ストレッチドロー法による円筒成形に関する研究*
(第1報, 単段及び2段成形の実験的検討)後藤 學^{*1}, 金 英 洙^{*2}, 山下 実^{*1}A Fundamental Study of Cup forming by Stretch-Drawing Process
(1st Report, Experiments of Single and Double Operations)Manabu GOTOH^{*3}, Young-Soo KIM and Minoru YAMASHITA^{*3}Gifu University, Dept. of Mechanical & Systems Engineering, 1-1 Yanagido, Gifu, 501-1193 Japan

Fundamental and informative data of axi-symmetric stretch-drawing of several sheet metals with thicknesses of 0.7-1.0 mm are presented both for single and double operations. Very small radius is applied to the die profile (or-shoulder) in all operations to induce wall-thinning by the effect of bending-under-tension, from which the name 'stretch-drawing' comes. It is clearly demonstrated that deeper cups could be formed by single and double stretch-drawings from smaller circular blanks due to such wall-thinning action than in the usual deep-drawing of larger blanks. From this fact, it is emphasized that the deep-drawability of a sheet metal is not evaluated simply by the conventional L. D. R (limiting drawing ratio), but the depth of the drawn cup should also be taken into account. Many experimental data about various metals and thicknesses given in this paper offer a valuable information in this process for more general use which recommends to replace the conventional deep-drawing process by the stretch-drawing process both for single and double operations. In the single stretch-drawing, it is also confirmed that a deeper cup can be produced by raising the blank-holding force at later stage of operation.

Key Words: Plasticity, Sheet Metal Forming, Stretch Drawing, Single Operation, Double Operation

1. 緒 言

板材の塑性成形でも基本的な円筒深絞り成形に関して、素板の成形性の評価はもっぱら限界絞り比(Limiting Drawing Ratio, L.D.R.)で行うことが常識になっている。すなわち、これが大なるほど深絞り性が高いと考える。本来深絞り成形は平らな板から低付き容器を成形するのが目的であり、最初に所望するカップ深さがあり、深さが重要な因子である。また、材料の節約の観点から、所定の深さのカップを得るのなるべく小さな寸法の素板を使いたいという要請がある。しかし、L.D.R.には成形できる最大カップ深さとか、ある深さのカップを成形するのにいかに素板寸法を小さくできるか、といった重要な観点が脱落している。おそらく、L.D.R.が大なる板材ほどこうした要請にも応えられるという暗黙の了解があると思われるが、それが真実なのかの検討は従来ない。

周知のように、板材においては「引張下曲げでの板厚減少促進」という現象がある¹⁾。一般的な板材のプ

レス成形において、典型的不良現象としての破断は、ほぼ例外なく引張下で曲げを受ける部位で生じるが、それはこの板厚減少促進が原因である。したがって、一般論として板材成形においては可能な限り引張下曲げを軽度抑えることが常識である。円筒深絞り成形では、素板はボンチ肩部とダイス肩部で引張下曲げを受ける。したがって、曲げ作用を緩和するために、ボンチ肩及びダイス肩半径はなるべく大きく採り、板厚の6~10倍とすることが常識化している。深絞り性評価因子としてのL.D.R.は、こうした常識のもとで慣用されているものである。ダイス肩半径に上限が設けられているのは、大き過ぎると破断とは別種の不良現象であるボディしわを誘起するからである²⁾。

ところが、比較的最近今津らがダイス肩半径を板厚よりやや大きい程度とする深絞り成形を検討し、さらに初段に浅絞りしたカップを素材として用いることでダイス肩での引張を積極的に増す方法で、忌避すべきとされてきた「引張下曲げ」作用を強め、ダイス肩での破断を来すことなく、通常の深絞り成形より深いカップを造る技術を開発した^{3), 4)}。これは引張下曲げで板厚減少が促進されると、結果としてカップがその

