鑄鉄のエレクトロスラグ溶接 (第2報)*

(試作フラックスに関する2, 3の検討)

石井 勇五郎** 田村 博** 加藤 昇**
吉田 晴彦*** 白川 和久****

Electroslag Welding of Cast Iron (Report 2)*

(Some investigations on experimentally produced fluxes)

by Yugoro Ishii**, Hiroshi Tamura**, Noboru Kato**, Haruhiko Yoshida***
and Kazuhisa Shirakawa****

Abstract

As described in the last report,¹⁾ it was known that electroslag welding of cast iron can be executed by use of a cored wire ($\text{Fe}_3\text{C} + \text{Fe-Si}$) and a hollow graphite nozzle. This welding, however, has been somewhat unstable; as one reason for this instability may be mentioned the adoption of commercial flux for mild steel. Since the melting point of cast iron is only slightly higher than that of the commercial flux, slag inclusion is liable to happen and the welding results tend to be poor.

Thereupon, with mainly the aim to develop a welding flux that can produce a lower temperature fusible slag, several types of flux were prepared; the electroslag welding of cast iron plates using them were investigated. Meanwhile, the performances of these fluxes were compared by measuring the physical properties, such as viscosity and electric resistance of welding slag. Furthermore, the dynamic behavior of the molten slag during welding was observed by X-ray inspection. Finally there were described the results of repair welding practically applied on defects of large machine tool tables using the flux E6 selected from the results in this study.

1. 緒 言

前報¹⁾では、白鑄鉄粉末充填ワイヤと黒鉛ノズル電極を用いた新しい鑄鉄用エレクトロスラグ溶接法を開発し、組成、色調、振動減衰率、硬さ、強度とも母材とほとんど差のない溶接を行うことができたことを報告した。

しかし、フラックスは市販の鋼用のものをそのまま用いたため、溶接境界部にスラグ巻込などの欠陥が生じたりして溶接の安定性に乏しかった。

鑄鉄のエレクトロスラグ溶接用スラグは、溶接時には $1200^\circ\text{C} \sim 1700^\circ\text{C}$ くらいの温度に加熱されているが、この鑄鉄用スラグに必要な主な条件は、 1700°C 付近での高温でも粘性や電気抵抗が極端に小さくならないことや、アークの不安定性などのほかに、鑄鉄の凝固温度である 1200°C 付近での粘性および電気伝導度が適度であ

ることがあげられる。

しかしながら、既存の市販エレクトロスラグ用フラックスは鋼用としてつくられているので、その融点は $1250 \sim 1450^\circ\text{C}$ に限定されている。そのため、鋼の凝固温度付近では、スラグは完全に溶融していて適度の粘性と電導度を持つが、鑄鉄の凝固温度である 1200°C 付近での粘性はかなり高く、スラグ巻込などの欠陥をつくる原因となっている。

黒鉛ノズル式エレクトロスラグ溶接に必要なスラグの特性としては、以上のほかに、スラグ組成のうちの溶融酸化物が、炭素などによってあまり還元されないことや、蒸気圧が高いことによる成分の気化などによってスラグの物性が変化しないことが望まれる。

しかしながら、以上の諸性質を同時に満足するスラグをつくることは一般に困難なので、本報告では低融点スラグの開発に主眼をおき研究を進めた。

2. スラグの組成

多くのスラグは、電導度が大きく、融点の低い CaF_2 (融点約 1350°C) をベースとしてつくられている。

* 原稿受付 昭和48年5月23日 (44年度秋季全国大会に発表)

** 正 員 東京工業大学 Member, Tokyo Institute of Technology

*** 学生員 東京工業大学 Student Member, Tokyo Institute of Technology

**** 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

この CaF_2 は, 各種の介在物に対するぬれ性も非常によいため, 脱介在物性に優れているなど多くの利点をもつ。しかしながら, この CaF_2 を単体として鑄鉄の溶接に使用する場合は, それでもなお融点が高過ぎたり, 電導度が大き過ぎたりして適切ではない。

一般市販の軟鋼溶接用フラックスは CaO_2 のほかに CaO , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , MnO などを配合して適度の粘性と電導度が得られている。一般に粘性を下げる成分としては CaF_2 , CaO , TiO_2 などがあり, 電導度を下げる成分として Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 などがあげられる。しかしながら4元系以上のスラグの, 各温度での粘性および電導度を知るための状態図がほとんどないこともあって, 多くの溶接フラックスは試行錯誤の結果つくられている。

