単一行程内の再絞りによる成形高さの向上*

加藤 浩三^{*1}, 近藤 一義^{*2}, 井戸 勝也^{*3}

Redrawing Process during One Stroke for Increasing Cup Height

Kohzoh KATOH, Kazuyoshi KONDO and Katsuya IDO

With a view to regarding deep drawing as a new process for fabricating bottomless tubular elements, a deep drawing test was conducted with thick aluminum material. Two diameters of punches were used for a tapered die during one stroke. The diameter of the first punch was larger than the inner diameter of the straight part of the die and the diameter of the second punch was smaller than the inner diameter. Since the first punch was used only for the die tapered region before punch exchange, the limiting drawing ratio and cup height was increased efficiently.

Key Words: Plastic Forming, Deep Drawing, Limiting Drawing Ratio, Cup Height, Aluminum, Thick Blank, Redrawing

1. 緒 言

著者らは、これまでに厚板材の深絞り加工を「底部のない管状素材の成形加工方法」として位置づけ、成形容器の壁部高さの向上を目的として、実験的な検討を行ってきた^{(1)~(3)}。ここで、厚板材とは、深絞り加工の加工限界が「パンチ肩部材料の破断(以下、 α 破断と称す)」のみによって規定され、「フランジ部のしわ」は、加工上の問題とはならないものをいう。このような厚板材の深絞り加工では、「しわ押さえ」が不要であり、加工荷重の分散のため、テーパダイスを用いるのが一般的である。本報告は、これまでの研究と同じ目的で行われた実験的研究に関するものであり、工具コストを低く押さえつつ、成形性の向上、ひいては成形高さの向上を達成することができる加工方法を提案している。

一般に再絞りは、最終の容器形状を成形するまでに、複数のパンチとダイスの組を用いて、これら工具の直径を順次、小さくする加工方法である。これにより、各

工具段階での絞り比を小さくすることができるため、最終的には、初期の素材直径に比較して、大きな絞り比の容器製品を得ることができる。しかし、複数組の工具を用いるため、工具コストの点では不利である。

本研究では、再絞りで得られる高い絞り比の利点を享受しながら、かつ、工具コストの点では、比較的有利な加工方法の検討を実施した。本加工方法では、同一のダイスに対して、1行程中に2種類の直径の異なるパンチを用いる加工方法である。厚板材を加工対象としているため、ダイスはテーパ形状であり、このことが2種類のパンチを用いることを可能にしている。パンチは交換するが、ダイスは同一のものであるため、通常の再絞りに比べて、工具コスト上の利点がある。

これまでの検討結果^{(1)~(3)}をまとめると、パンチ肩半径が、限界絞り比(以下、 LDR)、および「容器の壁部高さ」に及ぼす影響は、

(1) パンチ肩半径が大きいほど、 α 破断は抑制され、 LDR は向上する。これは、パンチ肩部の曲げ加工力が小さいためである。

(2) パンチ肩半径が小さいほど、成形容器の壁部高さは向上する。これは、幾何学的理由により、パンチ肩部材料の材料損失が少ないためである。

本研究では、再絞りによる LDR の向上を期待して、

* 原稿受付 平成5年10月25日。

^{*1} 正員、岐阜工業高等専門学校 (〒501-04 岐阜県本巣郡真直町)。

^{*2} 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)。

^{*3} 岐阜工業高等専門学校 (現：京都工芸繊維大学学生)。

一つめのパンチ直径は大きく、二つめのパンチ直径は小さくしている。パンチ肩半径の条件は、上記(1)、(2)の結果を踏まえて設定した。すなわち、一つめのパンチは、加工終了時の容器形状に及ぼす影響は小さいので、パンチ肩部材料の損失を気にしないで、 α 破断の抑制のみを考慮し、大きいパンチ肩半径とした。一方、二つめのパンチは、パンチ肩部の材料損失を抑制するため、小さいパンチ肩半径とした。なお、本研究で提案する深絞り加工法を簡略して、以下、「再絞り法」と称する。

実験結果では、「再絞り法」と通常の深絞り加工-行程初期から小さい肩半径のパンチを用いた場合-とを、LDR と壁部高さの2項目について、定量的に比較している。

2. 実験方法

2.1 加工方法概要 図1に「再絞り法」の概要を定性的に示す。初期用パンチの直径は、ダイス内径に比べて大きく、また肩半径も大きい。このパンチは、ブランク形状がダイステーパー部の形状になじむタイミングまで使用される。この間は、張出し成形が主体である。

