速度依存性構成式による BCC 結晶のすべりと回転の検討†

阿 部 武 治* 難 波 敏 光** 山 田 誠***

A Study on Crystal Slip and Grain Rotation of BCC Metals Based on Strain-Rate Type Constitutive Equation

by

Takeji ABE*, Toshimitsu NANBA** and Makoto YAMADA***

Crystal grains in polycrystalline metals rotate during the plastic deformation by crystal slips, which results in the deformation textures of polycrystalline metals. In the present paper, the rotation of crystal due to slips was calculated adopting the constant stress model of polycrystals. The rate dependent type constitutive laws for crystalline materials that deform plastically by slips was used. Namely, a power law used by Hutchinson and an exponential type law proposed by Bodner were adopted as a relation between shear stress and shear strain-rate on the slip plane. It was pointed out that the parameters in the rate-type constitutive equations are related to the number of active slip systems. The relation between the rotation of crystals and these parameters, that is, the number of the active slip systems was clarified. A method was proposed to change the constant stress polycrystalline model toward the constant strain model by changing the parameter in the constitutive equation.

Key words : Plastic deformation, Body-centered crystal, Crystal slip, Crystal rotation, Strain-rate type constitutive equation

1 緒 言

多結晶体が塑性変形する場合、各結晶粒内でのすべりに伴って結晶方位が回転し、変形集合組織が形成されることが知られている。この点を明らかにすることは、材料の異方性や優先方位の発達、巨視的な塑性変形挙動などを把握する上で重要であり、従来から解析的、実験的に数多くの研究がなされている。^{(1)~(11)}

多結晶金属の塑性変形を結晶のすべりに基づいて解析する、いわゆる結晶塑性解析もその重要な一分野であり、以前から種々の多結晶モデルが提案されている。それらのモデルは、(1)結晶粒間のひずみ(変位)の拘束の取扱い、(2)活動すべり系の数の設定、の2点によって分類することができる。^{(12), (13)} 塑性変形に伴う結晶の回転の予測をする場合にも、これらの点をどのように仮定するかによって得られる結果が異なる。

結晶回転を求める古典的な研究として、Bishop⁽⁵⁾による面心立方晶(fcc)についての研究がある。Bishopは、(1)各結晶粒はひずみ一定の条件にしたがって変形する、(2)活動すべり系は少なくとも5個ある、と仮定し、また各すべり系が一定の臨界せん断応力によって降伏を開始すると考えて、結晶の回転を

計算している。しかしながら、この方法では多くの方位に対して活動すべり系の組合わせを唯一つ決定することはできず、したがって結晶方位の回転にも一定の任意性が残されることになる。この任意性を解消するために、関根らは偶応力の効果を導入することを試みているが、解析は複雑となっている。^{(7), (8)}

一方、材料の変形は本質的に速度依存性であり、時間に依存しない定式化は近似理論であることも指摘されている。^{(14), (15)}

これらの点を考慮して、本報告では速度依存性構成式を用いて、金属結晶の変形を記述するとともに、すべり系の選択の問題を回避することによって計算を簡略化する。速度依存性構成式を多結晶金属の変形解析に導入する試みは、たとえばせん断帯形成⁽¹⁶⁾、塑性加工における集合組織の予測⁽¹⁰⁾、などの数値シミュレーションにおいて用いられている。本研究でもこのような速度依存性構成式を用いるが、従来の論文とは異なって、構成式に含まれるパラメータを変化させることによって活動すべり系を変化させ、それが結晶回転に及ぼす影響を表現しうる可能性について検討する。⁽¹¹⁾

本報告ではこのような試みの一環として、単軸圧縮

† 原稿受理 平成2年9月3日 Received Sep. 3, 1990

* 正 会 員 岡山大学工学部 岡山市津島中, Faculty of Engineering, Okayama University, Tsushima-naka, Okayama

** 大日本スクリーン製造(株) 京都市上京区堀川通寺之内, Dainippon Screen Mfg. Co. Ltd., Horikawa-dori Teranouchi, Kamigyo-ku, Kyoto

*** NKK(株) 川崎市川崎区南渡田町, NKK Co., Minami-watarida-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki

応力を受ける体心立方 (bcc) 金属の結晶の回転を, パーソナルコンピュータを用いて解析する. また, 速度依存性構成式として, Hutchinson によって用いられた式⁽⁶⁾⁻⁽²⁰⁾の他に, Bodner によって提案された式^{(21),(22)}を用いた場合の結晶回転についても計算し, 比較検討する.

