

穴付きブランクの絞り加工における変形を考慮した穴形状設計手法の確立

堀之内悠介*，栗毛野裕太**

Development of a Hole Shape Design Method for Perforated Blanks Considering Deformation in Deep Drawing

Yusuke HORINOCHI and Yuta KURIGENO

本研究では、あらかじめ穴をあけたSPCCのブランク（以下、穴付きブランク）の絞り加工技術及び穴形状の設計手法を開発した。本手法は、穴付きブランクの穴形状を変えながら絞り加工解析を繰り返すことで、絞り加工後に割れやしわ等が発生しない、かつ目的の穴を有する金属カップを成形するものである。

本手法によって設計された穴付きブランクを用いて実試験を行った結果、割れやしわ等の欠陥がなく、かつ普通寸法許容差内の穴を有する金属カップを成形できたので報告する。

Keyword : Drawing process, Pre-hole, Finite Element Method, Deformation Control, Principal Stress

1. 諸 言

照明器具やモータハウジングに用いられる反射板や外装カバーなどの薄肉カップ形状部品は、冷間圧延鋼板などの薄いブランク材の絞り加工によって成形することで大量生産されている。

照明用部品の例を図1に示す。これらの部品には、電球やLEDモジュールの配線を通すための穴や、取付用ねじ穴などが設けられているのが一般的である。穴位置については底面部や側壁部等であり、穴精度については精密な寸法精度を求めない普通寸法許容差程度となっている。従来は、絞り加工後の立体形状に対して打抜き加工や切削加工を施し、所定の位置に穴を形成していた。

しかし、立体形状のワークに穴あけ加工を行うには、専用の加工機や治具の製作等が不可欠であり、そのための段取り時間や製造コストの上昇が避けられない。一方、平板状のブランクであれば、穴あけ加工は比較的容易であり、既存設備を用いて短時間で加工できる。このため、絞り加工前にあらかじめ穴を設ける手法（タレットパンチプレスや順送プレスにおける加工）は、製造工程の簡略化およびコスト削減に直結する可能性を有している。

本研究では、平板状のブランクであれば、穴あけ加工は比較的容易であることに着目し、穴付きブランクの絞り加工技術の可能性について検討したところ、以下の2つの課題が明らかとなった。

1つ目の課題は、絞り加工時に、穴も同時に変形するため、成形後に目標寸法・形状を得ることが困難である。

2つ目の課題は、穴に応力が集中し、割れやしわ等の欠陥が発生しやすくなる。



図1 照明用部品の例

これらの課題から、本技術を適用できる形状や精度は一定の制約を受けると予想される。そこで本研究では、直径50.0mm、高さ30.0mmのカップ形状モデルを対象とし、FEM解析により適用可能な穴形状と精度を検討したうえで、穴形状の設計手法を構築し、実試験によりその妥当性を検証した。

その結果、割れやしわ等の欠陥がなく、かつ寸法公差 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内の穴を有する金属カップを成形できることを確認したため、以下に報告する。

2. 実験方法

2.1 研究対象モデル

研究対象モデルの外観を図2に、穴付きブランクの外観を図3に、絞り解析金型の模式図を図4に示す。

本研究では、直径50.0mm、高さ30.0mmのカップ形状を基本とし、底面部中央、底面部、底R部、側壁部、フランジ部の各領域に直径3.0mmの穴を有する絞り加工を目標とした。本モデルは照明用部品を想定しており、必要とする穴は直径3.0mm程度の配線通し穴とした。

評価基準として寸法公差はJIS B 0405¹⁾に準拠した打抜き加工の普通寸法許容差に基づいて、穴寸法が $\pm 0.2\text{mm}$ の公差内に収まること、および絞り加工後にしわや割れなどの欠陥が発生しないこととした。事前に絞り加工解析を行い、穴なしの基本形状カップを成形できることを確認した。

