エレクトロスラグ溶接におけるスラグ浴内現象の観察*

山崎 圭**, 浅野 涼**, 戸田 亮***, 齋藤 康之***, 茂田 正哉****, 田中 学*****

Observation of Phenomena in the Slag Bath during Electroslag Welding*

by YAMAZAKI Kei**, ASANO Ryo**, TODA Ryo***, SAITO Yasuyuki***, SHIGETA Masaya****, TANAKA Manabu*****

In ESW process, welding phenomena and mechanism have not been understood enough. In this study, phenomena in the slag bath during ESW were observed by using X-ray transmission imaging system. By changing welding conditions, various droplet transfer mode similar to GMAW were observed in the slag bath. According to the temperature measurement result in the slag bath, upper and middle part was around 1700-1900 K that was near the melting point of iron, and bottom part was more than 2300 K. Therefore, it is presumed that most of welding current is concentrated at the bottom of the slag bath and spreads radially from the wire tip, and then the electromagnetic pinch force acts effective in the droplet detachment. In addition, in the bottom of slag bath, high-speed rotating convection was observed. It is estimated that penetration depth is governed by this convective heat transport. These observations indicate that wire tip position and temperature distribution in the slag bath are determined by the setting of welding conditions, then the welding current path in the slag bath changes by these acting mutually. It is suggested that droplet transfer mode and convection phenomenon are also determined by the current path in the slag bath. Then the effects of wire extension length and slag bath depth on wire melting rate were also investigated. In the case of the same wire extension length and the same welding current, the wire melting rate of ESW was lower than that of EGW. Furthermore, it was clarified that Joule heat at the wire extension and wire melting rate varied with the slag bath depth also, despite the same wire extension length. Therefore, the slag bath depth control method should be developed to expand the application of ESW process in the future.

Key Words: Electroslag welding, Slag bath, Droplet transfer, Convection, Wire extension, Wire melting rate, Joule heat

1. 緒 言

エレクトロスラグ溶接法（以下、ESW）は、1951年に旧ソ連（現ウクライナ）のパトン電気溶接研究所にて開発され¹⁾、それ以降、厚鋼板を対象とした立向自動溶接法として普及した^{2,3)}。ESWは溶融スラグの抵抗発熱を熱源として利用した消耗電極式溶接法であり、ガスシールドアーク溶接法（以下、GMAW）のようなアーク放電を利用した溶接法とは本質的に異なるものである。このESWは、1) 溶着効率が高く、厚板を1パスで施工できる高能率溶接法であること、2) スパッタやヒュームの発生が極めて少なく、溶接作業環境に優れること、3) 開先精度に対する裕度が比較的に広いこと、4) 1パス施工であるため、溶接時の角変形が小さいこと、5) 溶融スラグによる外気からの保護作用により、シールドガスを必要としない上、耐風性に優れること等の様々な利点を有している。しかし、ESWではワイヤの溶融や溶込み形成が溶融スラグ層（以下、スラグ浴）の内部で行われるため、これら現象を目視することができない。したがって、その施工条件選定には必然的に試行錯誤が多くなり、溶接

中の条件調整においても作業者の経験や感覚に頼る部分が少なくない。このような施工自体の難しさを背景にESWの適用事例は徐々に減少していき、我が国における適用も鉄骨ボックス柱製作におけるダイヤフラム立向溶接等の特定分野に留まっているのが現状であり^{4,5)}、また、これまでのESWに関連する研究も本特定分野を対象とした材質性能や構造評価に関するものが大半を占めている⁶⁻⁸⁾。一方、近年、このESWの優れた利点を改めて工業的に活用しようとする新たな技術開発も検討されてきているが⁹⁻¹³⁾、昨今の深刻な熟練作業員不足の状況およびESW施工の難しさを鑑みると、これらの新たな展開を実現させるためには、溶接現象の理解に基づいたより高度な自動化技術の確立が必須になるものと考えられる。なお、ESWの溶接現象に関する研究事例としては、1970年代に安藤らによって実施された溶込み形成機構に関する研究¹⁴⁻¹⁷⁾が代表的なものである。その中で安藤らは、溶接中におけるスラグ浴内の溶接電流分布を測定し、電流の大半がワイヤ先端付近から流出（スラグ浴底部に集中）していることを明らかにした。そして、その電流分布が浴底部から母材側壁に向かうスラグ浴内対流を生じさせ、この対流現象が溶込み形成の主因であるということ推定している。しかし、これ以降のESWとその溶接現象に関する研究事例は、他の溶接法と比較して圧倒的に少なく、目視が困難であるが故に、今もスラグ浴内現象について十分に解明されているとは言い難い。

そこで、本研究では、高輝度X線透過型高速度イメージ

*受付日 2021年4月27日 受理日 2021年7月27日

**正 員 株式会社神戸製鋼所 Member, KOBE STEEL, LTD.
*** 株式会社神戸製鋼所 KOBE STEEL, LTD.

****正 員 東北大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Tohoku University

*****正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

ング装置¹⁸⁾を用いてESWにおけるスラグ浴内現象を透視観察し、溶接条件が溶滴移行形態に及ぼす影響を整理すると共に、溶接中のスラグ浴内温度分布や電位分布を測定し、これらが溶滴移行現象やスラグ浴内の対流現象に及ぼす影響について考察する。更に、突出し長さやスラグ浴深さが溶接電流とワイヤ溶融速度に及ぼす影響についても検討し、これら結果からESWの更なる高度化に向けた溶接制御法の課題について提言する。

2. 溶滴移行現象の観察

2.1 高輝度X線透過型高速度イメージング装置

Fig.1に本研究で用いた高輝度X線透過型高速度イメージング装置の外観を示す。本装置は高輝度X線発生装置および高感度X線イメージンシファイア付き高速度デジタルビデオカメラから構成されている。これらと後述する被溶接材をFig.2のように配置し、観察方向に対して溶接装置および溶接トーチを垂直方向に上昇させながらESWを行い、そのスラグ浴内を透視観察した。なお、本研究では高い透過能力を有するミニフォーカスX線源(225kV, 3.5mA)を用い、毎秒100もしくは250コマで撮像しながら、溶接電流・電圧の波形データも画像と同期測定した。

2.2 実験方法

JIS G 3106 SM490Aを供試鋼板として用い、Fig.3に示すように、鋼板で囲まれた矩形断面25mm×24mmの空間内

Fig.1 Appearance of the X-ray transmission imaging system

Fig.2 Schematic diagram of the experimental setup for the X-ray transmission imaging system

