高耐力耐熱合金の疲労・クリープ相互作用下における き裂進展則に基づく寿命評価法の検討†

松田 憲昭* 梅沢 貞夫**

A Prediction Method for Fatigue-Creep Interaction Life of High Strength Superalloy Based on Crack Propagation Behavior Rule

by

Noriaki MATSUDA* and Sadao UMEZAWA**

A new life prediction method is proposed for a cast Ni base superalloy, René80, under fatigue-creep interaction (FCI) conditions based on its surface crack propagation behavior.

In the previous paper, we proposed that the frequency modified total strain energy parameter was useful for evaluating the failure life (N_f) and crack initiation life (N_c) of a high strength superalloy under FCI conditions. The tensile strain energy parameter was obtained from the total tensile strain energy (ΔW_{TT}) and the loading time (τ_{TT}) under tensile stress.

In this paper, not only the failure and crack initiation lives but also surface crack propagation behavior are found to be evaluated by this parameter under FCI conditions. The surface crack propagation rate (da/dN) is a function of the parameter and surface crack half length (a);

$$da/dN = B'(\Delta W_{TT}\tau_{TT}^n)^\ell \cdot a$$

where B' , ℓ , n are material constants.

A new life prediction method taking account of surface crack propagation behavior and initiation life can be defined;

$$N_{2a} = A(\Delta W_{TT}\tau_{TT}^n)^m + B(\Delta W_{TT}\tau_{TT}^n)^{-\ell}(\log(2a) - \log(2a_0))$$

If the grain size ($2a_0$) and the number of cycles [$N_{c2a_0} = A(\Delta W_{TT}\tau_{TT}^n)^m$] needed for the surface crack length to grow to $2a_0$ are known, the number of cycles (N_{2a}) in a certain crack length ($2a$) can be determined from the above equation.

Key words: Crack initiation, Crack propagation, Total strain energy, Fatigue-creep interaction, René80

1 緒 言

金属材料のクリープと疲労の相互作用下における低サイクル疲労寿命評価法としては、線形損傷則¹⁾、ひずみ範囲分割法²⁾、周波数修正損傷関数則³⁾、周波数修正疲労寿命則等⁴⁾が提案されている。しかし、これらの寿命評価法の中には、圧縮応力によるクリープ損傷を引張応力によるクリープ損傷と同等に扱ったり、実用上重要な非対称負荷ひずみ波形への適用が制限されているなどの問題が含まれていた。また、非弾性ひずみ成分を基準とした評価法であるため、高耐力材料のように全ひずみ中に占める弾性ひずみ成分が損傷に深く関与する場合には改善が必要であると考えられる。

本報は、負荷全ひずみ中において、弾性ひずみの占める割合の高い Ni 基鋳造合金 René80 のクリープ・

疲労相互作用下における寿命評価法の確立を目的としたものである。René80 に対するクリープ・疲労相互作用下の疲労寿命評価に関しては、上述の周波数修正疲労寿命則³⁾が Coffin らによって開発されている。しかし、この寿命則はクリープ・疲労寿命評価への圧縮クリープの取扱いに問題を有すると共に、非対称負荷波形へ適用しにくいなどの問題点がある。

W. J. Ostergren は Coffin らの René80 や SUS304, CrMoV 鋼のデータにおいて、クリープ・疲労相互作用下の寿命評価法として、周波数修正損傷関数則を提唱している。この寿命則は引張側のヒステリシスループの面積を周波数で修正することにより、保持時間の影響を考慮している。この寿命則は圧縮クリープによる損傷を評価しているが、非対称波形への配慮がな

† 本報を「鋳造耐熱超合金の疲労・クリープ・相互作用下の寿命評価法の検討 (第2報)」(Life Prediction Method under Fatigue-Creep Interaction for Cast Superalloy, II) とする。

原稿受理 平成元年3月25日 Received Mar. 25, 1989

* 正会員 (株)日立製作所機械研究所 日立市幸町, Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Saiwai-cho, Hitachi

** (株)日立製作所機械研究所 日立市幸町, Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Saiwai-cho, Hitachi

れていない。また、Ni 基耐熱超合金のような高耐力材料では弾性ひずみ成分が損傷に主要な役割を果たしていると考えられるが、非弾性ひずみのみを評価因子としている点に疑問が残る。

このような状況に鑑み、筆者らは前報において全ひずみ範囲中に占める弾性ひずみ範囲の割合の高い René80 のクリープ・疲労相互作用下の破損寿命、き裂発生寿命を表現できる周波数修正全ひずみエネルギー則を提案した。

