宇宙ステーション軌道圧力での GHTA 溶接実験*

吹田 義一**, 正箱信一郎***, 佐藤 順子***, 黒川 哲平***, 高井 大輔***,
佃 芳行**, 寺嶋 昇**, 藤澤正一郎****, 黄地 尚義****, 増淵 興一*****

GHTA Welding Experiments in the Space Station Orbital Pressure*

by SUITA Yoshikazu**, SHOBAKO Shinichiro***, SATO Junko***, KUROKAWA Teppei***,
TAKAI Daisuke***, TSUKUDA Yoshiyuki**, TERAJIMA Noboru**, FUJISAWA Shoichiro****,
OHJI Takayoshi***** and MASUBUCHI Koichi*****

As a welding method in space, the authors have proposed the GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) welding method in the previous papers, where some GHTA welding experiments have been conducted under the condition of low pressure (10^{-2} Pa) and/or the micro-gravity. In the present paper, a feasibility study has been conducted whether the method can be used under such a high vacuum condition (10^{-5} Pa) as on the space station orbit.

As a result, it is made clear that the GHTA method is quite feasible under the high vacuum condition and its melting process strongly depends on the operating gas species such as Ne, Ar and Kr. Increasing the flow rate of operating gas decreases the mass of metal vapor from molten pool and the use of a heavy operating gas such as Kr also decreases the mass of metal vapor.

Key Words: Space welding, Space GHTA welding, GTA welding, TIG welding, Ignition of arc discharge, Arc operating gas, Metal vapor, ISS

1. 緒 論

2001年12月8日、国際宇宙ステーションISS(International Space Station)に到着した「エンデバー」から乗り込んだ第4次滞在クルーによってISSの建設が現在進行中である。2007年完成予定のISSの運用期間は、約20年の長期間に及ぶと予想されるためにスペースデブリなどの衝突による損傷修理や高機能化を目的とした改造の要求が出る可能性もある。また、今後の宇宙開発計画を考えると各種プラットフォーム、太陽光発電衛星などの宇宙構造物の建造や月面基地建設などの宇宙インフラストラクチャ構築が必要となる。これらの要求に応えるには効率的な接合法である宇宙溶接技術の確立が望まれる。

旧ソ連は早くから宇宙溶接技術の必要性を認識し、1960年頃から電子ビーム溶接¹⁻⁴⁾を中心に研究開発を実施してきた。また、米国でも電子ビーム溶接⁵⁾やNd-YAGレーザー溶接⁶⁾の研究が行われた。NASAは旧ソ連が開発した最新

の宇宙電子ビーム溶接装置“ユニバーサル”をスペースシャトルに搭載し、1997年10月に国際宇宙溶接実験ISWE(International Space Welding Experiment)を計画した。しかし、実験の約半年前にスケジュールや溶接実験での宇宙飛行士の安全性確保などの問題が発生し、急遽無期延期⁷⁾にした経緯がある。

日本では、アルゴンガス雰囲気、微小重力環境でのGTA溶接実験⁸⁻¹⁰⁾や模擬宇宙環境下での電子ビーム溶接実験¹¹⁾が行われ、微小重力環境が溶接現象に及ぼす影響が調査されている。著者らは1993年に中空タングステン電極を使用する宇宙GHTA(Gas Hollow Tungsten Arc)溶接法^{12,13)}を提案した。1998年には真空チャンバ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^{14,15)}に成功した。そして、アーク溶接の溶接現象は電磁力の影響を大きく受けるために微小重力環境の悪影響は少なく宇宙GHTA溶接法が宇宙適用できる可能性を示した。しかし、航空機に搭載した真空チャンバの到達圧力が 10^{-2} Paであり、高真空の宇宙ステーション軌道圧力 10^{-5} Paで適用できるかどうかの課題が未解決である。そこで今回は、宇宙ステーション軌道圧力 10^{-5} Paを実現できるスペース・チャンバを新設し、 10^{-5} Paの高真空環境下でGHTA溶接実験を実施した。その結果、 10^{-5} Pa高真空環境下でも宇宙GHTA溶接法のアーク起動が可能であることが実証できた。また、アーク作動ガスにNe, Ar, Krを使用した溶接実験を行い、アーク作動ガスの種類についても検討を行ったので報告する。

*原稿受付 平成14年5月7日 平成13年度春季全国大会で発表

**正 員 高松工業高等専門学校 Member, Takamatsu National College of Technology

***学 生 員 高松工業高等専門学校 Student Member, Takamatsu National College of Technology
**** 高松工業高等専門学校 Takamatsu National College of Technology

