

# 論文 紫外線による各種繊維の劣化現象の評価方法に関する基礎研究

山口明伸\*1・西村次男\*2・魚本健人\*3

**要旨：**一方向繊維強化プラスチック(FRP)ロッドを構成する各種繊維の紫外線による劣化性状を検討した結果、アラミド繊維には強度低下が認められたが、ガラス繊維およびカーボン繊維に強度低下が認められなかった。これは、アラミド繊維では非結晶部分が何らかの影響を受け欠陥を生じている可能性が高いと考えられる。そこで、材料の破壊を鎖の破壊と考えるワイブルの weakest link 理論を用いることにより紫外線劣化したアラミド繊維の強度推定を試み、その適用性を明らかにした。

**キーワード：**連続繊維補強材、紫外線劣化、ワイブル分布

## 1. はじめに

コンクリート用補強材として用いられる繊維補強プラスチック (FRP) ロッドは高強度、高耐食性、軽量、非磁性体等の特徴を有することから、建設分野における利用の可能性があり種々の検討が成されている[1]。既に、各種繊維とそれを用いた各種ロッドの力学的特性、耐アルカリ性、耐候性について実験的に検討し、その結果を報告している[2]。特に耐候性に関しては、アラミド繊維、ガラス繊維、およびカーボン繊維で一方向強化された FRP ロッドを自然環境で暴露した場合の力学特性の変化を検討した結果、特にアラミド繊維を用いた FRP ロッドの強度低下が大きく、その原因が紫外線劣化である可能性が高いことを報告している[3]。アラミド繊維は、分子結合内に結晶部分と非結晶部分が存在するため紫外線により結合能力の低い非結晶部分が何らかの影響を受け、繊維内に欠陥部分を生じている可能性が高いと考えられる。

そこで本研究では、アラミド、ガラス、カーボンを含んだ各種繊維の紫外線による劣化性状を促進試験により実験的に検討した結果を報告すると共に紫外線により劣化した繊維の強度を推定することを試みた。

## 2. 実験概要

実験に使用した各種繊維の促進試験前の材料特性および試験条件は、試験結果と併せて表-1 に示した。紫外線照射時間は 10,50,100,500,1000 時間とし、1 時間当たりの紫外線照射量は約 0.2MJ/m<sup>2</sup> (銚子における 6 月の平均放射照度) とした。試料は図-1 のように繊維 1 本ずつのモノフェラメントとして紫外線照射を行い、各照射時間終了後、変位制御型オートグラフ (5kgf) を用いて室温 (20±3°C) において引張試験を行った。測定項目は破断荷重 (gf)

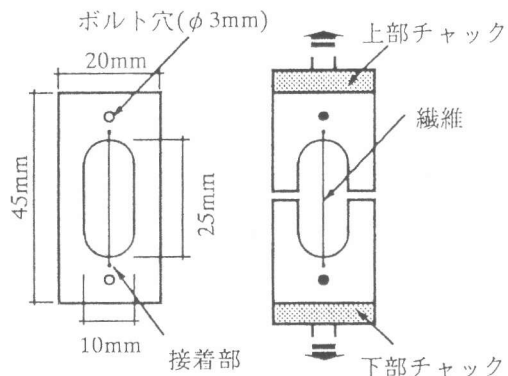


図-1 供試体概略図

\*1 東京大学大学院 (正会員)

\*2 東京大学生産技術研究所、技術官 (正会員)

\*3 東京大学生産技術研究所、教授、工学博士 (正会員)

表-1 各種繊維の引張強度試験結果

	照射時間(hours)	0	10	50	100	500	1000
アラミド	AVG (kgf/mm <sup>2</sup> )	341	289	239	227	174	152
	標準偏差 (kgf/mm <sup>2</sup> )	51	36	40	44	43	36
	変動係数 (%)	15.0	12.3	16.7	19.5	24.5	23.8
カーボン	AVG (kgf/mm <sup>2</sup> )	182	181	184	182	162	121
	標準偏差 (kgf/mm <sup>2</sup> )	39	71	43	39	35	21
	変動係数 (%)	21.5	39.4	23.1	21.4	21.6	17.7
ガラス	AVG (kgf/mm <sup>2</sup> )	251	268	343	254	260	302
	標準偏差 (kgf/mm <sup>2</sup> )	87	66	55	75	74	90
	変動係数 (%)	34.7	24.6	16.0	29.3	28.5	29.9

