

論文

UDC 669.14.018.8 : 669.15'24'26-194.3 : 620.194.2 : 539.375

17Cr-11Ni ステンレス鋼の応力腐食割れ破断寿命の確率分布*

柴田 俊夫**・竹山 太郎**

Probability Distribution of Failure Times of Stress
Corrosion Cracking of 17Cr-11Ni Stainless Steel

Toshio SHIBATA and Taro TAKEYAMA

Synopsis:

Probability distribution of failure times of stress corrosion cracking of 17Cr-11Ni stainless steel under constant stresses of 5 to 30 kg/mm² in 25%, 35%, and 45% MgCl₂ solutions at their boiling temperature has been analysed by using the Weibull probability paper which is widely used in reliability engineering. Probability distribution of failure times was found to be described as single or composite Weibull distributions. The composite distribution consisting of mode 1 and mode 2 distributions is found at the low stress conditions. Mode 1 is observed at the earlier failure time region and its shape parameter is larger than unity, depending on the stress and temperature examined. On the other hand, the shape parameter of mode 2 which is observed in the latter region of failure times shows almost a constant value of unity. The condition which gives the shape parameter of unity is likely to correspond to a chance failure or random occurrence of crack initiation, while the shape parameter larger than unity indicates a wearout failure which seems to correspond to crack propagation. Thus, the type of distribution of failure times is likely to connect with the failure mode, i. e., crack initiation or propagation.

1. 緒 言

孔食, すき間腐食, あるいは応力腐食割れ等の不均一腐食は本質的に確率的性質を有しているので, 実験室試験の結果や実際の装置における材料寿命を定量的に評価するためにも, 不均一腐食における材料寿命の確率的評価法の確立¹⁾が望まれている。材料強度や疲労寿命の確率的取り扱い²⁾³⁾ははやくからなされているが, 応力腐食割れ寿命についての検討は少なく, わずかに BOOTH⁴⁾⁵⁾, LOCKS⁶⁾, HARSHBARGER ら⁷⁾, CLARK ら⁸⁾, De BORDT⁹⁾, 浅輪¹⁰⁾らの研究がみられるにすぎない。

本研究では信頼性工学¹¹⁾において広く用いられているワイブル確率紙を用いて, 17Cr-11Ni ステンレス鋼/沸とう MgCl₂ 系における応力腐食割れ破断寿命の確率分布の解析を行つたので, これを報告する。

2. 実験方法

2.1 試料

実験に用いたオーステナイトステンレス鋼の組成は,

(C : 0.050, Si : 0.47, Mn : 1.48, P : 0.033, S : 0.015, Ni : 11.04, Cr : 17.47, Mo : 0.14, Cu : 0.14, N : 0.039)であり, SUS 304 鋼よりも若干 Ni 量が多いので, 以下これを 17Cr-11Ni 鋼と呼ぶ。2 mm 直径の供試材より線引きによつて, 0.35 mm 直径の細線を得, 長さ 130 mm の線状試片を約 300 本作成した。これらを石英アンプル中に真空封入し, 1050°C×15 min の焼なましを行い, そのまま水中急冷した。線状試片は約 10 mm の露出部を残し, 他は支持棒 (直径 2.5 mm の SUS 316 鋼) も含めて, シリコンシーラントを用いて被覆した。実験に先立つての表面前処理は行わなかつた。したがつて実験時の表面は真空焼なまし面である。

2.2 実験装置

実験装置の略図を Fig. 1 に示した。図の装置は荷重を直接下部に加える方法をとつている。実験に着手した当初には, STAEBLE ら¹²⁾の装置と同じくプーリを介して上部から荷重を加える方式をとつていた。この方式では滑車部の摩擦によつて負荷された荷重よりも小さく, しかも実験の度に変動する荷重を与えることが見出され

* 昭和 54 年 8 月 30 日受付 (Received Aug. 30, 1979)

** 北海道大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita 13-jo Nishi-8-chome Kita-ku, Sapporo 060)

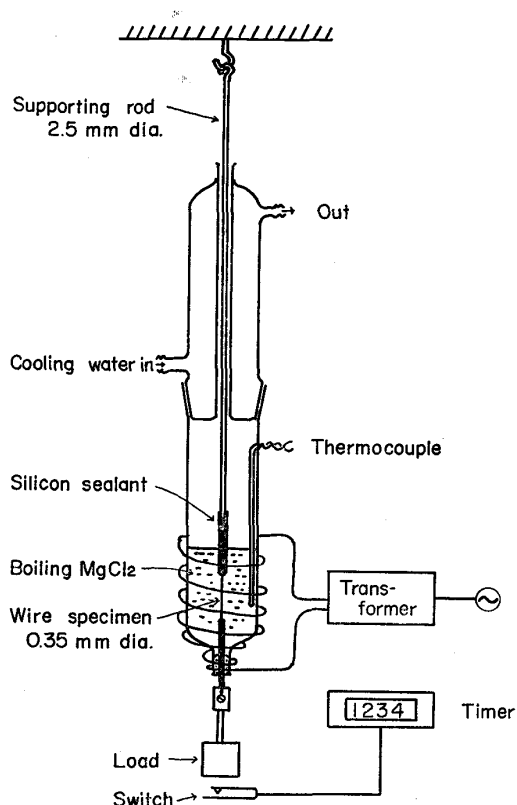


Fig. 1 Experimental apparatus for measuring failure times of the thin wire specimen in boiling MgCl_2 solutions.

