高静水圧力下におけるカドミウム単結晶の塑性挙動[†]

中 島 孝 慈* 藤 城 郁 哉** 武 藤 進***

Plastic Deformation Behavior of Cadmium Single Crystals under High Hydrostatic Pressure

by

Takayoshi NAKAJIMA*, Ikuya FUJISHIRO** and Susumu MUTO***

In the preceeding study on the effect of hydrostatic pressure on the flow stress of polycrystalline cadmium, it was indicated that the rate of increase of the flow stress $\Delta\sigma/\sigma$ due to 600 MPa was larger than that of the shear modulus $\Delta G/G$ due to the same pressure. In the present study, tensile tests were made under hydrostatic pressures of 10 and 600 MPa on cadmium single crystals of four different orientations.

The results obtained are summarized as follows.

(1) The yield stress for the slip in the basal plane increased by 6.9% at 600 MPa and this amount of the rate of increase was in good agreement with $\Delta G/G$ of 7.0% on the basal plane. The value of $\Delta\sigma/\sigma$ for the basal slip increased monotonically with an increase of strain.

(2) A non-basal slip system operative in cadmium crystals was $\{11\bar{2}2\} \langle 1123 \rangle$. The value of $\Delta\sigma/\sigma$ for this slip was 16 to 18% and it was considerably larger than $\Delta G/G$ of 4.9% on the $\{11\bar{2}2\}$ plane. Further, a decrease in the strain hardening rate due to high pressure occurred in the high strain range near to the maximum load point.

(3) In the extension along $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ and $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, $\Delta\sigma/\sigma$ for the deformation twinning was smaller than those for the basal and the $\{11\bar{2}2\} \langle 1123 \rangle$ slip. Especially in the $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ crystals the flow stress σ and $\Delta\sigma/\sigma$ for the slip within the twin block were well consistent with those for the $\{11\bar{2}2\} \langle 1123 \rangle$ slip.

キー・ワード：カドミウム単結晶，静水圧力，流動応力，すべり変形，双晶変形

1 緒 言

金属材料の流動応力に及ぼす静水圧力の影響は一般的には少なく，増加が認められる場合でも横弾性係数の圧力による増加 $\Delta G/G$ の程度である。小口¹⁾らは1.2 GPa という高圧力下で，銅や鉄では2~3%，アルミニウムや亜鉛では約10%，流動応力が増加することを示し，これらの値が $\Delta G/G$ に一致することを明らかにした。Chua²⁾らは，液体窒素温度，5.15 kb (515 MPa) の条件下で多結晶体カリウムを引張り，42%という大きい降伏応力の増加を測定したけれども，この値も $\Delta G/G$ に相当する大きさである。

一方，筆者らは多結晶カドミウムの圧延材および焼なまし材³⁾を600 MPaの静水圧力下で引張試験して，流動応力の圧力による増加率 $\Delta\sigma/\sigma$ が $\Delta G/G$ (5.25%) より著しく大きく，場合によっては $\Delta G/G$ の3倍以上にも達することを明らかにし，また，集合組織，ひずみ硬化状態，結晶粒径など試験片の内部構造の違い

に依存して変ることを示した。さらに，結晶粒界近傍の変形や高ひずみ域での変形に，それぞれ圧力による軟化現象やひずみ硬化率の減少が認められることを指摘した。カドミウムの多結晶体が塑性変形を続けるためには，底面すべりと双晶変形のほかに非底面すべりの活動が不可欠である。これまでに非底面すべりとして， $\{10\bar{1}1\} \langle 12\bar{1}0 \rangle$ および $\{11\bar{2}2\} \langle 1123 \rangle$ すべりが確認^{5,6)}されており，流動応力やその温度依存性についても報告⁷⁾されている。しかし，静水圧力下における多結晶体カドミウムの塑性挙動を理解するためには，それぞれの変形様式による塑性流動に対する圧力の効果を明らかにする必要がある。

本研究では，これらの変形様式が優先的に生ずる特定方位のカドミウム単結晶を10および600 MPaの圧力下で引張試験し，また，一部の方位のものには圧縮試験を行った。その結果，得られた応力-ひずみ関係と多結晶体のものを比較検討した。さらに，多結晶体

[†] 本報を「カドミウムの流動応力に及ぼす静水圧力の影響 (第3報)」(Effect of Hydrostatic Pressure on Flow Stress of Cadmium, III) とする。

