論文および報告

高速度写真による MIG 熔接現象に関する研究 (第1報)*

浮 田 勇** 信 原 貞 夫**

A Study on Phenomena of Inert Gas Metal Arc Welding
by High Speed Motion Pictures (Report 1)*

By I. Ukita** and S. Nobuhara**

Abstract

We have investigated phenomena of the argon gas metal arc welding of aluminum by the high speed motion pictures.

We have photographed the welding arc by the method similar to that of Dr. T. Okamoto and Dr. K. Ando, that is, we have photographed the welding arc as a shade, made by lightening of an intense carbon arc from the backside.

In the clear pictures obtained, some effect of current density, wire speed, welding speed, and characteristics of the welder upon the phenomena are remarked.

The results obtained are as follows :

(1) The comparatively large particles and comparatively small particles of molten metal transfer, one by one, from the wire tip to the base metal. Then particles more than one do not transfer at a time.

The small particles are made in some circumstances at separation of the large particles from the molten parts of wire tip.

(2) In the drooping characteristics of the welder, the size of particles is scarcely affected by current density in the region of our experiment. But in the rising characteristics, it tends to be smaller than in the drooping characteristics.

(3) As a matter of course, the speed of growth of particles become large as the current density is large, and accordingly, times of the transference of particles increase.

(4) Although the current density is large, there are scarcely the chance of short circuit and arc is peaceful when the gap between the wire tip and the base metal is long and the welding speed is proper.

If the gap is short or the welding speed is too fast, arc, molten pool of the base metal and molten parts of the wire tip are agitated violently, and the spattering of small particles repeats frequently.

In the rising characteristics, the agitation of arc, molten pool, molten parts seems to be stronger than in the drooping characteristics.

§ 1 緒 言

MIG 熔接現象に関しては、わが国においてもすでに 2, 3 の研究がなされている。しかしアーク熔接現象を究めるには、高速度カメラを利用するのが最もよいと考えられる。従来の金属アーク熔接については、かつて岡本博士、安藤博士等が主として軟鋼のアーク熔接現象に関して、多くの鮮明な高速度写真を撮られ、その熔接現象を詳細に解明されている。しかし MIG 熔接については未だわが国では高速度写真がとられていないようである。欧米においては、すでに MIG 熔接現象に関する高速度写真がとられているが、アークの光が十分に消されず、熔融粒子移行の状態を解明するのに十分でないきらいがある。

幸い本大学において、Kodak 社の高速度カメラを入手

することができたので、これを用いて MIG 熔接現象の研究に着手した。まず Al 材を実験材料として、電流密度、ワイヤー送給速度、熔接速度等の熔接現象に及ぼす影響を観察して、2, 3 の結果を得たので報告する次第である。

§ 2 撮 影 法

カメラは上記のごとく米国 Kodak 社の 16mm フィルム用の公称 3000

駒/秒の高速度カメラである。

速度は 1000~30

00 駒/秒の範囲

で調節されるよ

うになっている。

Fig. 1 は実

測したカメラ速

度である。100

呎フィルムで 75

Fig. 1 Speed characteristics of camera

* 原稿受付 昭和32年12月25日 (昭和33年度熔接学会春季学術講演会において発表)

** 正員, 姫路工業大学 Member, Faculty of Engineering, Himeji Technical College.

%以上回転してからでない3000駒/秒の速度にならない。
Fig. 1 のとき速度特性で、100呎を撮影するのに要する時間は2.2秒である。

Fig. 2 は撮影法を示すものである。熔融粒子移行の状

Fig. 2 Apparatus and connections

態を分明に撮影するために、かつて岡本博士、安藤博士等が実施された¹⁾と同様に、Al のアークをできるだけ消す目的で、Al のアークに対してカメラと反対の側から強力な炭素アークで照射し、影絵を撮影する方法をとった。また Al アークのスペクトルは大体炭素アークのスペクトルと重なった波長が出ているが、特に波長の短い部分に強い輝線があるので、これを減衰させるために Amber-9A のフィルターを使用した。

本実験においては電圧、電流の変化は電磁オシログラムによって観察した。電磁オシログラムとフィルム画面との同期が問題となるが、カメラにタイミング装置と同期スイッチがついているので、これを利用してあるフィルム長さになったときフィルム画面とオシログラムとに同時にタイミングが入るようにして同期をとった。Photo. 1 は同期の状態を示すものである。フィルムの右側の白線、オシログラムの右側の交流波形がタイミングである。第1駒に、おいてタイミングが始めて入り、第132駒で第8タイミングが入っていて、オシログラムと対照して第133駒で短絡し、第135駒で短絡が破れていることが分る。

