

多機能曲げ試験・成形装置の開発

千葉大学工学部 電子機械工学科
助教授 小山秀夫
(平成元年度研究開発助成 AF-89016)

キーワード：曲げ加工，繰返し曲げ，複曲面成形

1. 研究の目的と背景

薄板の曲げ成形においては通常型が用いられ，特に複曲面状の成形においては型の形状が最終的な製品の形状を決定するため，他品種少量生産には多数の型を準備する必要がある．しかし，板に負荷する力の大きさや方向などを制御することが出来れば，形状によっては型を用いない成形も可能である．そこで，薄板の両端部をチャックによりつかみ，チャック自体を回転させることにより板を曲げ，さらにチャックの形状を円弧状にすれば複曲面状の成形も可能である．

このような考え方をもとに，本研究では一組のチャックをモーターによりそれぞれ独立して回転させ，そのチャックも横方向に移動できるような装置を製作し，制御用のプログラムを開発した．そこでは，材料特性が未知の材料でも，曲げ過程での測定データから成形後のスプリングバックを予測して，オーバーバンドを施す機能をもたせ，比較的簡単に様々な半径の円弧状曲げ，S形状と Ω 形状の成形を行った．さらに円弧状のチャックを用いた2方向の曲げ成形（複曲面成形）も試み，製品精度向上について検討した．また本装置では，材料に曲げ，曲げ返し変形を連続的に負荷し，装置のチャック回転角度と回転軸に作用するトルクを測定することにより，繰返し曲げにおける材料の形状とチャック軸にかかるトルクの関係も求めることができる．

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置の構成

本研究で試作した曲げ試験装置は，大きく分けて制御部，加工部，測定部の3つの部分に分けられる．図1は本装置の全体で，図2は加工部の概略図である．図中のチャックは材料を平面でつかむタイプであり，1方向の曲げに用いた．複曲面成形時は，このチャックを曲率半径200mmの円弧状または後述の曲率可変チャックに付け替えた．

図2に示すように，本装置の曲げ加工部は基本的には試験片両端をチャックによりつかみ，これを回転させることにより材料に曲げモーメントを加える構造である．チャック回転用には減速機組込サーボモータを使用し，さらにもう一段外付けの減速機を用いてトルクを大きくする．一組のチャックのうち，一方のチャックとその回転機構の載るテーブルには，テーブル移動用サーボモータにボールねじを接続し，強制的に移動させる機構を加えた．

サーボモータの回転量制御は，モータに付いているエンコーダからのパルスを送るサーボコントローラが検出して行う．チャックの回転精度は，1回転の最大誤差 0.03° であり，テーブル送り精度は $\pm 0.225 \mu\text{m/mm}$ 以内の誤差である．なお平面チャックを用いた場合は，チャック先端をダイヤルゲージを用いて回転中心と一致させた．

測定部では，モータの回転力をチャックへ伝える伝達軸上に貼付した4枚のひずみゲージにより測定したひずみ値からトルクを求め制御部へ送る．この伝達軸で測定されたひずみとトルク（曲げモーメント）の関係は，静荷重により校正し，さらにチャックの自重による補正も行い，その関係はチャック回転角ごとに保存した．またテーブルの送