でESWを行った。X線透過能の関係上、観察方向の前後に配置する鋼板板厚を12mmとしており、大電流条件ではこれが溶落する危険性があるため、本実験では溶接電流360A程度以下にて現象観察した。使用したフラックスはJIS Z 3353 FES-Zに該当する溶融フラックスであり、各試験体の開先内に毎回同一量のフラックスを投入後、溶接を開始した。ただし、一部の未溶融フラックスが開先底部(溶接開始部)に残存する場合があったため、定常部におけるスラグ浴深さ(スラグ浴表面から溶融池表面までの距離)は全試験体で統一されておらず、本実験におけるスラグ浴深さは20~30mmであった。溶接ワイヤはJIS Z 3353 YES 561-Mに分類されるフラックス入りワイヤφ1.6mm(以下、FCW)を主として用い、比較としてJIS Z 3312 YGW 11に該当するソリッドワイヤφ1.2および1.6mmも用いた。また、溶接電源は定格600Aのサイリスタ制御式直流定電圧電源(極性DCEP)を用い、出力される溶接電流がおおよそ一定となるように、溶接トーチの上昇速度を制御することが可能な専用溶接装置を用いた。なお、3章以降の実験においても溶接電源および溶接装置は同一のものを使用している。

2.3 プロジェクト移行形態

FCWφ1.6mmを用い、溶接電流320A、溶接電圧39.5V、ワイヤ送給速度10.0m/min、スラグ浴深さ30mmとした場合の溶接電流・電圧波形および溶滴移行現象をFig.4に示す。ワイヤ先端にワイヤ径程度の溶滴が形成され(Fig.4(b)(1)~(3)および(7)~(9))、その溶滴がワイヤ送給方向に離脱・移行する様子(Fig.4(b)(4)~(6)および(10)~(12))が観察された。そして、この溶滴形成・離脱挙動と連動して溶接電流・電圧波形も変動していた。これは混合ガスを用いたGMAWで見られるプロジェクト移行形態と類似の溶滴移行現象であると考えられ、本溶接条件において画像から測定された溶滴移行周波数は30~66Hzであった。本観察結果は、ESWにおいてもワイヤ先端の溶滴離脱に寄与する何らかの外力が作用していることを示唆するものである。なお、Fig.4において、溶融スラグが灰色に撮像されているのは、溶融スラグの密度が母材や溶接ワイヤと比較して低く¹⁹⁾、X

Fig.3 Shape and dimension of the test piece

(a) Welding current and voltage waveform

(b) Droplet transfer phenomena images

Fig.4 Welding current and voltage waveforms and droplet transfer phenomena images in projected transfer mode

線が減衰しないためである。また、スラグ浴底部が特に薄い灰色に撮像されているのは、観察方向前後に配置された銅板が溶融してスラグ浴底部に溶込みが形成され、X線の銅板透過距離が短くなったことに起因するものと考えられる。更に、本実験で撮影されたX線透過画像はやや傾いているように観察されるが、これは観察対象を透過したX線がイメージインテンシファイア内の入力面蛍光膜に入射し、その光電効果によって発生した電子が溶接電流によって発生する磁界の影響を受け、イメージインテンシファイア内の出力面蛍光膜まで直進できないことによるものである。

2.4 グロビュール移行形態

前述のプロジェクト移行形態となる溶接条件から電流もしくは電圧を低下させていくと、炭酸ガスを用いたGMAWで見られるグロビュール移行形態と類似の溶滴移行現象が観察された。Fig.5はFCWφ1.6mmを用い、溶接電流265A、溶接電圧32.5V、ワイヤ送給速度7.0m/min、スラグ浴深さ22mmとした場合の溶接電流・電圧波形および溶滴移行現象である。ワイヤ先端にワイヤ径よりも大きい溶滴が形成され (Fig.5(b) (1)～(5)および(7)～(11))、その溶滴がワイヤ送給方向から反れて離脱・移行する様子 (Fig.5(b) (6) およ

び(12))が観察された。したがって、本溶接条件においては溶滴を押上げる何らかの外力が作用しているものと考えられる。なお、画像から測定された溶滴移行周波数は8~15Hzであった。また、プロジェクト移行形態 (Fig.4) では溶融池表面形状が比較的平坦であり、母材側壁には幅方向に溶込みが形成されているのに対し、Fig.5のグロビュール移行形態における溶融池表面形状は、中央部が深く掘下げられた下方に尖った形状であり、更に、母材側壁への溶込みが殆ど形成されていないのが特徴的であった。これは後述するスラグ浴内における電流経路やスラグ浴内対流現象の違いに起因するものと考えられる。なお、Fig.5はグロビュール移行の中でも反発移行に分類されるものであるが、低電流かつ高電圧条件においては、ワイヤ径以上に成長した溶滴がワイヤ送給方向に離脱・移行するドロップ移行形態も観察された。

2.5 短絡移行形態

前述のグロビュール移行形態となる溶接条件から電圧を更に低下させていくと短絡移行形態が観察された。FCWφ1.6mmを用い、溶接電流245A、溶接電圧28.5V、ワイヤ送給速度6.0m/min、スラグ浴深さ28mmとした場合の溶接電流・

(a) Welding current and voltage waveform

(b) Droplet transfer phenomena images

Fig.5 Welding current and voltage waveforms and droplet transfer phenomena images in globular transfer mode

(a) Welding current and voltage waveform

(b) Droplet transfer phenomena images

Fig.6 Welding current and voltage waveforms and droplet transfer phenomena images in short circuiting transfer mode

電圧波形および溶滴移行現象を Fig.6 に示す。ワイヤ先端に溶滴が形成され、(Fig.6(b) (1)~(4))、その溶滴が溶融池に短絡し (Fig.6(b) (5)~(6))、約 20ms 後に短絡が開放され (Fig.6(b) (7))、その後、新たな溶滴がワイヤ先端に形成された (Fig.6(b) (8)~(12))。この溶滴形成期間において、溶融池表面は下方に掘下げられているが (Fig.6(b) (2)~(4))、短絡期間では溶滴の移行によって溶融池中央部表面が上方に盛り上がり (Fig.6(b) (5)~(6))、短絡開放後の溶滴形成期間にて再び溶融池表面が掘下げられる現象 (Fig.6(b) (9)~(12)) が観察された。なお、本条件においても母材側壁への溶込みは殆ど形成されなかった。

