

## 技術報告

UDC 669.15'24'26-194.2 : 539.56.016.3 : 620.178.729 : 620.186.8

高温焼戻脆化した Ni-Cr 鋼の機械的性質におよぼす  
変形速度および温度の影響\*

中村 正久\*\*堀江 史郎\*\*・松田明教\*\*\*

Effects of Deformation Rate and Temperature on Mechanical  
Properties of Temper-embritted Nickel-Chromium Steels

Tadahisa NAKAMURA, Shirō HORIE, and Akinori MATSUDA

## Synopsis:

Temper embrittled nickel-chromium steels were subjected to the impact and static tensile tests and Charpy test in the temperature range from ambient temperature down to that of liquid nitrogen, in order to investigate the effect of deformation rate on yield and tensile strengths and the variation of ductile brittle transition temperature with carbon content and austenite grain size.

The variation of yield and tensile strengths with decrease of temperature was found to be significantly different between temper embrittled and unembrittled specimens. In temper embrittled specimens, the ductile-brittle transition phenomena similar to Charpy test was observed in the impact tensile tests and the strength of the specimens intergranularly fractured in a brittle manner was constant irrespective of austenite grain size and deformation rates.

The relationship between the transition temperature and  $\ln d^{-1/2}$  ( $d$ : austenite grain size) was linear regardless of deformation mode and rate. The slope of these lines was estimated to be  $125^\circ\text{C}/\text{cm}^{1/2}$ , which is larger than that of mild steel. This result suggests that the ductile-brittle transition phenomena of temper embrittled steels are significantly depend on austenite grain size.

## 1. 結 言

Ni-Cr 鋼に現われる高温焼戻脆性については古くからよく知られており、これまでに数多くの研究がなされてきた<sup>1)</sup>。この脆化現象は衝撃曲げ試験に特に顕著に認められるもので、通常の引張試験では脆化試料と靱性試料の相違を明確にすることはかなり困難である。したがって、焼戻脆化に関する研究は衝撃試験を中心とした報告が多く、温度-衝撃値曲線の重要性がよく認識されている。焼戻脆化試料の遷移温度は靱性試料に比較して著しく高温に現われ、合金元素、不純物元素、熱処理条件、結晶粒度等によつて影響をうけるので、これら諸因子と遷移温度の関係についての報告は多数にのほつている<sup>2)-5)</sup>。脆性破壊に対しては破壊靱性試験が重要であるが、たとえ小型試験であつても高温焼戻脆性が対象となるような場合は強度が低い余程の大型の試験片でなければならぬため、報文はほとんど見当たらない。欠陥

を予想した切欠き試験片は切欠き底部に集中した変形をうけるので、実質的には高速変形となつている。強度の解析の容易な一軸引張において高い変形速度における性質の変化を調べておくことは、切欠き試験片の性質を予想できることになるので参考になるところが大きいであろう。また、靱性試料と脆化試料の間に、高い変形速度のもとにおいて性質の相違が現れるとすれば、そのこと自体がこの脆化の基本的な性質の把握に役立つことになるであろう。

著者ら<sup>6)7)</sup>は種々鉄鋼材料について、衝撃引張試験により機械的諸性質を調べ、降伏強さおよび破壊強さの変形速度依存性ならびに延性-脆性遷移温度の結晶粒度およびひずみ速度依存性などについて報告してきた。

そこで本報告では衝撃引張試験およびシャルピー曲げ試験により、焼戻脆化が顕著に起こる代表的な鋼として知られている Ni-Cr 構造用鋼について、焼戻脆化試料および靱性試料の機械的性質に対する変形速度、結晶粒

\* 昭和 51 年 6 月 2 日受付 (Received June 2, 1976)

\*\* 東京工業大学大学院総合理工学研究科 (Graduate School of Science and Engineering at Nagatsuta, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ōokayama Meguro-ku Tokyo 152)

\*\*\* (株)豊田中央研究所 (Toyota Central Reseach and Development Laboratories Inc.)

Table 1. Chemical compositions of the specimens used (wt%).

Steels	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	As	Sn	Sb	Al
SNC 22	0.15	0.25	0.42	0.010	0.007	3.07	0.81	0.003	0.004	0.006	0.018
SNC 2	0.35	0.30	0.56	0.008	0.006	2.75	0.81	0.002	0.004	0.004	0.028
SNC 3	0.36	0.27	0.56	0.001	0.009	3.15	0.79	0.002	0.005	0.003	0.020

度などの影響について詳細に調べたので、これらの結果について述べる。

## 2. 試料ならびに実験方法

用いた試料は3種類のNi-Cr構造用鋼(SNC 2, SNC 3およびSNC 22)である。これらの化学組成をTable 1に示す。選んだ鋼はNi, Crなどの合金元素を一定とし、炭素含有量のみを変化させた。これによつて3試料の焼戻脆性の特徴すなわち、(1)降伏強さの温度ならびに変形速度依存性、(2)破壊強さの同じような挙動、(3)遷移温度の変形速度および結晶粒度による変化、などについてを把握することを目的とした。

