

## 材料加工教育のための卓上加工機の試作

Production of Tabletop Machine for Material Processing Education

吉田 昌史\*, 内海能重\*\*, 野崎孝志\*

Masashi YOSHIDA, Noah UTSUMI, Takashi NOZAKI

**Abstract:** We gave students the opportunity to experience working with plastic using our developed tabletop deep drawing machine during class. The deep drawing press was operated on a desk in the classroom. We investigated the educational effects produced by this experience. This class room experience helped the students to easily understand the basics of the deep drawing process. A bending machine was also developed to provide students with a better understanding of sheet metal forming. It was light enough to be moved around easily, and could safely carry out a bending operation on a desk in the classroom. V bending test using pure aluminum sheets was conducted to evaluate the performance of this machine.

### 1. はじめに

材料加工は自動車や鉄鋼などにおけるものづくり技術の重要な基盤的技術の一つである。同じ形状の製品を作る加工法は多種多様にあり、技術者は常に最適な材料と加工法の選択をしなければならない。このため、各加工法の原理と特徴を幅広く理解しておくことが重要となる。

本学機械工学科を卒業した学生のほとんどが加工関連の企業に就職している。しかし、学生らは在学中に塑性加工に触れる機会はあまり多くなく、塑性加工の原理と特徴を十分に理解して卒業しているとは言い難い。塑性加工に関する各設備を導入しようとする、金型の費用、設置スペース、危険性などの問題があり、高等教育機関であっても容易に設備を導入できない。このため、高価な設備を導

入することなく安全に塑性加工に触れることができるような教育教材を開発することができれば、学生らに塑性加工法の原理と特徴を十分に理解させることができると思われる。

これまでに、我々は座学講義内で加工体験が可能な卓上加工機に関する教育プログラムの開発を目的とし、前報では軽量で持ち運びが可能な卓上深絞り機を試作し、加工実験を行った<sup>1)</sup>。本加工機でアルミニウム薄板から円筒状の底付き容器を成形できることを確認した。また、本加工機による加工実験で潤滑剤の効果、製品不良、成形品の肉厚減少などを確認でき、教育用途として十分に利用できることが分かった。

今回の報告では、座学講義内で卓上深絞り機の加工体験を実施し、本加工機による教育的効果を検討した。また、薄板の曲げ加工機も試作したので、これらの結果について報告する。

### 2. 座学講義内での深絞り加工体験

#### 2.1 実施内容および条件

機械工学科2年生の「材料加工学」の座学講義内で受講者53名に対して加工体験を行った。講義内容は15回の授業の内、铸造5回、塑性加工5回、溶接3回、粉末冶金2回であり、塑性加工5回の最終回に加工体験を実施した。図1に示す前報と同じ加工機を使用し、手動計測スタンド、フォースゲージ(負荷荷重の計測)、ダイヤルゲージ(パンチ押し込み量の計測)はそれぞれ教卓に設置し、学生らには図1に示す深絞り機のみを配布した。体験時間は約30分で、1台の加工機を約8名の学生が使用した。しわ押え力を学生らに決めてもらい、しわや破断などが起こらない

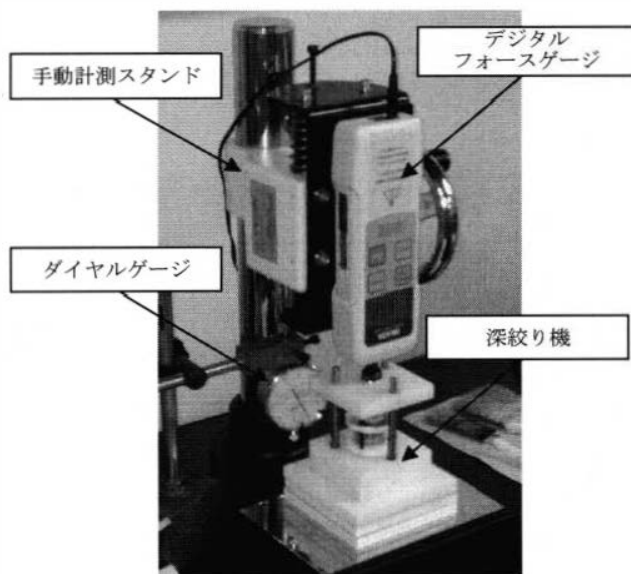


図1 加工実験機の外観

2013年2月25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

ようにアルミニウム薄板から円筒状底付き容器を成形する加工体験を実施してもらった。実施時は学部4年生1名が補助として、受講学生らに供試体の設置方法などの指導を行った。学生らは机上で供試体を設置し、しわ押え力を決めた。その後、教卓にある手動計測スタンドに深絞り機を設置し、加工を行った。デジタルフォースゲージとダイヤルゲージに示された負荷荷重とパンチ押込み量の変化を見ながら加工の様子を想像してもらった。図2は加工体験の様子である。なお、計測スタンド、デジタルフォースゲージなどは比較的高価なものであるが、受講生が約50名程度であれば、それぞれ1台ずつで実施可能であった。

