論文

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の開発

飛田 隼佑* 新宮 豊久*

山崎 雄司* 平本 治郎**

Development of Forming Technology to Reduce Dimensional Scattering of
Automotive Parts with Cambers by Using Bauschinger Effect

Shunsuke TOBITA*, Toyohisa SHINMIYA*,

Yuji YAMASAKI* and Jiro HIRAMOTO**

(Received on March 26, 2018)

Dimensional scattering is a severe problem in press forming of ultrahigh-strength steels (UHSS), because of material strength scattering in mass production. In this study, camber back which occurs in longitudinally curved parts was focused on and a new forming method whereby dimensional scattering of camber back can be suppressed by the Bauschinger effect was developed. The new method consists of two processes. In the 1st process, a blank is formed to with a small radius of curvature compared with the 2nd-process radius of curvature. In the 2nd process, the 1st-formed part is formed to a large radius of curvature compared with the 1st-process radius of curvature. Then the Bauschinger effect works to decrease the amount of camber back. The new method was applied to a hat-shaped model of 590, 980, and 1180 MPa-grade steels, where the radius of curvature in the longitudinal direction was 1600 mm. The experimental results showed that the difference in the amount of camber back between 590 MPa and 1180 MPa steels formed by the developed method decreased 95 % compared with the case of the conventional method.

Key words: sheet metal forming, press forming, ultrahigh-strength steel, springback, Bauschinger effect.

1. 緒言

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超ハイテン材の適用が進んでいる^{1)~4)}。その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いる。超ハイテン材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^{5), 6)}。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。

スプリングバックには縦壁の反りとパンチ肩部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、三次元曲がり部品で発生する捩れがある。壁開きは板の表裏応力差に起因する曲げモーメント、湾曲部品で発生するスプリングバックはプレス成形下死点の板面応力に起因す

る構造体としての曲げモーメントにより発生する。壁開きに関しては、過去に様々な対策技術が提案されている^{7)~9)}。一方、湾曲部品で発生するスプリングバックに関しては、佐藤らによる前工程と後工程の成形品の幅を変えることで応力をコントロールし、側面視湾曲部品のスプリングバック（キャンパーバック）を低減する方法¹⁰⁾や、小峯らによる絞り-絞り戻し加工を用いたスプリングバック要因応力をキャンセルさせる方法¹¹⁾などの提案があるが、有効な対策技術は乏しい。

自動車部品のプレス成形の工程数は、一般に全 3~5 工程で、そのうち目的の形状/寸法に造形する工程は 2~3 工程ある。従来、これらの造形工程では、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^{12), 13)}。近年、FEM(Finite Element Method)解析技術の発達により¹⁴⁾、スプリングバック量を事前に、高精度に予測することが可能となり、効率よく見込み形状を設計できるようになってきた。しかし、最終工程のプレス成形下死点で大きな応力が発生するため、材料強度変動が大きい場合はプレス成形下死点の応力変動も大きくなり、寸法精度変動が大きくなる。

* JFE スチール(株) スチール研究所 〒721-8510 福山市鋼管町 1 番地
Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation,
1, Kokan-cho, Fukuyama, Hiroshima 721-8510, Japan.
E-mail:s-tobita@jfe-steel.co.jp

**JFE スチール(株) スチール研究所 〒260-0835 千葉市中央区川崎町 1 番地
Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation,
1, Kawasaki-cho, Chuo-ku, Chiba 260-0835, Japan.

そこで、バウシinger効果^{15),16)}を活用することでキャンバーバックの寸法精度変動を低減する新しいプレス成形方法を考案した。本開発技術は、最終工程の下死点でバウシinger効果による流動応力低減効果が発現するように、前工程形状を設計する技術である。本開発技術によれば、材料強度変動が大きい超ハイテン材を成形する場合でも、プレス成形下死点の応力変動が小さくなり、スプリングバック量と寸法精度変動が低減する。本論文では FEM 解析により最適な前工程金型形状を設計し、プレス実験により本開発技術の効果を実証した。

2. キャンバーバックの発生メカニズムと新工法の狙い

本章では側面視湾曲部品で発生するキャンバーバックの発生メカニズムと、新工法の狙いを説明する。キャンバーバックは Fig. 1 に示すように、長手方向に湾曲した部品で発生するスプリングバックである。キャンバーバックは Fig. 2(a) に示すように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。Fig. 2(b) に従来工法で量産材の強度の上下限材を成形した際のパンチ底とフランジの応力-ひずみ関係の模式図を示す。材料強度が変動すると、プレス成形下死点での応力が変動し、寸法精度変動が生じる。材料強度変動が大きいほど、寸法精度変動は大きくなる。キャンバーバックの寸法精度変動を低減するためには、

