

(論文)

溶接部の電着塗装性を向上させるスラグ制御技術

木梨 光*¹・孫 悦*¹・井海和也*¹

Slag Control Technology to Improve the Electrodeposition Coating Properties of Arc Weld Joints

Hikaru KINASHI・Yue SUN・Kazuya IKAI

要旨

自動車足回り部品のアーク溶接継手の耐久性および信頼性を向上することを目的として、溶接ワイヤに含まれる脱酸元素を調整することで溶接継手の電着塗装性を向上させることができる溶接材料を開発した。従来ワイヤと開発ワイヤを用いて重ね溶接継手を作製し、溶接スラグ表面および断面からの観察を行うことにより、スラグ中の酸化物の状態と電着塗装性の関係について調査した。開発ワイヤの溶接スラグ中の主要な酸化物の状態は、従来ワイヤを含む一般的な溶接ワイヤで生成するSi-Mnからなる酸化物ではなく、複数のMn(系)酸化物で構成されることを確認した。また、母材鋼板の希釈率の違いによって溶接スラグ中のMn酸化物の存在状態も変化しており、これらが電着塗装性にも影響を与えていることが示唆された。

Abstract

To improve durability and reliability of arc weld joints of automobile chassis parts, we developed welding consumable that can improve the electrodeposition coating properties of weld bead by adjusting the deoxidizing elements in the welding wire. In this paper, the lap fillet weld joints were prepared using conventional and developed wire, and the surface and cross-section of weld slag were observed to investigate the relationship between oxide state and electrodeposition coating properties. It was confirmed that the composition of the major oxides in the weld slag of the developed wire is multiple Mn-based oxides, rather than Si-Mn composite oxides. In addition, it was confirmed that the constitutional state of the Mn-based oxides in the welding slag changed due to the dilution effect of the base steel plate, and that these also affected the electrodeposition coating properties.

検索用キーワード

アーク溶接, 自動車, 電着塗装性, 溶接スラグ, 足回り部品

まえがき = サスペンションなどの自動車の足回り部品には一般的に鉄鋼材料が用いられており、高い強度や剛性、耐疲労性、耐食性を同時に満足することが求められる。例えば耐食性に関しては、走行時における路面からの飛び石などによる物理的損傷、沿岸地域での潮風、寒冷地での融雪剤など、厳しい腐食環境下にさらされるため、より一層の性能向上が求められている。実状としては、部分的な亜鉛めっき鋼板の採用や、部品全体の電着塗装による防錆処理¹⁾によって一定の品質を確保している。

自動車の足回り部品の接合には、一般にガスシールドアーク溶接が用いられる。ガスシールドアーク溶接に使う溶接ワイヤの成分には、SiやMnをはじめとした脱酸元素が添加されている。これらの元素が溶融金属内に溶込んだ酸素と反応し、溶接スラグとしてビード表面に浮上・生成することで、健全な溶接継手が得られる。いっぽう、この溶接スラグは酸化Siを主体とする絶縁物であるため、これらがビード表面に存在すると、溶接後の電着塗装工程で電着塗膜が形成されない。腐食環境下において電着塗膜が形成されていない部分は、錆の起点となることが知られている。パルスマグ溶接で重ね溶接継手を作製したテストピースに対し、電着塗装後にサイク

ル腐食試験を実施した結果を図1に示す。溶接継手ビード上のスラグ残留部には電着塗膜が形成されておらず、その箇所を起点に腐食が進展している様子が確認できる。

溶接継手の電着塗装状態を改善するためには、可能な限り事前にスラグを除去することが好ましい。しかし、人力によるスラグ除去は作業負荷が高く、生産効率の低下につながるため限定的にしか行われていない。そのほか、ショットブラストなどで物理的にスラグを除去する方法もあるが、コストアップになるだけでなく、複雑な形状への適用が難しいなど技術面での問題が多い。

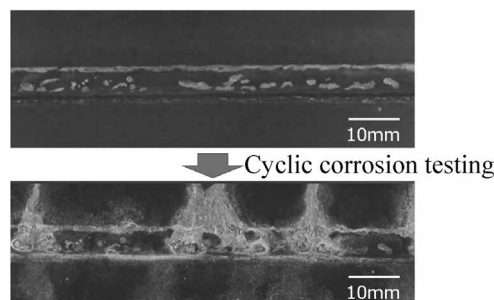


図1 複合サイクル腐食試験前後の溶接ビード外観の一例
Fig.1 Appearance of weld bead before and after cyclic corrosion testing

