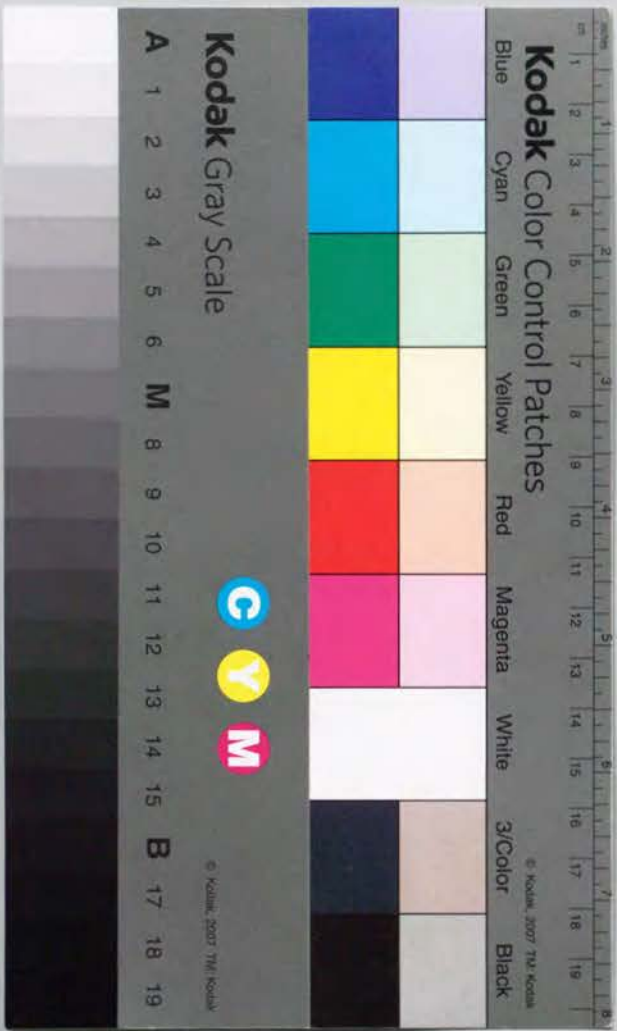


光通信線路における心線対照技術の  
実用化に関する研究

清水 正利



①

光通信線路における心線対照技術の  
実用化に関する研究

清水 正利

## 目 次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 光通信線路の心線対照技術に関する研究状況	10
1.3 本論文の構成	12
第2章 光ファイバ曲げ入射/曲げ受光系の光学モデル解析と特性評価	16
2.1 緒言	16
2.2 曲げ入射光学系のモデル化(長さ方向)	16
2.2.1 曲げ入射角と曲げ入射効率の特性解析	17
2.2.2 曲げ半径とコア入射角特性	18
2.2.3 曲げ入射特性の測定と評価	19
2.2.4 UV被覆層の被覆厚偏差とコア入射角特性	20
2.2.5 屈折率整合剤の屈折率とコア入射角特性	22
2.3 曲げ入射光学系のモデル化(径方向)	23
2.3.1 曲げ入射軸ずれ量と曲げ入射効率の特性解析	26
2.3.2 曲げ入射軸ずれ特性の測定と評価	27
2.4 曲げ受光光学系のモデル化と特性解析	28
2.5 結言	32
第3章 心線対照機能実用化のための光学設計と光学特性解析	34
3.1 緒言	34
3.2 心線対照系の構成	34
3.3 光ファイバ曲げ部の光学特性評価	36
3.3.1 単一モード光ファイバパラメータと曲げ部の光損失特性の評価	37
3.3.1.1 モードフィールド直径と曲げ光損失特性	37
3.3.1.2 実効カットオフ波長と曲げ光損失特性	38
3.3.2 曲げ部の光ファイバ破断確率の解析	41

3.4	心線対照系の光学設計	4 3
3.4.1	曲げ入射特性	4 3
3.4.2	曲げ受光特性	4 3
3.4.3	曲げ入射／曲げ受光特性	4 5
3.5	線番確認機能の光学設計	4 8
3.6	切替接続損失評価機能の光学設計	4 8
3.7	結言	5 0
第4章	心線対照実用装置の機能と評価	5 2
4.1	緒言	5 2
4.2	心線対照実用装置の適用形態	5 3
4.3	心線対照実用装置の所要機能	5 4
4.3.1	曲げ入射／曲げ受光方式の所要機能	5 4
4.3.2	端面入射／曲げ受光方式の所要機能	5 7
4.4	実用装置のシステム設計	5 8
4.4.1	曲げ入射／曲げ受光方式の所要値	5 8
4.4.2	端面入射／曲げ受光方式の所要値	5 9
4.5	曲げ入射装置の光学設計と入射特性	5 9
4.5.1	曲げ挿入損失	5 9
4.5.2	対照信号光波長の選定	6 1
4.5.3	曲げ入射効率	6 1
4.5.4	クラッドモードカッター	6 3
4.6	曲げ受光装置の光学設計と受光特性	6 4
4.6.1	曲げ受光効率	6 4
4.6.1.1	曲げ受光効率の受光位置依存性	6 4
4.6.1.2	曲げ受光効率	6 4
4.6.2	線番対照機能	6 9
4.7	切替接続損失の評価	7 1
4.7.1	曲げ入射／曲げ受光方式による切替接続損失評価	7 1
4.7.2	OTDRによる切替接続損失評価	7 3
4.8	心線対照実用装置の評価	7 4

4.8.1	曲げ入射／曲げ受光方式	7 4
4.8.2	端面入射／曲げ受光方式	7 4
4.8.3	光ファイバ切替接続システムへの適用	7 6
4.9	結言	7 7
第5章	光アクセス機能を有する心線対照用単一モード光コネクタの設計	7 8
5.1	緒言	7 8
5.2	光アクセス機能を有する光コネクタの構造設計とアクセス特性解析	7 8
5.2.1	接続損失と光モニタ効率の関係	7 8
5.2.2	光導波路と単一モード光ファイバの接触構造	8 3
5.2.3	光導波路接着用UV樹脂の屈折率と光モニタ効率の関係	8 6
5.2.4	光モニタ効率と入射光パワーの関係	8 6
5.2.5	接続損失とインジェクション効率の関係	8 8
5.3	試作結果	8 8
5.4	結言	9 0
第6章	光ファイバケーブル接続部における光ファイバハンドリング時の光損失変動特性評価	9 1
6.1	緒言	9 1
6.2	心線処理時の光損失変動要因	9 2
6.2.1	心線処理部の構造	9 2
6.2.2	丸め処理による光損失	9 3
6.2.3	側圧による光損失	9 5
6.2.4	捻れによる光損失	9 7
6.3	光損失変動に対するアナログベースバンド画像伝送特性評価	1 0 1
6.3.1	光損失変動量の許容値	1 0 1
6.3.2	心線の曲率変動周波数と光損失特性	1 0 2
6.3.3	変形周波数と信号伝送品質の関係	1 0 4
6.4	心線処理部の光損失変動特性評価	1 0 5
6.5	結言	1 0 8
第7章	光ファイバ切替接続による伝送システムへの影響	1 1 0
7.1	緒言	1 1 0

7.2	対照信号光による通信回線への影響評価	110
7.3	光信号の瞬断による伝送装置への影響	112
7.4	光信号の瞬断による通信サービスへの影響	115
7.5	光ファイバ切替接続システムの商用試験結果	119
7.6	結言	120
第8章	結 論	121
8.1	本研究で得られた成果	121
8.2	本研究の工学的価値	123
8.3	今後の展望	124
謝 辞		125
参考文献		127
研究業績		132
関連特許		137

## 記 号 一 覧

### 第1章に使用した記号

DCE	: データ回線終端装置
DTE	: 端末装置
DSU	: デジタル回線終端装置
ISDN	: サービス総合デジタル網
FTM	: 光ファイバ加入者終端架
MDF	: 主配線盤
LAN	: 企業情報通信網
SLT	: 光加入者線終端装置

### 第2章に使用した記号

$a$	: 光ファイバのコア半径
$d$	: コアの中心からUV被覆最外部までの距離
$L$	: 曲げ入射用光ファイバから放射するSM型光ファイバテープ間距離
$n_{(X)}$	: X地点の屈折率
$n_0$	: 屈折率整合剤の屈折率
$n_1$	: UV被覆層の屈折率
$P_1$	: 曲げ入射用光ファイバから放射する対照信号光の光出力
$P_2$	: 被入射光ファイバから放射する対照信号光の光出力
$P_3$	: 曲げ受光部通過前の伝搬光パワー
$P_4$	: 通過後の伝搬光パワー
$P_5$	: 曲げ部からの漏洩光パワー
$P_6$	: 曲げ受光パワー
$R$	: 光ファイバ曲げ半径
$r$	: 曲げ中心から光ファイバテープの曲げ入射部までの距離

$r_1$  : 曲げ中心から曲げ入射側クラッドまでの距離  
 $u$  : 基底モードの固有値  
 $w$  : 基底モードの固有値  
 $X$  : 曲げ中心からの距離  
 $y_0$  : 被入射光ファイバの中心から曲げ入射用光ファイバまでの軸ずれ量  
 $Z_0$  : 入射軸ずれ量  
 $\alpha_0$  : 曲げ損失  
 $\Delta$  : 比屈折率差  
 $\delta$  : UV被覆厚の偏差  
 $k_1$  : 1次の第二種変形ベッセル関数  
 $\gamma$  : コアに入射可能な許容軸ずれ量  
 $\eta_F$  : 曲げ部前後の光パワー伝達係数  
 $\eta_C$  : 漏洩光パワーのうち受光器に受光可能となる受光係数  
 $\eta_{LD}$  : 曲げ受光効率  
 $\eta_{LI}$  : 曲げ入射効率  
 $\Delta\eta_{LD}$  : 曲げ受光効率差  
 $\theta_0$  : 曲げ入射角  
 $\theta_1$  : 曲げ入射角  $\theta_0$  で入射した時の光ファイバテーパー内への屈折角  
 $\theta_2$  : コア内へ入射する光線の角度  
 $\theta_{\text{Gauss}}$  : 一様媒質中のガウスビームの広がり角  
 $\theta_3$  : コア入射角 ( $\theta_2$  の補角)  
 $\lambda$  : 光源波長  
 $\phi_1$  : 対照信号光のUV被覆内への屈折角  
 $\Phi_{LD}$  : ガウス分布における確率積分  
 $\omega_0$  : 光ファイバ内を伝搬する光ビームのスポットサイズ  
 $\omega_1$  : 光ファイバテーパー入射時の光ビームのスポットサイズ

第3章に使用した記号

$D$  : ファイバ曲げ部外郭直径  
 $d$  : 線路損失

$EI$  : End-face Injection  
 $F_{\text{破}}$  : 破断確率  
 $F_{\text{ファイバ}}$  : ファイバ曲げ部に対する破断確率  
 $L$  : ファイバ曲げ長さ  
 $LD$  : Local Detection  
 $LI$  : Local Injection  
 $m$  : 保証パラメータ  
 $MFD$  : モードフィールド直径  
 $N_F$  : 保証パラメータ  
 $n$  : 保証パラメータ  
 $OCU$  : Office Channel Unit  
 $P_{\text{入射}}$  : 曲げ入射光パワー  
 $P_{\text{端面受光}}$  : 曲げ入射光の光ファイバ端面受光光パワー  
 $P_{\text{入射}}$  : 曲げ入射光パワー  
 $P_{\text{端面受光}}$  : 光ファイバ端面受光光パワー  
 $P_{\text{最小}}$  : 最小受光光パワー  
 $P_{\text{出力}}$  : 光源出力光パワー  
 $p$  : 保証パラメータ  
 $R$  : 曲げ半径  
 $t_0$  : 保証パラメータ  
 $t_1$  : 曲げ時間  
 $\eta$  : 曲げ入射/曲げ受光効率  
 $\eta_{LI}$  : 曲げ入射効率  
 $\eta_{LD}$  : 曲げ受光効率  
 $\lambda_{\text{カット}}$  : カットオフ波長

第4章に使用した記号

$d$  : 軸ずれ  
 $d_L$  : 線路損失  
 $DSU$  : Digital Service Unit

$n$  : 適用距離  
 $n_f$  : 屈折率整合剤の屈折率  
 OTDR : Optical Time Domain Reflectometer  
 $P_0$  : シャッタ全開時の曲げ受光パワー  
 $P_1$  : 対照信号光が伝搬している光ファイバ心線をシャッタで覆った状態の曲げ受光パワー  
 $P_2$  : 対照信号光が伝搬している光ファイバ心線と反対側を覆った状態の曲げ受光パワー  
 $P_{10}$  : 曲げ入射装置から出射される対照信号光の光出力  
 $P_{11}$  : 曲げ入射された対照信号光が1 km伝搬後のSM型光ファイバ端面から出射される光出力  
 $P_{100}$  : SM型光ファイバ内入射レベル  
 $P_{min}$  : 受光素子の最小受光レベル  
 $P_{out}$  : 発光素子の光出力  
 $P_{101}$  : 端面入射光に対するSM型光ファイバ端面から出射する光出力  
 $P_{102}$  : 曲げ受光パワー  
 $P_{103}$  : 曲げ入射光にたいする曲げ受光パワー  
 $R_m$  : クラッドモードカッタの曲げ半径  
 $W_1, W_2$  : 光ファイバスポットサイズ  
 $X, Y, Z$  : 曲げ受光方向  
 $\alpha_1$  : コネクタ接続時の軸ずれ損失  
 $\alpha_2$  : コネクタ接続時の角度ずれ損失  
 $\alpha_{30}$  : 光カブラの分岐側ポートから通信側ポートへ結合するための結合損失  
 $\alpha_4$  : コネクタ接続時の界分布不整合損失  
 $\alpha_5$  : コネクタ接続損失  
 $\theta$  : 曲げ受光角  
 $\theta_1$  : 角度ずれ量  
 $\lambda$  : 光源波長  
 $\eta_{10}$  : 曲げ受光効率  
 $\eta_{11}$  : 曲げ入射効率

$\eta_{101}$  : 端面入射光に対する曲げ受光効率  
 $\eta_{102}$  : 曲げ入射光に対する曲げ受光効率

#### 第5章に使用した記号

$a$  : 光ファイバのコア半径  
 $D$  : 光ファイバのクラッド直径  
 $\ell$  : 光ファイバと光導波路間隔  
 $L$  : 光ファイバと光導波路接触長  
 $n_1$  : コアの屈折率  
 $n_2$  : クラッドの屈折率  
 $n_3$  : UV樹脂の屈折率  
 $n_4$  : 光導波路の屈折率  
 $n_3/n_4$  : 屈折率比  
 $P_0$  : 入射光パワー  
 $P_1$  : 伝搬光パワー  
 $P_2$  : 漏洩光パワー  
 $P_2/P_0$  : 漏洩光パワーと入射光パワーの比  
 $P_3$  : モニタ光パワー  
 $P_4$  : 光導波路への入射光パワー  
 $P_5$  : 1 km伝搬後の単一モード光ファイバの出射光パワー  
 $V$  : 規格化周波数  
 $\alpha$  : 接続損失  
 $\Delta$  : 比屈折率差  
 $\theta_{min}$  : 漏洩光の放射角の最小値  
 $\eta_1$  : 光インジェクション効率  
 $\eta_2$  : 漏洩光パワー $P_2$ 成分のうちモニタ光パワー $P_3$ となるための集光効率  
 $\eta_3$  : 接続点での光パワーの伝達係数  
 $\eta_4$  : 入射光パワー $P_0$ のうち光導波路内への伝搬するモニタ光パワー $P_3$ となるための光モニタ効率  
 $k$  : 伝搬定数

- $\lambda$  : 光源波長  
 $\delta X$  : 軸ずれ  
 $\delta Z$  : 間隔ずれ  
 $\omega_s$  : 単一モード光ファイバのスポットサイズ

第6章に使用した記号

- $A$  : 光ファイバテープに収容された中心の光ファイバ心線と最遠端の光ファイバ心線の中心間距離  
 A G C : 自動利得制御器  
 $C_m$  : ファイバの最大変位量  
 $E_s$  : 緩衝層のヤング率  
 $P$  : 側圧を加えるピッチ  
 $L$  : 捻れ部の心線長  
 $L_s$  : 線路損失  
 $m$  : 光の変調度  
 $n$  : 側圧を加える箇所  
 $R_{s1}$  : 曲がり部の最小曲率半径  
 $R_s$  : 曲線に接触する曲率円の半径  
 $R_{s2}$  : 捻れによる最小曲げ半径  
 $P_{r(r)}$  : 受信光電力  
 $P_s$  : 送信光電力  
 $r_s$  : 圧縮時の曲率半径  
 $S_{min}$  : S N R の最小値  
 S N R : 映像信号の信号対雑音電力比  
 $S N R_s$  : 光出力対光損失変動量比  
 $t$  : 最遠端の光ファイバ心線の中心が描く軌跡の媒介変数  
 $T$  : 無次元化緩衝層厚  
 $W_s$  : 側圧  
 $X$  : A G C の抑圧量  
 $\alpha_s$  : 曲がりによる光損失 (波長  $0.85 \mu m$ )

- $\alpha_s$  : 曲がりによる光損失 (波長  $1.31 \mu m$ )  
 $\Delta L$  : 損失変動の振幅  
 $\omega_1$  : 損失変動の角周波数  
 $\omega_s$  : 送信信号の角周波数  
 $\phi$  : 捻れ角  
 $\phi_s$  : 送信信号の初期位相

第7章に使用した記号

- A G C : 自動利得制御  
 D C A T : デジタル伝送同期端局装置  
 D S U : デジタル回線終端装置  
 D T E : データ端末装置  
 $P_s$  : 回線信号光パワー  
 $P_{Li}$  : 対照信号光パワー  
 S L T : 加入者線端局装置



## 第 1 章 序 論

### 1.1 研究の背景

社会・経済活動の広域化、情報化社会の進展を支える技術として電気通信の果たす役割は極めて大きい。21世紀に向け電気通信サービスに対するニーズも高度化、多様化し、これまでの基本サービスであるアナログ電話、専用線、INSネットサービスから高速広帯域サービスとして、映像分配サービス、高速LAN等の新規サービスの提供が予想される。この様な新規サービスに対応するため、限界の見えている既存のメタリック設備に変わる、電気通信技術の高度化・高機能化を図る必要がある。1960年T. H. Maimanによるルビー固体レーザーの発振成功<sup>(1)</sup>を契機に、光を用いた空間伝送<sup>(2)</sup>、ビームガイド伝送<sup>(3)</sup>等の伝送方式が検討されたが、伝送媒体としての十分な性能が得られず実用に至らなかった。1966年K. C. Kaoらによる低損失光ファイバの可能性が示されて以来、光ファイバを用いた伝送方式が注目されることとなった。また、半導体レーザーの室温連続発振の成功は、半導体レーザーを光源とし、石英系光ファイバを伝送媒体とした光伝送方式の研究実用化を急速に促した。光ファイバは従来の銅ケーブルと比較して、(1)低損失、(2)広帯域、(3)無漏話、(4)無誘導、(5)細径、(6)軽量、(7)可とう性に富むなど優れた特徴を有している。これら光ファイバの優れた特徴に着目し、通信用光ファイバ、光ケーブルの研究開発が活発に進められた。光ファイバを構造的に分類すると伝送容量の比較的小さな多モード型光ファイバ(以降MM[Multi-Mode]型光ファイバと略称)と伝送容量の大きな単一モード型光ファイバ(以降SM[Single-Mode]型光ファイバと略称)に分類される。両者とも外径は125 $\mu\text{m}$ だが、MM型光ファイバでは、光が伝搬するコア径は50 $\mu\text{m}$ 、SM型光ファイバではコア径10 $\mu\text{m}$ と異なる。さらに、光ファイバの被覆方法により、単心の光ファイバを樹脂で被覆した光ファイバ心線と複数本の光ファイバ心線を一括した光ファイバテープに分類される。現在、NTTで使用している代表的な光ファイバケーブルと光ファイバテープの構造を図1-1に示す

(1), (2)。

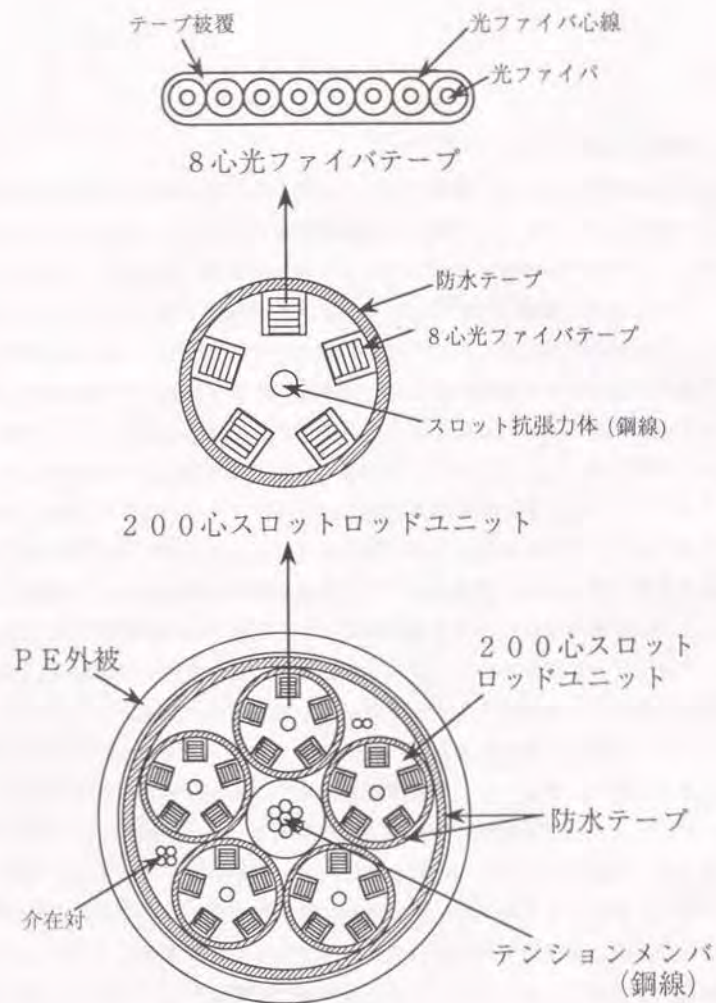
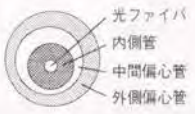
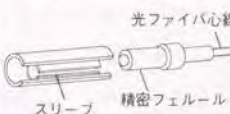
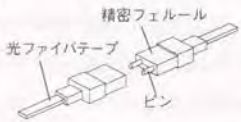


図1-1 光ファイバケーブルと光ファイバテープの構造例

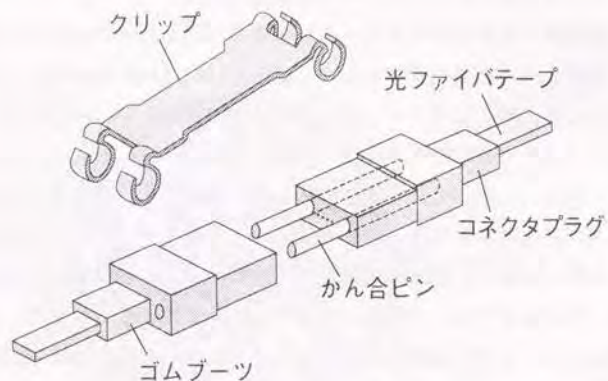
光ファイバの開発に伴い、光線路建設に不可欠な接続技術の開発も積極的に行われた。光ファイバの接続形態は大きく2種類に分類される。一つは着脱可能なコネクタ接続法、もう一つは接続後に取り外しを行わない永久接続法である。コネクタ接続法は、再接続可能であることを最も大きな特徴とし、単心用と多心用のコネクタが開発されている。代表的な光コネクタを図1-2に示す<sup>(17) (18)</sup>。図1-2(b)に示すMTコネクタは、1対のコネクタプラグ、2本の光ファイバ軸合わせ用のかん合ピン、かん合状態を保持するためのクリップにより構成されている。このコネクタは、 $1.31\mu\text{m}$ ゼロ分散SM型光ファイバの4心或いは8心光ファイバテープに適用する。光ファイバテープとコネクタプラグの接続部は、光ファイバテープの極端な曲がり防止するためゴムブーツにより保護されている。また、コネクタプラグの材料、かん合部のクリアランス条件等の最適設計により、屋外環境(-40℃から60℃)における損失増加は0.1dB以下であり非常に安定した温度特性を有する<sup>(19)</sup>。永久接続法は、光ファイバの固定方法の違いによって、接着法と融着法に分けられる。接着法は光ファイバを接着剤を用いて固定する方法である。融着法は、光ファイバを加熱、熔融して接続する方法である。融着法は、接続損失が小さく、接続部自体の伝送品質が劣化しない等の特徴を有する<sup>(20) (21)</sup>。

光加入者線路網の基本構成を図1-3に示す<sup>(17) (22)</sup>。光加入者線路は、局内の各加入者単位に用意された伝送装置(SLT: Subscriber Line terminal)に接続される光ファイバ心線(単心光ファイバコード)を集線するFO(Fun-out)コードを用いて光ファイバ加入者終端架(FTM: Fiber Termination Module)の光ファイバテープ(4心或いは8心テープ)に集約され、光ファイバケーブルに接続される。局外に構成される光配線形態は、4心或いは8心光ファイバテープをループ状に配線したき線系とき線系と加入者間をスター状に配線した配線系により構成され、光加入者宅へ2心或いは1心の光ファイバにより接続する方法が考えられている。この配線法により、メタル線路に採用されているスター配線法に比べてき線ループを利用した通信線路の2ルート化が容易になることからネットワークの高信頼化が可能となる。さらに、き線ループ内の需要に柔軟に対応出来るため、ケーブル内の心線使用率の向上が可能となり、線路網の経済化が図れる。

また、電気通信サービスの多様化に対応するため加入者線までデジタル化し、電話、画像通信、データ通信等の各種サービスを同一のインタフェースで提供する

接続心数	単 心		多 心
軸 合 せ	調 心	無 調 心	無 調 心
コ ネ ク タ	(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) 精密フェールスリーブ形: 中心にファイバ穴を有する精密フェールをスリーブに挿入して外形を合せる 	(例) ビン嵌(かん)合形: 位置合わせ用のピンを有する精密フェールでファイバ位置を合せる 

(a) 多心/単心光コネクタの構造



(b) MTコネクタの構造

図1-2 光コネクタの構造例

FTM: Fiber Termination Module (光ファイバ加入者終端架)  
 SLT: Subscriber Line Terminal equipment (光加入者線端局装置)  
 DSU: Digital Service Unit (デジタル回線終端装置)  
 Feeder Cable: き線ケーブル  
 Aerial Distribution Cable: 架空配線ケーブル

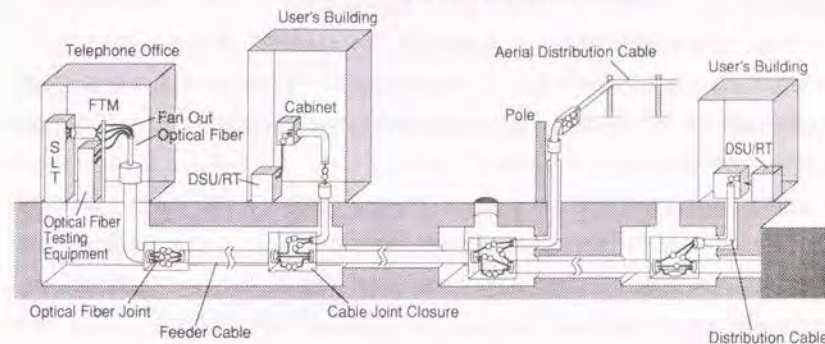


図1-3 光加入者網の基本構成

ことを目的としたサービス総合デジタル網 (ISDN: Integrated Service Digital Network) の検討が進められている。通信ネットワークはデジタル化によって、各個別サービス網から統合網へと変遷してきており、今後予想される多様なサービス要求や需要の動向に対して、柔軟に、かつ迅速に対応できる光加入者網を構成する必要がある。このため、加入者網の全面的な光化 (Fiber To The Home) が検討されている。

光ファイバケーブル技術、光ファイバ接続技術等の光線路構成技術の高機能化並びに経済化、及び光線路網の保守を目的とした光線路試験・監視技術、光線路切替運用技術、光線路設備管理技術等の光線路保守・オペレーション技術の確立は、加入者線路網の全光化を実現するための重要な研究開発課題となっている。

近年、光ファイバケーブルの導入が面的な広がりを見せるのに伴い、道路工事等による既存光ファイバケーブルを新設光ファイバケーブルに切替える光ファイバケーブルの支障移転工事やケーブル統合工事は年々増加している。これらの工事に伴う現用回線の切替作業は夜間、長時間にわたって加入者への通信サービスを中断した回線借用中に行われている。ISDNの本格的な導入に伴い、長時間の回線借

用を行う事が年々困難になる状況にある。また、同一のケーブルを再工事する間隔は5～6年に1度程度と大きいものの、企業の情報通信ネットワークが全国展開されるに従い、全国で発生するケーブルの支障移転工事等による通信サービスの中断は企業活動に大きな影響を与えることになる。

このような問題を解決するため、①通信サービスへの影響を最小限にとどめる、②計画的な切替接続を可能とする、③工期を短縮する、④回線借用稼働を削減する等の効果を期待できる光線路切替運用技術は効率的な光加入者線路網を構成するための重要な技術となる。

現用回線の異なる2点間で既設光ファイバ線路を新設光ファイバ線路へ切替える心線切替を行うと、光信号の一時的な瞬断と伝送遅延が発生する。一時的な瞬断は現用信号光を伝送している光ファイバ心線を他の心線に切替える動作時間に依存し、伝送遅延は現用信号光を伝送している光ファイバ心線と切替える心線との心線長の差に依存する。心線切替では、サービスを提供している回線に符号誤りを発生させることなく切替が行えることが望ましく、これを実現するためには超高速光切替素子及び伝送遅延を補償できる大容量光メモリ技術が必要となる。現在、大容量光メモリ技術は研究途上であり、伝送遅延による符号誤りを補償した回線の無瞬断切替技術の実現には将来の研究成果を待たねばならない。

高速デジタル伝送サービスのユーザ・網インターフェースでは回線の故障や試験のためサービスが提供されない状態であることを端末装置に通知する情報としてDNR (DCE[Data Circuit-terminating Equipment: データ回線終端装置] Not Ready)信号が使用されている。故障時にはDNR信号がアクティブ(DNR=1)となり、同信号がDSU (Digital Service Unit: デジタル回線終端装置)からDTE (Data Terminal Equipment: 端末装置)に送出される<sup>11)</sup>。短時間に多数の符号誤りが集中して起こるバースト誤り等伝送品質の一時的な劣化状態においてもDNR信号がアクティブとなる。高速デジタル回線のバースト誤りによるDNR信号継続時間は概ね100ms以下<sup>12)</sup>であり、心線切替による回線断時間の目標を100ms以下と設定した。回線断時間100ms以下を実現するためには、媒体レベルの心線切替時間は数十ms以下が必要となる。これらの切替条件を満足する光線路の高速切替方法として、導波路型光スイッチあるいは機械式光スイッチをあらかじめ光線路の中に設置しておく方法が考えられるが、これらのスイッチは、

①屋外設備の厳しい環境に耐えるための十分な信頼性に乏しい、②光ファイバとの接続損失が大きい、③高価である等の問題を解決するためのブレークスルーが要求される。一方、光線路接続用の多心コネクタを利用した心線切替を実現することにより、切替位置に制約のない自由度の高い、しかも低損失で信頼性の高い切替接続システムを実現できる。光ファイバ切替接続システム (Optical Fiber Cable Transfer Splicing System)<sup>11)</sup>はこの様なコンセプトのもとで、コネクタを高速で移動させることにより、サービス中の現用光ファイバ心線を瞬時に新設心線に切替える切替接続システムであり、図1-2(b)に示すSM型光ファイバの多心光コネクタ (MTコネクタ: Mechanically Transferable Connector) 間で切替接続を行う<sup>11)</sup>。光ファイバケーブル切替接続システムの基本構成を図1-4に示す。また、システムの概要を表1-1に示す。本システムは、心線対照装置 (Identification equipment)、心線切替装置 (Fiber transfer splicing equipment)そして切替制御装置 (Synchronous control equipment) から構成される。心線対照装置は切替点において切替対象の現用回線の光ファイバテープを光ファイバケーブルの中から識別するための装置である。心線切替装置は、現用回線の光ファイバテープのコネクタ

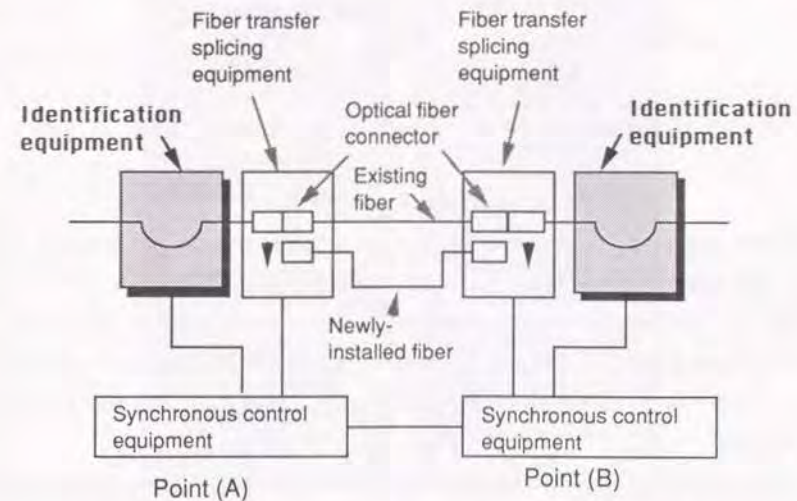


図1-4 光ファイバケーブル切替接続システムの基本構成

表 1-1 光ファイバケーブル切替接続システムの概要

要素技術	検討課題
①切替駆動装置	・心線切替接続動作前後の損失差：0.3dB 以下 ・切替時間：50ms以下
②同期制御装置	・既設、新設の光ファイバ（1心）、介在心線（2心）により制御可能であること
③心線対照装置	・2点間で現用回線の通信を途絶させないで心線対照が行えること

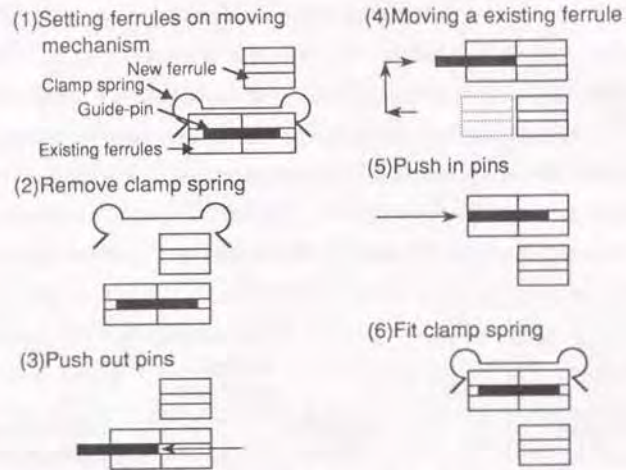


図 1-5 切替装置の動作手順

接続部を高速で移動し、新設側の光コネクタに切替するためのコネクタ移動装置である。切替装置の動作手順を図 1-5 に示す。本装置はモータ、電磁ソレノイド (SOL)、位置検知センサ等により構成され、コネクタの切替を行う。はじめに、新設と既設の MT コネクタをセットしたのち、既設 MT コネクタのクリップを取り外し、既設コネクタのガイドピンを高速で押し込み、移動させ、新設 MT コネクタに押し込む。このようなシンプルな機構のため高速切替が可能となる。

