

マルチスケールCAEシステムによる 多結晶金属材料の降伏強度評価

東北大学大学院 学生員 田端大人
東北大学大学院 正員 寺田賢二郎
京都工芸繊維大学 秋山雅義
九州大学大学院 正員 堤成一郎

1. はじめに

本研究では、均質化法¹⁾に基づくマルチスケールCAEシステム²⁾により、多結晶金属のマイクロ構造に対して理想的な荷重パターンを設定して加工を模擬した変形履歴を与えたマイクロ構造に対して数値材料試験を行い、マクロ後続降伏曲面の進展の観察とマクロ異方性の特徴付けならびにその影響因子となるマクロ残留応力、及びマクロ残留ひずみと集合組織等についての考察を行う。本研究では、計算コスト軽減のためにマクロ・ミクロスケールの連成効果を保持しながら2つの境界値問題を別々に解析するマイクロマクロ非連成近似解法²⁾によるマルチスケールCAEシステムを採用する。

2. 多結晶金属の数値材料試験

2.1 マクロ降伏挙動の評価方法

ここでは、数値材料試験の結果を整理する際に採用するマクロ降伏強度の指標を導入する。本研究では、以下の3つのマクロ降伏点を定義する。なお、以下ではユニットセルの初期状態のマクロ応答を調べる解析を「予備解析」、様々なマクロ荷重パターンにより変形履歴を作る解析を「初期解析」、その履歴を保持して行う解析を「後続解析」と呼ぶことにする。

・ 比例限界：予備解析から得られるマクロ応力ひずみ関係から傾きを算出し、後続解析に際してその応力ひずみ曲線の傾きが95/100になったときのマクロ真応力の偏差成分のノルム値

・ 0.1%耐力値：弾性除荷を行った際に、マクロ応力ひずみ曲線においてマクロ永久ひずみが0.1%となるマクロ真応力の偏差成分のノルム値

・ 0.2%耐力値：弾性除荷を行った際に、マクロ応力ひずみ曲線においてマクロ永久ひずみが0.2%となるマクロ真応力の偏差成分のノルム値

2.2 初期降伏面とユニットセルモデルの初期等方性

後に行うマクロ後続降伏曲面の進展の観察とマクロ異方性の特徴付けの際の比較対象として、図-1に示す塑性変形履歴を持たないマイクロモデルが初期状態において示すマクロ降伏挙動について予備解析により調べる。なお、ミクロスケールの座標系 Y_1, Y_2, Y_3 は、マクロスケールの座標系 X_1, X_2, X_3 と一致させる。

得られたマクロ応力 - ひずみ関係とマクロ初期降伏曲面を図-1に示す。これより、ある程度等方的なマクロ応答が得られており、代表体積要素としての資格を有しているものと判断する。

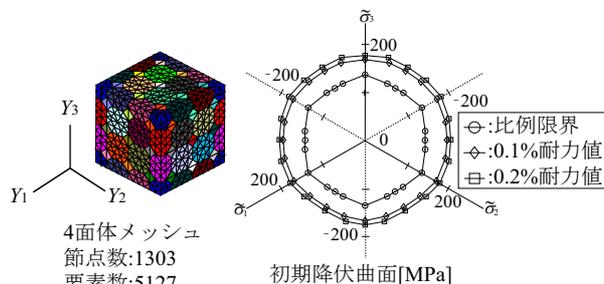


図-1 ユニットセルモデルと初期降伏曲面

2.3 数値材料試験ケース

多結晶金属が加工を受け、その結果生ずるマイクロな残留応力や集合組織の形成、マクロ降伏強度の異方性に与える影響を調査するための数値材料試験（後続解析）条件とケースについて述べる。実際の数値材料試験は次の手順で行う。

・ 理想的な荷重パターンを想定して数値材料試験（初期解析）により、加工後のマイクロ変形状態を作成する。

・ 得られたマイクロの変形状態を初期状態として、後続降伏曲面が π 平面上に描けるように、13ケースのマクロスケールの荷重条件について数値材料試験（後続解析）を行い、得られたマクロ応力 - ひずみ関係から、後続マクロ降伏挙動に対する評価を行う。

