

小断面骨組みレインフォースメントを備えた 新しい鋼製軽量ドア構造の提案

Proposal of New Steel Lightweight-door-structure Applying Frame Reinforcements with Extremely Small Section

鈴木 利哉*
Toshiya SUZUKI

中澤 嘉明
Yoshiaki NAKAZAWA

広瀬 智史
Satoshi HIROSE

吉田 亨
Tohru YOSHIDA

抄 録

高強度鋼板適用による自動車車体部品の薄肉軽量化は、車体骨格部品だけでなくクロージャー部品でも積極的に取り組まれている。ドア外板パネルでは薄肉化による張り剛性の低下が課題となることから、軽量化のためには剛性の改善が重要となる。そこで、極小断面の骨組みレインフォースメントを備えた新しい鋼製軽量ドア構造を提案し、その基礎検討結果について報告した。

Abstract

Reduction of thickness and weight of automotive body parts by applying high-strength steel sheet has been worked on actively for not only body structural parts but also closure parts. In case of door outer panel, decline of panel stiffness due to the thickness reduction is a problem, therefore improvement of stiffness is a key technology for the weight reduction. In this paper, results of fundamental investigation about new steel lightweight-door-structure applying frame reinforcements with an extremely small section are described.

1. 緒 言

地球温暖化への対応の一つとして自動車のCO₂排出規制が世界各国で行われており、自動車の燃費向上が強く求められている。このため自動車車体への高強度鋼板の適用を拡大し、部品の薄肉化や削減などによる車体軽量化が進められている。また衝突安全性の観点でも高強度鋼板の適用による車体強度向上のニーズは高く、車体骨格を中心に軽量化と衝突安全性向上を両立する構造設計も含めた技術開発が進められている。

ドアやフードなどのクロージャー部品でも骨格部品と同様に軽量化や衝突安全性の向上への取り組みがなされている。本研究の検討対象であるドアについては、側突対応部品のドアインパクトビームへの国内初のホットスタンプ採用¹⁾や1470MPa級高強度鋼板適用²⁾など、高強度化や構造検討が進められている。一方、ドアアウターパネルなどの外板パネルでは、洗車やワックス掛けなどで人が手で触った際の抵抗感やべこつき易さに対応する張り剛性や、小石の飛来などによる凹みへの抵抗を示す耐デント性が要

求されるが、いずれも薄肉化によりその性能は低下する。

耐デント性については降伏強度を上げることで向上するため高強度鋼板の適用により改善できるが、高降伏強度化はプレス成形時の面ひずみを悪化させる要因となるため、成形時は低降伏強度で塗装焼付け後に高い降伏強度を示す焼付け硬化(BH)鋼板が実用化され³⁾、薄肉軽量化へ寄与している。しかしながら張り剛性については、その支配因子は板厚⁴⁾、パネル形状⁵⁾、弾性係数⁶⁾であり、高強度化による改善は見込めないこと、パネル形状には意匠性の影響が大きく設計自由度は限定されることから、今後外板パネルのさらなる薄肉化による軽量化に取り組むためには張り剛性の低下を補う補剛技術が重要になる。

日本製鉄(株)では鋼製ドアモジュールのさらなる軽量化の一助とするため、ドアアウターパネルの薄肉化とその成立のための補剛構造についての研究開発に取り組んでいる。本報では、極小断面の骨組みレインフォースメントを備えた新しい鋼製軽量ドア構造の基礎検討として、FEM解析による張り剛性および側突性能の機能評価と骨組みレ

* 鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部 主幹研究員 博士(工学) 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8 〒660-0891

