連載講義

溶接アークプロセスの物理 [III]

—電極ワイヤの溶融速度と温度分布—*

平 田 好 則**

Physics of Welding [III]

—Melting rate and temperature distribution of electrode wire—*

by Yoshinori Hirata**

キーワード：ミグ・マグ溶接，ワイヤ溶融速度，抵抗発熱，熱伝導，突き出し長，アークの電極加熱，溶滴の保有熱量

1. はじめに

ミグ・マグ溶接などのガスシールドメタルアーク溶接 (GMAW) に代表される溶極式アーク溶接法では，溶接ワイヤや溶接棒がアーク放電の電極となる。電極のワイヤ・棒はアーク熱によって溶融し，溶滴となって溶融池へ移行する。溶滴がワイヤ端から離脱する毎に断続的にアーク長が変化する。したがって，移行する溶滴の大きさや形，移行頻度は溶接アークの安定性を支配し，作業性や溶接品質に影響する。すなわち，電極ワイヤ端から移行する溶滴のサイズが，大きすぎたり，ふぞろいになったりすると，溶滴移行にともなうアーク長やアーク発生位置の変動が大きくなり，アークが不安定になる。また，溶滴の移行がスムーズでない場合には，溶接棒端や溶融池から溶融金属が飛散するスパッタ現象が生じる。一方，電極ワイヤや溶接棒の溶融速度は，単位時間当たりの溶着金属量に直結し，溶接能率を支配する。

これらの電極ワイヤの溶融移行現象は，溶接法や溶接条件 (電流，電圧)，極性，シールドガス，ワイ

ヤの材質・種類 (ソリッド，コアード)，ワイヤ径，母材など多くの操作因子によって変化する。本稿では，電極ワイヤの加熱・溶融現象を理解する上で基本となる突き出し部の温度分布とワイヤ溶融速度について述べ，次号においてワイヤ端に形成された溶融金属の離脱・移行の機構について解説する。なお，本講義で扱う対象は，ミグ・マグ溶接，炭酸ガスアーク溶接など溶接ワイヤを主として定速送給する溶接法の溶滴移行現象とする。

2. 電極ワイヤの温度分布

周知の通り，固体ワイヤ端には溶滴が付着しており，溶滴を含む端部領域がアーク熱によって加熱される。電極ワイヤの温度分布や溶融速度を考える上で，ワイヤ端の溶滴の形成や離脱の現象は問題を複雑にする。そこで，いくつかの仮定のもとで成り立つ簡単なモデルを用いて述べることにする。

2.1 熱伝導方程式¹⁾

図1は電極ワイヤの温度分布を推定するのに用いられる座標系を示す。すなわち，ワイヤ先端 ($x=E_x$) の温度を融点とし，アーク熱によって融点以上に加熱された溶融金属は，ワイヤ端部 ($x=E_x$) から次々と連続的に離脱，母材へ移行するものと仮定する。

*原稿受付 平成6年8月8日

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

図1 電極ワイヤの温度分布を計算する座標系

したがって、この計算モデルのワイヤ端には、溶滴が存在しない。ワイヤ端から流入した熱は、ワイヤ突き出し部 ($x=0 \sim E_x$) を熱伝導によって移動し、温度一定の給電チップ (通常、トーチは水冷ないしは空冷されているので、チップ温度もほぼ一定と考えてよい) に流れ込む。あわせて、溶接電流はこのワイヤ突き出し部を通して、ワイヤ端からアーク放電部に流出するので、ワイヤの材質や径、突き出し長さによっては抵抗発熱による温度上昇の影響を無視できない。

上記の仮定をもとにワイヤを一定速度で送給するとき、突き出し部の温度分布は、次の1次元熱伝導方程式で表現できる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_w \frac{\partial T}{\partial x} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{J^2 R(T)}{cp} \quad (1)$$

ここで、 $T(x, t)$: ワイヤ突き出し部位置 x での温度 (K), v_w : ワイヤ送給速度 (m/s), k : ワイヤ材の熱拡散率 (m^2/s) [$k = K/cp$, K : 熱伝導率 (W/mK)], ρ : 密度 (kg/m^3), c : 比熱 (J/kgK), J : ワイヤ突き出し部の電流密度 (A/m^2), $R(T)$: 温度 T における抵抗率 (Ωm) である。

