

宇宙 GHTA 溶接法によるアルミニウム合金 T 型隅肉溶接継手の製作

高松工業高等専門学校 亀井美佐, 大原将広, 吹田義一, 佃 芳行, 寺嶋 昇, 大賀祐介
宇宙航空研究開発機構 鈴木 峰男, 今川 吉郎

Fabrication of T-Joints on Aluminum Alloy by Space GHTA Welding

Misa Kamei¹⁾, Masahiro Ohara¹⁾, Yoshikazu Suita¹⁾, Yoshiyuki Tsukuda¹⁾, Noboru Terajima¹⁾,
Yusuke Ohga¹⁾, Mineo Suzuki²⁾ and Kichiro Imagawa²⁾

1) Takamatsu National College of Technology, Chokushi-cho, Takamatsu-city,, Kagawa, 761-8058

2) Japan Aerospace Exploration Agency, Sengen, Tsukuba-city, Ibaraki, 305-8505

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

Abstract: Aluminum alloys have been used widely in constructing various space structures including the International Space Station (ISS) and launch vehicles. In order to apply the Space GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) welding process in space, welding experiments on the aluminum alloy were performed using GHTA welding processes using a filler wire feeder for the production of but welding joints in a vacuum.

Fillet welds have become one of the most commonly used fastening methods for joining members. In this study, we investigated the melting phenomenon of a base metal and a filler wire during fillet welding. It was clarified that the effects of wire feeding speed on bead size and the bending strength of fillet weld joints. Furthermore the fillet weld joints were welded by the optimum wire feeding speed and the bending moments of those weld joints were evaluated. The mean value of the maximum bending moment of fillet weld joints that were made using the DC pulsed GHTA welding with filler wire in vacuum was almost same value as that was welded by GTA (Gas Tungsten Arc) welding in air.

Key words: Space Structure, DC pulsed Power Supply, Space GHTA Welding, Fillet Welds

1. 緒 論

現在建設中の ISS(International Space Station)の運用期間は完成後 10 年におよぶ。そのために、ISS 長期運用にあたりデブリ衝突、その他の要因による損傷の修理や高機能化のための改造要求が ISS に対してである可能性がある。また、各種プラットフォームや宇宙建造物の建造、月面基地建設など今後の宇宙開発計画を考えると安全に適用できる宇宙溶接技術の確立が望まれる。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装置の研究開発^{1,2)}を実施した。米国でも宇宙適用を目的にした電子ビーム溶接や YAG レーザ溶接の研究も行われたが、種々の理由で中断された。日本では、宇宙で適用できる可能性を持つ溶接法として著者らが中空タングステン電極を使用する日本独自の安全性の高い宇宙 GHTA(Gas Hollow Tungsten Arc)溶接法³⁻⁶⁾と半導体レーザ溶接法を提案した。GHTA 溶接法については、1998 年には真空チャンバーを搭載した航空機の放物飛行で得られる模擬宇宙環境下での GHTA 溶接実験に成功している。

宇宙開発ではアルミニウム合金が多用されるのでアルミニウム合金の GHTA 溶接技術の確立が望まれる。そこで、真空環境下で直流パルス電源を

使用し、ISS 軌道圧力での直流高電圧方式による GHTA 起動実験などが試みられてきた。これまでに著者らは、アルミニウム合金の直流パルス GHTA 溶接実験⁷⁾を行い、十分な強度をもつ突合せ溶接継手の製作に成功⁸⁾している。しかし、実際の構造物などには隅肉溶接が多く用いられているため、本研究ではインバータ制御交流/直流両用ティグ溶接機を使用して、直流パルス GHTA 溶接による隅肉溶接継手のメルトラン溶接実験と溶加材を供給した溶接実験を実施し、継手の曲げ強度を調査して、直流パルス GHTA 溶接法による隅肉溶接が宇宙で適用できる可能性を検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

