低炭素鋼の変形抵抗に及ぼす引張速度および 温度の影響，有効応力成分について*

藤 野 宗 昭** 新 田 哲 夫***
山 本 正 弘****平 修 二*****

The Effect of Strain-Rate and Temperature on the Flow Stress of Low Carbon Steel ; Effective Stress

by

Motoaki FUJINO

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

Tetsuo NITTA

(Mitsubishi-Juko, Takasago)

Masahiro YAMAMOTO and Shuji TAIRA

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

Hereunder is described a new approach to evaluating the influence of strain-rate and temperature on the flow stress of mild steel.

The flow stress consists of two components, thermal and athermal. Application of thermal activated process permits separation of flow stress into the two components developed during the deformation.

Strain-rate cycling tests were performed during the tensile deformation in the temperature range 25°C~450°C. The effect of strain-rate and temperature on the thermal component and of history on the athermal component were discussed.

(Received June 15, 1970)

1 序 論

材料の強度や加工性といった機械的性質を示す諸量が各種の試験で求められるがそのうちでも引張試験は最も一般的，かつ簡便な方法である。塑性力学は一軸引張りでの応力-ひずみ関係を基礎にしているが，より現実に即した適用範囲の広い塑性力学の展開は，ひずみ速度および温度の項をも取り入れた。応力-ひずみ関係の解釈がなされて初めて可能になるのであり，成形性試験，衝撃試験等から得られる諸量との関連も明らかになるであろう。

これまで，定温度，定ひずみ速度引張試験を逐一実施することによって，変形抵抗の温度依存，ひずみ速度依存を調べる努力がなされてきた。その解釈の一段階として MacGregor¹⁾らの提案した“ひずみ速度修正

温度”の考え方がある。しかしこの考えは，単一の熱活性化過程が変形を支配しているような変形条件の範囲で有効であっても，現実に実用鋼を室温から 600°C に至る温度範囲で変形する場合には鋼の内部組織が変わり，負荷応力をそのまま変形へ寄与するところの応力(有効応力)成分であると考えることができなくなる。

したがって従来の関係式 $\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$ にかえて

$$\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T, \text{structure}) \quad (1)$$

としなければならない。Structure の実体がなにであるかは，後で定義するが，少なくとも変形の履歴に依存するものである。ここでひずみを時間と同等な変数として変形条件(ひずみ速度および温度)の経路を表わすと structure 項は次の積分形式で表現される。

$$\text{Structure} = \int_0^{\epsilon} f(\dot{\epsilon}(\epsilon'), T(\epsilon')) d\epsilon' \quad (2)$$

変形条件を設定すれば structure 項が(2)式で求まり，その値を(1)式に代入すると応力が決まるということを上記の考えは意味している。

さて，(1)式を考えるにあたって，変形抵抗を有効応力 (Effective stress) と内部応力 (Internal stress)

* 本報を「低炭素鋼の高温引張変形 (第1報)」(Tensile Deformation of a Low Carbon Steel at Elevated Temperature, I) とする。

原稿受理 昭和45年6月15日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 三菱重工 高砂市

**** 学生会員 京都大学大学院 京都市左京区吉田本町

***** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

とに分割する²⁾。有効応力は、その時のひずみ速度を支配するものであり、dissipated な応力と考えられる。一方内部応力は、その時の変形条件に直接には依存せず、材料の内部状態（格子欠陥の分布状態）で決まり、stored energyに関係したpotential な応力と考えられる。この分類に従うと速度論的立場からみた変形挙動は、主として有効応力により、金属組織学的観点からの変形挙動は、主として内部応力によるものであろう。

