錫単結晶のペンシルグライドによる押込みクリープ変形*

藤原 雅美** 広川 友雄***

J. Japan Inst. Metals, Vol. 56, No. 2 (1992), pp. 155-160

Indentation Creep Deformation by Pencil Glide in Tin Crystals*

Masami Fujiwara** and Tomoo Hirokawa***

Indentation tests were carried out to investigate the deformation mechanism of [001] pencil glide in tin crystals at the temperatures of 298, 333 and 373 K using a Vickers microhardness tester with a heating stage. To further examine the nature of the pencil glide, tensile tests were performed at various strain rates in the same temperature range. The steady state deformation of the pencil glide occurred in tension, in the range of strain rate and temperature. The size of the impression produced increased with increasing load and temperature. The activation energy and the activation volume of the pencil glide were 27~41 kJ/mol and $2.1 \times 10^{-25} \sim 2.7 \times 10^{-25} \text{ m}^3$, respectively. It was concluded that the steady state deformation due to the pencil glide was rate-controlled probably by cross slip between planes containing the [001] slip vector.

(Received March 15, 1991)

Keywords: tin crystal, pencil glide, cross slip, Vickers microhardness, indentation creep, high-temperature hardness, activation energy, activation volume, rate-controlling mechanism

I. 緒 言

高温における硬さ値は、負荷時間が経過するにつれて低下することが知られている⁽¹⁾。一定荷重の下で圧痕の大きさが負荷時間とともに増大する変形を、「硬さのクリープ」と呼ぶことがある⁽²⁾。Indentation creep 法(以下では押込みクリープ法と記す)⁽³⁾は、硬さのクリープ現象を利用して材料の力学的性質を調べる方法であり、少数の微小試験片からクリープに関する情報を求めるのに好都合な手段として、近年注目されている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。

押込みクリープ法で求めた変形の活性化エネルギーやひずみ速度の応力指数は、従来の一軸クリープ法によって得られた結果と相関性はあっても一致しない場合が多い。その主な原因として以下のことが考えられる。

(1) 圧子を押込んだとき、圧痕周辺の表面が隆起して押込み抵抗に影響する場合がある。

(2) 圧子による変形が複雑なため、パラメータとして用いられる応力やひずみ速度が通常のものと同義でなく、両者における各々の値どうしに比例関係のない場合がある。

(3) 圧子による加工硬化が、変形中に十分回復しない場合がある。

本論文では、ビッカース微小硬さ計の圧子を押込んだと

き試料の厚さ方向だけにペンシルグライドする結晶学的条件にある白錫単結晶を用いて⁽⁷⁾、上記(1)(2)(3)の事項を含まない条件下で硬さ計による押込みクリープ試験を行い、変形の活性化エネルギーと活性化体積を求めて変形の律速機構を推定している。

II. 実験方法

ビッカース微小硬さ計を利用した押込みクリープ試験法と試料については、既報⁽⁷⁾に述べた通りである。本研究における押込みクリープ試験は、298 K・333 K および 373 K (各々は $0.59T_m$ ・ $0.66T_m$ および $0.74T_m$ に相当、 T_m は融点)の各温度で行われた。試験中の温度変動は ± 2 K 以内であった。

引張試験に用いた試料は、異なる結晶方位をもつ2種類の白錫単結晶(純度99.999質量%Sn)である。この結晶の寸法は $2 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ である。試料の結晶方位は、 $(5 \times 50 \text{ mm}^2)$ 表面に生成されたエッチピット内部のフェセット⁽⁸⁾の形状および各フェセットの角度関係を調べて確かめられた。以後では、主すべり系が[001](010)のものをA試料と呼び、[001](110)のものをB試料と呼ぶことにする。Fig. 1のステレオ投影図に、試料AおよびBの引張軸の方向と $(5 \times 50 \text{ mm}^2)$ 表面の方向を示す。A試料の

* 1990年9月日本金属学会秋期大会に発表

** 日本大学工学部(College of Engineering, Nihon University, Koriyama)

*** 日本大学工学部、現在：日本大学名誉教授(College of Engineering, Nihon University, Koriyama. Present situation: Emeritus Professor, Nihon University)

Fig. 1 Stereographic projection of specimen axes. The open circle and square show the tensile axis and the normal to the $5 \times 50 \text{ mm}^2$ -surface of A-specimen, respectively. The closed circle and square are for the case of B-specimen.

