

ハイテン適用拡大に貢献するプレス成形解析技術

Press Forming Analysis Contributing to the Expansion of High Strength Steel Sheet Applications

石渡 亮伸 ISHIWATARI Akinobu 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)
卜部 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 (課長)・工学博士
稲積 透 INAZUMI Toru JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部長・工学博士

要旨

自動車用高張力鋼板 (ハイテン: High tensile strength steel) の適用拡大に向けて課題となっている (1) 伸びフランジ割れ, (2) 寸法精度不良に対する技術を開発した。伸びフランジ割れを正確に予測するために, ひずみ勾配を用いた割れ予測する技術を開発した。本技術により, 従来の成形限界線図での割れ予測では不可能であった伸びフランジ割れの予測が可能となった。また, ハイテン材のスプリングバック低減を目的に, ハイテンプルス部品の寸法精度不良の原因となる部位, 応力箇所を特定するスプリングバック要因分析技術を開発した。本手法により効果的なスプリングバック対策をたてることが可能となった。

Abstract:

JFE Steel has developed new technologies in order to predict stretch flange fracture and to reduce springback for applying high tensile strength steel sheet to more diverse automobile parts. The technology which uses maximum principal strain gradient was developed to predict stretch flange fracture. By this technology, the accurate prediction of stretch flange fracture, which cannot be predicted by forming limit diagram, was obtained. The factor analysis technology of springback was developed to reduce springback in high strength steel press parts. The analysis specifies the area of parts which affects most on springback. By using the analysis, it became possible to obtain the effective solution to reduce the springback.

1. はじめに

近年, CO₂ などの環境負荷物質低減の観点から自動車の燃費の向上が求められ, 自動車の軽量化が図られている。また, 車体のさらなる衝突安全性能の向上への対応といった観点から, 車体の高強度化も求められている。この課題に対応するために, 構造部品へのハイテン (High tensile strength steel) の適用が拡大している¹⁾が, プレス成形では割れ, 特に板端部での割れへの対応および部品寸法精度の確保が重要な課題となっている²⁾。ハイテンの成形では成形様式が絞り成形からフォーム成形へ変わってきたために, これまでの成形限界線図 (FLD) による破断判定では適切な判定のできない板縁からの割れが多発してきている。このような板端部からの割れはフランジアップ加工, 穴広げ (バーリング) 加工などのフランジ部を伸ばす成形時に発生し, 伸びフランジ割れといわれる。このような割れの判定を計算機上で行うために, 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³⁾を開発し, CAE 解析に適用している。

また, ハイテンにおいて部品の寸法精度を確保するにはスプリングバック発生の原因を把握し, その原因に対して適切な対策をたてることが効果的である。このため JFE スチールではプレス下死点位置の応力を操作することによりスプリングバックの要因を分析する技術⁴⁾を開発した。

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 FLD などが用いられている。しかしフランジアップ加工や穴広げ (バーリング) 加工などによるブランクエッジの変形限界判定は板の内部の変形限界とは破断に至るメカニズムが異なるため, FLD を用いても実際の現象通りの判定をすることはできない。

伸びフランジ変形の変形限界には, 材料特性⁵⁾や, せん断縁の加工条件^{6,7)}とともに, ひずみ勾配⁸⁾が影響因子としてあげられる。このうち材料特性や, せん断縁の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かった。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³⁾、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

伸びフランジ限界に影響を及ぼすと考えられるひずみ勾配は2種類が考えられる。1つは打抜穴に対して最大主ひずみ(円周方向ひずみ)と直交する方向(半径方向)の最大主ひずみの勾配である(以下、半径方向ひずみ勾配)。もうひとつは最大主ひずみ方向(円周方向)の最大主ひずみの勾配である(以下、円周方向ひずみ勾配)。本節ではこれらの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980MPa級ハイテンまでの5種類の鋼板を用意した。まず、伸びフランジ変形限界に及ぼす半径方向ひずみ勾配の影響を検討するための試験条件を表2に示す。打抜穴径を3水準、ポンチ形状は頂角が60°の円錐と平底円筒の2水準として、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。

