

部品機能向上を実現する高造形工法

Development of Forming Technology for Improvement of Auto-body Structural Parts

西 村 隆 一*
Ryuichi NISHIMURA田 中 康 治
Yasuharu TANAKA宮 城 隆 司
Takashi MIYAGI小 川 操
Misao OGAWA大 塚 研一郎
Kenichiro OTSUKA中 澤 嘉 明
Yoshiaki NAKAZAWA

抄 録

一層の車体軽量化、衝突安全には、部材の更なる高強度化に加え、結合部の高強度・高剛性化が有効である。代表的な結合部である接合用フランジやL字・T字型の湾曲内接結合部を有する高機能部材開発のため、加工技術を主体とした開発を行った。フランジ連続化工法は超高強度鋼のフランジ連続化を実現し、最適設計構造は剛性、衝突特性ともに大幅に向上させる。自由曲げ工法は、L字・T字型の湾曲内接結合部を有する超高強度鋼難加工部材の成形を可能とし、高強度化、減肉抑制効果により、大幅な機能向上に貢献する。以上から、超高強度鋼製のフランジ連続化部材およびL字・T字型湾曲部材が実用化され、自動車の軽量化、衝突安全性向上に貢献している。

Abstract

For further weight reduction and improvement of crashability of automotive body, increase of strength and rigidity of joint parts is effective. Development of sheet forming technology was carried out, for establishment of two types of representative high-performance components with notchless joint flanges or L/T-shape-curved inscribed joints. Developed flange forming method realizes notchless flange of ultra-high-tensile strength steel (UHSS), and optimum design structure greatly improves both rigidity and crashability. Free Bend Sheet Forming makes it possible to form structural member with L/T-shape-curved inscribed joint using UHSS, and contributes to a significant improvement in function through increase of strength and reduction of thickness decrease. From the above, high-performance components with notchless joint flange or L/T-shape-curved joint have been put to practical use and contributing to weight reduction and improvement of crashability of automotive body.

1. 緒 言

地球温暖化抑止および衝突安全への要求の高まりから、自動車車体には軽量高強度化が求められる。そのため、高強度鋼板（ハイテン）の適用が急速に拡大し、さらに引張強度 TS が 780 MPa を超える超高強度鋼板（超ハイテン）の適用比率も年々高まっている。しかしながら、一般に鋼板強度が高いほど延性が低下するため、複雑形状の構造部材では、ハイテンの適用強度が限定され、形状自由度が低下する。より一層の車体軽量化ならびに衝突安全性向上には、部材の更なる高強度化に加えて、上述の複雑形状の中でも、部材結合部の高強度・高剛性化が有効であると考えた。図 1 に示すように、部材結合部には (1) 他部品と当接する長手方向端部の接合用フランジと (2) L 字や T 字型の

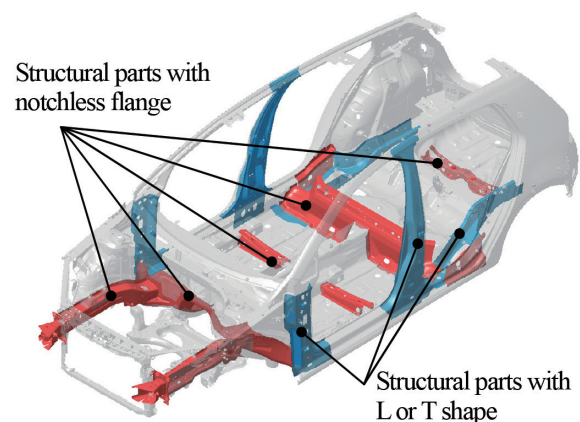


図 1 高造形工法の想定適用対象部品の例
Examples of auto-body application parts of developed press-forming technology

湾曲内接結合部の大きく2種類が挙げられる。これら結合部は、成形時に割れやしわが生じる難加工部である。

そこで、これら結合部を有する高強度・高機能部材すなわち(1)端部フランジ連続化部材、(2)内接する湾曲結合部を有するL字・T字部材の開発のため、加工技術を主体とした技術群の確立に取り組んだ。はじめに“ひずみ分散・抑制”、“変形経路制御”の観点から、新たなプレス成形工法の開発に取り組んだ。つぎに、これら考案工法が実現した高強度・高機能部材について、機能面からの形状設計、機能評価にも取り組み、優れた部材機能を明らかにした。その上で、超ハイテンを用いた実部材模擬試作を行い、開発した高造形工法の妥当性を実証した。これら高機能部材開発について、それぞれ2章、3章で報告する。

