Review

矩形容器の再絞り金型のデジタル瞬時設計



磯邊 邦夫*

1. 緒言

深い容器は再絞りによって作られる. Romanowski¹⁾は 矩形容器の再絞り金型設計式を示し、これを基本にした 金型設計^{2),3)}が行われているが、物理的根拠が不明確な ため、金型作製には経験と勘と試行錯誤が必要である. 桑原ら^{4),5)}はすべり線場法を用いた金型設計法を提示し た.著者はこの方法をより一般化し、再絞りにおける周 方向ひずみ分布を考慮した任意形状容器の再絞り金型の 瞬時設計の確立を目的として、一連の研究^{6)~14)}を行い、 材料の塑性変形を考慮した金型設計を行うと、熟練者で なくとも、金型設計が可能であることがわかった.

また,深絞りされた矩形容器のコーナーにはフィレット がついており,この半径が小さい製品を要求されることが 多く,その金型設計も経験に頼っているのが現状である. そこで,その設計についての基本的考え方を提示し,計算 と実験による確認を行ったので,その結果^{15),16)}も述べる.

2. すべり線場法を用いた再絞り金型設計法 2.1 桑原らの設計法^{4,5}

図1は再絞り工程の模式図である.金型内縁では再絞 りパンチにより材料はパンチ速度 V_Pで流出し,予成形 筒は速度 V_sで再絞り金型内に流入する必要がある.再絞 り金型内では,材料は絞り加工を受けるが,その材料速 度は周方向で均一ではない.そこで,桑原らは,すべり 線場解析を行って,そのホドグラフから材料速度を計算 し,予成形筒の任意高さ a'b' の材料が同一時刻に金型内 縁 a₀ & に到達するように,再絞りダイス肩角度 θ の周方 向分布を計算する方法を提示した.提示された方法は, 直線と円弧からなる製品にしか適用できないこと,また, 予成形筒形状は製品形状から構成されるすべり線場の最 小主応力線の軌跡に限られるなどの制限があったが,塑 性加工理論に立脚した初めての金型設計法と言える.

2.2 桑原らの方法の改善

任意凸形状容器の再絞り金型設計を行うには、製品容器形状の周辺にすべり線場を直接作図することが有効である. すべり線やホドグラフの作図は、簡単な描画プログラムをパソコンで実行すれば得ることができるの. 図2に40×40mm, コーナー半径 r_c=8mmの正方形容器に対するすべり線場,流線,最小主応力の軌跡線を示す^{10,11}.

また,ダイス肩角度θを計算するために,予成形筒形 状の規定点での材料の速度ベクトル(速度と方向)を求 める必要がある.これも,その形状規定点に対応するホ

```
*富山工業高等専門学校機械工学科 教授
```





図2 再絞り製品形状と種々の予成形筒形状

ドグラフから、簡単なプログラムを組めば、容易に求めることができる.このようにすると、その形状規定点における予成形筒法線と材料の速度ベクトルのなす角 *ξ*(図2参照)を求めることができ、ダイス肩角の周方向分布は次式を満足するよう決定すれば良い.

$$\frac{2l_{\rm s}}{\left(\frac{m}{\cos\xi}+1\right)\cos\theta} - \frac{l_{\rm s}\tan\theta}{m} = {\rm const.} \qquad \cdots (1)$$

ここで, /_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.

$$m = \frac{a_0 b_0}{ab} \qquad \cdots (2)$$

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*=8mm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のの再絞り容器の周方向に 沿う分布であり,*I_p*=18mm位置が製品容器コーナーに対応する.

実験材料は母板厚な=0.57mm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 / 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.

3.1.1 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,

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

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 その間隔が広くなっている.この傾向は*p*=3,4と*p*を大 きくす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。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ε。= -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rc'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rc'をできるだけ大きく することも重要¹⁰であろう.

3.1.2 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 φ 100 の円形とし,母板厚 t₀=0.57mm のフェライト系ステンレス鋼の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.

(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,再絞り時にパンチ とダイス間のクリアランスが不足し,しごき加工による 発熱問題の原因となる.

(2) p=4 の予成形筒の場合

図7は図2のp=4の形状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、0.45mm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、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.

3.1.3 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 t₀=0.57mm のフェライト系ステンレス 鋼 RSX-2 である.図8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肩角の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8(a)の三角形状部分) は僅かな凹面となっていた.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8(b)のように、 問題無く再絞りできた.なお、凹面を凸面に修正しても、 問題なく再絞りができた.

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



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(母板厚 t₀=0.57mm,周長再絞り率 m=0.78)



図7 p=4 を初絞り形状とした場合の容器の板厚分布 (母板厚 t₀= 0.57mm,周長再絞り率 m=0.78)



(a) 初絞り深さ h=45mm
(b) 再絞り深さ h=60mm
図8 ダイヤ・スクウェア工程で作られた正方形容器





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.

3.2 長方形容器の再絞り実験¹⁴⁾

長短辺が 60, 30mm, コーナー半径 r_c=8mm の長方形容 器を初絞り, 再絞りの 2 工程で作ることを検討した. 図 9 はこれらの容器の平面形状とすべり線場である. ここ でも,最小主応力線の軌跡を初絞り容器形状とした場合 (MS)について,上記の方法で得られたダイス肩角の周方 向分布を図 10 に示す.また,再絞り時の周方向ひずみ分 布を図 11 に示す.

一方,これらの図中には初絞り容器形状が長短半径 36, 25mmの楕円とした場合(Ov36-25)と略記)の結果も示す. この場合周方向ひずみ分布は最小主応力線の軌跡の場合に 比べると,より均一になっていることがわかる.

