

## 論 文

UDC 669.14.018.8 : 669.14'24'26-194.56 : 539.43 : 539.37

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304, 321 の  
高温低サイクル疲労に及ぼすひずみ波形の影響\*

平川 賢爾\*\*・時政 勝行\*\*\*・外山 和男\*\*\*

The Effect of Strain-wave Form on the Low-cycle Fatigue Behavior  
of Type 304 and 321 Stainless Steel at Elevated Temperatures

Kenji HIRAKAWA, Katsuyuki TOKIMASA, and Kazuo TOYAMA

## Synopsis:

The influence of strain-wave form on the low-cycle fatigue life of type 304 and 321 stainless steels was studied at 650 and 700°C. Fully reversed strain-controlled low-cycle fatigue tests were conducted with a symmetrical triangular, a trapezoidal and an asymmetrical triangular wave form.

The effect of creep-fatigue interaction was analyzed by the strain-range partitioning approach. The micro-structural change during the test was also observed and its effects on the fatigue life were discussed considering the mode of fatigue crack growth and the environmental effects.

It was found that the creep-fatigue properties  $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$  and  $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$  of 304 steel are the same as those of 321 steel, but the other effects such as the micro-structural change, environment and so on is greater in 321 steel than in 304 steel in such test as with trapezoidal strain-wave form of long hold time.

## 1. 緒 言

クリープ変形が無視できない温度領域において繰返し応力が作用する場合には、いわゆるクリープと疲労の重畳効果が問題となり、これを明らかにすることが高温疲労設計の重要な問題となつている。これまでクリープと疲労の重畳効果については、温度<sup>1)~3)</sup>、ひずみ速度<sup>3)4)</sup>保持時間<sup>5)~9)</sup>、雰囲気<sup>10)11)</sup>などの影響が多くの研究者によつて検討されてきた。しかしながら、高温低サイクル疲労における材料の時間依存形の非弾性挙動(クリープ、組織変化など)との関連についてはまだ十分に明らかにされておらず、したがつてこれまでに提案されている高温低サイクル疲労寿命推定法<sup>12)~15)</sup>の多くは材料の変形機構との関連が明確でないため、上述の諸因子の影響を定量的に評価するにはなお多くの問題を含んでいる。例えば、WALKER<sup>5)</sup>、EDMUNDS ら<sup>6)</sup>の Cr-Mo 鋼についての報告や DAWSON ら<sup>7)</sup>のステンレス鋼についての報告にみられるように、1サイクルの最大ひずみ位置に保持

時間が導入されると疲労寿命が低下することはよく知られているが、疲労寿命の低下割合が鋼種によつて異なる理由については明確でない。また CONWAY ら<sup>8)</sup>は1サイクルに要する時間で寿命を整理すると、ひずみ速度の低下による寿命の低下と保持時間の増大による寿命の低下が同一直線で表わされることにより、ひずみ速度の影響と保持時間の影響は等価であるとみなしていたが、その後の研究<sup>9)</sup>によりひずみ速度を小さくした場合と保持時間を長くした場合では異なつた損傷が材料に蓄積されることが明らかにされた。このように従来ひずみ速度とか保持時間といったパラメータで整理されてきたひずみ波形の影響は、その結果を長時間側へ外挿したり他材質へ適用する場合には問題があり、これを解決するためには、塑性ひずみやクリープひずみなどの力学的因子の影響、組織変化などの材料因子の影響および環境因子の影響を明らかにする必要がある。これら諸因子の影響を統一的に把握するにはまず力学的因子の影響を材料の変形機構と関連させて明らかにすることが必要と考えられ

\* 昭和 53 年 10 月 23 日 (Received Oct. 23, 1978)

\*\* 住友金属工業(株)中央技術研究所 工博 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

\*\*\* 住友金属工業(株)中央技術研究所 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Hondori Nishinagasu Amagasaki 660)

Table 1. Chemical compositions (wt.%).

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti
304 steel	0.07	0.69	1.71	0.022	0.008	0.03	9.22	18.79	0.05	—
321 steel	0.08	0.53	1.69	0.018	0.007	0.02	10.55	17.70	0.03	0.46

Table 2. Mechanical properties ( $\dot{\epsilon}=2 \times 10^{-3}$  1/sec).

Material	Temperature $T$ (°C)	0.2% Proof stress $\sigma_{0.2}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength $\sigma_B$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation $\delta$ (%)	Reduction of area $\phi$ (%)
204 Steel	R.T.	25.2	63.0	96.0	75.8
	650	11.1	31.6	51.8	71.5
	700	11.2	26.6	76.4	76.6
321 Steel	R.T.	25.7	59.3	56.0	69.0
	650	13.9	36.4	38.8	65.0
	700	17.7	31.9	44.2	67.9

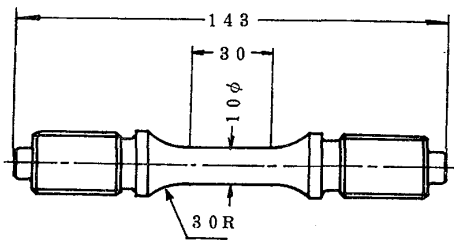


Fig. 1. Shape and dimensions of a low-cycle fatigue specimen.

る。

著者らは主にステンレス鋼を用いてクリープと疲労の重畳効果に及ぼす諸因子の影響を微視的な変形挙動と関連づけて系統的に明らかにする目的で一連の試験を行なっており、すでに 321 鋼の低サイクル疲労寿命に及ぼす温度、ひずみ速度の影響について検討し、500~700°C の温度域では微視的な変形機構として低温では動的ひずみ時効、高温ではクリープ、析出が重要であることを明らかにした<sup>16)</sup>。

本報は 304 鋼, 321 鋼の高温低サイクル疲労挙動に及ぼすひずみ波形の影響を動的ひずみ時効の影響が小さい 650, 700°C の高温域で調べ、得られた結果をひずみ範囲分割法<sup>17)18)</sup>で解析しクリープの影響、組織変化の影響および環境の影響について検討したものである。

## 2. 方法

### 2.1 供試材

供試材は SUS304 および 321 鋼であり、その化学成分、機械的性質を Table 1, 2 に示す。供試材は全て冷間引き抜き後、溶体化処理し Fig. 1 に示す試験片形状

