S 35 C 平滑材の疲労寿命に及ぼす予ひずみの影響*

西谷 弘信**, 後藤 真宏***, 宮川 浩臣***

Effect of Pre-Strain on the Fatigue Life of 0.34% C Steel Plain Specimens

Hironobu NISITANI, Masahiro GOTO, and Hiroomi MIYAGAWA

Several studies have been performed concerning the effect of pre-strain on fatigue strength. According to their general trends, the fatigue strength decreases due to small pre-strain and it increases with further pre-strain. In this paper, the physical background of pre-strain is investigated based on the successive observations of fatigue damage on the specimen surface. As a factor in pre-strain, the change in mechanical properties is observed, for example the increase in yield stress and the decrease in reduction of area. A close relation between the change in mechanical properties and the crack initiation life is hardly observed, and the effect of pre-strain on initiation life is very small. On the other hand, the effect of pre-strain is observed in propagation behaviour, that is, the crack propagation life decreases due to small pre-strain and it increases with further pre-strain. The change in propagation life due to pre-strain can be evaluated approximately by its mechanical properties.

Key Words: Fatigue, Carbon Steel, Plain Specimen, Rotating Bending, Pre-Strain, Crack Initiation, Small Crack Propagation

1. 緒 言

疲労限度に及ぼす予ひずみの影響に関しては、これまでもいくつかの報告^{(1)~(8)}がなされており、その一般的な傾向として数%程度の予ひずみを与えれば疲労限度は若干減少するが、それ以上の予ひずみ付加に対しては予ひずみ量の増加とともに疲労限度は増加し、さらに大きな予ひずみを加えれば疲労限度は減少する傾向があることが明らかにされている。また、このような予ひずみの効果を表面のすべり系の観察により検討した研究⁽⁹⁾もある。

一方、有限寿命域に及ぼす予ひずみの影響を調べた研究は、疲労限度に及ぼす影響を調べたものに比べて少ないようである。有限寿命域における予ひずみの効果として、数%程度の予ひずみは破断寿命を減少させるが、予ひずみ量が多くなれば破断寿命は予ひずみが零の場合より増加することがある⁽¹⁰⁾。しかし、このような予ひずみの影響をその表面の疲労被害の観察を通して研究したものはあまり例をみず、まだ不明な点が多く残されている。

そこで本論文では、以上の観点から回転曲げにおいて引張予ひずみを与えた電解研磨材の S-N 曲線を求め、特にそれぞれの応力繰返しのもとでの微小表面き裂の挙動に注目して、予ひずみが有限寿命域に及ぼす影響を定量的に示すとともにその物理的意味を検討した。また、焼なまし材にその降伏応力を超える大応力を繰返す実験も行った。これらは、高サイクル領域と低サイクル領域を含む広い範囲の寿命予測に対して有益と考えられる。

2. 材料・試験片および実験方法

素材は市販の S35C 圧延丸棒（直径約 26 mm）であり、それに 870°C1 h の焼なましを行った。表 1 に本材料の化学成分を示す。

焼なまし材のままの試験片（以後焼なまし材と呼ぶ）は、焼なまし後図 1 に示す形状に機械加工（後に示す部分切欠き〔図 2(a)〕はこのときに加工する）し、さらに 600°C1 h の応力除去焼なましを行った。

表 1 化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.34	0.34	0.74	0.012	0.016	0.01	0.02	0.10

* 昭和 61 年 11 月 25 日 第 941 回講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 5 月 14 日。

** 正員、九州大学工学部（〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1）。

*** 正員、大分大学工学部（〒870-11 大分市旦野原 700）。

予ひずみを与えた試験片（以後予ひずみ材と呼ぶ）は、焼なまし後3.5%および10%の引張予ひずみを与え、100°Cで1hの低温焼なましを行った後図1に示す形状に機械加工した。100°Cで1hの低温焼なましは、常温で約3ヵ月の時効に相当する。

