

技術論文

ホットスタンプ用鋼板を用いた高機能一体化部品を実現する 技術開発

Development of Technology to Realize High-performance Integrated Parts Using Steel Sheets for Hot Stamping

木本野樹*
Naoki KIMOTO

銭谷 佑
Tasuku ZENIYA

田畑進一郎
Shinichiro TABATA

米林 亮
Tohru YONEBAYASHI

大野敦史
Atsushi OHNO

吉田博司
Hiroshi YOSHIDA

久保雅寛
Masahiro KUBO

岡田 徹
Tohru OKADA

池上健太
Kenta IKEGAMI

藤田宗士
Soshi FUJITA

抄 録

自動車車体骨格では、各種性能を確保しつつ軽量化・コスト低減・GHG 排出量低減等が求められる。近年、それらの要求を満たす手段の1つとして、部品一体化の進展がみられる。日本製鉄(株)において開発してきた多様な強度特性・変形能力を有するホットスタンプ用鋼板とそれらを活かす構造設計・成形工法等の利用技術を紹介することで、高機能な一体化部品を実現する総合的取り組みについて概説を行った。

Abstract

In automotive body structures, there is a demand for weight reduction, cost reduction, and GHG emission reduction while ensuring various performance characteristics. One of the means to meet these requirements is the recent progress in component integration. Nippon Steel Corporation has developed hot stamping steel sheets with various strength characteristics and deformation capabilities, and by introducing the utilization technologies such as structural design and forming methods that leverage these properties, we provide an overview of the comprehensive efforts to realize high-performance integrated components.

1. 緒 言

1.1 背景：自動車に求められるニーズ

2050年のカーボンニュートラル実現に向け、ライフサイクルでの温室効果ガス(Life Cycle-Greenhouse gases: LC-GHG)排出量の低減が求められており、自動車分野では、走行時のGHG排出量の少ない電気自動車(Battery Electric Vehicle: BEV)の普及が近年急速に進んでいる¹⁾。一方、BEVに搭載されるバッテリーは重量が数百kgと重く、車両総重量もそれ相応に増加するため、車体骨格にはこれまで以上に高い衝突性能が求められる。また、バッテリーはその製造コストが高く、車両全体の価格上昇の一因となっている。そのため、自動車の車体骨格には、衝突性能の向上に加えて、コストの低減もあわせて求められる。また、少子高齢化による労働人口の減少や職業志向の変化から、

自動車分野では省人化可能な技術ニーズも顕在化している。上記のニーズへ対応の一例として、例えばテスラが世界で初めて採用したギガキャストは、大型アルミニウム部品を一体成形する革新的なダイキャスト技術で、テスラはこの技術を活用し、リアアンダーボデーで約70の部品を1つのギガキャスト部品に統合し、生産効率を向上させた²⁾。ギガキャスト部品を製造するためには、新たに大型設備を導入する必要がある。数多くの部品が一部品化されているため軽衝突時の補修性に劣る、多車種の製造に不向きであるといった課題も指摘されている³⁾が、このような動きを受けて自動車メーカー各社では改めて車体製造プロセスの最適化を検討する動きが広がっている。

以上のように自動車業界においては、環境規制の強化、電動車の普及、車体構造の変化、製造技術の革新等の大きな変革が生じている。これらの変化に対応するために日本

* 鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部 主任研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

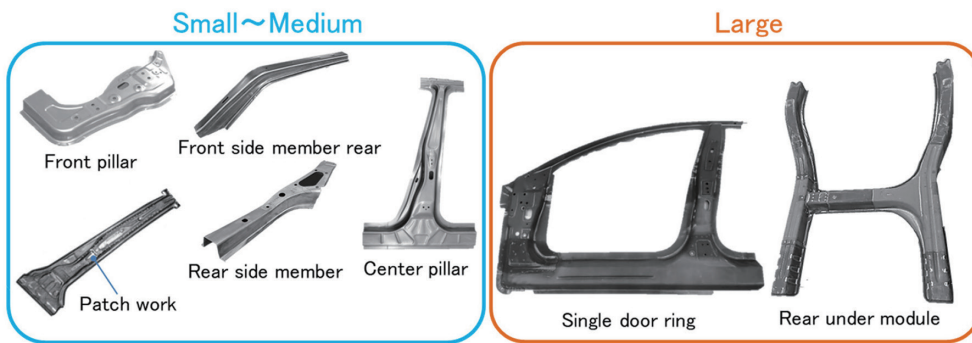


図1 一体化部品の事例
Examples of the integrated components

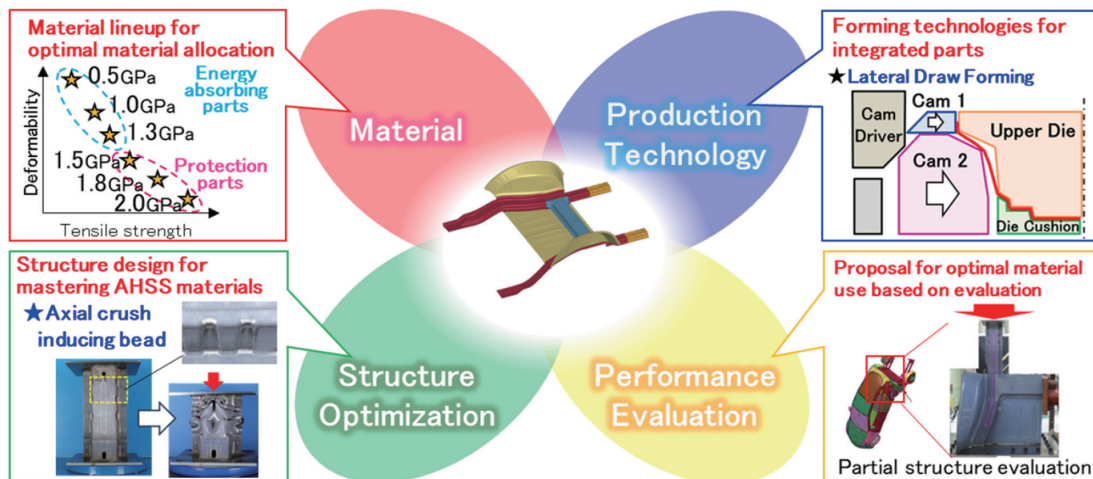


図2 高機能一体部品に関するトータルソリューション
Total solution for high-performance integrated parts

製鉄(株)は、次世代自動車コンセプト“Nsafe®-AutoConcept”を構築した。本報および次報(目次 No. 7)では、図1に示すような一体化部品を対象に、トータルコストやGHG排出量の削減、軽量化に貢献する種々の要素技術を開発しており、そのコンセプトと効果について紹介する。本報では、ホットスタンプ用鋼板を活用した技術、次報では冷間ハイテンを活用した技術を紹介する。

