PP/CP および CP/PP ひずみ波形変動下における Mod. 9Cr-1Mo 鋼の高温疲労特性とその寿命推定について†

宮原 光雄* 時政 勝行**

High Temperature Fatigue Properties and Life Prediction of Mod. 9Cr-1Mo Steel under PP/CP and CP/PP Type Variable Straining

by

Mitsuo MIYAHARA* and Katsuyuki TOKIMASA**

Two-step PP/CP and CP/PP variable straining tests were conducted for Mod. 9Cr-1Mo Steel at 600°C in air to clarify the small crack growth curve in CP test, where the strain range was kept constant and the strain waveform varied from PP to CP (PP/CP tests) or from CP to PP (CP/PP tests). It was found that in PP/CP tests the sum of life ratios was smaller than unity when the primary cycle ratio n_1/N_1 was large. On the other hand, in CP/PP tests the sum of life ratios was larger than unity in the large n_1/N_1 regime. The smaller the straining level, the larger the discrepancy between the experimental result and the linear damage rule prediction.

The small crack growth curve in CP test was determined so that the fatigue properties under two-step variable straining tests could be well explained by the proposed crack growth model based on the strain range partitioning concept. It is suggested that the initial crack length in CP test $(a_0)_{pp+cp}$ is equal to the CP type initial crack length $(a_0)_{cp}$ when $\Delta\epsilon_{cp}/\Delta\epsilon_{pp} \geq 1$ and that $(a_0)_{pp+cp}$ is equal to the PP type initial crack length $(a_0)_{pp}$ when $\Delta\epsilon_{cp}/\Delta\epsilon_{pp} < 1$.

Key words : High temperature, Fatigue, Creep, Small crack propagation, Life prediction

1 緒 言

著者らは前報¹⁾において Mod. 9Cr-1Mo 鋼を供試材として、ひずみ波形が PP 型一定でひずみ範囲が変動する二段二重変動ひずみ試験を行い、Fig. 1 に示すように $\Delta\epsilon_{pp} \geq 0.55\%$ の高ひずみ領域では一次波の寿命比 n_1/N_1 と二次波の寿命比 n_2/N_2 の間に線形損傷則 (Linear Damage Rule) が成立するのに対して、低

Fig. 1. Relationship between n_1/N_1 and n_2/N_2 in HL and LH tests obtained in the previous paper¹⁾.

ひずみ領域では LDR が成立しないことを示した。また、この原因について微小き裂進展挙動との関連から検討した結果、Fig. 2 (a) に示すように高ひずみ領域ではひずみ範囲分割概念に基づくき裂進展則が成立し、疲労寿命は微小き裂の進展寿命により支配されるのに対して、低ひずみ領域ではき裂進展寿命に先立ってき裂発生寿命が存在することを明らかにし、Fig. 2 (b) に示すようにき裂発生寿命の全寿命に対する割合 α と $\Delta\epsilon_{pp}$ の関係を求め、き裂進展を考慮した寿命評価法を用いることにより、低ひずみ領域での LDR からのずれを予測しうることを示した。

Fig. 2. Crack growth curve for PP straining obtained in the previous paper¹⁾.

† 原稿受理 平成元年 8 月 2 日 Received Aug. 2, 1989

* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 尼崎市西長洲本通, Iron and Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Nishinagasu-hondori, Amagasaki

** 正会員 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 尼崎市西長洲本通, Iron and Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Nishinagasu-hondori, Amagasaki

Table I. Chemical composition (wt. %).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Nb	Al	N
0.10	0.40	0.40	0.013	0.002	8.60	0.95	0.12	0.22	0.08	0.03	0.045

このき裂進展を考慮した寿命評価法をさらに一般的な問題へ適用するためには、CP 波形等の異なったひずみ波形におけるき裂進展則の有効性について検討を行う必要がある。ここで、例えば CP 波形下のき裂進展挙動を推定するためには、CP 波形間でひずみ範囲が変動する二段二重試験を行うよりも、前報でき裂進展曲線が既知となった PP 波形を用いて、PP 波形と CP 波形の間でひずみ波形が変動する二段二重試験を行う方が容易な方法であると考えられる。

