技術論文

自動車ボディの接合技術における最近の課題とその対策技術一後編

Current Problems and the Answer Techniques in Welding Technique of Auto Bodies-Second Part

内 藤 恭 章* 児玉真 山達也 崎 康信 崎 宮 Yasuaki NAITO Shinji KODAMA Tatsuya SAKIYAMA Yasunobu MIYAZAKI 瀬 哲 野 郎 Tetsuro NOSE

録

抄

自動車ボディの組立てに使われるレーザ溶接および機械的接合に関する近年の技術動向と研究成果について紹介した。レーザ溶接では、近年リモート溶接の利用が進みつつあることから、リモート溶接時の留 意点として、加工点から吹き上がるプルームによるパワーの減衰現象について、またリモート溶接の応用 として高板厚比3枚重ね板組を対象としたハイブリッドスポット溶接技術、さらに鋼板間隙間に対応する ためのフィラー揺動レーザ溶接法について紹介した。そして非溶融接合の例として機械的接合法を取り上 げ、ワンサイドリベット継手の強度特性について紹介した。

Abstract

Research progress concerning laser welding and mechanical clinching which are being used for the assembly of auto bodies. On the laser welding, usage of remote welding is recently expanding, therefore, the next things were shown: 1) attenuation phenomenon of laser power, as an important point on the remote welding, caused by plume blowing out of workpiece, 2) hybrid spot welding technique applicable for the welding of three steel sheets highly differing in thickness and 3) laser welding method accompanied with filler vibration corresponding to the welding with a gap between steel sheets. Furthermore, as a non-melting joining technique, mechanical clinching was referred to and property of strength concerning one-side riveted joints were introduced.

1. 緒 言

自動車分野へのレーザ加工の適用は,1972年のGM社 によるイグニッションコイルペーパーのレーザ切断に始ま り¹⁾,1985年にはトヨタ自動車およびAudiによりテーラー ドブランクへの利用が始められた²⁾。また,同じ頃,GM 社は,ルーフの溶接にレーザを適用し,組立工程における 最初の例となった³⁾。現在,レーザ発振器の進歩の結果,ガ ルバノミラーを駆動し所定の立体的エリア内を自由に溶接 可能なリモート溶接が可能となっている。リモート溶接の 適用は,クライスラー社による2003年のスイングドアの 溶接が最初とされ,国内でもフタバ産業によるインパネリ ンフォースの溶接⁴⁰や日産自動車によるトランクリッドお よびフードの溶接が報告されている⁵。

しかし実用化されて10年程度の本溶接技術は、未だそのポイントが完全に解明されているとは言い難い。そこ

で、リモート溶接時に加工点から吹き上げる高温の金属蒸 気(プルーム)の溶接への影響について最新の研究成果を 紹介するとともに、応用例として高板厚比3枚重ね板組の 溶接を対象としたハイブリッドスポット溶接法を紹介す る。ところで、レーザ単独での溶接では、鋼板間に隙間が あると溶接が困難となる。不足する溶鋼を供給する方法と して、アークとのハイブリッド溶接もあるが、入熱が大き いことから溶接変形が大きくなることが懸念される。そこ で、入熱の増大を避け、フィラーの溶け残し不良の発生し にくい、フィラー揺動レーザ溶接法を紹介する。

近年,車体のマルチマテリアル化が進みつつある。アル ミニウムとの異種金属接合では、リベットによる機械的接 合がよく使われている。異種金属接合については、別報に ゆずり、ここでは鋼板同士のリベット接合の可能性につい て、継手強度特性から論じる。

^{*} 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員 工博 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

2. レーザ溶接

2.1 プルームによるパワーの減衰

リモートレーザ溶接が実生産に適用され始めている。光 源としては、炭酸ガスレーザと固体レーザの2種類が用い られる。波長が10.6µmである炭酸ガスレーザを用いた溶 接では、加工点から吹き上がる金属蒸気がプラズマとなっ て逆制動輻射による吸収を起こし、加工点に到達するパ ワーが著しく減少することが知られている。一方、ファ イバレーザに代表される波長が1µm程度の固体レーザ光 では逆制動輻射が起こり難く、プルームは加工に影響を与 えないものと考えられてきた。しかし近年、固体レーザの 品質が向上し集光レンズをワークから離せるようになると, 固体レーザによる溶接においても、プルーム中でのレーザ 光の屈折とパワーの減衰が指摘されるようになった^{7,8)}。安 定したリモート溶接を実現する上で、こうした現象の正確 な理解が必要となる。そこで、加工中のプルームによる焦 点シフト量とレーザ光の減衰係数を定量的に決定すること を試みた。

