研究論文

ハット曲げ成形のスプリングバックに与える加工条件の影響

片山　聡*，杉井　伸吾**，田村　信**，坂井　修**，相田　収平***

FEM Analysis of Springback in Hat-shaped Bending

KATAYAMA Satoshi*，SUGII Shingo**，TAMURA Makoto**，SAKAI Osamu**and AIDA Shuhei***

抄　　録

ハット曲げ成形におけるスプリングバックの抑制のため，金型形状やしわ抑え力などの成形条件がスプリングバックに与える影響を FEM 解析により調べた結果，成形中の材料に加わる引張応力が大きくなるとスプリングバックが減少することがわかった。また，その結果を基に成形条件を変えた実験を行い，解析結果を確認，検証した。

1.　緒　　言

ステンレス鋼製の角筒容器を絞り成形する際に開口直辺部に口開き現象が起こり，形状精度が問題となることがある。角筒直辺部の成形は材料の曲げ，曲げ戻し変形が主な変形過程となり，こうした加工によるスプリングバックの抑制には加工後に張力をかけることが有効とされている[1)]。

このため，角筒直辺部と同様の変形を経るハット曲げ成形を対象として，金型のダイス肩 R，ビードの有無，しわ抑え力などの成形条件がスプリングバックに与える影響を FEM 解析により求めた。また，その結果を基に成形条件とスプリングバック量の確認を行ったので報告する。

2.　FEM 解析

2.1　解析方法

ハット曲げ解析は，仏 ESI 社製動的陽解法プレス成形シミュレーションソフトウェア PAM-STAMP 2G version 2007 により実施した。解析に用いた金型構成を図 1 に，金型とブランクの寸法値を表 1 に示す。要素分割は, PAM-STAMP 2G のオートメッシング機能を用いて作成した。使用した要素は低減積分型 4 節点 4 辺形シェル要素，要素密度は平面部が 2mm 間隔，角 R 部が 6 度間

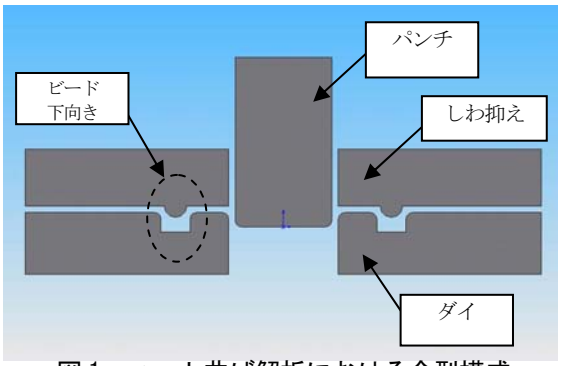


図 1　ハット曲げ解析における金型構成

表 1　金型寸法

パンチ肩R		2 mm
ダイス肩R		2，4 mm
パンチーダイスのクリアランス		0.9mm（板厚+0.1mm）
ダイス内面とビード中心距離		14mm
ビード向き		下向き、上向き
ビード形状（凸側）	高さ	1，2，3 mm
	R	2mm
ビード形状（凹側）	幅	6 mm
	R	2 mm
ブランク		L160×W40×t0.8 mm

*　　中越技術支援センター
**　　研究開発センター
***　　下越技術支援センター

表 2　SUS304 材の機械特性

ヤング率 (GPa)		190
ポアソン比		0.3
r値	0度	0.69
	45度	0.9
	90度	0.66
質量密度 (kg/m^3)		7850

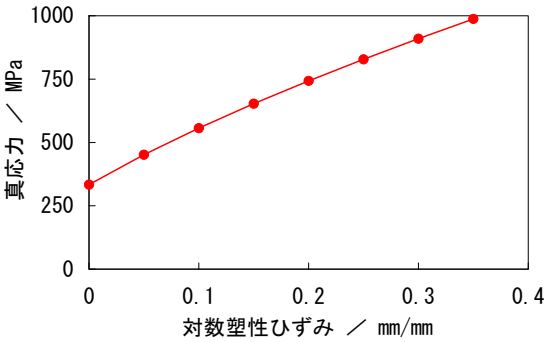


図 2　SUS304 材の真応力ー対数塑性ひずみ曲線

隔である。ブランクのみ隣接角 10 度での細分化を 4 レベルに設定した。なお，モデルは対称中立面拘束による 1/4 モデルとした。(しわ抑え力はフルモデルの数値で示す)

