

インテリジェント曲げ加工システムの開発

京都大学 工学部 機械工学科

教授 島 進

(平成2年度研究開発助成 AF - 90015)

1. 研究の背景

近年、従来の大量生産に代わって、多品種小量生産に対応するためFMSあるいはCIMシステムの構築へのニーズが高まる中で、塑性加工の分野でもそれに対応するフレキシブルでかつ従来よりも高精度な塑性加工システムの開発が重要な課題となっている。このような観点から、本研究ではインテリジェントな薄板V曲げ加工システムの開発を試みる。

V曲げ加工は、金属板材の曲げ加工の中で最も広く採用されている加工法の一つである。通常曲げられた素材は除荷によってスプリングバックするため、スプリングバック後の曲げ角度が目標角度に等しくなるようにポンチとダイスの角度が設計される。従って、素材のスプリングバック量を正確に把握することが加工精度に関わる重要なポイントである。ところが、現状では同じコイルから切り取った材料でも材料定数や板厚はある範囲内ではらつており、そのためスプリングバック量は一定ではない。加工精度を上げるためには、スプリングバック量のばらつきへの対処が不可欠である。実際の加工では、加工精度を上げるためには、底突きやコイニングなどのような素材をポンチとダイスの間で強く圧縮する方法によって除荷後のスプリングバック量を少なくし、スプリングバック量のばらつきによる影響を減らすような方法が採られている。この場合、荷重が必然的に高くなり、高剛性の加工工具が必要となる。

V曲げ加工の精度を高めるためのもう1つの方法として、底突きを行うのではなく、ポンチの動きを制御することが考えられる。この場合、前記の方法よりスプリングバック量が大きく、加工精

度が材料定数などのばらつきによって影響されやすいが、素材の材料特性や板厚のばらつきに対応してポンチの押込み量を正確に制御すれば、製品の誤差を抑えることが可能である。

通常のV型曲げとエアバンドとを比較すると、前者の場合は製品の曲げ角度に合わせて工具の形状を設計するので、製品の曲げ角度が異なれば、角度の異なる工具を使う必要がある。また、同一の曲げ角度の製品を加工する場合でも、材質や板厚の異なる材料に対して曲率分布やスプリングバック量などの素材の変形パターンが異なるので、それに応じて使用する工具の角度も違ってくる。更に、底突きを行う時に荷重が高くなるため、この加工方式はフレキシビリティに欠け、多品種少量生産に適さないとと言える。一方、後者の場合はポンチの動きを制御することによって加工を行うため、コンピュータ制御に適した加工法である。また、ポンチの押込み量を変えることによって素材を任意の曲げ角度に加工できる。すなわち、同一工具で様々な曲げ角度の加工が可能である。従って、後者は前者よりフレキシブルであると言える。しかも、荷重が前者と比較して低くなる。

以上のことから、従来のV型工具を用いた底突きによる加工方式はFMS化あるいはCIMには適しておらず、むしろ工具の動きを制御する加工方式が適していると思われる。

そこで本研究では、FMSが導入しやすいV曲げ加工システムを開発するために従来のV型工具に代わって新しいV曲げ工具を開発し、加工方式としてポンチの動きを制御する方式を採用することとする。そして、新たな工具によるV曲げ加工の特性を調べ、シミュレーションによって曲げ加工

における素材の変形解析を行う。更に、コンピュータ制御システムの導入によるV曲げ加工の知能化について検討し、高精度かつフレキシブルなV曲げ加工システムの開発を試みようとするものである。

2. 従来方式の曲げ加工

従来のV型曲げ工具を用いた90度曲げの場合、図1³⁾に示すようにポンチ押込みの初期段階では、素材がポンチおよびダイスの両肩と接触し、三点曲げと同様な状態で、素材がポンチとの接点を中心に広い範囲にわたって変形する。素材とダイスとの接点間距離が比較的大きいので、ポンチの荷重は小さい(図1のステージa)が、曲げ角度が最終角度の直前になると、素材がダイスの側面と接触し、接触点がダイスの肩から底部付近に大きく移動する(図1のステージb)。ポンチが更に押込まれるにつれて素材がポンチの側面に接触し、曲げ戻される(図1のステージc)。その結果素材が複雑に変形した後、ポンチとダイスの間に密着するまで押し付けられる(図1のステージd)。最後に、ポンチとダイスの間で強圧することにより、素材は平らに押し伸ばされ、押し付け力の増加と共にスプリングバック量はほぼ一定値に落ち着く。