たので、Fig. 1 の直接荷重方式に変更し、これを用いてほとんどの実験を行った。多数回の実験を行うために Fig. 1 の装置を 3 台用いた。

2.3 腐食溶液と実験方法

線状試片を Fig. 1 のセル中に設定し、荷重を負荷した後に、あらかじめビーカー中で沸とうさせ沸点を調整した MgCl_2 溶液をセル中に加えた。検討した実験温度は 154°C 、 126°C 、 111°C であり、これらの沸点を示す MgCl_2 溶液の濃度は CASALE¹³⁾ の値を参照するとそれぞれ 45%、35%、25% である。溶液に接触した時から破断に至るまでの時間をタイマーによって記録し、これを破断寿命とした。破断寿命が長いときには、腐食生成物によって溶液は着色したが、液更新は行わなかった。溶液の温度は AC 熱電対を用いて時々チェックしたが、必ずしも一定でなく $\pm 3^\circ\text{C}$ の範囲の変動があつた。同一の実験条件（応力、温度一定）に対して、20 個以上の破断寿命値を得、これをワイブル確率紙にプロットし、応力腐食割れ寿命の確率分布を解析した。実験後の試片の表面および破面は走査顕微鏡を用いて観察した。

3. 実験結果

3.1 応力腐食割れ寿命のワイブルプロット

ワイブル分布¹⁴⁾においては、破断寿命 t を確率変数として、累積確率分布関数 $F(t)$ は、

$$F(t) = 1 - \exp\{-(t-\gamma)^m/t_0\} \dots\dots\dots (1)$$

によって表される。ここで m は分布の形状を決定する形状パラメータ、 t_0 は尺度パラメータ、 γ は位置パラメータである。ワイブル確率紙を用いると上述のパラメータは容易に決定される¹⁵⁾。ワイブル確率紙の性質と、それによる応力腐食割れ寿命の解析例はすでに述べた¹⁾²⁵⁾ ので、ワイブルプロットの手順のみについて以下に述べる。同一条件において得られた破断寿命値を小さな値から大きさの順に並べ順序統計量とする。 n 番目の値の累積確率 $F(t)$ は測定総数 N として、 $F(t) = n/(1+N)$ によって与えられる。破断寿命値とそれに対応する累積確率 $F(t)$ をワイブル確率紙にプロットすると、ワイブル分布に従うならば直線が得られる。

沸点 154°C の MgCl_2 中における 17Cr-11Ni 鋼の応力腐食割れ破断寿命のワイブルプロットを Fig. 2、Fig. 3 に示した。Fig. 2 は Fig. 1 の直接荷重方式の装置ではなく、プーリを用いた上部荷重方式の装置を用いて得られた結果である。 30 kg/mm^2 と 20.7 kg/mm^2 の応力において一本の直線となるが、 16 kg/mm^2 と 10 kg/mm^2 では二本の直線で表され、長寿命側の直線の傾きは短寿命側のそれよりも小さい。これらの測定値を得た装置はプーリを用いているため荷重の小さなときに試片に加えられる荷重にばらつきの生ずるのが見出された。これが低応力値における測定値のばらつきを大きくし、二本の直線を与える可能性が考えられたので、

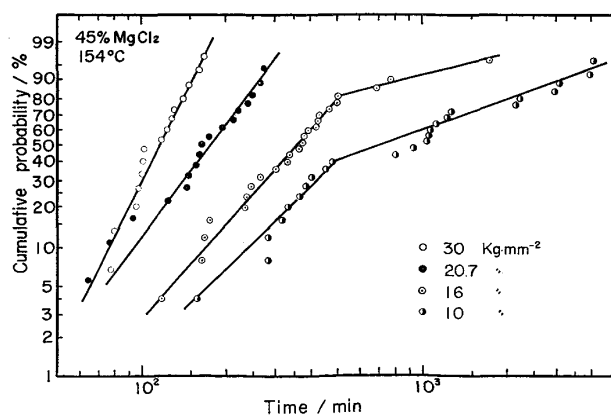


Fig. 2. Plots of the cumulative probability of failure times in Weibull probability paper. Data were measured by the pulley loading system. Single and composite distributions were observed.

