

広範囲なひずみ速度および温度域における鉄の変形機構

遠藤, 肇 / SAKINO, Kiyotaka / ENDOH, Hajime / 崎野, 清憲

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学工学部研究集報 / 法政大学工学部研究集報

(巻 / Volume)

39

(開始ページ / Start Page)

13

(終了ページ / End Page)

16

(発行年 / Year)

2003-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00003774>

広範囲なひずみ速度および温度域における鉄の変形機構

DEFORMATION MECHANISM OF IRON IN WIDE STRAIN RATE AND TEMPERATURE RANGES

遠藤 肇*, 崎野 清憲**

Hajime ENDOH and Kiyotaka SAKINO

In order to clarify a rate controlling mechanism of iron, compressive tests for 0.01wt.%C iron are conducted in the strain rate range from about 1×10^{-3} to 2×10^4 /s and at temperatures ranging from 79K to 473K. The results of measurement are treated on the basis of a theory of thermally activated process. In a high strain rate and low temperature ranges, a dominant rate controlling mechanism is dislocation motion which surmounts the Peierls potential barriers with the aid of the thermally activated formation of kink pairs. Below the strain rate of 1/sec and at temperature of 293K, the mechanism may be controlled by the thermally assisted cutting of point obstacles with moving dislocations.

Key Words: Dynamic Flow Stress, Strain rate sensitivity, Thermal Activation Energy, Rate Controlling mechanism

1. はじめに

面心立方金属は、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ /sec 台のいわゆる準静的変形の領域から $\dot{\epsilon} = 10^3$ /sec 台前半の領域までは変形特性に本質的な変化は見られず、変形応力はひずみ速度の対数に対し緩やかに上昇するのが普通である。しかし、 $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^3$ /sec 程度以上になると変形応力は急な上昇を示す事が知られている。一方、体心立方金属も面心立方金属と同様、 $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^3$ /sec 付近での変形応力の急上昇が報告¹⁾されている。ひずみ速度 5×10^3 /sec 付近から顕著になる変形応力の急な上昇は、運動転位の律速機構が低速側の熱活性化過程支配から高速側のフォノン粘性抵抗支配へ移行するためと考えられている^{2,3)}が、体心立方金属に対しては疑問視する報告⁴⁾もある。一般に、体心立方金属の律速機構は準静的領域からひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 10^3$ /sec 程度まではキックモデルを用いた熱活性化過程で表せると考えられるが、変形応力が低くなる室温の準静的領域は非熱的機構であると解釈もある。このように、広い範囲にわたるひずみ速度や温度域における変形機構は必ずしも定かではない。

広いひずみ速度範囲をカバーする構成式を導くためにも、上記の高ひずみ速度域を含む広いひずみ速度域における変形応力のひずみ速度依存の機構を統一的に把握する必要がある。

本研究では、炭素量 0.01wt.% の鉄試験片に対し、 $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$ /sec の準静的領域から $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^4$ /sec の高ひずみ

速度領域迄の変形応力のひずみ速度依存性を温度 $T = 79\text{K} \sim 493\text{K}$ の範囲で調べた。また、ひずみ速度履歴の影響を調べるために、高ひずみ速度領域で速度急変実験も併せて行った。以上はすべて圧縮試験である。さらに、Aonoら⁵⁾が求めた高純度の鉄単結晶の活性化エネルギーを用いて求められる変形応力のひずみ速度依存性と本研究の実験結果を比較し、準静的領域から高ひずみ速度領域にかけての広い範囲にわたる鉄の変形応力のひずみ速度依存の機構について考察した。

2. 鉄の変形応力のひずみ速度依存性に関する諸説

低炭素鋼の広範囲ひずみ速度域ならびに温度域における変形機構について述べた代表的なものとして Rosenfield と Hahn⁶⁾、Campbell と Ferguson³⁾ さらには Perzyna⁷⁾ の論文を上げることができる。これらは室温程度の温度域では、準静的領域の変形機構は非熱的であり、それ以上のひずみ速度領域では熱的機構つまり熱活性化過程となり、さらにひずみ速度が $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^3$ /sec 程度以上の領域からは転位の運動に対する減衰機構いわゆるフォノン粘性抵抗によって支配されるとする解釈である。野島⁴⁾は低炭素鋼に対して行ったひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \sim 10^3$ /sec の実験結果をキックモデルで整理し、さらに Campbell と Ferguson の実験結果を再検討することにより、非熱的とされる準静的領域から $\dot{\epsilon} = 10^4 \sim 10^5$ /sec 程度の高ひずみ速度域までをキック対形成の単一の熱活性化過程で説明できるとしている。野島が指

