高出力 YAG レーザを用いた溶接技術の研究 (マグネシウム合金の溶接条件の研究)

平賀　仁*

Study on high power YAG laser welding
(Study on welding conditions of magnesium alloy)

by
HIRAGA　Hitoshi

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、CO_2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、昨年度までの軟鋼、ステンレス鋼、純チタンおよびアルミニウム合金に引き続き、マグネシウム合金の最適加工条件データベース化を行った。

1.　緒言

近年実用合金上最も軽量であるマグネシウム合金の携帯情報機器や輸送機器への適用が進んでいる。

マグネシウム合金は最密六方構造であることから、室温での塑性加工性が著しく劣るため、主にダイカスト法などの鋳物によって作られており、溶接の検討は進んでいない。しかし近年ではプレス加工技術が大きく進展したため、展伸材の利用も進みつつあり、その場合には溶接技術はキーテクノロジーの一つとなる[1)]。

また大型構造物を作るには、ダイカスト材の溶接も一つの方法であり、そのデータベース化も重要である。

本研究では、6kW YAG レーザで展伸材 AZ31B およびダイカスト材　AZ91D を溶接し、溶接条件（レーザ出力、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 CO_2 レーザを比較し、その特徴を明らかにした。

*（株）レーザ応用工学センター技術部
（現(財)新潟県県央地域地場産業振興センター）

2.　実験方法

2.1　実験装置

供試材として、板厚が 0.5 mm,1.25 mm および 2.5 mm の展伸材 AZ31B と 1 mm、2 mm および 5 mm のダイカスト材　AZ91D を用いた。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　６ｋＷＹＡＧ レーザ装置仕様

レーザの方式	ＭＯＰＡ (Master Oscillator Power Amplifier)
発振波長	１．０６μm
平均出力	６．０kW以上
ピーク出力	１８kW
ビーム品質	１００mm・ｍｒａｄ
光ﾌｧｲﾊﾞｰ	６００μm　NA０．１５
周波数	３０～５００Ｈｚ
変調ﾃﾞｭｰﾃｨ	１００～４０%可変

レーザ発振器から出射された光は、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。従って焦点位置での

ビーム径は約 600 μm であり、焦点位置から ±2 mm 変化させてもビーム径は 1 割程度しか変化せず、深い焦点深度を持っている。また出力が高いと、焦点でのビーム径はわずかに大きくなるが、CO_2 レーザで見られたような焦点位置の変動はない。これはレンズ素材である石英の熱膨張係数が 1×10^{-6} /K 以下と非常に小さいことが大きく影響している。

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。溶接する面の酸化膜を予めステンレス鋼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に使用し、ノズル高さ 8 mm、直径 7 mm のノズルからガス流量 15 l/min でビームと同軸状に流した。

2.3 突合せ溶接

突合せ端部近傍の酸化膜をワイヤーブラシを用いて除去後、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。レーザ出力を 1～5 kW、溶接速度を 0.5～20 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以外にバックシールドも併用した。

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 枚重ねてレーザ溶接を行った。レーザ出力を 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、主に溶接断面のマクロ観察とした。

ただし結果は、本報告からは割愛した。

3. 実験結果及び考察

3.1 ビードオンプレート溶接

展伸材 AZ31B 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 1 に示す。

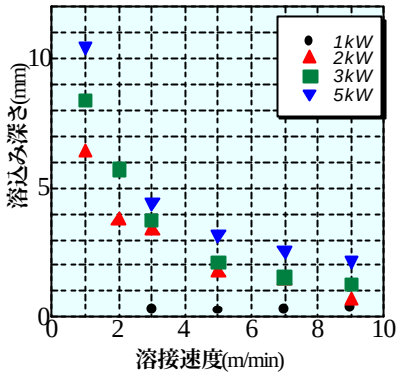
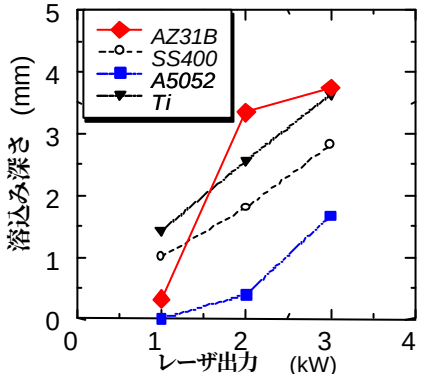


