低圧下における中空陰極アークの熱源的特性に関する研究

学生員 西川 宏 (大阪大学大学院)

非会員 吉田和弘 (大阪大学大学院)

非会員 丸山敏和 (大阪大学大学院)

正 員 黄地尚義 (大阪大学大学院)

非会員 吹田義一 (高松高専)

非会員 増淵興一 (マサチューセッツ工科大学)

Characteristics of HCA as a heat source under low pressure condition

Hiroshi Nishikawa, Student Member, Kazuhiro Yoshida, Non-member, Toshikazu Maruyama, Non-member, Takayoshi Ohji, Member (Osaka University)
Yoshikazu Suita, Non-member (Takamatsu National College of Technology)
Koichi Masubuchi, Non-member (Massachusetts Institute of Technology)

A feasibility study has been conducted to determine if Hollow Cathode Arc (HCA) can be used for a welding heat source in space, that is a high vacuum and a microgravity condition. The HCA method enables the arc discharge to form under low pressure conditions by purging a small amount of gas through the center of the hollow cathode.

In this paper, fundamental characteristics of HCA as a welding heat source, such as volt-ampere characteristics, arc current distribution on anode surface and the electron density and temperature in arc space, have been made clear.

The results are summarized as follows,

- (1) The current distribution on anode surface of HCA is extremely diffuse, and the anode diameter reaches to about 55mm under the condition that arc length is 10mm.
- (2) The melting process by HCA is significantly affected by the diffuse anode, and it is characterized by shallow and wide penetration.
- (3) The electron density of HCA is about $5 \times 10^{19}/\text{m}^3$ at the center of arc column, and the electron temperature is about 12000~18000K in arc space.

キーワード：中空陰極アーク, 宇宙環境, 熱源, アーク特性, 電子密度・温度

Hollow Cathode Arc, space environment, heat source, arc characteristics, electron density and temperature

1. はじめに

1998年11月に始まった国際宇宙ステーション (ISS) の建造に代表されるように, 宇宙空間での大型構造物の建造が現実のものとなってきた。将来, 宇宙空間における各種インフラストラクチャーの整備や大型構造物の建造の際には, 安全で信頼性の高い溶接技術が必要になるとと思われる。また無数ともいえる人工衛星や浮遊物が宇宙空間を飛び交う時代であり, 構造物との衝突も十分に考えられ, 補修技術確立の必要性が高まるものと思われる。

このような状況の中で, 宇宙溶接技術の必要性を早くから認識していた旧ソ連は 1960 年頃から宇宙溶接の研究に着手しており, 1984 年には Salyut-7 号の船外のオープンス

ペースで電子ビーム銃を用いた溶接実験を行っている¹⁻³⁾。また米国においても, 以前から宇宙溶接の研究が行われており, 1997 年には NASA とウクライナのバトン電気溶接研究所との共同で, スペースシャトルでの電子ビームを用いた溶接実験が計画された。しかし残念ながら直前に無期延期となっている⁴⁾。このような背景には, 溶接中に発生する X 線による宇宙飛行士の被ばくや電子ビームの安全性に問題があると思われ, 実用化に至っていないのが現状である。

