低サイクル疲労における平均応力効果とサイクリッククリープ*

原 田 昭 治^{*1}, 遠 藤 達 雄^{*1}
福 島 良 博^{*1}, 安 東 秀 夫^{*2}The Effect of Cyclic Strain-Induced Creep on the Low-cycle Fatigue
of a Medium Carbon Steel under Imposed Mean StressShoji HARADA, Tatsuo ENDO,
Yoshihiro FUKUSHIMA, and Hideo ANDO

In a nominal or engineering stress-controlled low-cycle fatigue test, cyclic strain-induced creep (C. C) often advances when a mean stress is imposed. To examine rigorously the effect of this C. C behaviour on fatigue strength, true stress-controlled low-cycle fatigue tests were conducted on a medium carbon steel under imposed either tensile or compressive mean stress. The effects of a cyclic stress-strain relationship and C. C behaviour-produced axial plastic strain (ϵ_m) on fatigue strength were examined. Those effects were also examined from the viewpoint of microcrack initiation and propagation. The following results were obtained: (1) The cyclic plastic strain versus stress amplitude relation at the steady cyclic stress-strain state showed a power type relationship, irrespective of tensile or compressive mean stress. (2) An increase of ϵ_m per cycle at half of the fatigue life was expressed by a power law of maximum tensile or compressive stress. (3) A modified Manson-Coffin relation, inclusive of a parameter of mean stress, was proposed. (4) The effect of the C. C behaviour on the fatigue strength was estimated on the basis of a microcrack growth law-aided approach previously developed.

Key Words: Fatigue, Low-cycle Fatigue, Mean Stress, Cyclic Strain-induced Creep, Microcrack Initiation and Propagation, True Stress

1. 結 言

疲労寿命に及ぼす平均応力の影響を明らかにすることは、実働荷重下の構造部材の疲労寿命予測問題とも関連して実用上重要な問題であり、これまでに数多くの研究が行われている。従来の研究報告を概観すると高サイクル疲労に関連した研究が数多く見受けられるが、低サイクル疲労に関する検討例は比較的少ない。高サイクル疲労の場合、平均応力の影響は大略以下のように理解されている。すなわち、高サイクル疲労では、き裂発生過程は繰返しせん断応力によって支配されるため平均応力の影響はほとんど認められない⁽¹⁾。しかし、き裂伝ば過程はき裂面に作用する垂直応力の大きさによって支配されるため、平均応力の影響が顕著に現れ、また破壊力学的手法を用いてその影響を定量的に評価することが可能である。

さて、繰返し荷重レベルが材料の降伏点を超える低サイクル疲労の場合、平均応力作用下では、いわゆるサイクリッククリープ (Cyclic creep, 以下 C. C と称す) 現象が生起する場合があり、平均応力効果の評価

は一般に高サイクル疲労の場合に比べ困難である。周知のように低サイクル疲労試験は荷重制御またはひずみ制御方式で行われるが、荷重制御の場合、平均応力作用下ではこの C. C 現象は顕著となる。一般にひずみ制御方式下では平均ひずみが作用しても C. C 現象がほとんど生起せず、平均ひずみの影響評価法も大略確立されているようである^{(2)~(6)}。一方、荷重制御の場合、平均応力効果について検討した報告例がいくつか見られるが^{(7)~(13)}特に C. C 現象と関連づけて研究した例は少なく、白鳥らによる一連の研究^{(10)~(13)}が見られる程度である。彼らは定荷重および定応力 (繰返し真応力振幅一定) 試験の結果を比較検討することにより、C. C 現象と疲労寿命の関係について一定の解釈を与えている。

ところで、荷重制御方式の場合、平均応力作用下で C. C 現象が進行すると、当然公称応力振幅は一定でも真応力振幅は変化するので、平均応力の影響を正しく評価し得ない場合も起こり得ることが考えられる。そこで著者らは先にマイコンを利用した真応力制御方式の疲労試験システムを試作し⁽¹⁴⁾、C. C 現象や疲労寿命に及ぼす引張平均応力の影響の検討結果⁽¹⁵⁾について報告した。本報では圧縮平均応力の場合も加え、引張りおよび圧縮平均応力作用下での C. C 現象と疲労寿

* 昭和62年11月20日 第949回講演会において講演、原稿受付 昭和62年5月20日。

^{*1} 正員、九州工業大学 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)。

^{*2} 准員、三菱重工業(株) (〒850-91 長崎市飽の浦町1-1)。

命の関係について検討を加えた。さらに著者らが数年来進めている、微小き裂の発生、伝ばに基づいて低サイクル疲労寿命を評価する一連の研究^{(16)~(19)}の一環として、本研究でも平均応力効果を微小き裂の発生・伝ば特性の評価を通じて把握することを試みた。

