

データベースを利用したアルミニウム合金プレス成形用 AI 制御システムの開発

真鍋 健一*・吉原 正一郎**・楊 明***

1. まえがき

近年、地球温暖化などの環境問題の克服のため、自動車をはじめ、輸送機器等の軽量化による省エネルギー、省資源化が積極的に行われている。その軽量化に適した材料としてアルミニウムなどの軽合金や樹脂が注目され、なかでもアルミニウム合金は軽量化の旗手として一躍脚光を浴びることになった。しかし、アルミニウム合金は、鋼板と比べ亀裂が生じやすく成形性に劣り、またスプリングバックが大きく製品精度が悪いといった問題点が指摘されていた。また、アルミニウム合金のプレス成形に関する研究は少なく、成形性に関するデータベースもほとんど見られないのが現状であった。

ところで、材料データベースは、設計において材料選択・評価だけでなく、CAEの基礎データとして、またそれを基にした最適設計へと、その用途は広く重要性は増している。同様に、成形性に関するデータベースは加工プロセスの最適化やプロセス制御の高精度化などにも必要であり、高精度加工がますます要求される今後、ますますその位置付けは高く重要なものになるであろう。欧米では、データベースがわが国よりはるかに進んでおり、高度化しているCAE技術を補完する技術としてもその重要な役割を果たしている。塑性加工における成形性評価や設計過程ではトライアル実験による確認工程を省くほどまでその信頼性が高まっている。

本研究では、上述の背景から、アルミニウム合金に関する成形加工のデータベースを構築し、それを基にして新たにAI(Artificial Intelligence)技術を導入して、プレス成形加工の知的プロセス制御を行い、アルミニウム合金の成形性の克服・改善の道を拓くことを目的としている。本報告ではプレス成形の中で円筒深絞り加工を取り上げ、その可変しわ抑え力制御に適用した結果について報告する。

2. データベース援用知的プレス成形プロセスの概要

データベースを用いるAI制御システムは、「データベース援用知的制御システム」と呼ぶことができる。ここで提案する概念は、加工中のインプロセスセンシングデータは実加工中のすべての因子を網羅した真のものであり、これを基本とすることによって最も誤差の少ない合理的かつ最適な成形加工のプロセス制御が可能となるとの発想から出発している。実際の加工中のデータをもとに構築するデータベースは将来的にも有効活用できる

重要な情報資源であり、知的財産にすることができる。

図1にデータベースを利用した知的制御プレス成形加工システム概念を、深絞り加工を例に示す。近年、加工機械は自動化が進み、コンピューター制御さらに、多くのセンシング機能が付与されつつある。このような機械では加工ごとに種々のプロセスデータのセンシングが可能になっている。したがって、従来の加工プロセス中に基礎となるプロセスデータベースが比較的簡単に構築できる。例えば、加工ラインでは生産管理用コンピューターから素材の種類、ブランクの寸法・仕様、種々の加工条件が送信され、検索可能なようにヘッダーがつけられたあと、インプロセスセンシングデータが逐次データベースに入力、格納されることになる。このようにして構築された基礎プロセスデータベースをもとに、次にオンライン知的加工プロセス制御システムが構築される。ファジィ、ニューラルネットワークさらには遺伝的アルゴリズム等の知識工学を応用して最適プロセス制御に必要な知的アルゴリズムが確立される。ここでは、可変しわ抑え力(BHF)の最適制御用ファジィルールを構築する。それをもつ頭脳(プロセッサ)が加工機械や型工