次に、数値材料試験にデータとして用いるマクロ変形量を設定する。まず、比較的小さな変形を受けた際の変形履歴の作成を行う。この場合、マクロ降伏強度の異方性に対してミクロスケールの残留応力の影響が大きく現れ、集合組織の影響は少ないと期待する。それに対し、非常に大きな変形を想定した初期解析を行い、対応する変形履歴も作成する。この場合は比較的小さな変形に比べ、マクロ降伏強度の異方性に対してミクロスケールの残留応力だけでなく集合組織の影響が顕著になり、異なるマクロ降伏挙動を観察できることが予測される。

以上の考察から、本解析では以下に示す数値材料試験のケースで、マクロ降伏挙動の評価を試みる。

- ・ X_3 方向に1軸引っ張り変形
マクロ真ひずみのノルム値：1%, 2%, 5%, 20%, 40%
- ・ X_1 方向に1軸圧縮変形
マクロ真ひずみのノルム値：1%, 2%, 5%, 20%, 40%

2.4 初期解析終了時のマイクロ応答と対応するマクロ応答

マイクロ解析から算出したマクロ応力 - ひずみ関係、除荷終了時のユニットセルの von-Mises 等価応力分布 [MPa]、および極点図についての解析結果の例を図-2に示す。

この結果、マクロ的な応力はゼロであるにもかかわらず、ミクロスケールには局所的に残留応力があることがわ

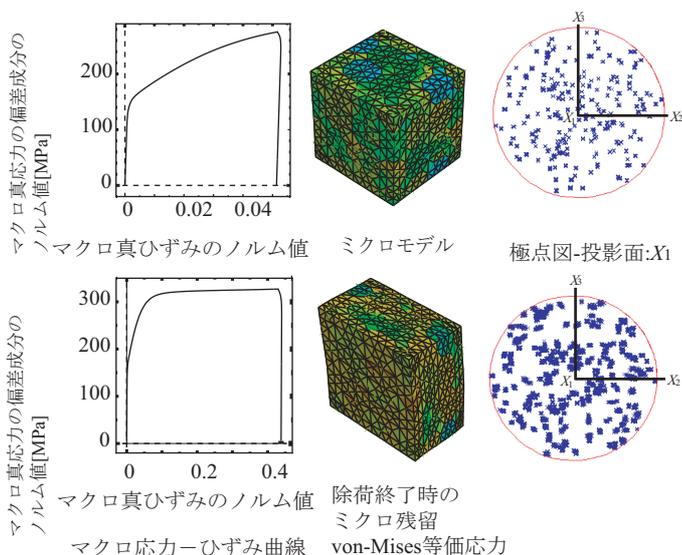


図-2 X_1 方向マクロひずみ 5, 40%時の1軸圧縮変形

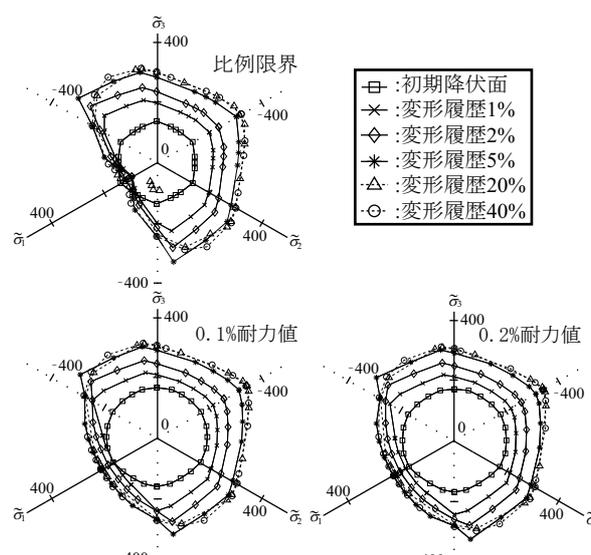


図-4 X_1 方向1軸圧縮変形時のマクロ後続降伏曲面

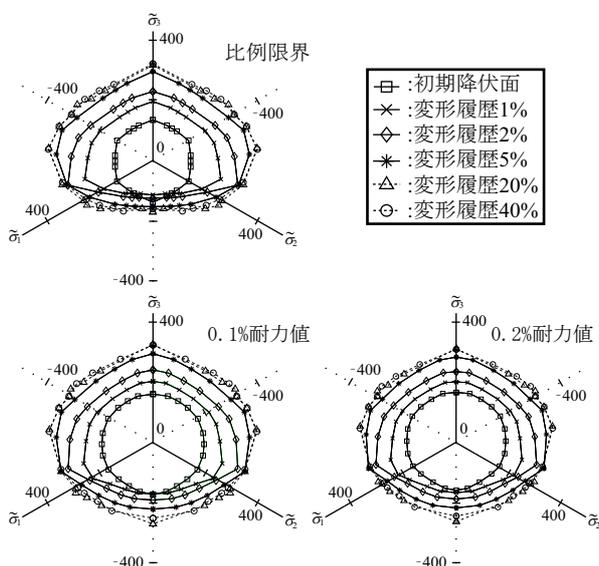


図-3 X_3 方向1軸引張変形時のマクロ後続降伏曲面
 かる。また、 X_1 方向に1軸圧縮変形40%の履歴を保持したマイクロ構造には集合組織の形成が見られる。

3. 後続マクロ降伏挙動評価

