

論文・解説

22

ハイアルゴン溶接の技術開発

Development of New Welding Process in High Argon Gas

田中 正顕*1 斉藤 直子*2 深堀 貢*3
Masaaki Tanaka Naoko Saito Mitsugi Fukahori
小川 貴史*4
Takashi Ogawa

要 約

マツダでは、すべてのお客様に「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を提供するため、ダイナミクス性能向上と環境性能の両立から、軽量化技術開発に取り組んでいる。厳しい環境下で使用される足廻りの板金部品は、溶接部近傍の錆による板厚減少の問題があり、薄板化での軽量化が難しい。一方、錆びにくい部品の実現は、お客様が車を所有する喜びにつながり、魅力性能の一つになると考える。

本技術は、アルゴン比率を増加させた溶接技術開発により、発錆原因の一つである溶接時に発生する「スラグ」を極小化することで電着塗装の密着性を向上させ、従来工法と比較して、防錆性能を劇的に向上させるものである。しかし、シールドガス中の酸素成分が極めて少ないため、従来考慮しなかったシールドガス流れのパラツキが性能に影響を及ぼす懸念がある。本稿では、ハイアルゴン溶接の開発過程と、溶接時の気体流れの解析から導出した「大気巻き込み」のメカニズムについて報告する。

Summary

With a purpose of providing "Driving pleasure" and "Excellent environmental performance" to all customers, Mazda is developing vehicle weight saving technologies which improve both vehicle dynamic and environmental performance. Stamping parts applied to suspension used under severe conditions are difficult to reduce the weight as they need material thickness to prevent rusting. As rustproof parts increase customer's satisfaction and have appealing quality, we addressed welding technology development with increased Argon ratio.

This technology minimizes the "slag", one of the causes of rusting, which is generated at welding, so that the adhesion of E-coat painting is improved, leading to the significant improvement in rustproof performance. However, as the amount of oxygen in the shield gas is significantly small in this process, causing unprecedented variations, which may affect the rustproof performance. In this article, the developmental process of High-Argon welding and the "turbulence flow" mechanism which is derived from CAE analysis of gas flow at welding to be reported.

1. はじめに

自動車に対する二酸化炭素排出量の低減、更なる燃費の向上が必要な中、より一層の車両重量の軽減が必須である。また、マツダの理想は、安心感と運転する喜びを実現し、お客様に愛される車を提供し続けることである。しかし、足廻り部品に生じる初期見栄え錆は、お客様に部品破損のイメージを想起させるとともに、軽量化に必要な薄板化を阻害する (Fig. 1)。この初期見栄え錆を抑

制することで、車を所有する喜びに貢献するとともに、穴あき錆に至る期間を延ばし軽量化を可能とする。一方、アームやサスペンションクロスメンバーに代表される自動車の足廻り部品は、高いレベルの操縦安定性・NVH性能を実現するために高い剛性が必要であり、強度・信頼性等の複数の性能を両立しなくてはならない。厳しい入力荷重を薄板で保証するため、混合ガス溶接に代表される連続溶接が効果的である。

*1 シャシー開発部
Chassis Development Dept.

*4 車体技術部

Body Production Engineering Dept.

*2, 3 技術研究所
Technical Research Center



Fig. 1 Chassis Condition after Car Corrosion Test

MAG溶接などのガスシールドアーク溶接は、アークの状態を安定化させ溶接作業性を確保する目的で、アルゴン (Ar) に二酸化炭素 (CO₂) などを加えたシールドガスを用いる。CO₂はアーク熱によって解離し、活性な酸素成分を生じる。この酸素成分と溶融金属が化学反応し、溶接スラグが生成される⁽¹⁾。溶融金属中の酸素は、靱性低下や気孔欠陥の原因となるため、溶接ワイヤ中に意図的に脱酸成分 (Si, Mn) を添加している。CO₂の比率が高くなるほど、脱酸成分を多く添加する必要があり、その分、スラグが多く発生する。