図12は母板厚 t₀=0.58mmのフェライト系ステンレス鋼板を用い、この容器を再絞りした後の容器の側壁厚分布である.再絞り後の容器コーナーは位置4に対応し(図9)、コーナー部の板厚が増大し、直辺部の板厚が極端に低減している.これは、正方形容器の場合と同じ現象である.

そこで、初絞り容器を最小主応力線の軌跡とした場合 (MS)と楕円(Ov36-25)とした場合について、LS-DYNA を用いた計算を行った結果を図13、14に示す.両者の比 較から、楕円(Ov36-25)とした場合の方が製品の周方向 板厚分布がより均一であることがわかり、今後実験で確 認する予定である.

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¹⁵⁾

ここでは、図15、表1に示す長辺 α₀×短辺 δ₀, コー ナー半径 R₀=8mm 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=4mm 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15(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=0.8mm (d の最小値は再々絞り容器コーナー板厚)







図13初絞り容器が最小主応力線の軌跡(MS)の場合の板厚分布(t₀=0.58mm, m=0.80)



 (a) 初絞り後
(b) 再絞り後
図 14 初絞り容器が楕円(0v36-25)の場合の 板厚分布(t₀=0.58mm, m=0.86)

を与える.更に、同図中に示す角度 w をパラメータとし て用いると、図15(b)のように、素材の再絞り容器に対



(b) 角度ψと再々絞り容器形状の関係



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					
$R_0 = 8$ mm $R = 4$ mm $d = 0.8$ mm									

目に

表2 再々絞り容器外形寸法と長短辺の幅変化量

角度 ¥	(°)	0	45	50	55	60	90
長辺 a	r (mm)	58.40	56.53	56.12	55.68	55.20	52.00
短辺 6	(mm)	22.00	26.53	26.90	27.24	27.54	28.40
幅変	$\Delta a (\mathrm{mm})$	1.60	3.47	3.88	4.32	4.80	8.00
化量	$\Delta b (mm)$	8.00	3.47	3.10	2.76	2.46	1.60

 $a_0 = 60$ mm, $b_0 = 30$ mm, $R_0 = 8$ mm, R = 4mm, d = 0.8mm

して,再々絞り容器の形状が規定できる.

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a0/b0は表1に示すようであり, a0/ *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 Ro=8mm 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=4mm 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to=0.58mm一定とした.

4.3 a0/b0=60/30 の場合の容器底面変形

表2はa₀/b₀=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 Δα, Δδ である. 図16 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を示す.

図 16(a) の ψ=0° では、表 2 に示すように短辺の変形量 が大きいので, 容器底面の座屈量が底面中心で最も大き くなる. 一方,図 16(f) に示すように、 y=90° では長辺の 圧縮変形量が大きいものの、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 16(b) の ψ=45° では, 容器底面中央の盛上り変形量 w はw=0°の場合よりも小さくなる.更に,角度wが増加す ると、容器底面中央の盛上り変形量wは減少する、w=55 。(図 16(d))となると、容器中央が盛上る変形様式から、 容器長辺近傍が盛上る変形様式に変化する.

図17は再々絞り実験による容器の底面変形状態であ り,図16の計算結果と良く対応している.

ここで, 容器底面の変形量 w に関し, 図 16(a) のように, 容器底面中央が盛上がる変形の場合 w>0,図16(f)のよう

(c) $\psi = 60^{\circ}$







に長辺近傍が盛上る変形を 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¹⁶⁾

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 w の関係を図 18 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° 程度とすると底面変形量が小さくなる ことがわかる.



図18 矩形比の異なる容器の底面変形量 w と角度パラ メータ w の関係

4.5 再々絞り容器の側壁厚分布

図 19 (a)~(c) は a_0/b_0 =42.4/42.4, ψ =45°, 55°, 90°の場 合の再々絞り後の容器の板厚分布である.上記のように、 再々絞り工程での現象を明確にするために、計算では素 材としての再絞り容器の板厚を t_0 =0.58mm 一定とした. 図 16(a) の ψ =45°では、図 14 から明らかなように容器底



図19 再々絞り容器の板厚分布 (a₀/b₀=42.4/42.4, 再 絞り容器板厚 t₀=0.58mm)

面中央が盛上るために、容器底はポ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. w=90°(図 19(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w=55°(図19(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.

5. 結言

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、矩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、この方法が実用に供することを確認した.この方法の特徴は、再絞り 工程における周方向ひずみが考慮できるので、容器コー ナー部の板厚増加を防ぐ工程設計ができることである. ただし、パンチ面が凹面になって、若干の修正が必要な 場合がある.

更に,矩形容器のコーナー半径の縮小化のための再絞 り工程設計方法を提案し,容器底面の座屈変形現象を実 験及び LS-DYNA を用いた計算で確認した.座屈変形が 少なくなる条件では容器コーナー部の板厚増加も少なく なること,その条件は容器の矩形比に依存して変化する ことが明らかとなった.

謝辞

本研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団及び日本 鉄鋼協会からの研究助成によることを付記し、謝意を表し ます.

参考文献

- 1) Romanowski, W. P. : Handbuch der stanzerei-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) 磯邉: 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) 磯邉ほか: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) 磯邉: CAMP-ISIJ, 17(2004), 264.
- 15) 磯邊:第58回塑加連講論, (2007), 89-90.
- 16) 磯邊:平成 20 年度塑加春講論, (2008), 81-82.