それぞれの材料の機械的性質を表2に示す。

図1の試験片中央部の詳細を図2に示す。平滑材に相当するものは図2(a)に示す浅い部分切欠を加工（切欠係数は小さ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）した後、表面を直径で約30 μ m程度電解研磨により取除いて実験を行った。微小穴材は、30 μ m程度の電解研磨後図2(b)に示す穴径・穴深さとも0.1mmの微小穴を加工したものである。焼なまし材でも微小穴加工後には焼なましを行っていない。

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 $\cdot$ m）で、回転数は毎分約3000回転である。

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（ $\times 400$ ）で行った。き裂長さ l としては試験片表面の円周方向の長さを取り、応力は部分切欠・微小穴の存在を無視した試験片最小断面の公称応力で表した。以下 σ_a で応力振幅を表す。

3. 実験結果および考察

3.1 S-N曲線に及ぼす予ひずみの影響 図3に平滑材のS-N曲線を示す（点線は後に示す1結晶粒程度のき裂発生寿命である）。表3は、回転曲げ試験

表3 各種炭素鋼平滑材（浅い部分切欠をもつもの）の疲労限度と他の機械的性質との関係（回転曲げ）

Material	Pre-Strain %	σ_s MPa	σ_B MPa	σ_T MPa	$\frac{\sigma_s}{\sigma_B}$	$\frac{\sigma_s}{\sigma_T}$
S10C (11)	0	206	373	162	0.79	0.43
S20C (12)	0	276	469	205	0.74	0.44
	10	543	562	235	0.43	0.42
S35C	0	317	572	230	0.73	0.40
	3.5	463	608	235	0.51	0.39
	10	586	638	250	0.43	0.39
S45C (13)	0	364	631	255	0.70	0.40

$\sigma_s: \sigma_B$ or $\sigma_{0.2}$

表2 機械的性質

Material	MPa			%
	σ_s	σ_B	σ_T	ψ
Annealed	317*	572	1061	58.2
3.5% Pre-strain	463**	608	1030	52.4
10% pre-strain	586**	638	1070	48.4

*: σ_s , **: $\sigma_{0.2}$

図1 試験片形状（中央部表面に図2に示す部分切欠または微小穴を有する）

(a) 部分切欠の形状 (b) 微小穴の形状

図2 試験片中央部の詳細

図3 焼なまし材および予ひずみ材のS-N曲線とき裂発生曲線

における浅い部分切欠をもつ各種炭素鋼平滑材（焼なまし材および予ひずみ材）の疲労限度と他の機械的性質とを比較したものである。予ひずみを与えれば疲労限度は増加するが、その増加量は降伏応力の増加量に比べかなり小さい。しかし、 σ_w/σ_B の値は焼なまし材と予ひずみ材とで差はあまり認められず、 $\sigma_w/\sigma_B \cong 0.4$ である。

一方、有限寿命域についてみれば、焼なまし材と予ひずみ材では $S-N$ 曲線の形状が多少異なる。同一応力を繰返す際の破断寿命 N_f を比較すれば、予ひずみ 10 % では $\sigma_a \leq 300$ MPa の範囲に焼なまし材との差は

あまり認められないが、それ以上の応力では焼なまし材より N_f は大きくなる。3.5 % 予ひずみ材では、全体的に N_f は焼なまし材より小さい。以上のように、予ひずみにより静的降伏応力が著しく増加する場合でも疲労強度の増加は少なく、予ひずみの程度によっては減少する場合もありうる。

以上、 $S-N$ 曲線を基に予ひずみの効果を示したが、予ひずみの意味を明確にするにはき裂発生と伝ばとを分けてその影響を調べる必要がある。以下に、それぞれの過程に及ぼす予ひずみの影響を示す。

3・2 き裂発生過程に及ぼす予ひずみの影響 図

図 4 同一応力 ($\sigma_a = 300$ MPa) を繰返すときの焼なまし材および予ひずみ材の表面状態の変化

4 に同一応力 ($\sigma_a=300$ MPa) を繰返したときのそれぞれの材料の表面状態の変化を示す。焼なまし材・予ひずみ材とも繰返しのごく初期から将来き裂となる部分にすべり（一結晶粒程度の寸法をもつ）が確認され、また予ひずみ材のほうがすべりが局所に集中される傾向にはあるが、全体としての疲労過程にあまり差は認められない。一結晶粒程度のき裂発生時期にも予ひずみの影響は認められず、いずれの場合も $N=3 \times 10^4$ 回程度でき裂が発生しており、繰返し予ひずみを与えた S45C の引張圧縮⁽¹⁴⁾でも認められたように、同一応力振幅下のき裂発生寿命に予ひずみの影響はあまり認められない。

