

$$\frac{2l_s}{\left(\frac{m}{\cos\xi} + 1\right)\cos\theta} - \frac{l_s \tan\theta}{m} = \text{const.} \quad \dots(1)$$

ここで、 l_s は図1のように流線長さ、 m は周長再絞り率で、再絞り前後の容器の周長の比として次式で定義される。

$$m = \frac{a_0 b_0}{ab} \quad \dots(2)$$

このようにすることにより、任意凸形状容器の再絞りのための任意凸形予成形筒形状に対応した金型の3次元形状が数秒で計算できるようになった。

3. 新しい再絞り金型設計法

3.1 正方形容器の再絞り実験

図2に示す最小主応力の軌跡(MSと略記)を予成形筒として、この形状の容器を初絞りした後に、1辺40mm、コーナー半径 $r_c=8\text{mm}$ の正方形容器を再絞りする金型を作成した。以後、この工程をMS-Sq.工程と呼ぶ。図3は計算されたダイス肩角 θ の再絞り容器の周方向に沿う分布であり、 $l_p=18\text{mm}$ 位置が製品容器コーナーに対応する。

実験材料は母板厚 $t_0=0.57\text{mm}$ のフェライト系ステンレス鋼RSX-2である。初絞りで深さ30mmの予成形筒を作り、再絞りで40mm深さの正方形容器を作った。この正方形容器の側壁厚 t を測定した結果¹⁰⁾を図4に示す。この図より、容器コーナー部は母板厚よりも厚くなり、直辺部は板厚が大幅に減少していることがわかる。容器コーナー部の板厚増加は矩形容器の再絞りで発生する問題の一つであり、しごき加工が発生して金型温度の上昇、破損原因となる。

3.2 周方向ひずみ分布を考慮した工程設計法^{10)~12)}

図2において、隣り合った流線間の周長変化より周方向ひずみが計算できる。従って、予成形筒を最小主応力線の軌跡(MS)とすると、再絞り工程での周方向ひずみが直線辺に比べてコーナー部で大きいことがわかる。そこで、コーナー部の周方向ひずみを小さくするには、予成形筒とコーナー部の間隔を狭くし、直辺部と予成形筒との間隔を広くすれば周方向ひずみ分布の不均一が緩和されると期待できる。

ここでは、図2の $x'-y'$ 座標系において、

$$(x')^p + (y')^p = (r')^p, \quad p > 1 \quad \dots(3)$$

となる曲線を予成形筒形状とすることを考えた。ただし、製品が正方形なので、 $\gamma=\pi/4$ である。

図2に示す最小主応力線の軌跡(MS)の予成形筒では、周長再絞り率(製品周長/予成形筒周長) $m=0.78$ であるから、同じ再絞り率で、 $p=2, 3, 4$ の場合の予成形筒を示す曲線を図2に合わせて示す。

$p=2$ の円の場合、予成形筒とコーナー部の間隔は最小主応力線の軌跡(MS)の場合より狭くなり、直辺部ではその間隔が広がっている。この傾向は $p=3, 4$ と p を大きくす

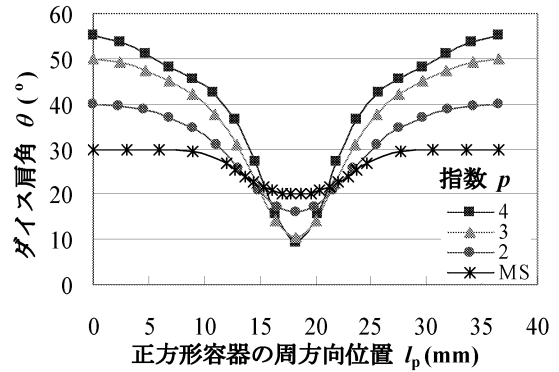


図3 ダイス肩角の分布(周長再絞り率 $m=0.78$)