図1 実験装置全体

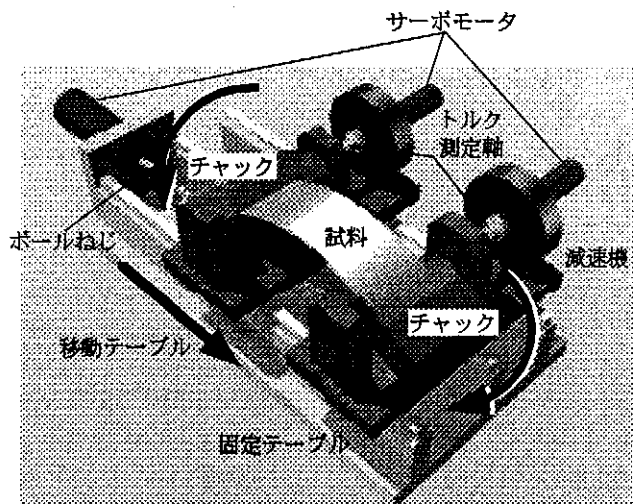


図2 装置加工部

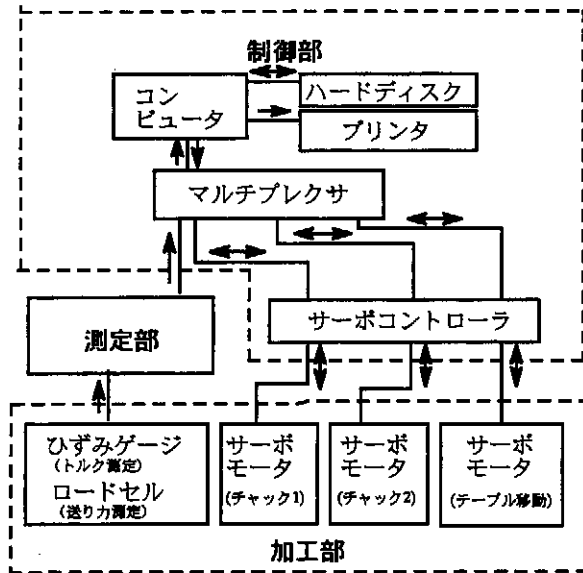


図3 実験装置各部の接続

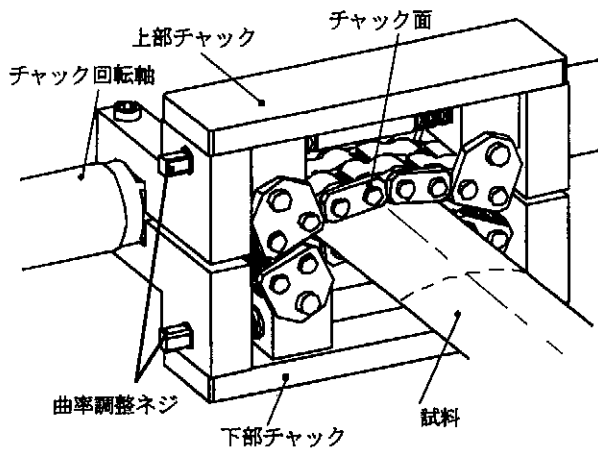


図4 曲率可変チャック

り機構には、送り力測定のためにロードセルを内蔵した。

本装置の各部分相互の接続を図3に示した。図中の矢印は信号の流れの方向である。制御部は、装置全体を制御するコンピュータ、曲げ加工部のチャック回転用とテーブル移動用の計3台のサーボモータを制御するサーボコントローラで構成され、これらの装置間相互と測定部は、RS-232Cマルチプレクサで接続した。

2.2 曲率可変チャック

平面状のチャックあるいは円弧状のチャックに加えて、図4に示すような曲率可変式チャックも製作した。チャック側部の曲率調整ネジを回転させることにより、チャック面が任意の曲率の円弧面を形成する仕組みとなっている。このチャック面は、8の字形状の特殊な歯車を主要部材として、ピン結合された連鎖状リンクを成しており、リンク中で隣接する2つの歯車の回転角が、どの箇所においても全て等しくなるように動作する。したがってチャック面形状は、平面状ないし任意の曲率の円弧状に限定される。

2.3 実験方法

加工前の準備として、チャックのつかみ面を水平にし、チャック先端間距離と試験片曲げ部の長さを一致させた。

曲げ行程では、平板から設定する形状に曲げるまでの過程を、数百のステップに分割した。ステップ数は曲げるの程度、あるいは1ステップあたりの曲げ角度などで変化するが、本装置で与えられる曲げるの程度は、最大曲率で $0.005\text{mm}^{-1} \sim 0.01\text{mm}^{-1}$ であり、1ステップあたりの回転角は $0.25^\circ \sim 1.0^\circ$ の範囲とした。各ステップでのテーブル送りとチャック回転は完全に同期させた。

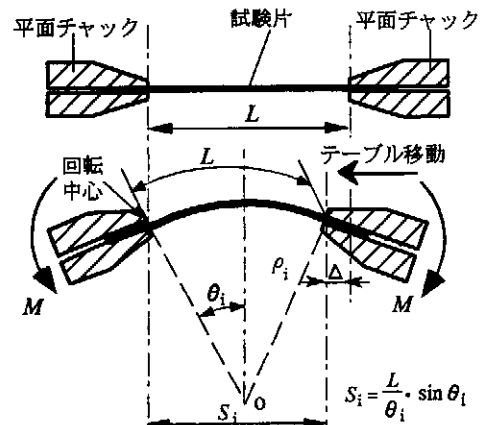
制御プログラムでは、まず最終形状に至るまでのチャック回転量とテーブル移動量から、1ステップ毎の回転角度及びテーブル送り量を決定し、それをサーボコントローラに送信して装置を作動させた。1ステップの動作が完了した時点で、トルク測定軸からのひずみ値を読み込み、設定したチャック角度、テーブル位置とともに保存した。最も基本的な円弧状の曲げるの場合は、図5に示すように、両チャックをそれぞれ逆方向に同角度回転させ、試験片は円弧に曲がっていると仮定して、試験片長さ L とチャック回転角 θ から曲率とテーブル移動量を計算した。本研究ではこれを要求曲率と称し、実際の試験片の曲率と区別した。未知の材料の場合は、回転軸のひずみゲージの値から計算したトルクを曲げモーメントとし、それにチャックの自重に基づく補正値を加え、曲げモーメント・要求曲率線図を求めた。

