擬似火星大気での GTA 溶接および GHTA 溶接実験*

吹田 義一**, 正箱 信一郎**, 白井 瑞木***, 佐藤 亮太***, 寺嶋 昇**, 山下 雅弘****

Phenomena in GTA and GHTA Welding under like Mars Atmosphere*

by SUITA Yoshikazu**, SHOBAKO Shinichiro**, SHIRAI Mizuki***, SATOU Ryouta***,
TERAJIMA Noboru** and YAMASHITA Masahiro****

NASA is advancing the project of manned Mars exploration. In the future, Martian outposts and structures will be constructed. To realize this, welding technology is expected to be applied. The main atmospheric component of Mars is carbon dioxide, and the atmospheric pressure is approximately 700 Pa. In this study, welding experiments were carried out in a simulated Mars atmosphere of 99.5% carbon dioxide and a pressure of 700 Pa. Conventional Gas Tungsten Arc (GTA) welding and Gas Hollow Tungsten Arc (GHTA) welding, in which arc operating gas is allowed only to flow out from the electrode tip of a hollow tungsten electrode, were investigated. The arc discharge behavior and the melting characteristics in the simulated Mars atmosphere were studied. As a result, it was shown that GTA welding and GHTA welding might be applicable even in the Mars atmosphere.

Key Words: GTA welding, GHTA welding, Mars, Simulated Mars atmosphere, Arc discharge, Melting phenomenon

1. 緒 言

2010年, 米国のオバマ大統領は, 2030年代半ばを目標にした有人火星探査計画¹⁾を発表した. 将来的には, 火星前哨基地や火星構造物の建設が行われると予想されている. それらを効率よく短時間に実現するために, 溶接技術の適用が期待される. 火星大気圧力は, 地球大気圧力 (101,325 Pa) の約百分の一の約 700 Pa で, 火星大気成分²⁾は炭酸ガス 95.3%, 窒素 2.7%, アルゴン 1.6%, 酸素 0.13%, 一酸化炭素 0.07%, 水蒸気 0.03% である. これまで, このような火星大気雰囲気での溶接技術の適用を検討した報告は, ほとんど見あたらない.

本報告では, 溶接用炭酸ガス (純度 99.5%) を利用して, 炭酸ガス 99.5%, 圧力 700 Pa の擬似火星大気において, 従来の GTA (Gas Tungsten Arc) 溶接と GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) 溶接³⁻⁶⁾による溶接実験を行った. GHTA 溶接は中空タングステン電極を使用して電極先端からのみ極微量のアーク作動ガスを流出させる溶接法であ

る. 火星表面付近の大気温度約 -60°C と重力加速度 3.73 m/s^2 は模擬していないが, 炭酸ガス 99.5%, 圧力 700 Pa の室温の擬似火星大気中でステンレス鋼の GTA および GHTA 溶接実験によってアーク放電状況, 溶融状況を調査した. その結果, GTA 溶接と GHTA 溶接が火星大気中でも適用できる可能性を示すことができたので報告する.

2. 実 験 方 法

2.1 実験装置

擬似火星大気中での溶接実験に使用した実験装置を Fig. 1 (a), (b) に示す. Fig. 1 (a) は実験装置全体図である. 実験装置は真空容器, 油回転ポンプ, 拡散ポンプおよびインバータ制御 GTA 溶接機で構成される. Fig. 1 (b) は真空容器内部に設置された溶接トーチ, 移動台車と台車上に固定された被溶接材 (供試材) である. GTA 溶接実験では, Fig. 1 (b) に示す従来の GTA 溶接トーチ (Fig. 2 と同じ溶接トーチ・ノズル) に頂角 60° , 直径 4 mm の 2% 酸化ランタン入り中実タングステン電極を装着し, 所定流量のアルゴンをシールドガスとして溶接した. 実験で採用した溶接電流 60~180 A に対する適正な電極直径よりも太い電極を採用した理由は, 中空タングステン電極を使用する GHTA 溶接の実験結果と比較するためである. Fig. 2 は, GHTA 溶接に使用した GHTA 溶接トーチの構造模式図である. 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を使用して, 中空タングステン電極の先端からのみアーク作動ガスとして極微量のアルゴンを流出させて溶接した.

