航空機を使用した模擬宇宙環境での宇宙 GHTA 溶接法による アルミニウム管の溶接実験*

吹田 義一**, 大原 将広***, 十川 弘樹***, 松下 和憲***, 正箱 信一郎**,
寺嶋 昇**, 佃 芳行**, 増渕 興一****, 山内 庄司*****

Welding Experiments on Aluminum Pipe by Space GHTA Welding in Aircraft-Borne Simulated Space Environment*

by SUITA Yoshikazu**, OHARA Masahiro***, SOGAWA Hiroki***, MATSUSITA Kazunori***, SHOBAKO Shinichiro**,
TERAJIMA Noboru**, TSUKUDA Yoshiyuki**, MASUBUCHI Koichi**** and YAMAUCHI Shoji*****

The Gas Hollow Tungsten Arc (GHTA) welding experiments on aluminum pipe were carried out in a simulated space environment using an aircraft. A vacuum chamber and welding machine for GHTA welding test were placed in the cabin of aircraft and the 10^{-2} G gravity environment was produced by a parabolic flight of the aircraft. The square butt welding joints with non root gap on aluminum pipe were made by orbital welding in the vacuum chamber without wire filler metal using DC or DC-pulsed power supply under the 10^{-2} G and 1 G gravity conditions. The welding phenomenon during the aluminum GHTA welding recorded in the high-speed video image was analyzed and also the macrostructure and mechanical properties of butt weld joints were investigated. The welding experiments under simulated space environment showed that the DC-pulsed GHTA process could make the welding joints without the weld defects such as a lack of fusion, oxide film inclusion and spattering, though throat thickness decreased by the impulsive arc pressure of pulsed current. It was also clarified that the arc discharge phenomenon and melting characteristic at the molten pool surface during the DC-pulsed GHTA welding were insensitive to the gravity condition. However, the sagging weld metal made at 1 G gravity condition increases a little than that welded under the 10^{-2} G gravity condition.

Key Words: Space Welding, Space GHTA Welding, GHTAW, Space Environment, Aluminum, GTA, TIG, Flying Laboratory

1. 緒 言

現在、国際宇宙ステーション ISS の建造が進められており、2007 年12月には日本モジュール「きぼう」が打ち上げられる予定である。デブリ衝突などによる ISS の修理や宇宙構造物の建造、月面基地の建設などの宇宙インフラストラクチャ構築¹⁾には宇宙溶接技術が必要になる。旧ソ連は、1960 年頃から電子ビーム溶接²⁻⁵⁾を中心に研究開発を実施した。1984 年にサリユート 7 号の船外で電子ビーム溶接実験に成功し、1986 年には長さ 12m のトラス桁の製作を行った。当時は冷戦下であり、宇宙溶接実験の詳細はほとんど報告されていない。米国でも、1991 年に模擬宇宙環境下でレーザ溶接実験⁶⁾が行われた。その後、宇宙溶接技術の必要性を再確認した NASA は、1997 年に旧ソ連の電子ビーム溶接装

置をスペース・シャトルに搭載する国際宇宙溶接実験を計画した。しかし、高圧電源による溶融金属の飛散など宇宙飛行士の安全確保などに問題が発生して実験を無期延期⁷⁾にした。日本でも微小重力、低圧環境での溶接実験⁸⁻¹⁰⁾が行われ、模擬宇宙環境での溶接現象の特徴が報告された。

著者らは、GTA 溶接法の原理に着目した中空タングステン電極を使用する宇宙 GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) 溶接法による模擬宇宙環境下でのステンレス鋼管の突合せ溶接実験⁸⁾に成功した。次に、地上真空環境で直流パルス電源を使用する GHTA 溶接によって、溶接中にアルミニウム合金溶融池表面の酸化膜を機械的に粉碎・除去¹¹⁾できることを示した。そして、溶加ワイヤを溶融池に供給する溶接実験で、のど厚不足、融合不良、ブローホールなどの溶接欠陥の無い、十分な溶接継手強度を持つ突合せ溶接継手を製作¹²⁾できることを示した。

