

教育教材としての卓上深絞り機の開発

Development of Table Top Deep Drawing Machine as Teaching Material

吉田 昌史*, 内海能亜**, 野崎孝志*

Masashi Yoshida, Noah Utsumi, Takashi Nozaki

Abstract: A table top deep drawing machine for understanding plastic working was developed in this study. It was light enough to be moved around easily, dismantled and re-assembled, and safe to carry out the deep drawing press on a desk in class. Deep drawing press of pure aluminum foils was also conducted to evaluate the formability of this machine. Effect of lubricant on the formability was investigated using our machine. We can observe the defects such as the cracking and the wrinkling during the forming. Critical blank-holding force in deep drawing of the foils were estimated using Siebel's equation, and the blank-holding force required for the elimination of wrinkling was confirmed through the experimental results.

1. はじめに

塑性加工とは塑性を利用して材料を永久変形させ、目的に応じた寸法や形を得る加工法である。この加工は切屑が出ないため、材料の無駄が少なく、製品を大量生産でき、加工によって材料の機械的性質を改善できるなどの利点を持つ。塑性加工品は、自動車、建築物、台所用品、文房具や硬貨までに及んでおり、ものづくりを行う上で塑性加工は重要な役割を果たしている。このため、高等教育機関では、これに関する教育が以前から行われてきた。しかし、近年においては実習・実験科目、先端科目が多くなり、塑性加工に関する内容を学ぶ授業時間が削減されている。本学機械工学科においては、2年前期の半期で「材料加工学」が開講されており、15回中5回だけ塑性加工についての授業が行われている。3年前期に塑性加工に関する実験が行われているが、一つの実験装置に対し8人~10人の学生が配置するような形であるため、塑性加工の利点・特徴などを十分に理解することは難しいと思われる。一方、除去加工である機械加工については、座学講義は勿論のこと、旋盤・フライス盤を利用した機械工作に関する実習が行われている。本学機械工学を卒業した学生のほとんどが加工に関する企業に就職するが、塑性加工に触れたことのある学生はほとんどおらず、塑性加工の利点、特徴、重要性について十分に理解せず卒業している。このため、機械工作実習のように塑性加工実習を行う必要があると思われるが、塑性加工装置は高価、大型設備であるため、高等教育機関であっても簡単に導入することはできない。

これまでに、我々は小型プレス機械を製作し、塑性加工の原理や各種加工法によって製品が完成するまでの行程が学べる小中学生対象の教育プログラムを検討し、小型加工機を使用すれば、小中学生でも塑性加工の意義を十分に

理解することができるということが分かった¹⁻²⁾。これらの結果を生せば、小型プレス機を用いれば工学部学生らも塑性加工に関する意義を十分に理解させることが出来ると思われる。このため、我々は第一段階として座学講義内で加工の体験をすることができる卓上加工機を開発を目的としている。なお、工学系の大学だけでなく、工業高校、普通科高校、小・中学校でも加工教育が実施できるよう、主にCNC卓上加工機(オリジナルマインド社製)を使用し、加工機の製作を行うこととし、大型加工機は用いないようにした。比較的安価なCNC卓上加工機を用いれば、切削加工の教育、CAM教育にもつながる可能性があり、本加工機を広く展開することが出来ると思われる。今回の報告では、卓上深絞り機を製作するとともに、製作した加工機を用いて加工実験を行ったので、この結果を報告する。

2. 卓上深絞り機の製作

2.1 素板

素板には純アルミニウム(ニラコ株式会社製)を使用した。形状は $\phi 20 \times 0.1$ mmであり、処理温度400℃、加熱保持時間1hとし、大気中で焼きなましを行ったものを使用した。金属箔の深絞り成形においては、板厚の薄板化にともない破断限界が低下するとともに、しわが発生しやすくなることが知られている³⁾。しわ発生の抑制には、大きなしわ押え力が必要となり、限界しわ押え力の評価には、E. Siebelの式が広く用いられている⁴⁾。図1はSiebelの式から見積もったときの限界しわ押え力と板厚との関係を示しており、板厚が薄くなるとともに限界しわ押え力が徐々に増加し、板厚0.3mmでは急激な増加を示している。しわ押え力の増加により、しわ押えと素板との接触面における摩擦抵抗力が増加し、成形性が著しく低下する。板厚