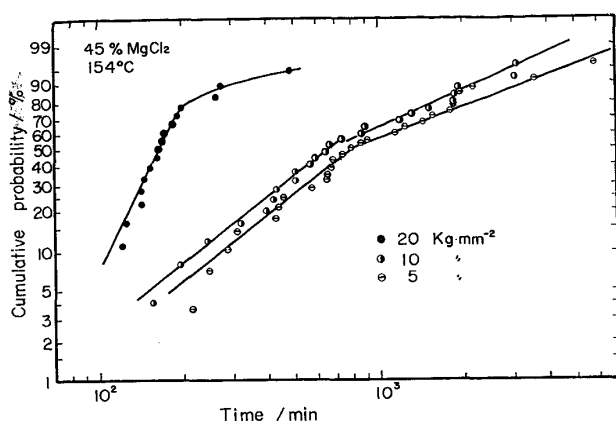


Fig. 3. Weibull plots of failure times which were obtained by using the direct loading system indicated in Fig. 1. No difference between Fig. 2 and Fig. 3 is observed.

Fig. 1 に示した直接荷重方式の装置を用いて再度実験を行つた。Fig. 3 がその結果である。Fig. 2 と全く同様な結果が得られ、荷重方式の差は認められなかつた。すなわち負荷応力の（若干の）変動は、ワイブルプロットにおける二本の直線の出現の原因とはなつていないと考えられる。

また Fig. 2, Fig. 3 の測定値の中には、露出部以外の個所で破断した場合の値も含まれているが、これを取り除いてプロットしてもほとんど同一の直線関係が得られた。したがつて他の場合についても破断個所が露出部以外であつた測定値も含めてプロットすることとした。ただし露出部以外で破断した試片の数は、いずれの場合も 10% 以下であつた。

Fig. 4 は 126°C 沸点、Fig. 5 は 111°C 沸点の結果である。これらはいずれも Fig. 1 の装置を用いて得られた結果である。126°C においてはいずれの応力値においても二本の直線となり、111°C では 5 kg/mm² の応力値を除き他は一本の直線となつた。

3.2 表面および破面の特徴

Fig. 2 および Fig. 3 の 154°C における試片について、実験終了後の表面を肉眼で観察すると、100 min 程度の破断寿命を示した試片では、初期の光沢表面を保つていたが、150 min 以上浸漬されて破断した試片の表面は黒色に変化していた。100~150 min の破断寿命を示した試片では光沢を保つたままのものと黒色表面のものとが混在していた。Fig. 4 の 126°C では 100 min まではほとんど表面変化が認められず、200 min 以降に黒色に変化したものと変化しなかつたものとが混在していた。しかし黒色表面を呈した試片の割合は 10% 以下であつた。さらに Fig. 5 の 111°C では、ほとんど表面

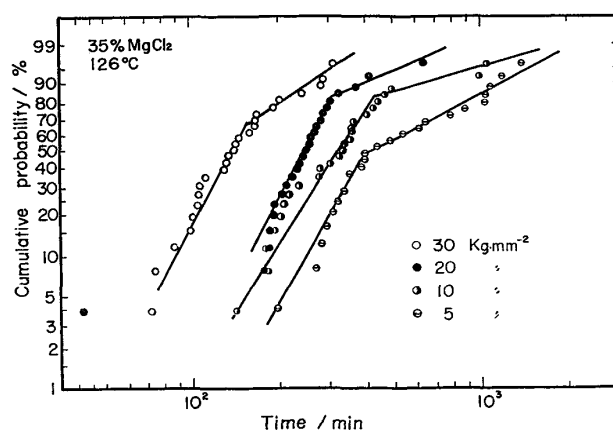


Fig. 4. Weibull plots which show composite distributions.

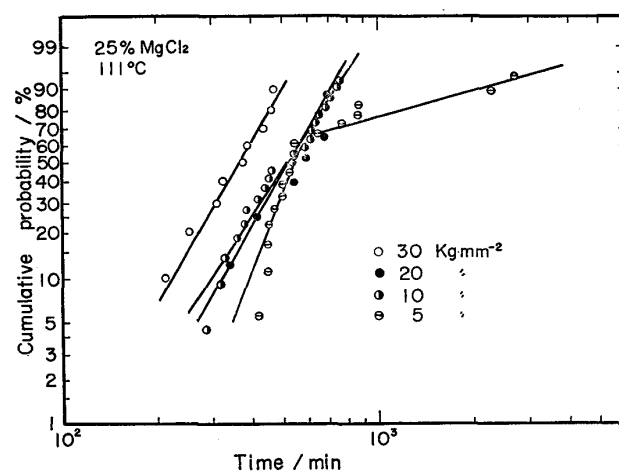


Fig. 5. Weibull plots which show single and composite distributions.

色調の変化は認められなかつた。

Photo. 1 は表面が黒色に変化した試片についての走査電顕写真である。(a)は破面であり(b)は表面である。いずれも厚い沈殿皮膜が形成しているのが認められる。Photo. 2(a), (b) は、表面が変色しなかつた試片であるが、浸漬前に生成していた酸化皮膜の浸食された個所が割れの起点となつているのが認められる。(b)のように孔食状の割れ起点の認められる例は極めて少なかつた。

4. 考 察

4.1 単一および複合ワイブル分布

Fig. 2~Fig. 5 に示したように、実験値のいずれもワイブル確率紙上直線で表されるので、この系の応力腐食割れ破断寿命の確率分布はワイブル分布に従うと結論することができる。

Fig. 2 が典型的な例であるが、高応力では傾きの大きな一本の直線となり、低応力では破断寿命が長くなると



(a) 45% MgCl_2 , 154°C, 5 kg/mm², $t=243$ min
 (b) 45% MgCl_2 , 154°C, 5 kg/mm², $t=243$ min

Photo. 1. Black thick film covers (a) fractured surface, and also (b) outer corroded surface which were obtained at 154°C.

