

I - 1 不均一粒径分布を有する多結晶金属の結晶塑性 マルチスケール解析

○東北大学 学生員 丸山敦志
東北大学大学院 学生員 渡邊育夢
東北大学大学院 正員 寺田賢二郎

1. はじめに

金属材料の多くは不均質な多結晶構造を有しており、その力学的挙動は巨視的な材料特性を支配している。したがって、多結晶金属の巨視的な変形挙動を結晶スケールの力学現象と結びつけて論じることで、より精確な材料評価が期待される。これに対して、結晶スケールの不均質性を考慮したいいくつかの材料評価手法¹⁾が提案されているが、その多くは結晶方位の不均一分布のみに基づいて材料の不均質性を概定しており、各結晶粒の複雑な幾何形状を考慮したものは少ない。一方、均質化法に基づくマルチスケールモデリング²⁾によれば、二つの異なるスケールで生じる力学現象を連成させてモデル化し、結晶組織の幾何形状として任意の形状を考慮することが可能となる。本研究では、均質化法に基づくマルチスケールモデリングのミクロスケールに結晶塑性論における構成モデルを適用した数値解析を行い、結晶粒径分布における不均一具合の違いが多結晶金属のマクロな変形特性に与える影響を考察する。

2. 結晶塑性マルチスケールモデリング

本研究では、Teradaら²⁾によるtwo-scaleモデリングのミクロスケールに単結晶のすべりに基づく弾塑性構成モデルを適用する。ここでは、以下の降伏関数で与えられる一般的な非速度依存型モデルを用いる。

$$\phi^{(\alpha)} := s_i^{(\alpha)} \cdot (\tau m_i^{(\alpha)}) - \tau_Y^{(\alpha)} + \sum_{\beta=1}^{n_{slip}} h_{\alpha\beta} \xi^{(\beta)} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha = 1, 2, \dots, n_{slip}$ 、 $s_i^{(\alpha)}$ はすべり系 α における基準配置の単位すべり方向ベクトル、 $m_i^{(\alpha)}$ はすべり面の単位法線ベクトル、 τ はKirchhoff応力、 $\tau^{(\alpha)}$ はすべり方向への分解せん断応力、 $\xi^{(\alpha)}$ は塑性履歴パラメータであり、 $h_{\alpha\beta}$ は硬化定数で自己硬化($\alpha = \beta$)、潜在硬化($\alpha \neq \beta$)の2種類を考える。

3. 不均一粒径分布を有した多結晶金属の解析

3.1 解析モデル

本節では、多結晶金属のミクロ構造として、粒径分布の不均一具合が異なる結晶組織を想定した3種類のモデルを用いて解析を行う。また、2次元平面ひずみ問題を想定するものとし、単結晶のすべり系については、図-1-(a)に示すようなすべり方向ベクトル及びすべり面の法線ベクトルが同一平面内に存在する4組の2次元すべり系を仮定する。さらに、マクロ座標系 X_1, X_2 とミクロ座標系 Y_1, Y_2 は図-1-(b)に示すように変数 θ で関連付けられるものとする。材料パラメータについては全ての粒で $\tau = 0.1\text{GPa}$ 、 $h_{\alpha\beta} 0.1\text{GPa}$ ($\alpha = \beta$)、 $h_{\alpha\beta} 0.15\text{GPa}$ ($\alpha \neq \beta$)を用いる。

図-2に各モデルのミクロユニットセルを示す。model aは、ほぼ均一な粒径分布を有しており、ユニットセルは実

際の結晶形状を模擬した28個の結晶粒からなる。model bでは、ユニットセルの中心に周囲の粒よりも一回り大きな結晶粒が存在する。model cでは、ユニットセル中心にある粒と周囲の粒との粒径差がより広がっている。ここで、均質化法に基づくマルチスケールモデリングにおいて、ユニットセルは具体的なスケールを持たず、各粒どうしの相対的な大小関係のみが反映されることに留意する。各粒の結晶方位については、図-2に与えた色の濃淡別に乱数を用いて与えており、各結晶方位の分布割合は3つのモデルで統一してある。また、全体構造をモデル化したマクロモデルについては、各モデルとも一般的な変位法による単一のアイソパラメトリック要素に1軸引張状態を与えるものとする。

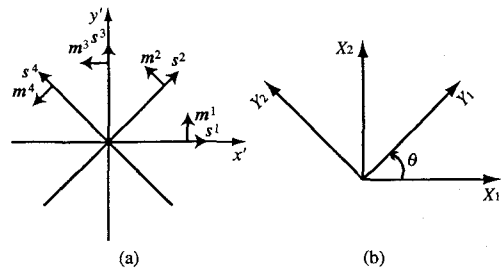


図-1 (a) 単結晶の2次元すべり系 (b) マクロ座標系とミクロ座標系

3.2 解析結果

各モデルに対して、1軸引張状態でマクロひずみ0.5%までで変形を与えた。数値解析の結果得られたマクロ応力-ひずみ関係を図-3に、マクロひずみ0.3%に対応するミクロユニットセルの相当塑性ひずみ分布を図-4に示す。図-3においてp付近が各モデルのミクロスケールにおいて塑性が生じる点である。

