

技術論文

高強度鋼板の寸法精度不良と対策技術

Forming Defects of Dimensional Accuracy and Its Countermeasures of High Strength Steel Sheets

吉 田 亨*
Tohru YOSHIDA磯 貝 栄 志
Eiji ISOGAI佐 藤 浩 一
Koichi SATO橋 本 浩 二
Koji HASHIMOTO

抄 録

自動車車体用鋼板の高強度化が進展しているが、プレス加工時のスプリングバックによる寸法精度不良が問題となっている。代表的な寸法精度不良について現象ごとに分類し、その発生機構に基づき対策技術を検討した。メンバー部品の断面開きについてはフォーム成形の活用や縦壁張力増大により寸法精度が向上した。また、複雑形状部品のねじれ、キャンバーについてはCAE解析により発生要因を特定し、面内応力を制御することにより不良の低減が可能であった。さらに、パネルの座屈ねじれ現象についても発生メカニズムを検討し、その対策事例について述べた。高強度鋼板の寸法精度不良の基本的な対応方法としては、できるだけ形状を高剛性化した上で、残留応力制御工法を活用し、最小限の金型見込みによる微調整を行うことが望ましい。

Abstract

Springback is one of the most difficult problems in applying high strength steel sheets to automotive body parts. The mechanism of springback behavior classified by the phenomenon and countermeasures based on each mechanism were reported. It was made clear that section opening of member parts was reduced by crash forming and wall tension control. And torsion and camber of complicated shape parts were possible to decrease by planer stress control using the developed analytical methods of CAE. In addition, about the buckling torsion of panels, the mechanism of the occurrence was studied and effects of countermeasures were reported. Basic concept of countermeasure for springback is expected to design the part high rigidity at first, utilize the stress control methods and minimize the compensation of die tools.

1. 緒 言

自動車は環境問題を背景とした軽量化や衝突安全性の確保という課題に直面しており、これらを解決するために車体に使用される鋼材の高強度化が進展している¹⁾。高強度鋼板は広範囲の強度レベルにわたって材料が開発されており、機能や用途により目的に合った素材を選択することができる。また、他の軽量化素材に比べ低コストで、従来の生産設備も使えるなどの利点から、軽量化・安全対策を実現するための主要な材料として活用されている。しかしながら、材料強度上昇にともなう延性の低下はプレス成形時の破断の危険性を高め、降伏応力の上昇は寸法精度不良(スプリングバック)やしわが増加するなど成形上の課題も多い。

これらに対応するためにトライ工程の金型修正回数が増加し、型製作コストが増大する傾向にあり、大きな技術課

題となっている。これに対し、DP (Dual Phase) 鋼や低合金TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼等の延性に優れた先進的な高強度鋼板 AHSS (Advanced High Strength Steel) の開発²⁾や自動車ボディへの適用も進んでいるが、さらなる部品の高強度化や適用部品の拡大のためには加工技術面からのアプローチも非常に重要である。

高強度鋼板を冷間でプレスする場合に通常強度の鋼板と比べて、まず問題になるのは成形品の寸法精度確保である。すなわち、強度レベルの上昇による弾性回復量の増大に対応する必要があるが、スプリングバックは材料固有の物性値である弾性係数に依るところが大きく、材料側からの対策には限りがある。スプリングバックの対策として一般的に用いられている手法は金型の見込みであるが、どの程度見込む必要があるかは熟練者でも設計が難しいといわれており、実物トライアル中心の試行錯誤による調整が行われているのが現状である。そこで本稿では、まず高強度

鋼板の加工時に問題となるスプリングバックについて、代表的な寸法精度不良を分類し、発生メカニズムについて述べる。次に、各発生機構に応じた対策技術の効果をモデル実験で検証した結果を報告する。また、実部品における対策検討においてはCAE解析の活用が必須であるとの考えに基づき、その活用方法についても概説する。

