

論 文

UDC 669.15'24'26'28'249-194 : 62-25 : 539.42 : 621.73

ローター材の室温付近の破壊靱性値と平面
ひずみ破壊靱性値の条件*

菊池英雄**・鈴木 章***・青木 満****・池田一夫****

Fracture Toughness of Turbine Rotor Material Around Room Temperature
and Validity Criterion for Plane Strain Fracture Toughness

Hideo KIKUCHI, Akira SUZUKI, Mitsuru AOKI, and Kazuo IKEDA

Synopsis:

The plane strain fracture toughness of 2.8%Ni-Cr-Mo-V steels was evaluated at the lowest service temperature (around room temperature) using huge size specimen with 345 mm in thickness and 920 mm in diameter, probably the largest fracture toughness specimen ever tested in the world.

The validity criterion for K_{IC} has been investigated by using various sizes of compact tension specimens.

It is proposed that K_{IC} can be obtained when only the condition of $P_{max.} = P_0$ is satisfied, namely the linear relationship between load and displacement is maintained.

1. 緒 言

ローターが大型化すると作用応力も高くなり、素材の品質・均質性を維持することが難しくなるので、運転中の脆性破壊が問題となる。脆性破壊は低温ほど起こりやすいので、ローターの使用温度範囲の最低温度（通常室温）での破壊靱性値を知る必要がある。しかし最近製造される低圧ローター、発電機ローターの 50% 破面遷移温度 (FATT) は通常室温または室温以下であり、室温付近の靱性は極めて高いものと考えられる。一方平面ひずみ破壊靱性値、 K_{IC} は通常米国の規格である ASTM-E399¹⁾ にしたがつてもとめられる。この規格によると、室温付近の高い K_{IC} をもとめるには非常に大きな試験片を準備しなければならないため、ローターの使用温度より低い温度での試験がほとんどである。

本研究では、ASTM-E399 で示される平面ひずみ破壊靱性を得るための条件について検討を加えるとともに、その結果を利用して直径 920 mm、板厚 345 mm の大きな円板状の試験片を用いて（世界最大の試験片であると思われる²⁾）、2.8Ni-Cr-Mo-V 鋼低圧タービンローター材の最低使用温度（室温付近）での K_{IC} の評価を試

みたものである。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

供試材は真空カーボン脱酸処理した 150 t 鋼塊より鍛造した 2.8Ni-Cr-Mo-V 鋼ローター素材の鋼塊頂部に相当する直径 920 mm の余長部より採取した。Fig. 1 に示すように板 A と B は同一鍛造品から、円板 C は他の鍛造品から焼入焼もどし後ローター本体より切り離した。供試材の化学組成、熱処理、機械的性質および FATT と無延性遷移温度 (NDTT) をそれぞれ Table 1, 2, 3 および Fig. 2 に示す。

2.2 実験方法

2.2.1 14 RCT 試験

高い K_{IC} 値を ASTM-E399 にしたがつてもとめるには、なるべく厚い試験片が必要となる。供試材は直径 920 mm の円柱状であることから、通常破壊靱性値の測定に使われる Compact Tension 試験片 (CT 試験片) より FEDDERN³⁾ らの提案した Round Compact Tension 試験片 (RCT 試験片) の方がより厚い試験片を得ることができる (Fig. 3) ので、直径 920 mm の余長部よ

* 昭和 52 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 52 年 11 月 11 日受付 (Received Nov. 11, 1977)

** (株)神戸製鋼所 (Kobe Steel, Ltd., 2-3-1 Niihama Arai-cho Takasago 676)

*** (株)神戸製鋼所 工博 (Kobe Steel, Ltd.)

**** (株)神戸製鋼所構造研究所 (Structural Engineering Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

Table 1. Chemical composition of test materials.

Disc	Chemical composition, %												
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	As	Cu	Sb	Sn
A B	0.27	0.07	0.32	0.007	0.0009	1.49	0.34	2.86	0.08	0.003	0.02	0.0039	0.003
C	0.28	0.03	0.29	0.008	0.009	1.66	0.35	2.94	0.10	0.002	0.02	0.0014	0.002

Table 2. Quality heat treatment of test materials.