に機械加工した。試験に際しては試験片平行部をエメリー紙 #400 にて軸方向に研磨した。

### 2.2 試験機

使用した試験機はコンピュータ制御電気油圧式高温低サイクル試験装置であり、試験片の加熱には赤外線加熱炉を用いた。ひずみは平行部内に石英棒を押しあて標点間 (25 mm) の伸びをひずみゲージを介して検出した。

### 2.3 試験条件

試験は温度 650, 700°C で行なつた。試験温度は標点間中央で測定し、標点間の温度誤差は  $\pm 5^\circ\text{C}$  以内である。試験片に繰返されるひずみ波形は完全両振三角波、最大ひずみ時に保持時間を有する台形波、負荷時と除荷時のひずみ速度の異なる非対称三角波の三種類である。これらのひずみと応力の関係を Fig. 2 に示す。ここで  $\Delta \epsilon_t$  は全ひずみ範囲であり、弾性ひずみ範囲 ( $\Delta \epsilon_e$ ) と塑性ひずみ範囲 ( $\Delta \epsilon_{in}$ ) の和で与えられる。さらに  $\Delta \epsilon_{in}$

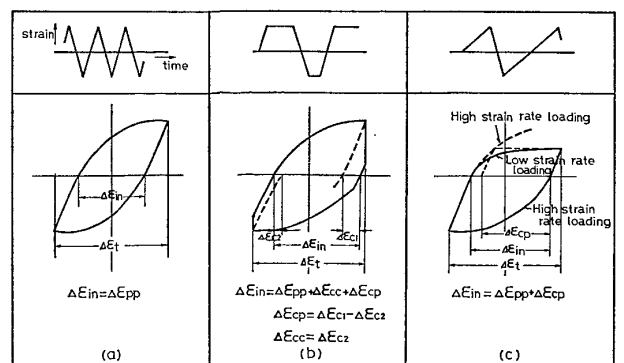
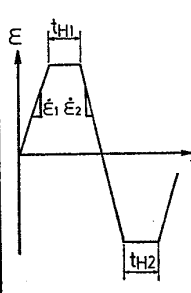


Fig. 2. A symmetrical triangular, a trapezoidal and an asymmetrical triangular strain-wave forms, and partitioning of inelastic strain range  $\Delta \epsilon_{in}$  in respective cases.

Table 3. Fully reversed strain controlled low-cycle fatigue test conditions at 650 and 700°C.

Material	304					321				
	$\dot{\epsilon}_1$	$\dot{\epsilon}_2$	$t_{H1}$	$t_{H2}$	$\Delta\epsilon_t$	$\dot{\epsilon}_1$	$\dot{\epsilon}_2$	$t_{H1}$	$t_{H2}$	$\Delta\epsilon_t$
	$2 \times 10^3$	$2 \times 10^3$	0	0	14,1.0,0.6	$2 \times 10^3$	$2 \times 10^3$	0	0	1.4,1.0,0.6
	"	"	10	0	"	"	"	10	0	"
	$4 \times 10^4$	"	0	"	1.0	"	"	1,2,6	0	1.0
	$4 \times 10^5$	"	"	"	"	"	"	1	1	"
	$10^4$	$8 \times 10^3$	"	"	1.5,1.0,0.8	"	"	2	2	"
	"	"	"	"	"	"	"	1	2	"
	"	"	"	"	"	"	"	2	1	"
"	$10^4$	$8 \times 10^3$	0	0	1.2,1.0,0.6	"	"	0	0	1.2,1.0,0.6

$\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2$  (1/sec),  $\Delta\epsilon_t$  (%),  $t_{H1}, t_{H2}$  (min)

は MANSON らのひずみ範囲分割法にしたがつて  $\Delta\epsilon_{pp}$ ,  $\Delta\epsilon_{pc}$ ,  $\Delta\epsilon_{cc}$  に分割される. 試験条件の一覧を Table 3 に示す.

2.4 ひずみ範囲分割法による解析方法

MANSON ら<sup>17)</sup>によれば, 4つの非弾性ひずみ範囲  $\Delta\epsilon_{pp}$ ,  $\Delta\epsilon_{pc}$ ,  $\Delta\epsilon_{cp}$ ,  $\Delta\epsilon_{cc}$  に対応する寿命  $N_{pp}$ ,  $N_{pc}$ ,  $N_{cp}$ ,  $N_{cc}$  が既知のとき,  $\Delta\epsilon_{in} = \Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{pc} + \Delta\epsilon_{cp} + \Delta\epsilon_{cc}$  が繰返されたときの疲労寿命  $N_f$  は, 線型被害則を仮定して, 次式で与えられると\*、種々の  $\Delta\epsilon_{pp}$ ,  $\Delta\epsilon_{pc}$ ,  $\Delta\epsilon_{cp}$ ,  $\Delta\epsilon_{cc}$  を組合せたときの寿命  $N_f$  を知るにより逆に  $\Delta\epsilon_{pp}$ - $N_{pp}$ ,  $\Delta\epsilon_{pc}$ - $N_{pc}$ ,  $\Delta\epsilon_{cp}$ - $N_{cp}$ ,  $\Delta\epsilon_{cc}$ - $N_{cc}$  を求めた.

$$\frac{1}{N_{pp}} + \frac{1}{N_{pc}} + \frac{1}{N_{cp}} + \frac{1}{N_{cc}} = \frac{1}{N_f} \dots\dots\dots(1)$$

本研究においても, 式(1)を用い, MANSON らの方法<sup>17)</sup>にしたがつて単純三角波, 引張保持時間を有する台形波および非対称三角波による疲労寿命を知ることにより  $\Delta\epsilon_{pp}$ ,  $\Delta\epsilon_{cp}$  に対応する寿命  $N_{pp}$ ,  $N_{cp}$  を求めた. すなわち,

単純三角波の場合  $\Delta\epsilon_{in} = \Delta\epsilon_{pp}$   
 のとき寿命  $N_f = N_{pp} \dots\dots\dots(2)$

非対称三角波の場合  $\Delta\epsilon_{in}' = \Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{cp}$   
 のとき寿命  $N_f' = \frac{N_{pp}}{1 + N_{pp}/N_{cp}} \dots\dots\dots(3)$

(2)(3)において  $\Delta\epsilon_{in}$ ,  $N_f$ ,  $\Delta\epsilon_{in}'$ ,  $N_f'$  が既知であるから,  $\Delta\epsilon_{pp}$ - $N_{pp}$ ,  $\Delta\epsilon_{cp}$ - $N_{cp}$  関係が求まる.

