

## 高真空環境下における宇宙半導体レーザー溶接実験

高松工業高等専門学校 大谷雅人, 三谷健太, 吹田義一, 正箱信一郎, 寺嶋昇, 佃芳行, 平岡延章

Welding Experiments by Space Diode Laser Welding at High Vacuum

Masato Otani, Mitani Kenta, Yoshikazu Suita, Shobako Shinichiro, Noboru Terajima,

Yoshiyuki Tsukuda and Nobuaki Hiraoka

Takamatsu National College of Technology Chokushi, Takamatsu, Kagawa 761-8058

E-Mail: [suita@takamatsu-nct.ac.jp](mailto:suita@takamatsu-nct.ac.jp)

Abstract: The authors have been developing the space Gas Hollow Tungsten Arc (GHTA) welding process for space application since 1993. We have also been developing the space Diode Laser (DL) welding which its welding principle differs from the space GHTA welding. The metal vapor deposition on optical devices caused in the DL welding experiments in a vacuum can be prevented by using the shielding gas. We performed the butt welding experiments with SUS304 stainless steel and A2014-T6 aluminum alloy at the International Space Station (ISS) orbital pressure. The mechanical properties of butt welding joints, and the effect of root gap and filler metal addition on weld metal shape were clarified.

### 1. 緒 論

宇宙開発に必要な不可欠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<sup>1,2)</sup>を提案した.真空環境中のレーザー溶接では,金属蒸着による光学部品の損傷の問題<sup>3)</sup>があったが,ノズルを取りつけ,Ar ガスをシールドガスとして流すことにより解決<sup>4)</sup>した.そこで本研究では,宇宙 DL 溶接法で突合せ溶接継手を製作し,ルートギャップ,溶加ワイヤ添加の有無が溶接金属形状に及ぼす影響や継手強度などの機械的性質を明らかにした.

### 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.実験システムは真空チャンバと 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:  $N_2, 0.65 \text{ m}^3/\text{s}$ )とクライオポンプ(同:  $Ar, 8.4 \text{ m}^3/\text{s}$ )を採用した.レーザー波長は  $(808, 940) \pm 10 \text{ nm}$  の混合波長で, 2.5 kW 連続発振のダイレクト・ダイオードレーザー装置である. Fig.2 は,レーザー射出ユニットである.

今回, Fig.2 に示すようにヘッド先端にノズルを取り付け,ガスパイプからノズル内にシールドガスを供給した.ノズル内からシールドガスを流出させ,蒸発金属を吹き飛ばし 70 mm の保護用石英板(Protection glass)への金属蒸着を抑制している.

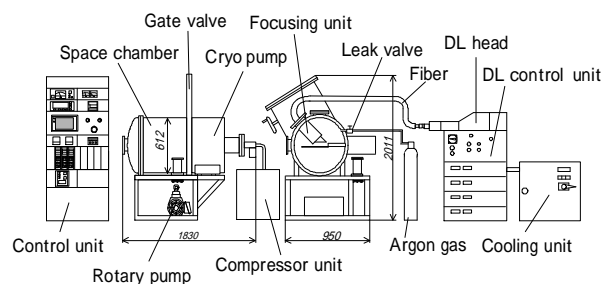


Fig.1 高真空 DL 溶接実験システム

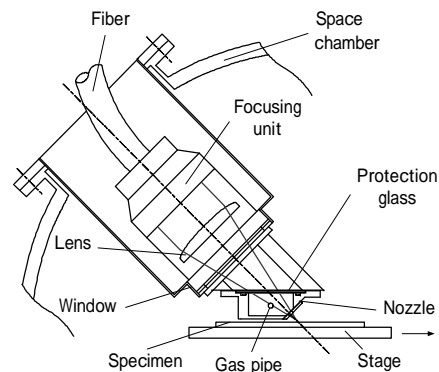


Fig.2 レーザー射出ユニット

## 2-2 供試材と実験方法

板厚 3 mm × 幅 45 mm × 長さ 100 mm の SUS304 ステンレス鋼板，板厚 3 mm × 板幅 45 mm × 長さ 150 mm の A2014-T6 アルミニウム合金板を使用し，表面状態は受け入れ状態で脱脂を行い，両端及び中央部をタック溶接したものを供試材とした．

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し，ISS 軌道圧力  $10^{-5}$  Pa を実現した．Ar ガス流量は 0.83 ml/s とした．供試材表面がレーザ光の焦点となるジヤストフォーカスで 30 秒間のメルトラン溶接を行った．溶接速度は SUS304 の場合 0.125 cm/s，A2014-T6 の場合 0.3 cm/s である．SUS304，A2014-T6 それぞれルートギャップを 0~2.0 mm の間で変化させメルトラン溶接を行う実験，ルートギャップを同様に変化させ溶接線上に溶加ワイヤを設置した溶接実験を行った．継手強度など機械的性質を調べ，マクロ組織の観察，硬度測定及び引張試験を行った．