Fig. 3 Characteristics of welder

§ 3 熔接機および実験条件

本実験では半自動式の熔接ガンを固定し、母材を移動させて全自動熔接として実験した。熔接機は垂下特性の差動複巻直流発電機を使用した。直巻界磁巻線を短絡することにより、あるいは和動に切替えることによって分巻特性、定電圧特性、上昇特性をも得ることができる。Fig. 3 はこのようにして得た熔接機の垂下特性と上昇特性を示すものである。

MIG 熔接において、電流密度があまり小さいと熔融金属粒子の移行が連続的に行われず、ある電流密度以上で粒子の移行が連続的となって熔接可能となることはよく知られているところであるが、本実験はすべて連続的移行の電流範囲で行った。

なお電源極性はすべて逆極性である。また実験材料および掲載写真に関する実験条件は次のごとくである。

実験条件：—

Table of Welding Conditions

Items	Film No.	2	4	5	6	7
	Photo. No.	4	7	1	2	6
		5		8	3	
Diameter of wire, mm		2.3	2.3	2.3	1.6	1.6
Charct. of welder		Drooping	Rising	Drooping	Drooping	Drooping
No load voltage, V		82	18	80	66	78
Average arc voltage, V		18	22	19	20	22
Average arc current, A		180	254	216	152	190
Current density, A/mm ²		43.3	61.2	52.1	75.6	94.6
Wire speed, cm/min.		258	285	249	276	444
Welding speed, cm/min.		98	100	49	60	90
Argon gas flow, ft ³ /h2.3		35	35	35	35	35

Photo. 1
Synchronizing of
oscillogram to film
(Wire 2.3mm ϕ)

Photo. 2
Transference of
large particle
(Wire 1.6mm ϕ)

Photo. 3
Growth and
transference of
small particle
(Wire 1.6mm ϕ)

Photo. 4
Anode spatter
(Wire 2.3mm ϕ)

Photo. 5
Large speed of
wire, large we-
lding speed
(Wire 2.3mm ϕ)

Photo. 6
Very large cu-
rrent density
(Wire 1.6mm ϕ)

Photo. 7
Rising characteris-
tics of welder
(Wire 2.3mm ϕ)

Photo. 8
Creation of cra-
ter in molten pool
(Wire 2.3mm ϕ)

母材: 2S 5 mm 厚

心線: 2S, 1.6 mm ϕ , 2.3 mm ϕ

実験条件: —

§ 4 実験結果と考察

(1) 熔融金属の移行

MIG 溶接における熔融金属の移行は Photo. 2, Photo. 3 に見られるごとく、粒子状の移行である。実験の電流範囲では Photo. 2 のごとく心線の径程度（少し大きな場合も小さい場合もある。）の比較的大きな粒子状で移行する場合と、その半分程度の比較的小さい粒子状で移行する場合とが認められる。このとき粒子が心線から離脱して空間を母材へ移行する場合と、心線から離脱する前に母材上の熔融金属部と短絡して移行する場合とがある。この短絡の機会は、心線と母材の距離が短いほど、また溶接速度（心線と母材の相対速度）の大きいほど多くなるが、電流密度が小さく globular 移行となる値以上の splay 移行の範囲

の電流密度では、短絡移行よりも離脱移行の方が遙かに多いことが写真およびオシログラムから認められる。

熔融金属粒子移行において、大粒子の移行後、続いてまた大粒子が生成移行することもあるし、大粒子移行後小粒子が1粒づゝ1回または数回生成移行してまた大粒子が生成移行することもある。このように大粒子、小粒子の移行は必ずしも規則的ではないが、これは大粒子が心線先端から離脱した瞬間の状態如何によるものと考えられる。すなわち大粒子が心線先端から離脱した瞬間には、心線先端の熔融金属部はその反作用を受けて動揺し、その動揺の状態によって続いて大粒子が生成移行するか、小粒子が1回又は数回続いて移行するようになるものと考えられる。このことから小粒子の生成移行はむしろ大粒子の生成移行に伴うものと考えられる。

なお小粒子の移行において、粒子移行速度が極めて速いので同時に心線と母材の間の空間に2個以上の小粒子が重なるように移行するようなことは認められない、すなわち

2S 材において小粒子生成が比較的短時間に行われる場合でも、0.0026 秒であるのに対して、小粒子が心線を離脱して母材へ移行する時間は比較的長いときでも 0.0009 秒であるから上のようなことは起り得ない。