2. 実験材料および方法

実験材料および方法についてはすでに前報⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾で詳述したので、ここでは必要事項を簡潔に述べるに止める。供試材は市販のS45C圧延丸棒（直径22 mm、降伏点304 MPa、抗張力580 MPa、伸び49.4%）で、素材に焼なまし熱処理（844°C, 1 h）を施した後、砂時計形試験片形状（全長106 mm、最小断面直径8 mm）に機械加工した。試験片表面を#06まで紙やすり仕上げした後表面観察用に軽く電解研磨を施した。また観察位置を限定するため、最小断面部に応力集中に影響を及ぼさない浅い微小切欠きを設けた。

試験片最小断面部の直径方向変位を伸び計を用いて検出し、その伸び（ひずみ）信号とロードセルにより検出した荷重信号をA/D変換してマイコン（PC8801）に導き、繰返し真応力振幅一定の疲労試験を行った。繰返し速度は0.03~0.3 Hzで、また一定の繰返し数ごとにレプリカを採取し、光学顕微鏡観察を通じて微小き裂発生・伝ば状況を追跡した。実験遂行上での前報⁽¹⁴⁾との主な相違は用いた疲労試験機および伸び計が異なることである。

真応力制御方式の疲労試験装置の精度を調べるため、真応力制御と公称応力制御（見かけ上の繰返し荷重振幅一定）の疲労試験を行い、比較検討した。応力振幅 $\Delta\sigma/2$ が370 MPaで平均応力 σ_m が50 MPaの場合の結果を図1に示す。ただし、縦軸は繰返し真応力の最大値 σ_{max} および最小値 σ_{min} の絶対値 $|\sigma_{min}|$ 、横軸は破断繰返し数比 N/N_f をそれぞれ示す。図より明らかなごとく、真応力制御の場合、 σ_{max} 、 σ_{min} は N/N_f に無関係に設定値にほぼ一致しているのに対し、公称応力制御では応力の上下限は繰返しに伴うC.C現象の進行により増加し、特に寿命の初期および後期で変化が大きい。

引張圧縮疲労試験を真応力振幅 $\Delta\sigma/2$ （ただし、 $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ ）を一定にして平均真応力 σ_m を正と負に変化させた場合、反対に σ_m を一定にして $\Delta\sigma/2$ を変えた場合について実施した。表1に本研究で行った $\Delta\sigma/2$ と σ_m の組合せについての試験条件を示す。C.C現象によって生じる一方向変形（軸方向の平均塑性ひずみ ε_m ）と $\Delta\sigma/2$ 、 σ_m との関係およびManson-Coffin形寿命則と σ_m の関係について検討した。なお、以下の

記述においては特に断わらない限り、応力振幅および平均応力は、真応力振幅および平均真応力を表すものとする。

3. 実験結果

3.1 繰返し応力-ひずみ特性と $\Delta\sigma/2$ 、 σ_m の関係

図1に示した結果から容易に理解されるように、C.C現象進行下での繰返し応力振幅 $\Delta\sigma/2$ を設定値に保つことは、負荷荷重の振幅を各繰返し数ごとに变化させることを意味する。したがって、当然疲労寿命と密接に関連する繰返し塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon_p$ も繰返しに伴って変化する。図2(a), (b)にそれぞれ、応力振幅 $\Delta\sigma/2$ を一定（=370 MPa）にして平均応力を変えた場合、反対に σ_m を一定（=-40 MPa）にして $\Delta\sigma/2$ を変化させた場合の繰返しに伴う $\Delta\varepsilon_p$ の変化を示す。 $\sigma_m \geq 0$ の場合も含め、他の $\Delta\sigma/2$ と σ_m の組合せ（表1参照）の場合にも $\Delta\varepsilon_p$ - N/N_f 関係は同図とほぼ同じ傾向を示した。 $\Delta\varepsilon_p$ は寿命の初期に繰返し硬化によって急減し、その後漸減または飽和の傾向を示し、寿命の最終段階で急増している。飽和時の $\Delta\varepsilon_p$ と $\Delta\sigma/2$ および σ_m の関係の特徴として、(i) $\Delta\sigma/2$ 一定の場合、 $\Delta\varepsilon_p$ は $\sigma_m = 0$ の場合が最も大きく、 σ_m が正と負に変化して

表1 疲労試験時の応力条件- $\Delta\sigma/2$ と σ_m の組合せ

σ_m $\Delta\sigma/2$	0	50	80	-30	-40	-50
340	○	—	—	●	●	●
370	□	□	□	■	■	■
400	△	—	—	▲	▲	▲
430	◇	◇	◇	—	—	—
460	▽	▽	▽	—	—	—
490	◇	◇	—	—	—	—
540	◇	—	—	—	—	—