一方、後期用のパンチは、直径、肩半径ともに小さい。ブランクが絞り加工としごき加工を受け、加工が完了するまで、このパンチは使用される。

図1 再絞り法の概要

図2 実験装置の概要

2.2 実験装置 図2に実験装置の概要を示す。装置は能力 25 ton.f の油圧プレスに設置されている。パンチ上部のロードセル①により荷重を測定し、またひずみゲージ式変位計⑨によりパンチストロークを測定する。これらのデータはデジタル指示式静ひずみ計を経てデータロガーに同時に記録される。

2.3 実験条件 表1に実験条件を示す。「再絞り法」における初期用パンチの直径を $D_{p1}=24.99$ mm, 肩半径を $r_{p1}=12.495$ mm とした。また、後期用パンチの直径を $D_{p2}=21.40$ mm, 肩半径を $r_{p2}=1.0$ mm とした。

一方、テーパダイスのダイス半角は $\alpha=15^\circ, 25^\circ$ および 30° の3条件とした。ダイステーパー部の中心軸方向長さは、それぞれ、21.5 mm, 12.4 mm, および 10.0 mm であり、しごき部長さは、5.0 mm, 7.6 mm, および 10.0 mm である。しごき部のダイス内径はいずれも $\phi 25.0$ である。

また、初期用パンチのストローク S_1 は、パンチ-ダイス間でブランクを圧縮しないように、ブランク厚み

表1 実験条件

Name	Material	Experimental Condition
1st Punch	SKD11	Profile Radius mm $r_{p1}=12.495(\text{hemisphere})$ Diameter $D_{p1}=24.99$ mm
2nd Punch	SKD11	Profile Radius mm $r_{p2}=1.0$ Diameter $D_{p2}=21.4$ mm Ironing Reduction 10 %
Die	SKD11	Inner Diameter 25.0 mm Semi-angle $\alpha=15^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ $S_1=23.0, 18.0, 16.0$
Blank	A1050 r-value 0.675 F-value 141 MPa n-value 0.263	Annealed 420°C 1hr Thickness $t: 2.0$ mm Diameter $D_b=\phi 43.0 \sim \phi 53.0$ (increment 1mm) D. R. : 1.84~2.26
Lubricant	Kyodo Yushi Co. Ltd Plastic Working Oil PB-120 Kinematic viscosity 92 cSt (40 °C) Coated on both sides of Blank by Gauze

図3 初期用パンチのストローク ($\alpha=15^\circ$)

2.0 mm に対して 2.9~3.0 mm のすきまができる距離とした。 $\alpha=15^\circ$ のとき $S_1=23.0$ mm, $\alpha=25^\circ$ のとき $S_1=18.0$ mm, および $\alpha=30^\circ$ のとき $S_1=16.0$ mm とした。一例として, $\alpha=15^\circ$, $S_1=23.0$ mm の場合における初期用パンチとダイスの位置関係を図3に示す。この場合, パンチとダイスの最小すきまは, 2.9 mm である。板厚 2.0 mm に対して, 0.9 mm のすきまがある。

比較のために行った通常の深絞り加工実験の場合には, 行程初期から終了まで上記の後期用パンチのみを用いた。

潤滑剤としては, 協同油脂(株)製で動粘度 92 cSt (40°C) のクリアループ PB 120 を用い, ブランクの表裏面にガーゼにて充分塗布した。

2・4 供試材 供試材は工業用純アルミニウム (A 1050) である。1 m×1 m, 板厚 2 mm の圧延板から矩形に切り出した旋盤により円盤形状に加工した後, 420°C で 1 時間の焼きなましを施した。なおブランク直径 D_b は 43.0 mm~53.0 mm の範囲で 1 mm ごとの 11 条件とした。

絞り比の定義は, 菅野の定義に従った⁽⁴⁾。すなわち, ブランク直径を, 「板厚とパンチ直径の和」で除したものとした。

2・5 成形高さの評価方法 本実験で得られた成形容器には, 材料の面内異方性のため, 四つの耳と四つの谷部を生じた。〈底部のない円筒状素材の成形〉という本研究の位置づけに基づき, 壁部の高さを「成形高さ」と称して, 以下のように定めた。すなわち, 該当テストピースについて, 「壁部の最下点」から谷部までの距離を, 4 点について測定し, この加算平均を該当テストピースの「成形高さ」とした。なお, 成形後のテストピースの外壁部にはしごきのため著しい金属光沢が生じており, 「壁部の最下点」とは, この金属光沢のある部分とない部分との境界である。またこの境界は, テストピース外形プロフィールにおいては, 「円弧形状の肩部で曲率のある部分」と「軸対称の軸に鉛直な真直部分」との境界である。

