

鋼／アルミニウム系クラッド板のプレス成形性

吉田 総仁*

1. はじめに

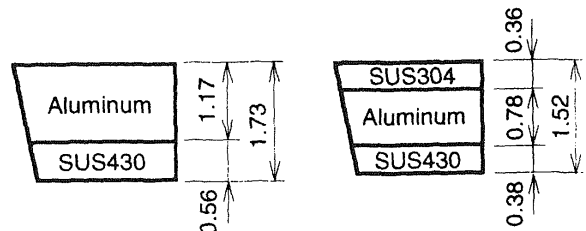
近年、互いに異なる金属層から成る種々のクラッド板が開発、使用されている。これらのクラッド板はプレス成形において、単一板とは異なる複雑な変形挙動を示すため、従来の単一板に関する知見に基づいてクラッド板の成形性を予測することは困難である。したがって、クラッド板を構成する素材の機械的性質と積層比からクラッド板自体の変形挙動や成形性が予測できるようになれば、クラッド板の開発やそのプレス成形条件の決定に指針を与えることができ、その意義は大きい。しかしながら、クラッド板の成形性に関する基礎的データの蓄積や理論の構築はまだ十分に行われていないのが現状である。

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^{1,2)}。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³⁾と破断限界⁴⁾、深絞り成形限界⁵⁾について論じた。最後に、2層クラッド板の構成素材の弾塑性特性(構成式)を各層を分離(除去)することなく決定する方法の提案を新たに行っている⁶⁾。

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 ϵ_1 , ϵ_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。

2・2 くびれ発生条件 クラッド板とその構成



(a) 2層クラッド板 (b) 3層クラッド板
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)

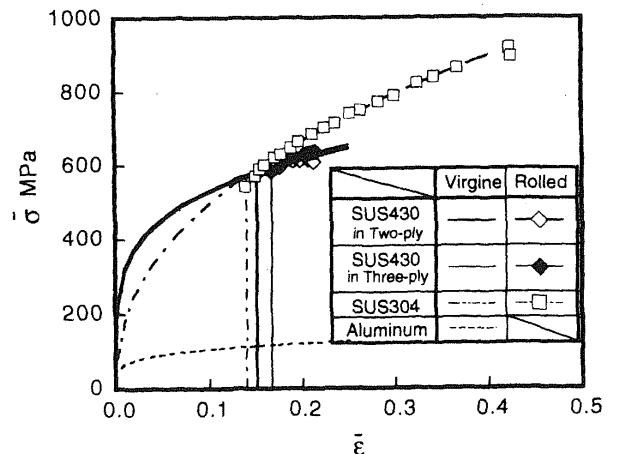
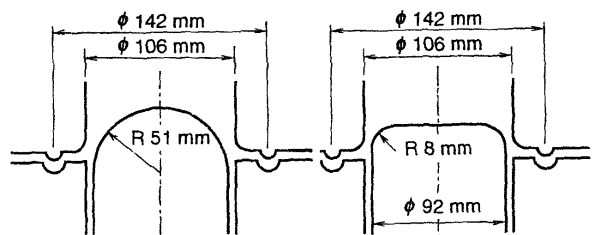


図2 構成素材の相当応力-相当塑性ひずみ曲線



(a) 球頭パンチ (b) 平頭パンチ
図3 張り出し試験装置の概略図

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 $\beta (= \epsilon_2/\epsilon_1) \leq 0$ 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ういわゆる修正M-K (Marciniak-Kuczynski) 理論の考え方を基礎とし、新たにくびれ部におけるボ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

