

# 金属板材のコイニング曲げ加工

職業能力開発総合大学校 生産機械工学科

教授 小川秀夫

(平成12年度研究開発助成 AF-2000001)

キーワード：ベンディング，コイニング，ポトミング

## 1. 研究の目的と背景

金属板材のV曲げ加工を，加工中の板と曲げ型との接触点数により分類すると，曲げ加工に必要な最少点数（3点）で接している自由曲げと，それよりも多くの点数で接しているポトミング曲げ，コイニング曲げに大別される．自由曲げについてはこれまで多くの解析的，実験的研究がなされてきた<sup>1)</sup>．一方，ポトミング曲げ，コイニング曲げは安定した高精度が得られることから精密，小物の曲げに多用されているにもかかわらず，それらについての報告はきわめて少ない<sup>2)</sup>．また，ポトミング曲げとコイニング曲げの境界さえ必ずしも明確になっていない．スプリングバック現象などの曲げ加工特性を解明するには板材内部の応力状態を正確に把握することが必要となるが，曲げ型と多数点で接触するポトミング曲げやコイニング曲げでは応力状態が複雑となり，実験的手法でそれらを正確に把握することが困難となる．このこともポトミング曲げ，コイニング曲げに関する報告が少ない要因の一つと考えられる．

本研究の目的は，コイニング曲げに見られるような，金型と板表面とが多数点で接触する曲げにおける板材内部の応力状態，それに伴うスプリングバック特性及びポトミング曲げとコイニング曲げの境界を明らかにするとともに，加工力特性，適正曲げ型寸法，曲げ型表面に作用する加工力分布について検討することである．検討は実験および曲げ加工過程のFEMシミュレーションにより行った．

## 2. 実験条件及びシミュレーション条件

### 2.1 曲げ加工条件及び実験方法

曲げ型条件を表1に示す．V字形状の溝を持つダイの上に曲げ試験片を置き，先端半径 $R_p$ のV字形状パンチを下降させて曲げを行う．ダイV溝幅 $D_w$ は9.72mmである．ただし，適正ダイ溝幅の検討にあたっては $D_w$ を9.72～14.0mmの範囲で変化させた．パンチ幅 $P_w$ は10.0mmである．ただし，適正パンチ幅を検討するにあたって $P_w$ を6～10mmの範囲で変化させた．

曲げ加工実験には秤量300kNの油圧式材料試験機を用いた．曲げ試験片両面には潤滑油としてDN.マスタードロ－FR-80（出光興産株式会社製）を塗布した．

### 2.2 加工板材

加工板材は公称板厚2.0mmの冷間圧延鋼板SPCCである．その機械的性質を表1に示す．定尺素板をシャーで四辺形にせん断した後，その4辺をミーリングで切削し，43mm（曲げ線長さ，圧延方向に一致）×40mmに仕上げ曲げ試験片とした．なお，表1中のヤング率とポアソン比は便覧等での標準値を採用したもので，曲げ加工シミュレーションを行う上で使用した．

### 2.3 シミュレーション条件

曲げ加工過程のFEMシミュレーションも実験と全く同

様に，固定したダイの上に加工板材を置き，パンチに下向きの強制変位を与え，曲げ型と板との接触状態を自動的に更新しながら変形を進めた．表1にシミュレーションの主要条件を示す．シミュレーションに用いた弾塑性有限要素法プログラムはITAS-2D<sup>3)</sup>をベースにして開発されたAITAS-2D<sup>4)</sup>である．ここでは曲げ加工を平面ひずみの二次元問題として扱い，加工板材の板厚断面を4節点四角形要素で分割した．板厚方向の分割は16層とし，板幅方向の分割はパンチ斜面やダイ溝斜面などと接触する範囲は細かくし，曲げ型と接触しないフランジ端部では粗くした．要素内応力の積分法はSMM（安定化マトリックス法）であり，積分点数は1点とした．