1.2 一体化技術の概要

自動車の車体骨格では、部位ごとに異なる強度特性や変形能力が要求される。日本製鉄は図2に示すように、幅広い材料ラインナップとそれらを活かす構造・工法・評価技術のトータルソリューションを有しており、小中規模から大規模までの様々な規模で種々の要求に的確に対応する高機能な一体化部品を実現する技術を開発した。

Nsafe®-AutoConceptの根幹となる材料は、ホットスタンプ用鋼板で図2の左上に示すように2.0GPa級ホットスタンプ用鋼板(HS材)のような最先端の高強度鋼板や衝突時の変形特性に優れた高変形・高エネルギー吸収材(例えば、0.5GPa, 1.0GPa, 1.3GPa級HS材)を開発している。これらの各種材料をTailored Welded Blank(TWB)技術を活用

して、必要部位ごとにつなぎ合わせることで、大幅な軽量化・GHG排出量の低減、コスト低減等が可能である。

例えば、小中規模な一体化においては、上記TWBの活用に加えて、多重構造の部品を一体成形するパッチワーク技術⁹⁾や高強度鋼板への置換による補強部材削減等が挙げられる(図1左)。組立ラインを短縮できるような大規模な部品一体化の実現には、ホットスタンプ技術の活用が有効な選択肢の1つとなる。部品例としては、2010年代から実用化されているドアリングや2020年頃から提案されているリアアンダーモジュールが挙げられる(図1右)。

2. 開発コンセプト

2.1 開発コンセプト

日本製鉄では、ホットスタンプ用鋼板を活用した大規模な一体化部品のコンセプトを開発しており、図3にその一例を示す。図3はリアアンダーモジュールであり、(a)アッパー側と(b)ロア側から構成される。材料はホットスタンプ用アルミめっき鋼板を採用し、フロント側には変形を抑止する2.0GPa-HS材、リア側には軸圧潰変形によってエネルギー吸収を狙った1.0GPa-HS材、クロスメンバー、リアフロアやホイールハウスには1.5GPa-HS材を用いた。素

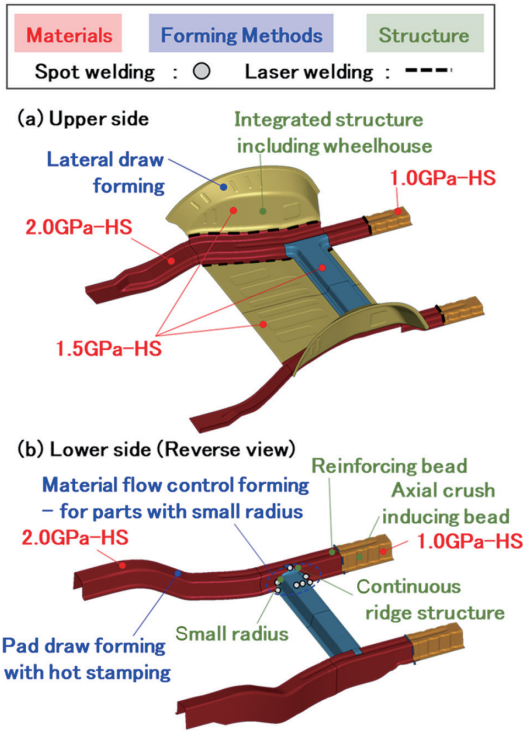


図3 大規模リアアンダーモジュールのコンセプト
Integrated rear under module concept with large-scale hot stamping

材同士はTWBにより接合しており、部位によってスポット溶接によるTWBと突合せレーザー溶接によるTWBを使い分けた。レーザー溶接によるTWBは、溶接強度を向上させる溶接技術を開発した。スポット溶接によるTWBでは、成形前後の溶接打点を最適化することで、一体化部品においても従来の分割構造と同等の構造を実現できる工法を開発した。最後に、アッパー側のホイールハウスはホイールハウス下部のサイドメンバーやフロアと一体化しており、これを実現するためにカム機構を活用した二軸ホットスタンプ工法を開発した。これら要素技術の詳細は3章に示す。

2.2 開発コンセプトの効果

緒言に記載の通り自動車の車体骨格には種々の要求があり、各種要求を満たす手段の1つとして、部品一体化は有効である。

図4にリアアンダーモジュールを対象に、後面衝突性能を同等として、前節で紹介したホットスタンプ用鋼板による一体化構造、アルミ/鋼混合の分割構造、アルミダイキャスト構造で、ライフサイクルでのGHG排出量、重量を試算した結果を示す。GHG排出の計算は別報(目次No.5)のライフサイクルアセスメント(LCA)に記載の通りである。

図4の通り、アルミ/鋼混合の分割構造やアルミダイキャストに比べて、開発した一体化構造は、GHG排出量、重量ともに優位な結果であり、競争力の高い構造を実現している。一体化構造が優位な主要因は、いずれも、アルミニ

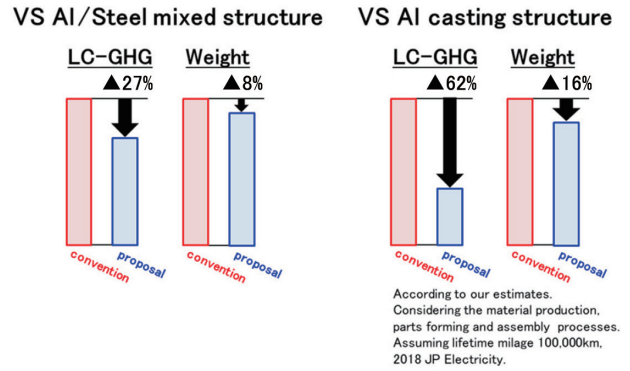


図4 LC-GHG, 軽量化の試算結果
LC-GHG, weight of integrated steel structure compared to Al/Steel mixed and Al casting structure

表1 コスト, LC-GHG, 軽量化の比較
Comparison of cost, LC-GHG, weight

Type	Cost	LC-GHG	Weight
Integrated hot stamping structure	Good	Good	Good
Al/steel mixed structure	Poor	Poor	Poor
Al casting structure	Very poor	Very poor	Poor

