

球状黒鉛鑄鉄材の衝撃特性の X 線フラクトグラフィ的研究†

松井和幸* 広瀬幸雄**
茶谷明義*** 田中啓介****

X-Ray Fractographic Study on Fracture Surface of Ductile Cast Iron
Made by Dynamic Fracture Toughness Test

by

Kazuyuki MATSUI*, Yukio HIROSE**, Akiyoshi CHADANI***
and Keisuke TANAKA****

Austempered Ductile Iron (ADI) is being used in highly stressed components, particularly in the automotive industry. It therefore becomes essential to understand the factors influencing the ductile and fatigue properties of this material.

In the present paper, to obtain basic data of ADI, dynamic fracture toughness test and static fracture toughness test were conducted. And then X-ray fractographic technique was applied on the fracture surface made by these fracture toughness tests. The plastic zone size was determined from the distribution of the half value and residual stress near the fracture surface. These data obtained in the laboratory tests were used to estimate the dynamic fracture toughness parameter $K_{I,d}$ at actual fracture of machine parts.

Key words : X-ray fractography, Plastic zone size, Fracture analysis, Fracture toughness test

1 緒 言

鑄鉄の中でも球状黒鉛鑄鉄は優れた強度やじん性を持つため機械部品の軽量化や低価格を目的とした代替材料として工業的に広く利用されている。開発当時は鑄放しで黒鉛を球状にすることにより 400 MPa 以上の引張強さを達成することができた。その後、合金元素の添加などにより基地のパーライト量を変化させることによって、鑄放しで 700 MPa 程度の引張強さも可能となり、強度の他に延性、耐磨耗性および疲れ強さなどの品質の改善を行うことができた¹⁾。近年これをさらに改善して過酷な使用条件に耐えられるように熱処理を施し、基地をベイナイトと残留オーステナイトから成る二相混合地組織にすることで耐衝撃性が向上し、しかも引張強さが 1000 MPa 以上という材料が使用されている。この材料は一般的に ADI (Austempered Ductile Cast Iron) とよばれ、北米、欧州を中心に生産量が確実に伸びてきており、日本においても自動車関連産業でその使用事例が多い²⁾。一方、代替材料として利用するためには機械的じん性特性を把握することが重要となる。最近ではこのじん性評価法として、小型試験片で簡便に行える計装化シャルピ

試験法の応用研究が数多く試みられているが³⁾、その動的破壊じん性値の測定結果の有効性が必ずしも確立しておらず、静的試験の場合に比べて明白にすべき点が多くあるのも事実である。

本報では ADI の耐衝撃特性を明らかにするために、マトリックス組織を熱処理によりフェライト、マルテンサイト、ベイナイト組織に調質した球状黒鉛鑄鉄材の動的破壊じん性試験と静的破壊じん性試験を行った。そして X 線回折法による破面解析 (X 線フラクトグラフィ) 手法を用いて⁴⁾⁻⁷⁾、破面近傍の残留応力および X 線回折線半価幅を測定し、それらの結果を比較し動的破壊じん性値の有効性について検討した。更にその応用例として球状黒鉛鑄鉄で製作された実機部品の破壊事故解析への適用について報告する。

2 実験方法

2・1 供試材および試験片

供試材には低周波誘導炉で 75 mm 厚の Y 型ブロック (JIS Y 型 D 号) に鑄造した JIS FCD45 相当の球状黒鉛鑄鉄を用いた。化学成分は (wt %) ; 3.63C, 2.79Si, 0.20Mn, 0.02P, 0.012S, 0.028 Mg である。試験片は、Y 型ブロックの湯口部を切断除去し、厚

† 原稿受理 平成 2 年 9 月 27 日 Received Sep. 27, 1990

* 正会員 (株)石川製作所 金沢市南森本町, Ishikawa Seisakusho Co. Ltd., Minamimorimoto-machi, Kanazawa

** 正会員 金沢大学教育学部 金沢市丸ノ内, Faculty of Education, Kanazawa University, Marunouchi, Kanazawa

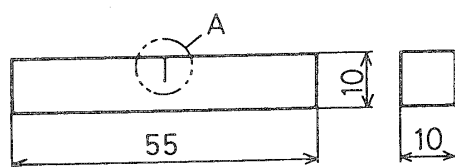
*** 正会員 金沢大学工学部 金沢市小立野, Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kodatsuno, Kanazawa

