

多角形閉断面形状を有する軽量・高性能自動車部品の プレス成形技術の開発

Development of Press Forming Technologies for Closed Polygonal Cross-section Parts for Automobiles with Light Weight and High Performance

樋貝 和彦 HIGAI Kazuhiko 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)
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 (副課長)
山崎 雄司 YAMASAKI Yuji 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 (部長)

要旨

軽量化と衝突安全性能向上を両立させることを目的に、フランジを最小化した多角形閉断面部品の新しいプレス成形技術を開発した。開発した成形技術は汎用のプレス機を用いて成形が可能である。開発した成形技術を用いてフロントサイドメンバーモデル部品の試作を行い、性能および軽量化効果を評価した。その結果、従来のハット形状部品と比較し高い衝突性能と剛性を示し、断面形状最適化と高強度鋼板の適用により軽量化との両立が可能であることが分かった。

Abstract:

A new press forming technology has been developed for closed polygonal cross-section automotive parts to achieve both the weight reduction and the crashworthiness improvement. The developed press forming method can be performed by conventional mechanical press machines. A front side member model of a flange minimizing closed hexagonal cross-section manufactured by the developed press forming method shows high crashworthiness and stiffness in comparison with conventional hat-shape parts, and weight reduction can be achieved by combination of optimizing a cross-section shape and using high strength steel sheet.

1. はじめに

CO₂ 排出量抑制による地球環境保全の観点から、自動車開発において車体軽量化は重要な課題である。同時に、衝突安全性や車体剛性などの特性向上も重要な課題であり、これらの特性を両立させることが必須となっている。すでに、各種メンバーなどの骨格部品やドア・フードなどに付随する補強部品について、使用鋼板の高強度化により衝突安全性を満足させつつ鋼板板厚の低減による車体軽量化が進んでいる。しかし、さらなる車体軽量化のためには、構造面・材料面からのアプローチが必要である。

閉断面構造は衝突性能、剛性を確保する上で有効であり、現行の自動車部品において多く使用されている。一般的に、プレス成形された2つの部品の上下フランジ部をスポット溶接で接合することで、閉断面構造化を行っている。

本報告では、自動車部品をスポット溶接で組み立てる際に必須であるフランジ部を最小化し、さらに断面形状を最

適化することによって、衝突性能や剛性といった部品性能を維持すると同時に軽量化が可能となる多角形閉断面部品の新しいプレス成形技術を開発したので報告する。

2. 多角形閉断面化による部品性能向上の検討

2.1 シミュレーション条件

自動車部品を想定したモデル形状の軸圧壊特性や剛性に及ぼす断面形状の影響について、シミュレーションによる解析を実施した。ソルバーには LS-DYNA[®] (Livermore Software Technology Corp. 製) を用いた。軸圧壊性能評価には、ハット形状、フランジレス4角閉断面形状、フランジレス六角閉断面形状などの閉断面形状を有した、部品長 400 mm、曲げ部 R 5 mm、メッシュサイズ 2.5 mm の形状モデルを用いた。材料モデルは、引張強度レベルを 590 MPa もしくは 980 MPa、ヤング率 = 210 GPa、板厚 1.4 mm ~ 1.6 mm、密度 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、ポアソン比 = 0.3 とし、衝突速度 10 m/s (36 km/h) など速圧壊における圧壊開始から圧壊距離 100 mm までの吸収エネルギーを評価した。ね

じり剛性および3点曲げ剛性解析は、部品長を900 mmとし、ソルバーにOptiStruct[®] (Altair Engineering, Inc. 製)を用いた。材料モデルは軸圧壊性能評価と同一条件とした。3点曲げ剛性は、部品長軸方向中央部に2 kNの荷重を負荷した場合の部品上面の最大変位量と下面の最大変位量の平均値により評価した。ねじり剛性は部品中心軸に1 kN・mのモーメントを負荷した場合のねじり角度で評価した。

2.2 高速圧壊試験条件

シミュレーションで性能評価と断面形状を最適化したモデル形状部品について、軸圧壊での性能を評価した。高速圧壊試験¹⁾の条件はシミュレーション条件と同等とした。すなわち、衝突速度10 m/s (36 km/h)で等速圧壊し、圧壊開始から100 mmまでの吸収エネルギーを評価した。テストピースは590 MPaもしくは980 MPa材、板厚1.4~1.6 mmのハイテン材を用い、曲げ成形により作製後、レーザー溶接による突合せ接合もしくはフランジ部のスポット溶接により閉断面化した。スポットピッチは35 mmとした。部品長は400 mm、曲げ部R5 mmとした。

