研究論文

側圧絞り法によるフランジ付円筒の成形

朝倉 健二*・小林 信雄*・高津 正秀*

Forming of flanged cylinders by deep drawing
utilizing lateral fluid pressureKenji ASAKURA*, Nobuo KOBAYASHI*
and Masahide KOHZU*

Soft aluminum blanks having a coaxial circular hole were formed by drawing in which lateral fluid pressure was applied in combination with hole flanging. Two different methods, hole flanging after deep drawing and deep drawing after hole flanging, were tested. Sufficiently deep cylinders widely flanged are produced by both methods. In forming by the former method, the drawing force consists of two components caused by punch pressure and lateral fluid pressure. The component caused by lateral fluid pressure occupies most of the drawing force. The product more accurate in dimension of its inner cylindrical surface is finished by the latter method.

Keywords: flanged cylinders, deep drawing, lateral fluid pressure, hole flanging, aluminum blanks

(Received December 11, 1986)

1. 緒 言

薄肉のフランジ付円筒の単一成形には、従来円管につばを付ける加工法と平板に穴をあけた穴をポンチでしごき起こして円筒壁をたてる穴広げ加工法(バーリング加工)が用いられている。しかし、前者の方法では、管縁の材料の伸び限界によりフランジ面積が制約を受け、また後者の方法では、板の穴縁の伸び限界により円筒部高さに制約がある。これに対し、穴あき素板に対する対向液圧絞り¹⁾では、伸びフランジ変形の抑制効果により絞り比2.8の絞りを可能にし、穴広げ後の円筒部高さはポンチ径の約1.7倍に達している。円筒部高さをこのように大きくした場合には、フランジ面積はポンチ断面積の約2倍程度となっているが、いずれも上述の従来法における成形限界とは比較にならない。ただし、素板穴径を穴広げ時にきれつを生じない範囲で小さくとしているため、円筒部先端の板厚はかなり薄くなるものと考えられる。

筆者ら^{2),3)}は、十数年前より素板の側面に高液圧を負荷して絞る側圧絞り加工の研究をアルミニウム板を用いて行ってきたが、この絞り法では、きわめて小さいポンチ力で非常に大きな絞り比(最大6)の成形が可能であ

る。そしてさらに、側圧のみで絞るポンチレス側圧絞り法²⁾をダイス穴径に近い穴径を有する素板に適用して、絞り比4でフランジ付円筒の成形を行ったが⁴⁾、座屈を生じやすく、十分な円筒部高さを有する成形品は得られなかった。

本研究では、絞り比の大きい側圧絞りにポンチによる穴広げを組み合わせ、円筒部高さ、フランジ面積のいずれも大きい成形品を得る方法を検討するとともに、成形品の形状、寸法に及ぼす加工条件の影響を調べた。

2. 側圧絞り法

2.1 絞り装置

側圧絞り装置²⁾の本体はFig. 1に示すような構造を有し、50 ton 万能試験機のテーブル上に置かれている。本装置では、絞り力を発生させるための油圧系統として、側圧系とポンチ圧系が設けてある。本装置の主な構成要素は側圧系に高圧を発生させるプランジャ⑦、ポンチ圧系を側圧系から隔絶するための中間シリンダ⑧、ポンチ②、ダイス③およびホルドダウンシリンダ④(以下H.D. シリンダと呼ぶ)であり、これらが高圧容器①に収められている。H.D. シリンダはポンチのガイド、高

* 大阪府立大学工学部(堺市)。Department of Metallurgical Engineering, College of Engineering, University of Osaka Prefecture (Sakai).

Fig. 1 Diagram of main equipment.