*大学院機械工学専攻

**機械工学科

摘するように、準静的領域においても変形応力がひずみ速度に依存することは明らかであり、この領域を熱活性化過程で取り扱うことは妥当と考えるが、その律速機構が高ひずみ速度域と同じ単一の機構で表し得るかは後に本論文でも指摘するようにさらなる検討が必要と考える。また、Follansbeeら⁸⁾は銅の"threshold stress"を広いひずみ速度域で測定し、高ひずみ速度域で見られる高い変形応力のひずみ速度依存性は変形の過程で形成される内部組織のひずみ速度履歴依存性によるものとし、他の金属に対しても同様の解釈が可能であるとしている。

3. 実験

3.1 試験片および実験装置

試験片は直径および長さがそれぞれ 1.0mm および 2.0mm の円柱形であり、800℃で1時間真空焼鈍した。ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=1/\text{sec}$ 以下における圧縮試験にはインストロン型の試験機を使用し、高ひずみ速度領域 $\dot{\epsilon}=4 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4/\text{sec}$ での高速圧縮試験ならびに速度急変試験⁹⁾にはホプキンソン棒装置を使用した。高温試験には小型のニクロム炉を、低温試験には液体窒素とエチルアルコールを用いて行った。

3.2 各温度における変形応力とひずみ速度の関係

図1に本実験で行った広範囲なひずみ速度および温度域における変形応力とひずみ速度の関係を示す。

$T=293, 208\text{K}$ における変形応力は高いひずみ速度依存性を示すものの、高ひずみ速度域で律速機構が粘性抵抗領域へ遷移したと思われるような急な上昇は見られない。なお、高温、低ひずみ速度域では負のひずみ速度依存性が見られるが、これは動的ひずみ時効の影響と思われる。

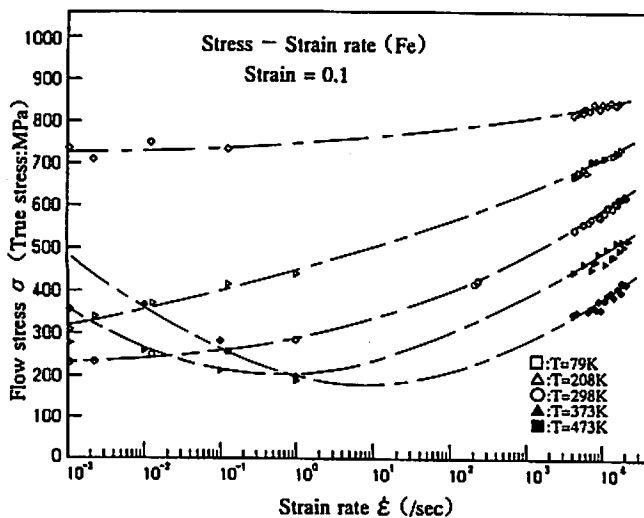


図1 広いひずみ速度および温度域における変形応力とひずみ速度の関係

3.3 高ひずみ速度域における速度急変実験

ひずみ速度急変実験は $T=293\text{K}$ でひずみ速度 $\dot{\epsilon} \approx 1 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^4/\text{sec}$ の領域で行った。その結果の一例を定ひずみ速度実験の結果と共に図2に示す。速度急変前の両者の変形応力の良好なる一致から、速度急変後の両者の差をひずみ速度変化による変形応力の降下量とみなす事ができる。ここで、瞬間ひずみ速度の変形応力への寄与を定量的に考察するため、 $\Delta\sigma_f$ を速度急変による変形応力の降下量、 $\Delta\sigma_d$ を定ひずみ速度実験の結果から求めたひずみ速度降下前、降下後に対応する変形応力差とし、 $\Delta\sigma_f/\Delta\sigma_d$ を速度急変による変形応力の降下率とする。図3に示すように $\Delta\sigma_f/\Delta\sigma_d$ の平均値がおよそ1となることから、この領域における高い変形応力のひずみ速度依存性はひずみ速度履歴ではなく瞬間のひずみ速度に依存していることになる。

