カーボンコーティングによる光ファイバの高信頼化

吉澤 信幸*

* NTT フィールドシステム研究開発センタ

Improvement of Optical Fiber by Carbon Coating

Nobuyuki Yoshizawa*

* NTT Telecommunication Field Systems R & D Center

Review of the investigations on "Carbon-Coated Optical Fiber (CCF)" is given. Outstanding features of CCF is presented and its utility is discussed from a point of view of reliability of optical fiber cable in field condition. A brief history of developments of high-strength CCF is described.

Key words: carbon-coated fiber, hermetic fiber

1. はじめに

光ファイバは非常に高性能の通信媒体であり、これを用いた光通信技術は社会の高度情報化に触発されて、急速に発展している。

最近、この光ファイバ表面にカーボンコーティングすることによって、信頼性を著しく向上する技術が開発されつつあるので^{1)~4)}、ご紹介する。

解説記事という立場から、背景にある光ファイバおよび光通信について説明を試みるとともに、光ファイバ材料の劣化と環境とのかわりについて要約したが、筆者の浅学のため説明の行き届かない点についてはご容赦願いたい。

2. 光ファイバ通信技術

2.1 光ファイバとは

光通信に用いられている光ファイバの材料は、非常に高純度の石英ガラスである。

図1に通信用光ファイバおよび光ケーブルの構造例を示す。光ファイバは外径 125 μm の真円形状であり、中心部分のコアと周囲のクラッドで構成されている。コア

の屈折率はクラッドに比べて高く設定されているので、コアに入射した光信号はスネルの法則によりコアとクラッドの境界部で全反射し、コアから漏れることなくファイバ中を進行する。電波の周波数は 100 GHz 以下であるが、光の周波数は 200 から 300 THz もあるので光通信はきわめて広帯域の通信が可能である。

このように原理は単純であるが、その実用化には低損失で高強度な光ファイバの開発が必要であった。現在、長距離光通信に用いられている光ファイバの損失は波長 1.55 μm で約 0.23 dB/km、破断応力は約 6 GPa である。つまり、光ファイバ中を伝わる光信号の強度は、13 km 先で半分に減衰する程度である。そして破断強度はピアノ線よりも強い。しかし、石英ガラスはぜい性材料であり、クラッド表面に微少な傷（クラックと呼んでいる。）が生じると、長期間のうちに疲労劣化し、光ファイバが破断に至る原因になる。

表面でのクラックの発生を防止するため、クラッド表面には緩衝作用を有する軟質樹脂を被覆し、これを光ファイバ素線と呼んでいる。光ファイバの取扱いは、素線を最小単位としている。光ファイバを用いた光ケーブル

* 〒319-11 茨城県東海村白方白根 162 (162, Shirakata Shirane, Tokai-Mura, Ibaraki-Ken, 319-11 Japan)

著者紹介:

昭和 52 年 早稲田大学理工学部機械科卒業、昭和 54 年 同大学院修士課程了。同年電電公社 (現在 NTT) 茨城電気通信研究所入社。以来、海底光ファイバケーブルの構造設計の研究に従事。現在フィールドシステム研究開発センタ主任研究員として、カーボンコート光ファイバを用いた多心海底光ケーブルおよびニューラルネットワークを用いた三次元物体認識を研究。工学博士、IEEE、電子情報通信学会、応用物理学会会員。

図1 光ファイバケーブルの断面図

図2 近年報告された長スパン伝送実験¹⁰⁾（許諾をえて転載）

の構造は、用途に応じて様々なものがあるが、いずれも機械的に弱い光ファイバを環境から保護する機能を持っている。

図1はその一例である。素線を数心束ねて光ファイバテープ心線を構成し、これをポリエチレン製のスペーサ表面に設けられた螺旋状の溝の中に収納している。スペーサ中心にはピアノ線などを用いた抗張力体が設けられており、光ファイバを伸びひずみから保護している。

2.2 光通信

この光ファイバを用いた通信方式としては、現在では光の ON, OFF を信号として用いた強度変調・直接検波方式が実用化されている。また、最近では光の波としての性質を利用したコヒーレント通信方式が開発されつつある。

