

## 高 Si 球状黒鉛鑄鉄の切欠き強度とその構造部材としての考察

池田 朋弘<sup>\*1</sup>, 梅谷 拓郎<sup>\*1</sup>, 甲斐 信博<sup>\*1</sup>, 大城 桂作<sup>\*1</sup>  
赤木 大地<sup>\*2</sup>, 野田 尚昭<sup>\*3</sup>, 佐野 義一<sup>\*4</sup>

## Notch strength of high silicon ductile cast iron and wide applicability to structural design

Tomohiro IKEDA<sup>\*1</sup>, Takuo UMETANI<sup>\*1</sup>, Nobuhiro KAI<sup>\*1</sup>, Keisaku OGI<sup>\*1</sup>,  
Daichi AKAGI<sup>\*2</sup>, Nao-Aki NODA<sup>\*3</sup> and Yoshikazu SANO<sup>\*4</sup><sup>\*1</sup>HINODE, Ltd. Research and Development Center

Azaiwasaki, Miyaki-cho, Miyaki-gun, Saga 849-0101 Japan

<sup>\*2,\*3,\*4</sup>Department of Mechanical and Control Engineering, Kyushu Institute of Technology

1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka 804-8550 Japan

Received: 26 September 2016; Revised: 28 March 2017; Accepted: 1 June 2017

## Abstract

In this study, the notch strength  $\sigma_B^{\text{notch}}$  was investigated for high silicon solid solution strengthened ferritic ductile cast iron in comparison with the tensile strength  $\sigma_B^{\text{smooth}}$ . High speed tensile tests were conducted on notched and smooth specimens at various strain rate and temperatures. The strain rate-temperature parameter ( $R$  parameter) is found to be useful for evaluating the temperature and strain rate upon the notch strength. The required range of  $R$  parameter was investigated for welded structural members in several industrial fields. The notch strength  $\sigma_B^{\text{notch}}$  is always larger than the tensile strength at room temperature  $\sigma_{B, RT}^{\text{smooth}}$  in the range of  $R$  parameter required for the welded structures. Therefore, tensile strength  $\sigma_{B, RT}^{\text{smooth}}$  is confirmed to be more useful than Charpy absorbed energy for the structural design. It is expected that the high Si ductile cast iron has wide industrial application potentiality.

**Key words** : High Si ductile cast iron, Notch strength, Tensile strength, Strain rate, Temperature

## 1. 緒 言

鋼や鑄鉄などの構造用材料の強度・靱性は、ひずみ速度と温度の影響を強く受けるため(藤井他, 1985)(後藤他, 1994)(山本他, 1999)(山本他, 2000), 新材料の開発や新用途への実用化に向けては、強度・靱性面からの材料の適用限界を正しく知ることが重要である。各種構造物の設計においては、構造用材料の安全性を保障するためのひずみ速度の上限値と温度の下限値が存在する。その中でも要求が厳しい溶接構造部材において、外板-隔壁溶接部での限界値が上田ら(上田他, 1995)により示されており、柱-梁溶接止端部での限界値が岡下ら(岡下他, 1998), 豊田(豊田, 1996)により示されているため、これらを表1に整理した。また、表1には、一般的な平滑材の引張試験ならびにVノッチシャルピー衝撃試験でのひずみ速度(作井他, 1963)(杉浦他, 1995)および比較検討した温度の条件も示した。表1において、引張試験やVノッチシャルピー衝撃試験などの一般的な試験法では、ひずみ速度や温度の条件が構造用材料の安全性を保障するためのひずみ速度の上限値や温度の下限値に合致せず、構造用材料の強度・靱性面の高速・低温側適用限界を適切に把握出来ないことは明らかである。著者らはこのような背景から、応力集中の大きいVノッチシャルピー衝撃試験片に着目して様々な試験速度と温度での三点曲げ試験を行っている(Ikeda et al., 2016)。しかしながら、鉄鋼製品の設計・製造において、三点曲げ試験は設計基準

No.16-00455 [DOI:10.1299/transjsme.16-00455], J-STAGE Advance Publication date : 15 June, 2017

<sup>\*1</sup> 日之出水道機器(株)(〒849-0101 佐賀県三養基郡みやき町大字原古賀字岩崎 R&D 総合センター)<sup>\*2</sup> 九州工業大学 大学院 工学府(〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)<sup>\*3</sup> 正員, フェロー, 九州工業大学 大学院工学研究院 機械知能工学研究系<sup>\*4</sup> 正員, 九州工業大学 大学院工学研究院 機械知能工学研究系

E-mail of corresponding author: t\_ikeda@hinodesuido.co.jp

強度を求める方法としては一般的ではなく、引張強度、耐力や疲労限度などの引張特性に関連する値が必要とされる。ところで、球状黒鉛鑄鉄の引張特性に及ぼすひずみ速度と温度の影響に関する知見は少なく、殆ど調査されていない(山本他, 1999)。

一方で、Si量を通常の2.0~2.7%よりも高めた固溶強化型高Siフェライト基地球状黒鉛鑄鉄(EN, 2011)の構造部材への適用検討が近年進められている。この高Si球状黒鉛鑄鉄は、同強度のフェライト-パーライト型球状黒鉛鑄鉄FCD500等と比較して、機械的性質の肉厚感受性が小さく、延性、高サイクル疲労特性などに優れる(梅谷他, 2014)。しかしながら、材料中のSi量の増加は、各種強度評価試験において延性-脆性遷移温度を高温側に移動させ(池田他, 2013)(梅谷他, 2014)、同様にひずみ速度の影響も受け易くする(Ikeda et al., 2015)。この点が懸念され、同材料の産業への適用は未だに限定的である。

したがって、高Si球状黒鉛鑄鉄の引張特性に及ぼすひずみ速度と温度の影響を示すことは、同材料の適用範囲を正しく判断する上で重要な知見のひとつとなる。また、得られた知見は、一般的な球状黒鉛鑄鉄の実用上での評価を行う上でも有用と考える。そこで本研究では、高Si球状黒鉛鑄鉄を評価対象として、平滑材での様々な変位速度と温度における引張試験を行った。さらに、ひずみ速度と温度の感受性を高めるために切欠きを設けた試験片についても、様々な変位速度と温度における引張試験を行った。そして、既報(Ikeda et al., 2016)の三点曲げ試験での検討に引き続き、切欠き強度に着目し、ひずみ速度-温度依存性の観点から、同材料の構造部材への適応性を定量的に考察した。

Table 1 Examples of strain rate and temperature range acting on various structural components.

Industrial field		Strain rate $\dot{\epsilon}$ [ $s^{-1}$ ]	Temperature $T$ [ $^{\circ}C$ ]	$R$ parameter [K]
Design	Welded part of outer plate-bulkhead (Ship hull)	$\sim 1$	-10 ~	4846 ~
	Weld toes of beam-column (Architectural structure)	$\sim 2$	-18 ~	4522 ~
Test	Tensile test	$10^{-5} \sim 10^{-2}$	Room temperature ( $\cong 25$ )	6864 ~ 8923
	V-notch Charpy impact test	$\cong 10^2$	Temperature range of this table (-18 ~ 25)	3524 ~ 4118

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材料

供試材料は、表2に示す成分に調整した完全フェライト基地の高Si球状黒鉛鑄鉄である。JIS G 5502に規定されているB号Yブロック砂型を用い、鑄造後そのまま図1に示す範囲から評価試験片を採取した。表3に、素材の引張試験結果を示す。引張試験結果は、JIS Z 2241に規定されている4号引張試験片(直径 = 14 mm, 原標点間距離 = 50 mm)を用いて同規格に準拠して試験を行った結果である。

Table 2 Chemical compositions of as cast specimens. [mass %]

C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg
3.27	3.94	0.35	0.023	0.010	0.02	0.043

Table 3 Tensile properties of test specimen.

