微小き裂伝ば則に基づく繰返し軟化・
硬化型材の低サイクル疲労寿命評価*原田 昭 治^{*1}, 福 島 良 博^{*1}
永 富 邦 昌^{*2}, 遠 藤 達 雄^{*3}Application of Microcrack Growth Law-Aided Low-cycle Fatigue Life
Evaluation of Cyclic Softening and Hardening Type of MaterialsShoji HARADA, Yoshihiro FUKUSHIMA,
Kunimasa NAGATOMI, and Tatsuo ENDO

The approach of microcrack growth law-aided low-cycle fatigue life evaluation, derived on a cyclically stable material in a previous paper, was applied to cyclic hardening and softening types of materials. Cyclic strain controlled low-cycle fatigue tests were conducted on WT 80 and SCM 435 H steels (cyclic softening type) and SUS 304 steel (cyclic hardening type). Either constant or two-step strain amplitude was selected in experiments. To simulate microcrack growth, notched specimens with a small drilled hole of 40 μm in diameter were used as well as unnotched specimens. It was found that the previous method is essentially applicable for all materials tested. That is, the microcrack growth rate is proportional to crack length and fatigue life predicted on the basis of the microcrack growth law agrees fairly well with the measured value. Cyclic softening and hardening behaviours which affect the cyclic stress-strain relationships, as well as cyclic strain-induced martensitic transformation observed on SUS 304 steel, hardly influence the microcrack growth.

Key Words: Fatigue, Low Cycle Fatigue, Microcrack Growth Law, Manson-Coffin's Law, Cyclic Softening and Hardening Materials, Martensitic Transformation

1. 緒 言

繰返し応力が降伏点を越えるいわゆる低サイクル疲労の研究は、疲労損傷の物理的実体が表面に発生した微小き裂の伝ばと対応づけられることが明らかにされて以来、微小き裂の発生・伝ばに注目した研究が多くなされている。例えば、平滑試験片の疲労寿命を、微小き裂の伝ば挙動に注目し、弾・塑性破壊力学的解析によって求まる種々のパラメータを用いて評価・検討した研究報告が見られる^{(1)~(4)}。

著者らは前報^{(5)~(8)}で S 45 C 平滑材と直径および深さが 40~200 μm の微小穴を導入した穴材を用いて一定ひずみ振幅下、二段二重ひずみ振幅下およびランダムひずみ下疲労試験を実施し、試験片表面の微小き裂発生・伝ば過程の詳細な連続観察を通じて、低サイクル疲労を論ずる上で重要と考えられる二、三の基礎的事項を明らかにした。特に、き裂長さ l の 1 次 に 比例するき裂伝ば則を導き、それを用いて疲労寿命を予測

できることを示した。さらに、実用材の一つである圧力容器用鍛造鋼板 A 533 B 材の疲労寿命の方向性について調べた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。鍛造によって伸長された介在物より発生したき裂の伝ばに注目し、S 45 C 材で用いた手法を適用すると、疲労寿命の異方性がき裂伝ばの立場より説明できることを示した。

ところで、一般の金属材料では、疲労試験の途中で材料特性（繰返し応力-ひずみ関係）が変化する、いわゆる繰返し軟化および硬化挙動を示す場合がある。このような材料の疲労寿命を評価する場合、通常破断繰返し数の約 1/2 の材料特性を代表値として用いている。しかし、寿命のほぼ全範囲で材料特性が変化する材料の寿命を評価する場合、特に全寿命がき裂伝ばで費やされるような材料では、材料特性の変化のき裂伝ばに及ぼす影響を明らかにすることにより、疲労損傷の物理的実体である微小き裂の発生・伝ばに基づいた疲労寿命評価が可能となる。本研究では、繰返し軟化材である WT 80 および SCM 435 H 材、繰返し硬化材である SUS 304 材を用い、一定ひずみ振幅および二段二重ひずみ振幅下の疲労試験を実試した。繰返しに伴う材料特性の変化を調べ、平滑材と人工微小欠陥を導入した穴材の寿命の比較を行い、繰返しに伴う材料組織変化のき裂伝ばに及ぼす影響を調べた。さらに

