

## 衝撃試験における球状黒鉛鋳鉄及び Si 鋳鋼の破面解析

信木関\*, 塩田俊雄\*\*, 旗手稔\*\*

### Fractography of Spheroidal Graphite Cast Iron and Silicon Cast Steel in Impact Test

Tohru NOBUKI, Toshio SHIOTA, Minoru HATATE

#### Synopsis

This study aims to clarify the influence of graphite on impact fracture of ferritic spheroidal graphite cast iron (FDI) by means of comparing the fractography of FDI to that of silicon cast steel whose composition is same to that of the matrix of FDI. In ductile region, the impact value of FDI is lower than that of cast steel. It is because graphite nodules make not only the effective sectional area ratio of matrix decrease but also notch effect around graphite increase. In brittle region, however, the impact value of FDI is larger than that of cast steel. The impact transition temperature of FDI is much lower than that of steel, and the fracture surface of FDI at room temperature is more ductile than that of cast steel. It is because the graphite nodules tend to produce ductile fracture due to their function as nuclei of dimples.

**Key words:** Fractography, Impact test, Ductile fracture surfaces, Brittle fracture surfaces, S.G. cast iron, Si cast steel, Notch, Transition temperature

#### 1. 緒言

材料が何らかの原因で破壊した場合、その破面には破壊の過程が記録されている。この模様を解読することにより、材料の破壊の仕方や破壊の原因を究明する方法を、破面解析(フラクトグラフィ)と呼ぶ。フラクトグラフィは破壊事故解析において、破壊現場のかけがえのない証拠を与えることは言うまでもないが、材料の破壊についての基礎的研究の常套手段としても活用されており<sup>1-6)</sup>、鋳鉄の引張、衝撃及び疲労破面についていくつかの報告<sup>7-15)</sup>がある。

前報<sup>16)</sup>では、フェライト地球状黒鉛鋳鉄及び球状黒鉛鋳鉄の基地部と同様の組成を有する Si 鋳鋼を用いて衝撃試験を行い、鋳鉄の基地に存在する黒鉛の衝撃特性に及ぼす役割について検討を行った。その結果、球状黒鉛鋳鉄の靱性は、黒鉛が存在するため基地の有効断面積が減少し、またこの黒鉛部で応力集中が生じることなどの理由から、衝撃特性は鋼材より劣っているが、黒鉛が存

在することによって衝撃遷移温度は、球状黒鉛鋳鉄の方が鋼材に比べて著しく低いことなどを明らかにした。

そこで本研究では、衝撃特性と破断面との関係、また球状黒鉛鋳鉄と Si 鋳鋼の衝撃破断面の相違から、その破壊機構、特に鋳鉄の黒鉛が破壊に果たす役割、外部欠けの破面への影響を明らかにすることを目的とした。

#### 2. 実験方法

##### 2.1 供試材

供試材の作製にあたっては、球状黒鉛鋳鉄は、原料銑鉄として高純度銑鉄を使用した。溶製方法は次の通りである。20kVA の高周波誘導電気炉を用いて溶解し、溶湯の温度が 1693K に達すると Fe-75%Si 合金を添加し、溶湯の温度が 1823 K に達すると、あらかじめ 873 K に加熱しておいた黒鉛坩堝を使用して希土類市販球状化剤と Fe-45%Si-8%Mg 合金を 1.6% 添加して、置注法で黒鉛球状化处理し、Fe-50%Si 合金を 0.4% 接種した後、底部

\*近畿大学工学部研究員, 同非常勤講師(現在:東海大学特定研究員)  
\*\*近畿大学工学部機械工学科

Researcher and part-time lecturer, School of Engineering,  
KINKI University.  
Department of Mechanical Engineering, School of Engineering,  
KINKI University.

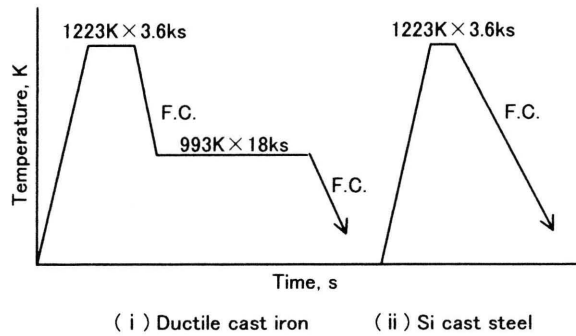


Fig. 1 Heat treating conditions.  
(F.C: Furnace Cooling)

厚さ 30 mm, 高さ 100 mm, 長さ 160 mm の Y ブロック CO<sub>2</sub> 鋳型に鋳込んだ。

Si 鋳鋼は, 機械構造用炭素鋼(S15CK)50%と市販高純度電解鉄 50%を高周波誘導電気炉を用いて 20kg 溶解した。溶製方法は, 溶け落ち後 1873K に達すると, 予め 123K に加熱しておいた黒鉛坩堝を使用して, 目標 Si 量となるように Fe-75%Si 合金を 3.23%添加した後, Al ショット材を 0.1%添加して脱酸処理し, 底部肉厚 15 mm, 高さ 100mm, 長さ 160mm の Y ブロック CO<sub>2</sub> 鋳型に鋳込んだ。なお, 加炭を防止するため溶解炉及び溶湯を受ける坩堝の内面に水で溶いたアルミナを塗布したものをを用い, さらに溶解中には酸化を極力少なくする目的で Ar ガスを流量約 1.25 L/min 流入した。

