

# 複雑変形挙動を記述可能にする 高精度弾塑性メゾ・マクロ材料モデルの構築

近畿大学 機械工学科

講師 上森 武

(平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008019)

キーワード 複雑変形挙動, 材料モデル

## 1. 研究の目的と背景

近年,自動車業界を中心とした板材のプレス成型の分野において,生産コストの低減・開発期間の短縮などの要求に応える一つの取り組みとして,CAE(Computer Aided Engineering)システムの開発・導入の検討および評価が行われている。これにより,プレス成形時に発生する成形不良の予測に関しては従来に比べ信頼たるものとなってきている。この発展に特に大きな役割を果たしているのが,有限要素法(FEM)に組み込まれている数値モデルの高精度化である。例えば,多軸応力状態における異方性を表記する降伏関数は, Hill<sup>1),2)</sup>や Barlat<sup>3),4)</sup>などによってさまざまな提案がされており,応力-ひずみ関係に代表される加工硬化を表記する硬化則は本研究室が提案した Yoshida-Uemori モデル<sup>5)</sup>が精度の面で評価され FEM に導入され始めている。しかし,それらの材料モデルには次のような問題点がある。①高精度な異方性降伏関数と硬化則は組合わされておらず(組合せの選択肢が少なく),どちらか一方の精度が不十分な場合がある。②過去に行われてきた計算精度の検証試験は,負荷経路が一方向で比例的な変形でしか行われていない。この二つの問題点のため,多軸応力状態で応力経路が連続的に変化するような複雑な変形(非比例変形)では,材料の持つ異方硬化挙動を再現する保証はないのが現状である。実際にプレス加工において,複雑な目的形状にするために多段プレス工程が用いられるが,その際板材は応力経路が変化するような非比例変形を受けると考えられる。プレス用鋼板において,より複雑な成形形状を実現するための高度な成形性が求められる。これら要求を満足できる IF 鋼(極低炭素鋼)はハイテン化が進む現在でも自動車車体において未だ多くの使用比率を占めている。IF 鋼は高延性・高深絞り性で成形性に優れる反面,交差効果という特殊な現象を持つ材料として過去に多くの研究がなされてきた。交差効果とは予変形後の再負荷において流動応力の異方性が生じる現象であるが,この交差効果は実際の多段プレス成形において起こり得る現象であるため,交差効果挙動を実験的に把握することは学術的にも工業的にも重要かつ有益である。したがって,FEMによる成形シミュレーションの精度の精度向

上には,バウシinger効果や初期面内異方性に加え交差効果を考慮した材料モデルを用いることは必須である。

そこで本研究では,IF 鋼に加え交差効果が確認されている純銅板や純アルミニウム板において応力経路をさまざまに変化させた非比例負荷試験を行い交差効果挙動を観察し,得られた応力-ひずみ関係から非比例変形時の降伏曲面の拡大・移動を推論することで,応力経路変化を考慮した新たな硬化則を提案した。さらに,高次異方性降伏関数との組合せた弾塑性構成式を作成し,汎用 FEM コードに導入した。最終的に,応力経路が変化するような簡易成形試験結果と FEM シミュレーション結果を比較することで,本モデルの有用性を示した。

## 2. 弾塑性構成モデル

弾塑性変形挙動を再現するために重要なことは,予ひずみ負荷試験後に行う面内応力反転試験でのバウシinger効果や繰返し加工硬化などの応力状態を精度良く表現できることである。しかし従来のモデルでは,等方硬化則や線形移動硬化則によるデフォルト設定が行われておりバウシinger効果を精度よく表現出来ていなかった。そこで,本研究では応力反転後に起こるバウシinger効果を高

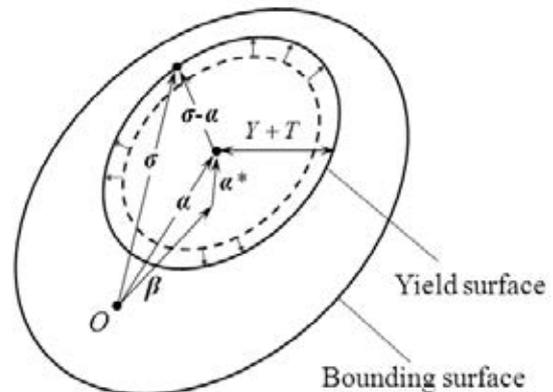


図1 今回提案した改良 Yoshida-Uemori モデルの概念図

精度に再現できる Yoshida-Uemori モデルを基部とした、弾塑性構成式を開発することにより非比例負荷時の応力-ひずみ応答の解析を行った。図 1 に Yoshida-Uemori モデル<sup>5),6)</sup>の概念図とそのモデルについての理論を述べる。

$$f = \phi(\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}) - (Y + T) = 0 \quad (1)$$

$$F = \phi(\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\beta}) - (B + R) = 0 \quad (2)$$

$$d\varepsilon^p = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} d\lambda \quad (3)$$

