

## (討23) 軟鋼の降伏点の粒度依存性について

東大工学部冶金学科

五弓勇雄 ○木原諄二

はじめに

鉄や軟鋼の降伏応力や変形応力が、(1)式のように粒径  $d$  の平方根の逆数と直線関係にあることはよく知られている。

$$\sigma = \sigma_0 + Kd^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここで  $\sigma$  は降伏応力又は変形応力である。1954年に Petch<sup>(1)</sup> は、この粒度依存性を Cottrell 雰囲気中に釘付けされた転位線が隣接粒に堆積した転位によって引き起された応力集中によって活動する状況が降伏の状況であるとして、理論的に(1)式の  $K$  を説明した。しかしながら、試料を焼鈍温度から徐冷したり、あるいは焼入れ後長時間焼戻ししたりした場合、 $K$  は温度に依存しない。降伏応力の熱的特性が Cottrell 雰囲気からの離脱応力の熱的特性によって決定されるならば、 $K$  はかなり温度に依存すべきである。いくつかの ad-hoc な説明が Conrad<sup>(2)</sup> や Cottrell et al<sup>(3)</sup> によって試みられた。

1963年に、Hutchison<sup>(4)</sup> が上降伏点の  $K$  は下降伏点の場合より約2倍に存することを見出した。1964年に Petch<sup>(5)</sup> はこのことを確かめ、上降伏点の  $K$  が高いのは降伏の不均一性に基づくひずみ速度増巾度が粒度に依存することと変形応力のひずみ速度依存性が大であるからであると説明した。同じく1964年に著者らは同じ考え方を発表した。彼らは Petch と異なり下降伏点の粒度依存性に対しても同様に考えるべきであると提案した。

この考え方が正しいければ、 $K$  は均一降伏の場合と不均一降伏の場合とは異なるはずである。そこで、本報告では引張試験と圧縮試験の場合の  $K$  と比較した。またこの考え方の正当性を示す結果が得られたことを報告する。

## 実験方法

試料の化学成分は Table 1 に示す。引張試験片 A は Fig. 1 に示す方法で製作した。この試片の結晶粒径も圧縮法も Fig. 1 に示した。Table 2 に示す条件で製作した引張試験片 B は厚さ 1mm、巾 6mm、平行部長 30mm である。各試片の結晶粒径も Table 2 に示した。圧縮試験片は径 7mm、高さ 8mm で製作条件、結晶粒径は同じく Table 2 に示してある。引張試験片 A を除くすべての試片は焼鈍後 400°C まで徐冷し、ここで 10 分保持した後、再び室温まで徐冷した。

引張試験も圧縮試験もすべてインストロニ型試験機を使用した。とくに、B 試片の引張試験においては、Lüders 帯伝播中にクロスヘッド速度を変化させ、下降伏点のひずみ速度依存性を求めた。

## 実験結果とその考察

引張試験における  $K$  と圧縮試験における  $K$  とを比較した。同じ結晶粒度の試片に

を用いた場合の典型的な応力-ひずみ曲線を Fig. 2 に示す。応力の差は降伏のとき非常に大きく、ひずみの高いところではほとんどなくなる。それぞれの場合の降伏応力と結晶粒径との関係を Fig. 3 に示す。引張り試験の場合の  $K$  は圧縮試験の場合に比べてかなり大である。

Cottrell 雰囲気からの離脱又は転位を生成するために必要な応力と  $K$  とを関係づける立場からこの結果を説明することはできない。なぜならば、同一温度ではこれらの応力（転位の雰囲気からの離脱応力と転位の生成応力）は変形様式がかわっても一定と考えることができるからである。離脱又は生成モデルと代る考え方はすでに述べた、ひずみ速度増中度の粒度依存性と降伏応力の温度とひずみ速度に依存する部分のひずみ速度依存性とを組み合わせで説明するものである。第一近似として、平行部長  $L$ 、粒径  $d$ 、Luders 帯の front の数を  $n$  とするとひずみ速度増中係数を  $L/nd$  と考えることは妥当である。一方、降伏応力や変形応力のひずみ速度依存性は著者の求めた力学的状態方程式<sup>(2)</sup>によって与えられる。すなわち、降伏応力又は変形応力は次式で表わされる。

$$\sigma = \sigma_a + e^{6.5} (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{k/0.14} \quad \text{--- (2)}$$