本加工機の教育効果を検討するために、機械工学科3年生の「機械工学実験1」の薄板成形実験を受講した学生ら40名にも2年生の学生らと同様のアンケートを行った。薄板成形試験で使用した装置は、株式会社東京衡機試験機製の薄板成形機（最大荷重12 ton）を用いた。試験機の大きさは700 mm×850 mm×1400 mmであり、本体重量は700 kgである。実施内容は厚さ0.8mmのアルミニウム板を供試体とし、しわ押え力と成形不良との関係、供試体としわ押え面との間の摩擦係数の算出、パンチ力と絞り比との関係から限界絞り比を見積もることであった。座学講義内での加工体験と機械工学実験での実験講義との実施条件についてまとめたものを表1に示す。

なお、本学のカリキュラム移行時期であったため、2年生と3年生ともに同時期にそれぞれ材料加工学の講義を受講しており、2年生と3年生ともに塑性加工の予備知識は同程度であった。

表1 実施条件

	本加工機 (座学講義)	実加工機 (実験講義)
実施時間	約30分	約3時間
対象人数	52名	40名
機械台数	6台	1台
機械1台あたりの 受講者数	約8名	約8名
補助者	1名	1名



図2 座学講義内での加工体験

## 2.2 アンケート結果

加工体験および薄板成形実験が終了した学生に対して、アンケートを実施した。アンケート内容は「問1 深絞り加工の概略を理解することができましたか。」と「問2 絞り比を理解することができましたか。」であり、[理解できる]・[どちらかといえば理解できる]・[どちらかといえば理解できない]・[理解できない]の4段階で評価してもらった。アンケート結果についてまとめたものを表2に示す。「問1 深絞り加工の概略を理解することができましたか。」の問いに対して、本加工機と実加工機ともにどちらも高い回答率を得た。本加工機と実加工機ともに加工前後の供試体の変化から、深絞り加工の概略を理解することができるため、高い回答率を得ることができたと思われる。本加工機と実加工機の回答率を比較すると、本加工機の方が回答率は高かった。実加工機の方は主にアシスタント学生が供試体のセットをしていたが、本加工機の方は学生自身が供試体を加工機にセットする必要がある。また、加工を実施するときは、実加工機ではアシスタント学生が加工開始のボタンを押すことで加工が行われ、X-Yレコーダーに負荷荷重とパンチ押込み量との関係が自動的に描かれていき、この操作を受講学生が観察していた。これに対し、本加工機の方は、自ら深絞り機を手動計測ステージにセットし、手動で計測ステージのハンドルを回し、加工を行っていく。加工荷重はフォースゲージで読み取ることができるが、学生自身が加工荷重を体感することになる。一般的にパンチ行程と加工荷重の関係は図3のようになる。図3の(a)のように加工開始時はしわ押えで供試体が押えられているため、ハンドルの回転は重い。加工が進むにつれ、しわ押えと供試体との接触面が減少するため、徐々にハンドルの回転が軽くなっていき加工が終了する。なお、供試体が破断したときは図3の(b)のようにハンドルの回転が重くなった後、急に軽くなる。このように、供試体のセットから加工実施まで比較的短時間で実施することができ、加工荷重を学生が自ら体感できるという点で、深絞り加工の概略について理解できたという項目で高い回答率を得ることができたと言える。

「問2 絞り比を理解することが出来ましたか。」の問いに対しては、実加工機では受講学生の半分しか絞り比について理解していなかった。一方、本加工機の方は、ほとんどの学生が絞り比について理解をしていると回答した。実加工機では、パンチとダイスを取り外す手間があったため、教科書の深絞り加工の概略図を用いて絞り比（パンチ直径とダイス内径の比）について説明を行った。本加工機の方では、供試体を加工機にセットする際に加工機を分解



する必要がある。このとき、分解したパンチとダイスの形状を学生らに手に持って確認させるとともに、絞り比についての説明を行った。パンチとダイスの実物を手にとって学生らに確認させ、説明したため、本加工機の方が絞り比の理解で高い回答率を得ることができたと思われる。