ウムに比べて鋼は素材製造時のGHG排出量の原単位の低さが挙げられる。特に、一体化構造はアルミダイキャストに比べると大幅に優位な結果である。アルミダイキャストは素材の強度は部品のどの部位もほぼ同一であり、構造や板厚で耐力を制御する必要があるため、素材の密度から考えるよりも重い構造となる。鋼板ではTWBにより強度と板厚を適材適所に配置することで軽量化が可能である。

表1に、ホットスタンプ用鋼板による一体化構造、アルミ/鋼混合の分割構造、アルミダイキャスト構造で、市場情報をもとにコスト試算を行い、比較した結果を示す。表1には、図4のGHG排出量、重量の結果も合わせて示す。コストについても、アルミ/鋼混合の分割構造やアルミダイキャストに比べて、開発した一体化構造は優位な結果であった。

以上より、ホットスタンプ用鋼板による一体化構造を用いることで、自動車車体の低コスト化、軽量化、GHG排出量低減に貢献できる。

3. 要素技術

3.1 2.0GPa級ホットスタンプ用鋼板の活用技術

図2に示したように最先端の高強度鋼板として、2.0GPa-HS材が実用化されている⁵⁾。2.0GPa-HS材の車体骨格部材への適用によって、従来、部材の耐力を確保するために配置されている補強部材を省略して部品点数削減および軽量化が可能となることが期待される。図5にセンターピラーにおける2.0GPa-HS材を用いた部品点数削減および軽量化の例を示す⁶⁾。980MPa級材を使用した場合と比較して、

2.0GPa-HS 材を適用した場合は補強部材を省略しつつ 29% の軽量化が可能と試算している。

ホットスタンプ部材は主にマルテンサイト組織の活用によって強度を確保している。マルテンサイト組織の強度は炭素量を増やすことにより高めることができるが、強度上昇に伴い靱性が低下し、衝突変形時に材料の破断によって十分な性能が得られないことが想定される。また、材料強度・拡散性水素量・引張の残留応力が一定条件を満たした場合に起こる水素脆化割れも、高強度化によって感受性が高まる傾向にある。これらの課題を解決するために材料と利用技術の両面に対策技術を開発している。材料面では、成分設計等によって靱性および耐水素脆化特性を高めており、腐食環境下での水素脆化割れが懸念されるアンダーボデー、例えば図 3 に示すリアアンダーモジュールにおいても適用が期待される。

また利用技術面においても衝突変形時の破断を抑制する技術を開発しておりその一例を以下に紹介する。自動車の骨格部材において、部材に折れ変形が生じた場合に材料が破断する可能性が想定される。これに対して、例えば壁面にビードを設定して剛性を向上させつつ断面線長を稼ぎ曲げ折れ時のひずみを分散することで、骨格部材の破断の抑制が期待される⁷⁾。図 6 に 2.0GPa-HS 材を適用したフロントピラーで側面からポールが衝突した場合を模擬して実施

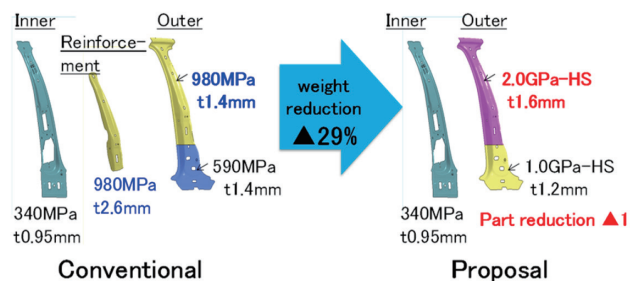
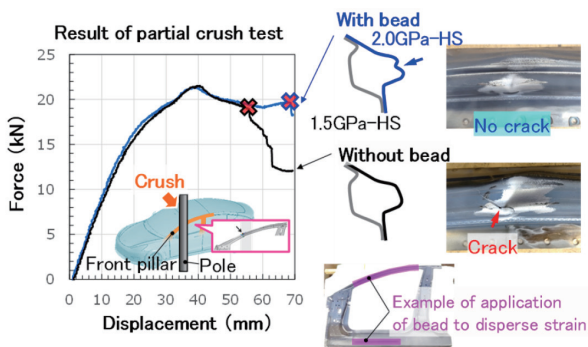


図 5 センターピラーにおける 2.0GPa 級ホットスタンプ用鋼板を用いた部品点数削減および軽量化の例
Example of part reduction and weight reduction using 2.0GPa hot stamping steel



The application of beads can disperse strain and prevent crack.

図 6 衝突時に部材に発生するひずみを分散する断面設計
Cross sectional design that disperses strain during collision deformation

した部分構造での側突試験の結果を示す。ビードを設定していない断面形状では材料破断が発生するが、ビードを設定することで材料の破断が抑制されている。

高強度鋼板の衝突変形時において他にスポット溶接部および熱影響部（以降、HAZ 部と表記）からの破断も想定される。対策手法の詳細は、別報（目次 No. 12）に記載するが、スポット溶接部破断対策としては、溶接条件の工夫による継手強度向上⁸⁾に加えて、部材形状の工夫による応力緩和⁹⁾等があげられる。また、HAZ 部からの破断対策としては、ホットスタンプしてから溶接するまでの間に溶接箇所を焼き戻しすることによる HAZ 部の硬度差低減、フランジ形状や断面形状の最適化による引張荷重の低減¹⁰⁻¹²⁾等があげられる。

3.2 エネルギー吸収部材向けホットスタンプ用鋼板の活用技術

前面衝突（後面衝突）を受けた際に、クラッシュボックスやフロントサイドメンバー（リアサイドメンバー）を大きく変形をさせることで衝突エネルギーを吸収させてキャビンへの損害を防ぐ場合がある。クラッシュボックスやフロントサイドメンバー（リアサイドメンバー）の変形の一例として、蛇腹状に折りたたまれながら変形する軸圧潰変形が挙げられる。軸圧潰変形を受ける部材では、破断による変形進行の不連続化を起こさないことが必要であり、2010 年代までは、590MPa 級材の適用が主体であった。そこで、軸圧潰変形を受ける部材の軽量化のため、強度と軸圧潰変形に耐える変形能力（特に曲げ性）を両立した材料として、冷間ハイテンでは 980EA 材、ホットスタンプ用鋼板では 1.0GPa 級材等が開発されている。

図 7 にリアサイドメンバーのリア側を模擬したハット型部材に 1.0GPa-HS 材を適用した場合の動的軸圧潰試験の結果を紹介する。エネルギー吸収特性の確保には屈服の安

