

# バウシンガー効果活用による自動車部品の 寸法精度変動低減技術

## Forming Technology to Reduce Dimensional Variation of Automotive Parts by Using Bauschinger Effect

飛田 隼佑 TOBITA Shunsuke JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部 主任研究員  
新宮 豊久 SHINMIYA Toyohisa JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部 グループリーダー

### 要旨

高強度鋼板は量産時の材料強度変動が大きいいため、プレス成形に適用した場合、寸法精度変動が重要な課題となる。本研究では長手方向湾曲部品で生じるキャンバーバックに対し、バウシンガー効果を活用して寸法精度変動を抑制するストレスリバース<sup>®</sup>工法を開発した。開発工法は 2 工程から成り、1 工程目は側面視曲率を 2 工程目よりも大きく成形し、2 工程目は側面視曲率を 1 工程目よりも小さく成形する。長手方向の曲率半径 1 600 mm のハット断面モデルに対して、590、980 および 1 180 MPa 材を適用し開発工法の効果を検討した。開発工法では従来工法に比べて、590 MPa 材と 1 180 MPa 材のキャンバーバック量の差が 95% 低減する実験結果が得られた。

### Abstract:

Dimensional variation is a severe problem in press forming of ultrahigh-strength steels (UHSS), because of material strength variation in mass production. In this study, camber back, which occurs in longitudinally curved parts, was examined, and a new forming method whereby dimensional variation of camber back can be suppressed by the Bauschinger effect was developed. The new method consists of two processes. In the 1<sup>st</sup> process, a blank is formed with a large curvature compared with that in the 2<sup>nd</sup>-process. In the 2<sup>nd</sup> process, that part is formed to a smaller curvature than in the 1<sup>st</sup> process. The new method was applied to hat-shaped models of 590, 980, and 1 180 MPa-grade steels in which the radius of curvature in the longitudinal direction was 1 600 mm. The experimental results showed that the difference in the amount of camber back between the 590 MPa and 1 180 MPa steels formed by the developed method decreased by 95% compared with parts formed by the conventional method.

## 1. はじめに

近年、自動車車体の軽量化と衝突安全性向上を目的として、自動車骨格部品への高強度鋼板（以下、ハイテン）の適用が進んでいる<sup>1)</sup>。自動車骨格部品のほとんどは生産性の高いプレス成形で製造されており、ハイテンのプレス成形課題の一つにスプリングバックによる寸法精度不良がある<sup>2,3)</sup>。これは、材料強度の上昇に伴いプレス成形下死点の応力が大きくなるためスプリングバック量が大きくなり、要求精度から外れるという課題である。

この寸法精度課題に加えて、ハイテンは素材量産時の材料強度変動が大きくなるため、プレス下死点で大きな応力が発生する場合、自動車部品量産時の下死点の応力変動も大きくなり、寸法精度変動（寸法ばらつき）が大きくなる課題も発生する。つまり材料ロットが変わると、材料強度が規格内であっても製品の要求精度から外れる可能性がある。

従来、寸法精度不良の対策技術は数多く提案されているが、特に湾曲部品における製品の寸法公差に対する寸法ばらつきにも着目した対策技術は少なく、ハイテンをさらに広く適用するには寸法精度変動対策技術が必要不可欠である。

そこでこの課題に対して、ハイテンの応力反転時に発生するバウシンガー効果<sup>4)</sup>を活用した工法（ストレスリバース<sup>®</sup>工法）を開発した<sup>5,6)</sup>。本開発技術はプレス最終工程の下死点における応力の絶対値と、材料強度変動要因の応力差を同時に低減する工法である。

本稿では、寸法精度変動発生メカニズムと開発技術のコンセプトおよび単純モデルでの開発技術検証結果について述べる。また、量産採用事例も併せて紹介する。

## 2. 自動車プレス品量産時の寸法精度変動課題

スプリングバックは縦壁の反りとパンチ肩の角度変化による壁開き、平面視湾曲部品や側面視湾曲部品などの湾曲部品で発生する成形品長手方向のスプリングバックなどに分

2025 年 9 月 24 日受付

類される。まず壁開きスプリングバックを対象に課題を説明する。**写真1**に590 MPa材と980 MPa材を適用したハット部品の成形品を示す。材料強度の上昇に伴い、スプリングバックによる壁開きが大きくなる。これは、材料強度が上昇するとプレス成形下死点の応力が大きくなるためであり、自動車部品量産時にこのようにスプリングバックが大きくなると、要求精度から外れる恐れがある。

