

# 次世代電動車ボディの高機能化に貢献する接合技術

## Joining Technology that Contributes to Improving the Reliability of Next-generation EV Body

岡田 徹*	堀川 裕史	谷口 大河
Tohru OKADA	Hiroshi HORIKAWA	Taiga TANIGUCHI
水谷 巧	鈴木 淳一郎	相藤 孝博
Takumi MIZUTANI	Junichiro SUZUKI	Takahiro AITO
徳永 仁寿	富士本 博紀	吉田 博司
Masatoshi TOKUNAGA	Hiroki FUJIMOTO	Hiroshi YOSHIDA

### 抄 録

高強度鋼板の性能を使い切り、自動車ボディの高機能化を実現するためには、溶接部の破断対策がキー技術となる。適切な破断対策を施すためには実車での溶接部への負荷を解析し、それに基づく破断予測技術が必要不可欠である。本報では、日本製鉄(株)独自のスポット溶接部破断予測ソフトウェア NSafe<sup>®</sup>-SPOT を用いて、部材でスポット溶接部の各種破断対策の効果を検証した事例を紹介する。高精度な破断予測により対策位置を限定することで、タクトタイムやコストの増加を最小化し、優れた衝突性能を有する自動車ボディの開発に貢献できると考える。

### Abstract

To fully utilize the performance of high strength steel sheets and realize high performance automobile bodies, weld fracture prevention is a key technology. To implement appropriate fracture prevention measures, it is essential to analyze the load on the welds in an actual vehicle and develop fracture prediction technology based on the analysis. In this report, we introduce a case where the effectiveness of various fracture prevention measures for spot welds in components was verified using Nippon Steel Corporation's proprietary spot weld fracture prediction software, NSafe<sup>TM</sup>-SPOT. We believe that by limiting the location of countermeasures through highly accurate fracture prediction, it is possible to minimize increases in process time and costs, and contribute to the development of automobile bodies with excellent crash performance.

## 1. 緒 言

2050年のカーボンニュートラルの実現に向けて、ライフサイクルでのCO<sub>2</sub>をはじめとする温室効果ガス排出量の低減が求められており、自動車分野では、走行時の温室効果ガス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。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、自動車ボディ骨格にはこれまで以上に高い衝突性能が求められる。

自動車ボディの衝突試験において、材料破断およびスポット溶接部破断が発生した場合、設計性能が得られない可能性がある。スポット溶接継手のせん断力の指標である引張せん断強さ(TSS)と、軸力の指標である十字引張強さ

(CTS)の母材強度との関係を図1に示す。TSSは母材強度が1.5GPa級を超えると減少し、CTSは母材強度が590MPa級を超えると減少傾向を示す<sup>2)</sup>。すなわち、近年の超高強度鋼板の急速な適用拡大に伴い、従来に比べスポット溶接部の設計の難しさが増しており、スポット溶接部の破断対策が自動車ボディ高機能化のキー技術であると考えられる。

適切な対策を施すためには、FEM解析を用いてこれら破断を事前に予測することが重要である。日本製鉄(株)ではNSafe<sup>®</sup>-SPOT(スポット溶接部破断予測ソフトウェア)およびNSafe<sup>®</sup>-MAT(材料破断予測ソフトウェア)を開発し<sup>3,5)</sup>、実装している。これらソフトウェアは、フルビークルモデルでの使用を前提として開発しており、自動車ボディの衝突解析の分野において広く用いられている汎用ソルバーLS-DYNAのサブルーチンプログラムとして動作する。

