容器の冷間押出し加工における偏肉*

(第4報, 初期偏心およびポンチ先端形状の影響)

水野高爾^{*1}, 松井正仁^{*2}, 白井徳雄^{*3}

Study on Eccentricity in Cold Cup Extrusion (4th Report, Effects of Initial Eccentricity and Punch Nose Profile)

Takaji MIZUNO, Masahito MATSUI and Tokuo SHIRAI

Deviation of punch load center from the punch center, lateral force exerted on the punch head and eccentricity between punch and die are measured through the forward cup extrusion. When an initial eccentricity exists between the punch and die, lateral force initiates and bends the punch toward the die center; then the eccentricity of the cup decreases with increase in punch penetration. This centripetence appears when both initial eccentricity and extrusion ratio are large. Conversely, when both initial eccentricity and extrusion ratio are small, the eccentricity induced by some disturbances increases with punch penetration. A coned punch surpasses a flat-ended punch in the centripetence, but is apt to become unstable as the process proceeds. A frustum-headed punch is concluded to be the most stable. An increase in the land length stabilizes the punch but tends to lead to galling. Unbalanced friction and the oblique end of the blank cause larger eccentricity for the coned punch than for the previously reported flat-ended punch.

Key Words: Plastic Forming, Cold Forging, Cup Extrusion, Accuracy, Eccentricity, Deflection of Punch, Lateral Force, Punch Profile

1. 緒 言

容器状の冷間鍛造品は形状の自由度が大きく付加価値も高い。しかし、ポンチは一般に細長くなるため押出し加工中に曲がって製品に偏心・偏肉をもたらしやすい。偏心・偏肉の問題は高精度化のための重要な課題であるが、解析するにしろ、実験するにしろ、わずかな非軸対称成分を扱うために困難が多く、偏心の発生機構に関する研究はほとんどない。

著者らはポンチ荷重の偏心およびポンチ頭部に二次的に作用する横荷重の大きさと方向などの加工中の推移を測定できる前方押出し形式の実験装置⁽¹⁾を試作して、ブランクの端面の傾きおよび端面摩擦の不均衡と偏心・偏肉の関係を明らかにした⁽²⁾。また、非軸対

称成分を含む可容速度場を提案して、ポンチとダイの初期偏心およびブランクの降伏応力や摩擦の不均一によって生じる非軸対称流動を予測した⁽³⁾。

本報では、ポンチとダイの初期偏心によって惹起される非軸対称荷重成分と偏心・偏肉の推移を示す。また、ポンチ先端形状が偏心・偏肉の推移にどう関与するかを明らかにし、前報までの結果と合わせて、容器押出しにおける型設計の指針の一端を示す。

2. 実験条件, 方法および記号

図1に前方押出し形式の実験装置を示す。ポンチとダイの初期偏心は偏心リングにより与えられる。一部の実験では、厚肉側と薄肉側の流出速度のちがいを図に示すように板ばねで測定した。ポンチ荷重のほかに、ポンチに加わる曲げモーメントとその方向を2カ所で測定することによりポンチ荷重の偏心とその方向およびポンチ頭部に作用する横荷重とその方向が求められ、ポンチ先端のたわみが計算される。

* 原稿受付 平成4年6月22日。

^{*1} 正員, 名古屋工業大学 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

^{*2} 名古屋工業大学大学院。

^{*3} 正員, 日本電装(株) (〒448 刈谷市昭和町1-1)。

図1 押し出し実験装置

2.1 用語および記号 図2に示すように、ダイ中心 O_d (不変)、ポンチ初期中心 O_p 、初期偏心 E_0 とする。ポンチ先端のたわみを δ とし、加工中のポンチ先端中心を O'_p とすると、製品容器の偏心 $E = O_d O'_p$ は

$$E = E_0 + \delta \quad (1)$$

で計算される。

ポンチ荷重 P の偏心と方向は、ポンチ端面内に x, y 軸をとり、ポンチ初期中心 O_p および加工中のポンチ先端中心 O'_p を基準として、それぞれ、 e_p と θ_p および e'_p と θ'_p で表す。ポンチ先端のたわみ δ に關与するのは P と e_p である。

ポンチ先端横荷重 F の方向は θ_F で表す。ここで、 F は3つの成分から成る。すなわち、非軸対称塑性流動に起因する成分 F_f としては、ポンチ頭部(肩丸みとランド)の圧力分布の不均衡分 F_t と摩擦の不均衡分 F_n が考えられる。それに、ポンチがたわんで先端が i だけ傾くと、 $P \cdot i$ の横荷重が派生的に加わる。したがって、

$$F = F_f + P \cdot i \quad (2)$$

$$F_f = F_t + F_n \quad (3)$$

である。 $P \cdot i$ は測定・計算されるが、 F_t と F_n を分離して示すことはできない。

2.2 実験条件 実験に用いたポンチは、直径 $d = 14\text{mm}$ 、肩丸み $R_p = 1\text{mm}$ 、ランド部の長さ $l = 0 \sim 0.5\text{mm}$ を基準として、図3に示すような、(A)平頭、(B)載頭円錐、(C)円錐の3種類である。

