疲労寿命のばらつき特性とフェライト粒径の関係*

後藤 真 宏^{*1}, 三浦 篤 義^{*1}, 西谷 弘 信^{*2}Relation Between the Scatter Characteristics of
Fatigue Life and Ferrite Grain Size

Masahiro GOTO, Atsuyoshi MIURA and Hironobu NISITANI

It is important to evaluate the scatter in fatigue life. In the present study, rotating bending fatigue tests of 0.21% C steel having three ferrite grain sizes were carried out respectively. The initiation and growth behavior of cracks which led to the fracture of the specimens were examined. The fatigue data were statistically analyzed, and the following results were obtained. The scatter in the crack propagation behavior at the stress close to fatigue limit is especially large. Such a large scatter depends on the behavior of microcracks whose length is about 8 times smaller than the grain size. However, the scatter in propagation behavior of cracks 8 times larger than the grain size is relatively small. Distributions relating to all phases of lifetime can be expressed by the two-or three-parameter Weibull distribution. The coefficient of variance CV vs σ_a/σ_w relation for these distributions can be individually expressed as a narrow band independent of ferrite grain size.

Key Words: Fatigue, Statistical Treatment, Ferrite Grain Size, Microcrack, Plain Specimen, Weibull Distribution

1. 結 言

平滑材の疲労寿命は、き裂発生寿命と微小き裂伝ば寿命により支配される⁽¹⁾ので、疲労寿命およびそのばらつき特性の物理的背景を検討するには、微小き裂の挙動を把握する必要がある。微視的き裂では、伝ば速度が母相粒界や相境界で著しく低下すること、また同一 ΔK のもとでは長いき裂より伝ば速度が大きくかつかなりばらつくことなどが示されている^{(2)~(6)}。以上のように、平滑材では、小さいき裂の挙動が疲労寿命に大きく影響しかつ組織の影響を受けて大きくばらつくので、疲労寿命のばらつき特性を検討するには、微視的き裂の挙動を詳細に調べる必要がある。

疲労寿命のばらつきについて検討した報告^{(7)~(11)}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が、微視的き裂の挙動を通して疲労寿命のばらつき特性を検討したものはそれほど多くはない。著者らは先に、S 45 C 調質材⁽¹²⁾、S 20 C 焼なまし材⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾および S 20 C 焼ならし材⁽¹⁵⁾の回転曲げ疲労試験を行い、疲労寿命のばらつき特性には微視的き裂の発生および

伝ば挙動のばらつきが反映されていることを定量的に示した。しかしながら、微視的き裂のばらつきに及ぼす組織の影響に関して十分な検討は行っていない。

本研究では以上のことを考慮して、3 種類のフェライト粒径をもつ S 20 C 平滑材の回転曲げ疲労試験の結果から、疲労寿命のばらつきの物理的背景を検討した。すなわち、各応力ごとに複数(15~18 本)の試験片を破断させ、すべての試験片について破断に導いたき裂の挙動をレプリカ法による表面の連続観察により追跡した。そして、疲労寿命のばらつきと微視的き裂の挙動との関係およびそれに及ぼすフェライト粒径の影響を検討した。また、ワイブル分布による各種データの統計処理を行い、ばらつきの定量的評価を行った。これまで、小孔から発生したき裂の伝ば挙動のばらつきに及ぼすフェライト粒径の影響⁽¹⁶⁾については検討されているが、平滑材の微視的き裂でその影響を統計的に検討した報告は見られない。

2. 試験片・材料および実験方法

素材は、表 1 に示す化学成分の市販の S 20 C 圧延丸棒(直径約 22 mm)である。それに表 2 に示す熱処理を行った。表 3 に熱処理後の機械的性質を示す。図 1 に組織写真を示す。それぞれの材料のフェライト粒径