2. フランジ連続化による高機能部品の開発

図2に示すように、クロスメンバ等の自動車構造部材の長手方向端部には、接合用の端部フランジ^{2,3)}が設けられる。端部フランジは、コーナー部の成形において伸びフランジ成形難易度が極めて高い^{4,5)}一方で、部材間接合に用いられるため、車体剛性や衝突特性面で重要な機能を担う。ところが難易度の高い伸びフランジ成形を避けるため、特に引張強度 TS が440MPaを超えるハイテンの場合、端部フランジのコーナー部には切欠きが設けられていた。そのため、ハイテンの強度特性が車体機能に活かされていない状態であった。

そこで、ハイテンでも端部フランジのコーナー部が連続化されたフランジ連続化高機能部品の開発のため、成形技術開発および機能面からの形状設計に取り組んだ。

2.1 成形技術の開発 (NSafe®-FORM-RU)

端部フランジが連続化された超ハイテン部材の成形を可能とするフランジ連続化成形技術の開発に取り組んだ。フランジ連続化成形では、素材端面を外形抜き(前工程)によって整えた後、フランジアップ成形(成形工程)を行う。前工程は、成形工程における伸びフランジ成形限界に大きな影響を及ぼすため、両工程で成形性向上手法の検討を行った。

まず外形抜きでの検討結果を概説する。図示しないが、

外形抜きは、従来研究事例が多い穴抜きとは、伸びフランジ成形性に及ぼす打抜き条件の傾向が異なることを明らかにするとともに、以下の知見を得た⁶⁾。(1)超ハイテンでは20%程度のクリアランス(上刃、下刃間の隙間)でも、過度な素材倒れ込みに起因して過大ばりが生じる結果、極端に成形性が低下する場合がある。(2)素材倒れ込みを抑制すれば、クリアランス20%超での過大ばりおよび成形性低下が抑制できる。

つぎに、フランジアップ成形に関する検討結果^{4,5,7)}を詳述する。フランジアップ成形に通常の曲げ工法(ここでは従来工法)を適用すると、稜線フランジ部の1か所に変形が集中し、割れまたはしわが生じるため、ハイテンでフランジ連続化ができない^{4,5)}。そこで、“ひずみ分散”の観点から成形技術の開発を行った⁷⁾。

図3に、考案工法の一例および従来工法のフランジアップ成形の第1工程を示す。両工法ともに、第1工程では、ハット型断面を形成しながら端部フランジを 0° から 60° まで立ち上げ、第2工程では、端部フランジを 60° から製品角度まで立ち上げる成形を行う^{4,5,7)}。両工法の違いは第1工程にある。

考案工法では、下金型側の加圧機構(図3(b)の下金型側斜線部)で保持されたパッド(以下、下パッド)を用いた。成形初期、下パッドが下パッドストローク S_{lp} だけパンチ頂部より上方で保持され、ブランクの幅方向中央部は一定高さに保持された状態で成形が進行する。そのため、図3(b)に示すように、フランジ根元の2か所で曲げられる。上パッドがダイの面位置に底付きした後は、上パッドとダイは一体で動作し、下パッドが下がる。成形下死点で、ブランク挟持面がパンチの面位置に一致し、第1工程の成形が完了する。このように、考案工法は、フランジ根元の曲げ部を2か所設けることで、先端の伸びフランジ部のひずみ分散を実現している。

考案工法の効果検証のため、基礎モデル形状での成形実験を行った。鋼板強度の異なるハイテン590Yと超ハイテン980Yを用いて、フランジ高さは $H=15\text{mm}$ で固定した。 $S_{lp}=0\sim 25\text{mm}$ で変化させ、フランジエッジ最薄部の板厚ひずみで、成形性を評価した。

図4に、成形性に及ぼす S_{lp} の影響を示す。従来工法

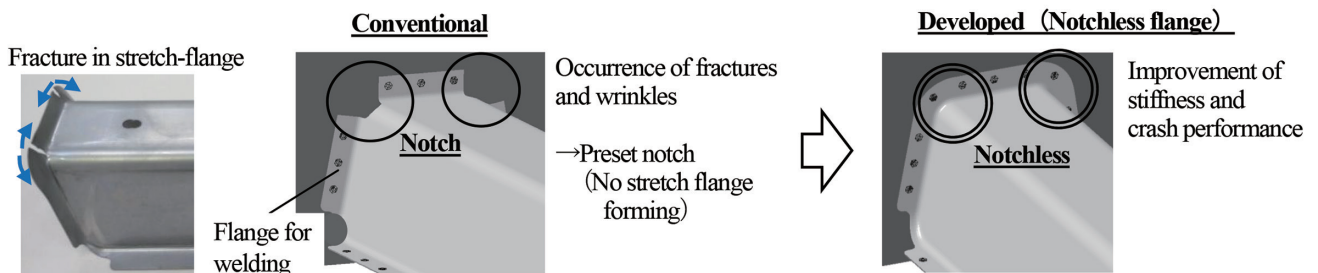


図2 フランジ連続化の目的
Background of development of structural parts with notchless flange