インフォースメントの成形試験の結果について報告する。

2. 骨組みドア構造の概要

ドアアウターパネルの薄肉化により低下する張り剛性を補うために補剛部材を追加した場合、これに伴う重量増加が軽量化効果を目減りさせることになる。この課題を解決するため補剛機能と側突機能を併せ持つドア構造について種々検討を行い、小断面の長尺レインフォースメント (R/F) をドアアウターパネルの内側に格子状に配置した新しいドア構造 (以下、骨組みドア構造) を考案した。市販車のドア形状をベースとして開発中の骨組みドア構造を適用した例を図1に、従来のドア構造の模式図を図2に示す (ドアアウターパネルは省略)。骨組みドア構造の最大の特徴は、小断面かつ矩形閉断面を持つ複数の部材 (以下、骨組み R/F) がドアアウターパネルの内側に沿って格子状に配置されている点、および従来構造において側突機能を担うドアインパクトビームが省略されている点である。

骨組み R/F はその設置に伴う重量の増加を最小限に抑えるため薄物材を用いた中空閉断面部材とし、また車幅方向の負荷に対する曲げ剛性を効率よく高めることができるように、正方形または車幅方向に長辺を持つ長方形の断面形状とした。本報告の検討に用いた骨組み R/F の断面形状の一例を図3に示す。さらに、ドアインパクトビームの側突

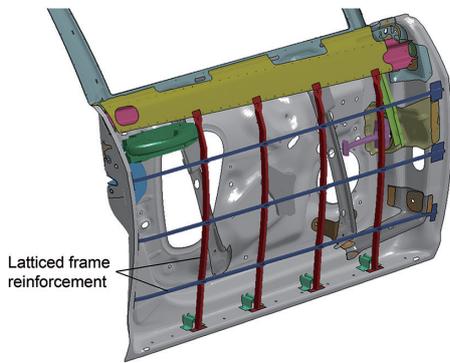


図1 開発軽量ドア構造の一例
Example of developed lightweight-door-structure

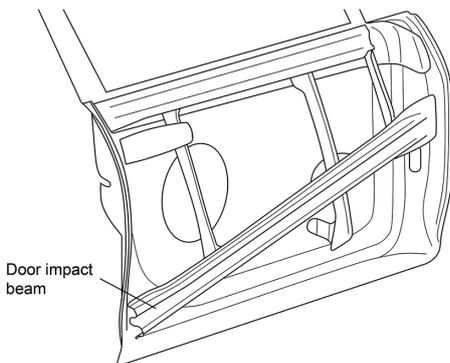


図2 従来ドア構造の模式図
Schematic illustration of conventional door structure

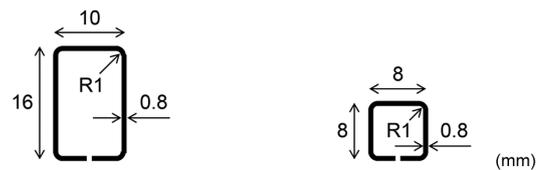
機能を代替するため、骨組み R/F は高強度部材とすることが必要であるため、本報告の検討内容では 1500MPa 級のホットスタンプ用鋼板を適用することを前提とした。また図1の適用例では骨組み R/F の支持を目的として従来部品の設計変更や部品追加を適宜実施した。

3. 骨組みドア構造の補剛・側突機能

骨組みドア構造に必要な要件として、部品性能の観点では“外板パネルの薄肉化に伴い低下する張り剛性を改善する補剛機能”，“従来の側突対応部品を代替する側突機能”の2点が挙げられる。本章では開発ドア構造のこの2つの機能に関して評価、検証した結果について説明する。

3.1 FEM 解析による張り剛性と側突性能の評価

図1, 2に示した開発ドア構造および従来ドア構造を対象に、汎用構造解析 FEM ソルバー LS-DYNA を用いた FEM 解析により張り剛性および側突性能の比較を行った。図4に張り剛性解析での圧子押し込み位置、および側突解析でのインパクト負荷位置を示す。張り剛性解析では半径 50mm の球状の剛体圧子を使用した。評価する圧子の押し込み位置は図4 (a) に示す点 A, B で、それぞれ開発ドア構造の骨組み R/F およびドアアウターパネルの端部ラインで形成される各格子形状の中央の点であり、点 A は従来ドア構造で、点 B は開発ドア構造で張り剛性が最も低かった位置である。従来ドア構造では点 A を、開発ドア構造では点 A, B の2点を押し込み位置として張り剛性の評価を実施した。また張り剛性解析では骨組み R/F とドアアウターパネルの接着を想定した拘束条件を付与した。