そこで、有効応力に関しては、ひずみ速度変動試験と転位論に基礎を置いた仮定とを組み合わせ有効応力の分離を行ない、そのひずみ速度依存および温度依存性について検討を加えた。一方、内部応力に関しては、問題を二つに分ける。すなわち、変形条件（ひずみ速度、温度）が内部組織をどのように決定するか。さらに形成された内部組織が応力とどのように関連するかの二段階である。われわれは、内部組織は転位密度で代表されるものとし、X線回折法を用いて観察し、半現象論的な転位密度状態方程式を作成した。本報告そのIでは、実用材である S15C 棒材および SB42 板材に関する応力の温度およびひずみ速度依存性と、有効応力成分について検討した結果を述べ、報告そのIIで、それらの内部組織について検討した結果を述べる。さらに、この変形条件範囲で特徴的な青熱ぜい性についての考察を付記する。

2 一定ひずみ速度引張試験

2.1 実験方法

インストロン型引張試験機に、自動ひずみ速度制御装置を設置し、標点間のひずみ速度を一定として試験を行なった。試験ひずみ速度は、0.1, 1.0, 10, 100%/min (1.7×10^{-5} , $\times 10^{-4}$, $\times 10^{-3}$, $\times 10^{-2}$ mm/mm·sec) の4種類であり、ひずみ速度一定保持の精度は5%以内である。試験温度は 25, 100, 200, 300, 400, 450, 550℃ の7段階であり、加熱は電気炉を用いた。試験片上下方向の温度差、試験中の温度変動は、とも

Table I. Chemical compositions and heat treatment of the material tested.

Chemical compositions (%) S15C								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	N
0.16	0.26	0.47	0.018	0.025	0.02	0.03	0.023	0.0064
Sol. N 0.0010%								
Chemical compositions (%) SB42								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	N
0.16	0.25	0.60	0.008	0.005	—	—	<0.001	0.0086
Sol. N 0.0068								
Heat treatment								
900℃×1hr F.O.

Fig. 1. Specimen for tensile test.

に 2℃ 以内である。

実験に用いた材料は S15C および SB42 である。その化学成分および熱処理条件を Table I に示す。試験片形状は Fig. 1 に示すごとく、標点間距離 50 mm、直径 10 mm の標準試験片である。

2.2 実験結果

2.2.1 機械構造用炭素鋼材 S15C 各温度における応力-ひずみ曲線を Fig. 2 に、変形抵抗とひずみ速度の関係を Fig. 3 に示す。Fig. 4 で引張強度 σ_B お

Fig. 2. (a) Stress-strain curves at the temperature of 25°C.

Fig. 2. (b) Stress-strain curves at the temperature of 300°C.

Fig. 2. (c) Stress-strain curves at the temperature of 450°C.

Fig. 3. (a) Effect of strain-rate on the flow stress at the temperature of 25°C.

Fig. 3. (b) Effect of strain-rate on the flow stress at the temperature of 300°C.

Fig. 3. (c) Effect of strain-rate on the flow stress at the temperature of 450°C.

Fig. 4. Effect of temperature on the lower yield stress or 0.2% proof stress and tensile strength.

よび下降伏点 σ_y と温度との関係を示す。これらのグラフから、25°C 付近 100~300°C の範囲および 450°C 付近、以上の 3 つの温度範囲において塑性変形の挙動が異なることがわかる。

(1) 25°C の場合

応力-ひずみ曲線はひずみ速度が大きくなるにつれて、応力の高い方へ移動する。変形抵抗はひずみ速度の単調な増加函数である。下降伏点が最も大きく、ひずみ速度の影響を受け、他方、変形抵抗はひずみに関係なくほぼ同一のひずみ速度依存性を示している。

(2) 100°C~300°C の青熱ぜい性を示す温度範囲

下降伏点はひずみ速度の増加函数であるが、変形抵抗は、ひずみ速度の減少につれて、また、温度の上昇につれて大きくなる。すなわち、負のひずみ速度依存、負の温度依存を示す。加工硬化係数も温度に対して同様な傾向を示す。またこの温度範囲では、あるひずみ速度の下で、応力-ひずみ曲線が鋸歯状になるがこれらは全て動的ひずみ時効に起因するものである。これについては次の節で述べる。

