

U 曲げ加工の精度向上に関する研究

福島高専 機械工学科

教授 永井康友

(平成 16 年度研究開発助成 AF-2004005)

キーワード : U 曲げ, 二段 U 曲げ, スプリングバック

1. 研究の目的と背景

自動車において、軽量化は環境問題などにとって重要な課題であり、排出ガスの低下、燃費の向上につながる。軽量化の手法として、材料を高強度化する事による薄肉化が有効かつ現実的であるが、高強度になるとプレス加工、特に曲げ加工においてスプリングバックが大きくなり、製品精度の確保が難しくなる。

そこで本研究では主に高強度鋼板の U 曲げ加工を対象に、フランジ角が直角でかつウェブ（底面）の平坦な製品を得ることを目的に金型形状とスプリングバックの関係について調査を行なった。

具体的には次の 2 項目について研究を行なった。

①背圧法 U 曲げ加工におけるパンチ、パッド形状のスプリングバック変形に及ぼす影響。

②ダイを二段にしたいわゆる二段 U 曲げ加工法のスプリングバック特性。

2. U 曲げ加工のスプリングバック特性

2.1 変形過程

一般に、U 曲げにおいて直角を出すためには背圧（クッション圧）の大きさを調整して行っている。それで、この方法を背圧法と呼んでいる。以下にこの背圧法につ

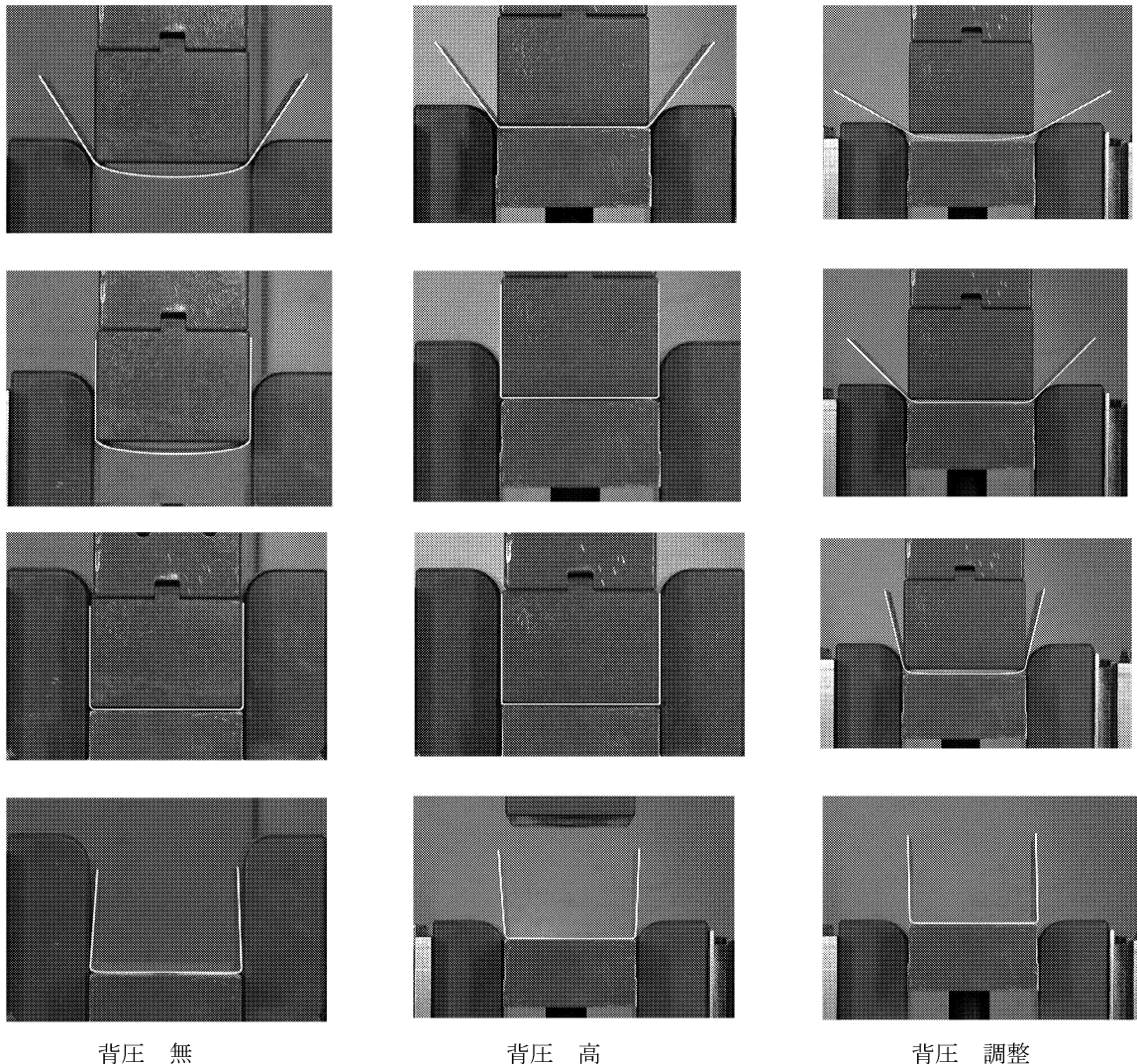


図 1 背圧の違いによるフランジ角度の違い

いて説明する。

図1の写真は背圧を変えたときのU曲げ成形過程を示したものである。背圧無しの場合（左図）には板はパンチの下降と共にパンチとダイで曲げられ、板の底面（ウェブ）部はパンチ下面には密着しないで弧を描き、下死点でそのたわんだ弧の部分が平坦になるまで押し潰される。そして、パンチを引き上げると、スプリングバックによりフランジは内側へ倒れるような変形をする。

それに対し、高背圧（中央図）では、板は最初からパンチとパッドではさまれた状態で曲げられるため、ウェブはたわまない。そして、除荷後はフランジが外へ開くような変形をする。