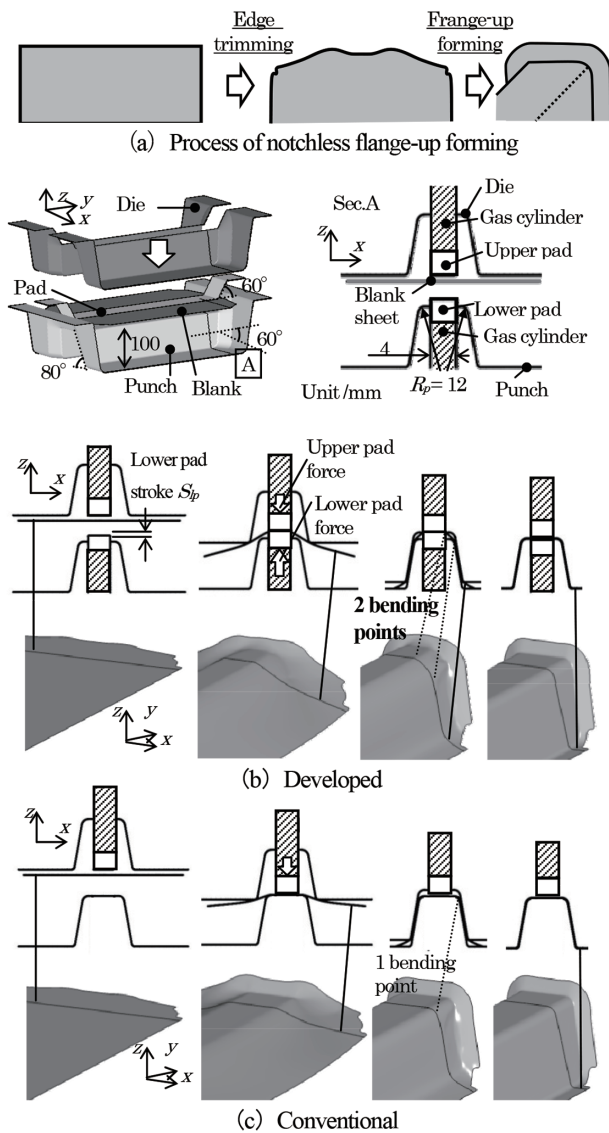


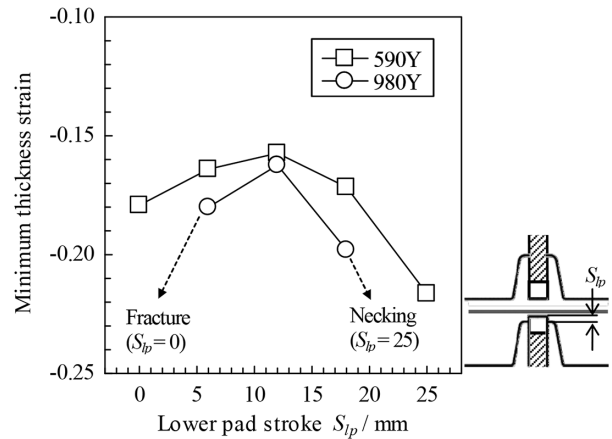
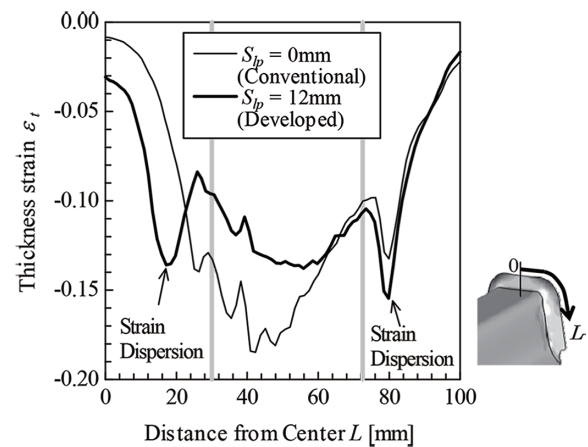
図3 フランジ連続化成形工程

Mechanism of developed notchless flange-up forming

($S_p=0\text{mm}$)では、980Yで伸びフランジ破断が生じた。一方、考案工法では伸びフランジ破断の抑制が可能となり、また板厚減少抑制の観点から最適な S_{ip} が存在することがわかる。さらに、図5に示すようなひずみ分散効果により、考案工法の最適条件では超ハイテンの980Yが590Yと同等の板厚減少に抑制できている⁷⁾。その結果、クリアランス $CL/t=11\%$ で外形抜きした980Yのブランクを用いてフランジ連続化成形が可能となった。

