深絞り加工の薄肉化技術に関する研究*

(第1報, ストレッチドロウ法における成形条件の実験的検討)

今 津 勝 宏^{*1}

Studies on Draw and Thin Redraw Forming (1st Report, Experimental Investigation of Optimum Working Conditions for Stretch Draw Forming Using Laminated Sheet)

Katsuhiro IMAZU

A new deep drawing process for laminated sheet metal is developed to eliminate unfriendly environmental factors from a can manufacturing system. This new dry forming process is carried out without using coolant/lubricant and take advantage of the good sliding property of polyester film. The main purpose of the stretch draw forming is to reduce the thickness of the body walls by more than 20%. From Experimental results on wall thickness reductions, optimum regions of die radius and blank holder radius in the stretch draw forming are determined as $1.1 < Rd/to < 3$ and $4 < Rh/to < 12$, respectively. As far as any wrinkling or breakdown occurs, a higher backward tension on the body wall, which can be controlled by the blank holding force, is effective to achieve a high reduction in cup wall thickness. The limiting reduction rate of wall thickness is related to the material strength.

Key Words: Deep Drawing, Press Working, Sheet Metal Forming, Stretch Draw Forming, Laminated Sheet, Die Radius, Blank Holder Radius, Blank Holding Force, Backward Tension

1. 緒 言

従来、飲料缶詰用の金属容器は、溶接缶、接着缶の3ピース缶や絞り・しごき(Draw and Wall Ironing)缶が内容物の用途によって使い分けられている。特に炭酸ガスなどの入った内容物で容器に内圧のかかる製品にはD I缶が多量に製造され使用されている。この絞り・しごき加工法においては、加工性、加工発熱、工具摩耗あるいは表面性状などの点から水溶性潤滑剤を大量に使用している。さらにこの潤滑剤の脱脂・洗浄および耐食性のための表面処理が必要であり、これらの廃液・排水のための処理が不可欠である。また食品用の金属製品であるため食品の保護のために金属容器の内外面を塗装・印刷する必要性から大量の塗料、溶剤を使用し、塗料を硬化焼付けするために多量の燃焼ガスを必要とするのが現状である。このことは、省資源、省エネルギーの観点から必ずしも望ましい最善の製造方法とはいえない。

これらの短所を改善するために、電解クロム酸めっ

き処理を施した薄鋼板(ECCS)に予め共重合ポリエチレンテレフタレート(PET系)フィルムを両面に同時に熱溶着した素材を用いて、食品衛生上問題の無い僅かな潤滑剤を塗布して有機被膜に対して損傷なしにカップ側壁部を均一に薄肉化するドライ加工法(ストレッチドロウ成形法)を考案した。^{1)~3)}

本報では、このストレッチドロウ成形法における側壁部の薄肉化におよぼす成形条件の影響因子を把握するために、各種成形条件と側壁部の薄肉化との関係について実験的検討を行った。

2. ストレッチドロウ法の原理

ストレッチドロウ工程とその成形法の概念図を図1および図2に示す。有機被覆鋼板の打抜きと同時に浅絞りの前工程を行ったカップに次の数次の再絞り工程において所定の高さを得るための成形を行う。

ストレッチドロウ法は、この再絞り工程において引張り曲げ・曲げ戻し変形を再絞り変形の中で強制的に行い側壁部の板厚を元板厚より減少させ薄肉化し所望の板厚に制御する成形法である。成形条件として特に重要な点はダイラジラス(Rd)、ブランクホルダーラジラス(Rh)および成形中の縮みフランジ部のしわを抑制するためにしわ押え力(BHF)を負荷し、これらの最適

* 原稿受付 1995年11月30日。

^{*1} 正員、東洋製罐グループ総合研究所(〒240 横浜市保土ヶ谷区岡沢町22-4)。

Fig.1 Processes of stretch draw forming

Fig.3 Schematic illustration of a film laminated sheet

Table 1 Mechanical properties of the tested material
(values after lamination)

T.S /MPa	El. /%	Hardness (HR30-T)	Earing /%	Grain / μm	Erichsen /mm
697	3.5	75.5	5.3	4.7	4.7

化を図ることである。またPET フィルムの潤滑効果を十分活用することも重要なことである。この原理に基づく成形法は、被加工材として有機被覆材を適用することにより、ドライ状態での連続成形が可能である。^{4) 5)}

3. 実験方法

3.1 供試材 供試板材は、成形における破断強度と容器強度を考慮し板厚0.175mm、調質度DR10相当の電解クロムめっき(ECCS)薄鋼板を用いた。板材の内外面には25 μm 共重合クリアポリエステルおよび20 μm の二酸化チタン含有の共重合ポリエステルフィルム(PET)を熱融着し供試した。なお、以降用いる板厚 t_0 = 金属板厚 + 両面フィルム厚みと定義する。この供試材の両面には成形前に潤滑剤として白色ワセリンが塗油量として約60mg/ m^2 が塗布されている。このラミネートした供試材をクランクプレスにより通常の絞り加工(絞り比=1.59, R_d/t_0 =8.6, BHF=40kN, 室温)にて予め浅絞