本材料のクリープ・疲労相互作用下の低サイクル疲労においては、同一全ひずみ範囲でも波形によっては、ひずみ保持中および低速変形中のクリープ挙動のために、引張最大応力に差が生じ、寿命に与える影響が大きいことが実験的に分かっている。

そこで、この影響を、周波数修正損傷関数則と同様に引張側の非弾性ひずみエネルギーをパラメータとして考慮することとした。さらに、高耐力材料では弾性ひずみ成分が損傷に主要な役割を果たすので、本寿命則では引張側の弾性ひずみエネルギーをも考慮した全ひずみエネルギーを基本的なパラメータとして採用したものである。これに保持時間の影響として、全ひずみエネルギーを引張応力の作用時間で補正し、寿命評価のパラメータとしたものである。本寿命則により、三角波形、鋸歯状波形、圧縮保持台形波形、引張保持台形波形等波形にかかわらず、クリープ・疲労相互作用下の低サイクル疲労寿命が精度良く予測できることを明らかにしている。

本報においては、さらに、周波数修正全ひずみエネルギーが平滑材のき裂発生寿命、破損寿命だけでなく、き裂進展挙動の予測にも有効なパラメータであることを見出したのでここに報告する。

2 実験方法

2・1 供試材料および試験片形状

供試材料は Ni 基鋳造合金 René80 である。化学成分を Table I、機械的性質を Table II に示す。René80 は γ' の析出強化型合金であり、高強度低延性材料である。実験に供した試験片形状を Fig. 1 に示す。所要形状よりわずかに大きい寸法の素材を精密鋳造に

Table I. Chemical compositions (wt %).

C	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	B	Ni
0.15	13.9	9.2	4.0	4.0	4.9	3.02	0.014	Bal.

Table II. Mechanical properties.

Temp. (°C)	Tensile strength (MPa)	0.2 % offset stress (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
R. T.	951	614	5.9	7.4
871	580	487	24.7	31.9

(a) Specimen for F-F, F-S and S-F waveform tests

(b) Specimen for trapezoidal waveform test

Fig. 1. Specimens for fatigue creep interaction tests.

て製作し、熱処理を施した後、機械加工により所定の形状、寸法に仕上げた。なお、試験片の標点距離は 25 mm と 16 mm である。

2・2 試験方法

クリープ・疲労相互作用下の低サイクル疲労試験を試験温度 815°C と 900°C で実施した。試験片の加熱は高周波誘導加熱装置 (10 kW, 100 kHz) および電気炉 (2 kW) で、温度制御および温度記録はそれぞれ標点距離外に付けた制御用熱電対 (R) および温度監視用熱電対 (K) 各 1 対にて行った。標点間距離内の温度は、高周波誘導加熱装置の場合では、あらかじめ、熱電対で校正した放射温度計にて計測し、電気炉の場合は標点距離内に取付けた熱電対にて計測した後、熱電対を除去した。標点距離内の温度は所定の試験温度の $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内で得られている。なお、試験にはサーボ油圧式疲労試験機 (容量 249 kN) および長周期クリープ・疲労試験機 (容量 49 kN) を用い、使用荷重レンジは ± 49 kN である。

疲労とクリープの重畳試験は標点距離間の軸ひずみ制御試験とし、三角波形 (F-F)、非対称ひずみ波形 (F-S, S-F) 並びに台形波形 (引張側のみ 10 または 60 min 保持: T10, T60, あるいは、圧縮側のみ 10, 60 あるいは 480 min 保持: C10, C60, C480) を採用、負荷全ひずみ範囲は 0.5~1.0% とした。高速変形中のひずみ速度は 0.1 %/s、低速変形中のそれは 0.001 %/s、台形波については 0.05 %/s とした。

き裂計測はレプリカ法による。計測は、全ひずみ範囲が 1.0 % の場合には約 50 cycles ごと、0.5% の時には 200~500 cycles ごとに試験を停止し、降温して実施した。このレプリカからのき裂計測は万能投影機 ($\times 100, 50, 20$) を介して行った。なお、レプリカ採取のための試験中断がその後の結果に大きな影響を与えないことは連続した実験結果との対比により確認している。

3 実験結果およびその検討

3・1 平滑材のクリープ・疲労相互作用下でのき裂進展挙動

温度や負荷ひずみレベルによって異なるが、高温低サイクル疲労破損寿命の大部分はき裂の進展過程で占められることが、既に明らかになっており、平滑材のクリープ・疲労相互作用下における破損寿命を論じる上でき裂進展挙動を明確にする必要がある。

