

# 薄板材料のプレス成形における成形難易の評価法に関する研究

大同工業大学 機械工学科

教授 中島浩衛

(平成7年度研究開発助成AF-95027)

キーワード：成形限界, FLD, くびれ限界, しわ, 成型難易

## I 薄板材料の高ひずみ領域における加工硬化指数 $n$ 値とくびれ限界との関係の明確化

### 1. 研究の目的と背景

近年、地球環境問題等の社会的要請からプレス成形の高強度化、一体成形化、アルミニウム合金等の使用による軽量化が暫時増加しつつある。プレス成形における破断現象は、決定的な製品不良につながるものであり、これらの不良現象が生じない成形可能な限界を明らかにする必要がある<sup>1)</sup>。そこで、薄鋼板、高張力鋼板、Al合金薄板の各種材料を用いて、1軸引張条件から等2軸張り出し条件までの2軸応力下における材料別の成形限界曲線(FLD)を明らかにした<sup>2)</sup>。また、高ひずみ領域の加工硬化指数  $n$  値を求め<sup>3)</sup>、FLDとの関係を調べた。

### 2. 供試材および実験方法

供試材は、薄鋼板(SPCC、SPCE、SSPDX)、高張力鋼板(SAFC370R)、Al合金薄板(Al100、5000系)の計6種を用い、圧延方向に対し0°、45°、90°の各3方向から採取した。試験片は、幅30~120mm(30、40、60、80、92、100、108、120)×長さ165mmの8種類を用いた。それらの機械的性質の平均値を表1に示す。

表1 供試材の機械的性質(平均値)

材料	Y.P. [MPa]	T.S. [MPa]	T.El. [%]	$n$ 値	$n$ 値	U 値
SPCC	200	342	34	0.219	1.243	0.12
SPCE	161	312	40	0.26	1.547	0.16
SSPDX	126	279	47	0.278	1.759	0.18
SAFC370R	218	380	33	0.223	1.292	0.13
Al100	32	96	34	0.259	0.548	0.09
Al(5000系)	105	260	27	0.355	0.905	0.17

実験は10ton深絞り試験装置にて、 $\phi 80$ 球頭ポンチ、ビード付きダイスを基本に用いて、しわ押さえ力を6ton一定として行った。また、ひずみの測定は、成形前の試験片にスクライブドサークル(直径5mm)を刻印し、成形後の最大ひずみ  $\epsilon_x$  と最小ひずみ  $\epsilon_y$  を測定することにより求めた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 各種材料の成形限界曲線(FLD)

図1は各種材料の成形限界試験によって得られたFLDの平均値をもって代表させ、それらを総括的に示したものである<sup>2)</sup>。

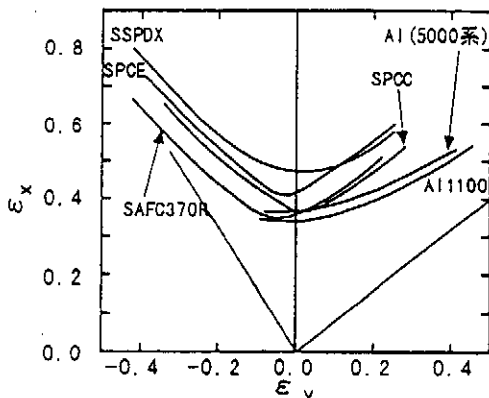


図1 各種材料の成形限界曲線 (FLD)

薄鋼板材料は、グレードの順になっていることが明らかになった。また、Al合金薄板材料は、1軸引張領域でのFLD値が得られなかった。2軸張り出し領域では薄鋼板とAl鋼板との差が明瞭に認められた。

#### 3.2 くびれ発生限界<sup>4)5)</sup>

各種材料の板幅30mmにおける局部ひずみ  $\epsilon_x$  と平均伸びひずみ  $\epsilon_{av}$  の関係を図2に示す<sup>4)</sup>。両者の関係は、成形の途中まで比例関係にあるが、ある平均伸びひずみを越えると急激に局部くびれが増大することが分かる。この点がひずみによるくびれ発生点であると考えられる。このことは板幅の広いものに関しても同様な結果となった。

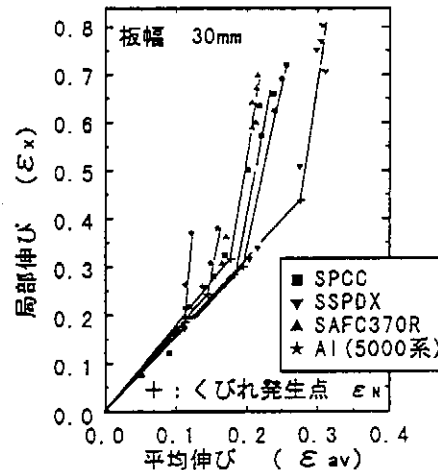


図2 成形過程におけるくびれ発生点の局部ひずみ(板幅30mm)

