# 通信用光ファイバの強度保証と破断特性評価技術

NTT アクセスサービスシステム研究所

山田 裕介, 中島 和秀, 倉嶋 利雄

# Strength assurance and fatigue characterization of optical fiber

Yusuke Yamada, Kazuhide Nakajima, Toshio Kurashima

NTT Access Network Service Systems Laboratories, NTT Corporation

1. はじめに

現在,光ファイバを家まで引き込むFTTH (Fiber To The Home)サービスが普及してい る。一般的な光通信伝送路に用いられる光ファ イバは,2つの異なる屈折率を有する石英ガラ スから作られている。光ファイバの中心部に は,「コア」と呼ばれる高屈折率部が形成され、 その外周には「クラッド」と呼ばれる低屈折率 部が形成されている。このような構造にするこ とで,光は高屈折率部であるコアに閉じ込めら れて伝搬する。さて,光ファイバは,外被など を施した光ケーブルまたは光コードとして光通 信伝送路に用いられるが,光ケーブルの布設や 実使用環境下において加わる機械的な外力によ って疲労破壊しないように長期的な信頼性を確 保することが重要である。本稿では,光ファイ

〒305-0805 茨城県つくば市花畑 1-7-1 NTT アクセスサービスシステム研究所 TEL 029-868-6123 FAX 029-868-6142 E-mail: y. yusuke@lab. ntt. co. jp バの破断特性と強度保証に関する解説と破断特 性評価方法の一例を紹介する。

## 2. 光ファイバの破断特性と強度保証

石英系ガラスの引張強度は、本来約 300 kg/ mm<sup>2</sup>と大きく、鉄鋼の2倍、鋼、アルミの10 倍以上である。しかし、光ファイバ表面に傷が 発生すると破断強度は著しく低下する。通信用 光ファイバは、直径 0.125 mm と非常に細いた め、微小な傷などが破断特性に大きく影響す る。このため実使用環境下において光ファイバ に加わるひずみを考慮し、長期的な特性を確保 する必要がある。そこで光ファイバの最低強度 を保証するために、スクリーニング試験が行わ れている。スクリーニング試験とは、製造され た光ファイバの全長にわたり所定の張力(スク リーニングひずみ)を加えて傷などの低強度部 分を取り除くことであり、光ファイバの強度を 全長に亘って保証する試験である。

図1は,光ファイバに一定期間,一定の負荷 (ひずみ)が加わり続けた場合の累積破断確率 の計算例である。光ファイバの累積破断確率 F は、次式によって求めることができる。

$$F = 1 - \exp \sum_{i=1}^{2} \left[ -\frac{L}{L_0} \left\{ \left( \frac{\varepsilon^n t + \varepsilon_p^n t_p}{k_{0i}} \right)^{b_i} - \left( \frac{\varepsilon_p^n t_p}{k_{0i}} \right)^{b_i} \right\} \right]$$

ここで、L:光ファイバ長、 $\epsilon$ :光ファイバ に加わるひずみ、t:光ファイバにひずみが加 わる期間(20年)、 $\epsilon_p$ :スクリーニングひずみ、  $t_p$ :スクリーニング時間、n:疲労定数、L<sub>0</sub>、  $k_{0i}$ :スクリーニング試験条件・結果から求めら れる定数である [1]。

この図に示すように、光ファイバの破断特性 は2つの領域に分けられる。一つは光ファイバ 固有の特性を示す領域(Intrinsic region)、も う一つは光ファイバ表面に分布する傷に依存し た特性を示す領域(Extrinsic region)である。 この図より、比較的小さいひずみであっても、 光ファイバ表面の傷から亀裂が成長して短い時 間で疲労破断に至ることがわかる。また、スク リーニングひずみを大きくするほど傷などの低 強度部分が除去されるため、ひずみが小さい領 域での破断確率を小さくし最低強度を保証でき ることが分かる。

なお,屋外配線用の光ファイバケーブルは, 実使用環境下において光ファイバに加わりうる ひずみをスクリーニングひずみの約3割以下と なるように設計している。図1からもわかるよ うに,例えば,εp=1.0%のスクリーニング試 験を行った光ファイバでは,0.3%以下の伸び



ひずみが加わっても、低強度部分が十分に取り 除かれた領域であり、十分な信頼性を確保でき る。

### 3. 微小曲げ時の光ファイバ破断特性評価

従来アクセス系伝送路に用いられてきた光フ ァイバでは,許容曲げ径よりも小さい径で曲げ るとコアを伝搬する光が漏れ、光損失増加を生 じてしまう。このため、近年では、曲げ損失特 性を改善した様々な光ファイバの研究・開発が 盛んに行われている。これらの低曲げ損失光フ ァイバは、宅内配線時などの直角曲げや結び 等、メタリックケーブルのような施工性の実現 を主な目的として, 開発・実用化されてきた [2.3]。このような光ファイバを用いた光ケー ブルや光コードは、取り扱い性に優れる反面、 従来よりも急峻な曲げが加わることになる。こ れまで光ファイバの曲げ径は、光損失特性によ って制限されていたため、微小な曲げによる破 断特性に関する報告は少ない。一方、光ファイ バの疲労破断特性の試験方法には、様々な試験 方法がある。その中でも、2点曲げによる疲労 破断試験は、簡易で優れた手法である[4]。し かし、この2点曲げ試験では、光ファイバに加