\* 鉄鋼研究所 接合研究部 課長 博士(工学) 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

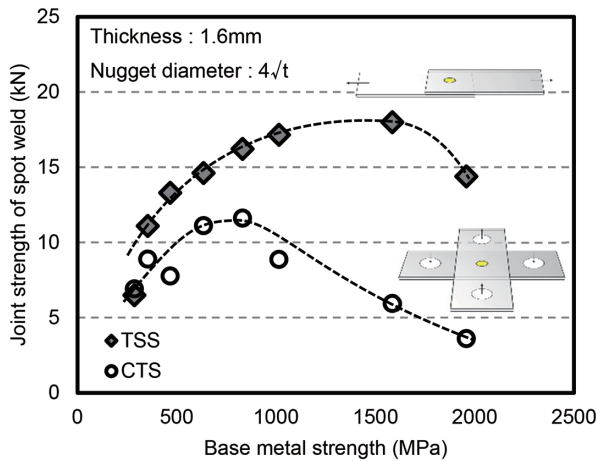


図1 スポット溶接継手強度と母材強度の関係  
Relationship between spot weld joint strength and base metal strength

本報では、NSafe®-SPOTによるスポット溶接部の破断予測に基づき、破断リスクの高い箇所に対策を施して部材性能を向上させた接合ソリューション事例を紹介する。

## 2. スポット溶接部の破断予測技術

スポット溶接部破断予測ソフトウェア NSafe®-SPOT は前述したようにフルビークルモデルでの使用を前提に開発されており、部材には比較的粗いシェル要素を、スポット溶接部にはビーム要素（オプション機能により実際はソリッド要素化されて計算）を用いている。自動車ボディの衝突解析分野の汎用ソルバーである LS-DYNA においてスポット溶接部をビーム要素でモデル化した場合、スポット溶接部への負荷はせん断力、軸力、モーメントとして出力される。それぞれ、スポット溶接継手強度の指標である TSS、CTS、L 字引張強さ (LTS) と対応していると考えられる。しかし、実車でのスポット溶接部には複合的な荷重モードが負荷され、さらに、鋼種、板厚、溶接条件、部材形状等によって破断限界が変化するため、考慮すべき因子が多く予測モデルの構築が困難であった。

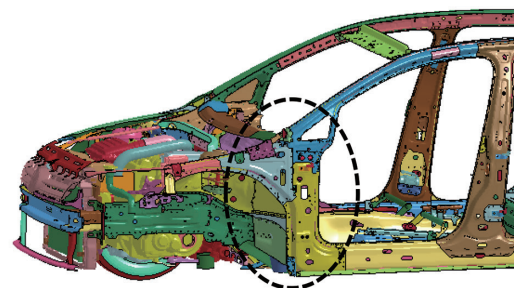
そこで日本製鉄では、TSS、CTS、LTS 試験によって、材料、スポット溶接条件、試験片幅を変化させた実験を行い、スポット溶接部に作用するせん断力、軸力、モーメント、それらによる合力を評価することで、材料やスポット溶接条件が同じであっても試験片幅が変化すると破断強度が変化することを見出した。上記の実験結果から応力集中の考えに基づき、応力集中係数と、ナゲット径と試験片幅の比の関係を整理することで、鋼種、板厚、スポット溶接条件、試験片幅、負荷モード (TSS、CTS、LTS) に関わらず、単一の破断限界曲線でスポット溶接部破断を予測することが可能になる。

また、数千打点に及ぶスポット溶接部に対して膨大なインプットファイルを作成する必要があるが、これを補助するための Pre ソフトウェア (NSafe®-SPOT Pre) も合わせて