Tensile strength $\sigma_B$ [MPa]	0.2% Proof stress $\sigma_{0.2}$ [MPa]	Fracture strain $\epsilon_B$ [%]
543	426	20

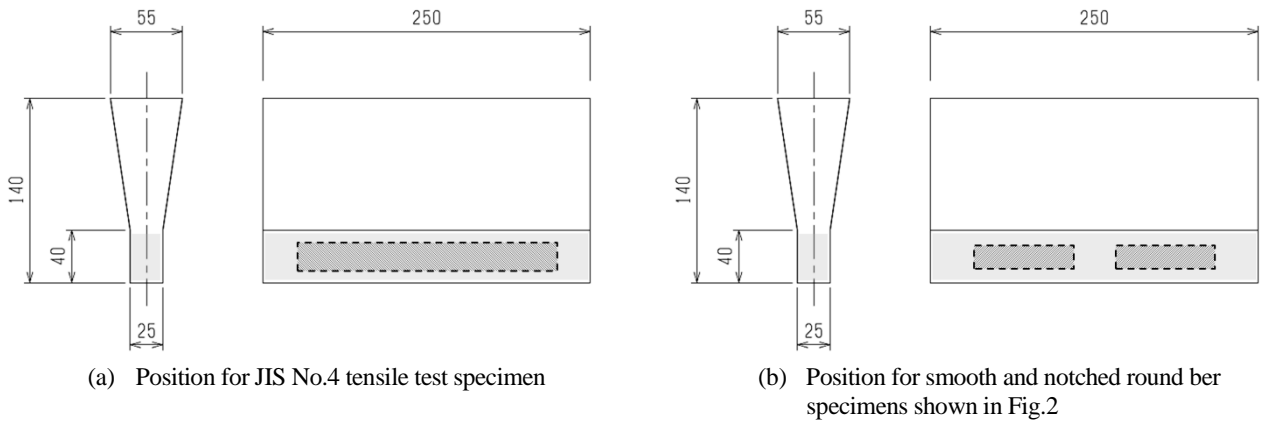


Fig. 1 Schematic view of Y-shaped block (in mm) and position of specimens.

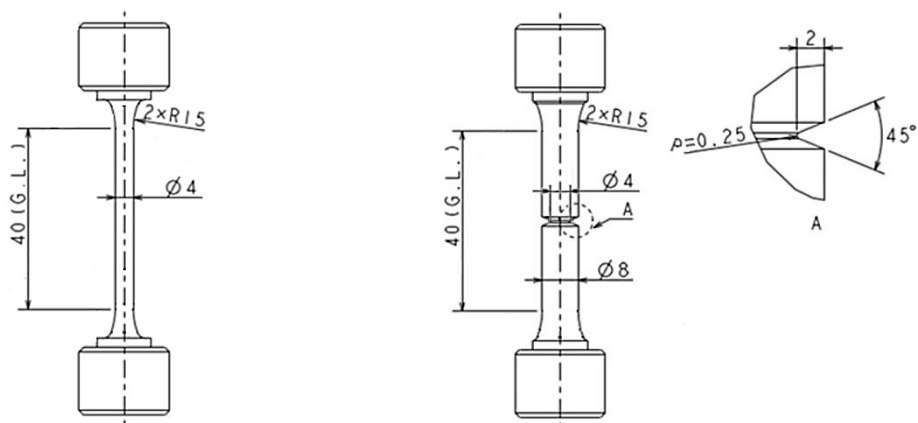
## 2・2 各種速度と温度での引張試験と破面観察

図2に本実験で用いた試験片平行部の寸法を示す。試験片は、鑄鉄分野で一般的な試験片形状である丸棒の平滑材を準備した。また、ひずみ速度と温度の感受性を高めるために環状切欠き材を準備した。切欠き形状は、シャルピー衝撃試験片で用いられているVノッチと同形状とした。ここで、シャルピー衝撃試験片に準じた図2(b)に示す切欠き深さ2 mmは、実際の鑄物製品の鑄肌や加工によって形成される面の凹凸よりも明らかに深いものである。また、図2(b)に示す切欠き底半径 $\rho = 0.25$  mmについては、例えば鑄造製品に関する規格でコーナー部の半径 $\rho^*$ は2 mm以上であることが規定されている(鑄造工学会, 2002)(日本工業規格, 1987)。したがって、本研究に用いる切欠き形状・寸法は、実製品に見られるものよりも非常に厳しいものである。なお、後述の切欠き強化に関する考察では、 $\rho = 0.25$  mmの切欠き材とは別に、切欠き底半径を変えた $\rho = 2$  mmの切欠き材も用いた。

引張試験には電気油圧サーボ式試験機(島津製作所 E100kN)を用い、ストローク変位速度 $v$ を $8.5 \times 10^{-3} \sim 2.7 \times 10^2$  mm/s、温度 $T$ を $-130 \sim 25$  °Cの条件にて試験した。そして、平滑材の引張強度 $\sigma_B^{\text{smooth}}$ および環状切欠き材の切欠き強度 $\sigma_B^{\text{notch}}$ を次式より求めた。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_B^{\text{smooth}} &= 4P_{\text{max}} / \pi d^2 \\ \sigma_B^{\text{notch}} &= 4P_{\text{max}} / \pi d^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $P_{\text{max}}$ は試験時の最大荷重、 $d$ は平滑材試験片平行部および環状切欠き材最小断面(切欠き底部)の試験前の直径である。さらに、試験条件に伴う破壊様式の変化を示すために試験片の破面観察を行い、延性破面率 $f_b$ (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、 $f_b$ が1%以下の極めて小さい試料については、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。



(a) Smooth specimen ( $d = 4$  mm,  $\rho = \infty$ ) (b) Notched round bar specimen ( $d = 4$  mm,  $\rho = 0.25$  mm)

Fig. 2 Configuration of test specimens (in mm).

### 2・3 ひずみ速度-温度パラメータの算出

本研究では、ひずみ速度と温度の影響を統一的に評価するために、ひずみ速度-温度パラメータ  $R$  値(Strain rate-temperature parameter)を用い、平滑材の引張強度 $\sigma_B^{\text{smooth}}$ および環状切欠き材の切欠き強度 $\sigma_B^{\text{notch}}$ を整理した。 $R$  値は、ひずみ速度の影響を試験温度の影響と等価なものとして置き換えたものである。Bennettらにより、鋼材などのbcc金属において、降伏点のひずみ速度-温度依存性を $R$ 値により整理できることが示され(Bennett and Sinclair, 1966), その後、例えば藤井らや後藤ら(藤井他, 1985)(後藤他, 1994)によって実験的にも裏付けされている。また、降伏点だけでなく引張強度も同様に整理できることが実験的に報告されており(南他, 1998), フェライト基地球状黒鉛鑄鉄の引張強度, 降伏点(耐力)も $R$ 値と良い相関があることが報告されている(山本他, 1999)。 $R$ 値は、式(2)により表される。

$$R = T \times \ln(A / \dot{\epsilon}) \quad (2)$$

ここで、 $T$ は試験温度、 $A$ は材料定数、 $10^8 \text{ s}^{-1}$ である(Bennett and Sinclair, 1966)(山本他, 1999)。 $\dot{\epsilon}$ は平滑材の平行部のひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{\text{smooth}}$ , または環状切欠き材の切欠き底のひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{\text{notch}}$ である。平滑材の平行部のひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{\text{smooth}}$ は、式(3)により定義した。

$$\dot{\epsilon}^{\text{smooth}} = (u(t) / t) / \ell \quad (3)$$

ここで、 $u(t)$ はストローク変位であり、時間に比例するものとする。 $\ell$ は平行部長さ40 mm、 $t$ は負荷時間である。一方、環状切欠き材の場合は、最も高いひずみ速度が生じる切欠き底に着目する。切欠き底のひずみは、実験での計測が極めて困難であるので、 $\dot{\epsilon}^{\text{notch}}$ は式(4)で表される算出方法(安藤他, 2014)(野田他, 2013)(Noda et al., 2015)により求めた。

$$\dot{\epsilon}^{\text{notch}} = (u(t) / t) / \ell \times K_{t\dot{\epsilon}} \quad (4)$$