以上のことから、成形途中のウェブのたわみ量によって除荷後の角度が左右されるのが推測される。そして、そのたわみ量は背圧の大きさによって変化する。図1の右図は除荷後にちょうど直角になるように背圧を調整した場合であるが、成形途中でパンチと材料のウェブの間にすきまがあるのが分かる。

2.2 スプリングバックのメカニズム

次に、なぜたわんだウェブを平坦にすることによって、フランジ角度が変わるのかについてFEMの解析結果を基に説明する。

図2は、たわんだウェブが潰れて行くのに伴って曲げR部の材料がどのような変形をするかを示したものである。曲げR部も詳細に観ると場所によって変形挙動が異なっている。そこで、R部の材料を図のようにA：ウェブ側、B：R中央、C：フランジ側の3箇所に分けて、それぞれの挙動について説明する。

Aの部分は潰される前はウェブがたわんでいるため、平坦ではなく外へ凸なR形状がついている。それが潰されることによって平坦になる。つまり、曲げ戻し変形を受けている。

Bの部分はパンチRに接触している部分であるが、パンチストロークの進行と共に接触部分が増えていき、最後は全域がパンチに巻き付く。つまり、曲げ変形が進行し、曲げRが大から小へ変化する。

Cの部分は、最初はパンチRの部分に少しかかっているため、平坦でなくA部と同じように外へ凸なR形状になっている。それが、ウェブが潰されることによってフランジ側に押出されるが、パンチとダイのスキマで拘束されているため、平坦になる。つまり、A部と同じように曲げ戻し変形を受ける。

整理すると、A、C部が曲げ戻し変形を受け、B部は曲げが進行する。そして、スプリングバックの向きは、B部はフランジが外へ開くような通常の向きであるが、A、C部は曲げ戻し変形を受けているため、内閉じになるような逆向きのスプリングバック（スプリングゴー）をする。最終的にはこれらが組み合わされたスプリングバック変形をすることになるが、B部のスプリングバック量とA、C部のスプリングゴーの量が等しければ直角な製品を得られる訳である。

B部のスプリングバック量は、パンチRと板厚、材質によって大体決まってしまうので、これと同じ量のA、C部のスプリングゴーの量をウェブのたわみ量によって、すなわち背圧の大きさによって調整するのが背圧法である。

