SUS 304 鋼の高温疲労特性に及ぼすふん囲気の影響*

平 川 賢 爾** 時 政 勝 行**

Effect of Environment on Partitioned Strain-Life Relations
 $\Delta\epsilon_{ij}$ - N_{ij} of SUS 304 Stainless Steel

by

Kenji HIRAKAWA and Katsuyuki TOKIMASA

(Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Amagasaki)

The effect of environment on high temperature fatigue properties of 304 stainless steel was studied. Strain-controlled low-cycle fatigue tests were conducted with a symmetrical and an asymmetrical strain-wave forms at 700° and 800°C in air and vacuum. The results were analyzed and the partitioned strain-life relations $\Delta\epsilon_{ij}$ - N_{ij} were determined by the strain-range partitioning approach.

The main results obtained in this study are as follows:

(1) $\Delta\epsilon_{pp}$ - N_{pp} and $\Delta\epsilon_{cc}$ - N_{cc} properties are sensitive to environmental effects, while not $\Delta\epsilon_{pc}$ - N_{pc} and $\Delta\epsilon_{cp}$ - N_{cp} properties.

(2) Each of $\Delta\epsilon_{ij}$ - N_{ij} properties in air and vacuum is insensitive to the test temperature.

(3) $\Delta\epsilon_{pp}$ - N_{pp} and $\Delta\epsilon_{cc}$ - N_{cc} properties in vacuum can be estimated by the Manson-Coffin equations as follows:

$$\Delta\epsilon_{pp} = D_p^{0.6} N_{pp}^{-0.6} \quad (D_p = -\ln(1-\phi_p)), \quad \Delta\epsilon_{cc} = D_c^{0.6} N_{cc}^{-0.6} \quad (D_c = -\ln(1-\phi_c))$$

where ϕ_p and ϕ_c are the values of the reduction in area during tensile and creep rupture test, respectively.

(4) When $\Delta\epsilon_{pp}$ -or $\Delta\epsilon_{cc}$ -type of strain is cycled, a crack tends to initiate at the specimen surface and grow to the final failure. This fact is probably the main reason of the remarkable effect of environment on partitioned fatigue life N_{pp} or N_{cc} .

(5) On the other hand, the reason of no environmental effects on $\Delta\epsilon_{pc}$ - N_{pc} and $\Delta\epsilon_{cp}$ - N_{cp} is probably due to the fact that the specimen failure is caused by the tensile failure mode when $\Delta\epsilon_{pc}$ -type of strain is cycled and by the coalescence or connection of grain-boundary cracks inside the specimen when $\Delta\epsilon_{cp}$ -type of strain is cycled.

(Received Oct. 24, 1978)

キー・ワード：高温，強度，疲労，波形効果，ふん囲気効果

1 緒 言

クリープと疲労の重畳効果は高温疲労設計上考慮すべき重要な問題の一つであり，最近種々の面から多くの研究が行われている．実際の使用条件下ではクリープの影響は極めて長時間使用後に現れるので，研究的にはこれをシミュレートした加速試験が実施されているのが現状である．

しかしながら，このような加速試験では，実験条件によってはクリープの影響よりも動的ひずみ時効やふん囲気，組織変化の影響の方が著しくなる場合があり，

しかもこれら動的ひずみ時効やふん囲気の影響は高温低サイクル疲労寿命を低下させるためにクリープの影響と混同される場合がある．したがって，クリープの影響を正確に評価するためには実験条件の設定が重要である．

筆者らは，これまでひずみ範囲分割法を用いて主として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に及ぼす諸因子の影響を検討してきたが，動的ひずみ時効が著しくなる500℃～600℃の温度域での短時間の試験ではクリープの影響が正確に把握できなかった．そこで650℃以上における実験によりクリープの影響を調べ，高温疲労特性 $\Delta\epsilon_{ij}$ - N_{ij} 特性を求めた．しかし，高温になると動的ひずみ時効が抑制されクリープ変形が大きくなる反面，ふん囲気の影響も

* 本報を「疲労とクリープの重畳効果に関する研究(第4報)」(Investigations on Fatigue-creep Interaction, IV)とする．

原稿受理 昭和53年10月24日

** 正 会 員 住友金属工業(株)中央技術研究所 尼崎市西長洲本通

大きくなるので、高温大気中で得られた $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性をより低温での寿命推定に使う場合には $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性に及ぼす高温酸化の影響を定量的に把握することが重要である。

