レーザ溶接技術教材の開発

- レーザ溶接特性 -

Development of teaching materials about laser welding technique

- Characteristic of laser welding -

田中 義弘,下笠 賢二

TANAKA Yoshihiro, SHIMOKASA Kenji

1.緒 言

金属の溶接は一般に、アーク溶接やガ ス溶接、TIG 溶接等が行われているが、 熱影響層が大きいこと、ビード幅に対す る溶込み深さの比(アスペクト比)が小 さいこと等の理由で、精密部品の溶接に は、熱影響層が小さくアスペクト比が大 きいレーザ溶接や電子ビーム溶接が多く 用いられている。特にレーザ溶接は大気 中で行えるため、大型部品への適応やコ ストの点で有利である。これらの特長を 生かすために、従来の溶接法を単純にレ ーザに置き換えるのではなく、レーザ溶 接を前提とした構造設計、材料選択、前 後工程を含む全生産ラインの構築が行わ れている。

これまで学生や企業に対して、炭酸ガ スレーザによる穴あけや切断、ケガキ等 の指導やアドバイスを行っているが、こ れらに加えて溶接についても行って行き たいと考えている。レーザ溶接を指導す るに当たり、加工機の操作方法、レーザ 溶接の種類、溶接条件、溶接方法、安全 作業法等を纏めた指導テキストが必要に なるが、それに相当するものが見あたら ない。そこで今回、ビデオ画像を含めた 指導教材を開発するものである。

今回はその第一弾として、試料の材種 毎に溶接条件を変化させ、ビード幅や溶 込み深さ、品質等を実験によって確認し、 その傾向を明らかにすると共に溶接断面 の評価を行った。また、薄板の重合わせ 溶接の状況やレーザ出力制御の効果を確認したので、以下に詳細を述べる。

2. レーザ溶接の概要

2.1 レーザ溶接の原理

(1) レーザ溶接のメカニズム

レーザ加工で使用する加工ヘッドを図 1に示す。(a)は今回使用した溶接用で、 (b)は穴あけや切断に使用するものであ る。溶接用加工ヘッドの内部の構造は、 図2に示すように、放物面鏡、シールド ガス、ノズルを基本要素としている。





(a) 溶接用 (b) 切断用 図1 加エヘッド

レーザ溶接では、不活性ガスであるア ルゴンやヘリウムなどのシールドガスを ノズルから弱い圧力で流す。これは、大 気中の酸素を排除した雰囲気中で溶接を 行い、溶接部表面の酸化を防止するため である。もし、高圧のシールドガスを使 用すると、溶融部が吹き飛ばされ、大き なくぼみを生じてしまうことになる。 このようにシールドガスの圧力が弱い状



図2 レーザ溶接用加工ヘッドの構成

況で、穴あけや切断で使用する加エヘッ ドを使用すると、溶融時に発生する溶融 部からの飛散物が集光レンズに付着しや すく、また高温になった集光レンズの冷 却も困難になる。そのため、レーザ溶接 では、集光レンズに代わり冷却がしやす い放物面鏡が使用されている。

レーザ溶接は、急速加熱、急速冷却に よる溶融・凝固を行うもので、そのプロ セスを図3に示す。



図3 レーザ溶接のプロセス 図3の①において、集光されたレーザ

(3)

キーホール

光が試料表面で吸収され、試料表面は瞬 時に溶融・気化すると共に、蒸気圧の上 昇により蒸発物が噴出し、小さなくぼみ を形成する。くぼみに照射されたレーザ 光は溶融部に吸収され、さらに溶融・気 化・蒸発物の噴出が繰り返される。一般 に金属は、固体の状態では波長 10.6μm の炭酸ガスレーザ光を吸収しにくい(反 射する)が、溶融状態ではよく吸収する 性質がある。そのため、試料表面が溶融 すると加工速度は格段に速くなる。

②において、凹みは穴となり、穴の壁 面に多重反射したレーザ光の吸収率が大 幅に増加し、深穴(キーホール)が形成 される。

③において、②の状態からレーザ光を 適切な速度で移動すると、キーホールは、 キーホール内の蒸気圧、溶融部の表面張 力、溶融部の重力などの力のバランスに より維持され、レーザ光は前方の試料を 溶融する。この溶融部分がキーホールの 周囲に運ばれ、後方で合流し凝固して溶 接ビードを形成する。結果として溶接が 可能となる。