図2により求めたくびれ発生限界点による限界線をFLDに併せて示したものを図3、図4に示す。図3は鉄鋼材料、図4はAl材料のものである。図中の破線がくびれ発生限界線であり、Hill-Swiftの塑性不安定理論による局部くびれ、拡散くびれの計算値を  $\epsilon_{xl}$ 、 $\epsilon_{xd}$  とし示した。くびれ発生限界線は拡散くびれに類似しており、理論値よりやや上に位置した。

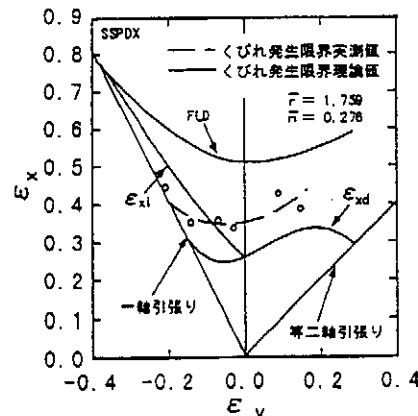


図3 SSPDX材のくびれ限界線と粗さ限界線

Al 材料の場合、 $n$  値が大きいため理論値が実験値より大きくなる結果となった。Al 材料については検討が必要であると思われる。

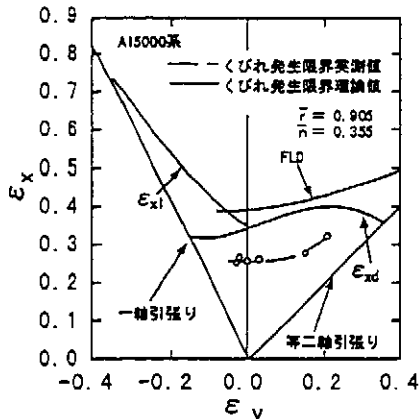


図4 Al5000系材のくびれ限界線と粗さ限界線

### 3.3 加工硬化特性のひずみ依存性<sup>6)</sup>

一般に加工硬化指数  $n$  値は、一様変形領域の応力ひずみ線図により求められる。しかし、薄板の成形限界条件などを扱う場合、高ひずみ領域での  $n$  値についても検討する必要がある。そこで、高ひずみ領域での  $n$  値を求める実験を行った。1 軸引張試験片に 2mm の格子を刻印し、荷重不安定点以降 10 段階程度に成形を進め、段階ごとの変形ひずみと荷重を測定することにより  $n$  値を求めた。図 5 に高ひずみ領域の  $n$  値の測定結果を示す。また、図 6 に試験後の引張試験片写真を示す。

荷重不安定点を超えた  $n$  値は鉄鋼材料では急激な増加傾向を、Al5000 系材料では減少する傾向を示した。これら高ひずみ領域の  $n$  値を次のように定義し、FLD およびひずみによるくびれ限界との比較を行った。高ひずみ領域での平均  $n$  値を  $\bar{n}^*$ 、荷重不安定点での  $n$  値を  $n^{*max}$ 、高ひずみ領域での最大、最小  $n$  値(Al5000 系)を  $n^{*max}$ 、 $n^{*min}$  とした。表 2 に高ひずみ領域における各  $n$  値を示す。

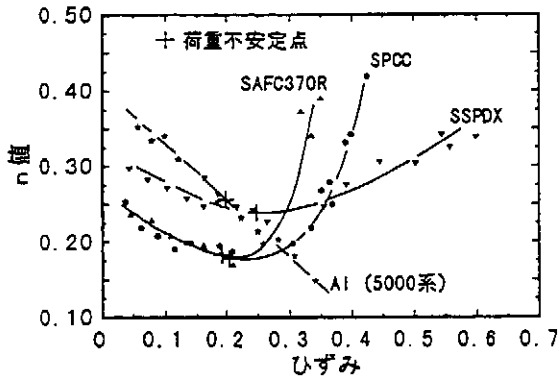


図5 高ひずみ領域における  $n$  値とひずみの関係

表2 高ひずみ領域における各  $n$  値

	$\bar{n}$	$\bar{n}^*$	$n_{max}^*(n_{min}^*)$
SPCC	0.219	0.267	0.391
SSPDX	0.276	0.316	0.344
SAFC370R	0.223	0.277	0.418
Al(5000系)	0.355	0.266	0.15