図 3 の S-N 曲線中に点線でそれぞれの場合の一結晶粒程度のき裂発生寿命を示す。応力レベル・予ひずみ量にあまり影響されずき裂発生寿命はほぼ 1 本の曲線で表される。この発生寿命は焼なまし材では比較的安定しているが、予ひずみ材では多少ばらつく傾向にある。これは、予ひずみ材では加工軟化によりすべりが局所に集中し（図 4）、平均化の傾向が弱くなるためと思われる。

以上のように、焼なまし材と予ひずみ材のき裂発生寿命にあまり差が認められないのは、予ひずみによる巨視的塑性流動応力の増加に比較して、微視的すべりに対する抵抗の増加が意外に少ない⁽⁹⁾ことが関係している。

3.3 き裂伝ば過程に及ぼす予ひずみの影響 3.2 節からわかるように、き裂発生寿命に予ひずみの影響はほとんど認められない。したがって、図 3 の S-N 曲線の差はき裂伝ば寿命の差が現れたものであり、3.5 % 予ひずみ材・焼なまし材・10 % 予ひずみ材の順に伝ば寿命は大きくなる。このようなき裂伝ばに対する予ひずみの効果は、き裂発生に対する効果とは本質的に

異なるものと考えられる（き裂発生には一結晶粒程度の寸法をもつ領域に繰返されるすべりが関係するため、予ひずみの影響もこのような領域に繰返されるすべりと密接に関係しているのに対し、き裂伝ばでは結晶粒の大きさよりはるかに小さい線状の領域の平均的な性質が関係する）。また、き裂伝ばを考えると一般にき裂伝ば寿命の大部分が 1 mm 以下の微小き裂の伝ばで占められている。ここでは、このような微小き裂の伝ば則を微小穴を有する試験片を用いて検討する。

図 5 に微小穴材の S-N 曲線を示す。この場合も平滑材（図 3）で示したように、焼なまし材と予ひずみ材とでは S-N 曲線の形状に差が認められる。また、有限寿命域の破断寿命にも、平滑材とほぼ同様の傾向がある。

図 6 は、図 5 の S-N 曲線を降伏応力 σ_s を基準とした相対応力 σ_a/σ_s の関係で書き直したものである。点線は平滑材を示している。これより、予ひずみ材では $\sigma_a/\sigma_s \cong 0.5 \sim 0.6$ 、焼なまし材では $\sigma_a/\sigma_s \cong 1.0 \sim 1.1$ 付近で S-N 曲線が折れ曲がり、その形状（傾き）に変化が認められる。この形状変化は、微小き裂伝ば則の変化として説明される⁽¹⁵⁾（ただし、本材料では ΔK によって整理される領域が相対的に小さく、また、疲労限度近傍では微小穴材でもき裂発生のおける割合が大きいいため、S-N 曲線の形状に ΔK^4 支配の特徴がめいりようには現れていない）。また、平滑材と微小穴材の関係はいずれの場合もよく似ていることがわかる。

図 7 にき裂伝ば速度 dl/dN を応力拡大係数幅 ΔK で整理した結果を示す。応力が相対的に小さければ ($\sigma_a/\sigma_s < 0.5$)、 dl/dN は ΔK により一義的に決まり、本材料でも Paris ら⁽¹⁶⁾による四乗則 $dl/dN = C\Delta K^4$ が近似的に成り立つ。しかし、予ひずみ材と同じ応力を繰

図 5 微小穴材の S-N 曲線

図 6 降伏応力を基準とした S-N 曲線

返す場合でも焼なまし材では $\sigma_a/\sigma_s < 0.5$ とはならず小規模降伏の条件は満足されていない。

図 8 に応力振幅一定のもとで、焼なまし材と予ひずみ材の $dl/dN-l$ の関係を比較したものを示す。いずれの場合もき裂長さが 1 mm 程度以下の範囲では両者の間に近似的に直線関係が認められる。直線の傾きは焼なまし材では約 1 となる。予ひずみ材では $\sigma_a/\sigma_s > 0.6$ の範囲では焼なまし材同様 1 であるが、 σ_a の減少