ウェブの中央部もスプリングバック変形をするが、量としてはA、B、C部よりも小さい。この部分は図2の変形過程を見れば分かるが、「外へ凸」から「内へ凸」に

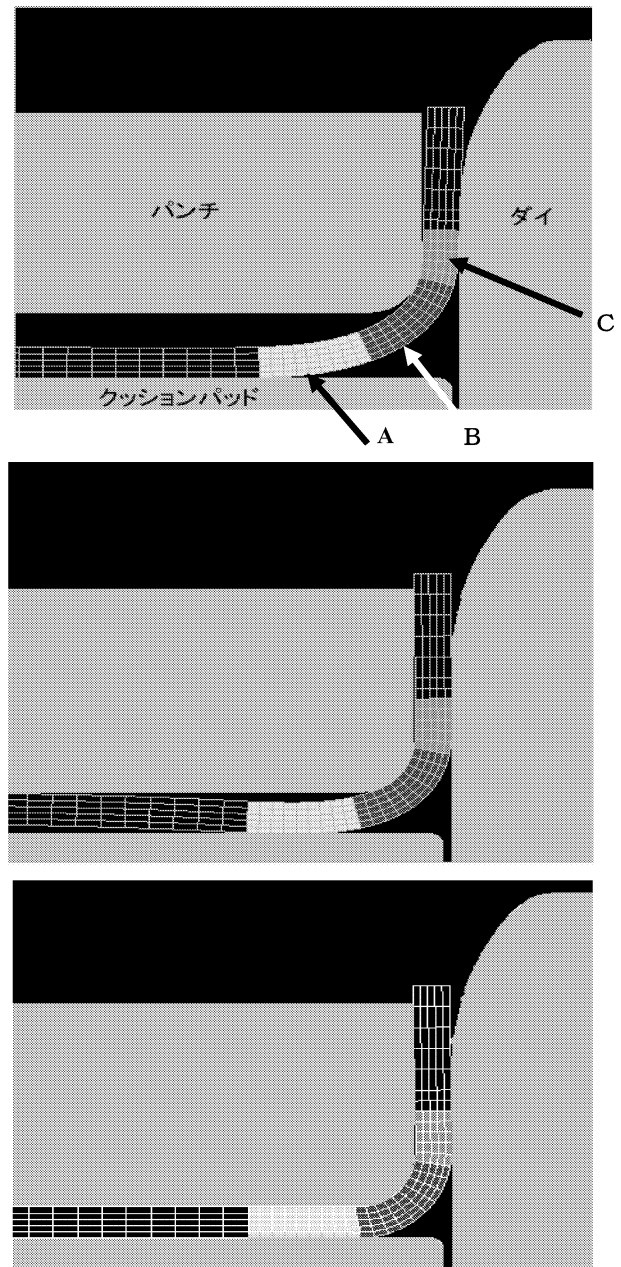


図2 曲げR部の変形挙動

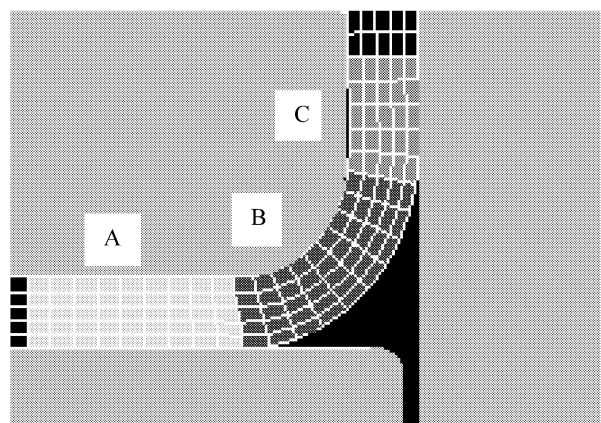


図3 曲げR部拡大図

なり、そして最後に平坦になる。つまり、曲げー曲げ戻しー再曲げ戻し変形をする複雑な履歴をたどるが、そのためにスプリングバックとスプリングゴーがキャンセルするような効果が生じ、結果的にはあまりスプリングバックしない。

図3はR部を拡大したものである。A、C部は見かけ上、平坦で変形していないように見えるが、よく観ると板厚内では変形しているのが分かる。そのためにスプリングゴーの変形を起こす。

