

光ファイバの機械的強度に関する信頼性寿命予測

Inference of the Optical Fiber Lifetime for Mechanical Reliability

麻生 修^{*}
Osamu Aso

松藤敏夫^{*2}
Toshio Matsufuji

石川卓哉^{*}
Takuya Ishikawa

忠隈昌輝^{*4}
Masateru Tadakuma

乙須総一郎^{*3}
Soichiro Otosu

八木 健^{*4}
Takeshi Yagi

奥 誠人^{*5}
Masato Oku

概要 光ファイバ通信が、宅内光配線、光インターコネクション、車載用などの新しい分野で応用され始めている。これらの応用分野においては、特に光ファイバの機械的強度に関する信頼性の議論が重要である。通常、光ファイバの寿命予測は数理統計的な理論で行われるが、議論の見通しを得るのは容易でない。われわれは統計的強度劣化図と呼ぶ寿命予測の理論を直感的に表現した可視化ツールを開発した。

また、光ファイバの寿命予測はMitsunagaら^{8), 9)}の寿命予測式の B 値問題を回避するために近似式を用いて行なわれるが、短時間で大きな負荷が加わる場合の寿命予測に用いる際には近似が悪くなるため、この課題を解決する新しい手法を提案する。

1. はじめに

宅内光配線、車載マルチメディアシステム、光インターコネクションなどの光ファイバ通信の新しい応用分野では、光ファイバを従来よりもコンパクトに配線する必要があり、この目的に適合する曲げ損失が小さな光ファイバが開発されている^{1)~3)}。

光ファイバを長距離伝送で使用する場合には、累積する伝送路固有の損失が大きいため、光ケーブルの接続箱(クロージャ)内部で余分な損失が増加しない様に最小曲げ半径が30 mm以上に設計されている。このような緩やかな曲げの場合、光ファイバの機械強度はあまり問題にならない。他方、配線用途では伝送距離が短く伝送路全体での損失が小さくなるため、一箇所の曲げに対する許容曲げ半径を小さくできる。加えて上述のように曲げ損失の小さな光ファイバが開発される事で、市場における曲げ半径数mmでの配線が実現できる。この場合、光ファイバに加わる機械的な負荷応力は非常に大きくなり、従来では想定外であった「深刻な曲げ損失が生じる前に破断する」という故障モードが起き得るため、機械的強度に関する信頼性の議論が必要になる⁴⁾。

光ファイバの機械的強度に関する信頼性の議論は、将来の基幹伝送路においても不可欠である。最近では伝送容量の飛躍的な拡大のために、マルチコア光ファイバなど空間多重伝送をにらんだ新規の光ファイバが開発されている^{5), 6)}。これらの光ファイバは従来とは物理的な構造が異なるために、信頼性の保証の方法も整理しなおす必要がある。

光ファイバの機械的強度に関する寿命予測の理論について、IECの技術資料(IEC-TR62048)⁷⁾が標準的な文献として上げられる事が多い。この技術資料の議論はその基礎をMitsunagaら^{8), 9)}の寿命予測理論に拠っているが、数理統計的な色彩が強いため技術の理解と共有化が必ずしも容易ではない。

本論文では、まず光ファイバの寿命予測理論^{8), 9)}の直感的な理解を実現する、統計的強度劣化図と呼ぶ可視化ツールを開発した。これを用いて従来行われてきた議論を図的に再解釈する。

次に B 値問題について考察する。Mitsunagaらによって提案された寿命予測式⁸⁾は、実験で決定すべきパラメータをいくつか含んでいる。過去の多くの研究にも関わらず、このうちの B パラメータの値を正確に決定する事が困難である事が分かっている。このために光ファイバの機械的強度に関する寿命予測には、 $B \rightarrow 0$ とした近似式が用いられる。近似の程度によって、長距離伝送用光ファイバでは満永近似と言われるMitsunagaらによる(自身で導出した厳密式の)近似式^{8), 9)}が用いられ、配線材用光ファイバの小径曲げの議論ではGriffioenの式⁴⁾が用いられる事が多い。我々はMitsunagaらの厳密式をそのまま使用し、近似的な B 値を用いるという新しい近似法(パラメータ近似)を提案し、実際に取得した1,960本の光ファイバの引張り試験データを基に、上記の三つの寿命予測の比較を行う。