ここで、 $K_{t\dot{\epsilon}}$ は有限要素法による弾性解析で求められたひずみ速度集中係数で(安藤他, 2014)(野田他, 2013)(Noda et al., 2015), 本研究で用いた環状切欠き材の場合、 $K_{t\dot{\epsilon}}$ は9.49である。

### 3. 常温・静的条件における切欠き強度と切欠き強化

図3に高Si球状黒鉛鑄鉄の常温での静的引張試験における平滑材および切欠き材の応力-ひずみ曲線を示し、表4に、その最大強度( $\sigma_B^{\text{smooth}}$ および $\sigma_B^{\text{notch}}$ )を一覧に整理して示す。図4には、表4に記した最大強度と切欠き底半径 $\rho$ の関係を示す。なお、ここでは考察のために、図2(b)に示した $\rho=0.25 \text{ mm}$ とは別に、切欠き底半径を変えた $\rho=2 \text{ mm}$ における引張試験結果も示した。図4より、切欠き底半径が小さいほど最大強度は上昇している。このような切欠き強化は、鋼などの延性の高い材料で広く認識されている。本供試材と同程度の引張強度を有する一般のフェライト-パーライト型球状黒鉛鑄鉄においても切欠き強化は確認されており、応力の多軸性と関連付けた考察が行われている(野口, 1980)。そこで、有限要素法により応力の多軸度を示す指標 $\eta$ (Davis and Connolly, 1959)(間島他, 1986)を求めた。 $\eta$ は、式(5)により表される。

$$\eta = 3\sigma_m / \sigma_{\text{eq}} = \sqrt{2}(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) / \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2} \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_m$ は平均垂直応力、 $\sigma_{\text{eq}}$ は相当応力である。上式では、弾性解析の結果を用いているが、例えば間島ら(間島他, 1986)は、この方法で種々の鋼材に対して切欠き強化と応力の多軸性との関係を整理できている。したがって、基地組織がフェライトである高Si球状黒鉛鑄鉄も、同手法により切欠き強化と応力の多軸性との関連付けが定性的に可能であると考えられる。図5に、最大強度を $\eta$ との関係で整理した結果を示す。図5より、 $\eta$ の上昇

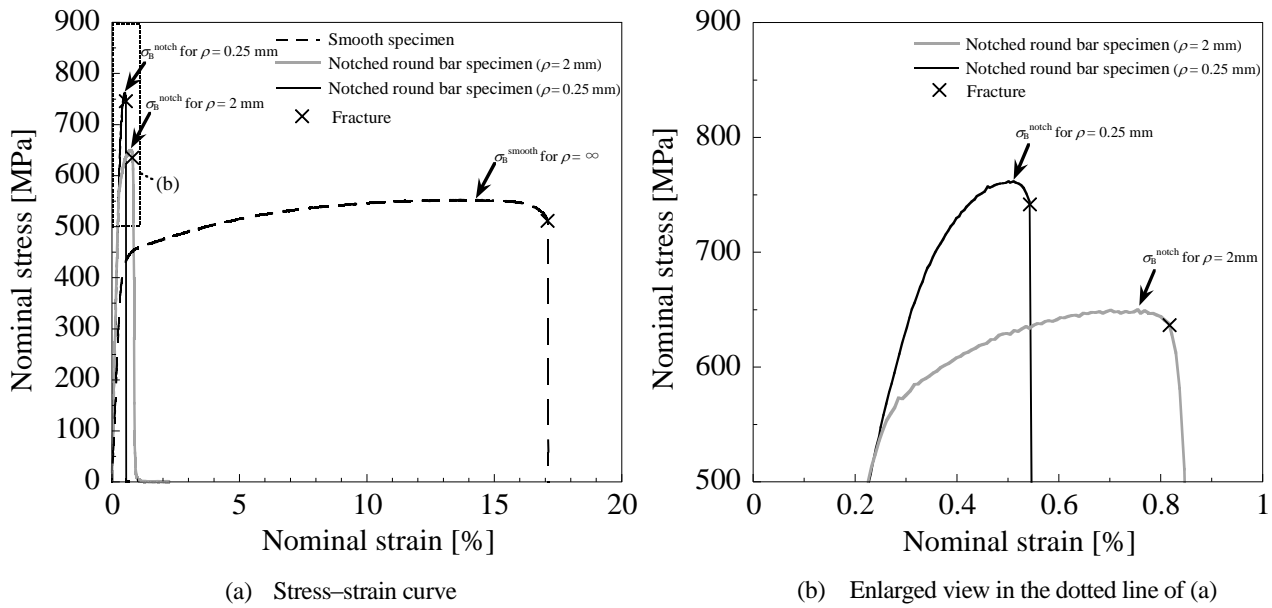


Fig. 3 Stress-strain curves of notched round bar specimen and smooth specimen on static tensile test at temperature  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . It is seen that the maximum strength of notched round bar specimen is larger than that of smooth specimen.

Table 4 Results of static tensile test for notched round bar specimen and smooth specimen at temperature  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Test conditions			Test results		Triaxiality factor $\eta$
Notch root radius $\rho$ [mm]	Temperature $T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Stroke speed $u(t)/t$ [mm/s]	Maximum load $P_{\text{max}}$ [kN]	Tensile strength $\sigma_B^{\text{smooth}}$ and notch strength $\sigma_B^{\text{notch}}$ [MPa]	
$\infty$ (smooth)	$25 \pm 1$	0.01	6.8	553	1
2		0.01	8.3	650	1.29
0.25		0.01	10.0	762	1.47

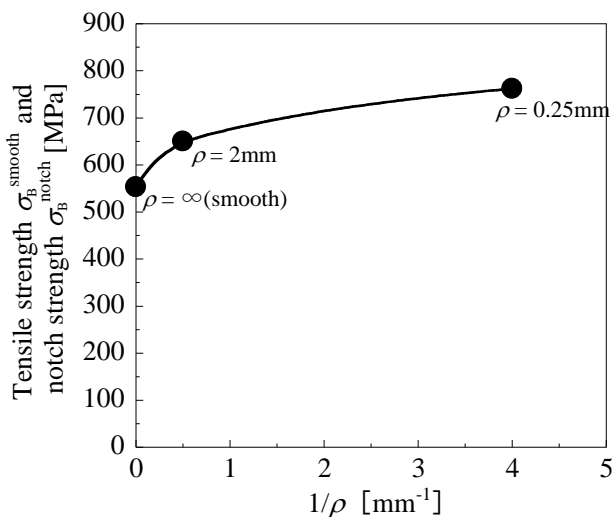


Fig. 4 Relationship between the maximum strength and  $1/\rho$  on static tensile test at temperature  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The maximum strength tends to increase with increasing  $1/\rho$ .