2.1.1 プルームによる溶込みの変化

固体レーザによる溶接では,加工点からのスパッタや ヒュームによる保護ガラスの汚損を防ぐため、図1に示す ようにエアナイフを用いることが多い。別途、サイドシー ルドノズルやセンターシールドノズルを用いなければ、加 工点から噴出するプルームは、エアナイフに遮られるまで 自由に吹き上がることになる。エアナイフ高さ210mmに て溶接した場合の溶接ビード外観を図2(a)に示す。光源 はファイバレーザであり、3kWのレーザビームを焦点距 離460mmにて0.92mm径に集光し、1m/minでメルトラン を行った。表ビードは概略均一であるが、裏面の酸化状態 は、溶接ビード長手方向で変動しており、溶接位置によっ て溶込み状態に違いが生じていることが予想される。図2 (b)は、溶接始端からの各距離における溶接部断面写真と プルームの写真である。プルームが高く成長している位置 では溶込みが浅く,低い位置では深くなっていることが分 かる。



図1 溶接時のエアナイフの配置 Configuration of air knife at welding





 (b) Photos of plume and penetration at that plume state
図 2 プルームの成長状態と溶込み状態 State of plume and penetration

2.1.2 プルーム高さと溶融断面積の関係

エアナイフによりプルーム高さを作り分けたメルトラン を行い,プルーム高さと溶融断面積の関係を求めた⁸⁰。図 3にその結果を示す。この実験では,YAGレーザを用いて おり,4kWのレーザビームを焦点距離280mmにて0.84mm 径に集光し,2m/minでメルトランを行った。溶接中,プ ルーム高さの変動が大きくなりすぎないように,エアナイ フ高さの上限は160mmとし,溶込みの安定化に努めた。本 実験の範囲内で溶融効率が変化する要素はなく,効率は一 定と考えられることから,溶融断面積は鋼板に歩留まった エネルギーに比例していると考えられる。従って図3は, プルームを高く成長させると,鋼板に到達するエネルギー が減衰することを示す。

2.1.3 プルームによるレーザ光の減衰係数

エアナイフ高さを20mmとし、プルーム高さを固定した 状態でレーザ出力を変更してメルトランを行い、溶融断面 積とレーザ出力の関係を求めた。その結果を図4に示す。 実験範囲内で、溶融断面積はレーザ出力に比例し、以下の 関係が得られた。





図 5 加工点レーザ出力相対値のプルーム高さ依存性 Dependence of relative laser power at work on plume height

Area(mm²) = 7.636 × Relative power - 3.074 (1) この関係を用いて図3における溶融断面積からレーザ出 力を逆算すれば、その値はプルームにより減衰しながらも 鋼板に到達したレーザ出力に相当すると考えられる。プ ルーム高さと鋼板に到達したレーザ出力の関係を図5に示 す。単位長さのプルームをレーザビームが通過するとき、 一定の割合で減衰すると仮定して回帰し、(2)式を得た。 両者の関係は、(3)式に近似できるように、概略線型であ り、100 mmの可視プルームをレーザ光が通過すると、8.8 %の減衰が生じるものと判断された。

Relative laser power

- $= 1.028*\exp(-0.000882 \times \text{Plume height}(\text{mm}) \quad (2)$
- $= 1.028*(1-0.000882 \times \text{Plume height}(\text{mm}))$ (3)

プルーム中でこのようにレーザ光が減衰する機構として、レーリー散乱が考えられる⁹。ところで、プルームによ

る焦点シフトも溶込みに影響を与えるものと考えられる¹⁰⁾。 しかし、今回の実験のように、エアナイフ下の距離が短い 場合、焦点シフト量は小さく、溶込みに与える影響は限定 的であると推定される¹¹⁾、リモート溶接のようにエアナイ フ下の距離が長くなる場合には注意が必要と考える。

2.2 ハイブリッドスポット溶接

前編⁽²⁾で述べたように,自動車には高板厚比の3枚重ね 溶接が必要となる部位があり,スポット溶接でいかに薄板 -厚板間に安定したナゲットを形成するかが課題である。 ここでは,薄板-厚板間を確実に接合するため,スポット 溶接後に薄板側からリモートレーザ溶接を行って溶融部を 形成し,確実に3枚重ね溶接を実現することを狙った手法 の検討結果^{13,14)}について説明する。