SNC 22 および SNC 3 鋼には Table 2 に示した熱処理を施して靱性試料 (880°C 焼入, 650°C 焼戻急冷)、脆化試料 (880°C 焼入, 650°C 焼戻徐冷) ならびに等温脆化試料 (880°C 焼入, 650°C 焼戻急冷, 500°C, 100 h 再加熱急冷) を得た。また SNC 2 鋼では焼入温度 900°C 一定とし、最高加熱温度 1000~1300°C の間で変えて、オーステナイト結晶粒度の異なる焼入試料を得た。この焼入試料を 650°C に 2 h 焼戻し、半数は水冷して靱性試料とし、残りの半数は 40°C/h の冷却速度で常温まで徐冷し脆化試料とした。このような熱処理によつて結晶粒度のみが異なるソルバイト組織の試料を得た。これらの熱処理の詳細および試料記号は一括して Table 2 に示した。

引強試験は平行部直径 8 mm, 標点間距離 35 mm の JIS 4号相当の平滑試験片を、シャルピー衝撃曲げ試験にはV切欠き試験片 (JIS 4号) を用いた。静的試験はアムスラー型油圧万能試験機を衝撃引張試験には前報<sup>9)</sup>で示した回転円板型衝撃引張試験機をそれぞれ用いた。変形速度は 1 mm/min~20m/s の範囲で行ない、また試験温度は室温から液体窒素の温度範囲にわたつて行なつた。シャルピー試験を含めて荷重の測定はすべて前報<sup>9)</sup>で述べたごとく針金ひずみゲージを貼りつけたロードセルを用い、ロードセルの出力を特別の増幅機を用いないで、直接シンクロスコープに内蔵してある直流増幅機のみによつてブラウン管上に荷重-時間曲線を記録した。この方法により、静荷重による直接荷重較正を行なうことができる。試験方法および試料の冷却方法などの詳細

は前報<sup>9)</sup>で述べた通りである。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 シャルピー試験

3種類のNi-Cr鋼 (SNC 2, SNC 3およびSNC 22) に対するシャルピー試験の結果を Fig. 1~3 に示す。図には試験温度に対する吸収エネルギーのほか、荷重-時間記録から求めた最大荷重ならびに降伏荷重も示した。また各試料に対する遷移温度も表示した。この場合の遷移温度として、平均吸収エネルギー-遷移温度 (破線で表示)、作井ら<sup>10)</sup>が定義したⅣ型荷重-時間曲線\*の現われる最高試験温度 (矢印で表示) の両者で示した。

まず SNC 22 鋼および SNC 3 鋼の両鋼種におけるシャルピー試験の結果として、(1)Ⅳ型曲線出現温度および平均吸収エネルギー-遷移温度はいずれもほとんど同じ変化をし、靱性試料と脆化試料および等温脆化試料との相違は SNC 22 鋼において、72°C および 63°C, SNC 3 鋼において、105°C および 122°C であり、この結果、脆化による遷移温度の上昇は炭素含有量の高いものほど大きい。(2)靱性試料において、降伏荷重は延性-脆性遷移温度域で温度の低下とともにかなり急激に増加するが、脆化試料においてはこの傾向はあまり顕著ではない。などの相違があることがわかる。

さらに Fig. 3 には SNC 2 鋼に対して、オーステナイト結晶粒のみを変えた場合の結果を示す。靱性試料では、結晶粒度による遷移温度の変化は小さく、その相違は 20°C 程度である。一方、脆化試料に対する遷移温度の上昇は結晶粒の粗大化にともない増大し、平均吸収エネルギーの遷移温度の上昇で細粒試料 (試料 K) が 95°C, 中間試料 (試料 L) が 110°C, 粗粒試料 (試料 N) においては 182°C となつており、焼戻脆化は結晶粒の粗大化によつて顕著になる。吸収エネルギー曲線は結晶粒の粗大化により最大吸収エネルギーは小さくかつ曲線の勾配はなだらかになる。さらに降伏荷重ならびに最大荷重に関して、靱性試料では延性-脆性遷移温度域で両荷重とも温度の低下とともに急激に増加し、脆性破壊強さ

\* 種々の温度で試験した場合に得られる荷重-時間曲線は5つの型に分けることができる。この内、Ⅳ型の曲線とは脆性クラックの発生のために、曲線上に急激に荷重降下が観察される場合の曲線と定義した。

Table 2. Heat treatments, states and grain diameter of specimens used.

