

S45C 調質材のき裂発生と伝ば挙動に関する確率疲労特性*

後藤 真宏*¹, 福島 茂*², 西谷 弘信*³Probabilistic Fatigue Property on the Initiation and Propagation of Cracks
in a Heat-Treated 0.45 % C Steel

Masahiro GOTO, Shigeru FUKUSHIMA and Hironobu NISITANI

In order to study the probabilistic characteristics of the initiation and propagation of cracks, rotating bending fatigue tests of heat-treated 0.45 % C steel smooth specimens were carried out in three stress ranges ($1.1\sigma_w < \sigma_a < 1.6\sigma_w$, σ_w : fatigue limit). The 16 specimens were tested at each stress range. The following results were obtained through the successive observations of cracks which led to final fracture. The propagation life of a crack from initiation up to fracture, N_{i-f} , and the total number of cycles to fracture, N_f , are expressed by the three-parameter Weibull distribution. A slight dependency of the coefficient of variation, CV , in N_{i-f} on the stress range is recognized. Although the initiation life of a crack, N_i , is also expressed by the three-parameter Weibull distribution, the value of CV increases with the decrease in stress range.

Key Words: Fatigue, Statistical Treatment, Crack Initiation, Crack Propagation, Heat-Treated Steel, Smooth Specimen

1. 緒 言

比較的高い応力のもとで使用される機械や構造物では、疲労寿命を推定することが設計上重要な課題である。それとともに、疲労に関するデータは一般にかなりのばらつきを含むので、推定した寿命に対する信頼性を定量化する必要がある。これまでも疲労寿命の統計的整理を行った研究は多く、特に平滑材に関しては種々の材料で寿命分布が示されている^{(1)~(3)}。また、疲労寿命は普通き裂発生と伝ばとに分けられることから、き裂の起点としての応力集中部を有する試験片を用いて、それぞれの寿命分布特性を調べた研究^{(4)~(7)}もある。

平滑材の疲労寿命の大部分はき裂発生寿命と微小き裂の伝ば寿命で占められている。したがって、き裂発生と微小き裂の伝ば挙動の確率特性を明らかにすることは、合理的な材料選定や保守管理を行う上で有益と考えられる。最近、微小き裂の発生・伝ば挙動の統計的性質について調べた研究^{(8)~(11)}も報告されているが、

その数は少なく、さらに多くのデータの集積が望まれる。

一方、苛酷な条件下で使用される機械や構造物には調質材が多く使われるので、調質材の疲労特性を明らかにすることは実用上重要である。一般に、疲労強度は高強度材料程欠陥に対して敏感となり、それがばらつきに関係するので、調質材の確率疲労特性を検討する意味は大きいと思われる。

本研究では以上のことを考慮して、S45C 調質平滑材の回転曲げ疲労試験を行った。そして、レプリカ法により複数の試験片の表面の連続観察を行い、破断に導くき裂およびこれに準ずるき裂の発生・伝ば挙動を詳細に調べ、その確率疲労特性の検討を行った。

2. 使用材料、試験片および実験方法

素材は市販の S45C 圧延丸棒(直径は約 19 mm)であり、それを 845°C で焼ならし(30 分保持)、845°C で焼入れ(30 分保持)、600°C で焼戻し(60 分保持)を行った。表 1 に素材の化学成分、表 2 に熱処理後の機械的性質を示す。図 1 に組織写真を示す。

図 2 に試験片の形状を示す。試験片は半径 20 mm の環状切欠きをもつが、その切欠係数は 1 に近く(約 1.03)、実質的には平滑材とみなせるので以後これを

* 原稿受付 平成 2 年 8 月 13 日。

¹ 正員、大分大学工学部 (〒870-11 大分市田野原 700)。² 学生員、大分大学大学院。³ 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

平滑材と呼ぶ。試験片製作後、電解研磨により表面を直径で約 50 μm 程度取り除いてから実験を行った。

使用した試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機(容量: 14.7 N・m, 回転数: 3 000 rpm)である。

