

薄板の深絞り用ブランクの瞬時設計

磯邊邦夫*

1. 研究の目的と背景

深絞りを用いる最適ブランク形状はその使用材料と製品の容器形状や付随するフランジ形状によって変える必要がある、多くの場合、試行錯誤法により決定されている。これは、容器形状やフランジ形状が製品毎に違うことと、使用する板の製造履歴によって集合組織が変化して板面内異方性が異なることによる。

深絞りに関する板面内異方性の程度はランクフォード値 (r 値) の圧延方向からの角度による変化を測定することにより知ることができる。しかし、その変化が円筒深絞り時にどれだけの耳を発生させるか、まして任意形状深絞り容器のブランク形状にどれだけの影響を与えるか明確ではない。

近年、有限要素法を用いた任意形状容器のブランク形状の計算に加えて、板材の異方性を考慮した計算も行われるようになってきた。しかし、計算ソフトの値段、計算時間、プログラムを扱う技術者の確保などの観点から一般の中小企業のプレス工場で有限要素法を自在に扱うには更に時間を要すると思われる。

そこで、本論文では先ず、神馬¹⁾の行った異方性を考慮した円筒深絞りのすべり線場解析を発展させ、任意凸形状容器のブランク形状をパソコンで瞬時に解析する方法の概要を述べる。次に、深絞りを行う材料から円形ブランクを切りだし、円筒深絞りを行ってその耳高さを測定し、この高さからその材料の面内異方性を表すパラメータを決定する方法を示す。更に、この異方性パラメータを用いて任意凸形状容器のブランク形状を計算した結果と実験の比較からこの方法の妥当性を述べるとともに、段付き容器の計算方法を述べる。

2. 解析の概要

等方性材料に関するすべり線場の構成方法の詳細は既報²⁾に示してあるので、以下、異方性の扱いについての概要を述べる。

Hill³⁾は円筒深絞りにおいて4つ耳が発生することに関して、塑性異方性を考慮した理論を提示し、神馬¹⁾はすべり線場法によりその解析を行った。Hillの異方性パラメータ c は r 値の圧延方向からの角度を添字⁴⁾で表すと、

$$c = 1 - \frac{(r_0 + r_{90})^2 (1 + 2r_{45})}{4r_0 r_{90} (1 + r_0 + r_{90})} \dots (1)$$

である。異方性材料の場合、平均圧縮応力 p と α すべり線の x 軸からの角度 ϕ の関係は、 T を x, y 軸のせん断降伏応力とすると

$$\frac{p}{2T} \pm g(\phi) = \text{const.} \quad \text{複号は } \alpha, \beta \text{ 線上} \dots (2)$$

$$g(\phi) = \frac{-\cos 4\phi}{4\sqrt{1-c\sin^2 2\phi}} + \frac{1}{2} \int_0^{2\phi} \sqrt{1-c\sin^2 \phi} d\phi \dots (3)$$

で示される³⁾。ここで、ポンチとダイの肩半径をゼロと仮定し、ダイ内縁線は主応力線と一致し¹⁾、かつダイ内縁に沿って主応力は一定¹⁾と仮定する。異方性の解析のためには式(3)の第2項の第2種楕円積分が必要となるが、パソコンの計算では15°おきの計算値をスプライン関数近似して用いた。

直線と円弧を組み合わせて構成される任意凸形状製品、又は数十点の x, y 座標値を与えこれらをスプライン関数で近似⁴⁾した任意凸形状製品に対し、製品曲線の法線角度が10°変化する位置を出発点としてすべり線場を幾何学的に構成する方法⁵⁾を用いている。

3. 円筒深絞り法による異方性パラメータの決定

3.1 円筒深絞りの耳高さのすべり線場解析結果

すべり線場解析の中に板面内異方性を取り込み、 c 値を与えて ϕD の円形ブランクから ϕd の円筒容器を絞る時に発生する耳高さ Δh を計算した。

図1は種々の異方性パラメータ c の材料を絞り比 $D/d = 86/43 = 2$ で絞った場合のすべり線場、耳形状及びホドグラフである。すべり線場の図において、周方向の曲線群は ϕD の円形ブランクが絞りの進行に伴って変化するフランジ形状を示しており、これらは最小主応力線の軌跡ともなっている。 $c < 0$ では圧延方向から45°方向の材料の流入速度が圧延方向及び90°方向の流入速度より小さいために圧延方向から45°方向に耳が発生する。そこで、 $\Delta h < 0$ と定義する。 $c > 0$ では圧延方向及び90°方向に耳が発生し、 $\Delta h > 0$ と定義する。異方性パラメータ c の絶対値が大きくなるに従って、耳が大きくなることやホドグラフが交差⁵⁾することがわかる。