2013年2月28日受理

* 理工学部 機械工学科

** 埼玉大学 教育学部 技術教育講座

を大きくすれば加工は容易になるが、成形荷重が増加するため加工機の小型化が困難となる。卓上で利用できる加工機の製作を目的としているため、今回は素板に純アルミニウム箔を用いることにした。なお、高精度加工は求めず、深絞り加工の概略が理解できるような構造となるよう、加工機的设计・製作を行うようにした。

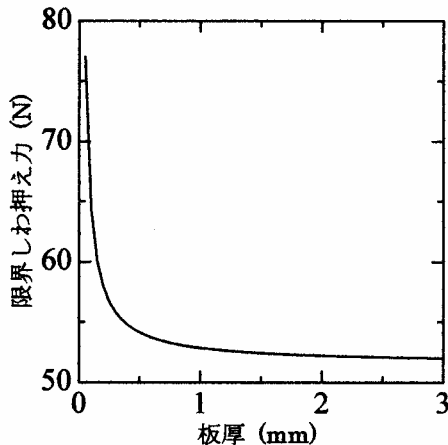


図1 限界しわ押え力と板厚との関係

2.2 卓上深絞り加工機の概略

材料・部品などは入手しやすいよう、ミスミ株式会社で購入することとし、加工機的设计製作を行った。製作した加工機の外観を図2に示している。加工機の部品点数は23点、製作費は15,000円であった。パンチ、ダイス、ボルト類、バネ類、プッシュが金属製であり、それ以外はメタクリル樹脂(アクリル樹脂)で製作している。加工機の重量は520gと非常に軽量であり、持ち運びも可能である。また、分解・組み立てもできるため、学生らは加工機の構造などを理解することが容易であると考えられる。

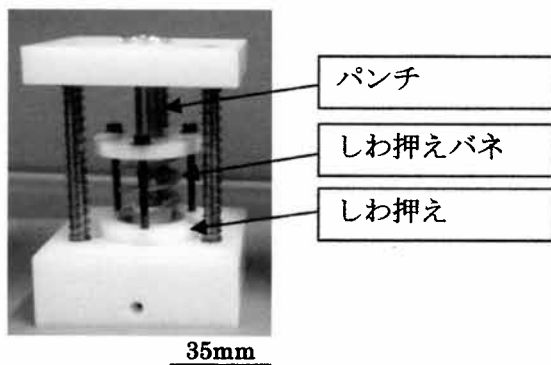


図2 製作した加工機の外観

2.3 パンチおよびダイス

図3に示すような材質SKD11のパンチおよびダイスを使用した。パンチとダイスのクリアランスは0.5mmとし、パンチ直径dに対する素板直径Dの比D/d(絞り比)は2.2である。

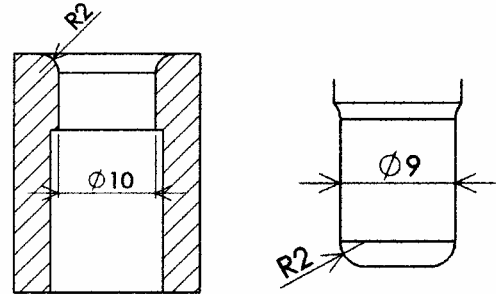


図3 パンチ、ダイスの形状

2.4 しわ押え

薄板を円筒状に絞る場合、フランジ部では半径方向に引張応力、円周方向に圧縮応力が生じ、フランジしわが発生する。このしわは、板が座屈することにより起こる現象で、板厚が薄く、変形量大きいほどおこりやすい。このため、しわ押えを用いてしわの発生を抑える必要がある。また、しわ押え板の表面粗さは一般に数μm程度以下にするのが好ましいとされている⁵⁾。製作したしわ押えの概略を図4に示す。これらは卓上CNC加工機(オリジナルマインド社製)を用いて製作を行った。材質は摩擦力低減のためメタクリル樹脂を使用し、しわ押え面の表面粗さRaは0.017であった。