2. 寸法精度不良対策の基本的な考え方

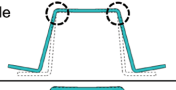
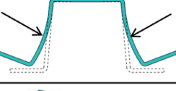
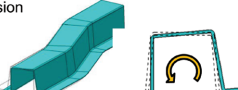
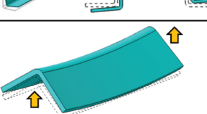
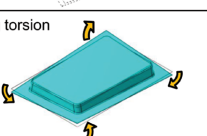
成形品を成形後に金型から取り出す、あるいは、不要な部分をトリミングするなど、拘束を緩和することで残留応力が駆動力となり、新たなつりあいを満たすよう部品に弾性変形が生じる。高強度鋼板ではこの弾性回復量が大きいいため、最終製品として要求される寸法精度の確保が困難になりやすい。代表的な寸法精度不良は現象に応じて、角度変化、壁そり、ねじれ、稜線そり（キャンバー）、パネルの座屈ねじれに分類される（表1）。いずれの場合でも、部品内での残留応力分布が曲げまたはねじりのモーメントとしてはたらき、材料の弾性係数や板厚、部品形状で決まる剛性に応じて変形した結果である。例えば、もっとも良く知られている例は断面における曲げ角度変化や壁そりである。これらは板厚方向の応力分布が駆動力となり、剛性は

主に板厚で決定される。このメカニズムに基づく、寸法精度不良の対策方法を以下の3種類に分類することができる³⁾。

- (1) 駆動力低減：残留応力の分布を（低いレベルに）平準化し、スプリングバックのモードに応じた駆動力（モーメント）を低減する。
- (2) 高剛性化：板厚や部品形状を変更し、スプリングバックのモードに対する剛性を高める。
- (3) 予測補償：スプリングバック後に所定の寸法に収まるよう、変形を見込んで意図的に製品形状と異なる金型形状を用いる。

表2に、この分類に基づいた具体的な対策技術の例とその特徴を挙げる。例えば、ハット断面部品の絞り曲げで発生する壁そりについては、ダイ肩通過時の曲げ、曲げ戻しによる板厚方向曲げモーメントが駆動源となっており、ダイ肩半径の適正化による逆曲げの活用や曲げ戻し張力の増加により、不良の低減が可能である⁴⁾。また、高剛性化と駆動力低減を併せた対策として、ハット断面部品の縦壁に段差を設ける手法も検討されている⁵⁾。これらのスプリングバック対策で重要なことは、金型コストや生産性を阻害せず、なるべく金型設計段階の初期（できれば製品設計段階）に織り込み可能な技術であることである。

表1 代表的な寸法精度不良の分類と発生要因
Classification of typical springback problems and its mechanisms of occurrence

Parts	Defects of dimensional accuracy	Mechanisms of occurrence
Member	Opening angle 	Elastic recovery of bending moment by uneven stress in thickness direction after bending
	Wall warp 	Elastic recovery of bending moment by uneven stress in thickness direction after bending and unbending
	Torsion 	Elastic recovery of torsion moment by uneven stress in plane with stretch and shrink flange deformation
	Camber 	Elastic recovery of bending moment along punch ridgeline by uneven stress in thickness direction
Panel	Buckling torsion 	Buckling deformation in unloading by uneven stress in plane in drawing of panel

3. メンバー部品の寸法精度不良対策

3.1 フォーム成形によるスプリングバック低減効果

高強度鋼板の加工において、フォーム成形と呼ばれるしわ押さえを用いしないでプレスする方法を実生産で用いる例が増えている。図1はしわ押さえを用いるドローバンド成形とフォーム成形の概略図であるが、フォーム成形ではダ

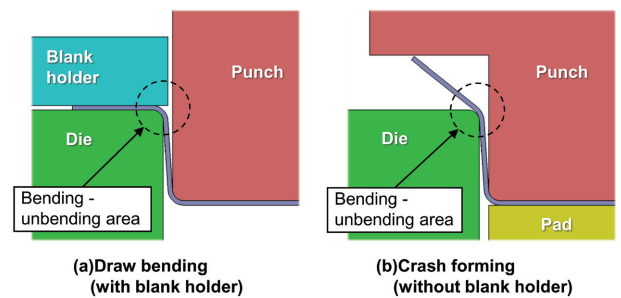


図1 ドローバンド成形とフォーム成形の比較
Schematic figures of draw bending and crash forming

表2 スプリングバック対策の基本的な考え方
Basic concept of countermeasures for springback

Mechanism	Countermeasure	Example	Costs	Stability	Effect on parts performance
Reduction of driving force (low moment)	Forming methods	Crash forming Tension control	High	Mid.	Mid.
	Parts design	Emboss, bead	Low		Mid. - large
Increase rigidity				High	
Prediction	Modified die tool	Compensation	Mid. - high	Low	Small

イ肩での材料の巻き付きが緩くなるため、壁そりの原因となる曲げ変形が小さくなることが期待できる。そこで、基礎モデル型を用いた高強度鋼板のフォーム成形とドローバンド成形実験を行い、寸法精度に及ぼす材料強度の影響を比較した。

