高強度鋼における内部き裂発生寿命と疲労限度の実験的推定*

中島 正 貴^{*1}, 神谷 奈 美^{*2}, 井藤 賀 久 岳^{*3}
戸 梶 恵 郎^{*4}, 高 行 男^{*3}Experimental Estimation of Subsurface Crack Initiation Lives
and Intrinsic Fatigue Limit in a High Strength SteelMasaki NAKAJIMA^{*5}, Nami KAMIYA, Hisatake ITOGA,
Keiro TOKAJI and Haeng-Nam KO^{*5} Department of Mechanical Engineering, Toyota College of Technology,
2-1 Eisei-cho, Toyota-shi, Aichi, 471-8525 Japan

Fatigue tests under two-step variable amplitude loading were conducted on a high carbon chromium steel, JIS SUJ 2, in order to clarify the crack initiation lives and the intrinsic fatigue limit in subsurface fracture. Particular attention was paid to the granular area around the non-metallic inclusion in fish-eye. The granular area does not appear in short life region at high stress levels, but appears in long life region at low stress levels. Using this property, low-high sequences with a different cycle ratio at low stress level were applied to shot-peened specimens. If the granular area is observed after testing, then it is assumed that the granular area is generated in the cycle ratio examined. It was found that subsurface crack nucleation took place at the early stage of fatigue life, i.e. 5% or so. Similar low-high sequence tests with 5×10^8 cycles and 10^9 cycles at low stress levels were performed. Provided that the granular area is not observed after testing, the low stress level applied could be an intrinsic fatigue limit for subsurface fracture. After testing for 5×10^8 cycles, the granular area was observed at a low stress level of 800 MPa, but not at 750 MPa. After 10^9 cycles, the granular area was not seen at 650 MPa, but seen at 700 MPa. Therefore, it is concluded that the intrinsic fatigue limit would exist around 650 MPa in the present material.

Key Words: Fatigue, Fractography, Iron and Steel, Variable Amplitude Loading Test, Crack Initiation Life, Fatigue Limit, Subsurface Fracture

1. 緒 言

高強度鋼や表面処理材では、 $S-N$ 曲線に特徴的な二段折れ曲り現象が現れ、従来の疲労限度以下の応力において fish-eye を伴う内部き裂の発生、進展によって破壊を生じる^{(1)~(6)}。この内部破壊の機構については不明な点が多く、内部き裂の発生時期や内部起点形破壊に対する疲労限度に関しても、直接観察することが不可能であるために研究は少ない⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

ところで、内部起点形破壊において、内部き裂は非金属介在物周辺に粒状領域(Granular area)を形成後、fish-eye へと遷移し、本研究のような回転曲げ疲労試験では fish-eye が試験片表面に達した時点から、表面き裂として進展することが知られている⁽⁹⁾。また、こ

の破壊機構の初期段階に見られる非金属介在物を取りまく粒状領域は、低応力・長寿命域においては認められるが、高応力・短寿命域では現れないことが明らかになっている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

本研究では、この粒状領域発生に関する性質を利用して、それが現れる応力と現れない応力の間で(低→高)二段二重変動応力試験を行い、内部き裂発生時期の推定を行うとともに、内部き裂発生に対する疲労限度の実験的推定を試みた。

2. 供試材および実験方法

2・1 供試材 供試材料は高炭素クロム軸受鋼 JIS SUJ 2 であり、その化学成分[mass.%]は、1.01 C, 0.23 Si, 0.36 Mn, 0.012 P, 0.007 S, 0.06 Cu, 0.04 Ni, 1.45 Cr, 0.02 Mo, Bal. Fe である。材料には焼入れ(835°C・40 分保持後油冷)、焼戻し(180°C・120 分保持後水冷)の熱処理を施しており、熱処理後の機械的性質は引張強さ σ_B : 2 316 MPa, ビッカース硬さ HV : 750~795(平均 778), 伸び δ : 2%, 絞り φ : 0.4% である。熱処理後、最小断面部直径 3 mm の砂時計形試験片に機械加工した。応力集中係数は 1.06 である。さらに、最小断面部に微粒子ショットピーニ

