

## ■5 群(通信・放送) - 2 編(光アクセス線路・伝送技術)

# 4 章 光ファイバケーブル

(執筆者：泉田 史，大塚健一郎，倉嶋利雄)

### ■概要■

本章では、光通信ネットワークで使用されている光ファイバケーブルについて説明する。

4-1 節では、1970 年代に始まる光ファイバケーブルの研究開発や商用化開発における技術の変遷、2000 年以降の FTTH 網を経済的に構築する光ファイバケーブル技術、高信頼性を確保するための設計技術や定期試験技術、さらには、プラスチックファイバ技術について解説する。

4-2 節では、光ファイバケーブルをアクセスインフラ設備に布設する標準的な工法について概説する。FTTH 網に適した効率的な一束化工法や多様化するユーザニーズに応える宅内における配線技術についても述べる。

4-3 節では、光ファイバケーブルの IEC (International Electrotechnical Commission) 標準化規格の製品規格と試験方法の内容と体系について紹介する。

4-4 節では、多種多様なアプリケーションに適用される光ファイバケーブルについて概説する。既設のアクセスインフラ設備を有効に利用するための細径で高密度な光ファイバケーブル技術、狭い配管の中でも配線できる低摩擦光ファイバケーブル技術、クマゼミ対策技術、サッシ窓等の隙間を通すことができる光ファイバケーブル、車の配線に使われる光ワイヤハーネス技術についても紹介する。

### 【本章の構成】

本章では、光ファイバケーブルの特徴 (4-1 節)、光ファイバケーブル布設技術 (4-2 節)、光ファイバケーブルの標準化規格 (4-3 節)、色々な光ファイバケーブル (4-4 節) について述べる。

## ■5 群 - 2 編 - 4 章

### 4-1 光ファイバケーブルの特徴

#### 4-1-1 光ファイバケーブル技術の変遷

(執筆者：星野 豊)

1970 年、当時としては画期的となる損失 20dB/km の石英光ファイバの製造が成功した。また半導体レーザの室温連続発振の成功により、光ファイバを用いた長距離通信の実現性が高まった。1970 年は“光ファイバ通信の元年”と位置づけられ、これまでのメタリックケーブルに代わる光ファイバケーブルを伝送媒体とする研究開発が進められてきた。我が国においては、1971 年に光ファイバの製造方法の研究が開始された。その後光ファイバケーブルの実用化に向けた技術検討が実施され、特にフィールドでの布設実験においては、光ファイバケーブル技術だけでなく、接続技術等のネットワーク構築に向けた技術的成果を上げてきた。

本節では、1970 年代から 1980 年代にかけて検討された光ファイバケーブル技術の変遷について概説する。

##### (1) 光ファイバケーブル開発初期

1974 年に我が国で世界初となる光ファイバケーブルの現場布設に成功した。ステップインデックス型 (SI 型) 光ファイバを用いた 4 心の光ファイバケーブルであった。図 4・1 はその光ファイバケーブルの写真であり、LAP (アルミラミネートテープ付 PE シース) 構造の外被を用いている。図 4・2 はこの光ファイバケーブルを実際のフィールドで布設実験をした現場である。この光ファイバケーブルは架空、地下にそれぞれ 200 m 布設され、光損失、接続損失等が収集された。この実験から、従来のメタリックケーブルと同じ工法での布設が可能であり、十分な可とう性を有し、細径、軽量であることから実用に耐えうるものであることを実証した。また、光ファイバに微小な曲げが生じることで発生するマイクロベンドロスを目明らかにし、その後の開発に大きく貢献した<sup>1) 2)</sup>。



図 4・1 世界初の光ファイバケーブル (4 心)

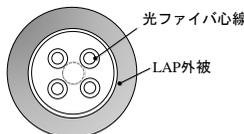


図 4・2 布設現場

1976 年、当時の電電公社 (現 NTT) の研究所構内の実験用とう道に延べ光ファイバ長 64 km の光ファイバケーブルが布設され、光中継器と組み合わせた総合的な伝送実験が行われた。

図4・3に実験に用いた光ファイバケーブルの構造を示す。光ファイバにはステップインデックス型（SI型）が用いられ、抗張力体の周囲に撚り合わせた構造であった。この実験から布設技術、接続技術、測定技術等、多くの知見が得られ、その後の光ファイバ伝送の開発に貢献した。さらに、この光ファイバケーブルは当時としては世界的にも最高水準であり、国際会議にてその成果が報告された<sup>3)</sup>。

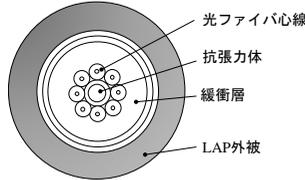


図4・3 所内実験用光ファイバケーブル構造

(2) 光ファイバケーブルの実用化検討

1976年の実験用とう道における伝送実験の成功を受けて、1978年に比較的早期に実用化が期待される近距離光ファイバケーブル伝送方式について、都内（唐ヶ崎－霞ヶ関－大手町－蔵前－浜町）の約20 kmの区間に光ファイバケーブルを布設し、伝送実験を行った。図4・4に実験ルートを、図4・5には実験に用いた光ファイバケーブルの構造を示す。

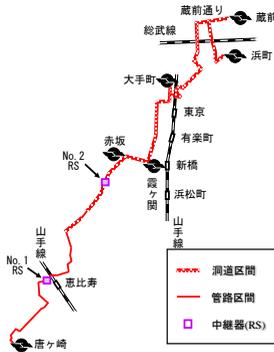


図4・4 唐ヶ崎－浜町間伝送実験ルート

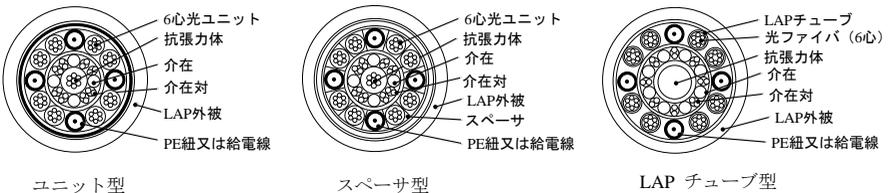


図4・5 伝送実験用光ファイバケーブル構造（48心）

実験には構造の異なる 3 種のケーブルを使用した。また、それまで数心であった光ファイバケーブルと異なり、48 心と多心化が図られた。それまでは、抗張力体の周囲に光ファイバを撚り合わせる構造であったが、48 心となるとこのような構造には限界があった。そこで、光ファイバ 6 心をユニット化し、このユニットを撚り合わせることで 48 心を実現した。ユニットは側圧等による損失増加を考慮し、3 種のユニット構造が採用された。また、光ファイバにはグレーデッドインデックス型 (GI 型) が用いられた。また、光ファイバは MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) 技術で製造されていたが、一部区間には新たな光ファイバ製造方法である VAD (Vapor-phase Axial Deposition) 技術を用いた光ファイバも使用された [MCVD と VAD は本編 3 章 3-1-1 「光ファイバとは」 参照]。後に、ユニット型は数十心の光ケーブルにいち早く採用され、スペーサ型の光ファイバ収納技術はスロット型ケーブルとして実用化されている。また、LAP チューブ型は初期の加入者用光ファイバケーブルに採用され、いずれの構造も今日の光ファイバケーブル構造の礎を築いたものとなっている。これらのケーブルは布設工事での光ファイバ破断や損失増加もなく、安定した性能を示した<sup>4)5)</sup>。

1980 年に世界で初めて 1.3  $\mu\text{m}$  帯の伝送方式について、川崎地区の約 18 km の区間に光ファイバケーブルを布設し、伝送実験を行った。ケーブル構造は前述のユニット型が採用された。光ファイバにはグレーデッドインデックス型 (GI 型) が用いられたが、それまでのコア径 60  $\mu\text{m}$ 、ガラス外径 150  $\mu\text{m}$  から、コア径 50  $\mu\text{m}$ 、外径 125  $\mu\text{m}$  に変更され、その後の国際標準となっている。[本編 3 章 3-3 「光ファイバの標準化規格」 詳細参照]

1982 年にこの実験で布設した光ファイバの伝送損失が増加していることが確認された。原因は光ファイバの被覆材料からガラス中に拡散した水素が酸素欠陥と結合した OH 基であることが判明した。このことは、光ファイバ通信実用化における最大の危機を回避しただけでなく、ケーブル材料が光ファイバの長期信頼性に影響するという知見は、今日においてもケーブル材料の選定に生かされている<sup>6)</sup>。

1980 年から 1982 年に武蔵野-厚木間の 76 km のルートで大容量、長距離区間に適用する伝送方式について、伝送実験を行った。図 4・6 に実験に用いた光ファイバケーブルの構造を示す。現在は防水材料を使用することでガス保守がされなくなったが [本章 4-1-2 「非ガス化と高密度技術」 詳細参照]、当時の中継ケーブルはガス保守するという前提でシステム設計されていた。そこで、ケーブル中にガスが充満するように、ケーブルの中に縦に切り込みの入ったプラスチックパイプ (ガスパイプ) を配置した。ガスはケーブルの長手方向にはパイプ内を通り、断面方向には切り込みから漏れることで充満するようになっている。この実験では 2,500 m の長尺ケーブルが布設され、布設時の張力を分散する中間牽引技術等の成果が得られた<sup>4)</sup>。

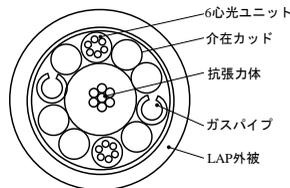


図 4・6 長距離伝送実験用光ファイバケーブル構造

### (3) 光ファイバケーブルの商用化

1981年から1982年にかけて大手町ー青山, 倉敷ー水島ほか全国で12区間に光ファイバケーブルを商用として導入を開始した。図4・7に商用試験に使用されたケーブル構造を示す。光ファイバはコア径50 $\mu\text{m}$ , クラッド径125 $\mu\text{m}$ のグレーデッドインデックス型(GI型)が使用された。光ユニットは0.9mmの3層構造心線を中心部材の周囲に撚り合わせた6心ユニットとなっている。ケーブルは光ユニットを介在と共に抗張力体に撚り合わせた構造となっている。

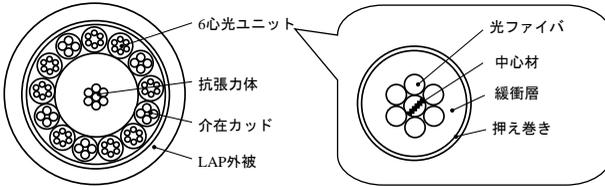


図4・7 商用試験用光ファイバケーブル構造 (48心)

1983年には旭川から鹿児島までの3,400kmを光ファイバケーブルで結ぶ日本縦貫ルートの建設に着手した。1983年に一部区間の商用試験を開始し、1985年2月に完成した。約650億円の工費をかけた一大プロジェクトであった。図4・8に日本縦貫ルートを示す。また、図4・9に商用試験に使用された24心ケーブルの構造を示す。使用されたケーブルは最小で4心, 最大で24心であった。光ファイバはシングルモード型(SM型)が使用された。これは、SM型光ファイバを使用したケーブルを世界に先駆けて導入したプロジェクトでもあった<sup>7)</sup>。“光ファイバ通信の元年”と位置づけられた1970年から10年余りで商用化に至ったわけであるが、我が国が世界に先駆けて実現した技術が多数あり、この中に今日の光ファイバ通信網のめざましい発展の一端を見ることができる。



図4・8 日本縦貫ルート

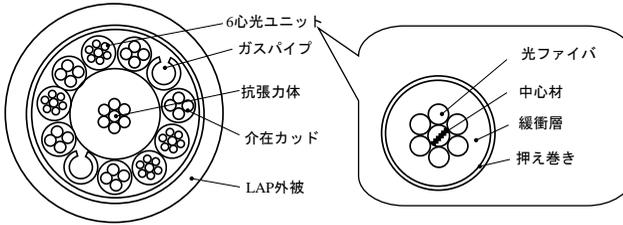


図 4・9 日本縦貫ルート商用試験用ケーブル構造 (24心)

#### 4-1-2 光ファイバケーブルの非ガス保守化技術と高密度化技術

(執筆者：山中正義)

2000年代となり、FTTH網が急ピッチに拡大し、経済的なネットワーク構築技術が求められた。建設工事も含めたネットワーク構築のコストダウン及び管路などの既存設備を有効に利用することなどを目的として、光ファイバケーブルの細径化・高密度化が検討され、実現された。光ファイバケーブルの細径化・高密度化の技術的なポイントとして、以下の3項目が挙げられる。

- ① 非ガス化光ファイバケーブルの実現 (1989年)
- ② 多心光ファイバケーブルのシングルスロット化 (1995年)
- ③ 低曲げ損光ファイバの採用による細径化 (2008年)

本節では、これらのポイントを踏まえ、非ガス化光ファイバケーブルと高密度光ファイバケーブルの技術の変遷について述べる。

##### (1) 光ファイバケーブルの非ガス化

###### (a) 光ファイバケーブルのガス保守

光ファイバケーブル導入当初、地下光ファイバケーブルの保守は、基本的に従来のメタリックケーブルと同様のガス保守が用いられてきた。ガス保守は、ケーブルやその接続部に乾燥空気を一定の圧力で常時印加するもので、乾燥状態の維持、内圧による湿気や水の浸入防止、圧力監視による異常検出可能、などの特長があった。図 4・10 にガス保守されるケーブルの例を示す。ケーブル内のガス流動抵抗を下げるために、ケーブル長手方向に切れ目のあるプラスチックパイプ (ガスパイプ) が実装されている。保守用の圧力センサは地下接続クロージャ内に設置され、銅線 (介在対) で、保守局に設置されているガス圧遠隔監視装置に接続されている。

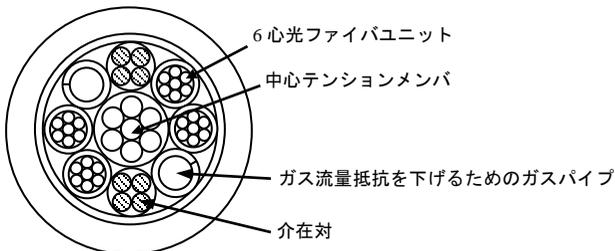


図 4・10 ガス保守光ファイバケーブルの構造例

## (b) 光ファイバケーブルの非ガス化の検討

ガス保守を行うためには、ビル引込み口や立上げ部でガス封止のためのガスダムが必要であるが、ガスダム部はケーブル部に比べて太くなるため、設置場所の選定などの作業が必要となり、建設工事の面から欠点となっていた。また、伝送機器の高性能化が進み、線路区間長が長くなってきたこととケーブルの高密度化が進んできたことから、ケーブル内のガス流動抵抗が大きくなり、ガス保守が難しい線路網となってきた。さらに、光ファイバケーブルは浸水しても直ちに絶縁劣化のような障害になりにくいこともあり、光ファイバケーブルの非ガス化の検討が行われた。

非ガス化光ファイバケーブルとして、吸水テープをスロットの周りに巻いた防水型光ファイバケーブルが開発された。実用化された非ガス化光ファイバケーブルの例として、1000心光ファイバケーブルの構造を図4・11に示す。ケーブルの防水構造としては、ジェリー充填型と、吸水材を充填し浸水した水により吸水材が膨潤して水走りを止めるドライ型があるが、作業性を考慮しドライ構造が採用されている。また、融着接続及びMTコネクタによる一括接続実現のためテープ心線を実装する設計としており、300心以下の少心系は4心テープ心線を用いたシングルスロット構造、400心以上の多心系は8心テープ心線を用いたマルチスロット構造（200心スロットを撚り合わせた構造）となっている。

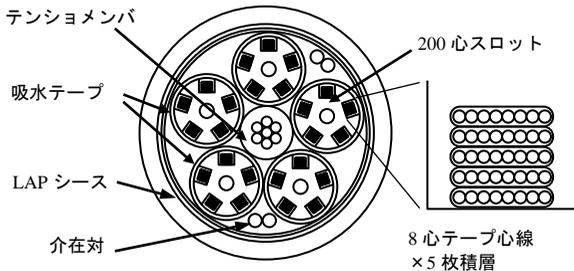


図4・11 マルチスロット型1000心ケーブル

ガス保守の代替手段として、浸水時に光ファイバを曲げて検知する浸水検知センサによる線路構成が開発された。図4・12に浸水検知センサの基本構造を示す。浸水すると膨潤材が膨張して一定の曲率を有する可動部を押し上げ、固定部との間に光ファイバ心線を挟むことにより発生する曲げ損失を検知する原理となっている。

