

氏 名 村 岡 幹 夫

授 与 学 位 博 士 ( 工 学 )

学 位 授 与 年 月 日 平 成 5 年 3 月 18 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 61 年 3 月

東北大学大学院工学研究科機械工学専攻前期2年の課程修了

学 位 論 文 題 目 石 英 ガ ラ ス フ ァ イ バ の 強 度 評 価 に 関 す る 研 究

論 文 審 査 委 員 東 北 大 学 教 授 阿 部 博 之 東 北 大 学 教 授 高 橋 秀 明

東 北 大 学 教 授 庄 子 哲 雄 東 北 大 学 教 授 林 一 夫

東 北 大 学 教 授 坂 真 澄

## 論 文 内 容 要 旨

増大する通信需要に応えるべく、光ファイバの通信ケーブルへの導入は世界各国で急速に進められている。光ファイバは石英ガラスを素材としているために、そのケーブル化に際し考慮しなければならない重要な現象がある。ガラスは静疲労と呼ばれる一種の遅れ破壊を引き起こす。すなわち破断強度以下の応力であっても、それが長時間負荷されると突然破断してしまう現象である。これは水分子誘起の応力腐食により生じるガラス表面の微小な欠陥の成長によるものである。光ファイバは一般に、ケーブル内で負荷を受ける。そのため光ファイバの遅れ破壊特性を正しく評価し、正しい予測手法のもとにその寿命を保証することが不可欠である。

従来から用いられているファイバの破断寿命予測法は破壊力学による指数則モデルに基づいている。そこでは、ファイバの微小表面き裂が指数則に従い成長すると仮定されている。指数則とは、石英ガラス大形き裂試験片でのみ確認されていたもので、き裂成長速度が応力拡大係数の $n$ 乗に比例するというき裂進展則である。また最終破断条件を与えるファイバの破壊靱性値に関しても、破壊靱性値が環境(温度、湿度)に依存しないという仮定が用いられている。これら二つの仮定に基づき得られる破断時間と一定負荷応力の関係が寿命予測の基礎として採用されている。

寿命予測に必要な指数 $n$ の値は、従来、静疲労計測(破断時間と一定負荷応力の関係の計測)あるいは動疲労計測(破断強度と一定負荷速度の関係の計測)により評価されてきた。両疲労計測では、共に欠陥寸法が未知であり様々である適当な長さのファイバ試験片が用いられる。そのため計測値は大ききばらつくが、これに対して統計的処理を行い $n$ が評価される。このような統計処理の不確かさのために、 $n$ の評価値は予測寿命に重大な影響を及ぼすほどにばらついてしまうという問

題が生じている。

また、指数則モデルのファイバに対する妥当性に関して、ファイバの微小き裂成長に対する適切な計測手法が見い出されていなかったこともあって、先の静疲労計測、動疲労計測を用いた検討がなされてきた。しかしながら両疲労計測には、常に上記のようなばらつきの問題を伴っているため、指数則モデルの明確な妥当性を得るには至っていなかった。そのため企業における寿命予測では、上記妥当性に対して疑問を抱きながらもこれを容認し、 $n$ の値として論文等で多く報告されている値（約20）を慣習として用いているのが現状となっている。

本研究では、上記問題の解決を目的として以下のような光ファイバ用石英ガラスファイバの遅れ破壊評価に関する新たな展開を行った。すなわち、従来成功をみていなかった微小き裂の成長に対する詳細な計測を独自の手法により実現し、ファイバのき裂進展則の直接評価を初めて行った。また最終破断条件を与える破壊靱性値に関しても実物試験片のき裂計測に基づく評価手法を見出し、これを初めて評価した。これらにより、従来の寿命予測法における指数則モデルの妥当性を明らかにし、また従来法における評価精度の悪さを大幅に改善することに成功した。

## 第1章 序 論

現在までの光ファイバ用石英ガラスファイバの遅れ破壊を対象とした研究および従来から用いられてきた寿命予測法を概観し、そこにおける問題点を明確にし、これに基づき本研究の目的ならびに背景を明らかにしている。

