

## 延性き裂の安定成長挙動について\*

真壁朝敏\*\*, 村上敬宜\*\*\*

## A Consideration of Stable Growth of a Ductile Crack

Chobin MAKABE and Yukitaka MURAKAMI

The deformation of a ductile crack and the strain distribution in the vicinity of the crack tip were investigated in order to study the stable growth process of a crack in a center-cracked plate of 70/30 brass. Specimens which have a short fatigue crack in its center were prepared so that the outer boundaries of the specimens did not disturb the substantial characteristics of the strain distribution near the crack tip. The distribution of strain,  $\epsilon_x$ , in the tensile direction near the crack tip is approximately expressed by the following equation regardless of the crack length,  $a$ .

$$\epsilon_x \cong C_1 \epsilon_f (a/r)^{\beta} \quad (C_1 \cong 0.10 \sim 0.13, \beta \cong 0.4 \sim 0.5, 0.01 \leq r/a \leq 0.5)$$

where  $\epsilon_f$  is the fracture ductility in the tensile test of a round bar and  $r$  is the distance from the crack tip. The crack opening displacement,  $\delta(x)$ , near the crack tip has a unique correlation with the distance,  $x$ , from the crack tip, that is,

$$\delta(x) \propto x/a$$

These two equations imply that the following equation holds between the rate of crack growth,  $da$ , due to the increase in external loading and the crack length,  $a$ , i. e.

$$da/d\epsilon_0 \propto a$$

where  $\epsilon_0$  indicates the external average strain defined by a gauge length of 20 mm.

**Key Words:** Fracture, Stable Fracture, Ductile Crack, Strain Distribution, Grid Sheet, Crack Shape, Tensile Test, 70/30 Brass

## 1. 緒 言

延性安定・不安定破壊に関する研究が、ライン管、圧力容器の破壊および発電プラントの安全性の問題等に関連して最近盛んに行われつつある<sup>(1)(2)</sup>。

全ひずみ理論に基づく小規模降伏状態での静止き裂先端近傍の応力場やひずみ場はHRR特異性を有することが知られている<sup>(3)(4)</sup>。しかし、静止き裂の場合でも塑性変形が進行し、ひずみがある程度以上大きくなるとHRR特異性が失われる<sup>(5)(6)</sup>。また、進展する延性き裂先端近傍の応力場やひずみ場をHRR場として一般的に評価するのは不合理であることが最近の研究で明らかにされつつある<sup>(7)</sup>。現在、延性き裂の進展を特徴づけるパラメータとしては、 $J$ 積分、き裂開口量<sup>(8)</sup>あるいは塑性仕事  $W_p$  のき裂長さに対する変化に基づく Tearing Modulus ( $T$ ,  $T_s$ ,  $T_w$ )<sup>(9)</sup> そしてき裂先端開口角(CTOA)<sup>(10)</sup>等が考えられている。これらの研究では、ASME や JSME の弾塑性破壊じん性試験方法<sup>(11)</sup>が考慮され、実用的な高じん性材料について検討してい

る。

本研究では基礎実験的立場から延性き裂進展挙動を解明することを目的とした。そのため、これまでの研究で採用されてきた ASME および JSME 規準 (あるいは推奨値) を考慮せず、有限板幅の影響を少なくするため初期き裂長さ  $2a_0$  と板幅  $2W_0$  の比が  $a_0/W_0 \cong 0.10 \sim 0.23$  の中央き裂試験片 (CCP 試験片) について実験を行い、進展するき裂の先端近傍の観察および格子法によるき裂先端近傍のひずみ分布を測定し、その特徴を明らかにした。

## 2. 使用材料および実験方法

素材は、70/30 黄銅圧延板 (23×220×1275 mm) である。それを 400°C で 40 分間焼なました後、試験片を製作した。表 1 にその化学成分と機械的性質を示す。図 1 に試験片形状を示す。試験片は中央き裂試験片とするため、あらかじめ人工穴を加工し、図 2 に示すように片振り疲労試験によって初期き裂を作製した。このときの応力振幅は 190~220 MPa で、応力比は  $R \cong 0$  である。穴径  $d$  を含めた初期き裂長さ  $2a_0$  の板幅  $2W_0$  に対する割合は、 $a_0/W_0 \cong 0.10, 0.20, 0.23$  の 3 とおりにした。これらの値は、JSME 規準 (推奨値)；JSME S001<sup>(11)</sup>における  $0.5 \leq a_0/W_0 \leq 0.75$  よりかなり