非ガス化においては、浸水時の信頼性が十分に検討され、防水型ケーブル及び浸水センサを設置して定期監視を行うことでガス保守と比べて遜色ない信頼性が確保されることが確認された<sup>7)</sup> [本章 4-1-4「光ファイバケーブルの定期試験」詳細参照]。光パルス試験器を用いることで、上記線路網の監視や故障点の検出が可能であり、FITAS や AURORA による非ガス保守線路の監視・試験等が可能となった<sup>8)</sup> [本編 6章 6-2「光線路試験システム」詳細参照]。非ガス保守方式は1990年より運用開始された。

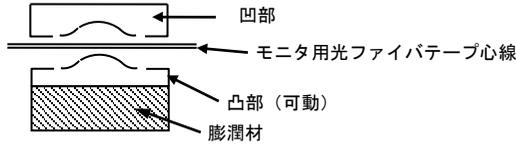


図 4・12 浸水検知センサの基本構造図

## (2) 高密度光ファイバケーブル技術

### (a) シングルスロット化による高密度化

アクセス系光線路網の構築に向け、多心光ファイバケーブルのコストダウンと高密度化の必要性が高まり、図 4・11 に示すような複数のスロットロッドを撚りあわせたマルチスロット構造から、シングルスロット構造とすることでこれを実現した<sup>9), 10), 11)</sup>。図 4・13 に、シングルスロット型 1000 心ケーブルの構造を示す。実装密度の向上と、信頼性の観点から光ファイバ歪の減少を考慮し、8 心テープ心線の標準厚をこれまでの 0.4 mm から 0.3 mm と薄肉化し、1 溝当たりの積層テープ枚数をこれまでの 5 枚から 10 枚とした。1000 心ケーブルの外径は 40 mm $\phi$  から 30 mm $\phi$  と細径化された。また、4 心テープ心線も同様に薄肉化され、300 心以下のシングルスロット型ケーブルの細径化も実現された。

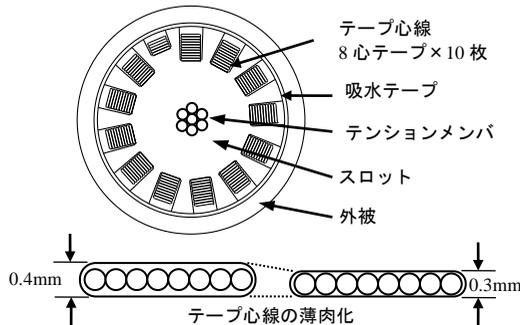


図 4・13 シングルスロット型 1000 心ケーブル

### (b) 低曲げ損光ファイバの採用による高密度化

2000 年以降 FTTH サービスは成長期を迎え、急増する光需要による地下管路の行き詰まりが懸念された。これを解消するため、地下区間における既存基盤設備の効率的な利用が必要となり、1 管路当たり 3000 心収容の実現を目的として、1000 心ケーブルの更なる細径化開発が 2007 年より開始され、2008 年より実用化された。

1 管路当たり 3000 心収納を実現するためには、多条敷設技術として用いられるケーブル保護用可とう管 (インナーパイプ) 内に 1000 心ケーブルの敷設を可能とする必要がある。インナーパイプ内に十分な距離を敷設するためには、ケーブル外径を 24 mm 以下とする必要があった<sup>12)</sup>。低曲げ損光ファイバ (R15) の採用及びテープ心線厚の更なる薄肉化により、図 4・

14に示すようにスロット溝内のクリアランスを縮小し、溝寸法の削減が可能となり、ケーブル外径 24 mm 以下を実現した。さらに、難燃ケーブルに対しては新規に開発した高強度難燃樹脂の適用により細径化を実現した。従来構造と比較して最大 24%細径化され、最大 40%軽量化された<sup>13)</sup>。管路内に 3000 心収納される模式図を図 4・15 に示した。また、本技術の適用により、300 心以下の少心ケーブルの細径・軽量化も実現された。

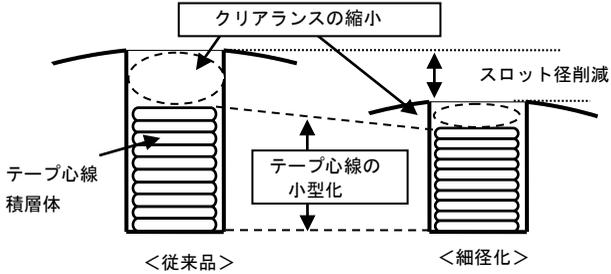


図 4・14 溝寸法の削減

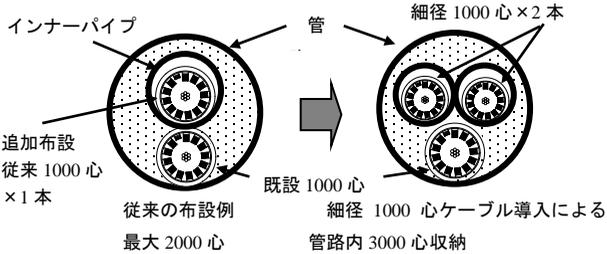


図 4・15 細径 1000 心導入による管路内多条布設

### (3) まとめ

光ファイバケーブルの非ガス化以降、FTTH の急速な拡大に伴い光ファイバケーブルの高密度化は急ピッチで進められた。光ファイバケーブルの高密度化の変遷として、1000 心ケーブルの実装密度（単位面積当たりの光ファイバ実装心数）を図 4・16 に示した。マルチスロット 1000 心ケーブルでは 0.8 心/mm<sup>2</sup>であったが、シングルスロット化の実現、さらには低曲げ損光ファイバの適用による構造パラメータの見直しにより、2.4 心/mm<sup>2</sup>までの高密度化が実現されたことがわかる。

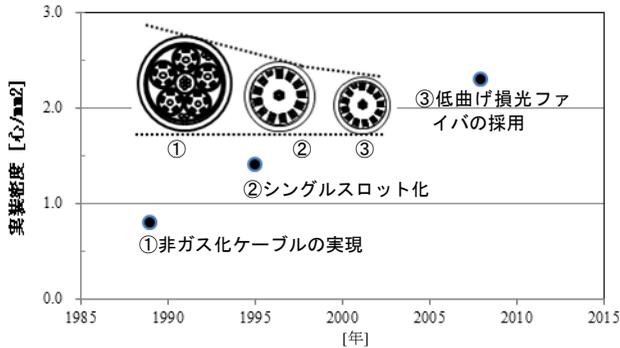


図 4・16 1000 心ケーブルの実装密度の変遷

#### 4-1-3 光ファイバケーブルの信頼性設計

(執筆者：宮島義昭) [2015年6月 受領]

光ファイバの信頼性設計の基本的な考え方について述べる．ブルーテスト理論に基づいたファイバ強度の保証技術を、海底光ファイバケーブルへの応用例とともに説明する．また、信頼度の設定の考え方を、ブルーテスト後の生存長と歩留まりに基づいて示す．

##### (1) 光ファイバの信頼性とは

光ファイバの材料である石英ガラスは、破断伸びが非常に小さく、金属材料の約 1/10 程度である．脆性材料固有の性質として、表面あるいは内部に存在する微小欠陥（傷）により、その強度が著しく低下し、しばしば破断にいたるというトラブルを引き起こす．しかも、これらの表面傷は光ファイバの長さ方向にある確率で存在するため、光ファイバ製造時には、一定荷重を印加するブルーテストを実施することで品質を保証している．ここでは、ブルーテストに基づく光ファイバの信頼性設計の基本的な考え方について述べる．

光ファイバの強度は、光ファイバ内に存在する微小傷（クラック）の大きさと密接な関係があり、Griffith は、下記の式で破断応力が与えられることを示した<sup>14)</sup>．

$$\sigma_c = \sqrt{2E\gamma_s/\pi x} \quad (4 \cdot 1)$$

ここで、 $\sigma_c$ は破断応力、 $2x$ はクラックの大きさ、 $E$ はガラスのヤング率、 $\gamma_s$ は表面エネルギーである．クラックのモデルについては、光ファイバの表面から中心に向かって深さ  $x$  の半円状のクラックが、光ファイバの同心円状に発生しているものと仮定している．式(4・1)は、非常に速い速度で荷重印加した場合の強度を示すが、遅れ破壊あるいは静疲労と言われる時間とともにクラックが成長する場合にも拡張して適用される．すなわち、式(4・1)よりも小さな応力でも長時間印加し続けるとクラックの大きさは成長し破断に至る．クラックの成長速度に関する関係式<sup>15)</sup>は

$$dx/dt = A_1 K_I^n \quad (4 \cdot 2)$$

で表わされる．ここで、 $A_1$ 及び  $n$  は材料で決まる定数であり、特に  $n$  は、疲労係数と呼ばれ

ている。\$K\_I\$は、応力拡大係数と呼ばれ、次式で与えられる。

$$K_I = \sigma Y \sqrt{x} \quad (4 \cdot 3)$$

ここで、\$Y\$はクラック形状に関する係数であり、半円状クラックの場合には\$Y = \sqrt{\pi}\$である。

大きさ \$x\_i\$ の初期クラックが応力により成長し時間 \$t\$ 後に \$x\_f\$ となり、破断が生じたと考えるとき、式(4.2)を時間 \$t\$ で積分することにより

$$x_f = [A_1 Y^n \sigma^n t (n-2)/2]^{2/(2-n)} \quad (4 \cdot 4)$$

となる。ただし、\$x\_i \ll x\_f\$ であり、\$n\$ は通常 20 前後であることを考慮し、\$x\_f\$ の項は無視した。式(4.4)は、大きさ \$x\_i\$ のクラックに応力 \$\sigma\$ を時間 \$t\$ 印加すると、光ファイバは破断することを示す。つまり、クラックが破断に至るまでの成長の度合いは \$\sigma^n t\$ で表現できることがわかる。

次に、光ファイバ内に含まれるクラックはランダムに存在すると仮定すると、光ファイバの累積破断確率 \$F\$ は、一般的にはワイブル分布として次式で表わされる。

$$F = 1 - \exp(-L \cdot N) \quad (4 \cdot 5)$$

ここで、\$L\$ は光ファイバ長、\$N\$ はクラック数の単位長さ当たりの累積分布であり、クラックが破断に至るまでの成長の度合いは \$\sigma^n t\$ で表現できるので、次式で表わせる。

$$N = (k/k_0)^b \quad (4 \cdot 6)$$

ただし、応力 \$\sigma\$ が時間的に変化する概念も含めて、

$$k = \int_0^t \sigma^n dt \quad (4 \cdot 7)$$

であり、\$k\_0\$ 及び \$b\$ は定数である。

以上より、光ファイバの累積破断確率 \$F(k, L)\$ は、

$$F(k, L) = 1 - \exp[-L \cdot (k/k_0)^b] \quad (4 \cdot 8)$$

となる。また、ブルーテスト時の累積破断確率を \$F\_p\$、ブルーテスト後の累積破断確率を \$F\_s\$ とすると、ブルーテストを通過した光ファイバの累積破断確率 \$F\_r\$ は、ブルーテスト中に破断したサンプル数を除いて考えると、

$$F_r = (F_s - F_p) / (1 - F_p) \quad (4 \cdot 9)$$

となる。これらを変形して、下記の式が得られる。

$$\sigma^n t = \left\{ [1 + \ln(1 - F_r) / \ln(1 - F_p)]^{1/b} - 1 \right\} \sigma_p^n t_p \quad (4 \cdot 10)$$

式(4.10)の左辺は、光ファイバが実使用環境で受ける応力履歴によるもので、複合的な応力印加を考える場合には、\$\Sigma \sigma^n t\$ で与えられる。

## (2) 海底光ファイバケーブルにおけるブルーテスト値

海底光ファイバケーブルに適用すべきブルーテスト荷重は、上記の式(4.10)からわかるとおり、光ファイバケーブルに加わる伸び歪、疲労係数 \$n\$ 値、破断確率（あるいは信頼度）などの要因で決まる。

まず、海底光ファイバケーブルの伸び特性について述べる。図 4.17 は、一般的な海底光ファイバケーブルの構造を示す。中心部に 0.4 mm 径の光ファイバ心線 6 本が中心線の周りに集合され、その外側を金属パイプで保護し、更にその外側にピアノ線からなる高張力体が配置されている。

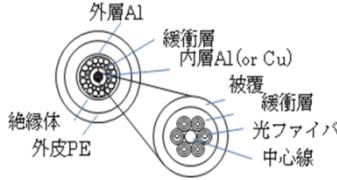


図 4・17 海底光ファイバケーブルの構造

図 4・18 は、海底光ファイバケーブルの伸び特性の実測例を計算値とともに示す。ここでは 2 種類の光ファイバケーブル構造を示し、光ファイバケーブル内層の金属パイプとして銅 (Cu) とアルミ (Al) の例を示す。図中、横軸 Cable Modulus というのは、張力をケーブルの単位長あたりの水中重量で除した値で、布設水深に相当するケーブル重量である。アルミの方が軽量なため同じ水深荷重でも伸びが小さいのが分かる。実際には、布設中・引揚げ中には、波浪による船体の動揺があるため、ケーブルには水深荷重の 1.5 倍 (通常布設) から 2.5 倍 (修理引揚げ時) の重量がかかることがわかっている。

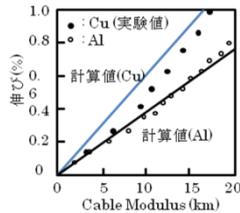


図 4・18 海底光ファイバケーブルの伸び特性

海底光ファイバケーブルの所要プルーフテスト値を算出するには、式(4・10)の左辺として、布設から障害時の引揚げなど全ての工程を想定した歪量の総和をもとに計算されなければならない。実際には布設速度を 1.5 ノット、引揚げ時の速度を 0.8 ノット、またケーブルの引揚げ・修理には 8 時間がかかると仮定し、アルミケーブルの伸び特性に基づいて算出した<sup>16)</sup>。

次に、式(4・10)における  $(1 - F_p)$  の求め方について述べる。 $(1 - F_p)$  は、光ファイバ長さ方向でのクラックの存在確率と密接な関係をもち、プルーフテスト時の光ファイバ生存長を測定することにより求められる。プルーフテスト値  $\sigma_p$  と平均光ファイバ生存長  $L_{pm}$  との間には、実験的に次式が成立する<sup>16)</sup>。

$$\ln L_{pm} + C_1 \ln \sigma_p = C_2 \quad (4 \cdot 11)$$

ここで、 $C_1$  及び  $C_2$  は定数である。 $L_{pm}$  は、プルーフテスト時の光ファイバ生存長を算術平均したものであり、生存長が  $L_p$  よりも長いものが含まれる割合を  $P_f$  とすると次式が成立する<sup>16)</sup>。

$$P_f = \exp(-L_p/L_{pm}) \quad (4 \cdot 12)$$

式(4・12)は、プルーフテスト荷重が  $\sigma_p$  のときに  $L_p$  よりも長いファイバが得られる確率が  $P_f$  であることを意味しているので、 $P_f$  を  $(1 - F_p)$  で置き換えることにより、式(4・11)、式(4・12)より、次式が得られる。

$$1 - F_p = \exp[-L_p \cdot \sigma_p^{C_1} \cdot \exp(-C_2)] \quad (4 \cdot 13)$$

したがって、平均生存長  $L_{pm}$  を測定して定数  $C_1, C_2$  を求めることにより、 $(1 - F_p)$  は求められる。

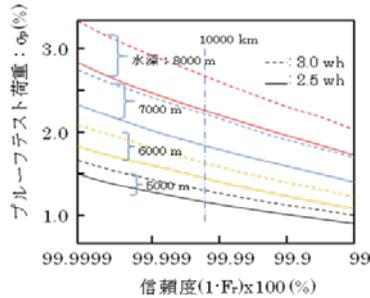


図 4-19 要ブルーテストレベル

所要ブルーテスト値の計算結果を図 4-19 に示す。ここで、横軸には、光ファイバ 5 km あたりの信頼度  $(1 - F_r)$  を変数としている。また、計算に用いた定数は、 $C_1=1.60, C_2=2.76$  である<sup>16)</sup>。ケーブル総延長を 10,000 km、最大水深を 8,000 m と想定した場合、2.2 % のブルーテストが必要となる。なお、信頼性設計に関する基本的業績及び陸上ケーブルへの適用例については Mitsunaga 氏の文献<sup>17)</sup>を参照されたい。