(a) Vertical frame reinforcement (b) Horizontal frame reinforcement

図3 小断面骨組みレインフォースメントの基本断面形状
Basic cross section shapes of frame reinforcement with small section

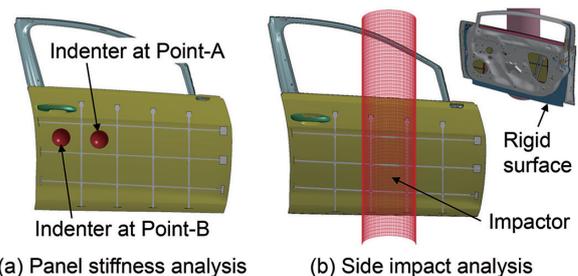


図4 張り剛性解析および側突解析の FE モデル
FE models of panel stiffness analysis and side impact analysis

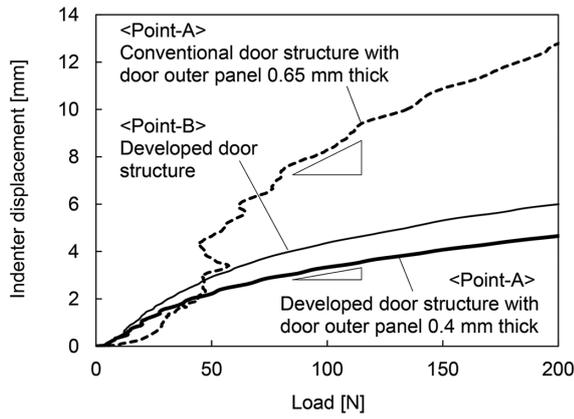


図5 張り剛性解析による荷重-変位曲線
Load-displacement curves by panel stiffness analysis

次に、側突解析では半径 150mm のボール状の剛体インパクトを使用し、図 4 (b) に示すように縦方向の骨組み R/F の中央 2 本の間に対応する位置をインパクトによる負荷位置に設定した。また境界条件としては、ドアインナーパネルの車幅方向内側面の A ピラー、B ピラーおよびサイドシルに相対する領域に剛体面を当接させて変位を支持した。張り剛性解析、側突解析ともに、ドアアウターパネルは開発ドア構造では板厚 0.4mm の 590MPa 級高強度鋼板を、従来ドア構造では板厚 0.65mm の軟鋼板を想定した。また、骨組み R/F は前述の通り図 3 に示す断面形状を基本断面とする 1500MPa 級ホットスタンプ部材と設定した。

張り剛性解析により得られた荷重-変位曲線の計算結果を図 5 に示す。従来ドア構造では圧子の変位が 3mm から 4mm にかけて荷重の低下、すなわち飛び移りが生じているのに加えて、全体的に荷重増加に対する変位増加の勾配が大きく剛性が低い。これに対して、開発ドア構造では飛び移りに相当する荷重の低下は生じておらず、また荷重-変位曲線の勾配も相対的に小さく高い剛性を示していることから、ドアアウターパネルの板厚が 0.4mm と非常に薄い条件であっても、従来ドア構造と同等以上の張り剛性が得られる可能性が高いものと考えられる。

図 6 は圧子押し込み位置が点 A の場合の張り剛性解析で、約 100N の負荷時にドアアウターパネルに生じる面内せん断応力の分布を示している。従来ドア構造で生じる面内せん断応力は圧子の負荷位置を中心に広く分布し、絶対値は小さい。これに対して開発ドア構造では、格子形状の内側に集中して大きな面内せん断応力が発生している。すなわち、格子状の骨組み R/F でパネル面を小領域に分割して支持することでパネル面内の張力を得られやすくなり、張り剛性が向上するものと考えられる。