しわ押え方法は、図5に示すように3本のボルトを締付けることでしわ押え力を管理することとした。しわ押え力が素板に均等にかかるようにする必要である。このため、ステンレス製管を予め所定の長さで切っておき、管にボルトを通し、3本のボルトの締付け量を管理することにした。なお、しわ押え用バネはバネ定数5.35 N/mのものを使用した。

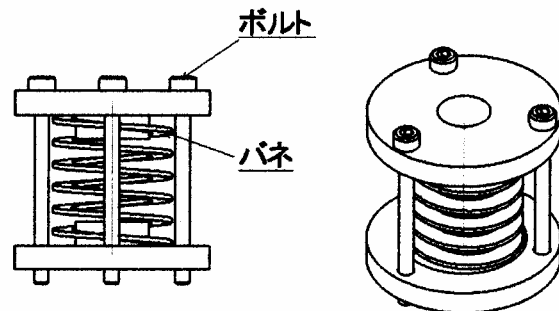


図4 しわ押えの概略図

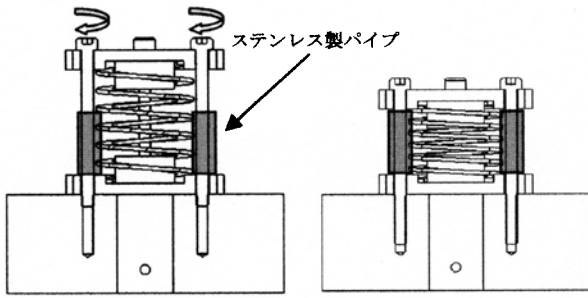


図5 しわ押え方法の概略

3. 実験方法

図6に示すような縦型手動計測スタンド(株式会社イマダ製, SVH-1000, 許容荷重 1000 N)に加工機を設置し, 加工実験を行った. 計測スタンドにデジタルフォースゲージ, ダイアルゲージを取り付け, 荷重, パンチ行程を計測した.

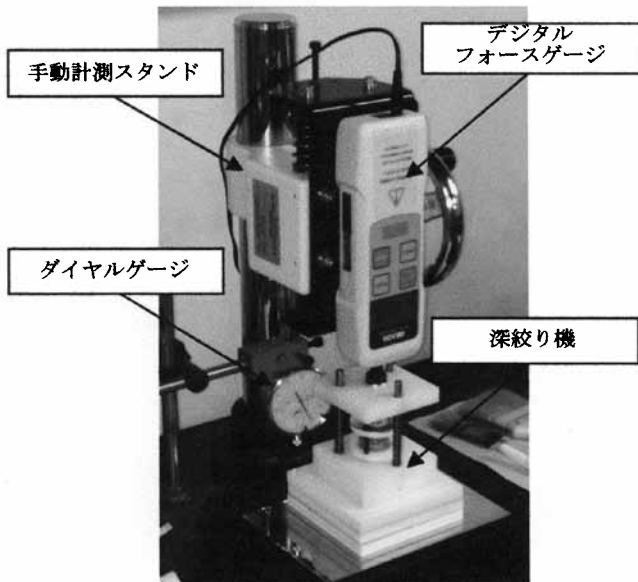


図6 加工実験機の外観

4. 結果および考察

4.1 潤滑剤の影響

潤滑条件は, $t=0.008$ mm のポリエチレンフィルム (以降, PEフィルムと呼ぶ), 二硫化モリブデン, 無潤滑とし, しわ押え力 65 Nとした. 加工実験は素板が破断, もしくは絞り終わるまで行い, 荷重とパンチ行程の関係を調査し, 各潤滑条件で3回の試験を行った. 図7は各潤滑条件で行ったときの荷重とパンチ行程の関係の結果であり, ∇ マークは破断位置を示している. 無潤滑では, パンチ行程 3mmで破断した. 3回の加工実験で成形荷重とパンチ行程の関係にばらつきがなく, 再現性の良い結果が得られた. 二硫化モリブデンを用いたときは無潤滑のときよりも深く絞

ることができ, パンチ行程 4~5mmで破断した. 無潤滑のときに比べ破断位置にばらつきがある. これは, 二硫化モリブデンの塗布量が一定でなかったことが主な原因として考えられる. 次に, PEフィルムを用いたときの結果に着目すると, パンチ行程 6mmまで荷重が増加していき, 6mm以降は荷重が低下し, 破断することなく加工することができた. 成形荷重とパンチ行程の関係, 加工終了位置もほぼ一致している.