2.3 部品性能に及ぼす断面形状の影響

フロントサイドメンバーなどの構造部品の断面形状は一

般的に図1(a)に示すハット形状である。ハット形状部品はインナー部品とアウター部品をスポット溶接で接合して組み立てるため、フランジが必要である。フランジ幅は20~30 mmである場合が多く、フロントサイドメンバーの場合、部品全重量に対するフランジ部の重量は約20%を占める。したがって、部品の軽量化にフランジを省略した構造も一つの方策として考えられる。しかし、単にハット形状のフランジ部分を省略した場合、図1(b)に示すように、軽量化が可能である一方、フロントサイドメンバーに必要な軸圧壊特性および剛性が著しく低下する。また図1(c)のように、(a)と同一のハット形状を単純にハイテン化して薄肉化した場合、衝突特性は改善するが、剛性の低下が大きい。これまでに、断面形状を六角形や八角形など多角形化することで、衝突特性が向上することが報告されている²⁾。図1(d)、(e)に六角閉断面化した場合の形状例と特性変化を示した。この場合、従来のハット断面に対して、最大12%の軽量化ができるだけでなく、同時に剛性および衝突特性もハット形状よりも向上した。以上の結果から、このように、多角形閉断面形状によるフランジ省略は、部品の軽量化と性能向上に有効な方法である。

図2に圧壊試験結果から算出される吸収エネルギーが10.4 kN・mとなるように断面形状を種々変化させた場合のハット形状サンプルに対する各フランジレス閉断面形状サンプルの軽量化率を示す。今回評価したフランジレス六角閉断面形状の場合、片ハット形状に対して約40%の軽量化が可能であることが確認できた。

また、多角形化による性能向上は、断面角や各辺の辺長比の影響が大きい。図3に図1(d)の六角閉断面形状について、軸圧壊時の吸収エネルギーに及ぼす断面角 θ_1 の影響を示す。断面角 θ_1 が130°から140°にかけて、吸収エネル

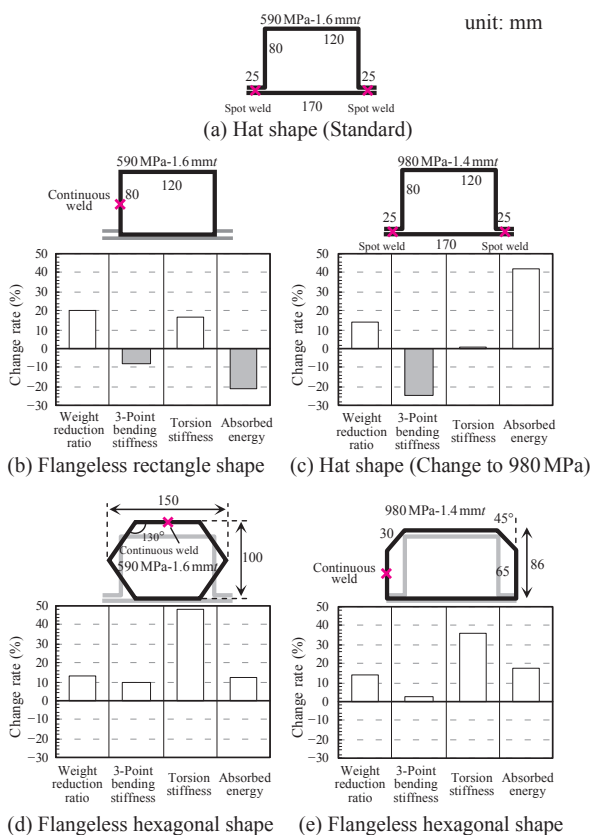


図1 各種特性に及ぼす断面形状の影響

Fig. 1 Effect of cross-sectional shape on various properties of closed section shape