3. 実験結果

3・1 成形限界 図4は, 「再絞り法」と通常の深絞り加工法について, 成形限界を比較したものである。横軸をダイス半角, 縦軸を LDR としている。 α 破断した LDR 条件と, 加工がうまくいった LDR 条件との境界を実線で区切り, 成形限界線としている。ダイス半角条件に係わらず, 再絞り法では LDR が向上した。向上代は, ダイス半角条件によりばらつきがあ

図4 成形限界線の比較

図5 成形限界線作図法(再絞り法)

図6 成形限界線作図法(通常の深絞り)

るが、0.05～0.10である。なお、図4を作成する際に用いた各加工方法ごとの成形限界図を図5および図6に示した。

図5は、「再絞り法」の場合の成形限界を示すためのものであり、横軸をダイス半角 α 、縦軸を絞り比 DR としている。 α 破断した条件を●、加工が完遂した条件を○で、それぞれ表し、プロットしている。各プロット点には、再現性を確認するため、同一条件で、3枚のテストピースを用いている。結果が分かれた場合には、1/3あるいは2/3の比率に応じて、プロット点内を120°あるいは240°で区切っている。加工の成否の境界を実線で区切り、成形限界線とした。この際、3枚のテストピースの結果が分かれたプロット点上を、成形限界線が通るようにした。

限界線は左上がりの曲線となり、ダイス半角 α が小さいほど成形性がよい結果になっている。これは、ダ

イス半角 α が小さいほど加工荷重の分散効果が顕著なためである⁽³⁾。

また、図6は、通常の深絞り加工法による場合の成形限界を図5と同様の方法で示したものであるが、図5と同様ダイス半角 α が小さいほど加工荷重の分散が顕著であり成形限界が向上している。

3.2 成形高さ 図7は、「再絞り法」と通常の深絞り加工法について、成形高さを比較したものである。同一のブランク直径、 $D_b=43.0$ の条件下の比較であるため、 LDR の差異の影響は含まれていない。ダイス半角条件により、定量的には差はあるが、通常の深絞り加工法のほうが、0.6～0.8 mm、成形高さは高い。

3.3 限界成形高さ 図8の縦軸は、各ダイス半角条件において、加工が成功した最大のブランク直径条件のブランクの成形高さを「限界成形高さ」として示したものである。したがって、縦軸は、成形限界の向上代-成形可能なブランク直径の向上代-を含めた成形高さを意味している。「再絞り法」と、通常の深絞りの場合とを比較しているが、ダイス半角条件にかかわらず「再絞り法」では、約2.0 mm 向上している。

4. 考 察

4.1 成形限界向上 図9および図10は、図4に示した「再絞り法では成形限界が向上する」理由を説明するためのものである。図9は、荷重-ストローク線図であり、本研究で提案する「再絞り法」と通常の深絞り加工法とを比較している。ブランク直径が $D_b=43.0$ mmと小さいため、両条件ともに α 破断が生じることなく、加工が終了した条件である。両条件を比較すると、「再絞り法」では、一つめのパンチ直径を大きくし絞り比を小さくしているため、行程初期の荷重レベルが低減している。通常、テーパダイスを用いた深絞り加工の荷重-ストローク線図は三つの山をもつ曲線となり、一つめの山はブランクがダイステーパー形状になじむプロセスである⁽³⁾。 α 破断が生じる場合には、このプロセスで破断するため、行程初期の荷重レベルの低減は α 破断抑制に有利である。

なお、「再絞り法」における荷重レベルの低減には、パンチ肩半径を大きくし曲げ加工力を低減した効果も含まれていると推察する。ただし、荷重低減代に占める割合は明らかではない。

また、図10はブランク直径が $D_b=51.0$ mmと比較的大きいため、通常の深絞り加工法では α 破断を生じた例である。「再絞り法」では、通常の深絞り加工法で α 破断を生じた荷重レベル以上でも破断を生じ

図7 成形高さの比較

図8 限界成形高さの比較

図9 荷重-ストローク線図の比較
(ブランク直径 $D_b=43.0$)

図10 荷重-ストローク線図の比較
(ブランク直径 $D_b=51.0$)

図11 加工完了後のテストピース断面形状

ていない。一つめのパンチ直径を大きくしているため、荷重を負担するリング形状の断面積が増加したためであると考えられる。この根拠として、通常の深絞り法で α 破断したテストピースの断面プロフィールと「再絞り法」の荷重ピーク付近の断面プロフィールとを図10に示した。