一方、プレス成形に用いる鋼板の材料強度の規格幅は、**図1**に示すように低強度材に比べて高強度材の方が広く設定されている。このような材料を自動車プレス部品の量産に適用した場合、前述の寸法精度変動が発生し目標精度を満足することが困難になる。

この寸法精度変動について、写真1に示したハット部品を事例にさらに説明する。ハット部品に適用した材料強度(引張強さ)と壁開き量の関係を**図2**に示す。前述のように、材料強度の上昇に伴い壁開き量が大きくなり、おおむね線形関係で示される。ここで材料強度変動が発生した場合を想定すると、590 MPa材の材料強度変動①に比べて980 MPa材の材料強度変動②の方が相対的に大きくなる。この強度変動の大きさに比例して寸法精度の変動が発生する。このため、**図2**に示すとおり590 MPa材の寸法精度変動①に比べて980 MPa材の寸法精度変動②の方が大きくなる。このようなハット断面で発生する壁開きとその寸法精度変動に対しては、従来から提案されているずらし曲げ<sup>3)</sup>などのスプリングバック変形を相殺するプレス成形技術により対策が可能である。

一方、例えば**図3**に示すような側面視湾曲部品で発生するキャンバーバックに対する寸法精度変動対策技術は少ない。ブランクホルダーと上型で鋼板を押さえて成形した場

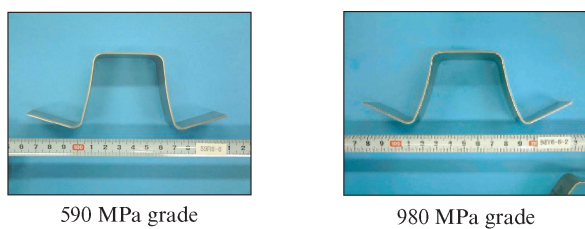


写真1 ハット部品の成形品<sup>7)</sup>  
Photo 1 Hat model pressed part

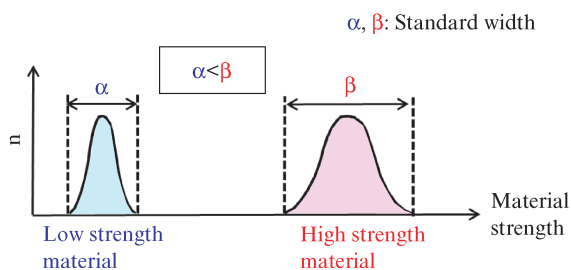


図1 材料強度の規格幅イメージ<sup>7)</sup>

Fig. 1 Image of material strength standard width

合のプレス成形下死点応力を**図4**に示す。キャンバーバックは、プレス成形下死点でのパンチ底の引張応力とフランジの圧縮応力の応力差に起因する曲げモーメントによって発生する。**図5**に量産材の強度上下限材を1工程で成形した際のパンチ底の応力-ひずみ関係の模式図を示す。材料強度

