

# 技術紹介

## 2

## 小型高液圧絞り成形法の研究開発

### Research and development of compact high-pressure drawing method

木村 心哉

Shinya Kimura

コネクタ事業部 製品開発 1 部 主任

**キーワード:** 液圧絞り成形、深絞り成形、マイクロフォーミング、対向液圧、周液圧**Keywords :** Hydromechanical deep drawing, Micro forming, Counter pressure, Radial pressure

### 要 旨

本稿では、新たに考案した高圧の液圧生成プロセスを金型内で完結した液圧絞り成形法を紹介いたします。最大の特徴は、金型内に設けた液圧生成ピストン構造により高液圧を能動的に生成することが可能となることです。また、金型自体を小型化することで得られる寸法効果のメリットを活用し、慣用絞り加工同様の設備で液圧絞り加工を可能にしました。考案した成形法を具体化した小型液圧絞り成形装置を開発し、液圧生成実験およびマイクロ円筒液圧絞り成形実験を行いました。その結果、金型内に設置したピストンが 100 MPa 以上の高液圧を能動的に生成できることを実証しました。パスカル原理に基づいており、金型を小型化することで小型化プレス機(50 kN)動力のみで実現しております。また、高液圧の対向液圧および周液圧を能動的に加えることで、マイクロサイズの絞り成形性を大幅に向上させることに成功しました。更に、考案した成形法は、単動プレス機や順送金型に適用することで、工程毎に最適化された条件でワンモーション液圧絞り加工が可能となります。

### SUMMARY

We developed a new hydraulic drawing method that completes high-pressure fluid generation within the mold. It features a hydraulic pressure generating piston structure inside the mold, allowing for active high hydraulic pressure generation. By downsizing the mold, we leverage the dimensional effect to perform hydraulic drawing using existing equipment. Our compact hydraulic drawing device demonstrates the effectiveness of our forming method, generating over 100 MPa of hydraulic pressure. We achieve this using a downsized press machine (50 kN) based on Pascal's principle. Applying high opposing and peripheral hydraulic pressure significantly improves the drawing formability of micro-sized products. Furthermore, our forming method can be applied to single-action press machines or progressive dies, enabling optimized one-motion hydraulic drawing for each process.

## 1. はじめに

近年、スマートフォンなど電子製品の多機能化が進み、製品内部の部品点数が増加しています。例えば、Wi-Fi7 など高速通信化へ対応するためには複数の帯域での受信が必要となるためアンテナ数が増加し、それらを繋ぐコネクタの数も増加傾向です。そのため、部品単体の小型化への要求が以前より高まり、内装コネクタの外形サイズは数年で 50%以下に減少しています。コネクタの金属部品に着目すると、マイクロスケールでの絞り加工が求められます。

マイクロスケールでの絞り加工では、寸法効果の影響を受けて成形性が低下することが知られています。<sup>1-12)</sup>材料板厚に対し結晶粒径サイズが相対的に大きくなり、材料の延性や強度が低下するためです。また、材料と金型の寸法関係が変化するため、絞り加工では  $D/t$  ( $D$ : ブランク直径、 $t$ : 板厚) が低下し、相対的に厚肉絞りの条件に該当します。更に、金型の肩  $R$  寸法 (パンチ、ダイ) が小さくなるため、絞り荷重の増加や、曲げ変形による板厚減少を起こしやすくなります。慣用絞り成形法では、目的の深絞り形状を形成できない問題が発生します。

成形性を向上させる方法として、様々な特殊絞り成形法が開発されています。<sup>13-17)</sup>その一つに、液圧絞り成形法があります。<sup>18-24)</sup>対向液圧は、材料をパンチ金型に押し付ける方向に作用し、材料とパンチ金型間の摩擦保持効果を得ることができます。周液圧は、フランジ部の板厚面全周に作用し、絞り荷重低減効果を得られます。これら液圧効果によって、大幅に成形性を向上させることが可能です。したがって、マイクロ化に伴う成形性の低下という問題を解決する手法として、液圧絞り成形法は有効であると考えられます。

しかし、液圧絞り成形法をマイクロスケールに適用した研究例は少なく、また明確な深絞り性向上を示している報告はありませんでした。<sup>25-26)</sup>その理由としてマイクロスケール下で液圧効果を得るには、高液圧が必要になることがキーポイントだと考えられます。マイクロスケールのプレス加工では、材料の相対的な板厚が厚くなるため、材料を塑性変形させるためには高圧力が必要になるためです。<sup>27)</sup>先行研究の多くが液圧 60 MPa 以下の検証であるため、液圧が不足している可能性があります。<sup>28)</sup>従来の液圧生成方法は、絞りパンチストロークに依存する受動的な液圧生成になるため、成形初期段階から高液圧を生成することが非常に困難となります。他にも液圧絞り成形法は設備的な課題を抱えており、大量の液体を扱うため、供給ポンプ、昇圧ポンプ、配管が必要になります。また、液圧反力が非常に大きく、大型のプレス機を必要とします。そのため、設備が大型化し、設備コストの増加を招くことになります。また、単型での使用が前提で、順送型への対応が困難です。

本稿では、マイクロスケール下で大幅な成形性向上と、慣用絞り同等の設備で液圧絞り成形を可能とする、画期的な液圧絞り成形法を紹介いたします。考案した液圧絞り成形法は、金型内に液圧生成ピストン構造を設け、100 MPa 以上の高圧の液圧生成プロセスを金型内で完結することが最大の特徴です。また、小型化した金型の寸法効果のメリットを活かすことで、慣用絞り成形同等の設備で、能動的に高液圧を生成することが可能です。本技報ではマイクロ円筒絞り加工において対向液圧、周液圧が成形性に及ぼす影響を明らかにし、提案する液圧絞り成形法の有効性を明らかにします。