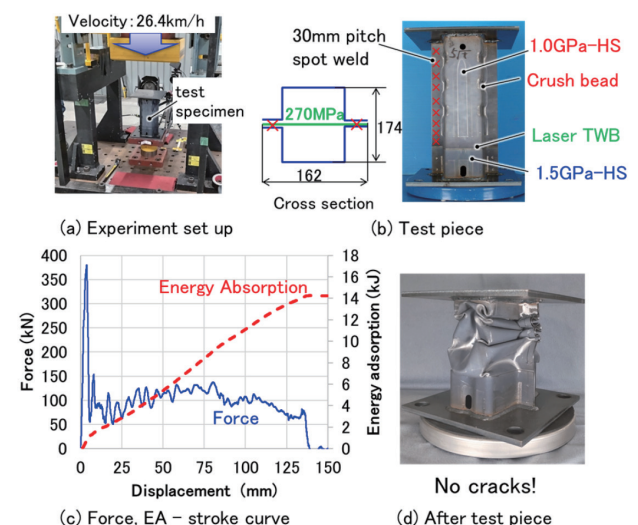


図 7 1.0GPa 級ホットスタンプ用鋼板を用いた軸圧潰試験
Effect on 1.0 GPa hot stamping steel in axial crush test

定化が重要であると考えて、部材には座屈制御用に形状（幅、深さ）を調整したビードや中板を設定した。衝突試験には日本製鉄の波崎研究センターにある落錘試験機を用いた。試験の結果、割れが生じることなく座屈ビードに沿って軸圧潰できた。各座屈部では鋼板同士が密着する密着曲げとなっており極めて大きな変形となっているが、本材料では割れが生じず、衝突に対する変形特性の高さが示された。

3.3 カム機構を活用して複雑構造の成形を実現する新工法：二軸ホットスタンプ工法

本節では、リアアンダーモジュールを例に、複雑な構造の成形を実現する工法を紹介する。リアアンダーモジュールを題材とした部品一体化では、サイドメンバーとクロスメンバーを一体化したH型フレーム¹³⁾等がこれまでに報告されているが、ホイールハウスまでリアアンダーモジュールの一体化構造に統合することで、さらなる部品点数削減や側面衝突への対応強化が期待される。ここで、図8にリアアンダーモジュールのアップ側断面図を示す。本断面は、ホイールハウス、サイドメンバー、リアフロアといった部品で構成される。図中の矢印は、各部品を個別に成形する場合のプレス方向および成形様式を示している。サイドメンバーおよびリアフロアは車体組付け姿勢とほぼ同じ姿勢で曲げ変形にてプレス成形される場合が多い。一方、ホイールハウスは車体組付け姿勢から約90°回転させた状態で絞り成形される場合が多い。従って、これらの部品の一体成形は、プレス方向が約90°異なり、かつ異なる成形様式の部品同士を一体成形することを意味し、成形難易度の増大が懸念される。

そこで、リアサイドメンバーとフロアは従来のプレス方向のまま、さらに車両外側から内側に向かうホイールハウス部の絞り成形を実現する新工法：二軸ホットスタンプ工法を考案した¹³⁾。その金型構造を図9に示す。ブランク下側に位置する金型を、ホイールハウスのフランジ部を成形するカム1と、ホイールハウスのフランジを除いた部分を成形するカム2と、リアフロア部およびサイドメンバー部を成形するクッションの3つに分割された金型構造とした。このとき2つのカムは単一のカムドライバーによって時間差で駆動するよう金型構造を工夫した。より具体的には、上側のカム1が下死点まで駆動した後に下側のカム2を駆動させることで、上型とクッション、および上型とカム1の2箇所ブランクをホールドした状態を作り出し、カム2を用いてホイールハウス部においては外側から内側に向かって絞り成形を可能とした。

上記の開発工法コンセプトの有用性について、成形解析を用いて検証した。解析には、汎用のFEMソルバーであるAutoForm R10を用いた。供試材にはホットスタンプ鋼板(22MnB鋼)の材料特性を設定し、材料温度変化およびホットスタンプ中の相変態も考慮して解析を行った。本解

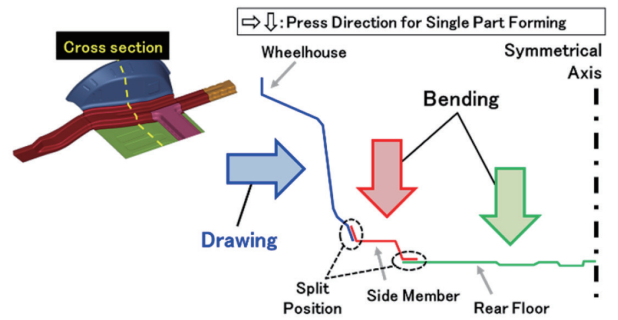


図8 リアアンダーモジュールのアップ側の断面図
Cross-sectional diagram of upper side of rear under module

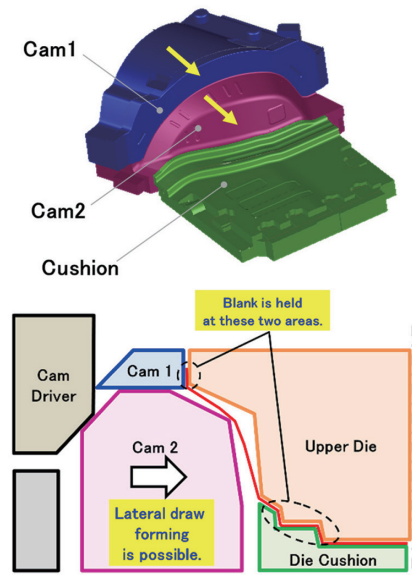


図9 二軸ホットスタンプ工法の金型構造断面図
Cross-sectional diagram of die structure in developed method

析で想定したプロセスは、鋼板を920℃に加熱後、炉出から成形開始までを18秒とした。

図10に下死点における成形解析結果を示す。ホイールハウスのフランジをカム1でブランクホールドした後、カム2でホイールハウス部を外側から内側に向かって絞り成形することで、狙い通り、顕著なしわを発生させることなく、ホイールハウス部を成形することが可能となった。また、板厚減少率は最大20%程度であり、割れやしわの発生を抑制しつつ、大規模一体成形を実現できる見込みが得られた。

次に成形解析で検討した工法を用いて、実際のプレス機を用いてホットスタンプでの部品試作を行った。試作での成形条件は、成形解析と同様の条件で行った。図11に部品試作結果を示す。実際に得られた成形品も顕著なしわや割れが生じることなく、成形可能であることを確認した。従って、プレス方向に上下に並んだ2つのカムによって、1回のプレスストロークで、異なるプレス方向かつ異なる成形様式の加工を可能とし、これによって、複雑な形状の大規模一体成形が実現可能であることが検証できた。