* 原稿受付 平成 4 年 11 月 19 日。

*¹ 正員, 大分大学工学部(〒870-11 大分市旦野原 700)。*² 正員, 九州大学工学部(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

d は、885°C 焼ならし材で約 25 μm 、920°C 焼なまし材で約 40 μm 、1020°C 焼なまし材で約 70 μm である。

図 2 に試験片形状を示す。試験片は切欠半径 20 mm の環状切欠きを有するが、その切欠係数は 1 に近く実質的には平滑材とみなせるので、以後これを平滑材と呼ぶ。試験片製作後 600°C で 1 h の応力除去焼なましを行い、さらに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 14.8 N・m, 3 000 rpm) である。

試験片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ついて金属顕微鏡($\times 400$)で行った。き裂長さ l は試験片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

本研究では、疲労限度 σ_w 近傍から降伏点付近までの範囲の応力における疲労寿命のばらつき特性を検討するため、 $d=25\ \mu\text{m}$ の材料では $\sigma_a=260, 300\ \text{MPa}$ ($1.06\sigma_w < \sigma_a < 1.23\sigma_w$, $\sigma_w=245\ \text{MPa}$) にて、 $d=40\ \mu\text{m}$ では $\sigma_a=240, 255, 270\ \text{MPa}$ ($1.07\sigma_w < \sigma_a < 1.2\sigma_w$, $\sigma_w=225\ \text{MPa}$) にて、 $d=70\ \mu\text{m}$ では $\sigma_a=215, 230\ \text{MPa}$ ($1.05\sigma_w < \sigma_a < 1.12\sigma_w$, $\sigma_w=205\ \text{MPa}$) にてそれぞれ 15~18 本の試験片を破断させ、すべての試験片について表面に発生した主き裂(破断に導いたき裂)の発生・伝ば挙動を観察した。以下に得られた結果を項目ごとに示す。

3.1 S-N 曲線 図 3 に疲労限度を基準とした

表 1 化学成分(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

表 2 熱処理条件とフェライト粒径

Grain size $d\ (\mu\text{m})$	Heat treatment condition
25	885°C(1hr), Normalizing
40	920°C(1hr), Annealing
70	1020°C(1hr), Annealing

表 3 機械的性質

Grain size $d\ (\mu\text{m})$	MPa			%	Hv^*
	σ_{e1}	σ_s	σ_T	ϕ	
25	324	498	978	63.2	146
40	263	467	942	57.2	135
70	225	460	960	54.5	130

*:Vickers hardness(load:9.8N)

S-N 曲線を示す。いずれの場合も、疲労寿命 N_f のばらつきは応力が小さいほど増加する傾向にある。また、疲労限度 σ_w は $d=25, 40, 70\ \mu\text{m}$ についてそれぞれ 245, 225, 205 MPa である。なお、 $d=70\ \mu\text{m}$ については、 $\sigma_a=1.05\sigma_w$ の繰返しのもとで 10^7 回をわずかに越えて破断する例が一例観察されたので、疲労限度は 2×10^7 回の繰返しにも耐えることを確認した。いずれの場合も、疲労限度の応力を 10^7 回または 2×10^7 回繰返した後の表面には微視的停留き裂が多数認められた。図 4 に、表面で認められた最大寸法の微視的停留き裂を示す。最大の停留き裂長さ l_{npe} は、 $d=25, 40, 70\ \mu\text{m}$ についてそれぞれ 60, 105, 195 μm である。また、き裂先端がフェライト粒界やパーライト相で停留した例も観察されるが、表面で見る限りフェライト粒内である場合が多い。

3.2 き裂発生および伝ば挙動 図 5 に、 $\sigma_a=240$

図 1 各種材料の組織写真

図 2 試験片の形状と寸法

(a) $d=25\ \mu\text{m}$ の場合

(b) $d=40\ \mu\text{m}$ の場合

(c) $d=70\ \mu\text{m}$ の場合

図 3 疲労限度を基準とした $S-N$ 曲線

MPa ($=1.07\sigma_w$) を繰返したときの、 $d=40\ \mu\text{m}$ の場合の主な裂近傍の表面状態の変化を示す。繰返しの初期から将来き裂となる部分にはすべりが認められ、それが繰返しとともにほとんど寸法を増すことなく、 $N=8\times 10^5$ 回でき裂となっている。き裂発生後き裂は伝ば・拡大するが、 1.2×10^6 から 1.8×10^6 回の間は表面で見る限り一時的に伝ばを停止している。しかしなが