につれその傾きは大きくなり $\sigma_a/\sigma_s < 0.5$ の範囲では約 2 となる。焼なまし材では、平滑材で dl/dN が測定されるのは $\sigma_a/\sigma_s > 0.7$ のときであることから、いずれの材料でも $\sigma_a/\sigma_s > 0.6$ の範囲の dl/dN は l に比例することになる。また、同一応力下で同一寸法のき裂を比較したとき、10% 予ひずみ材の dl/dN はいずれの応力のもとでも最も小さいことがわかる。焼なまし材と 3.5% 予ひずみ材とでは、応力が ~ 350 MPa 以上の dl/dN は両者ともほぼ一致するが、それ以下の応力では 3.5% 予ひずみ材の dl/dN が焼なまし材より多少大きくなっている。

本材料で $\sigma_a/\sigma_s > 0.6$ の範囲の dl/dN の応力振幅依存性を調べてみれば、き裂長さ一定のもとではいずれの l においても $dl/dN \propto \sigma_a^n$ の関係が近似的に成り立つ。それぞれの場合で n の値を求めた結果、焼なまし

図 7 $dl/dN-\Delta K$ 関係

図 8 微小穴材の dl/dN の l 依存性

(a) 焼なまし材 ($\sigma_a/\sigma_s < 1$) の場合 ($n \cong 8$)

(b) 焼なまし材 ($\sigma_a/\sigma_s > 1.1$) および予ひずみ材の場合 ($n \cong 6.5$)

図 9 $dl/dN-\sigma_a^n l$ の関係

材では $\sigma_a/\sigma_s < 1$ の範囲では $dl/dN \propto \sigma_a^8$ の関係が、 $\sigma_a/\sigma_s > 1.1$ の範囲では $dl/dN \propto \sigma_a^{6.5}$ の関係が成り立つ。予ひずみではいずれの場合も $dl/dN \propto \sigma_a^{6.5}$ の関係が成り立つ。このことと図8から、 $\sigma_a/\sigma_s > 0.6$ の範囲ではき裂伝ば速度は次式⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾により決まる。

$$\frac{dl}{dN} = C_1 \sigma_a^n l \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし n の値は、焼なまし材では $n \cong 8 (\sigma_a/\sigma_s < 1)$ および $n \cong 6.5 (\sigma_a/\sigma_s > 1.1)$ となり、予ひずみ材では $n \cong 6.5$ (他の材料⁽¹²⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾でも n はこれに近い) である。

図9に $dl/dN - \sigma_a^n l$ の関係を示す。いずれの場合も dl/dN は $\sigma_a^n l$ により一義的に決まる。

図10に、 $300 \leq \sigma_a \leq 500$ MPa の応力繰返しによって破断した試験片表面のビッカース硬さ (荷重: 4.9 N, 6 点の平均) を調べた結果を示す。焼なまし材では繰返しにより 17 % 程度硬さは増加するが、予ひずみ材ではいずれも 8 % 程度減少している。また、 $\sigma_a \geq 350$ MPa では焼なまし材と 3.5 % 予ひずみ材の硬さにあまり差が認められない。すなわち、この範囲では焼なまし材と 3.5 % 予ひずみ材とは硬さについてはほぼ同じ材料とみなせる。図3および図5で認められた 3.5 % 予ひずみ材と焼なまし材 ($\sigma_a/\sigma_s > 1.1$) の S-N 曲線が近いことの背景には、両者の伝ば則が同じ $dl/dN = C_1 \sigma_a^n l$ で表され、また材質変化も似ていることがある。

3.4 疲労寿命に及ぼす予ひずみの意味 平滑材でも全寿命の大部分がき裂伝ば寿命であるが、その中でも 1 mm 以下の微小き裂の伝ばが支配的である。予ひずみの影響も主として微小き裂伝ば挙動に現れる。ここでは、微小き裂伝ばに及ぼす予ひずみの物理的意味を検討する。

