エレクトロスラグ溶接現象の研究 (第4報)*

—ワイヤの溶融速度—

安藤弘平** 仲田周次*** 和田宏一****

Studies on the Electroslag Welding (Report 4)

—Melting Phenomena of Wire in Electroslag Welding—

by Kohei Ando**, Shuji Nakata*** and Hirokazu Wada****

Abstract

In previous reports, the fundamental mechanism of penetration, and the influence of some welding conditions and electrical conductivity of fused flux on the penetration of base metal are described.

In this paper, the melting speed of wire is discussed from the experimental data. The experimental results are as follows.

Under the constant welding voltage, the welding current and the steeping length of wire increases as the wire feed speed is increased (See Fig. 1 and 3). When the welding voltage is increased, the wire feed speed should be decreased to maintain the constant welding current, and the steeping length of wire decreases (Fig. 2).

For flux III, which has good electrical conductivity only at higher temperature compared to flux II, the wire feed speed is increased compared to the flux II under the given welding voltage and current and the wire steeping of the former is a little deeper than that of the latter. The reason is that the heat energy in a molten slag pool of flux III concentrates remarkably at wire tip which is already mentioned in previous report (See report 3).

The input energy to the wire is estimated from the melting speed assuming the temperature of molten wire to be 1700°C, and the energy is expressed in the form of equivalent voltage. The resistance drop along the wire is also estimated approximately. These are calculated as shown in Fig. 7. The difference of above two voltages gives the equivalent voltage in heating effect of slag on the wire. From Fig. 7 the equivalent voltage is about 2.3V for flux I ($V_f=18V$), 6.8V for flux II ($V_f=36V$) and 8.1V for flux III ($V_f=36V$). It is interesting that the values remain almost constant independently of the current,

When the slag depth is increased, both the wire melting speed and the equivalent voltage increase. This is due to the increase of steeping surface area of wire in spite of the falling down slag temperature.

When the root gap is decreased wire melting speed decreases under the given welding voltage, current and slag depth. We presume that the reason is due to both falling down of the average temperature of slag pool increase of welding speed and the low heat of slag at the upper zone due to difficulty of convection.

本 報 の 内 容

I ワイヤの溶融速度に関する実験結果

前第2²⁾, 3³⁾報では 溶接条件 (負荷電圧, 電流, スラグ浴深さ, フラックスの種類など) を変化した場合の溶接結果のうち, 主として母材の溶込みに着眼して報告

した. その記述のために掲げた図形には ワイヤの送給速度 (すなわち溶融速度) も参考として図の下方に掲げておいたが, 今 重複をいわず, ワイヤの溶融速度に着眼して, 溶接条件を変えた場合の実験結果を示すと Fig. 1~5 のようになる*.

Fig. 1 は 負荷電圧は一定 ($V_f=36V$) として溶接電流を変えた場合の実験結果で, 図の下方に示すように溶接電流が増大すると, ワイヤの送給速度 V_f が増大している ($V_f=2.6\sim 10.8\text{ cm/sec}$ また図にみるようにスラグ浴内へのワイヤの浸漬深さが大となっている).

* ルートギャップを変えた場合については第2報 Fig. 13~16 参照.

*原稿受付 昭和47年5月18日

**正 員 近畿大学理工学部 Member, Faculty of Engineering, Kinki University.

***正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering Osaka University.

****正 員 三菱重工, 広島研究所 Member, Mitsubishi Heavy Industry Co., Ltd.

Fig. 2 は 溶接電流は一定 ($I=350$ A) に保ち、負荷電圧 (V_f) を変えた場合で、図の下部に見られるように V_f が大なるときには ワイヤの送給速度 V_f は小さい ($V_f=3.1\sim4.4$ cm/sec).

Fig. 3 は 電流の種々なる値に対するこれら $V_f=30, 36, 43$ V の場合のワイヤの送給速度を示している.

つぎに Fig. 4 は スラグ浴深さを変えた場合で、図のように 負荷電圧、電流は一定の条件の下で スラグ浴深さが増すと、ワイヤの送給速度は大となっている ($V_f=3.0\sim3.9$ cm/sec).

Fig. 5 は フラックスの種類を変えた場合で、図に見られるように フラックスⅢはⅡよりも少しだけ溶融

Fig. 3 Relation between wire feed speed and welding current.

