S20C 焼ならし平滑材の疲労寿命のばらつき特性†

後 藤 真 宏* 西 谷 弘 信** 薬 師 寺 輝 敏***

Scatter Characteristics of Fatigue Life in Normalized 0.21% C Steel Plain Specimens

by

Masahiro GOTO*, Hironobu NISITANI** and Terutoshi YAKUSHIJI***

In order to study the physical basis of scatter in fatigue life, fatigue tests were carried out on the smooth specimens of a normalized 0.21% C steel. Fifteen specimens were fatigued at each stress level and the behavior of all cracks which led to the fracture of the specimens was examined. Fatigue data were analyzed statistically by assuming the Weibull distribution. The results show that the scatter in the number of cycles required to attain a crack length 0.2 mm is particularly large. There is only slight scatter for the propagation life from 0.2 mm up to fracture. The distribution relating to all phases of lifetime can be expressed by the three-parameter Weibull distribution. The values of the coefficient of variance, CV, for the initiation life of a crack length of 0.2 mm and fatigue life increase with decreasing stress level. However, CV for crack growing from 0.2 mm to failure shows only a slight dependency on the stress level. The scatter in fatigue life is due mainly to the behavior of microcracks. The influence of microstructure on microcrack propagation is especially large at lower stress levels, *i. e.* near the fatigue limit.

Key words : Fatigue, Normalized steel, Statistical treatment, Smooth specimen, Rotating bending, Weibull distribution

1 緒 言

相対的に高い応力レベルのもとで使用される機械・構造物では、疲労寿命を予測し、その信頼性を定量化することが重要である。また、平滑材の疲労寿命はき裂発生および微小表面き裂の伝ば寿命で占められるので、微小き裂の挙動を通して疲労被害の物理的背景を検討することは、合理的な材料選定や保守・管理を行う上で有益である。例えば、比較的寸法の小さいき裂の伝ば速度が組織の影響を受け大きくばらつくことなども、考慮すべき重要な事実であろう。疲労寿命のばらつきを調べた研究は多く、種々の材料で疲労寿命の分布状態が示されている^{1)~4)}。しかしながら、微小き裂の挙動を通して疲労寿命のばらつきを検討したものは、それ程多くはない^{5)~7)}。

一方、納入されたままの材料は、製造時に大きなひずみを受け材質的に不安定な場合がある。そこで、材質改善のための焼ならしを行ってから使用されることがある。したがって、焼ならし材の疲労寿命のばらつき特性を検討することは実用上重要と思われる。

本研究では、以上のことを考慮して S20C 焼なら

し平滑材の回転曲げ疲労試験を行った。そして、各応力ごとに 15 本の試験片を用いて、破断に導いたき裂の発生・伝ば挙動をレプリカ法により連続観察し、疲労被害およびばらつきの物理的背景を検討した。また、ワイブル分布による統計処理も行い、ばらつき特性の定量的評価を行った。

2 実験方法

素材は市販の S20C 圧延丸棒(直径約 22 mm)であり、それを 885°C で焼ならした(1 時間保持)。素材の化学成分を Table I に、熱処理後の機械的性質を

Table I. Chemical composition (wt %).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.21	0.21	0.47	0.014	0.017	0.21	0.06	0.09

Table II. Mechanical property.

MPa			%	Hv*
σ_{B}	σ_{B}	σ_{T}	ϕ	
324	498	978	63.2	146

* Vickers hardness (Load : 9.8N).

† 原稿受理 平成 4 年 5 月 28 日 Received May 28, 1992

* 正 会 員 大分大学工学部生産システム工学科 〒870-11 大分市旦野原, Dept. of Production Systems Eng., Oita Univ., Dannoharu, Oita, 870-11

** 正 会 員 九州大学工学部材料強弱学教室 〒812 福岡市東区箱崎, Dept. of Mech. & Strength of Solids, Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812

*** 大分工業高等専門学校機械工学科 〒870-01 大分市牧, Oita National College of Tech., Maki, Oita, 870-01

Fig. 1. Microstructure of the material.

Fig. 2. Shape of the specimen (in mm).

