

# 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\*

(鉄鋼材料の高速衝撃引張試験に関する研究—IV)

作井 誠太\*\*・中村 正久\*\*・大森 正信\*\*\*

## The Effects of Grain Size and Deformation Rate on the Tensile Properties of Mild Steel at Low Temperature.

(Studies of tensile properties of steels under high-speed impulsive Loading—IV)

Seita SAKUI, Tadahisa NAKAMURA and Masanobu OHMORI

### Synopsis:

A mild steel with 0.15% C, having three kinds of grain diameter, was tested at temperatures from room temperature to liquid nitrogen one under impact and quasi-static tensile loadings.

Experimental results are summarized as follows:—

(1) The increase of lower yield stress with the lowering of temperature was much greater than that of tensile strength in both static and impact tensile test. Below the temperature at which brittle fracture was observed, the yield stress (brittle fracture strength) was almost constant.

(2) The transition from ductile to brittle fracture was observed on the unnotched test piece in both static and impact tension test. The transition temperature registered in the latter test was higher by 60°C than that in the former. The transition temperature was also affected by the grain size, i. e., the specimen N1 (grain diameter: 0.091 mm), no matter what the deformation rate was changed, had the temperature higher by 40°C than one with N3 (grain diameter: 0.017 mm). This 40°C was quite equal to the difference between the transition temperatures of the respective specimens (N1 and N3) in Charpy V-notch test.

(3) Although the lower yield strength and tensile strength were functions of deformation rate as  $\sigma = A \log \dot{\epsilon} + B$  ( $\sigma$ : yield strength or tensile strength,  $\dot{\epsilon}$ : strain rate,  $A$  and  $B$ : constants) at a given temperature, the deformation rate dependence was larger for the lower yield strength. This dependence increased with the decrease of the temperature, at which ductile fracture occurred. However, it became very small when the specimen fractured in brittle manner.

(4) The lower yield stress (or brittle fracture strength)  $\sigma_u$  obeyed quite well the relation  $\sigma_u = \sigma_i + kd^{-1/2}$  ( $\sigma_i$ ,  $k$ : constants,  $d$ : grain diameter). The value of  $k$  for the impact tensile test was larger than that for the static one.

(5) In the range of temperatures at which ductile fracture occurred,  $k$  was found to be not a function of temperature but of deformation rate, and friction stress  $\sigma_i$  was a function of both temperature and deformation rate.  $\sigma_i = \alpha \exp(-\beta T)$  ( $\alpha$ ,  $\beta$ : constants,  $T$ : temperature) was found at a given deformation rate. Meanwhile, when the brittle fracture occurred, the constant  $k$  became larger but independent of the temperature and of the deformation rate, and  $\sigma_i$  had not any dependence on the temperature but a slight one on the deformation rate.

(Received 13 Feb. 1963)

### I. 緒 言

鋼の低温脆性に関する諸問題は、従来、衝撃曲げ試験をはじめとして、主として切欠きを付した試験片を用いた多くの実験方法により研究されてきたが、最近では、破壊の機構などの考察を容易にするため、切欠きなどの不明瞭な因子を除いて、平滑試験片を用いた一軸引張試

験を採用している例が少くない。著者らは前報<sup>2)</sup>において、切欠きおよび平滑両試験片を用いた、衝撃引張試験による軟鋼の低温脆性に関する実験結果をのべ、平滑

\* 昭和37年10月本会講演大会にて発表

昭和38年2月13日受付

\*\* 東京工業大学、工博

\*\*\* 東京工業大学

試験片によっても、変形速度を大きくすれば、液体窒素温度程度までの低温において、十分に脆性破壊を行なわせることができ、破壊強度の解釈が容易であることなどを示した。

本報告においては、切欠きのない平滑試験片の低温における衝撃ならびに静的引張試験により、主として以下に示す諸点について実験した結果について述べる。

焼鈍軟鋼の下降伏点  $\sigma_u$  は、温度と変形速度を一定にすると、結晶粒度のみの函数となり、(1)式で表わせる。

$$\sigma_u = \sigma_i + k d^{-1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで  $\sigma_i$ ,  $k$  はともに定数,  $d$  は結晶粒平均直径である。焼鈍軟鋼の強度や延性は、温度および変形速度に強く依存し、特に  $\sigma_u$  は温度が低下するほど、また変形速度が増すほど大きくなり、一般に  $\sigma_i$  と  $k$  も、 $\sigma_u$  と同じように温度と変形速度の函数である。 $\sigma_i$  や  $k$  は、それらのどのような函数になるのか、また延性破壊の場合と、脆性破壊の場合とで、どのようにちがうかを観察した。さらに平滑引張試験片の靱脆遷移温度とV切欠標準シャルピー衝撃曲げ試験片のそれとの関係をも調べた。

## II. 実験方法

試料は Table 1 に示す組成の軟鋼で、焼鈍条件を変えて同表に示すような、3種類の結晶粒度を得た。この試料の素材は、直径 22mm まで熱間圧延せる市販鋼である。

引張試験片の冷却方法を Fig. 1 に示した。静的引張試験の場合には、(a)に示すごとく、試験片を薄肉鉄パイプで包み、その外側をさらに木桶で包み、この鉄パイプ中に冷却剤を充たすことによって、衝撃引張試験の場合には、(b)に示すようなステンレス製のパイプで試験片を包み、その中に冷却剤を充たすことによつてそれぞれ冷却した。

Table 1. Chemical composition (wt.%) and grain size of specimen.