切替制御機能は、2点間の同期切替制御のためのデータ伝送、通話等の機能を持つ。2点間の同期切替フローを図 1-6 に示す。データ伝送時のシリアル/パラレ

ル変換に要する時間等による 2 点間の同期偏差を補償するため、マスター側 CPU からスレーブ側 CPU へ切替準備信号を送信し、スレーブ側からの確認信号を受信するまでの時間  $T$  を測定する。測定後、マスター側は切替信号をスレーブ側に送信し、同期補償時間  $T/2$  時間待機し、切替信号を切替装置に送信する。この方法により、電気レベルでの切替トリガの最大偏差を 1ms 以下とすることが可能となる。

光線路の建設、保守時に目視による心線識別を行うためテープ心線の被覆材料が着色されている<sup>12)</sup>。しかし、建設時の誤接続も多く、サービス中の切替対象の光ファイバテープを識別するための十分な信頼性を確保することが困難である。本システム構成技術の中で、システム全体の作業性を高め、切替接続作業の信頼性を確保するうえで、異なる切替点において切替対象の現用心線を確実に能率良く識別でき、また、切替前後の接続部の評価も行える心線対照技術は重要な要素技術となる。

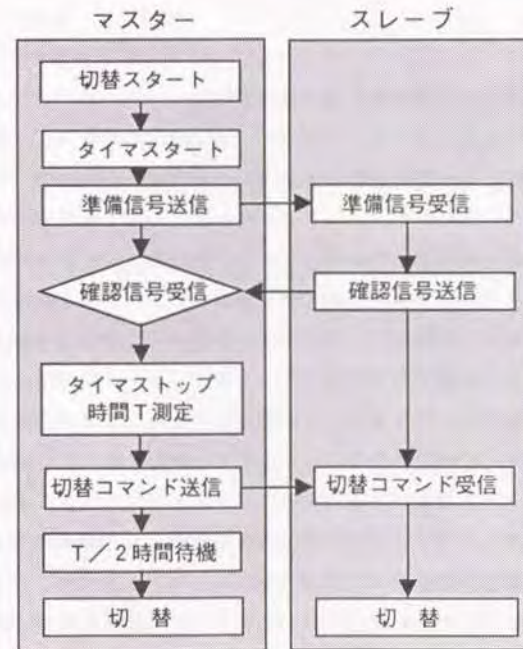


図 1-6 同期切替制御フロー

一方、高速・広帯域光伝送方式の加入者系への本格導入にあたり加入者光線路を構成する光ファイバケーブル接続部は、光ファイバケーブルと同様に光損失特性と信頼性に対して良好な特性を要求される。これら光ケーブル接続部では、線路建設以後に光加入者の需要変動に伴うケーブル分岐、ケーブル移転等が発生した場合、心線の接続替、切替接続を行なうため心線処理部に収容されている心線接続部と光ファイバ心線をハンドリングする必要がある。この時、信号伝送品質の観点から通信中の心線の光損失特性に影響を与えないこと、心線処理部に収納されているその他の心線の伝送特性に影響を与えないことが求められる。

本論文は、このような背景のもとで光線路の心線対照技術に関する研究開発の成果として、伝送品質を劣化させることなく目的の現用光ファイバ心線を対照する技術並びに光ファイバハンドリング時の光損失変動特性の評価技術とそれを用いた光ファイバ接続部を収納するための心線処理法について研究成果をまとめたものである。

## 1.2 光通信線路の心線対照技術に関する研究状況

本論文では、通信線路として光ファイバケーブル線路を対象とし、サービス中の現用回線を識別するための心線対照技術について検討する<sup>(1)(2)(3)</sup>。検討課題としては、2切替点においてサービスを中断することなく現用光ファイバ心線に対照信号光を入射し、受光するための光ファイバ曲げ入射/曲げ受光系の光学モデル解析と特性評価、心線対照機能実用化のための光学設計と光学特性解析、心線対照実用装置の対照特性と機能評価、光ファイバを曲げることなく心線対照系を構成するための光アクセス機能を有する単一モード光コネクタの設計法、光ファイバ切替接続システムによる伝送システムへの影響について明らかにする必要がある。さらに、現用光ファイバを対照装置等にセットするために光ファイバ接続部と光ファイバをハンドリングする必要がある。このため、光ファイバケーブル接続部における光ファイバハンドリング時の光損失変動特性を明確にする必要がある。

以下、各項目に対する研究状況について述べる。

(1) 光ファイバ曲げ入射/曲げ受光系の光学モデル解析と特性評価：光ファイバを曲げることにより光ファイバ内の伝搬モードと放射モード間に生じるモード結合を利用する曲げ入射/曲げ受光法の原理は、S M型光ファイバ融着接続時の接続損失

の推定<sup>(4)(5)</sup>を目的として提案されている。しかし、現在まで精度よく入射、受光するための曲げ入射光学系、曲げ受光光学系の入射/結合条件は明らかにされていない。本論文では、光ファイバ曲げ入射/曲げ受光系の光学モデルを用い、曲げ入射/曲げ受光法の可能性を理論的、実験的に論じている。

(2) 心線対照機能実用化のための光学設計と光学特性解析：現在まで、光加入者開通時に、光ファイバケーブル内の空きファイバテープの中から新規加入者に割り当てられた心線の対照を目的とした心線対照法について検討されている<sup>(6)</sup>。しかし、この従来方法は、空き回線を対象としているため、片端より対照信号光の入射が可能なこと、通信サービスへの影響を考慮する必要がないことから、光ケーブルの現用回線に対照信号光を入射し、心線対照を行う心線対照系の設計条件、対照システム構成法、要求機能等について検討されていない。本論文では、(1)の検討結果をもとに心線対照系の光学設計を行い、実用化のための要求機能に対する光学特性評価について論じている。

(3) 心線対照実用装置の機能と評価：現用回線の対照を目的とした心線対照装置は今日まで実用化されていない。本論文では、(1)、(2)の検討結果をもとに心線対照実用装置を試作し、その対照機能評価について論じている。

(4) 光アクセス機能を有する単一モード光コネクタの設計法：従来、心線対照には光ファイバ端面あるいは曲げ部より光ファイバ回線内に対照信号光を送出し、対照信号光の一部を光ファイバ曲げ受光法により受光する方法が用いられている。本論文では作業性の向上等将来への対照システムの改良を目的として、単一モード光ファイバの接続点で対照信号光を入射でき、かつ、対照信号光を受光できる光アクセス機能を有する単一モード光コネクタの基本構造を提案し、構造設計法、光アクセス特性、試作結果について論じている。

(5) 光ファイバケーブル接続部における光ファイバハンドリング時の光損失変動特性評価：光ファイバケーブル接続部では、線路建設時以外にケーブル移転等により光ファイバ心線と心線接続部をハンドリングする場合がある。従来、光ファイバをハンドリングした時の現用光ファイバ内の現用信号光の動的な光損失変動特性について検討した例はない。本論文では、光ファイバ心線と光ファイバ接続部を収納した心線処理部において光ファイバをハンドリングした時の現用信号光の光損失変動特性を検討し、アナログベースバンド画像伝送方式に対する光損失変動特性評価法を

示し、伝送品質劣化を生じない心線処理法について論じている。

(6) 光ファイバ切替接続による伝送システムへの影響評価：現用光ファイバに対照信号光を入射した時にサービス中の通信回線へ与える影響、サービス中の光信号の瞬断による伝送装置及び通信サービスへの影響について検討した例は無い。このため、本論文では光ファイバ切替接続システムによる伝送システムへの影響を明確にすると共に、商用試験結果を示し、本システムが公衆回線において実用可能であることを示す。

### 1.3 本論文の構成

本論文は8章より構成され、論文の構成を図1-7、論文の概要を図1-8にそれぞれ示す。

第1章は序論であり、本研究の背景や関連する従来の研究について概説するとともに、本研究の目的について述べている。

第2章では光ファイバ曲げ入射/曲げ受光光学系の光学モデル解析と特性評価について述べている。切替対象の光ファイバ心線は既に使用されている現用回線であるため、切替点において対照信号光を端面入射、端面受光することは不可能である。このため、対照信号光を現用光ファイバ心線に入射するための曲げ入射装置と現用通信光と対照信号光の中から対照信号光を識別する曲げ受光装置を開発する必要がある。本章では、対照信号光を効率良く現用回線に伝搬させるための曲げ入射条件及び光ファイバ内を伝搬する対照信号光を効率良く受光するための曲げ受光条件を理論的、実験的に求めている。

第3章では曲げ入射/曲げ受光方式の実用化のための光学設計と光学特性解析について、前章の研究結果を踏まえ、光ファイバ曲げ入射/曲げ受光光学系を用いた心線対照の実現に向け検討した結果について述べている。

第4章では心線対照実用装置の対照特性と評価について述べている。サービス中の現用回線を瞬時に切り替える光ファイバケーブル切替接続システムの開発が進められ、このシステムの構成装置として切替対象の現用回線をサービスに影響を与えることなく対照するための心線対照装置の開発が求められた。本章では、心線対照実用装置の装置構成について提案し、適用形態、所要機能、要求条件、心線対照装置の設計と特性について論じている。

第5章では心線システムの改良を目的として光アクセス機能を有する心線対照用単一モード光コネクタの設計について述べている。まず、本章では単一モード光ファイバの接続点で対照信号光を入射でき、かつ、心線対照光を受光できる光アクセス機能を有する単一モード光コネクタの基本構造を提案し、構造設計法、光アクセス特性、試作結果について述べている。

第6章では光ファイバケーブル接続部における光ファイバハンドリング時の光損失変動特性評価について述べている。光ファイバ心線接続部と光ファイバ心線をハンドリングした時の光損失変動特性を検討し、信号伝送品質に影響を与えない心線処理法を明らかにする必要がある。本章では、心線処理時の光損失変動要因の検討、アナログベースバンド画像信号伝送時の光損失変動特性評価法の検討を行い、加入者線路に適した心線処理方式を提案している。

第7章では光ファイバ切替接続による伝送システムへの影響について述べている。光ファイバ切替接続システムを加入者光線路に適用した時にサービス中の伝送品質に与える影響を明らかにする必要がある。まず、対照信号光が通信回線へ与える影響評価を行い、対照信号光レベルを調整することにより伝送品質を劣化させることなく心線対照が可能であることを示した。また、サービス中の光信号の瞬断による伝送装置への影響及び通信サービスへの影響評価を行い、十分実用可能であることを確認した。

第8章は「結論」であり、本研究で得られた知見をまとめると共に今後の課題について言及している。

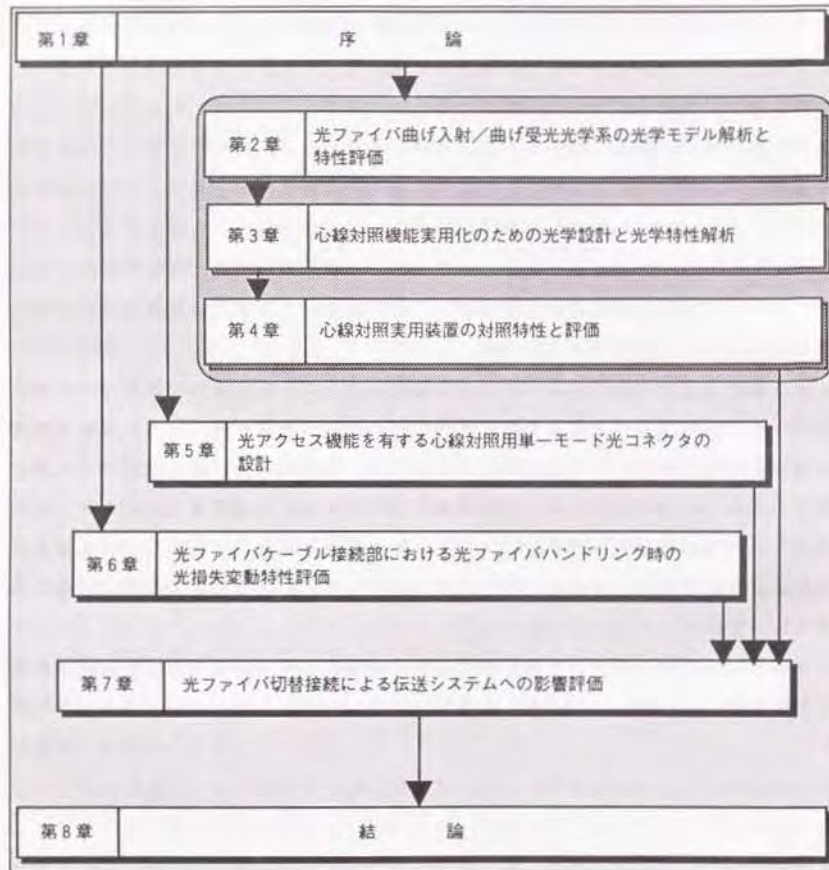


図1-7 論文の構成

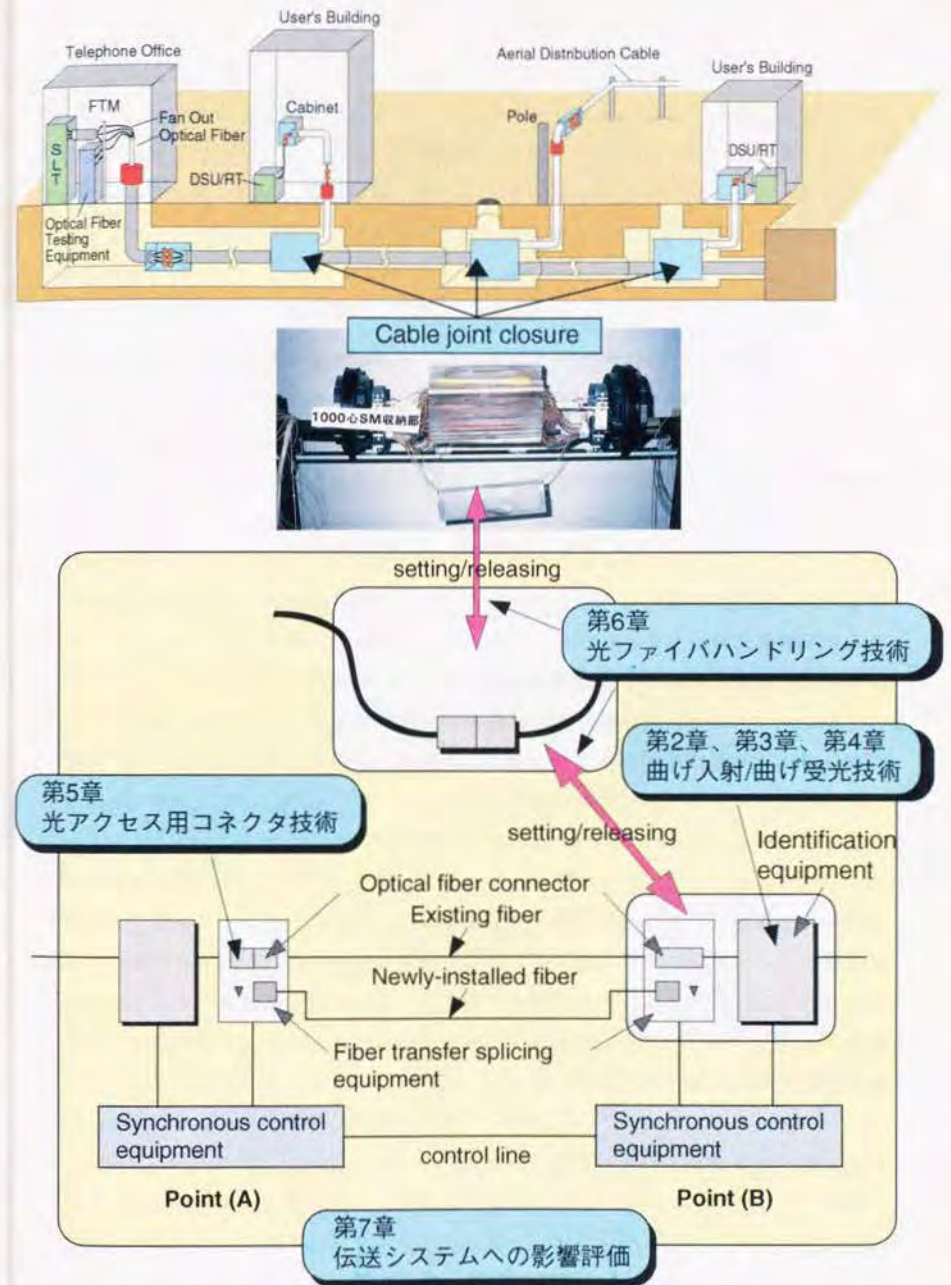


図1-8 論文の概要



## 第 2 章 光ファイバ曲げ入射 / 曲げ受光系の光学モデル解析と特性評価

### 2.1 緒言

高速・広帯域サービスの需要拡大に対して、加入者線路への光ファイバケーブルの導入は、面的な広がりを見せている。このような状況下において、光ファイバケーブルの支障移転やケーブル統合等の工事は年々増加し、これらの工事に伴う心線切替作業は、夜間、長時間の回線借用中に行われている。

そこで、ユーザへのサービス性を確保しつつ、作業性の向上、作業コストの低減を目的として、現用回線を高速で新設回線へ切り替える光ファイバケーブル切替接続システムの開発が進められている<sup>(1)(2)(3)</sup>。光ファイバケーブル切替接続システムの構成技術の中で、異なる 2 作業点において保守対象の現用光ファイバ心線を効率良く確認するための心線対照技術は、重要な要素技術となる。

このため、筆者らは心線切替点の近傍より対照信号光を曲げ入射し、もう一方の切替点において曲げ受光する現用回線の心線対照を目的とした光ファイバ曲げ入射 / 曲げ受光結合系について検討を進めてきた<sup>(4)(5)(6)(7)</sup>。光ファイバ心線を曲げるにより光ファイバ内の伝搬モード光と放射モード光間に生じるモード結合を利用する曲げ入射 / 曲げ受光法の基本原理は、SM 型光ファイバ融着接続時の接続損失の推定<sup>(8)(9)</sup>を目的として提案されている。しかし、現在まで、精度良く推定するための曲げ入射光学系、曲げ受光光学系の入射 / 受光条件は明らかにされていない。本章では、対照信号光を効率良く現用回線に伝搬させる為の曲げ入射条件及び光ファイバ内を伝搬する対照信号光を効率良く受光するための曲げ受光条件を理論的、実験的に明らかにする。

### 2.2 曲げ入射光学系のモデル化 (長さ方向)

光ファイバに対照信号光を側方入射するための曲げ入射部を構成する方法として、①レーザダイオードとレンズ系により構成する方法、②レーザダイオードと入射用光ファイバにより構成する方法がある。①、②の装置構成の中で、曲げ入射機構の

小型化、装置構成の簡単化の点において②の方法が有利であると考えられる。ここでは、光線法を用いて長さ方向の計算モデルによりコアモードとして伝搬させるための曲げ入射角について検討する。さらに、径方向の計算モデルを用いて曲げ入射用光ファイバと被入射光ファイバ間の入射軸ずれ量と曲げ入射効率の関係について検討する。

### 2.2.1 曲げ入射角と曲げ入射効率の特性解析

図 2-1 に長さ方向の曲げ入射モデルを示す。対照信号光は曲げ入射用光ファイバにより、曲げ部に導かれ放射される。

光ファイバに半径  $R$  の一様曲げを加えた場合、曲げ中心から  $(R+x)$  の地点の屈折率  $n(x)$  の変化は次の様に表される。<sup>(10)</sup>

$$n(x) \rightarrow n(x)(1+x/R) \quad (2-1)$$

光ファイバテープに屈折率  $n_0$  の屈折率整合剤を塗布し、曲げ半径  $R$  で一様に曲げる。曲げ入射用光ファイバ端面と曲げ入射光が入射する光ファイバテープ入射面が平行であると仮定すると、式(2-1)を用いて側方から入射角  $\theta_0$  で入射した光線の

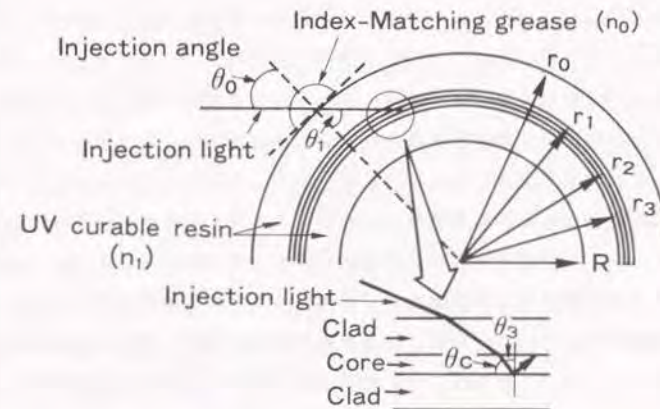


図 2-1 曲げ入射光学系モデル (長さ方向)

光ファイバテープUV被覆層における入射角 $\theta_0$ と屈折角 $\theta_1$ の関係はUV被覆層の屈折率を $n_1$ 、曲げ中心から光ファイバテープの曲げ入射部までの距離を $r_0$ 、曲げ中心から曲げ入射側クラッドまでの距離を $r_1$ とすると次式で表される。

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_1} = \frac{n_1 r_1}{n_0 r_0} \quad (2-2)$$

図2-1と式(2-2)を用いて、コア内へ入射する光線の角度 $\theta_0$ の補角をコア入射角 $\theta_c$ とすると、コア入射角 $\theta_c$ は次式で表される。

$$\theta_c = \cos^{-1} \left( \frac{n_0 r_0 \sin \theta_0}{n_1 r_1} \right) \quad (2-3)$$

ただし、

$$\theta_c = 90 - \theta_1$$

ここで、 $n_1$ はコアの屈折率、 $r_1$ は曲げ中心からコアまでの距離を示す。コア入射角 $\theta_c$ が、SM型光ファイバのコア内を伝搬する光線の全反射角 $\sin^{-1} \sqrt{2\Delta}$  ( $=4.4(\text{deg})$ ; 比屈折率差 $\Delta=0.3\%$ )より小さければ、側方から入射した光線をSM型光ファイバのコアモードとして伝搬させることが可能となる。次に、式(2-3)を用いて曲げ入射条件について示す。

### 2.2.2 曲げ半径とコア入射角特性

図2-2にコアの屈折率 $n_1=1.46$ 、屈折率整合剤の屈折率 $n_0=1.47$ 、SM型光ファイバテープ厚さを $0.4\text{mm}$ 、テープ被覆からコアまでの厚さを $0.195\text{mm}$ とした時、曲げ入射角 $\theta_0=73$ 度、 $74$ 度、 $75.1$ 度、 $76$ 度それぞれに対するSM型光ファイバの曲げ半径 $R$ とコア入射角 $\theta_c$ の関係を示す。図2-2から、曲げ半径 $R$ を小さくするとコア内を伝搬可能な曲げ入射角 $\theta_0$ は小さくなる事が分かる。SM型光ファイバの曲げ半径 $R=7\text{mm}$ の時、コア入射角が最小となる曲げ入射角 $\theta_0$ は $75.1$

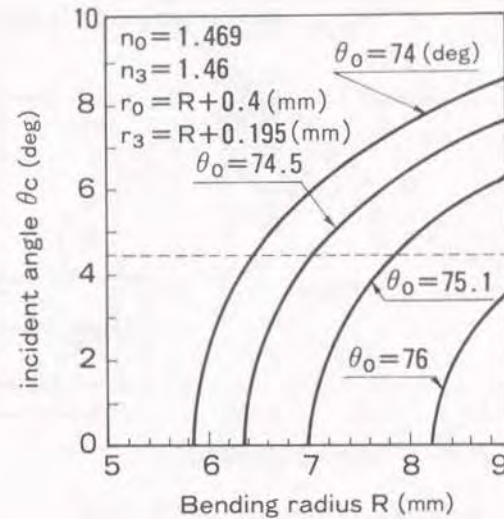


図2-2 曲げ半径とコア入射角の関係

度となり、これ以上大きな曲げ入射角 $\theta_0$ を与えると曲げ入射光はコア部へ入射することなくUV被覆層、クラッド、コアの各境界面において全反射してしまうことが分かる。

### 2.2.3 曲げ入射特性の測定と評価

図2-3に曲げ半径と曲げ入射角の測定系を示す。長さ $1\text{km}$ の光ファイバの片端を曲げ治具(曲げ半径 $R=7\text{mm}$ 、 $11\text{mm}$ )を用いて曲げ、対照光入射用フェルールとの入射角を曲げ治具にセットされた微動台により変化させ、 $1\text{km}$ 伝搬後の対照光の光強度の変化を光パワーメータを用いて測定した。

ここで、曲げ入射用光ファイバから放射する対照信号光の光出力を $P_1(\text{dBm})$ 、被入射光ファイバから放射する対照信号光の光出力を $P_2(\text{dBm})$ とすると曲げ入射効率 $\eta_u(\text{dB})$ は次式で表される。

$$\eta_u = P_2 - P_1 \quad (2-4)$$

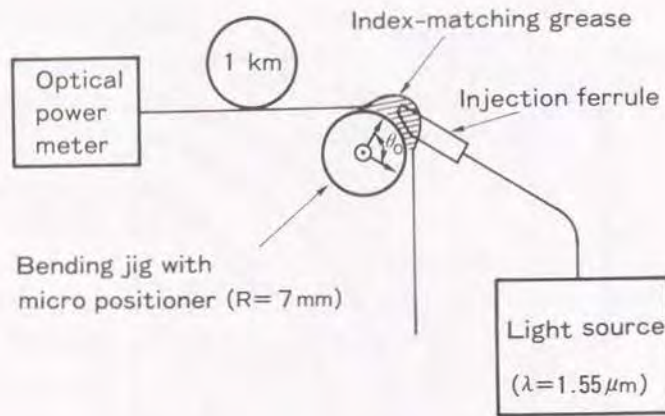


図 2-3 曲げ入射特性測定系

式(2-4)を用いて曲げ半径を変化させた時の曲げ入射効率の測定結果を図2-4に示す。図2-4から、曲げ入射効率の最大値を示す曲げ入射角 $\theta$ は、 $R=7\text{mm}$ の時、69度、 $R=11\text{mm}$ の時、74度となる。これより、曲げ半径を小さくするほど曲げ入射効率を最大とする曲げ入射角は減少する傾向を示す。これは、図2-2の傾向とよく一致することが分かる。また、曲げ半径が大きくなるほど曲げ入射効率は小さくなる傾向を示すことが分かる。

#### 2.2.4 UV被覆層の被覆厚偏差とコア入射角特性

図2-5に屈折率整合剤の屈折率 $n_0=1.47$ 、曲げ半径 $R=7\text{mm}$ 、曲げ入射角を74度、74.5度、75.1度、光ファイバテープの厚さを $0.4\text{mm}$ とした時のUV被覆厚の偏差 $\delta$ とコア入射角 $\theta_c$ の関係を示す。図2-5からUV被覆厚が増加するとコアを伝搬可能な曲げ入射角 $\theta_c$ は減少することが分かる。また、曲げ入射角75.1度で入射した場合、UV被覆厚が増加し、SM型光ファイバテープの厚さが $0.4\text{mm}$ より厚くなると曲げ入射光はコアとの境界面において全反射し、コア内を伝搬できないことが分かる。また、曲げ入射角が74.5度の時、SM型光ファイバテープの厚さが $0.4\text{mm}$ より薄くなると曲げ入射光はコアモードとして伝搬するためのコア入射角度より大きくなるため、コア内を伝搬できないことが分かる。

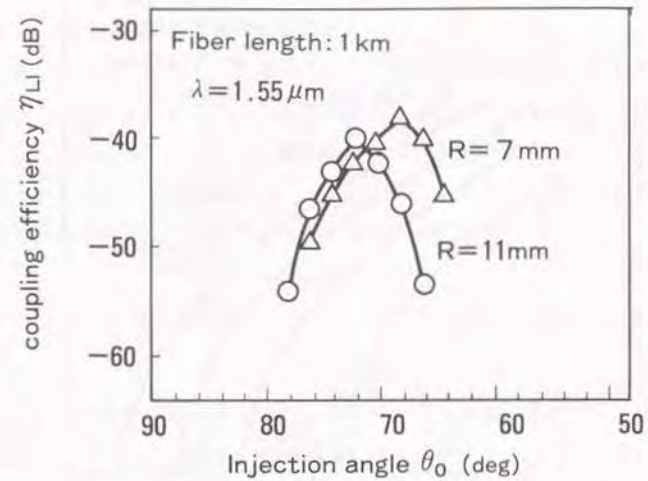


図 2-4 曲げ半径と曲げ入射角の関係

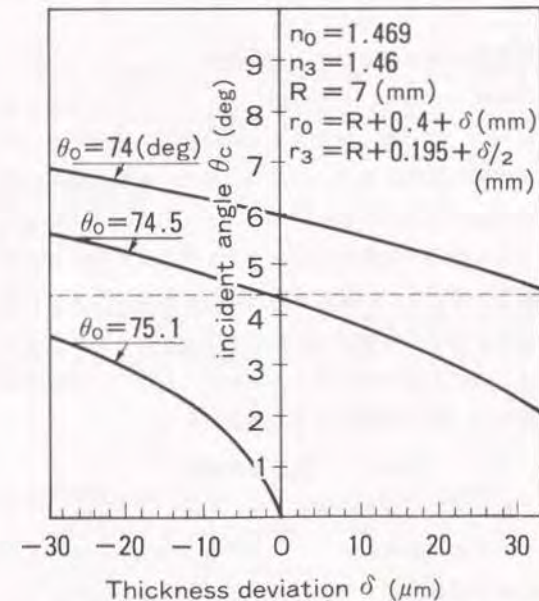


図 2-5 UV被覆厚偏差とコア入射角の関係

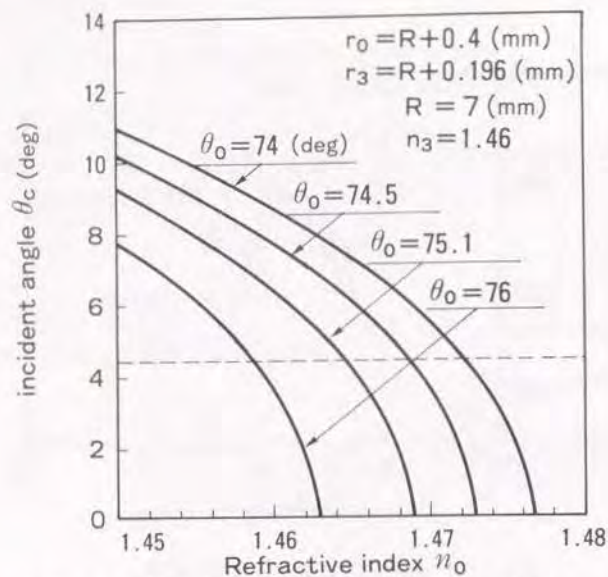


図2-6 屈折率整合剤の屈折率とコア入射角の関係

### 2.2.5 屈折率整合剤の屈折率とコア入射角特性

図2-6に曲げ半径  $R=7\text{mm}$ 、SM型光ファイバテープの厚さを  $0.4\text{mm}$ 、曲げ入射角  $\theta_0$  を  $73$ 度、 $74$ 度、 $75.1$ 度、 $76$ 度とした時の曲げ入射部の屈折率整合剤の屈折率とコア入射角の関係を示す。曲げ入射角  $75.1$ 度で入射した場合、図2-6から、屈折率整合剤の屈折率が小さくなるのに従いコアへの入射角は増加し、屈折率が  $1.465$  より小さくなると曲げ入射光をSM光ファイバのコア内に閉じ込めることが出来なくなることが分かる。また、屈折率整合剤の屈折率を小さくすると許容されるコア入射角を満足するためには曲げ入射角を大きくする必要があることが分かる。

以上の検討から、曲げ入射条件を表2-1とすると、コア内を伝搬可能な曲げ入射角は、 $74.5$ 度から  $75.1$ 度の範囲となることが分かる。

表2-1 曲げ入射条件

屈折率整合剤の屈折率 $n_0$	1.47
コアの屈折率 $n_3$	1.46
曲げ半径 $R$ (mm)	7
SM型光ファイバテープ厚 (mm)	0.4

### 2.3 曲げ入射光学系のモデル化 (径方向)

曲げ入射用光ファイバと被入射光ファイバとの軸ずれ量が曲げ入射効率に与える影響について検討する。まず、図2-1の曲げ入射光学系を用いて、曲げ入射用光ファイバとSM型光ファイバテープ間距離  $L$  と曲げ入射用光ファイバから出射され、SM型光ファイバテープ入射時の光ビームのスポットサイズの関係を求める。ここで、光源の波長と規格化周波数の関係は次式で表される。<sup>12)</sup>

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot n_3 \cdot \sqrt{2\Delta} \quad (2-5)$$

ただし、 $\lambda$  は光源の波長、 $a$  は光ファイバのコア半径を示す。また、光ファイバ内を伝搬する光ビームのスポットサイズ  $\omega_0$  は次式となる。

$$\frac{\omega_0}{a} = 0.65 + \frac{1.619}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6} \quad (2-6)$$

式(2-5)、(2-6)を用いて、 $\lambda = 1.31\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ 、 $a = 5\mu\text{m}$ 、 $n_3 = 1.46$ 、 $\Delta = 0.3\%$  とするとスポットサイズは次のようになる。

$$\begin{cases} \omega_{0(1.31)} = 5.08(\mu\text{m}) \\ \omega_{0(1.55)} = 5.69(\mu\text{m}) \end{cases} \quad (2-7)$$

曲げ入射用光ファイバをSM型光ファイバとすると、放射される光ビームは、ガウスビームにより近似できる。一様媒質中のガウスビームの広がり角  $\theta_{\dots}$  は次式で表される。<sup>12)</sup>

$$\theta_{\text{beam}} = \tan^{-1} \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \right) \doteq \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \quad (2-8)$$

式(2-7)、(2-8)より、光ビームの広がり角  $\theta_{\dots}$  は次のようになる。

$$\begin{cases} \theta_{\text{beam}(1.31)} = 0.081(\text{rad}) \\ \theta_{\text{beam}(1.55)} = 0.087(\text{rad}) \end{cases} \quad (2-9)$$

式(2-9)より、光ファイバテープ入射時の光ビームのスポットサイズ $\omega'$ は次式となる。

$$\begin{cases} \omega'_{(1.31)} = L \cdot \tan(0.081) \\ \omega'_{(1.55)} = L \cdot \tan(0.087) \end{cases} \quad (2-10)$$

式(2-10)を用いて、光ビームのスポットサイズを計算すると、波長 $1.55\mu\text{m}$ の方が $1.31\mu\text{m}$ より大きくなり、間隔 $L=1.2\text{mm}$ の時、 $\omega'_{(1.31)}=97.4\mu\text{m}$ 、 $\omega'_{(1.55)}=104.6\mu\text{m}$ となることが分かる。

図2-7に曲げ入射光学系の入射軸ずれ計算モデルを示す。UV被覆層の数は、光線のコア入射位置を変化させるが、曲げ入射軸ずれ量と曲げ入射効率の関係には影響しない。ここでは、簡単のためにUV被覆を1層とする。図2-7に示す対照信号光のUV被覆内への屈折角 $\phi_1$ は次式で表される。

$$\phi_1 = \sin^{-1} \frac{n_0 y_0}{n_1 d_0} \quad (2-11)$$

ここで、 $n_1$ はUV被覆の屈折率、 $y_0$ は被入射光ファイバの中心から曲げ入射用光ファイバまでの軸ずれ量、 $d_0$ はコアの中心からUV被覆最外部までの距離を示す。これより、UV樹脂内を進む光線の方程式は次のようになる。

$$y = \tan(\phi_1 - \phi_2)(x + d_0^2 - y_0^2) + y_0 \quad (2-12)$$

式(2-12)とクラッドとの交点を $(x_1, y_1)$ とすると、クラッド内の光線の方程式は次のようになる。

$$Y = \tan\left\{\tan^{-1}\left(\frac{y_1}{x_1}\right) - \phi_2\right\}(x - x_1) + y_1 \quad (2-13)$$

$$\text{ここで、} \phi_2 = (\phi_1 - \phi_0) - \tan^{-1}\left(\frac{y_1}{x_1}\right)$$

$$\phi_3 = \sin\left(\frac{n_2 \sin \phi_2}{n_1}\right)$$

UV樹脂の屈折率 $n_1=1.5$ 、コアの屈折率 $n_2=1.46$ 、比屈折率差 $\Delta=0.3\%$ 、曲げ入射部の屈折率整合剤の屈折率 $n_3=1.46$ に対するクラッド内の光線がコアに入射可能な軸ずれ量 $y_0$ は、式(2-12)、(2-13)を用いて、波長 $1.31\mu\text{m}$ の時、 $5.4\mu\text{m}$ 、波長 $1.55\mu\text{m}$ の時、 $6\mu\text{m}$ となる。

