

展望・総説・総論（再掲）

球状黒鉛鋳鉄における切欠き強度の新たな評価方法（3） —— 切欠き三点曲げ強度に及ぼすひずみ速度の影響 ——

池田 朋弘*・野田 尚昭†・佐野 義一‡

1. はじめに

一発破壊（中でも脆性破壊）に関する評価法として、引張試験の他にシャルピー衝撃試験が工業的に広く普及している。そのため、新材料の適用を考える場合に候補材のシャルピー吸収エネルギー値が従来材と比べて低いことで、ユーザー、中でも設計技術者が材料の一発破壊に対して大きな不安を持つことがある。前回、典型的な例として、高 Si 球状黒鉛鋳鉄について述べた。高 Si 球状黒鉛鋳鉄は、近年、新材料として欧州を中心に構造部材への適用が検討されているが、常温から低温側において従来材よりもシャルピー吸収エネルギー値が低い。このことが懸念され、同材料の産業への適用は未だに限定的である。しかしながら、シャルピー衝撃試験を設計強度評価法として用いることには、その妥当性に疑問が持たれてきた¹⁾。

シャルピー衝撃試験は、振り子式のハンマーにより試験片を破壊させる手法であるため、実際の使用環境に合わせて試験速度を任意に変えることが困難である。したがって、シャルピー衝撃試験は、往々にして実際とはかけ離れた高速側のひずみ速度条件下での評価となる場合がある。図 1.1 に、各産業分野で想定されているひずみ速度を静的から超高速までに分類して示す^{2)~13)}。併せて、静的から超高速までの各ひずみ速度にそれぞれ対

応できる試験方法も示す^{5), 6), 14), 15), 16)~18)}。図 1.1 より、自動車分野や建設機械分野における衝撃部材のひずみ速度は、シャルピー衝撃試験と同程度であり、衝撃の領域に分類される^{11), 12), 14), 15)}。一方で、多くの構造部材、特に橋梁分野や船舶分野などにおける溶接構造部材が受ける最も厳しいひずみ速度は、動的の領域であり、より遅いひずみ速度の引張試験やより速いひずみ速度のシャルピー衝撃試験では対応していない^{2), 3), 14), 15), 9)~11)}。

そこで、まずはシャルピー衝撃試験と同様の形式で試験速度を変化させた場合について考える。本稿では、シャルピー衝撃試験と同形状の治具と試験片（V ノッチ試験片）を用いて、高 Si 球状黒鉛鋳鉄について、静的から動的の領域のひずみ速度範囲において様々な試験速度で高速三点曲げ試験を行い、吸収エネルギー値とひずみ速度の関係を調べた結果について述べる。また、最大強度（切欠き三点曲げ強度）とひずみ速度の関係も調べ、吸収エネルギー値のひずみ速度依存性と比較検討する。さらに、各産業分野で用いられてきたフェライト-パーライト基地球状黒鉛鋳鉄における評価結果と比較検討することにより、高 Si 球状黒鉛鋳鉄の幅広い分野への適用の可能性について考察する。

2. 実験方法

供試材料は、表 2.1 に示す成分に調整した高 Si 球状黒鉛鋳鉄である。また、高 Si 球状黒鉛鋳鉄と同程度の引張強さを有する JIS-FCD500 および、耐力が同程度の JIS-FCD700 を比較材料に用いた。なお、目的の強度を得るために、高 Si 球状黒鉛鋳鉄では Si 量を成分調整し、JIS-FCD500

* 日之出水道機器株式会社 R&D 総合センター
(Tomohiro Ikeda)

† 九州工業大学 大学院工学研究院
機械知能工学研究系 教授
(Nao-Aki Noda)

‡ 九州工業大学 大学院工学研究院
機械知能工学研究系
(Yoshikazu Sano)

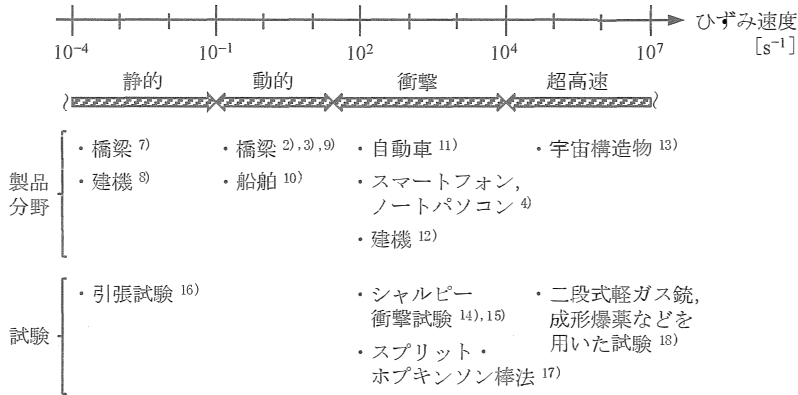
図 1.1 各産業分野で想定されているひずみ速度と対応可能な試験^{5), 6)}

表 2.1 各供試材料の成分 (wt%)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg
高 Si 球状黒鉛鑄鉄	3.20	3.72	0.32	0.022	0.008	0.02	0.038
JIS-FCD500	3.63	2.02	0.42	0.020	0.011	0.26	0.029
JIS-FCD700	3.64	2.14	0.42	0.022	0.003	0.38	0.039

と JIS-FCD700 では、Cu 量を調整した。図 2.1 に試験用に鑄造した素材の形状 (JIS G 5502¹⁹⁾ 規定の B 号 Y ブロック) と供試材料の採取状況を示す。鑄造では、300kg 溶解炉にて目的の成分に調整した溶湯を注湯取鍋に移してサンドイッチ法 (ポケット取鍋式) により球状化处理し、砂型に 0.2% の注湯接種を施しながら注湯した。そして、鑄放し状態のまま、JIS G 5502 に基づき、図 2.1 に灰色で示す Y ブロック底から 40mm の範囲より各試験片を採取した。

図 2.2 に各供試材料の組織写真を示し、表 2.2 に JIS G 5502 に基づく各供試材料の球状化率測

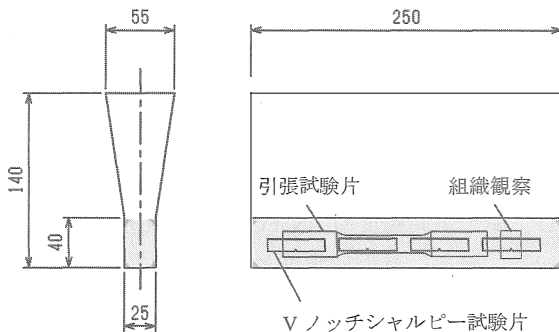


図 2.1 素材形状と供試材料の採取位置 (mm)

