

真空中での交流電源を用いた宇宙 GHTA 溶接の溶接現象

高松工業高等専門学校 福家英敏, 吹田義一, 土居優人, 正箱信一郎, 寺嶋昇, 山内庄司

Space GHTA Welding Phenomena with AC Power Supply in Vacuum

Hidetoshi Fuke, Yoshikazu Suita, Doi Yuto, Shinichiro Shobako, Noboru Terajima, Shoji Yamauchi
Takamatsu National College of Technology

E-Mail : suita@takamatsu-nct.ac.jp

Abstract : The butt weld and bead on plate experiments on aluminum alloy plate were performed with the space GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) welding process using the AC (alternating current) welding machine with 600 re-striking voltage in a vacuum. The welding phenomena such as arc discharge and cleaning area expanding and the weld metal shape were investigated. As a result, it was clarified that the arc discharge using AC welding machine become unstable arc compare with the arc discharge using pulsed DC (direct current) welding machine with DCEN in a vacuum and the arc discharge begins between the electrode and the edges of base metal.

Key words : Space GHTA welding, Vacuum environment, Arc discharge, Alternating current, Cleaning action, Aluminum

1. 緒 論

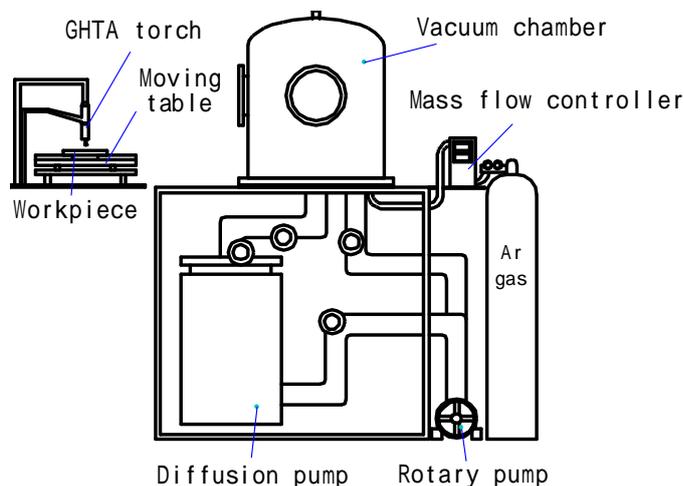
現在建設中の国際宇宙ステーション ISS の修理, 改造および今後の宇宙開発に必要な宇宙構造物の建造, 月面基地建設等には効率的な接合技術である宇宙溶接技術が必要不可欠となる. そこで, 著者等は 1993 年に日本独自の宇宙 GHTA(Gas Hollow Tungsten Arc)溶接法を提案¹⁾し, 研究開発²⁻⁴⁾を行っている. その後のアルミニウム合金の溶接研究によって, 真空中での宇宙 GHTA 溶接において直流パルス電流のアーク衝撃圧力でアルミニウム合金表面の酸化膜を粉砕除去する新技术を開発^{5,6)}している. 2006 年には航空機を使用した模擬宇宙環境下での溶加ワイヤ供給溶接実験を行い, 十分な強度を有するアルミニウムの溶接継手が製作可能⁷⁾であることを実証した. しかし, アーク衝撃圧力を用いて酸化膜を除去するため溶接ビード表面に凹凸が発生する問題が

確認された. この問題の解決策として, 陰極点のクリーニング作用で酸化膜を除去する交流電源を用いた溶接法が挙げられる. そこで, 真空中でも再点弧可能なように再点弧電圧 600V 溶接機を試作して溶接実験を実施した. その結果, 真空中でも大気圧環境下と同様に陰極点の持つクリーニング作用によってアルミニウム合金表面の酸化膜を除去し, 溶接が可能であることを明らかにした. しかし, 交流電源を用いると電極プラス期間においてアークが不安定になり, 宇宙での適用を考えた場合, 危険を伴う可能性があることがわかった.

