

真空中でのアルミニウム合金の半導体レーザー溶接現象

高松工業高等専門学校 相賀裕太郎, 吹田義一, 山崎健太, 船城 央, 正箱信一郎, 寺嶋 昇,
平岡延章
香川県産業技術センター 山下雅弘

Welding Phenomena with Direct-Diode Laser on Aluminum Alloy in Vacuum

*Yutaro Aiga, Yoshikazu Suita, Kenta Yamasaki, Nakaba Funaki, Shinichiro Shobako,
Noboru Terajima, Nobuaki Hiraoka*

Takamatsu National College of Technology, 355 Chokushi, Takamatsu, Kagawa 761-8058
E-Mail: suita@takamatsu-nct.ac.jp

Masahiro Yamashita

Kagawa Prefectural Industrial Technology Center, 587-1 Gohtoh, Takamatsu, Kagawa 761-8031
E-Mail: yamasita@itc.pref.kagawa.jp

Abstract: The diode laser (DL) welding process has possible applicability in space, because it is highly efficient, compact, lightweight and free of maintenance. We carried out the bead-on-plate and butt weld experiments on A2014 aluminum alloy using the DL welding process in vacuum. It is clear that there is a spattering phenomenon peculiar to a vacuum environment that the high-temperature fine particles scatter from the surface during the butt and bead-on-plate weld, and the A2014 aluminum alloy butt weld joint welded with wire feed has the enough joint strength.

Key words: Space, Diode laser welding, Aluminum alloy, Direct-diode laser, Vacuum

1. 緒 論

現在, 国際宇宙ステーションの建設が2010年の完成に向けて行われている。国際宇宙ステーションの運用期間は約10年の長期間に及ぶために, 宇宙での修理・改造が必要となる可能性がある。また, NASAは有人火星探査計画やそれに伴う月面基地建設計画を発表している。これらの理由から宇宙での溶接技術は近い将来において必要になると考えられる。

一方, 近年の半導体レーザー(Diode Laser, 以下ではDLと記す)装置の高出力化, 高発振効率化は目覚しく, 小型, 軽量などの特長を持つため, 宇宙空間での宇宙構造物の建造・修理に適用できる可能性を持っている。著者らはそこに注目し, 宇宙DL溶接法^{1, 2)}を提案した。これまでの宇宙DL溶接法による突合せ溶接実験により溶加ワイヤ供給の必要性が確認され, ステンレス鋼において溶加ワイヤ供給の有効性が示された。しかし, 宇宙材料であるアルミニウム合金についての溶接現象および溶加ワイヤの有効性は明らかになっていない。

そこで, 本研究では真空中でアルミニウム合金を供試材としたDL溶接をビードオンプレート溶接および突合せ溶接について行い, 溶接現象を調査した。溶接現象の調査過程で, 溶接を行う際に注意

を必要とする溶融池から飛散物が発生する現象を確認したため, それについても調査し, 発生原因, 発生機構を考察した。また溶加ワイヤ供給を行う突合せ溶接継手を作製し, 溶接継手強度および硬度の評価を行うことで溶加ワイヤ供給の有効性を調査した。

2. 実験方法

実験装置はFig.1に示すDL溶接実験システムを用い, 到達圧力 6×10^{-6} Paの真空チャンバと最大出力2.5 kWのDL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。またDL装置の仕様をTable 1に示す。

溶接中はレーザー光学部品への金属蒸着による損傷を防止するために, Fig.2に示すレーザー射出ユニットにノズルを取り付け, そこからArガスを2.5 mm/sで流出させている。溶加ワイヤの供給を行う実験では, Fig.2に示す溶加ワイヤ供給装置を用い, 直径1 mmの溶加ワイヤA4043を用いた。供試材にはA2014-T6アルミニウム合金を用い, 表面状態は受け入れ状態で熱処理時に発生した酸化膜が残存する表面を脱脂した。板厚3 mm×板幅90 mm×長さ150 mmをビードオンプレート溶接, 板厚3mm×板幅45 mm×

