

討15 破壊様式の遷移を伴う低温破壊靱性の評価に関する研究

東京工業大学工学部 O平野一美 小林英男 中沢一

1. 緒言

著者らはこれまでに高強度鋼を対象にして低温を含む一連の破壊靱性試験を行ない、有効な平面ひずみ破壊靱性値 K_{IC} を求める上での問題点を明らかにしてきた^{(1)~(3)}。さらにその試験結果を踏まえて、小型な試験片から K_{IC} を推定する破壊靱性試験法、すなわち疲労予き裂領域と急速破壊領域との間に観察されるストレッチ・ゾーンの解析を主体としたフラクトグラフィ的手法に基づく J_{IC} 試験法を提案し、その試験法の有効性を確認した⁽⁴⁾。しかしそのような J_{IC} 試験法のさらに広い意味での有効性は、 K_{IC} を得ることが事実上困難な高温から破壊様式の遷移を伴う低温までの広範囲の温度域にわたる破壊靱性値の評価により立証されるものと考えられる。そこで本研究では、破壊様式の遷移挙動に注目して低温破壊靱性値の評価という観点から高強度低靱性材料 SNCM8、低強度高靱性材料 SS41E を供試材として破壊靱性試験を行った。SNCM8 のような高強度鋼の低温ならぬに SS41E のような低強度鋼の低温破壊靱性値の遷移域においてもデインプル破壊からいき開破壊への破壊様式の遷移があるにもかかわらず、ストレッチ・ゾーンが存在は確認されており、さらに遷移全域にわたって K_{IC} を求めよには十分な試験片厚さを必要とすることも認識されており、そのような遷移域で小型な試験片から K_{IC} を推定する上で提案した J_{IC} 試験法は十分な試験法と考えられる。そこで、そのような遷移域において提案した J_{IC} 試験法が有効であるか否かの検討を含めて破壊靱性試験を行った。

2. 材料および実験方法

実験に供した材料は 850°C × 40min 油焼入れ、600°C × 90min 水冷焼もどし熱処理を施した SNCM8 と市販の一般構造用圧延鋼材 SS41 の 2 種類であり、直径 5φ、平行部長さ 25mm のツバ付試験片を用いて行った低温での引張試験結果を表 1 に示す。

図 1 に用いた試験片の形状・寸法を示す。室温における SNCM8 の K_{IC} および J_{IC} 試験には一部 (a) に示すエンパクト・テンションタイプ（以下 CT と略記）の試験片を用いたが、低温における試験には両材とも (b) に示す三点曲げ試験片を用いた。試験片には 0.5mm の砥石でシエトロシ状の切欠きを付した⁽⁵⁾。ASTM 規格に準じて疲労予き裂を、 K_{IC} 試験片については $a/w = 0.5$ 、 J_{IC} 試験片については $a/w = 0.6$ にするように入れた。

K_{IC} 試験は ASTM 規格の平面ひずみ破壊靱性試験法に従って行ない、また J_{IC} 試験は提案した試験法に従って行なう。試験は溶剤としてドライアイスとエチルアルコールおよび液体窒素を用いて室温から -196°C の温度範囲で行なった。

フラクトグラフィ的観察は SNCM8 については透過型、SS41E については走査型電子顕微鏡により応力の三軸性が最も強い試験片の厚さ方向の中央部について行なった。

表 1 Mechanical properties

Material	Test Temp. deg. C	σ_{ys} kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	ψ %	δ %
SS41	+15	27.1	41.0	70.7	54.0
	-35	37.6	46.0	69.7	32.6
	-70	42.3	51.9	68.4	33.6
	-100	51.9	57.9	61.7	23.2
	-140	59.0	66.6	60.4	19.2
	-190	83.9	75.4	9.4	5.7
SNCM8	+15	109	116	54.3	18.2
	-70	114	122	54.8	14.9
	-140	124	133	49.6	14.2
	-190	148	153	42.9	10.4