高板厚比の3枚重ね板組みとして,板厚0.8 mmの270 MPa級GA(合金化溶融亜鉛めっき)鋼板および板厚2.3 mmの590MPa級GA鋼板を用い,板厚比が6.75となる0.8 mm+2.3 mm+2.3 mmの板組みについて検討した。鋼板 はすべて両面めっき(めっき付着量45 g/m²)とした。抵 抗スポット溶接機として,サーボモータ加圧式単相交流溶 接機を用い,電極にはCr-Cu製のDR形電極(先端曲率半 径40 mm,先端径6 mm)を用いた。

溶接条件は,加圧力2.45 kN,通電時間29 cyclesである。 スポット溶接後に,薄板側からレーザ光の軌跡直径を4.5 ~7.5 mm(設定値)の範囲としたレーザ溶接を行い,健 全な溶接ビードが形成されるかどうかを調査した。光源に はファイバレーザを使用しており,焦点距離 600 mmでス ポット径0.6 mmに集光し,リモートで溶接した。レーザ 溶接条件は,1枚目の薄板(0.8 mm)は貫通するが,2枚 目の厚板は部分貫通となるように,加工点出力2kW,溶 接速度4 m/min,焦点はずし距離+3 mm(以下,2kW条 件と略記),あるいは,加工点出力2.5 kW,溶接速度4 m/ min,焦点はずし距離+6 mm(以下,2.5 kW条件と略記) とした。

溶接電流とナゲット形成状態の関係を断面マクロ写真と して、図6に示す。また、スポット溶接後2kW条件でリ モートレーザ溶接を行い、健全なビードが形成できた場合 と、溶融池が吹き飛んで欠陥となった場合の代表的な外観 写真を図7に示す。どのナゲット径に対しても、リモート 溶接径を大きくしていくと、溶融池の吹き飛びが生じ、健



図 6 ナゲットの溶接電流値依存性(板組:0.8 mmt + 2.3 mmt + 2.3 mmt) Dependence of nugget formation on welding current (sheet combination: 0.8mmt / 2.3 mmt / 2.3 mmt)



図7 健全ビードおよび欠陥ビードの外観写真およびマクロ 断面

Surface appearance and macro cross-sections without and with defect in hybrid spot welding





Weldability lobe of spot and remote welding for three galvannealed steel sheets. (sheet combination: 0.8 mmt + 2.3 mmt + 2.3 mmt)

全なビードは形成できなかった。スポット溶接した際の厚 板-厚板間および薄板-厚板間に形成されたナゲット径の 測定値と、リモート溶接した際に健全な溶接ビードが形成 できるか否かについて検討した結果を図8に示す。スポッ ト溶接における適正電流範囲を4 \sqrt{t} (t:板厚)以上、かつ 散り発生までと定義すると、厚板-厚板間において、 4 \sqrt{t} 以上のナゲット径は6.1~7.6 kAの電流範囲で形成で きたが、薄板-厚板間においては、7.0~7.6 kAと狭い範 囲となった。

一方リモートレーザ溶接については、厚板-厚板間に形 成されたナゲット径とほぼ同等の直径以下であれば、薄板 -厚板間に健全な溶接部が形成できることが分かった。通 常GA鋼板の重ねレーザ溶接では、鋼板間に隙間を設けな いと亜鉛蒸気により溶融池が吹き飛ばされて健全なビード は形成できない。しかし本ハイブリッドスポット溶接法で は、図7に示したように、鋼板間に隙間がなくとも健全な ビードを形成できる。これはスポット溶接時に薄板-厚板 間の圧接部において、めっき金属が大部分排除されるため である。

継手強度の評価のため、スポット溶接のみとハイブリッ ド溶接の、2種類の十字引張試験片を作製した。スポット 溶接時の電流値はパラメータとし、リモート溶接は2.5 kW 条件で溶接径は4.5 mmとした。試験片形状はJIS Z 3137に 従い、3枚目には縦横 45 mmの鋼板を用いている。十字 引張試験は、1枚目の薄板(GA270MPa級鋼板)と2枚目 の厚板(GA590MPa級鋼板)を、引張速度10 mm/minで剥 離することにより実施した。試験後の継手破断部外観およ び断面マクロ写真を図9に、十字引張強さ(CTS:Cross tension strength)を図10に示す。エラーバーは継手強度の 上限と下限を示し、□および△マークは平均値を示す。ス ポット溶接では、溶接電流が6.1~6.7 kAにおいて強度が 大きくばらつき、7.0 kA以上になるとばらつきが小さくな るとともに、継手強度も向上した。この理由として、低電 流量領域で形成された薄板-厚板間の圧接部は不安定であ るのに対し、7.0 kA以上では安定した圧接部が形成された ためと考えられる。