本論文では、式や記号の表記はIECの技術資料⁷⁾に準拠した。

2. 寿命予測理論の可視化のための統計的強度劣化図の開発

2.1 光ファイバの寿命予測理論

光ファイバの寿命予測理論は故障モードとして、応力腐食食応(SCC, stress corrosion cracking)での亀裂成長による脆性材料の破断を、単純引張りの場合のモードI¹⁰⁾に限定してモデ

* 研究開発本部 横浜研究所

*2 情報通信カンパニー 情報産業営業部

*3 情報通信カンパニー ブロードバンド事業部

*4 研究開発本部 ファイテルフォトンクス研究所

*5 情報通信カンパニー ファイバ・ケーブル事業部

ル化する。理論ではガラスの亀裂成長のPower-Law理論^{8), 9)}と、不活性強度のワイブル分布を基礎におく。不活性強度はSCCが起きない状態での光ファイバの強度である。

ガラスに入った亀裂の大きさを a として、応力拡大係数を K_I 、光ファイバの動疲労係数を n とした場合、亀裂成長は $da/dt=AK_I^n$ という方程式に従うとする(Power-Law理論)。ここで t は時間を表し、 A は比例係数である。この関係は実験で確認されている^{8), 9)}。亀裂の成長とともに K_I も増加し K_I と破壊靱性 K_{Ic} が一致した場合に破断が起きる。

ファイバの強度を S とすると、 Y を比例係数として $K_{Ic}=YSa^{1/2}$ で表され、負荷応力 σ を用いて $K_I=Y\sigma a^{1/2}$ となる。

以上の関係を用いると、亀裂成長の方程式は以下の強度劣化の方程式に書き換えられる。

$$\frac{dS^{n-2}(t)}{dt} = \frac{\sigma^n(t)}{B}, \quad (1)$$

ここで $B=2/\{AY^2(n-2)K_{Ic}^{n-2}\}$ は B 値と呼ばれる。方程式(1)は決定論的である。ファイバの特性値として n と B の値が測定で決まれば、 $t=0$ における強度 $S(0)$ を初期条件として負荷応力 $\sigma(t)$ の下での強度の時間的変化 $S(t)$ が計算できる。 $K_I=K_{Ic}$ での破断条件は $S(t)=\sigma(t)$ で書き換えられ、破断までに要した時間を寿命と呼ぶ。図1に強度劣化図¹¹⁾を用いたPower-Law理論による脆性材料の疲労破壊の過程の概念図を示す。図中で、横軸は経過時間を、縦軸は応力または強度を表す。図1(b)における $t=t_c$ が寿命に相当する。

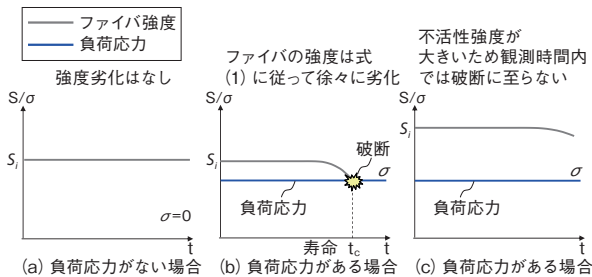


図1 強度劣化図を用いたPower-Law理論による脆性材料の疲労破壊の過程の概念図
Schematic of the fracture of the brittle materials according to the Power-Law theory by using the strength degradation map.