(3) 450°C 付近

変形抵抗はひずみ速度の減少および温度の上昇にともない単調に小さくなる。変形抵抗のひずみ速度に対する増加割合、すなわち、ひずみ速度効果 (Strain-rate sensitivity)

$$n = \frac{\Delta \log \sigma}{\Delta \log \dot{\epsilon}} = \frac{\log(\sigma_2/\sigma_1)}{\log(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)} \quad (3)$$

の値はひずみが増すにつれて大きくなる。0.2% 耐力のひずみ速度依存性は非常に小さい。一方、引張強度はかなり強いひずみ速度依存性を示している。その原因は変形中の動的回復 (Dynamic recovery) が高温になるほど、低ひずみ速度になるほど、顕著になるた

めである。

2・2・2 ポイラー用圧延鋼板 SB42 SB42 で特に注目するのは青熱ぜい性温度範囲における変形挙動である。Fig. 5 に各温度における応力-ひずみ曲線を示す。150℃において、S15C 材では現われなかった下降伏点の負のひずみ速度効果がみられる。巨視的降伏をする以前にも、塑性変形が起こるが、動的ひずみ時効

Fig. 5. Stress-strain curves for SB42.

Fig. 6. Effect of temperature on the flow stress of S15C.

Fig. 7. Effect of temperature on the flow stress of SB42.

の大きいこの材料では、pre-yield の領域でも顕著に時効現象が起きているためである。Fig. 7 にひずみ 10% における変形抵抗の温度による変化を示す。S15C の場合 (Fig. 6) と比較すると、青熱ぜい性域での極値が非常に高いこと、極値を示す温度が低温側に移動することである。この差は Table I に示すように SB 42 が S15C に比べて約 6 倍の固溶窒素を含むことに起因しているであろう。

2・3 青熱ぜい性 (特に Portevin-Le Chatelier 現象)

青熱ぜい性温度範囲での負のひずみ速度依存、負の温度依存、鋸歯状応力-ひずみ曲線 (セレーション) は動的ひずみ時効に起因するが、セレーションの始まる条件から、動的ひずみ時効について考察を加えることができる。動的ひずみ時効は、セル壁などの障害物によって速度の落ちた転位群が、溶質原子により固着されて起こると考えられる。可動転位群の一部が固着されると定ひずみ速度を維持するために残りの可動転位の速度は増大しなければならない。それを可能にするように応力が増加し、副次的な結果として、それまで活動していなかった転位源が増殖機能を発揮し始める。すなわち、固着と増殖を繰り返すことにより、セレーションが生ずる。さらに動的ひずみ時効が盛んに行なわれる温度とひずみ速度の変形条件下では、この繰り返しが速いため、高い加工硬化を実現しているにもかかわらず、応力-ひずみ曲線にはセレーションとして現われない。ただし、間接的に応力が低下する場合については、固着力の限界を示していると解釈する。このように考えれば、動的ひずみ時効は、セレーションと大きい加工硬化を特徴とすることが理解できる。これを定量化すれば、負のひずみ速度依存、負の温度依存、S15C と SB42 との差が導かれるが、この点については報告そのⅡで述べる。

3 ひずみ速度変動引張試験

3・1 試験方法

引張試験途中でひずみ速度を $\dot{\epsilon}_1$ から $\dot{\epsilon}_2$ へ変えると、Fig. 8 に示すように応力が $\Delta\sigma$ だけ変化する。ひずみ速度を変化させてしばらくの間、材料の内部組織の変化は小さく無視できると考えられる。内部応力 σ_u は内部組織が変化しなければ一定であると考えられるから応力の増分 $\Delta\sigma$ は有効応力の増分 $\Delta\sigma^*$ と等しくなる。有効応力をひずみ速度の関数として $\sigma^* = \sigma^*(\log \dot{\epsilon})$ と表わすと、応力増分 $\Delta\sigma^*$ は次のように示すことができる。

$$\Delta\sigma^* = \frac{\partial \sigma^*}{\partial \log \dot{\epsilon}} \Delta \log \dot{\epsilon} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \sigma^*}{\partial \log \dot{\epsilon}^2} (\Delta \log \dot{\epsilon})^2 + \dots \quad (4)$$

