

## 安定き裂先端近傍におけるボイドの形成について\*

小栗久和\*<sup>1</sup>, 本間寛臣\*<sup>2</sup>, 平河昌己\*<sup>3</sup>

## Void Formation around a Stably Growing Crack Tip

Hisakazu OGURI, Hiroomi HOMMA, and Masami HIRAKAWA

Voids formed around the tip of a stably growing crack in SM50A steel were observed in every 10  $\mu\text{m}$  thickness of the specimen through an optical microscope. The results showed that the shape of voids was disklike, the thickness of which was in the direction of the specimen thickness. The void dimensions increased with the  $J$ -integral level, maintaining a similar configuration. The density of void distribution ahead of the stable crack became higher as the  $J$ -integral level increased, but it was so low that coalescence of the voids and the crack resulted in a zigzag crack front.

**Key Words:** Ductile Fracture, Crack Propagation,  $J$ -integral Stable Crack Growth, Voids

## 1. 緒 言

金属材料の延性安定き裂は、負荷の上昇とともに、次のような過程を経て進展する。すなわち、鋭いき裂先端が鈍化し、き裂先端近傍において第二相粒子を核としたボイドが発生し、ボイドの成長と合体により安定き裂が進展する。このように、ボイドは安定き裂の進展において重要な役割を演じていることから、ボイドの発生、成長および主き裂との合体機構を解明することは、金属材料の安定き裂進展機構を研究する上で重要である。

このような背景から、安定き裂先端近傍に形成されるボイドに関しては、多くの研究がなされている。特にプロセスゾーンにおけるボイドの合体が微視的なき裂進展を導くことから、宮本ら<sup>(1)</sup>はアルミニウム合金に対して、プロセスゾーンの変形の局所化、ボイドの変形量などを、ボイド材の構成式を用いて、二次元の有限要素法により解析している。また、東郷ら<sup>(2)</sup>は溶

接構造用圧延鋼材に対して、実験と有限要素法により、延性き裂発生の限界ボイド体積率の適用性について検討している。

これらの例のように、二次元有限要素法を用いた延性破壊における微視的破壊機構の解析では、二次元的なボイドの成長を取扱うことになるが、実際には、ボイドの形状および分布は三次元的である。これを二次元的に取扱うことの妥当性を検討するためには、ボイドの形状・合体および成長を三次元的に調べ、さらにき裂先端近傍におけるボイドの分布状態を明らかにする必要があると思われる。しかしながら、これらを明らかにした例は見当たらない。そこで本研究では、溶接構造用圧延鋼材(SM50A)を供試材とし、安定き裂先端近傍に形成されるボイドについて、その三次元的な形状・成長過程および分布を明らかにし、それらと $J$ 積分値との関連を調べることを目的とした。

## 2. 実験方法

**2-1 供試材および試験片** 本実験で使用した供試材は溶接構造用圧延鋼材(SM50A)の市販品である。表1, 2にその化学成分と機械的性質を示す。

試験片は図1に示すような、幅48 mm, 板厚25 mmのコンパクトテンション試験片である。き裂進展

\* 平成元年11月10日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成元年5月8日。

<sup>1</sup> 正員、岐阜工業高等専門学校(〒501-04 岐阜市本巣郡真正町上真桑2236-2)。

<sup>2</sup> 正員、豊橋技術科学大学(〒440 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。

<sup>3</sup> 川崎重工業(株)(〒504 各務原市川崎町1)。

方向は圧延方向と垂直になるように加工した。ノッチ先端には約 3 mm の疲労予き裂を導入し、実験に供した。

**2・2 実験装置および方法** 本実験で使用した装置の概略を図 2 に示す。試験片にはクローズドループ式電気油圧制御式材料試験機より、約 490 kN/s の速度で引張荷重が作用された。負荷中の荷重と荷重線変位はロードセルとクリップゲージにより検出された。両データは X-Y レコーダに記録されると同時に、A/D 変換器を通してパーソナルコンピュータに入力され、このデータをもとに、逐次積分値が計算・表示され、所定の値になったらただちに除荷された。

