

# パネル軽量化に資する要素技術開発

## Development of Underlying Technologies Contributing to Panel Weight Reduction

薬師 神 豊\*  
Yutaka YAKUSHIJIN

澤 靖 典  
Yasunori SAWA

大塚 研一郎  
Kenichiro OHTSUKA

米 林 亮  
Tohru YONEBAYASHI

漆 畑 諒  
Ryo URUSHIBATA

植 松 一 夫  
Kazuo UEMATSU

西 村 隆 一  
Ryuichi NISHIMURA

### 抄 録

地球環境保護の観点から、温室効果ガス排出削減の重要性が高まり、電動自動車の普及も促進されている。このような状況下、自動車の外板パネルや蓋物部品にはコスト上昇を最小化しつつ軽量化することが重要である。本報では、まずフード、バックドア等のパネル類の薄肉軽量化に寄与する補剛補強の要素技術とそれらの効果実証例を紹介する。またドア内に配置され、側面衝突時の侵入抑止を担うドアインパクトビームには、ホットスタンプや高強度鋼板製プレス部品、高強度鋼管製部品が適用され軽量化に寄与している。本報では高強度鋼管製のドアインパクトビームに関わる日本製鉄(株)の開発事例について述べる。

### Abstract

Reducing the amount of greenhouse gas emissions is of great importance to protect the global environment, and the adoption of electric vehicles is also accelerating. Under these circumstances, it is crucial to reduce the weight of outer panels and closure parts while minimizing cost increases. This report begins by presenting the underlying technologies for stiffening and reinforcement and their applications that contribute to the weight reduction of panels by thinning, such as hoods and back doors. Door impact beams, positioned inside the door to prevent intrusion during a side crush, are manufactured using high-strength steel sheets by hot stamping or press forming, or high-strength steel pipes, contributing to weight reduction. This report details examples of our development: applying high-strength steel pipes to door impact beams.

## 1. 緒 言

2015年のパリ協定合意を受け、カーボンニュートラルをめざす動きが国内外で加速している。2020年10月、日本政府も“2050年に、温室効果ガス(Greenhouse Gas:GHG)の排出を全体としてゼロにする<sup>1,2)</sup>”という目標を表明した。2021年4月には、2030年目標(2013年度比46%削減を必達とし、更に50%削減の高みを目指す)<sup>3)</sup>が発表された<sup>3)</sup>。この目標の実現に向けて、自動車業界においてはライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment:LCA)でのGHG排出量の低減が求められている<sup>4,7)</sup>。

久保らは、自動車車体や部品を対象としてLCAでのGHG排出量を評価している<sup>6,7)</sup>。評価は、①素材製造/加工段階、②車両製造段階、③走行段階(燃料製造&燃料消費)、④廃棄/リサイクル段階に分類して、車体/部品単位で計算し、部品の製造工程ごとに分析している。その結果、

①、③が、LCAでのGHG排出量の大半を占めており、これらのGHG排出量の低減を両立することが重要であると述べている。また、先進材料であるAHSS(Advanced High-Strength Steel<sup>8)</sup>)を活用した軽量化検討の事例を挙げて、それらは①と③のGHG排出量低減に貢献し、電気自動車(Battery Electric Vehicle:BEV)、内燃機関車(Internal Combustion Engine:ICE)のいずれにおいても、ライフサイクルでのGHG排出量を削減する有力な方法であるとしている。

本報の主題である外板パネルおよび蓋物部品は、外板パネルや衝突対応部品への先進材料適用や形状最適化による軽量化が想定される。外板パネルに関連した軽量化事例として、準外板であるサイドアウトへの高強度鋼板適用による補強部品等の周辺部材軽量化<sup>9,10)</sup>や、外板自体の薄肉化による軽量化も想定される。本報では、まずフードやバックドア等の外板を薄肉化した場合の剛性低下等の課題に対応した要素技術について述べる。また、側面衝突において、

\* 鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部 主任研究員 兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891