Specimen	Steels	Heat treatment	States	Grain diameter (mm)	JIS G.S. No
A	SNC 22	880°C 0.Q-650°C/2h S.C	Temper embrittled		
B	SNC 3				
C	SNC 22	880°C 0.Q-650°C/2h W.Q	Tough		
D	SNC 3				
E	SNC 22	880°C 0.Q-650°C/2h W.Q 550°C/100h W.Q	Isothermally embrittled		
F	SNC 3				
K	SNC 2	1 000°C/0.5h-900°C/0.5h 0.Q 650°C/2h S.C	Temper embrittled	0.025	8
J	SNC 2				
L	SNC 2	1 150°C/0.5h-900°C-0.5h 0.Q 650°C/2h S.C	Temper embrittled	0.05	6
M	SNC 2				
N	SNC 2	1 300°C/0.5h-900°C-0.5h 0.Q 650°C/2h S.C	Temper embrittled	0.25	-2
O	SNC 2				
		1 300°C/0.5h-900°C-0.5h 0.Q 650°C/2h W.C	Tough		

O.Q : Oil quench, W.Q : Water quench, S.C : Slow cool

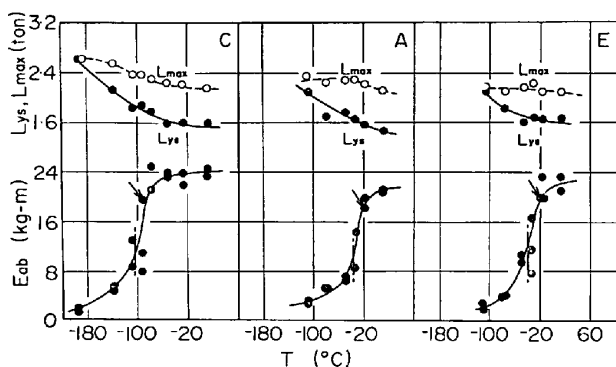


Fig. 1. Results of Charpy V-notch test, SNC22 steels. Eab: Energy absorbed, Lys: Yield strength, Lmax: Maximum load, C: Tough state, A: Temper embrittled, E: Isothermally embrittled.

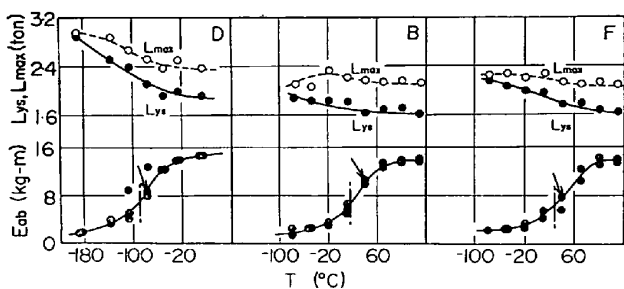


Fig. 2. Results of Charpy V-notch test, SNC 3 steels. Eab: Energy absorbed, Lys: Yield strength, Lmax: Maximum load, D: Tough state, B: Temper embrittled, F: Isothermally embrittled.

が高いことを意味している。またそれらの温度に対する変化は結晶粒度によつて変化しない。このことは前報<sup>6)</sup>における調質軟鋼の結果と類似しており、ソルバイト組織を持つ鋼の特徴であると考えられる。一方、脆化試料の降伏荷重ならびに最大荷重は脆性破壊温度域においては一定になるかあるいは粗粒試料では低下する傾向にさえある。これらの結果の多くは Fig. 1 および 2 に示し

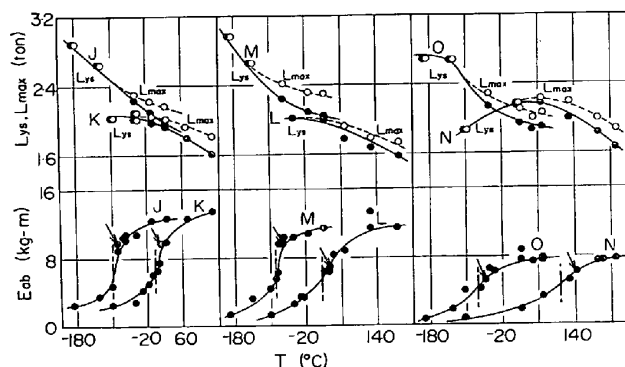


Fig. 3. Results of Charpy V-notch test, SNC 2 steels. Eab: Energy absorbed, Lys: Yield strength, Lmax: Maximum load, J, M, O: Tough state, K, L, N: Temper embrittled, J, K: Grain diameter of 0.025 mm, M, L: 0.05 mm, O, N: 0.25 mm.

た炭素含有量の相違にもとづく結果とよく類似している。すなわち、結晶粒の粗大化と炭素含有量の増加は焼戻脆化現象を顕著にし、これらの因子は脆性破壊強さを低下させているものである。事実、焼戻温度によつて脆化の現れ方が異なることは古くから認められており、オーステナイト結晶粒の粗大化により遷移温度が高温側に移動し、焼戻脆化を促進させることは多くの研究者が指摘していることである<sup>2)3)</sup>。

### 3.2 衝撃引張試験

焼戻・脆性鋼を引張試験によつて調べた研究は少なく、脆化の極めて強く進んだ試料について、破断時に縦方向の割れを生ずることが報告されているが<sup>11)</sup>一般には通常の引張試験では靱性および脆化した両試料間にはほとんど明確な相違を認めることはできない。しかし、低温かつ高速変形下で試験した場合には引張試験においても靱性試料と脆化試料の間に相違を認めることができる。