圧油のシールおよび素板のしわ押えの役割を果たす。なお、ポンチストロークの測定は、ストローク計を用いてダイス穴に満たされた油の流出量を測定することにより行う。

2.2 加工方法

側圧絞り加工の主要な作業手順は以下の通りである²⁾。

- (1) 滑滑剤(牛脂)を塗布した素板⑥をダイス③上にセットする。
- (2) H.D. シリンダ④, ポンチ②, 中間シリンダ⑧, 高压容器のふたをセットし, ボルトで締めつける。
- (3) 油圧系 (Fig. 1 の黒塗り部) にタービン油を満たし, プランジャ⑦をセットする。
- (4) プランジャにハンドポンプをセットする。
- (5) ストローク計を接続する。[加工準備完了]
- (6) プランジャを押し下げ, 側圧系の昇圧を開始する。
- (7) 側圧系のシール完了時点(側圧約 20 MPa) で昇圧を一時停止し, ストローク計の零点を合わせる。
- (8) 側圧を設定値まで上げる。
- (9) 側圧を一定(設定値)に保ちながらポンチ圧を負荷して絞り込んでいく。
- (10) フランジの大部分が絞り込まれた時点で側圧を下げ, ポンチのみで絞り終える。[加工の最終段階]
- (11) ふたのボルトを外し, ストローク計の回路を封じ, ハンドポンプを高压容器底部の油圧回路に接続したのち, ふたとともに③, ⑥, ⑤, ②, ④, ⑨, ⑧, ⑦を押し上げて製品を取り出す。

作業(5)が終わった加工準備完了時点においては, H.D. シリンダ④は弾性体リング⑨により素板⑥に押しつけられている。作業(6)で側圧が上昇していくと, それに伴って H.D. シリンダが押し下げられ, その下面の突出部 (Fig. 2 参照) が素板に食い込んでいき, シールが完了する。

3. 実験条件および方法

3.1 実験条件

実験試料としては, 板厚 0.80 mm のアルミニウム板 A1050P-O 材を用いた。その主な機械的性質は, 引張強さ 80 MPa, 伸び 45%, 加工硬化指数 0.28 である。

本実験に使用した工具の寸法を Table 1 に示す。ポンチ径 15 mm は穴なし素板に対する側圧絞り²⁾の実験で採用した条件と同様であり, 側圧を有効に働かせるために, ポンチ径に対する板厚比を大きくとっている。そのため, ポンチ角部での曲げが成形品の円筒部先端近傍の形状, 寸法にかなり影響する。予備実験の結果, 平頭ポンチでは良好な形状の成形品が得難いことがわかったので, 本実験では球頭および円すい頭ポンチを用いることにした。一方, ダイスとしては, 穴なし素板に対する側圧絞り²⁾で用いた D-2 よりかなり小さい肩半径の D-1 を主として用いた。これは円筒部付け根のまるみ半径の小さいフランジ付円筒品を得るためである。本装置では, Fig. 2 に示すように, H.D. シリンダ突出部高さ h , ストップリング厚さ T および素板の初期板厚 t_0 より初期すき間 c_0 と初期食込み量 b_0 の値が定まるが, これらの値は穴なし素板に対する側圧絞り²⁾の実験で採用した条件と同様いずれも 0.05 mm とした。

Table 1 Main dimensions of tools

Punch		Diameter d_p /mm		Head profile	
	P-1 P-2	15.0		Hemi-sphere Cone*	
Die		Die throat diameter d_d /mm		Die profile radius ρ_d /mm	
	D-1 D-2	16.9		1.0 2.5	
Hold-down cylinder		Protrusion**			
		Diameter d_h /mm	Height h /mm	Taper angle $\theta/^\circ$	
	H-1	26	0.1	7	
Stop ring		Thickness T /mm			
	R-1	0.85			

* Cone semi-angle $\alpha = 45^\circ$,
Punch profile radius $\rho_d = 4.0$ mm

** See Fig. 2

Fig. 2 Initial depth of penetration b_0 and initial clearance c_0 .