図1 繰返しに伴う応力振幅 $\Delta\sigma/2$ の変化-公称応力制御と真応力制御の比較

も σ_m のレベル依存形の明確な差異は現れない。(ii) σ_m 一定の場合, σ_m が正負の場合ともに $\Delta\epsilon_p$ は $\Delta\sigma/2$ のレベル増加とともに大きくなる明確な傾向を示す。

周知のように $\Delta\epsilon_p$ は Manson-Coffin 則を介して寿命を直接評価できるパラメータであるが, 本研究のように真応力制御方式下では, $\Delta\epsilon_p$ が $\Delta\sigma/2$ および σ_m に依存して変化するため, その取扱いに注意する必要がある。 $\Delta\epsilon_p$ と $\Delta\sigma/2$ および σ_m の相互関係を導くため, よく行われているように繰返しに伴う $\Delta\epsilon_p$ の減少傾向がほぼ定常となる寿命の 50% における $\Delta\epsilon_p$ を採用して代表することにする。前報⁽¹⁵⁾と同様, 縦軸に $\Delta\epsilon_p$, 横軸に $\Delta\sigma/2$ をとって両者を両対数線図上にプロットし, 正負の各 σ_m に対して整理すると, 各 σ_m に対して $\Delta\epsilon_p$ - $\Delta\sigma/2$ 関係は平行な直線群として表される。その結果, 正負の σ_m に対し, $\Delta\epsilon_p$ - $\Delta\sigma/2$ 関係として次式を得る。

$$\Delta\epsilon_p = A(\Delta\sigma/2)^m \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし, m : 材料定数, A : σ_m の関数, であり, m , A は本研究の場合, 次式で与えられる。

$$m = 3.03(\sigma_m \geq 0, \sigma_m < 0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$A = \begin{cases} 10^{-4.60 \times 10^{-3} \sigma_m - 9.98} & (\sigma_m \geq 0) \\ 10^{5.43 \times 10^{-3} \sigma_m - 9.98} & (\sigma_m < 0) \end{cases}$$

$$\dots\dots\dots (3)$$

(a) $\Delta\sigma/2$ 一定で σ_m を変えた場合

(b) σ_m 一定で $\Delta\sigma/2$ を変えた場合

図2 繰返しに伴う塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ の変化

なお, 上式で $\sigma_m \geq 0$ の m , C が前報の結果とわずかに異なるが, これは使用した試験機および伸び計の違いに起因するものと考えられる。

3.2 C.C 現象進行下で生じる一方向変形とその評価

平均応力作用下での C.C 現象進行の結果生じる一方向変形, すなわち平均塑性ひずみ ϵ_m (軸方向累積塑性ひずみ) は, 疲労寿命に大きな影響を及ぼすため, その定量的評価を行った。定量化の方法は前報⁽¹⁵⁾とほぼ同じであるのでその詳細はここでは省略するが, $\sigma_m \geq 0$ および < 0 に対して $\epsilon_m \geq 0$ および < 0 であるので, 平均応力の符号によって多少取扱いを変える必要がある。まず, 各 $\Delta\sigma/2$, σ_m の組合せに対して繰返しに伴う ϵ_m の変化 (ϵ_m - N 関係) を両対数線図上にプロットすると, 両者は単調増加型の直線関係で表され, 互いに平行な直線群となる。繰返し途中での ϵ_m の増加を定量的に評価するため, 繰返しに伴う ϵ_m の増加速度 $d\epsilon_m/dN$ を考える。与えられた応力条件下での $d\epsilon_m/dN$ は既述の $\Delta\epsilon_p$ - N/N_f 関係 (図2 参照) の場合と同様 $N_f/2$ での値で代表するものとする。また, $d\epsilon_m/dN$ が繰返し中の正負の最大応力, すなわち $\sigma_m \geq 0$ では $\sigma_{\max}$, $\sigma_m < 0$ では $|\sigma_{\min}|$, で支配されているものとし, $(d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2}$ - $\sigma_{\max}$ または $|\sigma_{\min}|$ 関係を両対数線図上に表示すると, 図3に示すごとく, 両者の間には直線関係が成立し, また $\sigma_m \geq 0$ および $\sigma_m < 0$ の結果がほぼ一致する。同図より, 両者の間には次式で示される関係が成立する。

$$\left. \frac{d\epsilon_m}{dN} \right|_{N_f/2} = K \sigma_{\max}^n (\sigma_m \geq 0), = K |\sigma_{\min}|^n (\sigma_m < 0)$$

$$\dots\dots\dots (4)$$

ただし, K, n は定数で

$$K = 1.19 \times 10^{-33}, n = 10.6$$

図3 $(d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2}$ と最大応力 $[\sigma_{\max}(\sigma_m > 0)$ または $|\sigma_{\min}|(\sigma_m < 0)]$

