

高出力 YAG レーザを用いた溶接技術の研究

(チタン及びアルミの溶接条件の研究)

平賀 仁*

Study on high power YAG laser welding.
(Study on welding procedure of titanium and aluminum alloy.)

Hitoshi Hiraga

抄 録

Nd:YAG レーザ(以下 YAG レーザ)は、優れたビーム品質を維持しながら高出力化が一段と進み、また光ファイバーを利用できるために加工の自由度が大きく、非常に注目されている。しかし、高出力 YAG レーザは、ここ数年で著しく進んだために、CO₂ レーザを用いた加工技術と比較すると、その特性が十分に理解されておらず、今後の普及のためには、加工技術のデータベース化が急務である。本研究では、YAG レーザ溶接の系統的な技術蓄積のために、昨年度の軟鋼及びステンレス鋼に引き続き、純チタンおよびアルミニウム合金(以下 アルミ合金)の、最適加工条件データベース化を行った。

1. 緒言

YAG レーザの波長は、1.06 μm で、CO₂ レーザの波長の 1/10 であり、そのことに関連して、一般に金属材料表面での吸収が高く効率の高い溶接が可能である。また石英製光ファイバーによって伝送できるために、多関節ロボットの使用が容易であり、高速度・高精度というレーザー溶接の特徴を、自由な位置や方向でも実現できる。

本研究では 6kW YAG レーザで純チタンおよびアルミ合金を溶接し、溶接条件(レーザー出力、溶接速度)と溶接状態の関係を調査した。またプラズマの影響など YAG レーザと CO₂ レーザを比較し、その特徴を明らかにした。

2. 実験方法

2.1 実験装置

供試材として、板厚が 0.6 mm, 1.0 mm および 3.0 mm の純チタン(JIS1 種)とアルミ合金 A5052 を用いた。また試験片寸法は、どれも 60 \times 125mm とした。本研究で使用した 6 kW YAG レーザ装置の仕様を表 1 に示す。

表 1 6kW YAG レーザ装置仕様

レーザーの方式	MOPA(Master Oscillator Power Amplifier)
発振波長	1.06 μm
平均出力	6.0 kW 以上
ピーク出力	18 kW
ビーム品質	1.00 mm \cdot mrad
光ファイバー	600 μm NA0.15
周波数	30 ~ 500 Hz
変調 duty	100 ~ 40% 可変

レーザー発振器から出た光は、光ファイバー(コア径 600 μm)を用いて伝送し、焦点距離 187 mm のリコリメートレンズで平行光にした後、同じ焦点距離のレンズを用いて集光して加工に用いた。各出力の焦点位置とスポット半径の関係を図 1 に示す。

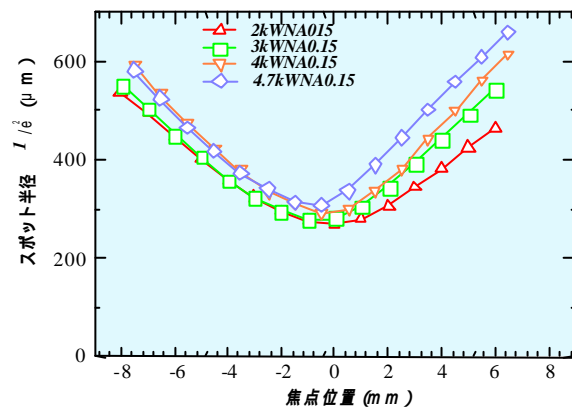


図 1 各出力での集光特性

出力が高いほど最小スポット径はわずかに大きくなるが、CO₂ レーザで見られたような焦点位置の変動はない。これは発振器内部の熱歪みはファイバーを通すことでキャンセルされ、またレンズ素材である石英の熱膨張係数が $1 \times 10^{-6} / \text{K}$ 以下と非常に小さいためである。

