過大過小応力下の疲労き裂伝ばと累積損傷*

小寺 沢 良 一** 志 茂 大 治 郎**

Fatigue Crack Propagation and Cumulative Damage
under Periodic Overstressing

by

Ryoichi KOTERAZAWA and Daijiro SHIMO

(Faculty of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka)

The effect of periodic overstressing on fatigue crack propagation was studied with sharp notched specimens of a low carbon steel, and the result was discussed in the light of the linear cumulative damage concept. A very small number of cycles of overstress applied intermittently during a very large number of cycling of understress had an extremely detrimental effect; namely, they yielded a remarkable acceleration of crack propagation (about one hundred times) and a very small value of the cumulative cycle ratio (less than one hundredth). Fractographic examinations revealed that the mechanism of crack propagation under the periodic overstressing was quite different from that under steady stress conditions, consistently with the high rate of crack propagation. Questions were raised on the conventional fatigue design based on the results with smooth specimens under steady loads, and also on the way of presenting the fatigue test data under program loads based on the modified Miner type laws.

(Received Feb. 4, 1976)

1 緒 言

実機の疲労強度が実験室における疲労試験により得られる疲労強度より著しく低いことはよく知られており、この問題に関して、最近、実機における繰返し荷重条件は大部分が疲労限以下の過小応力で、これに少数回の過大応力が加わる状態にあることが重要な事柄であって、このような荷重条件ではいわゆるマイナー則が成立せず、修正マイナー則など疲労限が消失したとみなした取り扱いの必要であることが明らかにされつつある²⁾³⁾。この種の研究としては、疲労き裂発生過程にその原因があるとみて平滑材を用いた実験が多いようであるが、本研究ではき裂伝ば過程におけるこの種の効果をみるため、鋭い切欠き材を用いて疲労試験を行ない、また破面解析によりき裂伝ば速度、き裂伝ば機構について検討した。

2 実 験 方 法

試験材料は低炭素鋼(リムド鋼、焼ならし材、Table I)で、試験片は鋭い切欠き材(60° V形環状切欠き、切欠き底径12、深さ1.5、切欠き半径0.1 mm、形状係数 $\alpha=5.2$)を用い、小野式回転曲げ疲労試験機(10 kg·m, 3 400 rpm)により、二段多重変動応力(Fig.

1) 下において疲労試験を実施した。試験は疲労限(8 kg/mm², Fig. 2: S-N 曲線参照)以下の過小応力 σ_1 の繰返しより開始し、以後、疲労限以上の過大応力 σ_2 を間欠的に負荷した。試験条件は Table II に示すよ

Table I. Chemical composition, condition of heat treatment and mechanical properties of the test material.

(%)					
C	Si	Mn	P	S	Fe
0.11	0.01	0.39	0.016	0.018	Bal
920°C 1 hr AC					
Yield point				23.2 (kg/mm ²)	
Tensile strength				33.4 (kg/mm ²)	
Elongation				45.3 (%)	
Reduction of area				75.4 (%)

Fig. 1. Loading program.

* 原稿受理 昭和51年2月4日

** 正 会 員 大阪大学基礎工学部 豊中市待兼山町

Fig. 2. S-N curves.

うに2群に分かれ, Table II (a)は, 1 プログラムサイクル中の過大応力繰返し数 n_2 が比較的多いもの ($n_2 > 150$) で, 通常行なわれるこの種の変動応力試験と同様の条件であるが, Table II (b)は n_2 を極端に少なくして ($n_2 = 2, 20$), 実働条件における, 大部分が疲労限以下の過小応力で, ときたま過大応力が加わる条件に近づけたものである. 前者の荷重はジャッキとタイマーで荷重を自動的にかけはずしすることにより与え, 後者は手動 (過荷重下の回転も含めて) によった.

二段多重変動応力試験であるため, 破面には貝殻模様に対応する巨視的縞模様が見られるが, その幅を測

Table II. Summary of test results.