4. 熱活性化過程による実験結果の解析

ここでは、速度急変実験の結果から、鉄の広範囲ひずみ速度領域における変形応力のひずみ速度依存性は

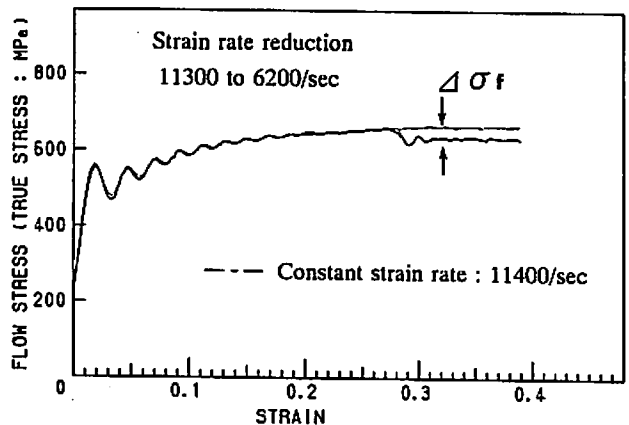


図2 ひずみ速度を $\dot{\epsilon}=11300$ から $6200/\text{sec}$ へ急変させた際の変形応力の降下量

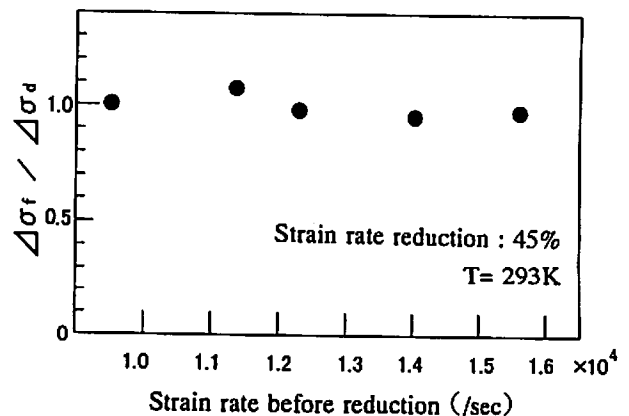


図3 高ひずみ速度域における速度急変実験から得られた $\Delta\sigma_f/\Delta\sigma_d$ の値

摘するように、準静的領域においても変形応力がひずみ速度に依存することは明らかであり、この領域を熱活性化過程で取り扱うことは妥当と考えるが、その律速機構が高ひずみ速度域と同じ単一の機構で表し得るか否かは後に本論文でも指摘するようにさらなる検討が必要と考える。また、Follansbeeら⁸⁾は銅の"threshold stress"を広いひずみ速度域で測定し、高ひずみ速度域で見られる高い変形応力のひずみ速度依存性は変形の過程で形成される内部組織のひずみ速度履歴依存性によるものとし、他の金属に対しても同様の解釈が可能であるとしている。

3. 実験

3.1 試験片および実験装置

試験片は直径および長さがそれぞれ 1.0mm および 2.0mm の円柱形であり、800℃で1時間真空焼鈍した。ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=1/\text{sec}$ 以下における圧縮試験にはインストロン型の試験機を使用し、高ひずみ速度領域 $\dot{\epsilon}=4 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4/\text{sec}$ での高速圧縮試験ならびに速度急変試験⁹⁾にはホプキンソン棒装置を使用した。高温試験には小型のニクロム炉を、低温試験には液体窒素とエチルアルコールを用いて行った。

3.2 各温度における変形応力とひずみ速度の関係

図1に本実験で行った広範囲なひずみ速度および温度域における変形応力とひずみ速度の関係を示す。

T=293, 208Kにおける変形応力は高いひずみ速度依存性を示すものの、高ひずみ速度域で律速機構が粘性抵抗領域へ遷移したと思われるような急な上昇は見られない。なお、高温、低ひずみ速度域では負のひずみ速度依存性が見られるが、これは動的ひずみ時効の影響と思われる。