素板としては、本装置で使用できる最大径 60 mm (絞り比 4) の板の中心に直径 $d_0=10$ mm の穴をあけたものを主として用いた。この素板穴径の値は、成形品の円筒部先端近傍の板厚減少量を少なくするため、穴縁にきれつを生じないで穴広げできる最小穴径 (約 7 mm) よりかなり大きくとっている。

3.2 実験方法

本研究では、所定のポンチストロークまで絞り込んだのち穴広げを行う方法 (以下絞り-穴広げ成形法と呼ぶ) と穴広げしたのち絞る方法 (以下穴広げ-絞り成形法と呼ぶ) の 2 通りの方法でフランジ付円筒の成形を行った。

前者では、2.2 で示した穴なし素板に対する側圧絞りの作業(1)~(9)を行い、作業(9)の途中のポンチストロークが所定の値に達した時点で側圧を下げ、絞り変形を停止させる。ついで、ポンチ圧をさらに上げて穴広げを行う。後者では、作業(7)を行ったのち、ポンチで穴広げを行い、穴広げ完了後速やかにポンチ圧を 0 にする。ついで、側圧を増加させ側圧のみで絞り込んでいく。絞り工程では、ポンチは絞りの進行につれて下降する。

4. 実験結果および考察

4.1 絞り-穴広げ成形法による成形

Fig. 3 は、種々の設定側圧 p_s (一定) を負荷した状態で球頭ポンチを押し込んだ場合のポンチ圧 p_p -ポンチストローク S 線図を示す。ここで、素板穴径 d_0 およびダイス肩半径 ρ_d はそれぞれ 10 mm および 1.0 mm である (以下、特に断らない限り、 d_0 および ρ_d はこれらの寸法とする)。図中の横軸上の○印 (原点を除く) は、側圧が設定値に達した段階に対応するものであるが、この段階ですでに側圧のみで絞り変形が生じており、素板の穴周辺はたわんでいる。しかし、ポンチはこれに追随しないので、ごくわずかなポンチ圧を加えて素板に接触するまで下降させ、そのときのポンチストロークをプロットしている。また、横軸上の●印は、ポンチが突き抜けた

Fig. 3 Diagram of punch pressure p_p -punch stroke S under different lateral fluid pressures p_s for deep drawing process before hole flanging (punch profile: hemi-spherical headed punch, die profile radius: $\rho_d=1.0$ mm, hole diameter of blank: $d_0=10$ mm).

Fig. 4 Product obtained by hole flanging after deep drawing (hemi-spherical headed punch, $\rho_d=1.0$ mm, $d_0=10$ mm).

場合の成形品の高さをプロットしたものである。図中の一点鎖線は、通常の穴広げ加工に対応するポンチ圧のみを負荷した場合の p_p - S 曲線を示し、この場合絞り変形は生じていない。

図において、設定側圧が 170 MPa 以上の場合、 p_p - S 曲線は S の増加とともに上昇し、ほぼ $S=20$ mm で最大値を示したのち、ゆるやかに下降している。この場合、素板の穴は曲線の上昇過程でわずかに広がるが、ポンチが突き抜けることなく絞りが進行している。これに対し、設定側圧 160 MPa 以下では、ポンチ圧が最大値に達した時点で絞り変形は停止し、その後は穴広がりのみが行進して最終的にポンチが素板の穴を突き抜けている。したがって、円筒部高さの大きい成形品を得るには、設定側圧 170 MPa 以上で絞り込んでいき、所定のポンチストロークに達した時点で、側圧を減少させてポンチで穴広げを行わなければならない。なお、円すい頭ポンチを用いた場合の p_p - S 線図は、球頭ポンチを用いた場合 (Fig. 3) とほとんど差がなかったので省略し

た。

Fig. 4 は、球頭ポンチを用いた場合の絞り-穴広げ成形法 ($p_s=170$ MPa) による成形品の外観および縦断面を示し、その詳細は4.3で述べる。

4.2 穴広げ絞り成形法による成形

Fig. 5 は穴広げ-絞り成形法の絞り工程における側圧の変化を示した側圧 p_s -円筒部高さ S' 線図であり、前述の絞り-穴広げ成形法の場合の p_p - S 線図 (Fig. 3) に相当するものである。絞り変形の程度を示すパラメータとして、ポンチストローク S の代わりに円筒部高さ (付け根の丸み部を含む) S' をとっているのは、ポンチがすでに素板の穴を突き抜けているからである。したがって、 p_s - S' 曲線はポンチ頭部形状には依存しない。 S' と S の関係は、各成形法で得られた同程度の残留フランジ面積を有する成形品の比較より、 $S'=S+5$ mm であった。図において、横軸上の●印は、ポンチによる穴広げのみを行った段階での円筒部高さをプロットしたものである。