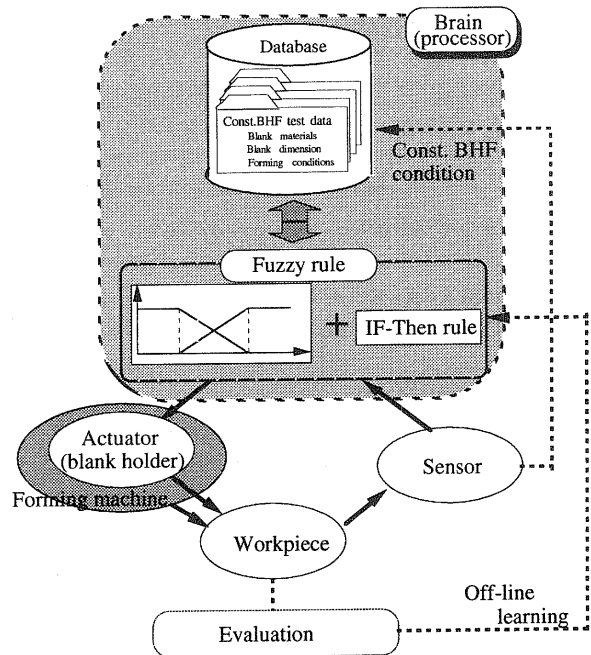


図1 データベースを用いたプレス成形用知能化制御システム概念

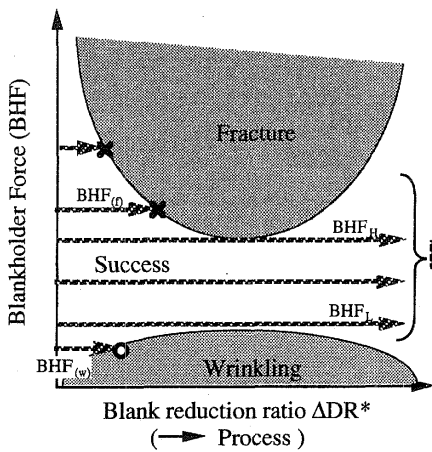


図2 円筒深絞り基礎プロセスデータベースの構成

具のアクチュエーター（ここでは、ブランクホルダー）に的確かつ迅速に指示を出し、それによって素材に対して加工条件の最適化（最適しわ抑え力プロセス制御）を行いながら加工を実行する。そこでは材料の変形などをセンサーでセンシングし、そのデータ（しわ抑え力、パンチ力、パンチ変位、フランジ流入変位、フランジ端肉厚）を頭脳に戻し、プロセスに必要な次の情報・指令（しわ抑え力制御量）を瞬時に出力してクロードループで制御・判断を行う自律した加工機械ないし、加工システムである。加工ごとにその時点の新しいプロセスデータがデータベースに供給できるため、それをもとにしたデータの更新によってデータベースの充実と信頼性を高め、また学習機能により知的水準の高度化が達成される。

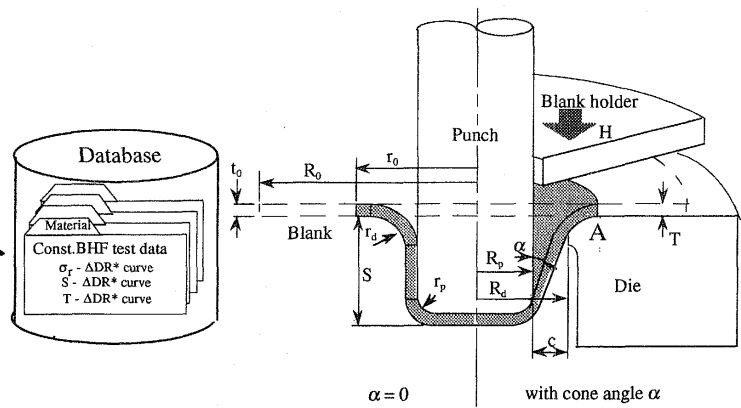
本加工プロセスの特徴は、最適プロセス制御が加工ごとに行われるため、高精度を常に維持できると、素材の材料特性および寸法の変化・変動等に対しても高いフレキシビリティを安定して保有できる点である。

3. 円筒深絞り用基礎プロセスデータベースの構築

上述の概念を円筒深絞り加工において実現するため、可変しわ抑え力制御法に基づく適応制御に適用する。

可変しわ抑え力制御に必要なプロセスデータベースは一定しわ抑え力深絞り実験によるものである。

図2は一定しわ抑え力実験におけるしわ抑え力条件を示したものである。必要となる基本のしわ抑え力条件は、次の4条件である。(1)破断する条件、(2)フランジしわが発生する条件、(3)成功領域での高いしわ抑え力条件、(4)成功領域での低いしわ抑え力条件。これを、異なる材料、材質、潤滑条件、ブランク寸法（板厚、直径）、工具条件、および環境条件に対して加工実験を行い、そのときの上述のプロセスデータ（しわ抑え力、パンチ力、パンチ変位、フランジ流入変位、フランジ端肉厚）を収集し、これらから絞り応力(σ_r)-フランジ端減少率(ΔDR^*)、S- ΔDR^* およびT- ΔDR^* 関係からなるデータベースを構築する。