* 生産技術部

** 企画支援部

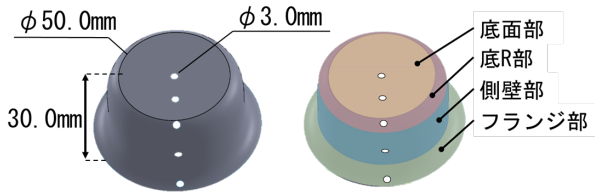


図2 研究対象モデルの外観

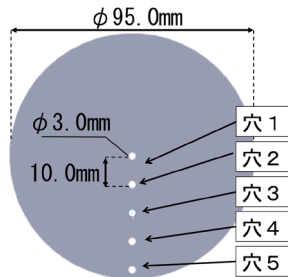


図3 穴付きブランクの外観

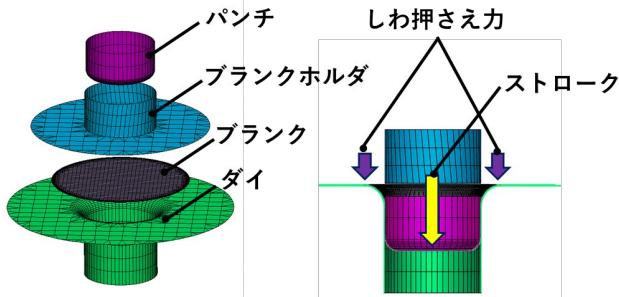


図4 絞り解析金型の模式図

穴付きブランクは、直径95.0mm、板厚1.0mmの円板とし、絞り加工後に成形品の各領域に穴が加工されるように、ブランクの中心から外径方向に向かって10.0mm間隔で直径3.0mmの穴を5か所加工したモデルを使用した。

2.2 設計手法

穴形状設計手法のフローチャートを図5に示す。本手法は矢印に従って次の①～⑤の手順を進める。

- ① 穴付きブランクに対し、絞り加工解析する。
- ② 解析結果から、穴の縦および横寸法の比率 r を(1)式により算出する。

$$r_i = \frac{d'_{ri}}{d_i} \quad (1)$$

d_i : 解析 i 回目における絞り加工前の穴寸法[mm]

d'_{ri} : 解析 i 回目における絞り加工後の穴寸法[mm]

- ③ 算出した比率 r を用いて(2)式により加工前の穴寸法 d を設計し、再解析する。

$$d_{i+1} = \frac{d'_{set}}{r_i} \quad (2)$$

d'_{set} : 目標とする絞り加工後の穴寸法[mm]