ドローバンド成形とフォーム成形の双方を実施可能なハット成形金型を作製し、片側の縦壁角度を 5° 傾斜させ、縦壁角度（垂直壁と傾斜壁）の影響を評価できるようにした。軟鋼板から780MPa級高強度鋼板を用いて、ドローバンド成形では、しわ押さえ力 $P=150\text{kN}$ 、フォーム成形ではパンチの背圧荷重 $F=20\text{kN}$ を負荷した後に、パンチストロークは80mmまで成形した。成形後に接触式3次元測定機を用いて断面の計測を行い、開き幅 ΔW 、縦壁の曲率半径 ρ 、パンチ肩角度変化量 θ を評価した。

図2はドローバンド成形（DB）とフォーム成形（FO）における各鋼種の開き幅 ΔW と引張強さ σ_B の関係を整理したものである。この図より、フォーム成形の開き幅はドローバンド成形より小さく、材料強度が高いほど低減量が大きくなることが分かる。この要因を明らかにするために、開き幅の発生要因である壁そりと開き角について各鋼板の σ_B との関係を調べた。図3の壁そり $1/\rho$ は垂直壁と傾斜壁で効果の大小はあるものの、ドローバンド成形に比べフォーム成形で小さくなっており、高強度になるほど差が大きい。一方、図には示さないが、角度変化 θ はドローバンド成形とフォーム成形で明瞭な差は見られなかった。

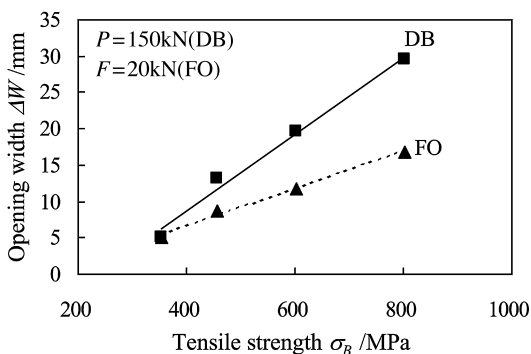


図2 フォーム成形による開き幅 ΔW 低減効果
Effect of reducing opening width ΔW by crash forming

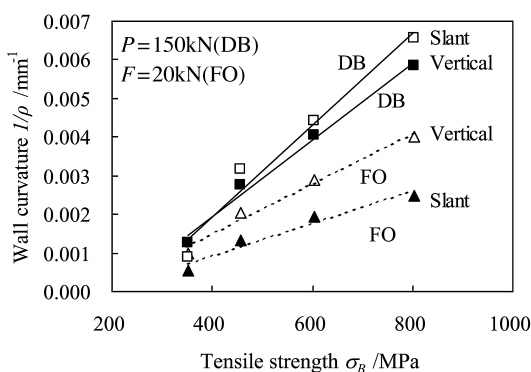


図3 フォーム成形による壁そり $1/\rho$ 低減効果
Effect of reducing wall curvature $1/\rho$ by crash forming

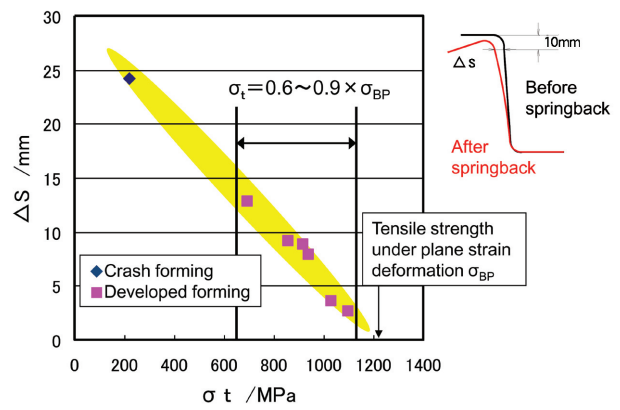


図4 縦壁張力と断面開き量 ΔS の関係
Relationship between wall tension and opening width ΔS

このため、フォーム成形による開き幅低減効果は主に壁そり低減によるものと考えられる。また、図3から分かるようにフォーム成形では傾斜壁の方が垂直壁より壁そりがかなり小さくなる。

この理由として、成形中に材料に加わる張力が小さいフォーム成形では、クリアランスが大きい傾斜壁側で材料の巻き付きがかなり緩く、壁そりの原因となる曲げ変形量が減少するためと考えられる。このような基礎検討から、フォーム成形においてスプリングバック低減効果を十分に得るためには、パンチ稜線部の決め押しや成形中のパンチ底たるみを利用した角度変化対策を組み合わせることが有効と考えられる。