と伸び量 (mm) である。試験本数はいずれの条件も 20~30 本とし、クロスヘッドスピードを 0.5mm/min とした。

### 3. 実験結果

図-2 および表-1 に静的引張試験によって得られた各種繊維の紫外線照射後の平均繊維強度、標準偏差および変動係数を示す。また、図-3 に各繊維の破壊確率の密度分布と累積分布を示す。紫外線照射後のカーボン繊維の強度はほとんど変化がみられなかった。また、ガラス繊維の強度には促進試験後の強度変化はほぼ標準偏差内であるため紫外線照射による明確な強度低下とは認められなかったが、屋外暴露約 15 後 (東京における紫外線の平均年間日射量は 264.3 (MJ/m<sup>2</sup>) であり、屋外暴露試験は本実験の約 1500 時間に相当する) にはある程度の強度低下がみられた。さらに、アラミド繊維の場合は照射時間が増加するに従い確実に強度が低下しており、紫外線による繊維の劣化を生じているものと考えられる。図あるいは表から分かるように、アラミド繊維の場合、暴露初期に強度が大きく低下し、照射 500 時間後には全体の約 50% 程度の強度低下が生じていることが分かる。

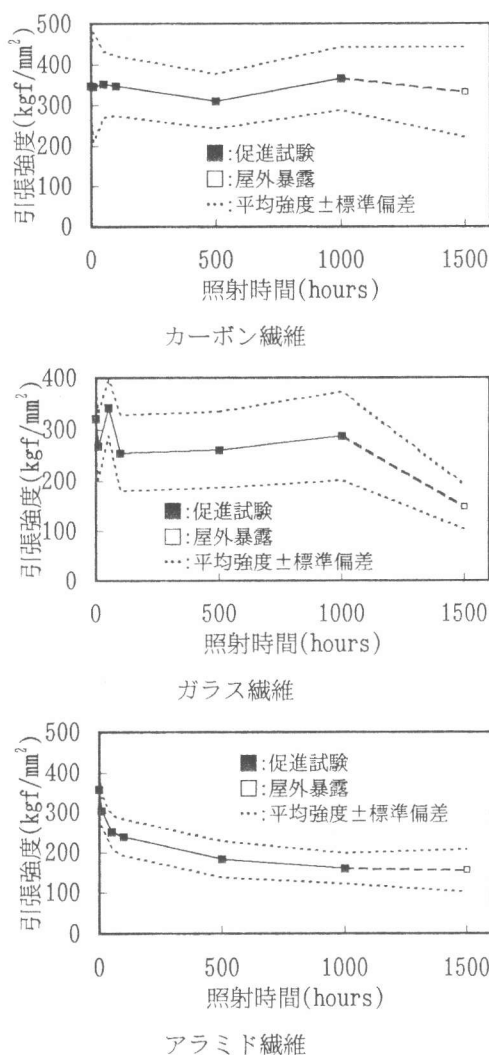


図-2 紫外線照射後の引張強度

### 4. 紫外線劣化した繊維の強度推定

高分子材料であるアラミド繊維は結晶部分と非結晶部分から構成されるため、その破壊は主に結合力の弱い非結晶部分に存在する欠陥を起点として発生すると考えられる。したがって、繊維