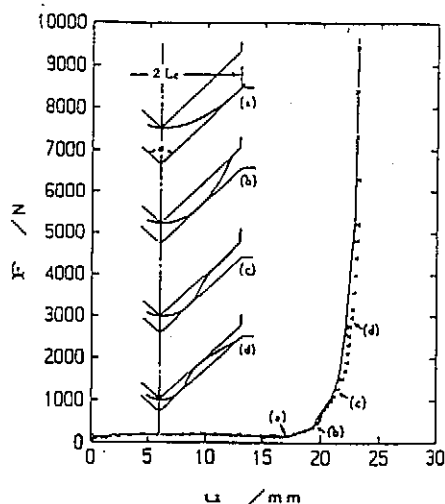


図1 通常のV曲げ工具による曲げにおける荷重-変位線図

そのため荷重は急激に増加するが、ほぼ一定の曲げ角度を得ることが可能である。

以上のような加工プロセスでは上述のように最終曲げ角度付近で荷重が急激に増加するので、ポンチの押込み量を制御して曲げ角度を決定することはほとんど不可能である。従って、材料特性の変動に応じて、ポンチの押込み量を制御するようなコンピュータ制御システムの導入に適していない加工方式である。

一方、エアベンドの場合(図2参照)は曲げの初期から最終段階に至るまで三点曲げによって素材が曲げられるため、荷重の急激な上昇がなく、ポンチの制御が行いやすい、しかし、上記のような底突きを行っていないため、素材のスプリングバック量が大きく、製品の曲げ角度は板厚や材質のばらつきに影響されやすい²⁾。従って、加工精度を上げるためには、ポンチの制御は板厚や材質の変動に応じて行われるべきである。

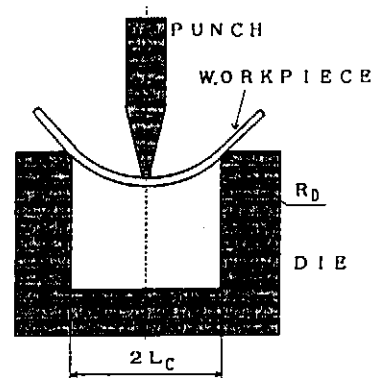


図2 エアベンド工具

3. 新しい加工工具の提案

3.1 曲げ工具の形状

図2に示すエアベンド工具によるV曲げ加工の場合は、曲げの曲率半径が大きくなるという欠点を補うためにダイス間隔 $2L_c$ の小さいものを用いればよい。しかし、そうすると押込み量の増加に対する荷重の増加率や曲げ角度の増加率が大きくなる。それに対して、特定の角度を持つV型工具

(図1を参照)で且つ底突きを行わない場合は、最終曲げ角度になる直前まで図2に示すエアベンドと同様な三点曲げであるので、ポンチの押し込み量を制御することによって目標曲げ角度を得ることは可能であるが、素材が広い範囲にわたって変形するため、曲率半径が大きくなる。

そこで、図3に示すような工具(以後、曲線ダイスと呼ぶ)を新たに考える。図2に示す工具と比較して、ポンチ形状は同じであるが、新しいダイスの方は肩が曲率の小さい曲線となっている。このような曲線ダイスを用いる際、ポンチを押し込むにつれて、素材とダイスとの接点が肩の斜面に沿ってダイス底部に向かって徐々に移動する。そのため、塑性変形前と塑性変形開始の直後までは、素材とダイスの両肩の接点の間隔が広く、図2の工具による場合と同様にポンチ荷重は小さい。ポンチを押し込むにつれて素材とダイスとの接点が中心に向かって徐々に移動するため、素材の被変形部長さは減り、変形域がポンチとの接点付近に集中するとともにポンチ荷重は徐々に増加する。従って、曲率半径の小さい製品を得ることができるであろう。また、この場合はエアベンド工具の場合と同様に三点曲げによって加工が行われるので、素材の変形は複雑ではなく、比較的容易にシミュレートすることができる。

