

インテリジェント曲げ加工システムの開発

島 進* 楊 明**

1. 緒言

多品種少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。本研究はこのような観点から、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たものである。

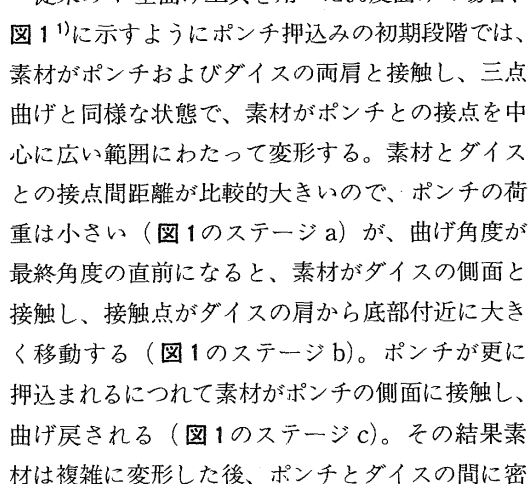
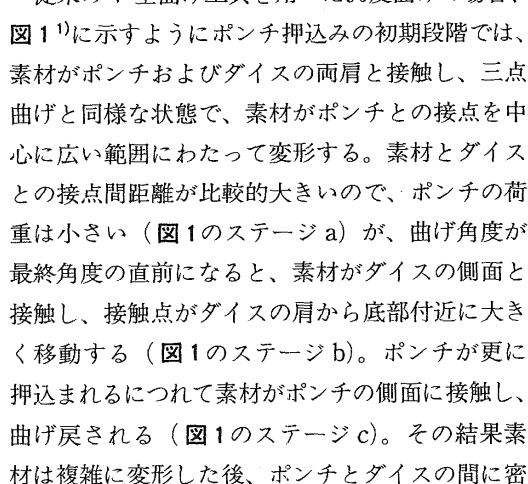
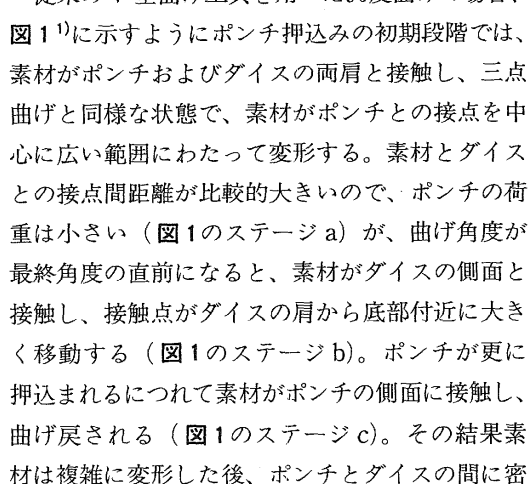
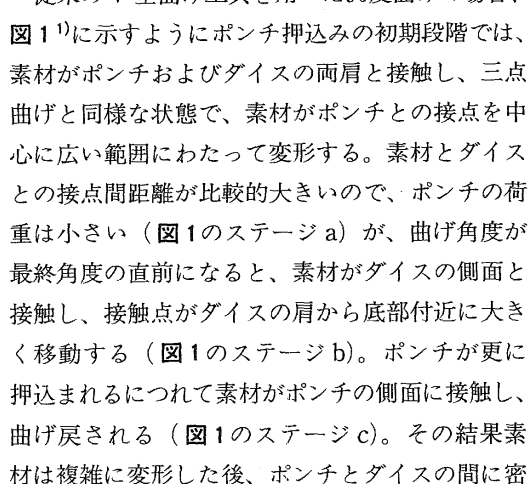
V 曲げ加工では、除荷による素材のスプリングバック後の曲げ角度が目標角度に等しくなるようにポンチとダイスの角度が設計される。ところが、現状では同じコイルから切り取った材料でも材料定数や板厚はある範囲内ではばらついており、そのためスプリングバック量は一定ではない。加工精度を上げるためには、スプリングバック量のばらつきへの対処が不可欠である。実際の加工では、加工精度を上げるためには、底突きやコイニングなどのような素材をポンチとダイスの間で強く圧縮する方法によって除荷後のスプリングバック量を少なくする方法が採られている。しかしこの加工方式はフレキシビリティに欠ける。

精度を高めるためのもう一つの方法として、底突きを行うかわりに、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し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。

この方式では、ポンチの押し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。

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、に示すようにポンチ押し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（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（のステージ b）。ポンチが更に押し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（のステージ c）。その結果素材は複雑に変形した後、ポンチとダイスの間に密