* 原稿受付 1999年2月1日。

^{*1} 正員, 岐阜大学工学部 (〒501-1193 岐阜市柳町1-1)。^{*2} 学生員, 岐阜大学大学院。

E-mail: gotohman@mech.gifu-u.ac.jp

分深くなることを狙ったものである。つまり、深絞り成形においてダイス肩半径は板厚のオーダーまで小さくしてもよいことが明確化され、さらにそれによりカップ深さを増大させることができることがわかった。

しかし、今津らの技術開発はもっぱら飲料用スチール缶の製法に限定され、板厚 0.2mm 程度の薄い硬質鋼板からの缶成形技術である。この技術が深絞り手法による円筒成形全般においてどのような効果をどの程度発揮するか、つまりより一般的な 1mm 程度の板厚で各種材質かつ各種調質度（各種硬質であるいは軟質）の板材への適用性はどうか、ストレッチドロー性といった板材の成形性が定義できるのか、またその支配因子は何なのか、などに関しては何も分かっていない。

それにも増して、ストレッチドロー成形法の成功は、著者らに深絞り性評価法の不完全性を強く認識させた。すなわち、「カップ深さ」も評価の尺度として用い、これをより重視することが必要である。また、従来の深絞り法に拘泥することなく、それに代わってストレッチドロー法を円筒成形全般に浸透させることが実際有効であるか否かを明確にする必要がある。

こうしたことを背景として、本研究では円筒成形によく使われる各種材質、調質度及び板厚 (0.7~1.0mm) の板材を供試材とし、一方ダイス肩半径は 0.5~3.0mm まで種々に変え、単段及び 2 段ストレッチドロー成形を行った。そして、特にカップ深さ自体と、所定の深さのカップを成形するのに必要な素材寸法などについて考察した。比較のためダイス肩半径を 8mm とする通常の深絞り成形も行った。

2. 工具、加工条件及び供試材

2.1 工具・加工条件 表 1 は本研究に使用した工具の寸法および加工条件を示す。また、図 1 と図 2 にそれぞれ単段及び 2 段のストレッチドロー成形の工程図を示す。

Fig.1 Illustration of 1st or single stretch-drawing process

Fig.2 Illustration of 2nd or double stretch-drawing process

単段成形ではポンチ直径 40 mm を用いた。2 段成形では 1 段目で内径 40 mm に絞ったカップを内径 30 mm のカップに再絞り成形をする。それゆえ、2 段目の絞り比は $40/30=1.33$ で一定である。また、ダイス肩半径 8 mm のダイスは従来の深絞り成形用であり、ストレッチドロー成形との比較を行うためのものである。また潤滑剤としてはモリブデングリースを使用し、1 段目のストレッチドローではダイスとしわ押えの表面に、2 段目では材料に接触するガイドリングとダイス、しわ押えの表面に塗布した。ストレッチドロー成形では厳しい引張下曲げ作用のため、ダイス肩部において面圧が大きく、非常に大きな半径方向の摩擦抵抗が発生する。これはしわ押え力に依存する。1 段目の成形でのしわ押え力は、円筒成形のときに通常用いられる Siebel の半理論式⁵⁾の 2 倍を用いた。2 段目の成形でのしわ押え力は、1 段目で成形された各カップに成形可能範囲内の最も厳しいダイス肩半径を用いたときに成形できる最大のしわ押え力を、その他のダイス肩半径の時にも一律に採用した。また、ストレッチドロー成形の後半でカップ口辺部が厚肉化する現象⁵⁾を抑えて、さらにカップ高さを増大させ得るかを調査するため、単段成形について成形途中でしわ押え力をそれまでの 3 倍に増加させる実験も行った。

ダイス肩半径は表 1 に示す 6 種類を用た。それぞれのダイス肩半径で成形を行った際の側壁部の板厚減少率およびカップ高さを測定した。また、ポンチ・ダイス間のクリアランスを 1.2 mm とし、ダイス穴直径を 42.4 mm に設定した。成形は約 1 mm/s という極低速で行った。実験はすべて $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の恒温室の中で行った。

Table1 Dimension of tools.

