

(解説)

ハイテン材実用化のための寸法精度対策技術

Counter-measures Against Dimensional Precision Defects in High-strength Steels (HSS)



山本倫明*

Tomoaki Yamamoto

To improve car fuel efficiency and crash worthiness, carmakers have been trying hard to reduce vehicle weight while increasing vehicle safety at the same time. As a result, significant improvements have been made in the application of high-strength steel (HSS) to car bodies. However, HSS are not perfect. They are known to have formability issues and dimensional precision defects. Dimensional precision defects are an especially troublesome for carmakers. This article reviews recently developed forming technologies that were designed to reduce angle change, wall warp, and torsion, all problems that frequently occur in car body parts using HSS.

まえがき = 近年、自動車メーカーでは、『環境保護(CO₂等の排出ガス削減)』と『衝突安全性向上』に関する法規制や社会的要求にこたえるべく『軽くて強い自動車作り』が進められており、ボディ骨格部品への高強度鋼板(ハイテン)および超ハイテン(一般的に780MPa級以上)の適用が積極的に行われている。

しかしながら、ハイテンの実用化(主にプレス成形)に際しては、成形性の劣化に伴う割れ・しわ、離型後の弾性回復量の増加に起因する寸法精度不良、材料と工具との摺動部の面圧の増加に伴う型かじりなどが解決すべき課題として知られており、その中でも寸法精度不良が最大の課題と捉えられている¹⁾。

当社では、ハイテンの実用化を促進するため、これらの課題に対して材料技術およびその利用技術に関する研究開発を進めている²⁾。本報では、近年取り組んできた寸法精度不良の対策技術(プレス成形技術)について紹介する。

1. 自動車部品における寸法精度不良

自動車のプレス部品は、薄鋼板を用いてプレス工程で成形され、その後の溶接工程で他部品と接合される。プレス工程で寸法精度不良が生じた場合、外観の劣化や衝突性能の低下、更には溶接工程における接合面に隙間をもたらす。特に、隙間が発生すると接合が困難になるとともに、超ハイテン材の場合には、無理に形状を拘束して接合することにより生じる残留応力が遅れ破壊をもたらす危険性がある。

プレス部品に生じる寸法精度不良としては様々なものが知られており、一般に表1³⁾のように分類されている。このうち、ハイテン材の適用が多いボディ骨格部品においては、2次元的な不良である角度変化、壁反り、そして

3次元的な不良であるねじれが問題となることが多く、それぞれの発生要因が板厚方向の応力差、あるいは面内応力であることが知られている。これらの不良に対し、表2に示すような対策技術が提案されている。

表1 寸法精度不良の分類³⁾

Table 1 Types of dimensional precision defects³⁾

Defect	Flames, members type	Panel type (interior, exterior)
Angular change		
Wall warp		
Torsion		
Ridge line warp		
Shape fixing defect of punch bottom		

表2 寸法精度不良の対策技術

Table 2 Countermeasures to dimensional precision defects

Defect	Angular change	Wall warp	Torsion
Countermeasures	<ul style="list-style-type: none"> • Shape-fixing bead⁴⁾ • Loading tension³⁾ • Loading compression³⁾ • Energy-beam irradiating⁵⁾ • Back pressure control⁶⁾ • Two-step bending^{7)*} • Springing control^{8)*} etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Shape-fixing bead^{9)*} • Crash forming¹⁰⁾ • Loading tension (Die-step forming^{11)*}, etc.) • Loading compression¹²⁾ • Springing control^{7), 13)*} • Overrun-inducing punch^{14)*} etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Beading⁵⁾ • Coining^{5), 15)*} • Overrun-inducing punch^{16)*} etc.