ワイヤ中の電流密度は、溶接電流 I (A) とワイヤ断面積 S (m^2) から、 $J = I/S$ で与えられる。ワイヤ径 d (m) のソリッドワイヤの場合、 $J = I/(\pi d^2/4)$ となるが、コアードワイヤにおいても、金属部とフラックス部との間での熱の移動が無視できる場合、金属部断面積を用いて (1) 式を適用することができる。

2.2 突き出し長の時間的变化

もとより、突き出し長が変動したり、電流が増減すると電極ワイヤの温度分布は時間的に変化することになる。とくに突き出し長の変動の大きさは、溶

極式アークの安定度を示す指標のひとつである。その変動原因としては、有限の大きさの溶滴が離脱することによるものと、ワイヤの送給と溶融のアンバランスによるものがある。ここでは、モデルの仮定から後者の場合を示すと、次式ようになる。

$$\frac{dE_x}{dt} = v_w - v_M \quad (2)$$

ただし、 v_M : ワイヤ溶融速度 (m/s)。ワイヤ端部が溶融すると同時に離脱するので、 v_M がワイヤ送給速度 v_w よりも大きい場合、突き出し長はどんどん短くなっていく。言い換えると $dE_x/dt < 0$ のとき、給電チップと母材間の距離が一定の場合、アーク長が長くなっていく。

ワイヤ端で溶融した金属は実際には、溶滴として付着しており、次回に述べる電磁力や重力などによって、ワイヤから離脱することになる。したがって、アークからの入熱が大きく、ワイヤ端に付着している時間が長い溶滴は、かなり加熱されることになる。一方、突き出し部への熱流はフーリエ則にしたがい、ワイヤ端 ($x = E_x$) での温度勾配に支配される。結局、アークからワイヤに与えられる熱量は、次式で示されるワイヤ溶融に必要な熱量とワイヤ固体部への熱伝導に費やされる。

$$\frac{Q}{S} = K \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=E_x} + \{\rho H_0 - \rho c (T_m - T_0)\} v_M \quad (3)$$

ただし、 Q : アークからの入熱 (W), H_0 : 溶滴の保有熱量 (溶融金属がワイヤから離脱する際に持ち去る熱量) (J/kg), T_m : ワイヤ材の融点 (K), T_0 : 給電チップ ($x=0$) の温度 (K) である。

2.3 準定常状態の解

いま、溶極式アークのアーク長もしくは突き出し長が一定で時間的に変化せず ($dE_x/dt = 0$)、安定なアークが維持されている場合を考える。つまり、(3) 式によるワイヤの溶融量と送給量がバランスすれば、突き出し長が一定になる。このような状態であっても、電流変化に応じて突き出し部の温度は変動する。

そこで、溶接電流を一定電流とし、ワイヤの温度分布が時間的に変化しない準定常状態 ($\partial T/\partial t = 0$) を想定する。ワイヤ材の抵抗率は温度上昇とともに大きくなるが、(1) 式の解析解を得るため、 $R(T) = R_0$ とおく。このとき、突き出し部の温度分布は次式で与えられる。

図2 ワイヤ突き出し部の温度分布

$$T(x) = \left(T_m - T_0 - \frac{E_x}{v_w} \frac{J^2 R_0}{cp} \right) \times \frac{\exp(v_w x/k) - 1}{\exp(v_w E_x/k) - 1} + \frac{J^2 R_0}{cp} \frac{x}{v_w} + T_0 \quad (4)$$

図2は軟鋼ワイヤ1.2mm径について、突き出し長 $E_x = 20$ mmとしたときの計算例を示す。なお、このときのワイヤ送給速度は実験的に求めたものを用いている。電流200Aと350Aのいずれの場合も、給電チップからの距離に比例して温度が高くなり、ワイヤ端から1mm程度の領域でアークからの熱により急激に温度が上昇している。ワイヤ径を細径にして高速で送給する溶接法では、突き出し部の温度に対して抵抗発熱の影響が大きい。

