

# 高張力鋼板の非比例負荷二軸塑性変形挙動実験観察とそのモデル化

広島大学大学院工学研究科 機械システム工学専攻

助教 上森 武

(平成 17 年度研究開発助成 A F - 2005029)

キーワード：高張力鋼板，非比例変形，二軸塑性変形，材料モデル

## 1. 緒言

衝突安全性と軽量化の両特性を有する車体を実現可能な高張力鋼板は自動車車体中の適用箇所が急激に拡大している。この理由の一つとして、高張力鋼板のプレス成形後の形状を正確に予測できるコンピュータシミュレーション技術の発展が挙げられる。特に商用 FEM を代表とする数値シミュレータの発展は著しく、高精度要素の開発や新しい工具接触アルゴリズムの開発に加え、近年、高精度材料モデル（材料構成式）の導入を精力的に行っており、汎用シミュレータは非常にパワフルな塑性加工支援ツールとしてその地位を確立しつつある。しかしながら、上記商用数値シミュレータの高精度化の検証は、ハット曲げのような単純な応力負荷経路の解析がほとんどであり、複雑形状を有する製品のプレス部品や多段プレス加工で問題となる応力負荷やひずみ経路が急変するプレス加工での検証を十分に行っているとは言えない<sup>1~4)</sup>。実際のプレス加工製品は、多段工程プレス加工により作製される為、鋼板に加わる変形挙動は複雑で、単軸のみならず多軸変形下におけるバウシinger 効果の検証を実験的に検証し、それを再現可能であるモデルの構築を行う必要がある。

そこで本研究では、複雑形状を有するプレス部品の高精度解析を実現するために、応力経路が変化する高張力鋼板の塑性変形挙動に注目した。具体的には、応力経路が変化するような変形経路を加えた時の高張力鋼板の降伏曲面やその後の等塑性ひずみ曲面と複雑変形履歴を有する高張力鋼板の繰返し塑性変形挙動についての実験観察とそのモデル化を行ったのでそれについて報告する<sup>5,6)</sup>。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験片

試験片は JFE スチール（株）社製 980MPa 級デュアルフェイズ高張力鋼板としている。板厚は 1.4mm である。本材料の圧延方向に対して 0°、45° そして 90° 方向の応力-ひずみ関係を図 1 に、塑性異方性を表す r 値を表 1 に示す。本研究では、上記高張力鋼板の応力負荷経路を変化させる為に、数種類の試験片を使用した。高張力鋼板の試験片形状は全て有限要素解析により、試験片に均一なひずみがかかることが確認されている。以下ではその試験片形状について述べる。

