真空中での宇宙 GHTA 溶接法によるアルミニウム合金の突合せ溶接^{*1} Butt Welding of Aluminum Alloy by Space GHTA Welding Process in Vacuum

吹 田 義 一^{*2}・新 池 修 平^{*3}・江 國 友 英^{*3}・寺 嶋 昇^{*2}

Yoshikazu SUITA, Shuhei SHINIKI, Tomohide EKUNI, Noboru TERAJIMA,

佃 芳 行^{*2}・今 川 吉 郎^{*4}

Yoshiyuki TSUKUDA and Kichiro IMAGAWA

Key Words: ISS, Space Welding, Space GHTA Welding, Aluminum Alloys, Butt Welding, Filler Wire, Vacuum

Abstract: Aluminum alloys have been widely used in the constructing various space structures including the International Space Station (ISS) and launch vehicles. For space application, welding experiments of an aluminum alloy were conducted by the GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) welding processes using a filler wire feeder in vacuum. We investigated the melting phenomena of a base metal and a filler wire, bead formation phenomena and effects of wire feeding speed on melting characteristics. The melting phenomenon of melt-run welding with a filler wire was basically the same as that of without a filler wire. It was clarified that the effects of wire feeding speed on bead sizes and configurations. Furthermore the butt welding joints were welded by the optimum wire feeding speed and the tensile strengths of those joints were evaluated. The mean value of tensile strengths of butt welding joints that were made using d.c.-pulsed GHTA welding with filler wire in vacuum was almost same value as that was welded by GTA (Gas Tungsten Arc) welding in air.

1. 緒 論

2003 年 2 月 1 日、乗員 7 名全員が死亡するシャトル・コロンビアの空中分解事故が起きた。事故調査委員会は、打ち上げ直後に外部燃料タンクから剥がれ落ちた断熱材が左翼前縁部耐熱パネルを損傷させ、大気圏再突入の際に高温ガスが損傷部から左翼内部に侵入して空中分解したと結論づけた。事故発生後、NASA は原因が解明されるまでシャトルの打ち上げを凍結したために国際宇宙ステーション ISS (International Space Station) の完成は 2010 年頃になる予定である。ISS の運用期間は種々の理由から延長される可能性もある。運用期間の長期化によってデブリ衝突や搭載機器の修理、高機能化の改造要求がでることも予想される。また、月面基地建設や太陽発電衛星などの宇宙構造物の建造を考えると、今後の宇宙開発では宇宙空間での溶接技術や加工技術の適用が期待¹⁾される。

旧ソ連邦は宇宙溶接技術の必要性を早くから認識し、1960 年頃から電子ビーム溶接²⁾を中心に研究開発を開始した。1984 年にはサリュート 7 号の船外で電子ビーム溶接実験に成功したが、実験結果の詳細を明らかにしていない。米国でも電子ビーム溶接³⁾や Nd-YAG レーザ溶接⁴⁾の研究が行われた。しかし、電子ビーム溶接には安全性の問題、レーザ

溶接には低発振効率、大型・重量などの問題があった。1989 年に NASA は宇宙航空、溶接関連の技術者、研究者を集めて宇宙溶接研究集会⁵⁾を開催し、宇宙溶接技術の必要性和可能性を再確認した。1992 年には ISS 修理などに溶接技術が適用できるのを確認するために、旧ソ連邦が開発した電子ビーム溶接装置をシャトルに搭載してカーゴベイで溶接実験をする計画を発表した。しかし、実験実施の半年前の 1997 年 3 月に、スケジュールや宇宙飛行士の安全性確保などに問題が発生したために実験を無期延期⁶⁾にした。そのため、現時点では NASA の宇宙溶接技術開発は行き詰まり状態にある。