種々の絞り比、異方性パラメータ値の場合の耳高さの計算結果をまとめて図2に示す。この図には後述の実験結果も示してあるが、絞り比、異方性パラメータの絶対値の増加に伴い耳高さは単調に増加することがわかる。そこで、種々の絞り比で円筒深絞りを行ってその耳高さと発生方向を測定すれば、その材料の異方性パラメータ c 値を図2より決定することができる。

3.2 異方性パラメータの決定

ポンチ径 $\phi 40$ 、ポンチ肩半径 $R6$ 、ダイ穴径 $d = \phi 43$ 、ダイ肩半径 $R8$ の円筒深絞り試験機を用い、絞り比 D/d

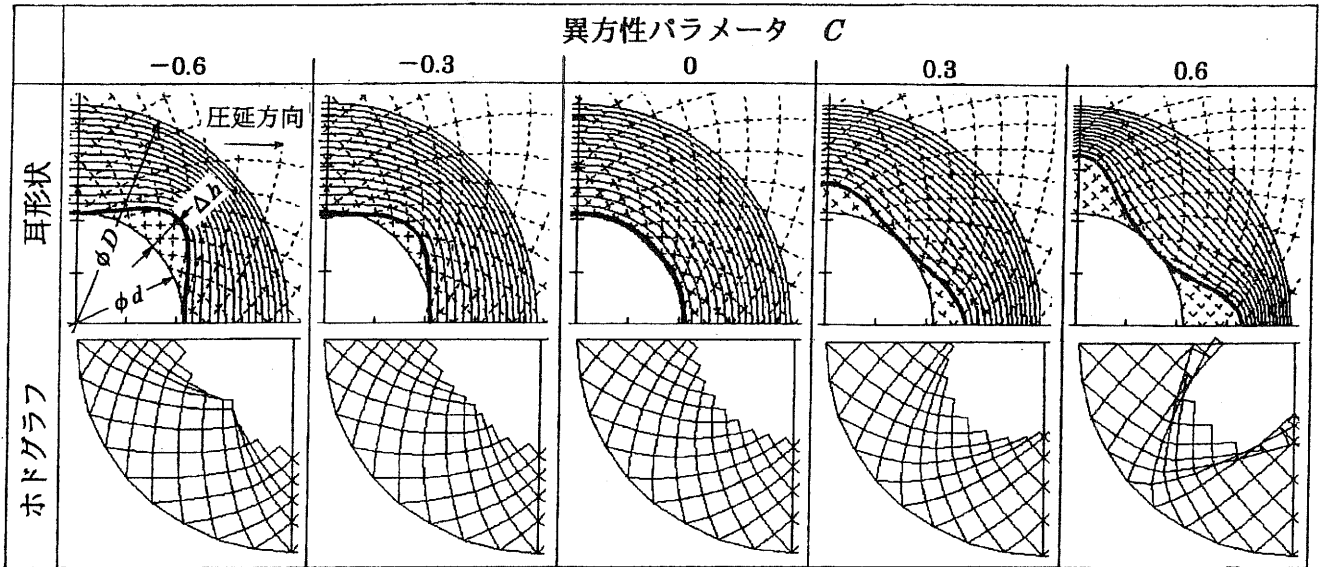


図1 種々の異方性パラメータ値の材料の円形ブランク ϕD から円筒深絞り ϕd を行った場合のフランジ形状の変化と耳高さ Δh 及びホドグラフのすべり線場解析による結果 (絞り比 $D/d=2.0$)

表1 円筒深絞りにおける耳高さ測定結果

材料	板厚 / mm	耳高さ $\Delta h/d$					
		絞り比 D/d					
		1.6	1.63	1.74	1.8	1.86	2.0
Cu	0.6	0.026	—	—	0.048	—	—
SPCE	0.7	0.007	—	—	0.017	—	0.027
Cu-Zn	0.6	-0.008	—	—	-0.022	—	-0.039
SUS304	0.6	-0.029	—	—	-0.056	—	-0.081
A1050-H	1.0	—	-0.059	-0.092	—	-0.131	—