2 解 析

2.1 多結晶体のモデル

結晶塑性解析を行うためには, 多結晶体の力学的モデルを設定する必要がある. 多結晶体モデルとしては応力一定モデルとひずみ一定モデルが代表的であるが, 実際の多結晶金属の変形は多くの場合これらの中間状態を示すことが知られている^{(12),(23)}. ここでは, Fig. 1 に示すような, 結晶粒が直列に配置する応力一定モデルを

Fig. 1. Constant stress model of polycrystals.

採用する. 応力一定モデルは, 各結晶粒の受ける応力が多結晶体全体に負荷される応力に等しいと仮定するものであり, 一方変形によって生ずる多結晶体のひずみは, 各結晶粒に生ずるひずみの平均値として与えられる. 応力一定モデルの利点の一つは, 計算を大幅に簡略化できることである. 本報告では, 構成式中の係数の選び方を変えることによって, 応力一定モデルを修正してひずみ一定モデルに近づける可能性についても検討する.

2.2 結晶のすべり

金属結晶の塑性変形は, 特定の結晶面上の特定の方向のすべりによって生ずる. このすべり面, すべり方向の組合せをすべり系と呼んでいる. 一般に, 金属結晶では最稠密の面ですべりが起こることが知られているが, bcc 結晶においては, すべり方向は $\langle 111 \rangle$ であり, すべり面は最稠密面 $\{110\}$ 以外にも, $\{112\}$, $\{123\}$ 面の合計 48 個のすべり系が存在する.

さて, 結晶のすべり変形を解析するために, n_i^k を第 k すべり系のすべり面単位法線ベクトルの結晶座標系における第 i 成分とする. 同様に, b_j^k をすべり方向単位ベクトルとする. 結晶座標系において応力 σ_{ij} が負荷されるとき, 各すべり系におけるせん断応力 τ^k は次式で与えられる.

$$\tau^k = n_i^k b_j^k \sigma_{ij} \quad (1)$$

式 (1) の τ^k は, 分解せん断応力 (resolved shear

stress) とも呼ばれている. 以下では, 式 (1) に示すような下付き添字に対して, テンソル表記の総和規約を用いることにする. たとえば, 式 (1) の右辺は i および j について 1, 2, 3 とした場合の和をとるものとする.

つぎに, 結晶内のすべり系 k に生ずるせん断ひずみ速度を $\dot{\gamma}^k$ と表すと, 結晶座標系で表した結晶のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ および結晶回転速度 $\dot{\omega}_{ij}$ は次式で与えられる.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \sum_k \frac{1}{2} (n_i^k b_j^k + n_j^k b_i^k) \dot{\gamma}^k \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_{ij} = \sum_k \frac{1}{2} (n_j^k b_i^k - n_i^k b_j^k) \dot{\gamma}^k \quad (3)$$

なお本報告では, ひずみの定義としてテンソルひずみを用いることにする (ただし, γ^k は工学ひずみである).

2.3 試料座標系と結晶座標系の変換

巨視的な試料座標系におけるひずみ成分と, 結晶座標系におけるひずみ成分を関係づけるためには, 座標変換を行う必要がある. 試料座標系 ($X_1-X_2-X_3$) と結晶座標系 ($x_1-x_2-x_3$) は, 一般に 3 個の独立な角度変数 (オイラー角) θ , ϕ , ψ によって関係づけられる. すなわち, これらのオイラー角を用いて, 二つの座標系の変換マトリックス L_{ij} を表すことができる. 軸対称変形 (単軸圧縮) の場合には, 変換マトリックス L_{ij} の成分は簡単化され, 2 個のオイラー角 θ , ϕ によって次のように与えられる.

