

適応制御深絞り加工機の開発

真鍋 健一*

1. 緒言

近年、工業製品の多様化に伴い、多品種少量生産に対応できる塑性加工の研究・開発が進展している。そのなかでは、生産加工ラインのFMS化とあわせて、柔軟性のある加工機械及び加工法の開発が要求されている。著者らは既報¹⁾で破断限界に着目した変圧しわ押え深絞り法を開発し、そのなかでパンチ力制御による変圧しわ押え法は、より多品種少量生産に適合する柔軟性のある深絞り法であることを明らかにした。しかしながら、その方法ではブランク材の破断パンチ力を最低1回はその加工条件で実測する必要があり、また深絞り中の潤滑状態の変化にも対応できない等の課題が残されていた。

上記のような課題を解決するためには、材料特性及び加工パラメータの加工中の変化に対応しながら最適加工条件で加工する適応制御加工法が有力である。この適応制御加工法は多品種少量生産に柔軟に対応できるだけでなく、高精度化、高能率化にも適し、さらに今後のプレス加工現場の技術者不足にも対応が可能なため、近年、注目を集めている加工法である。しかし、成形加工の分野では曲げ加工^{2)~4)}やスピニング加工⁵⁾で開発研究が進められているものの、変形の複雑な絞り加工ではまだ試みられていない。

そこで、本研究では変圧しわ押え深絞り法をさらに発展させ、多品種少量生産でも生産量が特に少ない場合を対象として、その際、問題となるブランク材料の寸法及び材料特性さらには加工条件

の変更や変動にも柔軟に対応できる適応制御深絞り加工機の開発を目的とした。具体的には、初等解析法を適用し円筒深絞り加工中にブランクの材料特性及びグイ、ブランク間の摩擦係数 μ を同定して材料破断を予測し、常に破断としわ限界の間で最適な深絞り条件になるようにしわ押え力を制御する方法を提案し、その原理の妥当性を確認するために実用性を考慮した適応制御深絞り加工機を試作・開発した。それをを用いて深絞り工程中にブランクの材料特性及び摩擦係数 μ を同定するステージの適正なしわ押え条件について検討した結果について述べる。さらに、より実用性を高めた高速の適応制御深絞りを行うため、成形初期の同定工程を低速にして、その後、高速の変圧しわ押え深絞りを行う方式について、検討した結果も報告する。

2. 本適応制御深絞り法の原理と基礎式

2.1 基礎式

用いた深絞りの基礎式はSiebelの式をもとに提案された河合の円筒絞りの式⁶⁾である。それはフランジ部の変形に着目したもので、次の仮定を設けている(図1)。

- 1) ブランク材料は等方性材料で、平面応力状態とする。
- 2) 板厚は不変で、平面ひずみ状態とする。
- 3) 相当応力 σ_{eq} はフランジ部で一様とみなし、その平均相当応力 $\bar{\sigma}_{eq}$ を用いる。

このとき、フランジ部の平均相当ひずみ $\bar{\epsilon}_{eq}$ は絞り比DRを用いて表すと次式のようにになる。

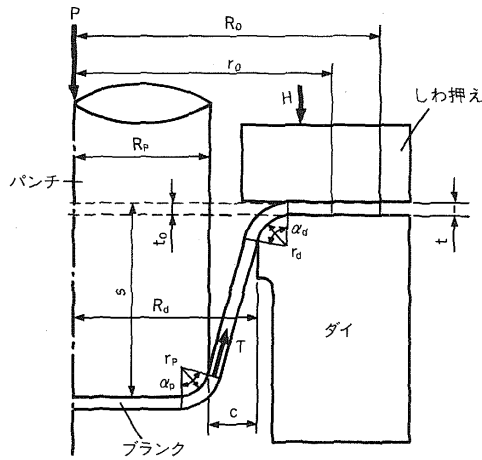


図1 記号

$$\bar{\epsilon}_{eq} = \frac{2}{3} \ln \left[\frac{R_o^2 - r_o^2 + \{(r_o + R_d)/2\}^2}{\{(r_o + R_d)/2\}^2} \right] \quad (1)$$

$$= \frac{2}{3} \ln \left[\frac{DR^2 - DR^{*2} + \{(DR^* + 1)/2\}^2}{\{(DR^* + 1)/2\}^2} \right] \quad (1)'$$

4) ブランク材料は \$n\$ 乗硬化則に従うものとする。すなわち、

$$\bar{\sigma}_{eq} = F \bar{\epsilon}_{eq}^n \quad (2)$$

ダイ入口における曲げ、曲げ戻しを考慮した合計の半径方向付加応力 \$\sigma_{Rd}\$、絞り力（壁部張力）\$T\$ およびパンチ荷重 \$P\$ は次式で与えられる⁶⁾。

$$\sigma_{Rd} = (1 + \mu\alpha) \left\{ 1.15 \bar{\sigma}_{eq} \ln \left(\frac{r_o}{R_d} \right) + \frac{\mu H}{\pi r_o t_0} \right\} + \frac{\bar{\sigma}_{eq} t_0}{2R_d} \quad (3)$$

$$T = 2\pi R_d t_0 \sigma_{Rd} \quad (4)$$

$$P = T \cdot \sin \alpha$$

$$= 2\pi R_d t_0 \sin \alpha \left\{ (1 + \mu\alpha) \left[1.15 \bar{\sigma}_{eq} \ln \left(\frac{r_o}{R_d} \right) + \frac{\mu H}{\pi r_o t_0} \right] + \frac{\bar{\sigma}_{eq} t_0}{2R_d} \right\} \quad (5)$$