*****正 員 大阪大学大学院 Member, Osaka University
*****推薦会員 マサチューセッツ工科大学 Guest Member, Massachusetts Institute of Technology

Fig. 1 Apparatus for GHTA welding experiment in high vacuum environment.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of stainless steel plate used.

a) Chemical compositions (mass%)						
	C	Mn	Si	P	S	Cr
SUS304	0.07	0.95	0.69	0.029	0.010	8.28
						18.25
b) Mechanical properties						
	0.2% Proof stress		Tensile strength		Elongation	Vickers hardness
	(MPa)		(MPa)		(%)	HV (9.8N)
SUS304	284.6		635.6		51.7	157.0

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1 は高度約 400 km の宇宙ステーション軌道圧力 10^{-5} Pa と同じ圧力環境で GHTA 溶接実験が可能な実験システムである。実験システムを構成する主な機器は、スペース・チャンバ（直径約 0.6 m, 容積 0.17 m^3 , 到達圧力 7×10^{-6} Pa）、真空ポンプ、GHTA 溶接機、計測・観察機器およびコントロールボックスである。真空ポンプには超高速排気能力（Ar, $8.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ）を有するクライオポンプを採用した。GHTA 溶接機は高周波アーク起動装置付き単相半波整流交直両用溶接機（IC サイリスタ制御方式、定電流特性）を使用した。供試母材のステンレス鋼板を固定した移動テーブルの移動速度（溶接速度）をチャンバ外部のサーボモータで制御して所定の溶接条件でメルトラン溶接を行った。溶接電圧（起動電圧とアーク電圧を合わせて溶接電圧と呼ぶ）、溶接電流（起動電流とアーク電流を合わせて溶接電流と呼ぶ）、Ar ガス流

量およびチャンバ内圧力の時間的変化はデジタルオシロで計測記録した。溶接電圧は計測機器を保護するために高電圧カット・オフプローブを介して計測したので点弧電圧は測定されていない。放電および溶融状況は 2 台のビデオカメラで録画・観察した。

2.2 供試材及び実験手順

母材にはアルミニウム合金に比べて溶接現象が比較的単純で観察しやすい 304 ステンレス鋼（幅 150 mm, 長さ 150 mm, 板厚 3 mm）を母材に使用した。Table 1 に使用した母材の化学成分と機械的性質を示す。中空タングステン電極は特別に製作した外径 $D=4 \text{ mm}$, 内径 $d=1.8 \text{ mm}$ の 2% 酸化ランタン（ La_2O_3 ）入り電極で、その先端は電極研磨機で頂角 60° に成形した。溶接条件は電極高さ $H_e=3 \text{ mm}$, 溶接速度 2.0 mm/s は一定にして、放電起動前の初期チャンバ内圧力は $8 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, アーク電流 $50 \sim 200 \text{ A}$ およびガス流量 $0.83 \sim 2.5 \text{ ml/s}$ の間で変化させた。全ての実験は直流電極マイナス極性（DCEN）で高周波アーク起動実験とメルトラン溶接実験を行った。Ne, Ar, Kr の 3 種類のアーク作動ガスを使用

Fig. 2 Phenomenon of arc ignition in high vacuum environment.

して、アーク作動ガスが放電現象、溶融現象に及ぼす影響を調査した。また、宇宙汚染の原因となる溶接中に発生する蒸発金属質量を調査するために、溶接前後の母材の質量差を電子天秤（最小表示 0.1 mg）で計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 高真空環境下でのアーク起動現象

Fig. 2 はアーク作動ガスに Ar ガスを使用して初期チャンバ内圧力 8×10^{-6} Pa で高周波アーク起動実験（アーク電流 100 A, Ar ガス流量 1.67 ml/s）を行ったときのチャンバ内圧力, Ar ガス流量, 溶接電圧, 溶接電流および放電状況の時間的変化である。図からわかるように、起動によって起動電圧が急上昇し、約 0.06 秒後の Ar ガス供給開始と同時に絶縁破壊によって瞬時に火花放電の起動電流が流れ、数 ms 後にはアーク放電に移行してアーク電流（ホット電流）が流れる。その後、アーク電流は徐々に低下して約 0.3 s 後には設定値 100 A に収束する。一方、起動電圧は火花放電の発生によって急激に低下してアーク電圧に移行し、起動から約 0.5 s 後に定常値の約 13 V に収束する。起動時の放電状況は①火花放電から電極先端部分の小さなアーク放電②, ③を経て、電極の加熱を伴う④, ⑤のアーク放電に移行する。また、高周波アーク起動方式では高周波の高い起動電圧や大きいアーク電流（200 A 以上）のために起動時に電極材料などの微小