著者らは, このような観点から, 安全かつ地球上で最も広く研究されているアーク溶接法に注目し, 宇宙環境下でのアーク溶接技術の確立を目指し, 研究を行っている。

宇宙空間は高度な真空環境下であり, ISS が建造されて

いる低高度軌道における平均圧力は、およそ $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ にまで達する。したがって宇宙空間は、電氣的絶縁状態にあるため、宇宙空間でのアーク発生及び維持に際しては、何らかの工夫が必要である。そこで著者らは、従来から真空中でのプラズマ発生源として用いられてきた中空陰極アーク (Hollow Cathode Arc (HCA))^{5,6)}を、宇宙空間での溶接用熱源として適用することを提案し、低圧下における中空陰極アークの種々の特性について検討を行っている。これまで地上真空容器内の実験により、HCA 法を用いることで、大気圧中で用いられているガス 텅ステンアーク (Gas Tungsten Arc (GTA)) 溶接法ではアーク放電の発生及び維持が困難である低圧中でも、アーク放電の発生及び維持が可能であることを確認している⁷⁾。またその放電特性や母材溶融特性について検討を行ってきた。その結果、放電開始電圧はガス流量に依存することや、ガス流量を 1.67ml/s とした場合、溶融形状が浅く広いものになることなどを明らかにした⁸⁾。また航空機による微小重力実験を行い模擬宇宙環境下でも HCA 法を使用し、溶接が可能であることを確認している⁹⁾。一方ロシアでは、これまでに低圧下で中空陰極によるアーク放電を溶接用熱源として利用すると、深い溶け込みが得られ、非常に集中したエネルギー源となることが報告されている¹⁰⁾。以上のようなことから今後 HCA は、宇宙空間での有望な熱源に成り得ると考えられる。

本研究では、まず低圧下で HCA を溶接熱源として用いた場合、母材の溶け込み形状には浅い溶け込みと深い溶け込みの2通りがあることを示す。さらにここでは、前者を形成するアーク放電の熱源としての特性を検討するため、アーク電圧-電流特性やアノード表面での電流分布領域、プ

ローブ法を用いた電子温度・密度の計測を行った結果について報告する。

2. 実験装置及び実験回路

2.1 HCA 法について

Fig.1 は、HCA 法用トーチの模式図である。HCA 法は、電極に中空電極を使用し、その電極先端からのみ放電に必要な最小限のガスを供給する仕組みになっている。そのガ

図1 中空陰極アーク用 トーチ
Fig.1 Detail of HCA torch

図2 HCA 用実験回路図
Fig.2 Experimental apparatus for HCA

スをプラズマ形成用ガスとすることで、従来から大気中で用いられている GTA 溶接法ではアーク放電の形成が難しい真空環境下でもアーク放電の形成及び維持を可能にしている。

本研究では、電極に外径 4.0mm・内径 1.8mm の 2%酸化ランタン入り中空タングステン電極を使用した。一部、HCA 法の典型的な溶け込み形状を示すときのみ、外径 4.0mm・内径 3.0mm の 2%酸化トリウム入り中空タングステン電極を使用している。電極先端は、アークの点弧性を考え、先端角を 60 度に削っている。電極先端形状の影響を検討するため、先端を削った場合とそうでない場合の溶け込み形状を比較したが、ほとんど影響がみられなかった。またノズル内にはアーク点弧時、放電の電極上方への這い上がりを防ぐために絶縁物を入れている。プラズマ形成用ガスには Ar ガスを用い、トーチ上方からトーチ内に供給され、電極先端からのみ流出されるしくみになっている。また点弧を容易にするため、すべての実験において、アーク点弧時にはガス流量を 2.5ml/s とし、点弧後所定のガス流量まで減らしている。電流は、コレットボディーを通して電極に供給される。

2. 2 実験装置・回路

今回試作した実験装置の回路図を Fig.2 に示す。航空機実験⁹⁾や宇宙空間での適用を考慮し、低ノイズかつ軽量の実験装置を試作した。回路はアーク放電用主回路とアーク点弧用回路から構成されている。具体的には、アーク放電用電源としてコンパクトかつノイズが少ない点を考慮し、バッテリーを使用した。バッテリーは、出力電圧 12V の密閉型バッテリーを 3~4 個直列にして使用した。またアーク点弧用として点弧時のノイズを軽減する目的で、直流の高電圧点弧方式を採用した。点弧用電源は、最大電圧 1kV、最大電流 50mA である。また実験はすべて電極を陰極としておこなった (DCEN)。アーク消弧用として、トランジスタを組み込んでいる。

使用した真空容器は、400×400×400mm の大きさのもの

であり、排気用ポンプとしては、ロータリーポンプとメカニカルブースターポンプを併用している。それによって、Ar ガスを供給しない状態で $4 \times 10^{-1} \text{Pa}$ ($3 \times 10^{-3} \text{Torr}$) の真空度となっている。

