

# 高強度鋼板の形状凍結性改善技術

## Shape Control Techniques for High Strength Steel in Sheet Metal Forming

吉 田 亨<sup>\*(1)</sup>  
Toru YOSHIDA

片 山 知 久<sup>\*(2)</sup>  
Tomohisa KATAYAMA

橋 本 浩 二<sup>\*(3)</sup>  
Koji HASHIMOTO

栗 山 幸 久<sup>\*(4)</sup>  
Yukihisa KURIYAMA

### 抄 録

高強度鋼板の自動車部品への適用において大きな障害となっているスプリングバックについて、発生メカニズムと対策技術の検討を行った。成形過程に発生する逆曲げを利用する方法、成形途中に縦壁の張力を増加させる方法、板厚方向に応力を加え不均一応力を改善する方法、温間成形法、しわ押さえを加えないことでダイ肩の曲げ変形を低減する方法について実験を行い、スプリングバックに及ぼす影響を調査した。これらの技術によりパンチ肩部の角度変化または縦壁の反り量を低減できることが明らかとなった。また、FEMによるスプリングバック解析を行い実験結果と比較した。FEM解析により材料強度の影響を把握できることを示した。これらの形状凍結性改善技術やFEM解析技術の利用により、今後、実部品におけるスプリングバック不良を低減していくことが可能と考える。

### Abstract

Springback is one of the most difficult problems in applying high strength steel (HSS) to automotive body parts. In this paper, the mechanism of springback behavior is studied and shape control techniques for HSS are examined. Effects of applying reverse bending in die gap, increasing wall tension at dead point, applying force in thickness direction, forming in warm working condition and decreasing bending strain at die shoulder without blank holding force are investigated. Springback at punch shoulder and side wall warp were improved by these shape control techniques. And FEM analysis of springback processes are also performed and predicted results of springback shapes correspond with the experimental ones. In the near future, shape-fixability of HSS in the mass production processes are highly improved by applying shape control techniques and FEM simulations, and expanded application of HSS to automotive parts is expected.

## 1. 緒 言

1997年の地球環境問題に対する国際会議以降、従来以上に自動車の軽量化が急務となり、高強度鋼板やアルミニウム合金板の採用が拡大しつつある。自動車車体に適用するための高強度鋼板の開発は、従来タイプの固溶強化鋼、析出強化鋼に加え、複合組織を有するDR Dual Phase 鋼、TRIP Transformation Induced Plasticity 鋼、また高バーリング鋼など良成形性高強度鋼板の開発が進んでいる<sup>1-4)</sup>。しかし、形状凍結不良に関しては高強度化に伴いますます深刻になっており、車体軽量化のための高強度鋼板適用において克服しなければならない重要な課題の一つである。

しかし、形状凍結性は材料固有の物性値であるヤング率によるところが大きく、材料側からの対策は困難で、そのために形状凍結性を改善する加工技術が種々考案されている<sup>5,6)</sup>。一般的に用いられている手法は、決め押しやフォームと呼ばれる成形法や金型の見込みなどであるが、スプリングバックは十分経験を積んだ金型設計技術者でもその予測が困難といわれており、対策技術の確立が望まれて

いる。そこで本報告では、高強度鋼板の自動車部品への適用において大きな障害となっている形状凍結性について、その発生メカニズム、対策方法及びFEMを用いたスプリングバック解析事例について概略をまとめる。

## 2. スプリングバックの発生メカニズム(基礎理論)

曲げ成形に伴う形状凍結不良を発生原因で大きく分類すると、1) 角度変化、2) 壁反り、3) 三次元的不良(ねじれ、稜線反り)、に分けられる。1)、2)は図1に示すように単純なハット成形でも生じ、板厚方向の応力不均一による曲げモーメントにより発生する。3)は複雑な形状を持つ部品で生じ、パネル面内の応力不均一に起因する。ここでは、1)、2)の形状凍結不良の発生メカニズムについて簡単に述べる。n乗硬化則に従う材料で図2に示すような単純曲げを行った場合、 $M_p$ を曲率半径 $R (= 1/\rho)$ に塑性曲げするのに必要なモーメント、 $M_e$ を曲率半径 $R$ まで弾性曲げする場合に必要なモーメントとすれば、単純曲げでのスプリングバック  $\Delta$  は、次式で与えられる。