## 3. SUS304 ステンレス鋼を供試材とした実験結果と考察

### 3-1 ルートギャップが溶接金属形状に及ぼす影響

ルートギャップが溶接金属形状に及ぼす影響を Table 1 に示す．ルートギャップ 0，0.5 mm ではメルトラン溶接が可能である．ルートギャップが 1 mm 以上になると母材は溶融しているものの接合されておらず溶接できていない．溶融金属が，温度

が低く表面張力の大きい母材の方へ引っ張られたために溶融金属が接合されなかったと考えられる．ルートギャップが 2.0 mm になると，ビーム短径が 3 mm であるためにレーザ光の大部分がルートギャップを通り抜け，母材に照射されないため母材がほとんど溶融しなかったと考えられる．

### 3-2 溶加ワイヤ添加が溶接金属形状に及ぼす影響

溶接線上に溶加ワイヤを設置してメルトラン溶接した場合の溶接金属形状を Table 2 に示す．溶接線上に溶加ワイヤを設置した場合はルートギャップが 1 mm 以上存在しても溶融金属は融合していた．溶接線上に溶加ワイヤを設置したことにより溶融金属が増加して，溶接が可能になったと考えられる．ワイヤ径 1 mm，ルートギャップ 2 mm の場合，接合しているが溶融金属量が不足し，のど厚が小さくなっている．ワイヤ径が 2 mm の場合，ルートギャップが 0.5 mm，1 mm のとき母材を裏面まで溶融できなかった．レーザ光の多くが溶加ワイヤに照射され，母材への入熱量が減ったためと考えられる．ルートギャップ 1.5，2 mm では裏面まで融合し，のど厚が小さくならず溶接できた．ルートギャップに対し，適切な直径の溶加ワイヤを使用すれば，融合不良やのど厚減少のない溶接金属が得られることがわかった．

Table 1 ルートギャップが溶接金属形状に及ぼす影響


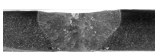


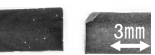
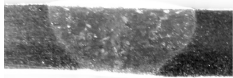
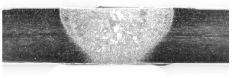
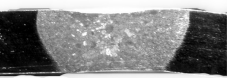

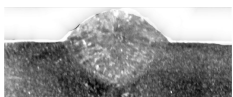

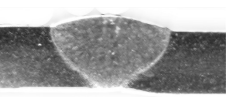
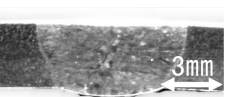
ルートギャップ	0 mm	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm
SUS304					

Table 2 溶加材添加が溶接金属形状に及ぼす影響

ルートギャップ	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm
溶加ワイヤ径 1 mm SUS304				
溶加ワイヤ径 2 mm SUS304				

### 3-3 SUS304 突合せ溶接継手の引張試験結果

ルートギャップ 0 mm ,溶加ワイヤをルートギャップ上に設置しないで製作された突合せ溶接継手の引張強さの平均値は 711 MPa で , 母材強度とほぼ同じ強度が得られた . Fig.3 のようにすべての引張試験片が母材部で破断しており , また Fig.4 に示すように溶接割れやブローホールなどの溶接欠陥は観察されなかった . この結果から , 真空中でも宇宙 DL 溶接法によって継手強度が十分満足できる突合せ溶接継手を得られることがわかった .

## 4 . A2014 -T6 アルミニウム合金を供試材とした実験結果と考察

### 4-1 ルートギャップが溶接金属形状に及ぼす影響

Table 3 に示すように A2014-T6 ではルートギャ

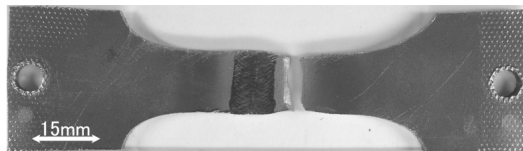


Fig.3 引張試験片の破断状況

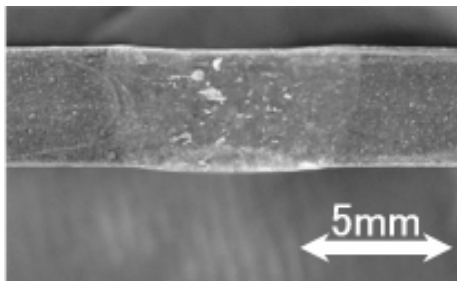


Fig.4 SUS304 ステンレス鋼溶接継手のマクロ組織

ップが 0 , 0.5 mm の場合 , メルトラン溶接が可能であった . 1.0 mm になると , 母材内部は裏面まで溶融しているが融合していたのは溶接金属の上半分のみであった . 母材の下部分は , ルート面の酸化膜が除去できていないため溶融金属が融合しなかったと考えられる . ルートギャップが 1.5 2.0 mm では , どちらも母材内部は裏面まで溶融しているが , 溶融金属不足や , ルート面の酸化膜が除去できていないため接合されていない . また , ルートギャップが大きくなると多くのレーザー光がルートギャップを通り抜けるために母材表面の酸化膜を除去できないと考えられる . 表面に高融点の酸化膜が存在する A2014-T6 は , SUS304 よりもルートギャップの変化が溶接金属形状に及ぼす影響が大きいと考えられる .