溶接ビード上に生成したスラグは、主にガラス質であり、導電性がないため電着塗料の付着を阻害し、その周辺から発錆しやすくなる。また、スラグの多くは、溶接ビードの止端部 (Toe) に残りやすい。ビード止端部は形状による応力集中が生じやすく、スラグ近傍で生じた板厚減少は信頼性に悪影響を及ぼす懸念がある (Fig. 2)。

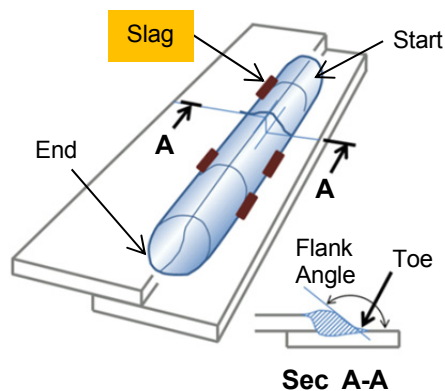


Fig. 2 Schematic of Welding Bead

ビード上のスラグ低減には、シールドガス中のCO₂量を低減することが有効である。一方で、過度なCO₂量の低減は、アークの状態を不安定にし、ビードの蛇行など溶接作業性を著しく悪化させる。また、亜鉛めっき鋼板の溶接においては、ブローホールなどの気孔欠陥を抑制する目的で、CO₂を含むことが望ましい。

従って、溶接作業性とスラグ低減を両立するためには、

脱酸成分を低減したワイヤを用いて、必要最小限のCO₂を有するシールドガス組成を決定する必要がある。本報では、開発した「ハイアルゴン溶接プロセス」について報告する⁽²⁾⁽³⁾。

2. ハイアルゴン溶接

2.1 ハイアルゴン溶接の基本プロセス

溶接部の早期発錆は電着塗装の被覆不足が原因で生じる。導電性を有さないスラグには電着塗料は析出せず、電着焼付時の樹脂の熱フローにより被覆される。溶接工法におけるスラグ量・サイズ低減が耐食性改善 (電着の被覆性改善) に有効である。ハイアルゴン溶接は、これら双方の低減を実現できることから、スラグ部の耐食性を改善することができる。

「ハイアルゴン溶接プロセス」のねらいは、以下である。

スラグ量の低減/サイズの縮小に対しては、

- ①シールドガス中の二酸化炭素量の低減
 - ②溶接ワイヤ中の脱酸成分 (Si, Mn) 量の低減
 - ③溶融池対流制御を用いた溶接終端部へのスラグ集中化
- 気孔欠陥の低減に対しては、
- ④パルス制御による高アーク圧力化

である。

①により、活性な酸素量を低減した上で、②にて母材 (Fe)、溶接ワイヤ (Fe, Si, Mn等) からなる溶融金属中の脱酸成分を低減し、スラグ (SiO₂, MnO) の量とサイズの最小化を図る。③では、溶融鉄に対する表面活性元素である硫黄 (S) をワイヤから添加することで、溶融金属の表面張力を低下させている。これにより溶融金属の対流が強化され、溶接中に生成されたスラグをビード終端部に凝集させることが可能となる (Fig. 3)。

