

# 高温におけるクリープとクリープ・疲労相互作用下の 表面き裂の伝ば

藤田 和孝\*・小寺沢 良一\*\*・中村 健二\*\*\*

Surface Crack Propagation under Creep and  
Creep-Fatigue Conditions at Elevated Temperatures

Kazutaka Fujita, Ryoichi Koterazawa  
and Kenji Nakamura

## Abstract

We have previously conducted crack propagation tests using macroscopic through thickness crack specimens under creep conditions, and found out nonlinear fracture mechanics behavior. Investigations on surface cracks are more practical than those on through thickness cracks, so that these will be important.

In this study, experimental investigations on the propagations of large and small surface cracks of sus 304 stainless steel and  $2\frac{1}{4}$ -Cr-1Mo steel were performed under creep and creep-fatigue conditions in air. It was found that static creep crack propagation rates of the small surface crack of sus 304 and the large surface crack of Cr-Mo steel were roughly correlated with those of macroscopic through thickness cracks by modified J integral  $\dot{J}$ . Under repeated load, the crack propagation rate of the large surface crack of sus 304 was correlated with the stress intensity range  $\Delta K$  at low propagation rate, whereas it was correlated with  $\dot{J}$  at high propagation rate and coincided with the rate of static creep crack. The crack propagation rate of the small surface crack of sus 304 was lower than of the large surface crack, and it was correlated with  $\dot{J}$ . This would be because small scale yielding condition was not satisfied due to the small crack size.

## 1. ま え が き

近年、高温機器の各構造要素のクリープが起る条件下の強度設計や保守管理の問題が重視されるようになってきている。特に構造物の大型化にともない、溶接部や小さなき裂のような応力集中部が存在することは避けられず、このような場合にはクリープあるいはクリープと疲労の相互作用によりき裂が発生成長し破壊に至ることが明らかにされている<sup>1)</sup>。このような高温クリープ条件下の

破壊あるいは寿命予測を定量的に取扱う方法として、き裂伝ばを支配する力学因子を明らかにしようとする研究が最近活発に行われている。

筆者らは寸法の異なる貫通き裂試験片を用いて、クリープ条件下のき裂伝ばを支配する破壊力学因子を明らかにするための一連の研究を実施し、クリープき裂伝ば速度は修正 J 積分  $\dot{J}$  によってよりよい相関が得られること、ならびにクリープ・疲労相互作用下のき裂伝ば速度は低伝ば速度域では応力拡大係数  $K$  が、高伝ば速度域では  $\dot{J}$  が支配力学量となることを示してきている<sup>2)~4)</sup>。

ここでは、これらの研究の一環として、実際の破壊に多くみられ、かつ実験的研究のほとんどなされていない

\* 宇部高専機械工学科

\*\* 筑波大学構造工学系

\*\*\* 川崎重工(株)

大きい表面き裂および微小表面き裂について、延性材である SUS304 ステンレス鋼を主とし一部延性の極めて低い 2¼Cr-1Mo 鋼焼入材を用いて、一定応力および繰返応力下の試験を行い、き裂伝ば挙動および破壊力学因子を調べた結果について報告する。

2. 試験方法

供試材は SUS304 鋼および 2¼Cr-1Mo 鋼で、それらの化学成分と熱処理条件、常温における機械的性質を表 1 に示す。試験片は図 1 に示すように平滑材表面中央に小穴を加工したもので、大きい表面き裂の伝ば試験には小穴直径 1.0 mm 深さ 1.4~1.5 mm の LSC 試験片を、微小表面き裂伝ば試験には小穴直径 0.2 mm 深さ 0.2 mm の SSC 試験片を使用した。試験温度は 304 鋼については 650°C、Cr-Mo 鋼については 565°C とした。試験機は、タイムとジャッキを用いて自動的に重錘を繰返負荷し得るようにした単レバー式クリープ試験機を用いた。き裂長さは、304 鋼の一定応力試験では遊尺付望遠顕微鏡 (×20) を用いて試験片表面で、Cr-Mo 鋼の一定荷重試験および 304 鋼の繰返応力試験では破面上で測定した。またき裂中央開口変位は、304 鋼の試験では遊尺付望遠顕微鏡で、Cr-Mo 鋼の試験では差動変圧器で測定し修正 J 積分の評価に用いた。

3. 試験結果と検討

3. 1 一定応力下のき裂伝ば

ここでは既報<sup>2)</sup>の 304 鋼を用いて行った大きい表面き裂に対して、クリープき裂伝ば寿命全体中で大きな割合を占める微小表面き裂の伝ばについて 304 鋼を用い試験した結果および 304 鋼などのクリープ延性の高い材料に対し延性の低い例として Cr-Mo 鋼焼入材を用い大きい表面き裂の伝ば試験を実施した結果について報告する。

