宇宙溶接技術の研究開発

Development of Space Welding Technology

吹田 義一*

Yoshikazu SUITA

Key Words: Welding in Space, In-Space Welding, Space GHTA Welding, Space DL Welding, Weld Repair

1. はじめに

本誌 21 巻 2 号 (1995) 掲載の「宇宙への挑戦－宇宙アーク溶接法の開発－」で、1995 年頃までの米国、旧ソ連（ウクライナ）および我が国の宇宙溶接技術の状況と宇宙 GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) 溶接技術を紹介した。本稿では、その後の宇宙溶接技術の動向と筆者らが開発をしている宇宙 GHTA 溶接技術と宇宙 DL (Diode Laser) 溶接技術の研究開発について紹介する。

2. 宇宙溶接技術の動向

旧ソ連は、1984 年にサリユート 7 号の船外で世界初の手持ち多目的電子ビーム・ツール VHT (Versatile Hand Tool) を使用した溶接・溶射実験を成功させ、1986 年にはミール船外でヒンジを電子ビーム溶接で溶融・凝固させて長さ 12 m のトラス桁を製作した。このような実績から、旧ソ連は宇宙溶接技術¹⁻⁴⁾をほぼ確立したと推察している。その後、宇宙溶接技術はパトン電気溶接研究所のあるウクライナに引き継がれている。一方、NASA は 10 年以上に亘って長期運用される国際宇宙ステーション ISS (International Space Station) の修理に宇宙溶接技術が必要になることから、1997 年にパトン電気溶接研究所が開発した電子ビーム溶接装置「ユニバーサル」を借り、スペース・シャトルのカーゴベイで宇宙溶接実験を行う計画をした。しかし、宇宙飛行士の安全性確保やシャトル・スケジュールの問題で中止^{5,6)}にした。その後、NASA は詳細不明であるが、EPL (Electric Propulsion Laboratory) 社が開発した高真空環境でも溶接可能なアーク溶接ヘッド⁶⁾の評価試験を行っている。

ロシアは、NASA から送り返された「ユニバーサル」を宇宙ステーション・ミールに打ち上げて船外活動 (EVA: Extra-Vehicular Activities) による宇宙溶接実験を計画したようである。しかし、ミールの老朽化と維持費の確保が困難になり、ミールが廃棄されて宇宙溶接実験は行われなかつ

た。そのために、宇宙溶接技術開発が行き詰まった状況にある。

我が国では、野城らが微小重力環境で GTA 溶接⁷⁾、模擬宇宙環境で電子ビーム溶接実験⁸⁾を行い、重力加速度が溶接現象に及ぼす影響を調査している。正箱らは HCA のアーク柱および入熱特性を調査⁹⁾している。著者らは真空溶接装置を搭載した航空機の放物飛行で得られる模擬宇宙環境において 2000 年に SUS304 ステンレス鋼管のメルトラン突合せ溶接実験¹⁰⁾を成功させた。また、2008 年にはアルミニウム管の溶加ワイヤ供給突合せ溶接実験¹¹⁾を成功させて宇宙 GHTA 溶接技術をほぼ確立した。現在は、日本の宇宙実験施設 ISS「きぼう」の船外実験プラットフォームや ISS に物資を搬入した後の HTV での宇宙溶接実験を提案し、宇宙 GHTA 溶接技術の実証実験の機会を待っている。また、重要技術を開発する場合は、異なる原理の技術を平行して開発する必要があるとの考えと近年の半導体レーザーの高出力化に注目して 2002 年に宇宙 DL (Diode Laser) 溶接法を提案¹²⁾して研究開発を実施している。宇宙 DL 溶接技術については、光学部品への金属蒸着防止技術¹³⁾を確立して模擬宇宙環境での溶接実験の準備をしている。

一方、NASA では 2000 年頃から活発な動き¹⁴⁾が見られる。MSFC (Marshall Space Flight Center) では、シャトルの外部燃料タンクへの摩擦攪拌接合 (FSW: Friction Stir Welding) の適用に続き、手持ち高速 FSW (HS-FSW) ユニットやロボット支援手持ち高速 FSW ユニットを開発している。そして、回転ツールを必要としない超音波攪拌接合 (USW: Ultrasonic Stir Welding) ユニットの開発も行っている。また、厚板の宇宙溶接を対象にした熱攪拌接合 (TSW: Thermal Stir Welding) の開発も実施している。この接合法は加熱、攪拌および鍛造の過程を独立に制御できるのが特徴である。筆者は、これらの攪拌接合は宇宙汚染防止に有効な接合法になると考えている。若い技術者・研究者に今後の技術開発を期待したい。

* 香川高等専門学校 創造工学専攻 (〒761-8058 香川県高松市勅使町 355)

Kagawa National College of Technology Advanced Course in Industrial and Systems Engineering
(355 Chokushi-cho, Takamatsu, Kagawa 761-8058 Japan)

Fig.1 Space GHTA welding experiment system under ultrahigh-vacuum condition.