図2に NTT における強度変調・直接検波方式実用化の経緯を示す¹⁰⁾。無中継伝送距離とは、光信号を増幅しないで通信できる最大距離を意味する。図中でMおよび

Gが末尾に付いた数字は伝送速度を示し、一例として1.6 G とは1.6 G bit/s である。光通信ではデジタル信号が用いられ、100 M bit/s は電話換算で1440 ch に相当する。既に実用となっている1.6 G 方式では、1 システム当り電話換算約23 000 ch、無中継伝送距離120 km が達成されている。

コヒーレント伝送方式では一層の無中継伝送距離の拡大が期待されている。光ファイバが出現するまで、有線伝送方式の中心であった同軸ケーブル方式においてはアナログ信号を用いており、信号容量は電話換算で2 700 ch 程度¹¹⁾、このときの無中継伝送距離が約6 km であったことを考えると、光通信によって通信品質の向上とともに通信容量と無中継伝送距離が大幅に増大されたことがわかる。光通信では波長の異なった信号を1本の光ファイバに重畳する波長多重技術も開発されつつある。

このように光ファイバは極めて高性能の通信媒体とすることができる。今後の光通信技術の発展に伴って、各家庭を光ファイバで結んだ光加入者網の実現が技術的に可能になると思われる。光加入者網の発展に伴って、光ファイバの需要は飛躍的に増大すると期待される。光ファイバ設備量が増加するにつれて、その長期信頼性の保証は、ますます重要になりつつある。

3. 光ファイバの信頼性とケーブル布設環境

3.1 光ファイバの劣化要因

光ファイバの損失増加要因として、曲げ損失と、水素の吸収損失がある。光ファイバを半径20 mm 程度以下に曲げると前項で述べた全反射条件が損なわれるので光はクラッドにしみだし、光損失が増加する。これを曲げ損失と呼ぶ。

また、水素が光ファイバ中に透過すると損失が増加する^{12), 13)}。この損失増加は H₂ の吸収損失と OH 基の吸収損失に区別できる。前者は光ファイバのコアに水素分子が拡散すると発生するが、水素が光ファイバから除去されると元に戻るため可逆現象である。後者は水素が光ファイバ中の構造欠陥にトラップされて化学反応をおこし化学的に安定な Si-OH などの光吸収源をつくるもので、水素を除去しても回復しない非可逆現象である。それぞれの固有の波長において吸収損失を生じるので、広い波長域にわたって損失が増加する（後述の図7参照）。

光ファイバの主な強度劣化要因としては、ひずみによる疲労、紫外線の照射、水分の吸着やアルカリとの反応¹⁴⁾などがある。

光ファイバに伸びひずみが作用していると、クラックが時間とともに成長して破断する。破断するまでの時間はひずみが大きいほど短い。ひずみεをいろいろ変えて、多数のサンプルについて50%の確率で破断するま

表1 風雪の記録と影響

項 目	記 録, 影 響			
台風による風速	最大風速 (10分平均)	69.8 m/sec	室戸岬	1965年
	最大瞬間風速	85.3 m/sec	宮古島	1966年
積 雪	最大積雪	337 cm	高 田	1945年
雪 荷 重 (橋梁添架の設計)	(区 分)	(最深雪量)	(常時荷重)	(一時荷重)
	一 般	0~0.5 m		100 kg/m ²
	多 雪	0.51~1.0 m	210 kg/m ²	300 kg/m ²
	多 雪	1.01~2.0 m	420 kg/m ²	600 kg/m ²

図3 外部環境温度の変化¹⁷⁾ (許諾をえて転載)

での時間 t を求め、対数目盛りでプロットすると直線関係が得られる。傾きを n とすると (1) 式が得られる。

$$\epsilon^n t = C \quad (\text{一定}) \quad (1)$$

n はクラックの成長を示す疲労係数であり、 n が大きいほどクラックが成長しにくい、つまり疲労しにくいことを表す。式 (1) の関係からひずみに対する寿命を推定できる¹⁵⁾。空气中に比べて、水中やアルカリ中では n 値は小さく、疲労しやすい。

光ファイバの信頼性 (破断確率) はブルーフ試験により保証できる。ブルーフ試験とは光ファイバ全長にわた

って一定のひずみを一定時間加えるものである。ブルーフ試験を通過した光ファイバについては、破断強度の累積分布を示すワイブル分布と比較することによって、破断確率を推定することができる。

