クリープ・疲労条件下の微小き裂発生・成長に及ぼす
圧縮ひずみ速度の影響*北村 隆行^{*1}, 多田 直哉^{*2}, 阿部 宗昭^{*2}
弓田 正人^{*3}, 大谷 隆一^{*1}Effect of Compression-Going Strain Rate on Initiation and Growth
of Small Cracks under Creep-Fatigue ConditionTakayuki KITAMURA, Naoya TADA, Muneaki ABE,
Masato YUMITA, and Ryuichi OHTANI

In order to clarify the effect of the compressive strain rate on initiation and growth of small cracks under creep-fatigue condition, the following tests were conducted using smooth specimens of Type 304 stainless steel at 650°C in air, (i) slow-tension and fast-compression (c-p type fatigue), (ii) slow-tension and slow-compression (c-c type fatigue), and (iii) slow-tension and very-slow-compression (c-s type fatigue). The results obtained are summarized as follows. (1) Multiple small cracks initiated and grew at random along grain boundaries being nearly perpendicular to the stress axis at each specimen surface. (2) The compression-going strain rate affected the crack initiation life and the crack density. The c-p type fatigue brought about the shortest initiation life and the highest crack density, and the c-s type fatigue did the longest and the lowest. (3) The crack growth rate was not influenced by the compression-going strain rate but was primarily governed by the tension-going strain rate. (4) The difference of life between c-p type and c-s type fatigue was caused by the difference of crack initiation life and crack coalescence. The highest crack density in the c-p type fatigue made the crack coalesce easily to bring about a long crack.

Key Words: Fatigue at Elevated Temperature, Crack Propagation, Life Prediction, Creep-Fatigue, Small Crack, Crack Initiation, Compression-going Strain Rate, Crack Coalescence

1. 緒 言

高温低サイクル疲労においてはひずみ波形が寿命に大きな影響を及ぼすことが知られている⁽¹⁾。高温においては時間に依存するクリープと繰返し数に依存する疲労が相互作用をして、一見複雑な破壊様相を示す。ひずみ波形効果はこのクリープ疲労相互作用の代表的な例であり、その解明は高温強度を理解するうえで重要な手がかりを与える。Manson ら⁽¹⁾⁽²⁾は、時間依存のクリープひずみは主に結晶粒界に損傷を与え、時間非依存の塑性ひずみは結晶粒内に損傷を与えるとして、非弾性ひずみを2種類に分けることを提案した。また、引張りと圧縮の負荷方向とひずみの種類の組合せでおのおの異なった寿命が現れると主張した。SUS 304 鋼の高温低サイクル疲労試験結果(650°C, 大気中)⁽³⁾より、引張ひずみが主に塑性の場合には粒内破壊、クリープの場合には粒界破壊が支配的であり、破壊のメカニズムが異なることが明白であった。ところが、引張クリープ・圧縮クリープ(いわゆる c-c type 疲労)と引

張クリープ・圧縮塑性(いわゆる c-p type 疲労)の場合のように圧縮ひずみが異なる場合にはその破壊様相に大きな違いはみられなかった。すなわち、その破壊メカニズムの相違は明確ではない。圧縮ひずみ速度が寿命に影響を与えることが知られているにもかかわらず、その破壊過程の相違を詳細に観察した例はほとんどない⁽⁴⁾。

一方、高温低サイクル疲労では寿命初期より試験片表面に多数のき裂が発生・成長し、それが破損をもたらすことが明らかになってきている^{(5)~(7)}。そこで、本研究ではオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 の平滑試験片を用いて圧縮ひずみ速度が大きく異なるクリープ疲労試験を行い、表面に発生・成長する微小き裂の挙動を観察した。そして、この結果に基づき疲労寿命と密接に関連する巨視き裂の形成過程に及ぼす圧縮ひずみ速度の影響について考察した。

2. 試 験 方 法

供試材は、SUS 304 の溶体化処理丸棒である。その化学成分を表 1 に示す。試験片は、図 1 に示す中実丸棒形である。平行部に微小き裂観察を容易にするため平面部を設けた。クリープ・疲労試験は、電気加熱炉を具備した電気機械(ボールねじ使用)サーボ方式の低

* 平成元年 10 月 14 日 第 67 期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成元年 3 月 20 日。