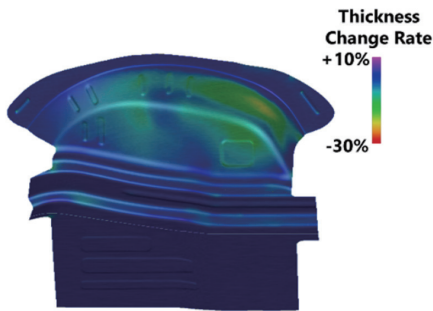


図 10 二軸ホットスタンプ工法の成形解析結果
Forming analysis results by developed method



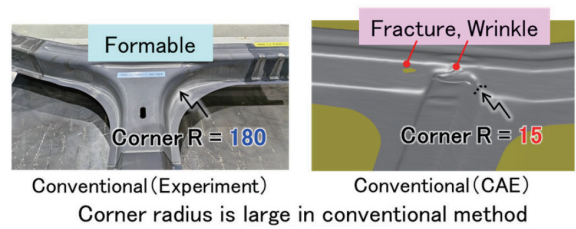
図 11 二軸ホットスタンプ工法を適用した部品試作結果
Prototype by developed method

3.4 材料流動を制御して一体化部品の成形性を向上させる新工法

部品を一体化した場合に想定される難成形部として、骨格部材同士が交差する結合部が挙げられる。例えば、ドアリングのフロントピラー（もしくはセンターピラー）下部とサイドシルの結合部、リアアンダーモジュールのリアサイドメンバーとクロスメンバーの結合部が挙げられる。部材結合部では、コーナー部での伸びフランジ変形による割れや断面線長の急変に起因した割れ・しわが課題として想定される（図 12）。このため、コーナー部では曲率半径（コーナー R）の拡大が必要となる場合があり、設計自由度が低下する。これにより、従来の分割構造をそのまま一体化構造に置換することができず、周辺部品のレイアウトの大幅な見直しが必要となることが懸念される。また、コーナー部 R が大きいことに起因した衝突性能の低下も課題として想定される。

そこで、一体化部品において、部材結合部のコーナー部 R の設計自由度を向上させる工法を開発した^{7,14,16}。概略図を図 13 に示す。部材の結合部に TWB が配置される場合において、TWB による接合部の一部を成形前、残りを成形後に適切に振り分けることで、成形中の材料流動を促進して、コーナー部や接合部における割れやしわを抑制することが可能となる。以降では、TWB をスポット溶接による TWB として本技術の詳細を紹介する。

設計したい構造によって使い分けが可能な 2 種類の工法として、TWB 材料流動制御オーバーラップ工法^{7,14,15}（図 13 (a)）と一体化小 R 工法¹⁶（図 13 (b)）を開発した。TWB 材料流動制御オーバーラップ工法では、結合部を構成する

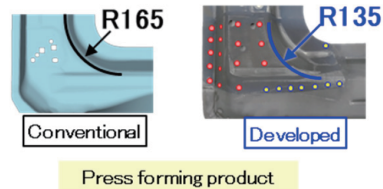
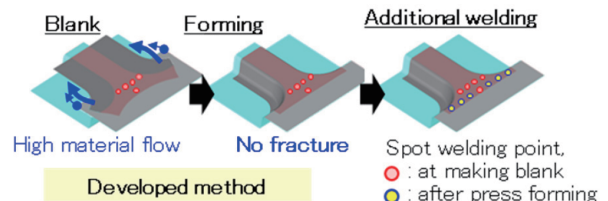


Disadvantage

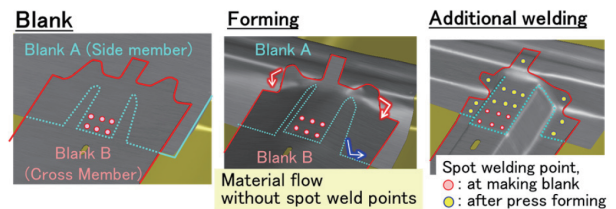
- Reduction in design flexibility
- Reduction in crush and rigidity performance

Forming method with small corner R is developed

図 12 従来工法の課題
Subject to conventional forming method



(a) TWB material flow control overlap method



(b) Integrated small corner R developed method

図 13 開発工法の概略

(a) TWB 材料流動制御オーバーラップ工法

(b) 一体化小 R 工法

Overview of spot TWB utilization forming method

部材間で広い範囲の重なり部を持たせており、ブランクでは成形時に材料流動しない、もしくはごくわずかとなる領域においては成形前にスポット溶接による TWB を配置し、材料流動部では成形後にスポット溶接するような工程とすることで、材料流動を促進して、成形性の向上を図っている。本工法は、部材同士の重なり部を広く持たせることが可能であり、例えば、フロントピラーとサイドシルの結合部やセンターピラーとサイドシルの結合部への適用が考えられ、重なり部をドア取り付け点に合わせてドア取り付け部の剛性を確保することや、重なり部を衝突変形モード制御に活用することが考えられる。一体化小 R 工法は、スポット溶接による TWB の配置について基本的な考え方は前記

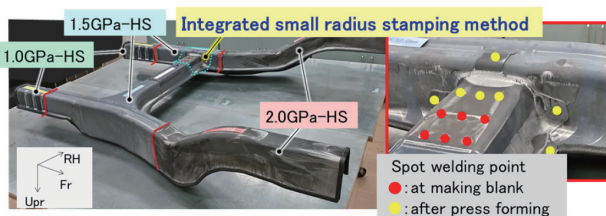


図 14 リアアンダーモジュールへの開発工法の適用例
Development methods applied to rear under module

工法と同様で、ブランク形状に工夫を加えることで、一方の部材の材料がコーナー部 R で曲げられて、他方の部材の縦壁に張り付くように流動させることで、前記工法と比較してより小さいコーナー部 R での成形が可能となる。本工法は、部材結合部のコーナー部 R を小さくすることが可能であり、周辺部品とのレイアウトが厳しい部位、例えば、リアサイドメンバーとクロスメンバーの結合部やフロアトンネルとフロアクロスとの結合部への適用が考えられる。構造に応じて開発工法を適切に選択することで高機能な一体化部品の実現に貢献できる。