ここで、 $\phi$  は降伏関数で算出される相当応力、 $Y$  は初期降伏応力である。また、 $\boldsymbol{\alpha}$  および  $\boldsymbol{\beta}$  はそれぞれの降伏曲面および限界曲面の中心、 $B$  および  $R$  は限界曲面の初期半径とその等方硬化応力収束値を表している。

また、限界曲面の中心  $\boldsymbol{\beta}$  に対する降伏曲面の中心  $\boldsymbol{\alpha}$  の相対的移動を表す背応力  $\boldsymbol{\alpha}^*$  は

$$\boldsymbol{\alpha}^* = \boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{\beta} \quad (4)$$

と表され、 $\boldsymbol{\alpha}^*$  および  $\boldsymbol{\beta}$  の発展式は

$$d\boldsymbol{\alpha}^* = C \left[ \left( \frac{\alpha}{Y} \right) (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}) - \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha^*}} \boldsymbol{\alpha}^* \right] d\varepsilon^p \quad (5)$$

$$d\boldsymbol{\beta} = m \left[ \left( \frac{b}{Y} \right) (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}) - \boldsymbol{\beta} \right] d\varepsilon^p \quad (6)$$

$$\alpha = B + R - Y = \alpha_0 + R \quad (7)$$

となる。 $b$ 、 $C$ 、および  $m$  は降伏曲面ならびに曲面限界の移動硬化量を決定する材料定数である。また、交差効果による流動応力の再現には降伏曲面の等方硬化を考慮したものが必要であり、それは式(1)の  $T$  であり、その発展式は以下となる。

$$dT = \left[ C_{Th} \left( 1 - \left| \frac{(\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}) : \boldsymbol{\alpha}}{|\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}| |\boldsymbol{\alpha}|} \right| \right) \alpha - C_{Ts} T \right] d\varepsilon^p \quad (8)$$

この発展式は、増加項と減少項から成っており、増加項は降伏後の一時的な流動応力の上昇幅を支配する物性値  $C_{Th}$ 、降伏曲面に対する応力点の相対ベクトル  $\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}$  と降伏曲面の背応力  $\boldsymbol{\alpha}^*$  内積を含む応力経路係数  $\lambda(\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\alpha})$ 、降伏曲面の半径と限界曲面の半径の差  $\alpha (= \alpha_0 + R)$  の積である。応力経路が変化した直後、 $\boldsymbol{\alpha}$  ベクトルの方向はほぼ不変であるのに対し、 $\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}$  ベクトルの方向は敏感に変化する。これにより二つのベクトルは非共軸となり  $T$  は急激に増加する。 $C_{Ts}$  は降伏曲面縮小速度を規定する材料物性値であり、 $R_{sat}$  は限界曲面の等方硬化の収束値である。また、非等方硬化領域の取り扱いについて以下のような展開式を用いた。

$$g_{\boldsymbol{\sigma}} = 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{\partial g_{\boldsymbol{\alpha}}}{\partial \boldsymbol{\beta}} : d\boldsymbol{\beta} > 0 \quad \text{のとき} \quad (9)$$

$$dR = m(R_{sat} - R) d\varepsilon^p$$

$$\text{それ以外では} \quad dR = m(R_{sat} - R) \left( 1 - \left| \frac{\boldsymbol{\beta} : d\boldsymbol{\beta}}{|\boldsymbol{\beta}| |d\boldsymbol{\beta}|} \right| \right) d\varepsilon^p \quad (10)$$

降伏前後での加工硬化係数の急激な変化を再現するため、降伏曲面の移動速度  $C$  を以下のような変数とする。

$$C = C_0 + C_c \left( 1 - \left| \frac{\boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\beta}}{|\boldsymbol{\sigma}| |\boldsymbol{\beta}|} \right| \right) \quad (11)$$

$C_0$  降伏曲面の初期移動速度であり、 $C_c$  移動速度である。移動速度の増加量は材料パラメータ  $C_c$  と応力経路係数  $\lambda(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\beta})$  によって支配される。応力経路係数の導入することで応力経路変化後移動速度は上昇し、そのまま変形が進展すると元の速度  $C_0$  に戻るという定式化を行っている。これについても後に実験結果の表現性を検証する際にこの定式化の有用性を示す。