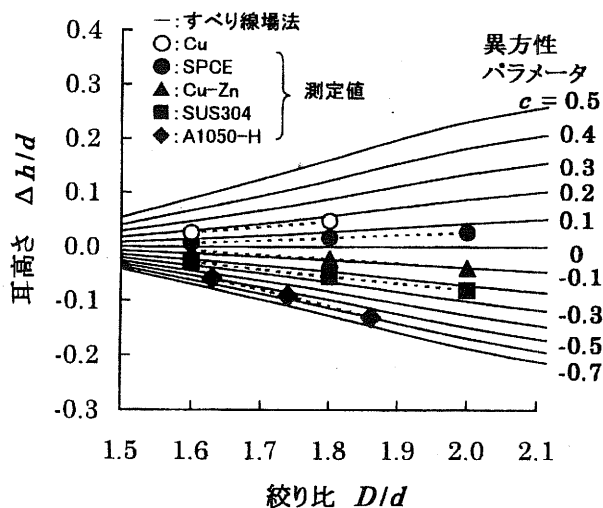


図2 耳高さ $\Delta h/d$, 絞り比 d/D , 異方性パラメータ c の関係

=1.6~2.0の円筒深絞りを行った結果、表1に示す耳高さの測定値を得た。

これらの耳高さ測定結果は図2のようにプロットされる。例えば SUS304 材の耳高さの測定値は絞り比 D/d を 1.6, 1.8, 2.0 と変えても異方性パラメータ $c=-0.2\sim-0.3$ に

あつて大きく変動しているわけではない。ここで図2の $D/d=2.0$ の場合、耳高さの測定値は $\Delta h/d=-0.081$ であるから、この図より SUS304 に対して $c=-0.23$ が得られる。このようにして円筒深絞りの耳高さ測定値から c 値を決定することができる。

なお、異方性パラメータを決める際に、円筒深絞りのしわ押え圧力、ダイ材質、表面粗さ、潤滑剤などを実際に製品の深絞りに使用する条件に合わせておけば、これらの加工条件の影響もある程度考慮した異方性パラメータ値が決まると期待できる。

4. 最適ブランクの計算と実験結果

4.1 円筒深絞り

円筒深絞り法の c 値を用いてすべり線場解析を行って円筒深絞りの最適ブランク形状を計算した。一例として SUS304 の計算結果と深絞りの結果を図3, 4に示す。図3(a)は円形ブランクであり、これを絞った結果図4(a)のように $\Delta h=3.48\text{mm}$ の耳が生じた。一方円筒深絞り法による $c=-0.23$ を与えてすべり線場解析して得た最適ブランク形状が図3(b)である。一周61点の (x,y) 座標値をワイヤーカット放電加工機に入力して直線補間をしてブランクを切りだし、絞った結果、図4(b)が得られた。なお、放電加工の影響で、容器の縁が鋸歯状となつてしまい耳高さの

厳密な測定ができないが 1mm より小さい。

なお、同様の実験を SPCE 材についても行った。この材料は表 1、図 2 のように異方性が小さいので、円形ブランクでも耳は小さいが、最適ブランクにより更に耳は小さくなった。

4.2 長方形筒の深絞り

長短辺が 80, 56mm, コーナ R16 の実験用長方形ダイを作成した。ポンチとダイ肩半径はいずれも R6 である。図 5(a) は深さ 30mm の SUS304 長方形容器に対する最適ブランク形状 ($c = -0.23$ として計算) と、このブランクを深さ $h = 5 \sim 30\text{mm}$ に絞った際のフランジ形状の計算結果を示している。また、この形状にグラインダーで切出したブランクを実際に $h = 20, 25, 30\text{mm}$ に絞った時のフランジ形状を図 5(b) に示す。ただし、これらの深さで深絞りを止めた 3 つの異なった試料のフランジ形状をトレースしている。

計算ではダイやポンチの肩半径をゼロとしていることや板厚変化がないとしていることなどから、計算と実験結果の定量的一致は見られないが、フランジ形状は比較的良く合っているといえる。更に、フランジ形状の変化過程を観察すると、長辺部の材料の流れ込みが大きいことがわかり、図 6 に示すように最終的にはコーナー部に若干の耳が発生した。しかし、深さ $h = 30\text{mm}$ 用のブランクに対し、34mm 深さの製品が得られ、ほぼ満足できる結果を得た。

5. 計算可能な製品形状

5.1 任意形状フランジを有する凸形状容器

ブランク形状計算が可能な容器形状は図 7 のようである。すべり線場を構成するには製品容器形状が凸形状である必要があるが、凹部には接線を引いて凸形状と認識させて計算することができる。なお、フランジ形状は任意である。