\* 昭和 61 年 11 月 3 日 中国四国支部・九州支部合同大分地方講演会において講演。原稿受付 昭和 61 年 4 月 24 日。

\*\* 正員、琉球大学短期大学部 (〒903-01 沖縄県西原町千原 1)。

\*\*\* 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

小さいがその理由はき裂先端近傍の変形の特徴に有限板幅の影響が入るのを避けるためである。

引張破壊試験は、き裂作製後、真空中でさらに400°C、40分間焼なました後行った。き裂先端付近の状況は顕微鏡(×50, ×100, ×200)により直接観察し、ひずみは写真食刻法<sup>(10)</sup>により耐熱格子<sup>(11)</sup>を試験片に焼き付け、格子間隔50μmを標線間隔として測定した。

試験機は、MTS社製の電気油圧制御式引張圧縮試験機である。引張試験は、変位制御方式および荷重制御方式で引張速度はそれぞれ2.0 mm/minおよび0.98 kN/min (0.1ton/min)である。

表1 化学成分および機械的性質

Chemical composition %				Mechanical properties			
Cu	Fe	Pb	Zn	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_B$	$\sigma_{TS}$	$\epsilon_f$
70.7	0.01	1	bal	196	340	1088	79.1
				(20.0)	(34.7)	(119.9)	

$\sigma_{0.2}$ : 0.2% proof stress     $\sigma_B$ : Tensile strength  
 $\sigma_{TS}$ : True fracture stress     $\epsilon_f$ : Reduction of area

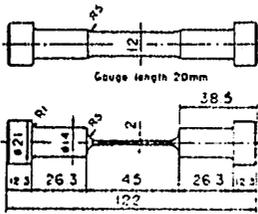


図1 試験片形状と寸法 (mm)

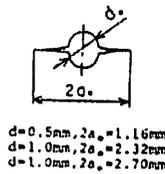


図2 き裂形状

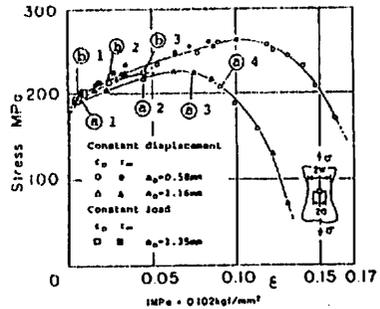
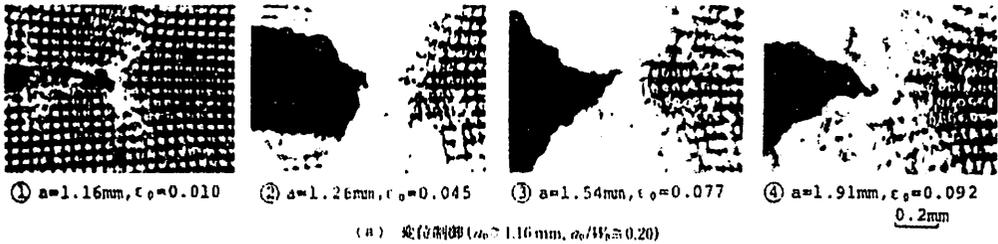
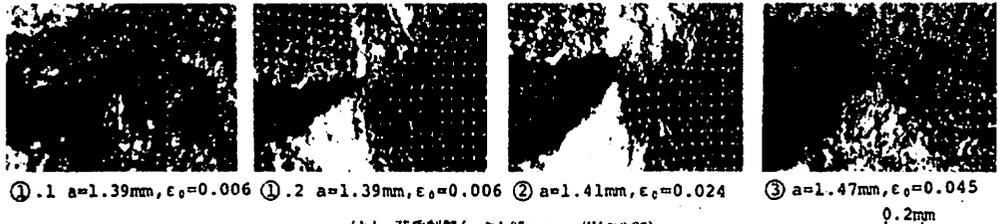


図3 公称応力-公称ひずみ線図



(a) 変位制御 ( $a_0 \approx 1.16$  mm,  $a_0/W_0 \approx 0.20$ )



(b) 荷重制御 ( $a_0 \approx 1.35$  mm,  $a_0/W_0 \approx 0.23$ )

図4 引張過程におけるき裂進展およびき裂形状変化の観察 (引張方向↑)

