

光ファイバの強度

NTT 電気通信研究所 稲垣伸夫

1. はじめに

光ファイバの強度特性は、これを伝送媒体として用いる光伝送方式の信頼性を確保するうえから、極めて重要な問題である。とくに海底光伝送方式は、その敷設、障害修理等における条件・環境が厳しく、陸上用に比べて一段と高い信頼性と強度特性が要求されている。ここでは、石英系高強度ファイバの製造法と信頼性保証を中心に現状技術を紹介する。

2. 石英ガラスの強度

現在すでに、石英系光ファイバーの強度は、ほとんど理論値に近い値が実現されている、この理論値そのものはまだ、確定されていないが、一応、Si-O の結合の強さから算出した値が 25 GPa、また、表面エネルギーから算出した値が 10 GPa と報告されている。実際の値は、液体ヘリウム中、及び液体窒素中で、15 GPa が得られている。

図 1 に、ファイバーの強度と温度との関係を示す。それぞれの温度のところでのデータがいろいろばらついているが、一番上のところが傷

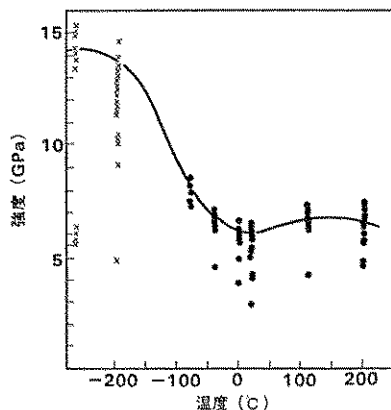


図 1 石英ファイバの強度と温度の関係

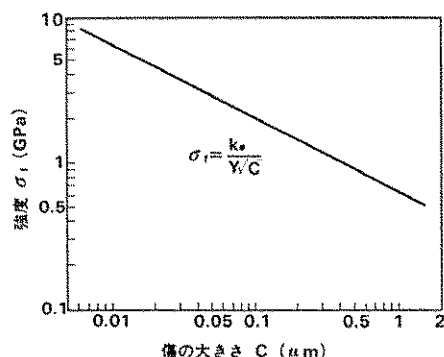


図 2 石英ガラスの強度と傷の関係

のないファイバーであると考えれば、最高値は 15 GPa 以上の値になっていることがわかる。しかし、常温ではせいぜい 5~7 GPa ぐらいの値である。低温ほど高強度になるのは、低温になるに従って表面での疲労破壊すなわち、水分が関与して生ずる強度劣化が防がれるためである。

