

後方せん孔押し加工の高精度化に関する研究

三重大学 工学部 機械工学科

助手 松井正仁

(平成6年度奨励研究助成 AF-94033)

1. 研究の背景

後方せん孔押しは冷間鍛造の基本的形態の一つで、内外面を機能面とする機械部品を中実素材から能率よく成形する加工法である。この場合、内外面の同軸度(偏心)が加工精度上重要な問題となる。一方、非対称製品を加工する場合には厚肉部分と薄肉部分の材料流動の違いによって製品高さが一様でなくなったりするという問題が生じる。

これまでに円筒容器のせん孔押しについて、パンチ荷重の偏心およびパンチ頭部に二次的に作用する横荷重を測定し、偏心・偏肉の発生機構を明らかにしてきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、偏心・偏肉の定量的予測はなお困難な状態にある。

本研究では、材料流動および加工力の非対称性を基礎的に明らかにするため、平面ひずみ問題に置き換えてその定常状態について上界法およびすべり線場法を用いて解析を行う。さらに二次元せん孔押しについて、パンチに働く荷重の非対称成分を測定できる装置を試作し、パンチの弾性変形と偏肉との関係を調べる。

2. 解析方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾

上界法においては、Fig. 1に示すような剛性三角形速度場を用い、パンチ下面にデッドゾーンができる場合とできない場合の二通りを仮定した。Fig. 1はデッドゾーンができる場合の速度場であるが、デッドゾーンの深さ $H=0$ とすればデッドゾーンの無い速度場となる。

断面減少率は $r=W_p/W_c$ である。 W_p はパンチ幅の半分、 W_c はコンテナ幅の半分である。

ダイ・コンテナに対するパンチの偏心を e とし、同軸の場合の製品厚さ(W_c-W_p)に対する比を偏心率 ε と定義する。

$$\varepsilon = \frac{e}{W_c - W_p} = \frac{a_L - a_R}{a_L + a_R} \quad (1)$$

ここで、 $a_R = W_c - W_p - e$ は薄肉側(右側)の製品厚さ、 $a_L = W_c - W_p + e$ は厚肉側(左側)の製品厚さである。

Fig. 1の e_{ef} はパンチ中心に対する材料流動の分水点の偏心を表す。

摩擦については、コンテナ壁は滑らかとし、パンチ端面が滑らかな場合(摩擦せん断係数 $m_p=0$)と粗い場合($m_p=1$)について解析を行った。デッドゾーンができる場合は未知数は22個で、デッドゾーンができない場合は $H=0$ であるから未知数は21個である。速度場の最適化には直接探索法の一つであるPowell法⁽⁷⁾を用いた。

すべり線場法においては行列演算子法⁽⁸⁾を用いて広い範囲のすべり線場解を求めた。結果をまとめてFig. 2に示す。パンチが粗くてデッドゾーンができる場合、すべり線場は断面減少率の増加につれて、 $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3^{(9)} \rightarrow S_4^{(10)} \rightarrow S_5^{(10)}$ と変化する。同様に、パンチが滑らかでデッドゾーンができない場合のすべり線場は、 $S_6^{(11)} \rightarrow S_7^{(11)} \rightarrow S_8^{(10)}$ と変化する。ただし、 S_6 、 S_7 については偏心がある場合の解を得るに至っていない。