ここで  $\sigma_a$  は  $\sigma$  の温度とひずみ速度に依存しない部分、 $\dot{\epsilon}$  はひずみ速度、他は通常の意味を持っている。Fig. 3 から圧縮においては降伏応力のひずみ速度依存性は結晶粒径によって変化していないことがわかる。したがって、降伏が均一に起るとすれば  $\sigma_a$  は粒径に依存しないと考えてよい。

(2) 式を用い、引張り試験片 B の  $\sigma_a$  とそのひずみ速度依存性から求める。この結果を Fig. 4 に示す。 $\sigma_a$  の粒度依存性は圧縮における粒度依存性とほぼ等しい。すなわち  $\sigma_a$  の  $K$  は  $1.2 \text{ kg/mm}^2$  である。そこで、引張り試験片 B の降伏応力  $\sigma$  は第一近似として次のようにあらわされる。

$$\sigma = \sigma_a + Kd^{-1/2} + e^{6.5} [(L/nd)(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)]^{k/0.14} \quad \text{--- (3)}$$

Fig. 4 の粒径  $50\mu$  の降伏応力のばらつきは、Luders front の数のばらつきに基づくものであって、ばらつきの上限は Luders front の数が 1 件の場合に対応する。この応力値と (3) 式の右辺とあわせて  $\sigma_a$  を求める。一方  $\sigma_a$  は  $\sigma_a$  の粒度依存性から  $9 \text{ kg/mm}^2$  となる。 $\dot{\epsilon}_0$  は粒径に依存しないとしてよいから、他の粒度の場合の応力  $\sigma$  (3) 式によって計算できる。他の粒度の場合は Luders front の数は 2 件であった。計算結果は Fig. 4 に見るごとく実験値とよい一致を示している。

## 結論

鉄及び軟鋼の降伏応力の粒度依存性はひずみ速度増中度の粒度依存性と変形応力のひずみ速度依存性に基づく部分があることがわかった。引張り試験 B の場合、Luders front の数は 2 件であったが、一般の場合この数  $n$  も粒度に依存する可能性がある。すなわち、変形応力のひずみ速度依存性による降伏応力の粒度依存性は、降伏の不均一性の粒度依存性に基づくものである。

文献

- (1) Petch, N.J. *et al*; *Progress in Metal Physics* vol. 5 (1954) 1
- (2) Conrad, H.; "Iron and Its Dilute Solutions" (1963) AIME 315
- (3) Cottrell, A.H. *et al*; "The Relation between the Structure and Mechanical Properties of Metals" vol. II (1963) 456
- (4) Hutchison, M.M.; *Phil. Mag.* 8 (1963), 121
- (5) Petch, N.J.; *Acta Met* 12 (1964) 59
- (6) 五弓, 木原; *塑性加工* 5 (1964) 557
- (7) 五弓, 木原; *日本金属学会誌* 31 (1967) 368
- (8) Gokyo, I. & Kihara, J; to be published

Table 1. The chemical compositions

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	(%)
0.015	0.02	0.07	0.012	0.009	0.47	0.02	

Table 2. The annealed conditions and grain sizes of the tensile specimens-A and the compression specimens.

Tensile;	600°C x 1.5hr.	18 μ	Compression;	750°C x 0.5hr.	50 μ
	650°C x 1 hr.	21 μ		800°C x 0.5hr.	56 μ
	700°C x 1 hr.	25 μ		850°C x 0.5hr.	59 μ
	800°C x 1 hr.	50 μ		950°C x 2 hr.	66 μ

Table 3. The testing conditions

Tensile-A	290°K	$9.2 \cdot 10^{-3}$ / sec.
Tensile-B	298°K	$2.8 \cdot 10^{-3}$ / sec.*
Compression	290°K	$1.7 \cdot 10^{-2}$ / sec.
		$1.7 \cdot 10^{-3}$ / sec.

\*The strain-rate sensitivity is obtained by changing strain rate during propagation of Luders bands.