3. 実験結果および考察

3.1 延性き裂成長挙動の観察 図3に応力-ひずみ線図を示す。ひずみは図中の○△□印の場合が、標線間20 mmの公称ひずみ  $\epsilon_0$  であり、●▲■印がき裂の中心より引張方向に10 mm程度離れた位置における公称ひずみ  $\epsilon_s$  (標線間隔0.5 mm) である。

図4に変位制御(a)および荷重制御(b)の状態でのき裂安定成長の様子を示す。写真の下の番号は図3の図中の番号の位置に対応した観察点を示している。(a)の変位制御の場合は、変形初期にき裂先端が鈍化するが、き裂の安定成長域では、き裂開口角(COA)は次第に小さくなっていくようであり、COAが一定になる兆候はみられない。(b)の荷重制御の場合は、き裂先端の鈍化後、最高応力  $\sigma_B$  に達し、ただちに不安定破壊した。なお、図4(b)①、②は同じ状態の写真であるが、(b)①は照明光を試験片面に垂直

に入射したもので、(b)①、2は他の写真と同様に斜めから入射したものである。照明光の斜入射<sup>(11)</sup>により格子変形の測定が可能になる。

延性き裂の成長と公称応力の関係を図5に示す。変位制御の場合(●, ▲印), 延性き裂は最高応力 $\sigma_H$ 以前ではわずかに進展し, き裂の安定成長過程はほとんどが $\sigma_H$ 以後に占められている。その際, き裂は除荷を伴いながら加速的に成長していく。それに対し, 荷重制御(△印)ではき裂がわずかに成長した後,  $\sigma_H$ に達し, 不安定破壊に至った。

3.2 延性き裂安定成長挙動の特徴と成長条件

構造物や機械の延性破壊の安定性は, その系全体あるいは一部分のコンプライアンスに関係し<sup>(11)(12)</sup>, 高じん性材料の延性き裂進展を支配するパラメータとしては, き裂開口角<sup>(6)</sup>, Tearing Modulus<sup>(7)</sup>等が提案されている。本節では, 従来の研究と材料や実験条件を異にすることにより延性き裂安定成長のクライテリオンに関する新しい知見が得られることを期待し, 高じん性材料とは性質の異なる70/30黄銅における延性き裂安定成長の特徴について考察する。観察結果に基づき, き裂先端付近のひずみ分布およびき裂形状の変化を調べた結果を中心に検討する。

3.2.1 き裂進展に伴うき裂先端付近のひずみ分布

の変化 図6にき裂先端を原点としたき裂進展方向(荷重軸に垂直方向)の引張方向ひずみ分布を示す。横軸はき裂先端からの距離 $r$ をき裂半長 $a$ で無次元化した量, 縦軸は引張方向ひずみを対数ひずみ $\epsilon_y$ で表している。図6(a), (b)は変位制御の場合で, (c)が荷重制御の場合である。本実験のき裂長さの範囲では用いた50 $\mu$ mの格子間隔ではき裂先端の極近傍のひずみ分布を詳細に測定するのは困難であったが,  $\epsilon_y$ と $r/a$ の傾向を調べるには十分な細かさであった。き裂進展および塑性変形の増加に伴ってき裂進展方向のひずみ分布は, 次第になだらかとなっていき, ある傾きに漸近する。その傾きは図6(a)の図中の $\sphericalangle$ で示すHRR特異性[加工硬化指数 $n \cong 8$ に対し, こう配 $-n/(n+1) \cong -0.89$ ]とは異なっており, HRR特異性による延性き裂進展条件の検討は本実験では不合理であることがわかった。この傾向は, 著者の一人らによる有限要素解析の結果<sup>(6)</sup>によっても示されている。なお, 変位制御[(a), (b)]と荷重制御(c)の傾向は若干異なっているようにみえる。しかし, 図6(c)に併記した図6(b)の $\sigma_H$ 付近のひずみ分布(×印)から, 両者の $\sigma_H$ 付近のひずみ分布は似通っていることがわかる。