引張軸は $[001]$ および $[010]$ 方向から 45° 傾いており、B試料のものは $[001]$ および $[110]$ 方向から 45° 傾いている。また試料AおよびBの $(5 \times 50 \text{ mm}^2)$ 表面は、 (001) 面と (010) 面および (001) 面と (110) 面から各々 45° 傾いている。したがって、試料AとBにおける主すべり系のシュミット因子は0.5である。試料は、 $298 \sim 373 \text{ K}$ の各温度に保たれたシリコン油中で、 $1.3 \times 10^{-2} \sim 3.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の各初ひずみ速度で引張られた。

III. 結果および考察

1. $[001]$ 転位によるペンシルグライド

(1) 硬さ計圧子による変形⁽⁷⁾

白錫単結晶の (001) 表面に硬さ計のピラミッド状圧子を押込んだとき、反対側の試料裏面には圧痕と同形で同一寸法の突起が形成され、突起の斜面には「ピラミッド」をとり巻くような四角形状で少し波打ったすべり線が生ずることが知られている。このとき、圧子による着点周辺では試料の厚さ方向だけにすべる $[001]$ ペンシルグライドが生ずる。変形した試料部分では、増殖した $[001]$ 転位ループが $(100) \cdot (010) \cdot (110)$ および $(1\bar{1}0)$ 面間の交差すべりをくり返ししながら他の増殖転位ループと合体するなどして一様なせん断応力場に沿って大きなループを形成し、あるいはさらに合体してプリズマチックループを形成し、これが厚さ方向に移動してペンシルグライドが起こると考えられている。

(2) 引張変形

圧子下で活動したすべり系の性質を調べるために、試料

AとBについて引張試験が行われた。Fig. 2(a)は、A試料を温度 298 K でせん断ひずみが約3%になるまで引張ったときの $(5 \times 50 \text{ mm}^2)$ 表面に生じたすべり線を示す。各すべり線は試料の 5 mm 方向つまり $[100]$ 方向に平行であるが少し波打っており、交差すべりが生じたことを示している。図(b)は、同じA試料の $(2 \times 50 \text{ mm}^2)$ 表面つまり (100) 表面の様子を示す。この表面にはすべり線は認められない。図(c)は、A試料を温度 373 K で図(a)の場合と同じせん断ひずみまで引張ったときの $(5 \times 50 \text{ mm}^2)$ 表面に生じたすべり線である(温度が 333 K のときのすべり線の状態は、 373 K の場合とほぼ同様であった)。この表面には波状のすべり帯が形成され、そこに大きな段差が生じて

Fig. 2 Slip lines of A-specimens. The micrographs (a) and (b) show slip lines on the $5 \times 50 \text{ mm}^2$ -top surface and the $2 \times 50 \text{ mm}^2$ -side surface of specimen deformed in tension at 298 K by about 3% shear strain, respectively. The micrograph (c) shows slip lines on the top surface of specimen deformed at 373 K by the same shear strain as in (a).

いる。この段差はひずみが増大するにつれて大きくなるが、ひずみが約10%になるまで引張っても段と段の間の領域にすべり線は認められなかった。なおこの場合も、(2×50 mm²)表面にはすべり線は認められなかった。一方 B 試料においても、各温度下で生じたすべり線の形態は A 試料の場合とほぼ同様であった。上記の結果は、298 K・333 K および 373 K の各温度下で [001] 転位が (100)・(010)・(110) および (1 $\bar{1}$ 0) 面間の交差すべりを伴いながらベンシルグライドすることを示している。

Fig. 3 は、初ひずみ速度が $3.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ であるときの試料 A および B の分解せん断応力-せん断ひずみ曲線である。温度 298 K における A と B 試料の変形は、各々ある一定の上限値をもって鋸歯状に変動する応力下で進行している(このような応力変動は、ひずみが約10%になっても続いていた)。一方 333 K および 373 K の場合、両試料は各々ほぼ一定な応力下で変形している。また、初ひずみ速度が $1.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ のときも一定な変形応力下で塑性流動することが見出され、この温度範囲では広いひずみ速度範囲でいわゆる定常変形状態⁽⁹⁾が現れることが確かめられた。以上のように、分解せん断応力-せん断ひずみ曲線の形は 298 K の場合と 333 K および 373 K の場合とでは異なっている。このことは、前述したように、すべり線の形態が 298 K の場合と 333 K および 373 K の場合とで異なっていることに対応している。