r_i : 解析 i 回目の穴寸法比率

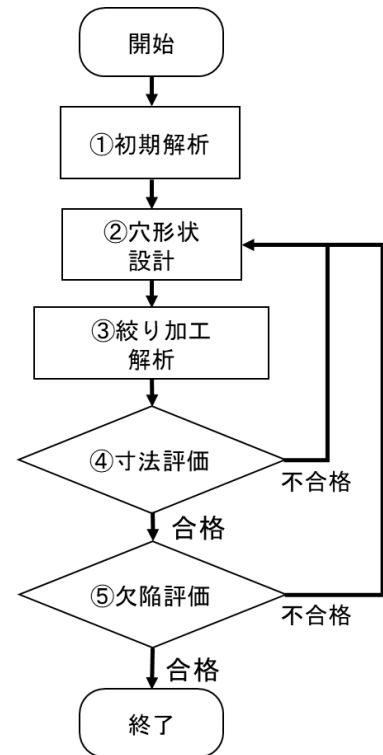


図5 穴形状設計手法のフローチャート

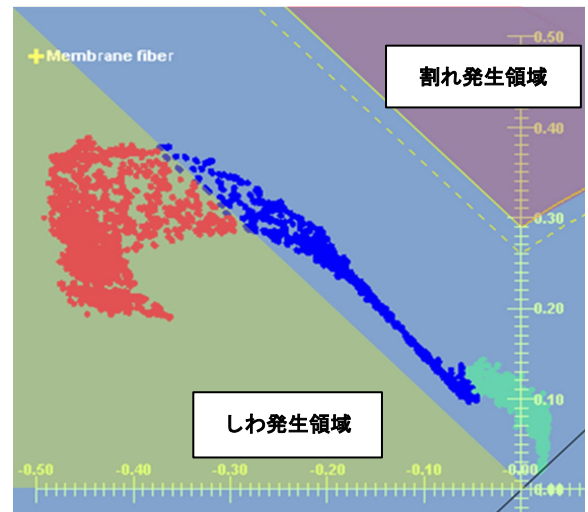


図6 成形限界曲線図の例

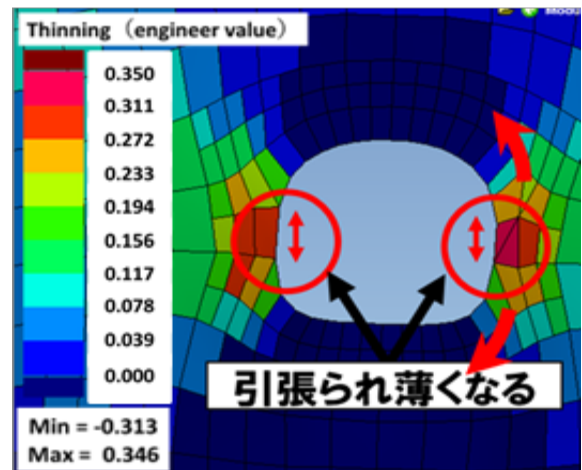


図7 板厚減少率の例

- ④ 穴の縦及び横寸法が普通寸法許容差以内となるまで
②～③の工程を繰り返す。
- ⑤ 寸法評価に合格後、成形限界曲線図と板厚減少率による欠陥評価を行う。不合格の場合は、穴形状を再検討し再解析を行う。欠陥評価に合格した時点で形状設計を終了する。

成形限界曲線図の例を図6に、板厚減少率の例を図7に示す。本研究では、成形限界曲線図及び板厚減少率によって成形品の欠陥評価を行った。

成形限界曲線図は、絞り加工前後のメッシュにおいて最大主ひずみを縦軸に、最小主ひずみを横軸にプロットしたものである。図6に示すとおり、しわ発生領域及び割れ発生領域にプロット点があると成形品に欠陥が生じる可能性があるため、この領域にプロット点がなければ合格と判断した。

板厚減少率 δ は、(3)式によって算出した。本研究では、一般的に割れが生じるとされる板厚減少率 25～30%^{2)～4)}を参考にし、25%未満を合格基準とした。

$$\delta = \frac{(t - t')}{t} \times 100 \quad (3)$$

t : 絞り加工前の板厚[mm]

t' : 絞り加工後の板厚[mm]

欠陥評価に不合格となった場合は、解析結果から割れやしわの発生位置と原因を特定し、該当部位の穴形状を再設計する。再設計では、成形後に大きな伸びが予測される領域に対し、加工前に伸びしろを持たせる形状補正を施し、応力集中を緩和する。補正後に再解析を行い、板厚減少率25%以下かつ寸法公差内であることを確認したうえで最終形状とした。

2. 3 解析条件

事前に基本形状のカップを実験により成形し、絞り加工解析との条件を確認した。解析条件を表1に示す。解析にはPAM-STAMP V2021を使用し、ブランクモデルを弾塑性体、金型モデルを剛体として設定し、パンチストローク30mm、しわ押さえ力50kN、摩擦係数0.1とし、材料の圧延方向をX軸方向に設定した。

2. 4 実試験による検証

本研究で使用した加工機の外観を図8に示す。ブランクの穴あけ加工には、レーザ加工機「QUATTRO」(株式会社アマダ製)を使用した。絞り加工には、プレス機「MJ333-5A32」(株式会社エムエイチセンター製)を使用した。実験時には、摩擦低減と加工性向上を目的として潤滑油「リライアプレスRA60」(ENEOS株式会社製)を用い、ハケにより金型およびブランク表裏面へ均一に塗布した。

表1 解析条件

ブランク材質	SPCC
板厚(mm)	1.0
摩擦係数	0.1
しわ押さえ力(kN)	50.0
最小メッシュサイズ[mm]	0.35



レーザ加工機

プレス機

図8 加工機の外観

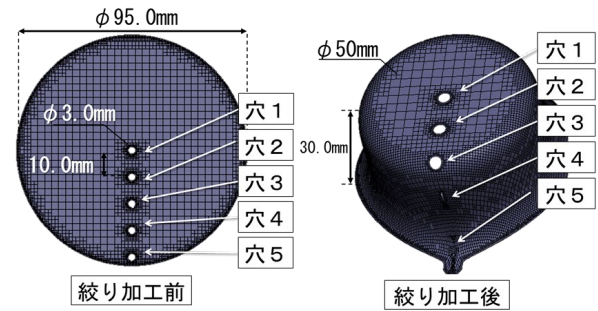


図9 穴付きブランクの初期解析結果

3. 実験結果

3. 1 解析時の各領域における穴変形挙動

穴付きブランクの絞り加工における初期解析結果を図9に、穴形状の拡大図を図10に示す。図10に示すとおり、各穴は底面部中央、底面部、底R部、側壁部、フランジ部の各領域に位置しており、直径50.0mm、高さ30.0mmのカップ形状を成形することは可能であった。しかし、いずれの位置においても目標寸法とする穴形状(3.0mm±0.2mm)を得ることはできなかった。

