

多結晶体の変形挙動におよぼす結晶方位分布の影響評価

京都工芸繊維大学 ○岡本 卓也 [学] 高木 知弘 秋山 雅義

Effects of Crystal Orientation Distribution on Deformation Behavior of polycrystalline Metal

Takuya OKAMOTO, Tomohiro TAKAKI and Masayoshi AKIYAMA

1. はじめに

通常使われる金属材料は、ミクロンオーダーの多結晶構造を有している。このような材料に一樣な変形を与えると、マクロ的には均一変形であるが、ミクロ的にみると結晶粒毎に方位が異なっており、これに起因して各粒内においては不均一な変形が生じる。この変形は特に粒界近傍において高くなる傾向があり、亀裂などの欠損の生成箇所となり、最終的には材料のマクロな強度を支配する。このように、多結晶金属材料を適切に使用するためには、粒内の不均一変形をある程度把握しておく必要がある。この最も強力な評価手法は、結晶塑性論を導入した有限要素シミュレーションであろう。しかしながら、一般の研究者が結晶塑性有限要素法を使いこなすためにはそれなりの時間と能力が必要であり、また、その都度計算を行うことは非常に効率が悪い。そこで、結晶粒内部に生じる不均一変形に対して影響を与える因子と粒内の最大応力などの関係をデータベースとして蓄積しておくことは非常に有意義であると考えられる。

そこで本研究では、このようなデータベース化を検討することを目的とし、2次元2すべり系結晶塑性有限要素法を用いることで、粒内の不均一変形に及ぼす結晶方位分布および粒形状の影響評価を行う。

2. 解析モデル

文献 [1] のひずみ勾配結晶塑性理論を用いた2すべり系2次元平面ひずみ有限要素シミュレーションを行う。材料はアルミを対象とし、各物性値は文献 [2] に示したものをを用いている。図1は有限要素シミュレーションに用いた多結晶モデルを示している。190.48×164.94 μm²の領域を40×60のcrossed triangles要素で分割し、等価粒径 $D=50\mu\text{m}$ の23個の正六角形粒を配置している。結晶方位 θ は図1右図のように定義している。ここで、中心の粒をGrain A、その第一近接粒をGrains B、第2近接粒以降の粒をGrains Cとする。また、Grain A内の不均一変形を評価するために、評価点としてP1～P6を設ける。評価値は、各粒界辺の中心に位置する節点を含む要素の平均値として算出する。通常、3重点が最も応力が集中し易い領域である。今回は比較的データが整理し易いであろうと考えられる粒界辺中心を評価対象点とする。これらの評価点では、変形がGrain Aの粒形状と、接する粒の方位差の影響が大きいと推測される。境界条件は、左右端をshear free、下端のy方向の変位を拘束、上端のy方向に一樣変位速度を与え、y方向への引張りシミュレーションを行う。

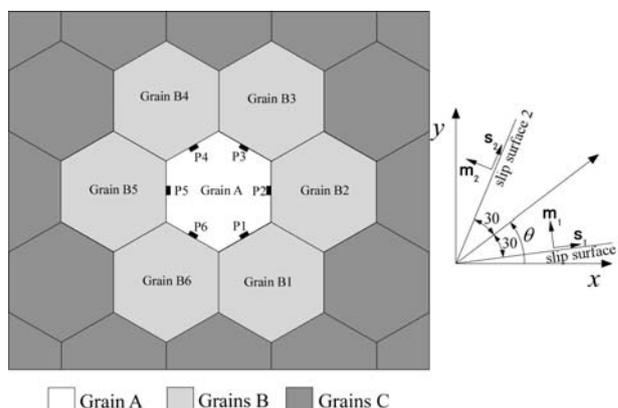


Fig. 1 Computational polycrystalline model and definition of crystal orientation

3. シミュレーション

本研究では、下記3種類のシミュレーションを行う。

- I. Grain A と Grains B の結晶方位を固定し、Grains C の結晶方位をランダムに変化させることで、第2近接以遠の粒がGrain Aの変形に及ぼす影響を評価する。
- II. Grains B の結晶方位を全て一定 ($\theta = 15^\circ$) とし、Grain A の結晶方位を $0 \sim 90$ 度まで変化させることで、Grain A の粒形状の影響を評価する。
- III. Grains B の6個の粒のうち1つの粒の方位をIIで設定した値 $\theta = 15^\circ$ とし、残りの粒の方位を任意に設定し、IIの結果と比較することでGrains B間の相互作用の影響を検討する。