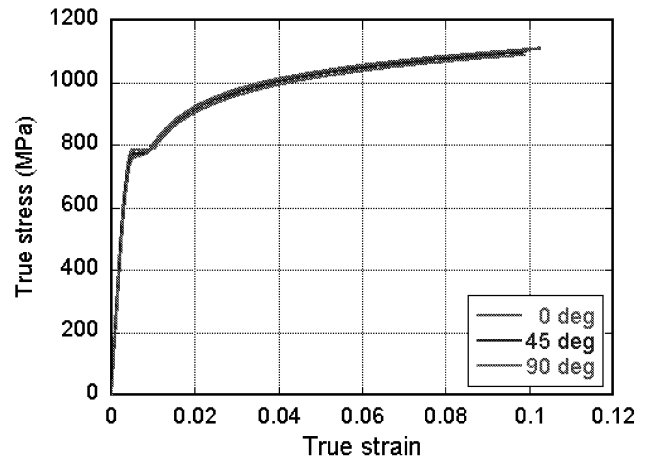


図 1 980MPa 高張力鋼板の応力-ひずみ曲線。

表 1 980MPa 高張力鋼板の r 値。

	r-value
0°	0.86
45°	0.90
90°	0.98

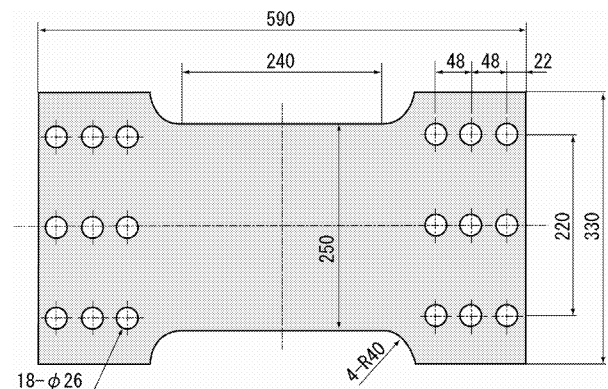


図 2 引張り予変形付与用試験片 (mm)。

## 2. 2 予変形付与用試験片形状

本研究では上記高張力鋼板に予変形を与えるために、図2に示す単軸引張り試験片を準備し、それを100tonの万能プレス機に設置後、単軸引張り予変形を与えている。予変形を受けた本試験片の内、均一変形領域から切り出した鋼板を以下で説明する面内反転試験片ならびに二軸引張り試験片に用いている。本試験片を用いて980MPa級高張力鋼板に加える予ひずみ量は、塑性予ひずみで2.5%としている。

## 2. 3 二軸引張り試験片形状

本研究では、図1で示した予変形付与用試験片にて所定の予ひずみを与えた高張力鋼板を図3に示す十字型形状(応力測定部である試験片中央部は50mm×50mm)に機械加工した。本試験片腕部には十字型試験片に引張り変形を加えた際に生じる変形拘束を緩和するために0.1mmのスリットを入れている。

## 2. 4 面内反転試験片形状

本研究では、図1で示した予変形付与用試験片にて所定の予ひずみを与えた高張力鋼板を図4に示す特殊試験片形状に機械加工し、その後、着積層することで面内反転試験片とした。接着剤は電気化学工業製ハードロックを使用し、接着層の厚さは非常に薄く、接着層の厚さが高張力鋼板の機械的特性に与える影響は殆どない。

## 2. 5 二軸引張り試験装置

本研究で使用した試験装置は、広島大学弾塑性工学研究室にて開発した二軸引張り試験装置である。その全景を図5に示す。図1で示した試験片に予変形を付与後、切り出した十字型引張り試験片に二軸応力状態を付与する。本装置は、直交方向にそれぞれストローク200mm、容量200kNの油圧アクチュエーターによって構成されている。なお、図2に示す十字型引張り試験片中央部(50mm×50mm)にはほぼ均一な応力状態を再現する。本研究では、二軸引張り荷重は試験装置四隅に設置された東京測器製ロードセルにて計測し、試験片中央部に生じるひずみは、東京測器製二軸塑性ひずみゲージを添付することにより計測している。

## 2. 6 面内反転試験装置

本研究で使用した試験装置は、広島大学弾塑性工学研究室にて開発した面内反転試験装置である。図3にて示した面内反転試験片を図6に示す島津製作所製サーボパルサーに面内反転試験治具装着することで実現した。荷重はサーボパルサー搭載ロードセル、ひずみはKEYENCE社製渦電流式変位計から計測・換算することによって取得している。

## 2. 7 面内反転試験装置

本研究で使用した試験装置は、広島大学弾塑性工学研究室にて開発した面内反転試験装置である。図3にて示した面内反転試験片を図5に示す島津製作所製サーボパルサ

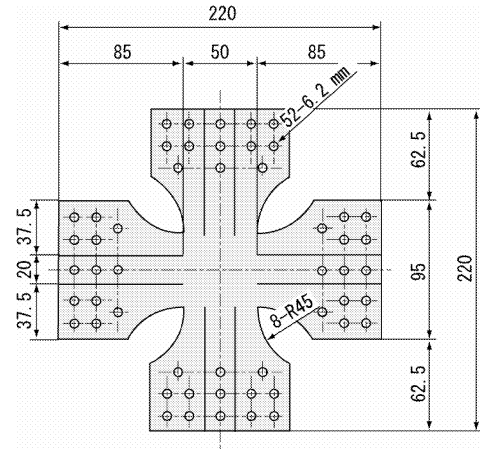


図3 二軸引張り試験片 (mm).