*受付日	平成26年2月28日	受理日	平成26年5月20日
	平成25年3月第18回四国地区材料関連学協会支部・研究会連合講演会で発表		
**正 員	香川高等専門学校 Member, Kagawa National College of Technology		
***	香川高等専門学校 Kagawa National College of Technology		
****正 員	香川県産業技術センター Member, Kagawa Prefectural Industrial Technology Center		

GHTA 溶接では主にアーク作動ガスの流れる電極内径表面から電子が放出されるので先端部を平坦に成形した。ノズル（プロテクタ）には、先細ノズル（先端部の外径 12 mm、内径 6.5 mm）を使用した。全ての溶接実験では、電極高さ（アーク長） $L=3$ mm、ノズル高さ $H=6$ mm、溶接速度 $v=0.6$ cm/s とし、DCEN 極性によるビード置き溶接あるいはルート間隔ゼロの I 型開先突合せ溶接とした。

(a) Vacuum chamber

(b) Inside view of vacuum chamber

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 GHTA welding torch

2.2 供試材と実験方法

供試材の SUS304 鋼（板厚 3 mm、板幅 75 mm、長さ 150 mm）を移動台車上に固定し、電極高さ L が 3 mm になるように溶接トーチを鉛直に固定した後、真空容器内を 50 Pa まで排気した。その後、排気しながらガス導入バルブから純度約 99.5% の炭酸ガス（炭酸ガスアーク溶接用シールドガス）を導入し、ガス導入バルブと排気バルブの開度を調整して容器内圧力 P を約 700 Pa に安定させることで室温の擬似火星大気とした。

ビード置き溶接は供試材の板幅中央部表面に溶加ワイヤを供給しないで溶接を行った。溶接長は約 100 mm（溶接時間約 17 秒）とした。GTA 溶接では、シールドガス流量 Q_s は 0~167 ml/s（供給ゲージ圧力 0.15 MPa）の範囲で、溶接電流 I は 60~180 A の範囲で変化させた。また、GHTA 溶接では、アルゴン流量 Q_A を 1~2.5 ml/s の範囲、溶接電流 I は 60~180 A の範囲で変化させて溶接実験を行った。アーク放電と溶融状況は、ND フィルターで減光し、絞りを調整してデジタル・ビデオカメラで録画・観察した。

3. 実験結果と考察

3.1 GTA 溶接実験

3.1.1 GTA 放電状況

擬似火星大気において、溶接電流 $I=140$ A、シールドガス流量 $Q_s=0\sim167$ ml/s の範囲で GTA 溶接によるビード置き溶

Table 1 Effect of shielding gas flow rate on arc appearance

(a) $Q_s = 0$ ml/s	(b) $Q_s = 16.7$ ml/s
(c) $Q_s = 33.3$ ml/s	(d) $Q_s = 50.0$ ml/s
(e) $Q_s = 83.3$ ml/s	(f) $Q_s = 117$ ml/s
	Welding current $I = 140$ A Welding speed $v = 0.6$ cm/s Arc length $L = 3$ mm
(g) $Q_s = 167$ ml/s	Welding conditions