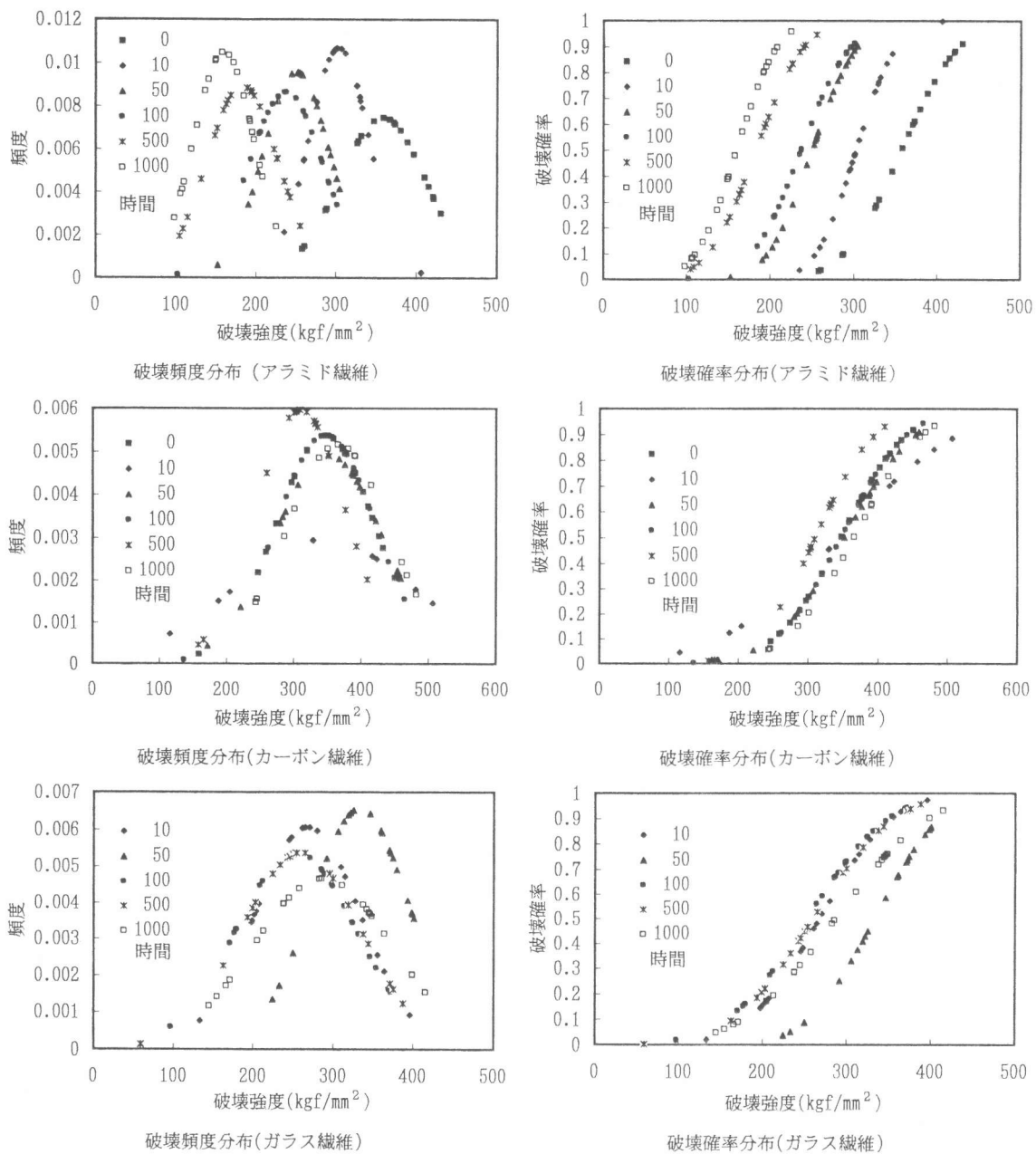


図-3 紫外線照射後の破壊確率

強度は繊維の平均的な性質ではなく繊維内に含まれる最大欠陥により支配されると考えることができる。既に筆者らは、アラミド繊維のアルカリおよび酸性の溶液による劣化のメカニズムを定量化するために、材料の破壊を鎖の破断と考えたワイブルの weakest link 仮説[4]を用いた強度推定方法を提案し、その適用性を確認している[2]。そこで本研究では、紫外線による劣化現象に関しても同様のワイブルの weakest link 仮説を用いることを考え、繊維の紫外線照射後の強度推定を試みた。この仮説によれば、ある荷重  $X$  で一つの結合が破壊する確率を  $F$ 、 $n$  個の結合を持つ鎖の破壊確率を  $F_n$  とすると、 $n$  個の結合のうちどれか一つが破壊しても鎖は破壊することから、 $n$  個の結合を持つ鎖が破壊しない確率  $1 - F_n$  は  $n$  個の結合すべてが破壊しない確率に等しい。