表面の疲労被害の観察およびき裂長さの測定は、所定の繰返し数において採取したレプリカに真空中で金を蒸着した後、金属顕微鏡(×400)にて行った。き裂長さ l は試験片表面の円周方向の長さを取り、応力 σ_a は試験片最小断面部の公称曲げ応力振幅で定義した。

3. 実験結果および考察

本研究では、疲労限度 ($\sigma_w = 440$ Mpa) 近傍を除く広

い範囲の応力のもとでのき裂発生・伝ば挙動の確率特性を調べるため、三つの応力レベル $\sigma_a = 500, 600, 700$ MPa ($1.1\sigma_w < \sigma_a < 1.6\sigma_w$) のもとで疲労試験を行った。そして、各応力ごとにそれぞれ 16 本の試験片を用いて、すべての試験片の表面に発生した主き裂(破断に導いたき裂)およびこれに準ずるき裂(以後準き裂と呼ぶ)の発生・伝ば挙動を調べた。ここで、準き裂としては、後に示すように全寿命のほぼ 90% が主き裂が 1 mm に達するまでの寿命であることを考慮して、破断直前の観察で 1 mm を越えたすべてのき裂を選んでいる。

3.1 き裂の発生および伝ば挙動 図 3 に S-N 曲線を示す。いずれの応力レベルにおいても破断寿命 N_f はかなりばらついている。

図 4 に、 $\sigma_a = 600$ MPa の場合の主き裂付近の表面状態の変化を示す。これより、き裂は微小表面欠陥を起点として発生する場合 [図 4(a)] とすべり帯を起点として発生する場合 [図 4(b)] があることがわかる。

図 5 に、欠陥を起点として発生したき裂の割合を示す。図には、主き裂のみを対象としたときと主き裂と準き裂を対象としたときを示してある。主き裂についてみれば、いずれの応力のもとでも破断に導くき裂の 60% 以上が欠陥から発生している。準き裂を含めた場合でも 50% 以上が欠陥を起点としている。またいずれを対象としても $\sigma_a = 500$ MPa ではその割合が他の

表 1 化学成分(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.45	0.25	0.79	0.01	0.01	0.09	0.03	0.18

表 2 機械的性質

MPa			%	Hv*
σ_{s1}	σ_B	σ_T	ψ	
750	833	1510	61.6	277

*Vickers hardness (Load: 9.8N)