球状黒鉛鋳鉄は, フェライト化するため, Fig. 1 に示すように, 1223K×7.2ks 993K×18ks 保持後炉冷し, フェライト化焼鈍を施した。Si 鋳鋼は, 組織を均一化するため, 1223K×3.6ks 後炉冷の焼鈍を行った。

## 2. 2 衝撃試験

衝撃試験は, 容量 300 J の計装化シャルピー衝撃試験機を使用し, 試験温度 123 K ~ 423 K の範囲で行った。試験片の温度測定は, φ0.32 mm の銅-コンスタンタン熱電対を試験片側面にスポット溶接機で溶着してデジタルサーモメータで測定し, メータが所定の試験設定温度になると同時に試験した。

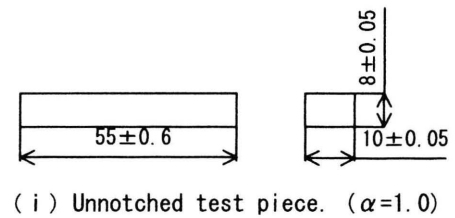
衝撃試験片は, Fig. 2 に示すように, 8×10×55 mm の無切欠き材と, 10×10×55 mm の切欠き材を使用した。外部切欠き材の応力集中係数( $\alpha$ )は, 西田<sup>17)</sup>によると無切欠き材の $\alpha$ は 1, R0.15 の切欠き材の $\alpha$ は 4.8 となる。

## 2. 3 静的試験

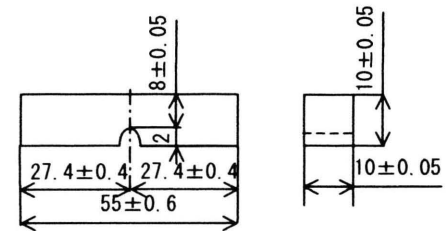
引張試験は, 平行部径 8 mm, 標点間距離 28 mm の試験片を用いて, インストロン万能試験機を使用して負荷速度  $8.33 \times 10^{-3}$  mm/s の条件で室温中で試験を行った。硬さ試験は, ブリネル硬さ試験を(10/3000/30)の条件で行い, 基地硬度は, マイクロビッカース硬さ試験を負荷荷重 0.49 N, 負荷時間 15 s の条件とし 10 点測定した。

## 2. 4 破面観察

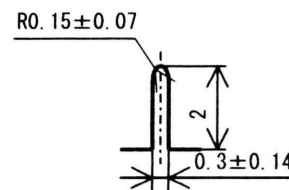
衝撃試験後の破断面は, 錆を防ぐ目的でアセトン中に浸漬し, 超音波洗浄を行った後, 破断表面を Pt-Pd のイ



(i) Unnotched test piece. ( $\alpha=1.0$ )



(ii) Notched test piece.



(iii) Details of notched part. ( $\alpha=4.8$ )

Fig. 2 Shape and dimension of impact specimens.

オンスパッタリングを施した。

マクロ破面観察は, 実体顕微鏡を用いて行い, ミクロ破面観察には, 高分解能電界放射型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) を使用し, 加速電圧 20kV のもと観察・写真撮影後, フラットベッド型のスキャナーで電子化した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3. 1 供試材の組織及び静的機械的性質

#### 3. 1. 1 供試材の化学組成及び組織

Table 1 に得られた供試材の化学組成を, Fig. 3 に得られた供試材の組織写真を示す。

これらの図, 表より, 得られたフェライト地球状黒鉛鋳鉄(以後 FDI)は 3.7%C, 2.4%Si, Si 鋳鋼は, 0.2%C,

Table 1 Chemical compositions of specimens. (mass%)

	C	Si	Mn	P	S
FDI	3.65	2.37	0.094	0.009	0.010
Si cast steel	0.20	2.50	0.070	0.010	0.010

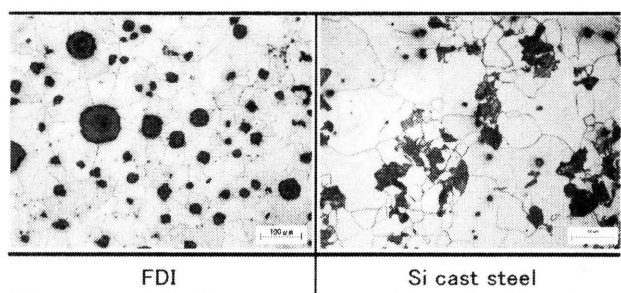


Fig. 3 Microstructures of specimens. (Nital etched)

Table 2 Mechanical properties of specimens. (R.T.)