このような状況下で、著者らは 1992 年に宇宙空間で安全に適用できる溶接技術として、中空タングステン電極を採用した宇宙 GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) 溶接技術を発表⁷⁻⁹⁾した。そして、その研究開発を実施して次節で述べるように宇宙 GHTA 溶接技術を宇宙適用するための要素技術を確認した。その結果、ISS 搭載機器に電磁ノイズ障害を与えることなく、フィラーワイヤ (溶加材) を溶融池に供給して十分な継手強度を有するアルミニウム合金の突合せ溶接継手を製作できる溶接技術を確立できたので報告する。

2. 宇宙 GHTA 溶接技術の開発経緯と課題

真空中で中空タングステン電極を使用する従来の GTA (Gas Tungsten Arc) 溶接を行うと、アーク放電が広がる現象やアークが Ar ガス流出孔に集中して銅製トーチ部品

^{*1} © 2004 日本航空宇宙学会

平成 16 年 5 月 12 日原稿受理

^{*2} 高松工業高等専門学校制御情報工学科

^{*3} 高松工業高等専門学校専攻科

^{*4} 独立行政法人宇宙航空研究開発機構

を損傷させ、アークが消失する現象^{8,9)}を確認した。著者らは、その現象に注目して中空タングステン電極を採用し、その先端からのみ不活性ガスを流出させる宇宙 GHTA 溶接法を考案した。そして、1998 年には航空機の放物飛行で得られる模擬宇宙環境下でステンレス鋼の宇宙 GHTA 溶接実験¹⁰⁾に成功し、宇宙空間で利用できる可能性を示した。

ISS 周辺の宇宙空間でアルミニウム合金製の宇宙構造物の建造、修理に宇宙 GHTA 溶接を適用するためには、次の課題が残されていた。

- (1) 高周波高電圧アーク起動時の電磁ノイズ障害対策
- (2) 溶接中の溶融池表面の酸化膜除去技術の確立
- (3) フィラーワイヤを供給する溶接技術の確立

(1) については、直流高電圧アーク起動方式のアーク起動を実現¹¹⁾して解決した。(2) については、直流パルス溶接電源を採用してアーク衝撃圧力によって溶融池表面の酸化膜を機械的に粉砕除去する方法¹²⁾で解決した。本論文では、(3) のフィラーワイヤを溶融池に供給する溶接技術によって充分な継手強度を有する突合せ溶接継手が得られることを実証している。その結果、宇宙空間で宇宙構造物の建造や修理に宇宙 GHTA 溶接を適用するための要素技術の確立することができた。今後に残された課題は、微小重力・真空の模擬宇宙環境でのアルミニウム合金溶接の実証実験である。

3. 実験方法

3.1 実験装置 第 1 図に真空中での溶接実験に使用した真空環境 GHTA 溶接実験装置を示す。内径 0.5 m、高さ 0.5 m のステンレス鋼製真空チャンバ内を油回転ポンプ ($0.26 \text{ m}^3/\text{s}$) と油拡散ポンプ ($0.35 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) で排気した。

第 1 図 真空環境 GHTA 溶接実験装置

チャンバ内部には中空タングステン電極を採用した水冷方式 GHTA 溶接トーチと直線移動する走行台車を内蔵している。溶接中の溶融池にフィラーワイヤを供給するために真空モータ駆動の小型ワイヤ供給装置もチャンバ内部に設置した。アーク作動ガスである Ar ガス流量を制御するためにマスフローコントローラを使用した。溶接機は高周波アーク起動装置付きインバータ交直両用 GTA 溶接機を使用した。溶接機の電源モードは直流パルス電源、極性は電極マイナス極性 (DCEN) として GHTA 溶接実験を行った。放電および溶融状況をビデオカメラで録画した。

