

# 鋼／アルミニウム系クラッド板のプレス成形性に関する研究

広島大学 工学部 第一類 (機械系)

教授 吉田総仁

(平成3年度研究開発助成 AF-91009)

## 1. はじめに

近年、互いに異なる金属層から成る種々のクラッド板が開発、使用されている。これらのクラッド板はプレス成形において、単一板とは異なる複雑な変形挙動を示すため、従来の単一板に関する知見に基づいてクラッド板の成形性を予測することは困難である。したがって、クラッド板を構成する素材の機械的性質と積層比からクラッド板自体の変形挙動や成形性が予測できるようになれば、クラッド板の開発やそのプレス成形条件の決定に指針を与えることができ、その意義は大きい。しかしながら、クラッド板の成形性に関する基礎的データの蓄積や理論の構築はまだ十分に行われていないのが現状である。

本研究は、クラッド板の成形性を予測する上で重要となるいくつかの基本的な問題を、薄板クラッド板として最も広く使われているステンレス鋼／アルミニウムクラッド板を用いた実験と塑性理論の両面から解明することを目的としている。具体的には、まず第一に最も基本的な問題である二軸平面応力下の成形限界（これは、成形限界線図 [FLD: Forming Limit Diagram] で示されることが多い）について検討した<sup>(1), (2), (3), (4)</sup>。次に、プレス成形時に頻繁にみられる引張曲げ・曲げ戻しにおける変形挙動と破断限界について論じた<sup>(5), (6)</sup>。最後に、スプリングバックや接合界面はく離などの問題についても検討した。

## 2. 二軸平面応力下における成形限界

### 2.1 張り出し実験

まず、クラッド板とその構成素材の二軸平面応力下における成形限界を求めるための張り出し実験を行った。用いた供試材はステンレス鋼とアルミニウムからなる2層 (A1100/SUS430)、および3層 (SUS304/A1100/SUS430) の圧延圧接クラッド板とその構成素材である。その積層構成を図1に、各素材の材料特性を図2に示す。また、試験装置の略図を図3に示す。張り出し実験では、種々のひずみ比のもとで局部くびれ発生限界における面内主ひずみ  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  を求め、これを成形限界ひずみとみなして成形限界線図 (FLD) を得た。また、一部の試験片については張り出しに伴う破断予定部の表面粗さの変化も測定した。

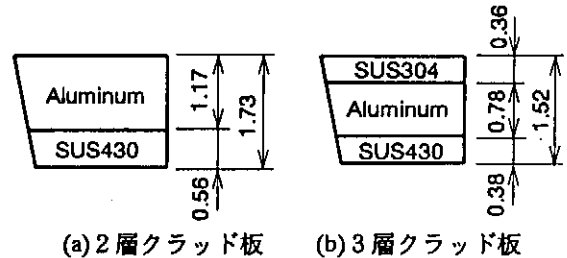


図1 実験に用いた2層および3層クラッド板の積層構成 (単位 mm)