Fig. 1 Illustration of penetration and position of wire tip when welding current is varied.

Fig. 4 Penetration and position of wire tip when slag depth is varied from 30 to 70 mm.

Fig. 2 Illustration of penetration and position of wire tip when welding voltage is varied.

Fig. 5 Relation between wire feed speed and welding current using fluxes II and III.

速度が大きい (フラックスⅡ, Ⅲについては第3報参照). フラックスⅠについても実験を行なっているが, これについては後掲 Fig. 8 参照.

なお図の再掲載は省略したが, ルートギャップを 35 → 15 mm に減らすと, ワイヤの溶融速度も少しだけ減少することが判明している (第2報 Fig. 15 参照).

II ワイヤの溶融速度についての考察

(a) Fig. 1 の考察

Fig. 1 に示される現象は「一定負荷電圧の下で電流が増大すると, ワイヤの送給速度 V_f が増大し, またスラグ浴内への浸漬深さも増す。」と記述できるが, つぎのように表現を改めた方が現象論的にわかりやすい. すなわち「一定負荷電圧の条件下でスラグ溶接を行なうとき, ワイヤの送給速度を増大してやると, ワイヤ浸漬深さは増し, 溶接電流も増す。」

上述の ワイヤ送給速度と浸漬深さ, 溶接電流 (すなわちワイヤの浸漬部からスラグ浴へ流出する電流の総量) との関係は スラグ浴内の温度分布, 温度によるスラグ浴の電気伝導度の変化などのために, これを定量的に論考することはむづかしいが, 定性的にはつぎのように理解できる.

いま スラグ溶接が一定条件下で連続的に行なわれており, 準定常状態に達しているものとし, そのとき突然にワイヤの送給速度を増大したと仮定して, その結果生ずる事象を考えてみる. しかれば まず初めに生起するのは ワイヤの浸漬深さの増大である. このとき もしも電源の電圧・電流特性が Fig. 6(a) のように定電流特性で, 初めの動作点が P_1 にあったとすると, 浸漬深さの増大によってワイヤ・母材間の電気抵抗が減少して, 動作点はたとえば P_2 に移る*. 定電流特性のために負荷端子電圧が減少するだけで電流は増さない. 電圧が低下するので電源からの入力力は減少する.

一方 ワイヤの送給速度は増加したのであるから, ワイヤの溶融に消費されるエネルギーは増大し, 結局 スラグ浴温度は しばらくの後は低下するはずである. 浴の温度が低下すると ワイヤの溶融は困難となり, 浸漬深さは初めに仮定した増加分よりさらに増加してワイヤの溶融平衡が維持される** (このとき 場合によると

a) Drooping characteristic b) Constant potential characteristic

Fig. 6 Illustration of working point

ワイヤ先端はスラグ浴底部の溶融池に接触短絡することが起るかも知れない).

もしも電源特性が Fig. 6(b) のような定電圧特性ならば, ワイヤの送給速度を急増せしめたとき, 動作点は (b) 図の P_1 から P_2 に移り, 電流が増加する. その結果電源からの入熱が増し, スラグ浴温度の低下を抑制する. 抑制するだけでなく 入熱の増大のためスラグ浴温度が増すか否か? これにともなう浸漬深さも初めの値よりも かえって減少するのではないか? などの問題は スラグ浴の導電性の温度負特性とからんで極めて興味ある研究問題であるが, 残念ながら著者らは現在この関係を明確に究明・理解していない. ただ送給速度を増せば浸漬深さも増すことは Fig. 1 に見るとおりである***.

(b) Fig. 2 の考察

つぎに $I = \text{一定 (350 A)}$ の条件下で負荷端子電圧 (V_f) を増大した場合を考えると, Fig. 2 に見るように V_f の増大とともにワイヤ送給速度 (V_f) は低下し, 浸漬深さも減少している.

ウカツに考えると, $I = \text{一定}$ として V_f を増大すると入熱が増大したのであるから, ワイヤの溶融速度も増加するかと考えられるが, 事実は逆である. ただし母材の溶込みは図にみるように V_f の増大 (入熱の増大) とともに実験範囲では増大している.