水野, 松村²⁾らは, この粘性および電導度と組成との関係を示す共通のパラメーターとして $(\text{NCaO}_2 + 2.2 \text{NCaF}_2)/(\text{NSiO}_2 + \text{NAl}_2\text{O}_3)$ をとり, これによってソ連の Paton 研究所によって開発されたいくつかのスラグを整理したところ, 電導度および粘性が一つの曲線によって表示できたとしている。すなわち, このパラメータの mol% による値が大きい場合は, 電導度が大きくなるとともに粘性が小さくなる。このように組成によってスラグの物性のある程度までは推定することは可能であるが, 粘性と電導度とが同じパラメーターで表わせる関係上, 電導度を変えないで粘性だけを低下させることはむずかしい。

本研究では, 鑄鉄の溶接に適したスラグ組成をきめるにあたりセラミックスの状態図³⁾を参考にしたものもあるが, 既存スラグの粘性を低下させることを主目的に組成を検討し, フラックスを試作した。

実験に用いたスラグの組成を Table 1 に示す。

A~E6 のフラックス組成はそれぞれ以下の理由により選定した。

- 1) セミラックスの状態図の中から選んだ低い粘性をもつもの (フラックス A および B)
- 2) 既存フラックスのうちでも比較的粘性が低いと思われるもの (フラックス C……ソ連で開発された鋼用フラックス AN-25⁴⁾…… CaF_2 が 37% 入っているほかに,

低粘性, 低電導の特異効果⁵⁾をもつ TiO_2 が 35% 入っている)

- 3) 前報¹⁾での「鑄鉄のエレクトロスラグ溶接」に用いたもの (市販フラックス E1)

- 4) E1 に CaF_2 を添加して融点を低下させたもの (フラックス E3, E6)

3. スラグの物性

上記の各種フラックスがどのような物性を示すかを知ることが, これからの溶接現象を観察するうえで, きわめて重要であると思われる。

なかでも, 粘性と電導度は, ガスの脱出, スラグ巻込, 発熱量, 溶接安定性などの点で溶接に大きな影響を与える因子であるので, まずこれらの測定を行なった。

3.1 粘度の測定法および結果

粘度の測定は, いろいろな方法が行われているが, 本実験では回転円筒法を用いて測定した。この方法は広い温度範囲の粘性を連続的に測定することが可能であり, 測定可能な粘性範囲も $0.1 \sim 10^4$ ポアズで適当である。

回転円筒の材料としては, 一般には白金, モリブデン, 黒鉛, アルミナ, マグネシヤなどの耐火物が考えられるが, 成形の難易, 経済性などを考慮して, 黒鉛を用いた。粘性測定装置を Fig. 1 に示す。ルツボにスラグ

Fig. 1 Measuring apparatus for viscosity of molten slag.

Table 1 Chemical analysis of welding fluxes tested.

Sign	wt. %							
	SiO_2	MnO	Al_2O_3	CaO	MgO	CaF_2	FeF	TiO_2
A	—	—	—	—	—	50.0	55.0	—
B	28.5	—	—	26.5	—	45.0	—	—
C	8.0	—	—	14.0	—	37.0	—	35.0
E1	47.3	17.1	2.5	24.9	7.8	—	—	—
E2	40.4	14.8	2.4	24.0	9.4	99.2	—	—
E3	30.7	12.1	2.3	20.4	11.0	3.6	—	—

Fig. 2 Relation between temperature and viscosity for each slag.

を入れて、タンマン炉によって加熱し、その冷却途中における粘性の変化を内円柱を回転させることによって生じた回転モーメントを連続的に計測して測定した。なお粘性は次式によって計算した。

$$\mu = \frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \frac{1}{2\pi n}$$

μ : 粘性 (poise = dyne·sec·cm⁻²), M : 回転モーメント (dyne·cm), r_1 : 内円柱の半径 (cm), r_2 : 外円筒の半径 (cm), h : 円柱の高さ (cm), n : 回転数 (sec⁻¹)

温度は 13% Pt/Pt Rh 熱電対をアルミナ保護管でつつみ、アルミナ製接着剤で密閉した後、ルッポの側壁に埋め込んで測定した。炉内の温度は場所により 40~50°C 程度の差があった。最高加熱温度は、実験装置の都合上 1300°C までとした。各種フラックスの粘性測定結果を Fig. 2 に示す。

粘度は E1, E3, B, E6, A の順に小さくなっている。とくにフラックス A の場合は、950°C 以上のすべての温度で 1 ポアズ前後の低粘性を示しているが、このように粘性が低い場合は、実際の溶接のときにわずかのすき間からもスラグがもれる可能性がある。しかしながら、一般には流出の途中で冷却されて粘性が低くなるので、粘性が低過ぎることはそれほど問題ではなく、スラグの巻込防止、ガスの脱出などの点からは、かえって都合がよい。

