

型曲げにおける板鍛造援用による曲げ角度および スプリングバック制御メカニズムの解明

京都工芸繊維大学 機械工学系
准教授 飯塚 高志
(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015035)

キーワード：V 曲げ，板鍛造，スプリングバック

1. 研究の目的と背景

金属薄板の型曲げにおける曲げ角度制御は除荷時のスプリングバックの影響があるため、理論的な予測が困難であり、現場において見込み金型の使用、決め押し、リストライクなどの経験的な手法によって行われている。これら経験的な手法の効果については、詳細なメカニズムは説明できていない。

スプリングバックを抑制する方法として、ボトミングやコイニングといった方法がある。これらの手法では、曲げ加工の終期において曲げ部に圧縮力による追加工を行うのがポイントと考えられるが、これらは板鍛造の一種と捉えることができる。したがって、これら板鍛造援用の手法をより積極的に利用することによって、さらに効果的・合理的に曲げ角度およびスプリングバックの制御ができると考えられる。

そこで本研究では、(1)ダイと不整合のパンチを用いた V 曲げとその後の板鍛造によるスプリングバックの抑制効果、(2)板鍛造を援用した V 曲げにおけるスプリング抑制効果への材料特性の影響および FEM 解析を用いたスプリングバック抑制効果のメカニズムの検討を行った。

2. 板鍛造を援用した V 曲げ時の曲げ角度およびスプリングバック制御手法の検討

2-1 板鍛造援用によるスプリングバック抑制法に関する基本コンセプト

V 曲げ加工後にパンチを押し込むことによって、曲げ角度を設計した角度に近づける方法は「決め押し」と呼ばれており、広く用いられている。この「決め押し」に関しては、ボトミングやコイニングと呼ばれる方法がある。このうち、コイニングは主にダイ底の素材にパンチを押し込む加工、ボトミングはダイ底部の隙間にダイ底の素材を押し出す加工として捉えることができる、しかしながら、これら「決め押し」に関する詳細なメカニズムは明らかにされていない。基本的には、いずれの場合もスプリングバック抑制は曲げ部の板厚方向に荷重をかけることによって、曲げ部内側の圧縮応力と外側の引張応力を減少させることによって生じると考えられているのが現状である¹⁾。

一般にスプリングバックの抑制は除荷前の弾性状態に依存すると説明することができるが、底部の鍛圧によって生じる材料流れやそれによって生じる形状変化と関連付

けて説明しようとする試みは少ない。これについて考えてみると、例えばボトミングでは曲げ後にパンチによってダイ底部の材料にパンチを押し込む加工を施すが、この時ダイ底部の素材に塑性変形を与えることが重要と考える。パンチ押し込みによる塑性変形は板厚方向への一軸圧縮変形になると考えられることから、パンチ底部の材料の変形は「曲げ」から「据込み」へと移行すると考えられる。この据込み加工は板厚方向に一樣な変形となるため、この変形だけを見れば除荷後の曲げ角度の変化を生じない加工であると考えられる。

一方、ボトミングに関しては、一般にダイ中央部の隙間に材料を押し出す加工と考えれば、「曲げ」から「押し出し」へ加工形態が変化することになる。この押し出し加工は、板厚方向に一樣な板長手方向の平面ひずみ圧縮変形に近いと考えられることから、やはり板厚方向に一樣な変形となり、この変形だけを見れば除荷後の曲げ角度の変化を生じない加工であるといえる。したがって、「決め押し」によるスプリングバック低減は、引張曲げや圧縮曲げのような曲げ加工中の応力状態を調整することによるものではなく、曲げ加工後の塑性加工形態の変化によって引き起こされていると考えることもできる。

このような観点から、曲げ加工後に曲げ部に鍛圧（板鍛造）を施し、材料を流動させる（塑性変形させる）ことができれば、「曲げ」から「板鍛造」へと加工形態が変化し、これによってスプリングバックを抑制できる可能性があると考えた。また、この「板鍛造」の方法については、恐らく「据込み」や「押し出し」に拘る必要はないものと考えられる。そこで、本研究では、まずダイと曲率が不整合のパンチを用いることによって、材料に流れる空間を与え、そこに板鍛造によって材料を流すことによって、「曲げ」から「板鍛造」に加工形態を変化させることでスプリングバックを抑制する可能性について検討した。