原稿受理 昭和61年12月8日 Received Dec. 8, 1986

* 正会員 富山工業高等専門学校 富山市本郷町, Toyama National College of Technology, Hongo-machi, Toyama

** 正会員 三重大学工学部 津市上浜町, Faculty of Engineering, Mie University, Kamihama-cho, Tsu

*** 日本碍子(株) 名古屋瑞穂区須田町, NGK Insulators Ltd., Suda-cho, Mizuho-ku, Nagoya

カドミウムの焼なまし材について圧力下のひずみ速度変更試験も実施して流動応力のひずみ速度依存性とその圧力依存性を調べ、熱活性化過程の観点から $\Delta\sigma/\sigma$ を考察した。

2 試験片および実験方法

2.1 単結晶試験片

出発原料である粒状カドミウムの純度は前報³⁾⁴⁾と同じ 99.9% である。以下に述べるとおり、基本的にはブリジマン法によって単結晶を作成した。まず、黒鉛の分割型をつばを用いて直径 4 mm の丸棒単結晶を成長させた。このとき、丸棒の軸を途中で 20° 曲げておき、底面の方位が最大 20° 異なる 2 種類の単結晶を得た。これらを種としてさらに方位の異なる単結晶を成長させて、最終的に後述する 4 種類の丸棒単結晶を作った。つぎに、6 本の試験片（平行部幅 2 mm、長さ 10 mm、肩部幅 4 mm）の列が引張軸方向に連なるようにフライス加工した厚さ 2 mm の多結晶圧延板の一端に、上記の種結晶（長さ 40 mm）を溶接した。種結晶の下端から 20 mm を残して、この素材の残部を管状炉内で溶融した後、炉を引上げて種結晶と同じ方位の単結晶を成長させた。この場合、つばと結晶素材の間の空間（厚さ 2 mm）に窒化ホウ素（HBN）の粉末を充てんし、これを型とするソフトモールド法を用いた。この単結晶の肩部の中央をアシッドカッターで切断し、これらに黄銅製のねじ部と頭部をはんだ付けして、前報³⁾⁴⁾の多結晶試験片と同じ外観を持つ引張用単結晶試験片を得た。また、圧縮用単結晶角棒（4×4 mm²、長さ 200 mm）もソフトモールド法で作成した。これをクリスタルカッターで切断し、中心部を放電加工した圧縮試験片の形状寸法を Fig. 1 に示す。

Fig. 1. Shape of specimen for compressive test.

Fig. 2 は単結晶試験片 B, C, P-I および P-II の荷重軸を規準三角形上に示したものである。P-I と P-II は双晶形成後に方位が図中の矢印で示した位置に変る。また、Table I にそれぞれの試験に用いた結晶の方位を示す。ここで、 ϕ は c 軸と引張軸のなす角であり、 λ は $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ と引張軸のなす角である。さら

Table I. Crystal orientation of specimens tested.

Specimen		Orientation (degree)	
		ϕ	λ
Tensile	B	44.0	46.0
	C	1.5	89.0
	P-I	88.5	30.0
	P-II	89.0	2.0
Compressive	P-I	88.5	30.0
	P-II	88.0	3.0

Fig. 2. Stereographic projection for crystal orientation of specimens tested.

Fig. 3. Crystallographic representation for specimens tested.

に、Fig. 3 は試験片表面および荷重軸に対する結晶格子の配置を模式的に示したものである。これらの結晶に予想される変形挙動の特徴を以下に列挙する。

- (1) 試験片 B の引張試験；底面すべりで変形する。このすべりの Schmid factor は 0.5 である。
- (2) 試験片 C の引張試験；底面すべり，双晶変形， $\{10\bar{1}\}\langle 1\bar{2}10 \rangle$ すべりは生じ得ない。 $\{11\bar{2}\}\langle 11\bar{2}3 \rangle$ の 6 重すべりが生ずる。
- (3) 試験片 P-I, P-II の引張試験；底面すべりは生じ得ないので，非底面すべりまたは双晶により変形