本研究は、このような目的のために、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 鋼の $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性を大気中と真空中で求め、高温疲労特性に及ぼすふん囲気の影響について検討を加えたものである。

2 実 験

供試材は Table I にその化学組成を示すオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 で、日本材料学会の高温熱疲労小委に提供した材料と同一のものである。28 ϕ ×400 l の丸棒に鍛伸後溶体化処理 (1100℃×30 min, 水冷) を施したのち試験に供した。Table II に機械的性質 (引張りおよびクリープ破断試験結果) を示す。

高温疲労試験片の形状を Fig. 1 に示す。直径 10 mm, 平行部 30 mm (GL=25 mm) の中実丸棒試験片で、試験片表面は試験前に 400 番エメリー紙で軸方向に仕上げ機械加工による条痕を除去した。Fig. 2 に本研究に用いた容量 25 Ton の電気油圧式サーボ制御型高温疲労試験装置 (MTS 製) の外観を示す。5×10⁻⁶mmHg 以下の真空中で試験が可能な真空チャンパーと高周波加熱装置を有しており、ひずみ波形の制御はデジタル関数発生器で行えるようになってい

Table I. Chemical compositions (wt. %).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.07	0.74	1.71	0.025	0.004	0.04	9.22	19.04	0.05

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

Fig. 2. High temperature low-cycle fatigue testing machine with a vacuum test chamber and an induction heater.

Table III は $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性を求めるために本研究で実施した試験条件を示したものである。基本的には完全両振三角波の疲労試験を採用し、負荷ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ と除荷ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_2$ が高速か低速かによって分類される 4 種類の試験、すなわち、PP, PC, CP および CC 試験を温度 700℃および 800℃において大気中と真空中 (1~5×10⁻⁶mmHg) で実施した。ひずみ速度としては、非常に速くて材料にクリープ変形が生じないひずみ速度として 8×10⁻³ (1/sec) を、温度 700℃, 800℃では充分大きなクリープ変形が得られるひずみ速度として 10⁻⁴ (1/sec) を選んだ。したがって、PP 試験の場合、材料に繰返される非弾性ひずみの種類は $\Delta\epsilon_{pp}$ タイプであり、PC 試験, CP 試験および CC 試験の場合、ひずみの種類はそれぞれ $\Delta\epsilon_{pp}+\Delta\epsilon_{pc}$, $\Delta\epsilon_{pp}+\Delta\epsilon_{cp}$ および $\Delta\epsilon_{pp}+\Delta\epsilon_{cc}$ となる。負荷する全ひずみ範囲の $\Delta\epsilon_t$ の大きさによって、 ij 試験での $\Delta\epsilon_{pp}$ と $\Delta\epsilon_{ij}$ の割合および大きさが異なることになる。非弾性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{in}-\Delta\epsilon_{pp}+\Delta\epsilon_{ij}$ を $\Delta\epsilon_{pp}$ と $\Delta\epsilon_{ij}$ に分割する方法とそのために試験の途中で採取すべきヒステリシスループを Fig. 3 に示す。 $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性は、まず PP 試験により $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性を定めたあと、 ij 試験を行うことにより求めた。すなわち、 $\Delta\epsilon_{in}=\Delta\epsilon_{pp}+\Delta\epsilon_{ij}$ なるひずみを繰返したときの寿命 N_f を求めることにより、 $\Delta\epsilon_{in}=\Delta\epsilon_{ij}(\Delta\epsilon_{pp}=0)$ なるひずみを繰返したときの寿命 N_{ij} を、次式の線型被害則を仮定して計算した。

$$1/N_{pp}+1/N_{ij}=1/N_f \quad (1)$$

Table II. Mechanical properties.

Temperature (°C)	Tensile properties				Creep rupture properties				
	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (kgf/mm ²)	Tensile strength σ_B (kgf/mm ²)	Elongation $\delta_p(\%)$	Reduction of area $\phi_p(\%)$	Stress (kgf/mm ²)	Minimum creep rate $\dot{\epsilon}_{min}$ (%/hr)	Rupture time t_p (hr)	Elongation $\delta_c(\%)$	Reduction of area $\phi_c(\%)$
RT	22.7	59.0	66.9	79.8	—	—	—	—	—
700	10.3	25.5	58.0	75.1	9	0.0159	1139	51.2	51.1
					10	0.0602	422	44.5	51.1
					11	0.126	223	54.0	58.0
					13.5	0.827	43.5	69.4	68.7

Table III. High temperature low-cycle fatigue test conditions.