超高強度鋼板における寸法精度不良をさらに改善するために、フォーム成形の下死点手前でしわ押さえ荷重をフランジ部に作用させるフォームドロー成形法を開発した。図4に980MPa級鋼板を用いてハット曲げのフォームドロー成形した結果を示す。横軸に板厚方向平均の縦壁張力 σ_t 、縦軸に開き幅 ΔS を示すが、 σ_t と ΔS には線形相関が見られ、平面ひずみ変形の破断限界応力に対し、60～90%の縦壁張力を負荷することで、断面の開きが大きく抑制されることが明らかとなった。

3.2 リアメンバーモデルにおけるねじれ・キャンバー対策

実生産の現場で起こるねじれやキャンバーなどの3次元寸法精度不良に関しては汎用的な対策技術は確立されていない。そこで、面内のみならずパンチストローク方向にも湾曲形状を持つリアメンバーモデル部品（図5）を対象に、ねじれやキャンバーの発生メカニズムの解明および対策技術の検討を実施した。

供試材として、引張強さ270～980MPa級の高強度鋼板を用いて標準BHF（Blank Holding Force）400kN、防錆油潤滑で成形試験を行った。980MPa材（板厚1.2mm）については潤滑条件の影響を評価するためテフロンシートを使った成形も実施した。寸法精度不良の評価としては、非

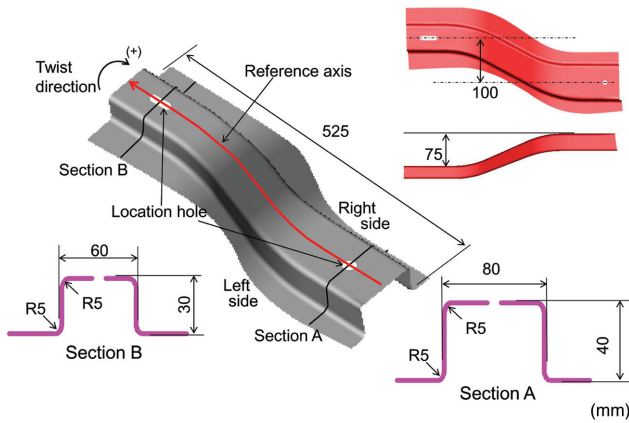


図5 リアメンバーモデル部品の寸法
Detail profile of the rear member parts

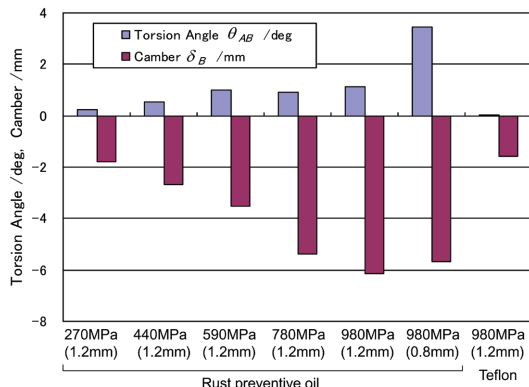


図6 リアメンバーモデル試験におけるねじれ角 θ_{AB} および
キャンパー量 δ_B
Torsion angle θ_{AB} and camber δ_B in rear member model tests

接触形状測定により得られた座標を計算処理し、断面AB間でのねじれ角 θ_{AB} およびキャンパー量 δ_B を算出した。図6に各鋼種の θ_{AB} 、 δ_B の比較のグラフを示す。材料強度の増加に伴い θ_{AB} 、 δ_B 共に増大する傾向であるが、板厚や潤滑の影響も大きいことが分かった。このような3次元的な形状変化がある部品において対策が困難な理由の一つに、ねじれ、キャンパーなどの不良が観測される位置と発生要因となる場所が一致しないことがある。

そこで、ねじれ、キャンパーについて、CAE解析結果から発生要因分析を実施し、不良を起こす不均一応力の発生位置を検討した。分析手法の詳細については文献⁹⁾を参照されたい。ねじれについては、ねじりモーメントが大きくなる主要因部は縦壁であり、特に伸びフランジ変形が大きくなる領域で最大となることが分かった。また、キャンパーについてはウェブ面と伸びフランジ及び縮みフランジが大きくなる側のフランジ部が要因であることが分かった。そこで形状不良対策として各部位の応力を分散もしくは低減する目的で、980MPa (1.2mm) 材を対象に①部分ビード②拡幅・縮幅加工の2種類の対策を実験で検討した。実験では対策部分のみブロック交換することで、対策位置の影響を検証した。