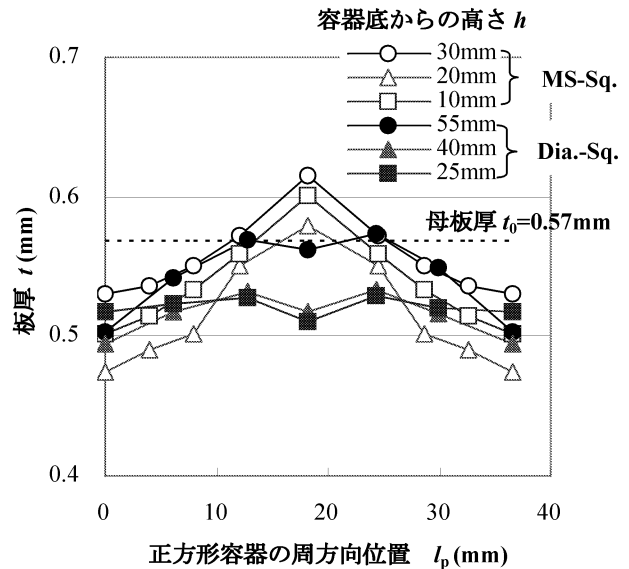


図4 再絞り正方形容器の側壁厚分布

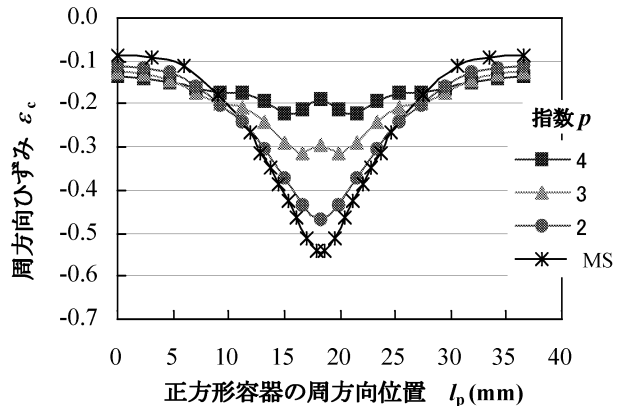


図5 正方形容器の再絞り時の周方向ひずみ分布(周長再絞り率 $m=0.78$)

るのに従って増大し、意図した結果が得られる。

図5には図2の種々の予成形筒から再絞りした時の周方向ひずみ ϵ_c の分布を示す。予成形筒を最小主応力線の軌跡(MS)とすると、再絞り工程での周方向ひずみが直線辺で $\epsilon_c = -0.086$ に対しコーナー部で -0.541 となり、その差が大きい。 $p=2$ の円の場合、周方向ひずみ分布は直辺部及びピコ

コーナー部でそれぞれ -0.110 , -0.467 であり、最小主応力線の軌跡(MS)の予成形筒の場合よりひずみ偏差が減少しているが、あまり大きな変化ではない。 $p=3$ の場合、直辺部の圧縮ひずみが若干増加し、コーナー部の圧縮ひずみが大幅に更に減少する。この傾向は $p=4$ で更に増大し、直辺部とコーナー部のひずみはそれぞれ -0.134 , -0.220 となり、周方向ひずみの不均一程度が大幅に緩和されている。しかし、指数 p をあまり大きくすると、図2に示すように x, y 軸上の予成形筒の曲率半径 r_c が小さくなり、この予成形筒を得るためのもう一段階前の再絞りにおいて同じ問題が発生する。従って、製品から遡って初絞りまでの工程設計を考える際には、予成形筒を示す曲線の最小曲率半径 r_c をできるだけ大きくすることも重要¹⁰⁾であろう。

3.3 容器の側壁厚分布の LS-DYNA による計算結果¹¹⁾

初絞りブランクは $\phi 100$ の円形とし、母板厚 $t_0=0.57\text{mm}$ のフェライト系ステンレス鋼RSX-2を想定し、材料の引張試験を行って、応力-ひずみ曲線を求めて、計算に用いた。

3.3.1 予成形筒を最小主応力の軌跡 (MS) とした場合

図6(a)は初絞り後の容器の板厚分布であり、容器コーナー部のパンチ肩部の板厚が最も薄くなっている。これを再絞りした後の板厚分布が図6(b)であり、再絞り後の容器コーナー部のパンチ肩部で板厚が最も薄くなっている。しかし、このコーナー部の厚みは、容器底から開口部に近づくに従って急激に増加している。

