

(5-7) 大橋, 川瀬, “加入者網への分散シフトファイバの適用性”, 信学論(B-1), J74-B-1, 2,
pp. 136-143, 1991.

(5-8) K. Kitayama, Y. Kato, M. Ohashi, Y. Ishida, and N. Uchida, “Design consideration
for structural optimization for a single-mode fiber”, IEEE J. Lightwave
Technol., LT-1, pp. 363-369, 1983.

(5-9) K. Inada, “A new graphical method relating to optical fiber attenuation,”
Opt. Commun. 19, pp. 437-439, 1976.

(5-10)M. Kawase, T. Fuchigami, M. Matsumoto, S. Nagasawa, S. Tomita and S. Takashima,
“Subscriber single-mode optical fiber ribbon cable technologies suitable
for midspan access”, IEEE J. Lightwave Technol., 7, 11, pp. 1675-1681, 1989.

(5-11)K. Shiraishi, Y. Aizawa and S. Kawakami, “Beam expanding fiber using thermal
diffusion of the dopant”, IEEE J. Lightwave Technol., 8, 8, pp. 1151-1161, 1990.

(5-12)伊藤, 中川, “長波長帯単一モード光ファイバ伝送系に関する一考察”, 信学技報
CS79-138, 1979.

第6章

(6-1) 森田, 大木, 宮川, “ガス圧遠隔測定システムの導入に伴うガスケーブル保守につ
いて”, 施設, 33-4, pp. 51-58, 1979.

(6-2) 川瀬, 篠原, “光ケーブル内部の水分移動量に関する検討”, 信学論(C), J69-C7,
pp. 936-937, 1986.

(6-3) Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, H. Kobayashi and Y. Ishida, “Failure prediction for
long length optical fiber based on proof testing”, J. Appl. Phys., 53, 7,
pp. 4846-4853, 1982.

(6-4) 佐野, 高江洲, 西村, “加入者光線路の信頼性配分に関する一検討”, 昭60信学総
全大2098, 1985.

(6-5) N. Tomita, H. Kobayashi, M. Shimizu and J. Takagi, “A new high-density fiber
organizer for optical fiber cable”, JLT, LT-4, 8, pp. 1223-1227, 1988.

(6-6) 満永, 勝山, 小林, 石田, “光ケーブル強度の信頼性設計”, 信学論(B), J66-B, 8,
pp. 1051-1058, 1983.

(6-7) 野口, 柴田, 上杉, 石原, 根岸, “水素の影響による光ファイバ損失増加と光ファ
イバケーブルの長期損失安定性”, 信学論(B), J68-B, 7, pp. 795-802, 1985

(6-8) K. Sontag and A. Ross, “A fiber optic cable monitoring system”, 35th IWCS.,
pp. 449-454, 1986.

- (6-9) S. Kukita, T. Nakai, A. Hayashi and H. Koga, "A new nonmetallic and waterproof optical fiber cable with absorbent polymer ribbon", 36th IWCS., pp. 356-371, 1987.
- (6-10) 川瀬, 富田, 笠原, 上野谷, "非ガス光ファイバケーブルによる加入者光線路の構成", 信学論(B-1), J73-B-1, 10, pp. 785-792, 1990.
- (6-11) S. Kukita, M. Kawase and F. Nihei, "Novel waterproof optical fiber cable with absorbent polymer yarn", Trans. IECE Japan, E69, 2, pp. 89-91, 1986.
- (6-12) H. Takasugi, N. Tomita, T. Uenoya, I. Nakamura and Y. Yokoo, "Design and evaluation of automatic optical fiber operation support system", 39th IWCS., pp. 623-629, 1990.
- (6-13) M. Tateda, T. Horiguchi, T. Kurashima and K. Ishihara, "First measurement of strain distribution along field-installed optical fibers using Brillouin spectroscopy", OFC'90, pp. PD15-1-PD15-4, 1990.

