< 綜 説 >

(受理: 平成 15 年 4 月 28 日)

光ファイバケーブル接続技術

Optical Fiber Splices and Connector

高谷 雅昭*・荒川 孝二*

Masaaki TAKAYA and Koji ARAKAWA

1. はじめに

高度情報化社会の実現に向けて、通信網の光化は必要不可欠である。経済的かつ信頼性の高い光通信網の構築には、媒体である光ファイバケーブル技術はもちろん、その接続技術は大変重要である。これまでに様々な光ファイバケーブル及びその接続技術がその用途に合わせて開発されてきた。光ファイバケーブルの接続は、メタルケーブルの接続と異なり、接続する光ファイバ同士の軸方向の正確な位置合わせが要求される。シングルモード (SM) 型光ファイバのコア径は約 $10\mu\text{m}$ と微小なため、その接続には高度な技術が必要である。現在用いられている主な光ファイバ接続技術は以下の3種類である。第一に融着接続技術。本技術は光ファイバの先端を高温で溶融し、その先端同士を互いに融着した状態で固定する技術である。光ファイバ同士を融着で固定するため、再接続は不可能である。第二にメカニカルスプライス技術。本技術はV溝によって光ファイバ同士を位置あわせし、上下の基盤で光ファイバを挟み込み、固定する技術である。本技術も信頼性の観点から融着接続と同様再接続は難しい。第三が光コネクタ技術。本技術は光ファイバの先端に光ファイバ固定用の部品 (フェルル) をとりつけ、このフェルル同士を高精度に位置あわせすることにより、光ファイバ同士の高精度な接続を実現する技術である。光コネクタ技術は簡単に再接続が可能であるため、着脱が頻繁に行われる場所において、ますます多用される傾向にある。しかし一方で、光コネクタは、価格

や性能の面で他の2つの技術に劣る。

光コネクタ技術において、光ファイバに光コネクタフェルルを取り付ける際、多くの光コネクタでは、接着剤を用いた固定方法が用いられている。このため、接着剤の性能が光コネクタの性能に大きく影響を与える。本稿では主に光ファイバ接続技術、特に光コネクタ技術に焦点を当て、その性能や要求条件について述べる。

2. 光ファイバケーブル技術

光ファイバケーブルの需要は年々高まりをみせている。アクセス系での光ファイバケーブル敷設長は、平成 13

高 谷 雅 昭

略歴: 1992年3月名古屋大学工学部
修士課程修了
1992年4月日本電信電話株式
会社入社
現在、東日本電信電話株式会
社サービス運営部技術協力セ
ンタにおいて、アクセス系光
線路の技術サポート業務に従
事
趣味: 旅行、読書

荒 川 孝 二

略歴: 1978年3月大阪府立大学工学
部卒
1978年4月電電公社入社
その後、研究所等において光
通信技術に関する研究開発に
従事
現在、東日本電信電話株式会
社サービス運営部技術協力セ
ンタにおいて、アクセス技術
全般にわたる技術サポート業
務に従事
趣味: スポーツ全般

* 東日本電信電話株式会社 サービス運営部 技術協力センタ
東京都品川区東五反田四丁目 10-23 〒141-0022
NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE EAST
CORPORATION
4-10-23 Higashigotanda, Shinagawa, Tokyo 141-0022
Japan

図1 光ファイバテープの構造

年度で約 24 万 km となった。これはメタルケーブルとの比較では 5 分の 1 程度であるが、光ファイバケーブルの敷設長は、今後も増加傾向にある。光ファイバケーブルの構造は様々であるが、国内における多心光ファイバケーブルの構造は、光ファイバテープを用いたスロット構造が主流である。ここで、光ファイバテープとは複数の光ファイバを一括してテープ化する技術であり、光ファイバが 0.25mm 間隔で配列されている。図 1 に光ファイバテープの構造を示す。光ファイバテープの厚さは 0.3mm であり、テープ部には紫外線硬化型 (UV) 樹脂が用いられている。光ケーブルを光ファイバテープで設計することの利点としては、光ファイバケーブルの高密度化が可能であること、心線接続時間を短縮できること、ハンドリング特性を向上できるなどが挙げられる。光ファイバテープには、主に 4 心と 8 心が存在し、4 心テープは 300 心以下のケーブルに、8 心テープは 400 心以上のケーブルに使用されている。