**** 正会員 名古屋大学工学部 名古屋市中千種区不老町, Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

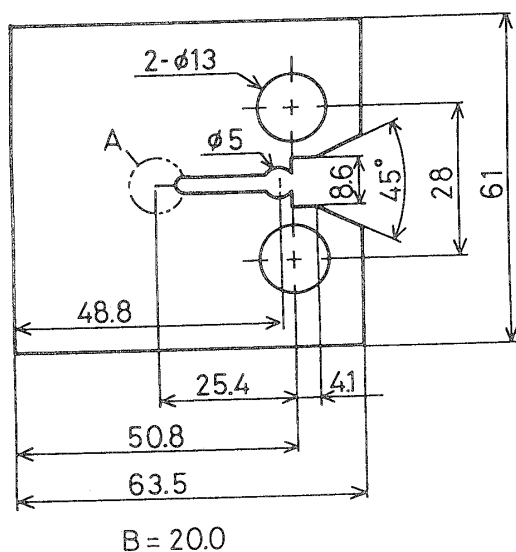
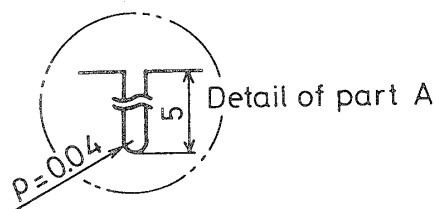
Table I. Mechanical properties of materials.

Matrix	Tensile strength σ_b (MPa)	Yield stress σ_y (MPa)	Elongation ϵ_1 (%)	Nodularity (%)
Bainite	1199	957	9.86	82
Martensite	1399	1189	0.61	83
Ferrite	405	279	26.4	86

さ 75 mm, 幅 73 mm, 長さ 330 mm の平板状に機械加工後採取した。熱処理は試験片形状に荒加工後, マトリックス組織をフェライト基地にするために 1193K で 4 hr 保持後炉中冷却した。ベイナイト基地については 1150 K で 40 min 加熱保持し 620K 3 hr でオーステンパ処理をおこなった。また, マルテンサイト基地は 1150K から油焼入れしたものから得た。熱処理後の機械的性質を Table I に示す。黒鉛の平均粒径は 52 μm で平均球状化率は 85 % である。Fig. 1



(a) Three-point bend specimen



(b) CT type specimen

Fig. 1. Dimensions of test specimen (in mm).

に破壊じん性試験を行うための試験片寸法について示す。動的破壊じん性試験片は板厚 $B=10$ mm, 板幅 $W=10$ mm, 長さ $L=55$ mm の三点曲げ用であり, 静的破壊じん性試験片には板厚 B が 20 mm, 板幅 W が 50.8 mm の 1 インチ型コンパクトタイプ (CT) を使用した。各試料はき裂進展方向と平板材の長手直角方向が一致するように採取し, 切欠き先端半径 ρ が 0.04 mm になるようワイヤ放電加工をした。

2・2 動的破壊じん性試験と静的破壊じん性試験

動的破壊じん性試験はひょう量 30 kgf・m のシャルピー式衝撃試験機のハンマ部にひずみゲージを貼付することにより計装化して行った。ひずみゲージからの衝撃信号は動ひずみアンプで増幅されたストレージスコープに記憶させた。ストレージスコープのトリガはひずみゲージの出力の立ち上がりを作動させ, 記憶した波形を荷重 P -時間 t 曲線として X-Y レコーダに記録させた⁸⁾。静的破壊じん性試験は ASTM 規格に従い電気油圧式疲労試験機 (島津サーボパルサ EHF10) を用いて, クロスヘッド速度 1 mm/min で行った。き裂発生点の検出には交流電位差法を用いた。実験には試験片の切欠き部をはさんで交流 1A の一定電流を流し, き裂発生に伴う電位差変化を測定した。そして, この電位差出力 ΔV と荷重 P および荷重変位 u をレコーダに自動記録した。 P と u はそれぞれロードセルと荷重着力線路上に取付けたクリップゲージにより測定した。応力拡大係数の計算は式 (1) より行った¹⁰⁾。

$$K = [P \cdot (2 + \eta) (0.866 + 4.64\eta - 13.32\eta^2 + 14.72\eta^3 - 5.6\eta^4) / [B \cdot W^{1/2} (1 - \eta)^{3/2}], \eta = a/W \quad (1)$$

ここで P は荷重, B は板厚, W は板幅, η は切欠き比, a は荷重軸中心からのき裂長さである。

2・3 X線による破面観察

各試験によって得られた破面に X 線を照射して, 破面近傍の半価幅を測定した。その X 線回折条件を Table II に示す。Cr-K α の特性 X 線により (211) 面を回折面として X 線応力測定装置を用いて X 線入射角 $\phi_0=0^\circ$ で回折プロファイルを測定した。測定位置は破面板厚中央部で, 動的破壊じん性試験片では 1×7 mm², 静的破壊じん性試験片では 1×10 mm² の X 線

Table II. X-ray diffraction condition.