① 部分ビードの検討では、ねじれを発生させる原因となる縦壁部の長手方向応力を分散・低減するため、伸びフランジ・縮みフランジ各部にビードを配置し、その効果を検証した。ビードの基本形状は丸ビードとし、突起側Rを3mm、ビード高さを2mmとし、図7に示す配置について検討した。各条件における θ_{AB} と δ_B の結果を図8に示す。

ねじれ角についてはビードを伸びフランジ部に設置した場合と縮みフランジに設置した場合で、ねじれ方向が異なり、Type1 (幅広側伸びフランジ部) の効果が大きいことが分かる。これは部分ビードにより特定の縦壁部及びフランジ部の残留応力を高めることで、ねじりモーメントの全体バランスを確保した結果、ねじれ角が減少したと考えられる。また、Type4-6のように縮みフランジへのビード配置を行うことでねじれ角が反転しており、特にType4の反転効果が大きく、大きな逆ねじれを発生している。またキャンパーについてもType1が有効であり、Type4 (幅広側縮みフランジ部ビード) についても効果が見られた。

② 拡幅・縮幅加工の検討では、伸びフランジ・縮みフランジ各部に対し、図9に示すように1工程目に幅を狭くした後、2工程目に拡幅し所定の形状に加工する手法(拡

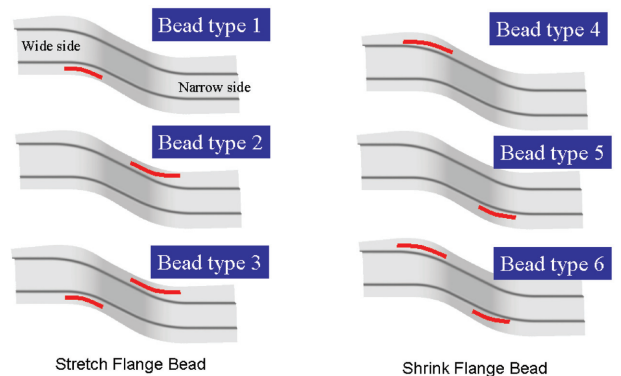


図7 部分ビードの設定位置
Positioning of partial bead in rear member model

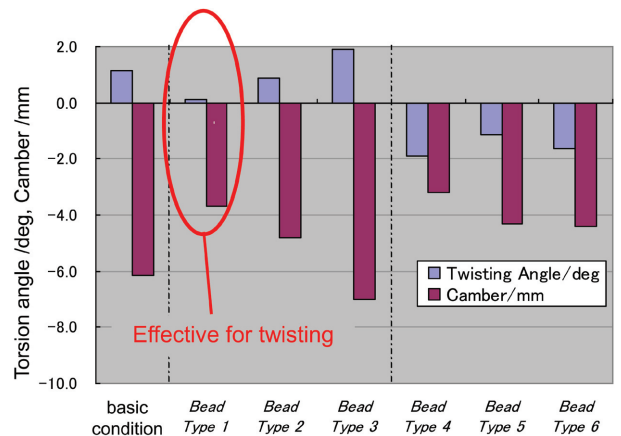


図8 ねじれ θ_{AB} 、キャンパー δ_B に及ぼす部分ビードの配置の影響
Influences of partial bead positioning on torsion angle θ_{AB} and camber δ_B