*¹ 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

電着塗装の阻害要因となるスラグを溶接時に制御する技術に関しては、溶接材料ならびに溶接プロセスからのアプローチが提案されてきた。例えば、硫黄 (S) を積極添加して溶接スラグを凝集させたり、溶接スラグの生成を可能な限り抑制しつつ生成したスラグをビード止端部に凝集させるプロセス^{2), 3)} がこれまでに提案されている。また、溶接ワイヤ中の Si, Mn 量を減らすことで電着塗装性が向上するという報告が過去になされている⁴⁾。著者らは、溶接ワイヤ中の脱酸元素添加量のバランスを調整することで、溶接スラグの形態や電気的性質を変化させ、溶接継手にスラグが残存しても電着塗装被膜が形成できる溶接材料を開発した。本報では、この溶接ワイヤと従来のパルスマグ溶接ワイヤの溶接継手部の電着塗装性を比較し、電着塗装性が改善する溶接スラグの組成ならびにスラグ内部の酸化物の構成状態を明らかにした結果を報告する。

1. 試験方法

1.1 供試材

評価に用いた溶接ワイヤ化学成分の一例を表 1 に示す。比較ワイヤとして、自動車の足回り部品の溶接で実績のあるパルスマグ溶接ワイヤ (JIS Z 3312 G 49 A 2 M 16) を用いた。開発ワイヤの化学成分の特徴は、Si が極端に少なく、Mn と Ti が多いことである。供試鋼板として、440 MPa 級熱間圧延鋼板 (SPH440) と冷間圧延鋼板 (SPCC) を用いた。鋼板化学成分の一例を表 2 に示す。

1.2 溶接継手の作製

溶接条件を表 3 に示す。板厚 2.3 mm, 幅 50 mm, 長さ 200 mm の鋼板を図 2 のようにジグで固定し、重ね溶接継手を 3 組ずつ作製した。溶接には (株) ダイヘン製デジタル電源 P500L と溶接ロボット FD-V8 を使用し、

80%Ar-20%CO₂ の混合ガスにてパルスマグ溶接を行った。作製したテストピースのうち 2 組は電着塗装を実施し、残りの 1 組は各種スラグの解析に用いた。

1.3 電着塗装

溶接直後のビード中央部を拡大して写真を撮影し、スラグの分布状態を溶接ワイヤならびに鋼板ごとと比較した。その後、電着塗装の前処理として洗浄、脱脂、表面調整、化成処理、洗浄を施し、最終的に黒色カチオン電着塗装を行った。狙いの電着膜厚は 20 μm とした。

1.4 溶接スラグの組成分析および相解析

作製したテストピースのビード中央部近傍 (ビード定常部) より、放電加工により組成分析用のサンプルを採取した。スラグの平均的な組成情報を得るために、まずスラグ表面側から Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometry (SEM-EDS) による元素分析を行った。その後、スラグ深さ方向の元素の分布状態を調べるために、溶接スラグの断面観察を行った。試験片を樹脂に埋込んで研磨を行い、スラグがビード断面方向で最も厚く形成されている上板側のスラグ箇所に着目して反射電子像観察を行った。開発ワイヤについては、Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) による元素マッピングも行った。また、サーモフィッシュャーサイエンティフィック社製多変量イメージ解析ソフトウェア COMPASS を用いて、EDS で得られた元素スペクトルから、特徴のあるスペクトルを有する酸化物相ごとに抽出する相分離解析を行った⁵⁾。

1.5 多成分系酸化物の平衡状態計算

溶接ワイヤの成分の違いによって溶融スラグからどのような種類の酸化物が優先して生成するのかを考察するために、熱力学平衡計算ソフトウェア FactSage8.1 を用いた酸化物の平衡状態計算を行った。ここでは複雑な酸

表 1 溶接ワイヤ化学成分の一例

Table 1 Chemical composition of welding wires (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ti
Conventional wire	0.05	0.75	1.25	0.010	0.004	< 0.01
Developed wire (Low Si wire)	0.05	0.10	1.96	0.010	0.006	Add.