* : Explained in this article

* 鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター

2. 角度変化の発生メカニズムと対策技術

角度変化は、図1に示すように、成形品の曲げR部が離型後に所定の角度とならず、通常は曲げ角度が大きくなる不良である。曲げ成形の下死点における材料のR部には、外側に引張り、内側に圧縮の応力が生じる。しかし、続く離型時には、これらが弾性回復することによって図1中の右側の太い矢印の方向にモーメントが生じ、角度変化が生じる。ハイテン材では、板厚表裏の応力差が大きくなるために離型後に生じるモーメントもより大きくなり、角度変化が増大するため、部品を曲げ加工で製造する際には大きな問題となる。

2.1 2回曲げ技術 (Two-step bending)⁷⁾

本技術は、曲げ成形においてパンチ肩R部に生じるスプリングバックを逆向きの角度変化である「スプリングゴー」によって相殺させ、パンチ肩の角度変化を低減させる技術である。図2に示すように、1工程目と2工程目の曲げ位置をずらして成形することによって、1工程目の曲げR部を2工程目で縦壁側に移動させて曲げ戻す。この曲げ戻しによってスプリングゴー成分が生じるが、これはずらし量によって制御可能であり、角度変化の低減効果を安定して得ることができる。図3は、同一の条件 ($R_1=5, R_2=5, W=2\text{mm}$) において材料強度を変えた場合の結果である。適正なずらし量においては、材料強度によらず角度変化をほぼゼロにすることができる。

2.2 踊り制御技術 (Springing control)⁸⁾

本技術も、2回曲げと同様に、スプリングゴーを利用する技術である。一般に、スプリングゴーを利用する方法として、V曲げにおけるダイ肩Rやその間隔、パンチ肩Rを適正に設定することで、成形中の材料に図4に示すような金型の間で波打つような挙動(以下では「踊り」

と呼ぶ)が生じ、これを下死点で押しつぶすことでスプリングゴー成分が発生し、角度変化を相殺できることが知られている¹⁷⁾。本技術は、上記の知見をより実部品に近い形状であるCチャンネルに適用すべく、図5に示すパンチ肩角度(図中の θ)および成形高さ(図中の H)を制御することで「踊り」を生じさせ、角度変化を相殺させる技術である。 $H=55\text{mm}$ におけるパンチ肩角度と角度変化の関係の一例を図6に示すが、パンチ肩角度を 90° 以上とすることによって角度変化を大きく低減できる。また、適正なパンチ肩角度(ここでは約 120°)においては、材料強度によらず角度変化をほぼゼロにすることができる。図3

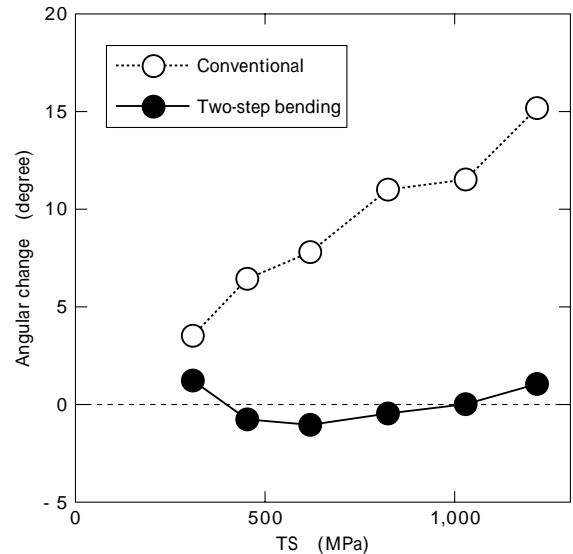


図3 2回曲げによる角度変化の低減効果⁷⁾
Fig. 3 Effect of two-step bending on reduction of angular change⁷⁾