ブランクに適用した SUS304 の機械特性を表 2 に，真応力ー対数塑性ひずみ曲線を図 2 に示す。降伏関数は Orthotropic Hill'48 を使用し，材料の圧延方向（0 度）はブランク長辺方向とした。

計算条件は表 3 のとおりで，スプリングバック形状の評価は，図 3 に示すような対称境界面に接する短辺側中立線を用いた。

2.2　解析結果

ダイス肩 R が 2mm，4mm の場合のスプリングバック形状を図 4 に示す。同一ダイス肩 R で比較すると，しわ抑え力が大きいほどスプリングバックは小さくなり，同じしわ抑え力で比較するとダイス肩 R が小さい 2mm の方がスプリングバックが小さくなることがわかる。

次に，ダイス肩 R を変えた場合，およびビード高さを変えた場合の材料にかかる引張応力最大値を図 5 に示す。同じしわ抑え力でもダイス肩 R が小さい方が，またビード高さが高い方が引張応力が大きい。また，ビード高さが高くなると小さなしわ抑え力の変化で大きな引張応力変化が現れる。

表 3　計算条件

摩擦係数		0.1（クーロン摩擦）
しわ抑え		荷重制御（10～60kN）
パンチストローク		45mm
金型挙動		剛体
スプリングバック	計算手法	陰解法
	固定点	対称境界面交差点

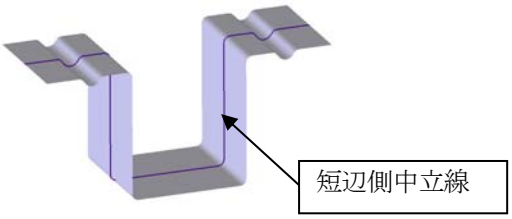


図 3　計算後の成形形状例

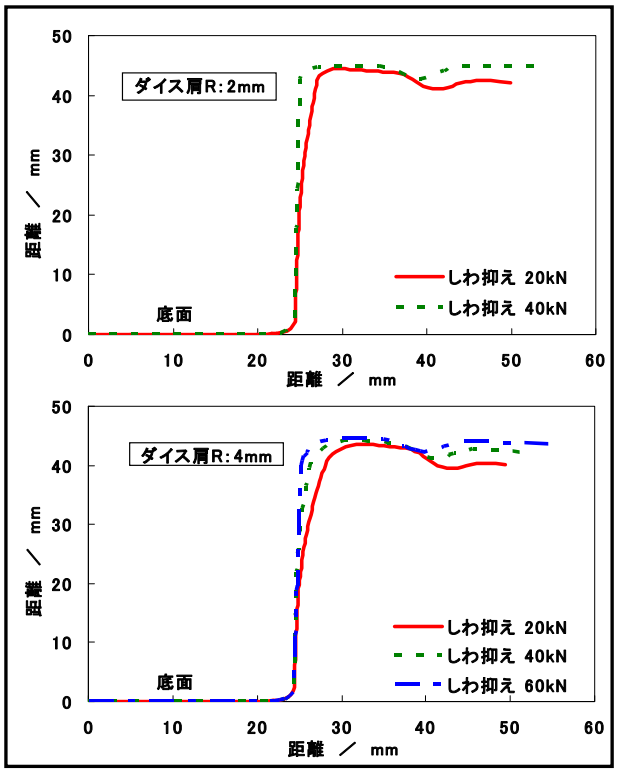


図 4　ダイス肩 R とスプリングバック形状

各ダイス肩 R における引張応力と最小板厚の関係を図 6 に示す。材料にかかる引張応力の増大につれて板厚減少も大きくなり，引張応力が同じでもダイス肩 R が小さい方が板厚減少が大きくなる。