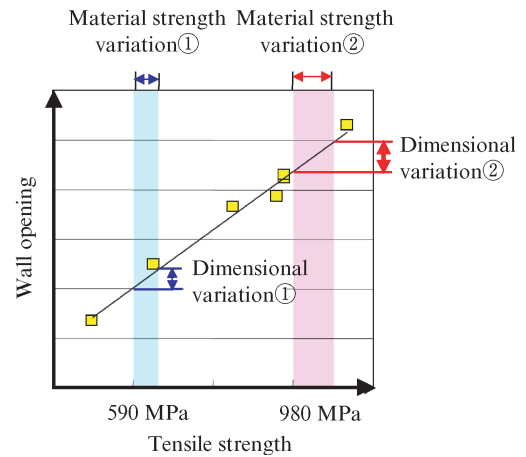


図2 引張強さと壁開き量の関係<sup>7)</sup>

Fig. 2 Relationship between tensile strength and wall opening

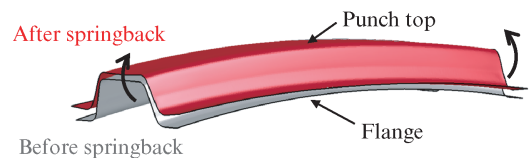


図3 側面視湾曲部品で発生するキャンバーバック<sup>7)</sup>

Fig. 3 Camber back of curved part

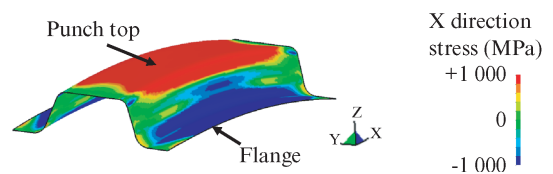


図4 プレス成形下死点の応力分布<sup>5)</sup>

Fig. 4 Stress distribution at bottom dead point

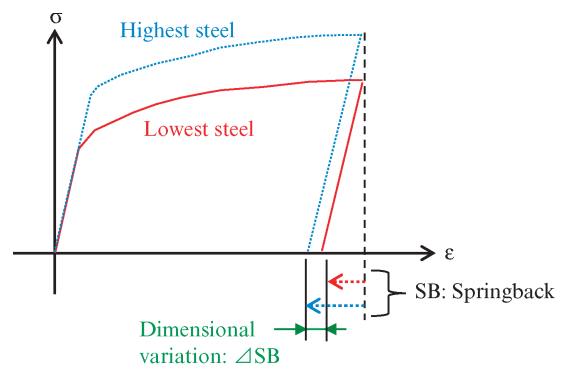


図5 1工程成形時のパンチ底の応力-ひずみ関係模式図<sup>7)</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of stress-strain relationship at punch top with 1<sup>st</sup> process forming

が変動するとプレス成形下死点応力も変動し、寸法精度変動が生じる。

従来、このキャンパーバックによる寸法精度不良に対しては、最初の工程で製品形状に近い形状に成形し、最終工程で見込みを加えた形状で成形して寸法精度を確保してきた<sup>8,9)</sup>。従来の見込み対策で2工程成形した場合の成形工程とスプリングバック挙動およびパンチ底の応力-ひずみ関係の模式図を図6に示す。強度上限材における2工程目のスプリングバック後④は製品形状となるが、材料強度が変動すると1工程成形時と同様に、プレス成形下死点応力も変動し、寸法精度変動が生じる。

近年のカーボンニュートラルの観点から、燃費改善を目的とした自動車車体のさらなる軽量化検討が進んでおり、解決手段の一つとして1470 MPa級などの超ハイテンの適用が拡大している。超ハイテンでは材料強度変動がさらに大きくなることから、寸法精度変動課題がさらに顕著になってきた。

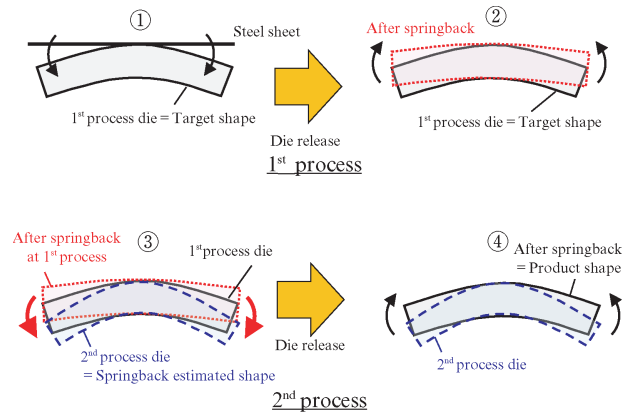


図6 従来の見込み対策でのスプリングバック挙動とパンチ底の応力-ひずみ関係模式図<sup>7)</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of stress-strain relationship at punch top and springback behavior in conventional countermeasures