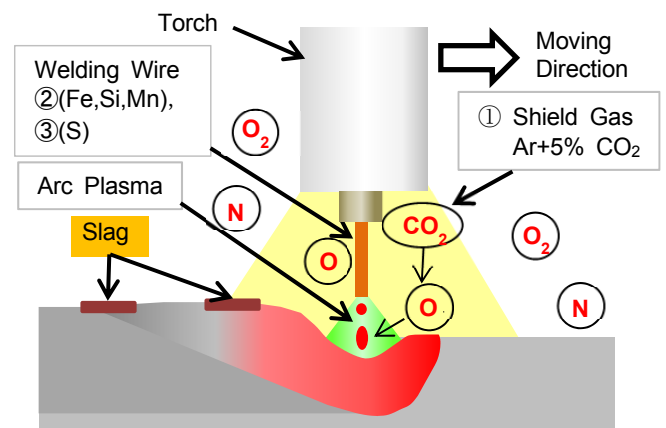


Fig. 3 Schematic of Welding Basic Process

なお、ハイアルゴン溶接プロセスでは前述のとおりシールドガス中のCO₂を低減しているため、亜鉛めっき鋼板の溶接では一般的なMAG溶接に対して耐気孔性に劣る

という課題がある。この課題の要因はシールドガス中CO₂比率の低下によるアーク圧力の低下にある。シールドガス中のCO₂はアークプラズマ中の高温環境において解離し、その際の吸熱作用によってアークを緊縮させる熱的ピンチ効果を発揮する。これによりアーク柱の電流密度が増加しアーク圧力が増大する。

ここで、シールドガス成分以外にアーク圧力を増大させる働きを持つものとして、④パルス溶接における高ピーク電流が挙げられる。Greeneの報告⁽⁴⁾では、アーク柱中における任意の点の電磁圧力は電流値の2乗に比例するとされており、パルス溶接では短絡溶接に比べて高い電磁圧力を得ることが可能であると考えられる。これらの働きを総称してアーク圧力と呼称する。

亜鉛めっき鋼板の溶接においては、表面の合金化亜鉛が鉄よりも低い沸点を有しているため、気化した合金化亜鉛によってブローホールやピットが形成されやすい。そのため、亜鉛蒸気を熔融金属外部への排出を促進することが重要となる。亜鉛蒸気排出を促進する手法が、高いアーク圧力によってアーク直下から熔融金属を押しつけるというものである⁽⁵⁾。すなわち、アークプラズマにより生成された亜鉛蒸気を、熔融金属内部に含まれる前にアーク直下で排出することで気孔欠陥の抑制が可能となる。Fig. 4に工法違いによる溶接ビード外観を示す。母材：440MPa級熔融亜鉛めっき鋼板の重ね継手を以下の条件、(A)従来工法 (Ar:CO₂=80:20, 短絡溶接)、(B)ハイアルゴン溶接 (Ar:CO₂=95:5, パルス溶接)で製作した。ハイアルゴン溶接は従来工法に比べ、スラグが約1/10に減少する。

Fig. 5に、溶接ビード断面形状を示す。本プロセスにより得られた溶接ビードは、従来プロセスのものに比べ幅広かつ平坦(大フランク角)となる。これは応力集中(疲労強度)に対し有利といえる⁽⁶⁾。

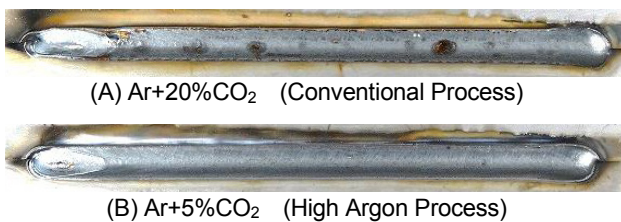


Fig. 4 Comparison of Appearance of Welding Bead both 20% CO₂ on Short Arc and 5% CO₂ on Pulse

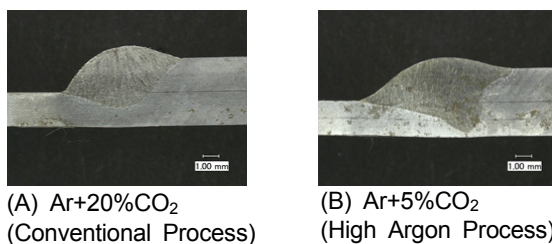


Fig. 5 Comparison of Welding Section both 20% CO₂ on Short Arc and 5% CO₂ on Pulse