さて Fig. 2 に見る実験結果のうち V_f を高くすると浸漬深さが減少することは つぎのように容易にうなずける. すなわち浸漬深さが元のままで 端子電圧が増大した状態を考えると, 当然 ワイヤからスラグ浴へ流出する電流は V_f に比例して増大してしまう. これがため入熱が増し, 温度 したがって導電度が上昇し, 電流の

* Fig. 6 において 原点 O と動作点 P とを結ぶ直線が横軸となす角を α とするとき 抵抗は $\tan \alpha$ で示される.

抵抗 = 電圧 / 電流 = $\tan \alpha$

** 温度が低下すると, スラグの導電性が悪くなる. 第3報 Fig. 2 参照. その結果 浸漬深さは増加したままでも 動作点は P_2 から P_1 の方へ戻る. つまり定電流特性の電源では 入熱が増加し, 浸漬深さの増大を抑止するように働く. この点はずの定電圧特性の電源の場合に温度が低下した場合は全く逆である.

*** ワイヤの送給速度を増すと, ワイヤの浸漬深さが増し, いかなる特性の電源においても電流が増加することは 云わばスナオに考えれば当然のことで, あえて論をまたないことであるが, それは安定な動作を前提とした考え方で, 安定, 不安定を考察するとむづかしくなるのである.

増大は初めに考えたよりもさらに増大する。したがって電流 I を元の値に保つためには 浸漬深さが小さくなっていなければならない。

上述のように V_f を大にしたとき、同一電流の条件下では 浸漬深さが小さくなる理由は簡明であるが、この場合 ワイヤの送給速度 V_f も小さくしなければならぬ件の論考は簡明ではなく、著者らは現在これを明快には論証し得ない*。

(c) Fig. 4 の考察

負荷端子電圧 V_f 、電流 I を同一としてスラグ浴深さを変えた場合の実験結果は Fig. 4 に見られるとおりで、スラグ浴深さが大きいと 浸漬深さも深く ワイヤ送給速度も大きい。

すでに第 2 報で述べたとおり このときワイヤ中の電流は主としてワイヤ下端部からスラグ浴へ流出するので、底部のスラグ浴間隙が (a), (b), (c) においてほぼ同一となり、したがってスラグ浴深さの大きいものほど 浸漬深さも大となるのである。Fig. 4(c) では (a), (b) に比べて当然スラグ浴の平均温度は低いと考えられる。それ故にワイヤがスラグ浴内に存在する時間（浸漬深さ÷送給速度）は (c) において最大となる。しかしもし (c) の送給速度が (b) のそれと同一であるとすれば、スラグ浴内での浸漬時間が長くなりすぎて、その結果浸漬深さは減少し、所定の電流が流れ得なくなると推察される。

ただし上の所論は (c) の送給速度が (b) よりも大となることを明確に論考し得たものではない。論考するにはスラグ浴内の温度分布、ワイヤの溶融機構を究明せねばならぬが、読者もおわかりのとおり それはむづかしい。

(d) ルートギャップを狭くすると ワイヤの溶融速度が低下する件

第 2 報 Fig. 14, 15 には 電圧、電流は一定でルー

* ワイヤ送給速度を小さくすれば、スラグ浴温度を一定とする条件下では 浸漬深さは明らかに減少する。しかしここでは V_f を増大しているので、スラグ浴温度が上昇している。それ故に一定送給速度の条件下でも浸漬深さは減少する。恐らくスラグ温度の増大の程度は少なく、その結果 V_f が増大して浸漬深さを小さくするためには 送給速度は減少せしめなければならないのであろう。

いま仮にスラグ浴内の温度は Fig. 2 の (a), (b), (c) においてあまり差がないと仮定すると、ワイヤがスラグ浴に浸漬して溶融温度に達するには 一定時間を必要とする。すなわちワイヤがその先端の点に至るまでの経過時間は (a), (b), (c) において同一となるはずで、これを浸漬深さ (35, 40, 47 mm) と送給速度 (3.1, 3.7, 4.4 cm/sec) とから検討してみると、ほぼ同一の条件が成立している。

また電流は浸漬ワイヤ表面からスラグ浴へ水平方向にのみ流れるものと仮想すると、 I —一定 (350A) の条件下では 浸漬深さは電圧 V_f に反比例するはずで、図に記す実験データを検討してみても大体この関係が満足されている。ただ (c) では (a), (b) に比べて浸漬深さが上の考え方による値より小さい。これはワイヤ先端がスラグ浴底部に近く、下方へ流出する電流がいちじるしく大きくなるためであるとして理解されよう (第 2 報 Fig. 7, 8 参照)