表1 供試材の材料特性

Table 1 Thickness and mechanical properties of examined steels

Steel	Thickness (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	λ (%)
A	1.2	168	309	49	155
B	1.2	330	459	35	107
C	1.2	419	643	28	62
D	1.2	603	823	20	72
E	1.2	787	1 005	18	47

YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation
λ: Hole expansion limit with conical punch

表2 半径方向ひずみ勾配影響の実験条件

Table 2 Experimental conditions to investigate the influence of strain gradient in the radial direction

Initial hole diameter in blank (mm)	Punch shape	Applied steel
10	60°conical	A, B, C, D, E
25		A, B, C, D, E
50		A, B, C, D, E
10	φ50 mm cylindrical	A, B, C
25	φ80 mm cylindrical	A, B, C
	φ50 mm cylindrical	D, E
50	φ150 mm cylindrical	A, B, C
	φ100 mm cylindrical	D, E

表3 周方向ひずみ勾配影響の実験条件

Table 3 Experimental conditions to investigate the influence of strain gradient in circumferential direction

Steel	Initial hole shape		Clearance (%)	Initial hole diameter in blank (mm)
	Semi major axis (mm)	Semi minor axis (mm)		
C	50	10	12.5	80
	50	30		

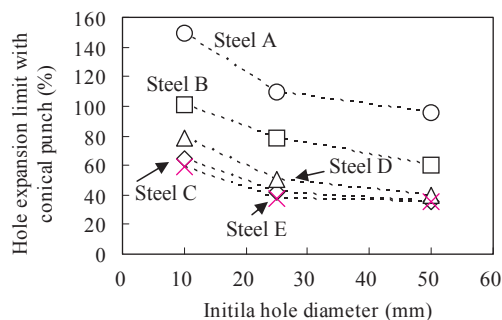


図1 円錐穴広げ試験におけるブランク初期穴径の穴広げ率に及ぼす影響

Fig. 1 Effect of initial hole diameter in blank on hole expansion limit with conical punch

なお、板厚に対する打抜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、材料特性に応じてポンチ径を適宜変更した。また伸びフランジ変形限界に及ぼす円周方向ひずみ勾配の影響を検討するための試験条件を表3に示す。打抜穴を楕円形状にして平底円筒穴広げ試験を行うことにより円周方向ひずみ勾配を変化させた。

2.1.2 限界穴広げ率に及ぼす打抜径の影響

円錐ポンチを使用した際の限界穴広げ率に及ぼす打抜径の影響を図1に示す。限界穴広げ率λは打抜穴径 d_0 、破断穴径 d とすると、

$$\lambda = (d - d_0) / d_0 \times 100 (\%) \quad \dots \dots \dots (1)$$

で表される。図1から分かるように限界穴広げ率は打抜径の増加にともない減少する。すなわち、打抜穴径が多様に変わる実プレスにおいて材料規格上の限界穴広げ率をそのまま適用することは困難であり、新たな指標による判定手法の開発が必要と考えられる。

2.1.3 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(最大主ひずみ)に及ぼす半径方向ひずみ勾配の影響を図2に示す。変形限界ひずみは穴縁でのひずみ量を一定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を模式的に図3に示す。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5mm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

