

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突合せ溶接実験

高松工業高等専門学校 大原将広, 松下和憲, 十川弘樹, 吹田義一, 正箱信一郎, 佃 芳行, 寺嶋 昇

Butt Welding Experiments of Aluminum Pipes by Space GHTA Welding Process under Simulated Space Environment

Masahiro Oohara, Kazunori Matsushita, Hiroki Sogawa, Yoshikazu Suita, Shinichiro Shobako,
Yoshiyuki Tsukuda and Noboru Terajima

Takamatsu National College of Technology, Chokushi, Takamatsu, Kagawa 761-8058

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

Abstract: GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) welding experiments were performed in a simulated space environment using the aircraft. A vacuum chamber for the GHTA welding test was placed in the cabin of the aircraft and the microgravity environment was produced by a parabolic flight of the aircraft. Butt welding and bead on plate welding of aluminum pipe were performed in the vacuum chamber under microgravity condition. Then we observed the welding phenomena and investigated macrostructures and mechanical properties of the butt weld joints. As a result, we showed the possibility of applying the GHTA welding process in space.

1. 緒 論

現在開発中の国際宇宙ステーション ISS の修理・改造, また今後の宇宙開発で必要となる宇宙構造物の建造, 月面基地建設などには宇宙溶接技術が必要不可欠になる。著者らは 1993 年に日本独自の宇宙 GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) 溶接法を提案¹⁾し, 研究開発を行ってきた²⁻⁴⁾。これまでの研究で, 真空中での GHTA 溶接において, 直流パルス電源によるアーク衝撃圧力でアルミニウム合金表面の酸化膜を粉碎除去できることを示した⁵⁾。そこで今回は, 航空機を使用した模擬宇宙環境でアルミニウム管の突合せ溶接実験を行い, 宇宙 GHTA 溶接法が宇宙環境下でアルミニウム管の溶接に適用できる可能性を示した。

2. 実験方法

2-1 実験装置

航空機に搭載し, 模擬宇宙環境下での溶接実験に使用した模擬宇宙環境溶接実験システムを Fig. 1 に示す。同実験システムは引上げアーク起動方式直流パルス/直流溶接機, 真空チャンバ, ロータリーポンプ, メカニカルブースターポンプ, コントロールボックスで構成される。真空チャンバには圧縮ガスにより作動する電極位置制御装置と溶接トーチ, 供試材固定用の治具, ステッピングモーターが取り付けられており, 電極を供試材に接触させた状態から任意距離引上げることと, 任意速度で供試材を回転させることができる。また, チャンバ前方と側面には 8mm ビデオカメラと高速度カメラ (500fps) を取り付けことができ, 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で制御した。GHTA 溶接トーチには, 外径 4mm, 内径 1.8mm の中空タングステン電極が装着されており, 電極先端を頂角 60° 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る 2%酸化ランタン (La_2O_3) 入りのもを使用した。溶接電流, 溶接電圧, Ar 流量, 真空チャンバ内圧力, 重力をデジタルオシログラフで記録した。

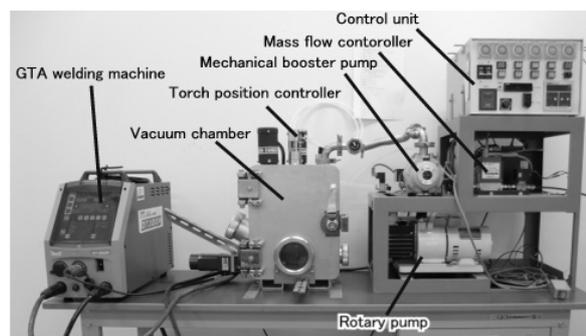


Fig.1 模擬宇宙環境溶接実験システム

2-2 供試材と実験手順

溶接する供試材のアルミニウム管は, 溶接性が国際宇宙ステーション ISS で採用されたアルミニウム合金 A2219-T6 とほぼ同じである純アルミニウム管 A1070-H14 とし, 直径 30mm, 肉厚 2mm のものを用いた。ビード・オン・プレート溶接では長さ 100mm のアルミニウム管を用い, 突合せ溶接では長さ 45mm のものを 2 本突合せ, 3 箇所 GTA 溶接で仮止めしたものを用い, 周方向溶接を行った。