ブランクはアルミニウム A1050-Oで、押し出し比 $R = 1.3, 1.7, 3.1, 4.3$ となるように、直径 D (ダイ内

図2 用語および記号

図3 ポンチ先端形状

図4 初期偏心がある場合の流出の不均一

径)を変え、高さ H_0 は、製品容器の深さをポンチ直径 d の3倍にしたときに押し残りの底の厚さが 10mm となるように決めた。

ブランクは旋削仕上げ後、潤滑処理(弗酸塩皮膜処理(アルボンドA) + 石けん(パループ235))された。

3. 偏心および非軸対称荷重の推移

図4に初期偏心 $E_0 = 0.4\text{mm}$ を与えた場合の厚肉側($\theta = 0$)の容器壁高さ $H(0)$ と薄肉側($\theta = \pi$)の壁高さ $H(\pi)$ の差： $\Delta H = H(0) - H(\pi)$ の推移を示す。以下では、材料がポンチ肩丸み出口に達した時点 $H = 0$ とする。押し出し比 $R = 3.1$ の場合には、 ΔH は正で、

厚肉側の流出速度の方が大きく、図の範囲では行程とともに ΔH は増加している。しかし、押出し比が小さい場合は、円周方向の拘束(相互干渉)が大きくなるので、ほとんど $\Delta H=0$ となり、流出速度は一樣になる。

図5に製品容器の偏心 E の測定結果と計算結果(式(1))を示す。計算結果と測定結果はほぼ一致している。初期偏心 E_0 が大きいほど、また、押出し比 R が大きいほど、行程とともに偏心が減少し、初期偏心が矯正される傾向がみられる。これを“求心作用”と称する。逆に、初期偏心 E_0 および押出し比 R が小さい場合には、偏心を助長する“遠心作用”がみられる。

図6に初期偏心 $E_0=0.4\text{ mm}$ 、押出し比 $R=3.1$ の場合のポンチ荷重 P 、その偏心 e_P および e'_P 、ポンチ先端横荷重 F とその成分 F_f と $P \cdot i$ およびポンチ先端のたわみ δ の推移を示す。

加工初期、ポンチ荷重の偏心 e_P は薄肉側($\theta_P=\pi$)にあり、非軸対称流動に起因する横荷重成分 F_f は厚肉側($\theta_{Ff}=0$)に向う。ポンチ荷重が薄肉側に偏心しているということは薄肉側のポンチ面圧が高いことを意味し、このことは薄肉側の流動抵抗が大きく、薄肉側の容器壁の流出速度が遅くなったことと対応する。

ポンチ肩丸みとランドの圧力も薄肉側で高くなるから、 F_t は厚肉側へ向う。また、厚肉側へ向う材料流動が優勢であるから、摩擦力 F_μ も厚肉側に向う。このため、式(2)の $F_f = F_t + F_\mu$ は厚肉側に向っている($\theta_{Ff}=0$)。その曲げ作用が $P \cdot e_P$ の曲げ作用を上回ったためにポンチは厚肉側に曲げられた($\theta_\delta=0$)と考えられる。

当初薄肉側にあった荷重偏心 e_P は $H=3\text{ mm}$ 辺り

図5 初期偏心がある場合のカップの偏心

から厚肉側($\theta_P=0$)に反転し、 $P \cdot e_P$ も F_f と同方向にポンチを曲げるようになる。一方、ポンチが曲がると、 $P \cdot i$ が F_f と逆方向に発生するため、全横荷重 $F = F_f - P \cdot i$ は減少し、 δ の増加は緩やかになる。

4. 横荷重 F_f および荷重偏心 e_P による曲げ作用

偏心・偏肉を支配する横荷重 F_f と荷重偏心 e_P による曲げ作用の大きさを比較するために、簡単のためポンチを片持ち梁とみなし、その先端に集中荷重 F_f が作用する場合とモーメント $P \cdot e_P$ が作用する場合とを考え、両者が同じたわみを生じさせる関係を求めると、本装置の場合、 $e_P = 65.7 \cdot F_f / P$ (mm) となる。そこで、

$$L_F = 65.7 \text{ mm} \quad (e_P \text{ の換算係数}) \quad (4)$$

とおく。

F_f/P は F_f の無次元化である。 e_P を e_P/L_F と無次元化して、 F_f/P と比較すれば、 F_f および e_P による曲げ作用の大きさを比較できることになる。

