

CAE を活用した超ハイテン成形技術の開発

Development of Press Forming Technologies for Ultra High Strength Steel Sheets Utilizing Computer Aided Engineering

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 主任研究員 (課長)
ト部 正樹 URABE Masaki 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 (副部長)・工学博士
藤井 祐輔 FUJII Yusuke 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 (副課長)

要旨

超ハイテン (引張強さ 780 MPa 以上の高強度鋼板) のプレス成形において, 割れ・しわやスプリングバック起因の寸法精度不良が大きな課題である。これらの課題に対し, JFE スチールは CAE を活用した種々の予測技術や新成形工法を開発した。伸びフランジ割れは従来の成形限界線図では予測が不可能であるが, ひずみ勾配を用いた割れ予測技術の開発により予測が可能となった。また, 効果的なスプリングバック低減を目的に, 寸法精度不良の原因となる部位や応力を特定するスプリングバック要因分析技術を開発した。張出し部の割れやしわを抑制する新成形工法として, 最終成形工程の前工程の成形品形状を最適に設計する予成形技術を開発した。湾曲部品であるフロントサイドメンバーや A ピラーロアの試作に予成形技術を適用し, 割れ・しわ抑制に対する有効性を確認した。

Abstract:

Problems in press forming, such as fractures and wrinkles, and poor dimensional accuracy due to springback, are much more serious in ultra high strength steels (UHSS) whose tensile strength is more than 780 MPa than in mild steels. JFE Steel has developed various technologies for defect prediction and new forming method utilizing computer aided engineering (CAE). Three of the developed technologies are presented in this paper. Although stretch flange fractures cannot be predicted with the conventional forming limit diagram, it is possible to predict stretch flange fractures accurately by the developed method using not only the maximum principal strain but also the maximum principal strain gradient in the radial direction. In order to find effective solution against springback, a technology of springback factor analysis was developed, which can spot the area holding stresses which govern the springback. Regarding a new forming technology for UHSS's, preforming is effective to improve formability of UHSS's, and optimization method of the preformed shape was developed. The effects of preforming on fractures and wrinkles were verified in the press trials of a front side member and A-pillar lower.

1. はじめに

燃費向上による CO₂ 排出量低減を目的とした車体重量の軽量化と乗員保護を目的とした衝突安全性の向上は, 自動車開発における大きな課題である。これらに対応するために自動車骨格部品へ高強度鋼板が適用されている。近年では引張強さ 980 MPa 以上の超ハイテンの適用が拡大しており, フロントサイドメンバーや A ピラーロアに代表される湾曲した全体形状を有する難成形部品への適用も増加している。

一般的に鋼板の加工性は高強度材ほど低下するため¹⁾, 超ハイテンの冷間プレス成形では, 割れやしわの発生が課題となる。加えて, スプリングバックも大きくなるため寸法精度確保も難しくなる。これらの課題の対策検討では, 近年急速に進歩した有限要素法などの CAE が活用されており,

割れ・しわ・スプリングバックの予測や新しい冷間プレス成形工法が開発が行われている。超ハイテンでは, せん断端面から発生する伸びフランジ割れやスプリングバックによる寸法精度不良の課題が顕著であり, CAE 解析での予測・判定技術が重要である。JFE スチールではひずみ勾配を用いた伸びフランジ割れ判定技術^{2,4)} およびスプリングバックの要因となるプレス下死点応力を特定するスプリングバック要因分析技術^{2,5,6)} を開発した。

また, 上述したフロントサイドメンバーなどの難成形湾曲部品の成形では, 割れ・しわの抑制が可能で新しいプレス成形工法が開発が必要である。一般的な複数工程のプレス成形工程では, 最終製品形状に近い形状に成形後, 最終工程で製品形状に成形される。JFE スチールでは, 最終成形工程の前工程成形の成形品形状を最適に設計する予成形技術を開発した。本報では予成形技術を活用した 2 つの新プレス成形工法を紹介する^{7,8)}。