曲げ変形によって衝撃荷重を受け止める衝突対応部品であるドア内のドアインパクトビーム (DIB) には、超高強度鋼板 (超ハイテン)、ホットスタンプのプレス部品や高強度鋼管が適用される。本報では高強度鋼管製のドアインパクトビームに関わる日本製鉄 (株) の開発事例について述べる。

## 2. フード軽量化に寄与する要素技術

### 2.1 軽量フード構造コンセプト

本章では、フード軽量化のため、アウトおよびインナを薄肉化した場合の課題に対応した要素技術について述べる。図 1 に軽量フード構造のコンセプトを示す。軽量化のため、アウトおよびインナを薄肉化すると、剛性や強度特性の低下が懸念される。そこで剛性低下対策として、アウトを小ピッチで支えるインナ形状 (小ピッチインナ構造) を適用した。また強度特性である耐デント性 (人の手で触れた際の永久変形の残りにくさ) や前突時の歩行者保護性能の低下対策として、アウトへの高強度鋼板適用を想定した。

### 2.2 薄肉アウトのプレス成形

図 2 に軽量フード試作品の外観を示す。アウト、インナともにプレス金型を用いて試作し、マスチック接着剤 (以下、マスチック) を介してヘム加工で、部材端部を相互に結合した。なおコンセプト一例として、試作ではアウトを板厚 0.45mm の 590MPa 級鋼板、インナを板厚 0.4mm の小ピッチインナ構造とした。

図 3 に、軽量フード試作品の面品質を評価するため、直線状で互いに平行な蛍光灯の光をアウトデザイン部にあてた際の反射光を示す。面ひずみが生じやすい領域 A、B 等、全体を目視確認したが、平行線の局所的なゆがみは観察されず面ひずみは確認されなかった。以上より、590MPa 級鋼板においても高い面品質が確保できる可能性があることを確認した。

### 2.3 軽量フード構造の特性評価

#### 2.3.1 張り剛性および耐デント特性

図 2 に示した軽量フード試作品を用いて、張り剛性および耐デント性を量産車と比較することで要素技術の妥当性を検証した。張り剛性評価試験 (図 4 左上) では、図 4 右

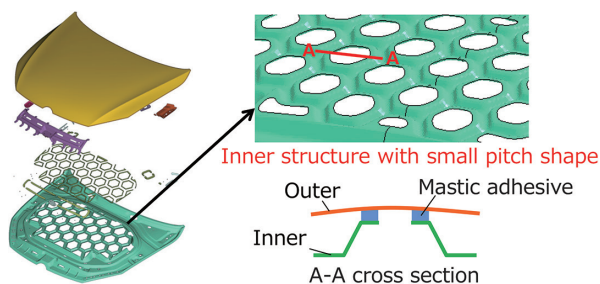


図 1 軽量フード構造のコンセプト  
Concept of lightweight-designed hood

上に示す点を対象として曲率半径  $R=50\text{mm}$  の半球状の鋼製圧子をアウトに押し当て、押し付け荷重とたわみ量を測定した。評価指標は 90N 付与時のたわみ量とした。耐デント性評価試験 (図 4 左上) では、図 4 右上に示す点を対象として曲率半径  $R=25\text{mm}$  の半球状の硬質ゴム製圧子をアウトに押し当て、除荷した後にデジタルダイヤルゲージにてデント痕深さを測定した。評価指標は、デント痕深さ 0.15mm での試験荷重とした。図 4 (a) に張り剛性、図 4 (b) に耐デント性の各点評価結果の平均値をそれぞれ示す。軽量フード試作品は、両特性ともに量産車と同程度であることがわかる。

#### 2.3.2 歩行者保護性能

CAE にて、軽量フード構造の歩行者保護性能を評価した。CAE 条件は、(独)自動車事故対策機構 NASVA の衝突安全性能アセスメント/歩行者頭部保護性能試験<sup>1)</sup>に準拠