Fig. 4 および 5 は SNC 22 鋼について、静的試験およ

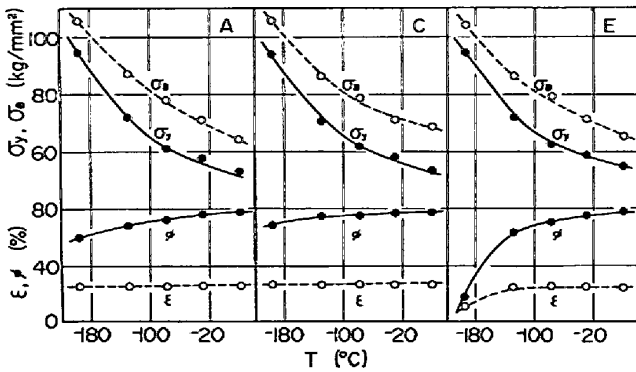


Fig. 4. Effect of temperature on the tensile properties of SNC 22 steels for static test.  $\epsilon$ : Elongation,  $\phi$ : Reduction of area,  $\sigma_y$ : Yield stress,  $\sigma_B$ : Tensile strength, A: Tempet embrittled, C: Tough state, E: Isothermally embrittled.

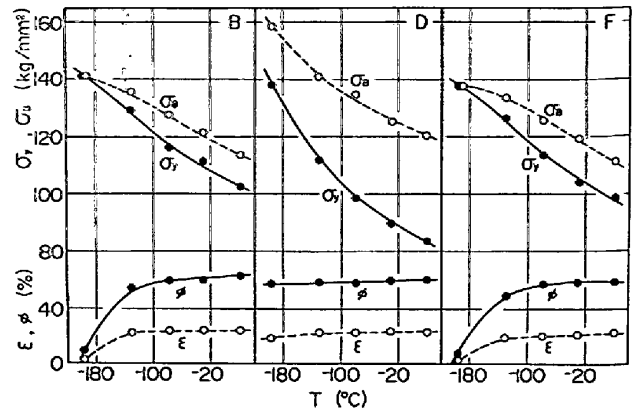


Fig. 7. Effect of temperature on the tensile properties of SNC 3 steels for impact test at 5m/s.  $\epsilon$ : Elongation,  $\phi$ : Reduction of area,  $\sigma_y$ : Yield stress,  $\sigma_B$ : Tensile strength, B: Temper embrittled, D: Tough state, F: Isothermally embrittled.

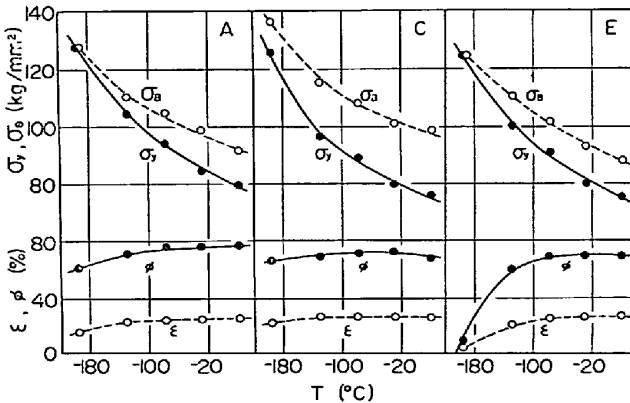


Fig. 5. Effect of temperature on the tensile properties of SNC 22 steels for impact test at 5m/s.  $\epsilon$ : Elongation,  $\phi$ : Reduction of area,  $\sigma_y$ : Yield stress,  $\sigma_B$ : Tensile strength, A: temper embrittled, C: Tough state, E: Isothermally embrittled.

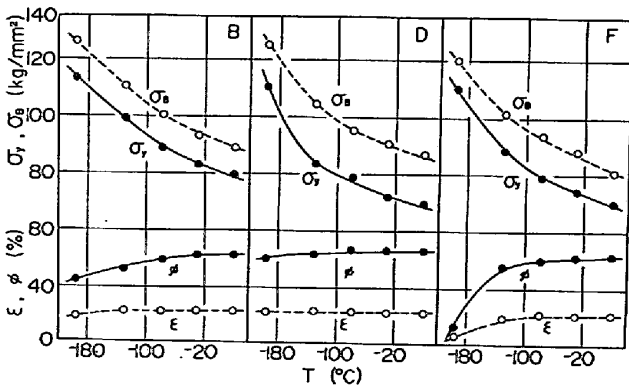


Fig. 6. Effect of temperature on the tensile properties of SNC 3 steels for static test.  $\epsilon$ : Elongation,  $\phi$ : Reduction of area,  $\sigma_y$ : Yield stress,  $\sigma_B$ : Tensile strength, B: Temper embrittled, D: Tough state, F: Isothermally embrittled.