長さ150 mmの2枚の板をI型開先(ルートギャップ 0)で両端を仮付け溶接したものを突合せ溶接に用いた。また表面に存在する酸化膜の影響を調査するために、ビードオンプレート溶接および突合せ溶接の両方について、溶接予定部を機械加工し酸化膜を除去して、板厚を3 mmにした同寸法の供試材も使用した。

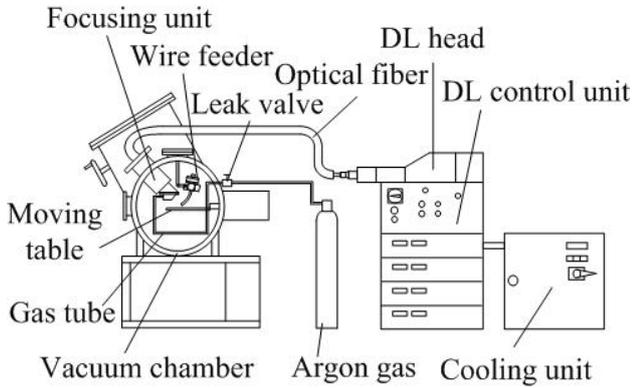


Fig.1 DL溶接実験システム

Table 1 DL溶接装置の仕様

Irradiating angle	45 deg
Wave lengths	808 ± 10 nm , 940 ± 10 nm
Output power	2.5 kW
Laser power	1.5 kW
Focal length	200 mm
Focus size	Ellipse : 6 × 9 mm

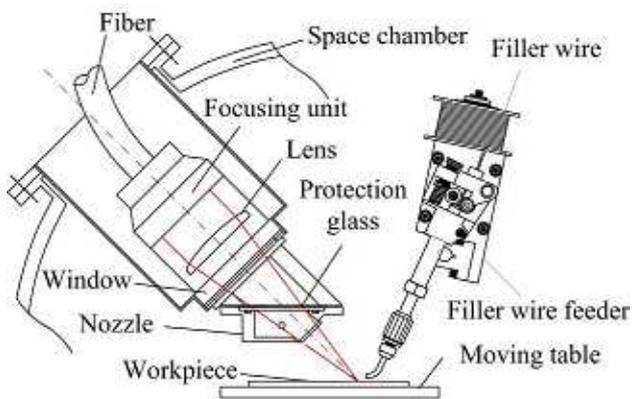


Fig.2 レーザ射出ユニットと溶加ワイヤ供給装置

3. 実験結果と考察

3.1 真空環境下でのアルミニウム合金の溶接現象

3.1.1 ビードオンプレート溶接

ビードオンプレート溶接ではレーザー照射部に溶融池が形成され、その溶融池が溶接進行方向に移動して溶接が進む安定した溶接現象であった。滑らかな溶接ビードの溶接で、溶接ビード中央部では酸化膜にき裂が発生した。しかし、Fig.3に示すように、溶接中に不規則に溶融池からスパッタのような粒子

が飛散する現象が10秒当り10~20回の頻度で観測された。この現象は実際の宇宙で溶接を行う場合を考えると、危険であり、防止および抑制する必要があると考えられる。

次に、表面を機械加工し酸化膜を除去してビードオンプレート溶接を行った。溶接中の溶融池の溶融現象に違いは見られなかった。しかし、前述の飛散現象は確認されなかった。これは表面に存在する酸化膜が機械加工によって除去されたためであり、飛散現象の発生原因の一つが酸化膜の存在と考えられる。