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.21	0.44	0.013	0.009

Specimen	Annealing	Grain diameter	ASTM No.
N1	1200°C 20h	0.0913mm	2.9
N2	900°C 1h	0.0266	7.3
N3	750°C 1h	0.0167	8.7

引張試験の試験温度として、常温(約20°C)、-30°C (エチルアルコールに液体窒素を滴下)、-78°C (エチルアルコールとドライアイスの共存)、-130°C (石油エーテルに液体窒素を滴下)および-196°C (液体窒素沸騰温度)をえらんだ。引張試験片の寸法は、前報<sup>2)</sup>に用いたものと同じく、直径 10mm、標点距離 35mm のものである。引張試験と並行しておこなった、シャルピー衝撃試験には、Table 1 に示した試料 N1 と N3 のV切欠標準試験片を用いた。

静的引張試験には、容量 35 t のアムスラー型油圧万能試験機を、衝撃引張試験には、荷重 10 t、最高衝撃速度 140m/s の能力を有する、回転円板型衝撃引張試験機を、衝撃曲げ試験には容量 30 kg-m のシャルピー試験機をそれぞれ用いた。引張試験における変形速度は静的(平均歪速度  $\dot{\epsilon} = 5.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )、衝撃速度 5m/s ( $\dot{\epsilon} = 1.4 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ ) ならびに 20 m/s ( $\dot{\epsilon} = 5.7 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ ) の3種類である。衝撃引張試験片や衝撃曲げ試験片に加わる荷重は、それぞれ針金歪計を貼りつけたロード・セルやハンマーの刃によつて検出し、荷重-時間曲線を記録した。

静的引張試験における変形速度は静的(平均歪速度  $\dot{\epsilon} = 5.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )、衝撃速度 5m/s ( $\dot{\epsilon} = 1.4 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ ) ならびに 20 m/s ( $\dot{\epsilon} = 5.7 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ ) の3種類である。衝撃引張試験片や衝撃曲げ試験片に加わる荷重は、それぞれ針金歪計を貼りつけたロード・セルやハンマーの刃によつて検出し、荷重-時間曲線を記録した。

## III. 実験結果と考察

### (1) 温度の影響

Fig. 2, 3 は、結晶粒度の

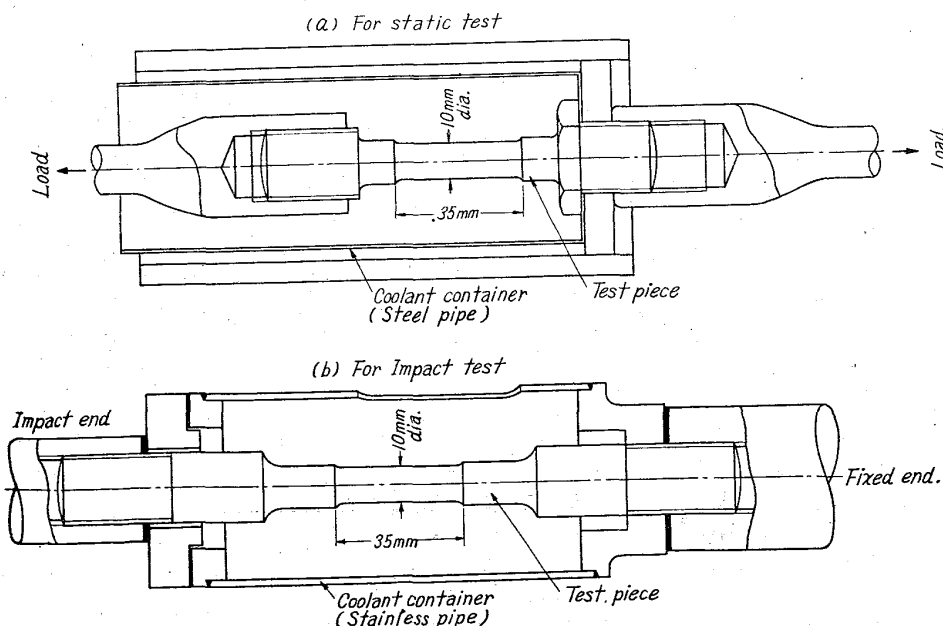


Fig. 1. Cooling of test pieces for static (a) and impact tensile test (b).