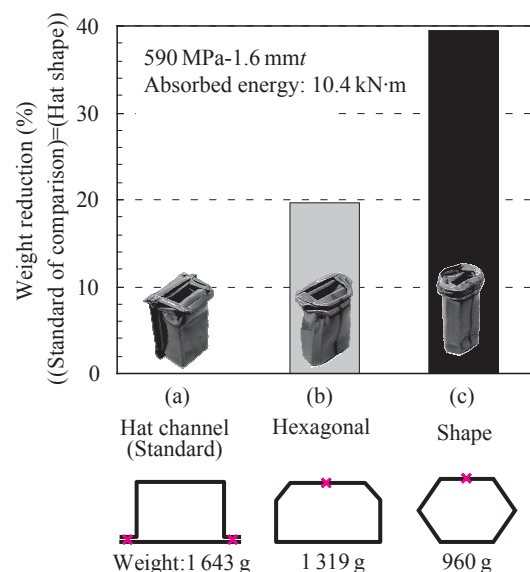


図2 軽量化率に及ぼす断面形状の影響

Fig. 2 Effect of cross-sectional shape on weight reduction ratio

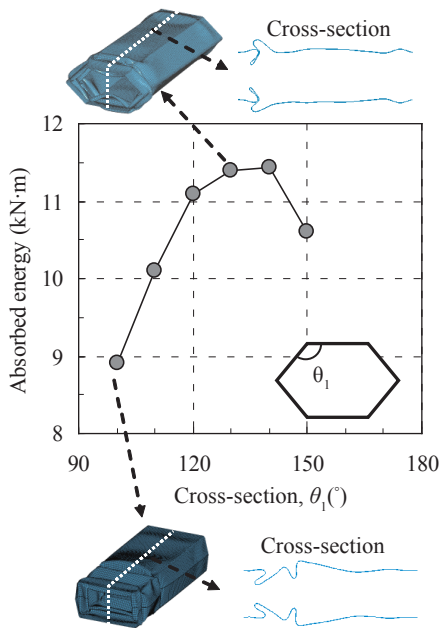


図3 六角閉断面の断面角 (θ_1) と吸収エネルギーの関係
Fig. 3 Relationship between cross-section angle (θ_1) and absorbed energy

ギーが最大を示した。図3中に示すとおり、断面角が上記範囲の場合、圧壊部品の折畳み密度の増加する。このため変形抵抗が増加し、吸収エネルギーが最大を示したと考えられる。図1(d)は、断面角 θ_1 が130°であり、上記の結果から、性能向上が顕著で軽量化効果も大きかったと考えられる。

図4に図1(e)の六角断面形状について、各種性能に及ぼす上面の左右コーナー部削ぎ取り量の影響を示す。ベースモデル(ハット断面)に対し、六角閉断面形状化により、ねじり剛性、3点曲げ剛性は上昇するが、吸収エネルギーは周

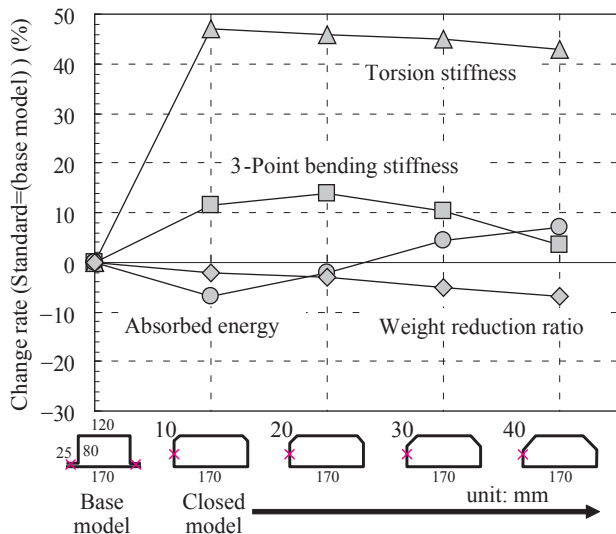


図4 六角閉断面のコーナー部削ぎ取り量と各種特性の関係
Fig. 4 Relationship between cross-section shape and various properties on flangeless hexagonal shape

長が減少するため低下した。さらに削ぎ取り量を拡大していくと、軽量化効果が拡大し、かつ断面の軸圧縮方向の変形抵抗が高まるため、吸収エネルギーが上昇した。なお、削ぎ取り量の拡大に対して、ねじり剛性はほとんど変化がなく、3点曲げ剛性は削ぎ取り幅40mmの場合、減少傾向となった。以上の結果から、軽量化効果が大きく、性能向上が最も高い、削ぎ取り幅30mmの六角断面形状を試作用モデル部品の断面形状とした。

3. プレス成形による フランジレス閉断面部品の成形技術開発

3.1 カム曲げ工法および型内仮止め技術

3.1.1 試作部品形状

図5に、試作対象としたフロントサイドメンバーモデルの外観形状をそれぞれ示す。図5の先端部の断面形状は図1(d)で示した六角断面の相似形とした。試作部品は部品先端から後端に向かって部品高さが80mmから150mmに拡大する形状であり、全長は450mmとした。また、部品先端には衝突時の軸圧壊開始点となるクラッシュビードを設けた。