3. 中空陰極アークの熱源特性

3. 1 典型的な溶け込み形状

低圧下で HCA 法を用いた場合に得られる典型的な 2 種類の母材溶け込み形状を Fig.3 に示す。実験に用いた材料は、大きさ 50×50×12mm のステンレス鋼(SUS304)である。異なる母材溶け込み形状を示すため、異なる条件で溶融実験をおこなった。その実験条件を Table 1 に示す。

両者の溶け込み形状を比較すると、電流とアーク長、溶融時間が等しいにもかかわらず、溶融池の形状及び幅・深さともに異なっていることがわかる。条件 1 による溶け込みは、深さ方向よりも横方向に広がっており、非常に浅い溶け込みとなっている。それに対し条件 2 による溶け込みは、中央部が深い溶け込みとなっており、溶融量も条件 1 に比べてかなり増加している。溶融量が異なる原因の一つとしては、アーク電圧の違いが挙げられる。このように

図 3 HCA の母材溶融特性

Fig.3 Effect of experimental condition on penetration in HCA

表 1 実験条件

Table 1 Experimental conditions

	Electrode	Size of electrode (mm)	Arc current (A)	Arc voltage (V)	Arc length (mm)	Arc time (s)	Gas flow rate (ml/s)
Condition 1	Tungsten containing 2% lanthanum oxide	Outside diameter:4.0 Inside diameter :1.8	150	12.5	10	40	1.67
Condition 2	Tungsten containing 2% Thorium oxide	Outside diameter:4.0 Inside diameter :3.0	150	20.3	10	40	0.167

表 2 実験条件範囲

Table 2 Range of experimental conditions

Ambient pressure (Pa)	Electrode	Size of electrode (mm)	Arc current (A)	Arc length (mm)	Gas flow rate (ml/s)
5-7	Tungsten containing 2% lanthanum oxide	Outside diameter:4.0 Inside diameter :1.8	20-150	1.5-10	1.67

HCA の溶け込み特性は、中空電極の内径やガス流量の放電条件によって、著しく影響されることがわかる。また後者では、写真撮影による観察結果から熔融池表面からの金属蒸気の影響を強く受けているものと推察している。以後、前者のような溶け込みを形成するものを Shallow Penetration type (S.P.型)、後者のような溶け込みを形成するものを Deep Penetration type (D.P.型)と呼ぶ。以下では、前者(S.P.型)の場合を対象とし、S.P.型 HCA の熱源特性について調査及び検討した結果について述べる。実験の諸条件について Table2 にまとめる。

3. 2 アーク入熱について

一般にアークによる母材の熔融現象を理解する上で、アークによって母材に持ち込まれる熱エネルギーについて知ることが重要である。本研究では、母材を陽極として用いているため、ここで陽極へのアーク入熱について簡単に述べる。

アークから陽極へ供給されるエネルギーとして考えられている主なものは、従来から次の3形態である。

- ① 陽極へ流入する電子が持ち込むエネルギー： Q_e
- ② アークプラズマからの放射エネルギー： Q_r
- ③ アークプラズマからの伝熱及び対流によるエネルギー： Q_c

これらのうち、電子の持ち込むエネルギーが最も重要であることが知られており、陽極への入熱は、近似的に次のように表現される¹²⁾。

$$Q_A = Q_e + Q_r + Q_c \approx Q_e = I_a (V_A + V_W + (5/2) kT_e / e) \quad (1)$$

ここで、 Q_A ：陽極入熱、 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、 k ：ボルツマン定数、 T_e ：電子温度、 e ：電子電荷

従って、母材への入熱及び母材の熔融には、アークの電圧・電流特性やアーク中の電子温度・密度、母材への電子の流入経路などが非常に重要になる。よって本研究においても、S.P.型 HCA の電流・電圧特性や母材表面上での電流領域及び電極・母材間における電子密度・温度分布の計測を行った。

