光ファイバの引張り強度と破断位置の相関** - A E による破断位置決定法 -「江馬一弘* 重川秀実* 兵藤申一*

Strength Mesurements of Optical Glass Fibers Correlated with Fracture Origin Detection

Kazuhiro Ema, Hidemi Shigekawa and Shin-ichi Hyodo

Together with strength measurements on plastic-coated optical glass fibers, the position of break origin was determined by using an acoustic technique. For samples other than those in which fracture was initiated at or very near the fixed ends, strength data in Weibull plots exhibited a single mode distribution with low variability $(m=20\sim25, corresponding to a coefficient of variation of 6.6~10.6\%)$.

1.緒 言

光ファィバの実用化に向けて、近年、材料として のガラスファイバの強度を評価する試みが行われて いる。評価の方法は、引張り試験によるものが大部 分であり、種々のコーティング材をつけたファイバ の引張り試験の結果が、報告されている。¹⁾⁻⁷⁾

ガラスの破壊強度は、初期状態で表面に存在する クラックの大きさと分布に支配され、その分布関数 は次のワイブル分布に従うことが知られてい²。

$$F = 1 - \mathbf{e} \times \mathbf{p} \left\{ - \frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{\mathsf{w}} \right\}$$

ここで、Lはゲージ長、Lo、 σ_0 、mは定数であ る。光ファイバの引っ張り試験では、多モード型ワ イブル分布、つまりmの値が破断強度 σ によって異 なる結果が報告されている。これは、異種の分布を しているクラックが、表面に存在していることを意 味している。しかし、最近の光ファイバの製造法で は、多種のクラックが初期状態に存在していること は考えられない。多モード型ワイブル分布になる説 明として、Franc²⁰らは、コーティング材の中 の欠陥によって、ワイブル分布の低強度領域が生じ ると、説明した。しかし、サンプルをはさむことに よりつけられる傷が原因して、低強度領域を生じる

という素朴な解釈がある。引張り試験においては、 サンプルを何等かの方法で固定せざるを得ないから、 この過程が強度に影響してくるのは当然といえるが、 この点につき直接に研究した例は見られない。この 理由は高強度光ファイバが破断する時、一方の固定 端から他方の固定端までサンプルすべてが一瞬に粉 砕してしまうので、破断後に破断起点を推定するこ とができないためである。つまり、固定した影響で 固定端近傍で破断が起こったのか否かを判別するこ とができない。本研究では、破断時に発生する突発 型アコースティック·エミッション (AE) を、サ ンプルファイバの両端で検出し、その到達時間差に より、破断起点を決定することに成功した。これに よって破断強度と破断位置の相関がわかり、ワイブ ル分布で低強度領域が現れるのは、固定端による影 響であることが確められた。

2. 実験方法

実験に用いた光ファイバは、コア径50μm、ク ラッド径125μmの多モード型シリカファイバで あり、被覆材としてシリコーン樹脂がコーティング され、全体の直径は約250μmとなっている。引 張り試験機として、Fig.1に示すようなテンシ

* 東京大学工学部

** 日本電信電話株式会社茨城通信研究所の委託研究「光ファイバの強度および信頼性に関する材料物性の研究」の報告



Fig.1 Schematic illustration of loading system.

ロンを用い、200mmのゲージ長で、600回の 試験を行った。クロスヘッドのスピードは、10、 50、500 mm/min.(歪み速度に直すと 8.4×10⁻²、4.2×10⁻¹、4.2 s⁻¹) の3種類を選び、それぞれ200回ずつ行った。固 定部分は、直径100mmのアルミ円盤に薄いスポ ンジを巻いたものでできており、この周囲を3回巻 きファイバとスポンジとの摩擦で固定する方法を取 っている。

破断時に放出されるAE信号は、両固定端のアル ミ板に取付けられたピエゾ型AEセンサーによって 検出され、2つのセンサーに到達する信号の時間差 によって破断位置が決定される。Fig.2に、こ の過程を示す。破断位置は、ゲージ長を21等分し



Fig.2 Block diagram of system for measuring difference in arrival times of acoustic signals at two ends of glass fiber.

たデジタルカウントで与えられ、この範囲からはず れてカウントしたものは、固定端及びその近傍で破 断したものとみなした。以下、この固定端での破断 を、「チャック切れ」と呼ぶ。このカウントの信頼 性を確めるために、実際の破断位置とカウントとの 対応を調べてみた。破断点を決めるのには、次のよ うな方法を用いた。

応力のかかっていない状態 (ゲージ長200mm) から、破断が自然に起こらない程度まで荷重を加え、 その状態で任意の位置をカッターで触れると、その 点が破断点となる。Fig.3にゲージ長を230 mmまで伸ばした時の破断位置とカウントとの対応 を示す。ここでは、カウントを到達時間に直してあ る。これにより、両端の近傍を除いて、破断位置と 到達時間差との良い線形性が示された。端の近傍に おいて、直線からはずれるのは、次のような理由か らである。AE信号は、ファイバ内を伝達する間に 減衰されるが、端近傍で破断した場合、破断点に近 いセンサーにはほとんど減衰されない信号が届くた め、到達を感知するトリガーが早く作動してしまう。 このため、実際よりも到達時間差は大きく計測され、 Fig.3のように直線の外側にはずれる傾向が生 じる。このグラフを、異なる応力について作成し、 端近傍のずれと、伸びによるAE伝達速度の変化に よる影響などを補正した。



Fig.3 Typical relation between observed time difference

and location of fracture origin in glass fiber.







