

ビード張力自在制御金型の研究

桑原 利彦*

1. 緒言

深絞り成形において、しわや割れのない最終製品を得るためには、しわ押え力やビード張力を最適な条件に調整することが必要である。しわ押え力やビード張力が適正值より小さいとしわが発生し、それらの値が適正值より高すぎると、材料の流入不足のため破断が生じる。

しわ押え力やビード張力の調整作業は、型当たりの修正作業など、金型技術者の経験と勘に依存することが多く、試行錯誤的作業が多いのが現状である。したがって、成形中の材料の流れを何らかの方法でセンシングし、その材料流れを最適に制御する機構を備えた「知能金型」が開発されれば、金型の修正作業が必要最小限となり、金型修正時間の大幅な短縮やプレス製品の品質向上に寄与すること大である。

深絞り加工における材料流れの制御技術に関する研究を概観する。しわ押え力をポンチ行程と連動させて制御する方式としては、円筒絞りへの適用¹⁾、分割しわ押え板を用いて、四角筒容器の成形性向上に成功した事例²⁾、4本のクッションピン圧を独立制御することにより、自動車ルーパネルのたて壁部ボデーしわの消去と材料のグレードダウンに成功した事例^{3, 4)}が報告されている。これらの方法では、比較的広い範囲のフランジ流入を制御することはできるが、金型やプレス構造が複雑になる、局所的な張力制御ができない、等の短所がある。

素板張力を局所的に制御するには、ビードが用いられる。しかし、通常、ビードは金型に彫り込まれるため、深絞り工程中のビード張力は一定となる。これに対し、ビード張力をポンチ行程とともに変化させる方式として、カム機構を用いた機械制御式可動ビード⁵⁾や素板の押えピン⁶⁾をしわ押え板の中に組み込む方式などが発案されている。それらを実加工に応用した研究報告はないようであるが、筆者らは、四角錐台形容器の深絞り成形実験において、素板張力を局所的に付加することが容器の成形性向上ならびに肉余りの除去に有効であることを確認している⁷⁾。

以上総括するに、深絞り行程中の材料流れを実時間でかつ局所的に制御する機能を組み込んだ金型の研究はほとんどなく、その効果についての知見もほとんどない。

そこで本研究では、金型の知能化のための基礎研究として、ビード張力を局所的にかつ実時間で制御する機能を備えた「ビード張力自在制御金型」を提案する。具体的には、しわ押え面上の素板に、くさび形状のしごきビードを押し付けて、局所的なビード張力を発生させる方法である。こ

のしごきビードを金型内の要所要所に組み込んで、各ビードの押し付け力を油圧制御することにより、局所的にかつ実時間でビード張力を制御できる。本研究では、その適用例として、2次元引張曲げ成形、し字形容器の深絞り成形、ならびに斜円錐台容器の深絞り成形を行い、その有効性を立証したので報告する。

2. 油圧制御式しごきビードの機構と張力特性

考案した油圧制御式しごきビードの構造を図1に示す。油圧ピストンの直径は20mm、ビード長さは33.7mm、ビード先端部丸み半径は1mmである。油圧力は油圧ピストンならびにピンを介してしごきビードに伝達される。これによりビードの先端が素板に押し付けられて、局所的なしごき張力を素板に発生させることができる。

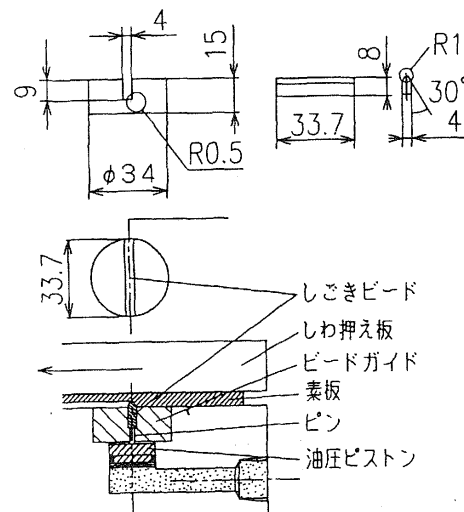


図1 油圧制御式しごきビード

表1 供試材の機械的性質

材料 (板厚/mm)	F 値 / MPa	n 値	r 値	引張強さ σ_B / MPa
A5182-O (1.0mm)	427 156	0.22 0.01	0.60	284
SPCEN (0.5mm)	410 434	0.19 0.22	2.29	291
SUS304 (0.5mm)	1014 791	0.24 0.15	0.92	784

