

結晶塑性構成則を用いた DP 鋼の成型限界特性評価

東北大学大学院 学生員 ○倍賞 建士
 東北大学大学院 正 員 寺田賢二郎
 東北大学大学院 正 員 京谷 孝史

1. はじめに

金属薄板の加工性を視覚的に表現する手段として従来から成型限界曲線が広く用いられてきた。しかし成型限界曲線にはひずみ経路依存性があることが既往の研究¹⁾から明らかとなっており、そのまま設計に用いるのは不適切である。そこで、ひずみ経路に依存しない評価指標として成型限界応力線が提案されている²⁾。本研究では、均質化法を用いたマルチスケール解析の枠組みにおいてマイクロ解析に結晶塑性構成則を導入し、DP 鋼マイクロ構造に対してひずみパターンや履歴を変化させる数値材料試験を行い、ひずみ経路が成型限界曲線に与える影響について検討し、成型限界応力線を作成して DP 鋼の成型限界を応力で評価することを行う。

2. マルチスケール解析による DP 鋼の成型限界特性評価手法

2.1 ミクロ構造の支配方程式とマクロ変数

均質化法に基づくマルチスケールモデリングでは、材料の微視的非均質性を特徴づけるミクロ構造とそれによって評価されるマクロ材料特性をパラメータとするマクロ構造体に対して、それぞれの支配方程式が導出される。

本研究で対象とする DP 鋼は典型的な弾塑性複合材料である。その周期的なミクロ構造（以下、ユニットセル）を仮定すれば、有限変形問題を対象としたときのミクロ構造の平衡方程式と変形勾配-変位関係は、 $\mathbf{Y}, \mathbf{y} = \varphi(\mathbf{Y})$ をそれぞれミクロスケールの初期配置と現配置として次式で与えられる³⁾。

$$\begin{aligned}\nabla_{\mathbf{Y}} \cdot \mathbf{P} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{F} &= \nabla_{\mathbf{Y}} \mathbf{y} = \tilde{\mathbf{F}} + \hat{\mathbf{F}} - \mathbf{1}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{P}$ はミクロスケールの公称応力であり、 $\mathbf{F}, \hat{\mathbf{F}}, \tilde{\mathbf{F}}$ はそれぞれミクロ変形勾配、その擾乱成分、マクロ変形勾配である。なお、 $\tilde{\mathbf{F}}$ はミクロスケール $\mathbf{Y}$ と独立なので、ミクロ構造内の変位は次式で与えられる。

$$\mathbf{u} = (\tilde{\mathbf{F}} - \mathbf{1}) \cdot \mathbf{Y} + \mathbf{u}^* \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}^*$ は $\hat{\mathbf{F}}$ に対応する擾乱変位であるが、均質化法の数学理論に従って周期拘束を与える。これらの式にミクロ構造内で定義した材料の構成則を付加した支配方程式は、マクロ変形 $\tilde{\mathbf{F}}$ を含む拘束条件 ($\mathbf{u}^*$ の周期性) が特殊である以外は固体材料に対する通常の境界値問題なので、ABAQUS 等の汎用 CAE ソフトで解析することでミクロ変数を定めることができる。対応するマクロ公称応力やマクロ変形勾配などの変数は、ユニットセル内の体積平均量として次のように算出される。

$$\tilde{\mathbf{P}} = \langle \mathbf{P} \rangle, \quad \tilde{\mathbf{F}} = \langle \mathbf{F} \rangle \quad (3)$$

これらのマクロ変数は、必要に応じてマクロ真応力やマクロ真ひずみなどの諸変数に変換すればよい。

2.2 結晶塑性構成則

前項で示した 2 変数境界値問題におけるミクロ問題における構成則には用いられている材料に応じて任意に設定できる。本研究ではミクロスケールに結晶粒の集合体である多結晶体を想定し、Pierce ら⁴⁾によって与えられた速度依存型の結晶塑性モデルを採用する。