## 3. 結果及び考察

### 3.1 加工力特性と変形過程

図1に曲げ加工過程のパンチ荷重-パンチ行程線図を示す．○印は実験結果であり，実線はシミュレーション結果である．またシミュレーション結果に付けた(1)～(4)の●印の位置での変形形状も示す．曲げ型条件は $R_p=0.5\text{mm}$ ， $P_w=10.0\text{mm}$ ， $D_w=9.72\text{mm}$ の基本条件である．平板の状態から開始した曲げ加工は，パンチ先端とダイの左右肩部の3点に接した状態で進行していき，やがて図1-(1)の変形形状に示したように，板外側表面上の節点がダイ溝斜面に接触し，曲げ加工中の角度がダイのV溝角度にちょうど等しい90°の状態となる．それまで小さな値で推移してきたパンチ荷重は，(1)の段階に至ると変曲点を示して増加し始める．その後，パンチ行程の進行につれて板はダイ肩部から離れ，板外側表面とダイ溝斜面との接触点はダイ溝斜面上

表1. 曲げ加工条件及びシミュレーション条件

曲げ型	パンチ	先端角度 90° 幅 $P_w$ (mm):60(幅検討)～100(基準 実験) 先端半径 $R_p$ (mm):0.2,0.5(実験),1.0,2.0
	ダイ	V溝角度 90° V溝幅 $D_w$ (mm): 9.72(基準,実験)～14.0(溝幅検討) 肩半径 $R_d$ (mm):1.0
加工板材	材質:SPCC, 板厚:1.96mm 降伏応力:185.8MPa, 引張強さ:320.5MPa 加工硬化式: $\sigma=565.3*(0.0079+\epsilon_p)^{0.23}$ ヤング率:205.8GPa, ポアソン比:0.3 曲げ試験片寸法: 43mm(曲げ線長さ) × 40mm	
シミュレーション	使用コード:AITAS-2D 使用要素:四角形 SMM 要素数:1072(右半分), 板厚方向分割数:16	

をダイ溝幅中央部へと移行していく。このため曲げ加工中の角度は $90^\circ$ よりも曲がり過ぎた鋭角形状となり、ついには板の内側表面がパンチ肩に接触する。荷重線図上の(2)で示した第二の変曲点が現れるのはこの段階である。成形が進み(3)で示した第三の変曲点が現れるのは、パンチ斜面とダイ溝斜面の隙間がちょうど板厚に等しくなったときである。本報ではこの状態を幾何学的下死点と呼ぶことにする。(3)の段階以降は板厚を圧縮する変形となり、パンチ荷重は急増する。板厚を $0.05\text{mm}$ (初期板厚の $2.55\%$ )圧縮したときの荷重値を図1の荷重線図上に $\times$ 印で示したが、この値は(1)の段階に至るまでの最大荷重の約10倍となっている。荷重線図の最終端は板厚を $0.2\text{mm}$ (初期板厚の $10.20\%$ )圧縮したときの荷重値を示している。

荷重が急増する幾何学的下死点以降では、曲げ加工実験に用いた材料試験機、ならびに曲げ型などの弾性変形が大きくなり、パンチ行程の正確な測定が困難になる。このため本実験では次のような方法によって幾何学的下死点以降のパンチ行程を求めた。まず幾何学的下死点以降の各パンチ行程で加工を止めて曲げ型から成形品を取り出す。パンチ斜面とダイ溝斜面との間で圧縮された部分の曲げ成形品板厚を測定し、その値をパンチ斜面とダイ溝斜面の間隔とみなして幾何学的にパンチ行程を求める方法である。図1に見られるように、パンチ荷重の大きい範囲では実験結果のほうがシミュレーション結果よりも大きな荷重値となっているが、これはシミュレーションでは曲げ型と加工板材との間の摩擦を考慮していないためと考えられる。

図2は幾何学的下死点から除荷したときの成形品の断面形状を、シミュレーション結果と合わせて示したものである。パンチ先端部に見られる曲げ内側での圧縮変形による盛り上がり変形や、曲げ角度を示すフランジ輪郭形状など、シミュレーション結果と実験結果は非常によく一致している。