光ファイバの寿命は初期強度 $S_i=S(0)$ に強く依存するが、 S_i を知るには破壊試験が必要であり、我々は市場に出る特定の製品の寿命を決定論的には知り得ない。このことから確率的な議論が導入される。同一の材料と工程から作られた光ファイバの強度は、確率的に同じ母集団に属すると考えられ、抜取りによる引張り(破壊)試験で母集団の強度分布を推定する。過去の検討から、光ファイバの強度分布はワイブル分布で記述できる事が知られており^{8), 13)}、ガラスの脆性破壊のPower-Law理論と不活性強度のワイブル分布から、寿命予測に関する一連の「公式」が導出される⁷⁾。

すなわち各々の故障確率 $F=F=1-\exp(-H)$ とした場合、累積ハザード関数¹²⁾ H は以下のようになる。

・光ファイバの初期強度分布(ワイブル分布)

$$H_i(S_i) = \frac{L}{L_0} \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^m, \quad (2)$$

・ブルーフ試験によるスクリーニング後の強度分布

$$H_p(S_p) = \frac{L}{\beta^{m_s}} \left\{ (BS_p^{n-2} + \sigma_p^n t_p)^{m_s} - (\sigma_p^n t_p + BS_{pmin}^{n-2})^{m_s} \right\}, \quad (3)$$

・寿命分布

$$H(t_{fp}, \sigma_a) = \frac{L}{\beta^{m_s}} \left\{ \left[\sigma_a^n \left(t_{fp} + \frac{B}{\sigma_a^n} \right) + \sigma_p^n t_p \right]^{m_s} - (\sigma_p^n t_p + BS_{pmin}^{n-2})^{m_s} \right\}, \quad (4)$$

故障確率が $0 \leq F \leq 1$ の範囲である必要から、条件 $H \geq 0$ が要求される。

式(2)において L_0 はゲージ長と呼ばれ、適当な長さを与えて使用する。 m はワイブル分布の形状パラメータを、 S_0 は実効的な尺度パラメータを表す。

式(3)はスクリーニング後に生き残った光ファイバの強度 S_p の分布を表す。

S_{pmin} は光ファイバの最小強度である。 $m_s=m/(n-2)$ であり、 $\beta=BS_0^{n-2}L_0^{1/m_s}$ である。Miyajimaや立蔵により、 k というファイバ固有のパラメータが理論において重要であることが指摘された^{4), 14)}。このパラメータ k は上式におけるIEC資料の表現の β と一致する。 σ_p はブルーフ試験で付与する応力の最大値である。 t_p はブルーフ時間と呼ばれ、試験中に応力 σ_p を実効的に付与した時間である。

式(4)が市場での寿命予測式であり、市場負荷 σ_a の元で、時間 t_{fp} 経過後の故障確率 F を与える。以上が標準的な寿命予測理論であるが、複雑な数式で与えられているために物理的な内容の見通しは必ずしもよくない。

2.2 統計的強度劣化図による理論の可視化

本節では図1の強度劣化図を拡張した統計的強度劣化図を導入することで、式(2)～(4)の物理的な内容の可視化を試みる。ここでは光ファイバの初期強度を不活性強度と一致させて考える。寿命予測理論を可視化するため、抜取り試験により推定した強度の確率分布を強度劣化図に埋め込む。こうして作成した図を本論文では、統計的強度劣化図とよび、その概念図を図2に示す。

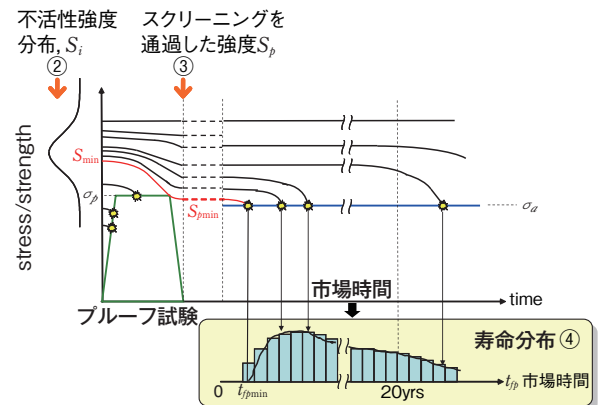


図2 統計的強度劣化図による寿命分布の統計解釈の概念図
Schematic of the meanings of the lifetime statistics using statistical-strength degradation map.