表 1 化学成分、熱処理条件および常温における機械的性質

| 材 質        | 化 学 成 分 Wt % |      |      |      |       |       |       |       |       |                          | 熱処理条件          | 機 械 的 性 質 MPa, % |              |      |
|------------|--------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|----------------|------------------|--------------|------|
|            | C            | Si   | Mn   | P    | S     | Cu    | Ni    | Cr    | Mo    | $\sigma_{0.2}, \sigma_y$ |                | $\sigma_B$       | $\psi$       |      |
|            | SUS 304 鋼    | a 材  | 0.06 | 0.68 | 0.99  | 0.029 | 0.007 | —     | 8.54  | 18.10                    |                | —                | 1100°C, 1 h, | 265  |
|            | b 材          | 0.07 | 0.61 | 1.44 | 0.03  | 0.006 | —     | 8.34  | 18.22 | —                        | 水 冷            | 255              | 588          | 61   |
| 2¼Cr-1Mo 鋼 |              | 0.15 | 0.42 | 0.58 | 0.007 | 0.006 | 0.019 | 0.021 | 2.44  | 1.04                     | 1100°C<br>水焼入れ | 1196             | 1372         | 17.5 |

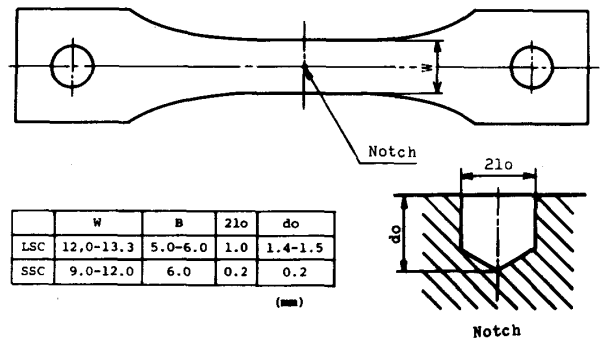


図 1 試験片形状

3. 1. 1 微小き裂

304 鋼の微小表面き裂試験片 (SSC) の破面および表面写真例を図 2、図 3 に示す。一定荷重試験では初期欠陥とした小穴から微小き裂が発生伝ばする以前に加速クリープに至るため、正味断面応力  $\sigma_{net}$  を一定とする荷重漸減クリープき裂伝ば試験を実施し、その後常温疲労により破断している。図 4 にこのような破面から測定したき裂前縁形状の縦横比  $a/b$  (●・●印) を先に同材料を用いて行った大きい表面き裂の  $a/b$  (○印) とともに示す。図 2、図 3 および図 4 からわかるようにき裂前縁形状は試験応力の高低によって差があり、高い場合には表面方向に長い浅い形状、低い場合には大きいき裂の結果と同様  $a/b \approx 1$  のほぼ半円形状を示す。また図 2、図 3 の表面写真をみると応力の高い場合の方が低い場合に比べ小穴は引張軸方向へ著しく変形しているが、内部方向のき裂伝ば量は応力の高い場合の方が著しく小さい。試験応力が高い場合に  $a/b$  が小さくなるのは、高応力試験条件にともなう高クリープひずみ速度のため結晶粒界の強度が若干上昇したことが考えられ<sup>5)</sup>、そのため引張軸方向の大きな変形をしたにもかかわらず内部方向のき裂伝ば量は小さく、また大きな変形をしたため拘束の小さな表面では粒界割れが発生成長しやすくなったと思われる。微視的破面様相は低応力、高応力試験条件によらずいずれ

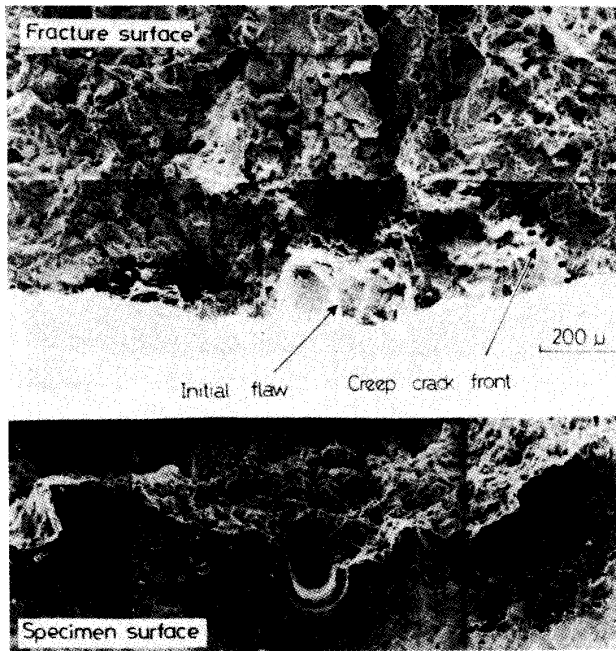


図2 一定応力試験の破面写真例  
(微小き裂、304鋼、低応力 $\sigma_{net}=191$  MPa)