次に、入射軸ずれ量と曲げ入射効率の関係について示す。曲げ入射用SM型光ファイバから放射する光ビームはガウス分布となることから、ガウス分布における確率積分 $\Theta(z)$ は次式で表される。

$$\Theta(z) = \frac{1}{\sqrt{2\Delta}} \int_{-\infty}^z e^{-t^2} dt \quad (2-14)$$

$$\text{ただし、} Z = \frac{2Z_d}{\omega_0}$$

ここで、 $Z_0$ は入射軸ずれ量を示す。

また、曲げ入射効率 $\eta_{(1)}$ と入射軸ずれ量 $Z_0$ の関係はコアに入射可能な許容軸ずれ量を $\gamma$ とすると次式で表される。なお、ここでは、曲げ入射光の波長、スポットサイズに対する入射条件の傾向分析を主目的とし、入射効率の絶対値の大小は本考察の本質とは関係がないため、曲げ入射光の光ファイバ表面あるいは被覆層境界面での反射による損失及び被覆層とクラッド層での吸収による損失等の損失成分を無視する。

$$\eta_{\mu} = 10 \log(\Theta(Z) - \Theta(Z')) \quad (2-15)$$

$$\text{ただし、} Z' = \frac{2(Z_d - \gamma)}{\omega_0}$$

$$\gamma = 2y_0$$

式(2-15)を用いて、入射光ビームのスポットサイズ $\omega_0$ 、許容軸ずれ量 $\gamma$ に対する曲げ入射条件について次に示す。

### 2.3.1 曲げ入射軸ずれ量と曲げ入射効率特性解析

図2-8に入射光ビームのスポットサイズを $\omega_0 = 60 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 、許容軸ずれ量 $\gamma$ を光源波長 $1.31 \mu\text{m}$ の時、 $10.8 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ の時、 $12 \mu\text{m}$ としたときの、入射軸ずれ量と曲げ入射効率の関係を示す。図2-8から、光ビームのスポットサ

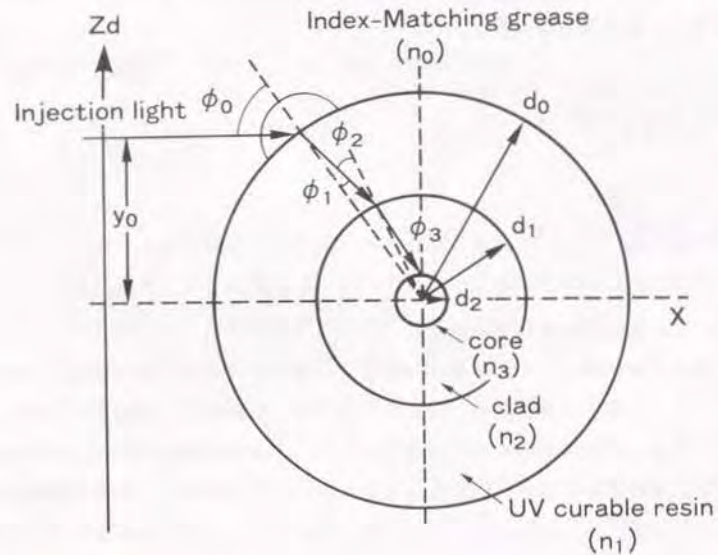


図2-7 曲げ入射モデル(径方向)

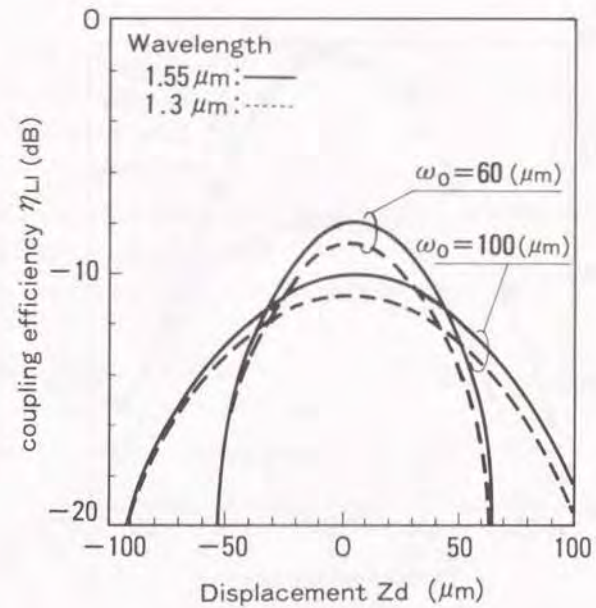


図2-8 入射軸ずれと曲げ入射効率(計算値)

イズが大きくなるのに伴い、入射効率の最大値は減少し、軸ずれに対する入射効率の変化量は小さくなるのが分かる。また、光源波長は $1.31 \mu\text{m}$ より $1.55 \mu\text{m}$ を使用することにより入射効率を大きくとれることが分かる。これは、被入射光ファイバのモードフィールド直径は光源波長が長くなるほど大きくなり、入射軸ずれ量を大きく取れるためと考えられる。これより、光ビームのスポットサイズを小さくし、光源の波長を長くすることにより曲げ入射効率を大きく取れることが分かる。

### 2.3.2 曲げ入射軸ずれ特性の測定と評価

図2-9に示す曲げ入射効率測定系を用いて、光源波長 $1.31 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ に対して最適な曲げ入射効率が得られるように曲げ入射用光ファイバと被入射光ファイバの位置を調整し、入射軸ずれ量と曲げ入射効率を測定した。その結果を図2-9に示す。図2-9より光源波長 $1.55 \mu\text{m}$ の入射効率は $1.31 \mu\text{m}$ より18dB程度大きくなること、また、光源波長 $1.55 \mu\text{m}$ に対する曲げ入射効率の最大値近傍における入射軸ずれ量と入射効率の変化量は $1.31 \mu\text{m}$ と同程度となり、計算値と同一の傾向を

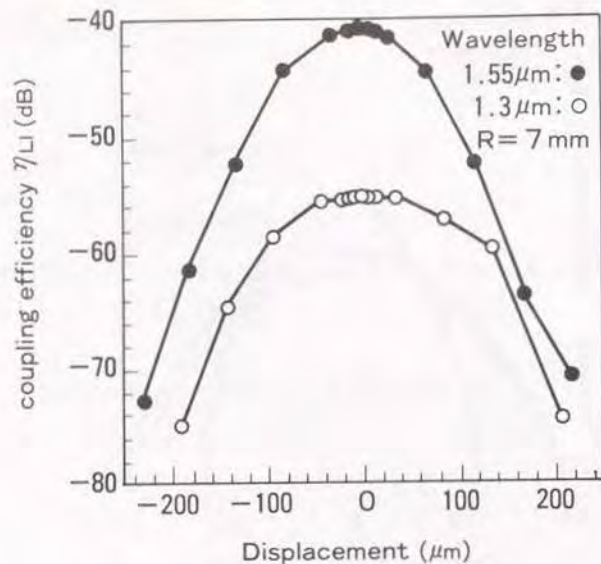


図2-9 入射軸ずれと曲げ入射効率 (実験値)

示すことが分かる。また、計算値と測定値において入射効率の値に差が生じる要因として、光ファイバ心線内の被覆層による吸収損失及び被覆、クラッドの各境界面の不整合による反射損失等により測定値は計算値と比較して曲げ入射効率が小さくなると考えられる。

#### 2.4 曲げ受光光学系のモデル化と特性解析

曲げ受光部は、受光器の受光面が2mmφ程度と光ファイバのコア径に比べて十分大きいため、曲げ入射部のような精密な位置決め機構は必要ないと考えられる。本章では、対照信号光の波長を1.55μmとし、現用回線の通信波長を1.31μmとした時の対照信号光を効率良く受光するための曲げ受光条件について検討する。曲げ受光光学系の測定系と計算モデルを図2-10(a)、(b)に示す。

図2-10(b)より、曲げ受光部通過前の伝搬光パワーを $P_1$ (W)、通過後の伝搬光パワーを $P_2$ (W)、曲げ部からの漏洩光パワーを $P_3$ (W)、受光パワーを $P_4$ (W)とすると、それぞれの関係は次式で表される。

$$P_4 = \eta_r P_3 \quad (2-16)$$

$$P_5 = (1 - \eta_r) P_3 \quad (2-17)$$

$$P_6 = \eta_c P_5 \quad (2-18)$$

ここで、 $\eta_r$ は曲げ部前後の光パワー伝達係数、 $\eta_c$ は漏洩光パワーのうち受光器に受光可能となる受光係数を示す。

式(2-17)、(2-18)より、受光パワー $P_4$ は次式となる。

$$P_6 = \eta_c (1 - \eta_r) P_3 \quad (2-19)$$

式(2-16)、(2-19)より、曲げ受光効率は次式となる。

$$\frac{P_6}{P_4} = \frac{\eta_c (1 - \eta_r)}{\eta_r} \quad (2-20)$$

式(2-16)より、曲げ損失 $\alpha_b$ (dB)は次式となる。

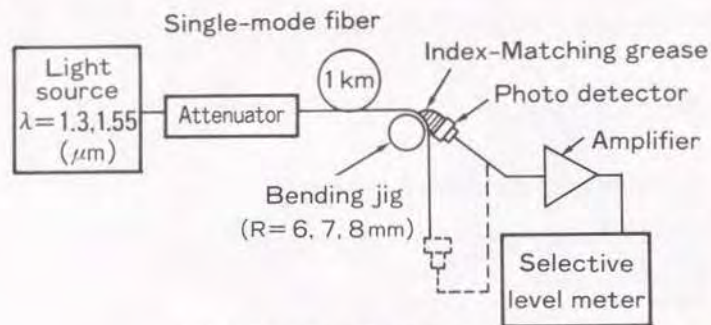
$$\alpha_b = -10 \log(\eta_r) \quad (2-21)$$

式(2-20)、(2-21)より、曲げ受光効率 $\eta_{LB}$ (dB)は次式となる。

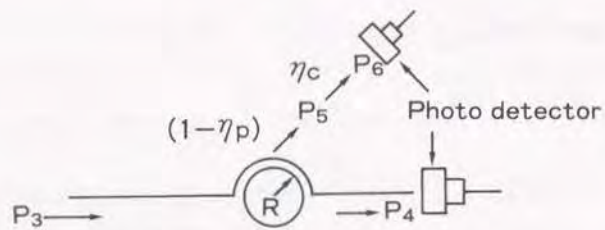
$$\eta_{LB} = 10 \log \left\{ \eta_c \left( 1 - 10^{-\frac{\alpha_b}{10}} \right) + \alpha_b \right\} \quad (2-22)$$

ここで、光源の波長 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ のときの曲げ損失を $\alpha_{b(1.31)}$ 、光源の波長 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ のときの曲げ損失を $\alpha_{b(1.55)}$ 、 $\eta_c$ を光源の波長によらず一定とすると、光源の波長に対する曲げ受光効率の差 $\Delta \eta_{LB}$ は次式となる。

$$\Delta \eta_{LB} = 10 \log \left\{ \frac{\left( 1 - 10^{-\frac{\alpha_{b(1.55)}}{10}} \right)}{\left( 1 - 10^{-\frac{\alpha_{b(1.31)}}{10}} \right)} \right\} + \alpha_{b(1.55)} - \alpha_{b(1.31)} \quad (2-23)$$



(a) Measurement setup



(b) Calculation model

図 2-10 曲げ受光光学系

また、SM型光ファイバの曲がりによる損失 $\alpha_b$ は、曲げ半径 $R$ 、コア半径 $a$ 、基底モードの固有値 $u$ 、 $w$ を用いて次式で表される<sup>(14)</sup>。

$$\alpha_b = 4.3 \times 10^3 \frac{\pi (u/a)^2 \exp\{-(2/3)R(\omega/a)^3/\beta^2\}}{2(\omega/a)^{3/2} V^2 R \{K_1(\omega)\}^2} \quad (2-24)$$

ただし、 $K_1$ は1次の第二種変形ベッセル関数である。式(2-5)、(2-23)、(2-24)を用いて、SM型光ファイバのスポットサイズを $4.5\mu\text{m}$ 、 $4.8\mu\text{m}$ 、 $5.25\mu\text{m}$ 、カットオフ波長を $1.17\mu\text{m}$ 、曲げ部ファイバ長を $10\text{mm}$ とした時の曲げ半径 $R$ と曲げ受光効率の差 $\Delta\eta_{LD}$ との関係を図2-11に示す。図2-11より、曲げ半径 $6\text{mm}$ 付近において $\Delta\eta_{LD}$ は極小値を示す。曲げ半径が $6\text{mm}$ より増加すると、 $\Delta\eta_{LD}$ は増加傾向を示す。これは、曲げ半径が大きくなると波長 $1.31\mu\text{m}$ の曲げ損失が $1.55\mu\text{m}$ と比較して非常に小さくなり、 $\Delta\eta_{LD}$ が大きくなるためと考えられる。

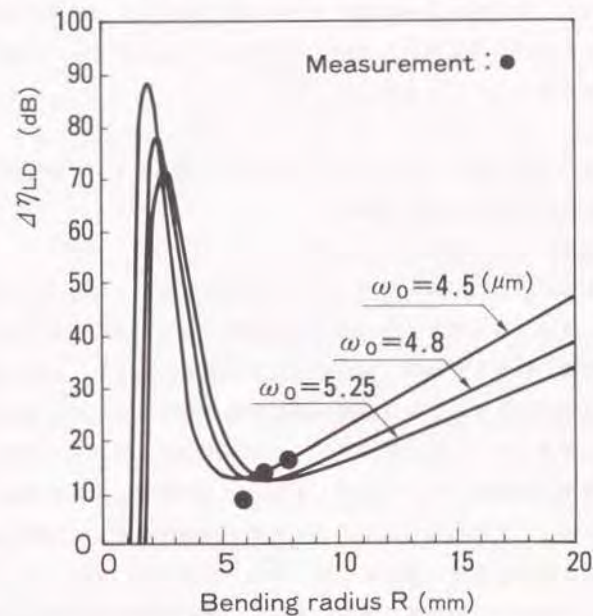


図 2-11 曲げ半径と曲げ受光効率差



この領域では、 $\Delta\eta_{10}$ は大きく取れるが曲げ受光可能な光パワーレベルは小さくなる。さらに、曲げ半径が6mmから3mm程度まで $\Delta\eta_{10}$ は急峻な増加を示し、3mmより小さくなると $\Delta\eta_{10}$ は急速に減少する。これは、曲げ半径6mmから3mmまでは $1.55\mu\text{m}$ の曲げ損失が非常に大きくなるため $\Delta\eta_{10}$ は急峻な増加を示し、さらに、曲げ半径3mm以下の場合には $1.31\mu\text{m}$ の曲げ損失が急激に増加するため $\Delta\eta_{10}$ は急速に減少するためと考えられる。また、曲げ半径6mm付近における極小値を示す曲げ半径は、SM型光ファイバのスポットサイズの増加と伴に大きくなること、曲げ受光効率は $1.31\mu\text{m}$ より $1.55\mu\text{m}$ の方が大きくなること、スポットサイズ $4.8\mu\text{m}$ 、カットオフ波長 $1.17\mu\text{m}$ のSM型光ファイバを用いて図2-10(a)に示す測定系により測定した結果を図中に示す。図中の測定結果より、計算結果と同一の傾向を示すことが分かる。

以上の検討から、曲げ受光効率を大きくするためには対照信号光を $1.55\mu\text{m}$ とし、曲げ部の曲げ半径を6mm以下にすることにより対照信号光を効果的に受光できることが分かる。また、曲げ半径を3mm程度以下にすると $\Delta\eta_{10}$ は急激な減少を示す。これは、 $1.31\mu\text{m}$ の通信光も急激に増加するためであり、この領域では伝送品質に大きな影響を与えるものと考えられる。

## 2.5 結言

光ファイバ曲げ入射/曲げ受光系について、光学モデルを用いた理論的な解析を行うと共に実験的に特性の評価を行った。

主な結果を要約すると下記のとおりである。

- (1) 曲げ入射光学系について被入射光ファイバの長さ方向の入射モデルを用いて理論解析を行い、対照信号光がコアモードとして伝搬可能な曲げ入射角と曲げ半径、UV被覆厚の偏差、屈折率整合剤の屈折率の関係を明らかにした。また、曲げ入射条件について実験的に検討し、理論計算と同様の傾向が得られることを確認した。
- (2) 曲げ入射光学系について被入射光ファイバの径方向の入射モデルを用いて理論解析を行い、曲げ入射用光ファイバと被入射光ファイバとの入射軸ずれ量と曲げ入射効率の関係を示し、入射光ビームのスポットサイズを小さくし、光源の波長を長くすることにより曲げ入射効率を大きく取れることを明らかにした。さらに、入射軸ずれ量と曲げ入射効率の関係を実験的に検討し、理論計算と同様の傾向が得られることを確認した。また、入射効率の計算値と測定値を比較すると入射効率の値に

差を生じる。この主な要因として、光ファイバ心線内の被覆層による吸収損失及び被覆、クラッドの各境界面の不整合による反射損失等により計算値と比較して曲げ入射効率が小さくなると考えられ、理論計算の高精度化は今後の検討課題である。

- (3) 曲げ受光光学系について曲げ受光モデルを用いた理論解析と実験による特性評価を行った。その結果、コア内を伝搬する対照信号光を曲げ受光する時の光源波長に対する曲げ受光部の曲げ受光効率は、光源波長を長くすることにより大きく取れること、さらに、対照信号光を効率良く受光できる曲げ半径について理論的、実験的に示した。

### 第 3 章 心線対照機能実用化のための 光学設計と光学特性解析

#### 3.1 緒言

第 2 章において、光ファイバテープに対照信号光を曲げ入射可能であること。また、光ファイバ中の対照信号光を曲げ受光可能であることを示した。

本章では、曲げ入射／曲げ受光を用いた心線対照技術として、(1)心線対照系の構成、(2)光ファイバ曲げ部の評価、(3)心線対照系の設計、(4)線番確認機能設計、(5)切替確認機能設計について検討している。(1)については、心線対照の基本フローを検討し、心線対照系に要求される所要機能を明らかにする。(2)については、曲げ部における光ファイバの破断確率を明らかにする。(3)曲げ入射機能設計、曲げ受光機能設計については、曲げ半径に対する曲げ入射効率分布、曲げ受光効率分布を明らかにする。さらに、曲げ入射／曲げ受光機能設計により適用距離を明らかにしている。(4)については、曲げ受光部内の受光素子と光ファイバテープ間にシャッタを設け、シャッタの出し入れによる光ファイバテープ内の心線番号識別機能（以降線番対照機能と記す）の検討をしている。最後に、(5)について、曲げ入射／曲げ受光による切替接続損失測定について検討する。

#### 3.2 心線対照系の構成

切替点(A)及び切替点(B)間における心線対照の基本的な作業フローを図 3-1 に示す<sup>\*)</sup>。切替点(A)において切替対象心線を選定し、対照信号光を曲げ入射法により当該光ファイバ心線に入射し、切替点(B)近傍において曲げ受光法により対照信号光の探索、確認、対照信号光レベルの測定(L<sub>1</sub>)を行い、既設心線の心線対照を終了する。次に、切替を行う。切替終了後、切替点(B)において対照信号光レベルの測定(L<sub>2</sub>)を行い、切替前後の対照信号光レベル差から、切替成否の判定を行う。

心線対照の基本的な作業フローの中で、特に、光ファイバテープの心線対照に要

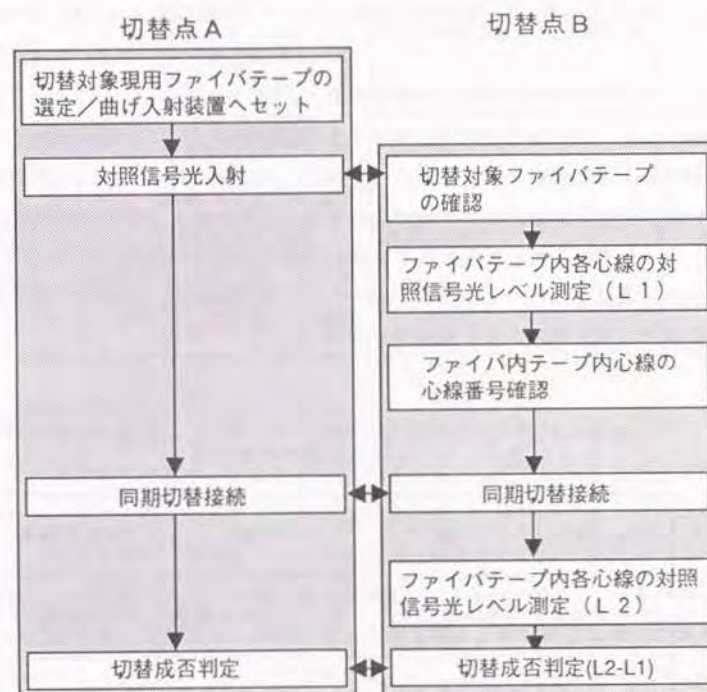


図 3-1 心線対照基本フロー

求される機能を表3-1に示す。測定項目別に分類すると、要求される機能は、切替対象の光ファイバテープの対照（以下、テープ対照と記す。）、テープ内の各光ファイバ心線の線番の確認（以下、線番対照と記す。）、さらに、切替成否の判定のためのテープ内全ファイバのレベルモニタに分けられる。以上の機能を満足する曲げ入射（L1）／曲げ受光（LD）方式の構成案を表3-2に示す。表3-2から、L1部走査／LD部固定方式（2）の装置構成により受光系のS/Nを低減でき、また、比較的lowコストな心線対照機の実現が可能であることが分かる。

### 3.3 光ファイバ曲げ部の光学特性評価

曲げ入射／曲げ受光方式は、光ファイバ心線を曲げることにより光ファイバ内の伝搬モード光と放射モード光間に生じるモード結合を利用して、外部から曲げ部に対照信号光を入射し、対照信号光をコア内に伝搬させる（曲げ入射部）、あるいは、コア内を伝搬する対照信号光を取り出す（曲げ受光部）方式である。このため、曲げ入射／曲げ受光による回線信号光への曲げ損失の影響、曲げ部における光ファイバの破断確率を明らかにする必要がある。

表3-1 心線対照機の所要機能

対照項目	機能	対象心線数
テープ対照	切替対象の光ファイバテープの識別	1心or複数心
線番対照	光ファイバテープ内心線の線番確認	1側or2心
切替確認	切替成否の判定（レベルモニタ）	全心線

トレーサ：光ケーブル内の光テープの通し番号を識別するために光ファイバテープにつけた識別マーク

表3-2 曲げ入射（L1）／曲げ受光（LD）方式の装置構成

構成案		特徴	評価
L1走査 LD固定 方式	(1) L1：単一光源の270Hz IM光を走査 ・光源波長：1.3 μm LD：単一受光器 大口径固定、スリット有り	○最も簡易、低コスト	○
	(2) L1：単一光源の270Hz IM光を走査 ・光源波長>1.3 μm LD：単一受光器 大口径固定、スリット、光フィルタ有り	○長波長使用により信号光への付加損は最小 ○受光系のS/N設計に有利	◎
	(3) L1：複数光源を固定 ・電氣的にスイッチング LD：単一受光器 大口径固定、スリット有り	▲高コスト	▲
L1固定 LD走査 方式	(1) L1：複数光源を固定 ・電氣的にスイッチング LD：単一受光器 小口径直接走査 or 単一受光器 大口径固定、スリット走査	▲高コスト	▲

#### 3.3.1 単一モード光ファイバパラメータと曲げ部の光損失特性の評価

光ファイバが曲率半径Rで一様に曲げられると、コアに閉じ込められた光は放射損を受ける。一般に、SM型光ファイバの曲げ損失は、ファイバパラメータの中でモードフィールド径MFD、実効カットオフ波長 $\lambda_{co}$ に依存することが知られている<sup>(18)</sup>。また、SM型光ファイバの曲げ損失の理論値はD. Marcuse<sup>(17)</sup>により導出されているが、曲げ損失の理論値は曲げ半径が小さくなると実験値との誤差が大きくなる傾向を示す。このため、ここでは実験により、L1/LD部の曲げ半径について検討する。

##### 3.3.1.1 モードフィールド直径と曲げ光損失特性

SM型光ファイバのモードフィールド径MFDに対する規格値<sup>(11)</sup>は $9.5 \pm 1 \mu\text{m}$ （ただし、光源波長1.55 μm、曲げ半径15mmの曲げ1ターンにおいて1dB以下の付帯制限有り）となる。ここでは、モードフィールド径MFDが9.3 μm、9.9 μm、10.0 μmの時の曲げ損失を測定し、モードフィールド径MFDと曲げ損

失の関係について検討する。

実効カットオフ波長 $\lambda_{co}$ を $1.22\mu\text{m}$ 、曲げ長さ $l$ を $10\text{mm}$ 、光源の波長を $1.31\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ 、曲げ半径 $R$ を $5\text{mm}$ 、 $7\text{mm}$ 、 $9\text{mm}$ とした時のモードフィールド径MFDと曲げ損失 $\alpha_b$ の関係を図3-2に示す。図3-2より、波長 $1.31\mu\text{m}$ 、 $R=7\text{mm}$ 、モードフィールド径MFD= $9.3\mu\text{m}$ の時、 $\alpha_b=0.12\text{dB}$ 、MFD= $9.9\mu\text{m}$ の時、 $\alpha_b=0.18\text{dB}$ 、MFD= $10.0\mu\text{m}$ の時、 $\alpha_b=0.2\text{dB}$ となり、モードフィールド径が増加するのに伴い、曲げ損失は単調に増加することが分かる。また、モードフィールド径 $10\text{mm}$ 、光源波長 $1.31\mu\text{m}$ 、 $R=5\text{mm}$ の時、 $\alpha_b=1.2\text{dB}$ 、 $R=7\text{mm}$ の時、 $\alpha_b=0.2\text{dB}$ 、 $R=9\text{mm}$ の時、 $\alpha_b=0.14\text{dB}$ 、光源波長 $1.55\mu\text{m}$ 、 $R=5\text{mm}$ の時、 $\alpha_b=6.5\text{dB}$ 、 $R=7\text{mm}$ の時、 $\alpha_b=4.0\text{dB}$ 、 $R=9\text{mm}$ の時、 $\alpha_b=1.8\text{dB}$ となり、曲げ半径の減少、光源波長の増加に伴い曲げ損失は増加することが分かる。

上述のモードフィールド径の規格値内において、回線信号光( $\lambda=1.31\mu\text{m}$ )に与える曲げ損失の目標値(1ヶ所当たり $0.5\text{dB}$ )を満足するためには、曲げ半径は $7\text{mm}$ 以上必要であることが分かる。

### 3.3.1.2 実効カットオフ波長と曲げ光損失特性

SM型光ファイバの実効カットオフ波長 $\lambda_{co}$ に対する規格値<sup>11)</sup>は $1.10\mu\text{m}$ から $1.29\mu\text{m}$ までの範囲となる。ここでは、 $\lambda_{co}=1.11\mu\text{m}$ 、 $1.19\mu\text{m}$ 、 $1.20\mu\text{m}$ の時の曲げ損失 $\alpha_b$ を測定し、実効カットオフ波長 $\lambda_{co}$ と曲げ損失 $\alpha_b$ の関係について検討する。

モードフィールド径MFDを $10.2\mu\text{m}$ 、曲げ長さ $l$ を $10\text{mm}$ 、光源の波長を $1.31\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ 、曲げ半径 $R$ を $5\text{mm}$ 、 $7\text{mm}$ 、 $9\text{mm}$ とした時のそれぞれについて実効カットオフ波長 $\lambda_{co}$ と曲げ損失の関係を図3-3に示す。

図3-3より、波長 $1.31\mu\text{m}$ 、 $R=7\text{mm}$ 、 $\lambda_{co}=1.1\mu\text{m}$ の時、 $\alpha_b=0.43\text{dB}$ 、 $\lambda_{co}=1.9\mu\text{m}$ の時、 $\alpha_b=0.28\text{dB}$ 、 $\lambda_{co}=1.2\mu\text{m}$ の時、 $\alpha_b=0.25\text{dB}$ となり、実効カットオフ波長 $\lambda_{co}$ が増加すると曲げ損失は単調に減少することが分かる。

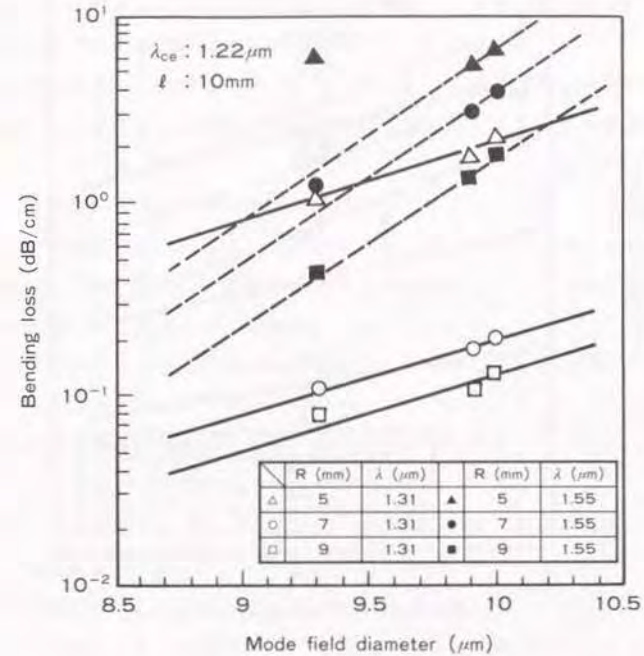


図3-2 モードフィールド径と曲げ損失の関係

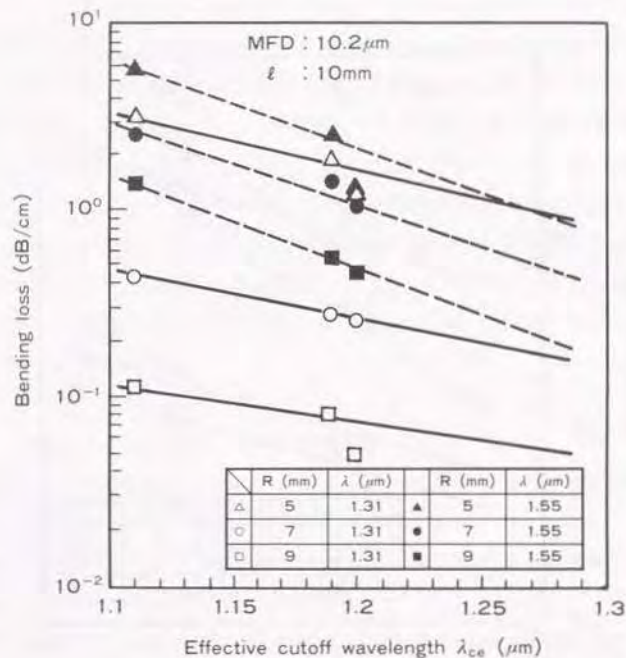


図3-3 実効カットオフ波長と曲げ損失の関係

また、実効カットオフ波長 $1.11\mu\text{m}$ 、光源波長 $1.31\mu\text{m}$ 、 $R=5\text{mm}$ の時、 $\alpha_b=3.2\text{dB}$ 、 $R=7\text{mm}$ の時、 $\alpha_b=0.44\text{dB}$ 、 $R=9\text{mm}$ の時、 $\alpha_b=0.12\text{dB}$ 、光源波長 $1.55\mu\text{m}$ の時、 $R=5\text{mm}$ の時、 $\alpha_b=5.5\text{dB}$ 、 $R=7\text{mm}$ の時、 $\alpha_b=2.6\text{dB}$ 、 $R=9\text{mm}$ の時、 $\alpha_b=1.5\text{dB}$ となり、曲げ半径の減少、光源波長の増加に伴い、曲げ損失は増加することが分かる。上述の実効カットオフ波長の規格値内において、回線信号光( $\lambda=1.31\mu\text{m}$ )に与える曲げ損失の目標値(1カ所当たり $0.5\text{dB}$ )を満足するためには、曲げ半径は $7\text{mm}$ 以上必要であることが分かる。

3.3.1の検討より、回線信号光( $\lambda=1.31\mu\text{m}$ )に与える曲げ損失の目標値を1カ所当たり $0.5\text{dB}$ とすると曲げ部の半径は $7\text{mm}$ 以上必要であることが分かる。

### 3.3.2 曲げ部の光ファイバ破断確率の解析

曲げ入射装置、曲げ受光装置の光ファイバ曲げ部において、光ファイバに曲げ応力が加えられた時、光ファイバ表面に伸び歪みが加わり、この歪みが長時間、許容値を越えて加わると光ファイバは破断に至る。

光ファイバに応力を加えた時の破断確率 $F$ は次式で表される。<sup>10)</sup>

$$F_s = 1 - \exp[-N_p L \{ (1 + (\epsilon_r + \epsilon_p)^n t_s / t_p)^{m/(n+1)} - 1 \}] \quad (3-1)$$

ここで、 $N_p$ はスクリーニング試験時の単位長さ当たりの破断回数、 $\epsilon_r$ はスクリーニング試験歪、 $t_s$ はスクリーニング試験時間、 $t_p$ は曲げ時間、 $n$ は疲労指数、 $m$ は強度分布パラメータ、 $L=2\pi R$ 、 $\epsilon_p=D/2R$ 、 $R$ は曲げ半径、 $D$ は光ファイバ外径を示す。各係数に対する文献(21)の代表値を表3-3に示す。

$$F_{sb} = F_s / 3 \quad (3-2)$$

表3-3 光ファイバ保証パラメータ<sup>10)</sup>

	$N_p$ (1/km)	$\epsilon_p$	$t_p$ (sec)	$n$	$m$
常温	0.03	0.005	1	22	2.4

式(3-2)より、曲げ時間 $t_b$ を600、1200、1800secとした時の光ファイバ曲げ半径と破断確率の関係を図3-4に示す。

図3-4から、 $t_b=600$ sec、曲げ半径 $R=7$ mmの時、光ファイバは約26万回に1回( $F_{sb}=3.8 \times 10^{-6}$ )破断することが分かる。クロージャ内の余長処理心線に与えられる所要の破断確率 $F_{sb}$ は $3.85 \times 10^{-6}$ (信頼性期間10年)であり、心線対照機の光ファイバ曲げ部の破断確率は余長処理心線の曲げ破断確率より十分小さいことが分かる。