$$L_{ij} = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\theta & \cos\phi \sin\theta & \sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\sin\phi \cos\theta & -\sin\phi \sin\theta & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここに, θ は X_3 および X_1 軸を含む面と X_3 および x_3 軸を含む面のなす角, ϕ は X_3 と x_3 軸とのなす角であり, 対称性から

$$0 \leq \theta \leq \pi/4, \quad 0 \leq \phi \leq \tan^{-1}(\sin\theta)$$

の領域を考えれば十分である. すなわち, 立方晶では対称性から, 応力軸方向をステレオ投影上の $[100]$ - $[110]$ - $[111]$ 基本三角形内に投影して表すことができる.

式 (4) の L_{ij} を用いると, 結晶座標系の応力 σ_{kl} と, 試料座標系の応力 Σ_{ij} の座標変換は

$$\sigma_{ij} = L_{ki} L_{lj} \Sigma_{kl} \quad (5)$$

と表される. 一方, ひずみ速度については, 結晶座標系および試料座標系のひずみ速度をそれぞれ $\dot{\epsilon}_{ij}$, $\dot{E}_{kl}$ とすると

$$\dot{\epsilon}_{ij} = L_{ki} L_{lj} \dot{E}_{kl} \quad (6)$$

の関係がある.

2.4 結晶の回転角

軸性速度ベクトル $\dot{\xi}_i$ と結晶回転速度 $\dot{\omega}_{ij}$ の間には,

Fig. 2. Axial vector and rotation angle.

交代テンソル e_{ijk} を用いると

$$\dot{\xi}_i = -\frac{1}{2} e_{ijk} \dot{\omega}_{jk} \quad (7)$$

の関係がある。式 (3) より, $\dot{\omega}_{11} = \dot{\omega}_{22} = \dot{\omega}_{33} = 0$ であるから, 軸性ベクトルの結晶座標系に関する投影成分は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\xi}_1 &= -\dot{\omega}_{23} = \dot{\omega}_{32} \\ \dot{\xi}_2 &= -\dot{\omega}_{31} = \dot{\omega}_{13} \\ \dot{\xi}_3 &= -\dot{\omega}_{12} = \dot{\omega}_{21} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Fig. 2 に示すように, 結晶軸の方向に対する応力軸の回転は, θ と ϕ の変化率を $\dot{\theta}$, $\dot{\phi}$ とすると, 軸性ベクトル速度 $\dot{\xi}_i$ によって, 次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\theta} &= \dot{\xi}_3 \\ \dot{\phi} &= \dot{\xi}_1 \sin \theta - \dot{\xi}_2 \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2・5 すべり面上の構成関係

ここでは, すべり面上の構成関係式として速度依存性を考える。まず, Hutchinson¹⁷⁾, Pan-Rice, Asaro^{16), 18), 19)}らが用いた指数形の次式を取上げる。

$$\dot{\gamma}^k = \dot{a}^k \left(\frac{\tau^k}{g^k} \right) \left| \frac{\tau^k}{g^k} \right|^{\frac{1}{m}-1} \quad (10)$$

以下では便宜上式 (10) を Hutchinson の構成式と呼ぶことにするが, この式は物理的には, 転位の等温, 準静的ひずみ速度運動を想定して導かれた式である。ここに, g^k はすべり系 k の現在のひずみ硬化状態を記述する関数で, 加工硬化関数と呼ばれる。 $\dot{a}^k$ は分解せん断応力 τ^k が g^k に等しいときに, $\dot{\gamma}^k = \dot{a}^k$ で定義されるパラメータである。 m はひずみ速度感受性指数と呼ばれ, 実際の金属では 0.01~0.03 程度の値をとることが知られているが, 本報告では m を一種のパラメータとみなして, $0 < m < 1$ の間で変化させる。 Fig. 3(a) は式 (10) で表される τ と $\dot{\gamma}$ の関係を, 種々の m の値に対して示している。

