

金属板材のスプリングバックを制御するV曲げ加工

職業能力開発総合大学校 精密機械システム工学科

教授 小川秀夫

(平成16年度研究開発助成AF-2004004)

キーワード: スプリングバック, V曲げ加工, プレスブレーキ

1. 研究の目的と背景

金属板材曲げ加工品の精度安定性を阻害する最大の要因はスプリングバックである。スプリングバックを抑制する手段として多く行われている方法は、曲げ加工終了時にパンチとダイによって曲げ部を板厚方向に圧縮する方法である。この方法は、曲げ部に生じた周方向の応力勾配を減少させるものである。周方向の応力勾配を減少させる他の方法として、周方向に引張力や圧縮力を加える方法、曲げ線方向に圧縮力を加える方法がある¹⁾。

本研究で開発を目指しているスプリングバックを制御するV曲げ加工はこれらとはまったく異なり、V曲げ加工行程のある特定段階から除荷すると、曲げ加工中の角度と除荷後の角度に差が生じない現象(本報ではスプリングバックレス現象とよぶ)のあること^{2),3)}を利用する方法である。スプリングバックレス現象を利用してスプリングバックを制御、抑制するV曲げ加工法を実用化するにあたっては、スプリングバックレス現象発現メカニズムの解明に加えて、次の課題を解決しなければならない。それは、

(1) 曲げ加工板材の材質や板厚、曲げ型寸法が変わった場合でも、スプリングバックレス現象を発現するパンチ行程位置を、曲げ加工中に予測できること、

(2) 曲げ加工板材が変わった場合でも、スプリングバックレス現象発現時の曲げ角を所望の角度とするための曲げ型仕様を特定できること、である。

本研究では、スプリングバックレス現象発現メカニズムを明らかにするとともに、上記(1)の課題を曲げ加工中の特性値から予測すること、(2)の課題を曲げ加工板材の材質、板厚から特定することを試みた。

検討は、曲げ加工中の角度、荷重、パンチ行程などの加工特性計測装置を備えたプレスブレーキによる実験と、曲げ加工過程のFEMシミュレーションにより行った。

2. 曲げ加工条件及び方法

2.1 曲げ型

使用した曲げ型は、精密板金加工で一般的に広く使用されているV字形状パンチとV溝を有するダイである。表1に使用した3種類の曲げ型各部の寸法を示す。曲げ型①はパンチ先端角度 α_p 、ダイ溝角度 α_d のいずれもが 90° であり、曲げ型②は 88° である。曲げ型③はスプリングバックレス状態発現時の

成形品角度を所望の角度とするための検討にも用いた。ただし、本研究では目的とする曲げ角を 90° とし、曲げ型③の α_p と α_d は同一角度の組合せとして変化させた。

2.2 加工板材

曲げ加工に使用した加工板材を表2に示す。材質は4種類であるが、SPCCとC1100Pは特性の異なる2条件とした。板厚 t は各材質とも $0.8\text{mm}\sim 2.0\text{mm}$ の範囲とし、曲げ試験片の寸法・形状は $60\text{mm}\times 80\text{mm}$ (曲げ線長さ)の長方形で、曲げ線は圧延方向に直角とした。表2中に記した加工硬化式は各材質とも $t=1.0\text{mm}$ のものであるが、板厚の異なる板材の曲げ加工シミュレーションにあたっては、各板厚毎に求めたそれぞれの加工硬化式を用いた。材質一定の条件で板厚が変化したときの影響を調べるためのシミュレーションには、表中の加工硬化式を用いた。

2.3 実験方法

実験には図1(a)に示したプレスブレーキ(AMADA-FMB-3613NT)を使用した。このプレスブレーキには曲げ加工中の角度、荷重、パンチ行程などの計測機能が備えられている。曲げ加工中の角度測定には小型の分度器型角度センサを用い、これを図1(b)に示すように分割ダイの間に設置して、曲げ加工品外側表面に接触子を当てる方式で測定した。