容器コーナー部の板厚が直辺部に比べて増大する原因は図5の再絞り時の周方向ひずみ分布から明らかである。即ち、再絞り工程で容器コーナー部の周方向圧縮ひずみが直辺部より大きいので、体積一定条件から、板厚が増加したのである。従って、図2に示す最小主応力の軌跡(MS)のような予成形筒形状から再絞りすると、場合によってはコーナー部の板厚が増大し、再絞り時にシワ押えとダイス間のクリアランスが不足し、再絞り不可能となることもあり得る。

3.3.2 $p=2, 3, 4$ の予成形筒の場合

図7は $p=2$ の円筒形を予成形筒とした場合の計算結果である。初絞り後の容器ではパンチ肩コーナー部の板厚の薄い領域は図6(a)に比べて広い。しかし、再絞り後の板厚は図6(b)の場合が 0.45mm を下回っているのに対し、図7(b)では、 0.5mm を下回ることがない。また、コーナー部において容器開口部に近づくとき、図6(b)の場合、板厚が 0.8mm を超える部分があるのに対し、図7(b)では口辺部を除けば 0.8mm を超えることはない。このように、コーナー部の板厚増加が少なく、同一高さにおける板厚分布がより均一になっていることは、図5の周方向ひずみの直辺部とコーナー部の差が小さいことと合致する。

$p=3$ の結果を図8に示す。図7(a), 8(a)との比較により、初絞り後の板厚が 0.55mm を下回る領域は $p=2$ の場合より

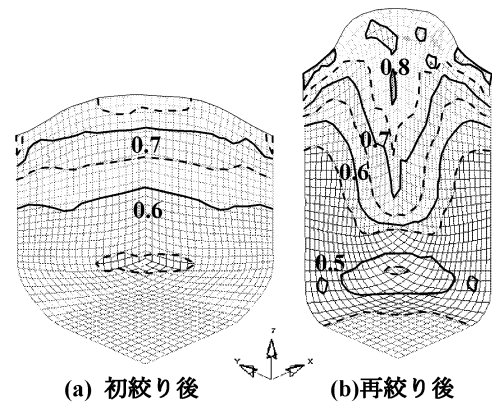


図6 最小主応力線の軌跡を初絞り形状とした場合の板厚分布 単位: mm, (周長再絞り率 $m=0.78$)

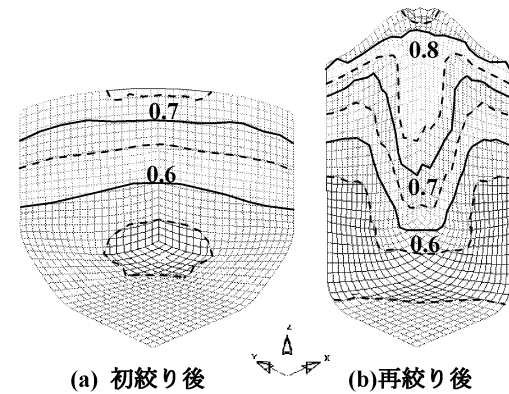


図7 $p=2$ を初絞り形状とした場合の容器の板厚分布 単位: mm, (周長再絞り率 $m=0.78$)

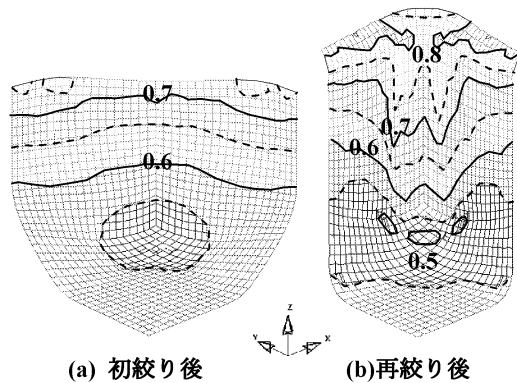


図8 $p=3$ を初絞り形状とした場合の容器の板厚分布 単位: mm, (周長再絞り率 $m=0.78$)