2.5 顕微鏡観察

試験後の析出物形態及びき裂進展形態を明らかにするため, 破面を含む縦断面の顕微鏡観察を行なった. 析出物は抽出レプリカ法により電子顕微鏡にて, き裂は光学顕微鏡にて観察した. また破面は SEM により調査し

\* MANSON らは linear damage rule と interaction damage rule の2つの方法を提案しているが, ここでは前者を採用した.

た.

3. 試験結果

3.1 ひずみの繰返しに伴う応力範囲の変化

ひずみの繰返しに伴う応力範囲の変化の一例を Fig.3 に示す. 保持時間がある場合 304 鋼 (Fig. 3-a) では繰返し硬化量は小さくなり, 321 鋼 (Fig. 3-b) では初期硬化量は大きいけれど, 飽和後の応力範囲はほとんど変わらないことがわかる. 非対称三角波の場合は単純三角波と台形波の中間に実験点がある.

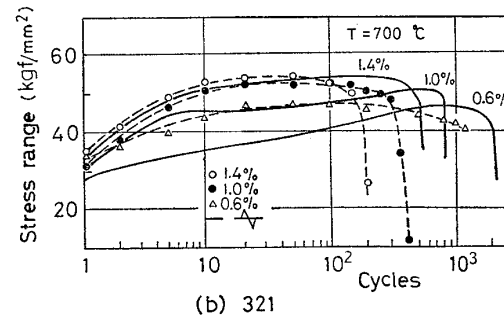
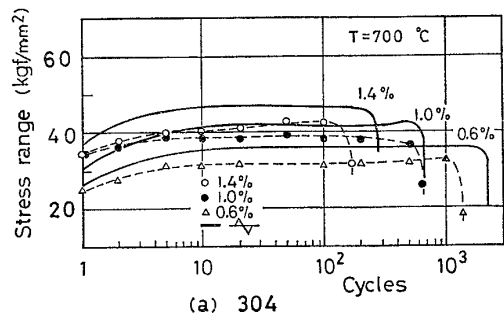


Fig. 3. Variation of the stress range during the low-cycle fatigue (Smooth lines : a symmetrical triangular strain fully reversed, Dotted lines : a trapezoidal strain fully reversed).

3.2 台形波による疲労試験結果

引張側に保持時間を導入した台形波の全ひずみ範囲と疲労寿命の関係を図. 4 に示す。同図より引張保持時間 10 min のものは保持時間のないものに比べ疲労寿命が低下していることがわかる。さらにその程度は 321 鋼で顕著である。疲労寿命に及ぼす引張保持、圧縮保持時間の影響を図. 5 に示す。これより引張保持の方が試験した範囲内では圧縮保持より常に大きな寿命の低下をもたらすことがわかる。また引張保持の場合は保持時間 1~2 min で寿命の低下が著しく、それ以上長くなると飽和する傾向(曲線 A)にあるのに対し、圧縮保持の場合は逆に保持時間が長い時に寿命の低下が著しい(曲線 B) 一方引張・圧縮の両方に保持時間がある場合(混合保持)は保持時間を合計して評価すると疲労寿命は曲線 A と B の中間にあることがわかる。また引張保持時間分だけを考えて疲労寿命は曲線 A と一致し、混合保持の場合引張保持時間だけが寿命低下に寄与していることがわかる。しかし、これは保持時間が 4 min 以内の試験結果で

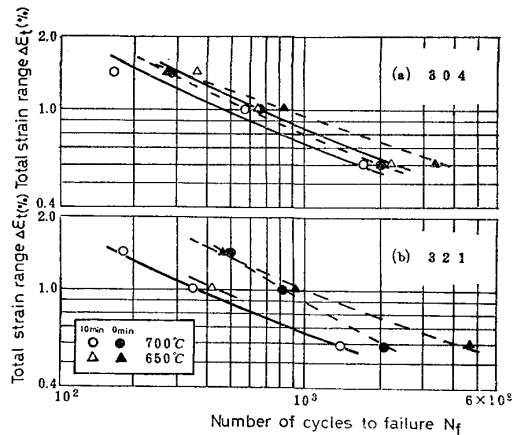


Fig. 4. The effect of tensile strain holding ( $t_{H1} = 10$  min) on the low-cycle fatigue life.

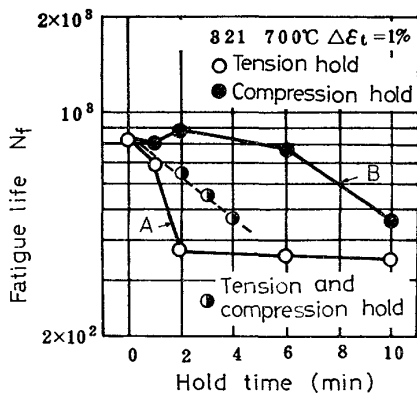


Fig. 5. The effect of hold time on the fatigue life of 321 steel in case of tension hold, compression hold, and tension-compression hold.

あり、圧縮保持時間の影響が表われない範囲であることを考慮すると保持時間の長い場合の混合保持に対してはさらに検討を要する。Fig. 6 は Fig. 4 および Fig. 5 の試験結果を非弾性ひずみ範囲で整理したものである。304 鋼の場合  $\Delta\epsilon_{in}$  で整理すると保持時間の有無にかかわらずほぼ 1 本の直線で表わされるのに対し、321 鋼ではこのような関係は存在せず試験条件による差異が大きい。

Table 4 に保持時間 10 min の場合の  $\Delta\epsilon_{in}$  中に含まれる  $\Delta\epsilon_{pp}$  と  $\Delta\epsilon_{cp}$  を示す。  $\Delta\epsilon_{cp}$  の値は  $\Delta\epsilon_{pp}$  に比べて非常に小さく、304 鋼に比べ 321 鋼の方が  $\Delta\epsilon_{cp}$  の値は若干大きい両者の差は顕著でない。