* 平成元年 4 月 3 日 第 66 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 7 月 4 日。

^{*1} 正員、九州工業大学工学部 (〒804 北九州市戸畑区仙水町)。

^{*2} 准員、東陶機器 (株) (〒802 北九州市小倉北区中島 2-1-1)。

^{*3} 正員、九州産業大学工学部 (〒813 福岡市東区松香台 2-327)。

前報までの手法を適用し、き裂伝ばに基づいた疲労寿命評価を行い、その寿命予測法の有効性について検討した。

2. 供試材および実験方法

供試材として、繰返し特性の異なる 3 種類の材料を選んだ。繰返し軟化材として市販の WT 80 材 (素材寸法: 510×510, 板厚 25 mm) と SCM 435 H 材 (素材寸法: 径 25 mm, 長さ 6 m) および繰返し硬化材として SUS 304 材 (素材寸法: 860×250 mm, 板厚 40 mm, 1100°C, 溶体化処理) を用いた。素材の化学成分を表 1 に、機械的性質を表 2 に示す。図 1 に素材の組織写真を示す。WT 80 材および SCM 435 H 材の組織は微細化されているのがわかる。一方 SUS 304 材のオーステナイト粒径は約 28 μm 程度である。試験片は、素材が板の場合も含め、試験片の荷重軸方向と素材の圧延方向とが一致するように採取した後、図 2 に示す形状に機械加工した。さらに表面の連続観察のため、試験片最小断面部をエメリー紙で #06 まで仕上げた後、アルミナを用いて鏡面に仕上げ、これを平滑材として使用した。また SUS 304 材については、比較用に試験片最小断面部に直径 40, 100 および 200 μm の微小ドリル穴を導入した穴材も用いた (図 2 参照)。疲労試験は電気油圧式サーボ疲労試験機 (容量 49 kN) を用い、繰返

し速度 0.04~0.3 Hz で実施した。制御方式は試験片最小断面部直径方向の変位を制御する、直径方向全ひずみ制御方式である。なお、データの整理は、軸方向ひずみに換算した値を採用した。き裂の発生・伝ば挙動の連続観察は、一定の繰返し数ごとに試験機を停止させ、レプリカを採取し、金属顕微鏡を用いて行った。き裂長さは、軸直角方向への投影長さを採用した。また、供試材は、繰返しの途中で材料特性が変化するのでヒステリシスループの形状変化を所定の繰返し数ごとに記録した。

3. 実験結果

3・1 一定ひずみ振幅下疲労試験 図 3 (a), (b), (c) にそれぞれ WT 80 材, SCM 435 H 材および SUS 304 材の繰返し数比 N/N_f に対する繰返し応力幅 $\Delta\sigma$ の変化を示す。WT 80 材および SCM 435 H 材は図 3 (a), (b) に示すように、寿命の初期 (全寿命の約 10 % 程度) で顕著な軟化挙動を示し、以後 $\Delta\sigma$ はほぼ安定している。ただし WT 80 材の初期軟化の程度は、繰返し塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ のレベルによって変化し、 $\Delta\epsilon_p=5.57\%$ で $\Delta\sigma=1750 \rightarrow 1640$ MPa, $\Delta\epsilon_p=0.67\%$ で $\Delta\sigma=1560 \rightarrow 1230$ MPa とその変化は $\Delta\epsilon_p$ が小さくなるほど大きくなっている。なお、SCM 435 H 材では軟化挙動はひずみレベルに依存せず、どのひずみレベルにおいても同じような変化をしている。破断直前の $\Delta\sigma$ が急変する領域を除き $N/N_f > 0.1$ の領域では両材とも $\Delta\sigma$ はほぼ定常値を示しているものとみなし、 $N/N_f=0.5$ での $\Delta\sigma \sim \Delta\epsilon_p$ の関係を求め、次式を得た。