真空環境での溶接実験に使用した真空環境 GHTA 溶接実験装置を Fig.1 に示した。内径 0.5m、高さ 0.5m のステンレス鋼製容器内に、外径 $D = 4\text{mm}$ 、内径 $d = 1.8\text{mm}$ で電極先端を 60° に成形した 2%酸化ランタン (La_2O_3) 入り中空タングステン電極を使用する水冷方式の GHTA 溶接トーチと直線移動する隅肉溶接用治具を内蔵した。その状況を Fig.2 に示す。真空ポンプには油回転ポンプ ($0.26\text{m}^3/\text{s}$) と油拡散ポンプ ($0.35\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$) を使用

した．Ar ガスの流量制御にはマスフローコントローラを使用した．溶接機には市販のインバータ制御交流 / 直流両用ティグ溶接機を使用した．溶加材を供給するために小型ワイヤ供給装置を容器内に設置した．

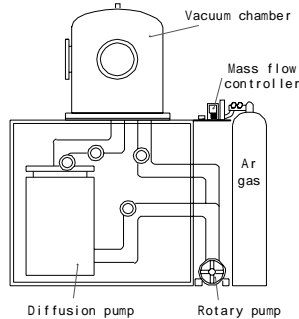


Fig.1 真空環境 G H T A 溶接実験装置

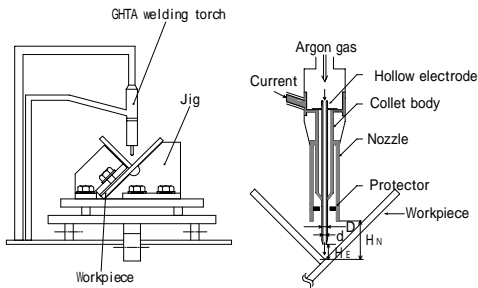


Fig.2 隅肉溶接用治具とトーチの詳細

2.2 供試材と実験手順

A 2014-T6 を供試材として採用し、溶加材は直径 1.0mm の A 4043 - WY を使用した．供試材は板厚 4.0mm，長さ 150mm，板幅はフランジ幅 75mm，ウェブ幅 37.5mm の T 型隅肉溶接継手とし，フランジとウェブの両端を GTA 溶接により仮付け溶接した．溶接条件を Table 1 に示した．

Table 1 Welding conditions

Pulse current I_p	80 ~ 200 A
Base current I_B	40 A
Pulse frequency F_p	3 Hz
Pluse width W_p	17.5 %
Flow rate of Ar Q_{Ar}	1.67 ml/s
Welding speed v	5 ~ 7 mm/s
Electrode gap H_E	3, 5 mm

溶接実験は，まず供試材のウェブとフランジの接合部の長手方向をメルトラン溶接した．パルス電流，溶接速度をパラメータとして溶接を行い，ビード外観，断面マクロ組織を観察し，曲げ強度試験を行った．次に，溶接速度が曲げ強度に及ぼす

影響を調査した．また，溶加材供給位置を変化させて溶加材を供給した隅肉溶接を行い，溶加材供給位置及び溶接速度がビード形成，曲げ強度に及ぼす影響を調査した．これらの実験により得られた最適条件を基に溶加材供給速度を変化させ，供給速度が曲げ強度に及ぼす影響を調査し，真空中の隅肉溶接への GHTA 溶接法の適用の可能性を検討した．

