

液圧バルジしごき複合加工による張出し成形高さの向上の研究

阿南工業高等専門学校 機械工学科
教授 畑中 伸夫
(平成 17 年度研究開発助成 AF-2005003)

キーワード：液圧張出，しごき加工，成形高さ

1. 研究の目的と背景

張出加工はフランジ部の材料がダイス穴内に流入しないため、素板の輪郭形状が変化せず、所要のフランジ形状を容易に得ることができる。しかし、剛体パンチとダイスを用いた通常の張出加工では、パンチ肩部に変形が集中するため、パンチ頭部や側壁部の材料には変形できる余裕が残っているにもかかわらず、パンチ肩部の板厚が局部的に薄くなり破断する。このため、通常の張出加工では、フランジを有する深い容器の成形は困難である。

張出加工において成形高さを向上させるには、局部的に板厚が薄くなることを防ぎ、成形品の頭部や側壁部の板厚を均等に薄くすることが重要である。著者らは、これまでゴムパンチを用いた張出・しごき複合加工¹⁾ および張出・逆張出・しごき複合加工²⁾ を考案し、張出成形高さを向上させる方法について検討してきた。その結果、成形品の板厚を全体的に減少させることが可能となり、通常の剛体工具による張出加工に比べ前者では約2倍、後者では約3倍の張出成形高さを得ることができた。

本研究においては、張出加工製品の成形高さを向上させる方法として、成形品頭部の板厚を減少させるために液圧を用いて張出加工を行い、その後、側壁部の板厚を減少させるために、しごき加工を行う「液圧張出・しごき複合加工」³⁾ について検討した。さらに、張出成形高さの向上に寄与する材料を増加させるために、ダイス穴周辺部を圧縮して板厚を減少させ、材料をダイス穴内に流入させる「ダイス穴周辺部圧縮・液圧張出・しごき複合加工」^{4) 5)} について検討した。

2. 加工原理

2.1 液圧張出加工の原理

フランジ部の材料がダイス穴内に流入しない張出加工では、ダイス穴部に位置する材料の板厚減少が成形高さに寄与する。しかし、通常の剛体平頭パンチとダイスを用いた張出加工においては、パンチ頭部にある材料が、パンチとの摩擦力によって変形が拘束され、板厚減少が生じないために、パンチとダイス間の材料のみによって張出成形が行われる。このため、張出加工によって深い容器を成形することは困難である。

一方、図1(a)に示す液圧を用いた自由張出加工によれば、液体と材料間には摩擦力が作用しないため、成形品頭部の板

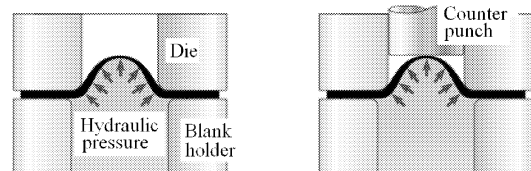
厚を薄くすることが可能である。しかし、液圧をさらに増加させると頭部で破断する。また、この張出加工で得られる製品は半球状であり、張出中心から離れるほど板厚が厚くなっており、この部分ではまだ変形の余裕を残している。

そこで、張出成形部全体の板厚が薄くなるように、液圧張出加工としごき加工を組み合わせた方法について検討した。図1(b)に示すように、成形品の頭部にカウンターパンチを配置し、頭部が破断する前に、頭部材料をカウンターパンチに接触させる。これによって、カウンターパンチに接触した部分には摩擦力が作用し、当該部分の変形を抑えることができる。この状態から液圧を増加させれば、側壁部の立った成形品を得ることができ、この成形品にしごき加工を施せば、側壁部の板厚減少により成形高さの向上を図ることが期待される。

2.2 ダイス穴周辺部圧縮による成形高さ向上

張出加工では、ダイス穴部に位置する材料の体積が成形高さに寄与するため、ダイス穴部に位置する材料を均等に薄肉化しても、成形高さの向上には限界がある。そこで、ダイス穴周辺部の板厚を減少させ、この板厚減少分の材料をダイス穴内に流入させることにより成形高さを向上する加工法について検討した。