^{*1} 正員、京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

^{*2} 学生員、京都大学大学院。

^{*3} 京都大学工学部。

ひずみ速度用疲労試験機を用いて行った。試験条件は、いずれも 650°C、大気中、全ひずみ範囲 1% の両振ひずみ制御であり、ひずみ波形は図 2 に示す 3 種類のものを用いた。いずれの場合も、引張ひずみ速度は比較的小さいため、引張クリープひずみは大きい。しかし、図 2(a) の c-p type では、圧縮ひずみ速度が引張ひずみ速度より著しく大きく、圧縮クリープひずみはほとんど生じない。図 2(b) の c-c type では、圧縮ひずみ速度は引張ひずみ速度と等しく、1 サイクル中に生じる圧縮クリープひずみは引張クリープひずみとほぼ同じである。図 2(c) の c-s type では、圧縮ひずみ速度は引張ひずみ速度よりかなり小さく、圧縮クリープひずみは引張クリープひずみより大きい。

一定繰返し数ごとに試験を中断して、試験片表面におけるき裂の発生と成長を光学顕微鏡で観察した。き裂の観察領域は、c-p type : $1.2 \times 2 \text{ mm}^2$ 、c-c type : $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 、c-s type : $3.1 \times 2 \text{ mm}^2$ である。観察面積が異なるのは、それぞれき裂の密度に大きな違いがあるので観察き裂数がほぼ同じになるように観察領域を設定したためである。観察き裂数はいずれの場合も最大数に達した時点で約 50 本である。微小き裂の観察方法の詳細は前報と同じである⁽⁵⁾。

3. 試験結果および考察

3.1 微小き裂の発生と成長 図 3 から図 5 に寿命中期の表面写真を示す。いずれの type においても応力軸にほぼ垂直な粒界のうちの特定の粒界に沿って、酸化層(写真中の灰色の部分)が認められる。これは粒界近傍のクロム欠乏帯と思われ、この酸化層を有する粒界に優先的にき裂が発生した。き裂は写真上で

は黒いすじとして確認できる。き裂は応力軸にほぼ垂直に成長した。また、写真から明らかなように、各 type でき裂の数が著しく異なっている。c-p type では、非常に多数のき裂が発生しているのに対して、c-c type および c-s type ではき裂の数は少ない。

図 6 にき裂密度 n の繰返し数 N に対する変化を示す。ここで、き裂発生はほぼ 1 結晶粒界長さに相当する $10 \mu\text{m}$ 以上のき裂が認められた時点と定義した。図 6 より、c-p type のき裂密度が最も高く、c-c type、c-s type の順に低くなっていることが明らかである。さらに詳細にみると、いずれの type においても、き裂は寿命の初期より認められ、初期から中期にかけては繰返し数に比例して増加する。しかし、中期から後期には、き裂密度は飽和して一定となる傾向を示す。すなわち、寿命中期までは、単位繰返し数当たりのき裂発生数はほぼ一定であり、中後期以降はほとんどき裂が発生しなくなることを示している。同様のき裂密度変化が真空中のクリープ疲労においても報告されている⁽⁷⁾。なお、c-p type で寿命後期にき裂密度の減少が認められるのは、き裂合体のためである。

図 7 から図 9 にき裂成長速度とき裂長さの関係を示す。ただし、き裂が合体により大きくなった場合には、その時点の成長速度はプロットしなかった。図 6 より、3 種類の type において同関係に相違が認められない。このことより、圧縮クリープ変形は微小き裂の成長には大きな影響を及ぼしていないことが明らかである。従来より、巨視き裂の成長速度は圧縮クリープ変形の影響をほとんど受けないことが知られている⁽⁸⁾が数結

表 1 供試材の化学成分

304SS (wt. %)									
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Fe
0.06	0.31	1.07	0.31	0.018	0.44	86.8	18.37	0.25	Bal.

図 1 試験片

図 2 ひずみ波形

図 3 試験片表面写真(c-p type, $N=250$)

図 4 試験片表面写真(c-c type, $N=450$)

図 5 試験片表面写真(c-s type, $N=450$)

晶粒界長さ以下の微小き裂の成長に関しても同じことがいえる。さらに詳細にみると、半長 $100\ \mu\text{m}$ 以下のき裂の成長速度は大きくばらついている。上限は約 $10^{-3}\ \text{mm/cycle}$ であり、下限は停留している。一方、き裂半長が $100\ \mu\text{m}$ を超えると成長速度のばらつきは小さくなる傾向を示している。この材料の場合、 $100\ \mu\text{m}$ 近傍が微視組織の乱れの影響を大きく受けるき裂成長とそれを受けないき裂成長の分岐点になっていることが報告されている⁽⁵⁾。したがって、本試験条件においてもき裂半長 $100\ \mu\text{m}$ 以上では巨視き裂の成長則がほぼ成立すると考えられる。