$$\Delta\sigma = K \cdot \Delta\epsilon_p^n \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 K, n は実験定数で以下のように表される。

$$\text{WT 80: } K=2359, n=0.149$$

$$\text{SCM 435 H: } K=2977, n=0.15$$

一方、SUS 304 材は図 3 (c) に示すように、寿命全体で緩やかな硬化挙動を示している。これを式 (1) を用いて表すことを試みた。硬化が全寿命を通じて進行

表 1 化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Al	N	Cu
WT80	0.16	0.31	0.89	0.014	0.12	-	0.93	0.36	0.019	-	-	-
SCM435H	0.36	0.28	0.75	0.017	0.017	0.06	1.00	-	-	-	-	0.015
SUS304	0.055	0.600	1.02	0.023	0.004	9.25	18.35	0.06	0.011	0.004	0.0232	-

表 2 3 種類の材料の機械的性質

	σ_s	σ_B	σ_T	ϕ	ψ	ϵ_f
WT80	743	819	1603	16.8	62.6	0.98
SCM435H	520	953	1449	16.1	51.1	0.72
SUS304	234	631	1684	67.0	71.4	1.25

σ_s : Yield stress
 σ_B : Ult. tensile strength
 σ_T : True fracture stress
 ϕ : Elongation
 ψ : Reduction of area
 ϵ_f : Fracture ductility

(a) WT 80 材

(b) SCM 435 H 材

(c) SUS 304 材

図 1 金属組織写真

200 μm

するため、式(1)の係数 K , n は N/N_f の関数で表されるものと仮定し、 K , n の値を N/N_f に対して調べ、次の関係を得た。

$$\begin{aligned} \text{SUS 304: } K &= 10\,080(N/N_f)^{0.420} \\ n &= 0.564(N/N_f)^{0.176} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

図4に各材の破断寿命線図 ($\Delta\epsilon_p \sim N_f$ 関係) を示す。SCM 435 H 材の場合、長寿命域で寿命線図が短寿命側に多少折れる傾向⁽¹¹⁾⁽¹²⁾が見られるが、全体として、各材の寿命線図は両対数線図上でほぼ直線関係を満たし、次式で示されるような Manson-Coffin 形の寿命則が成立している。

$$\Delta\epsilon_p^\alpha \cdot N_f = C^* \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで α , C^* は実験定数で、次のように表される。

$$\begin{aligned} \text{WT 80: } \alpha &= 1.72, \quad C^* = 0.81 \\ \text{SCM 435 H: } \alpha &= 1.55, \quad C^* = 0.38 \\ \text{SUS 304: } \alpha &= 2.35, \quad C^* = 0.036 \end{aligned}$$

さて、前報までの S 45 C 材で用いた手法^{(5)~(8)}を3種類の材料に適用し、微小き裂の発生・伝ばの立場から疲労寿命評価を試みた。その詳細は省略するが、破断に至った主き裂のき裂伝ば速度 dl/dN ($\mu\text{m}/\text{cycle}$) ~ き裂長さ l (μm) 関係を求めると、次のき裂伝ば則が各材に対して成立する。

$$dl/dN = A \cdot \Delta\epsilon_p^\beta \cdot l \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで A , β は実験定数で、以下のように表される。

$$\begin{aligned} \text{WT 80: } A &= 7.74, \quad \beta = 1.73 \\ \text{SCM 435 H: } A &= 9.02, \quad \beta = 1.35 \\ \text{SUS 304: } A &= 333, \quad \beta = 2.51 \end{aligned}$$