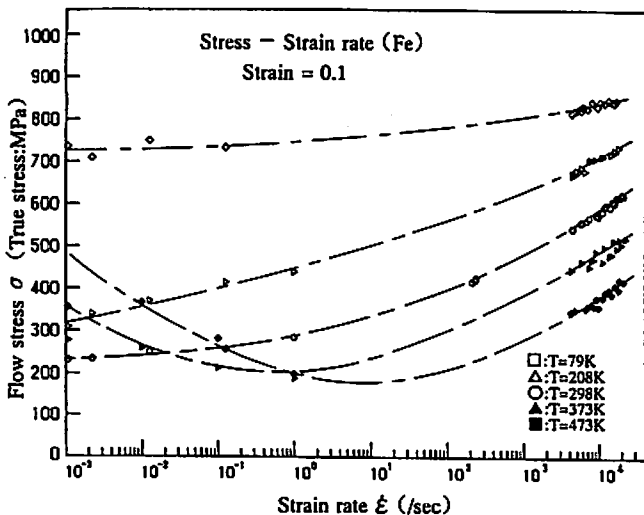


図1 広いひずみ速度および温度域における変形応力とひずみ速度の関係

3.3 高ひずみ速度域における速度急変実験

ひずみ速度急変実験は T=293K でひずみ速度 $\dot{\epsilon} \approx 1 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^4/\text{sec}$ の領域で行った。その結果の一例を定ひずみ速度実験の結果と共に図2に示す。速度急変前の両者の変形応力の良好なる一致から、速度急変後の両者の差をひずみ速度変化による変形応力の降下量とみなす事ができる。ここで、瞬間ひずみ速度の変形応力への寄与を定量的に考察するため、 $\Delta\sigma_f$ を速度急変による変形応力の降下量、 $\Delta\sigma_d$ を定ひずみ速度実験の結果から求めたひずみ速度降下前、降下後に対応する変形応力差とし、 $\Delta\sigma_f/\Delta\sigma_d$ を速度急変による変形応力の降下率とする。図3に示すように $\Delta\sigma_f/\Delta\sigma_d$ の平均値がおおよそ1となることから、この領域における高い変形応力のひずみ速度依存性はひずみ速度履歴ではなく瞬間のひずみ速度に依存していることになる。

4. 熱活性化過程による実験結果の解析

ここでは、速度急変実験の結果から、鉄の広範囲ひずみ速度領域における変形応力のひずみ速度依存性は

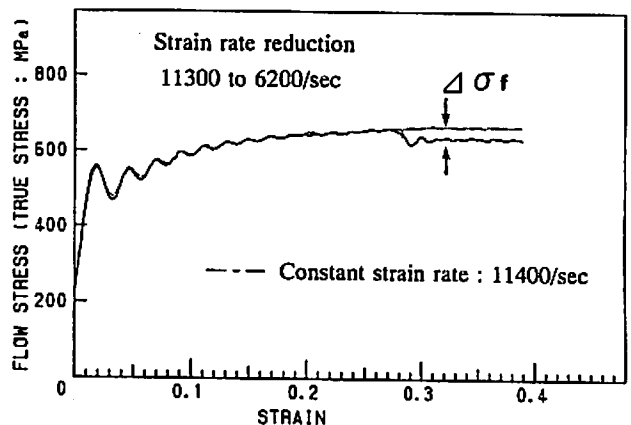


図2 ひずみ速度を $\dot{\epsilon} = 11300$ から $6200/\text{sec}$ へ急変させた際の変形応力の降下量

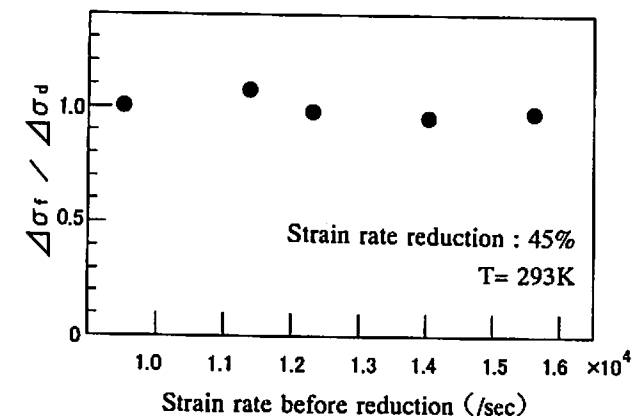


図3 高ひずみ速度域における速度急変実験から得られた $\Delta\sigma_f/\Delta\sigma_d$ の値

摘するように、準静的領域においても変形応力がひずみ速度に依存することは明らかであり、この領域を熱活性化過程で取り扱うことは妥当と考えるが、その律速機構が高ひずみ速度域と同じ単一の機構で表し得るかは後に本論文でも指摘するようにさらなる検討が必要と考える。また、Follansbeeら⁸⁾は銅の"threshold stress"を広いひずみ速度域で測定し、高ひずみ速度域で見られる高い変形応力のひずみ速度依存性は変形の過程で形成される内部組織のひずみ速度履歴依存性によるものとし、他の金属に対しても同様の解釈が可能であるとしている。

3. 実験

3.1 試験片および実験装置

試験片は直径および長さがそれぞれ 1.0mm および 2.0mm の円柱形であり、800℃で1時間真空焼鈍した。ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=1/\text{sec}$ 以下における圧縮試験にはインストロン型の試験機を使用し、高ひずみ速度領域 $\dot{\epsilon}=4 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4/\text{sec}$ での高速圧縮試験ならびに速度急変試験⁹⁾にはホプキンソン棒装置を使用した。高温試験には小型のニクロム炉を、低温試験には液体窒素とエチルアルコールを用いて行った。

