

光ファイバーの耐高温，耐低温特性

藤倉電線株式会社光エレクトロニクス研究所 山内 良三

Characteristics of optical fibers at high and low temperatures

Ryozo Yamauchi

Opto-electronics Laboratory
Fujikura Ltd.

1. はじめに

光ファイバは、わが国だけでも推定年間、約 60 万 km も使われるようになり、特殊な伝送媒体と言えなくなって久しい。その多くは、いわゆる公衆通信網に使用される石英ガラス系光ファイバである。しかし、この需要の伸びとともに、光ファイバまたは光ファイバケーブルを多様な厳しい環境下で使用することも珍しくなくなってきた。例えば、高温、低温、高水圧、高電界、放射線環境などがそれである。本稿では、これらの特殊環境のうち、高温、低温における光ファイバの特性を取り上げ、具体的な適用例を示しながら技術の現状を概説する。

2. 石英系光ファイバの温度特性

2.1 伝送特性¹⁾

低温領域での石英ガラスは、きわめて安定であり、被覆を被せていない光ファイバを液体ヘリウム温度に冷却しても伝送光学特性の変化はほとんどない。現在、ほとんど全ての光ファイバのコアにはゲルマニウムが添加されており、これによってコア、クラッド間の比屈折差を生じさせているが、ゲルマニウムを添加したガラスの線膨張係数は純粋な石英ガラスよりも大きいため、温度を変えるとファイバの屈折率分布が変化する。しかし、その変化は、100℃あたり、1%の比屈折率差が0.998%になるに過ぎない。実際のファイバの常温以下での伝送特性変化は、その被覆の低温での収縮によって生じるマイクロベンド損失によってもたらされる。

一方、高温領域でも石英ガラス系ファイバは、概して安定な伝送特性を保つが、ファイバの損失を決定している個別の損失原因を見てみると、波長によっては、特徴的な変化が現れる。式(1)は、光ファイバの損失波長特性を表している。

$$\alpha_{\text{total}} = A/\lambda^4 + B(\lambda) + \alpha_{\text{UV}}(\lambda) + \alpha_{\text{IR}}(\lambda) + \alpha_{\text{MP}}(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 α_{total} は全損失、 A/λ^4 はレーリー散乱損失、 B はコア・クラッド境界の不整や、ファイバの曲がり（マイクロベンド、マクロベンド）などによって生じる散乱損失、 α_{UV} は紫外吸収損失、 α_{IR} は赤外吸収損失、 α_{MP} は OH 基などによる不純物

