

# 第6回金属加工国際会議

京都大学 工学部 資源工学科

助教授 宅田裕彦

(平成7年度国際会議等参加助成 AF-95049)

1. 開催日：1996年6月23日～26日
2. 開催場所：ポーランド国、クラクフ市
3. 国際会議報告：

本研究では、有限要素シミュレーションにおいて延性破壊条件式を導入して、積層板成形における成形限界、すなわち破壊発生の予測を行えるようにすることを目的とした。有限要素シミュレーションから得られる積層板各層の応力・ひずみ分布を用いて延性破壊条件式の積分値を計算し、それが一定値以上になるとその層は破壊したものと見做し成形限界を求める。軟鋼板と種々のアルミニウム合金板の組み合わせによる積層板の深絞り加工に本方法を適用し、成形限界を予測し、その妥当性を実験結果との比較によって検証した。

### 3.1 延性破壊条件式

従来板材成形ではくびれの発生から成形限界が予測されていたが、本研究では延性破壊条件式を適用して、より広い範囲での成形限界を予測する。

種々の延性破壊理論に基づいて、これまで数多くの延性破壊条件式が提案されているが、簡易な表現で与えられており、すでに冷間鍛造や押し出しなどに適用され、信頼性も高い大矢根の条件式、

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left( \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} + a \right) d\bar{\epsilon} = b \quad (1)$$

を本研究では用いている。ここで、 $\bar{\epsilon}_f$ は破壊が生じた部分の相当ひずみ、 $\sigma_m$ は静水圧応力、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 $\bar{\epsilon}$ は相当ひずみ、 $a$ および $b$ は材料定数である。

式(1)の $a$ および $b$ の値を決定するためには最低2種類の応力状態における破壊試験を行う必要があるが、本研究では一軸引張試験と平面ひずみ引張試験での破断ひずみから算出する方法を採用している。

本報で取り扱う積層板を構成する材料は、厚さ1.0mmの3種類のアルミニウム合金板(A1100-O、A2024-T4およびA5052-O)と厚さ0.3mmの軟鋼板(SPCC)である。

それぞれの単層板の引張試験から得られた各材料の引張特性値(3方向の平均値)をTable 1に、定数 $a$ および $b$ をTable 2に示す。

### 3.2 積層板の深絞り試験およびシミュレーション方法

上記の軟鋼板と3種類のアルミニウム合金板をポリウレタン系樹脂接着剤を介してロール圧着した2層および3層の計6種類の積層板(Fig. 1)を用いた。積層板の断面を顕微鏡観察することによって、圧着による軟鋼板およびアルミニウム合金板の厚さの変化、すなわち塑性変形はないことを確認している。また、樹脂層の厚さは10~30 $\mu$ mであった。

これらの積層板から、1mm間隔で種々の径の円形ブランクを用意し、平底ポンチを用いた平面ダイス円筒深絞り試験を行った。ポンチ径は40mm、ポンチ肩半径は4mmである。2層および3層の積層板に対して、それぞれ径43mmおよび44mmのダイスを用いた。ダイス肩半径はいずれも8mmである。積層板の両面にワックスをスプレー塗布して潤滑し、しわ押え力はSiebelの式で与え、試験中一定とした。なお、Siebelの式に必要な板の引張強さには、積層板の一軸引張試験によって求めたTable 3の値を用いた。

Table 1 Tensile properties of materials.

	A1100	A2024	A5052	SPCC
F-value ( $\bar{\sigma} = F\bar{\epsilon}^n$ ) /MPa	179	749	401	615
Work-hardening exponent, $n$	0.26	0.19	0.30	0.20
Lankford value, $r$	0.80	0.78	0.72	1.41
Tensile strength /MPa	96	479	202	355

Table 2 Material constants  $a$  and  $b$  in eq.(1).

	A1100	A2024	A5052	SPCC
$a$	0.33	0.61	0.30	0.057
$b$	0.42	0.18	0.28	0.29

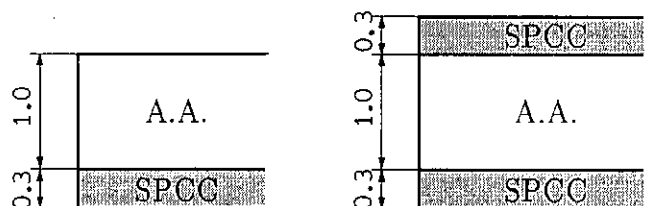


Fig. 1 Laminated sheets composed of SPCC and aluminium alloys, A.A..