(2) レーザ溶接の特徴

ー般に、試料表面に照射されるレーザ 光のエネルギ密度が 10⁶ W/cm² 以上に なると、電子ビーム溶接の場合と同じく キーホールの形成が可能で、アスペクト 比の大きな深溶込みのビードを得ること ができる。図4に、TIG 溶接、レーザ溶 接および電子ビーム溶接の溶込み形状の 概略を示す。



①TIG溶接②レーザ溶接③電子ビーム溶接図4各種溶接の溶込み形状の概略

レーザ溶接の特徴を纏めると、以下の

- ようになる。レーザ溶接の利点は、
- ①熱影響部が狭く、歪みが少ない。
- ②TIG 溶接に比べアスペクト比が大きく、 高速溶接が可能である。
- ③電子ビーム溶接に比べ、大気中で溶接 が可能で、X線の発生もない。
- ④非接触で溶接ができる。
- ⑤磁気の影響を受けないため、磁性材料 にも加工できる。
- ⑥溶落ちが少なく、溶接条件範囲が広い。
 ⑦溶接の再現性が高い。
- ⑧異種金属の溶接や、融点の高い金属の 溶接が他の溶接法に比べ容易である。
- ⑨自動化が容易である。
 - 一方、欠点は、
- ①試料の取付精度を高くする必要がある。
 ②試料表面の油や汚れを除去する必要がある。
- ③試料表面へのレーザ光の照射によって 発生するプラズマにより、レーザ光が 吸収されると溶込み深さが浅くなる。
 ④溶接部に気泡が発生しやすい。
- 2.2 レーザ溶接のパラメータ

レーザ溶接の加工条件パラメータには、 「レーザ出力」、「溶接速度」、「焦点距離」、 「焦点位置」および「シールドガス」が ある。これらのパラメータは、溶接能力 や溶接品質に大きな影響を及ぼす。以下 に、各パラメータの種類と性質について 述べる。

(1) レーザ出力

レーザ出力が大きくなると、ビード幅 も広くなる。その結果、突合わせ溶接時 のギャップに対する余裕度、および狙い 位置に対する余裕度が大きくなる。従っ て、溶接対象物の仕様を満たす出力設定 が重要となる。 (2) 溶接速度

溶接速度が大きくなると、溶込み深さ は浅くなる。

(3) 焦点距離

薄板(厚さ1~3mm程度)では、放 物面鏡の焦点距離が小さいほど、一般的 に集光ビーム径が小さくなって、深い溶 込みが得られる。しかし、板厚が3mm を超える領域では、焦点深度が大きい長 焦点のものほど、深い溶込みが得られる。

(4) 焦点位置

焦点位置とは、放物面鏡で集光された レーザ光の最も小さい径の位置と、試料 表面との位置関係を示す。

集光された最も小さい径の位置が試料 表面にセットされる場合をジャストフォ ーカスといい、焦点位置は「0」とする。 試料表面より上方を「+」、下方を「-」 で表す。

一般に、大出力で低速度の場合は「-」 方向に、小出力または高速度溶接の場合 は「0」に設定する。

(5) シールドガス

シールドガスとして一般にアルゴンガ スが使用される。ヘリウムガスは、レー ザ出力が限界に近い状況に於いて、さら に溶込み深さを必要とする場合に、プラ ズマの発生を抑え有効であり、また、試 料の熱によるそりの減少にも効果がある といわれている。