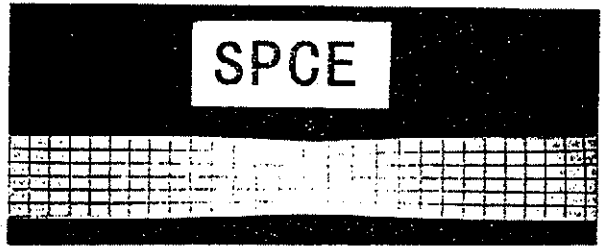


図6 高ひずみ領域の  $n$  値を求めた引張試験片

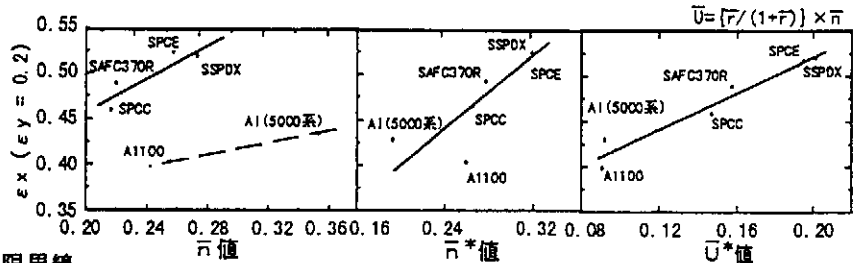


図7 成形限界曲線 FLD 値 ( $\epsilon_x$ ) と  $\bar{n}$  値、 $\bar{n}^{**}$  値および  $\bar{U}^*$  値の関係

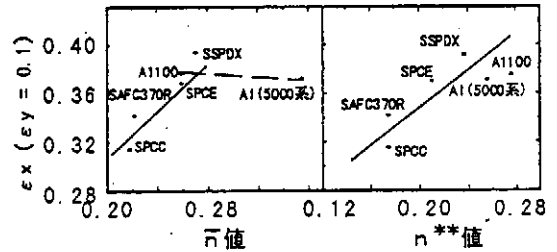


図8 くびれ発生限界値 ( $\epsilon_x$ ) と  $\bar{n}$  値、 $\bar{n}^{**}$  値の関係

図 7 に 2 軸張り出し領域における FLD 値 ( $\epsilon_y=0.2$  に対する  $\epsilon_x$  値) と通常の  $n$  値および高ひずみ領域の  $\bar{n}^*$  値、 $\bar{U}^*$  値 ( $n^*$  と  $r$  値の複合特性値) との比較を示す。通常の  $n$  値の場合、鉄鋼材料と Al 合金材料、それぞれの直線的な関係は存在するものの、統一的な関係は得られていない。しかし、 $\bar{n}^*$  および  $\bar{U}^*$  の場合は両者の間で統一的な関係を表示することができる。同様に図 8 にひずみによるくびれ発生限界値と通常の  $n$  値および高ひずみ領域の  $\bar{n}^{**}$  との比較を示す。FLD との関係同様、通常の  $n$  値では統一的な関係は得られなかったが、くびれ発生開始点である  $\bar{n}^{**}$  値との関係の場合には両材料に統一的な関係が得られることが分かった。

### 4. 結言

- 1) 薄鋼板、高張力鋼板、および Al 合金薄板材料の変形経路と成形限界曲線図 (FLD) を明らかにした。
- 2) 1 軸引張試験により高ひずみ領域におけるひずみ依存性が明らかとなり、材料によってその特性は非常に異なることが分かった。
- 3) FLD およびくびれ限界の限界ひずみと通常の機械的性質との間には鋼板と Al 合金材料を含めた統一的な関係は得られなかった。しかし、高ひずみ領域の  $n^*$  値との場合には両材料の統一的な関係が得られた。

### 参考文献

- 1) 中島、菊間、蓮香：製鉄研究、14-415 (1968)、8414
- 2) 伊藤：第 173 回塑性加工シンポジウム、(1997)、31
- 3) 田中、願、中島：平成 9 年度春季塑性加工論文集、31
- 4) 石垣：塑性と加工、15-158 (1974-3)、197
- 5) 山口：塑性と加工、21-231 (1980-4)、315
- 6) 後藤：日本機械学会論文集 (A 編)、50-458 (1984)、1753

## II 薄板材料のプレス成形における成形限界FLDの理論解析 (後藤理論)

### 1. 研究の目的と背景

近年、地球環境問題等の社会的要請からプレス成形の高強度化、一体成形化、アルミニウム合金等の使用による軽量化が暫時増加しつつある。プレス成形における破断現象は、決定的な製品不良につながるものであり<sup>2)</sup>、これらの不良現象が生じない成形可能な限界を明らかにする必要がある。そこで、薄鋼板、高張力鋼板、Al合金薄板の各種材料を用いて、1軸引張条件から等2軸張り出し条件までの2軸応力下における材料別の成形限界曲線(FLD)<sup>4)</sup>および表面の肌荒れ変化による粗さ限界曲線(NLD)<sup>4)</sup>を明らかにした。さらに、高ひずみ領域の加工硬化指数  $n$  値を求め、後藤理論<sup>5)</sup>に適用し、FLDとの比較を行った。

### 2. 供試材および実験方法

供試材は、薄鋼板(SPCC、SPCE、SSPDX)、高張力鋼板(SAFC370R)、Al合金薄板(A1100、5000系)の計6種を用い、圧延方向に対し  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  の各3方向から採取した。試験片は、幅  $30 \sim 120\text{mm}$  ( $30, 40, 60, 80, 92, 100, 108, 120$ )  $\times$  長さ  $165\text{mm}$  の8種類を用いた<sup>4)</sup>。それらの機械的性質の平均値を表1に示す。