### (3) ブルーテスト時の平均生存長と信頼度に関する考察

光ファイバの信頼性を保証する上で、ブルーテスト法が有効であることを明らかにしたが、ブルーテスト値が高くなるとテスト中の断線確率が高くなるので、現実的にはこの観点からも検討する必要がある。

図 4-20 には、ブルーテスト荷重が 0.8 % の時の光ファイバ生存長の分布を示す。平均生存長  $L_{pm}$  は、17.3 km である。 $L_{pm}$  と  $\sigma_p$  との間には、式(4-11)が成立する。また、 $L_p$  と  $L_{pm}$  の間には、式(4-12)が成立する。図 4-21 は、式(4-12)を図示したものである。ここで、歩留まり率とは、式(4-12)における  $P_f$  を示す。図 4-21 より、ブルーテスト値を 0.5% から 3% に上げていくと、得られる光ファイバの長さが短くなり、製造歩留まりが悪くなることが理解できる。1980 年頃には、ブルーテストを通過する高強度ファイバの製造歩留まりは極端に悪くなるため、ブルーテストで破断した光ファイバを高強度に接続することで長尺光ファイバを作成する方法も検討された<sup>18)</sup>。

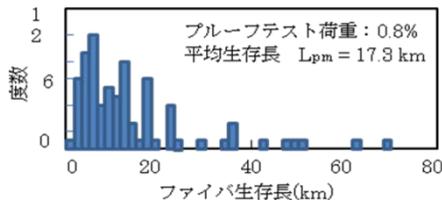


図 4-20 ブルーテスト時の光ファイバ生存長

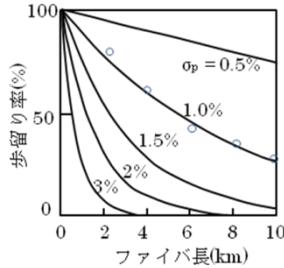


図4・21 光ファイバ生存長と歩留まり率

ところで、信頼度(1-F)というパラメータはどのような根拠で設定すべきであろうか？高い信頼性を保証するには、光ファイバの破断確率をできるだけ小さく設計すれば良いことになるが、そのためにはブルーテスト値を上げる必要があり、製造歩留まりを考慮するとコストは当然高いものとなると予想される。以下は、コストミナIMUMという考えに基づいて信頼度を設定する考え方について述べる<sup>19)</sup>。

基本的な概念図を図4・22に示す。図では、横軸に信頼度を取り、製造コスト  $C_m$  と修理時のコスト  $C_r$  をあわせて示している。信頼度が高くなると製造時のコストは高くなる。他方、ブルーテスト値を下げて信頼度を低下させると、障害発生率が高くなり、保守、修理に要するコストが高くなる。そのため、両者の合計がミナIMUMになる点が存在することになる。

ただし、障害の発生頻度が高すぎると復旧にかかる時間が増加するので、通信線路としての本来の役割からすれば、コストミナIMUMの考え方だけで信頼度を決めるのは実際的ではない。

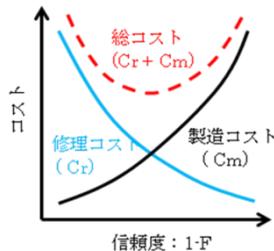


図4・22 製造コストと修理コストの比較

#### (4) 付録 (ブルーテストに基づく光ファイバの信頼性設計の詳説)

式(4・1)で与えられる応力より小さな応力を、長時間印加し続けると、クラックは成長して、いずれ破壊に至る。この現象は、遅れ破壊あるいは静疲労といわれるが、その時のクラックの成長速度は、下記の式(4・2)で表わされる。

$$dx/dt = A_1 K_1^n \quad (4 \cdot 2)$$

ただし、 $K_1$ は応力拡大係数であり、

$$K_1 = \sigma Y \sqrt{x} \quad (4 \cdot 3)$$

である。Yは、クラック形状に関する係数であり、半円状クラックの場合には $Y = \sqrt{\pi}$ である。この $K_I$ を用いると、式(4・1)の破壊が生じる条件は、次式で与えられる。

$$K_I = K_{IC} = \sqrt{2EY_s} \quad (A1)$$

$K_{IC}$ は、破壊靱性と呼ばれる値であり、式(A1)は、 $K_I$ が $K_{IC}$ を上回ると破壊に至ることを意味している。大きさ $x_i$ の初期クラックが応力により成長し時間 $t$ 後に $x_f$ となり、破断が生じたと考え、式(4・2)を時間 $t$ で積分することにより、次式が得られる。

$$x_i^{(2-n)/2} - x_f^{(2-n)/2} = A_1 Y^n \sigma^n t (2-n)/2 \quad (A2)$$

ここで、 $x_f$ は破断に至る直前のクラックの大きさである。 $x_i \ll x_f$ であり、疲労係数 $n$ は20前後であるので、左辺の第2項は無視できる。したがって、下記の式が得られる。

$$x_i = [A_1 Y^n \sigma^n t (n-2)/2]^{2/(2-n)} \quad (4・4)$$

式(4・4)は、大きさ $x_i$ のクラックに応力 $\sigma$ を時間 $t$ 印加すると、光ファイバは破断することを示す。つまり、クラックが破断に至るまでの成長の度合いは $\sigma^n t$ で表現できることがわかる。

次に、光ファイバ内に含まれるクラックはランダムに存在すると仮定すると、光ファイバの累積破断確率 $F$ は、一般的にはワイブルの鎖のモデル<sup>20)</sup>として次式で表わされる。

$$F = 1 - \exp(-L \cdot N) \quad (4・5)$$

ここで、 $L$ は光ファイバ長、 $N$ はクラック数の単位長さ当たりの累積分布であり、次式で表わせる<sup>20)</sup>。

$$N(\sigma_i) = (\sigma_i/\sigma_0)^m \quad (A3)$$

ここで、 $\sigma_0$ 及び $m$ は定数であり、 $\sigma_i$ は光ファイバの初期強度である。

時間的に変化する応力 $\sigma(t)$ が加えられるとクラックは成長するので、初期強度 $\sigma_i$ が $\sigma_f$ に変化したとすると、式(A2)に式(4・3)を代入して、

$$\sigma_i^{n-2} - \sigma_f^{n-2} = k/B \quad (A4)$$

ただし、

$$k = \int_0^t \sigma(t)^n dt \quad (A5)$$

$$1/B = A_1 Y^2 K_{IC}^{n-2} (n-2)/2 \quad (A6)$$

が得られる。式(A2)でも述べたとおり、応力印加した光ファイバのクラックの大きさが臨界値に達すると式(A4)の左辺第2項は無視できるので、次式となる。

$$\sigma_i = (k/B)^{1/(n-2)} \quad (A7)$$

式(A7)を式(A3)に代入して、式(4・6)と同じ次式が得られる。

$$N(\sigma_i) = (k/k_0)^b \quad (A8)$$

ただし、

$$b = m/(n-2) \quad (A9)$$

$$k_0 = [\sigma_0 B^{1/(n-2)}]^{m/b} \quad (A10)$$

以上より、光ファイバの累積破断確率 $F(k,L)$ は、

$$F(k,L) = 1 - \exp[-L \cdot (k/k_0)^b] \quad (4・8)$$

となる。また、プルーフテスト時の累積破断確率を $F_p$ 、プルーフテスト後の累積破断確率を $F_s$ とすると、

$$F_p = F(k_p, L) \quad (A11)$$

$$F_s = F(k + k_p, L) \quad (A12)$$

となる。通常、ブルーテストは一定荷重を印加して実施するので、 $\sigma_p$ 、 $t_p$ をそれぞれブルーテスト荷重、ブルーテスト時間とすると、式(A5)より、

$$k_p = \sigma_p^n t_p \quad (A13)$$

である。

ブルーテストを通過した光ファイバの累積破断確率  $F_r$  は、ブルーテスト中に破断したサンプル数を除いて考えると、

$$F_r = (F_s - F_p) / (1 - F_p) \quad (4 \cdot 9)$$

となる。式(A11)、式(A12)を式(4・9)に代入し、変形すると下記の式が得られる。

$$\sigma^n t = \left\{ \left[ 1 + \ln(1 - F_r) / \ln(1 - F_p) \right]^{1/b} - 1 \right\} \sigma_p^n t_p \quad (4 \cdot 10)$$

式(4・10)の左辺は、光ファイバが実使用環境で受ける応力履歴によるもので、複合的な応力印加を考える場合には、 $\Sigma \sigma^n t$  で与えられる。

#### 4-1-4 光ファイバケーブルの定期試験

(執筆者：荒木則幸) [2015年6月 受領]

非ガス化された光ファイバケーブルは1990年代から導入され、止水構造が採用されている [本章 4-1-2 光ファイバケーブルの非ガス保守化技術と高密度化技術 詳細参照]。光ファイバケーブルの接続部が浸水した場合、ケーブル内部に水走りが発生し、光ファイバケーブル内の止水テープが膨潤することで、水走りが止まる。しかし、接続部及び一部のケーブル内は浸水状態にあり、光ファイバの破断確率が增大する。そこで、接続部に設置した浸水検知モジュールを用いて光ファイバを定期的に試験監視して、光ファイバケーブル網の信頼性を担保している。

本項では、光ファイバケーブル網の信頼性を保つための定期試験の考え方を示す。光ファイバケーブル網の信頼性を保つため定期試験を行う。地下ケーブルの場合、各光ファイバケーブルの接続部への浸水検知を目的とした定期試験を行う必要がある。一般的には、各光ファイバケーブルの保守用心線と呼ばれる非現用心線を用いて定期的に光パルス試験を実施し、浸水を検知する。

##### (1) 浸水検知モジュール

接続部への浸水は、光ファイバケーブルの各接続部に浸水検知モジュールを取り付け、浸水時に保守用心線に曲げ損失を与えて検知する方式を用いている [本編 6章 6-1-1 線路の保守運用方法の(3) 保守業務 参照]。以下に浸水検知の手順を示す。浸水検知モジュールは、**図 4-23** に示すように吸水膨張材、曲げ部材から構成される。接続部が浸水したとき、吸水膨張材が膨張して曲げ部材を押し上げ、保守用心線に曲げを付与することで、光ファイバに曲げ損失を生じさせる。設備ビル等から光パルス試験を実施し、この曲げ損失を検出することで、光ファイバ接続部への浸水を検知することが可能となる。



図 4・23 浸水検知モジュール

## (2) 定期試験と光ファイバの破断確率

定期試験の間隔は、光ファイバの浸水期間と破断確率の関係から決定される。光ファイバの破断確率は、光ファイバに一定の張力をかけるスクリーニング試験に関連づけた理論解析から、ある程度の予測が可能である<sup>17)</sup>。光ファイバの引張強度は、主として光ファイバ表面に存在する傷によって決まり、応力により傷が進行して光ファイバの破断に至る。水に入れた状態ではOH基によるSi-O結合の切断が進み、光ファイバ表面に存在する欠陥が継時的に成長するため、水中の光ファイバの引張り強度は低下することが知られている。浸水状態を放置した場合の光ファイバの破断確率は、浸水がない場合（乾燥状態）と比較して10倍以上となる。定期的試験により浸水を検知して、早急に修理することで、光ファイバが浸水している時間を短くできるので、浸水による破断確率の増大を小さく抑えることができる。

## (3) 非ガス化ケーブル導入当初の定期試験間隔の考え方

1990年以降、非ガス保守をする光ファイバケーブルが導入され、定期試験の間隔は、浸水の許容期間と工事等を行うための修理期間を考慮して設定された<sup>21)</sup>。浸水の許容期間は、光ファイバの許容破断確率によって決まり、光ファイバケーブルの心線部（ケーブル部）と接続部に同等の信頼をもたせるため、20年間で $7 \times 10^{-6}$ （回/心箇所）に設定されていた。接続部の破断確率と時間の関係を図4・24に示す。接続部の光ファイバの破断確率を許容値以下とするためには浸水期間を100日以内にする必要がある。よって、修理期間を考慮し、定期試験の間隔を90日としていた。

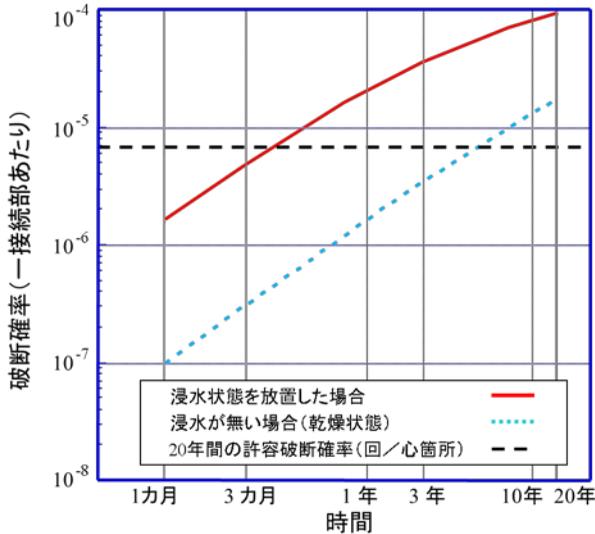


図 4・24 接続部の破断確率 (1990 年当初)

#### (4) 2000 年以降 FTTH 時代の定期試験間隔の考え方

2000 年以降 FTTH サービスが本格導入されている。FTTH の拡大により、光ファイバケーブルの設備量が増加するとともに光ファイバの製造技術も向上していることから、光ファイバの信頼性向上、設備形態の変化及び設備量の増加に合わせ、光ファイバケーブルの定期試験間隔の見直しが検討された<sup>22)</sup>。図 4・25 に現在の接続部の破断確率と時間の関係を示す。定期試験の間隔の見直しにあたり、

- 光ファイバの引張強度の主なパラメータであるプルーフ値も変更され、2000 年以降は IEC 等の国際標準に準拠した値である 1.0%、1990 年代に導入された光ファイバケーブルについては実力値を考慮して 0.8% とすること
- クロージャ等の光接続部の余長処理部の許容曲げ半径を規定値である 30mm から実態を考慮して 20mm とすること (ITU-T 勧告 L.13 「屋外用地下クロージャ」においては曲げ半径 20mm が許容されている<sup>23)</sup>)
- 光ファイバケーブルの心線部と同等の破断確率とするため、設備量の増加を考慮して、接続部の許容破断確率を  $7 \times 10^{-7}$  (回/心箇所) とすること

を変更点とした。(a)~(c)の変更を行った結果、既存の光ファイバケーブルの浸水期間を約 380 日 (プルーフ値=0.8%) 以内、現在の規格に準拠した光ファイバケーブルの浸水期間を約 8.5 年以内 (プルーフ値=1.0%) とすることで、接続部に要求される破断確率を満たすことができる。実導入されている光ファイバケーブル網では、様々な年代に製造された光ファイバケーブルが混在していることから、修理期間も考慮して、定期試験の間隔を 1 年以内として試験を行うことで、効率的な保守運用を行うことが可能と考えられる。

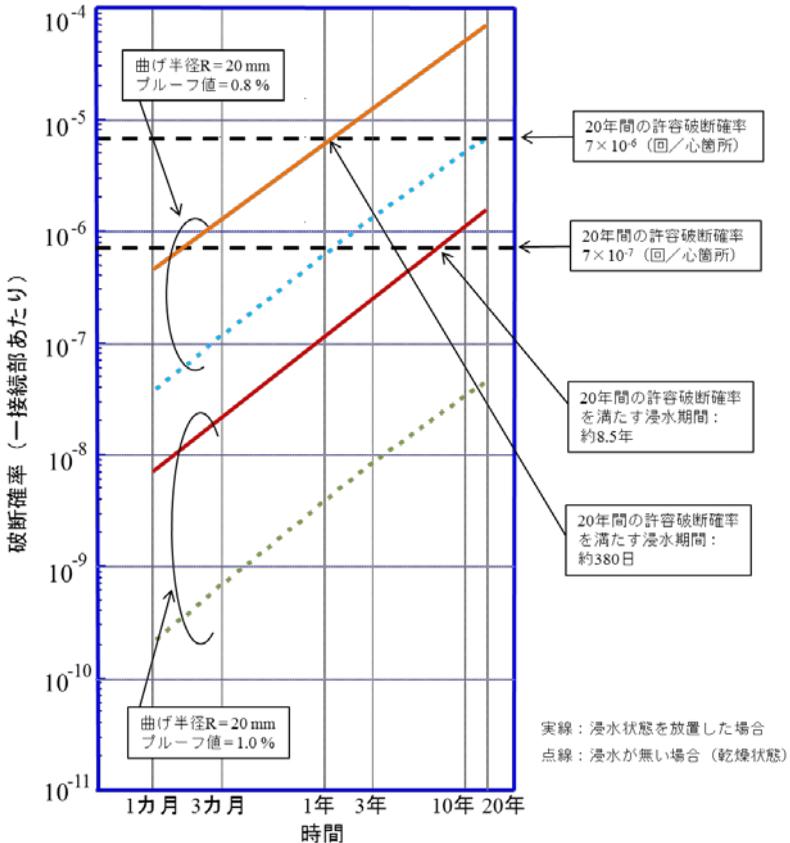


図 4・25 接続部の破断確率（現在）

#### 4-1-5 プラスチック光ファイバ

（執筆著：木村剛）[2015年6月 受領]