3.2 各温度における変形応力とひずみ速度の関係

図1に本実験で行った広範囲なひずみ速度および温度域における変形応力とひずみ速度の関係を示す。

$T=293, 208\text{K}$ における変形応力は高いひずみ速度依存性を示すものの、高ひずみ速度域で律速機構が粘性抵抗領域へ遷移したと思われるような急な上昇は見られない。なお、高温、低ひずみ速度域では負のひずみ速度依存性が見られるが、これは動的ひずみ時効の影響と思われる。

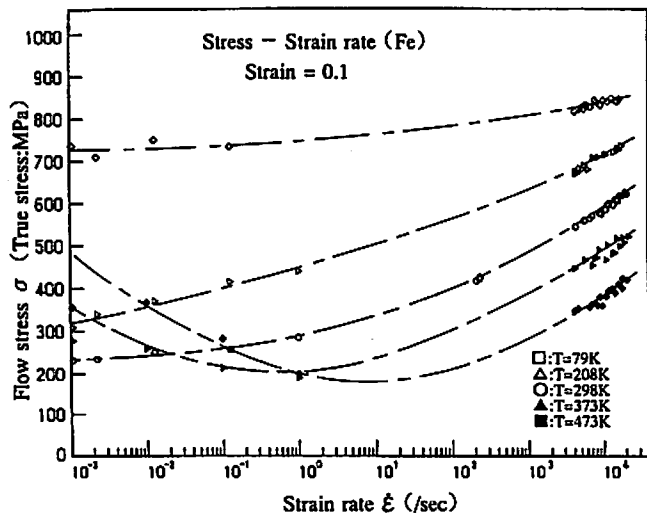


図1 広いひずみ速度および温度域における変形応力とひずみ速度の関係

3.3 高ひずみ速度域における速度急変実験

ひずみ速度急変実験は $T=293\text{K}$ でひずみ速度 $\dot{\epsilon} \approx 1 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^4/\text{sec}$ の領域で行った。その結果の一例を定ひずみ速度実験の結果と共に図2に示す。速度急変前の両者の変形応力の良好なる一致から、速度急変後の両者の差をひずみ速度変化による変形応力の降下量とみなす事ができる。ここで、瞬間ひずみ速度の変形応力への寄与を定量的に考察するため、 $\Delta\sigma_f$ を速度急変による変形応力の降下量、 $\Delta\sigma_d$ を定ひずみ速度実験の結果から求めたひずみ速度降下前、降下後に対応する変形応力差とし、 $\Delta\sigma_f/\Delta\sigma_d$ を速度急変による変形応力の降下率とする。図3に示すように $\Delta\sigma_f/\Delta\sigma_d$ の平均値がおよそ1となることから、この領域における高い変形応力のひずみ速度依存性はひずみ速度履歴ではなく瞬間のひずみ速度に依存していることになる。

