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. はじめに

DP(Dual Phase)鋼は,高い強度と優れた成形性を併せ もった鋼であり,その優れた機械的性能により幅広い分野 で利用されている.DP鋼の微視的構造は,軟らかいフェ ライト相を母相として,変態強化した硬いマルテンサイト 相が分布している非均質構造になっており,種々の応力条 件下における塑性変形から破壊に至るまでの巨視的な挙動 に対して,微視的構造の非均質性が大きな影響を与えるこ とが,これまでの研究からわかっている.¹⁾

本研究では,汎用数値解析ソフトウェア ANSYS を利用 して,DP 鋼に対する有限変形マルチスケール解析をおこ ない,巨視的弾塑性挙動を特徴づける指標の一つである成 形限界特性に対する微視的構造の影響を評価する.

- マルチスケール解析による DP 鋼の成形限
 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, $Y, y = \varphi(Y)$ 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²⁾.

$$\nabla_Y \cdot \boldsymbol{P} = \boldsymbol{0} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{F} = \nabla_Y \boldsymbol{y} = \boldsymbol{F} + \boldsymbol{F} - \boldsymbol{1} \tag{2}$$

ここで, P はミクロスケールの公称応力であり, F, \hat{F} , \hat{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{F} はミクロスケール 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.

$$\boldsymbol{u} = (\tilde{\boldsymbol{F}} - \boldsymbol{1}) \cdot \boldsymbol{Y} + \boldsymbol{u}^* \tag{3}$$

ここで, u^* は \hat{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{F} を含む拘束条件(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,ANSYS 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



図-1 成形限界曲線作成フロー

ように算出される.

$$\tilde{\boldsymbol{P}} = \langle \boldsymbol{P} \rangle, \quad \tilde{\boldsymbol{F}} = \langle \boldsymbol{F} \rangle$$
(4)

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.

本研究では, DP 鋼のミクロ構造に分布するフェライト とマルテンサイトの構成則をとして,最も古典的な J₂ 流 れ則と等方硬化則に基づく弾塑性モデルを採用する.

2.2 成形限界評価手法

本研究では,各相の分布性状を含む構造特性が異なるユ ニットセルモデルを設定して,前述の支配方程式を解いて マクロ変数を求める数値材料試験を行うことで,微視的構 造特性がマクロ弾塑性特性に与える影響を調べる.具体的 には,ミクロ解析の結果として得られるマクロ応力-ひず み応答を元に,図1に示すようなプロセスを経て成形限界 曲線を作成し,これらを比較・検討する.

3. マルチスケール数値解析結果

3.1 数值解析条件

本研究では、マルテンサイト相の分布形状と体積率が、異 なる微視的構造を持つ2つのモデル(モデル : $V_{\rm f} = 10\%$, 球状、モデル : $V_{\rm f} = 40\%$,帯状)に対して、図2に示す ような平面応力を仮定した二次元モデルを用いて解析を行 う.またフェライト、マルテンサイト単相材料での機械的 性質を表1に示す.

ひずみ経路は比例負荷を考慮し,一軸引張から二軸引張 状態を限度とするマクロひずみ経路を9本選択して,マク ロひずみを比例負荷する解析を行う.

	Ferrite	Martensite
Young 率 [MPa]	206000	206000
Poison 系数	0.2	0.2
均一伸び	0.23	0.048
引張強度 [MPa]	411	2500







図-3 成形限界に至るまでの応力ひずみ曲線(一軸引張 状態)

3.2 解析結果

図3に一軸引張状態における,両モデルの成形限界に達 するまでの応力ひずみ曲線を示す.モデル の均一伸びは 小さくモデル の1/5程度だが,逆に引張強度はモデル の約3倍となった.すなわち,モデル の方がより高強度 であるが成形性に乏しい材料であることがわかる.また, モデル はフェライト単相,モデル はマルテンサイト単 相の材料挙動に近くなっている.

次に,両モデルの成形限界曲線図を図4に示す.この結 果により,一軸引張だけでなく多軸引張状態における両モ デルの成形可能なひずみ領域を視覚的に捉えることができ る.モデル の成形可能なひずみ領域はモデル のそれよ り大きくなっており,モデル の成形性能がモデル より 大幅に優れていることが確認できる.

また,内部のひずみ状態を観察するため、図5に一軸引



図-4 成形限界曲線図



図-5 成形限界時の相当塑性ひずみ分布(一軸引張状態)

張状態での両モデルの成形限界時における微視的な相当塑 性ひずみ分布を示す.非連結型であるモデル は,変形に よって生じるひずみのほとんどをフェライト相でうけもっ ているのに対し,マルテンサイト連結型のモデル では同 じようにフェライト相で大きなひずみが生じているが,マ ルテンサイト相でも比較的大きなひずみが生じているのが わかる.これが,両モデルの弾塑性挙動の違いに大きな影 響を与えているといえる.

4. おわりに

本研究では,マルチスケール解析により微視的構造が DP 鋼の巨視的な成形限界特性に与える影響を,マルテン サイト相の体積率と分布形状の視点から評価した.微視的 構造においてマルテンサイト相の体積率が大きく連結度が 高い程,DP 鋼の巨視的な材料特性は硬く脆くなるという 性質があることが確認できた.

参考文献

- (1) 友田陽,田村今男:延性二相高強度鋼板の強度・延性と組織: 鉄と鋼,vol.9,pp.1147-1158
- Terada, K., Saiki, I., Matsui, K. and Yamakawa, Y.: Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Vol.192, pp.3531– 3563, 2003.

表-1 フェライト・マルテンサイト材料データ