実験では真空チャンバ内をロータリーポンプとディフュージョンポンプで減圧し, 航空機の 1 回の

パラボリックフライトで得られる約 20 秒間の 10Pa, $10^{-2}g$ の模擬宇宙環境下で溶接した。電源は直流電源あるいは直流パルス電源を使用し、直流電極マイナス(DCEN)極性とした。溶接条件は直流電源を使用する場合は溶接電流 $I=80A$ 、直流パルス電源使用時はパルス電流 $I_p=140, 150A$ 、ベース電流 $I_b=20A$ 、パルス周波数 $F_p=5Hz$ 、パルス幅 $W_p=30\%$ 、溶接速度 $v=7mm/s$ 、Ar ガス流量 $Q_{Ar}=2.5ml/s$ とし、アーク長(電極引き上げ高さ)は 3mm とした。

3. 実験結果と考察

3-1 直流電源による突合せ溶接実験

模擬宇宙環境下で直流電源を使用して GHTA 溶接法でアルミニウム管の突合せ溶接を行い、溶接状況、溶接現象、溶接部外観およびマクロ組織を観察した。Fig.2 に突合せ溶接状況を高速ビデオで撮影したコマ送り画像を示す。図中の時間は Fig.2(a)を 0 秒とした経過時間を示す。Fig.2(b)ではアルミニウム管表面の酸化膜が溶融せず、酸化膜下のアルミニウム素地のみが溶融する現象が起きている。溶融池上の酸化膜は Fig.2 (b)のように Ar 噴流、プラズマ気流および Ar 噴流のドラッグ効果でシワが発生し、そのシワが振動する様子が確認できた。酸化膜は時間が経過すると時間間隔は異なるが周期的に Fig.2(c)のように破れ、溶融金属を巻き込みながら後方に流された。Fig.2(d)では酸化膜の破れた孔が大きくなり、表面に酸化膜の無い溶融池(電極直下の黒く見える部分)が見える。また、流された酸化膜が後方の凝固した溶接金属に衝突するときに、溶融金属を含む酸化膜が折り畳まれながら凝固する現象が観察された。

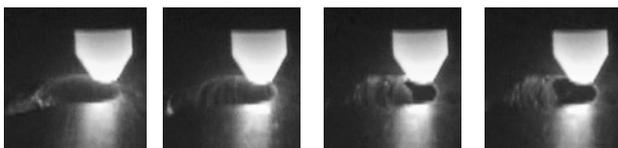
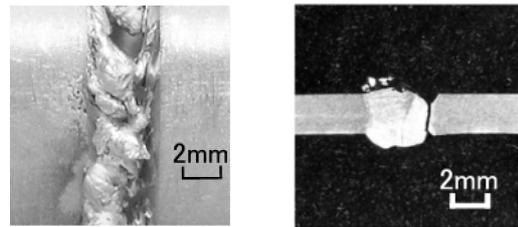


Fig.2 模擬宇宙環境突合せ溶接状況(直流電源)

Fig.3 は製作された突合せ溶接継手の溶接部外観とマクロ組織である。Fig.3(a)では溶融金属表面が酸化膜に覆われたまま流動するため溶融金属の流動性が悪く、また、溶融池後方の既に凝固した溶接金属に溶融金属を含む酸化膜が衝突して折り畳まれながら凝固するために、ガタガタで凸型の溶接金属が確認できた。また、溶融金属が後方へ流され、局部的に溶融池の溶融金属が不足するために、孔が開く溶接欠陥も発生した。そして、Fig.3(b)のようにアンダーカットや溶接金属中に酸化膜の巻き込み、融合不良などの溶接欠陥が認められた。このような溶接現象・状況を考えるとアルミニウムの溶接を行うには溶接中の酸化膜除去の必要性が再確認できる。

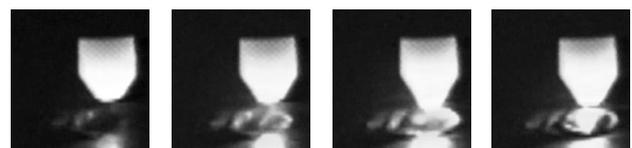


(a) 溶接部外観 (b) 溶接部マクロ組織

Fig.3 模擬宇宙環境突合せ溶接継手(直流電源)

