

(解説)

被覆アーク溶接棒における被覆剤の機能と特徴

Functions and Characteristics of Coating Flux on Covered Electrodes



栗山良平*1
Ryohei KURIYAMA

There are a variety of covered electrodes with functions and characteristics in accordance with their applications. This paper provides an overview of coating fluxes used for covered electrodes. It includes an example in which observations were made on the arc phenomena of electrodes covered with a high-titania-type coating and an iron-powder low-hydrogen type coating, using a high-speed camera based on laser irradiation. It has been found that, in case of the high-titania-type coating, both the core and covered flux contribute to the formation of arc, while, in case of the iron-powder low-hydrogen type coating, only the core contributes to that.

まえがき = 近年のアーク溶接は、溶接ロボットなどによる自動化も含め、ワイヤを用いる溶接法による合理化が進んでいる。このため、アーク溶接の中で最も歴史の古い被覆アーク溶接の適用は減少傾向にある。いっぽうで、被覆アーク溶接は溶接電源以外の装置やシールドガスの必要がない最も簡素なアーク溶接法であり、幅広い業種・分野において、溶接品質の信頼度の高さという観点からも、今もなくてはならないアーク溶接法である。

JIS Z3211「軟鋼、高張力鋼及び低温用鋼用被覆アーク溶接棒」では、溶着金属の機械的性質や化学成分だけでなく、被覆剤の種類により記号が多種に分類されている。これは、被覆アーク溶接は簡素な溶接法であるがゆえに、溶接金属に要求される品質、用途、目的に応じて使用できるよう、多様な種類が存在しているためである。

本稿では、被覆アーク溶接棒の被覆剤の種類と特徴、またアーク溶接中に機能する各種被覆剤の作用について解説するとともに、被覆アーク溶接のアーク現象を可視化した一例を紹介する。

1. 被覆アーク溶接の原理と被覆剤の作用

1.1 被覆アーク溶接電源

被覆アーク溶接の溶接電源には交流溶接機と直流溶接機があり、両方式ともアーク電圧変化に対して電流値変動の少ない垂下特性が採用されている。ガスシールドアーク溶接などで採用されている定電圧特性と比較した垂下特性における電流に対する電圧特性を図1に示す。

垂下特性は、溶接中のアーク長変動による瞬間的なアーク電圧変動や、被覆アーク溶接において不可避免的な溶接棒長の減少に伴う電圧降下量の減少があっても、溶接電流の変動はごくわずかなものとなり、溶接棒の溶融速

度にはほとんど影響が出ない特徴があり、被覆アーク溶接に適している。

日本国内の被覆アーク溶接用の溶接電源は交流が主流となっているが、可搬性の良いエンジン式溶接機などには直流もある。また、諸外国の溶接現場では、直流溶接機の適用は日本国内より多い傾向にある。溶接品質に及ぼす交流と直流（電極プラス）の比較を表1にまとめる。また、交流溶接と直流溶接（電極プラス）の溶接電流ならびにアーク電圧の時間変動を記録した波形の一例を図2に示す。

交流と比較して直流（電極プラス）は、陽極溶融時に被覆剤中の水分放出ならびにガス発生が盛んである。こ

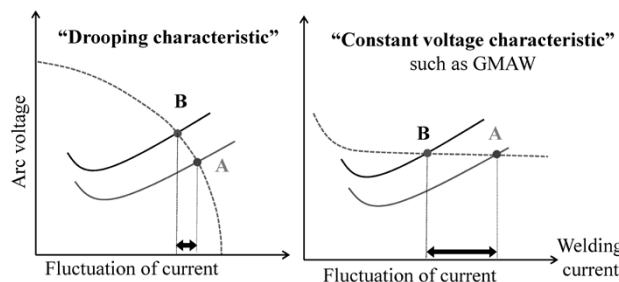


図1 被覆アーク溶接用電源の電流電圧特性
Fig. 1 Current-voltage characteristics of power source for shielded metal arc welding

表1 電源極性が溶接性能に及ぼす影響
Table 1 Typical influences of power source polarity on welding performance

