

## 討16 靱性測定法の現況

長岡科学技術大学

中村正久

東京工業大学 精密工学研究所 布村成具

### 1. はじめに

構造材料は外力による塑性変形あるいはき裂の進展(局部破壊)がある限度を越えるとその機能を喪失する。前者に対する材料の抵抗力は降伏強さとして前世紀から正しく把握されてきた。後者は靱性として定性的には捉えられていたが、その定量化は近年の構造物の大型化と高強度化がそれを強く必要としたため、破壊力学としてここ20数年の間に飛躍的に進歩をとげた。

き裂の生長により解放される歪エネルギーと形成される表面エネルギー関係より求めたGriffithの概念はIrwin-Orowanによって構造材料の靱性値 $G_c$ へと導かれた。 $G_c$ は単位き裂を作るに必要なエネルギーで、Griffith crackほど明瞭な意味を持たないが、実験結果よりその靱性評価の妥当性は認識されている。特に平面ひずみ条件での $G_{Ic}$ は不安定破壊開始の最低の負荷の大きさ、あるいは許容欠陥寸法を与える材料定数として用いられる。現在ではこの $G_{Ic}$ 値を(1)式をもつ

$$(1-\nu^2) K_{Ic}^2 = G_{Ic} \cdot E \quad (= J_{Ic} \cdot E) \quad (1)$$

で変換した $K_{Ic}$ が平面歪破壊靱性と呼ばれている。疲労き裂を付した3点曲げ試験片、コンパクト試験片およびC型試験片を用いての $K_{Ic}$ 試験は1972年にASTMで規格化され、幾度かの改訂を経て現在ASTM規格E399-78として世界的な基準として用いられている。 $G_{Ic}$ も $K_{Ic}$ も共に弾性計算をそこなわない程度の小規模降伏の範囲を対象とした線型破壊力学で評価されたものであるため、規格はこの小規模降伏と平面ひずみ条件を満たすため、試験片寸法の最小値を厳しく定めている。

正しく評価された靱性値は降伏強さに対して反比例に近い関係にあり、中低強度鋼の破壊による機能の喪失は、降伏による機能の喪失に比べてはるかに機会が少ない。このため高強度鋼に対するような設計にそのまま使える定量的評価の要請は小さかった。構造物の巨大化により、その必要性は増してはきたが、ASTM E399規格によって $K_{Ic}$ を求めるためには巨大な試験片(原子炉圧力容器A533B-1は $K_{Ic} = 160 \text{ MPa m}^{1/2}$ ,  $\sigma_s = 500 \text{ MPa}$ 程度であるから幅及び長さ500mm, 厚さ250mmのコンパクト試験片)が必要で、素材および設備の点から実施は困難である。

大規模降伏の範囲をも対象とする靱性値として、き裂先端開口変位CODがWells<sup>(1)</sup>によって提案され、これが小規模降伏の極限において概念的に $G_{Ic}$ と一致することが証明され、一時期積極的に中低強度鋼の靱性評価に取り入れられた。径路独立J積分がRice<sup>(2)</sup>によって非線型挙動をする弾性体に対して単位き裂形成に必要なエネルギーに等しいことが証明された。J積分も(1)式を経て $K$ 値に変換し、応力計算が容易な点および物理的意味がCODより理解容易な点から、CODに代り中低強度鋼の靱性評価の主流となる傾向にある。COD測定が大規模降伏以後の破壊の機構の解明に先行して不完全な形で確立してしま、たこともこの傾向を強めていると思われる。以下シンポジウムで中心的に討論されると思われるJ積分測定法についてその概要を述べるとともに、破壊力学以前の靱性値との関連を述べる。

### 2. $J_{Ic}$ 試験法

理想的なき裂に対してJ積分は(2)式で与えられる線積分で弾性体および全ひずみ理論塑性体に対してその径路独立性(材料定数であることの保障)が証明されている。金属材料の塑性変形をもっとも正し

$$J = \int (W dy + \vec{T} \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (2)$$

く表わすと思われるひずみ増分理論塑性体に対する径路独立性の証明は現在のところない。しかし有限

要素法計算によれば近似的に径路独立が成立するようである<sup>(3)</sup>。

J<sub>Ic</sub> の実際的な計算で(2)式を直接用いることはなく、計算は(3)式により実験的に、あるいは(3)式を基に得られた実験式によって行なう。<sup>(5)(6)(7)</sup> J<sub>Ic</sub> の計算には荷重-荷重点変位関係と共に安定き裂開始点を

$$J = - \frac{\partial V}{\partial a} = \frac{V(a) - V(a+\Delta a)}{\Delta a} \quad (3)$$