このひずみ波形が変動する二段二重試験としては Miller らが CrMoV 鋼を用いて PP 波形と CC 波形の間でひずみが変動する二段二重試験について検討した結果や岡崎らが 2½Cr-1Mo 鋼を用いて PP 波形と CP 波形の間でひずみが変動する二段二重試験について検討した結果が報告されているが、ひずみレベルの影響も含めて定量的に評価した結果は見られない。

以上の観点から本報では、ひずみ範囲が一定でひずみ波形が PP 波形と CP 波形の間で変動する二段二重試験を数種のひずみレベルについて行い、ひずみ範囲分割概念に基づくき裂進展則により、CP 波形下での微小き裂進展曲線を推定し、き裂進展を考慮した寿命評価法の有効性について検討した。

2 実験方法

供試材は Table I にその化学組成を示す Mod. 9Cr-1Mo 鋼である。素材は 100^φ×200^φ×300^φ mm の鋼板に熱間鍛造後 1050°C×1 hr 空冷+780°C×1 hr 空冷の熱処理を施した。Table II に熱処理後の機械的性質を示す。疲労試験片の形状を Fig. 3 に示す。疲労試験片は直径 10 mm、平行部長さ 30 mm (ゲージ長 25 mm) の平滑丸棒試験片であり、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こんを除去した。き裂進展試験に用いた中央切欠

Table II. Mechanical properties.

Temperature (°C)	0.2% proof stress (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
R. T.	53.3	70.9	33.6	69.8
600	32.0	33.6	37.2	84.0

Fig. 3. Shape and dimensions of fatigue specimen (GL=25 mm).

Fig. 4. Shape and dimensions of crack growth specimen (CCT specimen) (GL=25 mm).

Table III. Test condition.

Test	$\dot{\epsilon}_1$ (1/sec)	$\dot{\epsilon}_2$ (1/sec)
PP	8×10^{-3}	8×10^{-3}
CP	10^{-4}	8×10^{-3}

き付き試験片 (CCT 試験片) の形状を Fig. 4 に示す。試験機としては電気油圧サーボ型引張圧縮試験機 (MTS 製) を用いた。

試験はすべて、温度 600°C、大気中で完全両振三角ひずみ波形を用いて、PP 試験、CP 試験を行った。負荷ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ および除荷ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_2$ を Table III に示す。CP 試験中には適宜 Rapid straining を導入し、ひずみ範囲分割概念²⁾に基づいて、非弾性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{in}$ を $\Delta\epsilon_{pp}$ と $\Delta\epsilon_{cp}$ に分割した。また、一定ひずみ疲労試験における寿命は引張側荷重が破断寿命の 1/2 の時点から 50% 低下した時点の繰返し数で定義した。

つぎに二段二重変動ひずみ疲労試験としては Fig. 5 に示すように、全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t$ を一定とし、PP 型ひずみ波形を n_1 サイクル負荷した後、CP 型ひずみ波形を破断まで負荷する PP/CP 試験と、逆に CP 型ひずみ波形を n_1 サイクル負荷した後、PP 型ひずみ波形を破断まで負荷する CP/PP 試験を、 $\Delta\epsilon_t=1$,

Fig. 5. Straining pattern for PP/CP and CP/PP variable straining tests.