今回、新たに断面減少率が小さい範囲についてのすべり線場 S_1 、 S_2 を求めることができた。

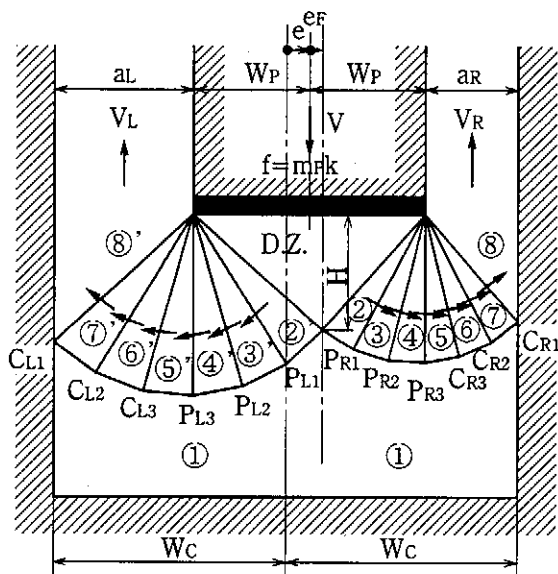


Fig. 1 Upper-bound field consisting of rigid triangles

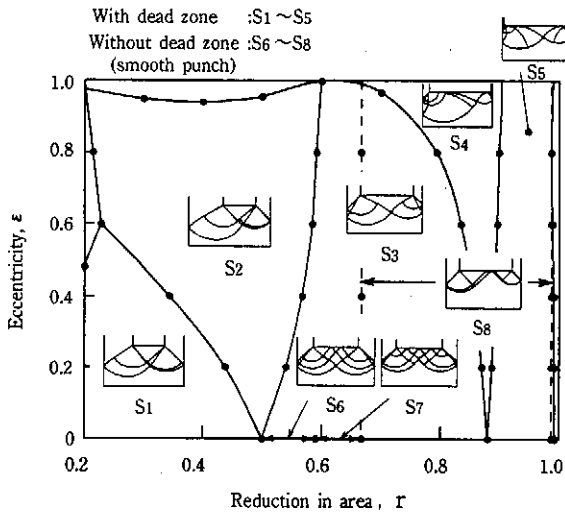


Fig. 2 Slip-line fields

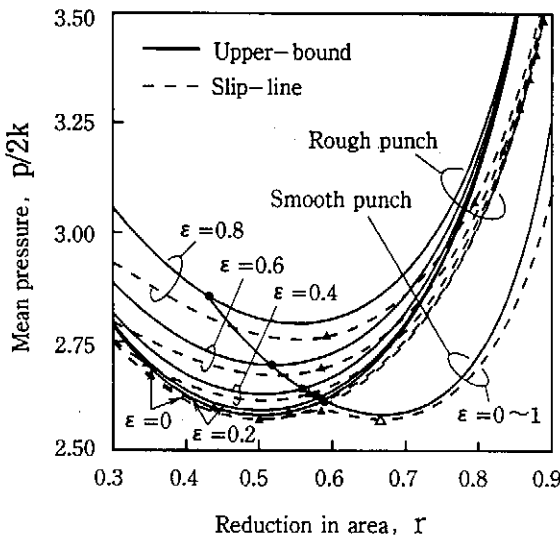


Fig. 3 Relationship between $p/2k$ and r

3. 解析結果

3.1 パンチ圧力

Fig. 3 に平均パンチ圧力 $p/2k$ を示す。 k は材料のせん断降伏応力である。 上界法によると、 r が小さいところではパンチ端面の摩擦状態に関わらずデッドゾーンができ、 r が大きくなるとできなくなる。 速度場が替わる r (●点) は偏心率 ϵ が大きくなるにつれて、 $\epsilon = 0$ で $r=0.59$ から $\epsilon = 0.8$ で $r=0.42$ と小さくなる。 得られたパンチ圧力 $p/2k$ の上界解をすべり線場解と比較すると、 高々 8% 大きいだけである。

3.2 出口速度

パンチの速度 V 、 薄肉側 (右側) の出口速度 V_R 、 厚肉側 (左側) の出口速度 V_L とする。 $\epsilon = 0$ では、 $V_R = V_L$ である。 偏心があると、 薄肉側の出口速度 V_R が大きくなり、 厚肉側の出口速度 V_L は小さくな