2.6 ストリーミング移行形態

ソリッドワイヤ $\phi 1.2\text{mm}$ を用い、溶接電流 265A、溶接電圧 39.7V、ワイヤ送給速度 18.0m/min、スラグ浴深さ 29mm とした場合の溶接電流・電圧波形および溶滴移行現象を Fig.7 に示す。本溶接条件では、プロジェクト移行形態 (Fig.4) と比較して溶滴移行に伴う電流・電圧変動が小さく、スラグ浴底部においてワイヤ先端液柱がわずかに揺れながら、液柱もしくは細粒溶滴が連続的に移行する現象が観察された。これはアルゴン比率の高い混合ガスを用いた GMAW で

見られるストリーミング移行形態と類似の溶滴移行現象であると考えられ、ソリッドワイヤ $\phi 1.2\text{mm}$ における高電流・高電圧条件にて頻繁に観察された。なお、本溶滴移行形態では、プロジェクト移行形態と同様に溶融池表面形状が比較的平坦であり、母材側壁には幅方向に溶込みが形成されていた。

2.7 溶接電流・電圧条件に対する溶滴移行形態の分布

FCW $\phi 1.6\text{mm}$ 、ワイヤ送給速度 10.0m/min において、溶接中に溶接電圧を徐々に低下させた場合の溶接電流・電圧波形を Fig.8 に示す。溶接電圧の低下に伴って溶滴移行形態が変化し、電流・電圧波形の変動状況も変化していく様子がわかる。Fig.8 においては、高電圧条件 (39.5 $\rightarrow$ 38.0V) のプロジェクト移行形態からグロービュール移行形態 (37.0 $\rightarrow$ 35.5V) に遷移し、低電圧条件 (35.0V 以下) において短絡移行形態に変化した。同様の実験を種々のワイヤ送給速度条件で実施することによって作成した溶接電流・電圧に対する溶滴移行形態分布図を Fig.9 に示す。FCW $\phi 1.6\text{mm}$ 、スラグ浴深さ 25~30mm において、グロービュール移行形態 (ドロップ移行形態) からプロジェクト移行形態に遷移する ESW の臨界電流は約 280A であった。また、比較

(a) Welding current and voltage waveform

(b) Droplet transfer phenomena images

Fig.7 Welding current and voltage waveforms and droplet transfer phenomena images in streaming transfer mode

Fig. 8 Transition of current and voltage waveforms when the welding voltage is gradually decreased

Fig. 9 Distribution map of droplet transfer mode

として用いたソリッドワイヤ $\phi 1.6\text{mm}$ における臨界電流も同じく 280A 程度であった。ただし、同一電流に対するワイヤ溶融速度が異なっており、FCW はソリッドワイヤと比較して 10~15% 大きかった。また、ソリッドワイヤ $\phi 1.2\text{mm}$ については、Fig. 9 に示した分布図が全体的に低電流・低電圧側にシフトする傾向にあったが、高電流・高電圧領域においては、プロジェクト移行とストリーミング移行が混在しているように観察されることが特徴的であった。したがって、ワイヤ種や径だけでなく、フラックス種や突出し長さ、スラグ浴深さ等の溶接条件が異なれば、Fig. 9 の分布図も変化するものと考えられる。なお、上記の ESW における臨界電流 280A は、同一ワイヤ径を用いた GMAW の臨界電流と比較して明らかに低い。例えば、混合ガス ($\text{Ar}-20\%\text{CO}_2$) を用いた GMAW (ソリッドワイヤ $\phi 1.6\text{mm}$) の突出し長さ

25mm における臨界電流は 340~350A である。これは ESW の突出し長さが一般的な GMAW と比較して長い（本実験では 55~60mm）ことに起因しているものと考えられ、溶滴移行形態が類似していたとしても、ESW におけるワイヤ突出し部の温度分布や溶滴の保有熱量は、GMAW とは大きく異なるものと推測される。

以上の実験により、ESW においても GMAW と同様に、設定した溶接条件によって幾つかの溶滴移行形態が存在することを明らかにした。そして、これらの中で母材側壁への幅方向の溶込みが形成されていたのはプロジェクト移行形態とストリーミング移行形態であった。実施工では $\phi 1.6\text{mm}$ 以上のソリッドワイヤもしくは FCW が使用されることが多く、十分に溶込み幅が確保される溶接条件が選定される。これらは本実験条件よりもやや高電流条件のものも含まれ

るが、その溶接電流・電圧波形はFig.4(a)やFig.7(a)と類似した挙動を呈しており、実施工において採用される溶接条件では、必然的にプロジェクト移行もしくはストリーミング移行形態になっているものと考えられる。

3. スラグ浴内の温度測定

3.1 実験方法

Fig.3に示した試験体において、観察方向に配置した鋼板の断面に上方から下方に斜めに貫通する挿入孔($\phi 1.2\text{mm}$)を形成し、先端以外をハフニア管で被覆されたW5%Re-W26%Re熱電対($\phi 0.25\text{mm}$)を挿入してワイヤ側方かつ母材側壁から3mmの位置となるように固定した。高輝度X線透過型高速度イメージング装置を用い、熱電対の測温点をスラグ浴が通過していく過程を撮像しながら、その温度を

同期測定した。なお、溶接材料は2章と同一のFCWと溶融フラックスを用い、溶接条件は溶滴移行がプロジェクト移行形態となる条件(溶接電流320A, 溶接電圧39.3V, ワイヤ送給速度10.0m/min)とし、スラグ浴深さを28mmとした。

3.2 スラグ浴内の温度測定結果と分布推定

Fig.10にスラグ浴の温度測定結果を示す。スラグ浴表面近傍の温度は約1600Kであり、スラグ浴深さ5mm程度の領域において、1800K程度まで温度上昇した。その後、スラグ浴深さ17mmまでの領域においては温度勾配が小さく、1700~1900Kを呈していた。そして、溶込み幅が形成され始める位置の約6mm上方より再び温度が上昇し、スラグ浴深さ22~23mmの位置において2000Kを超える温度まで測定されたが、スラグ浴底部において熱電対が溶損し、測定不可能となった。同様の実験を複数回実施したが、いずれ

Fig.10 Temperature profile in the slag bath along the depth direction

Fig.11 Temperature of the bottom part in the slag bath just after the stop of welding current

