

## 宇宙 GHTA 溶接法のタッチスタート方式によるアーク起動実験

高松工業高等専門学校 松下 和憲, 上田 尚子, 吹田 義一, 佃 芳行, 寺嶋 昇  
宇宙航空研究開発機構 鈴木 峰男, 今川 吉郎

### Arc Ignition Tests by the Space GHTA Welding Process using Touch Start Technique

Kazunori Matsushita<sup>1)</sup>, Naoko Ueda<sup>1)</sup>, Yoshikazu Suita<sup>1)</sup>, Yoshiyuki Tsukuda<sup>1)</sup>, Noboru Terajima<sup>1)</sup>, Mineo Suzuki<sup>2)</sup> and Kichiro Imagawa<sup>2)</sup>

1) Takamatsu National College of Technology, Chokushi-cho, Takamatsu-city, Kagawa, 761-8058

2) Japan Aerospace Exploration Agency, Sengen, Tsukuba-city, Ibaraki, 305-8505

E-Mail: [suita@takamatsu-nct.ac.jp](mailto:suita@takamatsu-nct.ac.jp)

**Abstract:** The space GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) welding with a high-voltage high-frequency device for arc initiation may cause electromagnetic noise problems for the computer equipment placed on the ISS (International Space Station). It was also clarified by from the experiments using a high-voltage DC device for arc start at the ISS orbital pressure that there is a shifting phenomenon in which a spark discharge shifts to either a glow discharge or an arc discharge when starting the arc. Therefore, in this report, arc starting experiments of the space GHTA welding using a touch start technique for arc start were carried at the ISS orbital pressure,  $10^{-5}$  Pa. As a result, the space GHTA welding using a touch start technique can be used for arc initiation when welding at the ISS orbital pressure.

**Key words;** Space welding, Space GHTA welding, Arc initiation, Touch start technique, ISS, High vacuum

## 1. 緒 論

現在建設中の国際宇宙ステーション ISS(International Space Station)の長期運用を考えるとデブリの衝突などによる損傷の修理や高機能化のための改造の要求が出る可能性がある。また、各種プラットフォームや宇宙構造物の建造、月面基地建設など今後の宇宙開発において宇宙空間での溶接技術や加工技術の確立が期待されている。

旧ソ連邦では電子ビーム溶接、米国でも電子ビーム溶接や Nd-YAG レーザ溶接の研究が行われた。日本では、著者らが中空タングステン電極を利用する宇宙 GHTA(Gas Hollow Tungsten Arc)溶接法を提案し<sup>1)</sup>、研究開発を行ってきた。宇宙 GHTA 溶接法のアーク起動方式には高周波高電圧方式、直流高電圧方式及びタッチスタート方式がある。これまでに、著者らは高周波高電圧方式<sup>2)</sup>と直流高電圧方式<sup>3,4)</sup>による GHTA 起動実験を実施し、ISS 軌道圧力で GHTA 起動が可能であることを実証している。しかし、高周波高電圧方式には電磁障害、直流高電圧方式にはアーク放電に移行せず、グロー放電に移行する問題がある。そこで、タッチスタート方式による GHTA 起動実験を実施し、アーク起動現象の観察を行うとともに、環境圧力と電極引き上げ条件がアーク起動現象に及ぼす影響を調査した。また、比較のために GHTA 起動実験と同じ電極引き上げ条件で GTA(Gas Tungsten Arc) 起動実験も行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

ISS 軌道圧力  $10^{-5}$ Pa において GHTA 起動実験を行うことができる超高真空環境 GHTA 溶接実験システムを Fig. 1 に示す。同装置は円筒型真空チャンバ、ロータリーポンプ、クライオポンプ及びタッチスタート機能をもつ市販の GTA 溶接機で構成される。また、コントロールボックス、電極位置制御装置と計測・観察機器を備えている。GHTA 溶接トーチには外径 4mm、内径 1.8mm の中空電極が装着されており、電極先端を頂角  $60^\circ$  に成形して実験に用いた。GTA 溶接トーチには外径 4mm の中実電極が装着されている。中空電極と同様の先端形状にするために先端を頂角  $60^\circ$ 、先端径が 1.8mm となるように平坦に成形した。電極は中空、中実ともに電子放出能の優れた 2% 酸化ランタン( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) 入りのタングステン電極を使用した。