成形品の形状を、図2に示すように、容器の外径 d 、高さ h の円筒形とし、材料の初期板厚は t_0 とする。ダイス穴周辺部の板厚を、中心から直径 D まで板厚 t_3 に減少させることにより、容器頭部の板厚が t_1 、側壁部の板厚が t_2 になったと仮定する。ダイス穴周辺部の板厚減少体積が、すべて容器の成形高さの向上に使われると仮定すると、容器の成形に使用される材料の体積 V_1 および成形後の容器を形成する材料の体積 V_2 は、それぞれ次式で表される。



(a) 自由液圧張出 (b) カウンターパンチを用いた液圧張出

図1 液圧張出加工の原理

$$V_1 = \frac{\pi}{4}(d-2t_2)^2 t_0 + \frac{\pi}{4}\{D^2 - (d-2t_2)^2\}(t_0 - t_3) \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{\pi}{4}(d-2t_2)^2 t_1 + \pi dh t_2 \quad (2)$$

ここで、 $V_1 = V_2$ であるから成形高さ h は、

$$h = \frac{1}{4dt_2}\{D^2(t_0 - t_3) + (d-2t_2)^2(t_3 - t_1)\} \quad (3)$$

となる。一方、ダイス穴周辺部圧縮を使用しない通常の張出加工では、

$$h_0 = \frac{1}{4dt_2}(d-2t_2)^2(t_0 - t_1) \quad (4)$$

である。式(3)および(4)において、頭部および側壁部の板厚が、均等に初期板厚の半分 ($t_1 = t_2 = \frac{1}{2}t_0$) に薄肉化された

と仮定して、ダイス穴周辺部を圧縮した場合の成形高さの向上に及ぼす圧縮率および圧縮外径 D の効果を図3に示す。ダイス穴周辺部の材料を広い範囲に、また、圧縮率を大きくすることにより、成形高さが指数的に増大する。この結果から、ダイス穴周辺部材料を圧縮することにより、成形高さが大きく向上することが期待される。

ダイス穴周辺部圧縮・液圧張出・しごき複合加工の各工程の概略を図4に示す。本加工法では図4(b)に示すように、液圧張出を行うと同時に、圧縮リングに圧縮荷重を加えることによって、ダイス穴周辺部の板厚を減少させ、板厚減少分の材料をダイス穴内に流入させる。また、この状態からさらに液圧を加えることにより、図4(c)に示すように成形品頭部の板厚が薄く、側壁部の立った成形品を得ることができる。そして、図4(d)に示すように、この成形品にしごき加工を行うことにより側壁部の板厚を薄くする。

3. 実験方法

3.1 液圧張出・しごき複合加工

実験に使用した各種工具の寸法を表1に示す。使用したダイスは各加工において共通であり、直径40mm、肩部半径4mmである。比較のために行った剛体平頭パンチの直径は36mm、肩部半径は4mmである。また、しごき加工に使用したパンチの直径は38.5mm、肩部半径4mmである。板押さえ荷重は、いずれの加工においても70kNである。ダイス内面および肩部、カウンターパンチの端面は研削加工後、ラッピング仕上げした。また、工具と材料間の摩擦を低減するために、ダイス肩部およびダイス穴内部、カウンターパンチ頭部にはテフロ潤滑剤および白色ワセリンを塗布した。

実験に使用した試験片は、市販の板厚1mmの軟質純アルミニウム板 (A1050P-0) から、直径 $d=60\text{mm}$ の円板を打抜き加工により作製した。

試験片には、成形後の変形状態を調べるため、あらかじめ1mm間隔でけがき線を描いて実験に供した。成形後の形状はフランジ部からの高さをダイヤルゲージで測定して求めた。また、各部の板厚ひずみは、けがき線間の板厚をポイントマイクロメータで測定し、対数ひずみとして算出した。

