

## 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

高松工業高等専門学校 三谷健太, 吹田義一, 相賀裕太郎, 正箱信一郎, 佃芳行, 寺嶋昇

### Butt Weld Experiments by Diode Laser Welding Process in Vacuum

*Kenta Mitani, Yoshikazu Suita, Yutaro Aiga, Shinichiro Shobako, Yoshiyuki Tsukuda and Noboru Terajima*

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

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

Abstract: We have been developing the space GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) welding process for space application since 1993. We have also been developing the space DL (Diode Laser) welding which its welding principle differs from the space GHTA welding. The metal vapor deposition on optical devices causes the Diode Laser welding experiments in a vacuum can be prevented by using the shielding gas. We performed the butt weld experiments with SUS304 stainless steel in Vacuum. In this study, it is showed that the mechanical properties of butt welds, and the effect the filler wire feed on weld metal form and the melting situation.

Key Words: Space Diode Laser Welding, Butt Weld, Vacuum, Filler Wire

#### 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、ノズルを取り付け、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 溶接法で溶加ワイヤを供給したステンレス鋼の溶接実験を行い、溶加ワイヤの供給が溶融状況や溶接金属形状、溶接ビード外観に及ぼす影響を調査した。また、溶接中に溶接部に溶加ワイヤを供給することで十分な強度を有する突合せ溶接継手が製作できることを明らかにしたので報告する。

#### 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 に示す。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<sub>2</sub>,0.65 m<sup>3</sup>/s)とクライオポンプ(同 : Ar,8.4 m<sup>3</sup>/s)を採用した。レーザ波長は 808±10 nm 及び 940±10 nm の混合波長で、2.5 kW 連続発振のダイレクト・ダイオードレーザ装置である。Fig.2 は、レーザ

射出ユニットである。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。ノズルからシールドガスを流出させ、蒸発金属を吹き飛ばし、直径 70 mm の保護用石英板 (Protection glass)への金属蒸着を抑制している。

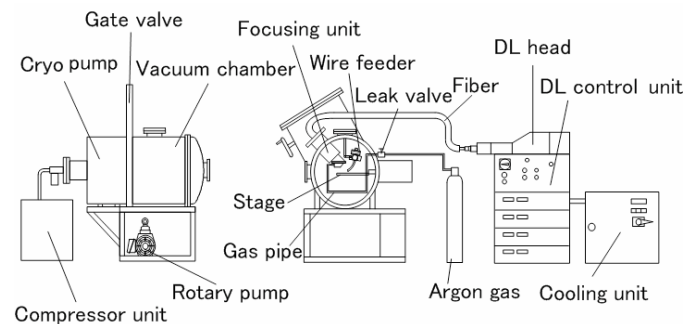


Fig.1 Experimental apparatus

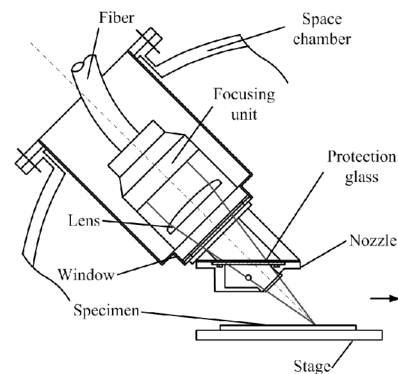


Fig.2 Laser emission unit

## 2-2 供試材と実験手順

一枚の母材表面を溶融させるビード・オン・プレート溶接用の供試材には、板厚 3 mm×板幅 90 mm×長さ 100 mm の SUS304 ステンレス鋼板、突合せ溶接用の供試材には、板厚 3 mm×板幅 45 mm×長さ 100 mm の SUS304 ステンレス鋼板 2 枚をルートギャップゼロの I 型開先で両端をタック溶接したものを使用した。表面状態は受け入れ状態 (No.1) とし、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して、ISS 軌道圧力  $10^{-5}$  Pa を実現した。Ar シールドガス流量は、保護用石英板の金属蒸着を防止できる 2.5 ml/s とした。供試材表面がレーザー光の焦点となるジャストフォーカスで 30 秒間のビード・オン・プレート溶接および突合せ溶接を行った。溶接速度は  $v=0.125$  cm/s とした。溶加ワイヤの供給が溶接金属形状と溶接ビード外観に及ぼす影響を明らかにするため、Fig.3(a), (b) に示すように溶加ワイヤの供給位置を変化させてビード・オン・プレート溶接を行う実験、溶加ワイヤの供給速度を  $v=2.5\sim 17.5$  mm/s の間で変化させる溶接実験を行った。また、これらの実験結果から実験を行った範囲内での最適溶接条件を決定し、最適溶接条件で突合せ溶接実験を行った。SUS304 突合せ溶接継手の機械的性質を調べるために、マクロ組織の観察、硬度試験及び引張試験を行った。それぞれの実験の溶融状況をビデオカメラで撮影し、溶融状況の観察を行った。