2.2 ハイアルゴン溶接のシールドガス組成

シールドガス中のCO₂量のねらい値は、溶接施工性とスラグ量から決まる。前述のメカニズムに基づく実験結果から、亜鉛めっき鋼板の気孔欠陥を抑制するには、5%以上のCO₂量が必要である。初期見栄え錆の目標達成に必要なスラグ量を明確にするため、同一溶接条件(溶接電流パルス波形、開発溶接ワイヤ)にて、CO₂量を5~10%の水準で評価した(Fig. 6)。10%CO₂の場合、スラグが連続しており電着塗装の密着性から望ましくない。耐気孔欠陥性、スラグ量/大きさが適切な状態となる「5%」をCO₂量のねらいとする。

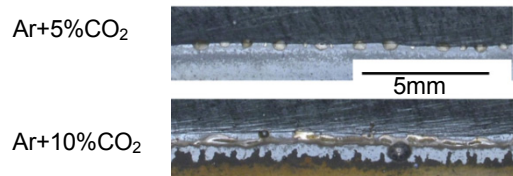


Fig. 6 Comparison of Slag by CO₂ Ratio

3. ハイアルゴン溶接の課題

本プロセスは極低CO₂量のシールドガスを用いるため、シールドガス中の酸素成分だけでなく、大気中の酸素成分の影響を受けることが懸念されるため、シールドガス流量の変化による溶接実験を実施した。

実験はシールドガス流量を変化させた場合のノズル内径違い(13mmφ, 19mmφ)でのスラグ量を調査し、Fig. 7に示す以下の結果が得られた。

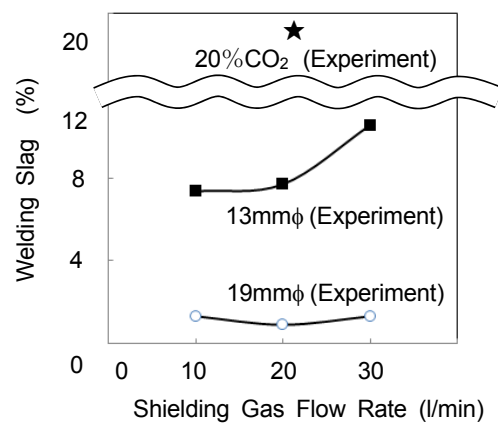


Fig. 7 Relationship between Welding Slag and Flow Rate(Experiment)

- ・細径ノズル(シールド範囲が狭い)はスラグ量が多い。
- ・細径ノズル(13mmφ)の場合、シールドガス流量の増加に伴い、スラグ量が増加する。

ノズル内径によりスラグ発生量に変化することは、性能確保の上で課題であり、その原因究明が必要である。そこで、グラフ横軸の流量を流速に換算したところ、細

径ノズルは大径ノズルに比べ、同一流量で流速が非常に大きくなっていることを確認した (Fig. 8)。

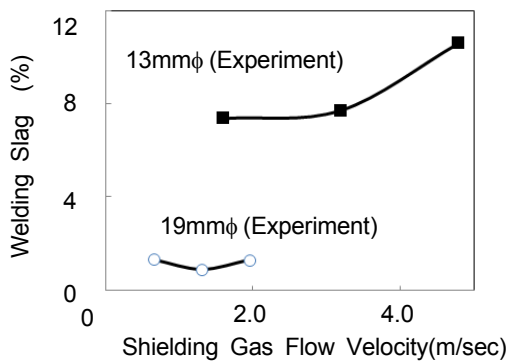


Fig. 8 Relationship between Welding Slag and Flow Velocity (Experiment)

これらの結果から以下の仮説を立てた (Fig. 9)。

- ・シールドガス流速が大きくなるほど、シールドガスと大気間に生じるせん断力によりシールドガス外部からの「大気巻き込み」が生じ、スラグが増加する。
- ・ノズル径が大きい方が、アーク中心から大気までの距離が大きく、巻き込んだ酸素成分が、アーク直下の高温で活性な溶融金属まで達しにくい。

