

## 論 文

点集束探触子を用いた超音波法による  
A 533 B-1 鋼の破壊靱性の測定

© 1985 ISIJ

安中 嵩\*・岩尾 暢彦\*・古屋 宣明\*  
山脇 寿\*<sup>2</sup>・松本庄次郎\*<sup>2</sup>・木村 勝美\*<sup>3</sup>Measurement of Fracture Toughness of A533B-1 Steel  
by Ultrasonic Method Using Point Focusing ProbesTakashi YASUNAKA, Nobuhiko IWAO, Nobuaki FURUYA,  
Hisashi YAMAWAKI, Shojiro MATSUMOTO and Katsuyoshi KIMURA

## Synopsis:

A single specimen method for determining fracture toughness  $J_{IC}$  has been studied using both ultrasonic through transmission and angle beam reflection techniques. Compact tension specimens of A533B-1 steel were used. By the use of point focusing probes, the crack extension in the midthickness portion of the specimen is measured. A computer is utilized in the measuring system for controlling apparatus, recording data, and calculating J values.

The fracture processes such as blunting of precrack tip, stable crack extension and transition process between them can be revealed by this method. The  $J_{IC}$  value obtained by ultrasonic method is in close agreement with that obtained by R-curve method.

Furthermore, crack growth resistance curve (J-R curve) can be determined because there is a linear relation between amount of relative decrease in through transmission pulse height and crack extension length.

## 1. 結 言

弾塑性破壊靱性  $J_{IC}$  の測定法は ASTM E813 および日本機械学会規準 JSME S001 で規定されているが、その基本は R 曲線法である。R 曲線法では多数の試験片を必要とすることから、単一試験片法が望まれている。単一試験片法には電位差法<sup>1)2)</sup>、AE 法<sup>3)4)</sup>、除荷コンプライアンス法<sup>5)</sup> のほかに超音波法がある。

超音波法には超音波をき裂面に平行に入射する反射法 (End-on 法)<sup>6)</sup>、き裂面に垂直に入射する反射法<sup>7)8)</sup>、さらに表面波法<sup>9)</sup> が報告されている。著者らもさきに 600 MPa 級高張力鋼を用いてき裂面に垂直に入射する反射法による安定き裂<sup>†</sup>の進展開始点の検出について研究を行ったが、この場合得られた  $J_{IC}$  は R 曲線法によるものより小さい値となつた<sup>10)</sup>。この方法はき裂の表面形状の影響を大きくうけるために、き裂の進展過程によつて

はミクロ的ないし局所的な変化を敏感に検出することになる。

そこで R 曲線法によるものとよく一致する  $J_{IC}$  が測定可能な超音波単一試験法を確立することを目的として、つぎの 2 種類の方法を併用した超音波法について研究した。すなわちき裂の表面形状の影響をあまりうけないと考えられる超音波をき裂面に垂直に入射する透過法 (以後単に垂直透過法という) と予き裂の鈍化状態をみるための斜角反射法を併用した。なお超音波法は適当な探触子を選ぶことによつて、平面ひずみ状態にある試験片厚さ中央部で最初におこるであろうき裂の進展を測定できるという他の方法にみられない特徴をもっている。本研究ではこの特徴を生かし、点集束探触子を用いて試験片厚さ中央部のき裂進展を検出する。

$J_{IC}$  は安定き裂進展時の材料の破壊抵抗 (initiation toughness) として評価できる。一方剪断延性き裂の不安定破壊条件については PARIS らによりテアリングモジュラス (tearing modulus)  $T_J$  が提案され<sup>11)</sup>、これに

† 破壊靱性試験ではき裂進展は予き裂先端の鈍化による進展をも含む。ここでは特に予き裂先端の鈍化後に進展するき裂を安定き裂と名づけて鈍化による進展と区別する。

昭和 59 年 10 月 18 日受付 (Received Oct. 18, 1984)

\* 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku, Tokyo 153)

\*<sup>2</sup> 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

\*<sup>3</sup> 金属材料技術研究所 (現: 日本溶接技術センター) 工博 (National Research Institute for Metals, Now The Japan Welding Technology Center)

