Hollow Cathode Arc におけるアーク柱の特性*

正箱 信一郎**, 太田 雅司***, 黄地 尚義****

Characteristics of Arc Column on Hollow Cathode Arc*

by SHOUBAKO Shinichiro **, OHTA Masashi *** and OHJI Takayoshi ****

Hollow Cathode Arc (HCA) was developed as a plasma source under the condition of low pressure in the 1960s, and various researches were performed to make clear the mechanism of the HCA. Since the HCA is a plasma source under low pressure environment, it attracts attention as a welding heat source in space. Moreover, the HCA is expected to be useful for the industrial application on the earth, because the melting process by HCA is very active and the penetration is huge in comparison with that by the conventional GTA.

In the previous paper, the discharge and melting process by the HCA has been discussed, and it has been shown that a concentrated columnar arc and a huge penetration are obtained in the case of low gas flowrate.

In the present paper, the current distribution on the anode surface and the floating potential of the HCA column have been made clear and the plasma structure of the HCA has been discussed to understand the heat input to the anode by the HCA. It is concluded that the huge penetration by the HCA in the case of low gas flowrate is closely related to concentrated current distribution on the anode surface and the strong flow of electrons in the HCA.

Key Words: Hollow Cathode Arc, Arc column, Current distribution, Plasma property, Floating potential, Input energy

1. 結 言

HCA(Hollow Cathode Arc)は低圧環境下でのプラズマ源として1960年代に開発され、そのメカニズムを解明するために様々な研究が行われてきた^{1,2)}。このHCAは、アーク電流を比較的大電流にすることによって溶接熱源としても適用可能であり³⁻⁵⁾、また低圧環境下でのプラズマ源であることから、宇宙環境下での溶接熱源として注目されている^{6,7)}。さらに通常の大気圧下でのGTA(Gas Tungsten Arc)を熱源に用いた場合に比べて母材の溶融量が桁違いに多くなることから⁸⁾、地上・低圧環境下での工業的な適用にも有効であると考えられる。

Fig. 1⁹⁾に、HCAにおいてArガス流量を変化させた場合の放電外観と母材(A1050)の溶融断面を示すが、図に示すように、HCAでは中空電極先端から流出させるArガスが少ないほど集中したアーク柱が得られ、母材の溶融量も多く

なることが示されている。しかし、HCAを熱源に用いた場合において、Arガス流量がアーク形態の変化および陽極への入熱量変化におよぼす影響や大気圧下でのGTAに比べて母材の溶融量が桁違いに多くなるメカニズムは完全に解明されているとは言えない。

Fig. 1 Effect of gas flow rate on arc appearance and penetration
($P = 3 \text{ Pa}$, $I = 150 \text{ A}$, $L = 10 \text{ mm}$, $v = 5 \text{ mm/s}$, Anode : A1050).

そこで本研究では、HCAを用いた場合の陽極への入熱特性およびアーク柱の特性を理解するために、まず陽極表面での電流密度分布を計測し、Arガス流量が陽極表面での電流密度分布に及ぼす影響を調査した。さらにHCAプラズマのフローティングポテンシャルを計測し、HCAにおけるアーク柱の特性および陽極への入熱特性について検討した。

* 原稿受付 平成16年11月8日 平成16年11月溶接アーク物理研究委員会で発表

** 学 生 員 大阪大学工学研究科知能・機能創成工学専攻 Student Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

*** 大阪大学工学研究科知能・機能創成工学専攻 Graduate School of Engineering, Osaka University

**** 正 員 大阪大学工学研究科知能・機能創成工学専攻 Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

2. 実験装置

2.1 HCA の原理

HCA(Hollow Cathode Arc)とは、低圧中において中空陰極から発生するアーク放電である。Fig. 2 に GTA 溶接用のトーチを改造して作成した HCA 用のトーチの概略図を示す。図中に示すように、HCA トーチでは中空陰極先端からのみアークの発生・維持に必要なだけの微量のプラズマ形成ガスを流出させることによって通常の GTA では困難である低圧中でのアークの発生・維持を可能としている。本実験での実験条件を Table 1 に示す。実験に使用した電極 (中空陰極) は 2%酸化トリウム入りのタングステンチューブで、外形 4 mm、内径 3 mm である。本実験でのプラズマ形成ガスには Ar を用いており、実験中の周囲圧力は 3 Pa 一定に保っている。溶接電源としては市販の MIG 溶接機を用い、実験はすべて直流電極マイナス (DCEN) 極性として行った。なお、陽極にはすべて銅板を用いている。

Fig. 2 Detail of HCA torch.