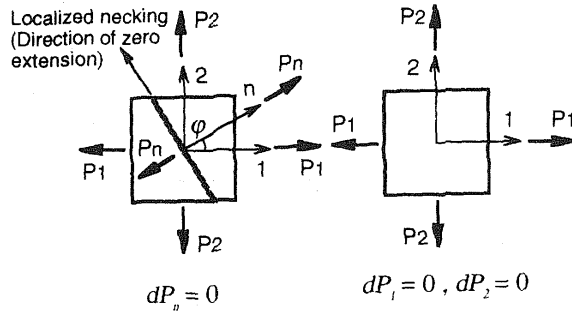


図4 局部くびれ条件

図5 拡散くびれ条件

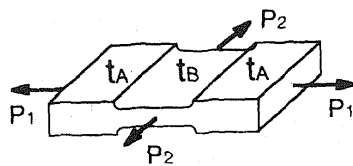


図6 板厚不整をあらわすM-Kモデル

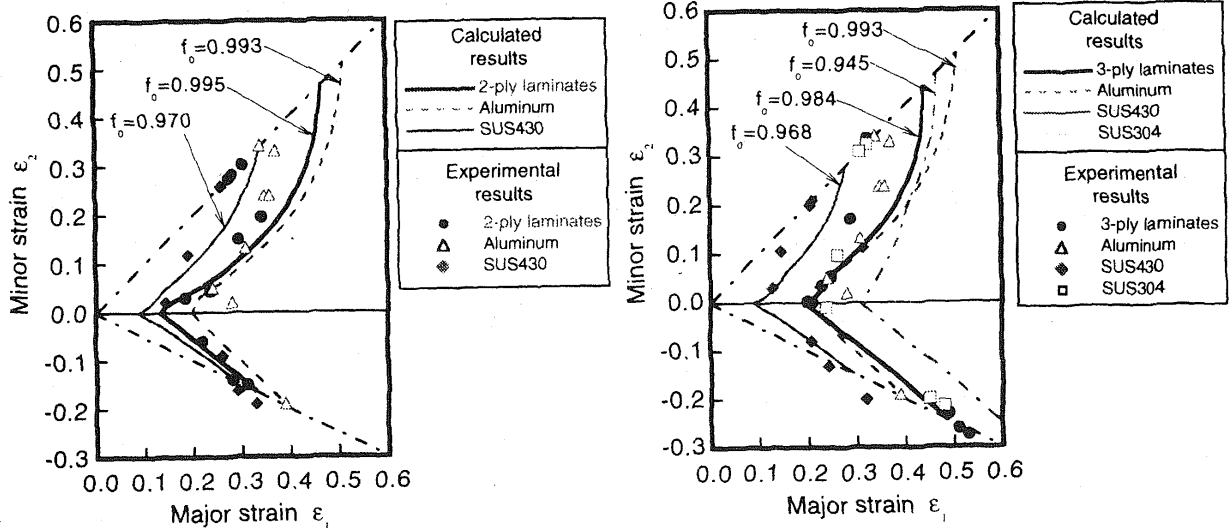
果から、M-Kモデルの考え方が妥当であることがわかって

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



(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)
(ボ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)

クラッド板の成形限界は格段に高くなることがわかった。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 ϵ_{θ} 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($dF/d\epsilon_{\theta}=0$)に達し、破断するものと考え

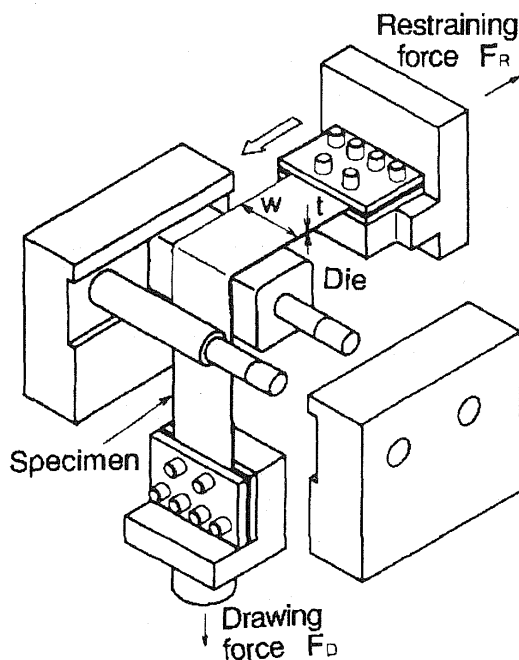
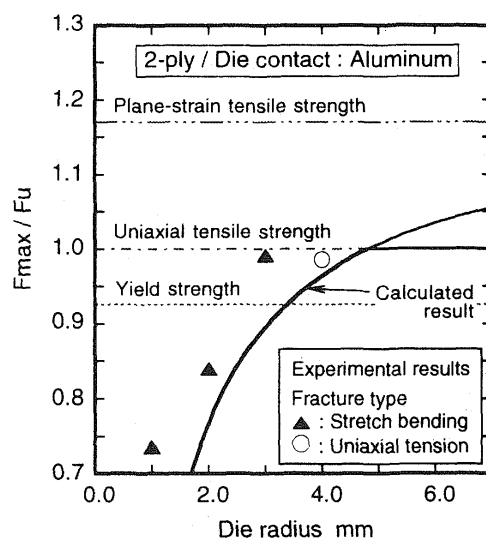