3.1.2 プレス成形工程

図6に開発した汎用メカニカルプレス機による閉断面部品の成形工程を示す。まず、第1工程として予成形を行う。本工程では部品各部が最終形状と同じ断面周長となるように成形を行い、同時にクラッシュビード成形も行う。第2工程で部品底部を予曲げ成形する。第3工程では部品底面をパッドで固定しつつ、プレス金型のカム機構によりカムを部品中心軸方向へ移動させて縦壁部を起き上がらせた後に、上方からパンチを下降させ、部品上部で仮止めを行う。ここで、部品上部の閉じ部を完全突合せ構造とし、次工程で溶接工程にて突合せ溶接を実施してもよいが、溶接精度を確保することが非常に困難であると推定されることから、プレス金型内で仮止めを行う工法を用いた。

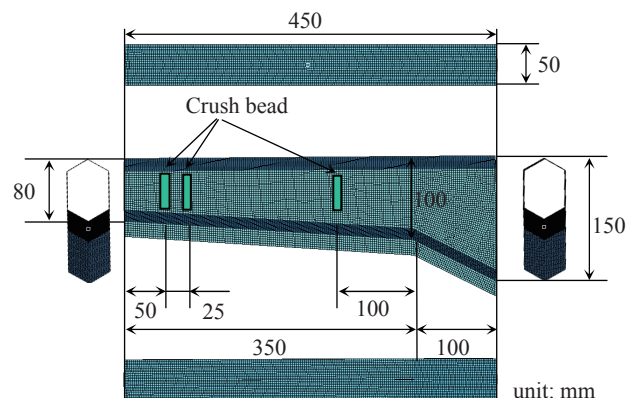


図5 試作フロントサイドメンバーモデルの形状
Fig. 5 Schematic diagram of the front side member model

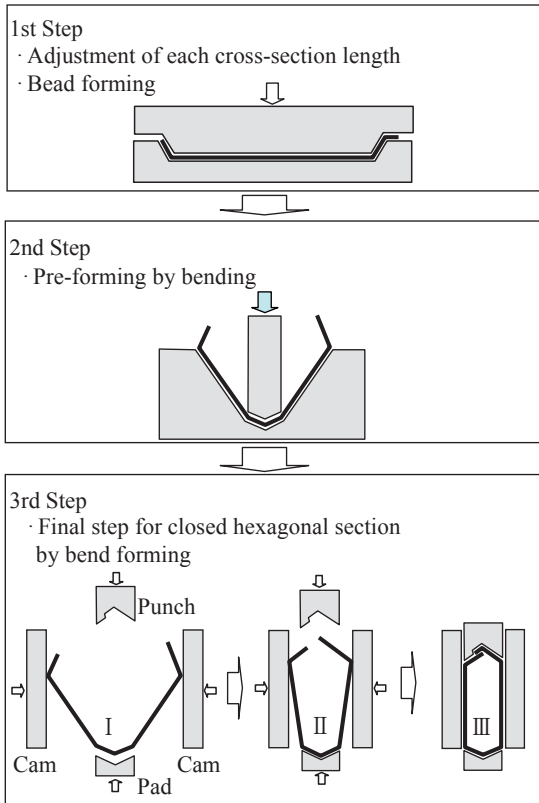


図6 開発閉断面成形工法の工程図

Fig. 6 Schematic diagram of the developed press forming method

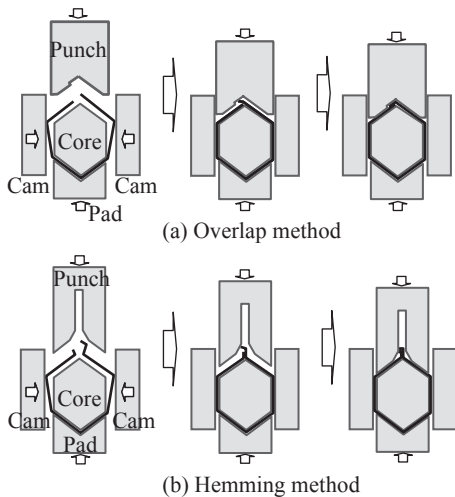


図7 仮止め方法の模式図

Fig. 7 Schematic diagram of temporary fix methods

図7に示すように、仮止め方法として(a) オーバーラップ法、(b) 片側部分ヘミング法を検討した。(a) オーバーラップ法はブランクの部品合わせ部の片側端面に5mm程度のラップ代を設けておき、パンチ圧下荷重により折り曲げることによって隣接面に対してラップさせ、仮止めする工法である。一方、(b) 片側部分ヘミング法は、ブランクの突合せ部の一部にヘミング用の突起を設けておき、ヘミング曲げ機構を設

