

変形中の素板をポンチの一部に利用した逐次深絞り法の開発

京都工芸繊維大学 工芸学部 機械システム工学科

教授 山口克彦

(平成3年度研究開発助成 AF-91003)

1. 研究の背景

金属板の深絞り加工を行う場合、1回の絞り加工によって得られる製品の深さには限界が存在する。例えば、円筒深絞り製品の場合、破断なしに成形しうる製品の深さは直径の約3/4程度(限界絞り比 ≈ 2.0 に相当)である。このため、さらに深い容器が必要な場合には、後加工として再絞り加工やしごき加工を繰り返さねばならない。このような多工程の成形では、各工程ごとに一組のポンチとダイスが必要になるので、工程数が多い場合には、工具製作の費用や時間が増大する。

板材のプレス成形では、多品種少量生産に対してどのように対処していけばよいかということが、従来から大きな問題になっている。多品種少量生産では、製品数量が少ないほど、また成形工程数が多いほど、工具コストが割高になる。したがって、コストの低減を図るためには、できるだけ少ない工具を使用して成形限界を向上させるような新しい成形法の開発が必要である。

本研究では、このような要求に応えるための一つの試みとして、変形中の素板をポンチの一部に利用した新しい深絞り法を提案する。この方法は、いったん成形されてポンチになじんだ容器を取り外さずに、これを新たなポンチとして次の素板を絞るといった操作を逐次繰り返していくものであり、ただ一組のポンチとダイスを使用して深い製品を成形しうるのが特徴である。

従来、限界絞り比を向上させるための深絞り法としては、高温深絞り法¹⁾、周辺加熱深絞り法²⁾、ポンチ頭部冷却法³⁾、素板の破断危険部を局部焼入れ⁴⁾やショットピーニング⁵⁾あるいは板厚増加^{6), 7)}によって強化する方法、ダイスとして液体やゴムなどの圧力媒体を使用する方法⁸⁾⁻¹⁰⁾など、多くのものが提案されている。また、初絞りと再絞りとを1ストロークで行うテレスコピックポンチによる深絞り法¹¹⁾や、ゴムリングを用いて素板フランジ部に求心向きの摩擦力を作用させ、深い容器を成形しようとするポンチなし深絞り法^{12), 13)}、さらにはゴムリングの代わりに鉛のような軟質金属パッドを工具とし、これを板材と一緒に塑性変形させることによって大きな絞り比を実現している深絞り法¹⁴⁾など、ユニークな方法も開発されている。

しかし、本研究のように、特別な装置や工具を使用するこ

となく、変形中の素板をポンチの一部に利用するといった簡単な方法によって、成形限界の向上を図った例はまったく見当たらない。本報では、この逐次深絞り法を円筒テーパ容器の深絞り加工に適用し、その可能性と問題点について検討した。

2. 逐次深絞り法の原理と特徴

従来の深絞り加工法では、いったん成形されてポンチになじんだ容器をその都度取り外し、再び新たな素板を絞るといった操作を繰り返す。いま、仮に、ポンチになじんだ容器を取り外さずにそのまま次の素板を絞ったとすれば、絞られた容器がポンチ頭部に層状に重なった状態になる。この状態では、見掛け上、ポンチの直径が積層容器の板厚分だけ増加しており、変形中の素板を工具の一部として利用できることを示唆している。

本研究は、この点に着目したものである。Fig. 1に、本深絞り加工法の概略を示す。この方法は、(a) 予備成形、(b) 逐次深絞り、および(c) 型押し of the three stages from which it is composed.