3. ファイバケーブル接続技術

図 2 に光アクセス網の概略図を示す。図に示すように、光アクセス網ではその用途に合わせて様々な接続技術が

用いられている。地下系光ファイバケーブル接続には多心融着接続や多心光コネクタ接続が、架空光ファイバケーブル接続にはこれらに加えてメカニカルスプライス接続技術が用いられている。また、局内やビル内など、単心の光配線が用いられている場所では、単心の光コネクタが主に用いられている。

3.1 接続損失の要因

同種の SM 型光ファイバ接続時に生じる光損失の主な要因は以下の 3 点である。第一に光ファイバのコア的位置ずれ、第二に接続した光ファイバ同士端面角度、第三に光ファイバ同士の間隙である。以上の要因によって生じる接続損失値 L (dB) は、以下の式によって導かれる。

$$L(\text{dB}) = -10 \log \left[\frac{16 \cdot n_1^2 \cdot n_0^2}{(n_1 + n_0)^4} \cdot \frac{S}{q} \exp \left(-\frac{p \cdot u}{q} \right) \right] \quad (1)$$

$$p = \frac{(kg \cdot \omega t)^2}{2} \quad q = G^2 + \frac{(S+1)^2}{4} \quad F = \frac{d}{kg \cdot \omega t^2}$$

$$G = \frac{z}{kg \cdot \omega t^2} \quad S = \left(\frac{\omega r}{\omega t} \right)^2$$

$$u = (S+1) \cdot F^2 + 2 \cdot S \cdot G \cdot \sin \theta + S \cdot \left(G + \frac{S+1}{4} \right) \cdot \sin^2 \theta$$

ここで、 n_1 , n_0 はそれぞれ光ファイバのコアと間隙の屈折率、 ω_i , ω_r はそれぞれ出射側、入射側の光ファイバのモードフィールド径、 d は接続した光ファイバ同士のコアの位置ずれ量、 z は光ファイバ間の間隙、 θ は接続した光ファイバの端面角度を表す。これまでの報告から、現在の接続技術における損失の主な要因は光ファイバコアの位置ずれ量であることが分かっている。そこで、式 (1) から位置ずれ量以外の要因を取り除くと式 (2) が得られる。

図2 光アクセス網における接続技術

$$L(\text{dB}) = 4.34 \cdot \left(\frac{d}{\omega} \right)^2 \quad (2)$$

接続損失は主に式 (2) によって示される。ただし、出射側と入射側のモードフィールド径は同じと仮定した。

3.2 融着接続

融着接続技術は光ファイバ同士を物理的に接合させる技術である。光ファイバは石英ガラスで出来ていることから高温 (2000℃程度) に熱すると先端が軟化する。融着接続では主に放電によって光ファイバの先端を加熱し、先端が軟化した状態で両端を付き合わせ、加熱を止めることで光ファイバ同士の融着を実現している。多心光ファイバを融着する場合は、放電の際の電界が一樣になる位置に光ファイバを配列するよう電極の位置と光ファイバの位置を適切に設計することが必要である。

融着接続において、光ファイバ同士の位置あわせを行う方法としては、光ファイバの外形を基準に調心する方法と、コアを調心する方法の2種類がある。接続損失を低減させるにはコアによって調心する方法が優れている。

融着接続技術は、物理的に光ファイバをつなげるため、信頼性は高い技術である。しかし反面、接続のための機器が高価であるという欠点が存在する。

3.3 メカニカルスプライス接続

メカニカルスプライス技術は、光ファイバ同士を高精度に位置あわせし、2枚の基盤間に機械的に把持して光ファイバ同士の接続を実現する技術である。メカニカルスプライスは接続方法が簡単のため、架空などの悪環境での作業にも適している。メカニカルスプライスによる接続は融着接続の場合と同様、光ファイバのコア位置を正確に一致させることが重要である。これまでに様々なタイプのメカニカルスプライスが実用化されており、光ファイバ同士を高精度に位置合わせする方法としては、基盤上にV溝を形成する方法や、ガラスチューブを用いる方法などが用いられている。