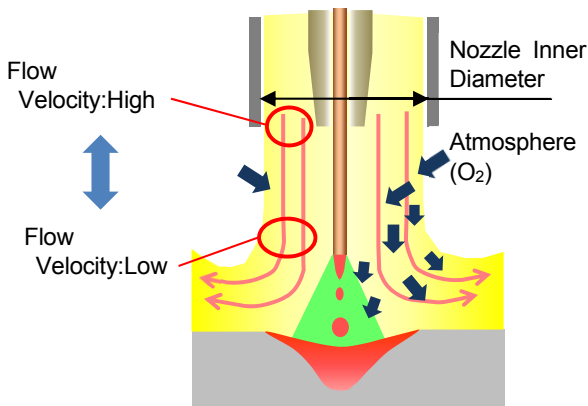


Fig. 9 Schematic of Shield Gas for Welding

4. 溶接中の気体流れ解析技術

前述のとおり、ハイアルゴン溶接におけるスラグの生成には溶接中の気体流れが関係すると推測され、その検証に有効な手段は可視化である。しかし、溶接中の気体流れは、プラズマ気流があるため可視化実験が困難である。気体流れのほか、熱輸送や電磁場などが関係する複雑な現象である溶接現象には、確立された解析手法はない。

そこで、MAG溶接のプラズマ気流の噴射に着目し、同様の現象を扱うエンジン専用熱流体解析のMAG溶接のシールドガス流れ解析への適用を検討した⁽⁷⁾。

4.1 解析方法

Fig. 10にノズル先端内径が13mmφのノズルにおける解析の概略図と解析モデルを示す。シールドガスの流速 (1~5m/s) は溶接速度 (0.01m/s) に対し非常に高いことから、気体流れに対する非定常性や電磁場の影響は非常に小さいと仮定した。溶接ワイヤ先端からアーク中のプラズマ気流を模擬した高温気体 (アークガス) が噴射される状態における気体の定常流れを、ノズル先端内径が13mmφ、及び19mmφのノズルと、10、20、30l/minのシールドガス流量について解析した。

解析は(株)IDAJ社のエンジン専用熱流体プログラム CONVERGEで行い、乱流モデルは乱流運動エネルギー k と消散率 ϵ の輸送方程式から渦粘性係数を求める $k-\epsilon$ モデルを使用した。また、アークガスはシールドガスと同種のArに5%のCO₂を混合した2元系混合ガスとし、温度、及び流速は田中の解析結果⁽⁶⁾を参考にそれぞれ15000K、及び200m/sとした。

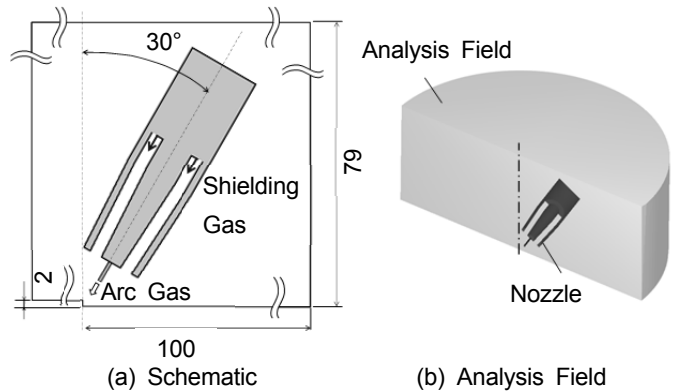


Fig. 10 Analysis Model

4.2 解析結果

(1) シールドガスの流れと酸素濃度

Fig. 11にノズル先端内径が13mmφのノズルにおける解析領域中心断面での解析結果 (流線と酸素濃度) を示す。大気はノズル先端から母材付近においてシールドガスに引き込まれている。また、酸素は溶接部近傍に発生した渦の周辺において高濃度で分布し、シールド内全体に拡散している。

