

フェライト球状黒鉛鑄鉄の衝撃ひずみ特性

永井 恭一

医療学部 医療工学科 臨床工学コース
nagai@toua-u.ac.jp

〈要 旨〉

フェライト球状黒鉛鑄鉄の無切欠き試験片を用いて様々な温度で動的曲げ試験を行った。計装化したシャルピー衝撃試験機を使用して得られた曲げ荷重-時間曲線を荷重-たわみ曲線に変換した。室温での最大曲げ荷重は21N、たわみは5.6mmであった。試験片の表面ひずみの値は主に荷重点で最大であり、室温では約30%であった。本論文ではこの最大ひずみと温度との関係を検討した。ひずみは温度に対して高温側ではほぼ一定であり、温度が下がるにつれて減少したが、210~240Kの範囲で急激に減少した。ひずみの温度に対する変化は吸収エネルギーの変化とよく対応した。ひずみ e と温度 T の関係は関数 $\log \frac{e}{e_0 - e} = aT + b$ で表現できた。ただし、 e_0 はひずみの高温側での飽和値であり、 a と b は定数である。シャルピー衝撃試験と静的曲げ試験を比べて、この材料ではひずみ速度を10倍増加するごとにひずみ-温度曲線が8.8Kだけ高温側に移動することがわかった。

1. 緒言

フェライト球状黒鉛鑄鉄は他の鑄鉄に比べ衝撃値または吸収エネルギーが大きく、優れたじん性を有し、多方面に使用されている。そのじん性を一層理解し向上させることは有意義であると考えられる。衝撃試験では通常吸収エネルギーから材質の評価を行うことが多い⁽¹⁾。また、計装化して荷重-時間(たわみ)曲線を調べて衝撃特性を検討した研究も多く見られる⁽²⁾。一方、変形の度合いを知るには破断時のひずみを測定するのがよいと思われるが、時間や労力の面からこれらについて調べた報告はほとんど見当たらないようである。以前、著者らはフェライト球状黒鉛鑄鉄の静的曲げ試験およびシャルピー衝撃試験についての特性⁽³⁾を別報で報告した。本研究では同じ材料を用いてシャルピー衝撃試験のデータを追加して、衝撃破壊についてひずみを中心に検討し直したので、ここに報告することにする。

2. 供試材および実験方法

本実験で使用した供試材は連続鑄造によって製造された市販の球状黒鉛鑄鉄であり、その化学組成を表1に示す。供試材は鑄放し状態で使用したが、その基地組織はほぼ完全なフェライトであった。また、この材料の引張強さは457MPaであり、伸びは20.8%であった。

表1 供試材の化学組成

C	Si	Mn	P	S	Mg
3.34	3.04	0.13	0.050	0.002	0.069

この供試材から10×10×55 (mm) の切欠きのない直方体試験片を作製した。試験片側面上の中央38mmの間に図1のように2mm間隔の標線を引き、0.01mmの精度の読み取り顕微鏡で試験前後の標線間隔を測定し、次式でひずみを計算した。

$$e_i = \frac{\Delta l_i}{l_i} \quad (1)$$

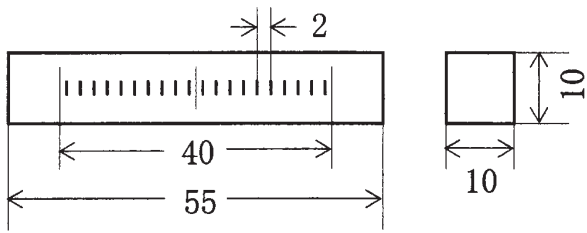


図1 試験片寸法と標線

ただし、 e_i は i 番目のひずみであり、 l_i や Δl_i はそれぞれ i 番目の試験前の標線距離および試験後の標線距離の変化である。また、図1に示している試験片中央の寸法40mmは次に述べる衝撃試験機のハンマ荷重に対する支点間距離である。

衝撃試験は容量300Nmのシャルピー衝撃試験機を使用して行った。その際、試験機のハンマ打撃刃の部分にひずみゲージを貼り付け、そのひずみの出力を動ひずみ測定器を通して波形記憶装置に記憶させ、その後方眼紙に荷重-時間曲線として記録させた(図2)。ただし、荷重の算出に際してはシャルピー衝撃試験機から打撃刃の部分を取り外し、打撃刃に静的圧縮荷重を負荷して荷重と打撃刃のひずみの関係を求めておき、この関係式を使用した(ここで述べている打撃刃のひずみは荷重を算出するためのものであり、後で述べる試験片のひずみとは異なる)。