### 3. 寸法精度変動対策技術の構想

2章の寸法精度変動課題に対して、ハイテンの応力反転時に発生するバウシinger効果を活用した工法(ストレスリバース<sup>®</sup>工法)を開発した<sup>5,6)</sup>。本章では、開発技術の構想について紹介する。

開発技術のポイントは大きく2つある。1つは「ハイテンの応力反転時に発生するバウシinger効果を活用する」という点である。バウシinger効果は、応力反転時に降伏応力が低下する現象である<sup>4)</sup>。1180 MPa材の応力反転挙動を図7(a)に示す。引張時の①の応力1283 MPaに対して、応力反転後の②の降伏応力は-388 MPaになり、大きく低減する。従来、ハイテンを適用した板材プレス成形のFEM解析において、バウシinger効果を再現できるYoshida-Uemoriモデル(Y-Uモデル)を適用することで、スプリングバック量の解析精度が向上することは知られており<sup>10)</sup>、バウシinger効果がスプリングバック量に影響することは周知である。しかし、バウシinger効果を活用した成形技術はこれまで提案されておらず、このバウシinger効果を活用して、プレス下死点の応力を低減することを考えた。材料強度変動の発生を想定して、980 MPa材と1180 MPa材の応力反転挙動を図7(b)に示す。引張りから圧縮へ応力反転した際に、980 MPa材と1180 MPa材のカーブが交わ

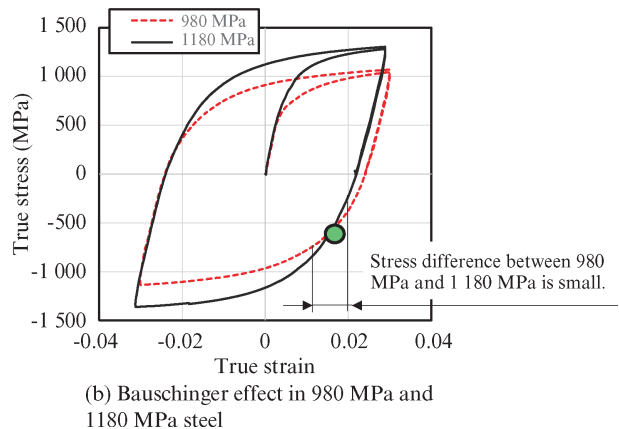
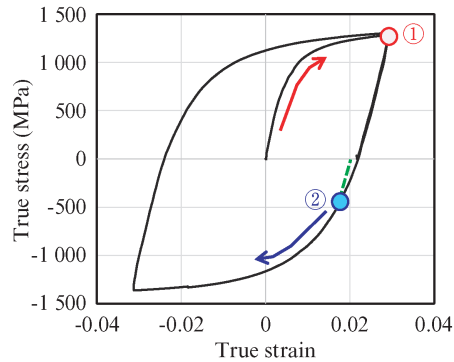


図7 引張圧縮試験での応力-ひずみ曲線<sup>7)</sup>

Fig. 7 Stress-strain curve in tension and compression test

る点が現れる。このことから、プレス成形時の下死点応力がこの交点近傍になるように金型を設計することで、980 MPa材と1180 MPa材のスプリングバック量は同程度となり、寸法精度変動が低減できると考えた。なお、この交点は等方硬化モデルでも現れるが、バウシinger効果の発生により、応力差の小さいひずみ範囲が広がると考えられる。

バウシinger効果を活用してプレス下死点の応力を低減する工法の検討で、2つ目のポイントとなるのが「見込みの順番」である。2章で述べたように、多工程あるプレスの量産工程において、スプリングバック対策は最終工程で行われてきた。ハイテンを適用した部品に対して、従来の「見込みの順番」では最終工程のプレス下死点で大きな応力が発生するため、寸法精度変動が大きくなる。

上記2つのポイントから、後工程でバウシinger効果が発現するように前工程で見込む工法を開発した。2章の部品形状で考えると、1工程目は長手方向曲率半径を2工程目より