2017年10月27日受付

2. 伸びフランジ割れ判定技術

薄鋼板のプレス成形 CAE 解析における割れ予測は一般的に成形限界線図(FLD)が用いられる。しかし、ブランクエッジなどせん断端面で発生する割れは、破断に至るメカニズムが面内の変形限界と異なるため、FLD を用いても判定をすることができない。伸びフランジ変形限界には、材料特性⁹⁾や、せん断加工条件^{10, 11)}とともに、ひずみ勾配¹²⁾が影響する。材料特性やせん断加工条件の影響については定量的な検討がされているが、ひずみ勾配についての定量的な検討はほとんどなされていない。そこで種々の鋼板を用いて、ひずみ勾配を変化させた数種類の穴広げ試験を行い、伸びフランジ変形限界に及ぼすひずみ勾配の影響を定量的に明らかにし、CAE 解析による伸びフランジ割れの予測技術を開発した。

2.1 伸びフランジ限界に及ぼすひずみ勾配の影響

伸びフランジ変形限界には、せん断端面の最大主ひずみ(円周方向)と直交する方向(半径方向)の最大主ひずみの勾配(以下、半径方向ひずみ勾配)が強く影響する。本節では半径方向ひずみ勾配が割れ限界時の最大主ひずみに及ぼす影響を調査した結果を述べる。

2.1.1 実験条件

供試材として表 1 に示す軟鋼板から 980 MPa 級ハイテン(板厚 1.2 mm)までの 5 種類の鋼板を用意し、種々の穴広げ試験を実施した。穴広げ試験条件を表 2 に示す。打抜き穴径を 3 水準、パンチ形状は頂角が 60 度の円錐と平底円筒

表 1 供試材の機械的特性

Table 1 Mechanical properties of examined steels

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	λ (%)
A	168	309	49	155
B	330	459	35	107
C	419	643	28	62
D	603	823	20	71
E	787	1 005	18	47

λ : Hole expansion ratio with conical punch

表 2 穴広げ試験条件

Table 2 Experimental conditions of hole expansion tests

initial hole diameter in blank (mm)	Punch shape	Applied steel
10, 25, 50	60° conical	A, B, C, D, E
10	ϕ 50 mm cylindrical	A, B, C
25	ϕ 80 mm cylindrical	A, B, C
	ϕ 50 mm cylindrical	D, E
50	ϕ 150 mm cylindrical	A, B, C
	ϕ 100 mm cylindrical	D, E

の 2 種類として、これらを組み合わせた 6 条件において穴広げ試験を行った。なお、板厚に対する打抜きクリアランスの割合は 12.5% 一定とし、平底円筒穴広げ試験では破断位置を穴縁とするため、材料特性に応じてパンチ径を適宜変更した。

2.1.2 変形限界ひずみに及ぼす半径方向ひずみ勾配の影響

穴縁部の変形限界ひずみに及ぼす半径方向ひずみ勾配の影響を図 1 に示す。変形限界ひずみは穴縁のひずみ量を円周方向で均一と仮定して限界穴広げ率より算出した。半径方向ひずみ勾配は、破断穴径における穴縁から半径方向距離 5 mm 間での最大主ひずみの平均勾配と定義し、CAE により算出した。CAE におけるソフトウェアは Livermore Software Technology Corp. 製の LS-DYNA[®] ver.971 を使用した。この結果、穴縁部の変形限界ひずみは材料により異なるが、いずれの材料も半径方向ひずみ勾配の増加にともないほぼ線形に増加することが分かった。これは、半径方向ひずみ勾配が大きくなると、穴縁が単軸引張のひずみ局所化条件に達してもその内部ではその条件に達していないことによるひずみの局所化抑制効果や、ひずみの少ない領域のくびれ成長抑制効果^{12, 13)}が大きくなるためと考えられる。

以上の検討により、打抜き穴径や穴広げパンチ形状などの加工条件によらず半径方向ひずみ勾配と穴縁の最大主ひずみによって各材料の破断限界が整理できることが分かる。

2.1.2 変形限界ひずみに及ぼすクリアランスの影響

ハイテンの穴広げ率はせん断加工時のクリアランスによって大きく変化することから¹⁰⁾、伸びフランジ変形部の成形可否は、半径方向ひずみ勾配に加えクリアランスも考慮して判定すべきであるといえる。そこで、クリアランスを考慮した変形限界ひずみについて、鋼 B を供試材として検討した。