0.8, 0.5% の 3 種類のひずみレベルについて行った。この場合の 2 次波の繰返し数 n_2 は、2 次波の引張側荷重が一定ひずみ試験の破断寿命の 1/2 の時点での引張側荷重から 50% 低下した時点の繰返し数で定義した。

3 実験結果

3.1 一定ひずみ高温疲労試験結果

一定ひずみ試験における $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性を Fig. 6 に示す。 N_{cp} は次式を用いて CP 試験の疲労寿命 N_f を N_{pp} と N_{cp} に分割することにより求めた。

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

この図のように $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性は次式で表示できる。

$$\Delta\epsilon_{ij} = A_{ij} N_{ij}^{-m_{ij}} \quad (2)$$

3.2 二段二重変動ひずみ高温疲労試験結果

Fig. 7 に各試験における 1 次波の寿命比 n_1/N_1 と 2 次波の寿命比 n_2/N_2 の関係を示す。ここで、 N_1 の評価にあたっては、1 次波の 1/2 の時点すなわち $n = n_1/2$ の時点での $\Delta\epsilon_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cp}$ を求め、これらの非弾性ひずみから式 (1), (2) により予測される一定ひずみ条件下での疲労寿命 N_f を N_1 とした。同様に、 N_2 としては 2 次波の 1/2 の時点すなわち $n = n_1 + (n_2/2)$ の時点での $\Delta\epsilon_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cp}$ より求めた N_f を用いた。 Fig. 7 中の実線は LDR により予測される n_1/N_1 と n_2/N_2 の関係

$$n_1/N_1 + n_2/N_2 = 1 \quad (3)$$

を示している。また、破線および一点鎖線はそれぞれ PP/CP 試験, CP/PP 試験結果を最小二乗法により近似した結果を示している。この図に示すように PP/CP 試験の近似線 (破線) のこう配は LDR (実

Fig. 6. $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ and $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ properties.

Fig. 7. Experimental results of relationship between n_1/N_1 and n_2/N_2 .

線) のこう配より大きく、逆に CP/PP 試験の近似線 (一点鎖線) のこう配は LDR のこう配より小さく、両者の近似線はある時点で交差する。すなわち、PP/CP 試験では 1 次波の寿命比 n_1/N_1 が小さい領域では LDR より長寿命側となり、 n_1/N_1 の増加に伴い低寿命側へと移行する。逆に CP/PP 試験では n_1/N_1 が小さい領域では LDR より低寿命側となり、 n_1/N_1 の増加に伴い長寿命側へと移行する。この傾向は $\Delta\epsilon_t = 1, 0.8\%$ では顕著ではなく、LDR からのずれも小さいが、 $\Delta\epsilon_t = 0.5\%$ の低ひずみレベルでは明確に LDR からのずれを生じている。

4 考察

4.1 ひずみ範囲分割概念に基づく高温クリープ疲労き裂進展則

著者らはこれまで平滑材の高温クリープ疲労特性のひずみ範囲分割法による評価研究を行い、高温クリープ疲労下の微小き裂進展速度が巨視き裂進展速度と同じく、非弾性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{ij}$ を用いて次式で表示しうことを示した。

$$(da/dN)_{ij} = B_{ij} \Delta\epsilon_{ij}^{1/m_{ij}} a \quad (4)$$

ここで m_{ij} は式 (2) の $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性から求まる定数である。 Fig. 8 に CCT 試験片を用いて実施したき裂進展試験結果の一例を示す。この図に示すように、き裂進展速度 (da/dN) とき裂半長 a の間にはほぼ比例関係が存在している。 Fig. 9(a) には各 PP 型き裂進展試験から求めた $(da/dN)_{pp}/a$ と $\Delta\epsilon_{pp}$ の関係を示す。図中の実線は実験結果を式 (4) で近似した結果を示しているが実験結果と近似線とは良く一致している。一

Fig. 8. Relationship between da/dN and a obtained by crack growth test with CCT specimen.

Fig. 9. Creep-fatigue crack growth properties.