3. 宇宙 GHTA 溶接技術の開発

3.1 宇宙 GHTA 溶接技術の開発経緯

1992年に宇宙 GHTA 溶接法を発表^{15, 16)}した後、地上真空容器内と航空機を使用した模擬宇宙環境での溶接実験を実施して、以下に述べる技術開発を行った。まず、溶接起動直後に発生する過渡アーク放電によるコレット・ボディー溶損の課題は、酸化トリウム入り中空タングステン電極に変えて電子放出能の優れた酸化ランタン入り中空タングステン電極を採用することで解決した。そして、真空環境下で SUS304 ステンレス鋼のメルトラン突合せ溶接、溶加ワイヤ供給突合せ溶接実験によって溶接欠陥のない十分な継手強度を有する突合せ溶接継手を製作できることを実証^{17, 18)}した。

次に、航空機実験や ISS「きぼう」船外実験プラットフォームでの宇宙溶接実験に備えて、ISS 軌道圧力での溶接実験で高周波高電圧アーク起動¹⁹⁾、直流高電圧アーク起動²⁰⁾およびタッチスタート方式のアーク起動技術²¹⁾が適用できることを実証した。1997年から3年間、宇宙開発事業団 NASDA（現在の宇宙航空研究開発機構 JAXA）の支援を受けて、航空機 MU-300 を使用して模擬宇宙環境で SUS304 ステンレス鋼管のメルトラン突合せ溶接実験¹⁰⁾に成功した。

その後、アルミニウム合金の溶接に必要な不可欠な溶接中に母材表面の酸化膜を除去する技術の研究開発を行った。その酸化膜除去技術を適用してアルミニウム合金の溶加ワイヤ供給溶接による突合せ溶接継手を製作²²⁾した。そして、優れた溶接外観と強度を持つ突合せ溶接継手を製作できることを実証した。

地上での最終段階の実験として、宇宙環境でアルミニウム合金の溶接に宇宙 GHTA 溶接技術が適用できることを検証するために、宇宙航空研究開発機構 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) の支援を受けて 2005、06 年に航空機 G-II を使用した模擬宇宙環境でアルミニウム管の

Fig.2 GHTA starting phenomenon in high-vacuum.

突合せ溶接実験^{11, 23)}を成功させた。以下に、地上真空容器内の実験と航空機を使用した模擬宇宙環境での溶接実験について紹介する。

3.2 地上真空容器内での溶接実験

3.2.1 ISS 軌道圧力でのアーク起動と溶接実験

これまでの溶接実験は地上真空容器内圧力 10^{-2} Pa で実施した。そのために、ISS 軌道圧力 10^{-5} Pa の高真空中で宇宙 GHTA 溶接法が適用できるかどうか不安があった。そこで、Ar 排気速度 $8.4 \text{ m}^3/\text{s}$ のクライオポンプを採用した Fig.1 の高真空環境溶接実験システムを製作して溶接起動実験を実施した。高周波高電圧、直流高電圧およびタッチスタートの起動方式を検討したが、どの起動方式でも 10^{-5} Pa でアーク起動と溶接が可能であった。しかし、高周波高電圧方式には電磁ノイズ障害、直流高電圧方式にはグロー放電に移

行する問題がある。また、同時に両方式は高電圧を使用するので安全上にも問題がある。それに対して、母材に接触させた中空タングステン電極を引き上げて溶接を開始するタッチスタート方式は、それらの課題を解決でき、しかも起動から約 10 ms 後に設定溶接電流に到達する安定したアーク溶接起動が可能になる。**Fig.2** は母材に A2014-T6 を用い、**Fig.1** の溶接実験システムを使用した高真空 10^{-5} Pa でのタッチスタート方式のアーク起動状況²¹⁾である。溶接電流 100 A、Ar ガス流量 1.67 ml/s、電極間隔 3 mm で、起動後の放電状況、電流、電圧および圧力の時間変化を示している。タッチスタート方式の溶接起動では、直流高電圧方式のようにグロー放電に移行する現象はなく、全てアーク放電に移行する安定したアーク起動が可能である。また、電極引き上げ条件、環境圧力、母材の種類などの影響を受け難く、電極の損耗もほとんどなく、数 10 ms で設定した溶接電流 100 A に到達できるなど宇宙溶接に適したアーク