穴広げ-絞り成形法では、Fig. 5 に示すように側圧約 150 MPa で絞り変形が開始し、その後 p_s - S' 曲線は円筒部高さ S' の増加とともに上昇するが、その傾きははだいに小さくなっている。 $S' > 25$ mm では加速度的に変形が進行するため、図では 25 mm までしか示していない。変形が加速度的になるのは、絞り変形の継続に必要な側圧が減少していく過程での側圧の制御が困難なためであり、したがって、 $S'=25$ mm がほぼ曲線のピークと考えられる。一方、設定側圧 170 MPa 以上の p_p - S 曲線 (Fig. 3) のピークに対応するポンチストローク S は約 20 mm であり、前述のようにこれに 5 mm を加えると 25 mm となり、両者の絞り変形の程度はよく一致する。

Fig. 6 は球頭ポンチを用いた場合の穴広げ-絞り成形法による成形品の外観および縦断面を示す。

4.3 成形品の形状

4.3.1 両成形法で得られた成形品の比較

本実験では、Fig. 4 および Fig. 6 に示したように、成形品の円筒部高さをポンチ径と同程度 (約 15 mm) にしており、この場合のフランジ面積はポンチ断面積の約 11 倍となっている。なお、円筒部高さをポンチ径の約 1.7 倍にした場合でも、フランジ面積はポンチ断面積の約 8 倍とかなり大きいことを予備実験により確認している。

Fig. 7 は、各成形法により得られた成形品の円筒部 (ダイス肩で曲げられた部分を除くと約 14 mm) の内径と板厚の分布を示す。円筒部の内径は(a)のように、絞り-穴広げ成形法の場合、絞り過程でポンチ頭部に沿って曲げられたのち曲げ戻されるため、先端より約 0.5~

Fig. 5 Diagram of lateral fluid pressure p_s -height of cylindrical part S' for deep drawing process after hole flanging ($\rho_d=1.0$ mm).

Fig. 6 Product obtained by deep drawing after hole flanging (hemi-spherical headed punch, $\rho_d=1.0$ mm, $d_0=10$ mm).

Fig. 7 Inner diameter and thickness of cylindrical part.

8 mm の部分がポンチ径の 15 mm (一点鎖線) より大きくなっている。特に、先端より 5 mm 付近ではポンチ径との差が約 0.2 mm と大きくなっている。これに対し、穴広げ-絞り成形法では、非常に均一であり、ポンチによく沿って変形していることがわかる。つぎに円筒部の板厚は(b)のように、いずれの成形法においても、先端からの距離が約 4 mm 以上の部分で、初期板厚 0.80

mm (一点鎖線) に対しほぼ一定量 (0.02 mm) 増加している。また、先端から約 4 mm 以内の部分では、先端に近づくに従って薄くなっており、先端では初期板厚より約 0.15 mm 減少している。このように、円筒部の板厚変化は、 -0.15 mm から $+0.02$ mm ($-19\% \sim +3\%$) とわずかである。

図には示していないが、円筒部以外の部分についても成形法による板厚分布の差は認められなかった。すなわち、フランジ部では、いずれも H.D. シリンドラ突出部が食い込むフランジ内縁近傍 (Fig. 2 参照) で初期板厚に対して約 0.05 mm 減少しているが、この部分より外周では外縁に向かうに従って厚くなり、外縁では約 0.05 mm 増加している。またダイス肩に対応する部分では、いずれもフランジ内縁から円筒部に向かうに従って厚くなっている。なお、円すい頭ポンチを用いた場合の成形品の形状は、球頭ポンチを用いた場合と差がなかった。

以上のように、絞り-穴広げ成形法では、成形品の円筒部に膨らみが生じ、また、絞り初期において偏心を生じやすく、対称な成形品を得ることが難しい。これに対し、穴広げ-絞り成形法では、成形品の円筒部の内径精度が非常によく、また偏心もほとんど生じない。

