

# 異方性金属板材の冷間・温間における大ひずみ塑性構成モデルとその成形シミュレーションへの応用

広島大学大学院工学研究科 機械システム工学専攻

教授 吉田 総仁

(平成14年度研究開発助成 AF-2002015)

キーワード：異方性板材，塑性構成モデル，成形シミュレーション

## 1. 研究の目的と背景

最近では自動車産業を中心として極めて強度の高い高張力鋼板（ハイテン材）が使われてきており，こうした板材についての破断，スプリングバックの予測は重要な課題となってきた。板材成形における破断・しわの発生には  $r$  値で代表される異方性が，スプリングバックには繰返し加工硬化特性とバウシinger効果が強く影響する。したがって，板材成形の数値シミュレーションではこれらの材料挙動を正確に表す塑性構成モデルが必要になる。こうした目的のために，板材の降伏曲面にたいする実験としては白鳥・池上<sup>1)</sup>，白井・戸澤<sup>2)</sup>の先駆的な研究があり，最近では桑原<sup>3)</sup>の二軸引張り実験がある。異方性降伏関数については，Hill<sup>4),5)</sup>，Logan-Hosford<sup>6)</sup>，Gotoh<sup>7)</sup>，Barlat<sup>7)</sup>などの多くの提案があるが，これらはバウシinger効果や繰返し硬化のモデル化は行っていない。著者らは，板材成形とりわけスプリングバックの解析にはバウシinger効果や繰返し硬化のモデル化が重要であることを早くから主張し<sup>9)-11)</sup>，新しい大ひずみ弾塑性構成モデル（Yoshida-Uemori model<sup>12)</sup>）を提案したが，集合組織による初期異方性については考えていなかった。

一方，アルミニウム合金やマグネシウム合金板の成形を考えると，これらは室温では延性に乏しい，ストレッチャー・ストレーンが発生するなどの問題があり，温間成形が行われることが多い。こうした材料の温間成形シミュレーションには，変形抵抗の温度・速度依存性を的確に表現する粘塑性モデルが必要となる。室温においては，アルミニウム合金の降伏関数についての Barlat らの一連研究があるが，温間成形シミュレーションに用いることができる温度・速度依存の粘塑性構成モデルの研究はほとんどみられない。とりわけ板材の多軸温間実験は皆無といってよい。

本研究の目的は次のとおりである。第一に，冷延鋼板（SPCC）および高張力鋼板，アルミニウム合金（A5083）やマグネシウム合金板（AZ31）について，二軸引張り実験および繰返し塑性実験を行い，これらの異方性，バウシinger効果や繰返し硬化挙動を実験的に明らかにする。とりわけアルミニウム合金およびマグネシウム合金板については材料挙動の温度・速度依存性について調査する。第二に，これらの材料挙動を適切に記述できる塑性（あるい

は粘塑性）構成モデルを提案する。第三に，このモデルを成形シミュレーションに応用することでモデルの有効性を明らかにする。

## 2. 塑性および粘塑性構成モデルの枠組み

### 2. 1 異方性塑性構成モデル<sup>13)</sup>

図1に模式的に示すように，降伏曲面は塑性変形に伴って拡大および移動する限界曲面（bounding surface）の中を移動するものとする。初期降伏条件が  $f = \phi(\sigma) - Y = 0$  で与えられるとき，

$$\text{降伏曲面： } f = \phi(\sigma - \alpha) - Y = 0 \quad (1)$$

$$\text{限界曲面： } F = \phi(\sigma - \beta) - (B + R) = 0 \quad (2)$$

ここで， $Y$ ：降伏曲面の大きさ（初期降伏強さ）， $\alpha$ ：降伏曲面の中心（背応力）， $B$ ：限界曲面の初期の大きさ， $R$ ：限界曲面の等方硬化， $\beta$ ：限界曲面の中心である。

塑性ひずみ速度  $D^p$  は次式で示す降伏曲面への垂直則より決定できる。

$$D^p = \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \dot{\lambda} \quad (3)$$