2. 硬さ計による押込みクリープ試験

(1) 圧子による変形過程

圧子によって試料の厚さ方向にベンシルグライドが生ずる場合、およそ次のような機構で変形することが知られている⁽⁷⁾。圧子が試料表面に達すると、その周辺の試料部分は着点からの距離によって決まるあるひずみ速度で沈下し始める。圧痕の周縁部分が負荷時間をかけて圧子斜面と

同じ角度まで傾くと、変形した試料表面が圧子斜面に接してこの部分の変形は終わり、次にその外側部分が同じ角度まで傾くといった過程をくり返して圧痕は負荷時間とともに拡がっていく。そして圧子斜面と同じ角度まで傾く変形は、圧痕の周縁に働くせん断応力が降伏相当応力にまで低下したところで停止する。

Fig. 4 中の下の直線は、圧子を (001) 表面に押込んだときに生じた圧痕の対角線長さ D_1 とそれに対応する突起の対角線長さ D_2 の比が、任意の ϕ に対して常に 1 となることを示している。ここで ϕ は、図中に示した圧痕の一边と試料の [110] 方向とのなす角である。上記の結果は、圧子をどのような角度 ϕ で押込んで、圧子下では試料の厚さ方向に [001] ベンシルグライドが発生し、圧痕の真下の試料裏面には圧痕と同じ大きさの突起が生ずることを表している。

図中の上の曲線は、圧痕の対角線長さ D_1 が角度 ϕ によって変化する様子を示す。 D_1 の値は、 ϕ が 0° または 90° のとき最大となり、 45° のとき最小となっている。前者では [001] 転位が圧痕の縁に沿って主に (110) および (1 $\bar{1}$ 0) 面を移動し、後者では主に (100) および (010) 面を移動することになる。上記の結果は、主すべり系が [001] (110) である B 試料よりも主すべり系が [001] (010) である A 試料の降伏応力のほうが高いこと (Fig. 3 を参照) によく対応している。なおこれ以降では、 ϕ が 45° になるように試料の方向を調整して圧子を押し込むことにする。

(2) 圧痕の大きさの負荷時間依存性

Fig. 5 の (a) は、温度 298 K の下で荷重が 0.10 N・0.25 N および 0.49 N のときの圧痕の一边の長さ x の逆数と負荷時間 t との関係を示す。例えば荷重が 0.49 N の場合、圧痕の大きさは負荷時間が約 60 s に至るまで増大し続けるが、それから以降では一定となっている。つまり

Fig. 3 Stress-strain curves of A and B specimens, which are deformed at the temperatures of 298, 333 and 373 K and at the strain rate of $3.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Fig. 4 Relation between size of impression and operating angle. The angle is defined as ϕ in the inset. D_1 and D_2 denote the diagonal length of impression and that of the corresponding projection, respectively. A load of 0.49 N is applied for 30 s at 298 K.

Fig. 5 (a) Dependence of applied load and loading time, t on reciprocal of x . The symbol x denotes the side length of impression. Loads of 0.10, 0.25 and 0.49 N are applied at 298 K. (b) relation between slope of line in (a), a , and Reciprocal of applied load, $1/W$.

圧子が試料表面に達してから約 60 s の間、圧子によるクリープ変形が続くことを表している。図において、硬さのクリープ過程にある測定値は直線(図中の太線)に乗っている、次の実験式が成り立つことになる。

$$1/x = a(b - \ln t) \quad (1)$$

3 本の直線グラフの延長線は、時間軸のほぼ一点で交差しており、式(1)の b は荷重に依存しない値であることを示している。また図(b)に示すように、式(1)の a の値は荷重にほぼ反比例する傾向が認められる。

Fig. 6 の(a)は、荷重 0.25 N の下で温度が 298 K・333 K および 373 K である場合の x の逆数と t の関係を示したものである。変形が停止したときの圧痕の大きさは、一定荷重の下では温度を変えてもほとんど同じ値になることが示されている。前報⁷⁾で述べたように、圧子斜面と同じ角度まで傾く変形は、圧痕周縁に働く厚さ方向のせん断応力が降伏相当応力にまで低下したところで停止する。したがって上記の結果は、変形の終状態において圧痕の周縁部

Fig. 6 (a) Dependence of test temperature and loading time, t on reciprocal of x . A load of 0.25 N is applied at 298, 333 and 373 K. (b) Relation between slope of line in (a), a , and temperature, T .