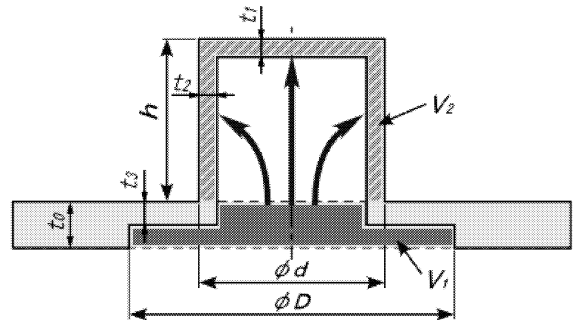


図2 ダイス穴周辺部材料の圧縮による張出加工の改善

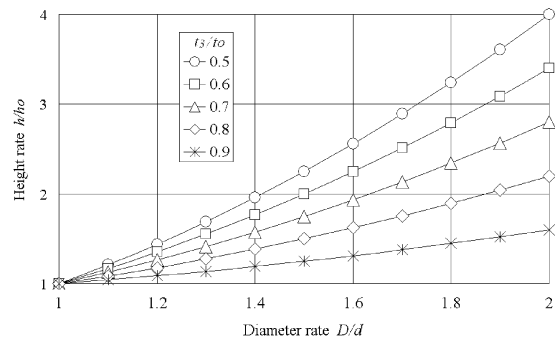


図3 圧縮リングの直径と張出高さの関係

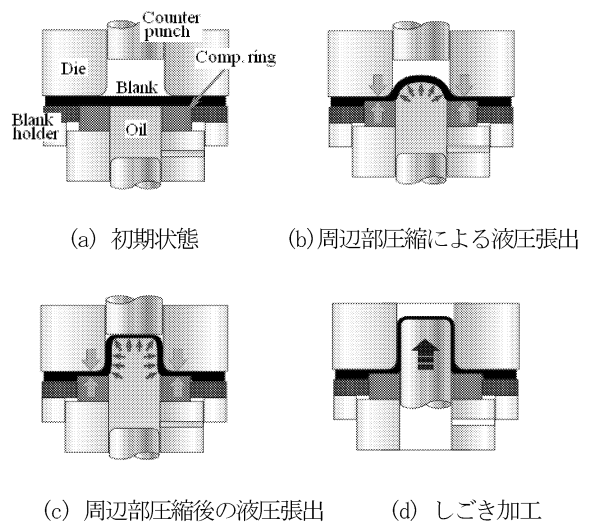


図4 ダイス穴周辺部圧縮を伴う液圧張出加工過程

3.2 ダイス穴周辺部圧縮・液圧張出・しごき複合加工

実験装置の概略を図5に示す。素板(a)をダイス(b)と圧縮リング(c)、板押さえ(d)の間に配置し、液槽(e)内に液体(f)を充満させる。カウンターパンチ(g)は調整ねじによって任意の高さに設定可能である。

表1 工具形状・寸法

	パンチ		ダイス	
	直径 D /mm	パンチ肩 半径, R /mm	直径, D /mm	ダイス肩 半径, R /mm
剛体工具	36.0	4.0	40.0	4.0
液圧張出	-	-	40.0	4.0
しごき	38.5	4.0	40.0	4.0

まず、油圧プレスラム(h)を下降させ、実験装置と接触させる。これによってダイスを加圧し、素板に板押さえ荷重 P_1 を作用させる。ダイスに作用する荷重 P はロードセル(i)によって検出・測定される。さらにプレスラムを下降させると、ダイスには板押さえ荷重 P_1 を超える荷重が作用する。このときリリース弁(j)の作用によって、可動シャフト(k)と板押さえ(d)が下降し、板押さえ荷重は常に P_1 に保たれる。これによって、板押さえ荷重を一定に保ちつつ、圧縮リング(c)に任意の荷重 $P_2 (=P)$ を作用させることができる。すなわち、フランジ部が変形することなく、ダイス穴周辺部のみを圧縮変形させることが可能となる。一方、ダイス穴周辺部圧縮中に、油圧ポンプ(l)によって素板に液圧 P_3 を作用させる。加工中の液圧は、油圧計(m)によって計測される。

実験中に減少するダイス穴周辺部の板厚を測定するために、油圧プレス上下ラム間にダイヤルゲージ(n)を設置した。そして、ダイス穴周辺部の板厚ひずみの値は、あらかじめ、ダイヤルゲージの読みと実際のダイス穴周辺部の板厚ひずみを対応させる校正曲線を作成することにより求めた。

本実験で使用した各種工具の寸法を表2に示す。使用したダイスは、直径31.5mm、肩部半径4mmである。しごき加工に使用したパンチの直径は30mm、肩部半径は4mmである。また、ダイス穴周辺部圧縮に使用した圧縮リングは、内径30mm、外径50mmである。

張出加工時の板押さえ荷重は150kNである。また、実験装置の最大成形液圧は30MPa、ダイス穴周辺部圧縮加工時の最大圧縮荷重は450kNである。加工時には、潤滑剤としてテフロン潤滑剤および白色ワセリンを併用した。