Fig.2 Principle of stretch draw forming

Table 2 Conditions of redrawing

Redraw Ratio	1.37
R_p /mm	8.0
R_d /mm	0.24, 0.32, 0.33, 0.45, 0.97, 1.41
R_h /mm	1.1, 1.4, 2.0, 2.3
BHF/kN	29.4, 39.2, 49.0, 58.8

Specifications of hydraulic press	
Punch ram	capacity 45kN
Blank holder ram	speed ~60m/min
Draw height	capacity 59kN
	max. 140mm

Fig.4 Experimental apparatus for redrawing

りの前工程カップを作成した。供試材の材料特性は表1に示す通りである。図3は供試ラミネート材の断面概略図を示した。板材とフィルムの接着性は本加工法に対して十分な密着力を有し成形中に剥離しないことが必要である。

3・2 再絞り試験 再絞り成形の実験は、図4に示すような複動型油圧プレスを用いて行い、成形速度は0.5m/s、工具温度は $45^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 一定になるように制御した。温度については有機被覆層と工具間のすべりを一定に保つために特に留意した。なお、パンチには成形荷重およびストロークが測定できるようにロードセルおよび変位計が取り付けられており、データはパソコンに取り入れる方法を取った。本実験の再絞り成形条件は表2に示す通りである。再絞り比(1.37)、パンチラジウス $R_p(8.0\text{mm})$ は一定とし、ダイラジウス R_d 、blankホルダーラジウス R_h 、しわ押え力BHFをそれぞれ変化させ成形試験を行った。成形後のカップの有機被覆層を含んだ側壁板厚分布および高さは、ダイヤルゲージを用いて板の圧延方向から 45° 間隔で8方向測定した。なお、ここでの平均板厚減少率(Red/%)は平均カップ高さから求めた平均側壁板厚(t_w)と元板厚(t_o)により次式で計算し求めることにした。

$$\text{Red.}/\% = (t_o - t_w) / t_o \times 100 \quad (1)$$

4. 実験結果および考察

4・1 円筒側壁板厚分布 図5は再絞り後の円筒側壁部の板厚分布 t_w/t_o を示したものである。 $R_d/t_o = 6.4$ の場合、すなわち通常の再絞り成形の条件の場合には円筒側壁部の底部に近い部分では、元板厚にほぼ等しいが、側壁上部に行くにしたがい徐々に板厚が増加し、口端部近傍では急な板厚勾配が生じる傾向がある。ダイラジウスを小さくすることにより、円筒側壁部の板厚は全体的に減少し、カップ高さが増す傾向が見られる。また、最もダイラジウスが小さい $R_d/t_o = 1.1$ の条件においては側壁部の約4/5の高さまで均一に薄肉化されていることがわかる。また全ての条件でみられる側壁部上部の板厚増加傾向は、前工程の浅絞りカップに元々ある板厚増加傾向および口端エッジがblankホルダーラジウス部を通過する過程でバックテンションとして作用する力が急激に減少するために、側壁部の薄肉化に対する作用が低下するためであると考えられる。

4・2 ダイラジウス(R_d)の影響 ダイラジウスを小さくすることによって、側壁部が薄肉化される傾向を述べたが、図6は板厚減少率におよぼすダイラジウスの影響について示したものである。ダイラジウスが板厚の3倍以上の領域、すなわち従来の再絞り成形される一般的な成形条件においては平均板厚は元板厚と比較して増加傾向にあるが、ストレッチドロウ法において適用する成形条件では、側壁部の平均板厚が急激に

Fig. 5 Wall thickness distributions of laminated cup after redraw forming

Fig. 6 Effect of die radius on wall thickness reduction

Fig. 7 Punch load-stroke diagrams in cup redrawing

薄肉化する傾向が顕著にあらわれる。図7は再絞り工程における荷重-ストローク線図を示す。ダイラジウスが小さいほど、すなわち薄肉化の程度が大きいほど成形荷重が高くなる。このことより、ダイラジウス部での薄肉化変形にかなりのエネルギーが費やされてい

ると推察される。これらの荷重-ストローク線図の共通の傾向は成形初期に急な荷重の増加があり、その後若干の低下も見られるが、全体的に緩やかに増大し最大荷重を越えた後はほぼ直線的に減少する。この荷重の減少は前絞りカップの口端エッジがブランクホルダーラジラス部を通過したのち、しわ押え面内での縮みフランジ変形成分が支配的になるためである。