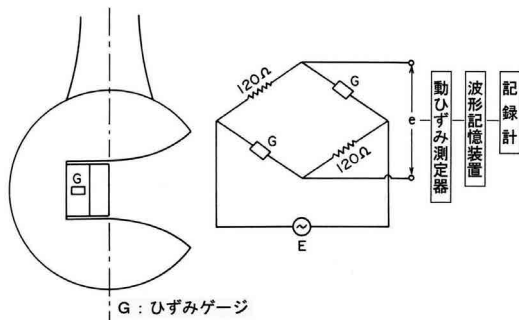


図2 荷重測定の計測概略図

シャルピー衝撃試験機の打撃ハンマの質量を M とし、回転中心からハンマ重心までの距離を L_1 ($=634\text{mm}$)、ハンマ持ち上げ角を α とすると、力学的エネルギーの保存則より試験片に荷重がかかり始めるときのハンマ重心の速度 v_α が計算できる。すなわち、

$$MgL_1(1-\cos\alpha) = \frac{1}{2}Mv_\alpha^2 \quad (2)$$

より

$$\begin{aligned} v_\alpha &= \sqrt{2gL_1(1-\cos\alpha)} \\ &= 2\sqrt{gL_1} \sin\frac{\alpha}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

である。ただし、 g は重力加速度である。また、ここでは三角関数の半角の公式を使用した。

試験片はVの字に変形して破断するが、破断直後のハンマ振り上がり角を β とすると、角度 α の場合と同様に考えて、試験片の破断終了時におけるハンマ重心の速度 v_β が得られる。試験片の打撃開始から破断まで、ハンマの速度は v_α から v_β まで時間に対して直線的に減少すると仮定すると、試験片破断中のハンマ重心の平均速度 \bar{v} は

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \frac{1}{2}(v_\alpha + v_\beta) \\ &= \sqrt{gL_1} \left(\sin\frac{\alpha}{2} + \sin\frac{\beta}{2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

のように表される。

さらに、回転中心からハンマの打撃点までの距離を L_2 ($=750\text{mm}$) とすると、 $(L_2/L_1)\bar{v}$ よりハンマ打撃点の平均速度が得られる。試験片のたわみを λ とするとき、 λ はハンマ打撃点の変位に等しいと考えられるので以下のように計算した。

$$\lambda = \frac{L_2}{L_1} \bar{v} t \quad (5)$$

ただし、 t は破断開始からの時間である。

試験片は所定温度の低温浴槽で保温した後、すばやく取り出して標線を入れた面と反対の面にハンマが当たるようにシャルピー衝撃試験機にセットして、ハンマ持ち上げ角 ($\alpha =$) 120° で打撃した。例えば、5秒以内のようにすばやく打撃を行う場合、試験片の低温からの温度上昇はほとんど無視できることが知られている⁽⁴⁾。低温液は約190Kまではメチルアルコールとドライアイスの混合、それ以下で約140Kまではイソペンタンを液体窒素で冷却したもの、さらにそれ以下は液体窒素を使用した。また、一部の低温以外の試験片は電気炉内で温度調節したものもある。

3. 実験結果

図3に室温でのハンマひずみと時間との関係の一例を示す。衝撃的な負荷のため、いくらかひずみ出力に振動が重なっている。振動部分では中央を通るようにして滑らかな曲線(これが曲げ荷重-時間曲線に相当する)にかき直し、この後時間

軸を微小に分割して曲線の縦軸、横軸の座標を読んだ。この微小に分割した横軸の時間の値に試験片破断中のハンマ打撃点の平均速度をかけてそれぞれのたわみを計算し、曲げ荷重-たわみ曲線を作成した。このようにして、図3の曲げ荷重-時間曲線から求めた曲げ荷重-たわみ曲線を図4に示す。これも含め室温の値を平均すると、最大曲げ荷重が20.9N、破断時のたわみは5.6mmであった。