また、いかに表面傷を小さくするかということが、ファイバーの製造上問題である。実際に

表 1 傷の成長速度

$$\frac{dc}{dt} = AK^n \quad (1) \text{式}$$

$$K (\text{応力拡大係数}) = Y\sigma_j\sqrt{C} \quad (2) \text{式}$$

σ_j : 負荷応力, A, n: 材料定数, Y: 形状係数

破壊の各件

$$K \geq K_c \quad (3) \text{式}$$

K_c : 破壊靱性

静疲労

$$\log t_f = -n \log \sigma + B \quad (4) \text{式}$$

t_f : 破断時間

動疲労

$$\log \sigma_i = \frac{1}{n+1} \log \dot{\sigma} + D \quad (5) \text{式}$$

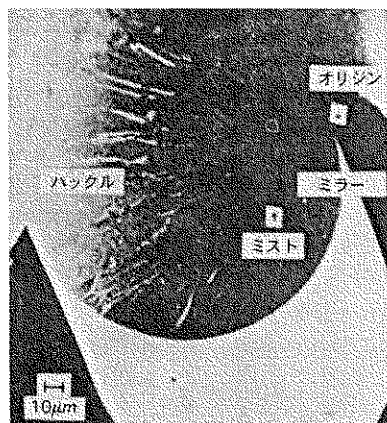


図 3(a) 光ファイバ表面の傷から破断した例

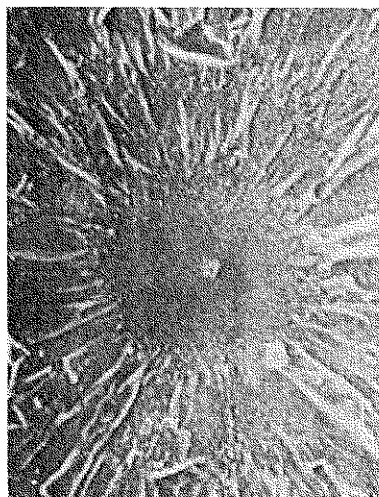


図 3(b) 光ファイバ内部の欠点から破断した例

用いられる 5 km 長のファイバーの表面積は約 2 m^2 となる。その中に傷が一つでもあるとそこから破断が生ずることになる。

図 2 に光ファイバの傷の大きさと強度の関係を示す。この値は表 1 の(2)式から求めたものである。例えば、 $1 \mu\text{m}$ の表面傷があると 0.4 GPa という非常に小さい強度で破断する。実際のファイバーに要求される強度は後述の通り 2~3% のブルーテストを通過しなければならない。すなわち 2~3 GPa の強度を保証するファイバーをつくらうとすると、表面に $0.05 \mu\text{m}$ 程度の小さな傷があってもいけないという、かなり厳しい状況になる。

ファイバの破断がどのように起こっているかを図 3 の写真で示す。写真(a)の右端がオリジン

ンであり、その回りにミラー部が生ずる。その外側にミストおよびハックルパターンが生ずる。写真(b)は内部に欠陥がある場合であり、何か不純物が入っていたりするとそこがオリジンとなり、低強度で破断してミラー部およびハックル部分を生じる。高強度ファイバ製造のためにはこの表面傷および内部欠陥を除去しなければならないが、特に表面傷をいかに防ぐかが、ファイバの製造上非常に重要な課題である。

3. 光ファイバ線引き技術と強度

3.1 線引き装置

図 4 に光ファイバの線引き装置を示す。母材を準備し、これを線引いて光ファイバを製造する。母材製造法は代表的に 3 種類ある。わが国においては VAD 法が主体であり、アメリカでは コーニング社の外付け法、また、ATT 等では MCVD 法が使われている。この母材には光伝送路としての導波構造がつけられており、屈折率の高いコア部と低いクラッド部からなっている。この母材を、カーボン炉もしくはジルコニア炉等を用いて、 $2,000^\circ\text{C}$ 以上の温度に加熱し光ファイバとする。VAD の場合にはここで直径が約 3 万分の 1 ぐらいになり、通常 $125 \mu\text{m}$ の径となる。光ファイバ径は線引直後にレーザにて測定され、キャプスタンの巻取りスピード

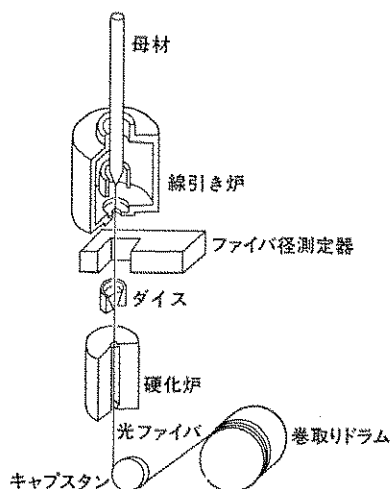


図 4 光ファイバ線引き装置の構成

にフィードバックされる。さらに線引き炉の温度等をコントロールすることによって、ファイバ径を $125 \pm 1 \mu\text{m}$ に制御する。

径を測定した直後、裸ファイバにプラスチックをコートする。いかに傷のつかないままプラスチックをコートするかということが重要なポイントである。このコートしたプラスチックを熱又は光によって硬化させ、キャプスタンで巻取る。硬化させるまではファイバが硬いものと接触することを防ぎ、表面に傷をつけないようにしている。

3.2 ファイバ強度評価装置

図5は引っ張り試験装置であり、チャック間に保持したファイバを一定速度で引張り、強度を測定する。この引っ張り試験装置の開発当初は、いかにこのチャック部分に工夫をこらすかということが重要な課題であった。うまくチャックしないとこのチャック部分で破断し、チャックの強度評価になってしまう。このためチャック部は大抵 10 cm ぐらいの径として、外周にソフトなものを巻きつけることによりこの問題を解決し、真のファイバ強度を求めることを可能にした。