表2 ダイス穴周辺部圧縮加工に使用した工具形状・寸法

	パンチ		ダイス		圧縮リング	
	直径 mm	肩半径 mm	直径 mm	肩半径 mm	外径 mm	内径 mm
液圧張出	-	-	31.5	4.0	50.0	30.0
しごき	30.0	4.0	31.5	4.0	-	-

使用した試験片は板厚 $t=2.0$ mm、一辺120mmの正方形の軟質純アルミニウム板(A1050P-0)である。材料の機械的性質は、Table2に示した板厚1mmの場合と同じであった。また、液圧張出・しごき複合加工の場合と同様に、試験片には成形後の変形状態を調べるために、1mm間隔でけがき線を描いて実験に供した。

4. 液圧張出・しごき複合加工

4.1 液圧張出加工

図6は、板厚1mmの軟質純アルミニウム板を剛体パンチ、自由液圧張出およびカウンターパンチを用いた液圧張出加工によって成形した結果を示す。図6(a)は成形品の外形形状を示す。剛体パンチによる張出成形においては、パンチの押し込み深さ7.5mm、除荷後の成形高さ7.3mmが張出限界高さであった。

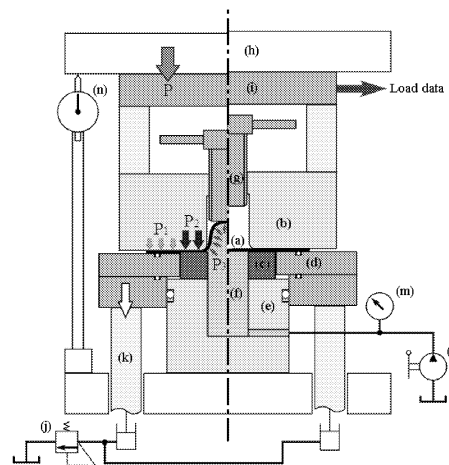


図5 実験装置概要図

- (a) 試験片 (b) ダイス (c) 圧縮リング (d) しわ抑え
- (e) オイルポット (f) 作動油 (g) カウンターパンチ
- (h) プレスラム (i) ロードセル (j) リリースバルブ
- (k) 可動シャフト (l) 油圧ポンプ (m) 油圧ゲージ

液圧による自由張出加工においては、液圧の増加とともに半球状に成形され、その高さが向上する。液圧 $p=5$ MPa で成形高さは $h=12.4$ mm、 $p=6$ MPa においては、 $h=17.2$ mmであった。ただし、 $p=6$ MPa においては、すべての試験片が頭頂部で板材の圧延方向に破断した。図中の■点は、破断部を避けて測定したものである。

そこで、板材が破断する前に頭頂部をカウンターパンチに接触させ、頭頂部の板厚減少を少なくすることにより成形高さを向上することを試みた。自由張出加工の結果から、カウンターパンチの高さ h を12mm、15mm、16.5mmに設定して実験を行った。その結果、カウンターパンチ高さ $h=12$ mm、液圧 $p=10$ MPa および $h=15$ mm、 $p=7$ MPa において、剛体パンチによる張出加工よりも成形高さが大きい側壁部が立った形状に成形された。しかし、いずれの場合にも液圧 p をさらに増加させると、カウンターパンチと材料の接触境界部分でき裂が発

生し、材料の圧延方向に進展して破断した。また、 $h=16.5$ mmの場合には、頭頂部の材料とパンチの接触力が弱く摩擦力が十分に作用しないため、頭部の板厚減少を防ぐことができず頭頂部で破断した。

図6 (b)は、各成形品の板厚ひずみ分布を示している。剛体パンチによる張出加工においては $r=16$ mm 付近で板厚の減少が最も大きく、板厚ひずみ -0.39 が観察された。しかし、パンチ頭部の板厚ひずみは -0.083 であり、ほとんど板厚が減少していない。

自由液圧張出加工の場合には、張出中心部において板厚が最も薄くなっている。一方、液圧 p が 5 MPa から 6 MPa に増加すると、板厚は全域で急激に減少し、頭頂部で破断した。