* 単軸引張応力-ひずみ曲線を $\sigma = F\varepsilon^n$ で近似したときの値を示す。各段の上段/下段の数値は、近似したひずみ範囲が、5-15% (各材料共通) / 0.3-1.4% (A5182-O) / 0.3-5.0% (SPCEN) および 0.1-2.0% (SUS304) であることを示す。

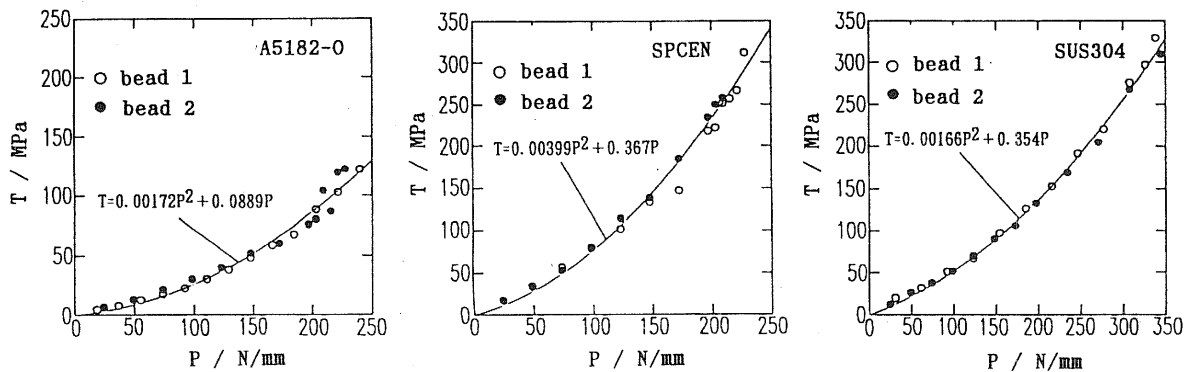


図2 帯板単位幅当たりのビード押し力 P とビード張力 (公称引張応力) T の関係

提案した油圧制御式しごきビードの基本特性を調べるために、ビード押し力とビード張力の関係を測定した。供試材はアルミニウム合金板 A5182-0 (板厚 1.0mm)、冷間圧延鋼板 SPCCEN (板厚 0.5mm)、ステンレス鋼板 SUS304 (板厚 0.48mm) の 3 種類で、全て幅 25mm の帯板である。それらの機械的性質を表 1 に示す。 F 値と n 値が 2 行にわたり記載されているが、これについては 3.2 節で述べる。潤滑剤は、SPCCEN にはマシン油#56 を、SUS304、A5182-0 にはジョンソンワックス No.700 の 3 倍の希釈水溶液を使用した。帯板としわ押え板の間にはスペーサ (板厚 + 0.04mm) により定すきまを与えた。引抜き方向は材料の圧延方向、引抜き速度は約 16mm/s である。

帯板の単位幅当たりのビード押し力 P と発生するビード張力 T (公称引張応力) の関係を図 2 に示す。実験においては異なる二つのビード (ビード 1、ビード 2) を使用し、ビードの個体差による張力のばらつきも確認した。図中の曲線は、実験点の最小自乗近似曲線である。同図より、ビード張力はビード押し力の増加に伴い、なめらかに増加することがわかる。これより、本しごきビードを用いれば、油圧によりビード押し力を変化させることにより、間接的にビード張力を容易に制御できることが確認された。なお二つのビード間で、張力のばらつきはほとんどない。

本ビードで発生させることのできる最大ビード張力は、A5182-0 で引張り強さ σ_b の 45%、SPCCEN で 100%、SUS304 で 40% であった。A5182-0 と SUS304 において、最大ビード張力が材料の引張り強さに達しない理由は、A5182-0 では、250MPa 以上の油圧をかけて引き抜くと、ビード押し込み部で材料が破断してしまうこと、SUS304 では、本試験機の最大許容油圧が 350MPa であることによる。なお、最大ビード押し力における試験片の板厚減少量は、A5182-0 で 29%、SPCCEN で 26%、SUS304 で 17% であった。