引張応力が約 560MPa となる条件におけるスプリングバック形状は，図 7 に示すようにほぼ一致している。また，ビードの向きによるスプリングバック形状は，図 8 に示すように曲げー曲げ戻し変形を受けた部分については，ビードの向きが変わっても同じしわ抑え力で比較すると一致していることがわかる。

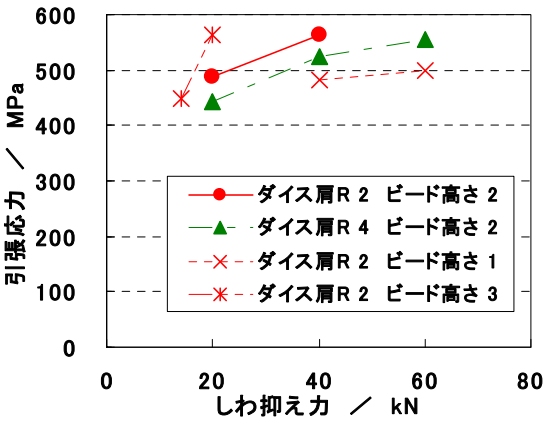


図 5　金型形状による引張応力

以上の結果より，スプリングバック現象は，変形履歴よりも引張応力に依存していると考えられる。このため，ハット曲げ実験についてはダイス肩 R やビード条件を変更して，引張応力とスプリングバック量の関係を確認することとした。

3.　実験検証

3.1　実験条件

解析の結果を受け，ハット曲げ加工深さは 80mm として表 4 に示す条件において実験を行った。実験においてはパンチ取付部にロードセルを設置して成形課程のパンチ荷重を測定し，成形中の材料にかかる引張応力を計算した。主な実験項目は，しわ抑え力の変更による引張応力の影響，ダイス肩 R の影響，ビード高さの影響の 3 点である。実験装置は複動油圧プレス装置（(株) アミノ製，インナ加圧能力 1274kN，アウタ加圧能力 686kN，ダイクッション能力 490kN）を使用した。また，形状測定には形状測定機（(株) ミツトヨ製コントレーサ CV-648）を用いた。実験に用いた金型の写真および下型図面を図 9 に示す。

3.2　実験結果

ハット曲げ成形において，しわ抑え力を変更することで成形部の材料にかかる引張応力の値が変わる。成形中のパンチ荷重最大値から成形部の材料にかかる引張応力を計算し，ダイス肩 R が 2mm，4mm でそれぞれビードは無し，およびビード高さ 3mm，4mm の時のしわ抑え力と引張応力の関係を

