1050-H24アルミニウム板の対向液圧付加による 深絞り限界の低下とその対策

中村 正美*・大倉 幸伸**・中村 和彦***

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 52, No. 5 (2002), pp. 221-225

Control of the deterioration of deep drawing limit by hydraulic counterpressure for 1050-H24 aluminum sheets

Masami NAKAMURA*, Yukinobu OHKURA** and Kazuhiko NAKAMURA***

Influence of hydraulic counterpressure on the deep drawability of an aluminum work hardening sheet, and the forming method for improving deep drawing limit are examined. When a 1050-H24 aluminum sheet is formed by hydraulic counterpressure deep drawing, the limiting drawing ratio decreases compared with one formed by the conventional deep drawing. This is caused by inverse bulging deformation generated between a punch and a die due to hydraulic counterpressure. The radial strain caused by the inverse bulging deformation concentrates on the punch profile radius, which causes the local decrease of sheet thickness. For this reason, it is impossible to encourage material inflow into the die from a flange part. For relieving locally concentrated strain caused by inverse bulging deformation, material inflow into the die from the flange part is necessary. For this purpose, a method to push the flange edge by radial pressure drawing is effective. In addition, for suppressing the inverse bulging deformation generated under high liquid pressure, a method to reduce a blank holder profile radius and restraining by the metallic mold is effective.

(Received October 4, 2001)

Keywords: deep drawing, hydraulic counterpressure forming, forming limit, work hardening, 1050 aluminum sheet

1. 緒 言

液体を満たした液圧室内に剛体パンチを用いて薄板を絞り込む対向液圧深絞り法は、パンチ頭部および成形側壁部に発生する摩擦保持効果とフランジおよびダイ肩部に発生する摩擦軽減効果により破断限界が向上することが知られている¹⁾。摩擦保持効果は、素板が対向液圧によりパンチに押付けられるために発生する素板とパンチ間の摩擦力によって成形側壁部の伝達力を向上させる効果である。また、摩擦軽減効果は、フランジ部とダイ肩部を流体潤滑状態にすることにより摩擦抵抗を減少させてフランジ部の絞り込みを助ける効果である。これらの効果は、すべて摩擦力の増減という力学的成形条件の変化を利用した方法であり、素板を加熱、冷却して被成形材の局所的な機械的性質変化を利用して破断限界を向上させる成形法とは異なる。そのため対向液圧深絞り法は、被成形材の影響を受けにくい成形法と考えられている。実際、対向液圧法は、軟鋼板、ステンレス鋼板、アルミニウム合金板、銅合金板、チタン合金板など多種の材質に用いられ深絞り限界を向上させている^{2)~4)}。しかし、加工硬化したアルミニウム板の深絞り加工において単に対向液圧を付加す

るとかえって慣用金型法に比べて深絞り限界が低下する現象が見られることも一方で指摘されている⁵⁾。そこで本報では、加工硬化した工業用純アルミニウム板の対向液圧円筒深絞り特性を調べ、深絞り限界の低下理由を明らかにする。また、いかにすれば対向液圧を付加したときに発生する摩擦保持効果、摩擦軽減効果を有効に利用できるかについても検討を加える。

2. 実験方法

対向液圧深絞り実験に使用した深絞り装置を **Fig. 1** に示す。しわ抑え力は、プレススライド滑り面の摩擦の影響を避けるため、アウトスライドとしわ抑え板の間に挿入したコイルばね（ばね定数：3.6~6.0 kN/mm）を介して素板に作用させ、スライドストップの高さを変えることによりしわ抑え力の調整を行う。使用した工具は、**Table 1** に示すもので、寸法の異なった2種類の工具を用いている。液圧付加方法は、基本的には液体を満たしたダイ内にパンチを押込むことで加圧され、液圧がダイ肩部のシール力やしわ抑え力に打ち勝つとフランジから液体が流出する自然加圧法である。しかし、A 工具では、パンチ押込み量に比較して液圧室容積が大