図2の横軸は光ファイバを線引きした時点からの経過時間を表し、縦軸は光ファイバの強度または負荷応力を表す。式(2)で表現される光ファイバの初期強度分布を図中左端②に示す。これは長さ L の1本の光ファイバの不活性強度の存在確率または、多くの光ファイバの製造ばらつきの分布と解釈できる。線引きされた光ファイバは、プルーフ試験において図中緑線で示した応力を受ける。この応力プロファイルは載荷、負荷、除荷の過程からなる台形状の形で表される。この応力下で光ファイバの強度はPower-Lawの式(1)に従って劣化し、 $S(t)=\sigma(t)$ になった時点で破断する。強度の大きいファイバは破断されずに残るため、スクリーニングが実現される。図中赤線は、生き残るファイバの内最小強度のものを示す。強度は試験の過程でも劣化するため、最小強度 S_{pmin} は対応する初期強度 S_{min} よりも小さい。また除荷過程でも疲労が加わるため一般に $S_{pmin}<\sigma_p$ になる。除荷時の疲労が大きく S_{pmin} がプルーフ応力 σ_p に比べて無視できない程小さければ、強度の弱い光ファイバが市場に出る事になる。この場合プルーフ試験条件は適切でないと判断される。プルーフ試験が適切に行われる条件はMitsunagaらにより調べられ⁸⁾、具体的には t_u を除荷時間とした条件 $\alpha=\sigma_p^2 t_u / ((n-2)B) < 1$ で与えられる。

スクリーニングを通過した光ファイバの強度分布は図2の図中③で示した位置での強度分布であり、式(3)で表される。これらの光ファイバが市場負荷応力 σ_a の元で強度劣化式(1)に従って強度劣化していき、 $S(t_p)=\sigma_a$ になった時に破断する。市場での故障確率は、スクリーニングを通過した光ファイバを新たな母集団として条件付確率で計算される。初期強度の分布に対応して、図2の右下④に示すように寿命も確率的に分布する。これが式(4)の寿命分布に相当する。図より分かるように、有限の最小強度 S_{pmin} の存在に対応して無故障時間 t_{fpmin} が存在する。

以上の議論は強度劣化の方程式(1)とワイブル分布(2)のみを用いて、過程を図的に表現し直しただけである。このように、統計的強度劣化図を利用する事でファイバ寿命予測理論が直感的に理解できる。

2.3 高強度部と低強度部

図3に我々が行った1,960本の光ファイバの引張り試験結果のワイブルプロットを示す。試験はファイバ長10 mで行った。

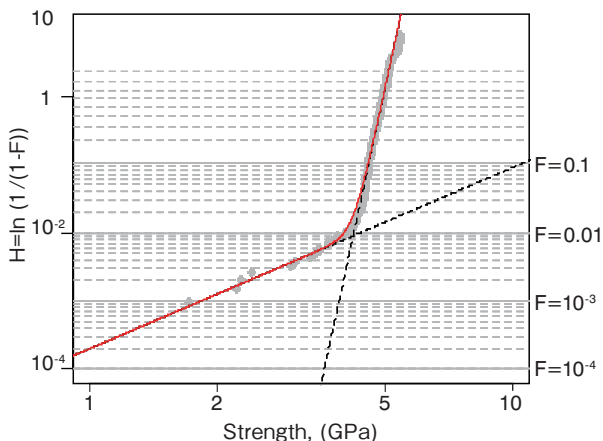


図3 1,960本の光ファイバに対する引張り試験結果のワイブルプロット
Weibull plot of the fatigue test of the 1,960 fibers.

図3の結果から実際の光ファイバの強度分布は単純なワイブル分布ではなく、高強度部と低強度部の二つのワイブル分布からなることが分かる。高強度部はガラス固有の強度であり、低強度部は光ファイバ中の欠陥や製造時に入った亀裂に起因する^{8), 13)}。この事実に対応するため、式(2)～(4)において累積ハザード関数も高強度部の寄与 H_1 と低強度部の寄与 H_2 に分けて表し、全体の累積ハザード関数を $H=H_1+H_2$ のように拡張する⁷⁾。この議論を統計的強度劣化図に反映させるためには、図2の②を拡張された分布に書き換え、それ以降の議論を同様に行なえばよい。