通常、引っ張り強度試験は 10 m~20 m の長い間隔で行う。光ファイバの破断するまでの伸びは約 6% であるので、10 m 長のファイバ

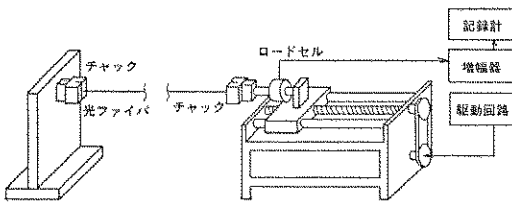


図5 引っ張り試験装置の構成

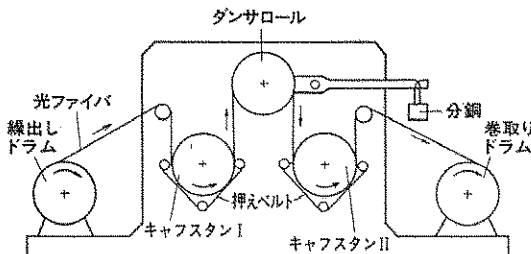


図6 ブルーフテスト装置の構成

では 60 cm ぐらい伸びる。“石英ファイバがゴムのように伸びる”。最初に見た人は、こんなに伸びるものかとびっくりした。

図6は、ファイバの信頼性に関連する試験機で、強度を保証するためのブルーフテスト装置である。製造したファイバに一たんある程度の負荷をかけその負荷を通過したものについてだけ、実際にケーブル化する。分銅をつけ、ファイバに 1%、2%、3% の負荷を与え、強度の弱いファイバはあらかじめカットしてしまい、高強度ファイバのみ実用に供する。

したがって、このブルーフテストをどのぐらいの歩どまりで通過し得るファイバを製造できるかが、製造プロセスでは非常に重要な問題である。現在では、3% 程度のブルーフテストをかけても充分歩どまりの高い製造技術が実用化されている。

3.3 製造技術の改善による高強度化

光ファイバ強度の要因と製造工程との関係は表2のようにまとめられるが、これら工程の改善策を述べる。

i) 母材

ファイバ母材の内部に泡や不純物が入っているのは、これはもう基本的にどうにもならない。したがって、まず母材品質をいかに均一なものにするかということが重要である。光ファイバの母材のコア部分は気相法でつくられ、非常に高純度な原料が使われているので不純物はほとんど入らないが、クラッド部分については、現在なお、天然石英が使われている場合があり、その天然石英の中には何らかの夾雑物が入っていることがある。それがあると強度劣化の原因

表2 光ファイバ強度の要因

製造工程	要因
母材製造	母材品質（均一性、泡、不純物）
	表面傷
線引き	炉内ダスト
	線引き条件
被覆	接触傷
	被覆材質

になる。その他、製造プロセスにおいて生ずる表面傷が強度劣化要因となる。この表面傷を取り除くため線引き前に弗酸処理し、さらに火炎研磨を行なっている。

図7はファイバ強度に及ぼす母材表面処理の効果を示す。横軸は強度で、縦軸は破断確率をワイブル分布で示してある。未処理の場合(A)には弱い部分が多く、大体30%近くが弱い強度部分になっている。