表1 供試材の機械的性質(平均値)

材料	Y.P. [MPa]	T.S. [MPa]	T.El. [%]	R値	r値	U値
SPCC	200	342	34	0.219	1.243	0.12
SPCE	161	312	40	0.26	1.547	0.16
SSPDX	126	279	47	0.278	1.759	0.18
SAFC370R	218	380	33	0.223	1.292	0.13
A1100	32	96	34	0.259	0.548	0.09
Al(5000系)	105	280	27	0.355	0.905	0.17

実験は10ton深絞り試験装置にて、 $\phi 80$ 球頭ポンチ、ビード付きダイスを基本に用いて(粗さ限界を求める際には平頭ポンチ  $\phi 62$  を使用)、しわ押さえ力を6ton一定として行った。また、ひずみの測定には、成形前の試験片にスクライブドサークル(直径5mm)を刻印し、成形後にこれを測定することにより求めた。また、粗さ限界を求める測定には触針式粗さ測定機を使用した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 各種材料の粗さ限界線(NLD)<sup>4)</sup>

図1に各種材料の板幅32mmにおける肌荒れ高さ  $R_{max}$  と最大ひずみ  $\epsilon_x$  の関係を示す。 $R_{max}$  は、成形が進むにつれて一定の勾配で増加し、ある最大ひずみを越えると急激に増大している。この点が肌荒れによる粗さ限界点であると考えられる。図1より成形が進むに従って表面の粗さが増加していくことは明らかであり、板面上の凹凸を板厚の変化として考えると、その板材には板厚の不均一が生じる。凸部の厚さを  $t_A$ 、凹部の厚さを  $t_B$  とすると表裏の粗さを考慮して  $t_B$  は次式で近似できる。

$$t_B = t_A - 2R_{max} \quad (1)$$

そして板厚の不均一さ  $f_r$  を次式で示した。<sup>6)</sup>

$$f_r = (t_B / t_A) = 1 - (2R_{max} / t_A) \quad (2)$$

図2は板厚の不均一さと相当ひずみの関係を示す。相当ひずみは異方性理論において次式により算出した。

$$\bar{\epsilon} = \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \sqrt{\epsilon_x^2 + \frac{2r}{1+r} \epsilon_x \epsilon_y + \epsilon_y^2} \quad (3)$$

$f_r=1$  は板材に粗さが全く存在しないことを示し、小さくなるほど不均一さが大きくなることを意味している。板厚の不均一さはひずみに対して緩やかに進展し始め、一定の傾きを保ちながら進んでいき、粗さ限界点から急激な進展を示している。図3にSSPDX材のFLDと試験片幅  $30 \sim 120\text{mm}$  における変形経路<sup>4)</sup>、図1より求めた粗さ限界線を示す。各変形経路はほぼ直線的にFLDに至っており、単純変形経路であることが確認できる。また、粗さ限界線はFLDに非常に類似した形となり、拡散くびれ発生後の局部くびれに相当するものと考えられる。また、図2よりくびれ発生点での不均一さを併せて示した。張り出し領域に近づくにつれ粗さ限界における板厚の不均一さは減少していることが分かった。

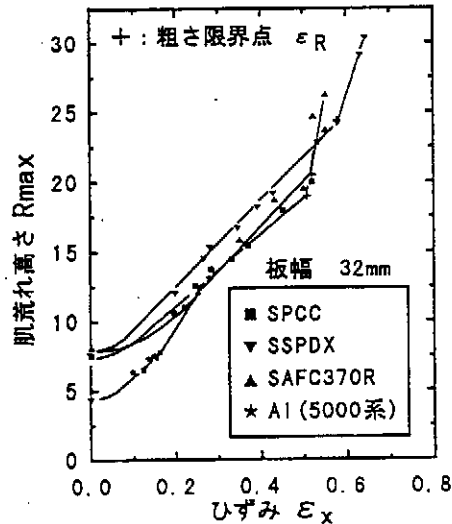


図1 肌荒れ高さ ( $R_{max}$ ) と最大ひずみ  $\epsilon_x$  との関係 (板幅32mm)

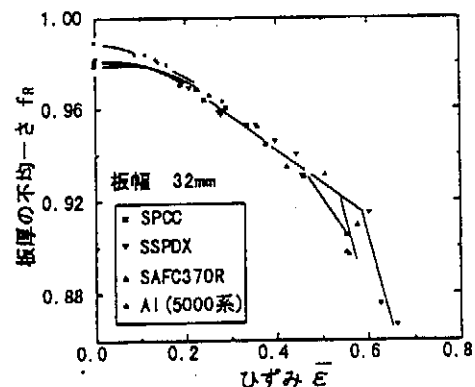


図2 肌荒れによる板厚の不均一さの進展 (幅32mm)