トギャップを 35, 25, 15 mm に変化した場合の実験データを示しているが、それによると (この実験範囲内では) ルートギャップが狭いときに ワイヤの送給速度 (溶融速度) が多少低くなっている。溶接条件を変えた場合のワイヤの溶融速度の変化は (c) 項の考察に述べたように たとえ定性的にでもその判定、説明が困難な場合があり、このルートギャップの影響の考察も同様である。恐らくはルートギャップが狭いと ワイヤ端の高温スラグ対流がスラグ浴上層に拡散せず、上層部の温度が低くなるために ワイヤが予熱されることが少ないので 溶融速度が低下するのであろう。もっとも さらにルートギャップが狭くなると、ワイヤの途中から電流が母材側壁へ向って流出し、上層部が加熱されるので、ワイヤの溶融速度はかえって上昇する可能性も考え得る。一方 ワイヤ中の電流による抵抗発熱は減少する。いずれにしても単なる机上の定性的考察だけでは判定できない。

(e) Fig. 5 の考察

Fig. 5 に見られるように フラックスⅢの方が 同一電流の条件においてワイヤの溶融速度は少し高い。第 3 報に述べたようにフラックスⅢはⅡに比べて 高温においてのみ電気伝導度を有するものである。ワイヤの先端はスラグ浴底部の溶融金属池に近く、浴の上層部は低温であり、発熱はワイヤ先端に集中している。上層部が低温で、ワイヤが予熱される程度が少ないのに溶融速度が大となるのは 一見 (d) の考察とむじゅんするかのよう考えられるが、ワイヤ先端部附近の高温の程度がいちじるしくなっているためと推察される。

III ワイヤの溶融速度のエネルギー的考察

(a) 比溶融量、溶融の等価電圧

Fig. 3, 5 を見ると、負荷端子電圧 V_f が一定の条件下では ワイヤの送給速度は電流に比例するよりは少し速く増大している。 V_f —一定の条件では 電源からの入熱は電流に比例して変化するのであるから、もしもワイヤの溶融速度 (送給速度) が電流に正比例して変化するものとすれば、溶融現象は簡明であるが、実際には上述のように 溶融速度は電流よりも速く増大しており、ワイヤ溶融の考察は複雑である。

さて スラグ溶接ではなく、アーク溶接では

(イ) 溶接棒の溶融速度は大体電流に比例し、1Amp. 1 sec. 当りの溶接棒の溶融重量—比溶融量—が電流に無関係にほぼ一定となり、

(ロ) また自動溶接のようにワイヤの電流密度の大きい場合には、ワイヤ中の抵抗発熱のために この比溶融量が電流とともに増大する。

ことが知られている。スラグ溶接についてこの比溶融量 (1Amp. 1sec. 当りのワイヤの溶融重量) を実験データから検討してみると、つぎのようにアーク溶接の場合と似た傾向が認められる。

Fig. 7 はこれを示すもので、横軸は溶接電流を示し、縦軸左側スケールのうち 内側のものは Amp・sec 当りのワイヤ溶融長さ (cm/Amp・sec) を、外側スケールはワイヤ断面 (ワイヤ径; 3.2mm) と比重とから 比溶融量 (g/A・sec) を計算したものである*。図中曲線のうち上2つは フラックスⅢ, Ⅱについて $V_f=36V$ の条件下の実験データ (Fig. 5) から計算したものである。フラックスⅠは $V_f=18V$ の場合のデータである。

Fig. 7 Specific melting rate and equivalent voltage of wire melting when welding current is varied.