Fig. 1 Camber back of curved part

(a) Stress distribution at bottom dead point

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

Fig. 2 Mechanisms of camber back and its scattering

キャンバーバックの要因となるパンチ底とフランジの応力を低減することが有効である。

そこで、バウシinger効果に着目し、Fig. 3 に示す寸法精度変動を抑制するプレス成形方法を開発した。開発工法は 2 工程からなり、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 工程目はリストライクする。本開発技術は Fig. 4(a) に示すように 2 工程目プレス成形下死点でスプリングバック量に影響が大きいパンチ底とフランジの応力が反転するように 1 工程目を設計する技術である。Fig. 4(b) に上下限材を適用した際のパンチ底とフランジの応力-ひずみ関係を示す。異なる強度の材料で成形した場合、2 工程目において応力を反転させ、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ことにより、材料強度の感受性を低減する。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 回で成形した場合よりも小さくなり、スプリングバック量が小さくなる。以上の結果により、本開発技術によれば、スプリングバック量とスプリングバックの材料強度感受性を低減できると考えられる。

Fig. 3 Newly developed 2-step press-forming method

(a) Stress distribution at bottom dead point of 2nd process

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

Fig. 4 Mechanism of camber-back suppression

3. FEM による開発工法の寸法精度変動低減の検証

3.1 FEM 解析条件

前章の効果を確認するため、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.9.71、材料モデルはバウシinger効果を表現可能な

Yoshida-Uemori モデル(以下 YU モデルと省略)を用い、シェル要素で検討した。プレス成形解析は動的陽解法、スプリングバック解析は静的陰解法とした。Fig. 5 に示すような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。材料強度変動の感受性を評価する目的で、Table 1 に示す機械的特性の 590 MPa~1180 MPa 材の冷延鋼板(t1.4 mm)を使用した。成形工程は Fig. 6 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 とした。本研究では 1 工程目と 2 工程目のパンチ底金型曲率半径を R1000~R1600 に縦壁高さ一定の下組み合わせて検討した。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。

Fig. 5 Model shape and its dimensions

Table 1 Mechanical properties of each steels

Steel	Yield Strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
JSC590Y	426	621	27.8
JSC980Y	685	1037	17.2
JSC1180Y	856	1242	13.4

Fig. 6 Tool configuration of developed 2-step press forming

3.2 YU モデルによるバウシinger効果の再現性

Table 1 に示す各材料の引張圧縮試験結果と、試験結果より作成した YU モデルの応力-ひずみ線図を Fig. 7 に示す。各材料の引張圧縮挙動が YU モデルで再現されている。また、材料強度の増加に伴いバウシinger効果が大きくなることが確認できる。

ここで 590 MPa 材と 1180 MPa 材の YU モデルを比較した図を Fig. 8 に示す。引張領域では大きな応力差が発生するが、引張から圧縮になる際にバウシinger効果が発現し、590 MPa 材と 1180 MPa 材の線が交わる点が現れる。このとき、それぞれの材料の応力差が低減し、各材料間の寸法

精度変動が抑制されると考えられる。

Fig. 7 Tension and compression test result for each material

Fig. 8 Results for 590 MPa steel and 1180 MPa steel

3.3 FEM 解析結果

1 工程目の金型曲率半径を R1000~R1600 で成形し、2 工程目を基準の R1600 でリストライクした場合の寸法精度変動を検討した。1 工程目の金型曲率半径と 1 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 Fig. 9 に示す。全材料で 1 工程目金型曲率半径が R1200 以下の条件において、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 R1600 よりも小さくなった。Fig. 10 に各 1 工程目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示す。1 工程目金型曲率半径

Fig. 9 Effects of punch top radius of curvature of 1st process on radius of curvature of web of panel formed in 1st process

Fig. 10 Effects of tensile strength of steel sheet on radius of curvature of web of panel formed in 2nd processes

が R1100 の条件で 590 MPa~1180 MPa 材の寸法精度変動が最小となった。以上より、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 工程目はリストライクすることで寸法精度変動が小さくなることがわかった。

3.4 考察

(1)バウシinger効果の影響 バウシinger効果の影響を調査するために、Table 2 に示す金型形状を用い従来工法と開発工法を比較した。A 条件は基準の R1600 で一回成形、B 条件は従来の最終工程での見込みを想定し、1 工程目で基準の R1600、2 工程目で基準よりも小さい R1400 で成形、C 条件は開発工法の成形条件とし、1 工程目で基準よりも小さい R1100、2 工程目で基準の R1600 で成形した。