3・1 シミュレーション I <第2近接粒の影響> 図2は、Grain A と Grains B の結晶方位を $\theta_A = 45^\circ$ 、 $\theta_{B1} = 60^\circ$ 、 $\theta_{B2} = 10^\circ$ 、 $\theta_{B3} = 80^\circ$ 、 $\theta_{B4} = 26^\circ$ 、 $\theta_{B5} = 73^\circ$ 、 $\theta_{B6} = 25^\circ$ と固定し、Grains Cの方位をランダムに変化させた場合の、公称ひずみ0.1までの各評価点における主すべり系上のせん断ひずみ(以降、最大せん断ひずみと呼ぶ)の変化を示している。ここで、Grains Cのランダム方位を4通り変化させている。図2より、多少のばらつきはあるが、公称ひずみ0.05程度までは4回のシミュレーションいずれも最大せん断ひずみが同様に増加しており、第2近接以遠の粒の影響を受けないことがわかる。変形が大きくなると4回のシミュレーションの値の差が大きくなっており、遠方の粒の影響が及んでいることが考えられる。以上の結果より、おおそ公称ひずみ0.05までであれば、Grain Aの変形は第一近接粒Grains Bのみの影響を受けるといえる。

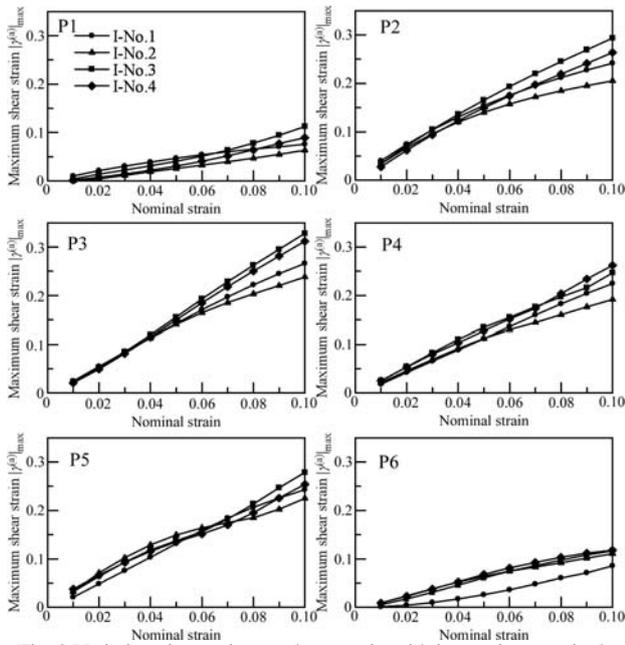


Fig. 2 Variations in maximum shear strain with increasing nominal strain for four simulations

3・2 シミュレーションII<粒形状の影響> Grain

Aの粒形状がGrain Aの変形に及ぼす影響をみるために、Grains Bの結晶方位を全て $\theta = 15^\circ$ 一定とし、Grain Aの結晶方位を $0 \sim 90^\circ$ まで 5° ずつ変化させる。図3はGrain Aの結晶方位を変化させたときの各評価点における最大せん断ひずみの変化を示している。図より、評価点P1, P3, P4, P6および、P2とP5の変化がそれぞれ比較的良く似ていることがわかる。Grain Aの形状は正六角形であり、荷重方向に対してP2とP5のある辺が平行であり、それ以外の辺は 60° の角度をなしており、荷重方向に対する粒形状の影響がGrain A内の変形に顕著に現れていることがわかる。