上式中の \$\alpha (\alpha = \alpha_d = \alpha_p)\$ は図1におけるダイ接触角であり、パンチとダイとのクリアランス部の

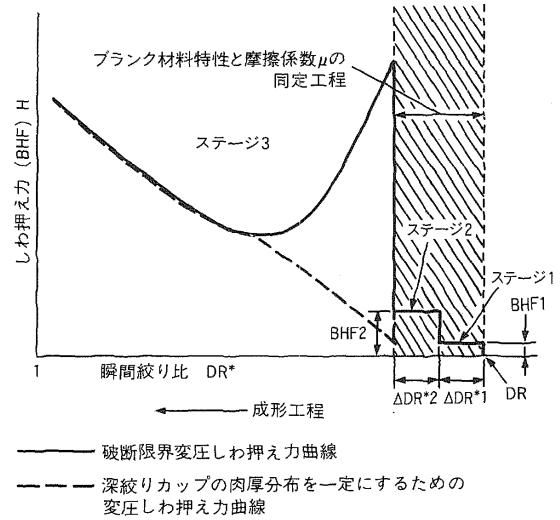


図2 本適応制御深絞り法の原理

ブランクが直線であると仮定することによって、パンチストローク \$s\$ から幾何学的に次式より求められる。

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{-B + (B^2 - 4AC)^{1/2}}{2A} \quad (6)$$

$$\text{ここに、} \quad A = \frac{(s - r_p - r_d)^2}{(c + r_p + r_d)^2} + 1,$$

$$B = \frac{2(r_p + r_d)(s - r_p + r_d)}{(c + r_p + r_d)^2},$$

$$C = \frac{(r_p + r_d)^2}{(c + r_p + r_d)^2} - 1$$

2.2 本適応制御法の原理と特長

図2に本適応制御法の原理図を示す。横軸は成形中のブランクのフランジ外半径をダイ内径で除した瞬間絞り比 \$DR^*(=r_o/R_d)\$ を表しており、矢印のように絞り比 \$DR\$ の位置から左に向かうように成形工程が進む。この図からわかるように、本法はブランク材の材料特性 (\$\sigma_B\$、\$F\$ 値、\$n\$ 値、平均相当応力-平均相当ひずみ曲線) と \$\mu\$ の同定を変圧しわ押え方式を応用して行うものであり、その基礎式は式(5)をもとにしている。同式にはブランクとダイの接触角 \$\alpha\$、摩擦係数 \$\mu\$、及び平均相当応力 \$\bar{\sigma}_{eq}\$ の3種類の未知数があるが、ダイ接触角は式(6)よりパンチストローク \$s\$ を計

測することから得られるので、残りの未知数は摩擦係数 μ と平均相当応力 $\bar{\sigma}_{eq}$ の二つである。それらは次のようにして求めることができる。

まず成形初期のステージ1ではしわ押え力（以後、BHF1と呼ぶ）の影響が無視できる程度に十分低く加える。その場合、成形初期であるため α が極めて小さくなり、式(5)の $\mu\alpha$ と μH の項が無視できるため、 $\bar{\sigma}_{eq}$ は次式のように表せる。

$$\bar{\sigma}_{eq} = \frac{P}{2\pi R_d t_0 \sin \alpha} \quad (7)$$

$$1.15 \ln \left(\frac{r_0}{R_d} \right) + \frac{t_0}{2r_d}$$

このBHF1の下で真値に近い $\bar{\sigma}_{eq}$ が得られるまでの成形区間 (ΔDR^*_1) を求める (図2)。このようにして妥当な $\bar{\sigma}_{eq}$ が求めれば、式(5)から残りの未知数 μ が得られることになる。

$$\mu = \frac{-B + (B^2 - 4AC)^{1/2}}{2A} \quad (8)$$

ここに、

$$A = \frac{\alpha H}{\pi r_0 t_0},$$

$$B = \frac{H}{\pi r_0 t_0} + 1.15 \bar{\sigma}_{eq} \alpha \ln \left(\frac{r_0}{R_d} \right),$$

$$C = 1.15 \bar{\sigma}_{eq} \ln \left(\frac{r_0}{R_d} \right) + \frac{t_0}{2r_d} \bar{\sigma}_{eq} - \frac{P}{2\pi R_d t_0 \sin \alpha}$$