1 次より高次の項が近似的に零の場合は

Fig. 8. Stress-strain curve for strain-rate cycling test.

$$\frac{\partial \sigma^*}{\partial \log \varepsilon} = \frac{\Delta \sigma^*}{\Delta \log \varepsilon} \quad (5)$$

となり σ^* の 1 階の微係数が求まる。この値は後で示すように活性化体積の値を与える。2 次の項までとると

$$\frac{\Delta \sigma^*}{\Delta \log \varepsilon} = \frac{\partial \sigma^*}{\partial \log \varepsilon} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \sigma^*}{\partial \log \varepsilon^2} (\Delta \log \varepsilon) \quad (6)$$

となり、 $\Delta \sigma^*/\Delta \log \varepsilon$ と $\Delta \log \varepsilon$ の関係から 2 階の微係数まで求まる。

ひずみ速度変動引張試験においては、ひずみ速度変動による内部組織の変化をできる限り小さくする必要がある。そのために、選ぶことのできるひずみ速度変動比 $\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1$ の範囲および変動させておく時間は限られてくる。そこで本研究では $\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1$ の値を 0.1~20 の範囲から選んだ。なお基準ひずみ速度は 0.1, 1.0%/min の 2 種である。

3.2 試験結果

(1) 応力増分

基準ひずみ速度 1.0%/min の場合の応力増分 $\Delta \sigma$ とひずみの関係を Fig. 9 に示す。200°C~300°C を境として低温側と高温側とで両者の関係が異なっている。200°C 以下の温度範囲では応力増分はひずみに関係なく一定の値を示す。一方 300°C 以上の温度範囲では応

Fig. 9. (a) Variation of stress increment, $\Delta \sigma$, with strain at 25°C. Fig. 9. (b) Variation of stress increment, $\Delta \sigma$, with strain at 450°C.

力増分はひずみとともに増加し、ある飽和値に漸近する傾向を示す。また、その値は低温側の 2~3 倍である。

応力増分はひずみ速度変動比 $\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1$ が大きくなると増加し、変動比が 1 より大きい場合は正であり、1 より小さいと負の値を示す。この傾向は変形抵抗が負のひずみ速度効果を示す青熱ぜい性の温度範囲でも同じである。

(2) 活性化体積

金属材料の塑性変形は熱的な活性化過程である。ひずみ速度は次の式で与えられる。

$$\dot{\varepsilon} = \nu \exp\left[-\frac{H}{RT}\right] = \nu \exp\left[-\frac{H^* - v^* \sigma^*}{kT}\right] \quad (7)$$

ここで H : 活性化エネルギー, $H^* = \int_{x_1}^{x_2} F dx$ (F は転位に加わる力), v^* : 活性化体積 $v^* = bL^*(x_2 - x_1)$, L^* : 活性化された転位の長さ, x : 距離,

これから活性化体積は次の式で表現できる。

$$v^* = kT \left(\frac{\partial \log \dot{\varepsilon}}{\partial \sigma} \right) = kT \left. \frac{\Delta \log \dot{\varepsilon}}{\Delta \sigma} \right|_{\Delta \sigma=0} \quad (8)$$

応力増分 $\Delta \sigma$ とひずみ速度変動比の対数 $\Delta \log \dot{\varepsilon}$ のグラフを Fig. 10 示す。このグラフの $\Delta \sigma=0$ における傾きから活性化体積 v^* が求まる。200°C 以下の温度範

Fig. 10. (a) Plot of $\Delta \sigma$ vs. $\Delta \log \dot{\varepsilon}$ at 25°C.

