

宇宙レーザー溶接における光学部品への蒸着抑制技術

高松工業高等専門学校 田中健司, 大谷雅人, 吹田義一, 寺嶋 昇, 佃 芳行, 平岡延章
宇宙航空研究開発機構 鈴木峰男, 今川吉郎

Prevention Technique of metal vapor deposition to Optical Devices in Space Laser Welding Technology

Kenji Tanaka¹⁾, Masato Ohtan¹⁾, Yoshikazu Suita¹⁾, Noboru Terajima¹⁾, Yoshiyuki Tsukuda¹⁾,
Nobuaki Hiraoka¹⁾, 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: The authors develop the space Gas Hollow Tungsten Arc (GHTA) welding process for space applications since 1993. In order to utilize the space welding technology required for space developments, we are also developing the space Diode Laser (DL) welding which a welding principle differs from the space GHTA welding. The DL welding experiments in vacuum clarified the features of welding in vacuum and vapor deposition problems to optical devices in welding on stainless steel and aluminum alloy. Since the evaporating phenomena cause the damage on optical devices and space contamination, they should become serious problems in space welding applications. Therefore, we proposed the prevention technique of metal vapor deposition to optical devices by shielding gas.

Key words: Space Diode Laser welding, Metal Vapor Deposition, Shielding gas

1. 緒 論

旧ソ連邦は、1960年頃からウクライナのパトン溶接研究所で宇宙 EB(Electron Beam)溶接を中心にした研究開発を実施した。同じ頃、米国でも EB 溶接法の宇宙適用に関する研究開発を実施したが、高電圧電子照射で発生する X 線による被爆問題などで、その開発が中止された。1991年には Nd-YAG レーザ溶接の宇宙適用に関する研究も実施されたが、大型・大重量で発振効率が極めて低いなどの理由から宇宙適用は絶望的であった。NASA は 1997 年 10 月にパトン溶接研究所が開発した最新の E B 溶接装置“ユニバーサル”をスペースシャトルに搭載して、宇宙空間で溶接実験を行う国際宇宙溶接実験を計画した。しかし、実験開始の約半年前にスケジュールや宇宙飛行士の安全確保に問題が発生し、急遽実験を無期延期した。その後、現在まで NASA には宇宙溶接実験計画は存在しない。日本では EB 溶接やレーザー溶接の問題点を考慮し、1993年に著者らにより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¹⁾が提案された。1998年には模擬宇宙環境下での溶接実験に成功した。現在は宇宙材料であるアルミニウム合金への適用性について検討している。

一方、近年の DL(Diode Laser)装置の高出力化は目覚しく、高発振効率、小型・軽量などの特長を持つため

に、宇宙空間での宇宙構造物の建造・修理などに適用できる可能性を持っている。著者らはそのことに注目して、宇宙開発に必要な溶接技術をより確実に実用化するために、宇宙 GHTA 溶接とは溶接原理の全く異なる宇宙 DL 溶接法²⁾を提案した。しかし、高真空環境下での蒸発現象は光学部品への蒸着を引き起こす。光学部品への蒸着は、透過率を低下させるだけでなく、熱膨張差によって石英ガラスなどの光学部品の破損が考えられる。そこで本研究では、真空環境中での蒸発金属の光学部品への蒸着を抑制する方法を検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験に使用した高真空 DL 溶接実験システムを Fig.1 に示した。実験システムは到達圧力 6×10^{-6} Pa の真空チャンバと最大出力 2.5kW の DL 溶接装置で構成されている。真空ポンプにはロータリ・ポンプ(排気速度: $0.65 \text{ m}^3/\text{s}$)とクライオポンプ(同: $8.4 \text{ m}^3/\text{s}$)を採用した。DL 溶接装置の仕様を Table 1 に示す。レーザー波長は $(808, 940) \pm 10 \text{ nm}$ の混合波長で、2.5kW 連続発振のダイレクト・ダイオードレーザー装置である。DL ヘッドからコア径 1.5mm の光ファイバでチャンバ外部に取り付けら