起動方式である。宇宙 GHTA 溶接法は、絶縁破壊のために中空タングステン電極先端から微量の Ar ガスを流出させるので、アーク起動と同時に真空容器内の圧力が急上昇するが、約 80 ms の期間は ISS 軌道圧力 10^{-5} Pa の範囲にあり、その期間でもアーク放電が維持できることを検証²¹⁾できた。

3.2.2 酸化膜除去技術

2000 系などの熱処理型アルミニウム合金表面には、人工時効で発生した厚さ 70 ~ 200 nm の酸化皮膜 Al_2O_3 が形成されている。このような材料を DCEN（直流電極マイナス）極性で溶接すると高融点の酸化膜が溶融せずに、酸化膜下の母材のみが溶融する現象^{24, 25)}が発生する。そのために、溶融金属の流動性が悪く、メルトラン突合せ溶接ではのど厚不足の溶接金属になる。また、溶加ワイヤ供給溶接では、溶融池に溶加ワイヤを供給するのが難しくなり、融合不良の原因になる。従って、溶接中に酸化膜を除去する必要がある。種々の酸化膜除去技術²⁶⁾があるが、クリーニング作用を利用するために交流溶接電源を使用すると電極プラス期間にアークが消失する現象²⁵⁾が発生して、酸化膜を除去できない。また、再点弧電圧を高くすると陰極点が母材表面を高速移動する現象が発生して溶接が困難になる。宇宙 GHTA 溶接法は、GTA 溶接を基礎にした溶接技術であるので交流溶接電源を使用したクリーニング作用を利用する工夫が必要である。酸化膜除去の課題は、パルス溶接電源を使用する DCEN 極性の溶接で解決できた。ベース電流からパルス電流に移行するときのアーク衝撃圧力（短時間でのアークプラズマ気流の運動量の変化に起因する圧力）で酸化膜を機械的に粉碎除去する技術である。**Fig.3** は母材表面に溶加ワイヤを置いて、それを横切るようにメルトラン溶接した場合の溶接金属外観である。**Fig.3(a)** の直流定電流を使用した場合は、酸化膜を除去できないので溶加ワイヤと溶接金属の融合状況が悪い。一方、**Fig.3(b)** のように直流パルス電流を使用した場合は、溶加ワイヤと溶接金属が融合しており、溶加ワイヤ供給溶接が可能になることがわかる。この直流パルス電流による酸化膜除去技術は、低圧環

(a) DC-constant current

(b) DC-pulsed current

Fig.3 Bead appearance by space GHTA welding process in vacuum.

Fig.4 Experiment system for space GHTA welding process under simulated space environment.

Table 1 Effects of gravity on arc discharge and weld bead shape.

(a) 10^{-2} G	(b) 1 G	(c) 2 G

Fig.5 Bead appearance of butt welded stainless steel pipe by space GHTA welding process under simulated space environment.

境で有効であって、大気圧環境では適用できない。

3.3 模擬宇宙環境での溶接実験

3.3.1 SUS304 鋼管のメルトラン溶接実験

小型ジェット機 MU-300 の放物飛行で得られる微小重力環境を利用した模擬宇宙環境で宇宙 GHTA 溶接実験を行うために **Fig.4** に示す航空機搭載型模擬宇宙環境溶接実験システムを製作した。MU-300 の供給電力では溶接電力が不足するのでバッテリー溶接電源を採用した。アーク起動方式は直流高電圧方式とした。**Fig.4** のように真空容器内の下部に SUS304 ステンレス鋼管 (外径 30 mm、肉厚 2 mm) を水平に設置し、鋼管を回転させながら鋼管頂部で周方向に 20 s 間の模擬宇宙環境で、メルトラン溶接でビード溶接と突合せ溶接実験を行った。溶接条件は、DCEN 極性で直流電流 90 A、溶接速度 (鋼管表面の周速度) 2.4 mm/s、Ar ガス流量 1.33 ml/s である。先端を 60° 円錐台状に成形した外径 4 mm、内径 1.8 mm の 2 % 酸化ランタン入りタングステン電極を使用し、電極高さは 3 mm とした。

Table 1 は 10^{-2} G 微小重力、地上 1 G 重力および 2 G 過重力環境での溶接状況である。 10^{-2} G 微小重力、2 G 過重力環境の溶接は航空機の放物飛行で実現し、1 G 重力環境での溶接は駐機場で行った。電磁力の影響を大きく受けるアーク放電現象には、重力加速度の影響が現れないことを確認した。そのために、溶込み深さ、溶接ビード幅には重力加速度の影響があまり認められない。しかし、**Table 1** のよ

Fig.6 Tensile test specimen of stainless steel pipe welded using space GHTA welding process under simulated space environment.