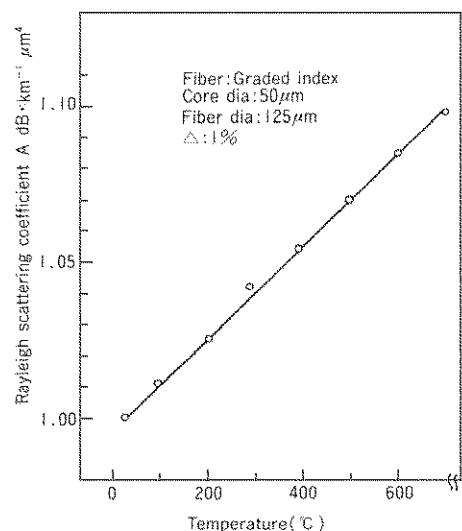


Fig. 1 レーリー散乱損失係数 A の温度依存性

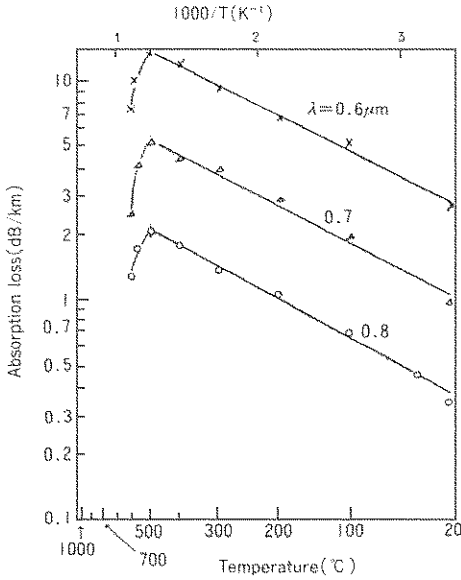


Fig. 2 紫外吸収端の温度依存性：ファイバは Fig. 1 と同じ。

吸収損失である。

Fig. 1 は、コア径 $50 \mu\text{m}$ の多モードファイバのレーリー散乱損失の温度依存性を示している。この測定は、光ファイバに光パルスを入射した時に生じる後方散乱強度を測定することにより行われたものであるが、常温から 700°C までの見かけのレーリー散乱損失係数の変化は約 10% に留まっている。ここで「見かけの」という表現を用いたのは、グレーデッド型多モードファイバでは、コアの中心付近を伝搬するモードほどドーパントであるゲルマニウムの影響を受けるので、高温でのファイバ被覆の状態変化に伴うマイクロバンドによってモード分布が変化すると、見かけのレーリー散乱損失も変化するからである。

Fig. 2 は、同じくゲルマニウムをドーパントとする多モードファイバの紫外吸収損失の変化を示している。紫外吸収端の温度依存性は大きく、 500°C までの温度では、

$$\alpha_{uv} = C \exp(-E/KT) \quad (2)$$

の形をとる (Urbach の式)。また、 500°C 以上では逆に急激に損失が減少していくことが知られている。この測定は、不活性ガス雰囲気の中での加熱炉の中にファイバを置いて行われたものであるが、実際

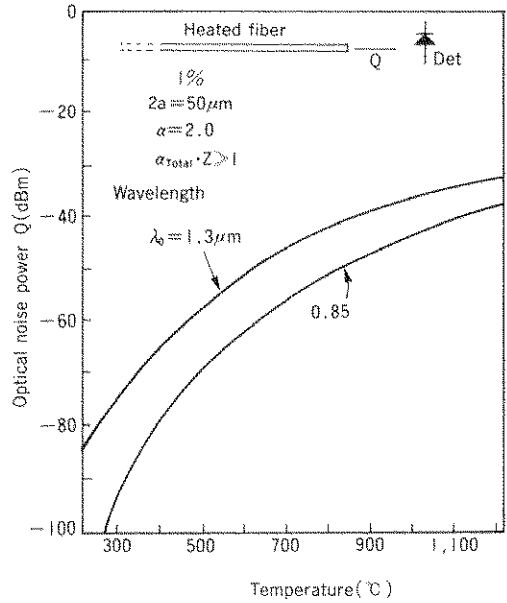


Fig. 3 加熱された光ファイバ端から取り出される雑音光 (計算値)：光検出器の感度は $\lambda_0 \pm 0.5 \mu\text{m}$ の範囲にのみ存在すると仮定した。

のファイバでは、 200°C 以上の高温になると、ファイバの被覆樹脂の分解に伴う水素がコア内に拡散して、水素分子の吸収が観測されたり、アルカリイオンなど、ガラス中で拡散係数の大きなイオンがコア内に拡散して、全く異なる吸収損失特性を示すことがある。

損失以外の伝送特性、例えば、多モードファイバの伝送帯域、単一モードファイバの波長分散などへの温度の影響は少ない。

2.2 高温での光ファイバの発光

例えば、光ファイバケーブルが、ビル内で火災に遭ったようなとき、光ファイバ射出端における雑音光強度を見積ってみる。雑音光が生じるプロセスには、二つあり、一つは高温で光ファイバのコア自身が発光するものと、ファイバコアの外で発光した光がファイバを横切るときに、ファイバの散乱損失機構を介して、ファイバの伝搬モードに結合するものと考えられる。グレーデッド型ファイバを加熱したとき、ファイバ端末での雑音光強度 Q の計算結果は、式(3)に示すように、ファイバの比屈折率差 Δ 、コア半径 a 、ファイバの損失