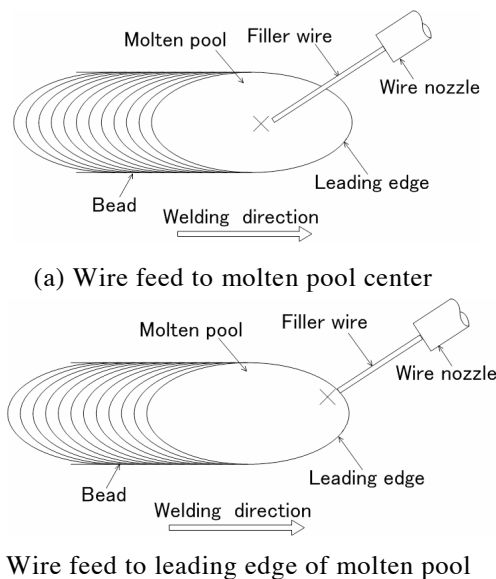


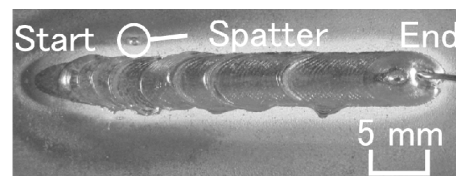
Fig.3 Wire feed location

## 3. 実験結果と考察

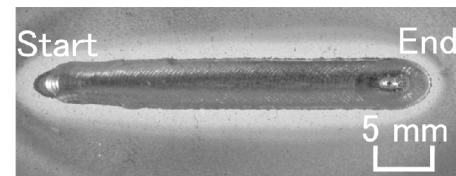
### 3-1 溶加ワイヤ供給実験

#### 3-1-1 溶加ワイヤの供給位置が溶接ビード外観に及ぼす影響

溶加ワイヤの供給位置が溶接ビード外観に及ぼす影響を Fig.4 に示す。Fig.4(a) は Fig.3(a) のように溶加ワイヤを溶融池の中心に供給した場合の溶接ビード外観、Fig.4(b) は Fig.3(b) のように溶融池の前縁に供給した場合の溶接ビード外観を示している。Fig.4(a) より溶融池の中心に向かって溶加ワイヤを供給すると、溶融金属の飛散 (スパッタ) が発生し、凹凸のある不安定な溶接ビードになることが分かった。溶接状況を観察した結果、溶加ワイヤを溶融池中心に供給すると、溶加ワイヤは溶融池に到達する前にレーザー光で溶融・球状化し、それが成長してある程度の大きさになると溶融池に落下する。この過程を不規則に繰り返すため、溶融池の中心に溶加ワイヤを供給した場合、溶接ビードが不安定になる。それに対して、Fig.4(b) の溶接ビードは凹凸が無く安定している。これは、溶加ワイヤを溶融池の前縁に供給することで、溶加ワイヤがレーザー光にほとんど触れず、溶融池に直接挿入され溶融池内で溶融するためである。