3.2 供試材及び実験手順 宇宙輸送システムや宇宙ステーションなどの宇宙構造物は、溶接性を考慮してアルミニウム合金 A2219-T6 が使用される。しかし、A2219-T6 の薄板が入手困難なことから、溶接性は多少劣るが A2014-T6 を供試材として採用した。第 1 表 (a) に供試材の化学成分を、第 1 表 (b) に機械的性質を示す。供試材寸法は板厚 4 mm、板幅 75 mm、長さ 150 mm とし、表面状態は受け入れ状態で脱脂処理のみを行った。フィラーワイヤには A4043-WY (直径 1 mm) を使用した。第 2 図に GHTA 溶接トーチの詳細を示した。中空タングステン電極は外径 $D = 4 \text{ mm}$ 、内径 $d = 1.8 \text{ mm}$ の 2% 酸化ランタン (La_2O_3) 入りタングステン電極で、先端を電極研磨機で頂角 60° に成形し、電極高さ (アーク長) $H_E = 3 \text{ mm}$ 、ノズル高さ $H_N = 15 \text{ mm}$ とした。溶接電流条件はパルス電流 $I_P = 200 \text{ A}$ 、ベース電流 $I_B = 40 \text{ A}$ 、パルス幅 $W_P = 17.5\%$ 、パルス周波数 $F_P = 3 \text{ Hz}$ とし、Ar ガス流量は $Q_{\text{Ar}} = 1.67 \text{ ml/s}$ 、溶接前の初期容器内圧力は 0.4 Pa の一定値とした。溶接速度は $v = 5.8 \sim 6.6 \text{ mm/s}$ 、フィラーワイヤ供給速度は $V_W = 26 \sim 55 \text{ mm/s}$ の間で変化させた。そして、フィラーワイヤ供給溶接時の母材、ワイヤの溶融機構、フィラーワイヤ供

第 2 図 GHTA 溶接トーチの詳細

第 1 表 アルミニウム合金 A2014-T6 の化学成分と機械的性質

a) Chemical compositions of aluminum alloy used (mass%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr+Ti	Ti	Al
A2014-T6	1.06	0.37	4.66	0.85	0.69	0.05	0.07	0.04	0.03	RE

b) Mechanical properties

	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Vickers hardness (9.8 N)
A2014-T6	441	478	10.1	170.2

第 3 図 メルトラン溶接における放電・溶融状況

給速度がビード高さ、ビード幅に及ぼす影響について調査した。最後に、I 型開先突合せ溶接継手を製作して、溶接継手の硬度分布、引張強さを調査した。

4. 実験結果と考察

4.1 フィラーワイヤ及び母材の溶融とビード形成機構

4.1.1 メルトラン溶接における母材の溶融とビード形成機構 溶接電流条件と Ar ガス流量を 3.2 節で示した値に設定して、溶接速度 $v = 6.6 \text{ mm/s}$ でフィラーワイヤを供給しないで母材のみを溶融させるメルトラン溶接を行った。第 3 図①～④は、その時の母材の溶融とビード形成状況の時間的変化である。また、第 3 図①～④の溶接状況にある時の溶接電流、電圧を第 4 図中に同じ番号①～④で示した。ビデオ観察結果から母材の溶融とビード形成機構を記述する。第 4 図中①の電流の小さいベース電流時はエネルギー不足のためにアークは第 3 図①のように母材を溶融させることができない。しかし、第 4 図中②、③のように大電流のパルス電流になると第 3 図②、③のようにアークが母材を溶融させ、アークの衝撃圧力によって溶融池を下方に掘下げ、また同時に溶融金属を凸状に変形させて後方に吹き飛ばすビード形成状況が確認できた。このときのアーク衝撃圧力、溶融金属の変形によって溶融金属表面の酸化膜 Al_2O_3 (膜厚は 70～200 nm 程度) が機械的に粉砕除去される。そして、再び第 4 図中④の小電流のベース電流になったときは、第 3 図④のようにパルス電流時の溶融金属が凝固するビード形成機構が観察できた。このように、直流パルス電源を使用した真空中での GHTA 溶接では、ある限られた溶接条件範囲であるがアルミニウム合金溶融池表面の酸化膜を機械的に粉砕除去できる現象¹²⁾を確認できた。この酸化膜除去機構は、大気中の交流 GTA 溶接でみられるクリーニング作用とは全く異なる機構である。酸化膜除去が可能になった結果、母材溶融金属とフィラーワイヤ溶融金属間のぬれ性が改善され、融合不良などの溶接欠陥を発生することなく次節で述べるフィラーワイヤを供給する溶接が可能になった。なお、粉砕された酸化膜は溶融金属内に混入したり、溶接金属表面に残留している。