3. 実験結果と考察

3.1 メルトラン溶接による隅肉溶接実験

3.1.1 ビード外観と溶融特性

溶接速度 $v=6.6\text{mm/s}$ を一定値とし，パルス電流を $I_p=80,120,160,200\text{A}$ と変化させて溶接実験を行い，パルス電流がビード形成に及ぼす影響を調査した．パルス電流が 80,120 A では，供試材が十分溶融されず，縦割れが発生した．パルス電流 160 A ではアーク衝撃圧力による機械的破壊によって酸化膜を除去できているが，縦割れを生じている．パルス電流 200 A では酸化膜の除去ができ，溶接欠陥は確認されず，良好なビードを得ることができた．真空中における GHTA 隅肉溶接において，パルス電流が 160 A 以下は健全な溶接や酸化膜の除去ができないことがわかった．そこで，パルス電流 200 A で，溶接速度を $v=5\sim 7\text{mm/s}$ に変化させて T 型隅肉溶接のメルトラン溶接を行った．Fig.3 に T 型隅肉溶接継手の曲げ強度の試験法を示した．隅肉溶接された T 型隅肉溶接継手から，図のように溶接長 30mm の曲げ試験片を 3 本製作した．曲げ試験片のフランジ部分を治具で固定し，フランジ表面から 20mm のウェブ上に長さ 30mm のローラにより線荷重を加えて曲げ試験を行った．最大荷重から最大曲げモーメントを算出し，T 型隅肉溶接継手の曲げ強度を評価した．

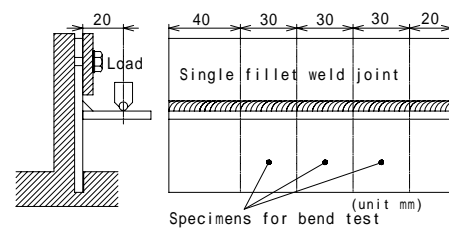


Fig.3 隅肉溶接継手と曲げ試験片

3.1.2 溶接速度が継手の曲げ強度に及ぼす影響

Fig.4 に試験後の破断面のマクロ組織を示す．この図より， $v=5\text{mm/s}$ ではボンド部（軟化域）で破断しているが， $v=6\text{mm/s}$ 及び 7mm/s では溶接金属のど厚部で破断している．この破断形態より， $v=5\text{mm/s}$ ではメルトラン溶接としてほぼ満足できる溶接継手強度が得られていることがわかる．こ

れに対し、 $v=6\text{mm/s}$ 及び 7mm/s では、溶接部の強度を上げる方法として、溶加材の供給により、のど厚を大きくする方法が考えられる。また、溶接欠陥としては、今回の写真では確認できないが、溶接速度によらず、いくつかの隅肉溶接継手の断面にブローホールが存在していることを確認した。しかし、少量のブローホールは曲げ強度にほとんど影響を与えないことが分かっている。



(1) $v = 5 \text{ mm/s}$ (2) $v = 6 \text{ mm/s}$ (3) $v = 7 \text{ mm/s}$

Fig.4 溶接速度を変化させた場合の破断形態

3.2 溶加材の供給をともなう隅肉溶接実験

3.2.1 溶加材供給位置とビード外観の関係

溶加材の供給位置を Fig.5 に示すように電極直下(A位置)、電極直下から 2mm 前方(B位置)、電極直下から 4mm 前方(C位置)と変化させて隅肉溶接を行った。溶加材供給位置が電極直下や電極直下から 4mm 前方では溶加材がスムーズに溶融池に供給されず溶接金属量が減少し、溶接金属量やビード幅が一定とならなかった。これに対し、溶加材供給位置が電極直下から 2mm 前方では、溶加材がスムーズに溶融池に供給され、良好なビード外観が得られた。

これらの結果から、真空中での GHTA 溶接法による隅肉溶接中の溶加材供給溶接は可能であり、溶加材供給位置は電極直下から 2mm 前方が最適であることがわかった。

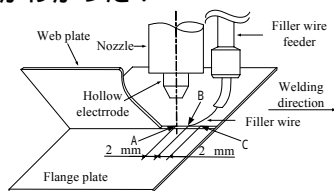


Fig.5 溶加材供給位置

3.2.2 溶加材の供給による曲げ強度の向上

$I_p=200 \text{ A}$ 、 $v=7\text{mm/s}$ の条件において、溶加材供給速度 $V_w=45\text{mm/s}$ で電極直下から 2mm 前方に供給した場合と、溶加材を供給しないメルトラン溶接を行い、Fig.3 の T 型隅肉溶接継手を製作し、曲げ試験を行った。得られた曲げ試験結果を正規確率紙にプロットしたものを Fig.6 に示した。溶加材供給の有無による最大曲げモーメントの平均値は溶加材の供給によって継手の曲げ強度が平均値で約 1.36 倍に上昇していることがわかる。溶加材の