2.2 部材形状設計

成形技術開発と並行して、部品機能面からフランジ連続化部品の形状最適化を検討した。対象部品の一例のクロスメンバは車幅方向に配置され、走行時にはねじり変形、側面衝突時には軸圧壊変形を受け、車室内の変形を抑制する機能を担う。そこで形状最適化では、ねじり剛性および衝突初期の軸圧壊特性に着目した。

図4 考案工法によるフランジアップ成形性向上
Improvement of flange-up formability by developed method図5 考案工法によるひずみ分散効果
Improvement of strain dispersion in developed method

2.2.1 基礎モデル形状での形状最適化検討

フランジ連続化による接合部の強度および剛性の向上に加えて、部材断面形状の最適化による機能向上の検討を行った。

まず、簡易モデルでの数値解析で、部材断面のねじり剛性 C に及ぼす断面形状因子の影響を調査し、剛性観点から形状最適化を検討した⁸⁾。図6に、ねじり剛性 C に及ぼす稜線曲率半径 R_p の影響を示す。部材長 500mm 、断面高さ $h=100\text{mm}$ 、稜線曲率半径 $R_p=0, 5, 12, 30, 50\text{mm}$ の角筒形状とし、一端を完全拘束し、他端にねじり変形を与えた。縦軸は、稜線曲率半径 $R_p=0\text{mm}$ の剛性 $C_{R_p=0\text{mm}}$ を基準とした各稜線曲率半径 R_p における剛性 C の比率、横軸は、断面高さ h に占める稜線曲率半径 R_p の比率である。なお図中には、ティモシェンコの著書⁹⁾に記載された式(省略)から算出した理論曲線をあわせて示す。数値解析、理論値ともに、稜線曲率半径 R_p が部材高さ h の 12.5% の場合に、ねじり剛性 C が最大となる。なお、 h が変化してもねじり剛性が最大値を示す R_p/h の値は同等であることも確認した⁸⁾。

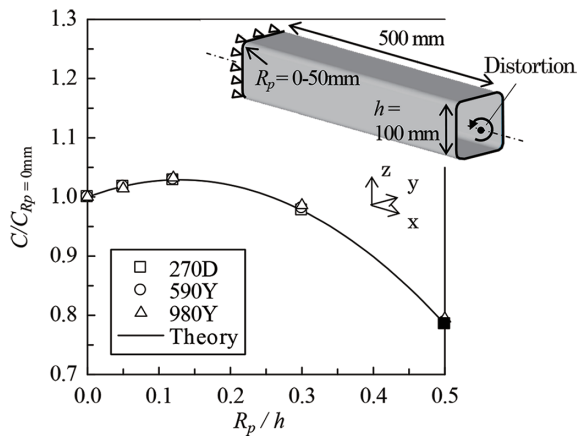


図6 ねじり剛性に及ぼす断面形状の影響 (基礎モデル形状)
Effect of sectional shape on torsional stiffness

つぎに、軸圧壊モデルでの検討を行った結果、図示しないが、変形抑制部材で重要な軸圧壊初期の衝突特性も、稜線曲率半径 R_p の拡大が有効であることがわかった。

以上より、従来では5mm以下の稜線曲率半径 R_p を、断面高さ $h=100\text{mm}$ の部材では約12mmに拡大することで、ねじり剛性および軸圧壊性能ともに向上することを明らかにした。なお、稜線曲率半径 R_p の拡大は、成形での伸びフランジ率低下にも繋がるため、本知見は機能と成形性の両面で寄与する。

2.2.2 実部品模擬形状での機能向上検証

実部品模擬形状での数値解析によって、現行 ($R_p=3\text{mm}$, 端部フランジ切欠き) に対する、最適構造 ($R_p=12\text{mm}$, 端部フランジ連続化) の機能向上効果を検証した。

図7、図8に、それぞれ評価解析モデル、機能に及ぼすフランジ連続化および形状最適化の効果を示す。現行に比べて最適構造では、ねじり剛性が約17%、衝突初期の軸圧壊特性が約30%向上することを明らかにした。

2.3 実部品模擬試作と実用化

考案工法によって、クロスメンバ等を想定した実部品模擬形状を試作した。2.2節で詳述したように、剛性および衝突特性から最適設計した断面形状を適用した。図9に、980Yを用いた成形品例を示す。接合用フランジが、従来切り欠かれていたコーナー部で、天板部や縦壁部と同等の高さで連続化されており、スポット打点が設けられている。