4.1.2 フィラーワイヤ供給時の母材の溶融とビード形成機構 第 5 図はフィラーワイヤを供給しながら溶接を行った場合の母材の溶融とビード形成状況の時間的変化である。母材の溶融についてはフィラーワイヤを供給しない第 3 図

第 4 図 溶接電流、電圧波形

のメルトラン溶接の場合とほぼ同じ溶融状況であった。一方、フィラーワイヤの溶融は、第 5 図①のようにベース電流時に溶融をはじめ、第 5 図②のパルス電流時には母材に溶融池が形成されるとともに溶融したフィラーワイヤの溶滴が溶融池に移行する様子が観察できた。第 5 図③では、フィラーワイヤと母材が溶融した溶融金属が後方に吹き飛ばされていることがわかる。第 5 図④は次の周期のベース電流時であり、再びフィラーワイヤの溶融開始が確認できる。フィラーワイヤを供給することで溶融金属が凝固した溶接金属の増加がみられ、メルトラン溶接の場合よりも豊富な溶接金属を確保できた。第 5 図の写真だけではフィラーワイヤを供給したビード溶接 (平板表面をメルトラン溶接) の溶融機構がわかりにくいので、ベース電流時とパルス電流時に分けて模式的に第 6 図に示した。また、フィラーワイヤ供給速度が遅い ($V_W = 26 \text{ mm/s}$) 場合は、フィラーワイヤがアーク柱内で溶融して塊となり、溶融池へのフィラーワイヤ供給が不安定になる現象がみられた。

4.2 フィラーワイヤ供給速度がビード溶接の溶融特性に及ぼす影響 フィラーワイヤを供給しながらメルトラン溶接するビード溶接実験によって、フィラーワイヤ供給速度がビード幅寸法に及ぼす影響を調査した。第 7 図はその結果であるが、フィラーワイヤ供給速度はビード幅寸法にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。ビード幅はアークの拡がりすなわちアーク幅によってほぼ決定されるので、今回のように電極高さ (アーク長) を 3 mm 一定値とした実験ではアーク幅も一定値となる。そのために、フィラーワイヤ供給速度を変化させてもビード幅に変化が表れなかった。

第5図 フィラーワイヤを供給した溶接の放電・溶融状況

(a) ベース電流時

(b) パルス電流時

第6図 フィラーワイヤを供給したビード溶接における溶融機構

第7図 フィラーワイヤ供給速度がビード幅に及ぼす影響

と考えられる。第8図はフィラーワイヤ供給速度がビード高さ(余盛高さ)に及ぼす影響である。フィラーワイヤ供給速度を速くすると溶融金属量が増大するためにビード高さが大きくなり、実験の範囲ではほぼ直線的に大きくなった。第9図はフィラーワイヤ供給速度を変化させたときの溶接部のマクロ組織である。第9図からフィラーワイヤ供給速度の増加とともに溶接金属量が増加していることがわかる。ビード形成が良好な状態は、適度に速い速度でワイヤが供給され、フィラーワイヤ先端の溶融金属が塊になる前の小