ともに傾きが小さくなる。そして長寿命側にさらに傾きの小さな直線が現れる。低応力において傾きの小さな直線が現れ二本の直線となるのは、Fig. 2～Fig. 5 のいずれの温度においても認められる共通の特徴である。

二本の直線となるワイブルプロットは、二つの異なるワイブル分布がある一定の割合で混合している場合（混合ワイブル分布）と、一つのワイブル分布から他のワイブル分布へある時間を境界として移行する場合（複合ワイブル分布）に認められることが知られている¹⁶⁾。前者の場合二本の直線の折れ曲がり部は曲線となり、折点は

不明瞭であるが、後者の複合ワイブル分布では明確な折点が認められる特徴がある¹⁶⁾。Fig. 2～Fig. 5 において二本の直線の認められる場合には、折点は明確であるので、この系の応力腐食割れ破断寿命は複合ワイブル分布に従うと考えられる。

ここで複合ワイブル分布を $F(t)$ とすると、 $F(t)$ は折点 $t=\delta$ まではモード 1 のワイブル分布 $F_1(t)$ によつて表され、 δ 以降ではモード 2 のワイブル分布 $F_2(t)$ によつて表される。すなわち、

$$F(t) = F_1(t) \quad (0 \leq t \leq \delta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

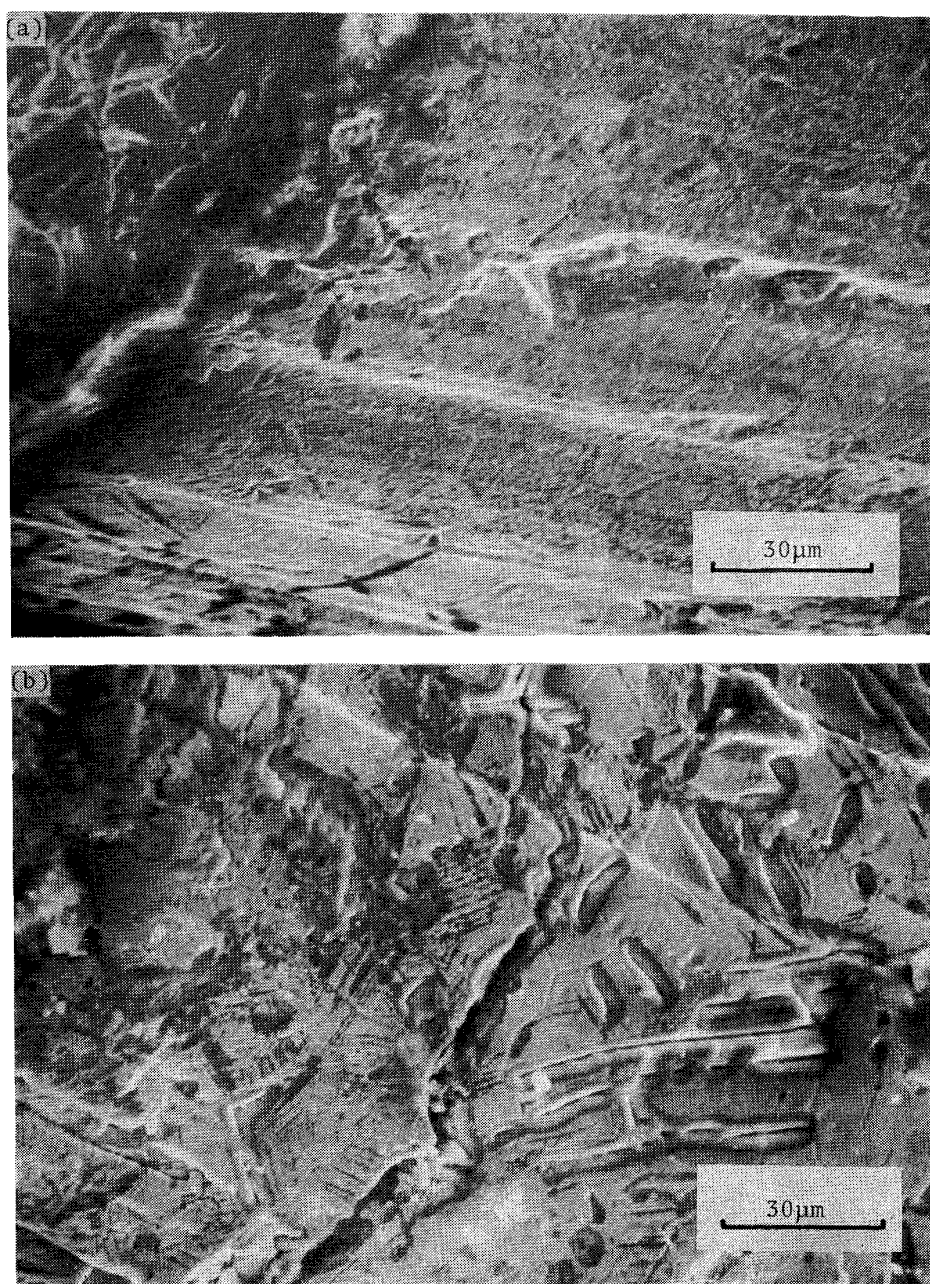
(a) 35%MgCl₂, 126°C, 5 kg/mm², $t=1\,047$ min(b) 35%MgCl₂, 126°C, 5 kg/mm², $t=1\,388$ min