これに対し、一般鋼用であるスラグ E1 の粘性はもっ

とも高い。しかし、鑄鉄の凝固温度である 1200°C 付近ではまだ 8 ポアズ程度で、常温でのグリセリンの粘性 (20°C → 14 poise) よりも小さい。そのため、前報での溶接実験結果でも明らかのように、このスラグ E1 を用いても溶接は可能である。しかし、このスラグの 1200°C 以下での粘性は急速に大きくなり、1100°C では数 10 ポアズにもなるので、アークなどが発生して溶接が不安定になった場合は溶接金属よりもスラグの方がさきに凝固する可能性もあり、スラグ巻込などの溶接欠陥をつくる原因になるとみられる。

E1 に CaF₂ を 9% 加えた E3 は、1100°C でもまだ 8 ポアズ程度なので、溶接性は E1 よりも良好と思われる。しかし、スラグ内のガスを迅速に浮上させることができるほどは高温での粘性は低くなく、アークが発生しやすかった。

B も E3 と同様の粘性をもっているが、次節で示すように、電導度は B の方がかなり大きいため、実際の溶接性については、大きな差があるものと思われる。

これに対し、E1 に CaF₂ を 23% 加えた E6 は、E1 や E3 よりも高温での粘性は小さく、鑄鉄の凝固温度よりも約 200°C 低い 1000°C でも 5 ポアズであった。これは軟鋼の凝固点より約 200°C 低い 1300°C での粘性が、6 ポアズである鋼用フラックス E1 の特性とよく似ている。次章の溶接実験でも、このスラグによりもっとも安定な溶接がえられたことから、鑄鉄の溶接には、粘性については E6 程度の値であれば、良好な溶接結果が期待できるものと考えられる。

なお、フラックス C の粘性は、測定中に回転が不規則になったりして測定できなかった。これは TiO₂ の還元による Ti の析出、および CO ガスの発生などによって回転に不規則が生じたためと思われる。

3.2 電気伝導度の測定法および結果

溶融スラグの電導度測定は、精錬、製鋼など工業的にも意義をもつため、これまでに比較的多く測定されている。しかし、その得られた結果は、測定誤差以上の差が認められ、結論は必ずしも一致していない。

電気分解や電気伝導の測定によって、溶融酸化物の多くはイオン電導を示すことがわかっている⁶⁾⁷⁾。これらのイオン電導体は電流を通じることによって電気分解をおこすため、融液の組成が変化したり、スラグー電極界面に分極現象が生じたりして、正確な電導度を求めることはむずかしい。

そこで一般には、400 Hz ~ 20 KHz の交流を通じて測定を行なうことによって、この分極による二重層の影響を小さくしているが、理想的には周波数を無限大まで外挿した場合の電導度が真の値に近いとされている。

このような、電極界面の分極現象は、周波数に依存する界面インピーダンスとして表わされるが、これらはスラグの発熱現象に重要な役割をもつとされている⁹⁾。また、このインピーダンス成分は、ときには直流成分の数倍の抵抗値を示すこともあるが、本エレクトロスラグ溶接のような、スラグ浴が小さい場合のインピーダンス成分と直流抵抗成分との比は、一層大きくなると思われる。

その他、スラグに通電したときの熱は、スラグの抵抗熱よりも、スラグが分解して生成したガス層を電流が流れることによって生じるものであるとの説もある⁹⁾。この場合はイオン化した CaF_2 の蒸気中にアークがとぶことによって発熱するものとされている。

また、本黒鉛ノズル式エレクトロスラグ溶接の場合はスラグー黒鉛電極界面において、 $\text{C}(\text{g}) + \text{O}^{2-}(\text{in slag}) = \text{CO}(\text{g}) + 2\text{e}$ の反応⁹⁾ も生じるので、これによっても測定値は異なってくる。以上のほかにも、電導度に影響を与えるいくつかの現象が報告¹⁰⁾されているので、エレクトロスラグ溶接の発熱現象とそのま結びつくような抵抗値を測定することは非常にむずかしい。

そのため、今回は一般鋼用スラグである E1 の抵抗値と、試作したスラグの抵抗値とを比較する意味で測定を行なった。なお、スラグの測定値を真の値に近づけるためには、できるだけ高い周波数で測定するのが望ましいが、一般のエレクトロスラグ溶接は、直流または商用周波数が使われていることから、測定も 50 Hz の商用周波数によって行なった。

Fig. 3 に電導度測定回路を示す。溶融したスラグ中に挿入した2本の白金電極間に交流電圧を加え、徐冷しながら各温度における端子電圧および電流を記録し、得られた結果を、KCl 水溶液によって補正して電導度を算出した。

Fig. 3 Measuring method for electric conductivity of molten slag.

Fig. 4 Relation between temperature and electric conductivity for each slag.