接を行った。Table 1 は溶接開始から約10秒後のアーク放電状況である。以後は、シールドガスを 사용하지 ない GTA 溶接を TA (Tungsten Arc) 溶接と記述する。真空中で TA 溶接を試みてもアークは発生しないが、擬似火星大気では Table 1 (a)~(g) のようにシールドガスの有無や流量に関係なく TA 溶接, GTA 溶接ともにアーク放電の発生と母材の溶融が確認できた。TA 溶接のアーク放電は, Table 1 (a) のようにアーク全体が薄青色に発光する碗形であった。母材が溶融しない (金属蒸気がほとんど発生しない) 小電流でも, アーク放電の発生と維持が可能なることも確認した。これらの結果から, 電極から放出される電子とその衝突で擬似火星大気成分の炭酸ガスの一部が解離, 電離してできた一酸化炭素, 酸素イオンなどの荷電粒子によってアークの発生と維持が可能になったと考えられる。地球大気中の TA 溶接ほど激しくないが, 溶接中に電極先端が溶融, 蒸発する現象が確認できた。一方, GTA 溶接では地球大気中の GTA 溶接と同じようにシールドガスのアルゴンがアーク放電形成に大きな役割を果たしている。少量のシールドガス $Q_s=16.7$ ml/s を流出させた場合は, Table 1 (b) のように電極先端付近に白く見える領域とその中心部に青く発光するプラズマの密度が高いと思われる領域が観察できた。シールドガス流量 $Q_s=33.3$ ml/s 以下では, Table 1 (a), (b), (c) のように, 碗形のアーク放電形状になった。TA 溶接やシールドガス流量の少ない GTA 溶接のアーク形状は, 周囲圧力が低いためにアークが膨張しやすく, シールドガスの緊縮効果 (熱的ピンチ効果) も少ないために半球状に近い碗形になったと推察される。Table 1 (d) のシールドガス流量 $Q_s=50$ ml/s あたりを境にして, シールドガス流量 $Q_s=83.3$ ml/s 以上では, Table 1 (e), (f), (g) のようにほぼ同じ大きさのベル形のアーク放電形状に移行した。シールドガス流量の増加で, アーク放電周囲の圧力が高くなり, アークプラズマの密度が上昇するとともに母材に衝突したプラズマ気流が横方向に拡がり, シールドガスによる緊縮効果でベル形のアーク形状に移行したと思われる。

Table 2 (a)~(g) は約17秒間のビード置き溶接を行った後の中実タングステン電極先端部の外観である。TA 溶接の電極先端部は, Table 2 (a) のように溶融・損耗して針状になり, 傘状のリム^{7, 8)}と呼ばれる付着物が確認できた。電極は電子の放出で冷却されるが, イオン衝突やアークプラズマからの放射と熱伝達で加熱される。周囲圧力が 10,000 Pa でも 2550 K になるとの報告⁷⁾や地球大気中での GTA 溶接の電極温度が約 3,500 K と測定された報告⁹⁾もある。アーク放電に巻き込まれた炭酸ガスの一部が解離して, 原子状酸素や衝突電離で酸素イオンが発生する。原子状酸素や酸素イオンが高温に加熱された電極のタングステンと反応して低融点の酸化タングステン (例えば⁸⁾, W_2O_5 の溶融温度は 1,073 K, 蒸発温度は 1,803 K) になり, タングステン電極が溶融, 蒸発して損耗し, また蒸着して傘状のリムが付着したと推察される。また, シールドガス流量 $Q_s=50$ ml/s 以下

の GTA 溶接では, 電極先端部が Table 2 (b), (c), (d) のように鈍化し, 黒褐色のスマットのような付着物が確認できた。シールドガス流量が $Q_s=83.3$ ml/s 以上になると Table 2 (e), (f), (g) のように多少の変色はあるが, 電極先端部の損耗は, ほとんど確認でなかった。

溶接電流 140 A の TA 溶接とシールドガス流量を変化させた GTA 溶接のアーク電圧を Fig. 3 に示した。TA 溶接では, 約 20 V のアーク電圧を示したが, シールドガス流量 $Q_s=16.7$ ml/s~167 ml/s の範囲では, アーク電圧はガス流量に関係なく約 16 V の一定値を示した。実験範囲内でシールドガス流量の変化ではアーク電圧に影響を与えるほどのプラズマ密度の変化が起きていないことが推察される。

Table 2 Relationship between shielding gas flow rate and electrode damage

(a) $Q_s = 0$ ml/s	(b) $Q_s = 16.7$ ml/s

(c) $Q_s = 33.3$ ml/s	(d) $Q_s = 50.0$ ml/s

(e) $Q_s = 83.3$ ml/s	(f) $Q_s = 117$ ml/s
Welding current $I = 140$ A Welding speed $v = 0.6$ cm/s Arc length $L = 3$ mm
(g) $Q_s = 167$ ml/s	Welding conditions

