論文

サーボ式マイクロ対向液圧深絞り装置の開発と マイクロ円筒カップ成形実験

佐藤 英樹* 真鍋 健一** 伊藤 國吉***

Dongbin WEI**** Zhengyi JIANG****

Development of Servo-Type Micro-Hydraulic Deep-Drawing Apparatus and Micro Deep-Drawing Experiments of Circular Cups

Hideki SATO*, Ken-ichi MANABE**, Kuniyoshi ITO***,

Dongbin WEI**** and Zhengyi JIANG****

(Received on March 13, 2013)

A micro-hydraulic deep-drawing (MHDD) apparatus for manufacturing a micro-complex-shape components and increasing of drawn cup accuracy has been developed in this study. This apparatus with a simple forming process mechanism can achieve high dimensional accuracy using servo press mechanics with a double-action type, one-stroke forming process without transferring and positioning, force control, and fine flow rate control of the pressure medium. It is confirmed that the MHDD apparatus developed can prevent wrinkling by applying an appropriate constant gap and stably generate the counterpressure. Micro-drawn cups of 0.8mm diameter are successfully fabricated. Also, the effects of counterpressure on drawability and dimensional accuracy at the bottom of the cup are investigated for phosphor bronze, stainless-steel, and pure titanium foils with a thickness of 50μm. The appropriate counterpressure applied in MHDD results in wrinkling constraint and a reduction in frictional drawing force. Consequently, it is concluded that the forming limit and dimensional accuracy can be improved by MHDD.

Key words: micro sheet hydroforming, micro-hydraulic deep-drawing, servo press, counterpressure, forming limit, dimensional accuracy, one-stroke forming.

1. はじめに

医療、精密および通信機器分野において性能向上や多機能かつコンパクト・集積化のため、超微細、複雑な形状、高精度を有するマイクロ部品の要求はますます高まっている¹⁾。これらのマイクロ部品の成形には超高精度、複雑形状を有する金型が必要となるが、微小化に伴いその金型の製造が困難となる。特に、三次元かつ複雑形状を有する金型の製造は、電子ビーム、イオンビームによる精密加工技術を用いても製造可能な金型形状、寸法に限界がある。さらに、微小化に伴い潤滑効果が低下することが問題とされ

ている²⁾。これは、マイクロスケールにおいて潤滑剤を保持する表面凹凸のポケットの接触面積に対する相対的割合が減少するためであり、これにより成形限界の低下や金型寿命の低下、部品表面性状の悪化が引き起こされる³⁾。そのため、マイクロ部品の成形にはできるだけ金型に依存せず、良好な潤滑性が期待できる成形法の開発が重要である。

そこで、本研究では対向液圧深絞りに着目した。この成形法は、製造が簡単な雄型のみを用いており、任意な形状部品の成形と寸法精度、成形限界の向上という特徴^{4), 5)}を有しているため、これらの問題に対して有効であると考えられる。しかし、現状ではこれをマイクロスケールに適用した研究例は未だない。そこで本研究では対向液圧深絞りをマイクロスケールに適用し、セミダイレス化、成形限界の向上が期待されるマイクロ対向液圧深絞り(MHDD, Micro-Hydraulic Deep-Drawing)の開発を目的とした。本報では、新たに MHDD 装置を試作開発し、性能試験により対向液圧創成の実現とマイクロカップの成形を行うことを目的とする。さらに、MHDD の成形限界に及ぼす対向

* 首都大学東京大学院理工学研究科 〒192-0397 八王子市南大沢 1-1, 院生 Graduate student, Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-osawa, Hachioji, 192-0394, Japan.

** 首都大学東京大学院理工学研究科 〒192-0397 八王子市南大沢 1-1 Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan, ibid.

*** 合同会社 微細加工研究所 〒192-0046 八王子市明神町 2-9-22 セキビル 4F (LLC) Micro Fabrication Laboratory, Seki-building 2-9-22 Myojin, Hachioji, 192-0046, Japan.

**** ウーロンゴン大学 ニューサウスウェールズ州ウーロンゴン ノースフィールドアベニュー 2522 School of Mechanical Materials and Mechatronic Engineering, University of Wollongong, Northfields Avenue, Wollongong, NSW, 2522, Australia.