Disc	Quality heat treatment.
A + B	830°C 35h/water spray quench + 630°C 66h/controlled furnace cool
C	850°C 35h/water spray quench + 830°C 35h/water spray quench + 630°C 40h/controlled furnace cool

Table 3. Mechanical properties of test materials.

Dics	$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	Elong. (%)	R. A. (%)
A + B	64.2~69.3	77.3~90.0	13~20	54~62
C	69.4~73.5	81.8~87.9	17~21	58~64

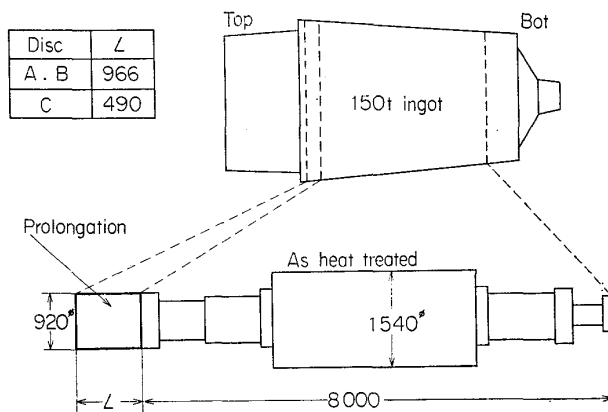


Fig. 1. Relative position of rotor and prolongation test forging in the 150 t ingot.

り厚さ 345 mm (約 14 インチ) の RCT 試験片 (Fig. 4) を加工した (以下 14 RCT 試験片と呼称)。

14 RCT 試験片に疲労クラックを導入するには大容量の疲労試験機を必要とする。本研究では 60 t 電気油圧式疲労試験機に Fig. 5 に示すような荷重増幅装置を取付けて、この原理を応用して最大荷重 150 t まで増幅し、繰返し速度 1 Hz、繰返し荷重範囲 0~150 t のもとで疲労クラックを導入した。試験片の表面で機械切欠

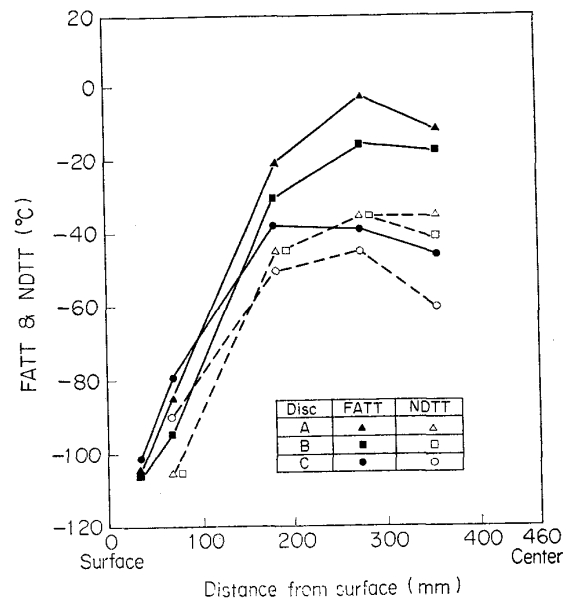


Fig. 2. FATT and NDTT of the as-received materials as a function of distance from surface.

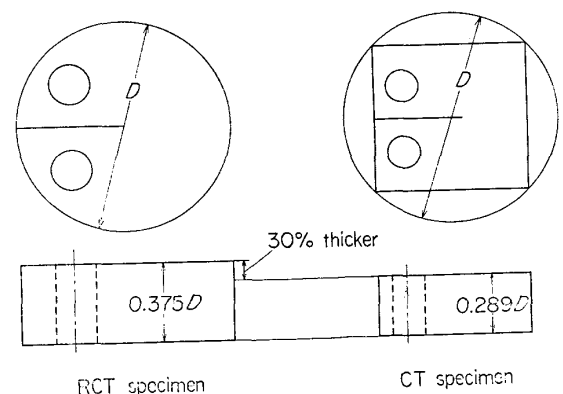


Fig. 3. Comparison of specimen preparation of CT and RCT specimen from cylindrical surface.