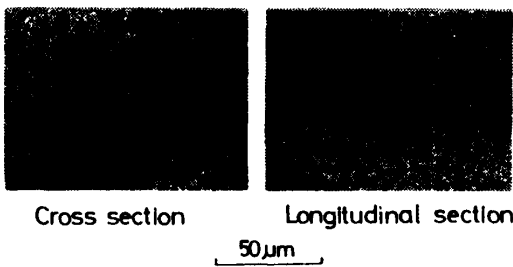


図 1 組織写真

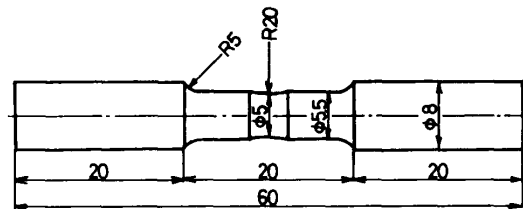


図 2 試験片形状

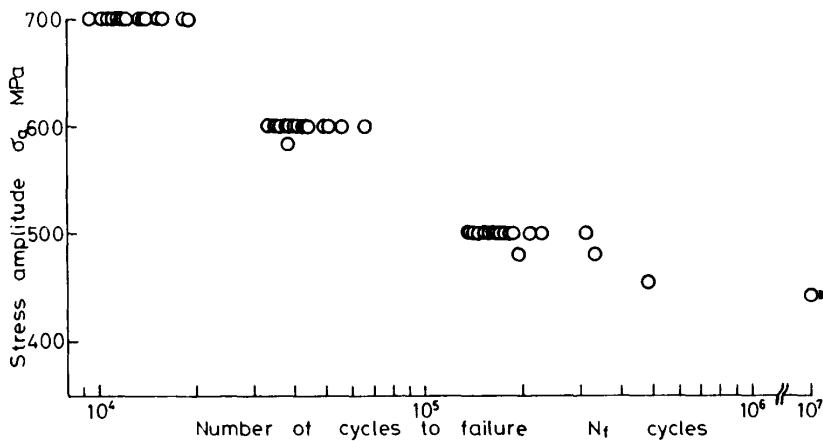


図 3 S-N 曲線

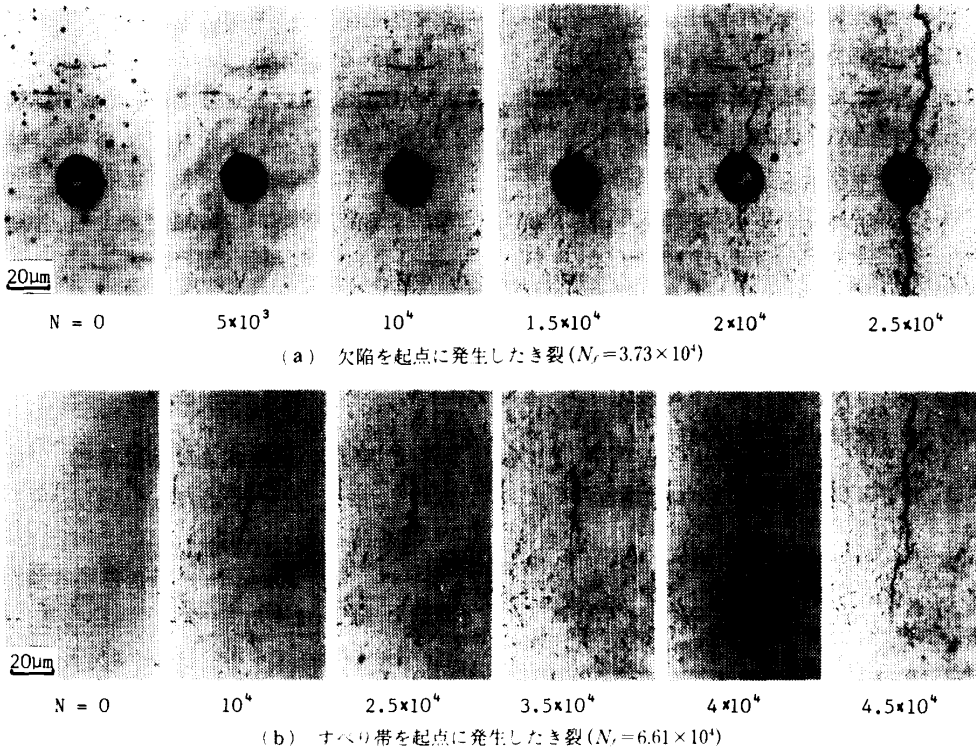


図 4 主き裂近傍の表面状態の変化 ($\sigma_a = 600\text{MPa}$)

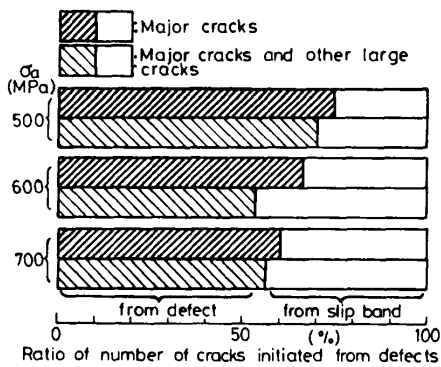


図 5 各応力における起点を欠陥とするき裂とすべり帯とするき裂の割合(主き裂のみの場合と準き裂を含む場合)

応力より大きく、応力が小さくなれば欠陥が疲労強度を支配する傾向が強まることを示している。これらき裂の発生した欠陥の円周方向の長さ d を測りその分布を調べたところ、 d は対数正規分布で整理できその中央値は約 $18\ \mu\text{m}$ であった(最大の d は $34\ \mu\text{m}$)。また、ここで言う微小表面欠陥は非金属介在物またはその脱落孔を意味する。

図 6 に $\sigma_a = 600\ \text{MPa}$ の主き裂の伝ば曲線を示す。図中○印は欠陥を起点としたき裂を、●印はすべり帯を起点としたき裂をそれぞれ示す。き裂の発生時期お