$d=25\ \mu\text{m}$, $\sigma_w=245\ \text{MPa}$
 $l_{npc}=60\ \mu\text{m}$

$d=40\ \mu\text{m}$, $\sigma_w=225\ \text{MPa}$
 $l_{npc}=105\ \mu\text{m}$

$d=70\ \mu\text{m}$, $\sigma_w=205\ \text{MPa}$
 $l_{npc}=195\ \mu\text{m}$

l_{npc} : Nonpropagating crack length
⊙: Crack tip, d : Grain size

図 4 疲労限度における各種材料に発生した最大寸法の微視的停滞き裂

⊙: Crack tip
↔: Axial direction
—: $50\ \mu\text{m}$, $N_f=3.04\times 10^6$

$N=0$

2×10^5

8×10^5

10^6

1.2×10^6

1.8×10^6

2.2×10^6

図 5 $d=40\ \mu\text{m}$ の材料に $\sigma_a=240\ \text{MPa}$ ($\approx 1.07\sigma_w$) を繰返したときの表面状態の変化 ($N_f=3.04\times 10^6$)

ら、その後急速に成長し試験片を破断に導く。他のフェライト粒径についてもこれと同様の現象が認められた。

図6に、それぞれの d の場合で $\sigma_a \cong 1.06\sigma_w$ を繰返したときの主き裂の伝ば曲線を示す。いずれの場合も伝ば曲線のばらつきは大きい、き裂が $d=25\mu\text{m}$ の

場合は 0.2mm に達するまで、 $d=40\mu\text{m}$ の場合は 0.3mm に達するまで、 $d=70\mu\text{m}$ の場合は 0.6mm に達するまでの伝ば曲線のばらつきが特に大きく、その後の伝ば挙動のばらつきはそれほど大きくないことがわかる。このときのき裂長さ $0.2, 0.3, 0.6\text{mm}$ は、

(a) $d=25\mu\text{m}$ の場合

(b) $d=40\mu\text{m}$ の場合

(c) $d=70\mu\text{m}$ の場合

図6 $\sigma_a \cong 1.06\sigma_w$ を繰返したときの主き裂の伝ば曲線

いずれの場合もそれぞれのフェライト粒径のほぼ8倍である。

図7は、 $d=70\mu\text{m}$ の試験片に $\sigma_a \approx 1.05\sigma_w$ を繰返し、き裂($l=460\mu\text{m}$)が一時的に停留したときのき裂と組織の関係を調べたものである。き裂は両先端ともパーライト相に達して停留している。また、片方のき裂先端(先端B)はパーライト相に達した後フェライト・パーライト境界に沿ってわずかに成長し、再びパーライト相で伝ばを停止している。以上のように、微視的き裂の伝ば挙動は組織(特にパーライト相)の影響を受け大きくばらつくが、き裂の成長につれその影響は小さくなり、いずれのフェライト粒径の場合もき裂が粒径の8倍程度($l=8d$)を越えれば、その影響はか

なり小さくなる。

図8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で整理したものを示す。図6のき裂伝ば曲線のばらつきがかなり大きい場合でも、 $\ln l-N_f/N_f$ 関係で整理すればそのばらつきは相対的に小さくなる。

3.3 疲労挙動のばらつきの統計的評価

以上では、疲労寿命のばらつき特性の定性的検討を行った。ここでは、ばらつきの定量的評価を行うが、そのためには疲労挙動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について調べた研究は数多く、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^{(7)~(23)}。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およびフェライト粒径の違いがばらつきに及ぼす影響の定量的評価を行う。ここで、3母数ワイブル分布関数 $F(x)$ は次式⁽²⁴⁾で定義される。