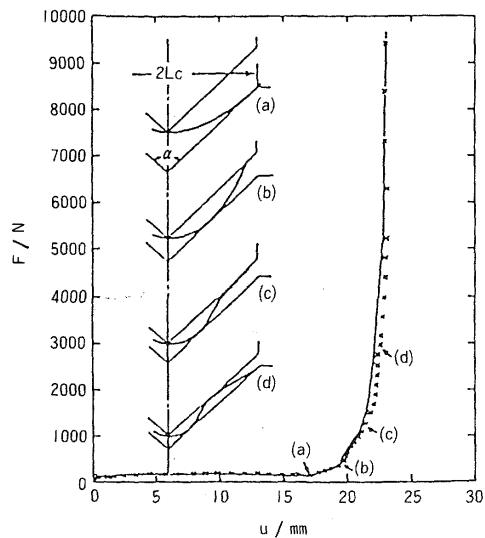


図1 通常のV曲げ工具による曲げにおける荷重-変位線図

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。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、ポンチの押し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、ポンチの押し込み量をコンピュータ制御するようなシステムの導入には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、ポンチの制御を行いやすい。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⁾。

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

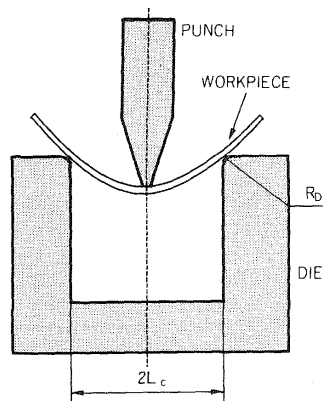


図2 エアベンド工具

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、そうすると押し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と、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。そして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。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。

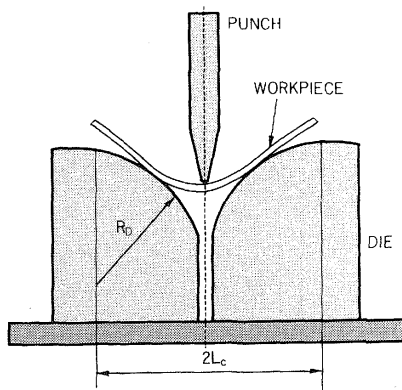


図3 新たな曲線形状ダイス

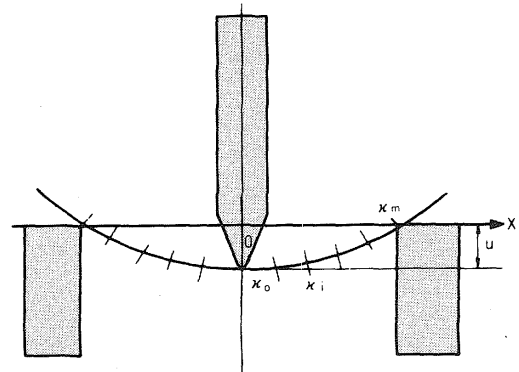


図4 曲げ変形解析のためのモデル

3.2 曲線ダイスによる曲げ加工特性

加工工具の働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。シミュレーションの概要を以下に記す。

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。

$$\sigma = \begin{cases} E \varepsilon & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ C \varepsilon^n & \varepsilon > \varepsilon_p \end{cases} \quad (1)$$

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_p 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

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

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圧縮とで等しい応力—ひずみ曲線を有するとする。

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。原点からダイス面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番目の節点の座標を (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 を長さに沿って積分することにより求められる。またスプリングバック後のフランク角 θ_f 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

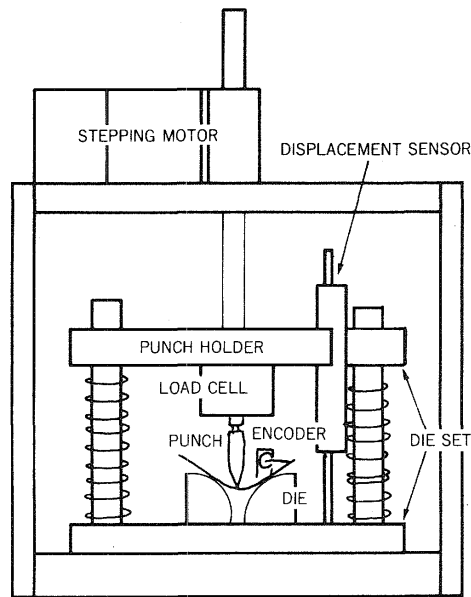


図5 曲げ試験装置

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のダイス（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 $R_D = 29\text{mm}$ 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間隔は広く、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、最終ポンチ荷重は多少小さいが、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ベンド工具による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**に示すエアベンド工具を用いて**図7**と同様な曲げの曲率半径を得るため、ダイス間距離を $2L_c = 22\text{mm}$ 、ダイスの肩半径 $R_D = 2\text{mm}$ 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ベ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