Fig.12 Illustration of temperature distribution in the slag bath

もスラグ浴底部にて熱電対が溶損してしまうことが繰り返された。そこで、溶接電流遮断直後にスラグ浴底部まで熱電対を挿入し、浴底部の温度測定を試みた。測定結果をFig.11に示す。本手法では熱電対は溶損せず、その温度が約2300Kに測定されたことから、溶接中のスラグ浴底部の温度は、少なくとも2300Kを超える高温になっているものと考えられる。Fig.12に本実験で測定されたスラグ浴内温度分布の模式図を示す。スラグ浴底部の温度が最も高くなっていることは、ワイヤ先端部付近からスラグ浴底部における電流密度が高いことを示唆するものである。一方、その上方から中央部分の大半の溶融スラグは鉄の融点近傍の温度を呈しており、スラグ浴深さ方向における温度勾配も小さい。これは後述するスラグ浴内対流によって、ワイヤ側方を溶融スラグが回転循環していることに起因するものと考えられる。なお、Fig.12はプロジェクト移行形態となる本実験条件での測定結果であるが、溶融スラグの種類や溶接条件によっては、この温度分布が変化し、スラグ浴内における電流経路や溶滴移行形態も変化するものと考えられる。

4. スラグ浴内の電位測定

4.1 実験方法

3章と同様に、観察方向に配置した鋼板の断面に上方から下方に斜めに貫通する挿入孔($\phi 2.0\text{mm}$)を形成し、先端以外をハフニア管で被覆したタングステン電極($\phi 1.0\text{mm}$)を挿入して、その先端がワイヤ側方2.5mmの位置となるように固定した。高輝度X線透過型高速度イメージング装置を用い、タングステン電極先端をスラグ浴が通過していく過程を撮像しながら、コンタクトチップ-スラグ間電位、スラグ-母材間電位を同期測定した。次に、タングステン電極先端がワイヤ側方9.8mmの位置となるように固定して同一

溶接条件にて電位測定した。なお、溶接材料は2および3章と同一のFCWと溶融フラックスを用い、溶接条件は溶滴移行がプロジェクト移行形態となる条件(溶接電流320A、溶接電圧39.4V、ワイヤ送給速度10.0m/min)とした。それぞれの実験時におけるスラグ浴深さは30および31mmであった。

4.2 スラグ浴内の電位測定結果と分布推定

Fig.13および14にスラグ浴の電位分布測定結果を示す。なお、図中の黒線は測定データを平均化処理したものである。(a)がコンタクトチップ-スラグ間電位、(b)がスラグ-母材間電位であり、それぞれのスラグ浴深さにおける(a)と(b)の和は溶接中におけるコンタクトチップ-母材間電位39.4Vと概ね等しい。また、スラグ浴の深さ方向に対して、これらの電位傾度は一定ではなく、更に、幅方向の異なる測定位置においても電位変化過程の様相は明らかに異なっていることがわかる。例えば、Fig.13(b)のワイヤ近傍におけるスラグ-母材間電位は、スラグ浴深さ5mm程度までの領域において11Vから8V程度まで低下したが、その後、スラグ浴深さ13mm程度までの電位変化は大きくない。そして、スラグ浴深さ15~30mmにおいて電位傾度が再び増加し、約0.35V/mmと概ね一定値を呈した。一方、Fig.14(b)の母材近傍におけるスラグ-母材間電位では、スラグ浴深さ8mm程度までの領域において12Vから5V程度まで急激に低下するが、その後、スラグ浴深さ15mm程度までの電位に大きな変化は認められない。そして、スラグ浴深さ15~30mmにおける電位傾度は約0.23V/mmとなり、Fig.13(b)のワイヤ近傍における測定結果と比較して勾配が緩やかであることがわかる。なお、Fig.13(b)のスラグ浴深さ30mm(スラグ浴とメタル浴の境界)において、1.0V弱の電位差が認められており、溶融スラグと溶融金属の境界において何ら

(a) Voltage between contact tip and slag

(b) Voltage between slag and base metal

Fig.13 Potential profile in the slag bath along the 2.5mm line from the wire

Fig.14 Potential profile in the slag bath along the 9.8mm line from the wire

かの界面電圧の存在が示唆された（一方、Fig.14(b)では明確な電位差は認められなかった.）.

次に、Fig.13(a)および14(a)におけるスラグ浴深さと平均化処理したコンタクトチップ-スラグ間の電位情報を用いて、同一電位を呈したプロット間を直線で結び、スラグ浴深さに対する等電位線とした。結果をFig.15の左側に示す。なお、右側には同一溶接条件で測定された温度分布を示す。ここで、ワイヤ先端部付近の等電位線に着目し、これらと直交する方向に表記した曲線矢印の方向が電流線に近いものであるとすると、溶接電流はワイヤ先端部付近からスラグ浴底部に向かって放射状に拡がって流れるように示された。本実験結果は安藤ら¹⁴⁾が推定した電流経路を裏付けるものであると共に、ESWにおいてもGMAWと同様に、溶滴に電磁ピンチ力が作用して溶滴移行形態を変化させることを示唆する結果である。すなわち、溶融スラグの電気伝導性は高温で向上する性質がある²⁰⁾ため、ワイヤ先端部付近における1900K以上の高温領域からスラグ浴底部に溶接電流の大半が集中することになり、スラグ浴底部の溶融スラグは自身の抵抗発熱により局所的に加熱され、2300Kを超える高温になるものと考えられる。そして、本実験条件のように、その高温部に集中する溶接電流がワイヤ先端部付近からスラグ浴底部に向かって放射状に拡がる場合、ワイヤ先端には溶滴を離脱させる方向に電磁ピンチ力が作用し、混合ガスを用いたGMAWで見られるようなプロジェクト移行形態（Fig.4）を呈するものと考えられる。一方、電圧が低い場合等は、Fig.15と比較してワイヤ先端部がスラグ浴底部に近づき、溶接電流の拡がり小さくなるものと考えられ、この場合、溶滴を押し上げる方向に電磁力が作用する結果、炭酸ガスを用いたGMAWで見られるようなグロービュール移行形態（Fig.5）になるものと考えられる。このように、溶接条件がワイヤ先端位置とスラグ浴内の温度

Fig.15 Equipotential line and current path in the slag bath

分布を変化させ、これらの相互作用によってスラグ浴内における電流経路と溶滴移行形態が決定されるものと考えられる。

5. スラグ浴内対流の観察

Fig.15に示したように、溶接電流がスラグ浴底部に向かって放射状に拡がって流れるものとする、ワイヤ先端部付近はスラグ浴底部と比較して電磁圧力が高くなり、この圧力差に起因してスラグ浴内に対流が生じるものと考えられる。そこで、ここでは高輝度X線透過型高速度イメージング装置を用いたスラグ浴内の観察実験の中で、このスラグ浴内対流を捉えた事例について述べる。Fig.16は3章のスラグ浴内温度測定実験（溶接電流320A、溶接電圧39.3V、ワ