図 1 AZ31B の溶接条件と溶込み深さの関係

出力が 1 kW の条件では、溶接速度が遅い条件でも 0.2mm 程度の溶込み深さである。これはレーザビームが基材表面で殆ど反射されているためである。しかし、2 kW 以上あれば十分な溶込みが見られている。また溶接速度が 1m/min になると、急に溶込みが増えている。これは、レーザ照射部以外に伝わった熱が滞留し、また融点が低いために垂れ落ちたものである。またマグネシウム合金やアルミニウム合金など各種金属のビードオンプレート溶接による溶込み特性を図 2 に示す。



溶接速度: 3 m/min、ｼｰﾙﾄﾞｶﾞｽ :Ar 30l/min

図 2 AZ91D と他の材料の溶込み深さの比較

チタンや SS400 では、溶込み深さは出力が 1kW から増えると単調に増加するのに対して、A5052 や AZ31B では、あるしきい値を境界にして、溶込みが大きく変わり、特に AZ31B がその変化が大きい。これは、ビームの反射率はどちらも低いが、熱伝導率は AZ31B の方が低いことが影響しているものと考えられる。

またこのことは、AZ31B はアルミ合金に比べて出力の低いレーザでも、溶接が可能であることを示している。

3.2 突合せ溶接

AZ31B 板厚 1.25 mm の、突合せ溶接の溶接断面マクロ写真の一例を図 3 に示す。

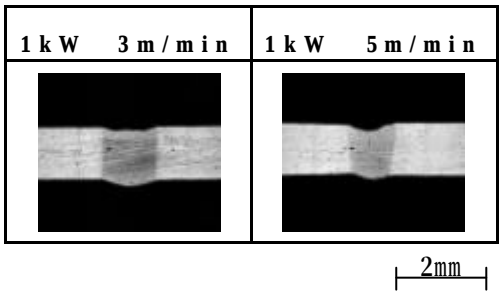


図 3 AZ31B 1.25mmt 突合せ溶接のマクロ写真例

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 4 に示す。

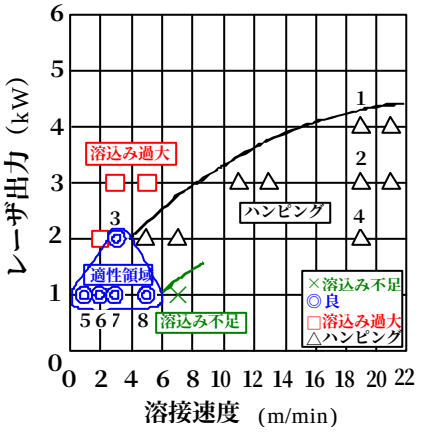


図 4 AZ31B 1.25mmt の突合せ溶接の適正加工条件

溶接線全体に穴や溶け落ちが発生しない、適正な条件となる領域が狭いが、レーザ出力 1 kW の時には、2～5 m/min、2 kW の時には、3 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、また速度が速いとハンピングビードが発生した。ビードは若干垂れ下がり、表面側では蒸発に起因すると考えられるアンダーフィルが発生した。

また AZ31B 板厚が 2.5 mm の溶接断面マクロ写真の一例を図 5 に示す。

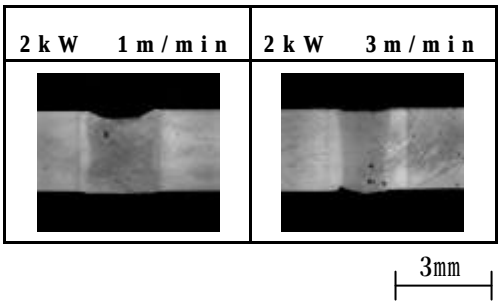


図 5 AZ31B 2.5mmt 突合せ溶接のマクロ写真例

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 6 に示す。

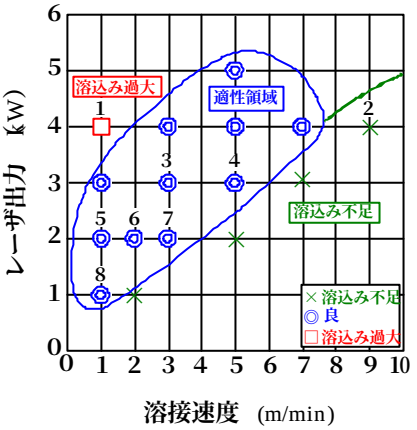


図 6 AZ31B2.5mmt の突合せ溶接の適正加工条件

アンダーフィルは溶接速度が速いと少なくなる事がわかる。また適正な領域は、板厚が 1.5 mm と比較して非常に広く裕度が大きいことが分かる。 また板厚が 0.5mm でも溶接試験を行ったが、パルス変調しない条件では、速度、出力、焦点外し距離などの条件を