3. 1方向の曲げ

3.3 繰返し曲げ

繰返し曲げ実験には、つかみ部が平面のチャックを用いた。試験片は、板厚 2.0mm のアルミニウム板 H24 材 (A1050P-H24) を用いた。試験片寸法は幅 $W=100\text{mm}$ 、曲げ部長さ $L=300\text{mm}$ とし、圧延方向に対して直角方向に曲げた。繰返し曲げは、円弧状の成形を正負(上下)両方向交互に連続的に行った。

前もって円弧曲げをする場合の試験片各部の曲げるの状態を調べるために、図6に示すように試験片上の3点 a, b, c の表裏にひずみゲージを貼付して、表面ひずみから成形中の曲率を求めた。試験片上の3点における実測曲率とチャック角度との関係を見ると、 a, b 点の間にある b 点では、要求曲率にほぼ一致していたが、チャック近傍の c 点



Δ : ステップ i までのテーブル移動量
 ρ_i : ステップ i での近似した曲率半径

図5 円弧状の成形でのチャック移動量と曲率半径

ではやや曲がり不足し、逆に中央部a点でわずかに曲がり過剰の傾向があった。またa,b点での曲率と要求曲率との差は、チャック角度が大きくなるにつれて増加した。なお同時に試験片に作用する軸ひずみとチャック角度の関係も求めたが、曲げの最初の段階で僅かな軸ひずみが生じたものの、曲げの程度が大きくなると軸ひずみはは全て0になった。

図7には、板厚2.0mmアルミニウムH24材の試料を、要求曲率 $\pm 8 \times 10^{-3}$ (1/mm) の範囲で繰返し曲げを行った場合の、単位幅あたりの曲げモーメントと要求曲率の関係を示した。図中のO-①が1次曲げで、①-②は1次曲げの除荷である。②-③が2次曲げであるが、加工硬化係数と縦弾性係数の比(D/E)の値がかなり小さい材料のため、③点の曲げモーメントの絶対値は①点の値より僅かに大きくなった。また④-⑤の3次曲げ、⑥-⑦の4次曲げとも2次曲げと同様の傾向を示していた。

3・2 円弧曲げ成形

本装置で円弧状の成形をする場合には、成形後のスプリングバックを予測してオーバーバンドを施した。そのため成形実験では、まず初期の弾性曲げ域を判別した。図8に示すように、現在の加工ステップ数を*i*としたとき、すでに測定した1~*i*-5回目までの測定点を最小二乗法を用いて原点を通る直線で近似し、この直線と測定点(1~*i*-5)との距離の最大値をT_{max}とした。そして直近の5回(*i*-*i*-4)の測定点とこの直線の距離を計算し、この値がすべてT_{max}より大きければ、第*i*点から弾性曲げ域を脱すると判別し、そうでなければ、まだ弾性曲げ域であると判別した。弾性曲げ域を脱すると判別される場合には計算した近似直線の傾きを α とする。同図に示すように、弾性曲げ判別で得た近似直線(線I)の傾き α を用いてスプリングバックを考慮し、除荷後に目標曲率となるようにオーバーバンドを施した。すなわち、スプリングバックは、曲げモーメント-曲率線図において弾性曲げの傾きに等しい傾きの直線になると仮定し、要求曲率 $1/\rho_R$ を通る傾き α の直線(線II)と曲げモーメント-曲率線図との交点を成形終了点とした。

図9には、板厚2.0mmのアルミニウムH24材と板厚

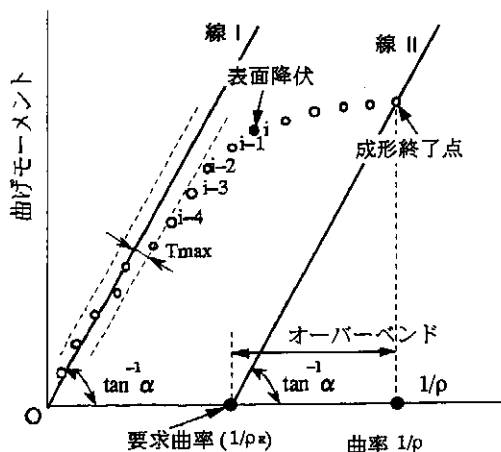


図8 弾性曲げの判別とオーバーバンド

1.0mmの鋼SS400材を、目標曲率半径200mm(曲率 0.005mm^{-1})で円弧状の成形を行った場合の、スプリングバック後の試験片上各点の曲率分布を示した。縦軸の曲率は、設定した曲率半径 ρ_0 と実際の曲率半径 ρ の比で表した。いずれの材料とも図6と同様の傾向が見られ、試験片中央部でわずかに曲がり過ぎ、チャック近傍になるに