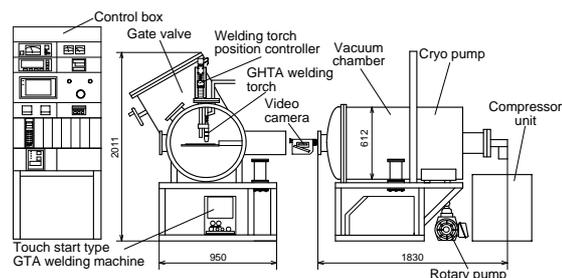


Fig. 1 GHTA welding experiment system under ultrahigh-vacuum condition.

## 2.2 供試材と実験手順

供試材にはSUS304ステンレス鋼(以後はSUS304鋼と記す)と A2014-T6 アルミニウム合金(以後はA2014合金と記す)を使用した。電極と母材を接触させた状態から電極を引き上げることによってアークを起動させ、アーク・スポット溶接を行いアーク起動現象を観察した。ここでは、起動電圧とアーク電圧をまとめて溶接電圧、起動電流とアーク電流をまとめて溶接電流と呼ぶ。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 高真空中での GHTA 起動現象

初期環境圧力  $10^{-5}$ Pa, アーク電流 100A, Ar ガス流量 1.67ml/s の溶接条件と最大電極間隔 3mm, 速度 50mm/s, 加速度  $2000\text{mm/s}^2$  の電極引き上げ条件でアーク起動実験を行った。Fig. 2 は供試材に SUS304 鋼を使用し, タッチスタート方式でアーク起動実験を行った場合の結果で, 起動からのチャンバ内圧力, 溶接電圧, 溶接電流及び放電状況の時間的変化を示している。電極が供試材から離れたときを  $t = 0$  ms としている。電極と供試材が接触している間は, 起動電圧 0.1V, 起動電流 6A の状態となる。電極が供試材から離れた瞬間にアークが発生し, 溶接電圧は起動電圧から急上昇し, 起動時で最も高い最大アーク電圧約 20V を示した後, 徐々に減少して 600ms 後に定常アーク電圧約 15V に収束した。溶接電流は電極が供試材から離れると起動電流 6A のアークが発生し, 約 15ms 後に急上昇して瞬時に設定値の 100A に到達した。放電状況は起動電流 6A のアーク放電(1)からアーク電流 100A のアーク放電(2)となり, 放電(3)を経て, 電極の加熱を伴う放電(4)に移行した。また, SUS304 鋼と A2014 合金の高真空中での GHTA 起動現象は, ほぼ同様であった。溶接電流が設定値の 100A に到

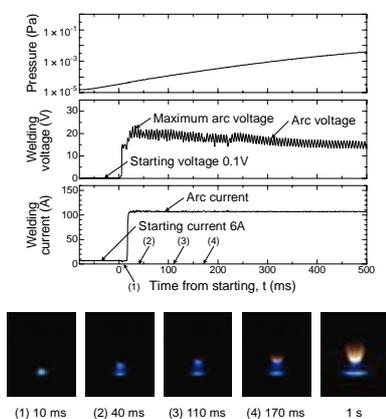


Fig. 2 GHTA starting phenomena in high-vacuum (SUS304).

達したときのチャンバ内圧力が  $10^{-5}$ Pa オーダであることから ISS 軌道圧力  $10^{-5}$ Pa でのタッチスタート方式による宇宙 GHTA 溶接のアーク起動の可能性を確認できた。