シールドガスの流量は、溶込み深さ、 ビード表面状態、ノズル径とノズル高さ、 レーザ出力および溶接速度等を考慮して 設定する必要がある。

3. レーザ溶接実験

試料の材種毎に溶接条件を変化させ、 溶込み特性の確認、溶接断面の評価、レ ーザ出力制御の効果の確認を行った。ま た、これらのデータを元に、薄板の重合

わせ溶接の状況を確認した。 今回、実験に使用した機器は以下の通 りである。 ・炭酸ガスレーザ加工機 (ML5036D-806T3) 定格出力: 3.5kW (最大 3.6kW) マルチモード ・ワイヤー放電加工機(U32J) 工具顕微鏡 3.1 溶込み特性 以下に、実験条件と実験方法を示す。 (1) 実験条件 ・試料:SS400 (150×100×t12) SUS304 $(150 \times 100 \times t7.2)$ A5057 $(150 \times 100 \times t15)$ •出力:2000W, 3000W, 3500W 発振形態: CW(連続発振) 溶接速度:F=1 (m/min), 2 (m/min), 3 (m/min), 4 (m/min), 5 (m/min) •焦点位置:Z=-3(mm), -2(mm), -1(mm), 0(mm), +1(mm),+2(mm), +3(mm)・焦点距離: f = 7.5 吋(190.5mm) ノズル径: d =2(mm) ・ノズル高さ(試料表面との距離): L = 8 (mm),(但し、A5057は飛散物が多い ため、L=10(mm)とした) ・シールドガス:Ar ガス 流量 Q = 20L/min, (但し、A5057はアンダーフィ ル(溶接表面のくぼみ)を生 じやすいため、流量は 10L/min とした) (2) 実験方法 実験の手順は以下の通りである。 ①試料表面の油や汚れをアセトンで 拭き取り、図5に示すように溶接ジグに

試料の両端を押さえ固定する。



②各試料に、レーザ出力と溶接速度および焦点位置を変化させ、直線状にレー ザ光を照射してビードを形成する。

③得られたビードに対して直角方向 に、各試料をワイヤー放電加工機で切断 する。

④腐食作業の前処理として、切断面の 磨きを行う。レーザ光照射による溶融・ 凝固部分と母材部を腐食によって明確に するには、切断面を鏡面にすることが望 ましい。今回は試料の大きさの関係で、 バフ研磨機ではなく、紙ヤスリの#120, #320,#1000 を使用して鏡面近くの粗さ まで磨いた。

⑤各試料の腐食作業を、以下の方法で
 行う。劇薬のため、取扱いには注意を要
 する。特に A5052 では、NaOH と反応
 し、H₂(水素ガス)が発生するので、充
 分な換気が必要である。

SS400-ナイタル液に2分浸し、
 水洗いする。

SUS304-マーブル液に2~3秒
 浸し、水洗いする。

・A5057-水酸化ナトリウム溶液に

5~10分浸し、水洗いする。 表1に各腐食液の組成を示す。

腐食液名	組成
ナイタル液	HNO $_{3} - 5\%(5ml)$
	$C_{2}H_{5}OH - 95\%(95ml)$
マーブル液	$CuSO_4 \cdot 5H_2O-4g$
	HCl-20ml
	${ m H}_2{ m O}-20{ m ml}$
水酸化	$H_{2}O - 100ml$
ナトリウム液	$\rm NaOH-10\!\sim\!20g$

表1 腐食液の組成

⑥光学顕微鏡で溶接部分のビード幅 と溶込み深さを測定し、溶接断面の評価 を行う。図6および図7において、Wを 溶込み幅、Hを溶込み深さとする。また、 図7のwを溶接幅とする。



図6 溶込み 図7 重合わせ

- 3.2 重合わせ溶接
 - 以下に、実験条件と実験方法を示す。 (1)実験条件
 - 試料:SS400 (150×100×t2)
 - SUS304 $(150 \times 100 \times t2.3)$
 - •出力:2000W, 3000W, 3500W
 - 発振形態: CW(連続発振)
 - 溶接速度: F = 2 (m/min)
 - ・焦点位置:Z=0(mm)
 - ・焦点距離: f =7.5 吋(190.5mm)
 - ・ノズル径: d=2(mm)
 - ・ノズル高さ(試料表面との距離):

```
L = 8 (mm),
```

・シールドガス:Ar ガス

流量 Q=20L/min,

(2) 実験方法

実験の手順は以下の通りである。

 ①試料表面の油や汚れをアセトンで 拭き取り、図5の溶接ジグに2枚重ねた 試料の両端を押さえ固定する。

②各試料に、レーザ出力を変化させ、 直線状にレーザ光を照射して重合わせ 溶接を行う。

③その後は3.1項目と同じように、切断、磨き、腐食および測定を行う。

4. 実験結果

- 4.1 溶込み特性
- (1) 溶込み形状

図8に、得られた SUS304の2000W と3000Wの溶込み形状を示す。それぞ れ左からF=1、F=3、F=5である。

溶接速度が小さいときは、溶込み幅が 広いワインカップ型に、溶接速度が大き くなると杭型になる。また、レーザ出力 が大きい程、溶込み深さは大きくなる。 SS400でも同じ傾向が見られた。