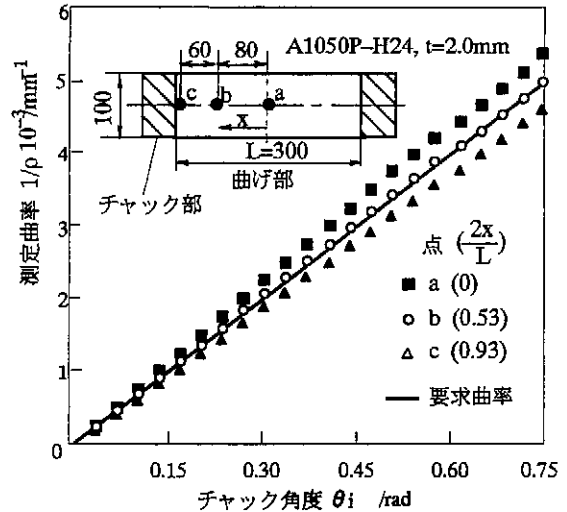


図6 円弧曲げにおける試料各部の曲率と要求曲率

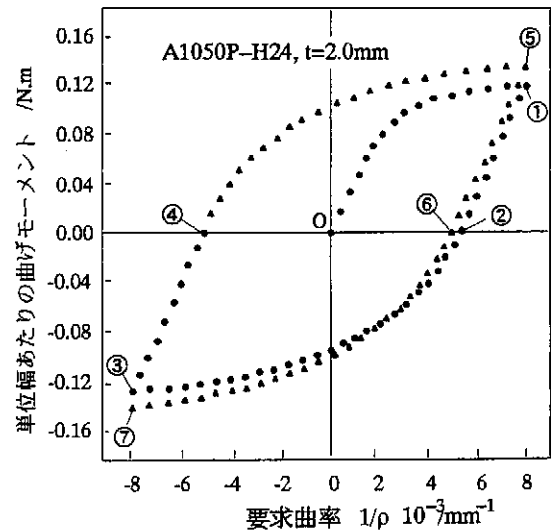


図7 繰返し曲げにおける要求曲率と曲げモーメントの関係

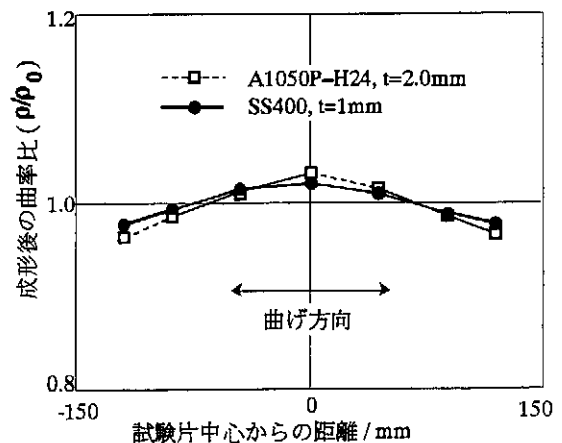


図9 円弧曲げにおける曲率分布

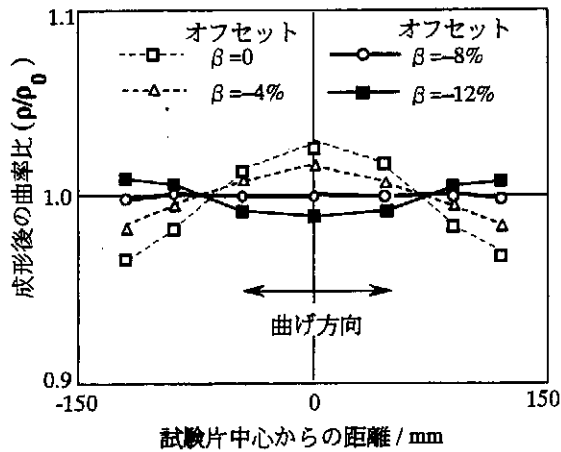


図10 送り方向にオフセットを与えた場合の曲率分布の変化

従い曲率が要求曲率より小さくなった。これは本装置で試験片を曲げる場合に、チャック付近では試料の曲げ方向の表面ひずみが押さえられ、曲げ直角方向にも反りが押さえられるという拘束があるためである。