そこで、クリープ・疲労相互作用下における平滑材の試験片表面でのき裂進展挙動を調査した。その結果を以下に示す。

Fig. 2~4 に本材料の 815°C における平滑材のき裂進展曲線を示す。Fig. 2 は $\Delta\epsilon=0.5\%$ の場合で、負荷波形は F-F, F-S, S-F, 引張側ひずみ保持 (60 または 10 min) および圧縮側ひずみ保持 (60 または 480 min) である。Fig. 3 は $\Delta\epsilon=0.7\%$ (F-F, F-S, S-F 波形) の場合、Fig. 4 は $\Delta\epsilon=1.0\%$ (F-F, F-S, S-F, 圧縮側ひずみ保持波形) の場合を示している。同様に、Fig. 5 は 900°C における $\Delta\epsilon=0.5, 1.0\%$ のき裂進展曲線の F-F, F-S, S-F 波形の結果を示し

Fig. 2. Crack propagation behavior of the plain round bar specimens of René80 under a fatigue-creep interaction condition at 815°C and total strain range of 0.5%.

Fig. 3. Crack propagation behavior of the plain round bar specimens of René80 under a fatigue-creep interaction condition at 815°C and total strain range of 0.7%.

Fig. 4. Crack propagation behavior of the plain round bar specimens of René80 under a fatigue-creep interaction condition at 815°C and total strain range of 1.0%.

ている。温度や負荷ひずみレベルによって傾向は異なるが、き裂長さはき裂発生直後に大きく増大し、その後はき裂長さ ($\log_{10}2a$) と繰返し数 (N) の間に直線関係が存在する。両者の間に直線関係が存在するのは、815°C の場合にはおおむね 1.0 mm 以上、900°C の場合は 0.5 mm 以上である。この大きさは、後述するように、材料の組織に関連している。

さて、前報にて示したが、本材料は疲労・クリープ相互作用下の損傷過程では初期より破損までの広範囲に亘って、加工硬化並びに加工軟化を示さない。したがって、個々の制御負荷ひずみに対応する引張応力並びに圧縮応力は破損まで変化しない。そのため、前報で提案した周波数修正全ひずみエネルギーは個々の試験片において全寿命中一定と考えて差し支えない。

そこで、Fig. 2~4 における直線関係の各こう配 ($d(\log_{10}2a)/dN$) と周波数修正全ひずみエネルギー ($\Delta W_{TT}\tau_{TT}^n$) の関係を求めた。それを Fig. 6 (a) に示す。ここで、 ΔW_{TT} は引張側の全ひずみエネルギー ($\text{MPa} \cdot \text{mm}/\text{mm}$)、 τ_{TT} は引張応力が作用する時間 (min) である。なお、($\Delta W_{TT}\tau_{TT}^n$) の値は前報で

Fig. 5. Crack propagation behavior of the plain round bar specimens of René80 under a fatigue-creep interaction condition at 900°C.

Fig. 6. Relation between crack propagation rate and frequency modified total strain energy value under a fatigue-creep interaction condition for René80.

示した値を使用することとする。また、こう配 ($d(\log_{10}2a)/dN$) およびこれ以降の数式の算出には最小二乗法を用いている。

Fig. 6(a) に示すように、負荷波形および周期が異なる三角波、鋸歯状波、台形波、さらには負荷ひずみ範囲が異なる各データに対して、き裂進展速度 ($d(\log_{10}2a)/dN$) と周波数修正全ひずみエネルギー ($\Delta W_{TT} \tau_{TT}^n$) の間には直線関係が得られる。この関係は次式で表される。

$$\frac{d(\log_{10}2a)}{dN} = 1.02 \times 10^{-3} (\Delta W_{TT} \tau_{TT}^{0.77})^{1.94} \quad (1)$$

式 (1) から、き裂進展速度 $d(2a)/dN$ とき裂長さ ($2a$) の関係は次式となる。

$$\frac{d(2a)}{dN} = 2.36 \times 10^{-3} (\Delta W_{TT} \tau_{TT}^{0.77})^{1.94} \cdot (2a) \quad (2)$$

同様に、Fig. 5 に示した 900°C におけるクリープ・

疲労相互作用下の実験結果を、周波数修正全ひずみエネルギーとき裂進展速度との関係で整理し、Fig. 6(b) に示す。Fig. 6(a) に示した 815°C の結果と同様次式の形に表すことができる。

$$\frac{d(2a)}{dN} = 5.27 \times 10^{-3} (\Delta W_{TT} \tau_{TT}^{0.242})^{0.795} (2a) \quad (3)$$