Photo. 2. No black thick film is observed and cracks initiate at the attacked sites of air-formed film, but pit related crack initiation was scarcely observed.

$$=F_2(t) \quad (t \geq \delta) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$F_1(t)$, $F_2(t)$ のそれぞれに対して, 直線の傾きから形状パラメータ m_1 および m_2 が決定され, また $F_1(t) = 0.5$, $F_2(t) = 0.5$ における t を求めることによつて, それぞれの中央値 ξ_1 , ξ_2 が決定される. なお従来はこの系の応力腐食割れ破断寿命が二群からなる事実は知られていない. したがつて $F(t) = 0.5$ から求められる全測定値に関する中央値 ξ が, 従来報告されている破断寿命値に対応するものと考えられる.

4.2 破断寿命の中央値, および 形状パラメータに及ぼす応力, 温度の影響

Fig. 6, Fig. 7 および Fig. 8 は, 154°C, 126°C, 111°C のそれぞれについての, (a) 破断寿命の中央値, および (b) 形状パラメータに対する応力の影響を示したものである. 図中黒丸は 短寿命側のモード 1 の分布 $F_1(t)$ の ξ_1 , m_1 を, 白丸は 長寿命側のモード 2 の分布 $F_2(t)$ の ξ_2 , m_2 を示している. なお (a) 図中の半黒丸は全測定値に関する破断寿命の中央値 ξ である.

Fig. 6 あるいは Fig. 2 から明らかなように, 154°C

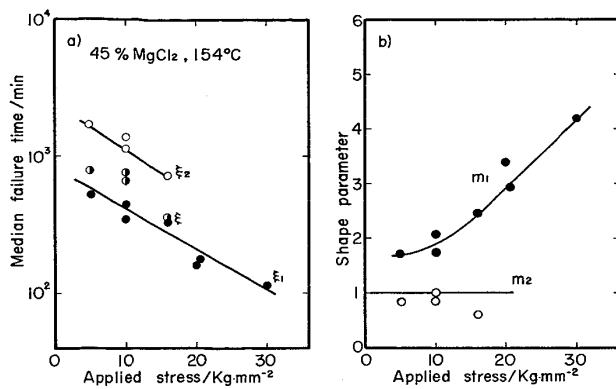


Fig. 6. Median failure time and shape parameter as a function of applied stress.

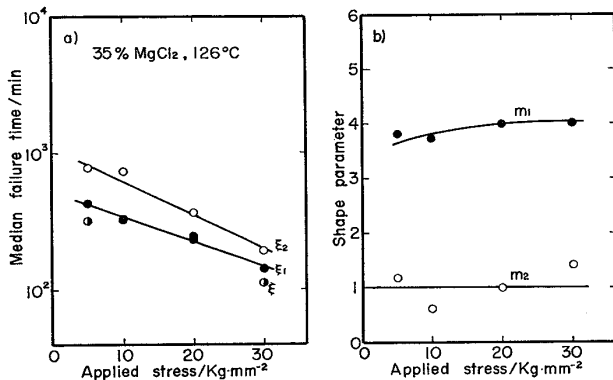


Fig. 7. Median failure time and shape parameter as a function of applied stress.

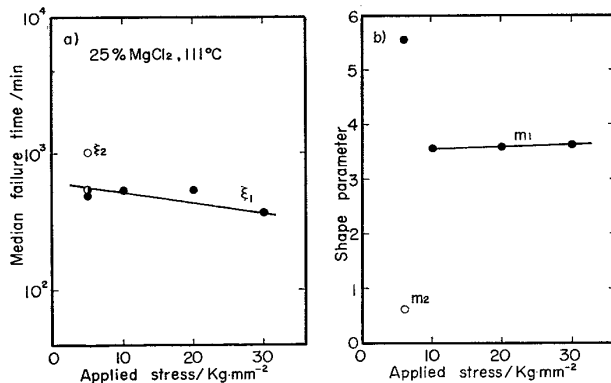


Fig. 8. Median failure time and shape parameter as a function of applied stress.