供給によって溶接金属量が増加し、ビード形状が、凹型隅肉からほぼ平坦なビードになったが、破断位置は供給有無によってほとんど変化はみられず、溶接金属のど厚部で破断した。過時効による軟化やのど厚不足が溶接金属のど厚部で破断したことの要因の一つである。溶込み深さは溶加材の供給の有無によらず、ほぼ同じであった。このことより、のど厚部の強度を上げるために溶加材供給速度を上げて、より多くの溶加材を供給し、ビードを凸型ビードにしたり、脚長を大きくしたりすることにより T 型隅肉溶接継手の曲げ強度を増加させる可能性について検討する。

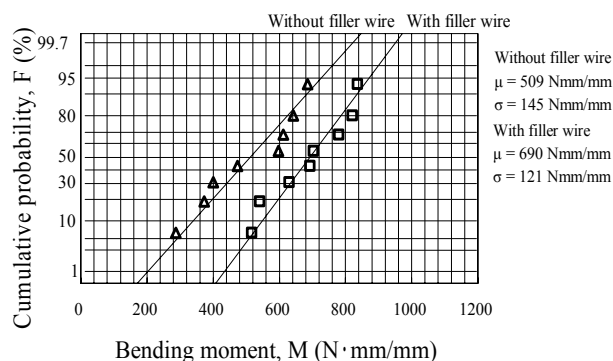


Fig.6 溶加材供給の有無が最大曲げモーメント分布に及ぼす影響

3.2.3 溶加材供給速度と曲げ強度の関係

溶加材供給速度を変化させ、溶加材供給速度と曲げ強度の関係を調査した。Fig.7 に溶加材供給速度 V_w が曲げ強度に及ぼす影響を示す。溶加材供給速度を $V_w = 45\text{mm/s}$ から 70mm/s へと増加させると平均最大曲げモーメントが約 1.8 増加していることがわかる。しかし、さらに供給速度を 90mm/s に増加させると、強度が低下した。これは、溶加材供給速度が増加したために母材を溶融する熱量が溶加材の溶融に奪われ、溶込みが浅くなり曲げ強度が低下したと考えられる。