3. 円弧曲げダイスによる引張曲げ実験

油圧制御式しごきビードを円弧曲げダイスに組み込み、スプリングバックの低減効果を実験検証する。

3.1 実験方法

実験装置の概略を図 3 に示す。しごきビード部の構造は図 1 と同一である。ポンチの円弧半径 (曲げ半径) R_p は

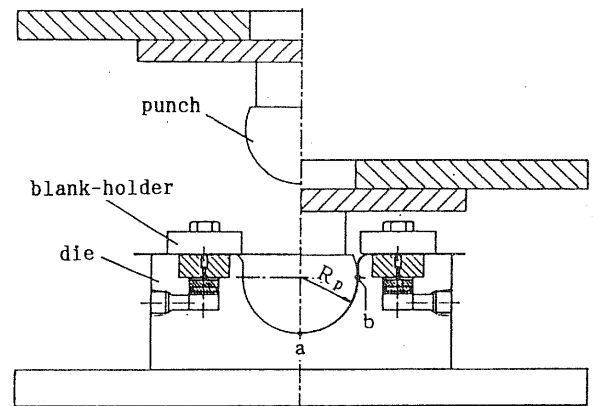


図3 しごきビードを組み込んだ円弧曲げ実験装置

37.5mm、ダイス円弧の内径は 38.5mm、ダイス肩半径 r_d は 7mm である。板押えとダイスの間は定すきま (板厚 + 0.04mm) に保たれている。帯板をその間に挿入して油圧をかけ、ビードを帯板に押しつけたのち、ポンチを押込み、円弧曲げ成形を行う。なお曲げ工程最終期において、材料がポンチによって底打ちされないよう注意した。供試材は表 1 と同じものを用いた。

スプリングバック量は次式で定義する。

$$\Delta R/R_p = (R' - R_p)/R_p \quad (1)$$

ここで、 R' は帯板外表面の除荷後の曲率半径で、ダイス肩部での曲げ曲げ戻しを变形を受けていない部分の形状を読み取り顕微鏡により測定し、円弧近似して求めた。同一のビード押し力に対して、3 枚ずつ円弧曲げ成形を行い、そのつど R' を測定した。

3.2 スプリングバックの計算法

筆者らが開発したスプリングバック解析プログラム⁸⁾を用いて、円弧曲げ実験におけるビード張力とスプリングバック量の関係を定量的に予測する。

スプリングバックの予測精度は、 n 値と F 値の同定精度に大きく依存する。すなわち、供試材の単軸引張り真応力-真ひずみ線図を $\sigma = Fe^n$ の形で最小自乗近似する際に、近似対象となるひずみ範囲を、曲げ加工中の帯板内に実際に発生するひずみ範囲と一致させることが肝要である⁸⁾。

そこで、通常の、5~15%の伸びひずみ域で決定された n 値と F 値(表1の上段の値)に加え、円弧曲げ成形中に、帯板内に実際に発生するひずみ域より決定された n 値と F 値も計算に用いた(表1の下段の値)。すなわち、帯板外表面の対数伸びひずみの計算値 ε_{out} (図4の上部の目盛り)を参照して、A5182-Oでは0.3~1.4%、SPCENでは0.3~5.0%、SUS304では0.1~2.0%のひずみ域より n 値と F 値を算定した。

帯板に作用する張力は、次の二通りで算定した。一つは、油圧の計測値から図2の校正曲線より定まるビード張力 T がそのまま帯板に作用するとした。もう一つの算定法では、ダイス肩部における曲げおよび曲げ戻し変形によって付加される応力増分 σ_b を考慮し、さらにベルト摩擦の公式を用いて⁹⁾、ダイス肩面上での張力増加およびポンチ円弧上での張力減少を補正して、ビード張力 T' とした。 T' は次式で算定した。

$$\begin{aligned} T' &= (T_a + T_b) / 2 \\ &= T_b \{ \exp(-\mu\phi) + 1 \} / 2 \end{aligned} \quad (2)$$

ただし

$$T_b = (T + \sigma_b) \exp(\mu\phi) + \sigma_b \quad (3)$$

ここで、 T_a はポンチ頂部 a での張力、 T_b はポンチ円弧の端部 b での張力である(図3参照)。また、 μ は摩擦係数、 ϕ はポンチ円弧部およびビード肩部における帯板の巻付き角度であり、ここでは $\mu = 0.15$ 、 $\phi = \pi/2$ とし計算した。このとき σ_b は次式で近似できる⁹⁾。

$$\sigma_b = \frac{t}{4r_d} \sigma_e \quad (4)$$

ここで、 t は材料の板厚、 r_d はダイス肩丸味半径、 σ_e は材料の塑性流動応力である。計算に用いた σ_e の値としては、 ε_{out} 以下のひずみ範囲における塑性流動応力の平均値を σ_e とした。具体的には、A5182-O材では150MPa、SPCENでは187MPa、SUS304では360MPaとした。