このような状況で、著者らは真空装置と溶接機を搭載した航空機のパラボリック飛行中に得られる微小重力 10^{-2} G (G は重力加速度を示す)、圧力 10Pa の模擬宇宙環境において、アルミニウム管の溶接実験を実施した。その結果、模擬宇宙環境でも直流パルス電源を使用する GHTA 溶接によってアルミニウム溶融池表面の酸化膜を除去でき、融合不良、ブローホールなどの溶接欠陥のない突合せ溶接継手を製作できる可能性が確認できたので報告する。

*受付日 平成19年 8 月 3 日 受理日 平成19年10月 8 日
平成18年度秋季全国大会で発表
**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
****推薦会員 マサチューセッツ工科大学 Guest Member, Massachusetts Institute of Technology
***** 高松工業高等専門学校 Takamatsu National College of Technology

Fig. 1 Experiment system for GHTA welding aluminum pipes under simulated space environment.

2. 実験方法

2.1 実験装置

航空機に搭載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 Fig. 1 (a) のように直流／直流パルス溶接機、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、Fig. 1 (b) のように引上げ方式でアーク起動するための溶接トーチ位置制御装置と供試材のアルミニウム管を取り付け、周方向に所定速度で回転させて溶接する駆動装置が内蔵されている。溶接トーチには、頂角 60° に成形した外径 4 mm、内径 1.8 mm の 2% 酸化ランタン入り中空タングステン電極が装着されている。アーク作動ガスに Ar ガスを使用し、マスフローコントローラーで流量を制御し、中空電極の先端からのみ流出させて溶接した。溶接状況は、真空チャンバの正面に設置した 8 mm ビデオカメラと側面の斜め上方 45° に設置した高速度ビデオカメラ (500 fps) で録画・観察した。溶接中の溶接電流、Ar 流量、真空チャンバ内圧力および重力加速度は、デジタルオシログラフで記録した。

2.2 供試材、溶接条件と実験手順

ISS モジュールにはアルミニウム合金 A2219 が使用されているが、直径 30 mm、肉厚 2 mm のアルミニウム管 A2219 を入手するのが困難なために、同寸法の純アルミニウム管 A1070TD-H14 (引張強さ 107 MPa、破断ひずみ 8%) を供試材に採用した。長さ 50 mm のアルミニウム管 2 本を I 型開先、ルートギャップゼロで突合わせ、3 箇所を GTA 溶接で仮付溶接したものを供試材とし、周方向に突合せ溶

(a) Welded aluminum pipe.

(b) Specimen size for tensile test.

Fig. 2 Dimensions of tensile test specimen.

接を行った。Fig. 2 は製作された突合せ溶接継手とそれから採取した引張試験片を示す。Fig. 2 (a) の図中の二点鎖線のように溶接開始点から約 180° の位置が引張試験片中央部になるように引張試験片を採取した。採取した試験片は Fig. 2 (b) のように試験片両端部を平坦に加工して引張試験を行った。

溶接電源には、直流電源あるいは直流パルス電源を使用し、電極マイナス (DCEN) 極性とした。直流電源を使用

Fig. 3 High-speed video sequences and illustrations showing aluminum pipe GHTA welding using DC power supply under simulated space environment.

する GHTA 溶接（以下、直流 GHTA 溶接と記す）の実験では、低圧環境でも安定して引上げ方式のアーク起動が行えるように、溶接電流 $I = 80 \text{ A}$ 、Ar ガス流量 $Q_{Ar} = 2.5 \text{ ml/s}$ 、アーク長 $H_E = 3 \text{ mm}$ に設定し、アルミニウム管裏面まで溶融するように溶接速度 $v = 7 \text{ mm/s}$ に設定した。これまでの地上実験結果から、直流パルス電源を使用する GHTA 溶接（以下、直流パルス GHTA 溶接と記す）では、ベース電流からパルス電流に瞬間的に移行するときのアーク圧力の衝撃的な変化（以下、アーク衝撃圧力と記す）が溶融池表面の酸化膜の機械的な粉碎・除去に効果があることがわかっている¹¹⁾。ベース電流とパルス電流の差が大きいくほどアーク衝撃圧力が大きいが、航空機実験では、航空機から供給される最大電力から最大パルス電流 I_p は 140 A に制限される。また、ベース電流期間でも安定した放電維持が必要なることからベース電流 I_b をあまり低くできないために 20 A とした。これらの溶接電流条件で、直流 GHTA 溶接と同じく Ar ガス流量 $Q_{Ar} = 2.5 \text{ ml/s}$ 、アーク長 $H_E = 3 \text{ mm}$ 、溶接速度 $v = 7 \text{ mm/s}$ で、アルミニウム管裏面まで溶融し、しかも溶融池表面の酸化膜を除去できるようにパルス周波数 $F_p = 5 \text{ Hz}$ とし、また実効電流値が直流 GHTA 溶接の溶接電流 80 A にほぼ等しくなるようにパルス幅 $W_p = 30\%$ に設定した。