Method	Parallel-beam method
Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction plane	(211)
Filter	V
Tube voltage	30 kV
Tube current	10 mA
Irradiated area	1×7 mm ² , 1×10 mm ²
Soller slit	1 deg
X-ray fixed time	2~6 sec

照射領域で行った。なお破面下の半価幅や残留応力の分布状態は表面層を逐時電解研磨を行い、測定した。

3 実験結果および考察

3・1 破壊じん性試験

Fig. 2 は計装化シャルピー衝撃試験から得られた荷重-時間曲線を示す。この荷重-時間曲線の縦軸は衝撃破断荷重に対応し、曲線の面積は衝撃破断に要した吸収エネルギーに対応している。各曲線は試験温度に応じて特徴ある形態をしており、Fig. 2(a)のマルテンサイト基地は試験温度の上昇に対して吸収エネルギーの増加はわずかであるが、Fig. 2(b)のベイナイト基地や Fig. 2(c)のフェライト基地は試験温度の上昇とともに大きく増大しているのがわかる。また、衝撃破断荷重はベイナイト基地が最も大きいことがわかる。Fig. 2(d)は低温領域 150K (Low-shelf) における各基地組織の曲線を抜粋したものである。各基地組織の衝撃吸収エネルギーは比較的小さく、これらの試料破面の電子顕微鏡観察では全面がへき開破面であった。Fig. 2(e)は遷移温度領域の $P-t$ 曲線を抜粋したものである。各組織の遷移温度は電顕観察結果と吸収エネルギーの変化から判断したが、マルテンサイト基地は 400K、ベイナイト基地は 270K、フェライト基地は 250K で

それぞれ遷移を示している。Fig. 2(f)は上部棚付近 420K (Upper-shelf) での各基地組織の $P-t$ 曲線である。この領域では各基地組織とも Fig. 2(d), Fig. 2(e)の曲線形状と比較して、き裂進展に要するエネルギーが大きいことがわかる。動的負荷に対する平面ひずみ破壊じん性値 K_{Id} の評価式はいくつか提案されているが、ここでは遷移温度までの $P-t$ 曲線において、矢印で示した点を破壊点として、式(2)を用いて動的破壊じん性値を算出した¹⁰⁾。

$$K = PS \cdot 3\eta^{1/2} [(1.99 - \eta)(1 - \eta)(2.15 - 3.93\eta + 2.7\eta^2)] / [BW^{3/2} \cdot 2(1 + 2\eta)(1 - \eta)^{3/2}],$$

$$\eta = a/W \quad (2)$$

ここで、 P , B , W , η , a は式(1)と同じで S はスパン長さである。

基地組織がマルテンサイトとベイナイトの球状黒鉛鑄鉄材について静的破壊じん性試験を行った。ベイナイト基地の破壊じん性試験で得られた荷重 P -開口変位 u および u -電位差出力 ΔV の関係の一例を Fig. 3 に示す。 $P-u$ 線図は初期において線形的に増加した後ポップインを示し、最大荷重点をすぎ全面降伏して破断した。また $u-\Delta V$ 線図は初期負荷に伴う予き裂先端部の開口によりわずか上昇し、その後ほぼ一定と