なお、長さ L の一樣断面のポンチでは $L_F = (2/3)L$ である。本装置では、ロードセル部分があるため L_F が大きくなっている。ロードセル部分がなければ、 $L_F =$

図6 ポンチ荷重の偏心、横荷重およびポンチのたわみ
(A)平頭ポンチ, $E_0=0.4\text{ mm}$, $\theta_{E0}=-176^\circ$)

38.7mm となり、 e_P の影響は1.7倍になる。

図7に(1)初期偏心がある場合、(2)blank端面に傾斜がある場合および(3)端面潤滑が不均一な場合について、 F_{fx}/P と e_{Px}/L_F の推移を示す。ただし、 θ_F および θ_P は、図6のように、0と π 以外の中途半端な値を推移することが多いので、ここでは、 F_f と e_P の x 方向成分： F_{fx} と e_{Px} で表した。いずれの場合でも、加工のごく初期には F_{fx} と e_{Px} の大きさはほぼ同じで逆方向に作用しており、そのためポンチはほとんど曲がらない。ポンチ肩丸みが半ば埋まった($H = -0.5\text{mm}$)頃から差が現れる。

4.1 初期偏心がある場合 図7で $E_0 = 0.4\text{mm}$ の

図7 初期偏心、blank端面の傾斜および摩擦の不均一がある場合 ((A)平頭ポンチ, $R = 3.1$)

図8 初期偏心による曲げ作用 ((A)平頭ポンチ)

場合をみると、 F_{fx} は偏心を矯正する方向(+方向)に作用し、 e_{Px} は $H = 4\text{mm}$ までは逆に偏心を助長する方向(-方向)に作用している。しかし、 F_{fx} による曲げ作用の方が大きいのでポンチは偏心を矯正する方向(+方向)に曲げられる。それ以降は、 e_{Px} もポンチの曲がりと同方向(+方向)に作用するようになるが、総じて、横荷重の影響が支配的であるといえる。

図8に行程 $H = 0$ における F_{fx}/P と e_{Px}/L_F の初期偏心 E_0 と押し出し比 R による変化を示す。 E_0 が大きいほど、また、 R が大きいほど、 F_{fx}/P は大きくなるようである。一方、初期偏心 $E_0 = 0$ でも F_{fx} と e_{Px} は0にならず、わずかな外乱の影響で大きな F_{fx}/P と e_{Px}/L_F が発生する。なお、これは押し出し比 R が小さいときに顕著となる。

4.2 blank端面に傾斜 β がある場合 図7で $\beta = 2^\circ$ の場合をみると、接触開始直後を除いて F_{fx} と e_{Px} は同方向(-方向)に作用している。このため、ポンチは低端面側(-方向)に曲げられ、大きな偏心偏肉が誘起される(図10)。前報⁽²⁾で詳述したように、加工初期に低端面側に向う大きな F_f が発生するのが特徴的である。なお、ランドが全面接触した後($H > 1\text{mm}$)は偏心・偏肉は漸減する。

図9に端面傾斜角 β と押し出し比 R による F_{fx}/P と e_{Px}/L_F の変化を示す。 β が大きいほど F_f による曲げ作用が大きくなる。

4.3 端面潤滑が不均一な場合 図7でblank端面の半分を無潤滑にした場合をみると、 e_{Px}/L_F が F_{fx}/P よりも大きく、ポンチを無潤滑側(-方向)に曲げるように作用している。やはり、前報⁽²⁾で詳述したように、主に荷重偏心によってポンチが曲げられ、偏心・偏肉が誘起されるのが特徴的である。なお、加工の進行にしたがって $|e_{Px}/L_F|$ と $|F_{fx}/P|$ がとも

図9 blank端面の傾斜による曲げ作用

に増大し、偏心・偏肉が増大すること⁽²⁾に注意すべきである。

5. ポンチ形状の影響

図10に $F_{fx}/P + e_{Px}/L_F$ とポンチのたわみ δ の関係を示す。当然ながら、両者は比例関係にある。ここで、(A)平頭ポンチと(C)円錐ポンチを比べると、端面傾斜あるいは潤滑不均一がある場合は、円錐ポンチのほうが $F_{fx}/P + e_{Px}/L_F$ の絶対値が大きくなり、偏心・偏肉が生じやすいことがわかる。

次に初期偏心 $E_0=0.4\text{mm}$ の場合について、 F_{fx}/P および e_{Px}/L_F が押し出し比とポンチ形状によってどう変化するかをまとめて示すと図11のようである。行程は $H=5\text{mm}$ である。この場合、 $F_{fx}/P>0$ および $e_{Px}/L_F>0$ であれば、ポンチは初期偏心を矯正する方向に曲げられる、すなわち、求心性を示す。この求心性は(C)円錐ポンチで大きく、以下、(B)載頭円錐ポンチ、(A)平頭ポンチの順である。求心性は押し出し比 R