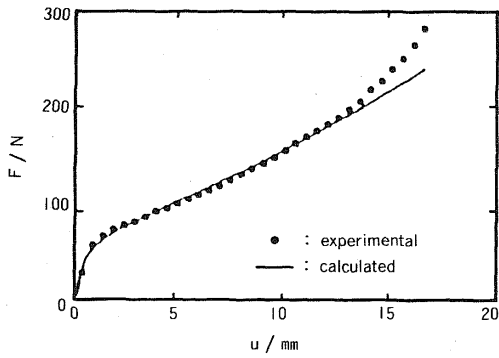


図6 円形ダイスによる荷重-変位線図

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%減少する。従って、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

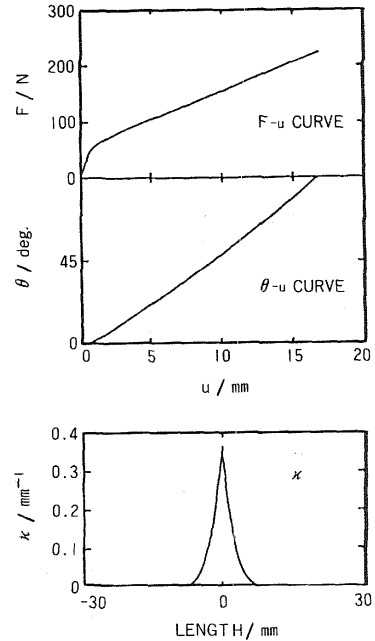


図7 円形ダイスによる曲げ変形特性

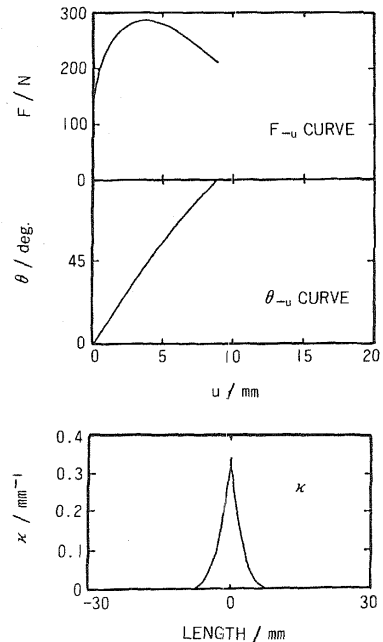


図8 エアバンド工具による曲げ変形特性

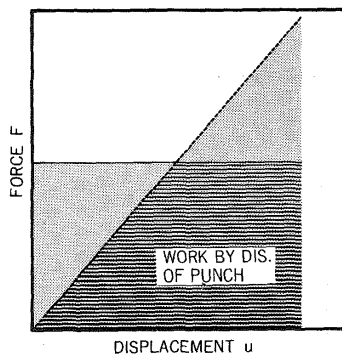


図9 曲げにおける荷重—変位線図の模式図

に示す) ような工具形状が理想的であると考えられる。

曲げの曲率半径が同一の製品を加工するに際し、最大荷重を小さくするため、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。

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、ポンチの押し込み量が大きくなるにつれて、荷重増加率が小さくなり、後期に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。

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。

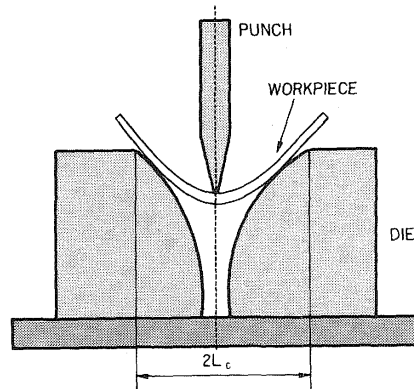


図10 楕円形状ダイス

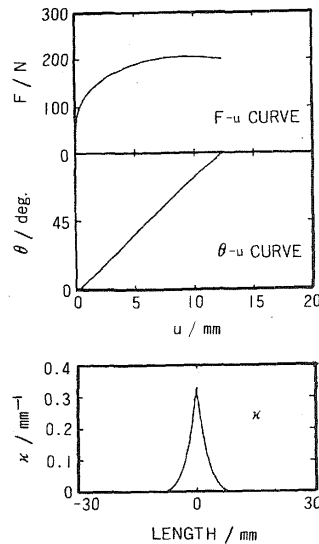


図11 楕円ダイスによる曲げ変形特性

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はエアバンド工具と比較して高精度かつフレキシブルな加工システム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、楕円形ダイスの場合は、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。