する。双晶内では、P-I はC と、P-II はB と同じすべりが生ずる。

(4) 試験片 P-I、P-II の圧縮試験；底面すべりと双晶変形は生じ得ない。非底面すべりの2重すべりが起こる。

2.2 実験方法

10 MPa (以下、常圧と呼ぶ) および 600 MPa の圧力下の引張試験については前報⁴⁾と同じ方法で行った。結果の整理にあたり、600 MPa 下の荷重計出力に対して、荷重計の感度低下分 (1.7%) および試験片の断面積減少分を補正した。これらを合せた補正量は試験片 B では2.5%、C では2.1%、P では2.9%である。なお、圧力による断面積の減少分は、それぞれの方位の線圧縮率に基づいて計算したものである。

つぎに、これまでと同じ試験機を用いて試験片 P の圧縮試験を行った。試験手順の概要を以下に述べる。引張試験の場合とは逆に、下部プランジャに圧力測定用マンガンゲージを、上部プランジャに荷重計を配置する。また、圧力容器内の突起の上に円柱状圧縮台を置き、その上に圧縮試験片を載せる。この後の操作は引張りの場合と同様で、所定の試験圧力を得た後、圧力容器を上方に移動させれば圧縮台と荷重計の間で試験片が一定圧力下で圧縮される。この場合、初期ひずみ速度を引張りの場合 (10%/min) と同じにするため、圧力容器の引上速度を 0.2 mm/min に設定した。

最後に、多結晶体カドミウムの焼なまし材に関して、引張りの途中で変形速度を約10倍に上げるひずみ速度変更試験を行い、流動応力のひずみ速度感受性指数 m を測定した。この試験は、引張りのための複動ラムに定流量バルブを通して作動油を送り 1 mm/min の変形速度で引張試験を行いつつ、試験片が一定の伸びに達したときにこのバルブに並列に配置されている2番目の定流量バルブを開放し、流量を10倍にして引張速度を急変するものである。引張速度を v_1 から v_2 に変更し、流動応力が σ_1 から σ_2 に変化したとき、 m は $m = \ln(\sigma_2/\sigma_1)/\ln(v_2/v_1)$ で与えられる。

3 実験結果および考察

3.1 単結晶試験片の応力-ひずみ関係

3.1.1 試験片 B Fig. 4 に試験片 B の公称応力-ひずみ曲線を示す。破線は変形の初期段階で常圧から 600 MPa へ圧力変更し、600 MPa で20%程度引張った後、再び常圧へ圧力変更した場合の曲線である。常圧下で引張試験した実線では、20%程度のひずみまで流動応力 σ がむしろ減少しているのに対し、600 MPa ではひずみの増加とともに単調に大きくなっていて、硬化率が上昇している。亜鉛やカドミウムの底面すべりの硬化率が低いのは原子空孔の拡散を伴う刃状転位の上昇に基づく変形中の回復によると言われており、

Fig. 4. Nominal stress-strain curves for specimens B pulled under pressure.

600 MPa での硬化率の上昇は圧力が上述の回復にあずかる空孔の形成と拡散を押えるために生ずるものと考えられる。しかし、この機構による回復は容易で、常圧下での再引張りにおける σ は 20 min の中断時間内に実線の値に戻る。いずれにしても、底面すべりによる σ は 1 MPa 程度であり、多結晶体の σ に比べると著しく低い。

3.1.2 試験片 C 試験片 C の常圧および 600 MPa 下での公称応力-ひずみ曲線と、両者を比較して求めた 600 MPa の圧力による流動応力の増加率 $\Delta\sigma/\sigma$ を Fig. 5 に示す。いずれの場合にも、15%程度のひずみで σ は最高値に達するが、30%を過ぎるまでは σ の極端な減少や試験片の局部的なくびれの発生は認められなかった。引張強さは常圧下でも 100 MPa に近く、多結晶体の場合より高い。また、10~30%のひずみ範囲における $\Delta\sigma/\sigma$ は16~18%で、多結晶体カドミウムにおける $\Delta\sigma/\sigma$ の最高値に匹敵するほど高い。

Fig. 5. Nominal stress-strain curves and rate of increase of flow stress due to 600 MPa for specimens C pulled under pressure.

3.1.3 試験片 P-I および P-II Fig. 6 および Fig. 7 は、それぞれ P-II、P-I の引張試験による公称応力-ひずみ曲線を示す。これらの試験片では当初双晶の伝ば拡大で塑性変形が進行し、曲線は応力の増加と減少を繰返しながらしだいに上昇する。このひず

Fig. 6. Nominal stress-strain curves for specimens P-II pulled under pressure.

Fig. 7. Nominal stress-strain curves for specimens P-I pulled under pressure.