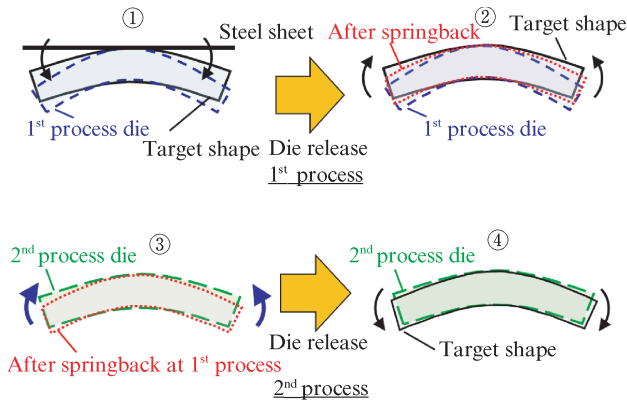
小さい曲率半径で成形し、2工程目は1工程目より大きい曲率半径で成形する。これにより、2工程目で構造体として曲げ戻されるため、2工程目プレス下死点でパンチ底とフランジの応力が適度に反転する。図8に開発技術の成形工程とスプリングバック挙動および材料強度の上下限材を適用した際のパンチ底の応力-ひずみ関係の模式図を示す。2工程目で応力を反転させ、各材料で発生する応力が一致するように1工程目の形状を設計すると、寸法精度変動は低減する。また、2工程目でバウシinger効果が発現するため、パンチ底とフランジに発生する応力の絶対値は、1回成形の場合より小さくなり、スプリングバック量も低減する。以上より、本開発技術により、スプリングバック量とスプリングバックの寸法精度変動を同時に低減できると考えられる。

## 4. 単純モデルによる開発技術の効果検証

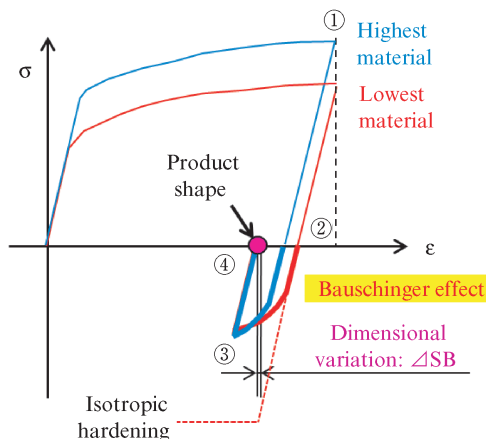
### 4.1 FEM解析による開発工法の検証

#### 4.1.1 FEM解析条件

開発技術の効果を検証するため、プレス成形解析を行った。FEM解析は有限要素法ソフトウェアであるLS-DYNA ver.971、材料モデルはバウシinger効果を表現可能なYUモデルを用い、シェル要素で検討した。図9に示すハット断面の長手方向湾曲モデルを用い、長手方向の長さは400 mm、基準の曲率半径はパンチ底R1600、フランジR1560の一定曲率とした。寸法精度変動を評価する目的で、表1に示す機械的特性(JIS5号、C方向)の590 MPa~1180 MPa級の冷延鋼板を使用した。成形工程は図10に示すように2工程とし、1工程目はドロー成形、2工程目はパッド付きフォーム成形とした。1工程目のBHF(Blank Holder Force)は490 kN、2工程目のパッド荷重は98 kN



(a) Forming process and springback behavior in development technology



(b) Schematic stress-strain curve of lowest and highest strength steel sheets of one grade

図8 開発技術でのスプリングバック挙動とパンチ底の応力-ひずみ関係模式図<sup>7)</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of stress-strain relationship at punch top and springback behavior in development technology

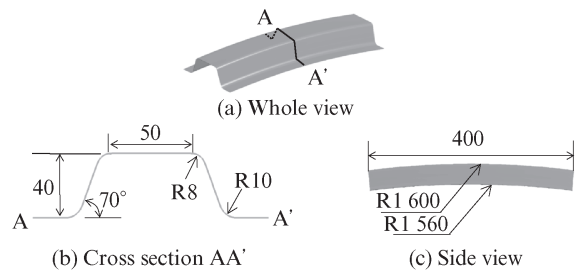


図9 モデル形状<sup>5)</sup>

Fig. 9 Model shape

表1 CAE で用いた材料の機械特性値

Table 1 Mechanical properties of each steel used in CAE

Steel	t (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
JSC590Y	1.4	426	621	28
JSC980Y	1.4	685	1 037	17
JSC1 180Y	1.4	856	1 242	13