2-2 実験方法

図 1 に実験装置の概略を示す。パンチとダイをダイセットに設置し、ダイセット上部にオートグラフ（島津製作所製 AG-50kN）により圧縮荷重を与えることで試験片に底部の角度が 90° になるような V 曲げを施した。試験片は A5052-H 材を使用し、試験片寸法は t3.0×12.5×70 とした。試験片の上下面には曲げ内側および曲げ外側の形状を

測定する基準として2本の標線を14mm間隔で罫書いた。

図2に実験手順を示す。ダイ上に試験片を配置し、V曲げはエアバンドで施す。曲げ後は、パンチをそのまま用いて板鍛造へと移行する。パンチ押し込みによって板鍛造へと移行する際に、荷重が急上昇し始める。そこで、便宜上、荷重が2kNに達した点を押し込み0の状態と定義することにした。その後、パンチ押し込み量を0.2mmずつ1.8mmまで増加させる。各パンチ押し込み量において、パンチ荷重、スプリングバック量および試験片底部の形状を測定した。

パンチとしては図3に示す3種類を使用した。ダイの隅半径は10mmとしたため、初期板厚が3.0mmの場合の整合性が取れる角半径7mmのパンチを通常パンチとして用意した。また、効果的にパンチを押し込むために、図3(b)および(c)のような半径の小さい一コブパンチ（コブ半径4mm）および二コブパンチ（コブ半径1.5mm）を用意して、板鍛造の効果を比較する。二コブパンチのコブ半径は一コブパンチのプロフィールとほぼ同じ長さになるように設計されている。

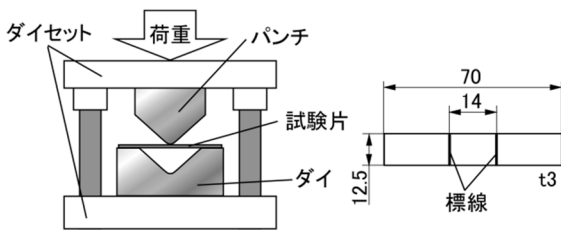


図1 V曲げ・板鍛造加工治具および試験片形状

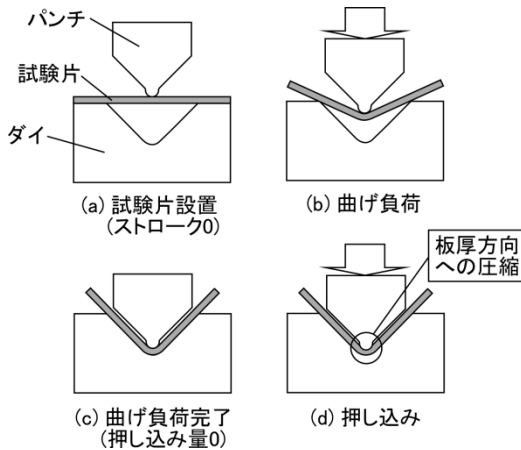


図2 実験手順

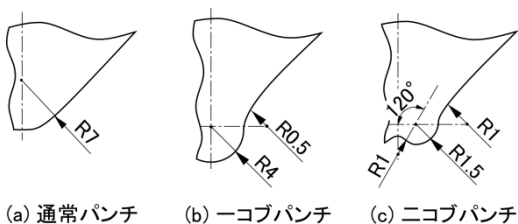


図3 パンチ先端形状

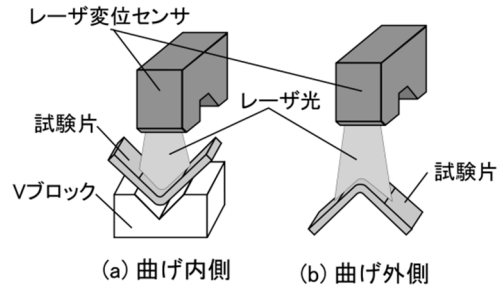


図4 曲げ角部の形状測定方法

実験後の試験片の曲げ角度の測定にはベベルプロトラクター(Trusco製 TP-495D)を用いた。荷重負荷中の形状はこの方法では測定できないため、試験中に撮影した写真から画像解析ソフトウェアを用いてベベルプロトラクターによる測定と同様な方法となるようにして測定した。