\*<sup>(1)</sup> 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 主任研究員 情報科学博士  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2251

\*<sup>(2)</sup> 名古屋技術研究部 主任研究員

\*<sup>(3)</sup> 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 主幹研究員 情報科学博士

\*<sup>(4)</sup> 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 所長 工博

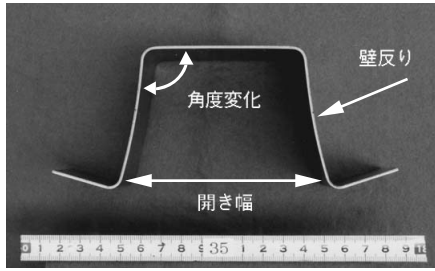


図1 ハット成形時のスプリングバック

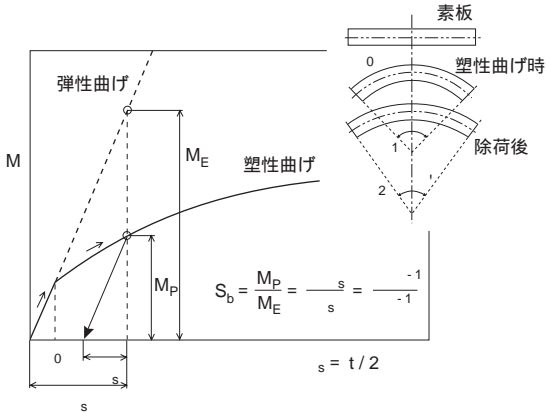


図2 単純曲げでのスプリングバック

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \rho_I \left( \frac{M_p}{EI} \right) = \frac{M_p}{M_E} \quad (1)$$

ここで、E：曲げ方向のヤング率

I：断面二次モーメント

従って、塑性曲げの大きくなる高強度鋼板ではスプリングバック量が軟鋼などに比べて大きくなる。

一方、壁反りは図3に示すように、曲げ開始前の点 a から曲げ成形の始まる点 b、曲げ戻し変形の点 c を経て点 d での除荷後の弾性回復を受けた形状となる。曲げ戻し後の壁反り量  $S_b$  は、 $M_p$  を曲率半径 R に塑性曲げするのに必要なモーメント、 $M_E$  を曲率半径 R まで弾性曲げする場合に必要なモーメントとすれば次式で与えられる。

$$S_b' = \frac{\Delta\epsilon_s}{\epsilon_s} = \frac{-M_p}{-M_E} \quad (2)$$

従って、 $M_p$  を下げるような加工法、例えば張力を負荷した場合には c 点での曲げモーメント  $-M_p$  が小さくなるために壁反り量を低く抑

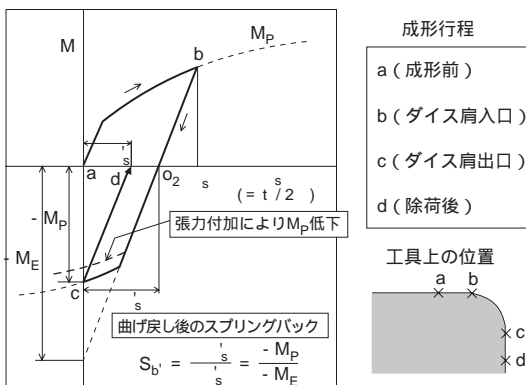


図3 壁反りの発生メカニズム

えることができる。

### 3. 形状凍結性改善技術

#### 3.1 逆曲げの利用

壁反り対策として工具のクリアランス内で発生する逆曲げ現象(図4)を利用する手法が提案されている<sup>7)</sup>。図5にその一例であるダイ肩Rを変化させた場合の壁反りの変化を示した。供試材には板厚1.4mmの590MPa材(析出強化)を用いた。各工具条件においてしわ押さえ力(BHF)を変化させることで横軸の縦壁張力  $\sigma_x$  を変化させた。 $\sigma_x$  は以下の式により算出した。

$$\sigma_x = P / 2wt \quad (3)$$

P：最大成形荷重、w：試験片幅、t：試験片板厚

ハット成形後の壁反りはこの図のようにダイ肩Rが2mm以下では壁反りがなくなる条件が見出され、さらには内反り(スプリングゴ-)になるような結果も見られる。これは板厚に対するダイ肩Rが小さくなるとダイ肩付近でのなじみが悪くなり、クリアランス内で逆曲げが発生するためである。材料強度や板厚に応じて適正なダイ肩Rやクリアランスを設定することで壁反りをなくすることができるが、実部品のように伸び縮みフランジがある場合は逆曲げ発生条件が異なることや、ダイ肩Rを小さくすることにより破断の危険性が高まるのが欠点である。

