

真空環境での宇宙 GHTA 溶接法による

アルミニウム合金 A2219 の多層突合せ溶接実験

富永 英嗣, 吹田 義一, 正箱 信一郎, 寺嶋 昇, 山内 庄司 (香川高専)
佐藤 広明, 赤松 弘基 (三菱重工 名航)

Multi-Layer Butt Welding on A2219 Aluminum Alloy Using Space GHTA Welding Process in Vacuum Environment

Eiji Tominaga, Yoshikazu Suita, Shinichiro Shobako, Noboru Terajima and Shoji Yamauchi (Kagawa National College of Technology) Hiroaki Sato and Hiroki Akamatsu (Mitsubishi Heavy Industries LTD.)

Abstract: We performed multi-layer butt welding experiments on A2219 using the space GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) welding process in vacuum. The first layer welding was carried out in the melt-run welding, and the second and third layer were welded with filler wire. As a result, there were no weld defects in welded metal. The experimental results showed that the space GHTA welding process could apply to make the multi-layer butt welding.

Key Words: Space GHTA Welding, A2219-T87 Aluminum Alloy, Vacuum, Multi-Layer Butt Welding, Filler Wire

1. 緒 論

宇宙環境を利用した研究を行うために、世界各国が協力して国際宇宙ステーション ISS の建造を行っている。また、月面基地建造などの宇宙進出も計画されている。このような背景から、宇宙空間での修理・加工技術¹⁾が要求されており、特に気密性と強度に優れる宇宙溶接技術は必須とされている。

このことに注目し、吹田らは宇宙 GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) 溶接²⁾を提案し、実用化に向けて研究を行っている。1998 年には模擬宇宙環境下でのステンレスの溶接実験³⁾に成功し、2006 年には模擬宇宙環境下での溶加ワイヤを供給するアルミニウム管の溶接実験⁴⁾に成功して宇宙 GHTA 溶接法の宇宙への適用性を示した。

2007 年より ISS に使用されている宇宙構造用アルミニウム合金 A2219-T87 に対して宇宙 GHTA 溶接実験を行い、実用性を高める研究を行っている。板厚 4 mm の A2219-T87 アルミニウム合金に対して裏当て金付 I 型突合せメルトラン溶接継手を製作した。

その結果、メルトラン溶接では満足できる継手強度を示す健全な溶接継手が得られた。しかし、溶接金属中央で破断したことから、溶加ワイヤを供給して余盛を付与する必要があることがわかった。また、ISS では板厚が 4 mm を超える中板・厚板材料も使用されているため、GHTA 溶接法を ISS に適用させるためには中板・厚板への多層溶接技術が要求される。

そこで、板厚 6.3 mm 中板の A2219-T87 材に対する 2 層 2 パス突合せ溶接実験を行った。その結果、熱処理型アルミニウム合金の溶接継手としては妥当な継手強度を持ち、溶接金属部で破断しない溶接継手が得られた。しかし、入熱量過多による軟化により、満足できる品質の溶接継手が得られなかった。

そこで、3 層 3 パス突合せ溶接実験によって最大入熱量を制限して過度の軟化を防止し、継手強度の向上と溶接継手品質の改善を目指した。その結果、宇宙環境での宇宙 GHTA 溶接によって、十分な継手強度をもつ、健全な溶接継手が製作可能であることを実証した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置は真空チャンバ、油回転ポンプと拡散ポンプ、GHTA 溶接装置で構成されている。真空チャンバ内を2種類の真空ポンプで0.4 Paまで減圧し、溶接実験を行った。真空チャンバ内には Fig.1 に示すように GHTA 溶接トーチ、移動台車、供試材、溶加ワイヤ供給装置を設置している。移動台車上の供試材を溶接した。GHTA 溶接トーチの内部構造を Fig.2 に示す。溶接電源には直流パルス電源を用い、電極には 2% 酸化ランタン入り中空タングステン（外径 4 mm, 内径 1.8 mm）を用いた。溶加ワイヤは溶加ワイヤ供給装置を用いて供給した。また、アークの点弧および安定化のために、銅板を用いた。