以上の成形技術開発および最適形状設計の成果は、ハイテン製のフランジ連続化部材の実用化に寄与し、自動車の軽量化および衝突安全性向上に貢献している。

3. 自由曲げ工法による湾曲部材の高強度・高機能化

内接する湾曲結合部を有するL字・T字部材は、断面線長変化が大きく成形難易度が高いため¹⁰⁾、従来の絞り工法

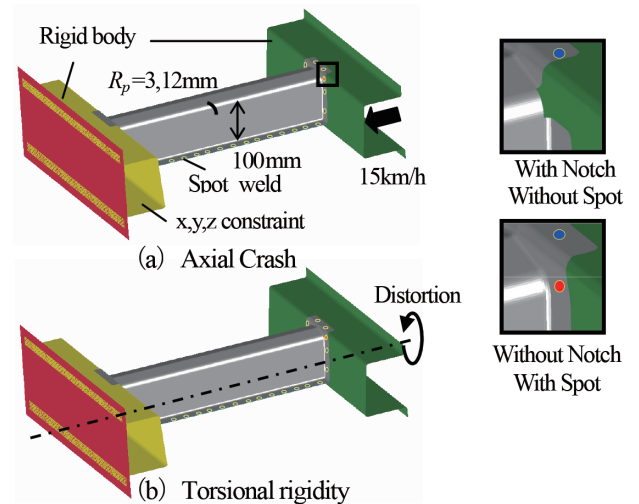


図7 実部品模擬形状の解析モデル
Performance evaluation model simulating actual auto-body parts

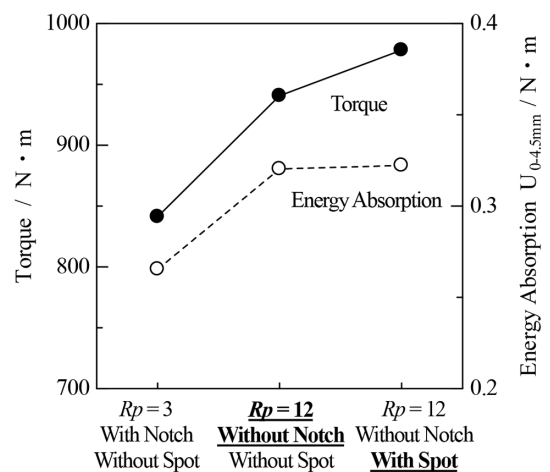


図8 フランジ連続化および形状最適化による機能向上効果
Performance improvement by notchless flange and shape optimization

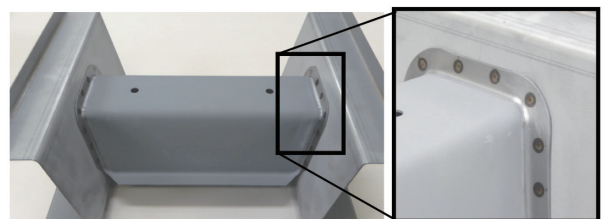


図9 超ハイテン製フランジ連続化成形品
Developed structural parts with notchless flange of ultra-high tensile strength steel (UHSS)

(以下、従来工法) ではハイテン化が困難とされてきた。そこで、超ハイテンでもL字やT字形の湾曲部の加工を可能とする新たな加工原理に基づく工法(自由曲げ工法)を開発し^{11,12)}、部材機能向上効果を検証することで、構造部材の部材機能向上に取り組んだ。

3.1 成形技術の開発（自由曲げ工法：NSafe®-FORM-LT）

図 10、図 11 に、基礎検討で用いた T 字モデル形状、自由曲げおよび従来工法を示す。従来工法で、ハイテンを湾曲形状に加工すると、天板部にしわが生じる。しわ低減のためブランクに高い張力を付与すると、割れが生じる。そこで図 11 に示すように、しわ対策として天板部のブランクを拘束するパッドを適用し、割れ対策として曲げ工法を適用し、さらに割れ懸念部への流入促進（ブランク流入制御）を行った。

図 12 に、割れおよびしわ懸念部の変形挙動を、工法間で比較して示す。しわが懸念される天板部は、従来工法では、ひずみ比が -1 より小さいしわ危険領域に広く分布し

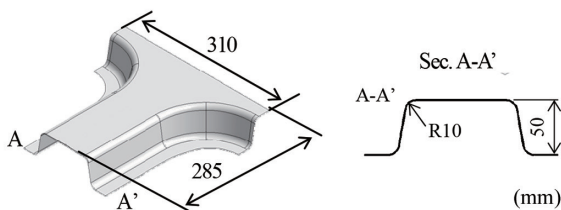


図 10 T 字モデル形状
“T”-shape model

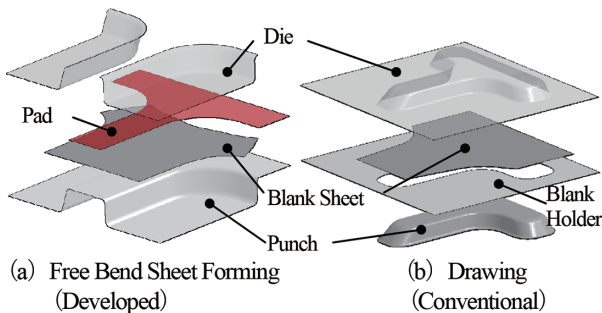


図 11 自由曲げ工法（考案）と絞り工法（従来）
Comparison between developed and conventional forming method