3. 曲げ加工機の試作

深絞り加工は薄板成形の代表的な加工法であるが、この加工法は曲げ戻しや2軸引張などの変形が作用するため、加工における応力状態は非常に複雑である。深絞り加工の理解を深めるためには、これを学ぶ前段階の教材が必要であると考えられるため、比較的単純な変形である曲げ加工機を試作することとした。曲げ加工は、素材に曲げ変形を与え、所定の角度、半径を持つ形状に成形する加工法である。板を曲げるだけという単純な加工のように思われるが、形状や寸法精度が要求される場合は、「そり」や「スプリングバック」などの問題が生じる。単純と思われがちな加工を学生らに体験させ、加工の際に起こる問題点を実感させ、気付かせることは、加工関連の企業で活躍していく予定の学生らにとって意義深いものと思われる。

試作した卓上V曲げ加工機は市販の簡易バイスにパンチと型をそれぞれ固定させたものであり、突曲げ様式(三点自由曲げ)とした。試作した加工機の外観を図4に示す。パンチとダイの材質はMCナイロンで、卓上CNC加工機で

製作した。供試体を型の上に置きパンチを押しこむことにより板をV字形断面に成形するものである。パンチの先端半径は3mm、ダイの溝幅は20mmである。なお、試作加工機は部品点数9点(市販ハンドルを1点とする)、費用2,200円、重量495gであった。

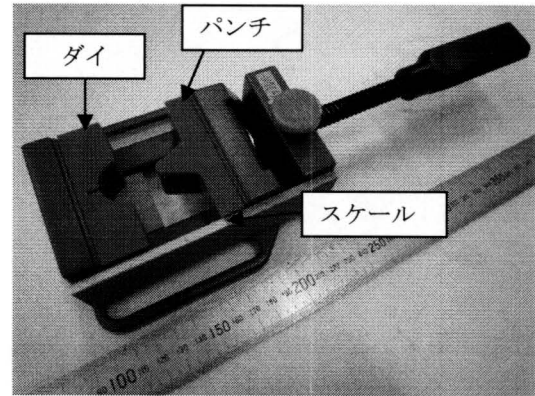


図4 卓上V曲げ加工機

表2 アンケート結果

		回答率 (%)	
		本加工機 (座学講義)	実加工機 (実験講義)
問1	理解できる。 どちらかといえば 理解できる。	96%	78%
問2	理解できる。 どちらかといえば 理解できない。	94%	50%

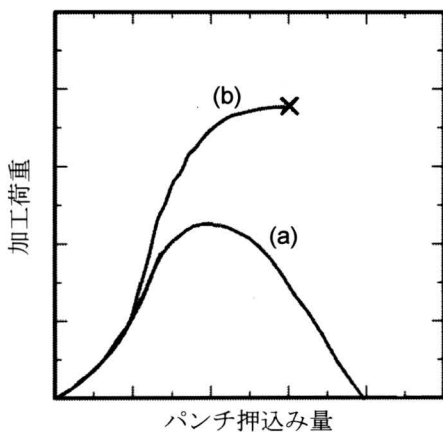


図3 パンチ行程と加工荷重の関係の概略

3.1 曲げ加工実験

3.1.1 加工条件

供試材は純アルミニウム (A1050) を使用し、板厚 1mm の板材の圧延方向を長手方向として、長さ 30mm、幅 10mm に加工したものをを用いた。簡易バイスの側面に貼り付けたスケールを読み取ることでパンチ押込み量を管理し、押込み量から図5に示すパンチ負荷時の曲げ角  $\theta_1$  を算出した。パンチ除荷後の曲げ角  $\theta_2$  については、加工後の薄板を用紙の上に載せ、0.3mm のシャープペンシルで薄板の形状をなぞった。その後、加工後の薄板形状がなぞられた用紙をスキャナーで読み取り、2次元CADの角度測定機能で測定した。また、比較として分度器を用いての計測も行った。

3.1.2 パンチ押込み量と曲げ角の関係

パンチ押込み量とパンチ負荷時と除荷後の曲げ角の関係を調査した結果を図6に示す。押込み量 0.5mm と 1mm のときは徐荷後の角度は  $180^\circ$  であり、弾性域での変形であることが分かる。押込み量 2mm 以上では塑性域での変形となり、押込み量の増加にともないパンチ除荷後の曲げ角度が減少した。この結果から、本加工機で加工を行い、曲げ角度と押込み量の関係を得ることで材料の弾性変形と塑性変形の違いを理解させることができるとと思われる。

