

受賞技術-37

自動車の進化を支える超高強度鋼板加工技術の開発

Development of Forming Technology of Ultrahigh-strength Steel Sheet Contributing to Evolution of Automobiles

日本製鉄(株) 技術開発本部
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
課長

西村隆一
Ryuichi Nishimura

日本製鉄(株) 名古屋製鉄所
品質管理部 ソリューション室
課長

宮城隆司
Takashi Miyagi

日本製鉄(株) 東日本製鉄所
品質管理部 君津ソリューション室
上席主幹

田中康治
Yasuharu Tanaka

1 緒言

地球温暖化抑止および衝突安全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。さらにライフサイクルでのCO₂排出量削減および製造コスト増抑制の観点から、引張強度TSが780MPa超の超高強度鋼板(以下、超ハイテン)の適用拡大が望まれる¹⁾。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ていた。温暖化抑止ならびに衝突安全性向上には、複雑形状の中でも特に重要な機能を

担う部材結合部の高強度・高剛性化が有効であると考えた。Fig.1に示すように、部材結合部には(1) L字やT字状の湾曲した結合部と(2) 他部品と当接する長手方向端部の接合用フランジの主に2種類である。これら結合部は割れ・しわの観点から特に難加工である。

そこで、結合部(1)、(2)を有する骨格部材のさらなる高強度化のため、加工技術を主体とした開発に取り組んだ。新たなプレス工法は「変形分散・抑制」、「変形様式の制御」の観点から開発を行った。つぎに、これら開発工法が実現する高強度部材の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、開発した超ハイテンの結合部工法の妥当性を実証した。これら(1)、(2)の高強度・高機能部材開発について、それぞれ2章、3章で紹介する。

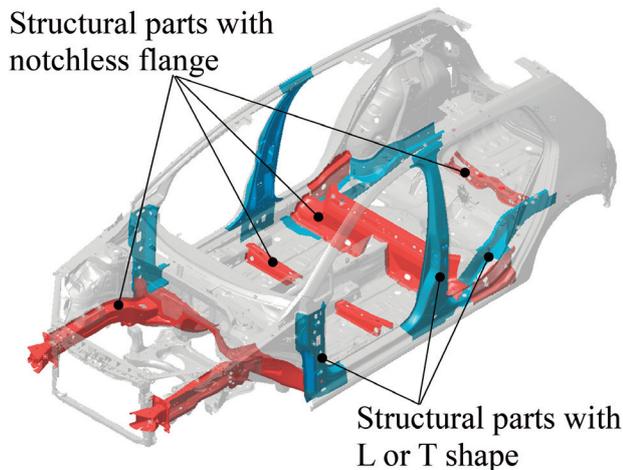


Fig.1 Examples of auto-body application parts of developed press-forming technology. (Online version in color.)

2 L, T字状結合部を有する骨格部材の高強度化

Aピラー-R/FやBピラー-R/F等の主要骨格部材は、サイドシル等の隣接する部材と結合するために下端部がそれぞれL字状や、L字が二つ重なったT字状の湾曲した縦壁とフランジを持つ形状になっている(Fig.1)。このような骨格部材端部に見られるL字やT字状湾曲部位は、後述のように一般的な絞り成形では割れとしわが発生しやすく²⁾、ハイテンでの成形が難しい。そこで、超ハイテンでもL字やT字形の加工を可能とする、新たな加工原理(変形様式の制御)に基づく工法を開発することで³⁻⁵⁾、骨格部材機能の向上に取り組んだ。

2.1 加工技術の開発 (自由曲げ工法: NSafe®-FORM-LT)

Fig.2に基礎検討で用いたT字モデル形状、Fig.3に開発した自由曲げ工法と従来の絞り工法の金型と素板 (ブランク) を示す。従来工法で、ハイテンをT字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Fig.3 (a) に示すように、開発工法ではしわ対策^{6,7)}として天板部のブランクを扶持するパッドを用い、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³⁾。

Fig.4に、数値解析結果より成形過程でのブランク挙動を示す。天板面は、初期状態から成形終了までパンチとパッドで扶持され、面外変形が拘束されるためしわは発生しない。ダイにより天板面以外が曲げ成形され、成形が進むにつれてT字両端部の材料が湾曲内側に大きく流入して縦壁とフランジが成形される。Fig.5上部に示すように、絞り成形の場合はアッパー側から材料が流入してT字両端部の縦壁が成形されるが、Fig.4, Fig.5上部に示すように、自由曲げ工法ではロア側から材料が流入して成形される (Fig.5 (a) 矢印)。