図6は, き裂進展がちょうど停止した状態でのひず

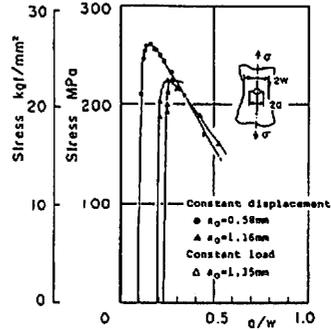
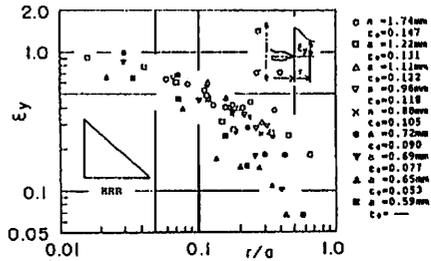
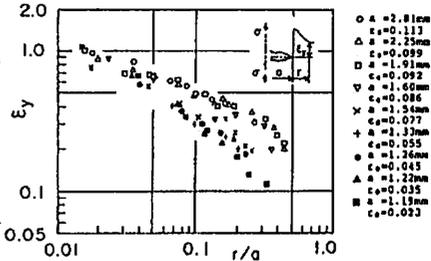


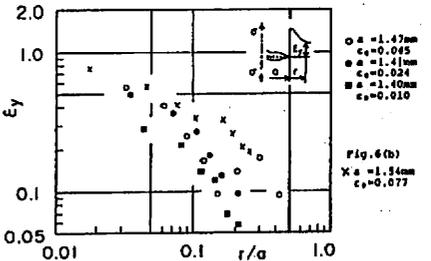
図5 無次元き裂長さ $a/W$ と応力の関係( $a, W$ はそれぞれき裂進展後のき裂および板幅の半長)



(a) 変位制御方式 ( $a_0 \cong 0.58$  mm,  $a_0/W_0 \cong 0.10$ )



(b) 変位制御方式 ( $a_0 \cong 1.16$  mm,  $a_0/W_0 \cong 0.20$ )



(c) 荷重制御方式 ( $a_0 \cong 1.35$  mm,  $a_0/W_0 \cong 0.23$ )

図6 き裂進展方向における引張方向ひずみ分布

み分布であるが、き裂は再負荷により再び鈍化するこ  
となく連続的に、ただちに進展していく。このことか  
ら図6におけるき裂先端極近傍でのひずみ分布はき裂  
がまさに伝ばする限界状態に近い状態での分布を示す  
ものと考えられる。

限界ひずみ  $\epsilon_{cr}$  の存在を仮定すると、 $\epsilon_y$  はき裂先端  
に近づくとつれ次第に  $\epsilon_{cr}$  に漸近すると考えられる。  
さらに  $\epsilon_{cr}$  が使用材料の破断延性値  $\epsilon_f \cong 1.5 \sim 1.6$  と同  
程度の値であると仮定すると、図6のひずみ分布から  
 $\epsilon_y$  はき裂長さにかかわらず無次元距離  $r/a \cong 0.007$   
 $\sim 0.01$  で  $\epsilon_{cr}$  にほぼ一致しているとみなすことができ

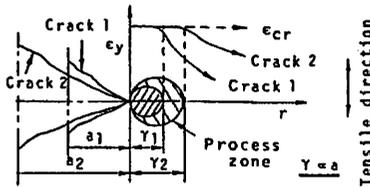
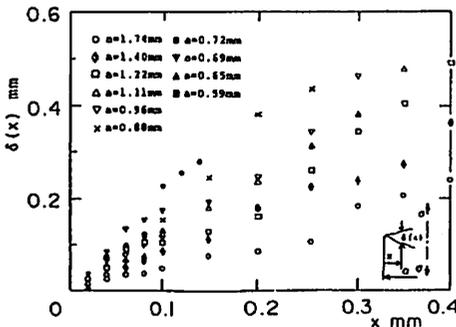
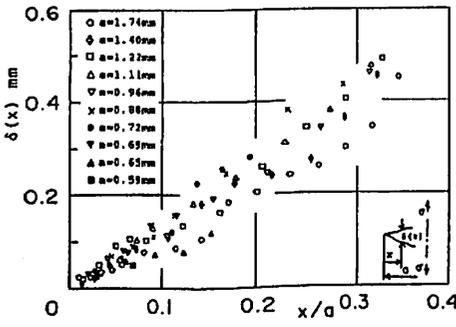


図7 き裂先端近傍の状態の模式図(き裂は、き裂  
半長を図示し、2個のき裂の先端をそろえ  
た)