		First stage	Second stage
Die (mm)	Diameter D_d	42.4	32.0
	Profile r_d	0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 3.0, 8.0	
Punch (mm)	Diameter D_p	40.0	30.0
	Profile r_p	8.0	6.0
Clearance (mm)		1.2	1.0
Velocity (mm/s)		0.941	
Lubricant		Molybdenum grease	

2.2 供試材 供試材の種類、板厚及び機械的特性の面内平均値を表2に示す。Alは純アルミニウム、Brは60/40黄銅、SPCEは軟鋼板、そしてSUSはステンレス鋼板である。また、Hは硬質、Oは軟質を示す。なお、表2の中にAl-Hが2種類あるが、ロットが異なる。供試材の r 値はいずれも1に近く、また n 値の範囲は0.035(Al-H)から0.445(SUS304)までである。

Table2 Tensile properties of materials tested.

Materials (Thickness)	K (MPa)	n Value	r Value	U.T.S. (MPa)	T.E. (%)
Al-H(1.0mm)	164.3	0.035	(1.051)	136.7	0.971
Al-H*(1.0mm)	147.1	0.022	(1.073)	131.1	1.584
Al-O(1.0mm)	147.9	0.247	0.860	82.42	43.80
Br-1/4H(1.0mm)	724.3	0.320	0.988	391.4	41.70
Br-O(1.0mm)	717.2	0.370	0.937	371.9	51.41
SPCE(0.7mm)	571.6	0.185	1.149	347.7	36.54
SUS304(0.8mm)	901.4	0.445	1.050	644.5	60.50
SUS304*(0.8mm)	722.3	0.184	1.228	704.0	64.74
SUS304L(1.0mm)	718.4	0.153	0.956	627.4	54.80

K, n: Work hardening property ($\sigma=k\epsilon^n$),

U.T.S.: Ultimate tensile strength, T.E.: Total elongation,

(): Reference value; All values are in-plane averages.

2.3 実験方法 単段ストレッチドロー成形では、各材料に対して前述の各種ダイス肩半径を用いて、それぞれに対する限界絞り比を求めた。成形カップの側壁厚さ分布は、成形品の円周方向45°おきにケガキ線を入れておいて、カップ底より10mmのところから高さ方向へ5mm間隔でマイクロダイヤルゲージを用いて測定した。カップ深さに関しては、耳と耳の間の谷部でデジタルノギスを用いて4点測定し、その平均値で評価した。

3. 実験結果と考察

3.1 単段ストレッチドロー 実験結果の特徴的な例を図3(a)~(e)に示した。これらの図で縦軸は相対カップ深さ(カップ深さ/ポンチ直径)、横軸は絞

り比である。この種の線図は供試材すべてについて得ている。

各図で、 r_d ごとにプロットの印が変えてあり、それぞれの右端の横座標がその r_d でのL.D.R.を与えている。各図より、実線で結んだ通常の深絞り($r_d=8\text{mm}$)に対するL.D.R.の大小と、他の r_d でのL.D.R.の大小は必ずしも一致していないことが分かる。(例:(a),(b)の、 $r_d=8$ と $r_d=0.5$ でのL.D.R.)すべての供試材で $r_d=8$ のデータに対して $r_d\leq 3\text{mm}$ のデータは上方に位置し、ストレッチドロー効果を端的に示している。最も注目すべきことの1つとして、通常絞りのL.D.R.でのカップ深さに比して、ストレッチドロー効果域($r_d\leq 3\text{mm}$)でのカップ深さの方が大きくなる材料が多くあることである。本実験では、表2中の9種の供試材のうち、Al-O, Al-H*, Br-O, Br-1/4H, SPCE及びSUS304*の6種が、 $r_d=3$ などに関してそうであった。その場合、もちろん絞り比は後者の方が小さい。つまり、ストレッチドローにより、通常絞りでは得られない深さのカップが、より小さな素板から成形可能なのである。