#### 3.2 縦壁の張力制御

縦壁の張力を成形過程において変化させる方法として、しわ押さえ力(BHF)制御によって形状不良を改善できることが報告されている<sup>8)</sup>。この方法は成形初期に比較的低いBHFを付与し、成形後期にBHFを高く設定する事により形状を矯正する手法である。この手法では一定圧力を加えた場合に比べて、スプリングバック、壁反りとも格段に改善されることが示されている。このしわ押さえ力制御法

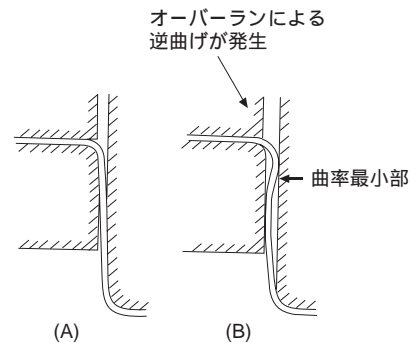


図4 ダイギャップ内の逆曲げ現象<sup>8)</sup>

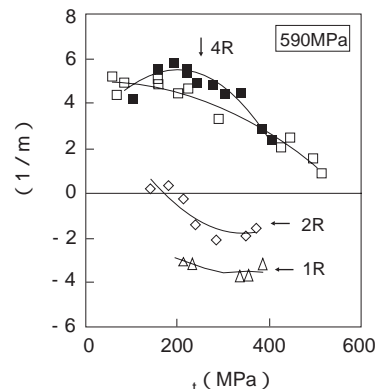


図5 壁反りに及ぼすダイ肩Rの影響

では、プレス機にしわ押さえ力を可変にする機構を備えている必要があり、従来使用されているプレス機の大半では対応が困難である。

そこで、著者らは金型に設置されているビードをカムなどを利用して、成形後期にビードがせり出してきて、ビード張力を増加することによりしわ押さえ力制御と同様の効果を与える手法を検討した。図6が可変ビード法による壁反り(曲率変化)の低減効果を示している。図中に概念図で示したが、ビードが可動式になっており、下死点前でせり出してくる仕組みとなっている。可変ビードの採用により、一定ビード張力では破断してしまうような高いビード張力を成形最終工程で与えることにより、690MPa級の高強度材でも390MPa材より優れた形状凍結性を確保することが可能である。

3.3 板厚方向応力の付加

一般的に知られているように、スプリングバックや壁反りは、曲げや曲げ戻しを受けた被加工材の板厚方向の応力不均一による曲げモーメントによって引き起こされる。そこで、板厚方向の曲げモーメントを小さくするように、下死点において板厚方向に圧縮応力を付加する決め押し手法が適用されている。図7は、ハット成形においてBHFを0kNから20kNの間で変えた時に、横軸にとった底押荷重(決め押し荷重)によって変化するスプリングバック角度を示している。決め押し荷重を高くすると角度がほぼ90°またはそれ以下になることが示された。

このように角度が90°以下になるようなスプリングゴウが発生するのは、図8に示すように成形初期にパンチ底に生じるたるみを決め押しで潰すことにより、曲げ領域が拡大し除荷後の弾性回復で角度が小さくなるためである。図7の結果でBHFが大きい場合は、成

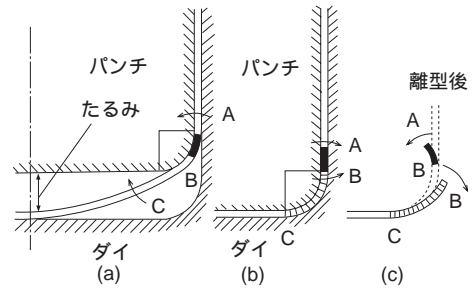


図8 単純U曲げにおけるスプリングゴウのメカニズム<sup>6)</sup>

形初期のパンチ底のたるみが減るためスプリングゴウの程度も小さくなる。決め押しは角度変化を抑制するのに有効であるが、壁反りには効果がないため、壁反りには別の対策が必要となる。その他、パンチ角部に突き出しや溝を付けたり、パンチ底部に凸形状を設ける手法の対策<sup>9,10)</sup>や、金型切削加工時のカスブ目をコイニングとして応用する対策が報告されている。