(a) き裂開口量  $\delta(x)$  と測定位置  $x$  との関係



(b) き裂開口量  $\delta(x)$  と無次元距離  $x/a$  の関係

図8 き裂開口状況(変位制御:  $a_0 \cong 0.58$  mm, 白ぬ  
きおよび×印は  $\sigma_f$  以後, 黒ぬり印は  $\sigma_f$  以前  
を示す)

る。  $\epsilon_y \cong \epsilon_{cr}$  に一致するときの  $r/a$  を  $(r/a)_c$  とすると、  
延性き裂進展量に直接関係するプロセスゾーンの大き  
さは、この  $(r/a)_c$  の値に関係すると思われる。そして  
以上の考察から、プロセスゾーンは、図7および式  
(1)に示すようにき裂長さに対応した大きさをもって  
いると類推される。

$$\gamma \propto a \quad (\gamma: \text{プロセスゾーン幅}) \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、本実験の場合においては、き裂が長くな  
るほど、き裂成長速度(例えば、後述する  $da/d\epsilon_0$ ) が速  
くなるようである。そして、図7に示すようにき裂は  
き裂先端極近傍のひずみ  $\epsilon_y$  が限界値  $\epsilon_{cr}$  に達しなが  
ら連続的に進展していくものと思われる。

また、本実験の初期き裂長さの範囲では変位制御の  
場合、き裂進展過程はほとんどが  $\sigma_f$  以後に占められ  
るが(図5)、 $\sigma_f$  以後、き裂先端近傍のひずみ分布は、  
無次元距離  $r/a$  によって決まり[図6(a), (b)の○  
□△▽×印], 測定範囲  $0.01 \leq r/a \leq 0.5$  において、次  
の関係で表される。

$$\epsilon_y \cong C_1 \cdot \epsilon_{cr} \cdot (a/r)^\beta \dots\dots\dots (2)$$

式(2)において  $C_1, \beta$  は定数であり、初期長さ  $a_0$  に  
よらず、それぞれ  $C_1 \cong 0.10 \sim 0.13, \beta \cong 0.4 \sim 0.5$  となっ  
ている(ただし、 $\epsilon_{cr} \cong \epsilon_f \cong 1.5$  とした)。

3.2.2 き裂進展に伴うき裂形状の変化 図  
8~10に引張過程においてき裂形状の変化する様子を  
示す。縦軸は、き裂先端を原点としたき裂中心軸方  
向への距離  $x$  の位置でのき裂開口量  $\delta(x)$  をとってい  
る。

図8は、変位制御で初期き裂半長  $a_0 \cong 0.58$  mm の場  
合である。(a)は  $\delta(x)$  と  $x$  の関係であるが、これか  
らわかるように本実験ではき裂進展条件としてき裂開  
口角(COA)が一定とするのは適当でない。これに対  
し、(b)はき裂半長  $a$  での無次元距離  $x/a$  で整理した  
もので、き裂長さにかかわらず、ほぼ  $\delta(x) = f(x/a)$   
の関係が成立している。図9は変位制御の場合で図8

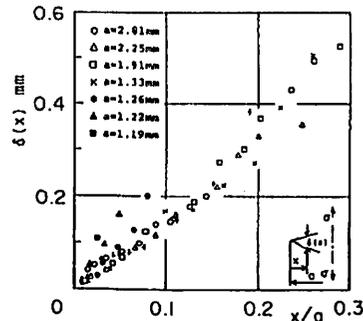


図9  $\delta(x)-x/a$  の関係(変位制御,  $a_0 \cong 1.16$  mm)

より初期き裂長さが2倍程度長い  $a_0 \cong 1.16$  mm の場合であるが、この場合も  $\delta(x) = f(x/a)$  の関係がある。ただし、き裂進展過程初期では鈍化の影響のため若干異なる傾向を示している。図10は、荷重制御の場合 ( $a_0 \cong 1.35$  mm) であるが、 $\sigma_B$  に達した後、ただちに不安定破壊に至ったため、十分な検討はできなかったが、ほぼ同様な傾向が認められる。