結晶格子のすべりは、すべり面上のせん断応力 τ^α が一定の臨界値に達することで生じると考える Schmidt の法則に基づく。Schmidt 則に基づいた速度依存結晶材料における α 番目すべり系のすべり速度を表す式は以下のような式を採用した。

$$\dot{\gamma}^\alpha = \dot{a}^\alpha \left(\frac{\tau^\alpha}{g^\alpha} \right) \left| \frac{\tau^\alpha}{g^\alpha} \right|^{n-1} \quad (4)$$

ここで、 $\dot{a}$ はすべり速度の基準値で、 n は速度依存性を制御するための値でいずれも材料パラメータである。また、 g^α はすべり系の硬化則であり、その時間微分は次式で定義される。

$$\dot{g}^\alpha = \sum_{\beta} h^{\alpha\beta} \dot{\gamma}^\beta \quad (5)$$

ここで、 $h^{\alpha\beta}$ はすべり硬化の材料定数であり、 $h^{\alpha\alpha}, h^{\alpha\beta} (\alpha \neq \beta)$ をそれぞれ自己硬化、潜在硬化と呼び以下のように定義している。

$$\begin{aligned}h^{\alpha\alpha} &= h_0 \sec h^2 \left(\frac{h_0 \gamma}{\tau_s - \tau_0} \right) \\ h^{\alpha\beta} &= q h^{\alpha\alpha} (\alpha \neq \beta)\end{aligned}\quad (6)$$

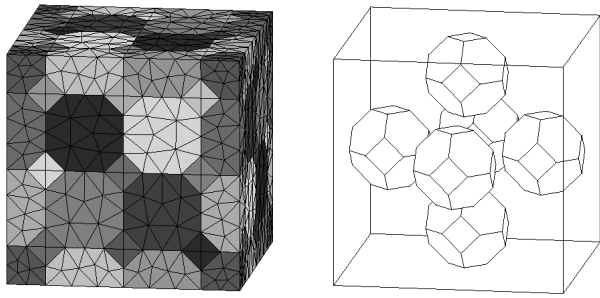
ここで、 h_0 は初期硬化係数、 τ_0 は降伏応力で g^α の初期値となり、 τ_s は大きな塑性流れ時の飽和応力を示し、 q は自己硬化係数と潜在硬化係数の比を表す。これらはいずれも材料パラメータである。 γ はすべり量の時間積分の総和で、以下のように定義される。

$$\gamma = \sum_{\alpha} \int_0^t |\dot{\gamma}^\alpha| dt \quad (7)$$

本研究では、ミクロ境界値問題に対してこの結晶塑性構成則を導入し、複数のひずみ経路について数値材料試験を行うことで成型限界曲線および成型限界応力線を作成し、これらを比較・検討する。

キーワード：DualPhase 鋼，成型限界，マルチスケール解析，結晶塑性

〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06, TEL : 022-795-7425, FAX : 022-795-7423, URL : <http://www.mm.civil.tohoku.ac.jp/>



(a) 解析に用いたメッシュ (b) マルテンサイト粒の配置

図-1 解析対象マイクロモデル
(節点数 : 1303, 要素数 : 5127)

2.3 成形限界評価手法

本研究では、マルチスケール解析で得られたマクロ公称応力 $\bar{P}$ の主値である最大主応力 P_1 または中間主応力 P_2 のどちらかがピークに達したときを成型限界として定義し、このときのマクロ真ひずみ $\bar{\epsilon}$ を成型限界ひずみ、マクロ真応力 $\bar{\sigma}$ を成型限界応力として定義する。

成形限界曲線を作成するにあたって、数値材料試験では、まずユニットセルに対して Y_1 方向一軸引張から Y_2 方向一軸引張まで複数の線形な経路を選択してマクロひずみを比例負荷する解析を行う。この一連の解析を Set I とする。次いで、 Y_2 方向に平面ひずみ状態で予ひずみを与え、続けて比例負荷と同じようにマクロひずみを与える。この一連の解析を Set II とする。以上により得られた成形限界ひずみについて、各解析セットごとに $\bar{\epsilon}$ の Y_1 方向成分 $\bar{\epsilon}_{11}$ と、 $\bar{\epsilon}$ の Y_2 方向成分 $\bar{\epsilon}_{22}$ を軸とした直交座標上にプロットすることで成形限界曲線を得る。また、数値材料試験の全ケースについて、成形限界時のマクロ真応力 $\bar{\sigma}$ の成分 $\bar{\sigma}_{11}$ および $\bar{\sigma}_{22}$ を直交座標上にプロットすることで、成形限界応力線を作成する。