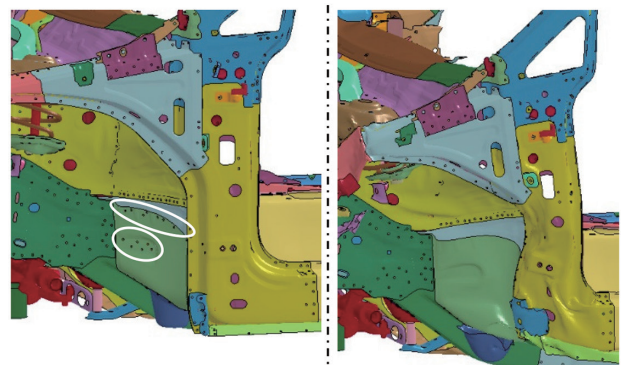
開発している。この NSafe®-SPOT Pre を用いることで、スポット溶接部毎に異なる、鋼種、板厚、ナゲット径、部材形状の情報を反映させた破断クライテリアを作成することができる。ここで言う部材形状の情報とは、各スポット溶接部が荷重を受け持つ幅（以降、有効幅と呼ぶ）であり、具体的には、荷重方向に垂直な方向のスポット溶接間隔もしくはフランジ幅を意味する（継手試験においては試験片幅を意味する）。他の破断予測手法と比較した場合の NSafe®-SPOT の特徴は、この有効幅を破断クライテリア構成式に組み込んでいることであり、これによって、実部品の接合面の形状に応じた破断予測が可能となる。

フルビークルモデルでオフセット前面衝突時のフロアとダッシュパネル結合部付近に着目し、上記システムによる破断予測結果と実車の衝突試験における破断状態を比較した事例が報告されている<sup>9)</sup>。両者はよく一致することに加え、各打点の負荷状態を時系列で詳細に分析できることが示されており、破断原因の調査、対策設計に活用することができる。

また、フルビークルモデルでスモールオーバーラップ衝突時のスポット溶接部の破断予測結果の一例を図2に示す。図2(a)の自動車ボディ骨格の図中点線で囲んだAピラーロアとダッシュパネル結合部付近に着目し、初期状態 0ms、最大変形時付近 50ms を比較すると、50ms までに図中丸印で囲ったダッシュパネルのスポット溶接打点が破断し、大きく変形している様子が確認される。自動車ボディ



(a) Body frame model (before crash test)



(b1) Initial state

(b2) 50ms

図2 自動車ボディ衝突試験時の変形状態とスポット溶接部の破断予測結果

Deformation during vehicle crash test and fracture prediction results for spot welds

性能へのスポット溶接部破断の影響が増す中で、本システムは、新鋼種への対応を取りながら、予測精度向上のための機能改善、機能追加を図っている。

### 3. スポット溶接部の破断対策技術

#### 3.1 打点設計

よく知られるスポット溶接部の破断抑制手法としては、打点の短ピッチ化による負荷荷重の分散や、ナゲット径の拡大が挙げられる。これらは有効な対策ではあるが、特定の打点に局部的に負荷が集中し破断するケースや、ナゲット径拡大の効果が相対的に小さくなる炭素量が高い鋼板で破断するケース、ナゲット径の品質管理が困難なケース等では必ずしも有効な対策にはならない場合がある。

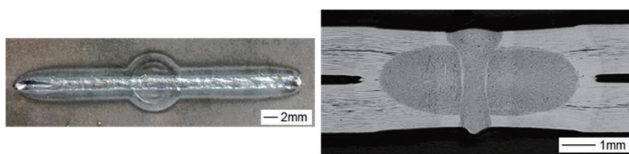
そこで、様々なケースに対応するためのスポット溶接部の破断対策プロセスの一例を次節、次々節で述べる。

#### 3.2 スポット溶接とレーザー溶接の併用

スポット溶接は離散的な点接合のため、接合されていない打点間の開口によりスポット溶接部に剥離荷重が負荷される。その抑制には連続溶接が有効であるが、代表的な連続溶接手法であるレーザー溶接では、板間の隙間に対する製造裕度が乏しく、アンダーフィルやブローホールといった溶接欠陥や、熱ひずみによる形状精度不良が懸念される。

そこで、スポット溶接組立後に打点上をレーザー溶接する手法を開発した。スポット溶接により板間の隙間を一定値以下に抑制することで安定したレーザー溶接施工が可能となる。一例として、スポット溶接後にレーザー溶接施工したテストピースの外観と断面写真を図3に示す。断面はレーザー溶接線と直交方向に切断して観察した。溶接欠陥のない安定したレーザー溶接部が形成されていることが判る。本手法によれば、スポット溶接組立による部材強度を担保した上で、レーザー溶接により打点間の開口を抑え、スポット溶接部に負荷される剥離荷重を低減させることができる。さらに、レーザー溶接による接合面積の増加により、せん断荷重負荷に対する破断抑制にも寄与する。また、本手法は面内引張モードにおけるHAZ軟化部破断の抑制に対しても有効であることを確認している<sup>2,7)</sup>。