つぎに、ストレッチドロー成形性の評価をカップ深さに注目して行う。図3及び図示を省略した同種の線図を参照する。これらの図から、通常の深絞り成形に対するストレッチドロー成形の優位性を、同一素板直径におけるカップ深さ比の観点から評価するため、横軸にダイス肩半径 r_d を採り、各 r_d に対して最大のカップ深さ利得比(H_s-H_d)/ $H_d\times 100(\%)$ を縦軸としてプロットしたのが図4である。ここに、 H_d =通常絞り成形によるカップ深さ、 H_s =ストレッチドローによるカップ深さ、である。

図4から、概略、以下の3つの傾向に分類でる。

1) ダイス肩半径が大きくなるほどストレッチドロー成形の優位性(深さ利得比)が小さくなり、通常の深絞りの結果に接近するもの(Al系)。

2) $r_d=0.5$ で深さ利得比が最大で、 r_d の増大と共に一旦低下し、再び上昇したあと低下してゆくもの(鋼板系)。

3) 深さ利得比がある特定の素板直径付近で顕著になっているもの。すなわち、ストレッチドロー成形にとって、最適素板直径が存在するもの(黄銅系)。

以上のように、傾向に関して一応材種ごとに分類されることは興味深い。全般を通じて見ると、深さ利得比の最大値は36%強(SUS304*, $r_d=0.5$)であり、30%前後にはいくつものプロット点が存在する。 $r_d=3$ での利得比は全体的に低い、Al-Oを除けばすべて10%以上であるし、Br-1/4Hは24%強という高い値を示している。 $r_d=3$ では絞り比も大きく、絶対的なカップ深さ

(a) Al-O ; 1mm thick

(e) SUS304L ; 1mm thick

Fig.3 Relationship between cup-depth and drawing ratio in single stretch-drawing (a)~(e).

(b) Br-O ; 1mm thick

(c) Br-1/4H ; 1mm thick

(d) SPCE ; 0.7mm thick

Fig.4 Maximum gain in cup depth by stretch-drawing relative to cup depth by usual deep-drawing, defined by $(H_s - H_d)/H_d$, for various die profile radii.

H_s : Drawn cup depth obtained by stretch-drawing

H_d : Drawn cup depth obtained by deep-drawing

も $r_d=0.5$ に比してかなり大きいことも考慮する必要がある。全体として、図 4 はストレッチドロー効果が大きいことを明瞭に示している。

ストレッチドロー性を、 r_d が小のところ（ここでは $r_d=0.5$ ）での深さ利得比の大小で評価すると、図 4 より、ステンレスを含む鋼板系と Al-O がよい。また、 r_d が大きくなっても（ただし ≤ 3 ）ストレッチドロー効果が持続することをもって、ストレッチドロー性がよいと評価すれば、黄銅系や SUS304*が優位である。

以上の全般を通じて、カップ深さに限定した評価からは、本実験の供試材では硬質の Al 以外はストレッチドロー性が大と評価できる。

次に、同一深さのカップを得るのに、ストレッチドロー成形と通常の深絞り成形で使用する素板の面積の差に注目し、各ダイス肩半径についてストレッチドローによる最大面積低減率 $(Ad-As)/Ad \times 100(\%)$ を計算して図 5 に示した。ここに、同一カップ深さに対する、 Ad =通常絞りでの素板面積、 As =ストレッチドローでの素板面積である。これは材料節減の観点から重要な意義をもつ。この場合、ストレッチドロー成形で得られた最大深さが、通常の限界絞り比での最大深さより高い場合については比較できないためプロットしていない。

Fig.5 Maximum gain in blank area by stretch-drawing relative to blank area required in usual deep-drawing, defined by $(Ad-As)/Ad$, for various die profile radii.