第8図 フィラーワイヤ供給速度がビード高さに及ぼす影響

粒のときにパルス電流期間で溶融池に移行する状態¹³⁾である。供給速度 $V_W = 35 \text{ mm/s}$ の場合は、そのようなビード形成がビデオ画像から確認できた。ワイヤ供給速度が大きい場合には、溶融池が盛り上がり電極先端と溶融金属が短絡するほどになる。溶融池表面の酸化膜が機械的に除去される溶接条件でフィラーワイヤを供給しているので、母材とフィラーワイヤの溶融金属は良好に融合し、第9図に示すように融合不良などの溶接欠陥は見当たらない。これらの結果より、真空中におけるアルミニウム合金の直流パルス GHTA 溶接では、フィラーワイヤを供給することにより溶接部のど厚を融合不良などの溶接欠陥を生じない状態で増加させることが可能になった。母材の板厚が 4 mm 程度であれば、ビード高さは一般的には 1.2 mm 程度が望ましいとされているので、第8図の図中に示された溶接条件に対する最適フィラーワイヤ供給速度を $V_W = 35 \text{ mm/s}$ とした。

4.3 突合せ溶接継手の製作と継手強度の評価

4.3.1 突合せ溶接継手の製作 第10図に示す母材寸法で I 型開先突合せ溶接継手を製作した。フィラーワイヤ供給速度は、前節で決定した最適フィラーワイヤ供給速度 $V_W = 35 \text{ mm/s}$ とし、ルートギャップの無い 1 パス 1 層の I 型開先突合せ溶接を行った。突合せ溶接継手の表裏面のビード外観を第11図(a), (b)に示した。表面ビードにはパルス電流によるリップルが観察される。裏面のビードは高さや幅には多少変動が認められるが、1 パス 1 層溶接による完全溶込み溶接が可能ながわかる。

第 9 図 フィラーワイヤ供給速度を変化させたときのマクロ組織

第 10 図 突合せ溶接継手と引張試験片

(a) Butt welding joint (Surface)

(b) Butt welding joint (Back)

第 11 図 突合せ溶接継手の外観

4.3.2 マクロ組織と硬度測定 フィラーワイヤを供給しないメルトラン溶接による I 型開先突合せ溶接継手の製作では、溶接金属の不足によって溶接部のど厚が母材板厚よりも小さくなる。その結果、溶接金属部で破断するなど溶接継手強度が低下する現象¹⁴⁾が発生した。今回のフィラーワイヤを供給する突合せ溶接継手の製作では、第 12 図に示したマクロ組織のように溶接部の表裏面におおむね良好

第 12 図 突合せ溶接継手のマクロ組織

第 13 図 突合せ溶接継手の硬度分布

な溶接金属を形成することができた。第 13 図は母材表面から 2 mm の位置で測定された硬度分布である。溶接金属部中心から両側約 15 mm の範囲では、溶接中の熱サイクルに原因する過時効による軟化が確認できる。溶接金属中央から約 3 mm のボンド部付近では自然時効による硬度の回復が認められる。一方、溶接金属部では硬度回復が確認できないが、これはフィラーワイヤに含まれる Cu 成分が少ないために自然時効が起きないためである。

4.3.3 突合せ溶接継手の引張試験 第 10 図に示した突合せ溶接継手から図中に一点鎖線で示すように平行部幅 20 mm の引張試験片を 11 本採取して引張試験を行った。破断位置はボンド部すぐ外側の硬度が最も低い部分であった。第 14 図は引張試験で得られた引張強さを正規確率紙にプロットしたものである。引張強さの分布は正規確率紙上で直線近似できることから正規分布で近似できることがわかる。引張強さの平均値は 264.2 MPa で、過時効による軟化によって母材強度の約 55% になっている。変動係数は 18.2% で、多少大きな値になっている。2000 系アルミニウム合金の溶接の場合、過時効による強度低下が避けられな

第 14 図 突合せ溶接継手の引張強さ (正規確率紙)