ところで、($\Delta W_{TT} \tau_{TT}^n$) は前述したように、ある負荷条件下では一定と考えられるから、き裂進展速度はき裂長さの関数として表すことができる。しかし、式 (2), (3) が成立するのは、Fig. 2~5 において、 $\log_{10}2a$ と N の間に直線関係が成立する領域であり、き裂発生後の初期、すなわち、815°C では $2a \leq 1.0$ mm, 900°C では $2a \leq 0.5$ mm の直線関係が存在しない領域では、式 (2), (3) は成立しない。

Fig. 7 に試験片表面の組織写真を示すが、上記の初期領域はおおむね 0.5~1.5 mm 程度で、結晶粒の大きさの範囲に相当する。また、Fig. 8 は試験中に採取した表面き裂の一例を示す。F-S, S-F 波形では結晶粒界にき裂が入っているのがよく分かる。負荷繰返しの初期に粒界に小さなき裂が多数発生し、早期に合体して結晶粒径程度のき裂となる。その後、成長あるいは他の粒界き裂と合体してマクロなき裂となる。

これらのことより、式 (2), (3) は結晶粒より大きなき裂に関して成立するものと考えることができ、この結果、クリープ・疲労相互作用下のき裂進展速度とき裂長さの関係は、次式で表示できる。

$$\frac{d(2a)}{dN} = B' (\Delta W_{TT} \cdot \tau_{TT}^n)^\ell \cdot (2a) \quad (4)$$

ここで、 B' と ℓ は温度により異なる材料定数である。

Fig. 7. Macro-photographs of specimen's surface.

(a) F-F Waveform $N=3050$ cycle ($N_f=9220$ cycle) (b) F-S Waveform $N=546$ cycle ($N_f=1804$ cycle) (c) S-F Waveform $N=635$ cycle ($N_f=1883$ cycle)

Fig. 8. Typical surface cracks of René80 test specimens.

3・2 平滑材の疲労・クリープ相互作用下の寿命則

前節において、結晶粒径以上の大きさのき裂長さに対して適用可能な疲労・クリープ相互作用下のき裂進展則を提案した。

一方、前報においては、周波数修正全ひずみエネルギーがき裂発生寿命をも精度良く表現できるパラメータであることを示している。

そこで、結晶粒径程度のき裂が発生する繰返し数と周波数修正全ひずみエネルギーの関係を求め、これと式(4)で示されるき裂進展則を組み合わせることによって、平滑材の疲労・クリープ相互作用下のき裂進展過程を評価できる寿命則を導いた。

Fig. 9. Dependence of frequency modified total strain energy on the number of cycles to crack initiation and failure under a fatigue-creep interaction condition at 815°C.

Fig. 9, 10 はき裂発生繰返し数と周波数修正全ひずみエネルギーとの関係を示したものである。図中、き裂長さが 0.2, 0.5, 1.0 mm になる繰返し数をそれぞれ $N_{c0.2}$, $N_{c0.5}$, $N_{c1.0}$ としている。Fig. 9, 10 には前報にて示した破損繰返し数と周波数修正全ひずみエネルギーの関係も併せて示した。図から、平滑材のき裂発生寿命は次式で表せることが分かる。

$$N_c = A(\Delta W_{TT} \tau_{TT}^n)^m \quad (5)$$

式(4)と式(5)から、任意のき裂長さに進展するまでの繰返し数は以下のように表される。

$$N_{2a} = N_{c2a0} + \int_{2a0}^{2a} \left(\frac{dN}{d(2a)} \right) d(2a) \quad (6)$$

Fig. 10. Dependence of frequency modified total strain energy on the number of cycles to crack initiation and failure under a fatigue-creep interaction condition at 900°C.

この結果, 表面き裂長さが $(2a)_N$ に成長した時点で繰返し数 (N_{2a}) は次式で得ることができる.

$$N_{2a} = A(\Delta W_{TT} \tau_{TT}^n)^m + B(\Delta W_{TT} \tau_{TT}^n)^{-\ell} [\log_{10}(2a)_N - \log_{10}(2a_0)] \quad (7)$$

ここで, $B = (1/0.4343B')$ である.

上式を用いることにより, $(2a)_N$ が平滑材の破損時のき裂長さ $2a_f$ となったときに破損寿命 N_f を求めることができる.

