Hollow Cathode Arc 溶接現象に関する基礎的研究*

吉田 和弘**, 西川 宏***, 黄地 尚義****, 吹田 義一*****, 増淵 興一*****

Fundamental Characteristics of Hollow Cathode Arc Welding*

by YOSHIDA Kazuhiro**, NISHIKAWA Hiroshi***, OHJI Takayoshi****, SUITA Yoshikazu*****
and MASUBUCHI Koichi*****

Hollow Cathode Arc (HCA) is a low-pressure arc discharge, which is formed in vacuum by supplying a very small quantity of gas from the tip of hollow cathode. The purpose of this work is to elucidate the HCA characteristics as a welding heat source.

In the present work, arc voltage-current characteristics of HCA and its melting characteristics have been discussed. As a result, it is made clear that the HCA process is very sensitive to arc parameters, such as gas flow rate, arc length, electrode shape, and ambient pressure.

The results of the present work are summarized as follows.

- (1) The voltage of HCA increases with the increase of electrode inner diameter and the decrease of Ar gas flow rate.
- (2) The penetration in HCA melting is extremely deep and huge under the condition that Ar gas flow rate is low and arc length is long.
- (3) The penetration in HCA melting is sensitive to the minor elements in base metal such as sulfur. Even in the low sulfur material, a deep penetration is formed under high speed and high current conditions.

The above results suggest that HCA method is promising as the heat source of welding in space or welding on the earth.

Key Words: Hollow Cathode Arc (HCA), Welding, Arc characteristics, Penetration, Stainless steel, Space welding

1. 緒 言

現在建設中の国際宇宙ステーションに象徴されるように、21世紀はまさに宇宙の世紀となるであろう。宇宙技術の進歩には目を見張るものがあり、宇宙ステーションや月面基地などの宇宙インフラストラクチャが今後数多く建設されることが予想される。その建造・運用にあたって溶接技術は不可欠なものになると思われる。また、宇宙空間にはスペースデブリや隕石が飛び交っており、それらとの衝突部を補修する場合にも溶接技術は大いに有効である。

このような観点から、旧ソ連は1960年代から宇宙溶接の研究・開発を行っている¹⁻⁴⁾。なかでも、電子ビームによる

宇宙溶接法がよく研究されているが、高い加速電圧を要するためX線による宇宙飛行士の被ばくが懸念されるなど、問題を残している。

そこで、本研究では、電子ビームよりも安全なアーク放電に注目し、中空電極を用いたアーク：HCA (Hollow Cathode Arc) 溶接法⁵⁻⁸⁾の確立を目指し、その溶接現象に関する検討を行っている。ここでは、地上の低圧下におけるHCAの放電特性と母材熔融現象について検討した結果を報告する。

2. HCA 放電⁹⁻¹¹⁾

低圧中においては、通常のティグアークの点弧や持続が困難であることが知られている。そこで、HCA法では、微量のガスを中空電極中に流し、電極先端からガスを供給する。こうして、電極母材間に気体密度の高い空間を局部的につくり出し、低圧下でのアーク放電を可能なものとしている。したがって、HCA法での供給ガスはプラズマ形成ガスとみなされる。また、低圧下での気体密度は大気に比べてはるかに低いので、シールドの問題は通常重要でない。本研究で用いたHCAの溶接トーチの概略をFig. 1に示す。図のように本研究では、プラズマ形成ガスとしてアルゴンを用いている。

*原稿受付 平成13年3月29日 平成12年度11月溶接アーク物理研究委員会発表

** 大阪大学大学院工学研究科(現：コマツ) Osaka University

***学 生 員 大阪大学大学院工学研究科 Student Member, Osaka University

****正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Osaka University

*****正 員 高松工業高等専門学校 Member, Takamatsu National College of Technology

*****推薦会員 マサチューセッツ工科大学 Guest Member, Massachusetts Institute of Technology

Fig. 1 Detail of HCA welding torch.