きの先端に約 10 mm の疲労クラックを導入するのに約 30 万回要した。Fig. 5 において、ピン D は試験片の表裏面に位置して支点の役目をし、試験片より若干大きな曲率半径を有する支持台 S は試験片の水平方向の運動をできるだけまぎつの少ない状態で回転運動に変換する働

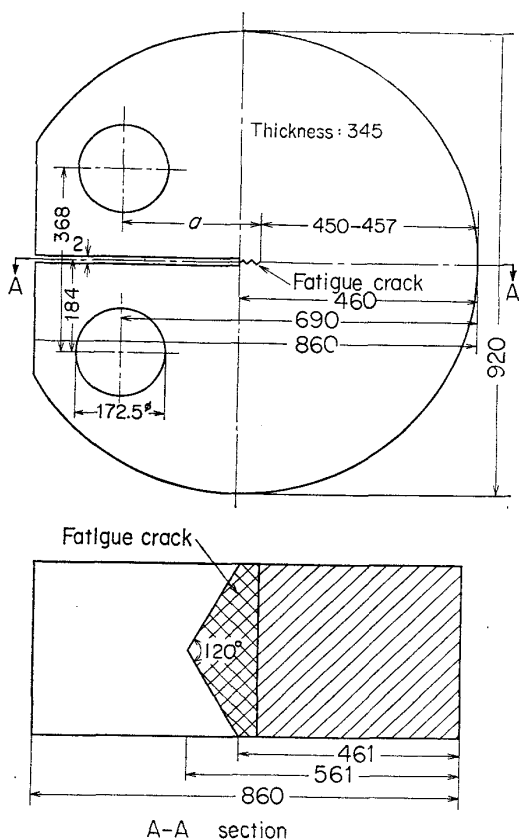


Fig. 4. 14 RCT specimen.

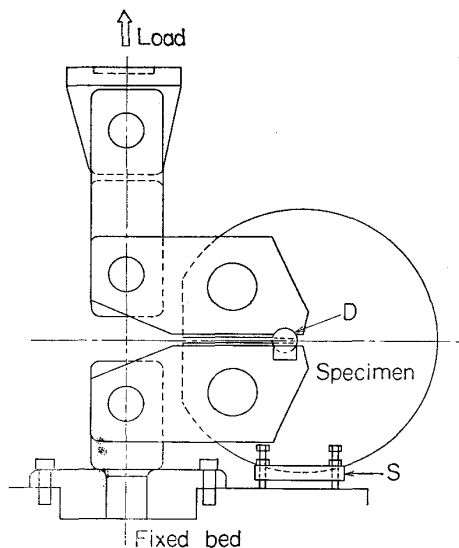


Fig. 5. Device for fatigue cracking of 14 RCT specimen.

きをしている。試験片は疲労クラック導入後、3000 t 横型引張試験機に取付け破壊試験を行なった。

2.2.2 CT 試験

14 RCT を行なった後、その破壊した試験片から Fig. に示す 3 種類の CT 試験片を採取した。CT 試験で切欠先端から破壊が進行していくと予想される線上は、Fig.

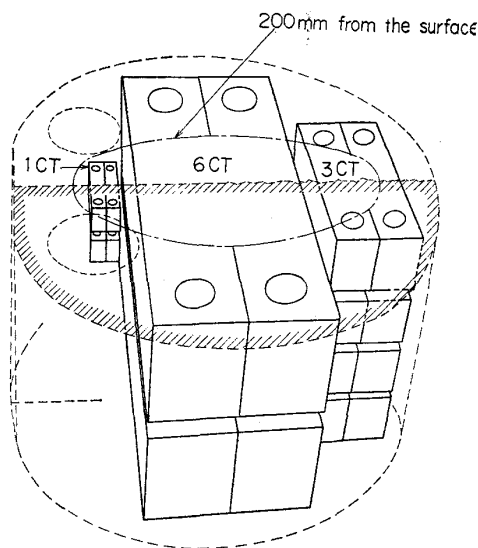


Fig. 6. Cutting of CT specimens from the fractured 14 RCT specimens. CT specimens were prepared in such a manner that the path of the fracture in fracture toughness test should be involved in the zone of shelf on the curves in Fig. 2, i. e., the area within a chain linked circle.