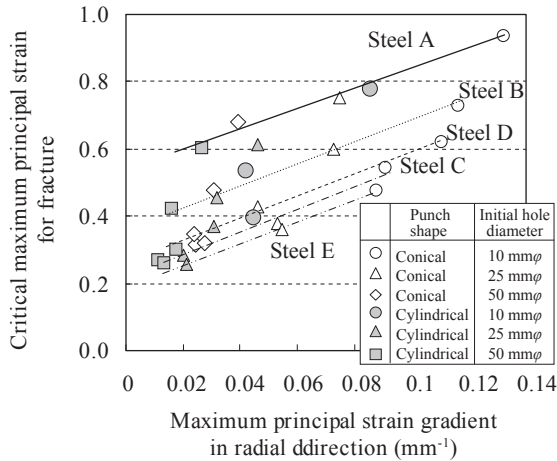


図2 最大主ひずみの半径方向勾配の破断限界ひずみに及ぼす影響

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

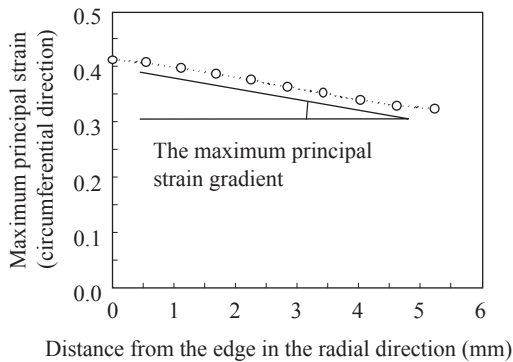


図3 最大主ひずみの半径方向勾配

Fig. 3 Gradient of maximum principal strain

Technology Corp. 製の LS-DYNA® ver.971 を使用した。この結果、伸びフランジエッジの変形限界ひずみは、いずれの材料もパンチ形状によらず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^{8,9)}が大きくなるためと考えられる。

以上の検討により、打抜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破断限界が整理できることが分かる。

2.1.4 変形限界ひずみに及ぼす

円周方向ひずみ勾配の影響

実部品では穴径が一樣ではない場合やフランジアップする高さが変化する場合など、最大主ひずみ方向（円周方向）にも勾配を有するケースがある。そこで打抜形状を楕円とした平底円筒穴広げ試験により、変形限界ひずみに及ぼす円周方向ひずみ勾配の影響を検討した。その結果を図4に示

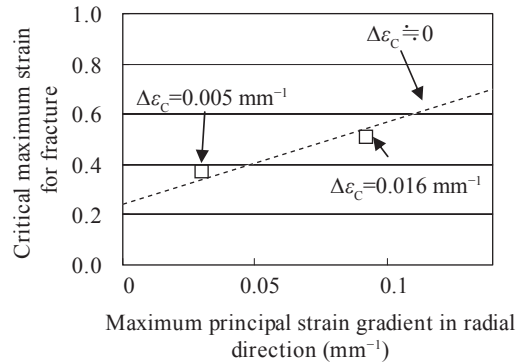


図4 最大主ひずみの円周方向勾配の $\Delta\epsilon_c$ 破断限界ひずみに及ぼす影響

Fig. 4 Effect of maximum strain gradient in the circumferential direction ($\Delta\epsilon_c$) on critical maximum principal strain

す。また、材料Cに関して図2で求めた変形限界線を同時に示す。打抜形状を楕円とした平底円筒穴広げ試験での変形限界ひずみとひずみ勾配は FEM^{2,10)} 解析より導出した。

円周方向のひずみ勾配を有する場合の変形限界ひずみと、ひずみ勾配がほぼ0と考えられる図2から求めた変形限界線はほぼ同レベルであることから、変形限界ひずみに及ぼす円周方向ひずみ勾配の影響は非常に小さいと考えられる。これはひずみの局所化抑制効果や、くびれ成長抑制効果は、亀裂伸展方向に対する作用が主であるためと考えられる。

2.2 CAE 成形解析への適用

前節の実験結果より伸びフランジ割れは半径方向のひずみ勾配と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、部品形状で行った解析結果について述べる。

2.2.1 プレス成形結果

実験および計算に用いたセンターピラー下部を模擬したラボプレス品の形状を写真1に示す。また、プレス実験には板厚 1.2mm の表4に示す特性の2種類の鋼板を用意した。F材は日本鉄鋼連盟規格¹¹⁾のλ値がG材に比べ20%以上大きい材料である。伸びフランジ部の写真を写真2に示す。F材では割れが発生していないのに対して、G材では割れが発生した。

2.2.2 プレス成形解析結果

このプレス成形実験について 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5に示す。F材、G材とも割れなしの判定となっており、正確な伸びフランジ割れを予測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 FEM により予測した結果、F材では最大主ひずみ 0.31、ひずみ勾配 0.0032、G材では最大主ひずみ 0.33、ひずみ勾配 0.0032であった。この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6に示す。F材のひずみのプロットは、伸びフランジ割れ限界線の下側にあり割れが



写真1 プレス部品
Photo 1 Pressed part

表4 プレス実験に供した材料の特性

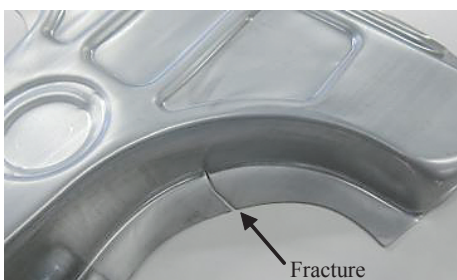
Table 4 Mechanical properties of steel used in press forming