3.3 非対称三角波による疲労試験結果

304 鋼について非対称三角波のひずみ波形で除荷ひずみ速度を一定 ( $2 \times 10^{-3}$  /sec) とし、負荷ひずみ速度を変

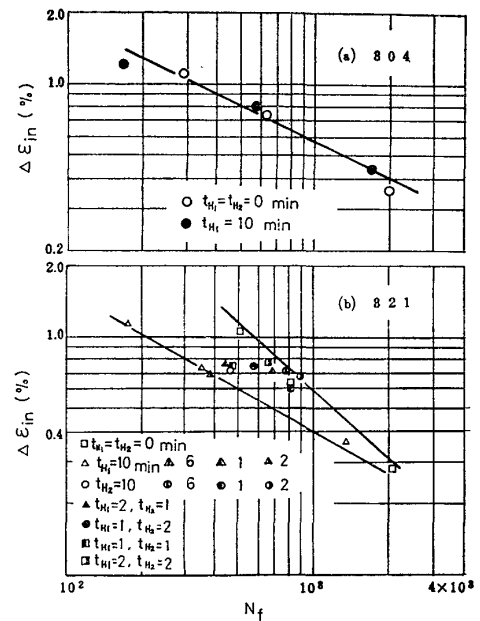


Fig. 6. The effect of hold times on  $\Delta\epsilon_{in}-N_f$  relationship of 304 and 321 steels at 700°C.

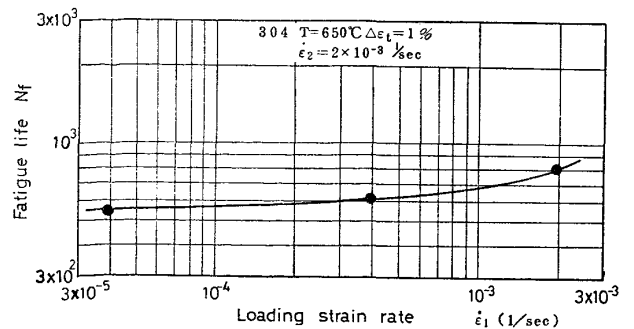


Fig. 7. The effect of loading strain rate on the fatigue life in case of an asymmetrical triangular strain-wave form.

Table 4. Results of the low-cycle fatigue test with a trapezoidal strain-wave form of  $t_{H_1}=10$  min and partitioning of inelastic strain ranges  $\Delta\epsilon_{in}$  into  $\Delta\epsilon_{pp}$  and  $\Delta\epsilon_{cp}$ .

Material	$T$ (°C)	$t_{H_1}$ (min)	$\Delta\epsilon_t$ (%)	$\Delta\epsilon_{in}$ (%)	$\Delta\epsilon_{pp}$ (%)	$\Delta\epsilon_{cp}$ (%)	Fatigue life $N_f$	Time to failure h
304 Steel	650	10	1.4	1.17	1.12	0.05	358	61.1
			1.0	0.75	0.70	0.05	629	106.6
			0.6	0.40	0.36	0.04	2 510	424.0
	700	10	1.4	1.19	1.11	0.08	166	28.3
			1.0	0.81	0.75	0.06	572	96.9
			0.6	0.44	0.39	0.05	1 689	284.3
321 Steel	650	10	1.0	0.68	0.61	0.07	420	71.2
			0.6	0.36	0.30	0.06	1 323	222.7
	700	10	1.4	1.12	1.04	0.08	183	31.2
			1.0	0.74	0.66	0.08	349	59.1
			0.6	0.36	0.30	0.06	1 323	222.7
			0.6	0.36	0.30	0.06	1 323	222.7

Table 5. Results of the low-cycle fatigue test with a asymmetrical strain-wave form and partitioning of inelastic strain ranges  $\Delta\epsilon_{in}$  into  $\Delta\epsilon_{pp}$  and  $\Delta\epsilon_{cp}$ .

Material	$T$ (°C)	$\dot{\epsilon}_1$ (1/sec)	$\dot{\epsilon}_2$ (1/sec)	$\Delta\epsilon_s$ (%)	$\Delta\epsilon_{in}$ (%)	$\Delta\epsilon_{pp}$ (%)	$\Delta\epsilon_{cp}$ (%)	Fatigue life $N_f$	Time to failure h
304 Steel	650	$4 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-3}$	1.0	0.76	0.70	0.06	615	5.1
		$4 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-3}$	1.0	0.75	0.51	0.24	547	38.7
	700*	$10^{-4}$	$8 \times 10^{-3}$	1.5	1.22	0.34	0.88	207	8.7
				1.0	0.75	0.38	0.37	497	14.0
				0.8	0.58	0.42	0.16	800	18.0
				0.6	0.30	0.20	0.10	1476	33.2
321 Steel	700	$10^{-4}$	$8 \times 10^{-3}$	1.2	0.80	0.29	0.51	223	9.4
				1.0	0.68	0.30	0.38	339	9.5
				0.6	0.30	0.20	0.10	1476	33.2
				0.6	0.30	0.20	0.10	1476	33.2

\* The present data are taken from another charge of 304 steel.

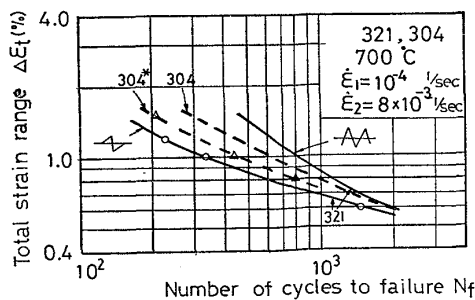


Fig. 8.  $\Delta\epsilon_t-N_f$  relationship in case of an asymmetrical triangular strain-wave form (\* indicates another charge of 304 steel).

化させた場合の温度 650°C における負荷ひずみ速度と疲労寿命の関係を Fig. 7 に示す。また負荷ひずみ速度を  $10^{-4}1/s$ , 除荷ひずみ速度を  $8 \times 10^{-3}1/s$  とし, 温度 700°C で求めた全ひずみ範囲と疲労寿命の関係を Fig. 8 に示す\*。非対称三角波では単純三角波に比べ疲労寿命は低下し, その低下割合は, 温度が高いほど, 全ひずみ

範囲が大きいほど大きく, 304 鋼より 321 鋼の方が大きい。これは材料, 温度およびひずみ条件によつて, Table 5 に示すように, 非弾性ひずみ範囲  $\Delta\epsilon_{in}$  中に占めるクリープひずみ範囲  $\Delta\epsilon_{cp}$  の割合が異なるためである。