図5に示したように薄板を曲げ加工した後、力を取り除くと弾性回復のため、 $\theta$  だけ戻る。この現象をスプリング

バックといい、図6の負荷時の曲げ角と除荷後の角との差から求めることができる。図6の結果から得られたスプリングバック量と押し込み量の関係を図7に示す。パンチの押し込み量が大きくなるにつれスプリングバック量が小さくなっている。一般的に、スプリングバック量は押し込み量とともに減少し<sup>2)</sup>、本加工機でも同様の結果が得られた。

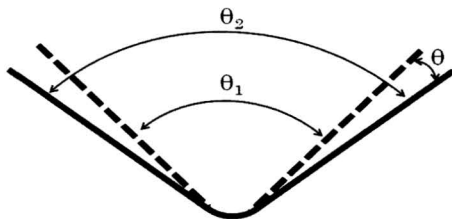


図5 パンチ負荷時の曲げ角  $\theta_1$  と除荷後の曲げ角  $\theta_2$

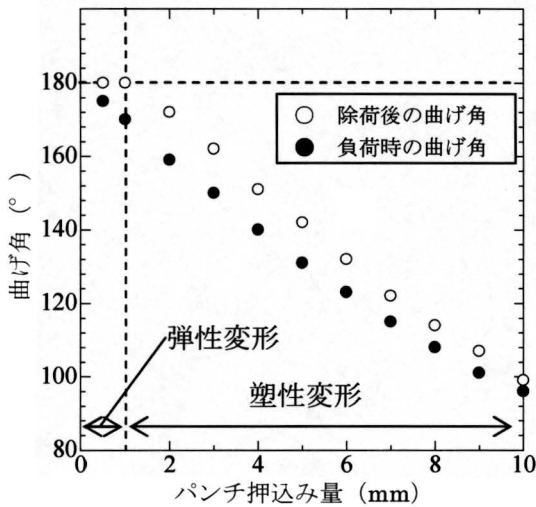


図6 パンチ押し込み量と曲げ角の関係

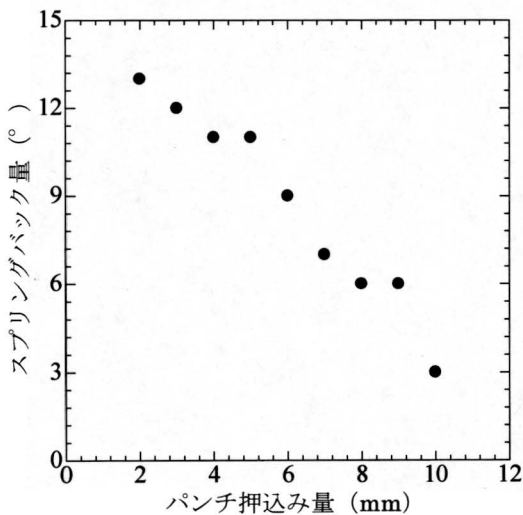


図7 パンチ押し込み量とスプリングバック量の関係

### 3.1.3 異方性（試験片採取方向）の影響

供試材の圧延方向に対して垂直方向と並行方向に曲げ加工を行ったときのスプリングバック量を測定し、異方性の影響について確認した。図8はパンチ行程とスプリングバック量の関係であり、スプリングバック量は垂直方向の方が平行方向よりも高い値を示した。供試体のヤング率は供試体の採取方向によらず一定であると思われる。このため、スプリングバック量は供試体の採取方向には影響しないと思われたが、今回の実験では異なる結果が得られた。供試体採取方向の影響については、桑原らによる報告がある。0.3mmのSUS304ステンレス鋼板を圧延方向に対して垂直方向と並行方向にV曲げした場合、垂直方向の方が約27%も圧縮強度が大きくなり、スプリングバック量は垂直方向の方が大きくなる<sup>3)</sup>。また、平行方向の場合はパンチを押し込むにつれ、曲げの外側で引張応力が働くため、ミクロな割れが生じスプリングバック量が減少したことも一つの理由として考えられる。この結果から、今回試作したV曲げ加工機は簡易なものではあるが、実機で得られる加工現象を再現よく得られるということが分かった。