#### 3.2 加工硬化特性のひずみ依存性

薄板の成形限界条件などを扱う場合、一般の加工硬化指数  $n$  値だけでなく高ひずみ領域での  $n$  値についても検討する必要がある。そこで、高ひずみ領域での  $n$  値を求める実験を行った結果、加工硬化特性のひずみ依存性が明らかとなった。高ひずみ領域での平均  $n$  値を  $n^*$ 、荷

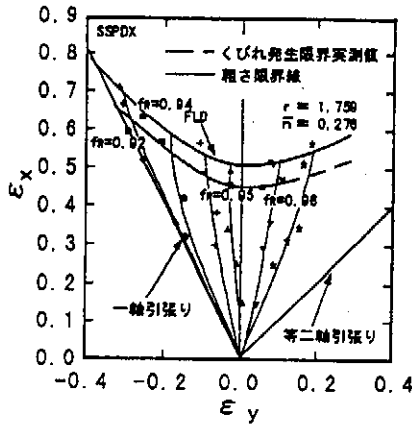


図3 SSPDX材のくびれ限界線と変形経路

重不安定点での  $n$  値を  $n^{**}$ 、高ひずみ領域での最大、最小  $n$  値を  $n^{*max}$ 、 $n^{*min}$  として高ひずみ領域の  $n$  値について検討した。表2に各高ひずみ領域の  $n$  値を示す。

表2 高ひずみ領域における各  $n$  値

	$\bar{n}$	$n^{**}$	$n^{*max}(n^{*min})$
SPCC	0.219	0.267	0.391
SSPDX	0.276	0.316	0.344
SAFC370R	0.223	0.277	0.418
Al(5000系)	0.355	0.266	0.15

### 3.3 成形限界曲線 FLD と後藤理論との比較<sup>6)</sup>

3.2で求めた高ひずみ領域での各  $n$  値を用いて後藤理論による理論計算<sup>6)</sup>を行い、実験により求めた FLD との比較を行った。図4に SPCC 材における通常の  $n$  値を用いた後藤理論および S-R 理論の計算結果を示す。図中の(1)は S-R 理論、(2)、(3)は後藤理論によるものであり、(2)は2次異方性、(3)は負荷面の尖り角を考慮したものである。また、破線は菊間による1mmゲージでの FLD に相当するものである。後藤理論による(3)の結果が最も FLD に類似することが分かった。しかし、平面ひずみ領域での値が低いため、全体的に低めの結果となった。

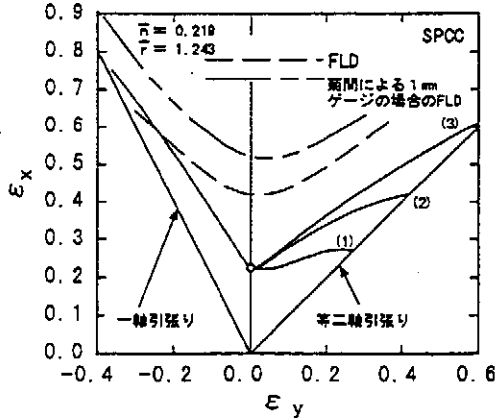


図4 SPCC材の成形限界理論(計算値)と実験値との比較(通常の平均  $\bar{n}$  値)

次に、高ひずみ領域での平均  $\bar{n}$  値を用いた計算結果を図5に示す。(3)の結果は、通常の  $n$  値に比べ、より FLD に近づく結果となった。さらに、図6に示すように、高ひずみ領域での最大  $n^{*max}$  を使用するとほぼ FLD と一致する良好な結果となった。

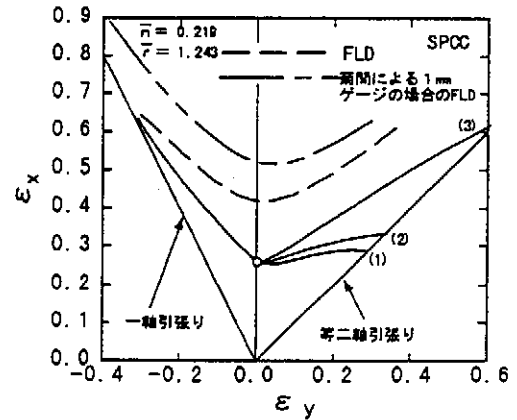


図5 SPCC材の成形限界理論(計算値)と実験値との比較(高ひずみ領域の平均  $\bar{n}$  値)

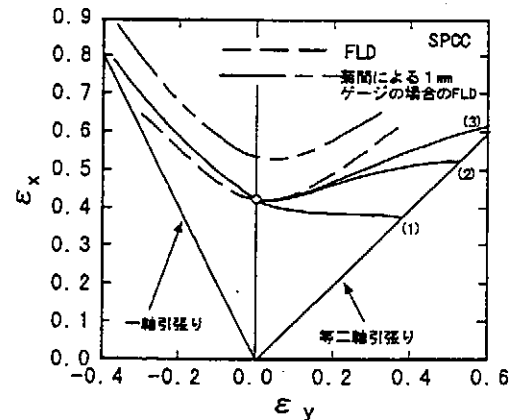


図6 SPCC材の成形限界理論(計算値)と実験値との比較(高ひずみ領域での最大  $n^{*max}$  値)