2.1 予備成形

この工程は、成形された容器をポンチ頭部に順次積層してポンチを太らせていく段階である。すなわち、Fig. 1(a)-(1)に示すような所定の素板をいきなり成形しようとすると、ポンチ径に比べて素板径が大き過ぎるために、ポンチ肩部破断が生じて絞りは成功しない。そこでまず、破断なしに絞りが行えるような直径の小さい素板を使用して深絞りを行う。そして、ポンチになじんだ容器を取り外さずに、これを新たなポンチとして次の素板を深絞りする。このような操作を繰り返していくと、Fig. 1(a)-(2)に示すように、ポンチの直径が順次大きくなる。その結果、Fig. 1(a)-(3)に示すように、所定の素板を破断させることなく深絞りできるようになる。

2.2 逐次深絞り

予備成形によってポンチの直径が所要の寸法に達したら、ポンチにかぶさっている容器のうち第1層目(ポンチに接触している容器)のみを取り外す。そして、新たに予備成形と同一の所定の素板をセットし、太った状態のポンチで絞りを行う[Fig. 1(b)-(1)]。この際、最外層の素板がダイ

ス壁に接すると、それ以後は、ポンチの進行に伴って各層が徐々にポンチ側に押しつけられていく。その結果、第1層目を取り外したことによって生じていた隙間（ポンチと第2層目の間に生じていた隙間）が小さくなり、最終的には第2層目がポンチになじむことになる [Fig. 1 (b)-(2)]。そこで再び第2層目のみを取り外し同様の操作を繰り返していくと、例えば、予備成形で Fig. 1 (a)-(2) のように3枚のブランクを使用した場合には、4層目以降から1ストロークごとに1個の深絞り製品が得られることになる。

2.3 型押し

これは、得られた深絞り容器の形状・寸法を矯正するために、深絞りで用いたポンチとダイスを使用して型押しを行う工程である。逐次深絞り法では、Fig. 1 (b)-(3) に示すように、ポンチ頭部に積層された容器の口辺部が、やや外

側にそり返った状態になるが、このリストラйкиングを行うことによって所定の寸法の製品を得ることができる。

2.4 限界絞り比向上の可能性

2.2節で述べた成形方法から理解されるように、本深絞り法では、素板はまずみかけのポンチで初絞りされた後、最終的にポンチになじむまでの間に徐々に再絞り加工を受けることになる。みかけのポンチ直径 d_p' は、ポンチ頭部に積層する容器の枚数 N によって変化し、近似的に次式で表わされる。