Fig.5下部に、割れおよびしわ懸念部の変形様式 (変形ひずみ) を工法間で比較して示す。しわが懸念される天板部 (領域A) 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ている一方で、自由曲げ工法ではひずみが抑制され、ひずみ比も-1程度のせん断変形近傍に制御できている。つぎに、割れが懸念される伸びフランジ部 (領域B) 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

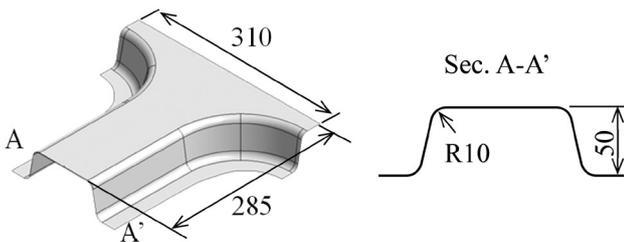


Fig.2 "T"-shape model.

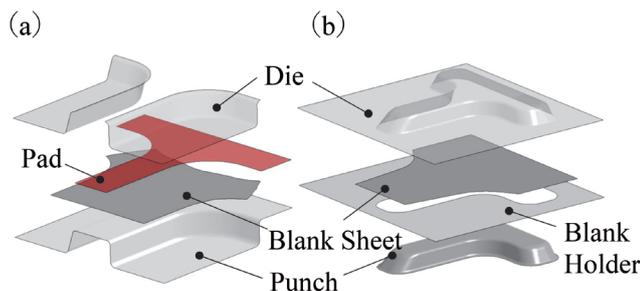


Fig.3 Comparison between developed and conventional forming method. (a) Free Bend Sheet Forming (Developed), (b) Drawing (Conventional). (Online version in color.)

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。その結果、Fig.6の成形性に及ぼす工法および材料強度の影響より、従来工法では、ハイテン化にともない、割れ、しわ指標ともに悪化する。一方、自由曲げ工法では、ハイテン化に伴う割れ・しわの悪化が抑制されている。

自由曲げ工法の成形性改善効果を確認するために、数値解析と同様のモデル形状で加工実験を行った。供試材は、板厚1.2mm, 980, 1470 MPa級超ハイテンとした。Fig.7に成形品写真を示すように、いずれも割れ、しわなく成形可能であった。