これより、曲げ入射装置、曲げ受光装置の光ファイバ曲げ部の光ファイバ心線の破断確率は非常に小さく実用上問題ないことが分かる。

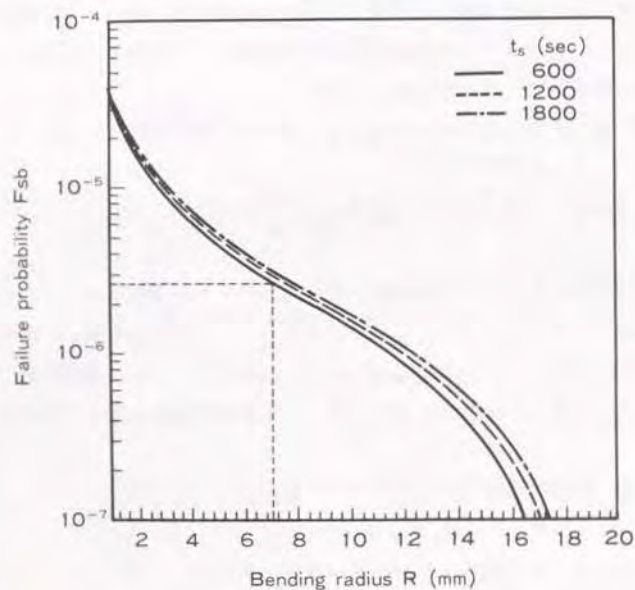


図3-4 光ファイバ曲げ半径と破断確率

### 3.4 心線対照系の光学設計

#### 3.4.1 曲げ入射特性

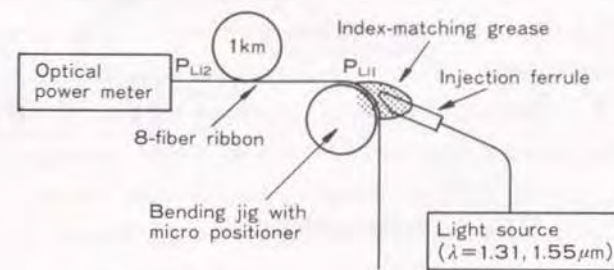
図3-5に示す測定系を用いて、光源波長 $1.31 \mu\text{m}$ と $1.55 \mu\text{m}$ に対する曲げ入射効率と曲げ半径の関係を検討した。この図から、曲げ入射効率は次式で与えられる。

$$\eta_{Li} = P_{Li2} - P_{Li1} \quad (3-3)$$

ここで、 $P_{Li1}$ は曲げ入射用フェルールから放射する光パワー、 $P_{Li2}$ は光ファイバ端面から出射する出射光パワーである。測定結果を図3-6に示す。図3-6から、一例として、曲げ半径7mm、光源波長 $1.31 \mu\text{m}$ と $1.55 \mu\text{m}$ の時、曲げ入射効率の平均値はそれぞれ-54dBm、-44dBmであった。これより、光ファイバ曲げ半径が大きくなるほど、また、光源波長が長くなるほど、曲げ入射効率は増加することが分かる。

#### 3.4.2 曲げ受光特性

図3-7に曲げ受光結合効率の測定系を示す。光減衰器を介してSM型光ファイバに入射した光を曲げ受光し、O/E変換された信号を増幅し、選択レベルメータ



$$\eta_{Li} = P_{Li2} - P_{Li1}$$

図3-5 曲げ入射効率測定系

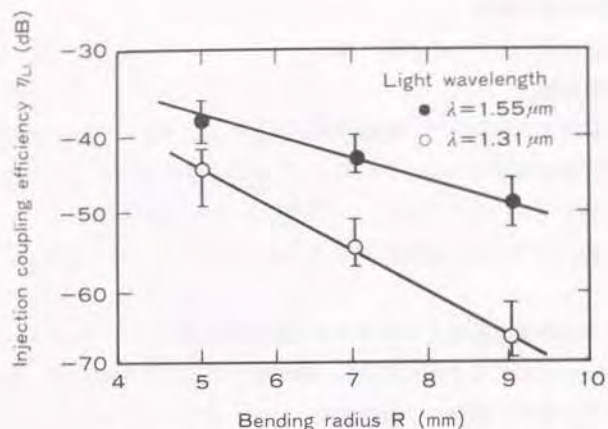


図3-6 曲げ入射効率

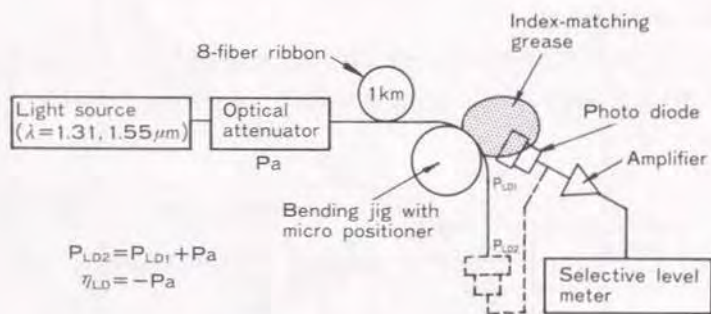


図3-7 曲げ受光効率測定系

の値を  $P_{LD1}$  (dBm) とする。また、S M 型光ファイバの出射端を直接受光したときの選択レベルメータの値を  $P_{LD2}$  (dBm) とする。  $P_{LD2} - P_{LD1}$  となる光減衰器の値を曲げ入射効率  $\eta_{LD}$  とし、測定結果を図3-8に示す。図から、例えば曲げ半径7mm、

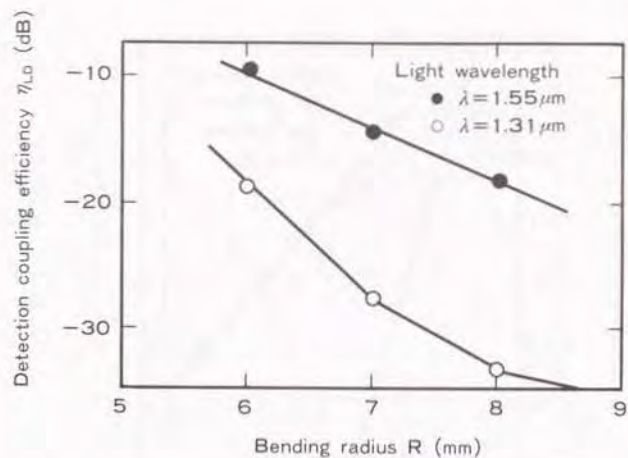


図3-8 曲げ受光効率

光源波長1.31 μm と1.55 μm の時、曲げ受光効率はそれぞれ-28dBm、-14dBmであった。これより、光ファイバ曲げ半径が大きくなるほど、また、光源波長が長くなるほど、曲げ受光効率は増加することが分かる。

### 3.4.3 曲げ入射/曲げ受光特性

図3-6と図3-8から、光ファイバ曲げ半径と曲げ入射/曲げ受光効率の関係を図3-9に示す。曲げ半径7mm、光源波長1.31 μm と1.55 μm の時、曲げ入射/曲げ受光効率  $\eta$  はそれぞれ-80dBm、-57dBmとなる。これより、光源波長1.55 μm に対する結合効率  $\eta$  は1.31 μm より大きく取れることがわかる。結合効率  $\eta$  と曲げ半径の関係から、曲げ半径が小さくなると結合効率が大きくなること分かる。心線対照システムに対する適用距離  $n$  と結合効率  $\eta$  (dB) の関係は次式で与えられる。

$$\eta = \eta_{LD} + \eta_{LD} \quad (3-4)$$

$$P_{min} < P_{out} + \eta - n \cdot d \quad (3-5)$$

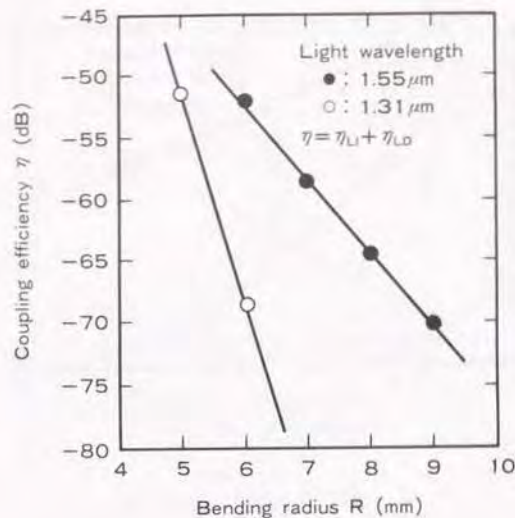


図3-9 曲げ半径と曲げ入射/受光効率

ここで、 $\eta_{LI}$  (dB)は曲げ入射効率、 $\eta_{LD}$  (dB)は曲げ受光効率、 $P_{min}$  (dBm)は最小受光レベル、 $P_{out}$ は光源出力光パワー、 $d$ は光線路損失を示す。式(7)と図3-9をもとに、曲げ半径と適用距離の関係を図3-10に示す。曲げ半径7mm、対照信号光波長を1.55  $\mu\text{m}$ としたとき、適用距離は21kmとなる。

曲げ入射装置の光ファイバ曲げ部、曲げ入射フェルール、微動装置の構造を図3-11に示す。対照信号光を光ファイバテープの各光ファイバ心線に入射するため曲げ入射用フェルールは微動装置により調整され、光ファイバテープの幅方向に走査される。曲げ受光装置の大きさは140×50×158mmである。

曲げ受光装置は図3-12に示す様に光ファイバ曲げ部、シャッタと受光素子により構成される。光ファイバ内の光ファイバ心線の線番を確認するために、曲げられた光ファイバテープと受光素子の間にシャッタが挿入されている。曲げ受光装置の大きさは175×25×33mmである。

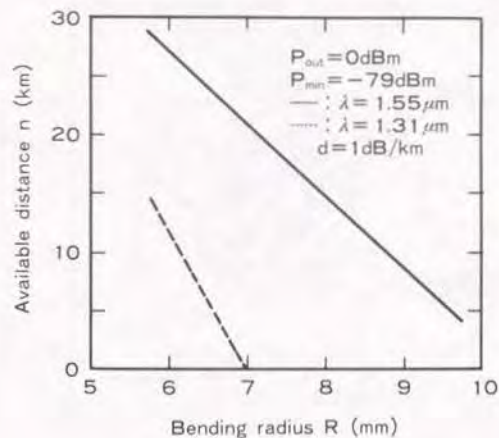


図3-10 曲げ半径と適用距離

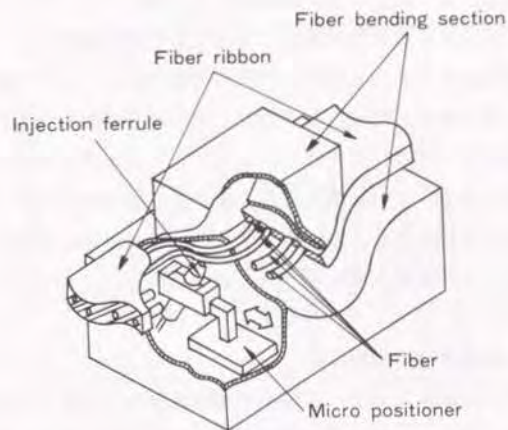


図3-11 曲げ入射装置構成例



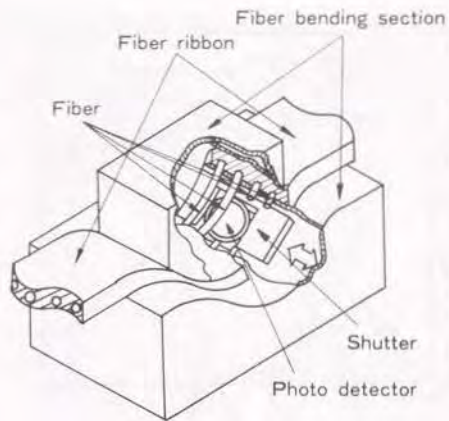


図 3-12 曲げ受光装置構成例

### 3.5 線番確認機能の光学設計

4心あるいは8心光ファイバテープの線番確認を目的として、光ファイバテープ表面の半分を覆うシャッタを曲げ受光装置の受光素子と曲げ部光ファイバテープ間に挿入する。心線対照光は光ファイバテープ内の両端の光ファイバ心線のいずれかに伝搬させ、シャッタを動かした時の曲げ受光レベルの違いによって光ファイバテープ内の線番確認を行う。曲げ受光パワーレベルとシャッタを動かした時の曲げ受光レベル差の関係を図3-13に示す。この図より、曲げ受光パワーが-80dBmの時、曲げ受光パワー差が9dBmである。これより、適用距離21kmにわたって光ファイバテープ内の光ファイバの線番を確認できることが分かる。

### 3.6 切替接続損失評価機能の光学設計

光ファイバテープ内の各光ファイバ心線の切替接続損失を判定するために、光ファイバテープの幅方向に沿って対照信号光を走査する必要がある。曲げ入射光源の走査時間と曲げ受光レベルの関係を図3-14に示す。図から対照信号光は各光ファイバ心線から放射される光パワーを受光できることが分かる。端面入射/端面出射光により測定した切替前後の接続損失と曲げ入射/曲げ受光により測定した切

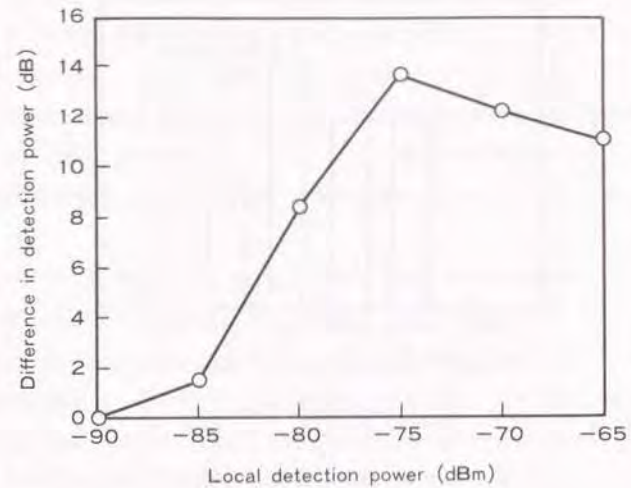


図 3-13 線番対照特性

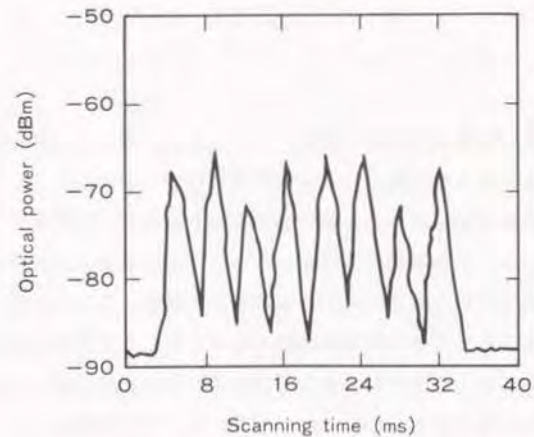


図 3-14 曲げ入射光走査による曲げ受光特性

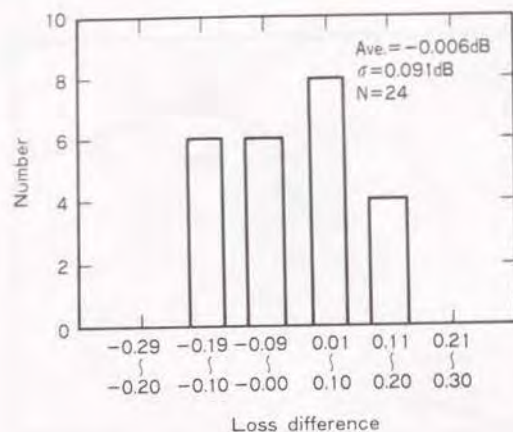


図 3-15 接続損失評価特性

替前後の接続損失との差を図 3-15 に示す。図 3-2 より、両者の接続損失差は 0.2dB であった。この結果、本システムにより切替接続損失を評価できることを確認した。

### 3.7 結言

現用回線の心線対照機能の実用化を目的として曲げ入射/曲げ受光系の光学設計と光学特性の解析を行った。得られた主な結果を以下に示す。

(1) 現用回線の心線対照に用いる心線対照フローを検討し、所要機能として①切替対象の光ファイバテープの識別を目的としたテープ対照機能、②切替区間内の接続部における接続の有無を判定するための線番対照機能、③コネクタ切替接続後、切替の成否を判定するための切替確認機能が必要なことを明らかにした。

(2) 現用回線を曲げるため曲げによる回線信号光 ( $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ ) への影響、曲げによる光ファイバ破断確率を明らかにした。現在、NTT が実用化している SM 型光ファイバパラメータにおいて曲げによる回線信号光の光損失を目標値 0.5dB 以下として検討した結果、曲げ半径を 7mm 以上にすることにより目標値を満足できることが分かった。また曲げ半径と光ファイバ破断確率について検討し、曲げ時間 10分、

曲げ半径 7mm のとき、曲げにより約 26 万回に 1 回 ( $F_{0.5} = 3.8 \times 10^{-5}$ ) 破断し、これはクロージャ内の余長処理心線に与えられた破断確率 ( $3.85 \times 10^{-5}$ ) より十分小さいことを明らかにした。

(3) 心線対照系の設計を目的として、曲げ入射機能設計条件と曲げ受光機能設計条件を明らかにした。その結果を用いて曲げ入射/曲げ受光機能設計を行い、曲げ半径 7mm、対照信号光波長  $1.55 \mu\text{m}$  を用いる適用距離は 21km となることを明らかにした。

(4) 曲げ入射/曲げ受光を用いた心線対照系に要求される所要機能の検討を行った。曲げ部の光ファイバテープと受光素子の間にシャッタを挿入し、シャッタにより光ファイバテープの反面を覆った時のレベル差から対照信号光の伝搬している心線位置の確認が可能であることを示した。さらに、曲げ入射/曲げ受光、端面入射/端面受光による切替接続損失差は、0.2dB 程度であり、曲げ入射/曲げ受光により切替確認が十分可能であることを明らかにした。

## 第4章 心線対照実用装置の機能と評価

### 4.1 緒言

光ファイバケーブルの支障移転やケーブル統合等の工事は年々増加し、これらの工事に伴う心線切替作業は夜間、長時間の回線借用中に手切替により行われている。光線路の多大な情報伝送能力のため、長時間の回線借用を行う事が年々困難になる状況にあり、工事計画における回線借用調整には多くの稼働を費やしている。

光ファイバ切替接続システムはこの様な問題を解決するため、サービス中の現用心線を瞬時に新設心線に切替る切替接続システムであり、計画的な切替接続作業が可能となり、サービス性の向上、工期の短縮、回線借用稼働の削減等が期待できる。

本システム構成技術の中で、作業性を高め信頼性を確保するうえで、異なる切替点において切替対象の現用心線を確実に能率良く対照でき、また、切替前後の接続部の評価も行える心線対照技術はきわめて重要な役割を担っている。

現在まで、光ケーブル後分岐接続<sup>1)</sup>等において現用回線を含む光ケーブルから空き光ファイバテープを対照するための心線対照法について検討されている<sup>2)</sup>。しかし、光ケーブルの切替接続を目的とした現用回線的心線対照を行う心線対照装置のシステム構成、要求機能等について検討されていない。

このため、筆者らはサービス中の現用回線的心線対照を目的とした心線対照装置の検討を進めてきた。<sup>3)</sup> 本章では、光ファイバ切替接続システムに用いる心線対照装置の構成として曲げ入射/曲げ受光方式と端面入射/曲げ受光方式の2種類の対照システムを提案し、それらの適用条件、要求機能について検討し、心線対照装置の設計と対照特性を明らかにした。

### 4.2 心線対照実用装置の適用形態

光ファイバ切替接続システムは操作性、保守性、安全性、信頼性等を考慮しつつ、効率的かつ確実に既設光ファイバケーブルの現用回線を新設光ファイバケーブルへコネクタ単位で切替接続を行うシステムである。

光ファイバ切替接続システム用心線対照装置のシステム構成を整理すると、次に示す2種類の対照方式が考えられる。

(1) 切替点において対照信号光を曲げ入射、曲げ受光する心線対照方式(以下曲げ入射/曲げ受光方式と記す)

(2) 局内の光カップラ<sup>4)</sup>の分岐ポートから対照信号光を入射し、切替点において曲げ受光する心線対照方式(以下端面入射/曲げ受光方式と記す)

各対照方式に対する適用形態の検討結果を表4-1に示す。表4-1より(1)に示した曲げ入射/曲げ受光方式は、切替直後に損失測定が可能のため、作業手順の低減、作業時間の短縮というメリットがある。しかし、曲げ入射点において切替対象光ファイバテープの選択を行うため、対照された光ファイバテープが切替対象のテープ番号であることへの信頼性に問題がある。(2)に示した端面入射/曲げ受光方式は、局内より対照信号光を入射するため、伝送装置間のテープ番号の信頼性は高い。しかし、局内に人を配置するため、作業点、作業人員が増え、作業点間の連携が煩雑になるデメリットがある。

テープ番号確認の精度に対する要求条件は、現用で使用している回線を切替えるためにユーザとの間で取り交わす回線借用形態に依存する。数時間に1度あるいは2度の瞬断が生じることを前提に回線借用可能であればケーブル全体を切替えることが可能であるため、切替対象回線の絶対的なテープ番号確認の必要性は小さくなると考えられる。また、数分に1度あるいは2度の瞬断を前提とする場合には、切替対象回線を十分に把握する必要がある、絶対的なテープ番号確認の必要性は大きくなると考えられる。

以下、2種類の心線対照方式のシステム構成について検討を進める。

表 4-1 心線対照装置の適用形態

機能構成	テープ対照	線対照	切替判定		特徴
			1次	2次	
曲げ入射／曲げ受光方式 (LI/LD方式)	LI/LD	LI/LD	LI/LD		<ul style="list-style-type: none"> <li>作業人員：少ない</li> <li>作業点数：2点</li> <li>テープ番号確認の信頼性：低い</li> </ul>
端面入射／曲げ受光方式 (EI/LD方式)	EI/LD	EI/LD	OCU 75-4 監視	OTDR	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業人員：多い</li> <li>作業点数：3点</li> <li>テープ番号確認の信頼性：高い</li> </ul>

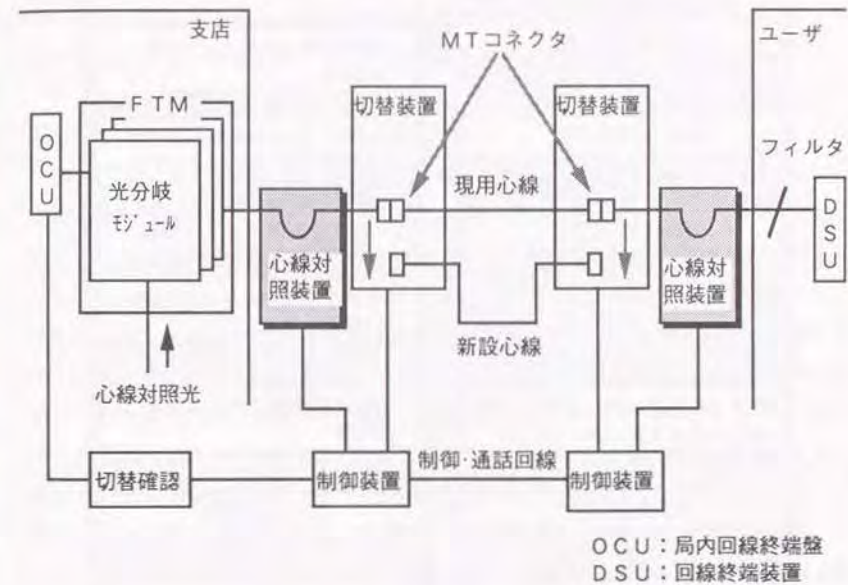
LI:Local Injection                      OCU:Office Channel Unit  
 LD:Local Detection                  OTDR:Optical Time Domain Reflectometer  
 EI:End-face Injection

4.3 心線対照実用装置の所要機能

4.3.1 曲げ入射／曲げ受光方式の所要機能

曲げ入射／曲げ受光方式を用いた光ファイバ切替接続システムの基本構成を図4-1に示す。心線対照装置は切替点(A)において切替対象の光ファイバテープに対照信号光を入射するための曲げ入射装置と切替点(B)において対照信号光を受光するための曲げ受光装置から構成される。次に、心線対照方法を図4-2に示す。

異なる切替点(A)、(B)2点間で打ち合わせ回線を設定した後、切替点(A)において切替対象光ファイバテープを選定し、曲げ入射装置により対照信号光を該当光ファイバテープ内の心線に入射する。切替点(B)において、該当する切替対象の光ファイバテープのテープ対照を行い、次に、切替区間内の接続の有無を判断するための線番対照を行う。さらに、光ファイバテープ内全心線の対照信号光レベルの測定(L1)を行い、サービス中の既設心線の心線対照を終了する。次に、切替点(A)において新設光ファイバテープを選定し、対照信号光を入射する。切替点(B)において該当光ファイバテープのテープ対照を行い、新設光ファイバテープの心線対照を終了する。



OCU：局内回線終端盤  
 DSU：回線終端装置

図 4-1 光ファイバ切替接続システムの基本構成

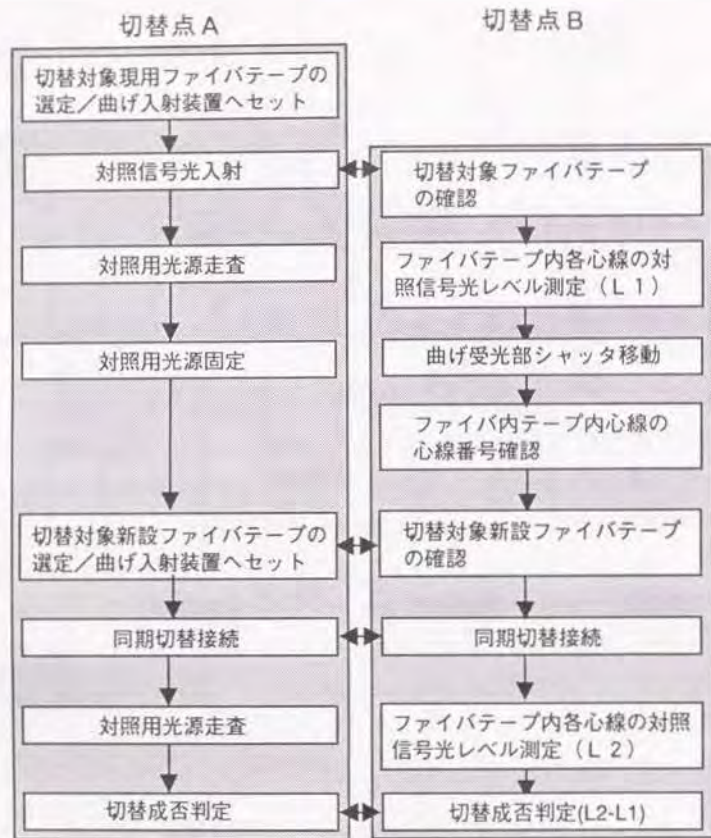


図 4-2 曲げ入射/曲げ受光方式を用いた心線対照フロー

次に、既設と新設のMTコネクタ (Mechanically Transferable optical connector) を切替装置にセットし、切替を行う。切替終了後、切替点 (B) において光ファイバテープ内全心線の対照信号光レベルの測定 (L2) を行い、切替前後の対照信号光レベル差から切替成否の判定を行う。

上記対照方法から、曲げ入射/曲げ受光方式に要求される機能は、切替対象となる光ファイバテープの識別機能、光ファイバテープ内心線の線番確認機能、切替成否判定のための光ファイバテープ内全心線のレベルモニタ機能となる。さらに、対照信号光と回線信号光に対する切替接続部評価法を明らかにする必要がある。

#### 4.3.2 端面入射/曲げ受光方式の所要機能

端面入射/曲げ受光方式による心線対照方法は、一部の局に導入されている光線路試験監視システム<sup>13)14)</sup> (AURORA: Automatic Optical Fiber Operation Support System) を用いて、局内の光分岐モジュール (光カップラ) から心線対照光を入射し、切替作業点において曲げ受光装置を用いてテープ対照、線番対照を行う。図 4-1 より、心線対照装置は局内の光分岐モジュールより対照信号光を入射するための光源、切替点 (A)、切替点 (B) に対照信号光を受光するための曲げ受光装置により構成される。端面入射/曲げ受光方式を用いた対照方法を図 4-3 に示す。局内の対照信号光入射点、切替点 (A)、(B) 間で打合わせ回線を設定した後、局内において切替対象光ファイバテープを選定し、対照信号光を光ファイバテープ内の光ファイバ心線 1 心に入射する。切替点 (A)、(B) において該当光ファイバテープのテープ対照、線番対照を行う。次に、新設テープの心線対照、既設と新設の切替接続を行う。切替終了後、局内の伝送装置の通信状態を確認する (1 次判定)。切替直後あるいは後日、OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) を用いて切替点の接続損失の測定を行い、データベースの線路データと比較し、切替成否の判定 (2 次判定) を行う。

これより、端面入射/曲げ受光方式に要求される機能は切替対照となる光ファイバテープの識別機能、光ファイバテープ内心線の線番確認機能が必要となる。さらに、OTDR により 2 次判定する場合の保守波長 (1.55 μm) と回線信号光波長 (1.31 μm) に対する切替接続部評価法を明らかにする必要がある。

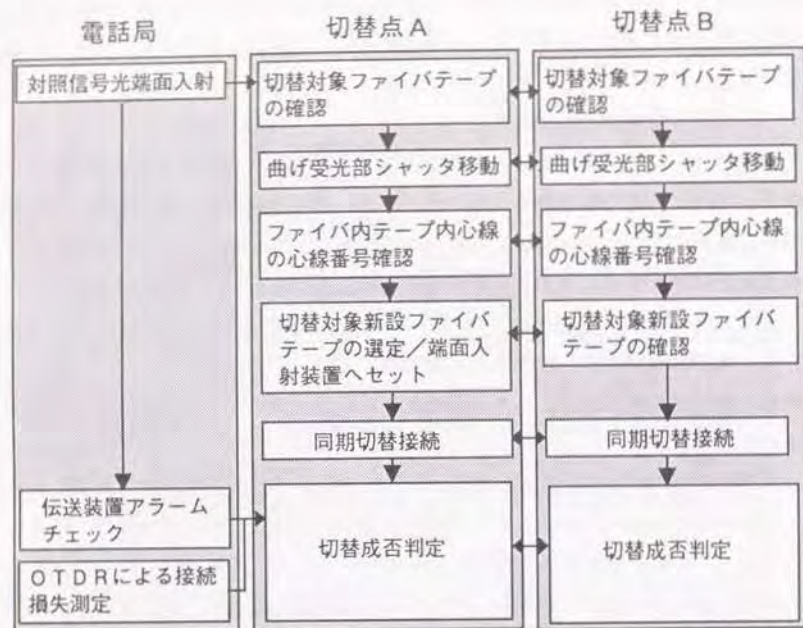


図4-3 端面入射/曲げ受光方式を用いた心線対照フロー

#### 4.4 実用装置のシステム設計

##### 4.4.1 曲げ入射/曲げ受光方式の所要値

曲げ入射効率、曲げ受光効率と心線対照方式の適用距離の関係を式(4-1)に示す。

(4-1)

$$P_{min} < P_{out} + (\eta_{in} + \eta_{out}) - n \cdot d_L \quad (4-1)$$

$P_{min}$  (dBm)は受光素子の最小受光レベル、 $P_{out}$  (dBm)は発光素子の光出力、

$n$  (km)は適用距離、 $d_L$  (dB)は線路損失を示す。 $P_{in}$  を-79dBm、 $P_{out}$  を0dBm、片端コネクタ付ケーブルを想定し1.5km 間隔でコネクタ接続と融着接続が交互に存在すると適用距離  $n$  は3km、 $d_L$  を1dB/kmとすると、要求される曲げ入射効率と曲げ受光効率の和 ( $\eta_{in} + \eta_{out}$ ) (dB)は、式(1)より-76dB 以上となる。

##### 4.4.2 端面入射/曲げ受光方式の所要値

端面入射装置と曲げ受光装置を用いた心線対照方式の適用距離の関係を式(4-2)に示す。<sup>12)</sup>

$$P_{min} < P_{in} + \eta_{in} - \alpha_{co} - n \cdot d_L \quad (4-2)$$

ここで、 $P_{min}$  (dBm)は最小受光レベル、 $P_{in}$  (dBm)はSM型光ファイバ内入射レベル、 $\eta_{in}$  (dB)は曲げ受光効率、 $\alpha_{co}$  (dB)は光カプラの分岐側ポートから通信側ポートへ結合するための結合損失、 $n$  は適用距離、 $d_L$  は線路損失を示す。

$P_{in} = -79$ dBm、 $P_{out} = -15$ dBm、 $\alpha_{co} = 8$ dB、 $n = 20$ km、 $d_L = 1$ dB/kmとした時、要求される曲げ受光効率は式(4-2)より-36dB 以上必要であることが分かる。

#### 4.5 曲げ入射装置の光学設計と入射特性

##### 4.5.1 曲げ挿入損失

光ファイバテープの曲げ半径を7mm、曲げ長さを5mmとした曲げ入射装置及び曲げ受光装置の回線信号光 ( $1.31 \mu\text{m}$ )に対する曲げ挿入損失を測定し、結果を図4-4、図4-5に示す。図4-4、図4-5より、曲げ入射装置の曲げ挿入損失は、平均0.17dB、最大0.36dB、曲げ受光部の曲げ損失は、平均0.06dB、最大0.09dBとなり、1ヶ所当たりの曲げ挿入損失の目標値0.5dBを十分満足できることが分かった。また、曲げ入射装置の曲げ挿入損失が大きいのは、SM型光ファイバテープの被覆と光ファイバ心線の密着度を上げるため、曲げ部の光ファイバテープに側圧を加えているためと考えられる。

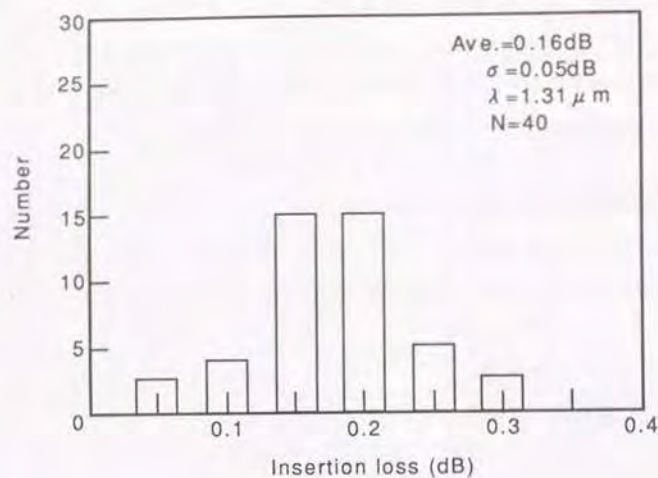


図 4-4 曲げ入射装置の挿入損失分布

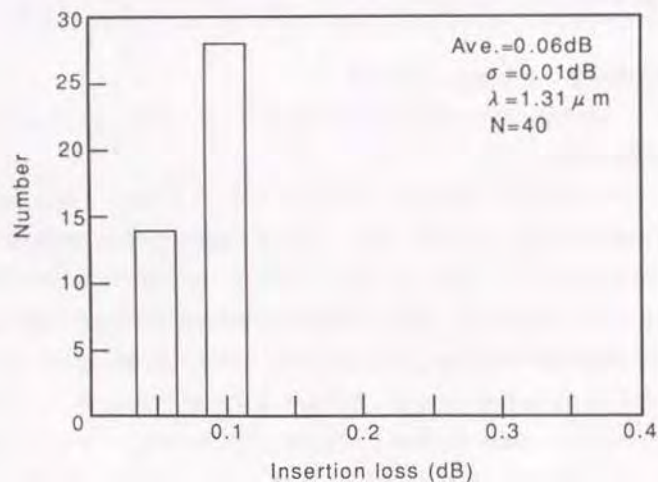


図 4-5 曲げ受光装置の挿入損失分布

#### 4.5.2 対照信号光波長の選定

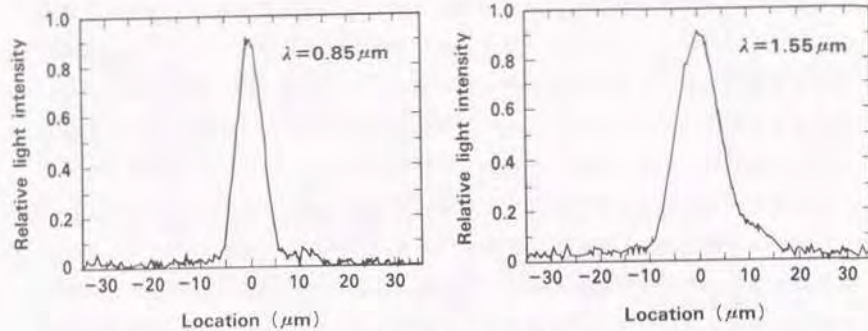
最適な曲げ入射用光源波長を選定するため、信頼性、価格の面で実用性に優れている  $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$  の 3 波長についてそれぞれ対照特性の検討を行った。対照信号光波長が  $0.85\mu\text{m}$  の場合、加入系に適用されている回線信号光波長  $1.31\mu\text{m}$  と比較して受光素子の量子効率が小さく対照信号光として大きな入射レベルを確保できる。 $1.31\mu\text{m}$  の場合には、回線信号光波長と同一波長となるため回線信号に影響を与えない入射レベルに制御する必要がある。また、 $1.55\mu\text{m}$  の場合には、D S U (Digital Service Unit) の手前にある光フィルタ<sup>(13)</sup>により光レベルが減衰されるため大きな入射レベルを確保できる。曲げ入射光の波長  $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$  に対する 1km 伝搬後の S M 型光ファイバ内曲げ入射光のニアフィールド分布の測定を行った。その結果を図 4-6 に示す。図 4-6 から、曲げ入射光源波長  $0.85\mu\text{m}$  のニアフィールド分布は 2 モード状態となり、クラッド部への漏洩が大きいため、伝搬損失の増加、曲げ入射光レベルの変動を生じると考えられる。このため、曲げ入射光源は  $1.31\mu\text{m}$  と  $1.55\mu\text{m}$  のいずれかとなるが、 $1.55\mu\text{m}$  の光源では  $1.31\mu\text{m}$  の光源と比較して曲げ入射効率と曲げ受光効率を大きくとれること<sup>(14)</sup>、入射レベル調整の必要がないことを考慮し心線対照用光源の波長に  $1.55\mu\text{m}$  を採用した。