	FDI	Si cast steel
Tensile strength (MPa)	358	522
0.2%Proof stress (MPa)	215	321
Elongation (%)	27.4	16.2
Reduction of area (%)	24.3	12.6
Ferrite grain size ( $\mu\text{m}$ )	55	180
Hardness (HB)	122	148
Hardness (HV)	191	164

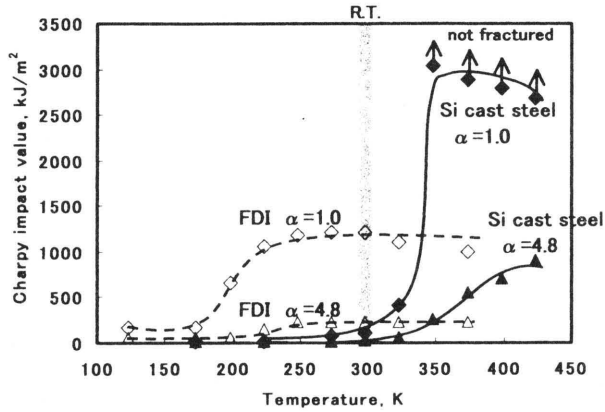


Fig. 4 Charpy impact transition curves.

2.5%Si の組成のものであり、Si 量がほぼ同等のものが得られている。また、FDI は黒鉛球状化率 89%、黒鉛面積率 13.3%、平均黒鉛粒径  $27\mu\text{m}$  のものである。なお、FDI の基地組織は完全なフェライト基地であるのに対し、Si 鋳鋼は 15%程度のパーライトが残存する組織となっている。また、FDI のフェライト粒径は  $55\mu\text{m}$  であるのに対し、Si 鋳鋼は  $180\mu\text{m}$  と FDI に比べはるかに大きい粒径である。

3. 1. 2 供試材の静的機械的性質

得られた供試材の静的機械的性質を Table 2 に示す。引張強度は、FDI は Si 鋳鋼に比べ有効断面積が小さいため低い、伸び率は、FDI の方が Si 鋳鋼に比べ高い。これは、Si 鋳鋼は常温で脆性的に破壊するためである。

3. 2 衝撃試験特性

3. 2. 1 衝撃遷移曲線

Fig. 4 に、供試材の衝撃遷移曲線を示す。同図より、延性域衝撃値は、Si 鋳鋼は FDI に比べてはるかに高いが、常温での衝撃値は、Si 鋳鋼よりも FDI の方が高いことがわかる。また、外部切欠きを付すことによって著しく減少することがわかる。

3. 2. 2 衝撃遷移温度

Fig. 5 に、衝撃エネルギー遷移温度と供試材との関係について示す。同図より、Si 鋳鋼の衝撃遷移温度は、FDI に比べてはるかに高いことがわかる。これは、フェライト結晶粒径の違い、パーライトの存在による遷移温度の上昇を考慮に入れても、60K 程度高いと考えられる。すなわち、これらの差は、鋳鉄中の球状黒鉛がデンプルの起点となって延性破壊させ易くするため、有効に衝撃遷移温度を低下させた結果であると考えられる。

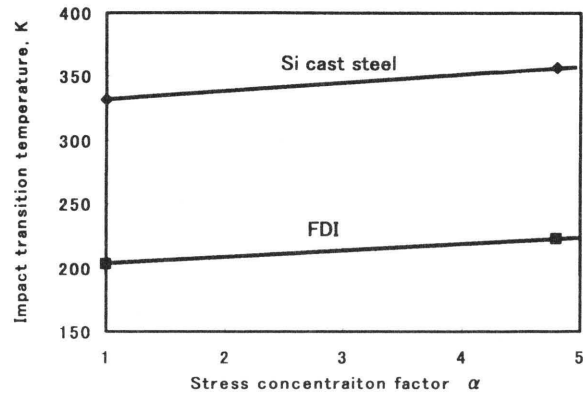
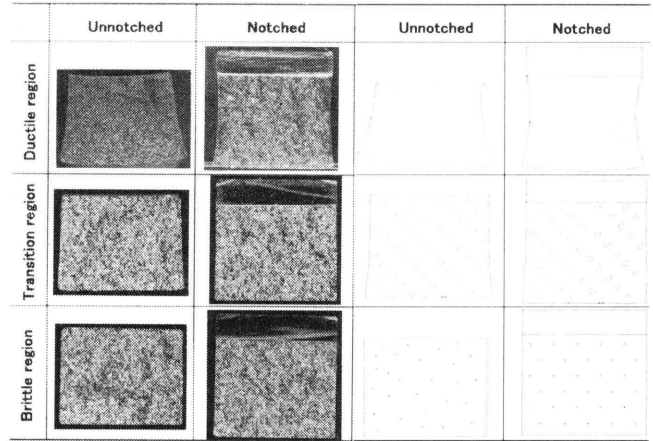
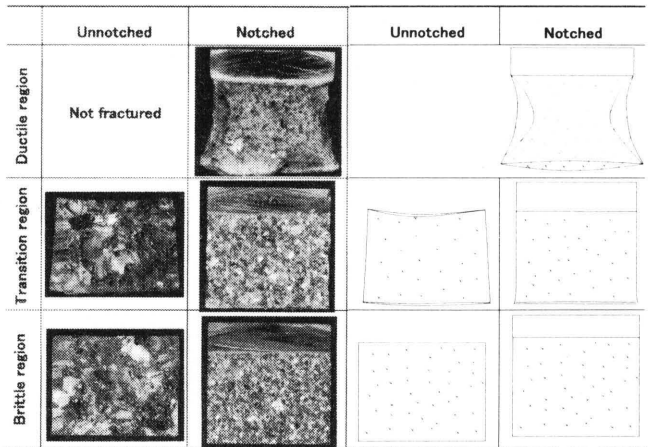


Fig. 5 Impact transition temperature of specimens.