以上のように、圧縮ひずみ速度はき裂発生に大きな影響を及ぼしたにもかかわらず、き裂成長にはほとんど影響していない。これらのき裂発生・成長特性は以下のように解釈できる。

(き裂発生)c-p type では、引張クリープによって粒界とその近傍には一方向に変形が累積する。これによ

図 6 き裂密度と繰返し数の関係

図 7 き裂成長速度とき裂長さの関係 (c-p type)

図 8 き裂成長速度とき裂長さの関係 (c-c type)

図 9 き裂成長速度とき裂長さの関係 (c-s type)

って粒界すべりやキャビティ発生・成長による粒界損傷が繰返しとともに増大し、多数の粒界き裂の発生に至る。一方、c-c type や c-s type では圧縮クリープにより粒界とその近傍には逆方向の変形が起こり、引張クリープによって導入された粒界の損傷が回復されるため、き裂の発生が抑制される。c-c type では巨視的なクリープひずみは引張りと同様であるが、局所的には損傷の回復が充分ではない。一方、c-s type では圧縮のクリープひずみが大きくなった分だけ損傷がさらに回復されるため、c-c type よりき裂発生が抑制される。つまり、圧縮クリープ変形は粒界損傷の累積を緩和するように働いている。

(き裂成長)き裂成長はき裂先端に隣接する粒界の破壊と考えることができる。すなわち、破壊のメカニズムはき裂発生の場合と同じである。大きな相違点は、き裂が存在することにより、引張応力負荷時にき裂前方の粒界のひずみが拡大されることである。圧縮時においては逆方向のひずみ拡大が生じると予想されるが、c-p type では圧縮クリープ変形がないため粒界の損傷回復には影響がない。c-c type および c-s type では粒界とその近傍の圧縮クリープ変形によりき裂面上の酸化物に誘起されたき裂閉口が生じることが考えられる。き裂が閉口すればき裂前方の特異応力場は消失するため、き裂先端近傍の圧縮ひずみの拡大は起こらない。すなわち、き裂前方の損傷回復はき裂の存在により促進されることはないと考えられる。き裂に隣接する粒界の破壊駆動力はき裂がない場合のそれよりかなり大きいことが明らかになっている⁽⁹⁾。圧縮クリープによる粒界損傷回復の効果がき裂発生に明確に現れたことより、その回復効果はき裂がない場合の粒界破壊駆動力と同オーダーであることが推察される。換言すれば、き裂成長の駆動力は回復より格段に大きいことになる。したがって、圧縮クリープによる損傷回復の影響はき裂成長駆動力に対して無視できるため、き裂成長は引張応力のみに依存する。以上のき裂発生と成長に関する圧縮方向の変形の寄与については、一方向変形(クリープ)と繰返し変形(クリープ疲労)の比較を行った実験結果によっても明らかにされている⁽¹⁰⁾。なお、クリープ疲労下の微小き裂開閉挙動について詳細な観察を行った例はなく、その点の検証については今後の研究課題である。

3・2 長いき裂の形成 本節では、クリープ疲労寿命を左右する長いき裂の形成過程について検討する。c-c type は c-s type と同じ傾向を示したので、ここでは相違が明確であった c-p type と c-s type を中心に比較・検討する。なお、c-p type と c-s type の寿

命は各々約 400 回と 800 回である。

まず、両 type において最終的に最も大きくなった 3 本のき裂の成長と合体の状況を図 10 に示す。図 10(a)は c-p type のものであり、最長き裂となった No.40 は繰返し数 25~125 に発生した 8 本のき裂が合体を繰返してき裂半長 300 μm 以上に達した。他のき裂についても合体を繰返ししながら 150 μm を超える長さになった。詳細にみると、c-p type においては、150 μm 程度のき裂長さになるまでに 2 回程度の合体を経てきていることがわかる。一方、図 10(b)に示した c-s type ではき裂合体は非常に少なく、最長き裂 No.4 も半長約 400 μm に至るまで単独で成長した。c-s type では 100 μm を超したき裂のうちで合体があったのは No.10 のみであり、しかも No.10 の合体は一度だけにすぎない。これは、明らかにき裂密度の相違に起因している。

図 11 に図 10 に示したき裂の成長曲線を示す。図 11 中の四角印は c-p type の結果であり、丸印は c-s type の結果である。破線部分は、合体によってき裂が大きくなったことを示す。図 11 より以下のことがわかる。

(1) c-p type のほうが短い繰返し数で長いき裂を形成している。き裂半長が 150 μm に達する繰返し数は両 type で 200~300 回程度の相違がある。最長き裂 No.40(c-p type)と No.4(c-s type)では、き裂半長が 400 μm 弱で 300 回以上の繰返し数の相違が認められる。