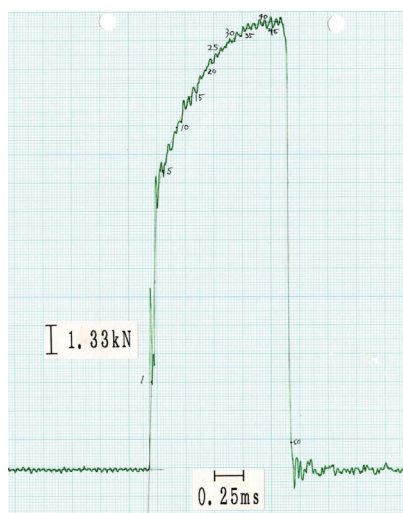


図3 衝撃曲げ荷重-時間曲線の例 (室温)

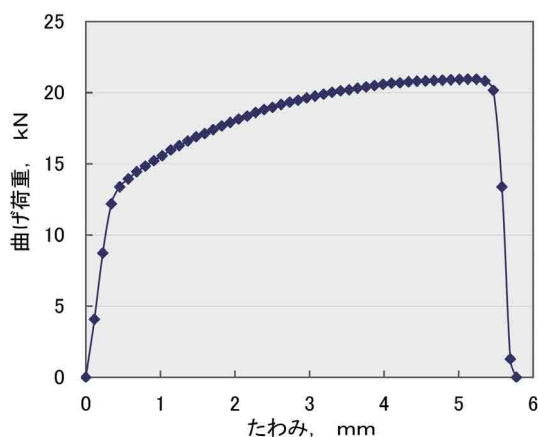


図4 衝撃曲げ荷重-たわみ曲線 (室温)

曲げ荷重-たわみ曲線から台形近似で微小面積すなわち破断に要した微小エネルギーを求め、これを合計して破断エネルギーWを計算した。また、打撃ハンマの持ち上げ角 α と試験後の振り上がり角 β を用いて次式のようにハンマ重心の位置エネルギーの差から計算される吸収エネルギーEを求め、WとEを比較すると両者の値はほぼ一致した。

$$E = MgL_1 (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (6)$$

図5は室温の場合の試験片外表面のひずみ分布の一例を示したものである。予想されるとおり、ひずみは荷重が作用する試験片中央で最大であり、その荷重点から離れるにつれて急激に減少する。また、ひずみはほぼ左右対称な値が得られていることがわかる。ただし、試験片によっては荷重点以外の箇所でもひずみが最大となる場合もいくつかあった。フェライト球状黒鉛鋳鉄に衝撃的な曲げ荷重が作用しても、室温で破断までのひずみは約30%あり、これからも延性に優れていることがわかる。

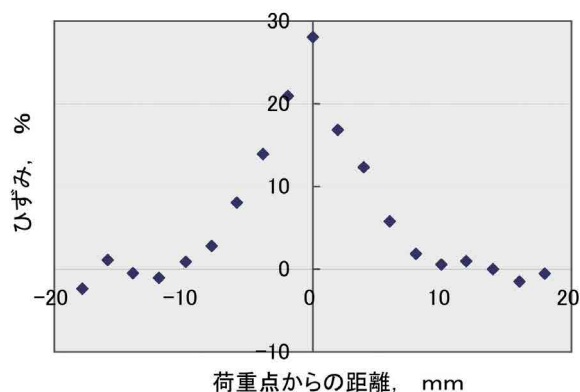


図5 試験片のひずみ分布

このようにして試験片ごとにひずみの最大値を求め、試験片最大ひずみと試験温度との関係を示したものが図6である。本論文ではこの最大ひずみと試験温度との関係を主に検討するが、最大ひずみが温度に対しても最大を示して紛らわしくなるので、以下では試験片最大ひずみを単にひずみと称することにする。ひずみは室温で約30%であり、温度が下がるにつれて減少するが、単調な減少ではなく210~240Kの範囲で急激に変化している。