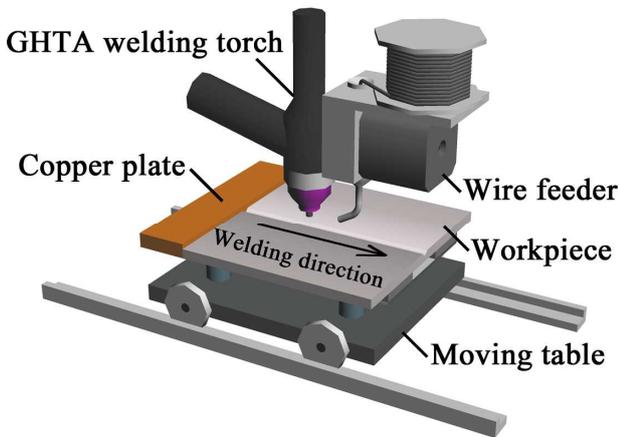


Fig.1 Welding experimental equipment

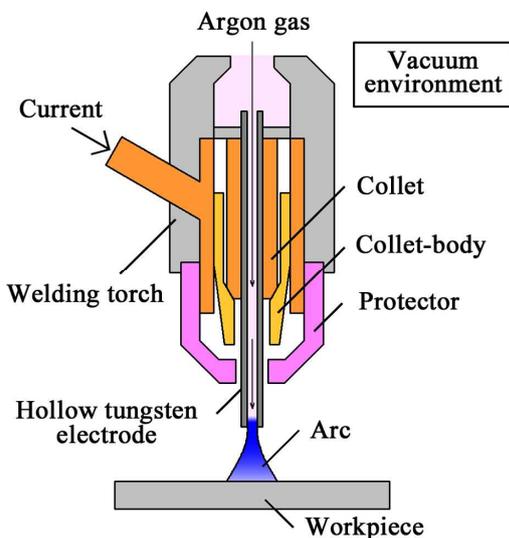


Fig.2 GHTA welding torch

2.2 実験方法

A2219-T87 材を用いて 3 層 3 パス突合せ溶接実験を行った。アルミニウムの表面酸化膜を破壊するために溶接には直流パルス電流を用いた。直流パルス電流波形を Fig. 3 に示す。初層溶接は適切な高さの裏波ビードを形成するために、メルトラン溶接で行った。第 2 層, 第 3 層溶接は余盛を付与するために溶加ワイヤの供給を伴う溶接を行った。

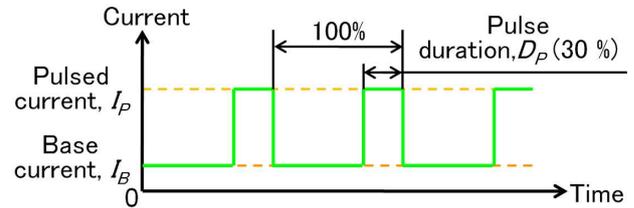


Fig. 3 Wave form of direct pulsed current in welding

供試材は A2219-T87 板厚 6.3 mm × 板幅 65 mm × 長さ 120 mm, ルートフェイス 2 mm, ルートギャップ 0 mm, 開先角 60°に加工し, 2 枚のルートフェイスを突合せて両端仮付け溶接したものを使用した。

初層溶接のメルトラン溶接条件は, パルス電流 $I_p=190$ A, ベース電流 $I_B=50$ A, パルス周波数 $F_p=8.0$ Hz, パルス幅 $D_p=30$ %, Ar ガス流量 $Q_{Ar}=0.83$ ml/s, 溶接速度 $v=4.8$ m m/s, ルート部からの電極高さ $H_E=6$ mm とした。2 層目に発生する溶接欠陥を減少させるためおよび溶加ワイヤの供給に悪影響を与えないようにビード表面を滑らかにする必要がある。ビード表面の凹凸を改善し, 適切な裏波ビード高さにするために, ガス流量を少なくし, 電極高さを高く設定した。

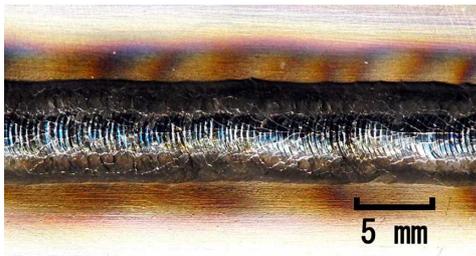
第 2 層, 第 3 層溶接は溶加ワイヤを供給しながら溶接した。溶加ワイヤには直径 1.2 mm の A2319 ワイヤを用いた。溶接条件はパルス電流 $I_p=180$ A, ベース電流 $I_B=40$ A, パルス周波数 $F_p=12$ Hz, パルス幅 $D_p=30$ %, Ar ガス流量 $Q_{Ar}=0.83$ ml/s, 溶接速度 $v=4.4$ mm/s, 溶接ビード表面からの電極高さ $H_E=10$ mm, 溶加ワイヤ供給速度 $s=35$ mm/s とした。溶接入熱量を必要最低限まで少なくしている。また, 溶加ワイヤの溶融不良を防ぐために, パルス周波数を高く設定している。