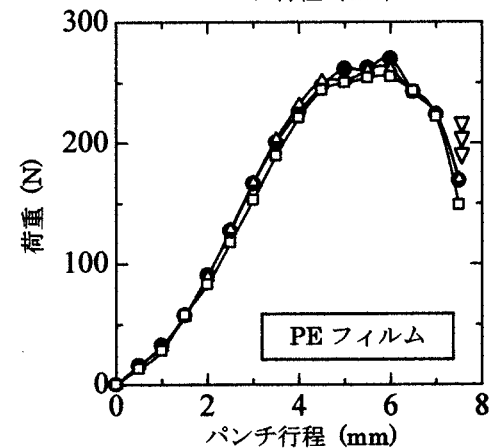
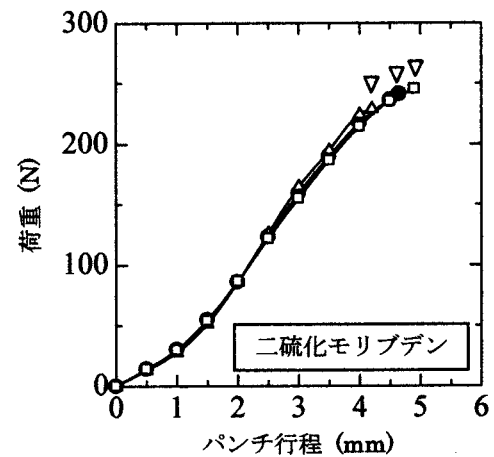
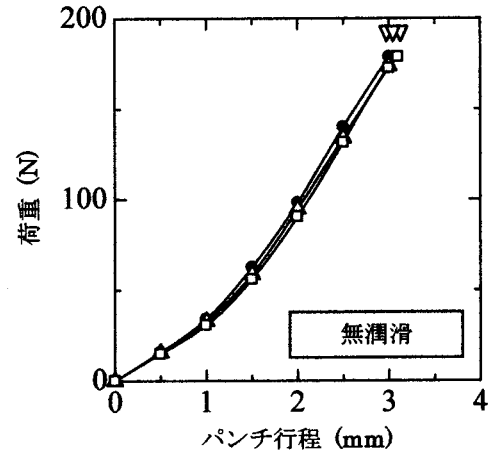


図7 各潤滑剤での荷重とストローク量の関係

図8は図7の結果を各潤滑条件でそれぞれ平均化し、一つのグラフにまとめたものである。無潤滑の場合は、二硫化モリブデン、PE フィルムのときよりも僅かであるが成形荷重が高くなっている。本加工機を用いて、潤滑剤の影響についての実験を行えば、潤滑剤の効果について知ることが出来るとともに、固体潤滑剤、液体潤滑剤の特徴についても学ぶことが出来ると思われる。

図9は、各潤滑条件で加工を行った後の供試材の外観である。無潤滑、二硫化モリブデンを用いたときの供試材料の破断位置は、パンチ肩部で起こっている。PE フィルムを用いたとき、最も深く絞ることができたが、フランジ部でしわの発生が認められた。成形品の外観を観察することで、深絞り加工での典型的な割れ、しわなどの不良を十分に確認することができる。

