

討18 電位差法による J_{Ic} 測定とRカーブ法の問題点

東京工業大学 精密工学研究所 布村成具・肥後矢吉

1. はじめに

中低強度鋼の破壊は、その靱性と降伏強さの関係から、き裂先端にかなりの大きさの塑性変形をとめない、いわゆる小規模降伏条件を満足せず、線形破壊靱性値 K_{Ic} あるいは G_{Ic} の適用は困難である。このような状態下での材料の靱性評価として、 J_{Ic} 値が有望であり、その適用および測定法に関して多く報告がなされている。この J_{Ic} はき裂の安定成長開始点における J 積分であり、その評価にはその開始点の検出と、これに対応する荷重-荷重点変位関係からの J 積分の算出が必要である。安定き裂開始点の検出には Rカーブ法を始め、いくつか考察されており、各々長所短所を持っている。Rカーブ法は *blunting line* に向題を残しているが、ほとんどの被験材料および試験片形状に適用が可能であること、標準の材料試験装置で求められること、および得られた値に測定者の個人差が入り難い点で優れており、内外規格において基準試験法として採用される傾向にある⁽²⁾。しかし前述の *blunting line* の向題の他に、R曲線法は数個以上の試験片を要し経済性に劣る。このことは更に損傷事故解明の如く限られたサンプルの場合、材料のスクリーニング、あるいは温度、速度、環境効果の測定に大きな障害となっている。

著者らはこれら多因子の測定のため、単一試験片で求める手法として電位差法、コンプライアンス法、AE法等試みてきたが、電位差法結果を非線形回帰を行なうことにより、炭素鋼等中低強度材料の J_{Ic} 値を再現性よく測定できたのでこれについて報告する。また電位差法の手法により R曲線を作製し、これによって R曲線向題点を検討した。

2. 電位差測定方法

測定記録系の系統図を図1に示す。定電流源として直流・交流の2種があり、後者によれば超高感度・高安定の交流増幅器の使用が可能である。しかし安定した大電流源が得難いこと、き裂長さとの相関が不安定なこと、および動的き裂の追従性の悪い等の欠点がある。著者らは 1 KHz 150 mA 電源によって測定を試みたが不調で、*Chopperfed* は 8 KHz 1 A の電源を用いたがよい結果は得られていない。主たる実験には自作 10 A 直流定電流電源および 35 A 直流定電流電源を使用した。このような大電流を用いるため温度上昇が懸念されるが、鋼の比抵抗、比熱から計算される温度上昇はジュール熱がまったく試験片外に伝達しないとしても、試験時間内では 1°C 以下 (35 A の場合) で、考慮する必要はない。しかし、電流端子における接触抵抗が大きいとこれによる発熱が試験片の温度を上昇させることがあり、接続法は重要である。本実験では圧着端子を試験片にハンダ付けし、リード線を圧着固定した結果

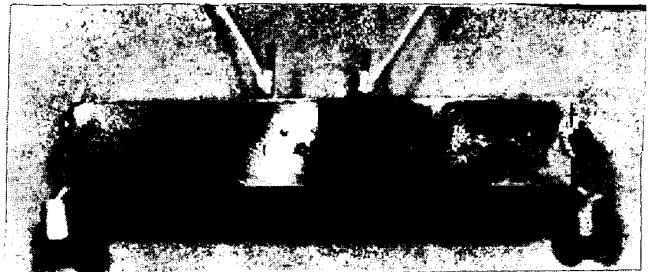


写真 電位差法 J_{Ic} 試験片の電流端子と電圧端子

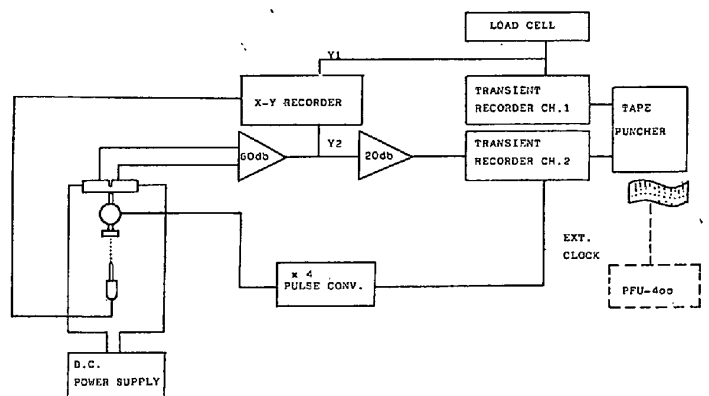


図1 静的曲げ試験片の電位差法 J_{Ic} 測定に用いた測定記録の系統図

このような温度上昇は認められなかった。(写真)