2.4 FEMシミュレーション

表1. 曲げ型仕様

	仕様	曲げ型①	曲げ型②	曲げ型③
パンチ	先端角度: α_p (deg.)	90	88	90~100
	V幅: W_p (mm)	10.0	12.5	10.0
	先端半径: R_p (mm)	0.5	0.6	0.5
	肩半径: R_s (mm)	1.0	0.2	1.0
ダイ	溝角度: α_d (deg.)	90	88	90~100
	溝幅: W_d (mm)	9.72	10.0	10.0
	肩半径: R_d (mm)	1.0	2.0	1.0

表2. 加工板材

	材質	板厚 t (mm)	加工硬化式
①	SPCC	0.8~2.0	$\bar{\sigma} = 565.3 \times (0.0079 + \bar{\epsilon}^n)^{0.23}$
②	SPCC	0.8~2.0	$\bar{\sigma} = 545.8 \times (0.0145 + \bar{\epsilon}^n)^{0.18}$
③	SPCE	0.8~2.0	$\bar{\sigma} = 558.4 \times (0.0160 + \bar{\epsilon}^n)^{0.21}$
④	SUS430	0.8~2.0	$\bar{\sigma} = 764.7 \times (0.0072 + \bar{\epsilon}^n)^{0.18}$
⑤	C1100p	0.8~2.0	$\bar{\sigma} = 447.7 \times (0.0081 + \bar{\epsilon}^n)^{0.35}$
⑥	C1100p	0.8~2.0	$\bar{\sigma} = 347.3 \times (0.0140 + \bar{\epsilon}^n)^{0.16}$



(a)



(b)

図1. 実験に使用したプレスブレーキ(a)と、曲げ加工中の角度測定センサ(b)

曲げ加工過程のシミュレーションには静的陽解法 FEM プログラム AITAS-2D⁴⁾ を用い、曲げ変形を平面ひずみ問題としてシミュレートした。使用要素は 4 節点四角形要素で、要素内の積分点数は 1 点とし、安定化マトリックス法を用いた。加工板材と曲げ型間の摩擦は無しとした。

3. 結果及び考察

3-1 スプリングバックレス現象発現のメカニズム

図2は加工板材③ (SPCE), $t=1.0\text{mm}$ を, $\alpha_p=\alpha_d=90^\circ$ の曲げ型③によってV曲げ加工したときの曲げ加工中の角度推移と、各パンチ行程から除荷した時の除荷後の角度の実験結果である。平板の状態から曲げられてきた左右フランジの外側表面がダイ溝斜面に広く接触した段階で、曲げ加工中の角度は 90° となる。その後、曲げの進行にともなって成形品角度は 90° よりも曲がり過ぎた鋭角形状となり、図2中に(I)で示したパンチ行程 S_{min} の位置で、フランジの曲げ内側表面がパンチ肩部に接触する。この時点で曲げ加工中の成形品角度は最小の θ_{min} となる。(I)の段階からさらに曲げを進行していくと、成形品はパンチ肩部によって曲げ戻し変形を受けて外側に開かれ、成形品角度は大きくなる。また、曲げ戻し変形によってフランジの曲げ内側表面近傍には、図3中の(b)部に

見られるように、板面に沿った引張応力が発生する。このため成形品にはパンチ直下の曲げ部外側(図3中の(a)部)と、フランジ内側の(b)部に引張応力が発生した状態となる。(a)部の引張応力は除荷時に成形品を外開きとするスプリングバックを引起し、(b)部の引張応力は成形品を内閉じとするスプリングゴーを引起す。このことから図2(I)の段階以降では、成形品にスプリングバック要因とスプリングゴー要因が共存した状態となり、除荷時に成形品が外開きとなるか内閉じとなるかは両要因の大きさによって決まることになる。図2(I)の段階直後では、パンチ肩部による曲げ戻し変形が小さいことから、スプリングゴー要因が小さく、スプリングバック要因が優勢であるため、除荷時に成形品は外開きとなる。しかし曲げ加工が進行して曲げ戻し変形が大きくなると、スプリングゴー要因が優勢となり、図2に見られるように除荷時の成形品は外開きから内閉じに転じる。これらのことから曲げ加工行程のある段階で、スプリングバック要因とスプリングゴー要因とがちょうどバランスして、曲げ加工中の角度と除荷後の角度が等しくなる状態が存在することになる^{5,6)}。図2中の(II)で示したパンチ行程 S_{sb} の位置がその状態であり、本