み域における σ に及ぼす圧力の影響を常圧と600 MPa下の曲線の比較から求めることは困難である。しかしながら、試験片全域への双晶の拡大が終了すると思われるひずみは600 MPa下での試験のものが明らかに小さい。例えばP-IIの場合、常圧下ではこれが7%であるのに対し、600 MPaでは5%である。つぎに、双晶内のすべり変形についてみると、P-Iでは最高圧力がそれぞれの圧力に対応する試験片Cの値にほぼ一致する。一方、P-IIの場合には双晶内底面すべりによる σ は試験片Bの σ より著しく高い。これは、このすべりによる変形に対する双晶境界の障害効果が大きいことによると考えられる。いずれにしろ、双晶内のすべり変形による σ も600 MPa下の方が高い。

非底面すべりの確認のために行った試験片Pの圧縮による応力-ひずみ関係において、供試した結晶の半数以上が3%までのひずみ段階で1~2回の急激な応力の降下を伴う異常を示し、その後の σ は低いまま推移した。Tapetadoらは亜鉛結晶を $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 圧縮して、上述のような応力の急減が底面すべりを伴うキンク対の形成によって生ずることを指摘した。また、 $\{11\bar{2}2\} \langle 11\bar{2}3 \rangle$ すべりで変形するとき、曲線はなめらかに上昇するけれども、最大応力を示した後 σ がゆるやかに減少する現象をbucklingと呼んで上述のkinkingと区別した。Fig. 8は試験片P-IIの圧縮による公称応力-ひずみ曲線を示したものである。これにはkin-

Fig. 8. Nominal stress-strain curves for specimens P-II compressed under pressure.

kingによる曲線は載せなかったが、600 MPa下の曲線にはbucklingによる σ の減少が認められる。また、600 MPaでの σ が明らかに大きい。

圧縮変形したP-IIの表面(底面)のSEM像をFig. 9に示す。Fig. 9には、不鮮明であるけれども、圧縮軸に垂直なすべり帯が認められる。一方、P-Iの底面上にはこれと同様なすべり帯が軸に対して60°、すべり帯相互に60°傾いていた。これらのことから、すでに述べた試験片CやP-Iの双晶内の変形を含め、カドミウム結晶において活動する非底面すべり系は $\{11\bar{2}2\} \langle 11\bar{2}3 \rangle$ であると考えられる。なお、どの試験片にも $\{10\bar{1}1\} \langle 12\bar{1}0 \rangle$ すべりと思われる変形の跡は観察できなかった。Krasovaらによると、 $\{11\bar{2}2\} \langle 11\bar{2}3 \rangle$ すべりの臨界せん断応力 τ_0 は底面すべりの τ_0 の20倍程度であるが、本実験では降伏応力の確認ができなかった。

Fig. 9. Scanning electron micrographs showing $\{11\bar{2}2\} \langle 11\bar{2}3 \rangle$ slip on specimen P-II compressed. (a) $\{11\bar{2}2\}$ slip bands on $\{0001\}$, (b) higher magnification in selected area.

3・2 圧力による流動応力の変化と横弾性係数の圧力依存性

多結晶体カドミウムの高圧力下の塑性挙動の特徴の

うち、特筆すべきものは、(1) $\Delta\sigma/\sigma$ が $\Delta G/G$ より大きいこと、(2) 圧力が軟化をもたらす場合が存在すること、である。ここでは、まず、各変形様式の活動に基づく応力-ひずみ関係の圧力による変化から見積られる $\Delta\sigma/\sigma$ と $\Delta G/G$ を比較検討する。

一般に、六方晶金属における任意の結晶面の横弾性係数 G と弾性定数 C_{ij} は次式で関係づけられる。

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{C_{44}} + \left(\frac{1}{C_{11} - C_{12}} - \frac{1}{2C_{44}} \right) (1 - r^2) + \left\{ \frac{2(C_{11} + C_{12}) + 4C_{13} + C_{33}}{(C_{11} + C_{12})C_{33} - 2C_{13}^2} + \frac{1}{C_{11} - C_{12}} - \frac{2}{C_{44}} \right\} r^2 (1 - r^2) \quad (1)$$

ここに、 r は結晶面法線の c 軸に対する方向余弦である。カドミウムに関する C_{ij} ¹¹⁾ およびその圧力微係数 dC_{ij}/dP ¹²⁾ の既存値 (Table II) と式(1)を用いて計算した、(0001), $\{11\bar{2}2\}$, $\{10\bar{1}2\}$ の $\Delta G/G$ を Table III に示す。また、Table III 中の $\Delta\sigma/\sigma$ は次のように評価した。

Table II. Elastic moduli of cadmium and these pressure derivatives.

c_{ij} (MPa)		dc_{ij}/dP
c_{11}	1.14×10^2	9.27
c_{33}	0.508	7.26
c_{44}	0.200	2.38
c_{12}	0.394	4.10
c_{13}	0.400	5.66

Table III. Rate of increase of shear modulus and of flow stress due to 600 MPa for three modes of plastic deformation.