3-2 直流パルス電源による 1g 真空環境での突合せ溶接実験

1g 真空環境下で直流パルス電源を使用して GHTA 溶接法でアルミニウム管の突合せ溶接を行った。パルス電流は $I_p=140A$ とし、溶接状況、溶接現象、溶接部外観およびマクロ組織を観察した。そのときの突合せ溶接状況のコマ送り画像を Fig.4 に示す。図中に示した時間はベース電流からパルス電流に移行した瞬間を 0 秒としている。Fig.4(a)はパルス電流に移行する 0.02 秒前のベース電流時のアーク放電状況である。前のパルス電流で形成された溶接金属の窪み(以下、クレータ)が確認できるが、ベース電流期間中はアルミニウム管は溶融していない。ベース電流からパルス電流に移行した瞬間に Fig.4(b)のようにアーク熱により電極直下のアルミニウム管が再溶融する。Fig.4(b)から Fig.4(c)のように、パルス電流期間中は時間の経過とともに溶融池寸法が徐々に大きくなり、溶融金属量も多くなる。この際にプラズマ気流、アーク衝撃圧力および Ar 噴流によって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変形、流動する現象が確認できる。また、パルス電流期間が終了してベース電流に移行するとアーク圧力が低下するので、それまで大きなアーク圧力で押されていた溶融金属が瞬間的に膨らむような変形挙動(Fig.4(c))を示した直後に凝固収縮する現象が確認できた。この変形・流動や瞬間的な膨張・凝固収縮過程で酸化膜が粉碎除去されているようである。また、溶接中にスパッタ等の飛散は観察されず、直流パルス電流によるアーク衝撃圧力で溶融金属を飛散させることなく酸化膜を除去し、突合せ溶接継手が製作できることが実証できた。



(a)-0.02 sec (b) 0 sec (c) 0.04 sec (d) 0.05 sec

Fig.4 1g 真空環境突合せ溶接状況(直流パルス電源)

製作されたアルミニウム管の突合せ溶接継手の溶接部外観とマクロ組織を Fig.5 に示す。Fig.5(a)より、パルス電流のアーク衝撃圧力によるクレータが連続

したリップル（さざ波）が観察された。また，外観検査では縦割れなどの溶接欠陥は確認できなかった。Fig.5(b)のマクロ組織の観察より，突合せ溶接された2本のアルミニウム管の溶接部には融合不良やブローホールなどの溶接欠陥は確認されなかったが，溶接金属が内側に凸状になり，のど厚の低下が観察される。これは直流パルス電源による溶接で重力による溶落ちやアーク衝撃圧力，アルゴン噴流により溶融金属が押し下げられたことが原因であると考えられる。のど厚の低下を防ぐには溶加ワイヤの供給が考えられる。これらの結果より，直流パルス電源を用いることにより1g真空環境下でアルミニウム管表面の酸化膜を除去し，アルミニウム管の突合せ溶接が可能であることが実証された。

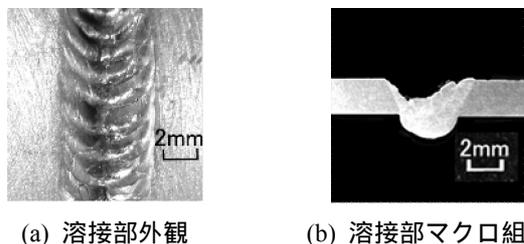


Fig.5 1g真空環境突合せ溶接継手（直流パルス電源）

3-3 直流パルス電源による模擬宇宙環境での突合せ溶接実験

前節の実験結果はGHTA溶接法が宇宙で利用できる可能性を示している。そこで，10Pa， $10^{-2}g$ の模擬宇宙環境下で直流パルス電源を使用してGHTA溶接法によるアルミニウム管の突合せ溶接を行った。溶接条件は3-2節と同条件とし，溶接状況，溶接状況，溶接部外観およびマクロ組織を観察した。Fig.6がその突合せ溶接状況のコマ送り画像である。図中に示した時間はFig.4と同様である。Fig.4と同様にベース電流期間中はアルミニウム管の溶融は確認できず，パルス電流期間中は時間の経過とともに溶融池寸法が振動しながら大きくなり，溶融金属量も多くなる。パルス電流期間終了後のベース電流への移行時にアーク圧力の低下による溶融金属の膨張・凝固収縮過程も確認でき，酸化膜除去機構は重力加速度によらず同様であった。また，溶接中にスパッタ等の飛散は観察されず，模擬宇宙環境下で直流パルス電流によるアーク衝撃圧力で溶融金属を飛散させることなく酸化膜を除去し，突合せ溶接継手が製作できることが実証できた。

