低圧下での GHТА 放電の特性と母材の溶融特性*

西川 宏**, 吉田 和弘***, 黄地 尚義****, 吹田 義一*****, 佃 芳行*****, 寺嶋 昇*****,
八田 崇*****, 河野 鉄平*****, 川田 賢司*****, 猪熊 力也*****, 増淵 興一*****

Fundamental Characteristics of GHТА under Low Pressure*

by Hiroshi NISHIKAWA**, Kazuhiro YOSHIDA**, Takayoshi OHJI****, Yoshikazu SUITA*****,
Yoshiyuki TSUKUDA*****, Noboru TERAJIMA*****, Takashi HATTA*****, Tettei KOHNO*****,
Kenji KAWATA*****, Rikiya INOKUMA*****, and Koichi MASUBUCHI*****

In this work, a feasibility study has been conducted to determine if gas-hollow-tungsten-arc (GHТА) can be used for welding purposes in space.

As described in the previous paper, the GHТА-method has been tested in a simulated space environment using aircraft. The test result shows that the method is very promising as a welding process in space.

In this paper, some fundamental characteristics of GHТА in vacuum chamber, such as ignition voltage and arc voltage-current characteristic, have been made clear and the results of melting test on stainless steel plate by GHТА-method have been compared with the case by a conventional GTА (gas tungsten arc)-method under atmospheric pressure.

The results are summarized as follows,

- (1) The ignition voltage of GHТА depends on the ambient pressure: P , and the voltage is minimized under condition of $P \approx 26.6$ [Pa]
- (2) The arc voltage-current characteristic of GHТА is nearly equal to that of GTА under atmospheric pressure.
- (3) The penetration shape by GHТА-method is quite different from that by GTА-method under atmospheric pressure. The GHТА method is characterized by shallow and wide penetration.
- (4) The current distribution on anode surface of GHТА is extremely diffused, and the anode area increases with the arc-length.
- (5) The diffused anode, which means diffused heat source, gives a satisfactory explanation for the shallow penetration in the GHТА-method.

Key Words: Gas Hollow Tungsten Arc (GHТА), Welding in space, Arc characteristics, Ignition, Anode, Penetration

1. 緒 言

国際宇宙ステーションの建造計画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味を帯びてきた。将来は、より大型の宇宙構造物が必要で、その建造の際には溶接を使用することが必要になると思われる。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、補修技術の確立が望まれる。

このような状況の中で、旧ソ連は1960年頃から宇宙溶接技術の研究に着手している^{1,2)}。宇宙環境下は高真空状態にあるため、真空状態でも使用できる電子ビーム溶接法に着目し、実際に1984年にはサリユート7号 (Salyut 7) の船外で、電子ビーム銃を用いた溶接実験に成功している³⁾。しかし、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を残したままである。また日本では、宇宙溶接技術としてアークプラズマを利用するGHТА (Gas Hollow Tungsten Arc) 法が、吹田らによって提案されており、航空機を使用した模擬宇宙環境下でのGHТА溶接実験に成功している^{4,5)}。しかしその特性については、十分に検討されているとはいえない。

したがって、ここではGHТА法に注目し、筆者らが行った真空環境下におけるGHТА法の放電特性や母材溶融特性、さらには航空機実験用として試作した実験装置等について報告する。

*原稿受付 平成11年7月13日 平成11年5月溶接アーク物理研究委員会発表

**学 生 員 大阪大学大学院 Student Member, Osaka University

*** 大阪大学大学院 Osaka University

****正 員 大阪大学大学院 Member, Osaka University

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

*****学 生 員 高松工業高等専門学校 Student 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

2. 実験装置及び実験方法

現在地上で一般に用いられているアーク溶接電源を航空機実験等に使用しようとする、溶接時に発生する高周波などのノイズが航空機の計器などに大きな影響を与えるため使用出来ない。このような問題は、将来宇宙空間での適用を考えたときにも十分起こりうる問題である。したがって、ここでは航空機実験にも用いることのできる低ノイズかつ軽量の電源を使用する実験装置を試作した。

今回試作した実験装置では高周波などのノイズの問題を解決するため、バッテリーを電源として使用し、さらには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。実験装置の回路図を Fig. 1 に示す。

この回路は、アーク持続用のバッテリー電源回路とアーク点弧用の高電圧電源回路から構成されている。バッテリーとしては出力電圧 12 V の密閉型バッテリーを 3 個直列にして使用し、高電圧電源としては可変式の最大電圧 1 kV、最大電流 50 mA のものを使用した。またアーク消弧用としてトランジスタを組み込んだ。アーク電圧およびアーク電流の測定は、図の位置で行っている。本実験の結果は、すべてこのバッテリーを用いた実験装置で行ったものである。

