

高張力鋼板の非比例変形解析

Numerical Simulation for Non-Proportional Deformation Behaviors of High Tensile Strength Steel Sheet

研究代表者 工学部機械工学科 講師 上森 武
Takeshi Uemori

共同研究者 大学院システム設計工学専攻 学生 赤木 宏行
Hiroyuki Akagi

In this paper, stress strain deformation behaviors of 780 MPa grade high tensile strength steel sheet (HTSS) after biaxial tension tests were investigated. To evaluate the accuracy of our constitutive model which can describe cyclic deformation behaviors of HTSS, several experimental results with stress path change were compared with the corresponding calculated results by using both an isotropic hardening model (IH model) and our kinematic hardening model (Yoshida-Uemori model). It is found that experimental stress strain curve after biaxial deformation show the lower flow stress than uniaxial tension flow stress. Our Yoshida-Uemori model can describe the above mentioned stress strain behavior however the IH model can not represent with accuracy. Yoshida-Uemori model provides a very good description of the stress strain behaviors after pre biaxial deformation histories.

1. はじめに

近年、自動車車体重量を極力低減しつつ、衝突安全性を満足する高張力鋼板の自動車部品への適用（ハイテン化）が加速的に進んでおり、高張力鋼板の加工技術に関する研究が各自動車会社を中心に精力的に行われている。これを実現可能にした背景としては、コンピュータ演算能力の大幅な向上、コンピュータの低価格化、そして多種多様な解析ツールの登場など数多く考えられるが、その中でも、従来その計算精度に問題の在った汎用 FEM の高精度化、特に材料構成式（材料モデル）の高精度化が与えた影響は非常に大きい。特に、私が提案した金属材料の塑性異方性、加工硬化特性そして応力反転時におけるバウシinger効果を高精度に再現可能な材料モデル（Yoshida-Uemori モデル）は、従来の材料モデルでは満足な精度で計算することが出来なかった諸問題である「しわ、割れそしてスプリングバック」を解決したと言え、FEM の高精度化を実現する為の因子としての材料構成式高精度化が持つ意味を明らかにした。そのような背景から、現在、数多くの研究者が高精度材料モデルに関する様々な研究を行っているものの、材料パラメータ数が多く、その決定方法や汎用性に欠けると言った問題点が存在する場合が多い。

上記材料モデルの高精度化に関する研究については、我々の研究グループの報告も含め、その精度を確認している解析結果の多くは非常に単純な変形経路（単一プレス工程）を金属材料に加えたものが多く、自動車プレス成形品によく見られる起伏に富んだ形状や多段プレスのような非常に複雑な変形履歴がプレス用鋼板に加わる場合についての検証は特になされていない。従来の研究では、単軸引張変形で見られるような応力負荷経路を単軸で変化させて生じた交差効果などについての検証はあるものの、プレス成形中に金属材料が受ける二軸応力状態や平面ひずみ変形を受けた後における再負荷弾塑性変形挙動について検討をした例は全く無い。通常のプレス加工工程において問題となる複雑な多軸変形履歴を受けた後の金属材料弾塑性変形挙動について検討することは、多段プレス成形後のスプリングバック変形量予測の高精度化を図る上、また、高張力鋼板の自動車車体適用を更に拡大する為には必要不可欠である。

そこで、本研究では二軸変形を受けた高張力鋼板の弾塑性変形挙動の解明やそのモデル化を行う為、今後自動車用車体にその適用が期待されている780MPa 級高張力鋼板の応力経路が変化する場合の弾塑性変形挙動について実験並びとそのモデル化について検証した。

2. 供試材並びに実験方法

2.1 供試材

本研究では供試材として、JFE スチール（株）提供の 780MPa 級デュアルフェイズ鋼を使用した。表 1 に本鋼板の機械的性質である 0.2%耐力ならびに Lankford 値（以下、 r 値）を示す。本値は、上記供試材を JIS13 号 A 試験片に機械加工した後、島津製作所製オートグラフ（型番 AG-X：定格荷重 50kN）を用い、準静的引張速度 1.0mm/min にて変形を付与した際に得られたものである。

表 1. 780MPa 級高張力鋼板の機械的的特性値 (0.2%耐力ならびに Lankford 値)

	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	r value
780MPa - 0 deg	475	0.71
- 45 deg	474	1.13
- 90 deg	486	1.04
- b	469	—