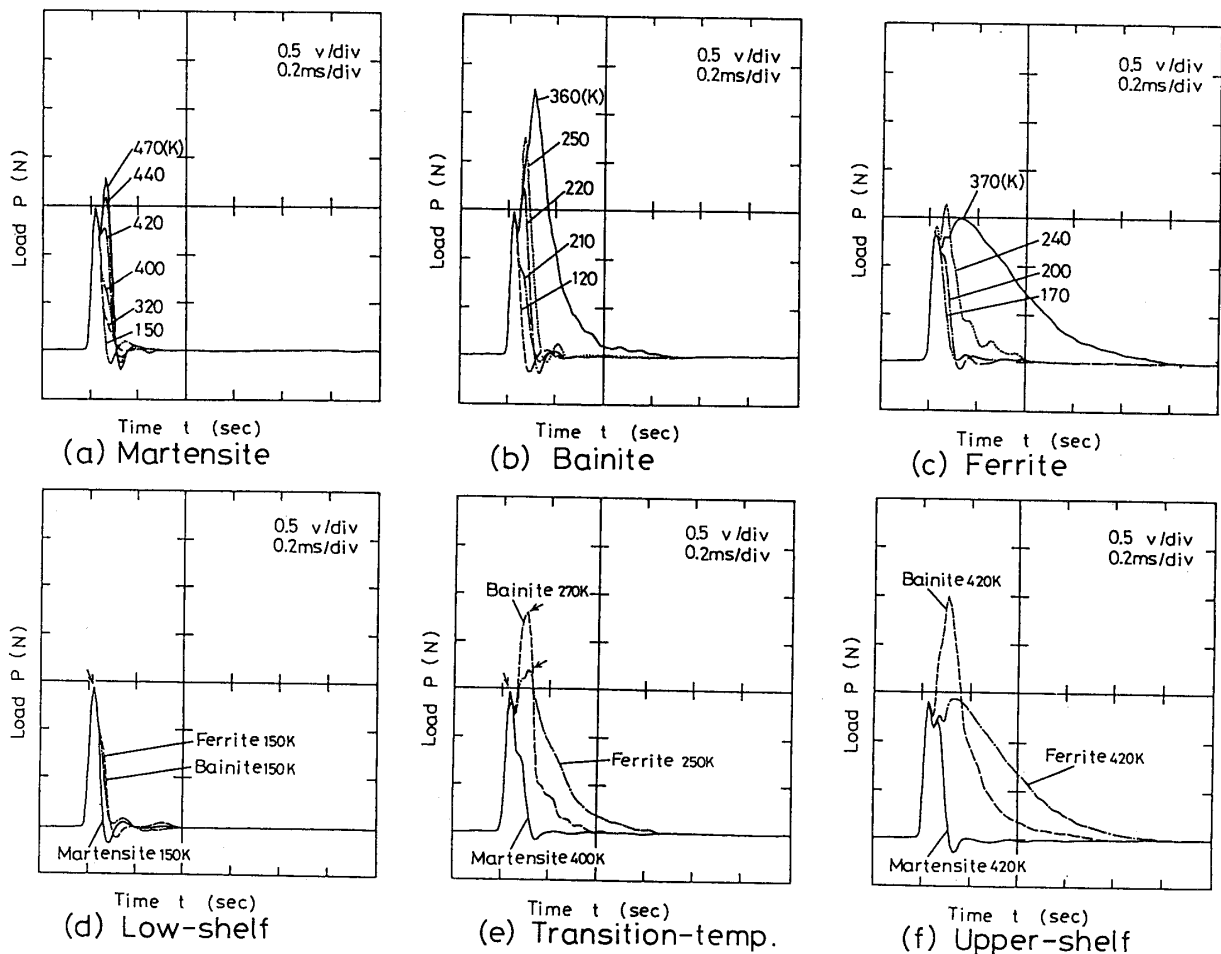


Fig. 2. Load-time curves with instrumented Charpy impact machine.

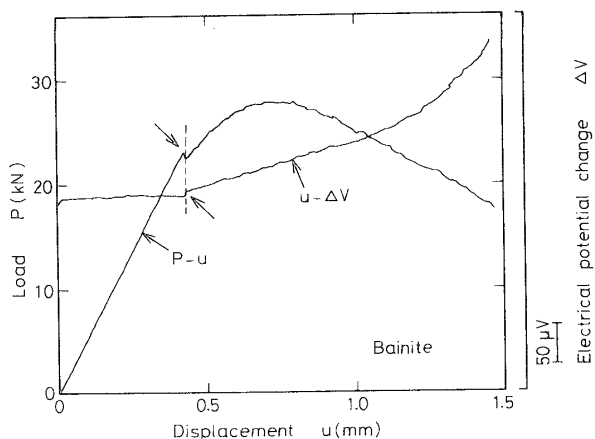


Fig. 3. Load versus load point displacement and electrical potential change.

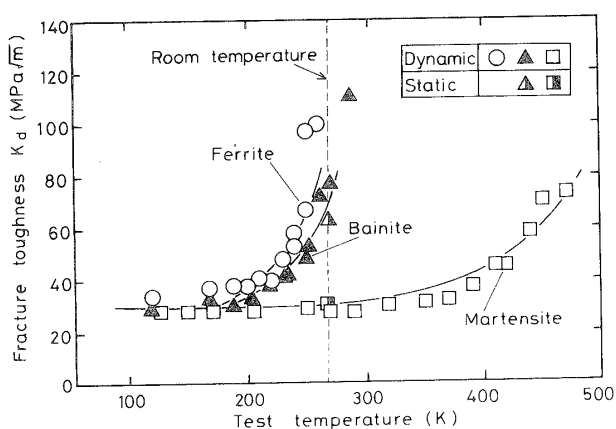


Fig. 4. The relationship between K_d and temperature.

なった後急激に上昇した。P-u 線図上に示される最初のポップイン点と、u- ΔV 線図の図中矢印で示される変曲点が一致しておりこの点をき裂発生点とした。

各基地組織について得られた静的破壊じん性値 K_{IC} はマルテンサイト $28.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、ベイナイト $60.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。Fig. 4 は種々の試験温度における動的破壊じん性試験の結果をまとめたものである。各基地組織とも試験温度に対して遷移領域が存在する。図中に静的破壊じん性値 K_{IC} もプロットしたが室温においてはマルテンサイト基地、ベイナイト基地の K_d と K_{IC} がほぼ同等の値を示しているのがわかる。