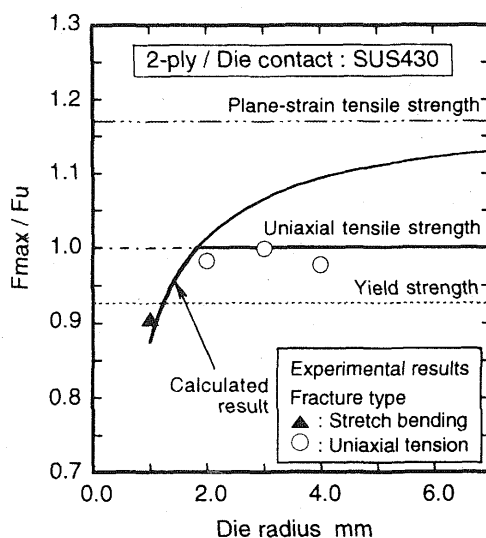
図8 引張曲げ・曲げ戻し実験装置の略図

える。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_0 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



(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

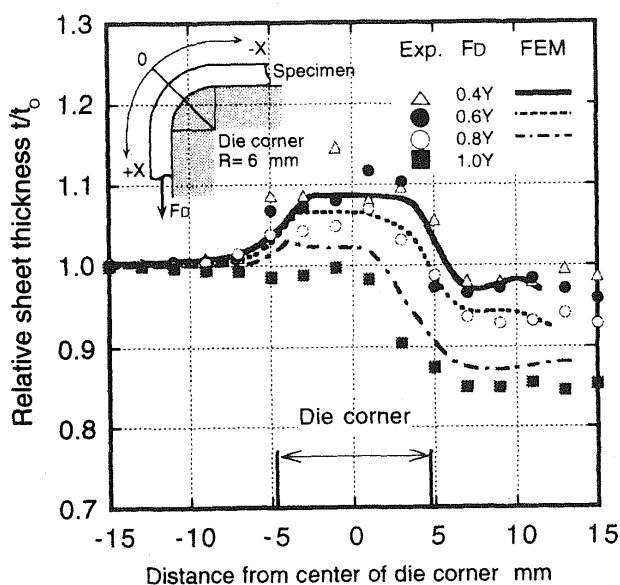
破断し、ダイス肩半径が小さい場合は曲げ部で破断している。また、引張曲げ破断荷重はダイス肩半径が小さくなると急速に低下する。また、アルミニウム内側の場合の方が、SUS430内側の場合よりも引張曲げ破断荷重が低くなっている。この理由は次ぎのように説明できる。高強度のSUS430が曲げの外側にくる場合には、引張り曲げにおいてSUS430層の厚さが（その逆の場合に比べて）大きく減少し、最終的に支え持てる荷重が小さくなるからである。引張り曲げ破断荷重の計算結果と実験結果はか

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。

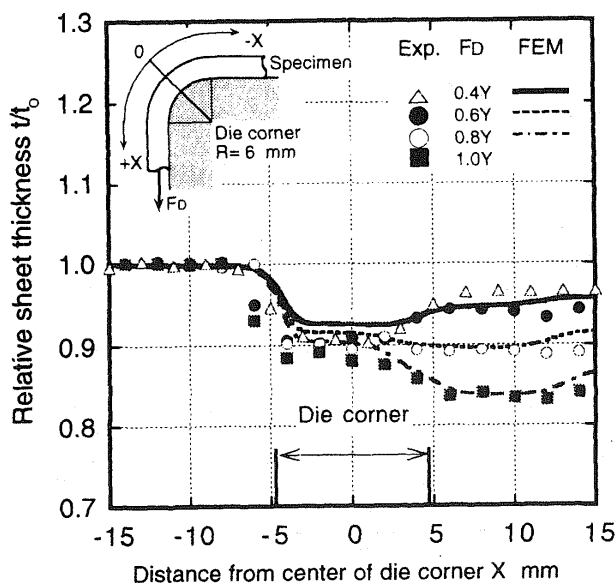
次に引張曲げ・曲げ戻しにおけるクラッド板の板厚変化挙動を検討する。図10にダイス肩半径を6mmとして引張曲げ・曲げ戻しを行った2層板の無次元板厚分布測定結果と剛塑性有限要素法による計算結果を示す。図の横軸はダイス中心部からの距離を示しており、負の側がダイス入り側、正の側がダイス出側である。アルミニウムをダイス接触側(曲げの内側)にすると、引張荷重が低い場合、曲げ時に板厚が増加した後、曲げ戻し時に板厚が減少している。引張荷重が高い場合、曲げにおいては板厚がほとんど変化せず、曲げ戻し時に板厚が大きく減少している。

