粒界き裂の発生と成長挙動の相違から見たクリープ疲労の破壊プロセスと寿命特性[†]

多 田 直 哉* 北 村 隆 行** 大 谷 隆 一***

Characteristics of Fracture Process and Failure Life in Creep Fatigue from the Viewpoint of Difference Between Initiation and Growth Behavior of Grain Boundary Cracks

by

Naoya TADA*, Takayuki KITAMURA** and Ryuichi OHTANI***

Fracture process of creep fatigue in a Type 304 stainless steel at 923K can be divided into two types; "crack initiation type" and "crack growth type". The former is characterized by multiple small cracks initiating one after another along grain boundaries on the specimen surface and coalescing each other at the late stage of failure life, when the material is subjected to relatively large strain ranges in slow tension-fast compression (so called c-p type) strain waveforms. This failure is mostly governed by crack initiation. The latter is distinctive of the initiation and growth of little coalescence, which is revealed under small strain ranges and/or in slow-slow (c-c type) or slow very slow (c-s type) strain waveforms. Therefore, the failure life is controlled by the growth rate of small cracks in this case. In this study, a numerical simulation was done based on a model of two kinds of driving forces for crack initiation and crack growth with random fracture resistance of grain boundaries, in order to distinguish between the two types of fracture process and to estimate the failure life in relation to the cracking behavior.

Key words: Creep fatigue, Type 304 stainless steel, Fracture process, Crack initiation type, Crack growth type, Failure life analysis, Numerical simulation

1 はじめに

高温構造用耐熱金属材料においては、複数の微小き裂の発生と成長が同時に進行することによって破壊がもたらされる場合が多い^{1),2)}。オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 のクリープ疲労では、c-p type (低速引張-高速圧縮) を例に挙げると、ひずみ範囲が大きい場合はより多数のき裂が試験片表面に発生し、それらが寿命末期に急速に合体・成長して破壊に至る。一方、ひずみ範囲が小さいときはき裂の発生数が比較的少なく、ある一つの微小き裂が成長して大きくなり、そのき裂の成長が破壊を導く^{2),3)}。本研究では、前者をその破壊プロセスが主としてき裂発生により支配されていることより「き裂発生主体型破壊」、後者をそのプロセスが主としてき裂成長により支配されていることより「き裂成長主体型破壊」と呼ぶことにする。ある破壊がこの二つのタイプのどちらに属するかは、実際にき裂観察を行うことによって直観的あるいは定性的に判断することができるが、材料や負荷条件によって

タイプが異なることを分析し、クリープ疲労破壊のプロセスを理解するためには、き裂の発生と成長に関する情報を適切に分離し、定量化する必要がある。著者らがすでに提案した「粒界破壊抵抗分布モデル」^{4),5)}はこの目的に適した簡単かつ明解なモデルであり、それに基づく数値シミュレーションによって SUS304 などの実用多結晶金属材料におけるクリープ疲労の微視組織的微小き裂の発生と成長挙動を一般的に再現することができると考えられるので、本研究ではこれを用いた逆問題解析の一つとして、き裂挙動から見た破壊のプロセス、タイプおよび破壊寿命とそのばらつきに関する検討を行う。また、実例として SUS304 の 650°C におけるクリープ疲労破壊をとりあげ、考察する。

2 モデルおよび数値シミュレーションの概要

著者らが先に提案した擬 3 次元の「粒界破壊抵抗分布モデル」^{5),6)}は、き裂発生に対する粒界ファセットの応

[†] 原稿受理 平成 3 年 12 月 10 日 Received Dec. 10, 1991

* 学生会員 京都大学大学院 〒606-01 京都市左京区吉田本町, Graduate Student, Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