本技術は、主にスポット溶接で構成される自動車ボディ生産ラインの一部をレーザー溶接機に置き換えることで実現



(a) Appearance image (b) Cross section image

図3 スポット／レーザー併用継手の外観および断面写真  
Appearance and cross section images of spot and laser welded joint

可能である。また、すでに導入されている生産ラインでは、レーザー溶接機はスポット溶接機の後に設置されている例も報告されている<sup>8)</sup>。この場合、Aピラーからルーフレールにかけて閉断面構造があり剛性向上のためにレーザー溶接打点が設定されている。図4に示すように既存のレーザー溶接部に加えて追加でスポット溶接の打点上をレーザー溶接することで、設備投資なくスポット溶接部の破断対策が可能となる。

#### 3.3 適応制御テンパー後通電

スポット溶接の継手強度を向上する技術として、様々な後通電技術が提案されている<sup>9-11)</sup>。例えば、剥離強度を低下させるPやSといった凝固偏析を緩和させる手法や、ナゲットを焼き戻して靱性を向上させる手法である。ただし、鋼板の炭素量が高くなるほど凝固偏析緩和後通電の効果は小さくなり、炭素量が0.3%を超える鋼板の継手強度の向上には、特にテンパー後通電が有効になる。

テンパー後通電は古くから知られている技術であるが、生産外乱に対するロバスト性が低いこと<sup>12)</sup>、適正条件裕度が狭いこと<sup>13)</sup>、品質管理方法が確立されていないこと、等の課題があり、これまで量産に用いられることはほとんどなかった。

日本製鉄では適応制御を後通電に適用することで生産外乱に対するロバスト性を大幅に向上させる技術を開発した。適応制御とは、溶接中に溶接品質と関係するパラメータをモニタリングし、その測定結果をリアルタイムにフィードバック制御する技術である。一般的に、比較的計測が容易な電極間抵抗をモニタリングパラメータとして、予め基準条件での時間特性曲線(以下、マスターカーブ)を取得し、そのマスターカーブを再現するように投入熱量を制御する手法が多い。本技術を後通電に活用し、後通電時のマスターカーブを記憶させた後、量産におけるナゲット径変動を模擬するため本通電の電流値を変えて形成したいくつかのナゲット径に対して後通電時の適応制御有無での焼き戻し効果の安定性を調査した。電流波形とスポット溶接部の硬さ分布を図5に示す。

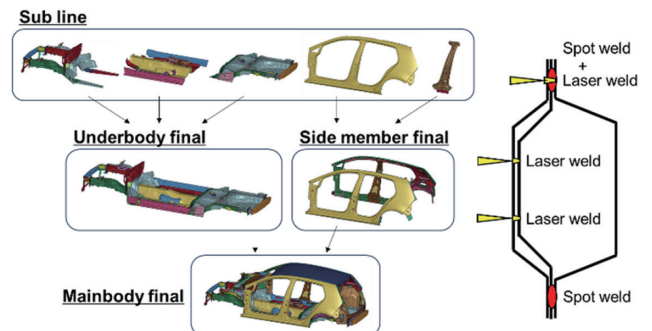


図4 従来生産ライン活用したスポット溶接とレーザー溶接の併用例  
Examples of the combination of spot welds and laser welds using conventional production line

図5(a)に示す後通電工程が適応制御なしの場合、本通電の電流値、すなわちナゲット径が変動しても後通電電流は一定であり、その結果、ナゲット径変動に対して硬さ分布が大きく変化した。一方、図5(b)に示す適応制御ありの場合では、ナゲット径が小さい場合には後通電電流値は小さく、ナゲット径が大きい場合には後通電電流値は大きくなるよう自動制御され、ナゲット径が変動しても硬さ分布は一定であった。すなわち、本技術により、ナゲット端