Fig. 10. (b) Plot of $\Delta\sigma$ vs. $\Delta\log \dot{\epsilon}$ at 450°C. Fig. 11. Effect of temperature on the activation volume, v^* , for 10% strain.

囲では活性化体積はひずみに関係なく変形中一定の値を示す。一方 300°C 以上の温度範囲では、ひずみの増加につれて減少しある値に漸近する傾向を示す。このような内容をもつ過程としてジョグの非保存運動があげられる。ジョグ間隔が変形とともに小さく¹²⁾なり、活性化体積が減少していったと考えられる。ひずみ量 10% における活性化体積と温度との関係を Fig. 11 に示すが、上記のことから 200°C 以下と 300°C 以上で変形の過程が異なっていることが結論できる。

3・3 有効応力の決定

応力増分 $\Delta\sigma$ とひずみ速度変動比の対数 $\Delta\log \dot{\epsilon}$ との関係が(6)式で表わせる場合、活性化体積のほかもう 1 つのパラメータとして有効応力 σ^* が求められる。また $\Delta\sigma$ と $\Delta\log \dot{\epsilon}$ の関係が(5)式で表わされる場合の σ^* の求め方についても述べる。

(1) 25°C～200°C の範囲での有効応力

エッチピット法によって転位の平均速度 v と負荷応力 σ_a の間に $v = (\sigma_a/\sigma_0)^m$ の関係式が存在することが実験的に確かめられている¹³⁾。しかし負荷応力 σ_a は有効応力 σ^* で置き換えるのが妥当である。

$$v = \left(\frac{\sigma^*}{\sigma_0} \right)^m \quad (9)$$

一般に用いられる $\dot{\epsilon} = (\text{const.}) \cdot \rho v b$ を採用すると

$$\dot{\epsilon} = (\text{const.}) \rho b \left(\frac{\sigma^*}{\sigma_0} \right)^m \quad (10)$$

ひずみ速度変動試験において ρ の変化は無視できると考え、かつ m も不変であるとする

$$\frac{\partial \sigma^*}{\partial \log \dot{\epsilon}} = \frac{\sigma^*}{m}, \quad \frac{\partial^2 \sigma^*}{\partial \log \dot{\epsilon}^2} = \frac{\sigma^*}{m^2} \quad (11)$$

(11)式を(6)式に代入し変形すると

$$\frac{\Delta \log \dot{\epsilon}}{\Delta \sigma^*} = \frac{m}{\sigma^*} - \frac{1}{2} \frac{m}{\sigma^{*2}} \Delta \sigma^* \quad (12)$$

$\Delta \log \dot{\epsilon} / \Delta \sigma$ と $\Delta \sigma$ のグラフの 1 例を Fig. 12 に示す。このグラフの傾きと縦軸との交点から σ^* と m の値が求まりこの場合 $\sigma^* = 5.2 \text{ kg/mm}^2$, $m = 18$ となる。

Fig. 13 にこの方法で求めた有効応力 σ^* の値を示す。

Fig. 12. Graphical method for calculation of m and σ^* .

25°C の場合、有効応力 σ^* はひずみ速度が 0.1%/min, と 1.0%/min, それぞれに対してひずみに関係なく 3.2 kg/mm², 5.2 kg/mm² の値をとる。負荷応力から σ^* を差しひいた値—内部応力 σ_μ —はひずみとともに増加し、その絶対値は σ^* に比較して大きい。また 2 つの変形条件で σ_μ は等しい。このことはひずみ速度の内部組織への影響が小さいことを予測させる。まとめると、変形抵抗のひずみ速度依存性は有効応力 σ^* に起因し、加工硬化は内部応力 σ_μ による。したがって σ^* と σ_μ の変形抵抗への寄与が完全に分離できる。