方, CP 試験の場合のき裂進展速度を

$$(da/dN) = (da/dN)_{pp} + (da/dN)_{cp} \quad (5)$$

のように, PP 型と CP 型のき裂進展速度の和 (重量則) と考えると, Fig. 9 (a) の PP 型き裂進展特性から求められる $(da/dN)_{pp}$ を CP 試験での (da/dN) から差し引くことにより $(da/dN)_{cp}$ が求まる. このようにして求めた各 CP 試験における $(da/dN)_{cp}/a$ と $\Delta\epsilon_{cp}$ の関係を Fig. 9 (b) に示す. 図中の実線は Fig. 9 (a) の場合と同様に実験結果を式 (4) で近似した結果を示しているが, 実験結果と近似線とは良く一致している.

ここで, 平滑材における初期き裂 (欠陥) 半長を a_0 , 最終破断時のき裂半長を a_f とし, 疲労寿命がき裂進展寿命に支配されると仮定すると, 式 (4) を $n=0$, $a=a_0$ から $n=N_{ij}$, $a=a_f$ まで積分することにより

$$\ln(a_f/a_0)_{ij} = B'_{ij} \Delta\epsilon_{ij}^{1/m_{ij}} N_{ij} \quad (6)$$

が得られ, これに式 (2) を代入することにより

$$\ln(a_f/a_0)_{ij} = B'_{ij} A'_{ij}^{1/m_{ij}} \quad (7)$$

が得られる. このことはき裂進展曲線, すなわち $a-n/N_{ij}$ 関係が Fig. 10 に示すように各ひずみ波形についてそれぞれ $\ln(a_0)_{ij}$ と $\ln(a_f)_{ij}$ を結ぶ直線となることを意味している.

一定ひずみ疲労試験, 巨視き裂進展試験より求めた各定数と, 各 $\Delta\epsilon_{ij}$ が単独で負荷される場合の $\ln(a_f/a_0)_{ij}$ を式 (7) により計算した結果を Table IV に示す. また, CP 試験の場合のように $\Delta\epsilon_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cp}$ 等の異なるひずみが重畳されて負荷される場合については, 式 (5) のようにき裂進展速度は次式の重量則で表される.

Fig. 10. Schematic representation of crack growth curve based on strain range partitioning concept.

Table IV. Creep-fatigue properties and value of (a_f/a_0) for $\Delta\epsilon_{pp}$ and $\Delta\epsilon_{cp}$ straining obtained by strain range partitioning analysis.

ij	A_{ij}	$1/m_{ij}$	B'_{ij}	$\ln(a_f/a_0)_{ij}$
PP	1.24	1.43	7.78	10.6
CP	0.454	1.45	22.8	7.26

Table V. Value of (a_c/a_0) for CP tests obtained by strain range partitioning analysis.

$\Delta\epsilon_t$ (%)	$\Delta\epsilon_{pp}$ (%)	$\Delta\epsilon_{cp}$ (%)	F_{cp}	$\Delta\epsilon_{cp}/\Delta\epsilon_{pp}$	$\ln(a_c/a_0)$
1	0.31	0.45	0.59	1.45	7.70
0.8	0.27	0.28	0.51	1.04	7.93
0.5	0.15	0.11	0.42	0.75	8.24

$$(da/dN) = \sum (B'_{ij} \Delta\epsilon_{ij}^{1/m_{ij}}) a \quad (8)$$

したがって, この場合の最終破断時のき裂半長を a_c とすると, $\ln(a_c/a_0)$ は次式で表される.

$$\begin{aligned} \ln(a_c/a_0) &= \sum (B'_{ij} \Delta\epsilon_{ij}^{1/m_{ij}}) N_f \\ &= \sum (B'_{ij} \Delta\epsilon_{ij}^{1/m_{ij}}) / \sum (1/N_{ij}) \\ &= \frac{\sum (B'_{ij} \Delta\epsilon_{ij}^{1/m_{ij}})}{\sum (B'_{ij} \Delta\epsilon_{ij}^{1/m_{ij}} / \ln(a_f/a_0)_{ij})} \quad (9) \end{aligned}$$

Table V に今回の CP 試験における $\ln(a_c/a_0)$ の値を示す. このように CP 試験の場合には $\ln(a_c/a_0)$ は $\Delta\epsilon_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cp}$ によって定まり, Fig. 10, Table V に示すように $(a_f/a_0)_{cp} < \ln(a_c/a_0) < \ln(a_f/a_0)_{pp}$ となるが, $\Delta\epsilon_t$ が小さいほど, $\Delta\epsilon_{cp}/\Delta\epsilon_{pp}$ が小さくなり $\ln(a_c/a_0)$ は $\ln(a_f/a_0)_{pp}$ に近づいてゆく.