も粒界クリープ破壊である。

次に、試験片表面で測定したき裂伝ば速度を修正 J 積分  $\dot{J}$  で整理した結果を図5に●・○印で示す。 $\dot{J}$ は、大谷らによって提案された浅いき裂に対しても解析解とのよい一致を示す簡便式<sup>6)</sup>  $\dot{J} = \sigma_{net} \dot{V}$  ( $\dot{V}$ : き裂中央開口変位速度) で評価し、 $\dot{V}$ はVの時間線図の傾きから求めている。微小き裂の結果は、上述したような試験応力の高低によるき裂伝ば挙動の若干の違いによらず、既報<sup>7) 2)</sup>の同材料を用いた板幅・板厚の異なる貫通き裂の結果(◇・□・△印) および大きい表面き裂の結果(⊙印) が示す傾き約1の比較的狭い一つの帯域の低速度側延長上に有り、微小き裂についても $\dot{J}$ が支配力学因子であるとみて差支えないことを示している。なお、図5には筆者らと同じく304鋼を用い650°Cで試験した大谷らの微小表面き裂の結果<sup>8)</sup>の平均値を実線で示しており、それらは本微小き裂の結果とほぼ一致している。

### 3. 1. 2 低延性材の大きいき裂

低延性材例として用いた2 1/2 Cr-1Mo 鋼水焼入材の表面き裂試験片(LSC)の破面写真例を図6に示す。一定荷重下のクリープき裂伝ば試験実施後、繰返応力により破断している。同図からわかるように試験片表面付近でき裂伝ばの遅れが著しいが、この部分を除くと既報<sup>2)</sup>の304鋼の大きい表面き裂や前述の低応力負荷の微小き裂と同

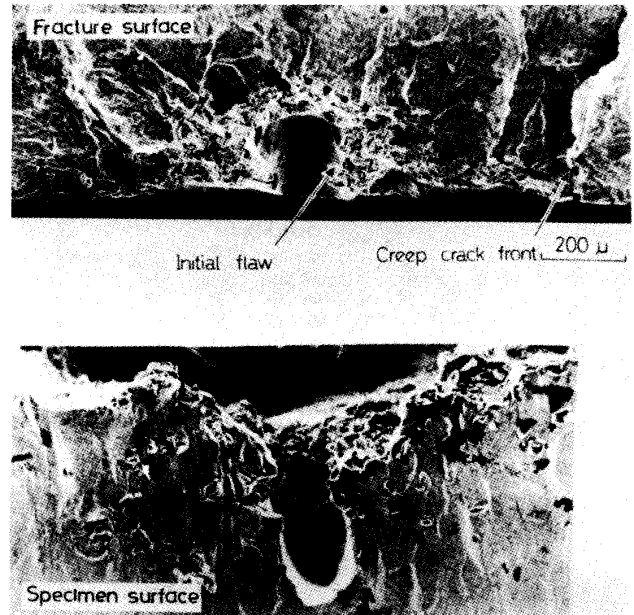


図3 一定応力試験の破面写真例  
(微小き裂、304鋼、高応力 $\sigma_{net}=260$  MPa)

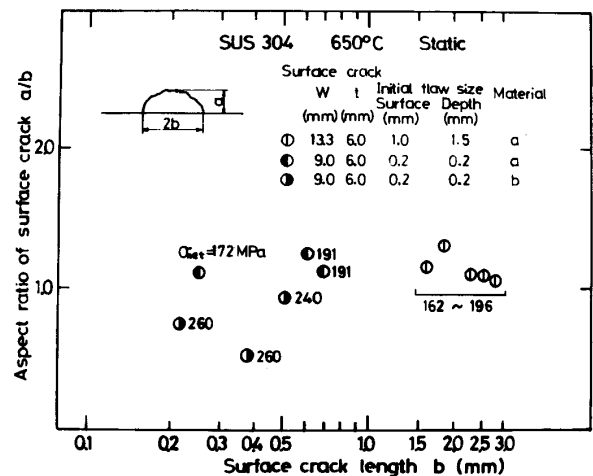


図4 試験応力と縦横比(微小き裂、304鋼)

様、ほぼ半円形状にき裂が伝ばしている。

本試験においては、上述したように試験片内部に比べ表面のき裂伝ばが著しく遅れているため、試験片表面におけるき裂伝ばがき裂全体を代表しているとは言いがたい。そこで破面から図7に示すような平均き裂伝ば速度を求めている。すなわち同一荷重下で負荷時間の異なる2つの結果を比較し、それらのき裂伝ば面積の差を平均き裂前縁長さで除して得ている。これを前述の304鋼の微小き裂と同様 $\dot{J} = \sigma_{net} \dot{V}$ に対して図示すると図8のようになる。Vは本材料の低クリープ延性のため表面観察に用いた低倍率(×20)の望遠顕微鏡では実測できず試

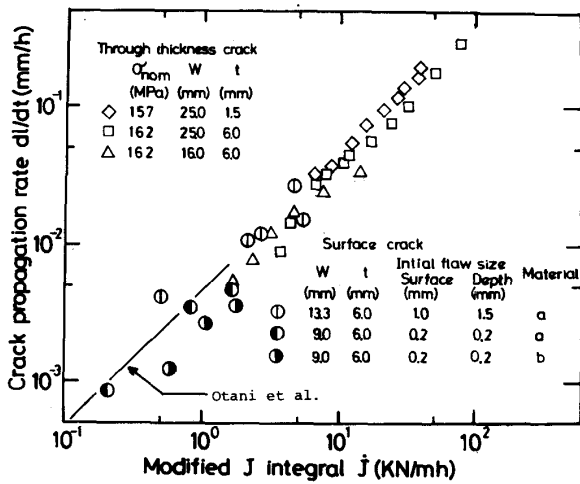


図5 j-dl/dt線図(304鋼、微小き裂)