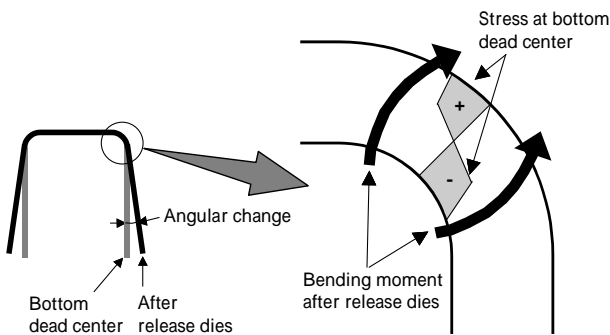


図1 角度変化の発生メカニズム
Fig. 1 Mechanism of occurrence of angular change

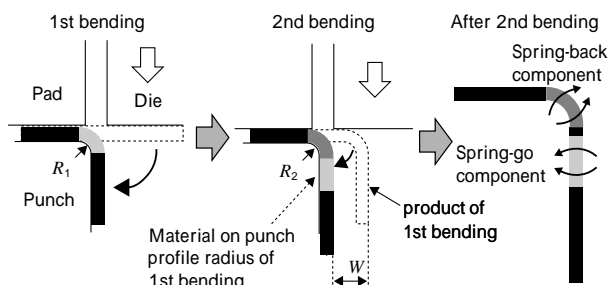


図2 2回曲げ技術の概略⁷⁾
Fig. 2 Schematic illustrations of two-step bending⁷⁾

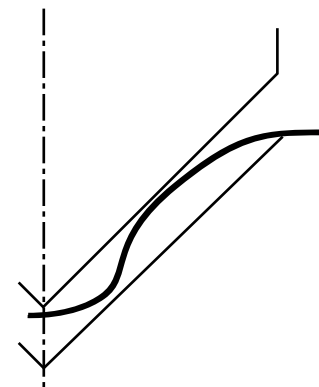


図4 V曲げにおける踊りのイメージ¹⁸⁾
Fig. 4 Schematic illustration of springing in V-bending¹⁸⁾

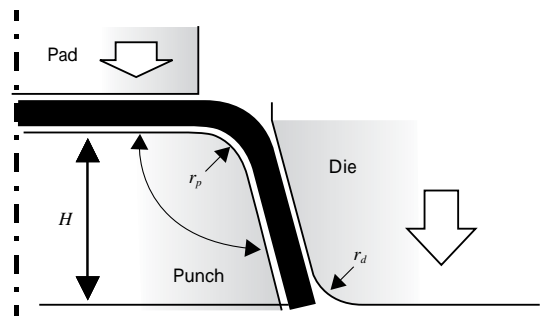


図5 L曲げの模式図⁸⁾
Fig. 5 Schematic illustration of L-bending⁸⁾

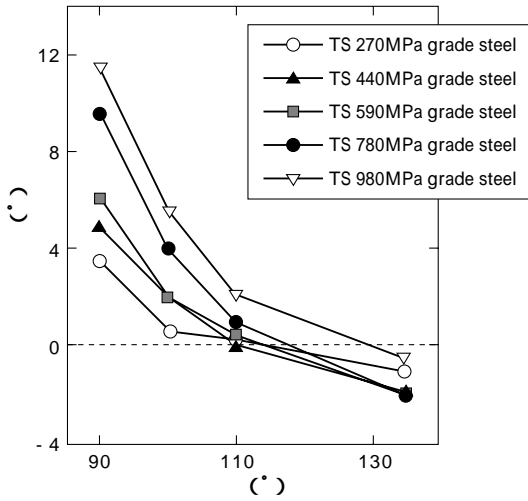


図6 L曲げの角度変化に及ぼすパンチ肩角度の影響(H=55mm)⁹⁾
 Fig. 6 Effects of punch shoulder angle on angular change of L-bending (H=55mm)⁹⁾

3. 壁反りの発生メカニズムと対策技術

絞り成形品の縦壁は、図7に示すように、成形中にダイ肩Rで曲げ変形、縦壁で曲げ戻し変形を受けて形成され、成形下死点においては材料の外側に引張り、内側に圧縮の応力が生じる。その結果、離型時には、これらが弾性回復することによって図中の右側の太い矢印の方向にモーメントが生じ、壁反りが発生する。壁反りも角度変化と同様に、材料強度が高くなるほど大きくなるため、ハイテン部品を絞り加工で製造する際には大きな問題となる。

3.1 形状凍結ビード (Shape-fixing bead)