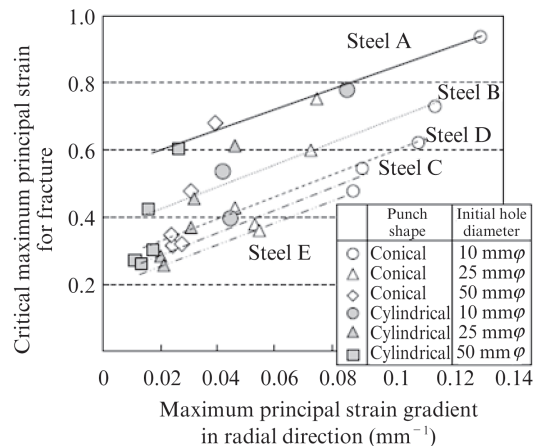


図 1 変形限界ひずみに及ぼす半径方向ひずみ勾配の影響

Fig. 1 Effect of maximum principal strain gradient in radial direction on critical strain for fracture

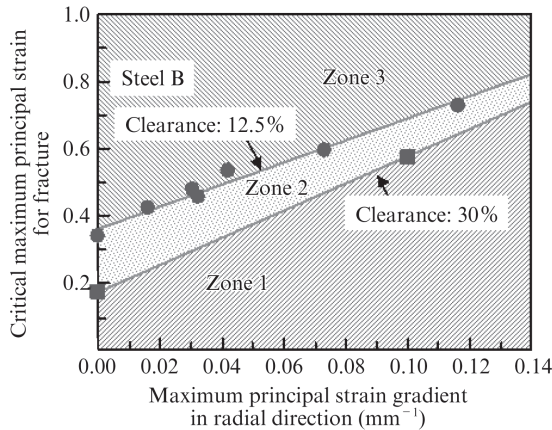


図2 クリアランス影響を考慮した変形限界ひずみに及ぼす半径方向ひずみ勾配の影響

Fig. 2 Effect of maximum principal strain gradient in radial direction on critical strain for fracture considering blanking clearances

変形限界ひずみが最も小さくなると想定されるクリアランス約30%の条件¹⁰⁾で、打抜き径10mmでの円錐穴広げ試験と短冊引張試験を実施し、変形限界ひずみに及ぼすクリアランスの影響を調査した。

図1の鋼Bにクリアランス約30%の限界線を追加した結果を図2に示す。図2より変形限界ひずみは半径方向ひずみ勾配に加えクリアランスの影響を強く受けることが分かる。CAE解析において伸びフランジ変形部の成形可否を、ひずみ勾配とクリアランスを考慮した変形限界線で判定する場合、Zone 1では成形可能、Zone 3では成形不可、Zone 2の場合は端面加工時のクリアランス次第では成形可能、すなわち割れの回避にはクリアランスの管理が重要である。

2.2 CAE 成形解析への適用

前節までの結果より伸びフランジ割れは半径方向のひずみ勾配と材料の変形限界ひずみを用いて判定可能であることが分かった。本節ではこの判定方法を汎用のCAE解析に組み込み、実部品形状で行った判定結果について述べる。

2.2.1 実プレス成形結果

プレス実験はBピラー下部のモデル金型で、穴広げ性の異なる2種類の590MPa級合金化溶融垂鉛めっき鋼板(以下GA, 板厚1.2mm)を用いて行った。プレス品の全体形状を写真1に、各材料の機械的特性を表3に示す。JFEスチールの高成形性高強度鋼板の一つであるJEFORMA 590 GA Type2は高EI-高λ型の材料であり、汎用DPに比べ穴広げ率が20%以上高い。写真2に示すように汎用DPでは伸びフランジ変形部において割れが発生した。

2.2.2 プレス成形解析結果

割れが発生した汎用DP材の結果についてCAE解析を行った。一般的な割れ判定で行われるFLD評価結果を図3に示す。割れなしの判定となっており、正確な伸びフランジ



写真1 プレス部品の全体形状 (Bピラー下部モデル)

Photo 1 Whole appearance of pressed part of B pillar model

表3 プレス実験に供した材料の機械的特性

Table 3 Mechanical properties of steel used in press forming

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	λ (%)
JEFORMA 590GA Type2	437	624	34	92
Conventional 590DP-GA	398	640	32	68