図11は、変位制御における標線間(20 mm)の公称ひずみ  $\epsilon_0$  と初期き裂半長  $a_0$  での無次元き裂長さ ( $a/a_0$ ) の対数との関係である。 $\sigma_B$  以後、両者にはほぼ直線関係があり、次の関係が成立している。

$$da/d\epsilon_0 \propto a \dots\dots\dots (3)$$

図12は、以上の実験結果をもとにしたき裂進展挙動の模式図である。大小2個のき裂の先端部分の変化をモデル化したものである。負荷の際、き裂先端から引張方向側にわずかにずれた部分の変位量を  $\Delta v/2$  とし、き裂半長  $a_1, a_2$  に対し、き裂がそれぞれ  $\Delta a_1, \Delta a_2$  だけ進展したとする。き裂進展後の元のき裂先端の位置での開口量を  $\Delta \delta$  とし、き裂伝ばの限界状態を考慮すると、 $\Delta v \cong \Delta \delta$  が成り立つ。したがって、図8~10の結果から図12(b)に示すように横軸のき裂半長での

無次元化により、き裂先端部分の形状がき裂長さによらずほぼ一致するので

$$\Delta a_1 / (a_1 + \Delta a_1) \cong \Delta a_2 / (a_2 + \Delta a_2)$$

が成り立つ。ここで  $\Delta a \ll a$  だから

$$\Delta a_1 / a_1 \cong \Delta a_2 / a_2 \dots\dots\dots (4)$$

き裂伝ば量が微小として、 $\Delta a \rightarrow da, \Delta v \rightarrow dv$  とすると

$$dv \propto da/a \text{ または } da/dv \propto a \dots\dots\dots (5)$$

の関係が成立する。

最高荷重以後、くびれ部にひずみが集中するので、 $\Delta \epsilon_0 \propto \Delta v$  が成立するとすれば式(3)と式(5)は対応する。

したがって、図6のひずみ分布に示される“き裂がき裂長さによらずほぼ比例して加速的に成長する”ということがき裂形状にも反映していることになる。

これまでの多くの研究<sup>(7)(8)</sup>においては、延性き裂の安定成長時には、理論的にき裂先端開口角(CTOA)が一定であると考えられてきたが、以上の結果により必ずしもその成長条件が成立していないことがわかった。

き裂安定成長時の大部分において、き裂先端部付近のひずみ分布、き裂先端部形状が、測定位置のき裂半長による無次元化により、き裂長さによらず、ほぼ同一形状となるのが本実験結果の特徴である。このような特徴は、理論的にもまだ十分検討されておらず、高じん性材料と延性材料による違いであるのか、実験条

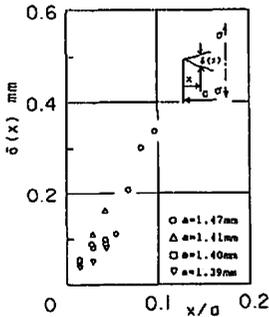


図10  $\delta(x)-x/a$  の関係 (荷重制御,  $a_0 \cong 1.35$  mm)

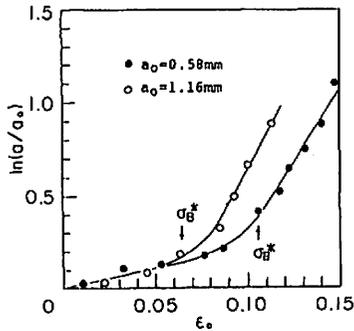


図11 無次元き裂長さ と 標線間ひずみの関係

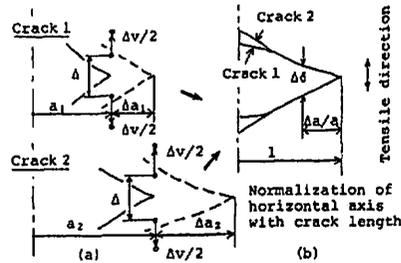
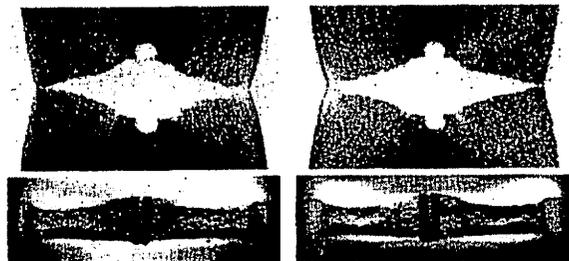


図12 き裂形状の変化とき裂進展量の関係



(a) 変位制御 ( $a_0 \cong 1.16$  mm) (b) 荷重制御 ( $a_0 \cong 1.35$  mm)