メカニカルスプライス技術は機械的に光ファイバを把持する技術であるため、信頼性は融着と比べ劣る。しかし、現在では屋外での使用には問題の無い性能のものが実用化されている。図3にプラスチックV溝基板を用いた単心用のメカニカルスプライスの概略図を示す。光ファイバは基盤に形成されたV溝によって高精度に位置あわせされている。上下のプラスチック基盤間に挟まれた光ファイバはクランプスプリングによって把持される。本メカニカルスプライスは小型軽量である上に、専用の工具を用いることにより簡単に低損失な光ファイバの接続が実現可能である。さらに、電源や接着剤を用いないため、場所を選ばず接続が可能である。同様な構造で多心のメカニカルスプライスも実用化されている。

図3 メカニカルスプライス部品

3.4 光コネクタ接続

光ファイバ同士の接続において、着脱が頻繁に行われる箇所では光コネクタ技術が有用である。これまでに様々な光コネクタがその用途に合わせて用いられてきた。局内やビル内での単心接続には主にFCコネクタやSCコネクタが用いられている。さらに最近ではSCコネクタより小型のMUコネクタやLCコネクタなども一般的に用いられるようになってきた。一方、アクセス系の光ファイバケーブル接続など多心接続が必要な箇所にはMT (Mechanically Transferable) コネクタが用いられている。最近では装置間通信などでの多心接続が必要な分野でも、MTコネクタや、MTコネクタの技術を基に、プッシュプル締結方式で簡易な着脱を可能にしたMPO (Multifiber Push-On) コネクタなども用いられるようになってきた。

光コネクタ技術では、光ファイバをフェルールに取り付ける必要がある。本技術では、このフェルールに光ファイバを高精度に固定し、さらにフェルール同士を高精度に位置あわせし、高精度な接続を実現している。光ファイバをフェルールに固定する方法としては、接着剤を用いる方法が一般的である。ここでは、多心光ファイバケーブル接続用MTコネクタを例に、光コネクタ技術とその組立方法について説明する。

4. MTコネクタ

光ケーブル接続用コネクタの要求条件には、小型軽量であること、着脱作業が簡易であること、外力に耐えること、低接続損失であること、環境に対する長期信頼性があること、経済性を有することなどが挙げられる。これらの要求条件を満たす多心光コネクタとしてMTコネクタが開発された。

4.1 MTコネクタの構造

図4にMTコネクタの構造を示す。本コネクタは、2個のプラスチック成形フェルール、2本のガイドピン、及びクランプスプリングより構成される。フェルールの寸法は3mm×7mm×8mmと小型である。フェルールには2個のガイドピン穴と、その間に配列した複数の光

図4 MTコネクタ

ファイバ穴が形成されている。光ファイバは光ファイバ穴に接着固定されており、その間隔は0.25mmである。この間隔は現在用いられている光ファイバテープの光ファイバ間隔に対応している。本コネクタは最大12心の光ファイバ心線を実装することが可能である。接続は、2本のガイドピンをガイドピン穴に挿入して、フェール同士を位置あわせした後、端面を突き合わせ、クラumpスプリングで締結することによって行う。ここで、接続するフェール端面には予め屈折率整合剤を塗布する。フェールの切り放しはクラumpスプリングを取り外すことによって行う。このようにMTコネクタではコネクタの接続と切り放しが簡易に行える。

4.2 MTコネクタの損失

3.1で述べたように、光ファイバ接続時の損失の要因は、主に接続する光ファイバ同士のコア位置のずれである。光コネクタにおいては、光ファイバのコア位置のずれ量は、各コネクタ部品の位置ずれ量の重ね合わせによって決定される。図5に、MTコネクタ端面形状と、各部品の位置ずれ要因を示す。MTコネクタは、光ファイバの位置あわせを2本のガイドピンによって行うため、以下の4点が光ファイバ同士を接続したときの位置ずれ量の要因となる。