Fig. 11 に各金型形状での材料強度と 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示す。A 条件は基準の R1600 からスプリングバックするため曲率半径が大きくなり、材料強度の増加に伴い曲率半径が大きくなる。B 条件は 2 工程目で基準より小さい R1400 で成形するため、基準の R1600 に比べて小さい曲率半径となり、寸法精度変動が発生する。C 条件は各材料強度で基準の R1600 に比べて

Fig. 11 Amount of camber back in developed forming method and conventional method

Fig. 12 Amount of camber back in YU model and IH model

小さい曲率半径になるが、A 条件と B 条件に比べて寸法精度変動が低減した。従来工法である B 条件の場合 590 MPa~1180 MPa 材の曲率半径差が 75 mm だったのに対し、開発工法である C 条件では 15 mm となり、従来工法に比べて 80 %低減した。

バウシinger効果の影響を検討するために、C 条件の開発工法に対してバウシinger効果を考慮しない等方硬化モデル(以下 IH モデルと省略)での FEM 解析結果を Fig. 12 に示す。YU モデルでの 590 MPa~1180 MPa 材の曲率半径差が 15 mm だったのに対し、IH モデルでは 37 mm となり、バウシinger効果を考慮することで寸法精度変動が低減した。

従来工法の B 条件と開発工法の C 条件の 590 MPa 材、1180 MPa 材の 2 工程目成形下死点応力分布を Fig. 13, Fig. 14 に示す。応力分布は空間固定された XYZ 座標系の X 方向板厚平均応力を示し、図中の数字はパンチ底、フランジの平均応力を示す。なお、本モデルで発生するキャンパーバックは構造体として発生するスプリングバックとなる。したがって、パンチ底とフランジに発生する板厚方向の応力差は無視できる。従来工法ではパンチ底に引張応力、フランジに圧縮応力が発生し、開発工法ではパンチ底に圧縮応力、フランジに引張応力が発生した。

C 条件での寸法精度変動低減メカニズムを明らかにするために、A 条件と C 条件の成形中のパンチ底の平均応力と平均ひずみの推移を Fig. 15(a)と(b)に示す。A 条件は成形中に引張応力が発生し、成形下死点で最大となる。また 590 MPa 材と 1180 MPa 材の成形下死点では約 360 MPa の応力差が発生した。

Table 2 Radius of curvature

Mold shape	Punch top radius of curvature of 1 st process [mm]	Punch top radius of curvature of 2 nd process [mm]
A	R1600	-
B	R1600	R1400
C	R1100	R1600

Fig. 13 Stress distributions at bottom dead center in conventional forming method

Fig. 14 Stress distributions at bottom dead center in developed forming method

Fig. 15 Stress and strain transitions at punch top

一方、C 条件は二工程目で応力が反転して圧縮側に推移する。このとき、バウシンガー効果により 590 MPa 材と 1180 MPa 材の応力差が約 120 MPa に低減する。したがって C 条件では 1 工程目曲率半径を小さくすることにより 2 工程目でバウシンガー効果が発生し、各材料強度間の応力差が低減した結果、寸法精度変動が低減した。

(2)壁開きの影響 長手方向に湾曲したハット断面部品では、キャンパーバックと壁開きが連動して発生する。そこで、壁開きがキャンパーバックに与える影響を検討した。まず、Fig. 16 に示す長手方向中心断面でパンチ底から 30 mm の位置で壁開き量を測定した。1 工程目の金型曲率半径と 2 工程目のスプリングバック後の壁開き量の関係を Fig. 17 に示す。材料強度の増加に伴い壁開き量も大きくなった。

パンチ肩の角度変化による壁開きを抑制するために、パンチ肩へ C 面取り¹⁾を適用(Fig. 18)した上で、開発工法の効果を検討した。Fig. 19 に 1 工程目の金型曲率半径が 2 工程目スプリングバック後の壁開き量に与える影響を示す。

Fig. 16 Definition of wall opening

Fig. 17 Effects of punch top radius of curvature of 1st process and steel grade on wall opening

Fig. 18 Punch R shapes in each forming process

Fig. 19 Effects of punch top radius of curvature of 1st process and steel grade on wall opening

Fig. 20 Effects of tensile strength on radius of curvature of web of panel formed in 2nd processes