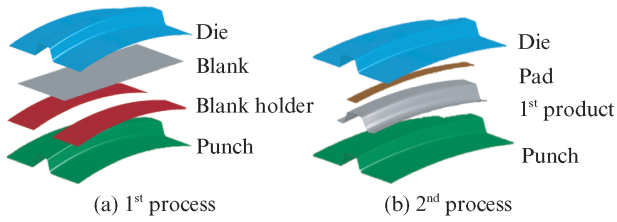


図 10 プレス成形工程<sup>5)</sup>

Fig. 10 Press forming process

とした。本研究では1工程目のパンチ底金型曲率半径をR1 000~R1 600に縦壁高さ一定のもと変更し、2工程目はR1 600で成形した。キャンパーバック量はパンチ底の曲率半径により評価した。なお、キャンパーバックと壁開きは連動して発生するため、壁開き対策として曲げ稜線にC面取り<sup>11)</sup>を適用し、キャンパーバックの影響のみ検討した。

4.1.2 FEM 解析結果

各材料強度における1工程目の各金型曲率半径と1工程目スプリングバック後のパンチ底曲率半径の関係を図11に示す。1工程目金型曲率半径がR1 200以下の条件において、各材料のスプリングバック後の曲率半径が2工程目金型曲率半径R1 600よりも小さくなった。

次に1工程目の各金型曲率半径における材料強度と2工程目のスプリングバック後のパンチ底曲率半径の関係を図12に示す。1工程目の金型曲率半径がR1 000の条件で、グラフの傾きで示される寸法精度変動が最も抑制された。590 MPa~1 180 MPa材の曲率半径差は、1工程目R1 600で243 mmであるが、1工程目R1 000では36 mmとなり、約85%低減した。

R1 600の金型形状で1工程成形した条件(対策無し)と1工程目R1 000で成形し、2工程目R1 600で成形した条件(開発工法)の、成形中のパンチ底の平均応力と平均ひずみの推移を図13(a), (b)に示す。1工程成形では成形中に引張応力が発生し、590 MPa材と1 180 MPa材の成形下死

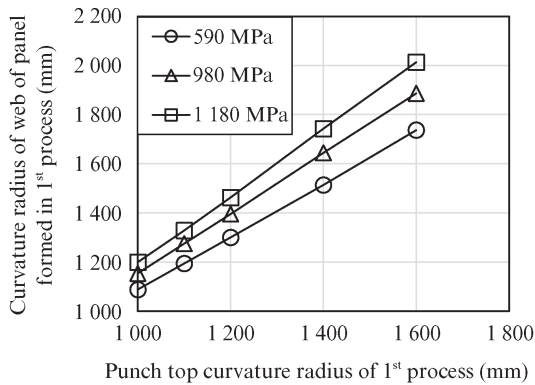


図 11 1工程目の金型曲率半径と1工程目スプリングバック後のパンチ底の曲率半径の関係<sup>12)</sup>

Fig. 11 Relationship of punch top curvature radius of 1st process on curvature radius of web of panel formed in 1st process

点で約360 MPaの応力差が発生した。一方、開発工法は2工程目で応力が反転して圧縮側に推移し、590 MPa材と1 180 MPa材の応力差が約160 MPaに低減した。この応力差と応力の絶対値の低減により寸法精度変動が低減したと考えられる。