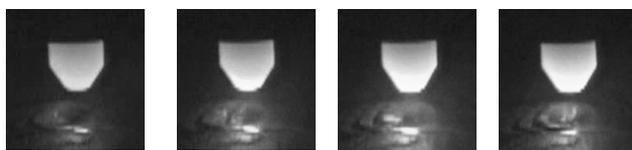


Fig.6 模擬宇宙環境突合せ溶接状況（直流パルス電源）

Fig.7に製作されたアルミニウム管の突合せ溶接継手の溶接部外観とマクロ組織を示した。Fig.7(a)より，1g真空環境下と同様にパルス電流のアーク衝撃圧力によるクレータが連続したリップルが観察された。また，溶接部中央に白い線のように見えるものがあるが，これは酸化膜が除去された跡が繋がったものであり，縦割れなどの溶接欠陥は確認できなかった。Fig.7(b)のマクロ組織からも突合せ溶接された2本のアルミニウム管の溶接部には融合不良やブローホールなどの溶接欠陥は確認されなかったが，溶加ワイヤを供給していないためのにど厚の低下が観察される。また，直流電源を使用した模擬宇宙環境下でのステンレス鋼の溶接実験⁶⁾では溶接金属の垂れ落ちは確認できなかったが，今回の直流パルス電源によるアルミニウム管の突合せ溶接ではFig.7(b)のように1g真空環境下と同様に内面の溶接金属が凸状になっている。これはアーク衝撃圧力やアルゴン噴流により溶融金属が押し下げられたことが原因であると考えられる。これらの実験結果より，模擬宇宙環境下での宇宙GHTA溶接法によるアルミニウム管の突合せ溶接において，電極直下の溶接部に溶融金属を保持でき，スパッタ等の飛散がないことが確認できた。また，溶接金属形状に与える影響はアーク衝撃圧力やアルゴン噴流が大きく，重力はあまり影響しないと考えられる。

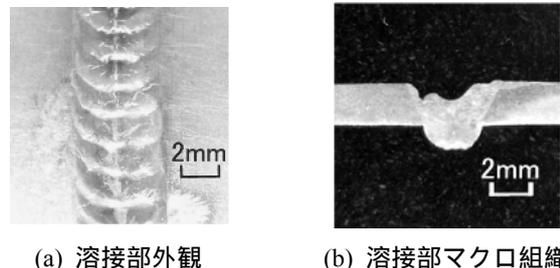


Fig.7 模擬宇宙環境突合せ溶接継手（直流パルス電源）

3-4 重力加速度が溶接金属形状に及ぼす影響

パルス電流 $I_p = 150A$ とし，重力加速度 10^{-2} ，1および1.8gの10Pa環境でアルミニウム管のビード・オン・プレート実験を行い，溶接部外観，マクロ組織を観察し，重力が溶接金属形状に及ぼす影響を調査した。Fig.8に実験で得られた溶接部外観，マクロ組織を示す。これまでの実験で重力が溶接状況，溶接金属状態に及ぼす影響はほとんど見られなかったが，過重力である1.8gであっても重力の影響はほとんど見られない。一般的に溶接金属形状を決定する要因としてはプラズマ気流，Arガス噴流，アーク圧力，熱対流，表面張力，電磁対流，自重が挙げられるが，重力が無い場合には熱対流，自重が無視できる。自重に対してはマクロ組織から1パルスによる溶融金属体積を見積もり1パルスによる溶融金属質量を計算すると約1.1gであった。直流パルス電源を用いた