また、Yoshida-Uemori モデルでは弾塑性判定パラメータが 7 個であるのに対し、本構成式では Yoshida-Uemori モデルの 7 個に加え降伏曲面の等方硬化量  $T$  を加えた合計 10 個となる。

### 3. 実験方法

#### 3.1 供試材

本研究で使用した供試材は、270MPa 級 IF 鋼板 (板厚 1.4mm) である。

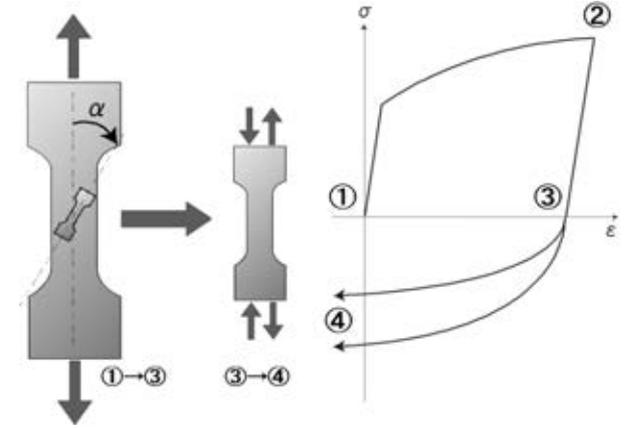


図 2 非比例変形概念図 (最初に大きな試験片にて予変形を付与 (①~③) 後、大きな試験片から任意の角度に試験片を切り出した後、圧縮変形を加える (③~④))

#### 3.2 予ひずみ負荷試験

予ひずみを与えるために(株)島津製作所製アムスラー型万能試験機 UMH-100 を用いて予ひずみ負荷試験を行った。制御方法は荷重制御により行った。ひずみは 2 つの平行部のうち片方の中央に添付した単軸塑性域ゲージ YEFLA-2 より計測した。試験は、図 2 より IF 鋼の真ひずみが  $\varepsilon=5\%$  に到達する所まで単軸引張試験①~②を行い除荷(②~③)し

た.

### 3・3 非比例圧縮試験

予ひずみ付加後の圧縮での交差効果挙動を観察するために非比例圧縮試験を行った. 5%予ひずみを付加した後,  $\alpha$  方向( $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ )に試験片を切り出し, その後各方向で圧縮試験(③~④)を行った.

### 4. 実験結果・解析結果

Yoshida-Uemori モデル材料パラメータ(7個)を表1に, 今回提案した構成式の材料パラメータ(3個)を表2に示す. さらに, 予ひずみ付与後の変形挙動を検討するために, 予ひずみ  $\epsilon=5\%$ ならびに  $\epsilon=10\%$ 付与・除荷, その後圧延方向に対して TD ( $90^\circ$  方向)と  $45^\circ$  方向の単軸引張試験実験結果とその変形挙動を本構成式によって計算し, その結果を比較した図を図3に示す.

表1 Yoshida-Uemori モデルの材料パラメータ

Material	Y /MPa	$a_0$ /MPa	C	b /MPa	m	$R_{sat}$ /MPa	h
IF	135	44	500	10	9	210	0.7

表2 改良 Yoshida-Uemori モデルの材料パラメータ

CTh	CTs	Cc
250	35	1000

材料パラメータであるが, これは, TD に予ひずみ 10%付与後の材料試験結果をもとに上述の 10 個を決定しており, その他の曲線については材料パラメータ同定には使用していない(実際の Yoshida-Uemori モデルの材料パラメータ