* 原稿受付 2003 年 12 月 11 日。

^{*1} 正員, 豊田工業高等専門学校機械工学科(☎ 471-8525 豊田市栄生町 2-1)。^{*2} 豊田工業高等専門学校専攻科(☎ 471-8525 豊田市栄生町 2-1)。^{*3} 正員, 中日本自動車短期大学(☎ 505-0077 岐阜県加茂郡坂祝町深萱 1301)。^{*4} 正員, 岐阜大学工学部機械システム工学科(☎ 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)。

E-mail: nakajima@toyota-ct.ac.jp

ング処理 (Fine Particle Bonbarding 処理: 以下, SP 処理) を施した。SP 処理には、一段めにスチール系ビーズ (メッシュサイズ: #150, アークハイト: 0.25 N・mm) を、二段めにセラミックス硬質ビーズ (メッシュサイズ: #300, アークハイト: 0.08 N・mm) を用いた。SP 処理を施した理由は、高応力域においても内部起点形破壊を導くためである。

2・2 試験方法 本研究では、実験室大気中において 4 連式片持回転曲げ疲労試験機 (繰返し速度 $f = 3150$ rpm) を用いて試験を実施した。ここでは、fish-eye 形成の初期段階に見られる非金属介在物を取りまく粒状領域に注目して、それが認められる応力域 (低応力・長寿命域) と認められない応力域 (高応力・短寿命域) があることから、それらの応力域の間で (低→高) 二段二重変動応力疲労試験を行った。実験後、走査形電子顕微鏡 (SEM) を用いて、疲労き裂発生点の確認および破面様相の観察を行った。

(a) For subsurface crack initiation life

(b) For intrinsic fatigue limit

Fig.1 Schematic illustrations of two-step variable amplitude loading tests for estimation of subsurface crack initiation lives and intrinsic fatigue limit

2・2・1 内部き裂発生時期の推定 図 1(a) および (b) に、本実験で用いた変動応力疲労試験の模式図を示す。図 1(a) は内部き裂発生時期の推定のための試験の模式図である。これは先述の粒状領域発生に関する性質を利用し、低応力 (σ_L) において任意の繰返し数比 (n_L/N_L) に相当する繰返しを与え、その後高応力 (σ_H) に変動させ、試験片が破断するまで繰返し方法である。破断後の破面に粒状領域が認められれば、それは低応力での繰返しの間に形成されたものと考えられるので、そのときの繰返し数比を内部き裂の発生時期とみなした。後述する $S-N$ 特性から粒状領域の有無を考慮して、低応力には $\sigma_L = 1100$ MPa, 高応力には $\sigma_H = 1600$ MPa を選択した。

2・2・2 疲労限度の推定 図 1(b) の模式図は疲労限度の実験的推定のためのものである。図に示すように、異なる低応力レベル ($\sigma_{L1} \sim \sigma_{L4}$) においてある繰返し数 (n_L) を与えた後、高応力 (σ_H) に変動させ破断まで繰返した。破断後、破面に粒状領域が確認されれば、低応力での繰返しの間にき裂は発生したと考えられる。確認されなければ fish-eye は高応力において形成され、低応力では形成されなかったと考えられるので、粒状領域が確認された σ_{Ln} と確認されなかった σ_{Ln+1} との間に内部き裂発生に対する疲労限度があると思なすことができる。ここでは、低応力として $\sigma_L = 600 \sim 850$ MPa, 繰返し数を $n_L = 5 \times 10^8$ および 10^9 と設定し、高応力には $\sigma_H = 1600$ MPa を選択した。

3. 実験結果

3・1 $S-N$ 特性 一定応力振幅下における疲労試験により得られた $S-N$ 曲線を図 2 に示す。SP 処理を施していない試験片 (以下、未処理材) には特徴的な二段折れ曲り現象が認められ、1400 MPa 以上の高

