

板面内異方性を考慮した任意凸形状筒の 深絞りのブランク設計システム

富山工業高等専門学校 機械工学科
教授 磯邊 邦夫
(平成 10 年度研究開発助成 AF-98014)

キーワード：深絞り，ブランク形状，板面内異方性

1. 研究の目的と背景

深絞りに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と、若干の計算例に関する検討結果を述べる。

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關して、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、

$$c = 1 - \frac{(r_0 + r_{90})^2(1 + 2r_{45})}{4r_0r_{90}(1 + r_0 + r_{90})} \dots (1)$$

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⁵⁾。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⁶⁾、かつダイ内縁に沿って主応力は一定⁷⁾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⁸⁾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⁹⁾することがわかる。

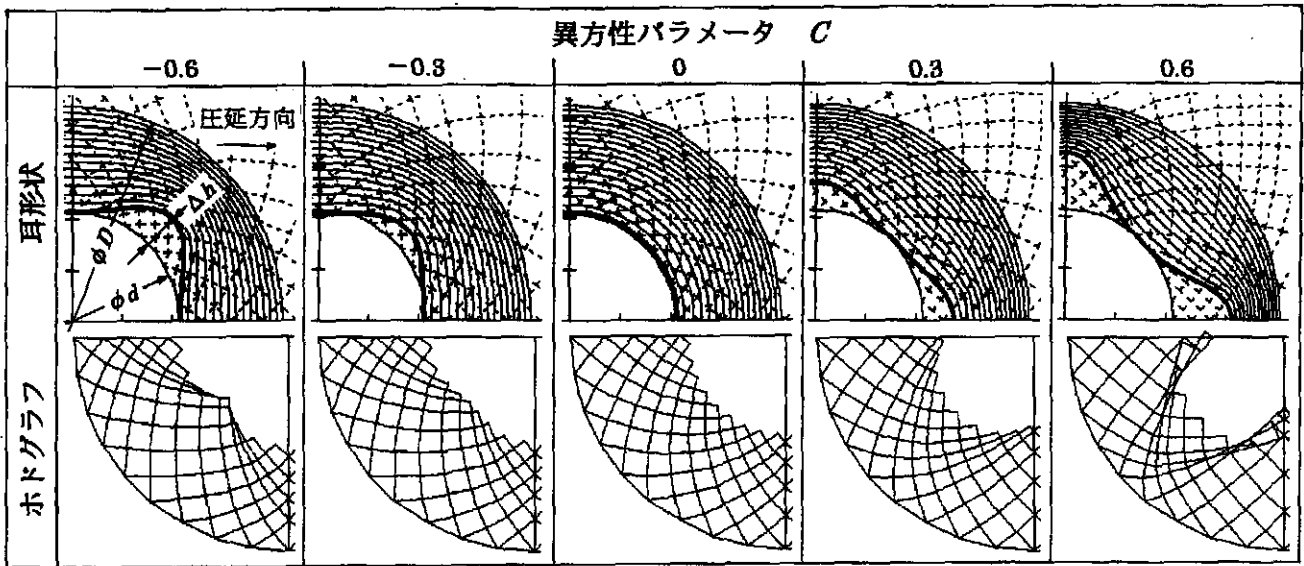


図1 種々の異方性パラメータ値の材料の円形ブランク ϕD から円筒深絞り ϕd を行った場合のフランジ形状の変化と耳高さ Δh 及びホドグラフのすべり線場解析による結果 (絞り比 $D/d=2.0$)

表1 実験材料と測定結果

材料	板厚 /mm	引張試験結果				耳高さ $\Delta h/d$					
		r_0	r_{45}	r_{90}	c	絞り比 D/d					
						1.6	1.63	1.74	1.8	1.86	2.0
Cu	0.6	0.797	0.508	0.815	0.228	0.026	—	—	0.048	—	—
SPCE	0.7	1.738	1.681	2.074	0.087	0.007	—	—	0.017	—	0.027
Cu-Zn	0.6	0.808	1.053	0.741	-0.220	-0.008	—	—	-0.022	—	-0.039
SUS304	0.6	0.879	1.393	0.829	-0.400	-0.029	—	—	-0.056	—	-0.081
A1050-H	1.0	0.282	0.765	0.678	-0.555	—	-0.059	-0.092	—	-0.131	—