ここで, PP 試験の場合は, $\Delta\epsilon_{pp} < 0.55\%$ の低ひずみ領域においては上記のき裂進展則が成立せず, き裂発生寿命が存在する. 今回の $\Delta\epsilon_t = 0.5\%$ の PP 試験では $\Delta\epsilon_{pp} = 0.27\%$ であり, き裂発生寿命の割合 α は Fig. 2 の式

$$\alpha = -0.922 \log(\Delta\epsilon_{pp}) - 2.08 \quad (10)$$

より $\alpha = 0.29$ と推定される.

4・2 き裂進展則に基づく寿命評価法

前報¹⁾で提案したき裂進展を考慮した寿命評価法を異なるひずみ波形を含む問題に適応した場合の模式図を Fig. 11 に示す. 例えばこの図に示す PP/CP 試験の場合には PP 波形が n_1/N_1 だけ負荷されることにより, き裂は PP 試験時のき裂進展曲線に沿って $(a_0)_{pp}$ から a_v (A 点) まで進展する. この時点でひずみ波形が変動し CP 波形が負荷されるため, き裂は CP 試験時のき裂進展曲線に沿って a_0 から $(a_c)_{pp+cp}$ まで進展し破断に至る. ここでこの図のように C 点でき裂進展曲線が交差している場合を考えると, ひずみ変

Fig. 11. Life prediction method based on crack growth curve for PP/CP test.

動点の A 点が C 点より小さい場合 (Fig. 11(a)) には, 寿命比の和 ($n_1/N_1 + n_2/N_2$) は $\Delta(n/N)$ だけ 1 より大きくなるのに対して, A 点が C 点より大きい場合 (Fig. 11(b)) には寿命比の和は $\Delta(n/N)$ だけ 1 より小さくなる。このように PP, CP の両試験時のき裂進展曲線が既知であれば Fig. 11 のモデルにより $n_1/N_1 - n_2/N_2$ 関係を求めることができる。

ここで 4・1 節のき裂進展則では Table IV, V に示したような a_f/a_c と a_0 の比を求めることができるが, 定量的にき裂進展曲線を求め, 二段二重試験結果を予測するためにはさらに各試験時における初期欠陥寸法 (a_{0pp} や $(a_0)_{pp+cp}$ を求める必要がある。

PP 試験の場合には試験片表面に発生したき裂がほぼ単独で進展し破断に至るという破壊形態であるため, $(a_f)_{pp}$ は試験片寸法に依存するものと考えられる。そこで, $2(a_f)_{pp} = 10 \text{ mm}$ (= 試験片直径) と仮定すると $\ln(a_f/a_{0pp}) = 10.6$ より $2(a_{0pp}) = 2.5 \times 10^{-4} \text{ mm}$ となる。この $2(a_{0pp})$ 値は結晶粒のすべり帯等の非常に微小な欠陥が PP 型き裂の起点となっていることを示唆していると考えられる。

一方, 純粋な CP 波形が負荷される場合, き裂の起点は結晶粒径あるいは粒界の析出物程度の大きさであり $2(a_0)_{cp} = 10^{-3} \text{ mm}$ オーダーの大きさであると推定される。

ところが, 今回の CP 試験の場合については破面は凹凸の多い粒界割れ状を呈してはいるが, オーステナイト鋼のような顕著な傾向は見られず, 起点の同定も困難であった。そこで以下に述べるように二段二重変動ひずみ試験の結果から CP 試験時の初期欠陥寸法 $(a_0)_{pp+cp}$ を推定することを試みた。