Mode of plastic deformation	$\Delta G/G$ (%)	$\Delta\sigma/\sigma$ (%)
(0001) $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ Basal slip	7.0	6.9
$\{11\bar{2}2\}$ $\langle 11\bar{2}3 \rangle$ Pyramidal slip	4.9	16-18
$\{10\bar{1}2\}$ $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ Twinning	5.9	—

最初に、(0001) $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ すべりの $\Delta\sigma/\sigma$ については、Fig. 4 の 600 MPa での応力-ひずみ曲線の直線部分を圧力変更時のひずみ (約 1.5%) に延長して求めた応力と常圧で引張りを中断した時の応力を比較して $\Delta\sigma/\sigma = 6.9\%$ を得た。この値は $\Delta G/G = 7.0\%$ にほぼ一致する。この場合、常圧下での予ひずみは少ないので、この $\Delta\sigma/\sigma$ を圧力による降伏応力の増加とみなすことができる。降伏後の $\Delta\sigma/\sigma$ はひずみとともに単調に増加し、20%程度のひずみで約15%に達するけれども、このひずみ範囲では上述の(2)の傾向は認められない。

つぎに、 $\{11\bar{2}2\}\langle 11\bar{2}3 \rangle$ すべりについては引張りと同様に圧縮による二種類の流動曲線 (Fig. 5, Fig. 8) を得て

いる。Tapetado¹⁰⁾ らおよび頼田¹³⁾らは、亜鉛単結晶の引張りと同様に圧縮試験の結果に基づいて、このすべり系の場合にはせん断方向によって流動応力 σ が2倍程度も異なることを指摘した。本実験の場合、試験片Cの引張りと同様にP-IIの圧縮では $\{11\bar{2}2\}$ 面でのせん断方向が同じで、かつSchmid因子も同じ値であるから、これらの点を考慮することなく相互に曲線を比較できるはずである。ただし、P-IIの圧縮による σ は、変形の進行に伴う試験片断面積と真ひずみ速度の増加や σ に対する静水圧応力成分の効果が σ を増加させる方向に作用するので、試験片Cの σ より若干高い。いずれにしても、 $\{11\bar{2}2\}\langle 11\bar{2}3 \rangle$ すべりでは変形初期の硬化率がきわめて高く、降伏時の曲線の屈曲を確認できなかった。また、圧縮試験の場合、試験片端面の加工精度などが微妙に作用して引張試験の場合より結果の再現性が悪い。結局、Table III には、試験片Cの10~30%のひずみ域における $\Delta\sigma/\sigma$ を示した。この $\Delta\sigma/\sigma$ は $\{11\bar{2}2\}$ の $\Delta G/G$ より3倍以上大きい。

さらに、 $\{11\bar{2}2\}\langle 11\bar{2}3 \rangle$ すべりで注目する点は、最高応力に達する前に $\Delta\sigma/\sigma$ が極値を示し、その後、減少することである (Fig. 5)。この傾向は多結晶体カドミウムにおける(2)の傾向に対応するものと思われる。また、試験片P-IIの600 MPa下の圧縮変形において (Fig. 8)、高ひずみ域にみられた buckling 現象も、試験片Cや多結晶体の場合と同様に、高圧力が交差すべりに基づく動的回復を促す⁴⁾ために生ずるものと考えられる。すなわち、600 MPa下で硬化率が低下すると、 $\{11\bar{2}2\}\langle 11\bar{2}3 \rangle$ の2重すべりから単一のすべり系による局部変形に移行し、結晶面の回転を伴う幾何学的軟化を伴う荷重の減少に至る。