き裂伝ばを考える際、それを規定するパラメータとして繰返し開口量 (または繰返し塑性域寸法) をとる

図10 応力の繰返しによるビッカース硬さの変化 (破断後の表面における硬さ、荷重 4.9 N, 6 点の平均)

のが自然である。一方、任意の開口量が与えられたときのき裂先端の繰返しひずみに対する変形抵抗もき裂伝ばを規定する重要な因子と考えられる。著者らは先に、式(1)の微小き裂伝ば則に材質の影響を一部考慮した伝ば則として次式⁽²¹⁾を提案した。

$$\frac{dl}{dN} = C_2 \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_s} \right)^n l \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで定数 C_2 は n の影響をほとんど受けず、材質ごとに安定したパラメータであり、その逆数 $1/C_2$ は物理的にはき裂伝ばに対する材料ごとの抵抗を表している。一方、 $(\sigma_a/\sigma_s)^n l$ は繰返し開口量に比例する量と考えられる。

本実験結果を式(2)で整理しそれぞれの材料の C_2 を求め、 $1/C_2$ と予ひずみ量 ϵ_p の関係を示したものが図11である。図11中点線は絞り ψ と予ひずみ量の関係である。予ひずみの増加とともにき裂伝ば抵抗は減少するが、その減少量は予ひずみの少ない範囲で特に大きいことがわかる。また、破断までの巨視的変形量を表す ψ の値も予ひずみの増加とともに減少する。

き裂伝ば速度 dl/dN は、上述した繰返し開口量 (または繰返し塑性域寸法 r_{prev}) とき裂伝ば抵抗により決まることになる。一方向負荷のもとでは、Dugdale モデル⁽²²⁾において無次元化した塑性域寸法 r_p/l と相対応力 σ/σ_s が一対一に対応するので、同一寸法のき裂に同一応力を繰返すとき σ_s が大きいほうが塑性域寸法は小さくなる。このことから、繰返し応力下でも予ひずみによる σ_s の増加は開口量を減少させる方向に働くと考えられる。一方、予ひずみは絞り ψ の値を減少させるが、これはき裂伝ば抵抗を減少させる方向に

図11 予ひずみ量と $1/C_2$ および ψ の関係

図 12 各種炭素鋼における $\ln C_2$ - ψ の関係

働くと考えられる。結局、伝ばに対する予ひずみの影響はこの相反する二つの作用の相乗効果として現れたものと理解される。同一応力下の 3.5 % 予ひずみ材の dl/dN が焼なまし材より大きい(図 8)のは、 σ_s の増加に比べて $1/C_2$ の減少が予ひずみ数 % 程度の範囲では特に大きいことが関係していると思われる。

図 12 は、これまで著者らによって行われた炭素鋼焼なまし材 (S10C, S20C, S35C, S45C, S50C), および予ひずみ材 (S20C, S35C) における $\ln C_2$ と ψ の関係を調べた結果である (ただし、いずれも回転曲げの結果を示す)。図 12 には S45C 焼なまし材で行われた広瀬らの結果⁽²³⁾と S10C 焼なまし材で行われた幡中らの結果⁽²⁴⁾も示してある。これより、この程度の材質のちがいはあまり影響されず $\ln C_2$ と ψ の関係は近似的に一本の直線で表せる。

疲労寿命はき裂発生寿命とき裂伝ば寿命により決まるが、き裂発生寿命は予ひずみによる機械的性質の変化の影響はほとんど受けず、一結晶粒程度の寸法をもつ領域の微視的な性質 (一般に発生寿命への影響は小さい) が関係している。一方、き裂伝ば寿命には結晶粒寸法よりはるかに小さい線状の領域の平均的性質が関係しているが、伝ばに及ぼす予ひずみの影響は、予ひずみ負荷後の機械的性質 (例えば、巨視的降伏応力・絞りなど) によってある程度は評価できる。