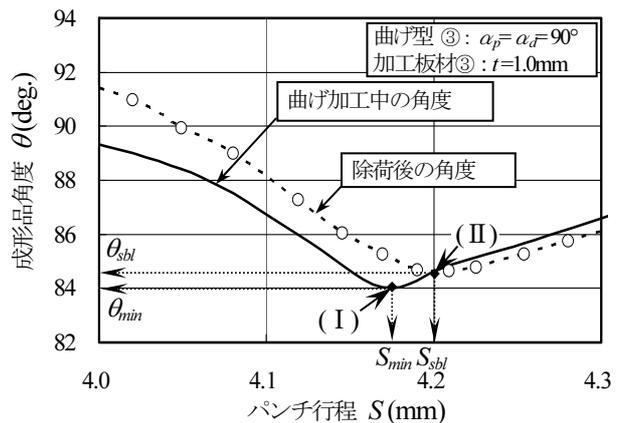


図2. 曲げ加工中の角度推移と除荷後の角度

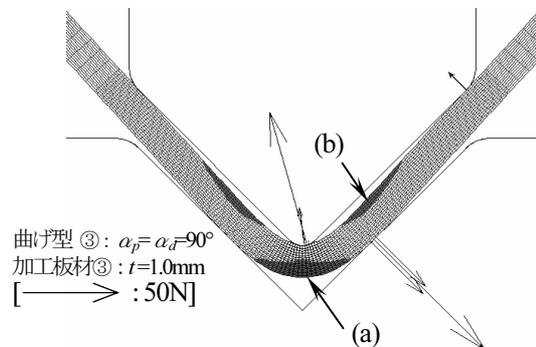


図3. スプリングバックレス現象発現時の応力状態および接触力分布(変形形状中の黒い領域は、板面に沿った引張応力が 105MPa 以上の範囲であり、曲げ加工形状の右半分につけた矢印は曲げ型と板との接触力の大きさを示す。)

方法はこの現象を利用するV曲げ加工法である。

3-2 スプリングバックレス現象発現位置の予測

スプリングバックレス現象発現のメカニズムが明らかになっても、曲げ加工行程中のどの位置でその現象が発現するかを予測できない限り、試し曲げ加工が必要となり本加工法は実用にはならない。加工板材の材質や板厚、曲げ型寸法が変わった場合でも、スプリングバックレス現象を発現するパンチ行程位置を予測できることが必要となる。しかも毎回の曲げ加工毎に、その位置を曲げ加工中に予測できなければならない。現在の実用的プレスブレーキで実測可能な加工中の特性値としては、荷重、曲げ角度、パンチ行程が一般的である。以下ではこれらの特性値を用いてスプリングバックレス現象発現位置を曲げ加工行程中に予測することを検討した。

(a) 曲げ荷重に基づく予測

本予測方法は、V曲げ加工中に計測されるある特定段階の荷重値を基準とし、その基準荷重値からスプリングバックレス現象発現時の荷重値を予測しておき、その後の曲げ加工行程で荷重値が予測しておいた値に到達した時点のスプリングバックレス現象発現点と見なす方法である。加工板材や曲げ型寸法が変わった場合でも基準荷重値として扱えるのは、自由曲げ時の最大荷重値 F_{air} (図4中の S_{air} の位置での荷重値) と、曲げ加工中の角度が最小となるときの荷重値 F_{min} (図2, 図4中の S_{min} の位置での荷重値) であろう。