すなわち、前報で示した繰返しに対して安定な材料の場合と同様、本研究の場合にもき裂伝ば速度がき裂長

さの1次に比例するき裂伝ば則が成立する。次に前報^{(5)~(8)}と同様、これらのき裂伝ば則を基に破断寿命評価を行った。式(4)を積分し、き裂発生および破断時のき裂長さを代入すると、Manson-Coffin 形の寿命則が導かれる。

$$\Delta\epsilon_p^\beta \cdot N_f = C' \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 C' は材料定数で、 $C' = 0.93$ (WT 80), 0.74 (SCM 435 H), 0.017 (SUS 304) のように表される。式(5)を用いて求めた予測寿命を図4中に破線で示す。

(a) WT 80 材

(b) SCM 435 H 材

(c) SUS 304 材

図3 繰返し途中の応力振幅の変化
(一定ひずみ振幅下)

(a) 疲労試験片

(b) ドリル穴形状

図2 試験片形状および微小ドリル穴

予測値は実験値とよく一致しているのがわかる。以上より繰返し軟化および硬化挙動を示す材料でも、 $N/N_f=0.5$ の塑性ひずみ幅を代表値として用いると、繰返しに対して安定なS45C材と同様に疲労寿命をき裂伝ばの立場から評価できることが示された。

3.2 組織変化の影響 周知のように、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304材は塑性ひずみの繰返しを受けると組織がオーステナイトからマルテンサイトへ変化する加工誘起形マルテンサイト変態が生じる。図5に平滑材の試験片表面に発生した主き裂が約500 μm に成長した段階でのき裂先端近傍の組織変化の観察の例を示す。き裂周辺のオーステナイト組織が

消滅しマルテンサイトに变化しているのがわかる。したがって発生したき裂はマルテンサイト化した組織中を伝ばすることになり、その組織変化がき裂伝ばに影響を及ぼすことが予想される。この点について調べるため、前報のS45C材で採用した手法を適用して検討を行った。手法の概略は以下のとおりである。平滑材と穴径が40, 100および200 μm と大きさの異なる微小穴を導入した穴材を用いて疲労試験を実施し、寿命の比較を行う。き裂伝ばに繰返し履歴(疲労予ひずみ)や組織変化が影響を及ぼすと仮定した場合、き裂がある一定の長さに成長した後の余寿命は平滑材と穴材で異なる。この点を確認するため、平滑材と穴材で一定き裂長さとして $l=300$ および500 μm を採った場合の、き裂が長さ l に成長するまでの繰返し数比 N_{300}/N_f および N_{500}/N_f と残存寿命 $N_f - N_{300}$ および $N_f - N_{500}$ の関係を $\Delta\epsilon_f=1.25\%$ の条件のもとで調べた。結果を図6に示す。図によると残存寿命は、 $l=300$ および500 μm の場合ともに繰返し数比が大きく変化しても残存寿命はほぼ一定となっている。このことは、き裂伝ばに繰返し履歴や組織変化の影響がないことを意味している。

