結晶塑性均質化法による鋼材の加工後強度予測

東北大学大学院　学生員　○名取 美咲
東北大学大学院　正　員　寺田 賢二郎

1. はじめに

本研究では，結晶塑性均質化法[1]に基づくマルチスケール解析手法の枠組みにおいて，ミクロおよびマクロスケールの連成効果を保持しながら両スケールの境界値問題を別個に解く解析手法である，ミクロ - マクロ非連成近似解法[2]を鋼管のピルガー加工のシミュレーションに適用し，加工後の強度およびその異方性の発現を予測するための評価手法を提案する．具体的には，ピルガー加工のシミュレーションにより得られるマクロ変形履歴をミクロ構造の負荷データとして時系列で与えて加工後の状態を模擬し，対応する数値供試体に対して数値材料試験を行うことで，強度異方性を評価する．

2. 結晶塑性均質化法に基づくマルチスケール解析手法

本研究では，結晶塑性均質化法に基づくマルチスケール解析手法を用いるが，具体的には以下の手順で塑性解析を行う．

1. ミクロ構造のモデルを決める．このとき，材料実験結果を受けてのキャリブレーションを行い，ミクロ材料パラメータの同定も行う．

2. 数値材料試験によりマクロ構成則のパラメータを同定する．材料実験を行っている場合にはそれを用いてマクロ構成則のパラメータ同定を行い，材料実験の結果がない場合にはミクロ構造に対して理想的なマクロ変形あるいは応力パターンを設定して，これをデータとするミクロ解析を実施し，対応するマクロ応力 - マクロひずみ関係を得る．

3. マクロ塑性加工解析を行う．

4. マクロ構造内の任意の点の変形履歴を抽出し，これを境界条件とするミクロ解析を行う．ここで，加工を経たミクロ構造の変形・応力状態を再現する．

5. マクロ変形履歴を与えられたミクロ構造は残留応力・残留ひずみを蓄えているので，それを反映した加工後の鋼材のマクロ強度評価を行うため，あるいはそれらが加工後の構造のマクロ変形強度特性に与える影響をみるために，再び数値材料実験を行う．

なお，ミクロ解析には汎用ソフト ABAQUS[3]を，マクロ解析には同じく汎用の ELFEN[4]を用いることとする．

3. 塑性加工のマクロ変形履歴を用いたミクロスケール解析

ピルガー加工法という鋼管の管径寸法を小さくする加工方法を題材にマクロ変形履歴を反映したミクロ解析を行うことにより，マクロ解析結果とミクロ解析の結果として得られるマクロ応答の比較を行う．

3.1 ユニットセルモデルとミクロ材料パラメータの同定

解析に用いるユニットセルモデルには，**図–1** のような正 6 面体を理想化した 54 結晶粒からなるミクロ構造を採用する．対象とするステンレス鋼は FCC 結晶構造のすべり系を有しており，鋼材の加工前と初期の非均質性は乱数で発生させた多結晶体内の結晶方位でのみ規定されるものとする．以下では，解析に先立ってミクロ材料パラメータの同定を行う．

鋼材の初期の変形強度特性を示す実験データを元に，ユニットセルに設定するミクロ材料パラメータをキャリブレーションにより同定した．本研究ではミクロ材料パラメータを同定する際に，(1)，(2) 式で示される結晶塑性モデルにおける自己硬化と潜在硬化モデルにおける各すべり系の強度，硬化パラメータおよび (3) 式で表される St.Venant の異方性弾性モデルにおける弾性係数について適宜調節することによって[5]，鋼材の初期の変形強度特性を示す実験データにフィッティングさせて同定した．

$$h_{\alpha\alpha} = h(\gamma) = h_0 \mathrm{sech}^2 \left| \frac{h_0 \gamma}{\tau_s - \tau_0} \right| \tag{1}$$

$$h_{\alpha\beta} = q h(\gamma) \quad (\alpha \neq \beta) \tag{2}$$

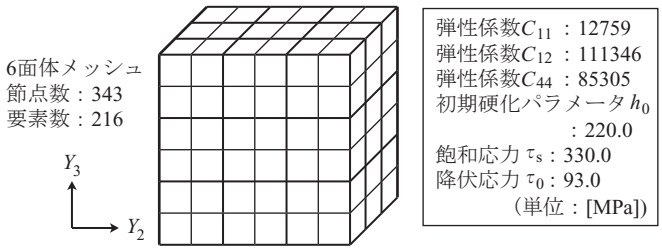
$$\boldsymbol{S} = \mathbb{C} : \boldsymbol{E} \tag{3}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix}, \quad C_{44} = \frac{C_{11} - C_{12}}{2}$$