表 2 鋼板化学成分の一例

Table 2 Chemical composition of steel sheets (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ti
440MPa steel sheet** (SPH440)	0.12	0.02	0.88	0.014	0.004	< 0.01
Mild steel sheet (SPCC)	0.02	0.01	0.11	0.017	0.002	< 0.01

**Hot rolled sheet.

表 3 溶接条件

Table 3 Welding conditions

Robot	FD-V8 (DAIHEN Corporation)
Power supply	Welbee P500L (DAIHEN Corporation)
Welding method	Pulse MAG
Shielding gas	80%Ar-20%CO ₂
Base metal	440 MPa steel sheet (2.3 mm T × 50 mm W × 200 mm L)
Current-voltage	200 A-24 V
Travel speed	80 cm/min
Travel angle	Perpendicular
Contact-tip to work distance	15 mm

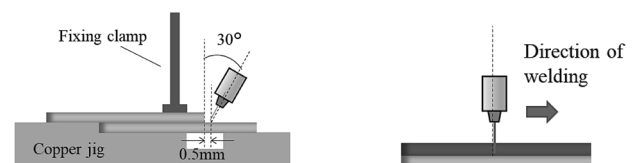


図 2 溶接姿勢

Fig. 2 Welding position

化物の関係を簡素化するために、Si, Mn, Ti, Feの4元素に限定し、熱力学データベースFToxidを用いてギブスエネルギー最小化法より各温度域で酸化物の生成量を計算した。スラグに占める各酸化物の質量比(係数)は、スラグ表面からのEDS分析結果をもとに各酸化物の係数の和が100となるように与えて計算した。

2. 試験結果および考察

2.1 溶接および電着塗装結果

溶接中の溶融池上でのスラグ挙動を観察した画像の例を図3に示す。従来ワイヤの溶接スラグは、溶融池上で凝集する傾向を示した。いっぽう、開発ワイヤの溶接スラグは溶融池上で凝集が抑制されており、溶融池後方に向かって表面に薄く形成される様子が確認できた。

溶接後および電着塗装後のビード外観写真を図4に示す。写真中央が溶接ビード部であり、写真上方に上板が、写真下方に下板がある。従来ワイヤではSPH440, SPCCのどちらの鋼板でもビード表面には光沢のある溶接スラグが形成されており、このスラグが残留した箇所では電着塗膜が形成されなかった。いっぽうで開発ワイヤのビード表面には、鋼板の種類によらず光沢のない暗褐色のスラグが広がって生成していた。上板側の溶接スラグの一部では電着塗装被膜が形成されない箇所も存在するが、従来ワイヤと比較してその面積が大幅に減少していることを確認した。また、鋼板の違いに着目すると、従来ワイヤと開発ワイヤのいずれにおいても、SPCC鋼板の方が電着塗装性は良好であった。

2.2 スラグ表面からの観察および組成分析結果

溶接ビード上に生成したスラグを、そのままの状態ですら表面側からSEM観察およびEDSによる組成分析を行った。従来ワイヤと開発ワイヤともに、上板側近傍に生成

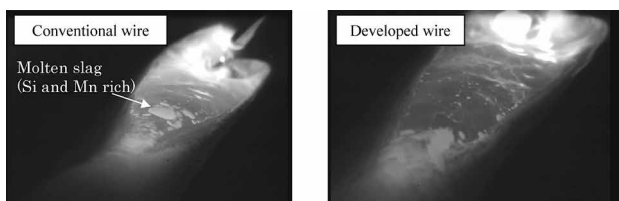


図3 アーク溶接中の溶融プール観察画像 (SPH440)
Fig.3 Observation image of molten pool during arc welding (SPH440)

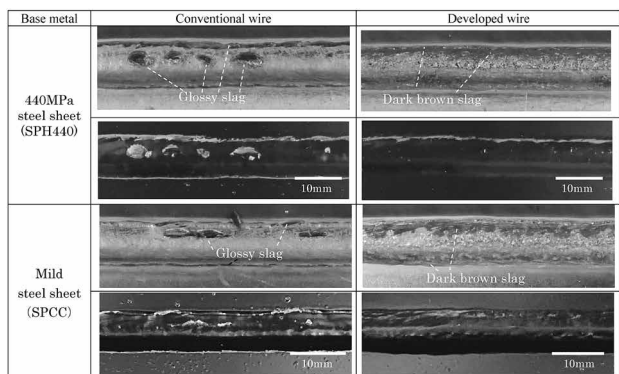


図4 溶接ビード外観 (上: 溶接後、下: 電着塗装後)
Fig.4 Weld bead appearance
(Top: as-welded, Bottom: electrodeposition coated)