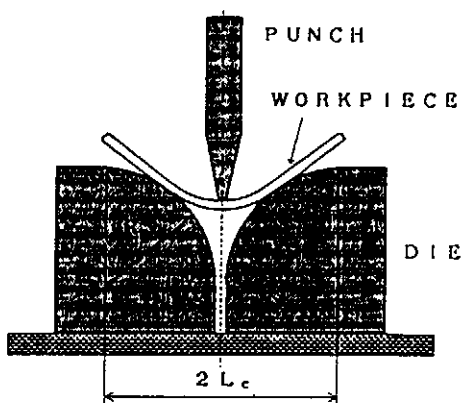


図3 新たな曲線形状ダイス

3.2 新しい加工工具によるV曲げ加工の特性 加工工具の動きを精度よく制御するに際して

は、何らかの方法で素材の材料特性をセンシングしながら制御する必要がある。そのためには変形のシミュレーションが不可欠である。

そこで新しい加工工具によるV曲げ加工のシミュレーションを行うことにする。簡単のために、弾塑性単純曲げ理論を基にして加工のシミュレーションを行った。シミュレーションに関する基礎式を以下に示す。

素材は軟鋼の板材とする。素材の応力-ひずみ曲線は引張り試験によって得られた。これを次の式で近似する。

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ C\varepsilon^n & \varepsilon > \varepsilon_0 \end{cases}$$

ここにE、C、nはそれぞれ弾性係数、塑性係数、加工硬化指数(n値)を表し、 ε_0 は降伏ひずみを表す。各材料定数の値は表1に示す。上式に示す応力-ひずみ曲線は引張り試験によって得られたものであるが、ここでは素材は引張りと同様の等しい応力-ひずみ曲線を有するとする。

表1 素材の材料定数等

弾性係数	E (GPa)	206
塑性係数	C (MPa)	650
加工硬化指数	n	0.21
厚さ	t (mm)	1.0
幅	b (mm)	20

図4に示すように真直な素材が変形する前のポンチの先端との接点を原点として、水平方向にX軸、垂直方向にY軸をとる。原点からダイス肩部との接点までの素材をm個の要素に分割する。素材とポンチとの接点を節点0とし、節点0からi番

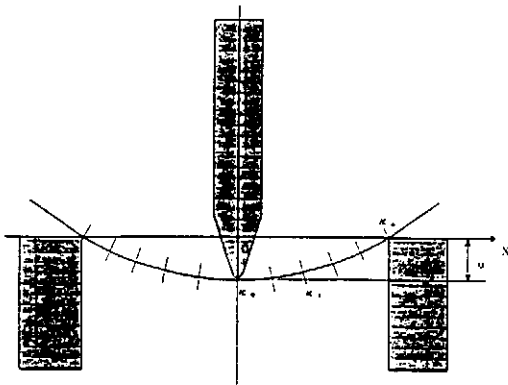


図4 曲げ変形解析のためのモデル

目の節点座標を (X_i, Y_i) 、傾きを θ_i 、原点からの長さを L_i とする。素材の受ける曲げモーメントの大きさは素材の長さ L に沿って線形に分布すると仮定すると、節点 i における曲げモーメント M_i が求められる。

素材が弾性変形をしているときは節点 i における曲率 κ_i は弾性論から導かれる。

弾塑性変形を開始した後は、剛塑性変形と近似する³⁾。

各節点の座標 (X_i, Y_i) 及び傾き θ_i (以後これをフランク角と呼ぶ) は幾何学的関係より κ を長さ L に沿って積分する事により求められる。またスプリングバック後のフランク角 θ_i も同様に求めることができる。