以上より、自由曲げ工法が、割れ・しわ懸念部での「変形様式制御、ひずみ抑制」により、超ハイテンでも湾曲結合部を有

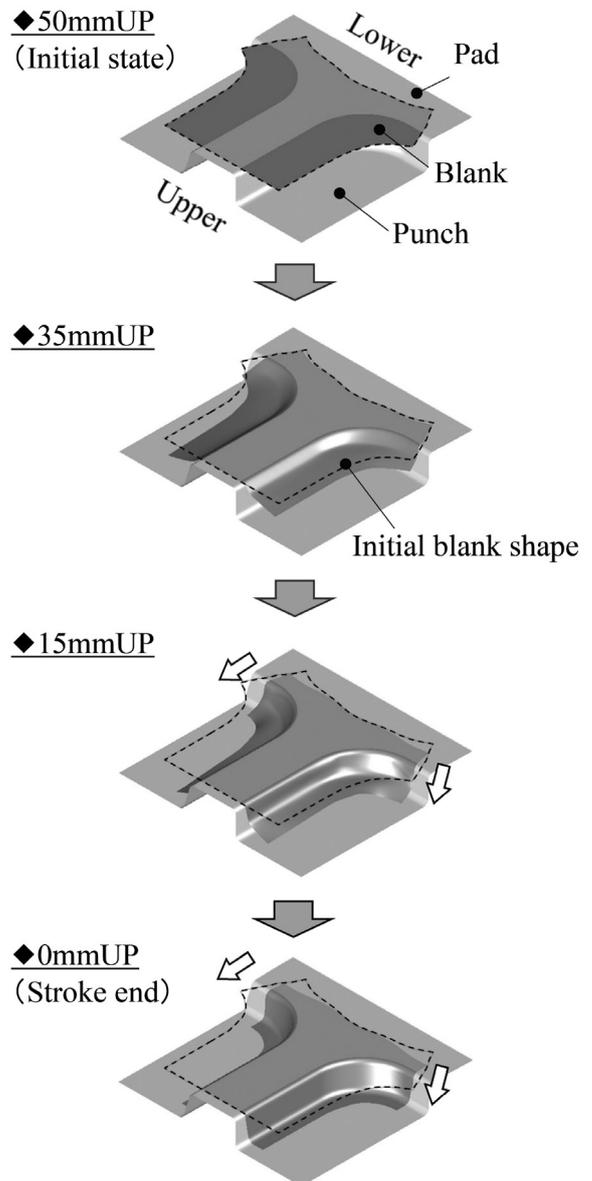


Fig.4 Blank inflow behavior during Free Bend Sheet Forming.

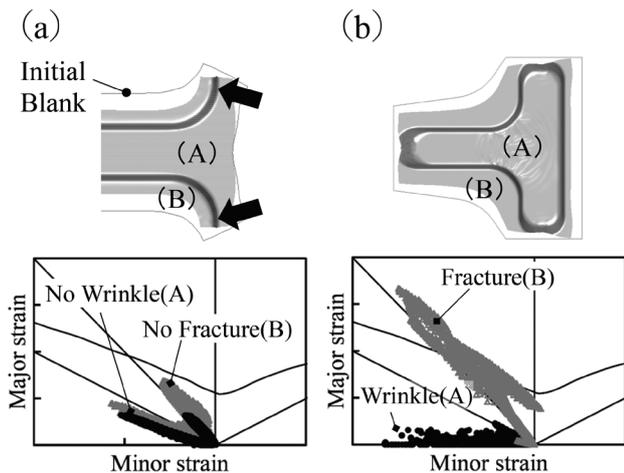


Fig.5 Mechanism of formability improvement by Free Bend Sheet Forming. (a) Free Bend Sheet Forming (Developed), (b) Drawing (Conventional).

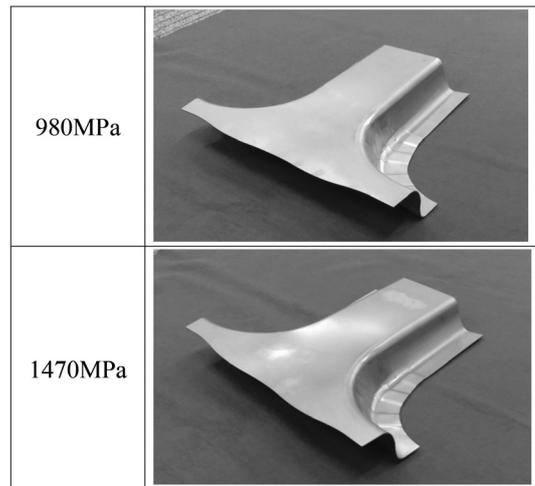


Fig.7 Press-formed samples of ultra high strength steel by Free Bend Sheet Forming.

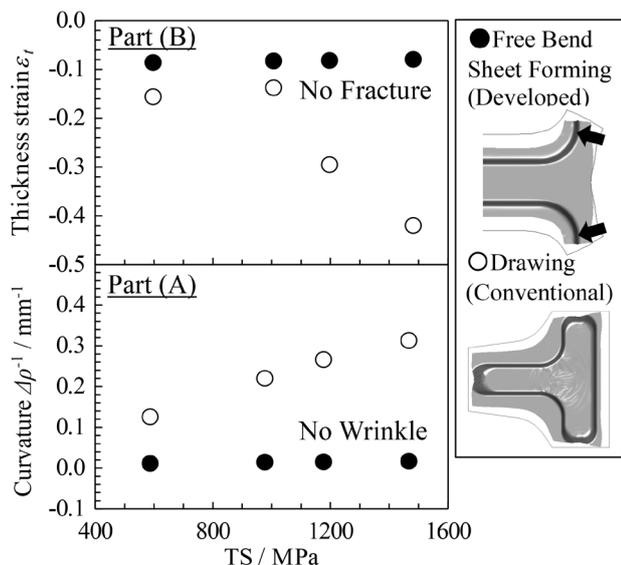


Fig.6 Improvement of formability by Free Bend Sheet Forming.

