論文

角筒容器の深絞り加工用 局部増肉テーラードブランクの絞り－圧縮板鍛造

安部 洋平* 古谷 友樹** 森 謙一郎*

Plate Forging Consisting of Drawing and Compression of Tailored Blanks Having Local Thickening for Deep Drawing of Square Cup

Yohei ABE*, Tomoki FURUYA** and Ken-ichiro MORI*

(Received on October 7, 2011)

A 2-stage plate forging process consisting of drawing and compression of tailored blanks having local thickening for the deep drawing of square cups was developed. A sheet having uniform thickness is drawn into a cup having a flange, and then is compressed with a punch and a flat die under fixture of edges of the flange to thicken the inclined portions. The degree of thickening was increased by controlling the punch stroke in the drawing stage, because the degree of thickening is small for a small stroke and folding occurs for a large stroke. The tailored blank having local thickening was drawn into a square cup. The limiting height of the drawn cup without fracture using the tailored blank was increased to 34 mm, whereas the height limit using the uniform blank was 18 mm. The limiting height of the cups for the tailored blanks formed by the drawing-compression having the 2 stages was almost similar to that formed by the bending-compression having the 4 stages, because the regions except for the target ones are thickened for the bending-compression. 2 shock lines appearing in the tailored blank were eliminated with a counter punch in the compression stage.

Key words: sheet metal forming, deformation behavior, plate forging, tailored blank, local thickening, deep drawing, compression, square cup.

1. 緒 論

板材のプレス成形品では、必要な強度に対して重量を最小化する最適な肉厚分布が求められてきている。プレス成形品は主に引張変形によって得られるために、金型角部付近の肉厚が減少して、強度低下が問題となることがある¹⁾。強度が必要な部分を増肉させたブランクをプレス成形すると、必要な肉厚分布を有する製品を得ることができる。厚さが異なる板材を溶接したテーラードブランクでは、部分的に厚さを変えることができるが、金型角部に相当する部分を増肉させるのは容易ではない²⁾。

塑性加工によって局部増肉ブランクを製造する方法として、圧延加工においてロール間隙を変化させて肉厚分布を得る圧延テーラードブランク法がある³⁾。本方法では、ロール間隙を変化させた増肉方法であるため、肉厚分布は1方向だけになり金型の角相当部のみを増肉したブランクの製造は困難である。塑性加工によって製造されたテーラードブランクでは板厚が連続的に変化し、溶接テーラードブランクのように段差が生じないため、その後のプレス成形では応力集中が生じなく、成形には有利である。

板鍛造が適用されるようになってきており、プレス成形品の肉厚分布が制御されるようになってきた⁴⁾。しかしながら、比較的板厚が薄いブランクの局部を圧縮して増肉することは、パンチ荷重が増大するために一般に困難である。そこで、著者ら⁵⁾は絞りと圧縮からなるリング状に増肉されるテーラードブランクの2段階板鍛造法を開発した。まず、円形ブランクを絞って増肉させる材料を確保して、絞られた周辺を拘束して絞られた部分を圧縮することによって、過大なパンチ荷重を防止してリング状に局部増肉させたテーラードブランクを成形した。リング状局部増肉テーラードブランクを深絞り加工すると、角部が増肉した円筒容器を成形できる。また、角筒容器の深絞り加工用局部増肉テーラードブランクの板鍛造法を開発した⁶⁾。板材を絞ると減肉するために曲げを適用して増肉量を大きくしたが、正方形リング部分の厚さを増加させるために曲げと圧縮を2回繰り返して4工程になり、また不要な部分も増肉された。

本研究では、絞りと圧縮からなる角筒容器の深絞り加工用局部増肉テーラードブランクの板鍛造法を開発した。板鍛造における増肉特性を調査するとともに、局部増肉テーラードブランクを角筒深絞り加工して容器高さを向上させた。また、得られた絞り－圧縮と従来の曲げ－圧縮のテーラードブランクを角筒深絞り加工して、限界容器高さを比較した。

* 豊橋技術科学大学工学部 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1
Hibarigaoka Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi, 441-8580, Japan.

** 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 同上
Graduate student, ibid.

2. 角筒容器の深絞り加工用絞り—圧縮局部増肉 テーラードブランクの 2 段板鍛造法

2.1 絞り—圧縮を用いた 2 段板鍛造法

角筒容器の深絞り加工では、ブランクは通常均一な厚さを有しているため、Fig. 1 (a)に示すように容器底角部に大きな引張応力が作用して底角端部の肉厚が大きく減少し、減少量が限界を超えると破断が生じる。一方、Fig. 1 (b)に示すような肉厚減少が大きい 4 箇所底角端部に相当する部分を予め増肉させたブランクを深絞り加工すると成形限界の向上が図れる。そこで、底角端部に相当する部分の局部増肉テーラードブランクの板鍛造法を開発した。