さらに曲げモーメントのつりあい条件より、ポンチにかかる荷重 F と押し込み量 u の関係が得られる。

以上の関係式を用いれば与えられた目標曲げ角度からポンチの押し込み量 u 、荷重 F 、フランク角 θ を求めることができる。さらに、板厚や材料特性にばらつきがある場合に、曲げモーメントや荷重にどの程度の影響が現れるかを推定することが可能である。

まず、例として形状が大きな円弧であるようなダイス (以後、円形ダイスと呼ぶ) を用いた場合の加工特性を調べた。ただし、素材とダイスの両肩との接点間の間隔は初期状態では $2L_c = 60\text{mm}$

と設定した。また、ダイス肩半径 $R_0 = 29\text{mm}$ とした (図3を参照)。比較のために表1に示す材料特性を持つ軟鋼板を用い、図5に示す実験装置 (本装置は本研究助成により試作開発したものである) で実際に曲げ試験を行った。結果を図6に示す。図に示すように初期の弾性変形や塑性変形開始の段階 ($u = 5\text{mm}$ 程度まで) では、素材とダイスの両肩との接点間の感覚は広く、荷重も小さいが、ポンチ押し込み量の増加につれて、素材とダイスとの接点が中心に移動するため、接点間の間隔が狭くなり、荷重も徐々に大きくなっていく。このよ

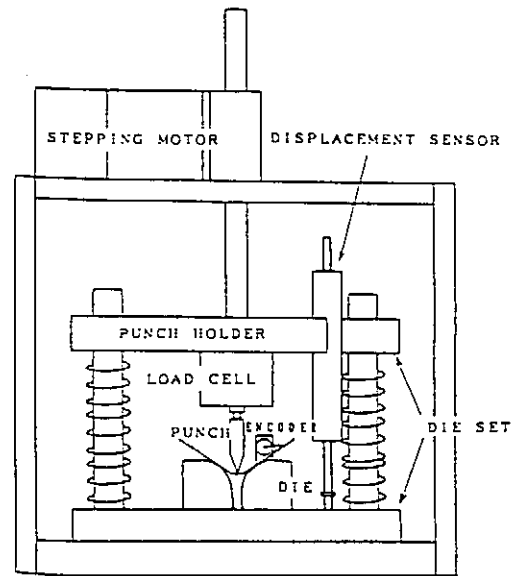


図5 曲げ試験装置

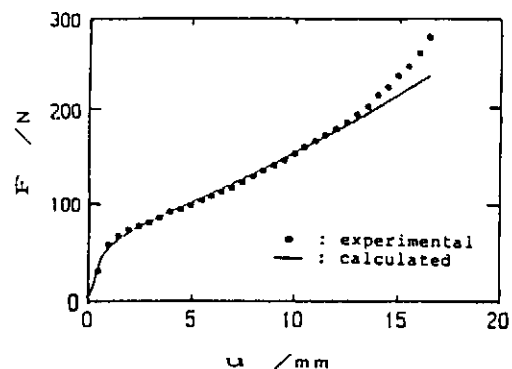


図6 円形ダイスによる荷重-変位線図

うなF-u曲線はV型曲げの場合のF-u曲線(図1を参照)とは非常に異なっていることが分かる。

シミュレーション結果は実験結果と比較して、最終ポンチ荷重が多少小さいが、このシミュレーションでは素材とダイスとの間の摩擦力や曲げ変形時に素材の幅方向に生じる反りを無視したためと思われる。しかし全体的にみて単純曲げ理論を用いても、このような曲げにおける素材の変形パターンをかなり精度よく評価できる。

ここで円形ダイスとエアバンド工具により曲げ特性を次に挙げる項目に着目して比較する。更にフレキシブルな加工システムの条件から適切な工具形状の検討を行う。

- a) ポンチ荷重と押し込み量の関係 (F-u 曲線)
- b) フランク角とポンチ押し込み量の関係 (θ -u 曲線)
- c) 素材の曲率分布 (κ 分布)

