八分割しわ抑え板を用いたアルミニウム板の 摩擦援用角筒深絞り加工

畑中 伸夫*・末永 亮**・飯塚 高志**
高倉 章雄**・山口 克彦**

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 62, No. 3 (2012), 109-114

Friction aided deep drawing of square cups by employing a blank holder composed of eight segments

Nobuo HATANAKA*, Ryo SUENAGA**, Takashi IIZUKA**
Norio TAKAKURA** and Katsuhiko YAMAGUCHI**

Friction aided deep drawing has been investigated to confirm the possibility of the deep drawing of square cups. A blank holder is divided into eight segments and these segments are used instead of the conventional blank holder. These segments of the blank holder can move radically inwards and outwards depending on the blank holding pressure. When an axially punch is used together with this deep drawing process, the drawing force decreases and also the shape and dimensional accuracy can be improved. In the square deep drawing, the deformation aspect varies from portion to portion; at the punch corner and at the straight flange portion. Experimental results show that the metal flow at the corner and at the straight flange portion is approximately uniform. The square cups of 60 mm height, which is 2.3 times of the side length, can be obtained from a circular blank of 120 mm diameter and 0.5 mm thickness. The number of moment of radial direction of the blank holding segments was 44 times.

(Received October 13, 2011 Accepted December 17, 2011)

Keywords: deep drawing, friction aided, blank holder, aluminum sheet, square cup

1. 緒 言

深絞り加工は、一枚の板材から容器形状の製品を成形する加工法として、広く用いられている。絞り加工において、フランジ部の絞り変形に伴う荷重をはじめ、すべての荷重はパンチ肩部の材料に作用する。そのため、パンチ肩部の材料強度が、これらの荷重の合力よりも低いと、パンチ肩部で破断する。したがって、1回の絞り加工により得られる容器の深さには限界がある。

四角筒容器の深絞り加工においては、Fig. 1に示すように、直辺部とコーナ部で材料の変形挙動が大きく異なり、直辺部の材料は曲げ・曲げ戻し変形を受け、コーナ部の材料は円筒の1/4に相当する円筒深絞り変形を受ける^{1), 2)}。このため、コーナ半径と辺長の比が小さくなるとコーナ部の絞り変形が厳しくなり、円筒絞り加工に比べて成形限界が小さくなる。また、角筒絞りに固有な成形不良である成形後期のコーナ部壁割れ^{3), 4)}の発生や直辺部の形状不良^{5)~7)}など、円筒深絞り加工にはない多くの問題がある。これらの問題を解決し、角筒容器の成形限界を向上させるために、その最適ブランク形状の決定方法^{8)~11)}やしわ抑え面圧の分布を制御する加工

法^{12), 13)}、対向液圧絞り加工法^{14), 15)}、すべり線場理論による解析^{11), 16)~19)}など数多くの研究がなされてきた。

著者らは、四分割および八分割可動式しわ抑え板を用いた円筒深絞り加工について検討^{20)~22)}し、外径120 mm、板厚0.5 mmの素板を用いて、しわ抑え板移動回数52回で、成形

Fig. 1 Schematic diagram of deformation aspect in deep drawing of square cups.

* 鳴門教育大学 生活・健康系コース (〒772-8502 徳島県鳴門市鳴門町高島字中島748)。Naruto University of Education (Naruto-cho, Naruto-shi, Tokushima 772-8502). E-mail: nhatanaka@naruto-u.ac.jp

** 京都工芸繊維大学工芸学部 (京都市)。Kyoto Institute of Technology (Kyoto-shi, Kyoto)。

高さ74mm, 絞り比4, 成形高さとパンチ直径の比2.47の深絞り加工が可能であることを示した。

本研究においては, 八分割可動式しわ抑え板を使用した成形法を, 四角筒深絞り加工に適用し, その効果を検討した²³⁾。その結果, 直辺部およびコーナ部の材料とも円滑にダイス穴に流入させることができ, 外径120mm, 板厚0.5mmの円形素板を用いて, しわ抑え板の移動回数44回で, 成形高さ60mm, 成形高さとパンチ辺長の比2.3の四角筒容器の深絞り成形が可能であった。