3.2 X線回折法による破面観察

Fig. 5 は球状黒鉛鑄鉄の各基地組織について、遷移温度で得られた試験片に X 線回折を行い、破面表層部から深さ方向へ X 線測定値の分布を示したものである。広東 X 線測定からは残留応力値と半価幅値の二つのパラメータが得られる。残留応力値はき裂先端での局所的な塑性変形の結果生じ、塑性ひずみの集中の強さに対応する。一方、半価幅値は塑性変形により材料中に導入された微視的ひずみや結晶微粒子の大きさ¹¹⁾に関係し、塑性ひずみ量に対応する。球状黒鉛鑄鉄

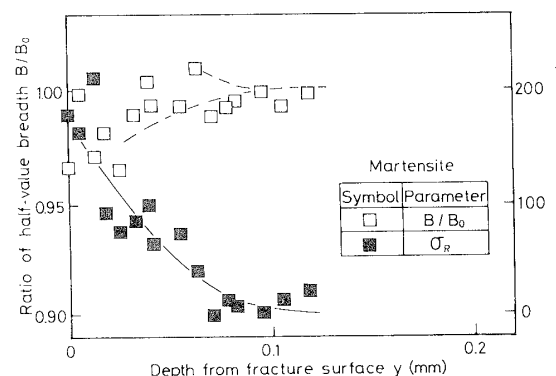
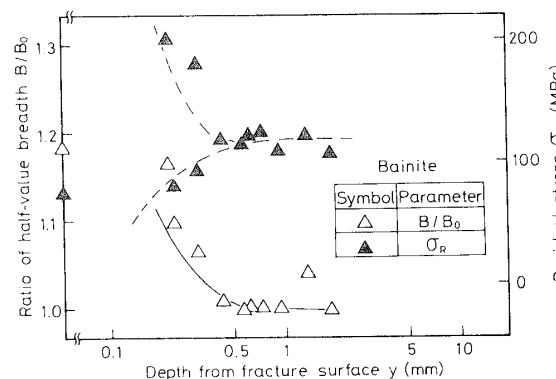
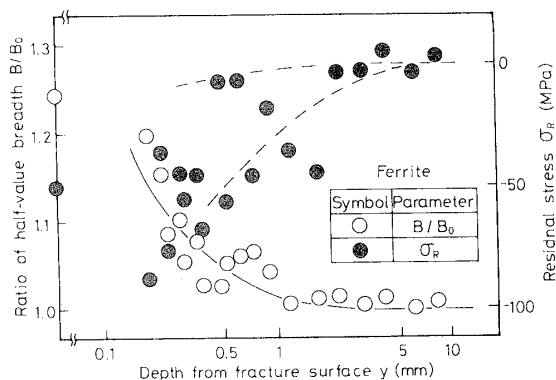
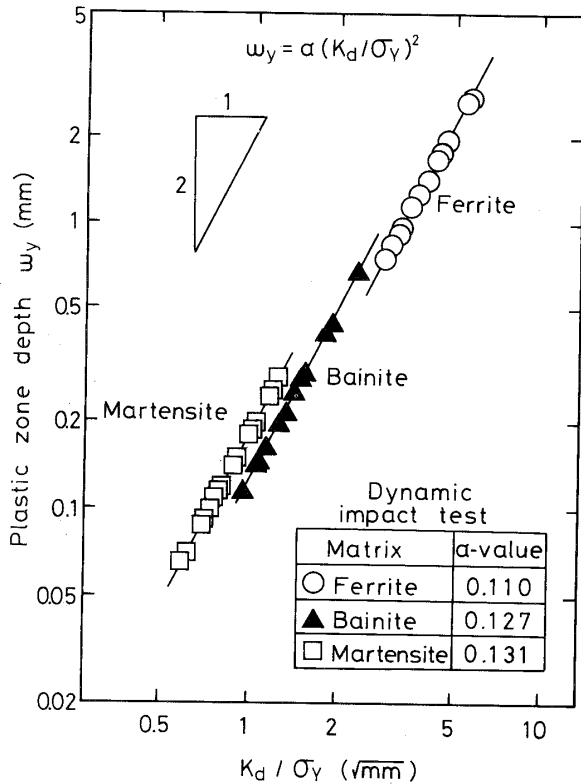


Fig. 5. Residual stress distribution and half-value breadth distribution near the fracture surface.

材の破壊じん性試験から得られた結果からは基地組織がフェライトとベイナイトは半価幅値、マルテンサイトは残留応力値に良好な分布形態が観察されている。この理由として定説はないが、材料の加工状態や表面状態などにより影響を受けると考えられている。一般的には高強度じん性材料に対しては残留応力値が有効なパラメータであり、低強度高じん性材料に対しては半価幅値が有効なパラメータとなるケースが多いようである。図中 B_0 は母材の半価幅値で初期値である。 B/B_0 の破面深さ方向の分布は深さ y とともに減少し、ある深さ以上で 1 近傍に収束する。塑性域 ω_y はこの半価幅比や残留応力値が一定値となる深さとして決定した¹¹⁾。Fig. 6 に X 線測定の結果得られた塑性域深さ ω_y と動的破壊じん性値 K_d との関係を示すが、横軸は K_d をそれぞれの基地組織の降伏応力 σ_y で割った商 (K_d/σ_y) で整理した。それぞれの基地組織とも両対

Fig. 6. Relation between ω_y and (K_d/σ_Y) .