CP 試験時のように $\Delta\epsilon_{pp}$, $\Delta\epsilon_{cp}$ が重畳して負荷される場合の初期欠陥寸法 $(a_0)_{pp+cp}$ は Fig. 12(a) に示すように $\Delta\epsilon_{cp}$ に対応する初期欠陥寸法 $(a_0)_{cp}$ に等しいか, あるいは Fig. 12(b) に示すように $\Delta\epsilon_{pp}$ に対応する初期欠陥 $(a_0)_{pp}$ に等しいかのいずれかであると考えられる。CP 試験時のき裂進展曲線が Fig. 12 で表さ

Fig. 12. Schematic representation of crack growth curve in CP test on the assumption $(a_0)_{pp+cp} = (a_0)_{cp}$ and $(a_0)_{pp+cp} = (a_0)_{pp}$.

Fig. 13. Schematic representation of relationship between n_1/N_1 and n_2/N_2 on the assumption $(a_0)_{pp+cp} = (a_0)_{cp}$ and $(a_0)_{pp+cp} = (a_0)_{pp}$.

Fig. 14. Crack growth curve for PP and CP tests predicted by strain range partitioning analysis.

れると仮定すると, 先に述べた寿命評価モデルにより二段二重試験時の $n_1/N_1 - n_2/N_2$ 関係は Fig. 13 のようになると予測される。このことより, 二段二重試験結果と Fig. 13 のような予測結果とを比較対照することにより $(a_0)_{pp+cp}$ が $(a_0)_{cp}$ に等しいか $(a_0)_{pp}$ に等しいかを判別することができる。

以上の考え方にに基づき具体的に PP 試験時および CP 試験時のき裂進展曲線を求めた結果を Fig. 14 に示す。図中の実線が PP 試験時のき裂進展曲線を示しており, 破線および一点鎖線がそれぞれ

$$(a) \quad 2(a_0)_{pp+cp} = 2(a_0)_{cp}$$

$$(b) \quad 2(a_0)_{pp+cp} = 2(a_0)_{pp}$$

という 2 つの仮定に基づいた場合の CP 試験時のき裂進展曲線を示している。またこれらのき裂進展曲線を用いて二段二重試験における $n_1/N_1 - n_2/N_2$ 関係を予測した結果を Fig. 15, 16 に示す。これらの図に示すように, いずれの仮定を用いても, $(a_c/a_0)_{pp+cp}$

Fig. 15. Comparison of experimental relationship between n_1/N_1 and n_2/N_2 with those predicted by crack growth curve based on the assumption $(a_0)_{pp+cp} = (a_0)_{cp}$.

Fig. 16. Comparison of experimental relationship between n_1/N_1 and n_2/N_2 with those predicted by crack growth curve based on the assumption $(a_0)_{pp+cp} = (a_0)_{cp}$.

$<(a_f/a_0)_{pp}$ であるため、PP/CP 試験時の $n_1/N_1 - n_2/N_2$ 関係のこう配が LDR のこう配より大きく、CP/PP 試験の $n_1/N_1 - n_2/N_2$ 関係のこう配が LDR のこう配より小さいという傾向を説明する。ここで $\Delta\epsilon_t = 1, 0.8\%$ の場合の予測結果について見ると、仮定 (b) では二段二重試験の $n_1/N_1 - n_2/N_2$ 関係が交差することを説明し得ない。この現象を説明するためには、PP, CP 両試験でのき裂進展曲線が交差すること、すなわち $(a_0)_{pp+cp} > (a_0)_{pp}$ であることが必要であり、この点で Fig. 15 (a), (b) に示す仮定 (a) の方が良い予測結果を与えている。一方、 $\Delta\epsilon_t = 0.5\%$ の場合については Fig. 16 (c) に示す仮定 (b) の方が良い予測結果を与えている。このことは CP 試験時の $\Delta\epsilon_{cp}$ と $\Delta\epsilon_{pp}$ の組合わせによって、 $(a_0)_{pp+cp}$ の値が変化するこ

Fig. 17. Relationship between $2(a_0)_{pp+cp}$ and $\Delta\epsilon_{cp}/\Delta\epsilon_{pp}$ obtained in the present study.