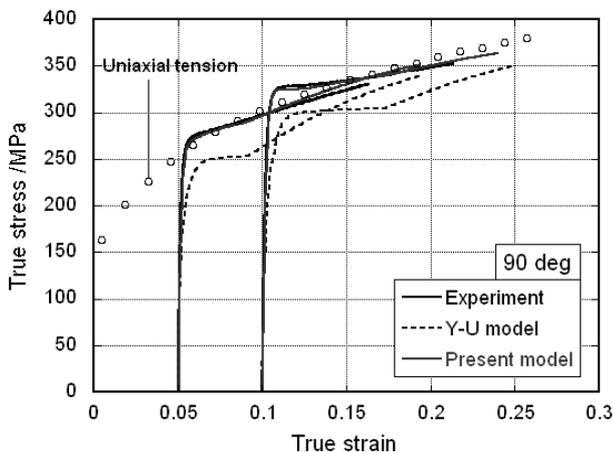


図3 圧延方向に予ひずみ5%ならびに10%付与した試験片の圧延方向に対して  $90^\circ$  に引張変形した際の鋼板の応力-ひずみ挙動実験結果

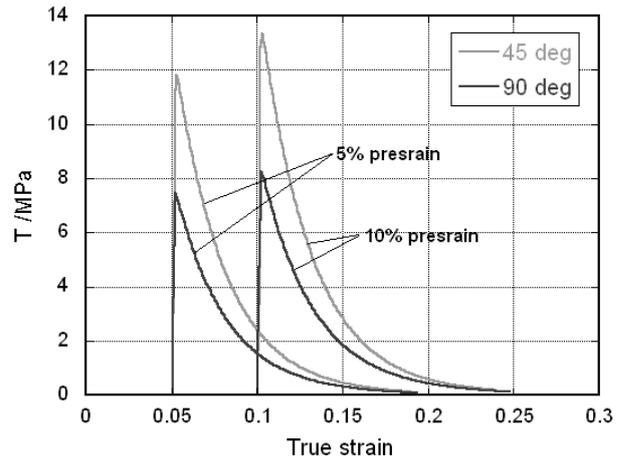


図4 圧延方向に予ひずみ5%ならびに10%付与した試験片の圧延方向に対して  $45^\circ$  に引張変形した際の鋼板の応力-ひずみ挙動実験結果

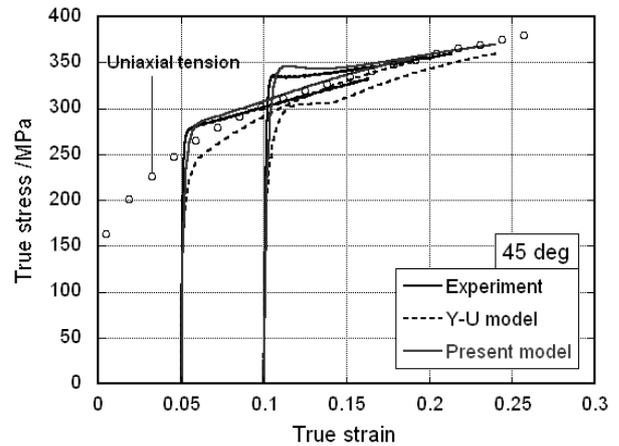


図5 予ひずみ5%ならびに10%付与した試験片の圧延方向に対して  $45^\circ$  に引張変形した際の  $T$  値(式(8)の発展式)の変化

タは, 単軸引張試験結果ならびに面内反転試験結果より決定されているので式(11)中の硬化係数3個の決定が主である). 図3ならびに図4に示す解析結果には, 各予ひずみを加えた後の応力-ひずみ関係実験結果と提案した改良 Yoshida-Uemori モデルと従来の Yoshida-Uemori モデルの計算結果をあわせて示す. 本結果より,  $45^\circ$  ならびに  $90^\circ$  方向への再引張結果の Yoshida-Uemori モデルの計算結果は, 早期降伏および非等方硬化領域の影響で実験結果を表現できていない. 一方, 本モデルの計算結果は上記の現象を再現し実験結果と良い一致を示していることがわかる.

この結果について降伏曲面の等方硬化量  $T$  に着目しながら考察する. 図5を見ると,  $T$  は変形が開始すると急激に増加し, ピークを迎えた後緩やかに減少し, やがて0に戻っている. この  $T$  の変化により, 一時的に流動応力を上昇させ, 変形が進むと元の基準曲線の加工硬化挙動に戻る現象を再現する. また図5において,  $45^\circ$  方向引張

りと90°方向引張りでの $T$ の値を比べると、45°方向引張りの方が大きな値になっている。これは式(6-5)より、45°方向引張りの方が $\sigma-\alpha$ と $\alpha$ が共軸になりにくいことに起因しており、このため $T$ は大きく発展しiiの傾向を再現したと考えられる。さらに、5%予ひずみ材に比べ10%予ひずみ材の方が $T$ は大きく発展している。これは式(6-5)中の $a$ が影響しており、 $T$ の増加に限界曲面等硬化量を入れることで、予ひずみの増加に伴い応力の上昇幅が大きくなる傾向を再現した。また、10%予ひずみ材において降伏後の硬化休止現象とその後の逆反りの挙動も再現できている。これは、非等方硬化領域と降伏曲面の縮小が重畳した結果である。

さらに複雑変形を考慮するために、予ひずみ付加後の圧縮での交差効果挙動を観察するために非比例圧縮試験を行った結果を図6に示す。今回はIF鋼の真ひずみが $\varepsilon=5\%$ に到達する所まで予ひずみ負荷試験後に各方向に圧縮試