では 30 kg/mm^2 と 20.7 kg/mm^2 において単一ワイブル分布に従うが、それらの形状パラメータは、Fig. 6 (b)に示したように低応力における複合ワイブル分布の $F_1(t)$ の形状パラメータの応力依存性の延長上にある。したがってこれら単一分布も複合ワイブル分布に属すると考えるべきであろう。すなわち単一分布も含めて $F_1(t)$ の形状パラメータは $m_1=4.2$ から応力の減少に伴って $m_1=1.7$ まで連続的に減少している。 $F_2(t)$ が

認められる応力は、この鋼の 154°C における 0.2% 耐力に近い 16 kg/mm^2 である。そして m_2 はほぼ 1 に近い。

破断寿命 (の中央値、以後中央値を省略する) についてみると、モード 1 およびモード 2 に分けられた破断寿命 (ξ_1 , ξ_2) の対数は、 m の変化と同様いずれも応力の減少とともに直線的に増加し、 0.2% 耐力近くでの折れ曲がりとは認められない。しかし ξ_1 についてみると、 10 kg/mm^2 近くから若干の折れ曲がり認められる。従来板材や丸棒試験片を用いたデータ¹⁷⁾では、 0.2% 耐力近くの折点が明確に認められているが、本実験と同じく細線試験片を用いた HoAR のデータ¹⁸⁾では、Fig. 6(a) の結果と同様折点が認められていない。おそらく細線であるため割れ伝ば期間が短く、発生後直ちに破断に至ることがその原因と考えられる。Fig. 7 の 126°C では、全応力にわたって複合ワイブル分布となり、形状パラメータ m_1 は応力の低下とともに若干減少するが、ほぼ $m_1=4.0$ である。一方 m_2 はほぼ一定の 1.0 をとっている。 m_2 のばらつきが大きい、これは $F_2(t)$ の割合が少なく、データ数が少ないことも相まってもたらされたものと考えられる。Fig. 8 の 111°C では 5 kg/mm^2 のみ複合ワイブル分布となるが、他の応力では単一分布であり、 m_1 の値は $m_1=3.6$ 近くの値を示している。 5 kg/mm^2 の m_1 値の大きい原因は不明であるが、実験数をさらに多くして検討する必要がある。

Fig. 9 は各応力における ξ_1 , ξ_2 , および m_1 , m_2 に対する温度の影響をまとめて示したものである。Fig. 9 (a) から明らかなように、 ξ_1 の温度依存性はあまり大きくない。それに比して ξ_2 のそれは若干大きな依存性を示す。低応力でとくに明瞭となるのであるが、 ξ_1 , ξ_2 ともに温度に対して単調な減少を示さず、なべ底型の変化が認められる。すなわち 126°C の破断寿命が 111°C

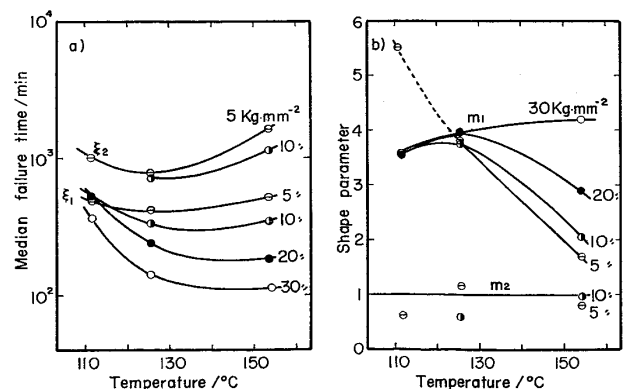


Fig. 9. Median failure time and shape parameter as a function of temperature and applied stress.

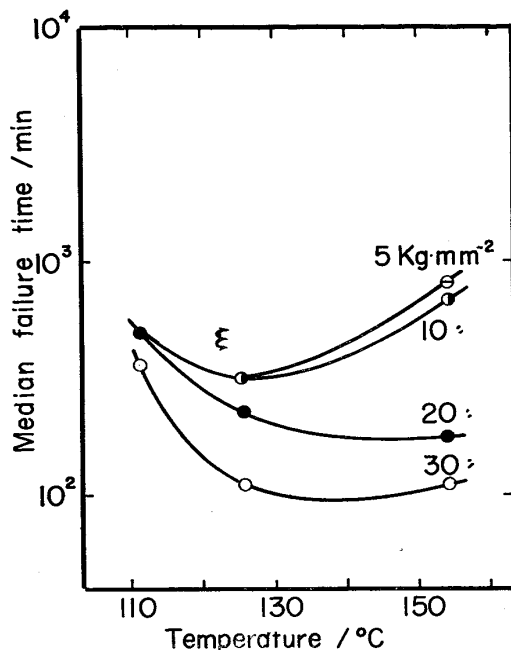


Fig. 10. Median failure time of $F(t)$ as a function of temperature and applied stress.