3.3 実験結果と考察

SPCEN と SUS304 について、ビード張力とスプリングバック量の関係を図4に示す。計算値 A, B は、各々表1の上段および下段に記載された F 値と n 値を用いた計算値である。測定値○は、油圧の計測値より図2の校正曲線から算定されたビード張力 T' をそのまま記載した場合、測定値●は、式(2)より求まる T' をビード張力とした場合である。

どちらの材料においても、曲げと摩擦の影響を考慮した測定値●は計算値とよい一致を示している。SUS304では(図には示さないが A5182-O の場合も)、計算値 B が測定値とよい一致を示している。この理由は、文献8)でも述べているように、計算値 B を求める際に、曲げ加工中の帯板に実際に発生するひずみ範囲より決定された n 値と F 値を用いているからである。一方 SPCEN では、計算値 A と B の差異は少ない。これも文献8)の結果と同じ傾向である。

以上総括するに、本しごきビードを組み込んだ金型は、スプリングバックの抑制に有効であることが立証された。さらに、図2の校正曲線と筆者らが開発したスプリングバック解析プログラム⁸⁾を併用すれば、油圧の計測値より、製品のスプリングバック量が精度よく予測できる。

4. L字形容器の深絞り実験

油圧制御しごきビードをL字形容器深絞り成形用の金型に組み込み、容器の成形性と形状精度に及ぼす効果を実験検証する。

4.1 実験方法

ポンチ形状としわ押え板の上面図を図5に示す。しごきビード部の構造は図1と同一である。ポンチ肩半径は5mm、ダイス肩半径は10mmである。凹部のしごきビード A からは、凹部コーナ底部に発生する肉余り(以下、肉余り)の除去効果が、直辺部のしごきビード B からは側壁部のべこの除去効果が期待できる。

しごきビードの油圧は、ポンチストロークの関数として、サーボ弁(日本ムーグ製 J770-100、最大許容油圧=

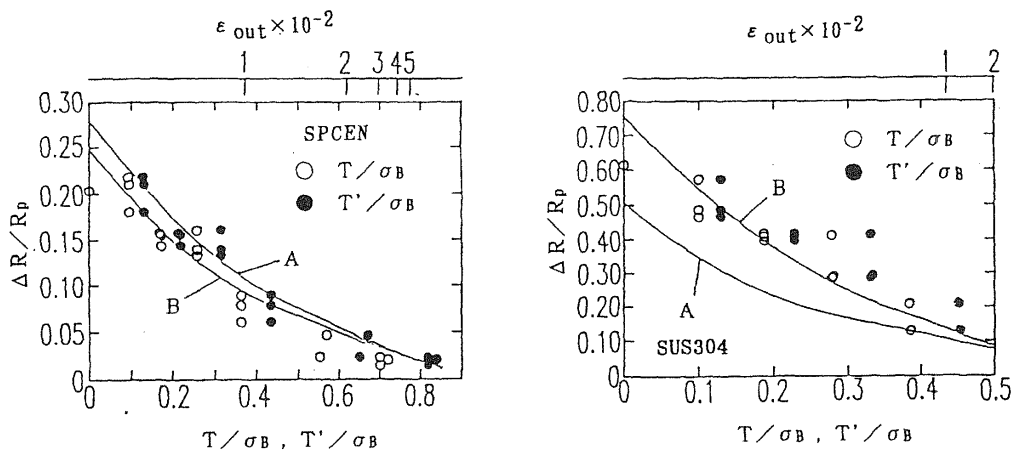


図4 円弧曲げ素板のスプリングバック量の実験値(○, ●)と計算値の比較. 曲線 A/B: 各々表1の上段および下段の F 値と n 値を用いた場合の計算値. ε_{out} : 帯板外表面の対数伸びひずみの計算値.

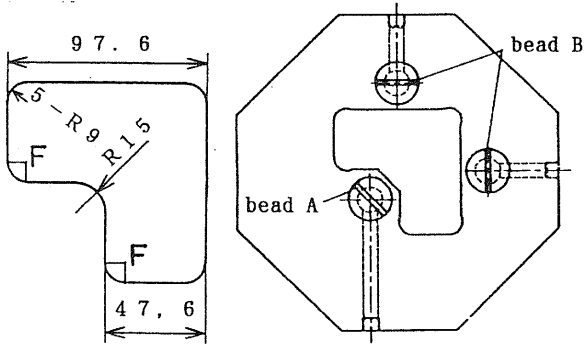


図5 L字型容器成形用のポンチとしわ押さえ板

22MPa)によりコンピューター制御される。これにより局所的なしごき張力を実時間で制御しながら素板に作用させることができる。本報ではビード A, B に作用する油圧は同一に設定した。