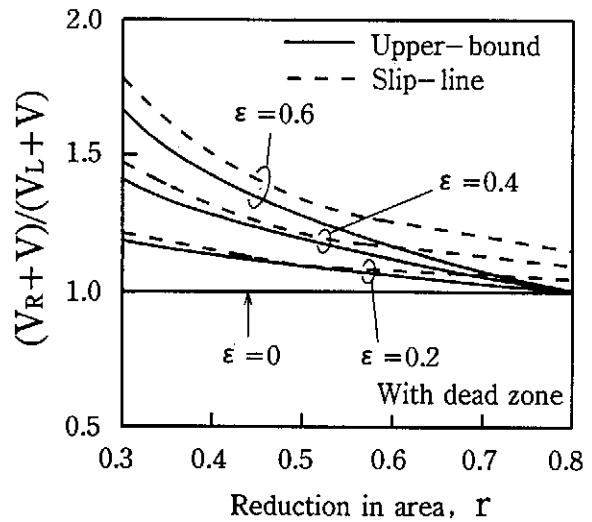


Fig. 4 Relationship between $(V_R + V)/(V_L + V)$ and r

る。 ただし、 デッドゾーンができない (パンチが滑らかで、 r が大きい) 場合は、 偏心があっても出口速度は等しくなる。

製品高さは、 パンチに対する相対速度 $V_R + V$ および $V_L + V$ で決まるので、 Fig. 4 に出口速度比 $(V_R + V)/(V_L + V)$ を示す。 速度差が生じるのはデッドゾーンができる場合であるのでデッドゾーンができる場合を示す。 薄肉側 (右側) の速度の方が大きくなるが、 r が大きいほど速度比は小さくなる。 なお、 上界解とすべり線場解は、 r と ϵ があまり大きくなければほぼ一致している。

3.3 横荷重と荷重偏心

パンチに働く荷重の非対称成分にはパンチに働く横荷重 (摩擦) が考えられる。 パンチの曲げ作用には荷重中心のパンチ中心からの偏心も関与する。 そこで、 パンチに働く横荷重 F および荷重 P のパンチ中心からの偏心 e_p をすべり線場法によって求めた。 Fig. 5 に示すように、 デッドゾーンができる場合はデッドゾーンが降伏状態に達していると仮定し、 パンチ端面までデッドゾーン内にすべり線を延長することにより、 パンチ端面に働く垂直圧力 p とせん断応力 τ の分布を求め、 横荷重および荷重偏心を求めた。 横荷重 F および荷重偏心 e_p の符号は Fig. 5 の方向を正とした。 どちらもパンチを曲げて偏心を助長する (遠心) 方向が正である。

Fig. 6 にパンチに働く横荷重 F をパンチ荷重 P で無次元化した F/P を示す。 パンチが滑らかでデッドゾーンができない場合は横荷重は発生しないので、 デッドゾーンができる場合のみを示している。