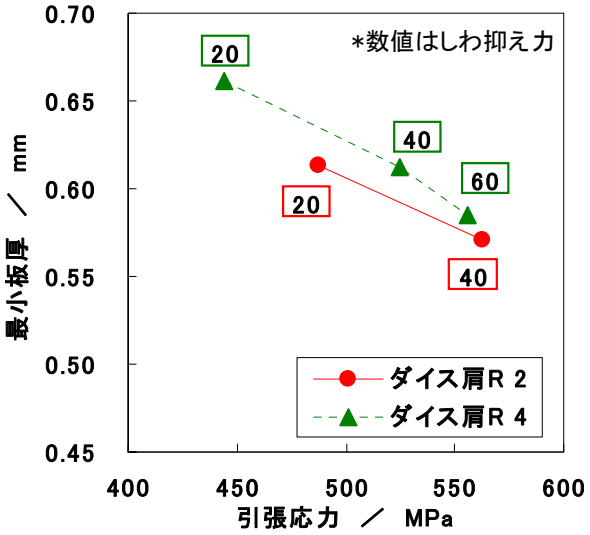


図 6　ダイス肩 R，引張応力と最小板厚

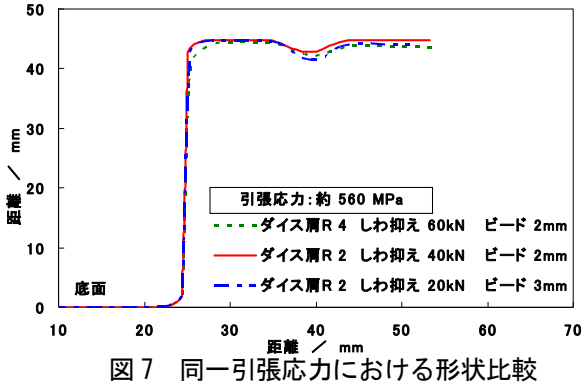


図 7　同一引張応力における形状比較

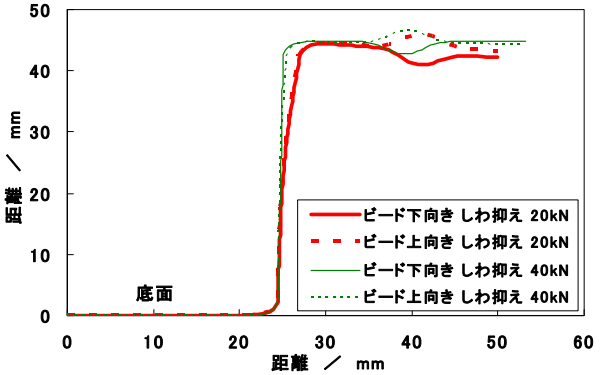
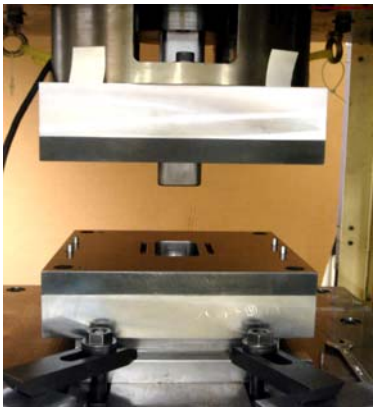


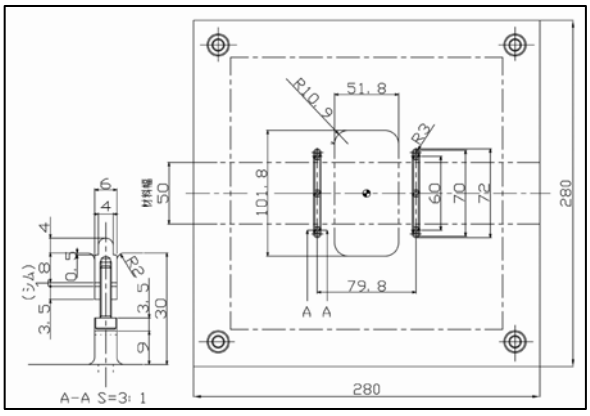
図 8　ビードの向きによる形状比較

表 4　実験条件

金型	ダイス材質	SKD11
	パンチ材質	SKD11＋TiCNラップなし
	パンチ幅	50mm
	ダイス幅	51.8mm
	パンチ肩R	4mm
	ダイス肩R	2mm，4mm
試験片	試験片幅	49mm
	試験片長さ	280mm
試験温度		28℃
潤滑剤		G-755BM+G-6030M(1:1)
加工深さ		80mm



(a) 写真



(b) 下型図面

図 9　ハット曲げ実験金型

図 10 に示す。いずれの場合もしわ抑え力を大きくすることで引張応力が大きくなることがわかる。ダイス肩 R が 2mm と 4mm では，同じしわ抑え力でも結果にバラツキがあり，ダイス肩 R による引張応力への影響は明確でない。ビードを設けることで小さなしわ抑え力で大きな引張応力が得られることがわかるが，ビード高さ 3mm と 4mm の差の影響も本実験では明らかでない。