次に、側突解析により得られたストローク-荷重曲線の計算結果を図 7 に示す。従来ドア構造において荷重レベルが低いストローク約 40mm までの範囲では開発ドア構造の

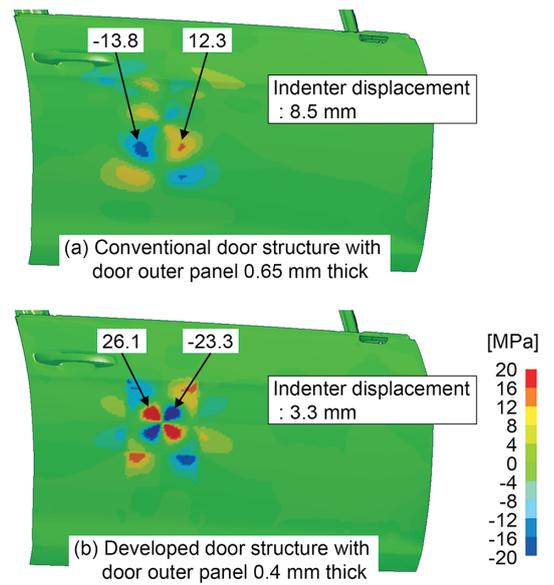


図6 100N 負荷時の面内せん断応力の計算結果
Calculated in-plane shear stress at load of 100N

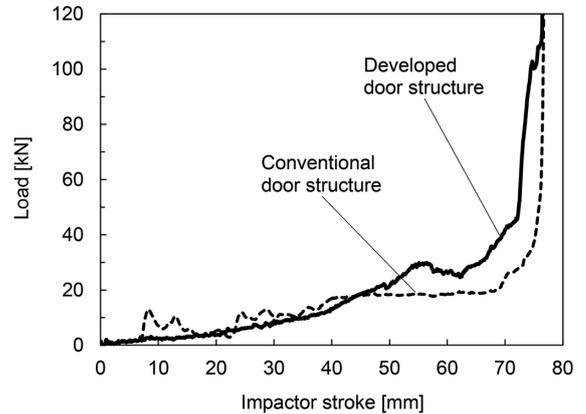


図7 側突解析によるストローク-荷重曲線
Stroke-load curves by side impact analysis

方が得られる反力はやや小さいものの、ストロークが約 45mm 以降の範囲では従来ドア構造よりも開発ドア構造の方がより大きな反力を得られており、ドアインパクトビームを省略しても従来ドア構造の側突性能を代替できる可能性が高いと考えられる。

3.2 張り剛性解析の精度検証

図 1 の開発構造でベースとしたものとは異なる市販車のドア形状をモデルとして試作した板厚 0.4mm の 440MPa 級高強度鋼板のドアアウターパネルを対象に、第 4 章で後述する成形工法により試作した縦方向の骨組み R/F 2 本をパネルの内側に接着し、張り剛性の評価試験を実施した。図 8 に張り剛性測定用サンプルの模式図を示す。試作した骨組み R/F の断面形状は図 3 (a) に示す基本断面と同じ形状とした。試験は薄鋼板成形技術研究会の活動でまとめられた統一試験方法⁷⁾を参考に実施した。圧子には先端半径が 50mm の鋼製圧子を使用し、ドアアウターパネルの前後

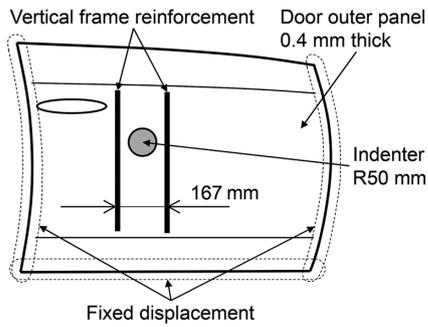


図8 張り剛性測定用サンプルの模式図
Schematic illustration of sample for panel stiffness measurement