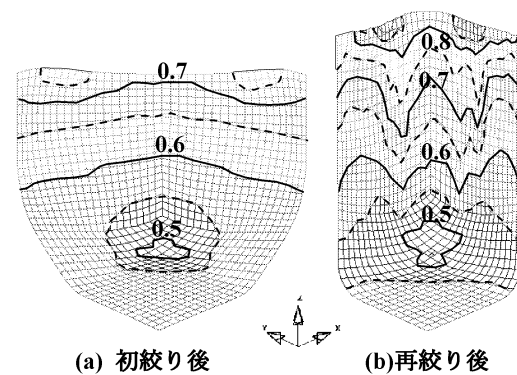


図9 $p=4$ を初絞り形状とした場合の容器の板厚分布 単位: mm, (周長再絞り率 $m=0.78$)

若干増加する。図 8(b)の再絞り後の板厚は 0.5mm を下回る領域があるが、開口部近傍の板厚が 0.75mm を超える部分は図 6(b)の場合より開口部側に移動していることがわかる。

図 9 に示す $p=4$ になると、これらの現象は更に増大し、容器の周方向板厚分布はより均一化されている。更に、板厚の周方向分布は周方向ひずみ分布のパターンと良く対応していることがわかり、再絞り後の板厚分布を決定する重要な因子であることが明確である。

3.4 ダイヤ・スクウェア工程による再絞り実験¹³⁾

上記の結果をふまえて更なる計算を行った結果、式(3)で $p=4$ 、周長再絞り率 $m=0.75$ となる条件を選択し、実験用金型を作成した。初絞り(予成形)容器形状は図 2 のように、製品の正方形容器に対して 45° 傾いた形状なので、この工程を以下ダイヤ・スクウェア (Dia.-Sq.と略記) 工程と呼ぶ。

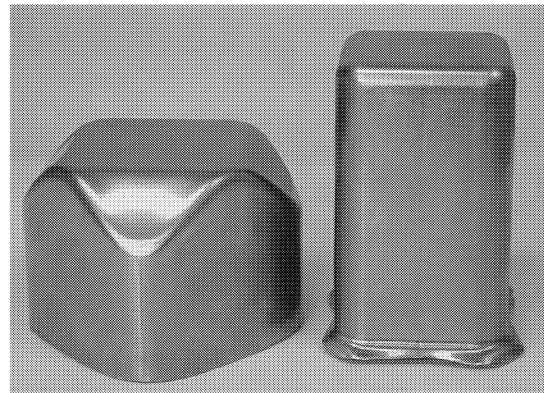
実験材料は母板厚 $t_0=0.57\text{mm}$ のフェライト系ステンレス鋼 RSX-2 である。図 10 に示すように、初絞りで深さ 45mm の予成形筒を絞り、再絞りで 60mm 深さの正方形容器をダイヤ・スクウェア (Dia.-Sq.) 工程で作った。今回、すべり線場法で計算されたダイス角分布のまま金型を作成したが、 x, y 軸近傍のパンチ傾斜部(図 10(a)の三角形形状部分)は僅かな凹面となっていたため、その稜辺部に初絞り荷重がかかり、板厚が過薄になることを恐れたが、図 10(b)のように、破断や極端に板厚が薄くなることは無かった。

再絞り後の正方形容器の板厚分布を図 4 に示す。この図よりダイヤ・スクウェア (Dia.-Sq.) 工程の板厚分布は、MS-Sq. 工程容器と同様に、容器直辺部で薄く、コーナー部では厚くなっているが、コーナー中央では若干薄くなっている。このような板厚分布は図 5 の周方向ひずみ分布とも合致し、容器深さが深いにもかかわらず、板厚偏差は約 1/2 に低減しており、側壁厚分布の均一性の観点から、正方形容器の再絞り工程としてはダイヤ・スクウェア (Dia.-Sq.) 工程のほうが優れていることがわかる。

