

金沢大教育 広瀬 幸雄, 京大工 田中 啓介, 金沢工大 矢島 善次郎

1. 緒言

本研究では球状黒鉛鋳鉄材を用いて常温および低温において破壊靱性試験を行ない、定き裂発生点 $J_{IC}$ およびき裂発生応力拡大係数 $K_{IC}$ を電位差法<sup>1)</sup>で求め、これら $J_{IC}$ ,  $K_{IC}$ がRカーブ法より求めた $J_{IC}$ と対比することをSEMによる破面観察より明らかにし、この材料の破壊靱性評価法について検討を加えた。また破面のX線フラクトグラフィ 実験結果から $K_{IC}$ との相関について破壊機構に関連して検討した。

2. 実験方法

2.1 材料および試験片

供試材は球状黒鉛鋳鉄の40x250x200mmの平板で鋳造しである。化学成分および機械的性質はwt%; 3.70C, 2.40Si, 0.40Mn, 0.04P, 0.018S, 降伏強さ $\sigma_y$ (0.2%耐力)は40.2kg/mm<sup>2</sup>, 引張強さ $\sigma_B$ は58.5kg/mm<sup>2</sup>, 伸びは6.7%である。また黒鉛は球状で球状化率85%で基体組織はフェライトで微量パーライトが存在する。平板よりコンパクト引張型試験片(CT)および三点曲げ試験片(TPB)を切欠き方向が一定となるよう採取した。CTおよびTPB試験片形状・寸法をFig.1 (A), (B)に示す。

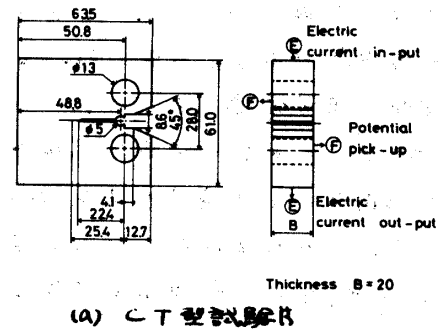
CT試験片は切欠き先端に $S=0.12, 0.25, 0.5, 1.0$ mmの鋭化切欠きを放電加工により入れ、また $S=0$ mmのものは圧入試験機により $K_{fmax}=40$ kg/mm<sup>3/2</sup>の条件で疲労き裂を入れた。TPB試験片は切欠き先端に疲労き裂を導入した。両試験片とも切欠き比 $a/W$ は $0.5^{+0.05}$ とした。

2.2 破壊靱性試験

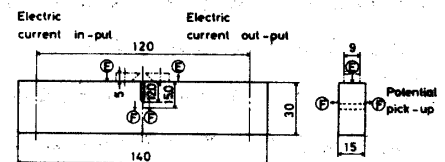
破壊靱性試験は島津オートグラフ DSS 10Tを用いクロスヘッド速度1mm/minで行った。き裂発生点の決定は電位差法で行い Fig.1 (A), (B)中の⑤点より直流30Aの一定電流を流し、き裂発生に伴う④点間の電位差変化を検出することにより行った。CT試験片の場合荷重(P)-着力点変位(U)およびP-電位差( $\Delta U$ )線図を記録した。TPB試験片では常温から-150°Cの範囲で液体窒素を冷媒とした低温槽を使用し、P-U, P-開口変位( $\sigma$ )およびP- $\Delta U$ 線図を記録した。またRカーブの構成はBogley, Landauの方法<sup>2)</sup>による。

2.3 SEMおよびX線による破面観察

破壊靱性試験後の破面をSEMおよびX線により観察した。SEMによる観察は疲労き裂もしくは切欠き先端で行った。またストレッチゾーン幅(SZWS)およびストレッチ



(A) CT型試験片



(B) TPB型試験片

Fig.1 破壊靱性試験片の形状寸法

ゾーンの限界値 ( $SZWC: S_c$ ) を測定した。

X線による破面観察は Fig. 2 に示す寸法および疲労予き裂先端近傍板厚中央部で  $1 \times 10 \text{ mm}^2$  の照射域で X線応力測定機を用いて  $\theta = 0^\circ$  の半価幅  $B$  を Table I に示す条件で測定した。深さ方向での測定は破面を逐次電解研磨し新生面に対して  $B$  を測定し母材の半価幅  $B_0$  との比を求めた。

Table I. X線条件

Characteristic X-ray	Cr-K $\alpha$
Diffraction plane	(211)
Filter	V
Tube voltage (KV)	30
Tube current (mA)	16
Scanning speed (deg/min)	4
Soller slit divergence (deg.)	0.15