$$1 - F_n = (1 - F)^n \quad (1)$$

また、ワイブルは(1)式中の $F$ を試料内の結合点の応力 $\sigma$ と最大応力 $\sigma_0$ との比として表した。

$$F = (\sigma/\sigma_0)^m \quad (2)$$

ここで、 $m$ :ワイブル係数

したがって、(2)を(1)式に代入すれば、(3)式が得られる。

$$1 - F_n = (1 - (\sigma/\sigma_0)^m)^n \quad (3)$$

$$\cong \exp(-n(\sigma/\sigma_0)^m)$$

$$= \exp(-(\sigma/\alpha)^m)$$

ただし、 $\alpha = n^{\frac{1}{m}} \sigma_0$  (4)

また、平均強度 $\sigma_{ave}$ は(5)式により与えられる。

$$\sigma_{ave} = \alpha \cdot \Gamma(1 + 1/m) \quad (5)$$

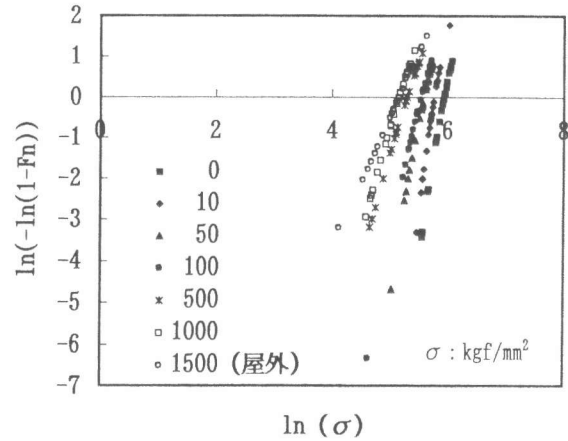
そこで、(5)式中の未知数 $m$ および $\alpha$ の値を決定するため、(3)式の両辺の対数を2度とると、

$$\ln(-\ln(1 - F_n)) = m \ln(\sigma) - m \ln(\alpha) \quad (6)$$

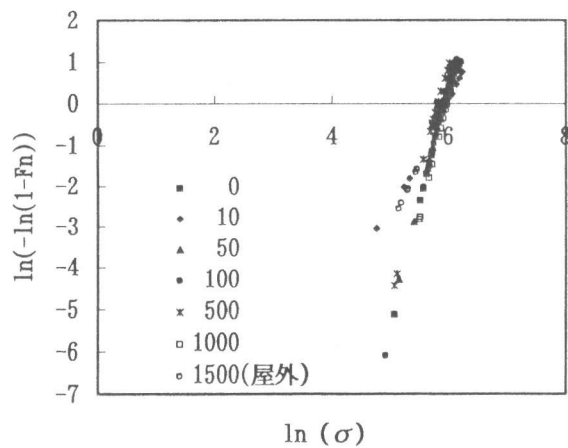
即ち、 $Y = mX + b$  (7)

となり、(6)式は(7)のような一次式になる。したがって、未知数 $m$ および $\alpha$ は直線式(7)から求めることができる。

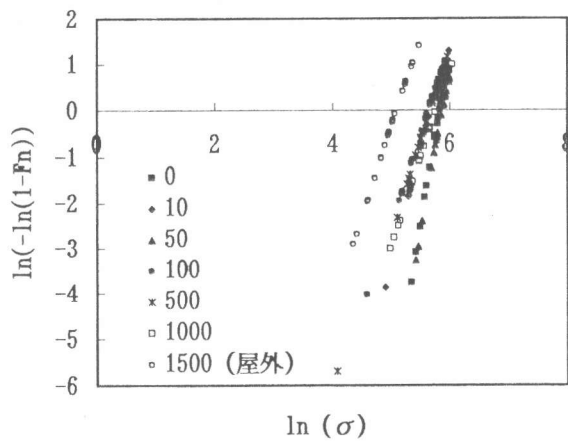
各紫外線照射時間ごとの各種繊維の強度試験結果を図-4にワイブル分布として示した。図-4より、アラミド繊維の場合、各照射時間毎にほぼ直線的な分布を示しており、照射時間が長くなるにしたがい分布は左へ移行していることから、繊維強度に及ぼす紫外線照射時間の影響をweakest link理論により評価できると考えられる。またカーボンの場合は、ほぼすべての照射時間で分布が重なり合っており、紫外線による劣化がないと言える。またガラス繊維の場合では、促進試験後の繊維の分布はほぼ一致しているが、屋外に暴露したものは、やや劣化の傾向を示し