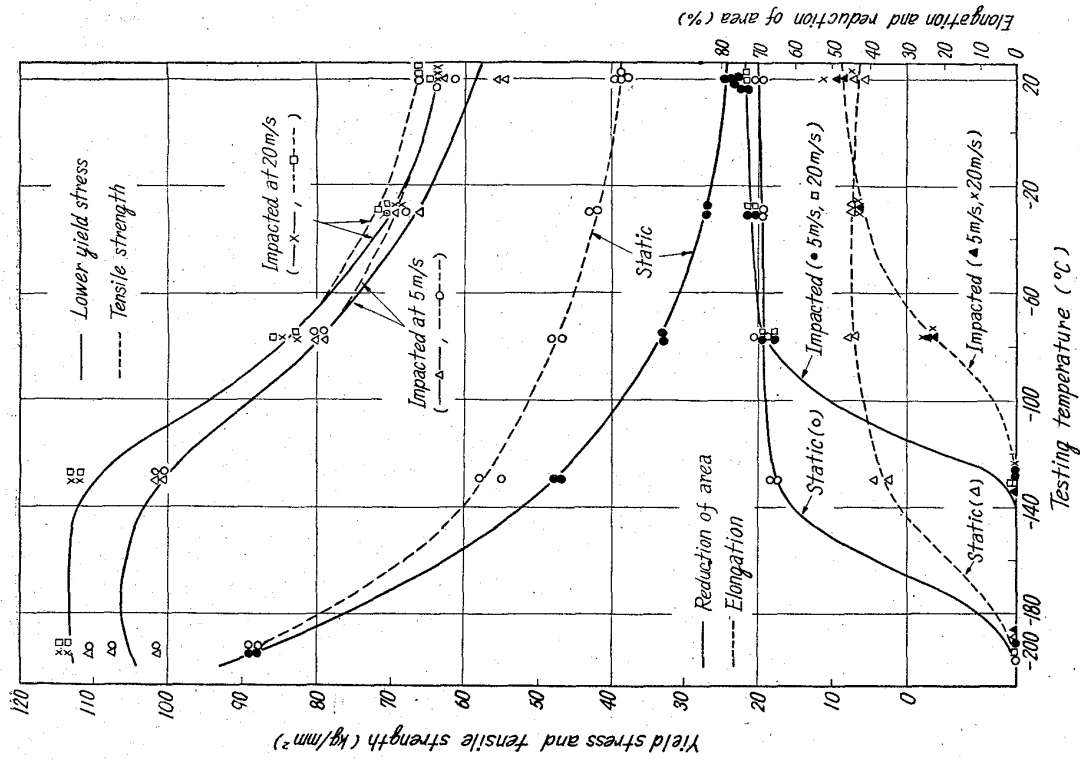


Fig. 3. Effect of temperature on the impact and static tensile properties of specimen N3.

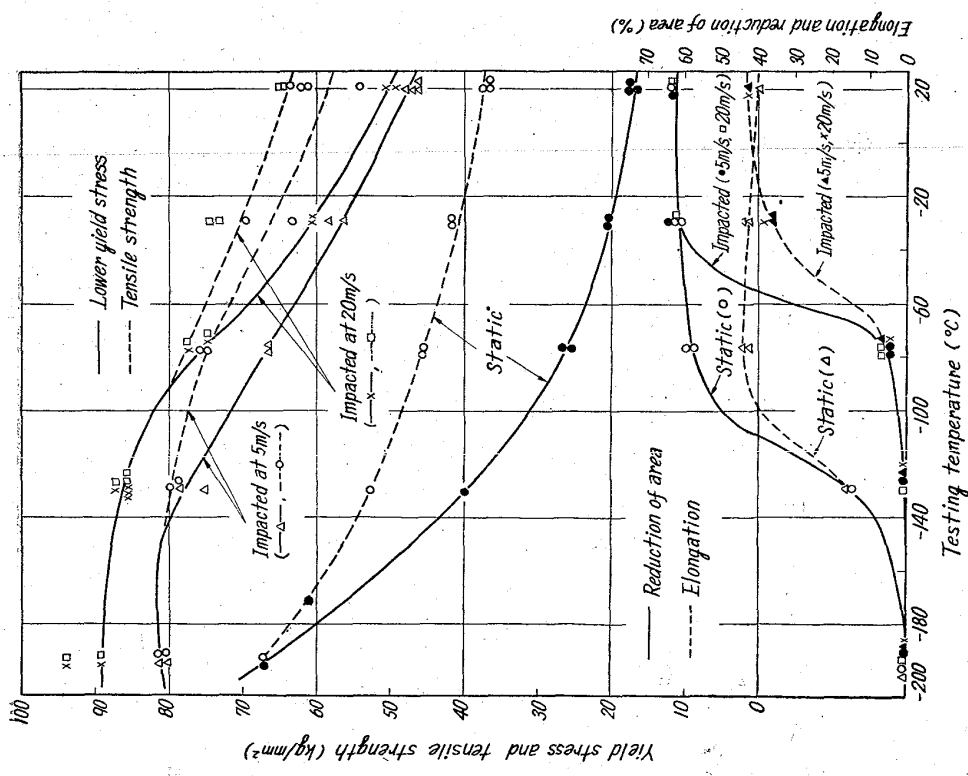


Fig. 2. Effect of temperature on the impact and static tensile properties of specimen N1.

最も大きい試料 N1 と最も小さい試料 N3 を静的、衝撃速度 5 および 20m/s で引張試験を行なったとき、引張諸性質におよぼす温度の影響を示したものである。温度の低下にともなう降伏点と引張強さの増加は、いずれの変形速度においても同じ傾向であるが、降伏点の増加は引張強さのそれよりいちじるしく、したがって低温になるほど降伏比が大になる。また常温から -78°C までは、温度低下とともに降伏点は、各々の変形速度においてほぼ平行に増加し、引張強さについてもこの関係は同じである。しかし、衝撃速度 5 および 20m/s の試験では、-130°C になると降伏点（引張強さとほとんど一致する）の増加はゆるやかになり、さらに低温の -196°C になればその増加はほとんど認められない。

Fig. 2, 3 にはまたそれぞれ試料 N1 および N3 の伸びと断面収縮率の温度に対する変化を示したが、いずれの変形速度においても、切欠衝撃曲げ試験で観察されると同様の靱脆遷移温度域の存在がみられる。試料 N1 および N3 の伸びと断面収縮率は、静的引張試験の場合には -196°C 以下、衝撃引張試験では -130°C 以下の温度でそれぞれ零になっており、延性を示さなくなる温度以下では、降伏点は増加しないことが認められる。このことは、他の試料 N2 についても全く同じであって、延性を示さなくなる温度、あるいはそれよりわずかに低い温度以下では、降伏強さ（脆性破壊強度）が一定値になることを示している。同様の結果は、のちにのべる衝撃曲げ試験、著者らが行なった軟鋼のシャルピー衝撃試験<sup>9)</sup>でも認めたところであり、他の研究者ら<sup>10)</sup>によっても、静的引張試験で得られている。また、切欠き引張試験片<sup>2)</sup>の場合、伸びが零になる条件は、3つの変数、すなわち温度、変形速度および切欠きの鋭さを適当にえらぶことにより決まったが、はじめて伸びが零（あるいは脆性破面率が 100%）になる条件のとき、引張強さが極大値を示したと類似の現象である。