Fig. 1 Deep drawing of tailored blank having local thickening into square cup

絞り—圧縮による角筒容器の深絞り加工用局部増肉テーラードブランクの 2 段板鍛造法を Fig. 2 に示す。1 段目では、均一厚さの 8 角形板材を絞ってフランジ付き容器を成形して増肉する材料を確保する。2 段目では、フランジ端部をホルダーによって外側に戻らないように固定して絞られた部分を圧縮すると、傾斜部が増肉する。絞られた部分を圧縮しているために、摩擦による拘束が少なくパンチ荷重の増大を防止できる。圧縮におけるホルダーによるフランジ端部の固定は、深絞り加工において大きく減肉する 4 箇所の底角端部に相当するフランジ端部のみとした。

Fig. 2 2-stage plate forging of tailored blank having local thickening by drawing and compression

2.2 2 段板鍛造と角筒深絞り加工条件

板材の材質は焼なまされた A1050 アルミニウム板であり、引張試験により得られた機械的性質を Table 1 に示す。板材は 1mm の厚さの対辺と対角の長さがそれぞれ L_s と L_d の 8 角形であり、基本的な増肉特性は正 8 角形の板材で調査された。ここでは、容器底部の肉厚はほとんど変化しないものとして、ブランクの底角端部に相当する部分を求め、板材の底角端相当部を増肉した。

Table 1 Mechanical properties of annealed aluminium sheet

Tensile strength /MPa	80.0
Elongation /%	50.8
Flow stress /MPa	$\sigma = 148\epsilon^{0.27}$

局部増肉テーラードブランクの 2 段板鍛造加工条件を Fig. 3 に示す。1 段目はパンチ、ダイス、しわ押えからなり、しわ押え面とダイス上面の隙間は板厚と同じとし、1 段目パンチストローク s_1 を 1mm ごとに増加させて増肉量を変化させた。2 段目では、絞られたフランジ付き容器をコンテナに入れて、容器の 4 箇所の底角端部に相当する方向のフランジ端部をホルダーにより固定して、パンチ底とコンテナ底の隙間が 1.3mm になるまで容器を圧縮して底角端相当部を増肉した。パンチは 4 箇所の底角端部に相当する部分を圧縮できるように 8 角形として、潤滑剤は 1, 2 段目ともに水溶性プレス油である。

Fig. 3 Conditions of 2-stage plate forging for tailored blank having local thickening

Fig. 4 Tools used for deep drawing of tailored blank having local thickening into square cup

角筒深絞り加工に用いたパンチとダイスの形状を Fig. 4 に示す。Fig. 4 に示したパンチとダイス、および、しわ押えを用いて、局部増肉テーラード blanks を角筒容器へ深絞り加工した。潤滑剤は 2 段板鍛造と同様の水溶性プレス油である。

3. 2 段板鍛造による局部増肉テーラード blanks の成形結果

$L_s=L_d=80\text{mm}$ における 1, 2 段目成形後の blanks を Fig. 5 に示す。1 段目成形後では板材がフランジ付きの角筒容器に絞られており、2 段目成形後ではフランジ端部を固定して絞られた部分を圧縮することによって角筒容器の底角端相当部が増肉している。1 段目パンチストローク $s_1=7\text{mm}$ では増肉しているが、 $s_1=8\text{mm}$ では増肉だけでなく折込みも生じている。また、容器底角相当部と容器底相当部にショックラインが現れている。

Fig. 5 Tailored blank having local thickening after 1st and 2nd stages for $L_s=L_d=80\text{mm}$

$s_1=7\text{mm}$, 8mm における 2 段目のパンチ荷重—ストローク曲線と blanks の対角方向の断面形状を Fig. 6 に示す。ストローク s の増加とともに、 $s_1=7\text{mm}$ では容器傾斜部は圧縮されるが、 $s_1=8\text{mm}$ では傾斜部の線長が大き過ぎるために $s=5.6\text{mm}$ 付近で折込みが発生している。パンチ荷重はストロークの増加とともに大きくなっており、1 段目パンチストロークが大きいほうが増加している。折込みを生じない $s_1=7\text{mm}$ の最大パンチ荷重を底角端相当部の面積で除した平均面圧は 179MPa であり、板材の引張強さが 80MPa であることから金型の負荷は大きくない。

$s_1=7\text{mm}$ における成形されたテーラード blanks の肉厚変化率の分布を Fig. 7 に示す。テーラード blanks の肉厚をマイクロメータによって 2mm 間隔で測定した。底角端相当部の肉厚が大きくなっている。

Fig. 6 Load-stroke curves and cross-sectional shapes in diagonal direction in 2nd stage for $s_1=7\text{mm}$ and 8mm and $L_s=L_d=80\text{mm}$

Fig. 7 Distribution of change in wall thickness of tailored blank after compression for $s_1=7\text{mm}$ and $L_s=L_d=80\text{mm}$

Fig. 8 Change in wall thickness of blank in diagonal direction before and after 2nd stage for $s_1=7\text{mm}$ and $L_s=L_d=80\text{mm}$

1, 2 段目成形後のブランクの対角方向の肉厚分布を Fig. 8 に示す. 1 段目成形後の肉厚分布は, 底角端相当部が絞られて肉厚減少が生じている. 2 段目成形後の中心からの距離が 25mm 付近の肉厚は初期板厚ほどであるが, 底角端相当部では増肉されている.