実験後に、予め試験片に罫書いた標線間の形状を測定した。標線間距離の測定にはレーザ変位センサを(KEYENCE製 LJ-500)を使用した。図4にレーザ変位計による形状測定方法を示す。レーザ変位センサにより試験片形状に沿った高さ分布が等間隔(33 μmピッチ)で出力される。それぞれ曲げ内側および外側からパンチ押し込み方向に曲げ線に平行に変位を測定し、それぞれの曲げ角部形状とした。

2・3 実験結果

図5に3種類のパンチによって加工を施した後の試験片形状を示す。通常パンチに関しては、加工荷重の関係で押し込み量0mmの状態まで加工できなかったため、この状態の写真を示している。一方で、コブパンチによる加工に関しては、押し込み量1.8mmまで板鍛造を施した加工試験片を示している。図より、パンチ角部(曲げ内側)において、コブパンチを用いた加工では、通常パンチには見られないくぼみが形成されていることがわかる。これは主にボトムリング加工の効果と考えられる。また、曲げ角度については通常パンチによる加工では設定角度よりも大きな角度となっており、スプリングバックが生じている結果となっているが、二つのコブパンチによる加工では逆に曲げ角度が90°より小さくなっていることが確認できた。

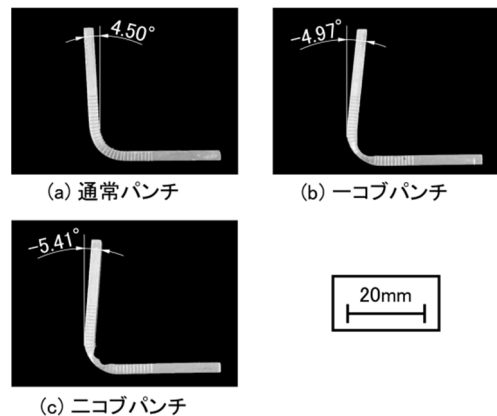


図5 3種類のパンチによる加工試験片(1.8mm押し込み)

次にパンチ押し込みに伴うスプリングバック量の変化を図 6(a)に示す。スプリングバック量はいずれの場合も正から負へと変化する傾向を示し、 0° となる押し込み量が存在することがわかる。このことはコブパンチによる板鍛造によってスプリングバックの抑制が可能であることを示していると考えられる。このスプリングバック量が 0° となる押し込み量はおよそ 0.8mm の押し込みであった。

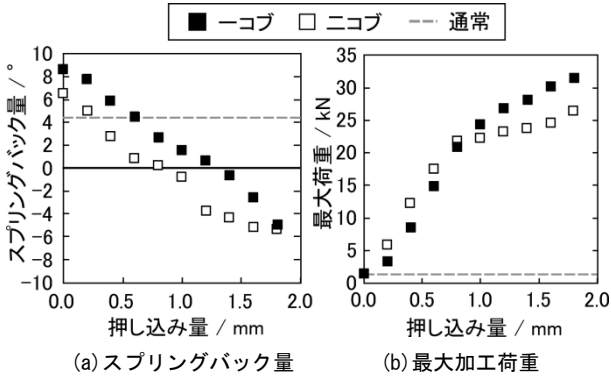


図 6 押し込み量に伴うスプリングバック量および最大加工荷重の変化

また、加工中の最大加工荷重の変化を図 6(b)に示す。図から押し込み量がおよそ 0.8mm になるまでは荷重増加率が大きく、その後低下する傾向を示した。初期の高い荷重増加率はほぼ一定であり、コブの数による影響も小さいように見える。一方、荷重増加率の変化点以降では一コブパンチによる加工の方が荷重増加率は高かった。この荷重増加率の変化点はスプリングバックが 0° となる点におよそ一致していることから、スプリングバックが 0° となった後に加工形態が変化したのではないかと考えられる。

図 7 に曲げ角部の形状の例を示す。図は一コブパンチを用いて 1.8mm のパンチ押し込みを行った試験片を測定した結果である。図から曲げ外側は滑らかな曲率を持った形状となっており、曲げ内側はパンチによって押し込まれた部分でパンチ形状に沿ったくぼみが形成されていることが確認できる。この測定した形状について、代表量として曲げ内側と外側の標線間距離の変化量を比較してみることにした。