れたレーザ射出ユニットに約 2kW のレーザ光を伝送した。射出ユニットからレーザ導入石英窓(Window)と保護用石英板(Protection glass)の 2 枚の合成石英板(透過率約 92%)を通して、移動試料台上の供試材にレーザ光(実測値 1.7kW)を斜め照射した。Fig.2(a)は、レーザ射出ユニットである。今回、ヘッド先端にFig.2(b)に示すようなノズルを取り付け、光学部品への金属蒸着抑制について検討する。さらに、ノズル先端から不活性ガスを流出させることで蒸発金属のノズル内への進入抑制を検討する。

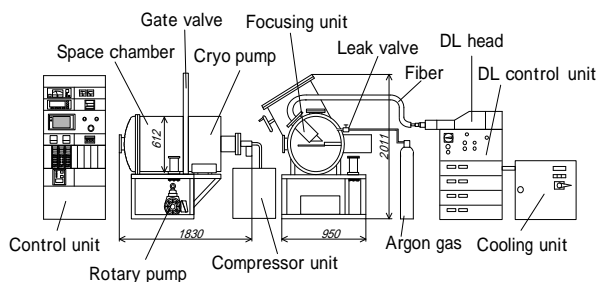


Fig. 1 High vacuum diode laser welding experiment system.

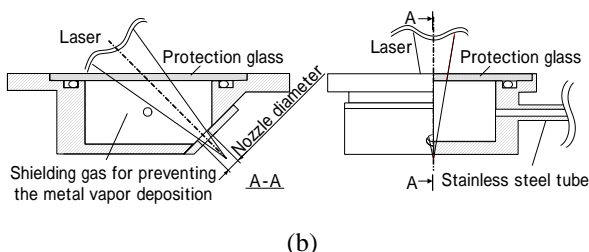
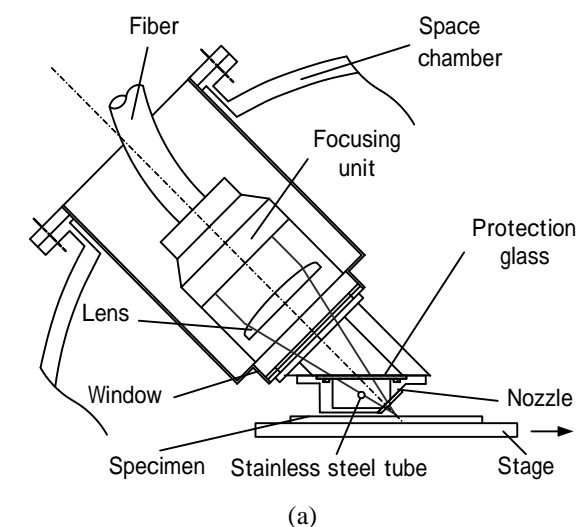


Fig. 2 Nozzle and focusing unit.

2.2 供試材と実験方法

供試材は板厚 3mm × 板幅 90mm × 長さ 80mm の SUS304 ステンレス鋼(以後は SUS304 鋼と記す)と、板厚 4mm × 板幅 90mm × 長さ 150mm の A2014-T6 アルミニウム合金(以後は A2014 合金と記す)を使用した。

また表面状態は受け入れ状態で脱脂を行った。供試材を移動ステージ上に固定した後に真空チャンバ内をロータリ・ポンプとクライオポンプで排気することにより、ISS 軌道圧力である 10^{-5} Pa を実現した。溶接実験は供試材表面がレーザ光の焦点となるジャストフォーカスでメルトラン溶接を行った。蒸発金属の光学部品への蒸着抑制を検討するため、蒸着抑制のためのシールドガス(Ar ガス)を流さないでノズル先端の口径を変化させる実験、ノズル先端からシールドガスを 0.167 ~ 1.67 ml/s の範囲で流出させる実験、シールドガスとして Ne, Kr を用いる実験、ノズルの無い場合の実験を行った。ノズル先端からシールドガスを流出させるとチャンバ内の圧力が上昇する。比較のため、Fig.1 に示すようにノズルから十分離れたリークバルブから Ar ガスを供給して、ノズルからシールドガスを流出させた場合と同じ圧力($1 \times 10^{-2} \sim 8 \times 10^{-2}$ Pa)で実験を行った。いずれの実験でも溶接速度 0.2cm/s、溶接時間 30 秒間の溶接条件とし、ガス流量は標準状態流量(20, 1 atm)とした。保護用石英板の透過率は分光光度計を用いて測定した。測定波長は実験で用いたレーザと同じ 808 ~ 940nm の範囲であり、測定部はレーザ光が透過する中心部とした。溶接前と溶接後の透過率を測定し、その差を透過率の低下量とした。溶接前の透過率は 92 ~ 94% の範囲である。