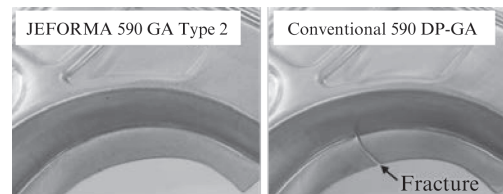


写真2 プレス成形実験結果

Photo 2 Result of press forming experiment

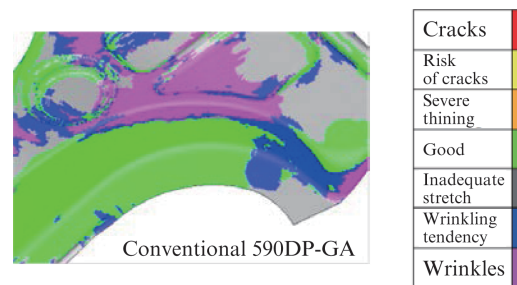


図3 一般的なFLDを用いた割れ判定結果

Fig. 3 Fracture judgment using conventional FLD

割れを判定できないことが分かる。

プレス成形実験で割れ発生した部分に関してブランク端面でのひずみ(最大主ひずみ)と直交方向のひずみ勾配をCAEにより予測した結果を別途求めた伸びフランジ限界線とともにプロットした結果を図4に示す。その結果、汎用DPではプロットは割れ限界線の上側にあり、割れが発生すると判定された。このCAE結果は実験結果の割れ状況と一致しており、ひずみ勾配を用いた伸びフランジ割れ評価手

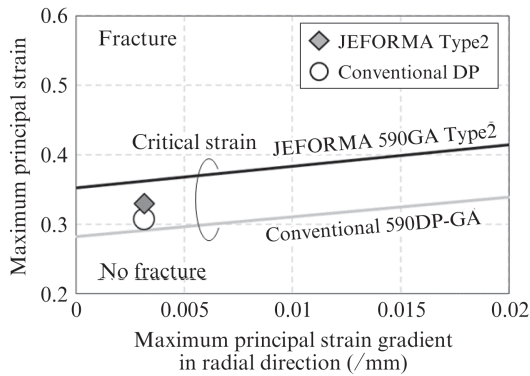


図4 半径方向ひずみ勾配を用いた評価結果

Fig. 4 Fracture evaluation using strain gradient in radial direction

法は実部品においても有効である。

3. スプリングバック要因分析技術

超ハイテンのプレス成形で発生するスプリングバックは非常に大きいため、従来の金型見込み技術で目標精度を得るには多くの金型修正が必要となっている。スプリングバックの低減にはスプリングバックの発生要因となる応力を特定し、その応力を低減する対策が必要である。複雑な形状を有する自動車部品において効果的に対策を講じるために、CAE 解析で要因応力を特定するスプリングバック要因分析手法を開発した。

3.1 スプリングバック要因分析の手順

スプリングバックは、プレス成形下死点において成形品内部に存在する応力（下死点応力）が、金型離型にともない解放されることにより発生する変形である。スプリングバック挙動と下死点応力を関連づける手法が、スプリングバック要因分析手法である。これは解析で得られたある特定領域の下死点応力をゼロに置き換えて行ったスプリングバック解析結果と基準となる通常の方法で行ったスプリングバック解析結果を比較することで、上記のある特定領域の下死点応力がスプリングバックに及ぼす影響を知る方法である。スプリングバック要因分析手法の概念図を図5に示す。

3.2 実部品を用いたスプリングバック要因分析

3.2.1 対象部品と供試材

前述のスプリングバック要因分析手法を自動車骨格部品であるフロントピラー・レインフォースを模擬した部品に適用した。部品形状を図6に示す。この部品は細長く、長手方向に湾曲しているため、ねじれや反りなど複雑なスプリングバックが発生する。プレス成形は、パッドを用いない1工程の曲げにより行った。供試材は980 MPa級GA鋼板、板

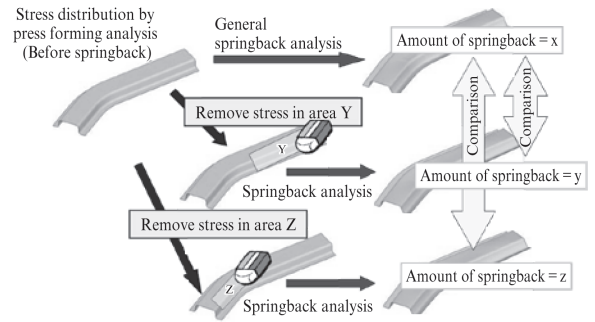


図5 スプリングバック要因分析手法の概念図

Fig. 5 Schematic diagram of springback factor analysis



図6 検討に使用した部品形状（フロントピラー R/F）

Fig. 6 Part shape of front pillar reinforcement

表4 供試材の機械的特性

Table 4 Mechanical properties of steel used

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	r-value
JAC980Y	687	1 011	19	0.9