## 4. 結言

- 1) 薄鋼板、高強度鋼板、および Al 合金薄板材料の変形経路と成形限界曲線図 (FLD) を明らかにした。
- 2) 成形過程における肌荒れ現象を追跡し、粗さ限界線を明らかにした。また、ひずみ比の変化に伴い板厚の不均一さは変化することが分かった。
- 3) 後藤による FLD 予測は負荷面の尖り角と高ひずみ領域の  $n$  値を考慮すると良好な結果が得られることが分かった。

## 参考文献

- 1) 中島、菊間、蓮香：製鉄研究、14-415(1968)、8414
- 2) 伊藤：第173回塑性加工シンポジウム、(1997)、31
- 3) 田中、顧、中島：平成9年度春季塑性加工論文集、31
- 4) 石垣：塑性と加工、15-158(1974-3)、197
- 5) 山口：塑性と加工、21-231(1980-4)、315
- 6) 吉田、白田：塑性と加工、11-116(1970-9)、670

### III 薄板材料のプレス成形におけるしわの発生・消滅に関する成形限界特性

#### 1 研究の目的と背景

薄板材料のプレス成形について、成形の限界となる現象には、破断現象と形状不良発生現象は典型的なものである。形状不良現象の中で取り分け「しわの発生」は成形形状や成形条件などの影響を受け、解決するのに厄介な課題である。しわ発生の実験の最も単純な方法として、吉田らはYBT法と呼ばれている1軸引張り応力によって、しわ発生を再現する方法を開発し提案している。また、松居らはこれらをさらに発展させて2軸方向引張り応力付加条件によるしわ発生シミュレーション研究を行っている。

本研究においては、YBT法によって予めしわを発生させておいて、それを平頭パンチを用いた二次成形によって、しわの消滅挙動を明かにすることとした。

#### 2 実験方法

##### 2.1 しわ発生の実験方法

1次成形実験としてはYBT法によって、図1に示すような正四角形板を対角方向に引張って、試験片に発生するしわの挙動を調べた。試験片のつかみ幅Dは40mmである。試験片の伸び量を評点間距離XY軸(G, L=75mm)の変化をコンパレータで測定し、平均伸びを求めた。発生したしわ高さは脚幅20mmの曲率計で測定した。したがって、しわ高さの測定値は、20mm幅に対する $h_{20}$ で表した。

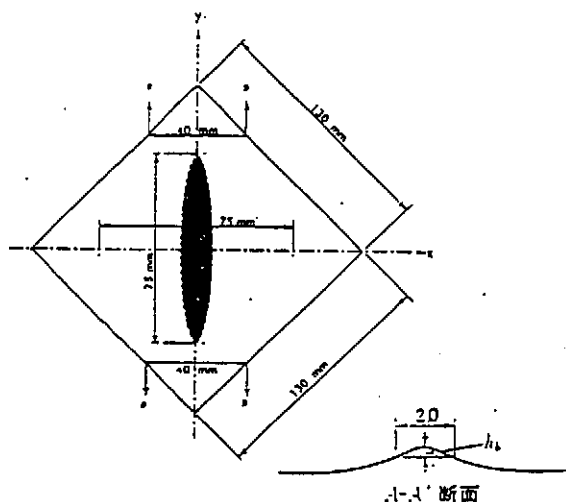


図1 試験片の寸法と形状

##### 2.2 二次成形の実験方法

しわ消滅特性を求めめるため、写真1に示すように、しわが発生した試験片を幅100mmと60mmに切断後、平頭パンチによる二次成形実験を行い、しわの成長・消滅挙動を調べた。

##### 2.3 供試材

表1に供試材の機械的性質を示すように、板厚0.8mmの薄鋼板4種類と板厚0.8mmおよび1.0mmのアルミ合金薄板5種類を用い、試験片の対角方向が板の圧延方向に対して45°方向になるように採取した。