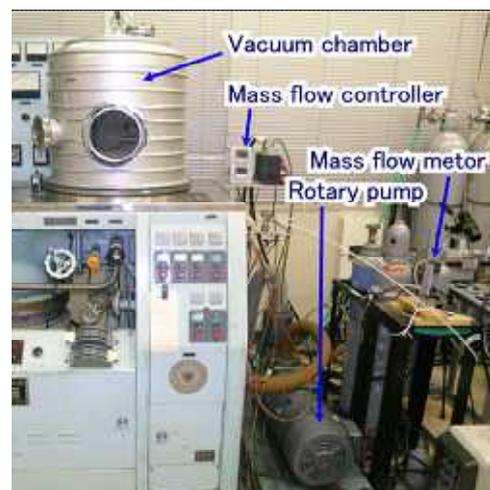
2. 実験方法と実験手順

2.1 実験装置

これまで, 再点弧電圧 250V 溶接機を使用していた



(a) Schematic diagram of experiment system



(b) Experimental apparatus

Fig.1 Experiment system for GHTA welding in vacuum environment

が、電極プラス (EP) 移行時にアークが再点弧しなかった。そこで本研究では再点弧電圧 600 V の試作溶接機を使用した。実験に使用した実験装置を Fig. 1 に示す。同実験装置は高周波起動方式交流溶接機、真空チャンバ、ロータリーポンプ、ディフュージョンポンプで構成される。真空チャンバ内には供試材を固定し、任意速度で移動する溶接台座が内蔵されている。また、チャンバ側面には 8 mm ビデオカメラを配置することができ、溶接状況を録画・観察できる。アーク起動ガスには Ar ガスを用い、その流量はマスフローコントローラーで制御した。GHTA 溶接トーチには、外径 4 mm、内径 1.8 mm の中空タングステン電極が装着されており、電極先端を水平に成形して実験に用いた。タングステン電極は電子放出能の優れた 2 % 酸化ランタン (La_2O_3) 入りを使用した。溶接電流、溶接電圧をデジタルオシログラフで記録した。

2. 2 供試材と実験手順

溶接する供試材のアルミニウム合金板は A2014-T6 とし、Fig. 2 のようにビード・オン・プレート溶接時には幅 75 mm、長さ 150 mm、板厚 4 mm のものを用い、突合せ溶接時には幅 37.5 mm、長さ 150 mm、板厚 4 mm のものを 2 枚用いた。実験では真空チャンバ内をロータリーポンプで約 50 Pa 程度に減圧し、実験を行った。電源には再点弧電圧 600V インバータ制御方式 GHTA 溶接用試作交直両用電源を使用した。溶接条件は、 $I_{EP} = I_{EN}$ (I_{EP} は電極プラスの時の電流値を、 I_{EN} は電極マイナスの時の電流値を意味する。) とした。溶接条件は交流周波数 $F = 50 \sim 150 \text{ Hz}$ 、1

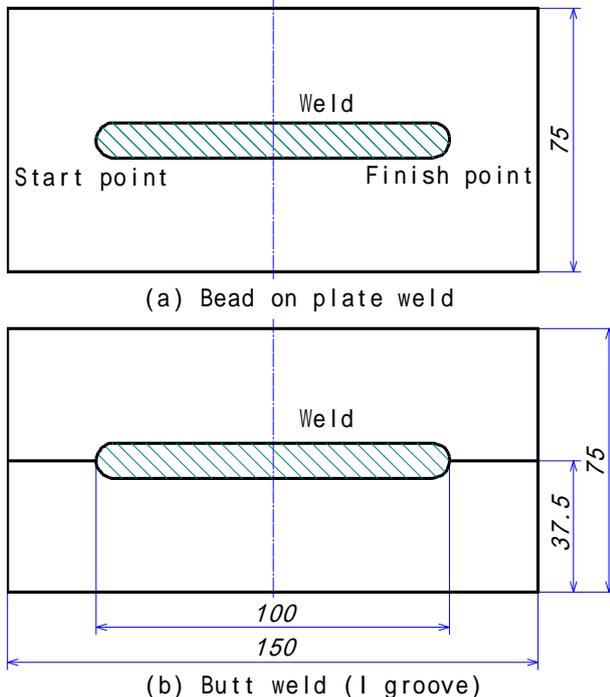


Fig. 2 Specimens for weld experiments

サイクル中で EP 期間の占める割合を示す EP 時間比率 $R_{EP} = 10 \sim 50 \%$ 、溶接速度 $v = 7.3 \text{ mm/s}$ 、Ar ガス流量 $Q_{Ar} = 1.33 \text{ ml/s}$ である。アーク長 (電極間隔) $H_g = 3 \text{ mm}$ で、アークスタートは供試材端 25 mm の位置とし、100 mm 溶接を行った。