したスラグ部で分析を実施した。SPH440鋼板を用いたときに発生した溶接スラグの組成分析位置を図5に示す。分析視野を四角枠で、分析範囲を丸枠でそれぞれ示す。従来ワイヤのスラグではSEM像の電子線照射位置にチャージアップの痕跡が確認されることから、相対的に導電性が低いと推察される。いっぽう、開発ワイヤの褐色スラグ部では、電子線照射位置にチャージアップの痕跡が見られなかった。次に、SPH440とSPCC鋼板を用いたときに生成した溶接スラグのEDS分析結果を図6に示す。どちらの鋼板においても、スラグ全体に占めるSiの割合は、従来ワイヤの方が高くなっていった。開発ワイヤではスラグ全体に占めるSiの割合が小さくなっており、溶接スラグが主にMnおよびTiの酸化物で構成されているという狙いどおりの結果と言える。そのほかFeや微量のAlも検出されたが、これらは母材鋼板から不可避免的に検出されたものと考えられる。

2.3 スラグ断面からの観察および相解析結果

2.3.1 従来ワイヤの溶接スラグ

従来ワイヤを用いてSPH440鋼板を溶接したときの、ビード断面の反射電子像を図7に示す。図中にはスラグ観察箇所を四角枠で示した。上板側近傍に凝集して生成したスラグの厚さは、局所的に約200μmとなっていた。溶接スラグの形態としては、暗く映っている箇所と明るい箇所、および特徴的な文様を呈する箇所の3つの形態が確認された。COMPASSを用いて酸化物相解析を実施した結果を図8に示す。括弧内に記載された元素は、同一相に占める質量比の大きい元素を左から順に並べて表記している。従来ワイヤで生成したスラグは大きく分けて3種類の酸化物相で構成されており、MnとSiで構成される酸化物相 (Phase①)、SiとFeで構成される酸化物相 (Phase②)、Mn, SiとFeで構成される酸

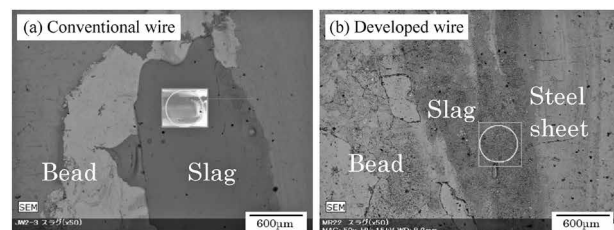


図5 EDS分析位置 (SPH440)
Fig.5 EDS Analysis position (SPH440)

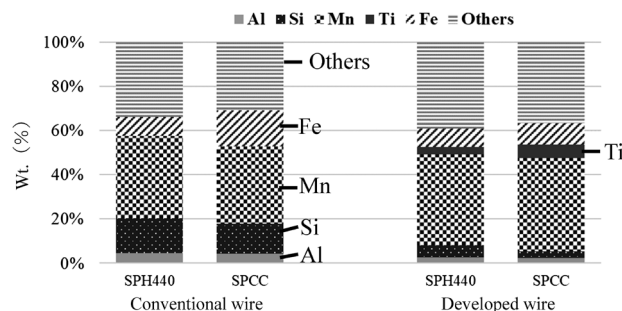


図6 EDS分析結果
Fig.6 Result of EDS analysis

化物相 (Phase③) であった。これらの各相は、反射電子像の観察結果ともそれぞれ対応しており、明確に分離して存在していた。過去の知見どおり、従来ワイヤの光沢を有するスラグは、全域にわたってSiとMnを主とする酸化物で構成されていることを確認した。

2.3.2 開発ワイヤの溶接スラグ

開発ワイヤを用いてSPH440鋼板を溶接したときに発生するスラグ断面の反射電子像と、四角棒の観察箇所を拡大した画像を図9に示す。スラグは従来ワイヤ同様に上板側で厚く形成される傾向であったが、厚さは最大でも100 μm 程度であり、従来ワイヤに比べると薄いことが確認された。スラグの形態はデンドライド状を呈しており、これらの形態は従来ワイヤの観察では見られなかった。SPH440鋼板に生成したスラグ部に対して、