4. 矩形容器のコーナー半径の縮小化

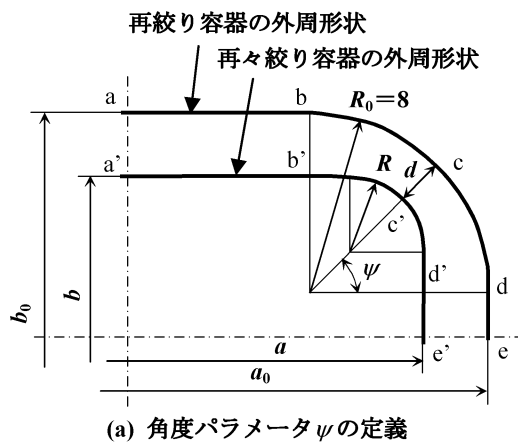
4.1 再絞り及び再々絞り容器形状¹⁴⁾

ここでは、図 11、表 1 に示す長辺 $a_0 \times$ 短辺 b_0 、コーナー半径 $R_0=8\text{mm}$ の長方形再絞り容器のコーナー半径を再々絞り工程で $R=4\text{mm}$ に縮小する方法について検討する。素材としての再絞り容器に対して、再々絞り容器の形状は無限に考えられる。そこで、何らかの方法で系統的に両者の関係を規定する必要がある。図 11(a)のように、素材の再絞り容器と再々絞り容器のコーナー部の間隔 $d=0.8\text{mm}$ (d の最小値は再々絞り容器コーナー板厚) を与える。更に、同図中に示す角度 ψ をパラメータとして用いると、図 11(b)のように、素材の再絞り容器に対して、再々絞り容器の形状が規定できる。

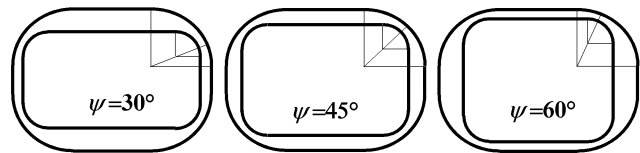


(a) 初絞り深さ $h=45\text{mm}$ (b) 再絞り深さ $h=60\text{mm}$

図 10 ダイヤ・スクウェア工程で作られた正方形容器



(a) 角度パラメータ ψ の定義



(b) 角度 ψ と再々絞り容器形状の関係

図 11 角度パラメータ ψ と絞り容器形状

表 1 再絞り容器の寸法、矩形比と容器コーナー半径

長辺 a_0 (mm)	42.4	60.0	72.0	90.0
短辺 b_0 (mm)	42.4	30.0	25.0	20.0
矩形比 a_0/b_0	1.0	2.0	2.88	4.50

$R_0=8\text{mm}$, $R=4\text{mm}$, $d=0.8\text{mm}$

4.2 再絞り容器の矩形比

ここで扱った素材としての再絞り容器の長短辺寸法と矩形比 a_0/b_0 は表 1 に示すようであり、 $a_0/b_0=42.4/42.4=1.0$ (正方形) から、 $a_0/b_0=90/20=4.50$ までである。なお、再絞り容器のコーナー半径は $R_0=8\text{mm}$ であり、上記のように再々絞りで容器のコーナー半径を $R=4\text{mm}$ とすることを検討した。ただし、再々絞り工程での現象を明確にするために、LS-DYNA による計算では、素材としての再絞り容器の板厚を $t_0=0.58\text{mm}$ 一定とした。

4.3 $a_0/b_0 = 60/30$ の場合の容器底面変形

表2は $a_0/b_0 = 60/30$ の場合における種々の角度パラメータ ψ と再々絞り容器の外形寸法 a, b , 再々絞り工程における長短辺の幅変化量 $\Delta a, \Delta b$ である。図12は種々の角度パラメータ ψ における底面変形のLS-DYNAによる計算結果であり、容器の1/4を示している。

図12(a)の $\psi=0^\circ$ では、表2に示すように短辺の変形量が大いので、容器底面の座屈量が底面中心で最も大きいことが明らかである。一方、図12(f)に示すように、 $\psi=90^\circ$ では長辺の圧縮変形量が大いものの、この変形が容器底面中央にまで及ばず、長辺側が座屈変形をするので、容器底面中央よりも底面が盛り上がった変形となる。