また実験で使用中空タングステン電極は、外径 (D) 4.0 mm・内径 (d) 1.8 mm で 2.0% 酸化ランタンを含むものであり、電極先端から流出させるガスには Ar ガスを用いた。また実験は、全て電極マイナスで行った。

真空チャンバーの大きさは、400×400×400 mm のものであり、排気ポンプとしては、ロータリーポンプとメカニ

カルプースターポンプを併用した。それによって、Ar ガスを供給しない状態で 4×10^{-1} Pa (3×10^{-3} Torr) の真空度となっている。

3. GHТА 法による低圧下での気体放電特性

3.1 放電開始特性に関する検討

3.1.1 放電開始過程

GHТА 法を適用し、電極間に高電圧を印加し、低圧下でグロー放電及びアーク放電が形成されたときの典型的な電圧変化の様子を Fig. 2 に示す。(a) はグロー放電、(b) はアーク放電が形成されたときの電圧変化である。いずれにおいても周囲圧力 (P) は 5.32 Pa (0.04 Torr) 程度であり、電極先端からの Ar ガス流量 (Q) は 1.67 ml/s、電極・母材間距離 (L) は 5 mm である。

これらを見ると火花電圧、すなわち放電開始電圧はいずれも約 700 V 程度である。大気圧下での火花電圧が数 kV であることを考えるとかなり低くなっており、大気圧中に比べ、放電し易くなっていることがわかる。

またアーク放電に移行するかグロー放電に移行するかは、電源の外部特性曲線に依存する。ただし、(a) 図の場合にはアーク持続用のバッテリーをはずして計測している*。

*Fig. 2 (b) 図で、放電開始前に数十 V の電圧があるのはバッテリー電圧である。

Fig. 1 Experimental apparatus for GHТА.

Fig. 2 Ignition process of GHTA.

Fig. 3 Relationship between ambient pressure and ignition voltage.

3.1.2 周囲圧力と放電開始電圧の関係

Fig. 3 にガス流量を一定とし、周囲圧力が放電開始電圧に及ぼす影響について調査した結果を示す。縦軸に放電開始電圧を、横軸に周囲圧力をとった。図中の●, ▲, ■, ◆はそれぞれ電極・母材間距離が 2, 5, 7, 10 mm のときを表している。それらの点は、各条件について 5 回程度計測をおこないの平均値をとったものである。(a)は電極先端から流出させるガス流量を 1.67 ml/s, (b)は 3.33 ml/s としたときのものである。本実験では周囲圧力を変化させるためにガス供給量は一定とし、真空チャンバーと排気ポンプの間のバルブによりチャンバー内圧力の調整を行った。

これらを見ると電極・母材間の距離、電極先端からのガス流量に関係なく周囲圧力が約 26.6 Pa (0.2 Torr) のときに放電開始電圧はほぼ最低値を示しており、約 26.6 Pa で最も放電し易くなることや、周囲圧力が 26.6 Pa よりも高い所では、ガス流量に関係なく類似な傾向を示すことがわかる。また、周囲圧力が 26.6 Pa よりも低い今回の実験範囲内では、放電開始電圧がガス流量に依存し、さらに低圧部

でもガス流量を増すことで放電開始電圧の上昇を抑制できる可能性がある。

3.2 GHTA 法によるアーク放電特性

3.2.1 アーク放電の形態

大気圧下で GTA 溶接法を用いたアーク放電と低圧下で GHTA 法を用いたアーク放電の静止アークの様子を Fig. 4 に示す。(a)は大気圧下での GTA (ガスタングステンアーク) 放電であり、アーク電流が 100 A, 電極・母材間距離が 5 mm, Ar ガス流量が 167 ml/s (シールドノズル径 10 mm) としたときのものである。(b)は低圧下 (5.32 Pa) での GHTA 放電であり、アーク電流が 100 A, 電極・母材間距離が 5 mm, 電極先端からのガス流量が 1.67 ml/s としたときのものである**。

大気圧下のアーク放電では、シールドガスに Ar ガスを

**溶接アーク現象〈増補版〉⁶⁾によると、GTA 放電の低圧下でのアーク起動は、18 Torr (約 2.4×10^3 Pa) 以下では困難であるとされている。

(a) GT-arc (b) GHT-arc
($P=1$ atm, $Q=167$ ml/s) ($P=5.32$ Pa, $Q=1.67$ ml/s)

Fig. 4 GTA and GHTA ($I=100$ A, $L=5$ mm)

Fig. 5 Relationship between arc current and arc voltage.