$L_s=L_d=80\text{mm}$ における対角方向に測定した底角端相当部の最大肉厚変化率と平均肉厚変化率に及ぼす 1 段目パンチストロークの影響を Fig. 9 に示す. 底角端相当部の最大肉厚変化率と平均肉厚変化率は, それぞれ Fig. 8 で示した中心からの距離が 25mm から 30mm までにおける最大値と平均値である. s_1 の増加とともに最大値と平均値はともに増加している. $s_1=7\text{mm}$ において最大値は 40% を超えて, 平均値は 21% である.

Fig. 9 Effect of stroke in deep drawing on maximum and average changes in wall thickness at equivalent portions for $s_1=7\text{mm}$ and $L_s=L_d=80\text{mm}$

$L_s=L_d$ における折込み限界に及ぼす板材の長さの影響を Fig. 10 に示す. いずれの板材の長さにおいても $s_1=8\text{mm}$ において折込みが生じており, $s_1=7\text{mm}$ が限界であった.

Fig. 10 Effect of blank length on occurrence of folding in 2nd stage for $L_s=L_d$

1 段目の限界ストロークであった $s_1=7\text{mm}$ における底角端相当部の最大と平均肉厚変化率に及ぼす板材の長さの影響を Fig. 11 に示す. 底角端相当部の肉厚は, 板材の長さの増加とともに 1 段目におけるフランジの変形抵抗が増加して肉厚減少が大きくなって, 最大値と平均値はともに減少している.

Fig. 11 Effect of blank length on maximum and average changes in wall thickness at equivalent portions for $s_1=7\text{mm}$ and $L_s=L_d$

4. 局部増肉テーラードブランクによる角筒容器の深絞り加工性の向上

4.1 限界容器高ささと容器底角端部の増肉

2 段板鍛造により角筒容器底角端に相当する部分を増肉したテーラードブランクを得たので, テーラードブランクと均一厚さのブランクを用いて角筒容器の最大高さを求め

Fig. 12 Drawn cups from tailored and uniform blanks and change in wall thickness of blank for $s_1=7\text{mm}$

た. 局部増肉ブランクの対角部の長さは, 1 段目において引き込まれて短くなるので容器の高さが低くなる. そこで, 角筒容器高さが最も高くなるように板材の L_s と L_d をそれぞれ増加させ, $s_1=7\text{mm}$ として成形した.

均一厚さのブランクと $s_1=7\text{mm}$ の局部増肉テーラードブランクにおける限界絞り容器, および, 局部増肉テーラードブランクの肉厚変化率を Fig. 12 に示す. $L_s=L_d=73\text{mm}$ の均一厚さブランクでは欠陥が生じていない 18mm の高さの容器が成形できているが, $L_s=L_d=74\text{mm}$ においてはパンチ角部付近で破断が生じている. $L_s=87\text{mm}$, $L_d=98\text{mm}$ の局部増肉テーラードブランクにおいては底角端相当部の増肉によって 34mm の高さの容器が得られている. また, 角筒容器成形後に容器底対角線上にショックラインが生じている. $L_s=89\text{mm}$, $L_d=100\text{mm}$ においては容器角部にて破断が生じている. 以上のように局部増肉テーラードブランクを用いることによって限界容器高さが 89% 向上できている.

$L_s=L_d=73\text{mm}$ における均一厚さと局部増肉テーラードブランクの対角方向の容器底角端部付近の断面形状を Fig. 13 に示す. 均一厚さブランクから得られた容器においてはくびれが生じているが, 局部増肉テーラードブランクでは生じておらず, 従来の深絞り加工では得ることの難しい底角端部に厚肉を有する容器を成形できている.