### 4-2 溶加ワイヤ添加が溶接金属形状に及ぼす影響

Table 4 に溶接線上に溶加ワイヤを設置して溶接を行った場合の溶接金属形状を示す . ルートギャップが 0.5 mm の場合 , 溶加ワイヤのみが溶融し , 母材は溶融せず , 溶加ワイヤの溶融金属と母材はぬれていない . ルートギャップが大きくなると溶加ワイヤはギャップに流れ込み , 母材も多少溶融している . ルートギャップが 2 mm になると溶加ワイヤの溶融金属は裏面まで流れ込んでいる . しかし , 母材表面 , ルート面の酸化膜が除去できていないため , 融合不良が発生している . レーザ光の多くが溶加ワイヤの溶融に費やされ , 母材への入

Table 3 ルートギャップが溶接金属形状に及ぼす影響

ルートギャップ	0 mm	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm
A2014-T6					

Table 4 溶加材添加が溶接金属形状に及ぼす影響

ルートギャップ	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm
A2014-T6				

熱量が減少し、また母材表面の酸化膜が除去できなかったために融合しなかったと考えられる。溶加ワイヤを溶接線上に設置しただけでは満足できる溶接金属が得られないことから、溶加ワイヤを供給しながらレーザー溶接を行う方法を確立する必要がある。

#### 4-3 A2014-T6 突合せ溶接継手の引張試験結果

ルートギャップ 0 mm、溶加ワイヤをルートギャップ上に設置しないで製作された突合せ溶接継手の引張強さの平均値は 201 MPa であった。この値は母材強度の約 50 % である。引張試験片は Fig.5 に示すようにすべて溶接金属部中央で破断している。溶接金属部で破断した原因として、Fig.6 に示す溶接部のど厚の減少、溶融による軟化などが考えられる。溶加ワイヤを供給して溶接部のど厚を大きくし、溶接金属部での破断を防ぐ必要がある。真空中で溶加ワイヤを供給して DL 溶接することができれば、宇宙 DL 溶接法がアルミニウム合金にも適用できる可能性を示すことができる。

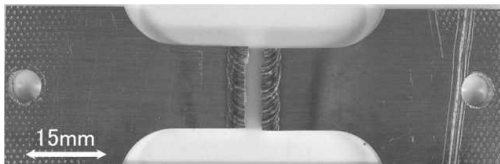


Fig.5 引張試験片の破断状況

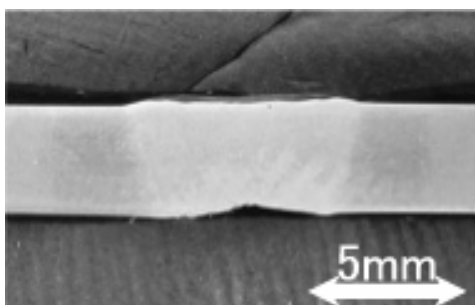


Fig.6 A2014-T6 突合せ溶接継手のマクロ組織

## 5. 結 論

宇宙 DL 溶接法による真空中での突合せ溶接実験を行い、以下のことを明らかにした。

1) SUS304 ステンレス鋼、A2014-T6 アルミニウ

ム合金の両突合せ溶接継手において、ルートギャップを変化させた場合、ギャップが大きくなると溶融金属が接合しなかった。

- 2) 溶加ワイヤを設置した場合、SUS304 ではルートギャップに対して適切なワイヤ径を使用すれば、ルートギャップが変化しても、のど厚の減少がない溶接金属が得られた。
- 3) SUS304突合せ溶接継手では、引張強さは母材とほぼ同じ強度を示し、マクロ組織の観察と硬度分布から溶接割れなどのない健全な溶接継手を得られた。
- 4) A2014-T6 に溶加ワイヤを設置した場合、表面の酸化膜を除去することができず融合不良が発生した。
- 5) A2014-T6 突合せ溶接継手では、引張強さは母材強度の約 50 % を示し、試験片はすべて溶接金属部中央付近で破断していた。
- 6) A2014-T6 では溶融による軟化、引張試験片の溶接金属部中央付近での破断などから、溶加ワイヤの供給が必要である。

## 参 考 文 献

- [1] 吹田義一,黒川哲平,正箱信一郎,佐藤順子, 荻谷英司, 藤澤正一郎, 今川吉郎: 宇宙 LD 溶接法の提案, レーザー加工学会誌, 9, 1(2002), pp. 29-33.
- [2] 吹田義一, 荻谷英司, 杉山智志, 寺島 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ー溶接法の開発, 日本航空宇宙学会論文集, 52, 601(2004), pp. 45-50.
- [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] 田中健司, 大谷雅人, 吹田義一, 寺嶋 昇, 佃 芳行: 宇宙半導体レーザー溶接における光学部品への蒸着抑制技術, '05 第 49 回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp327-332