各領域における穴変形挙動の詳細は以下のとおりである。

- 穴1(底面部中央): 加工時に均等な引張応力を受け、縦横ともほぼ同程度に拡張した。円形を維持しており、材料流動は比較的均一であると推測される。ただし、縦横の変形量にわずかな差が見られ、これは鋼材の圧延方向の影響と考えられる。

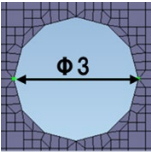
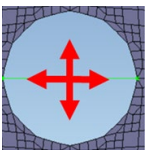
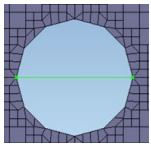
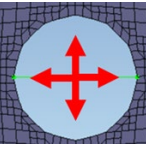
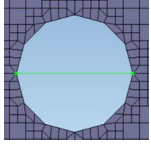
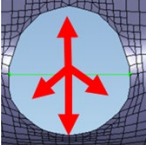
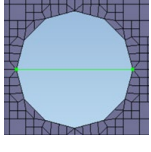
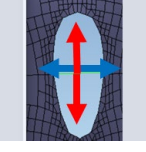
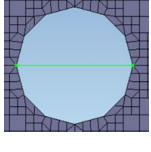
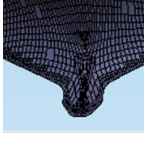
穴位置	絞り加工前の穴寸法(mm)	絞り加工後の穴寸法(mm)
穴 1 (底面部中央)		
	横 : 3.00 縦 : 3.00	縦 : 3.31 横 : 3.28
穴 2 (底面部)		
	横 : 3.00 縦 : 3.00	縦 : 3.30 横 : 3.30
穴 3 (底R部)		
	横 : 3.00 縦 : 3.00	縦 : 3.48 横 : 3.95
穴 4 (側壁部)		
	横 : 3.00 縦 : 3.00	横 : 0.58 縦 : 5.70
穴 5 (フランジ部)		
	横 : 3.00 縦 : 3.00	計測不可

図 10 初期解析における穴拡大図
(目標寸法 : 3.0±0.2mm)

- 穴 2 (底面部) : 穴 1 と同様に等方的に拡張し、円形を維持した。変形量は底面中央と同程度であり、板厚減少や材料流動の影響は均等に作用していると判断される。
- 穴 3 (底R部) : 縦方向への伸びが大きく、楕円化が確認された。底面から側壁への遷移部では縦方向に強

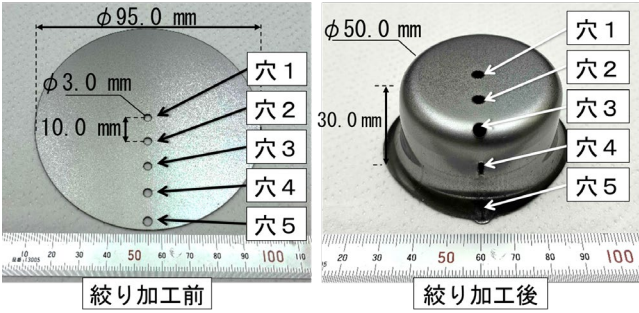


図 11 初期形状による実験結果

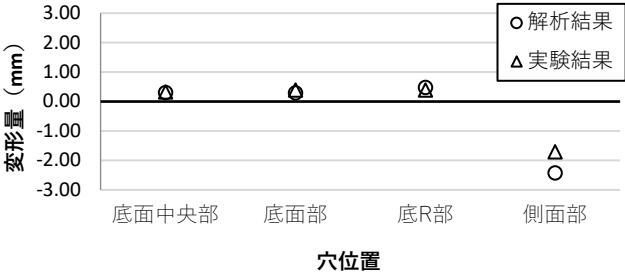


図 12 解析結果と実験結果における穴変形量の比較 (X軸方向)