- ① 光ファイバ穴中心の位置ずれ量
- ② 光ファイバ径と光ファイバ穴径のクリアランス量
- ③ ガイドピン径とガイド穴径のクリアランス量

図5 MTコネクタの端面形状と位置ずれ要因

④ 光ファイバのコアの偏心量

これら4つの要因が、すべて2次元正規分布に従うと仮定すると、接続した光ファイバ同士の位置ずれ量 d は、以下の分布に従う。

$$f(d) = \frac{d}{2 \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{d^2}{4 \cdot \sigma^2}\right) \quad (3)$$

ただし、 s は光ファイバの位置ずれ量の標準偏差で、要因①～④の標準偏差をそれぞれ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ とすると、 $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2$ で示される。

式(2)、(3)より光ファイバの接続損失の分布 $g(L)$ は式(4)で示される。

$$g(L) = \frac{1}{\tau} \exp\left(\frac{L}{\tau}\right) \left(\tau = \frac{17.36 \cdot \sigma^2}{\omega^2}\right) \quad (4)$$

このとき光コネクタの平均接続損失 $\bar{L}$ は、式(5)で示される。

$$\bar{L} = \frac{17.36 \cdot \sigma^2}{\omega^2} \quad (5)$$

MTコネクタでは、各ずれ量を制御することにより、光ファイバのコアの位置ずれ量を決定し、低損失な光コネクタを実現している。図6に各要因を制御したときのMTコネクタの接続損失を示す。図では、光ファイバ穴の位置ずれ量の平均を $0.55 \mu\text{m}$ 以下、ガイドピン穴とガイドピンのクリアランスを $0.2 \mu\text{m}$ 以下にすることにより、平均光接続損失0.2dB以下の低損失コネクタを得ている。

図6 MTコネクタの接続損失計算結果

4.3 MTコネクタの組立方法

MTコネクタの組み立て方法を以下に示す。まずフェール部品に光ファイバを挿入し、フェール窓から接着剤を挿入する。フェール内の空間に接着剤を充填させた後、フェールを加熱器によって約10分間加熱し充填した接着剤を硬化させる。その後フェール端面を研磨し、端面を平滑にしてMTコネクタプラグが完成する。図7にMTコネクタの内部構造の概略図を示す。光コネクタフェールの先端部は、光ファイバを高精度

図7 MTコネクタの内部構造

に位置あわせるために、光ファイバ径 125 μm に対し、直径 126 μm の穴が設けられている。また、後方部には接着剤を注入するフェルル窓の下部に大きな空間が存在する。高性能の MT コネクタを実現するためには、これらすべての空間に接着剤が充填され、気泡などが存在しないことが必要である。MT コネクタの組立において接着剤の取り扱い性は大変重要であり、以下の条件が要求される。

- ① コネクタ内の充填を考慮した適切な粘度であること
- ② 作業中に硬化しないこと
- ③ フェルルへの滴下後は短時間で硬化すること
- ④ 室温での保存が可能なこと

②と③の条件は相反するものであるが、MT コネクタでは、加熱により迅速に硬化する接着剤を用いることによってこの問題を解決している。他の光コネクタでは、熱硬化型の接着剤の他に、UV 硬化接着剤や、可視光硬化接着剤なども使用されているが、UV 光の使用は現場作業での危険性が、可視光接着剤は硬化の問題が存在するため、MT コネクタでは用いられていない。

表1に屋外組立用に用いられている MT コネクタ用接着剤の基本特性を示す。

表1 MTコネクタ用接着剤の特性

混合物粘度	3000 cp
可便時間	90℃ 10分
硬化時間	25℃ 20分
ヤング率	360 kg/mm ²
線膨張係数	$4.6 \times 10^{-5} \text{mm/mm}^{\circ}\text{C}$ ($-10^{\circ}\text{C} \sim \text{Tg}$)