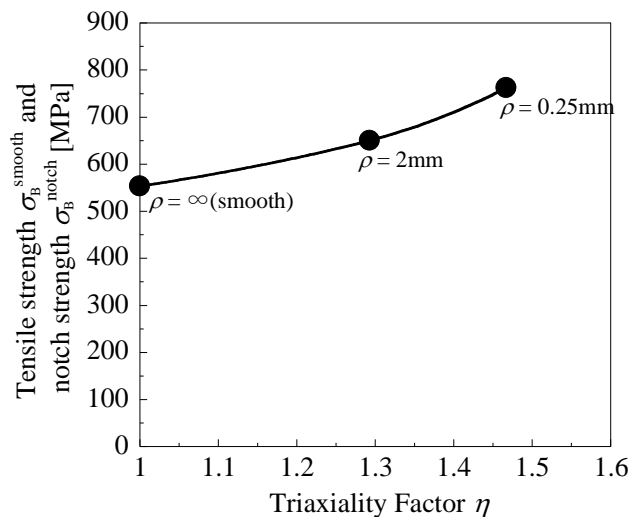


Fig. 5 Relationship between the maximum strength and triaxiality factor  $\eta$  on static tensile test at temperature  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The maximum strength depends on triaxiality factor.



に伴い最大強度は上昇しており、切欠きにより応力の多軸性が高くなることが高 Si 球状黒鉛鑄鉄の切欠き強化に影響していると考えられる。

#### 4. 切欠き強度に及ぼすひずみ速度と温度の影響

##### 4・1 平滑材

表 5 に、高 Si 球状黒鉛鑄鉄の平滑材における種々の温度と速度での引張試験結果を一覧にまとめて示す。図 6 には、表 5 に記した引張強度  $\sigma_B^{\text{smooth}}$  と  $R$  値の関係を実線で示す。また、図中には同じ強度レベルの鉄鋼材料や通常のフェライト基地球状黒鉛鑄鉄の文献値(栗原, 1997) (山本他, 1999)を比較として示した。本実験で求めた平滑材の引張強度  $\sigma_B^{\text{smooth}}$  は  $R$  値により整理できており、 $R$  値が低下するほど、 $\sigma_B^{\text{smooth}}$  が上昇する。この高 Si 球状黒鉛鑄鉄における  $\sigma_B^{\text{smooth}}$  の  $R$  値依存性は、一般に用いられている延性的材料の鉄鋼材料やフェライト基地球状黒鉛鑄鉄と同様の傾向を示した。

Table 5 Results of high speed tensile test for smooth specimens.

Test conditions			Test results		R parameter [K]
Temperature $T$ [°C]	Stroke speed $u(t)/t$ [mm/s]	Strain rate $\dot{\varepsilon}^{\text{smooth}}$ [s <sup>-1</sup> ]	Maximum load $P_{\text{max}}$ [kN]	Tensile strength $\sigma_B^{\text{smooth}}$ [MPa]	
25±1	0.01	0.0002	6.8	553	8033
	2.76	0.07	7.3	588	6292
	20.0	0.50	7.3	601	5701
	97.9	2.45	7.8	620	5237
	273	6.84	7.7	630	4921
-100±1	20.0	0.50	8.2	668	3276
-130±1	20.0	0.50	8.1	664	2726

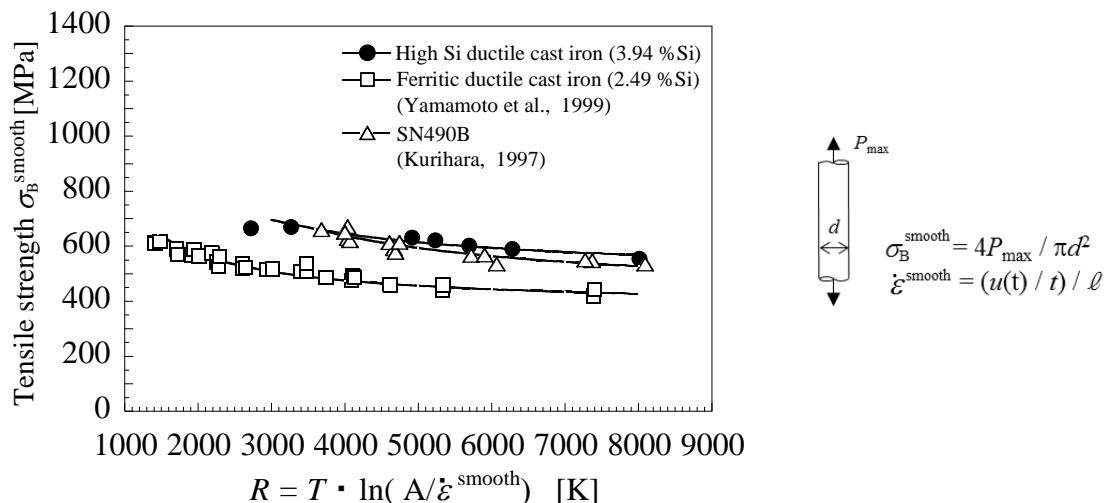


Fig. 6 Relationship between tensile strength  $\sigma_B^{\text{smooth}}$  and  $R$  parameter for high Si ductile cast iron, FCD(2.49 %Si)(Yamamoto et al., 1999) and SN490B(Kurihara, 1997). The tensile strength  $\sigma_B^{\text{smooth}}$  of high Si ductile cast iron tends to increase with decreasing  $R$  parameter. It is found that  $R$  parameter dependence of  $\sigma_B^{\text{smooth}}$  for high Si ductile cast iron is similar to those of FCD(2.49 % Si) and SN490B.

#### 4・2 切欠き材

表6に、高Si球状黒鉛鋳鉄の環状切欠き材における種々の温度と速度での引張試験結果を一覧にまとめて示す。これまでに、図6の平滑材では、ひずみ速度と温度の影響を $R$ 値により整理できることを述べてきた。次に、 $\rho=0.25$  mmの切欠きを設けた引張試験片の場合についても $R$ 値による整理を試みる。まず図7に、 $T$ が $25$  °Cの他に、 $-42$ ,  $-100$ ,  $-130$  °Cの各温度における $\sigma_B^{\text{notch}}$ と $\dot{\varepsilon}^{\text{notch}}$ の関係を示す。図7では、 $\sigma_B^{\text{notch}}$ は $\dot{\varepsilon}^{\text{notch}}$ の上昇とともに大きくなる傾向にあるが、ある限界のひずみ速度を超えると低下する。この $\sigma_B^{\text{notch}}$ が低下し始める臨界のひずみ速度は、温度が低くなるほど小さくなっている。そこで、図7を $\sigma_B^{\text{notch}}$ と $R$ 値の関係に再整理した結果を図8に示す。 $\sigma_B^{\text{notch}}$ は $R$ 値と良い相関があり、本実験範囲において、切欠き強度のひずみ速度-温度依存性の評価にひずみ速度-温度パラメータ $R$ 値を利用できることが示された。

Table 6 Results of high speed tensile test for notched round bar specimens( $\rho=0.25$  mm).