わる曲げ径は,光ファイバ長手方向に対して一様ではない。また,円柱に光ファイバを巻きつけることで,一様な曲げを付与できるが,微小な曲げの際には張力も加わることがあるため,曲げのみによる破断特性を評価することが困難である。そこで我々は,直径数 mm 程度の微小な曲げによる静疲労破断特性の新たな試験方法について検討を進めてきた [5]。図2に微小曲げ試験治具の構造を示す。試験治具の溝内に 光ファイバを収納してシャッタを閉めることで光ファイバに所定の曲げ径を付与することが可能な構造となっている。

本試験方法では、光ファイバの曲げによる破 断特性を評価することを目的としているため. 試験治具内の曲げ部において疲労破断を生じ ること。②光ファイバに曲げひずみのみが付与 されることの2点が特に重要である。図3は、 本手法によって直径 3.25 mm の曲げを光ファ イバの試験サンプルに与えた場合の破断試験結 果である。ここで、破断時間と累積破断確率の 関係から求められるワイブル分布に当てはめた 近似曲線の傾き(m値)は3.2であった。一 般的に疲労破壊の場合は、m>1となることが 知られている。図2の写真は、サンプルの破断 面である。破断面が疲労破断時に観察される破 壊的な形状を呈していることからも疲労破壊を 確認できる。さらに、破断サンプルを取り出し たところ、試験治具の曲げ部において破断が生 じていることを確認した。この結果から、試験 治具の曲げ部において疲労破断が生じているこ



とを確認した。

試験治具に光ファイバをセットする際には, 光ファイバを曲げた状態で溝に収納する必要が ある。光ファイバに張力が加わった場合に曲げ 部に張力が残留すると、曲げと張力による複合 的なひずみが加わる可能性がある。この場合に は、曲げのみによる破断特性を評価することが できない。そこで、試験治具内の光ファイバに 張力によって加わるひずみを測定した。図3 に、ひずみの測定方法を示す。ひずみの測定に は、コヒーレント干渉型の高精度反射計[6] を用いた。これは、光ファイバに伸びひずみが 加わると、光ファイバ中を伝搬する光の散乱光 の周波数スペクトルの変化が生じるという現象 を利用して、伸びひずみを計測する技術であ る。図4は、試験治具にセットした光ファイバ の伸びひずみの測定結果である。図中の実線 (initial) は、光ファイバを治具にセットした直 後のひずみを示す。これより曲げ部における伸 びひずみは、0.01%以下であることが分か る。さらに、光ファイバの片端に張力を印加さ せた状態でのひずみを測定した。この結果. 図 中の破線で示すように、曲げ部の手前では、張 力の増加に伴ってひずみが増加するものの.曲



げ部のひずみは、ほぼ一定である。また、張力 解放後には、図中の一点鎖線(After load)で 示すように、元のひずみに戻ることが確認され た。これより、試験治具内の光ファイバに加わ るひずみは、曲げひずみが支配的であると推察 される。以上の結果から、本手法は、微小曲げ 時の破断試験方法として有効であることを確認 した。

現在,我々は,本試験方法を用いて多様な構 造の光ファイバの破断特性試験を行い,光ファ イバ信頼性についての研究を進めている。

おわりに

ブロードバンドサービスの普及拡大が急速に 進展する中,光ファイバ通信が担う役割は大き く,その信頼性を確保することが今後も重要で ある。一方,更なる伝送容量の拡大などを目的 に,多様な光ファイバの研究が今もなお活発に 行われている。本稿で紹介した光ファイバの強 度保証ならびに破断特性評価技術は,今後の光 コードまたは光ケーブル設計においても活用さ れていく技術であると考える。

#### 参考文献

- M. Tachikura, Y. Kurosawa, and Y. Namekawa, "Improved theoretical estimation of mechanical reliability of optical fibers", Proceedings of the SPIE, Vol. 5623, pp. 622–629 (2005).
- [2] 鎌光男,青山浩,田中浩,小田泰男,"D. I. Y 感覚で光 配線を容易にできる曲げフリー光ファイバコードを 開発",NTT 技術 ジャーナル, Vol. 18, No. 4, pp. 65-67, (2006).
- [3] S. Aozasa, Y. Enomoto, H. Oohashi, and Y. Azuma, "Highly Reliable Optical Fiber Distribution Facilities in Central Office Employing Single-mode Hole-assisted Fiber Cord", Proceedings of 59 th International Wire and Cable Symposium, pp. 126–132 (2010).
- [4] M. J. Matthewson and C. R. Kurkjian, "Static fatigue of optical fiber in bending", J. Am. Ceram. Soc., vol. 70, no. 9, pp. 662–668 (1987).
- [5] 平松, 冨田, 関根, "光ファイバの寿命推定方法", 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-13-40, p. 294, (2008).
- [6] S. T. Kreger, D. K. Gifford, M. E. Froggatt, B. J. Soller and M. S. Wolfe, "High resolution distributed strain or temperature measurements in single-and multi-mode fiber using swept-wavelength interferometry", OFS-18, ThE 42, (2006).