上記の各結果を図7に示す。図7より、ポンチ押し込み量の増加に対して、フランク角の増加は緩

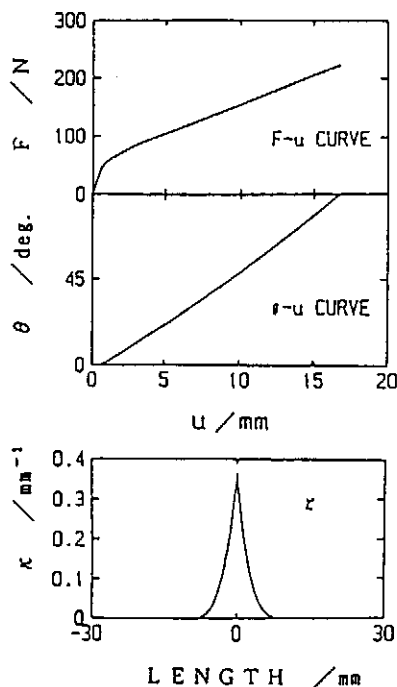


図7 円形ダイスによる曲げ変形特性

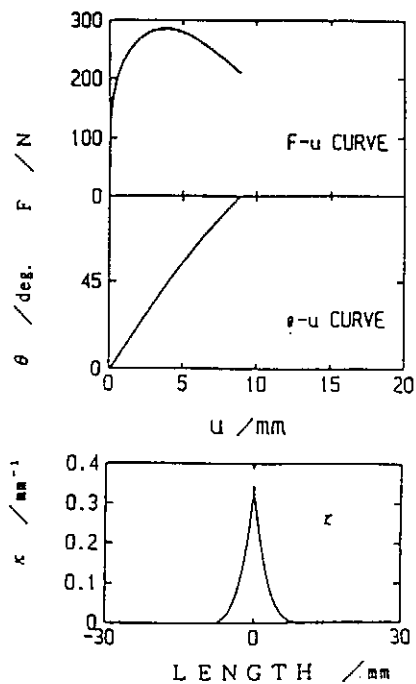


図8 エアバンド工具による曲げ変形特性

やかである。また曲率は中心に集中している。すなわち曲げの曲率半径が小さいことを示す。これに対して、図2に示すエアバンド工具を用いて図7と同様な曲げの曲率半径を得るためにはダイス間距離を $2L_c = 22\text{mm}$ 、ダイスの肩半径 $R_0 = 2\text{mm}$ とした場合の加工特性は図8のようになる。図7と図8の特性を比較すると、同じ曲げの曲率半径を得るには、円形ダイスによる方がエアバンドの場合より最大荷重は約20%小さく、押し込み量の増加に対する曲げ角度の平均増加率は約50%になっている。すなわち、同様な製品に加工するのに、円形ダイスを用いた場合は図2に示すエアバンド工具より加工精度が2倍に上がると同時に加工荷重が20%減少となる。従って、本研究で提案した高精度かつフレキシブルな加工システムの条件から考え、工具の移動量を制御する加工方式においては、図2に示すエアバンド工具より円形ダイスの方がよりすぐれていると言える。

3.3 最適工具形状

曲線ダイスの中から高精度かつフレキシブルな

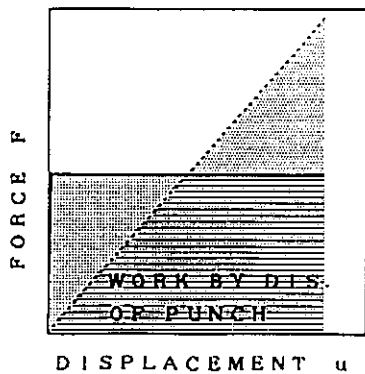


図9 曲げにおける荷重-変位線図の模式図

加工システムの条件により適するようなダイス形状を考えてみることにする。曲げ加工において、素材とダイスあるいはポンチとの間で摩擦が存在しないと仮定すると、ポンチの押込みによる仕事は素材の塑性変形エネルギーと弾性変形エネルギーの和に等しい、ダイスの形状が違って、加工後の素材の曲げ角度と曲げの曲率半径が同じであれば、素材の変形エネルギーはほぼ等しく、ポンチの押込みによる仕事もほぼ同じであると考えられる。図9は異なる加工工具によるポンチの押込みによる仕事量をモデル的に示したものであり、影で示す部分はその仕事量を表す。同じ仕事量に対してポンチの最大荷重を最小にする（図9の実線に示す）ような工具形状が理想的であると