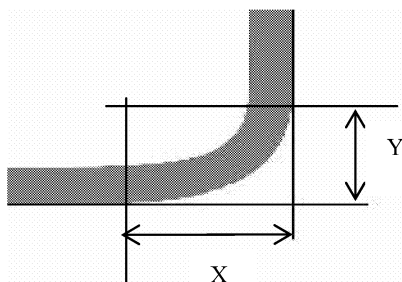


図4 曲げR部の楕円化

2.3 曲げR部の形状

図4は実際の曲げ製品のR部を拡大したものである。パンチRはもともとシングルRになっているが、製品は図のようにウェブ側のR止まりまでの距離Xの方が、フランジ側の距離Yよりも大きくなっているものが多い。このように楕円形状になりやすい理由は二つある。

一つは下死点での荷重不足である。背圧法でたわんだウェブを完全に平坦になるまで潰すには大荷重が必要になる。図2で示したシミュレーション結果は完全に押し切った状態であるが、実際には完全には押し切れない場合もある。特に高強度鋼板（ハイテン）になるほど押し切れない。そのために曲げR部近傍のウェブ側材料はRが残った状態になり、パンチRよりも大きなRになる。

二つめの理由は、下死点で完全に押し切ったとしても、スプリングバック変形するからである。前述したように、図2のA部の材料はスプリングゴーのため除荷後は平坦でなくなり、楕円になるような変形をする。これもハイテンになるほど大きく現れる。

パンチ底面が平らだと、ウェブを平坦にするためには、材料の逃げ場がないので大きな荷重が必要であるが、パンチ底面を少し逃げてやると、比較的低荷重でも直角度とウェブ平坦度を出すことができる。

3. パンチ、パッド形状の影響¹⁾

3.1 Aタイプ（平パンチ・平パッド）

前章で述べた内容はU曲げで最も一般的な形状である図5左の平パンチ・平パッド（ここではAタイプと呼ぶ）によるものである。材料が軟鋼板あるいはせいぜい引張強さが500MPaクラスであれば、このAタイプで十分精度を出せると思われる。

しかし、それ以上のハイテンになるとAタイプの金型で直角度とウェブ平坦度を出すためには大きな荷重が必要になってくるし、いくら大きな荷重をかけてもスプリングバックの影響でウェブの平坦度は悪くなる。

3.2 Bタイプ（凹パンチ・平パッド）

そこで、ウェブの平坦度対策として有効なのが図5中央のBタイプ（凹パンチ・平パッド）である。すなわち、

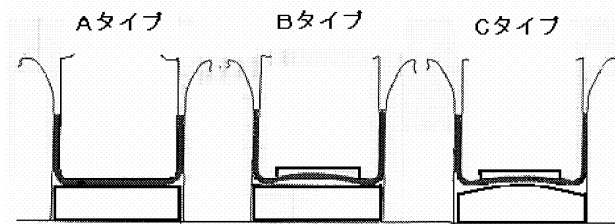


図5 金型形状

パッドはAタイプと同じで平らであるが、パンチ底部が逃がっている。

Bタイプでは下死点で荷重をかけることにより、ウェブがパンチ逃げ部に凹形状にたわむ。そして、除荷時のスプリングバック変形によりウェブは平坦になる。ボトム荷重もAタイプのようにパンチとパッドの間で無理矢理潰すことにはならないので、小さくて済む。

パンチ底部に逃げ加工を施さなくてはならないので、Aタイプに比べれば金型費はアップするが、ハイテンに対しては有効である。

3.3 Cタイプ（凹パンチ・凸パッド）高背圧法

Bタイプよりも更に積極的にウェブを凹にたわませようとするのが図5右に示す凹パンチ・凸パッドのCタイプである。パッドが凸状になっているのでBタイプに比べて容易にウェブをたわませることができる。

Cタイプの目的はBタイプよりも更に必要荷重を小さくすることである。

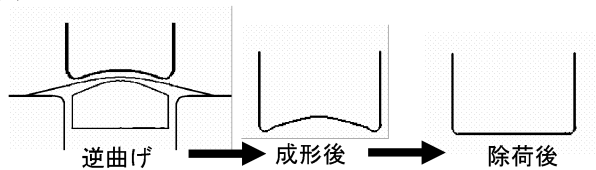


図6 Cタイプ（高背圧法）の変形過程

Cタイプの変形過程は図6に示すように、最初に高背圧で材料をパンチとパッドで挟んでおき、その背圧を保持したまま下死点までストロークさせ除荷させるが、下死点でボトム荷重をかける必要はない。