COMPASSによる酸化物相解析を行った結果を図10に示す。スラグは大きく分けて、Mn、TiとFeで構成される酸化物相 (Phase④)、Mn酸化物相 (Phase⑤)、鉄酸化物相 (Phase⑥)、およびFe、SiとMnで構成される酸化物相 (Phase⑦) の4種類の相で構成されていた。Phase④は深さ方向全体に形成されており、Phase⑤はスラグの表層近傍に、Phase⑥と⑦はスラグと母材界面に分布していた。これらの相は、従来ワイヤの観察結果とは異なり、それぞれが明確に分離しておらず、折り重なるように存在していた。EPMAによるスラグ部のマッピング結果を図11に示す。反射電子像でデンドライド状の結晶が明るく見えている箇所では主にMn、Ti、Feが濃化しており、暗くなっている箇所は主にSiが濃化している。

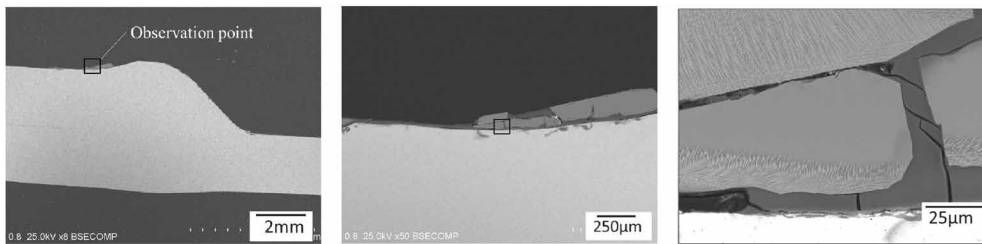


図7 スラグ観察位置 (四角棒) および反射電子像 (従来ワイヤ×SPH440)
Fig.7 Slag observation point (frame) and back scattered electron (BSE) image (conventional wire, SPH440)

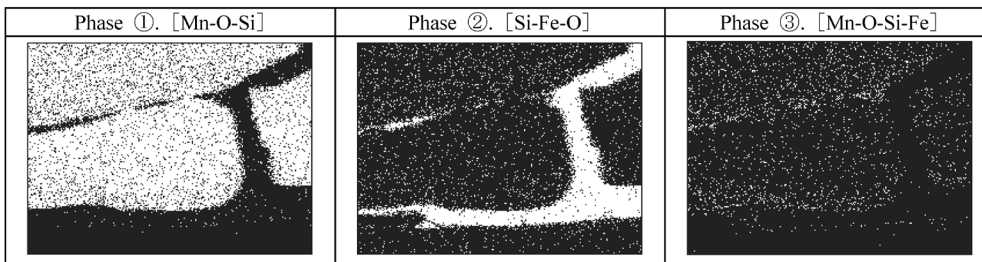


図8 相分析結果 [化学組成] (従来ワイヤ×SPH440)
Fig.8 Results of phase analysis [chemical composition] (conventional wire, SPH440)

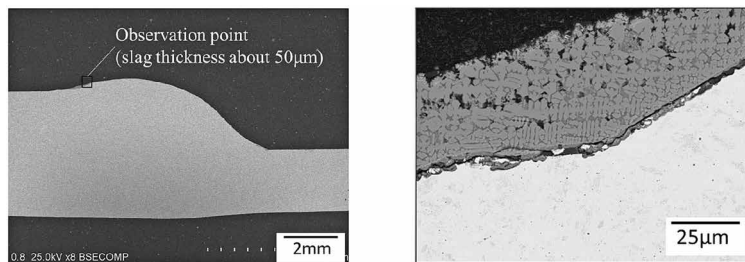


図9 スラグ観察位置 (四角棒) および反射電子組成像 (開発ワイヤ×SPH440)
Fig.9 Slag observation point (frame) and BSE image (developed wire, SPH440)

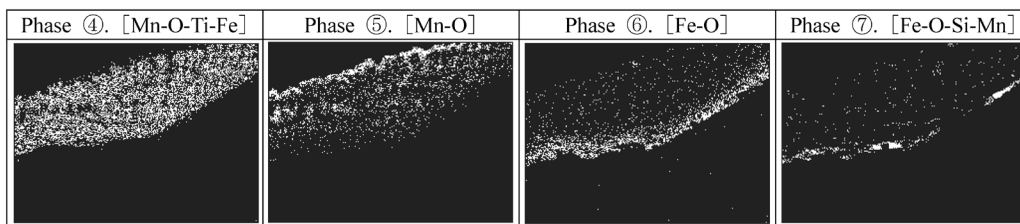


図10 相分析結果 [化学組成] (開発ワイヤ×SPH440)
Fig.10 Results of phase analysis [chemical composition] (developed wire, SPH440)