2.2 ビードオンプレート溶接

溶込み深さやビード形状などの溶接特性を調べるため、ビードオンプレート溶接を行った。

* (株)レーザー応用工学センター技術部

A5052 では、溶接する面の酸化膜を、予めステンレス製ワイヤーブラシを用いて除去し、さらに全ての試験で溶接前に表面をアセトンで洗浄した。また焦点位置は、試験片の表面に設定した。またレーザー出力を 1～5 kW、溶接速度を 0.2～20 m/min の間で変化させて溶接した。

またアルゴンガスをシールドガスに使用し、ノズル高さ 5 mm、直径 7 mm のノズルからガス流量 30 l/min でビームと同軸状に流した。チタンの場合には、レーザー照射後も十分にシールドして、酸化を防ぐ必要があるため、長さが約 100 mm のシールドボックスをノズルに取り付け、アルゴンガスを 30 l/min で流して溶接した。

2.3 突合せ溶接

A5052 はワイヤーブラシを用いて、突合せ端部近傍の酸化膜を除去後、全ての条件で端部を十分にアセトン洗浄して、機械加工した端面を突合せて溶接した。レーザー出力を 1～5 kW、溶接速度を 0.5～14 m/min の間で変化させて調べた。シールドガス及び焦点位置はビードオンプレート溶接と同じ条件で試験した。シールドは、センターガスシールド、アフターシールド以外にバックシールド（ビードの裏面を密閉したボックス構造にして、アルゴンガスを 10 l/min で流す方式）も併用した。

突合せ溶接の評価方法は、溶接表裏面の外観観察、断面のマクロ観察、引張試験及び曲げ試験とした。引張試験及び曲げ試験は JIS に準じて行った。

2.4 重ね合せ溶接

試験片を 2 枚重ねてレーザー溶接を行った。レーザー出力を 1～5 kW、溶接速度を 0.5～16 m/min の間で変化させた。焦点位置及びシールドガスは突合せ溶接と同様とし、評価方法(表裏面観察)は溶接断面マクロ観察とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 ビードオンプレート溶接

純チタンの、ビードオンプレート試験による溶接条件と溶込み深さの関係を、図 2 に示す。

出力と溶け込み深さの関係は、平成 11 年度に調べた、SUS304 とほぼ同じである。

また、シールド不良の場合、酸化によって吸収が増加するために、溶け込み深さが増加する。ただし、レーザー出力が高いほど、入熱が多く酸化されやすかった。

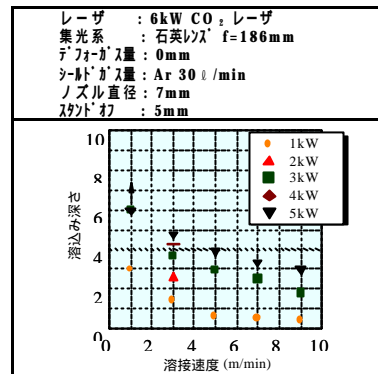


図 2 溶接条件と溶け込み深さの関係(純チタン)

また図 3 に A5052 のビードオンプレート溶接による溶接条件と溶込み深さの関係を示す。

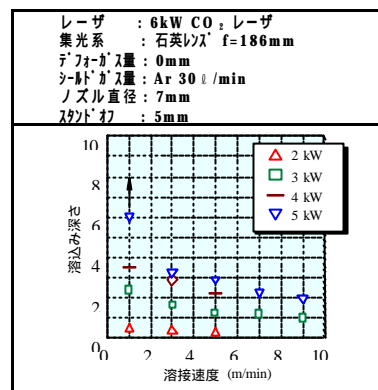


図 3 溶接条件と溶け込み深さの関係(アルミ A5052)