### 3.2 大気中での GTA 起動現象

アーク電流 100A, Ar シールドガス流量 5l/min の溶接条件, Fig. 2 の高真空中での GHTA 起動実験と同じ電極引き上げ条件で大気中での GTA 起動実験を行った。Fig. 3 は供試材に SUS304 鋼を使用し, アーク起動実験を行った場合の結果を示しており, 起動からのチャンバ内圧力, 溶接電圧, 溶接電流及び放電状況の時間的変化である。また, SUS304 鋼と A2014 合金の大気中での GTA 起動現象は, ほぼ同様であった。Fig. 2 の高真空中での GHTA 起動現象と Fig. 3 の大気中での GTA 起動現象を比較すると, 溶接電圧と溶接電流の時間的変化は, ほぼ同様であることがわかる。真空中では拡散速度が速く, 大気中に比べてアーク柱のプラズマ密度は低くなる。そのため, GHTA 溶接におけるアーク電圧は GTA 溶接のアーク電圧よりも高く, 電圧の変動も大きくなる。真空中での GHTA 溶接法のアーク放電状況は, プラズマ密度の低い低輝度の放電で, Ar ガスの噴出方向に指向性を持つが, 大気中での GTA 溶接法の放電は一般的に知られている高輝度のベル型形状である。

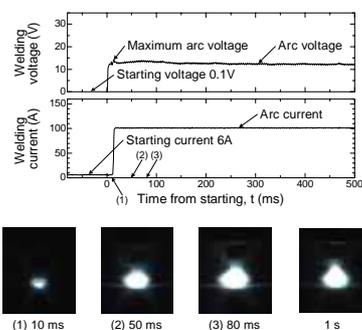


Fig. 3 GTA starting phenomenon in air(SUS304).

### 3.3 起動条件がアーク起動現象に及ぼす影響

#### 3.3.1 初期環境圧力の影響

Fig. 2 の GHTA 起動実験と同じ電極引き上げ条件で, 初期環境圧力を  $10^{-5} \sim 10^{-3}$ Pa の範囲で変化させて GHTA 起動実験を行い, アーク起動現象と起動現象を特徴づける要因の一つであるアーク起動時の最大アーク電圧を調査した。各初期環境圧力での起動時の溶接電圧, 溶接電流及び放電状況の時間的変化を比較しても, 初期環境圧力はアーク起動現象にほとんど影響を与えないことを確認した。Fig. 4 に初期環境圧力と最大アーク電圧との関

係を示す。Fig. 4 より初期環境圧力は最大アーク電圧に影響を与えないことがわかる。タッチスタート方式では、電極が供試材から離れた瞬間にアークが発生し、Fig. 2 のように起動から約 15ms 後に溶接電流が設定アーク電流に到達した直後に最大アーク電圧を示す。今回の電極引き上げ条件で、アーク電流が設定値となる時間  $t = 15 \text{ ms}$  のときの電極間隔を計算すると 0.225mm となる。このように電極間隔が小さい場合は、初期環境圧力が変化しても電極と供試材間の局所的な圧力変化が少ない。そのため、初期環境圧力が最大アーク電圧に影響を与えないと考えられる。

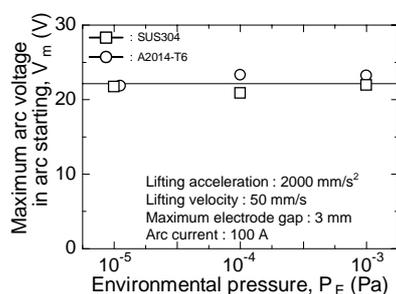


Fig. 4 Relationship between environmental pressure and maximum arc voltage.

### 3.3.2 電極引き上げ条件の影響

最大電極間隔 3 ~ 30mm, 電極引き上げ速度 50 ~ 300mm/s, 加速度 500 ~ 2500mm/s<sup>2</sup> の電極引き上げ条件と、初期環境圧力 10<sup>-5</sup>Pa, 起動電流 6A, アーク電流 100A, Ar ガス流量 1.67ml/s の溶接条件で GHTA 起動実験を行った。また、比較のために同じ範囲の電極引き上げ条件でアーク電流 100A, Ar シールドガス流量 5l/min で GTA 起動実験を行った。各電極引き上げ条件での起動時の溶接電圧, 溶接電流及び放電状況の時間的変化を比較して、今回の実験条件ではアーク起動現象は電極引き上げ条件の影響をはほとんど受けないことを確認した。