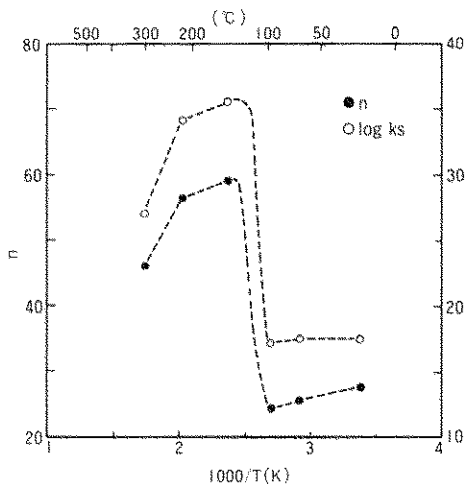


Fig. 4 ガラスの静疲労を表わすパラメータ n, k_s の温度依存性

α , 加熱長 Z に依存した量となる。ここで、 $E_b(\lambda)$ は、波長 λ における単色放射率である。

$$Q = \pi \Delta a^2 E_b(\lambda) [1 - \exp(-\alpha(\lambda)Z)] d\lambda \quad (3)$$

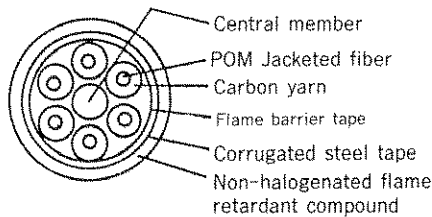
計算結果を Fig.3 に示す。実際にグレーデッド型ファイバ 250 m を加熱した場合の雑音光レベルは 750°C で -45 dBm であった。もし、火災等を想定したとき、このような雑音光が問題になるのであれば、光検出器の前に信号光のみを通す波長フィルタを挿入する必要があるだろう。

2.3 高温における機械特性²⁾

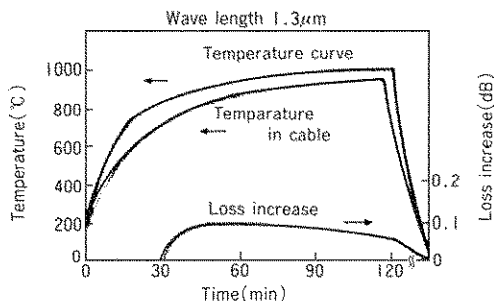
石英系ガラスファイバの機械強度の劣化は、引っ張り応力のもとで水分とガラスが反応してガラス表面の傷が伸長していくためと説明されている。また、その傷の伸長は、温度と湿度の影響を大きく受けることが知られている。このガラスの強度劣化を表すパラメータとして、式(4)に出てくる n 値が用いられており、一般に高温になるほど、応力下での機械的な寿命は短くなる。

$$\log t = -n \log \sigma + \log k_s \quad (4)$$

ここで、 t は破断までの時間、 σ は印加応力、 n, k_s は材料、形状、環境によって定まるパラメータである。しかし、興味深いことに、湿度を定義できない 100°C を超える温度領域では n 値は非常に大きくなり、ファイバの機械的寿命がむしろ増大することが報告されている。Fig.4 に高温での n 値の測定値を示すが、100°C を境に n, k_s とともに大き



a. ケーブル構造



RESULT OF FIRE RESISTANT TEST

b. 耐火試験結果

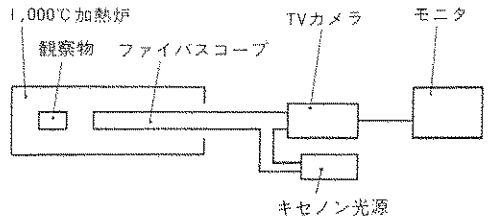
Fig. 5 耐火光ファイバケーブルの特性：試験長約 15 m、波長 1.3 μ m、IEEE 383 に従って行った試験。

く変化していることが分かる。もちろん、このときファイバのプライマリー・コートが高温で急激に劣化するようなものでないことが条件である。

3. 光ファイバケーブルの耐高温、耐低温特性

3.1 光ファイバケーブルの難燃化³⁾

数年前の世田谷の電話局火災は、記憶に新しいところであるが、米国でもイリノイ州などで幾つかの大きな電話局火災が起こっている。これらの事件を契機に、光ファイバケーブルを難燃化する検討が進んだ。一般に電線・ケーブルの被覆材料にはプラスチックが多く使われているが、以前は、難燃化の目的のためにプラスチック材料にハロゲンを多く含むものを使ってきた。しかし、ハロゲン含有樹脂が火災に遭うと、多量の煙と共に腐食性の有毒ガスを放出することから、人にも機器にも悪影響があった。そこで、ケーブル被覆に含有する難燃剤として金属水酸化物を用いたところのノン・ハロゲン難燃樹脂の検討が行われ、これを