(a)											
Specimen No.	σ_1	σ_2	n_1	n_2	Σn_1	Σn_2	$\frac{\Sigma n_2}{N_2}$	N_2	N_1^{**}	Symbols	Note
	(kg/mm ²)										
16	5.9	17.7	2.2×10^5	3.6×10^3	6.6×10^6	1.0×10^5	1.0	1.0×10^5	∞	○	
18	3.0	17.7	2.2×10^5	3.6×10^3	7.0×10^6	1.1×10^5	1.1	1.0×10^5	∞	▲	
26	5.9	23.6	3.1×10^3	2×10^2	3.6×10^5	2.2×10^4	1.2	1.9×10^4	∞	⊗	
14	5.9	23.6	4.0×10^4	1.2×10^3	5.2×10^5	1.3×10^4	0.68	1.9×10^4	1.6×10^6	△	
12	5.9	23.6	7.9×10^4	1.0×10^3	9.5×10^5	1.2×10^4	0.63	1.9×10^4	2.6×10^6	⊠	
13	5.9	23.6	2.2×10^3	1.2×10^3	2.7×10^6	1.2×10^4	0.63	1.9×10^4	7.3×10^6	●	
27	5.9	23.6	6.4×10^5	1.7×10^3	1.4×10^7	3.8×10^3	0.20	1.9×10^4	1.8×10^7	◐	
17	3.5	23.6	2.2×10^5	1.2×10^3	3.8×10^6	1.8×10^4	0.95	1.9×10^4	7.5×10^7	●	
15	5.9	29.5	4.0×10^4	1.2×10^3	2.0×10^5	5.2×10^3	0.96	5.4×10^3	5.0×10^6	□	
20	5.9	29.5	2.2×10^5	1.2×10^3	8.8×10^5	4.1×10^3	0.76	5.4×10^3	3.6×10^6	⊕	
28	5.9	29.5	6.4×10^5	1.7×10^2	1.0×10^7	2.8×10^3	0.52	5.4×10^3	2.1×10^7	⊕	
19	5.9	29.5	2.2×10^5	1.2×10^3	1.3×10^6	6.2×10^3	1.1	5.4×10^3	∞	■	
21	5.9	35.4	2.2×10^5	1.2×10^3	4.4×10^5	2.1×10^3	0.84	2.5×10^3	2.8×10^6	⊖	
53	5.9	14.2	2.1×10^5	2.5×10^4	4.4×10^6	5×10^3	1.2	3.8×10^3	∞	●	
(b)											
Specimen No.	σ_1	σ_2	n_1	n_2	Σn_1	Σn_2	$\frac{\Sigma n_2}{N_2}$	N_2	N_1^{**}	Symbols	Note
	(kg/mm ²)										
40	5.9	17.7	5.2×10^6	2	$7.3 \times 10^7*$	28*		1.0×10^5			Interrupted, no crack
38	4.5	23.6	5.2×10^6	2	$8.3 \times 10^7*$	36*		1.9×10^4			Interrupted, no crack
29	5.9	23.6	5.2×10^6	20	$1.1 \times 10^8*$	$4.4 \times 10^2*$	0.038	1.9×10^4	2.2×10^8	■	Interrupted
32	5.9	23.6	1.6×10^7	2	$2.0 \times 10^8*$	22*	0.0058	1.9×10^4	1.2×10^9	■	Interrupted
37	5.9	23.6	5.2×10^6	2	$8.3 \times 10^7*$	34*	0.0040	1.9×10^4	2.2×10^8	□	Interrupted
39	5.9	23.6	6.4×10^5	2	$1.7 \times 10^7*$	52*	0.0046	1.9×10^4	3.4×10^7	▣	Interrupted
43	5.9	23.6	1.1×10^5	2	$4.4 \times 10^6*$	80*	0.0071	1.9×10^4	8.9×10^6	■	Interrupted
41	5.9	23.6	1.1×10^4	2	$4.7 \times 10^5*$	86*	0.024	1.9×10^4	3.0×10^6	▣	Interrupted
42 ↓	5.9	23.6	5.2×10^6	2	$3.6 \times 10^7*$	14*	0.0039	1.9×10^4	2.2×10^8	◇	Cracked under $\sigma_2 = 23.6$
	5.9	17.7	5.2×10^6	2	$4.2 \times 10^7*$	16*	0.0012	1.0×10^5	5.3×10^8	◇	Tested under $\sigma_2 = 17.7$
47 ↓	5.9	23.6	5.2×10^6	2	$3.6 \times 10^7*$	14*	0.0029	1.9×10^4	1.7×10^8	◇	Cracked under $\sigma_2 = 23.6$
	5.9	14.2	5.2×10^6	2	$3.6 \times 10^7*$	14*	0.00048	3.5×10^5	1.0×10^6	◇	Tested under $\sigma_2 = 14.2$
49 ↓	5.9	23.6	6.4×10^5	2	$4.5 \times 10^6*$	14*	0.0038	1.9×10^4	2.8×10^7	◐	Cracked under $\sigma_1 = 5.9$
	4.5	23.6	6.4×10^5	2	$4.5 \times 10^6*$	14*	0.0071	1.9×10^4	5.4×10^7	◐	Tested under $\sigma_1 = 4.5$
52 ↓	5.9	23.6	6.4×10^5	2	$4.5 \times 10^6*$	14*	0.0035	1.9×10^4	2.8×10^7	◐	Cracked under $\sigma_1 = 5.9$
	3.0	23.6	5.2×10^6	2	$8.8 \times 10^7*$	34*	0.016	1.9×10^4	9.8×10^8	●	Tested under $\sigma_1 = 3.0$
50	5.9	29.5	6.4×10^5	2	$1.1 \times 10^7*$	34*	0.0098	5.4×10^3	1.7×10^7	◇	Interrupted
31	5.9	41.3	5.2×10^6	20	2.1×10^7	80	0.047	1.7×10^3	2.2×10^7	▽	
33	5.9	41.3	1.6×10^7	2	6.7×10^7	6	0.0035	1.7×10^3	6.7×10^7	▽	
34	3.0	41.3	1.6×10^7	2	$1.1 \times 10^8*$	120*	0.14	1.7×10^3	2.6×10^8	▽	Interrupted