数線上で傾き 2 の直線でよく近似されている。つまり次式の破壊力学関係が成立する。

$$\omega_y = \alpha(K_d/\sigma_Y)^2 \quad (3)$$

式(3)の α 値として、マルテンサイト 0.131, バイナイト 0.127, フェライト 0.110 を経験値として得ることができる。これらの値と Levy らの値¹³⁾ 0.15 とに差があるのは、単一荷重下での塑性域中に生ずる耐力値の変化によるものと考えられ、基地組織が低強度のものほどその影響が大きい。また低温領域から遷移温度領域までの範囲において、シャルピー衝撃試験の結果得られた動的破壊じん性値 K_a は破面観察の結果と吸収エネルギーの形態から、破壊力学的に有効と判断した。そして次節の応用例ではこの K_a 値を K_{ia} として静的破壊じん性値 K_{ic} との比較に利用した。

4 事故解析への応用

4.1 事故の概況

プレス機械に使用されている平面カム部品に破壊事故が発生した。プレス機械の運転を開始した時、プレス機械に付属する自動機構と連結するカムボックス内で異常音が発生したので、その内部を調査したところ、数枚のカムの中の一つにき裂が発生しているのを見つけた。Fig. 7 に示すとおりカムは二本の止めネジでカムシャフトに固定されており、その回転を往復運動に変える役目をしている。カムの材質には球状黒鉛鋳鉄が使用されており、その化学組成は (wt %); 3.70C, 2.62 Si, 0.20 Mn, 0.02P, 0.01S, 0.03 Mg である。

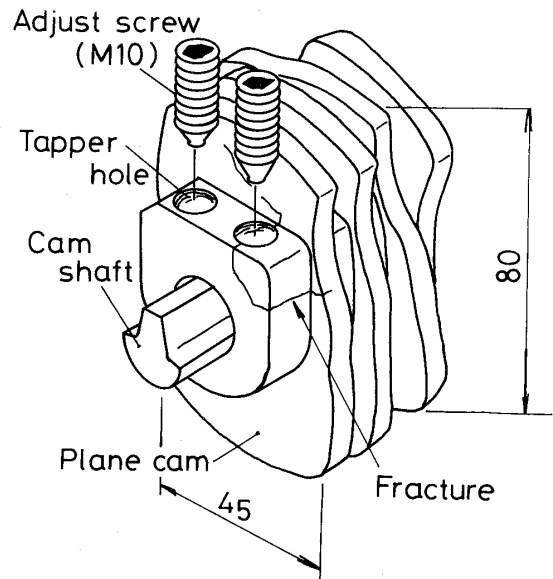


Fig. 7. Plane cam assembly which failed by brittle fracture.

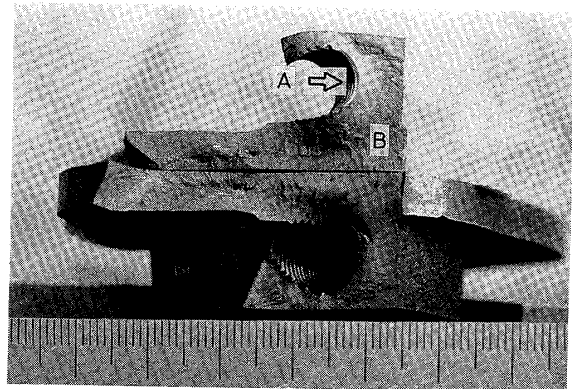


Fig. 8. Fracture surface of plane cam (in mm).

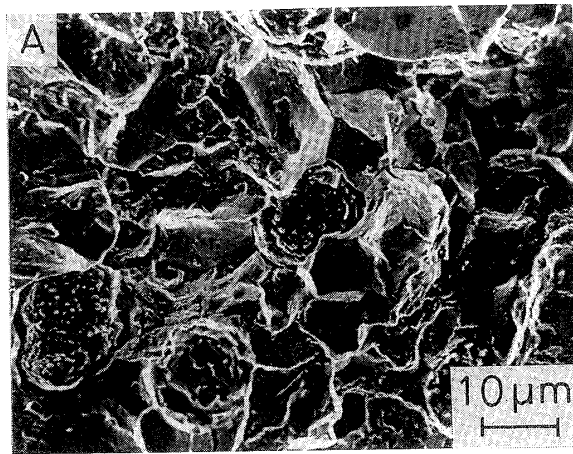
基地組織がマルテンサイトとなるように 1150K/30 min でオーステナイト化し、油焼入れを行い、470K 2 hr で焼もどしが施されている。耐力は 1056 MPa であった。