3.2 ケーブル布設環境

光ケーブルは光ファイバやプラスチック、鋼線など複数の材料で構成されており、それぞれの材料ごとに劣化の機構も程度も異なる。以下、光ファイバに注目して、自然環境下での劣化要因を考えてみる。

通信用光ケーブルの布設環境としては、陸と海に大別できるのでそれぞれの場合について述べる。

陸上では屋外布設環境は、架空と地下に大別できる。地下は、管路やマンホール、そして、とう道で構成されている。主な自然環境要因としては温度、湿度、浸水、風、雪などがあげられる。架空ケーブルは長期にわたって風雪や直射日光に曝される¹⁶⁾。

図3に各種外部環境における温度を示す¹⁷⁾。ケーブル内光ファイバの温度は、夏季には 45℃ 近くに達している。昼と夜の温度変化に伴ってケーブルは温度伸縮を繰り返す、光ファイバは疲労する。夏季には、換気の悪い管路やとう道内のみならず架空でも露結して、湿度は 100% に達する。高温多湿な環境では光ファイバの疲労劣化はクラックの成長が活性化するため加速される。また、地下ケーブルは管路内で水没している例が多い。浸水した状態では光ファイバの強度劣化は一層激しい。一方、冬季には寒冷地では凍結によるケーブルの圧壊や、光ファイバのマイクロベンド (半径が微小な曲げ) による伝送損失の増加が問題となる。

表1に風雪記録を示す¹⁷⁾。風の影響として、風圧によるケーブル中の光ファイバの伸びひずみや振動がある。また冬季には、電線の着雪によるケーブル重量の増加が、光ファイバひずみの原因となる。屋外で用いられる光ケーブルは、このような条件を考慮して設計されている。このほか、化学的な劣化要因として温泉や工場廃水がある。特にアルカリ環境下では光ファイバは侵食されるため、著しく強度劣化する。

海底では、水深に見合った水圧が作用する。光ファイバに水圧が作用すると曲げによる損失が発生する。また、水中では強度劣化しやすいので、海底光ケーブルは防湿耐圧殻構造によって光ファイバを保護している。この耐圧殻が摩耗などによって損なわれると、ケーブル中に高圧海水が侵入し、結果としてケーブルを構成する金属材料が腐食し、水素を発生して光ファイバ中に拡散するため損失が増加する。

温度については海域によって異なるが、深海では年間を通じての変化は少なく、例えば日本近海の黒潮域水深 1000 m 以下では 4°C 程度で安定しているので、温度による疲労は少ない。潮流の速さは海域によって異なるが、年間変動は少ない。日本近海では鳴門海峡の流速は速く、約 10 ノット (約時速 18 km) である。

潮流はケーブルを振動させ、摩耗の原因になるので、潮流の速さに応じて適当な鉄線外装をケーブルに施し、振動を防止し、かつケーブルを保護している。

生物も自然環境に含まれると考えるならば、カナリヤ諸島において、鯨が光ケーブルに咬みついて給電障害が発生したとの報告がある。

4. カーボンコート光ファイバ

以上述べたとおり、光ファイバは細径・軽量であるほか低損失・広帯域の伝送特性と、細径・軽量性を兼ね備えた優れた伝送媒体であるが、使用環境が過酷な場合には疲労劣化するため、長期的に許容できる伸びひずみが小さく、また、ケーブルの中が浸水するとケーブル材料の腐食によって水素損失増加が生じるといった弱点もある。

これらの弱点をカバーしたものがカーボンコート光ファイバ (Carbon-Coated Fiber, 以下 CCF と記す) である。本章では CCF の製造方法と優れた特長について概説するとともに、最近の筆者らの研究成果について紹介する。

4.1 製造方法および特性

図 4 に製造方法を示す。通常の光ファイバと同様に、光ファイバ母材先端を電気炉で溶融しながら一定速度で線引きすることによって外径 $125\ \mu\text{m}$ に紡糸する。電気炉に連続して設置した熱 CVD 炉においてカーボンを施す。続いてその外周に軟質樹脂を被覆して硬化させて素線となる。これらは連続した一工程で行われる。

熱 CVD 炉内部にはカーボン膜の原料である炭素を主成分とするガスが供給されており、気層化学反応によって線引き直後の石英ガラス表面に数 $10\ \text{nm}$ の厚さのカーボン膜を連続して堆積することができる。堆積速度は毎秒数 μm に達するので、毎分 100 m の線速が達成されている。熱 CVD 法を用いることによって、このよう