ϵ の小さいところでは、 横荷重 F/P は ϵ にほぼ比

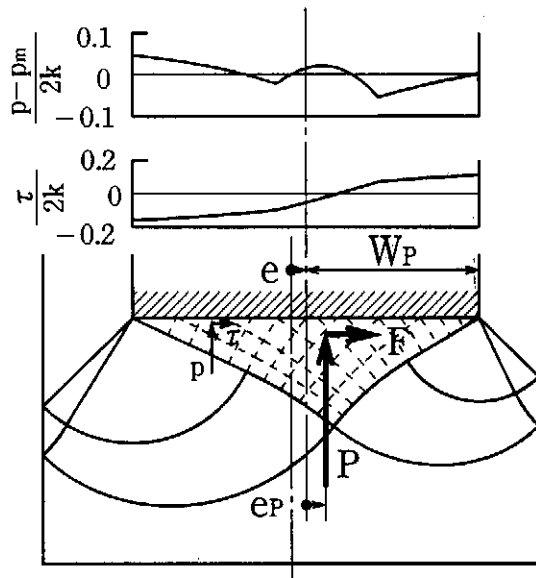


Fig. 5 Schematic illustration of F and e_p

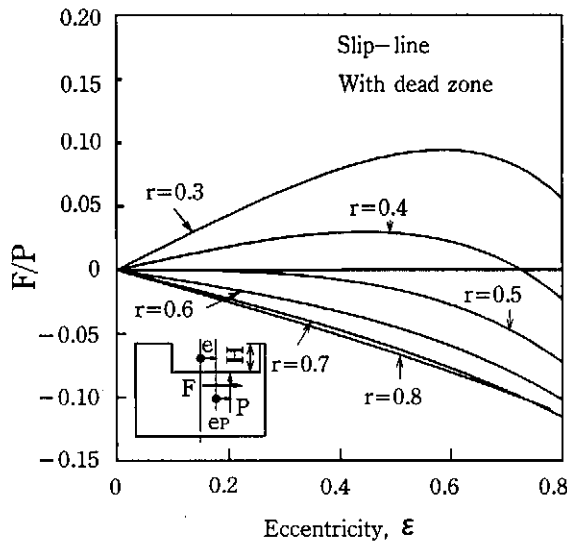


Fig. 6 Relationship between F/P and ϵ

例し、 $r < 0.5$ では r 小ほど遠心作用が増大し、 $r > 0.5$ では r 大ほど求心作用が増大する。 ϵ が大きくなるにつれて、 $r < 0.5$ における遠心作用が頭打ちになり、求心作用に転じる。

一方、Fig. 7にパンチ荷重の偏心 e_p をパンチ幅の半分 W_P で無次元化した e_p/W_P を示す。荷重偏心 e_p/W_P の r と ϵ による変化は複雑である。デッドゾーンができる場合、 $r=0.3, 0.4$ では、 ϵ が小さいところでは $e_p/W_P=0$ となり、荷重中心はパンチ中心と一致する。 ϵ が大きくなると荷重偏心は厚肉側に位置し、求心作用が大きくなる。 $r=0.5, 0.6, 0.7$ では $e_p/W_P < 0$ で求心作用を示すが、 ϵ

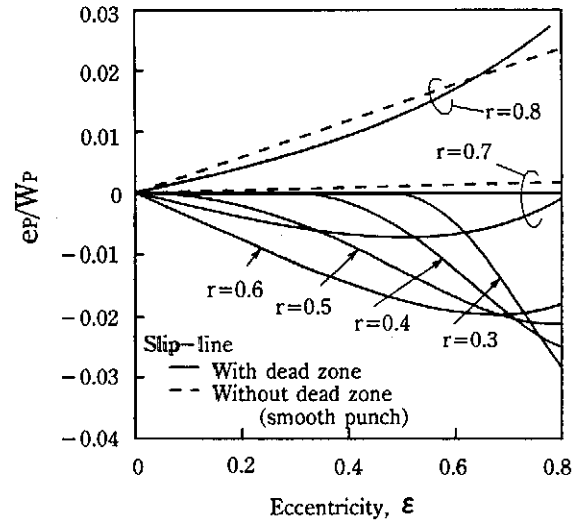


Fig. 7 Relationship between e_p/W_P and ϵ

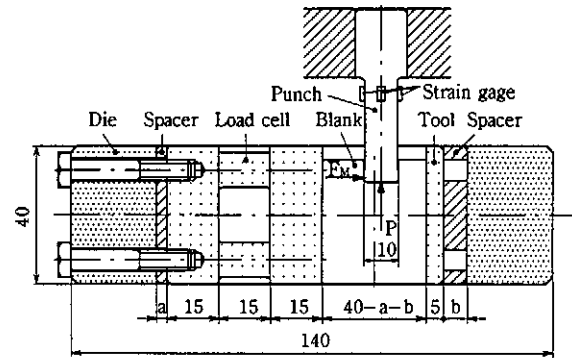
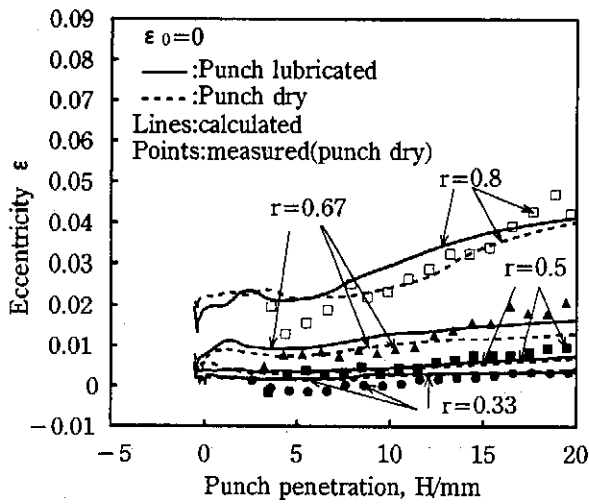