## 第2章 予き裂付きガラスファイバ試験片の作製方法ならびに遅れ破壊試験方法

本研究で新たに導入し、一貫して用いる予き裂付き実物試験片の作製方法を考案している。また同試験片を用いた遅れ破壊試験方法の概略を記述している。

## 第3章 ガラスファイバの破壊靱性評価方法

光ファイバ用石英ガラスファイバの破壊靱性値の評価方法を新たに考案している。ここでは、特に遅れ破壊試験に供した試験片の破断面の微分干渉顕微鏡観察により、最終不安定破壊開始時のき裂前縁形状の計測が可能であることを初めて見出ししている。本靱性評価方法は、計測される同き裂の三次元境界要素解析に基づいている。

## 第4章 ガラスファイバの破壊靱性に及ぼす湿度の影響

第3章の靱性評価法を用いて、種々の湿度、温度条件下の破壊靱性値を調べている。これにより、ファイバの破壊靱性値は、従来の寿命予測法において用いられた仮定の一つすなわち破壊靱性値が環境に依存しないという仮定と異なり、湿度に依存することを明らかにしている。

## 第5章 ガラスファイバのき裂進展則の評価方法

光ファイバ用石英ガラスファイバのき裂進展則の評価方法を新たに考案している。ここでは最終

不安定破壊開始以前の時々刻々変化する微小表面き裂の前縁形状をき裂面上に痕跡として記録させるという新手法の考案により、微小き裂成長の直接計測を実現している。これにより、ファイバにおける深さ約20 $\mu$ mの微小表面き裂の成長の詳細な計測すなわちき裂前縁形状変化の計測を実施し、ファイバのき裂進展則の評価例を示している。また、本評価例においてファイバに対して指数則が妥当であることを明らかにしている。さらにnの評価に関して、従来の静疲労計測、動疲労計測に比べ、ばらつきが格段に小さい十分な精度の結果が得られることを示している。

## 第6章 ガラスファイバのき裂成長に及ぼす湿度の影響および樹脂被覆の影響

第5章の手法を用いて広範囲の湿度条件でき裂成長計測を行い、き裂進展則を評価している。これにより本実験の湿度範囲でファイバに対して指数則が妥当であることを示すと共に、ファイバにおける微小き裂の成長に及ぼす湿度の影響を明らかにしている。また、樹脂被覆の影響についても検討している。

## 第7章 破断寿命保証

以上で得られた結果を踏まえ、従来の寿命予測法における指数則モデルの妥当性を検討している。第5,6章で指数則の妥当性が明らかとなるが、ここでは第4章で得られた結果すなわち破壊靱性値が湿度に依存するという実験事実に対して、寿命予測あるいは寿命保証を行う際に、同モデルの仮定のようにこれを無視して取扱え得るのかについて検討している。また、寿命予測（寿命保証）線図を示し、本き裂成長計測を用いることにより従来の静疲労計測、動疲労計測に比べて、格段に精度の良い寿命予測あるいは寿命保証が可能となることを明らかにしている。

## 第8章 結 論

本研究で得られた結果をまとめている。得られた主要な結果は以下の通りである。

- (1) 微小な予き裂を有する石英ガラスファイバ試験片の作製方法を新たに考案した。圧子押し込み法を発展させることにより、ファイバ ( $\phi 125\mu\text{m}$ ) への微小な予き裂の導入を実現することができた。
- (2) ファイバの破壊靱性値  $K_{IC}$  の評価方法を新たに考案した。同評価方法は、破断面の微分干渉顕微鏡観察により、不安定破壊開始時のき裂前縁形状の計測が可能であるという知見に基づいている。また三次元境界要素解析により、同き裂の応力拡大係数  $K_I$  は、き裂最深部で最大となるが、き裂前縁に沿う変化がわずかであることを明らかにし、き裂最深部における  $K_I$  の値を  $K_{IC}$  とみなせることを示した。
- (3) 上記の  $K_{IC}$  評価方法を用い、温度  $-14^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $2\sim 90\%$  r.h. の範囲でのファイバの  $K_{IC}$  を初めて明らかにした。ファイバの  $K_{IC}$  は、温度には依存しないが、水蒸気圧  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  が約  $3\text{kPa}$  以下の範囲では  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  の増加に従い減少すること（例えば  $p_{\text{H}_2\text{O}} \doteq 0.5\text{kPa}$  のとき  $K_{IC} \doteq 0.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 $p_{\text{H}_2\text{O}} \doteq 3\text{kPa}$  のとき  $K_{IC} \doteq 0.7\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ）を初めて示し、従来の寿命予測法における仮定と異なり、湿度に依存することを明らかにした。