3. 数値解析条件および結果

本研究では、図 1 に示すような 3 次元モデルを用いて解析を行う。各解析ケースにおける成形限界曲線図を図 2, 3 に示す。Set I と Set II を比較すると、予ひずみを与えたことにより、Set II での Set I の各ケースに対応するひずみ経路の成形限界時の真ひずみは小さくなった。また、成形限界応力線を図 4 に示す。成形限界時の応力を応力空間にプロットするとほぼ同一曲線上に並ぶことから、DP 鋼について成形限界応力線を用いることでひずみ経路に依存しない成形限界を示すことができた。

4. おわりに

本研究では、均質化法に基づくマルチスケール解析により、DP 鋼の成形限界応力線を作成した。これにより、成形限界応力線を用いることでひずみ経路に依存せずに DP 鋼の成形限界特性を示した。

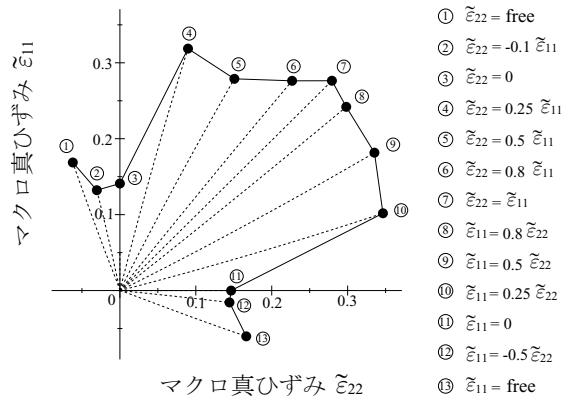


図-2 成形限界曲線図 (1) Set I

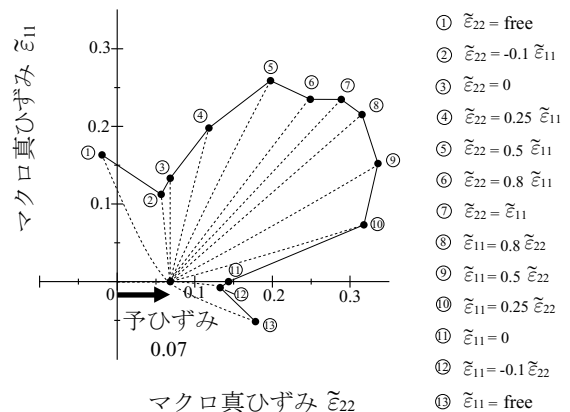


図-3 成形限界曲線図 (2) Set II

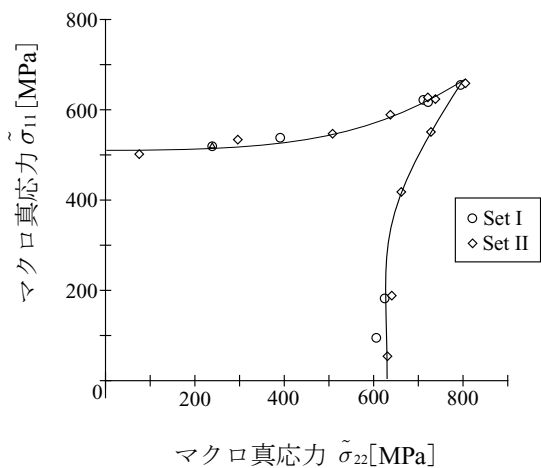


図-4 成形限界応力線図

参考文献

- 1) K.Nakazima, et al., Yawata Tech. Rep., No.264, 8517, 1968.
- 2) K.Yoshida, T.Kuwabara, M.Kuroda: Path-dependence of the forming limit stresses in a sheet metal, International Journal of Plasticity, Vol.23, pp.361-384, 2007.
- 3) 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.
- 4) D.Pierce, R.J.Asaro: Crystal Plasticity, Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, 1983.