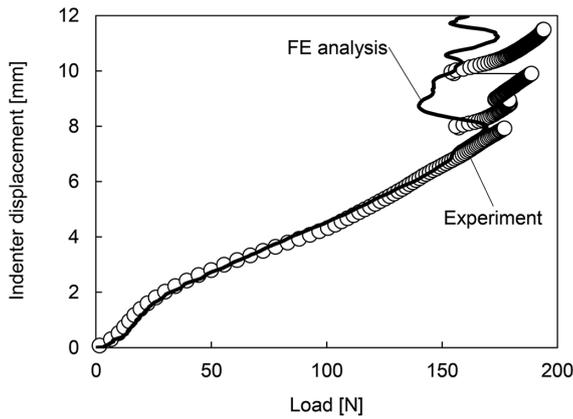


図9 張り剛性試験による荷重-変位曲線と解析結果の比較
Comparison of load-displacement curve by panel stiffness experiment with corresponding calculated result

および下側3辺の端部を治具拘束した。また、張り剛性解析は試験条件を模擬して計算を行った。

図9に張り剛性試験により得られた荷重-変位曲線と解析結果の比較を示す。どちらの結果も圧子変位が約8mmに到達したところで飛び移りが生じており、また飛び移りが生じる前までの荷重-変位曲線は良好に一致している。以上より、本報告で実施した張り剛性解析の良好な精度を確認できたことから、3.1節で得られた開発ドア構造の張り剛性特性も実現可能と考えられる。ただし実車ドアの張り剛性には例えばマスチックシーラーの配置や材質の影響⁸⁾など、他にも影響因子があると思われることから、今後はより実車に近い条件で評価、検証を進めていく。

4. 骨組みレインフォースメントの成形技術

骨組みドア構造に必要な3点目の要件としては製造面の観点から“小サイズ、中空矩形閉断面で長尺の骨組みR/Fを高強度かつ高精度に造形する加工技術”が挙げられる。矩形閉断面の長尺部品の加工方法としては、鋼板のロールフォーミング加工⁹⁾や矩形鋼管の曲げ加工¹⁰⁾などが考えられる。しかしながら図1の開発ドア構造では縦方向と横方向の骨組みR/Fのどちらもドアアウターパネルに沿わせることを想定しているため、両部材が交差する部位では部分

的に断面形状を変化させる必要がある。また部材の断面サイズや板厚の選定の自由度を上げることができるよう、本検討では汎用のプレス機を使用した薄板プレス加工を選択した。本章では本報告での骨組みR/Fの製作に採用した成形工法と、その成形試験の結果について説明する。

4.1 成形工法概要

図3に示すような板厚が薄く、断面サイズが小さく、かつ矩形閉断面の高強度部品をドアアウターパネルの断面形状に合わせて成形する場合、次の3つの課題が想定される。(1) 高強度鋼板を用いた冷間成形ではスプリングバックによる寸法精度不良が発生しやすく、薄物材ではさらに助長される。(2) 薄物材のホットスタンプでは加熱後の剛性が著しく下がるため、加熱炉内や出炉後の搬送時の変形に伴う不具合が生じる場合や、搬送中の放冷による温度低下が速くなるため、焼入れに必要な成形開始温度の確保が困難となる可能性がある。(3) 薄物材の矩形閉断面への成形における断面形状の崩れや、曲げ加工での座屈変形の可能性がある。これらの課題を解決する工法として、図10(a)~(d)の上部に示す冷間成形3工程+熱間曲げ1工程の4工程成形を検討した。最初の冷間3工程で中空矩形閉断面を持つ直線状の中間成形品までを成形し、4工程目に熱間での曲げ加工を行い長手方向に所定の形状を付与する。また、矩形閉断面へ成形する際に突き合せ部の2つの板端部を確実に突き当てることで断面形状崩れのリスクを軽減できると考えられるため、写真1に示すような向かい合う板端部で山/谷の位置をずらした波形状を成形1工程目において部品長手方向の数箇所に付与した。