$$d_p' \cong d_p + 2Nt_0 \frac{\cos \theta}{1 + \sin \theta} \quad (1)$$

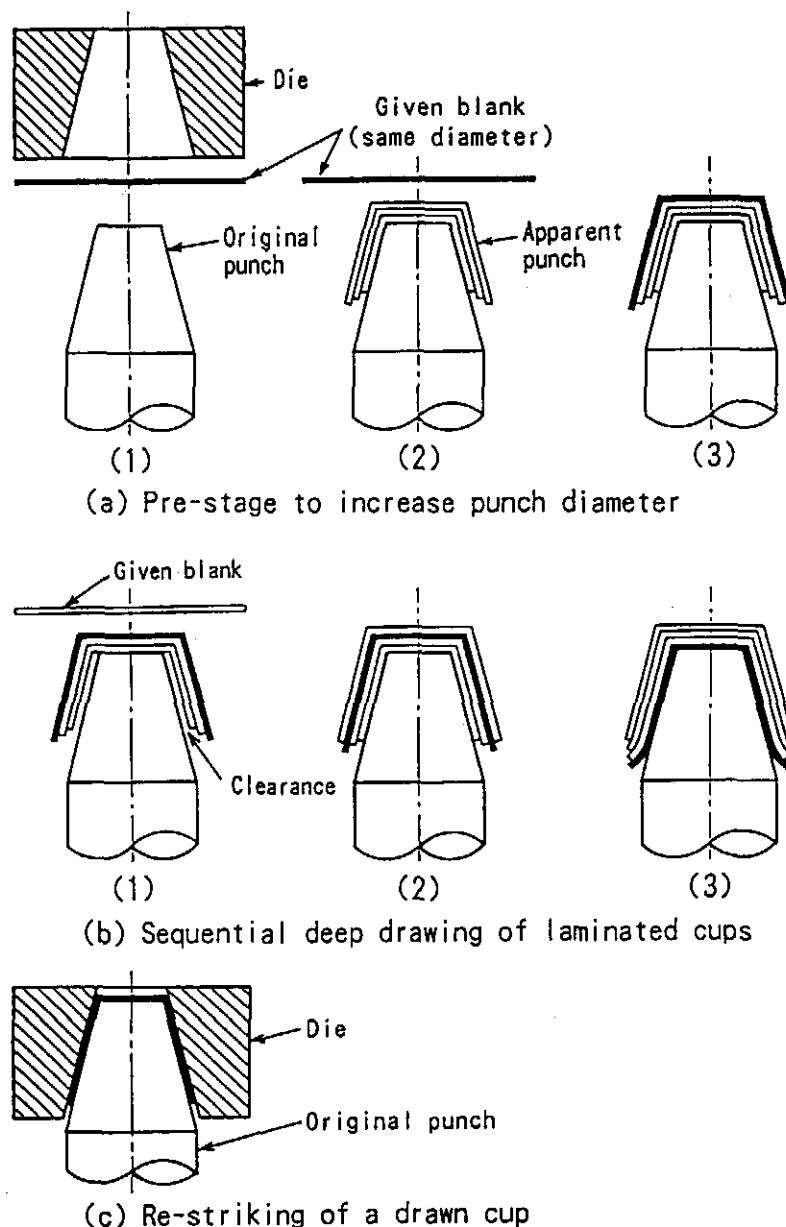


Fig. 1 Principle of a new deep drawing process using laminated cups as a part of punch.

ここで、 d_p はポンチ頭部の直径、 θ はテーパ半角、 t_0 は素板の板厚である (Fig. 2)。

いま、直径 D_0 の素板を直径 d_p' のみかけのポンチで初絞りした容器 (最外層) が、順次ポンチ側へ移行して直径 d_p の製品になった状態を考える。円筒深絞り加工の場合と同様に、ポンチ頭部の直径を基準にとって絞り比を定義することにすれば、絞り比 β は次のように表わせる。

$$\beta = \frac{D_0}{d_p'} \times \frac{d_p'}{d_p} \quad (2)$$

ここで、右辺の D_0/d_p' は初絞り比 β_1 、 d_p'/d_p は再絞り比 β_2 に相当する。式 (1) を用いれば式 (2) は

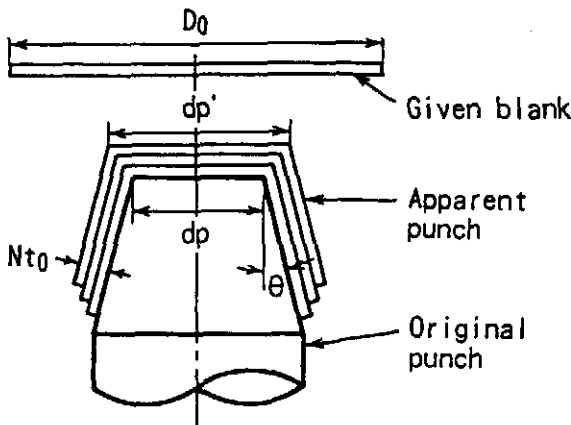


Fig. 2 Schematic illustration showing dimensions of blank, and apparent and original punches.

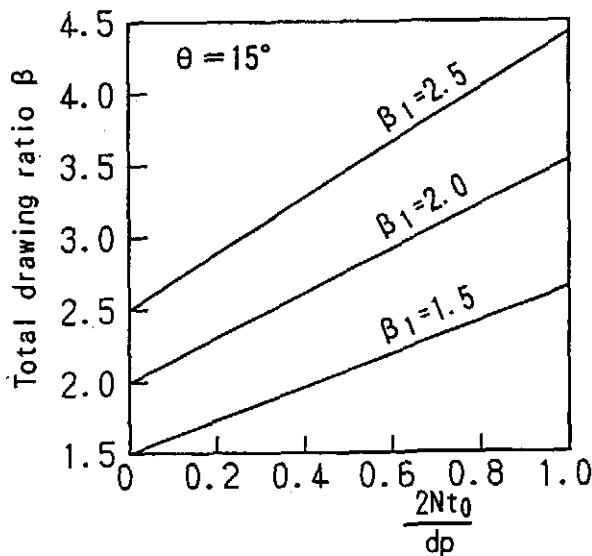


Fig. 3 Increase in calculated total drawing ratio, β , with the number of laminated cups, N .