しかし、 ΔDR^*_1 以降のステージ2では成形がある程度進んでいるため式(5)の $\mu\alpha$ の項が無視できなくなる。そこで、ステージ2では式(8)で得られる μ を用いて、改めて適正なしわ押え力（以後、BHF2と呼ぶ）を加え $\bar{\sigma}_{eq}$ を式(5)から得られる次式より求める。

$$\bar{\sigma}_{eq} = \frac{P}{2\pi R_d t_0 \sin \alpha} - \frac{\mu H}{\pi r_0 t_0} \quad (9)$$

$$(1 + \mu\alpha) \ln \left(\frac{r_0}{R_d} \right) + \frac{t_0}{2r_d}$$

それ以降は式(1) $\bar{\epsilon}_{eq}$ からのと合わせて、 μ と $\bar{\sigma}_{eq}$ を交互に計算し、このようにして得られた $\bar{\sigma}_{eq} - \bar{\epsilon}_{eq}$ の関係が実際の $\sigma_{eq} - \epsilon_{eq}$ 曲線と

よく一致し、以下の材料特性値が精度よく同定できる成形区間 (ΔDR^*_2) を決定すればよい。以上のように BHF1、 ΔDR^*_1 、BHF2、 ΔDR^*_2 の適正なしわ押え条件が得られれば、ステージ2の範囲で以下の材料特性が高精度で同定できることになる。

$$n = \frac{d(\ln \bar{\sigma}_{eq})}{d(\ln \bar{\epsilon}_{eq})} \quad (10)$$

$$F = \frac{\bar{\sigma}_{eq_i}}{(\bar{\epsilon}_{eq_i})^n} \quad (11)$$

$$\sigma_B = F \frac{\bar{\epsilon}_{eq}^n}{\exp(\bar{\epsilon}_{eq})} = F \left(\frac{n}{e} \right)^n \quad (12)$$

$$T_{max} = 3.3\pi R_d t_0 \sigma_B \quad (13)$$

次のステージ3では、要求される深絞り加工の特性に合わせて図2に示すように容器側壁部の均肉化を図る最適しわ押え力（破線）¹⁾、または破断限界深絞り法（実線）¹⁾ を採用すればよい。この破断限界深絞り法のしわ押え力 H はプランクの絞り力 T を最大絞り力 T_{max} と等しく一定、すなわち、 $T = T_{max}$ として式(5)に代入することによって得られ、次式のように表される。

$$H = \frac{\pi r_0 t_0}{\mu} \left\{ \frac{1}{1 + \mu\alpha} \left(\frac{T_{max}}{2\pi R_d t_0} - \frac{t_0}{2r_d} \bar{\sigma}_{eq} \right) - 1.15 \bar{\sigma}_{eq} \ln \left(\frac{r_0}{R_d} \right) \right\} \quad (14)$$

以上が本法の原理である。本方式であれば、刻々と変わる潤滑状態にも対応できるほか、材料特性が未知の材料でも常に、上述の最適な深絞り加工条件となるようにしわ押え力を制御してプランクの破断の回避または容器側壁部の肉厚分布制御ができる。さらに、パンチ速度とフランジ端速度との関係を監視することにより、カップの壁部応力からは予測できない延性不足による β 破断⁷⁾ を予知し、回避することも可能となる。したがって、深絞り加工の経験のない技術者でも、材料が不明でも、失敗することなく深絞り加工でき、今後の技術者不足にも対応できるという特長を有している。