出力が 2 kW の条件では、レーザー光が表面で反射されるために、殆ど溶込まない。

従って本装置で A5052 を溶接するには、3 kW 以上必要である。

また、速度が遅いほど、溶け落ちの傾向が見られた。

3.2 突合せ溶接

純チタン 板厚 1.0 mm の、突合せ溶接の溶接断面マクロ写真の一例を図 4 に示す。

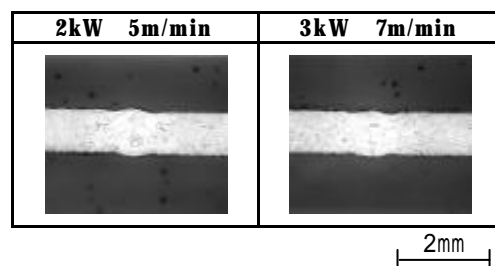


図 4 純チタン 1.0 mm 突合せ溶接の断面写真

また溶接条件と適正加工条件の関係をまとめた結果を図5に示す。

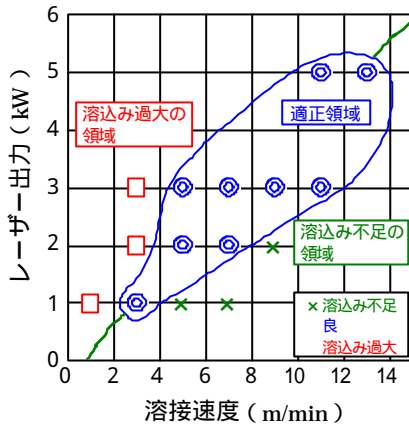


図5 純チタン1.0 mmtの突合せ溶接最適加工条件のグラフ

レーザ出力2 kWの時には、5 m/min、3 kWの時には、7 m/minで良好な溶接となった。また速度が遅いと入熱が大きくなり、溶け込み過大となって溶け落ち、また速度が速いと非貫通となった。アフターシールドを外して溶接すると、表面が著しく酸化して銀色から白色になった。このように溶接ビードの酸化が激しい場合には、溶接金属が脆くなるため注意が必要である。

またA5052板厚1.0 mmの、溶接断面マクロ写真の一例を図6に示す。

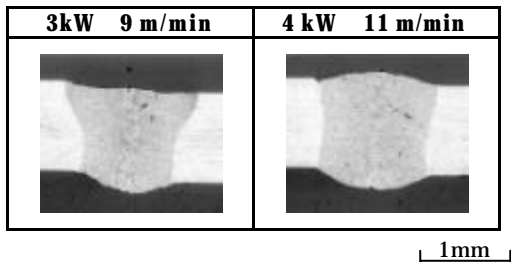


図6 アルミA5052 1.0 mmt突合せ溶接の断面写真

また溶接条件と適正加工条件の関係をまとめた結果を図7に示す。

レーザ出力が3 kWより低い場合は溶接不能であり、適正な溶接条件は出力が3 kWのとき、9 m/min、出力が4 kWのとき11 m/minであった。バックシールド無しで溶接した結果、ビード裏面に氷柱のように溶接金属が垂れ下がった。これはキーホールから熔融したアルミが吹き出された直後に酸化されて固まった物と考えられ、バックシールドが有効であることが判明した。

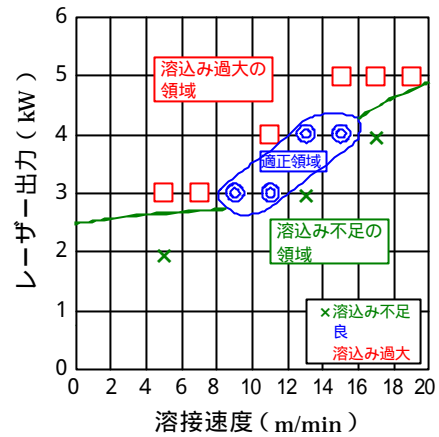


図7 アルミA5052 1.0 mmtの突合せ溶接最適加工条件のグラフ

溶接金属中央部を横切る方向でのビッカース硬さ測定結果を、図8及び図9に示す。

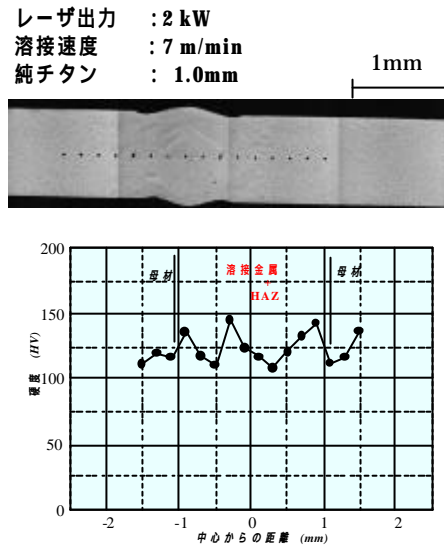


図8 ビッカース硬さ測定結果例(純チタン)