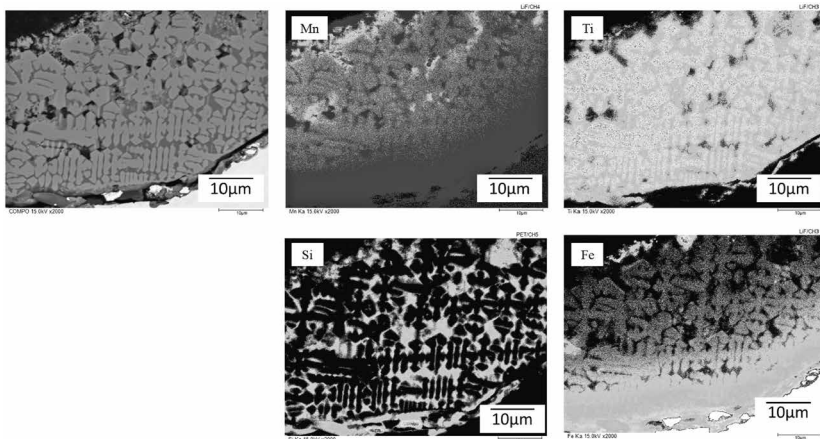


図11 EPMA解析結果 [化学組成] (開発ワイヤ×SPH440)
 Fig.11 Results of EPMA analysis [chemical composition] (developed wire, SPH440)

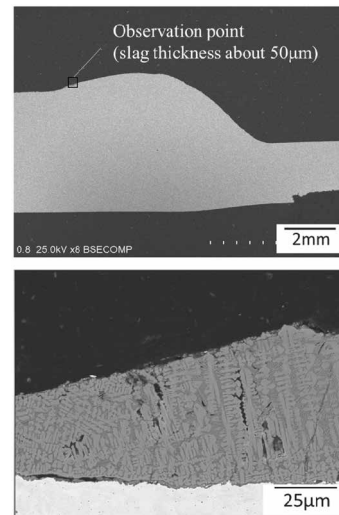


図12 スラグ観察位置 (四角枠) および反射電子像 (開発ワイヤ×SPCC)
 Fig.12 Slag observation point (frame) and BSE image (developed wire, SPCC)

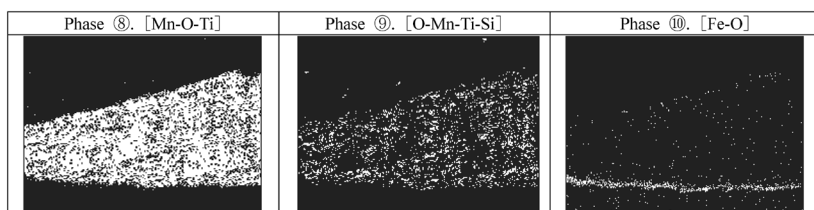


図13 相分析結果 [化学組成] (開発ワイヤ×SPCC)
 Fig.13 Results of phase analysis [chemical composition] (developed wire, SPCC)

2.3.3 溶接スラグに及ぼす鋼板組成の影響

鋼板組成が溶接スラグに与える影響を、開発ワイヤを用いて確認した。開発ワイヤを用いたSPCC鋼板の溶接スラグ断面の反射電子像と、四角枠の観察箇所を拡大した画像を図12に示す。スラグはSPH440鋼と同様に上板側で厚く形成される傾向であったが、厚さは最大でも50µm程度であり、SPCC鋼板でもデンドライド状の形態を呈していることが確認された。SPCC鋼板に生成したスラグ部に対するCOMPASSによる酸化物相解析結果を図13に示す。スラグは大きく3種類の相で構成されていたが、とくにMn、Tiで構成される酸化物相(Phase⑧)とMn、Ti、Siで構成される酸化物相(Phase⑨)の比率が高く、母材との界面近傍に鉄酸化物相(Phase⑩)が観察された。SPCC鋼板においても、SPH440鋼板と同様にMnとTiで構成される酸化物がスラグの主体相となっていた。