付録 本論文に関連した論文ならびに講演発表等のリスト

A-1 学会論文

- (1) S. Kukita, M. Kawase, F. Nihei, "Novel waterproof optical fiber cable with absorbent polymer yarn", Trans. IECE Japan, E69, 2, pp. 89-91, 1986.
- (2) H. Shinohara, M. Kawase, F. Nihei, "A new simple optical cable manufactured in a single process", Trans. IECE Japan, E69, 4, pp. 357-359, 1986.
- (3) 川瀬, 篠原, "光ケーブル内部の水分移動量に関する検討", 信学論(C), J69-C, 7, pp. 936-937, 1986.
- (4) T. Fuchigami, Y. Yokoo, K. Ugawa, M. Kawase, "Optical loss increase of SP-optical fiber cable at low temperature", Trans. IECE Japan, E70, 4, pp. 282-284, 1987.
- (5) M. Kawase, T. Fuchigami, F. Nihei, "Simple-structure optical fiber cables manufactured without stranding processes", J. Lightwave Technol., 6, 8, pp. 1280-1284, 1988.
- (6) M. Kawase, T. Fuchigami, M. Matsumoto, S. Nagasawa, S. Tomita, S. Takashima, "Subscriber single-mode optical fiber ribbon cable technologies suitable for mid-span access", J. Lightwave Technol., 7, 11, pp. 1675-1681, 1989.
- (7) 川瀬, 富田, 笠原, 上野谷, "非ガス光ファイバケーブルによる加入者光線路の構成", 信学論(B-1), J73-B-1, 10, pp. 785-792, 1990.
- (8) S. Tomita, F. Ashiya, M. Kawase, "1000-fiber water-blocking cable", Trans. IECE, E73, 9, pp. 1511-1516, 1990.
- (9) 大橋, 川瀬, "加入者網への分散シフトファイバの適用性", 信学論(B-1), J74-B-1, 2, pp. 136-143, 1991.

A-2 国際会議発表

- (1) M. Kawase, M. Tachikura, F. Nihei, H. Murata, "Mass fusion splices for high density optical fiber units", 9th ECOC, pp. 348-353, 1983.
- (2) T. Fuchigami, M. Kawase, F. Nihei, "Design and characteristics of high density optical fiber cable", IOOC' 83, pp. 432-433, 1983.
- (3) S. Hatano, Y. Katsuyama, M. Kawase, "Field trial results of optical subscriber loops", ICC' 84, pp. 1137-1140, 1984.
- (4) M. Kawase, T. Fuchigami, H. Shinohara, F. Nihei, "A new optical fiber cable design", OEC' 86, pp. 102-103, 1986.
- (5) M. Kawase, T. Fuchigami, T. Haibara, S. Nagasawa, S. Takashima, "Loop-network configuration for subscriber loops and single-mode optical fiber ribbon cable technologies suitable for mid-span access", 37th IWCS, pp. 141-149, 1988.
- (6) T. Haibara, S. Nagasawa, M. Matsumoto and M. Kawase, "Single-mode multifiber technique for high-density high-count subscriber cables", 37th IWCS, pp. 576-585, 1988.
- (7) M. Matsumoto, T. Haibara and M. Kawase, "Fully automatic mass-fusion splicer for single mode optical fiber ribbon", 38th IWCS, pp. 225-232, 1989.

A-3 国内大会発表

- (1) 川瀬, 渕上, "高密度テープ心線の残留歪の検討", 昭57信学会通信部門全大No. 355, 1982.
- (2) 村山, 茂木, 川瀬, "高密度テープ形光心線の試作結果と特性", 昭57信学会総全大No. 1799, 1982.
- (3) 川瀬, 渕上, 山口, 中平, 大竹, 鈴木, "高密度テープ心線のユニット形成法の検討", 昭57信学会総全大No. 1801, 1982.
- (4) 中平, 久木田, 山口, 川瀬, 村田, "加入者光線路の構成", 昭57信学会総全大No. 1890, 1982.

- (5) 川瀬, 渕上, 篠原, 久木田, "加入者光ケーブルの現場試験結果", 昭59信学会総全大No. 2243, 1984.
- (6) 渕上, 松本, 川瀬, "10心テープユニットの特性とケーブル化に関する検討", 昭59信学会総全大No. 2258, 1984.
- (7) 久木田, 斉藤, 川瀬, "吸水材を用いた防水型光ファイバケーブルの基本設計", 昭60信学会総全大No. 2133, 1985.
- (8) 篠原, 川瀬, 二瓶, "加入者用新構造光ケーブルの提案", 昭61信学会総全大No. 2072, 1986.
- (9) 川瀬, 篠原, 久木田, "光ケーブル端面からの水分流入量に関する検討", 昭61信学会総全大No. 2229, 1986.
- (10) 渕上, 横尾, 宇川, 川瀬, "テープ形S P光ファイバケーブルの伝送特性", 昭61信学会通信部門全大No. 265, 1986.
- (11) 久木田, 高堂, 木村, 川瀬, "高吸水性材料の止水特性", 第35回高分子学会年次大会, 1986.
- (12) 横尾, 渕上, 川瀬, "スロットロッド形簡易構造光ファイバケーブルの設計と特性", 昭63信学会春期全大No. B-563, 1988.
- (13) 渕上, 松本, 長沢, 川瀬, "S M型加入者光線路フィールド試験結果", 昭63信学会秋期全大No. B-373, 1988.
- (14) 富田, 富樫, 渕上, 川瀬, "光ファイバケーブルの接続替えに伴う損失変動", 1989信学会春期全大 No. B-637, 1989.
- (15) 和田, 富田, 川瀬, "加入者SM型光ファイバケーブルの伝送特性の調査結果", 1989信学会秋期全大 No. B-407, 1989.
- (16) 川瀬, 芦谷, "加入者光ファイバケーブル技術の現状と展望", 平成2年電気・情報関連学会連合大会, pp. 4-189-4-192, 1990.