ワイヤ送給速度 10.0m/min, スラグ浴深さ 28mm) において, スラグ浴底部にて溶損した熱電対の測温点がスラグ浴内の対流によって運ばれ, ワイヤ右側方のスラグ浴底部を反時計回りに回転する様子である. Fig. 16(a)でワイヤ先端付近に存在した測温点が30ms後の(d)にはスラグ浴底部に移動し, 方向を転じて80ms後の(i)には再びワイヤ先端付近まで戻ってきており, その移動速度は100~200mm/sであった. 次に, Fig. 17はワイヤ先端付近で発生した気泡がスラグ浴底部を回転移動した後, 上方に浮上していく過程を捉えたものである(溶接電流 320A, 溶接電圧 39.3V, ワイヤ送給速度 10.0m/min, スラグ浴深さ 35mm). Fig. 17(a)において, スラグ浴底部から上方に移動した気泡は, (b)でスラグ浴表面から深さ方向に17mm程度の位置まで一旦浮上し, (c)および(d)で再び底部へ向かって下降した. そして, (f)でスラグ浴深さ20mm程度の位置まで再度浮上後, (g)でもう一度, 底部へ下降し, 最終的に(h)~(j)のように浮上放出された.

これは Fig. 18 の模式図に示すように, 実線矢印(a)において, 高温の溶融スラグが浴底部を高速度で回転運動するのに伴い, 点線矢印(b)のように, 一部の溶融スラグは母材壁付近から中・上方部へも輸送され, ワイヤ近傍においては逆に中・上方部から浴底部へ向かって引込まれるような回転循環の存在を示唆するものである. このようなスラグ浴底部と中・上方部における溶融スラグの循環により, スラグ浴の温度勾配は単調減少とならず, 中・上方部における大半の溶融スラグ温度は1700~1900Kの概ね一定温度に維持されるものと考えられる. なお, 安藤ら¹⁴⁾は, この高温スラグの対流によって溶込み幅が形成されることを推定しており, Oginoら²¹⁾は, 耐熱ガラス越しの現象観察と数値シミュレーションにより, 溶融スラグの流動に加えて溶融金属の流動も溶込み形成に寄与している可能性を示している. 本観察実験においても, スラグ浴内の高速対流が生じている領域(スラグ浴底部)にて母材側壁に溶込み幅が形成され始めて

Fig. 16 Behavior of the tracer carried by the convection in the slag bath

Fig. 17 Behavior of the bubble carried by the convection in the slag bath

Fig.18 Illustration of the convection in the slag bath

いることから、このスラグ浴内における対流熱輸送が溶込み形成に大きく影響を及ぼしていることは間違いないものと考えられ、溶込み形成現象も溶滴移行現象と同様に、ワイヤ先端位置や浴内温度分布、電流経路等の相互作用の結果として理解できる。すなわち、プロジェクト移行形態 (Fig.4) やストリーミング移行形態 (Fig.7) では、Fig.15のように溶接電流がスラグ浴底部に向かって放射状に拡がって流れる結果、Fig.18(a)のように高温の溶融スラグによる浴底部の高速回転対流を誘起し、母材側壁には溶込み幅が形成される。一方、グロビュール移行形態 (Fig.5) や短絡移行形態 (Fig.6) では、ワイヤ先端位置がスラグ浴底部に近づくため、溶融スラグの高温領域および溶接電流経路がスラグ浴底部の中央に狭められるものと推定される。このように電流経路の拡がり小さくなると、電磁力は溶融池を掘下げるように作用するが、Fig.18(a)のような幅方向に拡がるスラグ浴内対流は殆ど生じず、母材側壁にも溶込み幅が形成されなくなるものと考えられる。

以上の実験結果から、スラグ浴および溶融池の上昇に適応して溶接トーチを上昇させながら、スラグ浴内におけるワイヤ先端位置を適切に制御することがスラグ浴内温度分布や電流経路を維持することに繋がり、これがESWの更なる自動化レベル向上に向けた基本方針になるものと考えられる。そして、そのスラグ浴内におけるワイヤ先端位置は、ワイヤ送給速度とワイヤ溶融速度のバランスによって決定されるものであるため、次章では、ワイヤ溶融速度に及ぼす突出し長さおよびスラグ浴深さの影響について検討する。

6. 突出し長さおよびスラグ浴深さが溶接電流およびワイヤ溶融速度に及ぼす影響

6.1. 実験方法

まず、溶接電流とワイヤ溶融速度の関係について、エレクトロガスアーク溶接法 (以下、EGW) とESWを比較する。ここで、600 mmL × 300 mmW × 35mmT のJIS G3106

SM490Aを供試鋼板として用い、開先角度30° V開先、ルートギャップを10mmとし、ルート側に固形フラックス裏当て材、表側に水冷摺動銅板を配置した。EGW用の溶接ワイヤはJIS Z 3319 YFEG-22Cに該当するFCWφ1.6mmを用い、シールドガスは100%CO₂とした。ESWでは前章までと同一のFCWφ1.6mmおよび溶融フラックスを用いた。なお、水冷摺動銅板を用いたESWでは、表ビード表面を覆うスラグが銅板と表ビードの隙間から常に排出されるため、本実験ではスラグ浴深さがおよそ25mmとなるように、フラックスを適宜供給しながら溶接を行った。また、本実験ではEGWの突出し長さを35mmとし、ESWではコンタクトチップ-スラグ浴表面間距離 (以下、Dry Ext.) を35mmとした。

次に、ESWのワイヤ溶融速度に及ぼす全突出し長さの影響を把握するため、Fig.3と同様の試験体を用いて溶接を行い、トーチを強制上昇後に停止させることによって全突出し長さを溶接中に変化させた。すなわち、一旦、全突出し長さは長くなるが、その後は溶融池およびスラグ浴が上昇してくるにもかかわらず、トーチは停止しているため、全突出し長さが徐々に短くなっていくという過程を高輝度X線透過型高速度イメージング装置にて撮像し、全突出し長さのうち、Dry Ext.とスラグ浴表面-ワイヤ先端間距離 (以下、Wet Ext.) の変化をそれぞれ得られた画像から測定すると共に、溶接電流も同期測定した。なお、6.2節Fig.20~22の実験ではワイヤ送給速度9.0m/min、溶接電圧38.2V、スラグ浴深さを30mmとし、6.3節Fig.23の実験ではワイヤ送給速度10.0m/min、溶接電圧39.1Vにおいてスラグ浴深さを19, 27, 37mmと変化させた。