表1 各種仮止め方法の特徴

Table 1 Characteristics of various temporary fix methods

	Hat shape (standard)	One-side flange	Overlap	Flange less
Cross-section shape	Spot weld	Spot weld or continuous weld	Spot weld or continuous weld	Continuous weld
Weight reduction ratio (%)	0 (Standard)	10	14	16
Increasing rate of absorbed energy (%)	0 (Standard)	27	24	22
Difficulty level of forming	○	○	○	△
Difficulty level of welding	○	○	○	△

○ : Easy
△ : Difficult

けたパンチによる圧下荷重でヘミング曲げを行い、仮固定を行う工法である。表1に今回検討した仮止め法について特徴を示す。完全突合せ法は軽量化効果が最も高い反面、高度な溶接精度が要求される。一方、オーバーラップ法、片側部分ヘミング法は、片ハット形状と比較して軽量化効果を保ちつつ衝突特性は同等以上かつ溶接時の精度確保も有利である特徴を有している。

3.1.3 金型構造と試作結果

写真1に今回試作に使用した試作用下金型の全景写真を示す。本金型は、カム機構を有するプレス成形金型である。パンチに対向して部品底面側にパッド、縦壁を曲げ成形にて起立させるためのカムを金型左右に配置している。パッドおよびカムは上型に配置したカムドライブによって、スライドが下降した際に駆動する構造となっている。金型材質はFC350 (JIS G 5501) とし、表面処理などは実施していない。

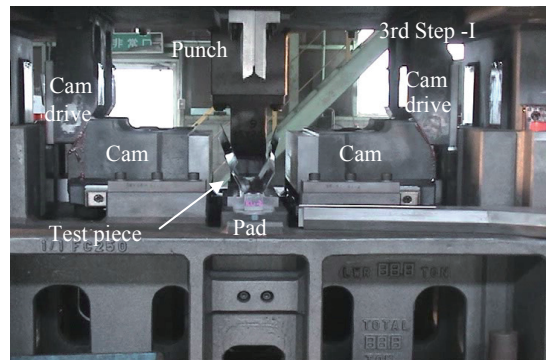


写真1 試作金型 (第3工程) の外観写真
Photo 1 Photo of trial die assembly (Third step-I)

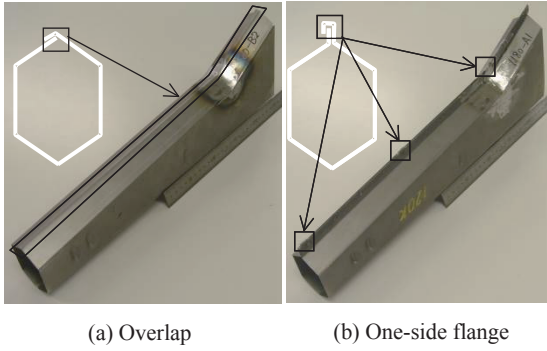


写真2 試作部品の外観写真

Photo 2 Appearance of front side member models after press trial

試作には、590 MPa 級材（板厚 1.6 mm）と 980 MPa 級材（板厚 1.2 mm）を用いたが、曲げを主体とする工法であるため、金型損傷は認められなかった。写真2に (a) オーバーラップ法および (b) 片側部分ヘミング法で成形した試作部品を示す。いずれの仮止め部分も割れ、しわなどの問題は発生しなかった。

3.1.4 試作部品の高速軸圧壊性能評価

図8にオーバーラップ法で試作した試作部品について、高速軸圧壊試験時の吸収エネルギーおよびハット形状部品を基準とした場合の軽量化率を示す。試作部品のオーバーラップ部はレーザ溶接による連続溶接を実施し、軸圧壊試験条件は前項と同様とした。比較のハット形状部品は断面形状を図1(a)と同等とし、590 MPa（板厚 1.6 mm）材を用いた。部品全長は 450 mm であり、スポット溶接でハット形状部品と底板を溶接した。980 MPa、板厚 1.2 mm 材を用いた試作部品は、ハット形状部品に対して 57%の軽量化率であった。一方、全部品とも圧壊時の吸収エネルギーは 10.4 kN・m であり、ハット形状部品と同等のエネルギー吸収能を有していた。