図 2 軽量フード試作品外観  
Appearance of the prototype of lightweight-designed hood

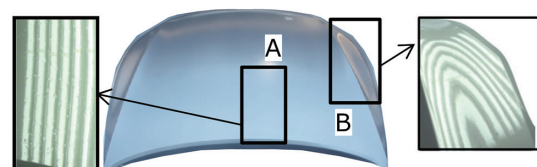


図 3 軽量フード試作品の面品質  
Surface quality of the prototype of lightweight-designed hood

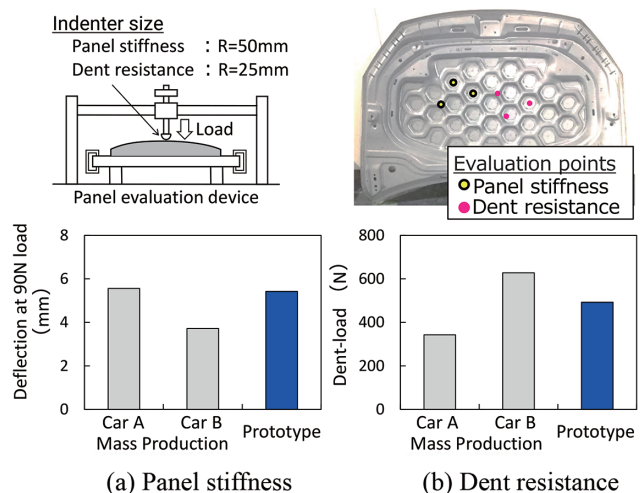


図 4 張り剛性および耐デント性の評価結果  
Comparisons of panel stiffness and dent resistance

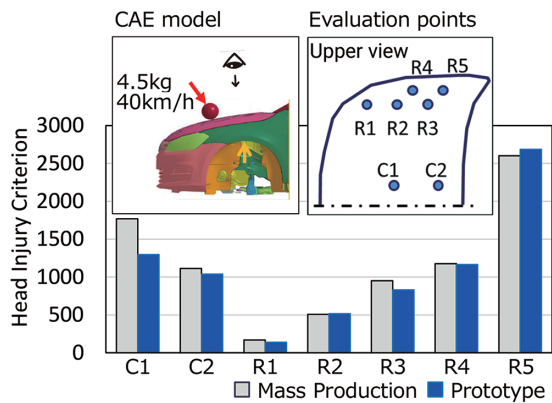


図5 歩行者保護性能結果  
Pedestrian protection performance

して設定した。CAEには、動的陽解法汎用FEMソフトLS-DYNA ver.R10.1.0を用いた。フードの評価面に対して歩行者の頭部を模擬した球状のインパクト(大人想定:Φ165mm, 4.5kg)を角度65°, 40km/hの速度で衝突させた。評価指標は、インパクト加速度から算出した頭部障害値(Head Injury Criterion: HIC)とした<sup>12)</sup>。評価点は小ピッチインナ構造のフード中央と補剛範囲外のサスタワー周辺部から抽出した。アウトは板厚0.4mmの590MPa級鋼板、インナは板厚0.4mmとした。図5に各評価点のHICを示す。フード中央部、サスタワー周辺部いずれにおいても、量産車と同程度の歩行者保護性能を示した。

以上より、提案する要素技術(小ピッチインナ構造、アウトへの薄肉ハイテン適用)は、パネル類の薄肉ハイテン化で懸念される張り剛性や耐デント性の低下を低減することができる。更に今回試作した条件では、量産車同程度の張り剛性、耐デント性や歩行者保護性能を確保可能であることを確認した。

### 3. 軽量バックドアの開発

#### 3.1 橋渡し補剛構造コンセプト

本章では、バックドア軽量化のための要素技術を提案し、検証を行った。軽量化のためドア等のアウトを薄肉化した際の一般的な対策として、図6に示すように、剛性が不足している位置に対し部分的に樹脂シートを補剛部材として貼り付けて、焼付塗装で樹脂を硬化・発泡させる方法が挙げられる。しかし、本方法にはアウトの鋼板と補剛部材の樹脂の線膨張係数の差に起因した焼付塗装時の熱ひずみが懸念される。既存の補剛技術に対して、上述の熱ひずみやコストを考慮して、日本製鉄では鋼材を活用した補剛方法“橋渡し補剛構造”を開発した。図7に開発した橋渡し補剛構造のメカニズムを示す。アウトの内側に、直線状の鋼製補剛部材の両端部を接合する。アウトの外側から押圧荷重が働いた際に、アウトが内側に凹む変形に対抗して補剛部材には張力が働き、アウトの変形を抑制する。これにより、アウトの張り剛性を向上することができる。補剛部材

