

# 光ファイバの被覆材料と構造

常石克之

Optical Fiber Coating Materials and the Structures — by Katsuyuki Tsuneishi — Optical fiber networks have expanded rapidly and more than 200 million km of optical fiber was sold in 2011. The optical fiber has now become a key technology to an information-oriented society. The conventional single mode fiber widely used in the world has not changed much in its refractive index profile, however, the coating materials and coating structures have developed due to changes in cable structures and installation environments. Coating materials play an important role in minimizing transmission loss and ensuring long-time reliability under external pressure in cabling and installation processes. This paper describes the history of coating materials and coating structures.

Keywords: optical fiber, coating, material, structure

## 1. 緒言

光ファイバが情報通信網で実用化されて30年以上が経過し、2011年の世界需要は年間2億km超に達し、情報インフラとして現在のIT社会の実現にはなくてはならないものとなっている。世界需要の大半を占めるシングルモード(SM)型光ファイバでは、光を伝搬するファイバガラスの基本構造は開発当初より大きく変わりはない。しかしながら、光ファイバの被覆材料や被覆構造は、ケーブル構造ならびに使用環境に応じて種々開発が進められてきた。

光ファイバの被覆には、ケーブル化や敷設時のハンドリング等の外圧から光ファイバを保護するとともに、敷設後の温度や湿度等の環境変化に対しても、長期間に渡って伝送損失の悪化や光ファイバの破断がないように、光ファイバ本来の光伝送特性や機械強度特性を維持することが求められる。本稿では、光ファイバの主な被覆材料と構造の概要についてまとめた。

## 2. 光ファイバ被覆の種類別

光ファイバの被覆にはプラスチック材料が主に用いられるが、線膨張係数が石英ガラスより大きいため低温下で収縮し、光ファイバの伝送損失を増加させやすい。光ファイバに外力が加わると同様に伝送損失が悪化するため、被覆で外圧を受け止め光ファイバに力が加わらないような構造にする必要がある。また、長期使用時に熱や湿度等による被覆の劣化に伴って伝送損失や強度特性を悪化させないように材料選択も重要である。

図1に各種要求特性に対応した光ファイバ被覆の種類別の概要をまとめた。以下、それぞれの光ファイバ被覆の特徴について述べていく。

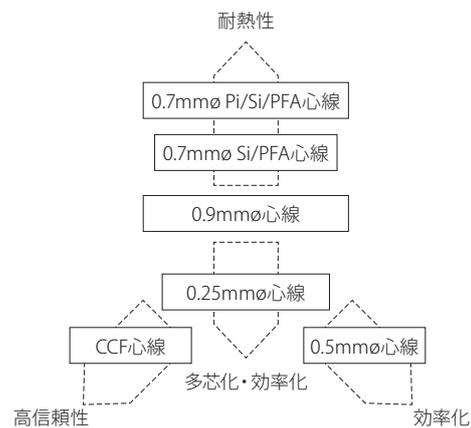


図1 光ファイバ被覆の種類別

## 3. 光ファイバの製造工程と被覆方法

本題に入る前に、光ファイバの製造工程について記す。光ファイバ母材を線引炉で約2000℃の温度で加熱熔融し、下方に外径を0.125mmφに制御しながら光ファイバをキャプスタンで引出す。光ファイバの強度特性を損なわないように光ファイバが他の個体物質に触れる前に、コーティングダイで樹脂を塗布し、硬化炉で硬化させる。所望の被覆構造を得るために塗布・硬化を繰り返して巻き取り、光ファイバ素線となる(図2)。

光ファイバ素線の周囲にケーブル化後の識別を容易とするため、着色樹脂を再度被覆して光ファイバ心線とする。熱可塑性樹脂を被覆する場合は、押出機(図3)で素線の

周囲に押出被覆する。後述の紫外線硬化インクを被覆する場合には、着色機にて線引と同様なコーティングダイでインクを塗布し硬化して巻き取る (図4)。

光ファイバの被覆は、周方向ならびに長さ方向に均一である必要があり、線引機におけるコーティング方法や装置の開発・検討が進められた。

光ファイバの開発当初は、樹脂が満たされたオープンダイと呼ばれる開放型のコーティングダイに光ファイバを走行させて樹脂を被覆していた (図5)。光ファイバの生産性向上 (線引速度の向上) のため、密閉型のコーティングダイ

