

# 模擬宇宙環境下での溶加ワイヤ供給を伴うアルミニウム管の宇宙GHTA 溶接実験

高松工業高等専門学校 十川 弘樹, 吹田 義一, 大原 将広, 福家 英敏, 正箱 信一郎, 佃 芳行, 寺嶋 昇

## Butt Welding Experiment on Aluminum Pipe by Space GHTA Welding Process with Wire Feed under Simulated Space Environment

Hiroki Sogawa, Yoshikazu Suita, Masahiro Ohara, Hidetoshi Fuke, Shinichiro Shobako,  
Yoshiyuki Tsukuda and Noboru Terajima  
Takamatsu National college of technology  
E-Mail : [suita@takamatsu-nct.ac.jp](mailto:suita@takamatsu-nct.ac.jp)

**Abstract :** Butt weld experiments on aluminum pipe were performed by the space GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) welding process with feeding a filler wire in a simulated space environment. The weld metal shape and mechanical properties of those butt weld joints and welding phenomena such as the arc discharge and base metal melting were investigated. As a result, it was clarified that the weld metal shape and mechanical properties were improved by the feeding filler wire compare with those of butt weld joints welded by melt-run.

**Keywords :** Space GHTA welding, Simulated space environment, Filler wire, Aluminum, Butt welding

### 1. 緒 論

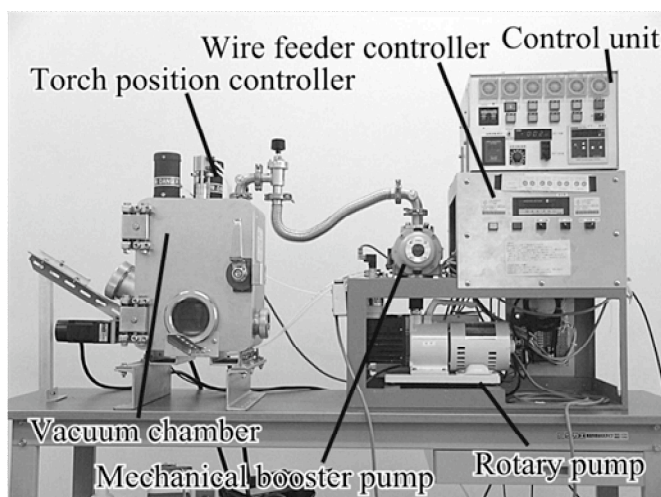
現在建設中の国際宇宙ステーション ISS の修理, 改造および今後の宇宙開発に必要となる宇宙構造物の建造, 月面基地建設等には宇宙溶接技術が必要不可欠となる. そこで, 著者等は 1993 年に日本独自の宇宙 GHTA(Gas Hollow Tungsten Arc)溶接法を提案<sup>1)</sup>し, 研究開発<sup>2-4)</sup>を行っている. これまでの研究で, 模擬宇宙環境下での直流パルス電源を使用した宇宙 GHTA 溶接法によって溶加ワイヤを供給しないメルトラン溶接によってアルミニウム管の溶接が可能なことを示した<sup>5)</sup>. しかし, アーク衝撃圧力によって溶接部のど厚が低下するために突合せ溶接継手の引張強度が低下した. この問題の解決策として溶加ワイヤの供給が挙げられる. そこで, 航空機を使用した

模擬宇宙環境下においてアルミニウム管の溶接中に溶加ワイヤを供給する溶接実験を実施した. その結果, 溶接部のど厚の低下を防げ, 引張強度が改善できることから, 模擬宇宙環境において宇宙 GHTA 溶接技術がアルミニウム管の突合せ溶接継手製作に利用できる可能性を示した. また, 溶加ワイヤの供給が溶接現象と溶融特性に与える影響を調査した.