Fig. 2 Hollow cathode arc discharge. ($L_a=5$ mm, $Q_{Ar}=20$ ml/min, $P=4$ Pa, SUS304 anode)

Fig. 2は、周囲圧力 P が4 PaでのHCAの放電外観である。このとき、アーク長 L_a は5 mm、供給ガス流量 Q_{Ar} は20 ml/minとしている。大気中ティグアークでは、Arシールドの場合の電子密度は約 $10^{23}/\text{m}^3$ と高いが、HCAのプラズマ密度は約 $10^{20}/\text{m}^3$ とかなり低い⁸⁾ため、アーク柱は明確には確認できない。

3. 実験装置と供試材料

実験装置は前報⁷⁾と同じである。ただし、溶接電源にはバッテリー電源、もしくは通常のインバータ電源を使用した。溶接トーチは水冷しており、トーチ姿勢は下向き（母材表面に垂直）である。なお、極性はすべてDCENである。

本研究で用いた電極の形状をTable 1に示す*。外径(D) 4.0 mm・内径(d) 1.8 mmの中空タングステン管（2%酸化ランタン入）、 $D=4.0$ mm・ $d=3.0$ mmの中空タングステン管（1.6~2%酸化トリウム入）、 $D=4.0$ mm・ $d=3.4$

*：ここでは、高融点材料でかつ比較的入手しやすいものを電極として採用した。詳しく検討できていないわけではないが、電極材質のアーク特性並びに母材の溶融特性に及ぼす影響はそれほど強くない。

Table 1 Electrodes used in this study.

Welding method	Electrode	Outside diameter	Inside diameter	Tip angle
TIG-arc	Solid tungsten*	4.0mm	—	60°
HCA	Hollow tungsten**	4.0mm	1.8mm	180°
	Hollow tungsten*		3.0mm	
	Hollow tantalum		3.4mm	

* : ThO₂(2%)—W,** : La₂O₃(2%)—W

Table 2 Chemical composition of materials (SUS304).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304 (ppm):LS	0.06	0.44	0.87	0.0030	0.001	8.09	18.07
SUS304 (ppm):HS	0.04	0.60	1.31	0.0035	0.008	8.21	18.37

mmの中空タンタル管を電極として用いている。前報⁷⁾とは異なり、本実験では、主に内径の大きい中空電極を使用した。

本実験で用いた母材はステンレス鋼 SUS304 である。その化学成分をTable 2に示す。硫黄含有量の異なる二種類のステンレス鋼を用いており、その含有量は10 ppm、80 ppmである。以後、前者をLS材、後者をHS材と記す。なお、以下の実験では特記しない限り、周囲圧力 P は4 Pa ($\approx 3 \times 10^{-2}$ Torr)、電極には外径 $D=4.0$ mm・内径 $d=3.0$ mmの中空タングステン管を用いている。また、比較に用いた大気中ティグ溶接法では、電極を中実タングステン棒（2%酸化トリウム入、 $D=4.0$ mm）で電極先端角度は60°とし、インバータ電源を用いている。

4. HCAの電気的特性

HCAと大気中ティグアークの電圧・電流特性の一例をFig. 3に示す。この例では、HCAのアーク電圧は、ティグアークに比べて全体的に7~10 V高い。

次に、電極内径のアーク特性に及ぼす影響をFig. 4に示す。前報⁷⁾では内径が小さく、ガス流量の多い場合のアーク特性を報告したが、本報の場合では、アーク特性が電極内径の影響を強く受けることが分かる。すなわち、低電流域では電極内径が大きい方が、アーク電圧は上昇する傾向にある。このような結果になるのは、電極内径の大小によって、アーク形態が異なっていることによるものと考えている。Delcroixは比較的低電流（20 A程度）アークのHCAについて検討を行い、中空電極内壁からの電子放出が存在し、アークプラズマは中空電極の内部から発生していると報告している¹¹⁾。これは電極内径が大きい場合に起こり得るものと考えており、内径が小さい場合は電極内部からアークが発生しているとは考えにくい。