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⁾。

2.2 自由曲げ工法による部材機能向上

自由曲げ工法適用による衝突機能向上効果を数値解析で検証を行う。Fig.8 (a) に、Bピラー-R/F模擬形状の衝突解析モデルを示す。供試材は440~980MPa級とした。まず成形解析を行い、その結果のひずみをマッピングした後、衝突解析を実施した。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的である。そこで、Bピラー下部の衝突時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。Fig.8 (b) に、自由曲げと従来工法で成形した場合の衝突機能を比

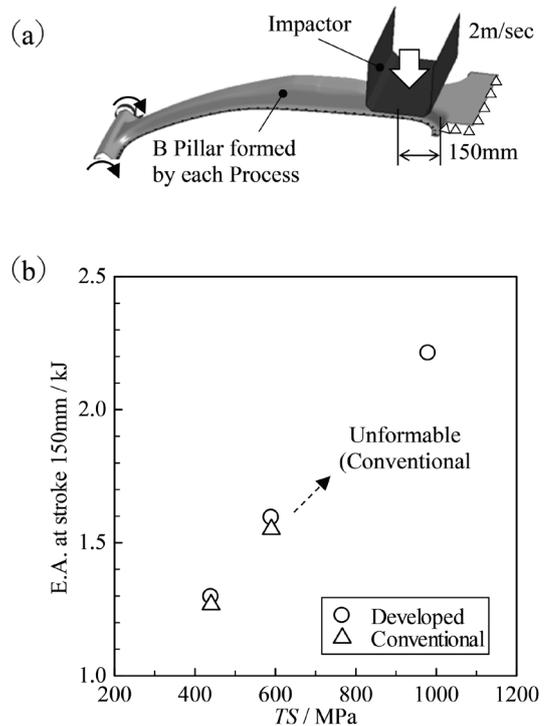


Fig.8 Improvement of crash performance of structural parts formed by Free Bend Sheet Forming. (a) Crash analysis model, (b) Effect of forming method and TS on *E.A.*

較して示す。従来工法は、980MPa級を成形できない。一方、自由曲げ工法はいずれの鋼板でも割れ・しわ無く成形可能である。ハイテン化にともない*E.A.*は向上し、自由曲げ工法だけが成形できた980MPa級は、590MPa級よりも大幅に高い*E.A.*を示す。なお、両工法とも成形可能な440、590MPa級でも、板厚減少抑制効果によって自由曲げの方が従来工法より*E.A.*が高い。

以上より、自由曲げ工法は、部材の更なるハイテン化と板厚減少抑制効果により、大幅な衝突機能向上、車体の軽量化に貢献できる。

2.3 実部品模擬試作と実用化

前節までに、開発した自由曲げ工法の難加工湾曲形状の成形性向上効果を詳述し、衝突機能面での有効性を確認した。ここでは代表的な湾曲骨格部品であるA, BピラーR/F模擬試作により、開発工法の妥当性を検証する。AピラーR/F試作では、L字成形に自由曲げ工法を適用した。第1工程では絞り成形で主に上部を成形し、第2工程で自由曲げ工法を行い、第3工程のスタンピングで座面等を成形した⁶⁾。BピラーR/F試作でも同様に、T字成形に自由曲げ工法を適用した。BピラーR/Fは、部品の中央部付近で、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、浅絞り成形で中央部付近を成形した後、自由曲げ工法を適用した⁷⁾。

Fig.9に、自由曲げ工法による1470MPa級超ハイテン試作品を示す。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が、自由曲げ工法の適用により、超ハイテンで割れ・しわ無く、加工できることが実証された^{6,7)}。さらに、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超ハイテン骨格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軽量化、材料歩留向上を通じて地球温暖化抑制および衝突安全性向上に貢献している。

