

討 26 鉄と低炭素鋼の flow stress の温度依存性について

東京大学工学部 冶金学科 五弓勇雄 ○本原諄二
東大大学院 工学系研究科 林 史

はじめに

鉄や低炭素鋼の flow stress の低温における温度依存性に関して、従来次のような見解が発表されている。

1. flow stress の低温における温度依存性は、鉄の結晶固有の運動転位に対する摩擦力の温度依存性をあらわす。

2. flow stress の温度依存性は、格子中に存在する格子間不純原子、N、C 他、の量によって変化する。これは、flow stress 中に N や C の作る摩擦力に依存する成分があるからである。

3. flow stress の温度依存性は一般に合金元素の固溶により小さくなる。これは転位に対する結晶の作り出す摩擦力が固溶原子の応力場によって乱され小さくなるためである。

多くの研究者は上記のそれぞれの見解に合致すると思われるような実験結果を発表しているが、それらの多くは次のような問題を有している。

1. 多くの flow stress の温度依存性のデータはいわゆる isothermal な試験で得られたものであって、differential な試験によるものではない。

2. とくに下降伏桌の温度依存性に関して検討する際、発生し伝播しつつある Lüders 帯の数の温度による変化を問題にしていない。

3. 不純原子や合金原子の固溶に伴う flow stress の温度依存性の変化は明白であるが、それからにり面における転位運動に対する摩擦力の変化に対するこれらの固溶原子の寄与に関しては不分明な点が多い。

4. 常温附近でかなり速く移動できる格子間不純原子のある場合、とくに differential な試験において、ひずみ時効の影響が充分注意されていないことが多い。

5. 変形の素過程についての熱力学的解析の有用性について転位論的に未だ充分検討されていない。また、現象論的に実験から求められた素過程の転位論的検討も、したがって、充分な裏りをもたらずまでは至っていない。これはとくに3項の問題と関連している。

そこで、我々は flow stress の温度とひずみ速度依存性を測定し、本討論会ですでに報告した方法、(同一 flow stress におけるひずみ速度と温度のプロットから素過程の活性化エネルギーを求める)により、変形過程の活性化エネルギーの flow stress 依存性を求め、この関係に対する種々の処理の影響を求め、これからはじめに述べた三問題について検討することになっている。したがって上記の実験における問題5は本研究においては扱かわれない。

この方法にもとずいて、我々は鉄と炭素鋼の flow stress の低温における温度依存性について従来より実験により以下の見解に到達している。

1. 再電解鉄程度の純度の鉄に炭素と $< 1 \text{ ppm} \sim 700 \text{ ppm}$ 加えた試料(多結晶)に於て、低温における flow stress σ は温度に依存しない成分 σ_a と温度に依存する成分 σ_t とに分けられ、 σ_t が少なくとも 2 kg/mm^2 と 25 kg/mm^2 との間では、活性化エネルギー $U(\sigma_t)$ は試料によらず

$$U(\sigma_t) = 0.91 - 0.14 \ln \sigma_t \quad (\text{eV}) \quad (1)$$

であらわされる。

2. $2 < \sigma_t < 25$ では 素過程は単一である。

3. (1) 式を用い、素過程の前指数部の係数と $\dot{\epsilon}$ 、ひずみ速度を $\dot{\epsilon}$ とすると σ_t は

$$\sigma_t = e^{6.5} (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{0.14/RT} \quad 2 \text{ kg/mm}^2 < \sigma_t < 25 \text{ kg/mm}^2 \quad (2)$$

であらわされ、これは Stein 他の高純度鉄の温度依存性ともよく一致した。

しかしながら、ここにいくつかの問題点がある。

まず試料がすべて徐冷試料であること。— 格子間不純原子量と変化させたことにならない。

固溶体軟化現象とも関連して、(2) 式と高ひずみ速度の冷間加工における変形抵抗の推定に使用できる Al や Mn の量の限界がわからない。

酸素の存在の影響についてはふれていない。

我々は本報告で上にあげたいくつかの問題に関する実験結果を中心に鉄中の転位の応力下の挙動について検討する。

実験方法と実験試料

flow stress は引張試験で求める。すべて 0°C であるひずみ（降伏点伸び以上）まで引張り、それ以下の温度で再引張りし、 σ_t の温度による変化を求めた。

必後に述べるが、 700°C で加熱後氷水に焼入れドラアイスに保存した試片は、 0°C において加工後再引張りするまでの間にひずみ時効が起ってしまうことがわかったので、この場合は -30°C で前ひずみを与えることにした。