ついでの研究が行われている。そして  $T_J$  の算出に必要な J 積分き裂伝播抵抗曲線 (J-R 曲線) の測定法としては、コンプライアンス法を用いた試験法の試案<sup>12)</sup> が ASTM より発表されているほか超音波 End-on 法<sup>13)</sup>、電位差法<sup>14)</sup> も報告されている。超音波垂直透過法の場合、パルス高さの変化量はき裂の進展長さを表すと考えられ、J-R 曲線の測定が可能となることが期待できるので、これについても検討した。

## 2. 試料および実験方法

### 2.1 供試材および探触子

供試材は ASTM A533B-1 鋼で、その化学成分 (wt %) は C 0.21%, Si 0.30%, Mn 1.16%, Ni 0.65%, Mo 0.53%, P 0.008%, S 0.005% 以下である。そして機械的性質は降伏点 505 MPa, 引張強さ 647 MPa, 伸び 19%, 絞り 74% であつた。

垂直透過法では送信用探触子として、ビーム径 3 mm の点集束垂直探触子 (PFNP), 受信用探触子として振動子径 12.5 mm の垂直探触子 (NP), 斜角反射法では屈折角 40°, ビーム径 2.5 mm の点集束斜角探触子 (PFAP) を用いた。超音波周波数はいずれも 5 MHz, 探触子の接触媒質にはグリセリンを用いた。

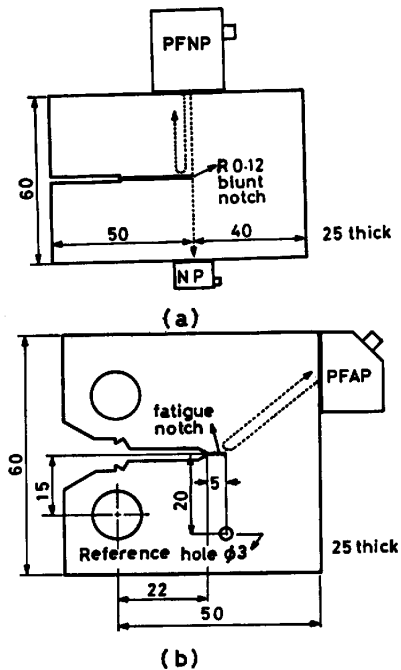
### 2.2 予備実験

実際の試験では試験片の引張りによる変形とき裂の進展が同時におこる。このときの垂直透過法および斜角反射法によるパルス高さの概略の変化を明らかにするために試験片が変形せずき裂のみが進展する場合と、き裂の進展がなくて試験片が変形する場合に分けて模擬的な予備実験を行つた。

まず、き裂のみが進展する場合として垂直透過法および斜角反射法の実験に用いた試験片形状と探触子の位置をそれぞれ Fig. 1(a), (b) に示す。(b) に示した試験片は 25 mm 厚コンパクトテンション (1TCT) 試験片で、パルス高さの基準値を得るために直径 3 mm の孔をあけたものである。探触子は移動装置によつて個別にまたは同時に移動させ、き裂の進展に伴うパルス高さの変化を調べた。つぎにき裂の進展がなく引張りによる試験片の変形のみがおこる場合として、疲労予き裂の代わりに切欠半径 0.12 mm の機械切り欠きをつけた 1TCT 試験片を負荷、除荷を繰り返して、負荷荷重を増しながら引張つて、パルス高さの変化を調べた。これらの結果から超音波探触子の固定位置、その他の測定条件を決定して破壊靱性試験を行つた。

### 2.3 破壊靱性試験

破壊靱性試験片はき裂面方位 L-S の 1TCT 試験片



(a) through transmission method, (b) angle beam reflection method. The hole of 3 mm in diameter is provided for normalizing pulse height.

Fig. 1. Specimen configurations used in the preliminary experiment and positions of ultrasonic probes (dimensions in mm).

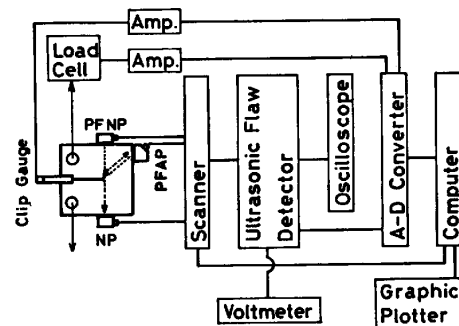


Fig. 2. Block diagram of measuring system.