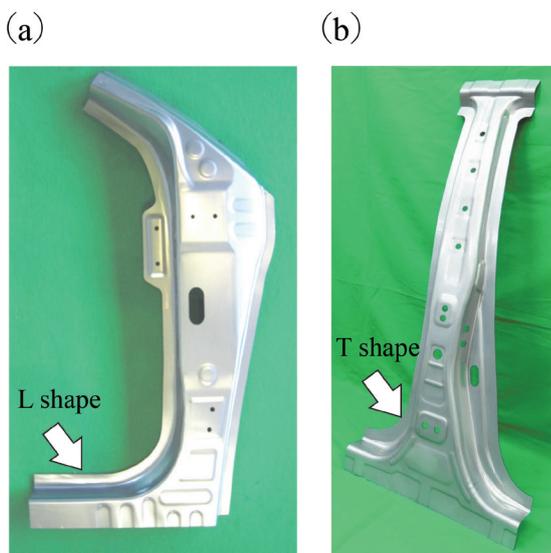


Fig.9 Developed structural parts formed by Free Bend Sheet Forming^{13,14)}. (a) A Pillar R/F, (b) B Pillar R/F. (Online version in color.)

3 連続フランジ結合部を有する骨格部材の高機能化

クロスメンバ等の主要骨格部材では、隣接する部材と結合するために接合用の端部フランジ^{8,9)}が設けられる (Fig.1)。Fig.10に示すように、端部フランジはコーナー部の成形難易度が高い^{10,11)}ため、特に引張強度TSが440 MPaを超えるハイテンでは、コーナー部には切欠きが設けられていた。ところが、端部フランジは部材間接合用として車体剛性や衝突特性面で重要な機能を担うため、コーナー部切欠きによって、剛性が低下したり、ハイテンの強度特性が衝突特性に活かしきれていない状態であった。そこで、ハイテンでもコーナー部が連続化された連続フランジ高機能部品開発のため、加工技術を主体とした開発を行った。

3.1 加工技術の開発 (連続フランジ工法、NSafe®-FORM-RU)

端部フランジが連続化されたハイテン部材の成形を可能とする連続フランジ成形開発に取り組んだ。端部フランジはL, T字の湾曲結合部と同様に、従来の絞り工法では割れやしわが生じて加工できない。そこで開発した連続フランジ工法では、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。

詳述しないが、前工程については (1) 超ハイテンでの伸びフランジ成形性を低下させる過大ばりが、外形抜き時の素材倒れ込みに起因すること、(2) 素材倒れ込みを抑制する外形

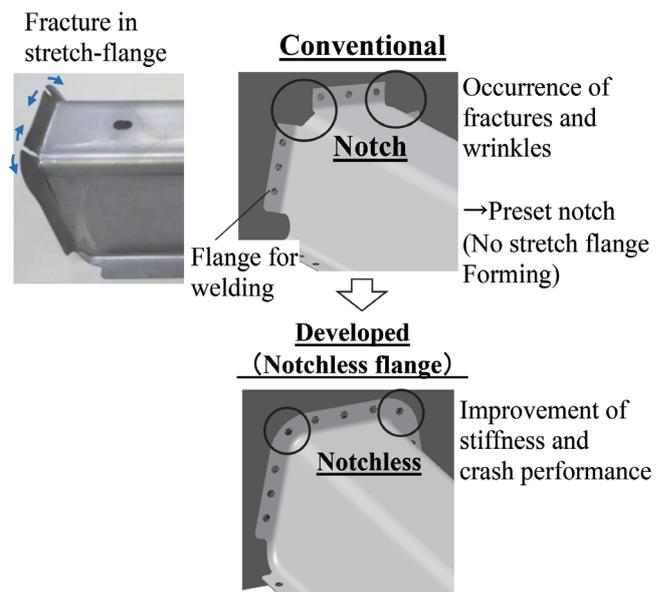


Fig.10 Background of development of structural parts with notchless flange. (Online version in color.)

抜き条件や、外形抜き金型構造を明らかにした¹²⁾。

以下、後工程に関する検討結果を詳述する。ハイテンのフランジアップ成形に通常の曲げ工法（以下、従来工法）を適用すると、フランジコーナー部の1か所に変形が集中し、割れまたはしわが生じてしまう^{10,11)}。そこで「変形分散」の観点から工法開発を行った¹³⁾。

Fig.11に、開発工法の一例および従来工法の第1工程を示す。両工法ともに、第1工程では端部フランジを0°から60°まで立ち上げながらハット型断面を形成し、第2工程では端部フランジを製品角度までさらに立ち上げる。Fig.11 (b) に