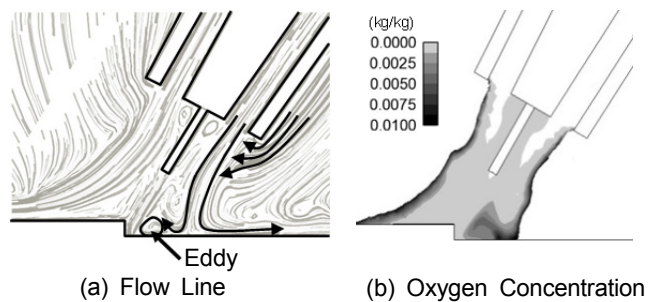


Fig. 11 Analysis Result (Shielding Gas Flow Rate:20l/min)

(2) 溶接部近傍における酸素濃度

Fig. 12に溶接部近傍における平均酸素濃度とシールドガス流量の関係を示す。酸素濃度は13mmφ, 19mmφともにシールドガス流量が多い場合で最も高くなっている。これは、酸素を多く含む大気との境界付近のシールドガスが溶接部近傍にある渦に流入するためであると考えられる。また、この溶接部近傍の酸素濃度はFig. 7のスラグ生成量と同じ傾向を示す。以上の結果から、スラグの生成にはシールド内の酸素のうち、溶接部近傍にある酸素が大きく影響すると考えられる。

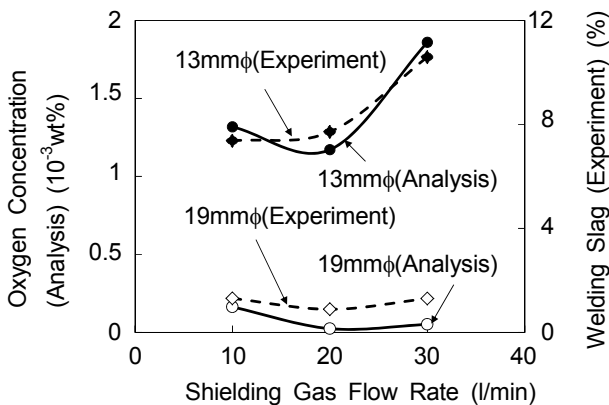


Fig. 12 Relationship between Oxygen Concentration and Shielding Gas Flow Rate

4.3 大気中酸素の溶接金属への流入メカニズムの推定

Fig. 13に 前述の結果から推定したMAG溶接部におけるスラグの生成メカニズムを示す。噴出口から噴出されたシールドガスは、流速を持ち大気に対し負圧であるため、前章で推測したとおり、大気中酸素はシールドガスと大気の境界からシールドガスに侵入し、シールドガス内に浸透する。一方、酸素を含んだシールドガスと溶接ワイヤ先端から発生したプラズマ気流は母材到達後に分流して接触し、溶接部近傍に渦が発生する。シールドガス中の酸素は、シールド内に拡散しつつ前述の渦に流入し、大気中酸素は溶融金属内に侵入、金属内のSi及びMnと反応してスラグが生成されると考えられる。

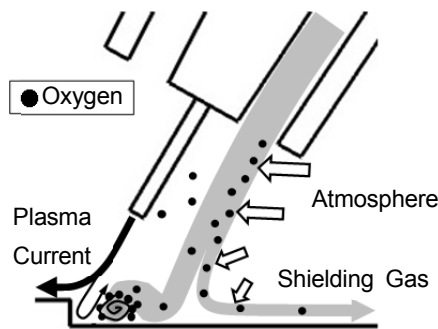


Fig. 13 Schematic of Oxygen Flow

5. 実部品への適用

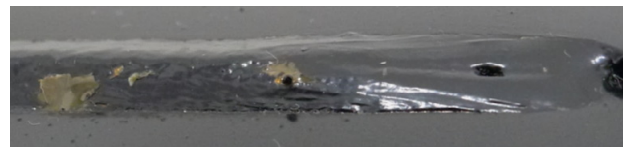
前述の結果から得た溶接条件、「Ar+5%CO₂シールドガス」、「低粘性・低スラグ溶接ワイヤ」、「電流波形のパルス化」、「大径ノズル」にて、サスペンションクロスメンバーを製作し、良好な施工性 (Fig. 14) と、ねらいのスラグ量 (Fig. 15) を確認した。また、Fig. 16に、ハイアルゴン溶接で製作したテストピースに電着塗装を施した状態を示す。ねらいどおり、溶接ビード上のスラグを被覆し、スラグの露出を大幅に低減した。