図12(b)の $\psi=45^\circ$ では、容器底面中央の盛り上がり変形量 w は $\psi=0^\circ$ の場合よりも小さくなる。更に、角度 ψ が増加すると、容器底面中央の盛り上がり変形量 w は減少する。 $\psi=55^\circ$ (図12(d))となると、容器中央が盛る変形様式から、容器長辺近傍が盛る変形様式に変化することがわかる。図13は再々絞り実験による容器の底面変形状態であり、計算結果と良く対応していることがわかる。

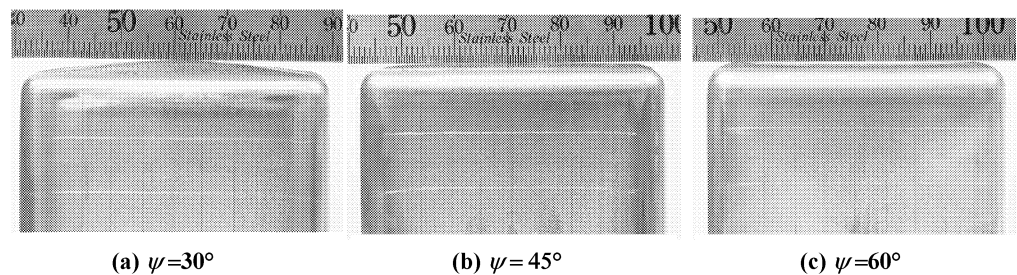


図13 再々絞り容器底面の変形 ($a_0/b_0 = 60/30$)

表2 再々絞り容器外形寸法と長短辺の幅変化量

角度 ψ (°)	0	45	50	55	60	90	
長辺 a (mm)	58.40	56.53	56.12	55.68	55.20	52.00	
短辺 b (mm)	22.00	26.53	26.90	27.24	27.54	28.40	
幅変化量	Δa (mm)	1.60	3.47	3.88	4.32	4.80	8.00
	Δb (mm)	8.00	3.47	3.10	2.76	2.46	1.60

$a_0=60\text{mm}, b_0=30\text{mm}, R_0=8\text{mm}, R=4\text{mm}, d=0.8\text{mm}$

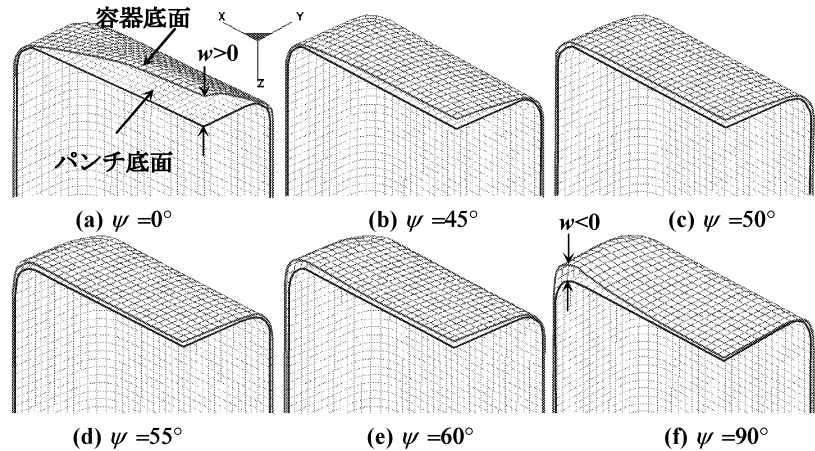


図12 $a_0/b_0 = 60/30$ の場合の容器底面変形と容器底面変形量 w の定義

ここで、容器底面の変形量 w に関し、図12(a)のように、容器底面中央が盛上がる変形の場合 $w>0$, 図12(f)のように長辺近傍が盛上がる変形を $w<0$ で定義することとする。

4.4 容器底面変形量の矩形比依存性¹⁵⁾

表1に示す種々の矩形比の容器の底面変形量 w と角度パラメータ ψ の関係を図14に示す。 $a_0/b_0=42.4/42.4$ の正方形容器の場合 $\psi=45^\circ$ とすると、容器底面中央が盛上がる変形が生じるので、 $\psi=53^\circ$ 程度とすると底面変形量 w がゼロに近い値となる。 $a_0/b_0=60/30$ の場合も $\psi=53^\circ$ 程度とすると底面変形量がゼロに近い値となることがわかる。更に矩形比の大きい $a_0/b_0=72/25, 90/20$ の場合では、それぞれ $\psi=60^\circ, 64^\circ$ 程度とすると底面変形量が小さくなるがわかる。