## 2. 小型液圧絞り成形法の考案

考案した液圧絞り成形法の金型コンセプトを図1に示します。液圧生成用のピストンを金型内に実装します。液室はピストンシリンダー部とダイキャビティ部に繋がっており、ピストンに圧縮荷重を加える事で、能動的に液圧を生成することが可能です。液体媒体は絞り加工用の潤滑油を流用し、液室を満たした状態で成形を開始します。生成された液圧は、圧力  $p = \text{荷重 } F \div \text{面積 } A$  のパスカル原理で予測することが可能です。ピストン直径が小さいほど低荷重で液圧を生成することができます。絞りパンチのストローク方向と、ピストンのストローク方向は同一で、プレス機のワンモーションで、同時に絞り加工と液圧生成が可能となります。液圧生成プロセスを金型内で完結できるので、供給ポンプ、昇圧ポンプ、配管が不要となり、慣用絞り成形同等の設備で対応可能です。また、順送型への対応が見込まれます。各工程に異なる仕様のピストン構造（例えば、ピストン長さ  $L$  を変更）を設けることで、液圧値や液圧生成のタイミングを可変することができ、スプリング構造を設けることで、調整レンジを拡大できます。プレス機のワンモーションで、工程毎に最適条件化された液圧絞り成形が可能です。

マイクロスケール下での液圧絞り成形は成形品の小型化に伴い金型を小型化できるので、以下のメリットが生まれます。一つは、必要な液体量を大幅に削減できます。液体量は体積なので、寸法の3乗で削減できます。液圧媒体として潤滑油の流用を見込めます。二つ目は、液圧反力を抑制できます。パスカル原理から、荷重は液圧を受ける面積で決まるため、反力は寸法面積の2乗で削減できます。液圧を受ける可動部は、液圧生成ピストン、しわ押さえ、絞りパンチ（材料を通して）の3カ所ですが、面積を最小限に抑える設計をすることで、液圧反力抑制と、低荷重での液圧生成が可能となります。従来のマクロスケール条件下では、液圧反力が非常に大きく、プレス機能力の限界で高液圧を断念している側面がありました。一例として、液圧絞り成形法が実用化されている自動車ボディサイズとコネクタのシェルサイズを比較すると、寸法は約  $1/1,000$  になりますが、液圧反力は  $1/1,000,000$ 、液体量は  $1/1,000,000,000$  まで削減できます。

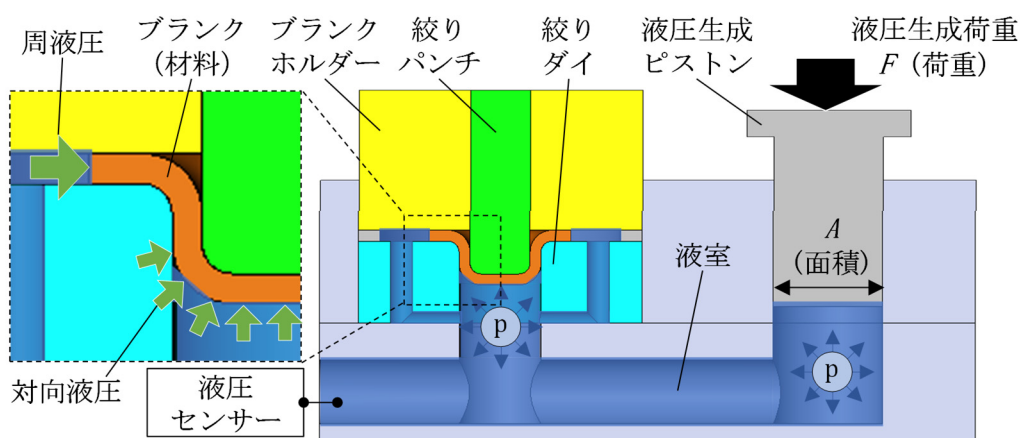


図1. 考案した液圧絞り成形法の金型コンセプトイメージ

### 3. 小型液圧絞り加工装置の開発および実験条件

金型内に液圧生成ピストンを実装した、液圧絞り成形装置を開発しました。考案した液圧生成方法の実現性およびマイクロスケール下での液圧効果の検証を行います。

実験装置を図 2 に示します。金型構造は、先に説明した図 1 と同様です。各寸法を表 1 にまとめます。絞り性に及ぼす材料サイズの違いの影響を調査するため、パンチ直径を基準に  $d_p=4.75\text{ mm}$ 、 $2.75\text{ mm}$ 、 $1.00\text{ mm}$  の 3 種類を評価します。液圧の種類は、対向液圧と、周液圧の 2 種類を評価します。なお、周液圧の場合、同時に対向液圧が付与されます。金型のシーリング構造は、ピストン、しわ押さえ、金型合わせ部にパッキンを装着し、液室を準密閉化しています。液圧室に圧力センサーを設置します。しわ押さえ方法は、定隙間方式を採用しています。

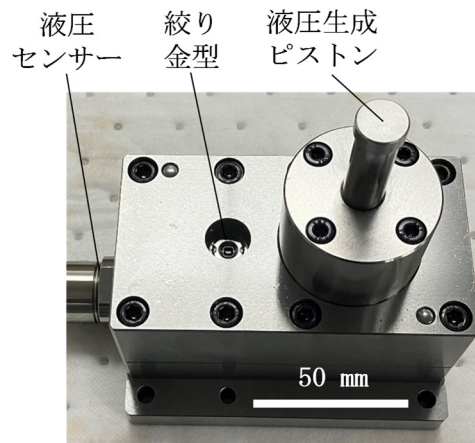
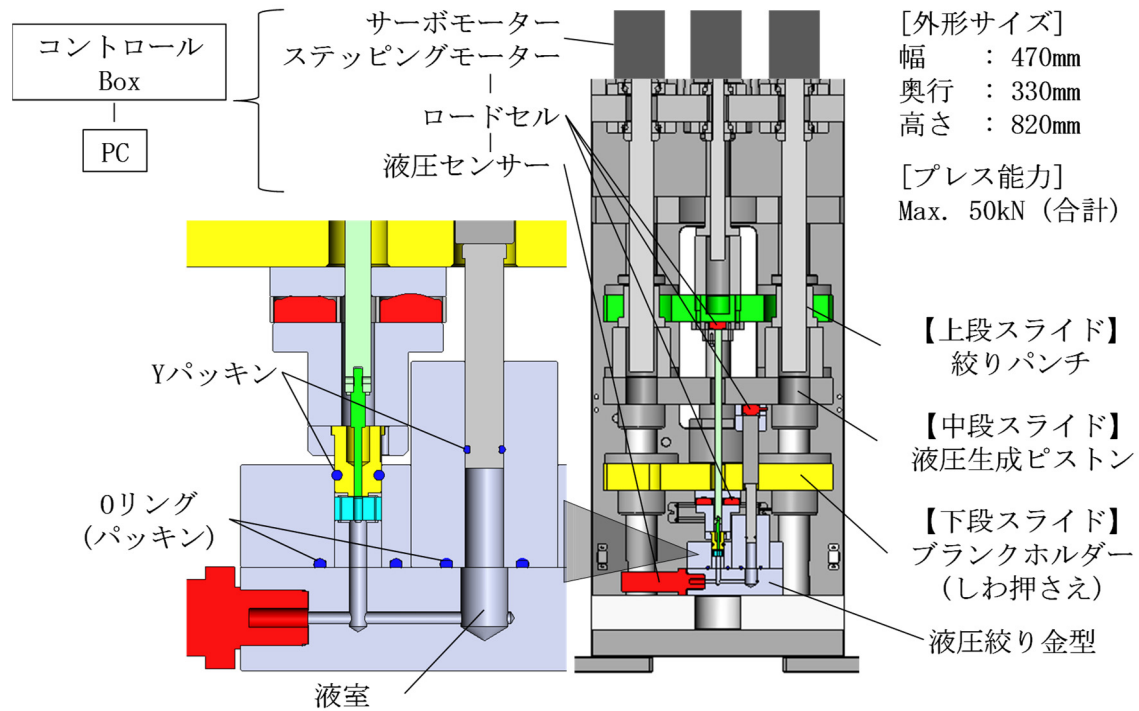
提案したコンセプトを試験的に評価するため最大荷重  $50\text{ kN}$  の 3 段スライドのプレス機を使用します。3 枚のスライドを独自に制御することが可能で、下段スライド：しわ押さえ、中段スライド：液圧生成ピストン、上段スライド：絞りパンチを割当てます。液圧値、各荷重値（絞り荷重、しわ押さえ荷重、液圧生成ピストン荷重）、ストローク量の制御およびログ取得が可能です。