Table 1 Specification for diode laser welding experiment system

Irradiating angles	45 deg
Wavelengths	(808,940)±10 nm
Output power	2.5 kW
Laser power	1.7 kW
Focal length	120 mm
Focus sizes	Ellipse : 3×4 mm
Energy density	20 kW/cm ²

3. SUS304 鋼を供試材とした実験結果と考察

3.1 ノズル口径が保護用石英板への蒸着及び溶融現象におよぼす影響

保護用石英板への蒸着を抑制するために、ノズル先端の口径 D_n を 8, 10, 12mm と変化させて実験を行った。Ar ガスは供給せず、初期チャンバ内圧力を 10^{-5} Pa とした。また、ノズルの効果を確認するためにノズルなし($D_n = \text{ }$)で同様の実験を行った。Fig.3 にノズル口径を変化させたときの保護用石英板のレーザ透過部での透過率低下量を示す。透過率の低下量は 3 ~ 6% の範囲となり、口径に関係ない結果となった。保護用石英板に金属蒸着がある場合、保護用石英板のレーザが通過する部分ではレーザ光の吸収による加熱によって蒸着した

金属の再蒸発がおこる。レーザが通過する部分の保護用石英板の表面状態は、蒸着・再蒸発を繰り返すため、口径に関係なく似かよった状態になると予想される。このため、保護用石英板のレーザ通過部の透過率は口径に影響されないと考えられる。この結果は、余弦法則(球状分布)に従う蒸発金属の放射³⁾に対しては、溶融池近傍でノズル(カバー)を取り付けても金属蒸着防止に大きな効果がないことを示している。

Fig.4 はノズル口径と溶接金属の溶込み深さの関係である。口径を変化させた場合もノズルを取り付けていない場合も溶込み深さは約 1mm で一定であった。これは、Fig.3 の透過率の低下がいずれの場合もほぼ同じであることから理解できる。

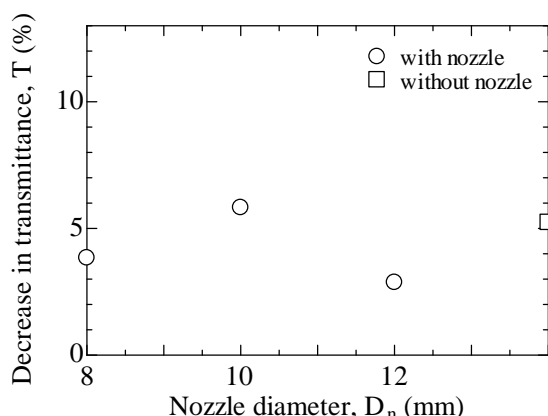


Fig. 3 Relationship between nozzle diameter and Decrease in transmittance of protection glass.

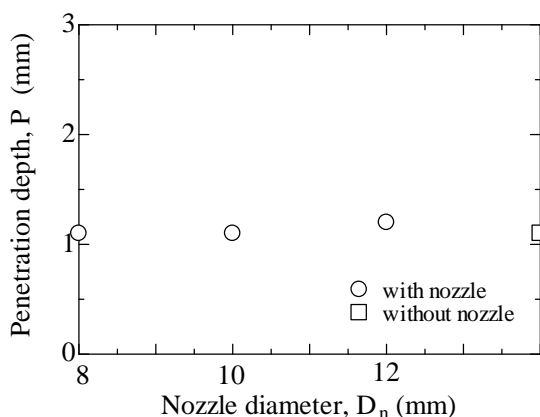


Fig. 4 Relationship between nozzle diameter, and penetration depth.