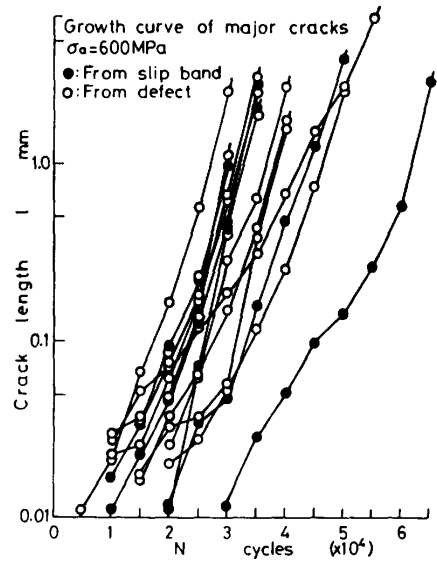


図 6 $\sigma_a = 600\text{MPa}$ における主き裂の伝ば曲線

よび発生後の伝ば挙動には、起点の違いによる大きな差はあまり認められない。また、発生の際のばらつきが伝ばの際のばらつきより相対的に大きい傾向にあることが定性的にわかる(伝ば曲線の傾きは、全体としてみればほぼ等しく伝ば寿命のばらつきは少ないが、発生寿命のばらつきは相対的に大きい。例えば、遅く発生するものは早く発生するものの約 6 倍の繰返しを要する)。

図7は、主き裂の $\ln l - N/N_f$ 関係を示す。いずれの応力の場合も両者の関係はほぼ1本の曲線で近似でき、応力レベルによる差はあまり認められない。

3・2 き裂発生・伝ば寿命の確率特性 前節ではき裂の発生と伝ばのばらつきを定性的に示したが、定量的な評価を行うためにはそれぞれを統計量としてその分布特性を明らかにする必要がある。疲労データを統計的に取扱った研究は数多く、対数正規分布やワイブル分布がよく適合することが示されている。ここでは、ワイブル分布による整理を行い確率特性を検討する。ここで、3母数ワイブル分布関数⁽¹²⁾ $F(x)$ は次式で示される。

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^m\right\} \dots\dots\dots (1)$$

上式中、 m, η および γ はそれぞれ形状母数、尺度母数

および位置母数である。また、各母数の決定は相関係数法⁽¹³⁾により行った。

図8に、き裂発生寿命 N_i をワイブル確率紙にプロットしたものを示す。ここで、き裂が発生した欠陥の最大寸法が $35 \mu\text{m}$ 以下であったことを考慮して、便宜上 $l=35 \mu\text{m}$ に達したときの繰返し数をき裂伝ば曲線から求め、これをき裂発生寿命と定義した。また、 Δ 印は主き裂を対象とした場合、 \circ 印は準き裂も含めた場合である ($\sigma_a=500 \text{ MPa}$ の場合は、ほとんどの試験片で $l=1 \text{ mm}$ を越えたき裂は主き裂だけであったので主き裂の結果のみ示す)。いずれの場合もき裂発生寿命は3母数ワイブル分布で整理できる。また、主き裂のみの場合と準き裂を含めた場合の分布を比べれば、 $\sigma_a=700 \text{ MPa}$ では両者に大きな差は認められず、主き裂と準き裂の発生時期は明確に区別できない。一方、 σ_a