引張試験は TOM 200C (インストロン型) を用いた。また冷媒はエタールアルコールとイソペンタン及び液体酸素を用いた。

実験試料は表 1 に示す化学成分をもち、それぞれ以下の過程で試片とした。

表 1 実験試料の化学成分

化学成分(%)	C	N	O	P	S	Mn	Al	Si	Cu	Al ₂ O ₃
純鉄	<0.005	—	<0.0002	<0.004	<0.005	0.005	0.005	0.006	<0.004	—
低炭素鋼	0.019	0.007	0.0034	0.010	0.011	0.07	0.048	tr.	0.07	0.019

純鉄試片の作製：電解鉄を高周波炉で大気溶解した後、長時間 H_2 気流中に保持し冷却する。この試料は水素を多量に含みきわめて冷間加工しにくいので、ダイナパックで冷間押出しを行い $10\text{mm}\phi$ の棒にし以後線引きによって $2\text{mm}\phi$ の線にした。これを $700^\circ\text{C} \times 1\text{hr.}$ 4タンととも真空焼鈍を行ない、水素を除き、酸素が入らないようにして、以後炉冷した。

低炭素鋼試片の作製： 3mm の熱間圧延板を 0.7mm まで冷間圧延した。これを 720°C の鉛浴中で30分加熱したのち氷水に焼入れ、半数はドラアイスとともに貯え、他の半数は $200^\circ\text{C} \times 1\text{hr.}$ の焼戻し処理を行なった。引張試片は平行部長 30mm 、中 6mm 、全長 70mm 、つかみ部の中 10mm である。

実験結果

純鉄： 0°C で前ひずみを与え、 0°C 以下の各温度で再引張りしたときの flow stress の σ_t 成分と温度との関係を図1に示す。 $\sigma_t = 25 \text{ kg/mm}^2$ 近傍で小さな折れがみとめられる。 -90°C 以下でひずみ速度を10倍上げたときの σ_t の値もプロットし、これらから活性化エネルギーと σ_t との関係とを求めた。この点については後に検討する。

低炭素鋼焼入れ材： 0°C で前ひずみを与え 540°C 後に 0°C で再引張りしたところ 1 kg/mm^2 の flow stress の上昇をみたので、flow stress の上昇量と 0°C における変形後の保持時間との関係をもとめた。その

結果をFig. 2に示す。この過程における flow stress のひずみ速度依存性を求め (2) 式を仮りに用いて、 $\dot{\epsilon}_0$ と σ_a との時間変化をもとめた結果がFig. 3であるが、これから時効の初期においては $\dot{\epsilon}_0$ の急激な減少があるだけで、 σ_a にはほとんど変化のないことがわかる。そこで、C, N の Diffusivity が、100 分の1程度になる -30°C で前ひずみを与え、より低温で再引張りしたときの σ_a と温度との関係をFig. 4に示す。これから、Fig. 1 の $\sigma_a \approx 25 \text{ kg/mm}^2$ における σ_a - 温度曲線における折点はやはりはっきりみとめられる。

低炭素鋼焼入れ焼戻し材: 0°C 及び 20°C においても前ひずみ後のひずみ時効の影響がみとめられなかったので、 0°C で前ひずみを与えた後、 $+20^\circ\text{C}$ 以下の各温度で再引張りを行った。この場合の σ_a と温度との関係をFig. 5に示す。この場合にも $\sigma_a \approx 25 \text{ kg/mm}^2$ において折点がみとめられる。

実験結果のまとめ: 以上から $\sigma_a \approx 25 \text{ kg/mm}^2$ より σ_a が高くなると $\sigma_a < 25 \text{ kg/mm}^2$ の場合と異なった原因が flow stress を決定していると予想される。Fig. 1 で純鉄の場合に求められた変形の活性化エネルギーと応力 σ_a との関係をFig. 6に示す。Fig. 7 にすべての試片についての $\ln \dot{\epsilon}_0$ - T の関係を示す。Fig. 6 より $\sigma_a \approx 25 \text{ kg/mm}^2$ を境としてそれ以上では $\dot{\epsilon}_0$ が 10 分の1程度に減っていることがわかる。