一方ハイブリッド溶接では,溶接電流の増加とともに継 手強度も向上し,7.0 kA以上の領域で,その強度はスポッ ト溶接の場合とほぼ一致した。6.1~6.7 kAにおける強度 のばらつきはスポット溶接と比べて抑えられており,また その平均強度も高かった。この理由として,図9のマクロ 断面における破断位置が溶接金属付近であることからも分 かるように,リモート溶接により一定径の溶接部が確保さ れ,強度の下限が保証されることが考えられる。同様な結 果が引張せん断試験でも得られ,ハイブリッドスポット溶 接が低電流域における継手強度の向上とばらつき抑制に有 効といえる。





Surface appearance and macro cross-sections of spot and hybrid spot weld after cross tensile test (welding current 6.1 kA)



図10 スポット溶接継手とハイブリッドスポット溶接継手 の薄板一厚板間CTS比較

Comparison of cross tension strengths between thin and thick sheets of spot welded joints and hybrid spot welded joints

2.3 フィラー揺動レーザ溶接

2.3.1 重ね継手の溶融溶接

レーザ溶接は低入熱・低ひずみの溶接が期待できる一方 で,溶融金属量が少ないことから鋼板間の隙間により接合 不良が生じ易い。フィラーワイヤ(以下,フィラー)の供 給により隙間に対する余裕度は向上するが,レーザは微小 な熱源であるため,フィラー送給位置の僅かな変動により 不整ビードが生じてしまう。そこで,フィラーの安定した 溶融状態を維持することを目的に,フィラーを高速に揺動 させつつ溶接部に供給する手法(フィラー揺動法)を試み た¹⁵⁾。

フィラー揺動レーザ溶接法の概略図を図11に示す。溶 接進行方向前方にフィラーを配置し,所定の周波数,振幅 で揺動させた。揺動装置は,モータの回転運動をフィラー の往復運動に変換する機構とし,50 Hzまでの高速揺動を 可能とした。

揺動周波数,揺動振幅を変えて溶接した試験体の外観を 図12に示す。周波数が20 Hz以下の低速揺動条件ではビー ドが蛇行したり、ビード止端部が不均一となる。特に揺動 振幅が大きい場合、未溶融のフィラーが残存しやすい傾向 となる。一方, 揺動周波数を30 Hzにすると, いずれの揺 動振幅でも良好なビードが得られた。揺動振幅が増すと フィラーのレーザ光に対する相対的な移動速度が増すこと になる。すると、揺動1回当りのフィラーへの入熱量が低 下し, 鋼板へ供給される溶融フィラーの量が減少してビー ド形状の周期的変動が顕著になると考えられる。また、揺 動周波数を増加すると同様に揺動1回当りのフィラーへの 入熱量が低減するものの,溶融フィラーの供給頻度は増加 する(連続的に溶融フィラーを供給する状態に近づく)た め、均一なビード形状が得られたと考えられる。本知見か ら以下の検討では揺動周波数40Hzの高速揺動条件を採用 した。





		Oscillating width		
		W=1mm	W=2mm	W=3mm
Oscillation frequency	f=30Hz	0 0	0	0
	f=20Hz	0	Δ	×
	f=10Hz	Δ	x	10mm





図13 重ね継手における溶込み形状の鋼板間隙間依存性 Dependence of penetration shape on sheet gap in lap joint