や 154°C の破断寿命よりも短いのが特徴である。この傾向は Fig. 10 に示した ξ の温度依存性にいてより明瞭に認められる。Fig. 9(a) の破断寿命のなべ底型温度依存性に対応した形状パラメータの変化が Fig. 9(b) にも認められる。

4.3 形状パラメータと割れ発生、伝ばの関係

ワイブル分布においては、形状パラメータは確率密度分布の形状を決定するとともに、故障の形式を決定している¹¹⁾¹⁵⁾。 $m=1$ は指数確率密度分布を与える。故障率は時間的に一定であり、ポアソン過程によつて現象の生ずるときにこの分布が認められる。信頼性工学ではこれを偶発故障型と呼んでいる。 m が 1 よりも大きくなるとともに、確率密度分布は対称型に近づき、 $m=3.2$ では正規分布に近似される。 $m>1$ の分布は故障率が時間とともに増大するので、これを摩耗故障型と呼ぶ。

すでに報告したようにステンレス鋼¹⁹⁾²⁰⁾や高ニッケル合金²¹⁾²²⁾の孔食発生過程は複数の確率過程から成っており、それら個々の確率過程はポアソン過程である。これは上述の $m=1$ の場合に相当し、孔食発生は偶発型である。 $m=1$ の分布が本実験の応力腐食割れ破断寿命分布のうち、長寿命側のモード 2 の分布に認められている。応力腐食割れの場合も孔食発生と同じく、破断寿命が発生過程によつて決定されるとき、偶発型となり $m=1$ の分布となると考えるのが妥当であろう。また $m>1$ 、すなわち故障率が時間とともに増加する場合に対しては、割れが伝ばとともに加速的に進行するモデルが考え

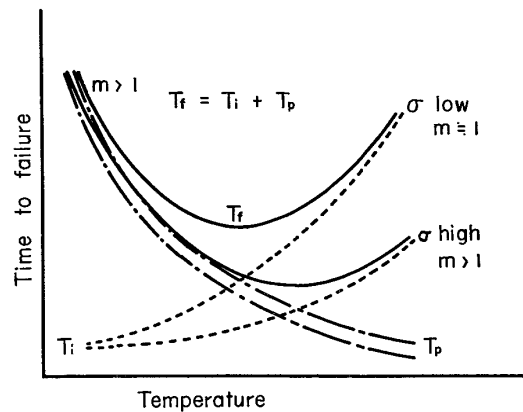


Fig. 11. Schematic illustration of time to failure (T_f) which consists of crack initiation (T_i) and propagation time (T_p). When the process is controlled by crack initiation the shape parameter of the distribution approaches to unity, while the shape parameter larger than unity relates to crack propagation.

られる。

このように形状パラメータ m の値は破断寿命が発生かあるいは伝ばのいずれによつて決定されているかを示しているものと考えられる。

小若ら²³⁾は本実験と同様な条件における種々のステンレス鋼の応力腐食割れ破断寿命を発生と伝ばに分けて測定している。SUS 304 鋼については 25 kg/mm^2 において、 140°C 近くに破断寿命の最小値を認め、これを発生と伝ばの温度依存性の相異によつて説明した。

Fig. 10 と小若らの結果²³⁾を参照し、また Fig. 9(b) に示した形状パラメータに基づいて、破断寿命の温度依存性に及ぼす発生と伝ば過程の寄与を示したのが Fig. 11 である。図中破断寿命 T_f は伝ば期間 T_p と発生期間 T_i との和からなる。ここで小若らの結果²³⁾を参照して、温度の増加とともに減少する T_p と、逆に増加する T_i 、ならびにその結果として中間温度において最小値をとる T_f とが示してある。Fig. 9(b) にみられるように、 154°C では応力の低い程、 m は 1 に近づくが、これは破断寿命に占める T_i の寄与が大であることを示している。これが Fig. 11 中に示した、低い応力 (σ) における右上りの T_i 曲線の場合である。同じ温度で高い σ では $m>1$ となるので、 T_i の寄与は少なくなると考えられ、右上りの T_i 曲線の傾きは小さくなり、結果として T_f は小さくなる。ここに示した T_f の傾向は Fig. 10 の結果とよく一致している。このように $m=1$ に近い程発生過程の寄与が大きくなると考えると、破断寿命の応力、温度依存性が合理的に説明できる。

なお、ここでは m_1 の変化に着目したが、このことはモード 1 に伝ばと発生がある比率で含まれていることを示している。それに対してモード 2 はいずれの場合も $m_2=1$ であつて、発生のみが現象を支配しているものと推定されるが、このモード 2 の寄与は従来報告されている破断寿命には明確に示されていない。WARREN²⁴⁾ による 304 鋼の wicking 試験の結果をワイブルプロットする²⁵⁾と、塩素イオン濃度にも依存するが、ほぼ $m=1$ の値が得られる。実際環境を比較的良くシミュレートしているとされている、wicking 試験において $m=1$ の値が得られることは、本実験でのモード 2 が実際環境の寿命分布に対応している可能性を示すものである。

なお 154°C の場合、モード 1 における m_1 の応力依存性が顕著であり、低応力では $m=1$ に近づき発生過程の寄与が大きい。表面観察の結果の示すように、154°C では 150 min 浸漬後にはほとんどの試片の表面が黒色に変化し、厚い沈殿皮膜が生成している。小若ら²³⁾は、 T_1 の寄与の著しくなる高温においては、全面腐食性が強いので、割れ発生しにくくなると考えている。確かに全面腐食性は強くなっているが、これが厚い沈殿皮膜の生成をもたらしていると考えられる。そしてこの皮膜生成が割れ発生を抑制するように働いていると推定される。また $m=1$ の偶発型においても、表面観察の結果孔食発生を起点とした割れはほとんど認められなかつた。この事実は偶発型が孔食発生と必ずしも結びつくのではなく、孔食を起点としない割れ発生にも偶発型が存在することを示している。