は直線状で端部をアウトに接合するため、アウトに沿わせる必要がなく、寸法精度を厳格に管理するに及ばない。補剛部材は、鋼製であれば板材でも線材でもよい。線材を補剛部材に用いた検証結果を後述するが、必要な剛性性能に応じて、補剛部材の数や取り付け範囲は調整可能である。

#### 3.2 橋渡し補剛構造の効果検証

図8に示すアウトを模擬した曲率半径R=1200mmの400mm角のかまぼこ形状のパネルを用いて、橋渡し補剛構造の効果検証実験を行った。パネルには270MPa級鋼板を用い、板厚は0.4~0.7mmとした。補剛部材にはS45Cの直径2mmの線材を用い、両端の5mmを同一方向に6°に曲げて接着剤でパネルに接着した。補剛部材数は5、15本の2条件とした。

張り剛性試験機(図4左上)を用いてパネルのフランジ面を拘束した状態で曲率半径R=50mmの半球状の鋼製圧子をパネル中央に押し当てて、押し付け荷重とたわみ量を評価した。図9(a)に板厚0.4mmパネルでの補剛部材有無の結果を示す。補剛部材が多くあることで、たわみ量が抑制され、張り剛性が向上した。補剛部材のないパネルでは顕著な飛び移りが低い荷重で起きているが、補剛部材15本では飛び移りがなく、5本では小さな飛び移りが確認された。図9(b)に、90Nでのたわみ量で整理した補剛材な

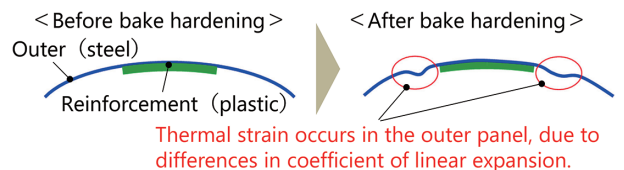


図6 樹脂シートによる補剛の課題  
Problem with reinforcement using resin sheets

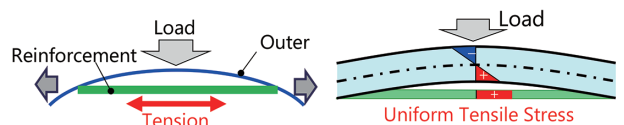


図7 開発した橋渡し補剛構造のメカニズム  
Mechanism of the developed bridge reinforcement

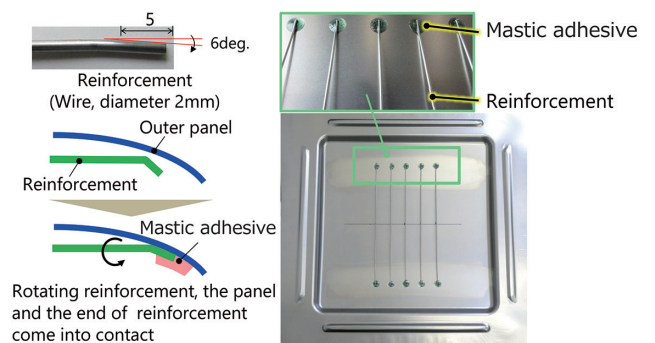
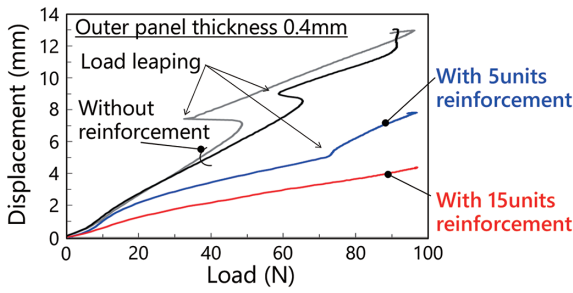
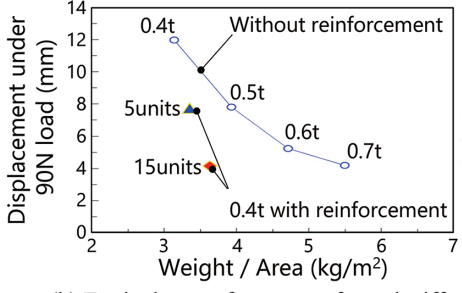