6.2 突出し長さが溶接電流およびワイヤ溶融速度に及ぼす影響

Fig.19にEGWとESWにおける溶接電流とワイヤ溶融速度の関係を示す。一般的にEGWでは定電圧特性の溶接電源を用いて、溶接電流が概ね一定となるように上昇速度を制御するため、突出し長さは実施工において重要なパラメータである。一方、ESWにおいても同様に突出し長さは重要なパラメータであるが、通常は溶接中のWet Ext.を常時確認することは困難であるため、Dry Ext.を施工上の管理パラメータとせざるを得ない。そこで本実験ではEGWにおける突出し長さとESWにおけるDry Ext.を共通条件 (35mm) とした。本実験条件の場合、同一溶接電流におけるワイヤ溶融速度はESWの方が高くなり、高電流域でその差も大きい。例えば、溶接電流400Aで比較すると、ESWはEGWと比較して約30%も溶融速度が大きくなった。

次に、トーチを強制上昇後に停止させ、全突出し長さ (Dry Ext. + Wet Ext.) を変化させた場合におけるDry Ext.およびWet Ext.の変化過程と溶接電流の変化過程をFig.20に示す。図中(a)の状態からトーチを強制上昇させて(b)の状態とした際、全突出し長さは(a)48mmから(b)73mmに長くなり、溶接電流は(a)約320Aから(b)約270Aに低下した。このとき、

Dry Ext. が(a)21mm から(b)53mm に長くなるのに伴い, Wet Ext. は(a)27mm から(b)20mm に短くなり, スラグ浴中におけるワイヤ先端位置が上方へ移動した. その後, トーチ上昇を停止させて(c)の状態となった際, 全突出し長さは再び(c)48mm に短くなり, 溶接電流も(c)約 320A まで増加した. このとき, Dry Ext. も(c)21mm まで短くなると共に, Wet Ext. は(b)20mm から(c)27mm へと長くなり, スラグ浴中におけるワイヤ先端位置は浴底部へ移動した. 本実験における(b)および(c)の状態におけるスラグ浴内の X 線透過画像を Fig. 21 に示す. (b)に示すように溶接電流の低下と共に, ワイヤ先端位置がスラグ浴上方に移動すると, スラグ浴内における電流経路や対流も変化してしまうものと考えられ, (c)と比較して幅方向への溶込みを確保できなくなっていることがわかる. 以上の実験結果から, ESW においては, 溶

融池の上昇速度に適応して溶接トーチを上昇させると共に, スラグ浴内におけるワイヤ先端位置と溶接電流を適切に制御することが極めて重要であることが示唆される. 更に, 実施工においては, 溶接中に突出し長さを変更せざるを得ない場面も多く, このような場合でも作業者の経験や感覚に頼ることなく, 溶込み幅や母材希釈率を安定化させるための高度な溶接条件適応制御機能が今後の自動化レベル向上に必要となるであろう.

上記の観察実験により得られたワイヤ送給速度 9.0m/min の条件における ESW の全突出し長さと溶接電流の関係および EGW における突出し長さと溶接電流の関係 (ワイヤ送給速度 9.0 および 10.7m/min) を Fig. 22 に示す. Fig. 19 (EGW における突出し長さと ESW における Dry Ext. を共通条件とした場合) において, 同一ワイヤ送給速度における溶接電

Fig. 19 Relationship between welding current and wire melting rate

Fig. 20 Change of welding current related to the change of wire extension

流はESWの方が低かったが、Fig.22において、同一の全突出し長さ(ワイヤ送給速度9.0m/min)で比較すると、EGW(▲プロット)と比較してESW(◆プロット)の方が高い溶接電流を要することがわかる。また、同一溶接電流かつ同一突出し長さで比較すると、EGW(●プロット)と比較してESW(◆プロット)のワイヤ溶融速度は1.7m/min低い。なお、突出し長さの変化に対する溶接電流の変化比率は両溶接法で大差は無く、1.5~3.0A/mmであった。4章において、ESWにおける溶接電流の大半はワイヤ先端部近傍から流出していることを述べたが、全電流がワイヤ先端から流出するわけではなく、Wet Ext.中からも少なからずスラグ浴内へ電流が流出していることを考慮すると、同一溶接電流かつ同一突出し長さのEGWと比較して、ESWにおけるワイヤ自身のジュール発熱量は小さくなるものと考えられ、これがワイヤ溶融速度の違いに影響を及ぼしている可能性がある。なお、EGW含めたGMAWにおけるワイヤ溶融速度は、

突出し長さ部におけるワイヤ自身のジュール発熱量とワイヤ先端におけるアークからの入熱の和によって決定されることが知られている²²⁾。一方、ESWにおけるワイヤ溶融速度の支配因子は、全突出し長さ部におけるワイヤ自身のジュール発熱量とスラグ浴内における溶融スラグからWet Ext.部への熱伝導、ワイヤ-スラグ間に存在する界面電圧に起因したジュール発熱等であると考えられるが、現状、ESWにおけるワイヤ溶融機構の詳細は明らかになっていない。したがって、上述の全突出し長さ部におけるジュール発熱量の違いのみではEGWとESWのワイヤ溶融速度の違いについて深く言及することは困難であり、これらは今後の研究課題である。

以上の実験により、同一溶接電流かつ同一突出し長さで比較すると、EGWと比較してESWのワイヤ溶融速度はやや低くなるものの、突出し長さの変化に対する溶接電流の変化比率は両溶接法で大差無いことが明らかとなった。し

Fig.21 Change of wire tip position and welding current related to the change of wire extension

Fig.22 Relationship between total extension and welding current

Fig. 23 Relationship between total extension and welding current

たがって、スラグ浴内への電流流出状況（突出し部のジュール発熱量）が溶接中に大きく変化しない状況下であれば、GMAW（EGW 含む）と同様に、突出し長さ、溶接電流、ワイヤ溶融速度の関係を予め導出しておくことによって、ワイヤ送給速度とワイヤ溶融速度をバランスさせながら装置の上昇速度を制御することも可能であると考えられる。