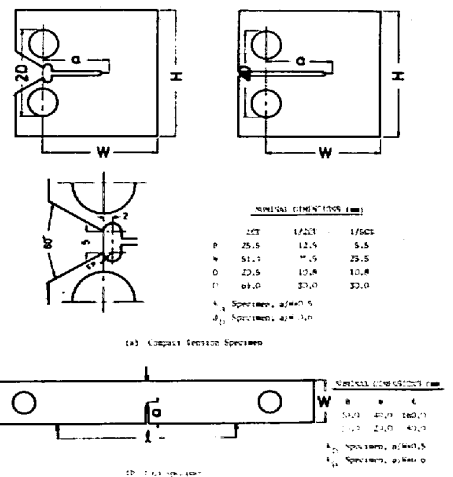


図 1. 試験片の形状・寸法

3. 実験結果および考察

3.1 K_{Ic} 試験結果 図2, 図3にSNM8およびSS41の低温における破壊靱性試験結果を示す。ここで, K_{Ic} はASTM規格の5% less法により求めた見掛け上の破壊靱性値であり, 試験片厚さの判定基準 $B \geq 2.5(K_{Ic}/\sigma_{ys})^2$ (ここで, σ_{ys} は降伏応力である) を満足せず invalid と判定されたデータである。また K_{Ic} は最高荷重 P_{max} より求めた K_{max} を反りに K_{Ic} として表示したものであり, 全試験温度範囲で不安定破壊開始時の破壊靱性値 K_{Ic} とは完全には対応せずこのように表示には多少問題があるが, 一応参考のためにプロットした。図から高強度鋼SNM8の K_{Ic} は本実験の温度範囲で試験温度の上昇とともに緩やかに増大し, K_{Ic} に lower shelf の存在は認められる, またその遷移挙動も顕著ではないことかわかる。これに反してSS41の K_{Ic} は試験片厚さ $B=20mm$ までの本実験から温度 $T = -100^\circ C$ 以下の低温域でしか求められず, それ以上の温度域における K_{Ic} の試験温度への依存性については明らかではないが, K_{Ic} は明らかに lower shelf の存在が認められ, $-100^\circ C$ 前後から急激な遷移挙動がみられることかわかる。このように低温における破壊様式の遷移に伴って破壊靱性が低下し顕著な低強度鋼SS41においても, 遷移全域において通常の実験室で行なえる試験片厚さでは K_{Ic} を求めることが困難であることかわかる。したがってSS41のような低強度鋼の破壊靱性値の遷移挙動を把握する上でも比較的小型な試験片から K_{Ic} を評価する試験法の確立は実際上からも重要な問題であると考える。

3.2 J_{Ic} 試験結果

低温での J_{Ic} 試験結果について述べる前に室温における J_{Ic} 試験から実験的に J_{Ic} 破壊条件の有効性を検討した結果について簡単に示す。

図4はSNM8の1/2CT, 1/4CTおよび1CT試験片について, フラクトグラフィ的観察からのストレッチ・ゾーン幅SZWを J に対してプロットした室温での結果である。安定破壊(引裂き破壊領域が存在)を介するかどうかの限界で決定した J_{Ic} は試験片厚さによらずほぼ一定となり, この場合の安定破壊が開始する際の J の値を J_{Ic} と呼ぶことは妥当であると考えられる。また, J_{Ic} に達する以前のSZW-J曲線は, J の値が小さい範囲で多少バラッキがあるが, 試験片厚さによらず一定であることかわかる。さらに, 安定破壊が開始した後のSZWは破壊の進行によらず一定となることかわ