図8 補剛構造の試作品外観  
Appearance of the prototype with a developed reinforcement



(a) Displacement



(b) Equivalent performance of panel stiffness

図9 補剛構造の効果

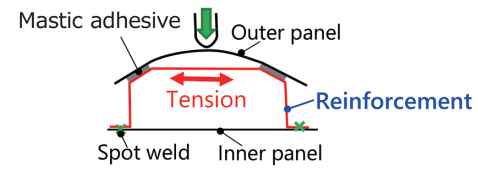
Effect of developed reinforcement on stiffness improvement

しのパネルとの比較を示す。例えば、板厚 0.4mm パネルに補剛部材 15 本を付与した場合、重量が板厚 0.5mm パネル以下であり、張り剛性が板厚 0.7mm のパネルと同等であった。以上より、補剛部材の顕著な補剛効果を確認することができた。なお、張り剛性評価の CAE も行ったが、概ね実験結果を再現し、CAE で補剛構造の設計を容易に行うことができることを確認した。

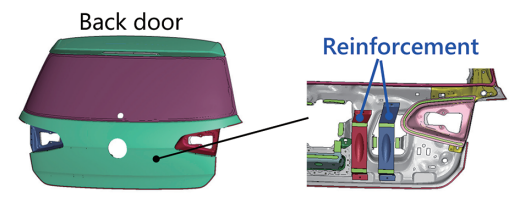
また 15 本の補剛部材を付与したパネルに対して、焼付塗装工程を模擬して 170℃ で 20 分間保持した後に空冷し、加熱前後でのパネル面品質を比較評価したが、目視可能な面ひずみが発生していないことも確認した。

### 3.3 バックドアへの橋渡し補剛構造の適用

バックドアに橋渡し補剛構造を適用した効果を CAE で検証した。バックドアは代表的な C セグメントの構造を用いた。補剛部材は、図 10 の通り薄鋼板のハット形状とした。フランジ部をインナパネルとスポット溶接し、肩部にマスチックを塗布しアウトパネルと接合した。補剛部材のマスチック間の領域が橋渡し補剛に相当する。CAE モデルは、表 1 の 2 条件で比較を行い補剛部材による剛性向上効果を検証した。張り剛性評価に加えて、薄肉化することで課題となる耐デント性や固有振動数についても評価した。張り剛性は曲率半径  $R=50\text{mm}$  の半球状の鋼製圧子を 98N で押込んだ時のたわみ量を求め、アウト 6 か所の平均値を評価した。耐デント性は張り剛性と同一圧子を 294N で押込んだ後にスプリングバック解析をして、残存した凹みの深さを求め、張り剛性と同様に 6 か所の平均値を評価した。固有振動数は開閉する動きのモードで評価した。



(a) Concept of developed reinforcement



(b) Back door with developed reinforcement

図 10 補剛構造のバックドアへの適用  
Application of developed reinforcement to back door

表 1 補剛バックドアの検証条件  
Verification conditions for the reinforced back door

Model	Reinforcement	Outer panel	Inner panel
A	None	270 MPa	270 MPa
		0.60 mm	0.60 mm
B	Some	590 MPa	270 MPa
		0.45 mm	0.45 mm

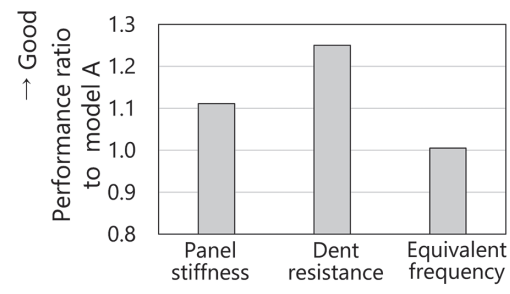


図 11 バックドアへの適用結果 (張り剛性, 耐デント性, 固有振動数)  
Results of application to back door (Panel stiffness, Dent resistance, Equivalent frequency)