パンチ押し込みに伴う曲げ内側および外側の標線間距離の変化を一コブおよび二コブパンチのそれぞれで比較した図を図 8 に示す。図にはそれぞれのパンチ押し込み量が 0mm のときの標線間距離を細線で示している。図を見るとエアバンド後に曲げ内側では約 2mm の縮みが、曲げ外側では約 2mm の伸びが生じていたことがわかる。その後のパンチ押し込みでは、いずれも伸びに転じていくことがわかる。ここで、スプリングバックがおよそ 0° になる押し込み量 0.8mm までは内側、外側ともに長さの変化が生じていないことが興味深い。逆に 0.8mm 以降ではいずれも明らかな伸びとなっており、このことは曲げ角部で一軸圧縮変形が生じていることを示唆していると考えられる。

純粋な一軸圧縮の場合には、曲げ内側と外側で伸び量が等しくなると考えられる。そこで、曲げ外側の長さに対する曲げ内側の長さの比の変化を調べてみた。図 9(a)にパンチ押し込みに伴う曲げ長さ比の変化を示す。図 8 で見たように、標線間長さの変化の少ないパンチ押し込み量 0.8mm までは長さ比 0.73~0.75 の間でほぼ一定を保っているパンチ押し込み量がさらに大きくなると、パンチ押し込み量 1.0~1.2mm の間で変化し、その後はほぼ一定もしくは一コブパンチで増加、二コブパンチで減少の傾向を示しているように見える。スプリングバック量とこの曲げ長さ比の関係を図にすると図 9(b)のようになる。図からスプリングバック量の減少は長さ比がほぼ一定の状態で生じ、 0° になった後は変形の形態に依存した関係になると思われる。

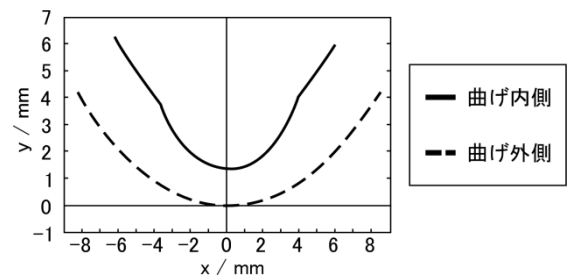


図 7 測定した曲げ角部形状の例 (一コブパンチ)

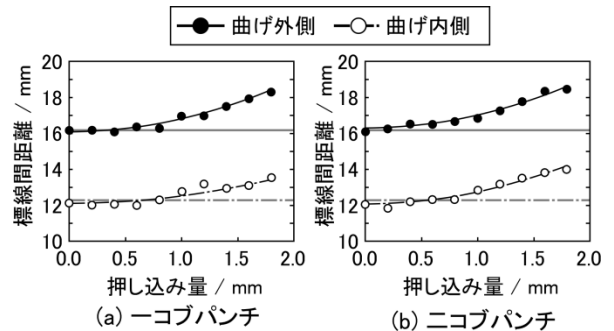


図 8 パンチ押し込みに伴う標線間距離の変化

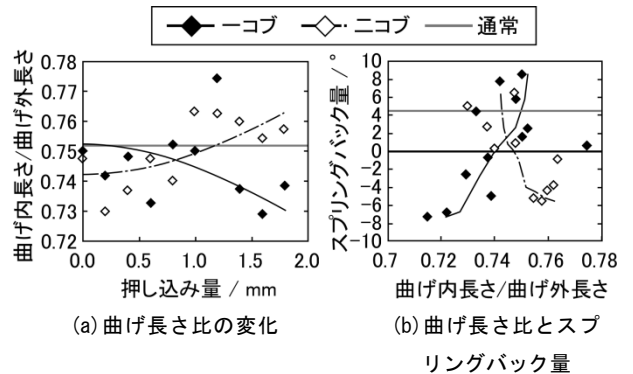


図 9 曲げ長さ比の変化とスプリングバック量の関係

3. スプリングバック制御に及ぼす素材特性の影響

3.1 スプリングバック量と材料特性の関係

材料特性が曲げ角度に与える影響は式(1)で与えられるような式で表されることが報告されている²⁾。

$$-\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{3F}{(n+2)E} \left(\frac{t}{\rho}\right)^{n-1} \quad (1)$$