* 千葉職業能力開発短期大学校（〒260-0025 千葉県千葉市中央区問屋町 2-25）。Chiba Polytechnic College (2-25 Tonyacho, Chuo-ku, Chiba-shi, Chiba 260-0025)。

** 千葉工業大学大学院生（習志野市）〔現在：キャノン㈱（土浦市）〕。Graduate student, Chiba Institute of Technology (Narashino-shi, Chiba). [Present: Canon Inc., (Tsuchiura-shi, Ibaragi)]。

*** 千葉工業大学工学部（習志野市）。Chiba Institute of Technology (Narashino-shi, Chiba)。

Fig. 1 Schematic experimental setup for hydraulic counterpressure method.

Table 1 Dimensions of cylindrical shell drawing tools (mm)

Tool name		A tool	B tool
Punch	Diameter, d_p	30.0	49.4
	Profile radius, r_p	5	6
Die	Diameter, d_D	32.4	51.8
	Profile radius, r_D	6	6
Blank holder	Diameter, d_H	32.0	50.5
	Profile radius, r_H	6	6

きくて初期の液圧上昇に遅れが生じたので、素板上 0 mm の位置にパンチを静止させ補助ポンプにより 2.0~2.5 MPa (最大到達液圧値の 10~20%) の初期液圧を付加させてパンチを押込む方法を用いている。圧力媒体は、油圧作動油 (動粘度 40°C, 33 mm²/s) を用い、潤滑油は、高粘度の不水溶性プレス工作油 (動粘度 50°C, 280 mm²/s) をフランジ部のみに塗布している。

供試材は、公称板厚 0.8 mm の 1050-H24 材で、その機械的性質を Table 2 に示す。なお、比較材として用いている 1050-O 材は、1050-H24 材を 380°C で 1 時間加熱して炉冷を行った完全焼なまし板である。

3. 対向液圧深絞り法による成形限界

1050-H24 材を A, B 工具を用いて対向液圧法と慣用金型法で深絞り加工したときの成形状態を絞り比 (D_0/d_p) としわ抑え力 H の関係で Fig. 2 に示す。また、比較のために O 材を B 工具で対向液圧法と慣用金型法で深絞り加工したときの成形状態を Fig. 3 に示す。

H24 材は、両工具とも対向液圧を付加しても行程初期破断を抑制することができずにかえって慣用金型法より成形可能領域が狭くなり、A 工具で 2.23 から 2.17 に、B 工具で 2.25 から 2.13 に限界絞り比が低下している。

一方、O 材は、対向液圧を付加すると摩擦保持効果が有効に作用してパンチ肩部破断の抑制が行われている。破断限界は、行程中期に発生するダイ肩部破断で支配されるようになり、慣用金型法で 2.38 であった限界絞り比が 2.98 まで 1.25

Table 2 Mechanical properties of test material

Material (Thickness) (mm)	Angle to rolling direction	σ_B (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ (%)	n value	r value
A1050-H24 ($t_0=0.8$)	0°	134	96	12	—	—
	45°	132	89	5	—	—
	90°	140	93	6	—	—
A1050-O ($t_0=0.8$)	0°	88	28	42	0.28	0.72
	45°	81	28	49	0.26	1.15
	90°	85	24	48	0.33	0.74

Fig. 2 Formable zones obtained by conventional deep drawing and hydraulic counterpressure deep drawing of A1050-H24 sheet.

Fig. 3 Types of fracture and formable zones obtained by conventional deep drawing and hydraulic counterpressure deep drawing of A1050-O sheet.

倍の向上を示している。しかし、しわ抑え力が高い領域 ($H \geq 78$ kN) では、慣用金型法で成形できる絞り比にも行程初期破断が発生し、成形可能領域が得られていない。この破断は、しわ抑え力の増加によりダイ内に創成される液圧が高くなり、Fig. 4 に示すようにダイ肩相当部に発生するパンチ進行方向と逆方向の張出変形が増加し、それによる板厚減少が大きくなることに起因している。Fig. 5 にしわ抑え力を変化させたときの液圧の挙動と成形状態を示す。

慣用金型法に対向液圧を付加することによる変形の違いは、

Fig. 4 Inverse bulging deformation at clearance between punch and blank holder.