カウンターパンチを用いた張出加工においては、液圧の増加に伴い板材の頭頂部はカウンターパンチに接触する。接触後の板材は摩擦力により変形が拘束される。最大の板厚ひずみは $h=12$ mm の場合に -0.668 、 $h=15$ mm の場合に -0.856 であった。一方、半径 $r=5$ mm 付近からダイス肩部まで、広い範囲において板厚が大きく減少している。また、 $r=13$ mm 以上では $h=12$ mm の方が板厚減少は大きい。このことから、カウンターパンチを使用することによって、全体的に板厚を減少することができ、側壁部の立った円筒形状に成形することができた。

4.2 しごき加工

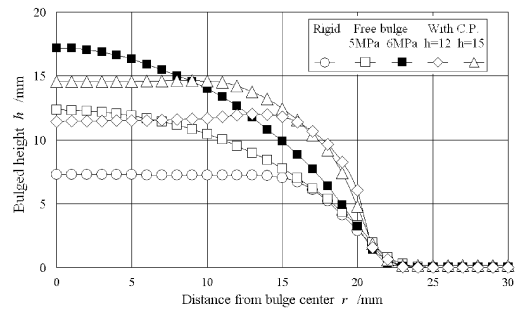
側壁部の板厚を薄くするとともに成形品の形状を整形するために、しごき加工を行った。しごき加工に使用した試料は、カウンターパンチ高さ $h=12$ mm、液圧 $p=10$ MPa および $h=15$ mm、 $p=6$ MPa の成形品である。

図7にしごき加工の結果を示す。図7 (a)はしごき加工による外形形状の変化を示す。カウンターパンチ高さ $h=12$ mm、 15 mm で加工した成形品にしごき加工を加えた結果、最大張出高さはそれぞれ 15.1 mm、 16.4 mm を得ることができた。また、側壁部の立った形状に成形することができた。両試料とも、しごきパンチをこれ以上押し込んだ場合には、パンチ肩部で破断した。

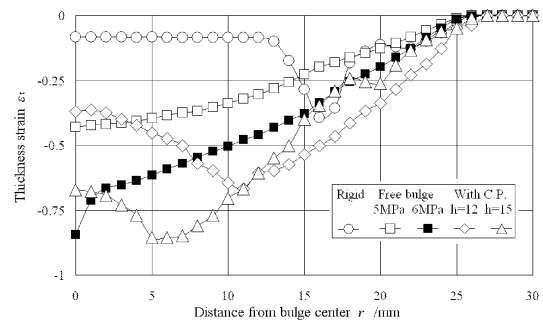
図7 (b)は、しごき加工による板厚ひずみ分布の変化を示す。 $h=12$ mm の場合には、張出加工において頭部が半径 $r=14$ mm 付近までカウンターパンチに接触しており、形状的にも側壁が立っているため、張出中央付近の板厚減少はほとんどないが、側壁部に位置する材料は大きな板厚減少を示している。一方、 $h=15$ mm の場合には、カウンターパンチに接触していた範囲は $r=7$ mm までであり、側壁部の形状もなだらかであり、しごき加工によって広範囲の板厚を減少することができた。その結果、成形高さが向上するとともに側壁部の立った成形形状が得られた。

図8は、各種張出加工によって得られた成形品の断面写真を示す。図8 (a)は、剛体工具による張出加工の結果である。パンチ頭部の板厚はほとんど減少せず、パンチ肩部で板厚が減少している。また、側壁部は台形形状となっている。図8 (b)

は液圧自由張出加工の場合である。半球状に張出され、頭頂部の板厚が最も薄くなっている。図8 (c)は、カウンターパンチ高さを $h=12$ mm に設定して張出加工を行った結果である。頭頂部の板厚減少が抑えられ、ほぼ均等に板厚減少が生じていることが観察される。図8 (d)は、しごき加工後の断面形状を示す。側壁部が薄く、切り立った形状に成形されている。