4.4 MTコネクタの性能

MT コネクタは平均接続損失 0.2dB 以下、反射減衰量 40dB 以上という良好な接続特性を有している。さらに、環境や機械的な負荷に対しても良好な特性を有している。表2に MT コネクタの信頼性試験項目を示す。試験項目としては振動、繰返し着脱等の機械的試験、ヒートサイクル、温湿度サイクル、高温放置、低温放置

表2 光コネクタ信頼性試験項目

環境特性	耐振性	10-55 Hz 振幅 0.75mm, 24 サイクル
	耐衝撃性	ピーク加速度 100G 6ms
	着脱	100 回
	引張り	軸方向 5.9 N
機械特性	曲げ	90° 0.5 N 10 回
	温度サイクル	-40-70℃, 4 時間, 10 サイクル
	温湿度サイクル	-10-65℃, 93%, 24h, 10 サイクル
	高温放置	70℃ 240 時間
	低温放置	-40℃ 240 時間

等の環境試験などが挙げられる。温度環境として MT コネクタでは、-40℃から 70℃までの温度範囲での性能を保障することが必要となっている。また、ここでは挙げていないが、地下で用いる場合には、水に対する耐久性も求められる。MT コネクタにおいては、各試験に対して実用上問題の無い特性が得られている。これは、MT コネクタに用いた接着剤が表に示した環境下でも問題の無い性能を有することをも示している。

5. これからの接続技術

今回紹介した MT コネクタに限らず、光コネクタに関しては更なる性能の向上や、組立方法の簡易化、経済化が求められている。特に組立作業性の向上に関しては様々な方法が検討されており、例として、接着剤を用いずにメカニカル方式で光ファイバを固定する方法や、新しい接着剤で光ファイバをフェルルに固定する方法などが挙げられる。新しい接着剤を用いる方法としては、短時間で硬化する接着剤を用いた組立方法等が検討されている。図8に MT コネクタの簡易組立技術の一例を示す。本方式では、まずフェルルに端面を高精度にカットした光ファイバを挿入し、光ファイバ端面をフェルル端面に揃える。その後、フェルル窓から高速硬化の接着剤を充填し、光ファイバとフェルルを高速に固定

図8 MTコネクタ簡易組立技術

する。この方式では、従来の MT コネクタの組立方法と異なり、接着剤の加熱工程と研磨工程が省略でき、大幅な作業時間の短縮と工具の簡易化を図ることが可能となる。ただし、フェルルールと光ファイバの間に均一に接着剤を充填する方法や、高速硬化型接着剤の耐環境特性問題など解決されていない課題が数多く存在するため、本方式は実用にはいたっていない。

6. まとめ

高度情報化社会の実現に向けて、光ファイバ網を構築することは大変重要である。光ファイバ網には様々な接続ポイントが存在するため、光ファイバの接続技術は必要不可欠である。接続技術の中でも光コネクタ技術は、着脱が必要な箇所においてはますます重要になっている。

現在用いられている光コネクタに対しては、経済化などの面から、より組立方法が簡単なものが必要となっており、その際には、新しい接着剤が必要不可欠である。また、接着剤を用いた新しい接続方法も提案されており、今後光ファイバケーブル接続技術の分野で、接着剤技術はますます重要になると考えられる。

文 献

- 1) D. Marcuse, The Bell System Technical Journal, 56, No. 5, 703 (1977)
- 2) M. Takaya, T. Katagiri, S. Nagasawa, Y. Murakami, S. Hatano, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing, 23, No. 1, 36 (2000)
- 3) K. Shibata, M. Takaya, S. Nagasawa, IEEE Photon. Technol. Lett., 13, No. 2, 136 (2001)

日本接着学会誌論文投稿について

当学会ではかねてより皆様の御研究の成果による学術論文を広く御紹介申し上げております。つきましては、最近の接着に関する科学と技術普及の為多数の論文御投稿をお願い申し上げます。当学会では多数の海外の著名な接着研究者に対して学会誌を寄贈致しております。また Chemical Abstract にも抄録されておりますので、本誌に掲載されれば、海外からの反響を期待できます。

- 1) 切 なし、随時
- 2) 投稿規定及び原稿用紙(1冊 500 円送料別)はハガキにてお申し出頂ければ折り返し御送付申し上げます。