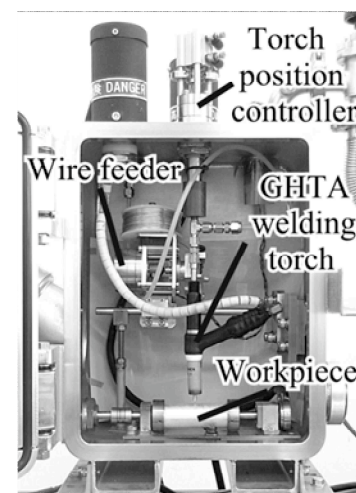
### 2. 実験方法

#### 2. 1 実験装置

実験は Fig.1 に示す模擬宇宙環境溶接実験システムによって行われた. 同実験システムは引上げアーク起動方式直流パルス溶接機, 真空チャンバ, ロータ



(a) Experimental apparatus



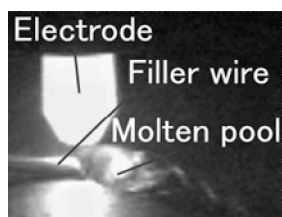
(b) Inside view of chamber

Fig.1 Experiment system for GHTA welding aluminum pipes under simulated space environment

リーポンプ，メカニカルブースターポンプ，コントロールボックスによって構成されている．真空チャンバには，電極位置制御装置と溶接トーチ，溶加ワイヤ供給装置，供試材固定用の治具が内蔵されており，電極の任意位置への引上げ，供試材の回転，溶加ワイヤの任意速度での供給が可能である．また，溶接状況は，チャンバ正面に取り付けた 8 mm ビデオカメラとチャンバ側面斜め 45° 上方に取り付けた高速ビデオカメラ(500 fps)で録画し，観察した．アーク起動ガスには Ar ガスを用い，その流量をマスフローコントローラによって制御した．GHTA 溶接トーチには，外径 4 mm，内径 1.8 mm の 2%酸化ランタン入り中空タングステン電極を用い，電極先端を 60° に成形して実験に用いた．溶接電流，Ar 流量，チャンバ内圧力，重力加速度は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

供試材には直径 30 mm，肉厚 2 mm の純アルミニウム管 A1070-H14 を使用し，溶加ワイヤは A1070-WY が入手困難だったために直径 1mm の A4043-WY を使用した．実験ではビード・オン・プレート溶接時には長さ 100 mm の純アルミニウム管を，突合せ溶接時には 45 mm のものを 2 本突合わせ，3 箇所仮止めしたものを用いた．チャンバ内部はロータリーポンプとメカニカルブースターポンプによって約 10 Pa まで排気し，航空機のパラボリックフライトによって得られる約 20 秒間の  $10^{-2}$  G の微小重力環境中に溶接実験を行った．溶接条件はベース電流  $I_B=20$  A，パルス電流  $I_P=140$  A，溶加ワイヤ供給速度  $v_W=7.5 \sim 25$  mm/s，パルス周波数  $F_P=3.5$  Hz，パルス幅  $W_P=30$  %，溶接速度  $v=7$  mm/s，Ar ガス流量  $Q_{Ar}=1.33$  ml/s とし，アーク長は  $H_E=3$  mm とした．また，溶加ワイヤは溶融池(アーク)前縁に供給した．Fig.2 に突合せ溶接継手強度試験に使用した引張試験片を示した．製作された突合せ継手から Fig.2(a)の二点鎖線で示すような引張試験片を溶接開始点から約 120 度の地点が中心となるように採取し，Fig.2(b)のようにチャック部を平坦に加工して引張試験を行い，破断箇所を観察し，突合せ溶接継手の引張強度を調査した．また，溶接部断面をバフ研磨し，マクロ組織を観察した．



(a) -0.024 (seconds)



(b) 0 (seconds)

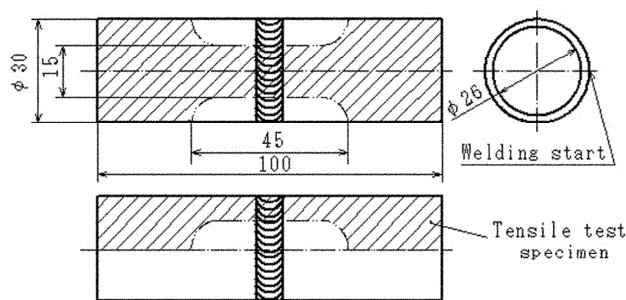


(c) 0.072 (seconds)