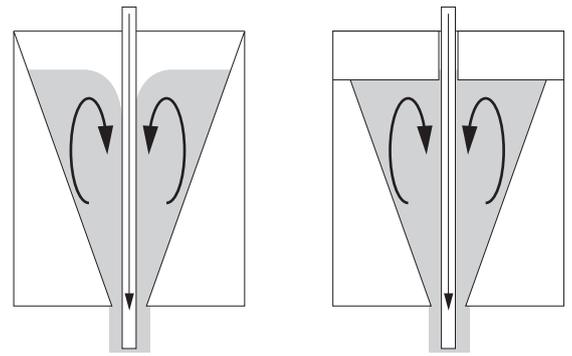


図5 オープンダイ

図6 加圧ダイ

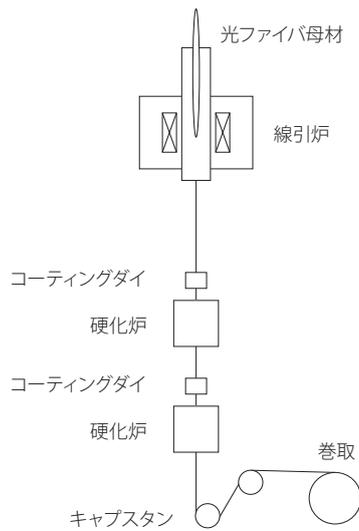


図2 線引機の概略図

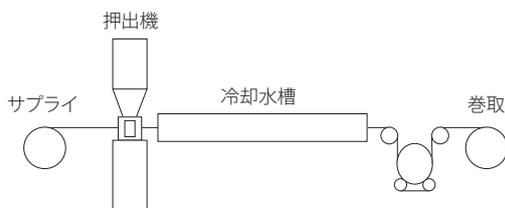


図3 押出機の概略図

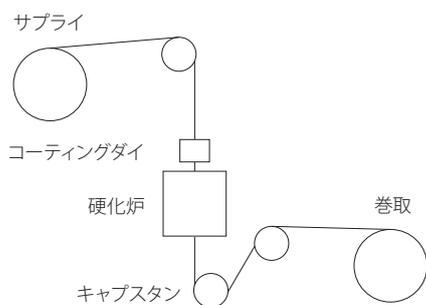


図4 着色機の概略図

イに樹脂を加圧供給して被覆する加圧ダイ<sup>(1)</sup>へと移行していく (図6)。また、2層の樹脂を同時に被覆する「double pressure coating system」<sup>(2)</sup>も提案されている。

コーティングダイの構造は変わっても、基本的には走行する光ファイバに樹脂を牽引させて、光ファイバに被覆することに大きく変わりはなく、被覆外径は光ファイバの外径、樹脂の粘度やコーティングダイの出口径でほぼ決定する。

コーティングダイに入線してくる光ファイバの温度も影響するので、室温付近の温度まで冷却する必要があり、線引炉以降の光ファイバの冷却過程も理論検討より (1) 式でモデル化されている<sup>(3)</sup>。

$$T_z = (T_s - T_o) \exp(-4hZ / \rho C_p d V_f) + T_o \quad \dots\dots (1)$$

ここで、各記号の意味は次のとおりである。T<sub>z</sub> : Z位置でのファイバ温度 (°C)、T<sub>s</sub> : 線引炉出口のファイバ温度 (°C)、T<sub>o</sub> : 周囲温度 (°C)、h : 熱伝達係数 (cal/cm<sup>2</sup>・sec・°C)、Z : 線引炉出口からの距離 (cm)、ρ : 密度 (g/cm<sup>3</sup>)、C<sub>p</sub> : 比熱 (cal/g・°C)、d : ファイバ外径 (cm)、V<sub>f</sub> : 線引速度 (cm/sec)。

光ファイバを被覆する際、光ファイバに牽引された大気が樹脂中に混入し、気泡として被覆中に残存することがある。光ファイバが低温下に晒された場合に被覆が収縮するが、気泡混入部では不均一となり光ファイバの伝送特性が悪化してしまうという問題がある。気泡混入を防止するダイス構造<sup>(4)</sup>や光ファイバのコーティングダイへの入線個所をフロンガスやCO<sub>2</sub>ガスで満たして気泡混入を防止する方法及び装置の提案もされている<sup>(5)</sup>。

また、光ファイバの全長に渡って被覆中の気泡の有無を検査するためのセンサーの開発も進められた<sup>(6)</sup>。

#### 4. 0.9mmφ心線<sup>(7)</sup>

光ファイバが実用化された1970年代後半、日本では1次被覆に外径0.4mmφの熱硬化型シリコン樹脂 (Si樹

脂)、2次被覆に外径0.9mm $\phi$ のナイロン樹脂 (Ny樹脂) を被覆した光ファイバ被覆 (Si/Ny心線) が標準構造 (図7) であった。

高張力線 (TM) の周りに光ファイバを撚り合わせた層撚り型ケーブル (図8) や数本の光ファイバを集合した光ファイバユニットをさらに複数本撚り合わせたユニット型ケーブル (図9) に0.9mm $\phi$ 心線は使用された。

光ファイバをTMに撚り合わせることで、光ファイバには側圧が加わり、マイクロバンド損失と呼ばれる放射損失で伝送損失が増加する。マイクロバンド損失増加を防ぐため、一次被覆材として光ファイバの周りに-65~200 $^{\circ}$ Cの広範囲の温度領域でゴム弾性を有するSi樹脂を緩衝層とし