形状凍結ビードは、一般に、ハットチャンネルの縦壁にビードを設け、形状剛性を向上させることによって壁反りを低減させる技術として知られている。当社は、形状剛性以外に、ビード間に生じる張力によって壁反り低減効果も大きいことを明らかにし、この効果を有効に活用できる形状凍結ビードの間隔を明確にすることで、より効果的な壁反り対策技術とした⁹⁾。間隔が70mmの場合の結果を図8に示すが、壁反り低減効果を得られることがわかる。また、一般に形状凍結ビードは軸圧壊において衝突性能を低下させるが、当社の考案した図9のような段差付きのビードにすることで、衝突性能の低下を抑えながらも壁反りを低減させることができる⁹⁾。

3.2 ダイステップ成形 (Die-step forming)¹¹⁾

トヨタ自動車㈱と共同で開発した本技術は、図10のように製品形状内に小さな段 (以下では「ステップ」と呼ぶ) を設け、下死点近傍におけるステップの成形時に縦壁に張力を生じさせ、壁反りを低減する技術である。従来知られている段絞りでは製品形状の外側に段を設け、成形後に段絞り部を切除するために材料の歩留りが悪化する。本技術は、製品内にステップを設けることによって、歩留りの悪化を抑制し、同時に壁反りを低減させるものである。図11に大小のステップ形状で、壁反りと連動して増減する「口開き」を低減させた例を示す。

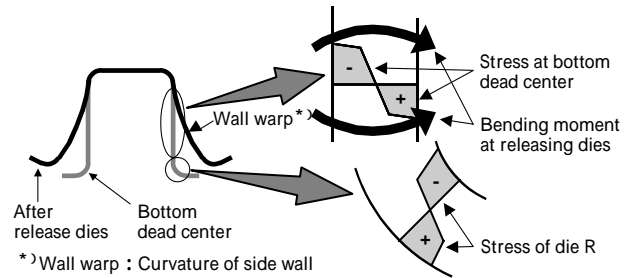


図7 壁反りの発生メカニズム
 Fig. 7 Mechanism of occurrence of wall warp

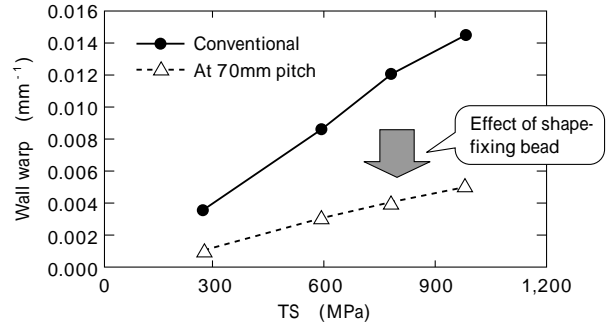


図8 壁反りに及ぼす形状凍結ビードの影響⁹⁾
 Fig. 8 Effect of shape-fixing bead on reduction of wall warp⁹⁾