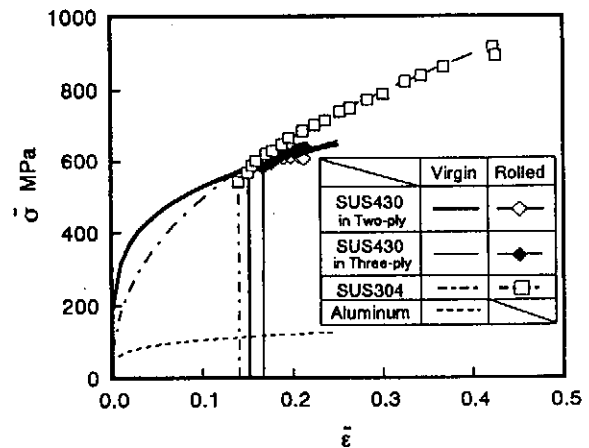


図2 構成素材の相当応力-相当塑性ひずみ曲線

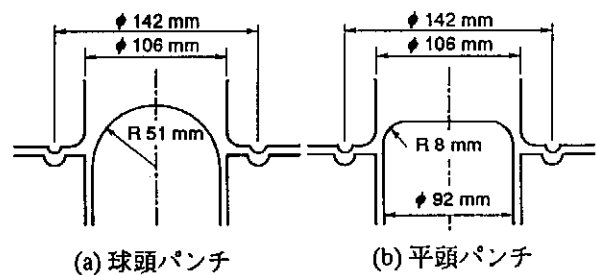


図3 張り出し試験装置の概略図

### 2.2 くびれ発生条件

クラッド板とその構成素材の成形限界について理論的検討を行うために、単一板に対して議論されているくびれ発生条件をクラッド板にも適用できるように拡張した。なお、以下の議論では各層は板厚異方性 (面内等方性) を持つものとし、二軸平面応力状態における比例変形を仮定している。また、くびれに先行する接合界面はく離はないものとしている。

ここでは、ひずみ比  $\beta (= \varepsilon_2 / \varepsilon_1) \leq 0$  の場合にはHillの局部くびれ条件を基礎として、クラッド板の局部くびれ発生条件を導いた。これは、くびれの方向、すなわち伸びが0の方向に直交する方向における最大荷重条件として与えられる(図4)。

$\beta > 0$  の場合には拡散くびれ時点においてわずかな板厚不整が出現し、それが成長して局部くびれに至るといいうゆる修正M-K (Marciniak-Kuczyński) 理論の考え方を基礎とし、新たにくびれ部におけるポイド成長を考慮して、クラッド板の局部くびれ発生条件を導いた。ここで、拡散くびれ条件は、面内二主方向における最大荷重条件として与えられる(図5)。また、M-K理論の力学モデルを図6に示す。試験片破断予定部の表面粗さ測定結果から、M-Kモデルの考え方が妥当であることがわかっている。

以上に述べたクラッド板のくびれ条件式の詳細な説明は省略するが、板厚異方性 ( $r$  値) が互いに異なる層から成るクラッド板についての局部くびれ条件は、本研究において初めて定式化されたものである。

### 2.3 結果と考察

図7にクラッド板と構成素材のFLD(実験結果と計算結果)を示す。図7より、SUS304とアルミニウムの成形限界が高く、SUS430のそれが低いこと、クラッド板の成形限界が各素材の中間に位置することがわかる。つまりSUS430のような成形性の悪い材料も、成形性の良い材料を積層することによって成形限界を向上させることができる。特に3層板ではこの成形限界向上効果が大きい。したがって、成形性向上の手段として積層を行う場合、変形抵抗および加工硬化性の高い材料を積層し、かつその積層比

を大きくとればよいといえる。また、実験によるFLDと計算によるそれを比較すると、両者の定性的傾向は一致している。つまり、計算結果は成形性の悪いSUS430にアルミニウムやSUS304を積層することによって格段に成形性が向上するという重要な特徴をよく表している。

以上の結果から、本研究で提案したクラッド板の局部くびれ条件は妥当なものであるといえる。ただし、拡散くびれ時点で存在すると仮定した板厚不整の形成過程、および等二軸引張り側での限界ひずみを大きく見積もりすぎるといった問題点などが検討課題として残されている。