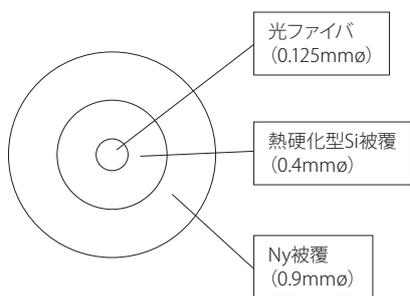


図7 0.9mm $\phi$  Si/Ny心線

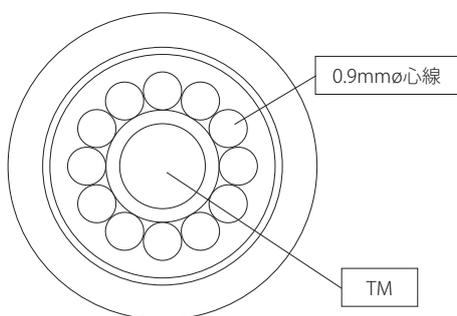


図8 層撚り型ケーブル

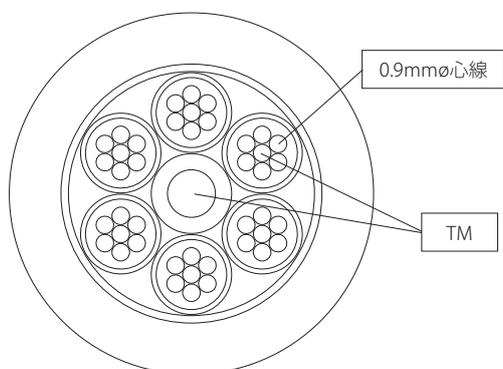


図9 ユニット型ケーブル

て、2次被覆にはシェル (殻) 効果を持ち、取扱い性を向上させるNy樹脂を被覆したSi/Ny心線が標準構造として採用された。

1982年、ケーブル敷設して数年後にケーブル内で発生した水素ガスの光ファイバへの拡散によって伝送損失増加する問題が発生し、ケーブル構成材料からの水素ガスの発生を抑制する対策が施された。光ファイバの被覆材においても同様の対策が求められ、Si樹脂も水素発生量の少ない低水素発生型Si樹脂へと改良された。

0.9mm $\phi$ 心線は、その後低廉化のため①熱硬化型Si樹脂から紫外線硬化型に、また②5項に記載する0.25mm $\phi$ 心線の周囲にノンハロゲン樹脂を被覆した0.9mm $\phi$ ノンハロゲン心線へと継承される。

## 5. 0.25mm $\phi$ 心線

光ファイバが中継系伝送網のみならず加入者系伝送網に拡充していく過程では、ケーブルの敷設効率の向上が課題となる。

光ファイバの接続は、光が伝搬するコア (外径約10 $\mu$ m $\phi$ ) を精密に対向させて融着することが必要であり、敷設作業の負担は大きい。光ファイバの多芯化とともに、多芯一括接続が可能なケーブル構造へと移行していく。

光ファイバの高密度化 (光ファイバ被覆外径の細径化) ならびに経済化 (被覆材料の低廉化および光ファイバの生産性向上) のため、光ファイバの被覆は、紫外線硬化型樹脂 (UV樹脂) を被覆した0.25mm $\phi$ 心線が世界的な標準構造となった。0.25mm $\phi$ 心線が標準となるまでに、0.4mm $\phi$ 心線や0.3mm $\phi$ 心線も検討されてきたが、ここでは割愛する。

ケーブル構造も0.9mm $\phi$ 心線を使用したユニット型ケーブルより、0.25mm $\phi$ 心線を4本または5本をテープ状に並べてUV樹脂で一括被覆したテープ心線をポリエチレンのスロット溝に収納したテープスロット型光ケーブル (図10) が開発・実用化され、光ファイバの密度も一挙に20倍となった<sup>(8)</sup>。

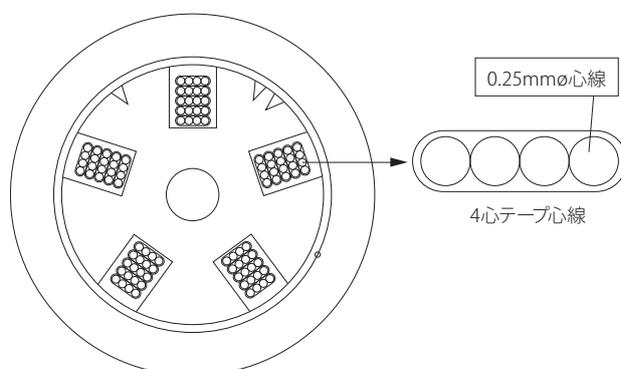


図10 テープスロット型光ケーブル

0.25mm $\phi$ 心線は、マイクロバンド損失低減のために、0.9mm $\phi$ 心線の設計指針と同様に、一次被覆には緩衝層として外径0.19～0.2mm $\phi$ の低ヤング率のUV樹脂が、二次被覆には高ヤング率のUV樹脂を外径0.24mm $\phi$ に被覆し、その外側には識別のために着色したUV樹脂を被覆して外径0.25mm $\phi$ とする（図11）。

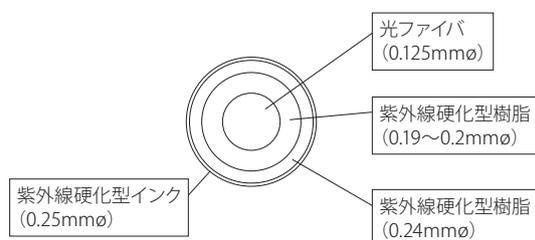


図11 0.25mm $\phi$ 心線の構造

テープ心線に用いられる0.25mm $\phi$ 心線には、新たに多芯一括接続を可能とするための特性が要求される。

一括接続を行うためには、複数本の光ファイバの端面が整列していなければならない、誤差は不揃い量として規定される（図12）。不揃い量の低減には、光ファイバが被覆内で長さ方向に移動しないように、光ファイバと被覆材が密着していなければならない。反面、光ファイバの接続のためには、被覆が容易に除去できることも必要である（被覆を加熱し柔らかくして、被覆除去を容易にした被覆除去装置も開発されている<sup>(9)</sup>）。このように相反する要求特性に関しても適正な樹脂設計がなされている。