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

上式中、 m, η, r 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⁽²⁵⁾により行った。

き裂伝ば曲線(図6)から、いずれの材料の場合もき裂長さがそれぞれのフェライト粒径の8倍程度に達するまでの伝ば曲線のばらつきが特に大きいことが示された。また、発生時のき裂長さは最大でもフェライト粒径の2倍程度($d=25, 40, 70\mu\text{m}$ に対して、発生時の長さはそれぞれ0.05, 0.1, 0.15 mm以下)である。これらを考慮して、ここでは $l=2d$ のき裂発生寿命 N_{2d} 、 $l=8d$ のき裂発生寿命 N_{8d} 、き裂が $8d$ に達して

図7 $d=70\mu\text{m}$ の材料で一時的に伝ばを停止したき裂と組織の関係($\sigma_a=215\text{MPa} \approx 1.05\sigma_w$)

図8 主き裂の $\ln l-N_f/N_f$ 関係

から破断するまでの伝ば寿命 $N_{8d \rightarrow f}$ および疲労寿命 N_f の分布状態を示す。さらに、微視的き裂の伝ば挙動のばらつき特性を検討するため、き裂長さが $2d$ から $8d$ に達するまでの寿命 $N_{2d \rightarrow 8d}$ の分布状態の検討も行った。

図 9 に、それぞれの材料で $\sigma_a \cong 1.06\sigma_w$ を繰返したときの N_{8d} , $N_{8d \rightarrow f}$ および N_f をワイブル確率紙にプロットしたものを示す。図 10 は、 N_{2d} および $N_{2d \rightarrow 8d}$ をワイブル確率紙にプロットしたものである。実線は式 (1) の分布関数であるが、実験点とよく一致しており

(a) $d = 25 \mu\text{m}$ の場合 (a) $d = 25 \mu\text{m}$ の場合 (b) $d = 40 \mu\text{m}$ の場合 (b) $d = 40 \mu\text{m}$ の場合 (c) $d = 70 \mu\text{m}$ の場合 (c) $d = 70 \mu\text{m}$ の場合

図 9 $\sigma_a \cong 1.06\sigma_w$ における N_{8d} , $N_{8d \rightarrow f}$ および N_f のワイブル確率紙による整理

図 10 $\sigma_a \cong 1.06\sigma_w$ における N_{2d} および $N_{2d \rightarrow 8d}$ のワイブル確率紙による整理

いずれの寿命も2母数または3母数ワイブル分布で整理できる。他の応力レベルの場合もこれと同様の整理ができる。

次に、以上の寿命のばらつき特性とフェライト粒径の関係を検討する。ここでは、各寿命の変動係数 $CV(=s/\mu, s$: 標準偏差, μ : 平均寿命) を求め、 CV の応力依存性を比較することで、フェライト粒径の影響を定量的に評価する。

図11に、 $CV-\sigma_a/\sigma_w$ 関係を示す。(a)、(b)、(c) はそれぞれ N_{8d} 、 N_{8d-f} および N_f の場合である。 N_{8d} と N_f の CV は応力の減少とともに増加する。一方、 N_{8d-f} の CV には応力依存性があまり認められず、いずれも CV は0.2~0.25程度である。すなわち、疲労寿命のばらつきは主として、き裂長さがフェライト粒

(a) N_{8d} の場合

(b) N_{8d-f} の場合

(c) N_f の場合

図11 $CV-\sigma_a/\sigma_w$ 関係

径の8倍程度に達するまでのばらつきにより支配されているといえる。また、いずれの寿命の $CV-\sigma_a/\sigma_w$ 関係もフェライト粒径の影響は認められず、比較的狭いバンドで近似できる。すなわち、疲労限度を基準とした相対応力で整理すれば、異なるフェライト粒径をもつ平滑材のばらつき特性を近似的に評価できる。