最後に、双晶変形については $\Delta\sigma/\sigma$ の定量的評価が困難であるので、3・1・3項に述べた双晶拡大が終了するひずみ e_p の圧力依存性から、以下のように双晶とすべりによる $\Delta\sigma/\sigma$ の大小関係を判断した。 e_p は、双晶によるひずみ e_T と双晶内外のすべりによるひずみ e_s から成る。 e_T は一定値であるから、600 MPa下での e_p が常圧下のものより小さいことは圧力の作用で e_s が減少したことを表しており、高圧力下ではすべりによる変形より双晶の拡大が相対的に容易になったことを反映している。このことは双晶による塑性流動の $\Delta\sigma/\sigma$ がすべりによる $\Delta\sigma/\sigma$ より小さいことを意味している。

3・3 流動応力のひずみ速度依存性

多結晶体カドミウムが塑性変形を続ける場合、結晶粒間のひずみの適合条件を満たすために非底面すべりの活動が不可欠である。3・2節に指摘したように $\{11\bar{2}2\}\langle 11\bar{2}3 \rangle$ すべりだけが多結晶体に似た塑性挙動の圧力依存性を示すことは、このすべりが多結晶体の

σ に占める支配的役割を示唆している。このことを念頭に、多結晶体カドミウムの $\Delta\sigma/\sigma$ とその粒径およびひずみ依存性を考察する。

Price⁵⁶⁾ はカドミウム単結晶薄膜を透過電子顕微鏡内で直接観察して、 $\{10\bar{1}1\}\langle 12\bar{1}0 \rangle$ すべりが主として刃状転位の移動によって変形するのに対し、 $\{11\bar{2}2\}\langle 11\bar{2}3 \rangle$ すべりはジョグを伴うらせん転位の移動によって変形することを示した。ジョグの非保存運動においては原子空孔の発生による体積増加が生じ、この過程が高圧力下で進行する場合には、余分の仕事ひいては流動応力の増加を必要とする。試験片Cや多結晶体カドミウムで測定された、 $\Delta G/G$ より大きい $\Delta\sigma/\sigma$ も基本的にはこのような機構によってもたらされるものと考えられる。

ところで、ジョグを伴ったらせん転位の運動は熱の助けを借りてエネルギー障壁を越える、いわゆる熱活性化過程であると考えられ、その際の活性化体積 V は次式で表される。

$$V = kT \left(\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} \right)_{T, P, \epsilon} \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial P} \right)_{T, \dot{\epsilon}, \epsilon} \quad (2)$$

ここに、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 ϵ はひずみ、 P は圧力である。また、 $(\partial \ln \sigma / \partial P)_{T, \dot{\epsilon}, \epsilon}$ は単位圧力当りの σ の増加率、 $(\partial \ln \dot{\epsilon} / \partial \ln \sigma)_{T, P, \epsilon}$ は σ のひずみ速度感受性指数 m の逆数である。Table IV は、粒径 d が 18 および 36 μm の多結晶体についてひずみ速度変更試験を行って求めた m 値と $\Delta\sigma/\sigma$ (前報⁴⁾の結果) をまとめて示したものである。これによると、 d が小さい方の m 値が大きく、また、600 MPa 下での m 値は常圧下のものより小さいことがわかる。

Table IV. Strain rate sensitivity indices of flow stress for polycrystalline cadmium specimens.

Grain size d (μm)	Pressure P (MPa)	Strain ϵ	m	$\Delta\sigma/\sigma$ (%)
18	10	0.1	2.3×10^{-2}	5.3
	600	0.1	2.0	
	10	0.15	3.0	—
36	10	0.05	1.5	—
	10	0.1	1.6	10.6
	600	0.1	1.2	

ここで、これらのデータと式(2)を用いて活性化体積 V を求めてみる。このとき、 $\Delta\sigma/\sigma$ としては Table IV の値から $\{11\bar{2}2\}$ の $\Delta G/G = 4.9\%$ を差し引いた値を、また、 m 値としては常圧下と 600 MPa 下の m 値の平均を用いた。その結果、 $\epsilon = 0.1$ における V として、 $d = 18\mu\text{m}$ では $0.13 \times 10^{-29}\text{m}^3$ 、 $d = 36\mu\text{m}$ では $2.7 \times$