定めることが必要で、この求め方にR曲線法、フラクトグラフィ法、コンプライアンス法、電位差法、AE法、超音波法等がある。

(R曲線法) R曲線(安定破壊抵抗曲線)を得るためには単調増加荷重のもとで予き裂先端からのき裂増分  $\Delta a$  が必要である。いわゆるR曲線法では複数個(4個以上)の試験片を適当な荷重から除荷し、マーキングの後破断して、破面上の疲れき裂先端からの増分を求める(図1)。各々の除荷点から計算されたJ値をこのき裂増分に対しプロットし、これらが規格の指定を満足するとき、直線回帰を行なう。もし満足しないときは更に実験点を追加する。一方き裂開始前にもき裂先端に鈍化があり、この長さもき裂増分として測定されるから、これを表わす鈍化曲線と回帰曲線の交点を安定き裂開始点とみなし、J<sub>Ic</sub> を求める。ASTM E 24 委規格案<sup>(8)</sup>及び日本機械学会推奨案においては、このR曲線法をJ積分評価の基本として採用している。ASTM案において指定されている(2の $\sigma_{flow} \Delta a$ )なる直線が正しい鈍化曲線を表わしていない点について多くの実験的証拠がある<sup>(9)</sup>。しかるになおこの直線を採用していることは物理的意味よりも得られた値の客観性に主体が置かれたためと思われる。日本機械学会案では鈍化直線(曲線ではない)を実測するか、または信頼おける破断開始点の見掛けのき裂増分を測定することを要求している。

有限要素法解によれば鈍化曲線は上に凹な曲線で、この直線近似にまず問題がある。更に加工硬化のまったくない材料の場合、この曲線はヤング率Eで一義的に定まる。塑性変形領域での加工硬化率が増すと、この曲線は変化し、立上りが鋭くなる(図2)。<sup>(10)</sup> 鋼では硬化率もひずみの関数であり、塑性域内のひずみ分布も一律でないため、材料に適した鈍化曲線を実験式で与えることはできない。ASTM法の $\sigma_{flow}$ は加工硬化とヤング率を漫然と含んだ値であり、評価の客観性の立場からヤング率の直接の関数として与えられていない点も非難はできないであろう。

(フラクトグラフィ法) 数本の試験片を破断し、破断面上のストレッチゾーン幅(SZW)より求めるこの方法は適用性がなく、経済性の面でも優れている。大規模降伏状態においてもき裂先端開口変位は実在し、小規模降伏状態でのCTOD<sub>Ic</sub>概念(G<sub>Ic</sub>と同じもの)の拡張として大規模降伏状態でもCTOD<sub>Ic</sub>の存在が期待できる。ただ旧来のCOD測定におけるCTOD<sub>Ic</sub>は破壊と先端の塑性変形を区別せず、最大荷重時の開口量として定義されており、J<sub>Ic</sub>評価と一致しない点に注意が必要であろう。安定破壊開始のCTOD<sub>Ic</sub>は平面ひずみ条件を満足する破面上の局部(厚さの中心部)に限定すれば、そのSZWと1:1の対応がある。破面上でこの限界SZWを測定し、また別の試験片を用意してSZW-J関係直線を作ることによってJ<sub>Ic</sub>を算出するこの方法は実験的にもその妥当性が認められており<sup>(11)</sup>

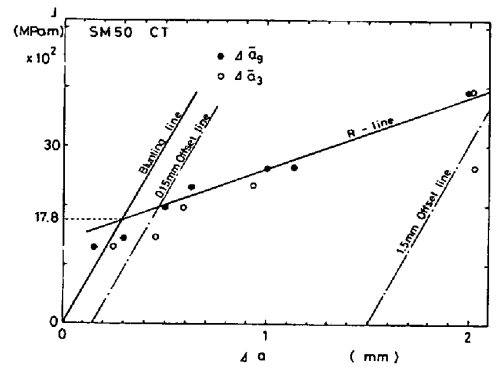


図1 R曲線法によるJ<sub>Ic</sub>の求め方

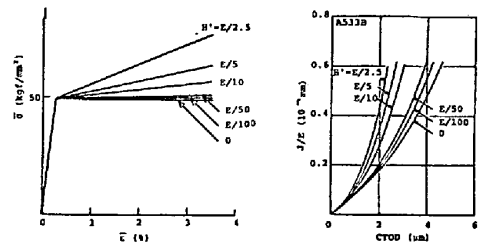


図2 加工硬化係数の異なる場合のCTODまたはSZW = J/Eの関係<sup>(10)</sup>

機械学会法ではR曲線法と併せて採用されている。特にS<sub>2</sub>W-J関係の既知の材料に対してはSEM観察のみで求められる利点があり、測定値の客観性(個人差)とJ<sub>IC</sub>概念との結合の弱さ、およびCTOD<sub>IC</sub>と限界S<sub>2</sub>Wの関係の安定性に若干難点を残している。