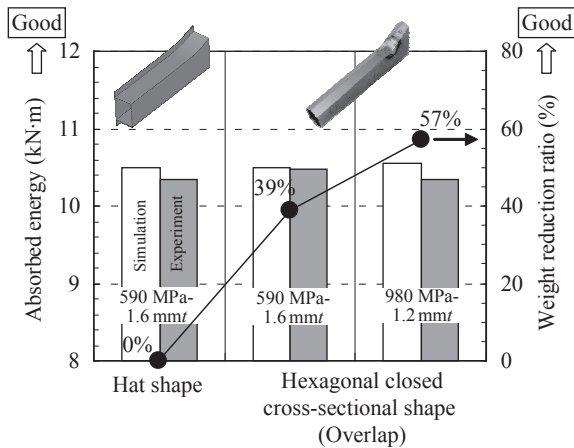


図8 試作部品の吸収エネルギーと軽量化率

Fig. 8 Absorption energy and weight reduction ratio of front side member model

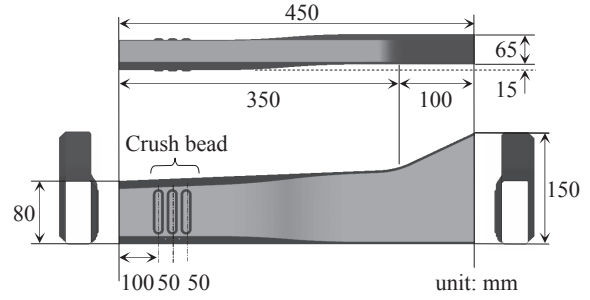


図9 試作フロントサイドメンバーモデルの形状

Fig. 9 Schematic diagram of the front side member model

3.2 ダイ押込み工法および突合せ溶接技術

3.2.1 試作部品形状

図9に試作部品形状を示す。対象はフロントサイドメンバーモデルである。先端部の断面形状は図1(e)で示した六角断面（削ぎ取り量 30 mm）の相似形とした。試作部品の高さ、全長、クラッシュビードは前項の試作部品と同様である。部品縦壁は、長手方向に曲面を有した形状であり、閉断面化部はフランジが存在しない端面突合せ形状とした。

3.2.2 プレス成形工程

図10に汎用メカニカルプレス機を用いた成形工程を示す。第1工程で予成形を行う。本工程では部品各断面が最終形状と同じ断面周長となるように成形を行い、同時にクラッシュビード成形も行う。この際、第2工程でパンチとパッドで挟みこまれる部分は、R 24 mm の曲率を有した形

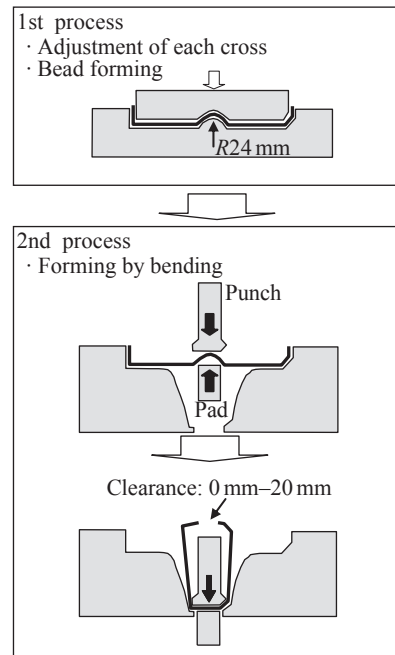


図10 開発閉断面成形工法の工程図

Fig. 10 Schematic diagrams of a developed press forming process (Die extrusion method)

状とした。この曲率部分は最終形状では平面となる部分であるが、最初からの平面形状とした場合、曲げ・曲げ戻しモードで成形される部位である。つまり、980 MPa 級ハイテンなどの超ハイテン材では、曲げ割れが発生しやすくなる部位である。曲率を有した形状とすれば、曲げ・曲げ戻しモードを極力発生させずに成形することが可能となる。

第2工程は、底面と縦壁の曲げ線を曲げる工程である。まず、前工程で成形した R 24 mm の曲率を有した部位をパンチとパッドで狭圧する。R 部分を平坦化させた後、パンチとパッドで狭圧したまま、パンチをダイ下方に向かって移動させ、部品縦壁部をダイフェース面で押上げるように成形する。パンチを下死点まで降下させた後、パッド圧を上昇させて部品下面を最終形状まで平坦化させながら、部品底面につながる斜面をダイセット下部とパンチ突起部で狭圧して目的の形状に成形する。成形完了後、ブランク材の両端面であった部分は部品開口部となる。この部位は次工程にて技術的に高いレベルが必要な突合せ溶接部位となるが、次項で示す新開発の溶接装置により精度良い突合せ溶接が可能となる。その際、溶接装置へのセットのため、成形後の開口部は 0 ~ 20 mm 程度の開口量を確保しておく必要がある。