10^{-29}m^3 が得られた。なお、カドミウムの原子容積は $2.2 \times 10^{-29}\text{m}^3$ である。本実験の場合、引張速度を作動油の量で調整するため速度急変後の応力が波打ち、 m 値の測定に多少の問題が生ずる。そこで、低速側の引張りを所定のひずみで中断、除荷した後、高速側の速度で再引張りする方法も試みた。この方法によって求めた m 値を使って V を算出した結果においても $d = 36\mu\text{m}$ の V が大きかった。また、試験片Cについては、 m 値が 11×10^{-2} とけた違いに大きい、 V は $d = 36\mu\text{m}$ のものにほぼ等しく、原子容積の 1/3 程度であった。

つぎに、式(2)をさらに P で偏微分して次式¹⁵⁾を得る。

$$\left(\frac{\partial(1/m)}{\partial P} \right)_{\sigma, T} = \frac{\sigma}{kT} \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)_{T, P} \quad (3)$$

式(3)によると、 m に圧力依存性が認められるときには V に応力依存性が存在することになる。Table IV によれば結晶粒径の大きさにかかわらず、600 MPa 下の m 値が常圧下の m 値より小さい。引張試験においては応力はひずみに依存するので、結局、 V はひずみに依存していることになる。以上の検討結果から、多結晶体カドミウムにおける $\Delta\sigma/\sigma$ の結晶粒径およびひずみ依存性は活性化体積の相違に基づいて生ずることが明らかになった。

4 結 言

多結晶体カドミウムの流動応力に対する静水圧力の影響を考察するために、底面すべり、非底面すべりおよび双晶変形が優先的に生ずる 4 種類の方位のカドミウム単結晶について、10 および 600 MPa の静水圧力下で引張試験を実施し、次の結果を得た。

(1) 底面すべりにおいては、600 MPa の圧力による降伏応力の増加率は 6.9% で、この値は圧力による横弾性係数の増加率 $\Delta G/G = 7.0\%$ にほぼ一致する。

(2) カドミウムにおいて活動する非底面すべり系は $\{11\bar{2}2\}\langle 11\bar{2}3 \rangle$ であり、このすべりにおける 600 MPa の圧力による流動応力の増加率 $\Delta\sigma/\sigma$ は 16~18% で、 $\Delta G/G = 4.9\%$ より著しく大きい。

(3) 双晶変形の $\Delta\sigma/\sigma$ はすべり変形の $\Delta\sigma/\sigma$ より小さい。 $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ 引張りでは、双晶内のすべり変形による流動応力 σ および $\Delta\sigma/\sigma$ は $\{11\bar{2}2\}\langle 11\bar{2}3 \rangle$ すべりの値に一致する。

(4) 底面すべりの場合、 $\Delta\sigma/\sigma$ はひずみの増加とともに単調に増加するのに対し、 $\{11\bar{2}2\}\langle 11\bar{2}3 \rangle$ すべりでは、多結晶体の場合と同様に、高ひずみ域で高圧力の作用によるひずみ硬化率の減少が生ずる。

(昭和53年6月10日 日本機械学会関西支部第238講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 小口 醇, 塑性と加工, 15, 683 (1974).

- 2) J. O. Chua and A. L. Ruoff, J. Applied Physics, **46**, 4659 (1975).
- 3) 中島孝慈, 藤城郁哉, 武藤 進, 材料, **35**, 978 (1986).
- 4) 中島孝慈, 藤城郁哉, 西川 寛, 材料, **36**, 320 (1987).
- 5) P. B. Price, J. Applied Physics, **32**, 1746 (1962).
- 6) P. B. Price, J. Applied Physics, **32**, 1750 (1962).
- 7) J. Krásová and P. Kratochvíl, Phys. Stat. Sol., **7**, 255 (1971).
- 8) B. Chalmers, Progress in Metal Physics, **2**, Chap. 3, 101 (1950) Pergamon Press Ltd., London.
- 9) A. Seeger and H. Träuble, Z. Metallkde., **51**, 435 (1960).
- 10) E. G. Tapetado and M. H. Loretto, Phil. Mag., **30**, 515 (1974).
- 11) K. H. Hellwege, Landolt-Börnstein, Group III-2, **7** (1969).
- 12) E. S. Fisher and M. H. Manghani, J. Phys. Chem. Solids, **32**, 667 (1971).
- 13) 頼田英機, 川崎頼雄, 日本金属学会誌, **47**, 373 (1983).
- 14) L. A. Davis and C. A. Pampillo, J. Applied Physics, **42**, 4659 (1971).
- 15) J. C. M. Li, Can. J. Phys., **45**, 493 (1967).