2.2 分割母板法

陽極表面での電流密度分布計測は、Fig. 3 に示す分割母板を用いる Nestor の方法¹⁰⁾で行った。以下に実験手順を示す。

- ・はじめにアークを陽極 1 で発生させ、陽極を図の右方向に送る。
- ・アークの位置が移動し、陽極 2 に電流が流れ始めてからすべての電流が陽極 2 に流れるまでの電流値をレコーダーによって記録する。Fig. 4 に陽極 2 での電流変化の一例を示す。

- ・最後に得られた電流値のデータ (Fig. 4) を Nestor の方法によってアーベル変換し、陽極表面での電流密度分布を得る。

なお、2つの陽極を絶縁するセラミックス板の厚さは 0.6 mm であり、陽極の移動速度は 5 mm/s とした。

Fig. 3 Experimental equipment for split anode method.

Fig. 4 Typical example of current curve measured by split anode method ($P = 3$ Pa, $I = 100$ A, $Q = 0.17$ ml/s, $L = 10$ mm).

2.3 プローブ法

HCA におけるフローティングポテンシャル計測にはプローブ法を用いた。Fig. 5 に実験装置の概略図を示す。

実験はプローブをモーター軸に固定し、アーク軸を通るように回転させ、陽極とプローブ先端間の電圧 (フローティングポテンシャル) の変化を計測した。なお、プローブの回転半径はアーク半径に対して十分大きく設定し、プローブがアーク内部をほぼ直線状に速度 140 mm/s で移動するようにしている。

Fig. 6 にプローブの先端形状を示す。プローブには先端が

Table 1 Range of experimental conditions used in the present paper.

Ambient pressure, P (Pa)	Electrode	Base metal	Arc current, I (A)	Arc length, L (mm)	Flowrate of Ar, Q (ml/s)
3	Tungsten containing 2%thorium oxide Outside diameter : 4.0 mm Inside diameter : 3.0 mm	C1020	100	10	0.17-3.3

90° 折れ曲がっているタングステン棒を用いており、周囲をアルミナで覆ってプローブの先端面のみが露出するようにしている。このプローブ面をアーク軸に対して電極方向（上向き、Upward）および陽極方向（下向き、Downward）とした場合について HCA のフローティングポテンシャルを計測した。

Fig. 7 に上向きプローブと電極の位置関係を示す。陰極先端からプローブ面までの距離を測定位置 h として以後表記している。下向きプローブも同様に陰極先端からプローブ面までの距離を測定位置 h としている。

Fig. 5 Experimental equipment for floating potential measurement.

Fig. 6 Schematic of probe used in this experiment.

Fig. 7 Probe position (h) for measurement.

フローティングポテンシャルとは、Fig. 5 においてプローブに流れる電流がゼロになる時のプローブの電位である¹¹⁾。プローブがプラズマ中を通る際、プラズマ内の電子はプローブ面に飛び込むわけであるが、通常、電子電流はイオン電流に比べて大きいのでフローティングポテンシャルは負の値をとり、電子電流を追い返す一方でイオン電流を引きつけ、両者の値が等しくなる所でフローティングポテンシャルの大きさが決まる。例えば、電子が 10 eV の運動エネルギーを持ってプローブに入ろうとしている場合には、プローブの電位を約 10 V 下げて電子を跳ね返さなければならない。よって、電子が大きなエネルギーを持っていればいるほど、フローティングポテンシャルはより低い値を示すこととなる。

3. 実験結果と考察

3.1 陽極表面での電流密度分布

Fig. 8 に Ar ガス流量 0.17 ml/s, アーク電流 100 A, アーク長 10 mm における HCA の放電外観と陽極表面での電流密度の計測結果を示す。先にも示したように、Ar ガス流量が 0.17 ml/s の場合には放電外観は円柱状となっており、その直径は電極の内径 (3 mm) とほぼ等しいことが確認できる。それに対し、陽極表面の電流密度分布はアーク柱の直径よりかなり広い範囲に分布していることがわかる。この結果から、HCA では円柱状のアークの外側にもプラズマが存在していると考えられる。

Fig. 8 Arc appearance and current distribution of HCA.

Fig. 9 Effect of gas flowrate on current distribution ($P=3$ Pa, $I=100$ A, $L=10$ mm).