Fig. 14 Appearance of Sus-Crossmember by High-Ar Welding Process



Fig. 15 Welding Bead by High-Ar Welding Process



(A) Ar+20%CO₂ (Conventional Process)



(B) Ar+5%CO₂ (High Argon Process)

Fig. 16 Welding Bead Covered by E-Coating

当初のねらいどおり溶接止端部のスラグを極小化し、小スパッタでの施工性、信頼性上有利な大きいフランク角を有す、溶接ビードが得られた。

量産に向けた課題として、

- ・ノズル大径化による狭隘部のアプローチ性悪化対策

・溶接終端のスラグだまり対応があり、継続して検討中である。

6. おわりに

錆が発生する原因の一つである溶接時に発生する「スラグ」を極小化したハイアルゴン溶接プロセスを開発し、その開発の過程で以下の知見を得た。

(1) 従来工法に対して、ハイアルゴン化、低粘性・低スラグ溶接ワイヤ、パルス化を行うことでスラグ、気孔欠陥の少ない溶接ができた。また、相対的にアークが広がり、強度耐久性に対して有利な幅広で平坦な溶接ビードが得られた。

(2) 大気中の酸素成分は、大気に対して負圧であるシールドガスに引き込まれ、溶接部近傍に発生した渦周辺で高濃度になることが分かった。また、この渦はシールドガスとワイヤ先端から発生するプラズマ気流との相互作用によって発生することが推察される。

また、本技術を適用し従来工法との比較で防錆性能が大幅に向上することを確認した。

最後に、本研究開発を進めるにあたり多大なご協力をいただいた(株)神戸製鋼所、岩谷産業(株)、(株)ワイテックの皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 河井・鈴木：自動車用鋼板のアーク溶接部における塗装性、耐腐食性の向上策，溶接学会全国大会講演概要 平成24年度春季全国大会
- (2) 宮田・田中ほか：亜鉛めっき鋼板用低スラグ溶接プロセスの開発に向けた基礎検討-第1報，溶接学会全国大会講演概要 第97集（2015），pp.444-445
- (3) 田中・深堀ほか：亜鉛めっき鋼板用低スラグ溶接プロセスの開発に向けた基礎検討-第2報：ガスシールドノズル形状と大気巻き込みに関する研究，溶接学会全国大会講演概要 第97集（2015），pp.444-445
- (4) Greene, W.J. : An Analysis of Transfer in Gas Shielded Welding Arcs, A.I.E.E. Winter General Meeting, New York (1960) (T.A.I.E.E)
- (5) 泉谷・山崎・鈴木：自動車向け亜鉛めっき鋼板用新溶接法「J-Solution™ Zn」，神戸製鋼技報/Vol. 63 No.1 (Apr. 2013) pp.54-59
- (6) 中澤・上田・池田ほか：シャシ板金溶接部品の耐食性&疲労強度向上技術の開発，自動車技術会 2016年春季大会 学術講演会 講演予稿集 文献番号：20165163 No.35-16S pp.874-876
- (7) 斉藤・深堀・田中ほか：亜鉛めっき鋼板用低スラグ溶接プロセスの開発に向けた基礎検討-第3報：エンジン筒内噴霧解析の応用によるスラグ生成メカニズム解明，溶接学会全国大会講演概要 第97集（2015），

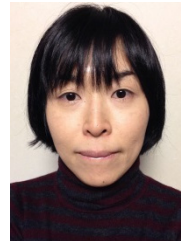
pp.444-445

- (8) 田中ほか：溶接アークの熱的ピンチ効果に関する一考察，溶接学会論文集 第25集 第2号（2007），pp.336-342

■ 著 者 ■



田中 正顕



斉藤 直子



深堀 貢



小川 貴史