Fig. 3 Relationship between shielding gas flow rate and arc voltage

Fig. 4 は、擬似火星大気、地球大気でのシールドガス流量 $Q_s=167 \text{ ml/s}$ の GTA 溶接と擬似火星大気での TA 溶接の溶接電流-アーク電圧特性である。溶接電流 $I=60\sim 180 \text{ A}$ の GTA 溶接では、擬似火星大気、地球大気ともに正特性を示し、擬似火星大気でのアーク電圧は、地球大気よりも約 2 V 高い値であった。擬似火星大気は、地球大気と比べて周囲圧力が低いためにアークプラズマの密度が低いことなどの原因でアーク電圧が高くなったと思われる。一方、擬似火星大気の TA 溶接では、アーク電圧は GTA 溶接に比べて約 $2\sim 8 \text{ V}$ 高く、溶接電流が増加するとアーク電圧が低下する負特性を示した。周囲圧力の低い擬似火星大気の TA 溶接では、炭酸ガスの一部が解離、電離したプラズマの密度の

Fig. 4 Welding current - arc voltage characteristics of TA and GTA welding

Table 3 Relationship between shielding gas flow rate and weld bead appearance

(a) $Q_s = 0 \text{ ml/s}$	(b) $Q_s = 16.7 \text{ ml/s}$

(c) $Q_s = 33.3 \text{ ml/s}$	(d) $Q_s = 50 \text{ ml/s}$

(e) $Q_s = 83.3 \text{ ml/s}$	(f) $Q_s = 117 \text{ ml/s}$
Welding current $I = 140 \text{ A}$ Welding speed $v = 0.6 \text{ cm/s}$ Arc length $L = 3 \text{ mm}$
(g) $Q_s = 167 \text{ ml/s}$	Welding conditions

低い環境のためにアーク電圧が高くなる。負特性を示した理由は明かでないが、溶接電流が高くなると金属蒸気が豊富になってアーク放電が容易になることが理由の一つに挙げられる。

3.1.2 GTA 溶融状況

TA 溶接と GTA 溶接の溶接ビード外観を Table 3 (a)~(g) に示した。溶加ワイヤ供給のないビード置き溶接のために、多少のアンダーフィルが発生するが、アンダーカット、溶接割れ、ブローホールなどの溶接欠陥は確認できなかった。しかし、全ての溶接金属とその周辺の高温に加熱された母材表面は黒青色、灰黒色、茶褐色あるいは薄青色に変色した。アークに巻き込まれた炭酸ガスの一部が解離、電離してできた一酸化炭素、原子状酸素や酸素イオンで酸化されて変色したと推察される。特に、Table 3 (a)~(c) の TA 溶接やシールドガス流量の少ない GTA 溶接では、酸化による変色に加えて顕著なスマットの付着が認められた。X 線回折法を用いてスマット成分の同定を行ったところ、母材の構成元素のほかに各種の酸化タングステン¹⁰⁾ (WO_2 : 褐色, WO_3 : 薄黄色, W_2O_5 : 青色など) のピークが観察された。Table 3 (a)~(g) の溶接金属と母材表面の微妙な色調の変化は、酸化の度合いとスマット中の各種酸化タングステンの割合が微妙に変化するためと考えられる。シールドガス流量が増加すると酸化・炭化が多少改善されるが、シールドガス流量 $Q_s=167 \text{ ml/s}$ でも Table 3 (g) のように溶接金属の酸化を十分に防止できない。低圧下のために溶接金属、母材の冷却速度の低下による溶接トーチ後方での酸化なども原因と考えられる。今後は、ガスレンズ採用、シールドガス増量などシールド効果の改善や溶融池に

Table 4 Relationship between shielding gas flow rate and weld metal size

(a) $Q_s = 0 \text{ ml/s}$	(b) $Q_s = 16.7 \text{ ml/s}$

(c) $Q_s = 33.3 \text{ ml/s}$	(d) $Q_s = 50.0 \text{ ml/s}$

(e) $Q_s = 83.3 \text{ ml/s}$	(f) $Q_s = 117 \text{ ml/s}$
Welding current $I = 140 \text{ A}$ Welding speed $v = 0.6 \text{ cm/s}$ Arc length $L = 3 \text{ mm}$
(g) $Q_s = 167 \text{ ml/s}$	Welding Condition