各材料強度および 1 工程目の金型曲率半径において、対策前の Fig. 17 に比べて著しく壁開きが抑制された。

次に壁開き対策を施した場合の、各 1 工程目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 Fig. 20 に示す。開き対策前の Fig. 10 と比較して 980 MPa 材と 1180 MPa 材の曲率半径が大きくなり、1 工程目の金型曲率半径が R1000 の条件で寸法精度変動が最も抑制された。以上のことから、壁開きとキャンパーバックは連動して発生し、壁開きが抑制されると曲率半径が大きくなる。したがって、本工法を適用する場合、壁開きの影響を考慮した上で、1 工程目形状の設計が必要であることがわかった。

4. プレス実験による開発技術の効果実証

4.1 実験方法および条件

第 3 章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。成形品の一例を Fig. 21 に示す。壁開きの影響を無くすために、Fig. 18 に示す C 面取りを適用した。用いた材料は Table 3 に示す機械的特性の 590 MPa 材, 980 MPa 材, 1180 MPa 材 (t1.4 mm) の 3 鋼種とした。実験条件を Table 4 に示す。金型 A は従来工法 (対策無し), 金型 B は開発工法を示している。

Fig. 21 Curved panel formed in press trial

Table 3 Mechanical properties of each steels

Steel	Yield Strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
JSC590Y	454	650	32.8
JSC980Y	676	1046	15.7
JSC1180Y	856	1242	13.4

Table 4 Experimental conditions

Mold shape	Punch top radius of curvature of 1 st process [mm]	Punch top radius of curvature of 2 nd process [mm]
A	R1600	R1600
B	R1000	R1600

4.2 実験結果

各金型形状での材料強度と 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 Fig. 22 に示す。FEM および実験結果共に 1 工程目の金型曲率半径を R1000 ですることにより寸法精度変動が低減し、実験において 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低減効果が確認された。

Fig. 22 Effects of tensile strength of steel sheet on radius of curvature of web of panel formed in 2nd processes in experiment and FEM

5. 結 言

長手方向に湾曲した部品を成形した際に発生するキャンパーバックに対して、バウシンガー効果を活用したプレス成形工法を開発し、次の結論を得た。

- (1) 1 工程目の金型曲率半径を 2 工程目より小さく成形し、2 工程目でリストライク成形することにより、590 MPa～1180 MPa 材の寸法精度変動が低減した。
- (2) 従来工法と本工法を FEM 解析で比較した結果、従来工法では 2 工程目下死点でパンチ底に引張応力、フランジに圧縮応力が発生し、各材料強度間の応力差が大きくなる。本工法では 2 工程目下死点でパンチ底に圧縮応力、フランジに引張応力が発生し、応力反転によりバウシンガー効果が発現することで、各材料強度間の応力差が小さくなり、寸法精度変動が 80 % 低減した。
- (3) 実験により本工法の効果を確認した結果、基準曲率半径 R1600 に対して、1 工程目の金型曲率半径を R1000 で成形することにより、対策無しに比べて 590 MPa～1180 MPa 材の寸法精度変動が約 95 % 低減し、本工法の効果が確認された。

参 考 文 献

- 1) Kunishige, K.: J. Soc. Mater. Sci. Jpn., **50**-1(2001), 47-54.
- 2) Seto, K.: Trans. Soc. Automot. Eng., **64**-11(2010), 29-34.
- 3) Narita, H.: Trans. Soc. Automot. Eng., **69**-2(2015), 6-11.
- 4) Suehiro, M.: Trans. Soc. Automot. Eng., **65**-6(2011), 23-27.
- 5) Hayashi, H.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **52**-606(2011), 756-760.
- 6) Iwaya, J.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **52**-606(2011), 772-776.
- 7) Matsumura, T. & Kitano, M.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **46**-534(2005), 600-606.
- 8) Yamano, T. & Iwaya, J.: Proc. 53th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast., (2002), 249-250.
- 9) Momodori, M. & Mita, T.: Proc. 2006 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (2006), 41-42.
- 10) Sato, K., Yoshida, T., Isogai, E., Hashimoto, K. & Kuriyama, Y.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **52**-606 (2011), 816-820.
- 11) Komine, H., Asakura, M., Geka, T., Kiso, T., Takamura, M., Sugiyama, T. & Asakawa, M.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **57**-660(2016), 60-65.
- 12) Sasahara, T.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **46**-534(2005), 607-611.
- 13) Maeda, S. & Eguchi, H.: Press Working, **47**-7(2009), 34-39.
- 14) Yoshida, F. & Uemori, T.: Int. J. Plast., **18**(2002), 661-686.
- 15) Uemori, T.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **57**-662(2016), 194-198.
- 16) Yakou, T. & Hasegawa, T.: Tetsu-to-Hagané, **70**-11(1984), 1551-1558.
- 17) Urabe, M., Saito, T. & Kano, H.: JP. 2009-262168 (2012).