分に働くせん断応力つまり引張試験における降伏応力がこの温度範囲では比較的わずかに変化しないことに対応している。図において、硬さのクリープ過程にある測定値は直線(図中の太線)に乗っている、この場合も式(1)が成り立っている。直線グラフの傾向から、式(1)の b は温度が高くなるにつれて減少することが分かる。また図(b)から、式(1)の a は温度にほぼ比例して増大する傾向が認められる。

以上のように、式(1)の a は温度に比例するとともに荷重の大きさにほぼ反比例し、 b は温度が高くなると小さくなるが荷重にはほとんど影響されない値である。

3. ペンシルグライドによるクリープ変形

(1) 変形の活性化エネルギーと活性化体積

前述のように、硬さ計の圧子を(001)面に押込んだとき、着点周辺ではその厚さ方向に[001]ペンシルグライドが生ずる。引張試験において、温度 298 K ではある一定の上限値をもって鋸歯状に変動する応力下で変形は進行し、333 K 以上の温度では広いひずみ速度範囲にわたって一定な変形応力下で[001]転位による塑性流動が生ずるの

で、同じ温度下の圧子によるペンシルグライドもほぼ定常変形していると考えられる。また圧痕の大きさは、温度が高いときほど荷重時間とともに速やかに大きくなる (Fig. 6(a) 参照) ので、この変形は何らかの熱活性化過程によって律速されていることになる。以下では、この場合の圧子による変形が熱活性化されたすべりで律速されているとして、変形の活性化エネルギーと活性化体積とを求める。

圧痕が荷重時間とともに大きくなるとき、厚さ方向のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ はよく知られた次式で与えられる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

$$\dot{\epsilon} = \rho b \bar{v} \quad (2)$$

ここで ρ は可動転位の密度、この b はパーガースベクトルの大きさである。また $\bar{v}$ は転位の平均すべり速度であり、次式で与えられる⁽⁹⁾。

$$\bar{v} = v_0 \exp \left(-\frac{\Delta H - \sigma q}{kT} \right) \quad (3)$$

ここで、 v_0 は障害の配置や原子振動などに関する $\bar{v}$ の前置因子、 σ は転位に働く正味のせん断応力であるが、ペンシルグライドがたえず未変形領域に進行し、内部応力としては非常に小さいので、外部せん断応力にほぼ等しいと考えてよい。また ΔH は変形の活性化エネルギー、 q は活性化体積、 k はボルツマン定数、 T は試験温度である。

圧子が試料表面に達すると、まず着力点周辺の一様なせん断応力場に沿って同心円状のすべり線が生じ、圧子が進入するにつれて圧痕のすぐ外側の部分にはその縁に沿ったすべり線が発生するようになる⁽⁷⁾。圧痕周辺では厚さ方向へ沈み込むような変形を生じているが、圧痕の周縁に沿った部分があるひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で荷重時間 t をかけて圧子斜面の同じ角度 ϵ (22°) まで傾くとすると、傾角 ϵ は $\dot{\epsilon} t$ で表される。ここでは簡単化して、初めから圧痕の縁に沿うような形状のすべり線が発生すると考えると、荷重時間 t における圧痕の周縁部分に生ずるせん断ひずみは、式(2)と(3)から

$$Kt \exp \left(-\frac{\Delta H - \sigma q}{kT} \right) = \epsilon \quad (4)$$

となる。ここで K は $\rho b v_0$ 、 ϵ は圧子斜面の傾角に相当するせん断ひずみ 0.4 である。このときの圧痕の一辺の長さ x と試料厚さ h からなる四角柱を考えると、圧痕の縁に沿った部分に生ずる厚さ方向のせん断応力 σ は次式で与えられる。

$$\sigma = W/4hx \quad (5)$$

ここで W は圧子による荷重である。したがって式(4)と(5)から次の関係が導かれる。

$$1/x = A(B - \ln t) \quad (6)$$

ただし、

$$A = 4hkT/qW, \quad (7)$$

$$B = \ln(0.4/K) + \Delta H/kT. \quad (8)$$

式(6)は、荷重や温度に対して次のような性質をもっている。(i) A は温度 T に比例し、そして荷重 W に反比例する。これは式(1)の a の傾向と同じである。(ii) B は、

K が応力に依存する値であっても $\ln$ 項に含まれるので応力に対してあまり変化せず、温度が高くなると減少することになる。これは式(1)の b の傾向と同じである。(iii) 温度は同じで荷重の大きさだけを変えた場合、式(6)を表す x^{-1} 対 $\ln t$ の直線の延長線は時間軸の一点で交差することになる。これは Fig. 5(a) に示した結果と一致している。(iv) 荷重は同じで温度が異なる場合、式(6)を表す直線の延長線は時間軸を異なる点で横切ることになる。これは Fig. 6(a) に示した結果と一致している。以上のように、式(6)は荷重や温度に対して実験式(1)と同様な性質をもっており、式(6)を用いて Fig. 5(a) と 6(a) の結果をうまく説明することができる。