### 3.2 コイニング曲げ領域の検討

図3に曲げ加工中の成形品角度の推移、及び各パンチ行程から除荷したときの除荷後の成形品角度を示す。実線は曲げ加工中の角度推移のシミュレーション結果であり、 $\times$ 印と $\circ$ 印はそれぞれスプリングバック後の角度のシミュレーション結果と実験結果である。曲げられてきた板の外側表面がダイ溝斜面に広く接し、曲げ加工中の角度がちょうど $90^\circ$ となる(1)の段階(図3中の(1)~(4)の段階は図1中の(1)~(4)の段階に対応している)以降も、曲げ加工中の角度は減少を続け、板の内側表面がパンチ肩に接触する(2)の段階で曲げ加工中の角度は最小となる。(2)の段階で曲げ型と板との接触点数は最少の3点でなくなることからこの段階で自由曲げは終わり、それ以降はボトムング曲げとなる。つまり(2)の段階が自由曲げとボトムング曲げの境界となる。

板の内側表面がパンチ肩に接するとフランジ部はパンチ肩で曲げ戻され、曲げの内側表面近傍には図4(2)に見られるように、板面に沿った引張応力 $\sigma_x$ が発生する(図4中の(1)~(4)の段階も図1、図3中の(1)~(4)の段階に対応している)。パンチ肩によって曲げ戻されたフランジ部の曲

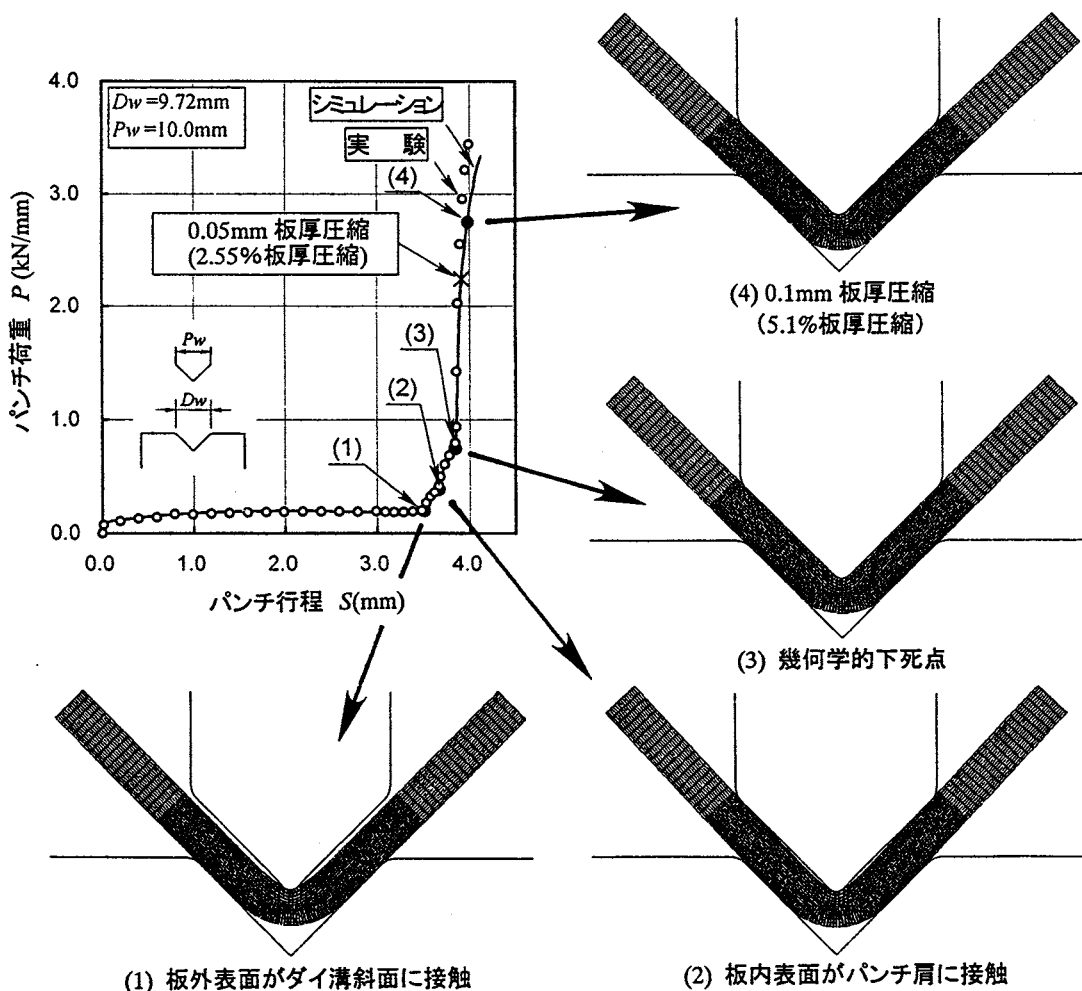


図1. V曲げ加工の荷重線図と変形過程( $R_p=0.5\text{mm}$ )