Fig.2 $S-N$ diagrams

応力域では表面起点形破壊が、1100 MPa 以下の低応力域では多くの場合、内部起点形破壊が生じた。これらの間の応力域では二つの破壊様式が共存しており、短寿命側では表面起点形破壊が、長寿命側では内部起点形破壊が認められた。なお、ステアケース法による一段めの折れ曲り応力は、 $\sigma_w=1275$ MPa であった。一方、SP 材の $S-N$ 曲線には、試験された応力域において二段折れ曲り現象は認められなかった。これは表面が硬化されているため表面起点形破壊を生じず、すべて内部起点形破壊を起こしたためである。すなわち、未処理材で表面起点形破壊を生じる応力域においても、SP 材では内部起点形破壊を生じ、疲労寿命はより長寿命側に位置した。また、SP 材の破面観察の結果、1400 MPa 以下の応力域では破壊起点である非金属介在物のまわりに粒状領域が確認されたが、1500 MPa 以上の応力域では確認されなかった。

(a) $n_L/N_L=2.8\%$

(b) $n_L/N_L=5.2\%$

(c) $n_L/N_L=11.2\%$

Fig. 3 SEM micrographs of fish-eye formed under variable amplitude loading

3・2 内部き裂の発生時期 3・1 節の結果より、1500 MPa 以上の応力で発生した fish-eye において粒状領域が確認されなかったため、粒状領域が発生する低応力 σ_L として 1100 MPa を、粒状領域の発生しない高応力 σ_H として 1600 MPa を選択し、図 1(a) に示す(低→高)二段二重変動応力疲労試験を行った。低応力域における繰返し数は、1100 MPa における一定応力振幅下の疲労寿命($N_L=2.71 \times 10^7$)の 2.8%~92%とした。破断後の破面観察の結果、全試験片 13 本中、2.8%、5.2%、および 11.2%の 3 本の試験片を除く試験片において粒状領域が確認された。

破面観察の結果、粒状領域の認められなかった破面の例を図 3(a)、(b)および(c)に示す。 $n_L/N_L=5\%$ 付近の繰返し数比には 3 本の試験片が用いられており、5.2%の試験片[図 3(b)]に粒状領域が見られず、残り 2 本から粒状領域が認められたことは、内部き裂の発生が、低応力における疲労寿命の約 5%程度ですでに起きていることを示している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。また、10%付近でも 3 本の試験片を用いて試験が行われているが、ほぼ同じ繰返し数比であるにもかかわらず、 $n_L/N_L=11.2\%$ の試験片[図 3(c)]において粒状領域が認められなかった。これは、他の試験片に比べて介在物寸法($\sqrt{\text{area}}=21.5 \mu\text{m}$)が大きく、その寸法が他の試験片の粒状領域寸法とほぼ同程度であったため、粒状領域を経由することなく fish-eye に遷移したものと考えられる。これより内部き裂の発生には、介在物の大きさ、形状および位置等によりばらつきが現れることが示唆される。

3・3 内部き裂発生に対する疲労限度の推定 内部き裂発生に対する疲労限度の推定のために図 1(b) に示す(低→高)二段二重変動応力疲労試験を行った。六つの低応力レベル、すなわち $\sigma_L=600, 650, 700, 750, 800$ および 850 MPa において、あらかじめ設定した繰返し数 $n_L=5 \times 10^8$ および 10^9 を与え、その後高応力レベル $\sigma_H=1600$ MPa へ変動させ、破断まで繰返した。 $n_L=5 \times 10^8$ の場合、 $\sigma_L=800$ および 850 MPa の 2 本の試験片では粒状領域が確認され、600~750 MPa の試験片では粒状領域を確認できなかった。一方 $n_L=10^9$ の場合、 $\sigma_L=700$ および 750 MPa の 2 本の試験片では粒状領域が認められ、600 および 650 MPa の試験片では粒状領域が確認されなかった。図 4(a)および(b)は、この試験の結果より得られた破面の SEM 写真である。図 4(a)は $\sigma_L=650$ MPa において $n_L=10^9$ 繰返された試験片の破面様相で、非金属介在物周辺に粒状領域は確認できない。一方、図 4(b)は $\sigma_L=700$ MPa における結果であり、介在物周