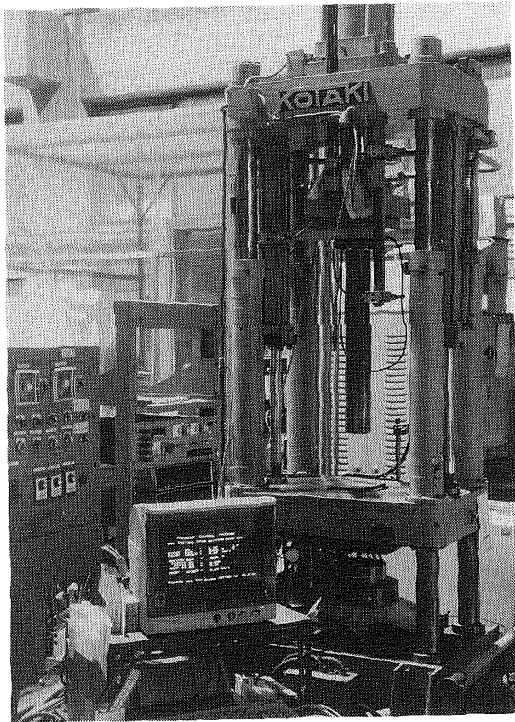


図3 適応制御深絞り加工機の外観

3. 適応制御深絞り加工機の試作・開発

高速・高精度適応制御深絞り加工機の開発を行うため、先に開発したコンピューター制御複動油圧プレス¹⁾のハードウェアをコンピューターを含め一新して、基本性能の向上を図り、さらに、操作性、応答性の向上のため、ソフトウェア関係も改良し、より高速で信頼性と実用性の高いものとした⁸⁾。開発した適応制御深絞り加工機の外観を図3に、そして、そのシステムブロック線図を図4に示す。本体のインナーラム(加圧能力294kN)はパンチを、アウターラム(同98kN)はしわ押え板をそれぞれ駆動する。加工中に取り込むデータは、パンチ荷重P、パンチ変位L、しわ押え力H、しわ押え板変位Q、そしてブランクのフランジ端移動量Dの5項目である。これらはそれぞれ各種I/Oボードを通してCPU(16ビットパーソナルコンピューターPC-286V)に入力される。また、CPUからの制御指令は、インナーとアウターのサーボバルブにそれぞれ伝えられ、全体としては閉ループを形成している。また、適応制御深絞り加工機として操作性をよくするため、MENU方式を導入しコンピューターのCRT上

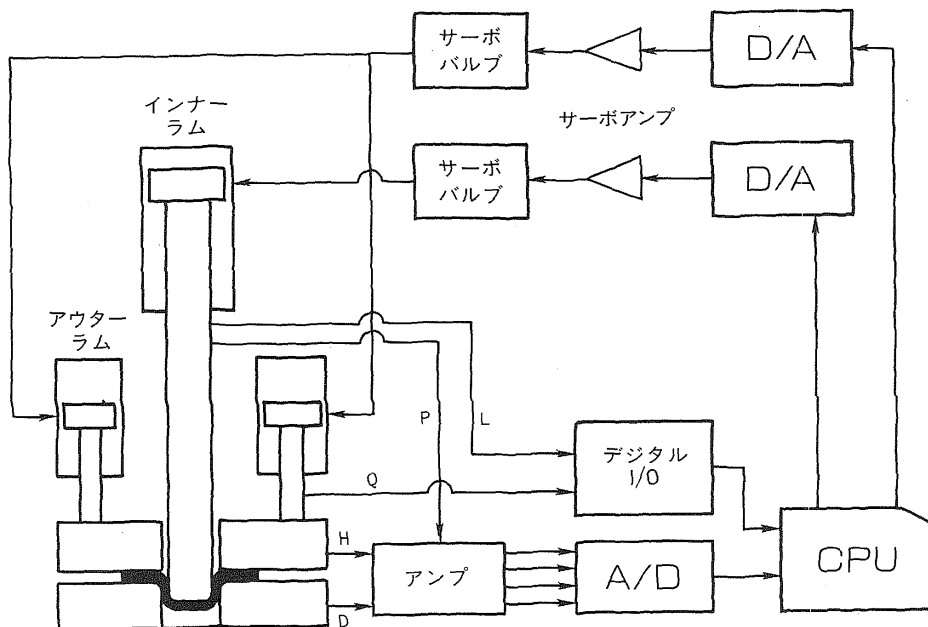
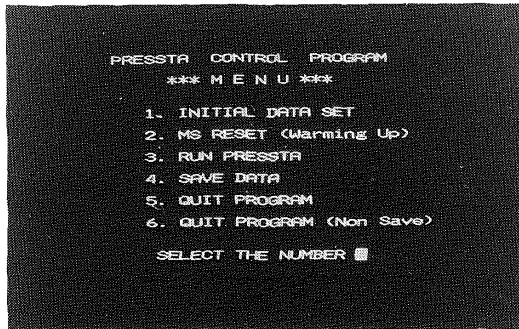
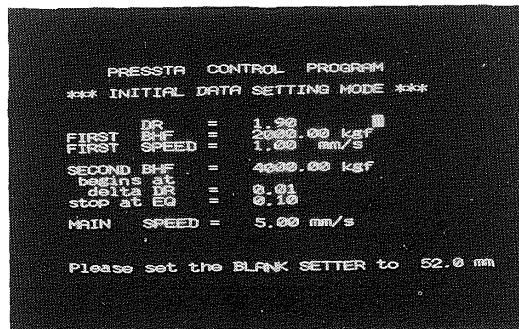


図4 制御システムのブロック線図



(a) MENU画面



(b) 入力データ画面

図5 適応制御深絞り加工前のCRT画面表示

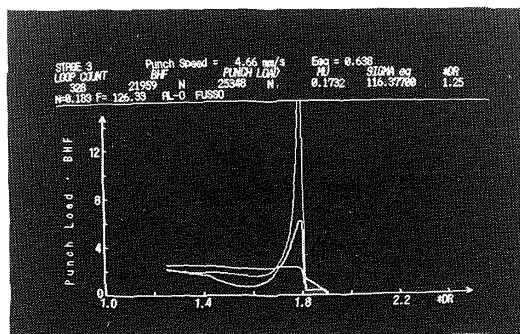


図6 適応制御深絞り加工中のCRT画面表示 (ステージ3の中期)

に図5(a)のようなMENU画面を表示させ、必要なデータは(b)図のように入力しやすいようにした。加工中には図6に示すように、CRT上にパンチ荷重 P と、ブランクのフランジ端移動量 D から得られる瞬間絞り比 DR^* (画面上には $*DR$ と表示)との関係及びしわ押え力 H (画面上には BHF) - DR^* 曲線が表示され、同定された材料