∖: Ductile fracture surfaces in black  
 ○: Transition fracture surfaces  
 ×: Brittle fracture surfaces with metallic lustered

Fig. 6 Schematic illustration of macroscopic fracture surfaces in FDI.



∖: Ductile fracture surfaces  
 /: Shear lip  
 X: Plastic hinge  
 ×: Brittle fracture surfaces with metallic lustered

Fig. 7 Schematic illustration of macroscopic fracture surfaces in Si cast steel.

また、いずれの供試材も、外部切欠きを付すことによって遷移温度は上昇する傾向を示すことがわかる。

3. 3 マクロ破面観察

3. 3. 1 球状黒鉛鑄鉄のマクロ破面

Fig. 6 に、FDI の延性域(298K)、遷移域(223K)及び脆性域(123K)でのマクロ破面と破面の模式図について示す。同図より、延性域では FDI の無切欠き材は、試験片の変形が大きく、横膨出量大きいことがわかる。切欠き材は、無切欠き材に比べて試験片の変形度合いが小さい。また、いずれの破面も黒色の延性破面である。

遷移域では、破断面表面は脆性的な白色に変化し、試験片の変形は、延性域に比べて小さくなっている。無切欠き材のものは、引張側に部分的にやや延性的な破面が観察されるが、切欠き材のものの方が無切欠き材に比べ塑性変形がやや小さい傾向となり、ざらざらとした光沢のある白色破面が増加している。

脆性域では、無切欠き材、切欠き材ともに試料の変形は殆ど認められず、破断面はほぼ矩形であり、遷移域に比べさらに金属光沢のある白色破面によって占められている。

3. 3. 2 Si 鑄鋼のマクロ破面

Fig. 7 に、Si 鑄鋼の延性域(423K)、遷移域(323K)及び脆性域(173K)のマクロ破面と破面の模式図を示す。同図より延性域では、試験片の塑性変形量は著しく大きく、極めて良好な耐衝撃性を示した破面であり、切欠き底下の延性破面、試料側面はシャアリップ、試料下部は塑性ヒンジに分けられる破面である。

遷移域では、延性域に比べ試験片の塑性変形量は小さくなっており、破断面は、延性域に比べて光沢のある白色破面が現れている。無切欠き材のものでは、引張側と圧縮側、切欠き材のものでは、圧縮側にごくわずかの延性的な破面が観察される。

脆性域では、遷移域以上に光沢のある白色破面であり、試料断面の塑性変形は殆ど認められない矩形断面である。

3. 4 ミクロ破面観察と破壊特性

3. 4. 1 球状黒鉛鑄鉄の破壊形態

Fig. 8 に、SEM によって観察した FDI の延性域におけるミクロ破面観察写真を示す。同図より、無切欠き材の FDI は、引張応力の作用した A 部及び中央の B 部では、黒鉛を核とする大きなディンプル、また、微小介在物を核とする小さなディンプルが見られるが、圧縮応力の作用した C 部では、球状黒鉛がつぶされている破面や、部分的にへき開的な破面が観察される。切欠き材は、A、B、C 部とも、無切欠き材のものと同様のディンプル破面を呈している。外部切欠きを付すと、引張

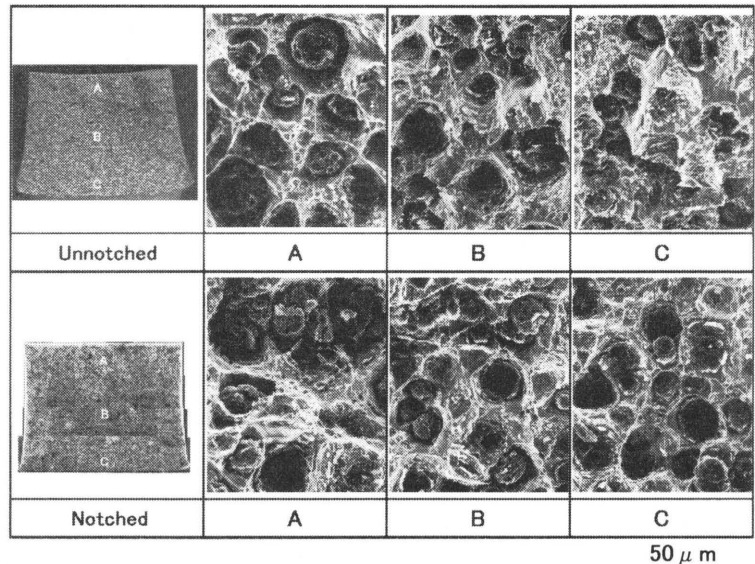


Fig. 8 SEM fractography of FDI in ductile fracture region.(298K)