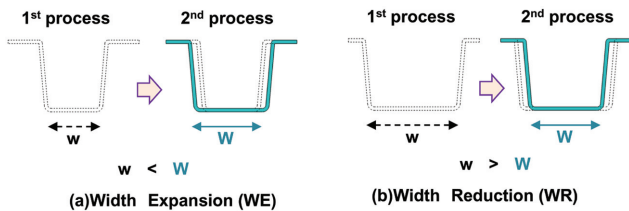


図9 拡幅成形と縮幅成形

Forming methods of width expansion and width reduction

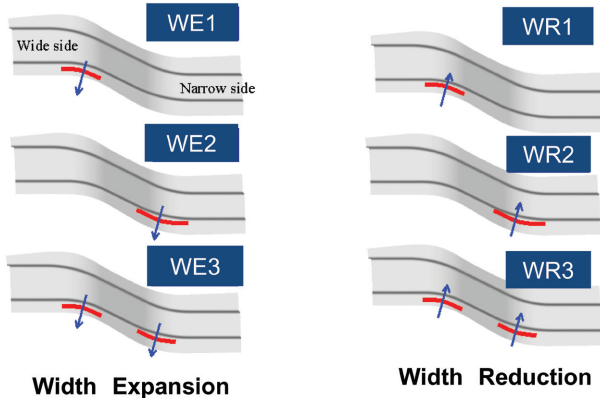
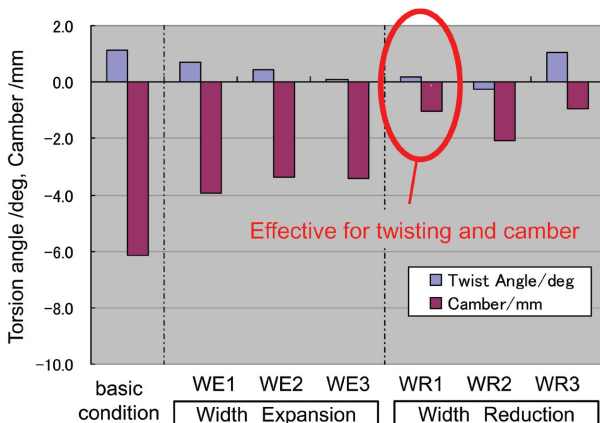
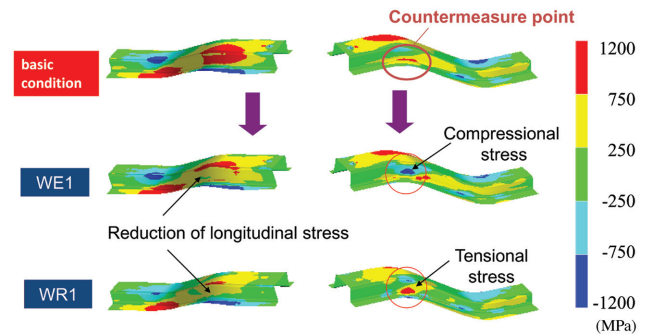


図10 拡幅・縮幅成形部の設定位置

Positioning of width expansion and reduction in rear member model

図11 ねじれ θ_{AB} 、キャンバー δ_B に及ぼす拡幅・縮幅成形の影響Influences of width expansion and reduction on torsion angle θ_{AB} and camber δ_B

幅成形:WE), 及び1工程目に幅を広くした後, 2工程目に縮幅する加工(縮幅成形:WR)を行った。縮幅, 拡幅を実施する位置については図10に示すとおり, 片側の伸びフランジ・縮みフランジ領域のみ行った場合と, 伸び・縮みフランジ両方に実施した場合に分け評価を行った。本手法により実験を行った結果を図11に示す。ねじれ量については, 拡幅, 縮幅とも効果が見られた。拡幅成形については伸びフランジ・縮みフランジ単体(WE1, WE2)での効果よりも, 両者を組み合わせた効果(WE3)が大きい。縮幅成形については, 伸びフランジ部(WR1)への効果が最も大きい一方で, 縮みフランジ部への適用(WR2)によ

図12 拡幅・縮幅成形による面内応力の変化
Planer stress transition by width expansion and reduction

りねじれ角が反転するケースや, 両者を組み合わせる(WR3)ことで逆にその効果が小さくなるケースもみられた。

一方, キャンバーについては拡幅成形よりも縮幅成形に大きな効果が見られ, 特にWR1にて効果が大きいことが分かる。上記実験結果を考察すべく, 拡幅(WE1)及び縮幅(WR1)のFEM解析結果(長手方向下死点応力)を図12に示す。WE1については, 2工程目の拡幅により伸びフランジ部が圧縮の残留応力状態となり, またWR1については逆に縮幅により引張の残留応力が局所的に発生しており, これらによって残留応力の分散が行われていることが分かる。さらに適用箇所と対向縦壁部ではWE1, WR1ともに軸方向残留応力が低減している。つまり縮幅・拡幅成形により残留応力の“分散”と“低減”が行われ, 結果としてねじれおよびキャンバーの抑制に効果があったと考えられる。