3.結果及び考察

上述の方法を用い、一回の引張り試験で破断強度 と破断位置を同時に調べ、チャック切れを区別して まとめるとFig・4とT a ble・1になる。ヒ ストグラムでは、チャック切れを斜線で示した。こ れからわかるように、低強度で破断したものはほと んどチャック切れであり、全体の約25%を占めて いる。また、破断強度分布の大きな分散もチャック 切れが原因であったことが明らかとなり、チャック 切れを除いたものの変動係数(標準偏差/平均値) は、10%以下と非常に小さくなっている。

Fig.5は、結果をワイブル確率紙にプロット したものである。破断確率Fと破断強度 $\sigma を、 m \sigma$ 対 m(m(1/1-F))としてプロットしてあ るので、ワイブル分布に従えば直線となり、傾きが mの値となる。Fig.5で、三角の点はすべての データを含めてプロットしたものであり、丸い点は チャック切れによるものだけを除いてプロットした ものである。チャック切れを除いたものは、単一モ ード型ワイブル分布を示すことは明らかであって、 多モード型になる原因は主としてチャック部分の影 響であることを示すものである。単一モードのmの 値を、最小自乗法で求めると、20~25の値とな った。

Crosshead Speed (Strain Rate)		Number of Trials	Mean Strength (GPa)	Standard Deviation [GPa]	Coefficient of Variation [%]
10mm/min. (0.083%/s)	Total	200	5.64	0.90	15.9
	Selected	142	5.88	0.62	10.6
50mm/min. (0.42%/s)	Total	200	5.72	1.12	19.5
	Selected	156	6.16	0.45	7.2
500mm/min. (4.2%/s)	Total	200	6.48	1.15	17.7
	Selected	168	6.80	0.45	6.6



Fig.5 Weibull plots of strength date for optical glass fibers. Triangles represent all date,circles the set of date excluding those which correspond to hatched areas in Fig.4.

破断位置の分布を破断強度別に5段階に分けてヒ ストグラムにしたものが、Fig.6である。最初 に述べたように、破断は初期に存在する最も危険な クラックによって決定され、破断位置はそのクラツ クのあった位置と一致するから、クラックの分布が 一様なら破断位置分布も、一様になるはずである。 Fig.6-(d),(e)は、低強度で破断した ものであるため、大部分が斜線領域(チャック切れ) に入っているが、中強度で破断したもの(Fig. 6-(c))は、破断位置が一様に分布しているこ とが確められた。これに対して、高強度で破断した ものは破断位置が中央に集中している傾向が見られ る。高強度の場合には自然に破断が起こるために、 Fig.3 のような補正グラフを作成することは不 可能である。このため、位置検出の精度は高強度フ



sample groupes differing in strength.

ァイバにおいてはあまり高くない。このことを考慮 すると、高強度の破断で位置検出器のカウントが中 心に集まる理由として、次の3通りが考えられる。

- 1)極限的高強度で破断する場合、応力分布が一様 でなくなり、破断位置は実際に中央によってくる。
- 2)本実験で用いたAEの伝達速度が、極限的応力 が加えられた状態で異常に大きくなる。このため 実際の破断位置分布は一様であっても、それが中 央に集まっているような位置検出器のカウントが 生じてしまう。
- 3) 高強度で破断する場合には、破断起点が一点と は限らず、複数点から破断が起こる。それらの破 断は、同時に発生する場合もあるし、AE信号が センサーまで伝わる間に起こる場合もありえよう。 このため、位置検出器は中心に集まっているよう にカウントしてしまう。

この三つの中で、1)はありえそうもなく、2) と3)が考えられるが、今までになされた高応力下 (~6GPa)での音速の研究からは、6GPa以 上でも音速の異常は予期されない。よって、3)が 最も妥当性があると思われるが、検証は行っていな い。検証のためには、さらに高応力下での音速の研 究と、高速カメラによる破壊現象の観察を並行して 行う必要がある。

4.結論

本研究により、光ファイバの引張り試験の結果が 多モード型ワイブル分布になる原因は、チャック切 れの影響であることが確認された。低強度で破断し たものについては大部分がチャック切れで、破壊起 点は端に寄っているが、中強度までの試料について は破断位置の分布が一様であることが確認された。

終わりにあたり、A E センサーと位置検出器を貸 与して下さった、日本電信電話株式会社茨城電気通 信研究所の稲垣伸夫氏、及び試料用の光ファイバを 提供して下さった、古河電気工業株式会社中央研究 所の木村正樹氏に感謝いたします。

REFERENCES

(에너지) 꼬(박

- R. D. Maurer, "Strength of Fiber Optical Waveguides", Appl. Phys. Lett., 27 [4] 220-221 (1975).
- (2) C. R. Kurkjian et al., "Strength of 0.04-50 m Lengths of Coated Fused Silica Fibers", *ibid.*, 28(10) 588-590 (1976).
- (3) D. Kalish, B. K. Tariyal and R. O. Pickwick, "Strength Distributions and Gage Length Extrapolations in Optical Fibers" J. Am. Ceram. Soc., 56 [5] 491-503 (1977).
- (4) W. D. Scott and A. Gaddipati, "Weibull Parameters and the Strength of Long Glass Fibers". Proc. Intern. Symp. Fracture Meeh. Ceram., 125-147 (1978).
- (5) W. E. Snowden, "Surface Flaws and the Mechanical Behavior of Glass Fibers". *ibid*. 143-158.
- (6) S. Sakaguchi, "Strength and Fracture of High-Strength Optical Fibers (in Japanese)", J. Jap. Soc. Mater. Strength, 13 (1) 14-24 (1978).
- (7) P. W. France, P. L. Dunn and M. H. Reev, "Plastic Coating of Glass Fibers and its Influence on Strength", Fiber and Integrated Optics, 213-41, 267-286 (1979).
- (8) A. M. Freudenthal, in "Fracture, an Advanced Treatise", vol. 11, H. Liebowitz, ed., Academic Press, New York, 1968, Chap. 6.