(a)アラミド繊維



(b)カーボン繊維



(c)ガラス繊維

図-4 繊維強度のワイブル分布

ている。これは、ガラス繊維が紫外線以外の環境要因により劣化していることを示している。図-4の結果と(6)式を用いて、各照射時間ごとのワイブル係数 $m$ および $\alpha$ の値を算定した結果を表-2 および図-5に示す。 $m$ は図-4の直線の傾きであるから強度のばらつき具合によって変化するが、各強度とも強度の標準偏差と同様に紫外線照射による影響は大きくない。 $\alpha$ の値は、アラミド繊維の場合は、照射時間が増加するに従い減少しており、明らかに紫外線による影響を示しているが、他の繊維については、明確な相関がみられなかった。この現象と(4)式から、アラミドの繊維強度は乗数を持つ変数である $n$ すなわち繊維内の欠陥数に支配されていると考えられる。

そこで、求めた $\alpha$ の値を用いて、紫外線照射により生じるアラミド繊維の欠陥数( $n$ )を(4)式から算出した結果を図-6に示す。なお、解析に使用する $m$ の値は表中の計算結果の平均値を用いた。図のように、紫外線照射時間の増加に伴いアラミド繊維内の欠陥数( $n$ )が直線的に増加していることが確認できる。もしこの関係が継続すると仮定すると図中併せて示した回帰式を用いて長期材令で発生するアラミド繊維の欠陥数を予測することができ、繊維強度を推定するための $\alpha$ の値をそれぞれ求めることができる。

以上の結果を用いて、紫外線を照射したアラミド繊維の強度低下を推定した結果を図-7に示す。図のように強度低下の推定曲線は実験による実測値に非常に良く一致している。また、図-7に併せて示した屋外暴露15ヶ月後のアラミド繊維の引張強度も促進試験の結果を用いて行った強度推定結果と極めてよく対応していることがわかる。

表-2 ワイブル係数 ( $m$ ,  $\alpha$ ) の計算結果

	時間	0	10	50	100	500	1000	1500
アラミド	$m$	8.4	9.5	7.6	6.5	4.8	4.9	3.2
	$\alpha$	379	318	266	254	199	174	173
カーボン	$m$	5.7	2.7	5.2	5.9	5.8	5.6	3.4
	$\alpha$	372	384	375	394	354	393	370
ガラス	$m$	7.1	4.7	8.1	3.9	3.7	3.8	3.9
	$\alpha$	343	292	363	281	288	317	164