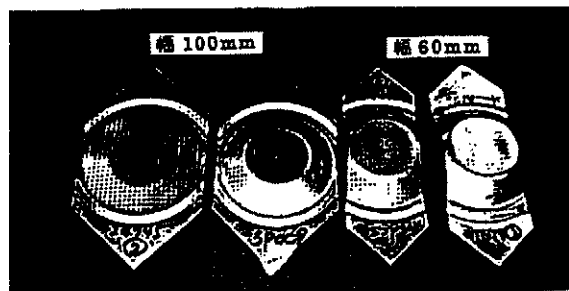


写真1 二次成形によるしわ消滅実験

表1 供試材料の機械的性質

材質	降伏耐力 $\sigma_y$ (MPa)	引張強さ $T_s$ (MPa)	全伸び (%)	n値	r値
SAFC	220.31	378.95	32.00	0.23	1.40
SPCC	203.41	340.33	31.00	0.22	1.26
SPCE	157.70	305.78	38.00	0.26	1.46
SSPDX	126.77	273.71	46.00	0.26	1.81
1000系	39.83	97.18	30.49	0.22	0.69
5000系(A)	98.58	270.17	29.02	0.23	0.70
5000系(B)	107.65	273.62	29.34	0.20	0.72
5000系(C)	98.85	254.87	27.00	0.36	0.92
6000系	157.02	252.14	22.94	0.12	0.52

\* 全ての値は45°方向の値を採用した

#### 3. 実験結果

##### 3.1 YBT法によるしわ発生特性

YBT法によるしわ高さ $h_{20}$ と伸び量 $\lambda_{75}$ との関係を図2に示すように、薄鋼板、アルミ合金薄板ともに、伸び量の増加によってしわ高さはわずかに増大する。また、ある一定量の伸びを与えると急激にしわ高さが増大することを示している。

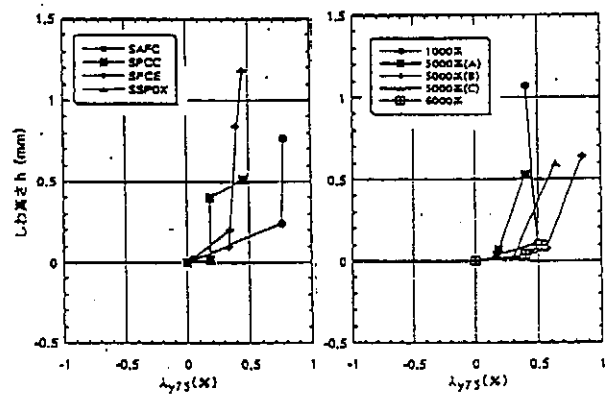


図2 YBT法によるしわ発生・成長

##### 3.2 二次成形によるしわ消滅特性

YBT法によるしわ発生試験片の幅を100mmと60mmに切断し、二次成形実験を行った。図3に示したように、幅が100mmの場合の二次成形によるしわ高さは、成形高さの増加とともに減少し、やがて消滅することを示している。なお、二次成形次のビード付きしわ押さえによって、初期のしわ高さ $h_{20}$ は、ある程度減少することがわかる。

しわ発生試験片の幅60mm材は、二次成形過程で成形高さが増大するとしわは一旦消滅するが、さらに成形を続けると、再び逆方向の二次しわが発生した。これらのしわ消滅・発生挙動を図4に示すように、B点は二次成形によ

てしわの消滅点である。さらに成形が進行すると逆方向のしわが発生し、C点でしわ高さは最大に達してから、再び二次成形が進むとD点でしわは消滅する。

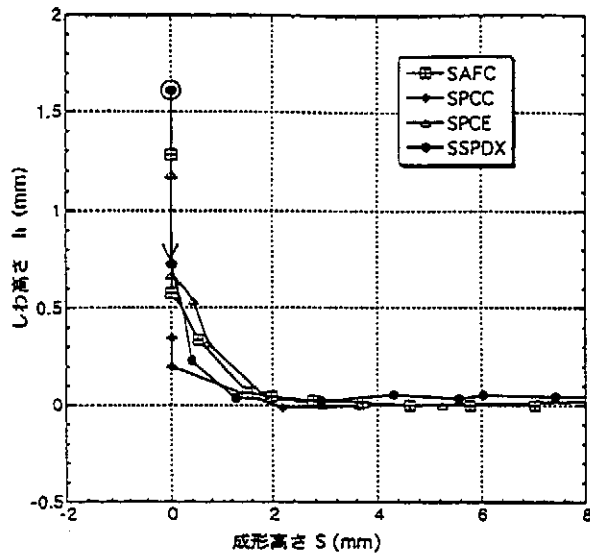


図3 二次成形によるしわの消滅特性 (幅 100mm)

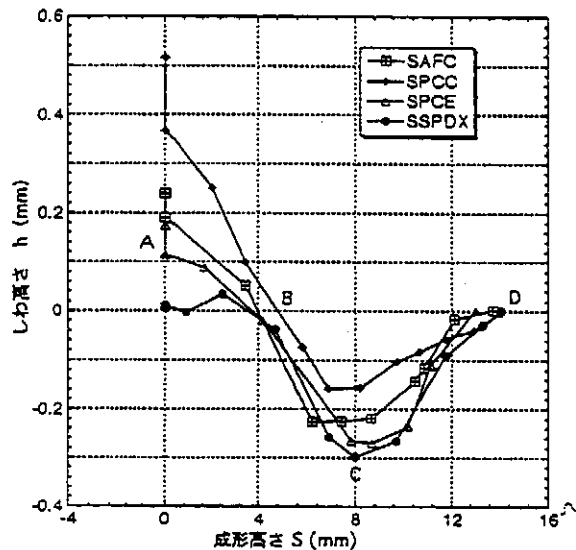


図4 二次しわの発生・消滅特性 (幅 60mm)