3.3 疲労寿命に及ぼす平均応力の影響 図4に $\Delta\sigma/2-N_f$ 関係で表した疲労寿命線図を示す。図4において、破断寿命は $\sigma_m=0$ の結果に対し、正負の平均応力が作用すると、いずれも長寿命側に移行している。ただし、 σ_m 依存形の寿命差の傾向は認められないようである。 $\sigma_m<0$ の場合はともかく、 $\sigma_m>0$ で疲労寿命が $\sigma_m=0$ のそれより長寿命側となるのは、通常の定荷重（公称応力振幅一定）制御方式の疲労試験結果から予想されるのと反対の傾向で、一見奇異である。これは図1および図2に示したように、真応力制御と公称応力制御におけるC.C挙動の相違による塑性ひずみ振幅や軸方向累積塑性ひずみの挙動の違いによるものと考えられる。

図5に $\Delta\epsilon_p-N_f$ 関係で表した寿命線図を示す。ただし、 $\Delta\epsilon_p$ は図2および式(1)の誘導を参照して、 $N_f/2$ における値を用いた。同図より、 $\Delta\epsilon_p-N_f$ 関係で表示した場合には、 $\Delta\sigma/2-N_f$ 関係表示の場合とは逆に $\sigma_m=0$ に対して $\sigma_m>0$ 、 $\sigma_m<0$ の結果がいずれも短寿命側となっている。完全両振りに比べ、平均応力作用下で寿命が低下する理由は、C.C現象進行による軸方向塑性ひずみの累積、すなわち、平均塑性ひずみ ϵ_m の増加による見かけ上の材料の破断延性 ϵ_f の低下によるものと考えられる。そこで、平均応力効果をパラメータ ϵ_m を用い、Manson-Coffin 形の寿命則を通じて評価するため、以下のような検討を行った。図5において、 $\sigma_m=0$ の結果を直線回帰すると、次式で表される Manson-Coffin 形の寿命則を得る。

$$\Delta\epsilon_p \cdot N_f^{0.533} = 0.673 \dots\dots\dots (5)$$

$\sigma_m=0$ の場合には一方向変形はほとんど起こらないもの ($\epsilon_m=0$) と仮定し、正負 σ_m の作用下での ϵ_m の増加が寿命低下、すなわち ϵ_f の減少をもたらすものとして $(0.673 - \Delta\epsilon_p N_f^{0.533}) / (d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2}$ と N_f の関係を両対数線図上にプロットすると図6のようになる。両者は $\sigma_m>0, <0$ の場合についてほぼ1本の直線関係で近似され、次の実験式を得る。

$$\Delta\epsilon_p \cdot N_f^{0.533} + C \cdot (d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2} \cdot N_f^\beta = 0.673 \dots\dots\dots (6)$$

ただし

$$\begin{cases} C=0.422, \beta=1.213 (\sigma_m>0) \\ C=6.69 \times 10^{-6}, \beta=2.268 (\sigma_m<0) \end{cases}$$

上式を平均応力作用下でのC.C現象の影響を考慮した修正 Manson-Coffin 則と呼ぶことにする。図7に以上のようにして求めた修正 Manson-Coffin 則を用いて算出した寿命と実測値の比較を示す。 σ_m が正負の場合ともに両者がほぼ一致していることがわかる。

3.4 微小き裂の発生、伝ばに基づく平均応力効果の評価 前節までに疲労寿命に及ぼす平均応力およびC.C現象の影響を巨視力学的因子 $\Delta\sigma/2$ 、 σ_m 、 $\Delta\epsilon_p$ および ϵ_m によって評価することを試みた。ところで、著者らは低サイクル疲労寿命を微小き裂の発生・伝ば

図4 破断寿命線図 ($\Delta\sigma/2-N_f$ 関係)

図5 破断寿命線図 ($\Delta\epsilon_p-N_f$ 関係)

図6 $(0.673 - \Delta\epsilon_p \cdot N_f^{0.533}) / (d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2} - N_f$ 関係

図7 修正 Manson-Coffin 則を用いて算出した寿命と実測値との比較

に基づいて評価する一連の研究^{(16)~(19)}を行っている。そこで、本節では、平均応力効果を同様な立場から検討した結果について述べる。

レプリカ法を用いて微小き裂の発生、伝ば挙動の連続観察を行った。まず、結晶粒オーダの微小き裂は、前報^{(16)~(19)}でのひずみ制御試験の場合と同様、全寿命のごく初期に発生し、また、平均応力作用の有無は無関係であった。主き裂が結晶粒オーダから破断直前の約2 mmの長さに成長するまでの伝ば過程を追跡し、平均応力作用下での微小き裂伝ば特性を明らかにした。平均応力作用下でも微小き裂伝ば挙動は定ひずみ振幅条件で行った前報の結果とほぼ同じで、主き裂の単一き裂形優先伝ばではなく、伝ばの途中で他の分布き裂と合体して成長する例も観察された。き裂の合体成長問題も含め、主き裂の伝ば則の誘導についてはすでに前報⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾で詳述したので、ここでは簡潔に述べる。平均応力の有無とは無関係に微小き裂伝ば則の誘導方法は同じであるので、ここでは $\sigma_m = 0$ の場合で代表して述べる。