Fig. 5(a) および 6(a) の直線の傾き a つまり A から、活性化体積 q の値を求めることができる。Fig. 5(b) の直線の傾きは $4hkT/q$ に相当するので、温度 298 K における q の値は約 $2.7 \times 10^{-25} \text{ m}^3$ となる。また、Fig. 6(b) の直線の傾き ($4hk/qW$) から求めた q の値は約 $2.1 \times 10^{-25} \text{ m}^3$ となり、Fig. 5(b) において求めたものとはほぼ等しい値となる。すなわち、298 K と 333~373 K における変形機構はほとんど同じであることを示唆している。しかしながら、Fig. 2 のすべり線観察の結果とは異なっている。この理由については、現在のところ不明である。

次に、式(8)の B に含まれる活性化エネルギー ΔH の求め方を述べる。Fig. 6(a) の直線を延長したときに時間軸を切るところの $\ln t$ の値から、 b つまり B の値を知ることができる。図において、ある温度 T_1 の直線を時間軸まで延長したときの交点の値を $\ln t_1$ つまり B_1 とし、温度 T_2 の場合の値を $\ln t_2$ つまり B_2 とする。各条件下の式(8)の内容をもつ B_1 と B_2 の差を求めて整理すると、この場合の活性化エネルギー ΔH は次のように表される。

$$\Delta H = \frac{kT_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln(t_2/t_1) \quad (9)$$

この式に実験値 (Fig. 6(a) から求めた上述の $\ln t_1$ および $\ln t_2$) を代入して得られた活性化エネルギー ΔH の値は、298 K から 373 K において 27~41 kJ/mol であった。

(2) ペンシルグライドを律速する機構

多くの金属において、クリープ変形の活性化エネルギーは温度範囲によって異なることが知られている⁽¹²⁾。Suh ら⁽¹³⁾によれば、純錫におけるクリープ変形の見かけ上の活性化エネルギーは、343~423 K ($0.68 \sim 0.84 T_m$) では 40~52 kJ/mol, 423~473 K ($0.84 \sim 0.94 T_m$) では 98~118 kJ/mol である。後者の温度域における値は、自己格子拡散の活性化エネルギー (105 kJ/mol)⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾ にほぼ等しいので、この温度域の定常変形は自己格子拡散支配による動的回復によって律速され则认为られている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

本実験から得られた 298~373 K ($0.59 \sim 0.74 T_m$) におけるペンシルグライドの活性化エネルギーの値は 27~41 kJ/mol であり、上述の一軸クリープ法による 343~423 K における見かけ上の活性化エネルギー (40~52 kJ/mol)

とはほぼ同じ大きさである。また Chu と Li⁽¹⁸⁾が、温度 338 K 付近で(001)表面に細い円柱を押込んで得た活性化エネルギー ΔH の値(約 37 kJ/mol)ともほぼ一致している。これらの値は、自己格子拡散の活性化エネルギーとは明らかに異なっており、この温度域における変形は上述のものとは別の機構で律速されていると考えられる。

本実験の温度域におけるペンシルグライドの熱活性化機構の支配因子としては、(1)grown-in 転位との交切、(2)転位芯拡散による上昇運動、(3)パイエルス機構、(4)交差すべり、などが考えられるが、現時点では特定することはできない。しかしながら、本実験で得た活性化体積から推定される熱活性化点の平均間隔は約 2×10^{-6} m であり、初転位密度から推定される林転位の平均間隔(約 30×10^{-6} m)よりもかなり小さいので、(1)の可能性は少ないといえる。また、圧痕とそれに対応する突起の大きさがほぼ完全に一致するというような極単純なペンシルグライドにおいては(2)の必然性は考え難いし、(3)の場合における活性化体積は一般に $10b^3 \sim 100b^3$ 程度であって、これは本実験において得た値($2.1 \times 10^{-25} \sim 2.7 \times 10^{-25}$ m³)よりもはるかに小さい。結局、(4)の交差すべりによる可能性が出てくる。前述したように、本実験の条件下で硬さ計の圧子を(001)表面に押込んだとき、増殖した[001]転位ループは交差すべりをくり返ししながら他の転位ループと合体し、あるいはさらに合体してブリスマチックループを形成するなどして、厚さ方向だけにすべる極単純な[001]ペンシルグライドを生ずる。この一連の過程における転位ループの交差すべりが、主としてこの場合の変形を律速していると考えられる。すなわち、298~373 K の各温度下で硬さ計の圧子を白錫単結晶の(001)表面に押込んだときに生ずる[001]ペンシルグライドでは、交差すべりの熱活性化過程が式(3)によって表される転位の運動速度を律速していると推定される。