ビード無しでダイス肩 R を変更した場合の成形部板厚測定結果を図 11 に示す。同じ引張応力においてもダイス肩 R が小さい R2 の方が板厚が薄い傾向を示すことがわかる。

しわ抑え力を成形可能な範囲で条件を変えてハット曲げ実験を行い，ダイス肩 R が 2mm の際の成形品形状測定結果を成形時の材料にかかる引張応力とともに図 12 に示す。引張応力が大きくなるほどスプリングバック量が小さくなることが確認できる。また，引張強さに近い応力においてもスプリングバックが確認できる。

次にダイス肩 R を変更した場合のスプリングバックについて調べた。上述のダイス肩 R2mm に対し肩 R4mm として，しわ抑え力を変更して同様に実験し，形状測定を行った。

形状測定結果から，目標形状からのずれ量（垂直成形位置の変位を 0 として，その点からのずれ量）を，底面からの高さ 60mm の点で求め，H60 変位（図 12 参照）として求めた。測定結果を図 13 に示す。H60 変位の値は，低引張応力域でばらつきが見られるものの，総じて引張応力の増加とともに小さくなる。また，ダイス肩 R2 と R4 の明確な差異は見られない。

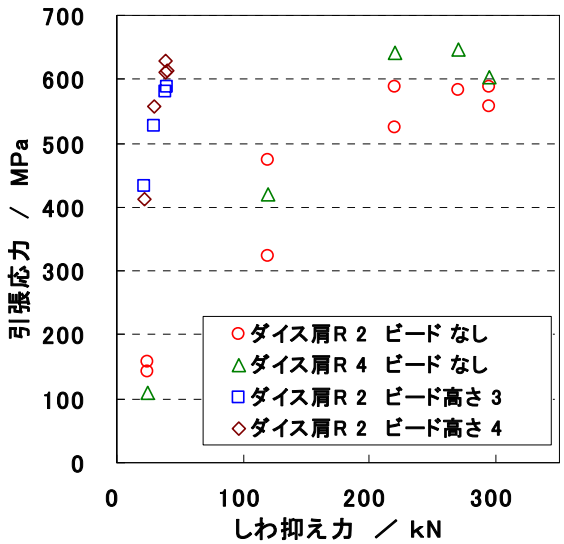


図 10　しわ抑え力と引張応力の関係

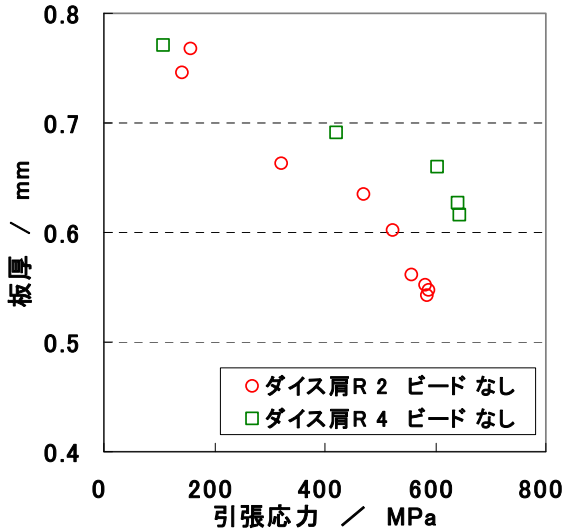


図 11　ダイス肩 R と板厚の関係

次にビードを付加した場合の測定結果を図 14 に示す。前述のとおりビードを取り付けることで同じしわ抑え力でも材料の引張応力は上昇するが，H60 変位の値は，ビード無しのそれと比べて同等の引張応力では差異が見られない。また，ビード高さが 3mm と 4mm の場合の差異も明らかでない。

これらの計算結果と実験の傾向が明確に一致しない点は，実験の条件が結果に大きな影響を与えない程度の変更であったと考えられる。また，スプリングバックの計算精度にはバウシンガー効果の有無が影響するといわれている[2] ことから，スプリングバック量が異なる点は本研究で用いた材料モデルの影響が大きいと考えられる。