Cタイプの変形メカニズムは次の通りである。除荷時のスプリングバックにより曲げR部は外へ開くが、ウェブの平坦になろうとする内閉じのスプリングバック（スプリングゴー）と相殺されてフランジ角は直角になる。

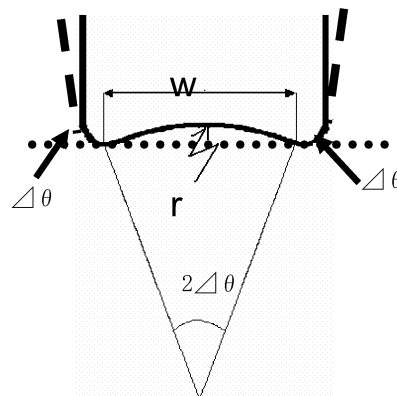


図7 Cタイプのウェブ表面応力の計算

しかし、この変形メカニズムが成り立つのは基本的にウェブが弾性変形でなければならない。そこで、その適用限界を理論的に検討する。曲げ R 部のスプリングバック量は材料と曲げ半径が与えられれば、ほぼ決まる。今、そのスプリングバック角を $\angle\theta$ とすると、これを打ち消すために図 7 の様に $2\angle\theta$ だけの角度になるような r をウェブ面にとる必要がある。その時のウェブ表面の応力が降伏点以下であれば除荷時にウェブは平坦に戻る。

ウェブ表面の応力は板厚を t 、ヤング率を E とすると式(1)で表すことができる。

$$\sigma = E\varepsilon = Et/2r \quad (1)$$

ウェブの有効幅を w とすると、幾何学的に $2r\angle\theta = W$ の関係があるから、上式は

$$\sigma = E\Delta\theta t/w \quad (2)$$

となり、この σ が降伏点より小さければよいことになる。

上式から σ を小さくするためには有効ウェブ幅 w が大きいほどよい。つまり、ウェブ幅が大きいほど C タイプ曲げはやりやすいことになる。

3.4 C タイプ低背圧法

図 8 は板厚 1.6mm の高強度鋼板 HT980 による実験結果 (曲げ R2.5, フランジ高さ 30, ウェブ幅 50, 曲げ幅 50) であるが、ウェブのたわみが約 0.5mm 残留しており、フランジ角も少し開いている。なお、この実験モデルは大型トラックフレームサイドメンバーの約 1/5 の大きさに相当する。

これを $E=206\text{GPa}$, $\angle\theta=10^\circ$, $W=40\text{mm}$ の条件で式(2)から応力を計算してみると $\sigma \approx 1400\text{MPa}$ となる。これは HT980 の降伏点 $\sigma_y \approx 600\text{MPa}$ より大きく、ウェブが一部塑性域に入っている事が分かる。

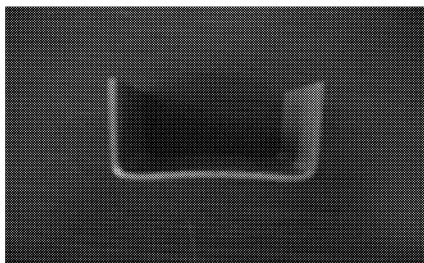


図 8 C タイプによる実験結果

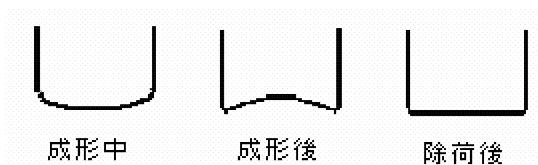


図 9 C タイプ (低背圧法) の変形過程

ウェブ幅が大きければ、3.3 で述べたように高背圧で成形すればボトム荷重をかけなくてもウェブが平坦で直角な製品を得ることができる。しかし、ウェブ幅が小さい製品でも、C タイプ金型で低背圧にすれば所望の製品が得られる。

図 9 に変形過程を示したが、背圧を調整してウェブをたわませながら成形し、下死点で押しつぶす。このやり方は A, B タイプと同じである。違いは C タイプではパッドに形状が付いているため、小さな荷重でも押しつぶすことができる。つまり、B タイプより小さな荷重で成形