素板には、表 1 と同一の材料を用いた。素板形状はすべり線場理論より決定した¹⁰⁾。これにより容器のフランジ幅を均一に残留させることができる。SPCEN においては B2 を、SUS304, A5182-O においては B3 を用いた(素板 B2, B3 の寸法の詳細については文献 10)を参照のこと)。潤滑剤は、ビード引抜き実験と同一のものを、ダイス面およびしわ押え面に塗布した。しわ押え方法は、SPCEN に対しては定すきま方式とし、すき間は板厚の 4% に設定した(しわ押え板とダイスの間にスペーサをはさみ、しわ押え力を十分高くして容器を成形した)。SUS304 においては、上述の定すきま方式ではフランジしわが顕著であったため、しわ押え力 50kN の定圧しわ押え方式で成形した。成形速さは 1 mm/sec である。

4.2 実験結果と考察

4.2.1 SPCEN における実験結果と考察

(a) 容器底部の形状精度の向上効果 予備実験の結果、

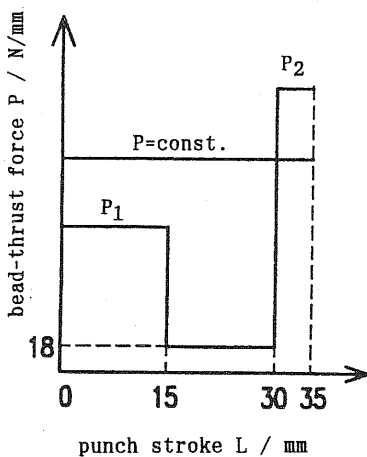


図6 ビード押し力の制御経路

SPCEN の場合は、図 6 に示すビード押し力制御パターンにおいて、ポンチ肩破断および容器底部の肉余りが効果的に抑制されることが判明した。そこで、帯板単位幅当たりの初期押し力 P_1 および後期押し力 P_2 を、各々 18, 84, 168N/mm の 3 通りに変化させて (P_1, P_2 の変化パターンはビード A, B に共通)、それらの組み合わせが容器の形状精度ならびに破断に及ぼす影響を検証した。

容器底部形状の測定結果を図 7 に示す。 P_1 を高くすると中央部の凸部が抑制され曲率変化が小さくなるが、高すぎると凹みが形成される。一方 P_2 を高くすると全体的な膨らみが抑制される。 P_2 の作用時間は P_1 よりも短い、凸部の低減効果は P_1 よりも大である。

図 7 で測定された肉余り量 Δh_1 とビード押し力の関係を図 8 (a) に示す。 P_1, P_2 とともに高い方が Δh_1 は小さくなるが、 $P_1 = 84, 168\text{N/mm}$ では差が小さい。 $P_2 = 168\text{N/mm}$ の容器は、 P_1 の大小にかかわらず、ビード押し力がゼロの場合(一点鎖線)や、押し力一定で容器を破断させずに絞ることのできる最大ビード押し力 121N/mm で成形した場合(二点鎖線)よりも肉余り量が小さく抑えられており、ビード張力を制御することにより、より効果的に肉余りが抑制されることが確認された。

(b) ポンチ肩破断危険部の板厚ひずみの低減効果 最も板厚減少が著しい、ポンチ肩部の公称板厚ひずみ ε_i の測定結果を図 8 (b) に示す。 P_2 が高くなるに従って板厚減少が大きくなり、破断に対する余裕度が少なくなるが、 P_1 を大きくすることにより、板厚減少は抑制され、成形性が向上する。直辺部の初期しわ押え力を高くすると四角筒容器の成形性が向上することは、分割しわ抑え方式でも確認されている²⁾。成形性向上の理由は、直辺部のポンチ肩材料の加工硬化がより促進され、直辺部の荷重負担能が増大したため^{2, 11)}と考える。