つぎに Fig. 7 の右側縦軸は 左側の比溶融量に対応する等価電圧を示しており、ワイヤの溶融鋼は 1700°C でワイヤ端から離脱してゆくものと仮定して次の公式によって算出したものである**。

$$V_m = 1.49 m \quad (m: \text{mg/coul.}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

(b) ワイヤ中の抵抗電圧降下

つぎに Fig. 7 の下方の点線は ワイヤ中の抵抗電圧

* たとえば Fig. 5 に見るようにフラックスⅢの場合、 $I=600\text{A}$ に対するワイヤ送給速度は

$$V_f = 8.1 \text{ cm/sec}$$

したがって 1Amp. 1sec 当りの溶融長さは

$$l = 8.1 + 600 = 1.35 \times 10^{-2} \text{ cm/A} \cdot \text{sec}$$

ワイヤ径は 3.2mm であるので、比溶融量は

$$m = \frac{\pi}{4} \times 3.2^2 \times 1.35 \times 10^{-2} \times 7.8 = 8.46 \times 10^{-3} \text{ g/A} \cdot \text{sec}$$

** 安藤, 長谷川共著「溶接アーク現象」8.3.6 参照。

降下の推定値を示すもので、脚注に誌すような仮定に基づいて計算したものである。この推算は必ずしも実情に即した正確なものではなく、いわば大まかなものであるが、図に見るように 曲線Ⅰ, Ⅱ, Ⅲの傾斜が 偶然 (?) この抵抗電圧曲線の傾斜に一致していることは注目に値する****。

(c) スラグ浴からの受熱エネルギーの等価電圧 (V_{ms})

上に述べたように Fig. 7 では フラックスⅠ, Ⅱ, Ⅲに対する溶融の等価電圧を示す曲線とワイヤ中の抵抗電圧降下の直線とが偶然 (?) 同一傾斜になったが、同一傾斜にならなくても、一般に ある与えられた溶接条件におけるワイヤの送給速度から 溶融の等価電圧 V_m を計算し****また、そのときのワイヤ中の抵抗電圧降下を推算すれば、これら両者の差は ワイヤがスラグ浴から受熱したエネルギーの等価電圧を与えることはいうまでもない。Fig. 7 では前記両曲線の傾斜が同一であるので、両曲線の高さの差は電流に無関係に一定となる。

*** スラグ浴内に浸漬しているワイヤの温度の推定は困難であるが、いまその平均固有抵抗を $\rho = 100 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$ とし、浸漬長さを $l = 32 \text{ mm}$ とすると、その部分の抵抗 R は (断面 $S = 0.08 \text{ cm}^2$)

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = 100 \times 10^{-6} \times \frac{3.2}{0.08} = 4 \times 10^{-3} \Omega$$

それゆえに $I = 800 \text{ A}$ が流れていると、電圧降下は $I \cdot R = 800 \times 4 \times 10^{-3} = 3.2 \text{ V} \quad \dots\dots\dots (2)$

Fig. 1 を見ると、浸漬深さは $l = 35 \sim 47 \text{ mm}$ である。一方 電流の一部はワイヤの途中からスラグ浴へ流出するので、上の計算では $l = 32 \text{ mm}$ の部分に全電流が流れるのと等価と仮定したのである。

つぎにワイヤの給電点、すなわちチップ端からスラグ浴表面までのワイヤ長は 本実験では $l' = 11 \text{ cm}$ である。この部分の平均固有抵抗を $\rho = 25 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ とすると、 $I = 800 \text{ A}$ に対する電圧降下は

$$I \cdot R' = 800 \times 25 \times 10^{-6} \times \frac{11}{0.08} = 2.75 \text{ V} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。したがって抵抗による全電圧降下は

$$3.2 + 2.75 = 5.95 \approx 6.0 \text{ V} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。Fig. 7 の点線は $I = 800 \text{ A}$ にて電圧降下が 6.0 V となるような原点を通る直線である。

フラックスⅠの場合には 第3報 Fig. 10 に見るように ワイヤの浸漬深さは 上の仮定値よりはるかに小さい。しかし逆に送給速度が低いので、(Fig. 8 の左側の縦軸参照) ワイヤが前記 l' 部分で加熱されている時間が長く、温度上昇し、 ρ' はその抵抗温度係数のためⅡ, Ⅲの場合に比べて大となる。

これらフラックスⅠ, Ⅱ, Ⅲの場合の全てに対して抵抗電圧降下を 図のような1本の点線で表示することは乱暴であることはいうまでもないが、ここでは概算を示したわけである。

**** これには ワイヤの溶滴の温度を仮定することが必要であることは言うまでもない。

その値は 曲線Ⅰ, Ⅱ, Ⅲを直線と見なして延長し, $I=0$ において縦軸と交わる点の目盛で与えられ, たとえば フラックスⅡ, Ⅲについては

$$V_{ms}=6.8\text{ V}, 8.1\text{ V}$$

であり, フラックスⅠでは

$$V_{ms}=2.3\text{ V}$$

である.