定結果を示す。各供試材料において黒鉛粒径、球状化率、黒鉛面積率は同等である。表 2.3 に、各供試材料の JIS Z 2241¹³⁾ に基づく 4 号試験片での引張試験 (島津製作所 UH300kNC) の結果を示す。また、表 2.3 には、JIS Z 2243²⁰⁾ に基づいたブリネル硬さ試験 (島津製作所) の結果も示す。

本研究では、上述の供試材料 (高 Si 球状黒鉛鑄鉄、JIS-FCD500、JIS-FCD700) を用いてシャルピー衝撃試験と高速三点曲げ試験を行った。図 2.3 (a) にシャルピー衝撃試験と高速三点曲げ試験に用いた試験片形状を示す。試験片は、JIS Z 2242²¹⁾ に規定される V ノッチシャルピー衝撃試験片を使用した。

図 2.3 (b) にシャルピー衝撃試験の負荷形式を示す。シャルピー衝撃試験 (島津製作所 JIS 300J) は、試験速度 (ハンマーによる初期の打撃速度) 5.18×10^3 mm/s、試験温度 $-80 \sim 100^\circ\text{C}$ の範囲において行い、吸収エネルギー値 ΔE を求めた。

図 2.3 (c) に高速三点曲げ試験の負荷形式を示す。高速三点曲げ試験は、シャルピー衝撃試験機と同じ形状寸法の曲げ治具を作製して使用し、試験片を支点間距離 $L_s = 40$ mm に支持して電気油圧サーボ式試験機 (島津製作所 E100kN) により、

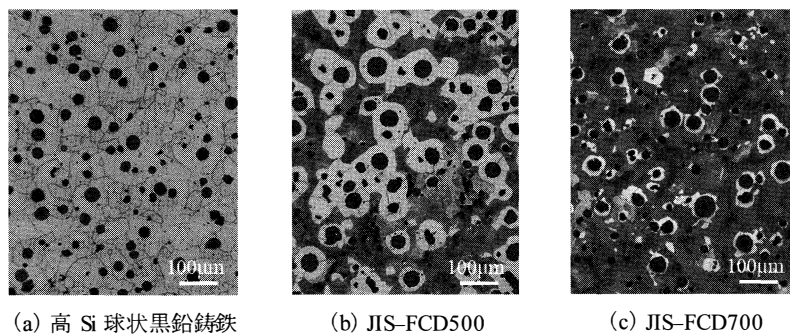


図 2.2 各供試材料の組織写真

表 2.2 各供試材料の黒鉛と組織の画像解析結果

材料	黒鉛粒径 [μm]	球状化率 [%]	黒鉛面積率 [%]	パーライト面積率 [%]
高 Si 球状黒鉛鑄鉄	28.1	97.7	10.6	100.0
JIS-FCD500	30.0	97.9	11.7	52.4
JIS-FCD700	27.3	97.5	10.2	87.2

表 2.3 各供試材料の引張試験結果およびブリネル硬さ試験結果

材料	引張強さ σ_B [MPa]	0.2% 耐力化率 $\sigma_{0.2}$ [MPa]	突合せ破断伸び ϵ_B [%]	ブリネル硬さ (HBW 10/3000)
高 Si 球状黒鉛鑄鉄	525	401	21	179
JIS-FCD500	555	336	13	183
JIS-FCD700	734	392	10	228

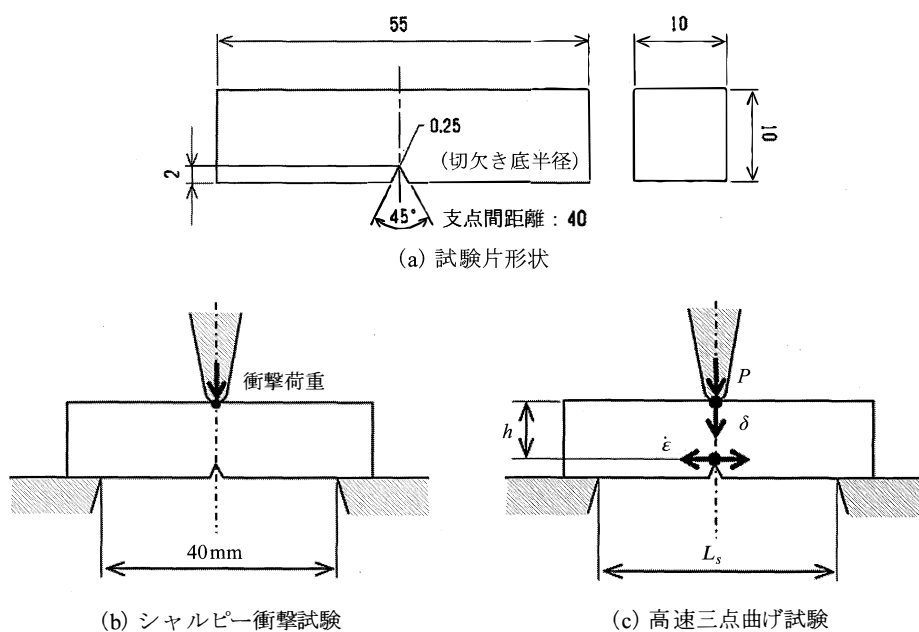


図 2.3 試験片形状と各試験の負荷形式

試験温度 22°C および -20°C, 試験速度 (ストローク変位速度) $10^{-3} \sim 10^2 \text{ mm/s}$ の条件で行った. ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は, 既往文献で用いられている式 (2.1) より求めた^{15), 22)~24)}.

$$\dot{\epsilon} = 6h(u(t)\dot{t})QL_s^2 \quad (2.1)$$

ここで, h は試験片幅, $u(t)\dot{t}$ は試験速度 (ストローク変位速度), $Q=1.94$ である^{15), 22)~24)}. 試験温度は, 液体窒素を用いた恒温槽の中でダミー試験片に熱電対を差し込んで温度を常に計測しながら, 試験が終了するまで目的の温度に保持し続けた. そして, 高速三点曲げ試験により計測した荷重-変位関係より, 図 2.4 に示すように, 斜線部分を吸収エネルギー E_t と定義した. また, 荷重-変位関係における最大荷重点より式 (2.2) により最大公称曲げ応力 (切欠き三点曲げ強度) $\sigma_{b,max}$ 求めた^{25), 26)}.

$$\sigma_{b,max} = \frac{3P_{max}L_s}{2bh^2} \quad (2.2)$$

ここで, P_{max} は最大荷重, b は試験片の厚みである.