Table II にそれぞれ示す。Fig. 1 に組織写真を示す。

Fig. 2 に試験片形状および寸法を示す。試験片は切欠き半径 20 mm の環状切欠きを有するが、その切欠き係数は小さく実質的には平滑材と見なせるので、以後これを平滑材と呼ぶ。試験片製作後、600°C で 1 時間の応力除去焼なましを行い、さらに電解研磨で表面を直径で約 50 μm 程度取除いてから実験に供した。

使用した試験機は小野式回転曲げ疲労試験機（容量：14, 7 Nm, 3000 rpm）である。

表面の疲労被害およびき裂長さの測定は、所定の繰返し数ごとに採取したレプリカに真空中で金を蒸着したものについて、金属顕微鏡（倍率×400）により行った。き裂長さ l は試験片表面の円周方向に沿って測った長さであり、応力 σ_a は試験片最小断面部の公称曲げ応力振幅である。

3 実験結果および考察

Fig. 3 に $S-N$ 曲線を示す。疲労寿命 N_f のばらつきは、応力が小さい程大きい。本研究では、疲労限度 σ_w ($=245$ MPa) 近傍と比較的大きい応力のもとにおける疲労寿命のばらつき特性を検討するため、 $\sigma_a = 260, 300$ MPa（それぞれ $1.06\sigma_w, 1.22\sigma_w$ ）において 15 本の試験片を破断させた。そして、すべての試験片表面に発生した主き裂（破断に導いた最大寸法のき裂）およびこれに準じるき裂（以後準き裂と呼ぶ）の発生・伝ば挙動を追跡した。ここで、準き裂としては、全寿命の約 90% が主き裂が 1 mm に達するまでの寿命で占められることを考慮して、破断直前の観察

Fig. 3. $S-N$ curve for normalized specimens.

で 1 mm を越えたすべてのき裂を選んでいる。以下では、疲労寿命のばらつき特性を定性的側面と定量的側面に分けて検討する。

3・1 き裂発生および伝ば挙動

Fig. 4 に、疲労限度の応力を 10^7 回を繰返したとき試験片表面に認められた停留き裂を示す。表面には多数の微視的停留き裂が認められ、その中で最大のものの寸法は 60 μm（結晶粒径：25 μm）である。また、停留時のき裂先端は、フェライト粒界やパーライト層などにあるものも認められるが、表面で見る限りフェライト粒内にある場合が多い。

Fig. 5 に、 $\sigma_a = 260$ MPa を繰返したときの表面状態の変化を示す。将来き裂となる部分には繰返しのごく初期から一結晶粒程度のすべり帯が認められ、その部分はほとんど寸法を増すことなく被害が蓄積され、 9×10^5 回の繰返しによりき裂が発生している。き裂が発生してからは、き裂先端にひずみ（応力）が集中するため伝ば拡大するが、 $N = 1.1 \times 10^6$ からしばらくは表面で見る限り一時的に伝ばを停止している（このときのき裂長さは 53 μm）。しかしながら、 $N = 1.4 \times 10^6$ では寸法の増加が認められる。このように、伝ば性のき裂が一時的に伝ばを停止するのは、微視組織（主としてパーライト層）の影響である。

Fig. 6 に、それぞれの応力のもとにおける主き裂の伝ば曲線を示す。いずれの場合もき裂伝ば曲線のばら

Fig. 4. Nonpropagating microcracks after 10^7 repetitions of σ_w ($\sigma_w = 245$ MPa).

Fig. 5. Change in surface state around a major crack ($\sigma_a=260$ MPa).

つきは大きく、き裂が 0.2 mm に達するまでのばらつきが特に大きいことがわかる。一方、 0.2 mm 以後の伝ばのばらつきはそれ程大きくはない（伝ば曲線の傾

(a) $\sigma_a=260$ MPa. (b) $\sigma_a=300$ MPa.

Fig. 6. Crack propagation curves of major cracks.