容器深さは任意の深さに対応した計算が可能であるが、実際に絞れるかどうかは材料の性質と加工条件に依存するのである程度の経験が必要である。深絞り可能かどうかの詳細検討には、得られたブランク形状を用いて有限要素法による計算をすることも可能であろう。

5.2 段付き容器のブランク計算

図 8(a) のような段付き容器は、工程としては先ず円形部分を第一絞りで作り、第二絞りでその外側の部分を絞る。

この場合のブランク形状はこの工程を逆にたどることによって計算が可能である。

すなわち、図 8(a) のように外側の容器側壁高さが均一な場合、Step 1 として第二絞りのダイ形状を与え、容器側壁高さ (容器深さ) が均一となるようなブランク形状を計算すると、図 8(b) が得られる。これは実際の工程では、第一絞りが終わった段階でのフランジ形状に対応する。計算の Step 2 としては、第一絞りのダイ形状を与え、その部分の容器深さと図 8(b) の第一絞りの後のフランジ形状を与えるると、第一絞りのブランク形状が計算できる。

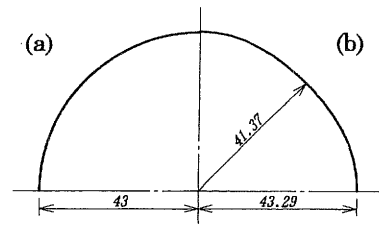


図 3 SUS304 円筒容器の(a)円形ブランク及び(b)最適ブランク形状

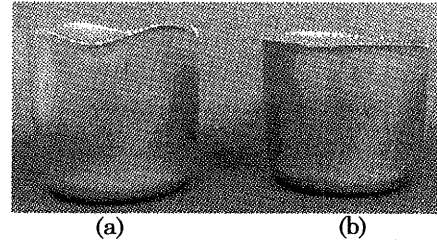


図 4 図 3 の(a)円形ブランク及び(b)最適ブランクから絞った円筒容器

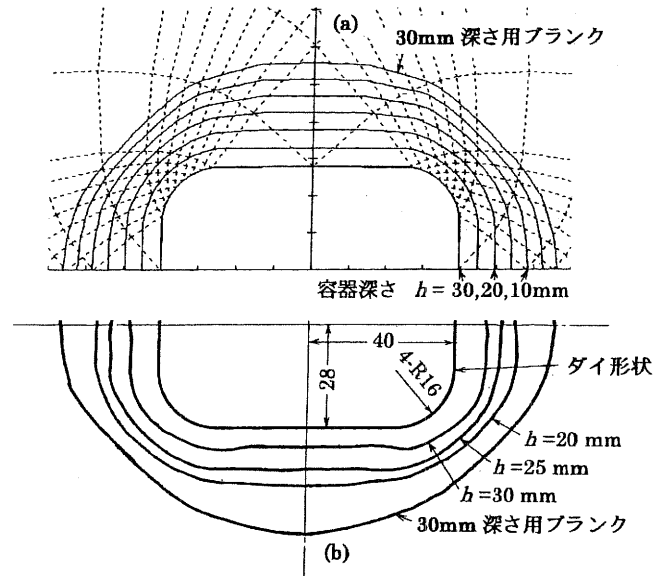


図 5 異方性パラメータ $c = -0.23$ の SUS304 板の長方形容器の深絞り時の(a)すべり線場法による計算ブランク及びフランジ形状と(b)測定フランジ形状の比較

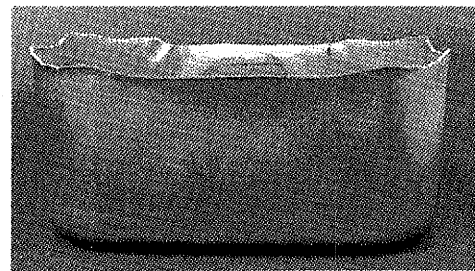


図 6 図 5(b)のブランク形状から深絞りされた SUS304 長方形容器 (成形後の容器深さ 34mm)