図 8 (a) SUS304 (2000W) の溶込み



SUS304 (3000W)の溶込み

図9に、得られたA5052の2000Wと 3000Wの溶込み形状を示す。それぞれ左 からF=1、F=3、F=5である。

全体的にアスペクト比は1より小さく なった。溶接速度が小さいときは溶込み 幅が広く、溶込み深さが大きくなる。ま た、レーザ出力が大きい程、溶込み幅は 広く、溶込み深さは大きくなる。

A5052の場合、溶接速度が小さいとき、 ビードの中央部分が凹んだアンダーフィ ルや、下部に僅かな割れを生じた。



図 9(a) A5052 (2000W)の溶込み



図 9 (b) A5052 (3000W) の溶込み

溶接速度と溶込み形状の測定結果を、 図 10 に SS400 の場合、図 11 に SUS304 の場合、図 12 に A5052 の場合を示す。

図 10 より SS400 では、溶込み幅は溶 接速度が大きくなるほど狭くなり、レー ザ出力の差は僅かに影響がある。溶込み 深さは溶接速度が大きくなるほど小さく なり、レーザ出力が大きいほど大きくな る。ただし、3000W と 3500W の差はそ れほど見られなかった。

図 11 より SUS304 では、溶込み幅と 溶込み深さの溶接速度に対する傾向は SS400 と同じであるが、双方ともレーザ 出力に対する差が殆ど見られない。

図 12 より A5052 では、溶込み深さよ りも溶込み幅が大きい点で SS400 や



SUS304と大きく異なる

図 13 に SUS304 と A5052 に関する溶 接速度とアスペクト比の関係を示す。

図より、A5052 は各条件でアスペクト 比が1未満であり、浅く幅広い溶込みで あるかが分かる。一方、SUS304 では、 溶接速度が1~3(m/min)と小さい範囲 ではアスペクト比と比例しているが、3 (m/min)を超えた範囲ではアスペクト比 と反比例している。

(2) 焦点位置の影響

図 14 に、レーザ出力 3500W における 焦点位置と溶込み形状の関係を示す。 SS400 では、溶込み幅は殆ど変化がない が、溶込み深さは Z=0 (ジャストフォー カス)の時、ピーク値が得られた。A5052 では、ビード幅と溶込み深さは共に Z=0 でピーク値が得られた。

4.2 レーザ出力制御の効果

レーザ溶接では、図3で示したような プロセスを取るため、始点に於いてはキ ーホール生成に伴う盛り上がりが生じ、 終点に於いてはキーホールが浅くはなる ものの凹みを生じてしまう。そこで本溶 接部の始点に、レーザ出力を0から徐々 に増加させる部分を10mm付加し、終点 には、レーザ出力を徐々に0に減少させ る部分を10mm付加して、その効果を確 認した。図15はSUS304に3000W、F =1、Z=0の条件で行った結果を示す。

図 15 の直線の上は出力制御無し、下 は出力制御有りで、それぞれ右から左方 向へ溶接している。溶込み幅や溶込み深 さが大きくなる条件にもかかわらず、始 点と終点の形状が改善されていることが わかる。

左側の円は出力制御無しで、左から右 回転で1周している。右側の円は出力制





図15 レーザ出力制御の効果

御有りで、左から右回転で1周し、さら に90°回転する間にレーザ出力を0にし ている。右側の円のように、重ね合わせ た場合に効果が認められる。

4.3 重合わせ溶接

図 16 に同種金属の重ね合わせ溶接の 溶込みの状態を示す。(a)は厚さ 2.3mm の SS400 で、(b)は厚さ 2mm の SUS304 である。それぞれ 3000W、F=2、Z=0 の条件で行った結果である。

図 17 にレーザ出力を変化させたとき の溶込み形状を示す。

図 16、図 17 から分かるように、1 枚 の試料に溶接を行ったときに比べ、溶込 み深さが小さくなっている。これは上が 溶接熱により反り、下板との間に隙間が 発生し、熱伝導が低下したためと思われ る。押さえ方の工夫が必要である。