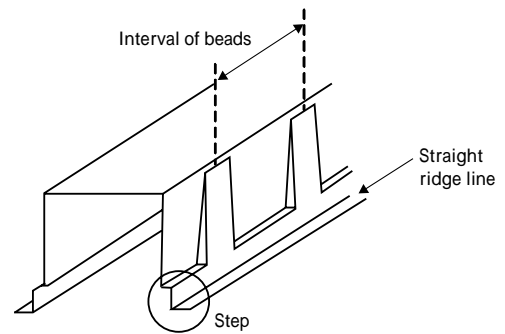


図9 形状凍結ビードの形状⁹⁾
 Fig. 9 Dimension of shape-fixing bead⁹⁾

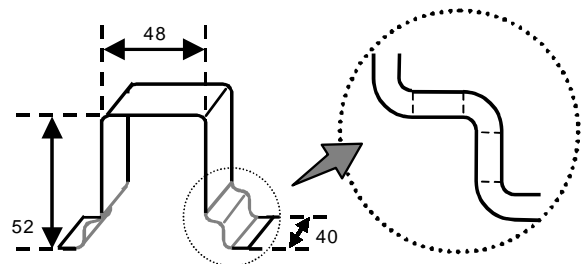


図10 ステップ形状¹¹⁾
 Fig.10 Dimensions of step¹¹⁾

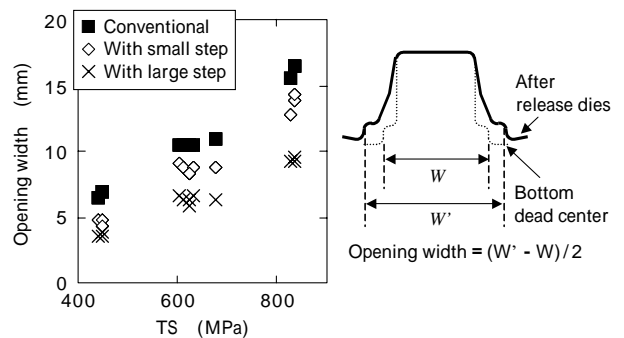


図11 ダイステップ成形による開き量の低減効果¹¹⁾
 Fig.11 Effects of die-step forming on reduction of opening width¹¹⁾

3.3 踊り制御技術 (Springing control)^{8),13)}

本技術は、2.2 節にて曲げ加工における角度変化対策技術として紹介したが、壁反り対策技術としても活用することができる。実部品に多く見られる形状であるハットチャンネルを曲げ成形する場合においても、成形末期に縦壁が曲げ曲げ戻し変形を受けて壁反りが発生する。本技術は角度変化対策として用いる場合よりも更にパンチ肩角度を大きくすることで曲げ曲げ戻し変形を低減させ、壁反りを低減させることができる。図12 に、成形高さ $H=60\text{mm}$ 、フランジ長さ $L_f=25\text{mm}$ における口開き (図中の W) に及ぼすパンチ肩角度の影響の一例を示すが、パンチ肩の角度を 135° とすることによって、口開きをほとんどゼロにできることがわかる。

また、パンチ肩角度が小さい成形品を得たい場合には、2.1 節にて紹介した2回曲げを併用することで、寸法精度の良いハットチャンネルを得ることができる。

3.4 オーバーラン誘発パンチ (Overrun-inducing punch)¹⁴⁾

本技術は、絞り成形において材料がダイ肩 R に沿わずに流入する「オーバーラン」を誘発させ、逆曲げによって壁反りを低減させる技術である。一般に、絞り成形においてオーバーランを利用することで壁反りを低減できることが知られている¹⁸⁾ が、そのためには板厚 (t) に対するダイ肩 R (r_d) の比 r_d/t を小さく設定する必要がある。特にハイテン材においてはダイ肩における破断や工具肩 R 部の磨耗などが問題となる。これに対し本技術では、 r_d/t が大きい場合にも成形中にオーバーランを誘発させることを目的に、図13 に示すようにパンチの側面を削ってオーバーランが生じるスペースを確保した。このスペースによって成形中にダイ肩 R 近傍でオーバーランが誘発さ

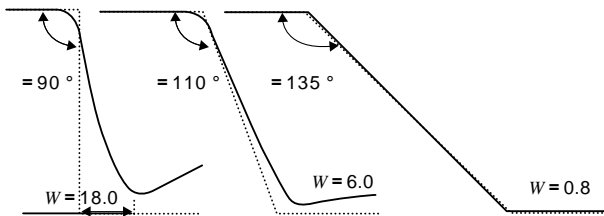


図12 踊り制御による壁反り低減効果 (780MPa 級材, $H=60\text{mm}$, $L_f=25\text{mm}$)⁸⁾

Fig.12 Effect of springing control on reduction of wall warp (TS 780MPa grade steel, $H=60\text{mm}$, $L_f=25\text{mm}$)⁸⁾