$\sigma_m = 0$ の場合、各応力振幅下でのき裂伝ば曲線(き裂長さ l -繰返し数 N 関係)より、き裂伝ば速度 dl/dN に関して次式で表される関係式を得た。

$$\left\{ \begin{array}{l} dl/dN \propto 10^{7.47 \times 10^{-3} \cdot (\Delta\sigma/2)} \cdot f(l) \\ f(l): l \text{ の関数} \end{array} \right. \dots\dots\dots (7)$$

さらに、き裂伝ば速度とき裂長さの関係を得るため、 $(dl/dN)/10^{7.47 \times 10^{-3} \cdot (\Delta\sigma/2)} - l$ 関係を両対数線図上にプロットすると、前報⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾の定ひずみ振幅試験結果と同様、各応力振幅下の結果がこう配がほぼ1の1本の直線で近似された。すなわち、 $dl/dN \propto l$ となり、次の関係式が得られた。

$$\frac{(dl/dN)}{10^{7.47 \times 10^{-3} \cdot (\Delta\sigma/2)}} = 1.58 \times 10^{-6} \cdot l \dots\dots\dots (8)$$

l_0 , l_f をそれぞれき裂発生時($N = N_0$) および破断時($N = N_f$) のき裂長さとして、上式を積分し、かつ以下の条件

$$l_0 = 19 \mu\text{m} \text{ (平均パーライト粒径)}$$

$$l_f = 8 \text{ mm (試験片直径)}$$

$$N_0 = 0 \text{ (} \because N_0 \ll N_f \text{)}$$

を代入すると最終的に次式が得られた。

$$\ln N_f = 6.58 - 7.47 \times 10^{-3} (\Delta\sigma/2) \dots\dots\dots (9)$$

式(1)を考慮すると、上式は式(5)で表されるManson-Coffin 形寿命則とほぼ同じ形の寿命則を微小き裂伝ば則に基づいて導けたことが理解される。正負の平均応力が作用した場合、同様にしてそれぞれの σ_m に対して式(8), (9)と同形のき裂伝ば則および寿命則を導くことができるが、その詳細は省略する。

図8に以上のように微小き裂伝ば則に基づいて算出した寿命を実測値と比較したものを示す。各平均応力の場合とも寿命の算出値と予測がほぼ一致していることがわかる。

4. 考 察

低サイクル疲労試験は通常荷重制御またはひずみ制御方式で行われる。ひずみ制御のほうが荷重制御に比べ、実験が安定して行えること、疲労寿命則と直接関連づけられるパラメータ $[\Delta\epsilon_p, \Delta\epsilon_t \text{ (全ひずみ幅)}]$ が評価しやすいこと、などの理由により、一般に広く同方式が採用されている。緒言でも述べたように、ひずみ制御の場合には、平均ひずみが作用しても、C.C 現象が起こらないので、平均ひずみ効果の評価は比較的容易である。例えば、引張平均ひずみが作用した場合、最も単純には破断延性 ϵ_f が平均ひずみに相当する分だけ見かけ上低下するとして、完全両振りとして取扱われている⁽²⁾。

さて、荷重制御の場合、繰返し述べたごとく、公称応力制御(定荷重振幅)と真応力制御では繰返し挙動が異なる(図1参照)。それゆえ、特に本研究のように、平均応力効果とC.C 現象の関係を議論するような場合には、この点に留意した取扱いが必要である。主として学問的興味に基づく真応力制御試験は、公称応力制御試験に比べ結果の実用的意味は小さいが、上述のような問題の議論の定量化には不可欠である。

本研究では、引張りおよび圧縮平均応力の疲労寿命に及ぼす影響をC.C 現象の進行に注目して検討した。 $\sigma_m < 0$ の場合、圧縮最大応力($\sigma_{\min}$) 時における試験片座屈の防止という実験上の制約のため、今回の実験では σ_m が比較的小さい範囲($-30 \sim -50 \text{ MPa}$)の資料しか得ることができなかった。そのため、図4や図5に示した寿命線図および微小き裂伝ば則に基づいて予測評価した寿命線図(図8)では、結果のばらつきも考

図8 微小き裂伝ば則に基づいて予測評価した寿命と実測値との比較

慮すれば、 σ_m の相違による寿命差を系統的に論じる程度の明確な傾向差が現れていないものと解釈するのが自然である。 $\sigma_m < 0$ での σ_m 依存形の平均応力効果をより明確な形で引き出すには、今後 σ_m がより大きい場合について検討を行う必要がある。