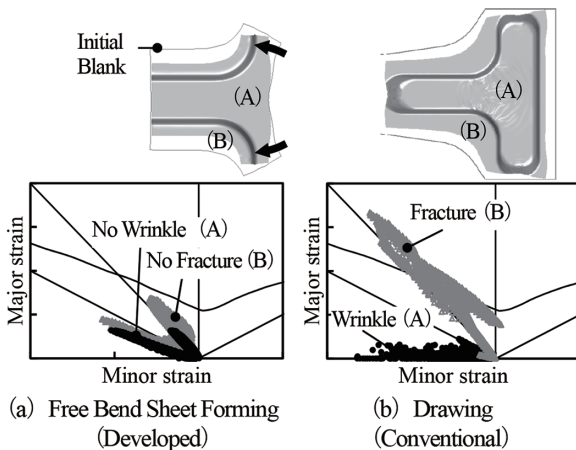


図 12 自由曲げ工法の成形性向上機構
Mechanism of formability improvement by free bend sheet forming

ている一方で、自由曲げ工法では、最小主ひずみが抑制され、ひずみ比も単軸変形寄りに制御できている。つぎに、割れが懸念される伸びフランジ部は、従来工法では、エッジ部の単軸変形領域、エッジより内側の絞り～平面ひずみ変形領域ともに、ひずみが大きく割れが生じる。一方、自由曲げ工法では、いずれの割れ懸念領域でもひずみが抑制できている。

図 13 の成形性評価結果より、従来工法では、ハイテン化にともない、割れ懸念部の板厚減少が顕著に増大し、しわ指標の曲率最大最小差も悪化する。一方、自由曲げ工法では、ハイテン化にともなう割れ、しわの危険性の増大が抑制されている。

以上より、自由曲げ工法が、割れ・しわ懸念部での“変形経路制御”、“ひずみ抑制”により、超ハイテンでも湾曲部を有する難加工部材の成形を実現する可能性が確認された。

3.2 自由曲げ工法による部材機能向上検証

前節で、難加工構造部材の更なる高強度化に寄与する自由曲げ工法の成形性向上メカニズムを詳述した。つぎに、本工法適用による衝突機能向上効果を数値解析で検証する。

図 14 に、B ピラー R/F (R/F: レインフォースメント) 模擬形状を対象とした衝突解析モデルを示す。供試材は 440 MPa ～ 980 MPa 級のハイテンとした。はじめに成形解析を

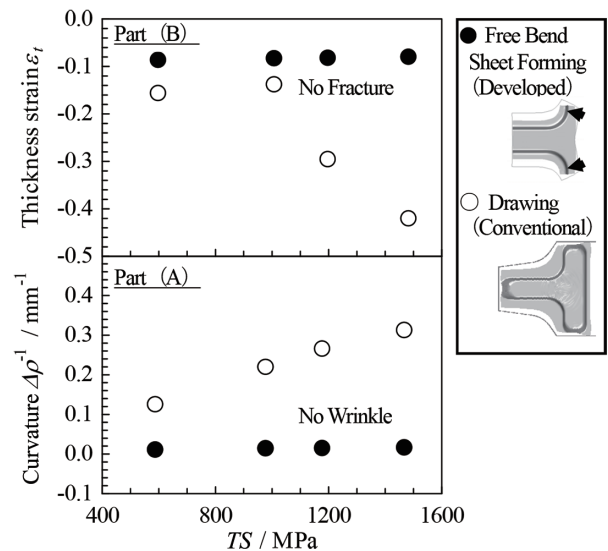


図 13 自由曲げ工法による成形性向上効果
Improvement of formability by free bend sheet forming

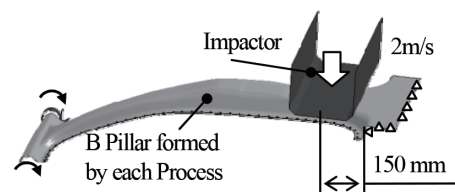


図 14 衝突解析モデル
Crash analysis model

行い、ひずみをマッピングした後、衝突解析を実施した。工法の効果検証のため、自由曲げおよび従来工法と比較した。側面衝突では、Bピラー下部が圧壊することで衝突エネルギーを吸収する構造が一般によく見られる。そこで、Bピラー下部のエネルギー吸収量（以下、 $E.A.$ ）を評価するため、下部にインパクトを衝突させる条件とした。 $E.A.$ は、衝突開始からストローク 150 mm までで算出した。