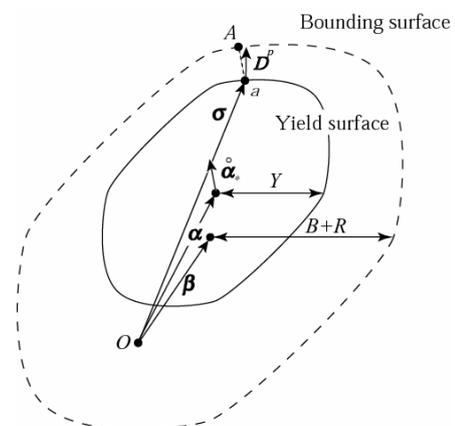


図1 降伏曲面と限界曲面

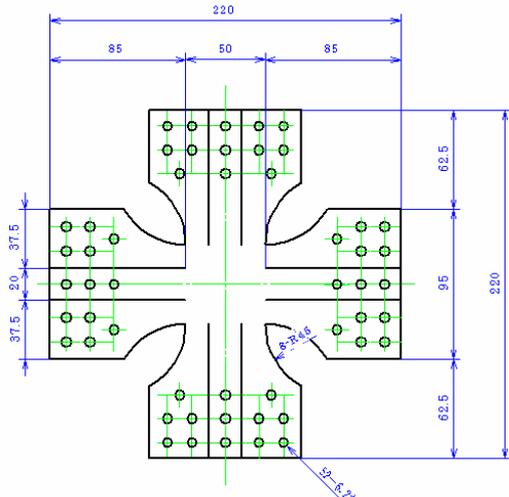


図2 二軸引張り試験片 (mm)

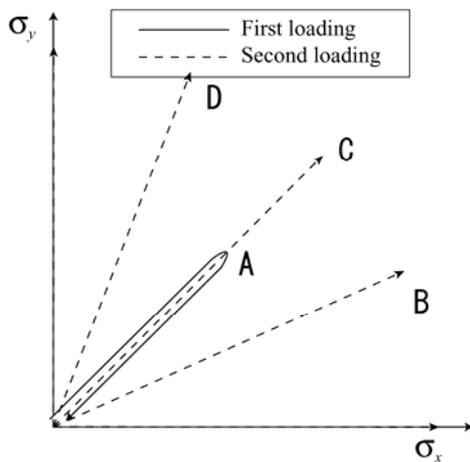


図3 非比例負荷経路

このモデルにおいて、異方性は降伏関数  $\phi(\sigma)$  により表現され、バウシinger効果や繰返し塑性硬化は背応力  $\alpha$  の発展式、さらにそれに関連する限界曲面の移動と大きさを表す内部状態変数  $\beta$ ,  $R$  の発展式により表されることになる。

## 2. 2 粘塑性構成モデル

降伏関数が式(1)で与えられるとき、速度依存型の粘塑性構成モデルの一般形を次式のように仮定する。

$$\dot{\varepsilon} = F(\langle \phi(\sigma - \alpha) - Y \rangle) \quad (4a)$$

$$D^p = \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \dot{\lambda} \quad (5b)$$

ここで、 $\dot{\varepsilon}$  は相当塑性ひずみ速度であり、これが超過応力 (overstress)  $\langle \phi(\sigma - \alpha) - Y \rangle$  の関数として与えられる。温度の影響は降伏応力  $Y$  および背応力  $\alpha$  を温度  $T$  の関数として表現される。本研究では高温において降伏関数  $\phi(\sigma)$  がどのような形になるかについて主に検討する。

## 3. 実験方法

### 3. 1 鋼板の室温における塑性変形特性<sup>13)</sup>

冷延鋼板 (SPCC) および 440, 590, 780, 980MPa 級の 高張力鋼板を用いて、単軸引張り、面内繰返し引張り圧縮 (接着積層試験片を用いる)、二軸引張り試験 (図2に示す十字型試験片を用いる) を行った。二軸引張り試験においては比例負荷試験とともに、図3に示すように、