2. 八分割しわ抑え板による四角筒深絞り機構

Fig. 2は, 四角筒深絞り加工に用いた, 八分割しわ抑え板の概略を示す。Fig. 2(a) に示す四角筒深絞り加工に用いたしわ抑え板の構造は, Fig. 2(b) に示す円筒深絞り加工の場合²²⁾と比較して, 中央部の穴が四角穴ダイスに合せて四角形に変更されているが, ほかの構造は同一である。摩擦援用深絞り加工におけるフランジ部の変形は, 八分割可動式しわ抑え板と素板との間に発生する摩擦力により行われる。パンチは, ダイス穴内に流入した材料を, ダイスに沿って引上げる役割をするだけで, 通常の深絞り加工のように大きな荷重を負担する必要はない。八等分したしわ抑え板のそれぞれの下面には5°のテーパが付けられており, 同じく上面に5°のテーパ面が8面に付けられた台の上に重ね合される。これにより, 各しわ抑え板が前後に移動しても, しわ抑え板の上面はダイス面に対して常に平行が保たれる。

8個のしわ抑え板のうち, まず, A-A'方向に位置した対向する1対(2個)と, A-A'方向に垂直な方向の対向する1対(2個), 合計2対(4個)のしわ抑え板(直辺部: 以下, A方向と呼ぶ)が, Fig. 2(c) に示すように, 同時にテーパ台の斜面を上り, 素板とダイスを持上げながらダイス穴中心向きに変位する。これによって, A方向しわ抑え板の上部に位置するフランジ部の材料は, ダイス穴中心向きに移動する。一方, それらの間に挟まれたB-B'方向およびB-B'方向に垂直な方向の残された2対(4個)のしわ抑え板(コーナ部: 同B方向)は, このときFig. 2(d) に示すように, 後方へ押出される。後退したしわ抑え板は, 素板との接触が断たれ, しわ抑え力

は発生しない。1回目の加工が終了後, しわ抑え板は初期位置に戻される。次に, B方向の2対(4個)のしわ抑え板がテーパ台の斜面を上り, 素板とダイスを持上げながらダイス穴中心向きに変位し, B方向のしわ抑え板の上部に位置するフランジ部の材料を, ダイス穴中心向きに移動させる。このとき, A方向の2対(4個)のしわ抑え板は, 後方へ押出され, 素板との接触が断たれるため, しわ抑え力は発生しない。このように八分割されたしわ抑え板を用いて, しわ抑え板の移動操作を, A方向, B方向と交互に繰り返すことにより, フランジ部の材料は交互に中心向きに移動し, パンチの牽引力によりダイス穴内に流入することにより, 深絞り加工が進行する。

3. 実験方法

実験に使用した材料は, 板厚0.5mmの軟質純アルミニウム板(A1050-O)である。材料の機械的性質をTable 1に示す。引張試験に使用した試験片は, 材料の圧延方向が引張軸方向と一致するよう作製した。なお, F, n 値は, 一軸引張りにおける応力-ひずみ線図を $\sigma = F\epsilon^n$ で近似したものである。 r 値は, 軸方向公称ひずみ0.15で測定した。

絞り加工に使用した試験片は, 外径が86mmおよび120mmの円形素板である。素板には, 成形後の材料流動を観察するために, 22.5°方向ごとに放射状および2mm間隔に同心円状のけがき線をいれた。なお, 成形加工において材料の圧延方向は, A方向と一致させた。

使用した工具の寸法をTable 2に示す。ダイスの辺長28mm, コーナ半径3mmおよび5mm, 肩部半径3mm, パンチの辺長26mm, コーナ半径2mm(肩部半径2mm)および4mm(同4mm)である。ダイスおよびしわ抑え板の材質はSKD11である。これらの工具が素板と接触する面の表面粗さは, 加工に重要な影響を与えるため, 接触面は研削加工を

Fig. 2 Principle and mechanism of friction aided deep drawing using eight segments as a blank holder.