(2) c-p type のほうがき裂発生繰返し数が短い。両 type のき裂発生繰返し数の差は大体 150~250 回程度である。

(3) c-p type では、き裂半長が 50~150 μm で 2 回程度合体をしている。

(4) き裂合体直後の成長速度は、き裂合体がない場合と比較して著しく減速されてはいない。

c-p type と c-s type の寿命の相違は約 400 回であるが、最長き裂が 400 μm 程度に成長するまでに、すでにそれにほぼ匹敵する繰返し数の相違が現れている。この長さ以上のき裂の成長は巨視き裂成長則にほぼ従うことや巨視き裂成長則はばらつきが比較的小さく、かつ圧縮クリープの影響をほとんど受けないことを考え合せると、圧縮ひずみ速度による寿命の相違は、400 μm 以下のき裂形成過程の違いによるものであることがわかる。さらに、そのうちの半分程度はき裂発生繰返し数の相違によるものである。残り半分は、両 type のき裂半長 400 μm 以下のき裂成長と合体の相違によることになる。これについて検討するため各き裂

の発生時点を繰返し数零として発生以降の成長曲線を図12に示す。図12より両typeのき裂成長曲線の相違にはき裂合体の影響が大きいことがわかる。一般的には、き裂は合体によりその形状が偏平となって表面におけるき裂先端近傍の応力拡大は低下するため、き裂成長の一時的な減速や停留が考えられる。しかし、図12ではき裂合体直後でもき裂成長の減速や停留は認められない。いま、微小き裂の成長速度は、式(1)で表される巨視き裂成長則を中心にばらついている⁽⁸⁾ことを考慮して、簡単のためき裂成長則

$$dc/dN = kc \quad \dots\dots\dots (1)$$

を仮定する。ここで、 k は試験条件や材料などに依存する定数である。合体がない場合のき裂半長 c_0 から c_f までのき裂成長寿命 N_{D0} は、式(1)を積分して

$$N_{D0} = \ln(c_f/c_0)/k \quad \dots\dots\dots (2)$$

と求められる。き裂合体により、き裂半長 c_{1a} から c_{1b} までジャンプがあれば、き裂成長寿命 N_{D1} はそのジャンプ分だけ短縮されて、

$$N_{D1} = [\ln(c_f/c_0) - \ln(c_{1b}/c_{1a})]/k \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。ただし、ここでは上述の試験結果を参考にし、合体によるき裂成長の加減速を考えていない。同様にして、合体が複数回のときの成長寿命を求めることができる。c-p type においてはき裂半長が $150\mu\text{m}$ に達するまでに2回の合体を経ている。また、ばらつきはあるものの、おおむね1回目の合体でほぼき裂長さは2倍、2回目では1.5倍程度になっている。このとき、2回の合体によって短縮された成長寿命 $N_{D0} - N_{D2}$ は、

$$N_{D0} - N_{D2} = N_{D0} \ln(2 \times 1.5) / \ln(c_f/c_0) \quad \dots\dots\dots (4)$$

図10 代表的な成長き裂の模式図

図 11 代表的な成長き裂のき裂長さと繰返し数の関係

図 12 代表的な成長き裂のき裂長さと発生後の繰返し数の関係

となる。 $c_o=20\text{ }\mu\text{m}$, $c_f=150\text{ }\mu\text{m}$ とすると,

$$N_{D2} \approx 0.5N_{D0} \dots\dots\dots (5)$$

である。図 12 より明らかなように、き裂合体のない c-s type ではき裂半長が $150\text{ }\mu\text{m}$ に達するのは 200~300 回前後であり、c-p type では 100~125 回前後である。式(5)と考え合わせると、図 12 に示された c-p type と c-s type のき裂成長曲線の相違は主にき裂合体に起因するものであることがわかる。なお、c-p type では、き裂半長が $300\text{ }\mu\text{m}$ に達するまでに 3 回以上の合体を経ており、この段階で c-p type と c-s type に 150 回以上の相違ができたことも納得できる。

以上のように、圧縮ひずみ速度が長いき裂の形成過程に及ぼす影響は、き裂発生繰返し数とき裂合体の相違となって現れている。き裂合体はき裂発生密度と相関があるため、これもき裂発生の相違によるものと考えることができる。すなわち、圧縮ひずみ速度の相違による平滑試験片のクリープ疲労寿命の差は、微視的な損傷の回復度の違いに起因するき裂発生挙動の相違によると結論される。