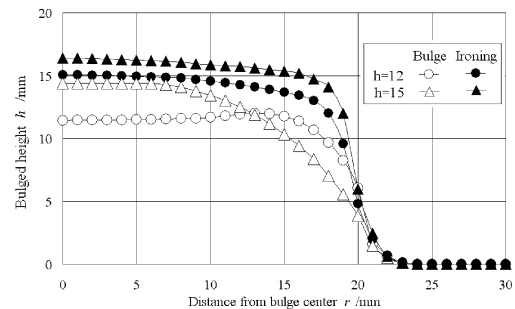


(a) 液圧張出加工製品の形状

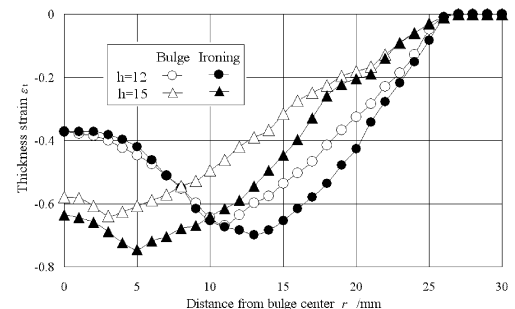


(b) 板厚ひずみ分布

図6 張出加工条件による成形製品の変化



(a) 製品形状の変化



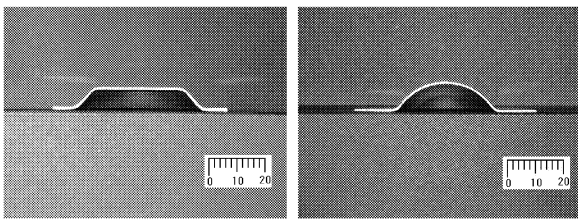
(b) 製品の板厚ひずみ分布の変化

図7 しごき加工後の製品形状

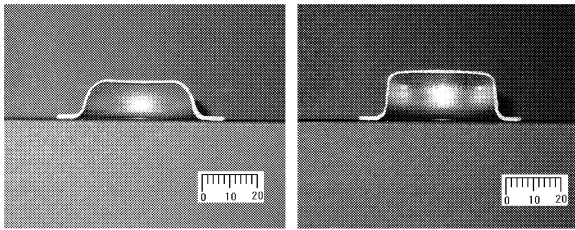
5. ダイス穴周辺部圧縮・液圧張出・しごき複合加工

5.1 ダイス穴周辺部圧縮加工

板厚2mmの軟質純アルミニウム板に外径 $D=50.0$ mmの圧縮リングを使用してダイス穴周辺部の圧縮加工を行った。圧縮に伴う成形品の形状変化を図9に示す。圧縮に伴ってダイス穴周辺部の板厚が減少し、材料がダイス穴内に流入することにより、ダイス内の材料が半球形状に変形していることが観察される。図10は、圧縮に伴う板厚ひずみの変化を示す。ダイス穴周辺部の板厚が減少するのに伴い、ダイス肩部に相当する中心からの初期位置10mm~15mm付近には、周辺材料が流入するため板厚の増加がみられる。しかし、成形品頭部付近の板厚はほとんど変化していない。一方、フランジ部への材料の流出はわずかであり、フランジ外形の変形はなかった。

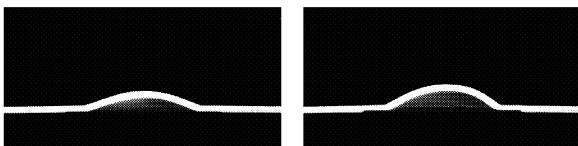


(a) 剛体工具による成形 (b) 液圧自由張出

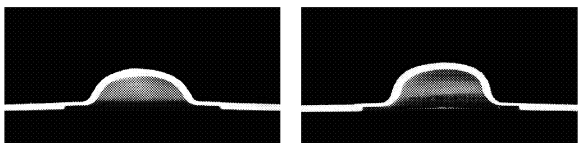


(c) カウンターパンチを用いた成形 (d) しごき加工

図8 各種張出成形後の製品の形状



(a) $\epsilon_t = -0.15$ (b) $\epsilon_t = -0.36$



(c) $\epsilon_t = -0.63$ (d) $\epsilon_t = -0.91$

図9 ダイス穴周辺部材料の圧縮に伴う材料の変形挙動

5.2 一定圧縮荷重保持・液圧負荷

ダイス穴周辺部に圧縮荷重を負荷し、周辺部に板厚ひずみ $\epsilon_t=0, -0.2, -0.4, -0.6$ を生じさせ、この荷重を保持した状態で液圧を負荷し、張出成形を行った。液圧を増加させ破断した時の成形品の例を図11、板厚ひずみ分布を図12に示す。ダイス穴周辺部ひずみが、 -0.4 および -0.6 の場合には、成