##### (1) はじめに

プラスチック光ファイバ（Plastic Optical Fiber ; POF）は 1960 年代に米国 Du Pont 社が光ファイバのコア材に透明性高分子材料を用いた研究を開始したことから始まり，その後，日系メーカーを中心にポリメタクリル酸メチル（PMMA）をコアとした SI 型の POF の一連の研究・開発が行われた．工業的には三菱レイヨン社が 1970 年代後半に製品化が行われ，続いて旭化成，東レが市場に参入して以来，40 年余りの歴史を有する．

POF は端面加工や取り扱いが容易であること，軽量であること，安価であること，大口径に設定できること等の利点を有し，装飾，照明・ライトガイドや光電センサ等の分野で先行して利用がはじまった．その後，各社の低損失化のプロセスの確立とともに伝送損失の改善がなされ，デジタルオーディオケーブルや，FA 通信，車載ネットワークなどの情報系ネット

ワークにおける通信に利用されるようになり、その使用量・使用領域とも拡大する傾向にある。本稿では特に、PMMAをコア材とするSI型POFの利用状況と、市場拡大に向けた新たな取り組みについて述べる。

## (2) SI型POFの特徴

SI型POFはPMMAなどの高透明性を有するポリマーをコアとし、その外周にコア材よりも屈折率の低いポリマー（クラッド材）を設けた構造からなる。特にクラッド材として用いられる材料はフッ化ビニリデン系共重合体やフッ素化アルキルメタクリレート系樹脂などが用いられる。POFの外径は0.25mm~3.0mmまで、幅広いラインナップを有し、プラスチックならではの柔軟性を特徴とし、大口径に設定することが可能である。またその重量は、代表的な直径1mmのもので約1g/mと非常に軽量である。

図4・26に示すように、POFに入射した光はコアとクラッドの界面で全反射し光を伝搬するため、コア・クラッド材の密着性や界面平滑性、真円度が要求される。

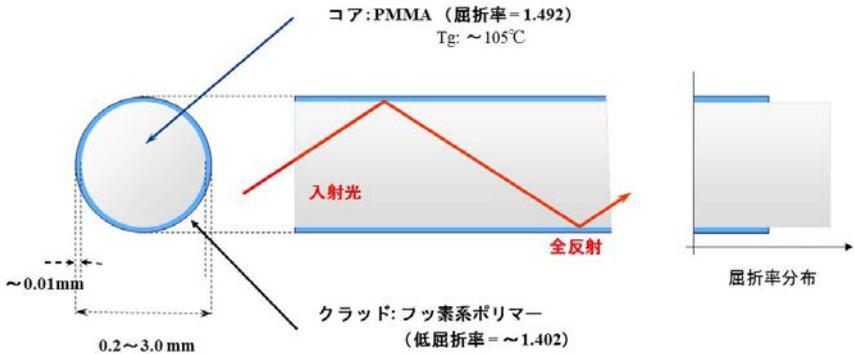
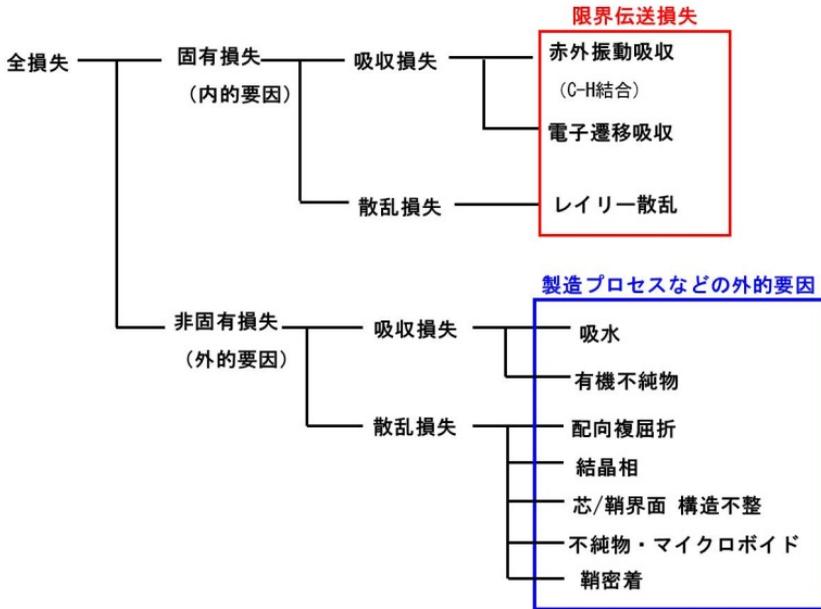


図4・26 POF構造のイメージ図

POFの製造に当たってはコア材のPMMAとクラッド材のフッ素系ポリマーを複合紡糸ノズルから一括して熔融紡糸する手法がとられており、開発当初は製造工程における不純物の混入を抑制することが重要であった。そのため原料モノマーの精製・重合から紡糸までの一括した完全密閉系での製造プロセスの開発がなされ、低損失化が可能となった。PMMAをコアとしたPOFの伝送損失の理論限界値は約100dB/km(650nm)<sup>24)</sup>と確認されており、現在の製造プロセスで製造されるPOFはほぼ理論的限界値に近いものが得られるようになっている。POFの伝送損失を支配する損失要因図を表4・1に示す。損失の主要因は、コア材を構成するPMMA分子鎖中のC-H伸縮運動による固有の吸収損失と、ポリマーの密度揺らぎによるレイリー散乱があげられる。そのため損失が低くなる波長領域は可視光領域に限られ、520nm, 570nm, 650nmに低損失領域が存在する。現在は光源の信頼性を考慮し650nmの波長領域を中心に使用されている。

表 4・1 POF の損失要因



POFの低損失化が進み用途が拡大する一方で、その可撓性を利用して狭い場所に敷設・配線されて利用されることが多くなった。POFを曲げた状態で敷設した際、曲げによる損失(曲げ損失)が増加するという問題が生じる。曲げ損失とはPOFに一定以上の曲げを加えた際に生じる損失のことで、急峻な曲げが加えられると、曲げ部分から光が漏れ、光の伝搬ができなくなる。そのため、曲げ損失を改善したPOFも実用化されている(図4・27)。これは従来型のPOFの設計思想を応用してクラッド材に、より低屈折率の材料を用いたものである。適切なクラッド材を選択することで、次式で示される開口数(Numerical Aperture; NA)

$$\text{開口数 (NA)} = (\mathbf{n}_{\text{core}}^2 - \mathbf{n}_{\text{clad}}^2)^{0.5}$$

を大きくすることができ、光の取り込み量を大きくすることができる。従来型のPOFの開口数(NA)が0.5程度であるのに対し、曲げ損失を改善したPOFのNAは0.6程度まで大きくなっており、従来型のPOFと同程度の伝送損失・機械特性を維持しながら、曲げ特性が改善したことで、更なる使用用途の拡大に貢献している。

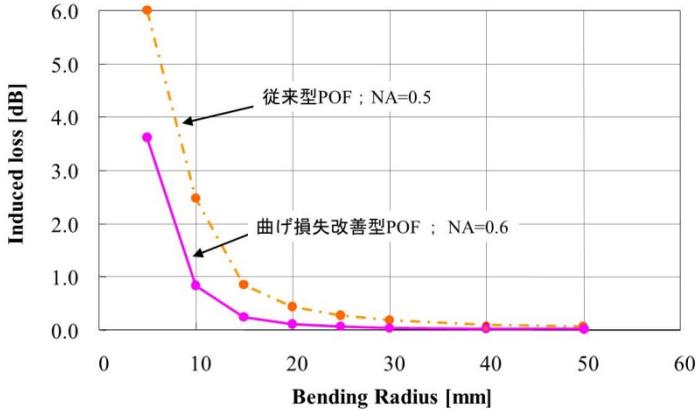


図 4・27 POF の曲げ特性 (360° 1 回曲げ)

### (3) POF ケーブル

POF を使用する際は照明用途を除き、裸線で用いられることは少なく、機械的強度や耐熱性、難燃性などを付与するために、POF を熱可塑性樹脂で覆ったケーブルとして使用されることが多い。POF 自体は電磁波を発生させないため、電線ケーブルに用いられるような電磁波遮蔽シールドや撚り線対策も不要となり、ケーブル自体もシースのみのシンプルな構造にすることが可能でありトータルの軽量化が期待できる。

また被覆樹脂は耐熱性の向上や難燃性付与、機械的特性付与といった要求性能に応じて選定され、表 4・2 に示すように様々な POF ケーブルが上市されている。ケーブルは一般的に、直径 1.0 mm の裸線に 0.25~0.6 mm 程度の被覆層を設け、ケーブル外径として 1.5~2.2 mm とすることが多い。このような被覆樹脂の限られた厚みでケーブルとしての十分な物性を発現させることは非常に難易度が高い。そのため被覆層として異種材料を用いて多層化することで単体樹脂では発現できない耐熱性や耐屈曲性、柔軟性などの付与など様々な工夫がなされている (図 4・28)。一方、被覆材に用いる樹脂には様々な機能性を付与するために難燃剤や可塑剤、安定剤、着色剤などの添加剤を含有しているため、これらが経時的に POF に移行して、POF 自体の透光性を低下させたり、機械的強度を低下させたりすることもある。そのため被覆材の開発や選定にあたっては、これらの要因も十分に考慮する必要がある。

また特に近年では、プラスチック製品の耐熱化、難燃化規制が厳しくなっており、POF ケーブルに対しても高い耐熱性や難燃性を有することが要望されている。そのため POF メーカー各社から UL (Underwriters Laboratories Inc.) や IEC (International Electrotechnical Commission) などの各種難燃性規格に適合した難燃性ケーブルが開発されている。

なおこれらのケーブルの製造には電線被覆と同様にクロスヘッド型押出機を用いて被覆することが可能である。しかし POF は被覆時の熱劣化や POF の細化などにより光学特性の低下が生じやすいため、被覆には細心の注意が必要である。

表 4・2 主な POF 用被覆樹脂

被覆樹脂	主な特徴	主な用途
ポリアミド	耐熱性 耐油性	・自動車 ・FA(機器内、機器間)
ポリオレフィン 熱可塑性エラストマー	柔軟性 軽量化	・ホームネットワーク ・センサー
ポリ塩化ビニル	難燃性	・センサー ・FA(機器内、機器間)
フッ素系樹脂	難燃性 耐薬品性	・センサー ・FA(機器内、機器間)

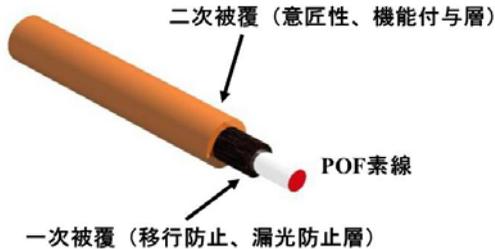


図 4・28 POF ケーブルの構造例

#### (4) POF ケーブルの用途例

POF ケーブルは情報伝送においていくつか有利な点を有している。それは先述したように、電磁波によるノイズの影響を受けない点や軽量で可撓性があり扱いやすい点である。このような利点を有し、センサやオーディオケーブル分野で広く用いられてきた。また近年、欧州において自動車内通信用配線として POF を利用する試みがなされ、移動体内の情報伝送用途としての実装されている。以下に POF ケーブルの用途の一例を示す。

##### (a) 光電センサ

POF を利用したセンサとして汎用的なものに光電センサがある。発光素子・受光素子を含む光学ユニットに、導光体として POF を使用したものである。特に耐熱性や耐薬品性に優れたケーブルを使用することで、暑熱エリアや製造現場などでの使用が可能となり、電磁障害による誤作動が無いなどの点も加味され産業分野で好適に使用されている。さらに近年では、狭所や可動部への敷設される用途が増え、曲げ特性を改善した高開口数タイプの POF やマルチコア POF を使用したセンサが採用されている(図 4・29)。マルチコアタイプの POF は多数の小さなコアが配列された形状を有しているため、曲げに強く、曲げて配線しても光量の低下がほとんど生じない。そのため SI 型 POF の許容曲げ半径が 25 mmR 程度であるのに対し、1 mmR までの曲げた状態でも使用可能であり、繰り返し屈曲性にも優れるという利点がある。

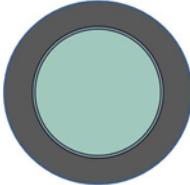
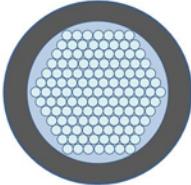
	従来型モノコアPOF		マルチコアPOF
構造	コア/クラッド		マルチコア (～数百コア)
			
曲げ半径	R=25mm (最大) (NA=0.5)	R=10mm (最大) (NA=0.6)	R=1mm (最大)
耐屈曲回数(R=15)	～数万回		10万回程度

図 4・29 モノコア POF とマルチコア POF のセンサへの応用

## (b) 車載ネットワーク

POF ケーブルの車載ネットワーク化は 1998 年よりダイムラー・クライスラー (当時) が中心となり車載ネットワーク環境が提唱され、1999 年より欧州を中心に実装されている。このシステムは MOST (Media Oriented Systems Transport) 規格によって定められ、POF の光学特性の他にケーブルの構成材料、機械特性、耐久性など詳細な仕様が規定されている<sup>25)</sup>。最近では車内スペースの拡大に伴い、敷設場所も限定される傾向にあり狭い場所への敷設を可能とした高 NA タイプの POF が実装され始めている。またこれらのケーブルの耐熱温度は 85 °C であり、敷設場所が温度のかからない範囲に限定されている。そこでルーフ部など、より高温領域での敷設を見据え、105 °C 耐熱ケーブルの開発も積極的に行われている<sup>26), 27), 29)</sup>。

## (c) その他の用途

新たな用途として鉄道車両向けに POF の搭載が検討されている。特に欧州では国境を越えた鉄道の運行がなされており、EN45545 などの車両火災関連規格が制定され、POF ケーブルにもこれらの規格の準拠が求められている。その他、工場内通信 (FA ネットワーク) にも POF が利用されており、長期間の使用に耐え得る信頼性と安全性が重要視されている。さらに最近では、ホームネットワーク向けに壁内配線やデジタル家電等の機器間配線の通信への利用が検討されている。

これらの用途のうち、特に安全性が要求される場面においては発煙性や有毒な燃焼ガスの発生を抑制した非ハロゲン系 LSZH (Low Smoke Zero Halogen) 難燃性ケーブルの要求も多く、開発が進められている<sup>28), 29)</sup>。

## (5) 終わりに

POF は開発から既に 40 年近い年月が立ち、工業的には成熟した商材であると言える。しかしメーカーの努力により高付加価値化が図られ、高性能化や広帯域化を目指した POF の開発が進められている。また新用途の開発もメーカーとユーザ間において積極的に行われており、意匠性を高めた新照明への利用も盛んに行われている。通信用途においても車載や鉄道に加え、航空機などの移動体の通信媒体としての利用可能性も備えており、今後の新規市場の開拓が大いに期待される。

## ■5群 - 2編 - 4章

### 4-2 光ファイバケーブル布設技術

#### 4-2-1 標準的布設工法

(執筆者：西村公敬) [2015年7月 受領]

地下光ファイバケーブルは、キャリアビル近傍はとう道と呼ばれる通信ケーブル専用のトンネルを経由し、道路下に埋設された地下管路を利用して布設している。布設方法はメタリックケーブルとほぼ同等の方法が適用可能であり、光ファイバケーブルがある細径、軽量という特徴を生かして、一度に長い距離を布設することができる。また、同一の管路内に複数の光ファイバケーブルを布設することも可能である。

