塑性加工プロセスにおけるミクロ変形履歴を考慮した多結晶金属のマクロ強度評価

○東北大学大学院　学生員　田端　大人
東北大学大学院　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，金属の多結晶構造の結晶粒レベルのミクロな非均質変形を考慮して，塑性加工を受けたマクロ構造物内の任意の点における材料の変形強度特性を評価するための手法を提案し，実際に具体的な加工法についての評価を行ってその適用性を例示する．

2. マルチスケール解析手法とマクロ塑性加工解析

均質化法によるマルチスケール解析手法は2つのスケールの連成解析手法であるので，対象とする塑性加工に対してミクロ-マクロ解析を実行することが望ましいが，そのためにはある点の評価のために，膨大なコストの計算を行わなければならない．そこでここでは，その枠組みを利用して，両者の連成効果を保持しながらマクロ解析とミクロ解析を個別に行う方法を考える．まず，ミクロ解析を行う代わりにマルチスケール解析とほぼ同じ応答を示すような構成モデルで代替しマクロ解析を行い，次にマクロモデル中のある点を選択し，マクロ解析により得られたマクロな変位場を入力データとしてミクロ解析を行い，マクロ解析の変形履歴を有するミクロモデルを得る．これにより，厳密ではないが塑性加工が想定されるマクロ問題の変形状態を反映したミクロ構造の加工後の状態を得ることができ，これを初期状態としたマルチスケール解析による強度評価を行うことで塑性加工による強度特性の変化を知ることができる．

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．材料定数は**表–1**に表す．

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	$\tau_{\mathrm{Y}}^{(\alpha)}$	[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]

	スウェージング	エクスパンド
軸方向	0.386	0.368
厚方向	0.442	0.340
周方向	0.397	0.376

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．

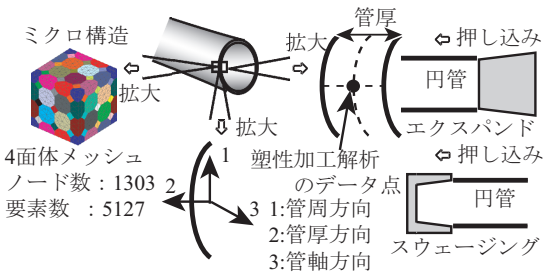
本研究では加工対象のマクロ構造として鋼管を考え，スウェージング（縮小加工），エクスパンド（拡張加工）の2つの加工方法による，加工履歴を経た多結晶金属の強度評価を行う．

3.2 塑性加工履歴によるマクロ応答の変化

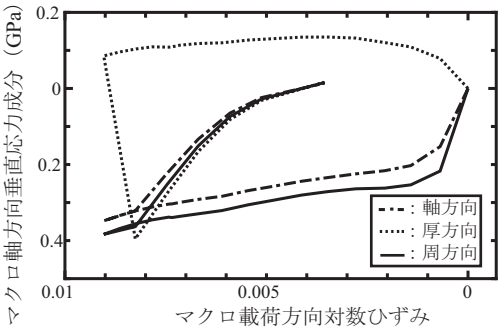
塑性加工解析から得られたマクロひずみをミクロモデルに与えた際のマクロ真応力の垂直応力成分の変化を**図–2，3**に，塑性履歴を保持したミクロモデルの管軸，管周，管厚方向への再載荷による真応力の載荷方向の垂直応力-軸方向ひずみ関係を**図–4，5**に示す．またこの際，軸ひずみが0.5%に達したときのミクロスケールの塑性ひずみ分布を**図–6**に示す．これより，初期状態では等方性を示していたが，各加工法に対応した変形履歴を与えることで，異方的なマクロ応答が得られている．また，スウェージング加工のケースでは，3方向ともマクロ変形の初期段階でミクロ的に塑性状態となるのに対し，エクスパンド加工では，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，スウェージング，エクスパンド加工ともに，管厚方向