Table 1 Mechanical properties of material (A1050-O)

Yield strength, $\sigma_{0.2}$ (MPa)	30
Ultimate tensile strength, σ_B (MPa)	82
Total elongation, δ (%)	38
F (MPa)	220
n -value	0.27
r -value	0°
	45°
	90°
Blank thickness (mm)	0.5
Blank diameter (mm)	86, 120

$$\sigma = F\epsilon^n$$

Table 2 Dimensions of punch and die used for square deep drawing

Die	Opposite side length	28
	Corner radius	3, 5
	Shoulder radius	3
Punch	Opposite side length	26
	Corner radius	2, 4
	Shoulder radius	2, 4

行い、さらにダイス表面および肩部は、ラッピング仕上げを行った。加工後の表面粗さは、ダイス表面 $Ra\ 0.05\ \mu\text{m}$ 、しわ抑え板表面 $Ra\ 0.2\ \mu\text{m}$ であった。成形加工時の潤滑状態は、素板としわ抑え板間は無潤滑とし、素板とダイス間には白色ワセリンとテフロンシートを併用した。加工条件は、八分割しわ抑え板を用いた円筒深絞り加工において、最も良好な結果が得られた条件と同一²²⁾とし、しわ抑え力 100kN 、1回当たりのしわ抑え板移動量 1mm 、パンチ荷重 4kN とした。

4. 実験結果と考察

4.1 しわ抑え板の移動回数に伴う成形高さおよび外径の変化

Fig. 3は、成形時の形状変化をしわ抑え板の移動回数 $N=10$ 回ごとに示したものである。パンチコーナ半径 $R2$ の場合である。また、**Fig. 4**は、しわ抑え板の移動回数の増加に伴う成形高さの変化を円筒深絞り加工の場合²²⁾と比較して示している。成形高さはしわ抑え板の移動回数に比例して、ほぼ直線的に増加した。成形高さの増加率は、パンチによる牽引力が同じであっても、円筒深絞りの場合に比べて、四角筒深絞りの場合の方が小さい。また、パンチコーナ半径が $R4$ から $R2$ に小さくなると、成形高さの増加率はさらにすこし小

Fig. 3 Increase in cup height with number of drawing operations.

Fig. 4 Increase in height of a square cup with number of drawing operations.

さくなる。この原因は、円筒深絞りの場合に比べ四角筒深絞りの場合には、フランジ部からダイス穴へ流入する材料が、A方向（直辺部）では曲げ・曲げ戻し変形のみを受けるだけで比較的多いが、B方向（コーナ部）では極めて厳しい絞り変形を受けるため少なく、全体として少なくなるためと考えられる。さらに、コーナ半径が小さくなると、コーナ部における絞り変形が一層厳しくなり、材料流入がさらに困難になる。また、コーナ近傍の側壁部を形成するのに必要な材料が増加するため、成形高さの増加率が小さくなると考えられる。

Fig. 5は、フランジ部の変形過程をしわ抑え板の移動回数 $N=10$ 回ごとに示したものである。パンチコーナ半径 $R2$ の場合である。加工の進行に伴いフランジ部の外径が減少し、8個の耳が形成されていく様子が観察される。また、**Fig. 6**は、しわ抑え板の移動回数の増加に伴う外径の変化を示している。A方向（直辺部）では、フランジ部の材料はダイス肩部で曲げ・曲げ戻し変形を受けるが、ダイス穴内への流入は比較的容易であり、外径の減少率は大きい。また、A方向のしわ抑え板に荷重が加わる奇数回目の加工時に外径は大きく減少しているが、荷重が加わらない偶数回目にはあまり減少し

Fig. 5 Variation of flange shape in square drawing with number of drawing operations.

Fig. 6 Decrease in outer diameter of the blank with drawing operations. (Dir. A: Direction of A)

ない。一方、B方向（コーナ部）では、フランジ部の材料は絞り変形を受けるため材料の流動抵抗が大きく、ダイス穴内への材料流入が少ないため、外径の減少率は小さい。また、B方向のしわ抑え板に荷重が加わる偶数回目には外径は大きく減少しているが、荷重が加わらない奇数回目の加工時にはほとんど減少しない。C方向では、A方向およびB方向の両方のしわ抑え板の移動時に、中心向きの力が作用するため、外径は直線的に大きな減少を示す。また、外径変化に及ぼすコーナ半径の影響はわずかであり、顕著な差異は認められない。