脱酸素元素のマンガン、ケイ素を多く含む溶加ワイヤ供給するなどの検討が期待される。

TA 溶接と GTA 溶接のシールドガス流量が溶接金属の寸法・形状に及ぼす影響を調査した結果を Table 4 (a)~(g) に示した。TA 溶接の溶接金属は GTA 溶接よりも大きく、裏面まで溶融した。TA 溶接はシールドガスが無いために溶接金属が熱伝達で冷やされ難いこと、アーク電圧が GTA 溶接より約 4 V 高いので溶接入熱量が大きいたことが理由に挙げられる。GTA 溶接では、シールドガス流量の増加とともにその冷却効果によって溶融断面積と溶込み深さが減少した。

Fig. 5 はシールドガス流量と溶込み深さの関係である。TA 溶接では裏面にまで溶融したが、GTA 溶接の溶込み深さはシールドガス流量に反比例するように減少した。ガス流量が少ないときは、ガス流量の僅かな増加で、溶込み深さは急激に低下するが、約 50 ml/s を越えると溶込み深さの減少割合が少なくなる現象を示した。その原因として、シールドガス流量の増加に伴うエネルギー密度の低下や熱伝達による冷却効果の変化などが考えられる。

Fig. 6 は擬火星大気の TA 溶接と GTA 溶接および地球大気の GTA 溶接による溶込み深さと溶接電流の関係であ

る。GTA 溶接のシールドガス流量は、タングステン電極の損耗が少ない $Q_S=83.3$ ml/s とした。同じ溶接電流値の溶込み深さは、擬火星大気の GTA 溶接、地球大気の GTA 溶接、擬火星大気の TA 溶接の順に大きくなった。また、母材裏面が溶融するまでは溶込み深さは溶接電流にほぼ比例して増加した。溶接電流の変化に比べてアーク電圧の変化が少ないためである。TA 溶接の溶込みが深い理由は、先に記述したが熱伝達による冷却がなく、アーク電圧が高いため溶接入熱量が大きくなるためである。GTA 溶接の擬火星大気の溶込み深さが地球大気の溶込み深さよりも小さくなったのは、擬火星大気圧力が低いために、プラズマ密度やアーク温度が低くなり、熱効率が低下したことなどが理由に挙げられる。

3.2 GHTA 溶接実験

3.2.1 GHTA 放電状況

擬火星大気中で中空タングステン電極の先端からのみ極微量のアーク作動ガスを流出させる GHTA 溶接でビード置き溶接を行った。アルゴン流量 Q_A は 1~2.5 ml/s、溶接電流 I は 60~180 A の範囲で変化させた。Fig. 7 はアルゴン流量 $Q_A=1.5$ ml/s、溶接電流 $I=180$ A のアーク放電状況で、擬

Fig. 5 Effect of shielding gas flow rate on penetration depth

Fig. 7 Typical arc appearance by GHTA welding ($I=180$ A, $Q_A=1.5$ ml/s, $L=3$ mm)

Fig. 6 Effect of welding current on penetration depth in TA and GTA welding

Fig. 8 Welding current - arc voltage characteristics of GTA and GHTA welding

Table 5 Relationship between welding current and weld bead appearance ($Q_A = 1.5$ ml/s, $v = 0.6$ cm/s, $L = 3$ mm)

Welding current, I (A)			
60	100	140	180

似火星大気中での GHTA 溶接の典型的なアーク放電状況である。実験条件範囲のアルゴン流量、溶接電流では、全て Fig. 7 と同じ半球状のアーク放電形状であった。電極先端から流出する極微量のアルゴンで作られる GHTA 溶接のアークプラズマは、半球状のアーク放電形状を示した。周囲圧力が低く、シールドガスの緊縮効果が小さいために、膨張して半球状になったと推察される。

Fig. 8 は、アルゴン流量 $Q_A = 1.5$ ml/s の GHTA 溶接の溶接電流－アーク電圧特性である。比較のために、シールドガス流量 $Q_S = 167$ ml/s の擬似火星大気と地球大気での GTA 溶接の溶接電流－アーク電圧特性も示した。GHTA 溶接のアーク作動ガス流量は、GTA 溶接のシールドガス流量の約百分の一であるにも拘わらず、GHTA 溶接のアーク電圧は GTA 溶接より 1～3 V 程度高い値に抑えられている。中空タングステン電極先端から流出させるアルゴンが擬似火星大気でのアーク放電の発生に効果的な役割を果たしているためと考えられる。溶接後の中空タングステン電極の損耗状況を調べたところ、アルゴン噴出口はほとんど損傷を受けていないが、電極先端外周縁部が僅かながら丸みを帯びる損傷が確認できた。