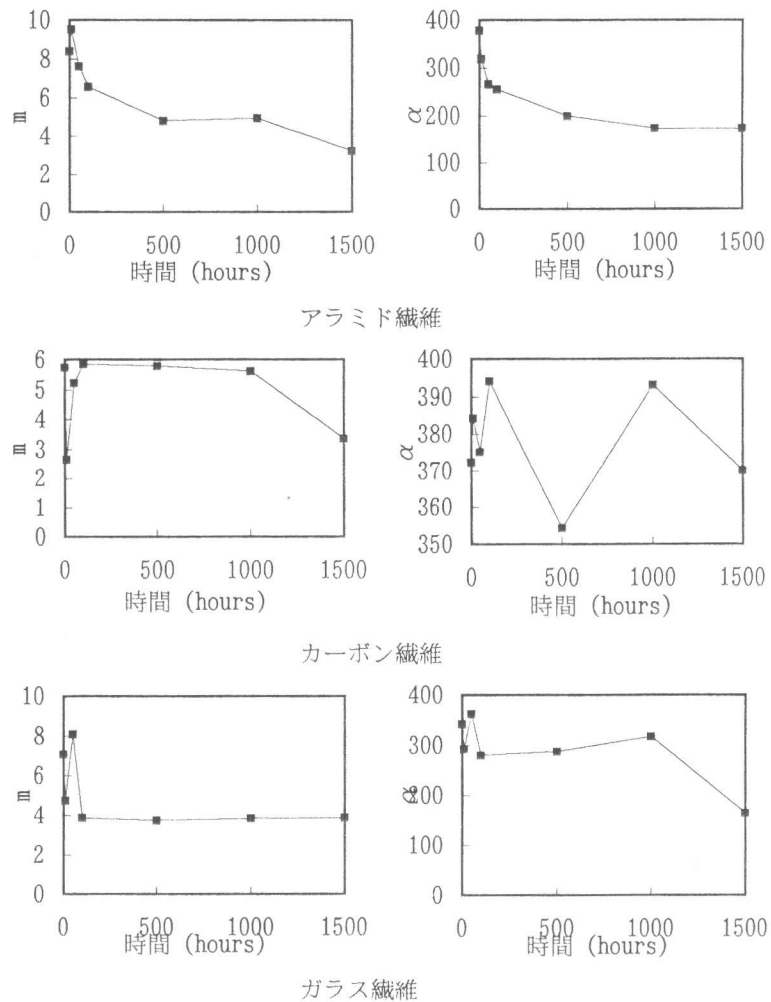


図-5  $m$ および $\alpha$ の経時変化

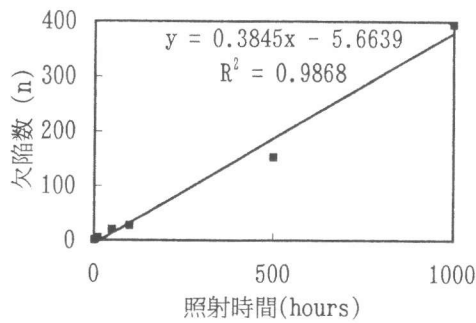


図-6 アラミド繊維内の欠陥数

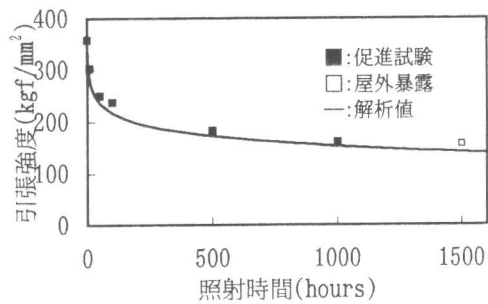


図-7 繊維の推定強度

したがってワイブルの weakest link 理論を用いることにより紫外線照射後のアラミド繊維の強度推定が可能であることが明らかとなった。

## 5. 結論

本研究の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) アラミド繊維は紫外線照射により劣化し、強度低下を生じる。
- (2) アラミド繊維は、紫外線照射により繊維中に不規則な欠陥部分を生じ、繊維の強度低下を引き起こしている可能性が高い。
- (4) アラミド繊維の紫外線照射による強度低下は、材料の破壊を鎖の破断と考えたワイブルの weakest link 理論により定量的に評価できることが明らかとなった。また、本推定手法は屋外暴露した繊維の強度推定にも適用可能であることを確認した。

なお、本研究で明らかになったことから、特にアラミド繊維を長期間日照のあたる場所に保管または設置することは望ましくないといえよう。

**謝辞：**本研究費の一部は平成7年度科学研究費一般研究A（課題番号 07405022、代表研究者：魚本健人）によるものであることを付記する。また、本論文をまとめるにあたり、実験に協力して頂いた芝浦工業大学金井建二君に感謝の意を表す。

### [参考文献]

- [1] 魚本、西村：FRPロッドの静的強度と弾性係数、土木学会論文集、No.472/V-20、pp77-86、1993.8
- [2] 勝木、魚本：アラミド繊維の耐アルカリ性および耐酸性の評価方法に関する一試案、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、1995.6
- [3] 魚本、西村：プレストレストコンクリート用FRP緊張材の特性(10)内陸および海洋環境下に暴露した各種FRPロッドの引張特性、生産研究投稿中
- [4] Weibull：A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics, Vol.13, Sept.1951, pp.293-297