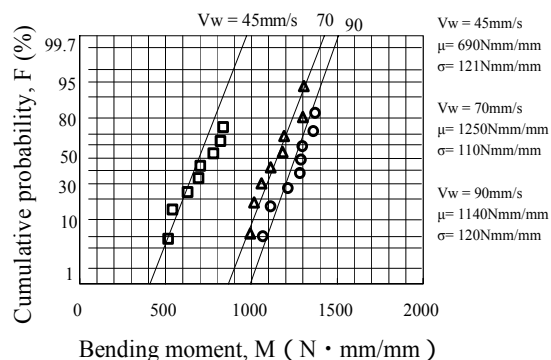


Fig.7 溶加材供給速度が最大曲げモーメント分布に及ぼす影響

3.3 大気中でのメルトラン及び溶加材供給をともなう隅肉溶接実験

大気中において溶接速度 7mm/s で溶加材を供給しない自動メルトラン溶接と、溶接長 1mm 当り 13.7mm の溶加材を供給し、溶接速度約 2~4mm/s で手動による溶接を行なった。これらの曲げ試験結果と真空中で溶接速度 7mm/s、溶加材供給速度 70mm/s で溶接した T 型隅肉溶接継手の曲げ強度を比較したものを Fig.8 に示す。当然ながら、大気中においてもメルトラン溶接(直線 A)に比べて溶加材を供給した場合の曲げ強度(直線 C)が高い。真空中で溶加材を供給して溶接を行った試験片(直線 B)は、大気中において溶加材を供給し溶接を行った試験片より曲げ強度が少し低い結果を示した。その主な理由は、大気中での溶加材を供給した場合の溶接速度が真空中の場合と比較すると半分以下の速度であるため、入熱量が大きく、溶込み深さが大きくなるのが原因であると考えられる。これらを総合的に判断すると、真空中での GHTA 溶接が十分な強度を持ち、宇宙において使用できる可能性があることが明らかとなった。

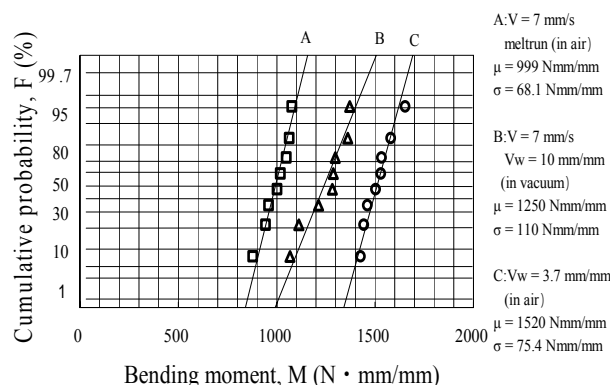


Fig.8 各種溶接継手の最大曲げモーメント分布

4. 結 論

直流パルス GHTA 溶接によるメルトラン溶接と溶加材を供給した隅肉溶接継手の溶接実験を行って、次のことを明らかにした。

- 1) 真空中での GHTA 溶接法によるメルトラン溶接や溶加材供給をともなう隅肉溶接は可能であり、溶加材供給位置は電極直下から 2mm 前方が最適であることがわかった。
- 2) ある溶加材供給速度までは、溶加材供給速度の上昇により、曲げ強度が増加することが明らかとなった。
- 3) 大気中でのメルトラン溶接による隅肉溶接継手の曲げ強度との比較により、真空中での GHTA 溶接による隅肉溶接継手がほぼ満足で

きる曲げ強度を有し、宇宙において GHTA 溶接が隅肉溶接の製作に使用できる可能性があることを明らかにした。

参考文献

- 1) Paton, B. E.: Welding in Space, Welding Engineer, 57(1972), pp.25-29
- 2) Dzhanibecov, V.A., Zagrebelny, A.A., Gavrish, S.S., Stesin, V.V., Shelyagin, V.D., Yurchenko, N.N., Markov, A.V.: Welding Equipment for Space Applications, Proc. Conf. Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding, 1991, New Carrollton, USA, pp.49-58.
- 3) 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
- 4) 吹田義一, 佃 芳行, 寺嶋 昇, 八田 崇, 河野鉄平, 猪熊力也, 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, 2(2000), pp.228-235
- 5) 吹田義一, 黒川哲平, 佐藤順子, 正箱信一郎, 河野鉄平, 佃 芳行, 寺嶋 昇, 増淵興一: 模擬宇宙環境下でのアルミニウム, チタニウム板の GHTA スポット溶接実験, 日本航空宇宙学会論文集, 49(2001), pp.155-161
- 6) Suita, Y., Kurokawa, T., Sato, J., Shobako, S., Kohno, T., Tsukuda, Y., Terajima, N. and Masubuchi, K.: GHTA Spot Welding Experiments of Aluminum and Titanium Plates under a Simulated Space Environment, Trans. Jan. Soc. Aeronaut. Space Sci., 45(2002), pp.139-145
- 7) 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, 2(2004), pp.218-223
- 8) 吹田義一, 新池修平, 江國友英, 寺嶋 昇, 佃 芳行, 今川吉郎: 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, 日本航空宇宙学会論文集, 52(2004), pp.522-527