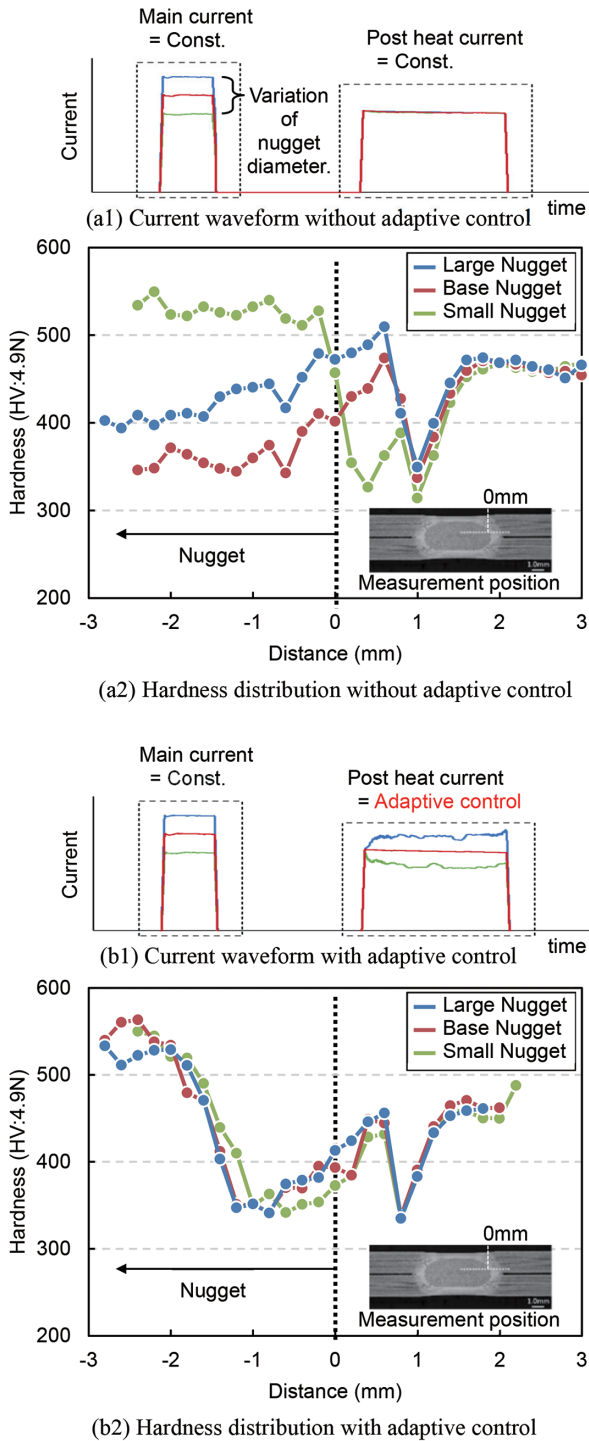


図5 電流波形とテンパー後通電後のスポット溶接部の硬さ分布  
Current waveform and hardness distribution of spot welds after post heat treatment

部を適切に、安定して焼き戻すことができることが判る。日本製鉄では、後通電時の抵抗波形により焼き戻し効果の良否を判定する技術も開発しており、量産へのテンパー後通電適用における課題を解決する技術を構築している。

#### 4. 部材検証結果

本章では、アウターに板厚1.6mmのAlめっき2.0GPa材、インナーに板厚1.2mmのAlめっき1.5GPa材を用いたAピラーを試作し、オフセット前面衝突を模擬した圧壊試験にて、前章で述べたスポット溶接部の破断対策技術の効果を検証した。