$(\sigma_x, \sigma_y) = (1:1)$  の等二軸引張り予負荷を加えた後、一度

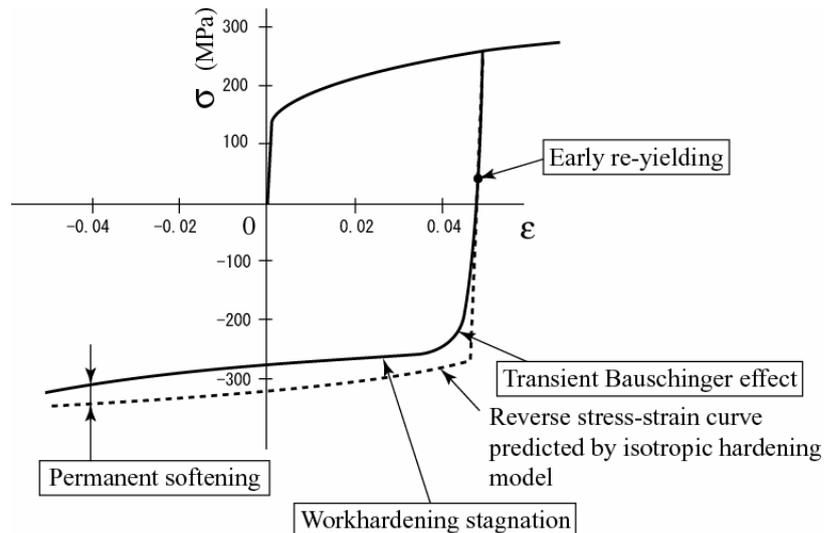


図4 応力反転における応力-ひずみ応答 (SPCCの実験結果)<sup>13)</sup>

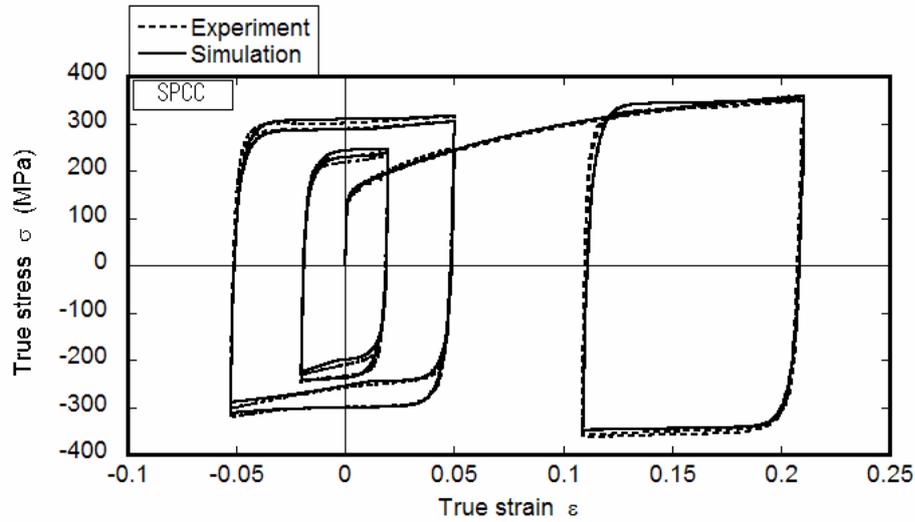


図5 繰返し応力反転における応力-ひずみ応答 (SPCCの実験結果とYoshida-Uemori modelによる計算結果<sup>12)</sup>)

除荷し (実線 O→A→O), 種々の方向の二軸引張り応力を再度加える (破線 O→B→D) 非比例負荷実験も行った.

### 3.2 アルミニウムおよびマグネシウム合金の高温粘塑性変形特性

アルミニウム合金 (A5083) およびマグネシウム合金板 (AZ31) を用いて, 種々の温度 (室温~350°C) とひずみ速度 ( $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{s}^{-1}$ ) における単軸引張りおよび二軸引張り試験を行った.

## 4. 材料挙動およびモデル化に関する結果と考察

### 4.1 鋼板の室温における塑性変形

大ひずみにおける応力反転時の塑性挙動の一例として, 冷延鋼板 (SPCC) の実験結果を図4に示す. また, 図5には繰返し応力-ひずみ応答の実験結果 (あわせて後述するモデルによるシミュレーション結果) を示す. これらにみられる塑性変形挙動の特徴を整理すると以下のとおりである.