* Values at interruption

** $N_1 = \frac{\Sigma n_1}{1 - \Sigma n_2/N_2}$

定することにより各プログラムサイクルにおける平均き裂伝ば速度を求めた。また走査電子顕微鏡（日立・明石 MSM-2 形）により破面の立体マッチング解析を行なってき裂伝ば機構を検討した。

3 実験結果

疲労試験の結果を、前章で述べたように 2 群に分け、Table II (a), (b) に示している。1 プログラムサイクル中の過大応力繰返し数 n_2 が多い Table II (a) では、マイナー則による累積繰返し数比 $\sum n_2/N_2$ は、従来の多くの実験結果と同様に、1 前後の値をとっているが、 n_2 を極端に少なくした Table II (b) では非常に小さく、1/100 程度あるいはそれ以下の値となっている場合が多い。^{*1}

破面の縞模様の間隔から求めたき裂伝ば速度を Fig. 3 に示す。Fig. 3 (a) は Table II (a)、Fig. 3 (b) は Table II (b) に対応する結果である。図中に破線で示した、過大応力 σ_2 と同じ応力における定常応力試験に対するき裂伝ば速度 $(\Delta l_1 + \Delta l_2)/n_2$ (Fig. 4 参照) から、これと定常応力試験における伝ば速度の比が、累積繰返し数比 $\sum n_2/N_2$ に等しいとして推定したものである。Fig. 3 (b) において、過大応力下の伝ば速度は同じ応力が定常的に加わった場合に比して著しく大きく、100 倍程度にもなっており、前述の累積繰返し数が 1/100 程度の小さい値であったこととよく対応し

Fig. 3. Crack propagation rates.