$$\Delta DR^* = (R_0 - r_0) / R_p : \text{blank reduction ratio}$$

R_0 : initial radius of the circular sheet blank

r_0 : current radius of the circular sheet blank

S : punch stroke

t_0 : initial blank thickness

T : blank holder displacement

c : clearance between die and punch

α : cone angle of body part

図3 円筒深絞り加工

4. データベース援用ファジイ可変しわ抑え力適応制御

前章で構築したデータベースをもとに、図1に従ってしわ抑え力制御量に関するファジイルールの作成に取り掛かる。

本研究では、加工中にしわ抑え力を可変制御させることによって製品の不良現象であるフランジ部でのしわやパンチ肩部での破断を発生させずに、高い柔軟性と信頼性をもつ深絞り加工の実現を目標としている。高い柔軟性に応える可変しわ抑え力制御には、熟練技術者の知識を定量的に表現できる知識工学手法であるファジイ制御を適用した。その理由は以下のとおりである。

(1) 深絞り加工では、しわ抑え力が低い場合にはフランジ部でのしわ、逆に高い場合にはパンチ肩部での破断を生じる。したがって、しわ抑え力はしわと破断挙動に対して相反する性質をもっており、多目的問題になる。

(2) 深絞り加工中、ブランクと工具間の摩擦係数 μ が変動するなど、定式化が非常に困難であり、非線形性を有する。

(3) 変形が時間の変数で、非定常である。

以上のことから、しわ抑え力を一義的に決定するのは非常に困難である。そこでこれらの問題を迅速に解決し、最適なしわ抑え力を負荷するために、ファジイ推論を適用した。

4・1 絞り応力こう配の制約条件関数

どのような材質、ブランク径、および潤滑状態にも広く適用でき柔軟に加工行程が決定できるように、パンチ荷重から得られる絞り応力こう配に着目した制約条件関数 χ を導入し、その加工行程を決定した¹⁾。その制約条件関数を以下に示す。

$$\chi = \frac{d(\sigma_r)}{d(\Delta DR^*)} \quad (1)$$

ここで、 σ_r は絞り応力(=P/(2 π Rpt₀)), Pはパンチ荷重である。

4・2 評価関数

評価関数は、制御量パラメータに依存し、適切な目的関数に適合するように選択する必要がある。ここではその一つの目的関数として深絞り容器の肉厚分布一様化を採用した。評価関数は、多目的問題を取り扱うことを考慮して、以下の二つの関数、パンチストローク曲線、最大板厚変化曲線を選択した。

(a)パンチストローク曲線 図3に示す深絞り容器の肉厚不変及び体積一定を仮定した幾何学的関係から肉厚分布の一様化に対応したパンチストロークS₁-フランジ端減少率 ΔDR^* の関係、及びそのこう配S₁'の関係式を理想曲線とした。ここで、加工中におけるパンチストローク曲線の実測値Sと理想曲線との偏差量を評価関数 ϕ とした(図4(a))。また、制御の応答性を高めるためにそのこう配である微分項 ϕ' をもう一つの評価関数とした。それらの評価関数を以下に示す。

$$\phi = S - S_1 \quad (2)$$

$$\phi' = \frac{d\phi}{d(\Delta DR^*)} = S_1' - S_1' \quad (3)$$

(b)最大板厚変化曲線 肉厚分布一様化の目的関数を満足するためには加工中の容器壁部の肉厚分布をセンシングすることが要求される。しかし、それは装置上、非常に困難なため、最大板厚を示すプランクホルダーの変位量Tで代表させた。したがって、評価関数はパンチストローク曲線と同様に、以下のとおりとした(図4(b))。