2 で示される FATT および NDTT がほぼ一定となる円柱材表面下 200 mm 以内になっている。

各試験片とも 60 t 電気油圧式疲労試験機を使い $K_{f \max} = 100 \text{ kg/mm}^{3/2}$ で疲労クラックを導入したのち、300 t または 100 t 万能試験機により破壊試験を行なった。

14 RCT 試験および CT 試験とも、切欠端部における切欠の開口変位をクリップゲージにより測定し、荷重と開口変位の関係を XY レコーダーに記録した。

3. 試験結果および考察

3.1 破壊靱性値におよぼす試験片寸法の影響

ASTM-E399 によると平面ひずみ破壊靱性値は次のようにしてもとめられる。

まず、破壊靱性値、 K_{IQ} を (1) 式からもとめる。

$$K_{IQ} = \frac{P_Q}{B\sqrt{w}} \cdot f(a/w) \quad (1)$$

ここで B = 板厚, w = 板幅, a = 切欠長さ

$$\begin{aligned} f(a/w) = & 29.6(a/w)^{1/2} - 185.5(a/w)^{3/2} \\ & + 655.7(a/w)^{5/2} - 1017.0(a/w)^{1/2} \\ & + 638.9(a/w)^{3/2} \quad (2) \end{aligned}$$

P_Q は次のように定義されている。Fig. 7 に示す荷重-変位曲線にてその直線部の傾きより 5% 少ない傾きを有する直線 (5% secant line) を原点を通るように引き、それと荷重-変位曲線の交点を P_s とする。Fig. 7 の (a)

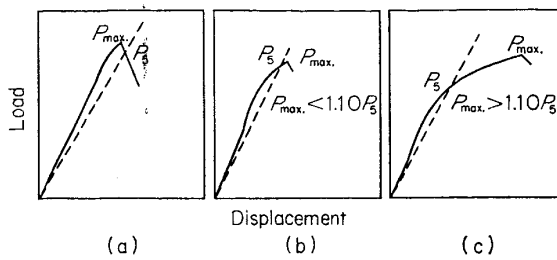


Fig. 7. Three types of load-displacement curves.

に示すように最大荷重, $P_{\max.}$ が P_5 より先に (低変位側で) 生じる場合は $P_{\max.} = P_Q$ とするが, Fig. 7 の (b) および (c) に示すように $P_{\max.}$ が P_5 より後に生じた場合には, (b) に示すような場合に限り, すなわち (3) 式を満足する場合に限り, $P_5 = P_Q$ とする.

$$P_{\max.} < 1.10 P_Q \dots\dots\dots (3)$$

このような条件のもとから決定された P_Q を (1) 式に代入して得られた K_Q が次に示す (4) 式を満足すれば K_{IC} とみなされる.

$$a \text{ および } B \geq 2.5 \quad (K_Q/\sigma_Y)^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで, σ_Y は降伏応力である.

(4) 式の試験片に関する平面ひずみ条件を満足するには, 低温での低い K_{IC} の測定や低靱性材の K_{IC} の測定の場合には小型の試験片を用いればよいが, 比較的高い K_{IC} が予想される場合には大きな試験片を使用しなければならない. そのため小型試験片を用いたことにより

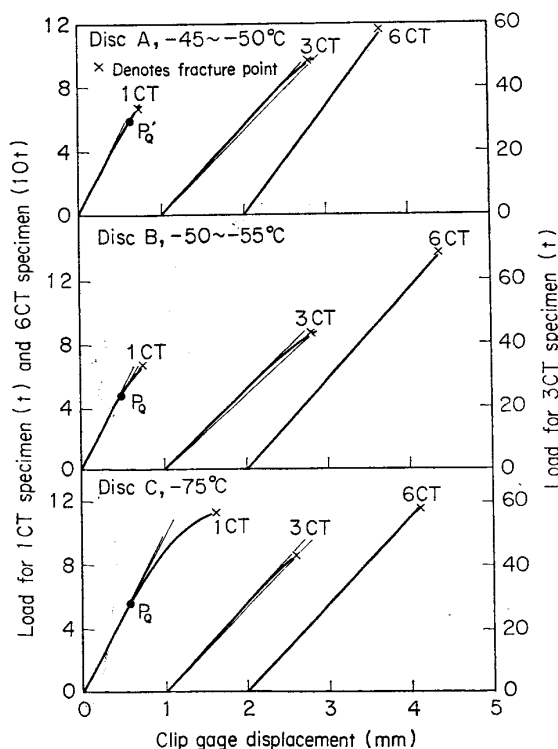


Fig. 8. Load-displacement records of CT tests.