As : Blank area used in stretch-drawing

Ad : Blank area used in deep-drawing

図 4 を図 5 と比較すると、傾向的には似ている。 $r_d=0.5$ などでプロット点の上下関係が変化していること、Al-H が r_d の大きいところでも面積低減率をあまり下げない点などが目立つ相違である。

従って、面積低減率からストレッチドロー性を評価しても、前の深さ利得比と同様なことが言える。ただ、具体的な数値に注目する必要がある。図 5 より、全体を通じて最大面積低減率は 24% 強で (Al-O, SUS304L; $r_d=0.5$)、20% 強のところ多くのプロット点が存在する。Br-O と Br-1/4H は $r_d=0.5$ に対するより $r_d=1.5$ 付近

で最も面積低減率が大きい (21% 強)。 $r_d=3$ では、深さ利得比と同様全体的に低減率は低くなっているが、前述の 6 種の材料ではこの付近で通常の深絞りにおける L.D.R. での深さを超えるカップ深さが得られていて、面積低減率はプロットできないことに注目する必要がある。図 5 は再びストレッチドロー効果の大きさを確認させるものである。

材料因子に注目すると、ここでの供試材では表 2 から従来の成形性因子のうち r 値はいずれも 1 に近い。 n 値については Al-H のように極端に小さい場合は良くないが、そうでなければストレッチドロー性と n 値の関連は明確ではない。 n 値依存性については文献 6) でも論じている。別の材料因子を考える必要がある。そこで、各材料の X 値を測定し表 3 に示した。ただし、材料のストック量が限定されており、表 2 中の一部の材料についてのみ測定した。ここに、 X 値とは、同一相当ひずみにおける面内等 2 軸引張降伏応力 σ_b /単軸降伏応力の面内平均 σ_d で、深絞り性評価に関し r 値を補う新たな材料因子として吉田により導入された成形性因子である⁷⁾。

Table3 X -value of materials tested.

Material	X -value
Al-H*	0.98
Br-1/4H	1.05
SPCE	1.37
SUS304*	1.53

等 2 軸引張降伏応力 σ_b の測定は、液圧円バルジ試験により行った。この X 値とほぼ同意義の $\bar{r}$ 値は、 r 値と共に面内等方性の 4 次異方性降伏関数に介入する 2 つの因子であること、また $\bar{r}$ 値は 2 次異方性降伏関数では $\sqrt{(1+r)/2}$ で与えられるが、4 次では r 値と本来的に独立であることなど、著者の 1 人が詳しく論じている⁸⁾。実際、表 3 の X 値は $\sqrt{(1+r)/2}$ とは異なる。

図 4 及び図 5 と、表 3 から、鋼板系でストレッチドロー性が良いことと、 X 値が大きいことが相関しているように思われる。Br-1/4H も r 値は 1 より小さいのに X 値は 1 以上であり、この材料のストレッチドロー性は X 値で持っているように思われる。

3.2 しわ押え力増加の効果 単段ストレッチドローでの板厚分布の例を Al-O に関して図 6 に示す。

この図のように、ストレッチドロー成形によるカップは、通常の深絞り成形によるカップに比べて壁厚は明らかに薄い。しかし、カップの成形後半 (カップ口辺部) では厚肉化傾向がみられる⁶⁾。この厚肉化傾向を抑制し、さらに深いカップが成形できる可能性を調

Fig.6 Distribution of wall thickness along the wall after single operations. (Al-0; 1mm thick)

Fig.7 Relationship between cup-depth and drawing ratio in single stretch-drawing with a raise in blank-holding-force at later stage of operation. (Al-0; 1 mm thick)

査するため、成形の後半でしわ押え力を3倍に増加させ、引張力を手動で増大させる実験を行った。その結果を図7に示す。

実線でプロット点を結んであるものが成形後半でしわ押え力を増加させた場合である。カップ深さはやや大きくなるに留まったが、しわ押え力制御を自動化することにより、さらなるカップ深さ増加は可能と判断される。