液圧の影響を実験的に明らかにし、MHDDの成形性及び形状精度について評価する。

2. マイクロ対向液圧深絞り装置の設計

2.1 マイクロ対向液圧深絞り装置の設計コンセプト

マクロスケールのプレス成形装置設計では、部品の成形に必要な工程数とプロセスを設計し、それに基づいて必要な金型、プレス、送り装置を用意する。しかし、この設計過程をマイクロスケールに適用する場合にはマイクロスケール特有な問題があり、その設計上の克服がなくてはプロセス設計はできない。一般的にマイクロスケールでは、これまでのマクロスケールの成形と比較して材料の送り制御、位置決め制御、荷重制御、ストローク位置制御に要求される精度が非常に高い。さらに液圧成形では、高圧での微小流量制御も必要となる。これらの高度制御を満たす装置を従来のマクロスケールの設計コンセプトの下で設計した場合には、装置全体が大型化し、高価となり、マイクロファクトリ⁶⁾に則した省エネルギー、省スペース、省資源化も実現できない。そこで、本MHDD装置では、Fig. 1に示すように成形プロセスおよび装置を単純化することを設計コンセプトとした。具体的には、①材料の送りや位置決め制御の必要をなくすために1ストローク成形の採用（多工程の同一軸化）、②しわ抑え法として高精度な荷重制御の必要をなくすために定隙間法の採用、③超微量の流量制御の必要をなくすために工具間のクリアランスの微小化によるシーリングおよび安定した対向液圧の創成、④多軸複動プレ

スの必要をなくし装置を簡易化するために金型内部の多軸化を行った。これにより、制御対象を少なくし、シンプルな装置でも成形部品の高精度化を実現することを目指した。

2.2 1ストローク成形プロセス

本MHDDプロセスでは全成形プロセスを同一軸にて行う1ストローク成形⁷⁾を採用することで、材料の搬送をなくし、部品の高精度化を図る。また、ブランクホルダによるしわ抑え力ではなく定隙間法を採用することで、高精度な荷重制御をなくし、高速化においても安定した成形を可能とする。しかし、上記のプロセスを採用することで Fig. 2(a), (b)に示すように、従来の液圧創成法⁸⁾であるブランク外周部のシーリング材、しわ抑え力(BHF)による液圧室のシーリングができない。さらに、高圧下における微小流量の制御は困難とされる。そこで、Fig. 2(c)に示すようにダイとブッシュのクリアランスを微小とすることで液圧媒体の漏れを調節し、微小流量を制御せずに安定した対向液圧を創成する方式とした。製造可能な寸法精度を考慮し、本MHDD金型ではクリアランスを $1\mu\text{m}$ とした。

Fig. 3に開発したMHDD装置における成形プロセスを示す。①絞りダイ(抜きパンチ)は固定されており、絞りパンチ、ブランクホルダ、抜きダイ、ブッシュ等の上型が下降する。これにより、絞りダイとブッシュのクリアランスが微小になりシーリングされることで、液圧創成工程が行われる。②さらに上型が下降すると、ブランクホルダと一体

Fig. 1 Design concept of new MHDD apparatus

Fig. 2 Schematic of pressure generation methods (a) BHF in HDD, (b) sealing at blank rim in HDD, (c) small clearance between drawing and blanking tools in MHDD

Fig. 3 Schematic of MHDD processes and movement of tool

Fig. 4 Developed micro-hydraulic deep-drawing tool set and hydraulic system

Fig. 5 Newly developed MHDD system with servo screw press apparatus

Table 1 Specification of developed MHDD apparatus

Specification of MHDD apparatus			
Main MHDD system	Servo screw press machine	Load capacity /kN	50
		Motion resolution /nm	400
	Hydraulic system	Pump pressure /MPa	20
Tooling	Forming process	1-stroke forming	
	Blank holder	Constant gap method	
	Pressure generation	1μm clearance between tools	
	Tolerance	Flat part /mm	±0.001
		Radius part /mm	±0.01