#### 4.5.3 曲げ入射効率

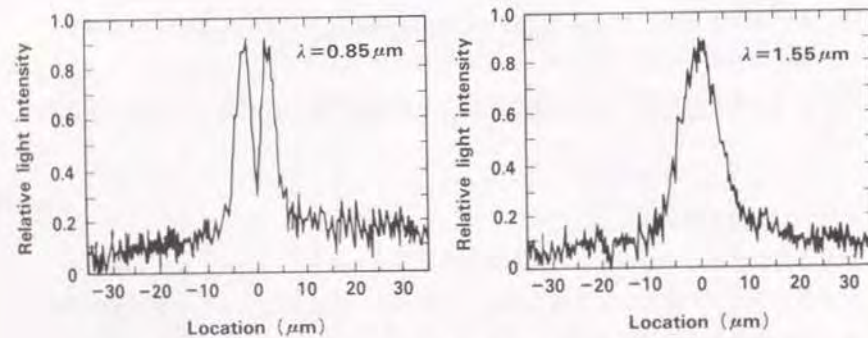
曲げ入射装置から出射される対照信号光の光出力を  $P_{L11}$  (dBm)、1km 伝搬後の S M 型光ファイバ端面から出射される光出力を  $P_{L12}$  (dBm) とすると、曲げ入射効率  $\eta_{L1}$  (dB) を次式で表現する<sup>(15)</sup>。

$$\eta_{L1} = P_{L12} - P_{L11} \quad (4-3)$$

式(4-3) の関係を用いて、曲げ入射効率の測定を行い、結果を図 4-7 に示す。図 4-7 より、曲げ入射効率の平均値  $-44.68\text{dB}$ 、標準偏差  $1.48\text{dB}$ 、最大値  $-41.61\text{dB}$ 、最小値  $-47.98\text{dB}$  であることが分かった。



(a) End-face injection



(b) Local injection

図4-6 端面入射光と曲げ入射光のニアフィールド分布

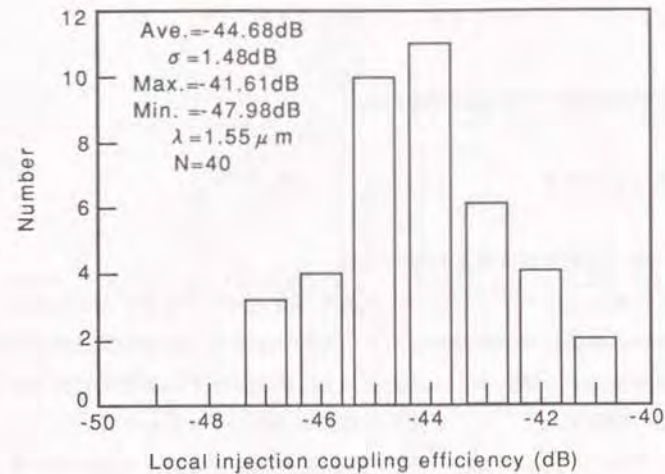


図4-7 曲げ入射効率分布

#### 4.5.4 クラッドモードカッタ

曲げ入射により生じるクラッドモードの対照信号光はコネクタ接続部でコアモードにモード変換されるため、曲げ受光時に対照光レベル変動の原因となる。このため、曲げ入射した直後にクラッドモード成分を効率良く放射させる補助曲げ部（以下クラッドモードカッタと記す）を設ける必要がある。<sup>(127)</sup>ここでは、クラッドモードカッタの曲げ半径とその効果を示す。

S M型光ファイバテープを曲げ入射装置及び曲げ受光装置で把持し、クラッドモードカッタを挿入しない時、曲げ半径をそれぞれ  $R_c = 10, 20, 30, 40$  mmのクラッドモードカッタを挿入した時の曲げ入射/曲げ受光方式の対照信号光のレベル変動を測定した。測定結果を図4-8(a)から(e)に示す。図4-8から、曲げ半径20 mmの時、最も偏差が少なく、効果的にクラッドモード光を光ファイバテープの外へ放射可能であることが分かる。また、曲げ半径が10 mmの時、曲げ入射光のクラッドモード光はファイバの外へ放射するがコアモードとして伝搬している成分の一部がクラッドモード成分に変換されるため、クラッドモードカッタの効果が小さくなっていると考えられる。また、曲げ半径40 mm、50 mmの場合にはクラッドモード光



を光ファイバ外へ十分に放射できないと考えられる。

#### 4.6 曲げ受光装置の光学設計と受光特性

##### 4.6.1 曲げ受光効率

###### 4.6.1.1 曲げ受光効率の受光位置依存性

曲げ部より光ファイバテープの外へ放射する対照信号光を効率良く受光するために図4-9に示す曲げ受光特性測定系を用いて最適な受光条件の検討を行った。測定結果を図4-10(a)から(d)に示す。同図(a)は $\theta$ 方向の受光角度と曲げ受光効率の関係を示す。(a)から最適な受光角は20度程度であることが分かる。また、同図(b)、(c)はそれぞれX方向の移動量、Y方向の移動量と曲げ受光効率の関係を示す。(b)、(c)から、X方向、Y方向に対して最適位置から0.5mm変位すると曲げ受光効率は10dB程度減少することが分かる。さらに、同図(d)はZ方向の移動量と曲げ受光効率の関係を示す。(d)からZ方向の受光効率の変化は、X方向、Y方向の移動量に比較して小さく、1mmの変化に対して0.6dB程度の変化であることが分かる。

これより、受光素子の位置の設定には、 $\theta = 20$ 度とし、X、Y方向の位置合わせを精度良く行う必要があると考えられる。また、Z方向の変位に対する曲げ受光効率の変化は小さいため、SM型光ファイバと受光素子の間に線番対照用スリットの挿入が可能であることが分かる。

###### 4.6.1.2 曲げ受光効率

図4-11に示す測定系を用いて曲げ受光効率の測定を行った。SM型光ファイバ端面より波長 $1.55\mu\text{m}$ の対照信号光を入射し、SM型光ファイバから出射する光出力 $P_{F1}$ を測定する。次に、曲げ受光装置で光ファイバテープの出射端面近傍を把持し、曲げ受光パワー $P_{LD1}$ を測定する。ここで端面入射光に対する曲げ受光効率 $\eta_{LD1}$ は式(4-4)で表せる。また、SM型光ファイバテープを曲げ入射装置に把持し、対照信号光を曲げ入射した時の端面から出射する光出力 $P_{F1}$ を測定する。次に、曲げ受光装置で出射端面近傍を把持し、曲げ受光パワー $P_{LD1}$ を測定する。

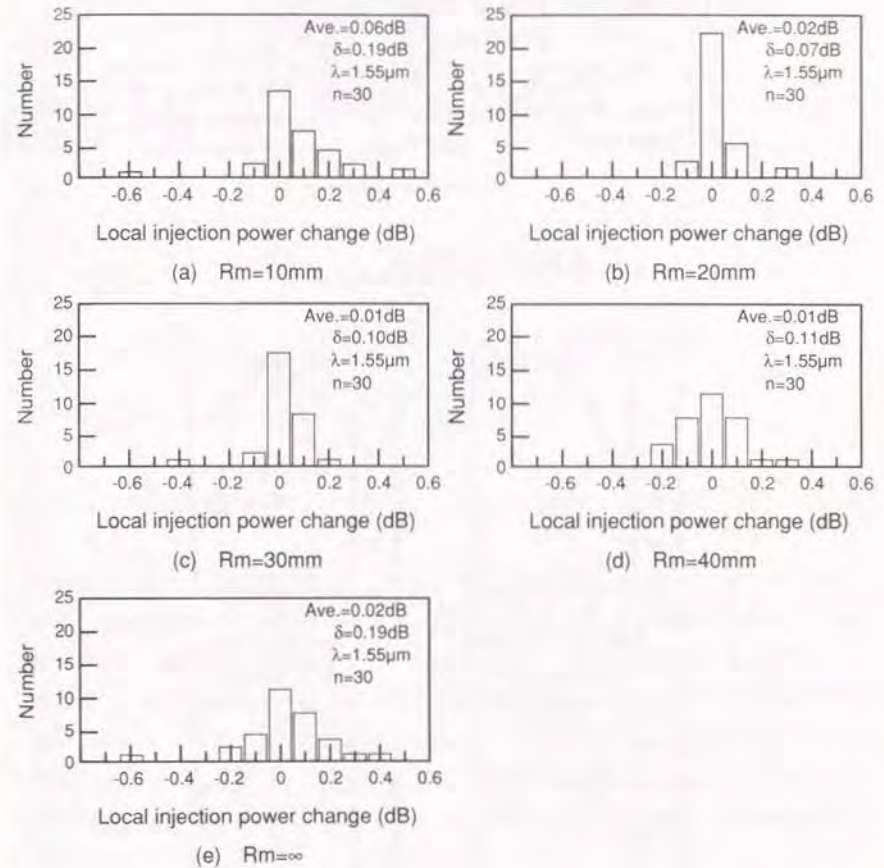


図4-8 曲げ入射光パワー変動とクラッドモードカット曲げ半径 $R_m$

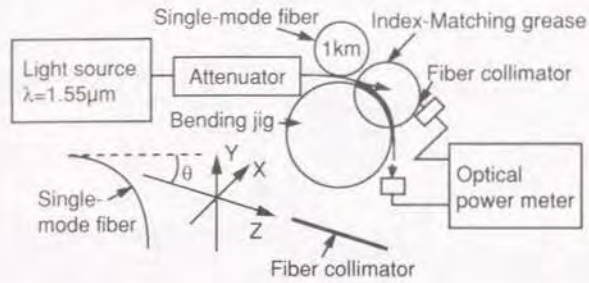


図 4-9 曲げ受光特性測定系

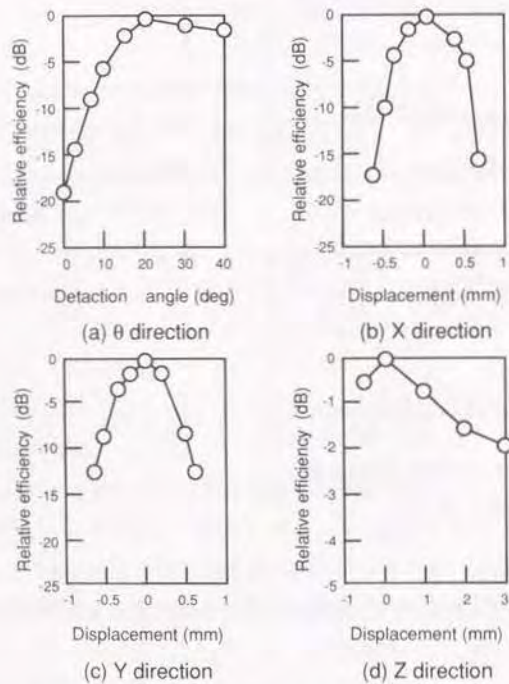


図 4-10 曲げ受光特性

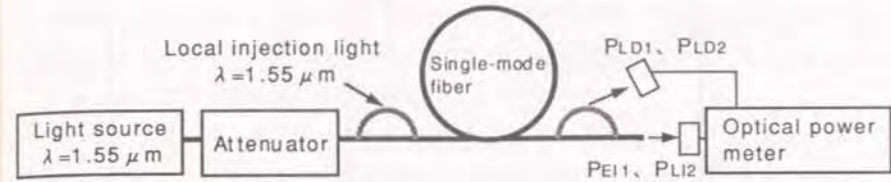


図 4-11 曲げ受光効率測定系

ここで曲げ入射光に対する曲げ受光効率  $\eta_{LD1}$  (dB) は式(4-5)となる<sup>(3)</sup>。

$$\eta_{LD1} = P_{LD1} - P_{E1} \text{ (dB)} \quad (4-4)$$

$$\eta_{LD2} = P_{LD2} - P_{L12} \text{ (dB)} \quad (4-5)$$

曲げ入射光は、SM型光ファイバ内を伝搬する光パワーが小さいため、光ファイバテープ被覆表面における対照信号光の散乱を防ぐため、屈折率整合剤をテープ被覆に塗布して測定を行った。また、端面入射光は、入射する対照信号光が大きくなるのでSM型光ファイバテープに屈折率整合剤を塗布することなく測定を行った。曲げ入射光及び端面入射光に対するSM型光ファイバテープの曲げ受光効率をそれぞれ図4-12、図4-13に示す。曲げ受光効率は曲げ入射光に対して平均-17.3dBm、標準偏差0.98dBm、端面入射光に対して平均-24.01dBm、標準偏差0.08dBとなる。

第4.5.3節及び第4.6.2.2節から、曲げ入射/曲げ受光方式に対する曲げ入射効率と曲げ受光効率の和の最小値は-67.32dB、また、端面入射/曲げ受光方式に対する曲げ受光効率の最小値は-27dBとなり、第4章で示した各対照システムの所要値以上確保できることが分かる。

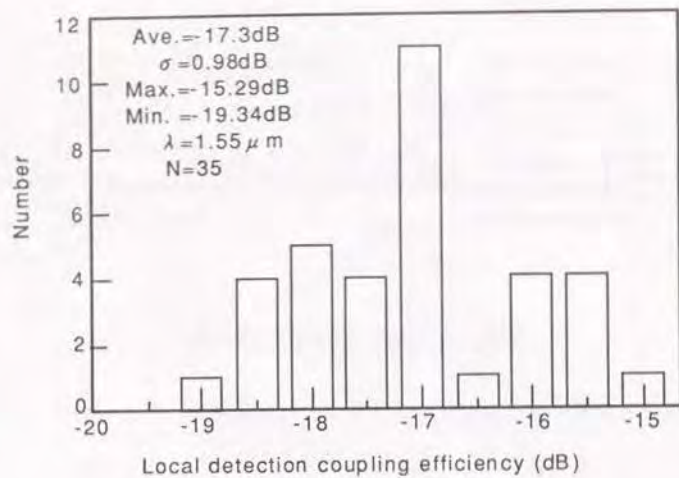


図 4-12 曲げ入射光に対する曲げ受光効率分布

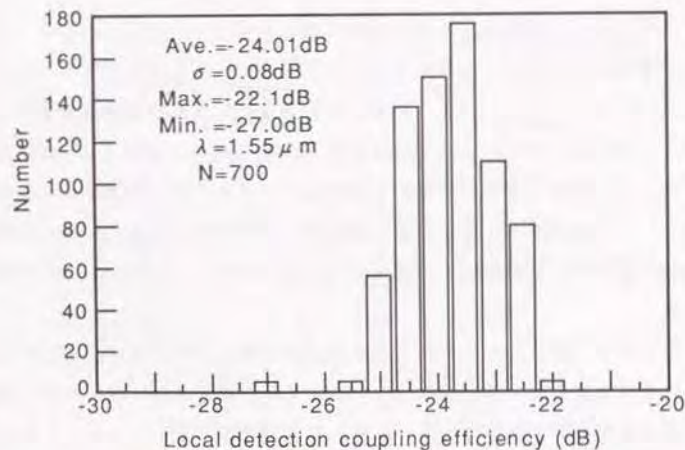


図 4-13 端面入射光に対する曲げ受光効率分布

#### 4.6.2 線番対照機能

光ファイバ内の光ファイバ心線番号を確認するため光ファイバテープと受光素子の間にシャッタを設け、シャッタを動かした時の受光素子に受光される対照信号光のレベル変化から対照信号光が入射されている心線位置を判定し、切替点2か所のシャッタ位置から接続の有無を判定する。

各光ファイバテープの光ファイバ心線にはテープ番号の識別を行うために色分けされている。このテープの色を基準にして光ファイバテープの把持方向を2ヶ所の切替点で統一することにより、表4-2に示すように2切替点内にある接続部の接続の有無を判定する。

表 4-2 接続の評価

接続の有無	対照光確認スリット位置	
	切替点 A	切替点 B
有	A	B
	B	A
無	A	A
	B	B

(A、Bはスリット位置を示す)

図4-14は線番対照用シャッタの動作を示す。図4-14(a)は、シャッタ全開の状態を示し、この時の受光パワーを $P_0$ 、(b)は対照信号光が伝搬している光ファイバ心線をシャッタで覆った状態を示し、受光パワーを $P_1$ 、(c)は対照信号光が伝搬している光ファイバ心線と反対側を覆った状態を示し、受光パワーを $P_2$ とする。対照信号光パワーを変化させた時の $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ を測定し、光ファイバ内対照信号光レベルと曲げ受光レベル差 $(P_1 - P_0)$ 、 $(P_2 - P_0)$ の関係を図4-15に示す。光ファイバ内の対照信号光レベルは曲げ入射/曲げ受光方式が小さく、適用距離 $n = 3\text{km}$ 、線路損失 $d = 1\text{dB/km}$ 、 $P_{\text{out}} = 0\text{dBm}$ 、最小曲げ入射効率 $\eta_{10} = -47.98\text{dB}$ とするとファイバ内の対照信号光の最小レベルは $-50.98\text{dBm}$ となる。これより、図4-15から曲げ受光効率差は13dB程度確保できることから、この方法により線番対照が可能であることが分かる。

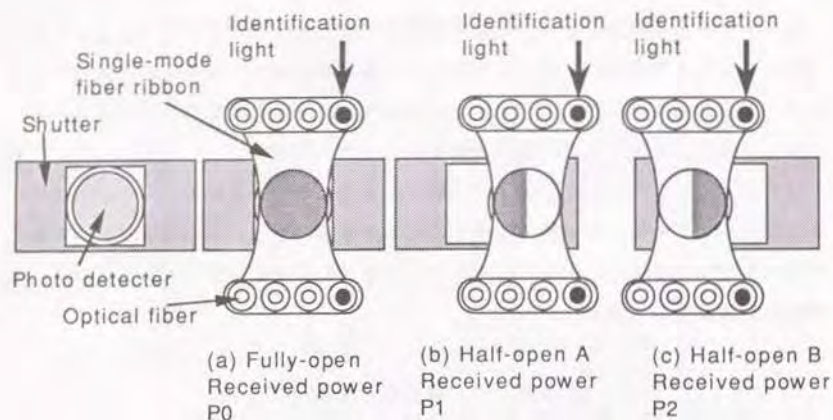


図 4-14 線番対照用シャッタの動作

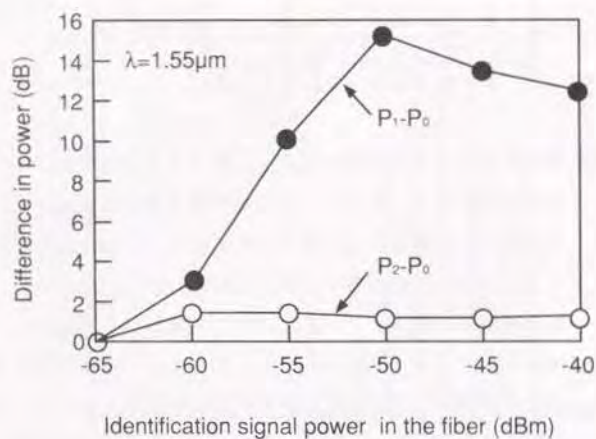


図 4-15 線番対照用シャッタ移動時の受光特性

#### 4.7 切替接続損失の評価

光ファイバ切替接続システムはサービス中の現用回線に適用するため、切替接続後に切替られたコネクタ接続部の接続損失を回線信号光波長 ( $1.31\mu\text{m}$ ) により評価することは不可能である。このため、コネクタ接続損失を回線信号光波長以外の保守波長 ( $1.55\mu\text{m}$ )<sup>11)</sup> を用いて評価する必要がある<sup>12) 14)</sup>。ここでは、曲げ入射/曲げ受光方式と OTDR による切替接続損失の評価結果を示す。曲げ入射/曲げ受光方式は、切替区間の切替前後の光損失差を測定し、切替後の通信状態を比較的短時間に評価可能である。また、OTDR は、測定に 1 心あたり数分の時間を要するが個々の切替点の接続損失の評価が可能である。このため、前者は切替直後の一次評価用として、後者は後日、接続状態確認用として有効である。

##### 4.7.1 曲げ入射/曲げ受光方式による切替接続損失評価

切替前後の接続損失評価を行うため、回線信号光 (光源波長  $1.31\mu\text{m}$ ) の接続損失と曲げ入射光 (光源波長  $1.55\mu\text{m}$ ) の接続損失の相関を明らかにする。曲げ入射/

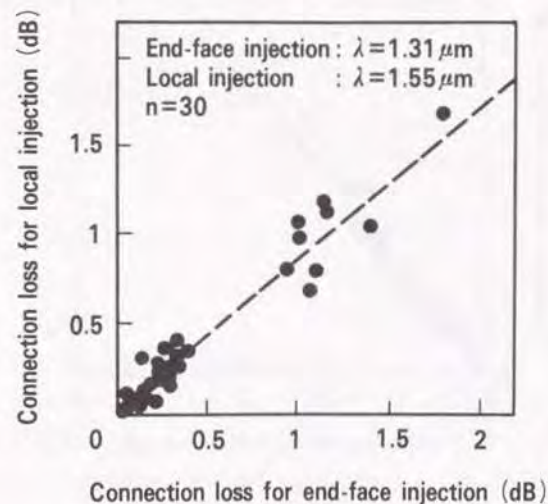


図 4-16 曲げ入射光による接続損失評価と端面入射光による接続損失の相関

曲げ受光方式によるコネクタ接続損失の測定、および光源波長 $1.31\mu\text{m}$ の端面入射光に対する端面入射/端面受光(光パワーメータ)方式によるコネクタ接続損失の測定を行い、結果を図4-16に示す。なお、曲げ入射/曲げ受光方式にはクラッドモードカッタ(曲げ半径 $20\text{mm}$ )を曲げ入射部と曲げ受光部に挿入した。

図4-16より曲げ入射/曲げ受光方式によるコネクタ接続損失と端面入射/端面受光(光パワーメータ)方式によるコネクタ接続損失には、

$$Y=0.85 \cdot X-0.01 \quad (\text{相関係数}0.96) \quad (4-6)$$

かなり深い相関があることが分かる。

これより、曲げ入射/曲げ受光方式を用いたコネクタ接続損失の測定により、回線信号光に対するコネクタ接続損失の評価が可能であることが分かる。

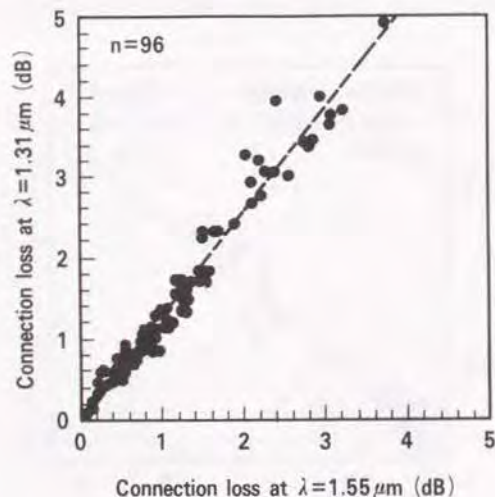


図4-17 OTDRを用いた光源波長 $1.31\mu\text{m}$ と $1.55\mu\text{m}$ の接続損失比較

#### 4.7.2 OTDRによる切替接続損失評価

コネクタ付き光ファイバテープの片端から、OTDRの光源波長 $1.31\mu\text{m}$ と $1.55\mu\text{m}$ に対するコネクタ接続損失を測定した。なお、コネクタ接続部は異社間接続とした。測定結果を図4-17に示す。両波長間には、

$$Y=1.29 \cdot X-0.03 \quad (\text{相関係数}0.99) \quad (4-7)$$

の関係があり、両波長についてかなり深い相関があることが分かる。

また、コネクタ接続時の接続損失は主に、軸ずれ、角度ずれ、界分布の不整合により生じる。<sup>13)</sup> 各要因に対する接続損失をそれぞれ、 $\alpha_s$ 、 $\alpha_c$ 、 $\alpha_r$ とおき、全接続損失を $\alpha$ とおくと、

$$\alpha_s = -10 \log \left\{ \frac{2W_1W_2}{(W_1^2+W_2^2)} \exp(-2d^2/(W_1^2+W_2^2)) \right\}^2 \quad (4-8)$$

$$\alpha_c = -20 \log \left\{ \frac{2W_1W_2}{(W_1^2+W_2^2)} \exp(-2(\pi n_s W_1W_2 \theta_c)^2 / (W_1^2+W_2^2) / \lambda^2) \right\} \quad (4-9)$$

$$\alpha_r = 20 \log \left\{ \frac{2W_1W_2}{(W_1^2+W_2^2)} \right\} \quad (4-10)$$

式(4-8)、(4-9)、(4-10)より、 $\alpha$ は式(4-11)で表される。

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_c + \alpha_r \quad (4-11)$$

ここで、 $W_1$ 、 $W_2$ は光ファイバのスポットサイズ、 $d$ は軸ずれ、 $n_s$ は屈折率整合剤の屈折率、 $\theta$ は角度ずれ量、 $\lambda$ は光源波長を示す。

式(4-8)から(4-11)により計算した結果を図4-18に示す。図4-18によると、コネクタ接続損失の比は $1.31\mu\text{m}$ と $1.55\mu\text{m}$ では約1.2倍 $1.31\mu\text{m}$ の方が大きくなり、式(4-7)の傾きに近い値になることが分かる。これより、OTDRを用いて $1.31\mu\text{m}$ のコネクタ接続損失と $1.55\mu\text{m}$ のコネクタ接続損失には理論値に近い相関で測定できることが分かる。

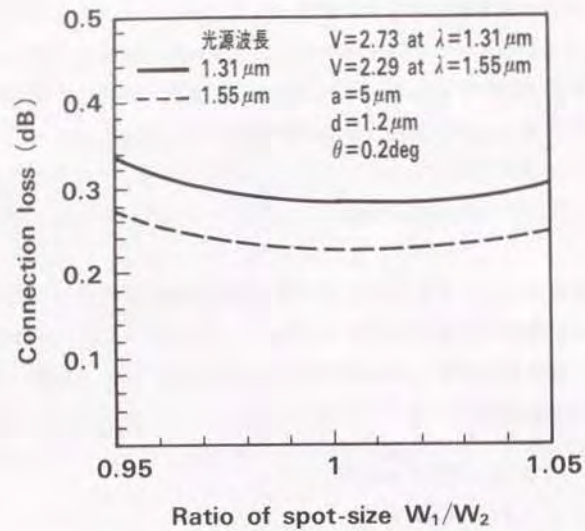


図 4-18 光ファイバスポットサイズ比と接続損失

#### 4.8 心線対照実用装置の評価

##### 4.8.1 曲げ入射/曲げ受光方式

心線対照実用装置として試作した装置の外観を図 4-19 に示す。

第 4.5.3 節から最小曲げ入射効率は  $-47.98\text{dB}$ 、第 4.6.2.2 から最小曲げ受光効率は  $-19.34\text{dB}$  となり、 $P_{\text{out}} = 0\text{dBm}$ 、 $P_{\text{in}} = -79\text{dBm}$ 、 $d = 1\text{dB/km}$  とすると、曲げ入射/曲げ受光方式を用いた心線対照装置の適用距離  $n$  は式(4-1) から  $11\text{km}$  程度となることが分かる。

##### 4.8.2 端面入射/曲げ受光方式

心線対照実用装置として試作した装置の外観を図 4-20 に示す。

第 4.6.2.2 節から最小曲げ受光効率は  $-27\text{dB}$  となり、 $P_{\text{out}} = -79\text{dBm}$ 、 $P_{\text{in}} =$



図 4-19 心線対照実用装置 (曲げ入射/曲げ受光方式)



図 4-20 心線対照実用装置 (端面入射/曲げ受光方式)

-15dBm、 $\alpha_c = 8\text{dB}$ 、 $d = 1\text{dB/km}$ とすると端面入射/曲げ受光方式を用いた心線対照装置の適用距離は式(4-2)より29km程度となることが分かる。

#### 4.8.3 光ファイバ切替接続システムへの適用

以上の検討結果から、曲げ入射/曲げ受光方式、端面入射/曲げ受光方式、2種類の心線対照方式について検討し、現用回線の切替接続を行う光ファイバ切替接続システムへ適用が可能であることが分かった。光ファイバ切替接続システムの外観図を図4-21に示す。今後、光ファイバ切替接続システムに要求される光ファイバテープ番号確認精度、作業人員構成等現場作業環境条件を明確し、光ファイバ切替接続システム運用上最適な心線対照方式を選定する。



図4-21 光ファイバ切替接続システムの外観図

#### 4.9 結言

本章では、心線対照実用装置の適用形態、所要機能、要求条件、対照特性と光学系の機能評価について論じている。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 心線対照実用装置の適用形態、所要機能の検討により、曲げ入射/曲げ受光方式、端面入射/曲げ受光方式を提案し、要求される所要機能を明確にした。
- (2) 曲げ入射装置の光学設計と入射特性として、曲げ挿入損失、対照信号光波長の選定、曲げ入射効率、クラッドモードカットの特性について明らかにした。
- (3) 曲げ受光装置の光学設計と受光特性として、曲げ受光効率、曲げ受光位置依存性、曲げ受光効率、線番対照機能について明らかにした。
- (4) 切替接続損失の評価として、曲げ入射/曲げ受光方式による切替接続損失評価、OTDRによる切替接続損失評価の検討を行い、光源波長 $1.55\mu\text{m}$ を用いて、 $1.31\mu\text{m}$ の通信波長の接続損失が評価可能であることを示した。
- (5) 以上の検討結果をもとに、各心線対照方式の評価を行い、曲げ入射/曲げ受光方式の適用距離は11km、端面入射/曲げ受光方式の適用距離は29kmであることを明らかにした。

## 第5章 光アクセス機能を有する心線対照用単一モード光コネクタ

### 5.1 緒言

光ファイバ回線の導入拡大に伴い、光経路の保守技術が重要視されつつある。光経路の保守技術の中で線路区間において建設、保守対象の光ファイバ心線を確認するための心線対照技術は重要な要素技術となる。道路工事に伴う光ケーブル切替工事や光加入者開通工事等により架空配線系における心線対照作業はますます増加すると考えられ、心線対照作業の効率化、作業性の向上は重要な検討課題となる。

このため、筆者らは将来への対照システムの改良を目的として単一モード光ファイバの接続点で心線対照光を入射でき、かつ、心線対照光を受光できる光アクセス機能を有する単一モード光コネクタの検討を進めてきた<sup>(1)(2)(3)</sup>。本論文は、まず、光アクセス機能を有する単一モード光コネクタの構造設計法を示し、単一モード光ファイバ接続部の受光特性と入射特性を明らかにする。次に、光アクセス機能を有する単一モード光コネクタを試作し、設計法の妥当性を確認している。

### 5.2 光アクセス機能を有する光コネクタの構造設計と特性解析

#### 5.2.1 接続損失と光受光効率の関係

光アクセス機能を有する光コネクタの基本構成を図5-1に示す。図5-1より、本光コネクタは、中央に光ファイバ回線と接続するための単一モード光ファイバ心線を配置し、フェルール先端から長さ $l$ だけ離れた位置より長さ $L$ にわたって単一モード光ファイバに接触するように光導波路をUV樹脂を用いて固定し、その片端をフェルール外部に取り出す構造である。

光コネクタ内の単一モード光ファイバ及び光導波路内を伝搬する光パワーの関係を式(5-1)から式(5-3)に示す。

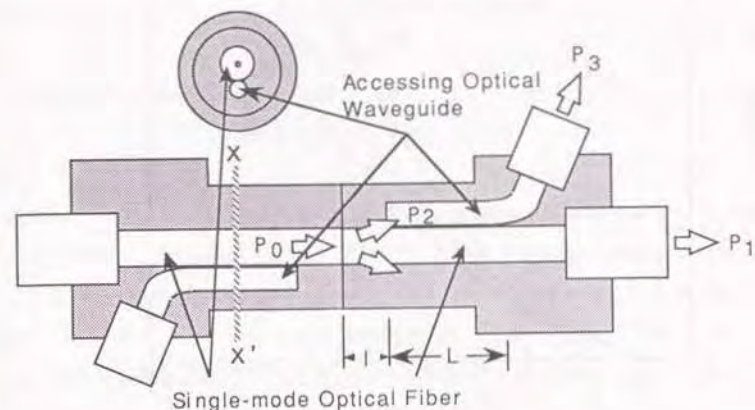


図5-1 光アクセス機能を有する光コネクタの基本構造

$$P_1 = \eta_r P_0 \quad (5-1)$$

$$P_2 = (1 - \eta_r) P_0 \quad (5-2)$$

$$P_3 = \eta_c P_2 = \eta_c \eta_r P_0 \quad (5-3)$$

ここで、 $P_0$  は入射光パワー(W)、 $P_1$  は伝搬光パワー(W)、 $P_2$  は漏洩光パワー(W)、 $P_3$  は受光パワー(W)、 $\eta_r$  は漏洩光パワー $P_2$ 成分のうち受光パワー $P_3$ となるための集光効率、 $\eta_c$  は接続点での光パワーの伝達係数、 $\eta_r$  は入射光パワー $P_0$ のうち光導波路内へ伝搬する受光光パワー $P_2$ となるための受光効率を示す。

光コネクタ接続に対する光ファイバ間の軸ずれ量と接続損失の関係を図5-2に示す<sup>(1)</sup>。図からコネクタ接続損失は、モードフィールド径が小さくなる程、大きくなる事が分かる。