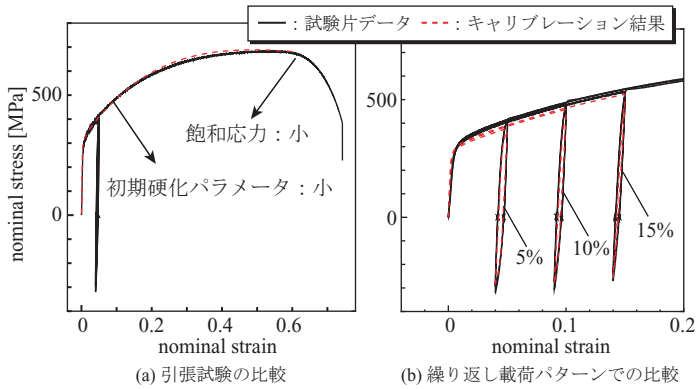
γ は総すべり量，$\boldsymbol{S}$ は第 2Piola-Kirchhoff 応力テンソルを，$\boldsymbol{E}$ は Green-Lagrange ひずみテンソルをそれぞれ表している．材料によって変化するパラメータである h_0：初期硬化パラメータ，q：潜在硬化係数，τ_s：飽和応力，C_{11}，C_{12}，C_{44}：弾性係数について最終的に同定したミクロ材料パラメータを**図–1** 中に示す．なお，同定したミクロ材料パラメータを用いて行って得られた引張・圧縮試験結果を比較したものが**図–2** である．

3.2 鋼管のピルガー加工のマルチスケール解析

図–3 に示すピルガー加工のマクロ解析結果として得られるマクロ変形履歴をデータとして，**3.1** 項で同定したミクロ材料パラメータを用いてミクロ解析を行う．ピルガー加工は他の加工法と比較して鋼管が剛体回転・平行移動および圧延を幾度も繰り返す複雑な動きをするため，**図–4** に示す既存のマクロ変形履歴の時系列データをユニットセルの剛体回転を適切に再現できるようにスムージング処理を行ったうえでミクロ解析の境界条件を設定して解析を行っ



図– 1 ユニットセルとミクロ材料パラメータ



図– 2 パラメータ同定結果

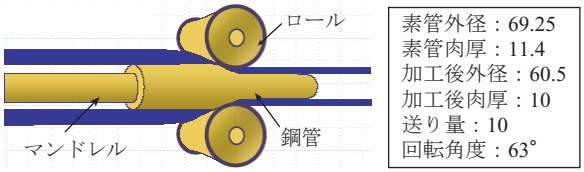
た．得られたミクロ解析の結果としてミクロ応力の体積平均を取って算出したマクロ応答のうち，マクロ応力 - ひずみ曲線を**図–5** (a) に，Mises 応力分布の加工開始時から終了までの時系列応答を**図–5** (b) に示す．また，マクロ解析結果とのマクロ応力経路の比較を示したものが**図–6** である．以上の結果から，ミクロ解析を行うことによって従来の古典塑性論を用いたマクロ解析では追従できない複雑な応力履歴をも表現可能であり，本研究に用いたマルチスケール解析手法の有効性がみてとれる．

4. おわりに

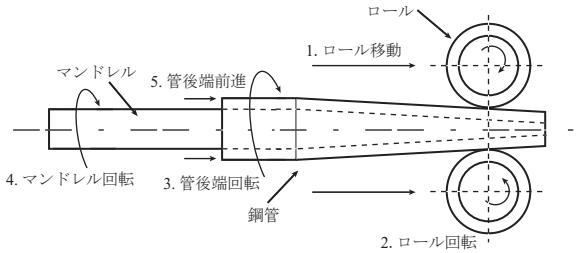
本研究では，結晶塑性均質化法を用いたマルチスケール解析手法を用いてピルガー加工法をシミュレートし，本手法を非連成にして解析した後に得られる数値供試体（加工後のミクロ構造）の妥当性の検証の一端を示した．本手法を用いてさらに数値材料試験を行うことにより加工後強度や異方性の評価が可能となると推察でき，鋼管の加工後強度評価に有用であると考えられる．