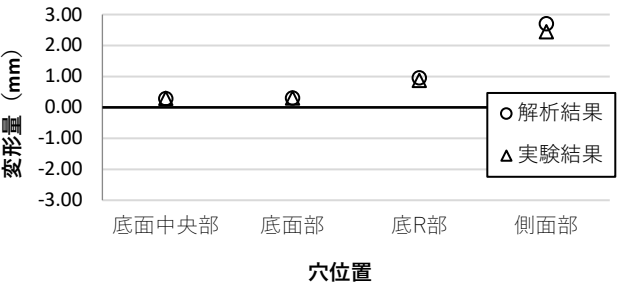


図 13 解析結果と実験結果における穴変形量の比較 (Y軸方向)

い引張応力が集中し、塑性変形が偏って進行した結果、縦長の楕円形状となった。

- 穴 4 (側壁部) : 縦方向に大きく伸び、横方向に大きく縮小した結果、極端な楕円化を示した。側壁部では円周方向の圧縮と軸方向の引張が強く作用するため、大きな寸法変化が生じ、穴位置および形状精度の確保が困難な領域である。
- 穴 5 (フランジ部) : 加工後の変形が著しく、穴が塞がって計測が不可能であった。このため寸法評価は行えず、本研究における設計手法の適用対象から除外した。

3. 2 解析結果の整合性確認

図11に初期形状による実験結果を、図12に解析結果と実験結果における穴変形量 (横方向) の比較を、図13に同 (縦方向) の比較を示す。比較の結果、いずれの穴位置においても解析結果と実験結果は同様の変形傾向を示し、寸法変化量の差異は最大でも±0.2mm以内であった。特に底面部中央から底R部にかけては良好な一致が確認され、解析が実際の材料流動を高精度に再現していることが確認できた。

3. 3 設計手法の適用結果

図 14 に、本手法によって設計した穴形状と、絞り加工後の穴形状の拡大図を示す。初期解析に基づき穴寸法を目標値 ($\phi 3.0 \pm 0.2 \text{ mm}$) 内に収めるため、形状補正を行った結果、各穴位置に応じた設計形状が得られた。

- ・ 穴 1 (底面部中央)
- ・ 穴 2 (底面部) : 縦横比を微調整することで目標寸法を達成できた。
- ・ 穴 3 (底 R 部) : 縦方向伸びに対応するため、加工前形状を楕円とする補正を行い、成形後に目標寸法を満たす結果が得られた。
- ・ 穴 4 (側壁部) : 単純な楕円形状では欠陥が発生することが分かったため、伸びしろを付与する形状補正を施すことで、目標寸法と欠陥評価の両方を満たす結果を得た。

3. 4 穴設計後の実試験結果

設計形状のブランクを用いた実験結果を図 15 に、穴形状の拡大図を図 16 に示す。設計形状を用いた場合、底面部中央から側壁部に至る全ての評価対象穴で、成形後の寸法が $\phi 3.0 \pm 0.2 \text{ mm}$ の範囲に収まり、かつ割れやしわなどの欠陥も認められなかった。特に、底 R 部および側壁部では、初期形状に比べて寸法誤差が大幅に低減され、形状精度の改善効果が明確に確認された。

3. 5 解析結果と実験結果の整合性評価

3. 4 で示した図 15 の実験結果をもとに、図 17 に解析結果と実験結果における穴変形量 (横方向) の比較を、図 18 に同 (縦方向) の比較を示す。比較の結果、すべての評価対象穴において解析と実験の変形傾向は一致し、寸法変化量の差異は最大でも $\pm 0.2 \text{ mm}$ 以内であった。底面部中央から底 R 部にかけても整合性が確認され、形状設計における寸法予測の信頼性が示された。

この結果から、形状の設計段階において本解析手法を適用することで、成形後の寸法精度と欠陥抑制を高い信頼性で予測できることが示された。

4. 考 察

本研究では、あらかじめ穴を設けたブランク材に対して絞り加工を行う際の穴変形挙動を FEM 解析および実験により検証し、寸法精度と欠陥抑制を両立する穴形状設計手法を構築した。その結果、以下の知見を得た。

(1) 解析と実験の整合性について

初期形状および設計形状のいずれの場合も、解析と実験の結果は全穴位置で変形傾向が一致し、誤差は $\pm 0.2 \text{ mm}$ 以内に収まった。特に底面部中央から底 R 部にかけての結果は、解析モデルが材料流動を正確に再現できることを裏付けて