$$\beta = \beta_1 \left(1 + \frac{2Nt_0}{d_p} \times \frac{\cos \theta}{1 + \sin \theta} \right) \quad (3)$$

となる。式 (3) をもとにして、絞り比 β と積層容器の枚数 N の関係を計算すると Fig. 3 のようになる。初絞り比 β_1 が大きいほど、また重ね枚数 N が多いほど、絞り比 β の向上が期待できることになる。

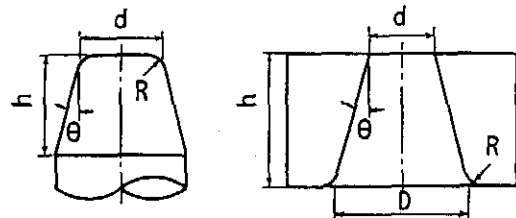
2.5 逐次深絞り法の特徴

以上のように、ただ一組のポンチとダイスを用いて初絞りと再絞りとを同時に進行させることが、本深絞り法の最も大きな特徴である。ポンチ頭部に積層する容器 (半成形品) の枚数 N を加減するだけで、ポンチの寸法を自由に変化させることができるので、いわゆる寸法可変工具としての利用が可能であり、初絞り比や再絞り比が異なる場合でも比較的容易に対応できる。したがって、慣用の深絞り法に比べると工具の数を減らすことができ、多品種少量生産に適した方法であるといえる。

3. 実験方法

3.1 実験装置および方法

実験では、円筒テーパ絞りを行い、本逐次深絞り法の可能性と問題点について検討した。実験に使用した工具 (ポンチとダイス) の形状・寸法を Fig. 4 に示す。テーパ半角は $\theta = 15^\circ$ 一定である。ポンチとダイスは、予備成形、逐次深絞り、型押し工程を通して同一のものを使用した。なお、深絞り実験は、無潤滑の場合と、素板のダイス接触面にテフロンスプレーを塗布した場合とについて行った。



		D/mm	d/mm	R/mm	h/mm	$\theta/^\circ$
Die	No.1	48	24	4	45	15
	No.2	63	34	4	66	15
	No.3	71	29	4	70	15
Punch	No.1	--	27	4	42	15
	No.2	--	27	4	62	15

Fig. 4 Dimensions and shapes of tapered punches and dies.

3. 2 供試材料

板厚 1.2mm の軟質アルミニウム板 (Al-O) を使用した。この材料の引張特性値を Table 1 に示す。素板の直径は、予備成形用の小径のものも含めて 55mm から 110mm まで 5mm 間隔で 12 種類準備した。

4. 予備成形におけるポンチ寸法の増加と

絞りの成否

4. 1 深絞り容器の積層によるポンチ寸法の増加

ポンチになじんだ容器を取り外さずに絞りを繰り返していくと、ポンチ頭部には成形された容器が層状に重なってくる。Fig. 5 は、このように積層された容器を半割りにし、各層のプロフィールを示した例である。容器の重ね枚数 N を増していくと、みかけのポンチ直径や肩半径が増加していくことがわかる。いま、このようなポンチ寸法の増加と容器の重ね枚数 N の関係を調べるために、Fig. 5 に示すような定義にしたがってポンチ寸法を測定してみた。すなわち、容器底のほぼ平坦とみなせる部分 AB の延長線と側壁 EF の延長線との交点を D とし、AD の 2 倍をみかけのポンチ頭部直径 d_p' と定義した。また、みかけのポンチ肩半径 r_p' は、直線部と曲線部の境界点 B、E を結ぶ線分の垂直二等分線が曲線部の外側輪郭と交わる点を C とし、B、C、E の 3 点を通る円の半径 OC とした。

このような定義にもとづいて測定したポンチ頭部直径 d_p' 、肩半径 r_p' と素板の重ね枚数 N の関係を Fig. 6 に示す。図中の破線は、式 (1) から計算したポンチ頭部の直径であ

Table 1 Tensile properties of aluminium sheet used.