用いるとプラズマ密度が約 $10^{23}/\text{m}^3$ にまで達することが知られている⁷⁾。このためアークプラズマの放出する光も強く、アーク柱は、通常、明瞭に観察できる。しかし低圧下のアーク放電では、周囲圧力が低いためプラズマ密度も低く、アーク柱が鮮明には観察できない。図のように、低圧下では、電極部の放射が、アークプラズマの放射よりも強くなっている。

3.2.2 アーク電流・電圧特性

Fig. 5 は、大気圧下の GTA と低圧下の GHTA の電流・電圧特性である***). ○は大気圧下の GTA の電流・電圧特

***電極形状そのもののアーク特性への影響を検討するため、大気圧下のアルゴンシールドの条件下で、中実タングステン電極と中空タングステン電極を用いて、それぞれのアークの電流・電圧特性を比較し、両者がほぼ一致することを確認している。

性であり、●は周囲圧力が 5.32 Pa (0.04 Torr) 程度での GHTA の電流・電圧特性である。それぞれにおいてアーク長は 2 mm とした。

低圧中ではプラズマの密度が、大気圧の場合に比べ、かなり低いはずである。しかし全体的な傾向として、低圧下でアーク電圧が数 V 程度高くなってはいるものの、両者は比較的近い特性を示している。

4. GHTA 法による母材の溶融現象

ここでは GHTA 法を用いて行った母材溶融現象についての調査結果を述べる。なお、母材の溶融実験については静止アークによる実験とし、溶融時間を溶融池サイズがほぼ安定する 20 秒とした。また実験に用いた材料は、硫黄の含有量が異なる 2 種類のステンレス鋼 SUS304 で、試験片の大きさは $50 \times 50 \times 12$ mm である。その化学成分を Table 1 に示す。以後、硫黄の含有率が 0.008% の材料を HS 材、 0.001% の材料を LS 材と表す。

4.1 GTA 法と GHTA 法による溶融現象の比較

4.1.1 溶け込み形状の比較

まず電極形状の影響を調べるために、一般に用いられている中実タングステン電極と今回使用した中空タングステン電極を用いた場合の母材溶融特性を大気圧下の GTA 法と比較した。その結果を Fig. 6 示す。それぞれにおいて、アーク電流 110 A、アーク長 2 mm、Ar ガス流量 167 ml/s とした。

Fig. 6 をみると、中空電極をもちいた方が多少溶け込みが浅くなっているが、母材溶融特性に及ぼす電極形状そのものの影響はそれほど大きくない。

次に GTA 法と GHTA 法による母材溶融特性を比較した結果を Fig. 7 に示す。なお GTA 法による溶融実験は、大気圧下で行い、Ar ガス流量は 167 ml/s とした。また GHTA 法による溶融実験は、 5.32 Pa (0.04 Torr) の低圧下でおこない、電極先端からの Ar ガス流量は 1.67 ml/s とした。それぞれにおいてアーク電流は 110 A、アーク長は 2 mm とした。

両者の溶け込み形状を比較すると、電流とアーク長が同じであるにもかかわらず、溶融池の形状及び幅・深さともに異なっている。GTA 法による溶け込みは、中央部が深くなっているのに対し、GHTA 法による溶け込みは、深さ方

Table 1 Chemical composition of materials.

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304(mass%)HS	0.04	0.6	1.31	0.0035	0.008	8.21	18.38
SUS304(mass%)LS	0.06	0.44	0.87	0.0030	0.001	8.09	18.07

	Solid cathode $P=1\text{atm}$ $L=2\text{mm}$ $\text{Ar:}Q=167\text{ml/s}$ $I=110\text{A}$	Hollow cathode $P=1\text{atm}$ $L=2\text{mm}$ $\text{Ar:}Q=167\text{ml/s}$ $I=110\text{A}$
SUS 304 HS
SUS 304 LS

Fig. 6 Effect of cathode configuration on penetration in GTA.

GTA $P=1\text{atm}$ $L=2\text{mm}$ $\text{Ar:}Q=167\text{ml/s}$ $I=110\text{A}$ SUS304; HS	GHTA $P=5.32\text{Pa}(0.04\text{Torr})$ $L=2\text{mm}$ $\text{Ar:}Q=1.67\text{ml/s}$ $I=110\text{A}$ SUS304; HS

Fig. 7 Penetrations in GTA and GHTA melting.