試験片表面から変位取出棒を介して差動変圧器により測定し、 $\dot{V}$ は得られたVの時間線図の傾きから求めている。本試験結果(●・●印)は、既報の同材料を用いた貫通き裂の結果(◇・□・△印)のバラツキを示す帯域(図中実線)内にあり、低延性材のこの例でも延性材である304鋼の場合と同様、支配力学因子が $\dot{J}$ とみなせ、これを用いることによって、表面クリープき裂の伝ば速度を貫通き裂の伝ば速度と関係づけ得ることを示している。微視的破面様相は粒界クリープ破壊である。

試験片表面付近におけるき裂伝ばの遅れは、この材料の貫通き裂の伝ばにみられるトンネル化現象と関連しているものと考えられる。前述したように延性材である304鋼の表面き裂では試験片表面付近におけるき裂伝ばの遅れは認められず、貫通き裂においてもき裂のトンネル化は低延性材であるCr-Mo鋼の場合ほど顕著でない。また、Cr-Mo鋼の貫通き裂試験片の側面に適当な深さの横溝を付けて試験片表面を拘束するとき裂のトンネル化は起らない<sup>3)</sup>。以上の実験事実より、表面き裂の伝ば様相の相異には材料の延性や応力状態が関与している可能性も考えられるが、その原因は明らかでない。本試験結果のように試験片表面付近でき裂伝ばが遅れ、内部で進むような場合は、実機の健全性評価において事実を誤認する危険性もあり、今後原因を明らかにすることが重要である。

### 3. 2 繰返応力下のき裂伝ば

ここでは、従来実験的データの得られていないクリープが顕著な温度域における繰返応力下の大きい表面き裂および微小表面き裂の伝ば試験を実施した結果について

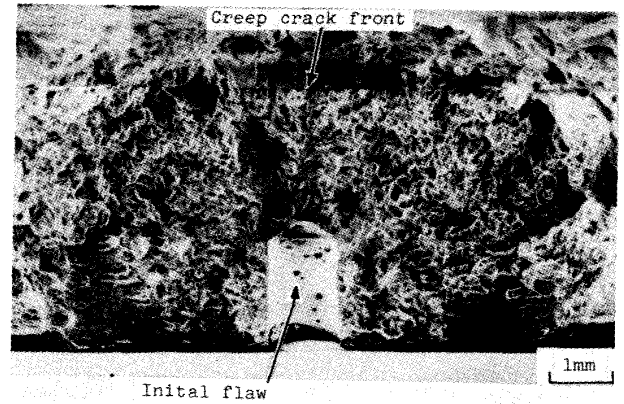
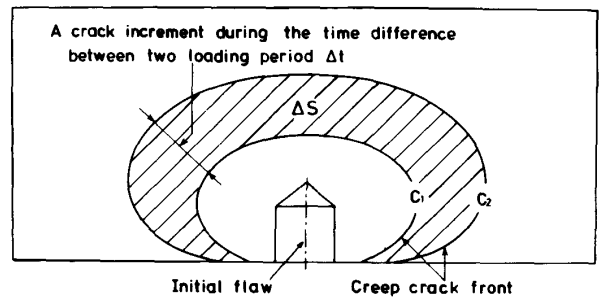


図6 一定応力試験の破面写真例(大きいき裂、2 1/4Cr-1Mo鋼)



$$\frac{dl}{dt} = \Delta S / (\Delta t \cdot C_{ave}) \quad C_{ave} = (C_1 + C_2) / 2$$

図7 表面き裂模型図(2 1/4Cr-1Mo鋼)

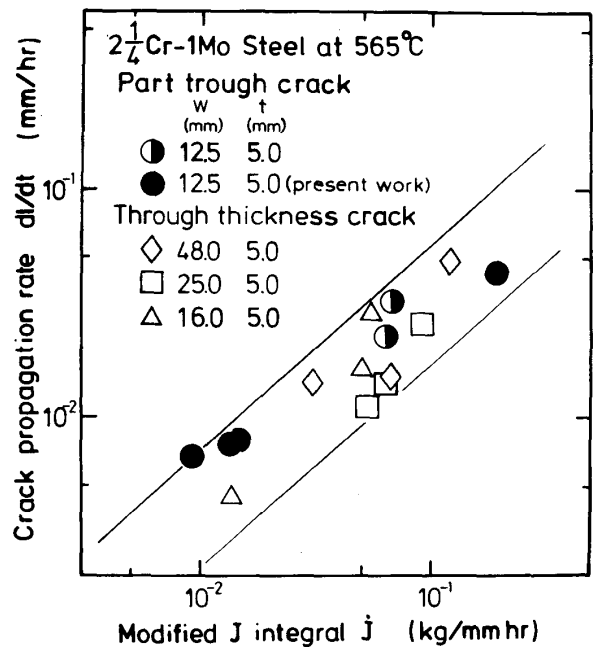


図8 j-dl/dt線図(2 1/4Cr-1Mo鋼)