図 11 に、張り剛性、耐デント性と固有振動数の評価結果を示す。張り剛性はたわみ量の逆数、耐デント性は残存凹みの逆数、固有振動数は開閉モードの値について、モデル A の値との比を表しており、値が大きいほど性能が高いことを表す。補剛部材があり板厚の薄い材料を使っているモデル B は、A よりも高い張り剛性および耐デント性を示しており、本補剛部材による効果を確認できた。次に、固有振動数はモデル A と B でほぼ同等であった。以上より、開発した橋渡し補剛構造は張り剛性だけでなく、耐デント性や固有振動数の向上にも効果があり、パネル部品の軽量化に貢献可能である。

### 4. 高機能ドアインパクトビームの開発

衝突安全性はますます厳格化される傾向であり、側面衝突において侵入抑止を担うドアインパクトビーム (DIB, 図

12) は更なる高機能化が望まれる。そのため、ホットスタンプや冷間超ハイテンのプレス成形部品での高強度化が想定される<sup>13,14)</sup>。また、一部車両においては曲げ耐力に優れた鋼管部品が適用されており、衝突性能確保と軽量化を両立すべく、更に高強度の鋼管適用が図られる。一方、直管では一般にアウト補剛機能を確保するために付属部品が必要となる。付属部品を省略してコストを削減するためには、アウト形状に沿って精度良く曲げられた鋼管製 DIB が望まれる。

鋼管の曲げ加工は、回転引き曲げ、移動ロールプレス曲げ、断面変形プレス曲げや 3次元熱間曲げ焼き入れ (Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench : 3DQ) といった種々のチューブフォーミング技術が開発されている<sup>15)</sup>。これらの中で、3DQ は少量多品種の生産に向けた技術である。一方、量産性やコストに優れた鋼管曲げ加工技術として、冷間プレス成形が可能な断面変形プレス曲げが提案されている。しかし、鋼管の高強度化に伴ってプレス成形後の残留応力増大による遅れ破壊が懸念されるため、残留応力を低減するための対策が重要である。

本章では、アウト形状に沿って精度良く曲げられた鋼管製 DIB の加工技術として、3DQ と遅れ破壊対策の冷間プレス成形新法“縮径プレス曲げ工法”を紹介する。

#### 4.1 3DQ

3DQ は鋼管を送りながら高周波コイルにより部分的に加熱し、ロボットで曲げモーメントを付与し直後に水冷することで、連続的に加工と焼き入れを同時に行う工法であり、以下の特徴を有する<sup>16)</sup>。① 1470MPa 以上の閉断面 3次元部材を製造可能である。②熱間加工であるため、残留応力が小さく形状凍結性に優れる。③金型を用いないダイレス成形であり、設備もコンパクトである。④ロボットの軌道データ変更が容易である。したがって、少量生産車においてアウトに沿った曲率を有する DIB 等が低コストで製造可能である<sup>17)</sup>。

#### 4.2 縮径プレス曲げ工法

図 13 に、縮径プレス曲げ工法の概略および成形工程を



図 12 DIB  
Door impact beam

示す。金型ダイフェースの断面周長を素管の断面周長よりも小さくすることで、成形下死点で加工部全面を圧縮場とし広範囲で比較的均一に塑性変形させ、形状凍結の促進と残留応力低減 (耐遅れ破壊特性の向上) を狙っている。素管は 1.5GPa 級焼き入れ鋼管 (肉厚 2.3mm, 外径  $\Phi 31.8\text{mm}$ , 長さ 1100mm) とした。

図 14 に曲げ部近傍における成形 CAE 結果の比較を示す。縮径プレス曲げ工法では、通常のプレス曲げ工法と比較して引張残留応力の最大値が 40% 低減できている。図 15 に衝突を模擬した 3 点曲げの CAE 結果を示す。縮径プ