Fig. 8 Experimental apparatus

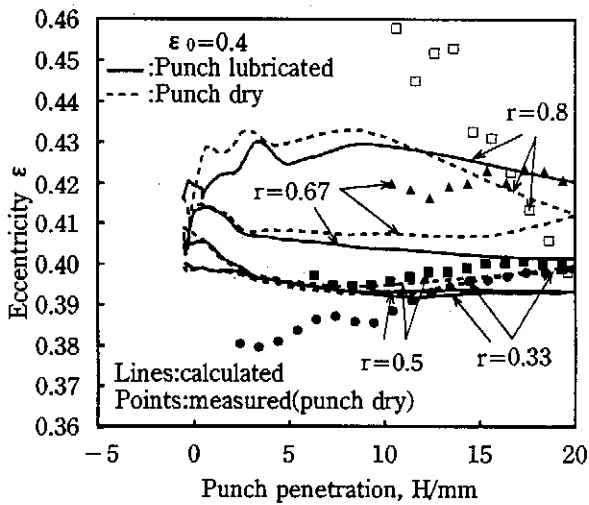
の増大につれて、 r 大ほど早く e_p/W_P に極小値が現れる。 $r=0.8$ では $e_p/W_P > 0$ で、 ϵ とともに遠心作用が大きくなる。

4. 実験装置および方法⁽¹²⁾⁽¹³⁾

解析結果の妥当性を調べるため、Fig. 8のような平面ひずみ後方せん孔押し装置を試作した。スペーサの厚さ a, b により、初期偏心率 ϵ_0 と断面減少率 r を設定する。パンチは幅10mm×奥行き15mm×長さ30mm、肩丸み0.5mmの平頭パンチとし、ランド長さ2mmとした。押し出し blanks は市販のアルミニウムA1050-H112を用いた。圧縮試験より変形抵抗は $\sigma = 144(\epsilon + 0.03)^{0.19}$ MPaである。製品深さ20mmのときの押し残り厚さが22mmとなるように blanks 高さを変更した。潤滑剤には牛脂を用いた。blanks 上面とパンチをアセトンで脱脂する脱脂条件と全面潤滑の条件について実験を行った。押し出し速度は3mm/minである。パンチ先端から23



(a) $\epsilon_0 = 0$



(b) $\epsilon_0 = 0.4$

Fig. 9 Variation of ϵ and H

mm の位置にひずみゲージを取り付け、パンチに働く垂直荷重 P と横荷重 (曲げモーメント) M を測定した。ただし、装置の都合上、荷重偏心と横荷重を分離して求めることができないので、パンチに働くモーメントをパンチ先端に働く横荷重に換算し F_M とした。

5. 実験結果および考察

Fig. 9 に製品深さ H ともなう偏心率 ϵ の推移を示す。なお、計算値はパンチを片持ちばりのみとし、先端に集中荷重 F_M が働くと考えて求めたものである。計算値と測定値はほぼ対応している。

初期偏心率 $\epsilon_0 = 0$ と偏心がほとんどない場合、行程とともに偏心が増大している。断面減少率 r が大きいほどその傾向は大きい。潤滑による差はみられない。