4. 結 論

予ひずみの程度を変えた S35C 平滑材の回転曲げ疲労試験を行い、表面の連続観察を通して疲労寿命に及ぼす予ひずみの影響を検討した。得られた主な結論を以下に示す。

(1) 本材料でも数 % 程度の引張予ひずみは疲労強度を減少させるが、予ひずみの量がある程度大きくなれば予ひずみを与えない場合より疲労強度は増加する (その増加量は静的降伏応力の増加に比べればかなり小さい)。

(2) き裂発生 (一結晶粒程度の寸法のき裂) までは予ひずみ付加の影響はあまり認められず、同一応力を繰返す際のき裂発生寿命は焼なまし材と予ひずみ材では同程度となる (予ひずみ材のばらつきが多少大きい)。これは、予ひずみ付加により巨視的塑性流動応力が大きく増加する割に微視的すべりに対する抵抗があまり増加しないことが関係している。

(3) き裂伝ば寿命は予ひずみの影響を受け、同一寸法のき裂に同一応力を繰返せば 3.5 % 予ひずみ材、焼なまし材、10 % 予ひずみ材の順でき裂伝ば速度は大きくなる。

(4) 本材料でも、応力が相対的に小さければ ($\sigma_a/\sigma_s < 0.5$) dl/dN は ΔK により決まるが、応力が相対的に大きければ ($\sigma_a/\sigma_s > 0.6$) ΔK では整理できない。このような場合の dl/dN は σ_a^n/l により一義的に決まる。 n の値は、焼なまし材の場合 $\sigma_a < \sigma_s$ では約 8 となり、 $\sigma_a > 1.1\sigma_s$ では約 6.5 となる。予ひずみ材の場合は予ひずみ量にあまり関係せず約 6.5 となる。

(5) 本実験結果を材質の影響を一部考慮した伝ば則 $dl/dN = C_2(\sigma_a/\sigma_s)^n/l$ により整理し、 $\ln C_2$ と絞り ψ の関係を調べた結果、両者の間には近似的に直線関係が認められた。さらに、材質の異なる他の炭素鋼の実験結果を $\ln C_2$ - ψ の関係で整理したところ、本実験結果とほぼ同じ関係により整理された。したがって、き裂伝ば抵抗 $1/C_2$ は絞り ψ によりある程度評価できると思われる。

終わりに、本研究において実験に協力いただいた大分大学工学部 森篤義氏、実験当時卒業生であった佐藤知己・山本圭一郎・長峰真嗣・佐藤友明ら四君に深く感謝します。

文 献

- (1) 例えば、福井・佐藤、東京大学理工学研究所報告, 3 (昭 24) 311.
- (2) 福井・佐藤、東京大学理工学研究所報告, 4 (昭 25), 210.
- (3) 福井・佐藤、東京大学理工学研究所報告, 5 (昭 26), 260.

- (4) 福井・佐藤, 東京大学理工学研究所報告, 6 (昭 27), 360.
- (5) 西原・ほか 3 名, 機論, 14-46 (昭 23), 110.
- (6) 河本・ほか 3 名, 材料試験, 7-59 (昭 33), 400.
- (7) Frost, N. E., *Metallurgia*, 57 (1958), 279.
- (8) 佐藤・ほか 3 名, 材料, 14-140 (昭 40), 389.
- (9) 西谷・西田, 機論, 39-319 (昭 48), 798.
- (10) 日本学術振興会編, 金属材料の強度および疲労資料集成, (昭 41), 141, 丸善.
- (11) 西谷・中村, 機論, 48-432, A (昭 57), 990.
- (12) 西谷・高瀬, 材料, 33-369 (昭 59), 50.
- (13) 西谷・後藤, 機論, 49-443, A (昭 58), 779.
- (14) 西谷・後藤, 機論, 50-460, A (昭 59), 1926.
- (15) 西谷・後藤, 機論, 51-465, A (昭 60), 1430.
- (16) Paris, P. C. and Erdogan, F., *Trans. ASME, Ser. D*, 85-4 (1963), 528.
- (17) 西谷・森光, 機論, 42-354 (昭 51), 325.
- (18) Nisitani, H. (Mura, T. ed.), *Mech. Fatigue-AMD*, 47 (1981), 151, ASME.
- (19) 村上・ほか 4 名, 機論, 49-447, A (昭 58), 1411.
- (20) 西谷・後藤, 機論, 51-462, A (昭 60), 440.
- (21) 西谷・後藤, 機論, 51-462, A (昭 60), 332.
- (22) Dugdale, D. S., *J. Mech. Phys. Solids*, 8 (1960), 100.
- (23) 広瀬・ほか 3 名, 機論, 45-400 (昭 51), 1496.
- (24) 幡中・ほか 2 名, 機論, 50-452, (昭 59), 737.