$\sigma_a < 25 \text{ kg/mm}^2$ の範囲においては、変形の活性化エネルギーの応力依存性は格子間不純原子量にも、低炭素鋼に含まれる程度の不純原子の存在によっても変化しないことがみとめられる。従来、格子間不純原子の固溶量を変化させた場合、低応力において一すなわち比較的常温に近いところで、flow stress の温度依存性とひずみ速度依存性に異常がみとめられることがしばしば報告されるが、これは $\dot{\epsilon}_0$ の温度変化がかなり迅速におこるひずみ時効によって生ずるためであると理解される。

結論

(1) 多結晶鉄と低炭素鋼においては、低温における変形の過程に対する各種不純原子の影響はほとんどみとめられない。みかけの温度依存性の変化は、 $\dot{\epsilon}_0$ の変化によるものと思われる。

(2) $\sigma_a > 25 \text{ kg/mm}^2$ に対して (2) 式は用いることができない。純鉄の場合の結果から、 $\dot{\epsilon}_0$ がこの σ_a の値において 10 分の1程度に減っており他の変形過程への変化と考えられる。

(3) この高応力、低温における変形機構としては、こり面の変化したパイエルスもしくは擬パイエルス機構が考えられるが、このことについては今後の研究がなされる。

(4) 高応力、低温において flow stress の温度依存性が変化する例はバナジウムにおいて明白に観察されている。

(5) 絶対零度における σ_a を外挿によって求めると $\approx 110 \text{ kg/mm}^2$ となる。この値は格子間不純原子の固溶、析出処理によって変化する。

(6) 低温における flow stress の温度依存性を転位運動の熱的活性化過程によると考えれば、鉄と低炭素鋼中の転位の易動度に、不純物原子は関係がないといえる。