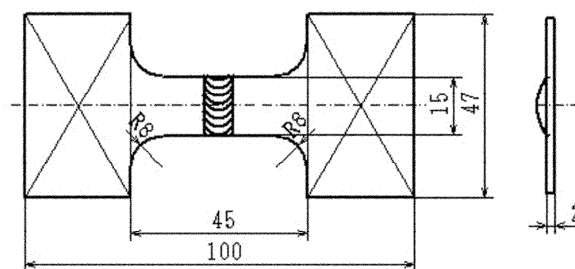


(d) 0.076 (seconds)

Fig.3 High-speed video sequences showing aluminum pipe GHTA welding with filler wire



(a) Welded aluminum pipe



(b) Specimen size for tensile test

Fig.2 Dimensions of tensile test specimen

## 3. 実験結果と考察

### 3. 1 模擬宇宙環境での溶接実験

模擬宇宙環境において溶加ワイヤを供給して溶接を行った際の溶接状況を Fig.3 に示す．その際の溶接電流波形を Fig.4 に示す．ここで，図中の  $T_P$  はパルス電流期間を示し， $T_B$  はベース電流期間を示している．溶加ワイヤ供給速度は  $v_W=12.5$  mm/s とした．図中に示した時間はベース電流からパルス電流に移行する瞬間を 0 秒としている．Fig.3(a)はパルス電流に移行する直前の溶接状況である．ベース電流期間中であるために溶加ワイヤ，母材共に溶融していないことが確認できる．Fig.3(b)のようにベース電流からパルス電流に移行すると溶加ワイヤ，母材共に溶融し始めることが Fig.3(c)より分かる．パルス電流期間中はプラズマ気流，アーク衝撃圧力および Ar 噴流によって母材と溶加ワイヤの溶融金属がさざ波のように振動しながら中心から外向きに拡大，変形，流動する現象が確認できる．溶加ワイヤも母材と同様に

溶融，変形，流動する現象を確認できた．このような溶接状況によって Fig.3(b)～(d)に示すように時間の経過とともに溶融池寸法が大きくなり，溶融金属量も多くなる．また，溶接によって母材の温度が上がるにつれて溶融金属の流動が目立つようになる．さらに，パルス電流期間が終了してベース電流期間に移行するとアーク圧力の低下によって，溶融金属が膨らむような変形挙動を示した直後に凝固収縮する現象を確認できた．この変形・流動や膨張・凝固収縮過程で酸化膜が除去されていると考えられる．1 G 真空環境下において同様な条件で実験を行ったところ同様な溶接現象が確認できた．このことから，アーク放電，溶融状況は重力の影響を受けないと考えられる．

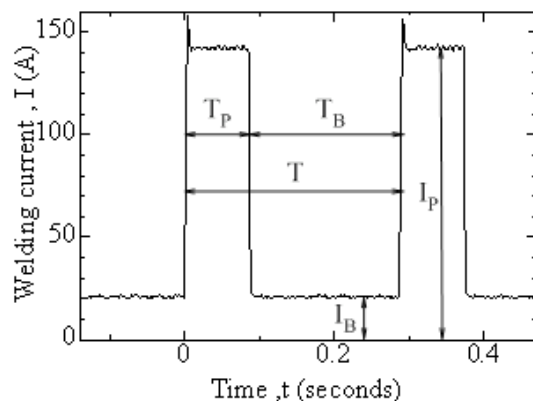


Fig.4 Current waveform

また，この溶加ワイヤ供給速度を 25 mm/s とすると溶接中に溶加ワイヤの小片の飛散(スパッタ)が確認された．その瞬間を Fig.5 に示す．図中の時間は Fig.3 と同様にパルス電流に移行する瞬間を 0 秒としている．Fig.5 (b)は Fig.3 (b)と同様な溶接状況が観察でき，Fig.5(c)ではパルス電流期間中に溶加ワイヤが折れ曲がったような変形を示した直後，Fig.5(d)に示すように溶加ワイヤと母材が融合せずに溶加ワイヤが飛散している．これは，溶加ワイヤの供給速度が速すぎるために電極直下において溶加ワイヤが完全に溶融せずに部分的に溶融切断されたとき，溶加ワイヤの小片と母材が接触していないためである．