向よりも横方向に広がっている。また、溶融部の表面中央に凹みがみられ、電極先端から流出するガスの影響によるものと考えられる****)。

Fig. 8 に GHTA 法を用いてアーク電流の大きさを变化させたときの溶融形状の変化の様子を示す。それぞれのアーク条件は、Fig. 7 と同様で、アーク電流のみを 90 A, 110 A, 140 A と変化させている。明らかにアーク電流が大きくなると溶融面積は増加しているが、電流が増加しても Fig. 7 に示した GTA 溶接法を用いたときのような溶け込み形状とはなっていない。つまり、GHTA 法を用いるとアーク電流の大きさに関係なく、溶融部は深さ方向よりも横方向に広がったような溶融形状になることがわかる。

****)Fig. 7 は、HS 材による比較である。LS 材に対しても、後述するように定性的には同じ結果が得られている。

$I=90\text{A}$	$I=110\text{A}$	$I=140\text{A}$

Fig. 8 Effect of arc current on penetration in GHTA. ($P=5.32\text{ Pa}$, $L=2\text{ mm}$, $Q=1.67\text{ ml/s}$)

このようなことから GTA 法と GHTA 法では、母材上でのアーク入熱の分布領域、溶融池内の対流熱輸送現象などが大きく異なっていると考えられる。

4.1.2 母材表面上の電流分布

GTA 法と GHTA 法を用いたときの静止アークによる溶け込み形状は、大きく異なることがわかった。この原因としては、母材表面上におけるアーク電流領域の違いが考えられる。ここでは分割母板法を用いて、GHTA 法のアーク電流領域の計測を行った結果を示す。

分割母板法の実験装置図を Fig. 9 に示す。2つの試験片(ステンレス鋼 SUS304, 12 mmt) はセラミックス板 (0.6 mmt) により絶縁し、それぞれに流れる電流はシャントを通してレコーダに記録した。また今回の実験では、母材を 1.0 mm/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。その計測結果の一例を Fig. 10 に示す。アーク条件は、アーク電流 65 A, アーク長 8 mm, ガス流量 1.67 ml/s, 周囲圧力 5.32 Pa (0.04 Torr) とした。図中の実線がそれぞれの試験片で計測された電流変化である。図のように電流領域は、非常に大きく、ここでは計測装置の関係もあり、片方の試験片に流れる電流量が 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。計測されたデータは、ほぼ軸対称の形をしており、分割されたアーク放電及びアーク電流はスムーズに移行していることがわかる。

次にアーク長を変化させて、アーク電流領域の計測をおこなった結果を Fig. 11 に示す。またアーク条件は、Fig. 10 の場合と同様である。これをみるとアーク長が 5 mm 程度までは、アーク長が伸びるにしたがって、アーク電流領域も大幅に広がり 50 mm にまで達し、その後も徐々に広がる傾向にあることがわかる。一般的な大気圧アークの電流領域が、アーク電流 100 A 程度では、アーク長にかかわらず 10 mm までである⁹⁾ことを考えると、このアーク電流領域の広がりが、低圧下での GHTA 法の母材溶融現象に大きな影響を与えているものと考えられる。

4.1.3 微量元素の溶融形状に及ぼす影響

従来よりアークによる母材の溶融現象が、母材中に含まれる微量な元素の差に影響されることが指摘されており、特に硫黄などの VI 族の元素及びハロゲン系の元素が溶け込

Fig. 9 Measurement of anode current distribution.

Fig. 10 Arc current distribution on anode.
($P=5.32$ Pa, $L=8$ mm, $Q=1.67$ ml/s, $I=65$ A)

Fig. 11 Change of anode zone with arc length.

中の微量元素が母材溶け込み形状に及ぼす影響について検討した。

GTA 法を用いて、大気圧下で HS 材と LS 材をそれぞれ溶融させたときの溶け込み形状を Fig. 12 に示す。条件については図に示す通りである。

LS 材に比べ HS 材を用いた方が溶け込みが深く、横方向への広がりが少ないことがわかる。

次に GHTA 法を用いて、低圧下で HS 材と LS 材をそれぞれ溶融させたときの溶け込み形状を Fig. 13 に示す。条件については図に示す通りである。

両者を見比べても溶け込み形状に大きな違いはなく、両者とも深さ方向よりも横方向に広がったような溶け込み形状を示している。このことから、GHTA 法の溶け込みは、母材中の微量元素、特に硫黄の含有量にほとんど影響されないことがわかる。

4.2 低圧下における GHTA 法の溶融現象に及ぼす支配因子

これまでに、静止アークにおける GHTA 法の溶融現象は、一般的に用いられている GTA 法の溶融現象と大きく異なることがわかった。その原因として、母材表面の電流領域の違いによる溶融池内の対流現象の違いが上げられる。ここでは GHTA 法の溶融現象に大きな影響を及ぼしそうなガス流量、アーク長といった諸条件の影響について述べる。