**2・3 ボイドの観察方法** 上記の方法で負荷した試験片から、図 3 に示すように 1 個の試験片に対し、光学顕微鏡によるき裂側面の観察試料(a)と、走査電子顕微鏡による破面の観察試料(b)の 2 個の観察試料を作製した。試料(a)は樹脂で充てんし、き裂側面を板厚中心部から表面方向に向かい、約 10 μm ずつバフ研磨し、その都度光学顕微鏡で写真撮影を行い、板厚方向に約 0.5~0.7 mm にわたるき裂側面の連続写真を撮影した。試料(b)は低温で脆性破壊させた後、走査電子顕微鏡によりき裂先端近傍のディンプルを観察した。

表 1 供試材の化学成分

(wt %)				
C	Si	Mn	P	S
0.13	0.30	1.16	0.018	0.004

表 2 供試材の機械的性質

E (GPa)	$\sigma_s$ (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	Elong.(%)
196	309	510	37

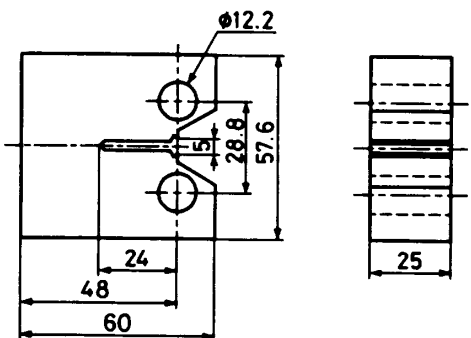


図 1 試験片の形状と寸法

### 3. 実験結果および考察

**3・1 ボイドの形状と成長挙動の特徴** まず、図 4 に示すように、き裂進展方向に X 軸、き裂面に垂直な方向に Y 軸、板厚方向に Z 軸をとる座標系を板厚中央のき裂先端部に定める。

本実験における荷重範囲は、図 5 のき裂進展抵抗曲線に示すとおり、き裂の鈍化域から、安定き裂進展域にわたっている。負荷された試験片の、X-Y 平面におけるき裂先端近傍の、板厚 (Z) 方向に対する連続写真の一例を図 6 に示す。観察開始時の面を Z=0 とした。写真左側の数字は、この観察開始面からの Z 方向の距離である。図 7 には、破面のき裂先端近傍の走査電子顕微鏡写真を示す。延性破面より前方 (右側) に大きなディンプルが形成されているのがわかる。また、図 6 に示すような連続写真をもとに、ボイドを Z-X

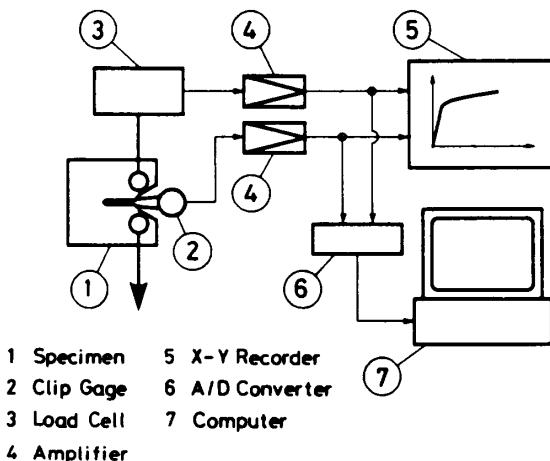


図 2 実験装置

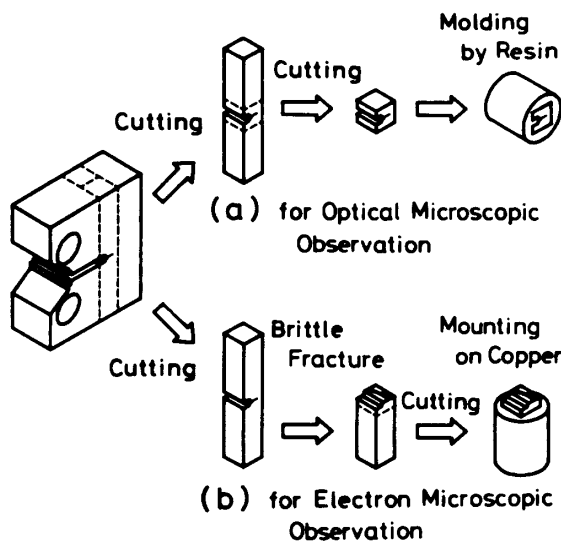


図 3 ボイドの観察試料の作製法

平面に投影した状態を示したのが図8である。この投影図と図7に示すような破面写真を比較したところ、ボイドとディンプルの形状および寸法がほぼ同様であることから、図6に示したき裂先端近傍のボイドは、図7の破面上の大きなディンプルに対応するものと思われる。