辺に明りょうに粒状領域が認められる。この結果より、粒状領域の現れていない $\sigma_L=650$ MPa の試験片は、fish-eye が高応力での繰返しに間に発生したことを示しており、低応力における繰返し中には、破壊の原因となるき裂が発生しなかったと考えられる。一方、粒状領域が現れている $\sigma_L=700$ MPa の結果では、この内部き裂が低応力での繰返しに間に現れたことを示している。以上の実験において、 $\sigma_L=650$ MPa 以下の応力では粒状領域が確認されず、700 MPa 以上では粒状領域が確認できたことから、繰返し数 10^9 における内部き裂発生に対する疲労限度は、650~700 MPa にあることが示された。

ここで、図2の $S-N$ 曲線における SP 材の寿命(破線)を最小二乗法によって低応力側へ延長して、試験された各応力レベルの寿命を推定すると、 $\sigma_L=750\sim 600$ MPa において $N_L=8.8\times 10^8\sim 3.9\times 10^9$ となり、 10^9 の繰返しは $\sigma_L=650$ MPa の推定寿命 $N_L=2.4\times 10^9$ の約 42% (1/2.4) となる。3・2 節の結果より、内部き裂発生寿命は寿命比の約 5% であると推定された。したがって、650 MPa における 10^9 の繰返しは、この応力レベルにおいて予想されるき裂発生寿命を大きく超えていると考えられる。

(a) $\sigma_L=650$ MPa $\rightarrow \sigma_H=1\ 600$ MPa ($n_H=1.53\times 10^5$)

(b) $\sigma_L=700$ MPa $\rightarrow \sigma_H=1\ 600$ MPa ($n_H=4.51\times 10^4$)

Fig. 4 SEM micrographs of inclusion and granular area in fish-eye formed under variable amplitude loading ($n_L=10^9$).

4. 考 察

4・1 ΔK による評価 村上らによる $\sqrt{area}$ パラメータモデル⁽¹⁾を用いて評価した介在物および粒状領域の応力拡大係数 ΔK と繰返し数比の関係を図5に示す。 ΔK の計算には以下の式を用いた。

$$\Delta K=0.5\sigma\sqrt{\pi\sqrt{area}} \quad \cdots \cdots (1)$$

なお、ここで用いた σ は介在物の位置における応力である。また、図中 $n_L/N_L=1$ の結果(右端の点)は 1 100 MPa における一定応力振幅下で破壊に至った試験片のものであり、それ以外の実験点($n_L/N_L=2.8\%\sim 92\%$)は、二段二重変動応力振幅下で得られたものである。

$n_L/N_L=2.8\%\sim 92\%$ の間では、介在物の ΔK 値は $2.5\sim 3.5$ MPa $\sqrt{m}$ となる。一方粒状領域の ΔK 値は $3.1\sim 4.1$ MPa $\sqrt{m}$ となり、その大きさは全繰返し数比を通じてほとんど変化しない。これらの値と比べて一定応力振幅下における粒状領域の ΔK 値は大きく、 $\Delta K=5.3$ MPa $\sqrt{m}$ であった。以上のことから、粒状領域から fish-eye への遷移は寿命の 90% を超える繰

Fig. 5 Relationships between ΔK values for inclusion and granular area and cycle ratio at primary stress ($\sigma_L=1\ 100$ MPa)

Fig. 6 Relationships between ΔK values for inclusion and granular area and cycle ratio at $\sigma=1\ 600$ MPa