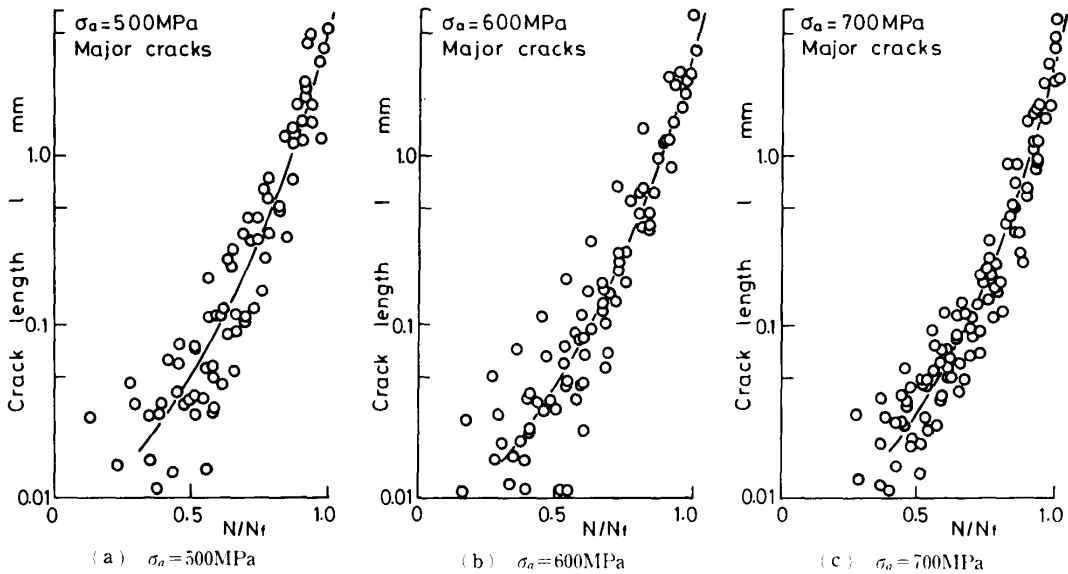


図7 主き裂の $\ln l - N/N_f$ 関係

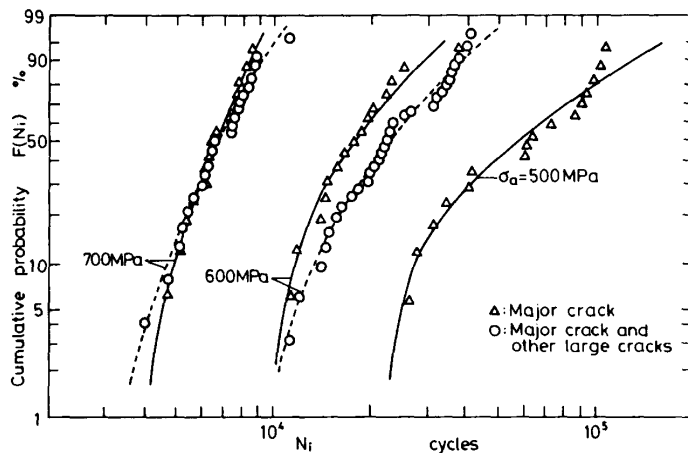
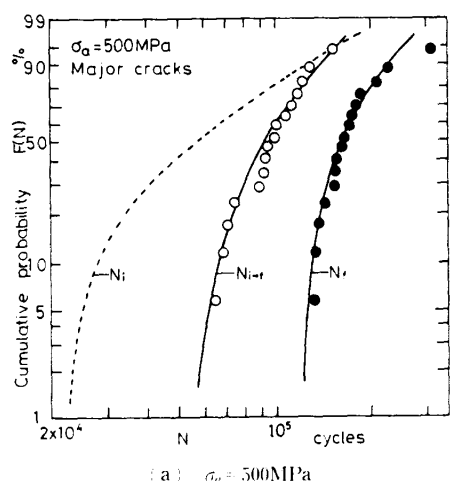


図8 き裂発生寿命 N_i のワイブル確率紙による整理

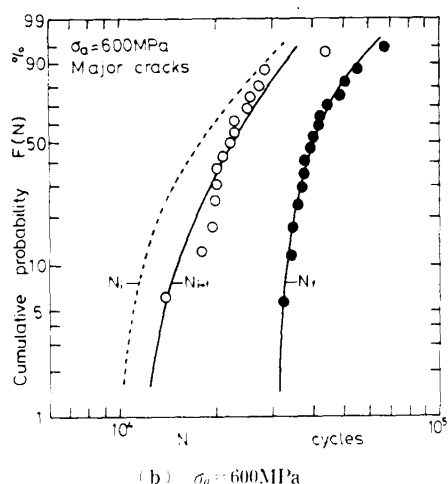
=600 MPa では、主き裂の分布が短寿命側にあり応力が小さくなれば、最初に発生したき裂が主き裂となる傾向が大きいことがわかる。図4で、き裂発生場所が欠陥とすべり帯に分けられることを示したが、これとき裂発生寿命 N_i の関係を調べたところ、応力が大き