Type of test	Strain-wave form	Environment	Temperature $T(^{\circ}\text{C})$	Loading strain rate $\dot{\epsilon}_1(1/\text{sec})$	Unloading strain rate $\dot{\epsilon}_2(1/\text{sec})$	Type of inelastic strain range imposed	Total strain range $\Delta\epsilon_t(\%)$
PP	Fully reversed triangular	Air, Vacuum	700, 800	8×10^{-3}	8×10^{-3}	$\Delta\epsilon_{pp}$	2.0~0.8
PC				8×10^{-3}	10^{-4}	$\Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{pc}$	1.5~0.6
CP				10^{-4}	8×10^{-3}	$\Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{cp}$	1.5~0.6
CC				10^{-4}	10^{-4}	$\Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{cc}$	2.0~0.6

Fig. 3. Strain-wave forms and hysteresis loops necessary to analyze an inelastic strain range into partitioned strain ranges $\Delta\epsilon_{pp}$, $\Delta\epsilon_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}$ and $\Delta\epsilon_{cc}$ in PP, PC, CP, and CC tests.

なお、疲労寿命 N_f は引張側荷重が50%低下する繰返し数として求めた。

疲労試験後、き裂の発生および進展状況を調べるため、試験片軸を含む縦断面のマイクロ組織を光学顕微鏡により調べ、一部破面の SEM 観察を行った。

3 結 果

3.1 $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性

Fig. 4~7 に PP, PC, CP および CC の各試験により得られた $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$, $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ および $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性を示す。

Fig. 4 から明らかなように、 $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性は大気中と真空中とで大きく異なるが、700℃と800℃の両温度であり変らない。大気中に比べ真空中の疲労寿命は約4倍長く、 $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性はふん囲気の影響を受けやすい特性であることがわかる。

Fig. 5 の $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$ 特性については、 $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性の場合に比べ実験的が少く、かつデータにばらつきが認められるので、さらに実験の積重ねが必要と考えられるが、定性的には、すべての実験点は両対数グラフ

Fig. 4. Partitioned strain-life relation $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ at 700 and 800°C in air and vacuum. Fig. 5. Partitioned strain-life relation $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$ at 700 and 800°C in air and vacuum.

上ではほぼ一本の直線上に載る傾向にあることがわかる。また、 $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性に認められるような著しく大きなふん囲気の影響は認められず、大気中のデータに比較して真空中のデータはむしろ短寿命側にある。これから、 $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$ 特性は温度およびふん囲気の影響を受けにくい特性であると言える。

Fig. 6 の $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性についてみると、大気中および真空中におけるすべての実験点が両対数グラフ上で一本の直線上に載り、ばらつきも小さい。Fig. 6 中には前報のロットが異なる SUS 304 鋼の溶体化処理材³⁾および長時間時効材 (650℃×1 000 hr) の温度 650℃で求めた $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性データも記入されているが温度700℃および800℃で得られたデータと完全に一致している。このことから、温度650℃~800℃の範囲において、SUS 304 鋼の $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性は変わらず、かつ $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性に及ぼすふん囲気の影響はないことが結論される。

Fig. 7 の $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ の特性については、実験点が少く真空中での温度の影響は調べられていないが、 $\Delta\epsilon_{pp}-$

Fig. 6. Partitioned strain-life relation $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ at 700 and 800°C in air and vacuum (Data at 650°C are cited from refs 4) and 5)).

Fig. 7. Partitioned strain-life relation $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ at 700 and 800°C in air and vacuum.

N_{pp} 特性の場合と同様にふん囲気の影響が歴然としており、真空中の疲労寿命は大気中の疲労寿命の約5倍である。温度の影響は大気中のデータからみて他の特性の場合と同様に小さく、真空中の場合も温度の影響は小さいものと考えられる。

全体的にみて、引張側と圧縮側の変形モードが等しい場合の疲労特性 ($\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性) には

ふん囲気の影響が顕著であり、引張側と圧縮側で変形モードが異なる場合の疲労特性 ($\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性) にはふん囲気の影響は認められない。