になっているキラー板がキラーピンにより固定されるため、ブランクホルダも同時に固定される。そのため、抜き工程では、絞りパンチ、抜きダイ、ブッシュのみが下降し抜き成形が行われる。③絞り工程では絞りダイとブランクホルダ間が一定のまま、絞りパンチが下降し絞り成形が行われる。このキラーピンの長さを調節することで、任意の定隙間にすることが可能である。④ストロークが下死点位置に到達すると上型が上昇し始め、成形カップがブランクホルダに引っかかりロックアウト工程が行われる。以上より、液圧創成工程、抜き工程、絞り工程、ロックアウト工程の

Fig. 6 Tool dimensions for micro deep-drawing ($\lambda=1/5, 1$)

4工程が同一軸で行われることがわかる。

2.3 MHDD 装置の概要

Fig. 4に開発したMHDD金型と油圧回路の概要図を示す。通常、1ショット加工には多軸サーボプレスを用いるが、本MHDD装置は単軸サーボプレスを用いて1ショット加工を実現する。そのため、金型内部で多軸を再現できる金型構造を設計し、MHDD装置全体の単純化を図る。開発したMHDD金型は各辺がおおよそ100mmと小型の金型である。これは、絞りダイ(抜きパンチ)、抜きダイ、絞りパンチおよびブッシュがそれぞれ独立して交換可能であるため、それぞれの部品を交換するだけで様々な寸法に適用可能である。また、抜きおよび絞り工具の許容誤差は平坦部で±0.001mm、半径部では±0.010mmと高精度な工具を用いた。パンチ荷重を測定するために、金型内に定格容量50Nの超小型圧縮型ロードセルを組み込み、これに直接絞りパンチが受ける荷重が伝わる構造とした。また、油圧回路には最大液圧を制御するためのリリーフ弁、金型に流れる流量を抑えるためのストップ弁、最大液圧が20MPaの油圧ポンプを用いた。プレス機本体はFig. 5に示す卓上小型サーボスクリープレス機を用いた。性能としては加圧力50kN、ダイハイト130mm、最大ストローク37mm、位置決め精度0.4μmである。Table 1に本MHDD装置の仕様をまとめて示す。

3. 新装置の性能試験による適正工具寸法の決定

開発したMHDD装置の動作確認および、しわ抑えや対向液圧創成における適正工具寸法を決定するために性能試験を行った。

3.1 供試材および試験条件

供試材として板厚 $t_0=20, 50\mu\text{m}$ のりん青銅箔材C5191-Hを用いた。使用した金型寸法はFig. 6に示すとおりで、幾何学的相似則に基づきスケール因子 $\lambda=t_0/t_{ref}=2/5, 1$ となる寸法条件とした。 $\lambda=1$ ではパンチ肩半径 $r_p=0.04\text{mm}$ に加え、 $r_p=0.25\text{mm}$ を用いた。絞り比は $D_0/D_p=1.74$ のカップを対象とした。しわ発生に及ぼす定隙間の影響を調べるため、従来のマイクロ深絞り(MDD)において定隙間 $h=1.10t_0, 1.20t_0, 1.30t_0, 1.40t_0, 2.40t_0$ の5条件にて実験を行った。MHDDでは加圧法として強制加圧法、圧力媒体として油圧作動油(40°C, 44mm²/s)を用い、MDDは無潤滑にて行った。圧力媒体は水冷を行うことで温度管理をした。絞り速度は0.4mm/sとした。

3.2 しわ抑え方式における適正定隙間の設定

Fig. 7にパンチ荷重—ストローク線図(P_H-s 曲線)におよぼす定隙間の影響を示す。定隙間 $h=1.10t_0$ にて正常な荷重

ーストローク線図が得られている。成形後半において生じている一定のパンチ荷重は摺動荷重であり、カップ口辺部がダイ側壁部に摺動されることで生じている。しかし、 h が $1.10t_0$ より大きくなると最大荷重後にしごき荷重が表れ、定隙間が大きくなるにつれてしごき荷重および摺動荷重も大きくなっている。 h が $1.10t_0$ および $2.40t_0$ の成形カップを比較すると、 $h=2.40t_0$ ではフランジしわが発生しているのに対し、 $h=1.10t_0$ では口辺しわのみが発生し、しわの大きさが減少していることがわかる。この結果より、定隙間が大きい場合はしわ抑えが正常に働かずフランジしわが発生してしまい、これが潰されることでしごき荷重が発生し、発生したしわにより摺動荷重が増加したと推測される。一方、定隙間が十分小さい場合はしわ抑えが正常に働き、しわの大きさが減少することでしごき荷重がなくなり、摺動荷重が低下したと推測される。しかし、本成形条件では定隙間を調節することで、しわを完全に除去することはできなかったが、十分しわ抑え効果を発揮できる適正定隙間を設定することができた。本装置では、定隙間 $h=1.10t_0$ とすることに決定した。