Performance	AC	DCEP
Arc stability		○
Magnetic blow (Arc blow)	○	
Mechanical property of weld metal	○	
Diffusive hydrogen content		○

*1 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

のため、低温割れの原因となる拡散性水素量は比較的low、良好な値を示す。その反面、直流方式では磁気吹きによりアークが不安定になる。

いっぽうで交流は、直流と比較して陽極溶融に費やされるエネルギーの割合が少ないため、結果、被覆剤に添加している合金元素が溶接金属中に残存しやすくなり、溶接金属の機械的性能の確保が可能である。しかしながら、交流方式では点弧・消弧を繰り返すことによる溶滴移行の不安定などになりやすい。このように、直流と交流にはそれぞれ一長一短がある。

1.2 被覆剤の主な作用

被覆アーク溶接棒は心線と被覆剤で構成されている。市場に流通している軟鋼および高張力鋼用の被覆アーク溶接棒の心線は、炭素やマンガンが少量添加されただけの軟鋼線材が一般的である。被覆剤には、ガス発生剤、スラグ生成剤、脱酸剤、合金添加剤、アーク安定剤、ならびに固着剤などの機能を有する原料が適正な比率で配合されている。代表的な被覆剤の原料と主な作用を表2に示す。

ガス発生剤の作用を図3に示す。溶融金属を保護するためにアーク熱による熱分解で大量の遮蔽（しゃへい）ガスを発生する。代表的なガス発生剤は炭酸カルシウムであり、熱分解によって発生する二酸化炭素が遮蔽ガスとなる。スラグ生成剤は、アーク熱によって溶融スラグとなって溶融池へ移行する（図4）。スラグは溶融池上で溶融金属の酸化や窒化を防止するだけでなく、溶接ビードの形状や外観を適正に保つうえでも重要な役割を果たしている。とくに、上向き・立向き上進・横向き姿勢

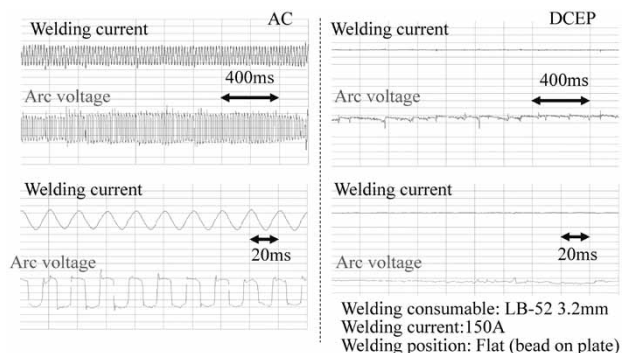


図2 溶接電流およびアーク電圧の波形一例

Fig. 2 Analog diagrams of welding current and arc voltage

表2 代表的な被覆剤原料と主な作用

Table 2 Typical function of major raw materials contained in coating flux

Raw materials	Target function in coating flux
Cellulose	Gas generator , Deoxidizer, Enhancement of coating flux
Rutile	Arc stabilizer , Slag former
ilmenite	Arc stabilizer , Slag former
Iron oxide	Slag former , Oxidizer , Arc stabilizer
Calcium carbonate	Slag former , Gas generator , Oxidizer, Arc stabilizer
Ferro manganese	Slag former , Deoxidizer , Alloy additive
Manganese dioxide	Slag former , Oxidizer, Enhancement of coating flux, Alloy additive
Silica sand	Slag former , Oxidizer, Alloy additive
Potassium silicate	Slag former , Solidifier , Arc stabilizer
Sodium silicate	Slag former , Solidifier , Arc stabilizer

においては、重力により溶融池が下方へ垂れ落ちることを抑止する機能を有し、重力に反した溶接姿勢での溶接を可能にしている。代表的なスラグ生成剤は酸化チタン、けい砂、酸化鉄、二酸化マンガンなどである。