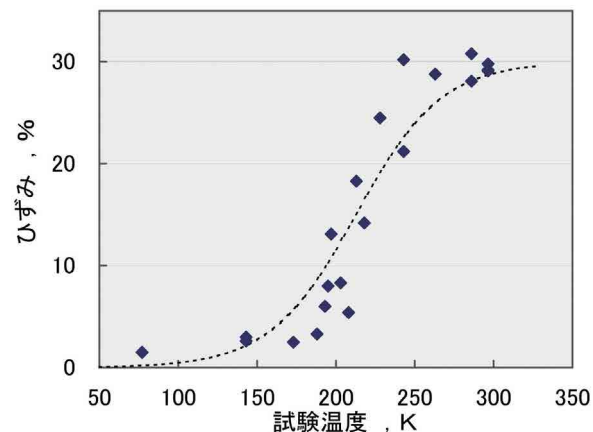


図6 ひずみと試験温度との関係

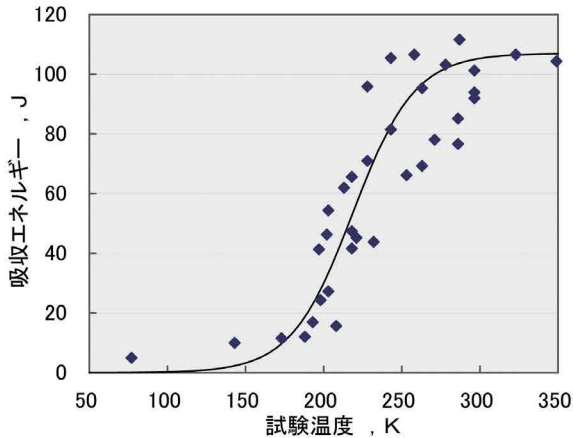


図7 吸収エネルギーと試験温度との関係

図7は吸収エネルギーと試験温度との関係を示したものである。ややばらつきがあるが、高温の領域で約110Jのアップershelf（上部棚）が見られ、これ以下の温度域では吸収エネルギーは温度が下がるにつれて減少する。延性破壊から脆性破壊へと変化していることがわかり、その遷移温度は220～230Kである。これは図6のひずみが急激に低下する温度域とほぼ一致している。

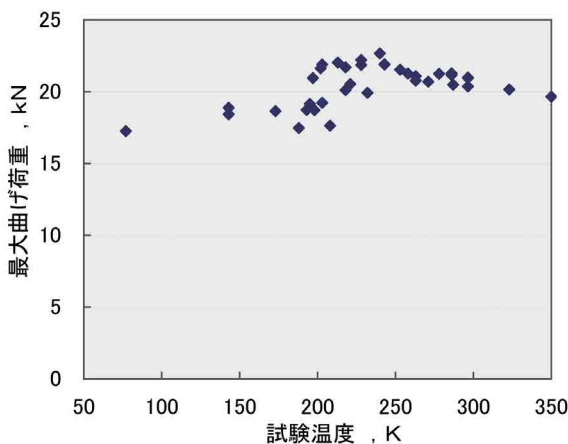


図8 最大曲げ荷重と試験温度との関係

図8は最大曲げ荷重と試験温度との関係を示したものである。最大曲げ荷重は温度に対して大きな変化はなく、室温から温度が低下すると非常に緩やかに上昇し、図7からわかる遷移温度領域や脆性破壊領域でもわずかに減少するだけである。室温から低温までの約300Kの温度範囲で、最大曲げ荷重は17～23kNであり、温度に対して他の特性値とは異なる変化を示した。

4. 考察

曲げ荷重についての試験速度依存性すなわちひずみ速度依存性は別報³⁾で触れたので、ここではひずみに注目して、ひずみ速度依存性を検討することにする。

先に述べた図6は試験片ひずみ（最大ひずみ）と温度との関係であった。ここでは、図6の結果を静的曲げ試験のひずみ-温度曲線と比べることにする。ただし、静的曲げ試験ではシャルピー衝撃試験の支点間距離と同寸法で、周囲に二重の浴槽を取り付けて低温液の温度設定をできるようにした曲げ装置を作製し、試験速度を $8.33 \times 10^{-6} \text{m/s}$ とした。この結果を図9に示す。静的曲げ試験でのひずみは室温で約31%であり、温度が下がるにつれて緩やかに減少する。静的曲げ試験とシャルピー衝撃試験を比べると、室温でのひずみは静的曲げでの値がいくらか大きいように見えるが、大きな差はないようである。また、温度が低下するにつれてひずみが減少するようすはほぼ同じである。