び引張速度 5 m/s で試験した場合の引張諸性質の変化を温度に対して示したものである。まず静的試験について、靱性試料および脆化試料の降伏強さおよび引張強さはほとんど同じであり、さらにその温度による変化も両試料間に相違は認められない。また絞りおよび伸びは試験温度の低下にともないわずかに減少するが靱性試料と脆化試料とは差はない。しかし等温脆化試料(試料 E)の変形能は  $-196^{\circ}\text{C}$  において急激に低下し、遷移現象の存在を認めることができる。一方、引張速度 5 m/s における衝撃試験の結果では、強度に関して、降伏強さは脆化試料が靱性試料よりも大きい値を示し、引張強さでは降伏強さとは逆に靱性試料が脆化試料よりも大きい値を示す。すなわち、後者は前者よりも降伏比が大きいことを意味している。また変形能に関しては、静的試験の場合と同様に、等温脆化試料(試料 E)に対する伸びおよび絞りが  $-196^{\circ}\text{C}$  において急激に低下することがわかる。

Fig. 6 および 7 は SNC 3 鋼に対する結果である。SNC 22 鋼に比較して炭素含有量が高いので全体的に延性の低下および強度の増加はあるが、温度に対する引張諸性質の変化は両鋼種ともほぼ同じ傾向を示している。これらの主な結果は (1) 等温脆化試料(試料 F)では明瞭な遷移現象が認められさらに脆化試料(試料 B)においても静的試験の場合には低温で延性の低下がある。(2) このような延性の低下がある温度範囲で、引張強さの温度依存性は小さくなる。(3) 靱性試料と脆化試料では著しく降伏比が異なる、などがあげられる。

SNC 2 鋼に対する結果を Fig. 8~10 に示す。靱性試料と脆化試料について 3 種類の結晶粒度に対する変化を

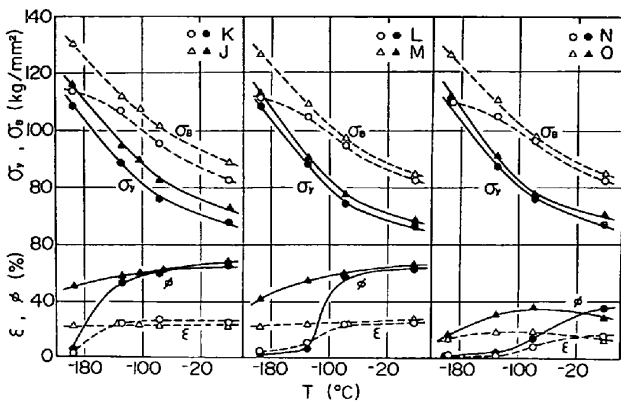


Fig. 8. Effect of temperature on the tensile properties of SNC 2 steels for static test.  $\epsilon$ : Elongation,  $\phi$ : Reduction of area,  $\sigma_y$ : Yield stress,  $\sigma_B$ : Tensile strength,  $K, J$ : Grain diameter of 0.025 mm,  $L, M$ : 0.05 mm,  $N, O$ : 0.25 mm,  $K, L, M$ : Temper embrittled,  $J, M, O$ : Tough state.

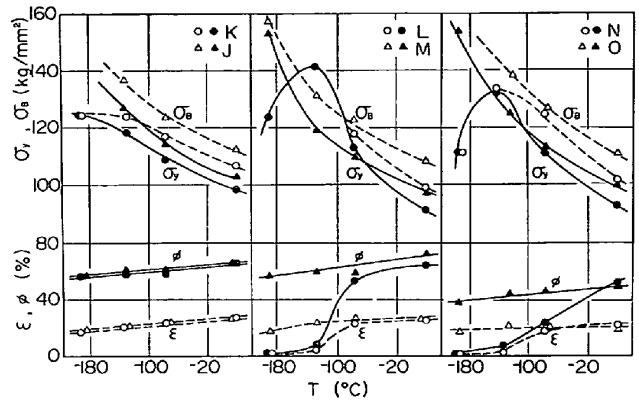


Fig. 10. Effect of temperature on the tensile properties of SNC 2 steels for impact test at 20m/s.  $\epsilon$ : Elongation,  $\phi$ : Reduction of area,  $\sigma_y$ : Yield stress,  $\sigma_B$ : Tensile strength,  $K, J$ : Grain diameter of 0.25 mm,  $L, M$ : 0.05 mm,  $N, O$ : 0.25 mm,  $K, L, M$ : Temper embrittled,  $J, M, O$ : Tough state.

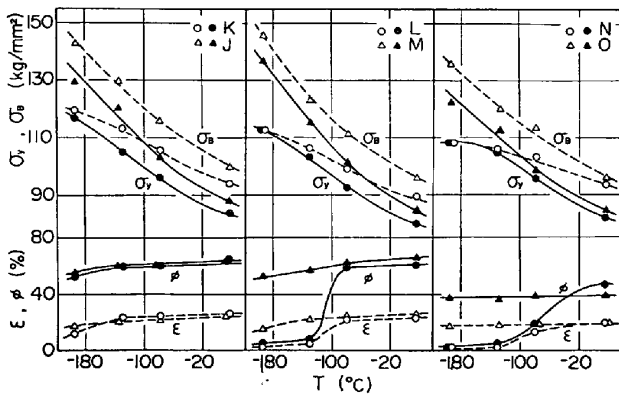


Fig. 9. Effect of temperature on the tensile properties of SNC 2 steels for impact test at 5m/s.  $\epsilon$ : Elongation,  $\phi$ : Reduction of area,  $\sigma_y$ : Yield stress,  $\sigma_B$ : Tensile strength,  $K, J$ : Grain diameter of 0.025 mm,  $L, M$ : 0.05 mm,  $N, O$ : 0.25 mm,  $K, L, M$ : Temper embrittled,  $J, M, O$ : Tough state.