Angle to rolling direction /°	0	45	90	mean
F - value /MPa	177	179	176	178
n - value	0.25	0.27	0.26	0.26
r - value	0.74	0.85	0.93	0.86
Tensile strength /MPa	114	111	112	112
Total elongation /%	35.9	41.6	42.2	40.1

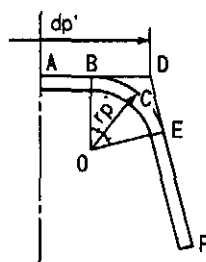
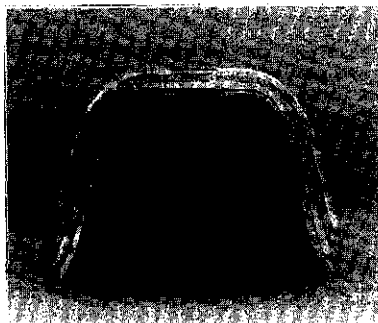


Fig. 5 Typical example of laminated cups on the original punch ($N=4$), and definition of bottom diameter, d_p' and profile radius, r_p' of apparent punch.

る。図から、みかけのポンチ直径 d_p' およびポンチ肩半径 r_p' は、容器の重ね枚数 N が増加するにつれてほぼ直線的に増加することがわかる。

4. 2 ポンチ荷重—ストローク線図

予備成形におけるポンチ荷重—ストローク線図の一例を Fig. 7 に示す。ポンチ荷重は、ストロークの進行に伴って $0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ のような変化を示す。0 から C までは慣用の円筒深絞りの場合と同様の傾向である。しかし、テーパ絞りの場合には、ダイス内に絞り込まれた容器がポンチとダイスの間で型押しされることになるので、ポンチ荷重が最終段階で C から D まで急上昇することになる。ポンチ頭部に重ねる容器の枚数 N を多くすると、その分だけ、みかけのポンチ直径や肩半径が大きくなる。したがって、同じ直径の素板を絞る場合には、重ね枚数 N が多いほど絞り込みが容易になり、ポンチ荷重の極大値が低下する。一方、重ね枚数 N が多くなると、型押し開始時期が早くなるため、荷重が急上昇し始めるポンチストロークは小さくなる。

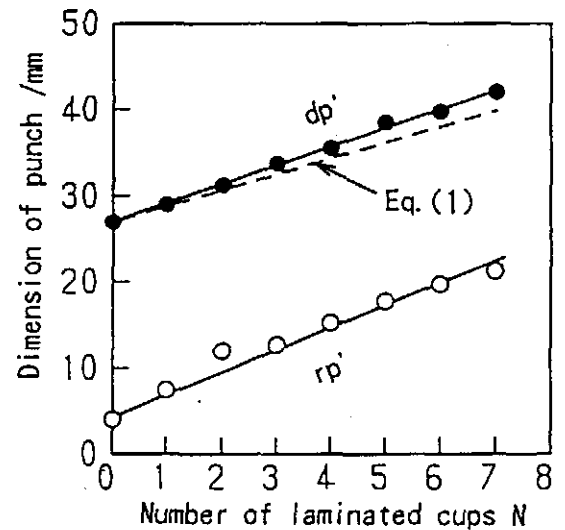


Fig. 6 Increase in bottom diameter, d_p' , and profile radius, r_p' , of apparent punch.

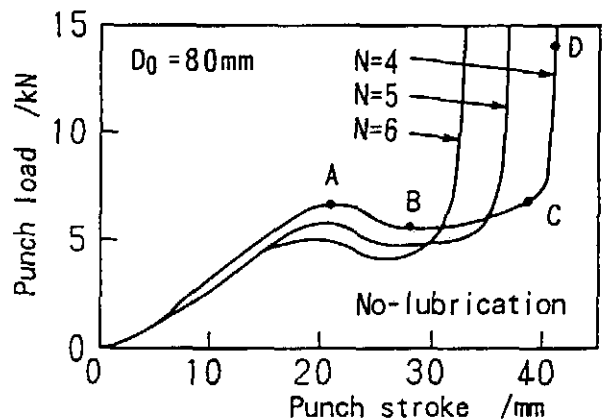


Fig. 7 Load-stroke curves for the present drawing process.