リアアンダーモジュールのロア側の部品に後者の一体化小 R 工法を適用した事例を図 14 に示す。サイドメンバー側には 1.5GPa-HS 材、クロスメンバー側には 1.0GPa-HS 材を用いた。図内の赤点は成形前（ブランクでの）、黄点は成形後のスポット溶接打点である。割れやしわなく成形でき、従来の分割構造と同等の一体化構造を実現することができた。

3.5 レーザー溶接による TWB 部へのソリューション技術

前節ではスポット溶接による TWB について言及したが、本節では突合せレーザー溶接による TWB 技術を紹介する。突合せレーザー溶接では、従来の分割構造と比較して、重なり部（溶接代）を削減することができ、軽量化が期待される。

3.5.1 ホットスタンプ用アルミめっき鋼板の突合せレーザー溶接による TWB 部における課題

アルミめっき鋼板をレーザー溶接すると溶接金属に多量の Al が混入することが知られている¹⁷⁾。レーザー溶接による TWB のような突合せ溶接においても鋼板表面の溶融境界から Al が混入し、溶接金属中に局所的な Al 濃化部を生じることが報告されている¹⁸⁾。Al 量が増加すると Ac3 点が上昇するため、アルミめっき鋼板の突合せレーザー溶接による TWB では、ホットスタンプの加熱温度では溶接金属部が十分にオーステナイト変態されずに焼入れ不足となり、母材よりも硬さが低下する。その結果、継手強度が低下し、荷重負荷時に溶接金属部で破断する原因となる恐れがある。換言すれば、溶接金属中の Al 濃度を適切な値に制御

することが重要と言えるが、上述したように溶接金属中の Al 濃度は均一ではないため、破断起点となり得る局所的な軟化部を内包する懸念は避けられない。そのため、溶接前に Al 混入起点である溶融境界部近傍の Al を適切に除去することが必要である。

3.5.2 突合せレーザー溶接による TWB 技術の概要と継手性能

日本製鉄のホットスタンプ用アルミめっき鋼板を用いた突合せレーザー溶接による TWB の製造工程の模式図を図 15 に示す。まずエンドミルを用いて、それぞれの鋼板の突合せ端面近傍の鋼板表面のアルミめっきを機械的に除去する。その実現のためにミクロンオーダーの高精度な切削技術を開発した。次に、それぞれの鋼板の切削された鋼板の端面を突合せて溶接する。ホットスタンプ鋼板の TWB では、加熱工程において溶接金属、HAZ、母材の硬さがほぼ同等になるため、成形時の減肉した箇所へのひずみ集中を回避することを目的に、フィラー添加レーザー溶接により溶接金属部の厚さを薄板側めっき除去部の板厚以上に確保している。

一例として、板厚 1.2mm のアルミめっき 1.3GPa-HS 材と板厚 1.6mm のアルミめっき 2.0GPa-HS 材を用いて開発技術と比較技術で突合せ溶接継手をそれぞれ作製し、その継手特性を調査した結果を以下に述べる。比較技術では、アルミめっきを除去せずに、フィラー無しでレーザー溶接した。溶接部断面の EPMA 分析による Al のマッピング結果を図 16 に示す。比較技術では、母材に対して溶接金属部に多量の Al が混入しており、溶融境界部近傍に局所的な Al 濃化部が観察された。一方、開発技術では溶接金属への Al 混入が抑制され、Al の局所的な濃化も観察されなかった。溶接部のビッカース硬さ分布を図 17 に示す。また、継手の引張試験後の外観写真を図 18 に示す。比較技術では、溶接金属の硬さが平均的に低強度鋼板側の母材硬さよ

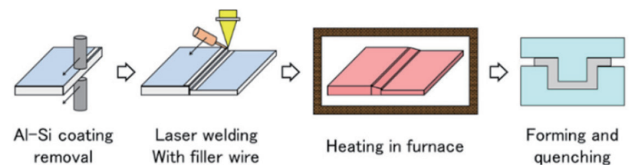


図 15 TWB 製造工程の模式図
TWB process of Al coated hot stamping steel

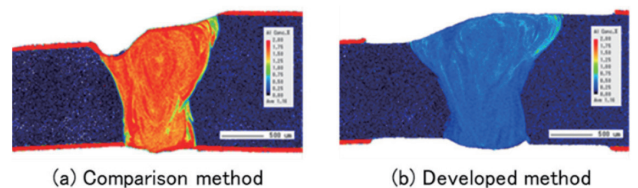


図 16 AI の EPMA マッピング結果
EPMA analysis of AI

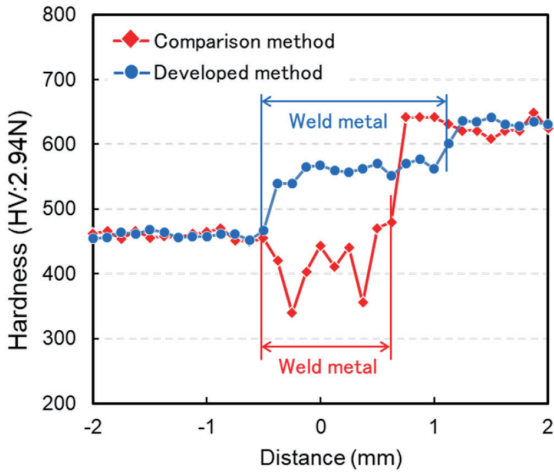


図 17 ホットスタンプ後の溶接部の硬さ分布
Hardness distribution of hot stamped laser welds

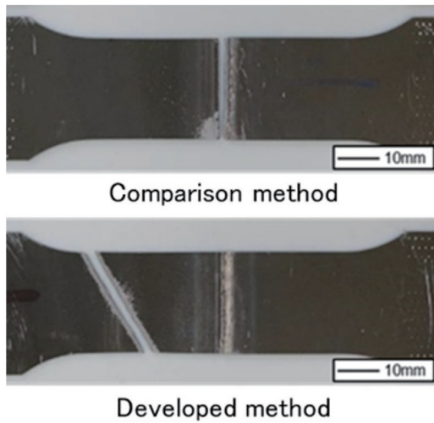


図 18 引張試験後の外観写真
Test specimen after tensile test

りも低下しており、溶接金属中でも局所的に硬さがHV100程度低下する箇所が観察された。一方、開発技術では、溶接金属の硬さは低強度鋼板側の母材硬さより高く、低強度鋼板側から高強度鋼板側にかけて概ね単調増加した。その結果、継手の引張試験において、比較技術では溶接金属で破断したのに対し、開発技術では破断部が母材であり、接合部の信頼性が高いことが確認された。