4. 熱活性化過程による実験結果の解析

ここでは、速度急変実験の結果から、鉄の広範囲ひずみ速度領域における変形応力のひずみ速度依存性は

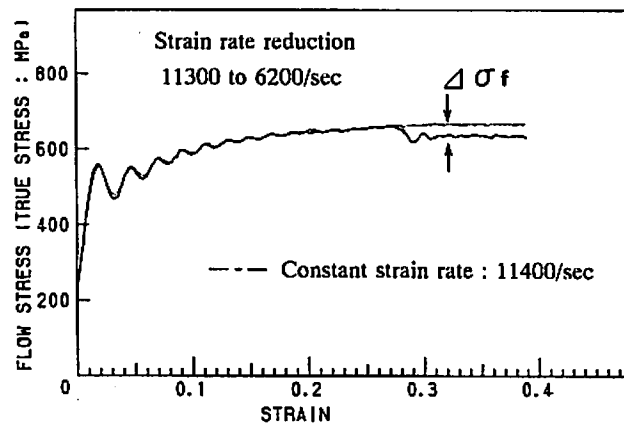


図2 ひずみ速度を $\dot{\epsilon}=11300$ から $6200/\text{sec}$ へ急変させた際の変形応力の降下量

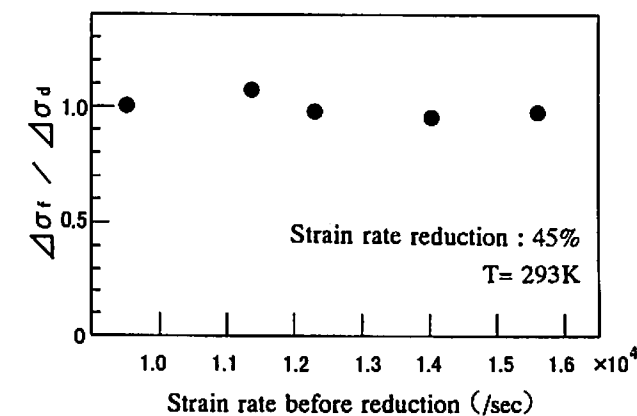


図3 高ひずみ速度域における速度急変実験から得られた $\Delta\sigma_f/\Delta\sigma_d$ の値

内部組織変化を伴うひずみ速度履歴によるものではなく、瞬間のひずみ速度つまり転位の運動に対する抵抗の大きさによるものと考え解析を進める。

4.1 キンクモデルを用いた解析

転位論の立場からみると体心立方金属の特色の一つはパイエルス力が大きいことである。転位はキンクの移動により高いパイエルスポテンシャルを越えて運動し、キンク対の生成頻度が変形を律速する。キンク対の生成は熱活性化過程で、したがってひずみ速度はアレニウスの式

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \exp\left(\frac{-E(\tau)}{kT}\right) \quad (1)$$

で表せると考えられている。ここに、 $\dot{\gamma}$ はせん断ひずみ速度、 $\dot{\gamma}_0$ はひずみ速度の次元を持つ定数、 $E(\tau)$ はキンク対生成のための見かけの活性化エネルギー、 τ はせん断応力、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。

Eq.(1)は転位に働く有効応力とひずみ速度の関係式であり実測値との定量的な比較に当たっては、転位が熱活性化過程によって越えることの出来ない非熱的障害から生じる長範囲な応力(以降、内部応力と定義する)を考慮する必要がある。外部から加わる変形応力を τ_0 、内部応力を τ_a と書くと、転位を動かそうとする有効応力 τ は $\tau_0 - \tau_a$ となる。ここでは、ひずみ $\epsilon_n = 0.1$ における内部応力を $\tau_a = 49.1\text{MPa}$ ($\sigma_a = 135\text{MPa}$)とした。 $E(\tau)$ はAonoら⁵⁾が求めた高純度の鉄単結晶の活性化エネルギーを用いた。高ひずみ速度域での変形は断熱的に行われるので、Eq.(1)の T には試験片の塑性仕事による温度変化 ΔT を考慮に入れる必要がある。 ΔT は以下のように求めた。

$$\Delta T = \frac{1}{\rho \zeta} \int_0^{\epsilon_n} \sigma_n d\epsilon \quad (2)$$

ここに、 ρ と ζ は鉄試験片の密度と比熱である。せん断応力と垂直応力の変換にはテラー因子を2.75にとった。これらの値を用い、Eq.(1)の前置因子の対数 $\log \dot{\epsilon}_0$ ($= \log 2.75 \dot{\gamma}$)を8.18とし、図4に実線で示される各温度における変形応力とひずみ速度の関係を予測した。図中には、試験片の断熱変形が変形応力に与える影響を見るために等温変形を仮定した場合の $\sigma - \log \dot{\epsilon}$ 線図を破線で同時に示した。低温、高ひずみ速度領ほど断熱変形の影響は大きく、 $T=79\text{K}$ における実際の変形応力のひずみ速度依存性はかなり大きなものとなる。

実線で示される $\sigma - \log \dot{\epsilon}$ 線図は、動的ひずみ時効が顕著になる $T=393, 473\text{K}$ における $\dot{\epsilon} = 1/\text{sec}$ 以下の領域を除けば、各温度における計算結果と実測値は概ね良い一致を示している。すなわち、低ひずみ速度域から変形応力が非常に高くなる $\dot{\epsilon} = 10^4/\text{sec}$ 以上の高ひずみ速度域ならびに低温域における変形応力のひずみ速度依存の