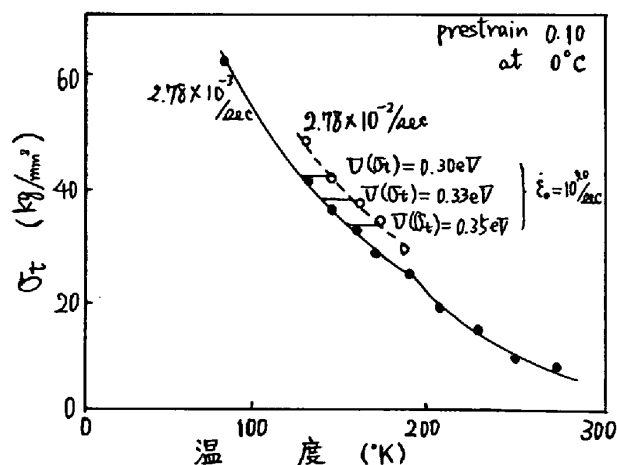
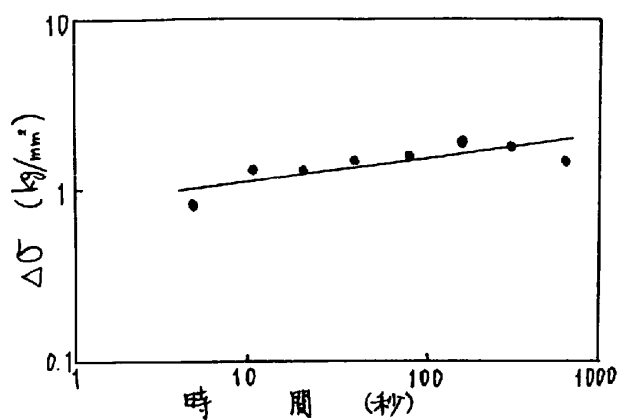
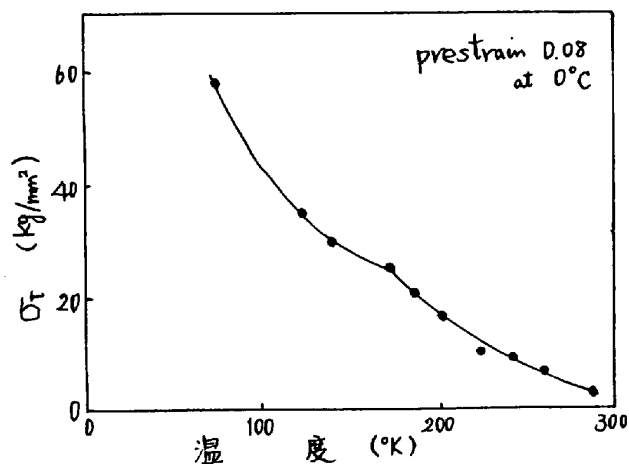
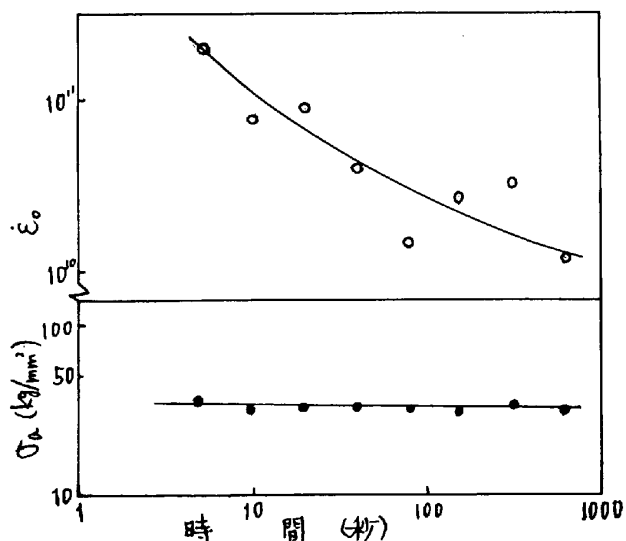
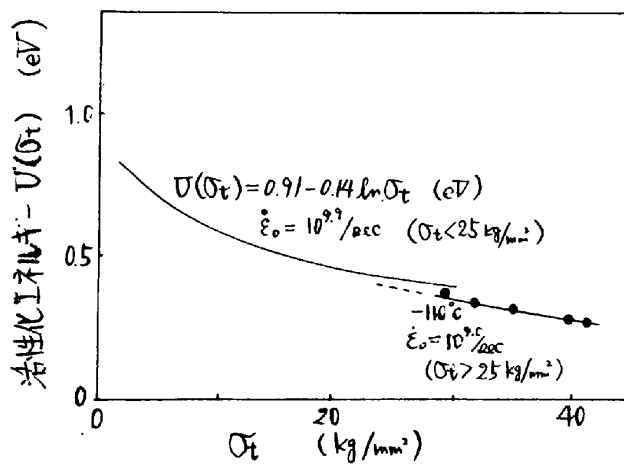
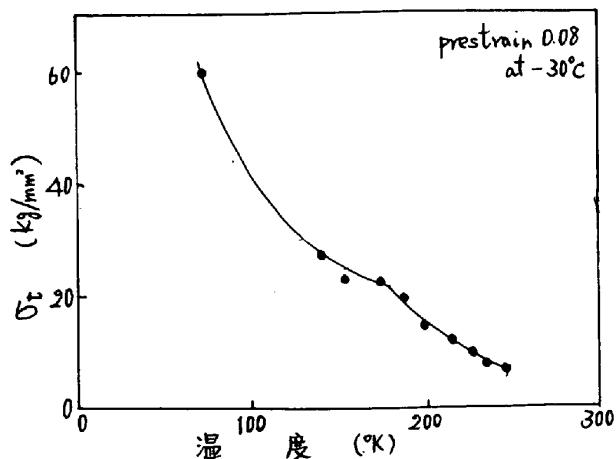
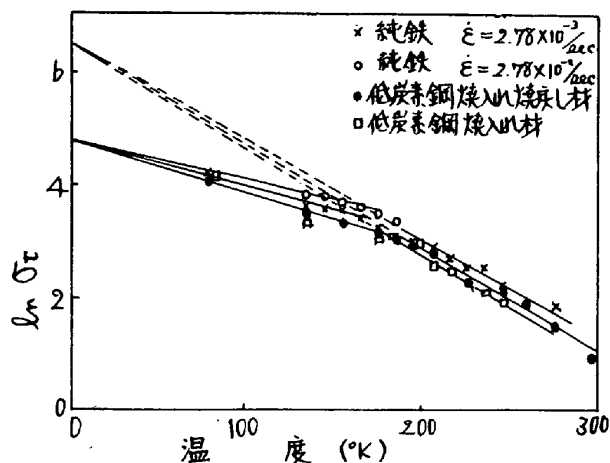


図1. 純鉄の σ_a と温度の関係

図2. 低炭素鋼焼入れ材の $\Delta\sigma$ -時間の関係図5. 低炭素鋼の焼入れ焼戻し材の σ_T と温度の関係図3. 低炭素鋼焼入れ材の $\sigma_A, \dot{\epsilon}_0$ と時間の関係図6. 純鉄の活性化エネルギー $U(\sigma_T)$ と σ_T の関係図4. 低炭素鋼焼入れ材の σ_T と温度の関係図7. 各試片の $\ln \sigma_T$ と温度の関係