2.2 面内反転試験

大ひずみ域における金属薄板の Bauschinger 効果を実験的に計測した（試験片形状ならびに試験装置は特許申請の都合上紙面掲載を割愛します）。本研究で使用する供試材をワイヤーカット放電加工にて特殊試験片形状に機械加工し、金属薄板材料を座屈変形させることなく繰返し面内反転変形を付与することを可能としている。実験時に得られる荷重はオートグラフ備え付けのロードセルによって、また、試験片平行部に加わるひずみは東京測器研究所製塑性ひずみゲージ (YFLA-2) により計測し、それぞれのデータを真応力並びに真ひずみに換算している。

2.3 二軸引張試験

多軸応力状態における金属薄板の弾塑性変形を実験的に明らかにする為、本研究グループが開発した二軸引張試験装置を図 1 に示す。本試験装置は、図 2 に示す特殊形状十字型二軸引張試験片中央部（応力測定部）に応力比の異なる応力場を与える事が可能である。なお二軸引張試験片形状であるが、汎用有限要素法ソフト Marc により、多軸変形を本試験片に付与した際、応力測定中央部（50mm×50mm の領域）に均一な応力場が加わることを計算上確認している。図 1 に示すように本装置の特徴は、試験

装置中央に配置された二軸試験片の変形を調整するパンタグラフであり、これにより供試材に安定した二軸変形を付与することを可能にしている。荷重は対角対に配置した東京測器株式会社製の容量 200kN ロードセルにより、変位は試験片表面に貼り付けた東京測器株式会社製二軸塑性ゲージ（型番 YEFCA-2）により計測した後、応力並びにひずみに換算している。本研究では、試験片圧延方向 (R.D.) を x 方向、圧延直向方向 (T.D.) を y 方向、板厚方向を z 方向として定義している。



図 1. 二軸引張試験装置

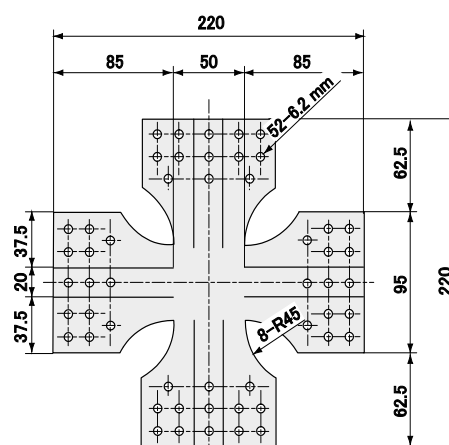


図 2. 二軸引張試験片（単位 mm）

2.4 非比例負荷試験

従来の多段プレスや複雑形状を有する高張力鋼板プレス成形品に加わる複雑な変形履歴弾塑性変形挙動を高張力鋼板に加える為、処女材の高張力鋼板を任意の応力比で引張変形を加えた後、再度別方向に引張変形を付与し、検討を行った。本研究では、プレス成形過程で頻繁に起こりうる塑性変形挙動として、二軸引張変形 $(\sigma_x, \sigma_y) = (1:1)$ 後に単軸引張

変形 $(\sigma_x, \sigma_y)=(1:0)$ を付与するケースと二軸引張変形 $(\sigma_x, \sigma_y)=(1:1)$ 後に平面ひずみ引張変形 $(\sigma_x, \sigma_y)=(2:1)$ が付与されるケースの二条件について検討を行っている。また、図3にて本研究で提示している応力付与履歴（非比例実験における応力付与履歴モード図）が成形限界線図（FLD）においてどのような変形に対応するかを示す。本研究で二軸試験片に加えている変形履歴は実プレス加工では頻繁に起こりえる変形履歴であり、このような履歴を有する金属材料の塑性変形挙動解明は非常に重要であることがこの図より確認できる。

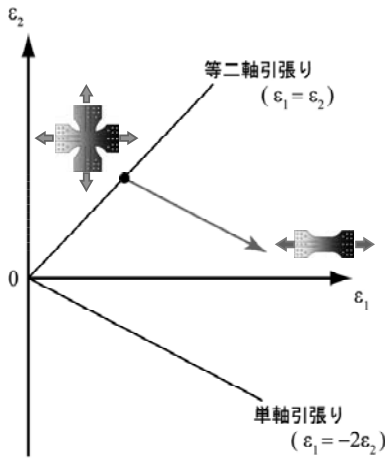


図3. 応力付与履歴（FLD との関係）

3. 解析モデル

本研究では、解析に使用する材料モデルとして、Yoshida-Uemori モデル並びに従来の汎用 FEM にて使用されてきた等方硬化（Ludwik 則）を使用した。Yoshida-Uemori モデルについての説明を以下に示す。