電圧端子でのき裂成長による電位差変化は100 mVのオーダーであり、端子間に温度差がある時熱起電力はこの値に比べて十分大きい。ハンダ付をした場合Sn-Cu間の起電力(3.4 μV/°C)が働き、環境の管理が必要である。著者らは最終的に金メッキピンを打込み銅線をラップする方法を用いて良い結果が得られた(Au-Cu間は0.2 μV/°C)。しかし端子に微風が当ることによって50~100 μmのき裂長さに対応する電位差変化を生じ、環境の管理はなお必要である。電位差とき裂長さの間にはJohnson⁽⁴⁾の解があり、曲げ試験の場合シュミレーション試験片の実測値とよく一致する。コンパクト試験片については有限要素計算を基準とした。JIC試験への適用はき裂先端の塑性変形を考慮し、これらの結果を線形高次近似式に置換したものを更に実験点(初期き裂長さ、き裂停止長さなど)で補正した。

3. 非線形回帰によるき裂開始点の決定

き裂の成長以前にき裂先端の塑性変形、すなわちストレッチゾーンの形成によっても電位差は変化する。このため電位差変化は連続的であり、SN比の悪い記録上での判別を困難にしている。この開始点の定め方として、図2のA, B, Cの3点が用いられているが、直線からの離脱点であるA, B点の定め方は共に判定者の個人差を持ち込む危険が大きい。一見客観的に見えるC点もX-X'直線は(場合によってはY-Y'直線も)必ずしも、その引き方に個人差の入り込む余地がないとはいえない。この点が電位差法の規格として採用され難い理由となっている。

き裂先端の塑性変形は荷重と線形の関係を保ちながら変化する。従って電位差も一定の関数関係のもとに増すであろう。安定き裂の開始後は電位差はき裂長さ、塑性域の大きさ(これは荷重とき裂長さの関数)により、定まる別の関数関係を持つことになる。図2に対応させるため、荷重の代わりに変位xを独立変数として、き裂開始前の関数 $f_1(x)$ が x_0 でき裂が開始して $f_2(x)$ に変るとする。 $f_1(x)$, $f_2(x)$ の形は未知であるが、これらをそれぞれ m_1 次, m_2 次の高次式(係数 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{m_1}, a_{m_1+1}, \dots, a_{m_1+m_2}, a_{m_1+m_2+1}$)として、測定した電位差-変位の記録が最っとよく合致するよう $f_1(x)$, $f_2(x)$, x_0 を決定すれば x_0 が求められる。これを修正ニュートン法を用いて行なった。

$$f(x) = \begin{cases} f_1(x) : x \leq x_0 \\ f_2(x) : x \geq x_0 \end{cases}, \quad f_1(x_0) = f_2(x_0), \quad f_1'(x_0) \neq f_2'(x_0)$$

近似解 a_i^0, x_0^0 を与え、 a_i だけ変位させると誤差平方 $G(a^0 + \Delta a^0)$ は測定値群を (x_i, y_i) とすると

$$G(a^0 + \Delta a^0) = \sum (y_i - f(a^0 + \Delta a^0)_i)^2$$

$$x_0 = a_{m_1+m_2+2} \quad \text{とし} \quad f_2'(a) = \frac{\partial}{\partial a_k} f(a) \quad \text{とおけば}$$