Aピラー圧壊試験の模式図を図6に示す。日本製鉄では、部分モデルにおいて、解析にてフルビークルでの負荷モードを再現する拘束条件を導出し、それを実現する多機能衝突試験技術を確認し、ノウハウを蓄積している。

部材組立は、ナゲット径 $4\sqrt{t}$ 、打点ピッチ30mmを基準条件とした。NSafe®-SPOTにより基準条件におけるスポット溶接部の破断を予測した結果を、実験結果と比較して図7に示す。解析では、Aピラー湾曲部の圧縮側における打点間で材料が座屈することにより、その両隣のスポット溶接部がLTS主体の負荷モードにより破断する結果となった。実験においても破断起点のスポット溶接打点は解析と一致し、その後、周囲のスポット溶接部へと破断が伝播する様子が観察され、NSafe®-SPOTが実現現象を精度よく捉えていることが判った。

そこで、破断起点となった二打点とそこに隣接する打点の領域に対して各種対策を施し、部材性能を評価した。具体的には、ナゲット径を $5\sqrt{t}$ に拡大した条件、適応制御テンパー後通電を施した条件、ナゲット中心からナゲット中

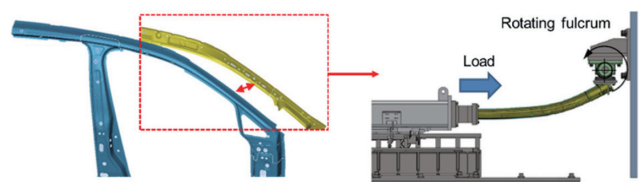


図6 Aピラー圧壊試験の模式図  
Schematic diagram of crash test of A-pillar

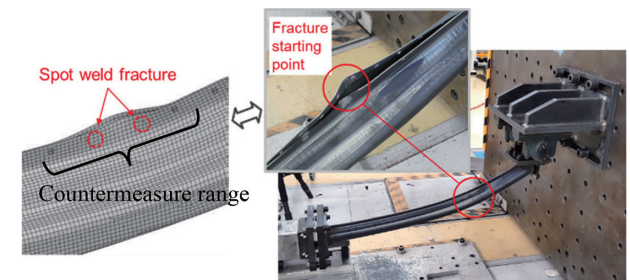


図7 基準条件の圧壊試験結果とスポット溶接部破断の予測結果  
Result of crash test and spot weld fracture prediction in standard assembly condition

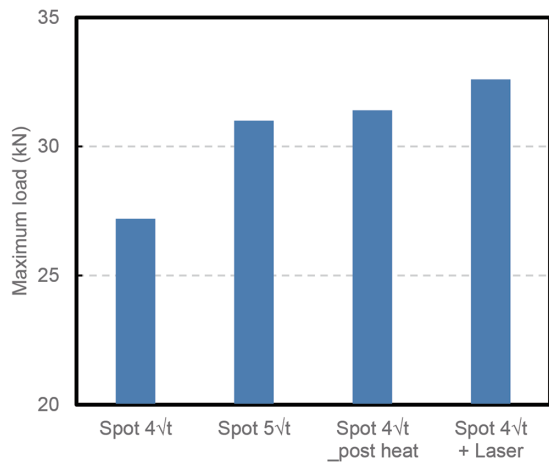


図8 各組立条件における最大荷重比較

Comparison of maximum loads under various assembly conditions

心までの打点間にレーザ溶接を追加した条件である。各組立条件の最大荷重を比較した結果を図8に示す。基準条件であるナゲット径 $4\sqrt{t}$ では最大荷重到達前にスポット溶接部が破断したのに対し、対策条件ではいずれの条件でも溶接部は最大荷重到達後に破断し、最大荷重が向上した。特に、スポット溶接とレーザ溶接の併用条件では、レーザ溶接部がスポット溶接打点間の座屈を抑制することで最大荷重がさらに向上した。また、図は省略するが、適応制御テンパー後通電を施した条件では、最大荷重はナゲット径 $5\sqrt{t}$ 条件と同程度であったが、ナゲット径 $4\sqrt{t}$ でも圧壊後期までスポット溶接部破断が抑制された。

