

微視的構造を考慮した DP 鋼の巨視的弾塑性材料特性の評価

東北大学大学院 学生員 吉田善紀
 東北大学大学院 正員 寺田賢二郎
 JFE スチール株式会社 奥田金晴
 JFE スチール株式会社 海野玲子

1. 序論

DP(Dual Phase) 鋼は、「高強度かつ高延性」を実現した鋼製品の一つであり、結晶の状態を変えて変態強化した硬いマルテンサイト相(以下、 α' 相)と、軟らかいフェライト相(以下、 α 相)を共存させた二相構造鋼である。DP 鋼は、その微視的構造の違いがマクロな成形性能に影響を及ぼすことが知られているが、これらの相互関係のメカニズムは明らかにされていない。

本研究では、この DP 鋼に対するマルチスケール解析を行い、微視的構造の幾何性状がマクロな成形限界特性に及ぼす影響について検討する。

2. マルチスケール解析手法

材料の非均質性を特徴づける周期的なマイクロ構造(ユニットセル)の変位場 w は次式で与えられる。

$$w = \tilde{H} \cdot Y + u^* \quad (1)$$

ここで、 Y はユニットセルの初期座標、 \tilde{H} はマクロ変位勾配、 u^* はミクロスケールの周期的な擾乱変位場である。一方、マクロ変形勾配 \tilde{F} 、マクロ第 1 Piola-Kirchhoff 応力 \tilde{P} は対応するミクロ変数のユニットセル体積平均量として、

$$\tilde{F} = \langle F \rangle = \frac{1}{|Y_0|} \int_{Y_0} F dY = \langle H \rangle + 1, \tilde{P} = \langle P \rangle \quad (2)$$

で与えられ、次の平衡方程式を満たす。

$$\nabla_X \cdot \tilde{P} + B = 0 \quad (3)$$

ここで B は物体力である。 \tilde{P} と \tilde{F} の関係は陽な形では与えられないが、上述のミクロ問題を \tilde{F} をデータとして解いて得られるミクロ応力 \tilde{P} を用いて (2) から算定すればよい。

3. マルチスケール解析と成形限界特性評価

3.1 数値材料試験条件

DP 鋼の微視的構造内部の α' 相の分布性状と体積率の影響を調べる目的で、平面応力状態を仮定した図-1(a)に示す 9 パターンの二次元有限要素モデルを用いて数値材料試験をおこなう。 α 、 α' 単相の材料データを図-1(b)に示す。

また、マクロ公称応力のノルム $\|\tilde{P}\|$ がピークに達するときをマクロ成形限界と定義し、このときのマクロ対数ひずみ成分を載荷方向を軸とした直交座標上にプロットする

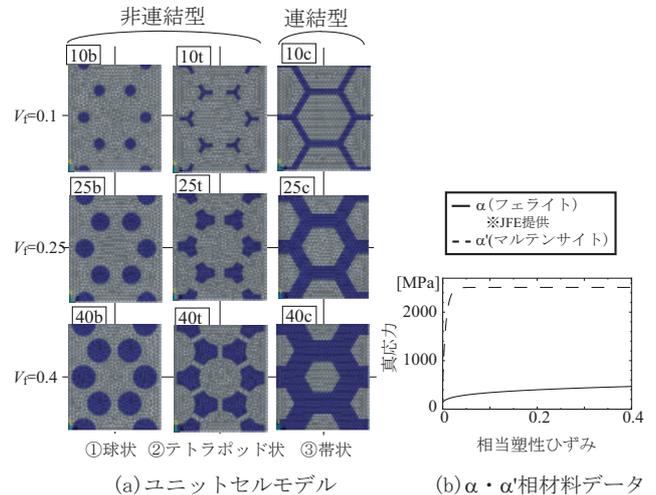


図-1 (a) ユニットセルモデルと (b) α 、 α' 単相の材料データ

ことで成形限界曲線を作成する。載荷経路については一軸引張から等二軸引張状態を限度とするマクロひずみ経路を 9 本選択して比例負荷するミクロ解析を行う。

3.2 α' 相の分布性状及び体積率がマクロ成形限界に及ぼす影響

α' 相の体積率を一定 ($V_f = 25\%$) として α' 相が分布したモデル (25b, 25t) と、連結したモデル (25c) について、数値材料試験で得られた一軸引張状態におけるマクロ成形限界に至るまでの応力-ひずみ曲線を図-2 に、成形限界曲線を図-3 に示す。また、体積率の異なるモデルについての成形限界曲線とミクロ内部のひずみ分布を図-4 に、ひずみ経路ごとのマクロ成形限界時のミクロ内部のひずみ分布を図-5 に示す。

図-2 から、ミクロ構造内における α' の体積率が同じであっても分布性状の違いによって、マクロな材料挙動に大きな差が生じることがわかる。連結型のモデル (25c) は非連結型のモデル (25b, 25t) と比較して変形特性が低く、強度特性が高い結果となった。また、図-3 より、多軸引張状態でも連結型モデルの変形特性は非連結型に比べ低くなっていることがわかる。これは、以下に述べるようなマクロ成形限界に至るミクロなメカニズムの違いによるものと推察される。

- 非連結型モデルは、ミクロ内部で α 相と α' 相に同程度のミクロ応力が生じるため、マクロ成形限界は強度

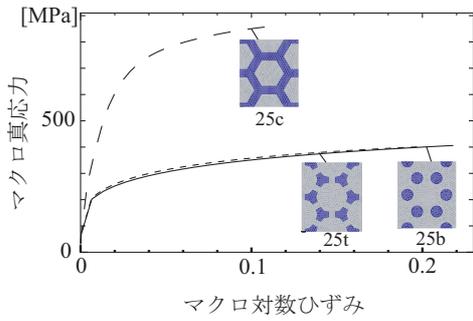


図-2 異なる α' 相の分布性状を有するミクロ構造についての一軸引張時の応力-ひずみ曲線 ($V_f = 25\%$)