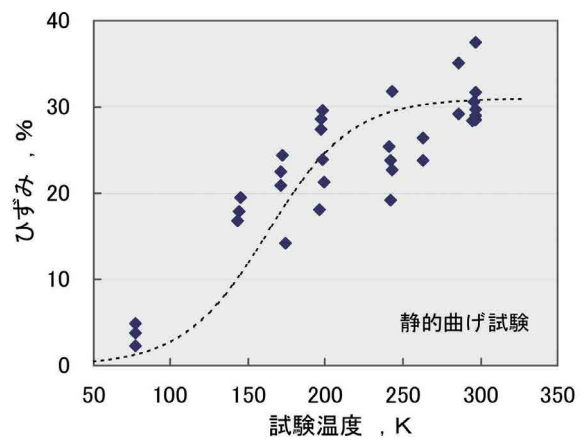


図9 静的曲げ試験でのひずみと試験温度との関係

曲げ試験での試験片表面ひずみを e 、たわみを δ (mm)、ひずみ速度を $\frac{de}{dt}$ とすると

$$\frac{de}{dt} = \frac{de}{d\delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (7)$$

である。本実験材料で種々の試験温度での結果から、 e と δ (mm) の間には

$$\delta = 20.0 e$$

の比例関係があり、これは静的曲げ試験、シャルピー衝撃試験に関わらず成り立った⁽³⁾。したがって、

$\frac{d\delta}{de} = 20\text{mm}$ より (7)式は

$$\frac{de}{dt} = \frac{1}{20} \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (8)$$

となる。静的曲げ試験の試験速度 $\frac{d\delta}{dt} = 8.33 \times 10^{-3} \text{mm/s}$ 、シャルピー衝撃試験の平均試験速度

$\frac{d\delta}{dt} = 4.05 \times 10^3 \text{mm/s}$ を使用すると、(8)式よりひずみ速度はそれぞれ $\frac{de}{dt} = 4.17 \times 10^{-4} / \text{s}$ 、 $\frac{de}{dt} = 2.03 \times 10^2 / \text{s}$ となる。

図7にも示したように、吸収エネルギーは高温側で飽和して一定値をとることが知られている。ひずみについても図6や図9の結果から、同様に高温側で一定値をとると考えられる。そこで、試験温度 T(K) に対するひずみ e の関係を数式化するにあたり、常用対数を用いて

$$\log \frac{e}{e_0 - e} = aT + b \quad (9)$$

で表すことにする。ここで、 e_0 はひずみの高温側での飽和値であり、a と b は定数である。ただし、関数 $\log \frac{y}{1-y} = ax + b$ は点 $(-b/a, 1/2)$ で対象であり、 $x \rightarrow \infty$ 、 $x \rightarrow -\infty$ のとき、それぞれ $y \rightarrow 1$ 、 $y \rightarrow 0$ となる曲線で、一例として $a = 0.02$ 、 $b = -4$ の場合を示すと、図10のようになる。a の値が増加すれば中央での y の変化が急になり、b の値が増加すれば曲線を低温側に移動させる。

図6、図9の場合について、ひずみの測定値と(9)式の e 値との誤差の2乗和が最小になるように(9)式の定数を求めると、静的曲げ試験、シャルピー衝撃試験に対して、それぞれ

$$a = 0.016, \quad b = -2.6$$

$$a = 0.016, \quad b = -3.4$$

が得られる。ただし、静的曲げ試験では $e_0 = 0.31$ 、シャルピー衝撃試験では $e_0 = 0.30$ とした。これらの結果を(9)式に代入して得られるひずみと温度