粒子飛散現象が確認された。Fig. 2 のチャンバ内圧力変化とアーク放電の特徴を示す溶接電圧, 溶接電流の時間的変化及びアーク放電状況からわかるように Ar ガス供給開始から数 ms でアーク放電に移行しており、圧力環境 10^{-5} Pa オーダーで GHTA 溶接法によるアーク起動が可能であることが確認できた。これらの結果から高度約 400 km の宇宙ステーション軌道でも宇宙 GHTA 溶接法が適用できる可能性の高いことが予想される。

Fig. 3 は環境圧力がアーク起動現象に及ぼす影響を調べるために初期チャンバ内圧力を 8×10^{-6} Pa, 5×10^{-5} Pa および 4×10^{-4} Pa に変化させてアーク起動実験（アーク電流 100 A, Ar ガス流量 1.67 ml/s）を行った場合の溶接電圧と溶接電流の時間的変化である。所定の初期容器内圧力で起動実験を行うために起動後すなわち高周波の起動電圧を加えた後に Ar ガスを供給するが供給開始時期に多少のずれがあるために起動電圧時間のばらつきとして現れている。Ar ガス供給開始と同時に火花放電からアーク放電に移行し、初期チャンバ内圧力に無関係に起動電流が同じ勾配で急上昇してアーク起動を完了する。この実験では、先に述べたように高電圧カット・オフプローブを介して溶接電圧を計測したので点弧電圧は測定されていない。Fig. 3 の結果から、 8×10^{-6} Pa ~ 4×10^{-4} Pa の範囲では圧力環境は宇宙 GHTA 溶接法のアーク起動現象にあまり影響を与えないことが確認できた。その理由としては、中空タングステン電極から常に所定流量の Ar ガスが流出しているために電極先端付近の Ar ガス密度に大き

Fig. 3 Effect of initial pressure on ignition of arc discharge.

Fig. 5 Effects of arc operating gas on bead shape.

Fig. 4 Relationship between arc current and arc voltage.

な差が発生しないためと予想される。

3.2 アーク作動ガスの検討

3.2.1 電流－電圧特性

Fig. 4 はアーク作動ガスがアーク電流－アーク電圧特性に及ぼす影響である。電極高さ 3 mm, ガス流量 1.67 ml/s の条件で定常放電状態 (約 0.1 Pa) での測定結果である。Fig. 4 の結果によると同じアーク電流に対するアーク電圧は Ne,

Ar, Kr ガスの順に低くなっており, 大気中での G T A 溶接と同じ傾向¹⁶⁾を示した。アーク作動ガスによるアーク電圧の違いは電離電圧の違いに原因する。Ne, Ar および Kr のおよその電離電圧は, それぞれ 21.2, 15.8 および 14.5 V である。原子量の大きい元素ほど電離電圧が低く, そのためにアーク放電を維持するのに必要なアーク電圧も低くなる。

アーク電流 100 A, 溶接速度 2.0 mm/s, Ar ガス流量 1.67 ml/s の溶接条件で定常なアーク放電形態に及ぼすアーク作動ガスの影響も観察した。図には示していないが電極先端と溶融池の間のアーク放電形態には, アーク作動ガスの違いによる影響は確認できない。しかし, 電極後方の溶融池上の発光状況を観察すると, Ne, Ar に比べて Kr ガスの溶融池上の発光が少ないことが確認できた。この主な原因は, 次節の溶融現象でも述べるがアーク作動ガスが Kr の場合は溶融池が小さいためである (Fig. 5 参照)。

3.2.2 溶融特性

アーク電流 100 A, 溶接速度 2.0 mm/s, ガス流量 1.67 ml/s の溶接条件で溶接開始位置から約 35 mm の位置のビード形状に及ぼすアーク作動ガスの影響を調べた結果を Fig. 5 に示した。図から明らかなように, ビード断面積は Ne, Ar, Kr ガスの順に減少する。Ne ガスでは母材裏面まで溶融するが Kr ガスの場合, 溶込み深さは 1 mm 以下 (母材板厚 3 mm)

Fig. 6 Effects of arc operating gas on penetration depth.

Fig. 7 Effects of arc operating gas on bead width.