- 応力反転後の再降伏は極めて早期に起こり, その後, 加工硬化係数が塑性ひずみの親展とともに急激に減少する遷移的バウシinger効果が見られる. なお, 応力反転時に一見線形弾性挙動のようにみえる応力-ひずみ応答も詳細に見ると非線形応答をしており, この部分の平均的応力・ひずみ勾配から求めたヤング率は処女材のそれよりも小さくなっている (いわゆるヤング率の塑性ひずみ依存性).
- 大きな塑性予ひずみ後の応力反転では, 遷移的バウシinger効果の後に加工硬化が休止したような領域が見られ (硬化休止現象[workhardening stagnation]), その後加工硬化が再開する. 反転後の塑性変形が大きくなっても流動応力レベルは同一のひずみにおける単調負荷のそれよりもわずかに低くなる (永久軟化現象).
- 繰返し塑性変形において応力振幅は繰返しとともに

増大するが, それはやがて一定の値に収束する. この繰返し応力振幅の収束値は繰返し塑性ひずみ幅が大きいほど大きくなる (応力振幅の繰返し塑性ひずみ幅依存性).

以上の繰返し塑性挙動を記述するために, 2.1節で述べた塑性構成モデル中の内部状態変数の発展式を次のように与える.

降伏曲面の限界曲面に対する相対移動:

$$\alpha_* = \alpha - \beta, \quad (6)$$

$$\dot{\alpha}_* = C \left[ \left( \frac{a}{Y} \right) (\alpha - \beta) - \sqrt{\frac{a}{\bar{\alpha}_*}} \alpha_* \right] \dot{\varepsilon}, \quad (7)$$

$$\bar{\alpha}_* = \phi(\alpha_*), \quad a = B + R - Y$$

$$\text{限界曲面の拡大: } \dot{R} = k(R_{sat} - R) \dot{\varepsilon} \quad (8)$$

$$\text{限界曲面の移動: } \dot{\beta}' = k \left( \frac{2}{3} b D^p - \beta' \dot{\varepsilon} \right) \quad (9)$$

降伏曲面の移動硬化は転位の運動に対して方向性を持つ長距離障害物 (比較的大きな第2相や介在物, 結晶粒界など) による硬化を表しており, これらの障害物により運動を阻止された転位は反転負荷により容易に可動性を回復する. 応力反転時における早期降伏と急速な加工硬化率の変化に特徴づけられる遷移的バウシinger効果の機構はこのように説明できる. 限界曲面はランダム配置された短距離障害物 (固溶原子, 微細析出物など) および転位壁やセルなどによる比較的安定な転位組織による硬化を表している. 反転負荷における硬化休止現象は単調負荷により形成された転位壁やセルが反転負荷によりその一部が分解され再構築される過程であることが実験観察により明らかにされているが, 本モデルではこれを限界曲面の拡大の一時停止, さらに非硬化領域の発展としてモデル化して

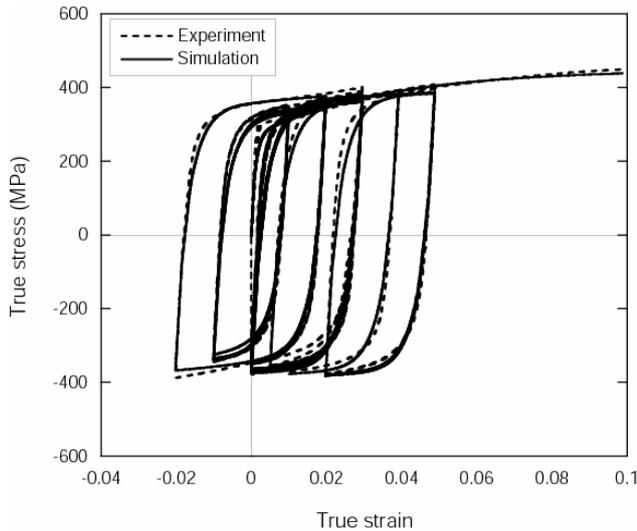


図6 繰返し応力反転における応力-ひずみ応答 (440MPa級高張力鋼板の実験結果とYoshida-Uemori modelによる計算結果)<sup>13)</sup>

いる (詳細は文献12) を参照). なお, ヤング率の塑性ひずみ依存性に関しては以下の式を提案している<sup>14)</sup>.

$$E = E_o - (E_o - E_a) [1 - \exp(-\xi \bar{\epsilon})] \quad (10)$$

ここで,  $E_o$  は処女材のヤング率,  $E_a$  は無限大の相当塑性ひずみを受けた材料のヤング率,  $\xi$  は材料定数である.