図6と図8より測定した、 $X, Y, Z$ 各方向のボイド寸法と、 $J$ 積分値との関係を図9に示す。 $J$ 積分値の増加に伴い、各方向のボイド寸法も増加しているが、 $Z$ 方向の増加率は $X$ および $Y$ 方向のそれに比べ低い。さらに、 $X$ 方向のボイド寸法に対する $Y, Z$ 方向のボイド寸法の比を計算し、 $J$ 積分値との関係を調べたところ、図10のような関係が得られた。この図より、 $Y/X$ は平均すると $J$ 積分値に依存せず、ほぼ1に近い値となっている。一方、 $Z/X$ の値は同じく $J$ 積分値に依存せず約0.3となっている。

以上の結果より、ボイド形状は $X-Y$ 平面においてはほぼ円形に近く、 $Z-X$ 平面においては、き裂進展( $X$ )方向の寸法に対して、板厚( $Z$ )方向の幅が約0.3の細長い形状を有している。すなわち、円盤状である

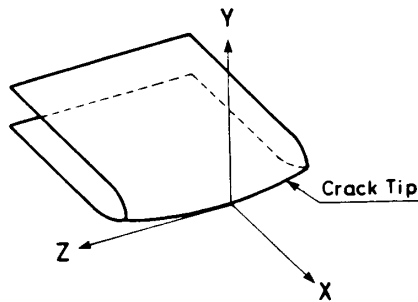


図4 き裂先端部における座標系

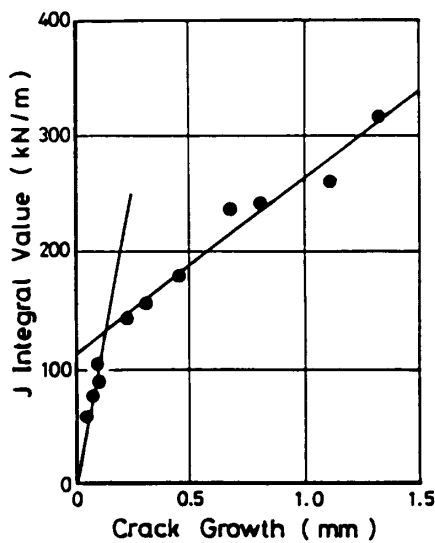


図5 き裂進展抵抗曲線

と考えられる。また、ボイドは $J$ 積分値の増加に伴い、相似な形状を保ちながら成長する。従来、ボイドは球状であるとみなされており、破面内のボイド寸法を直

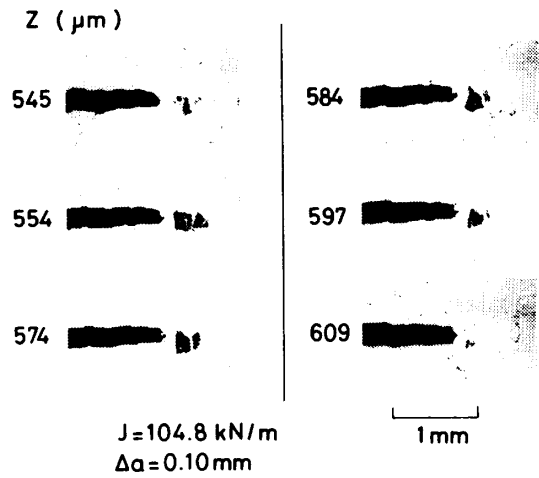


図6 き裂側面の連続写真

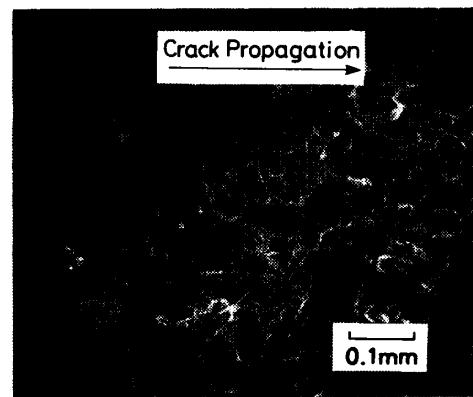


図7 破面の走査電子顕微鏡写真

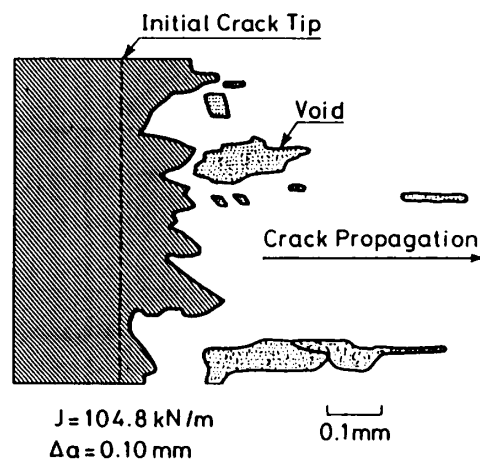


図8 破面に対して垂直方向から見たボイド形状

径で評価した例<sup>(3)</sup>がみられるが、この結果より、破面内におけるボイド寸法は、き裂進展方向の長さまたは板厚方向の厚さと表現したほうが適切であると思われる。