なお、物性定数表などに掲載されている標準水溶液の抵抗値は、一般に周波数依存性のきわめて少ない白金黒鍍金白金電極を用いて測定されているが、本測定では平滑白金電極をそのまま用いている。

測定されたそれぞれの電導度を Fig. 4 に示す。

前節でもっとも低粘性を示したスラグ A の電導度をもっとも大きく、次いで B, E6, E3, E1 の順に小さくなっている。

E1 がもっとも小さい電導度をもつが、前報で E1 を用いて鑄鉄を溶接したときの溶接制御電圧が、30~40 V の間を自由に調整できたことからみて、E1 程度の電導度をもっとも溶接に適しているのではないと思われる。

なお、スラグ C の電導度測定は、白金電極の消耗が激しく、測定できなかった。これは回路中に流した電流のために、電気分解された Ti が電極に析出して、白金と反応したものと思われる。

3.3 総括

以上の粘性および電導度の測定結果をまとめると、以下のようなになる。

- 1) 鑄鉄用スラグの粘性は、軟鋼用スラグである E1 とくらべてかなり低いものが必要であるが、鑄鉄の融点が鋼のそれより約 300°C 低いことから、目安としては鋼用スラグ E1 の粘性曲線をそのまま約 300°C だけ平

行移動させたものと同じような粘性をもつ E6, ないしそれよりも低い粘性をもつ A などがよいのではないと思われる。

- 2) 鑄鉄用スラグの電導度がどの程度が適当かは、電気伝導度を測定しただけでは判断できない。しかし、通電時のスラグ温度および発熱現象は、軟鋼溶接の場合も、鑄鉄溶接の場合も、だいたい同じと考えてよい。したがって、軟鋼用スラグとして適切な電導度をもつ E1 に近い電導度をもつスラグならば、鑄鉄の溶接にも差つかえないと思われる。すなわち、単純に考えれば E1 程度の電導度がもっともよく、以下 E3, E6, B, A の順に電導度が大きくなるほど、溶接には不適当なスラグになるものと考えられる。

4. 試作フラックスによるエレクトロスラグ溶接実験

以上の試作フラックスの物性と、溶接への適用性との関係を調べるため、これらのフラックスを用い実際に鑄鉄にエレクトロスラグ溶接を行なった場合について、以下にのべる実験を行なった。

4.1 実験方法

溶接は前報¹⁾で開発した黒鉛ノズル式エレクトロスラグ溶接法をそのまま用いた。溶接ワイヤも前報¹⁾で開発されたものの一つ (白鑄鉄粉末に Fe-Si を 5% 添加した混合粉末を、軟鋼製チューブの中に充填率として 40% つめたもの) を用いている。装置およびワイヤ断面形状を Fig. 5 に示す。試験片は $200 \times 250 \times 40$ mm のミーハナイト鑄鉄を用いた。溶接電流は直流正極性で 500~700 Amp. 溶接電圧 20~40 V, 溶接速度 2~10 mm/min

Fig. 5 Schematic view of electroslag welding.

程度である。なお、直流を用いたのは、大容量の交流電源がなかったためであり他意はない。

この黒鉛ノズル式溶接法が一般のエレクトロスラグ溶接法とことなる点は、ワイヤの送給を手動 (自動制御なし) とし、そのかわりにスラグ溶中にある黒鉛ノズル先端と、母材との間の電圧を検出することによって黒鉛ノズルの位置を自動制御していることである。このようにすると、溶接ワイヤの送給を停止させても黒鉛ノズルから常に溶接電流が流れるので、入熱をいくらでも大きくすることができる。また、粉末充填率が高く、溶解しにくい充填ワイヤであっても十分に溶解させることが可能である。

なお、X線イメージインテンシファイヤによって溶接中のアーク現象やスラグの挙動なども同時に観察した。X線観察のブロックダイアグラムを Fig. 6 に示す。280 kV 3 mA の X 線出力による像をイメージ管を通して TV カメラによって撮影し、ビデオテープレコーダに記録した。

4.2 溶接中の溶融スラグの直接観察

各種フラックスによる溶接現象を以下にのべる。

フラックス A...状態図によるとこのスラグの融点 は 950°C 程度であり、前節の粘性測定でももっとも低い値を示している。そのため、溶接時の粘性も非常に低いと思われるが、当て板のすき間からスラグが流れ出るようなことはなかった。

しかし、このスラグは電導度とくによく大きいので、スラグ中に電極を深く浸漬することができなかった。そのためスラグプールをよほど浅くしないと、溶接電流のほとんどがスラグ表面層を通過して側面の鑄鉄母材に流れてしまい、溶接金属プールの温度が低下した。なお、スラグプールを浅くした場合は溶接ワイヤが溶融しないうちに金属プールに突込んでしまったり、黒鉛ノズル先端がスラグ溶から離れて、スラグ表面との間にアーク放電をおこしたりして、安定した溶接ができなかった。

なお、溶接中にフラックスを添加した場合、その直後はフッガスと思われる刺激性のガスが多く発生するが、気泡は小さく、その上昇速度は非常に大きい。しかしスラグ温度が低いので母材溶接部の温度を十分に高くすることができず、溶融スラグと鑄鉄とのぬれは悪い。

Fig. 6 Outline of direct observation of molten slag during welding by X-ray inspection.