図-3では各モデルのマクロ応力-ひずみ曲線がほぼ一致しており、ユニットセルにおける相当塑性ひずみ分布を見ても、各セルの分布は比較的一致することが確認できる。これは、結晶粒径分布の不均一具合が違うことで各粒どうしの拘束形態が変化しても、全体的な変形特性にはほとんど影響がないことを示している。また、極めてわずかな差ではあるが、model bの応力-ひずみ曲線は塑性後に他のモデルと比べて軟らかい応答を示している。塑性ひずみの分布についてもmodel bでは若干平坦な分布が確認でき、ある程度まとまった数の粒がある点を境に一斉にすべり始めたことがうかがえる。以上の結果から、多結晶金属の巨視

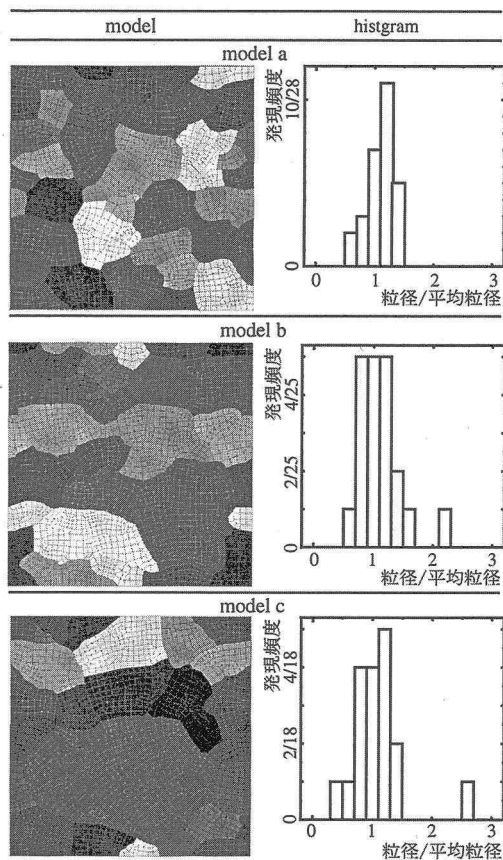


図-2 model a~c

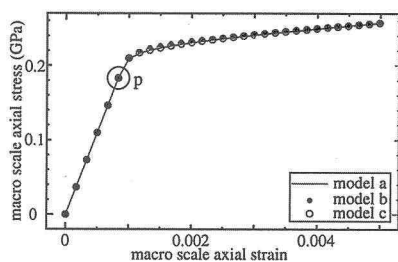


図-3 macro-scale axial stress-strain curve

的な変形特性が結晶スケールの不均一な変形挙動を受けて成立することが改めて確認できる。

4. まとめ

本研究では、多結晶金属に均質化法に基づくマルチスケールモデリングを適用して、粒径分布の異なる三種類の結晶組織を想定した数値解析を行った。その結果、結晶粒

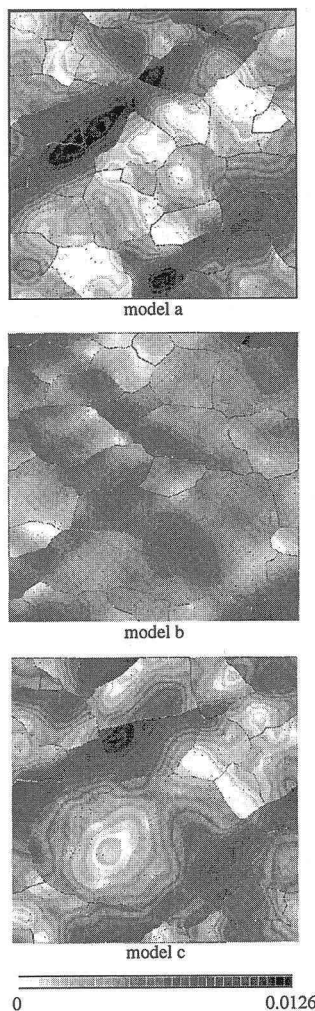


図-4 equivalent plastic strain

径分布の不均一具合が違うことによる各粒どうしの拘束形態の変化は、マクロな変形特性に対してほとんど影響しないことが確認された。

参考文献

- 1) 例えば Hill, R.: Continuum Micro-Mechanics of Elasto-Plastic Polycrystals, *J. Mech. Phys. Solids.*, Vol.13, pp.89-101, 1965.
- 2) Terada, K., Saiki, I., Matsui, K and Yamakawa, I.: Two-scale kinematics and linearization for simultaneous two-scale analysis of periodic heterogeneous solids at finite strain, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.192, pp.3531-3563, 2003.
- 3) 渡邊育夢, 寺田賢二郎, 松井和己, 秋山雅義, 根石豊: 多結晶金属のマリスケール解析, 応用力学論文集, Vol.6, pp.239-246, 2003.