

氏名	さかぐちしげき 坂口茂樹
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和59年3月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最終学歴	昭和50年3月 東北大学大学院工学研究科機械工学第二専攻 修士課程修了
学位論文題目	通信用石英系光ファイバの強度特性に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 川崎 正 東北大学教授 北條 英典 東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学助教授 沢木 洋三

## 論文内容要旨

### 第1章 序 論

本研究は、光通信用伝送媒体である石英系光ファイバの強度特性に関するものである。

光ファイバは、低損失のみならず、広帯域、無誘導、細径、軽量であるなど、通信線路として、すぐれた特徴を有する。そのため、公衆通信システムへの導入が積極的に進められているが、実用化に際して明らかにしなければならない重要な課題は、機械的強度とその長期にわたる信頼性の確保である。光ファイバは、典型的な脆性材料である石英ガラスを素材としているため、極めて脆く、わずかの張力によっても破断しやすい。

その破断強度は、環境に著しく影響され、いわゆる静疲労と呼ばれる一種の遅れ破壊現象を示す。このような機械的破壊による光ファイバの不慮の断線は、通信システムの信頼性に致命的な障害をもたらす。従って、信頼性の高い通信システムを確保するためには、光ファイバの機械的強度特性を明らか

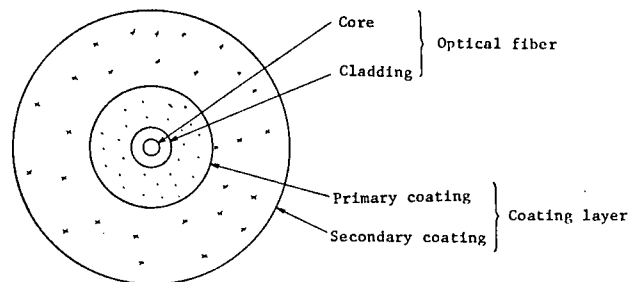


Fig. 1 An example of silica glass optical fiber

にすることが、今日、不可欠の課題となっている。

このような観点から、本研究は、図1に示すような光ファイバの強度と破壊の特性を明確にして、その結果を信頼性の高い高品位の光ファイバ製造技術の開発に応用することを目的としている。この目的を達成するため、石英ガラス並びに石英ファイバの強度特性の把握並びに線引き法との関連について研究し、光ファイバの高信頼化における問題点を究明したものである。

## 第2章 石英ガラスの強度と破壊

光ファイバの強度特性についての研究を行なうに当たって、その素材である石英ガラスの強度および破壊挙動を把握することが重要である。そのため、WOL (Wedge Opening Loading) 型CT (Compact Tension) 試験片を用い、強度評価の基礎となる破壊靱性を調べるとともに、蒸留水をはじめ、種々の環境中で、一定荷重下におけるき裂成長挙動について広範な実験を行い、脆性破壊抵抗並びにき裂成長特性に及ぼす環境の影響を明らかにした。

破壊靱性 $K_{Ic}$ の測定を広範な引張り速度条件で行った。得られた破壊靱性値は、引張り速度に関係なく、ほぼ一定となり、その値として、 $0.78 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  が得られた。

蒸留水、湿潤空気などの環境中で、一定荷重下による静疲労試験を行い、き裂成長挙動に及ぼす環境の影響を調べた。き裂成長速度は、応力拡大係数 $K$ をパラメータとする熱活性化過程として表わすことができ、蒸留水中において、き裂成長指数 $n$ として約40が得られた。空気中の湿度は、き裂成長に著しい影響を及ぼし、湿度が高い程成長速度は速くなる。また、各環境中で測定された破断時間は、初期応力拡大係数 $K_{I0}$ と対数表示ではほぼ直線関係にある。この関係および成長速度曲線から、蒸留水中におけるき裂の安定成長に対する下限界応力拡大係数 $K_{Isc}$ として、約 $0.37 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  が得られた。

## 第3章 石英系光ファイバの線引きと強度特性

光ファイバは、ケーブルの製造からその布設、保守に至る各段階において、断線しないための十分な機械的強度が要求される。一方において、光の伝送特性やファイバの接続の点からは、外径が均一でなければならない。本章では、強度および線径の均一性を満たす線引きの最適条件を明らかにした。

カーボン抵抗炉を用いた線引きにおいて、短周期の線径変動は、加熱領域での温度ゆらぎが支配的要因であることを明確にした。これにより、アルゴンガス流量および発熱体形状を適切に制御し、温度ゆらぎを $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下に抑制すれば線径変動幅が $1 \text{ }\mu\text{m}$ 以下になることがわかった。また、長周期の変動に対しては、線引き速度をフィードバック制御することが可能であり、これらにより、線径変動が $\pm 0.5 \text{ }\mu\text{m}$ 以下の長尺光ファイバが製造できた。