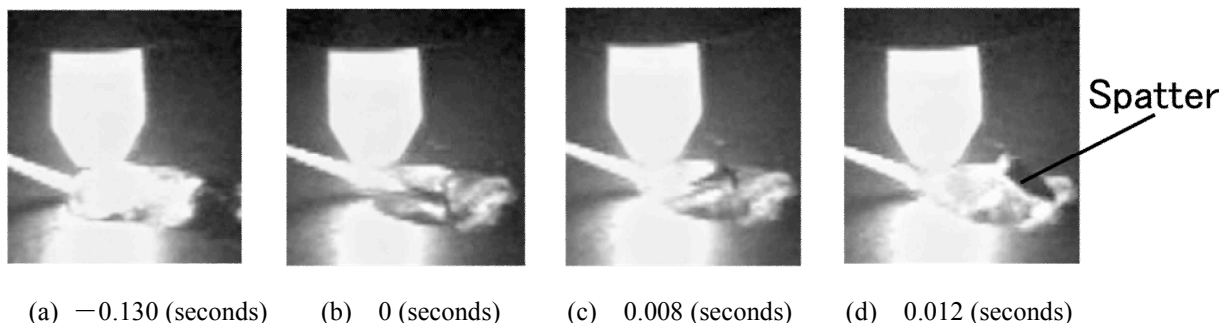


Fig.5 Spatter made with wire feed under simulated space environment

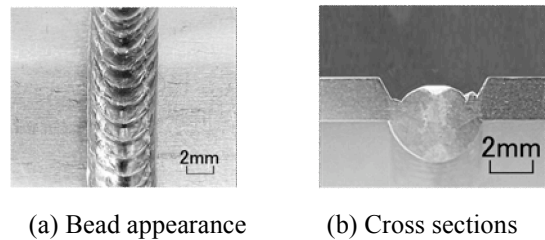


Fig.6 Melt-run weld made under simulated space environment

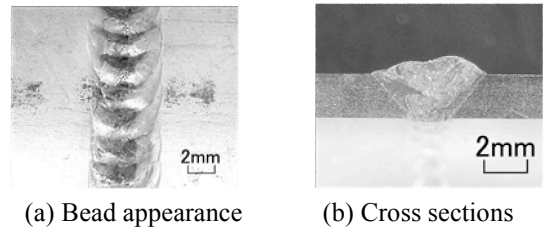


Fig.7 GHTA weld made with filler wire under simulated space environment

模擬宇宙環境でメルトラン溶接によって製作された溶接継手のビード外観と溶接金属形状(マクロ組織)を Fig.6 に，模擬宇宙環境で溶加ワイヤを供給して製作した突合せ溶接継手のビード外観と溶接金属形状を Fig.7 に示す．Fig.6 ではのど厚の低下が確認できる．しかし，Fig.7 では溶加ワイヤを供給したことによってのど厚低下が防止できていることが確認できる．Fig. 7 ではアンダカットやブローホール，融合不良等の溶接欠陥は確認できなかった．このことより，模擬宇宙環境においても溶加ワイヤを供給することで溶接部ののど厚低下を防止でき，溶接欠陥のない溶接継手を製作することが分かった．

また，1 G 真空環境下において同様な条件でメルトラン溶接によって製作された溶接のビード外観と溶接金属形状を Fig.8 に，溶加ワイヤを供給して実験を行った際の突合せ溶接継手のビード外観と溶接金属形状を Fig.9 に示す．Fig. 7 と同様に Fig. 9 においてもアンダカットやブローホール，融合不良等の溶接欠陥は確認できず，溶加ワイヤを供給することでのど厚低下が防止できている．溶融金属量の多い