図10においてSPH440鋼板で確認されたMn酸化物の表面濃化層が、SPCC鋼板では確認されなかった。これは、SPH440鋼板と比較して、SPCC鋼板中のMn量が非常に低いことが影響している可能性が高い。

2.3.4 電着塗装性に及ぼす溶接スラグ厚さの影響

スラグ厚さが電着塗装状態に及ぼす影響を確認するため、電着塗装を施した後、スラグ断面の観察を実施した。開発ワイヤで溶接したSPH440鋼板のスラグ近傍のSEM観察結果を図14に示す。スラグ厚さ40~50µm程度までは電着塗膜が形成されているが、スラグがさらに厚く形成されている箇所では電着塗膜が形成されていない様子が確認できる。このことから、スラグの凝集を抑制してスラグの厚さを低減させることも、電着塗装性を向上

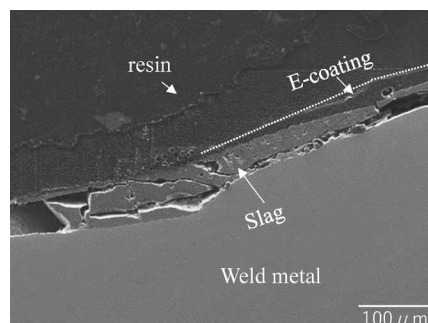


図14 溶接スラグのSEM画像 (開発ワイヤ×SPH440,電着塗装後)
 Fig.14 SEM image of weld slag (developed wire, SPH440 after electrodeposition coating)

させるうえで有効であることが示唆される。

2.4 平衡状態計算による多成分系酸化物の構造予測

従来ワイヤおよび開発ワイヤにおける平衡状態での酸化物計算結果を図15に示す。縦軸が酸化物の質量分率、横軸が温度である。従来ワイヤでは、1800℃から1200℃に温度が低下するにつれて熔融スラグは徐々に消失する。まずMnFe₂O₄が生成を開始し、続けてOlivine構造の酸化物のMn₂SiO₄およびMnSiO₃(Rhodonite)といったSi-Mn系の複合酸化物が生成してくることを意味している。室温付近では、とくにSiとMnの複合酸化物であるMn₂SiO₄が全体に占める割合が大きいく結果となった。過去にSi、Mn添加の鋼板における焼鈍環境において、SiとMnは互いの酸化反応を促進してFe酸化物を還元する効果があると報告されている⁶⁾。アーク溶接中のスラグ生成における脱酸過程でも、互いの酸化反応(溶接スラグ形成)を促進させていると考えられる。また、SiとMnの複合酸化物のMn₂SiO₄やMnSiO₃などは、FeやTiとMnの複合酸化物と比較すると低融点であることから、図3で示したとおり熔融池後方に滞留しやすく、凝固時には厚く大きな塊として残留した可能性が高い。

また、絶縁性のSiとMnの複合酸化物であるMn₂SiO₄は、熔融スラグから形成された後は室温近傍まで安定し

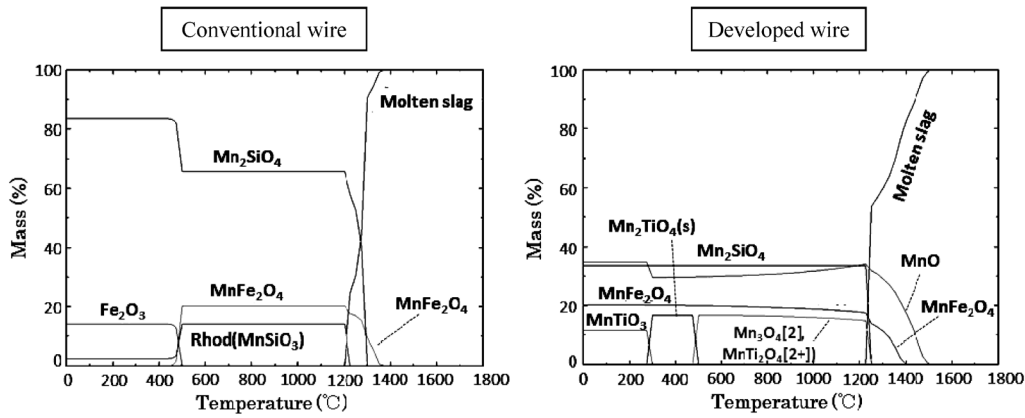


図15 酸化物の平衡状態 (質量分率に及ぼす温度の影響)
 Fig.15 Oxide equilibrium state (effect of temperature on mass percent)