このことは、最大荷重の位置と円筒側壁部板厚が急激に増加する位置が一致していることからわかる。

4.3 ブランクホルダーラジラス(Rh)の影響 板厚減少率におよぼすブランクホルダーラジラスの影響を図8に示す。Rhが小さくなるにつれて板厚減少率が増大する傾向がある。Rhの大きさについては、板厚の約4倍以下と小さすぎると曲げ変形がきつくなり、しわ押さえ面への流入不良が生じやすくなり、逆に大きすぎるとRh部において拘束無しになり絞り変形させる量が大きくなってその部分にしわが発生する傾向となる。このようにRhを変化させても板厚減少率にして5%程度の差であることから、その影響はダイラジラスの影響ほど顕著でないことがわかる。

4.4 しわ押さえ力(BHF)の影響 図9は板厚減少率におよぼすしわ押さえ力の影響を示したものである。

ダイラジラスの大小に係わらず、しわ押さえ力の増加とともに板厚減少率が大きくなる傾向がみられる。

しかしながら、しわ押さえ力の場合もブランクホルダーラジラスと同様にダイラジラスを変化させた場合よりも板厚減少率の変化は小さいが、ブランクホルダーラジラスよりは板厚減少率に対する効果は大きい傾向にあり、ダイラジラスが小さいほど直線の傾向が大きく、しわ押さえ力の影響が大きくなると推察される。

ストレッチドロー法においては、板厚と工具寸法、主としてクリアランスのみによりカップ高さが決まるしごき加工とは異なり、ここではしわ押さえ力は側壁部板厚減少の最終制御に対して重要であるといえる。

4.5 ストレッチドロー法におけるひずみ分布 これまで述べてきたストレッチドロー成形では、金属基材の表面に有機被覆材料(PET系フィルム)を融着したものを供試材としているために、有機被覆材に対する加工ひずみ量の大小が製品の品質性能を左右することから、従来の再絞り法とストレッチドロー法についてひずみ分布の比較を行った。

図10は通常の再絞り条件、 $R_d/t_o=6.4$ の場合の側壁部のひずみ分布を、図11にはストレッチドロー法条件

Fig.8 Effect of blank holder radius on wall thickness reduction

Fig.9 Effect of blank holding force on wall thickness reduction

$R_d/t_o=1.1$ の場合のひずみ分布を示した。ここでは実測した板厚分布から簡易的に3方向の主ひずみ(板厚方向 ϵ_t 、円周方向 ϵ_θ 、高さ方向 ϵ_ϕ)および相当ひずみ ϵ_{eq} を算出しその分布を示した。

ここで主ひずみおよび相当ひずみは、次式より求めた。すなわち、板厚方向ひずみ： $\epsilon_t = \ln t_x / t_o$ 、円周方向ひずみ： $\epsilon_\theta = \ln D_p / D_x$ 、高さ方向ひずみ： $\epsilon_\phi = -(\epsilon_\theta + \epsilon_t)$ および相当ひずみ $\epsilon_{eq} = \sqrt{2/3 (\epsilon_t^2 + \epsilon_\theta^2 + \epsilon_\phi^2)}$ である。ここで、 t_x はカップ高さの任意点における板厚、 t_o は元板厚、 D_p はカップ内径、 D_x はカップ高さの任意点 x に相当する元のブランク径である。板厚方向ひずみ ϵ_t はカップ高さの各部位における元板厚からの変化を示す。

円周方向ひずみ ϵ_θ は、一般的にはブランク径とパンチ径によって決まり、ひずみの変化のしかたに差は余りなく、側壁上部ほどその絶対値は単調増加する。

Fig. 10 Strain distributions along laminated cup wall in conventional redrawing method

すなわち、 ε_{θ} は板厚減少率に依存しないことから、ストレッチドロー法における軸方向ひずみ ε_{ϕ} および相当ひずみ ε_{eq} は板厚ひずみ ε_t によって一義的に決まるといえる。またストレッチドロー法によって形成されるカップにおいては、相当ひずみ ε_{eq} の最大値がカップ最先端部よりやや低い位置に存在する理由は、カップ上端部板厚増加に関係して板厚ひずみ ε_t の絶対値が小さくなるためであると考えられる。

更に両成形条件による違いによる相当ひずみの最大値に着目して比較すると、通常の再絞り法では107%、ストレッチドロー法では142%の最大ひずみになり、両者には大きな差が生じている。このことは特にストレッチドロー法の変形そのものと併せて有機被覆材料に対する加工の厳しさを表していることになる。ストレッチドロー法に供される有機被覆材料には、前述したように高加工度に十分耐える金属素材との高い密着性が要求される。

4・6 最小板厚（くびれ）部の板厚減少率 ストレッチドロー法では、ダイラジラス R_d を従来の再絞り加工において一般的に採用されている値よりも、かなり小さな値に設定していることから、図6の荷重—ストローク線図で示したように成形荷重が相当増大する。