キーワード：塑性加工，多結晶金属，均質化法，マルチスケール解析

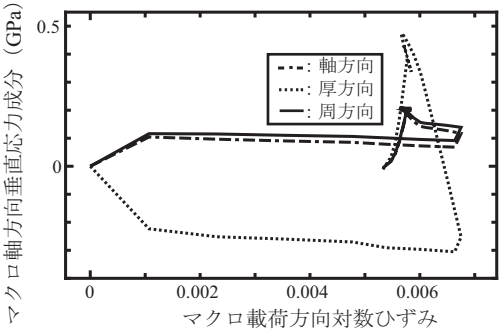
〒 980-8579　仙台市青葉区荒巻字青葉 06,　TEL 022-217-7126, FAX 022-217-7127 URL: http://www.nde.civil.tohoku.ac.jp/



図– 1 円管の解析の条件と加工方法



図– 2 スウェージング加工によるマクロ応力・ひずみ履歴



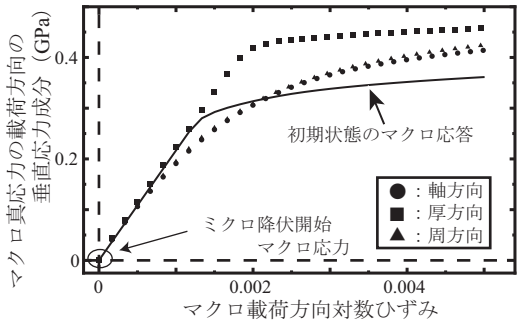
図– 3 エクスパンド加工によるマクロ応力・ひずみ履歴

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，**図–4，5** からわかるように載荷後のマクロ応答において，他の方向よりもスウェージング加工の履歴を持つ材料では硬く，エクスパンド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．

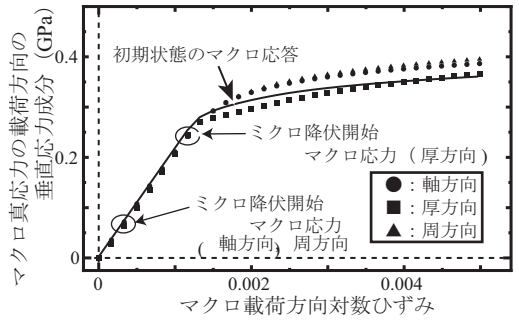
3.3　金属の強度特性評価

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．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%耐力とする．

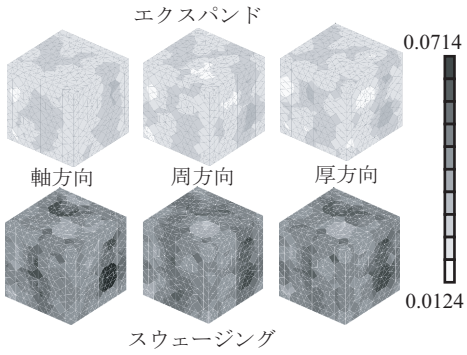
得られた強度評価結果を**表–2** に示す．ここで，初期載荷時の 0.2%耐力は 0.346[GPa] である．全ての方向に対し，スウェージング加工の履歴を保持した材料はエクスパンド加工のそれに比べ，大きなマクロ強度を示している．また，特に強度の差が大きいのは管厚方向であるが，エクスパンド加工についてはマクロの材料強度の変化はほとんど無いことがわかる．



図– 4 スウェージング加工終了後のマクロ応答



図– 5 エクスパンド加工終了後のマクロ応答



図– 6 加工の履歴を経た多結晶体の載荷時の塑性ひずみ分布

4.　結論

本研究では，均質化法に基づくマルチスケール解析手法を用いて，多結晶金属のミクロの幾何構造を考慮して，結晶粒，結晶粒内の非均質変形の影響をマクロ応答に反映した数値解析を行い，塑性加工履歴がマクロスケールの材料挙動に与える影響を調査した．結果，マクロ応答は，元々等方的な材料に変形強度特性の異方性が発現し，加工法ごとの履歴の違いによるマクロ材料応答の差が確認できた．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 linerization for simultaneous two–scale analisys of Periodic heterogeneous solids at finite strain, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.192, pp.3531–3563, 2003.