4.3 積層容器の枚数と絞りの成否の関係

上述のように、容器の重ね枚数 N を多くすると、みかけのポンチ直径および肩半径が大きくなるので、当然、大きな直径の素板が絞れるようになるはずである。そこで、この点を確認するために、容器の重ね枚数 N を変化させて深絞り実験を行い、予備成形における絞りの成否を調べてみた。得られた結果をFig. 8に示す。図より、絞りが可能となる限界blank直径は、重ね枚数 N が多くなるほど大きくなるのがわかる。また、この限界blank直径は、無潤滑の場合よりも潤滑剤を使用した場合の方が大きくなる。つまり、潤滑剤を使用すると無潤滑の場合に比べて、少ない重ね枚数で直径の大きな素板を絞ることができる。

5. 逐次深絞りにおける絞りの成否

5.1 積層容器の枚数と絞りの成否の関係

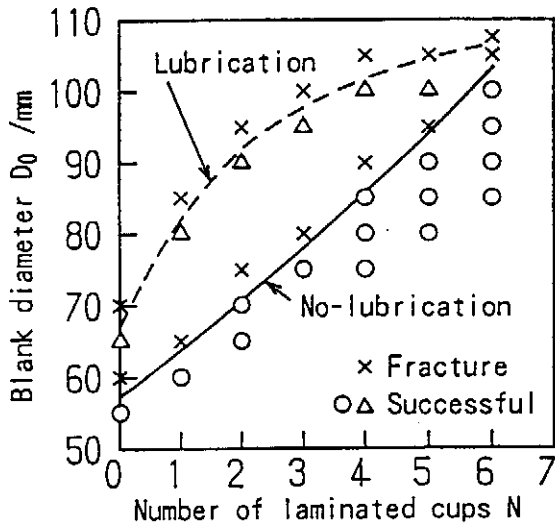


Fig. 8 Effect of number of laminated cups, N , on drawing limit in pre-stage drawing.

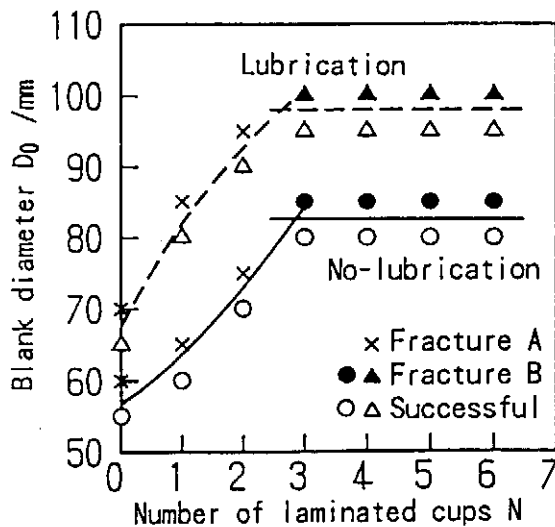


Fig. 9 Effect of number of laminated cups, N , on success or failure in sequential drawing.

Fig. 9は、逐次深絞り工程における成形限界が、積層容器の枚数 N や潤滑条件によってどのように変化するかを調べた結果である。図中の \times 印は、初絞り段階（素板がみかけのポンチになじむ以前の段階）において素板がポンチ肩部で破断したもの、 \bullet および \blacktriangle 印は再絞り段階（積層容器をポンチになじませる段階）において積層容器が重なった状態でポンチ肩破断したものを示す（Fig. 10）。

Fig. 9より、積層容器の枚数 N を増加させると、成形限界が向上することがわかる。例えば、無潤滑の場合についてみると、通常の深絞り（ $N=0$ ）では55mmの素板しか絞ることはできないが、 $N=3$ として逐次深絞りを行えば直径80mmの素板まで絞り込みが可能になる。また、通常の深絞りでは必ず破断していた直径60mmの素板が、 $N=1$ とすることによって必ず安全に絞り込めることになる。このことは、変形中の素板をたった1枚利用するだけで、再絞り工具の製作を省略できることを意味しており、実用的には大きな価値がある。