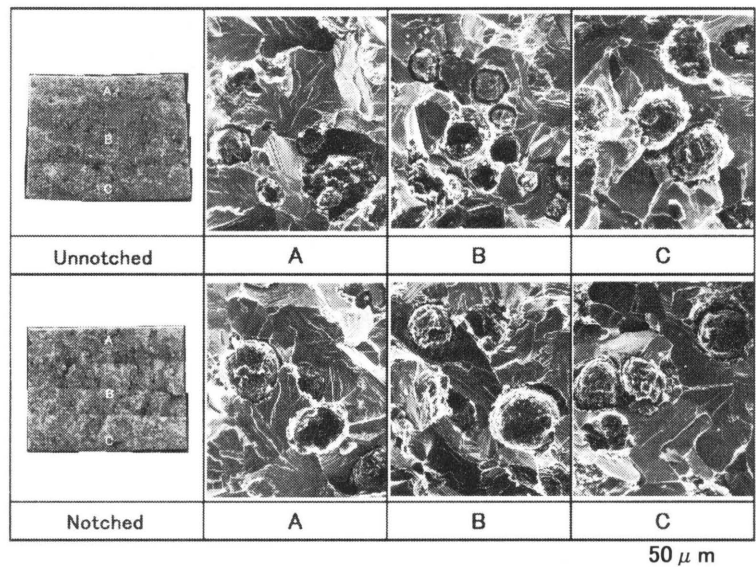


Fig. 9 SEM fractography of FDI in transition fracture region.(223K)

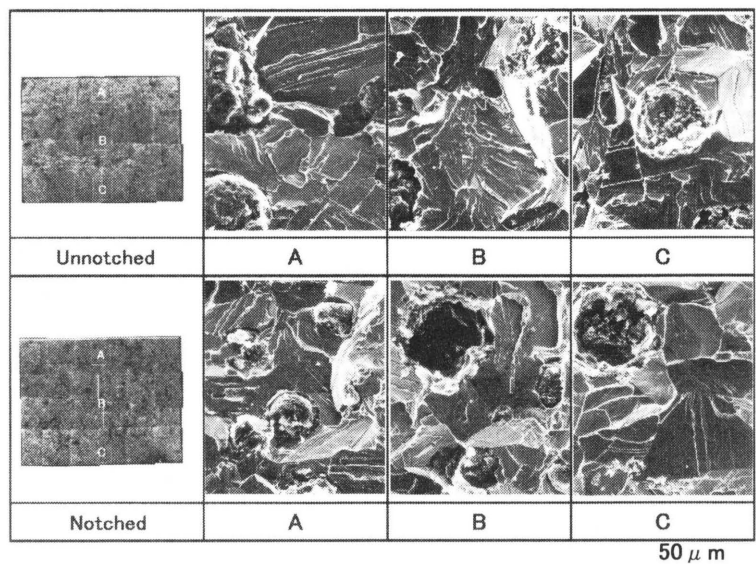


Fig. 10 SEM fractography of FDI in brittle fracture region.(123K)



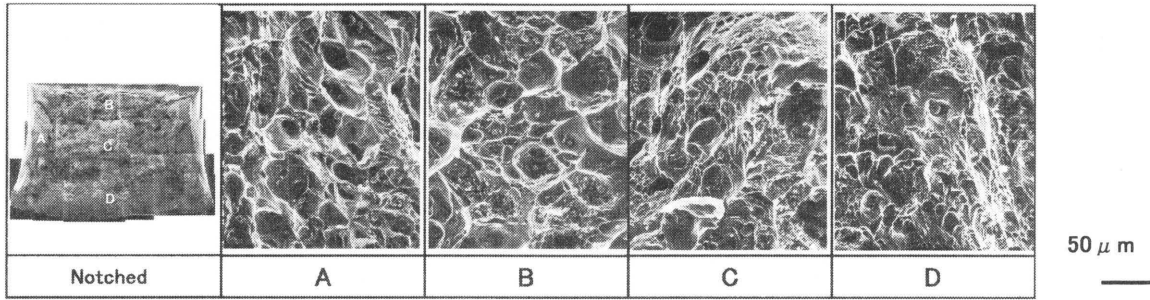


Fig. 11 SEM fractography of Si cast steel in ductile fracture region.(423K)

応力の作用した A 部では、黒鉛部周囲のポイドが小さくなる傾向が観察される。これは、外部切欠きを付すことによって、切欠き底で応力集中が起こり、黒鉛部周囲の基地の塑性変形を小さくし、亀裂発生エネルギーを低下させるため、結果として衝撃値を低下させたものと考察される。

Fig. 9に、遷移域のSEM観察写真を示す。無切欠き材は、引張応力の作用した A 部、中央部 B 及び圧縮側の C 部とも、フェライト基地部のリバーパターンを伴った凹凸のある劈開破面と球状黒鉛周囲にわずかな塑性変形を伴うポイドが観察される脆性破面と延性破面の混在した破面である。切欠き材は、無切欠きのものと同様の破面形態であるが、球状黒鉛周囲のポイドは小さく、脆性破壊傾向の強い破面である。