火炎研磨だけ行った場合(B)は、表面の傷がかなり取り除かれる結果高強度部分が多くなっている。

(C)は、弗酸に浸漬し、その後、火炎研磨したものである。この場合には高強度部分が増加し、弱点が1点しか見い出されなかったことを示している。

図8は母材が異なる光ファイバのプルーフテスト

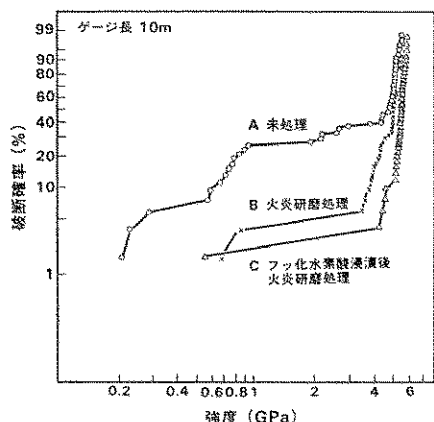


図7 光ファイバ強度に及ぼす母材表面処理の効果

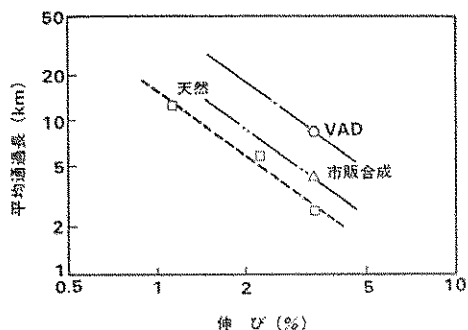


図8 母材が異なる光ファイバのプルーフテスト結果(被覆:シリコン)

スト結果を示す。クラッド部分を天然石英管で製造した場合、どうしても内部に小さな不純物が残っていたり、また、傷があったりするため、平均通過長が最も短くなっている。市販の合成石英をクラッド管にした場合、かなりの高強度化が実現している。最も高強度なファイバを得ているのは、ファイバ全体をVADで製造した場合である。その場合、3%のプルーフテストでも平均通過長が9kmぐらいであることを示している。海底ケーブル用の光ファイバはこの方法で作製した光ファイバが用いられている。

ii) 線引き炉

線引き炉として用いているカーボン炉もしくはジルコニア炉は、2,000℃近い高温になると、その炉自体が消耗してダストを生じる。これがファイバの表面に付着すると、ファイバの強度劣化の原因になる。

図9は、炉の中でダストがどのように発生しているかということを実際に測定したデータである。炉を加熱する電力の変化に応じて発生するダストの数を示している。電力を100%まで上げるまでに、2段階のステップをおいているが、最初の段階で32%を供給すると、それと同時に多くのダストが発生していることが観測される。さらに50%にし、100%の電力を供給するまでの約50分間、かなりのダストが発生している状況が見られる。

このことは、ファイバの線引きにおいて、線

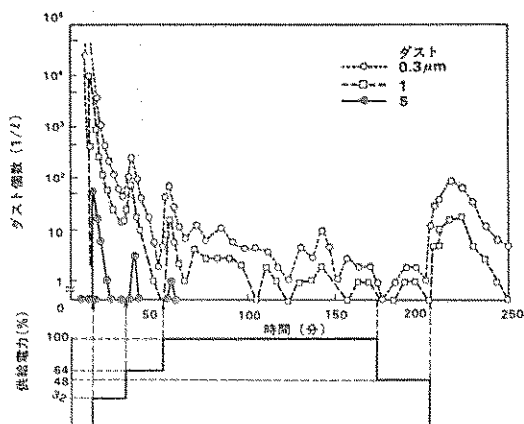


図9 線引き炉内ダスト発生量の経時変化

引き炉がある定常状態になるまで線引きしてはいけない、ということを示している。定常状態になっても、カーボン炉では $1\mu\text{m}$ ないし $0.3\mu\text{m}$ のダストがかなり発生している。このダストをどのように取り除きながら線引くかということが重要な課題である。

ダストを取り除く一つの方法として、炉内ガスを排気する方法がある。通常、炉心管内部には不活性ガスのアルゴンもしくは窒素を流しているが、そのガスを、一番効率のいい状態で排気する場合と、排気しない場合でのファイバ強度の比較を図 10 に示す。やはり、排気した場合にはダストが取り除かれてしまう結果、高強度のファイバが得られることを示している。

Ⅲ) 被覆

ファイバが炉の中から出てきた後、部屋の外気に直接触れる場合と、さらにそれを触れないようにする場合とあるが、高強度ファイバの場合は、外気に触れないようにして被覆用ダイスのところまで持っていく方法がとられている。また、光ファイバの線引き装置全体をクリーンルームの中に入れて、外気にさらされたとしても傷がつかないようにという考慮を払っている設備もある。

図 11 は光ファイバ強度のコート膜厚依存性を示す。裸の場合は、ゲージ長がただだか 20cm の試験結果でも非常に強度が低い。また膜厚が $5\sim 10\mu\text{m}$ のプライマリーコートをした場合