上述の結論を正しいとすると, スラグⅢの温度はⅡのそれよりも高く, Ⅰは低いと結論される. フラックスⅠは 負荷端子電圧を $V_t=18\text{ V}$ としており, Ⅱ, Ⅲの $V_t=36\text{ V}$ の $\frac{1}{2}$ であるので, 同一電流に対して入熱が $\frac{1}{2}$ で, 温度が低いことは第3報 Fig. 12 の実測例にも見られるとおりである. ただし上の数値から直ちに温度を推察するには間違いがあろう. すなわち たとえばフラックスⅠの場合は 第3報 Fig. 10 に見るように ワイヤの浸漬深さがⅡ, Ⅲの場合に比べて極めて小さいので, たとえ温度が高くて 熱はスラグからワイヤに伝わりにくく, これが上記の V_{ms} の低下を招く.

問題はフラックスⅡ, Ⅲの場合の比較についてであるが, 浸漬深さが相当に深い場合 すでに第3報 Fig. 8 について述べたように 電流は主としてワイヤ先端から流出し, 先端局部のスラグの温度が高い. それゆえにスラグ浴温度の高低を論ずるとき, どの点の温度を問題にしているかが問題であり, 軽々に結論することは困難である.

(d) 考察

後藤ら⁵⁾は スラグ浴温度が等価であると仮定し, これにワイヤが浸入したとき ワイヤ表面からの受熱によって ワイヤが溶融温度に達する経過時間を熱伝導論的に計算して ワイヤの溶融速度を論考している. しかしながら実際のスラグ浴内の温度分布は 第2報, 第3報に述べた浴内の電流分布, 発熱分布から考えて到底一様であるとは考えにくい. しかしこれらの電流分布, 発熱分布, 対流を考慮に入れて温度分布を計算し, ワイヤの溶融速度を計算することはむづかしい.

さらに一方 第1報¹⁾に述べたようにスラグ溶接においては陰極降下, 陽極降下が存在する. 仮りにワイヤが R.P. で使用されるとし, 陽極降下を V_A とするとき, 陽極局部に発生する熱量が $V_A \cdot I$ で表示して良いのか否か, またこの発熱は V_A の生じているスラグ浴局部に生じていて そのうちどれだけがワイヤに直接与えられるかなどの問題は 溶接アークにおける陽極の発熱*よりは はるかに複雑らしく, 浅学の著者らには現在その考察は困難である.

* アーク溶接では 陽極発熱の等価電圧は

$$V_{mA}=V_A+V_w+V_T$$

で表示できる. 安藤, 長谷川「溶接アーク現象」8.3.13式参照.

本稿では これらの基本的問題にはふれず, ただ実験結果を等価電圧の考え方で整理して今後の研究の手懸りとなる大体の目安を与えたわけである.

さて Fig. 7 は スラグ浴深さは 50 mm, 負荷端子電圧は $V_t=36\text{ V}$ の場合についてであるが (フラックスⅠでは $V_t=18\text{ V}$), Fig. 8 はこれらの条件を変えた場合について示している. 縦軸は溶融の等価電圧を示しているが, Fig. 7 と同様 ワイヤの溶滴温度を 1700°C と仮定して (1) 式によって V_m を算出したものである. 縦軸はワイヤ溶融速度に比例していることはいうまでもない.

Fig. 8 Relation between equivalent voltage of wire melting and welding current when welding voltage, slag depth and flux are changed.

Fig. 8 において フラックスⅡに注目し, スラグ深さが 50 mm の場合, $V_t=30, 36, 43\text{ V}$ の場合の V_m を考えると, 図に見るように V_t が高いほど V_m が低い. この3本の曲線は Fig. 3 に対応したもので, V_t が高いとき送給速度が低くなる理由はすでに述べたとおりである. V_t が高いと 同一電流において電源からの入熱が大きく, 当然スラグ浴温度は高いと考えられるが, 図のように V_m が小さくなるのは 浸漬深さが小さいことに原因があるといえよう**.