アーク特性に及ぼす供給Arガス流量の影響をFig. 5に示す。ここでの電極には、外径 $D=4.0$ mm・内径 $d=3.4$ mmのタンタル管を用いている。ガス流量が少ないほど、

アーク電圧は上昇している。これは、電極先端からの供給ガス流量が少なくなると、電極母材間の気体密度も低くなり、放電維持には高い電圧を要するためであると考えられ

る。

以上より、アーク特性は電極形状（内径）やガス流量の影響を強く受けることが分かった。電極内径が大きいほど、また供給 Ar ガス流量が少ないほど、HCA の電圧は上昇する。

5. HCA による母材溶融現象

静止溶融の場合の HCA と大気中ティグアークによる溶融部の断面形状を Fig. 6 に示す。このとき、アーク電流 I_a は 130 A、溶融（アーク）時間 t_a は 40 s としている。また、母材はステンレス鋼 (SUS304) の HS 材である。アーク電流が同じであるにも関わらず、両者の溶融量は大きく異なる。例えば、アーク長 L_a が 10 mm の場合に注目すれば、HCA による母材溶融量は、大気中ティグアークにおける場合の数倍以上に達している。これは、HCA による母材への入熱量が大気中ティグアークの場合を大幅に上回っていることを意味している。この理由としては、Hollow Cathode Arc 内部におけるプラズマの加熱機構¹¹⁾が関与しているものと推察されるが、その詳細についてはよく分かっていない。

次に、異なる内径の中空電極を用いたときの溶融部の断面形状を Fig. 7 に示す。アーク長が短く、ガス流量が多いときは前報⁷⁾同様、浅い溶込みを形成する。しかし、図示のようにアーク長が長く、ガス流量が少ない場合には、溶込み形状及び溶融量に大きな差が生じる。以下の実験では内径の大きい中空タンタル電極 ($d=3.4$ mm) を用いている。

Fig. 3 Comparison of arc characteristics between TIG-arc and HCA.

Fig. 4 Effect of electrode inner diameter on arc characteristics.

Fig. 5 Effect of Ar gas flow rate on arc characteristics.

	TIG-arc $P=0.1\text{MPa}$	HCA $P=4\text{Pa}$
$L_a=5\text{mm}$	$V_a=12.6\text{V}$	$V_a=20.1\text{V}$
$L_a=10\text{mm}$	$V_a=15.8\text{V}$	$V_a=20.5\text{V}$

4mm
└──┘

Fig. 6 Comparison of penetrations in TIG-arc and HCA. (HCA, $I_a=130$ A, $t_a=40$ s, $P=4$ Pa, SUS304 (HS material), 12 mm)

HCAにおいて、供給ガス流量 Q_{Ar} とアーク長 L_a を変化したときの溶融部の断面形状を Fig. 8 に示す。なお、ここでは、電極には中空タンタル管(外径 $D=4.0$ mm, 内径 $d=3.4$ mm)を用いている。供給ガス流量が少なくなるほど、溶込み深さは増加する傾向にある。また、この傾向はアーク長が長くなるほど顕著である。ガス流量 Q_{Ar} が 100 ml/min のときは、アーク長とともに溶融量は減少している。これは、一般の大气中ティグアークにみられる現象と同じであり、アーク長の増加とともにアークが拡がり、アークエネルギーが集中しなくなっているものと思われる。しかし、ガス流量 Q_{Ar} が 10 ml/min の場合には、アー

Fig. 7 Influence of electrode inner diameter on penetration.
(HCA, $L_a=10$ mm, $Q_{Ar}=10$ ml/min, $I_a=180$ A, $t_a=40$ s, $P=4$ Pa, SUS304 (HS material), 12 mmt)

Fig. 9 Influence of ambient pressure on penetration.
(HCA, $L_a=10$ mm, $Q_{Ar}=10$ ml/min, $I_a=130$ A, $t_a=40$ s, SUS304 (HS material), 12 mmt)

Fig. 10 Effect of ambient pressure on D/W value.