ボイドの観察域は板厚中央部であり、平面ひずみ状態が支配的であると考えられる。よって、このように扁平な形状は、材料の異方性に起因するものと予想される。また、ボイドが相似な形状を保ちながら成長するのは、本実験の全負荷範囲において三軸性が保たれ、各方向の応力が比例的に増加しているためであると考えられる。しかし、ボイドが常に円盤状となるか否かは、圧延方向・介在物・材料特性などの影響も考えられ、さらに詳細な検討が必要である。また、本研究においては、直径が約 30 μm 以上の大きなボイドを対象とし

たため、これ以下の微小なボイドについては、この議論の及ぶところではない。

**3.2 ボイド分布** 図 8 に示すように、観察領域の試料厚さ方向の寸法を  $t$  とする。また、き裂先端前方に出現したボイドのうち、き裂進展方向の寸法が 30 μm 以上のものの個数を  $n$  とすれば、板厚方向の平均ボイド間隔  $L$  は次式で表される。

$$L = t/n \dots\dots\dots (1)$$

この間隔が小さいほど、ボイドはき裂先端近傍において密に分布していることになる。

式(1)を用いて、各試験片の平均ボイド間隔を計算し、 $J$  積分値との関係を表したのが図 11 である。データのばらつきは大きい、 $J$  積分値の増加に伴い、平均ボイド間隔は次第に短くなっている。すなわち、負荷の上昇に従い、き裂先端近傍のボイド分布が、次第に密になっている。ところで、このデータのばらつきは、材料中の介在物の分布の影響によるものと思われる。

ここで、図 11 において、 $J$  積分値が約 240 kN/m 以下の平均ボイド間隔は、平均すると 120 μm 程度である。一方、図 9 に示した  $Z$  方向すなわち板厚方向のボイド寸法は、同じく  $J$  積分値が 240 kN/m 以下において約 25 μm である。これは、き裂前縁に沿って、厚さ 25 μm のボイドが 120 μm ごとに出現することを意味している。このことから、ボイドの分布はかなり疎であり、必ずしもき裂先端にボイドが存在しているとは限らない。き裂先端前方にボイドの存在する領域では、その合体により優先的にき裂が進展し、これは、ジグザグなき裂前縁を呈せしめる原因となる。また、前方にボイドの存在しない領域が破壊した部分は、破