ともかく、 $\sigma_m = 0$ に対して正負の平均応力が負荷されたとき、C.C現象が進行して寿命が変化するのは前節までに示した結果で明らかである。正負の平均応力の疲労寿命に及ぼす影響をC.C現象の進行と関連させて論じる場合、以下の点について考慮する必要がある。

(i) 真応力制御条件下で平均応力作用下での塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ の繰返しに伴う変化とその評価

(ii) σ_m 作用下C.C現象の進行により生じる平均塑性ひずみ(軸方向累積塑性ひずみ) ϵ_m の繰返しに伴う変化とその評価

σ_m が正負の場合ともに(i)、(ii)の因子は寿命を低下させる要因として作用する(図5参照)。(i)に関して、 $\Delta\epsilon_p$ - N/N_f 関係(図2)は、焼なましを施した中・低強度鋼のひずみ制御試験で確認される公称応力振幅 $\Delta\sigma/2$ - N/N_f と見かけ上正反対($\Delta\sigma/2$ は寿命初期に繰返しに伴って増加し、その後飽和した後寿命の最終段階で低下)となっている。 $\Delta\epsilon_p$ - N/N_f 関係の傾向から判断して、ひずみ制御の場合の $\Delta\sigma/2$ の評価の場合と同様、全寿命における平均的な値として $N_f/2$ での $\Delta\epsilon_p$ 値で代表することは妥当と考えられる。

一方、(ii)の ϵ_m はC.C現象の定量的解釈の基礎となる主要パラメータの一つと考えられる。ここでは例示を省略したが、既述のように、 ϵ_m - N/N_f 関係を両対数線図上にプロットすると、 $\Delta\sigma/2$ を一定にして σ_m を変化させた場合、互いに平行な直線群が得られた。すなわち、 ϵ_m は $\epsilon_m = CN^a$ (C は定数、 $a \neq 1$)の関係で表され、 N のべき乗に比例して増加した。したがって、繰返しに伴う ϵ_m の変化を考えた場合、基本的には $N_f/2$ での値で代表する $\Delta\epsilon_p$ の場合と同様な取扱いはできない。そこで本研究では、C.C現象進行による ϵ_m の増加が直接 ϵ_f の見かけ上の低下を引き起こすものと仮定してその評価を行った。その際、 $N_f/2$ での繰返しに伴う ϵ_m の増加率(速度) $d\epsilon_m/dN$ に着目し、 $(d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2}$ を $\sigma_{\max}(\sigma_m > 0)$ または $|\sigma_{\min}|(\sigma_m < 0)$ と関連づけて評価した。そして $(d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2}$ を繰返しに伴って ϵ_f を見かけ上減少させるパラメータとして式(6)で表されるC.C現象を考慮した修正Manson-Coffin則を導いた。図6に示した結果を見ると、 $\sigma_m < 0$ の結果にばらつきが見られるものの、 $\Delta\sigma/2$ と σ_m の組合せを変えた際の $(0.673 - \Delta\epsilon_p N^a)/(d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2} - N_f$ 関係

にはほぼ直線関係が認められ、また $\sigma_m < 0$ と $\sigma_m > 0$ で直線のかたむきは異なる。同図の縦軸に採ったパラメータ $(0.673 - \Delta\epsilon_p N^a)/(d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2}$ の内容は、 $(0.673 - \Delta\epsilon_p N^a)$ はある $\Delta\epsilon_p$ に対する $\sigma_m = 0$ と $\sigma_m > 0$ または $\sigma_m < 0$ の場合の寿命差、 $(d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2}$ は既述のように $N_f/2$ における軸方向平均塑性ひずみ増加速度($\Delta\sigma/2$ および σ_m に依存して変化)をそれぞれ表す。したがってこのパラメータを単一の物理量と関連づけて意味づけはできないが、結果として、C.C現象進行による見かけ上の ϵ_f 低下を表す尺度として、 $(d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2}$ は有効なパラメータであり、C.C現象を考慮した修正Manson-Coffin則〔式(6)〕が形式的に導ける。なお、 $\sigma_m > 0$ と $\sigma_m < 0$ で直線が異なることから平均塑性ひずみ ϵ_m の ϵ_f の低下に及ぼす影響が異なることが考えられるが、平均圧縮応力レベルの高い場合の検討が都合によりできなかったため、本研究の範囲では明らかでない。

3・4節で述べた微小き裂の発生・伝ばに基づく寿命評価に関して、微小き裂伝ば則の誘導方法は前報^{(16)~(19)}の定ひずみ振幅試験の場合と同様であるのでその詳細はここでは省略した。結果として、平均応力作用下の場合にも定ひずみ振幅試験結果と同様微小き裂伝ば則は σ_m が正負の場合ともに $dl/dN \propto l$ 、すなわち裂伝ば速度がき裂長さの1次に比例する形をとった。また、き裂伝ば則より算出した寿命を実測値と比較すると両者はほぼ一致した。ただし、 $\sigma_m < 0$ の場合、同一応力振幅下で σ_m を -30 、 -40 および -50 MPaと変化させた際のき裂伝ば曲線はほぼ一致し、微小き裂伝ば則に基づいて算出した寿命には平均応力レベル依存形の明確な寿命差の傾向は実測値の場合同様、認められなかった。