変えたが、全て穴あきのビードとなり適正な条件は存在しなかった。

またダイカスト材　AZ91D 板厚 1.0 mm の､溶接断面マクロ写真の一例を図 7 に示す。

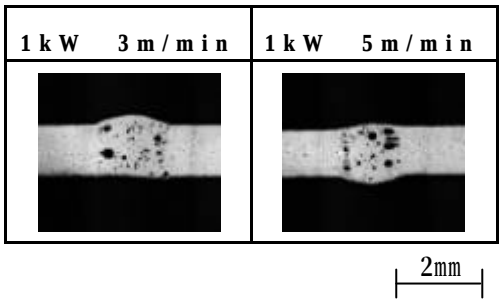


図 7　AZ91D　1mmt　突合せ溶接のマクロ写真例

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 8 に示す。

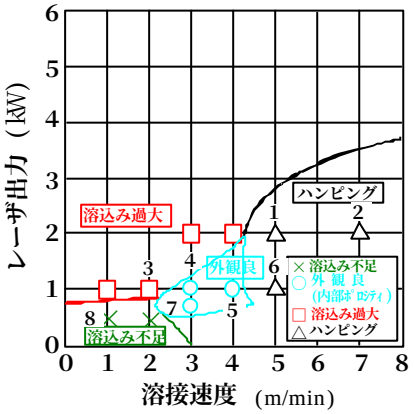


図 8　AZ91D　1mmt の突合せ溶接の適正加工条件

この場合、入熱（P/V）が低いと溶込み不足に、また大きいと過大となって、ビードに穴が開くのは展伸材と同様であるが、入熱上適正な条件下でも、溶接ビード内部に多数のポロシティが発生した。これはダイカスト材の製造時に混入した潤滑剤や離型材中の油分が加熱溶融で気化したり、製造時に巻き込まれた空気が膨張したものが主原因である。このようなポロシティの存在は外観上の膨れだけでなく、機械的な強度を低下させるため除く必要があるが、ダイカスト材の製造方法によって低減できることが分かっている。