6.3 スラグ浴深さが溶接電流およびワイヤ溶融速度に及ぼす影響

前節で述べたワイヤ自身のジュール発熱量は、スラグ浴深さおよび Wet Ext. の変化によっても変化する可能性が考えられるため、ここでは同一ワイヤ送給速度条件において、スラグ浴深さが溶接電流に及ぼす影響について検討する。ワイヤ送給速度 10.0m/min、スラグ浴深さ 27mm において、6.2 節と同様の方法により測定した全突出し長さと溶接電流の関係を Fig. 23 の△プロットで示す。また、同じくワイヤ送給速度 10.0m/min において、スラグ浴深さを 19, 27, 37mm と変化させた場合の全突出し長さと溶接電流の関係を同図に●プロットで示す。これら●プロットに着目すると、スラグ浴深さの変化に伴って全突出し長さが変化し、溶接電流もわずかに変化してはいるものの、その変化量は 0.5A/mm 程度であり、スラグ浴深さ 27mm において全突出し長さのみを変化させた場合の電流変化（△プロット；2.6A/mm）よりも明らかに小さい。これは同一の全突出し長さであっても、スラグ浴深さおよび Wet Ext. の変化に伴いワイヤ自身のジュール発熱量が変化するというを示唆する結果と考えられる。すなわち、スラグ浴深さの変化がワイヤ溶融速度を変化させるということになる。ここで、Fig. 23(a)~(e) における X 線透過画像を Fig. 24 に示す。(a) と比較して (b) および (c) はスラグ浴深さ 27mm において全突出し長さを変化させたものであるが、主に Dry Ext. が変化するのに伴いワ

イヤ自身のジュール発熱量が変化して溶接電流も変化している。一方、(b) と (d) を比較すると、全突出し長さは同一であるが、(d) はスラグ浴深さが浅くなり、Dry Ext. が長くなると共に Wet Ext. が短くなっている。その結果、(d) ではより多くの電流がワイヤ先端付近から流出するようになり、ワイヤ自身のジュール発熱量が増加するため、(b) ほどの電流増加を必要としないものと考えられる。また、(c) と (e) を比較すると、全突出し長さは同一であるが、(e) はスラグ浴深さが深くなり、Dry Ext. が短くなると共に Wet Ext. が長くなっている。その結果、(e) では Wet Ext. 中からスラグ浴へ流出する電流がより多くなるものと考えられ、ワイヤ自身のジュール発熱量が減少するため、(c) ほどには電流低下しないものと推定される。ただし、スラグ浴深さの変化に伴い、スラグ浴の平均温度も変化する可能性が考えられ、その結果、スラグ浴から Wet Ext. 部への入熱が変化すればワイヤ溶融速度にも影響を及ぼすであろうが、詳細は今後の研究課題である。

以上の実験により、スラグ浴深さが変化すると、スラグ浴内への電流流出状況が変化し、突出し部のジュール発熱量も変化する結果、突出し長さ、溶接電流、ワイヤ溶融速度の関係も変化することが明らかとなった。

7. ESW における溶接制御法の課題

2~5 章で示したスラグ浴内現象の観察結果から、溶接条件の設定がワイヤ先端位置とスラグ浴内の温度分布を変化させ、これらの相互作用によってスラグ浴内における電流経路が変化する結果、溶滴移行形態や対流による溶込み形成現象も変化するものが明らかとなった。また、6 章に示した実験結果より、溶融池の上昇速度に適応して溶接トーチを上昇させながら、スラグ浴内におけるワイヤ先端位置と溶

Fig.24 Relationship between depth of slag bath and welding current

接電流を適切に制御することの重要性が示唆された。そして、その上昇速度制御を決定づけるのは、溶接電流とワイヤ溶融速度、全突出し長さの関係であるが、これらの関係性はスラグ浴深さによっても変化することが明らかとなった。なお、ESWの更なる適用拡大のためには、開先の表側もしくは表・裏の両側に水冷摺動銅板等を配置して長尺溶接を可能とする必要性が想定されるが、この場合、スラグが銅板とビード表面の隙間から常に排出されるため、溶接中にスラグ浴深さが変化してしまうことになる。すなわち、従来のESW用装置・制御のままでは、正しい上昇速度制御による長尺溶接は困難であると考えられる。そして、このスラグ排出量は板厚やギャップ・開先形状等によって異なり、それらは溶接線の中でも変動するため、溶接中に何等かの方法を用いて、このスラグ浴深さの変化を検出し、スラグ浴が所定の深さとなるようにフラックスを適宜自動供給する制御の開発が今後の課題であろう。そして、本制御によりスラグ浴深さが一定となれば、全突出し長さと溶接電流、ワイヤ溶融速度の関係を用いることによって、溶融池の上昇に適応した溶接トーチの精緻な上昇速度制御を構築することが可能になるものと考えられる。ただし、施工においては溶接中に突出し長さを変更せざるを得ない場面も多く、このような場合でも作業者の経験や感覚に頼ることなく、溶込み幅や母材希釈率を安定化させる必要があり、上記のスラグ浴深さ一定化制御と上昇速度制御に加え、溶接電流やスラグ浴内におけるワイヤ先端位置を適正に維持するための高度な溶接条件適応制御機能も今後の自動化

レベル向上に向けた重要な課題であると考えられる。

8. 結 論

本研究では、ESWにおけるスラグ浴内現象を明らかにするため、高輝度X線透過型高速度イメージング装置を用いてスラグ浴内を透視観察した。溶接条件が溶滴移行形態に及ぼす影響を整理すると共に、溶接中のスラグ浴内温度分布や電位分布を測定し、これらが溶滴移行現象やスラグ浴内の対流現象に及ぼす影響について考察した。更に、突出し長さとスラグ浴深さがワイヤ溶融速度に及ぼす影響についても検討し、これら結果からESWの更なる高度化に向けた溶接制御法の課題について提言した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) ESWにおいてもGMAWと同様に、設定した溶接条件によって幾つかの溶滴移行形態が存在することを明らかにした。
- 2) 溶滴移行がプロジェクト移行形態となる条件（溶接電流320A、溶接電圧39.3V、ワイヤ送給速度10.0m/min、スラグ浴深さ28mm）において、スラグ浴内の温度分布を測定した結果、スラグ浴の大半の領域は鉄の融点近傍の温度（1700～1900K）を呈しており、スラグ浴底部において2300Kを超える高温状態となっていることを明らかにした。ワイヤ先端部付近からスラグ浴底部における電流密度が高いものと推定される。
- 3) 同じく溶滴移行がプロジェクト移行形態となる条件に

において、スラグ浴内の電位分布を測定した結果、スラグ浴の深さ方向に対して、その電位傾度は一定ではなく、幅方向の異なる測定位置においても電位変化過程が異なっていた。得られた等電位線によると、溶接電流はワイヤ先端部付近からスラグ浴底部に向かって放射状に拡がって流れるように示され、ESWにおいてもガスシールドアーク溶接と同様に、溶滴に電磁ピンチ力が作用しているものと推定された。