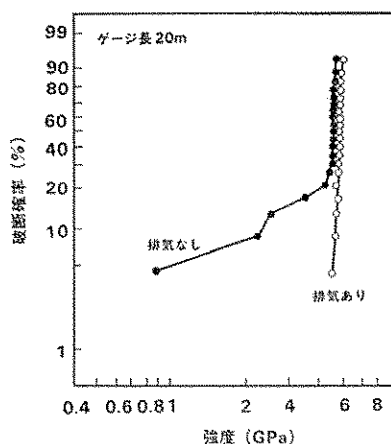


図 10 光ファイバ強度に及ぼす炉内ダスト排気の効果

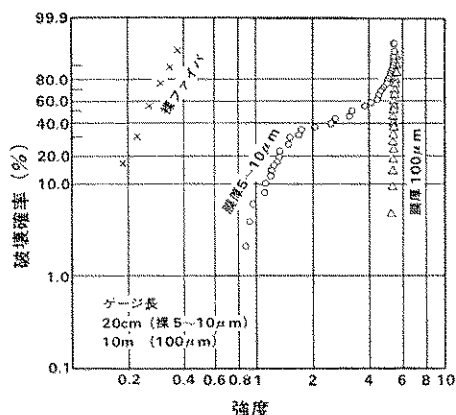


図 11 光ファイバ強度のプライマリーコート膜厚依存性

でもまだ充分な強度は得られず、 $100\mu\text{m}$ 以上でようやく高強度ファイバが得られることを示している。

4. 光ファイバの疲労特性

ここまでファイバの強度を向上させる手法について述べたが、実際の環境で使う場合にはそれぞれの雰囲気において疲労が起こり、強度が低下してくる。その疲労特性について述べる。

図 12 は光ファイバの疲労特性試験機を示す。上の図は、ファイバを巻きつけておいて荷

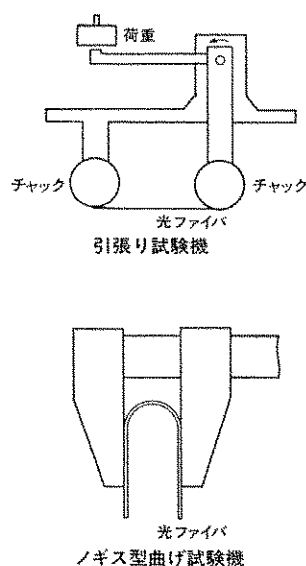


図 12 光ファイバの疲労特性試験

重をかけておくことで静疲労試験を行う方法であり、破断するまでの時間を測定するものである。下の図は、曲げ試験である応力をかけておき、この曲がった部分が切れるまでの時間を測定する方法である。

表1の(4)、(5)式が疲労特性を示している。式中の n が疲労係数であり、この係数が大きいほどファイバの疲労強度は強いということを示している。図13は静疲労特性を示しており、横軸の負荷応力に対して、縦軸は破断するまでの時間を示している。それぞれ、空気中の場合、蒸留水の中に入れた場合、また、蒸留水中で温度を上げていった場合、の測定結果を示

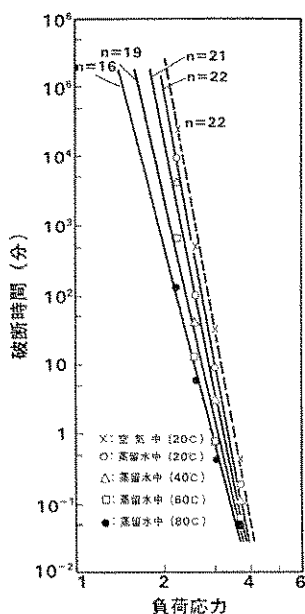


図13 光ファイバの静疲労特性

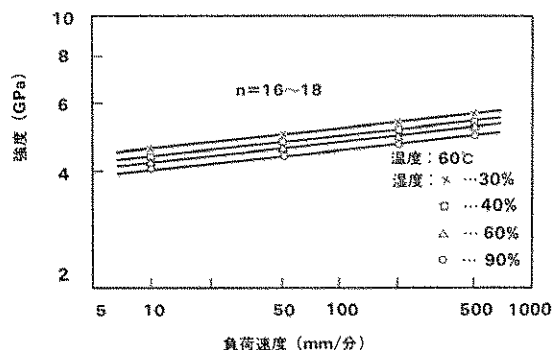


図14 強度の負荷速度依存性(動疲労)