Table 3 Tensile strengths of laminated sheets composed of SPCC and aluminium alloys, A.A. (MPa).

	A1100	A2024	A5052
2-ply (SPCC/A.A.)	154	443	236
3-ply (SPCC/A.A./SPCC)	187	425	254

有限要素シミュレーションでは、材料に板面異方性はないものとして軸対称問題とし、Hillの異方性降伏条件式にわずかな圧縮性を許容した降伏条件式、

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2(2+r)} \{r(\sigma_R - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_Z)^2 + (\sigma_Z - \sigma_R)^2\} + 3r^2 k_Z^2 + g \left\{ \frac{1}{1+2r} (r\sigma_R + r\sigma_\theta + \sigma_Z) \right\}^2} \quad (2)$$

を基礎式とした剛塑性有限要素法を用いた。ここで、 $g$ は小さな正の値である。積層板の取り扱いに関しては、本シミュレーションではソリッド要素を用いており、板厚方向にも要素分割を行っているので、積層板の各層に応じて異なった材料特性値を与えることができる。また、樹脂層の存在は無視し、接着面での各層のすべりはしないものとした。なお、工具と材料の間の摩擦係数 $\mu$ は0.05と仮定した。

さて、本解析では、前述の大矢根の条件式に基づいて材料の延性破壊を考慮するため、Table 2の $a$ および $b$ と、有限要素解析中に求まる各変形ステップでの $\sigma_m$ 、 $\bar{\sigma}$ および $d\bar{\epsilon}$ から、各要素についてつぎの積分値 $I$ 、

$$I = \frac{1}{b} \int_0^{\bar{\epsilon}} \left( \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} + a \right) d\bar{\epsilon} \quad (3)$$

を計算し、変形に伴うその変化を追跡した。積分値 $I$ が1に達した要素は、破壊の条件を満たしたことになる。

### 3.3 計算および実験結果

Fig. 2は、ブランク径 $d = 86\text{mm}$ で、A1100を中心材とする3層の積層板の深絞り計算結果を示すものである。図(a)ではポンチストローク $s$ の増加に伴う積層板断面形状の変化の様子を示している。ポンチ肩部にくびれが発生し、局部的に板厚が減少して変形が集中していき、これは成形限界を越えた加工であることがわかる。一方、図(b)は破壊の条件式(3)の積分値 $I$ の分布の推移を示す。横軸は板の中心からの初期の半径方向位置であり、縦軸はその位置での各層の $I$ の値を示している。図中(P)および(D)はそれぞれポンチ側およびダイス側を示す。ポンチ肩部で外側、すなわちダイス側のSPCC層から、やがてすべての層の $I$ の値が1に達しており、積層板全体がポンチ肩部で破断することがわかる。

前報では、比較的延性の高いA1100、A5052およびSPCCの単層板での破断は、ポンチ肩部のくびれによって起こることを述べた。今回の積層板においてもそれらの組み合わせによるものは、ほとんどの場合、ポンチ肩部でのくびれによって積層板全体が破断することが計算および実験結果いずれからも観察された。上記のFig. 2はその一例である。このような場合には、図(a)の板の断面形状の変化だけからくびれの発生は予測できるので、限界ストローク等を問題にしなれば、特に延性破壊条件式を必要としない。

しかし、これらのグループの中で特殊な例として、Fig. 3(a)に示すような積層板の一部だけがポンチ肩部で破断しているものが観察された。Fig. 3(a)は、A5052を

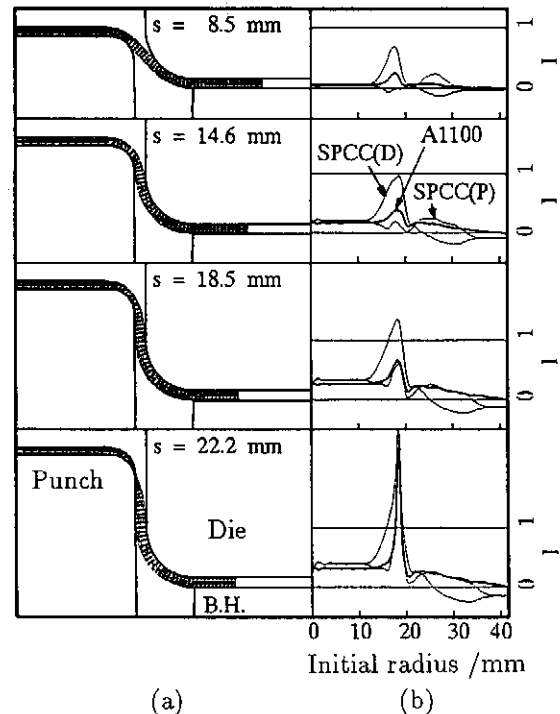


Fig. 2 (a) Deformed meshes and (b) distributions of integral  $I$  (see eq. (3)) in deep drawing calculated for SPCC/A1100/SPCC laminate and  $d = 86\text{mm}$ .