図5, 6にはそれぞれSPCCおよび440MPa級高張力鋼板の繰返し応力-ひずみ応答についての本モデルによるシミュレーション結果と実験結果とを比較して示す. 本モデルはバウシinger効果, 硬化休止現象, 応力振幅の繰返し塑性ひずみ幅依存性を精度良く表現できる.

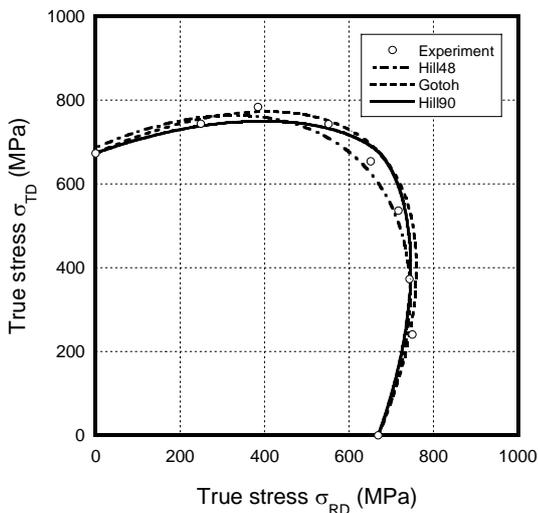


図7 比例荷重における等塑性仕事曲面 (980MPa級高張力鋼板)<sup>15)</sup>

このモデルの特長のひとつは任意の異方性降伏関数を用いることができることである. ここで, 二軸引張り試験により得られた降伏曲面の形状について検討してみる. 冷延鋼板 (SPCC) の平均 $r$ 値はおおよそ1.6程度であったが, 高張力鋼板の平均 $r$ 値は0.8~0.9程度であり比較的異方性は弱かった. 図7には, 一例として980MPa級の高張力鋼板の比例荷重変形時における降伏曲面 (0.2%耐力から算出した等塑性仕事曲面) の実験結果とそれを数種類の降伏関数 (Hill48<sup>4)</sup>, Gotoh<sup>7)</sup>, そしてHill90<sup>5)</sup>) を用いて計算した結果を比較して示している. この材料は異方性が強くない (平均 $r$ 値=0.8) こともあり, どの降伏関数を用いた計算結果も実験結果と比較的良く一致した. なお, 延鋼板 (SPCC) についてはHill48降伏関数の計算結果は実験結果との差が大きく, GotohおよびHill90降伏関数が比較的良い結果を与える.

ところで, 板材の降伏曲面に関する従来の研究は比例荷重におけるものがほとんどであり, 非比例荷重における検討はほとんどなされていない. 図8には, 980MPa級の高張力鋼板について, (1)初期降伏曲面, (2)比例荷重における等塑性ひずみ曲面 (相当塑性ひずみ0.2%), (3)等二軸荷重 (O→A) を加えた後に一旦除荷 (A→O) し, さらに種々の応力方向に荷重したときの等塑性ひずみ曲面 (相当塑性ひずみ0.3%) の実験値と本モデル (Hill48降伏関数を用いたYoshida-Uemori model) による計算結果の比較を示したものである<sup>15)</sup>. 計算結果は実験結果とよく一致しており, 本モデルの妥当性が検証できた. なお, 図中には等二軸荷重 (O→A)・除荷 (A→O) 後に  $(\sigma_x, \sigma_y) = (2:1)$  方向 (O→B) に応力を加えた際の降伏曲面の計算結果も合わせて示している.