きはほぼ等しい)。また、発生時のき裂長さはいずれの場合も最大で 50 μ m 以下である。

Fig. 7 に、き裂伝ば曲線を疲労寿命 N_f を基準とした相対繰返し数 N/N_f で整理し直したものを示す。伝ば曲線がかなりばらつく場合でも、 $\ln l - N/N_f$ 関係で整理すればそのばらつきはそれ程大きくない。

3・2 疲労挙動の統計的性質

前節では、疲労寿命のばらつきの定性的側面を検討したが、ばらつきの定量的評価を行うにはそれぞれを統計量とし、その統計的性質を明らかにする必要がある。疲労データの統計的性質を調べた研究は多く、対数正規分布やワイブル分布がよく適合することが報告⁶⁾⁻¹⁷⁾されている。本研究ではワイブル分布による整理を行い、疲労寿命のばらつき特性を検討する。ここで、3 母数ワイブル分布関数 $F(x)$ は次式で定義される。

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

上式中、 m 、 η 、 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により行った。

Fig. 6 のき裂伝ば曲線から分かるように、疲労寿命のばらつきの中でもき裂が 0.2 mm に達するまでのばらつきが特に大きい。また、疲労過程はき裂発生（本材料では、発生時のき裂長さは $20 \sim 50$ μ m の範囲で

(a) $\sigma_a=260$ MPa.(b) $\sigma_a=300$ MPa.Fig. 7. $\ln l$ versus N/N_f relation.

Fig. 8. Distribution of 0.05 mm crack initiation life.

ばらつく)と伝ばに分けられるので、疲労過程のそれぞれの段階についてばらつき特性を検討する必要がある。ここでは、50 μm のき裂発生寿命 $N_{0.05}$ の分布を示し、ついで 0.2 mm のき裂発生寿命 $N_{0.2}$ 、0.2 mm から破断までのき裂伝ば寿命 $N_{0.2-f}$ および疲労寿命 N_f についてそれぞれの分布状態を示す。さらに、50 μm から 0.2 mm までの微視的き裂の伝ば寿命 $N_{0.05-0.2}$

(a) $\sigma_a = 260 \text{ MPa}$.

(b) $\sigma_a = 300 \text{ MPa}$.

Fig. 9. Distribution of 0.2 mm crack initiation life, crack propagation life and fatigue life.

(a) $\sigma_a = 260 \text{ MPa}$.

(b) $\sigma_a = 300 \text{ MPa}$.

Fig. 10. Distribution of microcrack propagation life.

のばらつきの検討も行う。

Fig. 8 に、50 μm のき裂発生寿命 $N_{0.05}$ をワイブル確率紙にプロットしたものを示す。●、▲印は主き裂を対象としたとき、○、△印は準き裂も含めたときである。いずれも 3 母数ワイブル分布で整理される。また、主き裂のみの場合と準き裂を含めた場合の分布状態に大きな違いは認められない。

Fig. 9 は、 $N_{0.2}$ 、 $N_{0.2-f}$ 、 N_f をワイブル確率紙に整理したものである。いずれの応力の場合も、 $N_{0.2}$ および N_f は 3 母数ワイブル分布で、 $N_{0.2-f}$ は 2 母数ワイブル分布 ($\gamma=0$) で整理される。

Fig. 10 は、50 μm から 0.2 mm までの微視的き裂の伝ば寿命 $N_{0.05-0.2}$ のワイブルプロットである。比較のため、先に示した $N_{0.05}$ および $N_{0.2}$ を実線で示している。 $N_{0.05-0.2}$ は 3 母数ワイブル分布で整理される。また、応力が高い方が $N_{0.2}$ に占める 50 μm のき裂発生寿命の割合が大きい。

以上のように、それぞれの寿命はいずれも 3 母数ワイブル分布または 2 母数ワイブル分布により整理される。つぎに、これら寿命の変動係数 $CV (=s/\mu, s:$

Fig. 11. CV versus σ_a/σ_w relation for $N_{0.2}$ ($N_{0.3}$), $N_{0.2-f}$ ($N_{0.3-f}$) and N_f (N_f).

標準偏差, μ : 平均寿命) を調べることでばらつき特性の評価を行うが, 同一素材の焼なまし平滑材 (920°C, 1 時間保持) の結果も示し比較検討を行う。焼なまし材でも, 本材料と同様にき裂伝ば曲線はかなりばらつくが, その中でもき裂が 0.3 mm に達するまでのばらつきが特に大きく, 0.3 mm 以後の伝ば曲線のばらつきはそれほど大きくはない。また, 発生時のき裂長さはいずれも 0.1 mm 以下である。以上のことを考慮して, 焼なまし材に関しては 0.1 mm のき裂発生寿命 $N_{0.1}$, 0.1 mm から 0.3 mm までの微視的き裂の伝ば寿命 $N_{0.1-0.3}$, 0.3 mm のき裂発生寿命 $N_{0.3}$, 0.3 mm から破断までのき裂伝ば寿命 $N_{0.3-f}$ および疲労寿命 N_f のワイブル分布による整理を行い, それぞれの変動係数 CV を求め, 本実験の CV との比較を行う。