ている。

Fig. 4 は累積繰返し数比が小さい場合のマッチング写真の例である。立体観察により描いた両破面のプロフィルの模型図を写真と対応させて併示している。破

Fig. 4. Matching fractographs and a schematic illustration of stereo analysis.

*1 中断試験においては、中断時のき裂長さに達するまでの寿命に対して、累積繰返し数比を計算した。

面は鋸歯状になっていて、プログラムサイクルに対応しており、両破面のマッチングは山と谷の対応を示している。これは、通常の疲労破面のストライエーションのマッチングが山と山、谷と谷の対応であるのと著しく相違しており、上述のき裂伝ば速度が著しく大きいことと対応している。

4 実験結果の検討

4・1 過大、過小応力の繰返し数と累積損傷

二段多重変動荷重下のき裂伝ば速度は、一般に、高応力下では、初期にピークを生じて後、徐々に減少し定常応力の場合の伝ば速度に近づく。また、低応力下では徐々に小さくなり、き裂先端の応力がき裂伝ばを続けるに足る大きさであれば定常応力の場合の伝ば速度に漸進し、本実験の場合のように低応力が疲労限以下で、き裂先端の応力が小さければ、伝ば速度は低下を続けて、遂にはき裂は停留するであろう。低応力の繰返しによりつぎの高応力負荷時のき裂進展の準備ができ、高応力を負荷すると再びピークを生じて、以下これを繰り返すことになる。このような状況の下で累積繰返し数比をできるだけ小さくするためには、 σ_1 が疲労限以下の過小応力である場合には、その繰返し数（1プログラムサイクルあたり） n_1 は累積繰返し数比を与える式 $\sum n_i/N_i$ 中に入っていないから、これを充分大きくとってつぎの過大応力によるき裂進展のピークに対する準備を充分になさしめ、また過大応力の繰返し数 n_2 はできるだけ少なくしてピークの速度のみでき裂を進展せしめ、以後のより非効率な進展の部分の切り捨てればよい。Table II (b), Fig. 3 (b)の実験は、このような考え方によってその条件を定め、予想どおり、あるいはそれ以上の小さい累積繰返し数比を得たものである。

累積繰返し数比は同じであっても過小応力繰返し数 n_1 の小さい方が破断までの総繰返し数は小さく、より厳しい条件といえる。Fig. 5 は $n_2=2$ の場合につき、 n_1 を種々の値にとって累積繰返し数比の変化する状況を示したものである。 n_1 の小さい範囲では、 n_1 の増加とともに累積繰返し数比は減少し、つぎの過大応力サイクルにおけるき裂進展の準備が進行中であるこ

Fig. 5. Effect of number of cycles of understress in one program cycle (n_1) on the cumulative cycle ratio ($\sum \frac{n_1}{N_2}$).

Fig. 6. Effect of number of cycles of understress in one program cycle (n_1) on crack propagation.

とを示しているが、 n_1 が 10^5 以上では累積繰返し数比はほぼ一定で、準備が完了（もしくは飽和）したことを示唆している。したがって、この場合、 $n_1=10^5$ 付近が最も厳しい条件を与えることになる。Fig. 6 は、この場合の1プログラムサイクル中のき裂進展量 Δl_1 (過小応力下)、 Δl_2 (過大応力下) (Fig. 4) を示したものであるが、Fig. 5 の累積繰返し数比とはほぼ対応した変化を示している。