Fig. 8 は大気中および真空中における SUS 304 鋼の $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性を相互に比較したものである。大気中および真空中の各特性を通じて $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性が最も低寿命側にあり、SUS 304 鋼の場合真空中、大気中を問わず $\Delta\epsilon_{cp}$ タイプのひずみの繰返しが最も致命的となる。このことは、Manson らの 316 鋼についての結果と一致するものであり、オーステナイト系ステンレス鋼の一般的な性質といえる。また、Fig. 8 から大気中の $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$ 特性と $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性の差、および真空中の $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性と $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性の差はあまり大きくないことがわかる。

3・2 き裂の発生および進展状況

PP, PC, CP および CC の各試験における破面を目視した結果、PP 試験および CC 試験においてはき裂は試験片の表面に発生し、これが試験片軸方向にはほぼ直角に進展し破断に至る傾向にあり、一方、PC 試験と CP 試験では、PP, CC 試験とは様相の異なるき裂の発生および進展状況がみられる。すなわち、PC 試験においては表面にき裂は発生するがき裂の進展よりも $\Delta\epsilon_{pc}$ の繰返しによる引張ひずみの蓄積が大きくなり、引張破断に近い破断を呈し、破断部はネッキングを生じていた。また、CP 試験ではき裂の発生点は明確でなく、破面には大きな凹凸が認められ、き裂の進展が粒界的であることが容易に推測された。

Fig. 9 は試験片の表面に発生した二次き裂の進展状況例を示したものであり、Fig. 10 は試験片中央部の破面近傍の縦断面のミクロ組織を示したものである。

PP 試験および CC 試験の場合には Fig. 9 に示すように真空中の場合は大気中の場合と異って、き裂先端の酸化が極めて少い。また Fig. 10 に示すよう

Fig. 8. Summary of partitioned strain-life relations in air and vacuum.

に試験中心部にはき裂の発生は認められない。PC 試験の場合には破面近傍は大きな引張塑性変形を受けており、介在物が軸方向に長く伸びている。SEM 観察の結果破面にディンプルが多数認められた。CP 試験の場合は大気中、真空中を問わず試験後の試験片の表面から内部にかけて断面全体に無数の粒界き裂の発生が認められることが特徴である。Fig. 11 は破面の SEM 写真であり、粒界破面が試験後の破面全体にわたって認められ、Fig. 10 の断面写真中に認められる粒界き裂が互いに連絡して最終の破面が形成されたこと

Fig. 9. Growth behaviors of secondary fatigue cracks initiated at the specimen surface in PP and CC test in vacuum.

Fig. 10. Microphotographs obtained in the center of specimen near the fracture surface ($T=800^\circ\text{C}$).

が明らかである。

4 考 察

上述の結果より, 次の興味ある点が明らかとなった。

- (1) $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性に対して著しく大きなふん囲気の影響が認められる。
- (2) $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性はふん囲気の影響に対して鈍感である。
- (3) 真空中では $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性と $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性の間に差が認められない。
- (4) $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性は温度の影響に対しても鈍感であ

る。

このような結果は, 得られたデータをひずみ範囲分割法で解析することによりはじめて明らかになったのであって, これまで報告されている三角波, 台形波および非対称三角波によるふん囲気効果やクリープの影響の検討結果にみられるように, 得られた結果をそのまま力学的な関係式で表示しようとする方向では把握できなかった事実であり, ふん囲気効果の解析に対してもひずみ範囲分割法の概念が有用であることを示している。すなわち, ふん囲気の影響についても, 繰返

Fig. 11. A SEM photograph of the fracture surface obtained in CP test in vacuum ($T=700^{\circ}\text{C}$, $\Delta\epsilon_f=1\%$, $N_f=484$, $\Delta\epsilon_{pp}=0.42\%$, $\Delta\epsilon_{cp}=0.33\%$).

し作用するひずみの種類との関連で考える必要がある。

以下においては上述の各項目についてその原因とその示唆する事柄について若干の考察を加え、今後検討すべき方向について検討した。

4.1 $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性に対するふん囲気効果の存在について

$\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ および $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性がふん囲気の影響を著しく受け、大気中の寿命が真空中の寿命の1/4~1/5となる事実は、PP試験あるいはCC試験において、粒内あるいは粒界き裂の発生がまず試験片の表面から起り、これが主き裂となって進展するというき裂進展形態の観察結果により定性的に説明される。すなわち、 $\Delta\epsilon_{pp}$ あるいは $\Delta\epsilon_{cc}$ のように引張りと圧縮のひずみが同一種類でかつ reversible である場合、微視的にみて三軸応力状態の試験片内部よりも二軸応力状態の試験片表面で損傷が大となり、したがってき裂は表面から発生進展することになり、発生および進展の過程で主き裂は常にふん囲気の影響を受けることになる。したがって、ふん囲気の影響により損傷を受ける場所とひずみの繰返しにより損傷が大となる場所（き裂の先端）とが疲労過程中常に一致しているとき、ふん囲気の影響が顕著となる。