図4 HCA の放電の様子と概略図

アーク電流 150A, アーク長 10mm, ガス流量 1.67 ml/s, 周囲圧力 5.32Pa

Fig.4 Photograph and schematic diagram of HCA

Arc current 150A, arc gap 10mm, gas flow rate 1.67ml/s
Ambient pressure 5.32Pa

3. 3 低圧下でのアーク特性

低圧下での S.P.型 HCA の放電の様子とその模式図を Fig.4 に示す。放電条件は、周囲圧力 5.32Pa, アーク電流 150A, 電極間距離 10mm, 電極先端からのガス流量 1.67ml/s とした。また母材にはステンレス鋼(SUS304)を用いている。

図からわかるように、中空電極部での放射が電極間のプラズマ部分の放射より非常に強くなっており、アーク柱をはっきりと観察することができない。これは周囲圧力が低いために、アーク柱のプラズマ密度が大気圧下の Ar アークのそれに比べて低下しているためと考えられる。また母材表面上に青い発光部が観察され、母材表面からの金属蒸気の影響によるものと思われる。

Fig.5 に、低圧下(5.32Pa)での S.P.型 HCA の電圧・電流特性を示す。放電条件は、図中に示す通りであり、電極間距離を 2,5,8,10mm と変化させている。電極間距離を変化させてもアーク電圧はほとんど同じであることを考えると、アーク柱中の電位傾度はかなり低く、アーク電圧の大部分は陽極降下電圧、陰極降下電圧、赤熱した陰極自身での降下電圧で占められていると考えられる。それぞれの値については、現在検討中である。

図5 アーク長のアーク電圧電流特性への影響

Fig.5 Effect of arc length on volt-ampere characteristics

図6 分割母板法の実験装置

Fig.6 Measurement of anode current distribution

図7 分割母板法での典型的な計測結果

Fig.7 Typical example of current distribution by a split anode method on base metal

図8 HCAの母材表面上における電流分布領域

Fig.8 Anode diameter of HCA on base metal

3. 4 母材表面上の電流領域

分割母板法を用いて、S.P.型HCAの母材表面上における電流分布領域の計測を行った。その実験装置図をFig.6に示す。2つの試験片(SUS304, 12mm)をセラミックス板により絶縁し、それぞれに流れる電流をレコーダに記録した。また今回の実験では、母材を1.0mm/sの速度で移動させながら、それぞれに流れる電流の計測を行った。

計測結果の一例をFig.7に示す。放電条件は、アーク電流 65A、電極間距離 8mm、ガス流量 1.67ml/s、周囲圧力 5.32Paである。図中に示す実線が、それぞれの試験片で計測された電流の変化の様子である。図からわかるように、母材表面の電流領域は非常に大きく広がっている。したがって、ここでは計測装置の関係もあり、片側に流れる電流量が10%以下になったところを領域の端とみなし、図のようにアーク電流領域(Anode diameter)を定義した。

電極間距離を変化させて、低圧下におけるS.P.型HCAの母材表面電流領域の計測を行った結果をFig.8に示す。放電条件は、アーク電流 65A、ガス流量 1.67ml/s、周囲圧力 5.32Paである。

アーク電流領域は、電極間距離が5mm程度まで、距離

図9 プローブ法の実験装置

Fig.9 Experimental equipment for probe method

図10 プローブの概略図

Fig.10 Probe on this experiment

とともに電流領域も急激に拡大しており、電極間距離が10mmのときには直径55mm以上にまで達している。大気圧下におけるGTAの母材表面電流領域は、アーク長が12.7mmのときに、直径15mm程度である¹¹⁾ことを考えると、S.P.型HCAの母材表面における電流領域は大きく広がっており、母材表面の電流密度は、非常に低いと考えられる。すなわちこの広がりがS.P.型HCAの熱源としての特性に大きな影響を与えている。

3. 5 電子密度・温度

低圧下におけるS.P.型HCAの電子密度・温度の測定をシングルプローブ法を用いておこなった。その装置図をFig.9に示す。実験では、トーチと母材(SUS304, 12mm)を固定し、プローブをモータによって回転させ、任意の位置におけるプローブ電圧とプローブ電流の計測をおこなった。プローブには、Fig.10に示すように、0.4mm径のタングステン棒をアルミナ製絶縁管(外径1.0mm, 内径0.4mm)内に挿入後、タングステン表面を研磨したものを用いた。