また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 9 及び図 10 に示す。

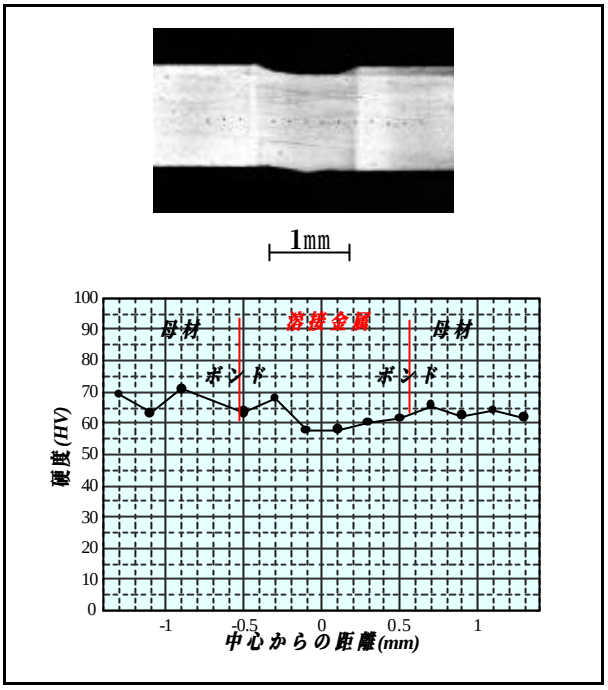


図 9　硬度試験結果例　AZ31B　1.25mmt
（レーザ出力 2 kW、溶接速度 3 m/min）

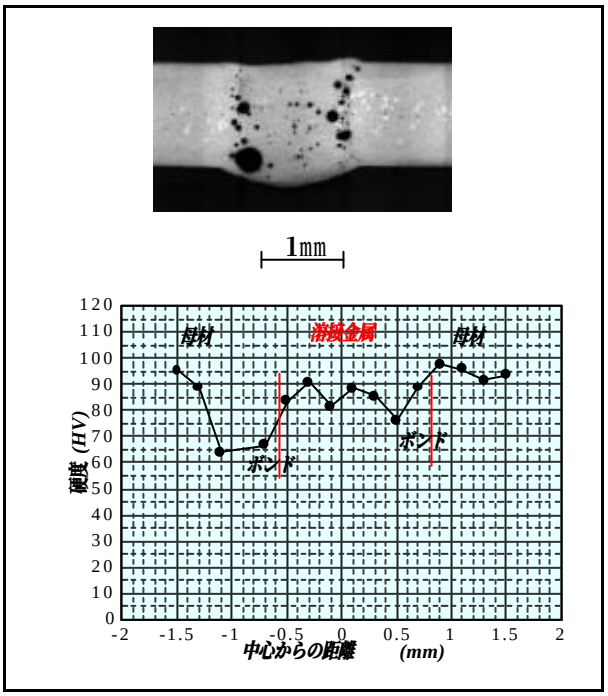


図 10　硬度試験結果例　AZ91D　1mmt
（レーザ出力 1 kW、溶接速度 3 m/min）

AZ31B 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、HV60 から 70 の間に分布する。一方 AZ91D では、母材の鋳造組織は硬度が若干高く（HV100 程度）ボンド部から HAZ にかけて硬度の低下が確認できる。

この一つには HAZ 部の粒径増大が影響しているものと考えられる。

次に使用するレーザ種類の影響を調べた結果を示す [2]。シールドにアルゴンガスを用いて CO_2 レーザで突合せ溶接を行うと、表面への黒色微粒子の付着やビードの荒れ、裏面が溝状に掘れることが分かった。そこで、出力を 2 kW、速度を 3 m/min に固定してシールドガスを変化させて表裏面とビード断面の観察を行った。

図 11 に各種溶接条件での溶接ビード表面および断面を比較した結果を示す。

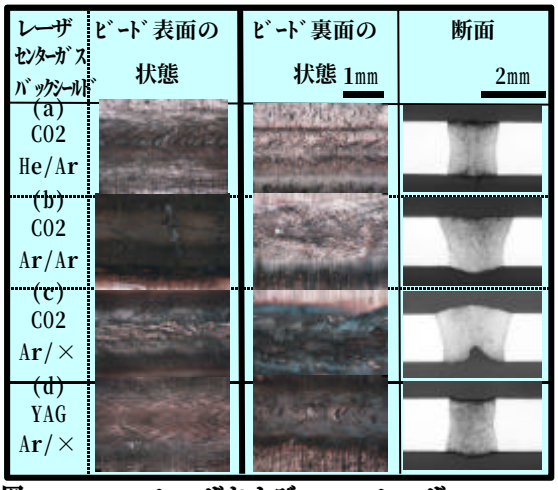
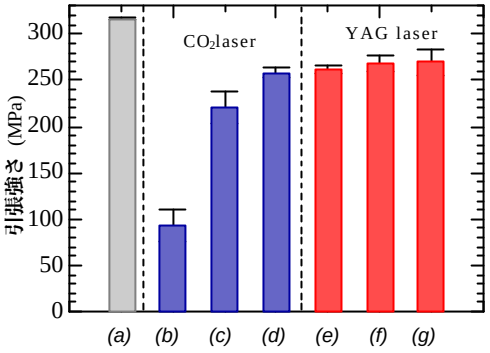


図 11　CO_2 レーザおよび YAG レーザ溶接でのシールドガスの影響

CO_2 レーザを用いた溶接では、(a)センターガスシールドに He、バックシールドに Ar を用いると、表裏面とも金属光沢およびリップルパターンが観察され、また、断面も若干アンダーカットが見られる程度で正常に溶接できた。しかし他の条件ではビードが変形し、特に(c)バックシールドを使用しないと、ビードが荒れて特に裏面側に深い溝ができる。断面写真によれば、この溝の深さは板厚に対して 1/3 程度とかなり大きい。しかし YAG レーザで同じシールド条件にすると(d)、リップルパターンの形成が確認でき、良好なビードを形成している事が確認できた。

次にシールド条件による機械的強度の差を調査するため、突合せ継手を作製し引張試験によって調べた。図 12 に結果を示す。



Laser	base	CO_2 laser			Nd:YAG laser		
Center	metal	Ar		He	Ar		Ar
Back		×	Ar	Ar	×	Ar	Ar
after		×	×	×	×	×	Ar

図 12　シールドガスと引張強さの関係

値は 3 本の平均値とした。CO_2 レーザではシールド条件、ビード形状に対応して引張強度が変化する。バックシールドがないと強度が低いのは、溝によって溶接断面積が減少したためと考えられる。また、センターガスが Ar と He で強度が異なるのは、プラズマが発生するほど高温場が広くなり、溶接金属の結晶粒径が大きくなるためと考えられる。