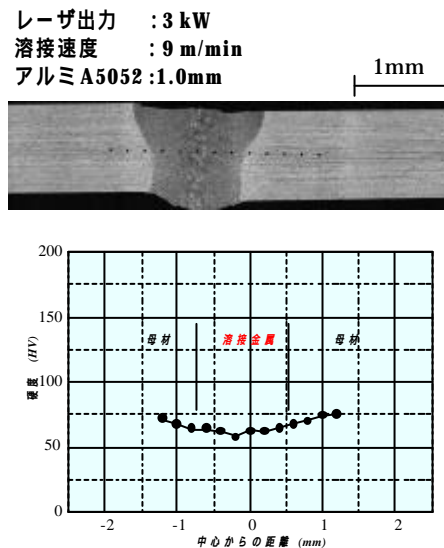


図9 ビッカース硬さ測定結果例(A5052)

純チタンの場合は、溶接金属と母材および HAZ 部の硬さは殆ど差がなく、HV110 から 150 の間に分布する。一方 A5052 では、溶接金属部の硬度は母材よりも低くなる。これは高蒸気圧元素である Mg の選択的欠損と考えられる。

CO₂ レーザおよび YAG レーザでの、純チタンおよび A5052 の適正加工条件を比較した結果を、図 10 に示す。

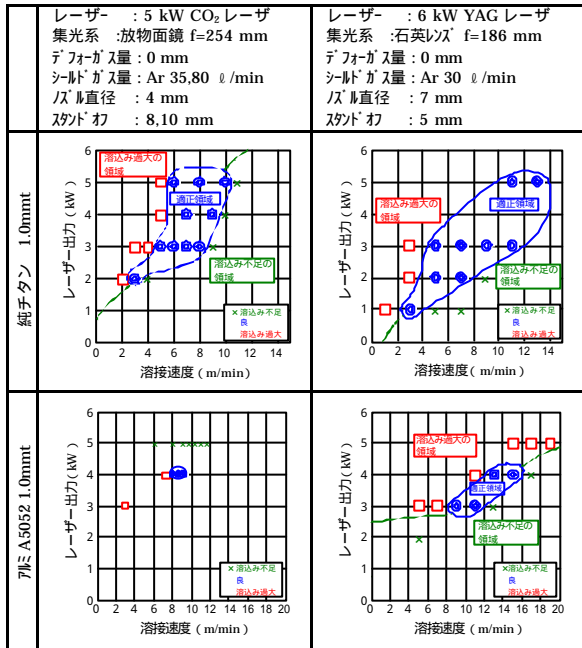


図 10 レーザの違いによる溶接条件と突合せ溶接における溶込み深さの関係

純チタンの場合、YAG レーザの方が、若干適正領域が広い程度であるが、A5052 では明らかに YAG レーザの適正領域の裕度が広い。これは表面での吸収の差とレーザ誘起プラズマの発生の有無によるものである。

次に溶接部の機械的な性質を調べるために、適正加工条件で溶接した試験片の引張試験結果を表 2 に示す。

表 2 引張試験結果

材質 板厚	溶接条件	耐力 _{0.2} (N/mm ²)	引張強さ TS (N/mm ²)	破断伸び (%) GL=20 mm	比強度	破断位置
純チタン 0.6 mm t	母材	177	327	76		
	1 kW, 3 m/min	220	325	87	99%	R. M.
純チタン 1.0 mm t	母材	269	345	96		
	1 kW, 3 m/min	228	346	72	100%	R. M.
純チタン 3.0 mm t	母材	295	355	90		
	3 kW, 3 m/min	252	336	48	95%	R. M.
A5052 1.0 mm t	母材	191	255	14		
	4 kW, 15 m/min	164	222	8	87%	W. M.
A5052 3.0 mm t	母材	158	221	23		
	5 kW, 4 m/min	134	201	14	91%	W. M.