真空チャンバ内を真空ポンプで高真空まで減圧するには時間が必要になる。1 時間に制限される実験飛行時間内に多くの溶接実験を行うために溶接前のチャンバ内圧力は約 10 Pa とした。パラボリック飛行中、パイロットの微小重力環境 10^{-2} G を告げる“Now”コールと同時に電極を引上げて溶接を開始した。1 回のパラボリック飛行で得られる約 20 秒間の模擬宇宙環境で 1 回の周方向溶接実験を行った。地上真空環境での溶接実験も溶接時間は 20 秒とした。

3. 実験結果と考察

3.1 直流電源による突合せ溶接実験

微小重力 10^{-2} G 、圧力 10 Pa の模擬宇宙環境で、直流 GHTA 溶接による突合せ溶接を行い、溶接状況をビデオカメラで録画・観察した。Fig. 3 は高速度ビデオカメラのコマ送り画像（斜め上方 45° からの撮影のためにアーク長が短く見える）と模式図である。図中の時間は、Fig. 3 (a) の溶接状況を 0 秒とした経過時間を示す。低圧での直流 GHTA 溶接はプラズマ密度が低いために大気中 GHTA 溶接のアーク放電のように輝度が高くない。アーク圧力と内径 1.8 mm の中空電極先端から噴出する Ar ガス噴流の圧力（以下、Ar 噴流圧力と記す）で溶融池が窪んでいる。Fig. 3 (a) から Fig. 3 (b) の間では、溶融池表面はシワを持つ未溶融酸化膜（矢印で示す）で覆われ、純アルミニウムの溶融池表面は露出していない。プラズマ気流、Ar 噴流のドラッグ効果で生じる摩擦力で未溶融酸化膜にシワが発生し、そのシワと酸化膜が振動する現象が観察できた。静かに煮立てた豆乳表面に生じる薄皮（湯葉）に息を吹きかけたときに生じるシワの発生と振動に似ている。振動する未溶融酸化膜は、Fig. 3 (c) の少し前に破れ、純アルミニウムの溶融池表面（黒色部）が露出する。そして、Fig. 3 (d) のように、未溶融酸化膜が後方に流されるために露出した溶融池表面が大きくなる。未溶融酸化膜は、溶融金属を巻き込み、また溶融金属に混入しながら溶融池後方に流れる。そして、溶融金属が未溶融酸化膜を折り畳みながら凝固するために凹凸の激しい溶接金属になる。未溶融酸化膜の存在は溶融金属の流動を阻害する。そのために、未溶融酸化膜に覆われた溶融金属は流

Fig. 4 Butt welding joint made using DC power supply under simulated space environment.

Fig. 5 Butt welding joint made using DC power supply in vacuum at 1 G gravity.

動性が悪く、溶融池が平坦になり難いのでアンダーカットを発生しやすい。未溶融酸化膜は異なる時間間隔で破れるが、再び Fig. 3 (a) のように溶融池表面が酸化膜で覆われた溶接状況になり、Fig. 3 (a) から Fig. 3 (d) の溶接状況が繰り返される。

Fig. 4 (a), (b) は模擬宇宙環境 10^{-2} G, 10 Pa において直流 GHTA 溶接で製作された突合せ溶接継手の外観と断面マクロ組織である。上述のような未溶融酸化膜、溶融金属の流動、凝固状況のために、融合不良、酸化膜巻込み、不整ビード、アンダーカットや貫通孔など多くの溶接欠陥が発生している。この溶接結果や上述の未溶融酸化膜と溶融金属の流動、凝固状況から、アルミニウム管突合せ溶接では、溶接中に溶融池表面の酸化膜を除去する必要があることがわかる。

地上真空環境 1 G, 10 Pa でも、同じ溶接条件で直流 GHTA 溶接を行った。アーク放電、表面溶融状況は、模擬宇宙環境での放電状況 Fig. 3 (a)～Fig. 3 (d) とほぼ同じで、重力加速度の影響は認められなかった。アーク放電現象は電磁力の影響を強く受けるために、重力加速度の影響が表に現れなかったと考えられる。地上真空環境での未溶融酸化膜と溶融金属の流動、凝固状況も、模擬宇宙環境とほぼ

Fig. 6 Current waveform (DC-pulsed power supply).