3. 実験結果と考察

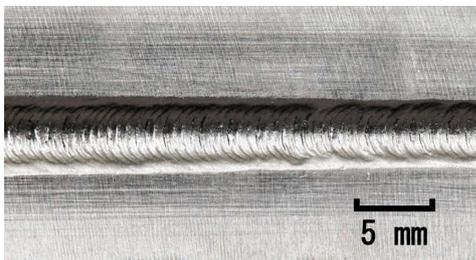
3.1 溶接外観と断面マクロ組織

初層溶接では第2層溶接の溶加ワイヤ供給に影響を与えない滑らかな溶接ビードと適切な高さの裏波ビードが得られた。初層溶接金属に溶接欠陥がないことを確認したため、溶加ワイヤを供給しながら第2層溶接を行った。第2層溶接金属においても滑らかな溶接ビードが得られ、第3層溶接の溶加ワイヤ供給に影響を与えないことを確認した。さらに、第2層溶接金属および層境界に融合不良などの溶接欠陥はないことを確認し、余盛を付与する第3層溶接を行った。

3層3パス突合せ溶接により得られた溶接継手の表面および裏面ビード外観を Fig. 4 に示す。第3層溶接完了後の溶接ビードは大きな応力集中をもたらすような不整ビードがない、滑らかで均一な溶接ビードである。表面および裏面溶接ビードに溶接割れなどの溶接欠陥は確認できない。



(a) Top face



(b) Bottom face

Fig. 4 Bead appearance

溶接継手の横断面マクロ組織を Fig. 5 に示す。断面マクロ組織からも適切な高さの裏波ビードが得られていることが確認でき、また余盛高さも適切であることがわかる。ブローホールなどの溶接欠陥もなく、良好なビード外観が得られていることも合わせ

ると、健全な溶接継手が得られたといえる。これらの結果から、真空環境において宇宙 GHTA 溶接法を多層溶接に適用できる可能性があることを確認することができた。

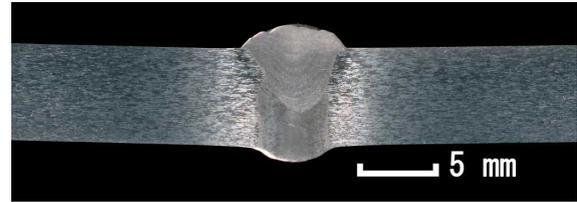


Fig. 5 Macrosection of 3-layer butt welding joint

3.2 硬度分布

3層3パス突合せ溶接継手の横断面の硬度測定を行った。測定位置は母材表面より 2 mm の位置とした。硬度測定結果を Fig. 6 に示す。A2219-T87 材は熱処理型アルミニウム合金であるため、溶接による軟化が確認された。溶接により溶融した溶接金属部の硬度は HV80 程度まで低下している。ポンド部付近は HV100 程度を示し、自然時効により周囲よりも硬度が高くなっている。ポンド外側の熱影響部では HV85 まで硬度が低下しており、溶接部から離れるに従って硬度が高くなっている。溶接金属中央部から約 20 mm の位置で母材硬度 HV150 程度を示し、硬度が一定となっている。この結果は一般的な溶接法による熱処理型アルミニウム合金の溶接継手の硬度分布と同じ傾向を示している。

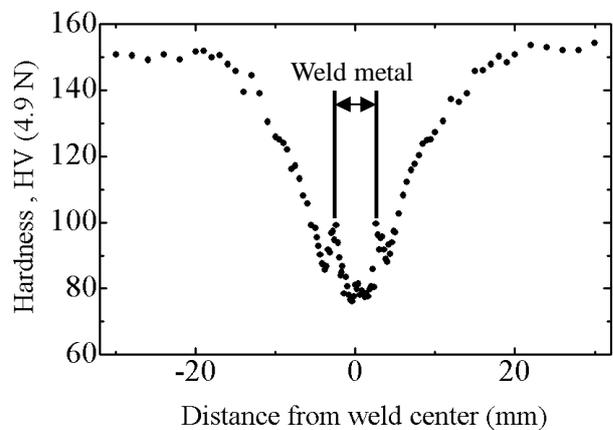


Fig. 6 Hardness distribution

3.3 引張試験

3層3パス突合せ溶接継手から，平行部の板厚 6.3 mm，板幅 15.0 mm の引張試験片を 7 本採取し，引張試験を行った．引張試験で引張強さと破断ひずみを測定し，正規確率紙を用いて統計を行った結果を Fig. 7，Fig. 8 に示す．