Fig.7 Space GHTA welding aluminum pipe with wire feed under simulated space environment.

うに溶接金属形状には明らかに重力加速度の影響が認められ、重力加速度が大きいほど溶接金属が管中心方向に垂れ下がる現象が確認できた。

Fig.5 はメルトラン溶接で製作された SUS304 ステンレス鋼管突合せ溶接継手の外観写真である。模擬宇宙環境の溶接実験で溶接欠陥のない優れた溶接ビード外観の溶接継手が製作できた。また、透過 X 線検査でもブローホール、融合不良などの溶接欠陥は確認できなかった。その継手から引張試験片を採取して引張試験を行った結果を **Fig.6** に示す。破断部は溶接部外側の熱影響部であり、母材強度以上の継手強度が得られた。これらの実験結果は、模擬宇宙環境でも宇宙 GHTA 溶接のメルトラン溶接で優れた突合せ溶接継手が製作できることを立証¹⁰⁾している。

3.3.2 アルミニウム管の溶加ワイヤ供給溶接実験

直流パルス電流による酸化膜除去技術を確立し、地上真空容器内でアルミニウム合金の溶加ワイヤ供給溶接で溶接欠陥のない充分な継手強度を有する突合せ溶接継手の製作に成功²²⁾した。その宇宙 GHTA 溶接技術が宇宙空間で適用できることを確認するために 2005、06 年にジェット機 G-II を使用して A1070TD-H14 アルミニウム管 (直径 30 mm、肉厚 2 mm) の模擬宇宙溶接実験を行った。航空機から供給される電力を 200 V に昇圧して、市販の直流パルス GTA 溶接機 (タッチスタート方式) を使用した。溶接条件はパルス電流 140 A、ベース電流 20 A、パルス周波数 3.5 Hz、パルス幅 30 %、溶接速度 (アルミニウム管周速度) 7 mm/s

Fig.8 Bead appearance of butt welded aluminum pipe by space GHTA welding process under simulated space environment.

Fig.9 Tensile test specimen of aluminum pipe welded using space GHTA welding process under simulated space environment.

である。電極材質、電極高さおよび Ar ガス流量は SUS304 ステンレス鋼の溶接実験と同条件である。直径 1 mm の溶加ワイヤ A4043 を供給速度 12.5 mm/s で溶融池前縁に供給した。

Fig.7 は模擬宇宙環境で溶加ワイヤを供給しながら突合せ溶接を行っている状況である。適切な溶加ワイヤ供給条件であれば、パルス電流で酸化膜を除去しながらスパッタ発生のない溶接ができることが実証できた。しかし、ワイヤ供給速度が速すぎるとアークによって切断された溶加ワイヤが浮遊飛散する現象が発生することを確認した。従って、溶加ワイヤ供給溶接では供給条件を慎重に選定する必要がある。

Fig.8 は、模擬宇宙環境下で直流パルス電流を使用した溶加ワイヤ供給溶接で得られたアルミニウム管の突合せ溶接継手である。溶接欠陥のない優れた溶接ビード外観の溶接継手を製作できた。この突合せ溶接継手から引張試験片を採取して引張試験を行った。その結果は、Fig.9 に示すように母材熱影響部の軟化域で破断し、十分な継手強度が得られることを検証できた。以上の実験から、宇宙 GHTA 溶接技術が宇宙空間で適用できる可能性を実証¹¹⁾できた。今後は、NASA よりも先に ISS の日本宇宙実験施設「きぼう」船外実験プラットフォーム（曝露部）あるいは ISS に物資を搬入後の HTV 船内与圧部・非与圧部での宇宙溶接実験が望まれる。

4. 宇宙 DL 溶接技術の開発

1991 年に米国において航空機を使用した模擬宇宙環境下

で Nd-YAG レーザ溶接実験²⁷⁾が行われた。しかし、大型・重量で発振効率が低いなどの問題があった。宇宙空間でのレーザ溶接を実現するために、太陽光励起レーザ溶接の概念が提案されている。一方、1990 年代後半になると高出力半導体レーザが開発されるようになった。高変換効率でファイバー伝送が可能なこと、レーザ光は真空環境でも熱源として利用できることに着目して、著者は宇宙 DL (Diode Laser) 溶接技術を提案¹²⁾した。ISS などの与圧部にレーザ発振装置を設置して、レーザ光をファイバーで伝送して溶接を行うシステムである。その可能性を検証するために、地上真空容器内で各種の溶接実験を実施した。そして、宇宙 DL 溶接が宇宙で適用できる可能性が高いことを確認した。最近のファイバーレーザの開発動向やその特長を考えるとファイバーレーザ溶接の宇宙適用も有望である。若い技術者・研究者の活躍の場になると思う。