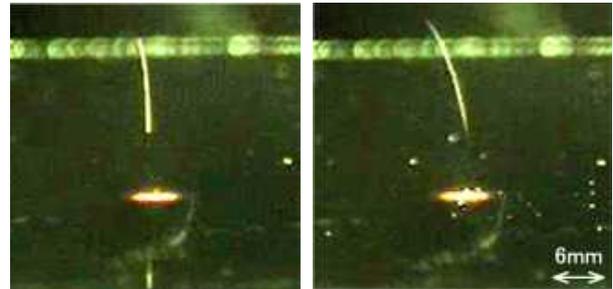


Fig.3 溶融池から飛散物が発生している様子

3.1.2 突合せ溶接

突合せ溶接の溶接状況をFig.4に示す。ビードオンプレート溶接の溶接現象に比べると、溶融池が沸騰した液体の表面のような振舞いを示し、不安定であった。それに伴い溶接ビードも滑らかでなかった。また飛散現象はビードオンプレート溶接の場合と比べると飛散の頻度が約10倍に増加した。

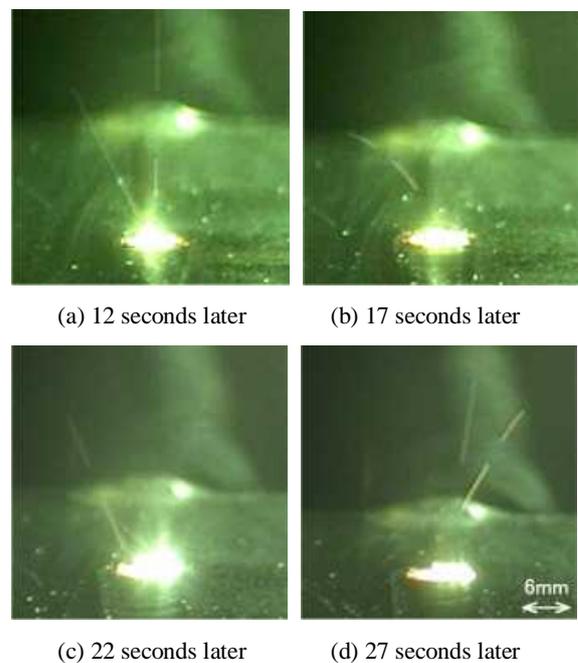


Fig.4 突合せ溶接の溶接状況

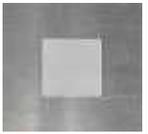
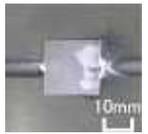
ビードオンプレート溶接と同様に表面を機械加工して酸化膜を除去した供試材の溶接を行ったが、ビードオンプレート溶接のように飛散現象が抑制できなかった。このことから、ビードオンプレート溶接と突合せ溶接の飛散現象は発生機構に違いがあると考えられる。現在、突合せ溶接の飛散現象の原因を調査中であり発生機構の解明の必要がある。

3.2 溶融池からの飛散物飛散現象

3.2.1 レーザ照射部の温度推定

ビードオンプレート溶接において、表面を機械加工して酸化膜を除去した場合は飛散現象が現れなかったことから、材料表面の酸化膜の存在が飛散現象の原因の一因と推察される。そこで、表面の酸化膜がレーザー照射によりどの程度の温度になっているかを調査するため、融点の異なる3種類の材料を供試材表面に置いてレーザー照射実験を行った。材料は20 mm角の石英板(SiO_2 , 融点: 約1720 K), アルミナ板(Al_2O_3 , 融点: 約2293 K), タングステン板(W, 融点: 約3695 K)である。Table 2に実験前後の状態を示す。レーザー照射の結果、石英板および酸化膜と同成分のアルミナ板は溶融し、タングステン板は溶融しなかった。タングステン板の一部が溶融しているように見えるが、面分析を行った結果、母材のアルミニウム合金が溶融し、表面で凝固していることがわかった。これらの結果から供試材表面はアルミナ板、つまり酸化膜の溶融温度に達していると考えられる。

Table 2 高融点材料のレーザー照射実験結果

Materials	SiO_2	Al_2O_3	W
Melting point (K)	1720	2293	3695
Before weld			
After weld			