評価用材料は、Stainless-steel (SUS316L) を使用します。機械的性質は、ヤング率  $E=193\text{ GPa}$ 、降伏応力  $\sigma_y=261\text{ MPa}$ 、引張強さ  $\sigma_B=621\text{ MPa}$ 、伸び  $\varepsilon=57\%$  を有します。液圧生成実験は、ピストン直径  $d_{pis}=10\text{ mm}$ 、 $13\text{ mm}$ 、 $15\text{ mm}$  の 3 種類を評価します。液圧生成の可否、必要な荷重、ストローク量を確認します。しわ押さえ荷重および液圧値は、目標値を保持するよう PID 制御します。

液圧絞り成形実験は、液圧生成実験同様、しわ押さえ荷重および液圧値が目標値を保持するよう PID 制御します。液圧効果検証は、慣用絞り成形の限界絞り比 ( $LDR$ ) と比較します。絞り比 ( $DR$ ) は、成形前の材料直径  $D$  を絞りパンチ直径  $d_p$  で除した値です。

表 1. 材料および金型寸法一覧

絞りパンチ直径				
(代表サイズ) : $d_p$	[mm]	4.75	2.75	1.00
材料(ブランク)直径 : $D$	[mm]	8.0-12.5	4.5-7.5	1.8-2.5
材料(ブランク)厚さ : $t$	[mm]	0.10	0.10	0.08
ダイ直径 : $d_d$	[mm]	5.00	3.00	1.21
パンチ肩R : $r_p$	[mm]	0.40	0.40	0.20
ダイ肩R : $r_d$	[mm]	0.40	0.40	0.10

液圧絞り金型  
(現物写真)

複動3段式 卓上プレス機

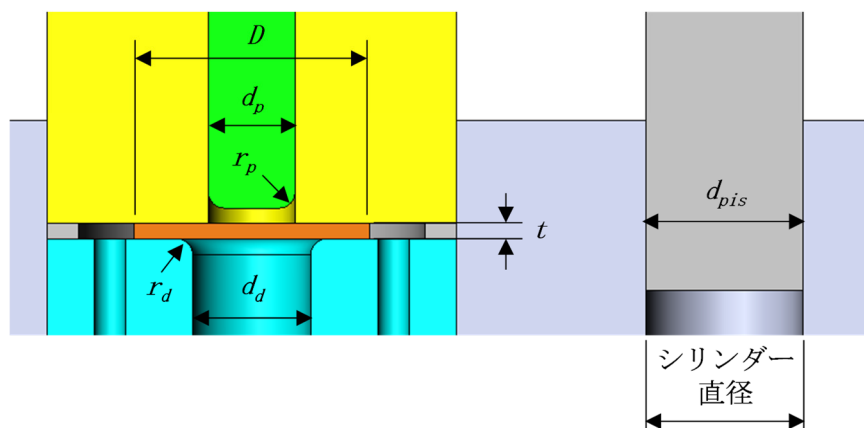


図 2. 液圧絞り加工実験装置

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 液圧生成実験

金型内に設置したピストンのストローク量に応じて、液圧がパスカル原理に基づいて増加するかを検証します。

図3は、ピストンストロークと、液圧値およびピストン荷重の関係を示したものです。ピストンストローク量の増加とともに生成された液圧は増加していることがわかります。最大液圧は  $d_{pis}=13$  mm を使用し、ストローク量約 9 mm のときに 110 MPa を実現することができました。また、目標液圧（110 MPa）に到達後、保持できることを確認しました。液圧生成に必要なピストン荷重は、パスカル原理から算出した理論値とほぼ一致しています。実験値の荷重がパスカル原理から計算された荷重よりも若干大きい傾向を示しましたが、これはピストンの摺動抵抗に起因するものだと考えられます。また、液圧を上昇させるためにはある程度のピストンストローク量が必要になることがわかりました。この理由としては液室が準密閉レベルであることが挙げられます。しわ押さえおよびピストンの摺動用パッキンから、少量の液体が流出していることを確認しました。

図4に、 $d_{pis}=10$  mm、15 mm の異なる条件で液圧生成した場合のピストンストロークと、液圧値およびピストン荷重の関係を示します。 $d_{pis}$  が小さくなるほど液圧生成に必要なピストンストローク量が増加します。これは、先に述べた準密閉レベルの液室が影響しています。さらに  $d_{pis}$  が小さくなると単位ストロークあたりの液体流量が減少するため、必要ストローク量が増加したと考えられます。液圧生成に必要なピストン荷重は、 $d_{pis}$  が小さくなるほど低下します。 $d_{pis}$  面積に比例しており、パスカル原理と一致しています。