** 正会員 京大工学部物理工学科 〒606-01 京都市左京区吉田本町, Dept. of Mech. Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

*** 正会員 京大工学部物理工学科 〒606-01 京都市左京区吉田本町, Dept. of Eng. Sci., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

力軸となす角度の依存性やき裂成長におけるき裂合体の頻度などに関してより事実に近いモデルであるが、これより以前に提案した1次元モデルと比較してシミュレーション結果に大局的な相違はないので、ここでは本研究の目的に照らして1次元モデルを用いることにする。モデルの説明については、その概要のみを述べるにとどめ、詳細は先の報告にゆずる。

(1) 応力軸に垂直な直線上に結晶粒界を配列する。配列する結晶粒界の長さは、測定結果に基づき、平均 $25\ \mu\text{m}$ 、標準偏差 $20\ \mu\text{m}$ の正規分布で与える。

(2) 各結晶粒界には破壊抵抗値 R として $0 \sim 1$ の範囲の一様乱数を与える。

(3) 単位繰返し数ごとに次式にて表される破壊駆動力 D を各結晶粒界に与える。

$$D(c) = F_0 + K_0 \cdot (c/l_{gm}) \quad (1)$$

ただし、上式中の c は各き裂の長さ（表面き裂半長）を、 l_{gm} は平均結晶粒界長さ（本研究で採用した SUS304 の場合は $25\ \mu\text{m}$ ）を表す。各粒界の破壊抵抗値 R は、この破壊駆動力に応じて各サイクルごとに D ずつ減少する。なお、上式中の F_0 と K_0 については後に説明する。

(4) ある粒界の残存破壊抵抗値が零または負になるとその粒界は破壊する。すなわちき裂発生とする。したがって、1結晶粒界長の破壊をき裂発生と仮定する。その破壊がき裂（以前に破壊していた粒界）に隣接している粒界で起こったときはき裂成長とみなし、き裂成長は1粒界長単位の断続的な破壊からなるものとする。

3 数値シミュレーションに基づく破壊プロセスと破損寿命の検討

3・1 駆動力 F_0 と K_0

本モデルにおける破壊駆動力 D は、式(1)から明らかにように2つの駆動力 F_0 と K_0 により決定される。 F_0 は主としてき裂が発生するまでの破壊駆動力、すなわちき裂発生を支配する駆動力である。一方、 K_0 は主としていったん発生したき裂が成長する際の駆動力であり、主にき裂成長を支配する。 F_0 、 K_0 ともに応力、ひずみ速度等の関数であるが、材料の種類および試験条件が決まれば一定値で与えられる。

Fig. 1 に両駆動力のき裂密度（単位面積当たりのき裂個数）に及ぼす影響を示す。本研究では、後の観察結果との対応を考えて、破壊した結晶粒界のうちで半長 $20\ \mu\text{m}$ 以上のものをき裂とみなすことにする。(a) 図と (b) 図を比較するとわかるように、き裂密度増加率は駆動力 F_0 によって顕著に変化し、 F_0 が増加するときき裂密度増加率がほぼそれに比例して増加することがわかる。それに対して、き裂成長を支配する駆動力 K_0 は、き裂密度にほとんど影響を及ぼさない。した

Fig. 1. Crack density, n_{20} , as a function of number of cycles, N . n_{20} shows the number of cracks of larger than $20\ \mu\text{m}$ in half length per fixed surface area of $1\ \text{mm}^2$.

がって、 F_0 は、き裂密度の増加率から求められる。

一方、き裂成長速度を支配する駆動力 K_0 は、微小き裂の成長速度から求めるのが本来である。しかし、その成長速度が微視組織およびき裂同士の力学的な干渉等の理由により大きくばらつくことから K_0 を微小き裂の成長速度から求めることは困難である。したがって、 K_0 は、き裂成長に関する駆動力が微視組織の影響に対して十分大きくなる領域、すなわち巨視き裂に関する成長則から求める。なお、ばらつく微小き裂の成長速度がき裂長さの増大に伴い、応力-ひずみのヒステリシス・ループより推定される巨視き裂成長則からの外挿線に収束することは別報にて確かめられている⁸⁾。