また MIG 溶接においては、心線が被覆されていないので、かつて岡本博士、安藤博士等が軟鋼被覆棒で実験されたとき指摘されたような多数の小粒子が同時に雨の降る如く移行する²⁾ というような現象はこの場合本質には起り得ないといつてよい。Photo. 4 においては、数個の粒子が同時に移行するのが見られるが、これは陽極スパッターと考えられる。これは大粒子の移行が短絡による場合あるいは熔接速度が速い時などで、粒子離脱直後の心線先端の熔融部が特に激しく複雑に動揺したときに起ることがあると考えられるから、本質的なものでないとしてよからう。

(2) 熔融金属粒子

熔融金属粒子の形状はおむね Photo. 2, Photo. 3 に見られるごとくきれいな球状である。これは安藤博士の指摘されるごとく³⁾、表面張力の外に、電流密度が大きいためピンチ効果が大きく、また Ar 気流中においてアークの動揺が少ないことなどによるものであろう。

熔融金属粒子の大きさは、電源が同じ垂下特性の場合我々の実験範囲では電流密度によってあまり変らなかった。例えば 2.3mm 心線において、電流密度 41.0 と 52.1A/mm² に対して大粒子の径は 2.0~2.6mm の程度であり、小粒子の径は 1.1~1.3mm の程度である。また 1.6mm 心線においては電流密度 75.6A/mm², 94.6A/mm² に対して、大粒子の径は 1.7~2.0mm であり、小粒子の径は 1.1~1.2mm の程度であってあまり変らない。

しかし電源が上昇特性の場合は粒子の大きさが小さくなる。例えば Table のフィルム No. 4 の条件のとき、大粒子の大きさは約 17mm であり、また 1.0~1.2mm の比較的小さい粒子の外に径 1mm 以下の微小粒子が生じる。また上昇特性の時は小粒子の移行がかなり多くなる。これらは粒子が次第に生成して粒子下端と母材間の距離が小さくなると垂下特性の場合に比べて電流増加が大きく、粒子の生長が速くなると共に心線先端の熔融部の動揺も激しくピンチ効果の大なることと相俟って、このようになるものと考えられる。

(3) 粒子の生成と落下

当然のことながら大粒子の生成期間は長く小粒子の生成期間は短い。例えば Photo. 2 は大粒子の生成過程と離脱移行の状態を示すものであるが、第 1 駒は前の粒子の移行直後で、これから大粒子が生長を始め第 89 駒に至って離脱直前までに発達し、第 90 駒で既に離脱落下している。すなわちこの場合粒子の生長に 89 駒すなわち $89/3000=0.029$ 秒を経ている。小粒子の生成は例えば Photo. 3 で第 2 駒に

始まって第 12 駒まで 10 駒 $=10/3000=0.0033$ 秒しか経ていない。これら粒子の生成期間は当然電流密度が大きくなるに従って短くなる。1.6mm 心線るとき、電流密度 75.6A/mm² では大粒子生成期間 0.049 秒であるのに対して、94.6A/mm² では 0.018 秒である。

従って粒子移行回数も電流密度の大きくなるほど多くなる。1.6mm 心線の上記の 75.6A/mm² 電流密度では粒子移行回数は 42 回/秒であるのに対して、94.6A/mm² の電流密度の場合は 67 回/秒である。

次に粒子の離脱移行における粒子の平均速度を Photo. 2 あるいは Photo. 3 より計算してみるに、離脱から母材に到着するまでを 4 駒とみて 150cm/sec である。重力のみの場合を計算すると 10cm/sec であり、実際の移行速度は岡本博士、安藤博士等の指摘される通り²⁾ 遙かに大きい。これは勿論岡本博士等の指摘されるごとく重力の外にピンチ効果、離脱瞬間における蒸気圧等の外にこの場合 Ar ガス流速にも関係があるのではないかと考えられる。因みにこの場合のノズル出口におけるガス流速は 228cm/sec である。

なおこれに関しては今後更に検討したいと思っている。

(4) アークの状態

本実験の如く、母材、心線ともすべて同一で Ar ガス流量が一定の場合、アークの状態は電流密度、ワイヤー供給速度すなわち母材と心線の間の距離および熔接速度すなわち心線と母材の相対速度によって影響される。

一般に電流密度が大きいほどアークは激しいものであるが、Photo. 2 に見られるごとく、電流密度が大きくても母材と心線の間の距離が長く、熔接速度が適当であればほとんど短絡も起らずアークは静かである。しかしこのときはアークが母材の方に拡がって熔込みは浅く、ビード巾が広くなる。