次に, Ar ガス流量を変化させて電流密度分布を計測した結果を Fig. 9 に示す. 実験条件はアーク電流 100 A, アーク長 10 mm で, Ar ガス流量を 0.17 ml/s から 3.3 ml/s まで変化させている. 図から, Ar ガス流量が少なくなるに従って電流密度の最大値が高くなり, 中央に集中した分布となっていることがわかる. このことが HCA において Ar ガス流量が少ない場合に母材の溶融量が増加する一因であると考えられる.

3.2 フローティングポテンシャルの計測による HCA の構造解析

Fig. 10 に HCA のフローティングポテンシャルを上向きプローブと下向きプローブで計測した結果を放電外観と合わ

せて示す. 実験条件はアーク電流 100 A, アーク長 10 mm, 測定位置(h)5 mm で, Ar ガス流量が 0.17 ml/s と 1.7 ml/s の場合についての計測結果である.

Ar ガス流量が 0.17 ml/s と少ない場合を見ると, 下向きプローブに比べて上向きプローブの場合では, 円柱状の放電外観が確認できるアーク軸付近でフローティングポテンシャルが大きく低下している. これは, HCA では陰極から陽極に向かう電子の運動エネルギーが大きい, つまり陰極から陽極に向かう電子の強い流れが存在していることを表している. また, フローティングポテンシャルの分布範囲は先に示した電流密度分布の計測結果と同様に円柱状のアークが確認できる範囲よりも大きく広がっている.

一方, Ar ガス流量が 1.7 ml/s と多い場合には上向きプローブ, 下向きプローブ共にフローティングポテンシャルの値に大きな変化は無く, その絶対値も小さい. よって Ar ガス流量が多い場合には陰極から陽極に向かう電子の流れは弱いと言える.

次に, 電子の強い流れが存在していると考えられた Ar ガス流量 0.17 ml/s において, 測定位置(h)を 1~7 mm に変化した場合の上向きプローブによるフローティングポテンシャルの計測結果を Fig. 11 に示す. その他の実験条件は Fig. 10 の場合と同様である.

図から, 陰極から遠くなるに従ってフローティングポテンシャルの分布範囲が広がっていることがわかるが, $h=7$ mm であってもアーク軸付近でフローティングポテンシャルが大きく低下しており, 陽極表面でも電子の強い流れが存在していると予想できる.

Fig. 10 Effect of gas flowrate on floating potential measured by upward or downward probe ($P=3$ Pa, $I=100$ A, $L=10$ mm).

Fig. 11 Effect of probe position on floating potential measured by upward probe ($P = 3 \text{ Pa}$, $I = 100 \text{ A}$, $Q = 0.17 \text{ ml/s}$, $L = 10 \text{ mm}$).

以上の結果から、HCA において Ar ガス流量が 0.17 ml/s と少ない場合には HCA の構造は Fig. 12 に示すように、大きく分けて二つの部分から成ると考えられる。

円柱状のアークが観察できるアーク軸付近では電子は陰極から陽極に向かって強い方向性を持って運動している。よってフローティングポテンシャルが大きく低下する。円柱状のアークより外の部分にもプラズマは存在するが、強い電子の流れはなく、電子はランダムに運動しているため、フローティングポテンシャルの低下は小さい。Ar ガス流量が多い場合にはこのようなアーク軸付近の電子の強い流れは失われる。

大気圧中でのアーク放電では、電子の衝突が頻繁に起こっているために電子の平均自由行程がかなり短く、上記のような電子の強い流れは起こりにくい。一方 HCA では低圧中であることやプラズマの電離度が高いこと¹⁾などから電子の平均自由行程が長く、強い方向性を持った電子の流れが起こるものと考えられるが、HCA における電子の平均自由行程や、電子の強い流れの発生機構については未だ解明されていない部分が多く、今後の検討課題である。

Fig. 12 Image of HCA plasma

上記のことを考慮し、ここでは HCA による陽極への入熱について検討する。

一般に、大気圧中での GTA の場合には、アークによる陽

極への入熱は(1)式で表される¹²⁾。

$$P_A = P_e + P_r + P_c \cong P_e = I_a \left(V_w + V_A + \frac{5}{2} \frac{kT_e}{e} \right) \quad (1)$$

ここで、 P_A ：陽極への入熱量、 P_e ：陽極へ流入する電子が持ち込むエネルギー、 P_r ：アークプラズマからの放射エネルギー、 P_c ：アークプラズマからの伝導および対流によるエネルギー、 I_a ：アーク電流、 V_A ：陽極降下電圧、 V_w ：陽極材料の仕事関数である。