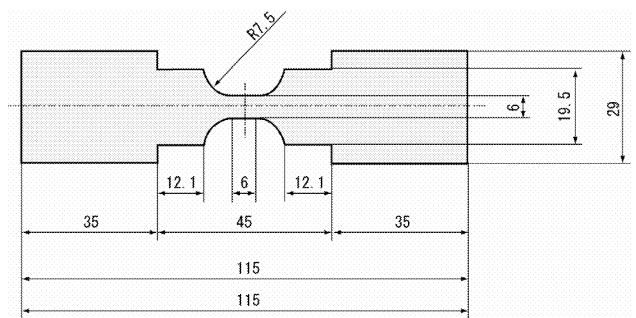


図4 面内反転用接着積層試験片 (mm).

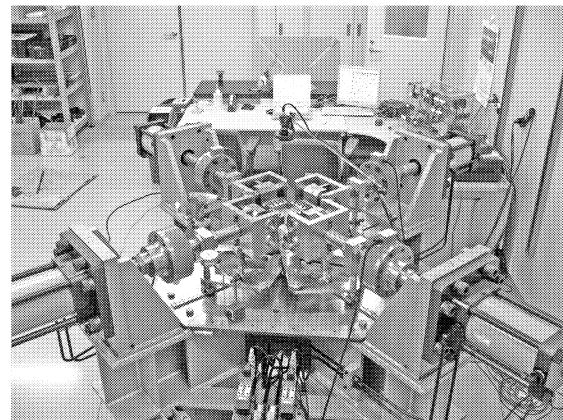


図5 二軸引張り試験装置全体図.

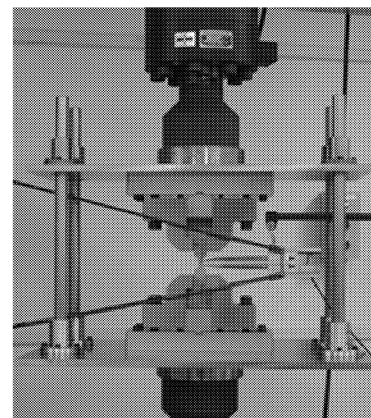


図6 面内繰返し反転試験装置全体図.

一に面内反転試験治具装着することで実現した。接着積層試験片の座屈を防止する為に試験片側面に座屈防止治具を装着して実験を行うが、その治具が実験結果である応力やひずみに与える影響はない。なお、荷重はサーボパルサー搭載ロードセル、ひずみはKEYENCE社製渦電流式センサーを搭載した変位計から計測・換算することによって取得している。

### 3. 材料モデル

#### 3.1 Yoshida-Uemori model<sup>7)</sup>

本研究で使用する材料モデルは、本研究グループが提案した高張力鋼板の塑性変形挙動（繰返し面内反転挙動）を高精度に再現可能な“Yoshida-Uemori model”である。Yoshida-Uemori model の概念図を図7に示す。本モデルは、降伏曲面と限界曲面の二曲面によって構成されている。降伏曲面は移動硬化のみ、限界曲面は等方硬化と移動硬化を行い、上記両曲面の移動硬化によって、以下に示す金属薄板材料の塑性変形の特徴である

- ・金属材料の初期降伏
- ・応力反転後の早期再降伏
- ・応力反転後の遷移軟化
- ・応力反転後の永久軟化
- ・非等方硬化領域

である。本モデル詳細を以下に示す。なお本研究では降伏関数 $\phi$ には、Hillの二次降伏関数を使用している<sup>8)</sup>。これは、本研究で使用した980MPa級デュアルフェイズ高張力鋼板の初期降伏曲面と後続降伏曲面実験結果を最も精度良く再現可能である降伏関数がHillの二次降伏関数であった為である。図8に塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p=0.002$ （初期降伏曲面）ならびに塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p=0.01$ （後続降伏曲面）時の等塑性ひずみ曲面実験結果ならびに、それを上記降伏関数で同定した結果を示す。

【Hillの二次降伏関数】

$$\phi = F\sigma_{xx}^2 + G\sigma_{yy}^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 \quad (1)$$