4.2 フランジ各部の変形状態

フランジ各部の変形状態を検討するため、素板に2mm間隔で同心円状にけがき線を入れ、Fig. 2に示したA, BおよびC方向について、けがき線の変位を加工1回ごとに測定した。Fig. 7は、しわ抑え板の移動に伴う、A方向（直辺部）のフランジ各部における材料の中心向き移動量の分布を示している。A方向のしわ抑え板をダイス穴中心向きに移動させたとき（奇数回の移動回数）には、すべての半径位置において材料の移動量はしわ抑え板の移動量1mmと等しくなった。一方、B方向のしわ抑え板をダイス穴中心向きに移動させ、A方向のしわ抑え板には荷重が加わらないとき（偶数回の移動回数）には、材料の移動量は半径方向に大きな分布を生じた。特に、ダイス肩付近の材料には、しわ抑え力が作用せず、ダイス穴中心向きの荷重が作用していないにもかかわらず、約1.1mmの大きな材料流動が生じている。この原因は、直辺部の材料は流動抵抗が小さく、隣接するB方向の材料流動に伴って移動させられること、また、パンチの牽引力による材料流入が大きいと考えられる。

Fig. 8はB方向（コーナ部）のフランジ各部における材料の中心向き変位量を示している。しわ抑え力を受けない奇数回時の変位量は、ダイス穴付近で約0.5mm、けがき線の最外部ではほとんど移動せず、全体として変位量は直辺部に比べて少なくなっている。これはコーナ部の変形が絞り変形であり、直辺部の曲げ・曲げ戻し変形に比べ、変形抵抗が大き

いためと考えられる。一方、B方向のしわ抑え板をダイス穴中心向きに移動させたときには（偶数回の移動回数）、すべての半径位置で材料の移動量はしわ抑え板の移動量1mmと等しくなった。

Fig. 9は、しわ抑え板の境界方向（C方向）における材料の中心向き移動量を示している。しわ抑え板の移動回数に関係なく、ほぼ同じ移動量を示している。移動量は、しわ抑え板の境界方向における移動量のダイス穴中心向き成分、 $1\text{mm} \times \cos 22.5^\circ = 0.92\text{mm}$ とほぼ一致している。

パンチのコーナ半径をR4にした場合、AおよびC方向の材料の移動量は、R2の場合とほとんど変わらなかった。しかし、B方向ではR2の場合に比べて、しわ抑え力を受けない回数時のダイス肩付近で変位量が少し増加した。これは、R4の場合にはコーナにおける絞り変形が相対的に容易な

Fig. 8 Distribution of material displacement of blank material at flange portion of B-directions with distance from center of the blank.

Fig. 7 Distribution of material displacement of blank material at flange portion of A-direction with distance from center of the blank.

Fig. 9 Distribution of material displacement of blank material at flange portion of C-directions with distance from center of the blank.

Fig. 10 Material flow at side wall of square cups.

めである。

4.3 側壁部の変形状態

Fig. 10は、成形前2mm間隔であった同心円状のけがき線と、22.5°ごとにけがいた放射状のけがき線の成形後の形状例を示している。Fig. 10(a)は、パンチコーナ半径2mmの場合、Fig. 10(b)は同4mmの場合である。コーナ半径の違いによる、成形後のけがき線の形状に大きな差異はない。

放射状のけがき線は、いずれの場合も成形後に側壁部ではほぼ平行になった。すべり線場理論による四角筒容器の絞り加工の解析^{16)~19)}によれば、フランジ部の材料は最大主応力線に沿って流動するとされている。このため、成形前に放射状のけがき線は、通常の四角筒深絞り加工後には平行にならない。しかし、Fig. 10に示すように、本成形法ではけがき線は成形後にほぼ平行であることから、コーナ部からしわ抑え板境界線 (Fig. 2のC方向) を越えて直辺部へ流出する材料は、通常の四角筒絞り加工の場合に比べ少ないと考えられる。この理由は、本加工法ではしわ抑え板による材料のダイス穴への流入が、コーナ部と直辺部で交互に独立して行われるためである。