4.1 宇宙 DL 溶接システムの構成と特徴

宇宙で利用される宇宙 DL 溶接システムは、与圧部内に設置されるレーザ発振装置、レーザ光伝送システム、宇宙ロボットおよびレーザ溶接ヘッドで構成されると予想している。宇宙空間の溶接では金属蒸気による周辺機器（天体・地球観測機器、通信機器など）の汚染が問題になる。そのために、溶接作業は基本的には特設溶接作業場や宇宙格納庫で行われる。宇宙ステーション、宇宙輸送システムなどの予圧部内に設置したレーザ発振装置からレーザ光を宇宙ロボットが把持するレーザ溶接ヘッドに伝送して、自動溶接を行うシステムである。また、与圧部内の宇宙飛行士がモニターを見ながらマニピュレータ先端に取り付けたレーザ溶接ヘッドで溶接する作業も考えられる。デブリ衝突などの不測の事態に対しては、溶接技能を有する宇宙飛行士が船外活動 EVA としてレーザ溶接ヘッドを手を持って修理溶接を行う場合も想定される。

宇宙 DL 溶接システムは、次のような特徴を持っている。

- 1) 軽量・小型で発振効率が低い（将来的には、太陽光励起技術の適用も予想される）
- 2) ファイバー伝送が可能なために自由度が大きく、宇宙ロボットやマニピュレータとのシステム構築が容易
- 3) 与圧部内での溶接作業にも対応できる
- 4) スパッタが少なく安全であるが、アルミニウム合金の溶接では反射光対策が必要
- 5) シールドガスなど光学部品の金属蒸着防止対策が必要

本稿では環境圧力が溶接状況、溶接金属の寸法・形状に及ぼす影響と金属蒸着防止技術について述べる。

4.2 地上真空容器内での DL 溶接実験

大型クライオポンプ（Ar 換算排気速度 8.4 m³/s）を採用した ISS 軌道圧力 10⁻⁵ Pa を実現できる Fig.10 の高真空環境半導体レーザ溶接実験システムを使用した溶接実験結果を紹介する。DL 溶接装置は、混合波長（940、808）± 10 nm

Fig.10 High-vacuum DL welding experiment system.

Fig.11 Focusing unit.

で 2.5 kW 連続発振ダイレクト・ダイオードレーザである。DL ヘッドから約 2 kW のレーザ光をコア径 1.5 mm の光ファイバーで真空容器外側に取り付けた射出ユニットに伝送して、レーザ鉛直照射溶接とレーザ斜め照射溶接実験を実施した。レーザ鉛直照射溶接では ISS 軌道圧力でもレーザ溶接が可能であることを実証^{12, 28)}した。しかし、溶接中に発生する金属蒸気で光学部品に金属蒸着が起こり、透過率の低下と劣化・損傷が発生する問題を提示し、光学部品の金属蒸着防止技術の確立の必要性を述べた。

レーザ斜め照射溶接実験²⁸⁾では、Fig.11(a) のノズル無射出ユニットからレーザを斜め照射してレーザ導入窓と保護用石英板を通して、真空容器内の移動台車上の供試材 SUS304 ステンレス鋼をビード・オン・プレート溶接した。供試材に照射されたレーザパワー実測値は約 1.7 kW である。供試材表面でのレーザ光スポット形状は短径約 3 mm、長径約 4 mm の楕円である。真空容器内を 10^{-5} Pa まで排気した後、リークバルブから Ar ガスを導入して所定の環境圧力にして溶接した。板厚 3 mm の SUS304 ステンレス鋼を溶接速度 0.2 cm/s で後進溶接（レーザ照射方向と逆方向にメルトラン溶接）した。

Table 2 は、環境圧力を変化させて溶接した結果である。圧力 10^5 Pa と 10^3 Pa での溶接は、ほぼ同じで安定した溶接

Table 2 Effect of environment pressure on weld metal shape.