3・2 破壊プロセス

ここでは、両駆動力と破壊プロセスとの関係について検討する。本研究では、破損寿命の設定基準を、 $1\ \text{mm}^2$ のシミュレーション領域中に長さ（半長） $1\ \text{mm}$ のき裂が生じたときとする。この破損基準の違いが寿命に及ぼす影響については次節にて検討する。Fig. 2 に F_0 、 K_0 の値により破損寿命がどのように変化するかを示す。(a) 図から、 F_0 が増加するときき裂発生数が

Fig. 2. Distribution of failure life.

増加するため寿命が短くなることがわかる。さらに、寿命のばらつきも小さくなる。一方、(b) 図からわかるように、 K_0 が増加すると、各き裂のき裂成長速度が大きくなり寿命は短くなる。しかし、寿命のばらつきはほとんど変化しない。このように破壊寿命は一見して2つの定数の大小によりさまざまに変化するように見える。しかし、すべてのき裂挙動をそれぞれの平均破壊寿命で規準化すると、すべての破壊プロセスは両駆動力の比 K_0/F_0 により決定される。言い換えると、比 K_0/F_0 が同じ二つの破壊挙動がある場合、寿命比が同じ時点で両者を比較するとそれらの破壊進行状況、すなわちき裂の分布状態は全く等しい。例えば、 F_0 と K_0 の両値を元の値の2倍に設定すると、すべての破壊プロセスは元の時間の半分で実現されることになり、破壊プロセスを寿命に対する相対的な時間で見た場合は元の条件と両値を2倍にした条件は全く等しくなる。これは理論的にも容易に証明できる⁹⁾。したがって、比の値 K_0/F_0 は、破壊プロセスを特徴づける一つのパラメーターとなりうることをわかる。

3・3 破壊寿命と破壊基準

本節では、まず、破壊寿命時の最大き裂長さ（破壊き裂長さ）がどの程度破壊寿命に影響するかについて検討する。Fig. 3 に破壊き裂長さ c_f と破壊寿命の関係を示す。本図には、両極端の破壊プロセス、すなわち $K_0/F_0=2.5$ の「き裂発生主体型」と $K_0/F_0=2.5 \times 10^2$ の「き裂成長主体型」について示してある。後述する SUS304 のクリープ疲労の破壊プロセスはすべてこの範囲内に含まれる。「き裂発生主体型」、「き裂成長主体型」を問わず、破壊き裂長さが破壊寿命に及

ぼす影響は小さい。例えば、破壊き裂長さを 0.5 mm から 5 mm と 1 オーダーに渡って変化させても平均破壊寿命は 2 倍も増加しない。また、寿命分布のばらつきを示す標準偏差値についても同様である。さらに、き裂成長速度が等しければ（正確には K_0 の値が等しければ）、 F_0 の値が大きい「き裂発生主体型」の方が「き裂成長主体型」より破壊寿命が短くなる。この理由は、隣接き裂の合体によってき裂成長速度が加速されるためばかりではなく、成長を開始するき裂がより早期に発生する確率が高いためである。

つぎに、異なる破壊基準を用いた場合の破壊寿命について検討する。き裂が多数発生するような条件下では破壊の基準が最大き裂長さではなくき裂面の合計面積等の有効断面積を反映した基準で評価されることが考えられる。そこで、本研究では、表面き裂を半円き裂と仮定し、多数のき裂面積（き裂面の面積）の合計が半長（半径）1 mm の一つの半円き裂の面積と等しくなるときを第二の寿命基準とした。以後、多数分布するき裂の面積の合計を一つのき裂の面積に換算し、

Fig. 3. The effect of maximum crack length at failure, c_f , on failure life, N_f .