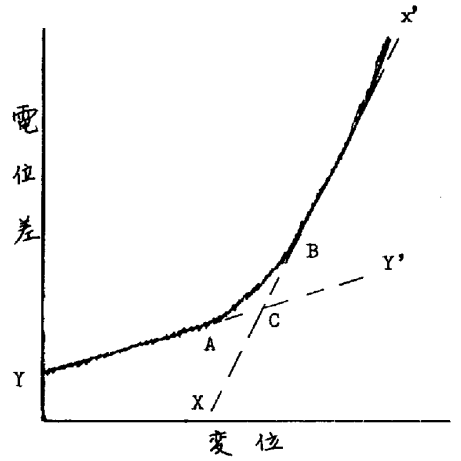


図2. 電位差記録上のき裂開始点の定め方

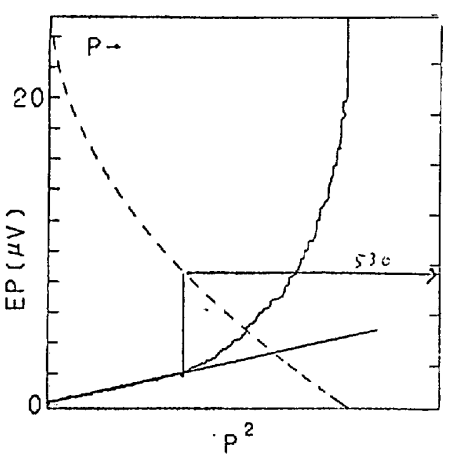
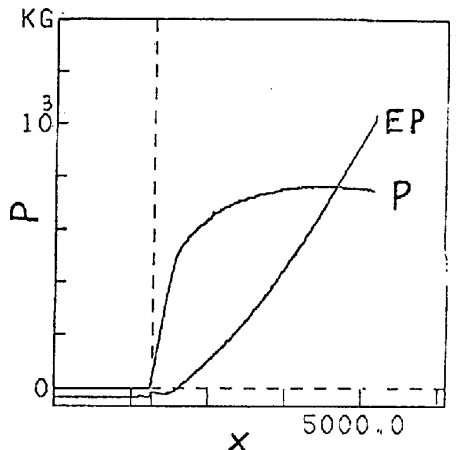


図3. 電位差-変位記録およびこれらから求めた(荷重)²電位差

$$f(a^0 + d^0) = f(a^0) + d_1^0 f_1' + d_2^0 f_2' + \dots + d_{m_1+m_2+2}^0 f_{m_1+m_2+2}'$$

$$\frac{\partial G}{\partial a_k} = G_k' = -2 \left[\sum (y_i - f(a^0 + d^0)) f_k' \right]$$

誤差平方和が最小となるのは、

$$G_1' = G_2' = G_3' = \dots = G_{m_1+m_2+2}' = 0$$

であるから、 d_i^0 ($i=1 \dots m_1+m_2+2$) に対する多元一次方程式が得られ、これを解くことによって一次移動量 d^0 が得られる。この d^0 を用い、 $g_1 = G(a^0)$, $g_2 = G(a^0 + d^0/2)$, $g_3 = G(a^0 + d^0)$ を求め、 a' 近似値 a を求める。

$$a' = a^0 + \{2d^0 - (g_3 - g_1)/(g_1 - 2g_2 + g_3)\} d^0/4$$

同一手順を繰返し、 d^k/a^k が許容値以下 (例えば 10^{-6}) になった時の $a_{m_1+m_2+2}^k (=a)$ からき裂開始位置を求める。数種の材料について m_1, m_2 の範囲を変えて調べたところ、 $m_1=2$, $m_2=3$ で十分で、これ以上大きな値を用いても結果にほとんど影響を与えない。

これらの計算は測定点をそのまま電子計算機の入力とすることと前提としており、著者らは図1に示すごとく紙テープを用いオフラインで処理した。しかしこの程度の計算はAD変換のあるマイコンで行なえる筈である (使用したトランジエントレコーダは8ビット)。

表に変位-電位差曲線から図2のA点として判定した場合 (単一測定者) と非線形回帰による場合のS38C鋼焼戻材の J_{IC} を示す。目視によった場合、そのバラツキの標準偏差が25%あったのに対して、非線形回帰によればその1/5に減じている。N-G項中の(--)はデジタル記録が得られなかったもの、(***)は指定回数の繰返して収斂しなかったものである。