今回の実験では、溶接幅:wは1mm 弱であった。溶接の強度については今後、 検討することにしたい。

5. 考察

(1) レーザ出力の影響

図 11、図 12 に示したように、SS400 と SUS304ではレーザ出力の増加に伴っ て溶込み深さは大きくなることが分かっ た。しかし、SS400 では 3500W の、 SUS304では 3000W と 3500W の溶込み 深さが小さいことが気になる。レーザ発 振器の特性なのか、レーザ溶接のプロセ スに起因するものかは、今後検討する必 要がある。また、SUS304 は SS400 に比 べ熱伝導率が低いため、溶込み深さは大 きくなっても良いと思われるが、それほ ど差は生じなかった。

A5052 では、アスペクト比が1未満で あることが分かった。溶込み幅はレーザ 出力に比例して広くなるが、溶込み深



(a) SS400(t2.3)(b) SUS304(t2)図16 重合わせ溶接の溶込み







(a) 使用前
 (b) 使用後
 図18 放物面鏡の汚れ
 さは SS400 や SUS304 と同じ傾向があ
 る。一般的にアルミニウム合金は、炭酸
 ガスレーザ光を反射しやすく、熱伝導率

も高いため加工がしにくい材質である。 A5052のレーザ溶接では、試料表面から のスパッタ(噴出物)が多く発生する。 そのため、シールドガスの流量は鋼材よ りも少なく(50%程度)しているが、特 に高出力、低速溶接の時は、図9に示す ようにアンダーフィルを生じてしまうの で、溶接条件の選択が重要になる。

図 19 に放物面鏡の使用前と使用後の 汚れの様子を示す。ノズルの穴を通って 7.5 吋上方の放物面鏡までスパッタが達 したものである。一定時間毎に所定のク リーニングを行う必要がある。

(2) 溶接速度の影響

今回使用した試料は何れも、溶込み幅、 溶込み深さにおいて、溶接速度の増加に 伴い減少している。単位時間に吸収する 熱量から考えても当然の結果である。

図8に示したようにSUS304やSS400 では、溶接速度が遅いとワインカップ型 に、溶接速度が速くなるに伴い杭型に近 づいてくる。また、図13に示したアス ペクト比を見ると、SUS304 では、3 (m/min)を超えた範囲ではアスペクト比 と反比例しているが、それ以下では比例 している。これは、低速領域で発生しや すいプラズマによって、レーザ光が吸収 されやすいこと、長時間熱量が供給され るため試料表面部分での熱伝導による溶 融・凝固が発生しやすいことが原因と考 えられる。

(3) 溶接断面の評価

レーザ溶接断面の品質の評価は、溶込 み形状と共に、アンダーカット(ビード の両端に発生する凹み)、アンダーフィル、 ブロホール(空洞、気泡)、凝固割れ等の 溶接欠陥の有無を見なければならない。 今回行った実験の中で、A5052を高出力、 低速で溶接したときに、アンダーフィル と、底部に凝固割れを生じた。今後、さ らに適切な条件を求めることが必要である。

(4) 熱歪みへの対応

薄板にレーザ溶接を行うと、溶接方向 と直角方向(溶接面側に反る)、および平 行方向(溶接面と反対側に反る)に熱歪 みによる反りを生じる。これらへの対応 として、極力入熱を少なくすることが重 要で、溶接速度を大きくすることが望ま しい。また、シールドガスとしてへリウ ムを使用すると効果があると思われる。

6. 結言

今回、レーザ溶接を行い、以下のこと が分かった。

- (1)レーザ出力と溶込み深さは比例する。
- (2) A5052 では、アスペクト比が1未 満である。
- (3) 溶込み幅、溶込み深さにおいて、 溶接速度の増加に伴い減少する。
- (4) SS400 と SUS304 のアスペクト比の高い溶接速度は 3 (m/min)である。
- (5) レーザ出力制御は効果がある。
- (6) 薄板のレーザ溶接では、熱歪み対 策が重要である。

今回、実験を行うに当たり、腐食液に ついて環境化学科の服部先生にアドバイ スとご協力を頂いた。ここに感謝の意を 表します。

参考文献

- 1)新井武二他:レーザ溶接加工,マシニ スト出版
 - 2) 佐藤國彦他: CO₂ レーザ加工技術,日 刊工業新聞社
- ンーザセミナーテキスト (YAG レー ザ溶接マニュアル), 三菱電機