$$\psi = \frac{T - t_0}{t_0} \quad (4)$$

$$\psi' = \frac{d\psi}{d(\Delta DR^*)} = T' \quad (5)$$

4・3 制約条件及び評価関数に及ぼすメンバーシップ関数及びしわ抑え力の影響

(a)絞り応力こう配 χ 制約条件となる加工行程の決定は、パンチ荷重に依存しない絞り応力こう配 χ を用いて決定した。加工初期においてパンチ荷重は増加するので絞り応力こう配の値は正、加工中期に近づくにつれ0になり、加工後期では絞り成分の減少により負の値になる。この特徴は、材料特性やプランク径の違いによっても変化しない。したがって、絞り応力こう配を、加工行程を決定する制約条件として選定することは適当である。ところで、既報⁷⁾では加工後期においてしわ抑え力の負荷の仕方が肉厚分布に大きく影響を及ぼすことが確認された。そこで、以上のことを考慮し、精度の向上のために、加工後期におけるメンバーシップ関数をさらに二段階に分割し、計4段階に設定した。具体的に、加工前期は $\chi \geq 0$ 、中期は $-0.04 \leq \chi \leq 0.08$ 、加工後期は $-0.08 \leq$

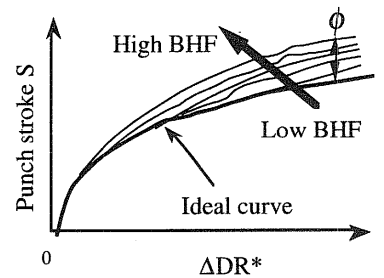
$\chi \leq 0$ 及び $\chi \leq -0.04$ の二段階に分割した。以上のことを考慮し、そのメンバーシップ関数を図5に示す。縦軸 $\mu_{\chi h}$ は、制約条件 χ に対する信頼度を表わす。

(b)パンチストローク曲線 ϕ 、 ϕ' 本評価関数は、破断を考慮した評価関数であり、 ϕ 及び ϕ' が増加するとしわ抑え力を低くするものである。従ってこれらの評価関数を簡便な大小関係でメンバーシップ関数を記述した。図6にパンチストローク曲線に関するメンバーシップ関数を示す。

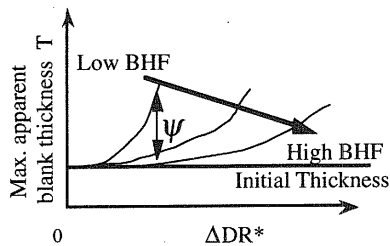
(c)最大板厚変化曲線 ψ 、 ψ' 最大板厚変化曲線はパンチストローク曲線とは逆にしわの発生を考慮した評価関数である。評価関数 ψ 及び ψ' が増加するにつれてしわ抑え力は高くするものである。パンチストローク曲線と同様に評価関数を簡便な大小関係でメンバーシップ関数を記述した。図7に最大板厚変化曲線に関するメンバーシップ関数を示す。

4・4 ファジイ推論を用いたしわ抑え力制御量の決定

しわ抑え力の最適プロセス制御を行うためには、制約



(a) ϕ



(b) ψ

図4 評価関数(ϕ, ψ)