てビード表面に存在することが可能であることを計算結果は示している。導電性の低いこれらの複合酸化物が溶接中に優先的に生成し、かつ凝集しながら局所的に成長していくことにより、電着塗膜の形成が阻害されたものと推測される。

いっぽう、開発ワイヤの成分における計算結果では、まず高温側から冷却過程においてMnOが、続いてスピネル構造を有するMnとFeの複合酸化物が、さらにOlivine構造のSiとMnの複合酸化物ならびにMnとTiの複合酸化物が順番に生成していく結果となった。このうち、MnOは図10で示した相解析におけるPhase⑤に相当する酸化物と考えられる。これまでのスラグ断面観察結果と照らし合わせると、開発ワイヤでは熔融池上に生成したスラグの凝固が進んでいく過程で、融点の高いMnO (Monoxide) がMnとFeの複合酸化物に先んじて析出し、ついでMnとSiの複合酸化物やMnとTiの複合酸化物が生成しはじめ、それらの酸化物が重なり合うように成長する。その結果、デンドライド状の凝固形態を呈したものと考えられる。スラグ分布状態からみると、MnOやMnとFeの複合酸化物は凝固開始温度が高く、またSiとMnの複合酸化物の比率も少ないことから、熔融池での凝集も起きにくくスラグは薄く広がる傾向になったと考えられる。その結果、スラグ部分の導電性が高まり、電着塗装性が向上したと推測される。また、計算結果からMn酸化物の導電性について考察すると、一般的にMnOはFeOに比べて室温での導電性は低いことが知られているため、スピネル構造を有するMn₃O₄、MnとFeおよびMnとTiの複合酸化物が導電性に寄与していると考えられる。しかしながら、生成したスラグはこれら複数の酸化物が複雑に重なり合うように形成されているため、酸化物の結合状態を個々に分離して特定することは難しく、実際にどのような電流経路をたどり電着塗膜が形成されたのか、メカニズムは十分に解明できていない。今後さらなる調査と考察を進めていく。

むすび=ワイヤ中の脱酸元素添加量のバランスを調整することで、溶接スラグの形態や電気的性質を変化させて、溶接継手にスラグが残存しても電着塗装被膜が形成できる溶接材料を開発した。本報告では、従来ワイヤと開発ワイヤのスラグの組成およびスラグ内部の酸化物の構成状態を詳細に把握することで、電着塗装性が改善した要因について以下のように考察した。

- ・ワイヤ中のSi、Mn、Ti成分比率を変化させることで、溶接スラグを構成する元素の比率を制御することができ、溶接ビード表面のスラグ形態も変化する。
- ・従来ワイヤのスラグ内部は全域にわたってSiとMnの酸化物を主体に構成されており、これらの酸化物はビード表面に局所的に厚く形成される。
- ・開発ワイヤではMn、TiとFeからなる酸化物の相がスラグ深さ方向に形成されており、デンドライド状を呈する。溶接中に熔融池後方でスラグ凝集が抑制され、スラグが従来ワイヤよりも薄く形成される。
- ・スラグの分析結果を用いた平衡計算結果から、開発ワイヤではスピネル構造型のMn酸化物がスラグの導電性に寄与している可能性が示唆された。

今回の調査では、開発ワイヤのスラグの導電性を担う酸化物の特定には至らなかった。引き続き、スラグを構成する酸化物の結合状態について調査を進め、電着塗装性が改善するメカニズムの解明に取り組んでいく。

参考文献

- 1) Oyabu et al. Transactions ISIJ. 1983, Vol.23, p.994.
- 2) 山崎亮太ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.98.
- 3) Umehara et al. Quarterly Journal of the Japan welding society. 2009, Vol.27, No.2, p.163s.
- 4) 児玉慎二ほか. 日本製鉄技報. 2019, Vol.412, p.78.
- 5) 和田充弘. Journal of Advanced Science. 2010, Vol.22, No.1&2, p.1.
- 6) 前田聡ほか. 鉄と鋼. 2018, Vol.104, No.9, p.509.