$\sigma_{ij}$  : Cauchy 応力,

$F, G, H$ : 異方性パラメータ

※金属薄板の二軸塑性変形挙動を考慮している為、せん断項の考慮はしていない。

【初期降伏曲面】

$$f_0 = \phi(\sigma) - Y = 0 \quad (2)$$

$Y$  : 初期降伏応力

【後続降伏曲面】

$$f = \phi(\sigma - \alpha) - Y = 0 \quad (3)$$

$\alpha_{ij}$  : 背応力

【限界曲面】

$$F = \phi(\sigma - \beta) - (B + R) = 0 \quad (4)$$

$\beta_{ij}$  : 限界曲面の移動硬化応力,

$B$  : 限界曲面の初期大きさ,

$R$  : 限界曲面の等方硬化応力

【非等方硬化領域】

$$\psi = \phi(\beta - q) - r^2 \quad (5)$$

$q$  : 非等方硬化領域の中心,

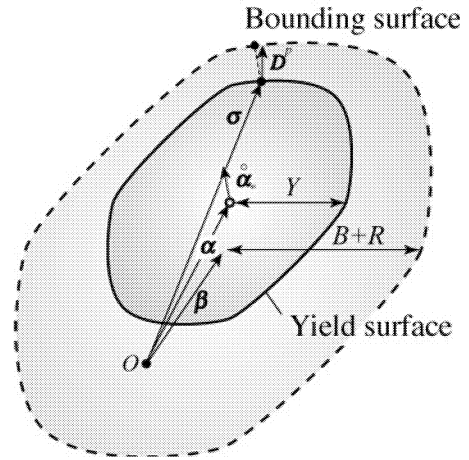


図7 Yoshida-Uemori model 概念図。

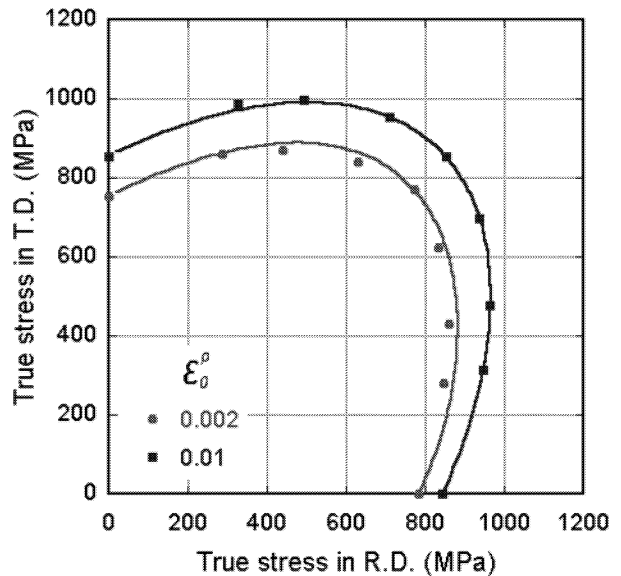


図8 比例荷変形時の等塑性ひずみ曲面実験結果（塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p=0.002$  ●,  $\bar{\epsilon}^p=0.01$  ■）とHillの二次降伏関数で計算結果の比較。

$r$  : 非等方硬化領域の初期半径

【Yoshida-Uemori model】

$$\dot{\alpha}_* = \dot{\alpha} - \dot{\beta}$$

$$= C \left[ \left( \frac{a}{Y} \right) (\sigma - \alpha) - \sqrt{\frac{a}{\alpha_*}} \alpha_* \right] \dot{p} \quad (6)$$

$$\dot{p} = \sqrt{\left( \frac{2}{3} \right) D^p} : D^p, \bar{\sigma}_* = \phi(\alpha_*),$$

$$a = B + R - Y$$

$\dot{p}$  : 相当塑性ひずみ速度

$D^p$  : 塑性ストレッチング

【Yoshida-Uemori model 限界曲面の中心の移動】

$$d\beta = m \left[ \left( \frac{b}{B+R} \right) (\sigma - \beta) - \beta \right] \dot{p} \quad (7)$$