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異なるためである。



(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

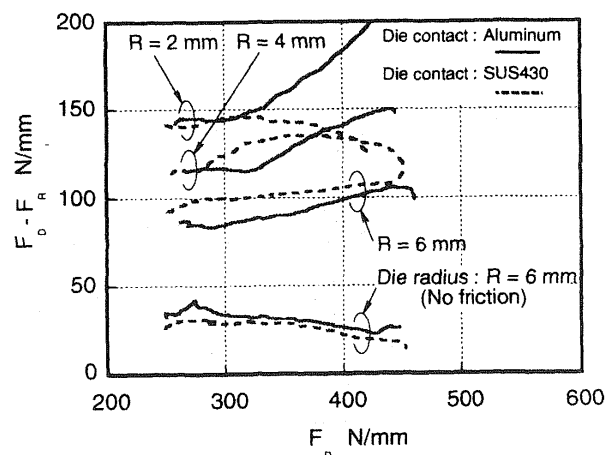


図11 2層クラッド板の引張曲げ・曲げ戻しにおける引き込み抵抗($F_D - F_R$)

4. 深絞り成形限界

金属クラッド板の深絞り成形限界について最も特徴的なことは、2層板の表裏を入れ替えることに限界絞り比(LDR)が大きく異なることである。例えばSUS430/アルミニウム積層板の円筒深絞り実験結果⁶⁾(ポリエチレンシートによる潤滑)をみると、SUS430がカップの外側にきたときのLDRは2.15、その逆の場合には2.40となっている。この例では、ダイス肩部における摩擦力は小さく、また引張り曲げ・曲げ戻し変形に起因する引込み抵抗力は積層板の表裏を入れ替えてもほとんど変化しないことから⁷⁾、与えられたブランク径に対するパンチ荷重は表裏入

替えによってほとんど変化しない。限界絞り比がブランクの表裏入替えによって変わるのは、既に3.2節で述べたとおり、パンチ肩部における引張り曲げ破断強度がブランクの表裏入替えによって変化するためである。なお、通常の潤滑条件では板の表裏入替えによって摩擦抵抗も変わるためその影響も無視できない。金属クラッド板の深絞り限界(限界絞り比)は有限要素シミュレーションによっても予測することができる⁶⁾。