積層容器の枚数 N が多くなると厚板のテーパ絞りと同様の加工になるため、積層容器をポンチになじませるための絞り抵抗や、ダイス壁での摩擦抵抗が増大する。その結果、これらの抵抗が荷重負担部（ポンチ肩部）材料の強度を越えると、各容器が層状に重なった状態で破断することになる。このため、成形限界の向上には限度がある。図示の例では、重ね枚数の上限は3枚であり、それ以上重ね枚数

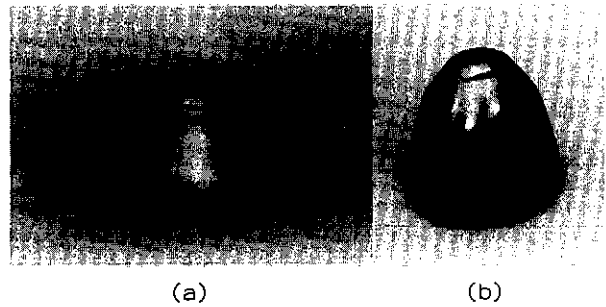


Fig. 10 Types of fracture in sequential drawing.

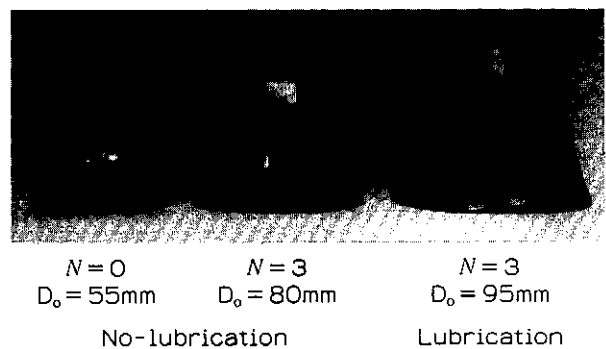


Fig. 11 Comparison of tapered cups produced by conventional method ($N=0$) with the present drawing process ($N=3$)

を増やしても成形限界の向上は期待できない。

なお、潤滑を施した場合には、無潤滑の場合に比べて成形限界が大きくなる。積層容器の枚数と絞りの成否の関係は、無潤滑の場合と同様である。

5.2 製品の板厚ひずみ分布

Fig. 11に、本逐次深絞り法によって得られた円筒テーパ容器の例 ($N=3$) を示す。通常の深絞り法 ($N=0$) に比べてかなり深い容器が得られることがわかる。

本深絞り法では、いったん成形された容器が順次ポンチ側へ移行していき最終製品になる。Fig. 12は、このような成形過程を通して、板厚ひずみ分布がどのように推移していくかを調べた例 (素板径80mm、重ね枚数 $N=4$ の場合) である。ポンチ頭部と側壁部では、層の違いによる板厚ひずみの差異はほとんど見られない。しかし、ポンチ肩部では、外層 (5層目) から内層 (1層目) へ向うにつれて順次再絞り加工を受けることになるので、ポンチ側へ移行する

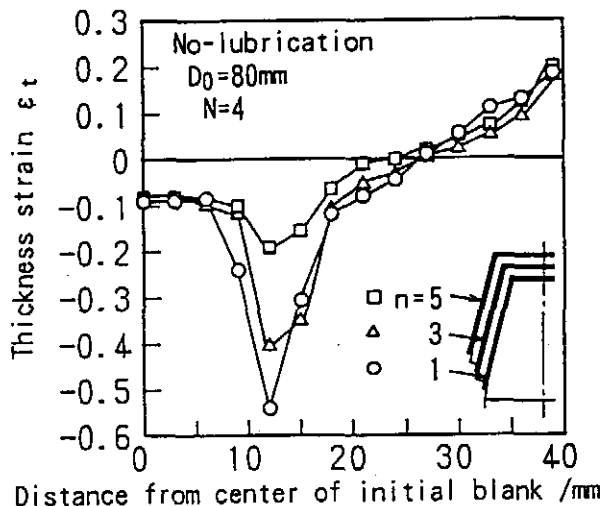


Fig. 12 Thickness strain distributions in different layers of laminated cups.