同心円状のけがき線の間隔は、3方向の中でC方向が増減なく均一に最も狭くなっている。A方向の間隔ははじめ狭いが、加工の進行に伴って広がっている。B方向の間隔ははじめからやや広く、加工の進行に伴ってさらに広がっている。けがき線の間隔はダイス肩からの材料供給が多いと狭く、少ないと広がると考えられる。

C方向においては、Fig. 6に示したように成形に伴う外径の減少率が最も大きく、Fig. 9に示したダイス肩近傍における材料の移動量が奇数回と偶数回 (例えば、第1回目と第2回目) を合せると約1.8mmと大きく、多くの材料がダイス穴内へ流入することから、けがき線の間隔が狭くなると考えられる。B方向では、Fig. 6の外径減少率が一番小さく、Fig. 8に示したダイス肩近傍の材料の移動量が奇数回と偶数回を合せて約1.5mmと小さく、材料流入が少ないことから、けがき線の間隔が広がると考えられる。一方、A方向では、Fig. 6の外径減少率はB方向とC方向の中位にあり、けがき線の間隔と定性的に一致している。しかし、Fig. 7に示したダイス肩近傍の材料の変位は、奇数回と偶数回を合せると約2mmと最も大きく、けがき線の間隔が最も狭くなるはずであるが、C方向の方が狭くなっている。この原因を明らかにするには、さらに詳細な検討が必要であるが、今後の課題とする。

Fig. 11 Thickness strain distribution of drawn cups.

4.4 成形品の板厚ひずみ分布

Fig. 11は、四角筒容器成形後の各方向における公称板厚ひずみ分布を示す。コーナ半径R2の場合である。なお、容器底部中央からパンチ肩部およびダイス肩部までの長さは、方向によって異なり、A方向では10~13mmおよび46~50mm、B方向では15~18mmおよび51~55mm、C方向では13~15mmおよび49~53mmである。図より、パンチ頭部では、板厚の減少はほとんどない。パンチ肩部では、ダイス穴に流入した材料をパンチが牽引するため、パンチ肩部の材料に荷重が局所的に加わり、板厚が減少している。この傾向は特に、B方向 (コーナ部) において著しい。

側壁部ではすべての方向において、板厚が増加している。この原因は、フランジ部における絞り変形により、材料は周方向に圧縮されるが、半径方向への材料流動が少ないために、材料が余剰となり板厚の増加が生じると考えられる。また、A方向 (直辺部) よりもB方向 (コーナ部) の方が、大きな絞り変形を受けることおよび半径方向の材料流動が少ないことから、板厚の増加が大きくなっている。直辺部においても板厚が増加しているが、この原因はコーナ部近傍における厳しい絞り変形を緩和するように、材料がコーナ部からしわ抑え境界線を越えて直辺部に流入するためである。

一方、B方向の側壁部には、板厚の細かな増減がみられる。

Fig. 12 Typical example of square cups.

Fig. 13 Effect of initial blank diameter on cup height.

この原因は、材料がダイス肩部を通過するときの変形条件の違いにより生じると考えられる。すなわち、しわ抑え力による圧縮を受けながらダイス穴内に流入するときには、材料はしわ抑え板により板厚方向に拘束されているため、板厚の増加は少ない。一方、しわ抑え力を受けないときには、絞り変形により板厚が増加した状態で、材料がダイス穴内に流入するために大きくなる。なお、コーナ半径R4の場合も同様な結果となった。

4.5 深い容器の成形品例

Fig. 12は、外径120mmの円形素板を用いた四角筒容器の成形品例である。しわ抑え板の移動回数44回で、コーナ半径R2の場合には成形高さ59mm、コーナ半径R4の場合には成形高さ60mmの四角筒容器を成形することができた。これらはパンチ辺長の約2.3倍に相当する。また、Fig. 13は、加工回数の増加に伴う成形高さの変化を示している。成形高さは、外径86mmの円形素板を用いた場合とほぼ同じ傾きで、直線的に増加している。