純チタンの場合、適正条件で溶接されていれば、引張強さは母材以上となり、破断位置も母材である。しかし破断伸びは母材よりも若干低下する。一方 A5052 では、引張強度は母材よりも減少し、破断位置は溶接金属部となる。破断伸びも母材の 60 % 程度に低下する。これは溶接金属部の硬度低下に起因すると考えられる。引張試験と同加工条件で溶接した試験片の曲げ試験を行ったが、チタン全種類と板厚が 1.0 mm の A5052 では、適正な条件で溶接した全ての試験片で、割れは見られず、良好な結果が得られた。

3.3 重ね合せ溶接

純チタン、板厚 1.0 mm を重ね合せ溶接した際の溶接断面マクロ写真の一例を図 11 に示す。

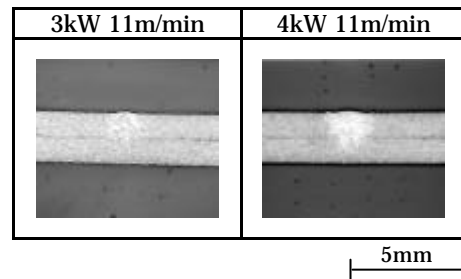


図 11 純チタン 1.0 mm t 重ね合せ溶接の断面写真

また裏面の外観を重視して、下板を十分溶融し、裏面へ非貫通のものを適正として、適正加工条件を図 12 に示す。

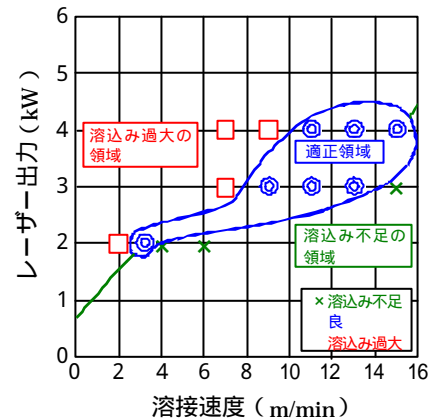


図 12 純チタン 1.0 mm t の重ね合せ溶接最適加工条件のグラフ

3 kW では 9 ~ 13 m/min、4 kW では 11 ~ 15 m/min が適正条件溶接である。また A5052、板厚 1.0 mm を重ね合せ溶接した際の溶接断面マクロ写真に一例を図 13 に示す。

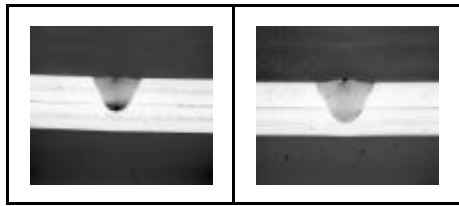


図 13 アルミ A5052 1.0mmt 重ね合せ溶接の表・裏ビード、断面写真

またその適正加工条件を図 14 に示す。

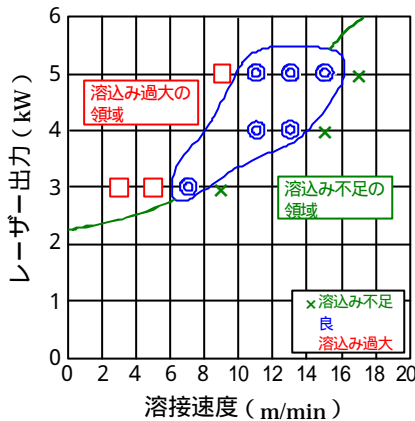


図 14 アルミ A5052 1.0mm の重ね合せ溶接最適加工条件のグラフ

4 kW では 9 ~ 13 m/min、5 kW では 11 ~ 15 m/min が適正条件溶接である。また図 15 に CO₂ レーザを用いた溶接と適正溶接条件と比較した結果を示す。