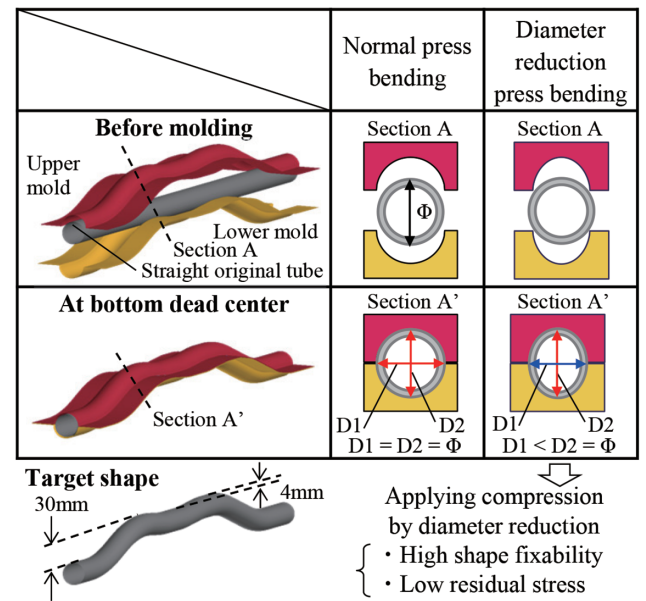


図 13 縮径プレス曲げ工法の概略および成形工程  
Outline and process of diameter reduction press bending method

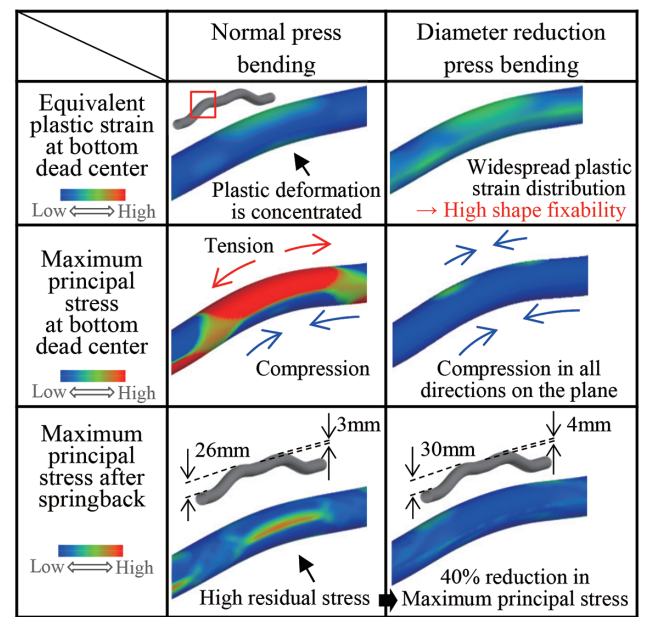


図 14 曲げ部近傍における成形 CAE 結果の比較  
Comparison of analysis results in the vicinity of the bending area

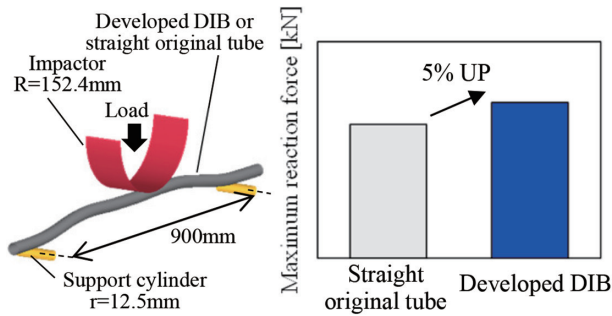


図 15 衝突を模擬した 3 点曲げの数値 CAE 結果  
Calculated maximum reaction force of 3-point bending



図 16 縮径プレス曲げ工法による試作品外観  
Appearance of prototype produced by the diameter reduction press bending method

レス曲げ工法は、素管と比較して荷重が高く衝突性能の向上が期待できる。加工硬化による部品耐力向上と車両外側に向けた凸形状による曲げ変形抵抗増大に起因すると推定される。図 16 に縮径プレス曲げ工法による試作品の外観を示す。試作品を用いて、遅れ破壊特性評価のための塩酸浸漬試験（塩酸 pH1.0, 浸漬時間 100hr, 比液量 5mL/cm<sup>2</sup>, RT, N 数 3）を実施した結果、き裂の発生は見られなかった。縮径プレス曲げ工法によって、耐遅れ破壊特性に優れ、狙い通りの形状をした DIB が得られることを確認した。