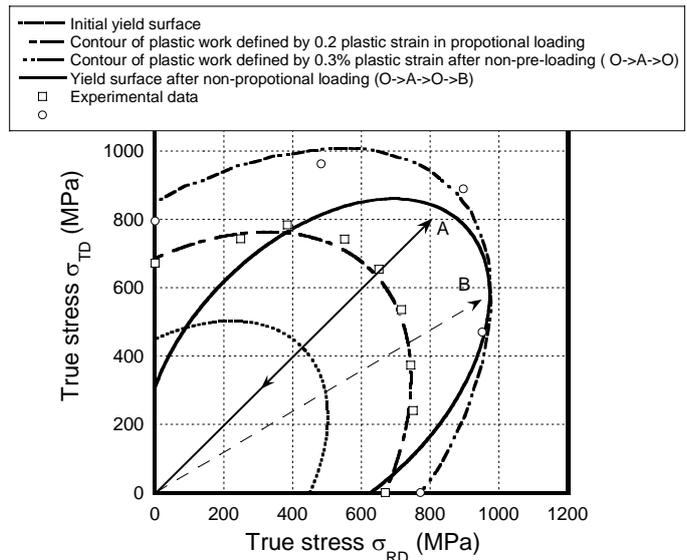


図8 非比例荷重変形時における等塑性仕事曲面の計算結果と実験結果の比較 (980MPa級高張力鋼板)<sup>15)</sup>

## 4.2 アルミニウムおよびマグネシウム合金板の高温粘塑性変形

ここでは主に高温における降伏曲面（等塑性ひずみ曲面）の実験結果について報告する。図9はアルミニウム合金（A5083）について、種々の温度における等塑性ひずみ曲面の実験結果（相当塑性ひずみ速度が $10^{-2} s^{-1}$ の場合）を示したものである<sup>16)</sup>。図中には種々の降伏関数（von Mises, Tresca, Hill48, Logan-Hosford, Barlat）による計算結果も合わせて示している。これらの結果から、Logan-HosfordおよびBarlatの降伏関数による計算結果は実験結果とよく一致していることがわかる。なお、これらのモデルに含まれる材料パラメータ（応力指数）は温度によらず一定としてよいことがわかり、モデル化のうえでは降伏曲面の大きさを温度の関数として与えればよいことになる。なお、変形抵抗のひずみ速度依存性は、他の多

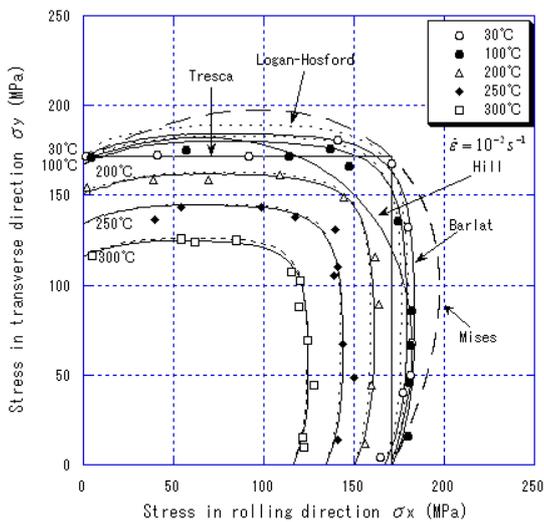


図9 A5083の高温における降伏曲面<sup>16)</sup>

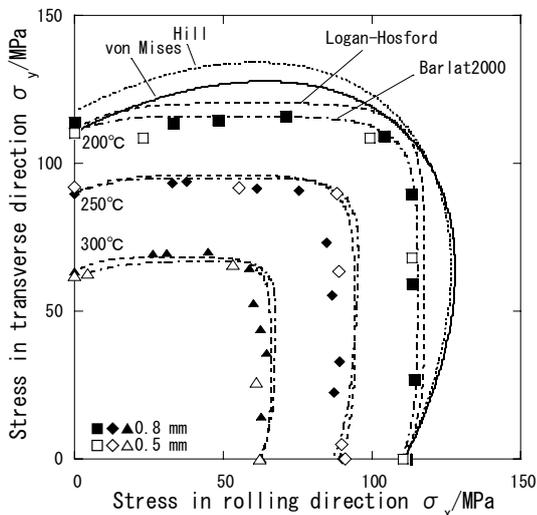


図10 AZ31の高温における降伏曲面<sup>17)</sup>

くの材料にみられるのと同様、温度が高くなるほど強くなった。ただし、A5083では、室温から100°C前後で動的ひずみ時効が起これ、この温度域ではわずかながら逆ひずみ速度依存性が観察された

図10はマグネシウム合金板（AZ31）の種々の温度における等塑性ひずみ曲面の実験結果（相当塑性ひずみ速度が $10^{-2} s^{-1}$ の場合）を示したものである<sup>17)</sup>。この材料についてもA5083と同様にLogan-HosfordおよびBarlatの降伏関数による計算結果は実験結果とよく一致していることがわかる。