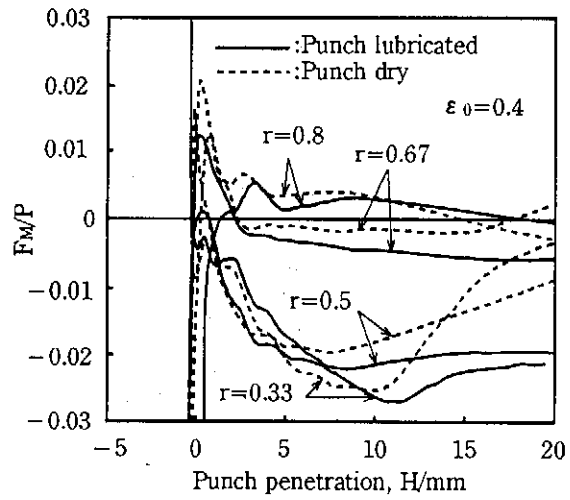


Fig. 10 Variation of F_M/P and H

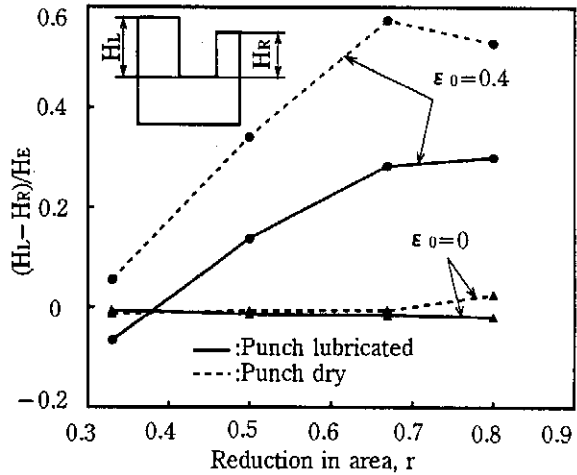


Fig. 11 Relationship between $(H_L - H_R)/H_E$ and r

$\epsilon_0 = 0.4$ と偏心が大きい場合、断面減少率 r が大きいほど、加工初期に偏心が増大するが、 $H=5\text{mm}$ 以降、偏心が減少していき、 $H=20\text{mm}$ では初期偏心よりも偏心は小さくなる。 $r < 0.8$ では脱脂した方が行程後期に偏心が大きくなり、 $r=0.8$ では偏心が小さくなっている。

Fig. 10 に横荷重 F_M をパンチ荷重 P で無次元化した F_M/P を示す。 F_M/P が正ということはパンチを曲げて偏心を増大させる遠心作用が働くことを示す。

$\epsilon_0 = 0.4$ の場合、断面減少率 r が小さいほど求心作用が大きい。 $r=0.8$ では加工初期は逆に遠心作用を示しているが、行程が進むにしたがい、求心作用が働くようになる。脱脂した場合に r が小さいと $H=10\text{mm}$ 付近から求心作用が小さくなり、 $r=0.8$ では求心作用が大きくなる。

Fig. 11 に実験後の厚肉側の製品深さ H_L と薄肉側

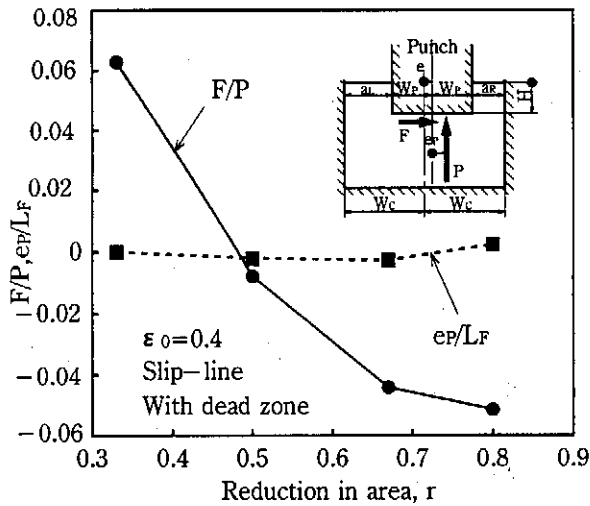


Fig. 12 Relationship between $F/P, e_p/L_F$ and r

の製品深さ H_R の差を偏心が無い場合の製品深さ H_E で無次元化した $(H_L - H_R)/H_E$ の測定結果を示す。

$\epsilon_0 = 0$ では製品深さの差はほとんど見られない。 $\epsilon_0 = 0.4$ では、 $(H_L - H_R)/H_E > 0$ と厚肉側の製品深さが大きく、 r が大きいほどその傾向が大きくなり、脱脂した方がその差は大きくなっている。解析では薄肉側の出口速度の方が大きくなったが、これは薄肉側の面圧が高く、薄肉側の流動抵抗が大きくなったためと考えられる。