(2) 変形速度の影響

本実験の静的および衝撃両引張試験の歪速度の比は大約、1:100,000 である。変形速度が、静的から衝撃に増加することによって、引張試験における遷移温度域は、いずれの試料とも伸び曲線で約 80°C、断面収縮率曲線で約 60°C 高温側に移動するが、衝撃速度 5m/s と 20m/s の間で差異は全く認められない。

Fig. 4 は試料 N1 の降伏点と引張強さにおよぼす歪速度の影響を、各試験温度について示したもので、温度が定まると次式で表わされる。

$$\sigma = A \log \dot{\epsilon} + B \dots\dots\dots (2)$$

$\sigma$  は降伏点または引張強さ、 $\dot{\epsilon}$  は歪速度、 $A$  と  $B$  は定数である。変形速度の影響は、すでに観察した温度の影響と同様に、引張強さに対するより、降伏点に対して顕著である。試料が延性破壊を示す温度範囲では、降伏点と引張強さに対する歪速度の影響は、温度の低下とともにしだいに大きくなり、それは特に降伏点に対していちじるしい。すなわち、常温から -78°C まで、Fig. 4 中の直線の勾配 ((2) 式中の定数  $A$ ) は漸増するが、-130°C からは減少し、各歪速度で脆性破壊を示す -196°C では、さらに激減する。23° ~ -65°C の延性破壊温度範囲で、M. EVERS<sup>4)</sup>は、純鉄の降伏点について同様の結果を報告している。この現象は、温度の低下によつて、転位の運動に対する抵抗が大となるために起こるのであつて、転位の locking の力が増大するためではないと考えられる。降伏点および引張強さに対する歪速度依存性の大小は、(2) 式の  $A$  の大小によつて示される。Table 2 に結晶粒度の異なる 3 種の試料について  $A$  の値を示す。

(3) 結晶粒度の影響

平滑試験片を用いた、静的および衝撃引張試験で、靱脆遷移温度の存在を認めたが、結晶粒度が大になるほど

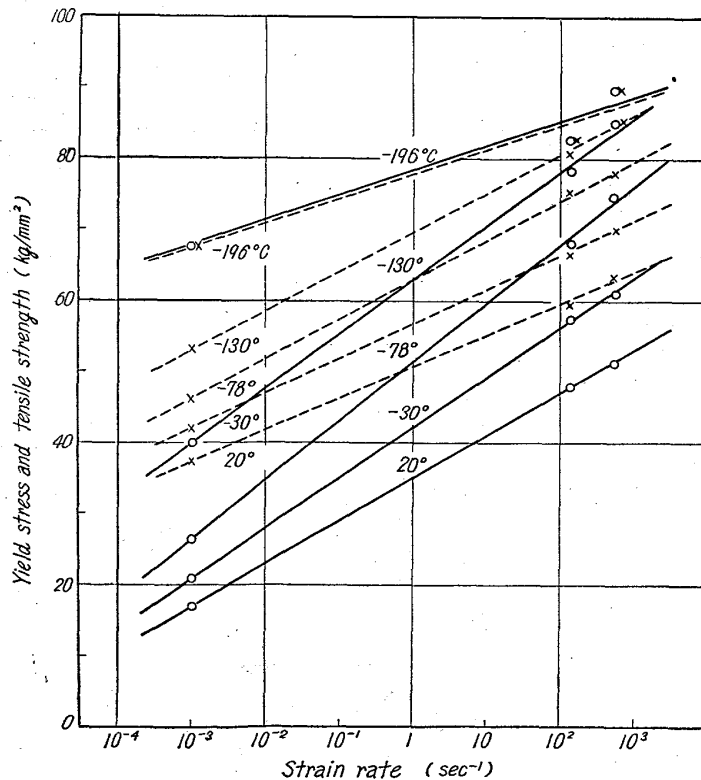


Fig. 4. The lower yield stress (—○—) and tensile strength (—×—) of specimen N1 as functions of strain rate at various temperatures.

Table 2. Values of A (kg·s/mm<sup>2</sup>) in the equation (2) for the lower yielded point (Y.P.) and tensile strength (T.S.)

Temperature	N 1		N 2		N 3	
	Y.P.	T.S.	Y.P.	T.S.	Y.P.	T.S.
20°C	6.0	4.5	6.8	3.7	6.8	4.7
30°C	7.0	4.8	7.2	4.3	7.6	5.1
78°C	8.0	5.5	7.4	5.3	8.8	6.1
130°C	7.5	5.5	8.2	6.0	10.6	8.6
196°C	3.3	3.3	3.0	3.0	3.9	3.9

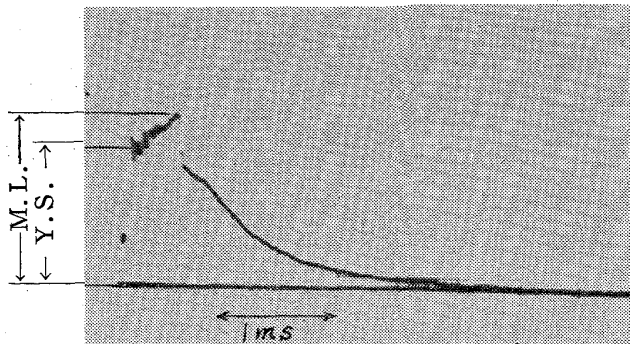


Photo. 1. A load-time curve with specimen N3 in Charpy test. Impacted at 30°C  
M.L.: Maximum load, Y.S.: Yield strength

Table 3. Yield stress at the notch root in Charpy test.