Fig.11は、プローブ電流・電圧特性の計測例である。これより、プラズマ中の電子がマクスウエル分布しているとして、電子密度(n_e)・温度(T_e)を求める。

次に、電極間距離を10mmとしたときのHCAを対象として、プローブ計測を行い、電子密度・温度を計算した結果についてFig.12, Fig.13に示す。放電条件は、アーク電

図 1 1 プローブ法による電流電圧特性の例

Fig.11 Example of Langmuir probe characteristic for HCA

図 1 2 HCA の半径方向の電子密度分布

Fig.12 Radial electron density distribution of HCA

流 60A, 電極間距離 10mm, ガス流量 1.67ml/s, 周囲圧力 5.32Pa である。

Fig.12 は、母材からの高さが 2, 8mm の位置でのアーク半径方向の電子密度分布を示している。母材からの高さが 8mm のとき、電極直下の電子密度が約 $5 \times 10^{19}/\text{m}^3$ となっており、大気圧下での Ar アークの電子密度が $10^{23}/\text{m}^3$ に達する¹¹⁾ことを考えると 1/1000 以下になっていることがわかる。また母材からの高さが 2mm のときには、8mm のときほどアーク軸上での電子密度は高くないものの、アーク軸から離れてもなだらかに減少し、母材表面上では電流が大きく広がっていることがわかる。

Fig.13 は、母材からの高さが 2, 4, 6mm の位置でのアーク半径方向の電子温度分布を示している。データにばらつきがみられるものの、計測した領域では電子温度は 12000 ~ 18000K の間で分布しており、全体的に電子温度分布はほぼ一様になっている。

図 1 3 HCA の半径方向の電子温度分布

Fig.13 Radial electron temperature distribution of HCA

図 1 4 電極近傍における等密度分布図

Fig.14 Density distribution of electron under electrode

Fig.14 は、電極近傍における等密度分布図である。図からわかるように、電子は電極先端で高密度になっているものと推察され、電極先端から放出されるプラズマ形成用ガスの影響を大きく受けているものと考えられる。またこの図から電極先端からだけでなく、電極表面からも熱電子放出により電子が放出されているものと推察される。母材表面付近では、アーク軸から 10mm 離れた位置でも、アーク軸上の電子密度と比べ 1/10 程度にも達しておらず、3. 4 項で述べたように、母材表面上では電流領域が大きく広がっていることがわかる。

以上より、母材表面上の広範囲に広がった低密度な電流領域が、Fig.3 に示したような深さ方向よりも横方向に広がった、浅い溶け込みを形成する原因になっている。

4. 結論

本研究では、中空陰極アーク(HCA)に注目し、低圧下で

HCA を溶接用熱源として用いた場合、2通りの溶け込み形状が得られることを示した。さらに S.P.型 HCA に着目し、その熱源としての特性を知るために、その放電特性やプラズマ特性について調査・検討を行った。そして以下に示すことを明らかにした。

- 1) 低圧下での HCA の溶け込み特性は、放電条件によって著しく影響される。
- 2) S.P.型 HCA のアノード表面上におけるアーク電流領域は、直径 50mm 以上にまで達する。
- 3) S.P.型 HCA では、電子密度が電極直下で $5 \times 10^{19}/\text{m}^3$ となっており、大気圧アークの電子密度の 1/1000 以下となっている。
- 4) 電子温度は、12000~18000K 程度と推測され、アーク柱内ではほぼ一様になっている。これは、大気圧アークの電子温度に比較的近い。

以上より、母材表面上の広範囲に広がった低密度な電流領域が、深さ方向よりも横方向に広がった、浅い溶け込みを形成する原因になっており、広い電流領域が S.P.型 HCA の熱源特性を特徴づけることを明らかにした。

今後は、深い溶け込みが得られる D.P.型 HCA に注目し、その放電特性やプラズマ特性の調査・検討を進めるとともに、そのメカニズムについても検討する予定である。