ただし、この式において $\Delta\theta$ はスプリングバック量、 θ は曲げ角度、 ρ は中立面の曲率である。この式によれば、スプリングバック量は材料の力学的特性のうち、ヤング率 E 、塑性係数 F および加工硬化指数 n に強く依存するといえる。このうち、 F/E は塑性ひずみが1の時の弾性ひずみ量と捉えることができ、関係式のスケールパラメータのような意味合いとなるだろう。したがって、関係式の形状は加工硬化指数の大きさに大きく依存するものと考えられる。

ここではアルミニウム合金 (A5052-H)、軟鋼 (SPCC) ステンレス鋼 (SUS304) を対象に板鍛造を援用したスプリングバック抑制を試み、その材料特性からの影響について検討する。

実験結果などを参考に各材料に関するヤング率 (GPa)、塑性係数 (MPa) および加工硬化指数を、Al (70, 389.0, 13)、SPCC (200, 476, 0.19) および SUS (200, 1524, 0.40) として、式(1)から算出した加工硬化指数と 90° のV曲げを行った際のスプリングバック量の関係を計算すると図10のようになる。ただし、板鍛造実験を想定して、板厚はAlおよびSUSに関しては3.0mm、SPCCに関しては3.2mmとして計算している。また、中立面の曲率は通常パンチを想定して8.5mmとしている。図には実験から求めた加工硬化指数の値を丸印で示している。

グラフは、いずれの場合も加工硬化指数が増加するほど、スプリングバックが低減される傾向を示した。ステンレスが最もスプリングバックが高く、ヤング率に比べて降伏応力の高いアルミニウム合金が中間の位置を取った。SPCCについては、スプリングバックはほとんど生じない傾向となると予想される。実際の加工硬化指数について丸印の位置を比較すると、加工硬化指数が大きいステンレスはアルミニウム合金とほぼ同程度のスプリングバックを示すことが予想された。

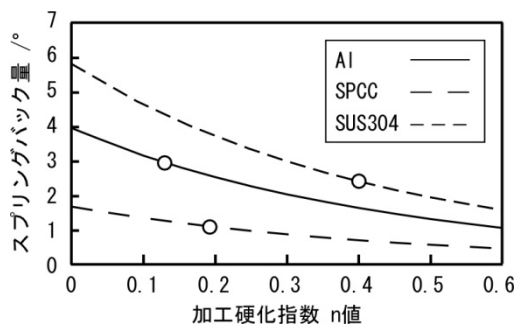


図10 加工硬化指数とスプリングバック量の関係

3・2 実験方法

実験に使用した金型および試験片形状を図11に示す。この実験においても、2章の実験で用いたものと同じダイおよび試験片を使用する。ただし、今回の実験では図11(c)に示すようなパンチ幅8mmで先端半径 R が5~8mmの4種の板状パンチを用いて実験を行った。その他の実験装置および実験・測定手順は第2章で説明したのと同じである。

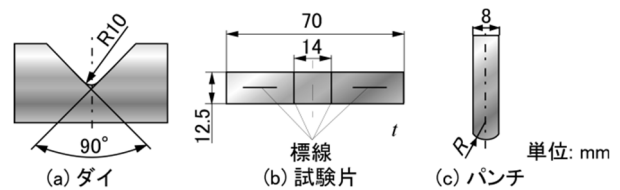


図11 金型および試験片形状

3・3 実験結果

まず、アルミニウム合金について得られたパンチ押し込み量とスプリングバック量の関係を図12に示す。図12には、第2章で一コブパンチを用いた実験で得られた結果もパンチ半径4mmとして示している。図からエアバンドによる曲げ試験片のスプリングバック量(押し込み量0mm)について、パンチ先端半径が大きくなるほど小さくなる傾向を示した。スプリングバック量はいずれのパンチ先端半径の場合もパンチ押し込み量の増加とともに減少し、この方法によってスプリングバック量を 0° にできることがわかった。この減少はパンチ押し込み量にほぼ線形で、パンチ先端半径の増加によって、スプリングバック量が小さい側にはほぼ平行にシフトするような結果となった。ただし、先端半径が6mm以上ではパンチ先端半径による差が小さくなった。