同じ状況であった。その溶接結果である溶接外観と断面マクロ組織を Fig. 5 (a), (b) に示した。模擬宇宙環境での溶接と同じように溶接金属の凹凸は激しく、融合不良、酸化膜巻込み、不整ビード、アンダーカットなどの溶接欠陥が発生している。地上真空環境で溶接された溶接金属は Fig. 5 (b) のように模擬宇宙環境の溶接金属 Fig. 4 (b) よりもわずかながら垂れ下がりが大きく、重力加速度の影響が認められる。ステンレス鋼の直流 GHTA 溶接実験⁸⁾でも、溶接金属垂れ下がり重力加速度の影響を受けることを確認している。

3.2 直流パルス電源による突合せ溶接実験

模擬宇宙環境 10^{-2} G, 10 Pa において、直流パルス GHTA 溶接で突合せ溶接したときの電流波形を Fig. 6 に示す。Fig. 7 は溶接状況を 45° 上方から撮影した高速度ビデオカメラのコマ送り画像と模式図である。図中に示す時間は、ベース電流からパルス電流に移行した瞬間を 0 秒とした時間経過である。Fig. 7 (a) はパルス電流に移行する 0.02 秒前のベース電流 ($I_B = 20$ A) 期間の放電状況である。電極直下に前サイクルのパルス電流期間に形成された溶接金属のクレータが確認できる。Fig. 7 (a) のベース電流期間では、アーク圧力や Ar 噴流圧力によるクレータの形状変化や流動が確認できないことからクレータは凝固しているようである。ベース電流からパルス電流 ($I_P = 140$ A) に移行した瞬間に Fig. 7 (b) のようにアーク熱で電極直下のクレータが再溶融する。クレータの形状変化や流動から再溶融を確認できる。パルス電流期間では、パルス電流のアークによって Fig. 7 (b) から Fig. 7 (c) のように時間経過とともに溶融金属量が増加し、また溶融池の窪みが徐々に拡大する。増量した溶融金属は、アーク衝撃圧力、プラズマ気流および Ar 噴流圧力によって、さざ波のように振動しながら Fig. 7 (b) から Fig. 7 (c) のように溶融金属量を増やしながら外向きに溶融、流動、変形する。この溶融金属の流動、変形の過程で未溶融酸化膜に張力が発生して、酸化膜が細かく引き裂かれると考えられる。

Fig. 8 (a), (b) は、直流パルス GHTA 溶接によって模擬宇宙環境で製作された突合せ溶接継手の外観と断面マクロ組織である。直流パルス電流のアーク衝撃圧力で発生した周期的なリップルが観察される。溶接金属表面にはアーク衝撃圧力による凹凸があるが溶接割れ、ブローホールなどの

Fig. 7 High-speed video sequences and illustrations showing aluminum pipe GHTA welding using DC-pulsed power supply under simulated space environment.

Fig. 8 Butt welding joint made using DC-pulsed power supply under simulated space environment.

Fig. 9 Butt welding joint made using DC-pulsed power supply in vacuum at 1 G gravity.

溶接欠陥は確認できない。溶加ワイヤを供給しない突合せ溶接のために溶接金属が不足しているが、Fig. 8 (b) の断面マクロ組織では、融合不良、ブローホール、酸化膜巻込みなどの溶接欠陥は確認できない。金属顕微鏡観察では一部の溶接金属に機械的に粉碎された酸化膜小片が、わずかながら混入している場合も確認された。直流パルス GHTA 溶接では、微小重力環境の溶接にも拘わらず、溶接金属は管内面に垂れ下がり、のど厚が減少した。パルス電流によるアーク衝撃圧力で熔融金属が管中心方向に押されたことに起因すると考えられる。