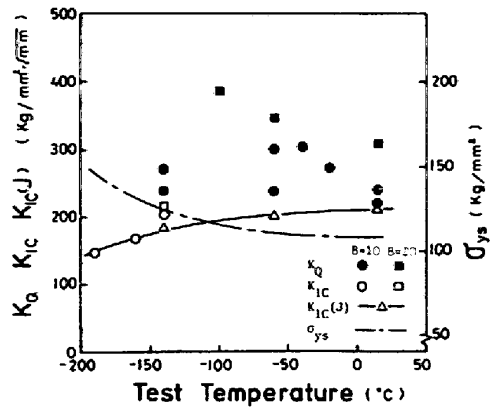


図2. SNM8の破壊靱性値の温度依存性

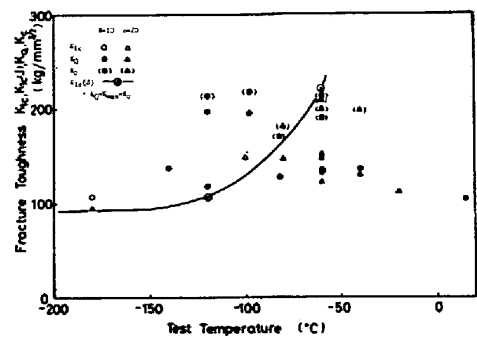


図3. SS41の破壊靱性値の温度依存性

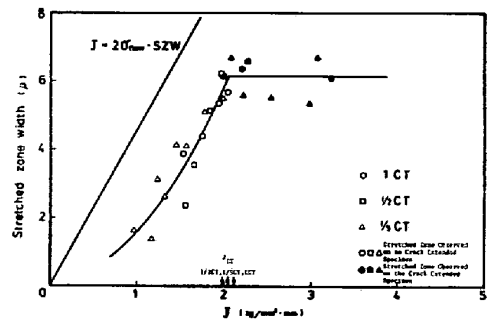


図4. J_{Ic} の試験片厚さの影響

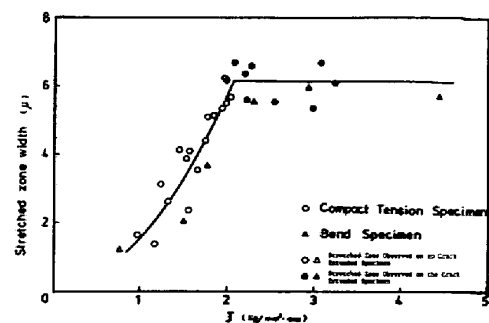


図5. J_{Ic} の荷重形式の影響

かる。

図5は室温における SNCM8 の CT 試験片および三点曲げ試験片による J_{IC} 試験結果である。安定破壊が介在するか否かの限界値として決定した J_{IC} は両者においてほぼ一致する。このように J_{IC} が荷重形式に依存しないことは、ASTM 規格に従って決定された K_{IC} に荷重形式の影響が存在するという従来の報告とも関連して重要な意味を持つものと考えられる。

以上図4および図5の結果から、安定破壊の開始点で決定した J_{IC} は K_{IC} よりもさらに広い試験片厚さの範囲で一定となり、かつ荷重形式に依存しない有用な破壊条件であることがわかる。

図6は SNCM8 の試験片厚さ $B = 10\text{ mm}$ の三点曲げ試験片による温度 $T = -140, -60$ および $+15^\circ\text{C}$ における J_{IC} 試験結果である。一般に J とき裂先端開口変位 CTOD との間には σ_{ys} を介して一義的な関係が存在するはずであるから、Begley らが仮定している $J = 2\sigma_{flow} \cdot \delta ZW$ (ここで $\sigma_{flow} = (\sigma_B + \sigma_{ys})/2$ である) なる簡単な表示が可能であるか否かは別問題として、 δZW と J との関係には σ_{ys} が何らかの形で関与しているはずである。しかし図6においてはそのような傾向は顕著ではない。そこで、 δZW と J の関係を試験温度に無関係な1本の曲線で近似した。また、 δZW は試験温度の低下とともに減少しているが、それぞれの試験温度で破壊の進行に影響されずにほぼ一定となることは前述したとおりである。この δZW と $\delta ZW - J$ 曲線より求めたそれぞれの試験温度における J_{IC} は図に矢印および表2に示すように 1.45, 1.80 および 2.03 ($\text{Kg}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$) となり、試験温度の上昇とともに増大している。