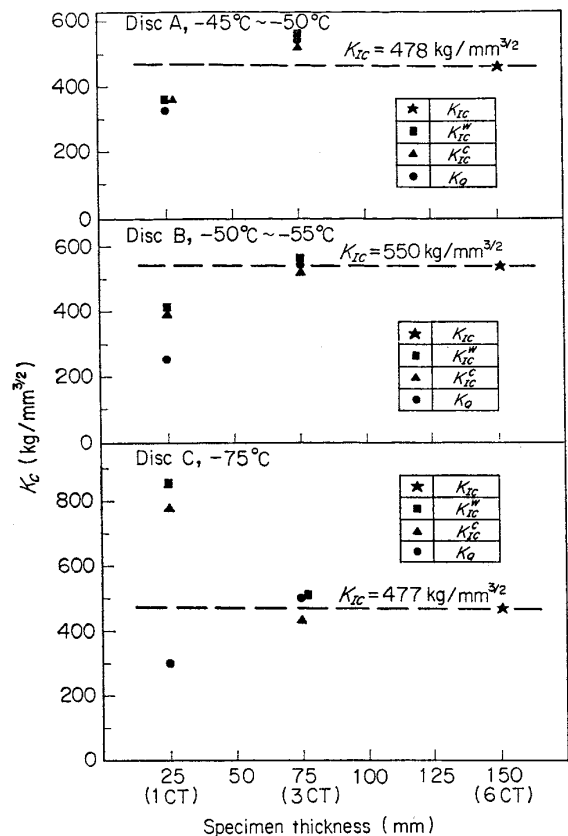


Fig. 9. Effect of specimen size on fracture toughness. Value K_{IC}^W is the K_{IC} estimated by employing the equivalent energy method⁴⁾ and also K_{IC}^B by applying the BILBY-COTTRELL-SWINDEN model⁵⁾ to the CT specimen as proposed CHELL et al.⁶⁾

ASTM-E399 を満足しない場合に K_{IC} 値を推定する方法が検討されている. WITT ら⁴⁾ は相似試験片で最高荷重までに吸収される単位体積当りのエネルギーは一定であるとの仮定に基づいて Equivalent Energy 法を提案している. また BILBY-COTTRELL-SWINDEN ら⁵⁾ が提唱する弾塑性クラックモデルを CT 試験片に適用した CHELL ら⁶⁾ の方法などが提案されている.

著者らは, これまでの経験からたとえ (4) 式が満足されなくても Fig. 7 の a に示すように破壊までの荷重-変位曲線がほぼ直線を保つていれば, すなわち (5) 式を満足すればそのときの K_Q は K_{IC} とみなせると考えてつぎに示す試験温度を選んで破壊靱性試験を行なった.

$$P_{\max.} = P_Q \dots\dots\dots (5)$$

- (i) 6 CT 試験では (3) および (4) 式とも満足する.
- (ii) 3 CT 試験では (4) 式は満足しないが (5) 式は満足する.
- (iii) 1 CT 試験では (4) および (5) 式とも満足しない.

6 CT, 3 CT および 1 CT 試験で得られた荷重-変位曲線を Fig. 8 に, K_Q 値を Fig. 9 に示す. 6 CT の切欠方向は半径方向であるのに対し, 3 CT および 1 CT のそれは円周方向である. しかし両者とも鍛造方向に対し直角方向で, いわゆる横目であることから, 同一に取り扱ってもよいと考えられる. 両図よりつぎのことがわかる.

- (i) 6 CT 試験から得られた K_Q 値は K_{IC} 値である.
- (ii) (5) 式を満足している 3 CT 試験は (4) 式を満足していないにもかかわらず, その K_Q 値は 6 CT の K_{IC} 値にほぼ等しい.
- (iii) (4) および (5) 式とも満足していない 1 CT 試験の K_Q 値は 6 CT の K_{IC} 値と等しいとはいえず, かなり小さな値となつている.

したがって, ASTM-E399 の寸法に関する平面ひずみ条件式 (4) を満足しなくても 荷重-変位曲線が破壊までほぼ直線性が維持されておれば, すなわち (5) 式が成り立つ場合には, その K_Q 値は K_{IC} 値とみなしてもよいと思われる.