Fig. 8 Influence of Ar gas flow rate and arc length on penetration.
(HCA, $I_a=140$ A, $t_a=40$ s, $P=4$ Pa, SUS304 (HS material), 12 mmt)

ク長が増加するにつれて溶融量は多くなり、アーク長 L_a が10 mm になると、極めて深い溶込みを形成する。なお、この場合のアーク電圧は約20 V でかなり高くなっている。このように、HCA による母材の溶融現象は、アーク長とガス流量の値に強く依存する。

周囲圧力が溶込みに及ぼす影響を Fig. 9 に示す。また、そのときの D/W 比を Fig. 10 に示す。周囲圧力が高くなるにつれて、溶融量は減少する。周囲圧力 P が4 Pa (3×10^{-2} Torr) と低いときは深溶込みを形成するが、 P が150 Pa (1 Torr) と高くなると、溶融量は激減する。このことは、周囲圧力により、アーク形態が大きく異なることを暗示している。この傾向は、図示のように供給ガス流量が少ない場合に顕著である。なお、 Q_{Ar} が100 ml/min と多い場合には、周囲圧力に関わらず溶融量が一定であることを確認している。

大気中ティグアークによる母材の溶融現象は、硫黄や酸素などといった母材中に含まれる微量元素の影響を強く受けることが知られている。そこで、HCA の溶融現象に及ぼす硫黄含有量の影響を調査した。その結果を Fig. 11 に示す。アーク長 L_a は5 mm, 10 mm とし、供給ガス流量 Q_{Ar} は10 ml/min である。LS 材では、アーク長に関係なく、広く浅い溶込みを形成するが、HS 材ではアーク長が長くなると溶込みは急激に深くなる。このように、ガス流量が少ない場合は、溶融現象に及ぼす微量元素の影響は顕著である。なお、前報⁷⁾でも示したように、ガス流量が多くなると、この影響は見られない。

次に、移動アークによる LS 材と HS 材におけるビード横断面形状を Fig. 12 に示す。静止溶融の場合と同様、移動溶融現象においても母材中の微量元素の影響を強く受ける。この例での溶込みの D/W 比は、LS 材で0.26, HS 材では1.13である。このように、LS 材における溶込みは浅くて広い。

LS 材において、溶接速度を変化させたときのビード横断面形状を Fig. 13 に示す。溶接速度 v が速いほど、単位面積当たりの入熱量が少なくなるので溶融量は減少するが、

D/W 比は大きくなり、0.5を超える。溶接速度が速くなるにつれて、アークが集中してくるのではないかと考えてい

4mm

Fig. 11 Minor elements (Sulfur) effect on penetration.
(HCA, $Q_{Ar}=10$ ml/min, $I_a=130$ A, $t_a=40$ s, $P=4$ Pa, SUS304, 12 mm)

3mm

Fig. 12 Minor elements (Sulfur) effect on bead cross section.
(HCA, $L_a=10$ mm, $Q_{Ar}=10$ ml/min, $I_a=150$ A, $v=2$ mm/s, $P=4$ Pa, SUS304)

4mm

Fig. 13 Influence of welding speed on bead cross section.
(HCA, $L_a=10$ mm, $Q_{Ar}=10$ ml/min, $I_a=230$ A, $P=4$ Pa, SUS304 (LS material), 12 mm)

Fig. 14 Influence of arc current on bead cross section.
(HCA, $L_a=10$ mm, $Q_{Ar}=10$ ml/min, $v=8$ mm/s,
 $P=4$ Pa, SUS304 (LS material), 12 mm)

Fig. 15 Effect of arc current on D/W value.