Fig. 4. The effect of equivalent crack length at failure, $\tilde{c}_f$, on failure life, N_f . The equivalent crack length means the length of a crack whose projected area is equal to the sum of the area of multiple small cracks.

そのき裂長さを等価き裂長さ, また, 破損時点での等価き裂長さを破損等価き裂長さと呼ぶことにする。Fig. 4 に破損等価き裂長さ $\tilde{c}_f$ と破損寿命分布の関係を示す。Fig. 3 と 4 を比較すると, $K_0/F_0 = 2.5$ の「き裂発生主体型」の破損き裂長さが短い場合において多少の相違 ($\tilde{c}_f$ 基準の方が短寿命) が認められるが, 全体として両破損基準間で寿命分布に大差はなく, また, 「き裂発生主体型」と「き裂成長主体型」との間の寿命の大小関係も同様であり, 第二の寿命基準を採用した場合でも破損き裂長さの寿命に対する影響は大きくない。ただし, 以上の結果は破壊が表面き裂の発生・成長で支配される場合であって, クリープ疲労においてもより高温あるいはより低ひずみ速度の条件下では, 多数のキャビティーやき裂が試験片内部に発生して破壊が内部き裂の挙動に支配されることを明らかにしている^{2), 10)}。このような内部き裂支配の破壊では, き裂が奥方向(試験片内部方向)にも分布するため, 2つの異なる寿命基準にて評価された寿命間により大きな差が出てくるものと考えられる。

4 試験結果の検討

4.1 破損寿命評価

本節では, 先に報告したクリープ疲労微小き裂に関する試験結果を数値シミュレーションに基づいて解析し, それぞれの条件における破損寿命および破壊プロセスについて定量的に検討する。本研究で解析する試験結果^{3), 11)}は, オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 のひずみ制御型クリープ疲労微小き裂に関するもので

Table I. Test conditions.

Type	Total strain range $\Delta\epsilon_t$ (%)	Tensile strain rate $\dot{\epsilon}_{ten}$ (%/s)	Compressive strain rate $\dot{\epsilon}_{com}$ (%/s)	Symbol in figures
c-p	1.5	1×10^{-4}	2×10^{-2}	○
c-p	0.7	1×10^{-4}	2×10^{-2}	●
c-c	1.0	2×10^{-3}	2×10^{-3}	□
c-s	1.0	2×10^{-3}	3.2×10^{-4}	■

* Environment : in air, Temperature : 923K.

あり, 試験は温度 923K, 大気中に実施された。試験条件をまとめて Table I に示す。また, 破壊駆動力 F_0 と K_0 の値は, 前述の考察に基づき, それぞれき裂密度増加率および巨視き裂伝ば則から求めた。求められた定数の値を Table II に示す。Fig. 5 にき裂密度に関する試験結果とシミュレーション結果を示す。各条件ともに試験結果とシミュレーション結果は一致しており, 本シミュレーションでき裂の発生挙動が良く模擬できていることがわかる。

Fig. 6 にはそれぞれの試験条件に対する実破損寿命と数値シミュレーションにより評価された破損寿命を比較して示す。なお, 本シミュレーションにおける破損寿命は前述の考察に基づき, 1 mm^2 中の最大き裂長さが 1 mm になったときとした。すべての条件で評価された破損寿命は試験結果とかなり良く一致しており, 本シミュレーションは, き裂の発生・成長挙動の模擬

Table II. Conditions in the simulation for each test.

Type	Total strain range $\Delta\epsilon_t$ (%)	F_0	K_0	Fraction K_0/F_0
c-p	1.5	3×10^{-3}	1.1×10^{-3}	3.6
c-p	0.7	8×10^{-5}	2.3×10^{-3}	28.1
c-c	1.0	4×10^{-5}	1.8×10^{-3}	43.8
c-s	1.0	2×10^{-5}	1.8×10^{-3}	87.5

Note: F_0 : driving force for crack initiation.

K_0 : driving force for crack growth.