3.2.2 飛散現象の発生機構に対する考察

酸化膜の残存する供試材のビードオンプレート溶接では飛散現象が発生し、突合せ溶接では酸化膜の有無に関係なく飛散現象が発生した。ビードオンプレート溶接の場合と突合せ溶接の場合を比較すると、突合せ溶接の場合の方が飛散現象が顕著に表れた。ここではビードオンプレート溶接の飛散現象の発生機構について考察する。

A2014-T6の表面に存在する酸化膜中には多数の気泡が存在³⁾する。A2014-T6のSEMによる表面付近の酸化膜を含む断面図をFig.5に示す。

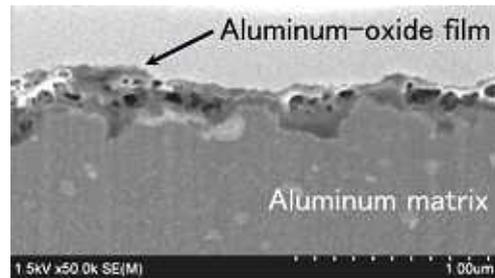
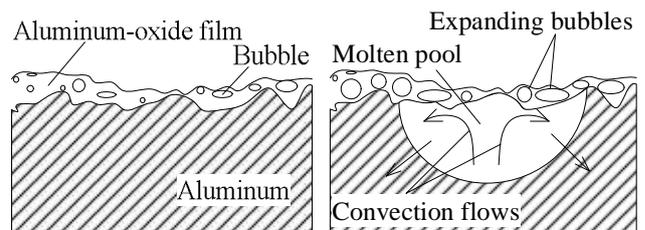
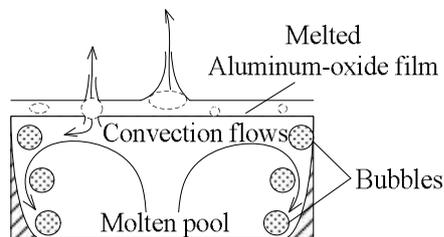


Fig.5 電子顕微鏡による供試材表面の断面図³⁾

A2014-T6アルミニウム合金の酸化膜は不均一な厚さ(70 ~ 200 nm)でアルミニウム合金素地上に存在し、多数の気泡を含んでいる。3.1.1項で述べたように、表面の機械加工を行うと多数の気泡を持つ酸化膜が除去され飛散現象が発生しなかった。この事実より、飛散現象の原因の一因として酸化膜の存在が挙げられる。気泡中のガスが、レーザー照射による急激な加熱で膨張することは容易に考えられる。真空環境下であり、軟化・溶融した酸化膜中でこのような気泡の膨張が起これば下図に示すような飛散現象が発生していると考えられる。



(a) Before laser irradiation (b) Right after laser irradiation



(c) Under laser irradiation

Fig.6 ビードオンプレート溶接における飛散現象発生機構

Fig.6(a)はFig.5の模式図であり、ここにレーザーが照射されるとFig.6(b)のように融点の低い母材だけ先に溶融し、表面の酸化膜が溶融していない状態となる。このとき酸化膜内の気泡が膨張し、溶融池内には熱対流が発生する。さらにレーザー照射が継続されるとFig.6(c)のように酸化膜が溶融し、酸化膜中の

気泡が加熱されさらに膨張することで破裂し、外部への飛散と溶融金属へ気泡として混入が起こる。溶融池内に混入した気泡は、熱対流によって溶接ポンド部へ移動する。このように飛散現象の原因は酸化膜中の気泡の膨張・破裂であると考えられる。

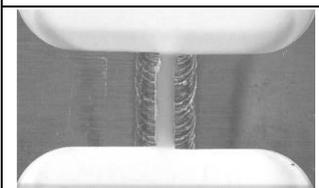
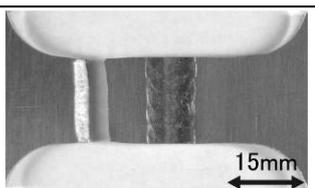
3.3 突合せ溶接継手の機械的性質