そのため溶接部はスラグ巻込が多く、不完全であった。

フラックス B…Aについて電導度の大きいスラグであるが、溶接電圧は 25 V 程度に保持することができた。

発生するガスの量はかなり多いが気泡の大きさは小さく、その脱出速度もかなり早い。気泡の脱出とともにスラグの一部は飛散して鑄鉄壁面に付着するが、付着したスラグはスラグプールにもどりにくい。そのためスラグ量を一定に保つことがむずかしく、溶接も比較的不安定であった。なお、このフラックスも鑄鉄母材を十分に溶融するには熱量が不十分で、スラグと鑄鉄とのぬれはよくない。

フラックス C…このフラックスはソ連で開発され、一般にも使われているものである。粘性、電導度とも測定できなかったが、 CaF_2 も多く入っているため低粘性が予想された。しかし、X線テレビによる気泡の観察では、大きな気泡が発生し、その上昇速度も遅く鑄鉄へのぬれはあまりよくない。なお、このスラグは典型的な組成である CaF_2 、 CaO 、 SiO_2 などのほかに、酸化物の生成自由エネルギーの高い TiO_2 が 35% も入っている。そのため、炭素により還元された多量の Ti によって、高融点となったスラグが黒鉛の当て板と溶接部との間に多量につき、それがスラグ巻込として溶接欠陥をつくった。なお、この付着したスラグは Ti を 50% 以上含有し、その他はほとんどが Ca であり Fe、Si、F などは微量であった。

フラックス E1…この鋼用スラグは、粘性が高いため、ガスの脱出速度は遅く、気泡も大きい。この気泡の停滞によってスラグ中の通電が防げられるので、その部分の電流密度が増し、電極周辺の急激な温度上昇をおこす。その結果スラグのガス化も一層激しくなって大きな気泡が生じ、その部分にアークを放電するものと思われる。アークが発生した場合は溶接は一層不安定になりスラグ巻込などの欠陥が生じやすい。この傾向は、電流を増すと一層顕著になる。

フラックス E3, E6…E3 は E1 よりも溶接安定性がかなりよくなり、500 Amp 程度ではアークが発生しない。しかし 700 Amp ではガス量も多くなりアーク放電する。これに対し、E6 は新しくスラグを投入したときのみガスを発生するが、その上昇速度は速く、気泡も小さい。電流を小さくした場合は、正極側の黒鉛当て板付近からわずかにガスの発生がみられるだけであるが、電流を大きくした場合はスラグ全体に細かい気泡がみられた。

このガスの固形成分を水冷銅板により採集したところ、Ca、Mn を多く含んでいたが、Si はほとんど検出できなかった。この他にも、CO、 CO_2 、 F_2 ガスなどが

Fig. 7 Oscillograms showing the variation of current (upper) and voltage (lower) during electroslag welding.

含まれていると思われる。なお、E6 の溶接安定性は非常によい。

Fig. 7 に各種スラグによって溶接した場合の、電流、電圧波形を示す。

もっとも電導度の大きいスラグ A は、溶接電圧を 30 V 程度に低くしてもアーク放電している (a 点)。この放電は、電極をスラグに接触するまで下げてやると止むが、スラグの電導度があまりにも大きいため、その瞬間に電圧は 20~15 V 程度にまで急速に降下する。このように低い電圧でありながらその 1 秒後 (b) に再びアーク放電がおこっているのは、電極の周りのスラグ温度が高くなり、ガス化しやすくなったためと思われる。

これに対し、スラグ B は溶接電圧を 20 V 程度に保持でき、電流、電圧とも安定していた。しかし、入熱が小さく、溶接は不良であった。

スラグ C は、E6、B に次いで安定な電圧、電流波形を示したが、 TiO_2 の還元によるスラグの巻込など、スラグの粘性や、電導度以外の原因によって溶接不良が生じたようである。

スラグ E1, E3 は、粘性が高いために停滞したガス部分にアーク放電をおこし、溶接不良を生じた。それに対し E6 は電圧を 35~40 V 程度に設定できる上に電流、電圧の変動も少なく、安定した溶接ができた。

Photo. 1 に、各種フラックスを用いて溶接した溶接部外観を示す。

E6 は完全な溶接部が得られたが、他のものにはスラグの巻込などがあり、C のようにほとんど溶接されていないものもあった。

Photo 1 Outward appearance of electroslag weld of cast iron.