** 図の縦軸は既述の方法で V_m を計算したもので, 溶融速度に比例している. すでに知るとおり V_t が大になると 同一電流に対してワイヤの送給速度 (溶融速度) を低くしなければならぬので, 縦軸を V_m ではなく, 送給速度として考えるときは 云わば自明の容易にうなずけるところであるが, これを V_m として考えるときには, ワイヤから離脱する溶滴の温度が果して一定であるか否かなどが問題となり, V_m については多少疑義が残る. しかし電圧が高いとワイヤ浸漬深さが浅くなり, スラグ浴の温度が高いにもかかわらず受熱面積が小さくなるために V_m が小さくなったとして解釈できよう.

つぎに $V_t=36V$ 一定として, スラグ浴深さを 70, 50, 30 mm に変えた場合に注目すると, スラグ浴深さが深いほど V_m (正しくはワイヤ溶融速度) は大きい。スラグ浴が深ければ母材への熱伝導は大きく, スラグ浴の平均温度は低くなっているはずであるのに 図のように V_m が大きいのはワイヤの浸漬深さが深く, スラグ浴からの受熱面積が大きいためである。

つぎに フラックスⅡにおいて V_m が高く, I において低いのは スラグ浴の動作温度に原因があることはすでに論考したとおりである。

つぎに Fig. 9 は スラグ浴深さは一定 (50 mm) で, ルートギャップを 35, 25, 15 mm に変化した場合の V_m を示している。ルートギャップを変化した場合の母材の溶込み深さ, スラグ浴内でのワイヤ先端位置の 1 例は第 2 報 Fig. 13~16 に示すとおりで, ルートギャップが 15 mm の場合には母材の溶込みが大きく, スラグ浴底部とワイヤ先端との間隔も大きい。図にみるようにルートギャップが小さいと V_m (正しくは溶融速度) は小さくなるが, 溶融ワイヤによって充填すべきギャップ空間が小さいために溶接速度は速くなり, したがってスラグ浴の平均温度は低くなると考えられる。ルートギャップが小さい (15 mm) 場合にワイヤ溶融速度が小さいのは, 上述のようにスラグ浴平均温度が低いことに一因があるかと考えられるが, 第 2 報に述べたようにワイヤ端に発生した高温スラグの対流がルートギャップ上部へ拡散しにくく, 上部温度が低くなることにも他の原因

がある。またワイヤの浸漬深さが浅くなり, スラグからの受熱表面積が小さいこともその一因である。

IV 結 論

本稿はエレクトロスラグ溶接におけるワイヤの溶融速度について 実験データを掲げてこれを現象論的に考察したもので, 明らかにした主なる点を誌すつぎのとおりである。

1. 負荷端子電圧を一定として ワイヤの送給速度を増すと, 電流が増加するとともに スラグ浴内でのワイヤの浸漬深さが増す (このときワイヤがスラグ浴底部に突込んでしまうか否かの安定の問題は明らかにしていない)。

2. 負荷電圧を高くすると, 同一ワイヤ送給速度に対して電流は増加する。電流を同一に保って負荷電圧を高くすると, ワイヤの浸漬深さは小さくなる (このとき送給速度も小さくしなければならぬ)。

3. 高温でのみ導電性のあるスラグを用いると, 発熱はワイヤ先端部に集中する傾向を示し, (同一電圧, 電流に対してワイヤの送給速度は大となる。)

4. 電圧, 電流を一定としてスラグ浴深さを深くすると, ワイヤ溶融速度は増大する。スラグ浴深さが深いと, スラグ浴の平均温度は低下するはずであるが, 溶融速度が増大するのは浸漬深さが大きく, スラグ浴からの受熱面積が大きくなったためと考えられる。

5. 電圧, 電流を一定, スラグ浴深さも一定として, ルートギャップを変化すると, ルートギャップが狭いほど ワイヤの溶融速度が小さくなる。これはルートギャップが狭いため溶接速度が大となり, スラグ浴平均温度が低くなることも一因かと考えられるが, ワイヤ端に発生した高温スラグ浴の対流が上方へ拡散せず, ワイヤが浴内上部で予熱される程度が小さくなることもその原因であろう。

6. スラグ浴内で鋼線ワイヤは 1700°C で溶融離脱するとしてワイヤの受熱エネルギーを計算すると, ワイヤ径 3.2 mm, フラックス G 90 の場合には 800 A に対して約 12.5 V の等価電圧となる。このとき ワイヤ中の抵抗電圧降下は 6 V 程度で, ワイヤがスラグ浴から受けた熱エネルギーは約 6.5 V となる (ただし D.C.R.P.)。

以上の結論のうち 1, 2, 3 などはいわば自明のことであるが, それでも () で示した部分まで含めると, すべての溶接条件において常に成立するか否か 著者らは現在明快に理解していない。すでに述べたようにスラグ浴内での電流分布, 温度分布が複雑で, これを理論的に明確に解明することがむずかしい。それゆえに

Fig. 9 Relation between equivalent voltage of wire melting and welding current when slag depth is varied using flux II.