(コンプライアンス法) き裂ある弾性体はき裂長さが変化すると見掛けの弾性定数が変わる。J<sub>IC</sub>試験中に見掛けの弾性定数、あるいはその逆数であるコンプライアンスを測定して、き裂長さが求められるならば、R曲線を求めるまでもなく電裂南始点のJ積分すなわちJ<sub>IC</sub>を求めることができる。このコンプライアンスを部分除荷によりその勾配から求めるのが除荷コンプライアンス法<sup>(12)</sup>、原理的には一個の試験片からJ<sub>IC</sub>が求められる利点がある。除荷コンプライアンス法の欠点は、除荷コンプライアンスが他の弾性的効果と混在し、精度の良い測定が困難な点である。オニとしてJ積分が全ひずみ理論塑性体に対して有効性が証明されたものであり、除荷の影響を如何に取扱うかという点である。これはまた前者の精度向上に必要な除荷幅を制限している。

(電位差法) き裂試験片の両端より大電流を流し、き裂をはさむ位置で電位差を測定すれば、き裂長さに応じた電位の変化が検出される。この点よりき裂南始点を求め、その点までの荷重-荷重点変位記録よりJ<sub>IC</sub>を計算する(図3)。この方法も前述のコンプライアンス法や後述するAE法、超音波法と共に単一試験片でJ<sub>IC</sub>が求められる可能性を有している。電位差はき裂の進展のみでなく、き裂周囲の塑性変形によっても変化するため両者を分離し南始点と定めねばならない。この分離と客観的に行なう手法の確立と、求められたき裂発生点の信頼性の保証が解決されるべき問題として残されている。

(AE法) 安定き裂の成長において発生する弾性波を捕捉してき裂南始点を定め、J<sub>IC</sub>値を計算する方法である。弾性波はき裂の成長のみならず、塑性変形、界在物の破壊はく離からも発生し、これらの区別の困難さが適用できる材料を限定している。しかし現象によって音源で発生する弾性波の成分は異なっている筈で、周波数分布を求められる広帯域の測定と伝達関数の補正が可能になるならば、この方法に対する特別の制約はない。北川、岸らのAEFT研究会等において積極的にその検討が行なわれている。

(超音波法) き裂の南始点の検出を超音波探傷法の原理により行なうもので、CT試験片のき裂前方から超音波を送り、反射波よりの検出がまず試みられた<sup>(13)</sup>。小林<sup>(14)</sup>らはき裂面に垂直に超音波を導入し、検出を試みており、測定法自体がまだ検討の段階にある。他の単一試験片法に比べて設備的に簡便で、その実用化が期待されている。

ASTME 24委案および日本機械学会案がすでに提案されているが、いずれも問題点を残しており、特に両者の整合と単一試験片法の取扱いに関する研究の積重ねが必要と思われる。

### 3. その他の靱性試験法との関係

(J<sub>IC</sub>とK<sub>IC</sub>) 不安定破壊特性を表わすK<sub>IC</sub>はその破壊様式が小さなvoidの合体であるデイル構造である限りJ<sub>IC</sub>との関係は(1)式で表わされる。フェライト系の中低強度鋼は低温においてへき南により破壊することがあるが、この場合のK<sub>IC</sub>は(1)式を用いてJ<sub>IC</sub>より求めることはできない。これは単位破面を形成するのに必要なエネルギーがデイル構造とへき南では当然異なるためである。100%へき南破壊の破壊靱性は100%のへき南破壊を行なわなければならないが、多くのへき南破壊は多量のデイル、シアリッジを混在しているため、凝へき南の場合