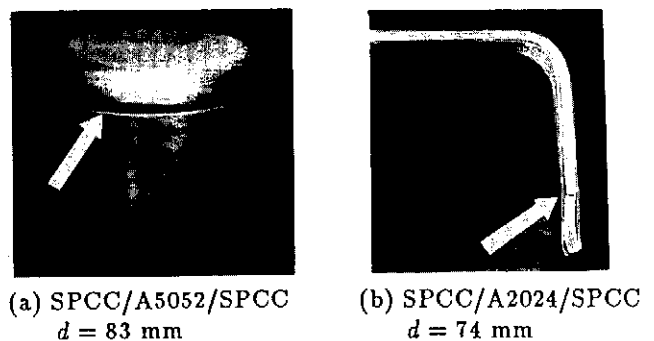


Fig. 3 Experimentally observed fractures.

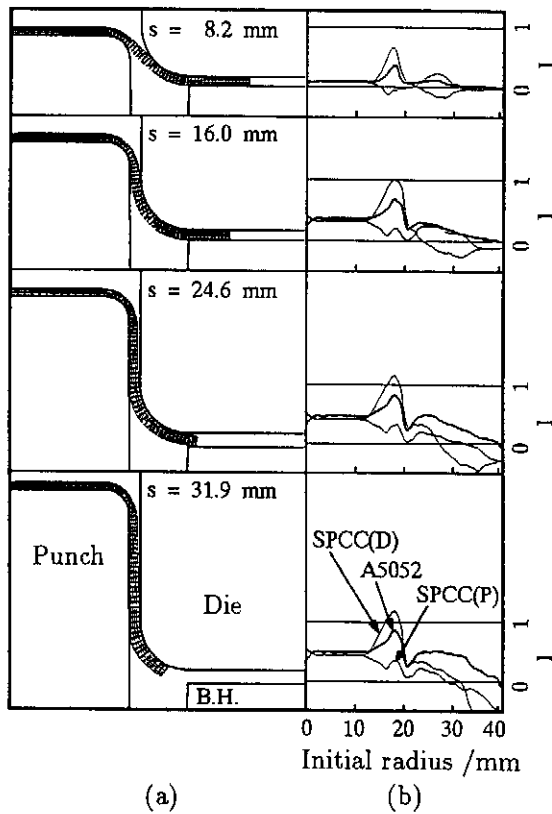


Fig. 4 (a) Deformed meshes and (b) distributions of integral  $I$  for SPCC/A5052/SPCC laminate and  $d = 83\text{mm}$ .

中心材とする3層の積層板 ( $d = 83\text{mm}$ ) の深絞り後の外観である。外側のSPCC層がポンチ肩部で破壊しているが、その他の部分は破壊することなく最後まで絞りきれている。この場合の計算結果をFig. 4に示す。図 (a) からこのような破壊を予測することは困難であるが、図 (b) からはダイス側のSPCC層だけがポンチ肩部で $I$ が1に達していることがわかり、その部分での破壊が予測できる。計算結果はFig. 3 (a) の実験結果とよく対応しており、延性破壊条件式の適用の有効性を示している。ただし、ある部分の $I$ が1に達すると、その部分は破壊するわけであるから、それ以後の計算は新たな境界条件を設けて行わなければならない。すなわち、Fig. 4を例にとると、ダイス側のSPCC層で $I$ が1に達した $s = 16.0\text{mm}$ 以降は、SPCC層に亀裂の入ったような新たな条件で計算を続行しないと、さらに他の部分が破壊するかどうかの判定は厳密にはできない。本報では破壊発生の有無だけを問題にしているため、そのような計算を行っていないことに注意していただきたい。

さて、延性破壊条件式の適用がより有効であるのは、延性の低い材料の破壊予測である。延性の低いA2024の単層板の深絞りでは、限界絞り比を大きく越えるブランク径の場合はポンチ肩部で明瞭なくびれの発生なしに、限界絞り比を少し越える程度のブランク径では側壁部で破壊すること