なお, シャルピー衝撃試験と高速三点曲げ試験の試験片の破面は, マイクロスコープ (キーエンス VHX900) を用いて巨視的に観察し, 延性破面率 f_D (破面上に観察されるディンプル破面領域の比率) を測定した. また, 高速三点曲げ試験にお

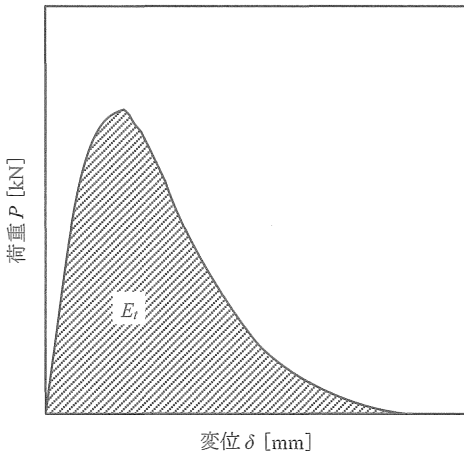
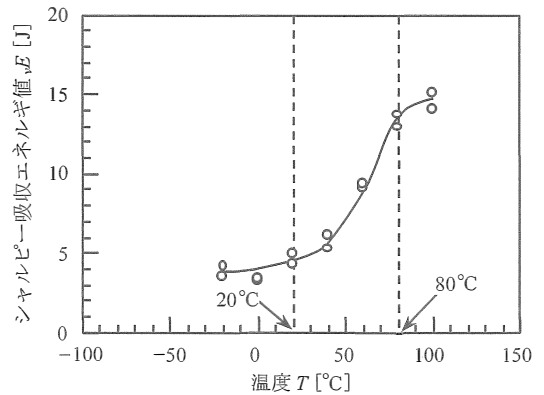


図 2.4 高速三点曲げ試験における吸収エネルギー値の定義

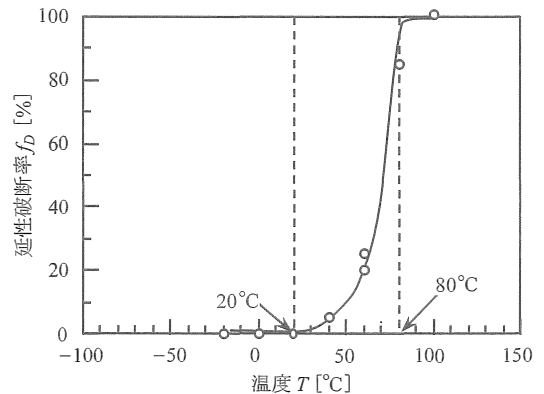
いて, わずかに切欠き底に延性破面が存在するだけの f_D が極めて小さい破面については, 走査型電子顕微鏡 (日立ハイテクノロジーズ S-3400N) を用いて, 延性破面の存在を観察した.

3. 実験結果および考察

図 3.1 (a) に高 Si 球状黒鉛鋳鉄のシャルピー衝撃試験における吸収エネルギー値 νE と温度 T の関係を示す. 吸収エネルギー値 νE は, 温度低下に伴い遷移しており, 図中の左向き黒矢印で示す 80°C で上部棚から低下し始め, 右向き黒矢印で示す 20°C 以下では下部棚の領域である. 図 3.1 (b) に 図 3.1 (a) の縦軸を延性破面率 f_D (破面上に観察されるディンプル破面領域の比率) で再整理した結果を示す. 延性破面率 f_D も



(a) シャルピー吸収エネルギー値 νE と温度 T の関係

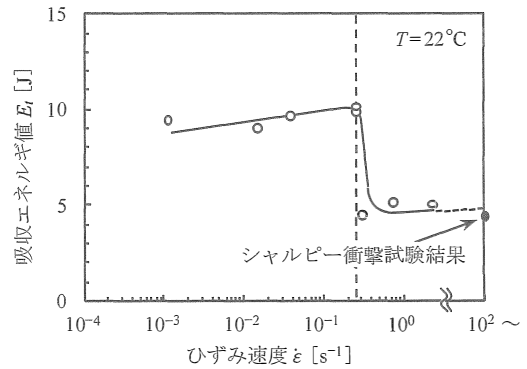


(b) 延性破面率 f_D と温度 T の関係

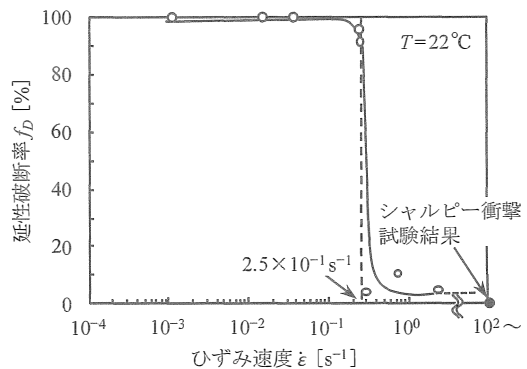
図 3.1 高 Si 球状黒鉛鋳鉄のシャルピー衝撃試験結果

図中の左向き黒矢印で示す 80°C で低下し始め、右向き黒矢印で示す 20°C で下部棚の領域であり、図 3.1(a) で示した νE の傾向と一致している。これは、温度低下に伴う破壊様式の延性-脆性遷移が吸収エネルギー値 νE の低下に大きく関係していることを示すものである。鋼材などの BCC 金属においては、各種強度評価試験において温度低下に伴い延性-脆性遷移を示すことが知られており、一般のフェライト-パーライト基地球状黒鉛鑄鉄も同様のことが知られている。