また、圧延圧接時の予ひずみがクラッド板の成形限界に及ぼす影響についても数値シミュレーションにより検討した。その結果、構成素材の予ひずみが小さくなるとクラッ

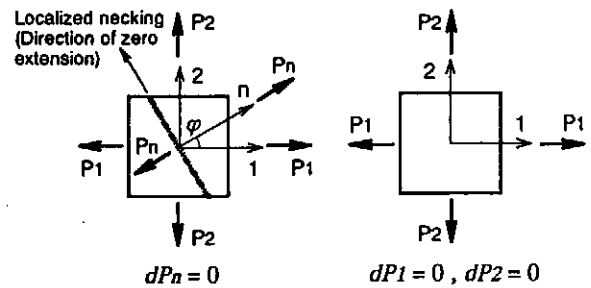


図4 局部くびれ条件

図5 拡散くびれ条件

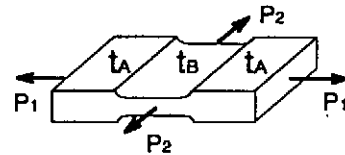
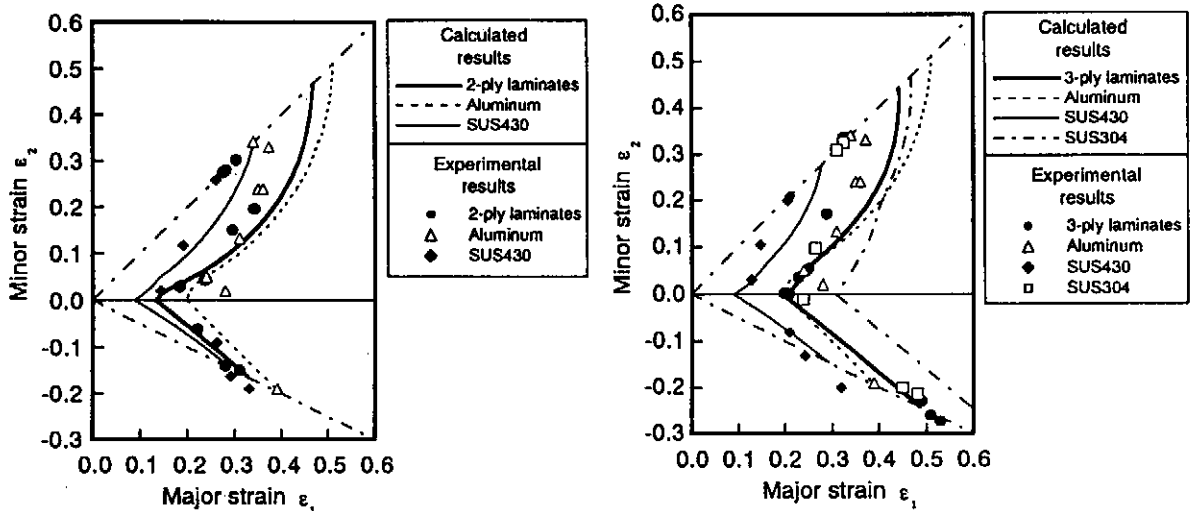


図6 板厚不整をあらわすM-Kモデル



(a) 2層クラッド板とその構成素材

(b) 3層クラッド板とその構成素材

図7 2層および3層クラッド板とその構成素材の成形限界線図(FLD)  
(ポイド成長を考慮した修正M-K理論による計算結果と実験結果の比較)

ド板の成形限界は格段に高くなるのがわかった。したがって、成形性の良いクラッド板を得るには、各層の予ひずみをできるだけ小さくするように圧接条件を制御するとよい。

### 3. 引張曲げ・曲げ戻しにおける変形と破壊

#### 3.1 実験方法

ここでは、クラッド板の引張曲げにおける破断荷重、および引張曲げ・曲げ戻しにおける板厚変化、引き込み抵抗について検討した。実験に用いた供試材は基本的に図1に示したものと同一である。また、図8に著者らが作製した実験装置の略図を示す。帯板状の試験片がダイス肩部に沿って引張曲げ、あるいは引張曲げ・曲げ戻しをうけるようになっている。この装置を用いて引張曲げ破断限界荷重  $F_{max}$ 、連続的な引張曲げ・曲げ戻しにおける板厚変化と引き込み抵抗  $F_D - F_R$  (ダイス出口側荷重  $F_D$  とダイス入口側荷重  $F_R$  の差) を測定した。