Fig. 10に、脆性域のSEM観察写真を示す。同図より、フェライト基地部は無切欠き及び切欠き材とも、リバーパターンに占められた脆性破面であり、黒鉛部周囲のポイドはほとんどなく、劈開破面は、Fig. 9に示した遷移域のものに比べ、より平坦な破面となっている。また、球状黒鉛周囲の劈開破面には、劈開段が観察され、延性域から脆性域となるに従って、破面上の黒鉛出現率は低下している。

### 3. 4. 2 Si 鑄鋼の破壊形態

Fig. 11に、Si 鑄鋼の延性域におけるSEM観察写真を示す。同図より、試料側面のシャーリップの観察された A 部では、すべりを伴った伸長ディンプルが観察される。切欠き底下の B 部では、微小介在物を核とする等軸ディンプルが観察され、明らかな延性破面である。中央部 C では B 部よりもさらに小さな楕円状の伸長ディンプルが観察され、塑性ヒンジ部 D では、小さな伸長ディンプルが多く観察される。Fig. 8に示した球状黒鉛鑄鉄の延性域のものに比べ、ディンプルの核となる黒鉛が存在しないためディンプルは浅いが、大量のディンプル破面によって構成されていることがわかる。

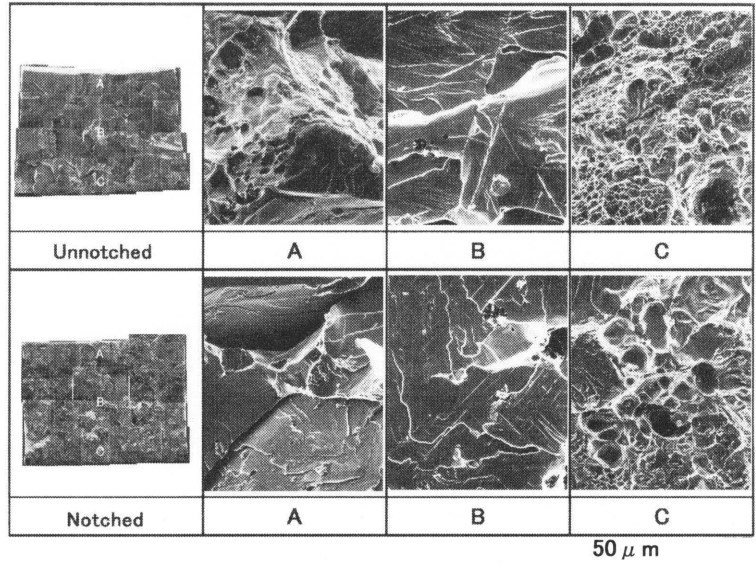


Fig. 12 SEM fractography of Si cast steel in transition fracture region.(323K)

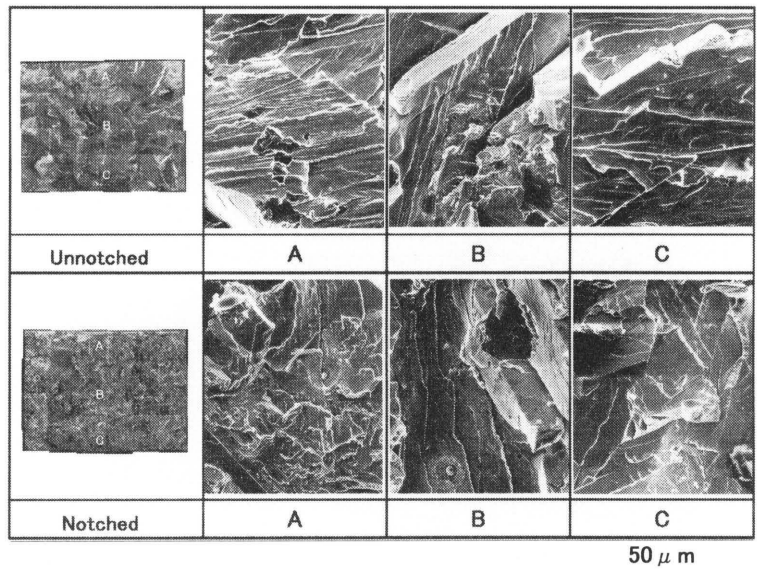


Fig. 13 SEM fractography of Si cast steel in brittle fracture region.(173K)

Fig. 12に、遷移域のSEM観察写真を示す。遷移域では、無切欠き材では、引張応力の作用した A 部では、フェライト基地部の劈開破面とディンプル破面の混在した破面が観察される。切欠き材のものでは、無切欠き材のものと同様に、フェライト基地部のリバーパターンの劈開破面と、ごくわずかな延性的な破面が観察されるが、無切欠き材のものに比べて脆性破壊傾向が強い。なお、圧縮応力の作用した C 部では、最終破断に伴う