図 3.1 に示したシャルピー衝撃試験の結果より、本研究で用いた高 Si 球状黒鉛鑄鉄は、温度低下に伴う延性-脆性遷移により、常温付近で脆性破壊の傾向を示した。しかしながら、図 1.1 で示したように、溶接品などの構造部材がさらされるひずみ速度と比較してシャルピー衝撃試験で試験片が受けるひずみ速度は過剰に高速側の条件である。そこで、JIS で規定されている引張試験で行われるような静的の領域から動的の領域（本実験では $10^{-4} \sim 10^0 \text{ s}^{-1}$ オーダー）を対象として、吸収エネルギー値を調べるために、シャルピー衝撃試験機と同様の負荷形式の高速三点曲げ試験を電気油圧サーボ式試験機により様々なひずみ速度で行った。図 3.2 (a) に高 Si 球状黒鉛鑄鉄の 22°C における高速三点曲げ試験より得られた吸収エネルギー値 E_I とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係を示す。シャルピー衝撃試験結果では常温で吸収エネルギー値が下部棚領域であったが、ひずみ速度が変化すると、図 3.2(a) のように、低ひずみ速度側で吸収エネルギー値の上部棚が現れている。このひずみ速度依存性は、シャルピー衝撃試験のみでは把握できない。そして、図中に黒矢印で示すひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 2.5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ において、 E_I は 10J から 5J に急激に低下している。このように、ひずみ速度による吸収エネルギー値の遷移挙動が明らかにされた。図 3.2(b) には、図 3.2(a) の縦軸を巨視的に観察して得られた延性破断面率 f_D (破面上に観察されるディンプル破面領域の比率) で再整理した結果を示す。延性破断面率 f_D が減少し始めるひずみ速度も黒矢印で示すように $2.5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ であり、 E_I が急激に低下し始めたひずみ速度と一致する。そして、 f_D の温度低下に伴う遷移曲線は図 3.2(a) に示した E_I の遷移曲線と一致している。した



(a) 吸収エネルギー値 E_I とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係

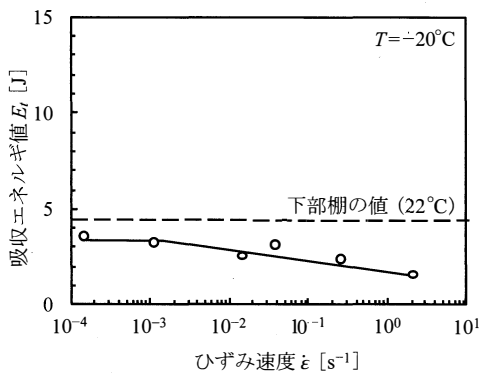


(b) 延性破断面率 f_D とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係

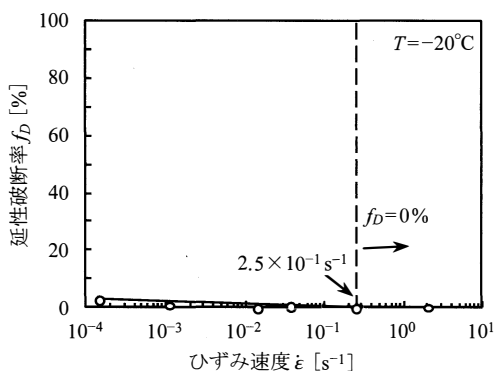
図 3.2 高 Si 球状黒鉛鑄鉄の 22°C における高速三点曲げ試験結果

がって、ひずみ速度の上昇に伴う破壊様式の延性-脆性遷移が吸収エネルギー値 E_I の低下に大きく関係している。すなわち、吸収エネルギー値に及ぼすひずみ速度上昇の影響は、温度低下の影響と同様の傾向を示す。

図 3.3 (a) に -20°C における高速三点曲げ試験より得られた吸収エネルギー値 E_I とひずみ速度の関係を示す。また、図 3.3 (b) に縦軸を延性破断面率 f_D で再整理した結果を示す。図 3.3(a) より、 -20°C において得られた全ての E_I は、図 3.2(a) で示した 22°C における下部棚よりも低い値を示している。また、図 3.3 (b) では全てのプロットにおいて延性破断面率 f_D がわずかであり、ほぼ脆性破面である。これは、試験温度の低下により、延性-脆性遷移のひずみ速度が低ひずみ速度側に



(a) 吸収エネルギー E_i とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係



(b) 延性破断率 f_D とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係

図 3.3 高 Si 球状黒鉛鋳鉄の -20°C における高速三点曲げ試験結果

移動し、図 3.3 (a), (b) では、下部棚以降の結果が示されていると考えられる。

図 3.4 に高 Si 球状黒鉛鋳鉄の 22°C における高速三点曲げ試験より得られた種々のひずみ速度における荷重-変位関係を示す。ここで、 P_{\max} は最大荷重であり、 δ_{\max} は図 3.4 中の各荷重-変位関係において×印で示される破断時の変位量（最大変位量）である。図 3.4 より、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の上昇に伴い、 δ_{\max} は小さくなる。前述した図 3.2 (a) において、 $\dot{\epsilon}$ の上昇に伴い吸収エネルギー E_i が上部棚の値から急激に低下したことについては、 $\dot{\epsilon}$ の上昇に伴う δ_{\max} の減少によるものである。一方で、 $\dot{\epsilon}$ の上昇に伴い最大荷重 P_{\max} が大きくなっていることは、注目すべき点である。

図 3.5 に高 Si 球状黒鉛鋳鉄の 22°C における高

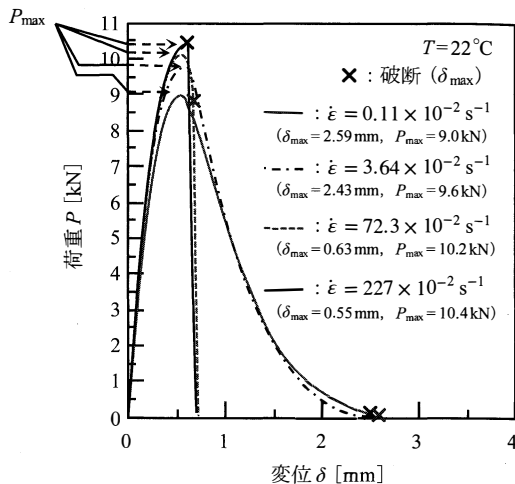


図 3.4 高 Si 球状黒鉛鋳鉄の 22°C での各ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ における高速三点曲げ試験の荷重-変位関係