関連流動則は以下で定義されるものとした。

【関連流動則】

$$D^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma} \dot{\lambda} \quad (8)$$

なお、Yoshida-Uemori model の材料パラメータは、コンピュータによる材料パラメータ同定システムで決定された値を用いている。求められた Yoshida-Uemori model の材料定数を表 2 に示す。

#### 4. 実験結果ならびに考察

図 9 に 2.5% の単軸予変形を受けた 980MPa 高張力鋼板の非比例負荷繰返し変形時の応力-ひずみ関係を示す。繰返し面内圧縮試験は、予変形方向に対して直交する (90°) 方向に切り出した鋼材を使用している。この結果より、予変形に対して直交方向に切り出した試験片を圧縮した際に明確なバウシinger 効果が確認出来る。更に繰返し変形を継続し、圧縮から引張りに転じる際においても明確なバウシinger 効果が存在することが確認できる。予変形を圧延方向に加え、繰返し変形を圧延直交方向に加えた場合、従来の商用 FEM に導入されている等方硬化モデルでは、この現象を再現できないことが分かる。また同実験結果を Yoshida-Uemori model にて計算した結果を実線にて示す。初期圧縮変形時において、本モデル計算結果と実験結果との間に約 70MPa の差が生じているが、その他の繰返し変形挙動については概ね実験結果を再現可能であることが分かる。この応力-ひずみ関係の違いを検討するために、圧延方向に予ひずみを加えた後、予ひずみ負荷方向と同方向に繰返し変形を付与した実験結果と予ひずみ負荷方向に直角に繰返し塑性変形を加えた際の繰返し応力-ひずみ関係を図 10 に示す。圧延方向の圧縮変形よりも圧延直交方向に圧縮変形を加えた時の圧縮降伏応力が大きくなっていることが分かる。つまり、応力負荷方向が急変すると交差効果のような現象が起こっており、この現象は塑性変形付与方向が急激に変わる際に、予変形で生成された転位の蓄積や転位壁が影響するものと考えられる。この現象を明らかにする為には結晶塑性解析のような金属内部の転位の蓄積やすべり変形を考慮できる解析をする必要がある。しかしながら、塑性加工のような大きな塑性ひずみを取り扱う問題では、Hill の二次降伏関数+Yoshida-Uemori model で再現した結果、初期圧縮変形時に若干の応力差があるものの概ねその特性を再現できていることが判る。

また図 11 に予変形を受けた二軸引張り変形結果を示す。単軸予変形を高張力鋼板に加えた為、実験結果の等塑性ひずみ曲面は、変形付与方向に移動した形になっていることがこの結果より確認できる。この結果を比較すると、Yoshida-Uemori model は各方向に付与した応力値を正確に予測できており、0.6% の塑性ひずみを加えた実験結果と解析結果は非常に良い一致を示していることが判る。本結果より、複雑な応力経路を検証する為には、等方硬化ではこのような現象をやはり再現できず、多軸応力下において、

表 2 Yoshida-Uemori model 材料定数

Y (MPa)	$a_n$ (MPa)	b (MPa)	C	m	$r_{sat}$ (MPa)	h
410	450	125	C1=500 C2=210	25	150	0.2

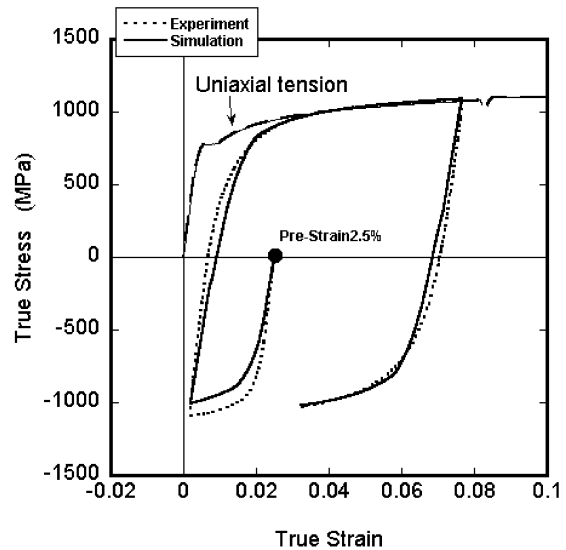


図 9 塑性予ひずみ 2.5% を圧延方向に加えた 980MPa 高張力鋼板の非比例負荷繰返し変形時の応力-ひずみ関係 (予変形として圧延方向に変形付与後、予変形付与方向に直交する方向に繰返し変形を付与した際の応力-ひずみ関係)。