3.6 接合部の耐食性

ホットスタンプ用アルミめっき鋼板(付着量両面 160g/m²)の耐食性は、通常の防錆鋼板である合金化溶融亜鉛めっき鋼板(GA)あるいは溶融亜鉛めっき鋼板(GI)と同等であることが報告されている¹⁹⁻²²⁾。前節までに紹介してきた一体化部品の場合には、部品単体でホットスタンプ成形する場合との変化点として、スポット溶接によるTWBやパッチワーク工法による重ね合せ部、または突合せレーザー溶接によるTWB部が存在する。以下に耐食性の評価例を紹介する。

図 19 にスポット溶接で 2 枚の鋼板を重ね合せたのちに

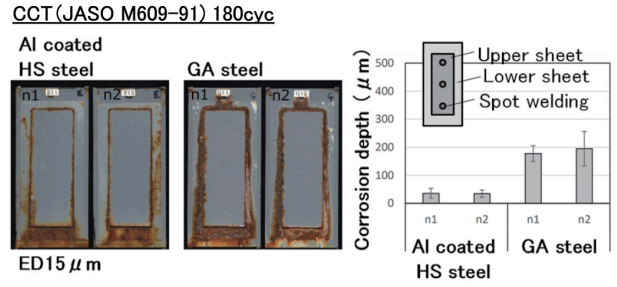
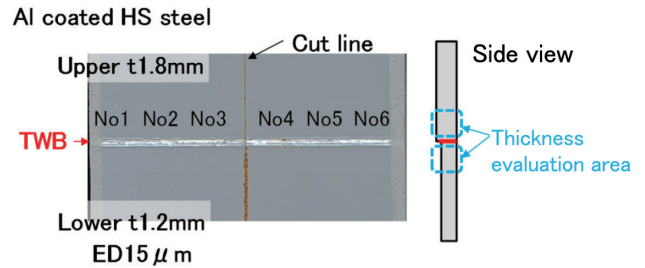


図 19 重ね合せ部の耐食性評価例
Corrosion resistance of overlapping parts

CCT(JASO M609-91) 30~60cyc



CCT(JASO M609-91) 360cyc

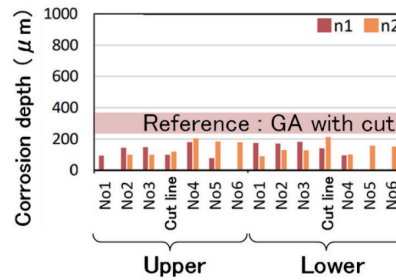


図 20 突合せレーザー溶接による TWB 部の耐食性評価例
Corrosion resistance of around the TWB area

電着塗装(膜厚 15μm)した試験片における耐食性評価例を示す。ホットスタンプ用アルミめっき鋼板の重ね合せの境界付近で腐食するが、180cyc まで腐食が進んだ際には亜鉛めっき鋼板(GA)と比較して、同等以上の耐食性(板厚減少)が得られている。

図 20 に突合せレーザー溶接による TWB 部で電着塗装(膜厚 15μm)した試験片における耐食性評価例を示す。カットを設けた TWB による突合せ溶接部で腐食するが、30~60cyc までは目立った錆は認められず、360cyc まで腐食が進んだ際には亜鉛めっき鋼板(GA)でカットを設けた場合(板厚減少 300μm 程度)と比較して、同等以上の耐食性(板厚減少)が得られている。

4. 実機試作による性能評価

4.1 試験体

3 章で述べた要素技術を織り込んだリアアンダーモジュールのホットスタンプ用鋼板による一体化構造の試験体を作成した。図 21 に試験体の車両下側から見た図を示す。

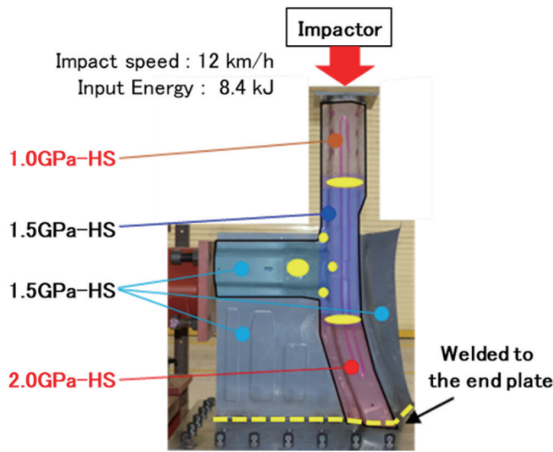


図 21 リアアンダーモジュール構造 衝突試験体
Integrated rear module crush test specimen

車両前方には変形を抑止するため 2.0GPa-HS 材を適用し、エネルギー吸収が求められる車両後方には 1.0GPa-HS 材を適用した。その他のクロスメンバー、ホイールハウス、フロアパネルには 1.5GPa-HS 材を適用した。リアサイドメンバーの材料接合部には突合せレーザー溶接による TWB、リアサイドメンバーとクロスメンバーの接合部にはスポット溶接による TWB を配置した。なお、アッパーとロアはスポット溶接にて接合した。また、試験体の車両前端および後端には端板をアーク溶接した。

4.2 試験方法

圧潰評価には日本製鉄波崎研究開発センターの大型落錘試験機²³⁾を用いた。図 22 に落錘試験機の外観を示す。車両後方が上向きとなるように試験体を治具上に固定し、剛体インパクトを平面が試験体に衝突するように落下させることで評価した。衝突速度は、事前に数値解析によって見積もったエネルギー吸収部位全長が圧潰した際の吸収エネルギー 8.4kJ から逆算し、12km/h とした。なお、試験体は車両右半分のみであるため、クロスメンバー端部に支え治具を設け車両幅方向の倒れを防止した。本評価では、車両前部が座屈せず耐えて、車両後方のエネルギー吸収部位にて母材破断なく軸圧潰変形してエネルギー吸収するかの確認を目的とする。

4.3 試験結果

図 23 に荷重-ストローク線図を示す。はじめに、荷重極大値を示した後、変位約 50mm 以降では、短い周期かつ小さな増減幅で荷重が推移した。図 23 に圧潰後の試験体を示す。後端部のアッパー、およびロアはともに、蛇腹状に折りたたまれながら変形する軸圧潰変形が生じている。今回試験したリアアンダーモジュールのフロント側の 2.0GPa-HS 材を適用した領域で衝突荷重に耐えて、リア側の 1.0GPa-HS 材を適用した領域で軸圧潰変形してエネルギー吸収するという設計コンセプトの成立性が確認でき