本稿で述べた考察は いわば実験結果をみて、その結果に合致するようなもっともらしい考察を誌したようなもので、必ずしもすべて確定的なものではない。異なる設定条件下では、たとえばスラグ深さを深くしたとき 溶融速度が大となるなどといった結論はあるいは逆転するかも知れなく、著者らはこの点については現在十分の理解に達していない。

問題は上記結論のうち 6 についてであって、本稿では溶融の等価電圧、スラグ浴からの受熱等価電圧などの観念を導入したが、これが溶接条件によっていかに変化するかなどは今後の研究にまたねばならない。

以上第 1～第 4 報をもって著者らが過去数年間にわたって阪大溶接教室で行なったエレクトロスラグ溶接に関する実験研究の報告をひとまず終ることとする。スラグ浴内でのワイヤ先端附近から発する高温スラグ浴の対流のためにスラグ浴内温度は大いに影響を受けるが、その現象が複雑であるので、これの理論的、数式的説明は困難であり、実験にまつより仕方がない。考えてみると古くから多数の人によって研究考察されているアーク溶接においても 開先寸法、電圧、電流などの条件を与えたとき、母材の溶込みがいかになるかの件は 理論的には説明されておらず、ただ実験にまっており、実験式程度のものが得られているに過ぎない。スラグ溶接は アーク溶接に比べると、いわば閉ざされた系内での現象で、問題の究明が多少容易なはずであるが、前記のようにス

ラグ浴対流のために 現象は複雑である。アーク溶接の場合 溶接棒の溶融速度は母板溶融池側からの影響を受けないので、簡明であり、すでに現象論的にある程度十分満足に究明されている。しかしスラグ溶接では ワイヤの溶融がスラグ浴からの受熱によっており、浴温度が前記対流その他の理由によって複雑になるので、簡単に結論は求められない。

本稿はこれらの問題に関して実験データをもととして現象論的に考察したもので、定性的にはあるが 二、三の基本的現象についてはこれを明らかにし得たと著者らは自負している。本稿が関係技術者の御参考になれば著者らの幸いとするところである。

なお 第 1 報には 極性効果について少し触れ、溶込が極性によって大いに影響を受けることを指摘した。何故に極性によって影響を受けるかの現象論的説明は文献 (6) に発表しておいたので、御参照下さい。

参 考 文 献

- 1) 安藤, 和田: “エレクトロスラグ溶接現象の研究” 第 1 報 溶学誌 Vol. 39 (1970), No. 7 p. 669
- 2) 安藤, 仲田, 和田: “同上” 第 2 報 溶学誌, Vol. 40 (1971), No. 10 p. 1016
- 3) 安藤, 仲田, 和田: “同上” 第 3 報 溶学誌, Vol. 40 (1971), No. 11 p. 1104
- 4) 安藤, 長谷川: “溶接アーク現象”, 産報, 1967
- 5) 後藤久夫, “エレクトロスラグ溶接におけるワイヤの溶融機構”, 溶接アーク物理研究委員会資料, No. 69-91 (1969)
- 6) 安藤, 仲田, 和田: 溶接学会全国大会講演概要第 10 集, (昭和 47 年春季大会) 講演番号 340, (1972)

16 th International Welding Congress 1973

“Research, development and industrial applications of electroslog welding and surfacing

主催者: Výskumný ústar zuáračský

・出席希望者は 2 月 28 日までにお申込み下さい。

・案内状希望者は溶接学会までご連絡下されば、コピーをお送りいたします。

問合先: Výskumný ústar zqáračský Organizačný výbor XVI, medzinárodného
zváračského kongresu, P.O.B. 436, 800 00 Bratislava ČSSR