単一モード光ファイバを伝搬する伝搬光の電磁界分布がガウス分布であると仮定



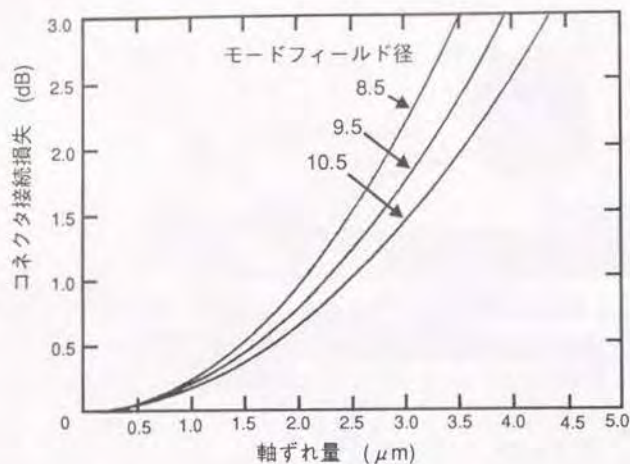


図5-2 光コネクタの軸ずれ量と接続損失の関係

すると、コネクタ接続時の伝搬モード間の伝達係数 $\eta_p$ は次式で表される<sup>(12)</sup>。

$$\eta_p = \frac{(n_1 k) \omega_0}{(\delta Z)^2 + (n_1 k)^2 \omega_0^4} \exp\left[-\frac{(n_1 k)^2 \omega_0^2 (\delta X)^2}{(\delta Z)^2 + (n_1 k)^2 \omega_0^4}\right] \quad (5-4)$$

ここで、 $k$ は伝搬定数( $=2\pi/\lambda$ )、 $\delta X$ は軸ずれ、 $\delta Z$ は間隔ずれを示す。また、 $\omega_0$ は単一モード光ファイバのスポットサイズを示し、次式で表される<sup>(12)</sup>。

$$\omega_0 = a \cdot (0.650 + 1.619V^{-1.5} + 2.879V^{-6}) \quad (5-5)$$

$$V = ak\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5-6)$$

ここで、 $a$ はコア半径、 $V$ は規格化周波数、 $n_1$ はコアの屈折率、 $n_2$ はクラッドの屈折率を示す。式(5-1)より、接続損失 $\alpha$ (dB)は次式で表される。

$$\begin{aligned} \alpha &= 10\log(P_0/P_1) \\ &= 10\log \eta_p \end{aligned} \quad (5-7)$$

式(5-2)、(5-7)より、漏洩光パワーと入射光パワーの比 $[P_2/P_1]$ (dB)は次式となる。

$$\begin{aligned} 10\log(P_2/P_1) &= 10\log(1 - \eta_p) \\ &= 10\log(1 - 10^{-(\alpha/10)}) \end{aligned} \quad (5-8)$$

式(5-8)を用いて、接続損失 $\alpha$ (dB)に対する漏洩光パワーと入射光パワーの比 $[P_2/P_1]$ (dB)の関係を図5-3に示す。図5-3から、接続損失の増加に伴い、漏洩光パワーと入射光パワーの比 $[P_2/P_1]$ は増加することが分かる。一例として、単一モード光コネクタの接続損失を0.5dB<sup>(13)</sup>とすると、 $[P_2/P_1]$ は、-9.7dBとなる。これより、接続損失0.5dBの時、漏洩光パワー $P_2$ は入射光パワーより9.7dB小さな値となることが分かる。

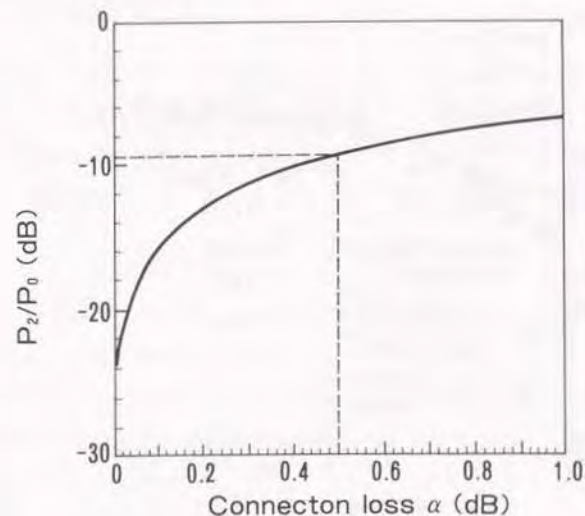


図5-3 接続損失に対する漏洩光パワーと入射光パワーの関係

次に、図5-1の構造図から明らかなように光導波路の接触位置が単一モード光ファイバの片側に位置していることによる受光効率 $\eta$ の接続部軸ずれ方向依存性について検討する。図5-4中に示す光接続部の片端を微動台を用いて、X、Y方向に移動させた時の接続損失と受光効率の関係を接触長 $L=10\text{mm}$ 、 $\ell=0.5\text{mm}$ の場合について測定し、その結果を図5-4に示す。図5-4からX、Y方向に軸ずれを生じた場合でも、受光効率の変化は非常に小さく、接続点での軸ずれ方向に依存しないことが分かる。これは、軸ずれにより生じる漏洩光の一部がクラッド部で線状の光線としてクラッド中を伝搬するため、受光効率は軸ずれ方向に依存しないと考えられる。

また、図5-4から接続損失0.5dBの時、受光効率-25dB、接続損失10dBの時、受光効率-17dBとなり受光効率が8dB大きくなることが分かる。実験結果から受光効率は接続損失が大きくなるのに従い、増加する傾向を示す。これは、式(5-8)を

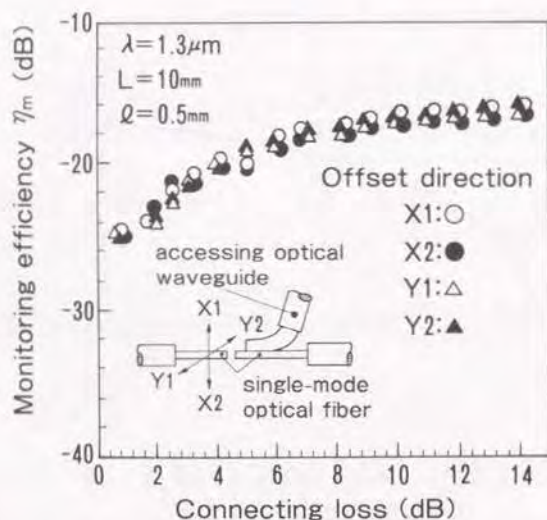


図5-4 軸ずれ方向と光受光効率の関係

用いて、接続損失0.5dBと接続損失10dBに対する漏洩光パワーの差を計算すると約9dB程度あり、接続損失の増加に伴って漏洩光が増加したためと考えられる。

### 5.2.2 光導波路と単一モード光ファイバの接触構造

光ファイバ先端から光導波路先端までの長さ $\ell$ は、光コネクタ作成時の心出し精度あるいは単一モード光ファイバの接着強度の観点からは長いほうが良いが、漏洩光の取り出しの観点からは接続点の軸ずれにより生じる漏洩光がクラッド内に存在する長さ以下にすることが受光効率を向上させる上で望ましい。

接続点の軸ずれによって生じる漏洩光の拡がり角(半角)は、伝搬モード光と同じく光ファイバの比屈折率差 $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$ により、 $\sin^{-1} \sqrt{2\Delta}$ で表される<sup>(11)</sup>。クラッドの直径をDとすると漏洩光がクラッド内に存在するための長さ $\ell$ は次式で表される。

$$\ell \leq \frac{D}{2} \frac{1}{\tan(\sin^{-1} \sqrt{2\Delta})} \quad (5-9)$$

標準単一モード光ファイバの場合、 $\Delta = 0.3\%$ 、 $D = 125\mu\text{m}$ とすると、 $\ell \leq 0.6\text{mm}$ となり、漏洩光を効率良く集光するためには、接続部端面からの単一モード光ファイバと光導波路の長さの差 $\ell$ を0.3mm以下にしなければならないことが分かる。

次に、光導波路と単一モード光ファイバとの接触長と受光効率の関係について示す。

単一モード光ファイバのコア内を伝搬する光の強度分布はガウス分布で近似できることから、軸ずれにより生じる漏洩光成分の中で放射角の最も小さな光を受光可能とすることにより受光効率を向上させることができる。

単一モード光ファイバのファーストモードパターンをガウス分布であると仮定すると、軸ずれによる接続損失 $\alpha$ と漏洩光の放射角の最小値 $\theta_{\min}$ の関係は式(5-10)のように示される。

$$\alpha(\theta_{\min}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\theta} e^{-t^2/2} dt \quad (5-10)$$

ただし、

$$\Theta = \frac{2\theta_{min}}{\theta_c}$$

$$\theta_c = \sin^{-1}\sqrt{2\Delta}$$

また、光導波路と単一モード光ファイバとの接触長Lは、漏洩光を子午光線とすると次式で表される。

$$L = \frac{D}{\tan(\theta_{min})} \quad (5-11)$$

式(5-10)、(5-11)、 $\Delta = 0.3\%$ を用いて計算した時の漏洩光の放射角の最小値 $\theta_{min}$ と接続損失 $\alpha$ の関係及び接触長Lとの関係を図5-5に示す。図5-5より、接続損失0.5dBの時 $\theta_{min} = 2.75\text{deg}$ 、接続損失1.0dBの時 $\theta_{min} = 1.8\text{deg}$ となり、全ての漏洩光を集光するためには光導波路と単一モード光ファイバとの接触長Lは、接続損失0.5dBの時2.6mm、接続損失1.0dBの時4mm以上必要であることが分かる。

次に、接続損失1dB、光源波長 $\lambda = 1.31\mu\text{m}$ とした時の接触長Lと受光効率の関係測定した結果を図5-6に示す。図5-6より、接触長L=8mm以上の時には、受光効率は一定値-26dBとなる。また、接触長Lが8mmより短くなると、受光効率は急激に減少し、L=4mmの時には受光効率は-35dBとなることが分かる。このため、単一モード光ファイバと接触する光導波路の長さは8mm以上必要であることが分かる。また、計算値より長い接触長を必要とする理由として、クラッド中を伝搬する漏洩光が線状の光線として伝搬するため計算値より大きな接触長を必要としていると考えられる。

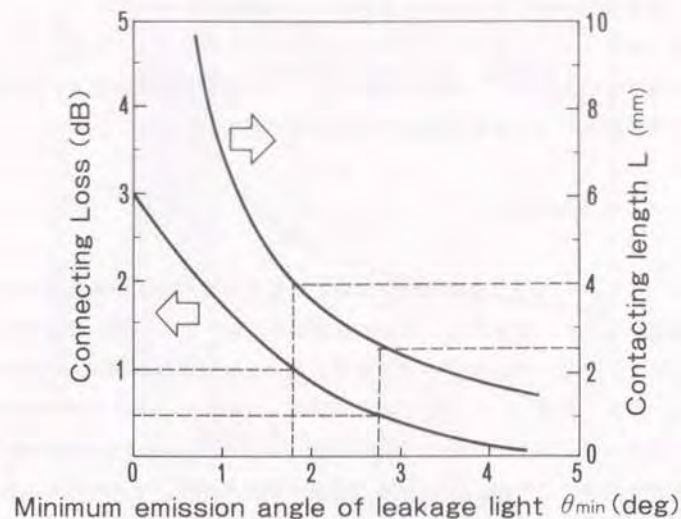


図5-5 接続損失と漏洩光放射角の最小値の関係

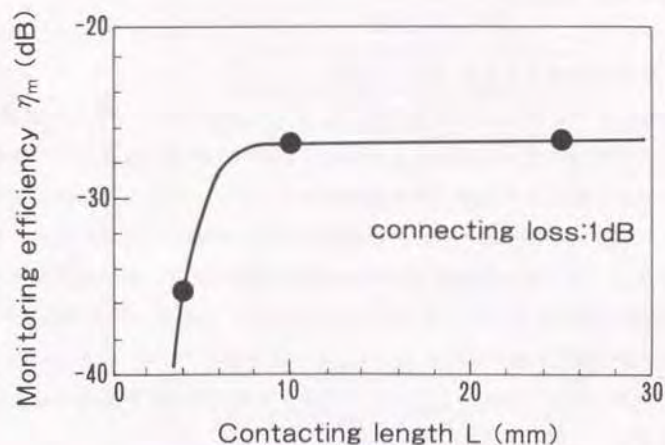


図5-6 接触長と光モニタ効率

### 5.2.3 光導波路接着用UV樹脂の屈折率と光受光効率の関係

単一モード光ファイバのクラッド部の屈折率 $n_1$ 、単一モード光ファイバと光導波路間を結合するためのUV樹脂の屈折率 $n_2$ 、光導波路の屈折率 $n_3$ に対する最適な屈折率の関係はスネルの法則より式(5-12)で表される。

$$n_2 \leq n_3 \leq n_1 \quad (5-12)$$

単一モード光ファイバと光導波路を接着するUV樹脂の屈折率が受光効率へ与える影響を求めため、接触長 $L=10\text{mm}$ 、接続損失 $0.3\text{dB}$ とした時の屈折率比(単一モード光ファイバと光導波路の接着に使用するUV樹脂の屈折率 $n_2$ と光導波路の屈折率 $n_3$ の比: $n_2/n_3$ )と受光効率の関係を測定した。その結果を図5-7に示す。図5-7より、UV樹脂の屈折率 $n_2$ が大きくなるほど受光効率は小さくなること分かる。これは、UV樹脂と光導波路の境界面上で全反射する漏洩光が増加するため、光導波路の集光効率は減少すると考えられる。さらに、光導波路内を伝搬する漏洩光を効率良く閉じ込めるためには単一モード光ファイバと光導波路の外側を $n_2$ よりもさらに低い屈折率を持つUV樹脂でコーティングすることが有効であると考えられる。

### 5.2.4 光受光効率と入射光パワーの関係

$L=10\text{mm}$ 、UV樹脂と光導波路の屈折率比 $1.0$ 、接続損失 $0.5\text{dB}$ 、光源波長 $\lambda=1.31\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ について入射光パワーと受光効率の関係を測定した。結果を図5-8に示す。図5-8から、受光効率は入射光パワー $P_0$ が $-45\text{dBm}$ より大きな時には $\lambda=1.31\mu\text{m}$ の時、 $-26\text{dB}$ 、 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ の時、 $-27\text{dB}$ とほぼ一定値となること分かる。また、入射光パワー $P_0$ が $-45\text{dBm}$ より小さい時には波長 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ では、受光効率は見かけ上増加する傾向を示す。これは、受光器の波長特性が $\lambda=1.55\mu\text{m}$ で感度が減少すること、さらに、入射光パワーが $-50\text{dBm}$ の時、受光パワーは $-76\text{dBm}$ と非常に小さくなることによる受光器及び測定器の雑音による影響と考えられる。

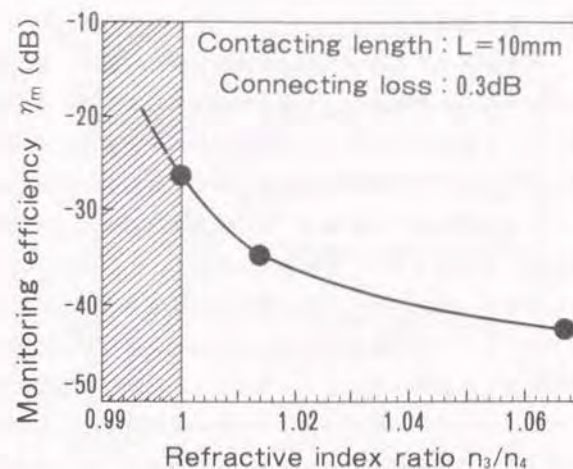


図5-7 屈折率比と光受光効率

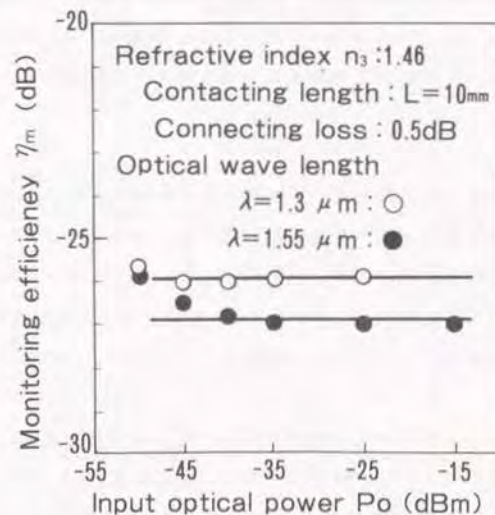


図5-8 入射光パワーと光受光効率の関係

### 5.2.5 接続損失と光入射効率の関係

光導波路から入射光を入射する場合、①光導波路長が短いこと、②心線対照用光源に出射光パワーの大きな半導体レーザを選択が可能であることから、光導波路、UV接着剤、単一モード光ファイバクラッド部の屈折率の関係は、モニタ効率を大きくする必要があり、式(5-12)の関係を満足する事が望ましい。また、光導波路端面からの反射光の心線対照光源への影響は、伝送装置の光源のような複雑な光利得制御を行わないためその影響は小さいと考えられる。

光導波路内を伝搬する入射光が単一モード光ファイバと結合するためには、コネクタ接続部の軸ずれによるモード変換を利用しなければならない。このため、コネクタ接続部の接続損失と入射光が単一モード光ファイバに結合するための結合効率 $\eta_i$ （以下光入射効率と記す）の関係を明らかにする必要がある。光導波路への入射光パワーを $P_i$ （W）、接続部を通過して1km伝搬後の単一モード光ファイバの出射光パワーを $P_o$ （W）とした時の入射効率 $\eta_i$ を $P_o/P_i$ とする。実験により接続損失と光入射効率の関係を求めた結果を図5-9に示す。図5-9から、接続損失0.2dBの時、光源波長 $\lambda=1.31\mu\text{m}$ に対する光入射効率は-52.4dB、 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ に対する光入射効率は-55dB、接続損失0.9dBの時、 $\lambda=1.31\mu\text{m}$ に対する光入射効率は-49dB、 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ に対する光入射効率は-51.6dBとなり、接続損失の増加に伴い光入射効率は増加する傾向を示すことが分かる。

### 5.3 試作結果

以上の検討結果をもとに単一モード光コネクタを試作した。光導波路はコア径 $200\mu\text{m}$ の大コア径の光ファイバを用いた。単一モード光ファイバと光導波路の接触部は大コア径光ファイバのクラッド部をエッチングし、コア部のみとし、屈折率1.46のUV樹脂により $L=10\text{mm}$ 、 $l=0.5\text{mm}$ の条件のもとで固定される。さらに、接触部を光コネクタのフェルール内に挿入し、エポキシ系の接着剤によりフェルール内に固定する。

試作した光コネクタを用いて、光受光特性と光入射特性を測定した結果を表5-1に示す。表5-1より、光受光効率は、光源波長 $\lambda=1.31\mu\text{m}$ の時、-29dB、 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ の時、-31dBとなる。5.2.4節の光受光効率より3dB程度光受

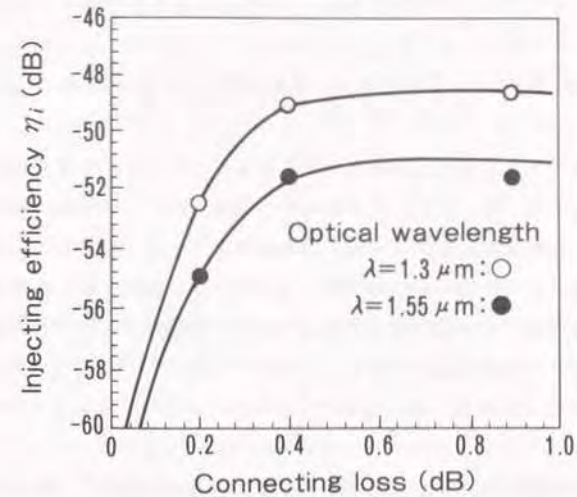


図5-9 接続損失と光入射効率

表5-1 光アクセス特性

波 長	$\lambda = 1.3 \mu\text{m}$	$\lambda = 1.55 \mu\text{m}$
光受光効率* $\eta_m$ (dB)	-29.0	-31.0
光入射効率** $\eta_i$ (dB)	-46.6	-49.8
$\eta_m + \eta_i$ (dB)	-75.6	-80.8
$-90 - (\eta_m + \eta_i)$ (dB)	-14.4	-9.2

\* 接続損失 : 0.3dB

\*\* 接続損失 : 0.4dB

光効率が小さいのは、フェルール内への接触部の固定に際して接触部に歪みが生じ、接続部の微小曲がりが発生し集光効率が減少したものと考えられる。

また、接続損失0.4dBの時光入射効率は、光源波長 $\lambda=1.31\mu\text{m}$ の時、-46.6dB、 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ の時、-49.8dBとなる。

さらに、光受光効率と光入射効率の和は、光源波長 $\lambda=1.31\mu\text{m}$ の時、-75.6dB、 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ の時、-80.8dBとなり、受光器の最小受光レベルを-90dBm、光アクセス用光ファイバへの最大入射光パワーを+10dBm程度とすると光源波長 $\lambda=1.31\mu\text{m}$ に対して、24.4dB、 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ に対して、19.2dBの線路損失余裕を持つことになり、任意の接続点において対照用信号光を光ファイバ回線内へ入射し、任意の接続点において受光することが可能となる。

#### 5.4 結言

本章では光アクセス機能を有する光コネクタの基本構造を提案し、構造設計法、光アクセス特性、試作結果について論じた。得られて主な結果を以下に示す。

(1) コネクタの構造設計法について、提案した単一モード光ファイバと光導波路の接着構造において光受光効率がコネクタ接続部の軸ずれ方向に依存しないことを示した。

(2) 単一モード光ファイバと光導波路の接着構造について理論的、実験的に検討し、光ファイバ先端から光導波路先端までの長さ $l \leq 0.6\text{mm}$ 、接触長 $L \geq 8\text{mm}$ であることを明らかにした。

(3) 光アクセス特性として光受光効率の接続損失依存性、光導波路接着用UV樹脂の屈折率と光モニタ効率の関係、接続損失と光入射効率の関係を明らかにし、光コネクタ接続部において対照光を受光可能であること、光導波路から対照光を単一モード光ファイバに入射可能であることを示した。

(4) 以上の検討結果をもとに光アクセス用光ファイバコネクタを試作した。その結果、接続点において対照用信号光を光ファイバ回線内へ入射し、任意の接続点において受光可能であることを確認した。今後、単一モード光ファイバと光導波路の接触構造作成技術の簡易化、接触部と光導波路曲がり部の信頼性向上を目的として紫外線硬化性樹脂等プラスチック材料を用いた検討が必要である。

## 第6章 光ファイバケーブル接続部における光ファイバハンドリング時の光損失変動特性

### 6.1 緒言

光ファイバケーブル接続部では、光加入者需要の増大に伴う光ファイバケーブルの多心化のため、心線接続部と接続余長心線を収容する光ファイバ心線処理部（以下心線処理部と記す）の大形化が予想される。これに対処するため著者らは既存線路設備（マンホール等）との寸法的整合性の確保が可能な高密度心線処理部の設計法を明らかにしてきた<sup>(1)(2)(3)</sup>。一方、これら光ケーブル接続部では、線路建設以後に光加入者の需要変動に伴うケーブル分岐、ケーブル移転等が発生した場合、心線の接続替を行なうため心線処理部に収容されている心線接続部と接続装置や切替接続装置へセットするための接続余長心線を動かす必要がある。この時、信号伝送品質の観点から通信中の心線の光損失特性に影響を与えないことが不可欠である。そこで、心線接続部と接続余長心線を動かした時の心線処理部の光損失変動特性を検討し、信号伝送品質に影響を与えない心線処理法を明らかにする必要がある。

本章では、光ファイバのハンドリングによる光信号の損失変動特性を明確にするため、まず接続余長心線を心線処理部に収容する際に発生する光損失変動の要因について、理論的、実験的に検討しその主要因を明らかにする。次に、光ファイバのハンドリングによって生じる光損失変動がアナログベースバンド画像信号伝送品質に与える影響について考察し、光ファイバのハンドリングに対する光損失変動特性評価法を示す。また、心線の曲率変動周波数と光損失変動特性の関係を明らかにし、信号伝送品質劣化の小さい心線処理方法を示す。更に、上記検討結果をもとに現在考えられている光ファイバ接続部を個別収納する折りたたみシート方式<sup>(4)(5)</sup>及び光ファイバ接続部を一括収納するポビン方式<sup>(6)</sup>の2種類の心線処理部に対し、接続余長心線の収容実験を行ない、光損失変動特性を考慮し信号伝送品質評価を行う。

## 6.2 心線処理時の光損失変動要因

### 6.2.1 心線処理部の構造

心線処理部構造は、図6-1に示すように折りたたみシート方式とボビン方式が提案されている。折りたたみシート方式（以下シート方式と記す）は余長心線を1心ずつ円形に丸め、シート1段あたり1心ずつ独立に複数心収容する個別処理方式である。また、ボビン方式は複数の心線を1枚の収納シートに入れ、接続した全心線を一括してボビンに巻きつけて収容する一括処理方式である。

ケーブル接続部に上述の心線処理部を有する加入者光線路ではケーブルの分岐接続や移転の場合に心線を動かす必要があり、この時通信中の心線が動的な曲率変動を受け、同心線に光損失変動が生じる。この場合、光損失変動要因として表7-1に示すように曲げ処理、側圧、捻れによる心線の変形が考えられる。次節以降、心線の変形時に生じる心線の動的曲率変動に起因する損失変動についてMM型光ファイバ心線の変形量と光損失変動量の関係を明らかにする。

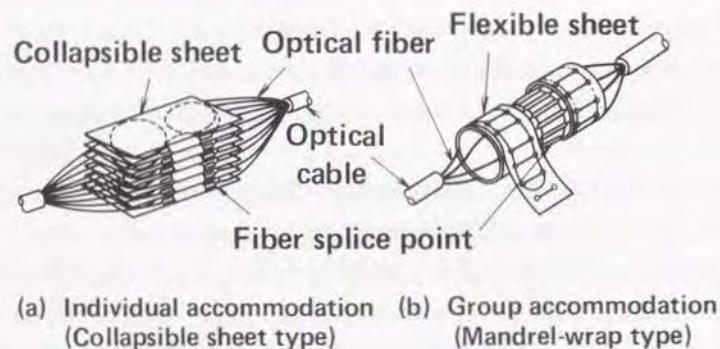


図6-1 心線処理部の構造

表6-1 心線処理による光損失変動要因

損失要因	損失の内容
曲げ処理	接続余長心線を円形に丸めて心線処理部に収納するときに生じる心線の曲がり
側圧	心線処理部の収納部品から受ける圧力により生じる心線の曲がり
ねじれ	接続余長心線の曲げ処理時及び心線処理部による圧縮時に生じる心線のねじれによる心線の曲がり

### 6.2.2 曲げ処理による光損失

接続余長心線を心線処理部に収容する場合に、同心線を丸めて心線処理部に収容するため曲げ変形が生じる。また、収容時には心線がシート等にあたるため動的曲げ変形が生じる。

曲げ損失の測定は、図6-2に示すように0.85 $\mu\text{m}$ 、1.31 $\mu\text{m}$ 帯のLED光源を用いてGSGダミー励振器による定常モード励振法<sup>11)</sup>により行った。ここでは心線長1mの単心光ファイバを曲げ半径10mmから50mmまで変化させたときの光損失増加量について測定した。心線の曲げ半径と光損失増加量の関係を実験により求めた結果を図6-3に示す。図6-3から曲げ半径30mm以下において、1.31 $\mu\text{m}$ 帯の光損失増加量は、0.85 $\mu\text{m}$ 帯より大きくなり、曲げ半径が30mm以上では同程度になった。これは、1.31 $\mu\text{m}$ 帯では0.85 $\mu\text{m}$ 帯に比べファイバ内のモードパワー分布が高次モード側へ広がるため、曲げ半径が小さくなり光損失増加量が増大した時にその影響が顕著になったと考えられる。また、図6-3には光損失増加特性を回帰分析した結果を0.85 $\mu\text{m}$ 、1.31 $\mu\text{m}$ 帯について各々実線と破線で示した。これより、0.85 $\mu\text{m}$ 及び、1.31 $\mu\text{m}$ における光損失増 $\alpha_a$ (dB/m)及び $\alpha_b$ (dB/m)と曲げ半径R(mm)の関係は次式で表される。

$$\alpha_a = 1.06 \exp(-0.096R) \quad (\text{dB}) \quad (6-1)$$

$$\alpha_b = 2.30 \exp(-0.126R) \quad (\text{dB}) \quad (6-2)$$

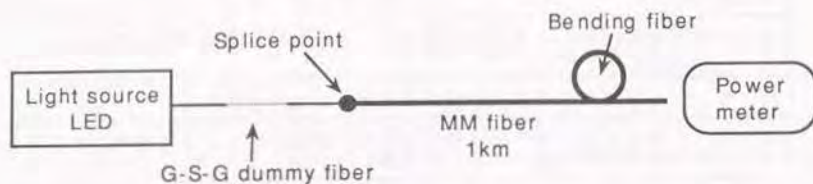


図6-2 曲げ損失の測定系

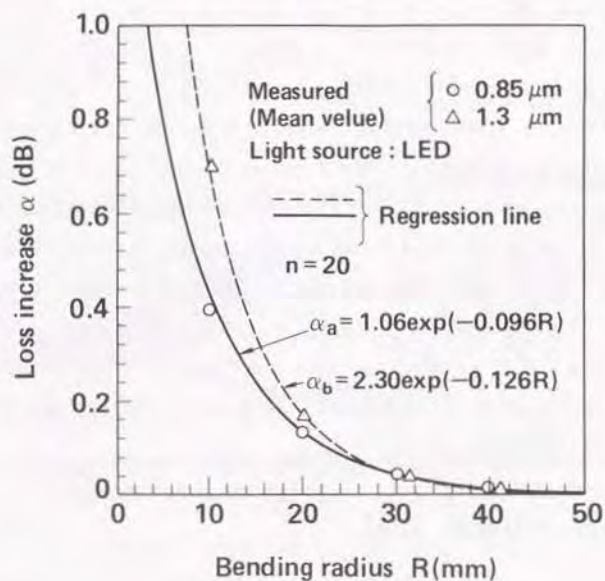


図6-3 曲げ半径と光損失増加量

### 6.2.3 側圧による光損失

接続余長心線は心線処理部に收容された後、垂直方向の圧縮により收容シートから側圧を受ける。この側圧により接続余長心線は曲げ変形を生じる。図6-4(a)に高密度光ファイバケーブルに用いられる5心一括光ファイバテープ<sup>(11)</sup>(以下光ファイバテープと記す)について丸め処理された接続余長心線及び心線接続部を收容シートに收容した状態を示す。ここで同図中の矢印は收容シートから受ける側圧を示す。図6-4(a)に示す光ファイバテープの各心線を剛体と仮定し、一本の光ファイバ心線に対し等間隔で周期に側圧が加わる状態にモデル化して図6-4(b)に示す。図6-4(b)において、心線に任意のピッチPで側圧 $W_b$ (kg)を $n$ 箇所加えた場合に、心線の変形により生じる曲り部の最小曲率半径 $R_{m1}$ (mm)は次式で表わされる<sup>(11)</sup>。

$$R_{m1} = 1 / [2C_m B^2 (1 + 2 \sum_{n=1}^N \exp(-nP) (\cos(nPB) - \sin(nPB)))] \quad (6-3)$$

ここで、

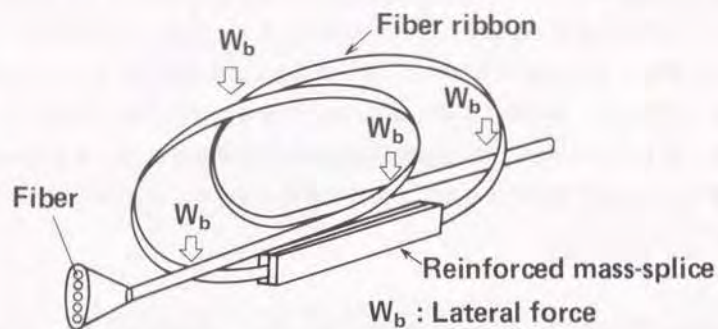
$$C_m = (-128.6T^2 + 20.26T - 1.53)W_b / E_b \quad (6-4)$$

$$B = -1.59T + 1.25 \quad (6-5)$$

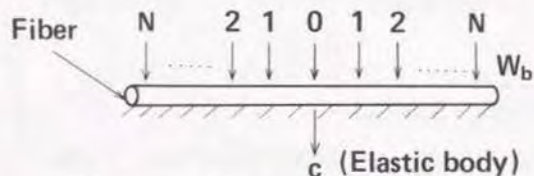
$T$ は無次元化緩衝層厚、 $C_m$ はファイバの最大変位量(mm)、 $W_b$ は側圧(kg)、 $E_b$ は緩衝層のヤング率(50kg/mm<sup>2</sup>)を示す。

図6-5に側圧のピッチ $P$ と最小曲げ半径 $R_{m1}$ の関係について、光ファイバ心線径を0.3mm、緩衝層厚を0.06mm<sup>(11)</sup>として式(6-3)~(6-5)を用いて計算した結果を示す。同図から側圧が大きくなる程、心線の最小曲げ半径は小さくなる事が分かる。また、側圧を加えるピッチが小さくなると剛体の長さ方向には均等荷重となるため最小曲げ半径は大きくなり、ピッチが大きくなると一点荷重に近づくため側圧に対する最小曲げ半径は一定値に漸近することが分かる。そこで、図6-5より最小曲げ半径が一定となるピッチ $P$ が5mm以上の状態及び6.2.1で求めた曲げ半径と光損失増加量の関係式(6-1)及び(6-2)を用い、側圧と光損失増加量の関係を求め





(a) Arrangement of slack fiber for accommodation



(b) Lateral force model

図 6-4 心線収容状態のモデル化

た結果を図 6-5 に示す。

心線に加えられる側圧は収容シートに加えられる圧縮荷重により生じ、心線収容時の圧縮荷重は通常 1kg 程度である<sup>1)</sup>。また、円形に丸められた接続余長心線が側圧によって曲げられる箇所は図 6-4 (a) に示すように最低 4 箇所となることより、心線に加わる側圧は最大 0.25kg となる。図 6-6 より側圧 0.25kg、側圧ピッチ  $P=5\text{mm}$  以上の時光損失増加は  $0.85\mu\text{m}$  帯、 $1.31\mu\text{m}$  帯とも  $0.02\text{dB}$  以下となることが分かる。従って、実際の収容状態では側圧による損失増は曲げ処理に対して小さく、損失変動要因として無視できることが分かる。

#### 6.2.4 捻れによる光損失

光ファイバテープの心線処理時には心線の捻れにより心線に曲げ変形が生じる。図 6-7 に光ファイバテープを捻った状態をモデル化して示す。ここで、 $A$  は光ファイバテープに収容された中心の光ファイバと最遠端の光ファイバの中心間距離 (mm)、 $L$  は捻れ部の心線長 (捻れ長: mm)、 $\phi$  (rad) は捻れ角、 $t$  (rad) は最遠端の光ファイバの中心が描く軌跡の媒介変数を示す。