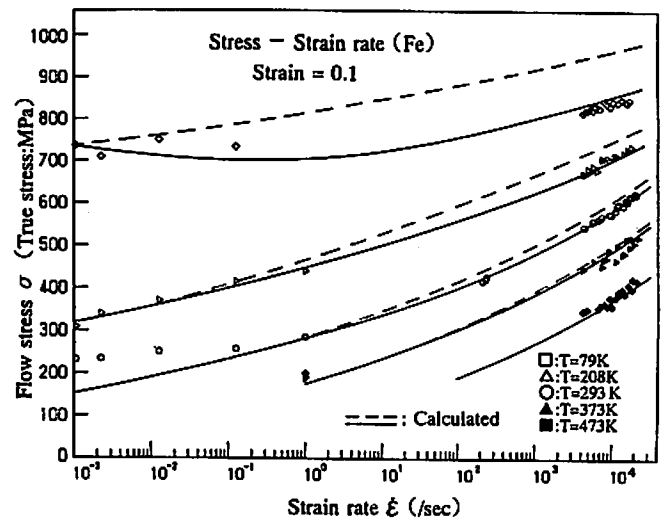


図4 活性化エネルギー $E(\tau)$ を用いて求めた $\sigma - \log \dot{\epsilon}$ 線図と実測値の比較

機構はキンク対の生成頻度で律速されていると見ることが出来る。しかし、 $T=293\text{K}$ における準静的領域の変形応力は動的ひずみ時効の影響が現れていないにもかかわらず、実測値の方が計算値よりも高く、その変形応力のひずみ速度依存性はかなり低くなっている。ちなみに、この領域の活性化体積は 200 b^3 程度となり、キンク対生成時の活性化体積としては大きすぎると考える。このように変形応力のひずみ速度依存性に明らかな違いが見られると言うことは、運動転位の律速機構の遷移すなわち転位の運動に対する他の障害が陽に現れてきたためではないかと推察される。活性化体積の大きさから推測して、転位の運動に対する障害としては、すべり面に交差する転位すなわち林転位との切り合いが考えられる。

4.2 転位の切り合いモデルを用いた解析

そこで、 $T=293\text{K}$ の準静的領域における変形機構を転位同士の切り合いによるものと仮定し、図5に示すような転位の動力学モデル⁽¹⁰⁾を用いて評価した。簡単のため、

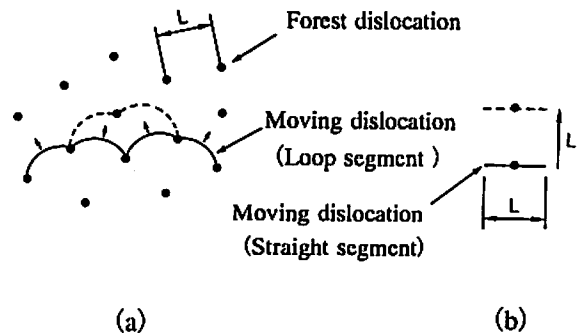


図5 簡単な転位の動力学モデル (a)ループセグメントモデル (b)剛セグメントモデル

図の(a)に示した運動転位ループの運動の一ステップを、同図(b)に示したような長さLの直線転位セグメントの距離Lの運動に置き換えて扱う。Lは林転位の平均間隔である。このように考えると、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は運動転位が林転位との切り合いに要する時間を t_t とし、林転位間を通過するのに要する時間を t_v とすると

$$\dot{\gamma} = \rho_a b [L / (t_t + t_v)] \quad (3)$$

と表される。ここに

ρ_a : 運動転位密度 (単位体積中の運動転位の総長さ)
 b : バーガースベクトル

である。林転位との切り合いは熱活性化の助けを借りて行われるため、 t_t は次式のように与えられる。

$$t_t = v^{-1} \exp[(E_c - \tau v^*) / kT] \quad (4)$$

ここに

v : デバイの振動数

E_c : 切り合いの真の活性化エネルギー

v^* : 活性化体積 $\approx Lb^2$

τ : せん断応力 ($= \tau_0 - \tau_a$)

である。前述するように $\dot{\epsilon} = 1$ /sec 以下の領域においては、ひずみ速度が低下するほど転位同士の切り合いによる律速機構が支配的になると考えられるため、Eq.(3)における t_t と t_v の関係は相対的に $t_t \gg t_v$ となる。よって、Eq.(3)は Eq.(4)より