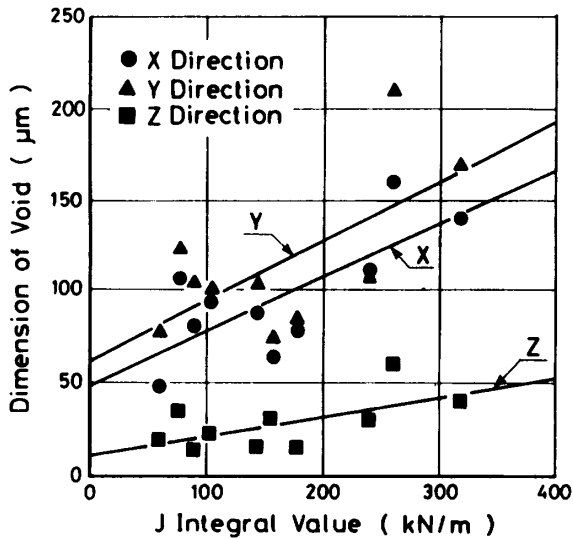


図 9 ボイド寸法と  $J$  積分値との関係

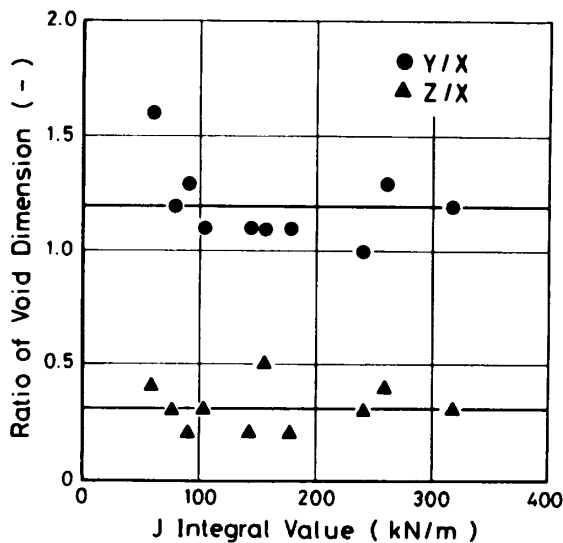


図 10 ボイド寸法比と  $J$  積分値との関係

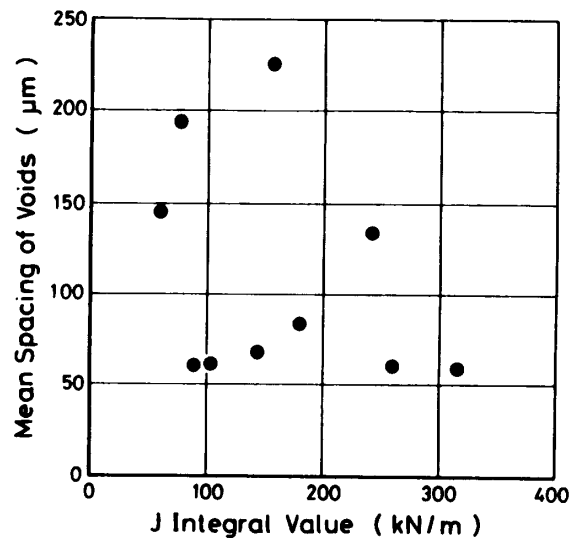


図 11 平均ボイド間隔と  $J$  積分値との関係

面において、微細なディンプルを呈する部分に対応するものと思われる。このディンプルには第二相粒子は観察し難く、文献<sup>(4)</sup>によれば微細な炭化物や地の性質に支配されるものである。このような領域が板厚方向に占める割合が大きいことから、この破壊機構が、大きなボイドの合体による破壊機構と本質的に同じであるかどうかを解明することは、安定き裂進展機構の解明において重要な課題であると思われる。

ところで、このような大きなボイドは、破面観察の結果より、微小なボイドの合体により形成されたものではなく、比較的大きな介在物から発生したものと予想される。したがって、東郷ら<sup>(2)</sup>が指摘しているように、材料中の介在物の分布との関連が重要であり、このボイドの核となる介在物の分布とボイド分布の関係について、さらに検討する必要がある。

#### 4. 結 言

溶接構造用圧延鋼材 (SM50A) を用いて、種々の大きさの  $J$  積分値に負荷されたコンパクトテンション試験片の、板厚中央部の安定き裂先端近傍における、

比較的大きな寸法のボイドの形成について調べたところ、次のような結果が得られた。

(1) ボイドはき裂側面において円形に近く、板厚方向には扁平な、円盤状の形状を有している。

(2) ボイドは荷重の増加に伴い、ほぼ相似な形状を保ちながら成長する。これは、板厚中央部において、各方向の応力が比例的に増加することに起因するものと思われる。

(3) 安定き裂先端前方には、必ずしもボイドは存在せず、初期の安定き裂進展は、ボイド分布がかなり疎な状態で進行する。よって、き裂先端前方にボイドが存在しない領域の破壊機構を解明することが重要である。

#### 文 献

- (1) 宮本・ほか3名, 材料, 37-419 (1988), 878-884.
- (2) 東郷・ほか2名, 機論, 53-495, A (1987), 2107-2114.
- (3) Miyamoto, ほか2名, JSME Int. J., 30-266 (1987), 1212-1220.
- (4) 北川・小寺沢, フラクトグラフィ, 破壊力学と材料強度講座 15, (1987), 52, 培風館.