3.3 対向液圧の創成における適正クリアランスの決定

Fig. 8 に MHDD における液圧および荷重-ストローク線図を示す。MHDD の成形プロセスは Fig. 3 で示した通り①液圧創成工程、②抜き工程、③絞り工程、④液圧解放およびノックアウト工程の4工程に分かれていることがわかる。絞り工程において対向液圧が安定して創成できていることから、絞りダイとプッシュのクリアランスを $1\mu\text{m}$ とすることで、十分安定した対向液圧を創成できることがわかった。また、成形中に対向液圧が低下していないことから、ブランク外周部から液圧媒体の漏れがないことがわかる。つまり、ブランク外周部から半径方向圧縮力を作用させることができる、間接法による周液圧深絞りとなる⁹⁾。これにより、半径方向張力の低減と、ブランクとブランクホルダ間から液圧媒体が流出することで摩擦低減効果を期待できる金型構造となっている。

3.4 成形カップ

Fig. 9 に各スケール因子、パンチ肩半径において成形したカップを示す。 $\lambda=2/5$, $r_p=0.04\text{mm}$ の条件では絞れていないが、MDD, MHDD とともに $\lambda=1$, $r_p=0.10\text{mm}$ および $\lambda=2/5$, $r_p=0.25\text{mm}$ の条件では成形に成功している。これにより、本 MHDD 装置は直径 1mm 以下のマイクロカップの成形が可能であることがわかる。Fig. 10(a) に MDD および MHDD において成形したカップの外観を示す。成形に成功した直径 0.8mm と 2mm のマイクロカップは米粒と比べても小さいことがわかる。Fig. 10(b) に成形カップの断面図を示す。 $\lambda=1$ のカップはパンチ肩半径が $r_p=0.10\text{mm}$ とシャープな形状であるのにも拘らず、カップの成形に成功している。

以上より、本 MHDD 装置は巨大かつ高価な装置を用いずとも、シンプルな成形プロセスと装置によって、要求される性能を実現できることが確認できた。

4. MHDD における対向液圧の効果

4.1 有効パンチ荷重

供試材として板厚 $t_0=50\mu\text{m}$ のりん青銅箔材 C5191-H、ステンレス箔材 SUS304-H、純チタン箔材 JIS 第1種 H 材を

用いた。引張試験より得られた各箔材の材料特性値を Table 2 に示す。

Fig. 7 Effect of gap between blank holder and drawing die on punch force-stroke curve (Phosphor bronze, C5191-H)

Fig. 8 Counterpressure- and punch force-stroke curves during MHDD process

	$\lambda=1$ ($D_p=2.0\text{mm}$)		$\lambda=2/5$ ($D_p=0.8\text{mm}$)	
	$r_p=0.10\text{mm}$	$r_p=0.04\text{mm}$	$r_p=0.25\text{mm}$	
MDD				
MHDD				

Fig. 9 Drawn cups under different scale factors and punch shoulder radii in MDD and MHDD (λ : scale factor)

Fig. 10 Appearance of drawn cups in MDD and MHDD (a) different scale cups around a rice grain, (b) axial cross section of drawn cup ($\lambda=1$, $D_p=2.0\text{mm}$)

使用した金型は Fig. 6 に示したとおりで、スケール因子は $\lambda=1$ 、定隙間は $h=1.10t_0$ とした。MHDD では液圧媒体として機械油、加圧法として強制加圧法を用い、MDD は無潤滑にて行った。絞り速度は 0.4mm/s とした。