以上の結果から、金型内に設置されたピストンによって 100 MPa 以上の高液圧が、パスカル原理に基づいて生成できることがわかりました。また、小型金型の寸法効果メリットにより、液体供給ポンプ、昇圧ポンプを使わず小型プレス機（50 kN）動力のみを使用して高液圧が生成できることがわかりました。

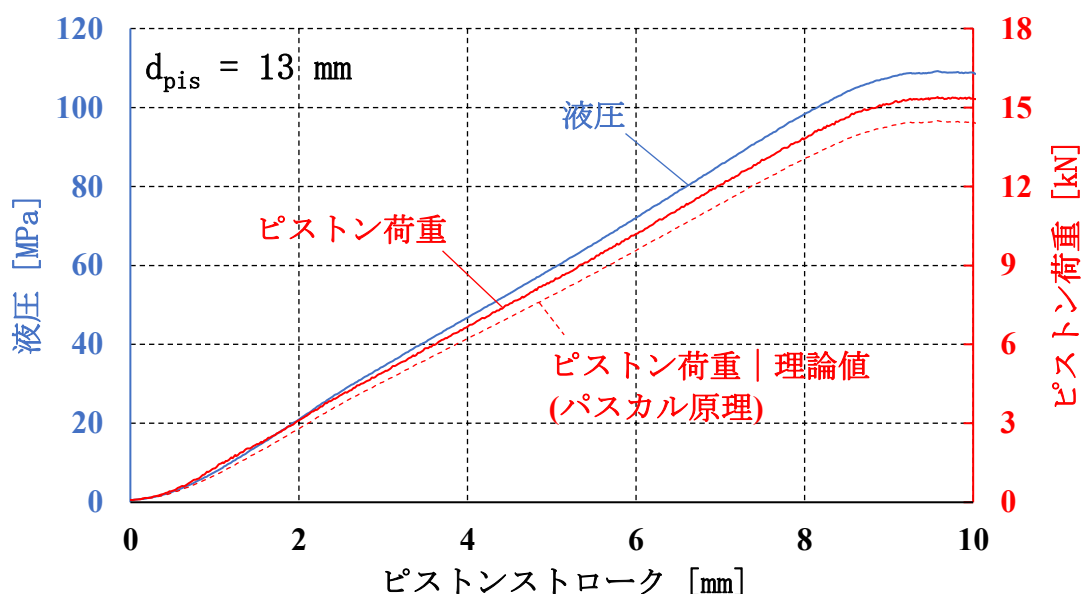


図3. ピストンストロークと液圧値およびピストン荷重の関係

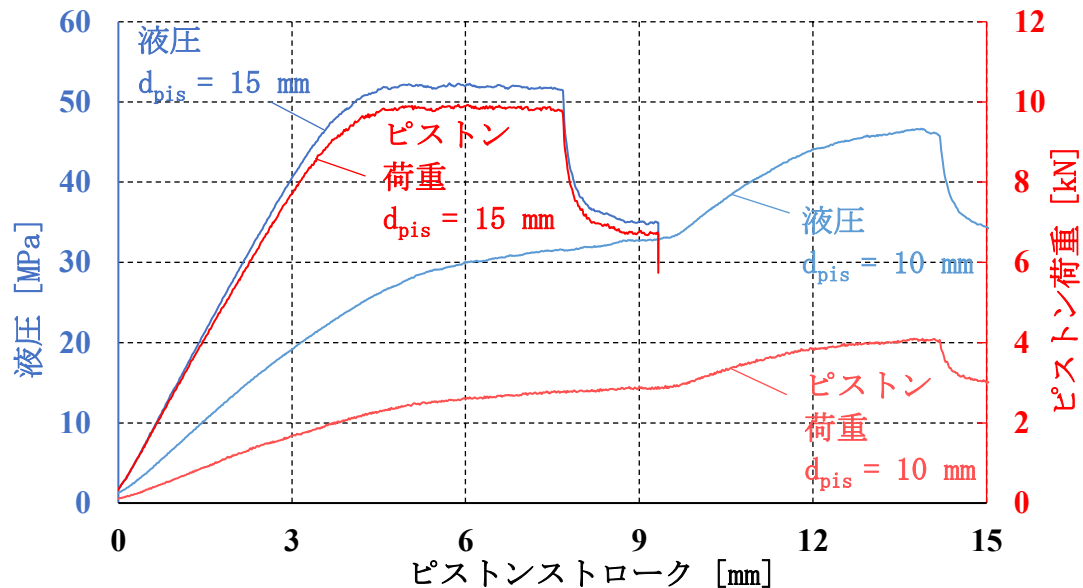


図 4. 異なるピストン直径毎のピストンストロークと液圧値およびピストン荷重の関係

#### 4.2 マイクロ円筒液圧絞り成形実験

マイクロ円筒絞り加工において、高圧力の対向液圧、周液圧が成形性に及ぼす影響を検証し、提案する液圧絞り成形法の有効性を確認します。

図 5 に、各条件における  $DR$  と絞り成形可否の関係を示します。何れのサイズにおいても、慣用絞り、対向液圧、周液圧の順に成形領域が拡大することがわかります。特に  $d_p=1\text{ mm}$  においては、周液圧の負荷のみでしか絞り成形は成功しませんでした。また、図 6 は、 $LDR$  に及ぼす最大液圧値および寸法の影響を示したものです。図 6 (a) に示すように対向液圧負荷時には慣用絞りと比較し  $d_p=4.75\text{ mm}$ 、 $2.75\text{ mm}$  にて深絞り性が向上しています。その一方で、 $d_p=1\text{ mm}$  においては本試験条件の最低設定  $DR$  である 1.8 で絞ることができませんでした。それに対し、図 6 (b) は周液圧を負荷した際はすべての  $d_p$  のパンチサイズにおいて、深絞り性を向上させることができています。また、高液圧になるほど深絞り性が向上することがわかりました。