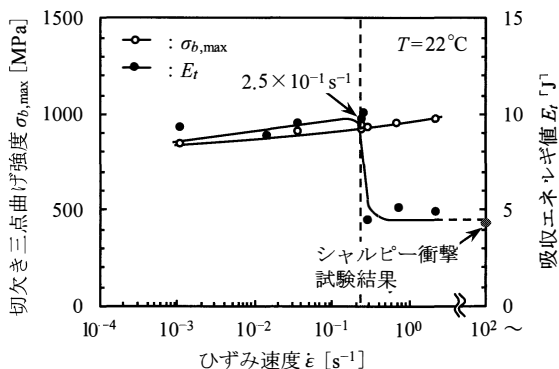


図 3.5 高 Si 球状黒鉛鋳鉄の 22°C での高速三点曲げ試験における切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,\max}$ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係

速三点曲げ試験より得られた切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,\max}$ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係を示す。切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,\max}$ は、最大荷重 P_{\max} より式 (2.2) で定義される。また、図 3.5 には、比較のために、図 3.2 (a) で示した吸収エネルギー E_i と $\dot{\epsilon}$ の関係を再度示している。図 3.5 では、ひずみ速度の上昇に伴い、吸収エネルギー E_i は $\dot{\epsilon}$ が $2.5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ において急激に低下し始めている。しかしながら、切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,\max}$ は、最も低速側の条件において得られた 850 MPa から低下していない。

図 3.6 (a) に図 3.4 中の $\dot{\epsilon} = 72.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ の試験片の破面写真を示す。また、図 3.6 (b) は、

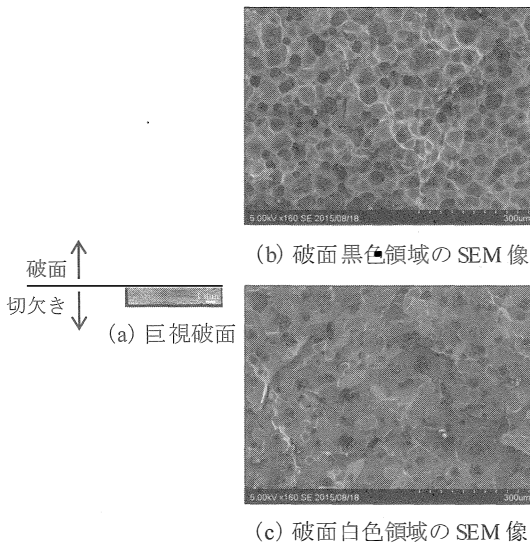


図 3.6 $\dot{\epsilon} = 72.3 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ の試験片の破面 (図 3.4)

図 3.6 (a) 中の切欠き底の黒色の破面の領域の SEM 像であり、図 3.6 (c) は白色の破面の領域の SEM 像である。図 3.6 (b) の黒色の破面の領域の SEM 像は黒鉛を起点としたディンプルを呈し、典型的な延性破面である。一方で、図 3.6 (c) の白色の破面の領域の SEM 像ではへき開破面が確認でき、脆性破壊によるものである。図 3.7 (a) に図 3.4 中の $\dot{\epsilon} = 227 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ の試験片の破面写真を示す。図 3.7 (a) において、図 3.6 (a) で観察されたような延性破面領域（黒い破面の領域）が巨視的に観察し難い。しかしながら、図 3.7 (b) に示す切欠き底近傍の破面の SEM 像では、切欠き底にわずかなディンプルの領域が明瞭に確認される。このわずかなディンプルの領域は、試験片の破壊過程における初期に形

成されたものと考えられる。既往研究では、球状黒鉛鑄鉄における静的な負荷条件の高速三点曲げ試験において、試験片の破壊の初期に切欠き底から微小な初期き裂が発生することが観察されている^{27), 28)}。これによると、三点曲げによるフェライト基地材における延性破壊の際、まず、約 $50 \mu\text{m}$ の微小き裂が切欠き底に発生する。同時に、球状黒鉛とフェライト基地の分離が確認される。そして、最大荷重点近傍において、微小なき裂は 0.1mm 以上のき裂に成長し、その後進展する。一方、脆性破壊の場合には、初期き裂の発生とほぼ同時に急速にき裂が進展して破断に至る。したがって、図 3.4 の $\dot{\epsilon} = 227 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ における試験片の破壊では、まず微小なき裂が発生したことにより図 3.7 (b) で示した切欠き底のわずかなディンプルの領域が形成され、その後脆性破壊による急速なき裂進展で破断に至り、へき開破面が形成されたものと考えられる。

以上のことから、図 3.2 (a) および図 3.5 で示した上部柵の領域（図 3.2 (b) における延性破面率 f_D が 100% の領域）では、切欠き底に黒鉛を起点としたわずかなディンプルが形成され、そのまま延性破面の形成が破断まで進み、全面が延性破面になったと推察される。一方で、ひずみ速度が上昇すると、図 3.2 (a) のように吸収エネルギー値 E_I が低下し始めた。これは、延性破壊が進み、全面が延性破面になる前に脆性破壊が途中で生じて急激に破断に至ったもので、これに伴い δ_{max} が減少し、 E_I の低下に繋がっていると推察される。さらにひずみ速度が上昇すると、切欠き底に広がる延性破面の割合（延性破面率 f_D ）が減少し、荷重-変位関係においてより早期に脆性破壊に至るため δ_{max} もこれに伴ってさらに小さくなり、 E_I

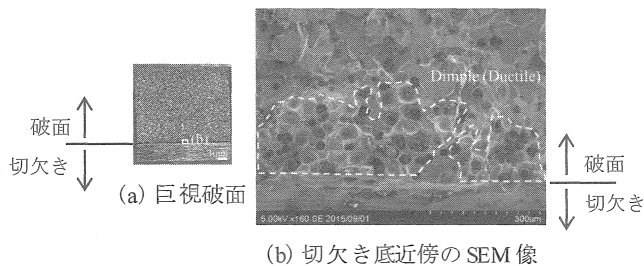


図 3.7 $\dot{\epsilon} = 227 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ の試験片の破面 (図 3.4)

が低下していくものと考えられる．ところで，22℃における本実験のひずみ速度範囲では， f_0 が0%となること（切欠き底の延性破面領域が消失すること）はなく，切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ は上昇し続けた．このような，切欠き底の延性破面の存在と $\sigma_{b,max}$ の関連性については次の-20℃における実験結果で述べる．