溶加ワイヤを供給速度17.5mmで溶融池の前縁に供給しながら突合せ溶接を行った。このサンプルから引張試験片を採取し、引張試験を行った。引張試験後の溶加ワイヤ供給の有無両方の試験片破断結果をTable 3に示す。また溶加ワイヤを供給した場合の供試材の硬度分布をFig.7に示す。

引張試験の結果より溶加ワイヤを供給しない場合は溶接部で破断し、その引張強さは201 MPaであった。一方、溶加ワイヤを供給した場合は母材熱影響部で破断し、引張強さは301 MPaであった。母材熱影響部で破断した原因は、Fig.7に示すように過時効による軟化が原因である。

溶接継手の製作では、この過時効による強度低下は現状では防止できない。これらの結果から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継手を製作できることがわかった。

Table 3 引張試験結果

without wire feed	with wire feed
	

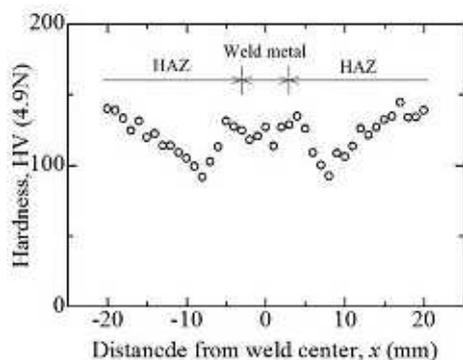


Fig.7 溶加ワイヤを供給した溶接継手の硬度分布

4. 結論

真空中でのDL溶接によるアルミニウム合金の溶接現象を調査し、溶加ワイヤ供給を行う突合せ溶接継手を評価することで溶加ワイヤの有効性を明らかにした。また溶接現象の調査の過程で、宇宙環境に

おいて溶接を行う際に注意を必要とする溶融池から飛散物が発生する現象が発生したため、それについても調査し、発生原因、発生機構を考察した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) ビードオンプレート溶接は安定した溶接が行え、溶融池表面の酸化膜は流動しないが、溶接ビード中心部では部分的に酸化膜が除去される。
- 2) 表面に酸化膜が残存するビードオンプレート溶接では非周期的に溶融池から飛散物が発生する。
- 3) 表面を機械加工して酸化膜を除去した供試材を用いたビードオンプレート溶接では飛散現象の発生を抑制できる。
- 4) 突合せ溶接は溶融池が沸騰した液体のような激しい振舞いを示し、それに伴って飛散現象も激しく起こる。
- 5) 突合せ溶接では表面を機械加工した供試材を用いてもビードオンプレート溶接のように飛散現象を抑制できない。
- 6) レーザ照射部の温度は酸化膜である酸化アルミニウムの融点に達し、タングステンの融点には到達していない。
- 7) 表面の酸化膜には多数の気泡が存在しているという事実から、ビードオンプレート溶接における飛散現象の原因は表面の酸化膜中の気泡と、溶融したときに発生した気泡であるといえる。
- 8) 飛散現象が発生しても、溶加ワイヤを供給することで十分な継手強度を有する突合せ溶接継手を作製できる。

ビードオンプレート溶接における飛散現象は、実験結果より考えられる発生原因から発生機構を考察できた。しかし突合せ溶接における飛散現象の発生原因は特定できなかった。今後突合せ溶接における飛散現象の発生原因を調査、発生機構の検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 吹田義一，黒川哲平，正箱信一郎，佐藤順子，菟谷英司，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，菟谷英司，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，江國友英，亀井美佐，佃芳行，寺嶋昇 他：宇宙GHTA溶接による真空中での溶接現象とアルミニウム酸化膜の除去機構，日本航空宇宙学会論文集，54巻(2006)，632号，pp.397-402