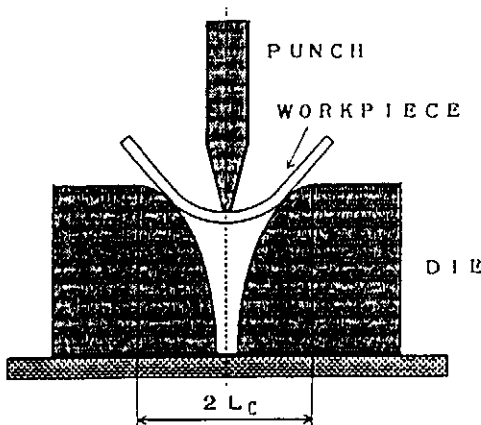


図10 楕円形状ダイス

考えられる。

曲げの曲率半径が同一の製品を加工するのに、より小さい荷重で加工できる方がより良い加工工具であるという考え方から、初期では荷重の増加率が大きく、ポンチストロークの増加に従って次第に荷重の増加率が小さくなるような楕円形のダイス（以後、楕円形ダイスと呼ぶ、図10参照）を考える。楕円形ダイスの場合、円形ダイスと比較して接点の中心方向への移動は初期では速く、次第に遅くなるので、 $F-u$ 曲線は図9の実線で示す曲線に近いものになるのであろう。ここで、長軸がY軸方向に一致するような楕円曲線のダイスを想定し、長軸=38mm、短軸=19mmとする。図7とほぼ同様な曲げの曲率半径を得るために、 $2L_c = 40\text{mm}$ としてシミュレーションを行った。この場合の結果は図11に示すようになる。図に示すように $F-u$ 曲線は初期で急激に上昇し、ポンチの押込み量が大きくなるにつれて、荷重増加率が小さくなり、最後では荷重はほぼ一定となる。最大荷重は円形ダイスの場合よりも更に小さくなっていることが分かる。

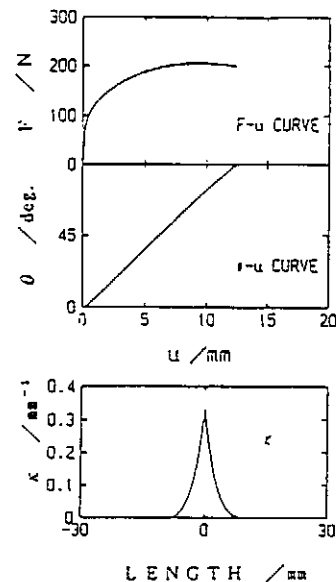


図11 楕円形ダイスによる曲げ変形特性

ここで、更にシミュレーションの場合と同じ形状の楕円形ダイスを用いて実際に曲げテストを行

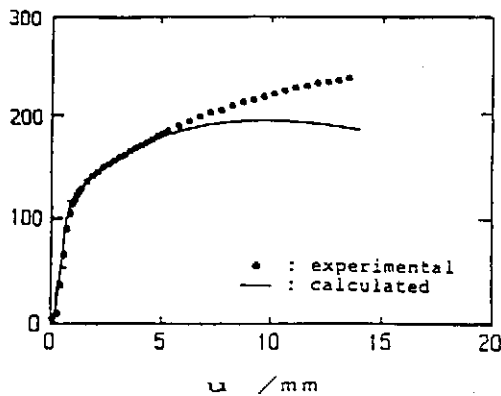


図12 楕円形ダイスによる荷重-変位線図

った。結果を図12に示す。ポンチストロークの後半では計算されたポンチ荷重は実験結果よりかなり小さくなっているが、これはダイスと素材との間での摩擦力の垂直方向の成分が円形ダイスよりも大きくなるためである。