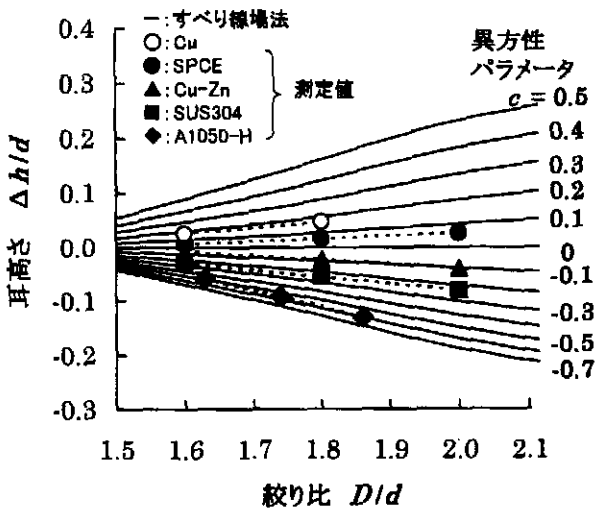


図2 耳高さ $\Delta h/d$, 絞り比 d/D , 異方性パラメータ c の関係

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

実験には表1に示す種々の材料を用い, それらの引張試験による r 値, これから式(1)より計算した c 値 (以下引張試験法による c 値と称する) を同表に示す。また, ポンチ径 $\phi 40$, ポンチ肩半径 $R6$, タイ穴径 $d = \phi 43$, タイ肩半径 $R8$ の円筒深絞り試験機を用い, 絞り比 $D/d = 1.6 \sim 2.0$ 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 $D/d = 2.0$ の計算値より $\Delta h/d$, c を縦横軸にとると図3が得られる。表1より SUS304, $D/d = 2.0$ 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。このように円筒深絞りの耳高さ測定値から得られる c 値を以下円筒深絞り法による c 値と称する。引張試験法による c 値は表1のように -0.4 であり, 円筒深絞り法による c 値のほうが小さい。このことは Cu, SPCE, Cu-Zn 材についても言える。一方, A-1050H 材は引張試験法の c 値が -0.555 に対して円筒深絞り法では $c = -0.5 \sim -0.6$ であり, 両者はほぼ一致している。すべり線場解析では平面ひずみ変形を仮定しているの

に対し、実際の深絞りでは耳の原因となるフランジの谷部の厚みは増加し、この部分にしわ押さえ力が集中し、耳の成長を抑制する作用がある。この板厚増加による耳の成長抑制効果は材料の厚みも影響するので、A-1050H は板厚が 1mm と厚いことが引張試験法と円筒深絞り法による c 値に大きな差が生じなかった一因と考えられる。また、円筒容器の山部がダイ内縁を通過する際にその厚みが局部的に薄くなり、山の高さが高くなる現象も生じ、板厚が厚いほどその影響が大きいことも一因である。

以上のように引張り試験法と円筒深絞り法による異方性パラメータに差があるが、実際に適用する加工方法は深絞りなので円筒深絞り法による値を採用することにする。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さえ圧力、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 4, 5 に示す。図 4(a) は円形ブランクであり、これを絞った結果図 5(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 4(b) である。一周 61 点の (x, y) 座標値をワイヤーク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 5(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ってしまう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 6(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 6(b) に示す。ただし、これらの深さで深絞りを止めた 3 つの異なる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

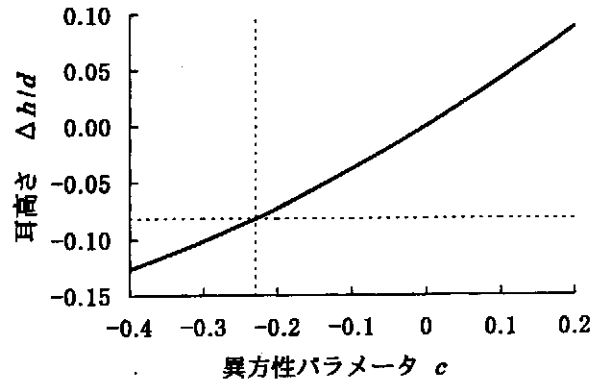


図 3 円筒深絞り法による耳高さの測定値からの材料の異方性パラメータの決定 (SUS304, $d/D=2.0$)