謝辞

本実験回路の試作に際して、多くの御助言を頂きましたマイト工業(株)の板野隆氏、松下産業機器(株)の浜本康司氏に御礼申し上げます。

なお、本研究は宇宙開発事業団、(財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行ったものであります。

(平成 12 年 9 月 25 日受付、平成 13 年 5 月 2 日再受付)

文 献

1. Paton and V.N.Kubasov: "Experimental Welding of Metals in Space", *Avt.Svarka*, Vol.23, No.5, pp7-12 (1970)
2. B.E.Paton: "Welding in Space", *Welding Engineer*, Vol.57, No.1, pp.25-29 (1972)
3. B.Irving: "Electron Beam Welding, Soviet Style: A Front Runner for Space", *Welding Journal*, Vol.70, No.7, pp55-59 (1991)
4. R.Johnsen: "Space Welding Experiment postponed Indefinitely", *Welding Journal*, Vol.76, No.4, pp22 (1997)
5. L.M.Lidsky, S.D.Rothleder, D.J.Rose and S.Yoshikawa: "Highly Ionized Hollow Cathode Discharge", *Journal of Applied Physics*, Vol.33, No.8, pp2490-2497 (1962)
6. Delcroix J.L. and Trindade A.R.: "Hollow cathode arcs", *Advances in Electronics and Electron Physics*, Vol.35, pp.87-190 (1974)
7. 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, pp.423-427 (1993)
8. 西川, 吉田, 黄地, 吹田, 佃, 寺嶋, 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, pp.272-279 (2000)
9. 吹田, 佃, 寺嶋, 八田, 河野, 猪熊, 川田, 黄地, 西川, 吉田, 増淵: 「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, pp.228-235 (2000)
10. V.M.Nerovnyi, V.P.Fedichev, G.V.Pod'yapol'skii: "Thermal Effect of the Low Pressure Welding Arc on the Heated Body", *Physics and chemistry of materials treatment*, Vol.22, No.2, pp.178-181 (1988)
11. ランカスター編著: 「溶接アークの物理」, 社団法人溶接学会 溶接アーク物理研究委員会, pp17(1990)
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*, Vol.55, No.3, pp714-722 (1984)

西川 宏

(学生員) 1973 年 9 月 5 日生まれ。1997 年 3 月大阪大学工学部生産加工工学科卒業。99 年 3 月同大学大学院工学研究科知能機能創成工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月同博士後期課程進学、現在に至る。主として、低圧下のアーク放電現象に関する研究に従事。

吉田 和弘

(非会員) 1976 年 11 月 18 日生まれ。1999 年 3 月大阪大学工学部生産加工工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科知能機能創成工学専攻博士前期課程入学、現在に至る。主として、低圧アーク放電による母材溶融現象に関する研究に従事。

丸山 敏和

(非会員) 1976 年 4 月 10 日生まれ。2000 年 3 月大阪大学工学部生産加工工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科知能機能創成工学専攻博士前期課程入学、現在に至る。主として、低圧中におけるホローカソードアークのプラズマ特性に関する研究に従事。

黄地 尚義

(正員) 1943 年 2 月 15 日生まれ。1965 年大阪大学工学部電気工学科卒業。1969 年同大学工学部助手、1979 年同助教授、1990 年同教授、現在に至る。アーク放電ならびに溶接プロセスの研究に従事。工学博士。

吹田 義一

(非会員) 1948 年生まれ。1969 年 3 月高松工業高等専門学校機械工学科卒業。1974 年同校助手, 1981 年同講師, 1986 年同助教授, 1993 年同校制御情報工学科教授, 現在に至る。宇宙溶接技術の研究に従事。工学博士。

増淵 興一

(非会員) 1924 年生まれ。1946 年 9 月東京大学第一工学部卒業。1948 年 9 月同大学大学院特別研究生前期修了。1948 年運輸省船舶試験所勤務, 1958 年米国バッテリー記念研究所客員研究員, 1963 年同研究員, 1968 年 MIT 準教授, 1971 年同海洋工学科教授, 現在に至る。

溶接変形, 溶接システムの研究に従事。工学博士。