現段階では、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。

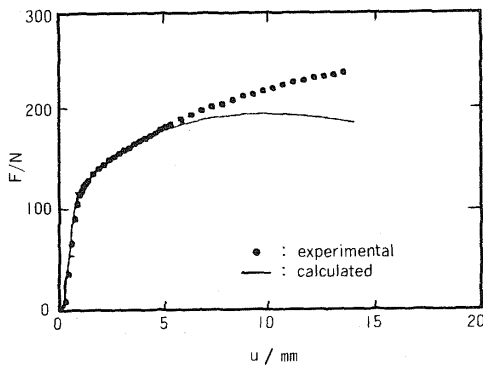


図12 精円ダイスによる荷重-変位線図

4. 加工のモデル制御

以上では新たな曲線ダイスを用いた場合の曲げ変形特性について検討を加えた。本節では図2のエアバンド工具を用いて実際に曲げ加工の制御を行って本制御システムの有効性を示す。曲げ加工装置はダイスが図2のものを使用する以外は図5に示すものと全く同じである。制御システムの概要は図13に示す。

4.1 材料特性の推定

材料定数 E 、 C 、 n のうち、まず弾性係数 E は表1に示す値であるとする。また、ポンチの押込み量と荷重の関係のみから C および n を同時に推定することは不可能であるため、ここでは n 値は一定であるとし、塑性係数 C の値のみを次に示すように推定することとする。

表1に示した各材料定数 E 、 n および $C=C_s$ (初期値) と、予め測定した板厚 t および板幅 b を用いて $F-u$ 曲線を計算し、オンラインで測定したポンチの荷重と押込み量の関係とを比較する。材料定数 E と n は一定値と仮定しているので、弾塑性変形の初期において計算値と実測値との間に差が存在すると、その差は最初に与えた C_s の値と実際の素材のそれとが一致していないために生じたものとみなす。従って、計算に用いた C_s の値を修正することによって、計算値を実測値に一致させることができる。その際、塑性係数 C の変化の割合と荷重 F とは同じであるから、計算された $F-u$ 曲線の最大値を実測値と比較して、

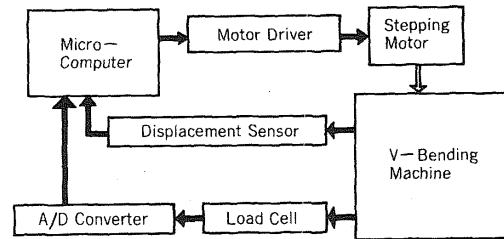


図13 制御システムの概要

素材の C の値を次に示すように決定する。

$$C = \frac{F_x}{F_s} \cdot C_s \quad (2)$$

ただし、 C_s は表1に示す値であり、 F_s はシミュレーションによって計算された最大ポンチ荷重である。また、 F_x は測定された最大ポンチ荷重を表す。

4.2 加工モデルの補正

ここでは前節で概説したシミュレーションに用いた解析モデルを加工モデルと呼ぶ。加工の制御を行う際には、加工モデルを用いてオンラインで製品の目標とする角度からポンチの押込み量を計算する。その際、シミュレーション結果(図6, 12参照)から分かるように、押込み量の小さいところでは $F-u$ 曲線の計算値と実験値は比較的一致しているが、押込み量が大きくなるにつれて、計算値と実験値の間にずれが生じる。従って、押込み量の大きい領域において、加工モデルに対して次のように補正を行う。

$F-u$ 曲線に対しては板厚の変動による影響が最も大きいから、押込み量の大きい領域において加工モデルによる計算値と実験値が一致するように板厚に対する修正を行うことにする。すなわち、ポンチの押し込み量が大きくなるにつれて板厚が次の式に示すように増えると近似して考える。

$$t = t_0 + f(u) \quad (3)$$

ただし、 t_0 は素材の板厚の初期値、 $f(u)$ はポンチ押込み量の関数を表す。 $f(u)$ を適当な関数に設定(ここでは $f(u) = a \cdot u^2$: a は可変パラメータ)し、計算値が実験値に近付けられるように実験誤差を用いて $f(u)$ 、すなわち a を修正していくようにする。