が大きいほど強くなるようで、 R の小さいところでは平頭ポンチは逆に遠心性を示している。

以上では、初期条件の影響が純粹に現れると思われる行程初段階の測定結果について述べた。行程が進むと、潤滑不良や変形と加工硬化の不均一などの影響が現れ、実験結果の再現性も悪くなる。

図12に、深さ $H=40\sim 50\text{mm}$ に達するまでの偏心 E (測定値)の推移を示す。一見、行程 H とともに偏心 E が増大する場合、減少する場合、途中で安定する場合などさまざまである。このうち、行程後半で一旦 E が急増するものがいくつか見られるが、これは塑性変形域が底部を貫通して塑性流動のパターンが変化したことに対応して現れたものとみてよい。事実、押し出し比 R が小さいほど早期に現れており、このとき、ポンチ荷重はわずかながら減少に転じた。

次に、押し出し比 R が小さいほど偏心 E が大きくなり

図10 $F_{fx}/P + e_{Px}/L_F$ と δ の関係

図11 押し出し比とポンチ先端形状による変化

図12 全行程にわたる偏心の推移(初期偏心, 押し出し比, ポンチ形状によるちがい)

図 13 ポンチ先端の動き, $E = E_0 + \delta$

やすい。また、初期偏心が大きい場合 ($E_0 = 0.4\text{mm}$) は、 R が大きいほど初期偏心が矯正されやすいことがわかる。

さて、ポンチ形状の影響をみると、(B) 載頭円錐ポンチで偏心の推移が最も安定している。(A) 平頭ポンチでは、初期偏心がほとんどない場合 ($E_0 = 20 \sim 30 \mu\text{m}$) でも押し出し比が小さいと、偏心・偏肉が現れる。(C) 円錐ポンチは浅い容器の加工にはよいが、深くなると、不安定になる。

なお図示はしないが、ポンチのランドを $l = 5\text{mm}$ にすると、ポンチと材料との接触面積が増え、ポンチの周りの材料の抵抗が大きくなってポンチの曲がり方が抑制されるため、加工の進行に伴う偏心・偏肉の変化が小さくなることがわかった。ただし、ランド部に焼き付きが生じやすく、加工荷重は増大した。なお、焼き付きはランド $l = 0.5\text{mm}$ の平頭ポンチでも行程が進むと生じることがあったが、円錐および載頭円錐ポンチで円錐角が小さいほど生じやすかった。

最後に、ポンチ先端の加工中の動き $E = E_0 + \delta$ (計算値) を平頭ポンチ、初期偏心 $E_0 \approx 0$ の場合について例示すると、図13のようである。 $H = -1\text{mm}$ の

点が初期位置を表す。このように初期偏心がほとんどない場合のポンチの変形と偏心挙動を予測することはほとんど不可能である。実験装置 (加圧機構を含む) の剛性の方向性の影響は認められない。

6. 結 言

(1) ポンチとダイに初期偏心がある場合、加工初期にポンチの偏心を矯正する方向に、すなわち、厚肉側に向かう横荷重 F_f が発生する。一方、ポンチ荷重 P の偏心 e_P および曲げモーメント $P \cdot e_P$ は偏心を助長する方向に生じる。しかし、 F_f による曲げ作用の方が優勢なため製品容器の偏心は初期偏心より小さくなる。この傾向は押し出し比が大きいほど顕著となる。

(2) 初期偏心が小さく押し出し比が小さい場合は、加工途上に派生する外乱の影響を受けやすく、行程とともに偏心・偏肉が単調増大することが多い。この場合はポンチの剛性を高める必要がある。

(3) 円錐ポンチは、平頭ポンチよりも求心性に富むが、行程が進むと不安定になる傾向がある。載頭円錐ポンチは両者の中間で、加工中の偏心の推移が最も安定している。ポンチのランド部を長くすると、ポンチの変形は小さくなり安定するが、焼き付きを生じやすい。

(4) ブランク端面の傾斜および端面摩擦の不均衡による偏心の発生機構は前報⁽²⁾のとおりであるが、平頭ポンチよりも円錐ポンチの方が偏心・偏肉が大きくなる。

終わりに、実験装置の製作およびブランクの潤滑処理に当たってご便宜をはかっていたいただいた(株)日本電装 太田和宏氏並びに村松勤氏に深甚なる謝意を表します。また、本研究は(財)天田金属加工機械技術振興財団から研究開発助成をうけた。

文 献

- (1) 白井・水野・村松：容器の冷間押し出し加工における偏肉, 第1報, 機論, 55-514, C (1989), 1538.
- (2) 水野・白井・松井・村松：同, 第3報, 機論, 56-529, C (1990), 2497.
- (3) 白井・小島・水野：同, 第2報, 機論, 56-524, C (1990), 1022.