3.2 シールドガス流量が蒸発及び溶融現象に及ぼす影響

口径 8mm のノズルから蒸着抑制のためシールドガス(Ar ガス流量 Q_{Ar} : 0 ~ 1.67ml/s)を流して影響を調べた。Fig.5 にノズルからシールドガスを流出させた場合の保護用石英板の透過率低下量(印)を示す。ノズルからのシールドガス流量が約 0.5ml/s 未満では透過率は 1 ~ 4 % 低下した。0.83ml/s 以上になると透過率の低下はなく、蒸着抑制効果が認められた。抑制効果

の要因がチャンバ内の圧力上昇でないことを確認するために、ノズルから十分離れたリークバルブからチャンバ内に Ar ガスを供給し、ノズルからシールドガスを流出させた場合と同じ圧力($1 \times 10^{-2} \sim 8 \times 10^{-2}$ Pa)で溶接を行った。その結果、透過率低下量(印)は 4 ~ 6% の範囲となり、Fig.3 のシールドガスを流出させない場合(10^{-5} Pa)と同程度であることを確認した。

ノズルからシールドガスを流出させた場合の供試材の溶込み深さを Fig.6(印)に示す。保護用石英板の透過率が低下していない 0.835ml/s 以上では溶込み深さは約 2mm であった。リークバルブから Ar ガスを供給した場合(印)の溶込み深さは約 1mm であり、Fig.5 のシールドガスを流出させない場合と同程度であった。

以上の結果より、ノズルからシールドガスを流出させることで、保護用石英板への蒸着を抑制し、供試材表面に到達するレーザパワーの低下を抑制できることがわかる。

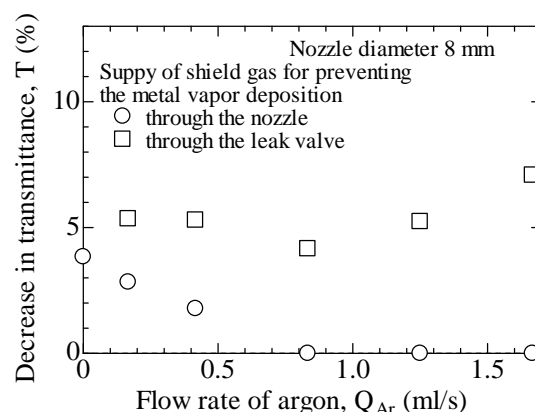


Fig. 5 Relationship between shielding gas flow rate and Decrease in transmittance of the protection glass.

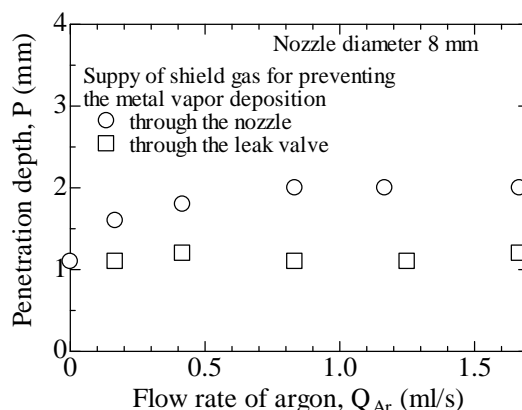


Fig. 6 Relationship between shielding gas flow rate, and penetration depth.

4. A2014 合金を供試材とした実験結果と考察

供試材を A2014 合金にして SUS304 鋼と同様の実験を行った。ノズル先端の口径を 8mm とし、シ

ールドガス(Ar)流量を流して影響を調べた。Fig.7 にシールドガス流量と保護用石英板の透過率低下量の関係を示す。A2014 合金の溶接では、シールドガスの有無に関係なく透過率の低下が小さく 1~2%程度である。これは、A2014 合金の蒸発温度が SUS304 鋼に比べて低い再蒸発しやすいからだと推測できる。1.33 × 10⁻²Pa でのアルミニウム合金の蒸発温度⁴⁾は約 1200 , それに対して SUS304 鋼の主成分である鉄の蒸発温度は約 1450 である。A2014 合金の再蒸発が容易であるため、レーザー光が保護用石英板をクリーニングしたと考えられる。しかし、保護用石英板のレーザー透過部以外には蒸着するため、シールドガスは必要であると考えられる。

Fig.8 にシールドガス流量と溶込み深さの関係を示す。ノズルからシールドガスを流出させた場合(○)とリークバルブから Ar ガスを供給した場合(□)に違いが見られないことも上述の理由から説明できる。