で、疲労予き裂は約 5 mm 導入した。予き裂導入時の疲労繰返し最大応力拡大係数は  $29 \text{ MPa m}^{1/2}$  である。試験は ASTM E813 および JSME S001 に概略準拠して行つた。試験片を適当な荷重線変位まで引張速度  $8.3 \times 10^{-3}$  または  $3.3 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$  で引張つたのち除荷した。ついでき裂の境界を明瞭にするために若干の疲労き裂を導入したのち低温で脆性破壊させた。き裂長さの測定は超音波による測定範囲と対応させるために、試験片厚さ中央部 3 mm の範囲を 0.5 mm 間隔で実体顕微鏡により測定して、その平均値をとつた。予き裂先端の鈍化領域のストレッチゾーン長さは走査型電顕によつて測定した。R 曲線法の J 積分値はき裂進展を無視し、初期き裂長さをき裂長さとする ASTM E813 および JSME

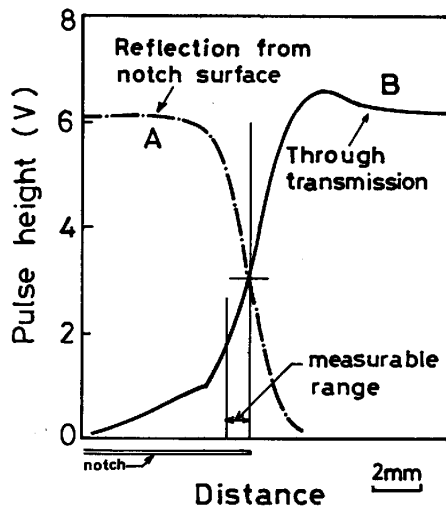


Fig. 3. Pulse height curves of reflection (A) and through transmission (B) using two normal probes which are moved on the specimen shown in Fig. 1 (a).

S001 の計算式に基づいて計算機を利用して計算した。超音波パルス高さおよび荷重、荷重線変位の測定系ブロック図を Fig. 2 に示す。探触子はホルダーおよびビニールテープで試験片の所定の位置に固定した。透過および反射パルス高さは計算機によつてスキャナを制御し、交互にスイッチを切り換えて測定した。得られたデータは磁気テープに記録したのちグラフィックプロッタを用いて図示させた。破面は 20 kV 走査型電顕で観察した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 予備実験

##### 3.1.1 垂直透過法

Fig. 3 は PFNP および NP を Fig. 1(a) に示す試験片上で移動させたときのパルス高さ変化である。曲線 A は PFNP のみを移動させたときの反射法によるパルス高さの変化である。切り欠き面からの反射パルス高さが最大値の 1/2 になる位置に PFNP を固定した。次に透過法により、透過パルス高さが最大になるように NP の位置を調整した。この PFNP と NP の相互位置を変えないで、試験片上を平行移動させたときのパルス高さ変化が B 曲線である。模擬き裂の進展につれてパルス高さは減少している。そして図中に示されているように、少なくとも約 1 mm のき裂進展の測定が可能な範囲があった。

また曲線 A から、PFNP が 3.5 mm 移動すると反射パルス高さは 90% 変化することがわかった。CT 試験片に導入した疲労予き裂長さ 5 mm は PFNP の取付位

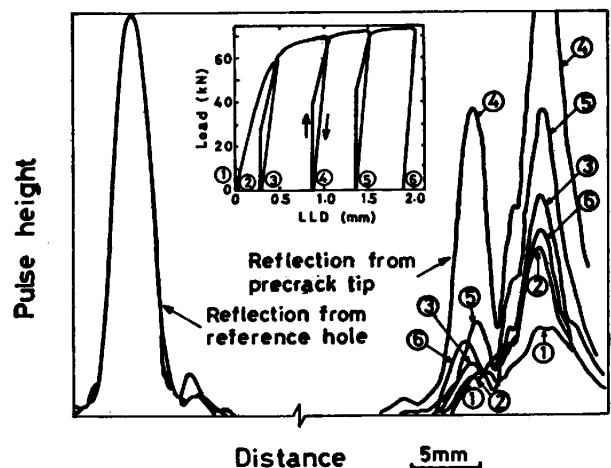


Fig. 4. Changes in profile of pulse height of reflection during blunting of the precrack tip. A point focusing angle probe is moved on a CT specimen (Fig. 1(b)). A wedge is inserted in the interstice of the notch under loading and load is released.