Test conditions			Test results		$R$ parameter [K]
Temperature $T$ [°C]	Stroke speed $u(t)/t$ [mm/s]	Strain rate $\dot{\varepsilon}^{\text{notch}}$ [ $s^{-1}$ ]	Maximum load $P_{max}$ [kN]	Notch strength $\sigma_B^{\text{notch}}$ [MPa]	
$25 \pm 1$	0.01	0.002	10.0	762	7344
	0.84	0.20	10.5	836	5969
	18.1	4.35	10.8	876	5048
	46.3	11.1	9.9	786	4774
$-42 \pm 1$	0.01	0.002	10.4	820	5671
	8.42	2.00	11.1	875	4087
	16.3	3.86	9.8	776	3943
$-100 \pm 1$	0.01	0.002	10.0	798	4262
	0.08	0.02	10.9	858	3855
	16.0	3.78	7.0	557	2965
$-130 \pm 1$	0.08	0.02	9.2	791	3194
	16.5	3.90	3.9	307	2451

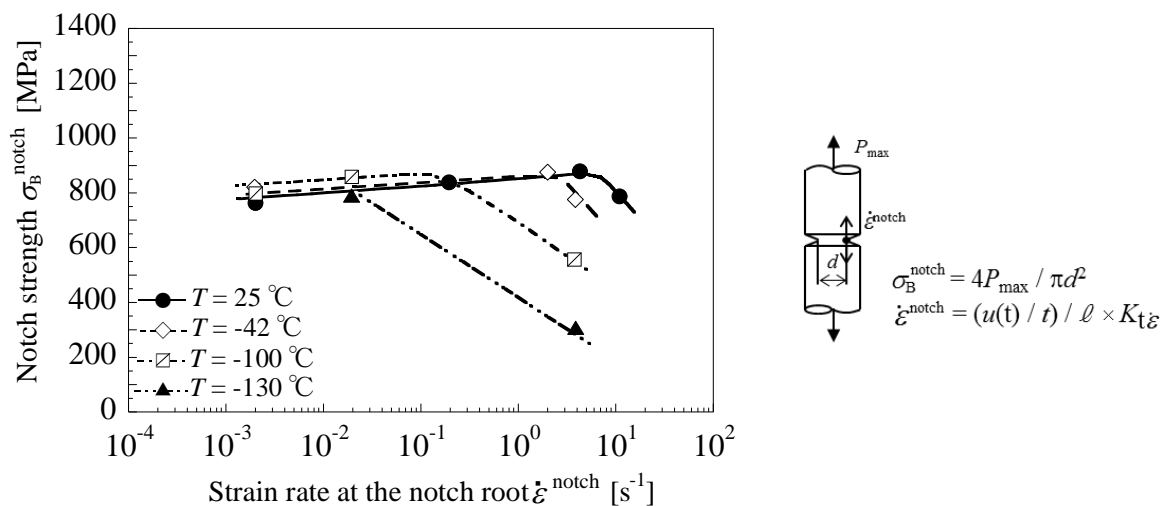


Fig. 7 Relationship between notch strength  $\sigma_B^{\text{notch}}$  ( $\rho=0.25$  mm) and strain rate at the notch root  $\dot{\varepsilon}^{\text{notch}}$  in the temperature range of  $-130 \sim 25$  °C. Strain rate dependence of  $\sigma_B^{\text{notch}}$  is influenced by the test temperature.

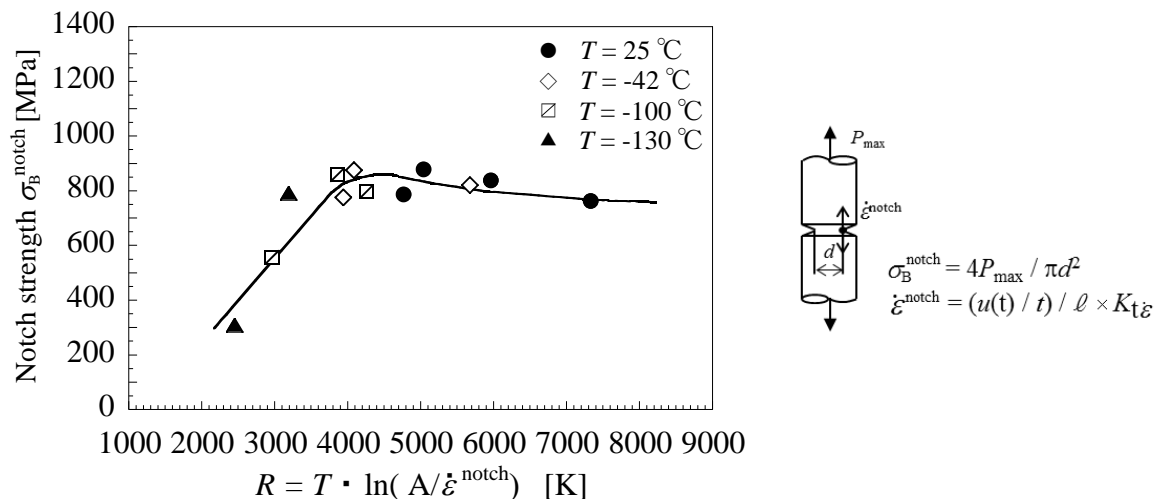


Fig. 8 Relationship between notch strength  $\sigma_B^{\text{notch}}$  ( $\rho = 0.25$  mm) and  $R$  parameter. It is found that  $\sigma_B^{\text{notch}}$  is controlled by  $R$  parameter for the wide range of strain rate and test temperature.

### 5. 溶接構造物の設計要件と高 Si 球状黒鉛鋳鉄の構造部材としての考察

図 8 では、 $R$  値の低下に伴う  $\sigma_B^{\text{notch}}$  ( $\rho = 0.25$  mm) の低下が  $R$  値 2450 ~ 4300 K の範囲で確認された。そこで、このような  $\sigma_B^{\text{notch}}$  の低下が溶接構造部材の設計要件として用いられる温度とひずみ速度の条件において、実用上問題となるか考察する。溶接構造部材の分野で要求されるひずみ速度や温度の部材強度特性に及ぼす影響を調査した研究は多く、ひずみ速度の上限値と温度の下限値は、表 1 のようにまとめることができる(岡下他, 1998)(豊田, 1996)(上田他, 1995)。これらの条件を用いて、各溶接構造部材の  $R$  値を式(2)より算出し、一般の材料特性試験である引張試験およびシャルピー衝撃試験における  $R$  値とも比較した。表 1 より、今回の実験の範囲内においては、溶接構造部材の設計に求められる下限  $R$  値 4522 K と比較して、シャルピー衝撃試験における  $R$  値 3524 ~ 4118 K は低  $R$  値側に有り、過剰な条件であると言える。

図 9 に、図 8 の切欠き強度  $\sigma_B^{\text{notch}}$  と  $R$  値の関係の中に、強度設計の基準として用いられる常温での平滑材静的引張強度  $\sigma_{B, RT}^{\text{smooth}}$  を破線で示す。同図には、表 1 での溶接構造部材の下限  $R$  値と引張試験、シャルピー衝撃試験における  $R$  値の範囲も示している。図 9 より、 $R$  値 4522 K 以上の範囲において高 Si 球状黒鉛鋳鉄の  $\sigma_B^{\text{notch}}$  は、 $\sigma_{B, RT}^{\text{smooth}}$  に比べて 30 ~ 50 % 程高い。このことから、溶接構造部材で要求される  $R$  値 4522 K 以上の範囲においては、高 Si 球状黒鉛鋳鉄品設計時の破壊基準として常温・静的での引張強度を用いることが瞬時破壊の発生に対し安全側の設計であると言える。なお、シャルピー衝撃試験は、今回の事例において、実用上の下限界を下回る  $R$  値における評価法であり、設計強度評価法としては、その妥当性に疑問がある。