示すように、開発工法では第1工程で、下金型側に加圧機構で保持した下パッドを適用した点が特徴である。これにより成形初～中期、下パッドがパンチ頂部より下パッドストローク S_p だけ上方でブランクの幅方向中央部を保持した状態で成形が進行する。その後、成形終了時には従来工法同様の成形品形状となる。このように開発工法では、成形中にブランクをフランジ根元の片側2か所（従来1か所）で曲げることで、先端部伸びフランジの変形分散を実現した。

以上のように、「変形分散」の観点からフランジアップ成形部の割れ、しわを抑制する連続フランジ工法開発を行った。

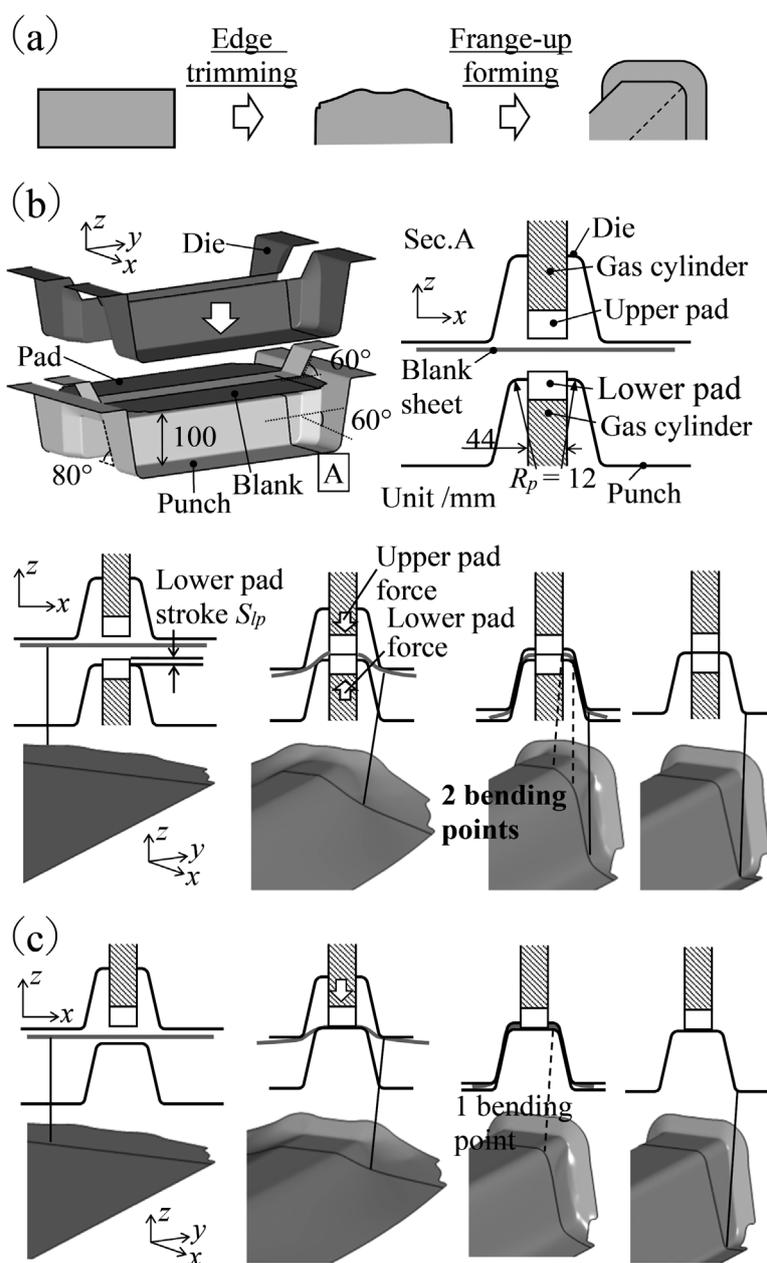


Fig.11 Mechanism of developed notchless flange-up forming. (a) Process of notchless flange-up forming, (b) Developed, (c) Conventional.