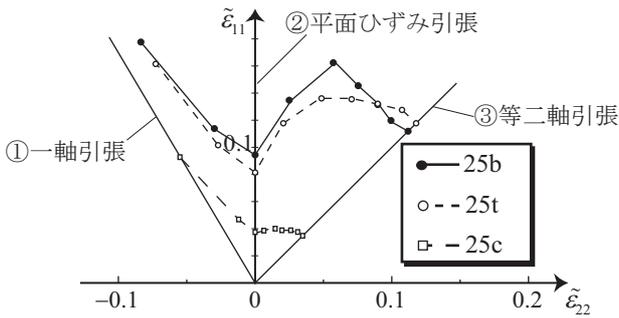


図-3 マクロ成形限界曲線図 (25b, 25t, 25c)

特性の低い α' 相が支配的となる。

- 連結型モデルは、ミクロ内部で α 相と α' 相に同程度のミクロひずみが生じるため、マクロ成形限界は変形特性の低い α' 相が支配的となる。

図-4 から α' 相の体積率が異なるモデルの成形限界曲線を比較すると、両モデルとも体積率が大きいほどマクロな変形特性は低くなっているのがわかる。また図-4 の右側に示したミクロ内部のひずみ分布を観察すると、これは以下に示すミクロ内部のメカニズムに起因するものと推察される。

- 非連結型モデルでは α 相体積率 ($1 - V_f$) が小さいと、 α' 相がほとんどひずまないため、マクロスケールで同等なひずみ状態でもミクロ内部で α 相が負担するひずみは大きくなり、結果的に低いマクロひずみ状態でマクロな成形限界に至る。
- 連結型モデルでは、 α' 相の体積率が大きいと α' 相の連結が強くなるため、 α' 相が微視的な破断に至るまでにマクロな応力状態は大きくなり、 α' 相の微視的な破断後、ほとんど変形することなくマクロ公称応力はピークを迎えマクロな成形限界に至る。

また、図-5 からひずみ経路によってミクロ構造内部のひずみ分布が異なることが確認できる。平面ひずみ引張状態 (b) では他と比較してひずみの局所化が顕著であり、脆

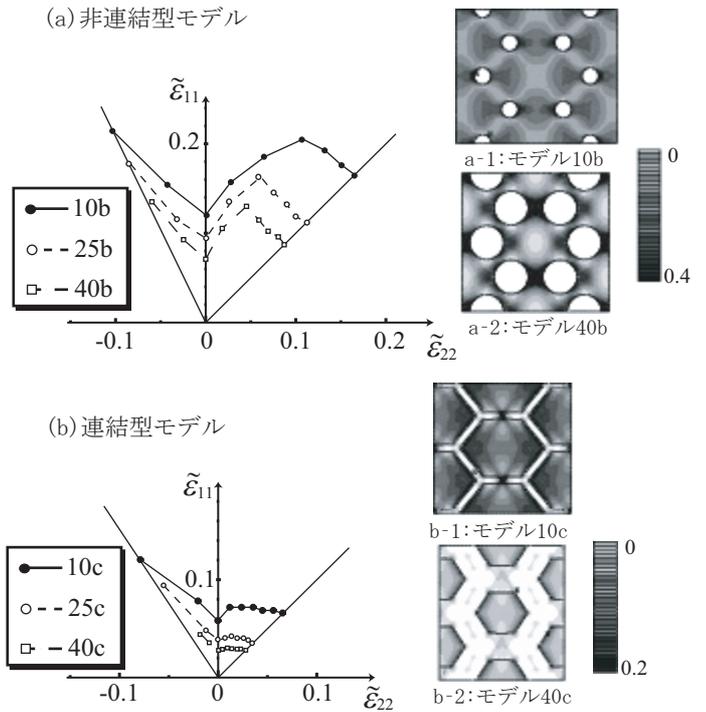


図-4 マクロ成形限界曲線図と一軸引張状態でのマクロ成形限界時の α' 相体積率ごとのミクロ相当塑性ひずみ分布 ((a) 非連結型モデル, (b) 連結型モデル)

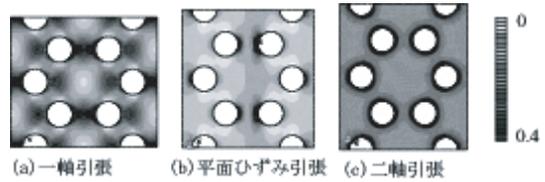


図-5 モデル 25b のマクロ成形限界における相当塑性ひずみ分布

性的な破断形態となることが推察される。これは、図-3 や図-4 で示した成形限界曲線の示す傾向とも整合している。

4. 結論

本研究では、DP 鋼の微視的構造におけるマルテンサイト相 (α' 相) の分布性状と体積率に焦点をあて、マルチスケール数値材料試験によりこれら微視的構造の幾何性状がマクロ成形限界特性に及ぼす影響評価を試みた。その結果、DP 鋼のマクロな変形強度特性はマクロひずみ経路だけでなく α' 相の連結性や体積率に支配されることがわかった。また、ミクロ構造内部の応力・ひずみ状態を観察することで、各モデルごとのマクロ成形限界の発現のメカニズムについてある程度解明することに成功した。

参考文献

- 1) Terada, K., Saiki, I., Matsui, K. and Yamakawa, Y.: *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.192, pp.3531-3563, 2003.