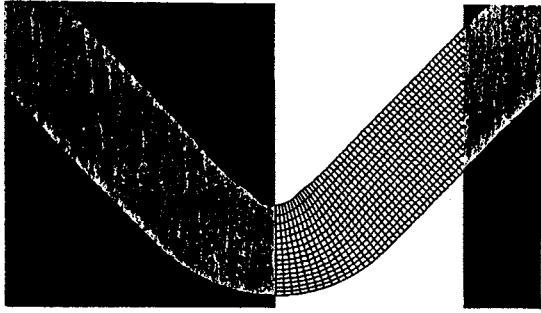


図2. 幾何学的下死点から除荷したときの断面形状  
(実験結果とシミュレーション結果の比較)

げ内側に生じた引張変形は除荷後に縮むことから、曲げ成形品を内側に閉じさせる変形（スプリングゴ）を引き起こす。したがってボトミング曲げは、曲げの内側に生じた引張変形によるスプリングゴと、パンチ先端直下の曲げ外側に生じた引張変形によるスプリングバックが共存した状態ともいえる。図3に示した自由曲げ以降の領域（ボトミング曲げ領域）では、ごく初期の段階を除いて、除荷後の角度は曲げ加工中の角度よりも小さくなっている。これは曲げ外側の引張変形によるスプリングバックよりも、曲げ内側の引張変形によるスプリングゴの方が大きいことを示している。幾何学的下死点に至っても、図4(3)に見られるように曲げの内側に発生した引張応力は消滅せず、曲げの内側と外側に引張応力域が共存したボトミング曲げの状態にある。

図5は曲げの内側に50MPa以上の引張応力 $\sigma_x$ が生じている領域面積の変化を示した結果である。 $\sigma_x$ はパンチ肩に板が接触した時点から発生し、幾何学的下死点付近で最大の面積を示した後、板厚の圧縮とともに急激に減少する。 $\sigma_x$ が完全に消滅するまでは板厚を約0.15mm圧縮しなければならぬが、その存在が十分無視できる程度にまで小さくなるのは、0.05mm（初期板厚の2.55%）の圧縮時である。したがって板厚をこれ以上圧縮した状態では、曲げ内側の引張応力域の存在を無視することができ、曲げ外側の引張応力との共存状態ではなくなる。したがってスプリングゴ要因は無くなり、スプリングバック要因だけとなる。この状態は曲げの内側、外側に引張応力域の共存するボトミング曲げとは明確に区別でき、これをコイニング曲げ領域と定義することができる。

ければならないが、その存在が十分無視できる程度にまで小さくなるのは、0.05mm（初期板厚の2.55%）の圧縮時である。したがって板厚をこれ以上圧縮した状態では、曲げ内側の引張応力域の存在を無視することができ、曲げ外側の引張応力との共存状態ではなくなる。したがってスプリングゴ要因は無くなり、スプリングバック要因だけとなる。この状態は曲げの内側、外側に引張応力域の共存するボトミング曲げとは明確に区別でき、これをコイニング曲げ領域と定義することができる。