調べたものである。この結果、Fig. 8に示した静的試験においても靱性・脆化両試料とでは各結晶粒度とも著しい相違が存在する。すなわち、脆化試料では温度の低下にともない前述したシャルピー試験で観察された場合と同様の延性-脆性遷移温度域の存在が認められ、この遷移温度は結晶粒の粗大化にともない高温側に移動する。それぞれの遷移温度\*は試料Kでは $-168^{\circ}\text{C}$ 、試料Lでは $-112^{\circ}\text{C}$ 、試料Nでは $-64^{\circ}\text{C}$ である。また粗粒試料では靱性・脆化両試料とも著しく変形能が低下する。降伏強さおよび引張強さに関しては、脆化試料よりも靱性

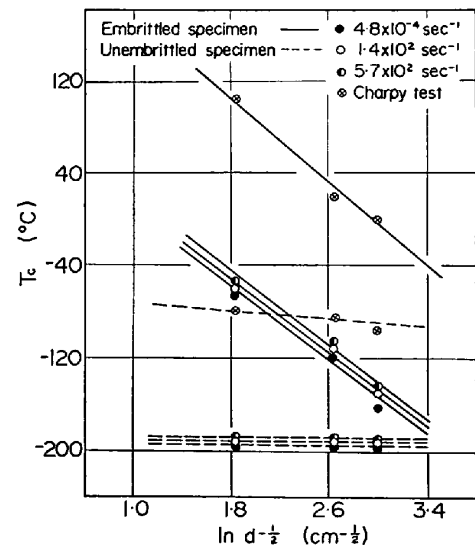


Fig. 11. Variation of transition temperature with grain size as functions of strain rates.  $T_C$ : Transition temperature,  $d$ : Grain diameter.

試料の方がわずかに高い。また脆性破壊温度域における脆化試料の引張強さの温度依存性は著しく小さくなり、降伏強さと引張強さはほぼ等しくなる。 $-196^{\circ}\text{C}$ では、いずれの脆化試料に対しても完全な脆性破壊を起し、この時の破壊強さはオーステナイト結晶粒には関係なく約 $110\sim 112\text{ kg/mm}^2$ と一定となる。一方、靱性試料では降伏強さおよび引張強さとも、全温度域にわたって高い温度依存性を有している。これらの結果から、結晶粒の粗大化は焼戻脆化度を促進させるものでシャルピー試験の結果ともよく一致している。

Fig. 9は衝撃引張速度 5 m/sの結果である。変形速度

\* この場合の遷移温度としては延性領域における絞りの50%に相当する温度とした。

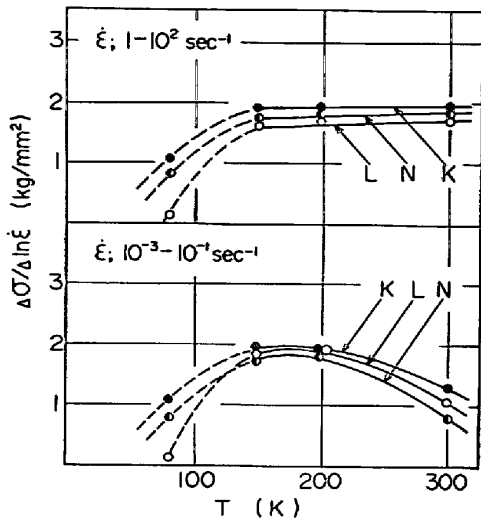


Fig. 12. Effect of temperature on the strain rate sensitivity of flow stress of embrittled specimens.  $\Delta\sigma/\Delta\ln \dot{\epsilon}$ : Strain rate sensitivity,  $T$ : Temperature,  $K$ : Grain diameter of 0.025 mm,  $L$ : 0.05 mm,  $N$ : 0.25 mm.

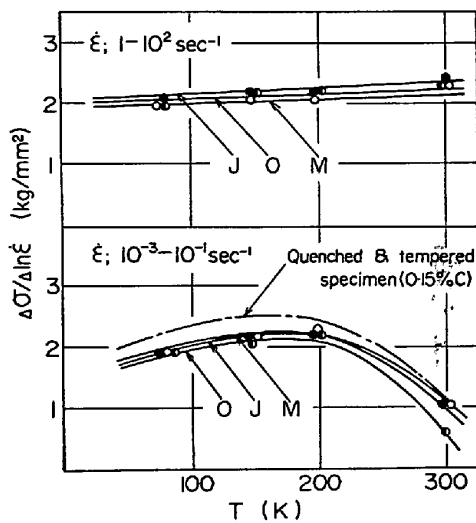


Fig. 13. Effect of temperature on the strain rate sensitivity of flow stress of unembrittled specimens.  $\Delta\sigma/\Delta\ln \dot{\epsilon}$ : Strain rate sensitivity,  $T$ : Temperature,  $J$ : Grain diameter of 0.025 mm,  $M$ : 0.05 mm,  $O$ : 0.25 mm. Chained curve shows results of quenched-and-tempered 0.15% C steel.