5. 結 言

可動式八分割しわ抑え板を用いた摩擦援用深絞り加工を四角筒容器の成形に適用し、加工中の材料流動や材料各部の変形挙動を観察し、深絞り性の向上について検討した。その結

果、以下の知見を得た。

(1) 八分割しわ抑え板を用いた摩擦援用四角筒深絞り加工において、パンチ肩部の材料に大きな荷重を加えることなく、分割しわ抑え板を交互に移動させることにより、直辺部およびコーナ部の材料を、円滑にダイス穴に流入させることができた。

(2) しわ抑え板の移動に伴って、しわ抑え力が加わっているフランジ部の材料は、しわ抑え板とほぼ同じだけ移動をする。一方、しわ抑え力が加わっていない側の材料は、全体的にはダイス穴中心向きに移動するが、ダイス穴近傍において、直辺部ではしわ抑え板移動量とほぼ同じだけ移動するが、コーナ部では約50%の移動にとどまる。

(3) 本成形法においては、コーナ部の材料が直辺部に流出することはなかった。また、側壁部の板厚は直辺部、コーナ部および境界部ともに増加するが、肉余りにより成形が妨げられることはなかった。

(4) 外径120mm、板厚0.5mmの円形素板を用いて、しわ抑え板の移動回数44回で、成形高さ60mm、成形高さとはパンチ辺長の比2.3の四角筒容器の深絞り成形が可能であった。

本研究は、財団法人金型技術振興財団および公益財団法人軽金属奨学会による研究助成により実施されました。記して、ここに謝意を示します。

参 考 文 献

- 1) 平岩正至, 近藤一義: 日本機械学会論文集C編, **49** (1983) 695-703.
- 2) 日本塑性加工学会: プレス絞り加工, 日本塑性加工学会, コロナ社, (1994), 46-48.
- 3) 岡本豊彦, 林 豊: 塑性と加工, **7** (1966), 584-593.
- 4) 林 豊: 塑性と加工, **10** (1969), 422-432.
- 5) 高橋 進, 桑原利彦, 伊藤健治: 塑性と加工, **37** (1996), 1360-1366.
- 6) 桑原利彦, 市川裕之, 田中芳郎: 平成2年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1990), 41-42.
- 7) 広瀬洋三, 菱田祐次, 佐藤信一: 第45回塑性加工連合講演会講演論文集, (1994), 343-344.
- 8) 福井伸二, 吉田清太, 阿部邦夫, 堀田勇次郎: 日本機械学会誌, **59** (1956), 898-903.
- 9) 森 敏彦, 河合 望, 丸茂康男, 千賀雅明: 日本機械学会論文集C編, **53** (1987), 771-779.
- 10) 桑原利彦: 塑性と加工, **35** (1994), 373-378.
- 11) 桑原利彦, 司文華, 秀野雅之: 塑性と加工, **37** (1996), 290-296.
- 12) 村田篤信, 恵比根美明, 松居正夫: 塑性と加工, **33** (1992), 411-416.
- 13) 桑原利彦, 増田大助, 畔柳 遵: 塑性と加工, **35** (1994), 868-874.
- 14) 中村和彦, 中村正美: 塑性と加工, **35** (1994), 881-886.
- 15) 中村和彦: 軽金属, **47** (1997), 323-328.
- 16) 神馬 敬: 塑性と加工, **11** (1970), 653-660.
- 17) 神馬 敬, 桑原利彦: 塑性と加工, **31** (1990), 141-145.
- 18) 伊倉 真, 栗山幸久, 大上哲郎: 第41回塑性加工連合講演会講演論文集, (1990), 297-298.
- 19) 司文華, 桑原利彦, 秀野雅之: 塑性と加工, **38** (1997), 354-359.
- 20) 畑中伸夫, 飯塚高志, 高倉章雄, 山口克彦, M. A. Hassan: 軽金属, **60** (2010), 315-320.
- 21) 畑中伸夫, 松浦規夫, 飯塚高志, 高倉章雄, 山口克彦: 軽金属, **60** (2010), 641-646.
- 22) 畑中伸夫, 末永 亮, 飯塚高志, 高倉章雄, 山口克彦: 軽金属, **61** (2011), 525-531.
- 23) 末永 亮, 高倉章雄, 山口克彦, 飯塚高志: 平成14年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2002), 271-272.