MHDD において摩擦力を評価するため、測定されたパンチ荷重 P_H を、式(1)により対向液圧がパンチを押し戻す力 F_H を引いた有効パンチ力 P_E にて整理した。

$$P_E = P_H - F_H = F_S + F_B + (F_{FDie} + F_{FBH}) \quad (1)$$

ここで、 F_S はフランジ部における縮み変形に必要な力、 F_B はダイ肩部における曲げ変形に必要な力、 F_{FDie} および F_{FBH} はブランクとダイおよびブランクホルダ間の摩擦力である。 F_S と F_B がどの条件でもほぼ等しいと考えられるので、 P_E より各条件における摩擦力の違いを評価できる¹⁰⁾。

4.2 MHDD における成形限界に及ぼす対向液圧の影響

Fig. 11 に各材料において MDD と MHDD を用いて成形したカップ外観を示す。ステンレス箔材に着目すると、MDD において適切な定隙間を用いても口辺しわが発生している。一方、MHDD では対向液圧を 15MPa 負荷することでこの口辺しわを除去できており、しわの発生が抑制できていることがわかる。これは対向液圧を負荷することでブランクがブランクホルダに押し付けられ、この圧縮応力によりしわ抑え力の効果が付加されるためであると考えられる。しかし、MHDD でも対向液圧を 20MPa まで大きくすると、パンチ肩部から破断に至る。また、MHDD における対向液圧付加によるしわの抑制効果は全ての材料および、Fig. 9 に示すように $\lambda=2/5$ においても確認できる。

Fig. 12 に引張強さで無次元化した最大有効パンチ荷重—ストローク曲線に及ぼす対向液圧の影響を示す。ステンレス箔材に着目すると対向液圧を負荷することで最大有効パンチ荷重が低下することがわかる。有効パンチ荷重の違いは摩擦力の違いを表しており、対向液圧を負荷することで摩擦低減効果が生じ潤滑状態が改善されたことがわかる。しかし、さらに対向液圧を増加させると最大有効パンチ荷重が増加している。これは、対向液圧負荷によりブランクがブランクホルダに押し付けられ摩擦力が増加したためである。この結果より、高圧下におけるパンチ肩部の破断は、フランジ部における摩擦力過大による破断であるとわかる。これらの挙動は、全ての材料において確認できる。

Fig. 13 に MHDD におけるしわや破断の発生に及ぼす対向液圧の影響を示す。対向液圧 p をヤング率 E で無次元化すると、一定値の p/E 以下ではしわが発生する領域が表われ、 p/E が過大になると破断に至る。これらの間で、成形に成功する領域が表れることがわかる。しかし、純チタン箔材の場合は、Fig. 11 からわかるように対向液圧を負荷するとしわの大きさは低減するが、しわが完全に除去される前に破断に至り、成功領域が表れないことがわかる。この原因として、純チタン箔材の場合、摩擦力が大きくなり破断する領域が低圧側にシフトしたため、しわが発生する領域と破断する領域が接し成形の成功領域が表れなかったと考えられる。これは、潤滑状態を良くし摩擦力を低減させ、破断する領域を高圧側にシフトさせることで、純チタン箔でも成形成功領域が表れるものと考えられる。また、円筒絞りにおける限界しわ抑え圧力をヤング率で無次元化する

Table 2 Mechanical properties of materials used

Material	Young's modulus E /GPa	Yield stress σ_y /MPa	Tensile strength σ_B /MPa	Elongation δ /%
Phosphor bronze (C5191-H)	110	610	682	0.6
Stainless-steel (SUS304-H)	193	1217	1331	2.4
Pure titanium (TR270C-H)	117	601	807	1.4

Fig. 11 Appearance of wrinkling, success and fracture cups in MDD and MHDD for various materials

Fig. 12 Effect of counterpressure on normalized punch force-stroke curve for various materials

Fig. 13 Effect of normalized counterpressure on occurrence of wrinkling and fracture in MHDD

Fig. 14 Effect of counterpressure on drawn cup profile at the bottom of the cup (Stainless-steel)

Fig. 15 Comparison of blank deformation at punch bottom in MDD and MHDD

と、その値はほぼ工具寸法によってのみ決まることが知られている¹¹⁾。つまり、同じ工具条件下においてしわの発生領域が一定値の p/E 以下になったということは、MHDD では対向液圧がしわ抑えと同等の役割を担っていることを意味する。以上より、本 MHDD では適切な対向液圧を負荷することでしわの発生の抑制および摩擦低減効果が得られ、成形限界の向上できることがわかった。