3. ワイヤ溶融速度

3.1 アークによるワイヤの加熱

(3)においてワイヤ溶融量を左右するアークからの入熱量を考える。電極ワイヤはアーク放電の陰極または陽極であり、それぞれの電極への入熱は、主としてアーク電流を運ぶ電子・イオンによって与えられる。加えて、高温のアークプラズマからの放射や熱伝導も寄与する。電極領域の現象は複雑であり、アーク物理としても未だ不明な点が多いため、考え方の基本を述べることにする²⁾。

ミグ・マグ溶接などでは、ワイヤを陽極とする直流棒プラス(DCEP)を用いることが多いが、一般に溶極式アーク溶接では、用途に応じて、直流棒マイナス(DCEN)や交流も使われる。

陽極領域部では、ほぼ100%電子流となり、アーク柱からの電子は陽極降下電圧 V_A (V) で加速され、陽極に飛び込む。そして、アーク空間よりもポテンシャルの低い陽極金属内の電子となるので、陽極物質の仕事関数 V_{WA} (V) に相当したエネルギーを与える。すなわち、陽極への入熱 Q_A (W) は次式で表せる。

$$Q_A = I(V_A + V_{WA} + V_T) \quad (5)$$

$V_T = (5/2) k_B T_e / e$: アークプラズマ中の電子のエンタルピーの等価電圧(V)。なお、 T_e : 電子温度(K), k_B : ボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/K), e : 電子電荷 (1.6×10^{-19} C) である。

陰極部ではアークプラズマからやってきたイオンが、陰極降下電圧 V_C (V) で加速されて陰極表面に衝突し、同時に陰極の電子と再結合して電離エネルギー V_I (V) を与える。一方、陰極からの電子は陰極物質の仕事関数 V_{WC} (V) に相当したエネルギーをもって、アーク空間に放出されるので、その分だけ陰極は冷却されることになる。陰極への入熱 Q_C (W) は次式で与えられる。

$$Q_C = (1-s) I \{ V_C + (V_I - V_{WC}) + V_T \} - sIV_{WC} \quad (6)$$

ここで、 s : 電子電流率(陰極領域を流れる電流のうち電子が運ぶ場合で、電子放出機構に依存する)、 $V_T = (3/2) k_B T_i / e$: アークプラズマ中のイオンの運動エネルギーの等価電圧(V), T_i : イオン温度(K) である。

V_{WA} と V_{WC} は電極材料によって異なり、3~4.5 V, V_I はプラズマガスによるが、アルゴンで15 V程度である。また、 V_C は10 V程度、 V_A と V_T は1 V程度と考えられている。(5)(6)式から、アークから電極ワイヤへの入熱は溶接電流に比例すると考え、次式で表す。

$$Q = I\phi \quad (7)$$

ただし、 ϕ は電極加熱の等価電圧(V)で、ワイヤが陽極の場合、 $\phi = V_A + V_{WA} + V_T$ となる。

3.2 ワイヤ溶融速度と溶滴の保有熱量

溶極式アークにおいては $v_w E_x / k > 1$ であるので、式(3)(4)(7)から、ワイヤ溶融速度は次式で与えられる。

$$v_w = \frac{1}{\rho H_0} (\phi J + R_0 E_x J^2) \quad (8)$$

すなわち、ワイヤ溶融速度は電流値によって変えることができるわけであるが、アークからの入熱量お

図 3 ワイヤ溶融速度と突き出し長の関係

表 1 ワイヤ溶融速度式の比例定数

ワイヤ	シールド ガス	極性	α $\text{mmA}^{-1}\text{s}^{-1}$	β $\text{A}^{-2}\text{s}^{-1}$	
軟鋼	1.2mm径	Ar	DCEP	0.311	4.63×10^{-5}
軟鋼	1.6mm径	Ar	DCEP	0.236	1.22×10^{-5}
ステンレス鋼	1.2mm径	Ar	DCEP	0.321	6.14×10^{-5}
軟鋼	1.0mm径	Ar + 2%O ₂	DCEP	0.381	1.62×10^{-4}
軟鋼	1.0mm径	Ar + 2%O ₂	DCEN	1.044	1.13×10^{-4}
軟鋼	1.0mm径	Ar + 20%CO ₂	DCEP	0.517	1.10×10^{-4}