## 5. 結 言

地球環境保護の観点から、温室効果ガス排出削減の重要性が高まっている。このような状況下、コスト上昇を最小化しつつ軽量化することが重要であり、外板自体や蓋物部品内の衝突対応部品の薄肉軽量化が有効である。

(1) フードでは、提案する要素技術（小ピッチインナ構造、アウトへの薄肉ハイテン適用）は、パネル類の薄肉ハイテン化で懸念される張り剛性や耐デント性の低下を低減することができる。本報で試作した条件では、量産車同程度の張り剛性、耐デント性や歩行者保護性能を確保可能であることを提示した。

(2) バックドアでは、提案する要素技術（橋渡し補剛構造）を適用することで、張り剛性だけでなく、耐デント性や固有振動数の向上にも効果があり、パネル部品の軽量化に貢献可能であることを提示した。

(3) DIB では、コスト削減のため、アウト形状に沿って精度良く曲げられた鋼管製 DIB が望まれる。少量多品種の生産に向けた鋼管曲げ技術としては日本製鉄開発の 3 次元熱間曲げ焼き入れ (3DQ) が挙げられる。また量産性やコストに優れた鋼管曲げ加工技術として縮径プレス曲げを開発し、その優れた曲げの形状凍結性や耐遅れ破壊特性を提示した。

## 参照文献

- 1) 環境省：2022 年度温室効果ガス排出・吸収量, <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/emissions/>, 2024
- 2) 環境省：サプライチェーンを通じた温室効果ガス排出量算定に関する基本ガイドライン. ver.2.6, 2024
- 3) 高村ゆかり：環境法政策学会誌. 26 (1-1), 1 (2023)
- 4) 自然エネルギー財団：EV 普及の動向と展望. 2018
- 5) (株)エヌ・ティ・ティ・データ経営研究所：令和 4 年度電動化シフトを踏まえた地域自動車部品サプライヤーの技術力・開発力向上に向けた動向調査報告書. 2023
- 6) 久保雅寛 ほか：自動車技術会 2022 年春季大会学術講演会講演予稿集. 講演番号 281, (2022)
- 7) 久保雅寛 ほか：日本製鉄技報. (425), 21 (2025)
- 8) 中澤嘉明 ほか：日本製鉄技報. (412), 2 (2019)
- 9) 本田技研工業(株)：N-BOX プレスインフォメーション. 2017, p.22
- 10) DIHATSU：DNGA 新技術説明会資料. 2019
- 11) (独)自動車事故対策機構：[https://www.nasva.go.jp/mamoru/assessment\\_car/head\\_protection\\_test.html](https://www.nasva.go.jp/mamoru/assessment_car/head_protection_test.html)
- 12) 中野正博 ほか：バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌. 12 (2), 57 (2010)
- 13) 樋渡俊二：表面技術. 73 (8), 390 (2022)
- 14) 樋渡俊二：ぶらすとす. 6 (63), 121 (2023)
- 15) 水村正昭 ほか：日本製鉄技報. 412, 35 (2019)
- 16) 富澤淳 ほか：新日鉄住金技報. 397, 83 (2013)
- 17) 浜崎豊 ほか：新日鉄住金技報. 402, 73 (2015)



薬師神豊 Yutaka YAKUSHIJIN  
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部  
主任研究員  
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



漆畑 諒 Ryo URUSHIBATA  
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部  
主任研究員



澤 靖典 Yasunori SAWA  
薄板事業部 自動車鋼板営業部  
主幹



植松一夫 Kazuo UEMATSU  
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部  
主幹研究員



大塚研一郎 Kenichiro OHTSUKA  
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部  
課長



西村隆一 Ryuichi NISHIMURA  
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部  
室長 博士(エネルギー科学)



米林 亮 Tohru YONEBAYASHI  
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部  
主幹研究員