ところで、図 9 では、 $R$  値の低下、すなわち低温、高速化によって切欠き強度  $\sigma_B^{\text{notch}}$  が上昇し、ピークに達した後には低下する挙動が見られる。この挙動を以下に考察する。図 10 に、図 9 で示す切欠き材の各実験点について、破面に占めるディンプル破面の比率  $f_D$  (延性破面率) と  $R$  値の関係で整理した結果を示す。図 11(a), (b), (c) では、図 10(b)中に示される実験点 A, B, C それぞれの試験片切欠き底部の破面 SEM 像を示している。図 10 および図 11 において、 $R$  値の低下に伴い  $f_D$  は減少しており、ディンプル破面領域の減少(脆性破面領域の増加)と図 9 で示した  $\sigma_B^{\text{notch}}$  の上昇が対応している。この傾向は、例えば坂巻らの報告にあるような極低炭素鋼での事例(坂巻, 稲田, 1976)と同様である。そして、高強度な材料ほどディンプル破面の領域が小さくなり破面様相が脆性的になる傾向と一致する。また、図 10 および図 11 において、 $R$  値 4000 K 付近でディンプル破面は完全に消失し始めており、図 9 における  $\sigma_B^{\text{notch}}$  が低下し始める  $R$  値と一致している。このように、破面が完全に脆性的な様相を示すようになってからは  $R$  値の低下に伴い切欠き強度  $\sigma_B^{\text{notch}}$  が低下している傾向は、V ノッチシャルピー衝撃試験片を用いた三点曲げ試験での報告と一致する(Ikeda et al., 2016)。以上のように、高 Si 球状黒鉛鋳鉄における  $\sigma_B^{\text{notch}}$  の  $R$  値依存性が破面解析の結果からも裏付けることができた。



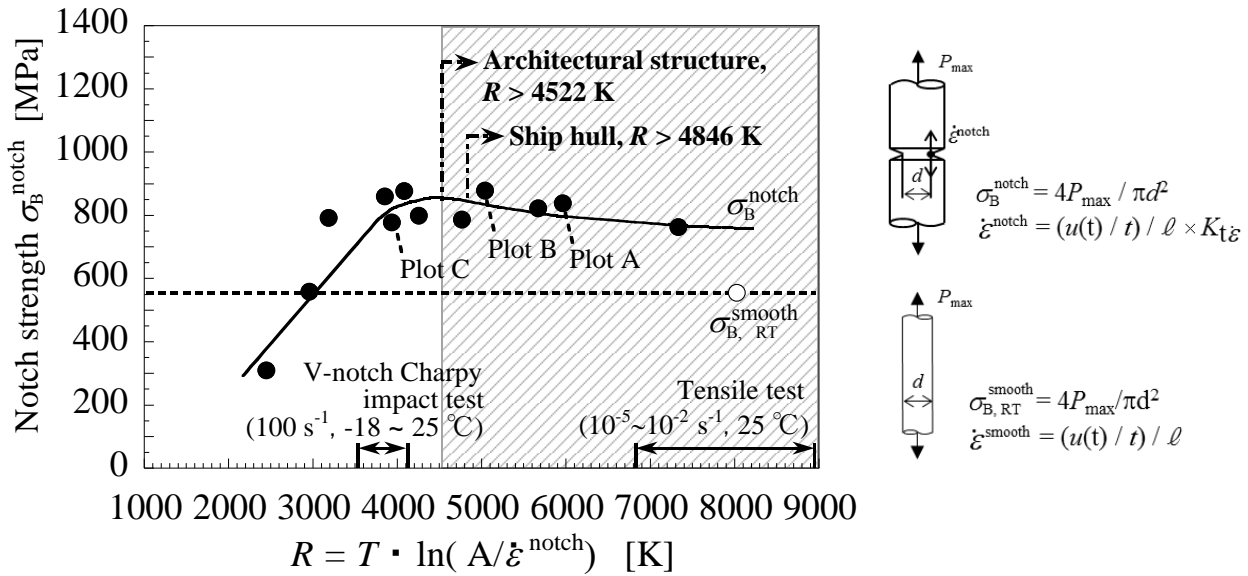
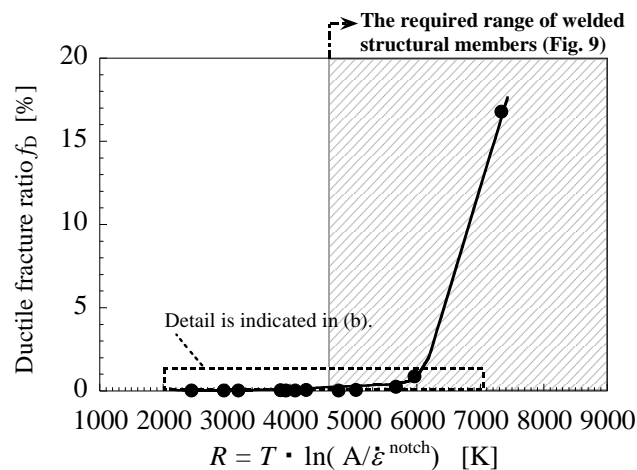
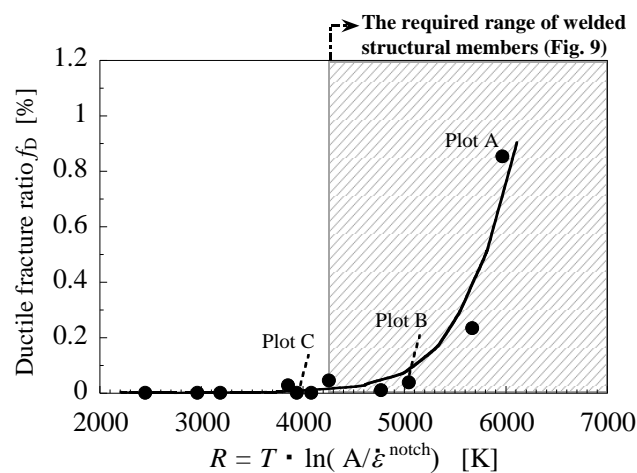


Fig. 9 The comparison of notch strength  $\sigma_B^{\text{notch}}$  ( $\rho = 0.25 \text{ mm}$ ) and static tensile strength at room temperature  $\sigma_{B, RT}^{\text{smooth}}$  in  $R$  parameter range of industrial fields. The notch strength  $\sigma_B^{\text{notch}}$  is always larger than the tensile strength at room temperature  $\sigma_{B, RT}^{\text{smooth}}$  in the required range of  $R$  parameter.