返し域で生じることが予想されるが⁽⁸⁾、この粒状領域の成長機構の詳細については今後の課題である。

図6は1600 MPaの応力レベルにおいて粒状領域が認められなかった理由について検討した図である。図中の破線は、1100 MPaにおける一定応力振幅下で得られた粒状領域からfish-eyeへ遷移する際の ΔK の範囲(3.1~5.3 MPa $\sqrt{\text{m}}$)を表している。図4の結果を導いた同じ介在物に対して、仮に最初から $\sigma=1600$ MPaを負荷したとすると、介在物の ΔK 値(○印)はすべて、粒状領域から内部き裂への遷移を生じる ΔK の範囲(破線の間)に入ることになる。このことから1600 MPaでは、介在物の ΔK 値が粒状領域から内部き裂への遷移領域に入るため、介在物は粒状領域を経ないで直接fish-eyeを発生させたものと推定される。一方、同様の ΔK の範囲を図5に適用すれば、図示はしていないが、介在物の ΔK 値(○印)は、ほとんどが遷移範囲の下限(3.1 MPa $\sqrt{\text{m}}$)以下となる。したがって、この場合は粒状領域を形成し、fish-eyeへ遷移することになる。また、図6における粒状領域の $\sigma=1600$ MPaにおける結果は、高応力への変動後の ΔK 値を示しているが、全体的に遷移範囲の上限(5.3 MPa $\sqrt{\text{m}}$)付近に位置している。このことから、本試験に用いた試験片では1100 MPaにおいて生じた粒状領域は1600 MPaへの応力変動によって、その応力(1600 MPa)で成長することなく、ただちにfish-eyeへ遷移したと予想される。

4.2 二次側寿命に及ぼす影響 図7は低応力(一次応力)側の負荷が高応力(二次応力)側の寿命に及ぼす影響を示した図である。図7に見られるように、 $n_L=5 \times 10^8$ の場合、 $\sigma_L=600 \sim 750$ MPaが負荷された後の高応力側における寿命(n_H)は、高応力1600 MPaでの一定応力振幅下の疲労寿命($N_H=1.79 \times 10^5$)とほぼ同じであるのに対して、800 MPa以上が負荷された

後の寿命は大きく低下している。一方、 $n_L=10^9$ の場合、 $\sigma_L=600$ および650 MPaが負荷された後の高応力側における寿命(n_H)は、高応力1600 MPaでの一定応力振幅下の疲労寿命とほぼ同じであるのに対して、700 MPaが負荷された後の寿命は大きく低下している。すなわち $n_L=5 \times 10^8$ の場合、800 MPa以上、 $n_L=10^9$ の場合、700 MPa以上の応力で、一次応力負荷の間に破壊の原因となるき裂が発生し、二次応力での負荷において、そのき裂が成長して破壊に至ったため、二次応力での寿命が減少したと考えられる。一方、 $n_L=5 \times 10^8$ では750 MPa以下、 $n_L=10^9$ では650 MPa以下の一次応力負荷の間には、破壊の原因となるき裂が発生しなかったことを示している。これは粒状領域の観察結果ともよく一致している。

図7における $n_L=10^9$ 、 $\sigma_L=750$ MPaの結果は、二次応力側において疲労寿命(n_H)が低下しなかった。この試験片の破面様相を図8に示す。図8から明らかに、三つのfish-eyeが発生している。このうち内部に存在する(A)および(B)のfish-eyeには介在物周辺に粒状領域が確認され、表面付近の(C)には、介在物周辺に粒状領域は認められなかった。介在物および粒状領域に関する ΔK 値は、fish-eye(A)について $\Delta K_{incA}=2.2$ MPa $\sqrt{\text{m}}$ 、 $\Delta K_{gaA}=4.9$ MPa $\sqrt{\text{m}}$ 、fish-eye(B)について $\Delta K_{incB}=2.4$ MPa $\sqrt{\text{m}}$ 、 $\Delta K_{gaB}=3.4$ MPa $\sqrt{\text{m}}$ 、およびfish-eye(C)について $\Delta K_{incC}=1.9$ MPa $\sqrt{\text{m}}$ であった。破面観察から $n_L=10^9$ の一次応力負荷の間に内部にfish-eye(A)および(B)が発生したが、二次応力への変動後に、これらのfish-eyeは破壊を導かなかったと考えられる。一方、表面付近のfish-eye(C)は粒状領域が確認されなかったことから、二次応力において発生したと推定され、これを起点として破壊に至ったと推論される。こうしたことから、二次応力における疲労寿命の低下は見られなかった