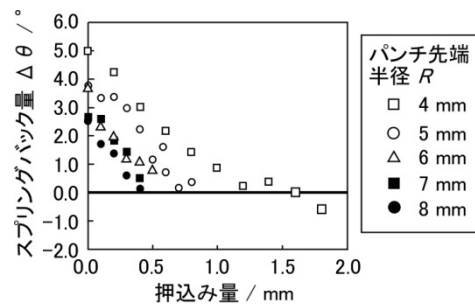


図12 パンチ押し込み量とスプリングバックの関係 (Al)

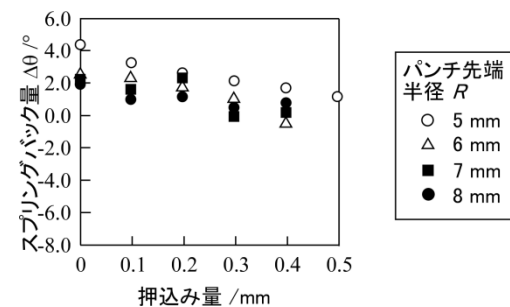


図13 パンチ押し込み量とスプリングバックの関係 (SUS)

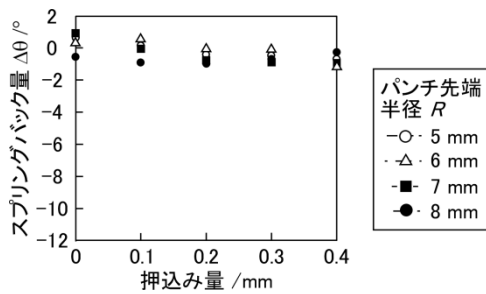


図 14 パンチ押込み量とスプリングバックの関係 (SPCC)

同様にパンチ押込み量とスプリングバックの関係について、ステンレス鋼と軟鋼について得られた結果を図 13 および図 14 にそれぞれ示す。押込み量については、ステンレス鋼で 0.5mm まで、軟鋼で 0.4mm までとしている。結果を見ると、ステンレス鋼に関しては押込み量 0 でほぼアルミニウム合金の場合と同じ傾向を示したことがわかる。これは図 10 で見たスプリングバック量の予測量がほぼアルミニウム合金の場合と同じだったことが関連していると考えられる。ただし、アルミニウム合金の場合と比較すると、パンチ押込みに伴うスプリングバックの減少率はやや高い傾向であった。一方で軟鋼について見ると、図 10 で予想された通り、元々他の材料と比べてスプリングバック量が少ない傾向にあった。他の素材の場合と同様にパンチ押込みによってスプリングバック量は減少する傾向を示し、押込み量が小さい段階でスプリングバック量が 0° となった。これらの結果から、いずれにしてもパンチ押込みによってスプリングバック量の低減が可能であり、また今回調べた条件範囲では、パンチ先端半径が大きくなるほどスプリングバック量が小さく、0° となるパンチ押込み量も小さくなることがわかった。

最後にパンチ押込み後の形状によるスプリングバック量変化への影響に関して考えるために図 9 (b) と同様に曲げ外側の標線間距離に対する曲げ内側の標線間距離の比 (曲げ長さ比) を測定し、スプリングバック量との関係を調べた結果を図 15 に示す。図にはパンチ先端半径が 5mm および 6mm の結果のみを抜粋して示している。図を見るとステンレス鋼と軟鋼の場合には曲げ長さ比が一定の状態を保ちながらスプリングバック量が 0° まで減少する傾向を示している。この傾向は第 2 章で見られた傾向と一致するものである。一方で、アルミニウム合金に関しては曲げ長さ比が増加しながらスプリングバック量が 0° に向かう傾向を示している。このことは、曲げ内側の長さを増加させながらスプリングバック量を減少させていることを示している。曲げ長さ比の増加によるスプリングバック量の減少は、パンチ先端半径の増加によって緩やかとなる傾向となっている。曲げ後の板鍛造の効果はエアベンド時に形成される形状とダイに接触する状態によって大きく変化すると考えられる。ダイと不整合のパンチによる曲げによって形成される形状によって、ダイ接触時にパンチおよびダイと素材の間に形成される微小な隙間の位置や大