Fig. 13 Cross-sectional shape of drawn cups in diagonal direction of tailored and uniform blanks for $L_s=L_d=73\text{mm}$

4.2 曲げ一圧縮と絞り一圧縮による限界容器高さ

一様ブランク, 既報⁶⁾の曲げ一圧縮と絞り一圧縮を利用した局部増肉テーラードブランクにより得られた容器を Fig. 14 に示す. 既報の 1.5mm 厚さの板材と角筒深絞り加工条件により比較した. 一様ブランクの限界容器高さは 21.3mm であり, 曲げ一圧縮と絞り一圧縮ブランクの限界容器高さはそれぞれ 28.3mm と 29.0mm であった. また, 限界を超えた条件ではパンチ角部付近で破断が生じている. 曲げ一圧縮では, ハット状の曲げ一圧縮によって 2 本の直線状に増肉され, 板材を直角に回転させて同様な曲げと圧縮を繰り返して直角方向も増肉させている. 角筒容器の底角に相当する正方形リング部分だけでなく容器フランジ部に相当する部分の増肉が生じるために容器成形時のフラン

ジ部分のしわが大きくなっている. 一方, 絞り一圧縮では容器底角端部のみの増肉であるためにフランジ部のしわは小さくなっている. 以上のように曲げ一圧縮と絞り一圧縮ブランクの最大肉厚変化率はそれぞれ 70% と 45% であり, 絞り一圧縮されたブランクの最大値は少ないが, 絞り一圧縮を利用してブランクの工程数を 2 工程に減らすことができた.

Fig. 14 Drawn cups for uniform and tailored blanks having local thickening by bending-compression and drawing-compression for $s_1=7\text{mm}$

4.3 カウンターパンチによるショックラインの抑制

2 段板鍛造により得たブランクには Fig. 5 に示すようにショックラインが現れる. 外側の円形および正方形リングは角筒容器の深絞り加工において消去されるが, 真ん中の 2 本の対角ショックラインは角筒容器の底部に残る. 2 本の対角ショックラインは, 2 段目において Fig. 15 (a) に示すように容器底部中央の倒れこみにより材料が圧縮されて発生する. そこで, Fig. 15 (b) に示すようにカウンターパンチにより底部の倒れこみを防止して容器底部の 2 本の対角ショックラインを抑制する.

容器底部のショックラインに及ぼすカウンターパンチの効果を Fig. 16 に示す. 1 段目のストローク $s_1=7\text{mm}$ では局部増肉ブランクに折込みが生じたために $s_1=6\text{mm}$ の結果を示している. カウンターパンチにより局部増肉ブランクにおいては 2 本の対角のショックラインは除去され, 容器に

においても底部のショックラインが発生していない。限界容器高さは Fig. 12(b)に示したカウンターパンチなしと同等となっている。また、Fig. 12(c)に示したような容器底相当部の増肉はカウンターパンチによって抑制されて、容器底角端相当部の肉厚はカウンターパンチなしによる限界と同等となっている。

Fig. 15 Prevention of occurrence of shock lines in bottom of cup with counter punch in 2nd stage

Fig. 16 Effect of counter punch in 2nd stage on shock lines in bottom of cup for $L_s=87\text{mm}$, $L_d=98\text{mm}$ and $s_1=6\text{mm}$

5. 結 論

絞りと圧縮からなる角筒容器の深絞り加工用テーラードブランクの2段階鍛造法を開発して、以下の知見を得た。

- 1) 均一厚さの板材を絞ってフランジ付き容器を成形して増肉する材料を確保し、フランジ端部をホルダーによって外側に戻らないように固定して絞られた部分を圧縮することにより傾斜部が増肉できた。
- 2) 均一厚さブランクでは限界容器高さは 18mm であったが、局部増肉テーラードブランクでは 34mm であり、限界が 89%向上できた。
- 3) 局部増肉テーラードブランクでは、一様ブランクの深絞り加工では得ることの難しい底角部に厚肉を有する容器を成形できた。
- 4) 曲げ-圧縮と絞り-圧縮を利用した局部増肉テーラードブランクの限界容器高さは同等であり、増肉を 2 工程に減らすことができた。
- 5) カウンターパンチにより容器底部の 2 本の対角ショックラインの発生を防止した局部増肉テーラードブランクによって角筒容器底部の増肉を抑制でき、限界容器高さはカウンターパンチなしと同等であった。

成形実験に協力していただきました当時豊橋技術科学大学学部 4 年生伊藤匠氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 安部洋平・Tan Chin Joo・森謙一郎・藤岡武洋・野中孝之・海老原治：塑性と加工, **48**-561 (2007), 925-929.
- 2) 杉山隆司：塑性と加工, **45**-526 (2004), 892-896.
- 3) Urban, M., Krahn, M., Hirt, G. & Kopp, R.: J. Mater. Process. Technol., **177**-1-3 (2007), 360-363.
- 4) 中野隆志・芦原和男・石永信行・井村隆昭・外山泰治：塑性と加工, **47**-551 (2006), 1146-1150.
- 5) 安部洋平・Tan Chin Joo・森謙一郎・鈴木通之：塑性と加工, **49**-573 (2008), 985-989.
- 6) 森謙一郎・平松繁樹・小坂田宏造・安部洋平：塑性と加工, **50**-586 (2009), 1044-1048.