報告する。いずれの試験も、供試材は304鋼であり、繰返応力は図9に示すように応力比  $R=0.05$ 、繰返速度  $f=2\text{cpm}$  の矩形波片振引張である。また、破面上で表面き裂の2次元き裂伝ば挙動を求めるため、試験中に応力比および繰返速度をそれぞれ  $R=0.5$ 、 $f=4\text{cpm}$  と変えて破面上にピーチマークを入れている。最終破断は、試験終了後常温疲労によっている。

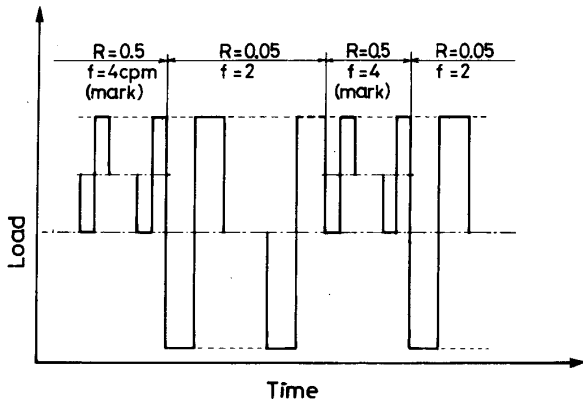


図9 繰返応力プログラム

3. 2. 1 大きいき裂

表面き裂試験片 (LSC) を用いて試験実施後、得られた破面写真例を図10に示す。破面上に見られるピーチマークを基に測定したき裂前縁の縦横比  $a/b$  の変化を図11に示す。 $a/b$  は、後述するようなき裂伝ばの支配力学因子の変遷に拘らずほぼ1で半円を示し、表面方向と深さ方向のき裂伝ば増分もほぼ等しい。そこで、き裂の最深点の1応力サイクル当りのき裂伝ば量を最深点での Shah と Kobayashi の解<sup>10)</sup>を用いた応力拡大係数幅  $\Delta K$  で整理した結果を図12に示す。同じ点の単位高応力負荷時間当りのき裂伝ば量  $da/dt$  を一定応力下のクリープき裂伝ば試験と同様  $\dot{J} = \sigma_{net} \dot{V}$  で整理した結果を図13に示す。本試験結果 (○印) は、図12において304鋼を用いて同一試験条件下で先に実施した板幅の異なる貫通き裂の結果の  $\Delta K$  支配域を示す実線に低伝ば速度域で収束し、この領域で  $\Delta K$  が支配力学因子であることを示しており、図13においては図12と逆に高き裂伝ば速度域において静的クリープき裂伝ば速度域を示す帯域 (○・●・●印) の高  $\dot{J}$  域で傾きを含めて一致する傾向があり、 $\dot{J}$  が支配力学因子であることを示している。微視的破面様相は、図12と図13に矢印で示したき裂伝ば速度より低伝ば速度側では全域ストライエーション状模様であり、矢印点で初めてディンプルが現れ、それ以上のき裂伝ば速度では全域

ディンプルを示した。また、矢印のディンプルの現れ初めた点は、図13において静的クリープき裂伝ば速度を示す傾きと一致する点に対応している。これらの表面き裂の伝ば挙動は、既報の貫通き裂の伝ば挙動と同様であり、繰返応力下の大きい表面き裂の伝ばが貫通き裂の伝ばと同様に取扱えることを示している。

以上のように繰返応力下の表面き裂の伝ばは、低伝ば速度域では  $\Delta K$  が、高伝ば速度域では  $\dot{J}$  が支配力学因子となったが、 $\Delta K$  にも  $\dot{J}$  にも支配されない中間速度域が既報の貫通き裂試験の場合と同様存在する。この中間速度域の微視的破壊機構は  $\Delta K$  支配域と同様ストライエーション状模様であり、き裂伝ばに負荷荷重の繰返効果が依然強く現われていることを示している。またこの領域ではき裂を含む断面が約1割しぼれている。そこでき裂伝ば試験中のしぼれを考慮し  $\Delta K$  と  $\dot{J}$  を求め、再度き裂伝ば速度を整理しなおすと図14と図15のようになる。図14の  $\Delta K$  線図の結果 (○印) は、初期断面を基にした図12の  $\Delta K$  線図と同様低伝ば速度域で貫通き裂伝ば速度の