きさは異なると考えられ、その後のパンチ押込みによってその隙間において曲げ戻しや押し出しが生じることで加工形態が変化し、スプリングバック量が抑制できると考えられる。したがって、今後は加工のメカニズムや材料流動を明らかにすることで、どのような加工形態がスプリングバック量の低減に効果的であるかを検討する必要がある。

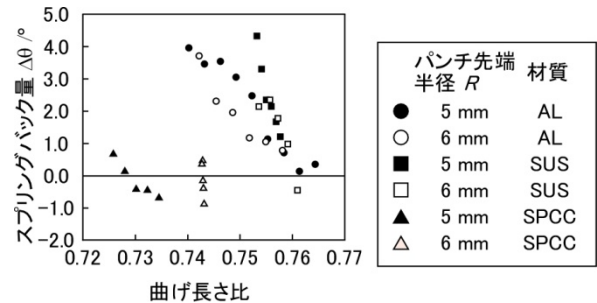


図 15 曲げ長さ比とスプリングバック量の関係

4. FEM 解析によるメカニズムの検討

4.1 解析および評価の方法

この章では、解析ソフト simufact. forming. 13.3 を使用して、第 2 章で取り扱った一コブおよび二コブパンチを用いた V 曲げ後の板鍛造によるスプリングバック低減のメカニズムについて検討した。解析に用いた材料特性は実験から得られたものを使用し、工具条件および加工方法は実験と同様にして解析を行った。表 1 に本解析の条件を示す。また、メッシュ形状を図 16 に示す。この形状では、板厚方向に 5 層の立方体となるメッシュを採用した。

表 1 解析条件

フローカーブ	$\sigma = F\epsilon^n$
ヤング率 / GPa	71
ポアソン比	0.33
F 値 / MPa	381
N 値	0.13
材質	A5052-H
摩擦係数	0.12
型温度 / °C	20

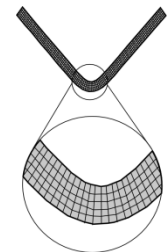


図 16 メッシュ形状

スプリングバックには曲げ負荷時の曲げモーメントおよびその分布が大きく影響していると考えられる。そこで、解析結果から式 (2) を用いて曲げモーメントの算出を行った。式において、曲げ応力 (σ) には曲げ線に沿った応力 (主応力) を用いた。また、中立面からの距離を r 、その位置の微小断面積を dA として示している。曲げモーメントは長手方向に 2mm 間隔で算出を行った。

$$M = \int \sigma r dA \quad (2)$$

式 (2) を用いた曲げモーメントの計算では、中立面の特定が必要となる。しかしながら、V 曲げ後にコブ押し込み加工を施すため、垂直に断面が保持されないことや各断面で板

厚が異なる, 曲げ内側と外側の面が平行でないといった問題があり, 中立面の同定法は検討の余地がある. 今回は便宜的に各断面の応力の平均値 (σ_{avr}) を算出し, 応力の偏差量が 0 となる面を中立面と設定して, モーメントの計算を行った. また, 実際にどこでスプリングバックによる回転が生じているのかを確認するために曲げ中央部からの距離 (x 座標) とその位置の回転角度の関係についても調査した.

4・2 解析結果

図 17 にパンチ押込みによるスプリングバック量の変化について調べた結果を示す. 結果から一コブ, ニコブのいずれの場合もパンチ押込みによるスプリングバック量低減の実験結果が再現された. ただし, スプリングバック量が 0° になった以降については解析結果においてより大きなスプリングバックとなる結果となった.