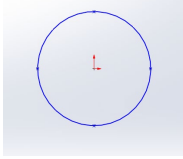
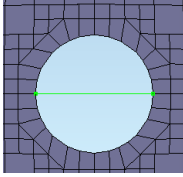
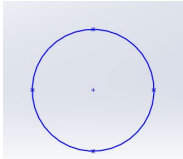
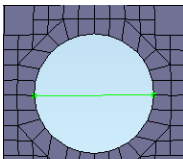
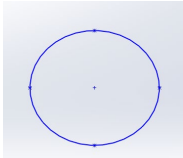
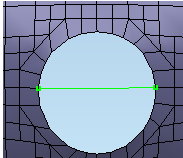
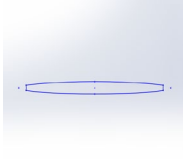
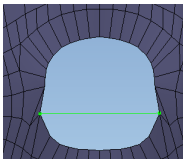
穴位置	絞り加工前の穴寸法 (mm)	絞り加工後の穴寸法 (mm)
穴 1 (底面部中央)		
	横 : 2.72 縦 : 2.74	縦 : 2.98 横 : 2.99
穴 2 (底面部)		
	横 : 2.74 縦 : 2.75	縦 : 2.99 横 : 2.98
穴 3 (底 R 部)		
	横 : 2.59 縦 : 2.28	縦 : 2.93 横 : 3.07
穴 4 (側壁部)		
	横 : 3.66 縦 : 0.24	横 : 2.96 縦 : 3.15

図 14 本手法適用後における穴拡大図
(目標寸法 : $3.0 \pm 0.2 \text{ mm}$)

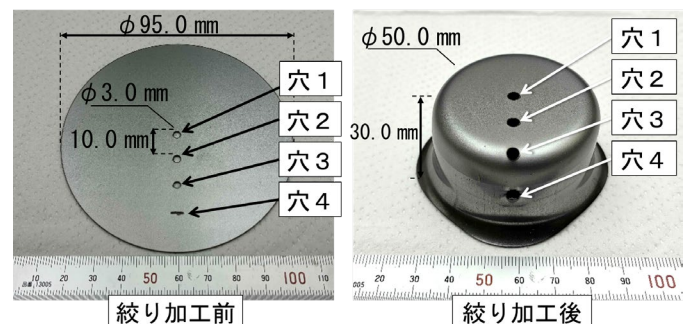


図 15 穴形状設計後の実験



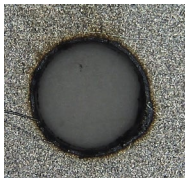





穴位置	絞り加工前の穴寸法(mm)	絞り加工後の穴寸法(mm)
穴 1 (底面部中央)		
	横 : 2.72 縦 : 2.74	縦 : 2.98 横 : 2.99
穴 2 (底面部)		
	横 : 2.74 縦 : 2.75	縦 : 2.99 横 : 2.98
穴 3 (底 R 部)		
	横 : 2.59 縦 : 2.28	縦 : 2.93 横 : 3.07
穴 4 (側壁部)		
	横 : 4.88 縦 : 0.24	横 : 2.96 縦 : 3.15

図 16 本手法適用後における穴拡大図
(目標寸法 : 3.0±0.2mm)

おり、本手法の適用性を支える重要な根拠となる。

(2) 領域ごとの変形特性と形状設計の効果

底面部中央および底面部は等方的な拡張を示し、比較的単純な寸法補正で目標精度が達成可能であった。一方、底 R 部および側壁部は縦方向の伸びが顕著で、特に側壁部では円周方向圧縮と軸方向引張が同時に作用するため極端な楕円化が生じた。これらの領域では、加工前に伸びしろを付与する形状補正を適用することで、寸法公差内に収めることが可能となった。

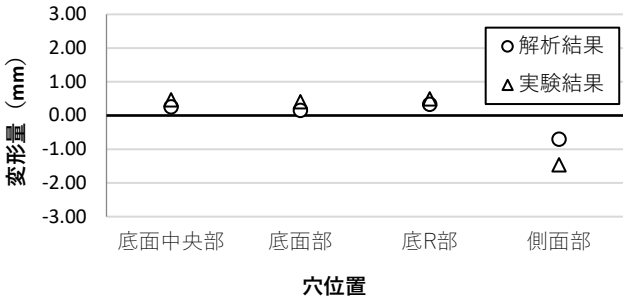


図 17 解析結果と実験結果における穴変形量の比較 (横方向)