Pressure, P (Pa)				
10^5	10^3	10	10^{-2}	10^{-5}

状況が観察され、供試材裏面まで溶融する溶接金属が得られた。溶接中に発生するレーザ誘起ブルームで保護用石英板が少し汚染された。一方、環境圧力が $10 \sim 10^{-5}$ Pa の溶接では、金属蒸気の蒸発が激しくなり、金属蒸気が高速で拡散して保護用石英板や周辺機器に付着する金属蒸着現象が顕著になる。金属蒸着が起きると保護用石英板のレーザ光透過部 (Table 3 参照) では、蒸着金属がレーザ光を吸収して赤熱し、金属の蒸発と蒸着が繰り返される。そのために、レーザ光透過部が劣化して透過率が低下するので供試材に照射されるレーザパワーが減少する。また、低圧環境では蒸発反力が低下するので、Table 2 のように熱伝導型溶融による溶込みの浅い溶接金属になる。前進溶接も、後進溶接とほぼ同じ溶接現象、溶接金属形状が観察された。

実験の結果から 10 Pa 以下では、金属蒸気による保護用石英板や周辺機器の汚染が問題になることがわかった。そこで、金属蒸着技術を確立するために保護用石英板の金属蒸着膜厚を計測して蒸発金属の放射分布特性を調べた。Fig.12 はその膜厚測定結果で、斜め照射のレーザ溶接でも蒸発金属放射分布は溶融池表面を微小平面蒸発源と仮定した図中の実線で示す余弦法則（球状分布）²⁹⁾に従うことがわかった。

4.3 光学部品の金属蒸着防止技術の開発

低圧環境の溶接では、前節で述べたように金属蒸着現象

が問題になる。保護用石英板などの光学部品に蒸着した金属蒸着膜は、レーザ光を吸収して発熱するので、光学部品の透過率を低下させ、溶融・損傷²⁸⁾させる原因になる。そのために、宇宙 DL 溶接技術を宇宙適用するためには金属蒸着防止技術の確立が必要になる。まず、レーザ斜め照

Fig.12 Film thickness distribution on protection quartz plate.

Fig.13 Nozzle detail.

射溶接の蒸発金属放射分布が余弦法則に従い、斜め方向の金属蒸気が少ないことに着目した。ノズル付射出ユニットを採用して Fig.11(b) のように保護用石英板をノズルで被い、ノズルによる金属蒸気の遮蔽効果を調べた。その結果は、ノズル口から金属蒸気が侵入して金属蒸着を防止できなかった。次に、Fig.13 のノズル詳細図に示すようにノズルに Ar ガスを供給してノズル口から Ar ガスを噴出させる方法を検討した。Table 3 は Ar ガスをノズル口から噴出させた場合と、溶接部から離れたリークバルブから真空容器に導入して溶接した場合の保護用石英板の金属蒸着状況と溶接金属の寸法・形状の関係である。円形の保護用石英板の中央付近の黒く変色した領域が金属蒸着膜である。中心付近の透明な楕円部がレーザ光透過部、その外側が金属蒸着領域である。金属蒸着が発生するとレーザ光透過部で金属蒸着膜の蒸発と蒸着が繰り返される。その結果、石英板が劣化して透過率の低下、部分的な表面溶融およびき裂が発生する。Table 3 からわかるようにノズルから Ar ガスを噴出させる場合は、Ar ガス流量が 0.83 ml/s 以上になると保護用石英板の金属蒸着を防止¹³⁾できる。その結果、透過率の低下がなく供試材に照射されるレーザパワーも低下しないので溶込み深さの大きい溶接金属になる。Fig.14 は、溶接後の保護用石英板の透過率低下量と Ar ガス流量の関係である。ノズルから Ar ガスを噴出させる場合は、Ar ガス流量が 0.83 ml/s 以上になると保護用石英板の金属蒸着を防止でき、透過率の低下を防ぐことができる。ノズル口径 8 mm のノズルに流量 0.83 ml/s の Ar ガスを供給した場合のノズル内の推定 Ar ガス圧力は 16.9 Pa である。従って、ノズル内の Ar ガス圧力を 16.9 Pa 以上にすることで光学部品

Table 3 Effects of Argon flow rate on metal deposition on quartz plate and weld metal dimensions.

When Ar blown from nozzle					
When Ar introduced from leak valve					
Ar flow rate (ml/s)	0.17	0.42	0.83	1.25	1.67

Fig.14 Effect of Argon flow rate on transmittance reduction in protection quartz glass.

Fig.15 Metal deposition area around weld metal.

の金属蒸着を防止できることになる。

圧力が高くなると金属蒸着が発生し難くなる現象が知られている。ノズルから Ar ガスを噴出させた場合の効果を調べるために、同じ Ar ガス流量をリークバルブから導入して容器内圧力を同じにして溶接実験を行った。その結果、リークバルブから Ar ガスを導入した場合は金属蒸着を抑制できないことがわかった。Table 3 のように Ar ガス流量 1.67 ml/s でも金属蒸着を抑制・防止できず、透過率が低下して供試材に照射されるレーザパワーが低下するので溶込みの浅い溶接金属になる。Fig.14 の透過率低下量の結果も、リークバルブから Ar ガスを導入した場合は透過率低下を抑制できないことを示している。