脱酸剤は溶融金属中の酸素と反応して酸化物を生成し、溶融金属上にスラグとなって浮上することによって、溶接金属の酸素量を低減させる働きがある。なお、脱酸剤のこうした働きは、スラグの塩基度に大きく左右されることが知られている。また、合金添加剤は溶接金属の化学成分を調整するために添加しており、代表的なものとしてフェロマンガンやフェロシリコンが挙げられる。脱酸剤ならびに合金添加剤の作用を図5に示す。

アーク安定剤は、化合物中のイオン化エネルギーが低いNaやKなどのアルカリ金属を含む化合物であり、被覆剤に添加されている。

上述の被覆剤の原料は粉末で構成されている混合物である。このため、被覆剤の原料を心線に固着させる目的で固着剤を用いている。けい酸カリウムやけい酸ソーダなどの水ガラスが代表的な固着剤であり、ほとんどの被覆アーク溶接棒に適用されている。

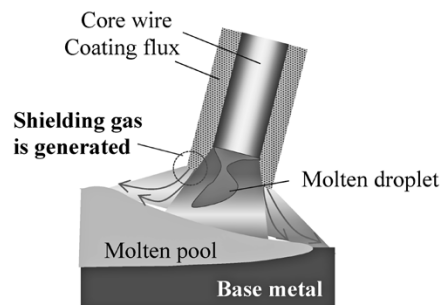


図3 ガス発生剤の作用を示す模式図

Fig. 3 Schematic illustration showing function of gas generator

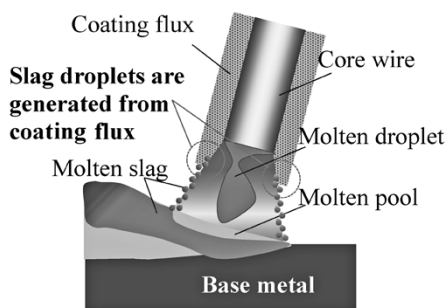


図4 スラグ生成剤の作用を示す模式図

Fig. 4 Schematic illustration showing function of slag former

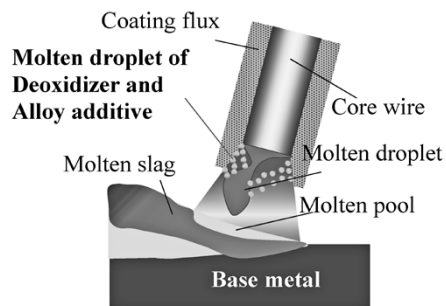


図5 脱酸剤ならびに合金添加剤の作用を示す模式図

Fig. 5 Schematic illustration showing function of deoxidizer and alloy additive

2. 被覆アーク溶接棒の種類と特徴

2.1 被覆剤の種類と系統

被覆アーク溶接棒は、その被覆剤の種類によって系統立てられており、イルミナイト系、高酸化チタン系、ライムチタニヤ系、鉄粉酸化チタン系、高セルロース系、低水素系ならびに鉄粉低水素系などに分類されている。これらの系統に用いられている心線は同等であり、その性能差は被覆剤の配合によって決まる。

系統別の代表的な被覆アーク溶接棒の性能、酸素量および拡散性水素量の一例を表3に示す。

2.2 イルミナイト系

イルミナイト系は国内の被覆アーク溶接棒としては最も歴史が古く、国内で多く適用されてきた実績がある一方で、海外の適用数は少ない。当社の代表的な銘柄にはFAMILIARCTM注1) B-10、FAMILIARCTM B-14、FAMILIARCTM B-17などがある。被覆剤はイルミナイト鉱石（酸化チタン、酸化鉄）を主成分として含んでおり、スラグ流動性に富んでいることから全姿勢溶接に適用される。また、他系統と比べてアークの吹き付けが強くて溶け込みも深く、X線透過試験の性能に優れていることから、各種圧力容器や一般構造物の20mm程度までの中厚板に適している。