3. B値問題を回避した寿命予測方法とその比較

3.1 B値問題と $B \rightarrow 0$ の近似式

寿命予測式に現れる B 値は不活性強度に関係するため、このパラメータを推定するには、液体窒素雰囲気での引張り試験もしくは非常に高速での引張り試験が必要である。これまで報告された B の推定値は $2 \times 10^{-8} \text{ GPa}^2 \cdot \text{s} \leq B \leq 0.5 \text{ GPa}^2 \cdot \text{s}$ のように8桁もの範囲にばらついており、十分な精度で決定できない。これは B 値問題として知られている¹⁷⁾。このため現状では厳密な寿命予測式(4)をそのまま用いる事はほとんどなく、 B 値問題を回避するために $B \rightarrow 0$ とした近似式が使われている。近似のレベルによってGriffioenの式と満永近似の二種類がある。

Griffioenの式は累積ハザード関数によって以下のように与えられる^{4), 16)}。

高強度部

$$H_1 = \frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma_a^n t_p}{B S_{01}^{n-2}} \right)^{m_{s1}} = \frac{L}{\beta_1^{m_{s1}}} (\sigma_a^n t_p)^{m_{s1}}, \quad (5)$$

低強度部

$$H_2 = N_p L \left\{ \left(\frac{\sigma_a^n t_p}{\sigma_p^n t_p} + 1 \right)^{m_{s2}} - 1 \right\} = \frac{L}{\beta_2^{m_{s2}}} \left\{ (\sigma_a^n t_p + \sigma_p^n t_p)^{m_{s2}} - (\sigma_p^n t_p)^{m_{s2}} \right\}, \quad (6)$$

ここで $m_{s1}=m_1/(n-2)$ 、 $m_{s2}=m_2/(n-2)$ は強度分布のワイブル形状パラメータ m が2種類(低強度部と高強度部)ある事に対応している。式(5)の S_{01} は高強度部の実効的なワイブル尺度パラメータである。 N_p は破断率であり、プルーフ試験における単位長さ当たりのファイバ破断回数を表す量である。Griffioenの低強度部の式(6)は厳密式(4)において $B \rightarrow 0$ とした近似だが、他方で $S_{pmin} \rightarrow 0$ かつ市場における疲労 $\sigma_a^n t_p$ が十分大きい場合の近似とも解釈できる。同様に式(5)は式(6)のパラメータの添字を2から1にした上で $\sigma_p^n t_p \rightarrow 0$ としたものと同形であり、高強度部はプルーフ試験の疲労をほとんど受けなかったとしたモデル化である。プルーフ試験が製造時の不良部を取り除くための試験だと考えれば、妥当な近似である。 B 以外のパラメータ n 、 β_1 、 β_2 、 m_{s1} 、 m_{s2} が実験で決まればGriffioenの式による寿命予測を行える。 n 値は動疲労試験から、残りのパラメータは図3に示した引張り試験の結果から決定できる⁷⁾。

満永近似はGriffioenの式の低強度部(6)のみを考え、市場での疲労がプルーフ試験で受けた疲労よりも十分に小さい、すなわち式(6)において $\sigma_a^n t_p < \sigma_p^n t_p$ とした式(7)で与えられる。

$$H=H_2=m_{s2}N_pL\frac{\sigma_a^nt_{fp}}{\sigma_p^nt_p}, \quad (7)$$

上述のようにGriffioenの式は物理的には $\sigma_a^nt_{fp}$ が大きい場合の近似であるため、 σ_a が大きい場合でも時間 t_{fp} が短ければ近似が成り立たない。光ファイバの寿命の議論は、通常、光ファイバを設置した後の議論であり10年以上の時間が想定される。一方でファイバ組付け作業時の破断を考えると、設置後よりも大きな負荷 σ_a の元で短い作業時間中の寿命を議論するため、Griffioenの式も適用範囲外になる可能性がある。 $B \rightarrow 0$ の近似にはこのような課題が想定される。