ければ N_i に起点による差はあまり認められず、応力が小さければすべり帯を起点とするき裂が欠陥を起点とするものより多少遅れて発生する傾向が認められた。一方、1 mm 以下のき裂も含めた全き裂の N_i は、起点が欠陥・すべり帯それぞれについて2母数ワイブル分布により整理され、起点を区別しなければ両者の混合ワイブル分布で整理される⁽¹⁰⁾。

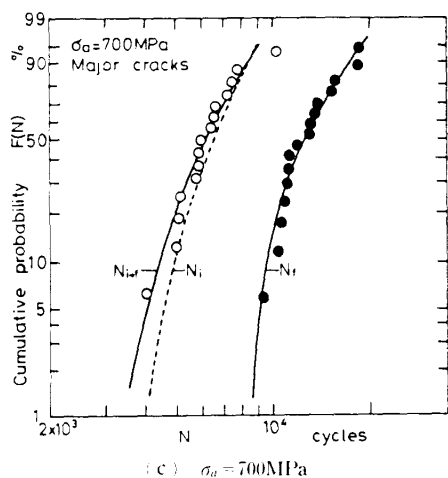
図9は、主き裂発生 ($l=35 \mu\text{m}$) 後破断に至るまでの寿命 N_{i-f} と破断寿命 N_f をワイブル確率紙にプロットしたものである。点線は、図8に示した主き裂の N_i の分布関数である。 N_{i-f} 、 N_f いずれも3母数ワイブル分布で整理される。また、 N_i と N_{i-f} の関係をみれば応力が小さければ、 N_i が N_{i-f} より小さいが、応力の増大とともに両者の関係は近づき、 $\sigma_a=700 \text{ MPa}$ では両者はほぼ一致し N_i が全寿命の約50%を占める。応力が降伏応力 (=750 MPa) に近づくとき裂が多数個発生し [本材料の $0.5 N_f$ におけるき裂密度 δ (1 mm² 当たりの全き裂個数) は、 $\sigma_a=700 \text{ MPa}$ では約10でありこれは $\sigma_a=600 \text{ MPa}$ のときの約10倍となる]、それらの中で比較的大きな寸法に成長したき裂同志の合体が頻繁に起こることが $\sigma_a=700 \text{ MPa}$ の $N_i \cong N_{i-f}$ に関係したと思われる(き裂の発生場所をある程度制限した本材料部分切欠材では、全寿命に対する発生寿命の占める割合は応力レベルにほとんど影響されない⁽¹⁴⁾)。



(a) $\sigma_a = 500 \text{ MPa}$



(b) $\sigma_a = 600 \text{ MPa}$



(c) $\sigma_a = 700 \text{ MPa}$

図9 N_i , N_{i-f} , N_f のワイブル確率紙による整理

表3 N_i , N_{i-f} , N_f のワイブル母数と各種統計量の値

N	σ_a (MPa)	m	η ($\times 10^3$)	γ ($\times 10^3$)	μ ($\times 10^3$)	CV	R
N_i	500	1.05	49.73	22.15	70.88	0.66	0.98
	600	1.26	10.01	9.91	19.22	0.39	0.97
	700	2.46	3.58	3.51	7.09	0.21	0.99
N_{i-f}	500	1.92	56.83	49.70	100.1	0.27	0.99
	600	2.00	14.20	10.45	23.03	0.28	0.94
	700	2.44	3.96	2.81	6.33	0.24	0.97
N_f	500	1.24	57.72	121.0	174.8	0.25	0.97
	600	1.14	11.60	31.69	42.76	0.23	0.99
	700	1.54	5.31	8.30	13.08	0.24	0.98