Fig. 7 Relationships between number of cycles to failure at secondary stress and primary stress

Fig. 8 SEM micrograph of three fish-eyes formed under variable amplitude loading ($\sigma_L=750$ MPa, $n_L=10^9$, $n_H=1.43 \times 10^5$)

Table 1 Fatigue limit estimated by $\sqrt{area}$ parameter model

Hardness (HV)	Inclusion : $\sqrt{area}$ [μm]			Granular area : $\sqrt{area}$ [μm]		
	Max. 21.5	Min. 5.3	Ave. 10.4	Max. 45.4	Min. 6.5	Ave. 20.8
	Fatigue limit : σ_w [MPa]					
Max. 795	856	1081	966	756	1045	860
Min. 750	814	1028	918	719	993	818
Ave. 778	840	1061	948	742	1025	844

Table 2 Fatigue limit estimated by statistics of extremes

Hardness (HV)	Inclusion : $\sqrt{area}$	Granular area : $\sqrt{area}$
	$F=99.9\% : 29.4$ [μm]	$F=99.9\% : 73.4$ [μm]
	Fatigue limit : σ_w [MPa]	
Max. 795	813	698
Min. 750	773	663
Ave. 778	797	685

が, fish-eye(A)および(B)が, なぜ高応力のもとで破壊を導かなかったかについては不明である。

4・3 極値統計による推定 本実験で得られた疲労限度を村上らによる $\sqrt{area}$ パラメータモデルを用いて得られる疲労限度 σ_w と比較した。非金属介在物が表面から離れた内部に存在していたため, 次式⁽¹²⁾を用いて σ_w を評価した。

$$\sigma_w = 1.56(HV + 120) / (\sqrt{area})^{1/6} \dots\dots\dots (2)$$

ここで, ビッカース硬さ (HV) として, 測定によって得られた最大値, 最小値および平均値を用いた。一方, 介在物ならびに粒状領域の寸法として, 全 41 本の試験片における最大値, 最小値および平均値を用いた。

結果を表 1 に示す。表 1 から明らかなように, 介在物寸法 ($\sqrt{area}$) を用いて疲労限度を推定すると $\sigma_w = 814 \sim 1081$ MPa となり, いずれの値も内部き裂発生における実験結果より高くなる。一方, 粒状領域寸法を用いると, $\sigma_w = 719 \sim 1045$ MPa となり, $n_L = 5 \times 10^8$ の内部き裂発生における実験結果はこの範囲に含まれる。しかし, $n_L = 10^9$ の場合, 疲労限度は 650 ~ 700 MPa となり, 推定値より低い。

そこで, 極値統計により介在物および粒状領域の最大値を予測し, 疲労限度の推定を試みた⁽¹³⁾。粒状領域寸法を統計量として用いることは, それが介在物の位置, 負荷応力および繰返しによって変化する量である

Fig.9 Statistics of extreme distribution on inclusions and granular areas

にもかかわらず, 式(2)によって疲労限度を決める際に有効な値であること⁽¹⁴⁾, また, ここで測定された粒状領域が, fish-eye へと遷移した後の成長を終えた最終寸法であることなどにより, 本研究で得られた粒状領域寸法を極値統計の対象とした。図 9 に介在物と粒状領域の極値統計グラフを示す。ここで, 全 41 本の試験片のうち, 粒状領域は 34 本の試験片において認められた。したがって, 検査回数は介在物については $n=41$, 粒状領域については $n=34$ とした。

