

I - 5 マルチスケールモデリングによる塑性加工プロセスを考慮した多結晶金属の強度評価

○東北大学工学部 学生員 田端大人
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. 序論

金属材料は、ミクロ領域で観測される現象がマクロ領域の材料特性に影響を与えることが知られており、スケール間の相互関係のメカニズムを解明することで、材料特性評価はより信頼性の高いものとなることが期待される。その一つの方策として、均質化法に基づいたマルチスケールモデリング¹⁾がある。この手法は、ミクロスケールの非均質な幾何構造を、有限要素モデルの任意の周期的なミクロ構造を有するマクロな均質体として考慮できるため、マクロ応答をより忠実に再現できるという利点がある。

本研究では、均質化法に基づく多結晶金属のマルチスケールモデリング²⁾により、複雑な変形挙動を示す塑性加工プロセスを考慮し、ミクロスケールにおける塑性加工履歴の違いが、マクロの材料挙動に与える影響を調査し、金属の強度特性評価を行う。

2. 単結晶に基づく構成モデル

本研究では、均質化法に基づいて導出したマルチスケールモデリングを適用し、ミクロスケールとマクロスケールの力学挙動を連結させた two-scale 境界値問題¹⁾において、結晶粒内部の材料挙動として、単結晶のすべりに基づく弾塑性構成モデルを適用する。降伏関数には、次式で与えられる、一般的な非速度依存モデルを用いる。

$$\phi^{(\alpha)} = \tau^{(\alpha)} - \tau_Y^{(\alpha)} - \sum_{\beta=1}^{n_{\text{slip}}} h_{\alpha\beta} \xi^{(\beta)} \quad (\alpha = 1, 2, \dots, n_{\text{slip}}) \quad (1)$$

ここで、 $\tau^{(\alpha)}$ はすべり方向への分解せん断応力、 $\tau_Y^{(\alpha)}$ は降伏応力、 $\xi^{(\alpha)}$ は塑性履歴パラメータ（すべり系 α のすべり量）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。降伏関数はすべり系の数だけ存在することから、複数の降伏面を有する弾塑性構成モデルである。

3. マルチスケール解析と強度特性評価

3.1 多結晶金属のミクロ解析モデルの設定と加工履歴を保持したミクロモデルの作成

多結晶金属のミクロ解析モデルは二十面体からなる同形状の結晶粒 54 個から構成された図-1 のようなミクロ構造を考える。数値解析で用いる材料定数は表-1 に表す。

まず、マクロの塑性加工解析から得られたマクロひずみを入力データとしてこのミクロ構造に与え、マクロの軸ひずみが 0.5% になった時点でマクロ応力を解放する。除荷時におけるこの値の変形履歴を保持したミクロモデルに対して、幾つかの方向に、一軸応力状態で引張変形を与え、発現するマクロ材料強度の異方性と加工法の関係を調査する。

表-1 材料定数

弾性係数 E	[GPa]	216.5
ポアソン比 ν		0.3
降伏分解応力 $\tau_Y^{(\alpha)}$	[GPa]	0.13
自己硬化定数 $h_{\alpha\alpha}$	[GPa]	0.5
潜在硬化定数 $h_{\alpha\beta} (\alpha \neq \beta)$	[GPa]	0.7

表-2 0.2%耐力 [GPa]

	スウェーjing	エクspand
$\theta = 0^\circ$	0.386	0.368
$\phi = 90^\circ$	0.397	0.376
$\psi = 90^\circ$	0.442	0.340

本研究では加工対象のマクロ構造として円管を考え、スウェーjing（縮小加工）、エクspand（拡張加工）の2つの加工方法による、加工履歴を経た多結晶金属の強度評価を行う。

3.2 塑性加工履歴によるマクロ応答の変化

塑性加工解析から得られたマクロひずみをミクロモデルに与えた際の各垂直応力成分の変化を図-2、3に、塑性履歴を保持したミクロモデルの、管軸、管周、管厚方向への再載荷による垂直応力-軸方向ひずみ関係を図-4、5に示す。またこの際、軸ひずみが 0.5% に達したときのミクロスケールの塑性ひずみ分布を図-6に示す。これより、初期状態では等方性を示していたが、各加工法に対応した変形履歴を与えることで、異方的なマクロ応答が得られている。また、スウェーjing加工のケースでは、3方向ともマクロ変形の初期段階でミクロ的に塑性状態となるのに対し、エクspand加工では、特に厚方向のマクロ変形では高いマクロ応力までミクロ領域で塑性が生じない。ところで、図-2、3からわかるように、スウェーjing、エクspand加工ともに、管厚方向は他の方向と異なったマクロ応力の履歴を持つ。この管厚方向が、載荷後のマクロ応答において、他の方向よりもスウェーjing加工の履歴を持つ材料では硬く、エクspand加工の履歴を持つ材料ではやわらかい応答をするのは、このマクロな応力履歴の違いが影響しているものと考えられる。ただし、図-6に示すミクロ応答には顕著な差は見られず、マクロ強度の異方性発現のメカニズムの解明にはさらに詳細な調査が必要である。