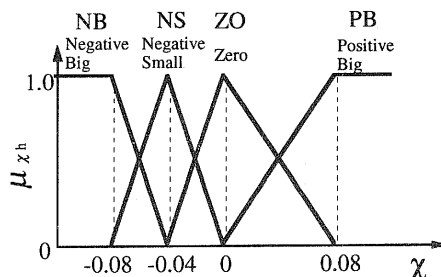


図5 制約条件に対するメンバーシップ関数

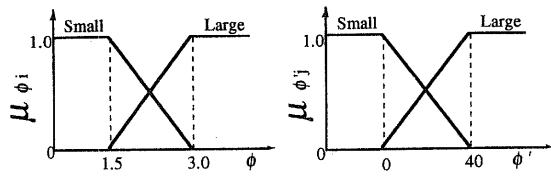


図6 評価関数(ϕ, ϕ')に関するパンチストローク曲線のメンバーシップ関数

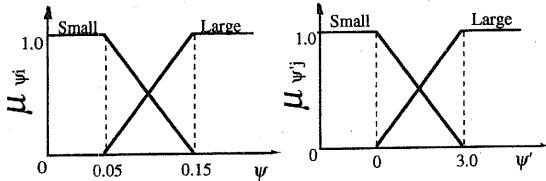


図7 評価関数(ψ, ψ')に関する最大見かけ板厚曲線のメンバーシップ関数

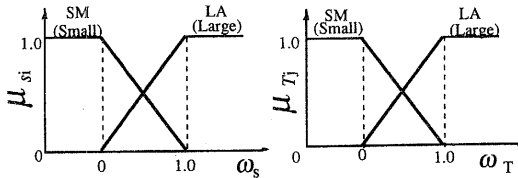


図8 評価関数(ω_s, ω_T)に対するメンバーシップ関数

表1 評価関数に対するパンチストローク曲線のIf-Thenルール

IF (ϕ_i, ϕ'_i)	THEN (ω_{Sij})
ϕ is Large(ϕ'_L) and ϕ' is Large(ϕ'_L)	$\omega_{sLL}=1.0$
ϕ is Large(ϕ'_L) and ϕ' is Small(ϕ'_S)	$\omega_{sLS}=0.5$
ϕ is Small(ϕ'_S) and ϕ' is Large(ϕ'_L)	$\omega_{sSL}=0.2$
ϕ is Small(ϕ'_S) and ϕ' is Small(ϕ'_S)	$\omega_{sSS}=0$

条件のもとで評価関数を総合的に最小にしなければならない。しわ抑え力を決定するには、制約条件と評価関数に対応するしわ抑え力制御量 (ΔBHF) を任意に設定する必要がある。しかしながら、これらの組み合わせから ΔBHF を決定するには膨大なIf-Thenルールを設定することになり、その調整も非常に困難になる。そこで、ファジールールを簡素化するために、各々の評価関数の偏差量とこう配を組み合わせ、新たに破断に対する評価関数 ω_s 、しわに対する評価関数 ω_T をパンチストローク曲線、最大板厚変化曲線から推論した。その新たな評価関数 ω_s, ω_T は図6, 7の信頼度を示すメンバーシップ関数、及び表1, 2に示すIf-Thenルールを用いて、以下の式で決定・評価した。

$$\omega_s = \frac{\sum \omega_{Sij} \mu_{\phi_i} \mu_{\phi'_i}}{\sum \mu_{\phi_i} \mu_{\phi'_i}} \quad (6)$$

$$\omega_T = \frac{\sum \omega_{Tij} \mu_{\psi_i} \mu_{\psi'_i}}{\sum \mu_{\psi_i} \mu_{\psi'_i}} \quad (7)$$

表2 評価関数に対する最大見かけ板厚曲線のIf-Thenルール

IF (ψ_i, ψ'_i)	THEN (ω_{Tij})
ψ is Large(ψ'_L) and ψ' is Large(ψ'_L)	$\omega_{TLL}=1.0$
ψ is Large(ψ'_L) and ψ' is Small(ψ'_S)	$\omega_{TLS}=0.5$
ψ is Small(ψ'_S) and ψ' is Large(ψ'_L)	$\omega_{TSL}=0.3$
ψ is Small(ψ'_S) and ψ' is Small(ψ'_S)	$\omega_{TSS}=0$

表3 If-Thenルール (χ, ω_s, ω_T)

IF (χ, ω_s, ω_T)	THEN (ΔBHF_{hij})
χ is PB and ω_s is LA and ω_T is LA	$\Delta BHF_{PLL}=0$
χ is PB and ω_s is LA and ω_T is SM	$\Delta BHF_{PLS}=1.50$
χ is PB and ω_s is SM and ω_T is LA	$\Delta BHF_{PSL}=-0.25$
χ is PB and ω_s is SM and ω_T is SM	$\Delta BHF_{PSS}=1.00$
χ is ZO and ω_s is LA and ω_T is LA	$\Delta BHF_{ZLL}=0$
χ is ZO and ω_s is LA and ω_T is SM	$\Delta BHF_{ZLS}=0.50$
χ is ZO and ω_s is SM and ω_T is LA	$\Delta BHF_{ZSL}=-0.50$
χ is ZO and ω_s is SM and ω_T is SM	$\Delta BHF_{ZSS}=0$
χ is NS and ω_s is LA and ω_T is LA	$\Delta BHF_{SLL}=0$
χ is NS and ω_s is LA and ω_T is SM	$\Delta BHF_{SLS}=3.00$
χ is NS and ω_s is SM and ω_T is LA	$\Delta BHF_{SSL}=-0.25$
χ is NS and ω_s is SM and ω_T is SM	$\Delta BHF_{SSS}=2.00$
χ is NB and ω_s is LA and ω_T is LA	$\Delta BHF_{BLL}=0$
χ is NB and ω_s is LA and ω_T is SM	$\Delta BHF_{BLS}=6.00$
χ is NB and ω_s is SM and ω_T is LA	$\Delta BHF_{BSL}=-0.25$
χ is NB and ω_s is SM and ω_T is SM	$\Delta BHF_{BSS}=3.00$