4.5 再々絞り容器の側壁厚分布

図15(a)~(c)は $a_0/b_0 = 42.4/42.4, \psi=45^\circ, 55^\circ, 90^\circ$ の場合の再々絞り後の容器の板厚分布である。図15(a)の $\psi=45^\circ$ では、図14から明らかなように容器底面中央が盛上がるために、容器底はパンチ角部近傍のみが接触するので、この部分の板厚が減少する。 $\psi=90^\circ$ (図15(c))では、 $w<0$ となるので、この問題は回避できるが、容器コーナー部の板厚増加が激しい。容器底面変形が少ない $\psi=55^\circ$ (図15(b))で

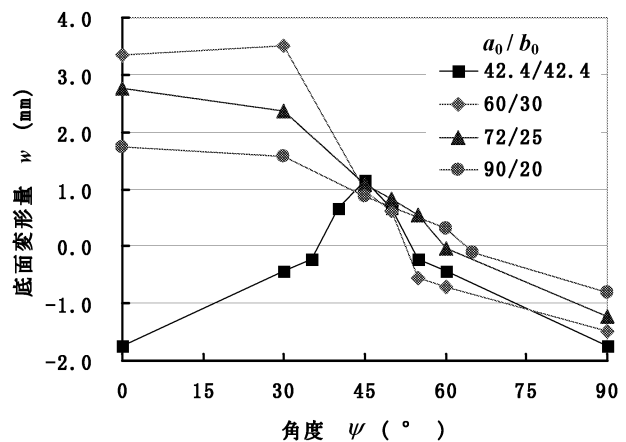


図14 矩形比の異なる容器の底面変形量 w と角度パラメータ ψ の関係

は、パンチが容器底面で比較的均一に接触するために、底面での板厚減少が避けられ、かつコーナー部の板厚増加もほどほどである。

図16(a)~(c)は矩形比の大きい $a_0/b_0 = 90/20, \psi=0^\circ, 65^\circ, 90^\circ$ の場合の再々絞り後の容器の板厚分布である。 $\psi=0^\circ$ (図

16(a)では、上記の場合と同様に、容器底面中央が盛り、容器はポンチ角部と接触するので、この部分の板厚が減少する。同図(c)の $\psi=90^\circ$ では、 $w<0$ となるので、この問題は回避できるが、容器コーナー部の板厚増加が激しい。容器底面変形が少ない $\psi=65^\circ$ （図16(b)）では、ポンチが容器底面で比較的均一に接触するために、底面での板厚減少が避けられ、かつコーナー部の板厚増加もほどほどである。

図15, 16の比較から、矩形比の大きい $a_0/b_0=90/20$ の方が、板厚の増減量が大きく、製造が困難であることがわかる。

5. 結言

正方形容器の再絞り金型設計法に関するまとめ

桑原らの提示したすべり線場法を用いた再絞り金型設計法をより一般化し、正方形容器の再絞り金型設計を行い、LS-DYNAを用いた計算及び実験により、以下の結論を得た。

- (1) 正方形容器の再絞り後の側壁厚分布が、すべり線場法で計算された再絞り前後の容器の周方向ひずみ分布と非常に良く対応する。
- (2) 従来の工程のように製品正方形より一回り大きな予成形筒から再絞りすると、容器コーナー部の板厚が過大になる。
- (3) 予成形筒形状としては、製品の正方形容器に対して 45° 傾けたダイヤ・スクウェア再絞り工程の方が従来工程に比べて容器側壁厚分布がより均一になる。