表 2 ワイヤ溶融速度から求めた溶滴の保有熱量 [() 内に実測値を示す] とアークによる溶融の等価電圧 (ミグアーク, DCEP, アルゴン)

ワイヤ	溶滴の保有熱量 H_0 J/kg	等価電圧 ϕ V	
軟鋼	1.2mm径	1.83×10^6 (1.87×10^6)	5.7
軟鋼	1.6mm径	1.62×10^6 (1.68×10^6)	6.3
ステンレス鋼	1.2mm径	1.71×10^6 (1.69×10^6)	5.3
銅合金(7/3Cu-Ni)	1.2mm径	1.29×10^6 (1.32×10^6)	5.1

よび突き出し部の抵抗発熱に加えて、溶滴の保有熱量に支配される。ワイヤ端部が融点になって、溶融すると同時にワイヤから離脱すると、溶滴の保有熱量が最小となるので、効率よくワイヤ溶融が行われることになる。

ワイヤ溶融速度あるいは溶融量に関して、これまでに数多くの研究がなされている³⁾。図3にミグ溶接による実験結果の一例を示す。溶接電流が一定の場合、ワイヤ溶融速度と突き出し長は直線関係を示している。その傾きは電流値や材質により異なり、溶融速度に対する抵抗発熱の寄与は、突き出し長にもよるが固有抵抗の大きいステンレス鋼や軟鋼では50%以上にも達する。これらの実験結果に基づいて、ワイヤ突き出し部の抵抗発熱効果を考慮すると、次のような実験式が得られる。

$$v_M = \alpha I + \beta E_x I^2 \quad (9)$$

ただし、 α (m/As) と β (l/A²s) は比例定数で、ワイヤの材質や径、シールドガスなどによって変化する。表1にミグ・マグ溶接における α と β を示す。溶融速度に対して、とくにワイヤ径の影響が大きい。極性を棒マイナスとするとアークから電極への入熱が増加する。(9)式の物理的な意味としては(8)式の関係により、ワイヤ材の仕事関数や溶滴の保有熱量、抵抗率などと結びついている^{4,5)}。したがって、両者を比較すると、溶滴の保有熱量とアークによるワイヤ溶融の等価電圧を求めることができる(表2)。溶滴の保有熱量は実測値(200～350 Aの平均

値)⁶⁾とほぼ近い値を示しており、定性的な議論に対しては上述のモデルを適用してもよいと考えられる。

4. お わ り に

電極ワイヤの溶融現象は、本質的には溶滴の離脱・移行をとともなう非定常な現象であり、取扱いも複雑になる。また、アークからの入熱が固体ワイヤおよびワイヤ端の溶融金属表面のどのような領域に与えられるかも重要である。電極表面への電流の流入出点であり、入熱点にもなる陰極領域と陽極領域の現象やワイヤ端の溶滴内での熱輸送機構など明らかではなく、今後の実験的および理論的検討による解明が待たれる。

参 考 文 献

- 1) 黄地：溶接アークプロセスの物理 [I]，溶接学会誌，vol. 63, No. 4, 1994.
- 2) ランカスター編著：溶接アークの物理，黒木出版，1990.
- 3) 例えば，Lesnewich, A: Weld. J., 37, 1968.
- 4) Halmoy, E: Wire melting rate, droplet temperature, and effective anode melting potential, Conference on Arc Physics and Weld Pool Behavior, 29, 1979.
- 5) 丸尾，平田，野田：パルス MIG 溶接におけるワイヤの溶融速度，溶接学会論文集，Vol. 3, No. 1, 1985.
- 6) 丸尾，平田，野田：パルス MIG 溶接における溶滴の保有熱量と温度，溶接学会論文集，Vol. 2, No. 4, 1984.

名著最新版を完訳!!

溶 接 ア ー ク の 物 理

第二版 J.F. ランカスター編著

溶接学会溶接アーク物理研究委員会 100 回記念刊行

定価 10,000 円 (税込)

A 5 判 370 頁

ISBN4-906110-25-8