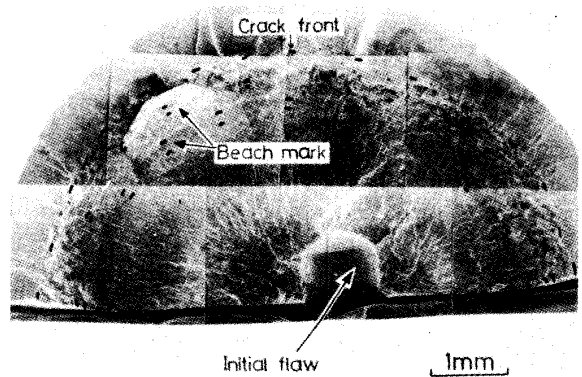


図10 繰返応力試験の破面写真例 (大きいき裂、304鋼)

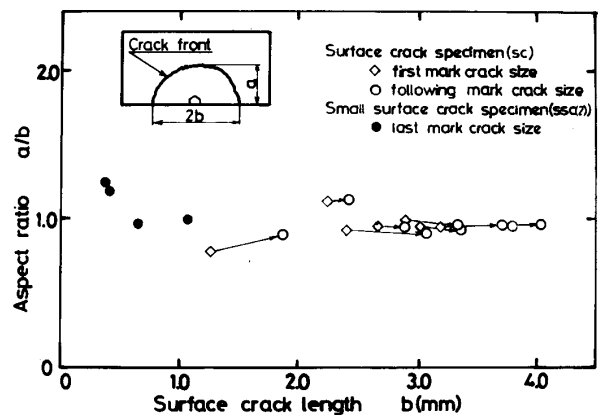


図11 表面き裂長さ と 縦横比 (304鋼)

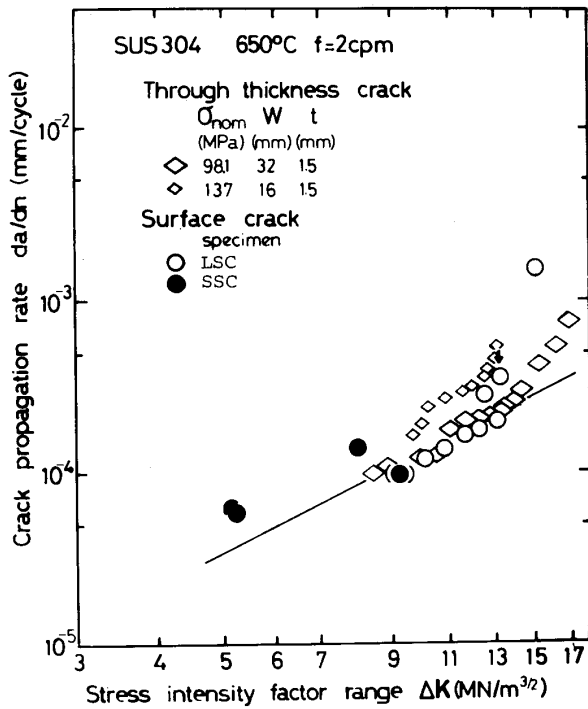


図12  $\Delta K$ -da/dn線図(繰返応力、304鋼)

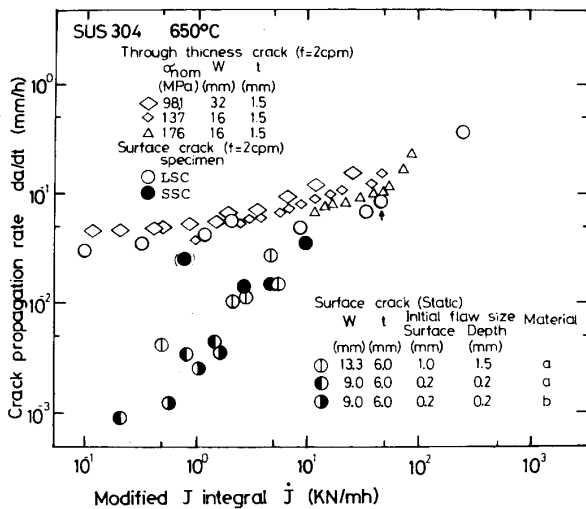


図13  $\dot{J}$ -da/dt線図(繰返応力、304鋼)

$\Delta K$ 支配域線へ収束しているが、 $\Delta K$ 支配域から遷移し始める伝ば速度は破面上にディンプルが現れ始めた矢印点とほぼ一致している。図15の $\dot{J}$ 線図は、図13との違いが対数線図上にほとんど現われておらず、図13の結果と同様ディンプルが現れ始めた伝ば速度より高速度側で $\dot{J}$ が支配力学因子となることを示している。さらに貫通き裂伝ば試験結果において、 $\Delta K$ 支配域線より20%高い伝ば速度でしぼれが10%であるという報告<sup>4)</sup>から、その伝ば速度の $\Delta K$ 値を修正すると図14の◇・◇印のようになり、