できるということである。

ウェブ幅が小さい場合に図 6 の高背圧法では成形不可で、図 9 の低背圧法ではなぜ可能なのかは次の理由による。

どちらも曲げ R 部の外開きのスプリングバック量は同じであるので、それを相殺するための同じ量の内閉じのスプリングバック (スプリングゴ) を発生させなければならない。その発生源が高背圧法ではウェブだけであるのに対して、低背圧法では曲げ R 部の材料が一部フランジ側に押し出されるので、図 3 の C 部も発生源になる。つまり、低背圧法の方がスプリングゴの量を大きくとれるので直角度とウェブ平坦度を出しやすい。

4. 二段 U 曲げ法²⁾

前章までの内容は背圧法によるものであるが、本章では全く違った U 曲げ加工法である二段 U 曲げ法について説明する。

4.1 成形プロセス

成形プロセスは図 10 のように、まず w_1 のダイ幅で U 曲げを行い、次にそのワークを w_1 よりわずかに狭い w_2 のダイ幅で再 U 曲げを行なう。図 10 では 2 工程のやり方を示したが、パンチに工夫を施せば 1 工程も可能であるが、その 1 工程工法については 4.2 で説明する。

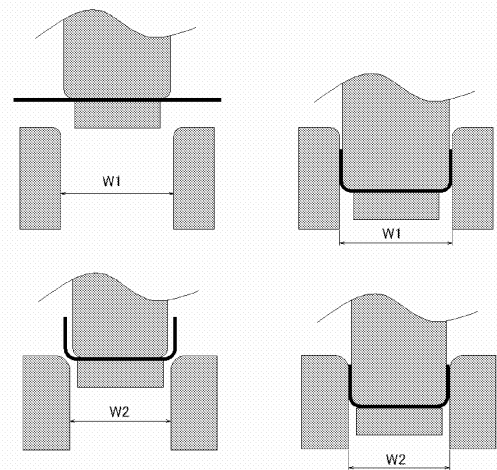
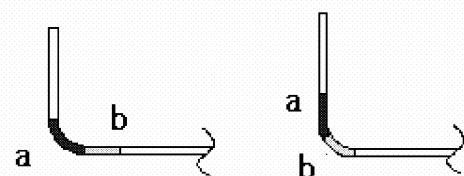


図 10 二段 U 曲げの成形プロセス

二段 U 曲げの狙いは曲げ R 部の一部に曲げ戻し変形を与え、その部分にスプリングゴを発生させることである。図 11 において、一段目 U 曲げ時に曲げ R 部にあった材料 a は二段目の曲げではフランジ部へ移動するため曲げ戻しを受ける。曲げ戻し量は一段目のダイ幅 w_1 と二段目ダイ幅 w_2 の差によって変化する。つまり、 $w_2 - w_1$ を調整することによってスプリングゴの量を調整することができる。



(1)一段目 U 曲げ時 (2)二段目 U 曲げ時

図 11 二段 U 曲げによる材料の移動

4.2 実験結果

図12の段付ダイで段差 δ を変えて実験を行った。条件はダイ幅50mm, パンチ $R=2.5\text{mm}$, ダイとのクリアランス1.7mmであり, 材料は表1に示す4種類で, 板厚は1.6mmである。一段目のパンチは通常のパンチであるが, 二段目のパンチは材料の変形を拘束しないように図13に示すようなテーパ状パンチを用いている。

表1 試験材料の機械的性質 (JIS5号引張試験)

	A5052	SPC	HT590	HT980
引張強さ (MPa)	358	200	627	1022
伸び (%)	20	52	34	18

図14は段差 δ と板厚 t の比 δ/t とフランジ角 $\angle\theta$ の関係を示したものである。 $\angle\theta$ が0で直角を表しており, 負になると内閉じを表している。高強度鋼板HT980では段差が板厚と等しい($\delta/t=1$)ときに直角になり, その他の材料では $\delta/t=0.5$ 付近で直角になる。 δ がそれ以上大きくなると内閉じになる。