5. 構成素材の機械的的特性の決定

以上の結果から、金属クラッド板の各層の機械的的特性

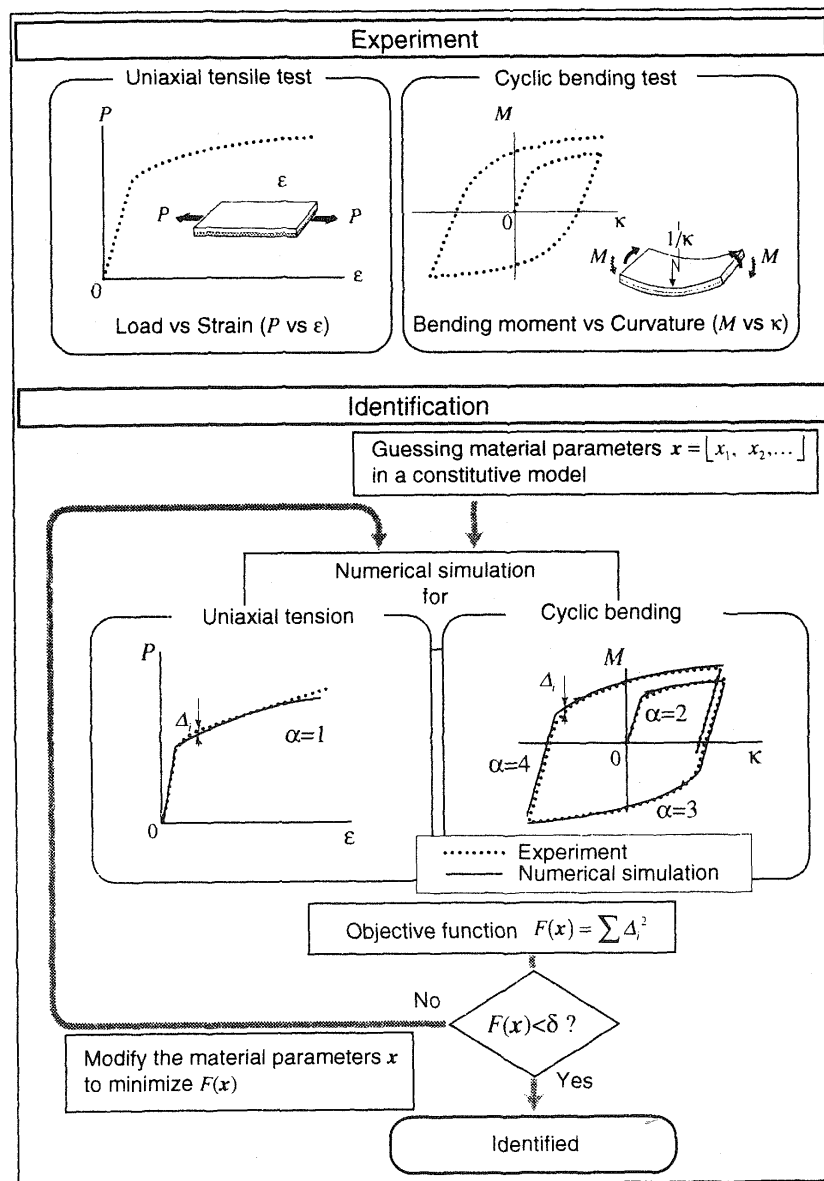


図12 引張り試験と曲げ試験の結果を基礎に数値解析(弾塑性逆解析)と組合わせて2層クラッド板の構成素材それぞれの機械的性質を決定する方法

がわかればクラッド板そのものの成形限界が予測しうる
ことがわかった。金属クラッド板の構成素材の機械的性
性を求める方法としては、各層を機械加工（あるいは化
学処理で）除去してから引張り試験にを行うのが一般的
であるが、この方法は極めて手間がかかる。著者らは最
近、こうした層の除去をせずに、金属クラッド板全体の
引張り試験と曲げ試験の結果を基礎に数値解析と組み合
わせて2層クラッド板の構成素材それぞれの機械的性質を
決定する方法も提案している⁶⁾。図12はその解析スキ
ームを示している。解析には多くの未知材料パラメータ
を含む弾塑性構成式を用い（例えば文献6）では、繰返し
加工硬化およびバウシング効果を表現するために等方硬
化と非線形移動硬化を組合わせて各層ごと8個〔計16
個〕のパラメータを持つ構成式を使っている）、これら
の材料パラメータを仮定した'引張り荷重とひずみ'お
よび'曲げモーメントと曲率'の数値計算を行い、これ
らが実験データとよく一致するまで材料パラメータの仮
定値の修正を繰返し、これらの値を決定している。

6. 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。

(1) 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。

(2) 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。とりわ
け2層金属クラッド板においては高強度材が曲げの外側
にくるような引張曲げにおいてはその逆の場合よりも破
断荷重が小さくなる現象を各層の板厚減少挙動と関連し
て説明することができた。

(3) 2層金属クラッド板の深絞り成形限界（限界絞り
比）がブランクの表裏入替えによって変わるのは、上記
(2)で述べたとおり、パンチ肩部における引張り曲げ破
断強度がブランクの表裏入替えによって変化するためで
ある。

(4) 金属クラッド板全体の引張り試験と曲げ試験の結
果を基礎に数値解析（弾塑性逆解析）と組合わせて2層ク
ラッド板の構成素材それぞれの機械的性質を決定する方
法も提案した。

なお、本稿の参考文献には本研究の成果を掲載した著
者らの論文を掲載しているが、文献7)にはその他の研究
者の研究も含めたレビューであるので、それも参考にし
て頂きたい。

謝 辞

本研究に対して助成を頂いた天田金属加工機械技術振
興財団に深く感謝いたします。また、試験材料を提供して頂
いた住友金属工業株式会社、広島大学大学院生として本
研究に大きな役割を果たした日野隆太郎君（現在福井大
学助手）、卜部正樹君（現在NKK総合材料技術研究所）、
岡田達夫氏（広島大学）に深謝いたします。

参考文献

- 1) 日野隆太郎・吉田総仁：機論A, 60-580(1994), 2808.
- 2) Yoshida, F. and Hino, R.: J. Materials Processing Technology, 63(1997), 66.
- 3) 日野隆太郎・吉田総仁：機論A, 61-592(1995), 2560.
- 4) 日野隆太郎・岡田達夫・吉田総仁：同上, 62-595(1996), 753.
- 5) 日野隆太郎・吉田総仁・岡田達夫：機論A, 64-621(1998), 267.
- 6) Yoshida, F., Urabe, M. and Toropov, V. V., in Proc. Int. Symp. Inverse Problems in Engineering Mechanics (Tanaka, M. and Dulikravich, G. S. ed.), (1998), 243., Elsevier.
- 7) 日野隆太郎・吉田総仁：塑性と加工, 37-430(1996), 1125.