最後に、本研究では低サイクル疲労に及ぼす平均応力の影響を真応力制御試験の実施により、C.C現象との関連を通じて検討した。応力振幅 $\Delta\sigma/2$ のレベルに比べて平均応力 σ_m のレベルが低い、比較的両振り応力状態に近い応力条件での検討が大部分であったため、今後は $\Delta\sigma/2$ に比べ σ_m が相対的に大きい部分両振り条件および圧縮平均応力が大きい場合について追加実験を行い、 $\sigma_m < 0$ と $\sigma_m > 0$ での平均応力効果の相違の有無について検討を深めたいと考えている。

5. 結 言

低サイクル疲労寿命に及ぼす平均応力 σ_m の影響を明らかにするため、真応力制御方式の疲労試験を実施し、サイクリッククリープ現象の進行に注目して検討を行った。真応力振幅 $\Delta\sigma/2$ と正負の平均真応力 σ_m の

組合せを変えて行った実験結果を要約すると、以下のよう結論づけられる。

(1) 繰返し塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ は寿命の初期および最終段階を除くとほぼ一定となり、破断寿命の $1/2$ での $\Delta\epsilon_p$ と応力振幅の間には次式の関係が成立する。

$$\Delta\epsilon_p = A(\Delta\sigma/2)^m$$

ただし、

$$A = 10^{-4.60 \times 10^{-3} \cdot \sigma_m - 9.98}, \quad (\sigma_m \geq 0)$$

$$= 10^{5.43 \times 10^{-3} \cdot \sigma_m - 9.98}, \quad (\sigma_m < 0)$$

$$m = 3.03$$

(2) 平均応力作用下では繰返しに伴い C. C 現象が進行し、軸方向平均塑性ひずみ ϵ_m が生じる。 $N_f/2$ における繰返し数あたりの ϵ_m の増加率 $(d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2}$ は最大引張応力 $\sigma_{\max}(\sigma_m > 0)$ または最大圧縮応力 $|\sigma_{\min}|$ のべき乗に比例する。

(3) $\Delta\sigma/2-N_f$ 関係で寿命を表示すると、 $\sigma_m = 0$ に対して正負の平均応力が作用すると見かけ上寿命は延びる。一方、 $\Delta\epsilon_p-N_f$ 関係で表示すると寿命差の傾向は反対となる。

(4) 正負の平均応力作用による軸方向平均塑性ひずみ ϵ_m が破断延性 ϵ_f を見かけ上低下させるものとして、次式で表される、 σ_m を考慮した修正 Manson-Coffin 則を導いた。

$$(\Delta\epsilon_p) \cdot N_f^{0.533} + C \{ (d\epsilon_m/dN)|_{N_f/2} \} N_f^\beta = 0.673$$

ただし C, β は定数で σ_m の正負によって異なる。

(5) 平均応力作用下の場合にも、前報までの両振

りひずみ制御の場合と同様、き裂伝ば速度 dl/dN はき裂長さの 1 次比例し、また微小き裂伝ば則を用いて寿命を予測評価することを明らかにした。

実験の遂行に際し、卒業研究の一部として、窪田浩二君〔現、九州大学大学院〕、安成晋一君〔現、日立製作所(株)〕、福田武君〔現、九州工業大学大学院〕および栗山和俊君〔現、大隈鉄工(株)〕の助力を得た。記して謝意を表す。

文 献

- (1) 西谷・蓮尾, 機論, 44-377 (昭 53), 1.
- (2) Sachs, G., ほか 3 名, *Proc. ASTM*, 60 (1960), 512.
- (3) Yao, J. T. P. and Munse, W. H., *ASTM STP*, 338 (1962), 5.
- (4) Ohji, K., ほか 2 名, *Trans. ASME, Ser. D*, 88 (1966), 801.
- (5) 大路, 機誌, 70-576 (昭 42), 36.
- (6) 菊川・ほか 3 名, 機誌, 70-585 (昭 42), 1495.
- (7) Coffin, L. F. Jr, *Trans. ASME, Ser. D*, 86 (1964), 673.
- (8) 小林・遠藤, 九州大学応用力学研究所所報, 45 (昭 51), 307.
- (9) 八木・富田, 日本造船学会論文集, 138 (昭 50), 410.
- (10) 白鳥・小幡谷, 機論, 32-283 (昭 41), 886; 同機論, 35-272 (昭 44), 701, 711; 同, 機論, 38-309 (昭 47), 962.
- (11) 井手・ほか 2 名, 機論, 44-377 (昭 53), 798.
- (12) 吉田・ほか 2 名, 機論, 45-395, A (昭 54), 769.
- (13) 吉田・ほか 2 名, 機論, 46-407, A (昭 55), 788.
- (14) 遠藤・坂本, 九州工業大学研究報告(工学), 48 (昭 59), 1.
- (15) 遠藤・ほか 3 名, 材料, 34-385 (昭 60), 1200.
- (16) 村上・ほか 4 名, 機論, 49-447, A (昭 58), 1411.
- (17) 原田・ほか 4 名, 機論, 51-464, A (昭 60), 1215.
- (18) 遠藤・ほか 3 名, 機論, 52-477, A (昭 61), 1276.
- (19) 原田・ほか 3 名, 機論, 53-485, A (昭 62), 26.