3.2 パラメータ近似の導入

前節の最後に示した $B \rightarrow 0$ の近似に伴う課題を緩和する方法を検討する。2.2節で議論したようにスクリーニングが成功する条件は $\alpha=\sigma_p^2t_u/((n-2)B)<1$ で与えられる。この事を利用すれば、除荷時に過疲労を起こさない適切なスクリーニングを経たファイバの B 値の下限は式(8)で推定できる。

$$B=B_{\min}=\frac{\sigma_p^2t_u}{n-2}, \quad (8)$$

Mitsunagaらの検討で寿命予測式(4)は B 値が大きい程故障確率を小さく推定する事が知られているため^{8), 9)}、近似値 $B=B_{\min}$ と厳密式を用いることで安全係数の大きな寿命予測が実現される。近似の精度も $B \rightarrow 0$ に比べて上がっている。また厳密式を扱う事で σ_a や t_{fp} に関する適用領域の制限はなくなる。

3.3 光ファイバの寿命予測と各種近似の比較

本節では実際の光ファイバの試験から推定したパラメータを用いて寿命予測の議論を行なう。我々は3.1節に示した方法で、試験結果から寿命予測式の計算に必要なパラメータを推定した。これらを用いて故障確率が計算される。一般に光ファイバの寿命に関して期待される情報は次の二つである。(イ)所定の寿命時間までファイバが破断しないために許容される市場負荷応力(すなわち、小さな曲げ半径)。(ロ)所定の市場負荷応力での破断までの時間。

$$\sigma(R)=E_0\frac{a_f}{R_0}\left[1+\frac{9a_f}{4R}\right], \quad (9)$$

ここで曲げ応力式(9)は実効的な最大応力を用いて評価し、光ファイバ長も実効長に変換したものを用いた⁷⁾。 E_0 は光ファイバのヤング率、 a_f は光ファイバのガラス部の半径で、 R は曲げ半径である。

図4は市場時間 $t_{fp}=15$ 年経過後の曲げ半径 R に対する故障確率の予測結果である。曲げは光ファイバを2.5周させている。図中黒線で示した満永近似は、市場での疲労が小さい $R>15$ mmの場合にGriffioenの式に一致し、3.1節の議論と一致する。一方でパラメータ近似とGriffioenの式の差異は $R>R_{\max} \sim 16$ mmで顕著になる。この領域ではパラメータ近似で計算した故障確率 $F=0$ になる。2.2節で示した無故障時間 $t_{fp\min}$ は市場負荷 σ_a が小さい程長くなるため、 $t_{fp\min}=15$ 年を満足する曲げ半径 $R=R_{\max}$ が存在し、 $R>R_{\max}$ による曲げ応力では市場時間15年では故障確率が0になる。

疲労 $\sigma_a^nt_{fp}$ が大きな領域ではGriffioenの式とパラメータ近似

は良く一致する。この場合、 $R<24$ mmまでは高強度部の寄与が支配的になる事が分かる。この領域では曲げに寄与する光ファイバ長も短くなり、曲がっている箇所製造時の傷などを含む確率が小さくなる。一方で負荷応力が大きくなる事で、ガラスの破断(高強度部)が支配的になる。以上は曲げ半径が小さい場合特有の議論であり、富田、倉嶋³⁾の結果と整合する。要求される故障率が0.1FIT程度の場合、最小曲げ半径は高強度部で規定される。

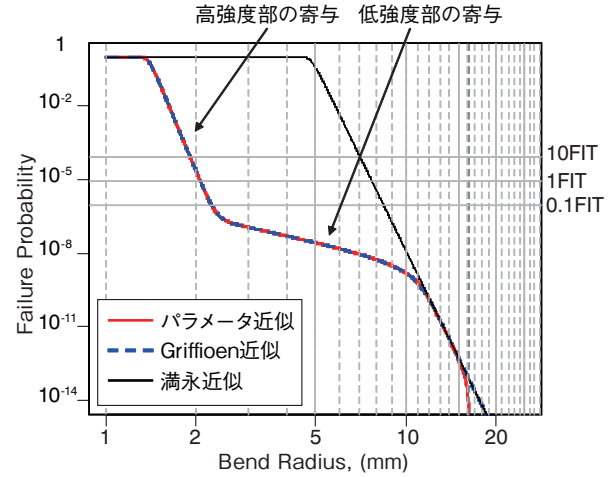


図4 光ファイバが市場で15年経過後の曲げ半径と故障確率の関係
Inferred relation between the bend radius and the failure probability after 15 years in the market.