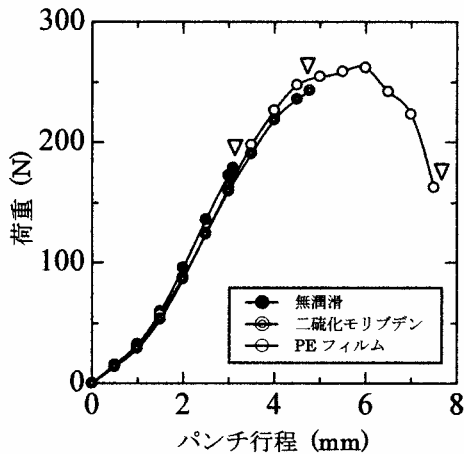


図8 潤滑剤の影響

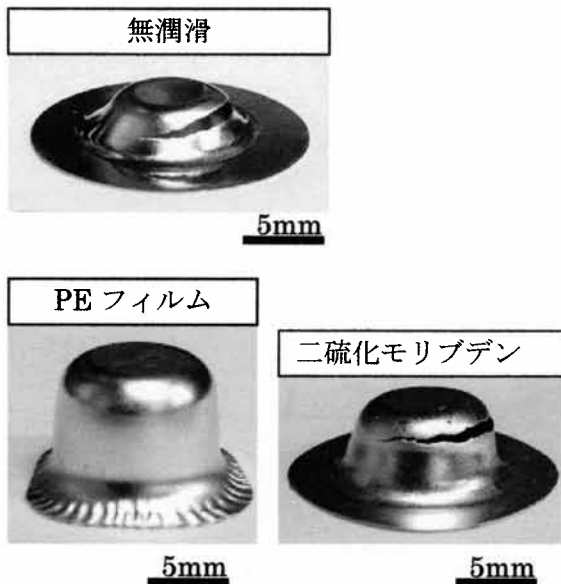


図9 成形後の供試材の外観

4.2 限界しわ押え力

パンチ行程を2.5mm一定とし、しわ押え力38N~65Nで加工を行い、荷重としわ押え力の関係を明らかにするとともに、各しわ押え力におけるしわの発生の有無を調べた。なお、潤滑条件は無潤滑とした。図10は成形荷重としわ押え力との関係であり、しわ押え力の増加により、成形荷重が増加していることがわかる。成形品の外観からしわ発生の有無を肉眼で確認した結果、しわ押え力が38N~62Nの範囲ではしわの発生が確認でき、65Nではしわの発生がほぼ抑制されていた。図11はしわ発生の有無の一例として、しわ押え力58N、65Nのときの成形品の外観を示している。Siebelの式から限界しわ押え力を見積もった結果、52N~78Nであった。実験により得られたしわ押え力とSiebelの式から見積もった限界しわ押え力とを比較すると、実験により得られたしわ押え力は、見積もった限界しわ押え力の範囲内であったが、実験ではしわ押え力65N以下でも、しわが発生していた。この原因は、供試材にしわ押え力が均等にかかっていないこと、加工機の剛性不足、金属箔の場合のしわ発生の評価式の不適合などが挙げられる。今回の実験では、しわ押え力65Nが限界であったが、バネ定数が大きいバネを用いるなどして、しわ押え力65N以上で加工を行い、しわ発生の有無、しわ押え力と限界しわ押え力との関係を明らかにするとともに、金属箔の場合のしわ押え力の適当な評価式を検討する必要がある。