(c) 容器側壁部の形状精度の向上効果 側壁のべこ量 Δh_2 の測定結果を図 8 (c) に示す。 P_1 が小さく、 P_2 が

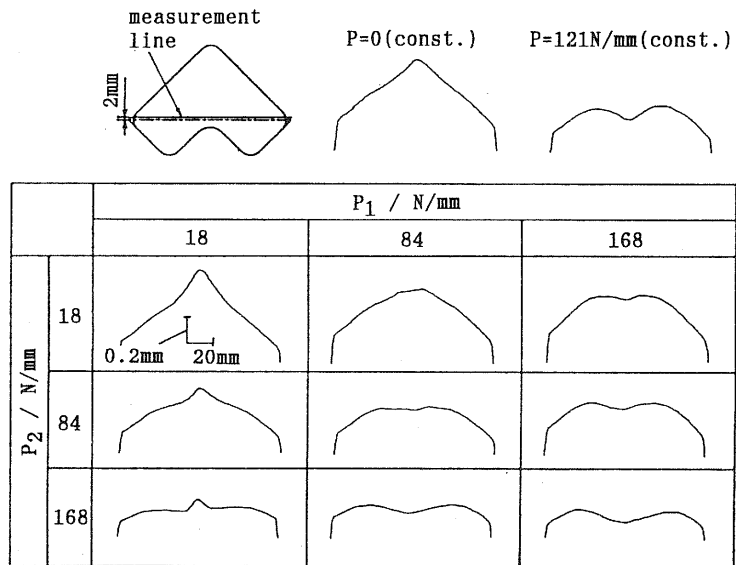


図7 L字型容器の底部形状の測定結果 (SPCE, $L=35\text{mm}$)

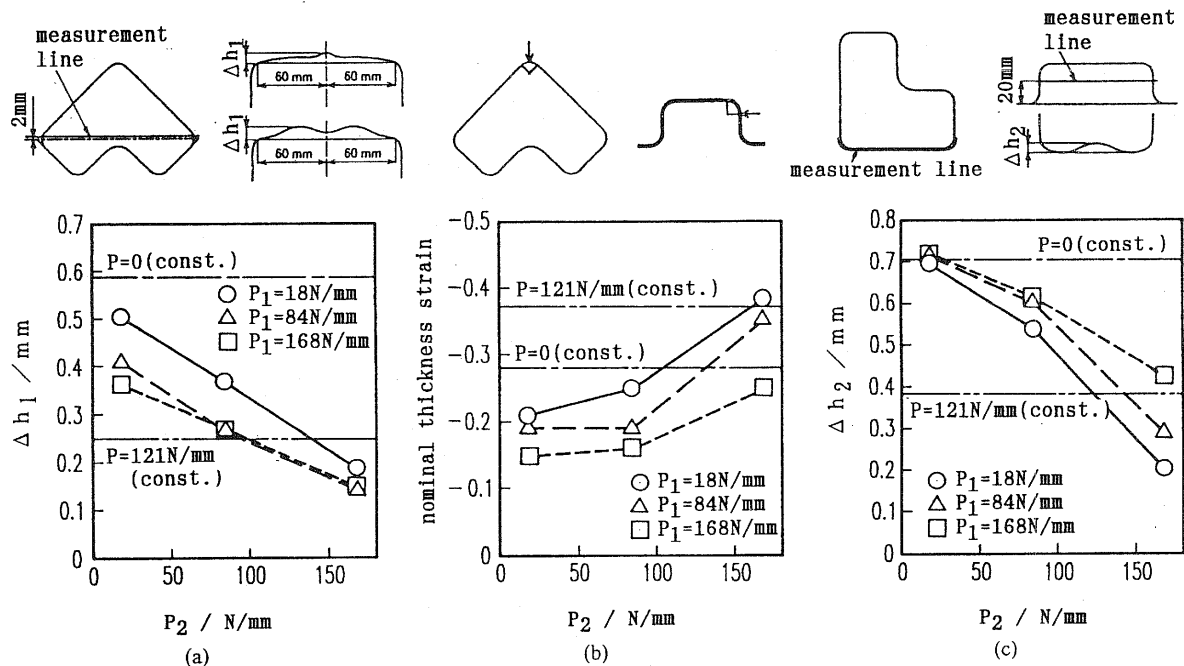


図8 (a)容器底部の肉余り高さ, (b)ポンチ肩破断危険部の板厚ひずみ, (c)側壁部のベコ量の測定結果 (SPCE)

大きいほど Δh_2 は小さくなる。結果, $P_1 = 18$ N/mm, $P_2 = 168$ N/mm のとき Δh_2 は最小となる。この時の Δh_2 は $P=0$ 一定, $P=121$ N/mm 一定のときよりも小さく, ビード張力の制御効果が確認された。

4.2.2 SUS304における実験結果と考察

容器底部形状の測定結果を図9に示す。定圧しわ押え下で, (i)しごきビードをかけない場合と, (ii)一定のビード押し力 $P=186$ N/mm (ポンチ肩割れが生じない範囲での最大押し力) を作用させた場合とを比較すると, 後者において肉余り量が 37% 低減した。さらに, (iii)ポンチ肩F部