- (4) ファイバにおける微小き裂成長の計測方法を新たに開発し、これに基づくき裂進展則の評価方法を考案した。成長する微小き裂の前縁形状をき裂面上に痕跡として記録させ、破断面の微分干渉顕微鏡観察により、成長時のき裂前縁形状変化の計測が初めて実現できた。同き裂形状記録は、遅れ破壊試験の際にファイバ試験片を一時的に除荷し、さらにわずかな横振動を与えることにより可能となる独自の手法によるものである。
- (5) 25°C, 30~90% r.h.の条件において、ファイバに関し、指数則が成立していることを初めて明らかにした。この知見は、従来から用いられてきた寿命予測法において、その妥当性が不明確であった指数則の仮定に対して、明確な妥当性の根拠を与える。
- (6) nの評価に関して、静疲労計測等の従来法による評価に比べ、格段に精度の良い結果が得られた。本評価結果は、25°C, 75% r.h.のとき  $n = 22.6$  および 25°C, 60% r.h.のとき  $n = 22.9$  となり、その標準偏差  $\Delta n$  は 0.9 と小さい。なお従来法の標準偏差は、 $\Delta n = 4$  である。
- (7) 30~90% r.h.の湿度範囲においてき裂成長速度が湿度の 2.5 乗に比例することを見出した。また同範囲において n の値が湿度に依存しないことを明らかにした。
- (8) 上記のき裂成長計測法を発展させ、シリコン樹脂被覆ファイバにおける微小き裂の成長計測を行った。これにより、外環境の水分子が容易に樹脂被覆内に拡散浸入してしまい、樹脂被覆ファイバのき裂成長特性は被覆なしのファイバと同様となることを明らかにした。
- (9) ファイバの遅れ破壊特性に関する以上の結果を踏まえ、従来から用いられてきた寿命予測法の妥当性を検討した。その結果、ファイバにおける  $K_{IC}$  の湿度依存性を無視している従来の寿命予測法は、安全側の評価を与えるという意味で、妥当であることを明らかにした。
- (10) 本き裂成長計測結果に基づき、寿命予測（寿命保証）線図を求めた。これにより、従来の疲労計測結果に基づく線図に比べ、格段に信頼性の高い寿命予測あるいは寿命保証が可能となることを明らかにし、従来法における寿命予測、寿命保証上の精度の悪さを大幅に改善することができた。

## 審 査 結 果 の 要 旨

石英ガラス光ファイバは、表面の微小な欠陥の成長によって、遅れ破壊を引き起こすことが知られているが、これまでは遅れ破壊特性を正しく評価し、必要な精度でその寿命を保証することができなかった。本研究は、従来成功をみていなかったファイバの微小き裂の成長に対する詳細な計測を独自の手法により実現し、き裂進展則の直接評価に初めて成功し、高精度の寿命予測法を新たに提示したもので、全編8章よりなる。

第1章は序論である。

第2章は、本実験のために新たに工夫した、予き裂付きガラスファイバ試験片の作製方法と遅れ破壊試験方法について述べている。

第3章では、微分干渉顕微鏡観察により、不安定破壊開始時のき裂前縁形状の計測に初めて成功している。破壊靱性評価の基礎になる画期的な成果である。

第4章では、種々の温度、湿度条件下の破壊靱性を調べ、とくに湿度に依存することを見出している。従来の理解を新たにした知見である。

第5章では、不安定破壊開始以前に時々刻々変化する微小表面き裂の前縁形状を痕跡として記録する新手法を考案し、き裂進展則の定量化に成功している。高精度寿命予測を可能にした有用な成果である。

第6章では、き裂成長に及ぼす湿度の影響および樹脂被覆の影響を明らかにしている。

第7章では、上記の結果に基づいた寿命予測（寿命保証）線図を新たに提案し、従来の経験的手法に比べて、格段に精度のよい寿命予測が可能となることを明らかにしている。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、石英ガラス光ファイバ内を伝播するき裂前縁形状を直接観察する新方法を考案し、これに基づいて遅れ破壊による破断寿命の高精度な保証法の実現に成功したもので、破壊力学および機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。