開発した金属蒸着防止技術¹³⁾を適用して、Ar ガス流量 0.83 ml/s、溶接速度 2 mm/s でステンレス鋼板をメルトラソ溶接したときの溶接ビード外観を Fig.15 に示す。溶接欠陥のない、優れた溶接金属が得られる。Ar ガスで押し戻された金属蒸気が溶接金属周辺に付着している状況が確認できる。このノズルで光学部品を蔽いノズル口から、Ar ガスを噴出させる金属蒸着防止技術は、合計積算溶接時間 1.5 hr 問題が発生しないことを確認している。またこの金属蒸着防止技術を適用して、ISS 軌道圧力に相当する高真空環境で直径 0.6 mm の溶加ワイヤ (Y308-WY) を供給しながら板厚 3 mm の SUS304 ステンレス鋼板の突合せ溶接継手を製

作して、引張試験を行った。その結果、ISS 軌道圧力に相当する高真空環境でも宇宙 DL 溶接技術で十分に満足できる溶接外観と機械的性質を有する突合せ溶接継手が製作できることを実証³⁰⁾している。現在は、アルミニウム合金の突合せ溶接継手、隅肉溶接継手の製作実験を実施している。

5. まとめ

本稿では、宇宙溶接技術の現状について紹介した。次に、筆者等が研究開発している宇宙 GHATA 溶接技術と宇宙 DL 溶接技術の現状を紹介した。宇宙 GHATA 溶接技術については、模擬宇宙環境で溶接欠陥のない突合せ溶接継手が製作できることを実証した。地上での溶接実験を完了して、ISS および HTV での宇宙溶接実験の機会に備えた準備をしている。宇宙 DL 溶接技術については、光学部品の金属蒸着防止技術を確立して、次の段階である模擬宇宙環境での溶接実験の機会を待っている。

謝 辞

1989 年に米国マサチューセッツ工科大学 (MIT: Massachusetts Institute of Technology) 船舶工学科増淵興一教授に MIT 客員研究員 (文部省在外研究員) として受け入れていただいた。増淵興一教授の助言から宇宙溶接に興味を持つようになり、MIT では水中溶接の研究をしながら宇宙溶接技術関連の情報収集・文献調査を行った。帰国後、1991 年から高松工業高等専門学校 (現在の香川高等専門学校) の卒業研究、特別研究として学生諸君の協力を得て宇宙溶接技術の研究開発を行うことができた。優れた創造力、解析力および実行力を発揮して研究開発を進展させた多くの学生諸君にお礼を申し上げる。

最後に、研究の一部は、独立行政法人宇宙航空研究開発機構の支援を受け、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ったものであること記してお礼を申し上げます。

引用文献

- 1) B. E. Paton: WELDING IN SPACE, Welding Engineer, 57-1(1972), pp.25-29.
- 2) B. E. Paton: STATE-OF-ART AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF AEROSPACE ENGINEERING IN THE USSR, Proc. "Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by welding", September, 24-26(1991), New Carrollton, Maryland, USA, pp. 1-11.
- 3) V. A. Dzhaniybekov, A. A. Zagrebelny, S. S. Gavrish, V. V. Stesin, V. D. Sheleyagin, N. N. Yurchenko, A. V. Markov: Welding Equipment for Space Applications, Ibid. pp. 49-58.
- 4) 黄地尚義 訳: 宇宙の溶接、産報出版 (2000), B. E. Paton, V. F. Lapchinsky: WELDING in SPACE and RELATED TECHNOLOGIES, pp.35-98.