Material	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	λ (%)
F	437	624	34.1	92
G	398	640	32.3	68

YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation
 λ : Hole expansion limit with conical punch



(a) Material F



(b) Material G

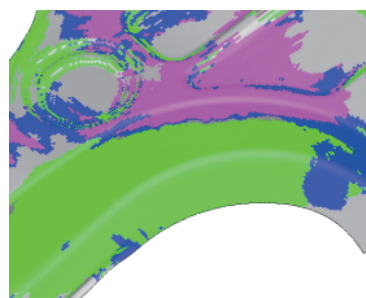
写真2 プレス成形結果

Photo 2 Results of press forming

発生しないと判定されるのに対して、G材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法が実部品においても有効であ



(a) Material F



(b) Material G

Cracks	Red
Risk of cracks	Yellow
Severe thinning	Orange
Good	Green
Inadequate stretch	Grey
Wrinkling tendency	Blue
Wrinkles	Purple

図5 プレス部品

Fig. 5 Pressed part

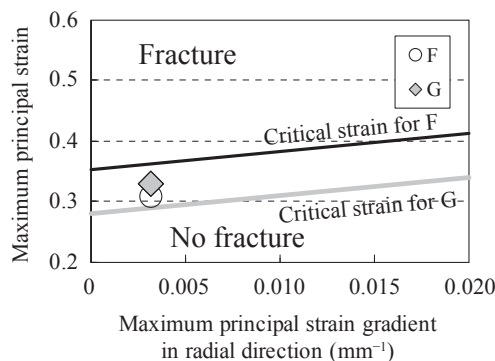


図6 伸びフランジ部について最大主ひずみの半径方向ひずみ勾配による評価結果

Fig. 6 Evaluation of stretch flange fracture by maximum principal strain in radial direction and strain gradient

ることを示している。

3. スプリングバック要因分析技術

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く、自動車車体の精度や組み立て溶接工程において問題となる。

このためハイテンを目標寸法に成形することが重要であり、従来より金型の見込みや余肉部の形状変更などによりスプリングバック対策が採られている。しかし、小さな金型形状の変更でスプリングバックが劇的に変化する場合がある一方で、ほとんどスプリングバックが変化しない場合もあるなど、スプリングバックに有効な対策を講じることが難しかった。

そこで、スプリングバック対策をどの部位に適用するのが有効であるかを CAE 解析により予測するスプリングバック要因分析手法⁴⁾を開発した。

3.1 スプリングバック要因分析の手順

スプリングバック要因分析の手順を図7に示す。本手法は、まず成形 FEM 解析を行い、そのプレス下死点の応力分布を求める。その後、ある部位の応力を除去し、その応力分布を用いてスプリングバック解析を行う。これを通常のスプリングバック解析結果と形状比較を行うことで、その部位の応力がスプリングバックに及ぼす影響を明らかにする手法である。

3.2 スプリングバック要因分析の実施例

スプリングバックの要因分析事例として図8に示す曲が

りハットの事例を示す。ハットの断面は45×45mmであり、ハットの長さは約500mmである。また、ハットの湾曲角は135度としている。プレス成形はドロー成形で行い、しわ押さえ圧は700kNとしている。

本検討で用いたブランク材の材料特性を表5に示す。板厚は1.2mmである。

本検討では曲がりハットの成形において生じるねじれを対象に解析を行った。ここでねじれの測定は図8にあるように湾曲部の中心を固定したときの、左右両側部のねじれ角で評価した。まず、図9に示すようにフランジ部(F1, F2)、ウェブ部(P), R部を含む壁部(T1, T2)に大きく分け応力を除去してスプリングバック解析を行った。外側フランジ部F2の応力を除去したスプリングバック解析前の応力分布を図10に、またねじれに及ぼすそれぞれの部位の影響を調