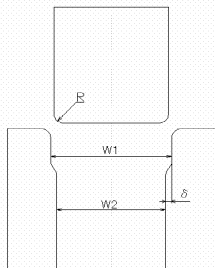


図12 段付ダイ

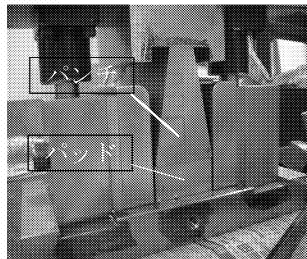


図13. 二段目パンチ

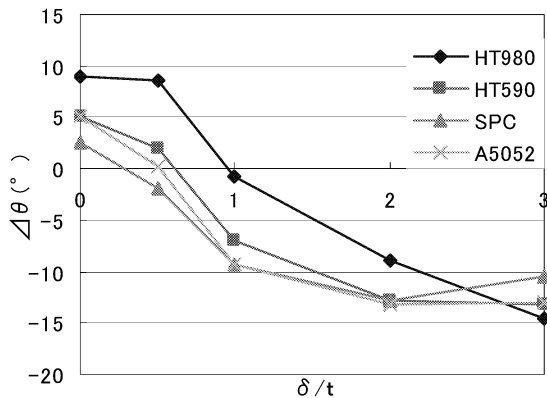


図14 段差とフランジ角の関係

図15は一例としてHT590の結果を示したものである。段差 δ が約0.5tでほぼ直角を得られている。それ以上 δ が大きくなると大きく内閉じになる。直角でなく, 内閉じ製品を得たい場合にはこの二段U曲げ加工法は有効である。

二段U曲げを2工程で行なうのは通常のU曲げに比べて生産性が悪い。金型費はアップするが, 1工程で加工したい場合は, 例えば図16のようにパンチを分割して間にウレタンなどのクッション材を挟めばよい。

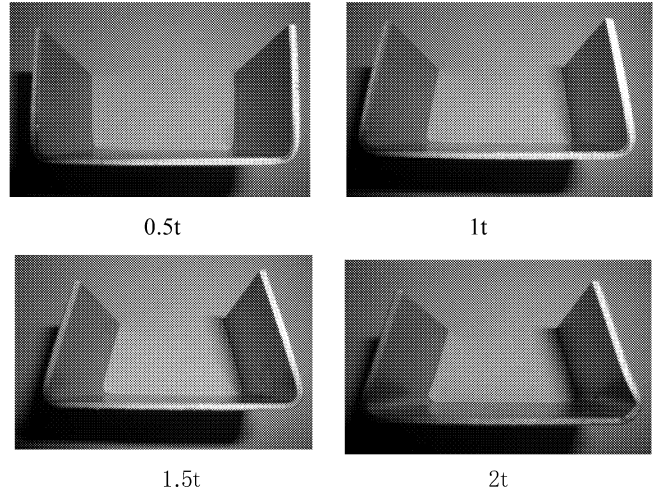


図15 段差 δ を変えたときの結果 (HT590)

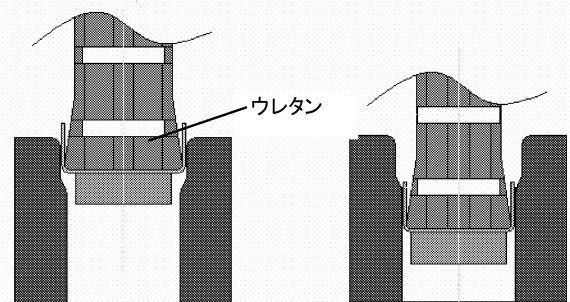


図16 1工程二段U曲げ

5. まとめ

U曲げ精度向上のため, 背圧法におけるパンチ・パッド形状の影響について検討した。また, 二段U曲げ法を考案, 実験を行い, その効果を明らかにした。主な結果は次の通りである。

- 1) ハイテンに対し, Aタイプでは, 直角度は出すことができるが, ウェブにたわみが残る。また, 大きな荷重を必要とする。
- 2) Bタイプではパンチ底面に逃げを設けているので, Aタイプに比べてウェブ平坦度が良くなる。
- 3) Cタイプではパッドにも形状を付けているので, Bタイプよりも低荷重で成形可能である。
- 4) 二段U曲げではダイに0.5t~1tの段差を付けることによりフランジ角が直角になる。更に段差大きくすることにより内閉じのU曲げ製品を容易に得ることができる。

謝辞

本研究は(財)天田金属加工機械技術振興財団の助成を受けて行われたものであり, ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木秀司・永井康友: 第57回塑加連講論(2006), 247.
- 2) 佐藤朝範・永井康友: 第56回塑加連講論(2005), 173.