### 3.3 コイニング曲げのスプリングバック特性

コイニング曲げ領域では上述のように、曲げの内側に引張応力 $\sigma_x$ が存在しないことから、これに起因するスプリングゴの要因は無くなり、曲げの外側の引張応力に起因したスプリングバックだけが生じることになる。図3(3)に示したように、幾何学的下死点から除荷した時の角度は加工中の角度よりも小さく、スプリングゴとなっている。この結果から判断すると、幾何学的下死点から除荷した場合、曲げ外側の引張応力に起因するスプリングバックよりも、曲げ内側の引張応力に起因するスプリングゴの方が大きいといえる。幾何学的下死点以降で板厚の圧縮が開始されると、曲げ内側の $\sigma_x$ の面積が急激に減少することから、これに起因するスプリングゴの要因は小さくなり、曲げ外側の引張応力に起因するスプリングバック要因の方が支配的となる。図3(3)の幾何学的下死点以降でのシミュレーション結果による角度の推移を見ると、板厚を0.02mm（初期板厚の1.02%）圧縮した状態を境として、スプリングゴからスプリングバックへと反転している。幾何学的下死点時にスプリングバック要因よりも大きかったスプリングゴ要因が、板厚の圧縮に伴って次第に減少し、0.02mm板厚圧縮時にスプリングバック要因と等しくなり、それ以降の行程では曲げ外側の引張応力に起因するスプリングバック要因が支配的となって、スプリングゴからスプリングバックへと反転することを示している。また

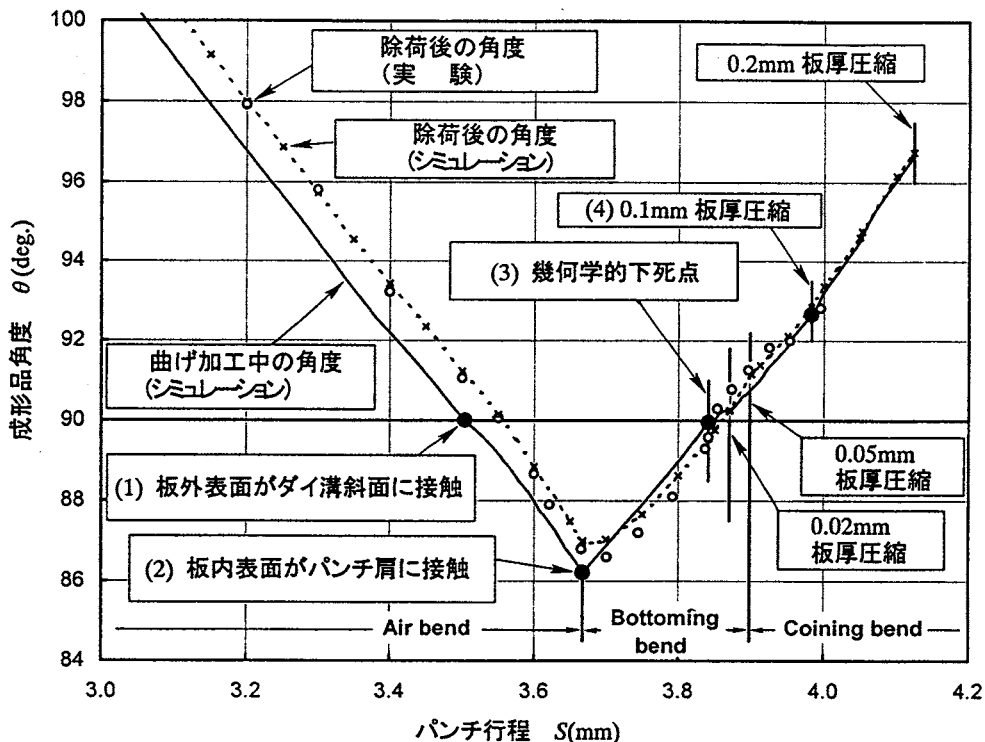


図3. パンチ行程の進行にともなう成形品角度の推移および曲げ加工区分

図3において0.02mm 圧縮時以降のスプリングバックの大きさを詳細に見ると、約0.05mm 圧縮時にスプリングバックは最大となっている。0.05mm 圧縮時は先に示したように、曲げ内側の引張応力  $\sigma_x$  がほぼ消滅し、コイニング曲げ領域へと移行する段階である。したがってスプリングゴ-の要因はほとんどなくなりスプリングバックだけが生じる状態となるため、最大のスプリングバックを示すといえる。0.05 mm 圧縮時以降でスプリングバックが減少するのは、板厚の圧縮とともに曲げ外側の引張応力域も小さくなるためである。図3 から見られるように、0.05mm 圧縮時のスプリングバックの大きさは自由曲げ領域の約1/3である。