Fig. 11 に, $N_{0.2}$ ($N_{0.3}$), $N_{0.2-f}$ ($N_{0.3-f}$) および N_f (N_f) の変動係数と相対応力 σ_a/σ_w の関係を示す (以下, (N) は焼なまし材の寿命を意味するものとする。また, 焼なまし材の結果は実線で示す)。いずれの場合も N_f と 0.2 mm (または 0.3 mm) のき裂発生寿命の CV は, 疲労限度近傍で急激に増加する。すなわち, 疲労寿命のばらつきは, それぞれき裂が 0.2 mm (または 0.3 mm) に達するまでのばらつきに支配されているといえる。き裂長さ 0.2 mm (および 0.3 mm) は, それぞれの材料の結晶粒径のほぼ 8 倍である。一方, き裂伝ば寿命は疲労限度近傍より応力が高い場合の CV が多少大きい傾向にあるが, 応力依存性はあまり認められない。応力が高い場合の CV が増加した理由

Fig. 12. CV versus σ_a/σ_w relation for microcrack initiation and propagation life.

Table III. Weibull parameters and statistical distribution data.

N	σ_a (MPa)	m	η ($\times 10^5$)	γ ($\times 10^5$)	μ ($\times 10^5$)	CV	R
$N_{0.05}$	260	1.19	57.1	13.4	67.3	0.67	0.977
	300	2.50	16.5	0.17	14.8	0.42	0.996
$N_{0.05-0.2}$	260	0.97	27.0	15.3	42.6	0.67	0.983
	300	2.05	7.5	0.77	7.5	0.38	0.993
$N_{0.2}$	260	1.79	88.7	21.3	100.2	0.44	0.966
	300	4.98	23.8	0.02	21.9	0.23	0.955
$N_{0.2-f}$	260	5.74	36.7	0	33.9	0.20	0.938
	300	4.23	10.2	0	9.3	0.26	0.975
N_f	260	1.87	90.4	55.6	135.8	0.33	0.956
	300	6.01	28.0	4.95	30.9	0.16	0.962

として, 高応力下では比較的長い寸法のき裂が多数発生し, これらが干渉・合体しながら伝ばすることが考えられる。また, 疲労限度を基準とした相対応力で整理すれば, 焼ならし材と焼なまし材の関係はほぼ一致するので, 焼なまし材の CV- σ_a/σ_w 関係から焼ならし材のばらつき特性を近似的に推定できる。

Fig. 12 に, 0.05 mm (および 0.1 mm) のき裂発生寿命 $N_{0.05}$ ($N_{0.1}$) と微視的き裂の伝ば寿命 $N_{0.05-0.2}$ ($N_{0.1-0.3}$) の CV- σ_a/σ_w 関係を示す。この場合も, 焼ならし材の結果は焼なまし材とはほぼ一致している。また, き裂発生寿命, 微視的き裂伝ば寿命いずれも CV は応力の減少とともに増加するが, 微視的き裂の伝ば寿命の CV は疲労限度近傍で急激に増加する傾向にある。下限界近傍の低伝ば速度域 (例えば, $dl/dN < 10^{-6}$ mm/cycle) ではき裂は組織に特に敏感となり, このような場合微視的き裂の伝ば挙動に組織依存性が現れやすくなると思われる。すなわち, 応力が疲労限度に近づけば微視的き裂の挙動に組織の影響が顕著に現れ, き裂伝ばのばらつきは急激に増加することになる。

Table III に, 以上に示した焼ならし材の各種寿命分布における, ワイブル母数と各種統計量の値をそれぞれ示す。

4 結 論

疲労寿命のばらつきの物理的背景を検討するため, S20C 焼ならし平滑材の回転曲げ疲労試験を行った。そして, それぞれの応力ごとに 15 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) の発生・伝ば挙動の連続観察を行った。また, 同一素材の焼なまし材で得られたばらつき特性との比較検討を行った。得られた主な結論を以下に示す。