3.2.3 金型構造と試作結果

写真3に試作用金型の全景写真を示す。(a)は1工程目のパンチ、(b)は1工程目のダイであり、(c)は第2工程の下金型セットである。開発成形工程は曲げ主体成形であり、金型の磨耗・損傷が少なく、いずれも金型材質はFC350とした。また、同じ理由から金型の表面処理も不必要であると考えられ、金型コストダウンに寄与できると考えられる。

写真4に、270 MPa 材および 1 180 MPa 材 (板厚 1.4 mm) を用いて成形した試作部品を示す。同じパッド圧 (588 kN) で成形しているため、材料により部品上面の開口部の幅に差が見られた。270 MPa 材の試作品は、離型後も完全閉断面化したままであった。一方、1 180 MPa 材の試作品は、約

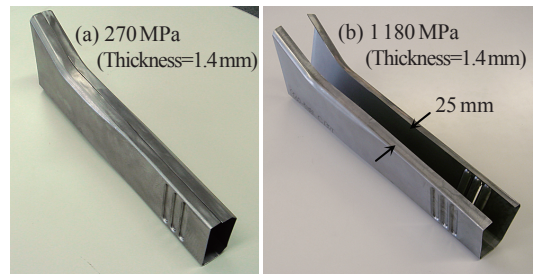


写真4 試作部品の外観写真

Photo 4 Appearance of front side member models after press trial

25 mm の開口部幅があった。これは、1 180 MPa 材はスプリングバック量が多いこと、部品底面に設置した R 24 mm の曲率を有した形状の平坦化が完全でないことが原因と考えられる。1 180 MPa 材の場合、パッド圧が 588 kN では、後述する専用溶接治具への設置可能な量である 20 mm を超過しているが、パッド圧を 588 kN から 980 kN へ増加することにより目標値範囲内の 20 mm 以下にすることが可能である。

3.2.4 閉断面化溶接装置の開発

図11に閉断面化溶接装置の全体図を示す。中子、溶接面固定治具、縦壁固定治具、位置決め治具で構成されている。この溶接装置を使用することで、一方の開口部端面を位置決めした後、もう一方の端面を位置決めした開口部端面へ

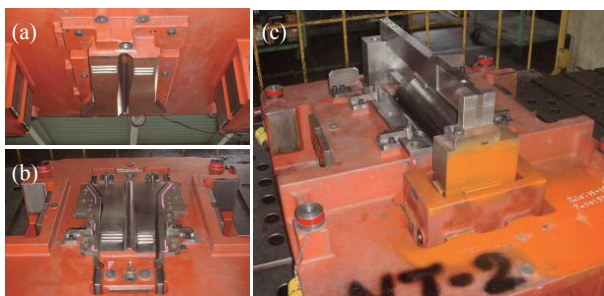


写真3 試作用金型の全景写真 ((a) 第1工程の上型, (b) 第1工程の下型, (c) 第2工程の下型)

Photo 3 Photos of the die assembly ((a) Upper die for first process, (b) Lower die for first process, (c) Lower die for second process)