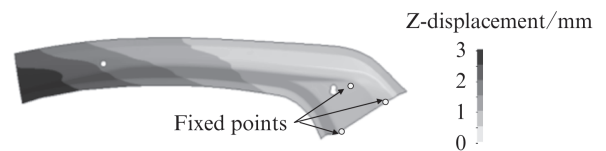


図7 スプリングバック解析結果

Fig. 7 Springback analysis result

厚は1.4 mmである。機械的特性を表4に示す。

3.2.2 スプリングバック要因分析結果

スプリングバック要因分析に必要なプレス成形解析とスプリングバック解析にはLS-DYNA® ver.971を使用した。

スプリングバック解析の結果、図7に示すように長手方向のねじれと反りが発生した。本報告ではねじれを対象に要因分析を行った。ねじれの評価は、図6に示すように部品右側に固定点を3点設定し、部品左側先端の2点から算出したねじれ角により行った。この評価方法による部品のねじれ角は3.9°であった。

プレス成形の下死点応力は、図8に示すように、部品全体に引張と圧縮応力が複雑に分布している。スプリングバック要因分析は図9のようにAからFの6領域に分割して評価を行った。評価結果を図10に示す。領域B、Eの応力がねじれ角を小さくする働きを持つことが分かる。したがって、

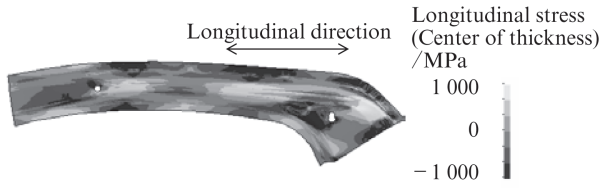


図8 プレス成形下死点の応力分布

Fig. 8 Stress distribution at bottom dead point before springback

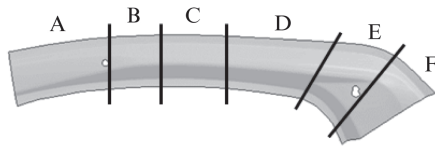


図9 スプリングバック要因分析で用いた分割領域

Fig. 9 Divided 6 areas for springback root cause analysis

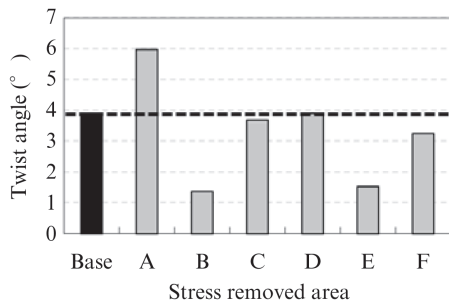


図10 ねじれ角度に及ぼす各領域の下死点応力の影響

Fig. 10 Effect of stress at bottom dead point in each areas on twist angle

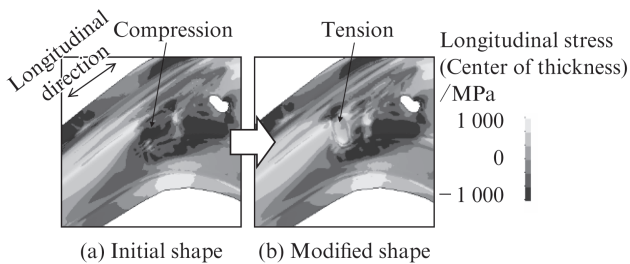


図11 付与した凹形状と成形解析での下死点応力分布変化

Fig. 11 Added bead shape and change in stress distribution at bottom dead point in press forming

工法や部品形状に工夫を加え、領域 B, E の応力を低減することにより、ねじれ角を小さくすることが可能と推測される。

そこで、領域 E の圧縮応力に対するスプリングバック対策を検討した。圧縮応力の発生要因を調査した結果、成形途中に材料余りが発生し、その材料余り部が成形されることにより下死点で圧縮応力が発生すると考えられる。よって対策として、圧縮応力部に凹形状を設けた。図 11 に、設けた凹形状および下死点応力分布を示す。凹形状の付与によ