2.3 高酸化チタン系

高酸化チタン系は、国内をはじめ世界各国で広く使用されている被覆アーク溶接棒である。とくに作業性の良さや良好なビード外観により、ASEAN諸国では高酸化チタン系の占める比率が高い。高酸化チタン系は直流、交流を問わず、他の被覆系統に比べてアーク安定性に富んでおり、スパッタ発生量も少ない。また、酸化チタンを多く含有するスラグは、凝固すると溶接金属表面から自然剥離（はくり）しやすい性質があり、美しい溶接ビード外観を呈する。溶接金属の酸素量は高く、溶接ビードの伸びも良いため、薄板の溶接に適している。いっぽう、他の系統と比べて溶接金属の拡散性水素量は高く、

溶接金属の衝撃性能も劣っている。このため、中厚板や重要構造物などの溶接には適していない。当社の代表的な銘柄にはFAMILIARCTM RB-26やFAMILIARCTM B-33がある。

2.4 ライムチタニヤ系

ライムチタニヤ系は被覆剤に炭酸カルシウム（ライム）と酸化チタンを多く含んでおり、高酸化チタン系の弱点である溶接金属の拡散性水素量や衝撃性能を改善した系統である。アーク安定性などの溶接作業性は高酸化チタン系に匹敵するほど良好であり、日本国内の市場ではライムチタニヤ系の使用量が最も多い。当社の代表的な銘柄にはFAMILIARCTM Z-44やFAMILIARCTM TB-24がある。

2.5 鉄粉酸化チタン系

鉄粉酸化チタン系は被覆剤に多くの鉄粉を含有することから、溶着量の大きい溶接を可能にしている。優れたスラグ剥離性や美しいビード外観は高酸化チタン系に匹敵し、日本国内では造船などのすみ肉溶接に多く適用されている。とくに、φ6.0~8.0mmまでの太径心線に厚被覆を施した被覆アーク溶接棒は、グラビティ溶接という施工法によく用いられている。グラビティ溶接機の外観を図6に示す。グラビティ溶接では、斜めに下降するレールをスライドできるよう溶接棒をつかむホルダが設置されている。アークスタート後は、被覆アーク溶接棒の消費に合わせて先端がスライドすることにより、すみ肉を做う形で溶接が継続される。グラビティ溶接機を一度セットすると、自動ですみ肉溶接ができるため、溶接作業一人ですべて同時に4~5台を操作することができ、生産性向上に大きく寄与できる。当社の代表的な鉄粉酸化チタン系の銘柄にはグラビティ溶接に適したFAMILIARCTM LT-B50があり、水平すみ肉溶接ではおおむね心線径と同等の脚長が得られる。

2.6 高セルロース系

高セルロース系は被覆剤にセルロースを多く含有している。アーク熱でセルロースが燃焼し、二酸化炭素や水

表3 代表的な被覆剤種類系統の銘柄における溶着金属の性能と拡散性水素量
Table 3 Performances and diffusible hydrogen contents of deposited metals on typical brands

Classification of JIS Z 3211:2008	Type of coating flux	Typical brand	Tensile property ^{*1}			Charpy absorbed energy [J] ^{*1}			Oxygen content ^{*2} [mass%]	Diffusible hydrogen content ^{*3} [mL/100g]
			Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]	at -30°C	at -20°C	at 0°C		
E4319U	Ilmenite	FAMILIARC TM B-14	400	450	26	-	80	110	0.090	35
E4313	High titania	FAMILIARC TM RB-26	450	510	23	-	50	70	0.095	45
E4303	Lime titania	FAMILIARC TM Z-44	410	460	28	-	90	120	0.085	25
E4924	Iron powder, Titania	FAMILIARC TM LT-B50	480	530	28	-	-	75	0.060	45
E4310	High cellulose	FAMILIARC TM KOBE-6010	430	510	27	65	75	-	0.060	40
E4916U	Low hydrogen	FAMILIARC TM LB-52	500	570	27	150	160	200	0.025	5
E4918	Iron powder, low hydrogen	FAMILIARC TM LB-52-18	500	560	27	140	155	195	0.035	5

*1 Tensile property and Charpy absorbed energy: according to "JIS Z 3211"