#### 3.2 引張曲げ破断条件

単軸引張においては拡散くびれ発生点(最大荷重条件成立点)における荷重が破断限界荷重となることから、引張曲げにおいても同様に最大荷重点が引張曲げ破断限界を与えるものと考え、次のような引張曲げ破断条件を提案した。すなわち、破断する材料要素は、まず一定の初期引張荷重  $F_0$  のもとで曲げられる。曲げ終了後、曲率一定のまま材料の内側表面のひずみ  $\epsilon_{\theta t}$  を増加させることによって引張を加えると、ある点で最大荷重点 ( $dF/d\epsilon_{\theta t} = 0$ ) に達し、破断するものとする。ただし、ダイスとの摩擦の影響は無視する。このように考え、ひずみ増分理論に基づく解析手

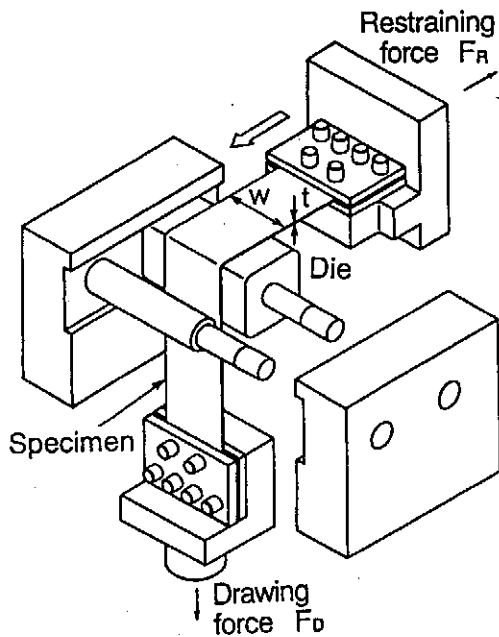
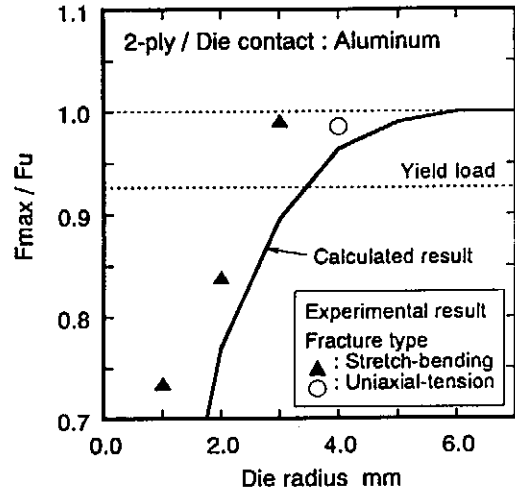


図8 引張曲げ・曲げ戻し実験装置の略図

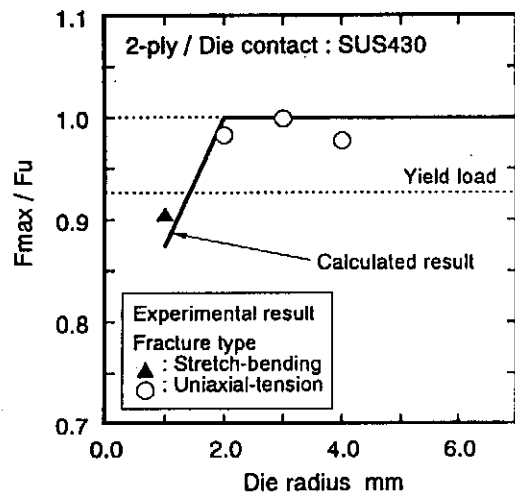
法を応用してクラッド板の引張曲げ破断荷重を求めた。

#### 3.3 結果と考察

図9に2層板の引張曲げ破断実験結果と計算結果を示す。3層板の結果は省略する。図の横軸はダイス肩半径であり、縦軸は破断荷重  $F_{max}$  を単軸引張における破断荷重  $F_U$  ( $F_U = 9310 N$ ) で無次元化した量である。試験片の破断形態は2種類ある。すなわち、ダイス肩の曲げ部で破断する場合と未変形部で単軸引張によって破断する場合である。これらの破断形態はそれぞれプロット記号▲、○によって示してある。ダイス肩半径が大きい場合は曲げを受けていない部分で単軸引張により破断し、ダイス肩半径が小さい場合は曲げ部で破断している。また、引張曲げ破断荷重はダイス肩半径が小さくなると急速に低下する。また、アルミニウム内側の方が、SUS430内側の場合よりも引張曲げ破断荷重が低くなっている。計算結果と実験結果はかなり良い一致を示しており、本研究で提案した引張曲げ