3.3 二段二重ひずみ振幅下疲労試験 繰返し軟化・硬化挙動を示す材料のひずみ振幅切り換え後の応力振幅の変化およびMiner則の検討をするため、WT

図4 破断寿命線図

SUS304材

図5 き裂近傍の金属組織

図6 き裂長さ300および500 μm からの残存寿命

80 材および SUS 304 材を用い、ひずみ振幅を繰返し途中で変化させた二段二重ひずみ振幅疲労試験を実施した。その際、ひずみ振幅の切り換えは主き裂が約 300 μm に成長したときに行った。結果を表 3 に示す。軟化挙動を示す WT 80 材、硬化挙動を示す SUS 304 材ともに $\Delta\epsilon_p$ を高から低レベルに切り換えた場合、繰返し数比の総和 $N_1/N_{f1} + N_2/N_{f2}$ が約 1.3~1.5、 $\Delta\epsilon_p$ を低から高レベルへ切り換えた場合は約 1 で破断している。多くの材料で確かめられている Miner 則成立のばらつきの範囲が 0.6~1.5⁽¹³⁾であることを考えると、本研究の場合も Miner 則が成立しているとみなせる。図 7 に両材の繰返し途中における繰返し応力幅 $\Delta\sigma$ の変化を繰返し数比の和に対して示す。図より WT 80 材はひずみレベルを切り換えても切り換え後の $\Delta\sigma$ には切り換え前のひずみ繰返しの影響はないことがわかる。一方、SUS 304 材では切り換え前の $\Delta\epsilon_p$ レベルが低い場合、切り換え後の $\Delta\sigma$ はひずみ切り換えの影響をうけず、 $\Delta\epsilon_p$ 一定条件下での $\Delta\sigma$ のレベルに落ち着いている。しかし、切り換え前のひずみレベルが高くなると、切り換え後の $\Delta\sigma$ は一定ひずみ振幅下の $\Delta\sigma$ よりやや高くなっているのがわかる。すなわち、ひずみの繰返しに伴って組織が変化する SUS 304 材の場合、繰返し応力~ひずみ関係が多少繰返し履歴の影響を受けることを意味している。

4. 考 察

4.1 繰返し軟化・硬化挙動および組織変化と疲労寿命の関係 繰返し述べたごとく、前報^{(5)~(8)}では繰返しに対して安定な S 45 C 材を用いて検討を行い、低サイクル疲労寿命を予測、評価する上で重要と考えられるいくつかの知見を得た。本研究の主目的はそれらの知見が繰返し軟化材または硬化材の場合にも成立するか否かを明らかにすることである。低サイクル疲労寿命が繰返し特性と密接に関係することから、当初成立しないものと予想された。しかし、結果的には前節で述べたごとく、本研究で取り上げた繰返し軟化材および硬化材は、形式的に繰返しに対して安定な材料と大略同様に取扱うことができる。ここではこの理由について考察する。

前報⁽⁵⁾でき裂伝ば速度 dl/dN がき裂長さ l の 1 次比例する実験き裂伝ば則、 $dl/dN = C \cdot l$ が成立することを示し、同式が成立する背景について考察した。そして、穴材の結果をもとに、き裂伝ば則が線形式となるための条件は、き裂伝ばに対して繰返し履歴（または疲労予ひずみ）が影響を及ぼさないことであることを明らかにした。

繰返し軟化を示す WT 80 材および SCM 435 H 材の場合、繰返し初期で著しく軟化するが、全寿命の約 10 % 以内で軟化傾向は飽和し〔図 3 (a), (b) 参照〕またき裂も寿命のごく初期に発生した。これらの点と線形のき裂伝ば則〔式 (4)〕が成立することを合わせて考えると、寿命の大部分は巨視的には一定の応力~ひずみ応答を示し、また微視的には固有の転位構造を示す、一定の巨視的および微視的支配条件下でのき裂伝ばで占められたものと判断される。その結果、見かけ上繰返しに対して安定な材料の場合と同様な傾向を示したものと理解される。軟化の影響が現れるとしても、それは寿命のごく初期のき裂発生までの段階で、全寿命に対してその影響は無視できるものと考えられる。なお、結晶粒寸法のき裂発生が寿命の大半を

表 3 Miner 則の実験による検討

	$\Delta\epsilon_{p1}$ (%)	$\Delta\epsilon_{p2}$ (%)	$\frac{N_1}{N_{f1}}$	$\frac{N_2}{N_{f2}}$	$\Sigma (N_i/N_{fi})$
WT80	1.64	3.58	0.93	0.54	1.47
	3.58	1.64	0.53	0.56	1.09
SUS304	0.82	1.73	0.60	0.74	1.34
	1.73	0.82	0.70	0.31	1.01

(a) WT 80 材

(b) SUS 304 材

図 7 繰返し途中の応力振幅の変化
(二段二重ひずみ振幅下)