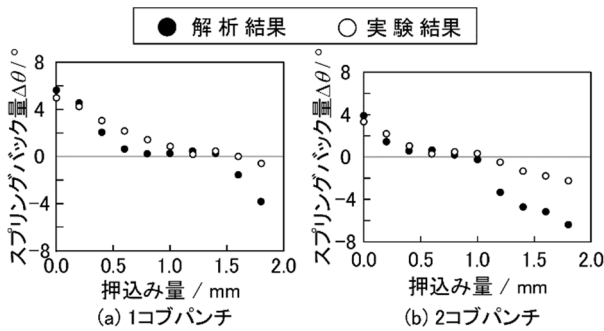


図 17 パンチ押込みによるスプリングバック量の変化

次に図 18 に計算結果から得られたダイ穴の幅間に位置する材料の曲げモーメント分布を示す. 図を見ると当初ダイ中央から $\pm 15\text{mm}$ の範囲でモーメントの大きいなだらかな丘形状であった分布であることがわかる. パンチ押込みが始まると, まずダイ中央のモーメントが大きくなるとともにその周辺 ($\pm 5\text{mm} \sim \pm 15\text{mm}$) のモーメントが急減していき, 急斜な山形状へと発達する. その後, 押込み量 0.6mm で中央の高いモーメントが急減しておよそ 0 となり, その後は複雑な形状となるが中央部ではおよそモーメント 0 の状態を保つことになる. 逆に曲げ周辺部は押込み量 0.8mm 以降増加に転じる傾向となった.

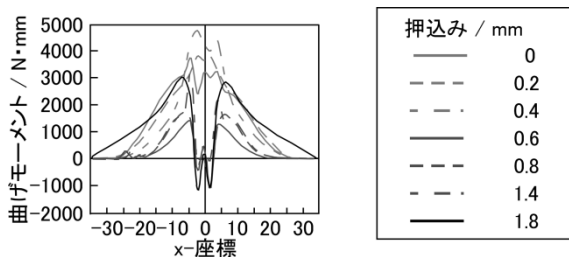


図 18 パンチ押込みによる曲げモーメント分布の変化

図 19 にスプリングバックによる回転角度分布を示す.

図を見るとダイ中央部 ($0\text{mm} \sim 5\text{mm}$) まででは, 初期的に大きいものの減少し, パンチ押込み量 0.8mm 以降では複雑な分布となることがわかる. しかしながら, ダイ中央部の角度変化の影響は小さく, 基本的にはパンチ押込みによって周辺部 ($\pm 5\text{mm} \sim \pm 15\text{mm}$) の回転角度が大きく減少し, パンチ押込み量 0.6 でおおよそ 0° となる. その後, パンチ押込み量 1.4mm 以降で逆回転に転じることが確認できた.

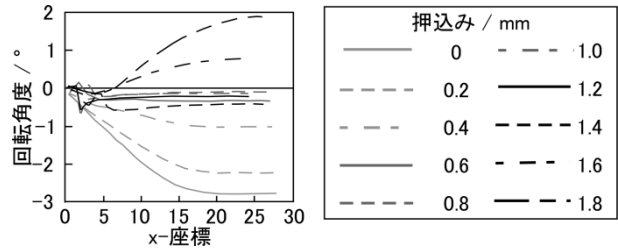


図 19 スプリングバックによる回転角度分布

これらの結果から, 板鍛造が始まると加工部では曲げが促進されるものの, そこで生じる材料流れによって曲げ周辺部に曲げ戻しが生じることで, スプリングバックの低減が行われると考えられる. 周辺部の曲げ戻しがほぼ完了する頃には, 加工部は曲げ変形から一軸圧縮変形へ移行することで曲げモーメントが非常に小さい状態が達成される. その後, 一軸圧縮が進行することで, それによって生じる材料流れによって次の変形形態に進むと考えられる.

5. 結言

本研究では, V 曲げに板鍛造を援用することでスプリングバック低減を試みた. さらに材料特性がスプリングバック低減効果に及ぼす影響を検討した. また, FEM 解析を用いて, この加工によるスプリングバック低減効果のメカニズムを検討した. これらの結果から, 以下の結言を得た.

1. V 曲げ後に曲げ部に板鍛造を施すことでスプリングバックを低減できることを確認した.
2. 板鍛造によるスプリングバックの低減の傾向は材料に関係なく生じる現象と考えられるが, その効果や最適条件などは材料特性に依存する.
3. スプリングバック低減は, 板鍛造によって鍛圧部に生じる材料流れによってその周辺部の曲げ戻し効果が主な要因で, 鍛圧部の曲げから一軸圧縮変形への変形形態変化によって達成されると考えられる.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり (公財) 天田財団より平成 27 年度一般研究開発助成 (AF-2015035) をいただきました. ここに心より感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 小川孝行・吉田総仁: 塑性と加工, 53-612 (2012), 69.
- 2) 益田森治: 薄板の曲げ加工, (1962), 58, 誠文堂新光社.