4.3.2 穴広げ-絞り成形法における素板穴径およびダイス肩半径の影響

絞り-穴広げ成形法では、絞り過程である程度のポンチ圧を負荷する必要があるため、素板穴径 d_0 は 10 mm 以下に限定された。これに対し、穴広げ-絞り成形法では、側圧のみにより絞るため、穴径 d_0 を大きくとることができ、円筒部先端における板厚減少量の少ない成形品が得られると考えられる。そこで、 $d_0 = 11$ mm および 12 mm の素板に対して成形を試みた。

素板穴径を大きくすることにより、初期板厚に対する円筒部先端の板厚減少量は、 $d_0 = 11$ mm の場合約 0.13 mm、12 mm の場合には約 0.10 mm と少なくなる。しかし、いずれの場合も円筒部先端近傍が外側 (ダイス側) に広がっており、特に Fig. 8 に示す $d_0 = 12$ mm の場合には、その傾向は顕著である。これは、Fig. 9 に示すように、穴広げ段階で形成される側壁部 (直線的な部分) が $d_0 = 10$ mm の場合に比べて短いため、ダイス肩で曲げられた部分とその後の絞り工程で完全に曲げ戻されず、ダイス側に返るためと考えられる。したがって、穴広げ-絞り成形法においても、良好な形状の成形品を得るためには、穴径 d_0 を 10 mm 程度にとどめるべきであるといえる。

つぎに、ダイス肩半径 ρ_d は、これまでの実験では円筒部つけ根のまるみ半径を小さくするため $\rho_d = 1.0$ mm という小さいものを用いてきたが、絞り力を軽減するには ρ_d は大きい方が望ましい。そこで従来の穴なし素板

Fig. 8 Product obtained by deep drawing after hole flanging (hemi-spherical headed punch, $\rho_d = 1.0$ mm, $d_0 = 12$ mm).

Fig. 9 Shape of the intermediate product obtained by hole flanging.

Fig. 10 Product obtained by deep drawing after hole flanging (hemi-spherical headed punch, $\rho_d = 2.5$ mm, $d_0 = 10$ mm).

に対する側圧絞り²⁾で用いた $\rho_d = 2.5$ mm のダイスで成形を試みた。

Fig. 10 は $\rho_d = 2.5$ mm の場合 ($d_0 = 10$ mm) の穴広げ-絞り成形品を示す。その円筒部の表面には、Fig. 7(a) に示した $\rho_d = 1.0$ mm の場合と異なり、光沢のある環状部分が存在している。これは、円筒部が形成される過程で部分的にダイス壁に接触しているためであり、内径精度も良くない。このように、小さい肩半径のダイスを用いた方が良好な成形品が得られるのは、素板がダイス肩に沿って曲がりやすく、ポンチ側面に強く押しつけられるためと考えられる。

4.4 両成形法の絞り工程における絞り力

前述のように、絞り工程において必要なポンチ圧は、絞り-穴広げ成形法では設定側圧の増加とともに小さくなり、側圧のみで絞る穴広げ-絞り成形法では当然 0 である。絞り-穴広げ成形法の場合、これらの圧力が絞りに貢献する割合は、作用する面が異なるため単純には求

められない。また、絞りに必要な総合的な力を比較しようとした場合、穴広げ-絞り成形法では側圧だけであるのに対し、絞り-穴広げ成形法では力が2元的に加えられているので、このままでは比較できない。これらのことは、筆者ら³⁾がすでに定義している側圧絞り法における絞り力を用いることにより可能となる。すなわち、絞り力 F はポンチ圧 p_p および側圧 p_s のした仕事の絞り深さ微分の和として定義され、ポンチ圧および側圧はそれらに基づく絞り力の成分として次式のように一元化される。

$$F = \pi r_p^2 \cdot p_p + 2\pi r_t t \cdot p_s \quad (1)$$

ただし、 $r_t = (r_p + r_d)/2$, r_p : ポンチ半径, r_d : ダイスイス穴半径, t : 板厚。式(1)の第1項および第2項はそれぞれ絞り力 F のポンチ圧に基づく成分 F_p および側圧に基づく成分 F_s であり、 F は絞りに必要な総合的な力で、通常の深絞りにおけるポンチ力に相当するものである。