置を決定するのに十分な長さであるといえる。透過法では以上の方法、すなわち PFNP は反射法により反射パルス高さが最大値の 1/2 になる位置に、NP は透過パルス高さ（以後垂直透過法によるパルス高さを  $E_t$  と略記する）が最大になる位置に取り付けて測定した。

##### 3.1.2 斜角反射法

予き裂先端の鈍化過程は斜角反射法によつて検出できることが期待された。適当な荷重線変位まで引張り、楔を切り欠き面間に挿入して除荷した試験片 (Fig. 1(b)) 上で PFAP を移動させて反射パルス高さ（以後 PFAP による反射パルス高さを  $E_a$  と略記する）を測定することを繰り返した。このときのパルス高さのプロファイルの変化を Fig. 4 に示す。 $E_a$  は直径 3 mm の孔からの最大反射パルス高さを基準として表してある。 $E_a$  の急増は予き裂の特定の場所で見られた。予き裂先端もその一つである。予き裂先端では  $E_a$  は荷重線変位の増加につれて初期には増加するが、のちには減少している。この試験片では最終的には安定き裂が進展していることが観察された。

PFAP を適切な位置に取り付ければ予き裂先端の変化を検出できる。そして予き裂先端から少し離れたところから大きな  $E_a$  が検出されるので、予き裂先端はある程度の負荷を与えなければ正確に見出せない場合が多いことがわかった。

これらのことから PFAP の取付位置の決定は予き裂導入時の疲労繰り返し最大荷重より小さい適当な荷重（本研究では 10 kN）をかけて行い、予き裂先端から最大の  $E_a$  が得られる位置とした。この荷重下で探触子の

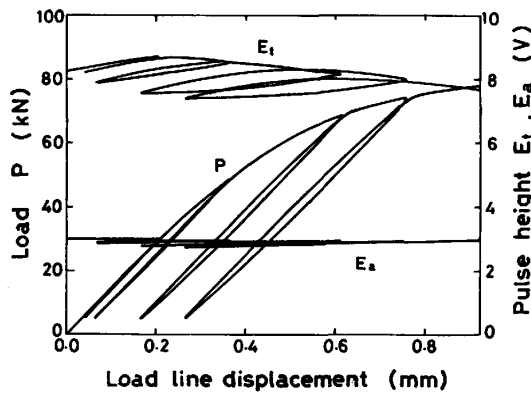


Fig. 5. Variation in pulse height of through transmission ( $E_t$ ) and angle beam reflection ( $E_a$ ) with load line displacement during loading and unloading. Blunt notched specimen is used.

取付位置を決定することは垂直透過法においても必要であつた。

### 3.1.3 試験片の変形の影響

$E_t$  および  $E_a$  は引張りに伴う試験片の変形により影響をうける。鈍化切り欠き CT 試験片 (切欠先端半径 0.12 mm) を用い、負荷、除荷を繰り返し、最大荷重を増しながら  $E_t$  および  $E_a$  を測定した結果を Fig. 5 に示す。この荷重線変位の範囲では、き裂の進展はなく、 $E_a$  の変化は非常に小さい。しかし  $E_t$  はマクロ的な意味で、弾性領域では増加、塑性領域では減少する。この  $E_t$  の増加と減少は試験片の湾曲による超音波入力の変化、二つの探触子間におけるビーム方向のずれ、切欠先端の応力分布に起因するビームの曲がりなど多くの原因が考えられるが、本研究ではどれが主原因であるか定量的に明らかにすることはできなかつた。ともあれ、単調な引張りにおいて、予き裂先端の形状に変化がなければ、荷重線変位の増加とともに  $E_t$  は初期には増加するが、塑性変形領域ではほぼ直線的に低下する。 $E_a$  の変化は小さい。

### 3.2 超音波パルス高さの変化とき裂進展過程

破壊靱性試験における代表的な  $E_t$  および  $E_a$  の変化を Fig. 6 に示す。鈍化切欠試験片でき裂の進展がない場合の  $E_t$  曲線 (Fig. 5) と比較して異なる点は、荷重線変位の増加に伴って、最初に急激な減少がみられることと、それに続く最大値を経て減少する過程で急に低下率が大きくなっている点 (矢印で示す) がみられることである。 $E_a$  は初期にはほぼ一定水準を保つが、だいに増加したのち急激な不安定的な変化へと移行している。この不安定的な変化が始まる点は前述の  $E_t$  の矢印で示す点と一致している。このときの荷重線変位を  $\delta_{in}$  とする。