4. 結 言

SUS 304 ステンレス鋼の平滑試験片を用いて、圧縮ひずみ速度の異なるクリープ疲労試験 (650°C , 大気中) を行い、微小き裂の発生・成長に及ぼす影響について明らかにした。また、その結果に基づき破損をもたらす長いき裂の形成過程について検討した。行った試験は低速引張り-高速圧縮 (c-p type), 低速引張り-低速圧縮 (c-c type), 低速引張り-極低速圧縮 (c-s type) の 3 種類である。得られた結果は次のように要約できる。

(1) き裂は 3 type とも応力軸にほぼ垂直な粒界に沿って発生・成長した。

(2) き裂発生密度は圧縮ひずみ速度の影響を強く受け、c-p type, c-c type, c-s type の順に低くなっ

た。すなわち、圧縮ひずみ速度が小さくなるほどき裂発生密度は低くなった。これは、引張クリープによって導入された粒界損傷が圧縮クリープによって回復されるためと考えられる。

(3) き裂の成長速度はいずれの type も差がなく、圧縮ひずみ速度の影響は認められなかった。この原因は次のように考えられる。き裂先端近傍の引張ひずみ拡大により損傷の累積が大きく加速される。一方、c-p type では圧縮クリープによる損傷回復がない。また、c-c type や c-s type ではき裂閉口によりき裂前方における圧縮クリープひずみ拡大は抑制されると考えられる。したがって、いずれの type の損傷回復も引張クリープひずみ拡大によって著しく加速された損傷累積に比べて無視できる程度に小さい。

(4) 破損寿命が各々約 400 回および 800 回の c-p type と c-s type における長いき裂の形成過程を比較した。c-p type のき裂発生繰返し数は c-s type のそれより約 200 回早かった。また、c-p type では頻繁なき裂合体が認められたが、c-s type ではほとんどき裂合体はなかった。この際、き裂合体直後でも成長の減速は認められず、最長き裂はき裂合体により発生から半長約 $400\text{ }\mu\text{m}$ に至るまでの繰返し数に約 150 回の相違をもたらした。すなわち、圧縮ひずみ速度のクリープ疲労寿命に及ぼす影響は、き裂発生繰返し数と合体数の相違によるものである。き裂合体はき裂密度と相関があることを考えれば、その影響はいずれもき裂発生の相違に起因している。

文 献

- (1) Manson, S. S., Halford, G. R. and Hirshberg, M. H., NASA T.M. X 67838(1971).
- (2) Halford, G. R., Hirshberg, M. H. and Manson, S. S., ASTM Spec. Tech. Publ. 520(1973), 658.
- (3) 日本鉄鋼協会高温強度研究委員会高温クリープ・疲労試

- 験分科会, 共同研究結果報告書, (1981).
- (4) 平川・時政, 材料, **30**(1981), 65.
- (5) 大谷・木南・坂本, 機論, **52**-480, A(1986), 1824.
- (6) 岡崎・遠藤・矢田・小泉, 材料, **36**(1987), 1232.
- (7) 大谷・北村・多田・坂本, 機講論, No.880-2(1988), 43.
- (8) 大谷・山田・柏木・松原, 機論, **48**-435, A(1982), 1378.
- (9) 大谷・北村・多田, 機論, **54**-503, A(1988), 1312.
- (10) 大谷・多田・橋本, 材料, **38**-432 (1989), 89-94.

討 論

〔質問〕 岡崎 正 和〔長岡技術科学大学〕

一連の系統的なご研究に敬意を表す。

例えば, 576 ページ左欄下 2 行め「酸化層……発生した。」という記述から推定して, き裂発生あるいはき裂密度には, 酸化の影響(波形による酸化の差)も大きいと考えられるが, これについて検討された結果があれば, ご教示願いたい。

〔回答〕 SUS 304 に関しては, 本論文で取り上げた 3 種類の波形の内 c-p type と c-c type については, すでに弱真空中(約 10^{-2} Pa)においても実験を行い, その微小き裂発生・成長について検討した^{(付1)(付2)}。その結果の概略を以下に述べる。

微小き裂は, 両環境中において c-p, c-c type ともに応力軸にほぼ垂直な粒界上に発生・成長した。き裂発生は環境の違いに敏感であって, 大気中においては弱真空中におけるよりもき裂密度, つまりき裂の発生率が小さい。一方, 微小き裂の成長は酸化の影響をほとんど受けない。

なお, 本論文で取り上げた c-s type については真空中において試験を行っていないが, 酸化の影響については上述の二つの波形におけるそれと同様であると考えている。

(付1) 大谷・木南・坂本, 機論, **52**-480, A(1986), 1824.

(付2) 大谷・北村・多田・坂本, 機講論, No. 880-2(1988-6), 43.