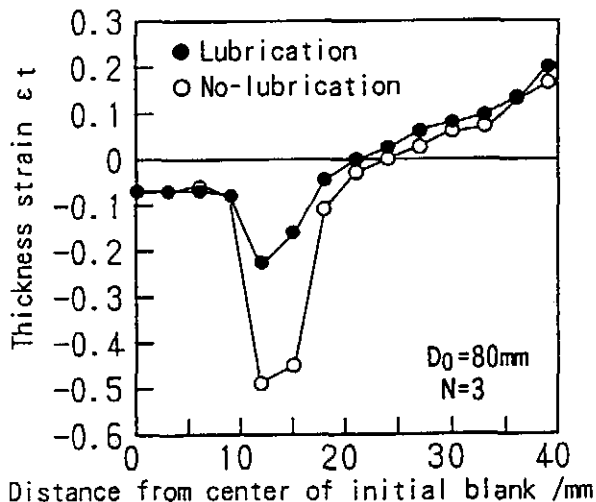


Fig. 13 Effect of lubrication on thickness strain distributions of final products.

につれて板厚ひずみの進展が大きくなっている。本深絞り法では、成形された容器が層状に重なっており、各層の間には摩擦による拘束力が作用している。したがって、通常の深絞り加工における板厚ひずみより大きなひずみに達しても、まだ破断には至っていない。

Fig. 13は、最終製品の板厚ひずみに対する潤滑の影響を示す。図に示すように、潤滑剤を使用した場合には無潤滑の場合に比べて、ポンチ肩部の板厚ひずみが半減している。

以上のことから、同じ直径の素板を深絞り加工する場合には、積層する容器の枚数はできるだけ少ないほうがよいといえる。また、過度の板厚減少を避けるためには、潤滑剤を使用することが望ましい。

6. 結言

できるだけ少ない工具を使用して深い容器を成形するための一方法として、変形中の素板をポンチの一部に利用した新しい深絞り法を提案した。この深絞り法をアルミニウム板 (板厚1.2mm) の円筒テーパ絞り加工に適用し、その可能性と問題点を検討した。

その結果、ポンチ頭部に適当な枚数 (3~4枚以内) の容器を積層した状態で逐次深絞りを繰り返していけば、ただ一組のポンチとダイスを使用して、慣用の深絞り法の場合よりも、限界絞り比をかなり大きく向上させることがわかった。

終わりに、本研究は、天田金属加工機械技術振興財団の助成によってなされたことを付記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 宮川松男: 機誌, 62-484 (1959), 713.
- 2) 戸沢康寿: 塑性と加工, 1-1 (1960), 23.
- 3) 河合 望、後藤 学、松田敏雄: 塑性と加工, 15-156 (1974), 11.
- 4) 町田輝史、中川威雄: 塑性と加工, 16-169 (1975), 148.
- 5) 近藤一義、大賀喬一: 機論, 41-344 (1975), 1122.
- 6) 福田正成、山口克彦、高倉章雄: 24回塑加連講論, (1973), 173.
- 7) 山口克彦、田中利治、高倉章雄、福田正成: 昭57巻塑加講論, (1982), 281.
- 8) 春日保男、野崎徳彦: 機論, 24-146 (1958), 720.
- 9) 中村和彦、中川威雄: 塑性と加工, 25-284 (1984), 831.
- 10) 福田正成、山口克彦、村松均: 機論, 38-315 (1972), 2967.

- 11) Gurumukhi, S. R. & Mellor P. B. : Proc. 16th Int. MTDR Conf., (1976), 507.
- 12) Maslennikov, N. A. : Metalworking Prod., (1957), 1417.
- 13) Yamaguchi, K., Takakura, N. & Fukuda, M. : J. Mech. Working Technol., 2-4 (1979), 357.
- 14) Brakman, C. M., Borsboom, C. G. & Bruin, B. A. : J. Mater. Process. Technol., 25 (1991), 153