Table 2 Results of chemical analysis of weld metals in electroslag welding by using of each flux.

wt. %							Base metal	Weld metal	Base metal
Sign	Check position	C	Si	P	S	Mn			
A	①	3.31	2.44	0.030	0.056	0.51	Direction of welding ↑	①	Check analytical position into specimen
	②	3.48	2.50	0.034	0.049	0.47		②	
	③	3.65	2.27	0.032	0.042	0.34		③	
C	①	2.96	2.11	0.031	0.049	0.47			
	②	3.39	1.88	0.035	0.049	0.53			
	③	3.54	1.80	0.031	0.049	0.54			
E1	①	3.36	1.91	0.033	0.053	0.96			
	②	3.46	2.34	0.034	0.060	1.08			
	③	3.54	2.89	0.037	0.056	1.63			
E6	①	2.96	2.40	0.032	0.076	0.65			
	②	3.32	2.48	0.035	0.060	0.73			
	③	3.55	2.50	0.038	0.081	1.40			

Table 3 Change of chemical composition in welding flux by welding.

wt. %							
Sign		SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	MgO	TCaO	TiO ₂
B	flux	25.1	—	—	—	56.9	—
	slag	18.1	—	—	—	64.0	—
C	flux	5.2	—	—	—	42.7	35.7
	slag	7.8	—	—	—	38.9	33.6
E1	flux	41.9	16.8	3.3	15.7	14.2	—
	slag	44.8	8.71	4.1	18.0	17.1	—
E6	flux	30.8	11.5	2.9	10.2	30.1	—
	slag	30.9	3.3	3.8	10.8	27.0	—

4.3 溶接金属およびスラグ組成の溶接による変化

Table 2 にそれぞれのスラグを用いて溶接した溶接金属の溶接開始部, 中央部, 終了部の化学組成を示す。

E1, E6 など, MnO 入りのフラックスを用いたものは, 還元された Mn が金属に移行し, 溶接スタート部での Mn 量が増している。

この MnO は, 酸化物の標準生成自由エネルギーが使用している酸化物の中ではもっとも高く, 不安定な成分であるが, 一般の鋼におけるエレクトロスラグ溶接では, それほど金属への移行はみられていない。すなわち, これらは本黒鉛ノズル式エレクトロスラグ溶接法だけの特殊な現象であると思われる。黒鉛および使用しているス

ラグ組成酸化物の標準生成自由エネルギーと温度との関係を見ると¹¹⁾, $2C + O_2 = 2CO$ の標準生成自由エネルギーは, 400°C 以下では最も高い。しかし, それ以上では $Mn + O = MnO$ のそれよりも低くなり, $MnO + C = Mn + CO$ の反応がおこりやすくなる。その他, SiO₂ は 1510°C, TiO₂ は 1620°C, MgO は 1820°C CaO は 2180°C 以上の温度で, C によって還元されることが可能になる。

本黒鉛ノズル式エレクトロスラグ溶接における溶接中のスラグ温度は, 1700°C 程度なので, MnO の他に SiO₂, TiO₂, などが C によって還元される可能性がある。

Table 3 に溶接によるスラグ組成の変化を示す。

Photo 2 (a) absorbed electron pattern.
(b) Ca X-ray pattern.
(c) Mn X-ray pattern.

MnO を含むスラグ E1, E6 や TiO を含むスラグ C などは、それぞれ MnO, TiO₂ が減少している。なお TCaO* の増減もみられるが E1 以外のものは CaO のほかに CaF₂ の減少分も含まれているので、どちらが減少したのかわからない。

なお、これらのうち CaO, CaF₂ などは比較的蒸気圧が高く、また遊離した Ca は 1480°C 付近で気化するのので、大電流を流したときなど、スラグ温度が異常に高くなった場合は、これらの成分の気化なども考えられる。

Photo 2 は E6 に大電流を流したときに発生したガスの固形成分を水冷銅板によって採集したものの XMA 写真であるが Ca, Mn などが多く含まれている。

4.4 総 括

① フラックス A, B は電導度が良すぎるため、溶接電圧を 30~40 V の適性値に保つことができなかった。とくにフラックス A は、温度上昇によるスラグのガス化によってアーク放電をおこしやすい。その場合アークの当たっている部分のスラグは高温になり過ぎて、スラグのガス化を一層早める一方、アークの当たっていない部分の温度は下り、スラグ巻込などの欠陥をつくった。

② フラックス C を用いて溶接した場合は、還元された Ti を多く含む高融点の金属状スラグが溶接部と黒鉛当て板との間に付着して、スラグ巻込などの欠陥をつくった。