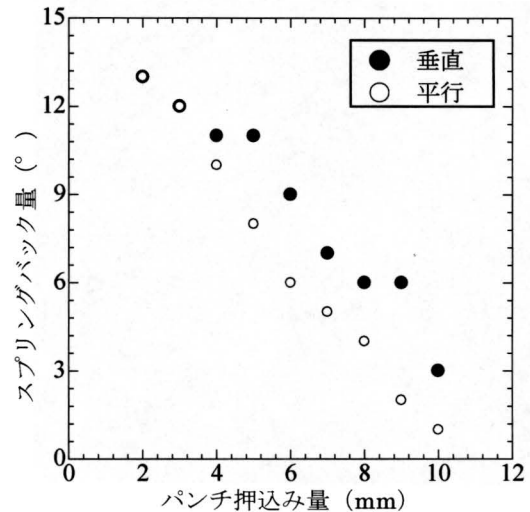


図8 パンチ行程とスプリングバック量の関係

### 3.1.4 曲げ角度測定方法

CADで測定する方法（以後CADと呼ぶ）と分度器で測定した結果を比較したグラフを図9に示す。パンチ押し込み量4mmまではCADと分度器での測定の差はほぼ一致したが、パンチ行程5mm以降は測定による差があらわれた。CADと分度器による計測では若干ずれが生じる



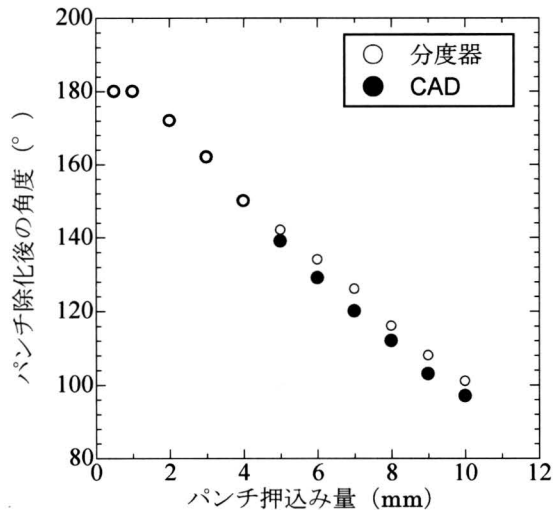


図9 角度測定法の比較

ものの、パンチ押込み量とパンチ除荷後の角度との関係の傾向はほぼ同じである。安価な加工機でV曲げ加工を行い、安価な測定器(分度器)で加工後の曲げ角度を計測してもパンチ押込み量とパンチ除荷後の関係を得られるということが分かった。

#### 4. 今後の課題

試作した卓上深絞り機を用いた加工体験により、深絞り加工の概略を十分に理解することがわかった。しかし、試作加工機では高精度な加工は行えないため、塑性加工は高い精度の加工ができるということを学生らに伝えることは難しいと思われる。このため、実機を用いた塑性加工実験を行う前段階の教材として本加工機を用いると、より効果的に塑性加工法の原理と特徴を理解させることができると思われる。また、塑性加工法は高精度で生産性が良い加工というだけでなく、加工後の製品の機械的性質を向上させることができるという特徴を持つ。このような塑性加工の特徴については、今回試作した加工機では理解することができない。このため、今後はより効果的な利用方法を検討す

るとともに、塑性加工法の特徴を理解させることができるような他の加工機の試作を行う予定である。

#### 5. まとめ

座学講義内で試作した卓上深絞り機の加工体験を実施し、本加工機による教育的効果を検討した。また、薄板の曲げ加工機も試作した。

実機を用いた加工実験よりも本卓上加工機を用いた体験的な加工実験の方が学生らは加工の概略を理解し易いという事が分かった。供試体のセットから加工実施までを学生自身が行う事ができるとともに、加工の際の荷重を自身で体感できるという点で理解度を高めることができたと思われる。

深絞り加工を学ぶ前段階の教材として、V曲げ加工機を試作した。市販の簡易バイスを購入し、卓上CNC加工機を用いてパンチとダイスを製作すれば、軽量かつ安価でV曲げ加工機を作製することができる。また、本加工機を用いることで、弾性変形と塑性変形の違いやスプリングバックについても理解することができるということが分かった。

#### 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浦雄飛氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 吉田昌史, 内海能亜, 野崎孝志, “教育教材としての卓上深絞り機の開発”, 静岡理科大学紀要, **21** (2013) 137.
- 2) 大矢根守哉, 新編 塑性加工学(養賢堂, 2012).
- 3) 桑原利彦, “材料モデルとシミュレーションの高度化に資する実験塑性力学”, 素形材, **51** (2010) 37.