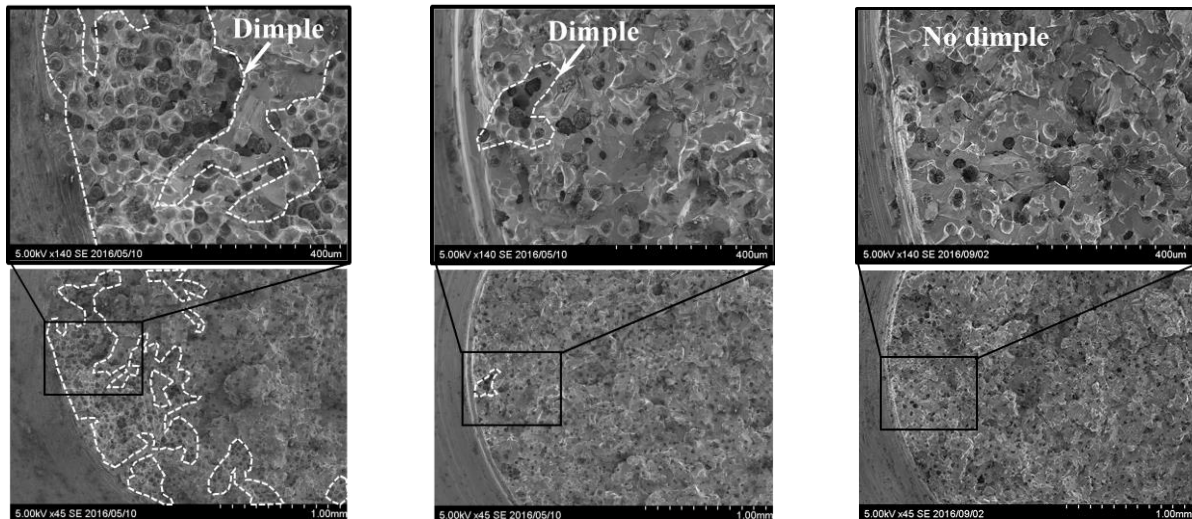


(a) Relationship between  $\sigma_B^{\text{notch}}$  and  $R$  parameter



(b) Enlarged view in the dotted line

Fig. 10 Relationship between ductile fracture ratio  $f_D$  and  $R$  parameter. It is found that the critical  $R$  parameter for  $\sigma_B^{\text{notch}}$  is closely related to the  $f_D$ .



(a) Fracture surface at plot A in Fig.10(b) ( $R = 5969 \text{ K}$ ,  $\sigma_B^{\text{notch}} = 836 \text{ MPa}$ )  
 (b) Fracture surface at plot B in Fig.10(b) ( $R = 5048 \text{ K}$ ,  $\sigma_B^{\text{notch}} = 876 \text{ MPa}$ )  
 (c) Fracture surface at plot C in Fig.10(b) ( $R = 3943 \text{ K}$ ,  $\sigma_B^{\text{notch}} = 776 \text{ MPa}$ )

Fig. 11 Fracture surface of plot A, B and C in Fig.10(b). There is no dimple in figure (c).

## 6. 結 言

本研究では、機械的性質の肉厚感受性が小さく、延性、高サイクル疲労特性に優れる等の特長を有し、より広範囲の分野、特に溶接構造部材などへの適用が期待される高 Si 球状黒鉛鋳鉄を供試材に選んだ。そこで、溶接構造物の設計条件範囲を含む温度  $T = -130 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、ひずみ速度  $\dot{\epsilon}^{\text{smooth}}$ ,  $\dot{\epsilon}^{\text{notch}} = 10^{-4} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$  の条件にて、平滑材と環状切欠き材の丸棒試験片を用いて、引張試験を行った。そして、平滑引張強度および切欠き強度を対象に、ひずみ速度の影響を温度の影響と等価なものとして評価できるひずみ速度-温度パラメータ  $R$  値による整理を試みた。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 高 Si 球状黒鉛鋳鉄の切欠き強度  $\sigma_B^{\text{notch}}$  ( $\rho = 0.25 \text{ mm}$ ) は  $R$  値によって整理できる。すなわち、 $R$  値は切欠き強度のひずみ速度-温度依存性を統一的に評価するパラメータとして有用である。
- (2) 船舶、建築分野など溶接構造部材におけるひずみ速度の上限値と温度の下限値の設計条件より具体的な  $R$  値を示し、シャルピー衝撃試験の条件が過剰であることを示唆した。
- (3) 溶接構造部材の設計条件とされる  $R$  値の範囲において、切欠き強度  $\sigma_B^{\text{notch}}$  は、常温での平滑材静的引張強度  $\sigma_{B, RT}^{\text{smooth}}$  よりも十分に高いことが明らかとなり、高 Si 球状黒鉛鋳鉄の設計強度として常温での平滑材静的引張強度の適用が可能であることを示唆した。

## 文 献

- 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, Vol.80, No.814(2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0149.
- Bennett, P. E. and Sinclair, G. M., Parameter representation of low-temperature yield behavior of body-centered cubic transition metals, Transactions of the ASME, Vol.65(1966), pp.518-524.
- British Standards Institution(BSI), Founding-spheroidal graphite cast irons(BS EN 1563), British Standards Institution(2011), pp.23-26.
- Davis, E. A., and Connolly, F. M., Stress distribution and plastic deformation in rotating cylinders of strain hardening material, Journal of Applied Mechanics Transactions of the ASME, Vol.26 (1959), pp.25-30.
- 藤井英輔, 大熊勇, 川口喜昭, 塚本雅敏, 鋼材の動的破壊靱性特性における温度および歪速度の影響の検討, 日本造船学会論文集, Vol.158(1985), pp.619-629.
- 後藤浩二, 平澤宏章, 豊貞雅宏, ひずみ速度, 温度を考慮した構造用鋼構成方程式の簡易推定法, 日本造船学会

論文集, Vol.176(1994), pp.501-507.

池田朋弘, 梅谷拓郎, 須浦直之, 根本嵩, 芦塚康佑, 高田洋吉, 大城桂作, 固溶強化型高 Si 球状黒鉛鑄鉄の破壊  
靱性, 鑄造工学会第 163 回全国講演大会講演概要集(2013), p.66.

Ikeda, T., Umetani, T., Kai, N., Ogi, K., Noda, N.-A. and Sano, Y., Influence of silicon content, Strain rate and temperature on  
toughness of solid solution strengthened ferritic ductile cast iron, Proceedings of GIFA/VDI Technical Forum(2015),  
pp.107-108.

Ikeda, T., Umetani, T., Kai, N., Noda, N.-A. and Sano, Y., Strain rate and temperature insensitiveness of notch-bend strength  
for high Si ductile cast iron, ISIJ International, Vol.56, No.5(2016), pp.868-874.

日本鑄造工学会編, 鑄造工学便覧(2002), p.12.

日本工業規格, 鑄造品の丸み, JIS B 0703 (1987), pp.2-13.

栗原正好, 鋼材の引張特性に及ぼす歪速度の影響, 溶接学会誌, Vol.66, No.1(1997), p.6.

間島保, 安西政徹, 中澤一, 延性材料の切欠き引張強さ, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.52, No.476(1986),  
pp.1171-1176

南二三吉, 橋田知幸, 豊田政男, 森川潤, 大村剛, 有特和茂, 菅田登, ローカルアプローチの適用による構造用  
鋼の動的破壊靱性評価, 日本造船学会論文集, Vol.184(1998), pp.453-464.

野田尚昭, 大塚駿, 安藤誠人, 佐野義一, 高瀬康, 篠崎貴宏, 菅文海, 高速引張試験における切欠き試験片の動  
的応力集中とひずみ速度集中の解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.79, No.804(2013), pp.1182-1190.

Noda, N.-A., Ohtsuka, H., Zheng, H., Sano, Y., Ando, M., Shinozaki, T. and Guan, W., Strain rate concentration and dynamic  
stress concentration for double-edge-notched specimens subjected to high-speed tensile loads, Fatigue & Fracture of  
Engineering Materials & Structures, Vol.38(2015), pp.125-138.