これまで、高温疲労に対するふん囲気の影響について数多くの研究がなされてきたが、¹⁰⁾ その多くが $\Delta\epsilon_{pp}$ あるいは $\Delta\epsilon_{pp}+\Delta\epsilon_{cc}$ タイプのひずみの繰返しに対して得られており、大きなふん囲気効果が観察されているのは本研究の結果からみて当然といえる。

また、Coffin and Solomon が実施したようなき裂進展試験によるふん囲気効果の検討も、¹¹⁾ $\Delta\epsilon_{pp}$ あるいは $\Delta\epsilon_{pp}+\Delta\epsilon_{cc}$ タイプのひずみの繰返しに対しては有効であるといえる。しかし、次に述べるように、 $\Delta\epsilon_{pc}$ あるいは $\Delta\epsilon_{cp}$ のひずみの繰返しに対してき裂進展試験によりふん囲気効果を検討することは必ずしも一般的でない。

なお、ひずみの種類が同一でかつ reversible であるとき、表面で損傷が大となることについての定量的な

検討は今後の課題である。

4.2 $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性がふん囲気の影響を受けにくい原因について

$\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性がふん囲気の影響に対して鈍感である原因についても、き裂の発生進展および破断状況の点から説明することができる。すなわち、 $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$ 特性については、PC試験での試験片の破断がほとんど引張破断であるためであり、 $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性については、Fig. 10 および 11 に示したように、ふん囲気の影響の及ばない試験片内部での粒界き裂の発生とその連結が疲労寿命を支配しているためである。

$\Delta\epsilon_{pc}$ あるいは $\Delta\epsilon_{cp}$ なるひずみの繰返しに対して引張破断あるいは粒界き裂の連結現象が認められるのは、Manson が述べているように、¹²⁾ $\Delta\epsilon_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}$ なるひずみは引張りと圧縮で変形モードが異なり、したがって irreversible であるため、“Internal ratcheting” 現象で、 $\Delta\epsilon_{pc}$ の場合引張側 plastic flow, 圧縮側 creep, $\Delta\epsilon_{cp}$ の場合引張側 creep, 圧縮側 plastic flow がそれぞれ蓄積され、SUS 304 鋼の場合、引張側の変形の蓄積に対する破壊抵抗性が圧縮側のそれを下回ったためと考えられる。

$\Delta\epsilon_{pc}$ あるいは $\Delta\epsilon_{cp}$ が繰返される場合、ふん囲気の影響が及ぶ場所とは別の場所で損傷が大きくなるので、 $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性は、ふん囲気の影響とひずみの繰返しによる損傷がき裂先端という同一箇所に同時に重畳されるき裂進展試験では把握できない特性であることに注意が必要である。

4.3 真空中における $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ および $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性

真空中で $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性と $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性の間に差が認められない事実は、Table II に示すように高温での引張破断絞り ϕ_p とクリープ破断絞り ϕ_c がほぼ等しいことに原因があると思われる。4.1 節で考察したように、 $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性は、試験片の表面からのき裂の発生寿命とその進展寿命の和で支配されることから $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性と同様 $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性に対しても Manson-coffin 式が成立すると考え、かつ真空中ではふん囲気の影響が小さいので室温で成立することが一般に認められている Universal slopes 式が高温でも成立すると考えた。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \Delta\epsilon_{pp} &= D_p^{0.6} N_f^{-0.6}, & (D_p &= -\ln(1-\phi_p)) \\ \Delta\epsilon_{cc} &= D_c^{0.6} N_f^{-0.6}, & (D_c &= -\ln(1-\phi_c)) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(2)式と実験結果の比較を Fig. 12 に示す。

Fig. 12 から明らかなように、引張破断延性 $D_p=1.39$ とクリープ破断延性 $D_c=1.16$ とから求めた $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性と $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性はほぼ等しく、真空中の実験結果とは良好な一致を示すことがわかる。

これから、ふん囲気の影響の及ばない真空中での

Fig. 12. Comparison between the experimental results and the calculated one of partitioned strain-life relations $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ and $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$.