4.3 対向液圧による形状精度の改善

Fig. 14 にカップ底部の形状精度に及ぼす対向液圧の影響を示す。従来の MDD ではカップ底部がパンチに対して外側に凸形状になっているのに対して、MHDD にて対向液圧を負荷することで逆に内側に凹形状になっており、MDD と MHDD でその変形挙動に際があることがわかる。また、対向液圧を大きくすることで、内側への凸変形が大きくなっていることがわかる。従来の MDD では Fig. 15 に示すように、絞り工程においてカップ底部が曲げモーメントにより張出し変形を受けるため、カップ底部の形状がパンチに対して外側に凸形状になる。一方、MHDD では曲げモーメントに対向する液圧が負荷されたことで凸状に張出し変形が抑制され、成形中はカップ底部が平坦であったと推測される。しかし、対向液圧を負荷することでパンチとblankの密着度が高くなるため、ノックアウト工程において負圧が発生する。さらに、ノックアウト工程が終わるまで対

向液圧が負荷され続けているため、これらによりカップ底部がパンチに対して内側に凹形状になったと考えられる。この負圧はパンチ中央部に穴を空けるか側面に小さな溝を掘ることで抑制できる。よって、MHDD においてカップ底部が内側に凹形状になるカップは、工具条件や成形条件を変えることで平坦にあるとみなせる。以上により、MHDD は対向液圧を付加することでカップ底部の形状精度が改善できることをマイクロスケールでも確認した。

5. まとめ

本研究では、シンプルな成形プロセスと装置により、制御対象を少なくし、成形部品の高精度化を実現することを設計コンセプトとし、マイクロ対向液圧深絞り装置(MHDD 装置)の開発を行った。以下に得られた知見と成果をまとめる。

- 1) 1 ストローク成形、定隙間法、微小なクリアランスを有する金型ならびに、多軸を再現できる金型構造を有するシンプルな機構のサーボ式 MHDD 装置の開発に成功した。
- 2) 開発した MHDD 装置は、定隙間を $h=1.10t_0$ とすることで十分なしわ抑え効果の付与および、工具間のクリアランスを $1\mu\text{m}$ とすることで十分安定したシーリングによる対向液圧の創成が可能であることを確認し、それを用いて直径 0.8mm のマイクロカップと直径が 2.0mm でパンチ肩半径が 0.1mm のシャープなカップの成形に成功した。
- 3) MHDD において、対向液圧 p をヤング率 E で無次元化した p/E が一定以下になることでしわが発生し、対向液圧が過大になると摩擦力が過大になりパンチ肩から破断が生じるが、適切な対向液圧を付与することによりしわの抑制および摩擦低減効果が得られ、成形限界が向上することを明らかにした。
- 4) カップ底部の形状が MDD においてはパンチ外側に凸形状であったのに対し、MHDD では対向液圧付与することでパンチ内側に凹形状になるが、空気抜き対策等で本質的に寸法精度が改善される可能性を示した。

参考文献

- 1) Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N. & Engel, U.: CIRP Ann., **50** (2001), 445-462.
- 2) Engel, U.: Wear, **266** (2006), 265-273.
- 3) 堂田邦明・牧野武彦：塑性と加工, **49-570** (2008), 638-642.
- 4) 春日保男：日本機械学会論文集, **24-146** (1958), 720-727.
- 5) 中村和彦：塑性と加工, **27-300** (1986), 159-168.
- 6) マイクロファクトリ研究会：機械の研究, **49-6** (1997), 619-624.
- 7) 森孝信：プレス技術, **50-11** (2010), 50.
- 8) Zhang, S. H. & Danckert, J.: J. Mater. Process. Technol., **83** (1998), 14-25.
- 9) 中村和彦：塑性と加工, **26-288** (1985), 73-80.
- 10) 浜孝之・西村祥彦・北島達・藤本仁・宅田裕彦：第 62 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2011), 395-396.
- 11) 河合望：日本機械学会論文集, **26-166** (1960), 857-863.