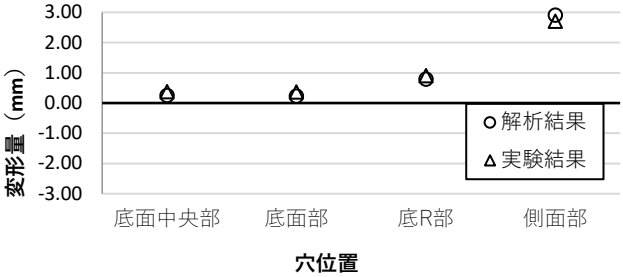


図 18 解析結果と実験結果における穴変形量の比較 (縦方向)

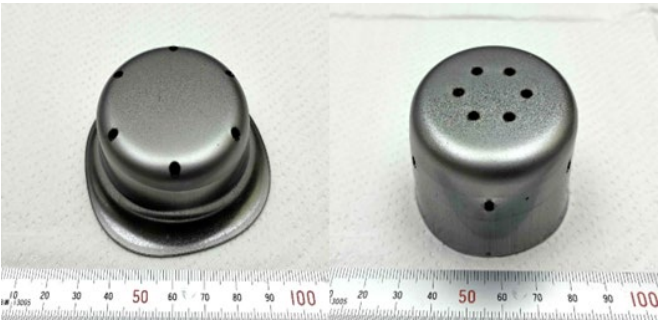


図 19 本技術にて成形した複数の穴を有する絞り加工品例

(3) 欠陥抑制と寸法精度の両立

成形限界曲線図および板厚減少率の解析により、設計形状では割れやしわ等の欠陥が発生せず、板厚減少率は全ての評価穴位置で25%以下であった。これは、本手法が寸法精度のみならず、成形性の確保にも有効であることを示す。

(4) 実加工での成果と実用性

設計形状を用いた実試験では、底面部から側壁部にかけて複数の穴を有するカップ形状を、一工程の絞り加工で成形可能となった。これにより、従来必要であった成形後の二次加工工程 (穴あけや追加治具使用) が不要となり、製造工程の短縮とコスト削減が可能となることが確認された。添付の成形品例に示すように、本手法は底面と側面に複数の穴を持つ複雑な形状にも適用可能であり、照明器具やモータハウジングなど幅広い製品分野での利用が期待できる。図19に、本技術にて成形した複数の穴を有する絞り加工品例を示す。

(5) 適用範囲と限界

本手法は、本研究で対象とした直径50.0mm、高さ30.0mmのカップ形状および板厚1.0mmのSPCC材において有効性が確認された。しかし、より深絞り形状や板厚の異なる材料に適用する場合は、材料流動や応力分布が大きく変化する可能性があるため、設計条件の再検討が必要である。また、複雑な穴配置や異形穴形状については、さらなる解析検証が求められる。

以上より、本研究で構築した穴形状設計手法は、解析と実験の高い整合性を背景に、絞り加工後の寸法精度と欠陥抑制を同時に達成できる有効な設計指針であることが示された。今後は、異なる材質・形状条件での適用性評価と、実生産条件に即した加工時間・コスト面の最適化を進めることで、産業応用範囲の拡大が期待される。

5. 結 言

本研究では、穴付きブランクの絞り加工における穴変形挙動を解析と実験により明らかにし、寸法精度と欠陥抑制を両立する穴形状設計手法を構築した。本手法を適用する

ことで、底面部から側壁部にかけて配置した複数の穴を有する金属カップを、単工程の絞り加工で成形できることを実証した。本成果は、従来の単一穴加工にとどまらず、複数穴を同時に有する複雑形状の成形を可能にした点で新規性を有し、二次加工削減による工程短縮とコスト低減に有効である。

参 考 文 献

- 1) 日本規格協会：JIS B 0405 円の直径及び円弧の半径の表し方，1991
- 2) 楠見 和久：ホットスタンプにおけるプレス成形性と成形解析技術，新日鉄技報，**393**(2012)
- 3) 吉田 弘美：絞り加工の基礎と技術動向，プレス技術，日刊工業新聞社，2004-11(2004)
- 4) 今津 勝宏：深絞り加工の薄肉化技術に関する研究-多段ストレッチドロー法の成形条件とその成形性に関する検討，日本機械学会論文集 C編，**63**(615)，4037-4042(1997)