3・3 オフセットの効果

円弧曲げにおける曲率の不均一を無くすためには、曲げ成形時に、試験片に引張力あるいは圧縮力を加えることが有効であると考えられる。そこで、所定の送り量に対して一定の割合で過小(-)あるいは過大(+)の送り量を与えた。その結果、試験片の端部と中央部に作用する曲げモーメントに差が生じ、特に送りを過小にする負のオフセットを加えると、試験片中央部の曲がりすぎが解消できると考えた。

図10には板厚2.0mmのアルミニウムH24材(A1050P-H24)板を目標曲率 $0.005m^{-1}$ になるように、オフセット $\beta=0\%$ 、 -4% 、 -8% 、 -12% で円弧状の成形を行った場合の、スプリングバック後の曲率分布の比較を示した。試験片寸法は幅100mm、曲げ部長さ300mmとした。オフセットの無い(0%)通常の曲げの場合には、チャック付近から中央部に向かうにつれて曲率の値が徐々に大きくなるのに対して、オフセット -4% の場合は、試験片上の曲率分布が小さくなり、試験片中央部の曲げの集中が引張力付加によって減少した。オフセット -8% の場合は、 -4% の場合よりさらに顕著な傾向となり、チャックの拘束により生じた成形後の曲率の不均一をほぼ解消することができた。しかし、オフセット -12% の場合は、チャックに加える引張力が大きすぎるため、曲率の分布はオフセット無しの場合と逆になり、試験片端部のほうが曲がり過剰となった。

3・4 円弧状以外の曲げ

S字形成形の制御プログラムでは、前ステップの曲げモーメントに増分 ΔM を加え、試験片の両端に作用する曲げモーメントを設定し、試験片内の曲げモーメント分布を決定する。この分布をもとに、要素分割した各要素に作用する曲げモーメントを設定する。そして先に計算しておいた曲げモーメント-曲率関係を用い、この要素の前歴と曲げモーメントからこの要素の曲率を計算する。

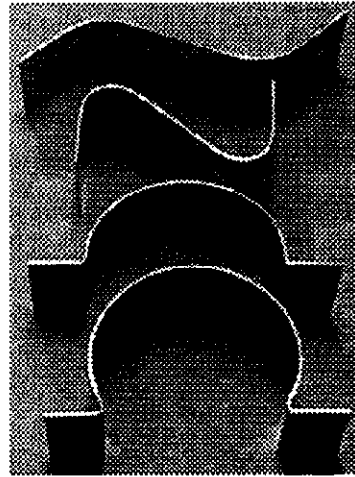


図11 S字形とΩ形の曲げ

これを全要素について行い、加工後の試験片形状を予測し、チャックの回転角および可動テーブルの送り量を計算した。以上の行程を繰返し、加工行程を終了した。Ω形成形は、S字形成形と同様の考え方をを用いて、試料のつかみ部分を所要の角度まで曲げた後、チャックを逆方向に回転させ、Ω形にする成形である。この成形は、通常の型曲げでは1工程では不可能である。

図11にはS字形成形とΩ形成形後の成形品の写真を示した。

同図上部のS字形は、それぞれチャックを $\pm 45^\circ$ 及び $\pm 90^\circ$ まで回転させて成形を行ったもので、いずれの場合も成形後の形状は予測形状とほぼ一致した。同図下部のΩ形は、曲げ部長さ300mmと420mmの2種類の試験片を成形後曲率が0.0105になるように成形したが、成形後の曲率はいずれの成形でも誤差1%以内であった。

4. 2方向の曲げ

4・1 円弧チャックを用いた2方向の曲げ

2方向曲げの場合の成形方法は、図12に示すように、まずスプリングバックを予測して、目的の曲率半径200mmになるように1次曲げ成形しておき、それを50mm幅の短冊状に切断した。次いで、平板チャックを半径200mmの円弧チャックに交換し、1次曲げと直交する方向に曲率半径が200mmになるまで2次曲げを行った。また、2次曲げを行うときに円弧曲げと同様に、いくつかのオフセットのもとで実験を行った。なお、チャックの回転中心は、1次曲げの円弧断面の中立軸に一致させた。

2次曲げ中に、図13中に示すように、試験片のA,B,C,Dの4点の表裏にひずみゲージを貼付し、成形中のX方向とY方向の表面ひずみを測定した。2次曲げ後、L1, L2, L3の3個所の1次曲げ(X)方向の曲率半径を測定し、2