Table 5 は、アルゴン流量 $Q_A = 1.5$ ml/s で溶接電流を変化させて GHTA 溶接を行った溶接ビード外観である。Table 3 の TA 溶接、GTA 溶接と同様に溶接金属表面とその近傍の高温に加熱された母材表面は、黒褐色、茶褐色に変色した。アークプラズマに巻き込まれた擬似火星大気成分の炭酸ガスの一部が一酸化炭素、原子状酸素に解離し、原子状酸素や衝突電離で生じた酸素イオンで酸化されたことが原因と思われる。しかし、溶接ビード表面と溶接部断面マクロ組織からは、溶接継手強度に影響を与えるような溶接欠陥は確認できなかった。

3.2.2 GHTA 溶融状況と突合せ溶接継手強度

擬似火星大気中での GHTA 溶接（アルゴン流量 $Q_A = 1.5$ ml/s）の溶込み深さと溶接電流の関係で調べた結果が Fig. 9 である。比較のために、擬似火星大気と地球大気での GTA 溶接（シールドガス流量 $Q_S = 83.3$ ml/s）の溶込み深さと溶接電流の関係も同図に示した。GHTA 溶接の溶込み深さは、GTA 溶接よりも大きくなった。GHTA 溶接のアーク電圧は Fig. 8 のように GTA 溶接のアーク電圧より 1～3 V 高い程度あるが、アーク作動ガス流量が GTA 溶接のシールドガス流量の約百分の一と少ないために熱伝達による溶融金属の冷却作

Fig. 9 Effect of welding current on penetration depth in GHTA and GTA welding **Fig. 10** Tensile test specimen welded using GHTA welding in simulated Mars atmosphere ($I = 120$ A, $Q_A = 1.5$ ml/s, $v = 0.6$ cm/s, $L = 3$ mm)

用が小さいためである。

Fig. 9 の結果を参考にして、擬似火星大気中で GHTA 溶接によるルート間隔ゼロの I 型開先突合せ溶接継手を製作した。溶接電流 $I = 120$ A、アルゴン流量 $Q_A = 1.5$ ml/s で、表裏面各 1 パスのメルトラン溶接を行った。製作した溶接継手は、溶接金属とその周辺が酸化して黒褐色、茶褐色に変色したが、溶接割れやブルーホールなどの溶接欠陥は認められなかった。溶接継手部の硬度は、母材原質部とほぼ同じ硬度であった。6 本の引張試験片を採取して引張試験を行った。引張試験片は全て Fig. 10 のように母材原質部で破断した。引張強さと破断ひずみを正規確率紙上にプロットした結果、引張強さと破断ひずみともに正規分布で近似できることを確認した。引張強さと破断ひずみの平均値は、778 N/mm²（変動係数 2.29%）と 60.8%（変動係数 10.1%）

で、母材 SUS304 とほぼ同じ値を示した。これらの結果から、溶接金属の酸化や金属組織的な問題が残るが、擬似火星大気で GHTA 溶接によって十分な継手強度を有する継手が得られることが確認できた。GTA 溶接と同様に、将来的にはマンガン、珪素などの脱酸剤を多く含む溶加ワイヤや供給などの検討が期待される。

4. 結 論

炭酸ガス 99.5%, 700 Pa の擬似火星大気中で GTA 溶接および GHTA 溶接によるステンレス鋼 SUS304 のビード置き溶接でアーク放電と溶融状況を調査した。また, GHTA 溶接でルート間隔ゼロの I 型開先突合せ溶接継手を製作して, 次のことを明らかにした。