3 CT および 1 CT 試験については前述した WITT ら⁴⁾ による K_{IC} の推定値, K_{IC}^w , および CHELL ら⁶⁾ による K_{IC} の推定値, K_{IC}^c , も Fig. 9 に示してある. K_{IC}^w および K_{IC}^c と 3 CT 試験の場合のように (5) 式が満足される場合には 6 CT から得られる K_{IC} 値とほぼ等しいが, (5) 式が満足されない 1 CT の場合には K_{IC} 値とはかなり異なつた値を示している.

3.2 14 RCT 試験片による室温付近での破壊靱性値

まず, 試験片 B の 14 RCT 試験を 10°C (室温) にて行なつたが, 荷重-変位曲線 (Fig. 10) に示すように 5% secant line を越え, 荷重が 1500 t になつても破壊しなかつた. この状態は, ASTM-E399 の寸法に関する条件式 (4) を満足していないし, また (5) 式も満足していない. そこで 10°C の試験を中止し, -30°C に試験片を冷却し, 再負荷し破壊せしめた (Fig. 10). 試験温度 10°C は (4) 式だけでなく (5) 式も満足しないと予想されたため, 残りの試験片 A および C についてはそれぞれ -20°C および -30°C と試験温度を下げた. その荷重-変位曲線を Fig. 11 に示す.

試験片 A および C の場合も温度を下げて試験したにもかかわらず, (4) 式を満足することはできなかったが, 試験片 A については (5) 式を満足していることから, その K_Q 値は K_{IC} 値とみなしうる. この 14 RCT 試験の K_Q 値は次式より求めた³⁾.

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{w}} \cdot f(a/w) \dots\dots\dots (6)$$

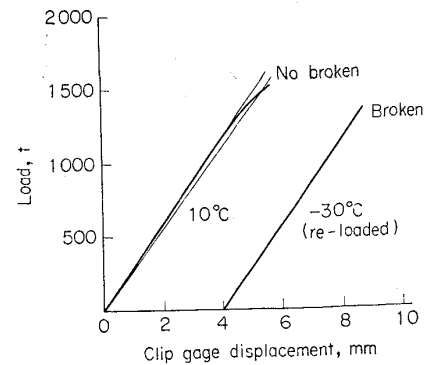


Fig. 10. Load-displacement records obtained from testing at 10 and -30°C (specimen B of 14 RCT).

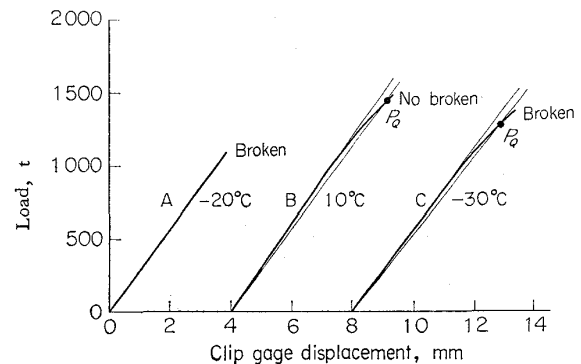


Fig. 11. Load-displacement records (14 RCT test).

$$\begin{aligned} f(a/w) = & 29.6(a/w)^{1/2} - 162.0(a/w)^{3/2} \\ & + 492.6(a/w)^{5/2} - 663.4(a/w)^{7/2} \\ & + 405.6(a/w)^{9/2} \end{aligned} \quad (7)$$

いつぼう, 試験片 C については (5) 式をも満足していないことから得られた K_Q 値は K_{IC} 値とみなし得ないが, 試験片 B の試験温度 -30°C の再試験結果 (Fig. 10) は (5) 式を満足している. 通常破壊靱性試験の前に試験片に負荷の履歴があると, 切欠先端近傍での残留応力や塑性変形の発生および切欠先端の鈍化などで試験条件で問題があるとされている. 実際試験片 B の破面の切欠先端近傍を調べると Photo. 1 に示すように疲労破面と擬劈界破面の間にディムプル模様がみられる. このディムプル模様は 10°C での試験で荷重-変位曲線が直線から偏倚し曲線になつた部分で発生したものと考えられる. しかし, -30°C での荷重-変位曲線が (5) 式を満足することからあえて K_Q を計算すると 885 kg/mm^{3/2} となり試験片 A の $K_Q = 736$ kg/mm^{3/2} に値が近いことから実用上は平面ひずみ破壊靱性値と考えてもよいように思われる.