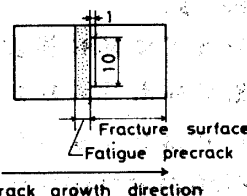


Fig. 2 X線破面観察位置

3. 実験結果および考察

3.1 破壊動性試験

き裂発生点の検出は電位差法によったが検討のため常温の破壊動性試験において Rカーブ法およびストレッチリフト法との比較を行った。Fig. 3 に CT 試験片で  $S=0 \text{ mm}$  の  $P-u$ ,  $P-\Delta V$  線図を示す。ここで  $P-u$  線図は全体的にカーブしたものとされており、 $P-\Delta V$  線図には二つの変曲点がある。A 点に対応する荷重まで負荷しその後除荷し疲労破壊したものについて SEM 観察した結果ストレッチゾーンおよび安定き裂は見られず A 点での変曲点は初期荷重による疲労き裂先端の開口によるものと推定される。つぎに矢印 (A) を示す変曲点について検討する。A~d 点までの荷重まで負荷しその後除荷し疲労破壊させたものについてこのマクロ破面を Fig. 4 に示す。A のものでは疲労き裂先端に安定き裂は観察されない。変曲点以後の b 点のものでは疲労予き裂とマークのための疲労破面の間に安定き裂が見られ荷重の増加する c, d ではさらにこの安定き裂は増加している。このことから矢印で示す変曲点がき裂発生点と一致するものと推定される。

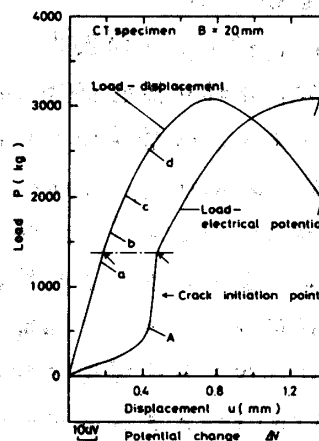


Fig. 3  $P-u$ ,  $P-\Delta V$  線図

Compact tension specimen B = 20 mm

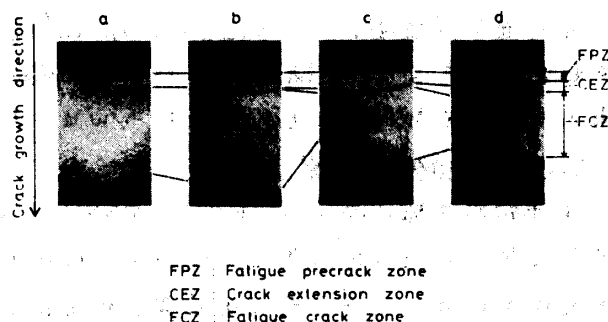


Fig. 4 マクロ破面

Fig. 5 に  $S$  と  $J$  との関係を示す。ここで  $S-J$  の関係での折れ曲がり点を  $J_{IC}$  とすると  $J_{IC} = 0.57 \text{ kg/mm}$  となる。また  $J_A$  は Fig. 3 中の A 点までの  $P-u$  線図より求めた  $J$  で  $J_A = 0.07 \text{ kg/mm}$  となりこの点では破面は観察されない。Fig. 6 に Rカーブの 1 例を示す。ここで Rカーブと  $S_c$  との交点が  $J_{IC}$  となり  $J_{IC} = 0.45 \text{ kg/mm}$  となる。ここで Fig. 5 より求めた  $J_{IC}$  値より小さくなる。Fig. 5 にあける  $S$  の測定値にはややばらつきがあるので本研究においては以後 Rカーブと  $S_c$  との交点より求めた  $J$  を  $J_{IC}$  とした。ここで Fig. 3 で決定したき裂発生点での  $J$  を求める

と  $J = 0.46 \text{ kg/mm}$  となりこのことからき裂発生点であることが確認された。今後き裂発生点の応力拡大係数  $K_i$  をもとて破壊靭性値とする。ここで  $J$  表示と  $K_i$  表示との間にはつぎの関係が成立する。

$$K_i = \sqrt{J_{ic} E / (1 - \nu^2)} \quad (1)$$

鋭化切欠き材の砥面上にはストレッチゾーンは観察されなかった。したが、この場合  $P-\Delta V$  線図の変曲点をもつてき裂発生点とした。  $K_i$  と  $\sqrt{g}$  との関係を図 7 に示す。  $K_i$  と  $\sqrt{g}$  は直線関係にある。  $S=0\text{mm}$  の  $K_i$  に対応する  $S$  を有効切欠き半径  $S_{eff}$  と定義すると  $S_{eff} = 20\mu\text{m}$  となる。