### 3.4 ひずみ範囲分割法による波形効果の解析結果

式(2)(3)を用い, 単純三角波の試験結果より  $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$  特性を求め, それをもとに台形波あるいは非対称三角波の試験結果をひずみ範囲分割法で解析し,  $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$  特性を求めた。Fig. 9 に示すように,  $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$  特性は 304, 321 鋼とも温度によらずよく一致している。 $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$  特性については, 台形波で得られた実験点が大きくばらついたので, これを除いて非対称三角波の結果のみから定め, Fig. 9 には非対称三角波により得られた結果のみプロットした。304 鋼の場合, 温度によらずよく一致している。台形波による実験点がばらついた原因については明確ではないが,  $\Delta\epsilon_{cp}$  の値が Table 4 に示すように  $\Delta\epsilon_{pp}$  に比べて非常に小さいことから, クリープ以外の因子 (例えば雰囲気, 組織変化など) の影響が大きくなった可能性がある。

\* \* のついた 304 鋼の 700°C のデータは試験片の都合により別ロット材を用いて得られたものである。

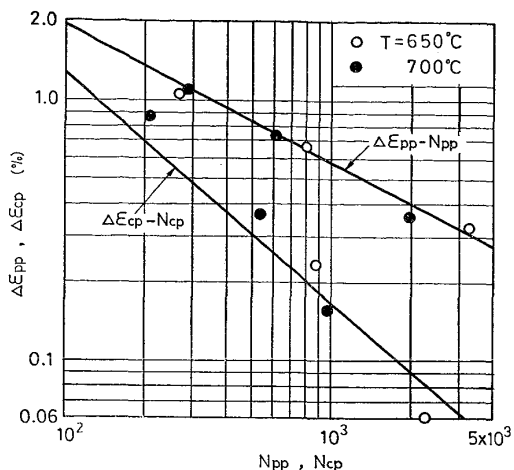


Fig. 9(a). The  $\Delta\varepsilon_{pp}-N_{pp}$  and  $\Delta\varepsilon_{cp}-N_{cp}$  properties of 304 steel.

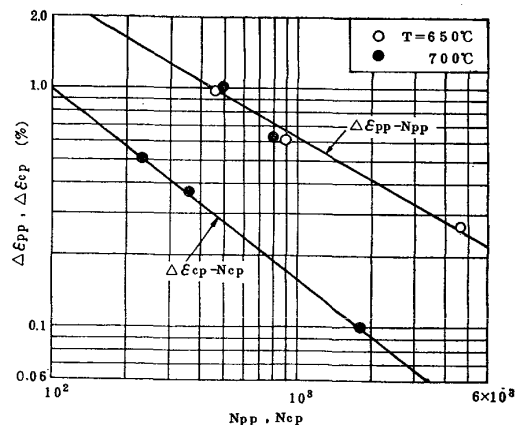


Fig. 9(b). The  $\Delta\varepsilon_{pp}-N_{pp}$  and  $\Delta\varepsilon_{cp}-N_{cp}$  properties of 321 steel.

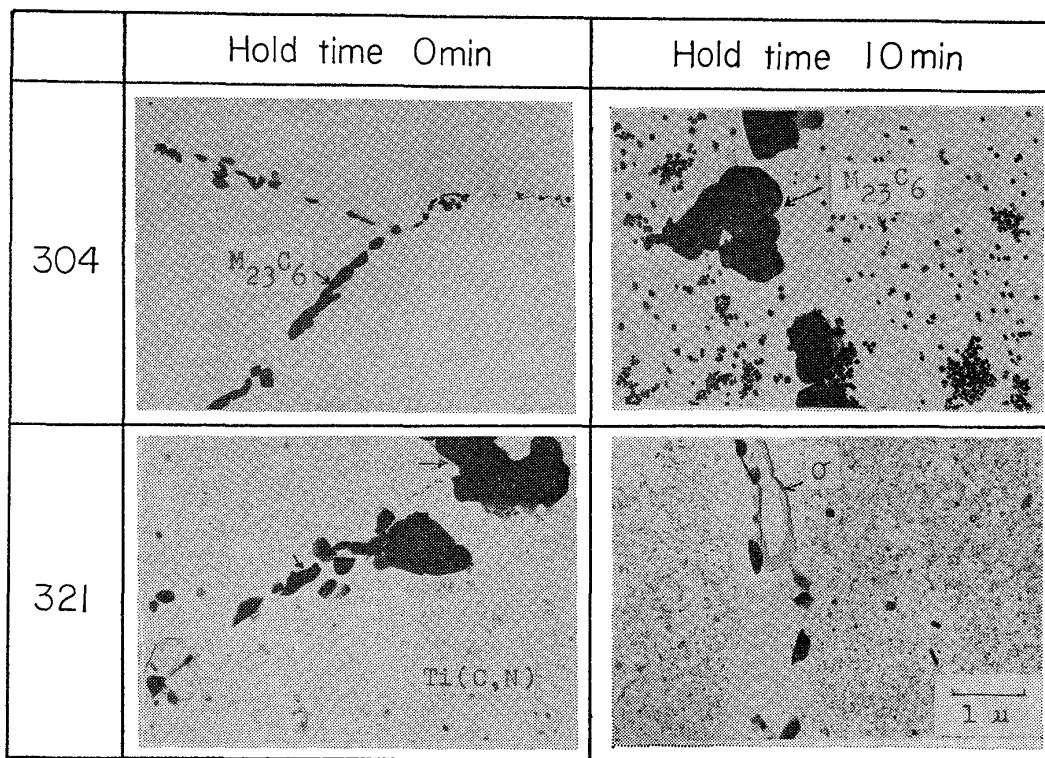


Photo. 1. Precipitates observed after the test by electron microscope ( $T=700^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\varepsilon_f=1\%$ )

### 3.5 疲労試験後の析出形態

試験後の析出物形態を Photo. 1 に示す。304 鋼では保持時間のない場合は粒界にのみ  $M_{23}C_6$  が析出しており、保持時間がある場合には粒界析出物は凝集粗大化するとともに粒内にも均一に  $M_{23}C_6$  が析出してくる。一方 321 鋼では保持時間の有無に拘らず粒界には  $M_{23}C_6$   $Ti(C,N)$  が、粒内には  $Ti(C,N)$  が認められる。ただ保持時間がある場合には粒界析出物の形態は著しく異なり、 $M_{23}C_6$  が減少し  $\sigma$  相が析出するとともに無析出帯が形成される。これらを Table 6 にまとめて示す。

### 3.6 き裂進展形態

破面の目視観察によると保持時間の有無にかかわらずき裂は試験片表面から発生し一方向に進展して破断する傾向にある。しかし非対称三角波ではき裂の発生点が試験片の表面か内部か明確ではない。試験片表面に発生した二次き裂の進展形態は Photo. 2 に示すように 304, 321 鋼いずれも保持時間のない場合には粒内一粒界混合伝播で主に粒内を、引張保持時間のある場合には粒界を伝播する傾向にある。非対称三角波の場合も Photo. 3 に示すように粒界を伝播する傾向にある。Photo. 4 に試

Table 6. Morphologies of precipitates observed after the tests.