形品頭部の板厚はほとんど減少せず、ダイス肩部で破断した。これらの結果から、ダイス穴周辺部を圧縮し、その荷重を保持した状態から液圧を負荷する方法では、成形品頭部およびその周辺部の板厚を減少させることはできなかった。

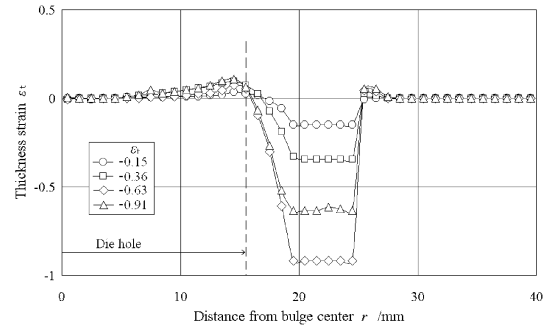
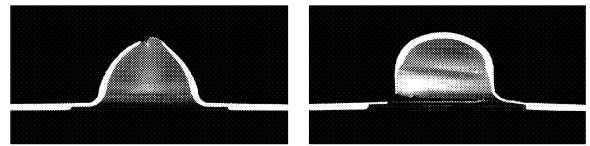


図10 ダイス穴周辺部圧縮に伴う板厚ひずみ分布の変化



(a) $\epsilon_t = -0.2$ (b) $\epsilon_t = -0.36$

図11 ダイス穴周辺部圧縮後の張出加工における破断

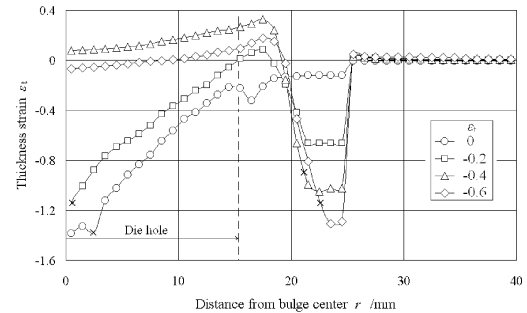


図12 ダイス穴周辺部圧縮後の板厚ひずみ分布

5.3 一定液圧保持・圧縮荷重負荷

液圧を負荷・保持した状態でダイス穴周辺部に圧縮荷重を負荷する加工法を試みた。ダイス穴周辺部の板厚ひずみ ϵ_t を約 -1.1 まで圧縮変形させたときの板厚ひずみ分布を図13に示す。これらの図から、保持液圧が大きくなるにつれて成形品頭部の板厚減少が大きくなり、張出高さが向上する。特に、19MPaまで液圧を負荷した成形品の頭部において大きな板厚減少がみられることから、成形品頭部の板厚減少率は、液圧負荷初期にほぼ決定すると考えられる。

この結果から、液圧を破断直前まで負荷し、その後液圧を保持した状態でダイス穴周辺部圧縮を行えば、成形品頭部とダイス穴周辺部の板厚をともに薄くすることが可能である。

5.4 しごき加工

図14(a)は、液圧19MPaを負荷することにより張出加工した成形品を示す。図14(b)は、この成形品に液圧16MPaを保

持しながらカウンターパンチを使用してダイス穴周辺部圧縮加工を行った結果である。その後、この成形品にしごき加工を行った。結果を図 14(c)に示す。また、各加工後の板厚ひずみ分布を図 15 に示す。最初の液圧負荷によって、成形品頭部の板厚が大きく減少し、ダイス穴周辺部圧縮加工によってダイス穴周辺部の板厚が大きく減少するとともに、成形品部の板厚減少が生じ、張出高さが大きく向上する。さらに、しごき加工によって側壁部の板厚が減少している。そして、成形品頭部、側壁部、ダイス穴周辺部すべての部分において、板厚ひずみ $\epsilon_t = -0.8 \sim -1.0$ 付近まで板厚が大きく減少した。

この結果、直径 31.5 mm、高さ 33.1 mm の張出高さを得ることができた。以上のことから、今回開発した複合加工法は、張出成形高さの向上にきわめて有効であることが明らかになった。