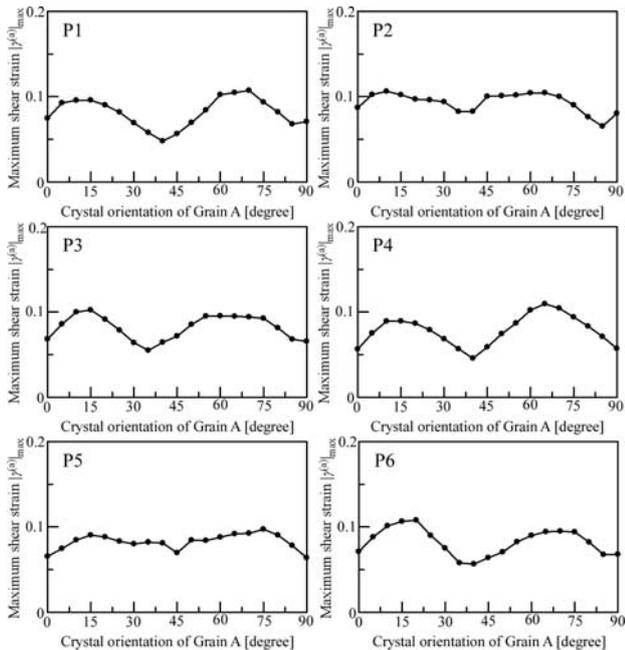


Fig. 3 Variations in maximum shear strain with crystal orientation of Grain A

3・3 シミュレーションIII<Grains B間の相互作用> 前節のシミュレーションIIでは、Grains Bの結晶方位を全て $\theta = 15^\circ$ 一定としてGrain Aの粒形状の影響をみた。ここでは、Grains Bの結晶方位を $\theta_{B1} = 60^\circ$, $\theta_{B2} = 10^\circ$, $\theta_{B3} = 80^\circ$, $\theta_{B4} = 26^\circ$, $\theta_{B5} = 73^\circ$, $\theta_{B6} = 25^\circ$ とし、1つだけをIIの $\theta = 15^\circ$ としてGrain Aの方位を変化させ各点の最大せん断ひずみの変化を評価する。図4はその結果を示している。例えば、P1の図は、Grain B1の方位を 15° とし、Grain Aの方位を $0 \sim 90^\circ$ まで変化させた際の評価点P1における最大せん断ひずみの変化である。また図3の結果も同時に示しており、この2つの結果が全く同じになれば、P1の変形はGrain B1にしかな影響を受けないということになる。図4より、P2の傾向はやや異なるが、全体的に図3の結果と変化の傾向は似ていることがわかる。しかしながら、最大せん断ひずみの絶対値は変化しており、例えばP1に関してはGrain B1に加えて、その両隣のGrain B2とGrain B6の変形の影響がおよんでいることが考えられる。

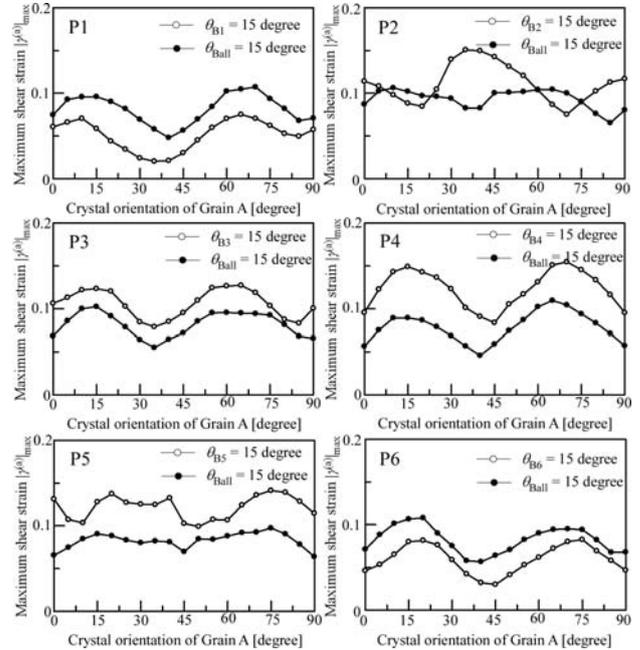


Fig. 4 Variations in maximum shear strain with crystal orientation of Grain A

3. おわりに

本研究では、多結晶構造の結晶粒内における不均一変形に対して何が最も支配的な因子になるのかを、結晶塑性有限要素シミュレーションにより評価した。この結果、結晶粒の大きさが全て同じであれば、変形が5%程度と小さい場合、第2近接以遠の粒の影響は小さいことを示した。また、粒形状と第一近接粒の方位関係が不均一変形に大きく寄与していることを明らかにした。この場合、第1近接の両隣の粒も変形の大きさに寄与していることがわかった。

参考文献

- 1) 比嘉吉一, 澤田幸秀, 富田佳宏, 機論 A 69 (1999) 523.
- 2) 高木知弘, 山中晃徳, 比嘉吉一, 富田佳宏, 機論 A 73 (2007) 482.