3.1 Yoshida-Uemori モデル

本モデルは、降伏曲面が限界曲面中を移動することで金属材料の加工硬化挙動を表現する二曲面モデルである。降伏曲面は限界曲面中を移動硬化し等方的な硬化は行わないが、限界曲面は移動硬化と等方硬化を行う。各加工硬化則は以下の式にて表される。

- ・降伏曲面の移動硬化則

$$\dot{\alpha}_* = \dot{\alpha} - \dot{\beta} = C \left[\left(\frac{a}{Y} \right) (\sigma - \alpha) - \sqrt{\frac{a}{\alpha_*}} \alpha_* \right] \dot{p} \quad (1)$$

$$\bar{\alpha}_* = \varphi(\alpha_*) \quad (\varphi \text{ は後述の降伏関数}) \quad (2)$$

$$a = B + R - Y \quad (3)$$

- ・限界曲面の移動硬化モデル

$$\dot{\beta} = \left[m \left(\frac{b}{Y} \right) (\sigma - \alpha) - \beta \right] \dot{p} \quad (4)$$

- ・限界曲面の等方硬化モデル

$$\dot{R} = m(R_{sat} - R) \dot{p} \quad (5)$$

上式で表される加工硬化則中で使用されている変数は以下で表される。

$$\dot{p} = \sqrt{\left(\frac{2}{3} \right) \mathbf{D}^p : \mathbf{D}^p} \quad (6)$$

なお、Yoshida-Uemori モデルの材料パラメータは、初期降伏応力 Y 、限界曲面の初期大きさ B 、降伏曲面の移動速度を定義する C 、限界曲面の移動並びに限界曲面の拡大速度を定義する m 、限界曲面の拡大量 R_{sat} 、限界曲面の移動量 b 、そして非等方硬化領域を定義するパラメータ h の7個となっており、これらの値は、前述した面内繰返し反転試験結果から同定される。

3.2 降伏条件式

本モデルで使用する二曲面の形状はともに同形であり、その形は従来の研究にて提案されてきた降伏関数であればどれでも構わない。本研究では以下に示すGotohが提案した4次降伏関数に背応力項 α を考慮した降伏条件式を使用した。

なお、 $A_1 \sim A_9$ までは塑性異方性を表す材料定数であり、本研究では比例負荷実験から求められる。

$$\begin{aligned} \varphi(\sigma - \alpha) = & A_1 (\sigma_{xx} - \alpha_{xx})^4 + A_2 (\sigma_{xx} - \alpha_{xx})^3 (\sigma_{yy} - \alpha_{yy}) \\ & + A_3 (\sigma_{xx} - \alpha_{xx})^2 (\sigma_{yy} - \alpha_{yy})^2 + A_4 (\sigma_{xx} - \alpha_{xx}) (\sigma_{yy} - \alpha_{yy})^3 + A_5 (\sigma_{yy} - \alpha_{yy})^4 \\ & + \left(A_6 (\sigma_{xx} - \alpha_{xx})^2 + A_7 (\sigma_{xx} - \alpha_{xx}) (\sigma_{yy} - \alpha_{yy}) + A_8 (\sigma_{yy} - \alpha_{yy})^2 \right) (\tau_{xy} - \alpha_{xy})^2 \\ & + A_9 (\tau_{xy} - \alpha_{xy})^4 - A_1 \bar{\sigma}^4 = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