##### (1) とう道区間

とう道区間で光ファイバケーブルを布設する場合には、人力による方法か、けん引機などの機械を使用する方法がある。

図 4・30 にとう道区間における光ファイバケーブルの布設イメージを示す。

けん引機は複数台設置し、けん引する張力を分散させ、けん引機の間にはローラなどの工具を配置し、布設時に光ファイバケーブルにかかる摩擦力を軽減させることができる。

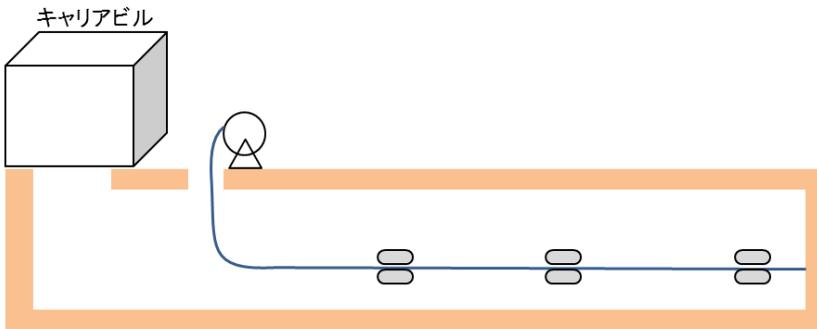


図 4・30 とう道内の光ファイバケーブル布設方法の概要

##### (2) 管路区間

管路区間で光ファイバケーブルを布設する場合、人力による方法と先端けん引、中間けん引、分散けん引の方法がある。

けん引機を使用すると一度に長い距離を布設することができるので、管路区間に布設する光ファイバケーブルの接続点を減らすことができる。光ファイバ心線の接続点では接続損失が発生するので、接続点を減らすことができる長スパン布設工法は、光ファイバ区間全体の損失を低減することができる。

図 4・31 に管路区間におけるケーブルの布設イメージを示す。

光ファイバケーブルを長スパンで布設するためには、複数のけん引機を配置し、光ファイバケーブルの先端、中間箇所と同時に張力かける必要がある。その際に加わる布設張力に耐える強度を光ケーブルに持たせている。

更に1本の管路に複数の光ケーブルを布設可能とするため、管路内に複数本の可とう管を設置し管路設備の有効活用している。

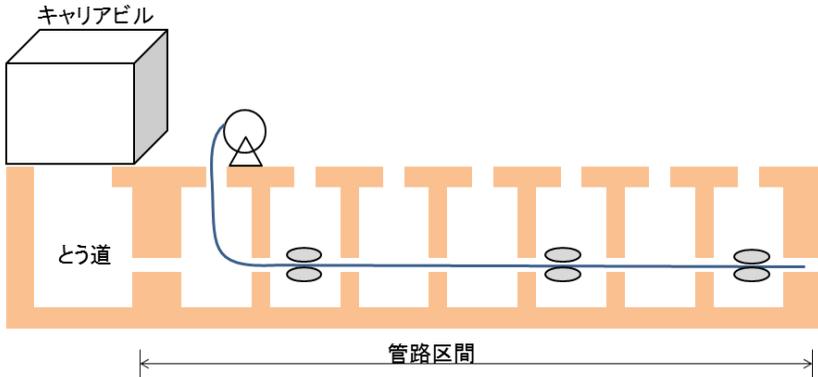


図4・31 管路区間の光ファイバケーブル布設方法の概要

### (3) 架空区間

架空光ファイバケーブルは、地下管路区間等から電柱に引き上げられ、電柱に架渉される。

図4・32に架空区間における光ファイバケーブルの布設イメージを示す。

光ファイバケーブルを布設する場合、電柱にカーブ用金車を取り付け、けん引機を使用する。ケーブルドラムは、光ファイバケーブルに極端な曲げを加えないように角度に気を付けて設置する必要がある。

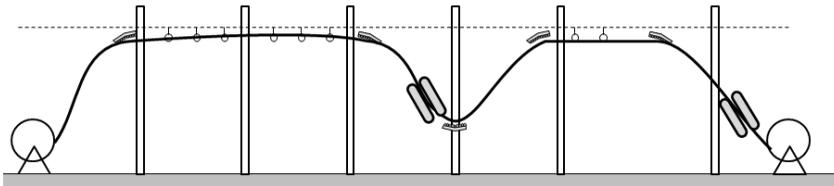


図4・32 架空区間の光ファイバケーブル布設方法の概要

### (4) 一束化

図4・33に一束化配線の布設概要を示す。

架空光ファイバケーブルを同一ルートに円滑に配線するため、既に配線されている支持線付ケーブルにハンガを設置し、そのハンガ内に光ファイバケーブルを新たに布設します(図4・34参照)。複数のケーブルを一束化し架設することで、既存設備(メタリックケーブル、

電柱、つり線)を最大限活用した光ファイバケーブルの架設が可能となる。

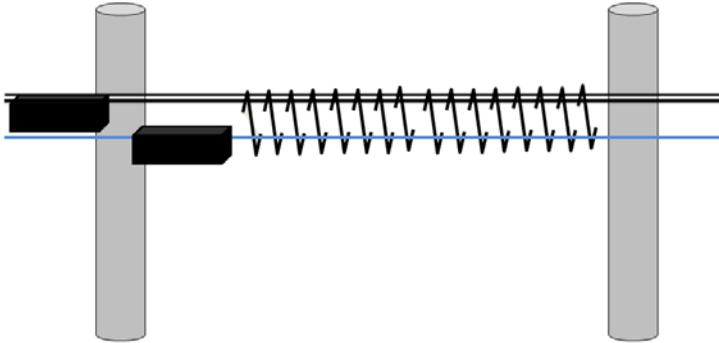


図 4・33 一束化配線の布設概要

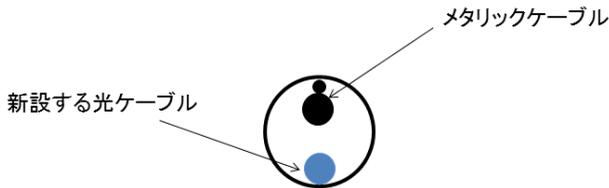


図 4・34 一束化の断面図

#### 4-2-2 ユーザ系の配線

(執筆者：中谷内勝司) [2015年7月 受領]

光ファイバケーブルのユーザ系配線は、1 心の場合ドロップケーブル (引込みケーブル) をそのままユーザ設備まで引き通す方法が現在では主流となっている。架空引込みの場合は、地上高の確保などを考慮する必要がある、戸建て住宅における壁面配線例を図 4・35 に示す。新規の地下引込の場合は、基本的に地下からビル MDF (Main Distribution Frame : 主配線盤) や戸建て配線 BOX までドロップケーブルを直接管路・配管内を通線する。

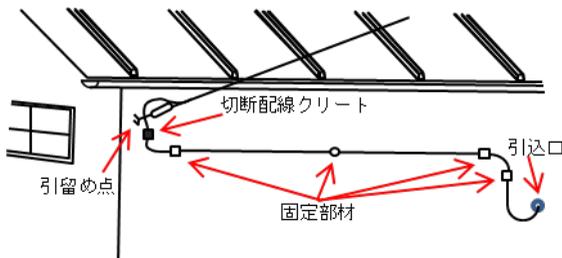


図 4・35 戸建て住宅壁面配線例



図 4・36 切断配線クリート外観

架空引込みの場合、引留め点下部側で切断配線クリート(図4・36)による固定が必要となる。これは、ドロップケーブルは引き通し配線となっているため、大型車両などによりドロップケーブルへのひっかけ事故が起こった場合、建物内の固定部材、壁面、接続されているユーザ側装置などの破損・損壊を回避するための方法である。本施工手順は、引留め点においてドロップケーブルの支持線とケーブル部を分離し、支持線のみ引留め、支持線にて張力を保持する。その後、引留め点下部側で分離した支持線とケーブル部を切断配線クリートの各溝に固定し、固定した下部側で支持線を切断する。切断配線クリートには、ケーブル部を通す溝に切断機能部があり、勘合することでケーブル部の外被とテンションメンバが切断され、光ファイバが損傷することはない構造となっている。これにより、大型車両などによるひっかけ事故が発生しても、切断配線クリート部にてドロップケーブルが切断され、下部側の建物内設備などに被害が及ばない仕組みとなっている。この仕組みは、ドロップケーブルの引通し配線が適用されてから実施しており、外被を剥ぎ取り心線部のみとしケースで保護する方法や、外被ごとループ状に切断刃に通しておき異常張力発生時に切断する方法などの変遷をたどり、より低コストで施工性が向上された上記の方法に至っている。また、引留め点と引込口が離れている場合には固定部材により壁面配線を実施するが、曲げによる損失を発生させないため一定の曲率半径を確保する規格となっている。

アパートなどの小規模な集合住宅は、各部屋への配管が設置されていない物件があり、光化を実施する場合は配線方法を考慮する必要がある。その配線方法としては、新たに配管設備を設置しその配管内を通線する方法、もしくは配管なしで直接ケーブルを外壁配線する方法の2パターンとなる。前者は通常の配線形態と同様であるため、ケーブルを外壁配線する形態(図4・37)について記載する。

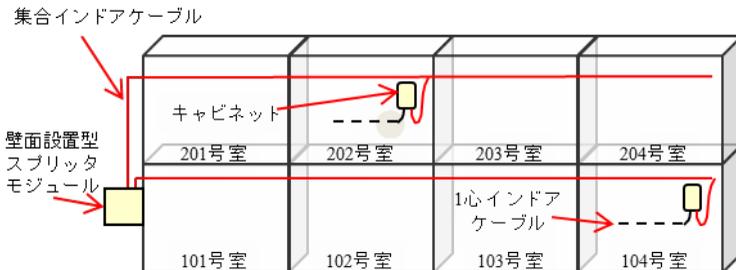


図 4・37 集合住宅壁面配線例

PON (Passive Optical Network) システムにおける集合住宅の設備構成は、基本的に光スプリッタを集合住宅内に設置する。しかし、配管が設置されていない集合住宅では、光スプリッタを設置する場所がないため、外壁に配線 BOX と光スプリッタ機能を兼ね備えた壁面設置型スプリッタモジュール (図 4・38) を設置する。

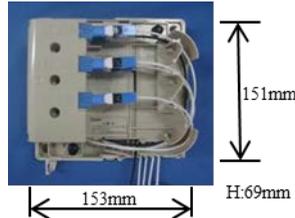


図 4・38 壁面設置型スプリッタモジュール (上蓋を外した状態)

これは、防滴特性を有しているため屋外設置が可能であり、4/8 分岐の 2 タイプから需要数に合わせ設置する。各部屋への配線は、需要発生の都度対象の部屋まで配線することも可能であるが、ほかの部屋を通過する場合、そのユーザが不在などで配線工事ができない場合がある。この課題を解決するため、あらかじめフロアごとに横系の配線を先行的に実施し、需要発生時に対象ユーザのみの入室で開通させる方法が用いられている。このときに横系の先行配線に適用するケーブルとして、8 本 (もしくは 4 本) のインドアケーブルを支持線により合わせた構造の集合インドアケーブルがある。断面構造を図 4・39 に、主な仕様を表 4・3 に示す。

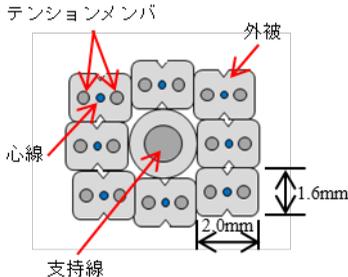


図 4・39 8 心集合インドアケーブルの断面構造

表 4・3 集合インドアケーブルの主な仕様

外径	8 mm
概算質量	50 g/m
単心ケーブル部本数	4 or 8
心線対照可否	可

部屋内への配線は、キャビネット内で集合インドアケーブルとインドアケーブルを接続し、壁面に穴あけもしくはエアコンダクトなどからのインドアケーブルを入線し、端末は光コンセントを設置する。光コンセント～ユーザ側装置間は宅内光配線コードによる接続となり、ユーザ自身での接続が可能である。

## ■5 群 - 2 編 - 4 章

## 4-3 光ファイバケーブルの標準規格

(執筆者：村田 暁) [2017 年 受領]

光ファイバケーブルの標準規格は IEC (International Electrotechnical Commission: 国際電気標準会議) の TC86 (ファイバオプティクス) / SC86A (光ファイバ, 光ファイバケーブル) / WG3 (光ファイバケーブル: 2015 年現在 40 か国で構成) で制定・改正の議論が行われており, IEC60794 シリーズにて規定されている。これらの規格では, 主にガラスファイバ (シングルモード, マルチモード) を使用した屋内ケーブル, 屋外ケーブル等に関する, 用語, 構造, 一般的な特性, 試験・測定方法, 規格値・基準値等が扱われている。また, プラスチックファイバを用いた光インダアケーブルについての規定も含まれている。

IEC60794 シリーズの規格の体系を図 4・40 に示す。

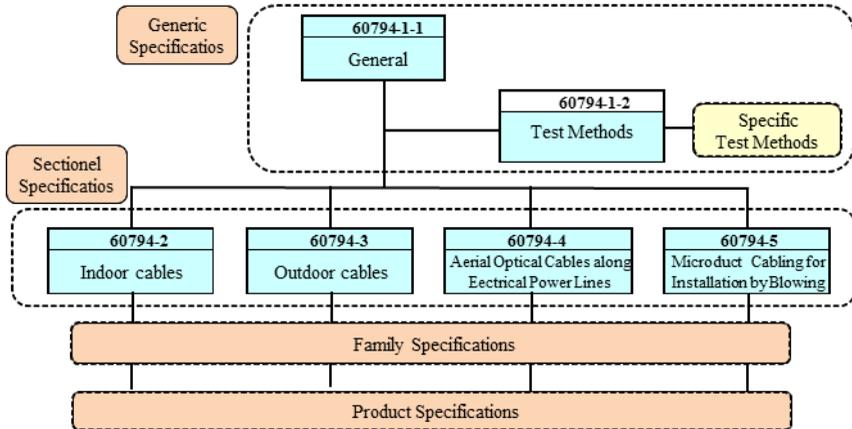


図 4・40 IEC60794 シリーズの規格の体系

IEC60794-1-1 (総則) には, 本規格シリーズが電気通信装置並びに機器とともに使用される光ファイバケーブル, 及び光/電気複合ケーブルに適用され, その構造, 伝送特性, 材料特性, 機械特性, 環境特性, 電気特性についての一般的要求事項を規定しているという適用範囲が明示されている。IEC60794-1-2 (試験法クロスリファレンス) 及び具体的な試験法の規格においては, まず, 旧版との整合をとるためのクロスリファレンスを明確にし, 以下の規格において, カテゴリーごとに試験法が規定されている。

- IEC60794-1-20 通則及び定義
- IEC60794-1-21 機械特性試験
- IEC60794-1-22 環境特性試験
- IEC60794-1-23 ケーブルエレメント試験
- IEC60794-1-24 電気特性試験

通則及び定義では、本規格が対象とする光ケーブルに光ユニットにも含まれることが明記され、用語や記号の定義、標準的な試験温度条件や、損失変動や歪における"No Change"の値が規定されている。機械特性としては、引張試験、圧壊試験、衝撃試験、曲げ試験といった外的要因に対して光ケーブルが有するべき耐性や、ケーブル化後の光ファイバ素線やテープ心線(リボン)の被覆除去性を規定する試験法等が規定されている。環境特性としては、老化試験や温度サイクル試験、防水特性、耐放射線特性などが規定されている。ケーブルエレメント特性としては、光ケーブルを構成するテープ心線(リボン)やチューブの試験法について規定されている。また、電気特性としては短絡試験や雷試験など、光/電気複合ケーブルに関する試験方法が規定されている。

続いて 4 項目の Sectional Specifications に区分され、それぞれ Family Specifications, Product Specifications が規定されている。

IEC60794-2 及びそれに付属する規格は、屋内 (Indoor) 環境下で使用されるケーブル類に構造・試験方法についての規格であり、以下五つのカテゴリーに分けられている。

IEC60794-2-10：単心及び 2 心ケーブル

IEC60794-2-20：多心ケーブル

IEC60794-2-30：テープ心線(リボン)形ケーブル

IEC60794-2-40：プラスチックファイバケーブル

IEC60794-2-50：単心及び 2 心のパッチコード(両端コネクタ付コード)

これらのケーブルには屋内用途、すなわち比較的温和な環境で使用される場合に適した光ケーブル試験方法が規定されている。プラスチックファイバを用いたケーブルや光コネクタ付のパッチコードも IEC60794-2 のカテゴリー内で規定されている。