図5は曲げ型①を用いたシミュレーションから求めた F_{air} ならびに F_{min} と、スプリングバックレス現象発現時の荷重値 F_{sbl} との関係を示した結果である。各プロット点につけた記号は同図中の表に示すように、加工板材の材質と板厚の組合せを示している。結果の特徴は F_{air} , F_{min} のいずれもが F_{sbl} と良い線形関係を示し、中でも F_{min} と F_{sbl} の相関係数は非常に良いことである。図5中には曲げ型②を用いた実験から得られた F_{min} と F_{sbl} との関係も示した。実験結果においても F_{min} と F_{sbl} とは非常に良い線形関係を示すとともに、実験結果とシミュ

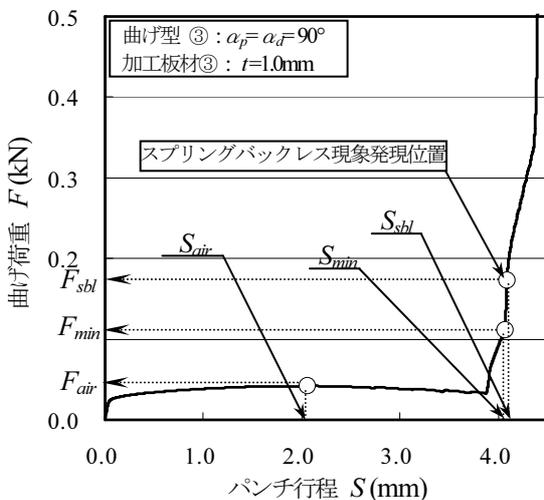


図4. V曲げ加工荷重線図

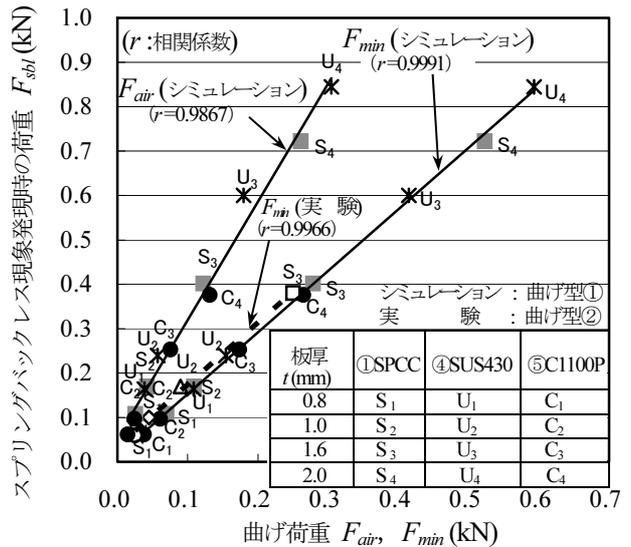


図5. スプリングバックレス現象発現時の荷重 F_{sbl} と曲げ加工中の特定段階の荷重 F_{air} , F_{min} の関係

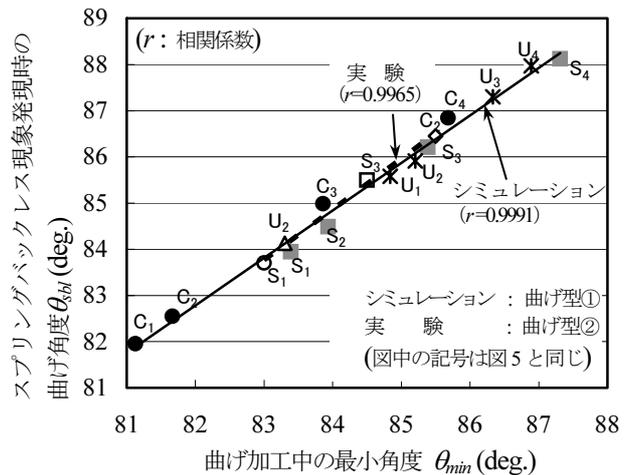


図6. スプリングバックレス現象発現時の曲げ角度 θ_{sbl} と曲げ加工中の最小角度 θ_{min} の関係

レーション結果にもよい一致がみられる。以上のように、加工板材、曲げ型寸法が変化した場合でも F_{min} と F_{sbl} はほぼ一つの線形関係を示すことがわかる。これらのことから曲げ加工中に F_{min} を計測して F_{sbl} を線形関係から計算しておけば、その後の曲げ加工行程で荷重値が F_{sbl} になった時点のスプリングバックレス現象発現点として特定することができる。