Table II の N_1 および Fig. 2 の疲労限以下の部分に Table II に示した記号で記入したものは

$$\sum \frac{n_1}{N_1} + \sum \frac{n_2}{N_2} = 1$$

において、実験における n_1, n_2, N_2 から、仮想的な N_1 を求めたものである。ここで、小さい記号は Table II (a) に示した $\sum n_2/N_2$ が 1 に近い場合、大きい記号は Table II (b) に示した $\sum n_2/N_2$ が 1/100 程度の場合であるが、 N_1 の小さいものが $\sum n_2/N_2$ が小さいわけではなく、 $\sum n_2/N_2$ が 1 に近いものの中にも N_1 が小さいものもある。これは、 N_1 は小さくても、累積繰返し数比の大部分は $\sum n_2/N_2$ によって占められていて、 $\sum n_1/N_1$ の占める割合は小さく、データのばらつきの程度の値でしかないことを意味している。このことは、この種の表記法のみでは充分でなく、マイナー則による累積繰返し数比をも併記する必要を示唆するものと考ええる。なお、この種の修正マイナー流の表記法は、累積繰返し数比の 1 より不足分がすべて疲労限以下の過小応力の繰返し中に累積されるものとみなしているが、実際にはそうではなく、上述のように過大応力下のき裂伝ば速度も著しく増加しているから、この種の表記法に物理的意味はなく、単なる形式的取り扱いに過ぎないことになる。

なおまた、元來き裂が停留する条件にある過小応力下でき裂が進展し続けていることは、定常応力下で求められた疲労限に一般的意味がないのと同様に、定常応力もしくはそれに近い条件下で求められたき裂伝ばの下限応力（もしくは応力拡大係数 AK_{th} ）にも一般

の意味がないことを示唆しているものと思われる。^{*2}

4・2 過大、過小応力値と累積損傷

本実験では、き裂伝ば過程における過大、過小応力の影響を明確な形で調査した例がないところから、この種の影響の有無、大小を定性的に把握することに重点をおいたため、応力値は実験の容易であるように主として比較的大きい値をとっている。しかしながら、実際問題においては、より小さい応力においてこの種の影響がどのように現われるかを定量的に把握することが重要である。これは今後のデータの集積をまつべき問題であるが、そのいとぐちを得るため、小応力による二、三の実験を行なっている。Table II 中の試験番号40, 38, 42, 47, 49, 52, 34がそれに相当するものであって、過大応力としては降伏点 (23 kg/mm^2) よりかなり低い応力 (14.2 kg/mm^2)、過小応力としては切欠き材の疲労限 (8 kg/mm^2) よりかなり低い応力 (3.0 kg/mm^2) においても前述と同様の小さい累積損傷比と大きいき裂伝ば速度 (Fig. 3 (b)) が得られている。なお、これらの試験においては、試験応力ではき裂が発生しなかった (試験番号 40, 38)、Table II に示したように、試験応力より大きい応力による過大応力試験によりき裂を発生せしめている。^{*3} 低応力の過大応力試験ではき裂が発生せず、き裂伝ばについては小さい累積損傷比が得られたことは、過大応力の影響が、き裂の発生よりもむしろき裂の伝ばに顕著に現われることを示唆しているように思われる。^{*4}

4・3 破面形態とき裂伝ば機構

本実験の眼目である累積繰返し数比が小さい場合の破面の立体マッピング解析結果は、Fig. 4 に示したように破面形態は相手破面の山と谷が対応する鋸歯状で、おのおのの山 (あるいは谷) が各プログラムサイクルに対応している。これは Fig. 7 に模型的に示したように、き裂が1プログラムサイクルごとに一つの山 (あるいは谷) を形成してジグザグに進展したことを示している。き裂先端部の平面ひずみ状態における塑性変形は、図中にハッチで示したようにき裂先端から斜前方に広がることが知られているから、き裂進展径路と塑性域の関係は大凡図に示したごときものとなると考えられる。すなわち、過大応力下では、き裂前方の塑性域の一方に沿ってせん断的に進展し、過小応

Fig. 7. A schematic illustration of crack propagation under periodic overstressing.