なお小若ら²⁶⁾は、低濃度 $MgCl_2$ における割れは孔食を起点として発生することを示している。しかしながら本実験では、そのような条件においても明確な孔食発生型割れの観察される例は少なかつた。これは出発表面として用いた真空焼鈍面上に酸化皮膜が生成していたため、それが孔食発生を抑制したものと推定される。このような表面状態の相違が応力腐食割れ寿命の確率分布に直接影響することが COCHRAN ら²⁷⁾によつて示されている。したがつて他の表面状態についても本実験と同様な解析を行い、孔食発生型と偶発型分布との関係の有無をさらに検討する必要があると考えられる。

5. 結 言

1) 種々の濃度の沸とう $MgCl_2$ 溶液中における、17 Cr-11Ni ステンレス鋼の応力腐食割れ破断寿命の確率分布は単一または複合ワイブル分布に従う。

2) 応力の低い場合、破断寿命の確率分布はモード 1 とモード 2 の 2 群に分かれ、複合ワイブル分布に従う。

モード 2 の形状パラメータはほぼ 1 であるが、モード 1 の形状パラメータは 1 よりも大きく、かつ応力や温度によつて変化する。

3) 形状パラメータ m が 1 に近いほど偶発型の割れ発生となり、 $m > 1$ の場合には伝ばが割れ寿命を決定しているものと考えられる。

4) したがつて確率分布の形状パラメータから、破断寿命に対する発生と伝ばの寄与を推定できる可能性がある。

本研究は鉄鋼基礎共同研究会特別研究費の補助によつて行われた。記して感謝申し上げる。

文 献

- 1) 柴田俊夫: 防食技術, 27 (1978), p. 23
- 2) 横堀武夫: 材料強度学, (1955), [技報堂], 材料強度学, (1974), [岩波書店]
- 3) 岡村弘之, 板垣 浩: 強度の統計的取扱二構造強度信頼性工学, (1979), [培風館]
- 4) F. F. BOOTH, G. E. G. TUCKER, and H. P. GODARD: Corrosion, 19 (1963), p. 390t
- 5) F. F. BOOTH and G. E. G. TUCKER: Corrosion, 21 (1965), p. 173
- 6) M. O. LOCKS: Corrosion, 27 (1971), p. 386
- 7) J. H. HARSHBARGER, A. I. KEMPPINEN, and B. W. STRUM: Handbook on Corrosion Testing and Evaluation, ed. by W. H. AILOR, (1971), p. 87, [Jhon Wiley & Sons]
- 8) W. L. CLARKE and G. M. GORDON: Corrosion, 29 (1973), p. 1
- 9) M. De BORDT: Corrosion, 30 (1974), p. 267
- 10) 浅輪光男: 日本金属学会誌, 40 (1976), p. 433
- 11) 塩見 弘: 信頼性工学入門, 改訂 2 版, (1972), [丸善]
- 12) R. W. STAEBLE, J. J. ROREULA, T. L. RAREDON, SERRATE, C. R. MORRIN and R. V. FARRAR: Corrosion, 26 (1970), p. 451
- 13) I. B. CASALE: Corrosion, 23 (1967), p. 314
- 14) W. WEIBULL: J. Appl. Mech., 18 (1951), p. 293
- 15) 日科技連編: 信頼性データの解析, (1967), [日科技連]
- 16) 文献 15) の p. 47, p. 55
- 17) たとえば E. E. DENHARD: Corrosion, 16 (1960), p. 359 t
- 18) T. P. HOAR and J. G. HINES: JISI, 182 (1956), p. 124
- 19) T. SHIBATA and T. TAKEYAMA: Nature, 260 (1976), p. 315
- 20) T. SHIBATA and T. TAKEYAMA: Corrosion, 33 (1977), p. 243
- 21) 柴田俊夫, 竹山太郎: 日本金属学会誌, 42 (1978), p. 743

-
- 22) 柴田俊夫, 竹山太郎: 日本金属学会誌, **43** (1969), p. 270
- 23) 小若正倫, 工藤赳夫: 日本金属学会誌, **37** (1973), p. 1320
- 24) D. WARREN: Proc. Fifth Annual Industrial Waste Conference, Purdue Vniversity, (1960) May: R. M. LATANISION and R. W. STAEHLE: Fundamental Aspects of Stress Corrosion Crack-
ing, ed. by R. W. STAEHLE, et al., (1969), p. 214, [NACE] より引用
- 25) 柴田俊夫: 第 25 回腐食防食討論会予稿集, (1978), p. 152
- 26) 小若正倫, 工藤赳夫: 第 20 回腐食防食討論会講演要旨集, (1973), p. 325
- 27) R. W. COCHRAN and R. W. STAEHLE: Corrosin, **24** (1968), p. 369
-