3.3 金属の強度特性評価

本研究では、0.2%の永久ひずみを生じる点のマクロ応力を 0.2%耐力とし、強度評価の一つの指標とする³⁾。強度の評価方法は、マクロの垂直応力-軸ひずみ関係で初期載荷時の弾性領域の傾きの直線を、ひずみ 0.2% の値まで平行移動し、その直線と交差する点の応力を 0.2%耐力と

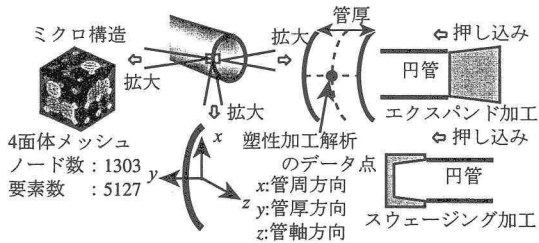


図-1 円管の解析の条件と加工方法

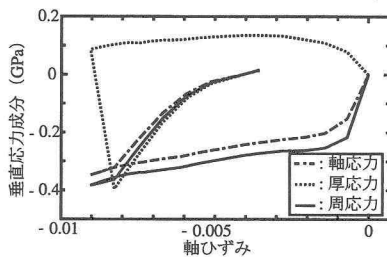


図-2 スウェーjing加工による応力履歴

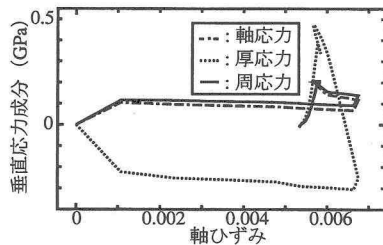


図-3 エクspand加工による応力履歴

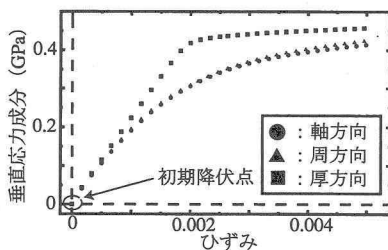


図-4 再載荷時のマクロ応答:スウェーjing加工のケース

する。得られた強度評価結果を図-7と表-2に示す。ここで、初期載荷時の0.2%耐力は0.346[GPa]である。全ての方向に対し、スウェーjing加工の履歴を保持した材料はエクspand加工のそれに比べ、大きなマクロ強度を示している。また、特に強度の差が大きいのは管厚方向であり、エクspand加工についてこの方向の加工によるマクロの材料強度の変化はほとんど無いことがわかる。

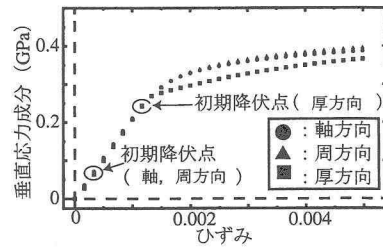


図-5 再載荷時のマクロ応答:エクspand加工のケース

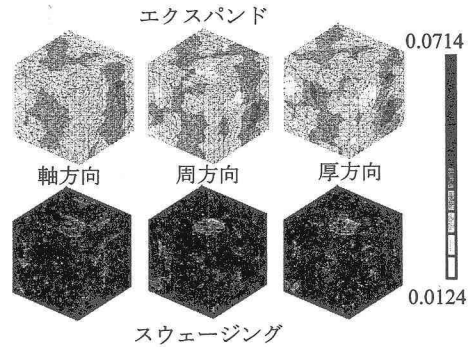


図-6 再載荷終了時の塑性ひずみ分布

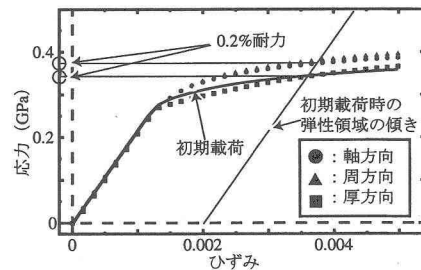


図-7 強度評価方法 (エクspand加工)

4. 結論

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において、多結晶金属のミクロの幾何構造を考慮し、塑性加工の履歴の違いがマクロスケールの材料挙動に与える影響を数値解析により調査した。結果、マクロ応答や強度は、等方的だった材料に異方性の発現が見られ、加工法ごとの履歴の違いによる強度の差が確認できた。今後は、ミクロスケールの応答結果から、マクロな異方性発現のメカニズムの解明を行う必要がある。

参考文献

- 1) Terada, K., Saiki, I., Matsui, K. and Yamakawa, Y.: 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.
- 2) 渡邊育夢, 寺田賢二郎, 松井和己, 秋山雅義, 根石豊: 多結晶金属のマルチスケール解析, *応用力学論文集*, Vol.6, pp.239-246, 2003.
- 3) 手塚則雄, 米山猛: 設計者に必要な材料の基礎知識, 日刊工業新聞社, 2003.