力下では、塑性域から脱出してつぎの過大応力負荷時の著しい進展の準備がなされる。この状況は、通常の疲労き裂進展において、き裂先端の開閉もしくは鈍化が起こり、これに伴って生じたき裂前方の塑性域中へき裂が進入していくために、き裂開閉現象 (crack closure) が現われ、過大応力負荷時にはとくにこのことが顕著でその後のき裂進展の遅延を生ずることと、著しく相違している。このようなき裂先端の顕著な開閉を伴わないジグザグ進展機構は、進展を妨害する塑性域を避けて進む非常に効率の良い進展機構と考えられ、本実験で得た著しいき裂進展の加速の重要な原因と思われる。

このようなき裂のジグザグ進展がなぜ起こるかは今後の研究課題であるが、一つの可能性として次のようなことが考えられる。まず、過大応力負荷時に通常のき裂進展におけるごとき著しい先端の開閉を伴わず、塑性域に沿ってせん断的に進展する理由については、過小応力の繰返し中に塑性域中に下部組織の形成されることが知られている⁸⁾が、この下部組織の境界に沿ってき裂の進展しやすい状態が準備されることが考えられる。下部組織は最大せん断応力方向に近い方向に生ずるすべり帯に沿って形成されているであろうから、Fig. 7 の進展方向と符合しており、また、炭素鋼の低き裂伝ば速度域の破面にはこのような下部組織境界に沿ったと思われるジグザグき裂進展を示す破面模様が⁵⁾多く観察されることから、この進展機構はかなりの確からしさをもつように思われる。つぎに過小応力下においてき裂が過大応力時の方向からそれて塑性域から脱出する理由は、引張応力方向に斜にスリットを入れ

^{*2} 本実験における過小応力の最小値 $\sigma_1 = 3.0 \text{ kg/mm}^2$ に対して応力拡大係数値は $l = 100 \sim 500 \mu$ において $4.5 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 前後である。

^{*3} 累積繰返し数比は試験応力負荷開始時のき裂長さから、試験中断時のき裂長さまでのき裂伝ば寿命に対して計算した。

^{*4} たとえば累積繰返し数比が1に近い試験 No. 26, $\sigma_2 = 23.6 \text{ kg/mm}^2$ では、1プログラムサイクルすなわち $n_2 = 2 \times 10^5$ ですでにき裂が発生しているが、No. 38, $\sigma_2 = 23.6$, $\sigma_1 = 4.5$ では $\Sigma n_2 = 36$ でき裂は発生しておらず、 $\Sigma n_2 / N_2 > 36 / 2 \times 10^5 = 0.18$ である。同じ条件に対するき裂伝ばの $\Sigma n_2 / N_2 = 0.0083$ (No. 49) で、前者より著しく小さい。

な試験片において、おそらく最大引張応力に垂直な方向に進もうとするために、スリットの方向からそれで進展する状況⁹⁾と酷似しており、これと同様の理由によるのではないかと考えられる。過大応力時の進展方向には前回の過小応力によって準備されたき裂の進展しやすい領域をき裂が進展してしまっており、それから先の同じ方向への進展に対する抵抗が大きいであろうこともこれに寄与しているであろう。

なお、従来得られている過大応力がき裂伝ばに及ぼす影響に関する実験結果には本実験の結果と反対にき裂伝ばの遅延をもたらすという結果が多いが、これは本実験が回転曲げで両振り応力条件で行なわれているのに対して、従来の実験の多くは片振り引張応力条件で行なわれているためと考えられる。片振り引張りの場合には過大応力により生じたき裂先端付近の大きい塑性変形が圧縮残留応力を生ぜしめ、そのために以後のき裂伝ばの遅延が起こるが、両振りの場合はこの残留応力が応力サイクルの圧縮行程に開放されるため、その後の遅延が起こらず、⁵⁾⁶⁾¹⁰⁾¹¹⁾逆に過大応力による加速効果が顕著に現われるものと思われる。