このためにパンチラジラス(R_p)部近傍での局所的な薄肉化によるくびれの発生が懸念される。このくびれの大小は成形時の破断を誘発する危険性を有していることから、極力小さく抑える必要がある。

Fig. 11 Strain distributions along laminated cup wall in the stretch redrawing method

ストレッチドロー法におけるくびれの程度を明らかにするために、ダイラジラスを変更した場合の平均板厚減少率とくびれ部の平均板厚減少率の関係を整理すると図12のような結果となった。

本実験の成形条件範囲では、平均板厚減少率に対してパンチラジラス部近傍のくびれ部の板厚減少率は約10%程度増加することが明らかになった。このことからダイラジラス、特にラジラスコーナー部をより小さくすることによってパンチラジラス部近傍のくびれが著しく助長されることはないものと推察される。しかしこのくびれの程度は、金属材料そのものの特性、性質によっても影響を受けることが予想されることから十分考慮する必要がある。

Fig. 12 Relationship between average reduction of wall thickness and thickness reduction for punch radius portion

4・7 ストレッチドロウ法の成形限界の推定

ストレッチドロウ法の成形において、板厚減少の限界を把握することは生産上の工程数、加工率などの見積りやプレス、金型を設計する上で重要なことである。

板厚減少の限界を推定するためには破断現象、変形機構、材料特性などが相互に関連し単純に推定できるものではないが、ここでは便宜上成形中の側壁に負荷される引張り応力に着目し板厚減少率の限界を推定する試みを行った。ここでは4・6項で述べたパンチラジウス部近傍のくびれ部で破断現象が生じることを想定した。側壁部に生じる引張り応力 σ_n は次式により算出し求めた。

$$\sigma_n = P_{\max} / \pi \cdot D_p \cdot t_n \quad (2)$$

ここで、 $P_{\max}$ はストレッチドロウ成形における最大成形荷重、 D_p はパンチ径、 t_n はパンチラジウス部近傍のくびれ部の最小板厚である。

図13は板厚減少率と成形時の側壁部に生じる引張り応力との関係について示す。 σ_n は板厚減少率とともに増大する傾向にある。この増加傾向をさらに外挿していくと板厚減少率は約27%が成形限界である。 σ_n は素材の元の引張り強さ σ にほぼ相当すると推定される。本実験に供した高強度の板材においては、前述した値が推定されたが、この限界値は板材の強度、伸などに左右される。また、ここでの σ は素材の加工硬化した側壁部の引張強さで推定すべきであるが、成形上の安全率を考慮する上では、素材の元の強度で推定するのが妥当である。

5. 結 言

有機被覆材料を使用し、従来の絞り・再絞り法とは異なる側壁部の薄肉化を図る新しいストレッチドロウ法を提案し、その加工原理とその薄肉化のための種々の成形条件の影響因子について検討した。その結果、より薄くかつ均一に薄肉化を行うための条件として、次の結論が得られた。

(1) ダイラジウス R_d またはブランクホルダーラジウス R_h はより小さく設定することにより、板厚減少率を大きくすることができる。特にダイラジウスの方がその影響が顕著である。

(2) 側壁部の板厚減少に対するダイラジウス R_d は適正な小さい範囲、特に $1.1 < R_d/t_0 < 3$ にすることが最も効果がある。

(3) ブランクホルダーラジウス R_h は小さく設定することにより板厚減少率を増すことができるが、その効果は緩やかである。そのブランクホルダーラジウス R_h の適正範囲は、 $4 < R_h/t_0 < 12$ の範囲が適切である。

Fig.13 Relationship between tensile stress on cup wall and wall thickness reduction

(4) ストレッチドロウ成形に必要な逆張力 T は、しわの発生および破断を考慮し、しわ押さえ力 BHF を大きく、ブランクホルダーラジウス R_h を小さくすることが有効である。

(5) ストレッチドロウ法における軸方向ひずみ ϵ_ψ および相当ひずみ ϵ_{eq} は板厚ひずみ ϵ_t によって一義的に決定され、その絶対値は従来の再絞り法に比較して相当大きくなり、金属材料と有機被覆材料との加工密着性が重要となる。

(6) ストレッチドロウ法における板厚減少の限界は、一工程当たり得られる最大の減少率は高強度薄鋼板の場合には約27%程度であるが、その限界値は材料特性に影響される。

文 献

- 1) 今津勝宏：包装技術，30(1992)，29。
- 2) 今津勝宏：材料とプロセス，6-2(1993)，540。
- 3) 今津勝宏：軽金属，44-2(1994)，110。
- 4) 葉山益次郎：塑性学と塑性加工，オーム社，(1981)，206。
- 5) 小林亮，小林具実，今津勝宏：平5春塑論，(1993)，215。