また、光ファイバ被覆はケーブルに使用される材料に対しても安定であることも必要で、ジェリー充填型光ケーブルでは、ジェリーが被覆へ影響を与えないことも確認されている<sup>(10)</sup>。

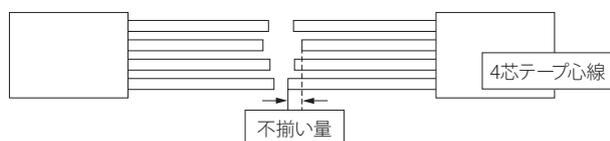


図12 一括接続時の不揃い

## 6. 耐熱光ファイバ被覆

6-1 200 $^{\circ}$ C耐熱光ファイバ被覆<sup>(11),(12)</sup> 耐熱光ファイバの開発は、光ファイバの電磁誘導を受けないという特徴より、高圧送電線を直撃雷から保護する避雷用アース線

（架空地線）の内部に光ファイバケーブルを実装したOPGW（Composite Fiber-Optic Overhead Ground Wire）への適用が始まりであった。架空地線は、落雷時や短絡事故時は短時間であるが200 $^{\circ}$ Cの高温に晒される。光ファイバを形成する石英ガラスは1000 $^{\circ}$ C以上の極めて高い耐熱性を有しているため、光ファイバの耐熱特性は被覆材料の耐熱性に依存する。

耐熱光ファイバの被覆材として、1次被覆に0.9mm $\phi$  Si/Ny心線に用いる約200 $^{\circ}$ Cの耐熱性を有するSi樹脂（外径0.4mm $\phi$ ）を、2次被覆には260 $^{\circ}$ Cの耐熱特性を持つPFA（Tetrafluoroethylene-perfluoralkylvinyl ether copolymer）樹脂を被覆とした外径0.7mm $\phi$ の心線（図13、Si/PFA心線）の開発が進められた。

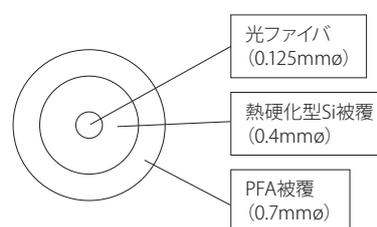


図13 Si/PFA心線の構造

PFA樹脂はNy樹脂と同様、0.4mm $\phi$  Si素線に押出機にて被覆するが、PFA被覆後の光ファイバの強度特性（引っ張り強度）が大幅に低下（図15）する問題が生じた。これは、押出時に約400 $^{\circ}$ Cに加熱されたPFA樹脂より、ガラスと反応して腐食させる性質を持つフッ化水素（HF）ガスが発生し（図14）、光ファイバ表面を腐食させていた。

PFA樹脂を押出加工する限り、HFガスの発生を抑制することはできないので、Si樹脂被覆に金属酸化物（TiO<sub>2</sub>：

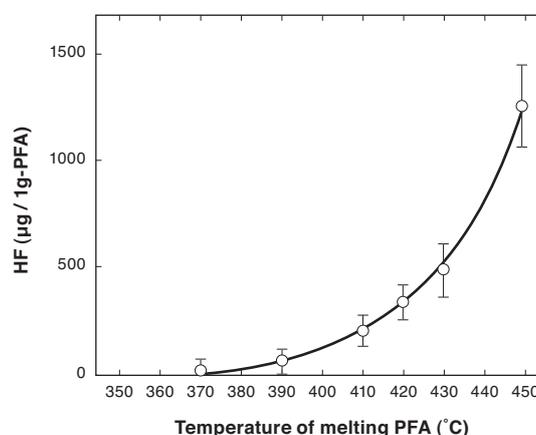


図14 PFAの熔融温度とHFガス発生量

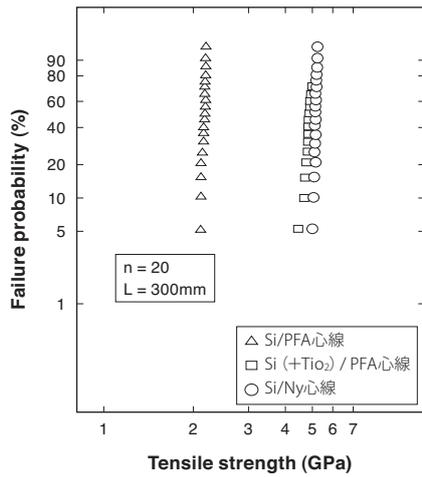


図15 Si/PFA心線の強度特性

チタニウムホワイトと呼ばれる白色顔料)を添加し、HFガスを吸着させることで光ファイバ表面へのHFガスの到達を防ぎ、Si/Ny心線と同等の強度特性に改善させた(図15)。また、 $-40^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ の広範囲の温度領域での伝送損失変化は、 $0.05\text{dB/km}$ 以下@SMファイバと良好な伝送特性を有する $200^{\circ}\text{C}$ 耐熱光ファイバが実用化された。