図12は、 N_{2d} および N_{2d-8d} の $CV-\sigma_a/\sigma_w$ 関係である。 N_{2d} の CV は応力の減少とともに増加するが、図11で示したように、 N_{8d-f} を除く他の寿命の CV は応力の減少とともに疲労限度付近の CV の増加が特に大きいのにに対し、 N_{2d} の CV に疲労限度付近の大きな増加傾向は認められない。すべり帯を起点とするき裂発生には、小応力下では1結晶粒の性質が関係するのに対し、大応力下では数結晶粒の平均的性質が関係する。このことが、き裂発生寿命のばらつきの応力依存性として現れる。一方、微視的き裂の伝ば寿命 N_{2d-8d} の CV は、 $\sigma_a/\sigma_w > 1.1$ の範囲では応力依存性があまり認められないが、応力が疲労限度に近づけば、応力の減少とともに CV は急激に増加する。すなわち、微視的き裂の伝ば挙動に及ぼす組織の影響は疲労限度近傍で特に大きいといえる。また、 N_{2d} のばらつきが多少大きい、 N_{2d} および N_{2d-8d} の $CV-\sigma_a/\sigma_w$ 関係はフェライト粒径にあまり影響されず、それぞれ1本のバンドで近似できる。

比較的大きなき裂では伝ば挙動の相対的なばらつき

(a) N_{2d} の場合

(b) N_{2d-8d} の場合

図12 $CV-\sigma_a/\sigma_w$ 関係

が少なく、 CV が応力にあまり影響されず $0.2 \sim 0.25$ 程度であるのに対し、微視的き裂では伝ば挙動のばらつきは大きく CV に応力依存性が強く現れることが示された。き裂の挙動は、き裂伝ば下限界近傍の低 dl/dN 域 (例えば $\sim 10^{-7}$ mm/cycle) では組織に特に敏感と考えられ、このような場合はばらつき特性に応力依存性が現れやすくなる。それぞれの材料で、 $\sigma_a \cong 1.06 \sigma_w$ を繰返したときの $l=8d$ における平均的な dl/dN を伝ば曲線から求めたところ、ばらつきはかなり大きいがいずれの場合も $\sim 10^{-6}$ mm/cycle 程度である。すなわち、き裂伝ば曲線に組織の影響が顕著に現れなくなるき裂長さとして、平均的き裂伝ば速度が 10^{-6} mm/cycle を十分に越える長さを考えればよいと思われる。

4. 結 論

疲労寿命のばらつき特性に及ぼす微視組織の影響を検討するため、3種類のフェライト粒径 ($d=25, 40, 70 \mu\text{m}$) を有する S 20 C 平滑材の回転曲げ疲労試験を行った。それぞれの応力ごとに 15~18 本の試験片を破断させ、すべての試験片で破断に導いたき裂の挙動をレプリカ法により連続観察した。実験結果の統計処理も併せて行い、以下に示す結論を得た。

(1) 疲労限度の応力 σ_w ($d=25, 40, 70 \mu\text{m}$ についてそれぞれ $\sigma_w=245, 225, 205 \text{ MPa}$) を 10^7 または 2×10^7 回繰返した後の表面には微視的停留き裂が多数認められ、その最大長さはいずれもフェライト粒径の 3 倍程度である。また、停留時のき裂先端は表面で見る限りフェライト粒内にあることが多い。

(2) き裂発生時の最大のき裂長さは、いずれの場合もフェライト粒径の 2 倍以下である。

(3) き裂伝ば曲線のばらつきはいずれの材料でもかなり大きい。き裂長さが $d=25 \mu\text{m}$ では 0.2 mm 、 $d=40 \mu\text{m}$ では 0.3 mm 、 $d=70 \mu\text{m}$ では 0.6 mm に達するまでのばらつきが特に大きく、その後の伝ば曲線のばらつきはそれほど大きくない。また、 $0.2, 0.3$ および 0.6 mm はそれぞれのフェライト粒径の約 8 倍である。

(4) 破断する応力を繰返す場合でも、き裂長さ l が $8d$ に達するまでは、き裂がしばらくの間伝ばを停止する現象が頻繁に認められた。このとき、一時的に伝ばを停止したき裂の先端は多くの場合パーライト相にある。