である。これらの理由の一つは、単位溶接長あたりの溶接入力熱量の違いである。Fig. 4 の結果によるとアーク作動ガス Ne, Ar および Kr の同じアーク電流 100 A に対するおおよそのアーク電圧はそれぞれ 13.9, 12.8 および 12.0 V である。溶接速度、ガス流量は同じであるから熱効率が同じと仮定すると溶接入力熱量は Ne, Ar, Kr の順に小さくなり、その結果としてビード断面積、溶込み深さが小さくなる。

次に、Ne, Ar および Kr を使用してアーク電流を変化させて溶融特性を調査した。Fig. 6 は溶込み深さ、Fig. 7 はビード幅についての結果である。この溶接条件で、母材を溶融させることができる最低アーク電流を求めると Ne, Ar, Kr でそれぞれ約 40, 60, 85 A である。また、例えば 2 mm の溶込み深さを得るためには Ne, Ar, Kr でそれぞれ約 85, 105, 125 A のアーク電流が必要である。このように原子量の大きいアーク作動ガスほど母材を溶融させるのに大きなアーク電流を必要とする。Fig. 7 のビード幅も同様の結果を示しており、同じビード幅にするためには Ne, Ar, Kr の順に大きなアーク電流が必要になる。

Fig. 8 Relationship between flow rate of Ar gas and mass of metal vapor.

3.3 溶接による蒸着現象

宇宙ステーション ISS には各種の観測・通信機器が搭載される。そのために ISS 外部の周辺で溶接施工した場合は溶接で発生する蒸発金属による宇宙汚染や各種機器への金属蒸着が問題になると予想される。特に、観測・通信機器への金属蒸着はそれらの性能低下を招き、太陽電池パネルへの金属蒸着は発電能力低下の原因になる。そこで、溶接による金属蒸着を調査する第一ステップとしてステンレス鋼をメルトラン溶接したときの蒸発金属質量を測定した。溶接速度 2.0 mm/s で溶接時間 30 秒の条件で、ガス流量とアーク電流を変化させた溶接実験を行った。蒸発金属質量は、溶接前後の母材質量を電子天秤で測定してその質量差から求めた。

Fig. 8 は Ar ガス流量が蒸発金属質量に及ぼす影響である。図からわかるように、Ar ガス流量が多くなると蒸発金属質量が減少する。この原因としては、Ar ガス流量の増加によって①溶融池が冷却されるために溶融池表面積（蒸発面積）の減少と溶融池温度の低下によって蒸発金属量が減少すること、②溶融池上部に存在するガスイオンや分子の密度が高くなるために溶融金属の蒸発が抑制されることなどが考えられる。

Fig. 9 は蒸発金属質量に及ぼすアーク電流の影響である。アーク電流が増加すると溶融池表面積が増加し、また溶融池温度も多少増加するので蒸発金属質量は増加する傾向を示す。同じアーク電流についての蒸発金属質量に注目すると、Ne, Ar, Kr の順に蒸発金属質量が減少する。これは Fig. 5 に示したアーク作動ガスによるビード断面積の違いや Kr のように原子量が大きいガスほど蒸発金属との衝突によって溶融池からの金属蒸発の抑制効果が大きいことが原因と考えられる。これらの結果から、アーク作動ガスの流量を増加させることによって蒸発金属質量の抑制効果が期待できる。しかし、Fig. 9 に示すように溶接条件によっては約 30 秒間の

Fig. 9 Relationship between arc current and mass of metal vapor.

溶接中に 80 mg 程度の蒸発金属が発生している。従って、宇宙ステーション周辺で溶接をする際には、保護シート内や専用作業区間での溶接施工など周辺の各種観測・通信機器などへの金属蒸着防止対策が必要になる。

4. 結 論

宇宙ステーション軌道圧力とほぼ同じ 10^{-5} Pa 高真空環境下で GHТА 溶接実験が実施できる実験システムを製作して、ステンレス鋼板と数種類のアーク作動ガスを使用したアーク起動実験、メルトラン溶接実験を実施して次のことを明らかにした。

- 1) 10^{-5} Pa 高真空環境下で GHТА 溶接によるアーク起動が可能であることを実証し、宇宙 GHТА 溶接法が宇宙ステーション軌道レベルの宇宙空間で適用できる可能性の高いことを示した。
- 2) 8×10^{-6} Pa ~ 4×10^{-4} Pa の範囲では環境圧力は宇宙 GHТА 溶接法のアーク起動現象にあまり影響を与えないことを明らかにした。
- 3) アーク作動ガス Ne, Ar および Kr の電流-電圧特性を明らかにした。また、原子量の大きいアーク作動ガスほどビード断面積が小さくなることを示した。
- 4) アーク作動ガス流量を多くすると蒸発金属質量が減少する。また、原子量の大きいアーク作動ガスは蒸発金属質量が少ない。