Specimen	N 1	N 3
10°C	85 kg/mm <sup>2</sup>	108 kg/mm <sup>2</sup>
30°C	75	94
60°C	66	77
100°C	61	66
130°C	58	66
160°C	58	66

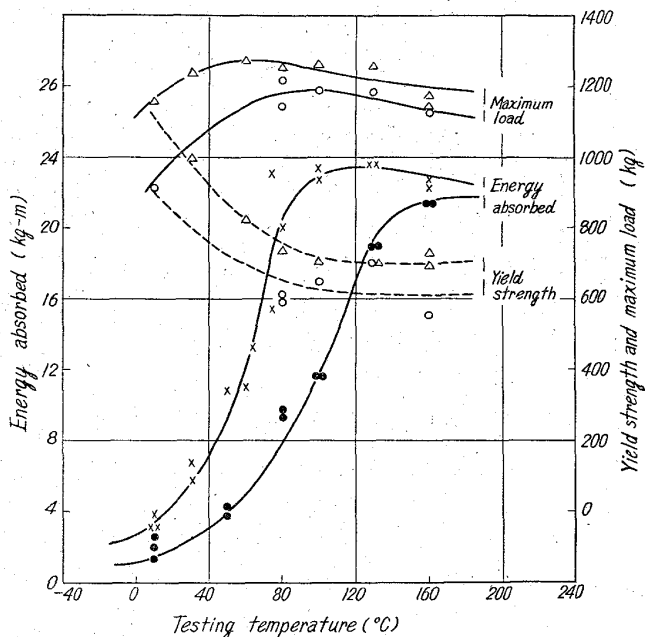


Fig. 5. Results of Charpy V notch test on specimens N1 (—●—, —○—, —○—) and N3 (—×—, —△—, —△—).

その遷移温度は上昇する(Fig. 2, 3). すなわち, 最も粒度の小さい試料 N3 に比較して, 粒度が最大である試料 N1 の伸び—温度曲線および断面収縮率—温度曲線は, 変形速度にかかわらず, それぞれ約 30°C および約 50°C 高温側に移動している. 同一試料 N1, N3 の V 切欠試験片を用いて, 標準シャルピー試験を行なった結果を Fig. 5 に示す. 横軸には試験温度, 縦軸には破断吸収エネルギー値, 最高荷重ならびに降伏荷重をとった. 降伏荷重は, 衝撃時に記録した荷重—時間曲線において, 塑性変形を開始する荷重を以つて定義した. Photo. 1 に衝撃曲げ試験で得られた荷重—時間曲線の一例と, 最高荷重および降伏荷重の定義を示す. 前記のべたごとく, N1, N3 両試料とも, 最高荷重—温度曲線は, それぞれ靱脆遷移温度域で極大値を示している. 上に定義した降伏荷重のとき, 試験片の切欠底が降伏すると考えて簡単な弾性計算, すなわち両端が自由に支えら

れたはりの中央に, 集中荷重が加わったときの skin stress の計算を行なうと, 切欠底の降伏応力は, Table 3 のようになる. 衝撃曲げ試験における遷移温度域の降伏応力は, 衝撃引張試験の遷移温度域で得られる下降伏点より若干大きい値を示すが, その温度に対する変化は極めてよく類似している. また, 吸収エネルギー曲線から, 試料 N1 は N3 より約 40°C 高い遷移温度を有していることが知られ, この値は, 上のべた引張試験における両試料の遷移温度の差と等しい. ただし, 引張試験では極めて低い温度で現われた靱脆遷移温度が, 曲げ試験では約 160°C ないし 200°C 高い温度で現われる. 本実験におけるシャルピー試験の衝撃速度は約 5m/s であるが, 衝撃速度 5 および 20m/s の衝撃引張試験に比べ, シャルピー試験がこれほど高い遷移温度を示す主な理由の一つは, 試験片の切欠底における歪速度が極度に大きいためであろう.

焼鈍軟鋼の引張諸性質は, その化学成分が一定であると, 温度, 変形速度および結晶粒度の函数として表わされる. 下降伏点も同様であつて次式のように表示できる.

$$\sigma_u = \sigma_u(T, \dot{\epsilon}, d) \dots \dots \dots (3)$$

T,  $\dot{\epsilon}$  および d はそれぞれ温度, 歪速度, 結晶粒直径である. T,  $\dot{\epsilon}$  が定まると,  $\sigma_u$  は d のみの函数(1)式で表わされる. Fig. 6 は, 横軸に結晶粒直径の平方根の逆数  $d^{-1/2}$  を, 縦軸に下降伏点  $\sigma_u$  をとり, 各試験温度で