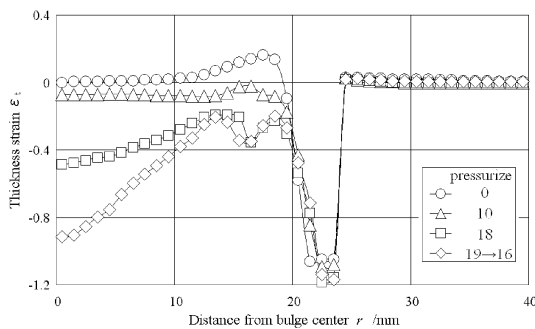
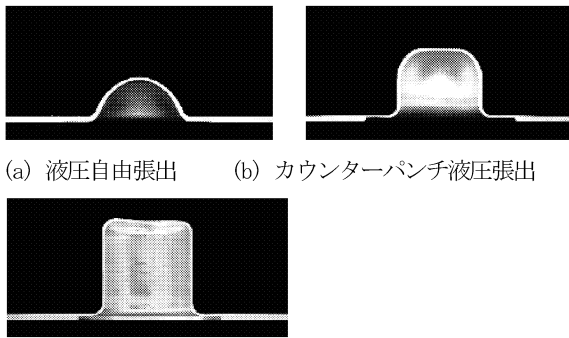


図 13 ダイス穴周辺部圧縮を伴った液圧張出加工における板厚ひずみ分布



(c) しごき加工後

図 14 各加工過程における製品の形状変化

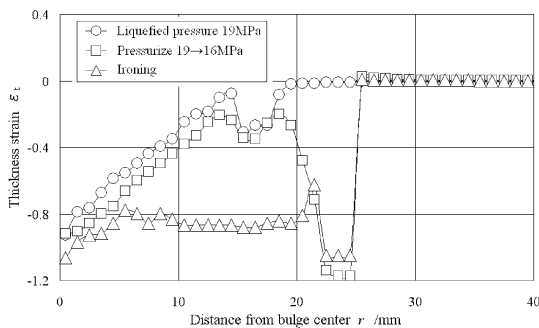


図 15 各加工過程における板厚ひずみ分布

6. 結論

本研究では、張出加工における成形高さを向上させるために、液圧を使用した各種張出加工を実施した。そして、各加工法によって得られた成形品の板厚ひずみ分布、張出高さ等を実験的に調べ、張出成形高さの向上について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 液圧を用いて自由張出加工を行えば、張出頭部の板厚を減少させることができる。この張出頭部の板厚減少を利用して、カウンターパンチを用いた液圧張出加工を行うと、頭部部の板厚が過度に薄くなることを防ぐことができ、成形高さを向上させるとともに、側壁部の立った成形品を得ることができる。
- 2) カウンターパンチを用いた液圧張出加工成形品に、しごき加工を行うことにより、側壁部の板厚減少率を大きくすることが可能であり、成形高さを向上させるのに有効である。
- 3) ダイス穴周辺部圧縮・液圧張出・しごき複合加工において、ダイス穴周辺部圧縮加工を行うことによって、ダイス穴周辺部の板厚を大きく減少させ、この板厚減少分の材料をダイス穴内に流入させることができた。
- 4) 一定の液圧を加えた状態で、ダイス穴周辺部圧縮加工を行うことにより、成形品頭部およびダイス穴周辺部の板厚を薄くすることが可能である。
- 5) ダイス穴周辺部圧縮・液圧張出・しごき複合加工によって、成形品頭部、側壁部、ダイス穴周辺部すべての部分において、板厚ひずみ $\epsilon_t = -0.8 \sim -1.0$ まで板厚を減少することができた。その結果、直径 31.5 mm、高さ 33.1 mm の張出高さを得られた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、財団法人天田金属加工機械技術振興財団から研究助成をいただきました。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 飯塚高志, 畑中伸夫, 高倉章雄: 軽金属, **56**(2006), 329-334.
- 2) 飯塚高志, 畑中伸夫, 高倉章雄: 軽金属, **56**(2006), 483-488.
- 3) 高倉章雄, 木村陽介, 山口克彦, 飯塚高志: 第 53 回塑性加工連合講演会論文集, (2002), 11-12.
- 4) 木村陽介, 高倉章雄, 山口克彦, 飯塚高志: 平成 15 年度塑性加工春季講演会論文集, (2003), 309-310.
- 5) 木村陽介, 高倉章雄, 山口克彦, 飯塚高志: 第 54 回塑性加工連合講演会論文集, (2003), 41-42.