4. パネル部品の寸法精度不良対策

浅絞りのパネルにおいて成形後に大きなねじれが発生することがある。パネル部品では面内曲げに対する剛性が, 面外曲げ剛性や断面のねじり剛性に比べて極端に大きいという幾何学的特徴を有している。そのため, 除荷時に曲がりにくい方向である面内曲げのみを引き起こすのではなく, もっと楽な面外曲げとねじれ変形の組み合わせを模索することになる。このように直接的な原因が幾何学形状に起因しているため, 設計形状を変えずに, 対策を考えることは至難の業である。これまでにモデル型による対策検討として, パンチ底部にコイニングを施したり, フランジ部にビーディングを施すことにより内部応力を緩和する方法が報告されている⁷⁾。ただし, 実際の工業製品のパネルでは形状がより複雑であるため, 単純な対策ではねじれが収まらない事例なども多く見られる。そこで, 浅絞りモデル部品を対象にCAE解析活用による座屈ねじれ発生メカニズムの明確化と対策手法の検討を行った。

検討対象は420mm×260mmの角筒パンチを用いて高さ25mmの絞り成形を行うパネル部品とした。基準モデルの

パンチ底はフラットとし、長手方向に深さ3mmのエンボス形状(凹み)を最大5個与えた条件を検討対象とした。供試材として板厚0.7mmの590MPa級高強度鋼板を用い、エンボスなし、エンボスあり(個数1, 3, 5本)の実験を行い、パネル長手方向の両端の断面間のねじれ角を測定した。測定結果をCAE解析を用いた予測結果と併せて図13に示す。横軸はCAE解析による成形下死点の応力から弾性ひずみエネルギーが安定平衡となる変形の比ねじれ角(単位長さ当たりのねじれ角)⁹⁾を示したものである。エンボスなしのみねじれが発生せず、エンボスありでは全ての条件で座屈ねじれが発生したが、エンボス個数によりねじれ角が異なり、予測結果も同様の傾向を示した。

座屈ねじれ発生要因検討のため、エンボス5本のパネル(E05)についてCAE解析を実施した。成形ストローク S に伴う基準軸方向面内張力のウェブ面、縦壁、フランジの各部位ごとの平均値の推移を図14に示す。この結果、 $S=22\text{mm}$ までは張力の関係が、ウェブ面(上部)は引張り、縦壁(中央部)はほぼ0、フランジ(下部)は圧縮と単調に変化しており、各部位が曲げ変形で受ける応力変化が丁度逆向きになるため曲げ変形のみで応力が減少し弾性ひずみエネルギーが安定平衡になる。しかし、 $S=23\text{mm}$ 以後

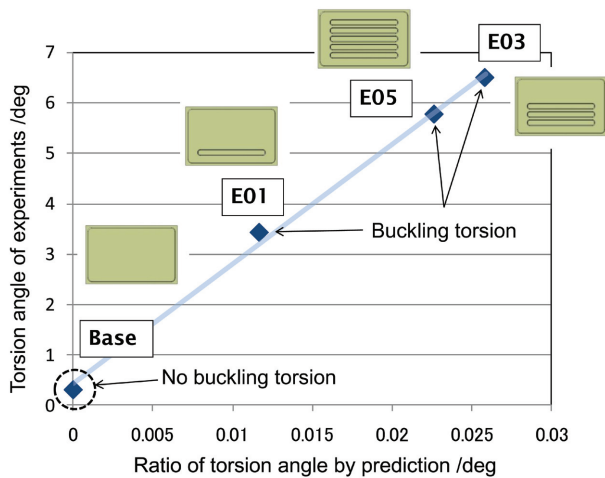


図13 実験による座屈ねじれ角度と予測結果の比較
Comparison between torsion angle of experiments and ratio of torsion angle by prediction

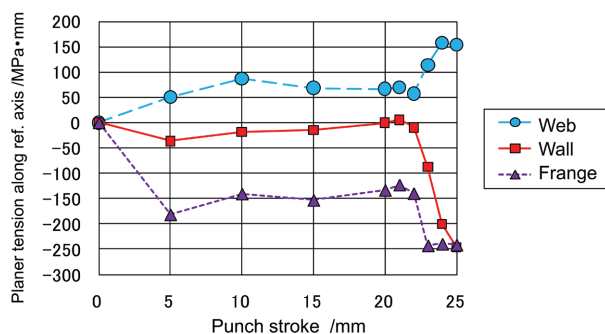


図14 成形過程における各部位の平均面内張力の推移(E05)
Transition of planer tension along ref. axis on each area in forming process (E05)