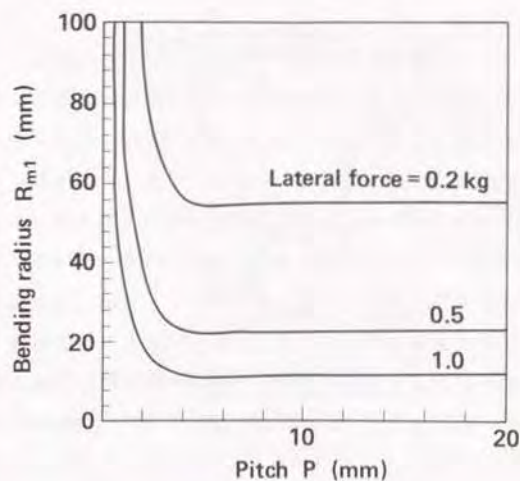


図 6-5 側圧ピッチと最小曲げ半径

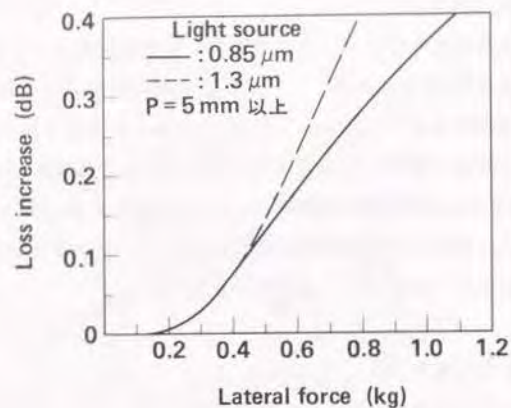


図 6-6 光損失増加量と側圧の関係

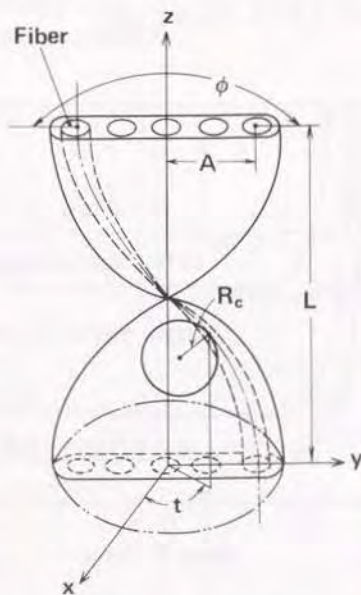


図 6-7 光ファイバケーブルのねじれモデル

図 6-7 より最遠端光ファイバの中心の描く曲線の座標は次式で表される。

$$X = A \cos(t)$$

$$Y = A \sin(t) \quad (6-6)$$

$$Z = -bt$$

ここで、

$$b = -L / \phi$$

式(6-6)で示される曲線上の任意の点において、本曲線に接触する曲率円の半径  $R_c$  は次式で表わされる<sup>(39)</sup>。

$$R_c = [1 + (dx/dy)^2] / |d^2y/dx^2| \quad (6-7)$$

式(6-6)、(6-7)を用い、捻れが最大となる最遠端の光ファイバについて、捻れ長  $L$  と最小曲げ半径  $R_{min}$  の関係を求めた結果を図 6-8 に示す。ここで、光ファイバケーブルは  $\pi$  から  $4\pi$  まで捻り、 $L$  は 60mm まで変化させて計算した。図 6-8 より、捻れ長が短くなるに伴い、また、捻れが大きくなるに伴い最小曲げ半径は小さくなる事が分かる。例えば、心線の曲げ半径を 30mm 以上にするためには、捻れが  $\pi$ 、 $2\pi$ 、 $3\pi$ 、 $4\pi$  の時、捻れ長 6mm、18mm、29mm、41mm 以上にならなければならない事が分かる。また、図 6-8 の結果及び曲げ半径と光損失増加量の関係式(6-1)(6-2)より、捻れ長と光損失増加量との関係を求めた結果を図 6-9 に示す。ここで、接続余長心線を丸める場合丸める方向を 1 回毎に反転させ捻れを取ることで、丸め回数の増加にかかわらず捻れ角は最大  $\pi$  となる。従って、図 6-9 より捻れが  $\pi$  の時捻れ長を 8mm 以上にすれば光損失増に対する捻れの影響をなくすことができる。

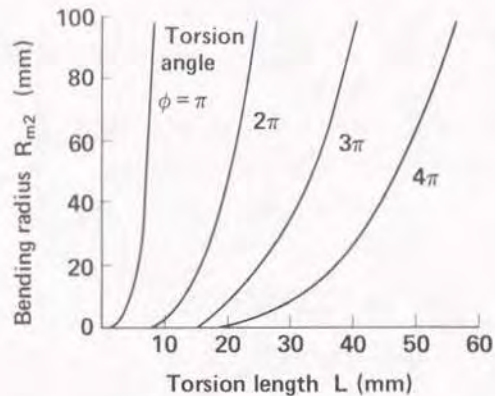


図 6-8 光ファイバテープのねじれ長と最小曲げ半径

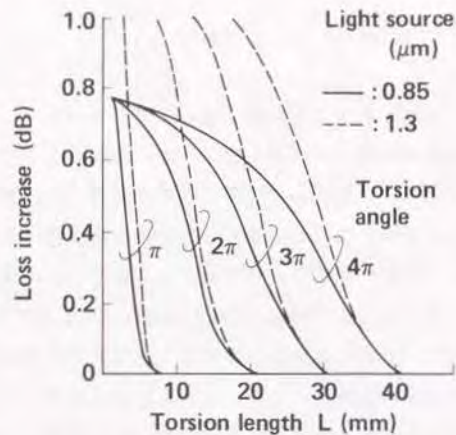


図 6-9 光ファイバテープのねじれ長と光損失増

以上の検討結果から、曲げ処理では曲げ半径が40mm以下になると約0.02dB以上、また側圧による光損失増は、0.02dB以下となり、さらに捻れによる光損失増は捻れ

部の長さを約8mm以上にするにより無視できることが分かった。その結果、心線処理時の光損失変動の主要因は、心線の曲げ処理であることが明らかになった。

### 6.3 光損失変動に対するアナログベースバンド画像伝送特性評価

#### 6.3.1 光損失変動量の許容値

光ファイバを用いたアナログベースバンド画像信号伝送において、線路に正弦波状の損失変動が生じた場合、送信光電力波形が強度変調を受けるため受信光電力波形  $P_r(t)$  は次式のように変化する<sup>13)</sup>。

$$P_r(t) = P_g G(t) 10^{-(L_0/10)} (1 + \delta \cos \omega t) \quad (6-8)$$

$$\text{但し } G(t) = \{1 + m \cos(\omega t + \phi)\}, \quad \delta = 10^{\frac{\Delta L - L_0}{10}}$$

ここで、 $P_g$  は送信光電力、 $\omega$ 、及び  $\phi$  は送信信号の角周波数及び初期位相、 $m$  は光の変調度、 $L_0$  は線路損失 (dB)、 $\Delta L$  及び  $\omega$  は損失変動の振幅及び角周波数である。

テレビ信号は映像信号と同期信号とから構成されており、その比 (7:3)<sup>13)</sup> を考慮すると同期信号を除いた映像信号の信号対雑音電力比 SNR (dB) は、自動利得制御器 (AGC) の抑圧成分である  $\omega$ 、 $\pm \omega$  成分について式 (6-8) から次式で表わされる。

$$\text{SNR} = 20 \log(1.4 / \delta) \quad (6-9)$$

ここで、画像伝送に対する許容値を  $\text{SNR} \geq 56 \text{ dB} (0 \sim 1 \text{ MHz})$ <sup>13)</sup> とし AGC の抑圧量を  $X$  (dB) とすると許容 SNR は次式となる。

$$\text{SNR} \geq 56 - X \quad (6-10)$$

次に、光出力対光損失変動量比 SNRc は、無変調時 ( $m = 0$  の信号対雑音電力比

と等価であり、SNRの導出手法と同様に、式(6-8)より次式で表わされる。

$$SNR_c = 20 \log(1/\delta) \quad (6-11)$$

従って、許容SNRは式(6-9)~(6-11)より次式となる。

$$SNR_c \geq 56 - X - 20 \log(1.4) \quad (6-12)$$

ここで、広帯域回線終端装置のAGC抑圧量Xを16dB程度とすると式(6-12)より許容SNRは次式となる。

$$SNR_c \geq 37.1 \text{ dB} \quad (6-13)$$

### 6.3.2 心線の曲率変動周波数と光損失特性

6.3.1節で述べたように心線処理作業による光損失変動の周波数成分がアナログベースバンド画像信号の伝送品質に大きく影響するため、心線の曲率変動速度に対する光損失変動の周波数成分を検討し、伝送品質劣化の小さい心線処理方法を明らかにする必要がある。そこで、図6-10に示す測定系<sup>(11)</sup>を用いて心線の曲率変動の周波数と光損失変動特性の関係を検討した。同図の曲率変動装置は図6-11(a)に示すように円形処理された心線を2枚の平板で挟み、一定周波数、一定振幅で一方の移動可能な平板を動かすことにより心線に曲率変動が加えられる装置である。円形に丸められた心線は、同図(b)に示すように圧縮により平板に接した部分は直線的に変化し、接しない部分は2枚の平板間隔(2r<sub>0</sub>)を直径として半円状に変化する。この装置により円形に曲げられた光ファイバは曲率とその変動周波数を変えられる。又、光ファイバを通過した光信号は受光器で電気信号に変換されFFTアナライザにより周波数分析される。

本測定系により長さ1mの心線を曲率半径30mmで円形に丸め、光損失変動の周波数特性を測定し、FFTアナライザの出力データから各周波数においてSNR<sub>c</sub>の最小値S<sub>min</sub>を求め図6-12に示した。ここで、圧縮時の曲率半径r<sub>m</sub>及び変形周波数を変化させた。図6-12より、S<sub>min</sub>は、光損失変動の周波数1~3Hz付近

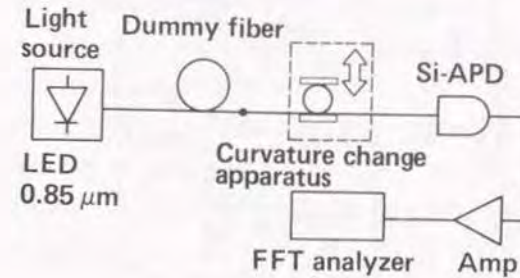


図6-10 光損失変動特性測定系

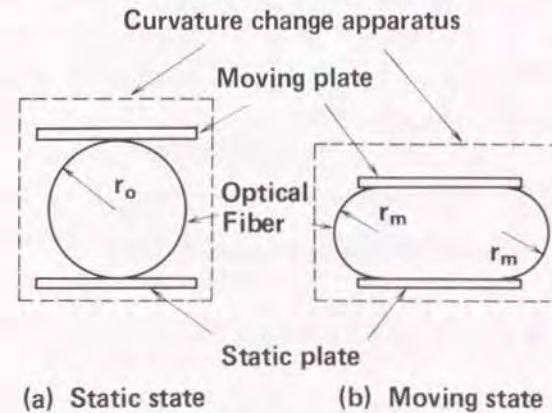


図6-11 光ファイバ心線の曲率変動方法

で最小になる傾向を示す。これは変形周波数が、小さくなると損失変動の各周波数成分は小さくなり、また図中破線で示す周波数約2Hzより大きくなると心線がもとの円形に戻る以前の次の曲げ変形が始まるので、曲率の残留により線路損失が大きくなり、損失変動が小さくなってしまふためと考えられる。

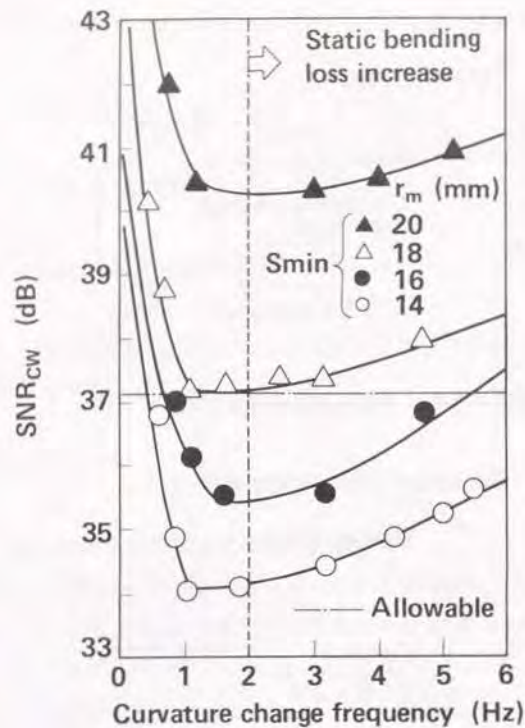


図6-12 曲率変動周波数とSNR。

また、同図には6.3で求めたSNRの許容値を一点鎖線で示しており、曲率が18mmの時 $S_{min}$ が全周波数で許容値より大きくなる事が分かる。従って、光伝送中の心線を直接心線処理する場合には曲げ処理時の心線の曲率変化を曲率半径18mm以上にすることによりアナログベースバンド画像信号伝送品質の劣化を防止できる事が分かる。

### 6.3.3 変形周波数と信号伝送品質の関係

図6-12より各曲率半径に対して $S_{min}$ が許容値(37.1dB)に一致する変動周波数を求め、この場合の曲率半径 $r_m$ と変形周波数との関係を図6-13に示す。

斜ハッチ部は許容領域を示す。また、破線で示した2Hz以上の部分は曲率変動時に変動速度が早いので曲率が元に戻らず最小の状態が残るため、損失特性が大きく劣化する領域を示す。従って、実際に許容できる領域は2Hz以下の斜ハッチ部分になる。心線処理部の変形に対して許容SNRcを満足するためには、図6-13に示す斜ハッチ部で2Hz以下の範囲の曲率半径と変形周波数の関係を満たす必要がある。例えば、心線処理作業時間を2倍にする即ち図6-13において変形周波数を1Hzから0.5Hzにすることにより許容される心線処理部の半径を18mmから14mmへ約20%緩和できることが分かる。

### 6.4 心線処理部の光損失変動特性評価

6.2.1の図6-1で示したシート方式、ポビン方式の2種類の心線処理部に対し、心線接続部及び接続余長心線の収容、取り出し実験を行い、これらに近接した心線の光損失変動量とその周波数スペクトルを測定した。ここで、測定は図6-10に示す測定系で、曲率変動装置の代わりに心線処理部を挿入し、0.85 $\mu$ m帯のLEDとLDを用いてGSG励振器による定常モード励振法<sup>(14)</sup>により行った。各心線処理方式における心線処理時の光損失変動量の測定結果を図6-14に示す。同図から心線処理したときの光損失変動量は、心線の収容時が最も大きくシート方式ではLD光源を用いた場合、平均0.08dB、LED光源を用いた場合、平均0.04dBであった。一方、ポビン方式ではLD光源を用いた場合、平均0.28dB、また、LED光源を用いた場合、平均0.21dBであり、シート方式より大きな損失変動が生じている。図6-15に光損失変動の周波数特性測定結果を示す。同図から、両方式とも損失変動の周波数成分は低周波数側で大きくなるが、特にポビン方式では数Hz以下の領域で大きな損失変動が見られた。これより、シート方式はポビン方式に比べて光損失変動が小さいことが分かる。これは、シート方式では接続心線の収容、取り出し時に、光信号伝送中の心線の動きが小さいためと考えられる。6.3.1で求めた許容SNRcを図6-15に一点鎖線で示す。折りたたみシートを用いた個別処理方式では許容値を越えるような光損失変動は生じなかったが、ポビンを用いた一括処理方式では心線の収納、取り出し時に数Hz以下の領域で許容値を越える損失変動が生じた。

以上の検討から、個別処理方式は、一括処理方式に比べて光損失変動が小さくア

ナログベースバンド画像信号伝送時の信号対雑音比の劣化を小さくできることが明らかになった。図6-16に現在、マンホール等の地下接続部に使用されている1000心光ファイバケーブル収容部を示す。

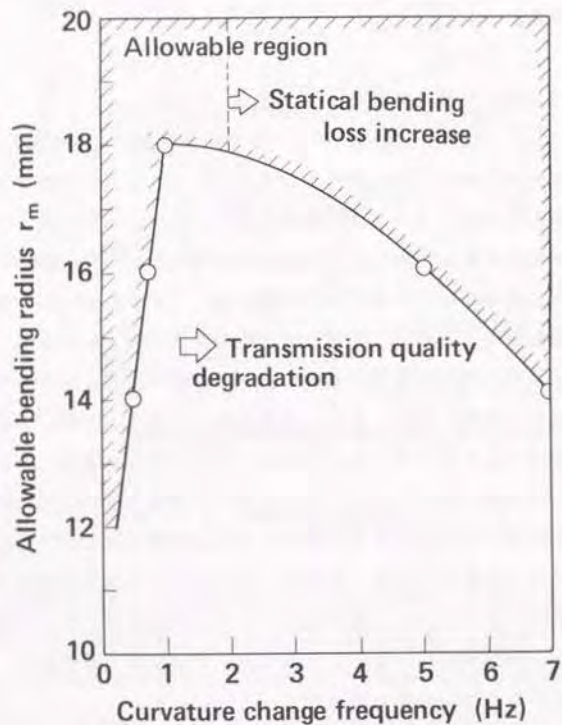


図6-13 曲率変動周波数と許容曲率半径

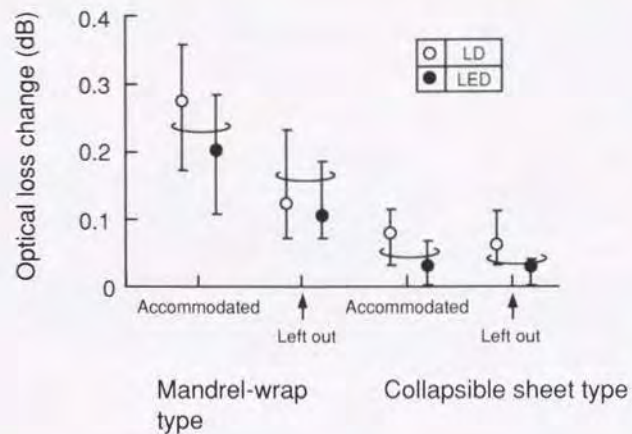


図6-14 心線処理方式の光損失変動特性

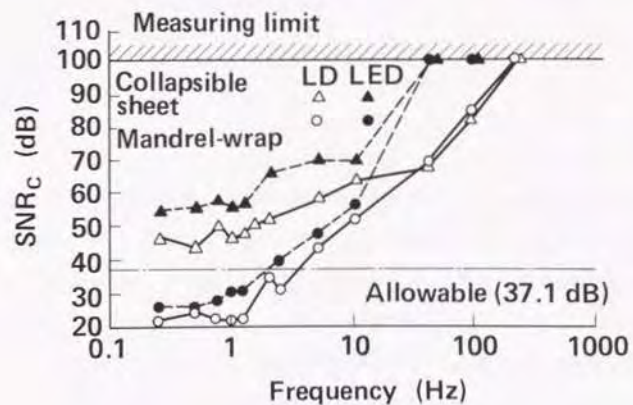


図6-15 心線処理損失変動の周波数特性

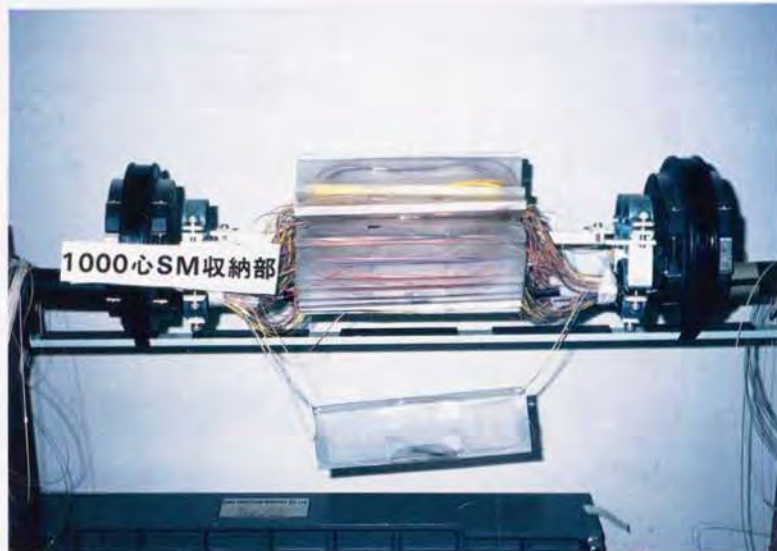


図6-16 1000心光ケーブル収容部

## 6.5 結言

本章で得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) 心線処理時の光損失変動要因として心線の丸め、側圧、捻れの三つを考え、理論的、実験的に検討し、丸めでは曲げ半径が40mm以下になると約0.02dB以上、また側圧による光損失増は、0.02dB以下となり、さらに捻れによる光損失増は捻れ部の長さを約8mm以上により無視できることが分かった。その結果、心線処理時の光損失変動の主要因は、心線の曲げ処理であることを明らかにした。
- (2) 光損失が正弦波状に変動する光線路モデルについて、アナログベースバンド画像信号を伝送した場合の光損失変動特性評価法を検討し、光出力対光損失変動量SNRは各周波数成分に対して37.1dB以上必要であることを明らかにした。次に、心線の曲率が一定周期で変動した場合の光損失変動の周波数成分を実験的に把握し、

各周波数で上述した所要SNRを満足する許容曲げ半径が18mmであることを明らかにした。更に所要SNRを満足する曲げ半径と曲率変動周波数の関係を明らかにし、その結果、例えば、心線処理作業時間を2倍にする(変動周波数を1Hzから0.5Hzにする)ことにより許容曲げ半径を18mmから14mmへ約20%緩和できることが分った。

(3) 心線処理方式として個別処理方式及び一括処理方式を取り上げ、心線処理部に対し心線接続部及び接続余長心線の収容実験を行い、これらに近接した心線の光損失変動特性を評価した。その結果、個別処理方式と一括処理方式を比較すると、個別処理方式はアナログベースバンド画像信号伝送時の信号対雑音比の劣化が小さいため、ケーブル接続部において心線の接続替が必要な加入者光線路に適した心線処理方式であることを明らかにした。

## 第7章 光ファイバ切替接続による 伝送システムへの影響

### 7.1 緒言

通信サービスを行っている現用光ファイバの心線対照を実現するため対照信号光の曲げ入射法、曲げ受光法の基本検討を第2章、第3章で行い、光ファイバ切替接続システムへの組み込みを目的とした心線対照実用装置の構成法、機能設計法について第4章で明らかにした。第5章では心線対照作業の効率化を目的に対照信号光の入射機能と受光機能を持った光コネクタの構造設計法について明らかにした。また、第6章ではサービス中の光ファイバを光ファイバ切替接続システムにセットするためにハンドリングした時の伝送品質への影響評価を行った。

本章では、光ファイバ切替接続システムを加入者系光線路へ適用したときに通信サービス中の伝送品質に与える影響について述べる。まず、サービス中の現用回線に対照信号光を入射し、対照信号光が伝送品質に与える影響を明らかにする。次に、通信中の光信号の瞬断による伝送装置及び通信サービスへの影響評価について述べる。最後に、商用回線を用いた商用試験結果を示し、本システムが良好な特性を有しており十分実用に供せることを明らかにする。

### 7.2 対照信号光による通信回線への影響評価

270Hzに変調された対照信号光（光源波長：1.55 $\mu\text{m}$ ）を、6.3Mb/s高速デジタル信号光（光源波長：1.31 $\mu\text{m}$ ）伝送時の回線に曲げ入射し、3km伝搬後曲げ受光する。受光素子により光/電気変換された信号は、電気段のフィルタリングにより対照信号光と高速デジタル信号光とに分離される。その時の曲げ受光特性（対照信号光の曲げ受光レベル：-79dBm）を図7-1に示す。図から電気段のフィルタリングにより通信サービスを行っている現用回線に対して、対照信号光を良好に識別できることが分かる。次に、6.3Mb/s高速デジタル信号光伝送時に対照信号光を入射したときの伝送信号に与える影響について1例を示す。対照信号光（270Hzに振

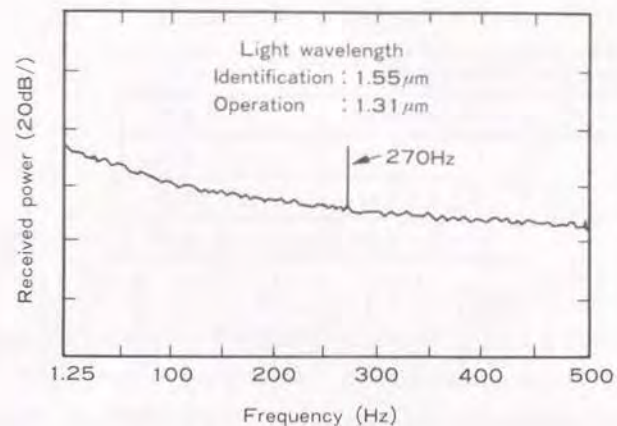


図7-1 心線対照特性

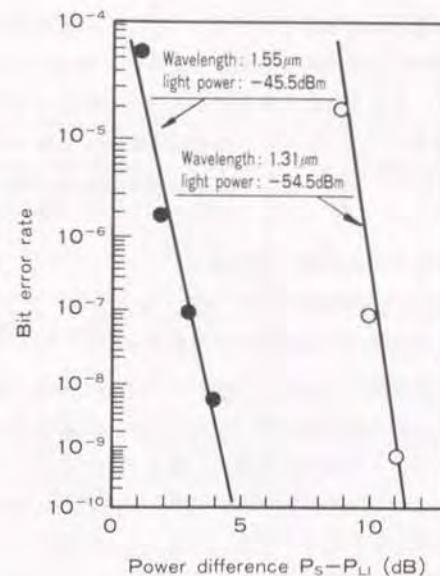


図7-2 対照信号光パワーと符号誤り率



表 7-1 曲げ部セット時の伝送品質

光伝送方式	符号誤り率
F-6.3M	$10^{-10}$ 以下
F-100M	$10^{-11}$ 以下
F-400M	$10^{-11}$ 以下
F-1.6G	$10^{-11}$ 以下

幅変調)の波長を1.31、1.55 $\mu\text{m}$ とし、回線信号光(光源波長:1.31 $\mu\text{m}$ )パワーと対照信号光パワーの差に対する符号誤り率の関係を図7-2に示す。

図7-2から、伝送品質に劣化を生じない符号誤り率( $10^{-9}$ 以下)を確保するためには回線信号光パワーと対照信号光パワーの差を、対照信号光波長が1.31 $\mu\text{m}$ の場合、約11dB以上、対照信号光波長が1.55 $\mu\text{m}$ の場合、約5dB以上必要であることが分かる。これより、対照信号光の曲げ入射パワーを調整することにより6.3Mb/s高速デジタル信号に影響を与えることなく光ファイバの心線対照が可能であることが分かる。次に、通信中の回線に心線対照装置の曲げ部をセットした時の伝送品質への影響評価を示す。表7-1に示す各光伝送方式に対して光信号の受光レベルを最小受光レベルに調整し、光ファイバに曲げ部をセットした。その時の符号誤り率を評価した。表より、曲げ部セットにより伝送品質に影響の無いことが分かる。

### 7.3 光信号の瞬断による伝送装置への影響

伝送速度6.3Mb/sの伝送装置を用いて図7-3に示すデジタル回線の実験系を構成し、光信号の瞬断に対する伝送品質への影響評価を行った。実験系は光信号の回線を收容するためのDSU(Digital Service Unit:デジタル回線終端装置)、DSUからの光信号をDCAT(Digital Circuit Access and Terminal equipment:デジタル伝送同期端局装置)に整合するようにインターフェース変換を行うSLT(Subscriber Line Terminal equipment:加入者線端局装置)、中継区間の回線設定及び多重化を行うDCATを用いて、中継系から加入者系にいたる光伝送路を構成している。切替接続点を加入者系のSLT(A)とDSU(A)の区間に設定し、瞬断によるアラームの流れと伝送装置の復帰時間について検討し

DTE : Data terminal equipment  
 DSU : Digital service unit  
 SLT : Subscriber line terminal  
 DCAT : Data circuit access and testing equipment

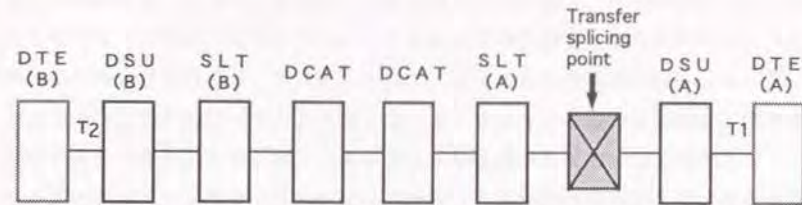


図 7-3 DNR信号継続時間の測定系

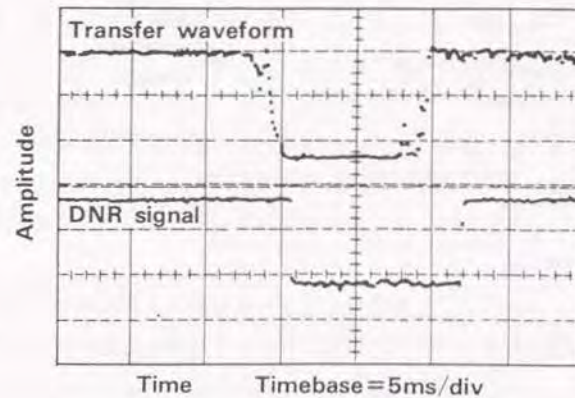


図 7-4 切替波形とDNR信号波形

た。光信号の瞬断や伝送装置の故障の際に対向する伝送装置から送信されるDNR信号(DCB Not Ready : 障害通知信号)の転送、検出手順を以下に示す。

DSU(A)~SLT(A)間の光入力断や同期外れ時にDSU(A)でRECアラーム(Receive Alarm)が検出されDSU(A)からDTE(A)(Data Terminal Equipment : データ端末装置)にDNR信号(DNR=1)を送出する。一方、SLT(A)側でも同様にRECアラームが検出され、対向するDCAT、SLT(B)に回線が異常である信号を送出し、SLT(B)からDSU(B)にDNR信号を送出し、さらにDSU(B)からDTE(B)にDNR信号を送出する。この手順により、網側の故障が端末装置に通知される。光入力断や同期外れが復帰すると上記と同様の手順でDNR信号(DNR=0)を送出し、網側の故障が復旧したことが端末装置に通知される。DTEではHDLC手順(High Level Data Link Control Procedures)等の伝送制御手順により欠落した情報の再送を行う。

図7-3で示す実験系を用いてDSU(A)とSLT(A)間において切替接続を行い、切替接続点に近いT<sub>1</sub>と対向するT<sub>2</sub>の2か所のDSUで、DNR信号継

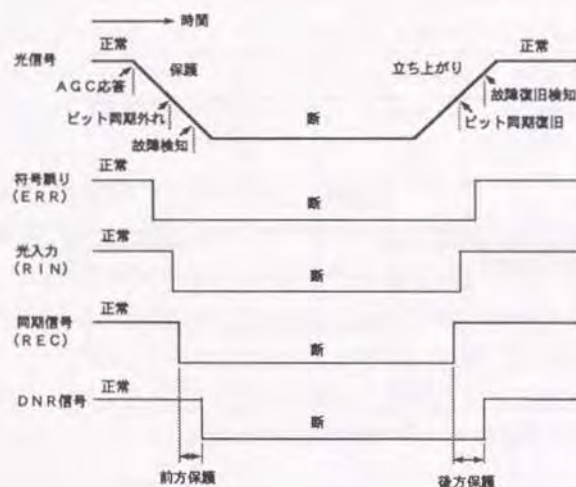


図7-5 光信号の瞬断に対するアラームの流れ

続時間を測定した。実験には4心テープ心線を使用し、2心で上り下りの光信号を伝送し、1心でCW光を伝送し、切替波形を測定した。CW光による切替波形とDNR信号の測定波形の一例を図7-4に示す。図より、切替波形が断になった後、少し遅れてDNR信号がアクティブ(DNR=1)になっている。これはDNR信号の送出、復帰に対して保護が加えられているためである。図6-5に光信号の瞬断に対するアラームの流れを示す。切替開始と同時に光信号レベルが減少し、DSUの受信側で電気段のAGC(Automatic Gain Control:自動利得制御)が動作する。さらに、受光レベルが低下し、パリティエラーチェックによる符号誤り率の増加を知らせるERRアラーム(Error Alarm)を検出する。

次に、マルチフレーム内のビット同期が外れ、光入力断を知らせるRINアラームの検出、さらにフレームパターンやDNRビットの一致回数等を監視(前方保護)によりフレーム同期外れを知らせるRECアラームを検出し、対向する伝送装置へDNR信号を送信する。切替終了直前に光信号のレベルが回復する過程で、ビット同期引き込み、RINアラームの復帰、さらにレベルが上昇し、ERRアラームが復帰する。さらに、フレームパターンやDNRビットの一致回数の監視(後方保護)によりRECアラームを復帰する。RECアラームの復帰によりDSUからDTE、SLTへ送信されていたDNR信号が復帰する。このため、切替点より遠方のDSU(B)の復帰時間は、SLT(A)、DCAT、SLT(B)の復帰を順次行うためDSU(A)と比較してDNR信号継続時間は長くなり、光信号の瞬断による影響は大きくなる。

図7-3に示す実験系を用いて切替接続を行い、測定したDNR信号継続時間はT<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>点において、それぞれ平均28ms、55msであり、本切替接続システム開発時の目標であった伝送装置の回線断時間100ms以下を満足することが分かった。

#### 7.4 光信号の瞬断による通信サービスへの影響

光信号の瞬断による通信サービス及び通信端末への影響評価を行い、結果を表6-2に示す。アナログ電話、デジタル電話では瞬断により、瞬断時間に相当する時間のノイズが発生する。FAXについては再送機能が有る場合はHDLC手順によりエラーが発生したブロックが自動的に再送される(G3、G4)。再送機能の無い場合、ライン抜け方式ではエラーが発生したラインが抜け(図7-6)、前

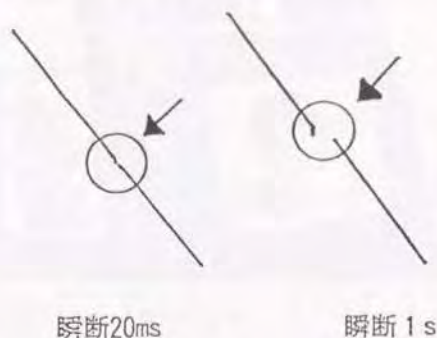
ライン置換方式では記憶している前ラインが再度記録される（図7-6）。データ伝送では再送機能がある場合はHDLC手順によりエラーが発生したブロックが自

表7-2 光信号の瞬断による通信サービス及び端末への影響

方式	サービス/ 端末装置	光信号瞬断時の影響
高速デジタル INS ネット1500	アナログ電話 デジタル電話	瞬断により通話中にノイズが発生する
	FAX (G2)	瞬断により通信中にノイズが発生し、それを紙面に書く (1ライン/160ms)
	FAX (G3)	瞬断によりエラーが発生すると、記憶している前ラインを再度紙面に書く (前ライン置換方式、1ライン/20ms)
		瞬断によりエラーが発生すると、エラーが発生したラインが抜ける (ライン抜け方式、1ライン/20ms)
		瞬断によりエラーが発生すると、HDLCフレームによりエラーが発生したブロックを自動的に再送する
	FAX (G4)	瞬断によりエラーが発生すると、HDLCフレームによりエラーが発生したブロックを自動的に再送する
	日本語テレックス	瞬断によりエラーが発生すると、HDLCフレームによりエラーが発生したブロックを自動的に再送する
	データ端末	瞬断によりエラーが発生すると、誤った文字や数字を打ち出す (エラー訂正機能なし、TTY手順等)
		瞬断によりエラーが発生すると、HDLCフレーム、BSC等によりエラーが発生したブロックを自動的に再送する
	アナログ映像 (静止画像)	瞬断によりエラーが発生すると、映像画面の一部が抜け、白くなる。
デジタル映像 (動画像)	瞬断等による障害検出中は映像CODECにより、再生画面を障害発生前の画面に固定しておき、障害復旧と同時に画面を自動的に再生する (フェージング処理方式)	
FV-4M	アナログ映像 デジタル映像 (動画像)	瞬断によりエラーが発生すると、瞬間的に映像画面が消えるが、瞬断終了とともに画面は再生する

HDLC (High Level Data Link Control Procedures) : ハイレベルデータリンク制御手順のことでレイヤ2のプロトコルであり、ビット単位の伝送を効率良く行う伝送制御手順のことである。