### 3・4 コイニング曲げの適正曲げ型寸法の検討

図3に示したように、ダイ溝幅  $D_w=9.72\text{mm}$  とした基本曲げ型条件では、板厚を0.05mm 圧縮したコイニング曲げ状態で成形を終了すると、除荷したときの角度は目的とした  $90^\circ$  よりも大きくなってしま-う。また、板厚の圧縮量を増すと成形品角度はさらに大きくなっていく。この原因は図1-(4)に見られたように、ダイ溝斜面と板との接触長さが、パンチ斜面と板との接触長さよりも小さいために、ダイ溝斜面との接触側で一方的に板厚が減少し、成形品が外開きの形状になるためとみられる。したがってコイニング曲げにおいて所定の曲げ角を得るには、ダイ溝幅あるいはパンチ幅を変えて板との接触長さの割合を適正にすればよいと考えられる。図6は0.05mm 板厚圧縮時から除荷したときの成形品角度に及ぼすダイ溝幅  $D_w$  およびパンチ幅  $P_w$  の影響を示した結果である。(a)は  $P_w$  を10.0mm で一定とし、 $D_w$  を変化させた結果である。 $D_w$  が約13mm のとき成形品角度はほぼ  $90^\circ$  になる。一方、(b)は  $D_w$  を9.72mm で一定とし、 $P_w$  を変化させた結果である。 $P_w$  が約7.2mm で成形品の角度がほぼ  $90^\circ$  になる。このように成形品の角度は板とダイ、板とパンチの接触長さの割合を変えることによって調節でき、曲げ角度を所定の値にする適正曲げ型寸法の存在することがわかる。

### 3・5 曲げ型表面に作用する接触力分布

コイニング曲げはパンチとダイとの間に板をはさみつけて圧縮変形を与える曲げ加工法であるため、自由曲げに比べて曲げ型表面に作用する接触力は大きくなる。接触力の大きさや分布形態は曲げ型の強度、曲げ型表面の摩耗を検討する上で重要な因子となる。

図7は曲げ型表面と板との接触力(節点力)分布のシミュレーション結果である<sup>5)7)</sup>。(1)の自由曲げ状態ではパンチ先端が板に食い込んでいてもパンチ先端中央部は板と接触せず、接触力の発生は認められない。(2)の幾何学的下死点の状態においてはパンチ肩部近傍に曲げ戻し変形のための接触力が発生し、ダイ斜面も曲げ戻し変形の反力を受け、接触力、接触域は大きくなる。(3)~(6)の板厚圧縮段階では、パンチ斜面と板との接触箇所はパンチ中心部へ移行しながら接触領域を拡大していくが、(6)の段階で板厚を0.05mm 圧縮した状態においてもパンチ斜面との未接触域が存在する。パンチ先端部での接触力の大きさをみると、パンチ行程が進行してもあまり増加しない。また、パンチと板との接触力の最大値は、パンチ先端丸みとパンチ斜面の交点近傍に生じる。一方、ダイ溝斜面との接触力は接触領域中央部で極小値を示す分布形態となり、最大値は曲げ変形部がダイ溝斜面と接し始める位置に生じる。

曲げ型摩耗の検討にあたっては、接触力の大きさに加え、型表面に板が接して移動する距離も重要となる。図8に型表面に板が接して移動する距離を示す。横軸の節点位置は図7(6)中にマークした位置番号である。パンチ