占める高繰返し数疲労の場合には本研究の場合と異なり、軟化の影響がより強く現れることが予想される。

一方、繰返し硬化を示す SUS 304 材の場合、微小き裂伝ば特性は軟化材のそれとほぼ同様に評価できた。ただし、詳しくは繰返し硬化マルテンサイト変態による組織変化、および式(2)で示したように、べき乗形の繰返し応力～ひずみ関係の係数 K , n が一定でなく、繰返し数比 N/N_f の関係で表される、などの要因があり、軟化材と異なる。このような要因が介在するにもかかわらず、結果的に軟化材や安定材と同様に取扱いが可能な理由として、以下のように考えられる。 K , n が N/N_f に依存して変化しても、寿命の 50 % の値で代表させると、線形のき裂伝ば則が成立し、かつき裂伝ば則に基づく寿命の予測値は実験値とよく一致した。前報⁽⁷⁾で述べたようにき裂伝ば則 $dl/dN = C \cdot l$ において、 C は一般に一定でなくき裂の伝ば段階によって変化し、き裂伝ば初期には小さくき裂が急速に伝ばする後半では大きい。したがって寿命の 50 % のき裂伝ば則を採用することは、 C の全寿命を通じての平均値を採ることである。図 3(c) に示したように、本研究に用いた SUS 304 材は繰返し硬化の程度がさほど大きくないこと、および上述の C の平均操作による伝ば速度の評価などの要因により、繰返し硬化材の場合にも安定材や軟化材と同様に取扱い得たものと考えられる。なお、組織変化に関して一般にき裂発生までの段階ではその影響が現れるが、き裂伝ば段階ではその影響は 2 次的と考えられる。また、図 5 に示したように、き裂先端近傍のひずみ集中の高い領域がマルテンサイト変態を起こしているため、組織変化が全寿命を通じてき裂伝ばに一定の影響を及ぼし、その結果き裂伝ば則には、その影響が現れなかったことも考えられる。

4.2 繰返し J 積分幅 ΔJ による微小き裂伝ば速度評価 低サイクル疲労条件下の巨視き裂および微小き裂の伝ば速度評価に弾塑性破壊力学パラメータ ΔJ が有効であることが示されている^{(1)~(4)}。特に、本研究のような繰返し軟化材および硬化材のひずみ制御条件下の微小き裂伝ば速度評価の際には、 ΔJ が繰返し途中の応力幅の変化を反映する、より有効な評価パラメータになりうるものと考え、3 種類の材料について $dl/dN \sim \Delta J$ 関係を求めた。両対数線図上に表示した結果を図 8 に示す。ただし、 ΔJ の算出は Dowling⁽¹³⁾ に従い、所定の繰返し数ごとに記録したヒステリシスループを用いて求めた。またその際、き裂先端は低サイクル疲労条件下の微小き裂伝ばの取扱いでしばしば行われるように、繰返しひずみ振幅の全範囲で開口して

いるものと仮定した。

さて図 8 を見ると 3 種類の材料の $dl/dN \sim \Delta J$ 関係は繰返し特性が異なるにもかかわらず、各材の dl/dN と ΔJ の間には両対数線図上でほぼ 1 本の直線で表され、次式のき裂伝ば則が成立しているのがわかる。

$$dl/dN = 1.24 \times 10^{-5} \cdot \Delta J^{1.02} \quad \dots\dots\dots (6)$$

このことは、繰返し途中で材料特性が変化しても、材料に関係なく dl/dN は ΔJ を用いて評価できることを示し、また ΔJ による整理は材料の種類の影響を受けにくいことを意味している。なお、 ΔJ が小さい範囲ではバラツキが大きくなっている。これは、き裂がまだ小さく、結晶組織やき裂形状の影響を受けやすく、また材料特性の変化が著しくその影響を多少受けたことも考えられる。本研究では、 ΔJ が繰返し硬化材および軟化材の微小き裂伝ば速度を評価するのに有効であるかどうかを検証するのに主眼をおいたが、き裂開口を考慮した $dl/dN \sim \Delta J$ 関係および微小き裂と巨視貫通き裂の速度の比較など、 ΔJ 評価に関連したより詳しい弾塑性破壊力学的立場からの検討については今後の課題と考えている。