次に SNCM8 よりもさらに破壊様式の遷移挙動が顕著である SS41 の J_{IC} 試験結果について述べる。試験温度は、 K_{IC} の lower shelf 域に近く、かつ K_{IC} が得られている温度として $T = -120^\circ\text{C}$ および K_{IC} の遷移挙動域として $T = -60^\circ\text{C}$ を選んだ。 $T = -120^\circ\text{C}$ においては $B = 10\text{ mm}$ 、 $T = -60^\circ\text{C}$ においては $B = 20\text{ mm}$ の試験片を用いた。得られた結果は表2に示すように、それぞれ 0.5 および 2.12 ($\text{Kg}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$) となった。

一般に小規模降伏状態においては J と K との間には次式のような関係が成立する。

$$K = (EJ / (1 - \nu^2))^{1/2} \tag{1}$$

ここで、 E は縦弾性係数および ν はポアソン比である。そこで上式より J_{IC} を見掛け上の破壊靱性値 $K_{IC}(J)$ に換算した。その結果を表2に示す。さらに試験温度に対してプロットすると、SNCM8 については図2に△印で、SS41については図3に◎印で示すように J_{IC} 試験結果と K_{IC} 試験結果とは良く一致することわかる。さらに、SS41 の $K_{IC}(J)$ の試験温度による変化は後述する δZW の試験温度による変化と照し合せてほぼ K_{IC} の変化として妥当であると思われる、 J_{IC} 試験によれば、 K_{IC} 試験では有効な平面ひずみ破壊靱性値が得られない温度域においても破壊靱性値が評価できる。

以上 SNCM8 および SS41 の試験結果から、提案した J_{IC} 試験法に従えば、小型な試験片より低温破壊靱性値の遷移挙動が評価できるものと考えられる。

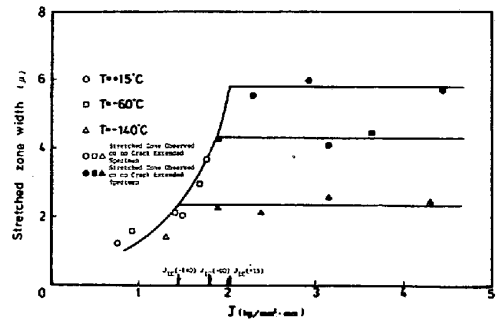
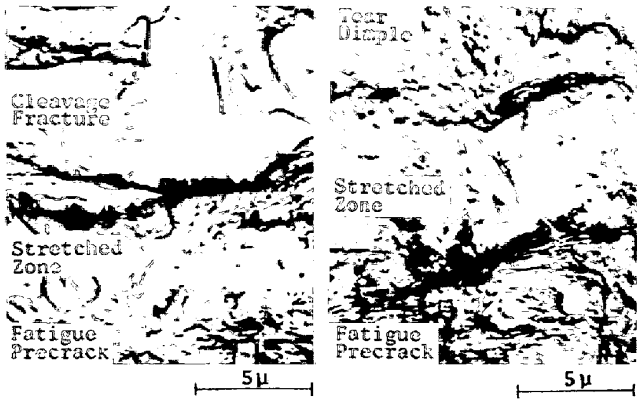


図6. SNCM8 の低温における J_{IC} 試験結果

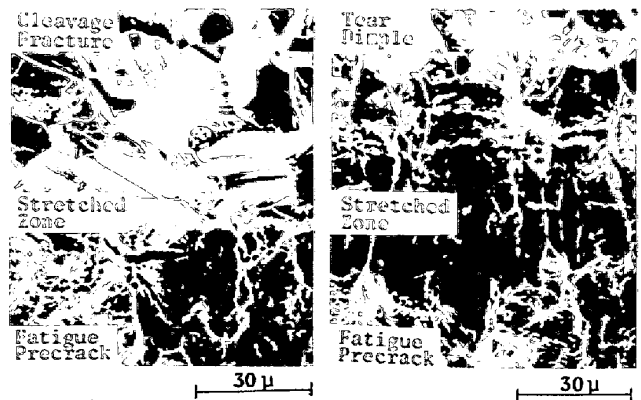
表2 J_{IC} test results

Material	Specimen	Test Temp. deg. C	B mm	J_{IC} kg/mm ² ·mm	$K_{IC}(J)$ kg/mm ² ·√mm
SNCM8	1CT	+15	25.4	2.12	221
	1/2CT	+15	12.5	1.98	214
	1/5CT	+15	5.5	2.04	217
	10×20	+15	10	2.03	216
	10×20	-60	10	1.80	205
	10×20	-140	10	1.45	185
SS41	20×40	-60	20	2.12	221
	10×20	-120	10	0.50	107