図5にブルーフ歪 ε_p ($\varepsilon_p=\sigma_p/E_0$)を変えて故障確率を計算した結果を示す。故障率が0.1FIT程度以上を想定する場合に対しては、ブルーフ試験時に歪を強く与えても機械的強度に関する信頼性に関しては効果がない事が分かる。この結果も文献³⁾の結果と整合する。

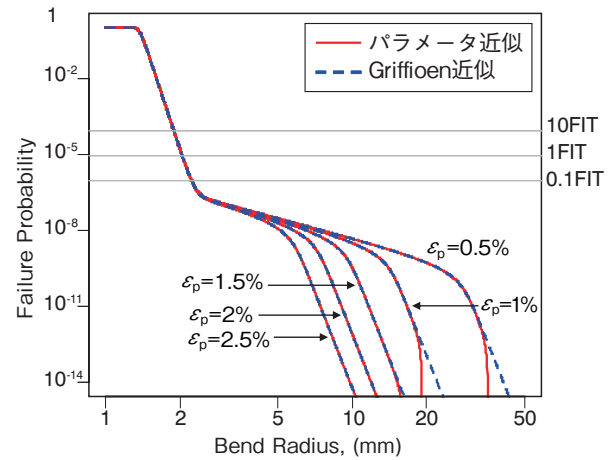


図5 光ファイバに対する、15年経過後の故障確率の予測結果。曲げ半径に対して2.5-turnの巻き付けを考えている。ブルーフ歪を変えて計算した結果
Inferred results of the failure probability after 15 years in the market. 2.5-turn bending around the bend radius is considered. Some proof-strain cases are shown.

3.3で示した(ロ)に対する予測結果を図6と図7に示す。結果は曲げ半径 $R=6$ mmで2.5周巻いた場合である。3.1節の最後に議論したように、市場時間 t_{fp} が短い $t_{fp}<3$ 日程度ではGriffioenの式とパラメータ近似との食い違いは大きい。故障確率で見ると小さな差であるが、故障率の議論では大きな違いになって現れる。この結果より、据付時のような短期信頼性の議論にGriffioenの式を用いるとファイバの寿命を過小評価し、設計に影響を与える恐れがあると考えられる。

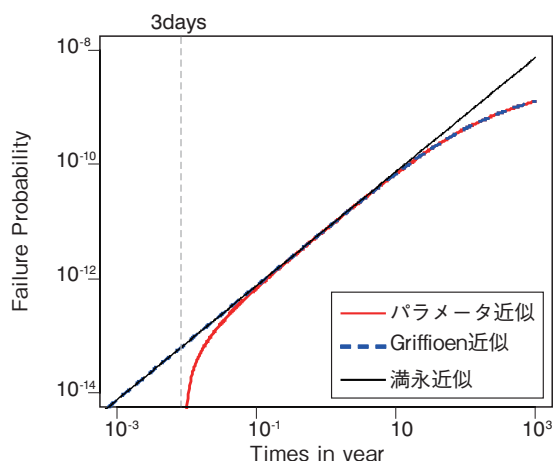


図6 光ファイバを曲げ半径 $R=6$ mmで2.5周巻いた場合の曲げ応力下での故障確率の時間発展の予測結果
Inference of the temporal growth of the failure probability under the condition of the 2.5-turn bending of the bend radius $R=6$ mm.