4.2 破面の電顕観察

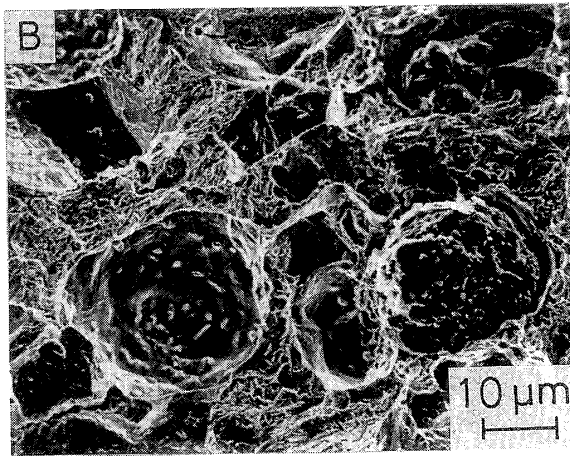
Fig. 8 は事故破面のマッピング写真である。図中の矢印はき裂の起点を示し、条こんの方向などから、き裂が図中の記号 A から B に進展しているのがうかがえる。さらに A 部、B 部の電顕フラクトグラフィ (SEM 写真) を Fig. 9 に示す。A 部では所々に粒界割れ、B 部では粒界割れと粒内割れの混在の様相が観察されている。これらの観察結果から事故破壊様式として、タップ穴のネジ底先端を起点にぜい性破壊が発生したものと推定した。

4.3 破壊応力の推定

Fig. 8 の事故破面の起点部 A における破面直下の残留応力分布を X 線解析で測定した。X 線の照射域を実験の場合と同様に $1 \times 7 \text{ mm}^2$ とし、残留応力測定方向をき裂進展方向 A から B に一致させた。その結果



SEM of area (A).



SEM of area (B).

Fig. 9. Micrograph of fracture surface. (Crack growth direction is from left to right).

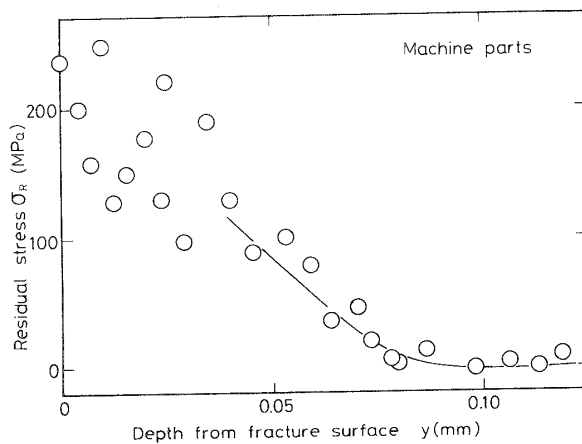


Fig. 10. Half-value breadth distribution near actual failure fracture surface.

を Fig. 10 に示す。残留応力値の分布は実験によって得られた破面と類似したものであった。この残留応力分布から塑性域深さを 0.08 mm と決定した。この値と式 (3) の $\alpha=0.131$ とから、事故発生時の K_a の推定値 $29.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を得る。この値を基に A 部における負荷応力の推定を行うために次の計算を行った。

まず Kumar らによる 8 節点シェル要素を用いた有

限要素解析からネジ底先端部に働く応力拡大係数 K_a と負荷応力 σ_m の関係を式 (4), (5) より得る。

$$K_a = \sigma_m \sqrt{\pi a} / Q \cdot F \quad (4)$$

$$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65} \quad (5)$$

ここで (a/c) はアスペクト比、 F はき裂形状補正項でこの事故破面の場合 1.07 とした。以上から事故破壊を生じさせたネジ部に働く軸力 σ_m を 513 MPa と推定した。この軸力はボルトの締め付け力に機械運転開始時の衝撃力が加わったものと考えられ、これがネジ部の谷底部に応力集中を生じ、ぜい性破壊が発生したと判断した。また、事故発生時の K_a の推定値 $29.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ はカム部品の限界値 K_{Ic} $28.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ をわずかに越えるものであった。すでに、一連の基礎実験でベイナイト球状黒鉛鋳鉄の K_{Ic} は $60.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ と優れたじん性特性を示しており、我々はこの事故の再発防止のため、カム部品の基地組織をベイナイトにする必要があると判断した。

5 結 言

球状黒鉛鋳鉄の衝撃特性を調べるために、破壊じん性試験とその破面への X 線回折測定を行った。そしてこれらの基礎データを実機部品の破壊事故に適用し、以下の結論を得た。

(1) 室温における K_{Ic} 値はマルテンサイト $28.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ベイナイト $60.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ となった。