Fig. 5 Effect of blank holding force on results of drawing and behavior of fluid pressure generated during drawing (material: A1050-O sheet).

- (1) 素板が対向液圧によりパンチに押付けられること
- (2) 素板をダイ肩部およびダイ平面から浮かせること
- (3) 素板をパンチ進行方向と逆方向に張出すこと

である。

(1)は、摩擦保持効果につながり、破断を抑制する。そのため、(1)の現象がH24材において慣用金型法より限界絞り比を低下させる原因とは考えにくい。また、(2)は、素板とダイ間の摩擦抵抗を減少させ破断限界を向上させる正の要因と、フランジ部をしわ寄せ板面に押付けて素板としわ寄せ板間の摩擦を増加させる負の要因が考えられる。しかし、素板としわ寄せ板間の摩擦抵抗を減少させるためにフランジ部のみにテフロンシート（厚み0.05 mm）を用いて成形してもH24材の成形可能領域に向上が見られなかったことから、(2)の現象も慣用金型法より限界絞り比を低下させる直接的な原因とは考えにくい。

一方、(3)は、Fig. 4に示したように素板がダイ肩部から離れる現象であるため摩擦低減効果にとって有効である。さらに素板が幾何学的にパンチに押付けられやすくなり摩擦保持効果も受けやすくなる点では有効である。また、成形品の精度向上⁶⁾、円錐台やパラボラ形状容器のボディしわ抑制⁷⁾にとっても有効である。しかし、ダイ肩相当部に発生する逆張出変形は、張出変形による板厚減少としわ寄せ板肩部と張出部頂点での曲げ・曲げ戻し変形による板厚減少を伴う。そのため、O材のしわ寄せ力の高い領域に見られたように破断を促進させる一面も持つ。このことは、(3)の現象が延性の低いH24材の破断限界を低下させる原因になりうることを示唆している。

4. ひずみ分布からの検討

慣用金型法で絞り抜け、対向液圧法で破断したH24材の $D_0/d_p = 2.23$, $H = 17.7$ kNにおける各パンチ行程での成形品

Fig. 6 Effect of punch stroke (s) on strain distributions of shell drawn by conventional deep drawing from A1050-H24 sheet.

Fig. 7 Effect of punch stroke (s) on strain distributions of shell drawn by hydraulic counterpressure deep drawing from A1050-H24 sheet.

外表面の半径方向対数ひずみ分布 (ϵ_r) と周方向対数ひずみ分布 (ϵ_θ) を Fig. 6 (慣用金型法), Fig. 7 (対向液圧法) に示す。なお、測定は、2 mm 間隔の正方形格子を素板に罫書き、圧延方向について行っている。

慣用金型法では、まず、パンチ肩部の曲げ変形により ϵ_r が増加し、パンチ肩部よりに第一極大値が現れる。その後、成形が進行すると ϵ_r に見られるパンチ肩部の極大値も増加するが、初期にダイ肩部で曲げられた部位の引張ひずみも増加し、ひずみの分散化が生じて第二の極大値がダイ肩部よりの ϵ_r に現れる。パンチ行程 $s = 5$ mm までは、ダイ肩部開始点と底部開始点間領域の材料のみが変形して成形深さが得られ、フランジ部からの材料流入は見られていない。しかし、 $s \geq 7$ mm になるとフランジ外周部において半径方向の引張ひずみに見合う周方向の縮み変形が見られるようになる。 ϵ_r の第一極大値は、それに伴い成長速度が鈍化し、最終ひずみ $\epsilon_r = 0.24$ で絞り抜け ($s = 48$ mm) が生じている。

一方、対向液圧を付加すると、ダイ肩部開始点と底部開始点間のパンチ肩部よりの材料が、逆張出変形によって半径方向に伸ばされ、その頂点が曲げ・曲げ戻し変形を受けながら

Fig. 8 Effect of punch stroke (s) on strain distributions of shell drawn by hydraulic counterpressure deep drawing from A1050-O sheet.