図 3.8 に高 Si 球状黒鉛鑄鉄の -20℃における高速三点曲げ試験より得られた種々のひずみ速度における荷重-変位関係を示す．図 3.8 中の $\dot{\epsilon} = 3.64 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ から $\dot{\epsilon} = 203 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ では，ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の上昇に伴い最大荷重 P_{max} が小さく

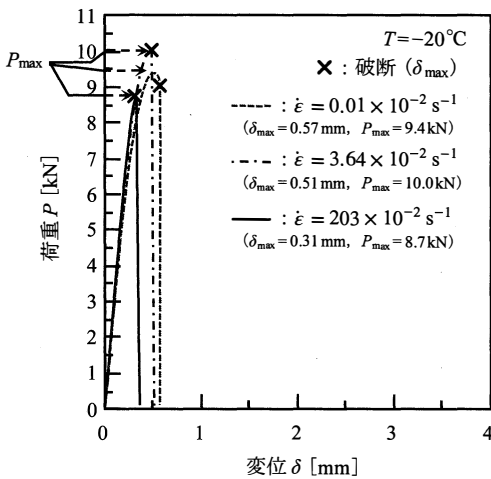


図 3.8 高 Si 球状黒鉛鑄鉄の -20℃での各ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ における高速三点曲げ試験の荷重-変位関係

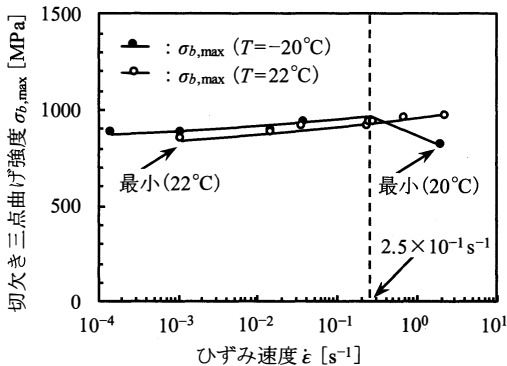


図 3.9 高 Si 球状黒鉛鑄鉄の -20℃での高速三点曲げ試験における切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係

なっており，22℃における結果とは異なる傾向を示している．そこで，-20℃と22℃での切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ のひずみ速度依存性を比較する．図 3.9 に高 Si 球状黒鉛鑄鉄の -20℃における高速三点曲げ試験より得られた $\sigma_{b,max}$ と $\dot{\epsilon}$ の関係を示す．また，図中には，図 3.5 で示した22℃における $\sigma_{b,max}$ のプロットも再度示している．図 3.9 より，-20℃ではひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の上昇に伴い，黒矢印で示す $\dot{\epsilon} = 2.5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 以上で $\sigma_{b,max}$ が低下し始めているが，-20℃における最小の $\sigma_{b,max}$ の値は，22℃における最小の $\sigma_{b,max}$ の値と大きくは変わらない．ここで，22℃と-20℃における吸収エネルギー値 E_t とひずみ速度の関係と比較するために，図 3.2 (a)と図 3.3 (a)をまとめて図 3.10 に示す．22℃における結果では， $\dot{\epsilon} = 2.5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ より E_t が急激に低下して下部棚の領域となり，-20℃において E_t は20℃の上部棚の値と比べて大幅に低い．このように，

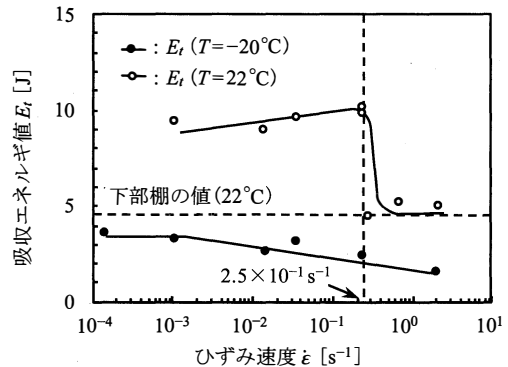
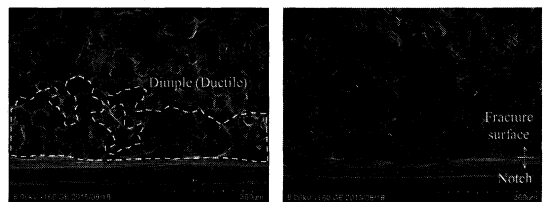


図 3.10 高 Si 球状黒鉛鑄鉄の -20℃および22℃での高速三点曲げ試験における吸収エネルギー値 E_t とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係



(a) $3.64 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (b) $203 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

図 3.11 -20℃での $3.64 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ および $203 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ の試験片の破面における切欠き底近傍のSEM像(図 3.8)

変化点に達した後の吸収エネルギー値 E_t は急激な低下を示すが、切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ の場合は低下が比較的緩やかである。

図 3.11 に図 3.8 中の $3.64 \times 10^{-2} s^{-1}$ と $203 \times 10^{-2} s^{-1}$ の試験片の破面における切欠き底近傍の SEM 像を示す。図 3.11 (a) の $3.64 \times 10^{-2} s^{-1}$ では切欠き底近傍にディンプルが確認される。一方、図 3.11 (b) では、ディンプルが確認されない。なお、図 3.3 (b) 中の黒矢印で示すように、 $\dot{\epsilon} = 2.5 \times 10^{-1} s^{-1}$ 以上では延性破面率 f_d は 0% であり、この $\dot{\epsilon}$ は、図 3.9 において $\sigma_{b,max}$ が低下し始める $\dot{\epsilon}$ と一致する。したがって、 $\sigma_{b,max}$ が低下し始める変化点は、切欠き底でのディンプルの存在、すなわち、延性破壊の存在と密接に関係していると考えられる。破壊初期において延性的である限り、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の上昇に伴い切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ は上昇すると考えられる。