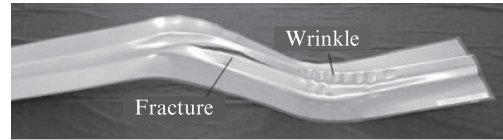


写真3 通常ドロー工程で成形したフロントサイドメンバーモデル部品

Photo 3 Front side member formed by conventional draw process

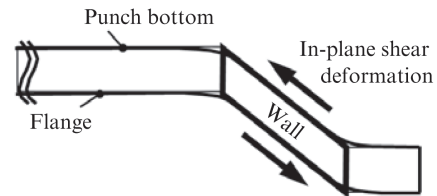


図12 縦壁への面内せん断変形の導入

Fig. 12 In-plane shear deformation in wall area

り領域 E に存在した圧縮応力が引張応力に変化することが確認された。また、スプリングバック解析の結果、ねじれ角が 3.9° から 2.2° と大幅に低減することが確認された。

4. 予成形技術を活用した新工法の開発

複数工程のプレス成形の場合、通常の工程では前工程で製品に近い形状に成形し、次のリストライク工程で製品形状に成形される。超ハイテンは延性が低く、降伏強度が高いため、フロントサイドメンバーや A ピラーロアなどの湾曲した全体形状の難成形部品では、割れやしわの課題が顕在化する。この課題に対し、複数工程の各工程を有効に活用する予成形技術を開発した。本技術では前工程の予成形品形状が重要であり、CAE を活用した最適形状の設計方法および予成形工法を開発した。

4.1 フロントサイドメンバーモデルへの適用

フロントサイドメンバーに代表される側面視において湾曲を有する部品を通常のドロー工程で成形する場合、湾曲の外内で材料の過不足が発生するため、写真 3 に示すように曲がり外側の割れ、内側のしわが課題である。これらの抑制には、図 12 に示すように縦壁を面内でせん断変形させることが有効であり、縦壁に相当する領域に面内せん断変形を導入可能な予成形工法を開発した。予成形工程は、写真 4 (a) に示すような短冊ブランクの深絞り成形であり、縦壁に相当する領域に面内せん断変形の付与が可能である。次工程で稜線を曲げることで部品形状に成形することができる。表 5 の機械的特性を有する 1180 MPa 級 GA 鋼板 (板厚 1.6 mm) を用いて開発工法による試作を行った結果、写真 4 (b) に示すように割れやしわの抑制が可能であること

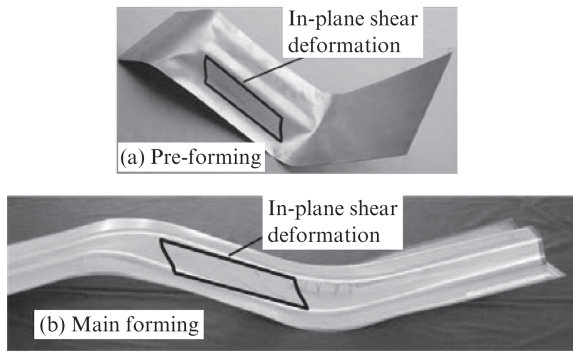


写真 4 試作品外観写真：(a) 予成形, (b) 本成形
Photo 4 Trial parts: (a) pre-forming, (b) main forming