パンチ肩部に押付けられる。そのため $s=5$ mm においてすでに ϵ_r の第一極大値が、慣用金型法で絞り抜けた成形品を越える $\epsilon_r=0.25$ にも達する。この部位には ϵ_θ がほとんど発生していないことから考え、第一極大値部は、ほぼその値に見合う板厚減少を起こしていることが推測できる。その後も、 ϵ_r の第一極大値部のみに変形が集中し、フランジ部の縮み変形を生じることなく成形が進行し、 $s=9$ mm で破断に至っている。そのときの第一極大値部のひずみは、 $\epsilon_r \geq 0.4$ に達している。

Fig. 8 に H24材と同一条件で成形に成功した O 材の対向液圧成形品におけるひずみ分布の進行具合を示す。O 材の対向液圧法でも ϵ_r の第一極大値は、 $s=7$ mm まで H24材の慣用金型法に比べて大きい。しかし、O 材では、 $s=3$ mm においてすでにフランジ部からダイ内への材料流入を示す周方向の縮み変形が見られる。また、 ϵ_r は、パンチ肩部としわ抑え板肩部における曲げ変形と逆張出変形により二つの極大値が現れ、その間に圧縮ひずみを受けた極小値の存在が見られてひずみの分散化が起きている。成形がさらに進行すると、 ϵ_r の第一極大値も増加するが、ダイ肩部付近の周方向圧縮ひずみが増加してダイ内への素板の流れ込みが生じ、ひずみの分散化がさらに進む。そのため、O 材では、第一極大値部へのひずみの集中が緩和され、行程初期に H24材とほぼ同値の半径方向引張ひずみがパンチ肩部付近に発生するにもかかわらず破断が抑制されている。

以上のことから、H24材において対向液圧を付加すると限界絞り比が低下する理由として、ひずみの局部集中が挙げられる。すなわち、対向液圧によって発生する逆張出変形による半径方向引張ひずみが、延性が低いため分散化できずにパンチ肩部の一点に集中し、その部分の板厚減少速度が加工硬化速度を上回り、フランジ部からの材料流入を促すことができないことが限界絞り比低下の原因と考えられる。

Fig. 9 Relation between limiting drawing ratio and maximum fluid pressure for different radial pressure drawing methods of A1050-H24 sheet.

Fig. 10 Schematic experimental setup for counterpressure drawing assisted by radial fluid pressure.

5. 成形限界向上への試み

5.1 フランジ押込み効果の利用

H24材の対向液圧法では、ダイ肩部開始点から底部開始点間領域にある素板のみが半径方向に伸ばされ、フランジからの材料流入が生じる前に破断に至っている。この破断を抑制するには、行程初期におけるフランジ部からの材料流入が不可欠と考える。その方法の一つとして周液圧深絞り法⁸⁾によるフランジ押込み効果の利用が考えられる。周液圧深絞り法は、液圧が高いほどフランジ押込み効果、摩擦保持効果が有効に作用する。

Fig. 9 に、周液圧深絞り限界に及ぼす最大液圧値の影響を示す。液圧付加方法は、液体を満した液圧室にパンチを押込むことによってリリース弁の設定液圧まで加圧される自然加圧法とパンチを素板上に配置してリリース弁で設定した最大液圧まで加圧した後パンチを押込む強制加圧法である。また、使用した実験装置は、Table 1 の A 工具を取付けた Fig. 10 に示す構造である。しわ抑え方式は、ダイとしわ抑え板間を一定に保つ固定隙間方式とし、しわ抑え隙間は素板板厚の 1.07~1.08 倍とした。圧力媒体および潤滑油は、対向

Fig. 11 Effect of blank holder profile radius on successful drawing regions in radial pressure drawing of A1050-H24 sheet.