前述での表 2.3 の通り、JI S-FCD500 の引張強さは、本研究で用いた高 Si 球状黒鉛鑄鉄の引張強さと同等である。また、JI SFCD700 の耐力は、高 Si 球状黒鉛鑄鉄と耐力と同等である。これらの一般的な従来のフェライト-パーライト基地球状黒鉛鑄鉄は、自動車の足回りや建設機械など、機械構造用部材として安全に用いられている。図 3.12 は、高 Si 球状黒鉛鑄鉄と JI SFCD500、JI S-FCD700 のシャルピー衝撃試験結果を比較したものである。JI S-FCD500 の吸収エネルギー値 vE は 0°C で上部棚から低下し始めており、これは高 Si 球状黒鉛鑄鉄の場合の 80°C よりも大幅に低温側である。一方、JIS-FCD700 の vE は 80°C で上部棚から低下し始めており、高 Si 球状黒鉛鑄鉄と同等レベルで、常温付近では吸収エネルギー値が低い。フェライト-パーライト基地球状黒鉛鑄鉄におけるパーライト率の上昇は、遷移温度を上昇させることが報告されている²⁹⁾。JI S-FCD700 のパーライト率は、JI SFCD500 よりも 35% 高い。パーライト率の増加により、JI SFCD700 と高 Si 球状黒鉛鑄鉄の結果は同等レベルのものになったと考えられる。

次に、切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ に関して、図 3.13 に高 Si 球状黒鉛鑄鉄と JI SFCD500、JI S-FCD700 の比較を示す。図 3.13 は、-20°C における高速三点曲げ試験の結果より、 $\sigma_{b,max}$ とひ

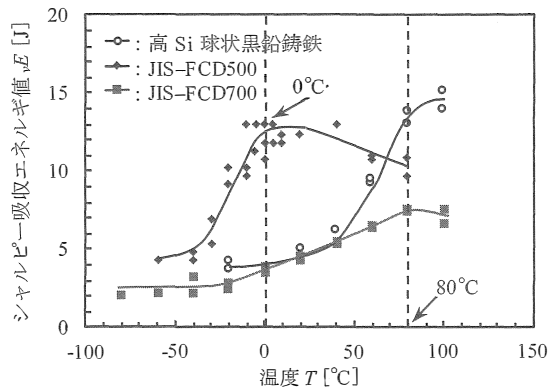


図 3.12 高 Si 球状黒鉛鑄鉄および JIS-FCD500, JIS-FCD700 のシャルピー衝撃試験結果³⁰⁾

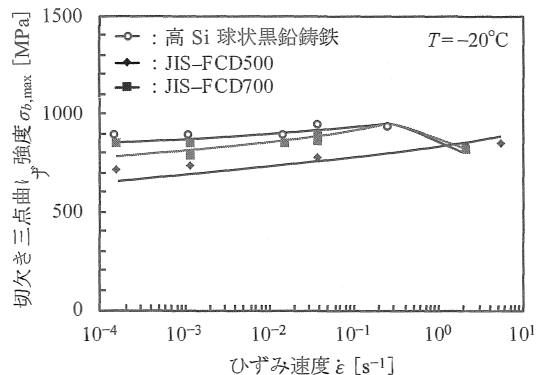


図 3.13 高 Si 球状黒鉛鑄鉄および JIS-FCD500, JIS-FCD700 の高速三点曲げ試験における切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係

ずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係を示している。高 Si 球状黒鉛鑄鉄と JI S-FCD700 では $\sigma_{b,max}$ がひずみ速度の上昇に伴って変化点以降で低下傾向を示したが、それでもなお、本実験範囲では、JI S-FCD500 と同程度の値である。このように、切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ に注目した場合には高 Si 球状黒鉛鑄鉄と JI S-FCD500, JI S-FCD700 で同等な評価になることは、注目すべき点である。高 Si 球状黒鉛鑄鉄は、幅広い分野での工業利用が可能であると考えられる。

4. おわりに

一発破壊に対する球状黒鉛鑄鉄の設計強度評価

法を検討するための一環として、球状黒鉛鋳鉄の強度・靱性それぞれに及ぼすひずみ速度の影響度を調査し、詳細に比較した。本研究では、構造部材への適用が検討されているものの、一発破壊に対して不安視される高 Si 球状黒鉛鋳鉄に着目し、同材料について、工業的に普及しているシャルピー衝撃試験と同形状の治具と試験片 (V ノッチ試験片) を用いて、静的から動的の領域のひずみ速度範囲内である $10^{-4} \sim 10^0 \text{ s}^{-1}$ オーダーでの高速三点曲げ試験を行った。そして、切欠き三点曲げ強度および吸収エネルギー値とひずみ速度の関係を整理した。併せて、各産業分野で用いられてきたフェライト-パーライト基地球状黒鉛鋳鉄における結果と比較検討することにより、高 Si 球状黒鉛鋳鉄の幅広い分野への適用の可能性についても考察した。得られた結論は、以下の通りである。

- ① 球状黒鉛鋳鉄の強度、靱性は、ひずみ速度の影響を受ける。一発破壊 (中でも脆性破壊) に対する球状黒鉛鋳鉄の評価では、温度のみならず、ひずみ速度の影響を把握することが重要である。
- ② 高 Si 球状黒鉛鋳鉄において、常温の本実験のひずみ速度範囲で、 E_t は低下したが、 $\sigma_{b,max}$ は低下しなかった。 -20°C の場合には、ひずみ速度の上昇に伴い $\sigma_{b,max}$ も低下し始めたが、本実験のひずみ速度範囲では E_t のように大幅に低下した値は得られなかった。切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ は、吸収エネルギー値 E_t と比較してひずみ速度と温度の影響を受けにくいと言える。
- ③ 切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ に着目すると、広範囲のひずみ速度と温度において、高 Si 球状黒鉛鋳鉄と JIS-FCD500, JIS-FCD700 は同等値を示した。強度設計の観点から、高 Si 球状黒鉛鋳鉄は、JIS-FCD500, JIS-FCD700 と比較して遜色なく、各産業分野への利用が期待できる。
- ④ 切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ が低下し始める変化点 (ひずみ速度) は、切欠き底でのディンプルの存在、すなわち、破壊初期における延性的破壊の有無と密接に関係している。試験後の破面において、切欠き底 (破壊の開始領

域) に延性破面が存在する限り、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の上昇に伴い切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ は上昇した。一方で、試験後の破面が完全な脆性破面になると、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の上昇に伴い切欠き三点曲げ強度 $\sigma_{b,max}$ は低下した。

- ⑤ なお、吸収エネルギーに関しては、あるひずみ速度から急激に変化する遷移挙動が明らかになった。本供試材では、遷移後の下部棚の値は、衝撃の速度領域まで同程度の値となった。