しかし、HCA では先に示したようにプラズマ中に陰極から陽極に向かう電子の強い流れが存在するため、その方向性速度 v_0 による運動エネルギー $E_B = m_e v_0^2 / 2$ を加える必要がある。よって HCA による陽極への入熱は(2)式となる。

$$P_A \cong P_e = I_a \left(V_w + V_A + \frac{5}{2} \frac{kT_e}{e} + \frac{1}{2} \frac{m_e v_0^2}{e} \right) \quad (2)$$

HCA において、Ar ガス流量が減少すると電子の方向性速度 v_0 は増加し、それによる運動エネルギー E_B も増加する。よって、陽極への入熱量および母材の溶融量が増加する。Fig.11 において、アーク軸付近におけるフローティングポテンシャルの値は約 27 V である。よってアーク軸付近における電子の運動エネルギー E_B は $20 \sim 30 \text{ eV}$ 程度になると考えられ、陽極への入熱量に大きく影響する。このことが、HCA を熱源に用いた場合に大気圧中での GTA 溶接に比べて母材の溶融量が桁違いに多くなる主要因であると考えられる。

4. 結 論

本研究は、HCA におけるアーク柱の特性と陽極への入熱について検討したものである。

得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 分割母板法によって陽極表面の電流密度分布を計測し、HCA の電流分布領域は、放電外観から確認できるアーク柱よりかなり広くなることを示した。
- 2) 陽極表面における電流密度は Ar ガス流量が少ないほどその最高値が高く、中心に集中した分布になることを示した。
- 3) HCA におけるフローティングポテンシャルを計測し、HCA は電子の強い流れが存在する中心部分と、電子がランダムに運動している周囲の部分との二重構造になっていることを示した。
- 4) HCA におけるアーク軸付近の電子の流れは、Ar ガス流量が少ないほど強くなることを明らかにした。
- 5) HCA による陽極への入熱には、電子の強い流れによる運動エネルギーを考慮する必要があることを指摘した。

参 考 文 献

- 1) L.M.Lidsky, S.D.Rothleder, D.J.Rose and S.Yoshikawa: Highly Ionized Hollow Cathode Discharge, Journal of Applied Physics,

- 33(1962), pp.2490-2497.
- 2) J.L.Delcroix and A.R.Trindade: Hollow Cathode Arcs, *Advances in Electronics and Electron Physics*, 35(1974), pp.87-190.
 - 3) V.M.Nerovnyi and G.V.Pod'yapol'skii: A Device for Sampling the Plasma in an Arc Discharge with a Hollow Cathode, *Automatic Welding*, 38(1985), pp.39-41.
 - 4) V.M.Nerovnyi, V.P.Fedichev, and G.V.Pod'yapol'skii: Measurement of the Radial Distributions of the Thermal-Power Parameters at the Anode of a High-Current, Low-Pressure, Arc Discharge, *Journal of Engineering Physics*, 54(1988), pp.183-187.
 - 5) V.M.Nerovnyi: Thermal Characteristics of the Arc Discharge used for Vacuum Welding Processes, *Welding International*, 16(2002), pp.561-565.
 - 6) B.E.Paton and V.F.Lapchinskii: *Welding in Space and Related Technologies*, Cambridge International Science Publishing, (1997).
 - 7) Y.Suita, Y.Tsukuda, T.Takagi, T.Ohji and K.Masubuchi: Study of Gas tungsten Arc Welding in Space (1st Report), *Welding International*, 8(1994), pp.269-273.
 - 8) N.Nishikawa, K.Kosaka and T.Ohji: Characteristics of Hollow Cathode Arc as Heat Source –Application of Hollow Cathode Arc to Welding of Aluminum Alloy–, *Journal of High Temperature Society*, 28(2002), pp.344-350. (in Japanese)
 - 9) N.Nishikawa, T.Maruyama and T.Ohji: Characteristics of Hollow Cathode Arc Plasma as a Heat Source –Investigation into Melting Mechanism Focusing on Electron Density and Temperature–, *IEEJ Trans. FM*, 123(2003), p.35-42. (in Japanese)
 - 10) O.H.Nestor and H.N.Olsen: Numerical Methods for Reducing Line and Surface Probe Data, *SIAM Review*, 2(1960), p.200-207.
 - 11) 堤井: プラズマ基礎工学 増補版, 内田老鶴圃, (1997).
 - 12) N.A.Sanders and E.Pfender: Measurement of Anode Falls and Anode Heat Transfer in Atmospheric Pressure High Intensity Arcs, *Journal of Applied Physics*, 55(1984), pp.714-722.