討 論

〔質問〕 井上達雄〔京都大学工学部〕

平均応力による繰返変形を考慮した低サイクル疲労寿命評価について貴重な検討をされたことに敬服する。

サイクリッククリープ速度を含む形で提案された式(6)は、ここで用いられた材料に対する実験式であるが、さらに同様の関係が他の材料や条件についても成立するとお考えか。また、その物理的ないしは理論的理由を伺えれば幸いである。さらに、この形の関係が成り立つとすると、材料定数を決めるのにどのような実験が必要か。

〔回答〕 本研究では平均応力作用下で進行する C. C 現象の疲労寿命に及ぼす影響を、巨視力学因子の変化と実際の疲労過程(微小き裂の発生、伝ば)に注目して検討しました。C. C 現象と力学因子の関係を単純化して捉えるため、図 2 に示されるように繰返しに対

して安定な材料を選び、かつ真応力制御方式の疲労試験を実施し、検討を加えている。C. C 現象が生じ、進行すると、それが寿命に影響を及ぼすことはこれまでの研究でよく知られているが、式(6)のように具体的にその影響を考慮に入れた寿命則は著者らの知見する限りでは見当たらないようである。式(6)は C. C 現象の寿命に及ぼす影響を 2, 3 節の仮定と実験結果を基礎にして導出し、陽の形で表現・提案した実験式にすぎない。もちろん、同式の一般性や物理的意義づけについては材料定数の簡便な実験的決定の問題も含め、力学因子と疲労機構の両面に注目しながら今後検討を重ねる必要があると考えている。

〔質問〕 小幡谷 洋一〔福井大学工学部〕

(1) 低サイクル疲れ寿命の評価において微小き裂伝ば則が平均応力の正負によらず適用されるとしている(図 8)が、その実験的裏づけは $dl/dN \propto l$ の関係が

付図 1

成立することにあると思う。 $\sigma_m < 0$ の場合の結果を例示していただきたい。

(2) σ_m の正負によらず微小き裂伝ば則が成り立つことを前提とするならば、 σ_m の正負によってそれぞれ異なる材料定数（実験定数）を考慮せざるを得ない修正 Manson-Coffin 則の見直しが必要となるのではないか。なぜならば、微小き裂の伝ば挙動に及ぼす C. C 現象の効果を明らかにすることのほうが、低サイ

クル疲れの本質を認識するうえでむしろ重要なことと考えられるので。

〔回答〕 (1) 付図 1 に一例として $\sigma_m = -50$ (MPa) で $\Delta\sigma/2$ を 240, 370 および 400 (MPa) に変えた際の $dl/dN-l$ 関係を示す。他の σ_m の場合にも同図と同じ傾向（両対数線図上でこう配が 1 の直線）となっている。また、 σ_m の正、0、負に対して一般に $dl/dN = 10^{C_1(\Delta\sigma/2)} \cdot C_2 l$ （ただし、 C_1, C_2 は σ_m によって定まる定数）なる関係が成立する。

(2) 式(6)は、平均応力作用下での C. C 現象進行の寿命に及ぼす影響を、微小き裂伝ばとは無関係に巨視力学因子に着目して評価し、それを通常の寿命則に取り込んだ寿命評価式である。式(1)、(2)、(3)より、 $\Delta\epsilon_p$ は $\sigma_m, \Delta\sigma/2$ の関数として与えられるので、結局式(6)で与えられる修正 Manson-Coffin 則は個々の σ_m に対してそれぞれ別の形で与えられることになる。一方、質問(1)とも関連して、微小き裂伝ばに基づく裂伝ば則〔式(8)〕および寿命評価式〔式(9)〕も各 σ_m に対して別個の形で与えられる。低サイクル疲労寿命の大部分が微小き裂の伝ば寿命で占められることを考えたとき、独立に誘導した二つの寿命評価式〔式(6)および(9)〕がいかなる関連を有するかを検討することが、微小き裂伝ばと C. C 現象の関係を究明する道につながるものと考えられる。