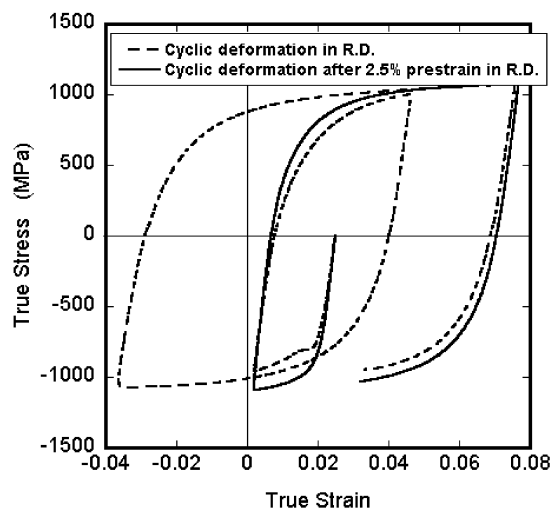


図 10 塑性予ひずみ 2.5% を圧延方向に加えた 980MPa 高張力鋼板の非比例負荷繰返し変形時の応力-ひずみ関係の比較 (予変形として圧延方向に変形付与後、予変形付与方向に同一方向に繰返し変形を加えた実験結果 (点線) とそれに直交する方向に繰返し変形を付与した際の応力-ひずみ実験結果 (実線))。

応力負荷が変化した（除荷・再負荷を高張力鋼板に付与した）結果も，Yoshida-Uemori model にて再現可能であることが確認できる。

### 謝辞

本研究遂行に当たり，試験片加工ならびに適切なお助言を頂きました広島商船高等専門学校，瀧口三千弘教授，吉田哲也教授，そして森下義博文部技官に厚くお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 藤原他：第 51 回塑加連講論（2000），117.
- 2) 倉光他：平 17 年塑加春講論（2005），125.
- 3) 狩野他：平 19 年塑加春講論（2007），161.
- 4) 麻 他：平 19 年塑加春講論（2007），325.
- 5) 上森他：平 19 年塑加春講論（2007），331.
- 6) 上森他：日本鉄鋼協会第 150 回秋季講演大会講演論文，18-5（2005.9），p.1255.
- 7) F.Yoshida and T.Uemori：Int. J. Plasticity，18（2002），661.
- 8) R. Hill：Proc. Roy. Soc., A193（1948），281.

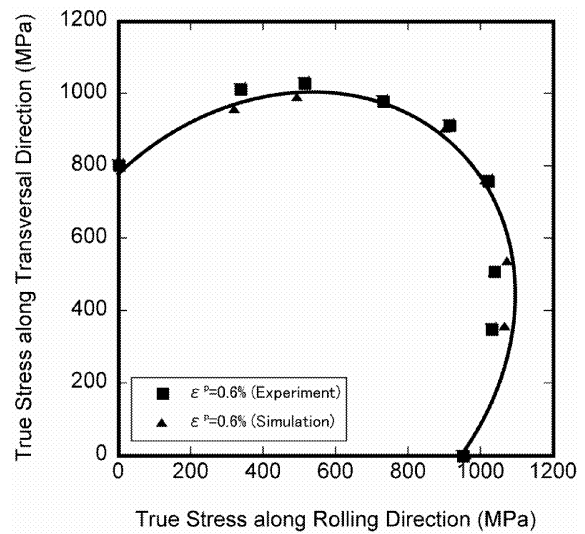


図 11 圧延方向に 2.5%の塑性予ひずみ付与後，再度 0.45%の塑性予ひずみを加えた際の等塑性ひずみ曲面実験結果と同条件での解析結果の比較。