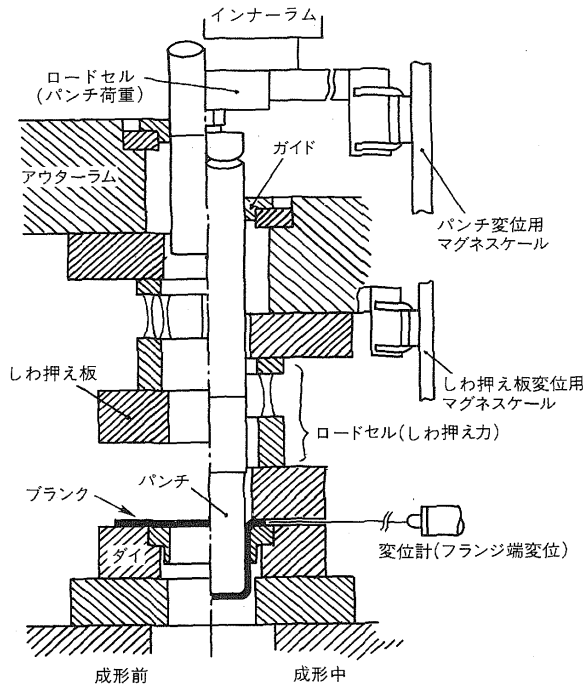


図7 深絞り成形装置の詳細

特性値(n 値、 F 値)、摩擦係数 μ 、パンチ速度なども表示され、適応制御深絞りの状況が時々刻々モニタリングできるようになっている。

図7に深絞り成形装置の詳細を示す。しわ押え力を直接センシングするため、しわ押え板の上部に自作のリング状ロードセルを設置した。本試験機ではしわ押え力制御の精度は目標値から ± 50 N以内であり、また、その適応制御可能な最高パンチ速度は後述の工具条件の場合、約300 mm/minである。

4. 供試材及び実験方法

本法が様々なブランクの材料特性、潤滑状態及び絞り比 DR にも広範囲に適用できる最適しわ押え条件を検討するため、供試材及び加工条件は次のようにした。供試材は、軟質材として純アルミニウム板(A1070-H26.)を $400^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ 保持後空冷したもの(以後、A1-0材と呼ぶ)と、硬質材

表1 供試材の機械的性質

材 料		σ_a /MPa	n	F/MPa	e_u /%	r	\bar{r}	t_0 /mm
Al-O	0°	83	0.28	157	38.9	0.71	1.02	1.00
	45°	73	0.29	137	54.2	1.28		
	90°	78	0.31	148	52.3	0.79		
SPC	0°	299	0.25	542	29.5	1.70	1.95	1.00
	45°	301	0.24	539	29.5	1.90		
	90°	301	0.26	554	29.5	2.30		

として深絞り用冷延鋼板（以後、SPC材と呼ぶ）を選んだ。その公称板厚 t_0 はいずれも1mmであり、引張試験で得られた材料特性値を表1に示す。潤滑剤は摩擦係数の大きいタービン油 ($\mu \approx 0.2$) と小さいふっ素樹脂 ($\mu \approx 0.05$) を選びブランクの両面に塗布した。また、各供試材とも二、三種類の絞り比 (DR) について実験を行った。実験に用いたパンチとダイは、それぞれ外径97.9mm、肩半径10mmと内径100.8mm、肩半径8mmである。

5. 実験結果

5.1 同定工程における最適しわ押え条件の決定

本法のステージ1は摩擦を無視した式を用いて妥当な $\bar{\sigma}_{eq}$ が得られるようになる準備段階であり、次のステージ2では摩擦係数 μ と $\bar{\sigma}_{eq}$ を交互に計算して $\bar{\sigma}_{eq} - \bar{\epsilon}_{eq}$ の関係から材料特性値等を同定する行程である。したがって、精度のよい同定を行うには、図2に示す同定行程の最適しわ押え条件 (BHF1、 ΔDR^*_1 、BHF2、 ΔDR^*_2) について検討する必要がある。

a) BHF1、 ΔDR^*_1 の決定

本実験装置のしわ押え力の制御下限が1kN弱であるため、BHF1の最適条件についてはそれ以上のしわ押え力について調べた。最適なBHF1および ΔDR^*_1 を決定するには以下の点を考慮する必要がある。ステージ1からステージ2へ移行するとき $\bar{\sigma}_{eq}$ が引張試験から得られる値とできるだけ等しく、同時に摩擦係数 μ も妥当な同定値でなければならない。また、 ΔDR^*_1 をできるだ