る。

また、LS材において、アーク電流を変化させたときのビード横断面形状を Fig. 14 に示す。また、その溶込みの D/W 比を Fig. 15 に示す。アーク電流の増加に伴い、溶融量だけでなく、溶込みの D/W 比も増加傾向にあり、0.7 程度に達することがある。

6. 結 言

本報告では、低圧下における内径の大きい中空電極を用いた場合の Hollow Cathode Arc の放電特性及び母材溶融特性について検討した結果を述べた。得られた主な結果は次のとおりである。

- (1) Hollow Cathode Arc の放電特性及び母材溶融特性は、電極内径や供給ガス流量、周囲圧力に敏感である。
- (2) HCA の電圧は、電極先端からの供給 Ar ガス流量が

少ない方が、また電極内径が大きいほど、上昇する。

- (3) HCA によるステンレス鋼 (HS 材) の溶込みは、ガス流量が少ないほど、アーク長が長いほど、そして周囲圧力が低いほど、深くなる。

- (4) 母材に含まれる S 量が溶融現象に及ぼす影響は、極めて顕著である。また、LS 材でも、溶接速度を増加させると溶込みの D/W 値が上昇し、大電流側ではかなり深い溶込みとなる。

HCA の放電特性とその母材溶融現象は非常に複雑であるが、極めて興味深いものである。そのメカニズムについては未知の部分が多く、今後さらなる検討が必要である。しかし、本報告で示したように、Hollow Cathode Arc は宇宙環境下における溶接熱源として、また地球上での低圧下における溶接熱源として極めて有効であると判断される。

参 考 文 献

- 1) B.E. Paton, V.F. Lapchinskii, “宇宙の溶接” (黄地訳), 産報出版 (2000).
- 2) B.E. Paton and V.N. Kubasov, “Experimental Welding of Metal in Space”, *Avt Svarka*, No. 5 (1970), p. 7-12.
- 3) B.E. Paton, “Welding in Space”, *Welding Engineer*, Vol. 57, No. 1 (1972), p. 25-29.
- 4) B. Irving, “Electron Beam Welding, Soviet Style: A Front Runner for Space”, *Welding Journal*, Vol. 70, No. 7 (1991), p. 55-59.
- 5) 吹田, 佃, 高木, 黄地, 増淵, “宇宙空間での GTA 溶接に関する研究 (第 1 報)”, 溶接学会論文集, Vol. 11, No. 3 (1993), p. 423-427.
- 6) 吹田, 佃, 寺島, 八田, 河野, 猪熊, 川田, 黄地, 西川, 吉田, “航空機を使用した模擬宇宙環境下での GHTA 溶接実験”, 溶接学会論文集, Vol. 18, No. 2 (2000), p. 228-235.
- 7) 西川, 吉田, 黄地, 吹田, 佃, 寺島, 八田, 河野, 川田, 猪熊, 増淵, “低圧下での GHTA 放電の特性と母材の溶融特性”, 溶接学会論文集, Vol. 18, No. 2 (2000), p. 272-279.
- 8) 西川, 吉田, 丸山, 黄地, 吹田, 増淵, “低圧下における中空陰極アークの熱源特性に関する研究”, 電気学会プラズマ研究会資料, pst-00-34 (2000).
- 9) V.M. Nervnyi, V.P. Fedichev, and G.V. Pod'yapol'skii, “Thermal Effect of the Low Pressure Welding Arc on the Heated Body” *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, Vol. 22, No. 2 (1988), p. 103-107.
- 10) L.M. Lidsky, S.D. Rotileder, D.J. Rose, and S. Yoshikawa, “Highly Ionized Hollow Cathode Discharge”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 33, No. 8 (1962), p. 2490-2497.
- 11) J.L. Delcroix, A.R. Trindade, *Hollow Cathode Arcs*, “Advances in Electronics and Electron Physics”, Editor: L. Marton, Academic Press (1974), p. 88-185.