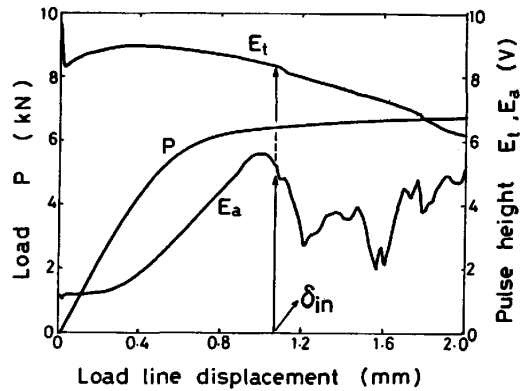


Fig. 6. Typical pulse height and load versus load line displacement curve showing the point of the onset of crack extension with the arrows.

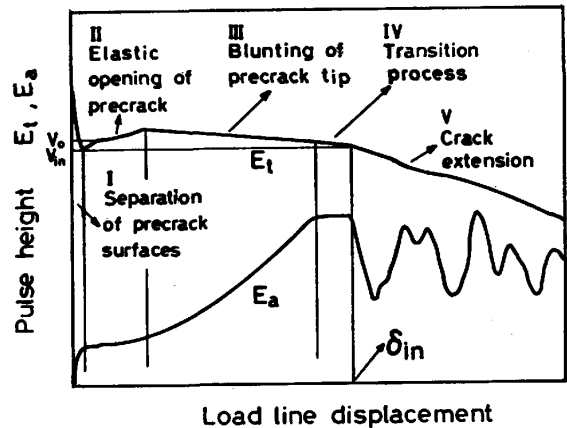


Fig. 7. Schematic representation of the relation between variation in ultrasonic pulse height and crack extension process.

Photo. 1(a) はまだ  $\delta_{in}$  に達しないうちに引張りを中止した試験片の破面で、予き裂先端の鈍化段階にあることが示されている。予き裂先端の鈍化は  $E_a$  の増加に対応している。(b)は  $\delta_{in}$  に達する直前で  $E_a$  がほとんど増加しなくなった段階のものである。ストレッチゾーンはさらに拡大し、その内に成長したポイドがみられるほか、主き裂面に垂直方向に入つた微小き裂も拡大している。ポイドは孤立し、安定き裂とはまだみなされない。この段階は予き裂先端の鈍化から安定き裂の進展開始にいたる遷移段階にあるといえる。(c)は  $\delta_{in}$  に達したのちの試験片破面で、すでに安定き裂は進展している。 $\delta_{in}$  は安定き裂の進展開始点であることを表している。Photo. 1(a), (b), (c) にその破面を示した試験片の  $J$  と  $\Delta a$  の測定値はあとで示される Fig. 8 の R 曲線中にそれぞれ (a), (b), (c) としてプロットしてある。