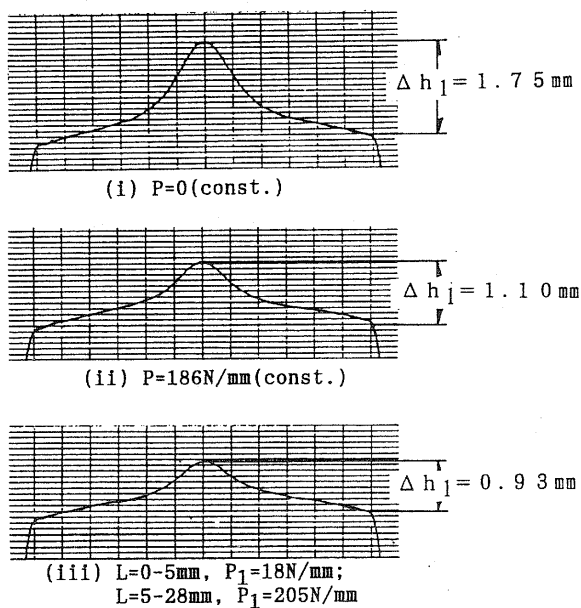


図9 容器底部の肉余り高さ (SUS304, $L=28$ mm) (垂直方向目盛り 0.1 mm, 水平方向目盛り 10 mm)

(図5参照)における割れを防ぐために, ポンチストローク $L=5$ mm まで $P=0$ とし, その後 $L=28$ mm まで $P_2 = 205$ N/mm (本サーボ弁で得られる最大許容押し力) で絞った場合には, 肉余り量 Δh_1 が(i)より 47% 減少し, ビード張力の制御効果が確認された。

A5182-O 材では, ビード張力を全くかけない場合でもポンチ肩F部で素板が割れ成形不能であった。

5. 斜円錐台容器の深絞り実験

5.1 実験方法

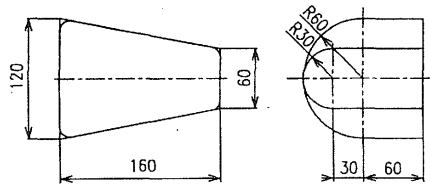
使用したポンチ寸法を図10(a)に示す。前部半径 30 mm, 後部半径 60 mm, 長さ 160 mm の斜円錐台形状である。ポンチ角部丸味半径は 10 mm, ダイス肩部丸味半径は 10 mm, ポンチとダイスのクリアランスは 1.2 mm である。供試材は A5052-O と SPCE を用いた。

しわ押え板の詳細を図10(b)に示す。しごきビードは, 容器側面に4個 (①②③④), 容器後部に2個 (⑤, ⑥), 計6個が組み込まれている。

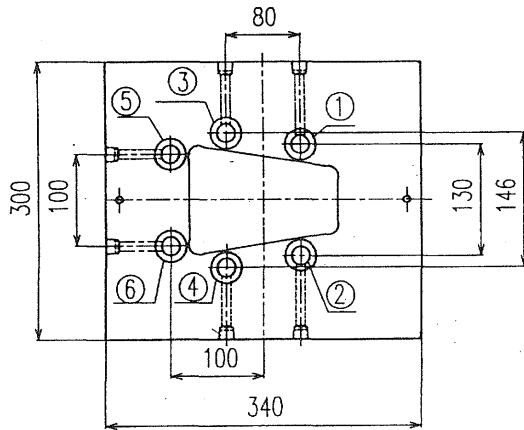
5.2 実験結果と考察

深絞り行程中のビード押し力を一定に保った場合について, 容器の概観写真の一例を図11に示す。種々の条件下での実験の結果, ビード押し力が増加するほどしわが減り, 最大許容ビード押し力 (A5052 では 6.15 kN, SPCE では 7.69 kN) において, しわがほぼ除去されることがわかった¹²⁾。またしわの除去には, ⑤⑥の位置にビード張力を作用させることが効果的であることが確認された。

なお, 本しごきビードを適用する場合, 容器内表面にはビードのしごき痕が残るので注意を要する。一方, 容器外表面はダイス面に押し付けられるので, 多少の光沢を有する。しかししごき痕は現れないので, 製品外観が損なわれ