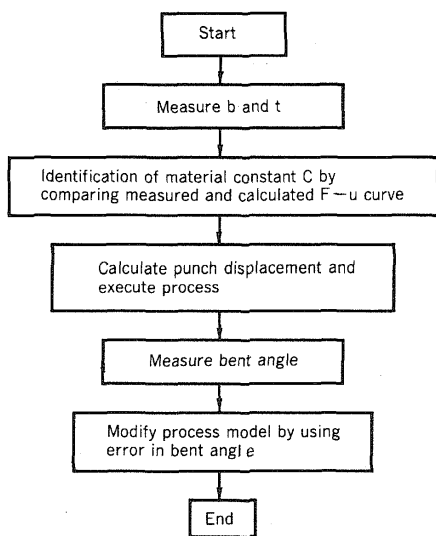


図14 制御の流れ図

4.3 加工制御の流れ

加工モデルをベースとしたV曲げ加工の制御は図14に示す流れのように行った。

まず、加工前に板幅 b と板厚 t を測定する。測定された t と b を用いて $F-u$ 曲線を計算する。オンラインで測定したポンチの押込み量 u と荷重 F の関係と、計算された $F-u$ 曲線から、上述の方法によって塑性係数 C を推定する。

測定された素材の板厚と幅、および推定された材料定数 C を用いて、ポンチ押込み量 u の大きい領域での $F-u$ 曲線を次に計算する。ここでポンチの最終押込み量を決定する際に、補正式(3)を用いて素材の板厚に対する修正を行う。可変パラメータ α には初期値として0を与える。そして、実験を行う都度その結果を用いて次のような学習方式で α を修正する。すなわち、先ず $\alpha = 0$ としたときの製品の曲げ角度を測定し、製品の曲げ角度と目標値との誤差 ε の大きさとその変化率 $d\varepsilon/du$ を用いてPD動作によって、 α に対して修正を加える。このように修正された α および製品の誤差 ε をデータとして蓄積し、次回の実験における α の決定に用いる。

製品の誤差が大きい場合、 α の値は大きく修正

されるが、誤差が小さくなっていくにつれて、 α もある一定の値に収束する。

5. 結果と考察

材料として表2に示す3種類の軟鋼板を用いて、90度曲げ加工の実験を行った。素材1および3と素材2は異なるコイルから切り取った試験片で、材料定数が多少異なると思われる。更に、素材2は素材1に対して板厚に変動がある場合、素材3は素材1に対して幅に変動がある場合に相当する。従来の底突きによるV曲げ加工の精度は0.5%~1%程度であるので、本実験では、従来の加工システムと同程度以上の加工精度を得ることを目標として曲げ角度の誤差の許容範囲を $\pm 0.5\%$ とした。

まず、加工モデルの補正式(3)のパラメータ α の値を決定するために、素材1を用いて実際に本モデル制御システムによる数回の加工を行った。各回の実験での曲げ曲率の誤差を図15に示す。また、誤差によって学習させた α の値を図16に示す。図15から、1回目の実験では $\alpha = 0$ であるため、得られた曲げ角度の誤差は大きい。 α の学習によって誤差が次第に小さくなり、5回目の実験では誤差は許容範囲内に入っている。得られた曲げ角度が誤差の許容範囲内にあるときには α の値に対する修正を行わないので、図16に示すように5回目での α の値は4回目のそれと同一の値となる。