適応制御テンパー後通電によるスポット溶接部破断に対する裕度向上や、スポット溶接とレーザ溶接併用の座屈コントロールによる最大荷重の向上は、換言すれば、材料強度の向上や断面形状によりさらに部材の耐力を高めても設計性能が得られる可能性を示唆しており、例えば、Aピラー細幅化による視認性向上に寄与できると考えられる。

このように、高精度な破断予測により、最小の対策工数で部材性能を向上することが可能となる。なお、スポット溶接とレーザ溶接の併用条件において、対策領域の最小化は、レーザ溶接長が長くなると懸念される熱ひずみによる形状精度不良の抑制にもつながる。

## 5. 結 言

これまで以上に高い衝突性能が求められる高機能な自動

車ボディの実現には高強度鋼板の性能使い切りが必要であり、そのためには、スポット溶接部の破断対策がキー技術になる。本報では、破断対策プロセスの取り組み事例を概説し、NSafe®-SPOTによる破断予測結果に基づいて、部材でそれらの効果を検証した結果を紹介した。対策プロセスには従来のスポット溶接に比べタクトタイムやコスト増加が必要になる場合があるが、高精度な破断予測により対策技術の適用位置を最適化することで、それらの増加を最小化し、衝突性能とのバランスに優れた自動車ボディの開発に貢献できると考えられる。

今後、ますます要求の高まる高機能化のニーズに応じていくためには、材料技術のみならず生産工程や部品形状に踏み込んだ、低コストで信頼性の高い部品を提案し続けることが重要と考える。今後とも、信頼性の高い継手を実現すると共に、新たな接合プロセス、工法の提案によって自動車ボディの開発に貢献していく。

## 参考文献

- 久保雅寛 ほか：自動車技術会学術講演会予稿集. (64-22), 20225281 (2022)
- 富士本博紀：溶接技術. 70 (3), 38-43 (2022)
- 吉田博司 ほか：自動車技術会学術講演会前刷集. (8-04), 20045205 (2004)
- 吉田博司 ほか：自動車技術会学術講演会前刷集. (49-05), 20055062 (2005)
- 上西朗弘 ほか：新日鉄技報. (393), 32-38 (2012)
- 吉田博司 ほか：自動車技術会学術講演会前刷集. (21-07), 20075067 (2007)
- 古迫誠司 ほか：日本製鉄技報. (412), 67-77 (2019)
- 杉野弘宜：溶接学会誌. 89 (1), 45-50 (2020)
- 浜谷秀樹 ほか：溶接学会全国大会講演概要. (89), 44-45 (2011)
- 平塚一富 ほか：溶接学会誌. 39 (3), 145-155 (1970)
- Cretteur, L., Merdji, Y., Kaczynski, C.: 7nd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel. CHS2, 385-393 (2019)
- 谷口大河 ほか：溶接学会全国大会講演概要. (107), 66-67 (2020)
- 阪本晃樹 ほか：溶接学会全国大会講演概要. (115), 54-55 (2024)



岡田 徹 Tohru OKADA  
鉄鋼研究所 接合研究部  
課長 博士(工学)  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



相藤孝博 Takahiro AITO  
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部  
主幹研究員



堀川裕史 Hiroshi HORIKAWA  
鉄鋼研究所 接合研究部  
主幹研究員



徳永仁寿 Masatoshi TOKUNAGA  
鉄鋼研究所 接合研究部  
課長



谷口大河 Taiga TANIGUCHI  
鉄鋼研究所 接合研究部  
主任研究員



富士本博紀 Hiroki FUJIMOTO  
鉄鋼研究所 接合研究部  
室長 博士(工学)



水谷 巧 Takumi MIZUTANI  
鉄鋼研究所 接合研究部



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



鈴木淳一郎 Junichiro SUZUKI  
名古屋製鉄所 品質管理部