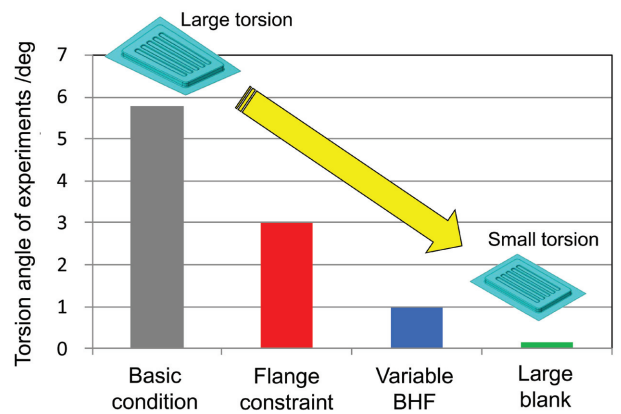


図15 実験による座屈ねじれの対策結果(E05)
Effects of reducing buckling torsion of experiments by countermeasures (E05)

では相対的に縦壁の圧縮応力が急速に増大し、曲げ変形だけでは応力を低減できず、残りの応力を低減するために座屈ねじれの発生が引き起こされる。縦壁の圧縮応力が高まるのは、エンボス成形に伴い材料流動する領域に絞り変形が起こるためである。

座屈ねじれの発生要因を低減するためには、エンボス成形により発生している基準軸方向面内張力を引張変形側に变化させることが重要であることが分かった。そこで、エンボスパネルE05を対象にパネル成形の引張変形を増加させる加工条件として、ビードを想定したフランジ拘束力増加、可変BHFによるエンボス成形時のしわ押さえ力増加、ブランク形状の延長を実験で検討した。各対策結果を図15に示すが、いずれの条件においてもパネル面内の張力が増加する傾向となり、ねじれ角が低減する傾向が確認できた。これらの対策はいずれの場合も、成形品の板厚減少を助長する傾向となるため、板厚減少の制約がある場合はその制約値を超えない範囲で条件を設定する必要がある。

5. 結 言

鉄鋼材料は一般的にリサイクル性、成形性、溶接性に優れるため自動車車体に多く用いられてきた。その中でも高強度鋼板は軽量化によるCO₂排出量低減と衝突安全性の両立に期待されており、今後さらなる高強度化が進むものと思われる。本稿では高強度鋼板の成形課題のうち、特に問題とされる寸法精度不良について、その発生メカニズムを整理し、発生機構に基づいた対策技術を適用した効果について述べた。基本的な対応方法としては、できるだけ形状を高剛性化した上で、残留応力制御工法を活用し、最小限の金型見込みによる微調整を行うことが望ましいと考えた。また、実部品における対策においてはCAE解析技術の活用は不可欠と考え、スプリングバック予測精度向上、不良発生要因の分析手法などの関連技術を開発した。本報では紙面の都合で省いたが、解析手法の詳細については既報⁹⁾を参照されたい。

参考文献

- 1) 例えば, 佐藤章仁: 塑性と加工. 46 (534), 548-551 (2005)
- 2) 高橋 学: ふえらむ. 7 (11), 34 (2002)
- 3) 樋渡俊二, 吉田 亨: 日本鉄鋼協会創形創質工学部会板成形フォーラムテキスト. 2005
- 4) 吉田 亨, 片山知久, 橋本浩二, 栗山幸久: 新日鉄技報. (378), 25-29 (2003)
- 5) 佐藤義人, 豊田大介, 野口俊一郎, 吉田 亨, 小島康治, 栗山幸久: 平成17年塑性加工春季講演会講演論文集. 2005, p. 139-140
- 6) 吉田 亨, 佐藤浩一, 磯貝栄志, 橋本浩二, 栗山幸久, 伊藤耿一, 植村 元: 第59回塑性加工連合講演会講演論文集. 2008, p. 377-378
- 7) 薄鋼板成形技術研究会編: プレス成形難易ハンドブック. 第3版. 日刊工業新聞社, 2007, p. 335-339
- 8) 吉田 亨, 植村 元, 伊藤耿一, 水村正昭, 末廣正芳: 第62回塑性加工連合講演会講演論文集. 2011, p. 399-400
- 9) 吉田 亨, 上西朗弘, 磯貝栄志, 佐藤浩一, 米村 繁: 新日鉄技報. (392), 65-71 (2012)



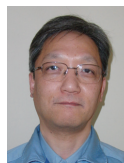
吉田 亨 Tohru YOSHIDA
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター
主幹研究員 博士 (情報科学)
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511



磯貝栄志 Eiji ISOGAI
広畑技術研究部 主任研究員



佐藤浩一 Koichi SATO
名古屋技術研究部 主任研究員
博士 (情報科学)



橋本浩二 Koji HASHIMOTO
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター
主幹研究員 博士 (情報科学)