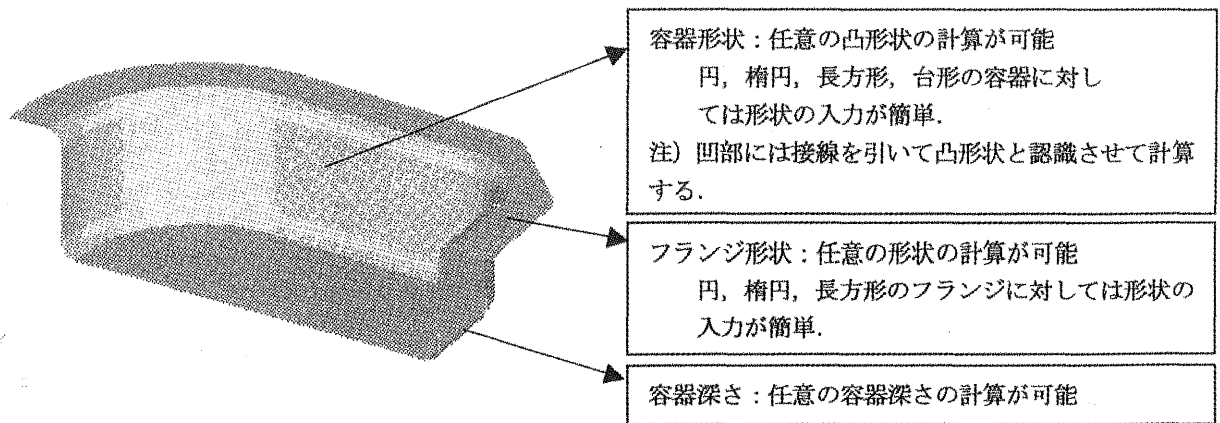


図7 ブランク設計が可能な容器形状

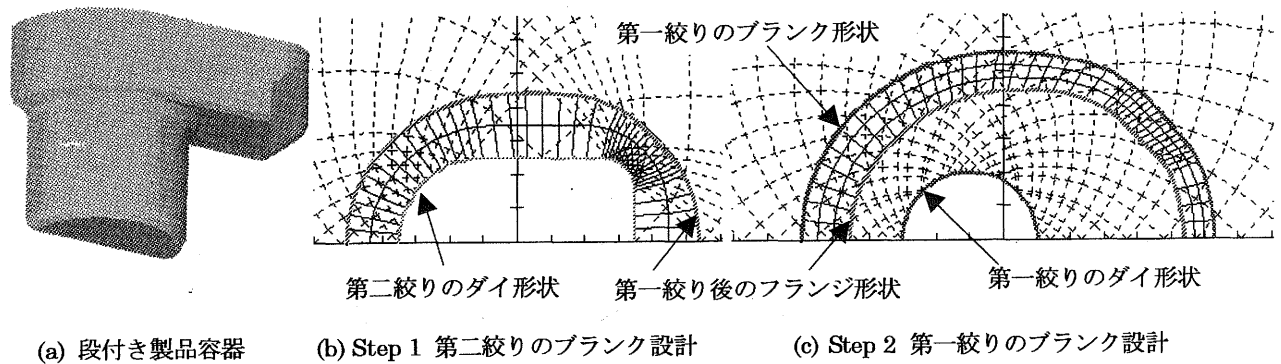


図8 段付き容器のブランク計算方法

6. 結言

(1) すべり線場法により材料の板面内異方性を考慮した任意凸形状容器の深絞り解析を瞬時に実行するパソコン用プログラムを完成させた。

(2) 円形ブランクから円筒深絞りを行った場合の耳高さ測定値からその材料の板面内異方性を推定することが可能である。

(3) 推定した異方性パラメータを用いて円筒深絞り用最適ブランク形状を計算し，その妥当性を検証した。

(4) 推定した異方性パラメータを用いて長方形及び菱形容器の深絞り用最適ブランク形状を計算し，その妥当性を検証した。

以上より，この方法がプレス現場でのブランク設計法として実用に供することが可能といえる。なお，直辺部と曲辺部のダイ内縁への流入速度に差がみられるので若干の修正が必要であり，今後の検討課題であるが，本プログラムは国内のCADに組込まれ，すでに利用されている。

7. 謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団からの研究助成によることを付記して感謝するとともに，実験材の提供を頂いた川崎製鉄(株)に謝意を表す。

参考文献

- 1) 神馬敬：塑性と加工 11(1970), 653-660
- 2) 磯邊邦夫：富山高専紀要 32(1998), 39-44
- 3) Hill, R. : 塑性学(1954), 324-336, 培風館
- 4) 磯邊邦夫：平 11 年塑加春講論(1999), 353-354
- 5) Sowerby, R. & Johnson, W. : J.Strain Analysis 9(1974), 102-108