3. 実験結果と考察

3. 1 真空中での交流アーク放電の再点弧

これまでは、真空中で再点弧電圧 250V 溶接機を使用して交流アーク溶接を実施するとアークが消失した。再点弧電圧を従来の 250 V から 600 V に上昇させることで EP 期間においても大気圧環境下と同様に再点弧可能になり、EN、EP の両期間でアーク放電が維持できた。その結果、EP 期間中にアーク放電の陰極点が供試材上の電子放出の容易な酸化物の存在箇所形成され、電子放出にともなう超高温時に酸化膜が蒸発するクリーニング作用が生じることを確認した。アークが安定するまでの初期放電期間中では再点弧電圧が 500 V 近くまで上昇するが、安定したアーク放電に移行した後は数 10 V 以下の電圧で放電する。

Fig. 3 に本実験装置による交流周波数 90 Hz とした場合の電流・電圧波形を示す。ここで、EP 時間比率 R_{EP} とは交流波形 1 周期における EP (電極プラス) 時間の割合で、 $(EP \text{ 時間}) / (\text{交流 1 周期の時間})$ で表される。

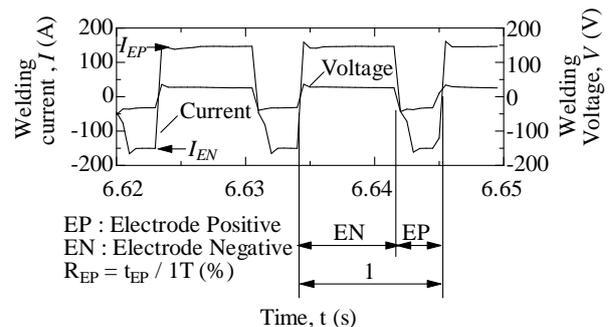


Fig. 3 Wave forms of current and voltage

3. 2 真空中での交流アーク放電現象

真空中において交流電源を用いて溶接を行った際の交流アーク放電状況を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) はアーク点弧時の放電状況である。溶接部以外から放電が起きていることが Fig. 4(a) 下方から確認できる。この放電が起きている箇所が陰極点である。溶接開始からアーク放電が安定するまでは、供試材側面など突起部 (エッジ) をはじめ、溶接部以外の点から激しい放電を伴いながら次第にアークが安定する。EP 期間中に供試材表面の陰極点から電子が飛び出すことで Fig. 4(b) のように溶接部表面の酸化膜をクリーニングしながらアーク放電により溶接が進行していく。溶接中も供試材側面での放電が確認された。アークのクリーニング領域は Fig. 4(c) に示すように広がっていくことが確認された。これはクリーニング作用を担う陰極点が電子

放出の容易な仕事関数の小さい酸化膜を求めてクリーニングしていく特性を持つためである．アーク安定後は，供試材側面など溶接部以外での放電頻度はアーク点弧時に比べれば少ないが，エッジでの放電が確認された．



Fig. 4 AC arc discharge phenomena in vacuum

アーク点弧時の放電状況コマ送り写真を Fig. 5 に示す．図中に示した時間は電極極性が EN から EP に切り替わった瞬間を 0 秒としている．Fig. 5(a) より極性が切り替わった瞬間，溶接部以外の供試材側面からも放電が確認された．その直後 Fig. 5(b) のように供試材側面から電極直下に向かって供試材表面を這うような放電が確認された．真空環境下というアークの再点弧に対して非常に厳しい状況でアークを発生させるために Fig. 5(a) のように電子放出が容易なエッジで放電が生じる．エッジ付近をクリーニングした後，Fig. 5(b) のように新たな酸化膜を求めて放電が供試材表面を這うようにしてエッジから電極直下に移行する．これによって，エッジで生じた放電が電極直下に移動し，安定する．電極直下で陰極点により溶接部表面がクリーニングされた後，クリーニング領域が周囲に広がっていくことが確認された．クリーニング作用は EP 期間で生じることから，EP 期間での放電現象がアークの挙動に大きな影響を与えられ