引張強さの平均値は 271 MPa，変動係数は 14.4 MPa，破断ひずみの平均値は 4.01%，変動係数は 0.413% を示した．これは母材強度の 57.3% と母材破断ひずみの 33.7% を示している．引張試験の破断状況を Fig. 9 に示す．破断位置は母材熱影響部であり，溶接金属部での破断を防ぐことができた．

継手強度は母材強度の 57.3% を示したが，熱処理型アルミニウム合金の軟化を考慮すると十分な継手強度が得られていると考えられる．3層3パス突合せ溶接によって溶接金属部で破断しない，十分な継手強度を持つ溶接継手が得られることを実証できた．

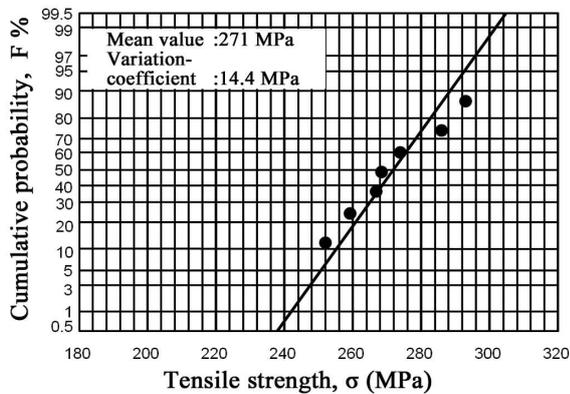


Fig.7 Distribution of tensile strength

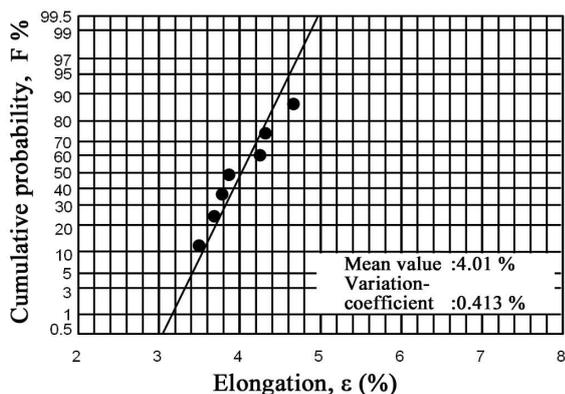


Fig. 8 Distribution of elongation

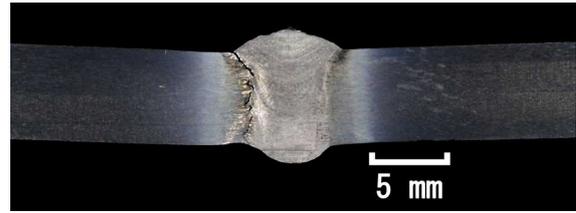


Fig. 9 Rupture situation of tension test specimen

4. 結 論

宇宙 GHTA 溶接法により宇宙ステーションに使用されるアルミニウム合金 A2219-T87 材を用いた 3 層 3 パス突合せ溶接実験を行った結果，以下のことを明らかにした．

- 1) 直流パルス電流を用いた宇宙 GHTA 溶接法でアルミニウム合金の多層溶接が可能である．
- 2) 溶加ワイヤを供給することで余盛を含む溶接金属高さを母材の板厚より大きくできる．
- 3) 中板の突合わせ溶接において十分な継手強度を持つ溶接継手を製作することができる．
- 4) 入熱範囲および入熱量を小さくすることで，熱処理型アルミニウム合金の軟化を防ぎ，継手強度の減少を防止することができる．
- 5) 宇宙構造物の溶接に宇宙 GHTA 溶接法を適用できる可能性があることを実証した．

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) 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
- 3) 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
- 4) 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：模擬宇宙環境での宇宙 GHTA 溶接によるアルミニウム管の突合せ溶接実験，第 51 回宇宙科学技術連合講演会講演概要，(2007)