		$t_H = 0$ min	$t_H = 10$ min
304 Steel	Grain Boundary	$M_{23}C_6$ (agglomerate)	$M_{23}C_6$ (agglomerate) (net)
	Matrix	No precipitates Observed	$M_{23}C_6$ (oblong) (rod)
321 Steel	Grain Boundary	$M_{23}C_6$ (agglomerate) Ti(C, N) (agglomerate)	$M_{23}C_6$ (agglomerate) Ti(C, N) (agglomerate) $\sigma$ -phase
	Matrix	Ti(C, N) (globule) (agglomerate)	Ti(C, N) (globule)

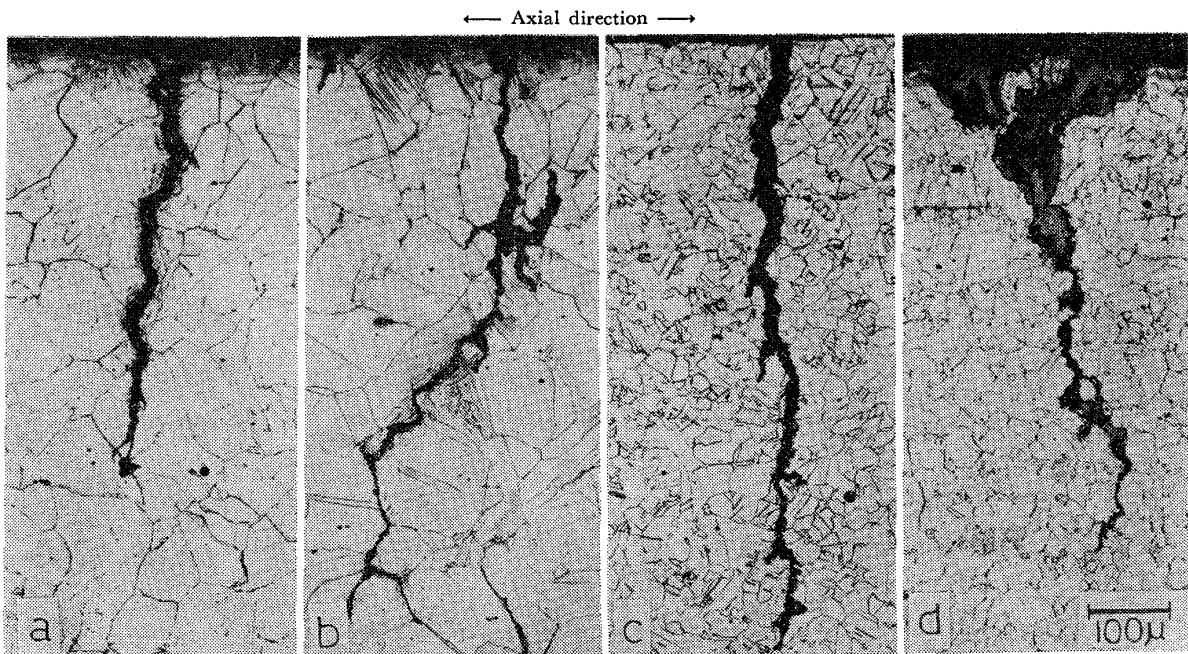


Photo. 2. Longitudinal cross-sectioned view of secondary surface fatigue cracks.

- a) 304, 650°C,  $\Delta\epsilon_t = 1\%$ ,  $t_{H1} = t_{H2} = 0$  min  
 b) 304, 650°C,  $\Delta\epsilon_t = 1\%$ ,  $t_{H1} = 10$  min,  $t_{H2} = 0$  min  
 c) 321, 700°C,  $\Delta\epsilon_t = 1\%$ ,  $t_{H1} = t_{H2} = 0$  min  
 d) 321, 700°C,  $\Delta\epsilon_t = 1\%$ ,  $t_{H1} = 10$  min,  $t_{H2} = 0$  min

験片表面近傍の SEM を 304 鋼について示す。二次き裂で観察された傾向がさらに顕著に認められる。

#### 4. 考 察

##### 4.1 ひずみの繰返しに伴う応力範囲の変化

ひずみの繰返しに伴う応力範囲の変化は転位構造の変化(転位の再配列<sup>19)</sup>, セル構造の形成<sup>20)</sup>, 動的ひずみ時効<sup>21)</sup>など)や相変化(時効析出<sup>22)</sup>, 析出物の再溶解<sup>23)</sup>など)に起因するものである。繰返し変形に必要な応力が主に粒内強度に依存していることを考えると, 304 鋼で保持時間がある場合に応力範囲が小さくなったのは Photo. 1 に示すように粒内析出により固溶強化作用が低下したためであろう。

##### 4.2 台形波試験における疲労寿命に及ぼす保持時間の影響について

650°C および 700°C での疲労寿命に及ぼす影響因子としてはクリープ, 組織変化およびき裂の発生と進展に対する環境効果が考えられる。3.4 で述べたように, 台形波試験では  $\Delta\epsilon_{cp}$  値が  $\Delta\epsilon_{pp}$  の値に比べて小さいため, クリープの影響は非対称三角波試験よりも小さくなるうえ, Table 4, 5 に示すように試験時間が逆に長いために, クリープよりも組織変化や環境効果などの他の因子の影響を受けやすい条件にあるといえる。したがって, Fig. 6 において, 304 鋼と 321 鋼の間で保持時間の影響が大きく異なつた原因も, これらの因子が関連していると考えられる。Fig. 10 は Table 4 および Fig. 9

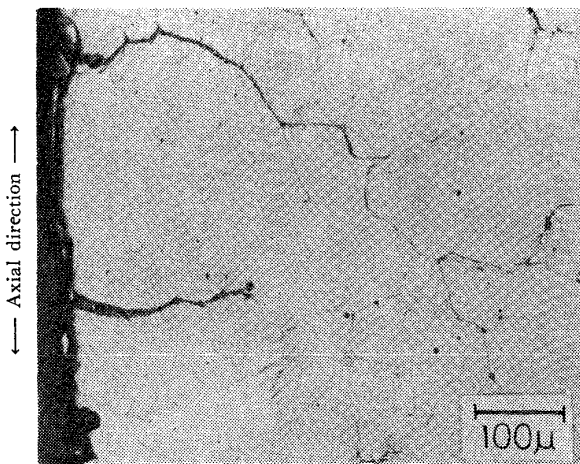


Photo. 3. Longitudinal cross-sectioned view of secondary surface fatigue cracks (304,  $T=650^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\epsilon_t=1\%$ ,  $\dot{\epsilon}_1=4\times 10^{-41}/\text{sec}$ ,  $\dot{\epsilon}_2=2\times 10^{-31}/\text{sec}$ ).