5. 結 言

繰返しに対して安定な材料の疲労寿命を微小き裂伝ば則に基づいて評価する手法を前報^{(5)~(8)}で導いた。本研究では同手法を繰返し軟化材および硬化材に適用し、その有効性について検討した。平滑材および穴材を用いて一定ひずみ振幅および二段二重振幅下の低サイクル疲労試験を実施し、微小き裂の発生・伝ば挙動を観察し、以下の結果を得た。

(1) WT 80 材および SCM 435 H 材の繰返し軟

図 8 き裂伝ば速度と ΔJ の関係

化挙動は、寿命のごく初期のき裂発生時期で飽和し、寿命の大部分で定常となった。一方、SUS 304 材は寿命全域で硬化挙動を示した。各材の $\Delta\sigma$ の繰返し途中の変化は $N/N_f=0.5$ の $\Delta\varepsilon_p$ を用いると、次式で表される。

$$\Delta\sigma = K \cdot \Delta\varepsilon_p^n$$

ここで K, n は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \text{WT 80: } & K=2\,359, \quad n=0.149 \\ \text{SCM 435 H: } & K=2\,977, \quad n=0.15 \\ \text{SUS 304: } & K=10\,080(N/N_f)^{0.420} \\ & n=0.564(N/N_f)^{0.176} \end{aligned}$$

(2) 繰返し軟化・硬化する材料の寿命は、繰返し応力～ひずみ関係を $N_f/2$ の値で代表させることにより、基本的には繰返しに対して安定な材料で導いた手法を直接適用することで評価できる。すなわち各材とも $dl/dN = C \cdot l$ (C : 実験定数) 形のき裂伝ば則が成立し、かつ同式を用いて Manson-Coffin 形の寿命則が導かれ、また、寿命の予測値が実験値とほぼ一致することが確認された。

(3) WT 80 材と SUS 304 材の二段二重ひずみ振幅下疲労の場合、微小き裂伝ばの立場から Miner 則が成立することが示された。

(4) SUS 304 材の場合、塑性ひずみの繰返しに伴いひずみ集中の大きいき裂先端近傍に加工誘起マルテンサイト組織が観察された。しかし、その組織変化の微小き裂伝ばに及ぼす影響が小さいこと、すなわち、

微小き裂伝ばに対する繰返し履歴がほとんど認められないことが平滑材と穴材の結果の比較により確認された。

(5) 微小き裂伝ば速度は、弾塑性破壊力学パラメータ ΔJ を用いて評価でき、各材の $dl/dN \sim \Delta J$ 関係は、材種に関係なく両対数線図上で次式で示すようなほぼ 1 本の直線で表せることが示された。

$$dl/dN = 1.24 \times 10^{-5} \cdot \Delta J^{1.02}$$

本研究の遂行に際し、卒業研究の一部として、中山健幸君〔現、日産ディーゼル工業(株)〕、吉田貴信君〔現、三菱電機(株)〕、檜崎徹司君〔現、英数学館〕、澤田弘君〔現、九州工業大学大学院〕の助力を得た。記して射意を表す。