③ フラックス E1, E3 は、発生したガスがスラグ中より浮上しにくいので、アークが発生しやすい。電流を小さくすればアークの発生を抑えることができるが、入熱が不足して溶接欠陥がかえって生じやすい。しかし、E6 などは電流を多くした場合でも、アークの発生やスラグの巻込もなく、良好な溶接ができた。

④ 鋳鉄は、強力な還元剤である炭素を多く含有してい

るが、本エレクトロスラグ法は、その上に炭素電極を用いて溶接を行なうので、MnO, TiO など還元されやすい酸化物は、できるだけ含まない方が望ましい。

5. 現場における補修溶接への適用

前章までは、主に鋳鉄の組立て溶接を対象とした平板の溶接に関して実験を進め、当初の目的をほぼ達成することができた。

しかし、現時点における現場においては、鋳鉄の平板溶接よりも、果埋めなどの補修溶接に対する要求がきわめて強い。

これまでにも小型鋳造品に対する小さな欠陥部に対しては、Ni 系あるいは共金溶接棒によって補修溶接が行なわれてきた。しかし、その色調が異なったり、高い予熱を必要としたり、あるいは溶接割れを防ぐために短いビードをたび石形に溶接してあとでつないでゆくなど、過大なコストと労力を必要とし、大型鋳造品などの大きな欠陥部の補修には適していない。

一方、工作機械や産業機械などは、ますます大型化しているが、これらにできた大きな鋳造欠陥部の能率的な補修ができれば、鋳造コストの低減に大きな役割を果たすといわれている。工作機械の場合は、テーブルの摺動面などに生じた欠陥がもっとも大きな障害となるが、これを補修する場合はとくに色調に差がないこと、収縮割れが生じないことなどが要求される。色調については共金金属で溶接すればあまり問題はないが、補修溶接の場合、平板溶接とくらべると格段に大きな拘束力を受けるので、収縮割れ対策がもっとも重要となる。このほか、硬さの差がないことも重要であるが、鋳造後には一般に応力焼鈍が行なわれているので、これによって硬さが低下できるならば、溶接直後の硬さが高いことはそれほど問題ではないと思われる。

以下に現場において行なったテーブルの補修溶接の結

* TCaO は CaO および CaF₂ の Ca 成分の CaO 換算値

Fig. 8 Schematic view of small-size machine tool table used in repair welding.

Fig. 9 Hardness measurement and macro-structure in repair weld of smallsize machine tool table.

果を示す。溶接材料は、4章に記した平板溶接のものと
同じものを用いた。フラックスは E6 を用い、予熱はま
ったく行っていない。

5.1 小型テーブルの補修実験

Fig. 8 に示すような小型テーブルの一部に、50 mmφ
×40 mm の孔をあけ、この部分を溶接した。スタート
は、まず黒鉛ノズル電極からアーク放電させて孔の底部
を溶解し、金属プールが形成されてからフラックスを投
入して充填ワイヤを送給した。

溶接後の表面硬さおよび溶接部断面形状を Fig. 9 に
示す。熱影響部を含むブリネル硬さは Hb170~229 (ビ
ッカース換算 205~258 Hr) の範囲であり、溶接のま
までも母材と大きな差はなかった。なお、表面のきざげ仕
上げをしたところ、母材部よりもかえって容易であり、
切削性もよいことがわかった。溶接スタート部の近く
には、数カ所のスラグ巻込およびブローホールなどがみ
られるが、これらはスタート時のワイヤ送給時期をさら
に遅らせることによって防ぐことができるものと思われ
る。なお、この場合は熱収縮割れはおこしていない。
Fig. 10 に、深さ方向の硬さ分布を示す。溶接スタート
部付近の硬さは高いが、表面から 10~20 mm 以内の硬

Fig. 10 Hardness distribution in repair weld.

Fig. 11 Schematic view of large-size machine tool table used in repair welding.

さは低く、このままでも摺動面として使えるのではない
かと考えられる。

5.2 大型テーブルの補修実験

以上のように予備実験では硬さが低く、収縮割れもお
こらない溶接ができたので、次に実際の大型テーブルの
補修溶接を行なった。テーブルの形状と欠陥部の位置を
Fig. 11 に示す。欠陥部の周囲を図に示したように黒鉛
ブロックで囲み、その中で溶接を行なった。欠陥部の大
きさは、小さなもので 70 mm×100 mm、大きなもので
120 mm×150 mm もあったので、黒鉛電極を 2 本用い、
補修も、一つの欠陥部を 2 回に分けて溶接をおこなっ
た。4 カ所溶接したが、そのすべてが 200°C 前後に冷却
したときに、図に示すような位置に収縮割れをおこし
た。これらの原因としては、予備実験とくらべて欠陥部
が大きかったことや、欠陥部形状が異なることによる収
縮応力分布の相異などが考えられる。試料全体を 200°C~