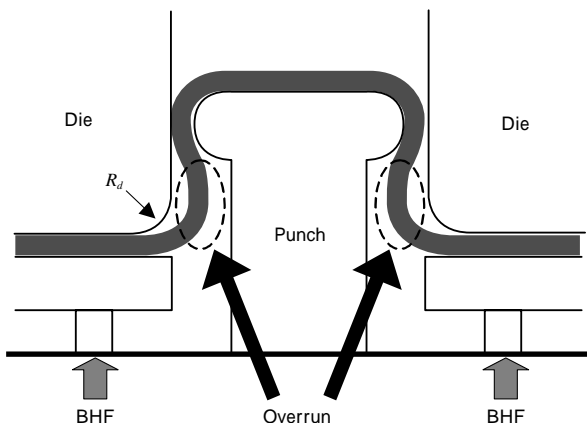


図13 オーバーラン誘発パンチ技術¹⁴⁾

Fig.13 Overrun-inducing punch¹⁴⁾

	Conventional punch	Overrun inducing punch
TS 590 MPa grade steel		
TS 780 MPa grade steel		
TS 980 MPa grade steel		
TS 1470 MPa grade steel		

図14 オーバーラン誘発パンチによる壁反り低減効果¹⁴⁾

Fig.14 Effect of overrun inducing punch on reduction of wall warp¹⁴⁾

れる。続く下死点以降の離型の過程においてパンチ肩部で逆曲げを付与し、壁反りを低減させることができる。効果の一例を図14 に示すが、材料強度によらず壁反りを低減できることがわかる。

4. ねじれの発生メカニズムと対策技術

ねじれは、部品の長手方向の軸に直角な2つの断面が互いに逆向きに回転する寸法精度不良である。その発生メカニズムについては様々な検討が行われており、浅絞りにおけるフランジの面内応力^{5),15)}や、湾曲したハットチャンネルにおける縦壁の反り¹⁵⁾などがねじれの原因であることが報告されている。このねじれも、材料強度の上昇に伴い大きくなること、現象が3次元的で複雑であることから、ハイテン材を適用する際に大きな問題となる。

4.1 フランジへのコイニング技術¹⁵⁾

フランジへのコイニング技術は、フランジを板厚方向に圧縮することで長手方向の線長を伸ばし、引張りの残留応力を低減させる技術である。当社の検討によれば図15 に示すような成形高さが低い湾曲ハットチャンネルの場合には、ねじれの主要因はフランジの面内の応力であり、本技術が有効であることがわかっている。成形高さが10mmの湾曲ハットチャンネルにおいて、湾曲の内側および外側のフランジにコイニングを行った場合のね

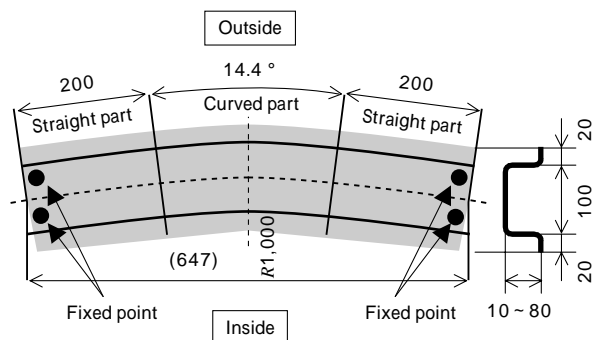


図15 湾曲ハットチャンネル部材の形状¹⁵⁾

Fig.15 Dimensions of curved hat channel¹⁵⁾

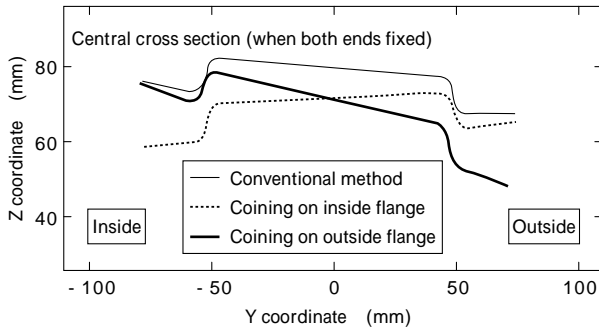


図16 コイニングによるねじれの変化(成形高さが低い場合)¹⁵⁾
 Fig.16 Change of torsion using coining on flange (In case of low forming height)¹⁵⁾