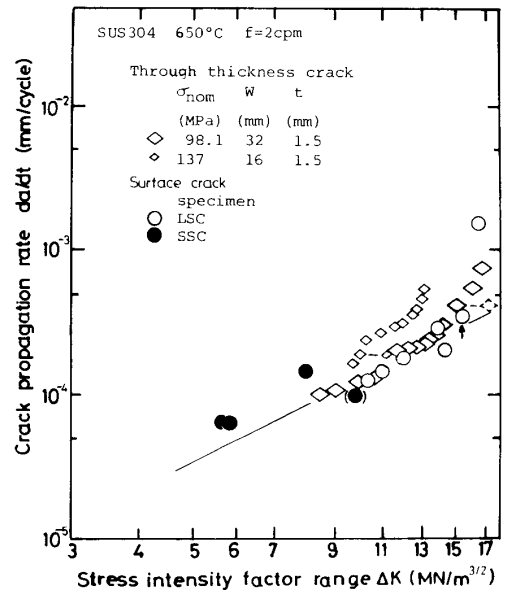


図14 しぼれを考慮した $\Delta K$ -da/dt線図(繰返応力、304鋼)

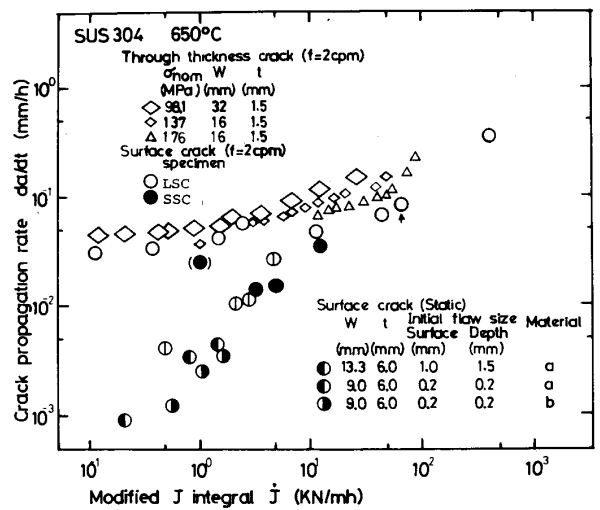


図15 しぼれを考慮した $\dot{J}$ -da/dt線図(繰返応力、304鋼)

ほぼ $\Delta K$ 支配域線上を示す。これらの結果から、しぼれを考慮し正しい断面積を基にした $\Delta K$ と $\dot{J}$ による繰返応力下の大きいき裂の伝ば速度の整理は、 $\Delta K$ から $\dot{J}$ への支配力学因子の遷移域を小さくおさえ、微視的破壊機構を $\Delta K$ 支配域ではストライエーション状模様、 $\dot{J}$ 支配域ではディンプルと対応づけ得る可能性を有し有効かと思われる。中間速度域のように比較的大きい断面のしぼれを生じた際、巨視的には残り全断面が降伏しており線形力学因子である $\Delta K$ は無効であるかにみられるが、引張

方向の比較的大きな塑性変形が累積していく場合でもき裂が大きいき裂の伝ば速度は依然小規模降伏条件を満足し $\Delta K$ がき裂伝ばを支配する力学因子に成り得る可能性があることを示唆している。

### 3. 2. 2 微小き裂

微小き裂試験片 (SSC) を用いて試験実施後、得られた破面写真例を図16に示す。大きいき裂の場合と同様、破面から求めたき裂前縁の縦横比  $a/b$  を図11に●印で示す。き裂前縁形状は、表面でのき裂半長  $b$  が 0.6 mm 以上で大きいき裂と同様  $a/b \approx 1$  と半円を示している。  $b$  が 0.6 mm 以下では  $a/b$  が 1 より若干大きくなっているが、これは初期欠陥とした小穴の  $a/b$  が約 2.0 と大きいことが影響したと思われる。大きいき裂と同様き裂最深部のき裂伝ば速度を  $\Delta K$  で整理した結果を図12に●印で示す。微小き裂の結果は、貫通き裂 (◇・◇印) や大きいき裂 (○印) の結果が収束した伝ば速度よりさらに低い伝ば速度域にあるが、図中実線で示した  $\Delta K$  支配域線と一致せず、これより若干高いき裂伝ば速度を示している。なお (●) 印は  $\Delta K$  支配域線上にあるが、これは他の微小き裂に比べ  $b$  が 1.0 mm と長いため、大きいき裂と同様な挙動を示したと考えられる。微視的破面様相はストライエーション状模様が支配的で、大きいき裂の  $\Delta K$  支配域と変わらない。次に単位高応力負荷時間当りのき裂伝ば速度を  $\dot{J} = \sigma_{net} \dot{V}$  で整理した結果を図13に●印で示す。低伝ば速度域において、貫通き裂 (◇・◇・△印) や大きいき裂 (○印) の結果が小さな傾きを示すのに比べ、微小き裂の結果は傾きが大きく静クリープき裂の結果 (①・●・●印) が示す帯域上にある。

前節の大きいき裂の場合と同様、試験中の断面のしぼれを考慮した  $\Delta K$  および  $\dot{J}$  でき裂伝ば速度の整理を行った結果をそれぞれ図14と図15に●印で示す。図14の  $\Delta K$  線図において、微小き裂の結果は  $\Delta K$  支配域線よりまだ若干高いき裂伝ば速度を示している。図15の  $\dot{J}$  線図は、初期断面形状を基にした図13の  $\dot{J}$  線図とほぼ同様な傾向を示している。