周液圧負荷時の液圧成形における液圧およびパンチ荷重の成形中の推移を調べるために  $LDR$  が最も高くなる  $d_p=2.75\text{ mm}$  の周液圧条件における、絞りパンチストロークと液圧値および絞り荷重の関係を図 7 に示します。パンチストローク  $0.25\text{ mm}$  の成形開始直後にピストンを約  $10\text{ mm}$  ストロークすることで、 $100\text{ MPa}$  近い液圧を生成しています。材料には対向液圧および周液圧が付与され、この段階では周液圧効果が有効で、対向液圧による摩擦保持効果は得られていないと推測します。パンチストロークが約  $2\text{ mm}$  に達した時、最大液圧値  $115\text{ MPa}$  を記録し、対向液圧および周液圧効果が得られます。その後、液圧値は  $90\text{ MPa}$  前後まで減圧し、成形終盤まで保持されます。パンチストロークが  $4.5\text{ mm}$  に達すると、材料のフランジ部がダイ内部に流入し終わり、一気に減圧します。能動的に高液圧を生成することで、成形初期は周液圧効果、成形中期～終期は対向液圧および周液圧効果が得られ、成形性が大きく向上したと推測します。

図 8 に  $d_p=2.75$  mm の慣用絞り、対向液圧、周液圧の各条件における *LDR* サンプルを示します。マイクロスケール下において  $d_p=2.75$  mm に対し絞り深さ約 4 mm の驚異的な深絞り成形を実現することができました。一方、 $d_p=1.00$  条件では、対向液圧効果を得られませんでした。慣用絞り同様、成形初期にパンチ肩 *R* 部で材料破断を起こします。寸法効果の影響を大きく受け、減肉した材料の強度が、フランジ部の絞り変形に必要な応力に耐えられなかったためです。対向液圧効果を得る前に、破断してしまったと推測します。そのため、成形初期から効果を得られる周液圧が有効となり *DR*: 2.10 の成形に成功しています。図 9 にサンプルを示します。非常に小さいサイズの深絞りカップを成形することができました。図 6 の結果からも、小型化するほど高液圧が必要になる傾向を示しています。特に、周液圧絞り成形は、マイクロスケールの絞りにおいて有効であることがわかりました。

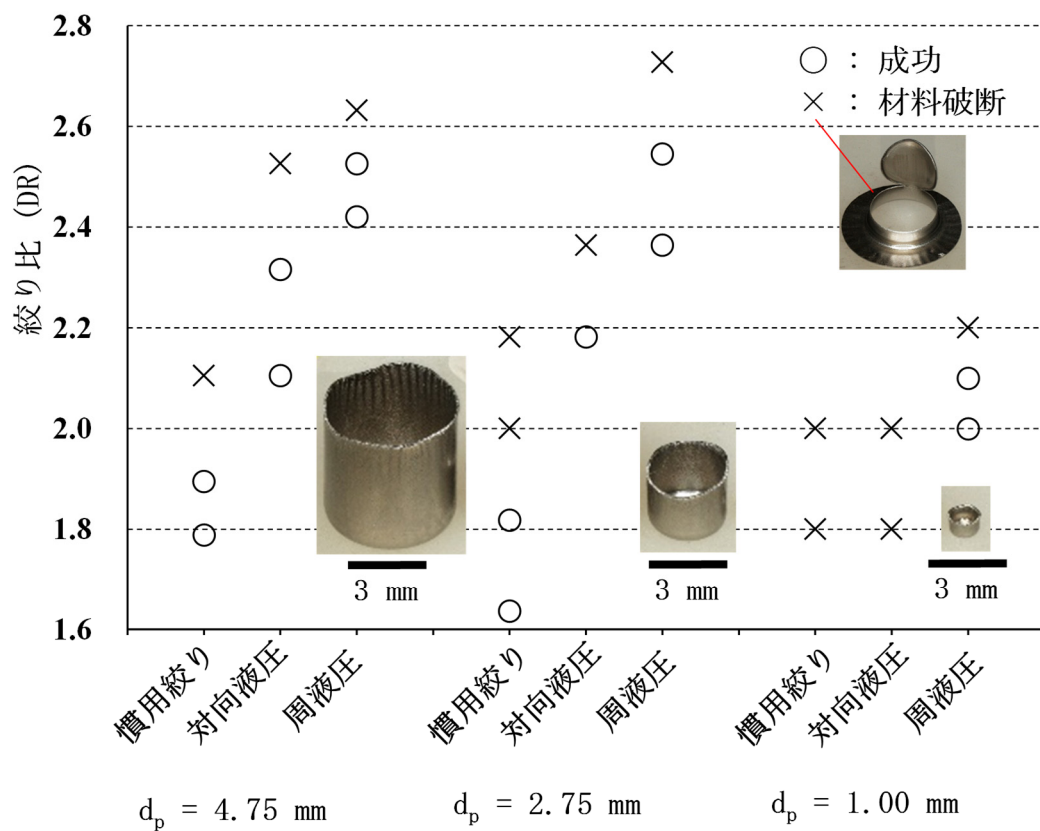
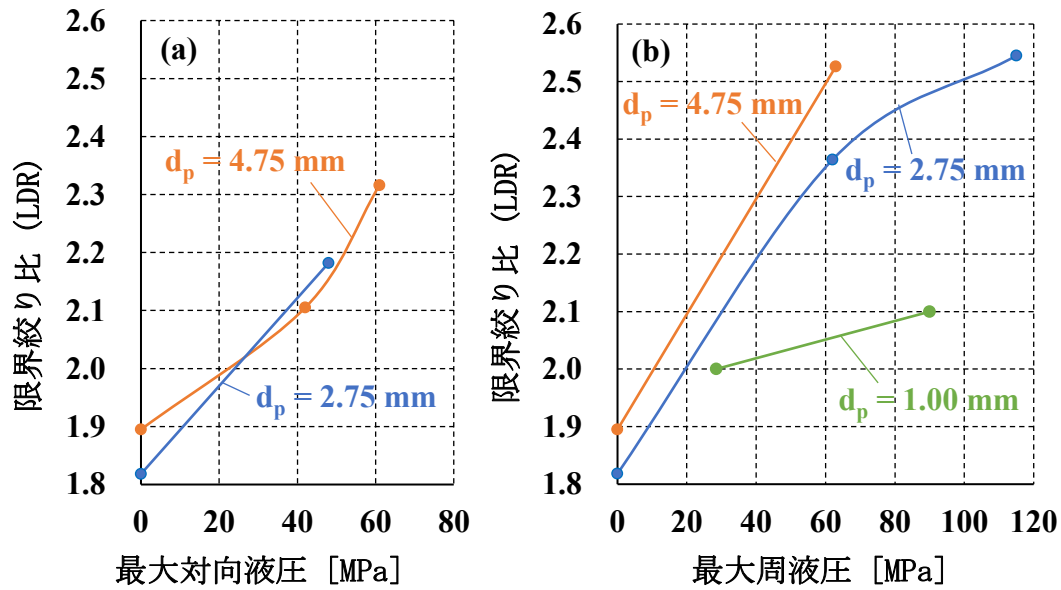
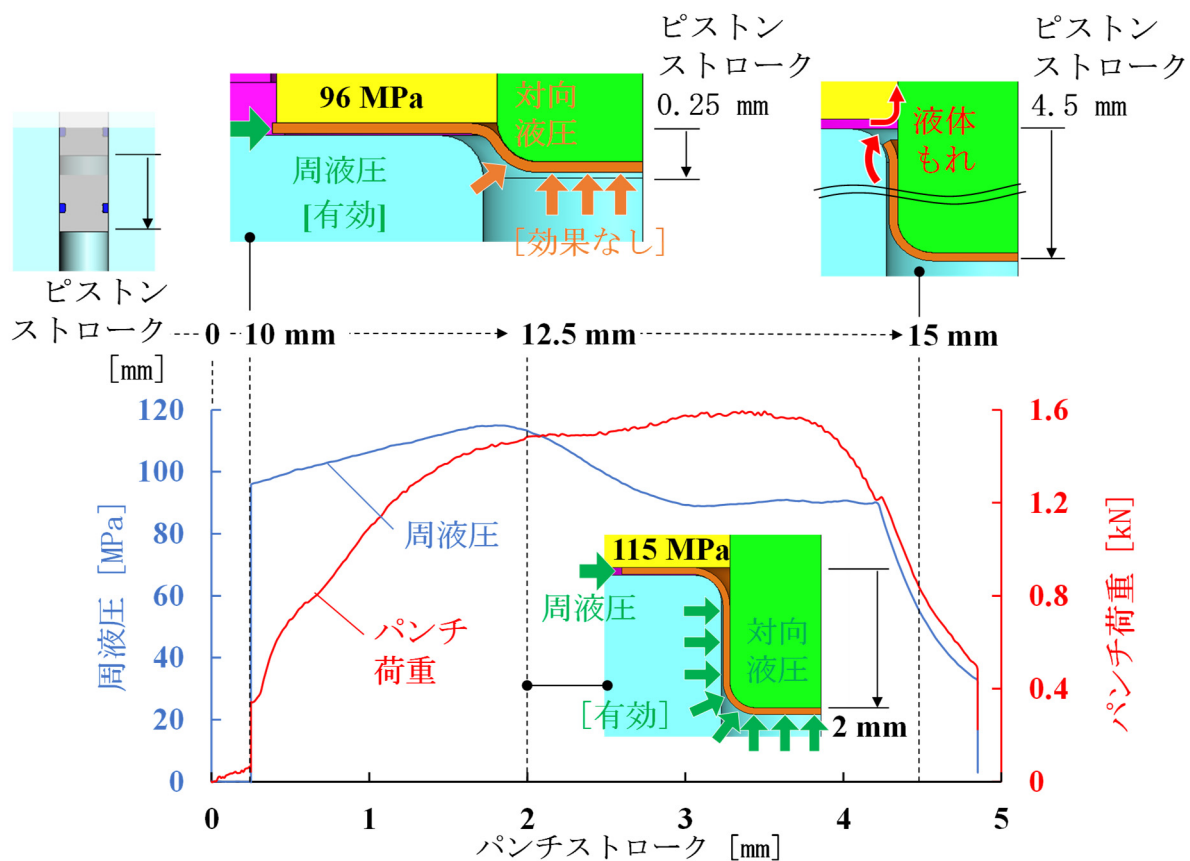