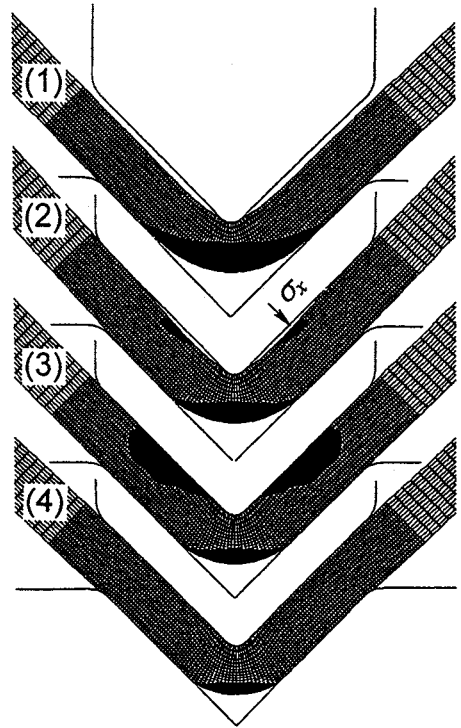


図4. 曲げ部に発生する板面に沿った引張応力  $\sigma_x$  の分布 (黒色領域は  $\sigma_x$  が100MPa以上の範囲を示す)

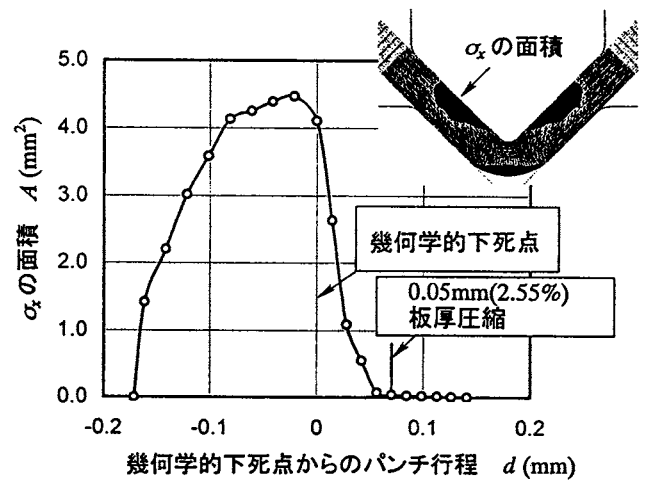


図5. 曲げ内側に発生する引張応力域  $\sigma_x$  の面積推移

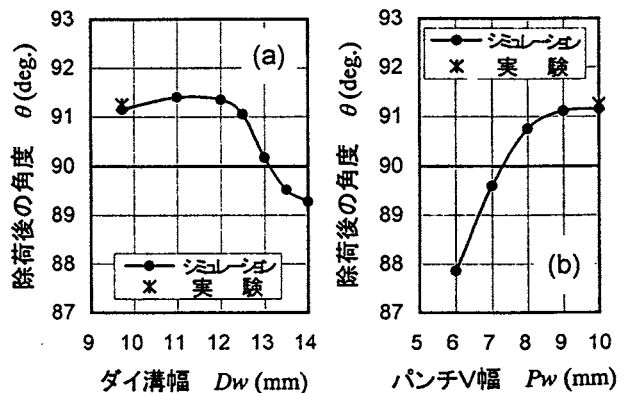


図6. ダイ溝幅  $D_w$  およびパンチ幅  $P_w$  が除荷後の成形品角度に及ぼす影響(0.05mm 板厚圧縮段階から除荷した結果)