一方, Bodner^{21), 22)}は式 (10) とは異なる次の指数関数形の速度依存性構成式を提案している。

$$\dot{\gamma}^k = \left(\frac{\tau^k}{\tau^k} \right) \dot{d}^k \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{z^k}{\tau^k} \right]^{2n} \right\} \quad (11)$$

ここで, $\dot{\gamma}^k$ はすべり系 k のせん断ひずみ速度, τ^k はせん断応力, $\dot{d}^k$ は限界せん断ひずみ速度である。 n は式 (10) の m と同様な役割を持つ材料定数であり, ひずみ速度感受性因子と呼ぶことにする。 z^k は負荷

(a) Hutchinson's equation.

(b) Bodner's equation.

Fig. 3. Rate-type constitutive relations on slip plane.

履歴依存性パラメータである。 Fig. 3(b) は式 (11) で与えられる関係を種々の n に対して示している。

なお, これら速度依存性構成式を用いることの利点は, 応力が負荷されたときすべてのすべり系においてすべりが生ずることから, 活動すべり系を選択するという解析上の複雑さが解消され, 各すべり面上でのせん断ひずみの大小が自動的に決定されることにある。

なお以下の解析では, すべてのすべり系について式 (10) あるいは式 (11) が同等に適用できるものと仮定し, 得られたひずみは結晶座標系で単純に加算する。すなわち, 潜在硬化などは考慮していない。

3 計算方法

以上の式を用いて, bcc 金属の単軸圧縮の場合について計算を行った。計算に使用したパーソナルコンピュータは PC-9801 RA2, 言語は PRO FORTRAN-77 (ライフボード社) を使用し, 画面表示用には HGX (イシガキエム・イー・エス) および The Graph (アスキー社), MS-Chart (マイクロソフト社), LOTUS 1-2-3 (ロータスデベロップメント社) を用いた。計算は [100]-[110]-[111] ステレオ三角形内に θ , ϕ を 5° おきにとり, 合計 46 の方位について行った [これらは後の Fig. 9 において, 破線の交点として示されている。]

以下では負荷応力として, 代表的に試料軸方向に単軸圧縮応力 -10 MPa を加えた場合について計算を行う。また, 式 (10) 中の $\dot{a}^k$ の値は, 回転量の表示が見やすくなるように, 各 m の値に対して適宜指定した。

計算に際しては, まず初期の結晶方位, 初期応力と速度感受性指数を指定する. つぎに, 初期方位により作成したオイラー角を用いて, 式 (5) から試料座標系応力を結晶座標系応力に変換し, これを用いて式 (1) より結晶座標系の各すべり系上でのせん断応力を算出し, さらに式 (10) または式 (11) によってせん断ひずみ速度を計算する. 得られたせん断ひずみ速度から, 式 (3), (7), (9) を用いて軸性速度ベクトルを計算し, 結晶回転角速度を求め, 結果を画面に表示する (ただし, 単位時間を考え回転角として表す). これを 46 個の方位について繰返す.

4 計算結果と考察

以下ではまず, Hutchinson の構成式 (10) を用い, 加工硬化関数 g^* を一定値とした場合についての結晶の回転を調べる.

4.1 せん断ひずみ速度

数値計算に際しては, 式 (10) に含まれる速度感受性指数 m の値として, 0.02, 0.1, 0.2, 0.5, 0.9 の 5 種類の場合を取上げる. このとき $\dot{\alpha}^*$ の値は各すべり系 k に対しては一定とし, またそれぞれの m に対応して, $\dot{\alpha}^*=0.1, 0.05, 0.05, 0.1, 0.5$ とした. [したがって, 得られた個々の結晶回転量は, 各結晶方位の相対的な量関係だけが意味を持っている.] g^* は一定値で, $g^*=5.0$ MPa とした.

Fig. 4. Ratio of shear strain-rate for all slip systems ($\theta=20^\circ$, $\phi=5^\circ$).

Fig. 5. Relation between number of active slip systems and number of crystal orientations for various values of m .