図 5. 各条件における絞り成形可否一覧

図 6.  $LDR$  に及ぼす最大液圧値および寸法の影響図 7.  $d_p=2.75$  mm 周液圧  $LDR$  条件の絞りパンチストロークと液圧値および絞り荷重の関係

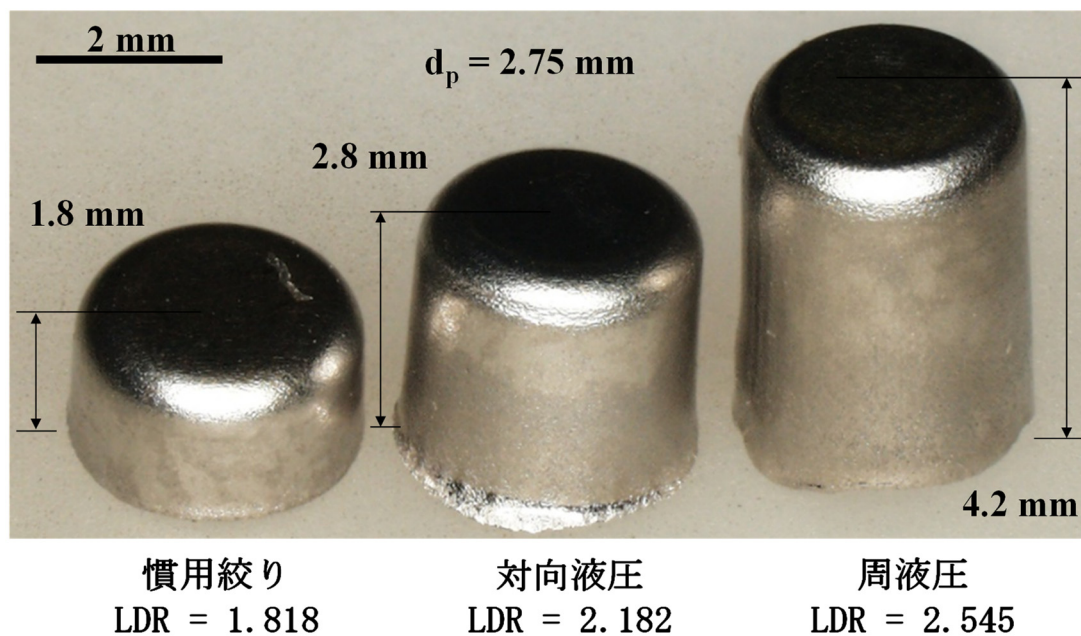


図 8.  $d_p=2.75 \text{ mm}$  の慣用絞り・対向液圧・周液圧各条件における  $LDR$  サンプル

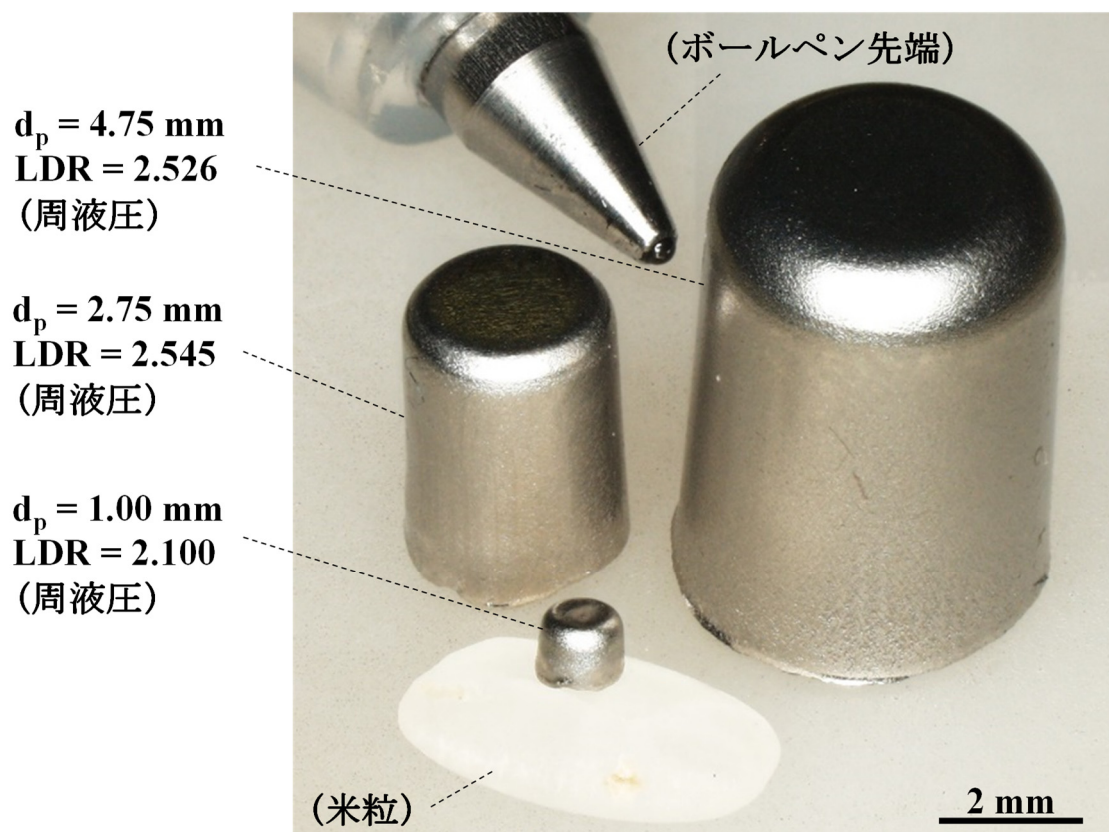


図 9. 各  $d_p$  の周液圧  $LDR$  サンプル

## 5. 結論

本稿では、高圧の液圧生成プロセスを金型内で完結した液圧絞り成形装置を使用し、液圧生成実験およびマイクロ円筒液圧絞り成形を行いました。その結果、以下の結果が得られました。

(1) 金型内に設置されたピストンによって 100 MPa 以上の高液圧をパスカル原理に基づいて能動的に生成することがわかりました。

(2) 金型を小型化することで、小型プレス機（50 kN）動力のみを使用して 100 MPa 以上の高液圧を生成することがわかりました。

(3) 高圧力の対向液圧、周液圧を能動的に付与することで、マイクロスケール下で大幅に深絞り性を向上することがわかりました。

以上の結果より、提案する液圧絞り成形法が、マイクロスケール下での成形性向上に有効であることがわかりました。更に、図 10 に示す様に、弾性体構造やリリース弁を用いてピストンストロークの確保および有効レンジを広げることで、単動プレス機において本液圧絞り成形法が可能であると考えます。また、順送型では、ピストン仕様等の変更で、工程毎に最適条件化された液圧絞り成形が、ワンモーションで実現できる可能性があります。

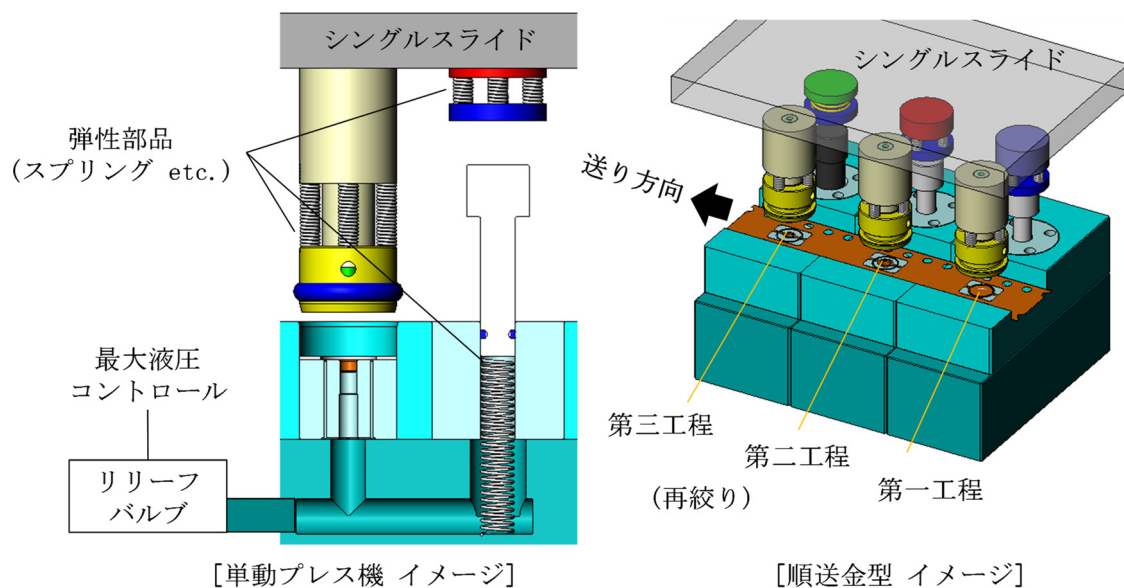


図 10. 本成形法の応用イメージ

## [本技報について]

本技報内容は、筆者が執筆した下記論文内容になります。

Kimura S, Furushima T (2023) New small-scale hydromechanical deep-drawing process using die-integrated active high-pressure generation system. *International Journal of Material Forming* <https://doi.org/10.1007/s12289-023-01773-0>