図 15 に、両工法で成形した B ピラー R/F の衝突機能を比較して示す。従来工法の場合、440W, 590Y では過大な割れ、しわを回避する条件が得られたが、980Y では割れやしわが発生し成形できない。一方、自由曲げ工法では、いずれの鋼板でも割れ、しわは無く加工可能である。図 15 より、ハイテン化にともない $E.A.$ は向上しており、自由曲げ工法だけが成形できた 980Y は、590Y よりも大幅に高い $E.A.$ を示す。さらに、440W, 590Y では、同じ部材形状および鋼板であるにもかかわらず、自由曲げの方が従来工法より $E.A.$ が高いことがわかる。これらの差異を分析するため、図 16 に、圧壊部近傍の成形ひずみ分布を両工法で比

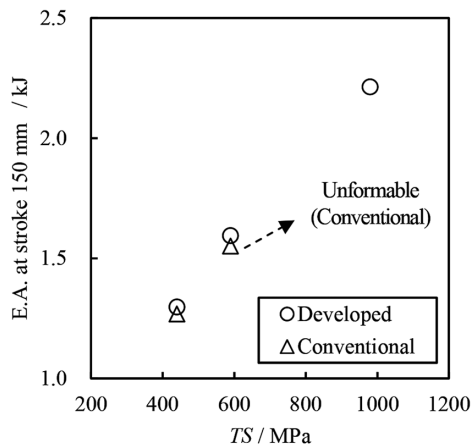


図 15 自由曲げ工法による衝突性能向上
Improvement of crash performance of structural parts formed by free bend sheet forming

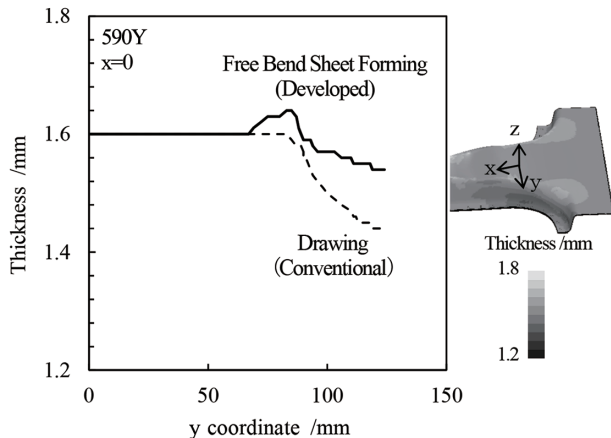


図 16 自由曲げ工法による板厚減少抑制効果
Suppression of thickness decrease by free bend sheet forming

較して示す。圧壊部近傍の縦壁の板厚減少が、自由曲げの方が従来工法よりも低減されており、両工法の成形性差異が $E.A.$ に影響を及ぼすことが示唆される。

以上より、自由曲げ工法は、部材の更なるハイテン化および板厚減少抑制効果によって、部材機能の大幅な向上に貢献することを明らかにした。

3.3 実部品模擬試作と実用化

前節までに、自由曲げ工法による難加工湾曲形状の成形性向上効果を詳述し、衝突性能面での有効性を確認した。ここでは代表的な湾曲部品である A・B ピラー R/F 実部品模擬試作により、同工法の妥当性を検証する。図 17 に、1470MPa 級超高強度鋼板を用いた自由曲げ工法による試作品を示す^{13,14)}。

A ピラー R/F 試作では、難易度の高い L 字成形に自由曲げ工法を適用した。図示しないが、第 1 工程では絞り成形で主に上部を成形し、第 2 工程に自由曲げ工法を適用し、第 3 工程のスタンピングで座面等を成形した¹³⁾。B ピラー R/F 試作でも同様に、T 字部成形に自由曲げ工法を適用した。B ピラー R/F は、部品の中央部付近の、側面視で湾曲しているため、曲げ工法ではフランジしわが懸念される。そこで予め、浅絞り成形にて中央部付近を成形した後、自由曲げ工法を適用した。両部品ともに、従来工法では過大なしわ等が生じるため加工できない。一方、自由曲げ工法を適用することで、超ハイテンで割れ、しわは無く、加工できることが実証された^{13,14)}。いずれの部品も、絞り工法と比べ必要な材料の余肉部が非常に少なく、材料歩留も大幅に改善することを確認している。

以上のように、自由曲げ工法は難加工な湾曲結合部を有する自動車構造部材の実成形への適用が可能となり、車体の更なる高強度化、軽量化に貢献できる。

4. 結 言

一層の車体軽量化ならびに衝突安全性向上には、部材の更なる高強度化に加えて、部材結合部の高強度・高剛性化

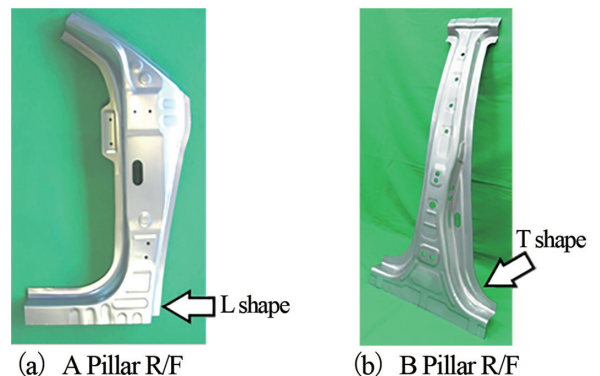


図 17 超ハイテン製自由曲げ工法成形品^{13,14)}
Developed structural parts formed by free bend sheet forming