Fig. 6. Relation between strain-rate sensitivity parameter m and number of active slip systems.

Fig. 7. Relation between strain-rate sensitivity factor n in Bodner's constitutive equation and number of active slip systems.

Fig. 4 は一例として, $\theta=20^\circ$, $\phi=5^\circ$ の方位の結晶について, 縦軸に全せん断ひずみ速度 (各すべり系のすべり速度の合計) に対する各すべり系上のせん断ひずみ速度の比をとって示している. Fig. 4 からわかるように, $m=0.02$ の場合には活動すべり系の数は少ない. m が大きくなり, $m=0.9$ 程度になると, ほとんどのすべり系が活動するようになる. なお, Fig. 4 中に活動すべり系の例を記入している [すべり方向 $[111]$ などと, すべり面 $(10\bar{1})$ など]. これからわかるように, この方位の結晶においては, $[\bar{1}\bar{1}1](10\bar{1})$ が最も活動するすべり系となっている.

Fig. 5 は各結晶方位において, Fig. 4 に示すようなせん断ひずみ速度の分布において, 全せん断ひずみ速度に対する比率が 2% 以上のものだけを活動すべり系であるとみなしたときの, 結晶方位の数の分布を示している. ここで 2% としたのは, 48 個のすべり系が均等に活動すると仮定したとき, すべてのすべり系が活動すべり系となるように選んだためである.

Fig. 6 は, Fig. 5 に示す分布から, 各 m についての活動すべり系の数の平均をとった結果を示している. Fig. 6 からわかるように, m の増加に伴って, 活動すべり系の数も単調に増加しており, パラメータ m が活動すべり系の数と密接に対応していることがわかる.

Fig. 7 は, 同様に Bodner の構成式 (11) を用いた場合について, パラメータ n と活動すべり系の数の関係を示している.

Fig. 8. Strain-rate in specimen coordinates.

4・2 試料座標系ひずみ速度

つぎに、各すべり系上のせん断ひずみ速度から、式(6)を用いて試料座標系ひずみ速度を種々の m について計算した結果を Fig. 8 に示している。Fig. 8(a) は、一般的な結晶方位の例として $\theta=20^\circ, \phi=5^\circ$ の方位の場合の結果を示しているが、応力一定条件 (Fig. 1) によって変形を加えていることから、試料座標系においてはせん断ひずみを生じている。

Fig. 8(b) は $[100]$ 方向へ引張応力を加えた場合のひずみ速度の例を示している。この場合にはせん断成分は現れず、 $\dot{\epsilon}_{22}, \dot{\epsilon}_{33}$ 成分が等しく、軸対称変形になっている。

4・3 結晶の回転

結晶の回転に対する速度感受性指数 m の影響について検討する。Fig. 9(a)~(e) は、それぞれの m の値について求めた結晶の回転を示している。(なお、図中に矢印が示されていない方位の回転は、きわめて小さい。) いずれの場合にも最終的な優先方位となる回転方向は、 $[100]$ と $[111]$ の二つがあり、bcc 金属の単軸圧縮変形では、 $[100]$ と $[111]$ の二重繊維組織が発達することを示している。これは、fcc 金属における同様の計算では単一の $[110]$ 繊維組織が発達することと比較すると、結晶の回転方向が逆になっている。また bcc 金属においても、負荷応力を引張りとなると、結晶回転の方向は逆になり、優先方位は $[110]$ となる。

Fig. 9. Rotation of crystal ($g^k=5.0$ MPa).