溶込み断面形状の鋼板間隙間依存性を図13に示す。 レーザ単独およびフィラー揺動有無で断面溶込み形状を比 較した。供試材には板厚1.2mmのGA鋼板を用い,フィ ラーには1.2mm径の溶接用フィラーワイヤ(JISZ3312 YGW12)を使用した。鋼板間隙間が0.6mmの場合,レー ザ単独では溶接部が切断状態となったが,フィラーを供給 することにより溶融金属の確保が可能となり,良好な溶融 断面形状が得られた。隙間が0.8mmになると,フィラー 揺動無しでは下板が非貫通となったが,フィラーを揺動さ せることによって若干のアンダーフィルが生じたものの, 下板を貫通した良好な溶接断面が得られた。これはフィ ラー揺動無しの条件では,溶けたフィラーが鋼板間隙間を 埋めて貫通溶接を阻害したのに対し,フィラーを揺動させ ることによりレーザの照射,溶融金属の供給が周期的に繰 り返され,良好な貫通が維持できたためと考えられる。

2.3.2 拝み継手のろう付

レーザろう付への適用例を図14に示す。板厚0.8 mmの GAめっき鋼板の拝み継手に対し、Cu+3%Siフィラーを 使用した。レーザ出力は3kW,溶接速度は2m/min、ビー ム集光径は2.3 mmとした。フィラー揺動無しではろう付 部が凸形状であり、またギャップの拡大によりろうが片側



図14 レーザろう付け部の断面形状 Cross sections of laser brazed joints

の鋼板のみに融着する結果となった。これに対し,フィ ラーを揺動させることによって,ろう付部形状の扁平化な らびに,ギャップ余裕度が拡大することを確認できた。

3. ワンサイドリベット

高強度鋼板をスポット溶接した継手の剥離強度は,前編¹²⁾の図1に示したように,鋼板強度が780MPa以上になると 低下する。ここでは,ブラインドリベット接合継手の強度 の鋼板強度依存性を評価し¹⁶,高強度鋼継手強度向上の可 能性を探った。ブラインドリベット接合とは,事前に鋼板 に下穴を開け,片側からリベットを入れて引き抜くことに よりリベットで接合する方法である。

供試材には,板厚1.2~2.0 mmの引張強さが270~1470 MPa級の鋼板を用いた。鋼板には予め下穴を設け,この 下穴の中心が重なるように2枚の鋼板を重ね,図15に示 す,インファステック社製のリベットを用いて接合した。 なおリベットのスリーブ径は6.8 mm,鋼板の下穴径は7.1 mm である。接合した継手の静的強さを評価するため, JIS Z 3136 や JIS Z 3137 に準拠した試験片を用いた引張せ ん断試験,および十字引張試験を行った。また,L字引張 試験においては,幅30 mmのL字試験片を用い,その折 り曲げ部(部材のフランジ部に相当)の長さは30 mm,フ ランジ端とリベット中心の距離は15 mmとした。引張速 度は,引張せん断試験およびL字引張試験では20 mm/ min,十字引張試験では10 mm/min一定とした。

ブラインドリベット接合継手の引張せん断強さ(TSS: Tensile shear strength)を図16に示す。TSSは鋼材強度の 増加とともに上昇するが、高強度厚手材(板厚1.6 mm)で は鋼材強度の増加に対して継手強度が飽和する傾向を示し た。破断形態は板厚1.2 mm ではリベット抜け(下穴周り の鋼板が変形しリベットが抜ける形態)であったが、板厚





が1.6 mm以上の980 MPa 級鋼板および1470 MPa 級鋼板 ではリベット芯部で破断した。板厚1.2 mm材および鋼材 強度が590 MPa以下の継手では,引張せん断試験において 接合部を中心とした回転変形が生じ,剥離方向の分力が発 生する。同時に下穴周囲に変形が生じ,ついにはリベット 抜けに至ると考えられる。下穴周囲の変形が継手強度を決 めるため継手の引張強さが鋼材強度とともに高くなったと 考えられる。一方,鋼板が厚く,鋼材強度が上がると回転 変形は抑制され,高強度厚手材の継手では剥離方向分力が 高くならないと推測される。また穴周囲の強度も高いの で,リベット芯部に働くせん断応力がリベットの限界応力 に達し,破断したものと考えられた。高強度鋼板継手の引 張強さが,鋼材強度の上昇に対し飽和傾向を示したのはこ のためである。

次に、ブラインドリベット接合継手のCTSを図17に示 す。抵抗スポット溶接継手とは異なり、CTSは鋼材強度が 590 MPa 級を超えても低下はすることなく、1470 MPa 級 まで増加することが確認できた。また、リベット芯部の破 断は無く、リベット抜けとなった。

L字引張強さ(LTS:L-shape tension strength)を図18に 示す。LTSはCTSと同様に鋼材強度とともに1470 MPa級 鋼板継手まで増加し,CTSのほぼ半分の値を示した。破断 は、十字引張継手と同様、リベット抜けであり、下穴端の