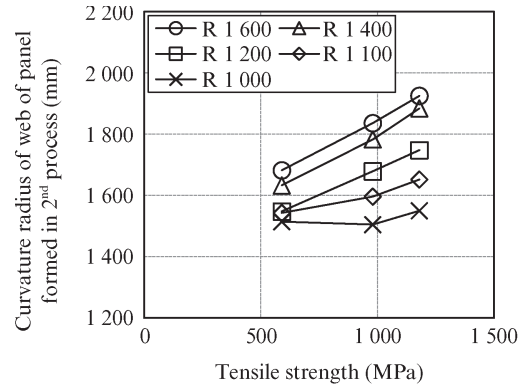
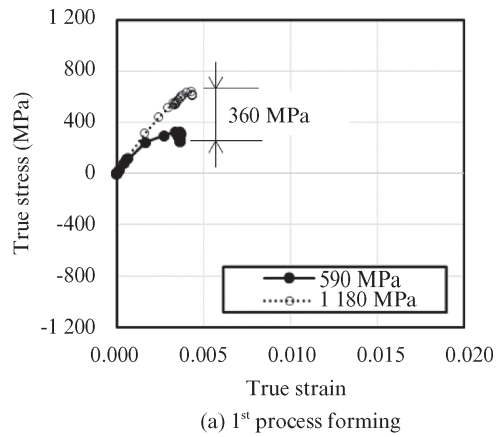
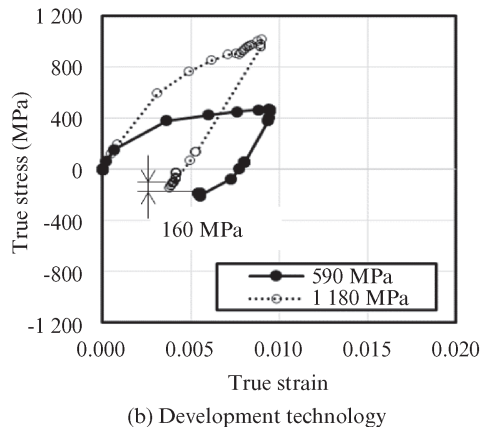


図 12 材料強度と2工程目スプリングバック後のパンチ底の曲率半径の関係<sup>12)</sup>

Fig. 12 Relationship of tensile strength of steel sheet on curvature radius of web of panel formed in 2nd process



(a) 1st process forming



(b) Development technology

図 13 パンチ底の応力-ひずみ推移<sup>12)</sup>

Fig. 13 Stress and strain transitions at punch top

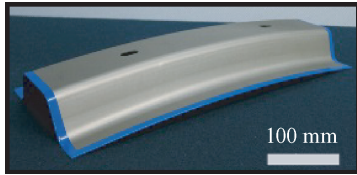


写真2 成形パネル<sup>12)</sup>

Photo 2 Curved panel formed in press trial

表2 実験で用いた材料の機械特性値

Table 2 Mechanical properties of each steel used in experiment

Steel	t (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
JSC590Y	1.4	454	650	33
JSC980Y	1.4	676	1 046	16
JSC1180Y	1.4	856	1 242	13

## 4.2 プレス実験による開発技術の効果検証

### 4.2.1 実験方法および条件

4.1節で示した開発工法の効果を検証するために、プレス実験を行なった。成形パネルの一例を写真2に示す。壁開きの影響を無くすために、4.1節と同様にC面取りを適用した。表2に示す機械的特性の590 MPa材、980 MPa材、1180 MPa材 (t1.4 mm) の3鋼種を用いた。実験は2工程で実施し、1工程目をR1 000 (開発工法) とR1 600 (対策無し) の2条件で成形し、2工程目はそれぞれR1 600で成形した。

### 4.2.2 実験結果

各成形条件での材料強度と2工程目のスプリングバック後のパンチ底曲率半径の関係を図14に示す。FEMおよび実験結果ともに1工程目の金型曲率半径をR1 000とすることにより寸法精度変動が低減し、実験の590 MPa~1180 MPa材の曲率半径差が320 mmから10 mmへ約95%低減した。以上の結果より、開発工法適用による寸法精度変動の低減効果が確認された。