14 RCT および 6 CT 以下の小型試験片で得られた本供試材の破壊靱性値の温度依存性を Fig. 12 に示す. ま

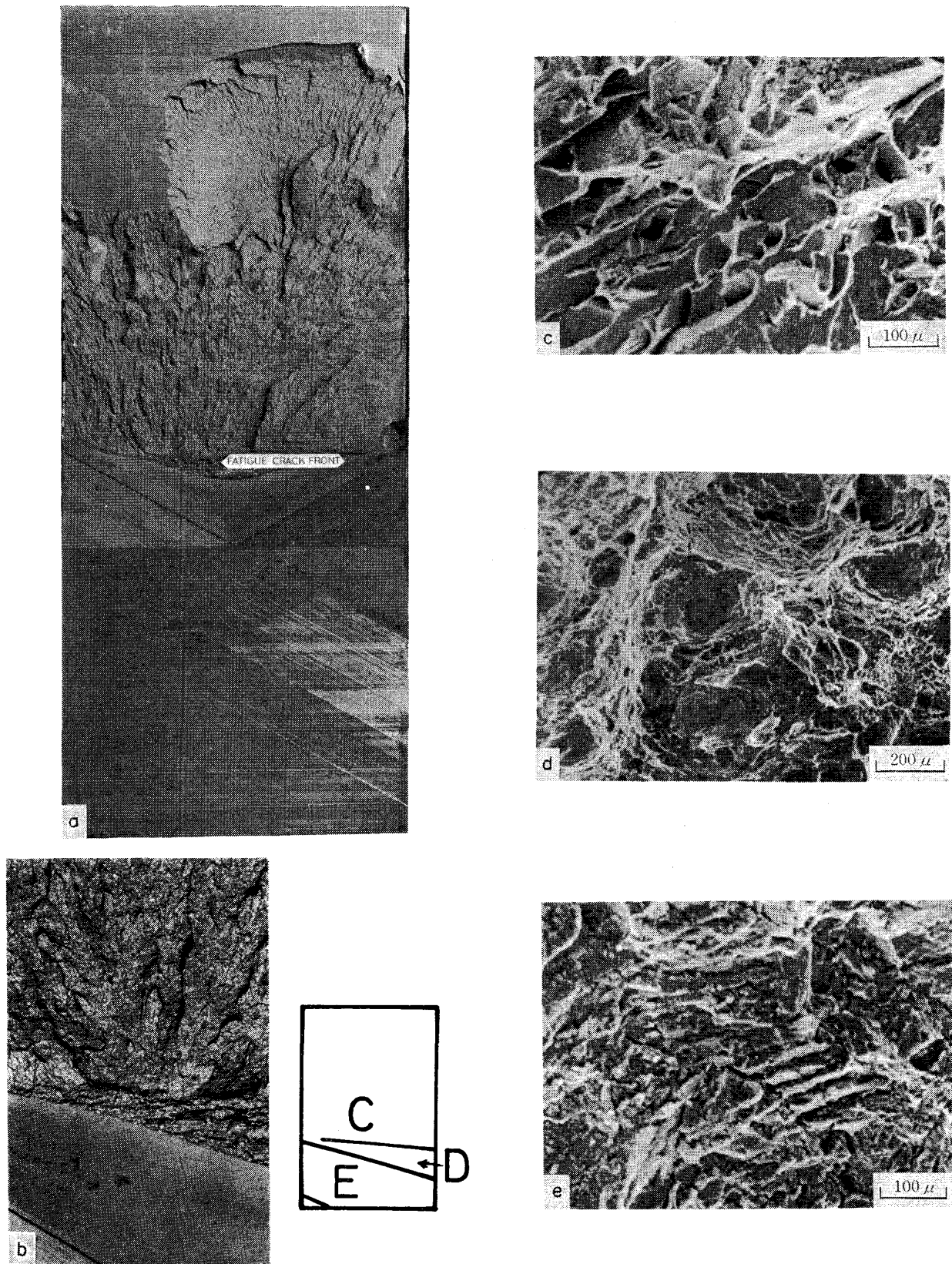


Photo. 1. Macroscopic and microscopic observation of fracture surface of 14RCT specimen B. complete view of fracture surface (a), locally magnified view including fatigue crack region E, slow crack D, and unstable crack C (b), quasi-cleavage mode in the region C (c), dimple pattern in the region D (d), and striation in the region E (e).