3.3 塑性ひずみ増分ベクトル

塑性ひずみ増分ベクトル $d\boldsymbol{\varepsilon}^p$ は、巨視的塑性理論で使われる関連流動則から算出する。

4. 考察

4.1 繰返し面内反転試験

図4に本研究で使用した780MPa級ハイテン板の面内繰返し反転試験結果を示す。

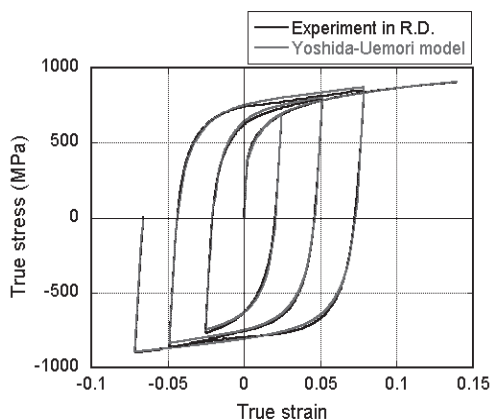


図4. 繰返し面内反転試験結果ならびに Yoshida-Uemori モデル計算結果との比較

本結果は、単軸引張試験結果と繰返しひずみ振幅を2.5%増加させながら、最大±7.5%ひずみまでの面内反転試験を行った結果と実験結果を Yoshida-Uemori モデルによって計算した結果である。本結果より、本ハイテン板は、初期降伏が非常になだらかに起こっており明確な初期降伏点を確認出来ないこと、応力反転時に明確なバウシinger効果を示していること（応力反転後の弾性回復が直線的な応答ではなく、応力反転直後から曲線的な応答を示している）、繰返し応力反転変形を付与した際に加工硬化が休止する（加工硬化率が低下する）非等方硬化領域が確認できる。

4.2 非比例負荷変形

図5に非比例負荷変形を付与した後における応力-ひずみ関係を示す。図5(a)は二軸引張変形 $(\sigma_x, \sigma_y) = (1:1)$ 後に単軸引張変形 $(\sigma_x, \sigma_y) = (1:0)$ を付与した場合の実験結果並びに解析結果、図5(b)

は二軸引張変形 $(\sigma_x, \sigma_y) = (1:1)$ 後に平面ひずみ引張変形 $(\sigma_x, \sigma_y) = (2:1)$ を付与した場合の実験結果並びに解析結果を示す。両結果において、解析には等方硬化則と Yoshida-Uemori モデルをそれぞれ示している。先ず図5(a)の結果、「等二軸引張変形を付与した後の単軸引張試験結果」をみると、二軸弾塑性変形を受けたハイテン材の単軸引張挙動は、非常になだらかな再降伏挙動を示して後、若干その後の弾塑性変形挙動が軟化していることが分かる。この現象を、従来の汎用 FEM で主に使用されてきた等方硬化モデルで計算すると、応力再負荷後のなだらかな初期降伏並びにその後の加工硬化を再現できていない。しかしながら、Yoshida-Uemori モデルで計算すると、初期降伏時において若干降伏応力値を低く見積もっているが、その後の塑性変形挙動を概ねよく再現していることが分かる。Yoshida-Uemori モデルによると、等二軸予変形の付与時における“降伏曲面の移動と限界曲面の移動・拡大”を考慮している為、予変形後の再負荷挙動を精度良く再現できているものと考えられる。

また、図5(b)に示した「等二軸引張変形を付与した後の平面ひずみ引張試験結果」をみると、上述した実験結果同様、再負荷時における各方向の応力-ひずみ関係が若干軟化していることが分かる。この軟化は、 x 軸方向 (R.D.) ならびに y 軸方向 (T.D.) ともに確認されており、多軸引張りから再多軸引張変形が付与された場合、等方硬化モデルでの計算結果は実験結果を大きく違えることになる可能性があることが分かった。等方硬化モデルとは異なり、Yoshida-Uemori モデルが概ね一致していることが分かる。本モデルは再平面引張変形時においても実験結果が示している軟化を精度良く再現可能であること示している。この原因も Yoshida-Uemori モデル中で考慮されている“降伏曲面の移動と限界曲面の移動・拡大”によって生じると考えられる。この限界曲面の移動ならびに拡大は差ほど大きなものではないが本問題のような複雑な変形履歴を解析する上で非常に重要である。しかしながら、Yoshida-Uemori モデルであっても初期降伏時において実験結果との間に若干のずれを生じており、これを再現する為には、塑性変形進展に伴う降伏曲面の形状変化などや材料学的な検討が必要であると思われる。本研究と

同様なアプローチとして 590MPa 級ハイテン板に複合変形経路を加えた際に加工硬化や交差効果が出現せず、再降伏時において流動応力が減少している現象が他の研究者らの研究にても提示されている。