強度に及ぼす製造因子の影響について、線引き炉耐火物としてアルミナ磁器を用いた場合には、これから発生するアルカリ・アルカリ土類酸化物の揮発成分がファイバ表面に付着して欠陥を形成するため、高強度ファイバは得られない。しかし、耐火物に高純度のカーボンフェルトを用いると加熱雰囲気清浄に保てることから、高強度ファイバが得られることがわかった。プラスチック被

覆は、ファイバ表面の保護に極めて有効であり、その効果は、被覆膜厚が厚い程大きい。また、被覆されるまでの間の雰囲気は、乾燥していることが必要である。

破面解析からは、破断面は強度レベルに応じて、特有の形態を示し、高強度光ファイバでは、表面の極めて微細な欠陥を起点として破壊することがわかった。また、低強度ファイバでは、ミラー面が観察され、ミラー定数として  $2.18 \text{ MP a}\sqrt{\text{m}}$  を得た。これらから、破断の起点となる欠陥は、外的要因によって生じる巨視的欠陥およびガラス固有の微視的欠陥であることが明らかになった。

#### 第4章 光ファイバの疲労

光ファイバの長期にわたる信頼性を確保するため、蒸留水中および空気中で、シリコン被覆した石英ファイバの強度の経時変化および疲労特性を調べた。

シリコン被覆石英ファイバを種々の温度の蒸留水中に保持し、破断強度の経時変化を調べた。その結果、 $20 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$  では、 $10,000$  時間経過後も強度はほとんど変化しないことから、シリコン被覆したファイバは、水に対して極めて安定であることがわかった。

シリコン被覆石英ファイバの蒸留水中での静および動疲労試験からは、得られたき裂の成長指数  $n$  は、蒸留水の温度  $T$  の逆数に対し、ほぼ直線関係にあり、温度が高い程小さくなる。実験した温度範囲 ( $20 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) で、 $n$  の値は  $16 \sim 23$  であった。空気中では、温度および湿度が高い程、疲労は促進されるが、 $n$  値は、湿度に対しては明確な依存性を示さず、ほぼ温度のみの関数として表わされる。

一方、表面に人為的に損傷を与えた強度の低い加傷ファイバの疲労試験からは、 $n$  値として約  $40$  が得られ、CT試験片での値とほぼ一致することが明らかとなった。これにより、巨視的な欠陥を含む低強度ファイバの疲労挙動は、CT試験片の挙動と一致することが示され、巨視的き裂の成長に対しては、 $n$  の値は、本来約  $40$  となることが妥当であることが明らかになった。

#### 第5章 長尺ファイバの強度特性

光ファイバには、その長さに沿って様々な大きさの欠陥がランダムに分布しており、寸法の最も大きな欠陥によって強度は左右される。長尺ファイバにおいて、その最小強度を把握し、限界荷重を明らかにするため、ワイブル分布およびスクリーニングによる強度評価を比較した。

短いゲージ長さの強度分布から、長尺ファイバの強度を推定するためには、ワイブル分布の分布指数  $m$  が、ゲージ長さに対して不変であるのが基本である。同一のファイバを  $10 \text{ m}$  および  $50 \text{ m}$  のゲージ長さで引張り試験し、得られた強度分布を比較したところ、ゲージ長さによって異なる  $m$  値が得られた。従って、短いゲージ長さでの強度分布に基づいて、長尺ファイバの強度を正確に評価することは困難であることがわかった。

スクリーニングしたファイバを引張り試験し、破断強度とスクリーニング応力との関係を調べた。得られた強度の最小値は、スクリーニング応力に対する限界き裂の大きさから計算される最小強度よりも大きく、スクリーニングすることにより、最小強度が保証されることが明らかになった。この結果から、ファイバに定常的な応力  $\sigma_a$  が負荷される場合、疲労によって断線しないための所要ス

クリーニング応力 $\sigma_p$ は、破壊靱性 $K_{IC}$  およびその環境での下限界応力拡大係数 $K_{ISCC}$  を用いて

$$\sigma_p = \frac{K_{IC}}{K_{ISCC}} \cdot \sigma_a$$

で表わすことができる。これにより、強度保証のためのスクリーニング応力をCT試験片から測定された破壊靱性および下限界応力拡大係数を用いて算出できることが明らかとなった。

## 第6章 長尺高強度光ファイバの線引き

光ファイバの特徴が最大限に発揮できる領域である海底伝送方式においては、海底ケーブルは、布設時の負荷条件が厳しく、修復も困難であることから、極めて高い信頼性を要求される。そのため、これに耐える長尺の高強度光ファイバの製造技術の開発が強く望まれる。