*2 Oxygen content: analyzed on the center of deposited metal

*3 Diffusive hydrogen content: according to "JIS Z 3118" gas chromatographic method (atmosphere: 21°C, 10%RH)

脚注1) FAMILIARC (FAMILIARCTM) は当社の商標である。

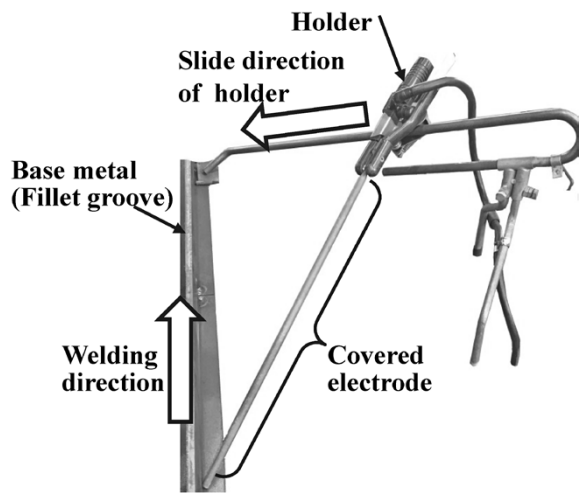


図6 グラビティ溶接機
Fig. 6 Gravity welding machine

蒸気ガスなどを発生させることで遮蔽ガスの役割を果たしている。国内での適用は極めて少ないが米国では古くから多く使用されている系統である。高セルロース系は強いアークを発生し、特にパイプの円周継手の初層裏波溶接では他の系統と比べて随一の溶接作業性を有している。しかし、比較的小さい粒のスパッタが大量に発生するという欠点もある。また、有機物であるセルロースを多く含有することから、溶接金属の拡散性水素量は高く、重要構造物の中厚板には適していない。当社の代表的な高セルロース系の銘柄はFAMILIARC™ KOBE-6010などがある。

2.7 低水素系

低水素系は、被覆アーク溶接棒の中で最も良好な溶接金属の機械的性質を得ることができる系統である。軟鋼や一般炭素鋼に対しては、用途に応じて低水素系以外の系統も多く適用されているが、高張力鋼、低温用鋼、耐熱鋼など比較的重要部材に用いる鋼材に適用される被覆アーク溶接棒は、低水素系や鉄粉低水素系に限られている。低水素系の被覆剤は、炭酸カルシウム（ライム）やフッ化カルシウム（蛍石）を多量に含有しており、発生する分解ガスが無酸化性雰囲気もしくは還元性雰囲気をつくる。これが、熔融池を大気から遮蔽して溶接金属の窒化と酸化を防止する効果大きい。一般的な低水素系被覆アーク溶接棒における溶接金属の酸素量は300 ppm程度であり、これはソリッドワイヤの炭酸ガスシールドアーク溶接を凌（しの）ぐ少なさである。なお、低水素系被覆アーク溶接棒は他の系統と比べると被覆剤の導電性が低いため、アークスタート性が劣っている。それを補うため、被覆アーク溶接棒の先端にアークスタート時の発火性に効果のある塗布剤を処理したものが一般的である。当社の代表的な低水素系の銘柄はFAMILIARC™ LB-47やFAMILIARC™ LB-52Uなどがある。