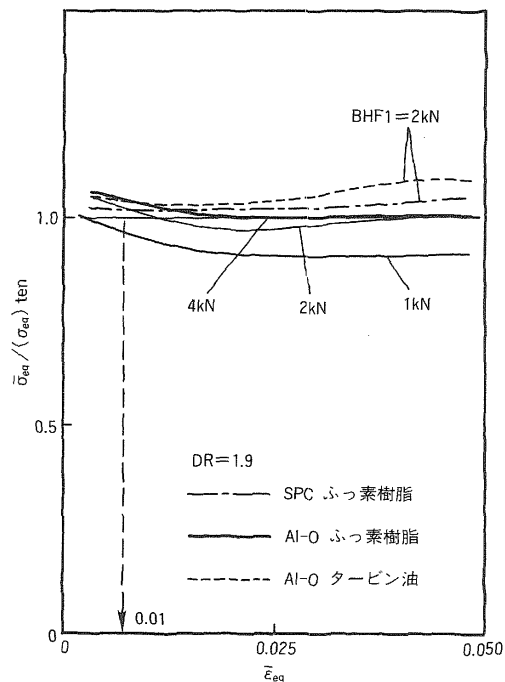


図8 引張試験結果に対するインプロセスデータからの評価値の比に及ぼすBHF1 (ステージ1のB.H.F)の影響

け小さくして早く同定を終らせ、最適条件で深絞りを完了することが要件となる。図8はステージ1における $\bar{\sigma}_{eq}$ の評価値と引張試験による実測値 $(\sigma_{eq})_{ten}$ との比に及ぼすBHF1の影響を示したものである。この図よりBHF1=2kNであればブランク材料、潤滑剤によらずほぼ良好な $\bar{\sigma}_{eq}$ の評価ができることがわかる。

そこで、これらを総合的に考慮して、BHF1=2kN、 $\bar{\epsilon}_{eq}=0.01$ とした、なお、 ΔDR^*_1 と $\bar{\epsilon}_{eq}$ の関係は

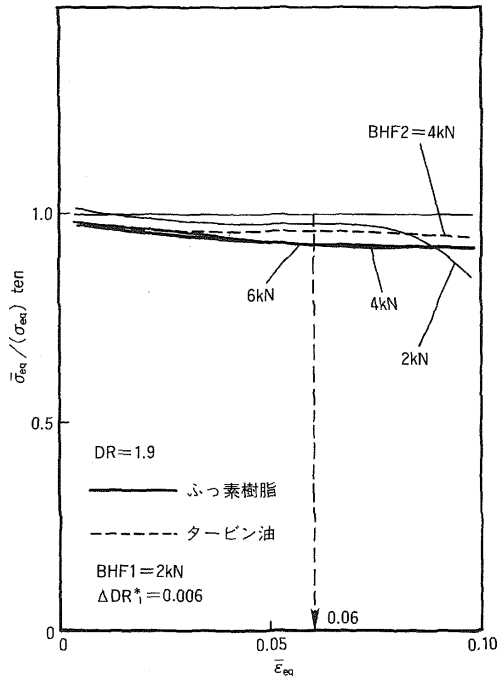


図9 引張試験結果に対するインプロセスデータからの評価値の比に及ぼすBHF2 (ステージ2のB.H.F.)の影響 (Al-O材)

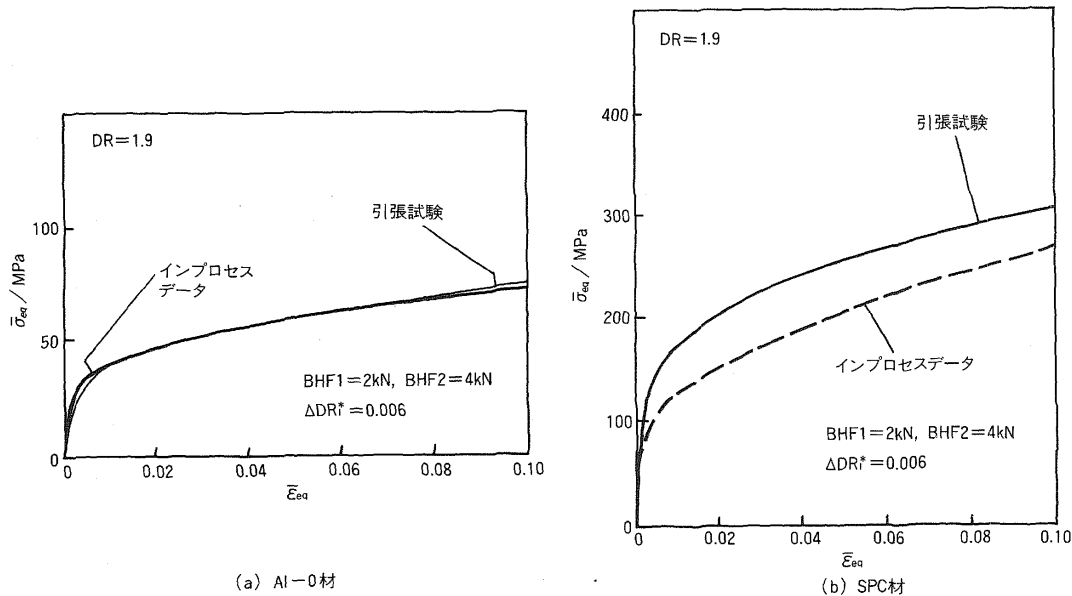
式(1)'において $\Delta DR^*_1 = DR - DR^*$ とおくことによって求められ、 $\bar{\epsilon}_{eq} = 0.01$ のとき、 $\Delta DR^*_1 = 0.006$ となる。