**6-2  $250^{\circ}\text{C}$ 耐熱光ファイバ被覆<sup>(13)</sup>** 更なる耐熱要求は、1990年代より活発化した石油・ガス探索産業界の油田探用システム(図16)への光ファイバの適用である。油田は海底の約5000m下に位置し、石油を効率的に採取するためには、採油抗の全域に亘り、周囲の成分、圧力、温度、流量等をモニターすることが必要である。

採油抗は、高温・高圧・腐食性ガスが存在する環境下であり、高圧ならびに硫黄やメタン等の腐食性ガスから光

ファイバを保護するため、ステンレス管に光ファイバ心線を挿入した上に、特殊な高分子材料で被覆を施し、更にその外側を金属被覆したケーブル構造が採用された。

Si/PFA心線の油田環境への適用可否の確認のため、加熱エージング処理後の強度試験を実施した。 $200^{\circ}\text{C}$ 加熱処理後では強度劣化が見られないが、要求される耐熱温度である $250^{\circ}\text{C}$ 加熱処理後には強度特性の劣化が確認された(図18)。これは一次被覆のSi樹脂が熱分解して通り抜けた水分子がガラス表面を侵食したものと推定された。

$250^{\circ}\text{C}$ 耐熱光ファイバの被覆材として検討されたのが約 $400^{\circ}\text{C}$ の耐熱性を持つポリイミド(Polyimide)樹脂(PI樹脂)である。

新規の被覆構造では、PI樹脂を外径 $0.14\text{mm}$ φで一次被覆し、取扱い性を考慮して、従来の $200^{\circ}\text{C}$ 耐熱光ファイバと同様に外径 $0.4\text{mm}$ φのSi樹脂(+ $\text{TiO}_2$ )の二次被覆と外径 $0.7\text{mm}$ φのPFAによる三次被覆を施した(図17、PI/Si/PFA心線)。

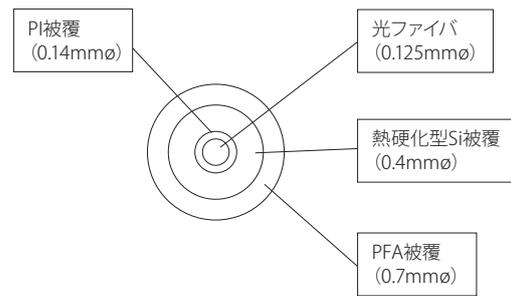


図17 PI/Si/PFA心線の構造

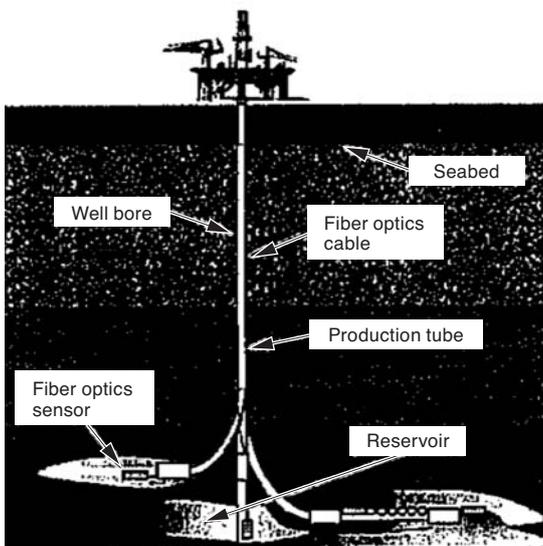


図16 油田探用システムの概要

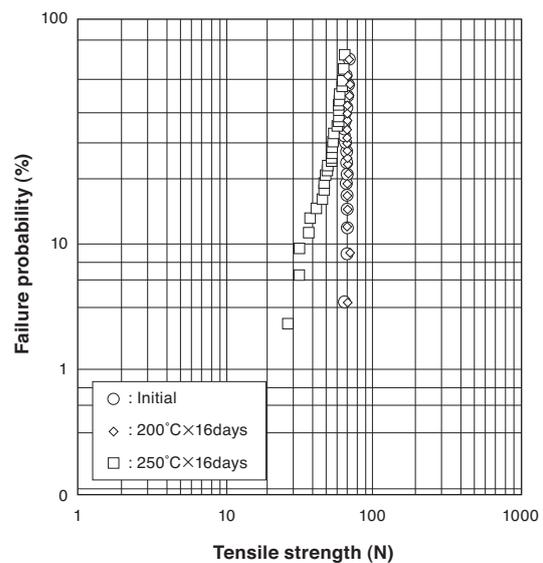


図18 Si/PFA心線の強度特性

ポリイミド被覆は、線引機でポリアミド酸溶液を塗布し、溶液を乾燥させた後300～500℃で熱処理しイミド化させる。PI樹脂を被覆するのは特に乾燥工程が重要であり、乾燥が不十分な状態で熱処理すると残存した溶液が発泡してしまうため、乾燥に充分な時間をかける必要がある。

PI/Si/PFA心線の250℃×30日加熱処理後も強度特性の劣化は見られていない(図19)。伝送損失変化も0.01dB/km以下と安定した伝送特性を有している。