している。

蒸留水中、しかも 80℃ で測定すると、 n が 16 と非常に小さくなり、それだけ早く破断に至ってしまう。温度が下がるに従って n が大きくなっている。空気中の場合、 n が 22 と最も安定している。

又、湿度の影響があり、湿度が高くなればなるほど n が小さくなり、破断時間が短くなっていく。これから、ガラス表面に水分が付着してそこから疲労破壊が進行するとが裏付けられる。

図14は動疲労特性を示す。動疲労とは、ある引っ張り速度で負荷をかけていったときどのくらいの強度で破断するかということを示しており、速いスピードで引っ張り試験をした方が強度が高くなる。スピードが零の場合、静疲労特性と同等となる。ここでも、湿度がだんだん高くなるに従って、又、温度の高い方が強度が弱くなっている。

この水分の接触をいかに防ぐかということについては、メタルコートファイバ等が考えられている。図15はそのファイバの動疲労特性を示す。横軸は破断時間、そして縦軸は応力（k psi）を示している。各々のラインの上の領域ではすべて破断し、ラインの下ではその応力でも安全であるということを示している。通常ファイバでは破断領域にあっても、15 μ m の Al をコートしたファイバでは1年経過後も破断しておらず、メタルコートの有効性を示している。

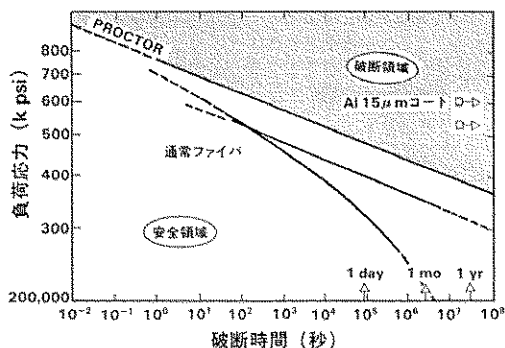


図15 金属コートファイバの動疲労特性

5. 実用ファイバの強度信頼性

5.1 海底ケーブル用ファイバ

図 16 は、実際に海底にケーブルを敷設する際の様子を示している。敷設する際は、その自重が船の先端部にかかる。したがって、この自重に耐えられるだけのファイバ強度が保証されている必要がある。また、何か障害が起これば、海底からケーブルを引き上げる際には、真ん中から吊り上げるので2倍の力がかかる。海底ケーブルは、ファイバだけではなく、海底で何かに切られたりしないようメタル等が巻かれている。それらの重さでファイバはかなり伸びており、それらの伸びに耐え得るように海底ケーブルには高強度ファイバが要求される。

図 17 は、それぞれの深さに対応して、用いる光ファイバにどれだけのブルーフテストが必要であるかということを示している。たとえば5,000メートルの深さの海底ケーブルの場合には、実際の補修作業で0.7%の負荷が4時間ぐらいかかるということが予測され、ファイバにそれだけの負荷がかかっても切断しないためには、約2.2%程度のブルーフテストを通過させる必要があるということを示している。これ

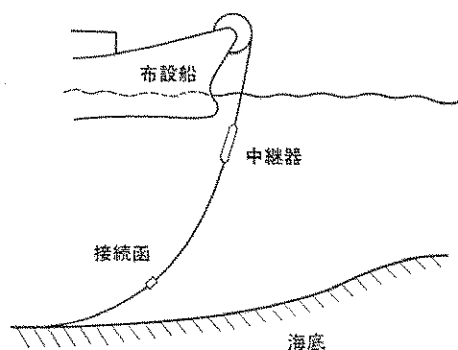


図 16 海底ケーブル敷設の様子

表 3 UV 心線のブルーフテスト結果 (クラッド母材: 市販合成石英ガラス)

ブルーフレベル (%)	平均通過長 (km)	5kmの歩留り (%)	ファイバ総長 (km)	破断回数 (回)
2.2	19.00	88	57.00	2
3.3	9.17	80	36.68	3