《実証試験》

- 加熱温度：1,000℃
- 加熱長：70cm
- イメージファイバ：10万画素石英系イメージファイバ

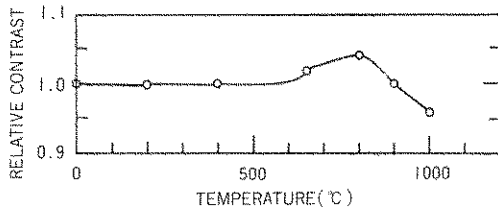


Fig. 6 耐熱イメージファイバによる高温物体の観察

用いたケーブルが公衆通信用の主流となっている。

3.2 耐熱，耐火光ファイバケーブル⁴⁾

火災などに非常時にも，光ファイバ通信を確保するためにファイバの被覆に工夫を凝らしたケーブルが開発されている。Fig. 5a に示すように，ファイバの被覆には POM (Polyoxymethylene) やカーボン繊維，ケーブル被覆にはスチール，ノンハロゲン難燃性樹脂などを用いている。耐火試験の結果は，最高温度約 1000℃，2 時間に曝しても損失増加は 0.1 dB に収まっている (Fig. 5)。

3.3 耐高温イメージファイバ^{5),6)}

ここで紹介するイメージファイバは，多数のファイバを束ねたものではなくて，一本のファイバの中に多数本のコアを有するファイバである。Fig. 6 に本ファイバを用いた測定例を示す。ファイバは，被観察物に照明光を送るための光ガイドと画像を伝送するためのイメージファイバ部とからなり，画素数 10 万，加熱長 70 cm，最高使用温度 1000℃ で設計されている。また，コアガラスは，ゲルマニウム・ドープ石英ガラス，クラッドガラスは純粋石英ガラスである。このファイバの伝送損失特性を Fig. 7 に示す。高温では，被観察物が発

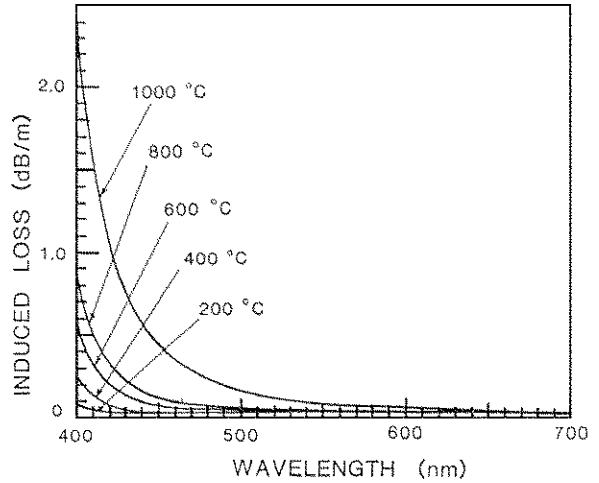


Fig. 7 高温における耐熱イメージファイバの損失増加特性；損失増の主要因は紫外吸収端であり，温度に対して可逆的变化をする。

光すると共に，前述のようにイメージファイバそのものも発光するので，どうしても観察時のコントラストが低下してくる。コントラスト低下を防ぐためには，自然発光強度を上回る照明光を被観察物に照射することが大きな効果を上げる。照度を 10 万 lx 程度まで上げることにより 1000℃ でも数%のコントラスト低下に抑えることが可能である。