- 4) スラグ浴底部のワイヤ側方において高速回転流が観察され、その対流熱輸送が溶込み形成現象に影響を及ぼしていることが推定された。また、一部の溶融スラグは母材壁付近から中・上方部へも輸送され、逆に、ワイヤ側方では中・上方部から浴底部へ向かって引込まれるような回転循環の様子も観察された。
- 5) スラグ浴内現象の観察結果から、溶接条件の設定によってワイヤ先端位置とスラグ浴内の温度分布が変化し、これらの相互作用によってスラグ浴内における電流経路も変化するということが示唆された。そして、この電流経路によって溶滴移行形態や対流による溶込み形成現象が決定され、対流による溶融スラグの回転循環がスラグ浴内における温度分布にも影響を及ぼしていることが推定された。
- 6) EGWにおける突出し長さやESWにおけるDry Ext.を共通条件とした場合、同一溶接電流におけるワイヤ溶融速度はESWの方が高くなる。
- 7) 一方、同一の突出し長さ、同一のワイヤ送給速度で比較すると、EGWと比較してESWの方が高い溶接電流を要し、同一の突出し長さ、同一の溶接電流で比較すると、ESWのワイヤ溶融速度は低くなる。これはWet Ext.部からスラグ浴へ流出する電流によって、突出し部におけるワイヤ自身のジュール発熱量が小さくなることに起因している可能性が考えられる。
- 8) スラグ浴深さを変化させるとWet Ext.も変化し、同一の全突出し長さであってもワイヤ自身のジュール発熱量が変化する結果、スラグ浴深さの変化によっても溶接電流およびワイヤ溶融速度が変化することを明らかにした。
- 9) 今後、ESWの更なる適用拡大のためには、スラグ浴深さを一定に維持するフラックス自動供給制御、溶融池の上昇に適応した溶接トーチの上昇速度制御、突出し長さ変更時においても溶接電流やスラグ浴内におけるワイヤ先端位置を適正に維持するための溶接条件適応制御等の開発と高度化が必要になるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) B.E.Paton : Electroslag Welding(1962), American Welding Society.
- 2) K. Teduka, T. Ouwa : 省力化溶接ハンドブック, Sankaido(1976). (in Japanese)
- 3) M. Inagaki, K. Terai : Procedure of Electroslag Welding, Journal of The Japan Welding Society, 36-11(1967), 1160-1172. (in Japanese)
- 4) T. Wada, M. Namba, T. Tanaka : Welding Consumables for Building and Civil Engineering, Journal of The Japan Welding Society, 59-7(1990), 514-520. (in Japanese)
- 5) JWS / JWES : 溶接・接合技術総論, Sanpo Publications, Inc(2015). (in Japanese)
- 6) F. Matsuda, Y. Kikuchi, A. Hatanaka, S. Fujihira : Effect of Welding Parameters on the Toughness Characteristics of ESW Weld Metal -Toughness distribution of Core and Rim Side in Weld Metal-, Transactions of JWRI, 22-1(1993), 103-111.
- 7) Y. Kitani, R. Ikeda, M. Ono, K. Ikeuchi : Improvement in Weld Metal Toughness in High Heat Input Electroslag Welding of Low Carbon Steel, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 27-3(2009), 240-246. (in Japanese)
- 8) T. Ishii, Y. Song, H. Shimokawa, T. Suzuki, Y. Harada, K. Morita : Relationship of Macro Stress and Maximum Principal Stress on Electro-slag Weld Zone Between Interior Diaphragm and Box Column, Steel Construction Engineering, 23-89(2016), 59-71. (in Japanese)
- 9) W. Bong : Electroslag Welding Makes Comeback for Fabricating Bridges, Welding Journal, 84-2(2005), 48-51
- 10) B. Turpin, D. Danks, W. William : Narrow Gap Electroslag Welding is Process of Choice for Welding San Francisco-Oakland Bay Bridge, Welding Journal, 91-5(2012), 24-31
- 11) Y. Yuan, K. Yamazaki, T. Morimoto : Development of High Efficiency and High Quality Electroslag Welding Process, Preprints for the National Meeting of The Japan Welding Society, 103(2018), 382-383. (in Japanese)
- 12) T. Tsuyama, S. Fukumoto, Y. Ogino, S. Asai : Development of a High Productive Electroslag Welding process, Preprints for the National Meeting of The Japan Welding Society, 103(2018), 384-385. (in Japanese)
- 13) K. Ishizaki, H. Nako, T. Sugimura, Y. Kitagawa : Study on Application of Electroslag Welding to 9% Ni Steel Vertical Joint, Preprints for the National Meeting of The Japan Welding Society, 105(2019), 68-69. (in Japanese)
- 14) K. Ando, H. Wada : Studies on the Electroslag Welding (Report 1) -Penetration Mechanism of Base Metal and Influence of Polarity Effect-, Journal of The Japan Welding Society, 39-7(1970), 669-676. (in Japanese)
- 15) K. Ando, S. Nakata, H. Wada : Studies on the Electroslag Welding (Report 2) -Influence of Welding Conditions on the Penetration of Base Metal-, Journal of The Japan Welding Society, 40-10(1971), 1016-1025. (in Japanese)
- 16) K. Ando, S. Nakata, H. Wada : Studies on the Electroslag Welding (Report 3) -Influence of Electrical Conductance of Flux on the Penetration of Base Metal-, Journal of The Japan Welding Society, 40-11(1971), 1104-1110. (in Japanese)
- 17) K. Ando, S. Nakata, H. Wada : Studies on the Electroslag Welding (Report 4) -Melting Phenomena of Wire in Electroslag Welding-, Journal of The Japan Welding Society, 42-2(1973), 106-113. (in Japanese)
- 18) S. Tashiro, M. Tanaka : Visualization of Welding and Joining Phenomena with X-ray Transmission Systems, Journal of The Japan Welding Society, 82-7(2013), 505-508. (in Japanese)
- 19) K. Ogino, S. Hara : Density, Surface Tension and Electrical Conductivity of Calcium Fluoride Based Fluxes for Electroslag Remelting, Tetsu-to-Hagane, 63-13(1977), 2141-2151(in Japanese)
- 20) S. Hara, H. Hashimoto, K. Ogino : Electrical Conductivity of Molten Slags for Electro-slag Remelting, Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 23(1983), 1053-1058
- 21) Y. Ogino, S. Fukumoto, S. Asai, T. Tsuyama : Direct Observation and Numerical Simulation of Molten Metal and Molten Slag Behavior in Electroslag Welding Process, Welding in the World, 64(2020), 1897-1904.
- 22) A. Lesnewich : Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding Part I-Control of Electrode Melting Rate, Welding Journal, 37-8(1958), 343s-353s.