$$\dot{\gamma} \approx \rho_a b L v \exp[-(E_c - \tau Lb^2) / kT] \quad (5)$$

と書ける。

これは運動転位が林転位と切り合う際の熱活性化待ち時間により律速される熱活性化流動の式で、変形応力はひずみ速度の対数に線形依存する。

式中の諸量の内、未知のものは林転位間隔 L と運動転位密度 ρ_a である。他の諸量については信頼できる数値あるいは関係式が得られている。林転位間隔 L は、ひずみ速度 10^{-3} /sec から 10^{-1} /sec の領域における σ_t vs. $\log \dot{\epsilon}$ の直線部分の勾配から Eq.(5)を用いて求めた。得られた L の値は 5.16×10^{-8} m である。また、活性化体積 v^* ($\approx Lb^2$) は 3.18×10^{-27} m³ ($\approx 200 b^3$) であり、面心立方金属の銅で得られた¹²⁾ 4.28×10^{-27} m³ と近い値を示した。運動転位密度 ρ_a は 10^{11} m⁻² 程度のオーダであることが知られており、ここでは 5×10^{11} m⁻² を使用した。転位同士の切り合いにはジョグが形成されるため、活性化エネルギー E_c は Ashby ら¹³⁾ が求めたジョグ形成のためのエネルギー $Gb^2/5$ を用いた。

上記の値を用いて計算した T=293K における $\sigma_t - \log \dot{\epsilon}$ 線図を鎖線で、Eq.(1)により求めた $\sigma_t - \log \dot{\epsilon}$ 線図を実線でそれぞれ図 6 に示した。変形応力が高くなる高ひずみ速度域では $t_v \gg t_t$ となり、転位同士の切り合い

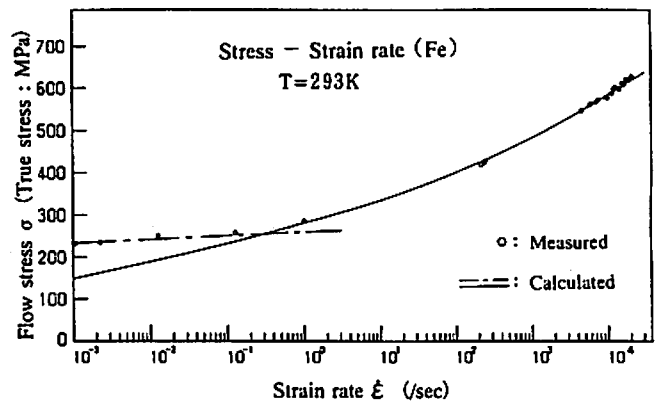


図6 ジョグ形成のための活性化エネルギー E_c を用いて計算した場合の $\sigma_t - \log \dot{\epsilon}$ 線図(鎖線)

は律速機構にはほとんど関与せず、キンク対の生成頻度が律速機構となる。また、 $\dot{\epsilon} = 10^{-1}$ /sec 以下の低ひずみ速度域では $t_t \gg t_v$ となり、転位の運動は林転位との切り合いによる機構が主体となる。したがって、T=293K における $\dot{\epsilon} = 10^{-1}$ /sec 以下の領域で Eq.(5)から得られる計算値と実測値がよい一致を示しているということは、この領域における変形の律速機構は運動転位が林転位を切る際の熱活性化過程に支配されているのではないかと考えることができる。

5. 結言

鉄の低温および高ひずみ速度域における変形応力のひずみ速度依存の機構は主に運動転位が高いパイエルスポテンシャルを乗り越える際のキンク対生成のための単一の熱活性化過程によって支配されているが、T=293K の準静的領域では熱活性化の助けによる転位同士の切り合いで律速されているのではないかと考えられる。

参考文献

- 1) Dowling, A. R., 他2名, J. Inst. Metals, 97, 215(1970).
- 2) Ferguson, W. G., 他2名, J. Appl. Phys. 38, 1863(1967).
- 3) J. D. Campbell and W. G. Ferguson, Phil. Mag., 21, 63(1970).
- 4) 野島武敏, 材料, Vol. 35, No397(1986), 1118-1124.
- 5) Aono, Y., 他2名: Rep. Res. Inst. Appl. Mechanics, Kyushu Univ., 24-92, 127(1981).
- 6) A. R. Rosenfield and G. T. Hahn, Trans. ASME, 59, 962(1966).
- 7) P. Perzyna, Inst. Phys. Conf. Ser., No. 21, 138(1974).
- 8) P. S. Follansbee, 他2名, J. de. Physique, C5, 25(1985).
- 9) 崎野清憲, 塩入淳平, 日本機械学会論文集, A-60, 77(1994).
- 10) Shioiri, J. and Satoh K., Inst. Phys. Conf. Ser., No. 70, 89(1984).
- 11) 崎野清憲, 材料, Vol. 47, No. 1, pp. 8-13(1998).
- 12) Ashby M. F. and Elbaum C.: Constitutive Equations in Plasticity(A. S. Argon Ed.), MIT Press, 117(1975).