いことや同じ供試材を大気中での溶接作業に適用される通常の交流 GTA 溶接で製作した溶接継手強度が約 260 MPa で、その値とほぼ同じであることを考慮するとほぼ満足できる溶接継手強度と言える。これらの結果から、直流パルス電源を使用してフィラーワイヤを供給する宇宙 GHTA 溶接法が、宇宙環境でのアルミニウム合金の溶接作業に適用できる可能性を示した。

5. 結 論

小型ワイヤ供給装置を使用したアルミニウム合金の宇宙 GHTA 溶接実験を行い、以下のことを明らかにした。

1) フィラーワイヤを供給するメルトラン溶接の母材の溶融機構は基本的にフィラーワイヤを供給しないメルトラン溶接とほぼ同じであった。

2) フィラーワイヤの溶融状況と供給速度がビード寸法・形状に及ぼす影響を明らかにした。

3) フィラーワイヤを供給する直流パルス GHTA 溶接では溶融池表面の酸化膜が除去されるために、母材とフィラーワイヤの溶融金属は欠陥を発生することなく融合することを示した。

4) フィラーワイヤを供給する直流パルス GHTA 溶接によって、板厚 4 mm のアルミニウム合金を 1 パス 1 層の I 型開先突合せ溶接継手を欠陥無く製作できる。

5) 最適フィラーワイヤ供給速度により直流パルス GHTA 溶接で製作した継手強度は大気中の GTA 溶接による継手

強度とほぼ同等であった。

6) 真空環境でフィラーワイヤを供給してアルミニウム合金を溶接する要素技術を確立した。

本研究の一部は、科学研究費補助金 (15560634) の助成により遂行された。また、本研究に対して長期間にわたって御支援をいただいている財団法人南海育英会に心から御礼を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) Paton, B. E.: Welding in Space, Welding Engineer, **57** (1972), pp. 25-29.
- 3) Schollhammer, F. R.: Electron Beam Welder for Space, National Symposium Materials for Space Vehicle Use, 6th Soc. Aerospace Material and Process Eng., Seattle, Wash., 1963, p. 51.
- 4) Kaukler, W. F. and Workman, G. L.: Laser Welding in Space, Proceedings from the Conference "Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding," New Carrollton, Maryland, USA, 1991, pp. 318-334.
- 5) Newton-Montiel, B.: Workshop Launches Welding in Space Research, Welding J., **69**, 3 (1990), pp. 45-47.
- 6) Johnsen, R.: Space Welding Experiment Postponed Indefinitely, Welding J., **76**, 4 (1997), p. 22.
- 7) 宇宙での溶接 OK (読売新聞, 13 版全国版), 「宇宙空間」での溶接実験に成功 (朝日新聞, 13 版全国版), 平成 4 年 5 月 29 日付.
- 8) 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.
- 9) 吹田義一, 増淵興一, 佃 芳行, 寺嶋 昇, 小笠原正信, 高橋 永: 宇宙空間での宇宙船・構造物の建造と修理を対象にしたアーク溶接法の開発, 日本機械学会論文集 C 編, **61** (1995), pp. 2134-2140.
- 10) 吹田義一, 佃 芳行, 寺嶋 昇, 八田 崇, 河野鉄平, 猪熊力也, 川田賢司, 黄地尚義, 西川 宏, 吉田和弘, 増淵興一: 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** (2000), pp. 228-235.
- 11) 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** (2004), pp. 10-15.
- 12) 吹田義一, 永井宏和, 新池修平, 佃 芳行, 寺嶋 昇, 藤澤正一郎, 増淵興一, 今川吉郎, 山下雅弘: 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** (2004), pp. 521-526.
- 13) 本間信吾, 安田克彦: 半自動 TIG 溶接に関する研究, 溶接学会論文集, **21** (2003), pp. 356-361.
- 14) 吹田義一, 佃 芳行, 寺嶋 昇, 高橋 永, 小笠原正信, 黄地尚義, 増淵興一: 真空中での GHTA 溶接によるアルミニウム合金の溶接, 溶接学会論文集, **14** (1996), pp. 634-640.