延性破面が観察されたが、この位置においても無切欠き材のものの方が、微小な伸長ディンプルが多く観察された。また、Fig. 9 に示した FDI の遷移域のものに比べ、ディンプルの核となり易い黒鉛が存在しないために、試料表面の劈開破面は平坦な傾向にある。

Fig. 13 に、脆性域の SEM 観察写真を示す。同図より、切欠きの有無にかかわらず、Fig. 12 に示した遷移域のものよりも明らかに塑性変形量が少なく、試料表面は平坦なリバーパターンのみによって占められ、微小介在物の周囲にも塑性変形は認められず、明らかな脆性破面である。さらに、Fig. 10 に示した FDI の脆性破面よりも、平坦な劈開破面である。

### 3. 4. 3 球状黒鉛鑄鉄と Si 鑄鋼の破面の比較

Fig. 14 に、切欠き材の延性破壊した FDI(298K) と Si 鑄鋼(423K) の荷重-変位曲線を示す。この図より、最大荷重点までの亀裂発生エネルギー及びそれ以降の亀裂伝播エネルギーは、Si 鑄鋼の方が著しく大きいことがわかる。この場合の両者の破面は、Fig. 8 及び Fig. 11 に示したように、FDI は破面全体が球状黒鉛を核としたディンプルが主体の延性破面になるが、Si 鑄鋼は介在物を核とした微小な伸長及び等軸ディンプルからなっており、FDI の黒鉛の存在による有効断面積の減少及びディンプルの大きさ、数が亀裂発生及び伝播エネルギーに大きな差異を生じさせているものと考えられる。

Fig. 15 に、切欠き材の常温における FDI と Si 鑄鋼の荷重-変位曲線を示す。同図から明らかなように、常温では、FDI は延性破壊しており、Si 鑄鋼は脆性破壊していることがわかる。

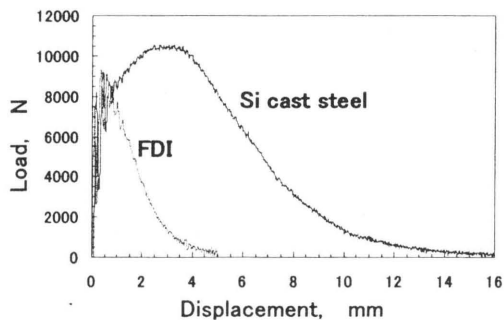


Fig. 14 Comparison in load-displacement curves of notched FDI and Si cast steel in ductile region.

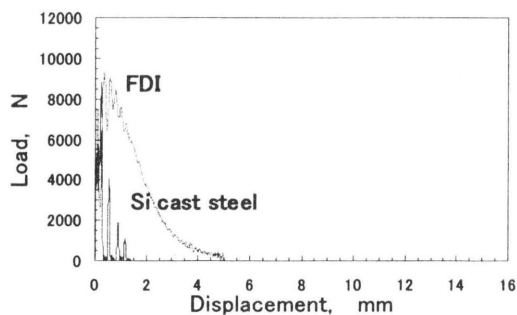


Fig. 15 Comparison in impact fracture energy of notched FDI and Si cast steel in R.T.

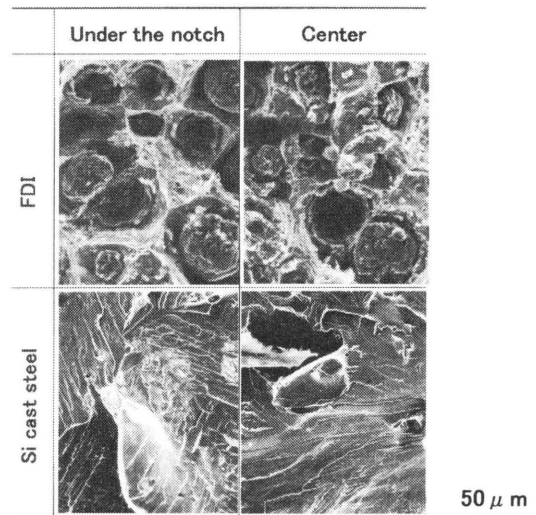


Fig. 16 SEM fractography of FDI and Si cast steel in R.T. (notched)

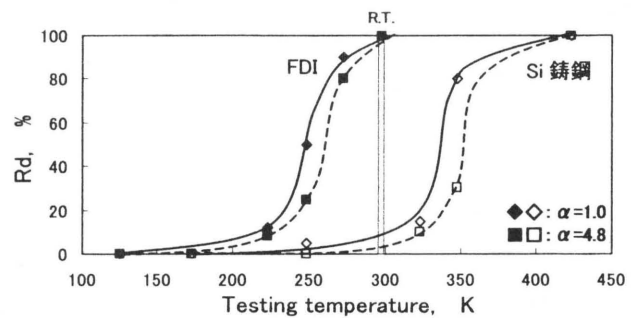


Fig. 17 Relation between ratio of ductile fracture surfaces of FDI & Si cast steel and testing temperature.