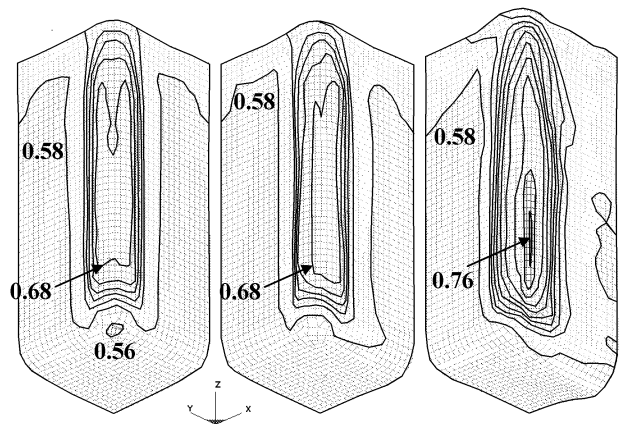
矩形容器のコーナー半径の縮小化に関するまとめ

コーナー半径の縮小化を行う再絞り工程について、LS-DYNAによる計算及び実験により、以下の結論を得た。

- (4) コーナー半径縮小化前後の半径の中心を結ぶ線と長辺とのなす角 ψ をパラメータとすることにより、コーナー半径縮小化後の形状を系統的に規定することが可能である。
- (5) パラメータ ψ の値によらず、周方向圧縮ひずみは殆どコーナー部で生じるのでコーナー部の板厚増加現象が生じる。
- (6) 容器底面の座屈変形量の少ない最適パラメータ角 ψ は容器の矩形比によって変化するが、その最適角では容器の板厚変動が最も少なくなる。

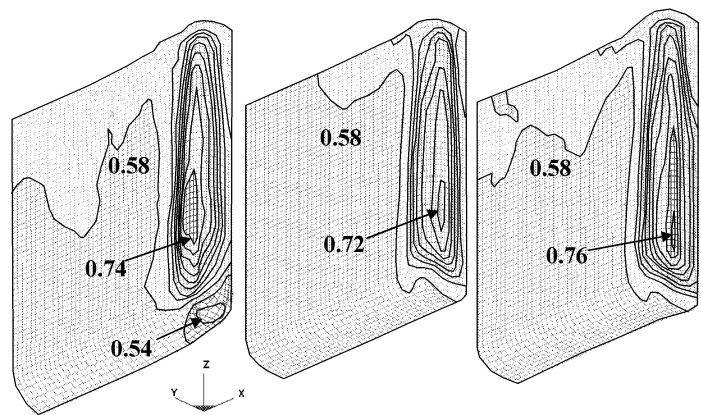
謝辞

本研究は天田金属加工機械振興財団からの研究助成によることを付記し、謝意を表します。



(a) $\psi=45^\circ$ (b) $\psi=55^\circ$ (c) $\psi=90^\circ$

図15 再々絞り容器の板厚分布($a_0/b_0=42.4/42.4$)



(a) $\psi=0^\circ$ (b) $\psi=65^\circ$ (c) $\psi=90^\circ$

図16 再々絞り容器の板厚分布($a_0/b_0=90/20$)

参考文献

- 1) Romanowski, W. P.: Handbuch der stanzeri-technik, 2nd ed. (1959), 153-195, VEB Verlag Technik, Berlin.
- 2) 太田: プレス技術, 21-6 (1983), 101-105.
- 3) 太田: プレス技術, 21-8 (1983), 101-105.
- 4) 桑原ほか: 塑性と加工, 30-337 (1989), 227-233.
- 5) 桑原ほか: 塑性と加工, 31-357 (1990), 1222-1228.
- 6) 磯邊: 塑性と加工, 41-482 (2000), 482-486.
- 7) 磯邊: 第51回塑加連講論, (2000), 211-212.
- 8) 磯邊: 第52回塑加連講論, (2001), 217-218.
- 9) 磯邊ほか: 第53回塑加連講論, (2002), 277-278.
- 10) 磯邊: 第55回塑加連講論, (2004), 399-400.
- 11) 磯邊: 第56回塑加連講論, (2005), 69-70.
- 12) 磯邊: 平成18年度塑加春講論, (2006), 127-128.
- 13) 磯邊: 平成19年度塑加春講論, (2007), 173-174.
- 14) 磯邊: 第58回塑加連講論, (2007), 89-90.
- 15) 磯邊: 平成20年度塑加春講論, (2008), 81-82.