Fig. 18. Ratio of experimental remaining cycles to those predicted by LDR and crack growth curve.

とを示していると考えられる。すなわち、Fig. 17 に示すように $\Delta\epsilon_{cp}/\Delta\epsilon_{pp} \geq 1$ で、 $\Delta\epsilon_{pp}$ に比べて $\Delta\epsilon_{cp}$ が大きい場合には $(a_0)_{pp+cp} = (a_0)_{cp}$ となり、逆に $\Delta\epsilon_{cp}/\Delta\epsilon_{pp} < 1$ の場合には $(a_0)_{pp+cp} = (a_0)_{pp}$ となると考えられる。Fig. 18 に LDR を用いた場合とき裂進展モデルを用いた場合における、 n_2 の予測値 n_{2pre} と実測値 n_{2exp} の比を示す。ここで、 $(a_0)_{pp+cp}$ は Fig. 17 に基づいて定めた。き裂進展を考慮した寿命予測結果は Factor of 2 の範囲内に含まれており、LDR に比べ良い予測精度となっている。

以上の結果より、今回の方法により推定した CP 型ひずみ波形下の微小き裂進展曲線はほぼ妥当なものと考えられるが、今後さらにその有効性を明らかにするためには、CP 波形間でひずみ範囲が変動する場合の二段二重試験を行い、その疲労特性と今回得られたき裂進展曲線による予測結果との対照を行う必要があると考えられる。

5 結 言

本報では Mod. 9Cr-1Mo 鋼を供試材として 600°C 大気中において、CP 試験時の微小き裂進展挙動を明らかにすることを目的として、ひずみ範囲が一定でひずみ波形が PP 型から CP 型へ (PP/CP 試験) または CP 型から PP 型へ (CP/PP 試験) と変動する二段二重変動ひずみ試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) PP/CP 試験の場合、1 次波の寿命比 n_1/N_1 が大きいほど、寿命比の和は LDR より低寿命側となり、逆に CP/PP 試験では n_1/N_1 が大きいほど、寿命比の和は LDR より長寿命側となる傾向がある。
- (2) 上記の LDR からのずれは、ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t$ が小さいほど大きくなる。
- (3) ひずみ範囲分割概念に基づきき裂進展モデルにより、二段二重変動ひずみ疲労特性を説明することができるように CP 試験時の微小き裂進展曲線を定めた。
- (4) CP 試験時の初期欠陥寸法 $(a_0)_{pp+cp}$ は、 $\Delta\epsilon_{cp}/\Delta\epsilon_{pp} \geq 1$ の場合には、純粋な CP 波形負荷時の初期欠陥寸法 $(a_0)_{cp}$ と等しく、 $\Delta\epsilon_{cp}/\Delta\epsilon_{pp} < 1$ の場合には、PP 波形負荷時の初期欠陥寸法 $(a_0)_{pp}$ と等しくなる傾向が認められた。

(昭和63年12月16日 第26回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 宮原光雄, 時政勝行, 第25回高温強度シンポジウム前刷集, 36 (1987); 材料, 39, 543 (1990).
- 2) S. S. Manson, ASTM STP 520, 744 (1973).
- 3) 時政勝行, 田中健一, 新田 勲, 材料, 35, 1030 (1986).
- 4) K. J. Miller and T. Gardiner, J. of Strain Analysis, 12, 253 (1977).
- 5) 岡崎正和, 服部一郎, 河原昭二, 小泉 堯, 第23回高温強度シンポジウム前刷集, 92 (1985).