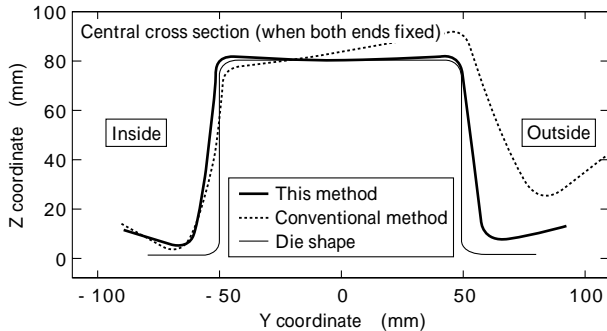


図17 オーバーラン誘発パンチによるねじれの変化(成形高さが高い場合)¹⁵⁾
 Fig.17 Change of torsion using overrun inducing punch (In case of low forming height)¹⁵⁾

じれの変化を図16に示す。この場合、引張りの残留応力が分布する内側のフランジにコイニングを行うことでねじれが低減することがわかる。

4.2 2次元の壁反り対策技術¹⁵⁾

当社の検討によれば、成形高さが高い場合のねじれの主要因は壁反りであることがわかっており、2次元の壁反り対策技術も有効と考えられる。その一例として、図15に示す成形高さが高い湾曲ハットチャンネル(成形高さ80mm)の成形において、3.4節で紹介したオーバーラン誘発パンチを適用した結果を図17に示す。同図より、壁反りが減少し、ねじれが低減されていることがわかる。

むすび=ハイテン材をプレス成形する上で重要な問題である寸法精度について、当社が近年取組んだ対策技術を紹介した。実部品への対策技術の適用においては、工法や部品形状など種々の制約に対応していく必要があると考えられる。特に、3次元的な寸法精度不良については現象が複雑であるがゆえに、まだ不明な点も多く、今後さらなる検討が必要である。また、メカニズムの解明や対策技術の開発を迅速に行うためには、FEM解析も有効なツールであり、FEM解析技術の更なる進歩も期待される。今後も、環境保護や衝突安全性向上の一端を担うべく、ハイテン材を実用化する技術を開発していく所存である。

参考文献

- 1) 杉山隆司：塑性と加工，Vol.46, No.534 (2005) p.552.
- 2) 例えば，岩谷二郎：R&D 神戸製鋼技報，Vol52, No.3(2002) p.27.
- 3) 薄鋼板成形技術研究会：プレス成形難易ハンドブック第2版，(1997) p.174. 日刊工業新聞社.
- 4) 基田昌彦：プレス技術，Vol.32, No.5 (1994) p.21.
- 5) 岩谷二郎ほか：第39回塑性加工連合講演会論文集，(1998) p.55.
- 6) 小嶋正康：第25回塑性加工連合講演会論文集，(1974) p.233.
- 7) 山野隆行ほか：第53回塑性加工連合講演会論文集，(2002) p.249.
- 8) 山野隆行ほか：第53回塑性加工連合講演会論文集，(2002) p.251.
- 9) 山本貴之ほか：第54回塑性加工連合講演会論文集，(2003) p.17.
- 10) 吉田亨ほか：塑性と加工，Vol.46, No.534 (2005) p.656.
- 11) 伊原智章ほか：平成18年度塑性加工春季講演会論文集，(2006) p.39.
- 12) 岩谷二郎ほか：特開2001-87816.
- 13) 山本倫明ほか：第56回塑性加工連合講演会論文集，(2005) p.169.
- 14) 山野隆行ほか：第54回塑性加工連合講演会論文集，(2003) p.15.
- 15) 山野隆行ほか：平成17年度塑性加工春季講演会論文集，(2005) p.137.
- 16) 山野隆行ほか：第56回塑性加工連合講演会論文集，(2005) p.167.
- 17) 例えば，益田森次ほか：薄板の曲げ加工，(1965) p.136，誠文堂新光社.
- 18) 林豊ほか：鉄と鋼，68-9 (1982) p.1236.