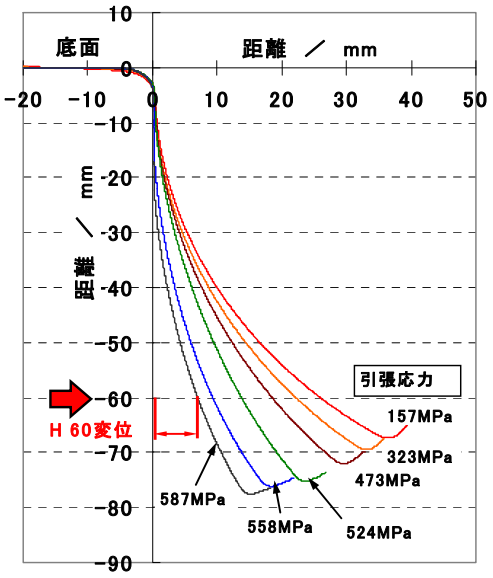


図 12　実験後の形状測定結果

4.　結　　言

SUS304 のハット曲げ成形において金型形状やしわ抑え力などの成形条件がスプリングバックに与える影響を FEM 解析により調べた結果，以下のことがわかった。

(1) 成形中の材料に加わる引張応力が大きくなるとスプリングバックが減少する。

(2) 引張応力が同じになる条件においても，ダイス肩 R が小さい方が板厚減少が大きくなる。

(3) ビードの付加やダイス肩 R を小さくすることで材料に加わる引張応力の値を大きくすることができるが，今回検討の範囲ではビード付加の影響が大きく，ダイス肩 R およびビード高さの影響は小さい。

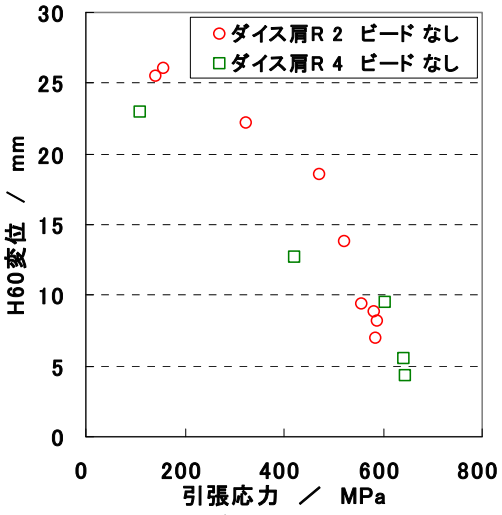


図 13　ダイス肩 R の影響

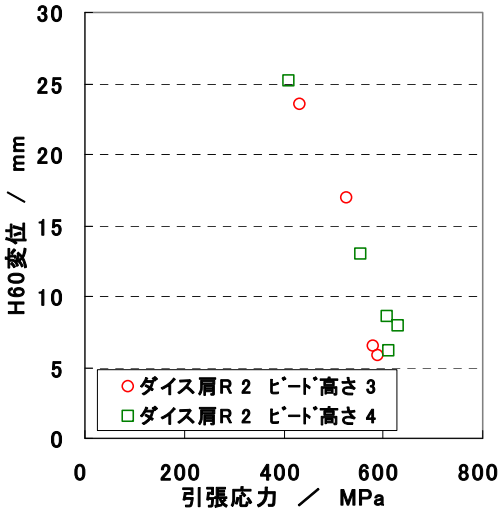


図 14　ビード高さの影響

なお，本研究は平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業の成果の一部であり，経済産業省の委託を受けて実施したものであることを付記する。

参考文献

1) (社) 日本塑性加工学会編，プレス絞り加工，1994，p27.

2) 上森武，岡田達夫，吉田総仁，“スプリングバック解析におけるバウシンガー効果の適切なモデル化の重要性”，塑性と加工，43，498，2002，p639-643.