#### 4. しわ成形限界特性に関する考察

##### 4.1 しわ消滅特性と機械的性質との関係

しわ高さと材料特性の密接な相関関係を認められ、しわ高さは $n$ 値および降伏応力に依存するといわれている。本実験は、二次成形によって、しわ高さと $h_{20}$ が成形進行とともに減少していく特性を、しわ消滅勾配係数 ( $dh/ds$ ) として表した。ここで、しわ消滅勾配係数と各種材料の機械的性質との関係を調べると、 $(n/\sigma_y)$  値との相関関係がえられ、それをまとめて図5に示した。また、試験片のY軸方向が45°方向となるように採用しているため、すべての材料特性値は45°方向の平均値を用いた。

図5に示したように、両者の間により相関関係がえられたこのことから、しわ発生を抑制するために好ましい材料特性としては、降伏耐力 $\sigma_y$ は低く、加工硬化指数 $n$ 値が大きいほど好ましいといえる。

##### 4.2 しわ発生・消滅に関する成形限界図の試み

挫屈現象によるしわ発生問題は、成形過程の破断限界等

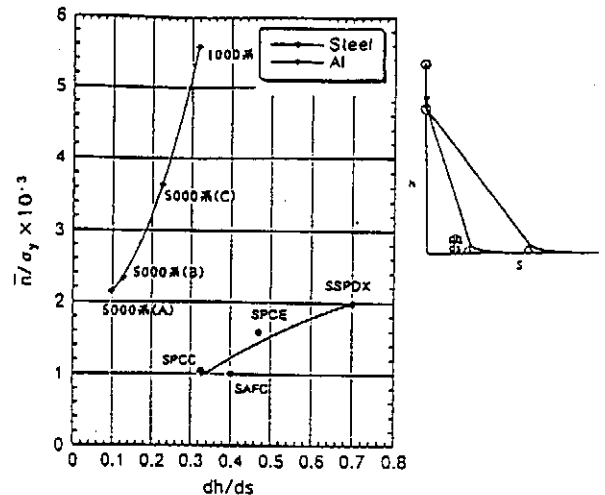


図5 しわ高さと材料特性の関係

の同一面内における局所的な変形ひずみとは異なり、広い範囲にわたり同一面内から飛び出した現象である。それゆえ、古林らの提案している材料移動率比 $\alpha (= \epsilon_x / \epsilon_y)$ の概念を用いて、しわ成形限界図の作成について検討した。通常のFLDで取り扱うひずみ比とは異なった概念である。

本実験のしわ発生時と二次成形におけるX、Y方向の材料移動率 $\epsilon_x$ と $\epsilon_y$ に無次元化して、両者の関係を整理すると、図6が得られた。ここで、X、Y方向の $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$ ともに成形過程のプルーフィル長さ変化から求めたもので、平均縮み、平均伸びひずみに相当している。この図の関係から、しわは二次成形が開始されると、次第にX、Y方向ともに伸び変形パターンとなって変形が進むことがわかる。さらに、成形が進むとしわが消滅する。しわが消滅しても、材料移動率 $\epsilon_x$ と $\epsilon_y$ は、同じ変形経路上で増大することがわかる。これは、しわ成形限界の変形経路といえるであろう。

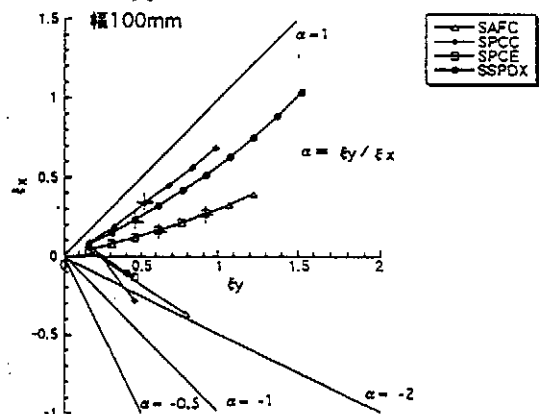


図6 X-Y方向の材料移動率によるしわ消滅と変形経路

#### 5. 結論

YBT法によるしわ発生試験片を使用して、二次成形によるしわの消滅特性、および二次しわの発生・成長・消滅特性を明らかにした。薄鋼板、およびAl合金材料の機械的性質 ( $n$ 値と降伏耐力 $\sigma_y$ ) としわの消滅特性との間に密接な関係があることが確認された。

#### 参考文献

- 1) 吉田清太: 塑性と加工 24-272, (1983) P. 901
- 2) 松居正夫, 岩田徳利: 塑性と加工 24-275, (1983) P. 1268