①前ライン置換方式



②前ライン抜け方式

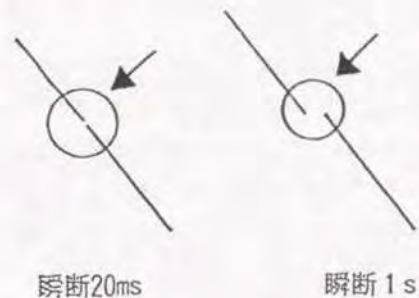
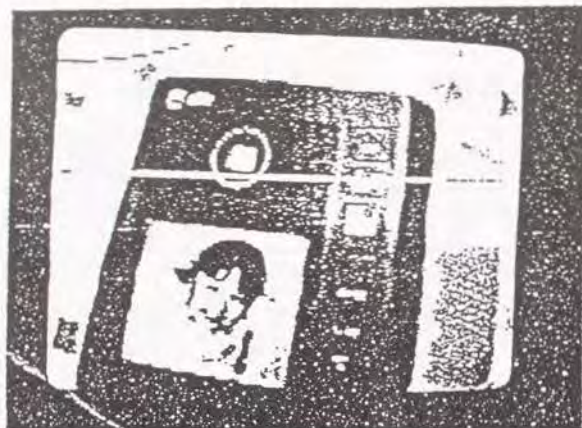


図7-6 光信号の瞬断による影響  
(FAXへの影響例)



(a) 静止画の例

固定画の例です  
 本日は晴天なり  
 光CATS(瞬断)  
 特性調査

(b) 固定画の例

図7-7 光信号の瞬断によるの影響  
 (アナログ映像〔静止画像〕への影響)

動的に再送され、再送機能が無い場合は誤った文字や数字が伝送される。データ通信の場合、通常、通信ソフトウェア上で何らかの再送機能を持たせている。アナログ映像、デジタル映像伝送については瞬断が発生すると画面が消え、瞬断終了とともに画面は再生する。映像伝送でフェージング処理方式の場合は瞬断が終了するまで、前の画面が継続して表示され、瞬断終了後、画面が再生する。

### 7.5 光ファイバ切替接続システムの商用試験結果

光ファイバ切替接続システムは、光ファイバケーブルの支障移転時の回線借用稼

表7-3 商用試験結果

実施事業所名	横浜支店 (関東支社)	北海道総合技術セン (北海道支社)	沼津支店 (東海支社)
切替実施日	1992.8.29 (土)	1992.11.3 (木)	1992.11.29 (日)
回線借用時間	12:00-13:00	12:30-13:30	9:00-17:00
切替回線種別	INS1500 4システム (光ファイバ2ケーブル)	HD 768kb/s 1システム (光ファイバ1ケーブル) INS1500 1システム (光ファイバ1ケーブル)	HD 3M, 384kb/s 4システム (光ファイバ3ケーブル) INS1500 4システム (光ファイバ3ケーブル)
端末使用状況	DSU PBX 電話 FAX	HD DSU M-TDM INS1500 TV会議システム	HD DSU M-TDM INS1500 PBX
ユーザ種別	重電メーカ	家電メーカ(HD) 電算機メーカ(I)	通信機メーカ
切替形態	FTM~MH	FTM~MH	FTM~MH
切替断時間	約20ms	約20ms	約20ms
端末への影響	電話：ノイズ確認 FAX：影響なし (リトライ機能)	(HD) 電話：ノイズ確認 FAX：影響なし (リトライ機能) (INS1500) TV会議システム：瞬断により画面が固定され、復旧と同時に再生	ユーザ所有の警報監視システムで瞬断検出されず

働削減を目的として、昭和62年5月国際調達による共同開発(トラックⅢ)を行い、平成2年システムの導入を目的に仕様化された。その後、平成4年11月まで、

商用回線を用いて機能確認及びユーザへの影響調査のための商用試験を行った。試験結果の例を表7-3に示す。

上記の検討により、システムの機能及び操作性、ユーザへの影響等開発当初の目標を達成できることを確認した。この試験結果をもとに、平成5年9月より本システムは一般導入される予定である。

## 7.6 結言

本章では、光ファイバ切替接続による伝送システムへの影響について論じている。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 対照信号光による通信回線への影響評価の検討により、対照信号光の曲げ入射パワーを調整することによりサービス中の現用回線の伝送品質を劣化させることなく心線対照が可能であることを明らかにした。
- (2) サービス中の光信号の瞬断による伝送装置への影響評価の検討により、アラームの流れを明確にし、切替接続点より遠方のDSUのDNR信号継続時間が近傍のDSUより長くなることを示した。また、切替接続時のDNR信号継続時間は、伝送装置の回線断時間100ms以下であり、現用回線への本システムの適用が可能であることが分かった。
- (3) サービス中の光信号の瞬断による通信サービスへの影響評価並びに商用試験結果により、光ファイバ切替接続システムが実用に供せる見通しが得られた。

## 第8章 結 論

### 8.1 本研究で得られた成果

高度情報化社会の基礎となる高度で多彩なサービスの提供が可能な全光化加入者線路網の実現に向けた研究が推進されている。本研究は、その一環として光ファイバケーブル内の心線を同定するための心線対照技術について検討したものである。本研究により得られた成果について要約すると以下のとおりである。

(1) 対照信号光を現用回線の光ファイバに入射/受光するための光ファイバ曲げ入射光学系と光ファイバ曲げ受光光学系について理論的、実験的に検討した。その結果、曲げ入射光学系については、対照信号光がコアモードとして伝搬可能な曲げ入射角と曲げ半径、UV被覆層厚の偏差、屈折率整合剤の屈折率との関係を明らかにした。さらに、曲げ入射用光ファイバと被入射光ファイバとの入射軸ずれ量と曲げ入射効率の関係を示し、入射光ビームのスポットサイズを小さくし、光源の波長を長くすることにより曲げ入射効率を大きくとれることを明らかにした。また、曲げ受光光学系については、コア内を伝搬する対照信号光を曲げ受光する時の光源波長に対する曲げ受光部の曲げ受光効率について検討し、光源波長を長くすることにより曲げ受光効率を大きく取れること、さらに、対照信号光を効率良く受光できる曲げ半径を示した。これらの結果から、曲げ入射/曲げ受光光学系を用いた心線対照方法の適用性を明らかにした。

(2) 曲げ入射/曲げ受光方式の実用化のための光学設計と光学特性の解析を行い、次のことを明らかにした。

はじめに、光ファイバ曲げ部の評価を目的として単一モード光ファイバパラメータと曲げ損失の関係、曲げ部の光ファイバ破断確率を検討し、曲げ部に要求される曲げ半径を明らかにした。次に、心線対照系の設計を目的として心線対照系の構成、要求機能を検討し、曲げ入射系、曲げ受光系の機能設計を行った。ここでは、光源波長に対する曲げ半径と曲げ入射効率、曲げ受光効率の関係を明らかにすると共に光ファイバ曲げ入射/曲げ受光光学系を用いた心線対照系の適用距離の上限値を示

した。また、受光素子と光ファイバ間にシャッタを設け、シャッタの出し入れによる受光パワーの差から光ファイバテープ内の光ファイバ心線の線番が確認できることを示した。さらに、切替前後の接続損失の変化量を曲げ入射/曲げ受光光学系により評価可能であることを示した。

(3) 心線対照実用装置の装置構成について提案し、適用形態、所要機能、要求条件、心線対照装置の設計と特性について検討した。心線対照装置の適用形態、所要機能の検討により、2か所の切替接続点間で対照を行う曲げ入射/曲げ受光方式と局内に光カップラの設置されている光線路への心線対照形態として局内の光カップラから対照信号光を端面入射し、2か所の切替接続点で曲げ受光による対照を行う端面入射/曲げ受光方式の適用を検討し、要求される所要機能として光ファイバケーブル内から切替接続対象の光ファイバテープを対照するためのテープ対照機能、光ファイバテープ内の光ファイバ心線の心線番号を対照するための線番対照機能の特性について明らかにした。また、曲げ入射光学系、曲げ受光光学系について第2章、第3章の研究結果をもとに試作検討を行い、曲げ入射装置の設計と特性として、曲げ挿入損失、対照信号光波長の選定、曲げ入射効率、クラッドモードカットの特性について明らかにした。さらに、曲げ受光装置の設計と特性として、曲げ受光効率の受光位置依存性、曲げ受光効率、線番対照機能について明らかにした。次に、切替接続損失の評価として、曲げ入射/曲げ受光方式による切替接続損失評価、OTDR (Optical Time Domain Reflectometer : 光パルス試験器) による切替接続損失評価の検討を行い、光源波長 $1.55\mu\text{m}$ を用いて、 $1.31\mu\text{m}$ 通信波長に対する接続損失が評価可能であることを示した。以上の検討結果をもとに、各心線対照方式の評価を行い、曲げ入射/曲げ受光方式の適用距離は $11\text{km}$ 、端面入射/曲げ受光方式の適用距離は $29\text{km}$ であることを明らかにした。

(4) 光アクセス機能を有する光コネクタの基本構造を提案し、構造設計法、光アクセス特性について検討した。本コネクタの構造設計法については、提案した単一モード光ファイバと光導波路の接着構造において光受光効率が軸ずれ方向に依存しないこと。また、最適な接着構造について理論的、実験的に検討し、光ファイバ先端から光導波路先端までの長さ $l \leq 0.6\text{mm}$ 、接触長 $L \geq 8\text{mm}$ 必要であることを明らかにした。さらに、光アクセス特性として光受光効率の接続損失依存性、光導波路接着用UV樹脂の屈折率と光受光効率の関係、接続損失と光入射効率の関係を明ら

かにし、光コネクタ接続部において対照光を受光可能であること、光導波路から対照光を単一モード光ファイバに入射可能であることを示した。以上の検討結果をもとに光アクセス用光ファイバコネクタを試作した。その結果、接続点において対照用光信号光を光ファイバ回線内へ入射し、任意の接続点において受光可能であることを確認した。

(5) 光ファイバ心線接続部と余長心線を収納する光ファイバ心線処理部の光損失変動特性評価法について検討した。まず、心線処理時の光損失変動要因として心線の曲げ変形に着目し、心線の曲げ処理、側圧、捻れによる心線の曲がりモデル化し、曲げ損失に対して理論的、実験的に検討し、曲げ処理では曲げ半径が $40\text{mm}$ 以下になると光損失増は約 $0.02\text{dB}$ から急激に増加すること、また、側圧による光損失増は、 $0.02\text{dB}$ 以下となること、さらに捻れによる光損失増は捻れ部の長さを $8\text{mm}$ 以上にするにより無視できることが分かった。その結果、心線処理時の光損失変動の主要因は、心線の曲げ処理であることを明らかにした。光損失が正弦波状に変動する光線路モデルについて、アナログベースバンド画像信号を伝送した場合の光損失変動特性評価法を検討し、光出力対光損失変動量SNRは各周波数成分に対して $37.1\text{dB}$ 以上必要であることを明らかにした。心線処理方式として個別処理方式及び一括処理方式を取り上げ、心線処理部に対し心線接続部及び接続余長心線の収容実験を行い、これらに近接した心線の光損失変動特性を評価した。その結果、個別処理方式はアナログベースバンド画像信号伝送時の信号対雑音比の劣化が小さいため、ケーブル接続部において心線の接続替が必要な加入者光線路に適した心線処理方式であることを明らかにした。

(6) 光ファイバ切替接続による伝送システムへの影響について検討した。対照信号光による通信回線への影響、通信サービス中の光信号の瞬断による伝送装置、通信サービスへの影響を明らかにした。さらに、光ファイバ切替接続システムの商用試験を行い、本システムの機能、操作性、ユーザへの影響等開発目標を達成できることを確認した。

## 8.2 本研究の工学的価値

本研究で得られた工学的価値について要約すると以下の通りである。  
本研究成果は、光加入者線路網の保守運用技術を飛躍的に高めることが可能であり、

高度情報化社会を支えるインフラストラクチャである光ファイバケーブル網の柔軟な運用を可能とする重要な要素技術となる。

本研究で得られた心線対照技術は、光ファイバ切替接続システムとして公衆電気通信網に導入される予定であり、現在NTTネットワークシステム開発センタにおいて現場環境下における機能確認試験が進められている。

また、光ファイバケーブル接続部では、線路建設時以外にケーブル移転等により光ファイバ心線処理部を動かす場合がある。信号伝送品質の観点からこのときの光伝送特性評価法を明らかにする必要があるが、従来光ファイバの動的損失変動特性について検討した例はない。本研究では、心線処理部において光損失変動特性を検討して、アナログベースバンド画像伝送方式に対する光損失変動特性評価法を明らかにしており、これより伝送品質劣化を生じない心線処理法および心線処理構造設計に対する一つの指針を与えることができた。本研究は、現在公衆電気通信網に導入されている光ファイバケーブル接続部取納技術の基盤となる研究成果であり、光線路設備構築技術に貢献するものである。

### 8.3 今後の展望

本研究は、光線路網の柔軟な運用を可能とする保守運用技術の提供を可能とした。今後は、光加入者線路網の運用、管理の省力化を目的として、特定の接続点に光スイッチを配置し、光線路の故障、需要変動に対応するための光線路切替運用技術、光線路設備の予防保全を目的とした光線路監視試験技術、光線路設備情報の管理、運用技術の統合を目的とした光線路オペレーションシステム技術の研究開発が重要となる。光加入者線路の構築技術と保守運用技術の自動化を目指したフィールドシステム技術の革新に向けた研究開発が推進されるであろう。

## 謝 辞

本研究をまとめるにあたり、終始懇切なご指導とご高配を賜った東京大学工学部桂井誠教授に心から深く感謝の意を表します。

また、東京大学工学部羽鳥光俊教授、小田哲治教授、菊地和朗助教授、保立和夫助教授、日高邦彦助教授には終始懇切なご指導と有益なご助言を頂いたことを深く感謝致します。水沢純一通信網総合研究所特別研究室長（元東京大学工学部助教授）には懇切なご指導と有益なご助言を頂いたことを感謝致します。さらに、茨城大学工学部藤井寛一教授にはご助言、ご激励を頂いたことを感謝致します。

本研究はNTT（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、フィールドシステム研究開発センタにおいて行ったものであり、当初研究の機会を与えて頂き、ご鞭撻頂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）、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）、坂本光住友電気工業株式会社横浜研究所長（当時線路システム研究部長）ならびに論文執筆の機会とご指導、ご助言を頂きました涌井裕フィールドシステム研究開発センタ所長、八木浩研究開発企画部長、石原浩志光加入者ケーブルシステム研究部長、川瀬正明光通信線路研究部長に感謝致します。

本研究を進めるにあたり光線路切替技術に関して、二瓶文博NTTアドバンステクノロジ株式会社取締役（当時光加入者線路室長）、徳田正満通信網総合研究所首席研究員（当時線路方式研究室長）、山本良一フィールドシステム研究開発センタ主幹研究員（当時線路方式研究室長）ならびに光線路切替技術の実用化に関して、高島征二グループ事業推進本部担当部長（当時ネットワークシステム開発センタ担当部長）、上野谷拓也山口支店長（当時ネットワークシステム開発センタ担当部長）にご指導頂きました。また、高江洲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）、村田久東北アルプス株式会社（当時ネットワークシステム開発センタ主幹技師）には切替システムの構成について、フィールドシステム研究開発センタ小林英夫主幹研究員、富田信夫主幹研究員、渡辺一郎主任研究員には切替技術、光ファイバ収容技術、切替制御技術に関して有意義なご指

導、ご討論を頂きました。フィールドシステム研究開発センタ 芦谷文博担当部長、松本三千人主幹研究員、長沢真二主幹研究員、灰原正主任研究員及びネットワークシステム研究開発センタ 牧野文社員、徳島支店 藤村重敏社員（当時ネットワークシステム研究開発センタ社員）、熊本南部支店 千々岩洋一社員（当時フィールドシステム研究開発センタ社員）には研究開発の各段階においてご討論、ご援助を頂き感謝致します。

本研究はさらに数多くのNTT開発部門の方々、導入事業部の方々及び試作製造で関連した各社の方々のご協力のもとに達成されたものであり、ここに感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) T. H. Maiman, "Stimulated optical radiation in ruby maser", Nature, vol. 187, pp. 493, 1960.
- (2) J. Hirano, C. Okawara, T. Ito, "Optical PCM transmission experiments through the atmosphere", Japan Telecommunication Review, vol. 13, pp. 94, 1971.
- (3) J. Hirano and Y. Fukutsu, "Stability of a light beam in a beam waveguide", Proc. IEEE, vol. 52, pp. 1284, 1964.
- (4) 川瀬、秦野、勝山、湖上、： "加入者高密度光ファイバケーブル"、通研実報、Vol. 34, No. 7, pp. 1111-1118 (1985).
- (5) 川瀬、湖上、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、Vol. 1, No. 1, pp. 73-76 (1984).
- (6) 佐武、長沢、加島、 "プラスチック成形光ファイバ多心コネクタの設計と特性"、信学論、Vol. J68-B, No. 3, pp. 427-434 (1985).
- (7) 長沢、古川、巻田、村田、 "高速切替可能なSM型光ファイバコネクタ"、平1信学総全大、B-636.
- (8) 松本、村田、宮内、窪田、 "光ファイバスプライス技術"、通研実報、Vol. 35 No. 8, pp. 773-778 (1986).
- (9) 立蔵、加島、平井、 "光ファイバ多心一括融着接続法"、通研実報、Vol. 34, No. 2, pp. 363-375 (1985).
- (10) F. Nihei, Y. Katsuyama and M. Tokuda, "High-count fiber cable and joining technologies for subscriber network", IEEE Global Telecommunications Conference, Vol. 1-4, pp. 1210-1215 (1986).
- (11) H. Kobayashi, M. Shimizu, I. Watanabe and T. Ueno: "Optical subscriber cable transfer system", Proc. ECOC 90th, pp. 521-524 (1990).
- (12) 山下、 "やさしいデジタル伝送"、pp. 190-192, 電気通信協会 (1988).
- (13) 沖見、加納、井上、 "ISDN"、pp. 149-151, 電気通信協会 (1988).



- (14) NTT高度通信サービス事業本部: "高速デジタル伝送サービスの技術参考資料", pp.14-62, 企画センター(1990).
- (15) I. Watanabe, M. Shimizu and H. Kobayashi: "Optical fiber cable transfer splicing system", International Wire & Cable Symposium Proceedings, 1989, pp.191-197.
- (16) H. Kobayashi, M. Shimizu, I. Watanabe, T. Maki and T. Uenoya: "Optical fiber cable transfer splicing system for fiber ribbon cables", ECOC, 1990, pp.521-524.
- (17) 小林、清水、渡辺: "光CATSシステムの概要" 信学技報, CS89-17, pp.37-41, 1989.
- (18) 清水正利、小林英夫: "現用光ファイバ線路の心線対照を目的とした光ファイバ曲げ入射/曲げ受光光学系の検討" 信学論B-I, Vol. J74-B-I, No. 7, pp.570-576, 1991.
- (19) 清水、藤村、村田: "光ファイバケーブル切替接続システム用心線対照法" 平1 信学春季全国大会, B-647.
- (20) 清水、牧、宮島、小林: "心線対照用光ファイバ曲げ入射/曲げ受光結合系の理論的検討" 平2 信学春季全国大会, B-895.
- (21) Vincent C. Y. SO, Richard P. HUGHES, Jason B. LAMONT, and Paul J. VELLA: "Splice Loss Measurement Using Local Launch and Detect", J. Lightwave Technol., vol. Lt-5, No. 12, pp.1663-1665, 1987.
- (22) Patrick V. Andrews, Richard Grigsby, Roger J. Hazelgen, Martin T. McDonough, and Sanjiv Saha: "A Portable Self-Aligning Fusion Splice for Single-Mode Fiber", International Wire & Cable Symposium Proceedings, pp.58-63, 1984.
- (23) K. Arakawa, K. Yoshida and H. Ikeya: "A Method for identifying single-mode fibers in an operating fiber cable system", IWCS, 1989, pp.88-93.
- (24) 井上彰二郎著: 光導波路, 朝倉書店, p.163-164, 1980.
- (25) 例えば、多田邦雄、神谷武志著: 光エレクトロニクスの基礎、丸善、p33-38, 1974.

- (26) M. Shimizu, H. Kobayashi, I. Watanabe, T. Maki and T. Uenoya: "Identification method for optical fiber transmission operation lines with local-light injection and detection coupling system", International Wire & Cable Symposium Proceedings, 1990, pp.735-741.
- (27) Marucuse, D.: "Loss analysis of single-mode fiber splices", Bell Sys. Tech. j., vol.56, pp.703-718, 1977.
- (28) 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", J. Lightwave Technol., vol.7, No. 11, pp.1675-1681, 1989.
- (29) Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, H. Kobayashi, and Y. Ishida: "Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing", J. Appl. Phys., vol. 53, pp.4847-4853, 1982.
- (30) Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, and Y. Ishida: "Reliable assurance for long-length optical fiber based on proof testing", Electron Lett., 17, pp.567-568, 1981.
- (31) N. Tomita, H. Kobayashi, M. Shimizu, and J. Takagi: "A New High-Density Fiber Organazer for Optical Fiber Cable Joints", IEEE J. Lightwave Tech. LT-4, 8, pp.1223-1227 (Aug. 1986).
- (32) 小林英夫、清水正利、渡辺一郎、牧輝文、上野谷拓也: "光多心コネクタを用いる心線切替システムの設計と特性" 信学論B-I, Vol. J74-B-I, No. 8, pp.628-638, 1991.
- (34) H. Takasugi, N. Tomita, T. Uenoya, I. Nakamura, and Y. Yokoo: "Design and evaluation of automatic optical fiber operation support system", IWCS, 1990, pp.623-629.
- (35) 牧輝文、清水正利、藤村重敏、小林英夫: "光ファイバ曲げ入射/曲げ受光を用いた心線対照法の検討" 1990年信学春季全国大会, B-893.
- (36) 清水正利、千々岩洋一、捫垣泉、小林英夫: "光ファイバケーブル切替接続用心線対照装置" 1991年信学春季全国大会, B-895.
- (37) 藤村重敏、清水正利、上野孝次、小林英夫: "光ファイバ曲げ入射/曲げ受光

- を用いた接続損失評価法の検討” 1990年信学春季全国大会、B-896.
- (38)清水正利、牧輝文、小林英夫：“加入系光CATS切替時のコネクタ接続損失の評価” 1990年信学春季全国大会、B-893.
- (39)山下、羽田野、小山田、徳田：“曲げ法を用いた光心線対照器の結合効率”、信学論(B)、J66-B、pp287-288(昭58-11)
- (39)清水、藤村、村田：“光モニタ機能を有する光ファイバコネクタ” 昭63信学春季全大、B-611
- (40)清水、藤村、村田：“光アクセス機能を有する光コネクタの実験的検討” 昭63信学秋季全大、B-350
- (41)I. Hatakeyama and H. Tsuchiya: "Fusion Splice Loss for Single-Mode Optical Fiber", Trans. IECE Jpn. J62-C, 803(1979)
- (42)T. Satake, S. Nagasawa, R. Arioka: "A New Type of Plastic-Molded Single-Mode Multifiber Connector", J. Lightwave Technol., vol. LT-4, no. 8, pp. 1232-1236, 1986.
- (43)末松安晴、伊賀健一：光ファイバ通信入門、オーム社、pp18-20.
- (44)小林、杉田、石原、三川：“加入者光線路構成物品の設計と特性”、通研実報33、3、pp. 571-584(1984).
- (45)宮内、下田、戸田、岩崎、星川：“光ファイバケーブルの接続余長処理部の構成方法”、昭55信学全大、1862.
- (46)徳田、堀口、植木、大島、田中：“励振用標準ファイバの設計と特性”、信学論(B)、J65-B、2、pp. 145-152(昭57-02).
- (47)国分、奏野、勝山、村田：“紫外線硬化樹脂被覆光ファイバテープの構造設計の検討”、信学論(C)、J69-C、5、pp. 580-587(昭61-05).
- (48)石原、内田：“光ファイバ心線の側圧-光損特性”、信学論(B)、J64-B、4、pp271-278(昭56-04).
- (49)高木、富田、佐村：“光ケーブル接続部の心線処理構造に関する検討”、昭59信学全大、456.
- (50)岩切晴二：微分積分学精説、培風館、pp. 332-335(昭44).
- (51)清水、富田、小林、小笠原：“光ケーブル接続部における心線処理部の光損失

- 変動特性”、信学論(B)、J69-B、3、pp. 281-282(昭61-03).
- (52)山口、藤田：電気通信工学 電気通信協会、pp. 122-146(昭61).
- (53)米田、金田、箱田、沢田、石尾：“カラーテレビジョン光伝送方式の設計と特性”、通研実報、30、9、pp. 2151-2166(昭56).
- (54)清水、小林、富田：“光ファイバ心線処理部の曲率変動と光損失変動特性”、昭61信学全大、303.

研究業績（発表論文リスト）

（A）Papers

（ア）本論文に関する論文

（1）清水正利、小林英夫：

“現用光ファイバ線路の心線対照を目的とした光ファイバ曲げ入射／曲げ出射光学系の検討”、信学論B-I, Vol. J74-B-1, No. 7, pp. 570-576, 1991.

（2）M. Shimizu, S. Takashima and H. Kobayashi：

“Identification System for Optical Fiber Transmission Operation Lines with Local-light Injection and Detection Coupling system”, J. Lightwave Tech. Vol. 10, No. 5, pp. 686-692 (MAY 1992).

（3）清水正利、千々岩洋一、小林英夫、高島征二：

“光ファイバ切替接続用心線対照装置の設計と特性”、信学論B-I, Vol. J75-B-1, No. 3, pp. 180-189, 1992.

（4）清水正利、小林英夫：

“光アクセス機能を有する単一モード光コネクタ”、信学論B-I, Vol. J74-B-1, No. 6, pp. 517-522, 1991.

（5）清水正利、富田信夫、小林英夫：

“光ファイバケーブル接続部における心線処理部の光損失変動特性”、信学論B, Vol. J71-B, No. 1, pp. 10-17, 1988.

（イ）本論文に関係しない論文

（6）小林英夫、清水正利：

“ロータリ型メカニカル光スイッチの検討”、信学論B-I, Vol. J74-B-1, No. 6, pp. 523-531, 1991.

（7）小林英夫、清水正利、渡辺一郎：

“光コネクタ切替機構の設計と特性”、信学論B-I, Vol. J74-B-1, No. 5, pp. 408-416, 1991.

（8）小林英夫、清水正利、渡辺一郎、牧輝文、上野谷拓也：

“光多心コネクタを用いる心線切替システムの設計と特性”、信学論B-I, Vol. J74-B-1, NO. 8, PP. 628-638, 1991.

（9）小林英夫、原田信吾、清水正利：

“架空ケーブルクロージャ心線処理構造の検討”、信学論B, Vol. J70-B, No. 10, pp. 1149-1156, 1987.

（10）N. Tomita, H. Kobayashi, M. Shimizu and J. Takagi：

“A New High-Density Fiber Organizer for Optical-Fiber Cable Joints”, J. Lightwave Technol., Vol. LT-4, No. 8, pp. 1223-1227, 1986.

（11）藤井寛一、清水正利、笠井克洋：

“負グロー型レーザの直接変調”、電学論A, Vol. 110-A, No. 8, Aug., 1990.

（B）国際大会講演（査読あり）

（1）M. Shimizu, H. Kobayashi, I. Watanabe and T. Uenoya：“Identification method for optical fiber transmission operation lines with local-light injection and detection coupling system”, IWCS, 1990, pp. 735-741.

（2）H. Kobayashi, M. Shimizu, I. Watanabe, T. Maki, and T. Uenoya：“Optical fiber cable transfer splicing system for fiber ribbon cables”, ECOC, 1990, pp. 521-524.

（3）I. Watanabe, M. Shimizu and H. Kobayashi：“Optical fiber cable transfer splicing system using optical fiber connectors”, IWCS, 1989, pp. 191-197.

（4）K. Fujii, M. Shimizu, and T. Takahashi：“Control of the cathode fall in potential by a grid electrode applied to lasers”, Gas Discharges and their Applications, 1982, pp. 184-186.

（5）T. Matsumoto, A. Kanekawa, M. Shimizu, and K. Fujii：“Ion source with a grid electrode for continuous energy control”, ISLAT'83&IPA T'83, 1983, pp. 397-402.

（C）Letters

（1）清水正利、富田信夫、小林英夫、小笠原治：“光ケーブル接続部における心線処理部の光損失変動特性”、信学論（B）、J69-B, 3, pp. 281-281, 1986

(D) 通研実報、Rev. of ECL 等

- (1) H. Kobayashi, K. Takeda, M. Shimizu : "Optical cable joint cabinets and closures for subscriber loops", Rev. ECL, NTT, Japan, Vol. 34, No. 6, pp. 661-667, 1986.
- (2) H. Kobayashi, M. Shimizu, I. Watanabe and S. Nagasawa : "Development of optical fiber cable Transfer Splicing system", NTT REVIEW, Japan, Vol. 3, No. 1, pp. 105-109, 1991.
- (3) 小林英夫、清水正利、渡辺一郎、長沢真二 : "光ファイバの高速切替で信頼されるサービスを〔光ファイバケーブル切替接続システム(光CARSシステム)の開発〕" NTT技術ジャーナル、No. 8, pp. 15-17, 1990.

(E) 講演、研究会

- (1) 小林英夫、清水正利、渡辺一郎 : "光CATSシステムの概要" 信学技報、CS89-17、pp. 37-41, 1989.

(F) 講演、全国大会

- (1) 清水正利、小笠原治、東恒人 : "光ファイバ心線処理部の伝送特性の検討" 昭59信学総全大、2224.
- (2) 佐村正義、清水正利、小笠原治 : "加入者光線路切換板の検討"、昭59信学総全大、2226.
- (3) 小笠原治、勝間田保明、清水正利 : "加入者光線路配線盤の設計法に関する検討"、昭59信学総全大、2223.
- (4) 清水正利、岩下克 : "単一偏波光ファイバの偏波分散の一測定法"、昭59信学総全大、1163.
- (5) 富田信夫、小林英夫、清水正利 : "光ファイバ心線接続部の高密度収容設計法の検討"、昭59信学総全大、455.
- (6) 清水正利、富田信夫、小林英夫、小笠原治 : "光ファイバ接続部における心線の動的変動と伝送特性"、昭59信学総全大、531.
- (7) 清水正利、富田信夫、小林英夫 : "光ケーブル接続部における曲げ損失の距離依存性"、昭60信学総全大、2198.
- (8) 清水正利、富田信夫、小林英夫、柳浦均 : "光ファイバ型5入力5出力光スイッチの検討"、昭60信学総全大、338.

- (9) 清水正利、小林英夫、富田信夫 : "光ファイバ心線処理部の曲率変動と光損失変動特性"、昭61信学総全大、303.
- (10) 清水正利、小林英夫 : "ロータリ式光ファイバ型光スイッチの検討"、昭61信学総全大、2181.
- (11) 清水正利、原田進吾、小林英夫、富田信夫 : "光架空ケーブル接続部の伝送特性の検討"、昭61信学総全大、2260.
- (12) 清水正利、小林英夫、富田信夫 : "光ファイバ心線処理部の曲率変動と光損失変動特性"、昭61信学総全大、303.
- (13) 清水正利、小林英夫 : "ロータリ式光スイッチの構造検討"、昭62信学総全大、2023.
- (14) 清水正利、藤村重敏、村田久 : "光モニタ機能を有する光ファイバコネクタ" 昭63信学春季全大、B-611.
- (15) 清水正利、藤村重敏、村田久 : "光アクセス機能を有する光コネクタの実験的検討" 昭63信学秋季全大、B-350.
- (16) 清水正利、藤村重敏、渡辺一郎 : "光ファイバケーブル切替接続システム用心線対照法"、1989年信学春季全国大会、B-646.
- (17) 牧輝文、清水正利、藤村重敏、小林英夫 : "光ファイバ曲げ入射/曲げ受光を用いた心線対照法の検討"、1990年信学春季全国大会、B-893.
- (18) 小林英夫、清水正利、渡辺一郎、千々岩洋一 : "加入系光ファイバケーブル切替接続(光CATS)システムの開発"、1990年信学春季全国大会、B-893.
- (19) 清水正利、牧輝文、宮島康、小林英夫 : "心線対照用光ファイバ曲げ入射/曲げ受光結合系の理論的検討"、1990年信学春季全国大会、B-895.
- (20) 藤村重敏、清水正利、上野孝次、小林英夫 : "光ファイバ曲げ入射/曲げ受光を用いた接続損失評価法の検討"、1990年信学春季全国大会、B-896.
- (21) 小林英夫、清水正利、千々岩洋一 : "光CATSコネクタ切替移動機構の動特性"、1990年信学春季全国大会、B-697.
- (22) 清水正利、牧輝文、小林英夫 : "加入系光CATS切替時のコネクタ接続損失の評価"、1990年信学春季全国大会、B-893.

(23)清水正利、千々岩洋一、捫垣泉、小林英夫：「光ファイバケーブル切替接続用心線対照装置」、1991年信学春季全国大会、B-895.

(24)清水正利、藤村重敏、村田久：「光ファイバケーブル切替接続システム用心線対照法」平1信学春季全国大会、B-647.

## 関 連 特 許

1. 特願昭60-058406(60.04.19), 「光ファイバ心線接続部収納体」柳浦、小林、清水
2. 特願昭60-095296(60.06.24), 「光ケーブル用接続盤」柳浦、小林、清水
3. 特願昭60-170243(60.08.01), 「光ファイバ心線接続部収納体」柳浦、小林、清水
4. 特願昭60-169867(60.08.02), 「光ファイバ心線接続部収納体」柳浦、小林、清水
5. 特願昭60-175922(60.08.12), 「光スイッチ」清水、小林、原田
6. 特願昭60-204667(60.09.17), 「光スイッチ」清水、小林、原田
7. 特願昭60-220448(60.10.04), 「光ファイバ切替器」小林、清水
8. 特願昭61-125653(61.06.02), 「光ファイバ切替器」小林、清水
9. 特願昭62-024803(62.02.06), 「光ファイバ光路切替器」小林、清水
10. 特願昭62-299072(62.11.27), 「光ファイバ回線のアクセス方法及びそのコネクタ」清水、小林
11. 特願昭62-303945(62.12.01), 「光ファイバ心線切替接続方法」小林、清水
12. 特願昭62-327214(62.12.25), 「光コネクタ切替接続装置」小林、清水
13. 特願昭62-335740(62.12.28), 「異種光ファイバ結合器」清水、小林
14. 特願昭63-002428(63.01.11), 「光ファイバの溶融切断方法」村田、小林、清水
15. 特願昭63-018488(63.02.01), 「光ファイバ心線中間被覆除去方法及びその装置」小林、村田、清水
16. 特願昭63-156924(63.06.27), 「光ファイバの心線対照方法及び心線対称装置」清水、小林、村田
17. 特願平01-091945(01.04.13), 「偏波変調装置」堀口、清水
18. 特願平01-238463(01.09.14), 「光通話機」清水、小林、富田
19. 特願平02-067174(02.03.19), 「光ファイバ線路切替方法」清水、小林
20. 特願平03-080094(03.04.12), 「任意接続型マトリクス光スイッチ」清水、小林
21. 特願平03-099207(03.04.30), 「任意接続型マトリクス光スイッチ」清水、小林
22. 特願平03-099208(03.04.30), 「マトリクス光スイッチ」清水、小林
23. 特願平03-144401(03.06.17), 「多心光ファイバスイッチおよび接続替え方法」片桐、立蔵、清水、小林

24. 特願平03-172759(03.07.12),「光ファイバ切替装置」立蔵、片桐、清水、小林
25. 特願平03-187774(03.07.26),「光配線切替装置」片桐、立蔵、小林、清水
26. 特願平03-260795(03.10.08),「光線路切替接続装置」小林、清水、立蔵
27. 特願平03-266242(03.10.15),「光線路切替接続装置」小林、清水、立蔵
28. 特願平03-266254(03.10.15),「光線路切替接続装置」小林、清水、立蔵