参考文献

1) 寺田賢二郎，菊池昇：均質化法入門，日本計算工学会編，丸善，2003.
2) 渡邊育夢，寺田賢二郎：結晶粒の損傷を考慮した多結晶金属のマルチスケール解析手法，土木学会論文集 A，Vol.62, pp.772-781, 2006
3) ABAQUS : *ABAQUS User's Manual*, Hibbit, Karlesson & Sorensen Inc., Pawtucket, Rood Island, 2007.
4) ELFEN：*ROCKFIELD. ELFEN user manual*, Pockfield Software, The Innovation Centre, University of Wales College Swansea, Singleton Park, Swansea, U.K., 2000.
5) Sedlak, et. al：Elastic constants of bcc austenite and 2H orhtorhombic martensite in CuAlNi shape memory alloy, *Acta Mater.* 53, pp. 3643–3661, 2005

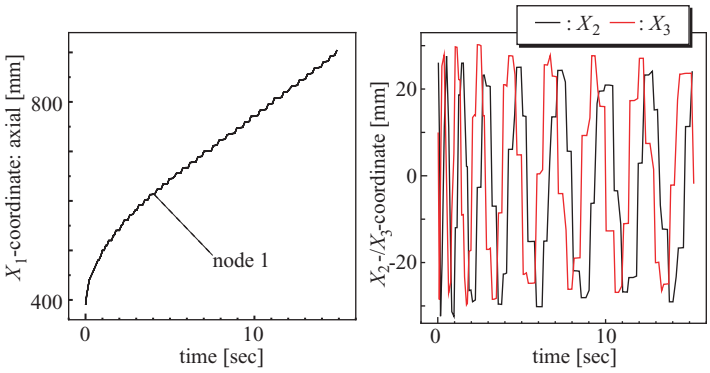


(a) 鋼管のピルガー加工の模式図（寸法単位：[mm]）

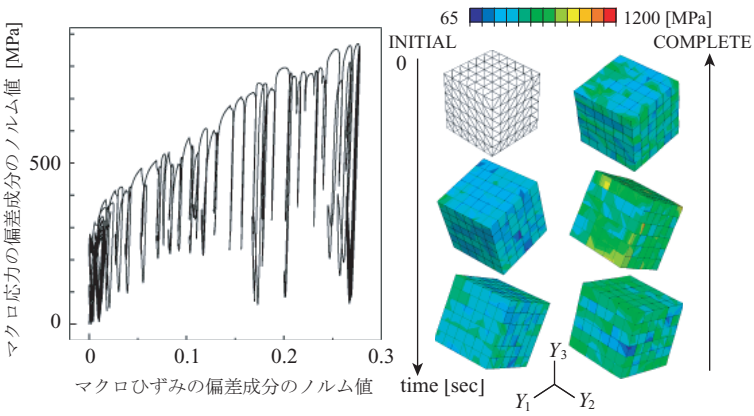


(b) 鋼管のピルガー加工の過程

図– 3 鋼管のピルガー加工過程の様子

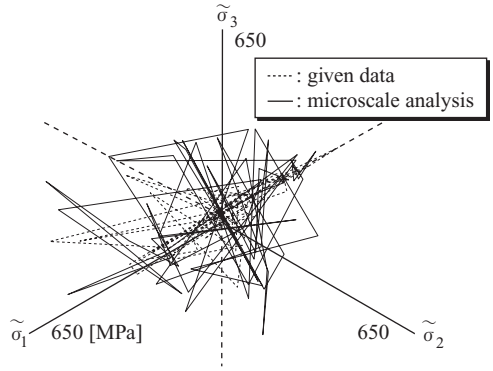


図– 4 マクロ解析結果（ある節点の座標の時刻歴応答）



(a) マクロ応力 - ひずみ曲線　(b) マクロ応力分布（Mises応力）

図– 5 ミクロ解析結果のマクロ応答



図– 6 マクロ応力経路の比較