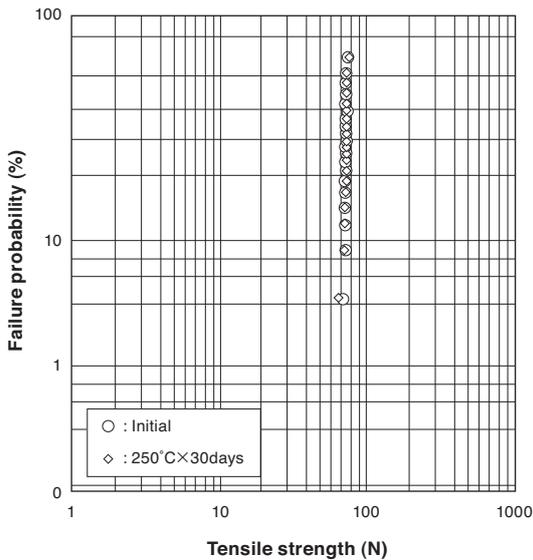


図19 PI/Si/PFA心線の強度特性

## 7. カーボン被覆心線<sup>(14)、(15)</sup>

カーボン被覆 (CCF: Carbon Coated Fiber) 心線は、1980年後半より開発が進められ、1990年前半には長期信頼性が要求される海底ケーブルに適用された。

CCF心線は、光ファイバの周囲に0.03～0.05μmの厚みでカーボン被膜を被覆し、その外側にUV樹脂(外径0.25mmφ)が被覆される(図20)。

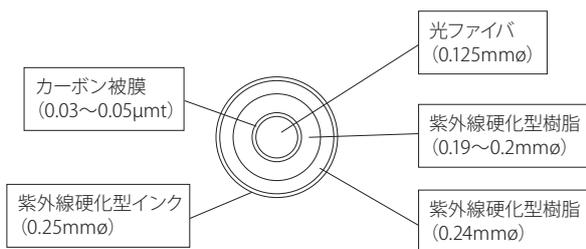


図20 カーボン被覆光ファイバの構造

光ファイバは、応力が負荷されていると石英ガラス表面に存在するマイクロな傷(クラック)が拡大することで破断に至る。いいかえると、破断応力以下の応力でも長時間継続して負荷させると傷が成長し破断に至る。これは、ガラスの疲労特性として知られ、IEC60793-1-33に規定される静疲労試験や動疲労試験によって疲労係数(n値)を求めることができる。

静疲労試験では、光ファイバに一定な歪(曲げ)を加え破断に至る時間を計測し、n値(nsと表記)を求める(図21)。動疲労試験では、光ファイバに加える歪速度を変え、破断強度を測定することでn値(ndと表記)を求める(図22)。光ファイバ材質や被覆で異なるが、通常は20～22前後である。

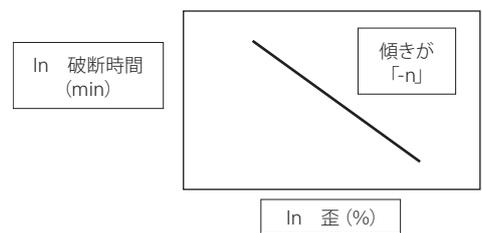


図21 静疲労試験による疲労係数の算出

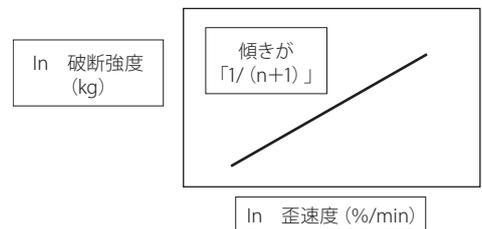


図22 動疲労試験による疲労係数の算出

疲労係数の考え方を別の観点から説明する。光ファイバに負荷される歪量 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 下において、傷が成長し破断に至る時間をそれぞれ $T_1$ 、 $T_2$ とすると、近似的に歪量と破断時間の関係は(2)式で表わされ、歪量の比に疲労係数nを乗じた値が破断に至る時間の比に等しい。

$$(\sigma_1 / \sigma_2)^n = T_2 / T_1 \dots\dots\dots (2)$$

1%伸び歪( $\sigma_1$ )下で、 $T_1 = 1$ 秒で破断に至る大きさの傷は、0.5%伸び歪( $\sigma_2$ )下では、疲労係数 $n = 20$ の場合、 $T_2 = 1.05 \times 10^6$ 秒には破断に至るという考え方である。疲労係数n値が大きくなればなるほど傷の成長が遅くなり、 $n = 50$ であれば $T_2$ は $1.13 \times 10^{15}$ 秒まで破断時間は伸びる。

このような石英ガラスの疲労特性には水分の存在が大きく関与し、ガラス表面の水分による応力腐食によると言われる。

CCF心線は、その緻密なカーボン被膜で光ファイバを覆うことで水分を遮断し、100以上の疲労係数を持つ長期信頼性に優れた光ファイバである。

CCF心線のもう一つの特徴は、水素分子もカーボン被膜で遮断できることであり、光ファイバ内への水素分子の拡散（伝送損失が増加する）を防ぎ、悪環境下でも長期的に安定した伝送損失を確保できる。