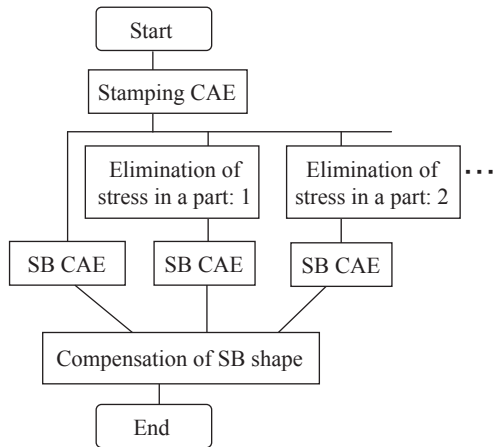


図7 スプリングバック (SB) 要因分析のフローチャート

Fig. 7 Flow chart of factor analysis of springback (SB)

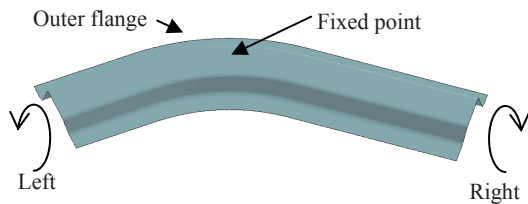


図8 曲がりハットのねじれ測定時の固定点

Fig. 8 Curved hat and fixed point in torsion measurement

表5 解析に用いた 590 MPa 級材の機械特性

Table 5 Mechanical properties of 590 MPa grade steel used for the factor analysis technology of spring back (SB)

Material	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	\bar{r}
590R	484	625	26.7	1.0

YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation
 \bar{r} : Lankford value

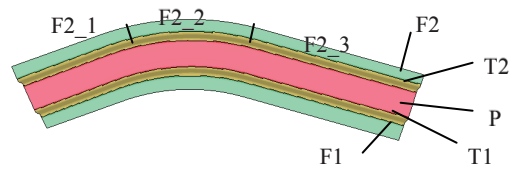


図9 応力を除去した範囲分割

Fig. 9 Areas where stress eliminated

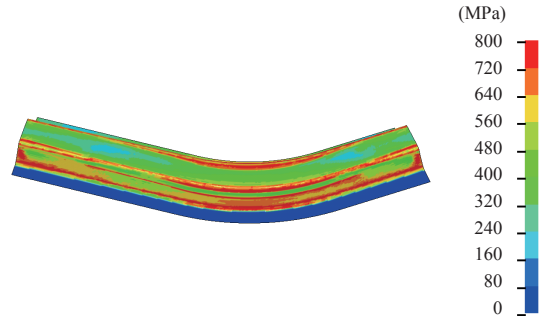


図10 F2範囲の応力を除去した応力分布

Fig. 10 Equivalent stress distribution in the case of which stress in F2 is eliminated

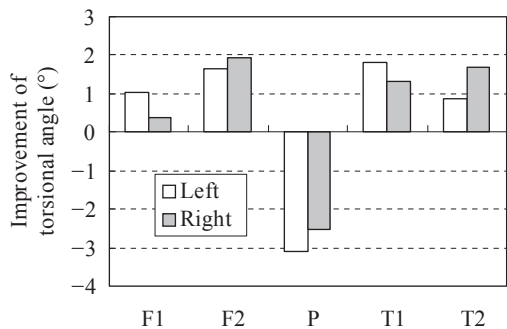


図11 ねじれの改善に及ぼす応力除去範囲の影響

Fig. 11 Effect of stress elimination from each area on improvement of torsional angle

査した結果を図 11 に示す。これより外側フランジ F2 の応力除去の影響が比較的大きく、ウェブ部の応力を除去した場合は悪化していることが分かる。すなわち、フランジ部などではプレス下死点で発生する応力を低減することでスプリングバック量を低減できる一方、ウェブ部では反対にねじれを抑制するにはこの部位の応力分布をさらに促進させる必要があることが分かる。

次に、ねじれの改善効果が比較的大きかった外側フランジ部 F2 について湾曲フランジ部 (F2-2) の、短い直線部フランジ (F2-1)、長い直線部のフランジ (F2-3) に分けて分析を行った結果を図 12 に示す。