本実験から得られた横荷重 F_M にはパンチ荷重の偏心による曲げ作用も含まれている。 F と e_p による曲げ作用を比較するため、片持ちはりの先端に集中荷重 F が作用する場合とモーメント $P \times e_p$ が作用する場合を考え、同じたわみを生じさせる関係を求め、 $F/P = e_p/L_F$ ($L_F =$ 換算係数) とおく。一様断面のパンチの場合、その長さを L とすると、 $L_F = 2L/3$ となり、本装置の場合 $L_F = 20\text{mm}$ である。パンチが長いほど L_F は大きくなり、 F の影響が大きくなる。

Fig. 12 に $\epsilon_0 = 0.4$ の場合のパンチ下にデッドゾーンができる場合のすべり線場から求めた横荷重 F/P と荷重偏心 e_p/L_F を示す。脱脂した場合が解析条件に近いので脱脂した場合の F_M/P と比較すると、行程初期は r が小さいほど求心作用が大きく、解析結果とは異なるが、行程後期には r が小さいと遠心方向に向かい、 r が大きいと求心作用が大きくなっていくという傾向はほぼ対応している。

本装置では F と e_p を分離して測定することができないが、比較のため実験後の製品の偏心の測定結果より F と e_p を試算した。Fig. 13, Fig. 14 に脱脂した場合の結果を示す。

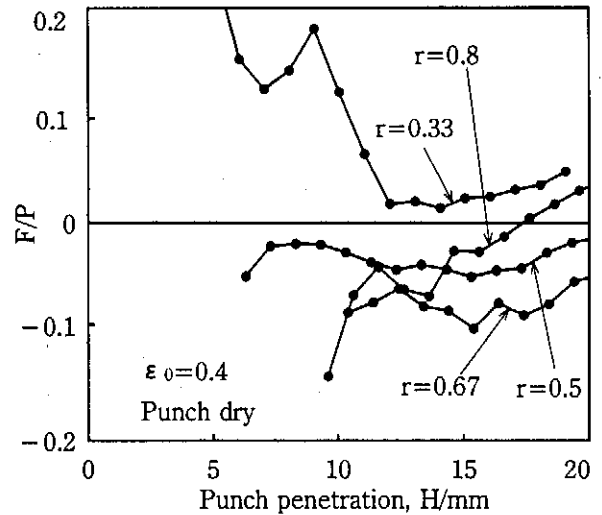


Fig. 13 Variation of F/P with H

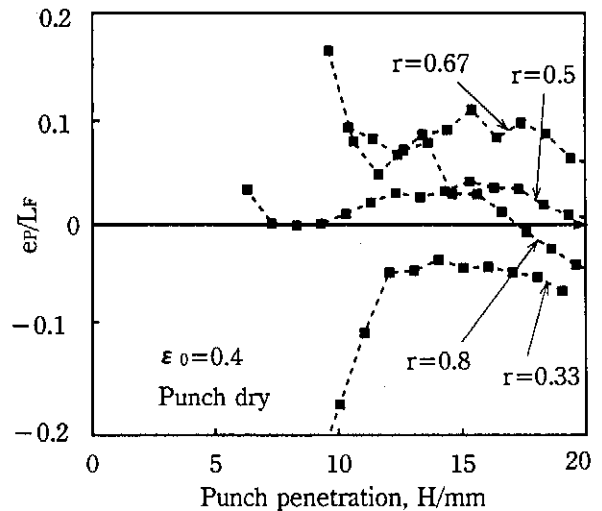


Fig. 14 Variation of e_p/L_F with H

$r > 0.33$ の場合、 F/P は求心作用を示し、 e_p/L_F は遠心作用を示す。 $r = 0.33$ の場合、 F/P は遠心作用を示し、 e_p/L_F は求心作用を示す。偏心の測定値は押出された材料がわん曲するため、 r が大きいほど誤差が大きくなっているが、求心、遠心の方向は解析結果とほぼ対応している。