液圧深絞り法と同一である。

自然加圧法を用いると、 $q_{\max} = 20 \sim 40$ MPa で限界絞り比 2.33, 不安定領域も成功領域と考えると $q_{\max} = 30$ MPa で 2.47 の限界絞り比が得られ、慣用金型法の 1.04～1.11 倍の向上を示す。このことは、フランジ押込み効果が延性の低い H24 材の液圧成形における深絞り限界向上にとって有効であることを意味している。しかし、液圧を $q_{\max} > 40$ MPa に設定すると逆張出変形過多による破断が発生し成形可能な絞り比を低下させている。また、強制加圧法を用いると自然加圧法よりも行程初期から素板が逆張出変形を受けるためにフランジ押込み効果よりも逆張出変形過多による影響を大きく受け、 $q_{\max} = 10$ MPa で限界絞り比 2.30 を得るにとどまっている。このことは、周液圧深絞り法も対向液圧法と同様に液圧が高すぎるとダイ肩相当部における逆張出変形による板厚減少が増加して限界絞り比を低下させるため、適正な液圧値の存在があることを意味している。H24 材の深絞り限界をさらに向上させるには、いかに逆張出変形を抑制してフランジ押込み効果に十分な液圧を作用させるかにかかっている。

5.2 金型形状からの対策

高い液圧を作用させたいでダイ肩相当部に発生する逆張出変形を抑制する方法として、しわ抑え板面で強制的に張出現象を抑制する方法が考えられる。Fig. 11 にしわ抑え板肩部半径を $r_H = 6$ mm から 2 mm に変化させたときの周液圧深絞り法 ($D_0/d_p = 2.40$) における液圧行程線図に現れる破断

限界線の変化を示す。 $r_H = 2$ mm と小さくしてもフランジ押込み効果、摩擦保持効果が不足する液圧の低い領域に発生する破断限界線には変化が見られない。しかし、液圧の高い領域に発生する破断限界線は、しわ抑え板肩部半径を小さくすることにより液圧の高い値に移動し、成形可能行程に広がりが見られる。このことは、逆張出変形過多による破断を抑制するのにしわ抑え板形状（パンチとの隙間、肩部半径）による強制的な抑制も有効な方法の一つであることを示している。

6. 結 言

延性の乏しい加工硬化した工業用純アルミニウム板（1050-H24）の円筒絞りにおける対向液圧の効果を調べ、次のことを明らかにした。

- (1) 加工硬化した工業用純アルミニウム板を従来の対向液圧法で深絞り加工すると慣用金型法よりも限界絞り比が低下する。
- (2) 限界絞り比が低下する理由は、対向液圧によって発生する逆張出変形による半径方向引張ひずみが、パンチ肩部に集中して局部的な板厚減少を起こし、フランジ部からの材料流入を促すことができないためである。
- (3) 逆張出変形によって生じるひずみの局部集中を抑制するには、フランジ部からダイ内への材料流入が必要であり、その方法として周液圧深絞り法によるフランジ押込み効果が有効である。
- (4) フランジ押込み効果は、液圧が高いほど効果があるが、逆張出変形による板厚減少が大きくなるため適正值が存在する。
- (5) 高い液圧下で発生する逆張出変形を抑制するには、しわ抑え板とパンチとの隙間の減少、しわ抑え板肩部半径の減少など、金型による強制的抑制法が有効となる。

参 考 文 献

- 1) 中村和彦：塑性と加工，33 (1992)，195.
- 2) 臨時増刊 ステンレス鋼のプレス加工ノウハウ集：プレス技術，35 (1997)，130.
- 3) 鈴木洋次：同上，36 (1998)，45.
- 4) 中村和彦，中村正美：塑性と加工，35 (1994)，881.
- 5) プレコート・表面処理のプレス加工技術研究会編：プレコート・表面処理アルミニウム板材の成形性データブック，軽金属学会，(2000)，123.
- 6) 中村和彦，郭 斌：塑性と加工，32 (1991)，1029.
- 7) 中村和彦，小原英隆：軽金属，48 (1998)，576.
- 8) 中村和彦，中川威雄：塑性と加工，26 (1985)，73.