3.2 連続フランジ化による部材機能向上

つぎに、部材機能向上、軽量化を最大化するため、連続フランジ部品の最適形状を検討した。対象部品一例のクロスメンバは、走行時にねじり変形を受け、側面衝突時に軸圧壊変形を受け、車室内変形を抑止する。そこで、ねじり剛性と衝突初期の軸圧壊特性の観点から形状最適化を行った。

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 および衝突初期の軸圧壊特性に及ぼす断面形状因子の影響を調査した。Fig.12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 $h=100\text{mm}$ 、 $R_p=0\sim 50\text{mm}$ 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、 $R_p=0\text{mm}$ 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 R_p の比率である。なお図中には、ティモシェンコの著書¹⁴⁾に記載された式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、 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¹⁵⁾。また図示し

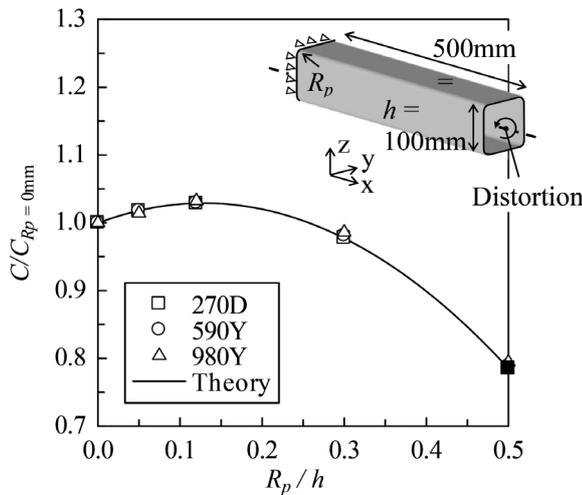


Fig.12 Effect of sectional shape on torsional stiffness.

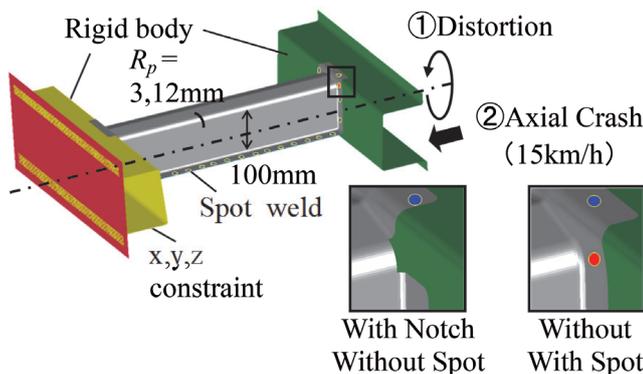


Fig.13 Performance evaluation model simulating actual auto-body parts. (Online version in color.)

ないが、軸圧壊モデルでの検討を行った結果、変形抑制部材で重要な軸圧壊初期の衝突特性も、 R_p の拡大が有効であることがわかった。つぎに、Fig.13に示す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。その結果、現行に比べ最適構造は、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。

以上より、骨格部材の結合部フランジをハイテンで連続フランジ化する加工技術に加え、 R_p を断面高さの12.5%程度に拡大することで、部材機能が大幅に向上し、車体軽量化に貢献できる。

3.3 実部品模擬試作と実用化

開発工法によって、クロスメンバ等を想定した実部品模擬形状を試作した。前節で詳述した、機能観点で最適設計した断面形状を適用した。590, 980MPa級を用いて、フランジ高さは $H=15\text{mm}$ で固定した。下パッドストローク $S_{lp}=0\sim 25\text{mm}$ 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。

Fig.14に、成形性に及ぼす S_{lp} の影響を示す。縦軸は最薄部板厚ひずみを $S_{lp}=12.5\text{mm}$ での最薄部板厚ひずみで除した値を示す。従来工法 ($S_{lp}=0\text{mm}$) では、980MPa級超ハイテンで伸びフランジ破断が生じた。一方、開発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_{lp} が存在することがわかる。さらに、最適条件では超ハイテンの980MPa級が590MPa級と同等の板厚減少に抑制できている。その結果、外形抜きした980Yのブランクを用いて連続フランジ成形が可能となった¹³⁾。Fig.15に示すように、接合用フランジが、従来切り欠かれていたコーナー部で、