4. 光ファイバによる温度分布測定⁷⁾

光ファイバに光を入射すると，弾性散乱であるレーリー散乱以外に，ファイバ構成物質であるガラスの熱振動との相互作用により，ラマン散乱光が発生する。ラマン散乱のうち，入射光よりも波長の長い光をストークス光，短い光をアンチ・ストークスと呼んでいるが，ともに原理的に大きな温度依存性を持つので温度計測に利用することができる。Fig. 8 に測定系を示す。原理は基本的に OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) を使用しており，強い光パルスがファイバ中を伝搬して行く間に後方に散乱するラマン光の時間変化を測定することによりファイバの各点の温度を測定する。ここでは，光源として比較的大きなパルス光が得られる 910 nm の発振波長を持つ半導

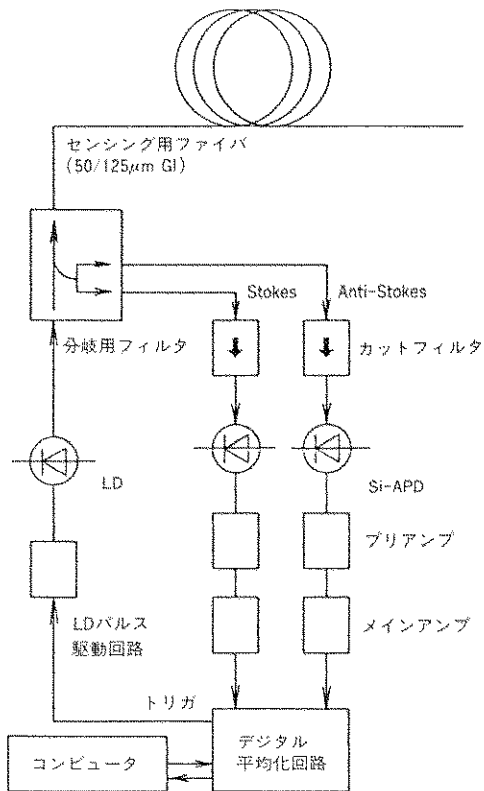


Fig. 8 分布型温度センサ

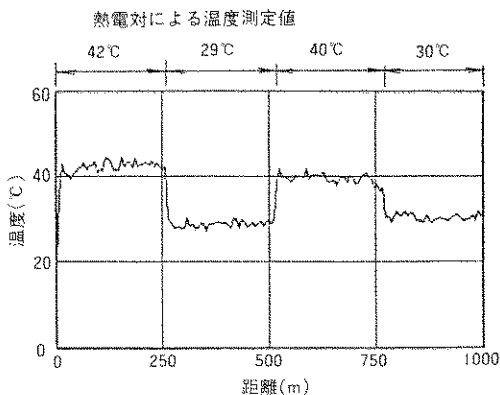


Fig. 9 分布型温度センサ測定例

体レーザを使用している。実際の測定では、ストークス光とアンチ・ストークス光の強度比をとることにより、光源のパワー変動などを相殺し測定精度を上げている。Fig. 9 に測定結果の例を示す。多モードファイバを用いて、距離分解能 5 m, 温度分解能 3°C, 温度測定範囲 -50°C ~ +150°C が得られている。

参考文献

- 1) 山内, 他: 電子通信学会論文誌, Vol. 65-C, No. 12, pp. 835-843.
- 2) A. Wada, et al.: A paper presented at Optical Fiber Communication Conference (OFC '86) held at Atlanta, TUI5.
- 3) 辻田, 他: 電子情報通信学会春季全国大会 (1989年), No. B-660.
- 4) 辻田, 他: 昭和 63 年度電子情報通信学会春季全国大会, No. B-579.
- 5) 中橋, 他: 電子情報通信学会春季全国大会 (1989年), No. C-584.
- 6) 大橋, 他: 電子情報通信学会秋季全国大会 (昭和 63 年度), No. C-309.
- 7) 和田, 他: 第 2 回光波センシング技術研究会 (応用物理学会), LST-2-7 (1988 年 12 月).

【筆者紹介】



山内 良三 (やまうち りょうぞう)
 昭和 47 年 名古屋大学電気工学科卒,
 昭和 49 年 同修士課程終了, 同年 藤倉電線に入社。
 以来, 光ファイバ, 光ケーブル, ファイバ応用光部品の研究開発に従事。現在に至る, 工学博士。