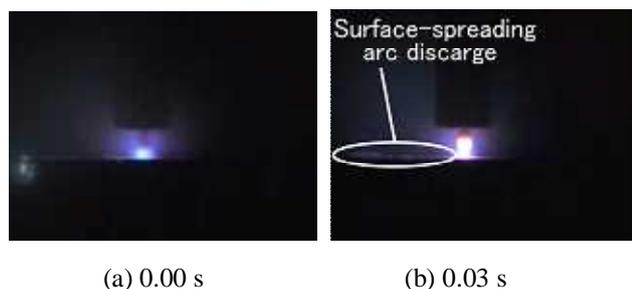


Fig. 5 Arc initiation

3.3 EP 時間比率が溶接現象に及ぼす影響

EP 期間での放電現象がアークの挙動に大きな影響を及ぼすことが確認された．そこで，Table 1 に示すように EP 時間比率 R_{EP} を変化させた際のビード・オン・プレート溶接のクリーニング領域と溶込み状況に及ぼす影響を調査した．

Table 1 Effect on cleaning states and penetration depth by EP time ratio

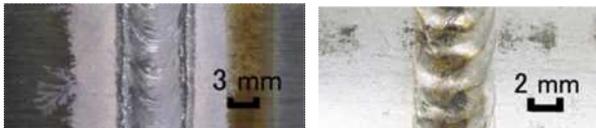
EP time ratio R_{EP} (%)	Weld face	Cross section of weld
20		
30		
40		
50		

$R_{EP}=20$ % の場合，エッジや供試材側面周辺などの溶接部以外でのクリーニングが著しく，溶接部の酸化膜が除去できないことが確認された．溶接部でのクリーニングが少ないのは R_{EP} が小さいため，1 パルス中での電極プラスの期間が少なく，エッジで再点弧した放電がエッジをクリーニングした後，溶接部で十分なクリーニングを行う前に電極極性がマイナスに切替わるためであると考えられる． $R_{EP}=30$ % の場合，溶接部表面のクリーニングが多くなり，溶接部表面の酸化膜が除去できていることが確認できる． $R_{EP}=20$ % の場合とは異なり，エッジをクリーニングした後，溶接部をクリーニングするのに十分な EP 期間があるので溶接部表面の酸化膜を除去する溶接が行えていることが確認できる． $R_{EP}=40$ % の場合，溶接部周辺でははっきりとしたクリーニング領域を確認できる．これは EP 期間が過大なために過度なクリーニング作用が生じたからである． $R_{EP}=50$ % の場合，溶接部でのクリーニングが特に顕著であるが，溶接部表面の広い範囲でクリーニングが確認された． R_{EP} が増大するに従って，クリーニング領域が広くなり， $R_{EP}=30 \sim 40$ % において溶接部で十分なクリーニングが得られた．溶融金属量は R_{EP} が増大するに従って減少し，溶込みが浅くなる． $R_{EP}=50$ % の場合，溶込みが確認されなかった．溶接中における EN 期間が R_{EP} の増大に従って減少することで，電極から放出された電子が溶接部に衝突する頻度が減少する．これにより，溶接部に供給される熱量が減少する．これに加え，EP 期間では供試材表面の広い範囲で放電が起きるため，熱量が一箇所に集中せず分散するため， R_{EP} の増大に従って溶接部の溶込みが浅くなると考