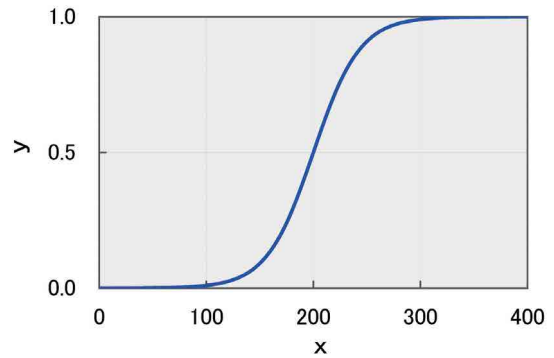


図10 a=0.02, b=-4の場合の関数

$$\log \frac{y}{1-y} = ax + b \text{ の形状と値}$$

の関係を、図6と図9中に破線で示している。破線と測定値にやや誤差はあるが、大局的に見れば、ひずみの値はこれらの数式でかなりよく表されていることがわかる。

ひずみを数式化したときの定数 b はひずみ速度

$\frac{de}{dt}$ によって変化した。そこで、ひずみ速度の変化による定数 b の変化を

$$b = n_1 \log \frac{de}{dt} + n_2 \quad (10)$$

によって表すと、2つのひずみ速度に対して b の値がわかっているので、

$$n_1 = -0.14, \quad n_2 = -3.1$$

が得られる。この結果を(10)式に代入し、ひずみを温度およびひずみ速度の関係として表すと、

$$\log \frac{e}{e_0 - e} = 0.016T - 0.14 \log \frac{de}{dt} - 3.1 \quad (11)$$

が得られる。

従来、ひずみ速度の増加は温度の低下と同じ効果を材料にもたらすといわれている⁽⁶⁾が、これは(11)式によく表れている。すなわち、温度 T の係数は正であり、 $\log \frac{de}{dt}$ の係数は負である。具体的に

は(11)式で $\frac{de}{dt}$ を10倍に増加したときのひずみは、

温度を $0.14/0.016 = 8.8(\text{K})$ だけ下げたときのひずみと同じ値を示す。これをひずみ-温度曲線で考

えれば, $\frac{de}{dt}$ を10倍に増加することとひずみ-温度

曲線を8.8Kだけ高温側に平行移動することは同じことになる。

本実験材料の場合, シャルピー衝撃試験では静的曲げ試験に対して $\log \frac{de}{dt}$ で5.69の差があり,

ひずみ-温度曲線を $8.8 \times 5.69 \approx 50$ (K)だけ上昇させた。

5. 結言

主に室温から低温までの温度でフェライト球状黒鉛鑄鉄の無切欠き試験片でシャルピー衝撃試験を行い, その特性を調べた。その結果を要約すると次のとおりである。

- (1)試験片のひずみは主に荷重点で最大であり, 室温での値は約30%であった。
- (2) (最大) ひずみは温度に対して高温側ではほぼ一定であり, 温度が下がるにつれて減少したが, 210~240Kの範囲で急激に変化をした。この温度に対する変化は吸収エネルギーの変化とほぼ同じであった。
- (3) (最大) ひずみ e と温度 T の関係は, 常用対数

を用いた関数 $\log \frac{e}{e_0 - e} = aT + b$ で表現でき

た。ただし, e_0 は (最大) ひずみの高温側での飽和値であり, a と b は定数である。

- (4)本試験材料では, ひずみ速度を10倍増加するとひずみ-温度曲線が8.8K高温側に移動した。

本論文の考察の項は九州工業大学名誉教授, 大和田野利郎先生にご指導いただいた内容を含んでいることを記し, 謹んで深謝申し上げます。

文 献

- (1)塩田俊雄, 小松眞一郎 (1981) 『材料』 30 : 387-393など
- (2)西成基, 小林俊郎, 多賀精二 (1975) 『鑄物』 47 : 816-822など
- (3)永井恭一, 大和田野利郎 (1998) 『鑄造工学』 70 : 563-568

(4)日本金属学会 (1976) 『講座・現代の金属学実験技術集6 材料試験法』 : 74

(5)小林英男 (1978) 『材料』 27 : 495-505

Impact Strain Properties of Ferritic Spheroidal Graphite Cast Iron

NAGAI Kyoichi

Faculty of Allied Health Sciences, Department of Medical Engineering, University of East Asia
nagai@toua-u.ac.jp

Abstract

Dynamic bending tests were carried out at various temperatures on unnotched specimens of ferritic spheroidal graphite cast iron. Bending load-time curves obtained by using an instrumented Charpy impact testing machine were converted to load-deflection curves. The maximum bend load was 21N and deflection was 5.6mm at room temperature. The strain values of the bent outer surface of the specimen reached the maximum mostly in the loading point and they were about 30% at room temperature. The relationship between the maximum strain and temperature was discussed in this paper. The strain at high temperatures is almost constant, independent of testing temperatures, and it decreased abruptly at temperature range of 210~240K with lowering temperature. The variation of strain with testing temperatures corresponded to that of absorbed energy with testing temperatures. The relationship between

strain e and temperature T was expressed by function $\log \frac{e}{e_0 - e} = aT + b$, where e_0 is the

saturation value of strain in high temperatures, a and b are constants. It was found that the strain-temperature curve shifted to the higher temperature by 8.8K with every tenfold of increase in strain rate by comparing the Charpy impact test with a static bending test in this iron.