5 結 言

低炭素鋼の鋭い切欠き材を用い、小野式回転曲げ疲労試験機により、疲労限以下の過小応力の上に少数の過大応力が加わる応力条件下において疲労試験および破面解析を行ない、マイナー則による累積繰返し数比が1/100程度のきわめて小さい値で破壊すること、これに対応してき裂伝ば速度が定常負荷の場合に比して100倍程度のきわめて大きい値となること、そしてまた、破面の立体マッチング解析の結果から、この場合のき裂伝ば機構が定常応力下の疲労き裂伝ば機構と非常に異なることを明らかにした。

過大過小応力の影響が、従来考えられていたようにき裂発生に影響するのみならず、き裂伝ばに対してもこのように大きい影響をもつことは、部材に切欠き、欠陥などの応力集中部がある場合にき裂伝ば過程が重要な役割を演ずるところから、応力集中部が疲労強度に大きい影響をもたらすことを示唆しており、また過大過小応力下の破壊機構が定常応力下の破壊機構と非常に異なることは、定常応力下の疲労試験結果から実働応力下の疲労強度を推定することが困難であることを示唆している。このことは従来よく行なわれている鏡面に磨いた平滑材の定常応力下の疲労試験により得られたS-N曲線を基準として疲労設計を行なおうと

する考え方に疑問を投げかけるものであり、実機においては切欠き、欠陥が避け得られないものであるから、これらを有する試験片について、実機において支配的な変動荷重条件下において行なった疲労試験の結果を基準とすることを検討する必要があるのではないかと考える。本実験で得られた累積繰返し数比(1/100~1/1000程度)は実機の疲労強度と実験室で得られる疲労強度の相違と同程度のものであるから、この方向で検討することにより、現在、止むなく採用されている意味不明の“安全率”を大幅に減少できることが期待される。また、これに関連して、現在多用されている修正マイナー流の考え方も物理的意味などに疑問があるから、併せて再検討の必要があろう。以上は少数の実験結果による議論であって、この種の実験結果の今後の集積が必要であるが、定性的な結論は得られたと考えるので、問題提起の意味でここに報告した。

本研究は日本材料学会疲労部門委員会共同研究Subgroup II, “過大過小応力の影響”の一部として行なったもので有益なご助言を賜った大阪大学工学部、菊川真、城野政弘、両氏をはじめ、同Subgroupの諸氏に深甚の謝意を表する。また、実験および論文作成に協力された大阪大学基礎工学部、近藤潤一氏に感謝の意を表する。

(昭和50年11月21日 シンポジウム「疲労における最近の諸問題」にて講演)

参 考 文 献

- 1) 中村 宏, 材料, **16**, 71 (1968).
- 2) 中村 宏, 堀川 武, 機械学会論文集, **36**, 1059(1970).
- 3) 菊川 真, 城野政弘, 宋 智浩, 材料, **23**, 743 (1974).
- 4) Meyn, D. A., Trans. ASM, **61**, 42 (1968).
- 5) Koterazawa, R., et al., Trans. ASME, Ser. H, **95**, 202 (1973).
- 6) 小寺沢良一, 本上 勉, 材料, **23**, 730 (1974).
- 7) 小寺沢良一, 機械学会フラクトグラフィ分科会成果報告書, C-23 (1973).
- 8) 小倉次夫, 辛島誠一, 金属学会会報, **9**, 423 (1970).
- 9) Iida, S., and A. S. Kobayashi., Trans. ASME, Ser. D, **91**, 764 (1969).
- 10) Schijve, J., Aeronautical Journal, **74**, 517 (1970); Advances in Aeronautical Sciences, Vols. 3-4, 387 (1962).
- 11) Euw, E. F. J. von, et al., ASTM STP-513, 230 (1972).