しわ抑え力制御量は制約条件関数 χ とこれら二つの評価関数 ω_s, ω_T の組み合わせによって決定した。そのときのメンバーシップ関数を図8に、If-Thenルールを表3に示す。しわ抑え力制御量の決定方法、すなわち推論方法は、全てのファジイモデル因子の項を考慮できる以下に示す代数積-加算-重心法によって決定した²⁾。

$$\Delta BHF = \frac{\sum \Delta BHF_{hij} \mu_{\chi_h} \mu_{\omega_{sh}} \mu_{\omega_{Tj}}}{\sum \mu_{\chi_h} \mu_{\omega_{sh}} \mu_{\omega_{Tj}}} \quad (8)$$

5. 実験

5.1 供試材

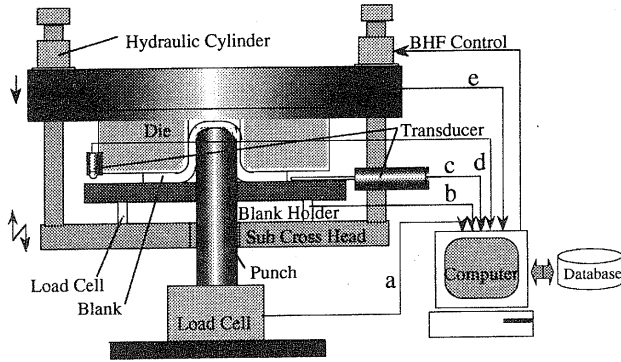
供試材は板厚 $t_0=1\text{mm}$ のアルミニウム合金板 (A5182-O) を使用した。その機械的性質を表4に示す。

5.2 実験装置³⁾

実験装置は多機能コンピューター制御深絞り試験機 (最大荷重: 100kN, 最高クロスヘッド速度: 1000mm/min) を用いた⁴⁾。本装置 (図9) は、しわ抑え力、パンチ変位 (パンチ速度)、パンチ荷重、フランジ端流入量およびフランジ端板厚 (ブランクホルダー変位) をセンシングし、しわ抑え力とパンチ速度を行程中に任意可変できる。なお、高精度が要求されるフランジ端板厚は渦電流式変位センサー (分解能: 0.6 μm) で、またフランジ端流入量はひずみゲージ式変位計で計測した。実験では装置の応答性を

表 4 供試材の材料特性

Material	Yield Stress $\sigma_s / \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	Tensile Strength $\sigma_B / \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	Breaking Elongation / %	F value $/ \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	n value	r value
A5182-O	117	264	30.1	398	0.28	0.6



Punch Speed	5 mm/min constant
BHF	0.5 - 30 kN variable

a: Punch Load b: BHF c: Flange Displacement
d: Blank Holder Displacement e: Punch Stroke

図 9 データベース援用知的適応制御円筒深絞り装置の構成

考慮し、初期しわ抑え力は2kNと設定した。

実験には $R_p = 16.5 \text{ mm}$ 、 $r_p = 4 \text{ mm}$ のパンチ及び $R_d = 18.25 \text{ mm}$ 、 $r_d = 3 \text{ mm}$ のダイを用いた。

5・3 実験方法

アルミニウム合金板のブランク径（絞り比DR）や潤滑状態にも広範囲に適用できるしわ抑え条件を検討するためにDR=1.98, 2.06の2種類、潤滑剤はスプレー式ふっ素潤滑剤と日本工作油製PG-3740潤滑油の2種類を用いた。前者は両面に、後者はダイ側のみ塗布した。パンチ速度は5mm/minと一定とし、 $22 \pm 2^\circ \text{C}$ の室温下で実験を行った。