3.4 温間成形技術

これまでに材料の機械的特性値の温度依存性を応用して成形性を向上させる技術が検討されてきた。従来、温間成形法は成形能の向上に焦点が当てられていたが、形状凍結性にも効果があることが確かめられた。高温(400℃)で引張強さが図9に示すように低下する590MPa材について高温でのハット成形試験を行い、壁反りを測定した。図10は、室温成形と比較した場合の温間成形の壁反り量低減効果を示している。400℃で成形することにより、590MPa材の形状凍結性は440MPa材相当にまで改善する。更に、高温加工条件下で高潤滑性能を発揮する潤滑剤を適用することにより、高BHFを付与できれば温間成形+高BHFにより、590MPa材でも軟鋼なみの形状凍結性が確保できることが著者らの実験で明らかになった。

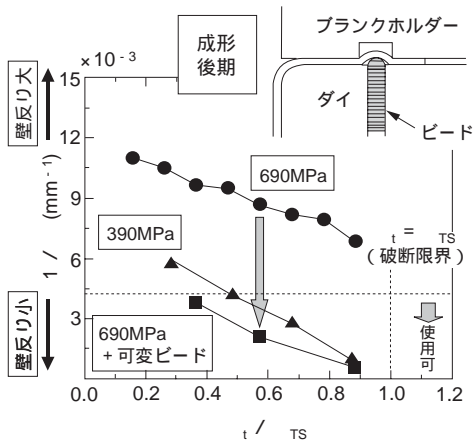


図6 可変ビード成形による壁反り量の低減効果

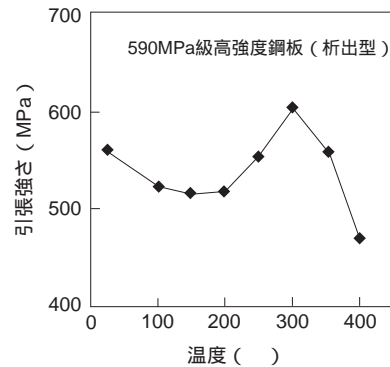


図9 590MPa高強度鋼板の引張強さに及ぼす温度の影響

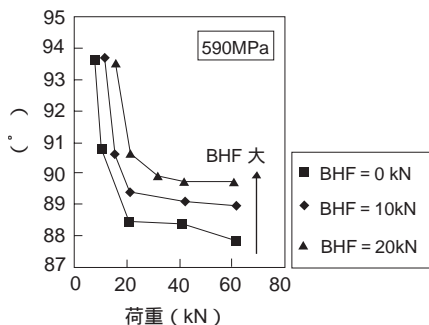


図7 角度変化に及ぼす決め押し荷重の影響

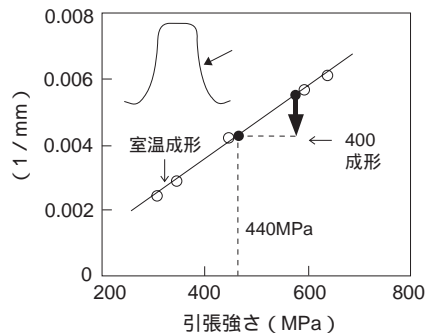


図10 400℃での温間成形による壁反り量の低減効果

3.5 成形方法の改善(フォーム成形, フォームドロ-成形)<sup>1)</sup>

高強度鋼板の形状凍結不良対策としてフォ-ム(バンド)成形が現場的に使われる例も増えている。フォ-ム成形はブランクホルダ-によるしわ押さえ荷重を加えない成形であり, ドロ-バンド成形に比べダイ肩の曲げ変形量を小さくできるため壁反りの低減が可能である。一方, デメリットとしては, BHFをかけないためしわを発生しやすいことであり, 基本的に断面形状変化の少ない部品に適用される。フォーム成形は高強度鋼板に適した成形法と言えるが, 過去に報告されている例も少なく基礎的なデータが十分ではない。ここではバンパ-モデル金型を用いた高強度鋼板のフォ-ム成形実験を行い, スプリングバックについてドロ-バンド成形と比較検討した結果を紹介する。またフォーム成形の下死点前で張力を加えることにより, 高強度鋼板を用いても形状凍結性に優れる部品を得ることが可能である。本加工方法を同金型の成形に適用した例について報告する。