本節では、前節の初期解析により得られたマイクロの変形状態を初期状態として、マクロスケールの载荷(経路)パターンを変えて後続解析を行い、その結果得られたマクロ応力-ひずみ関係からマクロ降伏挙動を調査し、加工を受ける前の初期状態のマクロ降伏挙動と比較しながらマクロ降伏強度の異方性の特徴付けを行う。

3.1 マクロ後続降伏曲面

得られたマクロ後続降伏曲面を図-3, 4に示す。このとき、マイクロスケールの残留応力などの影響によりマクロ降伏曲面が移動し、マクロ降伏強度の異方性が発現していることが確認される。これに対し、変形履歴20, 40%を保持したマイクロ構造から得られたマクロ後続降伏曲面は図-5に示すように、マクロ応力の経路が急激に曲がっていることがわかり、期待していた比例载荷が実現されていないこと

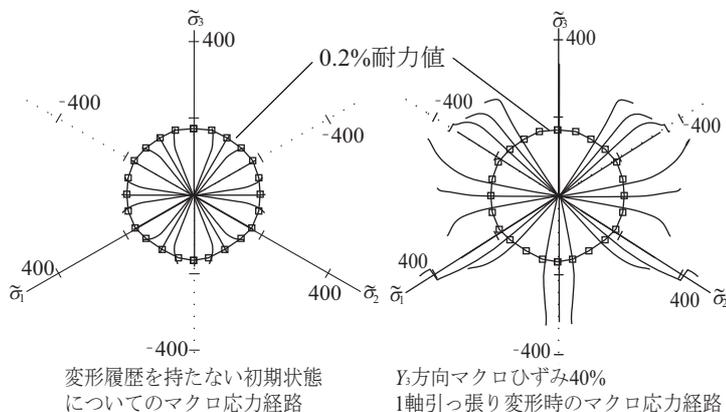


図-5 X_3 方向マクロひずみ40%の1軸引張変形時のマクロ応力経路

がわかる。

以上のような特異な降伏挙動は、変形履歴1, 2, 5%のマクロ後続降伏曲面でも多少みられたが顕著ではなく、大きな変形履歴による集合組織の形成によりユニットセルが材料軸を有する構造に変質したことを意味する。

4. 結論

本研究では、多結晶金属のマイクロ構造に対してマルチスケール塑性加工解析の枠組みで数値材料試験を行い、マクロ降伏挙動におよぼす変形履歴の影響について調べた。その結果、マイクロスケールの残留応力の影響によりマクロ降伏挙動の異方性が見られた。また、集合組織の影響によりユニットセルが材料軸を有する構造に変質し、マクロ降伏挙動の異方性が見られた。以上より、本研究はマクロ降伏挙動は変形履歴に応じてそのマイクロなメカニズムが異なることを示した。

参考文献

- 1) 寺田賢二郎, 菊池昇: 均質化法入門, 丸善, 2003.
- 2) 渡邊育夢, 寺田賢二郎: 非線形均質化理論における2変数境界値問題のマイクロ-マクロ非連続近似解法, 応用力学論文集, Vol.8, pp.277-285.