図13 破断面形状

件の違いによる結果であるのか今後検討する予定である。また、以上の議論は、き裂が伝ばしていくとき、き裂先端近傍が受けるひずみ履歴を含んだ状態に関するものであるが、この履歴の効果の定量的評価についても検討の必要がある。

**3・3 破面観察** 図13に破断面形状を示す。(a)が、変位制御( $a_0 \cong 1.16$  mm), (b)が荷重制御( $a_0 \cong 1.35$  mm)の場合である。他の報告<sup>(1)</sup>と同様に、変位制御では、破面全体が巨視的にほぼ平らであり、き裂の安定成長の痕跡が全体的に残されている。それに対し、荷重制御では最高荷重以後、不安定破壊が生じ、その部分は破面がV字形になっている。また、初期状態より板厚がほとんど変化しない穴部中央部と延性き裂進展領域の板厚の差から、本実験条件下ではき裂は著しい断面収縮を伴いながら進展していることがわかる。図6~12の結果が、このような断面収縮の影響のもとで得られたものであることは注意すべきであると思われる。

#### 4. 結 言

延性安定、不安定破壊は、これまで、高じん性材料を中心に $J$ 積分や塑性仕事等に関連した見地から検討され、破壊を支配するパラメータとしては、き裂先端開口角(CTOA)やTearing Modulus等が考えられている。

本研究では、実験・観察に基づき、き裂形状およびき裂先端付近のひずみ分布を測定することにより、延性き裂安定成長挙動を検討した。用いた材料が70/30黄銅であることも本研究の一つの特徴である。

これまでの高じん性材料の場合の報告にはみられない結果が得られたが、それらをまとめると以下のようになる。

(1) 本実験においては、き裂先端近傍のひずみ場はき裂進展過程および塑性ひずみ変化の広範囲においてHRR場とはならない。

(2) 延性き裂安定成長時には、き裂はき裂長さに比例して加速的に成長するが、それはき裂先端の極近傍のプロセスゾーン幅 $\gamma$ が、き裂長さに比例することと関連していると考えられる。

(3) き裂は、き裂先端の引張方向ひずみ $\epsilon_y$ がある限界値 $\epsilon_{cr}$ に達しながら連続的に進展していると考えられる。なお、限界ひずみ $\epsilon_{cr}$ は、素材の破断延性値 $\epsilon_f \cong 1.5 \sim 1.6$ に近い値である。

(4) 変位制御においては、き裂成長過程は、ほとんど最高荷重以後に占められる。最高荷重以後でのき裂進展方向のひずみ分布 $\epsilon_y$ は、試験片の周辺境界の影響がなければき裂長さにかかわらず、き裂先端からの無次元距離 $r/a$ によって本実験の測定範囲 $0.01 \leq r/a \leq 0.5$ において次のように表すことができる。

$$\epsilon_y \cong C_1 \cdot \epsilon_{cr} \cdot (a/r)^\beta$$

$$(C_1 \cong 0.10 \sim 0.13, \beta \cong 0.4 \sim 0.5, \epsilon_{cr} \cong \epsilon_f \cong 1.5)$$

(5) き裂が伝ばを開始すると、き裂先端形状はき裂の進展に伴って逆に先端がとがっていく。き裂進展量 $da$ とき裂先端の近傍の引張方向変位増分 $dv$ には次の関係がある。

$$da/dv \propto a$$

#### 文 献

- (1) 矢川、機論、48-425, A(昭57), 3.
- (2) 町田編、延性破壊力学、(昭59), 189, 日刊工業新聞社.
- (3) Hutchinson, J. W., *J. Mech. Phys. Solids*, 16 (1968), 13.
- (4) Rice, J. R. and Rosengren, G. F., *J. Mech. Phys. Solids*, 16 (1968), 1.
- (5) 村上・多比良、機論、51-463, A(昭60), 883.
- (6) 青木・ほか3名、機論、51-463, A(昭60), 824.
- (7) 例えば、坂・ほか3名、機論、47-424, A(昭56), 1301. 坂・阿部、機論、49-438, A(昭58), 172.
- (8) 例えば、三好・ほか3名、機論、50-453, A(昭59), 904.
- (9) 日本機械学会基準・弾塑性破壊靱性 $J_{IC}$ 試験方法, JSME S001, (昭57), 日本機械学会.
- (10) 永井・ほか2名、日本造船学会論文集, 124 (昭43), 355.
- (11) 小幡・島田、非破壊検査, 27-8 (昭53), 493.