(1) S-N 曲線のばらつきは応力が小さいほど大きくなる。疲労限度の応力を 10^7 回繰返した後の表面に

は、最大で $60\text{ }\mu\text{m}$ (結晶粒径約 $25\text{ }\mu\text{m}$) の微視的停留き裂が複数認められた。

(2) 発生時のき裂長さは応力にあまり影響されず最大でも $50\text{ }\mu\text{m}$ 以下である。また、き裂伝ば曲線のばらつきは大きい、き裂が 0.2 mm (結晶粒径の約 8 倍) に達するまでのばらつきが特に大きく、その後のばらつきはそれ程大きくない。き裂が 0.2 mm を越えるまでは、伝ばしていたき裂が一時的に伝ばを停止する現象がしばしば観察された。伝ば性のき裂が一時的に停留するのは微視組織 (特にパーライト層) の影響である。

(3) き裂伝ば曲線が大きくばらつく場合でも、 $\ln \ell - N/N_f$ 関係で整理すればそのばらつきは相対的にかなり小さくなる。

(4) 疲労寿命、き裂発生寿命および微視的き裂 (結晶粒径の 8 倍程度より小さい寸法のき裂) の伝ば寿命はいずれも 3 母数ワイブル分布で整理される。一方、8 倍を越える比較的大きい寸法のき裂伝ば寿命は 2 母数ワイブル ($\gamma=0$) で整理される。また、それら寿命の変動係数 CV は、 0.2 mm から破断するまでのき裂伝ば寿命を除いていずれも応力の減少とともに増加する。特に 0.2 mm 以下の微視的き裂の伝ば寿命における CV は疲労限度近傍で急激に増加する。一方、 0.2 mm 以後のき裂伝ば寿命の CV に応力依存性はあまり認められない。

(5) 相対応力 σ_a/σ_w (σ_w : 疲労限度) で整理すれば焼ならし材と焼なまし材の CV の値はほぼ対応する。すなわち、焼なまし材の結果から焼ならし材のばらつきを近似的に推定できる。

終わりに、実験に協力頂いた大分大学工学部技官三

浦篤義氏および研究当時大分大学工学部卒業研究生、小山田友紀、早田 卓の両君に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) H. Nisitani and M. Goto, The Behaviour of Short Fatigue Cracks, (Edited by K. J. Miller and E. R. de los Rios), EGF Pub. 1 (1987) 461 Mech. Engng Pub.
- 2) J. Lankford, Fatigue Eng. Mater. Struct., 5, 233 (1982).
- 3) K. Tanaka, M. Hojo and Y. Nakai ASTM STP, 811, 207 (1983).
- 4) 戸梶恵郎, 小川武史, 原田行雄, 材料, 35, 394 (1986).
- 5) 西島 敏, 増田千利, 材料, 22, 1097 (1973).
- 6) 田中道七, 藤井 勉, 材料, 25, 909 (1976).
- 7) 酒井達雄, 安井秀昭, 田中道七, 材料, 36, 915 (1987).
- 8) 佐々木茂美, 越智保雄, 石井 明, 安部浩文, 日本機械学会論文集, A-54, 426 (1988).
- 9) 後藤真宏, 福島 茂, 西谷弘信, 日本機械学会論文集, A-57, 1050 (1991).
- 10) M. Goto, Fatigue Eng. Mater. Struct., 15, 953 (1992).
- 11) 後藤真宏, 福島 茂, 西谷弘信, 材料, 41, 1499 (1992).
- 12) 戸梶恵郎, 安藤善司, 材料, 30, 15 (1981).
- 13) 越智保雄, 佐々木茂美, 平沢泰治, 材料, 31, 559 (1982).
- 14) 権 在度, 中曾根祐司, 北川英夫, 材料, 36, 927 (1987).
- 15) 後藤真宏, 柳川恭廣, 西谷弘信, 日本機械学会論文集, A-55, 1493 (1989).
- 16) M. Goto, Fatigue Eng. Mater. Struct., 14, 833 (1991).
- 17) M. Goto, Eng. Fract. Mech., 41, 893 (1992).
- 18) W. J. Weibull, J. Appl. Mech., 18, 293 (1951).
- 19) 酒井達雄, 田中道七, 材料, 29, 17 (1980).