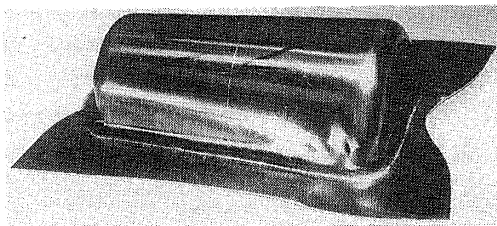


(a) ポンチ

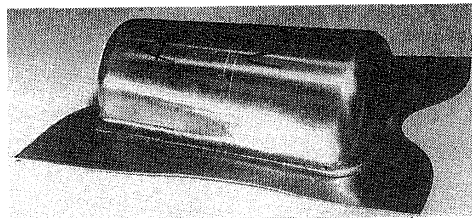


(b) しわ押え板

図10 斜円錐台容器成形用のポンチとしわ押さえ板



しごきビード不使用



しごきビード使用

図11 しごきビードによる斜円錐台容器のしわの抑制効果 (A5052, ビード1個当たり押し力: 6.15kN)

ることはない。

6. 結 言

金型の知能化のための基礎研究として、油圧制御式しごきビードを組み込み、局所的にかつ実時間でビード張力を制御する機能を備えた「ビード張力自在制御金型」を考案した。以下の実験的知見を得た。

1)提案した油圧制御式しごきビードの張力特性を測定した結果、ビード押し力の増加に伴って、ビード張力がなめらかに増加することが確認された。すなわち本しごきビードを用いれば、ビード押し力(油圧)を制御することによ

りビード張力を容易に制御できるので、加工中の張力が一定である従来型のビードに比べて、材料流動の制御能力が格段に向上すると考える。また、ビード張力を制御するのに、しわ押え力全体を変化させる必要がないので、省エネルギーの観点からも有利なプレス加工工程を構築できる。

2)本しごきビードを組み込んだ金型を用いて基礎的な成形実験を行い、(i)2次元引張曲げ成形におけるスプリングバック抑制効果、(ii)L字形深絞り容器における成形性ならびに形状精度の向上効果、(iii)斜円錐台深絞り容器におけるしわ抑制効果、を確認した。

3)今後の課題として、ビード張力の最適変化パターンならびにしごきビードの最適配置を決定するための方法論の確立が必要である。このためには、FEMシミュレーションなどによる材料流れの事前予測に加えて、最適ビード張力を生成するための判断材料(情報)を得る手段として、センサーによる材料変形の実時間計測手法の確立が重要な技術開発課題となる。

最後に、本研究遂行にあたり貴重な御示唆を賜った日本工業大学学長神馬敬先生、金型の設計・製作にあたり貴重な御助言・御援助を賜ったアイダエンジニアリング株式会社ならびに日産自動車株式会社、文献3)を御教示下された岩松真之氏、可動ビード(文献5)の典拠について御教示下された東京都立大学名誉教授宮川松男先生、文献6)を頂戴したトヨタ自動車株式会社伊倉真氏に厚く御礼申し上げます。また供試材を御提供下された川崎製鉄株式会社、スカイアルミニウム株式会社、日本金属工業株式会社に御礼申し上げます。

本研究は天田金属加工機械技術振興財団研究開発助成ならびに文部省科学研究費補助金(奨励研究(A))の援助を受けた。あわせて御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 真鍋健一・添田健太郎・長島敏幸・西村 尚、塑性と加工、33-375(1992)、423。
- 2) 村田篤信・恵比根美明・松居正夫：塑性と加工、33-375(1992)、411。
- 3) Hoffmann, H. & Schneider, F.: Werkstatt u. Betrieb, 122-5(1989)、363。
- 4) 氏原 新・広瀬洋三：塑性と加工、33-375(1992)、373。
- 5) プレス加工ノウハウ編集委員会編：プレス加工ノウハウ100題(改訂版)、(1981)、168、日刊工業新聞社。
- 6) 特開平3-71932(2)。
- 7) 桑原利彦・神馬 敬・松岡 功：アマダ技術ジャーナル臨時増刊号、(1990)、1。
- 8) 桑原利彦・高橋 進・秋山浩二・伊藤健治・宮下洋介：塑性と加工、36-410(1995)、203。
- 9) 益田森治・室田忠雄：改訂 工業塑性力学、(1981)、161、養賢堂。
- 10) 神馬 敬・桑原利彦・崔 淳哲：塑性と加工、26-294(1985)、744。
- 11) 平岩正至・近藤一義：機論C、49-440(1983)、695。
- 12) 桑原利彦・小林彰久・高橋進：45回塑加連講論、(1994)、351。

*東京農工大学工学部 機械システム工学科 助教授