えられる。

3.4 直流パルス電源と交流電源との溶接ビード外観の比較

アルミニウム合金への溶接ビード表面の酸化膜除去機構として、交流電源のクリーニング作用によるものと直流パルス電源のアーク衝撃圧力によるものを比較した。溶接ビード外観の写真を Fig. 6 に示す。Fig. 6(a)が交流電源を用いた溶接、Fig. 6(b)が直流パルス電源を用いた溶接である。両者とも溶接部外観の観察からブローホール、アンダカット等の溶接欠陥は確認されず、良好な溶接ビードが得られた。両者を比較すると Fig. 6(b)の直流パルス電源を用いた溶接ビードでは交流電源を用いたものに対して凹凸の大きなリプルが確認された。これはアーク衝撃圧力によってアルミニウム合金表面の酸化膜を除去するためである。両者の比較により、Fig. 6(a)の交流電源を用いた溶接ビードの方が滑らかで良好なことが明らかになった。



(a) AC power source (b) DC pulse power source
Fig. 6 Comparison of bead appearance

4. 結論

直流パルス電流を用いて宇宙 GHTA 溶接を行った場合、アーク衝撃圧力で溶接ビード表面に凹凸が生じる。それを防ぐためにクリーニング作用によって酸化膜を除去する交流電源を用いた宇宙 GHTA 溶接の基礎的研究を行った。真空中で、溶接実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 再点弧電圧を上昇させることで、真空中で EN, EP の両期間でアーク放電を維持することが可能となる。
- 2) 真空中でも大気圧環境下と同様に、交流電源を用いた溶接では EP 期間時にクリーニング作用を伴うアーク放電が生じる。
- 3) 真空中での交流電源アーク溶接では大気圧環境下とは異なり、溶接部以外で放電が生じる。
- 4) 供試材側面や角などのエッジで放電が起こり、交流アーク放電の起点となる。そのため、エッジ周辺で著しいクリーニングが生じる。

- 5) 交流電源を用いることで、真空中でも大気圧環境下と同等の凹凸の無い滑らかで良好な溶接ビードを得ることができる。

以上のことより、交流電源を用いた宇宙 GHTA 溶接は宇宙溶接用熱源として用いることができるが、交流電源を用いた宇宙 GHTA 溶接は溶接部以外での放電が著しいことが確認された。今後、溶接部以外での放電を抑制し、溶接継手の機械的性質を高めることで交流電源を用いた宇宙 GHTA 溶接が宇宙で適用できる可能性があると考えられる。

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, 佃 芳行, 寺嶋 昇, 八田 崇, 河野 鉄平 他: 航空機を使用した模擬宇宙環境での GHTA 溶接実験, 溶接学会論文集, 18(2000), pp.228-235.
- 3) 吹田 義一, 永井 宏和, 新池 修平, 佃 芳行, 寺嶋 昇 他: アルミニウム合金の真空中での GHTA 溶接現象, 溶接学会論文集, 22 巻(2004), 2 号, pp.218-223.
- 4) 吹田 義一, 松下 和憲, 寺嶋 昇, 佃 芳行, 増淵 興一: 宇宙 GHTA 溶接法のタッチスタート技術による真空中でのアーク起動現象, 溶接学会論文集, 24 巻(2006), 1 号, pp.26-31.
- 5) 吹田 義一, 永井 宏和, 新池 修平, 佃 芳行, 寺嶋 昇 他: アルミニウム合金の真空中での GHTA 溶接現象, 溶接学会論文集, 22 巻(2004), 2 号, pp.218-223.
- 6) 吹田 義一, 江國 友英, 亀井 美佐, 佃 芳行, 寺嶋 昇 他: 宇宙 GHTA 溶接による真空中での溶接現象とアルミニウム酸化膜の除去機構, 日本航空宇宙学会論文集, 54 巻(2006), 632 号, pp.397-402.
- 7) 吹田 義一, 大原 将広, 十川 弘樹, 松下 和憲, 正箱 信一郎, 寺嶋 昇, 佃 芳行, 増淵 興一, 山内 庄司 他: 航空機を使用した模擬宇宙環境での宇宙 GHTA 溶接法によるアルミニウム管の溶接実験, 溶接学会論文集, 25 巻, 4 号, p.494-500(2007)