疲労限度の計算結果を表 2 に示す。一定応力振幅下の累積確率 $F=99.9\%$ に対する介在物寸法は 29.4

μm となり、これを用いて式(2)によって推定された疲労限度は $\sigma_w = 773 \sim 813 \text{ MPa}$ となる。一方、粒状領域寸法は $73.4 \mu\text{m}$ であり、疲労限度は $\sigma_w = 663 \sim 698 \text{ MPa}$ となる。これは $n_L = 10^9$ の結果から得られた実験値 $\sigma_a = 650 \sim 700 \text{ MPa}$ の範囲に含まれる。これより、 $F = 99.9\%$ における粒状領域寸法の統計的推定値を用いた場合に実験結果と良い一致が認められたことになるが、実験結果を導いた介在物等は図4に示すとおりで、統計的推定値よりも小さい。本研究におけるき裂発生ということと式(2)の意図する疲労限度という考え方に、式を適用する上でのなんらかのそごが示唆されるが詳細は不明であり、今後の課題としたい。

5. 結 言

fish-eye 形成の初期段階に見られる非金属介在物を取りまく粒状領域に注目して、それが現れる低応力と現れない高応力の間で(低→高)二段二重変動応力疲労試験を行い、内部き裂発生寿命ならびに内部き裂発生に対する疲労限度の実験的推定を試み、以下の結論を得た。

(1) 低応力側における繰返し数比を2.8%から92%まで変えて行った内部き裂発生寿命推定のための試験において、繰返し数比5%程度の試験片から粒状領域が確認された。これより破断の原因となる内部き裂は、疲労寿命のごく初期の段階ですでに発生していることが示された。

(2) 上記実験において、繰返し数比11.2%の場合粒状領域が現れない試験片が認められた。これより内部き裂の発生する時期には、ばらつきがあることが明らかとなった。

(3) 粒状領域に応力拡大係数 ΔK を用いて評価した結果、粒状領域は疲労初期に出現し、その後寸法

を変えず、疲労寿命の90%を超えた寿命域において fish-eye へ遷移し、破断に至ることが示唆された。

(4) 本研究において用いた材料(SUJ2)の内部き裂発生に対する疲労限度は、 5×10^8 回の繰返しに対しては $750 \sim 800 \text{ MPa}$ 、また 10^9 回の繰返しに対しては $650 \sim 700 \text{ MPa}$ であると推定された。

(5) 介在物および粒状領域の寸法から極値統計を用いて疲労限度を推定した結果、累積確率 $F = 99.9\%$ における粒状領域寸法に対する疲労限度が $660 \sim 700 \text{ MPa}$ と予想され、 10^9 回の繰返しにおける内部き裂発生応力と良い一致を示した。

本研究を実施するにあたり、当時豊田工業高等専門学校学生・牧知弘君の協力を得た。記して謝意を表する。

文 献

- (1) 内藤武志・植田秀夫・菊池雅男, 材料, **32**-361 (1983), 1162-1166.
- (2) 江村秀樹・浅見克敏, 機論, **55**-509, A (1989), 45-50.
- (3) 村上敬宜・野本哲志・植田徹・村上保夫・大堀学, 材料, **48**-10 (1999), 1112-1117.
- (4) 勝谷悟志・黒島義人・原田昭治, 材料, **48**-10 (1999), 1107-1111.
- (5) 塩澤和章・魯連涛・石原外美, 材料, **48**-10 (1999), 1095-1100.
- (6) 酒井達雄・武田光弘・塩澤和章・越智保雄・中島正貴・中村孝・小熊規泰, 材料, **49**-7 (2000), 779-785.
- (7) 黒島義人・斉藤康弘・清水真佐男・川崎一博, 機論, **60**-580, A (1994) 2710-2715.
- (8) 魯連涛・塩澤和章, 機論, **68**-675, A (2002), 1666-1673.
- (9) 中島正貴・酒井達雄・清水利弘, 機論, **65**-640, A (1999), 2504-2510.
- (10) 村上敬宜・植田徹・野本哲志・村上保夫, 機論, **66**-642, A (2000), 311-319.
- (11) 村上敬宜・児玉昭太郎・小沼静代, 機論, **54**-500, A (1988), 688-696.
- (12) 村上敬宜・遠藤正浩, 材料, **35**-395 (1986), 911-917.
- (13) 村上敬宜・宇宿尚史, 機論, **55**-510, A (1989), 213-221.
- (14) 長田淳治・村上敬宜, 材料, **52**-8 (2003), 966-973.