$\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性は引張りおよびクリープの破断延性より簡単に求め得るといえる。

なお、 D_c の計算には Table II の700℃の最も短時間のデータを採用したが、これは CC 試験の試験時間が短いことを考慮したものである。

4・4 $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性の温度非依存性について

$\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性が温度の影響に対して鈍感であるという事実は Halford, Hirschberg and Manson¹³⁾によって大気中で316鋼について示されており、今回得られた結果は大気中および真空中の SUS 304 鋼についてもその結果を確認したことになる。

今回の結果で注意すべき点は、温度700℃と800℃とでは高温酸化の程度が大きく異なるにもかかわらず、 $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性に差がないことである。これは SUS 304 鋼の場合、酸化の程度がある限界以上大きくなると $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性が飽和する傾向にあることを示しており、Fig. 6 に示したように、 $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性が温度650℃のデータと一致していることから、700℃～800℃で得られた $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性をより低温での寿命推定に使用できることをも示している。したがって、今後の課題としてふん囲気の影響が飽和する限界条件を明らかにすることが重要となる。

5 結 言

クリープと疲労の重畳効果に及ぼすふん囲気の影響を基礎的に明らかにすることを目的として、SUS 304 鋼の高温疲労特性 $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性を $T=700^\circ\text{C}$, 800°C の大気中および真空中で求め、 $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性に及ぼすふん囲気の影響を検討した。

本研究により得られた結果は次のとおりである。

(1) $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性および $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性はふん囲気の影響には敏感であるが、温度の影響に対しては鈍感である。

(2) $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$ 特性および $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性は温度の影響に対して鈍感であるばかりでなくふん囲気の影響

に対しても鈍感である。

(3) 真空中での $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性, $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性は Manson coffin 式

$$\Delta\epsilon_{pp} = D_p^{0.6} N_{pp}^{-0.6}, \quad \Delta\epsilon_{cc} = D_c^{0.6} N_{cc}^{-0.6}$$

で与えられる。

(4) $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 両特性がふん囲気の影響に対して敏感であるのは、 $\Delta\epsilon_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cc}$ が試験片に繰返されたときの試験片の破断が表面き裂の発生と進展の結果生ずるため、き裂の発生および進展ともにふん囲気の影響を受けることが原因である。

(5) $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$ 特性がふん囲気の影響に鈍感であるのは $\Delta\epsilon_{pc}$ が繰返されたときの試験片の破断が、ほぼ引張破断に等しいことによるものと推定される。

(6) $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性がふん囲気の影響を受けない原因は、 $\Delta\epsilon_{cp}$ の繰返しによる試験片の破断がふん囲気の影響の及ばない試験片内部での粒界き裂の発生とその連結によって生じるためである。

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をはじめ、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。

(昭和53年10月13日 日本材料学会第16回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Manson, S.S., G.R. Halford, and M.H. Hirschberg, NASA TMX-67838 (1971).
- 2) 平川賢爾, 時政勝行, 外山和男, 材料, **27**, 948 (1978).
- 3) 平川賢爾, 時政勝行, 外山和男, 鉄と鋼, **25**, No.7 (1979) 掲載予定
- 4) 平川賢爾, 時政勝行, 外山和男, 鉄と鋼, **25**, No.7 (1979) 掲載予定
- 5) 耐熱合金の高温熱疲労に関する共同研究報告書, p. 32; p. 36 (1977) 日本材料学会
- 6) Coffin, L.F. Jr., Extension Seminar on High Temperature Strength of Metals of ICM, p. 31 (1971) Kyoto
- 7) 鵜戸口英善, 朝田泰英, 三橋俊作, 山中一由 日本機械学会講演論文集, 770-11, 130 (1977).
- 8) 平 修二, 藤野宗昭, 高橋 務, 材料, **27**, 434 (1978).
- 9) Sidey, D., and L.F. Coffin, Jr., GE Technical Information Series No. 78 CRD 050 (1978).
- 10) 例えば, 本間恒夫, 日本金属学会会報, **14**, 257 (1975).
- 11) Solomon, H. D., and L. F. Coffin, GE Technical Information Series No. 72, CRD 101 (1972).
- 12) Manson, S.S., ASTM STP 520, 744 (1973).
- 13) Halford, G.R., M.H. Hirschberg, and S.S. Manson, ASTM STP 520, 658 (1973).