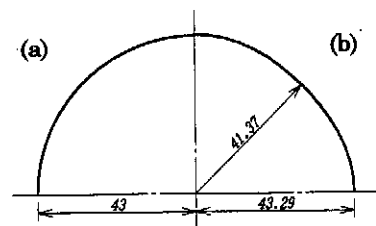


図 4 SUS304 円筒容器の(a)円形ブランク及び(b)最適ブランク形状



図 5 図 4 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

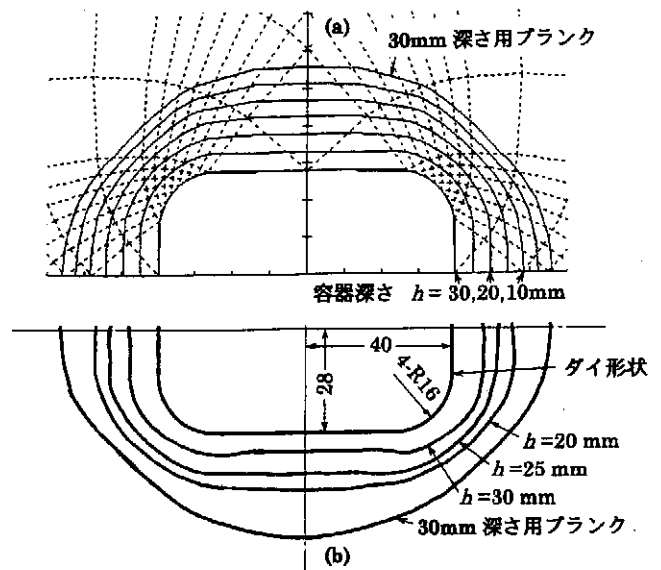


図 6 異方性パラメータ $c = -0.23$ の SUS304 板の長方形容器の深絞り時の(a)すべり線場法による計算ブランク及びフランジ形状と(b)測定フランジ形状の比較

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7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。

4.2 菱形筒の深絞り

図8(a)(b)は対角線長さが80、56mm 深さ40mmの菱形筒の結果である。長方形筒の場合と同様に、SUS304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 $h=5\sim 40\text{mm}$ 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、この形状に切出したSUS304ブランクを $h=35, 40, 45\text{mm}$ に絞った時のフランジ形状である。これらの比較から $h=35\text{mm}$ のフランジ形状は計算値と似た形状をしていること、直線辺部の材料の流れ込みが大きいこと、鈍角部より鋭角部の材料の流れ込みが悪いこと等がわかる。

以上の実験結果より、直線部と曲線部の材料のダイ内縁への流入速度に差が見られるのでその修正方法を考える必要があるものの、円筒深絞り法により推定した異方性パラメータ値を用いて決定したブランク形状は妥当であり、実用に供することが可能といえる。

5. 任意凸形状容器の最適ブランク計算例

5.1 卵型容器の計算例

卵型容器形状を半周39点の x, y 座標値で与え、これらをスプライン関数で曲線近似した場合の計算例を図9に示す。周方向の曲線群は最小主応力線の軌跡であり、ダイ内縁から容器深さ $h=10, 20, 30, 40, 50, 60\text{mm}$ のブランク形状に対応する。また、外側からは $h=60\text{mm}$ 用のブランクを深さ

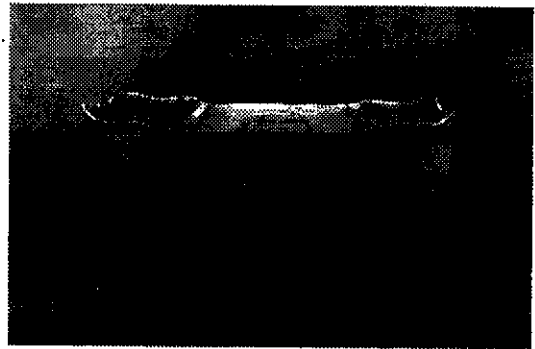


図7 図6(b)のブランク形状から深絞りされたSUS304長方形容器(成形後の容器深さ34mm)

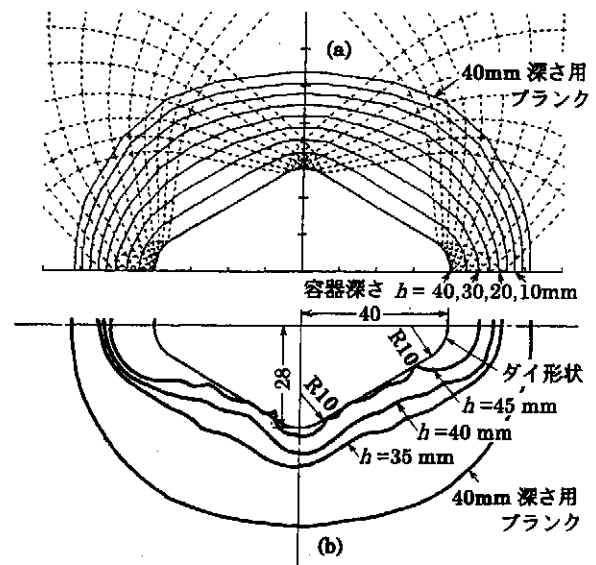


図8 異方性パラメータ $c=-0.23$ のSUS304板の菱形容器の深絞り時の(a)すべり線場法による計算ブランク及びフランジ形状と(b)測定フランジ形状の比較