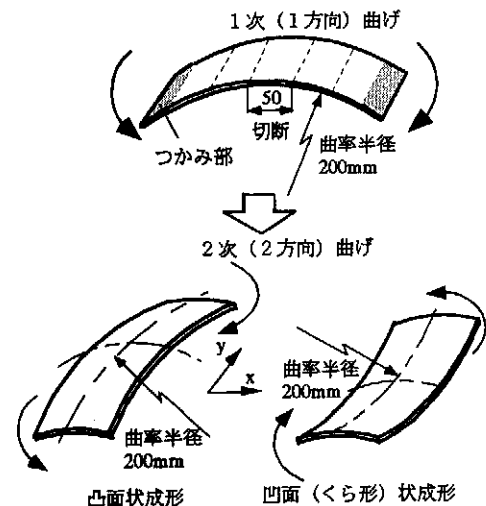


図12 2方向曲げの方法

次曲げ前後の曲率半径の比較を行った。試験片寸法は同図に示すとおりで、試験片は板厚2.0mm アルミニウム H24材 (A1050P-H24) を用いた。図13に示した凸面成形中のY方向曲率の分布と要求曲率の関係では、1方向曲げ成形の場合に見られたような曲率の不均一が負のオフセットによりほぼ解消することができた。

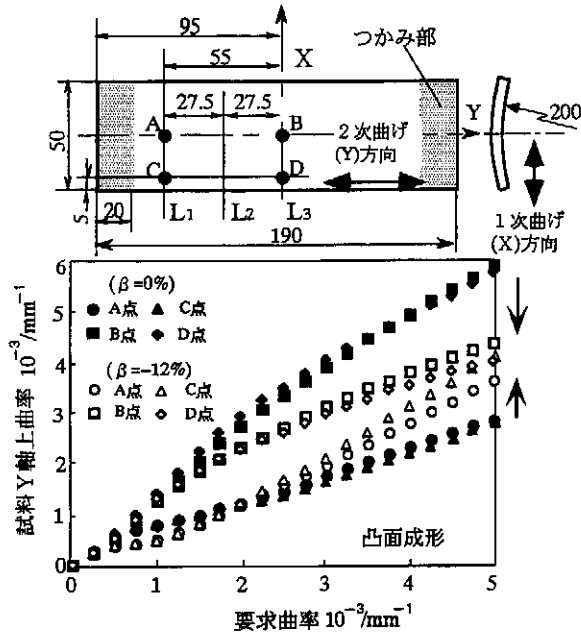


図13 凸面成形の2次曲げ方向曲率に及ぼすオフセットの影響

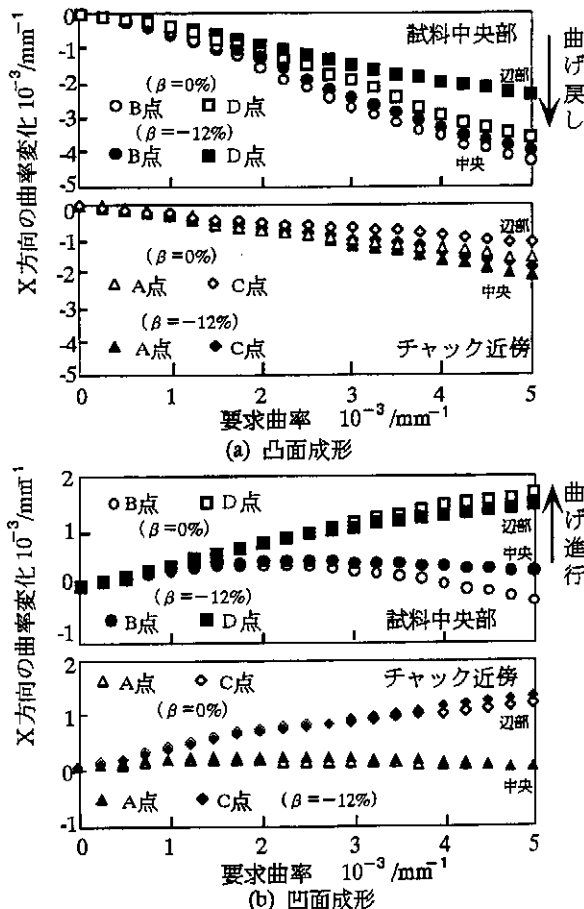


図14 2次曲げ曲率とX方向曲率の変化

図14には、2次曲げ中に生じる1次曲げ(X)方向の曲げ戻しと要求曲率の関係を示した。凸面成形の場合には、同図(a)に示すようにA, B, C, Dの4点とも、1次曲げ方向と逆方向に曲げ戻された。オフセット0%の場合はチャック近傍より中央部の曲げ戻しが大きかったが、これはチャックにより試験片のX方向の形状が保持されているためである。2次曲げ方向と比較すると、1次曲げ方向の曲げ戻しに対する負のオフセットの効果は大きくはなかった。凹面成形の場合は同図(b)に示すように、辺部のC点とD点は1次曲げ(X)方向に曲げが進み、Y方向の曲げ進行に伴いその曲率は増加した。-12%のオフセットを付加することにより、試験片中央部のD点の曲率増加がわずかに減少したが、C点の曲率増加は大きくなった。