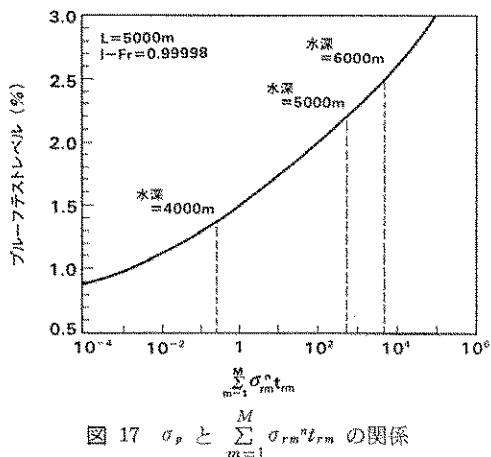


図 17 σ_p と $\sum_{m=1}^M \sigma_{rm}^n t_m$ の関係

は、2.2%のブルーフテストを通過したファイバであれば実際作業で破断しない確率が0.99998になる、ということを計算したものである。

表3は海底用光ファイバのブルーフテスト結果を示す。総長57kmのファイバについて2.2%のブルーフテストをしたときに、破断回数が2回で5kmを通過する確率は88%、平均通過長は19kmである。さらに、ブルーフテストを3%に上げると、総長36kmのファイバでの破断回数は3回であり、5kmの長さが通過し得る歩どまりは80%であるということを示している。

この春の学会でアメリカATTから、5%のブルーフテストで90%程度の歩どまりを示したというデータが発表された。アメリカで使っている線引き炉は主にジルコニア炉であり、ジルコニアの表面から出てくるダストをいかに防ぐかということに工夫をこらして、極めて高強度のファイバを製造した結果の報告である。

わが国ではすでに海底ケーブル用として、2~3%のブルーフテストを通過したファイバをケーブル化し、実際に敷設している。

5.2 接続部の強度

ファイバを、接続する際、まず被覆を除去し、その後、通常はアーク溶接を行っているが、火災で融着する方法もある。被覆を除去する場合に、機械的に除去する方法と酸処理で除去する方

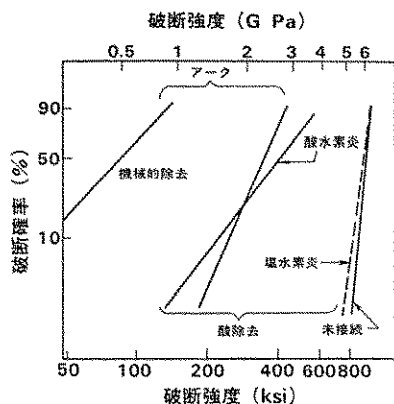


図 18 光ファイバ融着接続部の強度

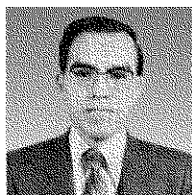
法とでは強度に大きな差がでてくる。機械的除去の場合にはファイバ表面に傷をつけてしまう結果、強度が弱くなる。

また融着も、アークで行う場合に比べて、酸水素炎を用いると、強度が改善される。さらに酸水素炎よりも塩水素炎で融着接続した方が強度が非常に高く無接続のファイバとほぼ同じ強度が保証されている(図 18)。したがって、海底ケーブル等で長いケーブル長のものをつくりた

い場合に途中で接続したケーブルを使う必要があり、その場合には、被覆を酸で除去し、塩水素炎で融着する方が高強度接続部が得られる。

現在すでに石英系光ファイバは全国に敷設されており、さらに海底でも広帯域のファイバとして用いられつつある。それらは強度特性上、限界ぎりぎりの理想に近い状態で使用されている。次世代ファイバとしての弗化物ファイバ、また、現在使われているプラスチックファイバ、さらに、多成分ファイバ等、種々の光ファイバがあるが、それらのファイバの中で、強度的には石英系ファイバが最も高強度であり、高信頼性のファイバである。

〔筆者紹介〕



稲垣伸夫 (いながきの おお)
1965 年東北大学金属工学科修士終了後電々公社武蔵野研究所にて金属防食の研究に従事、その後磁気記録媒体、光ファイバ製造技術の研究を経て、現在、茨城電気通信研究所部品研究部 主席研究員。