本研究において使用したデュアルフェイズ系ハイテン板においても、予変形によって材料（結晶粒）内部に生じた転位セルや転位下部組織の微視的構造の変化の違いがその後の加工硬化（軟化）に大きな影響を与えると考えられる。変形経路が急変する場合の金属結晶粒内部においては、予変形時に活動していたすべり系とは異なるすべり系の選択が行われ、二軸応力状態で生成された転位下部組織は、再負荷後においては障害として作用していないことが推測される。このような推測の正否は、メゾミクロ領域における詳細な実験観察を行うことで明らかになることであるが、特にそのような考察を現時点で考慮していない Yoshida-Uemori モデルが応力経路の急変するような複雑な塑性変形挙動を再現できるモデルであることを証明しており、上記モデルの中にメゾミクロ領域の情報を組み込むことでより原理的に詳細な解析も実現可能であると考えられる。上記結果より、面内繰返し反転試験結果並びに比例負荷二軸引張試験両実験結果から算出した材料パラメータを用いて応力経路が変化する場合のハイテン材の塑性変形挙動検証を行うことで、ハイテン板の非比例変形挙動を予測可能であると思われる。また、材料モデルとしては従来のパウシンガー効果を高精度に再現可能な移動硬化モデルに加え限界曲面の考慮が必要であることが確認できた。

5. まとめ

780MPa 級高張力鋼板（デュアルフェイズ）に二軸応力が作用する場合、とりわけ応力経路が変化する場合について、そのときの弾塑性変形挙動を実験的に調べた。また、そのときの応力-ひずみ応答の計算精度に関し、古典的等方硬化モデル（IH モデル）と著者らの提案している移動硬化モデル（Yoshida-Uemori モデル）について計算結果と実験結果を比較しながら検討した。得られた主な結果は以下の通りである。

1. 等二軸引張予負荷・完全徐荷後の放射状応力経路に沿う再負荷（プレス成形で特に問題になる「二軸引張変形後の単軸引張変形挙動」ならびに「二軸

引張変形後の応力比(2:1)方向への平面ひずみ引張変形挙動)では、流動応力が大きく低下する。等方硬化モデルではこのことが全く予測できない。

2. Yoshida-Uemori モデルでは上記の挙動も含め、本研究で採用した全ての二軸応力経路ならびにその後の応力-ひずみ応答を精度良く再現できている。本モデルのような精度良い移動硬化モデルは単なる応力反転だけではなく、応力経路が種々の方向に変化する場合の応力-ひずみ解析には不可欠であると考えられる。

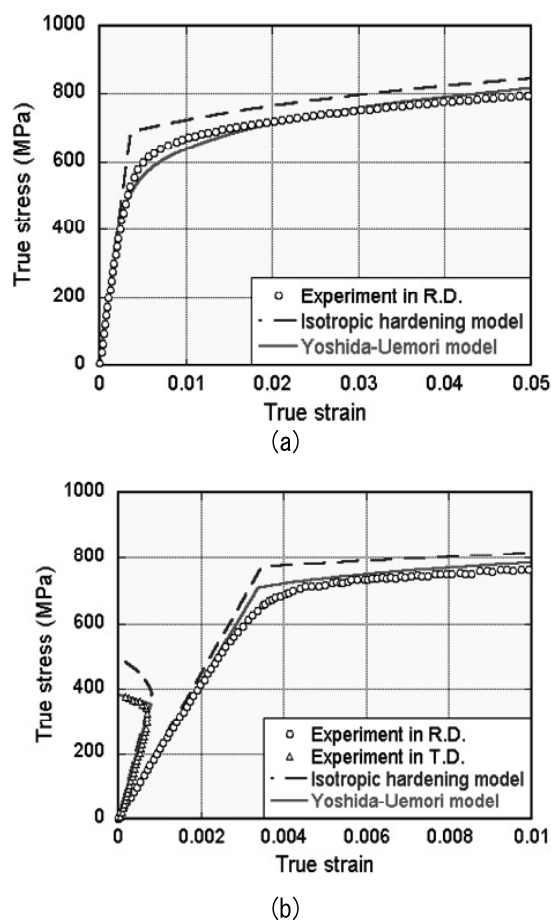


図5. 二軸引張試験片（単位 mm）；(a)二軸引張変形後に単軸引張変形を付与した場合、(b)二軸引張変形後に平面ひずみ引張変形を付与した場合

参考文献

- (1) Takeshi Uemori et al. “Plastic deformation behavior of high strength steel sheet under non-proportional loading and its modeling”,

Key Engineering Materials Vols.
340-341(2007), pp. 895-900..