本工法により先に挙げた3つの課題に対して、(1) 冷間

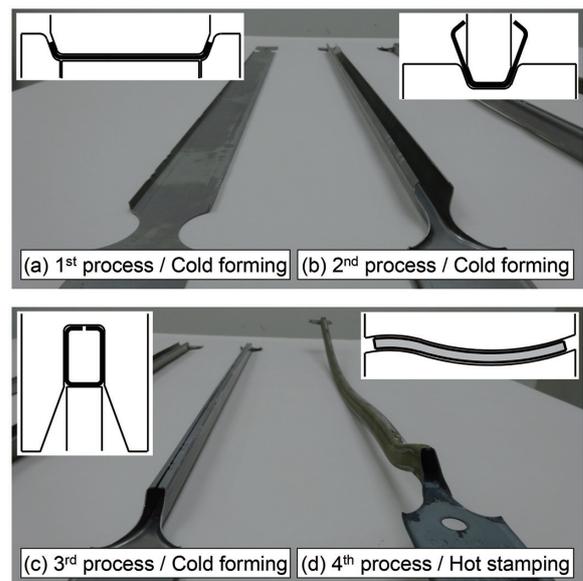


図10 矩形閉断面骨組みレインフォースメントの成形工程の一例
Example of press forming processes of frame reinforcement with rectangular closed section

成形を直線状の中間成形品までとすることで3次元的な寸法精度不良を抑制し、最後に形状凍結性に優れたホットスタンプを行うことで1500MPa級の高強度部品とすることができるとともに、薄物材であっても高い寸法精度が期待できるため、ドアアウターパネルに密着可能なレベルまでの加工が比較的容易に実現できる。(2) 中空閉断面の中間成形品を加熱してホットスタンプするため、薄物材であっても加熱後の剛性を平板に比べてはるかに高く保つことができ、また搬送中の放冷による温度低下の緩和も期待できる。(3) 突き合せ端部に写真1の波形状を付与することで閉断面化加工の際の断面形状崩れが回避できるとともに、曲げ加工を成形中の変形抵抗が小さいホットスタンプで行うことで、薄物材の中空閉断面品であっても座屈変形の抑制が期待できる。

以上の開発工法を用いて、開発ドア構造に適用する縦方向の骨組み R/F を対象とした成形試験を実施した。

4.2 成形試験結果

図10(a)～(d)の下部に各工程の成形品の写真を示すが、各工程において割れ、しわなどの成形不良や問題となる寸法精度不良が生じることなく、ドアアウターパネルの断面形状に対応した矩形閉断面部材を成形することができた。

図11に成形4工程目のホットスタンプ工程における炉加熱後の放冷曲線を取得した結果を示す。測温は、骨組み



写真1 骨組みレインフォースメントの突き合せ端部の波形状
Wave shape at butting edge of frame reinforcement

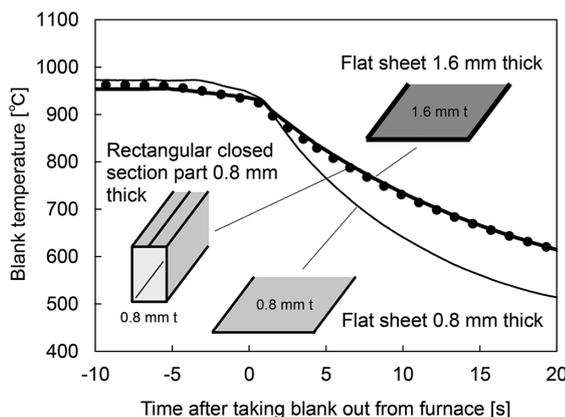


図11 矩形閉断面部材の放冷曲線
Air cooling curves for rectangular closed section part

R/Fの長手方向中央の内側壁面に相当する位置に熱電対を取り付けて第3工程まで成形した中空閉断面の中間成形品と、比較のために熱電対を取り付けた板厚0.8mm、1.6mmの平板について実施した。図11に示すように、板厚1.6mmの平板に対して板厚0.8mmの平板では放冷による温度低下が速いが、板厚0.8mmの中空閉断面品では板厚1.6mmの平板とほぼ同じ放冷速度であることが判る。板厚1.6mmはホットスタンプ部品として一般的な板厚条件であるため⁴⁾、本成形工法を用いれば、汎用のホットスタンプ設備でも加熱後の放冷による温度低下の課題は解消できるものと考えられる。