(a) Wire feed to molten pool center



(b) Wire feed to leading edge of molten pool

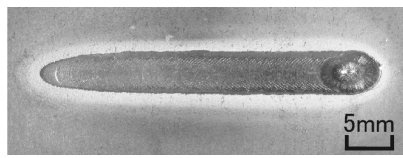
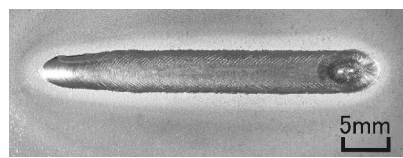
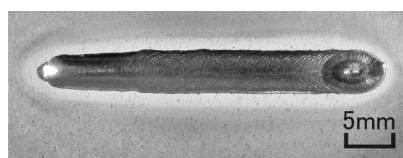
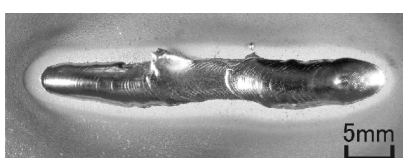
Fig.4 Effects of wire feed location on bead appearance

#### 3-1-2 溶加ワイヤの供給速度が溶接ビード外観に及ぼす影響

溶加ワイヤの供給速度が溶接ビード外観に及ぼす影響を Table 1 に示す。このとき溶加ワイヤの供給位置は、良好な溶接ビード外観が得られる溶融池前縁供給である。Table 1 より、溶加ワイヤの

供給速度が  $v=2.5\sim 12.5$  mm/s までは良好なビード外観が得られるが、供給速度が  $v=17.5$  mm/s になると、溶接ビードが不安定になっていることが分かる。その原因を調べるために供給速度  $v=17.5$  mm/s の溶融状況を観察すると、溶加ワイヤが完全に溶融せずに、溶融池内から溶加ワイヤの形状をほぼ保ったまま出てくるために不安定な溶接ビードになったことが分かった。供給速度が速くなるにしたがって裏面溶融長さが短くなる現象が確認できた。その理由は、溶融池に供給される溶加ワイヤの量が増加すると、溶加ワイヤを溶融させるのに必要な熱量が増加し、その結果として母材を溶融させる熱量が減少するためと考えられる。

Table 1 Effects of wire feed location on bead appearance

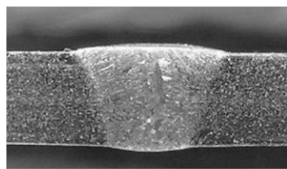
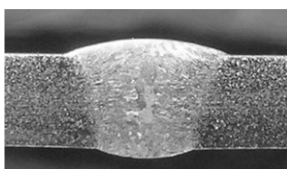
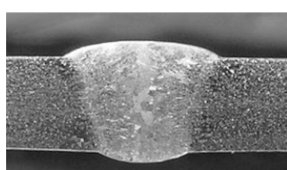
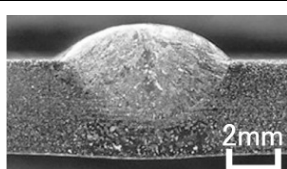
Wire feed rate $v$ (mm/s)	Bead appearance
2.5	
7.5	
12.5	
17.5	

### 3-1-3 溶加ワイヤの供給速度が溶接金属形状に及ぼす影響

溶加ワイヤの供給速度が溶接終了点から 10 mm 手前の位置の溶接金属形状に及ぼす影響を Table2 に示す。供給速度が  $v=2.5$  mm/s のとき、

溶接部表裏面の余盛は溶加ワイヤを供給しないメルトラン溶接の余盛高さとはほぼ同じであり、溶加ワイヤ供給の効果があまり認められない。溶加ワイヤ供給速度が  $v=7.5$  mm/s と  $v=12.5$  mm/s の結果を見ると、余盛高さはそれぞれ母材板厚の約 30% と約 40% であり、必要な余盛が確保できている。しかし、供給速度が  $v=17.5$  mm/s のときは、溶込み量の不足が発生する。溶加ワイヤの溶融に多くの熱量が費やされるために母材の裏面まで溶融しておらず、溶加ワイヤの供給速度として適していない。総ての溶加ワイヤ供給速度においてブローホール等の溶接欠陥は認められなかった。

Table 2 Effects of wire feed rate on bead cross sections

Wire feed rate $v$ (mm/s)	Bead cross sections
2.5	
7.5	
12.5	
17.5	

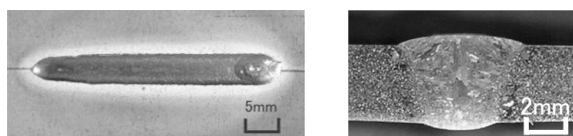
### 3-2 突合せ溶接継手の製作と機械的性質

#### 3-2-1 最適溶加ワイヤ供給条件での突合せ溶接実験

前節の結果から、実験範囲内での最適な溶加ワイヤ供給条件を選定する。選定する溶加ワイヤ供給位置は、凹凸のない安定した溶接ビード外観が得られる溶融池前縁が適しており、供給速度は、