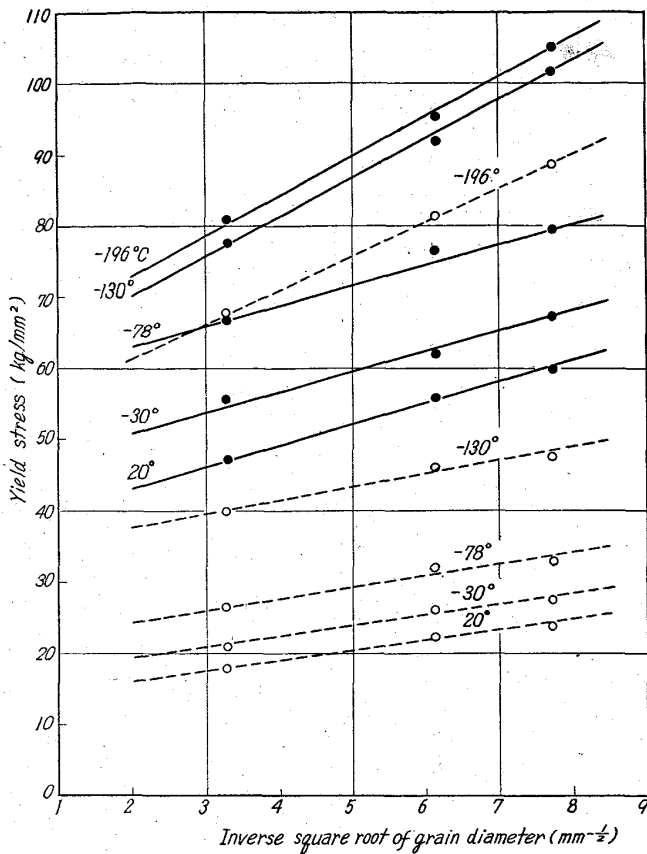


Fig. 6. Relation between lower yield stress and grain diameter at various temperatures. --○-- static, —●— impacted at 5m/s.

得られた結果を、静的、衝撃（衝撃速度 5 m/s）両引張試験について示したものである。この結果は (1) 式をよく満足している。静的引張試験では、20°C ~ -130°C まで図中の直線はそれぞれ平行であり、衝撃引張試験では、20°C ~ -78°C まで平行である。以上の温度範囲は、試験がいずれも延性破壊をする範囲であるが、それに反して、脆性破壊の起こる温度範囲では、静的、衝撃両試験で  $k$  の値は急激に増加する。Table 4 に各試験条件における  $k$  の値を示す。 $k$  は延性破壊の温度範囲では、変形速度の増加にともなつて大きくなるが、温度によつては変わらない。一方、脆性破壊の温度域では、 $k = 5$  の一定値となり、変形速度および温度のいずれにも依存しないことが Table 4 から推論できる。軟鋼の静的引張試験と同様の結果が、HAHN, COHEN, AVERBACH<sup>5)</sup> および

HESLOP, PETCH<sup>6)</sup>らによつてもみいだされており、延性破壊の場合における  $k$  の値は、本実験のそれとよく一致する。一方脆性破壊の場合、HAHN らの  $k$  の値は極めて大きく、著者らや HESLOP らの値 (= 5) の約 2 倍に達している。本実験では脆性破壊の場合、破壊強度をとつたのに反し、HAHN らは残留歪が 0.02% になる応力（双晶発生応力）を採用しており、これが脆性破壊における  $k$  の大きい差の原因であろう。

引張強さは、降伏点と同様に、結晶粒度の微細化によつて上昇するが、横軸に  $d^{-1/2}$  をとつても直線とならず (1) 式の形には従わない。

(4)  $\sigma_u = \sigma_u(T, \dot{\epsilon}, d)$  について

(1) 式は実験事実であると同時に、理論的にも誘導される。同式中の friction stress  $\sigma_i$  は、 $d = \infty$ 、すなわち単結晶の降伏応力を意味し、微細な析出物、転位、溶質原子などによつてうける自由転位の抵抗や、Peierls-Nabarro force などによる応力であり、 $k$  は粒界に堆積している転位によつて生ずる応力集中の度合を表わすとされている。降伏点の温度および変形速度依存性を考える場合、厳密なとり扱いとしては、 $\sigma_i$  と  $k$  に対するそれらの依存性を調べなければならない。Fig. 7 に  $k$  の歪速度による変化を示した。延性破壊の場合、 $k$  は温度に無関係 (Table 4) で、変形速度のみの函数である。脆性破壊になると、 $k$  は温度と変形速度のいずれか

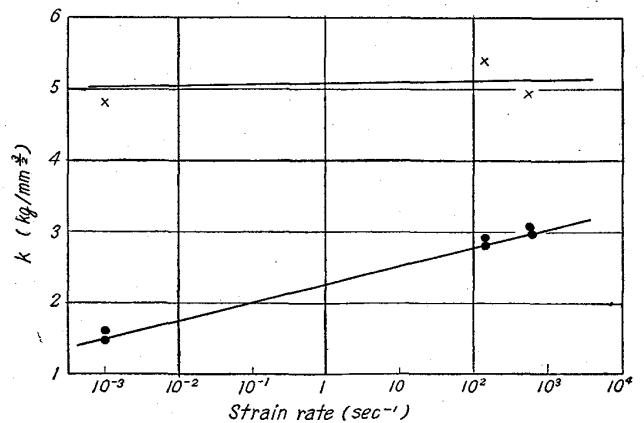


Fig. 7. Effect of strain rate on  $k$  in the equation (1). —●— ductile fractured at 20° to -78°C and —×— brittle fractured at -196°C.

Table 4. Values of  $K$  ( $\text{kg}/\text{mm}^{3/2}$ ) in the equation (1) at various test conditions.