図23にCCFの線引装置の概略を示す。カーボン被覆用の反応管が、線引炉とコーティングダイの間に配置される。約2000℃の線引炉で加熱熔融されて線引された光ファイバがまだ高温な状態で本反応管を通過する際に、反応管に炭素化合物を原料ガスとして供給すると、光ファイバの熱でCVD（Chemical Vapor Deposition）法により光ファイバ表面にカーボンが蒸着し被覆となる。カーボン被覆後、UV樹脂を被覆し、着色層を施す。

カーボン被膜の性質は、反応管を通過する光ファイバの温度が大きく影響し、緻密なカーボン被膜を得るには1000℃以上の高温条件が必要である。しかしながら、3項で述べたように線引炉から出た光ファイバは、走行中に冷却され最終的には室温まで低下する。この冷却過程の中で、適正な温度領域でカーボン被膜を得るため、線引速度とともに反応管の長さや設置位置が重要な製造条件となる。

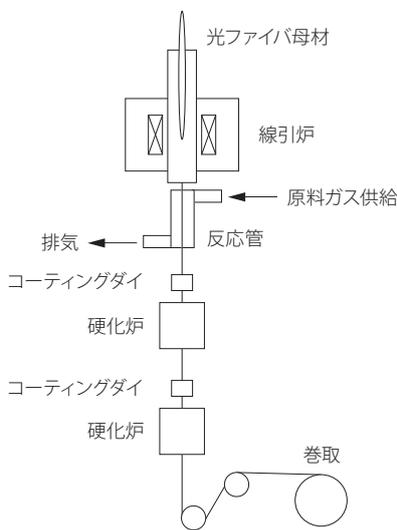


図23 CCF線引機の概略

## 8. 0.5mmφ心線<sup>(16)</sup>

FTTH（Fiber To The Home）サービスの本格的な普及が始まるとともに、光開通工事を短時間かつ効率的に行う

ことが求められ、局舎と家庭を結ぶアクセス系光配線に使用する光ケーブルや接続物品も今まで以上に作業性が良く効率的に敷設できるものが望まれた。

国内のアクセス系光配線模式図を図24に示す。アクセス系配線に使用する24芯型架空ケーブル、8芯架空ケーブル、建物に引き落とすドロップケーブル、及び建物内で使用するインドアケーブルが新たに開発され（図25）、これらのケーブルには0.25mmφ心線に変わって0.5mmφ心線が新たに適用された。これにより、従来作業時間がかかっていたテープ心線から単芯線を取り出す作業や、クロージャ内での取り回しや余長収納時における作業性の向上が期待される。

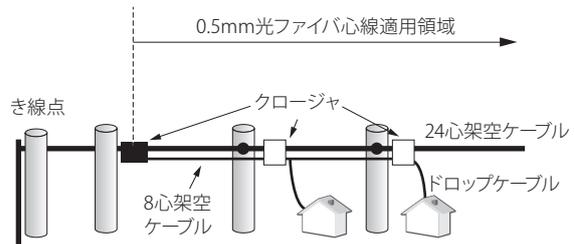


図24 光配線模式図

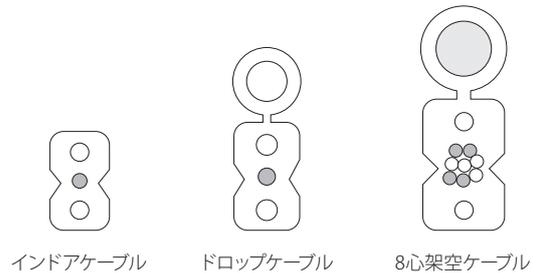


図25 各種ケーブルの断面模式図

0.5mmφオーバーコート心線は、UV樹脂被覆からなる従来の0.25mmφ心線の更にその外周に着色性UV樹脂層を施し、最終外径を0.5mmφとしている（図26）。

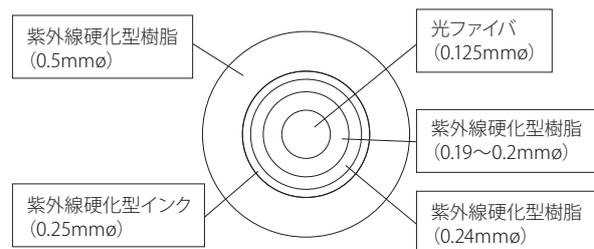


図26 0.5mmφ心線の構造

0.5mm $\phi$ 化に用いた着色性UV樹脂は、視認性の向上、及び後述する被覆除去作業時に最外層の除去確認を容易にするため、0.25mm $\phi$ 心線の着色層と同色に着色されている。

0.5mm $\phi$ 心線は、汎用ストリッパーを用いて最外層である着色性UV樹脂を除去し、0.25mm $\phi$ 心線を露出させることで0.25mm $\phi$ 心線に変換でき、従来の0.25mm $\phi$ 心線の接続機器類をそのまま使用することができる（図27）。