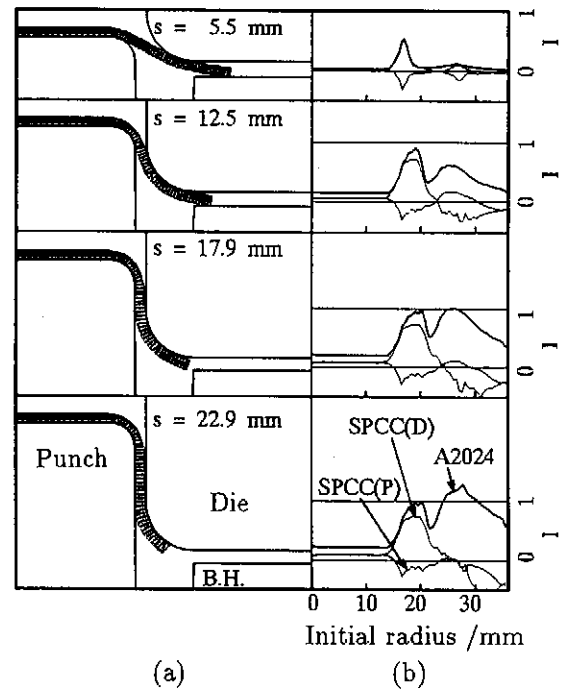


Fig. 5 (a) Deformed meshes and (b) distributions of integral  $I$  for SPCC/A2024/SPCC laminate and  $d = 74\text{mm}$ .

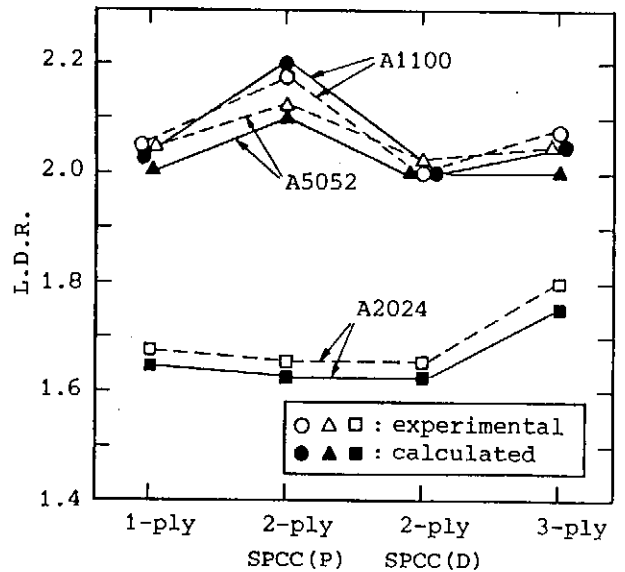


Fig. 6 Comparison between calculated and experimental limiting drawing ratios,  $L.D.R.$ , for various aluminium alloy and laminated sheets.

を前報で示した。特に側壁部での破壊では、破壊部の板厚は初期板厚よりむしろ増加しており、くびれ発生の有無による判定では成形限界は全く予測できない。

A2024とSPCCの組み合わせによる積層板においても、成形限界を決定するのはA2024層の側壁部での破壊であることが、計算および実験結果いずれからも観察された。実験において、A2024層の割れは、2層の場合には外観から観察できるが、3層の場合には材料を切開して断面を観察す

ることによって初めて発見できたものもあった。Fig. 3 (b) がその例で、A2024を中心材とする3層の積層板 ( $d=74\text{mm}$ ) の深絞り後の断面写真である。A2024層の側壁部に割れが発生しているのが観察される。Fig.5 (b) でA2024層においてのみ側壁部で $I$ が1に達していることからわかるように、延性破壊を考慮した計算結果はこのような破壊もよく予測している。

式 (3) の積分値 $I$ の値が1に達するとその部分は破壊するとして決定した、いずれの層にも破壊が生ずることなく絞りきれの限界絞り比  $L.D.R.$  の計算結果を、実験結果と比較してFig. 6に示す。2層の積層板の深絞りではその裏表

によってSPCC層がポンチ側にある場合とダイス側にある場合の2種類ある。前報の単層板の結果も含めて、2層、3層いずれの場合も計算結果は実験結果とよく一致しており、延性破壊条件式の導入は積層板の成形限界予測にも有効であることがわかる。

#### 4. 謝 辞

本国際会議に出席・発表するにあたり、(財) 天田金属加工機械技術振興財団より援助いただいたことをここに記し、深謝いたします。