(b) 曲げ角度に基づく予測

V曲げ加工中に計測されるある特定段階の曲げ角度を基準値とし、その基準値からスプリングバックレス現象発現位置を予測する方法である。V曲げ加工中の基準角度として扱えるのは、図2に示した曲げ加工中の最小角度 θ_{min} であろう。その理由は、スプリングバックレス現象発現のためには曲げ部に発生するスプリングバック要因を打消すスプリングコー

要因が必要であり、そのためにはフランジがパンチ肩部に接触して曲げ戻されることが必要となる。このことから曲げ加工中の角度が最小になる段階が必ず存在するからである。図6は曲げ加工中の最小角度 θ_{min} とスプリングバックレス現象発現時の曲げ角度 θ_{bl} との関係を示したものである。各種材質や板厚の加工板材が混在しても、また曲げ型の異なる実験結果とシミュレーション結果が混在しても θ_{min} と θ_{bl} は一つのよい線形関係を示す。このことから曲げ加工中に θ_{min} を検出することによって線形関係から θ_{bl} を予測することができ、スプリングバックレス現象発現位置を特定することができる。

以上のように、曲げ加工中に計測した荷重、曲げ角度からスプリングバックレス現象を発現するパンチ行程位置を特定できることを示したが、曲げ荷重および曲げ加工中の角度はそれぞれパンチ行程と関係づけられていることから、 θ_{min} を示すときのパンチ行程 S_{min} とスプリングバックレス現象発現時のパンチ行程 S_{bl} との関係も線形関係を示し、 S_{min} から S_{bl} を特定することもできる⁷⁾。