討 論

〔質問〕 鳥 居 太始之〔岡山大学工学部〕

質問者は、貴研究の疲労き裂伝ば則、とくに定数 n が材質に強く依存することに興味を持っている。そこで、下記の点をお伺いしたい。

焼なまし材において、 $\sigma_a/\sigma_s < 1$ で $n=8$, $\sigma_a/\sigma_s > 1$ で $n=6.5$ に減少して予ひずみ材と等しくなるのは、 $\sigma_a > \sigma_s$ では繰返し加工等により実際の σ_s は増大（予ひずみ材と同程度）するためと考えてよいのか。

〔回答〕 焼なまし材に $\sigma_a > 1.1\sigma_s$ を繰返したときの n の値が予ひずみ材とほぼ同じになったのは、降伏応力以上の応力の繰返しによる材質変化により、材質が予ひずみ材に近くなったことが考えられる〔一例として、図 10 に示したように焼なまし材 ($\sigma_a > 1.1\sigma_s$) と 3.5% 予ひずみ材の繰返し後の硬さはほぼ同じになる〕。確かに、繰返しによって焼なまし材の σ_s は増大するが、著者らは σ_s の増加そのものよりも繰返し特性が予ひずみ材に似ることのほうが関係していると考えている。

〔質問〕 越 智 保 雄〔電気通信大学〕

予ひずみ量がき裂の発生・伝ば挙動に及ぼす影響について明確な実験結果を得ておられることを興味深く拝見した。以下、二、三確認したいことがある。

(1) 379 ページ左欄 4 行め～5 行めの記述について、なにで確認されたのか。また、時効の程度は予ひずみ量によって変わらないのか。

(2) 379 ページの図 3 と 380 ページ 3・2 節の記述について、図 3 の 3.5% 予ひずみ材のき裂発生データ点が破断寿命のデータ数に比べて少ないようであるが、データ点を見ると、発生寿命は焼なまし材より早くなっているようにも思われる。つまり、3.5% 予ひずみ材では加工硬化によるすべりの集中（転位の局部的増殖）がき裂の発生を早めているとも解釈できると思われるが、いかがお考えか。

付図 1 $dl/dN - (\sigma_a/\sigma_s)^n l$ の関係

(3) 383 ページ右欄、式 (2) によって本研究結果を整理された結果をお示し願いたい。

〔回答〕 (1) 特に確認はしていない。また、ご指摘のような傾向もあるかもしれないが、本実験では予加工後試験片製作までの時間の不ぞろいに比べて、十分に長い放置時間に相当する時効を行う目的で、3 ヶ月程度の時効に相当するように温度と時間を 100°C, 1 hr (付 1) に設定した。

(2) まず、き裂発生時期を示すデータが少ないのは、破断させた試験片のうち、表面の連続観察を行わなかったものがあるためである。

また、3.5% 予ひずみ材のき裂発生寿命に関しては、き裂発生寿命のばらつきが大きく、破断寿命にみられるような明確な差が強く現れていないので「き裂発生寿命に及ぼす予ひずみの影響はあまり認められない」

〔付 1〕 金属塑性加工学, 加藤健三, (昭 46 年), 346, 丸善.

と結論した。しかし、確かに 3.5% 予ひずみ材のき裂発生寿命は他よりも早くなっており、ばらつきを考えれば上のような結論を下すには少し無理があったと思う。なお、その原因としては加工軟化によるすべりの

集中が考えられる。

(3) 付図 1 に、焼なまし材および予ひずみ材の $dl/dN - (\sigma_a/\sigma_s)^n l$ の関係を示します。なお、 $(\sigma_a/\sigma_s)^n l = 1$ のときの dl/dN が C_2 を意味している。