100°C, 200°C と温度が上昇するにつれ有効応力は減少し、またそのひずみ速度依存性は小さくなる。

(2) 450°C 付近の有効応力

この温度範囲では $\Delta\sigma$ と $\Delta\log \dot{\epsilon}$ の関係が(5)式で表わせ、熱活性化過程を示すパラメータは 1 個しか求まらない。しかし Fig. 11 から 450°C 付近では活性化体積のひずみ速度による変化が小さいことがわかるので、これを利用する。

Fig. 3(c) に示すように変形抵抗はひずみ速度の対数

と線型関係にある。

$$\dot{\epsilon} = (\text{const.}) \exp\left[\frac{B\sigma}{kT}\right] \quad (13)$$

変形抵抗の α 倍が有効応力である ($\sigma^* = \alpha\sigma$) とおくと

$$\dot{\epsilon} = (\text{const.}) \exp\left(\frac{B\sigma^*}{\alpha kT}\right) \quad (14)$$

(7)式と(14)式を比較して

$$\alpha = \frac{B}{v^*}, \quad \sigma^* = \frac{B}{v^*} \sigma \quad (15)$$

この方法を用いてひずみ速度 0.1%/min と 1.0%/min における有効応力 σ^* を求めた。活性化体積 v^* としては両者の平均値をとった。

Fig. 13 に400°C以上の温度範囲での有効応力を示す。有効応力の温度依存性、ひずみ速度依存性は200°C以下でのそれに比べてかなり大きい。まとめると、有効応力が強いひずみ速度、温度依存性を示し、かつ加工硬化に寄与すること、内部応力が履歴—変形条件—の影響を強く受けることである。

Fig. 13. Effect of temperature on the effective stress, σ^* , for 10% strain.

4 結 論

変形抵抗およびその熱的活性成分 σ^* と不活性成分 σ_μ の値を、種々の変形条件（ひずみ速度と温度）下

で求めそれらの特徴を示した。これらの3応力を現象論的に定式化するためには、状態変数 structure 項について吟味する必要がある。

(1) 定ひずみ速度引張試験を行なった結果、変形抵抗のひずみ速度依存性は25°C~550°Cの範囲で三段階に分けられる。

(2) ひずみ速度変動引張試験の結果、25°C~200°Cの範囲では、 $\dot{\epsilon} \propto \rho b \sigma^{*m}$ になりたち σ^* はひずみに関係なく一定である。450°C付近では $\dot{\epsilon} \propto \exp(\rho \sigma^*/kT)$ の関係が存在し、 σ^* の値は変形の進行とともに大きくなる。

参 考 文 献

- 1) たとえば MacGregor, C. W., J. C. Fisher, Trans. ASME, **67**, A11 (1946).
- 2) たとえば Conrad, H., J. Metals, **167**, 582 (1964).
- 3) 松場輝雄, 阿部義一, 材料, **18**, 215 (1969).
- 4) Rosenfield, A. R., Dislocation Dynamics, 351 (1968) McGraw-Hill
- 5) Brindley, B. J., and J. T. Barnby, Acta. Met., **14**, 1765 (1965).
- 6) 三浦 精, 高村仁一, 山下三千雄, 水曜会誌, **30**, 144 (1967).
- 7) Rosenfield, A. R., Dislocation Dynamics, 751 (1968) McGraw-Hill
- 8) Michalak, J. J., Acta. Met. **13**, 213 (1965).
- 9) Karashima, S., and T. Sakuma, Proc. 11th Jap. Cong. Mat. Res., 100 (1968).
- 10) Evans, R. W., and L. A. Simpson, Phil. Mg., **19**, No. 160, 809 (1969).
- 11) Conrad, H., JISI, **182**, 364 (1961).
- 12) Seeger, A., Phil. Mag. **46**, 1,194 (1955).
- 13) Jhonston, W. G., and J. J. Gilman, J. Appl. phys., **30**, 129 (1959).
- 14) Imura, T., H. Saka, and N. Yukawa, J. Phys. Soc. Japan, **26**, 1327 (1969).