アルゴン溶接におけるアーク力の測定 (2)*

内 田 彰**

A Measurement of Arc Force in Argon Arc
Welding (Part 2)*

By Akira Uchida**

Abstract

As the supplemental work to the previous paper¹⁾, the electromagnetic force, which is included in the measured arc force, is estimated by some experiments and considerations. Then the measurements of arc force in MIG arc with Al, Cu and stainless steel electrodes are described. (Figs. 6, 7, 8). The results are discussed in relation to those given by other investigators. Some consideration is also made on the nature of arc force.

1. ま え が き

前報¹⁾においてアーク力の測定装置およびタングステンアークの場合の測定結果を示した。その場合電流回路に働く電磁力については特に考慮を払わなかったが、その後これが無視できないことがわかった。本報はこの点について若干検討し、つづいて行った MIG アークの場合の実験結果を記し、また最近入手した外国の研究と比較検討を行ったものであり、これまでの研究や従来の知識を補うものである。

2. 電流回路の電磁力

タングステン電極を含めて、電源からタングステン電極先端に至るまでの電流回路と、アークを受ける電極から電源の他の端子(或はアース)に至る間の電流回路との間には一般に電磁的斥力が働く。これは後述するように一部分はアーク近傍に集中し必然的にそれに附随するものであり (Fig. 1, f_{e1})、一部はアークからやや離れて分布し回路の長さや距離形状によるものであって (f_{e2}) 後者は全く外部的のものとして除いて考えるほうがよい。しかしアーク力というものを被溶接材の溶け込みないしは溶融池の凹みに作用する力として考えるとき

Fig. 1 Illustration of electromagnetic repulsive force

は f_{e1} は、電極の形状によって多少変化するであろうが、アーク力の中に含まれるべきものと考えられ、これに反してアーク力を溶融電極の溶粒を加速するのに作用する力と考えるときは f_{e1} はアーク力の中に含まれるべきではないことになる。

Fig. 2 は f_{e1} に相当する力を直視的にするために試みた簡単な実験で、鉄の小さな器に溶かした錫を満た

Fig. 2 The depression around the electrode immersed in the molten tin through which runs the current of 400 A.

* 原稿受付, 昭和35年10月29日

** 正員, 鉄道技術研究所 Member, Railway Technical Research Institute.

し、銅の電極を中央にさし込み、器のまわりは銅の帯をまいて他方のリード線とし、電極との間に約400Aを通電した場合に電磁的斥力によって電極の周囲に生ずる凹みを撮影したものである。このような現象はアークの場合にも当然伴わねばならない。しかし筆者の測定装置ではアークを水平方向に発生させているので、この力を実測するのは困難である。そこで今電極およびアークを半無限線電流と仮定し、アークを受ける電極を無限大の薄い板と仮定して概略の評価をするならば (Fig. 3), 板を押し下げるように働く力は

$$df_{e1} = H_r \frac{db}{2\pi} i dr, \quad H_r = \frac{i}{r}$$

このまま $0 \rightarrow \infty$ に積分しては無限大になってしまうので、 r の最小を電極の太さの程度、最大を足のひろがり程度とみれば、100A (10 Weber) の電流のとき、 $r_1 = 0.1 \text{ cm}$ $r_2 = 0.5 \text{ cm}$ とし、 $f_{e1} = i^2 [\log r]_{r_1}^{r_2} = 162 \text{ dyne} = 0.165 \text{ g}$ 。これはきわめて大ざっぱな評価であるが、実際にもおおむねこの程度となるであろう。

次に f_{e2} を測定するためには Fig. 4 のように測定装置の両電極を水銀によって短絡した場合に測定装置に現れる斥力を測定した。この際水銀に浸すように曲げた部分の影響を除くために、その部分の両方間の距離 (d) を種々に変え、外挿法によって、真直ぐに短絡された場合に相当する値を求めた。その結果 100A に対して 0.11 g, 150A に対して 0.25 g の値を得た。すなわちこの測定装置においては $f_{e2} = 0.11 \times 10^{-4} i^2$ である。

さて最近の外国の研究についてみると、ソ聯の研究者によるもの²⁾では水平の天秤装置を用いているが、水銀槽によって電極と対電極を短絡することにより $f_{e1} + f_{e2} = 0.32 \text{ g}$ at 100A と与えている。($f_{\text{arc}} = 0.127 \text{ g}$ at 100A) 他方また英国の研究者³⁾はアーク力の本体をプラズマジェット流のみと考え、板電極の種々の位置に小孔を作り、マノメーターをつないで電極板上の圧力分布を測定した。これを板面上で積分すれば f_{e1} , f_{e2} 等を含めぬアーク力になる筈である。彼らの与えているグラフから