微小き裂の伝ば速度が、  $\Delta K$  で整理できた貫通き裂や大きい表面き裂の伝ば速度よりさらに低い伝ば速度域にあるにも拘らず、  $\Delta K$  ではなく  $\dot{J}$  で表わされる傾向を示すのは、き裂が小さいことに帰因する高応力負荷のため小規模降伏条件が満たされず、むしろき裂先端近傍のクリープひずみ速度場が主に影響したことによると考えられる。図17に、同一き裂伝ば速度域における微小き裂と大きいき裂の開口状態の比較例を示す。大きいき裂の先

端が閉じているのに対して微小き裂は著しく開口しており、上記の考え方を裏付けている。

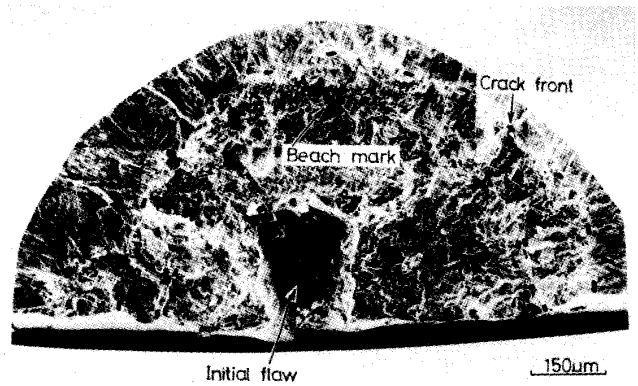
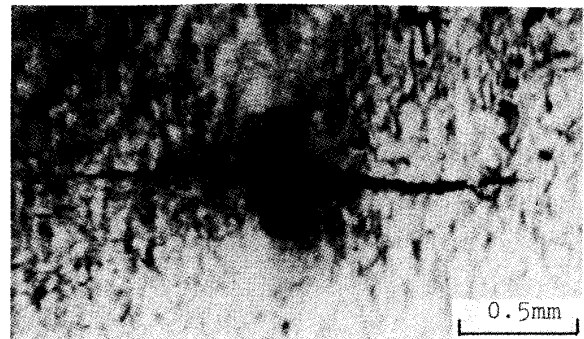


図16 繰返応力試験の破面写真例 (微小き裂、304鋼)



(a) controlled by  $K$  (large crack)



(b) controlled by  $\dot{J}$  (small crack)

図17 き裂の開口状態 (繰返応力、304鋼)

## 4. む す び

SUS 304 鋼および一部 2 ¼ Cr-1Mo 鋼について、高温クリープ条件下の表面き裂伝ば挙動を大きいき裂および微小き裂について検討し、得られた結論は次の通りである。

- (1)一定応力下のクリープき裂前縁形状は、SUS 304 鋼の微小き裂では試験応力が低い場合にはほぼ半円形状、高い場合には表面方向に長い浅い形状を示し、2 ¼ Cr-1Mo 鋼の大きいき裂ではほぼ半円形状であるが、表面では著しいき裂伝ばの遅れがみられた。
- (2)一定応力下のクリープき裂伝ば速度は、修正 J 積分  $\dot{J}$  で整理すると、SUS 304 鋼の微小き裂、2 ¼ Cr-1Mo 鋼の大きいき裂のいずれの場合も同材料の貫通き裂の結果と概略一致した。
- (3) SUS 304 鋼の繰返応力下のき裂前縁形状は、大きいき裂および微小き裂いずれの場合もほぼ半円形で、試験片表面方向と深さ方向のき裂伝ば速度はほぼ等しかった。
- (4) SUS 304 鋼の繰返応力下の大きいき裂の伝ばは、既報の貫通き裂の場合と同様低伝ば速度域では  $\Delta K$  支配、高伝ば速度域では  $\dot{J}$  支配であった。
- (5) SUS 304 鋼の繰返応力下の微小き裂の伝ばは、低伝ば速度域においても  $\dot{J}$  支配で、微視的破面様相はそれにも拘らずストライエーション状模様であった。これは、き裂が短いため小規模降伏条件が満足されないことによるものと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) L.M Wyatt and M.G. Gemmill, Proc. Joint Int. Conf. on Creep, P.7-1 (1963) IME.
- 2) 森・小寺沢, 第17回高温強度シンポジウム前刷集, P. 49 (1979).
- 3) 小寺沢・森, 材料29, 1135 (1980).
- 4) 小寺沢・森・中井, 材料, 29, 592 (1980).
- 5) G.E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", P. 472 (1976).
- 6) 大谷・小倉・久保, 機械学会論文集, 44, 1831(1978).
- 7) 小寺沢・森, 材料, 26, 948 (1977).
- 8) 大谷・中山, 材料学会第31期学術講演会前刷集, P. 255 (1982).
- 9) E.G. Ellison and D. Walton, Int. Conf. on Creep and Fatigue in Elevated Temperature Applications,

C173 (1974).

- 10) R.C. Shah and A.S. Kobayashi, ASME "The Surface Crack", P. 72 (1972).