これに反して電流密度が比較的小さくても母材と心線の間の距離が短いときは短絡の機会が多く、特に熔接速度の速い場合には母材の熔池および短絡が破れた直後における心線先端熔融部の動揺が激しく、粒子飛散等が生じ易い。Photo. 5 はその極端な例である。また Photo. 1, Photo. 8 はいずれもフィルム No. 5 のものであるが、これらは電流密度が比較的大で、母材と心線との間の距離が短い例であって、やはり短絡の機会が多く粒子拡散の多いことが見られる。Photo. 6 は極端に電流密度を多くし、これに応じて母材の板厚の関係から熔接速度も速くした場合であるが、アークおよび母材熔池の動揺甚しく、また粒子飛散の多い例である。

これらはいずれも垂下特性の場合であるが、上昇特性の場合には短絡の機会があれば電流の増加が大で、従って短絡の破れた瞬間におけるアーク並びに母材の熔池および心線先端の熔融部の動揺が激しく、また粒子飛散が生じ

い。Photo. 7 はこれを示す。

以上のことから考えると、MIG 溶接においては、アークが不活性の Ar ガスで包被されているのであるから、母材と心線の間の距離は長い目にした方が短絡も少く、一様なビードが得られるのではないかと考えられる。

熔け込みは電流密度が大で母材と心線の間の距離が短いほど深くなるのは当然であるが、この場合溶接速度が遅いと心線下の母材熔融部が壺状になり、遂には孔があくわけである。Photo. 8 は壺状になった中に熔融金属粒子が入り込んでしまっている状態を示す。

§ 5 結 言

Al の MIG 溶接に関する高速度写真の結果を要約すると次のようになる。

(1) 心線はその径程度の比較的大きな粒子並びにその半分程度の比較的小さい粒子となって一つつつ移行する。而して本質的には多数の粒子が降るように移行しない。

(2) 本実験の電流密度範囲において垂下特性では粒子の大きさに変化はなかった。上昇特性では粒子が多少小さくなると共に小粒子移行が多くなる。

(3) 粒子生成の速度は電流密度が大きくなると早くな

り、従って粒子移行回数も多くなる。

(4) 電流密度が大であっても、心線と母材の距離が比較的大であり、溶接速度が適正であれば短絡が少なくアークは静かである。母材と心線間の距離が短いとき、あるいは溶接速度が早すぎるときは、アーク、母材の熔池、心線先端の熔融部の動揺激しく粒子飛散が多い。特に溶接速度は適正にすべきである。

上昇特性の場合は垂下特性の場合に比べてアーク、熔池等の動揺が激しい傾向がある。

なお今後自己制御特性など更に Al の MIG 溶接の詳細について、また不銹鋼等の材料についてもこの研究を続ける計画である。

最後に本研究遂行に当って、研究費の一部を文部省科学研究費の援助によったことを附言する。

文 献

- 1) 岡本, 安藤, 長谷川 溶接協会誌 11 p. 47 1941 (昭和16年)
- 2) 岡本, 安藤 同上 6 No. 9 1926 (昭和11年)
- 3) 安藤, 長谷川 溶接学会誌 26 p. 675 1957 (昭和32年)

正 誤 表

第 27 卷 第 5 号 “MIG 溶接における自己制御特性の原因について” 安藤弘平, 西川 淳

頁	行	誤	正
34	上 カ ラ 10 行	ajusted	ajust
〃	上 カ ラ 14 行	expeaiment	experiment
〃	〃	15%	5%
〃	左 下 カ ラ 12 行	短くなると, E_q, IR	短くなるとは, E_q, IR
文中			

第 27 卷 第 5 号 “熔接棒の熔融速度に関する二、三の報告” 安藤弘平, 上山文男, 万木 享

頁	行	誤	正
38	左 上 カ ラ 14 行	A.C.C.D.S.P.	A.C, D.C.S.P.
〃	左 下 カ ラ 14 行	熔接頭の棒の	熔接棒の頭の
39	右 下 カ ラ 11 行	酸洗したの,	酸洗したもの,
〃	右 下 カ ラ 4 行	ほとんど全く異ならない。	ほとんど異ならない。
40	左 上 カ ラ 15 行	正極で	正極性で
〃	左 下 カ ラ 9 行	陰は降下	陰極降下
〃	右 上 カ ラ 20 行	対均	平均
〃	右 下 カ ラ 1 行	Table	Table
41	左 上 カ ラ 7 行	Arc voltage	Arc voltage
〃	左 下 カ ラ 8 行	Al_2O_3	Al_2O_3
〃	右 上 カ ラ 8 行	実験によるに	実験によると
〃	右 上 カ ラ 10 行	考案	考察
〃	右 下 カ ラ 15 行	5本のデータ	5本の棒
42	右 下 カ ラ 7 行	高調波を無視して得られる	高調波は無視し得られる
43	左 上 カ ラ 18 行	棒のは	棒の
〃	左 下 カ ラ 3 行	狭い所も	狭い所を