地上真空環境 1 G、10 Pa でも、同じ溶接条件の直流パルス GHTA 溶接を行った。アーク放電、表面熔融状況は、模擬宇宙環境の放電、表面熔融状況 Fig. 7 (a)～(d) とほぼ等しく、重力加速度の影響は確認できなかった。地上真空環境で製作した突合せ溶接継手の外観と断面マクロ組織を Fig. 9

(a), (b) に示した。Fig. 9 (a) の外観では模擬宇宙環境で製作された溶接継手 (Fig. 8) と同じように、溶接金属にはアーク衝撃圧力で発生した周期的なリップルと凹凸があるが、溶接割れなどの溶接欠陥は確認できなかった。溶加ワイヤを供給していないために溶接金属が不足しているが、Fig. 9 (b) の断面マクロ組織には融合不良、ブローホール、酸化膜巻込みなどの溶接欠陥は肉眼では確認できない。溶接金属垂れ下がりを見ると、Fig. 8 (b) に示した模擬宇宙環境で溶接された場合よりもわずかながら大きく、直流 GHTA 溶接と同じように溶接金属垂れ下がり、重力加速度の影響をわずかながら受けるようである。

宇宙環境の溶接ではスパッタが宇宙服を損傷させる可能性がある。そこで、溶接作業の安全性を調べるために、全ての直流 GHTA 溶接、直流パルス GHTA 溶接実験について、溶接中にスパッタの発生と飛散がないかを調査した。真空

チャンバの正面に設置した8mmビデオカメラと側面の斜め上方45°に設置した高速度ビデオカメラで溶接状況を録画・観察した。その結果、模擬宇宙環境、地上真空環境の両環境での直流GHTA溶接、直流パルスGHTA溶接においてスパッタの発生や飛散は認められず、宇宙GHTA溶接が安全に適用できる可能性を確認した。

3.3 GHTA溶接継手の機械的性質

模擬宇宙環境 10^{-2} G, 10 Pa と地上真空環境 1 G, 10 Pa において、直流パルスGHTA溶接で突合せ溶接継手を製作して硬度分布と溶接継手強度を調査した。Table 1 に両環境で製作された溶接継手の引張強さ、破断ひずみ、最小硬度を示した。Fig. 10 は模擬宇宙環境で溶接された溶接継手の肉厚中央部での硬度分布である。溶融と加熱のために溶接金属部と熱影響部の硬度が約HV23~37の範囲まで軟化している。地上真空環境で製作された溶接継手もほぼ同じ硬度分布を示した。Fig. 11 に模擬宇宙環境で溶接された溶接継手の引張試験後の破断状況を示す。溶加ワイヤを供給しない突合せ溶接のために溶接金属部の最小のど厚断面で破断した。引張強さは母材の約53%で約57MPa、破断ひずみは母材の2倍で約16%であった。強度低下は、Fig. 8 (b) のど厚減少とFig. 10の軟化が原因と考えられる。地上真空環境で溶接された突合せ溶接継手の引張強さと破断ひずみは、模擬宇宙環境で溶接された溶接継手とほぼ同じ値であった。アーク衝撃圧力が原因で起きる溶接部のど厚減少は、溶加ワイヤを溶接池に供給することで防止できることを確認している。

Table 1 Mechanical properties of butt welding joints.

Gravity	Specimen number	Tensile strength σ_t (MPa)	Elongation ε_t (%)	Minimum hardness HV _{min} (4.9N)
10^{-2} G	1	51.1	17.2	23.5
	2	58.3	16.1	23.2
	3	63.1	13.5	24.2
	Mean value	57.5	15.6	23.6
1 G	1	51.6	17.5	23.2
	2	52.5	15.9	23.6
	3	67.8	13.5	24.3
	Mean value	57.3	15.6	23.7

Fig. 10 Hardness distribution of butt joint welded using GHTA welding under simulated space environment.

Fig. 11 Tensile test specimen welded using GHTA welding under simulated space environment.