図15には、2次曲げ前後のX方向の曲率半径比と負のオフセット量の関係を示した。同図(a)は、凸面成形の場合で、負のオフセット量の増加にともない、X方向の曲げ戻しが減少し、1次曲げと2次曲げ(図13参照)の両方ともに成形精度が向上した。同図(b)に示した凹面成形の場合は、わずかな負のオフセットにより2次曲げ前後のX方向の曲率半径の比はほぼ1になった。

凸面成形、凹面成形とも、-12%より絶対値が大きいオフセット量を加えた場合には、X方向の曲率半径比はわずかに変化しただけであったが、2次曲げ(Y)方向の曲げがチャック近傍に集中し、よい結果は得られなかった。

4.2 曲率可変チャックを用いた2方向の曲げ

図4に示した曲率可変チャックでは、その構造上線状に材料をつかむため、柔らかいまたは薄い板の場合にはつかみ部に傷が入り折れ曲がった形状になってしまう。また現状では剛性不足のため、硬い材料の成形は無理であった。そのため、曲率可変チャックを用いた成形では、板厚3.0mmのアルミニウム軟質材(A1070P-O)を用いた。

曲率可変チャックの利点として、任意の曲率の組合せによる成形が可能なおの他に、円弧状チャックを用いた場合のようなチャックを変更して2回に分けた曲げは

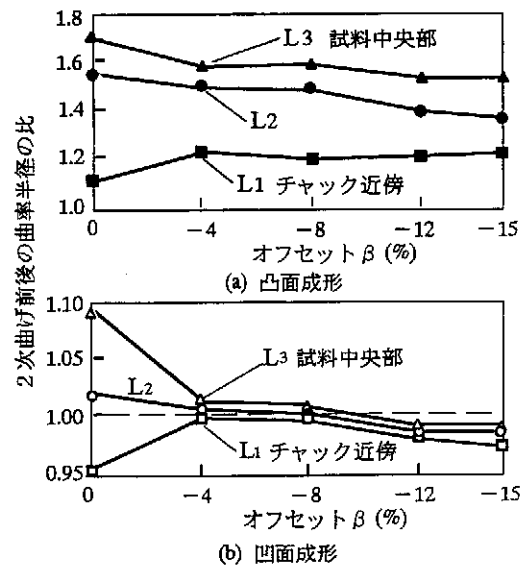


図15 2次曲げ前後のX方向曲率半径比とオフセットの関係

不要で、単独のチャックで連続的に曲げが可能である。当然2方向同時の曲げも可能ではあるが、制御が大変複雑となりほとんど成形が不可能だった。そのため、曲率可変チャック自体の変形によりまず一定の曲率半径 ρ_1 に1次曲げた後、そのままの状態チャックを回転させて1次曲げと直角な方向に半径 ρ_2 になるように2次曲げた。この成形法では凹面成形が大寸法まで成形できたので、ここでは凹面成形を中心に報告する。なお実験の結果得られた成形品について、目標形状との誤差を図16に示す様に計算し、これを指標として用いることにした。

図17に80mm×80mmの試料を連続曲げでくら形成したときの、 ρ_1, ρ_2 と形状誤差との関係を示した。この加工法では1次曲げ時に曲率可変チャック面の変形のみによって曲げが施されるため、チャックから離れた1次曲げ方向中心線は、いずれの ρ_1, ρ_2 でも曲げ不足になり、特に1次曲げ曲率が大きいほど誤差が大きくなる傾向を示した。また同図(b),(c)の $\rho_1 = 300\text{mm}, 200\text{mm}$ では、2次曲げ曲率が大きくなるほどいずれの線の誤差が増大したが、1次曲げ曲率の小さい $\rho_1 = 400\text{mm}$ (図(a))では、2次曲げ曲率が増加しても誤差はほとんど変化しなかった。チャック近傍の1次曲げ方向端部では、1次曲げは十分に施されるため、いずれの曲率半径の組合せでも誤差は少なかった。それに対し2次曲げ方向中心線の誤差(O)は、いずれの ρ_1, ρ_2 の組合せでも曲げ過剰となった。これは1次曲げ方向中心線が曲げ不足になり、それと直角方向の曲げがその中央部に集中してしまったためである。