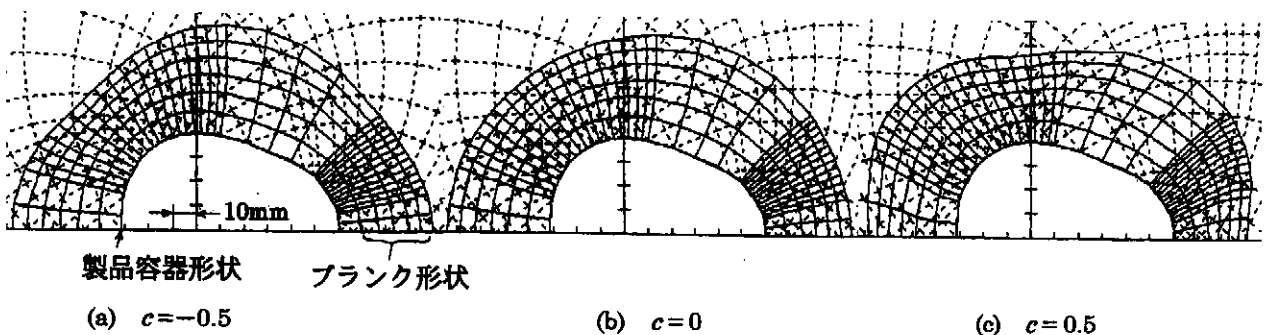


図9 異方性パラメータ c の変化による卵型容器の最適ブランク形状の変化(ブランク形状は容器深さ $h=10, 20, 30, 40, 50, 60\text{mm}$ に対応する)

10mm おきに深絞りを停止した場合のフランジ形状とも対応している。なお、半径方向の曲線群はフランジ変形中の流線である。

図9(a)~(c)には異方性パラメータの変化に対応してブランク形状が変化する様子を示す。当然のことながら、容器が浅ければブランク形状は容器と似た形状となるが、深

くなるに従って異方性の影響を考慮しなければならないことがわかる。 $c < 0$ では、図1に示すように圧延方向から 45° 方向のフランジ材料のダイ内縁への流入が遅くなる。従って、卵型容器に対してもこの方向のブランク長さは等方性の場合より短く、圧延方向から $0^\circ, 90^\circ$ 方向のブランク長さが長いことが、図9(a)(b)の比較から明らかで

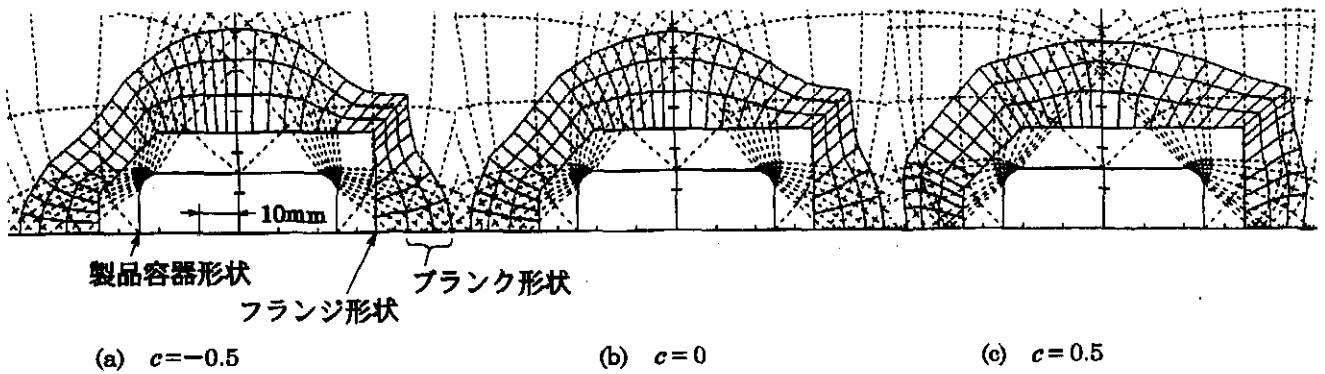


図10 異方性パラメータ c とフランジ形状の変化による最適ブランク形状の変化 (ブランク形状は容器深さ $h=10, 20, 30\text{mm}$ に対応する)

ある。図9(b)(c)の比較から $c > 0$ に対しては逆の関係にあることがわかる。

5.2 製品フランジ形状の影響

フランジ形状も数十点の x, y 座標値を与えることによって任意形状フランジの場合の計算が可能である。図10は長方形容器に単純な形状のフランジが付いた製品の計算例である。ここでは、フランジ形状は y 軸の右側では長方形容器の短長辺とも矩形であり、 y 軸の左側ではこのフランジのコーナーをカットした形状である。ブランク形状は、深さ 30mm まで 10mm ピッチのものを示す。図10(a)~(c)を比較すると異方性の影響は卵型容器の計算例で示したのと同様な議論ができる。しかし、 y 軸の左右のブランク形状を比較すると、異方性の影響よりもフランジ形状の影響の方がむしろ大きいことがわかる。

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行う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。

7. 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て感謝するとともに、実験材の提供を頂いた川崎製鉄㈱に謝意を表す。また、本実験を行った本学学生中田祐二、青木卓也、堀哲也君に感謝する。

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