* 3 point bend specimen



(T = -190°C) (T = -60°C)
図7. SNCH8のフラクトグラフ



(T = -120°C) (T = -40°C)
図8. SS41のフラクトグラフ

さて最後に疲労予き裂先端に観察される破壊バ開始する際の限界のストレッチ・ゾーン幅SZWCの試験温度による変化について述べる。破面のフラクトグラフィ的観察より得られた代表的なフラクトグラフを図7, 図8に示す。SNCH8については、 $T = -100^{\circ}\text{C}$ 以下においては急速破壊はディンプル破壊よりへき開破壊へ遷移しているが、図7(4)に示すように $T = -190^{\circ}\text{C}$ においてもストレッチ・ゾーンが存在することからわかる。SS41については図8(a)に示すように $T = -80^{\circ}\text{C}$ 以下にはストレッチ・ゾーン形成後直ちにへき開破壊

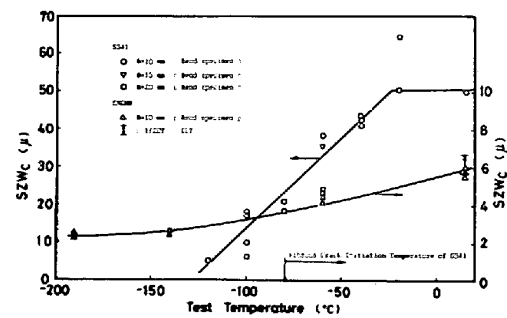


図9. SZWCの温度依存性

しているが、試験温度の上昇に伴ってディンプルで特徴づけられる安定破壊が介在したのちへき開破壊するようになる。以上のフラクトグラフィ的観察結果から、試験温度の上昇に伴って破壊靱性レベルの上昇に伴い、SZWCは大きくなり破壊靱性値を反映していることがわかる。このSZWCの試験温度に対する変化を示したのが図9である。現在、SZWCの温度依存性についてはいろいろの議論があり、統一的理解は得られていない。図からSZWCは温度の上昇に伴って増大していることがわかる。すなわち、試験温度が異なれば当然のことながら材料の機械的性質も異なり靱性レベルも異なってくるはずであるから、SZWCは温度とともに増大するものと著者は考える。しかしながら、 -30°C 前後から試験温度に無関係にほぼ一定値となる傾向を示したSS41の実験結果については、たまたま一定値になったに過ぎないものか、あるいはこの温度域における機械的性質の変化が小さいことや破壊靱性値のupper shelf域とも対応してSZWCが一定値となるたのたについては今後の詳細な実験が必要かと思われる。いずれにしてもSZWCが一定値となる温度と安定破壊が介在し始める温度とは図9に示したように似たりも一致しなかった。また、試験片厚さを種々に変化させた(1/2CT ~ 1CT)CT試験片による室温におけるSNCH8の結果さらには試験片厚さを10 ~ 20mmと変化させた $T = -60^{\circ}\text{C}$ でのSS41の三点曲げ試験片による結果を併せて考えると、SZWCは試験片形状・寸法に依存しないことがわかる。

4. 結言

破壊様式遷移を伴う低温破壊靱性の評価という観点から、SNCH8およびSS41を母材として、先に提案したフラクトグラフィ的手法に基づくJIC試験法に従って低温の破壊靱性試験を行い、破壊靱性値の遷移挙動を明らかにした。

<参考文献> 省略。なお、データは著者ら以下の文献より集録したものである。小林ら、機講論 No. 750-11 p261~p269, 平野ら、機講論 No. 760-9, p151, 平野ら、機講論(852-4) 機械学会誌