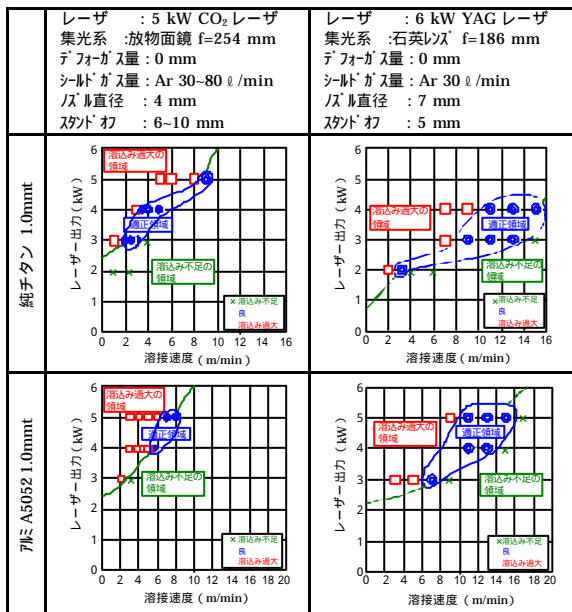


図 15 重ね合せ溶接におけるレーザの違いによる溶接条件と溶込み深さの関係

突合せ溶接同様にアルミ合金では YAG レー

ザによる溶接は CO₂ レーザよりも適正領域が広い。CO₂ レーザの場合レーザ誘起プラズマによる吸収のため、低出力では不安定となる。

3.4 溶接に関する周辺技術の検討

アルミ合金の溶接では、溶接ビードにアンダーカットとアンダーフィルの発生が避けられなかった。そこで、フィラーワイヤーを入れて余盛り付けを検討した。図 16 にフィラーワイヤーを入れた際のビード外観を示す。

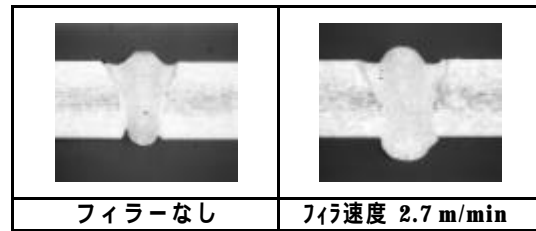


図 16 フィラーワイヤー利用による溶接ビード外観 (A5052, 3mmt, 出力 4kW, 溶接速度 3m/min, ワイヤー A5183-Y 1.6mm)

ワイヤー供給速度が溶接速度よりも遅いと、アンダーカットが減ることが分かる。またフィラーワイヤーの使用により、引張強度が若干向上した。また高速カメラを用いて純チタンおよび A5052 等の溶接状態を観察した。これらの結果は動画として見た方がわかりやすいため、実験条件などを書き込み mpeg ファイルとしてまとめた。

4. 結言

高出力 YAG レーザを用いて純チタンおよびアルミ合金 A5052 の、突合せ及び重ね合わせ溶接を行い、溶接条件と溶接状態との関係を明らかにした。また CO₂ レーザとの溶接条件の比較を行い、特にアルミ合金では、YAG レーザによる溶接は CO₂ レーザよりも溶込みが深くなり、また安定しやすいこと、また酸化防止シールド条件が、軟鋼や SUS304 などと比べて重要であり、センターガスシールドに加えてアルミ合金ではバックシールドが、またチタンではアフターシールドが必要であることが分かった。

5. 今後の課題

近年地球環境保護の観点から、マグネシウム合金の利用が進んでいる。YAG レーザはプラズマの影響が少ないことからマグネシウム合金の溶接に適していると考えられる。今後それらの溶接特性の探索に取り組む必要がある。