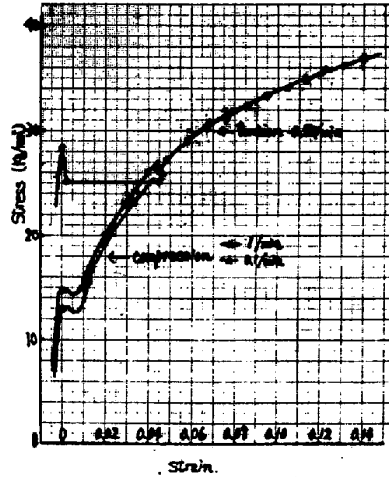
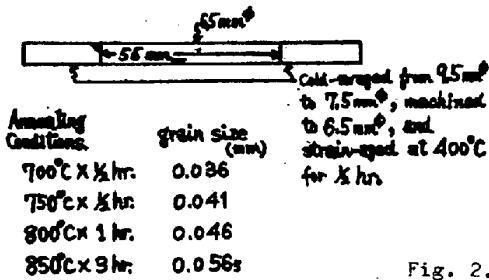


Fig. 1. The tension specimens-A, in tension and compression.  
 Fig. 2. The typical stress-strain relations

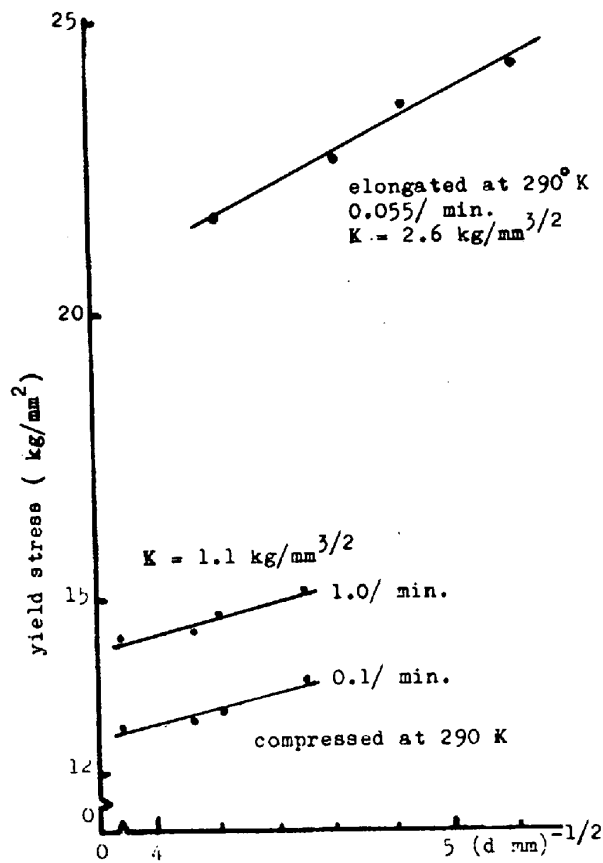


Fig. 3. The relation between the yield stress and the grain size.

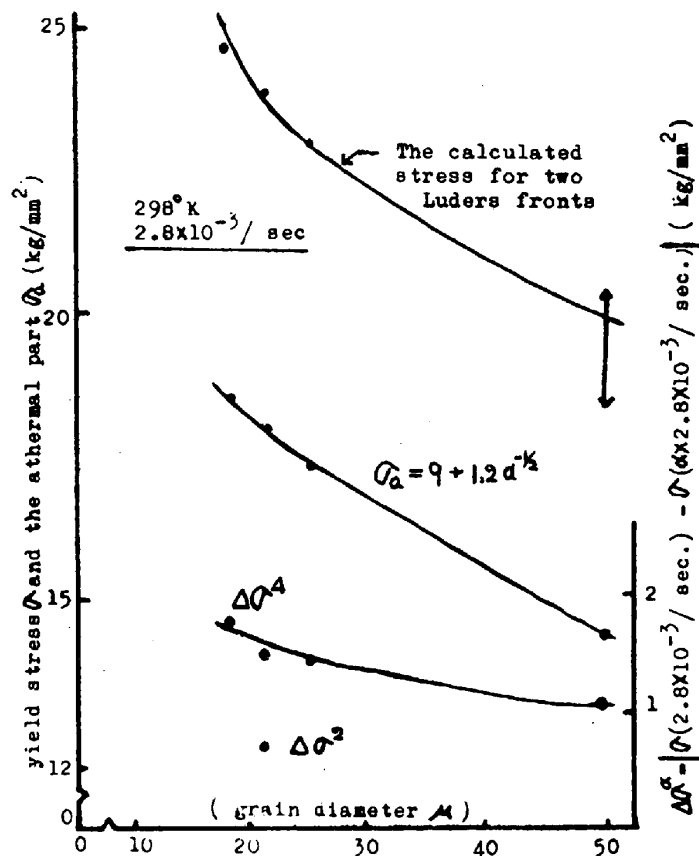


Fig. 4. The grain-size dependence of yield stress, the athermal part and the strain-rate sensitivity.