(a)ファジイモデル基礎実験 最適加工を行うにはファジイルールを最適にする必要がある。したがって、ファジイルールの各メンバーシップ関数の調整が必要となる。メンバーシップ関数の調整方法はいくつか挙げられるが、ここでは各3角形型ファジイ集合の一つのパラメーターを調整した。実際には、予め設定したファジイルールを用いて実験を行い、評価関数が最小になるようにメンバーシップ関数の調整を行った⁵⁾。

(b)クローズドループしわ抑え力ファジイ制御実験 上記のように調整したメンバーシップ関数を用いて最適プロセス制御実験を行った。その実験の一連の流れは、まず初期しわ抑え力およびブランク径をコンピューターに入力し、実験が開始される。絞り加工中にパンチ荷重、パンチストロークとブランクホルダー変位をセンシングし、制約条件関数及び評価関数を計算する。それをファジイモデルにあてはめしわ抑え力を決定し自動的に変圧させるクローズド

ループ制御をなしている。実験後、容器の肉厚分布を評価し、ファジイモデルの学習プロセスを取り込むことによってさらなる最適プロセス制御を目指した。

6. 実験結果及び考察

6・1 深絞り加工特性

図10に絞り比DR=1.98におけるパンチ荷重—フランジ端減少率曲線を示す。この図から一定しわ抑え力方式と比べ、パンチ荷重が一定に近づいており、「パンチ荷重一定方式」に近い制御が行われていることがわかる。それを裏付けるようにしわ抑え力は加工初期では多少減少し、その後は徐々に荷重が急増し、破断限界しわ抑え力方式のような可変制御が行われている。

他の条件、すなわち異なるDR、潤滑剤およびダイ肩半径においても同様な制御が行われることを確認している。

図11にDR=1.98の場合の最大板厚変化曲線を示す。成形の進行に伴い最大板厚は増加する。一定しわ抑え力方式の低いしわ抑え力の場合には板厚は増加し続け、しわを発生させていた。それに対し、ファジイ適応制御の場合には、その増加が抑えられ、しわの発生・成長を抑えるようにしわ抑え力制御していることがわかる。

6・2 深絞り容器の肉厚分布

図12にDR=1.98における深絞り容器の肉厚分布を示す。一定しわ抑え力方式で低いしわ抑え力の場合にはパンチ肩部の減肉が抑えられ口縁部では厚肉化している。高いしわ抑え力では口縁部の厚肉化が抑えられる反面、パンチ肩部の薄肉化が進行している。それに対し、ファジイ適応制御ではパンチ肩部の薄肉化が抑えられ、さらに容器口縁部の厚肉化も抑えられており、全体の変動幅も小さい。このことから、ファジイ適応制御可変しわ抑え力方式は、はね上がり⁶⁾などの現象にも対応して、しわ抑え力を制御しながら肉厚分布の改善が実現できることを示している。以上の結果は、DRや潤滑剤等に依存せず達成できることを確認している。

6・3 潤滑変動への対応性と成形限界

本適応制御では、原理的には潤滑剤の変更や加工中の

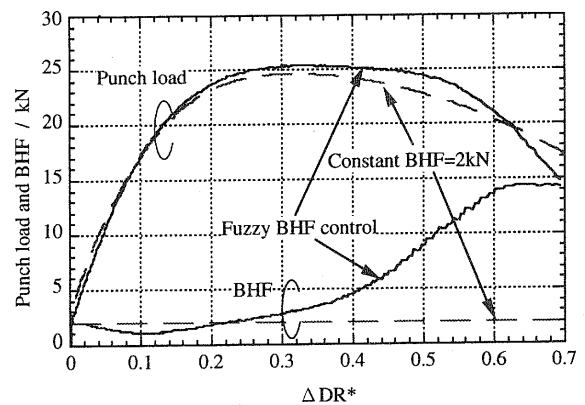


図 10 パンチ荷重—フランジ端減少率曲線(DR=1.98)

潤滑特性の変動にも対応して可変しわ抑え力制御が可能である。これを実証するため、域差潤滑方式を用いて、積極的に摩擦特性を変えた場合のしわ抑え力の制御結果を調べたところ、摩擦係数の変化に対応して適切にしわ抑え力が制御されていることを確認している⁷⁾。