(5) 疲労寿命のばらつきと微視的き裂の挙動のばらつきの関係を調べるため、 $2d$ および $8d$ の長さのき

裂発生寿命 N_{2d}, N_{8d} , $l=2d$ から $8d$ までの微視的き裂伝ば寿命 $N_{2d \rightarrow 8d}$, $l=8d$ から破断までのき裂伝ば寿命 $N_{8d \rightarrow f}$ および疲労寿命 N_f それぞれの分布状態を調べたところ、いずれも 2 母数または 3 母数ワイブル分布で整理できた。

(6) $N_{8d \rightarrow f}$ を除けば、いずれの寿命も応力が減少して疲労限度に近づくとともに変動係数 CV は増加する。 $N_{8d \rightarrow f}$ の CV には応力依存性があまり認められず、 CV は $0.2 \sim 0.25$ 程度となる。

(7) $N_{2d \rightarrow 8d}$ では、応力が $1.1 \sigma_w$ (σ_w : 疲労限度) を越える範囲では CV に応力依存性はあまり認められないが、それ以下では応力が疲労限度に近づくとつれ急激に CV が増加する。

(8) (5) に示した各寿命の CV は疲労限度を基準とした相対応力 σ_a/σ_w で整理すれば、フェライト粒径の違いにほとんど影響されず 1 本のバンドで近似できる。すなわち、この関係から異なるフェライト粒径をもつ試験片のばらつき特性を定量的に評価できる。

終わりに、実験に協力いただいた本学卒業研究生小畑智紀君 [現: 全日空整備(株)] および三浦嘉久君 [現: 西日本電線(株)] に感謝する。

文 献

- (1) Nisitani, H. and Goto, M (Miller, K. J. and de los Rios, E. R. 編), *The Behaviour of Short Fatigue Cracks*, EGF Pub, 1 (1987), 461, Mech, Engng Pub..
- (2) Lankford, J., *Fatigue Eng. Mater. Struct.*, 8-2 (1982), 161.
- (3) Tanaka, K., ほか 2 名, *ASTM STP*, 811, (1983), 207.
- (4) 戸梶・ほか 3 名, 材料, 35-391 (1986), 394.
- (5) 皮籠石・ほか 2 名, 機論, 57-537, A (1991), 1043.
- (6) 皮籠石・ほか 2 名, 機論, 57-554, A (1991), 2866.
- (7) 西島・増田, 材料, 22-243 (1973), 1097.
- (8) 田中・藤井, 材料, 25-276 (1976), 909.
- (9) 酒井・ほか 2 名, 材料, 36-408 (1987), 915.
- (10) 佐々木・ほか 3 名, 機論, 54-509, A (1988), 426.
- (11) 材料強度確率モデル研究会編, 材料強度の統計的性質, (1992), 養賢堂.
- (12) 後藤・ほか 2 名, 文献(5)の 1050 ページ.
- (13) Goto, M., *Fatigue Eng. Mater. Struct.*, 15-10 (1992), 953.
- (14) 後藤・ほか 2 名, 材料, 41-469 (1992), 1499.
- (15) 後藤・ほか 2 名, 材料, 42-473 (1993), 163.
- (16) Ochi, Y., ほか 2 名, *Fatigue Eng. Mater. Struct.*, 8-4 (1985), 327.
- (17) 戸梶・ほか 3 名, 材料, 30-327 (1981), 15.
- (18) 越智・ほか 2 名, 材料, 31-345 (1982), 559.
- (19) 権・ほか 2 名, 材料, 36-408 (1987), 927.
- (20) 後藤・ほか 2 名, 機論, 55-515, A (1989), 1493.
- (21) Goto, M., *Fatigue Eng. Mater. Struct.*, 14-8 (1991), 833.
- (22) 後藤・ほか 3 名, 機論, 57-543, A (1991), 2641.
- (23) Goto, M., *Eng. Fract. Mech.*, 42-6 (1992), 893.
- (24) Weibull, W. J., *J. Appl. Mech.*, 18 (1951), 293.
- (25) 酒井・田中, 材料, 29-316 (1980), 17.