Fig. 11 は、絞り工程における最大絞り力 $F_{\max}$ ($= \pi r_p^2 \cdot p_{p\max} + 2\pi r_t t \cdot p_s$) およびその側圧に基づく成分 F_s と設定側圧 p_s の関係を示す。図中の実線は $p_s > 170$ MPa における $F_{\max}$ と p_s の関係を示す。また、図中の一点鎖線は F_s と p_s の関係を示し、 $F_{\max}$ と F_s の差は絞り力のポンチ圧 $p_{p\max}$ に基づく成分 $F_{p\max}$ を表す。そして、 $F_{p\max} = 0$ となる実線と一点鎖線の交点 (●印) の座標は、穴広げ-絞り成形法における最大側圧と最大絞り力を示す。なお、 $p_s = 200$ MPa および 220 MPa では、側圧が設定値に達するまでに素板がかなり変形してポンチを先端まで挿入できなくなるので、わずかなポンチ圧を負荷しながら側圧を上昇させており、したがって、 p_p - s 線図 (Fig. 3) には示さなかった。

図に示すように、最大絞り力 $F_{\max}$ 中の側圧に基づく成分の占める割合は非常に大きく (87%以上)、本加工条件においては、側圧に基づく成分が絞り力の大部分を占めていることがわかる。また、 $F_{\max}$ は側圧の増加に伴いゆるやかではあるが直線的に増加し、側圧だけで絞る場合 (穴広げ-絞り成形法に相当) に最大となっている。これは、側圧が大きくなるほどポンチ圧が小さくなり、ダイス肩部で素板が曲がりにくくなるためと考えられる。

5. 結 言

中心に穴をあけたアルミニウム素板を円筒部高さ、フランジ面積ともに大きいフランジ付円筒に成形するため、ポンチ力の大幅な軽減により大きな絞り比が得られる側圧絞り法を適用した。成形は、ポンチを併用して絞ったのち穴広げを行う絞り-穴広げ法と穴広げしたのち側圧のみで絞る穴広げ-絞り法の2通りで行った。そして、円筒部形状の良好な成形品を得るための加工条件の

Fig. 11 Maximum drawing force $F_{\max}$ and its two components under different lateral fluid pressures p_s (F_s : a component caused by p_s , $F_{p\max}$: another component caused by punch pressure $p_{p\max}$).

検討および絞り工程における絞り力の解析を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) いずれの成形法においても、円筒部高さをポンチ径と同程度にした場合には、ポンチ断面積の約11倍のフランジ面積を有する成形品が得られ、また、素板穴径を比較的大きくとしているので、成形品の円筒部先端近傍の板厚減少量もわずかであった。

(2) 穴広げ-絞り成形法では、絞り-穴広げ成形法に比べ成形品円筒部の内径精度が非常によく、また、偏心もほとんど生じず、全体に形の整った優れた成形品が得られる。

(3) 穴広げ-絞り成形法では、肩半径の小さいダイスを用いた方が内径精度の良い成形品が得られる。また、素板穴径を大きくしすぎると、成形品の円筒部先端近傍が広がった状態となる。

(4) 側圧絞り法での絞り力の考え方を導入することにより、絞り-穴広げ成形法では、側圧に基づく成分が絞り力の大部分を占めていることがわかった。また、最大絞り力は、側圧のみで絞る場合 (穴広げ-絞り成形法に相当) に最大となることがわかった。

終りに、本実験の試料を提供して下さった古河アルミニウム工業㈱の関係各位に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 中村, 中川: 塑性と加工, **27** (1986), 1298.
- 2) 朝倉, 小林, 花本, 高津: 塑性と加工, **24** (1983), 927.
- 3) 朝倉, 小林, 高津, 鈴木: 塑性と加工, **25** (1984), 17.
- 4) 朝倉, 小林, 高津: 第31回塑加連講論 (1980), 101.