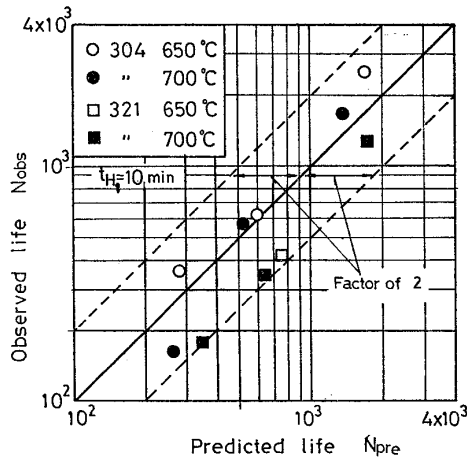


Fig. 10. Predictability of the strain-range partitioning creep-fatigue analysis for tension-hold fatigue data ( $t_{H1}=10\text{ min}$ ).

をもとに引張保持時間 10 min の疲労寿命を式(3)で推定し試験結果と比較したものである。両鋼とも推定値と実測値とは Factor of two の範囲で良く一致しており、Fig. 6 で認められたばらつきも factor of two の範囲内ならば問題とならない。しかし、304 鋼に比べて 321 鋼の場合は推定値よりも実験値の方が低寿命となる傾向があり、このことは 321 鋼ではクリープの影響による寿命の低下に加えて他の因子の影響、組織変化の影響や酸化などの環境因子の影響を受けやすいことを示唆している。ひずみ保持時間試験では  $\Delta\epsilon_{cp}$  が  $\Delta\epsilon_{pp}$  に比べて小さい場合、このような組織変化や環境などのクリープ以外の因子の影響も敏感に反映しているといえる。したがって、321 鋼ではクリープの影響を台形波試験で調べることは必ずしも適当でなく、他の因子の影響が含まれてくる可能性のあることに注意しなければならない。

### 4.3 組織変化及びき裂進展形態と環境の影響について

保持時間試験において 321 鋼がクリープ以外の因子の影響を受けやすいことを明らかにしたが、この原因を考える場合ひずみ保持時間中の組織変化やき裂の進展形態と環境の影響との関連を考慮しなければならない。Photo. 1 に示したように保持時間のある場合 304 鋼では粒界析出物に顕著な変化が見られないのに対し、321 鋼では  $\sigma$  相が形成され、これに伴い Cr 欠乏層が生じる。321 鋼は結晶粒が小さく、かつき裂が粒界を進展することから、このような耐酸化性の劣る Cr 欠乏層を生じた 321 鋼では寿命が大きく低下したものと考えられる。しかしこの点については現時点では不明確であり、今後検討する予定である。

## 5. 結 言

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304, 321 溶体化材の温度  $650^{\circ}\text{C}$ ,  $700^{\circ}\text{C}$  における低サイクル疲労寿命に及ぼすひずみ波形の影響について検討した結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 保持時間の影響により疲労寿命は低下する。その程度は 304 鋼より 321 鋼の方が大きい。
- (2) 保持時間のない場合にはき裂は粒内—粒界混合伝播で主に粒内を伝播する。一方保持時間 10 min の場合には粒界を主に伝播する。この傾向は引張保持で著しい。
- (3) 保持時間の影響による寿命の低下は 304 鋼では保持時間中の  $\Delta\epsilon_{in}$  の増加として評価できるが、321 鋼ではそれ以上に大きい。
- (4) 非対称三角波及び単純三角波より得られた  $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ ,  $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$  特性は 304 鋼と 321 鋼ではほぼ等しく、かつ  $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$  特性に比べ  $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$  特性が著しく劣る。
- (5) 上記結論(4)は保持時間試験における 321 鋼の顕著な寿命の低下がクリープ損傷の影響よりむしろ試験中の組織化や環境などの力学的因子以外の影響が強く現われていることを示している。
- (6) すなわち保持時間がある場合き裂は粒界を伝播し、321 鋼においては  $\sigma$  相が析出するとともに無析出帯が形成される。このため雰囲気の影響を強く受け、大きな寿命低下となつたと考えられる。
- (7) 以上よりオーステナイト系ステンレス鋼のクリープと疲労の重畳効果を評価する場合、力学的因子以外の影響が入ってくる可能性の強い大気中の保持時間試験より非対称三角波試験によるひずみ範囲分割法が適当である。