以上のことから、「再絞り法」により α 破断が抑制されたのは、荷重レベルの低減と荷重負担断面積増加の

表2 「再絞り法」の有用性

Type of Process	Number of Punches	Number of Dies	Increase of Limiting Cup Height
1) Usual Redrawing	more than 2	more than 2	more than 2.0 mm
2) New Redrawing	2	1	2.0 mm
3) Usual Drawing	1	1	0

2要因によると考えられる。ただし、2要因の占める各効果割合は、ブランク条件あるいはダイス半角条件により異なると推察する。

4.2 成形高さの考察 図11は、「再絞り法」のテストピースの断面プロフィールをスケッチしたもので、加工完了後のものである。後期用パンチおよびダイスとの位置関係も示している。パンチ底部で、パンチと材料が遊離しているのが認められる。したがって、3.2節で示した、「再絞り法」のほうが成形高さが低くなってしまった理由は、「初期用パンチにより成形された容器底部の形状が、後期用のパンチにより修正されていない」ためである。「再絞り法」では、パンチ肩部の材料損失を減少する目的で、後期用のパンチの肩半径を小さくしたが、その効果はない。

今後の課題として、後期用パンチの段階で、容器底部の材料をパンチ形状になじませ、容器底部の材料損失を減少させる手段として、ダイクッションの利用が考えられる。

4.3 限界成形高さ向上 図4と図8を比較すると、両図ともに横軸のダイス半角条件に対して、曲線は左上がりとなっており、また、「再絞り法」の曲線はダイス半角条件に関わらず、通常の深絞りの場合より上側にある。このことから図8は、図4の「再絞り法」が成形限界向上に及ぼす影響を著しく反映している、と考えられる。すなわち、「再絞り法」では成形可能なブランク直径を向上させることができるため、成形高さを向上させることができた。現段階の「再絞り法」では、4.2節で述べたように、容器底部の材料損失を低減することができなかったが、総合的には、この悪影響よりも、成形限界向上による効果のほうが大きいものと考えられる。

4.4 「再絞り法」の工業的有用性 表2は「再絞り法」の有用性を説明するためのものである。(1)従来からある再絞り加工、(2)「再絞り法」、および、(3)通常の、再絞りではない深絞り加工の3者を比較している。使用されるパンチとダイスの数については、

従来の再絞り加工では2組以上あり、「再絞り法」では、パンチ2個とダイス1個である。また、再絞りのない通常の深絞り加工では1組である。一方、限界成形高さの向上について、再絞りのない通常の深絞り加工を基準として評価すると、「再絞り法」では、3・3節で示したように、2.0 mmである。通常の再絞り加工では、パンチとダイスの組数を増せば「再絞り法」より限界成形高さを向上させうるので、2.0 mm以上としている。

以上のことから、「再絞り法」では、限界成形高さについて、その向上代は通常の再絞り加工以下ではあるが、通常の深絞り加工よりは向上させることが可能で、また、ダイスの使用数が少ない分、工具コストを抑制できることがわかる。したがって、製造現場の適用条件によっては、トータルのコストを低減させることが可能である。

5. 結 言

厚板材の深絞り加工を<底部のない管状素材成形加工方法>として位置づけ、容器の成形高さを向上させる手段として、「再絞り法」に着目した。これが成形限

界および成形高さに及ぼす効果を実験的に検討し、以下の結果を得た。

① 「再絞り法」では、初期の狙いどおり、初期用パンチによる絞り比の緩和により、通常の深絞り加工法より成形限界を向上させることができた。本実験の範囲における絞り比の向上代は0.05～0.1である。

② 同一のブランク直径条件では、ダイス半角条件にかかわらず、「再絞り法」のほうが、通常の深絞り加工方法より成形高さは0.6～0.8 mm低下した。この理由は、初期用パンチで成形された容器底部の円弧形状の材料損失が後期用パンチによって修正されないためである。

③ 成形限界の向上の効果も含めた成形高さを「限界成形高さ」として評価したところ、「再絞り法」では、約2.0 mmの向上が認められ、新たな加工方法による成形高さの向上には、成形限界向上の効果が著しい。

文 献

- (1) 加藤, 41 回塑加連講論, (1990), 289.
- (2) 加藤・近藤, 42 回塑加連講論, (1991), 779.
- (3) 加藤・近藤, アマダ技術ジャーナル, 25-118(1992), 21.
- (4) 菅野, 都立工業技術センター研究報告, 11(1982), 42.