野口徹, 環状切欠きを有する丸棒の破断強度について, 材料, Vol.29, No.319(1980), pp.387-393.

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, No.591(1998), pp.243-261.

坂巻清司, 稲田貞俊, 極低炭素鋼の曲げ遷移挙動に及ぼす変形速度の影響について, 材料, Vol.26, No.286(1976),  
pp.658-664.

作井誠太, 中村正久, 大森正信, 軟鋼の低温における引張諸性質におよぼす結晶粒度ならびに変形速度の影響,  
鉄と鋼, Vol.49, No.7(1963), pp.996-1003.

杉浦伸康, 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および三点曲  
げ特性, 軽金属, Vol.45, No.11(1995), pp.638-642.

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, まてりあ,  
Vol.35, No.4(1996), pp.370-379.

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, Vol.177(1995), pp.371-380.

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, Vol.86, No.1(2014), pp.36-42.

山本博, 小林俊郎, 藤田秀嗣, 球状黒鉛鑄鉄における衝撃引張特性の歪速度-温度依存性と延性破壊挙動, 鉄と鋼,  
Vol.85, No.10(1999), pp.765-770.

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, Vol.72,  
No.2(2000), pp.107-112.

## References

Ando, H., Noda, N.-A., Kuroshima, Y., Ishikawa, Y. and Takeda, H., Impact properties of polydimethylsiloxane  
copolymerized polycarbonate and application of the time-temperature superposition principle, Transactions of the JSME  
(in Japanese), Vol.80, No.814(2014), DOI: 10.1299/transjsme. 2014smm0149.

Bennett, P. E. and Sinclair, G. M., Parameter representation of low-temperature yield behavior of body-centered cubic  
transition metals, Transactions of the ASME, Vol.65(1966), pp.518-524.

British Standards Institution(BSI), Founding-spheroidal graphite cast irons(BS EN 1563), British Standards Institution(2011),  
pp.23-26.

Davis, E. A., and Connelly, F. M., Stress distribution and plastic deformation in rotating cylinders of strain hardening  
material, Journal of Applied Mechanics Transactions of the ASME, Vol.26 (1959), pp.25-30.

- Fuji, E., Ohkuma, Y., Kawaguchi, Y. and Tsukamoto, M., Effects of temperature and strain rate on dynamic fracture toughness of steel, The society of naval architects of Japan, Vol.158(1985), pp.619-629 (in Japanese).
- Goto, K., Hirasawa, H. and Toyosada, M., A simple estimating method of constitutive equation for structural steel as a function of strain rate and temperature, The society of naval architects of Japan, Vol.176(1994), pp.501-507(in Japanese).
- Ikeda, T., Umetani, T., Sura, Nemoto, T., Ashizuka, K., Takada, H. and Ogi, K., Fracture toughness of solution strengthened high silicon ferritic ductile cast iron, Proceedings of the 163rd JFS meeting(2013), p.66 (in Japanese).
- Ikeda, T., Umetani, T., Kai, N., Ogi, K., Noda, N.-A. and Sano, Y., Influence of silicon content, strain rate and temperature on toughness of solid solution strengthened ferritic ductile cast iron, Proceedings of GIFA/VDI Technical Forum(2015), pp.107-108.
- Ikeda, T., Umetani, T., Kai, N., Noda, N.-A. and Sano, Y., Strain rate and temperature insensitiveness of notch-bend strength for high Si ductile cast iron, ISIJ International, Vol.56, No.5(2016), pp.868-874.
- Japan Foundry Engineering Society ed., Foundry engineering handbook(2002), p.12.
- Japan Industrial Standards, Roundness of castings, JIS B 0703(1987), pp.2-13 (in Japanese).
- Kurihara, M., Influence of strain rate on tensile properties for steel, Journal of the Japan Welding Society, Vol.66, No.1(1997), p.6 (in Japanese).
- Majima, T., Anzai, M. and Nakazawa, H., Notch tensile strength of ductile materials, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.52, No.476(1986), pp.1171-1176 (in Japanese).
- Minami, F., Hashida, T., Toyoda, M., Morikawa, J., Ohmura, T., Arimochi, K. and Konda, N., Dynamic fracture toughness evaluation of structural steels based on the local approach, The society of naval architects of Japan, Vol.84(1998), pp.453-464(in Japanese).
- Noda, N.-A., Ohtuka, H., Ando, M., Sano, Y., Takase, Y., Shinozaki, T. and Guan, W., Analysis of dynamic stress concentration and strain rate concentration for notched specimens used for high speed tensile test, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.79, No.804(2013), pp.1182-1190 (in Japanese).
- Noda, N.-A., Ohtsuka, H., Zheng, H., Sano, Y., Ando, M., Shinozaki, T. and Guan, W., Strain rate concentration and dynamic stress concentration for double-edge-notched specimens subjected to high-speed tensile loads, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol.38(2015), pp.125-138
- Noguchi, T., Rupture strength of cast iron bar with circumferential notch, Journal of the Society of Materials Science, Vol.29, No.319(1980), pp.387-393 (in Japanese).
- Okashita, K., Ohminami, R., Michiba, K., Yamamoto, A., Tomimatsu, M., Tanji, Y. and Miki, C., Investigation of the brittle fracture at the corner of P75 rigid-frame pier in Kobe harbor highway during the Hyogoken-Nanbu earthquake, The Journal of Japan Society of Civil Engineers, No.591(1998), pp.243-261 (in Japanese).
- Sakamaki, K. and Inada, S., Effect of bending speed on transition behaviors of a low carbon steel, Journal of the Society of Materials Science, Vol.26, No.286(1976), pp.658-664 (in Japanese).
- Sakui, S., Nakamura, T. and Ohomori, M., The effects of grain size and deformation rate on the tensile properties of mild steel at low temperature, Vol.49, No.7(1963), pp.996-1003 (in Japanese).
- Sugiura, N., Kobayashi, T., Yamamoto, I., Nishido, S. and Hayashi, K., Comparison of tensile and 3-point bend properties under impact loading in an AC4CH-T6 aluminum casting alloy, Vol.45, No.11(1995), pp.638-642 (in Japanese).
- Toyoda, M., Lessons learned from great Hanshin earthquake for steel framed structures with particular reference to materials/welding, Materia Japan, Vol.35, No.4(1996), pp.370-379 (in Japanese).
- Ueda, Y., Murakawa, H., Tanigawa, M., Yoneda, N., Iwata, S. and Goto, K., Strength evaluation method for ductile fracture at structural discontinuous parts in the ship hull structure under collision, The Society of Naval Architects of Japan, No.177(1995), pp.371-380 (in Japanese).
- Umetani, T., Ikeda, T., Sura, N., Ashizuka, K., Nemoto, T., Takada, H. and Ogi, K., Tensile strength, fatigue strength and impact strength of solution strengthened high silicon ferritic ductile cast iron, Journal of Japan Foundry Engineering Society, Vol.86, No.1(2014), pp.36-42 (in Japanese).
- Yamamoto, H., Kobayashi, T. and Fujita, H., Strain rate-temperature dependency of impact tensile properties and ductile fracture behavior in ductile cast iron, Tetsu-to-Hagané, Vol.85, No.10(1999), pp.765-770 (in Japanese).
- Yamamoto, H., Kobayashi, T. and Fujita, H., Strain rate dependency of ductile-brittle transition behavior in ductile cast iron, Journal of Japan Foundry Engineering Society, Vol.72, No.2(2000), pp.107-112 (in Japanese).