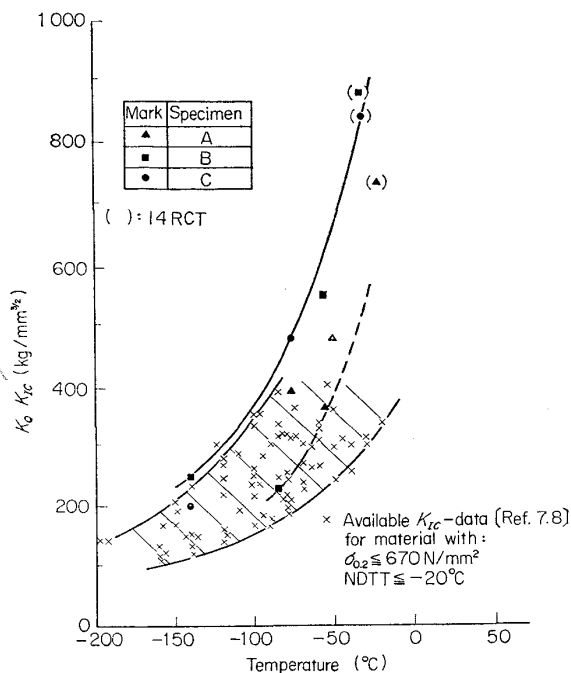


Fig. 12. Temperature dependence of fracture toughness for 2.8Ni-Cr-Mo-V steel.

た、本供試材と同一鋼種である 2.8Ni-Cr-Mo-V 鋼についてこれまでに得られている K_{IC} 値⁷⁾⁸⁾も比較のために示してある。本供試材の K_{IC} 値は同一鋼種の値の同一鋼種の K_{IC} 値のばらつきの範囲の中で上限近くのところに位置していることがわかる。

4. 結 論

ローター材の最低使用温度（室温付近）での破壊靱性値を調べるとともに、平面ひずみ破壊靱性値を得るための条件について検討した結果つぎの結果を得た。

(1) ASTM-E399 の試験片寸法に関する平面ひずみ破壊靱性値を満足しなくても、破壊するまでの荷重-変

位曲線がほぼ直線性を保つていれば、すなわち $P_{max.} = P_Q$ が成り立つならば、得られた K_Q は K_{IC} と考えられる。

(2) 3 枚の 14 RCT 試験片を用いて室温付近で破壊靱性試験を行ない、室温 10°C の試験では上記結論 (1) を適用しても K_{IC} を得ることはできなかったが、-20°C では上記結論 (1) を適用し K_{IC} を得た。また 10°C で負荷後 -30°C で再負荷を行ない破壊した試験片には、ノッチ先端にディンプル模様が観察されたが、得られた K_Q は K_{IC} に近い値を示した。

終りにこの研究に関し有益なご助言、ご討論をいただいた西独 KWU 社の故 Dr. U. S. HIEFERSTEIN ならびに Dr. C. BERGER に深甚の謝意を表します。またこの研究の試験片準備、試験遂行に協力された(株)神戸製鋼所構造研究ならびに高砂開発室の長尾仁朗、本梅元雄、木内 晃の諸氏に感謝の意を表する。

文 献

- 1) ASTM standard Designation E399-74, (1974),
- 2) H. D. GREENBERG, E. T. WESSEL, W. G. CLARK Jr., and W. H. PRYLE: 5th International Forgemasters Meeting, Terni, (1970)
- 3) G. FEDDERN and E. MACHERAUCH: Z. Metallkde., 64(1973), p. 882
- 4) F. J. WITT and T. R. MACER: 5th National Symposium on Fracture Mechanics, University of Illinois, (1971)
- 5) B. A. BILBY, A. H. COTTRELL and K. H. SWINDEN: Proc. Roy. Soc., A272, (1963), P. 304
- 6) G. G. Chell, I. MILNE, and J. H. KIRBY: Metals Technology, 2(1975), p. 456
- 7) R. SCHINN, F. STAIF, and WIEMANN: VGB-Kraftwerkstechnik, 54(1974), p. 456
- 8) Kraftwerk Union AG., Muelheim/Ruhr, West Germany, Unpublished company data