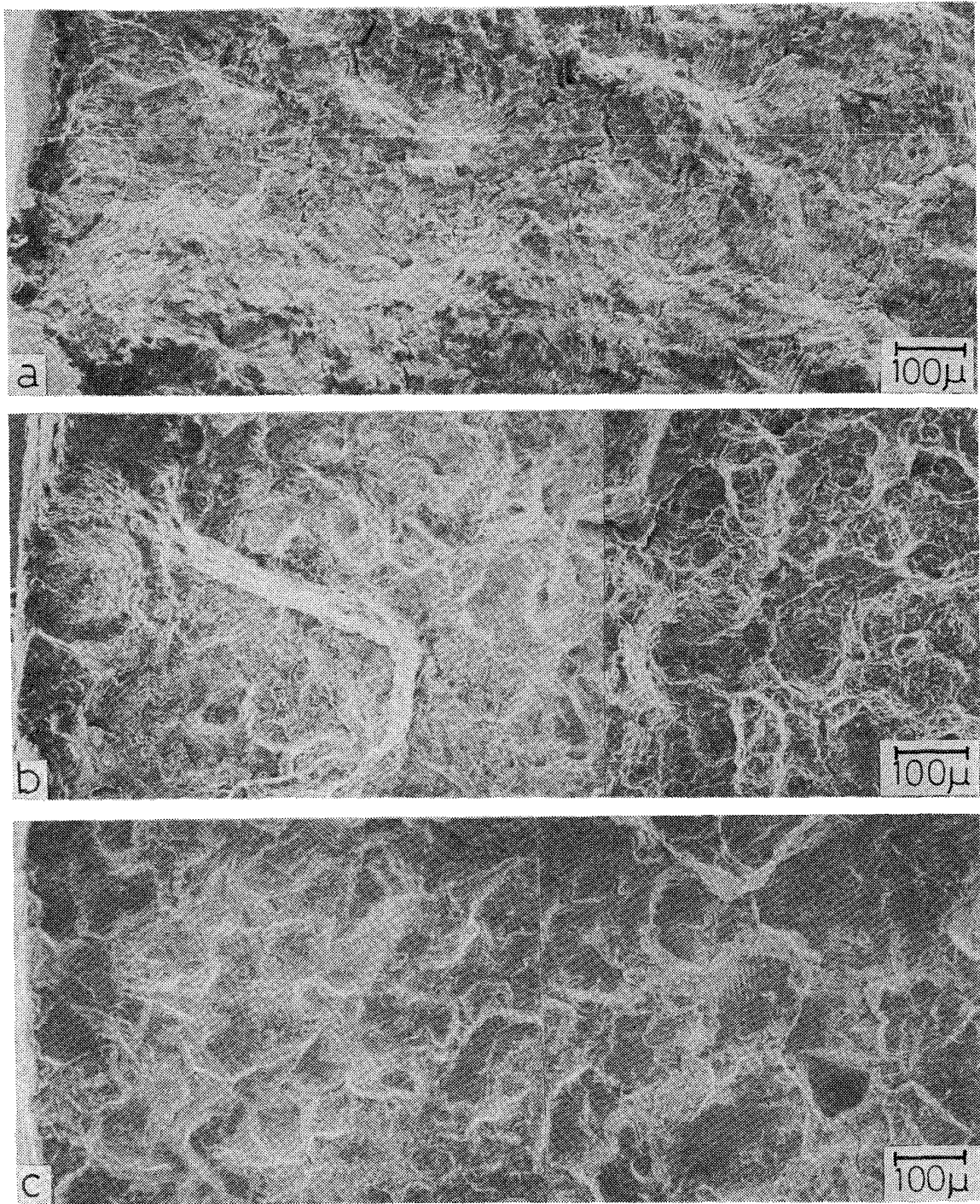


Photo. 4. Scanning electron micrographs of fracture surfaces of 304 steel at 650°C.

- a) Symmetrical triangular wave,  $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-3} 1/s$ ,  $\Delta \epsilon_t = 1\%$ ,  $N_f = 811$
- b) Trapezoidal wave,  $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-3} 1/sec$ ,  $t_{H1} = 10 \text{ min}$ ,  $\Delta \epsilon_t = 0.6\%$ ,  $N_f = 2\,519$
- c) Asymmetrical triangular wave,  $\dot{\epsilon}_1 = 4 \times 10^{-4} 1/s$ ,  $\dot{\epsilon}_2 = 2 \times 10^{-3} 1/s$ ,  $\Delta \epsilon_t = 1\%$ ,  $N_f = 512$

終りに、本研究を遂行するにあたり、中央技術研究所副所長西岡邦夫博士および同所次長行俊照夫博士をはじめ

め、多くの方々のご指導、ご鞭達を頂いた。記して謝意を表します。

文 献

- 1) C. H. WELLS and C. P. SULLIVAN: Trans. ASM, 58(1965), p. 391
- 2) M. GELL and G. R. LEVERANT: Proc. 2nd Int. Conf. on Fracture, (1969), p. 565
- 3) 山口弘二, 金沢健二, 吉田 進: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 1199
- 4) L. F. COFFIN Jr.: Met. Trans., 2(1971), p. 3105
- 5) C. D. WALKER: Joint Int. Conf. on Creep, (1963) paper 24
- 6) H. G. EDMUNDS and D. J. WHITE: J. Mech. Engg. Sci., 8(1966), p. 310
- 7) R. A. T. DAWSON, W. J. ELDER, and G. J. HILL: Proc. Int. Conf. on Thermal and High-strain Fatigue, (1967), p. 239
- 8) J. B. CONWAY and J. T. BERLING: Met. Trans., 1(1970), p. 324
- 9) J. B. CONWAY, J. T. BERLING, and R. H. STENTZ: ASTM STP, 520(1973), p. 637
- 10) D. J. DUQUET and M. GELL; Met. Trans., 3 (1972), p. 1899
- 11) L. F. COFFIN Jr.: ASTM STP, 520(1973), p. 5
- 12) S. S. MANSON: Int. J. Frac. Mech., 2(1966) p. 327
- 13) L. F. COFFIN Jr.: Proc. 2nd Int. Conf. on fracture, (1969), p. 643
- 14) R. D. CABELL: Trans. ASME Ser. D, 93 (1971), p. 887
- 15) J. B. CONWAY, J. T. BERLING, and R. H. STENTZ: Int. Conf. on thermal stress and Thermal Fatigue, (1969) p. 89
- 16) 平川賢爾, 時政勝行, 外山和男: 材料, 27 (1978), p. 948
- 17) S. S. MANSON, G. R. HALFORD, and M. H. HIRSCHBERG: Sym. on Design for Elevated Temperature Environment, (1971) p. 12
- 18) G. R. HOLFORD, M. H. HIRSCHBERG, and S. S. MANSON: ASTM-STP. 520(1973) p. 658
- 19) C. E. FELTER and C. LAIRD: Acta Met., 15 (1967), p. 1621
- 20) J. E. PRATT: *ibid*, 15(1967), p. 319
- 21) H. A. RAOUF, A. PLUMTREE, and T. H. TOPPER: ASTM STP, 519(1973), p. 28
- 22) P. J. E. FORSYTH and C. A. STUBBINGTON: J. Inst. Metals, 34(1955), p. 349
- 23) 例えば A. J. MCEVILY Jr, J. B. CLARK, E. C. UTLEY, and W. H. HERRNSTEIN III: Trans. AIME, 227(1963), p. 1093