3.3 2段ストレッチドロー 2段ストレッチドロー成形はAl-H*, SPCE, SUS304Lに関して検討を行った。

図8の(a), (b)にはSPCEとAl-Hの成形品の例を示す。それぞれ1段目ではダイス肩半径0.7, 3.0 mm, 2段目では1.0, 3.0 mmを使用した。同図に示すように、2段ストレッチドロー成形においても成形品に4つの耳が生じた。一方、図9に2段ストレッチドローで得

Fig.8 A few examples of formed cups by the single and double stretch-drawings. (a) SPCE, blank dia. 73, $r_d = 1.0$ (for both operations), (b) Al-H, blank dia. 77, $r_d = 3.0$ (for both operations). (r_d : die-profile radius (dimensions in mm))

Fig.9 Examples of earless cups formed by double stretch-drawing operations. (SUS304L) Right: blank dia. 63, $r_d = 0.5$ & 3.0 (single & double); Center: 63, 0.7 & 3.0; Left: 66, 1.0 & 3.0 (in mm)

られた SUS304L の成形品を示すが、この成形品ではほとんど耳が生じていない。

図10(a)~(c)に、Al-H*, SPCE, SUS304Lを単段および2段ストレッチドロー成形した時の相対カップ深さ対素板直径の関係図及び成形品の例を示す。縦軸は、カップ深さ(左側)および1段目成形に対する2段目成形の相対深さ(右側)である。同図の最上部と最下部には各素板直径に対して用いたダイス肩半径 r_d を示している。また、図において△型プロットがストレッチドローの結果である。○型は通常の深絞り結果である。

各図より、それぞれの素板直径において2段ストレッチドローした後の相対カップ深さは、ほぼ1段目成形後の約2倍にも達しており、ストレッチドローの効果が顕著であった。なお、深さの観点から評価すると、2段目成形で通常の深絞りとの比較ができない絶対深さを持つプロットが1段目の成形より増えていることがわかり、再絞りでのストレッチドロー成形の優位性を示している。

図11は、2段成形での深さ比の観点から評価するため、各材料に関して深さ利得比 $(H_s' - H_d') / H_d' \times 100(\%)$ を示す。ここに、 H_d' = 通常の再絞り成形によるカップ深さ、 H_s' = 2段ストレッチドローによるカップ深さである。図4と図11から単段成形の深さ利得比と2段の深さ利得比を比較すると、SPCEは2段成形では最大29%強(単段成形では26%)、Al-H*は26%(単段成形では24%)、SUS304Lは33%(単段成形では31%)であるが、使用した素材直径全体を通して見ると、SPCE

Blank dia.	80	77	71	69	64	61 (mm)
r_d (single)	8.0	3.0	1.5	1.5	0.7	0.5 (mm)
r_d (double)	8.0	3.0	1.5	1.5	1.5	1.5 (mm)

(a) Al-H*

Blank dia.	63	65	66	68	72	74 (mm)
r_d (single)	0.5	0.7	1.0	1.5	3.0	8.0 (mm)
r_d (double)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	8.0 (mm)

(c) SUS304L

Fig.10 Relationship between cup-depth and initial blank diameter. (Single and double operations)

Top photograph in each material shows the formed cups.

Blank dia.	80	77	76	74	72	70 (mm)
r_d (single)	8.0	3.0	1.5	1.0	0.7	0.5 (mm)
r_d (double)	8.0	3.0	1.5	1.0	1.0	1.0 (mm)

(b) SPCE

Fig.11 Gain in cup depth by double stretch-drawing relative to cup depth by usual double deep-drawing.

Hs' : Drawn cup depth obtained by double stretch-drawings
 Hd' : Drawn cup depth obtained by double deep-drawings

が2段階ストレッチドロー性において優位であると言える。

図12は2段階成形において、面積比の観点から面積低減率 $(Ad' - As') / Ad' \times 100(\%)$ を示す。ここに、同一深さのカップを得るものとして、 Ad' = 通常の再絞り成形による素板面積、 As' = 2段階ストレッチドローによる

Fig.12 Gain in cup depth by double stretch-drawing relative to cup depth by usual double deep-drawing.