Fig. 7 は  $E_t$  と  $E_a$  の変化を模式的に示したものである。段階 I は接触していた疲労予き裂面が開く段

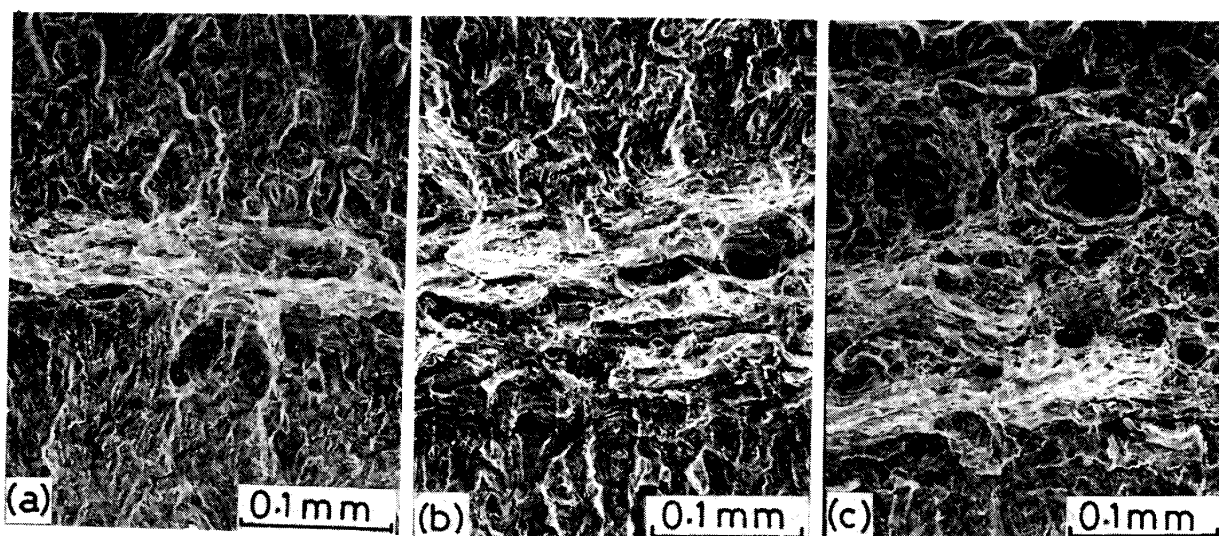


Photo. 1. Scanning electron fractographs near precrack tips. Specimens are loaded to the displacement levels of 0.81 mm (a), 1.04 mm (b), and 1.13 mm (c), where  $\delta_{in} = 1.07$  mm showing  $\delta_{in}$  is the critical displacement at the onset of crack extension. The data obtained from those specimens are plotted in Fig. 8.

階で、それまで超音波が透過していた接触面が開くので  $E_t$  は急激に減少する。  $E_a$  は多くの試験片では急増したが試験片によっては増減の不安定な変化を示した。段階Ⅱはマクロ的には弾性変形の段階で、  $E_t$  は増加、  $E_a$  はほぼ一定になる。なお  $E_a$  が一定値に達するのは、荷重が予き裂導入時の疲労最大荷重に達したときと一致した。段階Ⅲは予き裂の鈍化段階で (Photo. 1 (a)),  $E_t$  のゆるやかな減少と、  $E_a$  の増加がおこる。段階Ⅳは孤立したポイドの成長およびストレッチゾーン内の微小き裂の拡大段階である。ここでは安定き裂とみなされ得るほどのポイド間の連結はまだおこっておらず (Photo. 1 (b)), 安定き裂進展への遷移段階である。  $E_a$  はポイドや微小き裂によつてその増加がおさえられる。なお  $E_t$  はわずかに減少率が増加する。段階Ⅴは安定き裂の進展段階で (Photo. 1 (c)), 進展するき裂にさえぎられて  $E_t$  は急激に低下、  $E_a$  は増減の大きい不安定な変化を始める。この不安定な変化の開始は、  $E_a$  の急減で始まる場合と急増で始まる場合がある。急激な変化はき裂の進展に際し、急速な形状変化がおこるためであろう。  $E_a$  が急増するか急減するかは、き裂先端の形状に依存する。

### 3.3 $J_{IC}$ の測定

超音波法によれば安定き裂の進展開始点を検出することができるので、単一試験片による  $J_{IC}$  の測定が可能である。超音波法によつて測定した安定き裂が進展を開始するときの J 積分値  $J_{in(U)}$  と R 曲線法による J 積分値  $J_{in(R)}$  との比較を Fig. 8 に示す。  $J_{in(U)}$  の平均値

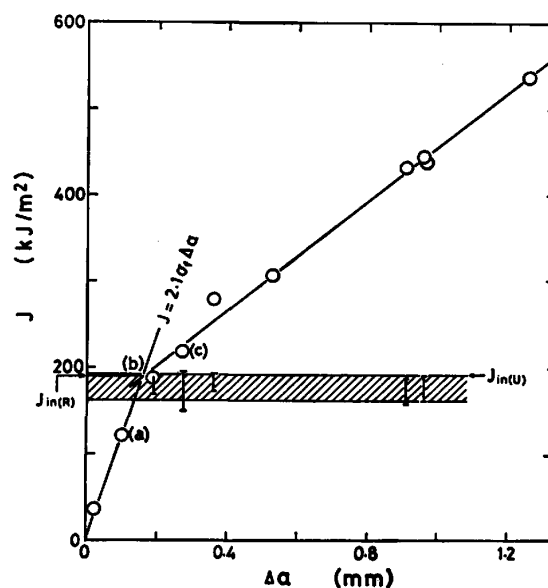


Fig. 8. Comparison between  $J_{in}$  values obtained by ultrasonic method and R-curve method. The range of transition process before the onset of crack extension is indicated by shading.