Dependence of cross tension strength on base metal strength



Dependence of L-shape tension strength on base metal strength



図19 リベット中心とフランジ端部の距離に対するLTS Dependence of L-shaped tension strength on distance between rivet center and flange edge

ー端だけが変形した。このように,L字継手の場合,穴端 の一部に応力が集中するため,十字引張に比較して継手強 度が低くなったと考えられる。

続いて、ブラインドリベット中心とフランジ端部との距離が、LTSに及ぼす影響を検討した^{ID}。リベット中心とフ ランジ端部の距離は5~15 mm とした。ブラインドリベッ ト接合継手のLTSを図19に示す。各供試材において、リ ベット中心とフランジ端部の距離が10 mm から15 mm の 範囲ではLTS はほとんど変化しなかったが、10 mm を下 回ると距離が短くなるほど継手強度は低下した。また、破 断形態は距離によらず、リベット抜けであり、リベット芯 部での破断は生じなかった。距離が短くなるとリベットか ら外側の荷重を負担する部分が減少する結果、下穴周囲が 変形しやすくなり、継手強度が低下したと考えられる。 270 MPa 級鋼板継手の強度は、距離が短くなると他鋼種に 比べてより強度の低下割合が大きいが、これは鋼材強度が 低いと下穴周囲が変形しやすいことに起因すると考えられ る。

4. 結 言

自動車の重要課題が"安全性確保と燃費改善"となって 久しく、加えて、乗り心地やデザインを向上させる努力も 続いている。複数の要件を同時に満たすために980 MPa以 上の高強度鋼の採用が進んできた。こうした状況下で接合 を含む製造技術においても革新が必要とされている。本報 や前編で紹介した技術をさらに発展させ、信頼性の高い接 合技術の開発要求に応えていきたい。

参照文献

- 1) 沓名宗春:溶接技術.50(5),127(2002)
- 2) 夏見文章: プレス技術. 34 (8), 18 (1996)
- 3) Larsson, J.K.: 溶接技術. 51 (11), 86 (2003)
- 4) 三瓶和久:レーザ加工学会誌.16(1),8(2009)
- 5) 樽井大志,森清和,吉川暢宏,長谷川隆久:レーザ加工学会論 文集.68,46 (2007)

- 6) 小野守章, 仲田清和, 小菅成義: 溶接学会論文集. 10 (2), 239 (1992)
- 7) 川人洋介,木下圭介,片山聖二,坪田秀峰,石出孝:レーザ加 工学会誌.13(1),41 (2006)
- 8) 宮崎康信,片山聖二:溶接学会全国大会講演概要.90,208 (2012)
- 9) 川人洋介,木下圭介,松本直幸,水谷正海,片山聖二:溶接学会 論文集.25(3),461(2007)
- 10) 大岩晋平,水谷正海,川人洋介,片山聖二,小沢直樹:溶接学会 全国大会講演概要.83,226 (2008)
- 11) 宮崎康信,片山聖二:溶接学会全国大会講演概要.87,376 (2010)
- 12) 古迫誠司,渡辺史徳,村山元,濱谷秀樹,及川初彦,高橋靖雄, 野瀬哲郎:新日鉄技報.(393),69-75 (2012)
- 13) 内藤恭章, 村山元, 宮崎康信: 溶接学会全国大会講演概要. 88 集, 152-153 (2011)
- 14) 内藤恭章, 村山元, 宮崎康信: 溶接学会全国大会講演概要. 89 集, 52-53 (2011)
- 15) 児玉真二, 宮崎康信:溶接学会・溶接法研究委員会"溶接プロ セスの高機能化にむけた新しい展開". 2008, p. 175
- 16) 崎山達也,宮崎康信:溶接学会秋季全国大会講演概要.89,58(2011)
- 17) 崎山達也,宮崎康信:溶接学会春季全国大会講演概要.90,234 (2012)



内藤恭章 Yasuaki NAITO 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員 工博 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

児玉真二 Shinnji KODAMA 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員



崎山達也 Tatsuya SAKIYAMA 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員



宮崎康信 Yasunobu MIYAZAKI 鉄鋼研究所 接合研究センター 主幹研究員



野瀬哲郎 Tetsuro NOSE 鉄鋼研究所 接合研究センター所長 工博