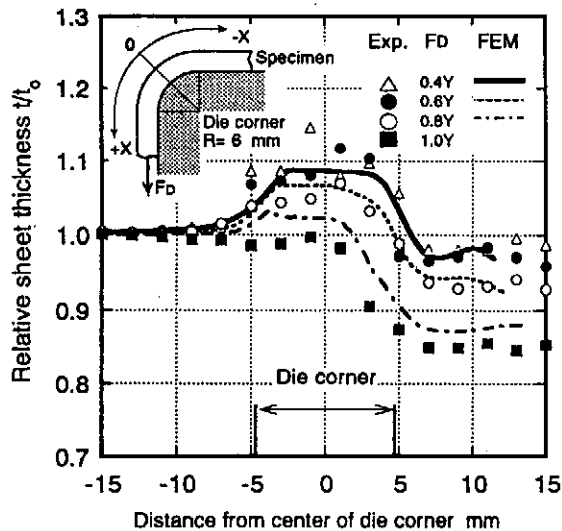


(a) アルミニウム内側の場合

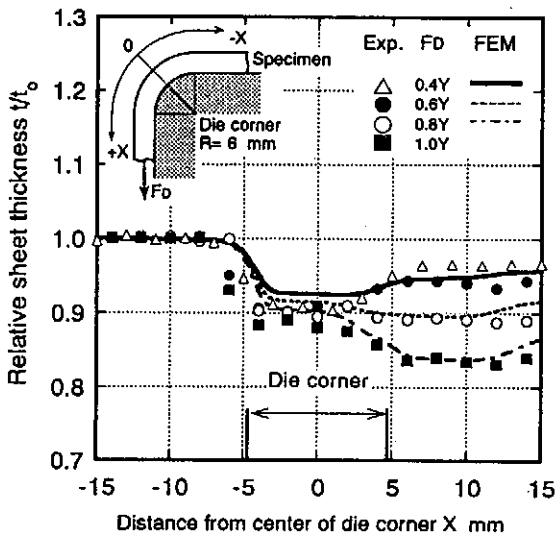


(b) SUS430内側の場合

図9 2層板の引張曲げ破断実験結果と計算結果



(a) アルミニウム内側の場合



(b) SUS430内側の場合

図10 2層板の引張曲げ・曲げ戻しにおける板厚変化

破断条件は、摩擦や荷重勾配の影響が考慮されていないものの、引張曲げ破断限界をよく表していることがわかる。

次に引張曲げ・曲げ戻しにおけるクラッド板の板厚変化挙動を検討する。図10にダイス肩半径を6mmとして引張曲げ・曲げ戻しを行った2層板の無次元板厚分布測定結果と剛塑性有限要素法による計算結果を示す。図の横軸はダイス中心部からの距離を示しており、負の側がダイス入り側、正の側がダイス出側である。アルミニウムをダイス接触側(曲げの内側)にすると、引張荷重が低い場合、曲げ時に板厚が増加した後、曲げ戻し時に板厚が減少している。引張荷重が高い場合、曲げにおいては板厚がほとんど変化せず、曲げ戻し時に板厚が大きく減少している。