図 4 カーボンコート光ファイバの製造工程

図 5 カーボンコート光ファイバの動疲労特性

な高速成膜が可能になった。酸素が存在すると生成したカーボンが燃焼して成膜できないので、CVD 炉の入口と出口にはシールガスを流して、空気の混入を防止している。膜質は緻密なアモルファスカーボンである。この膜が水素や水分の透過を防止する働きをすることになる。膜質と膜厚をコントロールするため、カーボン膜の電気抵抗を非接触で連続測定するリアルタイムの制御技術が開発されている。

図 5 に CCF と通常のファイバの動疲労試験結果を示

図6 n 値と許容ひずみの関係

す。縦軸は破断荷重の 50% 値、横軸はひずみ速度であり、それぞれ対数で示した。通常の光ファイバでは、光ファイバにゆっくりとした速度で張力を加えると、クラックが成長して疲労が進行するため破断荷重が低下する。一方、CCF では疲労が進行しないので、ひずみ速度にかかわらず破断荷重は一定になる。この結果から n 値を求めると、通常のファイバでは約 20 であるのに対し、CCF では約 200 もあることがわかる。

図 6 に n 値と許容ひずみの関係の計算例をブルーフひずみが 1% と 2% の場合について示す。ブルーフひずみとは、信頼性保証のためブルーフ試験において加えられるひずみの大きさであり、 n 値が 20 の従来の光ファイバでは、陸上用で 0.5%、高信頼が要求される海底用で 1 から 2% のブルーフひずみがかえられている。縦軸は 20 年間にわたって作用することが許容できるひずみの大きさである。従来のファイバの許容ひずみは 1% ブルーフで 0.3%、2% ブルーフで 0.6% 程度であるのに対し、CCF では n 値が 200 もあるので 1% ブルーフを用いてさえ許容ひずみは 0.8% に達する。

このように CCF は許容ひずみが大きいので、ケーブル構造の簡易化による経済化や、光ケーブル適用領域の拡大が可能である。また、きびしい曲がりを許容できるメリットは大きい。

図 7 にケーブルの浸水試験結果を示す。200 m 長のケーブルを高水圧容器中に置いて端末から 50 気圧の高圧水を加え、損失波長特性の経時的な変化を測定した。なお、反応を加速するため水温は 30°C に保持し、かつスロットの中心鋼線とアルミラミネートポリエチレンシースを電気的に導通させて実験した。図示のとおり通常のファイバではケーブル内の水素発生によって顕著な損失増加が 1 カ月後に生じている。波長 1.24 μm における損

図7 浸水した光ケーブルの光損失の長期変化

失増加は水素分子の吸収損失である。この大きさからケーブル中に発生した水素の分圧を推定することができる。一方、CCF では 1 年経過しても波長特性は初期値と全く同一であり、優れた耐水素性を有していることがわかる。

従って、CCF を用いれば、万が一海底光ケーブル内に海水が侵入するような事態が生じても、水素による損失は変化せず、かつ強度も劣化しないので、通信線路機能の長期間にわたる維持が期待できる。

このように現段階では総合的に優れた特性が評価されている CCF であるが、数年前には様々な課題をかかえていた。主な課題として、通常の光ファイバに比べて CCF の初期強度は 2~3 割低下することがあげられた。長期的な強度の耐疲労性には極めて優れるものの、初期強度が低いと取り扱いが難しいという問題点を抱えていた。また、低損失接続には側方からコアを直視する軸あわせ技術が実用化されているが、カーボン膜による悪影響の程度など、CCF の融着接続特性が明らかにされていない点も、重要な問題であった。

この数年間、筆者らはこれらの問題について系統的に検討し解決してきた。以下、高強度化の研究と得られた高強度 CCF の特性について紹介する^{8),9)}。

4.2 カーボンコート光ファイバの高強度化

数年前の CCF の初期強度は 4~5 GPa 程度であり、通常の光ファイバに比べて低かった。初期強度に影響する要因としては、カーボン膜の膜質や膜厚、CVD 条件、原料ガスの組成などさまざまなものが考えられるが、何が主要因かは明らかでなかった。高強度化を図るには主要因を解明し、改善する必要がある。