3.3 曲げ型仕様の検討

図2に示したように $\alpha_p = \alpha_d = 90^\circ$ の汎用的な曲げ型を使用し

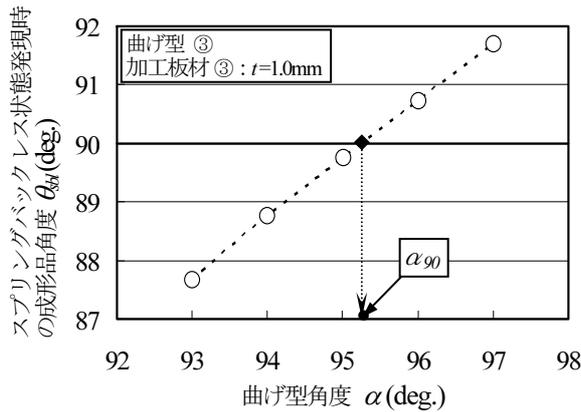


図7. 曲げ型角度 α とスプリングバックレス状態発現時の成形品角度 θ_{bl} の関係

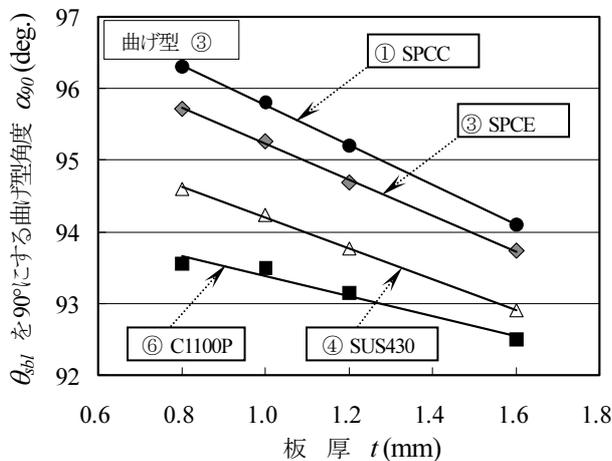


図8. 加工板材の板厚、材質と α_{90} の関係

た場合、スプリングバックレス現象発現時の成形品角度は一般に 90° とはならない。本加工法実用化のためには、スプリングバックレス現象発現時の曲げ角を所望の角度にできなければならない。本研究では精密板金加工で多く行われている 90° を目的の曲げ角とし、スプリングバックレス状態での曲げ角を 90° とするための曲げ型仕様の特定法について検討した。

図7は加工板材③ (SPCE), $t=1.0\text{mm}$ を曲げ型③の α_p, α_d を変化させて曲げを行ったときの、スプリングバックレス状態発現時の成形品角度 θ_{bl} のシミュレーション結果である。なお、 α_p と α_d は同一角度の組合せとして変化させているため、それらをまとめて曲げ型角度 α として表している。 α が大きくなるにつれて θ_{bl} は単調に大きくなり、 θ_{bl} をちょうど 90° にする α の存在することが分かる。ここでは θ_{bl} をちょうど 90° にする曲げ型角度を α_{90} で表すことにする。

図7と同様のシミュレーションを加工板材の材質、板厚を変えて行い、 α_{90} を求めた結果が図8である。結果の大きな特徴は加工板材の材質が変化しても、 α_{90} と板厚 t とは非常によい線形関係を示すことである。このことから α_{90} と t との関係を(1)式で近似すると、 A および B は加工板材の材質に関係

$$\alpha_{90} = At + B \quad (1)$$

した定数となる。材料特性値の中でも、パンチ先端での曲げ変形状に大きな変化を与える特性値として n 値をあげることができる。加工板材の板厚、曲げ型寸法が同一でも、 n 値が大きいかほど曲げ半径は大きくなり、曲げられてきた板のフランジ内側表面がパンチ肩部に接触する段階はパンチ行程の早い段階へと移行する⁸⁾。スプリングバックレス現象の生じるメカニズムは、パンチ肩部による曲げ戻し変形によって誘起されるスプリングゴア要因に起因していたことから、 n 値が変化してフランジ内側表面がパンチ肩部に接するときの曲げ角が変化すると、スプリングバックレス状態発現時の曲げ角も異なったものとなる。(1)式の A と n 値の関係、ならびに(1)式の B と n 値の関係は、図8の結果より、(2)式および(3)式に示した2次式となる。

$$A = 240n^2 - 111.98n + 10.33 \quad (2)$$

$$B = -376n^2 + 199.05n + 72.60 \quad (3)$$

(2), (3)式で示される A および B を(1)式に代入することによって、加工板材の板厚、材質が変わった場合でも α_{90} を予測することができる。(1)式による α_{90} の予測精度を実験によ

表3. α_{90} の予測角度と実験結果

加工板材	板厚 t (mm)	n 値	(1) 式から予測した α_{90}	実験によって得られた α_{90}
② SPCC	1.6	0.18	92.97°	93.00°
③ SPCE	1.0	0.21	95.22°	94.97°
③ SPCE	0.8	0.21	95.74°	95.71°
④ SUS430	1.0	0.18	94.20°	94.33°
⑥ C1100P	1.0	0.16	93.39°	93.25°