- 5) Mary Ruth Johnsen: Space Welding Experiment Postponed Indefinitely, *Welding Journal*, 76, 4(1997), p.22.
- 6) Edward D. Flinn: Welding Safely in Space, *Aerospace America*, 5(1998), pp.28-29.
- 7) K. NOGI, Y. AOKI, H. FUJII, K. NAKATA, S. KAIHARA: Weld Formation in Microgravity, *Iron and Steel Institute of Japan International*, 38, 2(1998), pp. 163-170.
- 8) K. NOGI, Y. AOKI, H. FUJII, K. NAKATA: BEHAVIOR OF BUBBLES IN WELD UNDER MICROGRAVITY, *Acta Materialia*, 46, 12(1998), pp.4405-4413.
- 9) 正箱信一郎、太田雅司、黄地尚義: Hollow Cathode Arc におけるアーク柱の特性、溶接学会論文集、23, 2(2005), pp.270-275.
- 10) 吹田義一、佃 芳行、寺嶋 昇、八田 崇、河野鉄平、猪熊力也、川田賢司、他: 航空機を使用した模擬宇宙環境下での GHТА 溶接実験、溶接学会論文集、18, 2(2000), pp.228-235.
- 11) 吹田義一、十川弘樹、大原将広、他: 模擬宇宙環境での宇宙 GHТА 溶接法による溶加ワイヤ供給を伴うアルミニウム管の突合せ溶接実験、日本航空宇宙学会論文集、59, 689 (2011-6), 掲載予定。
- 12) 吹田義一、黒川哲平、正箱信一郎、佐藤順子、苺谷英司、藤澤正一郎、今川吉郎: 宇宙 LD 溶接法の提案、レーザ加工学誌、9, 1(2002-2), pp.29-33.
- 13) 吹田義一、田中健司、大谷雅人、正箱信一郎、他: 宇宙半導体レーザ溶接の宇宙適用を目指した光学部品の金属蒸着防止技術、日本航空宇宙学会論文集、58, 673(2010-2), pp.54-59.
- 14) Jeff Ding, Robert Carter et al.: Friction Stir Welding Flies High at NASA, *Welding Journal* 3(2006), pp.54-59.
- 15) 読売新聞（平成4年5月29日、13版新全国版）、朝日新聞（平成4年5月29日、13版全国版）。
- 16) 吹田義一、佃 芳行、高木 隆、黄地尚義、増渕興一: 宇宙空間での GHТА 溶接に関する研究（第1報）、溶接学会論文集、11, 3(1993), pp.423-427.
- 17) 吹田義一、山地直樹、寺嶋 昇、佃 芳行 他: 小形ワイヤ供給装置を使用した真空中でのステンレス鋼の宇宙 GHТА 溶接、日本機械学会論文集（C編）、67, 658(2001-6), pp.2044-2050.
- 18) 吹田義一、増渕興一、寺嶋 昇、佃 芳行: 宇宙 GHТА 溶接法による真空環境下での SUS304 鋼の溶接、日本機械学会論文集（C編）、64, 622(1998-6), pp.2304-2309.
- 19) 吹田義一、正箱信一郎、佐藤順子、黒川哲平、他: 宇宙ステーション圧力での GHТА 溶接実験、溶接学会論文集、21, 1(2003), pp.33-38.
- 20) 吹田義一、高井大輔、杉山智志、他: ISS 軌道圧力での直流高電圧方式による GHТА 起動実験、溶接学会論文集、21, 3(2003), pp.350-355.
- 21) 吹田義一、松下和憲、寺嶋 昇、佃 芳行、増渕興一: 宇宙 GHТА 溶接法のタッチスタート技術による真空中でのアーク起動現象、溶接学会論文集、24, 1(2006), pp.26-31.
- 22) 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 GHТА 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, 610(2004-11), pp.522-527.
- 23) 吹田義一、大原将広、十川弘樹、松下和憲、正箱信一郎、他: 航空機を使用した模擬宇宙環境での宇宙 GHТА 溶接法によるアルミニウム管の溶接実験、溶接学会論文集、25, 4(2007), pp.494-500.
- 24) 吹田義一、佃芳行、寺嶋昇 他: 真空中での GHТА 溶接によるアルミニウム合金の溶接、溶接学会論文集、14, 4(1996), pp.633-640.
- 25) 吹田義一、永井宏和、新池修平、他: アルミニウム合金の真空中での GHТА 溶接現象、溶接学会論文集、22, 2(2004), pp.218-223.
- 26) 例えば、水野、簗田、坂口: アルミニウムとその合金の溶接、産報出版(1979)、西川、小坂、黄地: Hollow Cathode Arc の熱源特性に関する研究—アルミニウム合金の溶接への適用—、高温学会誌、28(2002), pp.344-350.
- 27) Kaukler, W. F. and Workman, G. L.: *Laser Welding in Space, Proceedings from the Conference "Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding"*, New Carrollton, Maryland (1991), pp.318-334.
- 28) 吹田義一、苺谷英司、杉山智志、寺嶋 昇、佃 芳行、藤澤正一郎、今川吉郎: 宇宙空間での宇宙構造物の建造・修理を対象にした宇宙レーザ溶接法の開発、日本航空宇宙学会論文集、52(2004), pp.45-50.
- 29) 吹田義一、田辺心有、寺嶋 昇、佃 芳行、今川吉郎: 宇宙半導体レーザ溶接法による各種環境圧力でのステンレス鋼の溶接現象、日本航空宇宙学会論文集、53, 620(2005-9), pp.426-430.
- 30) 三谷健太、吹田義一、相賀裕太郎、正箱信一郎、他: 真空中でのステンレス鋼の半導体レーザ突合せ溶接実験、第24回宇宙利用シンポジウム、24(2008), pp.94-97.