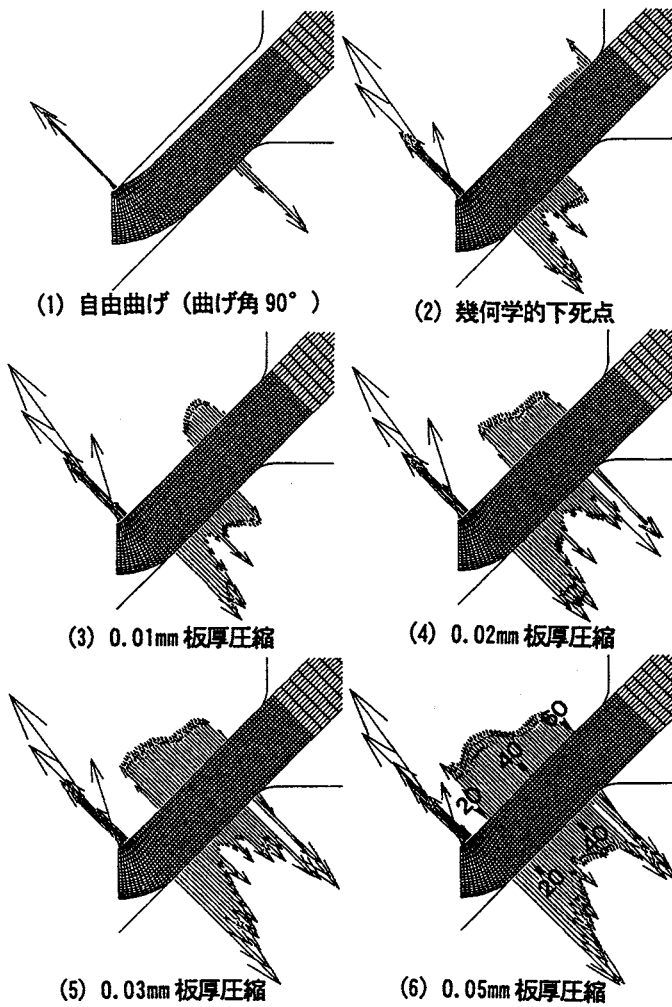


図7. 曲げ型表面と板との接触力分布( $R_p=0.2\text{mm}$ )

表面での移動量はパンチ先端部の8番目までの節点での移動量が大きく、ダイ表面での移動量はダイ溝中心部寄りの15番目より外側の節点で大きい。しかもこれらの節点では節点力も大きいことから、これらの節点と接する位置での金型表面の摩耗が大きくなる。

#### 4. 結 言

曲げ型と板とが多数点で接触するボトムング曲げ、コイニング曲げの加工特性を、実験およびFEMシミュレーションにより検討し、次の結果を得た。

(1)ボトムング曲げはスプリングバック要因とスプリング

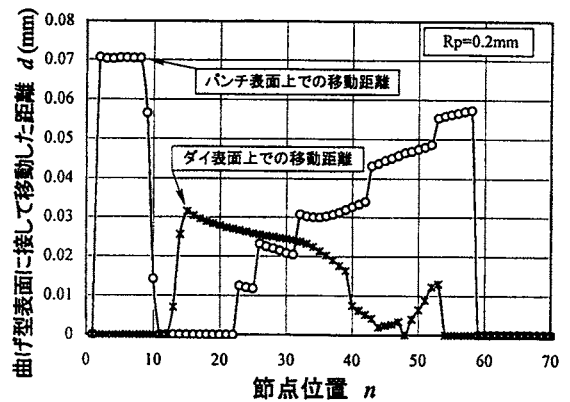


図8. 曲げ型表面に板が接して移動する距離

ゴ要因が共存する曲げであり、コイニング曲げはスプリングバック要因のみが存在する曲げということが出来る。

- (2)本報で対象とした曲げ加工条件では、コイニング曲げに必要な成形荷重は自由曲げの約10倍となり、スプリングバックの大きさは約1/3となる。
- (3)コイニング曲げの成形品角度はダイ溝幅、パンチ幅を変化させることによって調整できる。
- (4)コイニング曲げにおけるパンチと板との接触力は、パンチ先端丸みとパンチ斜面の交点近傍で最大となり、ダイと板との接触力は、ダイ肩部とダイ溝幅中央部寄り大きく、ダイ溝斜面中間部で小さい分布となる。
- (5)曲げ型と板との接触力の大きい位置では、型表面に接して板が移動する距離も大きい。

#### 5. 謝 辞

本研究を行うにあたり、財団法人天田金属加工機械技術振興財団から研究開発助成を賜りましたことを大変光栄に思うとともに、同財団に対して深く感謝申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) 塑性加工学会編：最新塑性加工要覧第2版，(2000)，280-284，(社)日本塑性加工学会。
- 2) 益田森治監修：薄板の曲げ加工，(1962)，116-135，158-170，誠文堂新光社。
- 3) 牧野内昭武：理研報告，66(1990)，30-44。
- 4) 滝沢堅：FEMシミュレーションシステム分科会資料集第6号，(1994)，19-27。
- 5) 小川秀夫：平12春塑加講論(2000)，215-216。
- 6) 小川秀夫：51回塑加連講論，(2000)，471-472。
- 7) 小川秀夫：型技術者会議2001，(2001)，124-125。