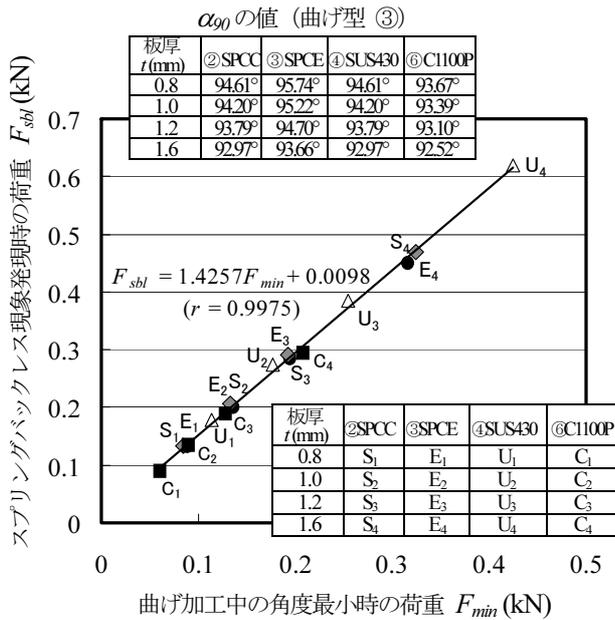


図 9. 曲げ加工中の角度最小時の荷重 F_{min} とスプリングバックレス現象発現時の荷重 F_{sbl} の関係

って検証した。その結果を表3に示す。実験結果と(1)式によって予測された α_{90} はよく一致しており、使用すべき曲げ型角度は(1)式によって特定できるといえる。

最後に、曲げ型角度 α_{90} は表3に示したように一般に 90° ではない。したがって曲げ型角度が 90° でない場合でも、スプリングバックレス現象発現位置を曲げ加工中の荷重、角度から予測できることが本加工法の実用化において必要となる。図9は α_{90} の曲げ型を用いた場合の F_{min} と F_{sbl} との関係調べた結果である。加工板材の材質、板厚が変化することによって図中の表に示したように α_{90} の値が変化しているにもかかわらず、 F_{min} と F_{sbl} との間には非常に良い線形関係が成り立つ。したがって曲げ型角度が 90° でない場合でも F_{min} によって F_{sbl} を予測することができる。

4. 結言

金属板材のV曲げ加工行程のある特定の段階から除荷すると、曲げ加工中の角度と除荷後の角度に差の生じない現象(ス

プリングバックレス現象)のあることを利用してスプリングバックを制御、抑制するV曲げ加工法の開発を行った。

以下の結果を得て、本加工法が実用可能なことを示すことができた。

- (1)スプリングバックレス現象は、パンチ直下の曲げ部に発生するスプリングバック要因と、パンチ肩部によって曲げ戻し変形を受けたフランジ部に発生するスプリングゴ−要因がちょうどバランスした状態で発現する。
- (2)加工板材の板厚や材質、曲げ型寸法が変化した場合でも、スプリングバックレス現象を発現するパンチ行程位置は、曲げ加工中の最小角度 θ_{min} 、そのときの荷重値 F_{min} 、およびパンチ行程 S_{min} から予測できる。
- (3)加工板材の板厚、材質が変化した場合でも、スプリングバックレス状態発現時の曲げ角を所定の角度(本研究では 90°)にするための曲げ型条件を板厚および n 値から特定できる。

謝辞

本研究を行うにあたって財団法人 天田金属加工機械技術振興財団から研究助成を受けた。また、プレスブレイキによる曲げ実験を行なうにあたり、(株)アマダ 小山純一氏、今井一成氏から全面的な協力を得た。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：塑性加工技術シリーズ 14 曲げ加工，(1995)，51-52，コロナ社。
- 2) 益田森治監修：薄板の曲げ加工，(1962)，177-178，誠文堂新光社。
- 3) 小川秀夫：塑性と加工，43-493(2002)，145-149。
- 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14 塑加春講論，(2002)，137-138。
- 6) 小川秀夫：平15 塑加春講論，(2003)，193-194。
- 7) 小川秀夫・重石健登：平16 塑加春講論，(2004)，353-354。
- 8) 小川秀夫・重石健登・小山純一：55 回塑加連講論，(2004)，19-20。