μ : Mean value, R: Correlation coefficient, CV: Coefficient of variation

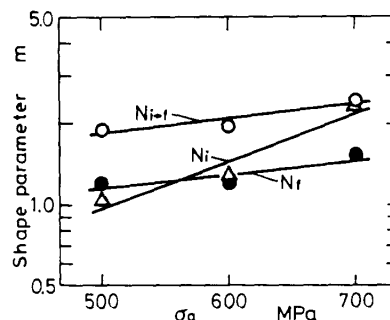


図10 形状母数 m と応力の関係

表 3 に、各応力ごとの N_i , N_{i-f} , N_f のワイブル 3 母数 m , η , γ の値と平均値 μ , 変動係数 $CV(=s/\mu$, s :標準偏差)および相関係数 R を示す。

図 10 は、 N_i , N_{i-f} , N_f の形状母数と応力レベルの関係である。いずれも応力の増加とともに m の値は増加するが、特に N_i の増加が大きい。

図 11 は、変動係数と応力レベルの関係である。 N_{i-f} および N_f の変動係数は応力が変化してもあまり変化しない ($CV=0.22\sim 0.29$ 程度)。一方、 N_i は応力の増加とともにかなり減少し、き裂発生寿命のばらつきの程度は応力が小さいほど大きくなる。

佐々木らは、NiCrMoV 鋼平滑材 ($\sigma_B=770$ MPa) の回転曲げ疲労試験を行い、き裂発生を $l=80 \mu\text{m}$ と定義したときのき裂発生寿命が 2 母数ワイブル分布 ($\gamma=0$) で整理されること、また $1500 \mu\text{m}$ までの伝ば寿命およびき裂が $3000 \mu\text{m}$ に達したときの繰返し数を破断寿命 N_f と定義したときの N_f がそれぞれ 3 母数ワイブル分布で整理されることを示している⁽¹⁵⁾。

図 12 に、 $N/N_f=0.7$ の場合の各応力における主き裂および準き裂のき裂長さ分布をワイブル確率紙にプロットしたものを示す。 N/N_f が同じでも、応力が大きいほうが分布するき裂長さは小さい。この傾向は他の繰返し数 ($N/N_f=0.5, 0.9$) でも認められた。表 4 に、このときのワイブル母数と他の統計量の値を示す。形状母数 m の値はいずれもほぼ 1 に近い(すべての平均

は $m \cong 1.07$)。応力が大きい方が破断に寄与するき裂長さが小寸法側に分布するのは、小応力のもとでは 1~2 個のき裂が破断に直接関係する(破面は比較的フラット)に対し、大応力下では多数個のき裂が破断に關係する(破面はジグザグ)のためと思われる。

4. 結 論

き裂の発生・伝ばに関する確率特性を検討するため、広い範囲の応力のもと ($1.1\sigma_w < \sigma_a < 1.6\sigma_w$, σ_w : 疲労限度)で、S 45 C 調質平滑材の回転曲げ試験を行った。そして、各応力ごとに 16 本の試験片を用いて、レプリカ法によりそれら試験片に発生した主き裂(破断に導いた最大寸法のき裂)の挙動を連続的に観察した。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 本材料では、き裂がすべり帯と微小表面欠陥(平均直径:約 $18 \mu\text{m}$)から発生する場合があります。主き裂の 60%以上が欠陥を起点として発生する。また、応力が疲労限度に近くなると欠陥からの割合が増加する傾向にある。
- (2) き裂発生寿命 N_i (便宜上 $35 \mu\text{m}$ にき裂が達したときの繰返し数を N_i と定義する)は 3 母数ワイブル分布で整理される。一方、き裂が発生してから破断するまでの寿命 N_{i-f} および破断寿命 N_f は、いずれも 3 母数ワイブル分布で整理される。
- (3) N_i と N_{i-f} の関係をみれば、応力が小さければ $N_i < N_{i-f}$ となるが、応力の増大とともに両者の関係は近づき、降伏応力近傍では $N_i \cong N_{i-f}$ となる。応力が大きくなればき裂が多数発生し、それらの中で比較的大きな寸法のき裂同志の合体が頻繁に起こることが、 $N_i \cong N_{i-f}$ に関係したものである。
- (4) N_i , N_{i-f} , N_f のワイブル分布関数の形状母