Fig. 3 Estimation of electro-magnetic force (f_{e1})

Fig. 4 Illustration of the measurement of electro-magnetic force (f_{e2})

Table 1 Arc Force Calculated from the Presseure Distribution on the Base Plate Measured by English Researchers³⁾

Arc length	Arc current	Arc force
3 mm	125 A	0.40 g
"	100	0.16
"	55	0.04
1	100	0.17
6	100	0.22

筆者が概算した結果は Table 1 のようになった。この結果ではおそらく測定の確度の範囲では、アークの長さによるアーク力の一定の変化は認め難い。また電流による変化は 55A, 100A のものに対して 125A では急に大きくなっているため (i^2 に比例すると考えた場合) 3つの値のうちどれを妥当なものとしてとるべきか迷われるが、100A の値はソ聯の研究者のものよりかなり大きくはあるが、一応妥当な値として 100A におけるアーク力を 0.17 g とすることができよう。そうすると我々の前報の測定結果と比較すると f_{e1} として 0.14 g (100A) となる。以上を総合すればタングステンアークの場合のアーク力を次のように表すことができよう。(S.P. R.P. 共に)

$$f_{\text{arc}} = f_{p,j} + f_{e1} = (k_{p,j} + k_{e1}) i^2 = (0.17 + 0.14) \times 10^{-4} i^2$$

(p,j はプラズマジェットを表す)

(ただし前報の測定のバランス用電磁コイルの磁場がアーク電流の影響を若干受けることが判明したので、これを考慮するところの測定の誤差の範囲では両極性ともアーク力は大差なく、前報の測定値は $k = 0.42$ (電磁力を含む) と訂正するものとする)。

3. MIG アークにおけるアーク力の測定

(1) 実験要領

装置は前報の通りであるが、Fig. 5 に示すように溶滴の落下が指針等に当らぬように適当なガイドや溶滴受けを設けた。アークは最初測定用電極の斜下方に設けた補助水冷電極との間に発生させ、安定に動作し始めてから、支持腕を廻転して測定電極にアークをあて、同時にバランス用電磁コイル電流のスイッチを入れる。またこの逆の順序に行って測定を終了するようにした。当初電極の損耗や、また溶着金属による disturbance 等の種々の困難が予想されたが、実際にやってみると、これらの障害は大したことはなく、電極の加熱その他の測定上の誤差に比べても比較的小さなものであった。しかし電流密度がきわめて低く金属移行が不安定であるようなア

Fig. 5 The illustration of applying the measuring device to MIG welding arc.

ークでは幾分相対的なバラツキが大きく、またある電流では測定電極に溶着金属が多量に付着しやすいなど実験操作上の若干の厄介は免れなかった。なお通常は金属溶滴の大部分は流れ落ちるので、溶滴はアークが直接電極にあたることを少なくする効果だけ生じ、測定電極自身はタングステンアークのときよりかえって加熱されることが少くなり、最大 250 A 位までは測定が可能であった。ガンの支持位置は Fig. 5 の中に記してある。シールドガス (Ar) 流量は 40 cfh の一定とし、これの吹付力は 0.18 g ないし 0.32 g (コンタクトチューブにより異なる) で前報のタングステンアークトーチの場合に比べて著しく小さいが、ノズル付近の構造によるものと考えられる。アークの長さは 4~6 mm である。

(2) アルミニウム, 銅, ステンレス線の測定結果

Fig. 6 は 43S アルミニウム合金線 ($\frac{3}{64}$ " R.P., $\frac{1}{16}$ " R.P., S.P.) と銅 ($\frac{3}{64}$ " R.P.) の測定値で、前節の f_{e2} を差引いたもの、すなわち $f_{arc} = f_{p,j} + f_{e1}$ の値を示す。銅の正極性はアークが極度に不安定で測定が不能であった。また Fig. 7 は同様に 308 ステンレス線 0.035", 0.045", $\frac{1}{16}$ " 各 R.P. および S.P.) の場合である。ステンレスではコンタクトチューブから先きの電極線の突出長さが溶融率に大きく効くが、この実験ではその長さを約 15 mm (筆者の以前の報告⁴⁾の set [3] に当たる) にしてある。いずれの場合もいわゆる critical current 以下でも精度の範囲では測定曲線に急な変化が認められていない。

タングステンアークの場合と同様にアーク力の測定値はおおむね I^2 に比例しているが、銅の場合はかなり著しくその関係からはずれ (増加の割合が大きい)、ステンレスのときもややはずれている。これは電流の大小によって溶滴や電極の尖端、アークの形態などに変化を生ずるためであろう。また Al では正極性は逆極性より

Fig. 6 The value of arc force using Al and Cu electrode wire at various arc current.