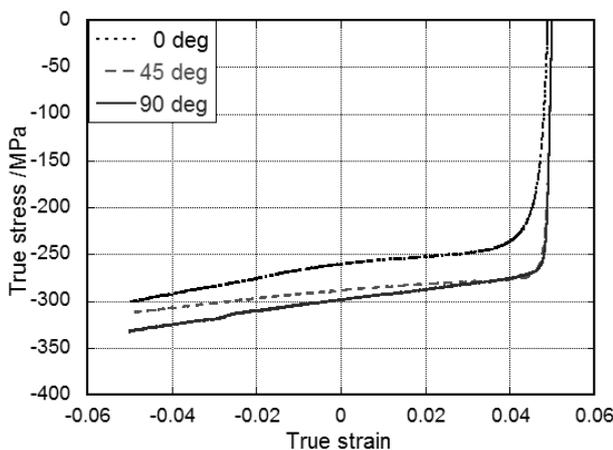


図6 圧延方向に予ひずみ5%付与した試験片の圧延方向に対して0°、45°そして90°に圧縮変形した際の鋼板の応力-ひずみ挙動実験結果

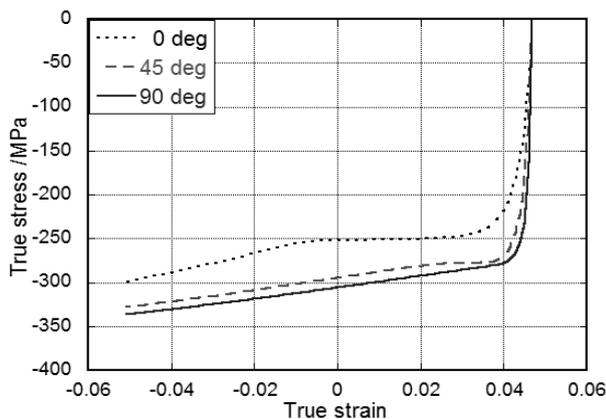


図7 圧延方向に予ひずみ5%付与した試験片の圧延方向に対して0°、45°そして90°に圧縮変形した際の鋼板

の応力-ひずみ挙動解析結果

験を行った。なお、今回は0°、45°、90°の3方向を示している。0°では、他の2方向に比べて早期に降伏しており降伏後は緩やかな硬化の後、顕著な硬化量の増加がみられた。45°、90°では、ほぼ同じ所で降伏しており、0°と比べると降伏応力の増加みられた。降伏応力の増加量は、角度の増加に従い増えるが一定の降伏応力で収束している。降伏後の45°、90°の流動応力はどちらも直線的ではあるが硬化量は90°の方がより高い値であり、角度の変化と応力挙動の関係がわかった。圧縮後の再降伏の曲率は角度が増すにつれ小さくなっている。

また、各方向のバウシinger効果の程度は、0°のバウシinger効果が大きく45°、90°はほぼ同じであり、角度が増すごとにバウシinger効果の程度は小さくなっている。非比例負荷の解析結果を図7に示す。0°、45°、90°とも降伏応力の精度は良く実験結果と同じ傾向を示した。流動応力は解析結果では、0°方向に非等方硬化領域が顕著に再現されており、実験結果と異なったがその後の流動応力は一致した。その他の45°、90°の解析結果は、どちらも流動応力は精度良く再現できることがわかった。

#### まとめ

- (1) 圧縮での交差効果挙動は、角度の増加とともに降伏応力は増加し、バウシinger効果の程度は小さくなる。
- (2) 圧縮後の再降伏の曲率は角度が増すにつれ小さくなっている。
- (3) Yoshida-Uemori modelに等方硬化量を考慮することにより、公差効果挙動を高精度に再現できた。

#### 謝辞

本研究の一部は、(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究助成により行われたことを付記し、財団関係者ならびに関係各位、そして本研究遂行にご助力頂きました広島大学大学院工学研究科、吉田総仁教授に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) R. Hill, Proc. R. Soc. Lond. Ser. A 193 (1948) 281-297.
- 2) R. Hill.: J. Mech. Phys. Solids, **38** (1990), 405-417.
- 3) F. Barlat, J. Lian: Int. J. Plasticity, **5** (1989), 51-66.
- 4) F. Barlat, J. C. Brem, J. W. Yoon, K. Chung, R. E. Dick, D. J. Lege, F. Pourboghraat, S.-H. Choi, E. Chu: Int. J. Plasticity, **19** (2003), 1237-1319.
- 5) Yoshida, F.: Int. J. Plasticity, **16**, (2000), 359-380.
- 6) Yoshida, F., Uemori, T, Fujiwara, K.: Int. J. Plasticity, **18**, (2002), 633-659.