Fig. 16 に、常温における FDI と Si 鑄鋼の SEM 観察写真を示す。これによると FDI は、黒鉛を核としたディンプルが形成され延性破壊しているが、Si 鑄鋼は劈開破面で形成され脆性破壊している。このことは、球状黒鉛鑄鉄の存在がディンプルの核となり、延性破壊させる効果があることを示しており、遷移温度を低下させる結果となっていると考えられる。

Fig. 17 に、FDI と Si 鑄鋼の温度と延性破面率との関係を示す。延性破面率は次式(1)より算出した。

$$Rd(\%) = \frac{Ad}{Af} \times 100 \quad \dots (eq. 1)$$

ここで、Rd: 延性破面率, Ad: 延性破面の面積, Af: 破断面の面積である。

同図より、FDI は Si 鑄鋼より延性破面率の遷移温度が低いことがわかる。また、両者とも外部切欠きを付すことによって、延性破面率は低下し、遷移温度が上昇していることがわかる。これは、衝撃エネルギー遷移温度の傾向と一致している。

## 4. 結言

フェライト基地球状黒鉛鑄鉄及び Si 鑄鋼に外部切欠きを付して種々な温度で衝撃試験を行い、その破断面を

SEM 観察し、両者の破断面の相違から衝撃破壊に対する黒鉛の効果について検討した結果、以下の結言が得られた。

- 1) FDI の延性域の衝撃値は、Si 鋳鋼に比べて著しく小さいが、遷移温度は著しく低い。また、FDI 及び Si 鋳鋼とも切欠きを付すことによって衝撃遷移温度は上昇する。
- 2) FDI の延性破壊においては、外部切欠きを付すことによってマクロ破面の基地の塑性変形は著しく減少し、衝撃値は低下するが、破壊形態は無切欠き材と大きく変わらない。しかし、Si 鋳鋼の場合は無切欠き材は破断しなかったが、切欠き材でも大きく塑性変形し、衝撃値も著しく大きい。また、遷移及び脆性域のマクロ破面は無切欠き材に比べて細かい凹凸のある脆性破面となる。
- 3) FDI は、延性破壊では主として黒鉛粒を核としたデインプルからなり、Si 鋳鋼は介在物を核とした微小デインプルからなっている。
- 4) 常温における破壊では、FDI には、デインプルを形成させ易くする黒鉛粒が存在するため延性破壊するが、Si 鋳鋼は微細な介在物しか存在しないため脆性破壊となり、結果として遷移温度は高くなる。

## 5. 文献

- 1) 加納誠, 菊池正紀, 町田賢司: 金属の疲労と破壊, 内田老鶴園, p247, 1999
- 2) 上田祐男: 破壊の基礎, パワー社, p1-4, 1995
- 3) 吉田亨: 金属破断面の見方, 日刊工業新聞社, p27, 1998
- 4) 藤木栄: 機械部品の疲労破壊・破断面の見方, 日刊工業新聞社, p2, 2002
- 5) 小寺沢良一: フラクトグラフィとその応用, 日刊工業新聞社, p31, 1981
- 6) 実際の設計研究会: 続々・実際の設計, 日刊工業新聞社, p25, 1996
- 7) 塩田俊雄, 旗手稔, 松岡敬: 球状黒鉛鋳鉄の各種負荷条件による破面の特徴, 鋳物, Vol. 66, p579, 1994
- 8) 辻川正人, 池永明, 岡林邦夫: パーライト基地球状黒鉛鋳鉄の衝撃及び疲労破面の定量的解析, 鋳物, Vol. 53, p604, 1981
- 9) 江原隆一郎, 石橋保博, 木村四郎, 増尾義信, 塩田俊雄, 小松眞一郎: 黒鉛形状の異なるフェライト地鋳鉄の破面解析, 材料, Vol. 32, p360, 1983
- 10) 増尾義信, 江原隆一郎, 石橋保博, 塩田俊雄, 小松眞一郎: 黒鉛形状の異なるパーライト地鋳鉄の破面解析, 材料, Vol. 34, p568, 1985
- 11) 炭本治喜, 中村幸吉: 球状黒鉛鋳鉄の衝撃破面の特徴について, 鋳物, Vol. 47, p326, 1975
- 12) 小林俊郎, 村中康成, 山田伸弥: 球状黒鉛鋳鉄の延性破壊に及ぼす応力 3 軸度及び基地組織の影響, 鋳造工学, Vol. 69, p924, 1997
- 13) 炭本治喜, 中村幸吉: 球状黒鉛鋳鉄の低温衝撃特性に及ぼす黒鉛の効果について, 鋳物, Vol. 47, p609, 1983
- 14) 大井利継, 藤岡稔: 急冷凝固した高けい素過共晶球状黒鉛鋳鉄の機械的性質について, 鋳物, Vol. 53, p233, 1981
- 15) 藤井要, 鷹合滋樹, 栗津薫: 機械部品の破壊事故解析事例, 石川県工業試験場研究報告, Vol. 53, 2003
- 16) 信木関, 塩田俊雄, 旗手稔: 球状および CV 黒鉛鋳鉄の衝撃特性に及ぼす黒鉛の影響, 近畿大学工学部研究報告, No. 37, p59, 2003
- 17) 西田正孝: 応力集中, 森北出版, p572, 1966