図12に試作した骨組み R/F の断面硬度分布の測定結果を示す。断面1、断面2では全周で450HV（引張強度TS：1500MPa相当）前後の硬度を得ることができた。これはホットスタンプ工程で焼入れに必要な成形開始温度、および成形下死点保持での必要な冷却速度が確保できたことを示唆しており、本工法では中空閉断面品の表面側のみの金型冷却となるものの、板厚が0.8mmと薄いことから十分な冷却速度が得られたものと考えられる。一方、断面3でもほとんどの測定点で450HV前後の硬度が得られているが、一部に370HV（TS：1170MPa相当）程度の硬度しか出ていない部位が見られ、これは部材長手方向で局部的に屈曲した部材形状の凸側面に相当する。

次に、図13に非接触3次元形状測定による寸法精度の評価結果を示す。ここでは参考として780MPa級高強度鋼板を用いて第4工程まで全工程で冷間成形した試作品の寸法精度評価結果、および各試作品の側面視の写真も合わせて示している。780MPa級の冷間成形品でも座屈変形などの成形不良は生じなかったが、全体的に曲率が小さく正規形状との比較において大きな形状の乖離が見られる。これに対して第4工程でホットスタンプを実施した開発工法の成形品は大幅に誤差が小さく、全体的に正規形状、すなわちドアアウターパネルの断面形状に沿った部品形状を得ることができた。一方、部材長手方向で局部的に屈曲した部

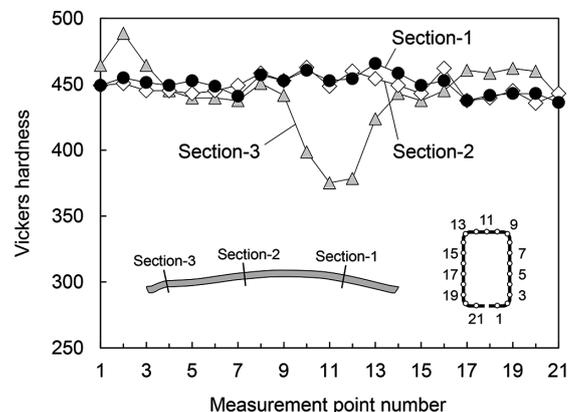


図12 骨組みレインフォースメント試作部品の断面硬度分布
Vickers hardness distributions in cross section of trial forming parts of frame reinforcement