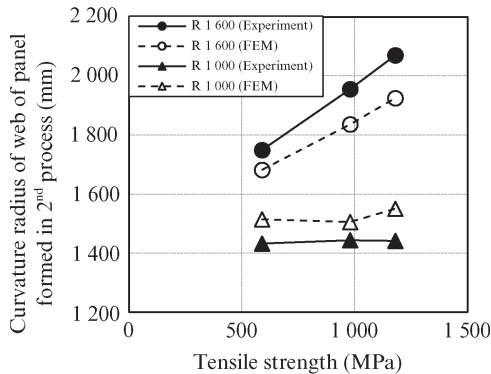


図14 実験とFEMにおける材料強度と2工程目スプリングバック後のパンチ底の曲率半径の関係<sup>12)</sup>

Fig. 14 Relationship of tensile strength of steel sheet on curvature radius of web of panel formed in 2<sup>nd</sup> process in experiment and FEM



(a) Roof center R/F



(b) Member front bumper

写真3 量産採用部品<sup>7)</sup>

Photo 3 Mass production parts using the developed technology

## 5. 開発技術の量産採用

本開発技術は1470 MPa冷延材適用ルーフセンターリンフォース<sup>13)</sup> (写真3 (a)) を初めとして、980~1180 MPa冷延材適用メンバーフロントバンパー部品 (写真3 (b)) などへのプレス量産技術として採用された。これらの部品は超ハイテンを適用しているため、寸法精度不良および寸法精度変動が大きな課題となっていたが、本開発工法適用によりこれらの課題が改善され、超ハイテンの適用拡大と自動車部品の安定生産に寄与している。

## 6. おわりに

従来、対策技術が無かった自動車プレス部品の寸法精度変動課題に対して、素材の引張-圧縮特性であるバウシंगाー効果を活用した新しいプレス成形工法を開発し、量産技術として採用された。本開発技術のメカニズムは他の湾曲形状で発生するスプリングバックへも適用可能と考えられる。今後はハイテンと開発技術のさらなる適用拡大を目指す。

### 参考文献

- 1) 瀬戸一洋. 車体軽量化を支える高強度鋼板とその利用技術. 自動車技術. 2010, vol. 64, no. 11, p. 29-34.
- 2) 林央. 高張力鋼板の成形技術の展望. 塑性と加工. 2011, vol. 52, no. 606, p. 756-760.
- 3) 岩谷二郎. 高張力鋼板の成形技術における形状不良対策. 塑性と加工. 2011, vol. 52, no. 606, p. 772-776.
- 4) 上森武. 成形シミュレーションにおけるバウシंगाー効果の影響と対策. 塑性と加工. 2016, vol. 57, no. 662, p. 194-198.
- 5) 飛田隼佑, 新宮豊久, 山崎雄司, 平本治郎. バウシंगाー効果活用による自動車部品の寸法精度変動低減技術の開発. 塑性と加工. 2019, vol. 60, no. 701, p. 155-160.
- 6) 飛田隼佑, 新宮豊久, 山崎雄司, 飯塚栄治, 玉井良清. バウシंगाー効果活用による自動車部品の寸法精度変動低減技術の開発. 第71回塑性加工連合講演会講演論文集. 2020, p. 191-192.
- 7) 飛田隼佑. バウシंगाー効果活用による自動車部品の寸法精度変動低減技術. ぶらすとす. 2025, vol 8, no. 87, p. 116-120.
- 8) 笹原孝利. CAEによるプレス金型のスプリングバック見込み形状の最適化. 塑性と加工. 2005, vol. 46, no. 534, p. 607-611.

- 9) 前田真吾, 江口啓之. シミュレーション予測技術を活用した金型づくり. プレス技術. 2009, vol. 47, no. 7, p. 34-39.
- 10) Yoshida, F; Uemori, T. A model of large-strain cyclic plasticity and its application to springback simulation. International Journal of Mechanical Sciences. 2003, vol. 45, no. 10, p. 1687-1702.
- 11) 卜部正樹, 齊藤孝信, 狩野裕隆. 特許第 4992048 号.
- 12) 飛田隼佑, 新宮豊久, 山崎雄司, 平本治郎. バウシंगाー効果活用による自動車部品の寸法精度変動低減技術. ぶらすとす. 2023, vol. 6, no. 72, p. 740-744.
- 13) 日経 BP. 日経 Automotive. 2022, 3 月号, 132, p. 54-59.