A-4 研究会発表

- (1) 川瀬, 渕上, "加入者高密度光ケーブル設計法の検討", 信学技報 CS81-151, 1982.
- (2) 高橋, 川瀬, 小林, 有岡, "加入者光線路現場試験概要", 信学技報 CS83-182, 1984.

(3) 久木田, 斉藤, 川瀬, “防水形光ファイバケーブルの設計と基本特性”, 信学技報 CAS84-217, 1985.

(4) 富田, 洲上, 川瀬, “高密度SM型光ファイバケーブル”, 信学技報 OCS89-7, 1989.

A-5 その他論文等

(1) 川瀬, 篠原, 二瓶, 高政, “加入者光ケーブルの設計と特性”, 通研実報, 33, 3, pp. 517-530, 1984.

(2) 永田, 大西, 渡辺, 川瀬, “広帯域加入者線光伝送方式”, 通研実報, 33, 11, pp. 2663-2677, 1984.

(3) Y. Nagata, R. Watanabe, M. Kawase, “Fiber-optic broadband subscriber system”, Rev. of ECL, 33, 4, pp. 601-607, 1985.

(4) M. Kawase, H. Shinohara, F. Nihei, “Design and performance of optical subscriber cables”, Rev. of ECL, 32, 4, pp. 626-635, 1984.

(5) 久木田, 川瀬, 小林, 小笠原, “構内光ケーブルおよびキャビネットの設計と特性”, 通研実報, 34, 5, pp. 905-918, 1985.

(6) 川瀬, 秦野, 勝山, 洲上, “加入者高密度光ファイバケーブル”, 通研実報, 34, 7, pp. 111-1118, 1985.

(7) M. Kawase, S. Hatano, T. Fuchigami, “Design and performance of high-density optical subscriber cable”, Rev. of ECL, 34, 1, pp. 47-52, 1986.

(8) 川瀬, 富田, “光ファイバケーブルによる加入者システムの構成法”, 電気計算, 54, 15, pp. 19-26, 1986.

(9) 川瀬, 榎並, “光ファイバケーブルおよび光線路建設技術の現状”, 信学会誌, 解説, 71, 7, pp. 732-738, 1988.

(10) 川瀬, 洲上, 松本, 長沢, “加入者網へのSM型光ファイバケーブルの開発”, NTT 技術ジャーナル, 1, 1, pp. 73-76, 1989.

(11) 川瀬, 首藤, 作山, “光加入者方式のキーテクノロジー”, NTT 技術ジャーナル, 1, 6, pp. 21-25, 1989.

(12) M. Kawase, K. Suto and Y. Sakuyama, “Key technologies for optical subscriber systems”, NTT Review, 1, 4, pp. 42-48, 1989.

(13) 芦谷, 川瀬, 富田, 笠原, “浸水が止まる? 非ガス保守光ファイバケーブルの開発”, NTT 技術ジャーナル, 2, 8, pp. 18-21, 1990.

(14) 川瀬, “低損失広帯域光ファイバケーブル”, NTT R & D, 40, 2, pp. 205-210, 1991.

A-6 特許等

(1) 特許第 1268334号(60. 6. 10) ガスダム付ケーブル

(2) 登録第 1729996号(63. 5. 16) 光ケーブルダム用固定装置

(3) 特許第 1474655号(H1. 1. 18) 光ケーブル

(4) 登録第 1759576号(H1. 2. 8) 光テープ心線

(5) 特許第 1508764号(H1. 7. 26) フラット形光ファイバ心線の製造法

(6) 特許第 1508766号(H1. 7. 26) テープ型光ファイバケーブルのガスダム部