IEC60794-3 及びそれに付属する規格は、屋外 (Outdoor) 環境下で使用されるケーブル類についての規格であり、以下六つのカテゴリーに分けられている。

IEC60794-3-10：ダクト内布設ケーブル、直埋ケーブル、巻付型架空ケーブル

IEC60794-3-20：自己支持型の架空ケーブル

IEC60794-3-30：湖底、河川横断、沿岸用などの水底ケーブル

IEC60794-3-40：下水道用ケーブル

IEC60794-3-50：高圧ガスパイプ用ケーブル

IEC60794-3-60：水道用ケーブル

IEC60794-3-70：応急処置用ケーブル

これらのケーブルは地下のダクト内への布設や地中へ直接埋設する形態、支持線を併設した自己支持型の架空ケーブルや、あらかじめ電柱に設置されたメッセンジャーワイヤ内に布設する形態のほか、様々な屋外環境に使用されるケーブルの構成や試験法とその基準値が規定されている。また、災害時の応急布設用もしくは繰り返し使用可能で堅牢な構造の応急処置用ケーブルについても規定されている。

IEC60794-4 及びそれに付属する規格は、電力線に沿った光ケーブル類についての規格であり、以下二つのファミリースペックに分けられている。

IEC60794-4-10：光架空地線ケーブル(OPGW)

IEC60794-4-20：無誘導自己支持型ケーブル All Dielectric Self-Support (ADSS)

IEC60794-5 及びそれに付属する規格は、圧送によってインストールするマイクロダクトケ

ケーブル及びユニット類についての規格であり、以下二つのファミリースペックに分けられている。

IEC60794-5-10 : マイクロダクトファイバケーブル

IEC60794-5-20 : マイクロダクトファイバユニット

今後新たな構造の光ケーブルが適用されれば、新たなセクションの追加や、既存セクションへの新たなカテゴリーの追加が行われる。

これらの IEC 規格の一部は JIS C 6850 : 光ファイバケーブル通則, JIS C 6851 : 光ファイバケーブル特性試験方法 (以上 2006 年 10 月改正), JIS C 6838 : テープ形光ファイバ心線 (2001 年 3 月改正) として日本工業規格として技術的な内容の変更なく制定されている。

## ■5群 - 2編 - 4章

### 4-4 色々な光ファイバケーブル

#### 4-4-1 細径高密度光ファイバケーブル

(執筆著者：山田裕介，泉田史) [2017年 受領]

光ファイバケーブルは、光ファイバ心線に曲げや圧縮・引張などの外力が加わらないように設計されており、光ファイバの安定な特性と長期信頼性を確保している[4章 4-1-3項参照]。このため、地下や架空などの屋外設備に用いる多心光ファイバケーブルは、スロットロッドや緩衝材によって光ファイバ心線を外力から保護する構造となっている[4章 4-1-2項参照]。**図 4・41**に既設の地下管路の状況を示す。3本のメタリックケーブルが三つの管路に布設されており、光ファイバケーブルが残り一つの管路に布設されたものである。この管路に複数本の光ファイバケーブルが布設できれば、アクセスインフラ設備〔本編 8章参照〕を増設することなく、光線路設備の増設ができる。また、架空設備では、細径高密度化すると光ファイバケーブルは軽量化が図れるので、布設時の牽引張力が小さく抑えられ、布設作業が容易になる。本項では、効率的な光線路設備の構築に寄与できる細径高密度光ファイバケーブルの設計と実用例について解説する。



**図 4・41** 地下管路と既設ケーブルの例

**図 4・42**に、2005年までに実用化されていた国内外の光ファイバケーブルの心線数と外径を示す。スロットロッド型の光ファイバケーブルは市中でも最も高密度な光ファイバケーブルであり、外径 23 mm の 1000 心光ファイバケーブルは、「シングルスロットロッド光ファイバケーブル構造」、「薄肉テーブ心線」、「低曲げ損失光ファイバ心線」などの高密度化技術を用いて開発され、導入された[4章 4-1-2項参照]。一つの地下管路に最大 3000 心（1000 心光ファイバケーブル 3 本）を布設することができる<sup>31)</sup>。

2005 年以降の FTTH サービス急速増に効率的に対応するため、例えば一管路当たり収容できるケーブル本数を増やし、更にケーブル一本当たりの光ファイバ心線数を増やすために、更なる光ファイバケーブルの細径高密度化を行った。ケーブル構造を抜本的に見直し、スロットロッドや緩衝材などの部材を可能な限り省略した。ケーブル断面方向の幾何学的な限界まで高密度に光ファイバ心線を集合することを目標とした。

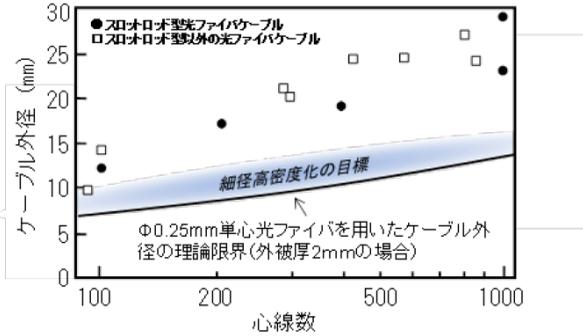


図 4・42 光ファイバケーブル細径高密度化の目標

図 4・43 に、光ファイバケーブルに求められる機能・特性と構造設計の考え方を示す。スロットロッドは、光ファイバに加わる曲げや側圧などの外力から保護し、光損失やひずみが増加しないようにする機能がある。スロットロッド型の光ファイバケーブルと同等の特性を維持するためにほかの構成部材で分担する必要がある。そこで、

- ① 光ファイバの曲げ損失特性を向上させることで外力による光損失増加を抑制し、
- ② テープ構造を変更することで光ファイバに加わる外力を緩和し、
- ③ 外被の厚さや材料特性を適切に設計することで機械的外力に耐え、

安定な特性と長期信頼性を確保することとした。

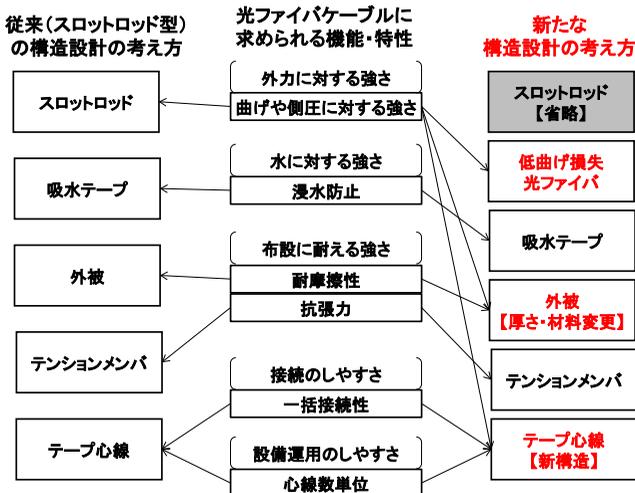


図 4・43 光ファイバケーブルの構造設計の考え方

図 4・44 に、200 心径高密度光ファイバケーブルの構造を示す。光ファイバ心線のみを高密度に撚り合わせ、その外周に外被を施している。外被材料には、従来ケーブルから実績のあるポリエチレン材料を用い、衝撃や側圧特性を確保できる最小限の外被厚とした。テンションメンバは、外被材料の温度伸縮抑制やケーブル製造性などを考慮して、外被内に埋め込む構造とした。

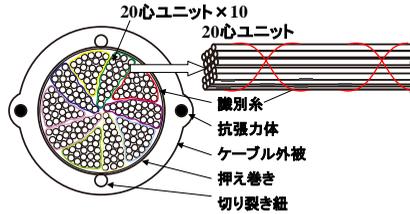


図 4・44 200 心径高密度光ファイバケーブルの構造

光ファイバ心線の構造は、単心光ファイバ（以下、単心）と光ファイバテープ心線（以下、テープ心線）がある。単心はその構造上、高密度に集合しやすい。しかし、光ファイバケーブルの心線数が多くなると、接続作業回数も増加する。一方、テープ心線は、複数本の光ファイバを一括で接続可能であるが、テープ心線の幅方向には曲がりにくく、高密度に集合しにくい。そこで、図 4・45 に示す間欠テープと低剛性テープの 2 種類の新たな構造の光ファイバテープを検討した<sup>32), 33)</sup>。(a)は、単心どうしの間に長手方向に対して間欠的に接着部を設けた構造（間欠テープ心線）であり、(b)は、単心どうしを剛性の低い材料で長手方向に連続して一体化するブリッジ部を設けた構造（低剛性テープ心線）である。それぞれ、ケーブル内では柔軟に変形することで高密度実装が可能で、かつ接続時には平面状に並ぶため一括接続が可能である。

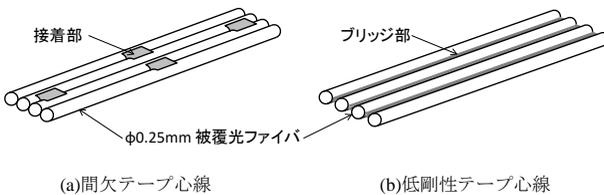


図 4・45 新たな光テープ心線の構造

図 4・46 に、試作した 200 心光ファイバケーブルの外観を示す。20 心の光ファイバ心線（単心、従来テープ心線、間欠テープ心線または低剛性テープ心線）を識別用の糸によって束ねてユニットを形成し、10 ユニットを撚り合わせた構造とした。ケーブル外径は、約 9.5 mm であり、質量は 0.07 kg/m、心線密度は 2.5 心/mm<sup>2</sup> 以上を実現している。

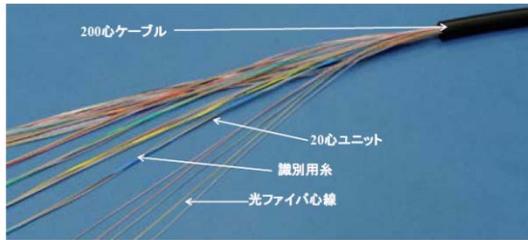


図 4・46 細径高密度光ファイバケーブル外観 (200 心の例)

ケーブル化による光損失増加及び温度変化時における最大光損失変動と光ファイバの曲げ損失特性を評価すると、光ファイバの最小許容曲げ半径 12 mm 以上では、光損失増加が生じていることが明らかになった。温度変化時の光損失増加は、従来テープと低剛性テープでは 0.3 dB 以上の大きな光損失増加であり、単心と間欠テープ心線は 0.3 dB 未満であり、ほぼ同等であった。ケーブル内の心線の変形のしやすさが影響していると考えられる。ほかの一般的な機械特性については、外被厚やテンションメンバ径を適切に設定することにより安定な特性を確保可能である。

従来のスロットロッド型光ファイバケーブルでは、スロットロッドの形状を適切に設計することで、光ファイバに生じる伸び・曲げひずみを制御して、機械的な長期信頼性を確保していた。細径高密度光ファイバケーブルでは、光ファイバがランダムに実装されるため、ケーブル内の光ファイバに生じるひずみを把握することが重要である。光ファイバケーブル内の光ファイバに加わるひずみの要因は、製造時、布設作業時、使用中の温度変化などがある。そのうち、ケーブル曲げ時に光ファイバに加わるひずみは、次の理由により心線構造に依存する。光ファイバケーブルが曲げられた場合、

- ① 光ファイバの曲げによるひずみ、
- ② ケーブル内の実装位置に依存する線長差によるひずみ、
- ③ 光ファイバテープ内の実装位置に依存する線長差によるひずみ

の 3 種類のひずみが生じる。③のひずみは、心線構造や変形のしやすさによってひずみの原因となる線長差が異なるため、心線構造に依存する。

ケーブルの曲げによって光ファイバに生じる伸びひずみを測定した結果、従来テープでは、単心と比較して約 3 倍の伸びひずみが加わっていることが明らかになり、間欠テープ心線と低剛性テープ心線は、従来テープ心線と単心の中間のひずみに抑制できていた。テープ心線内の心線数を増加させることを考えた場合、間欠テープ心線の変形のしやすさは低剛性テープ心線よりも優れるため、間欠テープ心線を採用した<sup>34)</sup>。以降、1000 心の細径高密度光ファイバケーブルにも間欠テープ心線を用いて良好な特性を得ている<sup>35)</sup>。

図 4・47 に、実用化した細径高密度光ファイバケーブルの種別とその適用領域を示す。架空区間では、ケーブル自重と風圧荷重の影響を低減し、支持線を含めた細径・軽量化によって、牽引機を用いることなく光ファイバケーブルの布設を可能とするなどを実現した。引上区間では、既設ケーブルにより新たな光ファイバケーブルを布設するスペースがひっ迫している場合でも光ファイバケーブルの細径化によって既設管路の有効利用を実現した。このよ

うに光ファイバケーブルの外径を最小化することで、経済的かつ効率的な光線路設備の構築に貢献した。

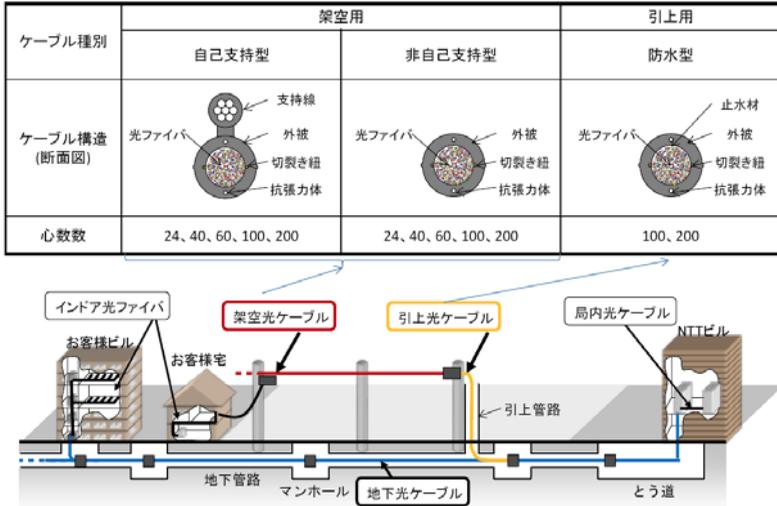


図 4・47 実用化した光ファイバケーブルの構造と適用領域

#### 4-4-2 低摩擦インドアケーブル

(執筆者：中谷内勝司) [2015年7月 受領]

既設集合住宅におけるブロードバンドサービスの提供方式としてメタリックケーブルを活用した VDSL 方式が普及してきたが、FTTH の普及拡大によりマンションなどにおいても各戸へ光ファイバケーブルを直接配線する方式が求められてきた。そこで、メタリックケーブルなどが配線されている既設配管の空きスペースに通線を可能とした低摩擦インドアケーブルについて、以下に述べる。

低摩擦インドアケーブルは、従来のインドアケーブルの基本特性（光学特性、機械特性、環境特性、作業性）と同等以上の特性を有しつつ、細径化及び低摩擦化を追求したものである。細径化により配管内の通線条数は増加させることができるが、ハンドリングなど作業上の制約から細径化には限界もあるため、それを補完するためにケーブルの低摩擦化が必要となる。

細径化を追求するにあたり影響が懸念される要素技術としては、耐衝撃性及び心線の取出し性があげられる。耐衝撃性については、様々な形状及び断面積の違うサンプルにより耐衝撃性実験を実施し、従来の  $3.1 \times 2.0 \text{ mm}$  から  $2.0 \times 1.6 \text{ mm}$  まで細径化を図ることで損失変動がないこと及びケーブル外被の亀裂が発生しないことを確認し、容積比で約 50% の削減を図った。詳細な説明については、文献 36) を参照のこと。低摩擦インドアケーブルの断面図を 図 4・48 に示す。

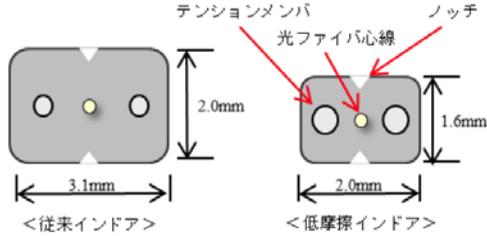


図 4・48 1心低摩擦インドアケーブルの断面構造

また、心線の取出し性を向上させるには、ノッチ部深さを深くするほど向上が図れる。ノッチ部深さの違うサンプルにより取出し性確認を実施することで、ノッチ部形状の最適化を図った。その結果、心線取出し時に損失変動が発生せず、テンションメンバの露出もないことを確認し、ノッチの引裂き力は従来の3/5程度まで向上させることができた。