(a) c-p type.

(b) c-c and c-s types.

Fig. 5. Comparison of simulation and experimental results on crack density.

Fig. 6. Failure life estimated by the simulation.

とともに寿命・余寿命評価にも有効であることがわかる。

4・2 破壊プロセス

第3章で検討したように、破壊のプロセスは駆動力の式に含まれる二種類の駆動力 F_0 と K_0 の比の値 K_0/F_0 により特徴づけられる。本研究でシミュレーションを行った4種類の試験条件についてこれらの比の値を比較すると Fig. 7 のようになる。図において、比の値が小さいほど、すなわち図の左側ほど破壊のプロセスが「き裂発生主体型」に近く、右側ほど「き裂成長主体型」に近い。同じ c-p type 波形（低速引張-高速圧縮）のクリープ疲労でも、全ひずみ範囲が大きいほど破壊形態が「き裂発生主体型」に近くなり、全ひずみ範囲が小さいほど「き裂成長主体型」に近くなる。また、c-c type（低速引張-低速圧縮）と c-s type（低速引張-極低速圧縮）について比の値 K_0/F_0 を比較すると、c-c type の方が c-s type よりも「き裂成長主体型破壊」に近い。なお、「き裂発生主体型」の場合はほぼ $K_0/F_0=1$ 、「き裂成長主体型」の場合

Fig. 7. Characteristics of failure mode represented by the fraction K_0/F_0 , in place of the cracking behavior.

はほぼ $K_0/F_0=100$ の値が目安となる。

比 K_0/F_0 の値が負荷条件の違いによって変わらない場合は、 F_0 と K_0 の負荷条件に対する依存性が等しく、これは各条件で破壊プロセスが類似していることを示す。しかし、実際は Fig. 7 からわかるように、同材料中でも比の値が試験条件に大きく依存し、それぞれの条件で破壊プロセスが異なる。これは、Table II からわかるように、 F_0 の方が K_0 よりも試験条件、すなわちひずみ範囲のみならずひずみ波形にも強く依存する、言い換えると、き裂発生の方がき裂成長よりも試験条件に敏感であるためである。したがって、数種類の破壊プロセスをシミュレートする場合、最低二つの駆動力、すなわちき裂発生を支配するものとき裂成長を支配するものが必要である。

さて、本シミュレーションを実機の寿命・余寿命評価に用いる場合には、式(1)中の2種類の破壊駆動力 F_0 および K_0 を何らかの方法で決定する必要がある。破壊駆動力 K_0 は、すでに説明したように巨視き裂伝ば則から求められる。しかし、破壊駆動力 F_0 に関しては、現在のところき裂発生に関する有力な力学的法則が確立されていないので、き裂発生に関する実験結果そのものに基づいて決定せざるをえない。その場合にも、実験結果に基づいて経験的法則を導出する手法の一つとして、本シミュレーションは有効であると考えられる。

本論文にて検討してきた破壊プロセスの定量的な評価は、以上述べてきたクリープ疲労破壊の一般的性質を理解したり、寿命・余寿命推定を行うのに重要であるばかりではなく、既存材料の適切な使用、新材料の開発等にも有効であると考えられる。例えば、材料の強化方法としては2つの方向、すなわちき裂発生抵抗を高める方向とき裂成長を抑制する方向が考えられる。材料の強度をある条件下で高めたい場合に、機器のき裂許容限界に照らし合わせてき裂発生抵抗とき裂成長抵抗のどちらを高める方がより効果的かを本シミュレーションを用いて定量的に評価できる。なお、本報告はクリープ支配のクリープ疲労粒界破壊に関するモデルに基づく議論であるが、疲労支配下の破壊についても同様な考え方および手法が適用できるものと考えられる。

5 ま と め

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 のクリープ疲労破壊に関して「粒界破壊抵抗分布モデル」に基づく数値シミュレーションを行い、そのシミュレーション結果から破壊プロセスを逆解析的に分析し、破壊の形態、破損寿命のばらつきや長短について検討した。得られた結果を要約して以下に示す。

(1) 「粒界破壊抵抗分布モデル」において破壊駆動

力 D を構成する二種類の駆動力 F_0 と K_0 は, それぞれき裂発生とき裂成長を支配する. このことによって微小き裂の発生と成長に対する応力あるいはひずみ範囲依存性が異なることのみならず, ひずみ速度やひずみ波形依存性が異なることを定量的に明確化することができた.