として 193 kJ/m<sup>2</sup> が得られた。R 曲線法で求めた  $J_{in(R)}$  は 190 kJ/m<sup>2</sup> であり、よく一致していた。これらの  $J_{in}$  は有効性の条件を満足させるので  $J_{IC}$  とみなすことができる。図中には安定き裂進展前の概略の遷移領域を斜線で示してある。遷移領域が大きいものでは超音波法による  $J_{IC}$  と R 曲線法による  $J_{IC}$  との差は大きくなるであろう。本研究の場合  $J_{IC}$  値に対し約 16% が遷移領域となつていた。この程度の遷移領域では超音波法と R 曲線法

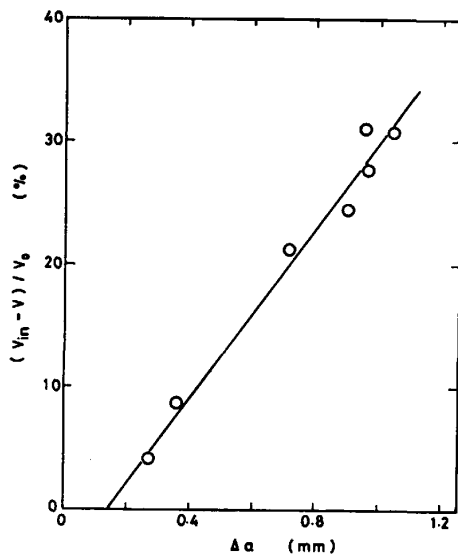


Fig. 9. Relation between relative amount of decrease in through transmission pulse height and crack extension.

による  $J_{1C}$  に大きな差はもたらしていない。

鈍化直線は  $J=2.1\sigma_f \Delta a$  で表され、係数は ASTM 法とよく一致した。ここで有効応力  $\sigma_f$  は降伏応力と引張強さの平均値、 $\Delta a$  はき裂進展長さである。ただし、これはき裂長さの測定範囲が試験片厚さ中央部 3 mm と狭い範囲であつたためであり、測定範囲を広くとれば鈍化直線の勾配は大きくなる。

### 3.4 J 積分き裂伝播抵抗 (J-R) 曲線

き裂の伝播に伴う  $E_t$  の減少量はき裂の進展長さ  $\Delta a$  を表していると考えられる。Fig. 9 は実測した  $\Delta a$  と  $E_t$  の減少量  $(V_{in}-V)/V_0$  をプロットしたもので両者の間には直線関係がある。ここに  $V_{in}$  は安定き裂進展開始点における  $E_t$ 、 $V_0$  は予き裂導入時の疲労最大荷重に達したときの  $E_t$  である (Fig. 7)。試験片の変形がない場合、模擬き裂の進展長さは  $E_t$  の減少量と直線関係があり (Fig. 3)、かつ安定き裂の進展が塑性域すなわち試験片の変形の影響が  $E_t$  の直線的な減少としてあらわれる範囲内 (Fig. 5) でおこるので、総合的には  $\Delta a$  と  $E_t$  の減少量には直線関係があるものと思われる。この直線の勾配を用いて J-R 曲線を求めた。

J 積分は次式<sup>12)</sup>に従つて計算した。

$$J_{i+1} = [J_i + (\eta/b)_i (A_{i,i+1}/B)] \times [1 - (\gamma/b)_i (a_{i+1} - a_i)]$$

ここで  $a$  はき裂長さ、 $b$  はリガメント幅、 $W$  は試験片幅、 $B$  は試験片厚さ

$$\eta = 2 + 0.522 (b/W)$$

$$\gamma = 1 + 0.76 (b/W)$$

$i$  は  $i$  番目の測定値

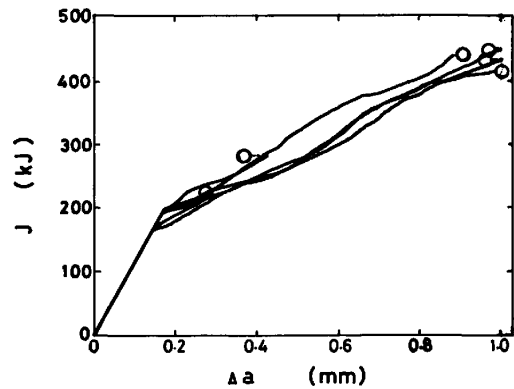


Fig. 10. J-R curve measured by ultrasonic method. Open circles represent the measured values of crack extension. Specimens have the same crack plane orientation of L-S showing their reproducibility of J-R curve.