パンチ底に段差がついたバンパ-モデル形状の金型(金型長手方向曲率: 4000R, パンチ肩R: 5mm, ダイス肩R: 5mm, 成形高さ: 70mm)を用いて1.4mm×300mm×300mmの供試材をフォーム成形(背圧負荷20kN)する過程を図11に示す。図11の成形工程2に示されるように成形途中でフランジがはねあがり, ダイ肩R部での材料の巻き付きが緩いのがフォーム成形の特徴である。成形工程3に示すように下死点では通常のドロ-バンド成形とほぼ同じ形状となる。

590MPa材についてパンチ底に背圧を負荷した条件と背圧なしの条件でフォ-ム成形したときの形状測定結果をドロ-バンド成形結果と比較して図12に示す。この図より, フォ-ム成形(背圧あり)はドロ-バンド成形よりも壁反りが低減するため幅開き量が小さくなる。また, パンチ底の背圧をなくすることで, 下死点付近でパンチ底からの材料流出量が大きくなり, パンチ肩の角度変化を小さく抑えることができるため, さらに幅開きが低減する。ただし, 590MPa材, 780MPa材では依然として壁反りが残存しており, 背圧なしのフォ-ム成形ではパンチ肩やダイ肩のコ-ナ-形状も緩くなっていることが分かった。

高強度材の形状凍結性をさらに改善するために, フォ-ム成形の最終工程(決め押し)に入る前にBHFをフランジ部に作用させるフォームドロ-成形法(フォーム+張力)を試してみた。その結果を

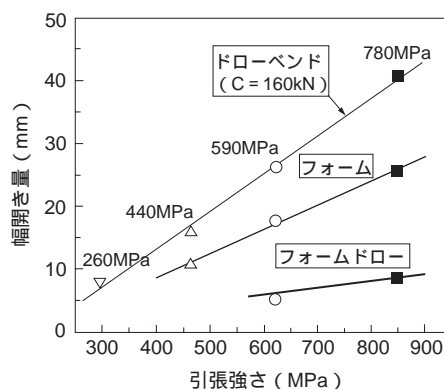


図13 幅開き量に及ぼす加工方法の影響

図13に示すが, フォ-ムドロ-成形により, 除荷後の幅開き量をさらに低減できることが分かる。また, フォ-ム成形, フォ-ム成形+張力ともに, 強度が高い材料ほど幅開き低減量が大きくなる傾向が見られ, 高強度鋼板に適した成形方法であると考えられる。

4. スプリングバック解析事例

形状凍結不良の対策として一般的に用いられている手法は金型の見込みであるが, どの程度見込む必要があるかは熟練者でも設計が難しいといわれており, 予測技術の確立が望まれている。スプリングバックを理論的に予測する手法としては, ハット曲げ形状などについて初等解析や実験式による予測手法が提案されているが, 逆曲げを考慮できない点や汎用性に劣ることなどから, FEM解析への期待は大きい。プレス成形シミュレ-ションは1990年代に陽解法の適用やユ-ザ-インタ-フェ-スの改良が進み設計および生産現場への適用が着実に進んできた。しかし, その適用は主に成形過程における破断, しわの予測に留まっており, 除荷の変形解析いわゆるスプリングバックの予測に利用されている例は非常に少ない。

その原因はひとえに, 現状のシミュレ-ションでは生産現場が要望するスプリングバックの精度が得られないとの一言につきるが, 精度が得られない理由としては多くの要因が考えられる。現在, 実部品の解析に主に使用されている動的陽解法は, 節点ごとの運動方程式を直接解くので連立方程式を解く必要がなく, 複雑な形状の成形シミュレーションなどに適しているが, 力の釣り合いは保証されないためスプリングバック解析には不向きである。また, スプリングバック解析の場合には, 解析に用いる要素の種類や材料構成式によっても大きな影響を受けることが指摘されている<sup>12,13)</sup>。ここでは現状のFEM解析によるスプリングバックの定量的予測精度を調査することを目的に, 前節で述べたバンパ-モデル成形試験について静的陰解法のソリッド要素を用いた基礎的な解析を行い実験結果と比較した<sup>14)</sup>。