Fig. 5 に最大電極間隔と最大アーク電圧との関係, Fig. 6 に電極引き上げ速度と最大アーク電圧との関係, また Fig. 7 に電極引き上げ加速度と最大アーク電圧との関係を示す。Fig. 5 から Fig. 7 より今回の実験条件の範囲では、供試材 SUS304 鋼, A2014 合金ともに高真空中での最大アーク電圧( , 印)は電極引き上げ条件の最大電極間隔, 電極引き上げ速度及び加速度の影響をほとんど受けないことがわかる。これらの実験結果はタッチスタート方式のアーク起動は電極引き上げ条件の影響を受けないアーク起動方式であり, ISS 軌道上での宇宙 GHTA 溶接のアーク起動法として優れていることを示している。Fig. 2 に示すように GHTA 起動では

起動後約 15ms の極短時間で溶接電圧が最大アーク電圧になる。そのため、引き上げ加速度が 2000mm/s<sup>2</sup> の場合、起動後 15ms の時点での電極間隔は 0.225mm, 引き上げ速度は 30mm/s であり、設定した最大電極間隔, 引き上げ速度になる前に最大アーク電圧になる。また、加速度を 500 ~ 2500mm/s<sup>2</sup> で変化させた場合、15ms 後の電極間隔は 0.056(500mm/s<sup>2</sup>) ~ 0.281(2500mm/s<sup>2</sup>)mm となる。最大アーク電圧には電極と供試材間の局所的な圧力の影響があると考えられる。そのため、引き上げ加速度を変化させても電極間隔が最大でも 0.281mm という微小な状態で最大アーク電圧となり、電極と供試材間の局所的な圧力変化が少ないためと考えられる。また、アーク起動時の最大アーク電圧は SUS304 鋼と A2014 合金でほぼ同じ電圧値を示した。その原因は、真空中では拡散速度が速いためにアーク柱の金属蒸気が少ない。そのため、供試材の種類に関係なくアーク柱のプラズ

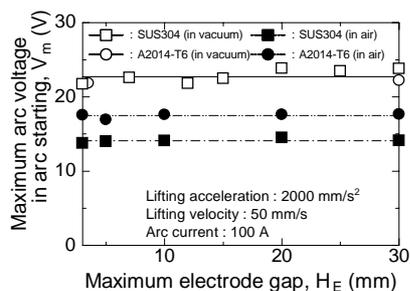


Fig. 5 Relationship between maximum electrode gap and maximum arc voltage.

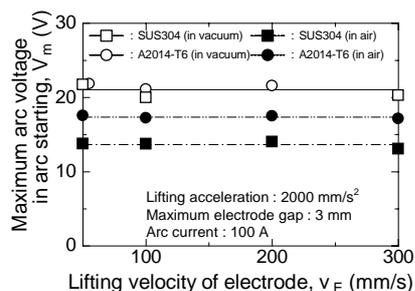


Fig. 6 Relationship between lifting velocity and maximum arc voltage.

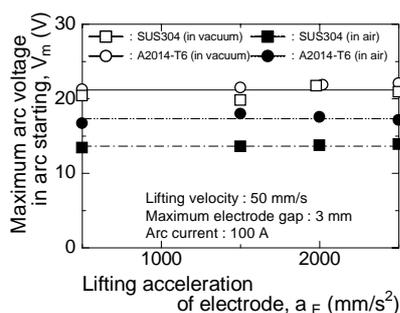


Fig. 7 Relationship between lifting acceleration and maximum arc voltage.

マ密度が同程度に低く、アーク作動ガスの種類によって決まる最大アーク電圧に近いアーク電圧になるためと考えられる。次に、Fig. 5 から Fig. 7 の大気中での GTA 起動の実験結果( , 印)を見ると、GHTA 起動の場合と同様に SUS304 鋼, A2014 合金ともに最大アーク電圧は引き上げ条件の影響を受けないことがわかる。また、アーク起動時の最大アーク電圧は SUS304 鋼よりも A2014 合金の方が高い値を示した。これは、DCEN(DC Electrode Negative)極性の GTA 溶接では A2014 合金表面の酸化膜が除去されないために SUS304 鋼の場合よりもアーク柱の金属蒸気が少ないためと考えられる。今回のタッチスタート方式によるアーク起動実験では、全ての場合においてアークが発生し、直流高電圧方式によるアーク起動のようにグロー放電に移行する現象は確認できなかった。タッチスタート方式によるアーク起動は、高周波高電圧方式、直流高電圧方式によるアーク起動よりも低電圧で、高周波高電圧方式で発生した大きなホット電流や電極材料のスパッタリングの無い穏やかなアーク起動が可能である。また、大気中での最大電極間隔 30mm の GTA 起動では、アークが消失したり、揺動するのに対して、真空中での GHTA 起動では安定したアーク放電が維持できるため、GHTA 放電が溶接熱源以外の熱間加工用熱源などに利用できる可能性がある。