Fig. 9(a)の $m=0.02$ の場合には, $[100]$ 方向に向かう結晶と $[111]$ 方向に向かう結晶との境界は $[100]$ に近く, その比は約2:8である。 m が大きくなるにつれ, 境界は $[110]$ 方向へ移動し, Fig. 9(e)の $m=0.9$ の場合には, $[100]$ と $[111]$ に向かう結晶の比は約3:2となっている。このような m の値による結晶回転の相違は, Fig. 6に示す活動すべり系の数に起因していると考えられる。

以上の結果をCalnan-Clewsによるbcc金属の結晶回転⁴⁾の計算結果と比べると, 結晶方位の回転方向は $m=0.02$ の場合と比較的よく似ている。

なお, 結晶の回転量の大きさに対する m の影響についてみると, m が小さいときには結晶方位による回転量のばらつきが大きい, m が大きくなるにしたがってばらつきは小さくなる傾向を示している。これは, Fig. 3(a)に示す応力-ひずみ速度関係の傾向と関連していると考えられる。

4・4 加工硬化関数 g^* の影響

つぎに, Hutchinsonの構成式(10)に含まれる加工硬化関数 g^* の影響を調べるために, [1]先と同様に g^* をすべての方位に対して一定とした場合, [2]各方位の結晶について, g^* をそれぞれの活動すべり系の分解せん断応力の最大値にとった場合, の二つを考える。

Fig. 10は, $m=0.2$ の場合について, すべての結晶方位の相当塑性ひずみ速度と, そのひずみ速度をもつ

Fig. 10. Relation between work-hardening parameter g^* and distribution of equivalent plastic strain-rate in specimen coordinate for all crystal orientations ($m=0.2$).

結晶方位の数の関係を, 両者の仮定について求めた結果を示している。仮定[2]の場合 (Fig. 10, 破線) には, 仮定[1]の $g^*=$ 一定の場合 (Fig. 10, 実線) よりも, 各方位の結晶のひずみの分布は平均ひずみに近づいている。すなわち, g^* をせん断応力の最大値とする[2]の仮定は, 多結晶体の变形条件を応力一定条件 (Fig. 1) からひずみ一定条件に近似的に近づける意味をもつことがわかる。いいかえると仮定[2]は, 実際の多結晶金属において, 結晶粒相互間の変形の拘束によって, 結晶粒間のひずみが平均化される効果を, 間接的に表している。

Fig. 11は g^* を臨界せん断応力の最大値にとった

Fig. 11. Rotation of crystal when work-hardening parameter g^* is equal to maximum value of resolved shear stress.

Fig. 12. Rotation of crystal for Bodner's constitutive equation ($z^k=5.0$ MPa).

きの結晶回転を示している。ここで、 $m=0.02, 0.2, 0.9$ に対して、それぞれ $\dot{\alpha}^k=0.1, 0.05, 0.5$ の値を用いている。先に Fig. 9 に示した計算結果と比較すると、各結晶方位間の結晶の回転量のばらつきは小さくなっている。しかし、結晶の回転方向は g^k を一定とした Fig. 9 の場合と同一であり、これは同一方位の結晶粒内では、活動すべり系の組合せが仮定 [1] と仮定 [2] では変化しないことと対応している。

なお、ここで用いた仮定 [2] は、多結晶体のモデルを応力一定条件からひずみ一定に近づける効果があるが、繰返し計算を用いることによって、さらにひずみ一定に近づけることも可能であると考えられる。

4・5 Bodner の構成式による結果

つぎに、結晶のすべりに対する構成関係として、Bodner^{(21), (22)} によって提案された構成式 (11) を用いて計算し、先の Hutchinson の構成式 (10) による結果と比較する。Fig. 12 は、Bodner の構成式 (11) 中のパラメータを $\alpha^k=5.0 \text{ MPa}$ として、 n を 1.0, 2.0, 8.0 と変化させたときの結晶回転の計算例を示している。このとき、式 (11) 中の d^k はそれぞれ 0.1, 0.05, 0.1 としている。Fig. 12 に示す結晶の回転は、Hutchinson の構成式による結果 (Fig. 9) と類似であるが、Fig. 6, 7 からわかるように、 m の大きい場合は n の小さい場合に、逆に m の小さい場合は n の大きい場合に対応している。

以上のように、活動すべり系の数を変化させるという目的に対しては、Hutchinson の構成式も Bodner の構成式もともに有用であるが、前者の方が式の形が簡単であり、便利と言えるようである。