IV. 結 言

試料の厚さ方向に[001]ペンシルグライドが生ずる白錫単結晶を用いて、298~373 K の温度下でビッカース微小硬さ計を利用した押込みクリープ試験が行われた。また圧子下で活動したすべり系の性質を調べるために、引張試験が行われた。この場合のペンシルグライドの活性化エネルギーと活性化体積が求められ、変形の律速機構が推定された。結果は次のように要約される。

(1) 引張試験によって交差すべりを伴う[001]ペンシルグライドが生ずるとき、298 K における変形はある一定の上限値をもった鋸歯状に変動する応力下で進行する。一方 333~373 K の場合、広いひずみ速度範囲にわたってほぼ一定な変形応力下で塑性流動する。

(2) 硬さ計のピラミッド状圧子を試料の(001)表面に押込んだとき、試料の[110]方向と圧痕の一边とのなす角 ϕ がどのような値であっても、交差すべりを伴いながら厚さ方向に[001]ペンシルグライドが生ずる。角度 ϕ の値が 0°または90°のとき圧痕は最大となり、45°のとき最小となる。この結果は、引張試験において主すべり系が[001](010)である試料の降伏応力のほうが[001](110)の場合よりも高いことに対応している。

(3) ビッカース微小硬さ計を利用した押込みクリープ試験において、温度が高いときほど圧痕の大きさが負荷時間とともに速やかに増大する。「硬さのクリープ」が生ずる。この試験法から得られた[001]ペンシルグライドの活性化エネルギーは、298~373 K において 27~41 kJ/mol であった。また活性化体積は $2.1 \times 10^{-25} \sim 2.7 \times 10^{-25}$ m³ であり、ほとんど温度依存性がなかった。

(4) 温度 298~373 K で、硬さ計の圧子を(001)表面に押込んだときに生ずる[001]ペンシルグライドでは、主として交差すべりが変形を律速していると推定される。

文 献

- (1) 例えば、Y. Kumashiro and E. Sakuma: J. Mater. Sci., **15**(1980), 1321.
- (2) 依田連平, 佐藤有一, 真下美佐男, 山内 勘: 日本金属学会誌, **34**(1970), 526.
- (3) S. N. G. Chu and J. C. M. Li: J. Mater. Sci., **12**(1977), 2200.
- (4) 後藤正治, 森 和彦, 吉永日出男: 日本金属学会誌, **46**(1982), 764.
- (5) 山口正治, 馬越祐吉, 山根寿巳: 日本金属学会秋期大会講演概要, (1983), 417.
- (6) M. J. Maya and W. D. Nix: Acta Met., **36**(1988), 2183.
- (7) 藤原雅美, 広川友雄: 日本金属学会誌, **56**(1992), 148.
- (8) K. Honda and T. Hirokawa: Japan. J. Appl. Phys., **10**(1971), 1489.
- (9) J. P. Poirier: 結晶の高温塑性, 舟久保熙康・小口醇 訳, 養賢堂, (1980), 12, 100, 123.
- (10) E. Orowan and J. West: Iron Steel Inst., **54**(1946-47), 45.
- (11) E. Orowan: in Symposium on Internal Stresses in Metals, Inst. Met., London, (1948), 451.
- (12) H. Luthy, A. K. Miller and O. D. Sherby: Acta Met., **28**(1980), 169.
- (13) S. H. Suh, J. B. Cohen and J. Weertman: Metall. Trans., **14A**(1983), 117.
- (14) J. D. Meakin and E. Klokholm: Trans. TMS-AIME, **218**(1960), 463.
- (15) C. Coston and N. H. Nachtrieb: J. Phys. Chem., **68**(1964), 2219.
- (16) J. E. Breen and J. Weertman: J. Met., **7**(1955), 1230.
- (17) J. Weertman: J. Appl. Phys., **28**(1957), 196.
- (18) S. N. G. Chu and J. C. M. Li: Mater. Sci. and Eng., **39**(1979), 1.