湾曲フランジ部においてねじれの改善効果が大きいこと

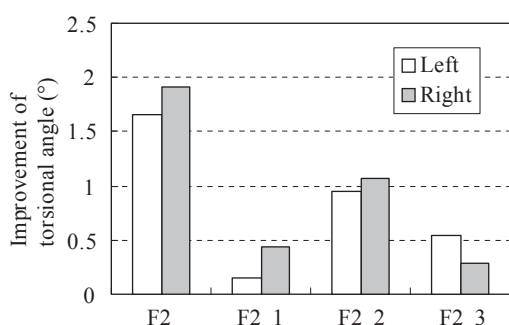


図 12 ねじれの改善に及ぼす外側フランジ部内での応力除去範囲の影響

Fig. 12 Effect of stress elimination from each area on improvement of torsional angle in the outer flange part

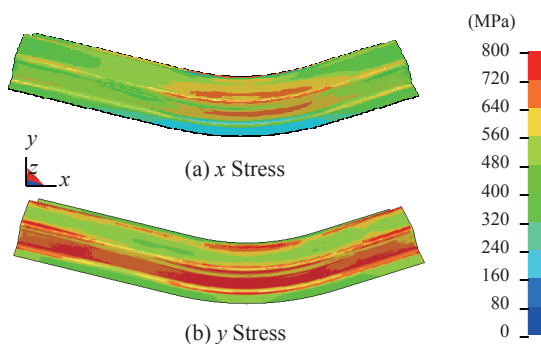


図 13 応力除去前の応力分布

Fig. 13 Stress distribution before stress elimination

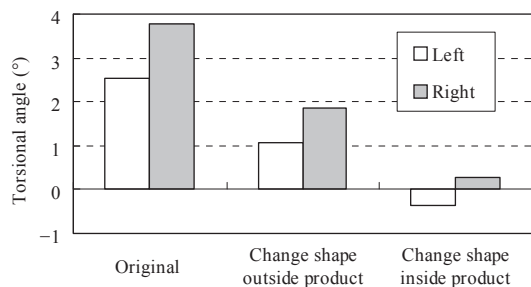


図 14 金型、製品形状変更によるねじれの改善

Fig. 14 Improvement by shape change

が分かる。この湾曲フランジ部の x 方向、 y 方向それぞれの応力分布を図 13 に示す。湾曲部の x 方向の応力分布が大きいため、この x 方向の応力分布がねじれに大きく影響していると推察される。

以上のスプリングバック要因分析から湾曲フランジ部がスプリングバックに影響しており、この部分の応力分布を低減することができればスプリングバックも低減できると考えられる。そこで金型の余肉部分および製品部分を変更することにより湾曲した部分を低減変更することにより湾曲部分の応力を低減させたところ、図 14 に示すようにねじれが大幅に改善させることができた。

4. おわりに

ハイテン適用拡大に向けて課題となっている伸びフランジ割れ、寸法精度不良に対する技術を開発した。

ひずみ勾配を用いて伸びフランジ割れを正確に予測する技術を開発した。本技術によりこれまで成形解析において一般的な FLD では判定不可能であった伸びフランジ割れの予測が可能となった。

また、ハイテンプレス部品の寸法精度不良の原因となる部位、応力箇所を特定するスプリングバック要因分析技術を開発した。本手法により効果的なスプリングバック対策がたてられることが可能となった。

参考文献

- 1) 吉武明英, 小野守章, 占部俊明. 自動車技術. 2005, vol. 59, no. 11, p. 4.
- 2) 卜部正樹, 玉井良清, 吉武明英, 豊田大介, 佐藤義人. 第 58 回塑加連講論. 2007, p. 535-536.
- 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. 卜部正樹. プレス成形解析方法. 特許第 4894294 号.
- 5) 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.
- 6) 飯塚栄治, 比良隆明, 吉武明英. 塑性と加工. 2005, vol. 46, no. 534, p. 625-629.
- 7) 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.
- 8) 中川威雄. 塑性と加工. 1978, vol. 19, no. 206, p. 227-235.
- 9) 後藤學. 塑性と加工. 1993, vol. 34, no. 388, p. 454-461.
- 10) 吉田亨, 橋本浩二, 阿賀弘晃. 第 47 回塑加連講論. 1996, p. 371-372.
- 11) 日本鉄鋼連盟規格. 穴広げ試験方法. JFS T1001-1996.



石渡 亮伸



卜部 正樹



稲積 透