き裂開始前の塑性変形による電位差の変化が塑性域の大きさの変化に比例すると仮定すると、塑性域の大きさは、き裂成長前は(荷重)²に比例するので、(荷重)²と電位差間に直線関係が期待でき、き裂の成長開始でこの直線から離脱すると考えられる。図3は上段の変位-荷重電位差と基に P^2-EP 曲線を作製したもので、A点以下での直線関係が明瞭に認められた。図においても明らかのように、通常用いられる変位-電位差関係よりもA点の判定が容易である。 P^2-EP 関係から求められた J_{IC} 値は $\delta-EP$ より求めた値よりも非線形回帰の結果に近づいた。表中においてそれを J_{IC} 値で表わしてあり、(+)印は $\delta-EP$ 法より良い結果の得られたものである。この方法は電子計算機に

表 電位差法で求めた J_{IC} 値とそのバラツキの比較 (Kg/mm)

| | $\delta-EP(Opt.)$ | $\delta-EP(N-G法)$ | P^2-EP |
|------------|-------------------|-------------------|----------|
| 1 | 9.5 | 9.5 | 9.6 (+) |
| 2 | 9.5 | 9.5 | 10.0 (+) |
| 3 | 8.0 | 8.1 | 6.2 (-) |
| 4 | 8.3 | *** | 9.3 (+) |
| 5 | 9.6 | -- | 9.8 (+) |
| 6 | 6.9 | *** | -- |
| 7 | 13.1 | 9.7 | 11.0 (+) |
| 8 | 10.7 | -- | 10.3 (+) |
| 9 | 10.6 | 9.9 | 9.7 (+) |
| 10 | 14.5 | 10.3 | 14.5 (+) |
| 11 | 13.5 | 10.6 | 13.8 (-) |
| 12 | 16.3 | 8.9 | 13.6 (+) |
| 13 | 12.2 | 9.7 | 11.9 (+) |
| mean | 11.0 | 9.7 | 10.8 |
| $\sigma\%$ | 25.2 | 5.5 | 21.5 |

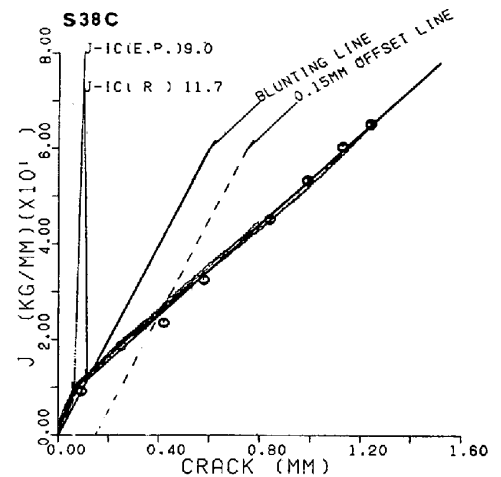


図4 S38C鋼の電位差法R曲線、試験は上表と別個に行なわれ、 $J_{IC}(EP)$, $J_{IC}(R)$ もこの実験結果のみより求められた。7本の電位差法R曲線が完全に一致している。

SS41

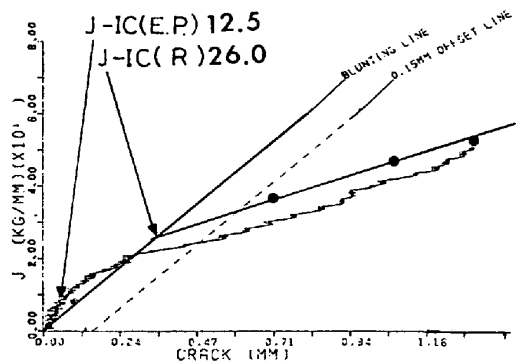


図5 Blunting line とのずれが大きい。

よる処理ができない場合、簡単な自乗演算素子を用いた回路をX-Yレコーダに付加することによって実行できる。この変換と非線形回帰を併用する方法は一般には無意味であるが、マイコンのようなメモリの不足の場合には有益である。

4. R曲線の形状と問題点

J_{IC}値を求める場合はき裂開始点のみ定めれば十分である。しかしASTM E24規格案ではR曲線法を指定し、電位差法等の単一試験片法はR曲線法と同じ情報が得られる場合に限定している。ストレッチゾーン形成、およびき裂成長に対する電位差変化を予め求めておけば、電位差法によってもR曲線を得ることが出来る。図4~図7に電位差法で求めたR曲線を示す。これらはR曲線法と対比するために複数個の試験片を用いASTM規格案及び機械学会案の手順によって試験を行ない、併せて求めた電位差記録をもとに作製したものである。図4のS38C鋼の場合、すべての電位差法によるR曲線(以下連続R曲線と記す)は一致した。R曲線法による測定点がこの連続R曲線からバラツキのは、この曲線を見る限り、材料固有のバラツキではなく、き裂長さを定める過程に発生している。Blunting lineは多くの報告にあるように、ここで示した材料ではすべて一致せず、CTODを過大に評価している。