b) BHF2、 ΔDR^*_2 の決定

次にステージ2における最適条件について調べた。図9に一例としてAl-O材に対する $\bar{\sigma}_{eq}$ の評価値と実測値との比に及ぼすBHF2の影響を示す。Al-O材ではBHF2=2kNの時、様々な条件の下でも最もよい評価値が得られることがわかる。しかし、SPC材についてはBHF2=2kNは低すぎるためしわが発生してしまった。したがってほぼ同様の結果が得られるBHF2=4kNを最適しわ押え力とした。また、このしわ押え力であっても $\bar{\epsilon}_{eq} = 0.07$ 以上ではしわが発生するものもあったので同定区間を $\bar{\epsilon}_{eq} = 0.06$ までとした。このときの ΔDR^*_2 の値は上記のa)と同様、式(1)'において $DR^* = DR - (\Delta DR^*_1 + \Delta DR^*_2)$ とおくことによって得られ、 $\Delta DR^*_2 = 0.045$ となる。

5.2 $\bar{\sigma}_{eq} - \bar{\epsilon}_{eq}$ 曲線

上記の適正しわ押え条件で得られた $\bar{\sigma}_{eq} - \bar{\epsilon}_{eq}$ の曲線例を図10に示す。Al-O材ではインプロセスで同定された $\bar{\sigma}_{eq} - \bar{\epsilon}_{eq}$ 曲線が引張試験の結



(a) Al-O材 (b) SPC材
図10 インプロセスデータと引張試験から得られる $\bar{\sigma}_{eq} - \bar{\epsilon}_{eq}$ 関係との比較

表2 材料特性値の決定法による同定値の比較

材 料		Al-O					
		n	S	F/MPa	S	σ_B /MPa	s
① 平均法	ふっ素樹脂	0.27	0.02	143	4.58	76.3	1.50
	タービン油	0.23	0.02	135	3.71	76.7	3.26
② 二点法	ふっ素樹脂	0.25	0.02	142	3.61	78.1	3.15
	タービン油	0.22	0.03	133	6.81	76.3	1.55

※n: n値、F: 強度係数 ($\sigma = Fe^n$)、S: 標準偏差 ϵ_n

果ときわめてよく一致している。一方、SPC材は、 $\bar{\sigma}_{eq}$ が破線のように引張試験値より低く評価されている。これはr値が大きいかかわらず、r値を考慮せず等方性としているためである。

5.3 材料特性値 n 値、F 値の求め方および同定結果

式(10)、(11)のn値とF値の算出法は簡便性と精度の面から、ステージ2の間で次の2方式について検討した。

①平均法; 1制御ループ毎にn値を計算し、BHF2区間終了時にそれらを平均してn'とする。F値はそのときの $\bar{\sigma}_{eq}$ とn'を用いて、 $F' = \bar{\sigma}_{eq} n' / (\bar{\epsilon}_{eq} n')^m$ から計算する。

②二点法; BHF2区間の最初と最後の $\bar{\sigma}_{eq}$ と $\bar{\epsilon}_{eq}$ のデータから計算する。

表2は $\bar{\sigma}_{eq} - \bar{\epsilon}_{eq}$ 曲線がきわめてよく一致するAl-O材に関し、F値、n値、 σ_B について両方式の同定結果を示したものである。なお、同表中には同一条件で実験を5回行いそのばらつきも併記した。このばらつきを考慮しても同定結果には方式①と②の有意さは認められない。そこで、以下の材料特性の同定では方式①を採用することにした。

図11は種々のプラック材、潤滑剤およびDRに対して同定した材料特性値から計算した σ_B と、引張試験から求めた値 $(\sigma_B)_{ten}$ との比を示したも

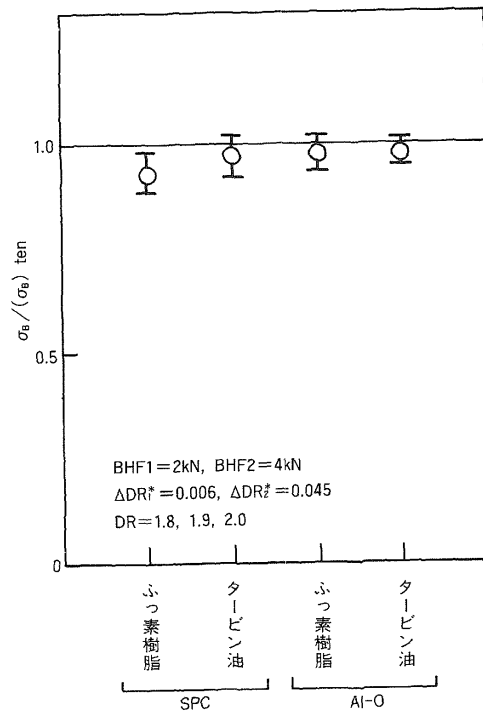


図11 引張試験結果に対するインプロセスデータからの評価値(σ_B)の比

のである。SPC材は図10では $\bar{\sigma}_{eq} - \bar{\epsilon}_{eq}$ 曲線があまり一致していなかったが、 σ_B で見ると比較的よく同定されている。これは図10を見ればわかるようにひずみが大きくなるにつれ、両者の $\bar{\sigma}_{eq} - \bar{\epsilon}_{eq}$ 曲線の差が小さくなっているためであ