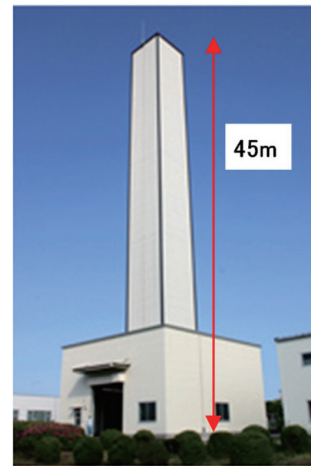


図 22 大型落錘試験機
Large-scale crush test apparatus

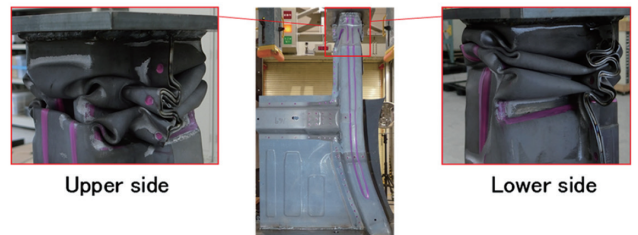
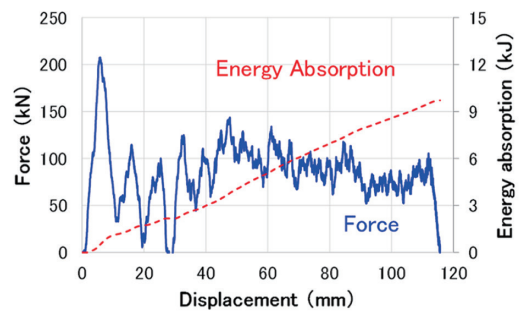


図 23 衝突試験結果
Crush test results for integrated rear module

た。また、通常、リアサイドメンバーとクロスメンバーを一体化する際には、リアサイドメンバーの縦壁部が消失するため後面から衝突に対して本部位が弱部となることが懸念される。そこで、今回のリアアンダーモジュール一体化構造では、前述した一体化小 R 工法をリアサイドメンバーの稜線部を残すことができるように適用した。圧潰試験の結果から、狙い通り縦壁の消失部位においても座屈せず耐えられることを確認できた。さらに、1.5GPa-HS 材を適用したフロアパネル、ホイールハウスにおいても破断等は確認されなかった。

以上より、一体化構造において、適切な材料選定、それを活かす構造設計、それを実現する工法を組み合わせることで、高機能な一体化部品を実現可能であることを確認した。

5. 結言・今後の展望

車両の軽量化や衝突性能の向上のみではなく、コストやライフサイクルでの GHG 排出量を低減可能な、ホットス

タンプ用鋼板を用いた高機能一体化部品を実現させる材料・構造・工法・評価のトータルソリューション技術を開発した。これらの技術を総合的に活用することで、様々な要求に的確に対応しつつ小中規模から大規模な部品一体化が可能である。具体的な要素技術としては2.0GPa級や1.0GPa級のホットスタンプ用鋼板とその利用技術や、複雑な一体化部品形状を実現する新工法、TWB部の接合技術などを紹介した。

今後、強度980MPa級以上のエネルギー吸収能に優れた材料やそのソリューション技術の開発、ここで紹介した一体成形技術のバッテリーボックスをはじめとする他のモジュールへの応用、さらに閉断面を一体成形で実現させる工法など、日本製鉄のトータルソリューション技術のさらなる開発を行っていく。これにより、自動車の軽量化・製造コストの低減・ライフサイクルGHG排出量低減の、高次元での実現に貢献していく。

参考文献

- 1) 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 文献番号 20225281 (2022)
- 2) Visnic, B.: Tesla casts a new strategy for lightweight structures: *Automot. Eng. SAE Int.* (2020), p.12-13
- 3) Volk, W.: Gigacasting ist geeignet, den Karosseriebau neu zu

denken: Automobilproduktion

- 4) https://www.nipponsteel.com/news/20220622_100.html
- 5) https://www.nipponsteel.com/news/20220830_200.html
- 6) https://www.nipponsteel.com/news/20220328_100.html
- 7) 木本野樹 ほか：自動車技術会 2024 年春季大会学術講演会 講演予稿集 文献番号 20245115 (2024)
- 8) 古迫誠司 ほか：日本製鉄技報. (412), 11 (2019)
- 9) 古賀敦雄 ほか：自動車技術会論文集. 49 (6), 1255 (2018)
- 10) 広瀬智史 ほか：自動車技術会論文集. 50 (2), 570-574 (2019)
- 11) 広瀬智史 ほか：自動車技術会論文集. 50 (6), 1679-1684 (2019)
- 12) 広瀬智史 ほか：自動車技術会論文集. 51 (1), 215-220 (2020)
- 13) 池上健太 ほか：第 75 回塑性加工連合講演会, 223 (2024)
- 14) 久保雅寛 ほか：2024 年度塑性加工春季講演会, 301 (2024)
- 15) 木本野樹 ほか：プレス技術. 2024 年 11 月号
- 16) 米林亮 ほか：第 75 回塑性加工連合講演会, 224 (2024)
- 17) 才田健二 ほか：溶接学会論文集. 27 (2), 145-153 (2009)
- 18) Shehryar Khan, M. et al.: *Science and Technology of Welding and Joining*. 25 (6), 447-467 (2020)
- 19) 末広正芳 ほか：新日鉄技報. (378), 15 (2003)
- 20) Maki, J. et al.: *CHS2 2011* p.499 (2011)
- 21) Dosdat, L. et al.: *Steel Research*. 82 (6), 726 (2011)
- 22) 楠見和久 ほか：新日鉄技報. (393), 8 (2012)
- 23) https://www.nipponsteel.com/tech/nssmc_tech/car/car_02/03.html



木本野樹 Naoki KIMOTO
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部
主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



大野敦史 Atsushi OHNO
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部
主幹研究員



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



岡田 徹 Tohru OKADA
鉄鋼研究所 接合研究部 課長 博士(工学)



久保雅寛 Masahiro KUBO
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部
主幹研究員 博士(エネルギー科学)



藤田宗士 Soshi FUJITA
九州技術研究部 課長



池上健太 Kenta IKEGAMI
名古屋製鉄所 品質管理部



田畑進一郎 Shinichiro TABATA
九州技術研究部 主幹研究員



銭谷 佑 Tasuku ZENIYA
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部
主幹研究員



吉田博司 Hiroshi YOSHIDA
鉄鋼研究所 接合研究部長 博士(工学)