(2) 球状黒鉛鋳鉄の動的破壊じん性試験から得られた遷移温度領域の K_{Ia} 値は、同種材の静的破壊じん性値 K_{Ic} とほぼ等しい。

(3) 破面表層部から深さ方向へ X 線回折を行ったが、球状黒鉛鋳鉄材の場合、その基地組織がフェライトとベイナイトは半価幅値、マルテンサイトは残留応力値に良好な分布形態が観察された。

(4) 塑性域寸法を破面表層部の半価幅分布と残留応力分布から決定した。その値と動的破壊じん性値 K_{Ia} には次の関係式が成立した。

$$\omega_y = \alpha(K_a / \sigma_r)^2$$

この α の値として、マルテンサイト 0.131, ベイナイト 0.127, フェライト 0.110 を得ることができた。

(5) 実機部品の破壊はタップ穴のネジ部に引張応力と機械運転時の衝撃力が重なりぜい性破壊したものである。そして事故破面の塑性域寸法から評価した(事故発生時の) K_{Ia} 値は $29.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。

(平成 2 年 7 月 27 日 第 27 回 X 線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) M. Johanssen, AFS Trans., 117 (1977).
- 2) Joc, Lincoln, 2nd. International Conference on ADI, p. 381 (1986).

- 3) A. K. Shoemaker and S. T. Rolf, Trans. of the ASME, 512 (1969).
- 4) Y. Hirose and K. Tanaka, Adv. X-Ray Analysis, 27, 213 (1984).
- 5) K. Matsui, Y. Hirose, A. Chadani and K. Tanaka, 2nd. International Conference on Residual stresses, p. 833 (1989).
- 6) 松井和幸, 広瀬幸雄, 茶谷明義, 田中啓介, 材料, 39, 614 (1990).
- 7) 松井和幸, 広瀬幸雄, 矢島善次郎, 田中啓介, 第25回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p. 101 (1988).
- 8) K. Matsui, Y. Hirose, A. Chadani and K. Tanaka, Preprints of ECF8, p. 1650 (1990).
- 9) ASTM Standards, Part10, E399-81, 592 (1981).
- 10) ASTM Standards, Part 10, E647-81, 772 (1982).
- 11) 田中啓介, 広瀬幸雄, 材料, 37, 1240 (1988).
- 12) 例えば, 後藤 徹, “材料損傷の非破壊的検出法に関する研究” (1982).
- 13) N. Levy, P. V. Marcal, W. J. Ostengren, J. R. Rice, Int J. Fract. Mech., 7, 143 (1971).
- 14) Y. Murakami, “Stress Intensity Factors Handbook”, Soc., Mater., Sci., Japan (1986).

~~~~~

書 評

~~~~~

“セラミックス原料鉱物”

岡田 清 (著)

(1990年, 株内田老鶴園発行, A 5 判, 150ページ, 2000円)

本書は東京工業大学工学部 無機材料工学科編のセラミックス基礎講座5として出版されたものである。本書は4章より構成されており, セラミックスの原料と関係がある地殻の構成および組成, 岩石, 鉱物, セラミックス原料と鉱床を系統的に結びつけて述べられている。第1章は地殻の構成と組成について述べられている。地球の内部を地球物理学的に分けると地殻, マントル, 核となる。体積比では, 地殻が1%, マントルが約83%, 核が約16%, 質量比では, 地殻が約1%以下, マントルが約70%, 核が約30%と計算されており, 地球全体で地殻の占める割合がいかに小さいかがわかる。これらの層の化学的組成がまとめられている。第2章は岩石について述べられている。最初は火成岩で, 火成作用によってできた岩石を意味する。火山石と深成岩に分けられ, おのおのについて組織, 化学組成, 鉱物組成, がまとめられている。さらに, 他の天体から地球上に落下してきたイン石にも触れている。この他に, 既にできていた岩石が地表で風化により細粒化し, 水や風などの力で運搬され堆積し固化した堆積岩, 岩石が地中で, 温度, 圧力の影響によってその鉱物組成や化学組成が変化した変成岩などに関して詳細に述べられている。第3章は鉱物である。岩石と鉱物を厳密に分類するのは困難ではあるが, ほぼ均質で一定の化学式をもち, 生物に無関係な自然過程でできた結晶構造の無機物であると言える。この章ではかなりのページを割いて, 構造, 物理, 化学的性質などがまとめられている。終章はセラミックス原料とその鉱床ということでしめくくってある。前述の地殻を構成している岩石および鉱物が, 種々の作用により凝集した場所を鉱床という。そこにある岩石が有用成分を含み, 経済的に価値があるとそれを鉱石という。大部分のセラミックス原料はこのような鉱石から得られる。このような観点でこの章では, 火成作用, 堆積作用, 変成作用による種々の鉱床タイプとセラミックス資源との関係が詳述されている。

本書はセラミックス原料の勉強のための入門書, 地学の知識のあまり無い初心者を対象とした入門書として理解しやすい平易な文章で記述された良書である。

(奈良工業高等専門学校 有間 淳一)