(2) すべての破壊プロセスは, 二種類の駆動力の大きさの比 K_0/F_0 で特徴づけられる. この比の値が小さいときは, その破壊がき裂発生により支配されるため「き裂発生主体型破壊」, 一方, 比の値が大きいときは, その破壊が極少数のき裂の成長により支配されるため「き裂成長主体型破壊」となる.

(3) 数値シミュレーションを用いて同じ破壊プロセスに対して異なる二つの破損基準 (最長き裂基準と等価き裂長さ基準 (有効断面積基準)) を適用し, 両寿命を求めて比較した. その結果, 本研究で検討したように破壊が表面粒界き裂の発生・成長により起こる場合は, その破壊プロセスが「き裂発生主体型」であるか「き裂成長主体型」であるかに係わらず両寿命間に大差が無かった. ただし, いずれの基準についても K_0 が等しい場合には F_0 の値が大きい「き裂発生主体型」の方が短寿命となった. この結果より, 例えば初期表面欠陥の数の大小が以後の破壊プロセスや寿命に及ぼす影響を推測することができる.

なお, 本研究は平成3年度文部省科学研究費補助金試験研究B (課題番号 03555015) によって実施した.

(平成3年11月29日 日本材料学会第29回高温強度シンポジウムにて講演)

参考文献

- 1) R. Ohtani and T. Kitamura, Proc. 4th Int. Conf. on Creep and Frac. of Eng. Mat. and Struc., p. 791 (1990) The Inst. of Metals, London
- 2) R. Ohtani, T. Kitamura and N. Tada, Mat. Sci. and Eng., **A143**, 213 (1991).
- 3) 大谷隆一, 北村隆行, 阿部宗昭, 栗山義英, 三木秀樹, 材料, **39**, 529 (1990).
- 4) 大谷隆一, 北村隆行, 村山英明, 多田直哉, 日本機械学会論文集, **A-54**, 1312 (1988).
- 5) 多田直哉, 北村隆行, 大谷隆一, 日本機械学会論文集, **A-56**, 708 (1990).
- 6) R. Ohtani, T. Kitamura and N. Tada, Proc. 4th Int. Conf. on Fatigue and Fatigue Thresholds (Fatigue 90), **IV**, 2143 (1990) Mat. and Component Eng. Pub., Birmingham
- 7) R. Ohtani, T. Kitamura and N. Tada, "Structural Design for Elevated Temperature Environments", ASME PVP, **163**, 123 (1989).
- 8) 多田直哉, 飯尾真司, 北村隆行, 大谷隆一, 日本材料学会第40期学術講演会前刷, p. 243 (1991) (材料, **41**, 1165 (1992).)
- 9) 大谷隆一, 北村隆行, 多田直哉, 日本機械学会講演論文集, **900-50**, 89 (1990).
- 10) 大谷隆一, 北村隆行, 多田直哉, 阿部宗昭, 日本機械学会講演論文集, **900-86**, 628 (1990).
- 11) 北村隆行, 多田直哉, 阿部宗昭, 弓田正人, 大谷隆一, 日本機械学会論文集, **A-56**, 575 (1990).
- 12) R. Ohtani, T. Kitamura and N. Tada, Proc. 6th Int. Conf. on Mech. Behavior of Mat. (ICM-6), **2**, p. 205 (1991) Pergamon, London