- 1) TA 溶接, GTA 溶接ともにアーク放電の発生, 維持と母材の溶融を確認した. TA 溶接やシールドガス流量が少ない GTA 溶接は, 梔形のアーク放電形状を示し, シールドガス流量が多くなるとベル形のアーク放電形状に移行する.
- 2) TA 溶接やシールドガス流量の少ない GTA 溶接では, 中実タングステン電極が溶融, 蒸発して損耗するが, シールドガス流量 83.3 ml/s 以上では, 電極先端部はほとんど損耗しない.
- 3) GTA 溶接の溶接電流-アーク電圧特性は, 擬似火星大気, 地球大気ともに溶接電流が高くなるとアーク電圧が上昇する正特性を示し, 擬似火星大気のアーク電圧は, 地球大気より少し高い. 擬似火星大気では GTA 溶接に比べて TA 溶接のアーク電圧は約 2~8V 高く, 負特性を示す.
- 4) TA 溶接と GTA 溶接の溶接金属には, アンダーカット, 溶接割れ, ブローホールなどの溶接欠陥は確認できない. しかし, 溶接金属とその周辺の母材表面は, 酸化と酸化タングステンの付着によって変色する.
- 5) TA 溶接の溶込み深さは GTA 溶接よりも大きく, GTA 溶接の溶込み深さはシールドガス流量に反比例して減少する.
- 6) 同じ溶接電流値の溶込み深さは, 擬似火星大気 of GTA 溶接, 地球大気 of GTA 溶接, 擬似火星大気 of TA 溶接の順に大きくなる. 母材裏面が溶融するまでは, 溶込み深さは溶接電流にほぼ比例して増加する.

- 7) 極微量のアーカ作動ガスを電極先端から流出させる GHTA 溶接は、半球状のアーカ放電形状を示し、GHTA 溶接のアーカ電圧は GTA 溶接より少し高い値に抑えられる。
- 8) GHTA 溶接の溶込み深さは、アーカ作動ガス流量が少ないために熱伝達による冷却が少ないので GTA 溶接よりも大きい。GHTA 溶接でも溶接金属とその近傍の母材表面は酸化で変色する。
- 9) GHTA 溶接で製作したルート間隔ゼロの I 型開先突合せ溶接継手は、母材と同等な引張強さ、破断ひずみを示す。

参考文献

- 1) ニュートンの編集部：火星有人探査へ，Newton (Separate Volume), p.90-127, Newton Press (2013) (in Japanese)
- 2) 矢沢サイエンスオフィス編集：最新宇宙技術論，学習研究社 (1989), p.84-90 など (in Japanese)
- 3) Y. Suita, Y. Tsukuda, T. Takagi, T. Ohji, K. Masubuchi: Study of gas tungsten arc welding in space (1st Report), Welding International, Vol.8 (1994), No.4, pp.269-273
- 4) Y. Suita, Y. Tsukuda, N. Terajima et al.: Gas hollow tungsten arc welding experiments in aircraft-borne simulated space environment, Welding International, Vol.15 (2001), No.2, pp.100-107
- 5) Y. Suita, H. Sogawa, M. Oohara et al.: Butt Welding Experiment on Aluminum Pipe using a Space Gas Hollow Tungsten Arc Welding Process with a Filler Wire Feed in a Simulated Space Environment, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.55, No.6, pp.349-355, Nov., 2012
- 6) Y. SUITA, K. MASUBUCHI et al.: Development of Arc Welding Process Applied to Construction and repair of Space Vehicles and Structures in Space. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.61 (1995), No.585, C, pp.2134-2140 (in Japanese)
- 7) F. Matsuda, M. Ushio, H. Fujii and A. A. Sadec: Consumption and "Rim" Formation of Gas Tungsten Arc Cathode - Study on GTA Cathode (2) - Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.6 (1988), No.2, pp.205-209 (in Japanese)
- 8) Y. OGAWA: Imaging Analysis of Welding Phenomena, Journal of High Temperature Society, Vol.37 (2011), No.3, pp.99-107 (in Japanese)
- 9) TANAKA M., TSUJIMURA Y.: Visualization of metal vapor in TIG welding, - Visualization of phenomena of welding arc by imaging spectroscopy -, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.30 (2012), No.2, pp.164-170 (in Japanese)
- 10) R. MIYAZAKI, K. HOSONO et al.: Growth of Tungsten Oxide Whisker and its Characterization, Proceedings of The School of Engineering of Tokai University, Vol.48 (2008), pp.55-62 (in Japanese)