$A_{i,i+1}$  は  $i$  番目と  $i+1$  番目間の荷重-荷重線変位下の面積

ただし、安定き裂の進展開始点  $\delta_{in}$  までは予き裂の鈍化によるき裂の進展として

$$\Delta a = J/2\sigma_f$$

と仮定した。

安定き裂の進展開始以後は予き裂の鈍化による  $\Delta a$  に Fig. 9 の直線の勾配から求められる  $\Delta a$  を加えて計算した。数本の試験片の結果をまとめて Fig. 10 に示す。 $\Delta a$  の実測値を図中に白丸で示してある。試験片により若干のばらつきが認められる。試験片厚さ中央部のき裂進展は一様ではなく段階的に進展している。試験片表面近くの平面応力状態の部分のき裂進展は遅れており、これにひきずられるためとも考えられるが、このような板厚依存性については今後の問題として残された。

## 4. 結 言

A533B-1 鋼の弾塑性破壊靱性試験において、点集束探触子を用いた超音波法によつて、試験片厚さ中央部のき裂進展の検出について研究し、次の結果を得た。

(1) 超音波垂直透過法および斜角反射法を併用することによつて、CT 試験片厚さ中央部の予き裂先端の鈍化、鈍化から安定き裂進展にいたる遷移過程および安定き裂の進展等の破壊過程を区別して測定することができる。

(2) この超音波法によつて、単一試験片で  $J_{1C}$  を測定することができる。

(3) 安定き裂の進展開始前におこる遷移領域が大きい材料では超音波法と R 曲線法による  $J_{1C}$  の差が大きくなるが、A533B-1 鋼の場合遷移領域は  $J_{1C}$  の 16% 程

度であり, 両法による  $J_{IC}$  はよく一致していた.

(4) 安定き裂進展開始後の透過パルス高さの低下量とき裂進展長さには直線関係がある. あらかじめこの関係を求めておけば J 積分き裂伝播抵抗曲線 (J-R 曲線) を単一試験片により連続測定することができる.

#### 文 献

- 1) J. M. LOWES and G. D. FEARNEHOUGH: Eng. Frac. Mech., 3 (1971), p. 103
- 2) 藤田春彦, 田中 学, 神谷 修: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 156
- 3) R. S. WILLIAMS: J. Met., 31 (1979) 9, p. 21
- 4) M. A. KHAN, T. SHOJI and H. TAKAHASHI: Proc. 5th Int. Acoustic Emission Sympo. (1980), p. 395 [Japanese Soc. NDI]
- 5) G. A. CLARKE, W. A. ANDREWS, P. C. PARIS and D. W. SCHMIDT: Mechanics of Crack Growth, ASTM STP 590 (1976), p. 27
- 6) J. H. UNDERWOOD, D. C. WINTERS and D. P. KENDALL: The Detection and Measurement of Cracks (1976), p. 31 [Welding Inst.]
- 7) S. J. KLIMA, D. M. FISHER and R. J. BUZZARD: J. Test. Eval., 4 (1976), p. 397
- 8) 平野一美, 小林英男, 中澤 一: 非破壊検査, 29 (1980), p. 198
- 9) 伊達和博, 島田平八, 伊東義晃: 非破壊検査, 31 (1982), p. 247
- 10) 安中 嵩, 岩尾暢彦, 木村勝美, 星本健一, 武藤功, 福原熙明, 松本庄次郎, 吉田秀彦: 非破壊検査, 31 (1982), p. 455
- 11) P. C. PARIS, H. TADA, A. ZAHOR and H. ERNST: Elastic-Plastic Fracture, ASTM STP 668 (1979), p. 5
- 12) P. ALBRECHT, W. R. ANDREWS, J. P. GUDAS, J. A. JOYCE, F. J. LOSS, D. E. McCABE, D. W. SCHMIDT and W. A. VANDERSLUYS: J. Test. Eval., 10 (1982), p. 245
- 13) 平野一美, 窪田隆一, 小林英男, 中澤 一: 日本機械学会論文集, 49 (1983) 448, p. 1556
- 14) 古平恒夫, 松本正勝, 中島伸也: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1040