## 5. 材料モデルの成形シミュレーションへの応用

### 5.1 高張力鋼板のスプリングバック解析

図11は、ハット曲げスプリングバックにおける壁反りの解析を種々の材料モデルを用いて行い、実験結果（590MPa級の高張力鋼板）と比較したものであるが、バウシinger効果と繰返し硬化の材料挙動を正確に表現する本モデルによる予測精度が最も良いことがわかる<sup>13)</sup>。なお、同様なことはS-レールのねじれも含むスプリングバック解析でも確かめている<sup>18)</sup>。

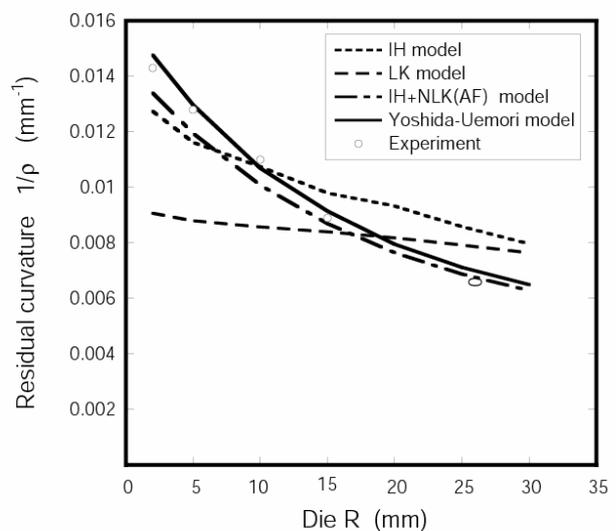
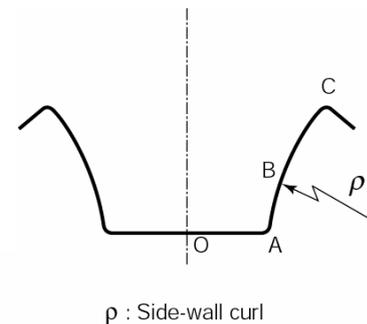


図11 590MPa級高張力鋼板のハット曲げにおける壁反りの実験結果と種々の材料モデルによる計算結果の比較<sup>13)</sup>

## 5.2 アルミニウムおよびマグネシウム合金板の温間成形限界の予測

アルミニウム合金板の変形抵抗と延性に及ぼす温度・速度の影響を明らかにし、成形シミュレーション結果と合わせて温間成形性 (FLD<sup>19</sup>), 深絞り<sup>20</sup>, 引張り曲げ<sup>21</sup>) 予測を可能とした。

マグネシウム合金板 (AZ31) は室温では六方稠密結晶の非底面すべり抵抗が大きい延性に乏しいが、温度上昇とともにこの抵抗が急激に小さくなるため成形加工が容易となる。本研究ではAZ31の変形抵抗と延性におよぼす温度の影響を実験的に調べるとともに、プレス成形限界について明らかにした<sup>22</sup>。