Table 1 のように母材板厚の約 30 %の余盛高さが確保できることと長い裏面溶融長さを確保できること考慮すると、 $v_w = 7.5 \text{ mm/s}$  が適していると考えられる。この最適溶加ワイヤ供給条件で突合せ溶接継手を製作し、機械的性質を調査した。最適溶加ワイヤ供給条件で溶接したときの溶接ビード外観とマクロ組織を Fig.5 に示す。安定した溶接ビードが得られ、マクロ組織からはブローホール等の溶接欠陥のないことが確認できる。



(a) Bead appearance (b) Bead cross sections

Fig.5 Butt welding

### 3-2-2 突合せ溶接継手の引張試験結果

上述した条件で製作した突合せ溶接継手から、7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、すべて母材部で破断した。また、突合せ溶接継手の引張強さを正規確率紙にプロットすると、Fig.6のように直線近似でき、突合せ溶接継手の引張強さの分布は正規分布で近似できることが分かった。引張強さの平均値は 712 MPa で母材強度とほぼ同じ値が得られた。変動係数については母材よりも少し大きく、7.65 %であったが、真空中で DL 溶接法によって満足できる突合せ溶接継手が得られることが分かった。

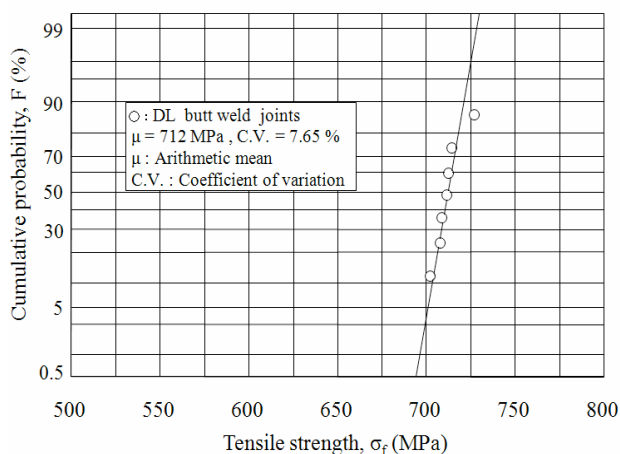


Fig.1 The distribution of the tensile

## 4. 結 論

SUS304ステンレス鋼を供試材にして、DL溶接法

による真空中でのビード・オン・プレート溶接および突合せ溶接実験を行い、以下のことを明らかにした。

- 1) 溶加ワイヤを溶融池の中心に供給した場合、溶融金属の飛散(スパッタ)が発生し、凹凸のある不安定な溶接ビードになった。
- 2) 溶加ワイヤを溶融池前縁に供給すると、溶融金属の飛散(スパッタ)が発生せず、平滑で安定した溶接ビードが得られる。
- 3) 溶加ワイヤ供給速度が速くなると余盛高さが高くなり、豊富な溶接金属を得ることができるが、適値以上になると未溶融状態で溶融池から出たり、母材の溶込み不足が発生する。
- 4) 溶接ビード外観とマクロ組織の観察、裏面の溶融長さを考慮した結果、今回のレーザパワーでは溶融池前縁に  $v = 7.5 \text{ mm/s}$  の速度で溶加ワイヤを供給することが、真空環境下で SUS304 ステンレス鋼を溶接する最適溶加ワイヤ供給条件である。
- 5) 最適溶加ワイヤ供給条件で製作した突合せ溶接継手の引張強さは、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健全な溶接継手が得られる。

以上の結果から、適切な溶接条件を設定することで、溶接金属の飛散がない溶接ができ、健全な溶接継手が得られる。したがって、真空中で宇宙 DL 溶接法が適用できる可能性がある。

### 参 考 文 献

- [1] 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, レーザー加工学会誌, 9, 1(2002), pp. 29-33.
- [2] 吹田義一, 苺谷英司, 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