GHTA 溶接法では酸化膜を粉碎除去できる力を持つと考えられるアーク衝撃圧力が関与するため、今回の実験条件では自重による影響は無視できる程度であると考えられる。これらのことより、溶接金属形状に与える影響はアーク衝撃圧力が大きく、重力はあまり影響していないと考えられる。

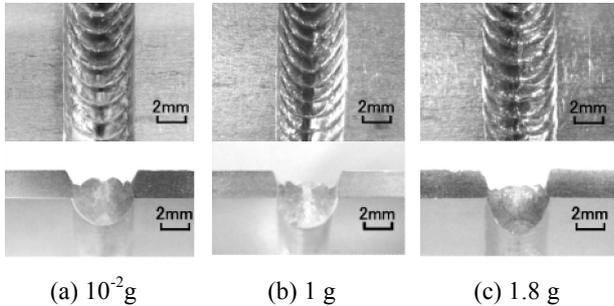


Fig.8 重力加速度が溶接金属形状に及ぼす影響

3 - 5 溶接部の機械的性質の評価

3 - 3 節で製作した突合せ継手から引張試験片を製作し、引張試験を行った。Fig.9 にその引張試験前後の試験片を示す。引張試験結果は溶接部中央の溶接金属で破断し、溶接継手の引張強度は 51.1 MPa で、A1070-H14 の母材強度 (107 MPa) の 48%であった。これは、アーク衝撃圧力やアルゴン噴流により溶融金属が押し下げられ、溶接部のど厚が低下しているためであると考えられる。このような溶接部のど厚の低下を防ぐためには、溶加ワイヤの供給技術の適用が必要と考えられる。

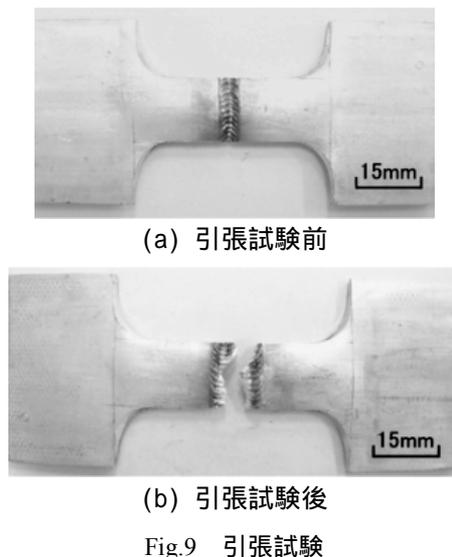


Fig.9 引張試験

4 . 結 論

模擬宇宙環境溶接実験システムを搭載した航空機のパラボリックフライトで得られる 10Pa, 10⁻²g の模擬宇宙環境下において宇宙 GHTA 溶接法による溶加ワイヤを供給しないメルトラン溶接でアルミニウム

管の溶接実験を実施し、以下のことを明らかにした。

- 1) 直流パルス電源を使用した突合せ溶接において、溶接中に溶接部に溶融金属を保持でき、アーク衝撃圧力等によって溶融金属が飛散しない。
- 2) 模擬宇宙環境下でも直流パルス電流のアーク衝撃圧力により、アルミニウム表面の酸化膜を粉碎除去が可能で、アルミニウム管の突合せ溶接継手が製作できる。
- 3) アーク衝撃圧力やアルゴン噴流によって溶融金属が押し下げられることにより、模擬宇宙環境下でも溶接金属は内面に凸状となる。
- 4) アルミニウム表面の酸化膜が除去できない直流電源による電極マイナス極性の溶接では、融合不良、アンダーカット、酸化膜の巻込み等の溶接欠陥を生じる。
- 5) 直流パルス電源を用いた GHTA 溶接法によるアルミニウムの溶接において、重力はアーク放電、溶融状況などの溶接現象、溶接金属形状にはあまり影響を与えない。
- 6) 宇宙 GHTA 溶接法は宇宙環境でのアルミニウムの溶接に適用できる可能性を持っている。

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。

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] 日本機械学会宇宙工学部門第81期運営委員会編集: 日本機械学会会員のための宇宙工学概論, (2004), pp.145-154.
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 吹田義一, 佃 芳行, 八田 崇 他: 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, 18 巻(2000), 2 号, pp.228-235