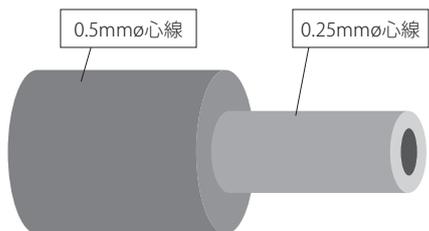


図27 0.5→0.25mm $\phi$ 心線への変換

0.5mm $\phi$ 心線から0.25mm $\phi$ 心線への変換を容易にするため、最外層の着色性UV樹脂を除去する際に加わる力の最大値（以後、被覆除去力と称す）を低くするよう樹脂設計がなされているが、低温下では樹脂が硬くなり、除去力は上昇する（図28）。

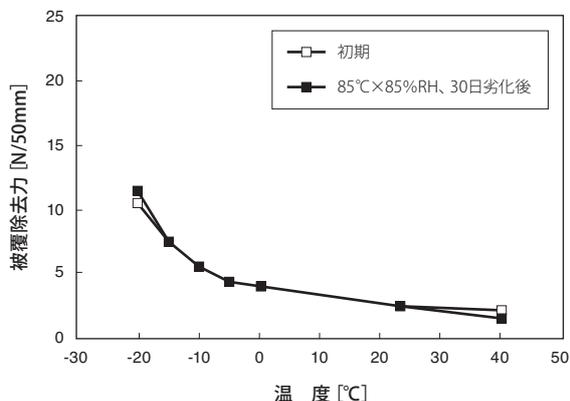


図28 被覆除去力の温度依存性

0.25mm $\phi$ 心線への変換評価は、最外層を除去した後の0.25mm $\phi$ 心線の着色表面の傷の有無を顕微鏡で観察し、光ファイバが露出する傷は除去不良判定として、被覆除去力が増加し除去不良頻度が増加する-20°Cの低温下で、試験N数3200本を試験して成功率99%以上を確認した。

また、伝送損失他の諸特性いずれも0.25mm $\phi$ 心線と同等以上の特性を有している。

## 9. 結 言

現在のIT社会の実現には、光ファイバ通信の実用化とともにその後の飛躍的な光通信網の構築によるところが大きい。今後もスマートフォン（多機能携帯電話）やタブレット端末（携帯型情報端末）等の高速移動体通信の増加や、宅内の情報機器や家電を光回線と接続してネットワーク制御するホームネットワークの普及等、必要な情報量は益々増加している。先の東日本大震災を機に情報通信ネットワークの耐災害性強化（迂回ルート等）等、光ファイバ通信ネットワークの整備は今後も不可欠であり、光ファイバの更なる高密度化の検討も進められている。

また、各種分野で光ファイバを利用したセンサーの開発も進められており、その使用環境はさまざまである。光ファイバの被覆もそれぞれの使用環境に対応して今後も種々開発を進めていかねばならない。

## 用語集

### ※1 CVD (Chemical Vapor Deposition) 法

さまざまな物質の薄膜を形成する蒸着法のひとつで、化学反応により膜を堆積する方法。

## 参 考 文 献

- (1) 千田 他、「光ファイバの高速線引き」、NTT研究実用化報告第32巻12号（1983年）
- (2) L. Stormbom et al., "A high speed optical fiber double pressure coating system", WIRE AND CABLE PANORAMA October / November, P53-55 (1986)
- (3) U. C. Peak and C. M. Schroeder, "Forced convective cooling of optical fibers in high-speed coating", j. Appl. Phys., vol.50, No.10, P151-155 (October 1979)
- (4) P. W. France et al., "Plastic Coating of Glass Fibers and Its Influence on Strength", Fiber and Integrated Optics, Vol.2, Number 3-4, P267-286 (1979)
- (5) チャールズ 他、特許公報第2635997号、「ガラス光ファイバに保護被膜有機材料を添着させる方法及び装置」
- (6) 吉田 他、特開平5-296942、「線状体樹脂被覆内気泡検出装置」
- (7) 光通信ハンドブック（1984年8月10日第2刷）
- (8) 松尾 他、「NTT向SM型光ファイバケーブルの開発」、住友電気第135号、P16-20（1989年9月）
- (9) 大阪 他、「加入者用SM多芯光ファイバテープ心線の融着接続技術」、住友電気第135号、P36-42（1989年9月）
- (10) 新倉 他、「難燃ノンメタリックジュエリー充填型光ケーブルの開発」、住友電気第136号、P51-55（1990年3月）
- (11) 亀尾 他、「フッ素樹脂被覆光ファイバの強度に関する一考察」、電子通信学会総合全国大会（1983年）

- (12) S. Okuyama et al., "High heat-resistant optical fiber coated thermal-cured type silicone and fluorine polymer", International Wire&Cable Symposium Proceeding, P.183-188 (1986)
  - (13) 清水 他、「高耐熱 (250℃) 光ファイバ心線の開発」、SEIテクニカルレビュー第156号 (2000年3月)
  - (14) 相川 他、「カーボンコート光ファイバにおけるカーボン膜の構造」、電子情報通信学会秋季全国大会 C-284 (1992年)
  - (15) H. Aikawa et al., "Characteristics of Carbon-Coated Optical Fibers and Structural Analysis of the Carbon Film", International Wire & Cable Symposium Proceeding, P.374-380 (1993)
  - (16) 藤井 他、「FTTH用光ファイバケーブルの開発」、SEIテクニカルレビュー第167号、P76-80 (2005年9月)
- 

---

**執 筆 者**

常石 克之 : 光通信事業部 主幹