Fig. 7 The value of arc force using stainless steel electrode wire of various diameter at various arc current.

アーク力が小となっているが、ステンレスでは反対の関係になっている。しかしこの機構についてはいまだ十分には明になし難い。

次に $f_{arc} = kI^2$ で表わした時のそれぞれの場合の k の値を Table 2 に示してある。ただし銅については一応 200 A に対応するものをとってある。同表には各線材の溶融速度とその溶融熱を併記してあるが、これは異種金属の間のアーク力の差異との間に一定の関係があるかもしれないと期待したのであるが、実際には表に示すようにそれはほとんど認められない。

電極線の太さとアーク力の関係はいずれの場合も線の

Table 2 The Value of k Coefficient and the Fusion Rate of Electrode.

Electrode metal	Al (43S)			Cu	Stainless steel (308)					
Dia. of electrode	$\frac{3}{64}$ "	$\frac{1}{16}$ "		$\frac{3}{64}$ "	0.035"	0.045"		$\frac{1}{16}$ "		
Polarity	R	S	R	R	S	R	S	R	S	R
k (10^{-4})	0.44	0.29	0.38	(0.49)	0.49	0.34	0.41	0.27	0.36	0.25
Melting rate, 10^{-3} g/sec. A. (a)	2.14	5.69	2.06	4.97	7.53	5.06	8.64	4.22	8.64	3.76
Heat of fusion, cal/g (b)	93			59	67					
(a)×(b)	0.199	0.529	0.192	0.293	0.504	0.339	0.578	0.282	0.578	0.297

細いほうがアーク力が大となっており、 k の値で示すと Fig. 8 のようになる。

(3) 他の研究との比較および検討

タングステンアークの場合についてソ聯および英国の研究者

達の測定値との比較はすでに第2節にのべた。もし測定が方法的に正しく、諸補正が正しく行われているとすれば、測定値の間の差異の原因として第一に考えられるのはタングステン電極に相対する板状電極の形状特に温度と測定時間とであろう。後者については Nieburg⁵⁾ が時間的变化を測定しており、それによれば20~30%ぐらいの変化がありうると思わねばならないが、さし当たりこれ以上詳細に立入ることはあまり意味がないであろう。

次にメタルアークについてはソ聯研究者のものは銅に限られているが、Nieburg は 空气中であるが Al, Cu などの 4 mm 棒電極による測定値を与えている。前者は0.3~0.5 mmφの細い電極を使用しており、また f_{e1} をも除外したものをアーク力としており、さらに比較的長いアークで測定しているので筆者の測定と直接比較するには問題があるが、Fig. 8 を考慮して筆者のステンレススチールの場合と比較するならばおおむね類似の値の程度と云えよう。また Nieburg の方法では電磁力 (f_{e2}) をどのように考慮してあるか詳かでないが、Al や Cu の彼の測定と筆者の値もおおむね同じ程度と見てよいと思われる。ただし Al の場合極性とアーク力の大小の関係が逆になっていることは注意しなければならないが、詳細を論断するにはいまだ検討の余地があろう。

Fig. 8 The relation between the diameter of electrode wire and the value of the coefficient k .

次に金属溶滴の衝突力について吟味しなければならない。電極の溶融量については Table 2 中に記したが、溶滴の移行速度については浮田氏⁶⁾その他⁷⁾⁸⁾の報告が参照できる。すなわち Al については 150 A で逆極性では 70 cm/sec 正極性では 20 cm/sec 程度、したがって溶滴の全運動量が力になるとすれば、この場合その寄与は逆極性で 0.022 g, 正極性では 0.017 g となる。ステンレスの粒子の速度には適当なデータがないが、かりに 30 cm/sec とすれば 0.035 g 程度でいずれもアーク力に対する相対的寄与は大して問題とならない。しかし溶粒速度は電流の約2乗に比例するであろうし、溶融量は1乗以上に比例するから、溶粒の衝突力は結局電流の3乗以上に比例し、電流とともに急速に増大し、Al (R.P.) で 400 Amp では 0.4 g 以上に達すると評価される。このようになるといわゆる finger type penetration⁹⁾ の原因ともなりうるであろう。しかし 250 A 以下ではほとんど問題とならぬことは以上によって知られる。