我々はカーボン膜の緻密さが初期強度に影響すると考

図 8 カarbonコート光ファイバ表面の STM 像

図 9 カarbon膜表面あらさとファイバ破断応力の関係

え、表面粗さを測定するため走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いてカarbon膜表面を観察した。

図 8 に、STM による観察例を示す。試料は、通常の 1.3 μm 用ファイバ表面に CVD 法でカarbon膜を施したものである。試料 A と B では明白な違いがみられる。用いた STM では膜厚方向の高低差を統計処理することによって観察面全体の平均表面粗さを求めることができる。測定精度は nm オーダーである。平均表面粗さは試料 A で 4 nm、試料 B で 68 nm である。標準偏差は 1 nm および 27 nm である。

図10 ファイバ破断応力とカarbon膜厚の関係

表 2 カarbon膜厚の影響

項 目	カarbon膜厚
初期強度	最適膜厚が存在
耐水素性	厚いほど良い
耐疲労性	厚いほど良い
製造性	薄いほど良い
心線対照	薄いほど良い

CVD 条件を種々変化させて成膜した CCF について表面粗さを測定するとともに、これらのファイバの初期強度を測定した。

図 9 に、表面粗さとファイバの初期強度の関係を示す。初期強度は、同一試料について室温条件で 15 本ずつ引張試験を行い、破断強度の平均値を求めた。ひずみ速度は毎分 20%、ゲージ長は 300 mm で実験した。試料 B のように表面粗さが 50 nm 以上では、初期強度は 4 GPa 以下であるのに対し、試料 A のように表面粗さが 5 nm 以下では 5 GPa 以上の初期強度を得た。

通常のファイバの初期強度は 6 GPa 程度であるので、表面が平坦となるようカarbonコーティングすることによって初期強度劣化を抑制できることがわかる。ただし、表面粗さに対し強度のばらつきが見られるので、表面が平坦なカarbonコートファイバが必ずしも高強度ではない。

他の要因を捜すため、初期強度に及ぼす膜厚の影響を調べた。CVD 条件および線速は一定にして、原料ガスの流量のみを制御することによって膜厚の異なる試料を準備し、これらの初期強度を測定した。膜厚は最大で 80 nm である。

図 10 に示すように、初期強度は膜厚にも依存し、膜厚 35 nm かつ表面粗さ 5 nm の条件で 6.2 GPa の高強度 CCF を得ることができた。膜厚が 30 nm 以下のさらに薄い被覆では低強度となった。この理由としては水分の透過による強度劣化が考えられる。膜厚が 70 nm 以上でも理由は不明だが低強度の結果となった。

図11 カーボンコート光ファイバと通常の光ファイバの水素試験結果

以上の結果から、膜厚も初期強度に影響し、適度な膜厚が存在することがわかる⁸⁾。

カーボン膜厚と諸特性の関係をまとめて表2に示す。強度面では先に述べたとおり最適膜厚が存在する。一方、耐水素性は膜厚が厚いほど高くなる。耐疲労性も湿度の遮断性に依存すると考えられるので膜厚が厚いほど良い。一方、製造性では膜厚が薄いほど高速被覆できるので適する。また、ケーブル中の複数の光ファイバ心線から特定の心線を確認するために行う心線対照作業においては、光ファイバ曲がり部からの漏洩光をモニターするので、膜厚が薄いほどよい。従って、膜厚はどの要求特性を重視するか用途に応じて定まると思われる。

上記の検討によって得られた高強度 CCF の膜厚は約 35 nm であり、カーボン膜厚としては比較的薄い部類に属するので、製造性や光の透過性については問題ない。一方、耐水素性や耐疲労性については問題が生ずる恐れがあるのでこれらの諸特性について検討した。

一例として耐水素性を示す。高温水素雰囲気中に試料 A をおいて、耐水素性を調べた。実験は、75°C に保持された容器中に 200 m 長の試料を密閉し、容器中に分圧 1 気圧の水素を満たし、伝送損失の変化を連続モニタした。

図 11 に実験結果を示す。図では 100 時間までの結果を示しているが、CCF は 300 時間まで実験を継続しても損失変化はなく、きわめて高い耐水素性を有することを確認した。一方、比較のために測定した通常の光ファイバでは 6 dB/km 以上の損失増加を示している。

以上述べたとおり、カーボン膜の平滑化および膜厚を選定することによって、従来の光ファイバに匹敵する初期強度を有し、かつきわめて高い耐疲労性と耐水素性を兼ね備えた CCF を初めて得ることができた。