Fig. 8 に三点曲げ試験により得られた  $P-u$  線図の最大荷重点より得た破壊靭性値  $K_0$  とき裂発生応力拡大係数  $K_i$  の温度依存性を示す。  $K_i$  は低温になるにしたがいやややかに減少し、  $-70^\circ\text{C}$  以下ではあまり変りない。  $K_0$  は  $-20^\circ\text{C}$  以下で急激に減少し  $-70^\circ\text{C}$  以下では  $K_i$  と一致する。 図中 No mark のものは SEM 観察の結果後予き裂先端から安定き裂が成長した後ディンプル破壊を生じたもの、縦線 "1" は安定き裂が成長した後入き開破壊したものの、横線 "2" は安定き裂成長なしに入き開破壊したものを示している。

### 3.2 X線による砥面観察

Fig. 9 に 1 例を示す。  $B/B_0$  の深さ方向の分布は、  $20^\circ\text{C}$ 、  $-20^\circ\text{C}$ 、  $-40^\circ\text{C}$  のものでは表面近傍で大きくばらつきがある深さ以上では小さくなり右下がりの曲線を示さる。  $-80^\circ\text{C}$  以下では表面近傍のばらつきは少ない。  $B/B_0$  がほぼ 1 となる深さをもつて塑性域  $W_p$  とすると、  $W_p$  と  $K_i$  を降伏強さ  $\sigma_y$  で割った  $K_i/\sigma_y$  と整理すると砥面様相の違いに関係なく傾きが 2 の直線に近似された。

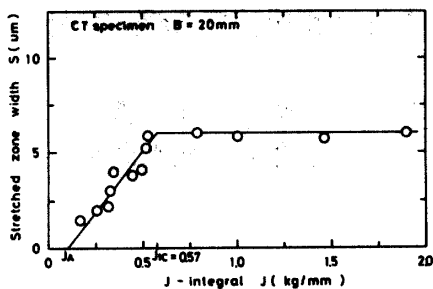


Fig. 5 S と J との関係

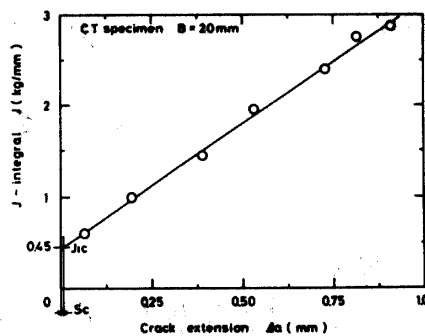


Fig. 6 R 値 - J

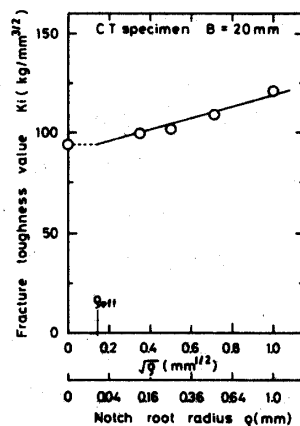


Fig. 7  $K_i$  と  $\sqrt{g}$  の関係

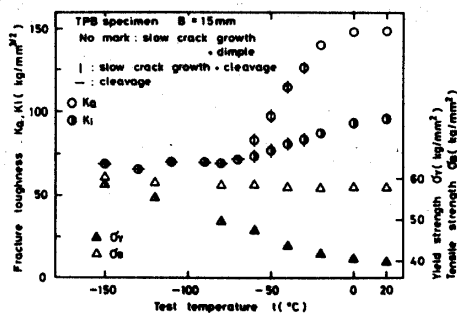


Fig. 8  $K_0, K_i$  の温度依存性

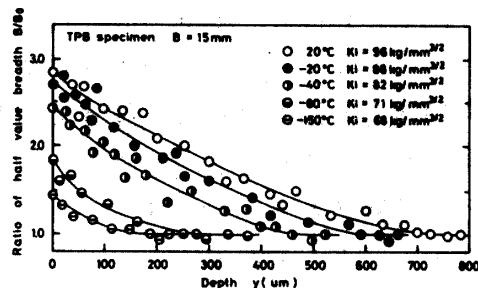


Fig. 9  $B/B_0$  と  $y$  との関係

参考文献 省略