次に金属の蒸気についても一考の要がある。かりに溶融する電極金属の1%が蒸発すると仮定すると Al の 150 A (R.P.) では 0.003 g/sec, アークの温度を 10000° K と仮定し、この蒸気が 2 mmφ の孔から吹出しているように仮定すると、その速度は 2,900 cm/sec になり、その衝突力は約 0.009 g である。したがって溶粒の数%が蒸発するとしても蒸気の力はわずかに効いてくる程度で、これも直接的には問題にならないことになる。

電極線が細い場合のアーク力の増加はアークがそのために収縮されること、さらに溶融率(ステンレスの場合)蒸発率が増加してそれに熱を奪われるために thermal pinch (冷却によってアークが収縮する現象)としても作用することなどによるものと考えられよう。しかし細部の問題についてはなお今後の研究にまたねばならない。

4. 結 び

アーク力についてのこれまでの知識を総括すると、溶接におけるアーク力のおもな要素は棒状電極と板状電極の間のアークに必然的に伴う plasma jet の吹付力と電磁的な反撥力とがおもな要素である。これは特に pinch 効果を強化するような要素が働かなければアルゴンアークも普通の溶接アークも通常の電流範囲では大きな差はないといってよいようである。

しかしながら通常 MIG 溶接では深溶込が得られると考えられており、その原因は (1) 小電流範囲ではガスの吹付力がかなり効く、(2) MIG 溶接では手溶接に比べると比較的大きな電流が使われることが多い (この際 pinch 効果が有効に働いている)。また細い電極が用いられる——電極径とアーク力の関係 (Fig. 8) はこれまで発表されていなかったものである。(3) 300 A 以上の大きな電流では溶粒の射入力効くものと思われる (finger type penetration)。また以上の考察からシールドガス中の thermal pinch を起すような混合物の効果や、セルロース系の溶接棒において放出ガス力が相当大きな役割を演ずることなどが理解されよう。

最後に以上の所論はまだ多くの大ざっぱな点や問題点

を残していることを断っておかねばならない。すなわち英国の研究者のような圧力分布の測定においてもジェット力のみならず前報 4 節に述べたような電気力学的な静圧が含まれているはずであろうし、また Fig. 2, 4 などのように電極を短絡した場合の電流通路はアークの発生している場合とは相当異ってもいようし、またイオンの衝撃力についてもあまり論議されないままである。高電流のアークの機構は単純なものではないから、何らかの実際の問題と関連した興味にとまって細部の研究がなされるべきであろう。

なお本論文について意見を与えて下さった大井一郎氏および実験に協力された萩原健三氏に感謝します。

文 献

- 1) 内田彰：溶接学会誌，Vol. 29 (1960)，No. 6，p. 15-20.
- 2) N.V. Shiganov & E.D. Raymond：Svarochnoe Proizvodstvo No. 12 (1957)，p. 13-17.
- 3) J.B. Wilkinson & D.R. Milner：British W.J. Feb. 1960，p. 115-128.
- 4) 内田，萩原：，溶接学会誌，Vol. 27 (1958) No. 1 p. 9-17.
- 5) Nieburg：Elektroschweissung 9 (1938)，H. 6，s. 101.
- 6) 浮田，信原：溶接学会誌，Vol. 29 (1960) No. 7，p. 20.
- 7) Ludwig：Weld. J.，1957 No. 1，p. 23-S
- 8) Gillete, Breymeier：Weld. J.，1951 No. 3，p. 146-S
- 9) Muir：British W.J.，1957 No. 7，p. 323.

次 号 予 告

資 料

- ☆ 熱交換器の管と管板の溶接..... {黒川 常夫
上田 正人

論文および報告

- ☆ 低温材料の自動溶接..... 一海 俊景
- ☆ 軟鋼溶着金属中の非金属介在物の形態と組成 (第 4 報) 加藤 和夫
- ☆ ジルカロイ 2 合金の可変雰囲気溶接に関する研究..... {鈴木 春義
橋本 達哉
松田 福久
- ☆ Ti および Ti 合金のイナートガス・アーク溶接..... {岡田 実夫
に関する研究 (第 1 報) 新成
- ☆ Ti および Ti 合金のイナートガス・アーク溶接..... {岡田 実夫
に関する研究 (第 2 報) 新成

文 献 紹 介

- ☆ 1960年度溶接文献リスト