	20°C	-30°C	-78°C	-130°C	-196°C
Static	1.50	1.51	1.65	1.90	4.80*
Impact (5m/s)	2.95	2.88	2.80	5.50*	5.55*
Impact (20m/s)	3.15	3.02	2.98	5.00*	4.90*

\* : Brittle fracture

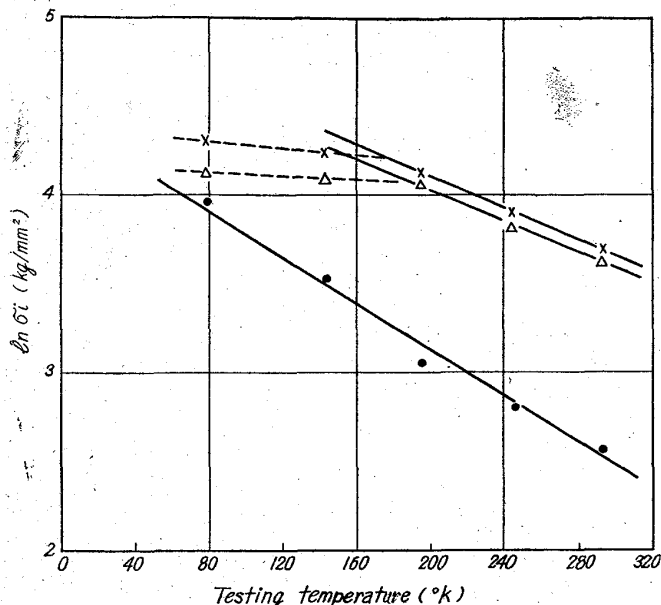


Fig. 8. Effect of temperature on friction stress  $\sigma_i$  in the equation (1). —●— static, —△— impacted at 5m/s and —×— at 20m/s.

らも影響をうけない。friction stress  $\sigma_i$  と温度  $T$  との関係を示したが、両者の間には次のごとき関係がある。

$$\sigma_i = \alpha \exp(-\beta T) \quad (\text{変形速度一定}) \dots\dots (4)$$

ここで  $\alpha$ ,  $\beta$  は定数である。この式は試料が延性破壊をする場合のみ成立つもので、脆性破壊では、図中点線で示したように  $\beta \rightarrow 0$  になり、 $\sigma_i$  は温度に依存しなくなる。静的、5m/s 衝撃、20m/s 衝撃の各引張試験について (4) 式の定数を求めると、それぞれ  $\ln \alpha = 4.4$  (kg/mm<sup>2</sup>),  $0.64 \times 10^{-2}$  (1/°K);  $\ln \alpha = 4.92$  (kg/mm<sup>2</sup>),  $\beta = 0.45 \times 10^{-2}$  (1/°K); および  $\ln \alpha = 5.0$  (kg/mm<sup>2</sup>),  $\beta = 0.45 \times 10^{-2}$  (1/°K) となる。BARON<sup>3)</sup> は歪速度  $10^2 \text{ S}^{-1}$  の引張試験で下降伏点を測定することにより、 $\ln \alpha = 23.4$  (応力の単位 dyne/cm<sup>2</sup>),  $\beta = 0.62 \times 10^{-2}$  (1/°K) を得ているが、彼の値は、本実験の静的試験で得た値と全く同じで、歪速度が  $1.4 \times 10^2 \text{ S}^{-1}$  である衝撃速度 5m/s の試験で求められた値とはかなり異なっている。 $\sigma_i$  の変形速度依存性を、横軸に歪速度の対数をとって、Fig. 9 に示した。 $\sigma_i$  は延性破壊の場合、変形速度に強く依存し、温度の低下とともにその依存性は一層著しくなる。それに反して、脆性破壊の温度では、歪速度の影響は小さくなる。

上にのべたごとく、延性破壊における降伏点  $\sigma_u$  の温度および変形速度依存性は、 $\sigma_i$  が温度と変形速度の両者により、 $k$  が変形速度のみによつて変化するというこ

とであつて、次の (5) 式によつて特徴づけることがで

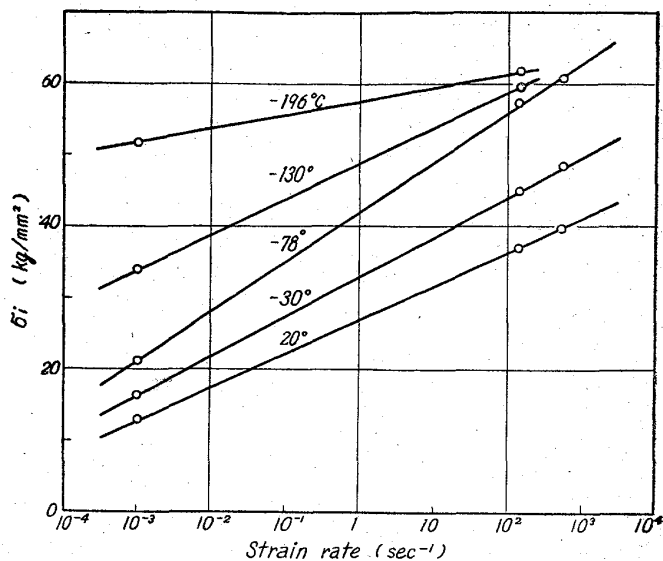


Fig. 9. Effect of strain rate on friction stress  $\sigma_i$  in the equation (1).