## [謝辞]

本研究開発において、多大なご協力をいただきました国立大学法人東京大学生産技術研究所の古島剛准教授に深く感謝申し上げます。

## [参考文献]

- 1) Geiger M, Kleiner M, Eckstein R, Tiesler N, Engel U (2001) Microforming. *CIRP Annals* 50, 445–462. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62991-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62991-6)
- 2) Vollertsen F (2008) Categories of size effects. *Production Engineering* 2, 377–383. <https://doi.org/10.1007/s11740-008-0127-z>
- 3) Engel U (2006) Tribology in microforming. *Wear* 260, 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.04.021>
- 4) Vollertsen F (2012) Effects on the deep drawing diagram in micro forming. *Production Engineering* 6, 11–18. <https://doi.org/10.1007/s11740-011-0355-5>
- 5) Hu Z (2011) Realisation and application of size dependent FEM-simulation for deep drawing of rectangular work pieces. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4, 90–95. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.05.006>
- 6) Fu MW, Chan WL (2011) Geometry and grain size effects on the fracture behavior of sheet metal in micro-scale plastic deformation. *Materials and Design* 32, 4738–4746. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.039>
- 7) Simons G, Weippert C, Dual J, Villain J (2006) Size effects in tensile testing of thin cold rolled and annealed Cu foils. *Materials Science and Engineering* 416, 290–299. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.10.060>
- 8) Chen CH, Gau JT, Lee RS (2009) An Experimental and Analytical Study on the Limit Drawing Ratio of Stainless Steel 304 Foils for Microsheet Forming. *Materials and Manufacturing Processes* 24, 1256–1265. <https://doi.org/10.1080/10426910903129786>
- 9) Yalçinkaya T, Özdemir İ, Simonovski I (2018) Micromechanical modeling of intrinsic and specimen size effects in microforming. *International Journal of Material Forming* 11, 729–741. <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1390-3>
- 10) Furushima T, Nakayama T, Sasaki K (2019) A new theoretical model of material inhomogeneity for prediction of surface roughening in micro metal forming. *CIRP Annals* 68, 257–260. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.057>
- 11) Saotome Y, Yasuda K, Kaga H (2001) Microdeep drawability of very thin sheet steels. *Journal of*

- Materials Processing Technology 113, 641–647. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00626-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00626-4)
- 12) Behrens G, Trier FO, Tetzl H, Vollertsen F (2016) Influence of tool geometry variations on the limiting drawing ratio in micro deep drawing. *International Journal of Material Forming* 9, 253–258. <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1228-9>
- 13) Savaş V, Seçgin Ö (2010) An experimental investigation of forming load and side-wall thickness obtained by a new deep drawing die. *International Journal of Material Forming* 3, 209–213. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0672-9>
- 14) Tommerup S, Endelt B (2009) Improving the quality of deep drawn parts using variable blank holder force. *International Journal of Material Forming* 2, 809–812. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0609-3>
- 15) Pepelnjak T, Kayhan E, Kaftanoglu B (2019) Analysis of non-isothermal warm deep drawing of dual-phase DP600 steel. *International Journal of Material Forming* 12, 223–240. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1400-0>
- 16) Jimma T, Kasuga Y, Iwaki N, Miyazawa O, Mori E, Ito K, Hatano H (1998) An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process. *Journal of Materials Processing Technology* 80–81, 406–412. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00195-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00195-2)
- 17) Irthiea IK, Green G (2017) Evaluation of micro deep drawing technique using soft die-simulation and experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89, 2363–2374. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9167-2>
- 18) Zhang SH, Danckert J (1998) Development of hydro-mechanical deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology* 83, 14–25. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00039-9)
- 19) Gelin JC, Delassus P (1993) Modelling and simulation of the aquadraw deep drawing process. *CIRP Annals* 42, 305–308. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62449-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62449-4)
- 20) Nakamura K, Nakagawa T (1986) Reverse deep drawing with hydraulic counter pressure using the peripheral pushing effect. *CIRP Annals* 35, 173–176. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61864-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61864-2)
- 21) Lang L, Danckert J, Nielsen KB (2004) Investigation into the effect of pre-bulging during hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44, 649–657. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.11.004>
- 22) Nakagawa T, Nakamura K, Amino H (1997) Various applications of hydraulic counter-pressure deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology* 71, 160 – 167. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00163-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00163-5)
- 23) Lang L, Danckert J, Nielsen KB (2004) Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure: Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 148, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.053>
- 24) Danckert J, Nielsen KB (2000) Hydromechanical deep drawing with uniform pressure on the

- flange. CIRP Annals 49, 217–220. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62932-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62932-1)
- 25) Lup L, Jiang Z, Wei D, Jia F (2021) A study of influence of hydraulic pressure on micro-hydromechanical deep drawing considering size effects and surface roughness. *Wear* 477:203803. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203803>
- 26) Luo L, Wei D, Wang X, Zhou C, Huang Q, Xu J, Wu D, Jiang Z (2017) Effects of hydraulic pressure on wrinkling and earing in micro hydro deep drawing of SUS304 circular cups. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 90, 189–197. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9380-z>
- 27) Mahabunphachai S, Koc M (2008) Investigation of size effects on material behavior of thin sheet metals using hydraulic bulge testing at micro/meso-scales. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48, 1014–1029. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.01.006>
- 28) Sato H, Manabe K, Ito K, Wei D, Jiang Z (2015) Development of servo-type micro-hydromechanical deep-drawing apparatus and micro deep-drawing experiments of circular cups. *Journal of Materials Processing Technology* 224, 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.05.014>