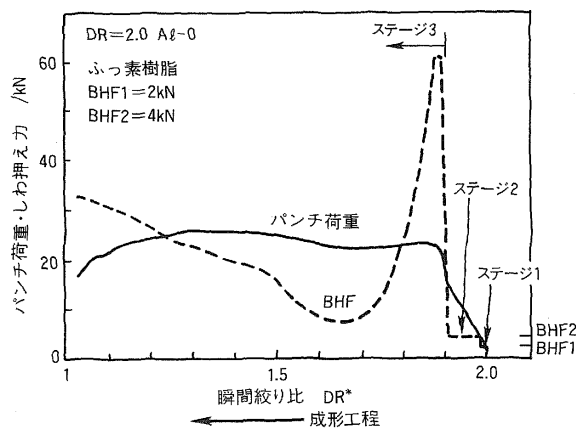


図12 適応制御深絞り法による成形特性の例
(同定工程後にパンチ速度の変更:60mm/min→300mm/min)

る。このように材料の破断応力を予測する材料特性値 σ_B の同定精度が引張試験値の10数%以内にすべて入っているため、ステージ3の変圧しわ押え深絞りも破断を十分精度よく回避して制御できるものと考えられる。SPC 材に関しては r 値を考慮することで、より高精度の同定が可能になると考えられる。

5.4 適応制御実験結果

図12は、適応制御実験として Al-O 材に対し、以上の最適しわ押え条件の下で同定を行い、その後破断限界変圧しわ押え法により深絞り加工を行ったときのパンチ力、しわ押え力曲線の例である。なお、本実験結果は高速深絞りの可能性を併わせて検討するため、同定工程のみ低速（パンチ速度60mm/min）で絞りそれ以後は高速（パンチ速度300mm/min）で絞ったものである。この図より、材料特性等の同定精度が高いため、破断することなく、図1の原理図における破断限界変圧しわ押え深絞りのようにパンチ力（≒絞り力）がほぼ一定になるように十分制御され、適応制御深絞りが達成されていることがわかる。また、この同定工程のみ低速で絞り、同定後は高速で絞る本方式を採用することによって、同定精度を犠牲にすることなしに加工に要する時間を大幅に短縮することができる。

(原稿受付日/9月11日 *東京都立大学工学部助教授)

6. 結言

1) ブランク材の材料特性値及び潤滑状態が不明な単品生産にも十分対応できる円筒深絞り法として、深絞り中にその材料特性と潤滑状態を同定し、最適な深絞り条件になるようにしわ押え力を制御する変圧しわ押え法を応用した適応制御深絞り法を提案した。

2) 高速で高精度な適応制御深絞り加工機を開発し、しわ押え力制御の精度が±50N以内まで向上することができた。また、生産性を高める方法として、同定工程を低速にして同定精度を上げ、その後の工程で高速にすれば、大幅な加工時間の短縮ができることを示した。試作・開発した適応制御深絞り加工機では同定工程を60mm/min、その後300mm/minまででも十分良好な深絞りができることを実証した。

3) 種々のブランク材料、潤滑剤、絞り比に対して満足する同定工程のしわ押え条件を検討した結果、その最適条件で適応制御深絞りが可能であることを試作した適応制御深絞り加工機で明らかにした。

終りに、本研究に協力してくれた本学大学院生、長島敏幸君（現在、NKK）と添田建太郎君（現在、ソニー(株)）に対し感謝するとともに、本研究を助成していただいた（財）天田金属加工機械技術振興財団に対し、あわせて謝意を表します。

参考文献

- 1) 真鍋健一・浜野秀光・西村尚：塑性と加工、29-330(1988)740。
- 2) Stelson, K. A. & Gossard, D. C. : Trans. ASME, J. Engng. Indust., 104-4(1982), 389。
- 3) Chandra, A. : ibid., 109-3(1987), 265。
- 4) Yang, M. & Shima, S. : Advanced Technology of Plasticity 1990, 3(1990), 1483。
- 5) Koehne, R. : Indust.-Anz., 107-50(1985), 19。
- 6) 河合望：塑性加工学、(昭48)、207、朝倉書店。
- 7) 日本塑性加工学会編：プレス加工便覧、(1975)、361、丸善。
- 8) 真鍋健一・添田建太郎：平元春望加講演、(1989)、363。
- 9) 篠原宗憲・森茂樹：36回塑加連講論、(1985)、229。