きる。

$$\sigma_u(T, \dot{\epsilon}, d) = \sigma_i(T, \dot{\epsilon}) + k(\dot{\epsilon}) d^{-1/2} \dots (5)$$

したがつて、Fig. 2, 3 に示した静的および衝撃引張試験の温度低下ともなる降伏点の上昇は、それぞれ  $20^\circ\text{C} \sim 130^\circ\text{C}$  および  $20^\circ\text{C} \sim -78^\circ\text{C}$  までは、 $\sigma_i$  の増加のみに起因する。また、Fig. 4 に示したように、降伏点が増加するのには、 $\sigma_i$  と  $k$  のいずれからも影響をうける結果である。さらに、同図で降伏応力を表わす直線の勾配が温度の低下とともに大きくなるのは、friction stress  $\sigma_i$  の増加によるためである。それ故、変形速度の影響でのべた推論すなわち、この勾配の温度低下による増加を、転位の運動に対する抵抗力の増大に帰したことは、正しい解釈である。

これに対して、脆性破壊における降伏強さ (脆性破壊強度) は、次式で特徴づけられるように、温度に無関係で、

$$\sigma_u(T, \dot{\epsilon}, d) = \sigma_i(\dot{\epsilon}) + k d^{-1/2} \dots\dots (6)$$

$\sigma_i$  がわずかながら変形速度依存性をもつのみである。

#### IV. 結 言

0.15% C 鋼の結晶粒度を変えて、常温から液体窒素までの温度範囲で、平滑試験片の衝撃ならびに静的引張試験をおこない、次のごとき結論を得た。

(1) 温度の低下による下降伏点と引張強さの増加は、静的および衝撃いずれの場合も、降伏点において特にいちじるしく、脆性破壊を示す温度以下では、降伏強さ (脆性破壊強度) はほとんど一定である。

(2) 平滑試験片を用いての、静的、衝撃両引張試験

で、靱脆遷移温度がみいだされた。すなわち、衝撃引張試験における遷移温度は、静的引張試験の場合より約60°C 高い。また、この遷移温度は、結晶粒度が大きくなるにつれて上昇する。試料 N1 (結晶粒平均直径: 0.091 mm) の遷移温度は N3 (同直径: 0.017 mm) のそれより約 40°C 高い。この 40°C は、N1, N3 両試料のシャルピー衝撃曲げ試験で求めた遷移温度の差に等しい。

(3) 降伏点および引張強さのいずれも、温度一定の下では、 $\sigma = A \log \dot{\epsilon} + B$  ( $\sigma$ : 降伏点あるいは引張強さ、 $\dot{\epsilon}$ : 歪速度、 $A, B$ : 定数) に従う変形速度依存性をもつが、この依存性は、引張強さに対するより、降伏点に対していちじるしい。延性破壊の温度範囲では、低温になるほど、変形速度の影響が大きくなり、特に降伏点でそれが顕著である。脆性破壊を示す温度では、降伏強さ(脆性破壊強度)の変形速度依存性は激減する。

(4) 静的、衝撃いずれの引張試験においても、下降強さ(あるいは脆性破壊強度)は、 $\sigma_u = \sigma_i + k d^{-1/2}$  の関係によくしたがう。 $k$  の値は、静的試験より衝撃試験における方が大きい。

(5) 延性破壊の温度範囲では、定数  $k$  は、温度に無関係な、変形速度のみの函数である。また friction stress  $\sigma_i$  は、温度と変形速度の函数で、変形速度一定

の下では、 $\sigma_i = \alpha \exp(-\beta T)$  なる形の温度依存性をもつ。それに反して、脆性破壊の場合には、 $k$  の値は大きくなるが、変形速度と温度の両者に無係な定数となる。また、 $\sigma_i$  は変形速度の影響をわずかにうけるのみで、温度には関係しない。

おわりに、本研究の一部は、昭和36年度文部省科学研究費によったことを附記する。

#### 文 献

- 1) たとえば, B. L. AVERBACH et alii: Fracture, p. 91
- 2) 作井, 中村, 大森, 布村: 鉄と鋼, 49 (1963), p. 55
- 3) S. SAKUI, T. NAKAMURA and M. OHMORI: Tetsu-to-Hagané Overseas, 1 (1961), p. 38
- 4) M. EVERS: Z. Metallkde, 52 (1961), p. 359
- 5) G. T. HAHN, M. COHEN and B. L. AVERBACH: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 200 (1962), p. 634
- 6) J. HESLOP and N. J. PETCH: Phil. Mag., 2 (1957), p. 649
- 7) A. H. COTTRELL: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 212 (1958), p. 192
- 8) H. G. BARON: J. Iron & Steel Inst. (U.K.) 182 (1956), p. 45

## 焼き入れ炭素鋼の水素脆化について\*

山 根 寿 巳\*\*

### On the Hydrogen Embrittlement of a Quenched Plain Carbon Steel.

Toshimi YAMANE

#### Synopsis:

To investigate the hydrogen embrittlement of a quenched plain carbon steel, the specimens of 0.3% carbon steel were annealed at 700°C, and quenched in a martemper oil and in water. Then, tensile tests of the specimens were carried out right after the specimens were made to absorb hydrogen through electrolysis. The volume of hydrogen which the quenched and annealed specimens absorbed was measured and the internal friction of the specimens before and after absorbing hydrogen was measured by a transversal vibrating method.

The experimental results were as follows:—

(1) The degrees of the hydrogen embrittlement of the specimens quenched in water, quenched in a martemper oil and annealed at 700°C after hot rolling, were 7.2, 38.5 and 42.8% respectively, where the degree of hydrogen embrittlement was shown by  $\{(\epsilon_0 - \epsilon) / \epsilon_0\} \times 100$ , and  $\epsilon_0$  was the reduction of area before hydrogen absorption,  $\epsilon$  was the minimum value of reduction of area owing to the increasing of the volume of absorbed hydrogen in the steel.

\* 昭和37年10月本会講演大会にて発表 昭和38年1月23日受付 \*\* 日立造船株式会社術研究所 工博