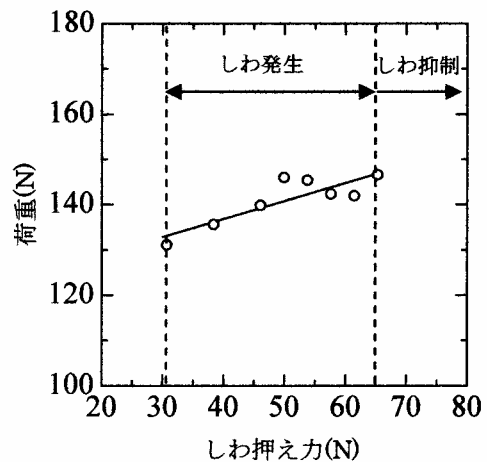


図10 荷重としわ押え力の関係

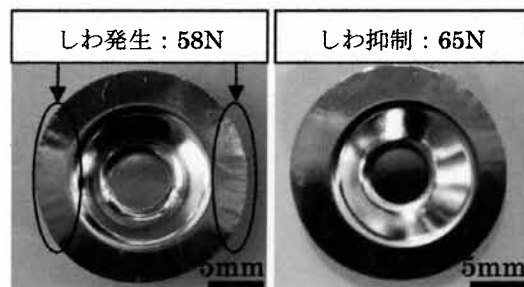


図11 成形後のしわ

4.3 成形後の肉厚変化

PE フィルムで加工を行った後の成形品 (図 8) の肉厚変化を調査した。肉厚の測定には、両球面マイクロメーターを使用し、図 12 に示すように成形品の側壁部、パンチ底部のみを測定した。深絞り加工では、パンチの下降とともに素板の外形が縮み、フランジ部では半径方向に引張応力、円周方向に圧縮応力が生じる。その後、ダイス肩部では、半径方向の引張変形が進む中で、円周方向の縮み変形と半径方向の曲げ変形を同時に受け、板厚を減少させながら側壁部を形成する。ダイス側壁部の材料は、引張と圧縮変形等が作用し、最終的にパンチ底部では面内のいずれの方向でも引張変形を受け、2 軸引張状態となる⁶⁾。このため、一般に側壁部、パンチ底部の肉厚は素板よりも薄くなる。成形品の側壁部の厚さは約 0.095mm、パンチ底部の厚さは約 0.088mm であり、素板の厚さ 0.1mm よりも薄くなっていた。成形品の側壁、パンチ底部の肉厚の減少を確認できるため、学生らに、深絞り加工における側壁部、パンチ底部の応力状態を考えさせるきっかけを与えることができると思われる。

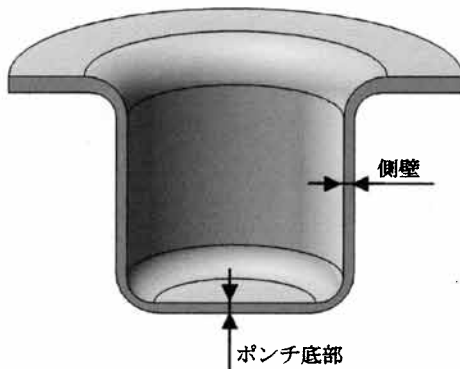


図 12 肉厚の測定箇所

4.4 座学講義内での本加工機の適用について

計測スタンド、デジタルフォールゲージは比較的高価なものであるため、一台で講義を実施できるよう検討していく必要がある。今後、曲げ、引抜き、押し出し、鍛造、圧延などの基本的な加工が体験できる卓上加工機をそれぞれ製作し、これらを用いた加工教育プログラムを構築する予定である。

5. まとめ

卓上深絞り機を製作するとともに、加工実験を行い、次の結果を得た。

- (1) 軽量、持ち運びができ、構造を理解することができ卓上深絞り加工機を製作することができた。
- (2) 潤滑剤の影響について検討した。この結果、PE フィルムが最も深く絞ることができ、潤滑剤の効果を体験することが可能であるといえる。また、固体潤滑剤、液体潤滑剤の特徴についても学べるようになった。
- (3) 成形品の外観から、深絞り製品の不良を肉眼で確認することができることが分かった。
- (4) 成形品の肉厚減少を確認することができた。学生らに、深絞り加工における各部の応力状態を考えさせるきっかけを与えることができると思われる。

謝辞

本研究の一部は静岡理科大学の平成 24 年度静岡理科大学提案型教育プロジェクト (B) の助成を受けたものであることを記し、ここに謝意を表します。実験に協力頂いた静岡理科大学の学部生の杉村瑞貴氏、高岡和浩氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 内海能亜、吉田昌史，“教材としてのミニチュアロール曲げ加工機の開発”，日本産業技術教育学会学会誌，**54** (2012) 29.
- 2) 内海能亜、吉田昌史，“塑性加工を学ぶ教材としての小型プレス機械の開発” 工学教育，**60** (2012) 92.
- 3) 古閑伸裕，R. Paisarn，管之揚，“マグネシウム箔のプレス成形”，塑性と加工，**47** (2006) 627.
- 4) E. Siebel, H. Beisswanger, *Tiefziehen* (Carl Hanser Verlag, München, 1955).
- 5) 古閑伸裕 他，塑性加工入門 (日本塑性加工学会, 2007).
- 6) 三浦秀士, JSME テキストシリーズ, 機械材料学 (日本機械学会, 2008).