また、本可変しわ抑え力方式の場合には「一定しわ抑え力方式」より成形限界がわずかではあるが、向上することが明らかになっている⁶⁾。この件について実験的に調べたところ、アルミニウム合金は鋼板等より成形限界の向上率が高いことが判明している⁸⁾。これは材料のF値の効果と考えられており、アルミニウムのようにF値の小さい材料ほどその効果は大きい⁹⁾。

以上のように、アルミニウム合金の成形性改善を図り、かつプロセスの高い柔軟性を得るためには、円筒深絞り加工ではデータベースを援用した知的適応制御可変しわ抑え力法が効果的である。

7. まとめ

本研究ではデータベースを援用する知的AI制御加工プロセスについて、円筒深絞りを取り上げて、その研究成果について紹介した。近年、加工プロセス中にセンシングデータをもとにデータベースを構築することがますます容易になりつつある。本報において、そのデータベースとAI技術を補完・活用することによって、新たな知的加工プロセス制御が可能になり、それによって、加工の柔軟性が飛躍的に向上し、また高精度、製品品質も著しく向上させることが夢でないことを示すことができたと考える。

近年、CAE(FEMシミュレーション)技術が著しい発展を遂げているが、ダイレクトにオンラインリアルタイム制御に適用することは、現在においても計算速度と精度の面から困難といわざるを得ない。その点では、データベース援用の方法が現実的で優れている。しかしながら、コンピュータ上ですべて制御も行うヴァーチャルフォーミングは可能であり、その結果を実制御システムに構築する考え方は今後進められるものと思われる。この分野は間違いなく急激に発展するものである。

提案したデータベース援用の知的加工プロセスの概念は他のプレス成形にも応用できるものであり、今後ますますデータベース援用技術が普及することを期待したい。

本研究の一部はアマダ金属加工機械技術振興財団の研究助成によるものであることを記して謝意を表します。また、実験にあたり材料を提供して頂きました古河電気工業(株)にあわせて感謝いたします。

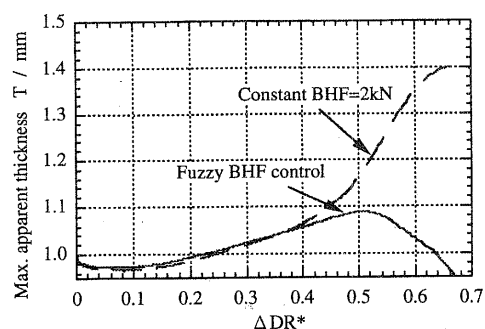


図 1.1 最大板厚—フランジ端減少率曲線(DR=1.98)

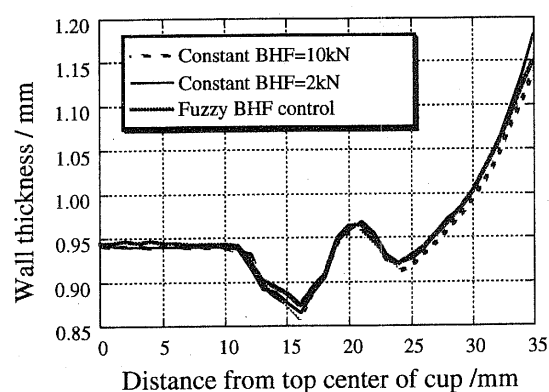


図 1.2 深絞り容器の肉厚分布(DR=1.98)

参考文献

- 1)吉原正一郎・真鍋健一・楊明：平8春塑加講論(1996), 256.
- 2)水野雅晴：システム／制御／情報, 38-11(1994),590.
- 3)真鍋健一・吉原正一郎・楊明・西村尚：塑性と加工, 36-416(1995),1015.
- 4)Soeda,K., Manabe,K. & Nishimura,H. : Proc. Int. Conf. Superplasticity Advanced Materials, (1991),819.
- 5)田中一夫：応用をめざす人のためのファジイ理論入門, (1991),186,ラッセル社.
- 6)真鍋健一・浜野秀光・西村尚：塑性と加工, 29-330 (1988),740.
- 7)吉原正一郎・真鍋健一：平9春塑加講論(1997),183.
- 8)網野雅章・吉原正一郎・真鍋健一・楊明：平8春塑加講論(1996),260.
- 9)吉原正一郎・真鍋健一・楊明・西村尚：機論C編, 投稿中.

* 東京都立大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 助教授

** 東京都立大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 博士課程学生

*** 東京都立大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 助手