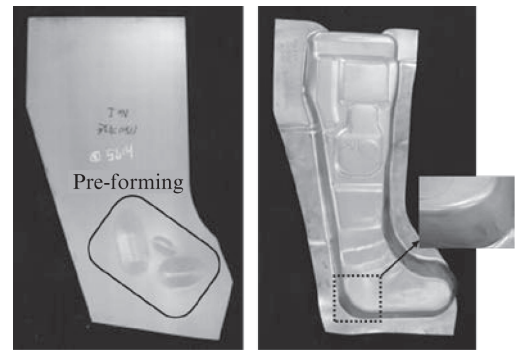


図 14 部分張出し予成形ブランクおよびドロー成形品
Fig. 14 Localized pre-formed blank and pressed part

表 5 供試材の機械的特性

Table 5 Mechanical properties of steel used

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)
JAC1180YL	819	1 234	11

表 6 供試材の機械的特性

Table 6 Mechanical properties of steel used

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)
JAC1180YL	878	1 182	10

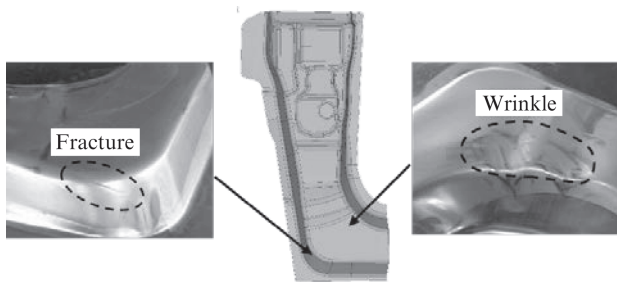


図 13 A ピラーロアのモデル部品形状と成形課題

Fig. 13 Part shape of A pillar lower and problems in press forming

が確認された。

4.2 A ピラーロアモデルへの適用

A ピラーロアは上面視において湾曲する L 字形の骨格部品である。図 13 に示すように通常のドロー工程で成形した場合、湾曲部の天板に発生するしわと、車両下部のパンチ肩に発生する絞り一張出し成形での割れが課題である。しわについては発生領域への局所パッドの適用で抑制可能であることから、割れ対策として予成形の適用を検討した。

車両下部の割れは、周辺からパンチ肩への材料供給が不足し、ひずみが局所的に集中するために発生する。そこで、成形時にパンチ底（天板）の低ひずみ領域からパンチ肩の割れ危険部に材料を供給することでひずみを分散させる狙いで、ブランクの適正な位置に部分的な張出し予成形形状を付与した。図 14 に最適な部分張出し予成形を付与したブランクと、そのブランクを用いて局所パッド付きドロー成形した試作品を示す。試作には、表 6 に示す機械的特性を有する 1 180 MPa 級 GA 鋼板（板厚 1.4 mm）を用いた。部分

張出し予成形と局所パッドにより割れ、しわが抑制できることが示された。また、ブランク工程で予成形形状を成形することで工程数や金型費用の削減が可能である。

5. おわりに

超ハイテンの冷間プレス成形は、今後も自動車骨格部品に多く適用されることから、課題である割れ、しわ、寸法精度不良の対策技術を開発した。

伸びフランジ割れは一般的な FLD では判定ができなかったが、ひずみ勾配を用いた伸びフランジ割れ予測技術を開発し、正確に予測することが可能となった。

また、寸法精度不良の原因となる部位や応力箇所を特定するスプリングバック要因分析技術の開発により、効果的なスプリングバック対策の立案が可能となった。

フロントサイドメンバーや A ピラーロアなどの湾曲を有する難成形部品の新しいプレス成形工法として、最終工程前の最適な成形品形状を設計する予成形技術を適用した工法を開発した。開発工法を適用したモデル部品の試作を行い、割れやしわに対する効果を確認した。

参考文献

- 1) 占部俊明, 細谷佳弘. 塑性と加工. 2005, vol. 46, no. 534, p. 560-564.
- 2) 石渡亮伸, 卜部正樹, 稲積透. JFE 技報. 2012, no. 30, p. 19-24.
- 3) 飯塚栄治, 卜部正樹, 山崎雄司, 稲積透. 塑性と加工. 2010, vol. 51, no. 594, p. 700-705.
- 4) JFE スチール. 飯塚栄治. 特許第 4935713 号.
- 5) 平本治郎, 卜部正樹, 石渡亮伸, 占部俊明, 吉田総仁. 塑性と加工. 2015, vol. 56, no. 658, p. 955-960.
- 6) JFE スチール. 卜部正樹. 特許第 4894294 号.
- 7) JFE スチール. 藤井祐輔. 特許第 6112226 号.

- 8) JFE スチール. 新宮豊久. 特許第 6191846 号.
- 9) 中川威雄, 滝田道夫, 吉田清太. 塑性と加工. 1970, vol. 11, no. 109, p. 142-151.
- 10) 飯塚米治, 比良隆明, 吉武明英. 塑性と加工. 2005, vol. 46, no. 534, p. 625-629.
- 11) 豊田大介, 佐藤義人, 卜部正樹, 玉井良清, 吉武明英. 第 58 回塑加連講論. 2007, p. 537-538.
- 12) 中川威雄. 塑性と加工. 1978, vol. 19, no. 206, p. 227-235.
- 13) 後藤學. 塑性と加工. 1993, vol. 34, no. 388, p. 454-461.



新宮 豊久



卜部 正樹



藤井 裕輔