5. まとめ

試験片の両端をチャックでつかみ、チャックを回転することにより、試験片を加工するコンピュータ制御の装置を開発した。この装置ではその構造を利用して、繰り返し曲げにおける材料の変形特性を求めることができたが、本来はダイレス曲げ加工を目指したものである。円弧状、S字形あるいは Ω 形の曲げ成形を行い、ほぼ予想通りの形状に成形することができた。しかし、制御プログラム上での仮定や試験片をチャックで掴むという構造上、円弧状の曲げを行っても完全な円弧にはならず、わずかな曲率の不均一を生じた。これに対しては、チャックの送りを減少させてわずかに引張力を与えるような、負のオフセットを加えながら成形すると、精度のよい1次曲げ成形品が得られた。

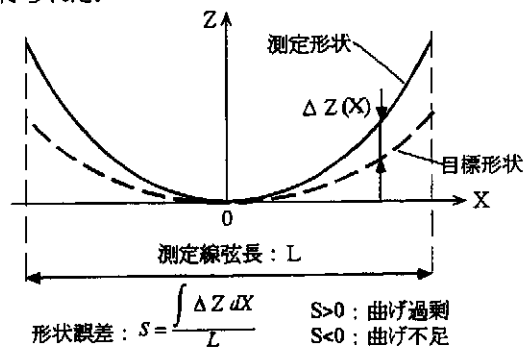


図16 成形品の評価のための形状誤差の計算

2方向の曲げ成形においても、成形中に引張力を加えることが有効であり、負のオフセットの有効性を確かめられた。本研究の範囲内では-12%程度のオフセットが効果的であったが、材料や曲げの程度により変化するはずである。また、曲率可変チャックを用いて工具の変更なしに2方向曲げを行った結果、チャックの変形による1次曲げが試料中央部まで十分に施されず、それと直角な方向の曲げはその中央部に集中する結果となった。しかし、曲げの程度が少ない2方向の成形は十分可能であった。

謝 辞

本研究は、長期間にわたり財団法人天田金属加工機械技術振興財団の研究補助金のもとに行われたことをここに付記し、厚く御礼申し上げます。

文 献

本研究に関連する論文として

- 1) H. Lippmann: Free rigid/plastic plane bending of a slender beam. Ing.-Arch. 60(1990), 293-302. など
- 2) 張ほか: 塑性と加工, 40-462 (1999), 658-662. など

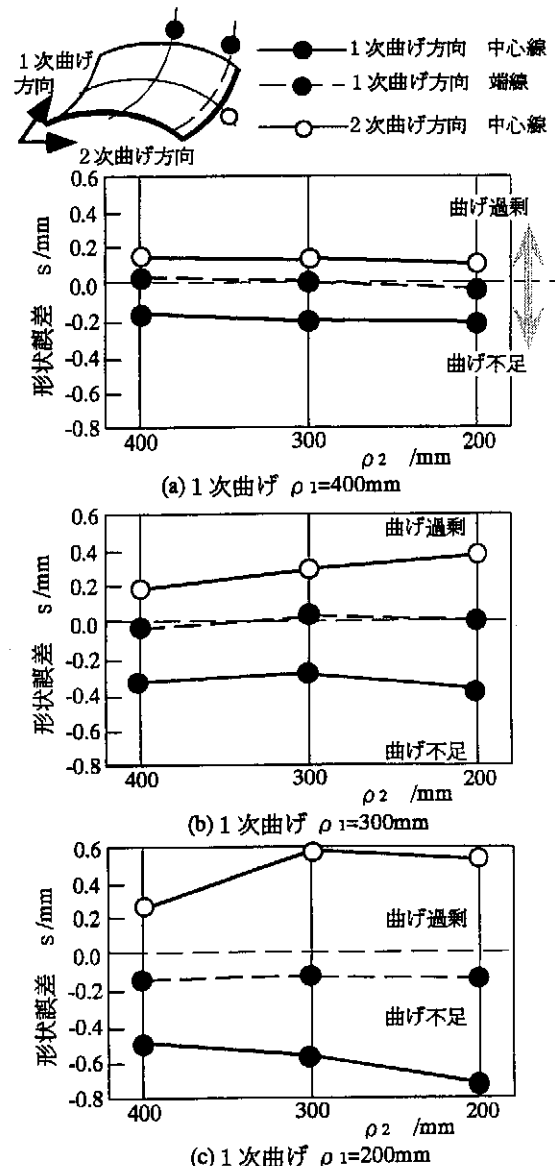


図17 連続曲げによる凹面成形品の形状誤差