4. 結 論

模擬宇宙環境と地上真空環境において、直流電源と直流パルス電源を使用し、溶加ワイヤ供給のない宇宙GHTA溶接法によってアルミニウム管の突合せ溶接実験を行い、次のことを明らかにした。

- 1) 直流GHTA溶接のアーク放電、表面溶融状況には、重力加速度の影響があまり認められない。しかし、地上真空環境の溶接金属の垂れ下がり、重力加速度の影響で模擬宇宙環境の垂れ下がりよりわずかながら大きい。
- 2) 模擬宇宙環境、地上真空環境の直流GHTA溶接では、溶融池表面の未溶融酸化膜は周期的に破れ、溶融池後方に流される。溶融金属が未溶融酸化膜を折り畳みながら凝固するために凹凸の激しい溶接金属になる。そのために、融合不良、酸化膜巻込み、不整ビード、アンダーカットなどの溶接欠陥を発生する。
- 3) 模擬宇宙環境と地上真空環境での直流パルスGHTA溶接では、パルス電流期間の溶融金属量の増加とアーク衝撃圧力による溶融金属の流動、変形によって溶融池表面の酸化膜を機械的に粉砕・除去できる。その結果、溶加ワイヤを供給しない場合は、のど厚不足が起きるが溶接金属には融合不良、酸化膜巻込みなどの溶接欠陥を発生しない。
- 4) 模擬宇宙環境と地上真空環境の直流パルスGHTA溶接のアーク放電、表面溶融状況は、ほぼ等しく重力加速度の影響が確認できない。しかし、地上真空環境の溶接金属の垂れ下がり、重力加速度の影響のために模擬宇宙環境よりもわずかながら大きい。
- 5) 模擬宇宙環境と地上重力環境で溶加ワイヤを供給しない直流パルスGHTA溶接で製作された突合せ溶接継手は、融合不良、ブローホールや酸化膜巻込みなどの溶接欠陥は発生しないが、のど厚減少と軟化のために十分な溶接継手強度を得られない。そのために溶加ワイヤを供給する直流パルスGHTA溶接技術が必要になる。
- 6) 直流パルスGHTA溶接法は、模擬宇宙環境でもスパッタの発生と飛散が無く、安全に溶接作業できる。

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。

航空機実験では、高松工業高等専門学校学生の亀井美佐、田中健司、大谷雅人、三谷健太、木村彰男および原田隆史諸君の協力を得たことを記してお礼を申しあげる。また、長期間に亘って御支援いただいている（財）南海育英会にお礼を申しあげる。

参 考 文 献

- 1) Y. Suita et al.: Research and Development of Space Processing Technology, Space Engineering Elements edited by the JSME Space Engineering Division, (2004), pp. 145-154. (in Japanese)
- 2) B. E. Paton: WELDING IN SPACE, Welding Engineer, 57-1 (1972), pp. 25-29.
- 3) Bob Irving: Electron Beam Welding, Soviet Style: A Front Runner for Space, Welding Journal, 70-7 (1991), pp. 55-59.
- 4) V. A. Dzhaniybekov et al.: Welding Equipment for Space Applications, Proc. "Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by welding", September, 24-26 (1991), New Carrollton, Maryland, USA, pp. 49-58.
- 5) T. Ohji (translation), Paton, B.E., Lapchinsky V. F.: WELDING in SPACE and RELATED TECHNOLOGIES, Sanpo (2000), 35-98. (in Japanese)
- 6) W. F. Kaukler, G. L. Workman: Laser Welding in Space, Proc. "Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding", September, 24-26 (1991), New Carrollton, Maryland, USA, pp. 318-334.
- 7) R. Johnsen: Space Welding Experiment Postponed Indefinitely, Welding Journal, 76-4 (1997), p. 22.
- 8) Y. Suita, Y. Tsukuda, N. Terajima, et al.: Gas Hollow Tungsten Arc Welding Experiments in Aircraft-Borne Simulated Space Environment, Welding International 15-2 (2001), pp. 100-107.
- 9) K. Masubuchi: A Hollow Electrode GTAW System Developed and Tested for Space Applications, Welding Journal, 78-12 (1999), pp. 36-38.
- 10) K. Nogi, Y. Aoki, H. Fujii, K. Nakata: Behavior of Bubbles in Weld under Microgravity, Acta Materialia, 46-12 (1998), pp. 4405-4413.
- 11) Y. Suita, H. Nagai, S. Shinike, Y. Tsukuda, N. Terajima, et al.: GHТА Welding Phenomena of an Aluminum Alloy in Vacuum, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 22-2 (2004), 218-223. (in Japanese)
- 12) Y. Suita, S. Shinike, T. Ekuni, et al.: Butt Welding of Aluminum Alloy by Space GHТА Welding process in Vacuum, Journal of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 52-610 (2004), pp. 522-527. (in Japanese)