$\epsilon_0 = 0.4$ と初期偏心が大きい場合、解析によると r が大きいほど薄肉側の製品深さが大きくなるのに対し、実験では r が大きいほど厚肉側の製品深さが大きくなっている。解析ではコンテナ壁の摩擦が等しいと考えているが、実験では薄肉側の流動抵抗が大きくなっている。解析よりも材料流動は厚肉側に優勢となり、 F/P の遠心作用は抑えられる。一方、厚肉側への材料流動が優勢になるということは薄肉

側のパンチ面圧が大きくなると考えられる。荷重偏心による遠心作用が解析よりも大きくなり、 r が大きい場合の求心作用が抑えられたと考えられる。脱脂した場合、 r が小さいと行程後期に遠心作用が大きくなっていき、 r が大きいと求心作用を示すという傾向は工藤らの実験^{(14) (15)}と一致した。

6. 結 言

非対称平面ひずみせん孔押出しにおける材料流動および荷重の非対称成分を上界法およびすべり線場法を用いて解析し、実験との比較検討を行った結果、次のことが明らかになった。

- (1) 新たに断面減少率の小さい範囲のすべり線場を求め、広い範囲のすべり線場解を得ることができた。
- (2) 材料流動および所要パンチ荷重については上界解とすべり線場解はよく一致した。しかし、上界法では応力分布を求めることができないので、すべり線場法を用いてパンチに働く横荷重だけでなくパンチ荷重中心の偏心を求めた。
- (3) 実験による偏心の測定結果と計算結果はほぼ一致した。
- (4) 初期偏心がほとんどない場合は偏心が助長され、偏心が大きい場合は行程とともに偏心が矯正される。
- (5) 偏心がある場合、解析では薄肉側の製品高さが大きくなるが、実験では薄肉側の面圧が大きくなるため厚肉側の製品高さが大きくなる。
- (6) 初期偏心が大きく、断面減少率 $r > 0.33$ の場合、材料流動は厚肉側に優勢であり横荷重 F/P は求心作用を示し、荷重偏心 e_P/L_F は遠心作用を示す。 $r = 0.33$ の場合、 F/P は遠心作用を示し、 e_P/L_F は求心作用を示す。解析と実験はほぼ対応した。

謝 辞

本研究は、天田金属加工機械技術財団の奨励研究助成により行われたものであり、ここに財団に対し厚く感謝いたします。

参考文献

- (1) 白井・水野・村松, 機論, 55-514, C (1989), 1538-1545.
- (2) 白井・小島・水野, 機論, 56-524, C (1990), 1022-1027.
- (3) 水野・ほか 3 名, 機論, 56-529, C (1990), 2497-2502.
- (4) 水野・松井・白井, 機論, 59-558, C (1993), 581-586.
- (5) 水野・松井, 平 4 春塑加講論, (1992), 403-406.
- (6) 松井・水野・黒崎, 機講論, 943-2, (1994), 185-186.
- (7) Powell, M. J. D., *The Comp. J.*, (1964), 155-162.
- (8) Dewhurst, P. & Collins, I. F., *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, 7 (1973), 357-378.
- (9) Johnson, W., Sowerby, R., Venter, R. D., *Plane Strain Slip Line Fields for Metal Deformation Processes*, (1982), 209-214, Pergamon Press.
- (10) Johnson, W., *J. Mech. Phys. Solids*, 4 (1956), 191-198.
- (11) Collins, I. F., *J. Mech. Phys. Solids*, 16(1968), 137-152.
- (12) 松井・水野・黒崎, 平 7 春塑加講論, (1995), 181-182.
- (13) 松井ほか 3 名, 平 8 春塑加講論, (1996), 194-195.
- (14) 工藤・伊藤, 22 回塑加連講論, (1971), 335-338.
- (15) 工藤・吉村, 昭 50 塑加講論, (1975), 237-240.