の増加により、靱性試料と脆化試料との相違はさらに顕著になる。脆化試料の脆性破壊強さは結晶粒を異にするいずれの試料に対しても  $110 \sim 118 \text{ kg/mm}^2$  であり、これは静的試験における値とほぼ等しく、脆化試料に対する破壊強さは変形速度にはほとんど依存しないことがわかる。一方、靱性試料では  $-196^\circ\text{C}$  でも、いずれの試料とも延性状態を保持しており遷移温度はさらに低い領域にあり、破壊強さは脆化試料よりもかなり高い値であ

る。伸びおよび絞りにおいても、靱性・脆化両料間で静的試験の場合と同様に著しい相違がある。脆化試料における遷移温度は試料  $K$  では  $-160^\circ\text{C}$ 、試料  $L$  では  $-108^\circ\text{C}$ 、試料  $N$  では  $-68^\circ\text{C}$  である。これらの遷移温度は破壊強さと同様に変形速度には依存しない。この結果はひずみ速度によつて遷移温度が著しく変化する焼なまし軟鋼の場合<sup>7)</sup>とは異なり、ソルバイト組織を持つ鋼に対する顕著な特徴の一つであろう。

Fig. 10 は衝撃引張速度  $20\text{m/s}$  の結果である。脆化試料(試料  $L$  および  $N$ ) では、破壊強さは試験温度の低下に対して複雑な変化を示す。延性-脆性遷移温度域で破壊強さは試験温度の低下に対して急激に増加するが、巨視的な塑性変形がまったく認められない完全な脆性破壊が起こる  $-196^\circ\text{C}$  では、破壊強さは逆に急激に低下する。このような低温かつ高速変形下では強度が急激に低下する現象は鋭い切欠きを有する試験片を低温で試験した場合によく認められている低応力破壊現象<sup>12)</sup>と類似しており、脆性クラックの伝播にともなつて発生するクラック先端における塑性変形量は極めて小さく、このような場合の強さは脆性きれつの伝播応力によつて決定できるものと考えられる。また、絞りおよび伸びについては靱性・脆化両試料間で静的および衝撃速度  $5\text{m/s}$  の場合と同様に著しい相違が認められる。

### 3.3 延性-脆性遷移温度

Fig. 11 は遷移温度とオーステナイト結晶粒との関係を示す。この結果は脆化試料の遷移温度が結晶粒径に強く依存することを表わしており、焼なまし軟鋼などにおいてフェライト結晶粒径を  $d$  とした場合、 $\ln d^{-1/2}$  または  $d^{-1/2}$  と遷移温度  $T_c$  とが直線関係<sup>13)</sup>にあることをよく満足している。この場合の直線の勾配は約  $80^\circ\text{C}/\text{cm}^{1/2}$  と一定になり、したがつて切欠き試験片を想定した場合を考えると、切欠きの形状、すどき等によつて変化しない定数となることを意味する。しかし、この勾配の値は中村ら<sup>14)</sup>が焼なましキルド軟鋼について求めた値  $50^\circ\text{C}/\text{cm}^{1/2}$  に比べるとかなり大きい値であり、旧オーステナイト結晶粒界で破壊が生じる焼戻脆性試料の遷移温度は結晶粒度に著しく依存する現象であるといふことができる。

### 3.4 降伏強さおよび破壊強さの変形速度依存性

Fig. 12 および 13 は SNC2 鋼に対する降伏強さの変形速度依存性 ( $\Delta\sigma/\Delta\ln \dot{\epsilon}$ ) を試験温度に対して示したものである。この結果、変形速度に対する降伏強さの変化は調質軟鋼 (Fig. 13 に破線を表示) における場合<sup>7)</sup>とほぼ類似の傾向を示しており、特に靱性試料においてよく一致する。すなわち、低ひずみ速度域 ( $10^{-3} \sim 10^{-1}$

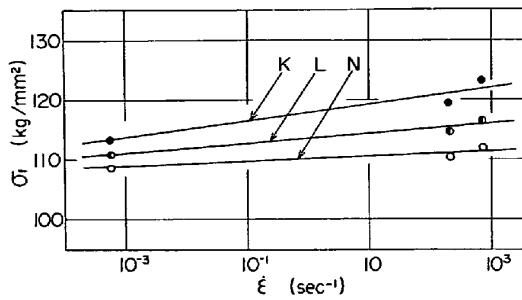


Fig. 14. Strain rate dependence of brittle fracture strength for embrittled specimens.  $\sigma_f$ : Brittle fracture strength,  $\dot{\epsilon}$ : Strain rate, K: Grain diameter of 0.025 mm, L: 0.05 mm, N: 0.25 mm.