が有効である。代表的な部材結合部 (1) 長手方向端部の接合用フランジと (2) L 字や T 字型の湾曲内接結合部は、割れあるいは過大なしわが生じる難加工部である。そこで、これら結合部を有する高強度・高機能部材開発のため、“ひずみ分散・抑制”、“変形経路制御”の観点から、加工技術を主体とした技術群の確立に取り組んだ。

4.1 フランジ連続化による高機能部品の開発

- (1) ひずみ分散を狙い考案したフランジ連続化工法は、割れ懸念部の板厚減少を抑制し、超ハイテンの外形抜きプランクでのフランジ連続化成形を可能とする。
- (2) 最適構造 ($R_p=12\text{mm}$, 端部フランジ連続化) では、現行 ($R_p=3\text{mm}$, 端部フランジ切欠き) に対して、ねじり剛性が約 17%、衝突初期の軸圧壊特性が約 30%向上する。

4.2 自由曲げ工法による湾曲部材の高強度・高機能化

- (1) 自由曲げ工法は、割れ・しわ懸念部の“変形経路制御”および“ひずみ抑制”により、超ハイテンでも、平面視の湾曲を有する難加工構造部材の成形を可能とする。
 - (2) 自由曲げ工法は、構造部材の高強度化を可能とすることで部材機能の大幅な向上に貢献すること、また同じ部材形状、鋼板強度であっても、板厚減少抑制効果によって部材機能向上効果があることを明らかにした。
- これら開発成果により、ハイテン・超ハイテン製のフランジ連続化部材および L 字・T 字型湾曲部材が実用化され、自動車の軽量化および衝突安全性向上に貢献している。

参照文献

- 1) 中澤嘉明, 吉田亨, 水村正昭, 田中康治, 泰山正則, 樋渡俊二: 自動車技術会フォーラムテキスト, 2017
- 2) プレス加工データブック編集委員会編: プレス加工データブック. 日刊工業新聞社, 1980, p.152
- 3) 樋渡俊二, 佐久間康治: 自動車技術会学術講演会前刷集, 2000, No.53-00, 文献 No.20005112
- 4) 西村隆一, 中澤嘉明: 塑性と加工, 57 (660), 28-33 (2016)
- 5) 西村隆一, 中澤嘉明: 塑性と加工, 57 (660), 34-40 (2016)
- 6) 西村隆一, 伊藤泰弘, 中田匡浩, 中澤嘉明: 塑性と加工, 57 (670), 1062-1069 (2016)
- 7) 西村隆一, 中澤嘉明, 浜孝之, 宅田裕彦: 塑性と加工, 58 (675), 304-310 (2017)
- 8) 大塚研一郎, 中澤嘉明: 自動車技術会論文集, 43 (5), 1087-1092 (2012)
- 9) Timoshenko, S.P., Gere, J.M.: Theory of Elastic Stability. McGraw-Hill, 1961
- 10) 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4版. 日刊工業新聞社, 2017, p.144
- 11) 田中康治, 宮城隆司, 小川操, 名取純希, 菅原稔: 平成 30 年度塑性加工春季講演会講演論文集, 2018, p.235-236
- 12) 田中康治, 宮城隆司, 小川操, 名取純希, 菅原稔: 平成 30 年度塑性加工春季講演会講演論文集, 2018, p.237-238
- 13) 田中康治, 宮城隆司, 小川操, 名取純希, 菅原稔: 平成 30 年度塑性加工春季講演会講演論文集, 2018, p.239-240
- 14) 田中康治, 宮城隆司, 小川操, 名取純希, 菅原稔: 平成 30 年度塑性加工春季講演会講演論文集, 2018, p.241-242



西村隆一 Ryuichi NISHIMURA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
主幹研究員 博士(エネルギー科学)
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



田中康治 Yasuharu TANAKA
名古屋製鉄所 品質管理部
設計・解析技術室長



宮城隆司 Takashi MIYAGI
名古屋製鉄所 品質管理部
設計・解析技術室 主幹



小川 操 Misao OGAWA
名古屋製鉄所 品質管理部
設計・解析技術室 主幹



大塚研一郎 Kenichiro OTSUKA
名古屋技術研究部 主幹研究員



中澤嘉明 Yoshiaki NAKAZAWA
技術開発企画部 研究推進室長
博士(工学)