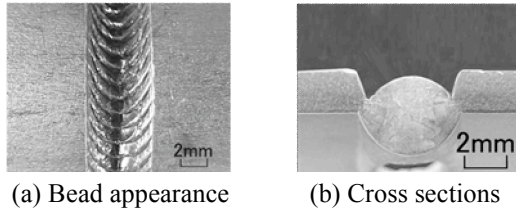


Fig.8 Melt-run weld made under 1G vacuum environment

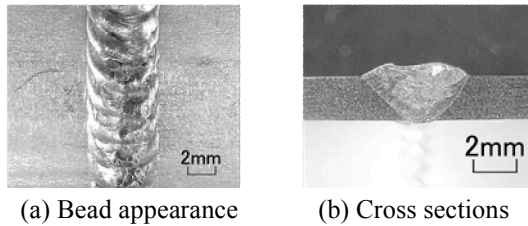
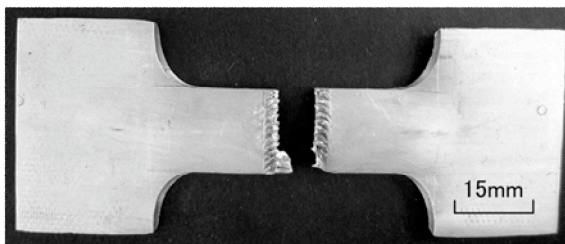


Fig.9 GHTA weld made with filler wire under 1G vacuum environment

Fig.6 と Fig.8 を比較すると Fig.8 の方が溶接金属の垂れ下がりがわずかながら大きい。一方、Fig.7 と Fig.9 を比較すると同様なビード外観と溶接金属形状が得られている。このことより溶融金属量が少ない場合は溶接金属の垂れ下がりには重力加速度の影響がほとんど現れないと考えられる。

### 3. 2 突合せ溶接継手の引張強度

模擬宇宙環境で製作した突合せ溶接継手から引張試験片を採取し、引張試験を行った。その結果、Fig.10 に示すようにメルトラン溶接継手は溶接部で破断し、その引張強度は 51.1MPa(母材の約 50%)を示した。一方、溶加ワイヤを供給した突合せ溶接継手は母材部で破断し、引張強度は 71.4MPa(母材の約 70%)を示した。母材部で破断したにもかかわらず突合せ溶接継手の引張強度が母材の約 70%になっているのは溶接熱による軟化のためである。この結果から、溶加ワイヤを供給することで引張強度を改善できることが確認できた。



(a) Butt welding joint made by melt-run

## 4. 結 論

模擬宇宙環境において溶加ワイヤを供給して溶接実験を行った結果以下のことが明らかになった。

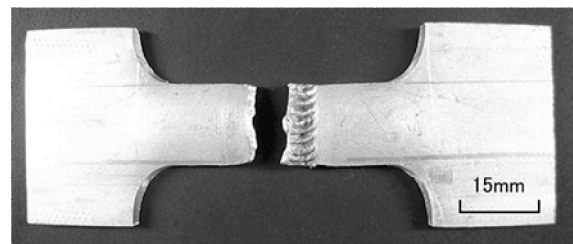
- 1) 模擬宇宙環境において溶加ワイヤを供給することによる溶接現象には 1G 真空環境での溶接現象と違いが見られない。
- 2) 溶加ワイヤを供給することによって突合せ溶接継手ののど厚低下が防止でき、引張強度が改善できる。
- 3) 宇宙 GHTA 溶接法は溶加ワイヤを適切な速度で供給すればスパッタ等が発生しない安全な溶接が可能である。
- 4) 宇宙 GHTA 溶接法は宇宙で適用される可能性を持っていることが分かった。

## 参 考 文 献

- 1) 吹田義一, 佃 芳行, 高木 隆, 黄地尚義, 増渕興一: 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, 増渕興一: 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, 大原将広, 十川弘樹, 松下和憲, 正箱信一郎 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(2007), 4 号, pp.494-500

## 謝 辞

本研究は(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る。



(b) Butt welding joint made with filler wire

Fig.10 Tensile test specimen welded using GHTA welding