$\text{sec}^{-1}$ ) では  $\Delta\sigma/\Delta\ln \dot{\epsilon}$  は室温では小さいが温度の低下とともに増加し 200K 近傍で最も大きくなる。一方、高ひずみ速度域 ( $1 \sim 10^2 \text{sec}^{-1}$ ) では温度に依存せずほぼ一定の値を示す。しかし脆化試料においては Fig. 12 に示すように、低温で  $\Delta\sigma/\Delta\ln \dot{\epsilon}$  は急激に低下しており、これは試料が脆性破壊を起こすためによるものである。これらの結果から、焼戻脆化鋼の降伏強さの変形速度に対する変化はソルバイト組織を持つ調質軟鋼の場合とほぼ類似の変化を示すものと考えてよいであろう。

Fig. 14 は脆化試料について、低温で脆性破壊を起こす場合の破壊強さの変化をひずみ速度に対して示したものである。結晶粒度によつて若干の相違はあるが破壊強さのひずみ速度に対する依存性は焼なまし軟鋼と比較すると著しく小さい。焼鈍軟鋼では、へき開破壊を起こすが、結晶粒界破壊を起こす焼戻脆性鋼では破壊強さはひずみ速度にほとんど依存しないことがわかる。さらに調質軟鋼においても、結晶粒界にそつて脆性破断するような場合には強さはひずみ速度によつて変わらないことがすでに確認されており、結晶粒界強さはひずみ速度に依存しないものといえる。

#### 4. 結 言

焼戻脆性が顕著に起こる鋼として知られている Ni-Cr 構造用鋼を用いて、種々の靱性・脆化両試料に対する降伏強さおよび引張強さの変形速度、温度依存性をシャルピー試験および衝撃引張試験により調べた。さらに炭素含有量、オーステナイト結晶粒度にもとづく遷移温度あるいは変形速度の変化についても検討した。

得た結果を要約すると次のようになる。

(1) シャルピー試験の結果として、脆化による遷移温度の上昇は高炭素鋼ならびに結晶粒の粗大なものほど著しく、これらの因子は焼戻脆化現象を顕著にする。さらに荷重-時間曲線から求めた降伏荷重は脆化試料の脆性破壊領域では温度によつてほとんど変化しなくなる。

(2) 衝撃引張試験の結果として、特に結晶粒度を変えた SNC 2 鋼では靱性・脆化両試料に著しい相違が認められた。すなわち、脆化試料では温度の低下にともない、シャルピー試験で観察されると同様の延性-脆性遷移現象が存在し、この遷移現象は結晶粒の粗大化にともない高温側に移動するが、変形速度によつては変化しない。また降伏強さおよび引張強さに関しては、脆化試料では脆性破壊温度域における引張強さの温度依存性は著しく小さく、降伏強さと引張強さはほぼ等しくなる。この時の強さはオーステナイト結晶粒および変形速度に依存せず約 110~118  $\text{kg/mm}^2$  と一定である。一方、靱性試料では、降伏強さおよび引張強さとも室温から  $-196^\circ\text{C}$  の温度域にわたつて大きな温度依存性を示している。

(3) 遷移温度と旧オーステナイト結晶粒径の平方根の対数との間には直線関係が成立し、とくに脆化試料のこの直線の勾配は  $80^\circ/\text{cm}^{1/2}$  という大きい値であり、これまでに報告されている同様の実験値の大きい範囲になり、焼戻脆化試料の遷移温度は結晶粒度に強く依存する。

(4) 脆化試料の脆性破壊強さは変形速度および結晶粒にはほとんど依存しない。同様の結果は調質軟鋼においても認められており、結晶粒界破壊を起こす場合の破壊強さはへき開破壊の場合と異なり、変形速度および結晶粒径には依存しないものと考えられる。

#### 文 献

- 1) たとえば C. J. McMAHON JR: Temper embrittlement in steel ASTM Special publ.407(1967)
- 2) B. C. WOODFINE: JISI, 173 (1953), p. 229, p. 240
- 3) L. D. JAFFE: Welding J., 34 (1955), p. 1412
- 4) L. D. JAFFE and D. C. BUFFUM: J. Metal, 5 (1953), p. 998
- 5) R. H. GREAVES and J. A. JANES: JISI, 111 (1925), p. 231
- 6) T. NAKAMURA, S. SAKUI, and A. MATSUDA: Proc. 11th Jap. Congr. Mat. Res., (1968), p. 82
- 7) T. NAKAMURA and A. MATSUDA: Proc. ICSTIS Suppl. Trans. ISIJ, 11 (1971), p. 982
- 8) T. TSUMURA, et al: Proc. 3rd. Jap. Congr. Test. Mat., (1960), p. 95
- 9) 作井誠太, 中村正久, 大森正信: 鉄と鋼, 49 (1963), p. 996
- 10) 作井誠太, 中村正久, 大森正信: 鉄と鋼, 46 (1960), p. 140
- 11) F. C. LEA and R. N. ARNOLD: Proc. Inst. Mech. Eng. (London), 131 (1935), p. 539
- 12) たとえば J. F. KNOTT and A. H. COTTRELL: JISI, 201 (1963), p. 249
- 13) J. HESLOP and N. J. PETCH: Phil. Mag., 1 (1956), p. 866, 2 (1957), p. 649, 3 (1958), p. 1128
- 14) 作井誠太, 中村正久, 大森正信, 大宝雄蔵: Proc. 8th Jap. Congr. Test. Mat., (1965) p. 65