連続R曲線のblunting line近傍をみると、両者はR曲線法で取扱われるような直線の交差ではなく、大きくわん曲していることが特に図4、図5では明瞭である。このため直線外による交点は機械学会案の如く、真のblunting lineが与えられたとしても過大評価することになる。この考えはき裂の発生がblunting line上のR曲線に変化を与えることを前提としており、図2でA点を開始点とすることに相当する。これを定証するためには、例えば図2のA,B,C点前後で負荷を中止した試験片の破面上のき裂の有無を調べる必要がある。著者らは多くの破面観察を行なった。実験の性質上AC間あるいはCB間で除荷した確証は得られないが、A点をき裂開始点とすることを否定する観察結果はなかった。荷重の増加によりストレッチゾーンがある大きさに達した後、破面中央の平面ひずみ部でき裂が開始し(図8-6)、荷重の増加に伴い幅と長さが増加し、ほぼ試験片幅に達した時(図8-4)外挿線にのり、成長すると推定される。J_{IC}が極限でK_{IC}に小試験片でも一致するのは、厚さ中央(常に平面ひずみ状態)の挙動を捉えるからで、(図8-6)点で求める方が合理的と思われる。巨視的な安定破壊開始よりもこの点が低すぎるとの理由で現行のR曲線法の矛盾を容認することは、材料定数を求めるとの立場、及びK_{IC}との関連で不適で、現行の方法が客観性の点で定まると理解すべきであろう。この意味で電位差法に客観性をもたせる非線形回帰は意義があると思われる。

4. まとめ 電位差記録を非線形回帰することにより、客観性あるJ_{IC}値を得ることができた。文献省略 討論16 (中村, 布村) 謝辞

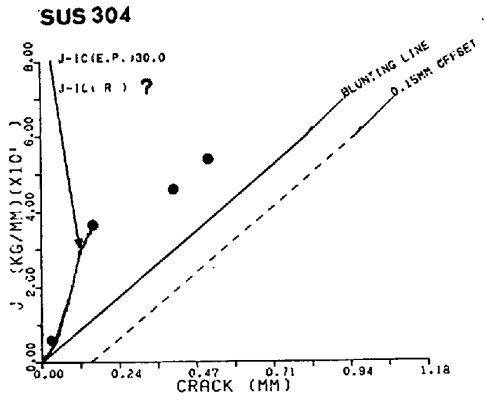


図6(上) SUS 304, 図7(下) 2024-T3

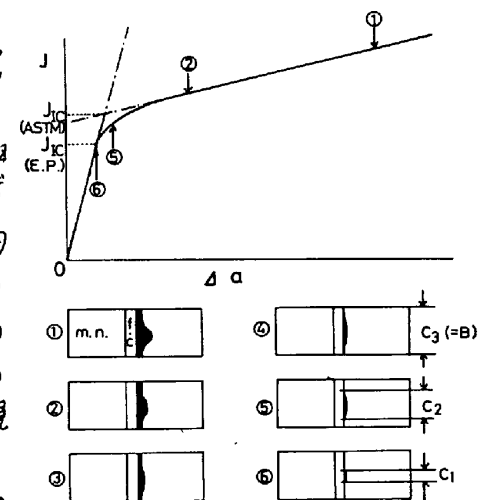
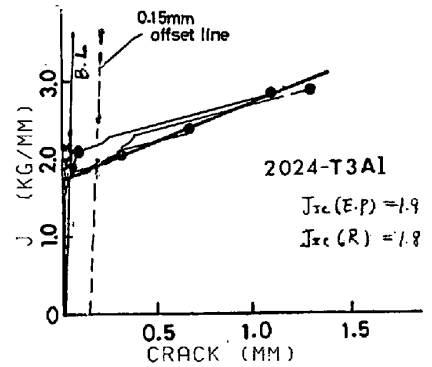


図8. き裂とR曲線の関係の推定