4.2.1 ガス流量の影響

電極先端から流出させるガス流量を変化させたときの溶け込み形状の変化の様子を Fig. 14 に示す。周囲圧力は、 5.32 Pa (0.04 Torr) であり、アーク長 2 mm、アーク電流 110 A で、ガス流量を 1.25 ml/s, 1.67 ml/s, 3.33 ml/s と変化させた。これらの溶け込み形状を比較すると、幅には

みを深くするといわれてきた。また、この現象は溶融池内における対流現象と密接に関係していることがわかっている。したがって、GHTA 法の母材溶融現象においても母材

Fig. 12 Effect of Sulfur on penetration in GTA.

Fig. 13 Effect of Sulfur on penetration in GHTA.

Fig. 14 Effect of gas flow rate on penetration in GHTA.
($P=5.32\text{ Pa}$, $L=2\text{ mm}$, $I=110\text{ A}$)

あまり差がないものの、ガス流量を増やすと溶融部中央の凹みが大きくなり、その周辺部の盛り上がりも大きくなっているのがわかる。

4.2.2 アーク長の影響

次にアーク長を変化させたときの溶け込み形状の変化の様子を Fig. 15 に示す。周囲圧力は、 5.32 Pa (0.04 Torr) であり、アーク電流 110 A 、ガス流量 1.67 ml/s としてアーク長を 2 mm 、 5 mm 、 10 mm と変化させた。

Fig. 15 Effect of arc length on penetration in GHTA.
($P=5.32\text{ Pa}$, $Q=1.67\text{ ml/s}$, $I=110\text{ A}$)

これらの溶け込み形状を比較すると、明らかにアーク長が長くなるほど溶融池が小さくなり、中央部の凹みが小さくなるのがわかる。中央部の凹みについては、ガスによる圧力の影響がアーク長が長くなることで小さくなるため、凹みも小さくなると考えられる。

またアーク電流が等しいにもかかわらず、溶融面積が大きく変化する理由は、4.1.2 で示したように、アーク長が長くなるにしたがってアーク自体が広がっていくためと考えられる。アークが広がるほど母材表面上の電流領域が広がり、アーク電流の大きさが等しければ電流密度が小さくなるために母材の溶融面積が減少するものと思われる。

5. 結 言

本研究では、GHTA 法に注目し、その放電特性、母材溶融特性について調査・検討を行い、以下のことを明らかにした。

- 1) 電極・母材間の距離やガス流量に関係なく、放電開始電圧は、周囲圧力が約 26.6 Pa (0.2 Torr) で最も低くなる。
- 2) この圧力より低い条件下では、放電開始電圧は、ガス流量に依存する。このため、ガス流量で放電開始電圧の上昇が抑制できる可能性がある。
- 3) 低圧下の GHTA では、アークプラズマの発光が極めて少なく、大気圧アークの場合に比べて、プラズマ密度が大幅に低下しているはずであるが、そのアーク電流・電圧特性は、大気圧アークの場合に近い。
- 4) GHTA 法では、アノードサイズが大きく、 50 mm 以上に達する場合がある。また、そのサイズはアーク長に強く依存する。
- 5) このため、大気圧アークに比べ、浅い溶け込みとなり、溶け込み特性はアーク長の影響を強く受ける。

なお、今回の実験では、ガスを流出させながらの周囲圧力は約 3.39 Pa (0.03 Torr) までであり、宇宙ステーション周辺の圧力が 10^{-4} Pa 程度であることを考えると今後さらに低圧側で実験を行う必要があると思われる。

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㈱の板野隆氏、松下産業機器㈱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。

参 考 文 献

- 1) B.E. Paton, V.N. Kubasov: Experimental welding of metals in space, Avt. Svarka, 5 (1970), 7s-12s.
 - 2) B.E. Paton: Welding in space, Welding Engineer, 57-1 (1972), 25s-29s.
 - 3) B. Irving: Electron Beam Welding, Soviet Style: A Front Runner for Space, Welding Journal, 70-7 (1991), 55s-59s.
 - 4) 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), 本会論文集, 11-3 (1993), 423-427.
 - 5) 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 GH TA 溶接実験 (本会論文集投稿中).
 - 6) 安藤, 長谷川共著: 溶接アーク現象<増補版>, 産報(1967), 409.
 - 7) 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 (1990), 17.
 - 8) O.H. Nester: Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs, J. Appl. Phys., 33-5 (1962), 1638s-1648s.
-