2.8 鉄粉低水素系

鉄粉低水素系は、被覆剤に20～30%程度の鉄粉を含有していることを除けば、低水素系に類似した被覆剤成分である。なお、被覆剤に鉄粉を含有することに由来し、

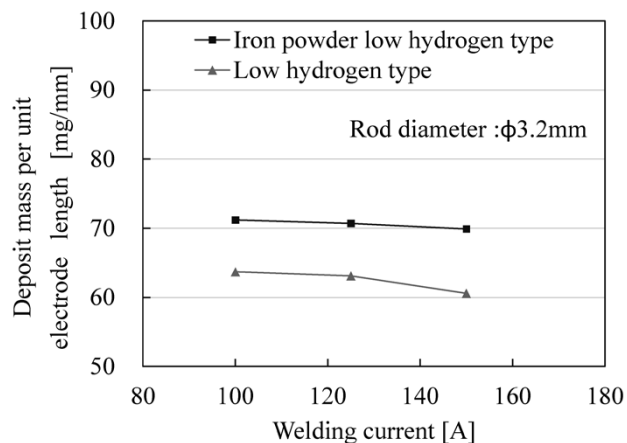


図7 単位棒長さに対する溶着量の比較の一例
Fig. 7 Example of deposit rate on unit electrode length

同径の被覆アーク溶接棒で単位長さあたりに得られる溶着量は低水素系よりも鉄粉低水素系のほうが大きくなり、溶接能率は向上する。図7に低水素系と鉄粉低水素系の単位棒長さに対する溶着量の比較を示す。当社の代表的な鉄粉低水素系の銘柄はFAMILIARC™ LB-52-18やFAMILIARC™ LT-B52Aがある。後者は厚被覆を有していることから下向きや水平すみ肉溶接に好適であり、グラビティ溶接にも適用可能である。

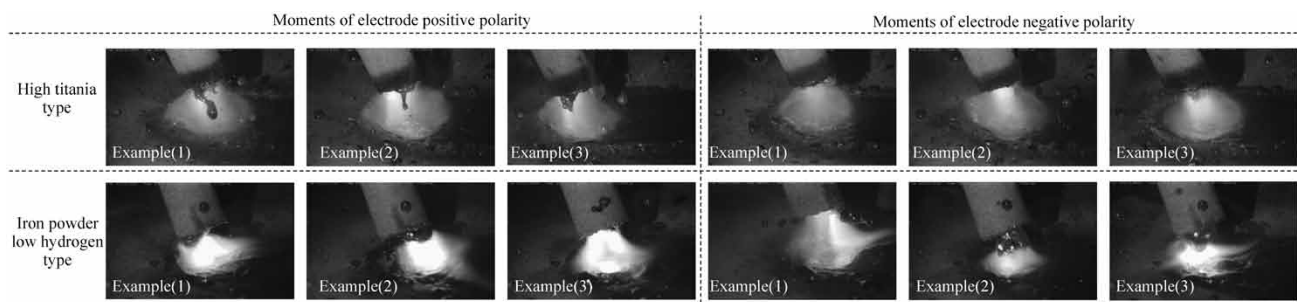
3. 被覆アーク溶接のアーク現象の観察

3.1 被覆系統によるアーク現象の比較

各種被覆系統の中でもとくにアーク安定性が優れている高酸化チタン系のアーク現象を高速カメラを用いて観察した。比較のため、とくに交流溶接でアーク不安定やアーク切れが発生しやすい鉄粉低水素系も観察した。今回、アークで覆われている溶滴移行現象をより詳しく観察するため、レーザーを照射しながらアーク現象の観察を行った。

アーク光を減衰させて撮影するために減光フィルタおよび露光時間の調整を行った。しかし、それだけでは視野全体が暗くなるため、撮影方法を工夫した。すなわち、カメラの露光タイミングでレーザー（波長0.64μm）をパルス発光させ、その波長のみを透過させるバンドパスフィルタをカメラに取り付けることによって、相対的にアーク光を弱めて視野全体の光度を保った。

溶接電圧波形と溶滴移行現象の関係性を明確にするため、被覆アーク溶接棒の溶滴移行と熔融池を高速カメラで撮影しながら、溶接電流とアーク電圧を同期計測した。溶接電流値が交流の電極プラス側最大値ならびに電極マイナス側最大値になったときの高酸化チタン系ならびに鉄粉低水素系の代表的なアーク現象を図8に示す。電極プラス側に着目すると、鉄粉低水素系ではアークが中央に強く集中している。これに対して高酸化チタン系では、弱めのアークが被覆剤先端からも発生し、アーク発生範囲は鉄粉低水素系よりも広範囲で全体的にアーク光が弱くなっている。また、アークプラズマの形状は、高酸化チタン系では被覆アーク溶接棒の直下で安定しているのに対し、鉄粉低水素系では揺らいでいる様子が観察