文 献

- (1) 幡中・藤満, 機論, 51-463, A (1985), 790.
- (2) 幡中・ほか 2 名, 機論, 52-475, A (1986), 579.
- (3) 山田・ほか 3 名, 機論, 49-440, A (1983), 441.
- (4) 星出・ほか 2 名, 機論, 50-451, A (1984), 320.
- (5) 村上・ほか 4 名, 機論, 49-447, A (1983), 1411.
- (6) Murakami, Y., ほか 3 名, *Eng. Fract. Mech.*, 18-5 (1983), 909.
- (7) 原田・ほか 4 名, 機論, 51-464, A (1985), 1215.
- (8) 遠藤・ほか 3 名, 機論, 52-477, A (1986), 1276.
- (9) 原田・ほか 3 名, 機論, 53-485, A (1987), 26.
- (10) Harada, S., ほか 3 名, *ASTM STP*, 942 (1987), 1181.
- (11) 幡中・藤満, 文献(4)の 291 ページ.
- (12) 幡中・ほか 2 名, 機論, 52-474, A (1986), 267.
- (13) 大路, 機誌, 70-576 (1967), 36.
- (14) Dowling, N. E., *ASTM STP*, 637 (1977), 97.

討 論

〔質問〕 戸 梶 恵 郎〔岐阜大学工学部〕

以下の点について、お教えいただければ幸いです。

(1) 式(4)を用いて寿命評価を行う際、き裂発生および破断時のき裂長さとして、どのような寸法を採用されたのか。破断時のき裂長さの若干の相違は結果に大きな影響を及ぼさないと思うが、き裂発生に対してどのような寸法を用いるかは重要と考えられる。もし、組織の単位程度の寸法を用いたとすれば、き裂進展に組織の影響が現れ、式(4)が成立していないことも相像される。この点についてもご意見をお伺いしたく思う。

(2) SUS 304 の場合、き裂周辺で顕著なマルテンサイト変態が観察されている。低サイクル疲労とはいえ、この変態がき裂閉口に影響を及ぼしている(変

態誘起き裂閉口) ことが考えられる(図 8 の J による評価にも関係する)。この点について、観察結果またはお考えをお教えいただきたい。

〔回答〕 (1) ご指摘のように、式(4)を用いて寿命評下する場合、き裂発生時のき裂長さは寿命予測に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、本報でも各材についてき裂発生時のき裂長さをレプリカを用いて測定した。付表 1 にき裂発生繰返し数とき裂長さを示す。ここで、SUS 304 材のき裂発生長さとしては、SUS 304 材の平均結晶粒径が $28 \mu\text{m}$ であることを考えて平均結晶粒径で代表させた。WT 80 材および SCM 435 H 材では組織寸法との比較は行わず、測定値を用いて式(4)で寿命評価した。なお、破断時のき裂長さはいずれの材料も前報同様、試験片直径の 8 mm を使用した。また付図 1 に SUS 304 材のき裂伝ば速

付表 1 き裂発生長さ

	N_0/N_f	l_0 (μm)
WT80	0.1	6
SCM435H	0.5	8
SUS304	0.5	25

度 dl/dN とき裂長さ l の関係を示す。付図 1 からご指摘のようにき裂長さが小さくなるほどき裂進展に組織の影響が現れ伝ば速度のばらつきが大きくなっているのがわかる。しかし、き裂伝ば則の式(4)は付図を基にき裂長さが $50 \sim 1000 \mu\text{m}$ までのデータの平均的な $dl/dN \sim l$ 関係を表した式であり、この式をき裂発生領域まで延長して予測した寿命が実験値とほぼ一致していることから、組織の単位程度のき裂長さまで式(4)は大略成立しているものと考えている。

(2) 明確な確証はないが、本研究のように軟化・硬化形材の場合にもき裂伝ば則の取扱いが前報の S45C の場合とほぼ同じになったことから、少なくとも一定応力またはひずみ振幅下の場合にはき裂開閉口の影響がより現れやすいものと考えている。実際、本研究の追加実験として行った SUS 304 材の二段二重

付図 1 き裂伝ば速度とき裂長さ関係(SUS 304 材)

ひずみ試験結果では、ひずみレベル切換え前後でき裂伝ば則が異なることが確認されており、組織変化とき裂開閉口の影響が関与したものと考えている。