解析ソルバ-としては市販の静的陰解法プログラムを使用し, 4節点平面ひずみ要素による弾塑性解析を行った。金型は剛体とし, ブランクは板厚方向に5分割(0.28mm), 幅方向500分割(0.6mm)した。材料硬化則は等方硬化とし, Swift型硬化式で近似して入力した。ブランクホルダ-を使わない成形であり, 摩擦係数が小さいと考えられるので, 工具と材料間の摩擦係数は0とした。背圧を負荷したパンチ成形後に, 背圧除荷, パンチ除荷, ダイ除荷の順で除荷過程の計算を行った。

図14に440MPa材, 780MPa材に関するスプリングバック解析結果

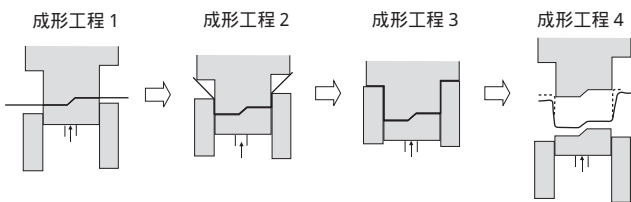


図11 バンパ-モデル型フォ-ム成形過程

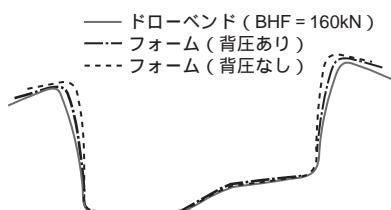


図12 フォ-ム成形後のスプリングバック形状(590MPa材)



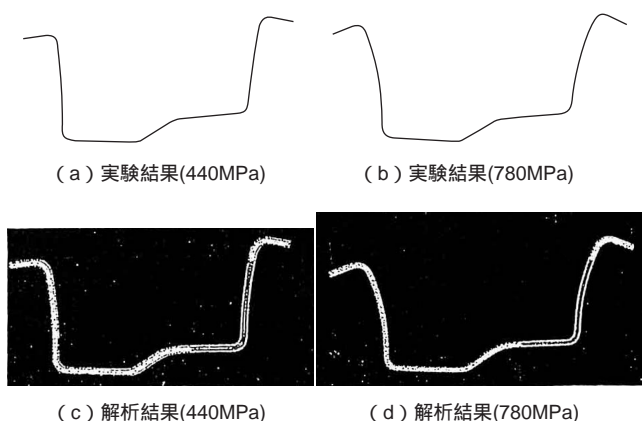


図14 フォ - ム成形後のスプリングバック形状 (440MPa級, 780MPa級)

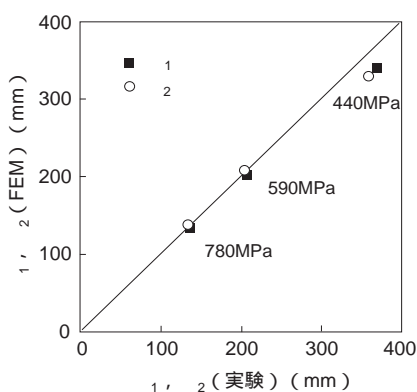


図15 壁反り曲率半径 の比較

を示す。TSの高い鋼種ほど開き量や壁反りが大きくなっており、実測データの傾向に一致することが確認された。左側及び右側の縦壁の壁反り曲率半径  $r_1, r_2$  についてFEMと実験の比較を図15に示すが、定量的にもほぼ一致しており、曲げ曲げ戻し変形過程をFEMで十分に解析し得る可能性が示された。440MPa材で計算の方が壁反り曲率半径が僅かに小さくなった理由として、本ソリッド要素の解析では  $r$  値を考慮していないことが考えられる。

本解析により壁反り曲率などで良い結果が得られた理由としては、本成形が長手方向に断面形状の変化が少なく、二次元問題にモデル化可能であったこと、また、フォ - ム成形であるため、成形過程における摩擦抵抗の影響が小さいことなどが挙げられる。今後、断面形状変化や伸びフランジ、縮みフランジを含む実形状部品に適用していくためには、シェル要素による三次元解析による検討が必要である。しかしながら、前述のとおりシェル要素を用いた解析では計算条件によって解析結果が異なり、計算手法が十分に確立されていない。