低摩擦化の追求にあたり影響が懸念される要素技術には、外被材料と表面処理がある。外被材料は、高硬度 PE 材のベース材に対して低摩擦剤と難燃剤の配合比率の最適化を図り、表面処理はケーブル表面粗さの最適化を図ることにより、摩擦係数が従来比の1/5となった。また、光学特性などの各種基本特性についても、従来と同等以上であることを確認した。低摩擦インドアケーブルの通線評価結果を図 4・49 に示す。従来インドアケーブルに比べて非常に小さいけん引張力にて通線が可能となることがわかる。

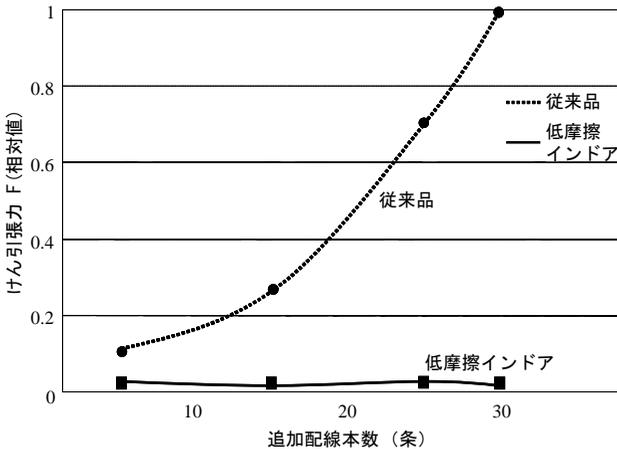


図 4・49 低摩擦インドアケーブルのけん引張力

これら細径化及び低摩擦化が実現できたことから、新たな通線方法としてこれまで不可能であった押し込み通線の検討を実施した。低摩擦インドアケーブルの剛性を高めることで、よ

り強い押込み力を得ることができるが、相反してハンドリング特性が低下する懸念がある。実験結果を図4・50に示す。

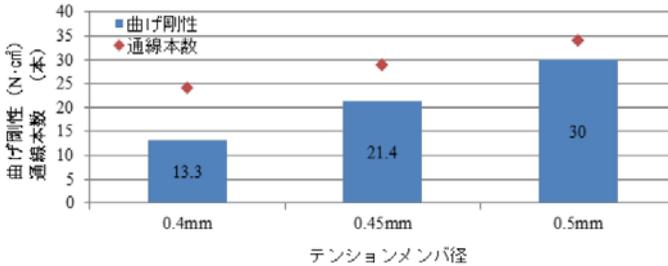


図4・50 テンションメンバ曲げ剛性と押込み通線本数

それぞれテンションメンバ径の違うサンプルにより押込み通線確認及びハンドリング特性を実施した結果、押込み本数が30本以上可能でありハンドリング特性に問題のないテンションメンバ径φ0.5mmを採用した。これにより、低摩擦インドアケーブル自身での配管内押込み通線が可能となり、作業性の向上を図ることができている。

低摩擦インドアケーブルの導入により、従来のインドアケーブルでは数条しか配線することができなかった既設の集合住宅配管において、低摩擦インドアケーブルを適用することにより全戸配線可能とすることができ、FTTHの普及拡大に大きく寄与することができた。

#### 4-4-3 生物被害対策ドロップケーブル

(執筆者：中谷内勝司) [2015年7月 受領]

集合住宅及び戸建て住宅への引込みケーブルとして適用されているドロップケーブルは、導入当初から施工性の向上及び低コスト化を図り構造変更を実施してきたが、その中でも様々な生物(鳥・虫・獣)から被害を受け故障に至る事象は、過去から多くの事象が報告されている。その中でも生物被害対策として「クマゼミ被害対策」を数年にわたり実施してきたため、その変遷について記載する。詳細については、文献37)を参照されたい。

ドロップケーブルにおけるクマゼミ被害は、平成11年(1999年)頃から年々故障報告件数も増加してきた。本被害は、主に西日本地域に生息するクマゼミによる被害であり、西日本地域に特化した故障であると思われていた。しかし、近年クマゼミの生息域が北上しているとの報告もあり、将来に向けては東日本地域においても対策を考慮する必要がある。

クマゼミ被害は、ドロップケーブルにクマゼミが産卵行為を行うことにより、産卵管が光ファイバ心線まで達し傷をつけ、温度変化・振動などの自然環境下においてその部分に応力が集中し、光ファイバ心線が破断する事象である。クマゼミの産卵管痕例を図4・51に示す。



図 4・51 クマゼミの産卵管痕例

クマゼミの産卵管痕は、ドロップケーブル外被の至る所に発見され、外被表面はミミズ腫れのような状況である。産卵管痕の断面を観察すると、光ファイバ心線にまで到達し破断しているサンプルもあり、対策の必要性が求められた。

ドロップケーブルのクマゼミ対策は、平成 16 年（2004 年）から本格的に検討が開始され、断面構造の変遷は図 4・52 のとおりである。

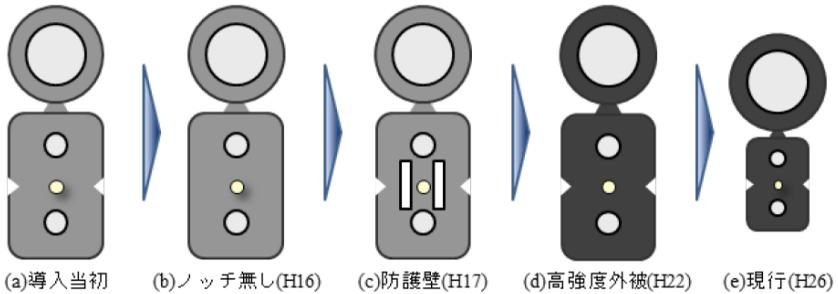


図 4・52 ドロップケーブル断面構造の変遷

(a) 導入当初

ドロップケーブルの基本構造は、支持線、テンションメンバ、光ファイバ心線が直線上に並び、ポリオレフィンによる一括充実被覆が施されている構造であり、現在に至るまで本構造は基本的には変更していない。支持線とケーブル部は首部でつながり、ケーブル部の側面には、光ファイバ心線の取り出し性向上のためのノッチ部が設けられている。

(b) ノッチ無し(H16)

クマゼミによるドロップケーブル被害の増加により、暫定措置として安価で短期間に導入できることからノッチ無し構造を採用した。これは、クマゼミの産卵管が光ファイバ心線に接触する確率を下げることを狙いとしたが、心線取り出し時に新たにノッチ作製する工程が増えることとなった。

(c) 防護壁(H17)

クマゼミの産卵管に刺されても産卵管がファイバに傷をつけない方法として、光ファイバ心線の両側に板状のプラスチック材料（防護壁）を配置する構造とした。本構造によりクマ

ゼミ被害は激減したが、材料増加によるコストアップ、心線取り出し時に防護壁の除去が必要となり施工性の低下となった。

(d) 高強度外被 (H22)

クマゼミの産卵管に刺されなくなる方法として、ケーブル外被にクマゼミ耐性をもつ材料を適用することにより、産卵管による外被損傷を防ぐ構造とした。これにより、更なるコスト削減及び施工性の向上を図ることができた。本構造は、基本的に現在まで採用されている。

(e) 現行 (H26)

現行構造は、更なる経済化及び施工性向上のため、ドロップケーブルのケーブル部をインドアケーブルの形状と統一化を図ったものである。

これらの構造変更などの変遷によりドロップケーブルのクマゼミ被害は、**図 4・53** のとおり故障発生率も減少し、対策の効果が表れていることがわかる。

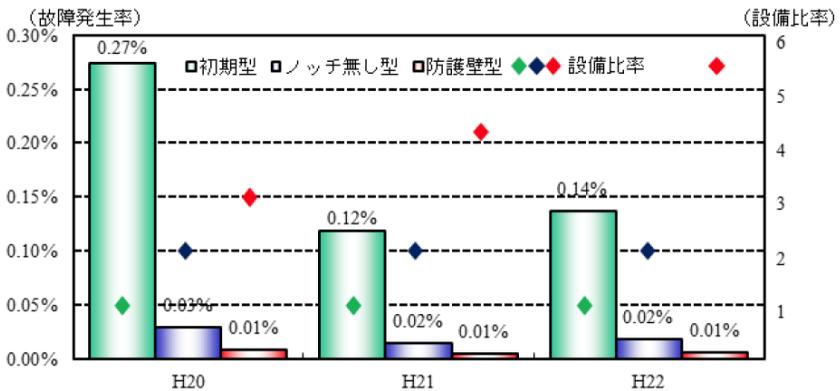


図 4・53 ドロップケーブル種別別故障発生率の推移

また、現在の高強度外被構造としてからは、これまでにクマゼミによる故障発生への報告はあがってきておらず、抜本的な対策として効果が表れているといえる。

#### 4-4-4 隙間配線ケーブル

(執筆者：中谷内勝司) [2015年7月 受領]

集合住宅等の各戸に光ケーブルを引き込む際、引き込む配管がない、配管経路がわからないなどにより光開通ができないという課題があり、その対応として壁などに穴を開けて光ケーブルを引き込む手段を取っていたが、ユーザから穴開けを了承されない場合は、光開通ができなかった。そこで、ドアなどの隙間スペースを利用し、配線を可能とする隙間配線ケーブルについて、以下に述べる。

まず、ドア隙間について調査を実施したところ、ドアには**図 4・54**のように2~3 mm程度のスペースがあり、ドア枠の曲率半径は2 mm程度であることがわかった。

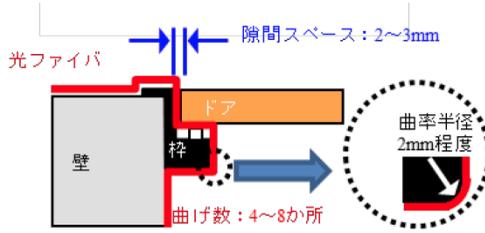


図 4・54 ドア隙間スペースの調査結果

このドア隙間を配線させるために必要な光ケーブルの要求条件は、

- (a) 曲げ損失特性を有する光ファイバであること
- (b) 隙間スペースの形状に適した光ケーブル構造であること
- (c) 厳しい曲げ箇所に対して現行と同等なファイバ破断確率であることが求められる。

(a)については、低曲げ損失光ファイバとしてシングルモード空孔アシストファイバ (HAF : Hole Assisted Fiber) を適用した。図 4・55 に示すように、HAF はコア付近のクラッド部分に空孔を設けた構造であり、石英ガラスと空孔 (空気) の屈折率差が大きいため、光信号の閉じ込め効果が高くなり、このコア構造と空孔構造を最適化することにより、国際標準 (ITU-T G.657.A2/B3) に準拠するシングルモード HAF を実現した。

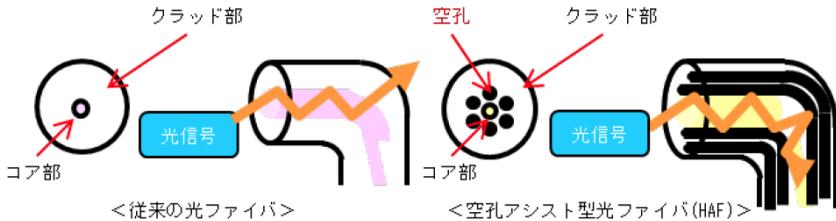


図 4・55 『従来の光ファイバ』と『空孔アシスト型光ファイバ』との違い

(b)については、ドアの隙間スペースの凹凸に配線しやすくするため、ドア隙間に配線する部分のシート部と、通常の露出配線部分に適用するコード部の構造としている。シート部のケーブル厚さは 2 mm 未満とし、シングルモード HAF の両側にテンションメンバを配置し、難燃性ポリオレフィンの外被材で一括成型の構成となる。更に、その両側に小曲げ部に適用した際に曲げ状態を保持することを可能とするための形状保持部材を配置した。シート部の固定には片面テープで上部から押さえ固定するため、これにより、小曲げ部に適用した際に曲げ状態を保持することが可能となる構造としている。隙間配線ケーブルの構造を図 4・56 に示す。

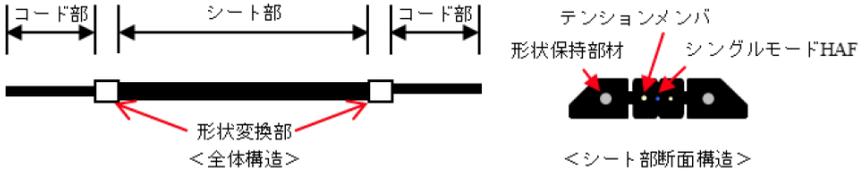


図 4・56 隙間配線ケーブルの構造

(c)については、光ファイバは曲げ半径が小さくなるとともに破断確率が高くなるが、曲げを加えた光ファイバにおける破断確率の計算結果(図 4・57)から、曲げ半径を 2.5 mm 以上にすることで長期信頼性として  $10^{-4}$  未満を保証することができ、現行の光ファイバと同等な信頼性を確保できることがわかる。

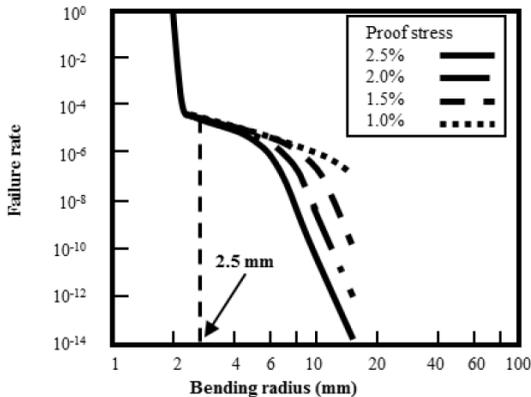


図 4・57 光ファイバの曲げ半径と破断確率の関係

隙間配線ケーブルの光学的特性としては、ドア隙間へ設置した状態で波長 1310 及び 1550 nm での挿入損失は、0.27 dB 以下であった。詳細な説明については、文献 38)を参照のこと。

これらの要求条件をクリアにすることで、隙間配線ケーブルを実現することができた。その結果、これまで光開通ができなかったユーザに対しても、隙間配線ケーブルを適用することで、光サービスの提供が可能となっている。

#### 4-4-5 光ワイヤハーネス技術

(執筆者: 若林知敬) [2015年6月 受領]

##### (5) 車載ネットワークの進化

2010年以降、環境、安全、快適に対する要求の増大に伴って自動車の高機能化が一層進んでおり、搭載機器間をつなぐネットワークへの要求も高度化している。車載ネットワークは、図 4・58 のようにエンターテインメント機器や周辺監視に用いるカメラなどをつなぐ情報系ネ

ネットワーク、エアコンや照明など車の利便性を高める機器をつなぐボディ系ネットワーク、車の「走る」「曲がる」「止まる」を制御する機器をつなぐ走行系ネットワーク、及び電源マネジメントからなり、車両ネットワークゲートウェイで各ネットワーク間の情報の交換を行っている。特に情報系では音楽や音声を中心とした伝送から映像伝送のニーズも高くなり、情報容量の増大が著しい。更に、高度な運転者支援や自動運転化を見据えた周辺監視映像の高精細化や低遅延伝送といった進化、センサ類の増加が進むものと考えられ、それに伴って情報容量増大に一層拍車がかかることが予想される<sup>39)</sup>。



図 4・58 車載ネットワークの構成

#### (6) 車載光配線の動向

この大容量性ととも耐ノイズ性、ケーブルの細線化・軽量化にメリットを活かせる車載光ネットワークは、1997年の欧州における D2B (Digital Domestic Bus) の導入より 20 年近くが経過した 2016 年でも欧州から北米、アジアに拡がりを見せている。図 4・59 に D2B, MOST (Media Oriented Systems Transport) といった車載ネットワーク規格からの高速化の流れを示す。2001 年以降は MOST を中心に光ネットワークの導入が活発に進んでおり、これまでの伝送速度 25 Mbps (MOST25) に加えて 2013 年には伝送速度 150 Mbps の MOST150 が実車化された。同規格では然り対線や同軸線での配線もサポートされているが<sup>40)</sup>、光ファイバを媒体とした配線の搭載車種はワールドワイドで増えていく傾向にある。

MOST25 及び MOST150 の構成部材としては、光伝送媒体には光接続の低コスト性からコア径が 980  $\mu\text{m}$  と大口径でかつ端末加工が簡素な SI-POF (Step Index- Plastic Optical Fiber) が、発光素子には波長 650 nm の LED (Light Emitting Diode) が用いられてきた。