## 6. 結言

本研究では、得られた主な結果を以下に列記する。

- (1) 冷延鋼板 (SPCC) および高張力鋼板を用いて、単軸引張り、面内繰返し引張り圧縮、二軸引張り試験を行い、板材の持つ集合組織による初期異方性、応力反転におけるバウシinger効果、繰返し加工硬化挙動を実験的に調査した。実用的に最も重要な高張力鋼板については、バウシinger効果が冷延鋼板より顕著で、異方性はさほど強くなく Hill48 降伏関数でほぼ記述できることなどがわかった。なお、二軸応力非比例負荷における塑性挙動 (降伏曲面) についての試験は従来の研究にみられないオリジナリティの高いものである。
- (2) 上記の実験観察で得られる大ひずみ繰返し塑性挙動を忠実に表現できる異方性塑性構成モデルを提案した。このモデルは任意の異方性降伏関数を用いることができ、材料パラメータの決定法も明確で汎用性が高い。これを用いた繰返し応力-ひずみ応答の数値シミュレーション結果は実験結果とよく一致し、本モデルの妥当性が確認できた。
- (3) このモデルを用いた高張力鋼板のスプリングバック解析結果は実験結果とよく一致した。一方、バウシinger効果や繰返し硬化特性を適切に表現していない従来モデルを用いたスプリングバック予測の精度は悪く、本モデルの優位性が確かめられた。
- (4) アルミニウム合金 (A5083) およびマグネシウム合金板 (AZ31) を用いて、種々の温度 (室温~350°C) とひずみ速度 ( $10^{-4}$ ~ $10^{-2}$ s<sup>-1</sup>) における単軸引張りおよび二軸引張り試験を行い、粘塑性挙動について実験的に調査した。これらの材料の高温における降伏曲面はLogan-HosfordあるいはBarlatの降伏関数で概ねよく記述できることがわかった。また、延性に関しても温度・速度依存性が強く、高温で低速変形ほど延性が高くなることがわかった。これらの特性を材料モデルで表現し、数値シミュレーションを実行することにより、温間プレス成形性 (FLD, 深絞り, 引張り曲げなど) の予測が可能となった。

## 謝辞

本研究は (財) 天田金属加工機械技術振興財団の平成14年度研究開発助成 (AF-2002015) により成された。共同研究者の日野隆太郎・上森武 (広島大学) 両氏には研究全体をとおして研究遂行の尽力していただいた。中哲夫 (弓削商船高専), 高津正秀・東健司 (大阪府立大学) の各氏からはアルミニウムおよびマグネシウム合金板の温間材料挙動と成形性に関する実験で多大な協力を得た。なお、広島大学大学院工学研究科弾塑性工学研究室の院生・学生諸君にはすべての材料試験に協力していただいた。ここに記し深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 白鳥英亮・池上皓三: 材料: 16-165(1967),433.
- 2) 白井久雄・戸澤康壽: 塑性と加工, 40-457 (1999), 1041.
- 3) 桑原利彦・池田聡: 塑性と加工, 40-457 (1999), 145.
- 4) Hill, R.: Proc. Roy. Soc., **A193** (1948), 281.
- 5) Hill, R.: J. Mech. Phys. Solids, **38-3** (1990), 405.
- 6) Logan R. W., Hosford W. F.: Int. J. Mech. Sci., **19** (1977), 505.
- 7) Gotoh, M.: Int. J. Mech. Sci., **19** (1977), 505.
- 8) Barlat, F. et al : Int.J.Plasticity, **19** (2003), 1297
- 9) Uemori, T, Okada, T., Yoshida, F.: Metals and Materials, **4**(1998), 311.
- 10) 上森武・藤原賢司・岡田達夫・吉田総仁: 塑性と加工, **42-480**(2001), 64.
- 11) 上森武・岡田達夫・吉田総仁: 塑性と加工, **43-498**(2002), 639.
- 12) Yoshida, F., Uemori, T.: Int. J. Plasticity, **18** (2002), 661.
- 13) Yoshida, F., Uemori, T.: Int. J. Mech. Sci., **45**(2003), 1687.
- 14) Yoshida, F., Uemori, T., Fujiwara, K.: Int. J. Plasticity, **18** (2002), 633.
- 15) 倉光徹・市丸隆志・上森武・日野隆太郎・中哲夫・吉田総仁: 平成17年塑性加工春講論, (2005), 125.
- 16) Naka, T., Nakayama, T., Uemori, T., Hino, R., Yoshida, F.: Key Engineering Materials, **274-276** (2004), 937.
- 17) 中哲夫・廣中智久・高津正秀・東健司・上森武・吉田総仁: 55回塑加連講論, (2004), 123.
- 18) 安部重毅・吉田総仁・日野隆太郎: 55回塑加連講論, (2004), 135.
- 19) 中哲夫・鳥飼岳・日野隆太郎・吉田総仁: 塑性と加工, **43-492**(2002), 66.
- 20) 中哲夫・鳥飼岳・日野隆太郎・吉田総仁: 塑性と加工, **43-497**(2002), 551-555
- 21) Naka, T., Hino, R., Yoshida, F.: Key Engineering Materials, **233-236**(2003), 113.
- 22) Kohzu, M., Yoshida, F., Higashi, K.: Materials Science Forum, **419-4** (2003), 321.