つぎに 815°C と 900°C の場合の各種負荷波形に対する寿命の実験結果と式 (7) で予測される結果との比較, 検討を行った. この場合, 式 (7) 中の $2a_0$, すなわち, 結晶粒径程度のき裂寸法としては, 表面き裂長さと繰返し数の関係が片対数グラフ上で直線となり始めるき裂長さを採用することとし, 900°C の場合 0.5, 815°C の場合 1.0 mm とした. また, $2a_f$ は Fig. 2~5 に示すように, 平滑試験片の破損直前のき裂長さが 5~10 mm 程度であることから, 815°C, 900°C のいずれの場合についても 10 mm とした. その結果, 815°C, 900°C の場合について周波数修正全ひずみエネルギーと破損繰返し数の関係式として次式が得られる.

$$N_{fpre}(815^\circ\text{C}) = 360(\Delta W_{TT} \tau_{TT}^{0.077})^{-2.123} + 976(\Delta W_{TT} \tau_{TT}^{0.077})^{-1.94} [\log(10) - \log(1.0)] \quad (8)$$

$$N_{fpre}(900^\circ\text{C}) = 151(\Delta W_{TT} \tau_{TT}^{0.242})^{-1.546} + 437(\Delta W_{TT} \tau_{TT}^{0.242})^{-0.795} [\log(10) - \log(0.5)] \quad (9)$$

Fig. 11 に破損寿命の推定値 (N_{fpre}) と実験で観察した破損繰返し数 (N_{fexp}) との関係を示す. Fig. 11 (a) は 815°C, Fig. 11 (b) は 900°C の場合を示しているが, いずれの場合も N_{fexp} と N_{fpre} の関係は factor of 2 の範囲に入っており, き裂進展過程の評価に基づいて求めた寿命則は精度良く実験結果を説明している.

以上の結果, 構造物の応力・ひずみ関係および運動

時間等より全ひずみエネルギーと引張応力の作用時間等が評価できれば, 寿命予測が可能である. また, 定期検査等で実機の損傷状態としての表面き裂長さが把握できれば, 余寿命予測にも適用可能である.

4 結 言

高耐力耐熱合金である Ni 基鋳造合金 René80 の平滑材を用いて, クリープ・疲労相互作用下のき裂進展挙動に基づいた寿命評価法の検討を行い, 次の知見を得た.

1) 引張側全ひずみエネルギー (ΔW_{TT}) を引張応力が作用する時間 (τ_{TT}) で補正した周波数修正全ひずみエネルギーにより, クリープ・疲労相互作用下の表面き裂の進展速度は次式で整理できる.

$$da/dN = B'(\Delta W_{TT} \tau_{TT}^n)^\ell \cdot a$$

ここで a は表面き裂半長, N は繰返し数, B' , n , ℓ は材料定数である.

2) この進展速度は結晶粒径程度の表面き裂 ($2a_0$) の発生以後に適用可能で, したがって, クリープ・疲労相互作用下の寿命評価則は次式で定義される.

$$N_{2a} = N_c + \int_{2a_0}^{2a} \left(\frac{dN}{d(2a)} \right) d(2a)$$

$$N_{2a} = A(\Delta W_{TT} \tau_{TT}^n)^m + B(\Delta W_{TT} \tau_{TT}^n)^{-\ell} [\log_{10}(2a)_N - \log_{10}(2a_0)]$$

ここで, N_c は表面き裂が $2a_0$ の時の繰返し数である.

3) この破損寿命則は, 高耐力材料である René80 の疲労・クリープ相互作用下の寿命評価に有効であることを確認した.

参 考 文 献

- 1) G. J. Lloyd and J. Wareing, Met. Technol., 8, 297 (1981).
- 2) S. S. Manson, G. R. Halford and M. H. Hirschberg, Design for elevated temperature environment, p. 12 (1971) S. Y. Zarmrik.
- 3) W. J. Ostergren, J. Testing and Evaluation, 4, [5], 327 (1976).
- 4) L. F. Coffin, Jr., Met. Trans., 5, 1053 (1974).
- 5) 日本材料学会高温強度部門委員会, 高温疲労試験のあり方調査作業グループ報告書 (1981).
- 6) D. C. Lord and L. F. Coffin, Jr., Met. Trans., 4, 1647 (1973).
- 7) 松田憲昭, 梅沢貞夫, 材料, 38, 1053 (1989).
- 8) 松田憲昭, 梅沢貞夫, 宮田 寛, 材料, 38, 809 (1989).
- 9) 松田憲昭, 梅沢貞夫, 材料, 35, 810 (1986).

Fig. 11. Comparison between the observed and predicted lives based on the frequency modified total strain energy rule for René80 round bar specimens.