表 4 各繰返し数比におけるき裂長さ分布のワイブル母数と各種統計量の値

N/N_f	σ_a (MPa)	m	η (μm)	γ (μm)	μ (μm)	CV	R
0.5	500	1.30	58.1	1.7	55.4	0.66	0.98
	600	0.85	31.8	3.4	38.0	1.06	0.99
	700	0.85	10.5	18.7	30.1	0.44	0.99
0.7	500	1.06	216.3	71.8	283.3	0.71	0.97
	600	0.71	83.9	63.3	168.2	0.86	0.99
	700	0.96	48.1	60.9	109.9	0.47	0.99
0.9	500	1.28	1223	974	2108	0.42	0.99
	600	1.42	1099	214	1214	0.57	0.99
	700	1.20	690.4	393	1042	0.52	0.97

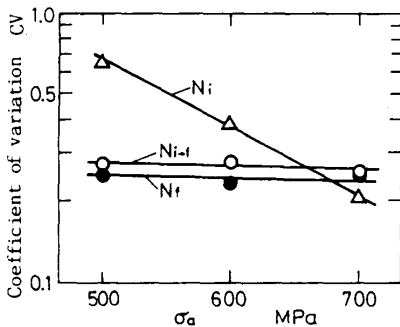


図 11 変動係数と応力の関係

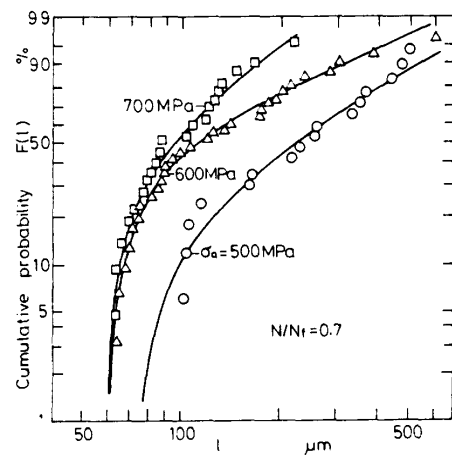


図 12 各応力下におけるき裂長さ分布 ($N/N_f=0.7$ の場合)

数 m の値は、応力の増加とともに増加する傾向にあり、 N_i における m の増加が特に大きい。また、変動係数 $CV (=s/\mu, s: \text{標準偏差}, \mu: \text{平均値})$ は、 N_i の応力が小さい場合が特に大きく、小応力下のき裂発生寿命のばらつきが相対的に大きいことを意味する。

(5) 各相対繰返し数 N/N_f における破断を支配するき裂(主き裂および準き裂)の長さ分布は、3母数ワイブル分布で整理でき、このときの m は応力、 N/N_f の値にあまり影響されずほぼ1に近い。

終わりに、本研究において実験にご協力いただいた、大分大学工学部技官三浦篤義氏、卒研究生小川賢司君(現：島津製作所)に感謝する。また、本研究は文部省科学研究費奨励研究(課題番号 02750074)によることを記して謝意を表す。

文 献

- (1) 西島・増田, 材料, 22-243 (1973), 1097.
- (2) 田中・藤井, 材料, 25-276 (1976), 909.
- (3) 酒井・ほか2名, 材料, 36-408 (1987), 915.
- (4) 市川・ほか2名, 材料, 31-346 (1981), 697.
- (5) Ochi, Y., ほか2名, *Fat. Fract. Eng. Mat. Struct.*, 8-4 (1985), 327.
- (6) Sasaki, S. K., ほか2名, *Eng. Fract. Mech.*, 28(1987), 761.
- (7) 佐々木・ほか3名, 機論, 54-499, A (1988), 426.
- (8) 北川・ほか2名, 機論, 51-461, A (1985), 179.
- (9) 城野・ほか3名, 材料, 37-420 (1988), 1003.
- (10) 後藤・ほか2名, 機論, 55-515, A (1989), 1493.
- (11) 後藤・ほか2名, 機論, 56-521, A (1990), 20.
- (12) Weibull, W. J., *J. Appl. Mech.*, 18-3(1951), 293.
- (13) 酒井・田中, 材料, 29-316(1980), 17.
- (14) 後藤・ほか3名, 機論, 55-511, A (1989), 453.
- (15) 佐々木・ほか2名, 機論, 55-509, A (1989), 22.