本報告では 1 軸応力がある単位時間が加わった場合の基本的な結果のみを示したが、これを複雑な荷重を伴う塑性加工を受ける材料の集合組織の発達の問題に適用するためには、さらに繰返し計算によって結晶回転の追跡する必要がある。なお、本計算に要した計算時間は、PC-9801RA2 (NEC) を用いて約 10 秒であった。

5 結 言

体心立方晶金属に単軸圧縮応力を負荷した場合について、結晶のすべり塑性変形に伴う方位の回転を、パーソナルコンピュータを用いて調べた。主な結果を要約すると次の通りである。

(1) 多結晶体の応力一定モデルを用いることによって計算が簡単化され、またすべり面上のせん断応力とせん断ひずみ速度を関係づける速度依存性構成式を採用することによって、活動すべり系を選択する複雑さがなくなることから、計算が容易となる。

(2) 速度依存性形の構成式に含まれるパラメータを変化させることによって、活動すべり系の数の影響を

間接的に表すことができる。

(3) 結晶回転の方向は活動すべり系の数によって大きく影響され、他方結晶回転量の大きさは多結晶体中の結晶粒相互のひずみの拘束の影響を受ける。

(4) 結晶の回転方向は、速度依存性構成式として Bodner の指数関数形の構成式を用いた場合にも、Hutchinson の指数形の構成式を用いた場合と類似の傾向を示す。

(5) 体心立方晶金属の結晶の回転方向は、面心立方晶金属のそれとは異なり、ほぼ逆の方向を向く結果となっており、従来から得られている結果と一致する。

終わりに、本研究に協力された岡山大学工学部長岐滋助教授に謝意を表します。

(平成 2 年 5 月 24 日 日本材料学会第 39 期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 長嶋晋一編, “集合組織” (1984) 丸善
- 2) 稲数直次, “金属引拔” (1985) 近代編集社
- 3) 大南正瑛, 塩沢正章, “多結晶体の強度と破壊” (1976) 培風館
- 4) E. A. Calnan and C. J. B. Clew, Phil. Mag., **41**, 1085 (1950); **42**, 616 (1951).
- 5) J. F. W. Bishop, Phil. Mag., **44**, 51 (1953).
- 6) 大矢根守哉, 小島公平, 日本機械学会論文集, **21**, 817 (1955).
- 7) 関根和喜, 吉村 修, 日本金属学会誌, **40**, 1205 (1976).
- 8) 関根和喜, 日本金属学会誌, **41**, 874 (1977).
- 9) 徳田正孝, 山田賢治, 日本機械学会論文集, **53**, 2444 (1987).
- 10) K. K. Mathur and P. R. Dawson, Int. J. Plasticity, **5**, 67 (1989).
- 11) T. Abe, M. Yamada and S. Nagaki, “Advances in Plasticity”, ed. by A. S. Khan and M. Tokuda, p. 601 (1989) Pergamon Press
- 12) 阿部武治, 材料, **28**, 87 (1979).
- 13) 阿部武治, 塑性と加工, **29**, 789 (1988).
- 14) H. J. Frost and M. F. Ashby, “Deformation-Mechanism Maps” (1982) Pergamon Press
- 15) 阿部武治編, “強度解析学Ⅱ”, p. 328 (1984) オーム社
- 16) R. J. Asaro, Advances in Applied Mechanics, **23**, 1 (1983) Academic Press
- 17) J. W. Hutchinson, Proc. Roy. Soc. Lond., **A348**, 101 (1976).
- 18) R. J. Asaro, J. Appl. Mech., **50**, 921 (1983).
- 19) R. J. Asaro and A. Needleman, Acta Metal, **33**, 923 (1985).
- 20) J. Pan and J. R. Rice, Int. J. Solid Struct., **19**, 973 (1983).
- 21) S. R. Bodner, “Unified Constitutive Equations for Creep and Plasticity”, ed. by A. K. Miller, p. 273 (1987) Elsevier
- 22) S. R. Bodner and K. S. Chan, Eng. Fracture Mech., **25**, 705 (1986).
- 23) 阿部武治, 機械の研究, **42**, 341 (1990).