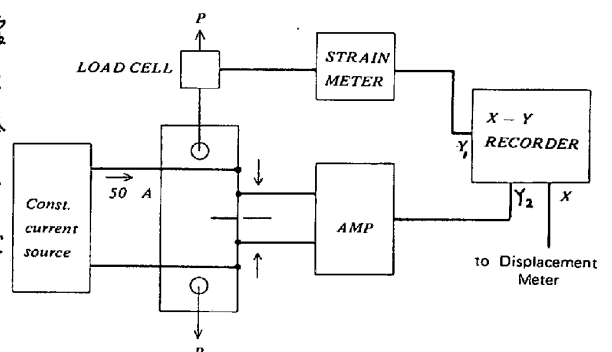


図3 電位差法の測定記録系統図 変位は荷重点変位またはCODを求める。

合を含めて、デイルポル形式の  $J_{Ic}$  から換算して求めることが、まったく誤りであるとはいえない。

(シャルピー衝撃試験) 破壊力学以前の靱性を求める試験法を代表するものとしてシャルピー衝撃曲げ試験がある。この試験の結果を破壊力学パラメーターに結びつけようとする努力が大きく払われている。V切欠試験片により求められる脆性—延性遷移温度 (FATT,  $T_{r15}$  など) 及び上部シエルフエネルギー (CVN) は破壊力学的パラメーターに密接が深い。Rolfe<sup>(15)</sup> は数種の鋼の CVN が有効な  $K_{Ic}$  (凝へき開あるいはデイルポル破壊) との間に(4)式の実験的関係を見出した。また Ault<sup>(16)</sup> は、より広範囲

$$(K_{Ic}/\sigma_s)^2 = 5 (CVN/\sigma_s - 0.05) \quad (4)$$

$$(K_{Ic}/\sigma_s)^2 = 1.37 (CVN/\sigma_s) - 0.045 \quad (5)$$

な靱性ある材料を対象として実験式(5)の成り立つことを示した。計装化シャルピー試験によれば CVN は最大荷重で破断する場合吸収されるエネルギーにほぼ等しく<sup>(17)</sup>、 $J_{Ic}$  測定に近い状態にあり、これらの関係は合理的と思われる。しかしこれには切欠先端の応力集中、塑性拘束及び破壊開始点などがすべて同一と仮定した場合のことで、類似の材料間で結果の再現性は充分期待できるが間接的推定の域を出ない。遷移温度<sup>(17)</sup> あるいは遷移域吸収エネルギーを用いた同一の試みは多い。

(計装化シャルピー試験) V切欠計装化シャルピー試験によれば前述の CVN を最大荷重点エネルギーに置き換えることができ、(4)(5)式の適用範囲は若干増すが、切欠感受性が材料に大きく依存するため<sup>(19)</sup> あまり多くは期待できない。疲れ予き裂のある試験片を用いるならば、それは破壊力学試験であり、試験片寸法の制約を満たすならば2節のいずれかの手法によって  $J_{Ic}$  を求めることができる。しかし動的なき裂長さの測定法はまだ確立されておらず、静的キャリブレーションに基いたフラクトグラフィ法が唯一のものであり、これもキャリブレーションの適否が問題である。測定法が確立すれば、 $J_{Ic}$  の動的特性および温度依存性研究の重要な手段となる。

(その他の試験) notched round bar NRB, surface-flawed SF, double-edge notch DSN, double cantilever beam DCB 試験片などの切欠引張試験片が多く試みられており、特に NRB は歴史が長い。さらに dynamic tear 試験、落重試験 (NDTT) など多く検討されている。これらは限定された材料用途に対して、良い靱性値を提供するが、中低強度鋼に対しては破壊力学パラメーターと直接結びつけることが困難である。

#### 4. まとめ

中低強度鋼の靱性評価のため現在  $J_{Ic}$  がもっとも有望であり規格化が進行しているが、そこにも解決されねばならない多くの問題がある。 $J_{Ic}$  以外の評価は限定された用途に有効であるが一般的なパラメーターとはなり得ない。

#### 引用文献

- (1) Wells, A.A., British Weld. Jour. 10(1963), 563 (2) Rice, J.R., ASME E35(1968), 379 (3) Hayes, D.J., et al, Int. Jour. Fractur 10(1974), 17 (4) Begley, J.A., et al, ASTM STP 514 (1972), 1 (5) Rice, J.R., ASTM STP 514 (1973), 231 (6) Bucci, R.J., et al, ASTM STP 514(1972), 40 (7) Merkle, J.G., et al, ASME E96(1974), 286 (8) ASTM E24-04-01 (9) 小林, 機構論, No 780-9 P1 他多数 (10) 三好他, 機構論, No 750-11, P253 (11) Kobayashi, H., et al, Proc. ICF4(1977), 583 (12) Clarke, G.A., et al, ASTM STP 590(1976), 31 (13) Underwood, J.A. Weld. Inst. (1976), 31 (14) Hirano, K., et al, Proc. 23rd Jap. Test Mat. Cong. (1980), (15) Rolfe, S.T., et al, ASTM STP 463(1970), 124 (16) Ault, R.T., et al, AFML-TR-71-27 (17) Nunomur, S., Bull. Tokyo Inst of Technology No123(1974), 101 (18) Greenberg, H.D., et al, Eng. Fracture Mech 1(1969), (19) Ritchi, R.O. "What does the Charpy test really tell us?" ASM(1978), 54 (20) Orowan, E., Reports on Progress in Physics, 12(1949), 185