逆にダイス接触側をSUS430とすると、引張荷重が低い場合、曲げ時に板厚が大きく減少した後、曲げ戻し時にあ

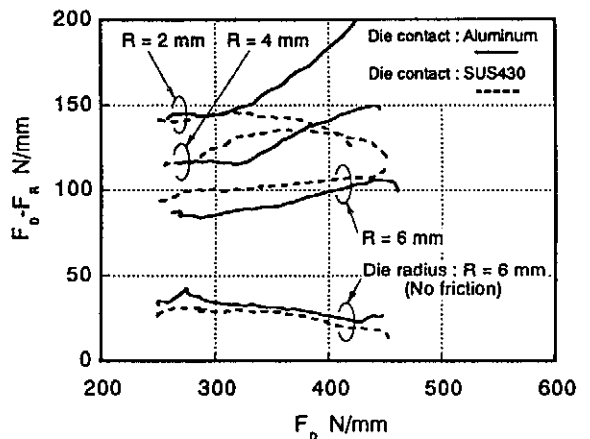


図11 2層クラッド板の引張曲げ・曲げ戻しにおける引き込み抵抗 ( $F_D - F_R$ )

る程度板厚が増加している。一方、引張荷重が高い場合、曲げ・曲げ戻しを通じて板厚が減少している。また、計算結果は実験結果の傾向をよく表している。これらの板厚変化挙動は曲げ・曲げ戻し時の軸方向応力分布や中立軸の位置と関連させて説明できることがわかった。

図11は、2層板の引張曲げ・曲げ戻しにおける引き込み抵抗 ( $F_D - F_R$ ) の実測値を示したものである。ダイス肩半径が小さいほど ( $F_D - F_R$ ) が大きくなっている。また、ダイス肩半径が小さいほど表裏入れ替えによって ( $F_D - F_R$ ) の挙動が大きく異なっている。しかし、肩半径6mmの無摩擦実験では、表裏入れ替えの影響はみられず、荷重  $F_D$  が増加するとともに ( $F_D - F_R$ ) は減少していくことがわかる。つまり、クラッド板の表裏を入れ替えると引き込み抵抗が変化するのは、表裏の材料の摩擦特性が違うためである。

#### 4. その他の成形上の問題

##### 4.1 スプリングバック

クラッド板の引張曲げ後のスプリングバックについて検討した。単一板とは異なり、2層クラッド板では、曲げの最中あるいは曲げ後の引張り力の負荷が必ずしもスプリングバック低減につながらないなどの特異な挙動が明らかとなった。

##### 4.2 接合界面はく離

クラッド板の引張曲げ・曲げ戻し時に接合界面のはく離が起こることがある。そこで、3章で示した引張曲げ・曲げ戻し試験機を用いてステンレス/アルミニウム冷間圧接クラッド板のはく離実験を行った。その結果、界面はく離はダイス接触側をステンレスとした場合のみ発生した。また、圧接時の圧下率が小さい試験片ほどはく離が起こりやすく、はく離はダイス肩半径が小さいほど、引張荷重が高いほど起こりやすいことなどが明らかになった。

## 5. 結 言

本研究ではクラッド板の成形性を予測する上で重要となるいくつかの基本的問題について検討を加え、以下のような結果を得た。

まず、二軸平面応力下におけるステンレス鋼/アルミニウムクラッド板とその構成素材のFLDを実験的に求めた。また、クラッド板の局部くびれ発生条件式を導いた。次にクラッド板の引張曲げにおける破断規準を提案し、引張曲げ破断荷重の予測をしたところ、実験結果との良好な一致を示した。また、クラッド板の引張曲げ・曲げ戻しにおける板厚変化のメカニズムを明らかにするとともに、ダイス肩における引き込み抵抗力の決定機構も明らかにした。さらに、スプリングバックや接合界面はく離の問題についても検討を加えた。

## 6. 文献

- (1) 日野隆太郎、吉田総仁、岡田達夫：平成5年度塑加春講論、(1993), 277.
- (2) 日野隆太郎、吉田総仁、岡田達夫：機講論No. 930-63,(1993), 293.
- (3) 日野隆太郎、吉田総仁：平成6年度塑加春講論、(1994), 259.
- (4) 日野隆太郎、吉田総仁：機論 A, 60-580, (1994), 2808.
- (5) F. Yoshida, R. Hino and T. Okada : Advances in Engineering Plasticity and its Applications, (1993), 1097.
- (6) 日野隆太郎、吉田総仁、岡田達夫：第45回塑加連講論、(1994), 559.