謝 辞

本研究は宇宙開発事業団、財団法人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われた。また、財団法人南海育英会の御支援にもお礼申しあげる。

参 考 文 献

- 1) Paton, B.E. : WELDING IN SPACE, Weld, Eng., 57-1 (1972), 25-29.
- 2) Dzhaniybekov, V.A., Zagrebelny, A.A., Gavrish, S.S., Stesin, V.V., Sheleyagin, V.D., Yurchenko, N.N., Markov, A.V. : Welding Equipment for Apace Applications, Proc. "Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by welding", Sept., 24-26 (1991), New Carrollton, Maryland, USA, 49-58.
- 3) Y. SUITA : Challenge Space : Development of Space Arc Welding Process, Journal of High Temperature Society, 21-2 (1995), 33-42. (in Japanese)
- 4) Ohji, T translation : 宇宙の溶接, Sanpo (2000), B.E. Paton, V.F. Lapchinsky : WELDING in SPACE and RELATED TECHNOLOGIES.
- 5) Schollhammer, F.R. : Electron Beam Welder for Space, Nat. Sympo. Materials for Space Vehicle Use, 6th, Seattle, Wash., Society of Aerospace Material and Process Eng., (1963-11), 51.
- 6) Kaukler, W.F. and Workman, G.L. : Laser Welding in Space, Proc. "Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding", Sept., 24-26 (1991), New Carrollton, Maryland, USA, 318-334.
- 7) Ruth Johnsen : Space Welding Experiment Postponed Indefinitely, Weld.J., 76-4 (1997), p22.
- 8) M. Nayama, T. Imada : Aircraft Experiment of The Fusion Welding under low-gravity, Prep. Nat. Meet. JWS, 48 (1991), 156-157. (in Japanese)
- 9) K. Nezaki, S. Kaihara, M. Kuribayashi, A. Tanji, K. Kawachi : Study on welding phenomena under micro-gravity, -Study on welding technique under micro-gravity (2), Prep. Nat. Meet. JWS, 54 (1991), 210-211. (in Japanese)
- 10) K. Nogi, Y. Aoki, H. Fujii, K. Nakata : Behavior of Bubbles in Welding Under Microgravity, Acta Materialia 46-12 (1998), 4405-4413.
- 11) K. Nogi, Y. Aoki, N. Matumura, A. Khoyama and H. Fujii : DEVELOPMENT OF ELECTRON BEAM WELDING SYSTEM FOR USE IN MICROGRAVITY ENVIRONMENT, Proc. Inter. Sympo. Environment-Conscious Innovative Materials Processing with Advanced Energy Sources (1998), 482-485.
- 12) Y. SUITA, Y. TSUKUDA, T. TAKAGI, T. OHJI, K. MASUBUCHI : Study of gas tungsten arc welding in space (1st Report), Quar. J. JWS, 11-3 (1993), 423-427.
- 13) Y. SUITA, Y. TSUKUDA, T. TAKAGI, T. OHJI, K. MASUBUCHI : Study of gas tungsten arc welding in space (1st Report), Weld., Inter., 8-4 (1994), 269-273.
- 14) Y. SUITA, Y. TSUKUDA, N. TERAJIMA, T. HATTA, T. KOHNO, R. INOKUMA, K. KAWADA, T. OHJI, H. HISHIKAWA, K. YOSIDA, K. MASUBUCHI : GHТА Welding Experiments under Simulated Space Environment in Flying Laboratory, Quar. J. JWS, 18-2 (2000), 228-235. (in Japanese)
- 15) Y. SUITA, T. KUOKAWA, J. SATO, S. SHOBAKO, T. KOHNO, Y. TSUKUDA, N. TERAJIMA, K. MASUBUCHI : GHТА Spot Welding Experiments of Aluminum and Titanium Plates under Simulated Space Environment, Trans. JSASS, 49-568 (2001), 155-161. (in Japanese)
- 16) Lancaster J.F edit : THE PHYSICS OF WELDING, 2nd edition, IIW (1986), 溶接学会, 溶接アーク物理研究委員会訳 : ランカスター編著 : 溶接アークの物理, 黒木出版社 (1990), 167.