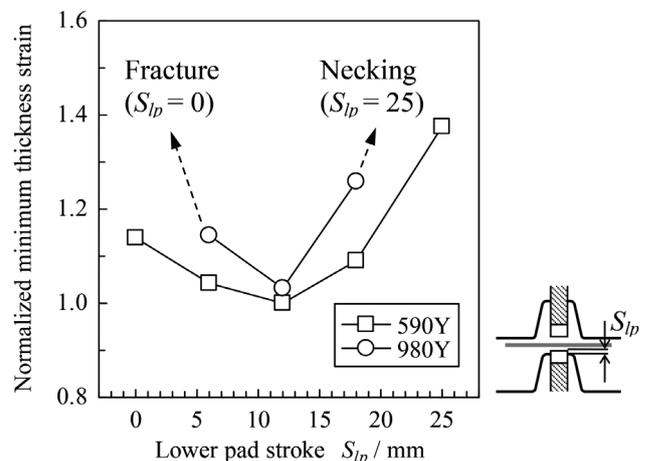


Fig.14 Improvement of flange-up formability by developed method.

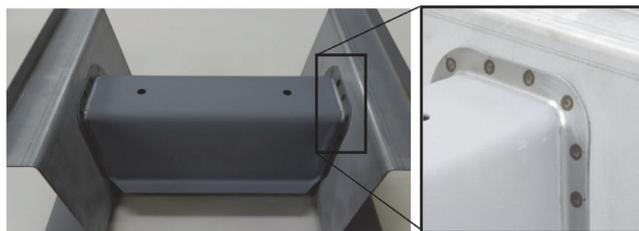


Fig.15 Developed structural parts with notchless flange of ultra high strength steel. (Online version in color.)

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検討の成果は、ハイテン、超ハイテン製の連続フランジ部材の実用化に寄与し、車体の更なる高強度軽量化、材料歩留向上を通じて地球温暖化抑止および衝突安全性向上に貢献している。

4 結言

地球温暖化抑止および衝突安全の観点から、自動車車体への超ハイテンの適用拡大が望まれていたが、一般に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ていた。複雑形状の中でも特に部材結合部の高強度・高剛性化が、温暖化抑止ならびに衝突安全性向上に有効である。そこで「変形様式の制御」、「変形分散・抑制」の観点から、難成形な部材接合部に関して加工技術を主体とした技術群の確立に取り組んだ。

4.1 L, T字結合部を有する骨格部材の高強度

- (1) 自由曲げ工法は「変形様式制御と変形抑制」により、超ハイテンでもL, T字状の湾曲を有する難加工結合部を有する骨格部材の成形を可能とする。
- (2) 自由曲げ工法は、L, T字状結合部を有する骨格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を明らかにした。

4.2 連続フランジ結合部を有する骨格部材の高機能化

- (1) 連続フランジ工法は「変形分散」により、超ハイテンの連続フランジ結合部の成形を可能とする。

- (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、衝突初期の軸圧壊特性ともに大幅に向上する。

これら開発成果により、ハイテン・超ハイテン製のL字・T字結合部を有する骨格部材および連続フランジ結合部を有する骨格部材が実用化され、地球温暖化抑止および衝突安全性向上に貢献している。

参考文献

- 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) 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), 144.
- 3) 田中康治, 宮城隆司, 小川操, 名取純希, 菅原稔: 塑性と加工, 60 (2019) 705, 283.
- 4) 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), 239.
- 5) 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), 241.
- 6) 田中康治, 王志剛, 唐崎裕章, 菅原稔: 塑性と加工, 62 (2021) 730, 159.
- 7) 田中康治, 王志剛, 唐崎裕章, 菅原稔: 塑性と加工, 62 (2021) 730, 168.
- 8) 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), 152.
- 9) 樋渡俊二・佐久間康治: 自動車技術会学術講演会前刷集, No.53-00, 文献No20005112, (2000).
- 10) 西村隆一, 中澤嘉明: 塑性と加工, 57 (2016) 660, 28.
- 11) 西村隆一, 中澤嘉明: 塑性と加工, 57 (2016) 660, 34.
- 12) 西村隆一, 伊藤泰弘, 中田匡浩, 中澤嘉明: 塑性と加工, 57 (2016) 670, 1062.
- 13) 西村隆一, 中澤嘉明, 浜孝之, 宅田裕彦: 塑性と加工, 58 (2017) 675, 304.
- 14) S.P.Timoshenko and J.M.Gere: Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, (1961).
- 15) 大塚研一郎, 中澤嘉明: 自動車技術会論文集, 43 (2012) 5, 1087.

(2022年2月22日受付)