As' : Blank area used in double stretch-drawings

Ad' : Blank area used in double deep-drawings

Fig.13 Distribution of wall thickness along the wall after double operations. (Al-H ; 1mm thick)

素板面積である。

図 12 の面積低減率より, SPCE は 2 段成形では最大 31% 強 (単段成形では 18%), Al-H* は 21% 強 (単段成形では 19%), SUS304L は 25% 強 (単段成形では 24% 強) であり, SPCE に関しては高さ利得比と同様なことが言える。

こうした結果から, 全体的に 2 段成形する場合も大きな素板節減が可能である。それゆえ, 再絞りにおいてもストレッチドローが推奨される。

図 13 に Al-H を 2 段ストレッチドロー成形した時の壁厚分布を示す。この図においては, 横軸にカップ底からの距離, 縦軸には側壁周方向の平均板厚が採っている。同図からダイス肩半径が厳しくなるほど特にカップ底から約 20 mm の部分で板厚が減少することがはっきり観察される。全ての材料において, 成形後半 (つまりカップ口辺部) で厚肉化傾向が見られた。これは, 単段ストレッチドローと同様の理由による。この厚肉化傾向を是正できれば, さらに深いカップが成形できるものと期待される。

4. 結 言

ストレッチドロー成形が主に材料節約にどれほど有効であるかを明確にするためと, 通常の深絞りまたは再絞りにとって代わり得るか否かを検討するため, 板厚 1 mm 程度の種々の材質及び板材について, 単段と 2 段ストレッチドロー成形を行なった。ダイス肩半径 r_d は 0.5 から 3mm までの 5 種類とし, 比較のため通常の深絞りとして $r_d=8\text{mm}$ を用いても実験した。その結果以下のように主な結論を得た。

1) 単段及び 2 段ストレッチドローにより, 通常の深絞り及び再絞りでは得られない深さのカップが, より小さな素板から得られる材料が多い。

2) 単段ストレッチドロー性を評価するため, 通常絞りに対する, 同一寸法の素板を用いる際のカップ深さ利得比 h_g と, 同一深さのカップを得る際の面積低減率 a_g を定義した。全体を通して, h_g の最大値は 36% 強, 30% 付近を示す場合も多かった。また, a_g の最大値は 24% 強で, 20% 強を示す場合も多かった。つまり, カップ深さ及び板材節減の双方の観点から, ストレッチドロー効果は大きいことが定量的にはっきりした。また, 材種ごとにストレッチドロー性に特徴のあることがわかった。

3) ストレッチドロー性と n 値の相関性は, 極端に n 値が小さいと不利であるということ以外, はっきりしなかった。X 値も測定してストレッチドロー性との相関を調べ, やや正相関を認めた。

4) 2 段ストレッチドローについても, 全体を通じて, h_g の最大値は 33% 強, また, a_g の最大値は 31% 強であり, 全体的に高さ利得比及び面積低減率とも大きいことが判明した。特に SPCE において効果が大きかった。かくして, 2 段成形でもストレッチドロー法は通常の再絞りにとって代わり得ることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 後藤 学: 塑性学, コロナ社, (1982), 95-103.
- 2) 後藤 学, 林 哲録, 荒浪 勝: 機論, 62-595 (1996), 1147-1155.
- 3) 今津 勝宏, 小林 亮, 小林 具実: 塑性加工春季講演会, 215 (1993), 581-584.
- 4) 今津 勝宏: 機論, 62-600 (1996), 3320-3325.
- 5) 河合 望: 塑性加工学, 朝倉書店, (1982), 191.
- 6) Gotoh, M., Katoh, M. & Yamasita, M.: J. Mat. Pross. Tech, 63-1-3 (1997) 123-128.
- 7) 後藤 学: 機械の研究, 26-4 (1974), 521-527.
- 8) 後藤 学: 塑性と加工, 19-210 (1978), 598-605.