図16はシェル要素を用いて成形時の数値積分手法 (S-I: 静的陰解法, D-E: 動的陽解法) や板厚方向積分点数 (IP) の影響を調べたものである。除荷時の解法はいずれも静的陰解法で行った。動的陽解法で成形過程を解いたものはいずれも幅開きや壁反りが小さくなっており、静的陰解法や実験値に比べ、スプリングバックを明らかに過小評価している。また、積分点数の影響は動的陽解法、静的陰解法ともに同じ傾向であり、積分点数が3点の場合はスプリングバック

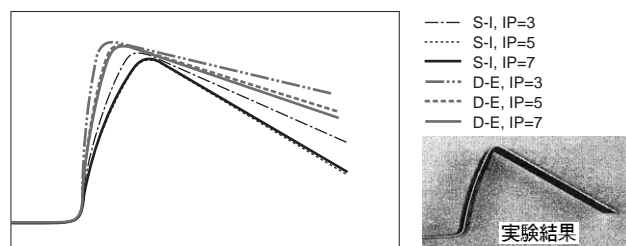


図16 ハット曲げのスプリングバック解析結果に及ぼす解析条件の影響 (シェル要素)

が小さいが、5点と7点では大きな差はなかった。

このようにシェル要素のスプリングバック解析では解析条件の影響が大きいため、精度良く解析できる条件を確立する必要がある。また、市販のソフトウェアで使われている材料モデルは等硬化しか扱えない場合が多く、材料の曲げ曲げ戻し時に発生するバウシニング効果を表現できないなどの問題がある。これに対しても反転負荷時の応力 - ひずみ関係を精度良く表せる構成式のFEMへの導入も試みられており<sup>15-17)</sup>、材料データベースの拡充も含めて今後の課題である。

## 5. 結 言

高強度鋼板の自動車部品への適用において大きな障害となっているスプリングバックについて、発生メカニズムと対策技術の検討を行った。成形過程に発生する逆曲げを利用する方法、成形途中に縦壁の張力を増加させる方法、板厚方向に応力を加え不均一応力を改善する方法、温間成形法、しわ押さえを加えないことでダイ肩の曲げ変形を低減する方法などについて実験を行い、スプリングバックに及ぼす影響を調査した。これらの技術によりパンチ肩部の角度変化または縦壁の反り量を低減できることが明らかとなった。また、FEMを用いたスプリングバックの解析事例について紹介し、材料強度の影響を解析により把握できることを示した。これらの形状凍結性改善技術やFEM解析技術の利用により、今後、実部品におけるスプリングバック不良を低減していくことが可能と考える。

## 参考文献

- 1) 山崎 小山: 塑性と加工 35(404), 1036(1994)
- 2) 瀬戸 坂田 加藤: 塑性と加工 35(404), 1042(1994)
- 3) 木下: 塑性と加工 35(404), 1048(1994)
- 4) 松村: 第179回塑性加工シンポジウム .1998 p.13
- 5) 岩谷: 第202回塑性加工シンポジウム 2001 p.9
- 6) 薄鋼板成形技術研究会編: プレス成形難易ハンドブック 第2版 .1997 p.171-250
- 7) 林 高木: 鉄と鋼 68(9), 1236(1982)
- 8) 広瀬 菱田 佐藤: 第45回塑加連講論 343(1994)
- 9) 千葉: プレス技術 .4月臨時増刊号 36(5), 16(1998)
- 10) Katayama, T., Yoshida, Y., Sato, A.: Proc. of the 22nd Biennial Congress of IDDRG . 2002, p.97
- 11) 吉田 橋本 栗山: 平14塑加春講論 302(2002)
- 12) 牧野内: 塑性と加工 40(460), 414(1999)
- 13) 鈴木 薫森 岩田 金子 加藤 松居: 第51回塑加連講論 .109(2000)
- 14) 大上 吉田 白井 菊間: 塑性と加工 43(494), 219(2002)
- 15) 薫森 岩田 鈴木 金子 加藤 松居: 第51回塑加連講論 .111(2000)
- 16) 上森 岡田 吉田: 第51回塑加連講論 .115(2000)
- 17) 鈴木 樋渡 上西 Lemoine, X., Teodosiu, C.: 第53回塑加連講論 31(2002)