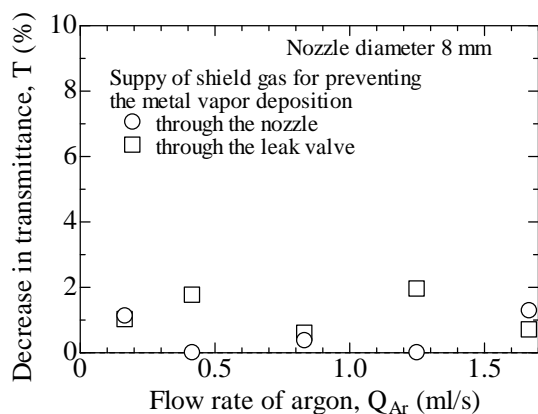


Fig. 7 Relationship between shielding gas flow rate and Decrease in transmittance of the protection glass.

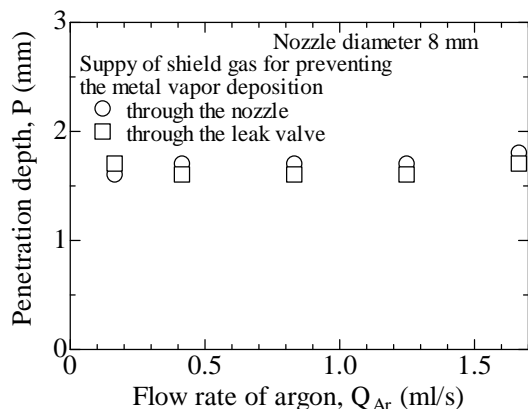


Fig. 8 The relationship between shielding gas flow rate and penetration depth.

5. ノズルの蒸着抑制効果

ノズルを取り付け、ノズルからシールドガスを流出させることによって蒸着を抑制することができた。これは Fig.9 のようにシールドガスがノズルから流出することにより蒸発金属を吹き飛ばしたと推測できる。

その他の要因としてシールドガスを流出した場合、ノズル内に Ar ガスが充満するため蒸発金属が保護用石英板に到達しなかったと考えられる。

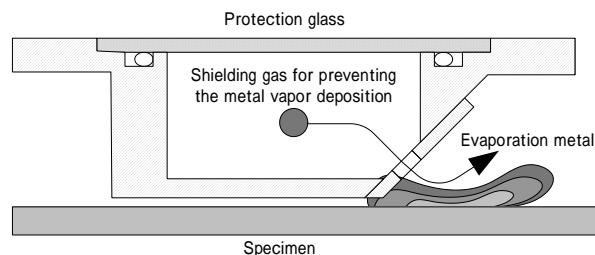


Fig. 9 Effect of shielding gas on preventing metal vapor deposition to optical device.

6. 結論

宇宙 DL 溶接技術の実用化を目標として、蒸着抑制のためのノズルを製作して供試材 SUS304 鋼、A2014 合金のメルトラン溶接実験を行い次のことを明らかにした。

- (1) SUS304鋼, A2014合金の両供試材において、ノズルの口径を変化させても金属蒸着による保護用石英板の透過率低下の抑制効果は小さい。
- (2) SUS304鋼, A2014合金の両供試材において、ノズルからシールドガスを流出させることにより、保護用石英板への蒸着を防止することができた。
- (3) SUS304鋼の溶接では、ノズルからシールドガスを流出させた場合、流出させない場合に比べて約2倍の溶込み深さを得た。

参考文献

- 1) 吹田義一, 佃 芳行, 高木 隆, 黄地尚義, 増淵興一: 宇宙空間での GTA 溶接に関する研究(第 1 報), 溶接学会論文集, 11, 3(1993), pp. 423-427.
- 2) 吹田義一, 黒川哲平, 正箱信一郎, 佐藤順子, 苜谷英司, 藤澤正一郎, 今川吉郎: 宇宙 LD 溶接法の提案, レーザ加工学会誌, 9, 1(2002), pp. 29-33.
- 3) 吹田義一, 田部心有, 寺嶋 昇, 佃 芳行, 今川吉郎: 宇宙半導体レーザー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)
- 4) 小宮宗治, オーム社出版局: わかりやすい真空技術