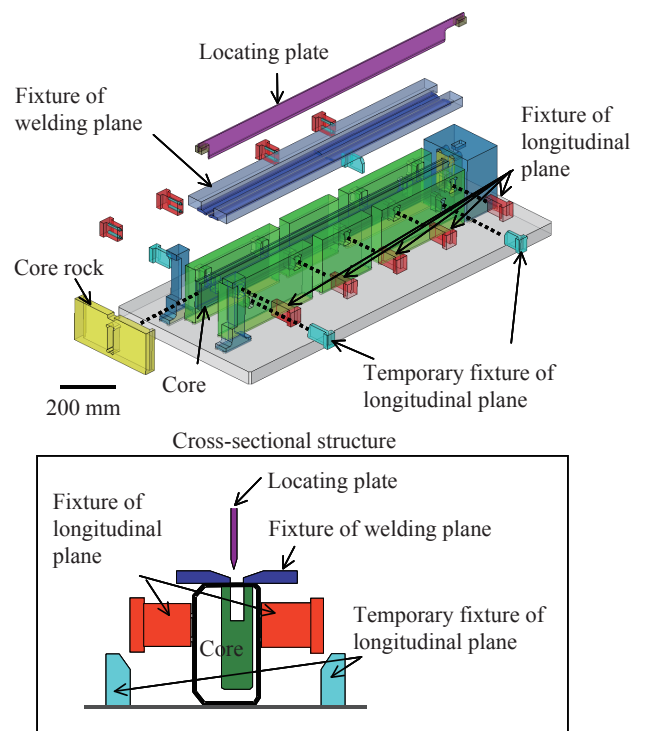


図11 閉断面化溶接装置の全体図

Fig. 11 Schematic diagrams of developed welding equipment

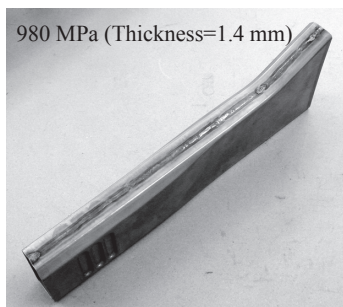


写真5 溶接後の試作部品の外観写真

Photo 5 Appearance of the front side member model

押し当てる方法で溶接位置を精度良く決定することができる。溶接はアーク、レーザなどの一般的な連続溶接を用いることが可能である。また、成形後の部品を装置治具に挿入する際、完全に閉断面化した部品よりも一定幅（20 mm 以下）、開口していた方が作業性良好となる特徴を有する。

写真5に上記溶接治具を用いてアーク溶接した試作部品を示す。素材は980 MPa材、板厚1.4 mmである。プレス成形後は口開き量が20 mmの部品であったが、開発治具により精度良く突合せすることが可能であり、連続溶接可能であることが確認できた。

4. 曲がり形状部品への閉断面化技術の適用

これまで長手方向に曲がり形状がない部品の閉断面成形工法について述べてきたが、自動車部品には曲がり形状を有するものも多い。そこで曲がり形状部品の閉断面成形技術の一例を以下に紹介する。

図12に成形工法の模式図とそれぞれの工程における試作品外観を示す。1工程目で最終形状に応じた折目を付与する。2工程目では、1工程目のパネルを2枚重ね合わせ、フランジ部を連続溶接し、フランジ部をトリミングする。3工程目では、両側フランジ部を掴み、フランジが近づく方向に圧縮する。本工法の特長は以下のとおりである。

- (1) 曲げ加工主体の成形のため、超ハイテン材を使用しても成形荷重が低い。
- (2) 1工程目で付与する折り線形状を変化させることで2軸曲げも可能である。

5. おわりに

閉断面部品について、JFE スチールが独自に開発した成形技術を紹介した。いずれも曲げ主体の成形工法であり、

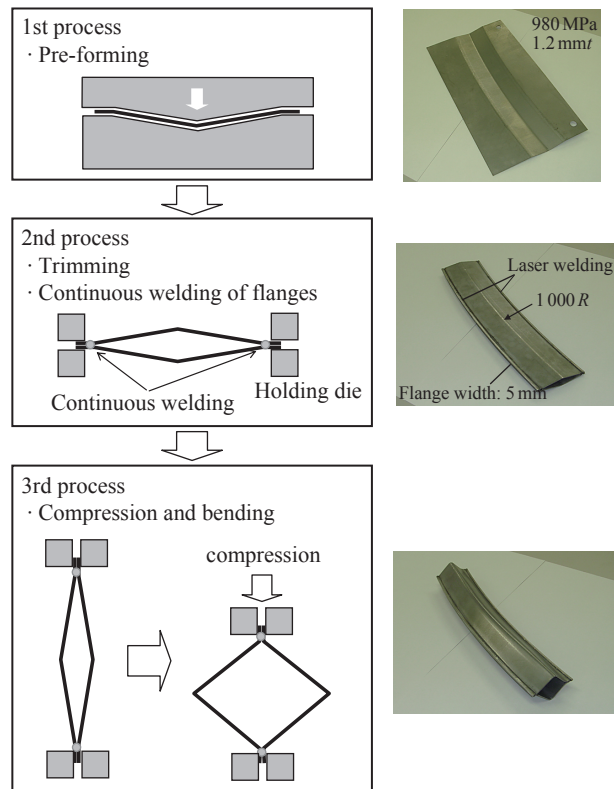


図12 曲がり形状閉断面部品の開発成形工法

Fig. 12 Schematic diagram and photos of the developed forming process for the part with bending portion

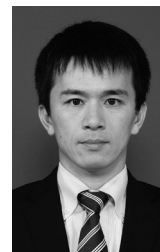
超ハイテン材を適用しやすく、軽量化と車体性能向上の両立が可能であることが特徴である。今後、さらに技術を改善することで新たな自動車造りに貢献していきたい。

参考文献

- 1) Yoshitake, A.; Sato, K.; Hosoya, Y. A Study of Improving Crashworthiness Automotive Parts by Using High Strength Steel Sheets. SAE Technical Papers, paper no. 980382.
- 2) 青木義男, 邊呉一. 車体形状と安全—車両フレームの形状と安全性についての考察—. IATSS Review. 2005, vol. 29, no. 4, p. 21-28.



樋貝 和彦



新宮 豊久



山崎 雄司