5. おわりに

光ファイバは低損失で広帯域といった伝送特性と、細径、軽量で可とう性に富むといった機械的特性をもつ非常に優れた伝送媒体である。その表面に 0.1 μm 以下の薄いカーボン膜を施した CCF は、通常の光ファイバと同じ取扱いが可能で、長期間にわたって大きなひずみを許容できる。また、水中でも高い強度を保持できる。水素環境下でも損失が増加しない。

CCF の出現によって、光ファイバの適用分野は、通信を中心に今後、さまざまな分野に拡大するものと期待できる。

謝 辞

ご指導いただいた NTT フィールドシステム研究開発センタ石原部長ならびに川瀬部長に感謝いたします。

(1991 年 10 月 16 日受理)

文 献

- 1) R. Hiskes, C. A. Schantz, E. G. Hanson, L. S. Mittelstadt, C. J. Scott, C. S. Joiner, G. F. Knutsen & J. G. Pound: "High performance hermetic optical fibers", Technical digest for Optical Fiber Communication Conference, 1984, Paper WI 6-1.
- 2) K. E. Lu, M. T. Lee, D. R. Powers & G. S. Glaesemann: "Hermetically coated optical fibers", Technical digest for Optical Fiber Communication Conference, 1988, Paper PD 1-1.
- 3) R. G. Huff, F. V. Dimarcello & A. C. Hart: "Amorphous carbon hermetically coated optical fibers", Technical digest for Optical Fiber Communication Conference, 1988, Paper TUG-2.
- 4) C. M. G. Jochem, H. Schaper, M. J. Swarts & J. W. M. Smits: "High-speed process for hermetic microcrystalline carbon coating on optical fibers", Technical digest for Optical Fiber Communication Conference, 1989, Paper PD 8-1.
- 5) M. Koguchi, Y. Matsuda, K. Kokura, M. Nishimoto & K. Hirabayashi: "Long length hermetically coated fiber", OFC '90, Paper THH6, (1990).
- 6) T. Watanabe, K. Osaka, T. Yanagi, Y. Ishiguro & Y. Asano: "Mass-fusion splicing of hermetically coated optical fiber ribbon", Proceedings of IWCS, p. 294, 1990.
- 7) K. Oohashi, T. Shimomichi, A. Araki, H. Suzuki & K. Inada: "Characteristics of Amorphous Carbon Coated Optical Fibers," ECOC '89, Paper TuP-13, (1989).
- 8) N. Yoshizawa & Y. Katsuyama: "High-strength carbon-coated optical fiber", *Electronics Letters*, 25, [21], 1429, (1989).
- 9) N. Yoshizawa, H. Tada & Y. Katsuyama:

- “Strength improvement and fusion splicing for carbon-coated optical fiber”, *IEEE, Journal of Lightwave Technology*, **9**, [4], 417 (1991).
- 10) 島田禎晉: “光伝送方式の研究の流れと今後の展開”, *O plus E*, p. 86, 7 月, 1991.
- 11) 志村静一監修: “海底同軸ケーブル通信方式”, 電子通信学会, コロナ社, (1978).
- 12) 内田直也: “メカニズムが解明され, 対策が確立した H_2 による光ファイバの損失増加現象”, *NIKKEI ELECTRONICS*, **12.3**, p. 213, (1984).
- 13) 波平宣敬: “ H_2 による損失増加現象と光海底ケーブルの長期信頼性”, *NIKKEI ELECTRONICS*, **12.3**, p. 233, (1984).
- 14) T. Kimura, S. Suzuki, Y. Katsuyama & T. Kuwabara: “Alkali resistance of UV-curable acrylate for optical fiber coating materials”, *Polym. Mater. Sci. and Eng.*, **59**, 1147, (1988).
- 15) Y. Miyazima: “Studies on high-tensile proof tests of optical fibers”, *IEEE, Journal of Lightwave Technology*, **LT-1**, [2], 340, (1983).
- 16) 桑原恒夫, 池田 始, 望月 諭: “紙絶縁スタルベスケーブルの絶縁抵抗劣化特性”, 信学論, **J 65-B**, [7], 859, (1982).
- 17) 福富秀雄: “電気通信線路技術”, 電気通信協会, p. 180, オーム社, (1977).