しかし、9回目に再び曲げ角度の誤差が許容範囲を越えたため、 α の値はそれによって新しく修正される。10回目以降はすべて許容範囲内に収まっている。

表2 用いた素材の寸法

No.	厚さ t (mm)	幅 b (mm)
1	1.0	20.0
2	0.95	20.0
3	1.0	25.0

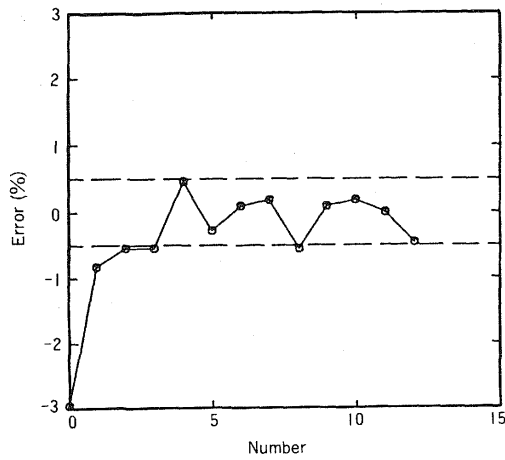


図15 曲げ角度の誤差

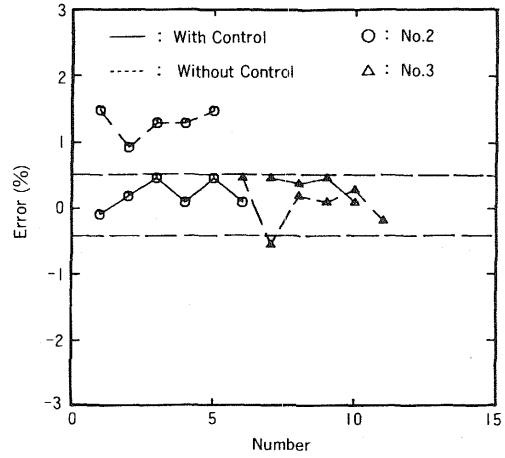


図17 素材2および3における曲げ角度の誤差

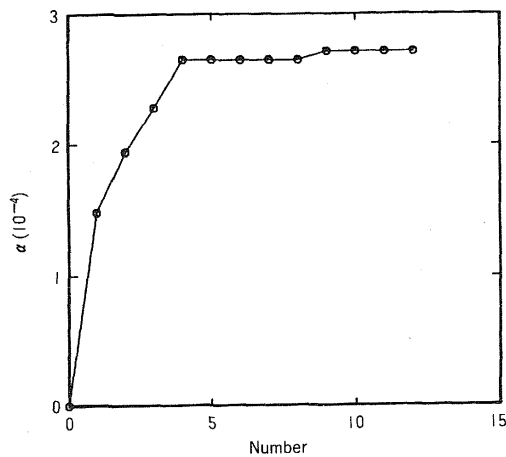


図16 修正係数 α の変化

次に、残りの素材2と素材3とを用いて上記の制御システムによる加工を行った。また比較するために、素材1を用いて加工を行った際の押込み量の平均値をポンチ押込み量として与え、制御システムを使用せずに加工を行った。結果を図17に示す。図に示すように、素材2と素材3は素材1に対して板厚や板幅あるいは材料特性が異なるが、上記の制御システムを用いることによって得られた曲げ角度がすべて誤差の許容範囲内に収まっている。それに対して、制御を行わない場合、素材2と素材1との板厚の差約2%に対して約1.4%の曲げ角度の誤差が生じた。また素材3は素材1より約20%幅が大きいですが、制御を行わなくても曲

げ角度の誤差はそれほど大きくならなかった。

本実験では、加工モデルに対して式(3)を用いて補正を行った。加工モデルとしては簡単な単純曲げ理論によるものであるが、補正を取り入れることによって比較的正確にポンチの押込み量を計算することができた。従って、制御のためのモデルとしては有効である。しかし、補正式(3)の第2頁 $f(u) = \alpha \cdot u^2$ は適当に定義したもので、物理的な意味はなく、また $f(u)$ としてどのような関数が最適であるかについては検討の余地がある。

6. 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変形させることになっているので、図2に示すエアバンドと同様に加工中にポンチの荷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⁴⁾⁵⁾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フレキシビリティを有する。

7. 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、従来には無かった新しい形状
の加工工具の開発を試みた。また、新しい加工工
具による 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従来の底突きによって加工精度を上げる加工法
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、ポンチの押込
み量を制御しやすい。
- ③素材の変形パターンを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な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 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。

更に単純曲げ理論を基にしたシミュレーション
を基礎にして制御を行った。すなわち、素材の板
厚と板幅を測定し、更にオンラインで材料特性を
推定することによって各試験片の板厚や材料特性
に応じたポンチの押込み量を用いて加工を行うこ
とができた。従来の V 型工具による曲げ加工と
異なり、適切にポンチ押込み量を制御すること
によって加工の高精度化を実現することができた。

参考文献

- 1) プレス加工便覧、(1975), 217, 丸善.
- 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) 楊 明ほか：システム／制御／情報, 35-2, (1991), 70.
- 5) Yang, M. et al.: Proc. Japan-U.S.A.
Symp. FA, (1990), 755.