300°Cに予熱すれば、収縮割れを防ぐことも可能であるが、溶接金属に延性があれば、当然その必要はない。延性のある鑄鉄としては溶接部を球状黒鉛化することがまず考えられるが、溶接部を延性鑄鉄にすることは非常にむずかしい。

なお、MnOを含むE1、E3、E6などのフラックスを用いて溶接した場合は、還元されたMnによって溶接金属が硬くなるとともに、延性も多少低下する。そこでフラックスE6からMnOを除いたフラックスをつくって溶接を行なった。ガスの発生はE6よりもさらに少なくなり、溶接作業性も一層良好であった。このほかにも鑄鉄の超塑性現象を利用して収縮割れを防ぐことも考えているが、これらについては次報で改めてのべる。

6. 結 論

以上、鑄鉄溶接用フラックスの開発の過程と、それを現場での補修溶接に適用した実験の結果をとりまとめると次の結論が得られる。

- 1) 試作した数種のフラックスについて、スラグの粘性測定およびそれを用いて溶接現象の直接観察をおこなった結果、スラグの粘性は鑄鉄の凝固温度よりも約200°C低い1000°Cでもまだ低粘性であるものが好結果が得られた。
- 2) 低粘性のスラグは比較的高電導になりやすいが、スラグ溶接ではスラグプールが小さいのでとくに低電導のものが必要である。E6程度の電導度でも溶接電圧の制御は容易であるが、これよりもいく分小さい方が望ましい。
- 3) 本エレクトロスラグ溶接は黒鉛ノズル電極を使う関係上、MnO、TiO₂などが比較的回元されやすい。分析結果によると、とくにMnOが還元され、E1、E3、E6などMnOが配合されているフラックスはMnが溶接金属中に還元されて溶接部を硬くした。しかし、E6からMnOを除いたフラックスを用いても溶接作業性はほとんど変化はなく、良好な溶接ができた。
- 4) 以上のスラグの粘性、電気伝導度の測定、溶接現象の直接観察をおこなった結果、これらと溶接結果の間の関連性を明らかにすることができた。その結果、鑄

鉄のエレクトロスラグ溶接にはフラックスE6ないしE6からMnOを除いたフラックス(SiO₂ 28%, Al₂O₃ 5%, CaO 25%, MgO 12%, CaF₂ 30%)を用いて溶接した場合が、電流、電圧の変動がもっとも少なく、溶接部外観もよく、溶接欠陥も生じなかった。

- 5) 現場における小型欠陥部の補修溶接では、おおむね満足できる結果が得られた。しかし大型欠陥部を補修した場合は熱収縮割れが発生した。大型鑄物の欠陥部を予熱なしで補修する場合は収縮応力がとくに強く働くので、これからは、延性のある溶接金属が得られるワイヤを開発する必要がある。

本実験を行なうにあたり、鑄鉄材料については東芝機械KK取締役兼プラスチック機械事業部長佐藤薫氏、また溶接材料の試作については日鉄溶接工業KK研究部熊谷良平主任研究員ならびに、中村成宏氏に、X線観察については船舶技術研究所神尾昭主任研究員、粘性測定については金属材料技術研究所中川竜一郎長ならびに郡司好喜室長からそれぞれご援助をお受けした。関係者各位に厚くお礼申上げる次第です。

文 献

- 1) 石井、田村、加藤他：鑄鉄のエレクトロスラグ溶接（第一報）溶接学会誌 Vol. 139 (1970) No. 3 p. 79
- 2) 水野、松村他：エレクトロスラグ溶接について、溶接冶金研究委員会、第43回資料、1971年2月
- 3) Ernest, M. Leven; Phase Diagrams for Ceramists. Copyright 1964 The American Ceramic Society.
- 4) B.E. Paton; Electroslog Welding. Reinhold Pub Corp 1962
- 5) 森一美他：溶接スラグの電導性について、溶接溶接部会、第3回シンポジウム資料
- 6) A.E. Martin, G. Derage; The Electrical Conductivity of Molten Blast-furnace Slags. Traus. AIME 154 (1943) 105
- 7) J.A. Kitchener, A.E. Davies; Electric Transport in Liquid Silicates. Trans Faraday Soc. 48 (1952) 536~548
- 8) 後藤：固体白金と溶融酸化物との界面インピーダンス 鉄と鋼 59 (1973) No. 1
- 9) A. Mitcnell; Proc. 2nd Int. Symp. on ESR Tech. Part 1
- 10) 戸塚 PbO Na₂Oを含む溶融ケイ酸塩の電気伝導度測定、日本金属学会誌, Vol. 33 (1969) No. 4 p. 498~503
- 11) 新版 金属便覧、丸善 p. 241