一方、今後要求が深まると考えられる伝送速度 1Gbps 程度の領域では、VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) と SI-HPCF (Step Index- Hard Polymer Cladding Fiber) といったより広帯域な部材の組み合わせによる方式<sup>41), 42)</sup>や、従来の SI-POF と LED を用い低速のボーレートで多値変調により伝送を行う方式<sup>43)</sup>が報告されている。この領域の国際標準化活動は、IEC などで活発化している状況である<sup>44)</sup>。更に将来的には GI (Graded Index) ファイバと VCSEL を組み合わせた高速伝送系の搭載も想定され、ギガビットオーダーの伝送では光配線の大容量性をより活かせるものと考えられる。

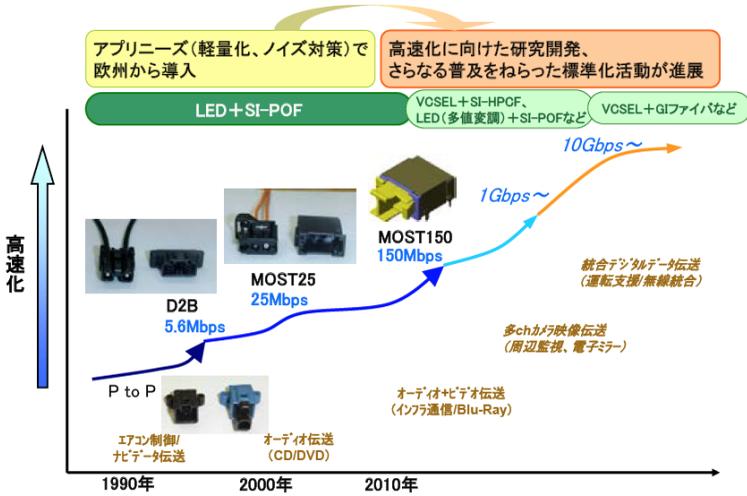


図 4・59 車載光 LAN の変遷と今後

(7) 車載用光配線の特徴と対応

車載光通信の伝送速度は民生用データコムと比べると低速であるが、構成部品には車載特有の耐環境性、配索性、機械的なロバスト性などが求められてきたほか、低コストをねらった加工性や作業性の検討も行われてきた。表 4・4 に、車載化されている SI-POF を使った系を一般的な民生用光部品（LC コネクタ付きパッチコード）と比較した例を示す。これより民生用品部の車載適用には多くの課題があり、独自の対応が必要であることがわかる。

表 4・4 車載用/民生用光部品比較

比較項目	特性、加工方法等	車載用	民生用
耐環境性	耐熱、耐湿	◎	△
配索性	高耐久被覆、 低曲げ損失	◎	○
機械的 ロバスト性	繰り返し屈曲、 耐衝撃	◎	○
加工性	研磨レス、溶着	◎	△
光コネクタ 嵌合作業性	端面保護、 コジリ防止	◎	△

環境面では、物理層の構成部材である光トランシーバ（FOT：Fiber Optic Transceiver）、光コネクタ、SI-POF ケーブルのいずれにも当初の高温側 85℃対応から配索部位の拡張に伴って 105℃対応の部品が見られるようになり、低温側-40℃からの広範囲がカバーされるよう

になった。これらの温度範囲では最低 1000 時間の長期耐久試験や温度サイクル試験、高温高湿試験を行うことで性能が確認される。また被覆は廃棄処理後を考慮し、ノンハロゲン化されている。配索面では、狭い車両内組み付けスペースでの急峻な曲げや分岐部分での鋭角な曲げに耐えられるべく被覆に工夫が施されている。曲げ損失を低減するためには、SI-POF に大きい NA (Numerical Aperture) が仕様化されているほか、ワイヤハーネスへの組み付け工程で過剰な曲げを発生させないための治具面での対策が行われる。長期的には上記温度範囲での曲げや側圧印加放置試験のほか、シートやドアミラーなどへ配索されることを想定した繰り返し屈曲試験が行われている。さらに、機械的なロバスト性確保では屈曲に加えて引張強度の確保も必要となる。

加工性については研磨レスやフェールールとの溶着による短時間での加工の検討やコネクタ組み立ての簡素化(抗張力体レスなど)などが図られてきた。また、作業性を考慮した点では、光コネクタ嵌合時に作業者が光ファイバ端面に触れないため、及びコネクタハウジングの角で光ファイバ端面を損傷させないため(コジリ防止)、光ファイバ端面がハウジングの面から引き込んだ構造となっている。以上の観点から、SI-POF ケーブルは図 4・60 のようなタイト構造、光コネクタは図 4・61 に例示した構造となっている。

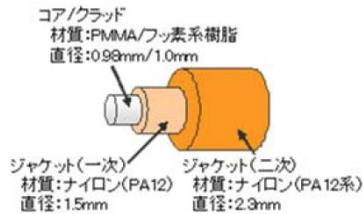


図 4・60 SI-POF ケーブル構造例



図 4・61 車載用光コネクタ構造例

#### (8) 車載ギガビット伝送用光配線

(2)項で記したとおり、車載でも 1Gbps を越える伝送容量を求める声が大きくなっている。そこで SI-POF よりも伝送帯域が広く、データコム領域で汎用的に使用されているコア径 50 $\mu\text{m}$  の GI 型光ファイバよりも接続部材の寸法精度を緩和できるコア径 200 $\mu\text{m}$  の石英コアからなる SI-HPCF を用いた光システムの検討が行われた<sup>4)</sup>。図 4・62 に SI-HPCF ケーブル試作品の構造を示す。SI-HPCF の NA は約 0.4 と伝搬モード数が多く、伝送帯域は励振条件に大きく依存する。図 4・63 は、励振条件 (MLE : Mode Limited Excitation—限定モード励振, OFL : Overfilled Launching Condition—全モード励振) を変えたときの伝送帯域の距離特性の

違いを表しており、計算値はモード拡散方程式を用いてシミュレーションした結果である。限定モード励振 (MLE1: 5%NA=0.12, MLE2: 5%NA=0.15) により車載配線長 (10~15m) で 1Gbps 伝送が可能な伝送帯域が得られることがわかっている。また、曲げや温度変化に対して伝送帯域劣化は充分小さいことを確認したほか、MLE2 で励振したときの 1~3Gbps 伝送での BER (Bit Error Rate) から求めたパワーペナルティ (図 4・64) より、本システムでのギガビット伝送の可能性が示されている。

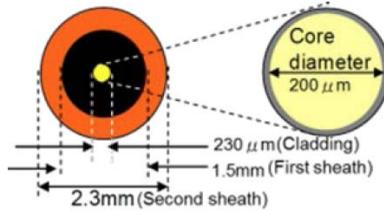


図 4・62 SI-HPCF ケーブル試作品構造

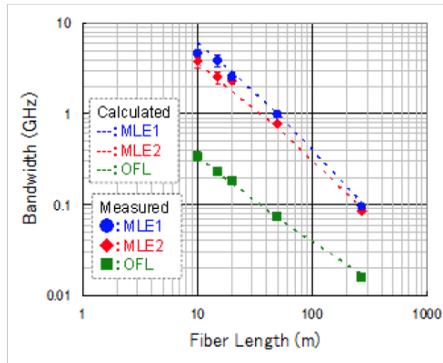


図 4・63 励振条件の違いによる伝送帯域距離特性の変化 (励振 NA は MLE1 < MLE2 < OFL)

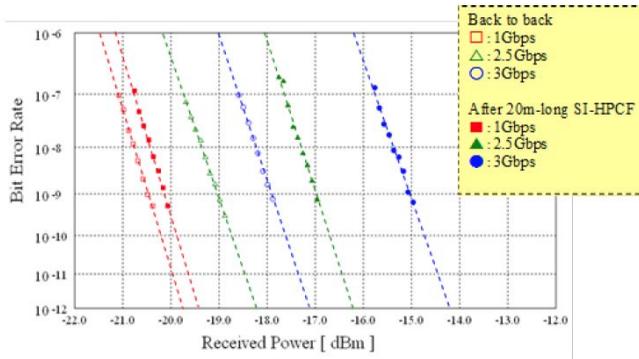


図 4・64 1~3Gbps 伝送における BER

## (9) まとめ

車載光ネットワークにおける大容量化の背景，構成部品の動向などを示した．今後は，運転支援や自動運転を見据えた映像品質，センサ類の進展が著しいと考えられ，情報容量増大に伴って車載光配線の必要性は増えていくものと考えられる．

## ■5群 - 2編 - 4章

### 参考文献

- 1) 村田 浩他：古河電工時報，第 68 号，pp.13-16 (1980)
- 2) 岡田昇，田島洋：2014 年電子情報通信学会総合大会，BI-6-1 (2014)
- 3) N. Uchida et al.: "Fabrication and Performances of Step Index Fiber Cable for 32Mb/s Optical Transmission System", in the proc. of 1<sup>st</sup>-IOOC, Tokyo (1977)
- 4) 石原 浩志他：電気通信，vol.58, No.587, pp.67-71 (1995)
- 5) 石原 浩志他：通研実報，第 28 巻第 9 号，pp.1867-1881 (1979)
- 6) 内田 直也：「開発物語 水素による光ファイバ損失増の発見と防止策の確立—最悪のシナリオを際どく回避—」，電子情報通信学会 通信ソサエティ和文マガジン(B-PLUS)，vol.25, 夏号，pp.72-79 (2013)
- 7) 石原 廣司他：電気通信，vol.59, No.599, pp.32-33 (1996)川瀬他：“非ガス光ファイバケーブルによる加入者光線路の構成”，信学論(B-I), J73-B-I, 10, pp. 785 – 792 (1990)
- 8) 上野谷他：“設備の高強度化からインテリジェント化へと進む”，NTT 技術ジャーナル，2, 8, pp. 7-9 (1990)
- 9) 吉岡他：“シングルスロット構造多心光ケーブルの実用化”，1995 年信学ソ大，B-627 (1995)
- 10) H. Iwata et al.: "Pre-connectorized 1000-fiber Single Slotted Core Cable", in the Proc. of IWCS, pp. 627 – 634 (1995)
- 11) N. Okada et al.: "Development of single slotted-rod type 1000-fiber optical fiber cable", in the Proc. of IWCS, pp. 463 – 467 (1995)
- 12) D. Kakuta et al.: "Development of Small Diameter 1000-fiber Underground Optical Cable for Effective Utilization of Underground Infrastructure Facilities, in the Proc. of IWCS, pp. 289 – 292 (1999)
- 13) K. Tomikawa et al.: "Development of Small Size 1000-fiber Cable using BIF", in the Proc. of IWCS, pp. 297 – 302 (2008)
- 14) A. A. Griffith: "The Phenomena of Rapture and Flaw in Solid", Phil. Trans. Roy. Soc. , 221, pp. 163-198 (1920)
- 15) A. G. Evans: "Slow Crack Growth in Brittle Materials under Dynamic Loading Conditions", Int. J. Fracture, Vol.10, No.2, pp.251-259 (1974)
- 16) Y. Miyajima: "Studies on High-Tensile Proof Tests of Optical Fibers", IEEE J. Lightwave Tech., Vol.LT-1, No.2, pp. 340-346 (1983)
- 17) 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, No.7, pp.4847-4853 (1982)
- 18) 大西正敏：“放電過熱を用いた光ファイバの高強度接続方法”，信学論(B), J67-B, 9, pp.974-981 (1984)
- 19) 宮島義昭：“海底光ファイバケーブルの信頼度の設定法”，信学論(B), J67-B, 11, pp.1231-1238 (1984)
- 20) W. Weibull: "Statistical Distribution Function of Wide Applicability", J. Appl. Mech., vol.18, pp.293-297, (1951)
- 21) 川瀬正明，富田茂，笠原伸也，上野谷拓也，“非ガス光ファイバケーブルによる加入者光線路の構成”，信学論(B), Vol. J73-B1, No.10, pp.785-792 (1990)
- 22) 岩田秀行，佐藤公紀，“光ファイバ定期試験の検討”，2000 信学ソ大 (通信)，B-10-36, pp259 (2000)
- 23) ITU-T Recommendation L.13, "Performance requirements for passive optical nodes: Sealed closures for outdoor environments" (2003)
- 24) T.Kain, J.Polym.Sci.Part A, 25, 37 (1987)
- 25) MOST COOPERATION <http://www.mostcooperation.com/>
- 26) 木村剛，塚本好宏，中村一己，第 17 回ポリマー材料フォーラム (2008)
- 27) Y. Tsukamoto, SEN'I GAKKAISHI , 60, 303 (2010)
- 28) K. Nakamura, Y. Tsukamoto, T. Kimura, J.F.Faller, The 20th International Conference on Plastic Optical Fibers (2011)
- 29) Y. Tsukamoto, T. Kimura, The 23rd International Conference on Plastic Optical Fibers (2014)
- 30) 豊田直樹，安齋貢一郎，山本智也，鉄谷成且，白木和之，高見沢和俊，小川直志，樽松大治：“新たな多

- 糸布設技術および細径 1000 心光ケーブルの開発”, NTT 技術ジャーナル, **20**, 12, pp.55-58 (2008)
- 31) Y. Yamada, D. Kakuta, S. Hamaguchi, H. Nakane, Y. Shibata, S. Kiyosue and K. Shiraki: “Development of Novel Optical Fiber Ribbon Assembled into Extremely High-Density Optical Fiber Cable”, Proc. of 61<sup>st</sup> International Wire and Cable Symposium, pp.25-30 (2012)
  - 32) K. Toge, Y. Yamada and K. Hogari: “Ultra-High-Density Optical Fiber Cable with Rollable Optical Fiber Ribbons”, Proc. of OECC2008, ThN-1, (2008)
  - 33) K. Toge, Y. Yamada and K. Hogari: “Densely Assembled Low-Rigidity Ribbon Cable using Bending-Loss Insensitive Fibers”, Proc. of OECC2009, ThM-5, (2009)
  - 34) Y. Yamada, D. Kakuta, S. Hamaguchi, H. Nakane, Y. Shibata, S. Kiyosue and K. Shiraki, “Development of Novel Optical Fiber Ribbon Assembled into Extremely High-Density Optical Fiber Cable”, Proc. of 61<sup>st</sup> International Wire and Cable Symposium, pp. 25-30 (2012).
  - 35) Y. Yamada, M. Kikuchi, H. Izumita and T. Kurashima: “5.2 fibers/mm<sup>2</sup> High-Density 1000-fiber Cable Assembled from Rollable Optical Fiber Ribbon”, Proc. of 62<sup>nd</sup> International Wire and Cable Symposium, pp. 592-596 (2013).
  - 36) 丹羽慎一, 鈴木慎太郎, 内野亮輔: “集合住宅における新たな光配線技術の開発” 2009 年 電子情報通信学会総合大会 B-10-15 (2009)
  - 37) 中谷内勝司, 青柳雄二: “セミ対策ドロップケーブル技術へセミとの戦いへ” 2014 年 電子情報通信学会総合大会 BI-6-4 (2014)
  - 38) 清水智弥, 倉本圭太, 大堂淳司, 青柳雄二, 高見沢和俊, 中島和秀, 倉嶋利雄: “空孔アシスト光ファイバを用いた隙間配線インドア光ケーブル” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J97-B, No. 8, pp. 622-631 (2014)
  - 39) 「2018 年には 200 万画素超へ」, 日経 Automotive, 2016 年 2 月号, pp.16-17
  - 40) "MOST Versatile standard", Henry Muyschondt, 16th interconnectivity Conference Asia, MOST Co., Nov., (2015)
  - 41) "Gigabit optical transmission using step-index hard polymer cladding fiber cord for vehicles", T. Aiba, T. Wakabayashi, K. Shirasu, and Y. Koyamada, 20th ITS World Congress Tokyo, Oct., 2013
  - 42) 川合, 漆畑, 中田, 古川: “小型 1 芯双方向光通信モジュールの開発” ,信学技報, vol. 109, no. 353, OPE2009-171, pp. 57, Dec., (2009)
  - 43) Óscar Ciordia, Carlos Pardo and Rubén Pérez de Aranda: "Commercial silicon for gigabit communication over SI-POF", POF2013, pp. 109, Sep., (2013)
  - 44) “戦略的国際標準化加速事業 国際標準共同研究開発事業 高速車載 LAN 用光伝送サブシステムの試験方法に関する標準化” , [http://www.meti.go.jp/medi\\_lib/report/2014fy/E003928.pdf](http://www.meti.go.jp/medi_lib/report/2014fy/E003928.pdf), Mar., (2014)