Rod diameter : 4.0mm, Welding current: 150A(AC), Welding position: Flat



図8 高酸化チタン系と鉄粉低水素系のアーク現象の比較（交流）
Fig. 8 Comparison of arc phenomena between "high titania type" and "iron powder low hydrogen type" (AC)

された。さらに、鉄粉低水素系では溶滴が大きく成長しやすく、被覆アーク溶接棒の先端から溶滴が離脱しにくい。このため、溶融池と溶滴間の距離が狭まりアーク長も短くなる傾向にあった。さらに、被覆アーク溶接棒の先端から溶滴が離脱できずに大きく成長すると溶融池と溶滴は短絡し、交流電流の極性が入れ替わるときに短絡状態が解除できないとアーク切れになってしまう現象が発生していた。なお、高酸化チタン系では被覆アーク溶接棒の先端で溶滴が成長する前に離脱し、アーク長は一定に保たれた状態になっていることが観察された。

3.2 被覆剤がアーク現象に及ぼす影響の考察

鉄粉低水素系と高酸化チタン系のアーク現象の違いを観察したところ、アークの発生位置、およびアークプラズマの形状と溶滴の切れやすさに特徴的な違いがあった。

鉄粉低水素系の被覆剤は炭酸カルシウムや蛍石などスラグの導電性が低い物質を主体に構成されているため、被覆アーク溶接棒先端のアーク発生点は被覆剤ではなく、内側にある心線が溶融した溶滴からのみとなる。そのため、被覆アーク溶接棒先端の中央部に集中したアークが観察される。いっぽう、高酸化チタン系の被覆剤はスラグの導電性が高いため、溶融した被覆剤の酸化チタンからもアークが発生すると考えられる。そのため、被覆アーク溶接棒先端の広い範囲からアークが発生し、電流密度が低下してアーク光は弱くなったものと考えられる。

鉄粉低水素系では、溶接金属の酸素量が低く（約350 ppm）、被覆剤中の石灰や蛍石などの遮蔽ガスの効果で溶滴の酸素量も低いと考えられる。溶滴中の酸素量低下は溶滴の表面張力を高める。また、被覆剤に含まれる鉄粉は溶滴の成長を助長する。これらにより、心線の

直下で前後左右に揺らぎやすい大きい溶滴が形成していると考察される。逆に、高酸化チタン系では溶接金属の酸素量が高く（約950 ppm）、溶滴の酸素量も高いと考えられ、表面張力が低い。このため、大粒に成長する前に溶滴は小粒のまま溶融池へ移行していると考察される。

むすび=日本国内は少子高齢化が加速しており、溶接士の数も減少している。また、被覆アーク溶接が適用される箇所は減少すると考えられ、溶材メーカー同士の被覆アーク溶接棒の販売競争は激化していくと予測される。

手動で施工される被覆アーク溶接における品質ニーズには『アークの吹き付け強さ』や『アークの広がり』など、定量化の難しい現象が多くある。溶接士の多様なニーズに応えるためには、被覆剤配合と溶接作業性の関連付けが必要不可欠なことである。本稿で紹介した高速度カメラによるアーク現象の可視化は、溶接士のニーズをより具体的に捉え、定量的に考察するうえで有用な計測方法の一例であると考えている。

これまでに培ってきた被覆アーク溶接棒の設計技術を土台に新たな観察、計測および解析の技術も駆使し、高い顧客満足度を得ることができる被覆アーク溶接棒のメニューを拡充することにより、当社プレゼンスの維持向上に今後も寄与していきたい。

参考文献

- 1) 永井雄雄ほか. 溶接棒各論. 株式会社神戸製鋼所, p.6-19, p.141-149.
- 2) 石崎敬三ほか. 溶接学会誌. 1963, Vol.32, No.3, p.192-198.
- 3) 安藤弘平ほか. 溶接学会誌. 1964, Vol.33, No.1, p.62-68.

PDFにて本記事をご覧の方へ

図8にある動画マーク  をクリックいただくと動画が再生されます。