### 3.5 各起動方式の評価

これまでの結果から、高周波高電圧方式、直流高電圧方式及びタッチスタート方式の ISS 軌道上での適用性について評価を行う。Table 1 は各起動方式を電磁障害、重量、安全性、応答性及びアーク放電への移行性の視点から評価した結果である。高周波高電圧方式では高周波電源を使用するので電磁障害を発生する可能性が高い。タッチスタート方式は高周波高電圧発生装置、直流高電圧発生装置などの特別な装置を必要としないので軽量で、また低電圧のために安全な起動が可能である。そして、高周波高電圧方式では起動後に設定溶接電流になるのに約 300ms の時間<sup>2)</sup>を要すが、直流高

電圧方式、タッチスタート方式では数 10ms 以内で可能である。また、タッチスタート方式は全ての起動でアーク起動が可能であり、先に述べたようにアーク起動現象は起動条件の影響を受けにくい。以上のことを考慮すると宇宙 GHTA 溶接法のアーク起動方式としては、タッチスタート方式が最適と判断できる。

### 4. 結 論

タッチスタート方式による高真空中での GHTA 起動実験と大気中での GTA 起動実験を行って、次のことを明らかにした。

- 1) ISS 軌道圧力  $10^{-5}$ Pa でタッチスタート方式による GHTA 起動が可能である。
- 2) SUS304 鋼と A2014 合金のタッチスタート方式による GHTA 起動現象は、ほとんど違いがない。
- 3) タッチスタート方式の GTA 起動現象と GHTA 起動現象は、ほぼ同じである。しかし、GTA 起動に比べて GHTA 起動では、プラズマ密度が低いためにアーク電圧が高く、低輝度のアーク放電である。
- 4) タッチスタート方式のアーク起動現象は、環境圧力及び電極引き上げ条件の最大電極間隔、速度及び加速度などの起動条件の影響を受けにくい。
- 5) ISS 軌道上での適用を考慮するとタッチスタート方式が宇宙 GHTA 溶接のアーク起動法として優れる。

### 参 考 文 献

- 1) 吹田義一, 佃 芳行, 高木 隆, 黄地尚義, 増淵興一: 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 ,11(1993) pp. 423-427.
- 2) 吹田義一, 正箱信一郎, 佐藤順子, 黒川哲平, 高井大輔, 佃 芳行, 寺嶋 昇, 藤澤正一郎, 黄地尚義, 増淵興一: 宇宙ステーション軌道圧力での GHTA 溶接実験, 溶接学会論文集, 21-1(2003), pp. 33-38.
- 3) 吹田義一, 高井大輔, 杉山智志, 佃 芳行, 寺嶋 昇, 藤澤正一郎, 黄地尚義, 増淵興一, 今川吉郎: ISS 軌道圧力での直流高電圧方式による GHTA 起動実験, 溶接学会論文集 ,21-3(2003), pp. 350-355.
- 4) 吹田義一, 高井大輔, 杉山智志, 寺嶋 昇, 佃 芳行, 藤澤正一郎, 今川吉郎: ISS 軌道圧力でのアルミニウム合金の宇宙 GHTA 溶接実験, 日本航空宇宙学会論文集 ,52-600(2004) ,pp. 10-15.

Table 1 Evaluation of each arc starting process.

|                | High-voltage high-frequency technique | High-voltage DC technique | Touch start technique |
|----------------|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| EMI            | ×                                     |                           |                       |
| Weight         |                                       |                           |                       |
| Safeness       |                                       |                           |                       |
| Responsiveness |                                       |                           |                       |
| TAD            |                                       |                           |                       |

: Good : Fair × : Bad  
EMI : Electromagnetic interference, TAD : Transferability to arc discharge