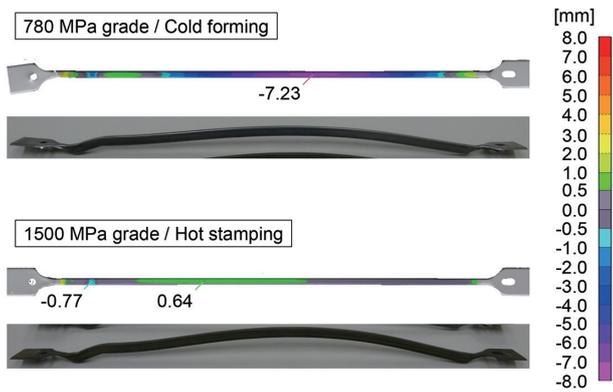


図 13 試作部品形状と正規形状の比較
Comparison of trial forming part shape with design shape

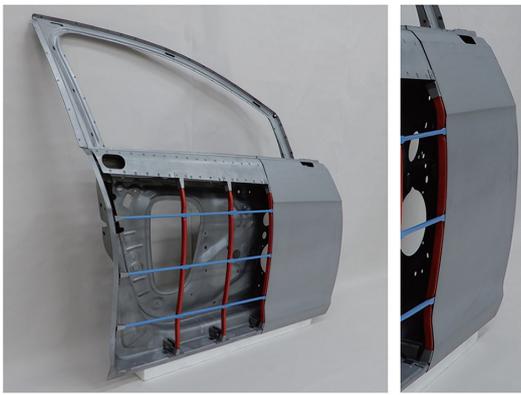


写真 2 開発した新構造鋼製ドアの試作品
Trial product of developed new structural steel door

位の凸側において正規形状に対する局所的な乖離（ -0.77 mm）が生じており、屈曲形状を曲げ成形した際の凸側面のひげに起因している。これは図 12 の断面 3 で硬度が低かった部位と同じ位置であり、この面のひげが原因となって下死点保持中の冷却速度が低下し、十分な硬度が得られなかったものと考えられる。なお、この面のひげに応じて第 4 工程の金型形状を修正することで焼入れ硬度は改善可能である。

本開発工法により縦方向および横方向の骨組み R/F を製作し、合わせて図 1 に示す開発構造の主要部品も製作して新構造ドアを試作した。なお、ドアアウターパネルには板厚 0.65 mm の軟鋼板を使用した。試作したドアを写真 2 に示す。縦方向の骨組み R/F の形状はドアアウターパネルの断面形状と良好に一致しており、薄物ホットスタンプ用鋼

板を用いた骨組み R/F の製作に本開発工法を適用できる目処を得た。

5. 結 言

ドアアウターパネルへ極薄材を適用しながらも従来構造と同等以上の張り剛性と側突性能を確保して軽量化することを目的とした新しいドア構造として骨組みドア構造を考案した。本報告では FEM 解析を用いて開発ドア構造による張り剛性と側突性能の基礎評価を行うとともに、成形試験により骨組み R/F の成形工法の検討を実施した。本検討で得られた結果を以下に記す。

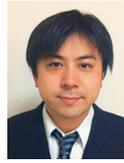
- 1) 開発ドア構造ではドアアウターパネルに板厚 0.4 mm の極薄材を適用した場合でも、従来ドア構造と同等以上の張り剛性を得られる可能性が高いことを張り剛性解析により確認した。
- 2) 開発ドア構造ではドアインパクトビームを省略しても、従来ドア構造と同等の側突性能を担保できる可能性が高いことを側突解析により確認した。
- 3) 冷間成形で中空矩形閉断面の直線状中間成形品を成形し、その後ホットスタンプで曲げ加工を行う開発工法により、高強度の骨組み R/F をドアアウターパネルに沿う高い寸法精度で造形できることを成形試験により実証した。

参照文献

- 1) 中嶋勝司 ほか：素形材. 43 (12), 31 (2002)
- 2) 吉岡典恭：神戸製鋼技報. 61 (2), 53 (2011)
- 3) 高橋学：新日鉄技報. (378), 2 (2003)
- 4) 高橋賢司 ほか：塑性と加工. 6 (58), 674 (1965)
- 5) 柚島善之 ほか：塑性と加工. 21 (229), 168 (1980)
- 6) 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. 東京, 日刊工業新聞社, 2017, p.506
- 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 4 版. 東京, 日刊工業新聞社, 2017, p.498
- 8) 岩間隆史 ほか：自動車技術会論文集. 44 (4), 1125 (2013)
- 9) 橘美枝 ほか：神戸製鋼技報. 57 (2), 31 (2007)
- 10) 富澤淳 ほか：新日鉄住金技報. (397), 83 (2013)
- 11) 森謙一郎：ホットスタンピング入門. 初版. 東京, 日刊工業新聞社, 2015, p.49



鈴木利哉 Toshiya SUZUKI
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
主幹研究員 博士(工学)
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



広瀬智史 Satoshi HIROSE
君津技術研究部 主幹研究員 Ph.D.



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



吉田 亨 Tohru YOSHIDA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
上席主幹研究員 博士(情報科学)