第3章で述べたように、欠陥形成に対しては、線引き炉内におけるダスト粒子による汚染が最も大きな要因となる。破断強度とダスト粒径 $2r$ との関係を調べた結果、要求強度 $\sigma$ に対し、 $r = (0.474/\sigma)^2$ よりも大きなダストは、炉から排除しなければならないことが示された。これに対し、線引き炉に、ガスの排気口を設けると同時に、線引きに先立って、炉を充分空焼きすることによってダストが排除され、高強度ファイバが線引きできることが見出された。この条件下で線引きした各種石英ファイバについて、スクリーニング試験により、強度特性を評価したところ、天然石英ファイバで、1.1%歪(0.8 GPa)スクリーニングで、平均通過長12.7 kmが得られた。これにより、海底無中継伝送方式で要求される強度特性を満たすファイバの製造技術を確立することができた。さらに、VAD合成石英ファイバでは、3.3%歪(2.4 GPa)スクリーニング8.7 kmの通過長が得られ、水深8000 mを含む大洋横断ケーブルに適用可能なファイバも製造できる見通しが与えられた。

## 第7章 結 論

本研究により得られた成果を要約すると以下の通りである。

石英ガラスの強度と破壊挙動を調べることにより、光ファイバの強度特性を究明する上での基礎的破壊力学パラメータが明らかになった。光ファイバの線引きにおいては、加熱温度条件をはじめ、外径を均一にするための最適条件が明らかにされたことにより、線引きの基本技術が確立された。この工程において、強度を低下させる欠陥の発生と製造上の因子、特に、加熱雰囲気的清浄性との関連を定量的に把握することにより、高強度光ファイバを線引きするために必要な清浄度が明らかになった。また、巨視的欠陥を含む低強度ファイバの疲労挙動がCT試験片と一致することが見出され、さらに、スクリーニングにより強度保証がなされることが確認されたことから、疲労により断線しないための許容限界荷重条件が、CT試験片から得られる破壊力学パラメータによって規定できることが明らかになった。これら光ファイバの強度および線引き法に関する研究成果は、信頼性の高い長尺高強度光ファイバ製造技術の根底をなすものであり、特に、海底光ケーブル伝送方式の実用化に大きく貢献するものである。

## 審査結果の要旨

光ファイバは最近優れた通信媒体として注目されているが、極めて脆く僅かの張力によっても破断し、疲労によって遅れ破壊を起こす欠点があり遠距離通信線路の長期にわたる信頼性確保の上からその強度特性の究明が望まれている。本論文は強度と信頼性の高い長尺光ファイバ製造技術の開発を目的として石英系光ファイバの強度と疲労に関して行った研究の成果をまとめたもので全編7章より成る。

第1章は序論である。

第2章は、石英ガラスの強度特性は破壊力学的手法を用いて解析できることを実験的に明らかにし、破壊靱性値 $K_{Ic}$ 、き裂成長限界応力拡大係数 $K_{Isc}$ 及びき裂成長指数 $n$ はガラスの強度評価の基礎となる重要なパラメータであることを示している。

第3章では、石英系光ファイバの破面は強度レベルに対して特有の形態を示し、低強度ファイバの破面にはミラー面が現われ表面の微細欠陥から破壊することを示している。そして強度に有害な欠陥が線引工程中に発生する原因を追求した結果、高純度カーボンを炉材とし線引炉内を清浄に保ち水分を除去し、また温度変動を $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内に炉の雰囲気制御すれば、表面欠陥は殆ど存在しない高強度ファイバの線引きが達成されることを確認している。

第4章では、このようにして製造された光ファイバの疲労寿命並びに破断強度が破壊力学パラメータによって評価できることを明らかにしている。

第5章では、ケーブルとして用いられる長尺ファイバが稼働中に断線しないことを保証するためのスクリーニング試験の条件を確立している。応力 $\sigma_p$ でスクリーニングしたファイバの破断強度の下限は $\sigma_p$ よりも大であることを確め、稼働応力 $\sigma_a$ に対して所要のスクリーニング応力は、 $\sigma_p=(K_{Ic}/K_{Isc})\sigma_a$ で与えられる。これは実用上貴重な成果である。

第6章では、平均長10 km以上が要求される海底ケーブル用ファイバの強度評価について検討し、線引炉内から $0.6\text{ }\mu\text{m}$ 以上の塵埃を完全に除去するよう雰囲気制御を行えば、強度並びに平均長に対する要求を満たすファイバの製造が可能であることを示している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文はガラスの強度特性を究明し、その結果に基づいて高強度長尺ファイバ製造技術の基礎を確立すると共に、実用光ファイバに要求される強度と平均長とを保証するスクリーニング試験の条件を破壊力学に基づいて提案しその有効性を立証したもので、材料強度学並びに機械工学に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。