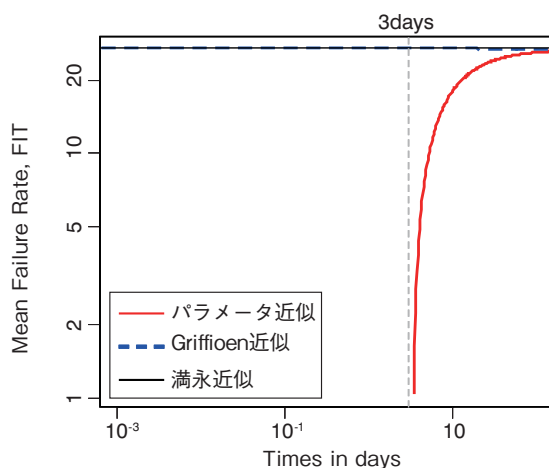


図7 光ファイバを曲げ半径 $R=6$ mmで2.5周巻いた場合の曲げ応力下での平均故障率の時間発展の予測結果
Inference of the temporal growth of the mean failure rate under the condition of the 2.5-turn bending of the bend radius $R=6$ mm.

4. おわりに

本論文の議論をまとめると下記のようになる。まず、2.では光ファイバの機械的強度に関する信頼性について、われわれが開発した統計的強度劣化図を用いて議論の見える化を行なった。これにより、寿命予測の結果だけでなく、途中の議論の過程も可視化できるようになったと考える。可視化することで衆

知を集め、よりよい議論ができるようになることが期待される。

3.では実際に寿命予測式の課題である B 値問題と、その課題を避けるために導入された満永近似とGriffioenの式についての説明を行い、ブルーフ試験時の除荷過程での過疲労がないための条件から、 $B=B_{\min}$ で評価するという B のパラメータ近似手法を提案した。

また、光ファイバの組み付け時の信頼性を保証する短時間での寿命の議論では、Griffioenの式では信頼性を過小評価する可能性がある。これは特に故障率を使った議論で顕著になる。このような場合に、本手法による近似が有効になると考えられる。

本研究を行う上で、古河電気工業(株)の中村浩史、新子谷悦宏、坂野 操、小野博史、浅尾真史、荒井慎一、宇井啓祐との議論が理解を深める上で非常に有益であった。ここに感謝する。

参考文献

- 1) 杉崎隆一, 宮部 亮, 八木 健: 古河電工時報, **116**, (2005), 2.
- 2) T. Yasutomi, F. Nakajima, and Y. Rintsu: *Proc. 53rd Int. wire and cable symp.*, (2004), 11.
- 3) 富田 茂, 倉嶋利雄, 電子情報通信学会誌, **91**, (2008), 689.
- 4) 立蔵正男, 電子情報通信学会論文誌, **J94-B**, (2011), 738.
- 5) 今村勝徳, 武笠和則, 杉崎隆一, 古河電工時報, **128**, (2011), 11.
- 6) K. Imamura, K. Mukasa, T. Yagi, *Proc. optical fiber communication conference*, (2009), paper OTuC3.
- 7) IEC, Technical Report, TR62048, first edition, (2002).
- 8) Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, H. Kobayashi, Y. Ishiida, *J. Appl. Phys.*, **53** (1982), 4847.
- 9) Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, H. Kobayashi, Y. Ishiida, *Electronics and Communications in Japan*, **66**, (1983), 79.
- 満永 豊, 勝山 豊, 小林敬和, 石田之則, 電子情報通信学会論文誌, **J66-B** (1983), p.829.
- 10) 谷村康行, 絵とき 破壊工学基礎のきそ, 日刊工業新聞社, (2009).
- 11) E. R. Fuller Jr., S. M. Wiedrehorn, J. E. Ritter Jr., P. B. Oates, *J. Mater. Sci.*, **15** (1980) 2282.
- 12) 日本科学技術連盟, 信頼性セミナー基礎コース テキスト, (2009).
- 13) R. Olshansky and R. D. Maurer, *J. Appl. Phys.*, **47**, (1976), 4497.
- 14) Y. Miyajima, *J. Lightwave Technol.*, **LT-1**, (1983), 340.
- 15) TIA/EIA Standard, *FOTP31 TIA/EIA-455-31C*, (1994).
- 16) P. Matthijsse, W. Griffioen, *Optical Fiber Technol.*, **11** (2005), 92.
- 17) T. Volotinen, A. Breuls, N. Evanno, K. Kemeter, C. Kurkjian, P. Regio, S. Semjonov, T. Svenson, S. Glaesemann, *Proc. 47th Int wire and cable symp.*, (1998), 881.