以上の結果から、円形ダイスや楕円形ダイスのような曲率の小さい曲線ダイスを用いた場合はエアバンド工具の場合より高精度かつフレキシブルな加工システムの条件により適していると言える。また、円形ダイスと楕円形ダイスとを比較すると、楕円形ダイスを用いた場合は、円形ダイスの場合よりも加工に要する最大荷重が小さくなる。一方、押し込み量に対する曲げ角度の増加率は円形ダイスの方が小さく、加工精度はより高くなると考えられる。

今回は、円形ダイスと図10に示すような楕円形ダイスの曲げ変形特性しか調べていないが、シミュレーションと実験によって、最適なダイス形状を見出すことも可能であろう。

4. 曲げ加工におけるスプリングバックと高精度化

V曲げ加工では除荷後のスプリングバック量が曲げ角度の精度に大きく影響する。したがって素材の板厚や弾性係数、塑性係数などの材料特性にばらつきがあるとスプリングバック量も変動するため精度良く加工を行うことは一般に難しい。

ところで金属材料は塑性変形にともなって加工硬化するが、弾性係数については一般に一定と考えられている。しかし塑性変形の進行にともなって弾性係数が減少するという報告⁶⁾もあり、十分調べられているとは言えない。そこで単軸引張りにより塑性変形させた素材の弾性係数を測定し、塑性変形にともなって弾性係数がどのように変化するかを調べた。更に弾性係数の減少が、V曲げ加工における素材の挙動にどのように影響するかについて弾塑性有限要素法 (FEM) により検討した⁵⁾。

図13に弾性係数Eの測定結果を示す(図中のキーについては表2参照)。図13(a)は試験片A及びBに対する結果であり、図13(b)には試験片C①、C②およびC③の結果をプロットしてある。なお(b)には比較のため受入れ材Aの結果を実線で示す。これらのグラフから軟鋼板のEは塑性ひずみの増加に伴い減少する傾向にあることがわか

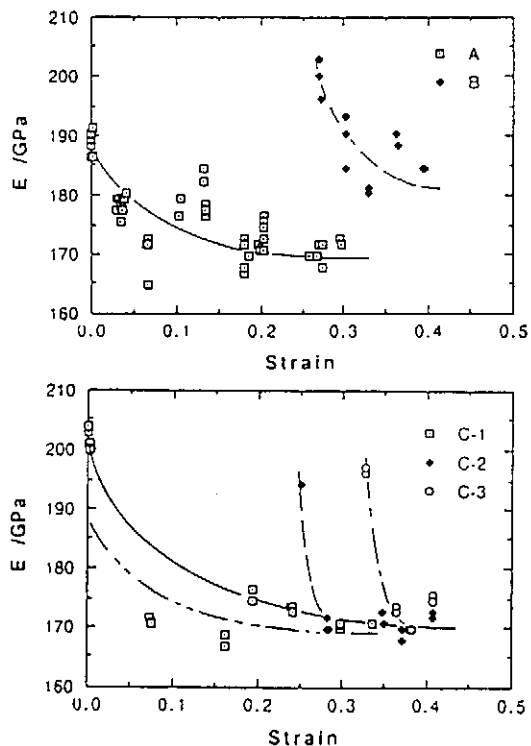


図13 変形による弾性係数の変化

表2 各試験片グループの焼鈍条件

A	受入れ材
B	$\epsilon_p = 0.27$ の後 $800^\circ\text{C} \times 30$ 分焼鈍
C①	$\epsilon_p = 0$ で $680^\circ\text{C} \times 1$ hr 焼鈍
C②	$\epsilon_p = 0.25$ の後 $680^\circ\text{C} \times 1$ hr 焼鈍
C③	$\epsilon_p = 0.325$ の後 $680^\circ\text{C} \times 1$ hr 焼鈍