一方 YAG レーザでは、バックシールドの有無で 3%程度違うが、シールド条件にかかわらず安定した強度を示すことが分かった。

以上により CO_2 レーザによる溶接では、シールドガスと金属の、レーザ誘起プラズマによる影響が大きく、特に裏面ではプラズマ反力の影響によって、ビードに溝が掘られるため強度が低下する。一方、Nd:YAG レーザによる溶接では、プラズマ吸収が少ないためセンターガスには Ar で十分であり、また、バックシールドを行わなくても良好な溶接ビードが形成される。これは、CO_2 レーザ溶接と比べてシールドガスや金属がプラズマ化し難く、Mg 成分は気化して周りに拡がって気化ガスシールドとして溶接部の酸化を防止する

ためと考えられる。

次にダイカスト材の突合せ溶接部のポロシティの分布と引張強度を図 13 に示す。

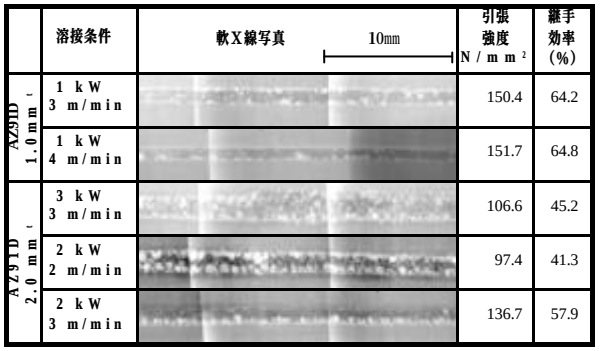


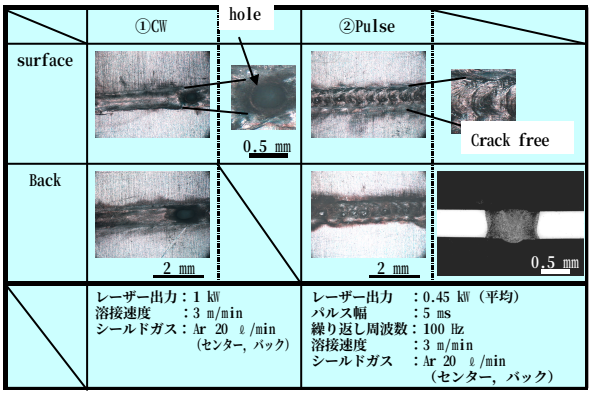
図 13　AZ91D ポロシティと引張強度

試験したどの条件でも継手効率で 40～50%とかなり低く、また継手破断した。またポロシティが多く、連続している場合ほど効率が低くなる傾向が見られた。

AZ31B の室温での曲げ試験では、殆どが溶接部で破断した。これはマグネシウム合金が最密六方構造のため母材においても滑り面が少なく塑性変形しにくいためであり、特に溶接部の強度が弱いことを示している。

3.3　パルス化による薄板突合せ溶接の検討

連続波 Nd:YAG レーザを連続波のままと、パルス化して溶接した場合の表裏および断面



を図 14 に示す。

図 14　AZ31B　0.5mmt の突合せ溶接（パルス化の検討）

連続波のまま溶接すると、①に示したように穴が部分的に空くか、部分溶込みとなり、適正条件が全く得られなかった。高速カメラで溶接現象を観察した結果、薄板になるほど溶融池の表面積が体積と比べて大きくなり、表面張力などの影響により穴が広がって、そのまま残留することが分かった。それを防止するにはレーザ光のオフ時間を作り（パルス化）、凝固を早め、溶融池が広がらないようにすることが重要である。②に連続波をパルス化して溶接したビード表面及び断面の例を示す。パルス変調しない場合と異なり、明確なリップルラインが観察され、また亀裂も存在しない。このときの引張試験の継手効率は母材と同等であり、破断伸びも 15%と良好な機械特性を示した。

4.　結言

高出力 YAG レーザを用いてマグネシウム合金の、突合せ及び重ね合わせ溶接を行い、溶接条件と溶接結果との関係を明らかにした。また CO_2 レーザとの溶接条件の比較を行い、シールドガスの影響を調べ、YAG レーザでは、溶接条件裕度が広いことを示した。今後展伸材の溶接構造やダイカスト材の大構造物など溶接の必要性が広がると考えられる。更なるレーザ溶接の技術の進展が重要である。

参考文献

1)K. Haferkamp, I. Burmester, N. Niemeyer, E. Doege and K. Droeder.: Innovative production technologies for magnesium light-weight constructions-Laser beam welding and sheet metal forming. Proc. Int. Symp. Automot. Technol. Autom. 30th, (1997) p247.

2)平賀仁、井上尚志、鎌土重晴、小島陽：Mg 合金薄板のレーザ溶接におけるレーザ波長とシールドガスの影響、溶接学会論文集、19, 4(2001) p591.