参考文献

- 1) 金沢 武:「鋼材の破壊靱性値評価法と溶接構造物の欠陥評価」, 鉄と鋼, 64, 7 (1978) p.990.
- 2) 豊田政男:「材料・溶接施工からみた阪神・淡路大震災における建築鉄骨損傷:被害から何を学ぶか」, までりあ, 35, 4 (1996) p.370.
- 3) 岡下勝彦・大南亮一・道場康二・山本晃久・富松実・丹治康行・三木千壽:「兵庫県南部地震による神戸港湾幹線道路 p75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討」, 土木学会論文集, 591 (1998) p.243.
- 4) 安藤誠人・野田尚昭・黒島義人・石川康弘・竹田英俊:「ポリジメチルシロキサンを共重合したポリカーボネートの衝撃特性と時間-温度換算則の適用」, 日本機械学会論文集, 80, 814 (2014) DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0149.
- 5) 中川憲治・岸田敬三・谷村眞治:「材料の衝撃問題の基礎と応用 2. 高速変形に対する材料の構成式」, 材料, 34, 384 (1985) p.113.
- 6) U.S. Lindholm: "Dynamic deformation of metals", Behavior of Materials under Dynamic Loading, N. J. Huffington (ed.) (1965) p.42.
- 7) 豊貞雅宏・藤井英輔・野原和宏・川口喜昭・有持和茂・井坂和実:「破壊靱性に及ぼすひずみ速度の影響」, 日本造船学会論文集, 161, (1987) p.343.
- 8) 田口一男・花井圭介・山下昌夫:「溶接構造物の低温靱性値におよぼす歪速度の影響」, 鉄と鋼, 58, 11 (1972) p.155.
- 9) 伊藤義人・劉 斌・宇佐見康一・草間竜一・貝沼重信:「車両衝突を受ける橋梁用鋼製防護柵の材料ひずみ速度効果と性能照査に関する研究」, 土木学会論文集, 759 (2004) p.337.
- 10) 上田幸雄・村川英一・谷川雅之・米田尚弘・岩田節雄・後藤浩二:「衝突時における船体構造不連続部の延性破壊評価法に関する研究」, 日本造船学会論文集, 177 (1995) p.371.
- 11) 向井陽一・渡辺憲一:「高強度鋼板の衝突特性と評価方法」, 神戸製鋼技報, 52, 3 (2002) p.32.
- 12) 木口昭二・曲田淳:「球状黒鉛鋳鉄と鋳鋼の衝撃特性の比較」, 鑄造工学, 69, 6 (1997) p.499.
- 13) 磯部大吾郎・森下真臣:「ASI 有限要素法による大規模宇宙骨組構造のデブリ衝突解析」, 日本機械学会論文集 A 編, 64, 627 (1998) p.58.

- 14) 大畑 充・澤 靖典・高嶋康人・南二三吉：「シャルピー衝撃試験と破壊力学靱性試験の延性・脆性破壊遷移温度相関に及ぼす鋼材特性の影響の評価モデルの提案」,日本船舶海洋工学論文集, **4** (2006) p.277.
- 15) 杉浦仲康・小林俊郎・山本 勇・西戸誠志・林 勝三：「AC4CH-T6 アルミニウム合金鑄物の衝撃引張り及び三点曲げ特性」, 軽金属, **45**, 11 (1995) p.638.
- 16) 日本規格協会：JISハンドブック 鉄鋼 I JIS Z 2241 (2011) 金属材料引張試験方法, (2013) p.321.
- 17) 山下 実・佐藤裕久：「高ひずみ速度材料試験」, 塑性と加工, **50**, 586 (2009) p.1009.
- 18) 山内良昭・中野元博・岸田敬三・尾崎典雅・笠井孝郎・笹谷育史・天木英彦・田中和夫：「レーザー加速飛翔体を用いた超高速衝撃試験における CFRP の変形と破壊」, 日本航空宇宙学会論文集, **49**, 571 (2001) p.262.
- 19) 日本規格協会：JISハンドブック 鉄鋼 I JIS G 5502 (2001) 球状黒鉛鑄鉄品 (2013) p.1880.
- 20) 日本規格協会：JISハンドブック 鉄鋼 I JIS Z 2243 (2008) プリネル硬さ試験-試験方法 (2013) p.378.
- 21) 日本規格協会：JISハンドブック 鉄鋼 I JIS Z 2242 (2005) 金属材料のシャルピー衝撃試験方法 (2013) p.366.
- 22) 山本 博・小林俊郎・藤田秀嗣：「球状黒鉛鑄鉄の延性-脆性遷移挙動のひずみ速度依存性」, 鑄造工学, **72**, 2 (2000) p.107.
- 23) R. Sandström and Y. Bergström : "Relationship between Charpy V transition temperature in mild steel and various material parameters", *Metal Science*, **18** (1984) p.177.
- 24) 松木一弘・坂東 学・佐々木元・柳沢 平 「フェライト基地球状黒鉛鑄鉄の高温破壊特性」, 鑄造工学, **79**, 5 (2007) p.229.
- 25) 小林俊郎・松原 等・上田椒完：「原子炉圧力容器用 A533B 鋼の軽装化衝撃試験からえられる破壊特性に関する情報」, 鉄と鋼, **69**, 9 (1983) p.97.
- 26) 布村成具・中代雅士：「シャルピー衝撃試験による破壊特性の評価」, 鉄と鋼, **64**, 7 (1978) p.32.
- 27) 信木 関・塩田俊雄・旗手 稔：「フェライト基地球状及び CV 黒鉛鑄鉄の切欠衝撃・曲げ特性」, 鑄造工学, **75**, 11 (2003) p.749.
- 28) 信木 関・塩田俊雄・旗手 稔：「パーライト基地球状及び CV 黒鉛鑄鉄の切欠衝撃・曲げ特性」, 鑄造工学, **76**, 7 (2004) p.55.
- 29) 奥本武臣・相沢達志：「球状黒鉛鑄鉄の衝撃繊維曲線に及ぼす珪素, 燐およびパーライト量の影響」, 鑄物, **35**, 11 (1963) p.25.
- 30) 梅谷拓郎・池田朋弘・須浦直之・芦塚康佑・根本嵩・高田洋吉・大城桂作：「高 Si フェライト基地球状黒鉛鑄鉄の引張強さ, 疲労強度, 衝撃強さ」, 鑄造工学, **86**, 1 (2014) p.36.

(次号へつづく)