る。すなわち $\epsilon_p = 0.3$ で弾性係数 E が $E = 170\text{GPa}$ となっている。これは初期の E が 189GPa であるから約 10% の減少である。

焼鈍後も同様にひずみの増加に伴い弾性係数は減少するが、その様子は焼鈍条件によって異なる(図13 (b))。 $800^\circ\text{C} \times 30$ 分焼鈍を行った試験片Bの弾性係数 E は受入れ材Aのそれよりも大きい。その後 E は受入れ材と同様約 10% 減少する。これに対して、 $680^\circ\text{C} \times 1$ 時間の焼鈍を行った試験片Cは焼鈍直後において、試験片Bの焼鈍直後と同程度弾性係数は大きくなる。しかしその後、塑性変形に伴って急激に減少し受入れ材Aの弾性係数の値とほぼ一致するようになる。

以上のことを考慮して弾塑性有限要素法による解析を行ったところ、 E として一般的に用いられる値 206GPa 一定とした場合の結果 (E1) は、実験値よりもかなり小さく、 E が変化するとした場合の結果 (E2) は、実験結果に近くなる。これは円形ダイス、楕円形ダイス、どちらについても同じであった。

以上からわかるように弾性係数は塑性変形にともない減少し、したがってスプリングバック量がそれによる影響を受けることが確かめられた。したがって曲げにおいて、より精度の高い加工を目指すには弾性係数について新たな取り扱いが必要

である。

5. 新たなダイスの自動制御に対する適応性

本研究で提案した曲線ダイスによるV曲げ加工は基本的に三点曲げによって素材を变形させることになっているので、図2に示すエアベンドと同様に加工中にポンチの加重や押込み量あるいは曲げ角度などを測定すれば、シミュレーションを介して材料定数をオンラインで推定することが可能であり、また目標曲げ角度からポンチの押込み量を計算することもできる。従って、既に我々が開発したインテリジェントな曲げ加工制御^{6,7)}を円形ダイスや楕円形ダイスによるV曲げ加工に適用することによって、本曲げ加工システムは高精度かつシャープな曲げ角度の製品を加工することができると同時にFMSあるいはCIMシステムに適応できるものになる考えられる。

6. 結 言

本研究では、V曲げ加工を多品種少量生産に適応させるために、従来では全く使用されていない新しい形状の加工工具の開発を試みた。また、新しい加工工具によりV曲げ加工の特性を調べ、V曲げ加工プロセスへのコンピュータ制御システムの導入に対する適応性について検討した。

本加工工具による曲げ加工システムの特徴として

- ①従来の高荷重による底突きによって加工精度を上げようとする加工法と異なり、ポンチのストロークを制御することによって加工を行う。
- ②従来の曲げ加工のように荷重の急激な増加がなく、高い荷重も必要としないため、ポンチ押込み量を制御しやすい。
- ③素材の変形パターンが簡単にシミュレートすることができるので、材料特性や板厚の変動に対応する押込み量を簡単に解析モデルによって計算することができる。従って、加工モデルをベースとした制御が適用しやすい。

- ④従来のV型曲げ工具と異なり、一種類の工具で任意の角度の製品を加工することができる。
- ⑤フレキシブルな加工法であるエアベンドの場合と比較しても、加工精度が高くなるであろう。
- ⑥素材の引張り試験の結果、弾性係数が塑性変形にともない減少する。したがって曲げにおいて、より精度の高い加工を目指すには弾性係数について新たな取り扱いが必要である。
- 2) 小山 勝己：塑性と加工、28 - 313, (1987), 118.
- 3) 大矢根守哉：塑性加工学, (1983), 188, 養賢堂.
- 4) 康ほか：40 塑加連講論, (1989), 603.
- 5) 楊 明ほか：平3 塑春講論, (1991), 459.
- 6) 楊 明ほか：システム／制御／情報, 35 - 2, (1991), 70.
- 7) Yang, M. et al. : Proc. Japan - U.S.A. Symp. FA, (1990), 755.

参考文献

- 1) プレス加工便覧、(1975)、217、丸善。