

レーザービーム溶接の 諸特性について

指導教員 小林和彦教授

知能機械システム工学科

1020161

山口 祐介

目次

第1章 緒言	1
第2章 レーザ溶接および加工について	3
2.1 レーザ加工の原理.....	3
2.2 レーザ加工の特徴.....	4
2.3 レーザ溶接の特徴.....	5
2.4 レーザ表面焼入れの特徴.....	6
第3章 レーザ溶接実験	7
3.1 実験目的.....	7
3.2 材料説明.....	7
3.3 実験方法および装置.....	8
3.4 実験結果、及び考察	15
3.4.1 溶け込み深さ.....	16
3.4.2 引張り強さ.....	18
3.4.3 溶接部硬度.....	22
第4章 レーザ表面焼入れ実験	23
4.1 実験目的.....	23
4.2 実験に使用した材料説明	23
4.3 実験方法.....	23
4.4 実験結果、及び考察	24
第5章 結言	25
謝辞.....	27
参考文献.....	27

第1章 緒言

近年、科学技術の進歩とともに、硬くて強度の高い材料が開発され、従来の加工法では加工が困難になってきました。そういった材料を加工する方法として特殊加工法 (Nontraditional Machining Method)がある。

特殊加工法には、ワイヤカット放電加工、形彫り放電加工、レーザ加工などがあり、ワイヤカット放電加工や形彫り放電加工は、短間隙での火花放電によって加工されるため、導電性の材料であれば硬さに関係なく加工することができる。またレーザ加工は、レーザ光が熱エネルギーに変換されてレーザ照射部が過熱され、組織変化や溶融、蒸発が生ずるプロセスを利用する加工技術である。本研究では、この特殊加工法のなかのレーザ加工法を取り上げた。

レーザ加工には穴あけ加工、切断加工、表面処理など、様々な加工用途がある。その中のレーザ溶接とレーザ表面焼入れの2つの研究を行った。

まず、従来の溶接は、一般的にアーク溶接とレーザ溶接が使われている。アーク溶接はアーク(エネルギー密度：約 10^{4-5}W/cm^2)により金属を溶融し接合する方法であるのに対し、レーザ溶接は光学系で集光したレーザビーム(エネルギー密度：約 10^{5-6}W/cm^2)により溶融し接合する方法であり、高エネルギー密度のため、ビーム中央で金属が蒸発し、ビーム孔を生じ、非常にふかい溶込みが可能な溶接である。

溶接は、穴あけや切断と比べると出力が大きいレーザが使用される。例えば、板厚 5 mm の鋼板を切断できる出力を有するレーザ加工機をもってしても同じ厚さの鋼板の溶接はできない。その理由は、穴加工や切断の場合は活性な酸素アシストガスを使用して、鉄との酸化反応熱といった補助エネルギーを有効に活用することができたが、溶接の場合はそのような活性ガスが使用できないからである(溶接の場合は溶融部を不活性ガスでシールドをしなければならない)。つまり、溶接の場合は加工に関与できるエネルギーはレーザビーム自身のエネルギーのみであり、レーザ自身に材料を溶融するに足りる十分なエネルギーが要求される。以上の理由により、実際に溶接に使用されているレーザは CO_2 レーザと YAG レーザの二種類である。

実際に現在の電気産業では YAG レーザによる精密溶接が広く利用されるようになり、具体的適用例としては、カラーテレビ用ブラウン管用電子銃のヒータ、カソード、グッドリドなどのスポット溶接、電池、コンデンサなどのリード部と本体とのスポットあるいはシーム溶接、ディスクヘッド、プリンタヘッド、センサ、オプトエレクトロニクス部品の素子、端子、ケースのスポット溶接、ステンレス鋼薄板のスポットあるいはシーム溶接などがある。

レーザ溶接に実施するにあたっては、穴加工や切断加工のときには無いパラメータを考える必要がある。つまり、溶接準備段階での材料セット時のギャップ(溶接ギャップ)の問題、突合せ接合における接合面からのビーム照射位置のずれなどの問題が出てくるとい

う点も考慮して研究を行った。

次に、従来のレーザー表面焼入れは、鋼材の焼き入れによる拡散浸炭法や高周波焼入れ法などが主に使われてきたが、最近では自動車産業などを中心に、レーザー表面焼入れが実用化されはじめている。具体的には、ステアリングギアハウジング、クランクシャフト、エンジン部品などへ適用されている。

これは、レーザー溶接の応用で、金属表面にレーザーを照射し、その急速加熱と金属母材の熱伝導による急速な自己冷却作用とを利用して熱処理(変態による焼入れ)をしようとするものである。

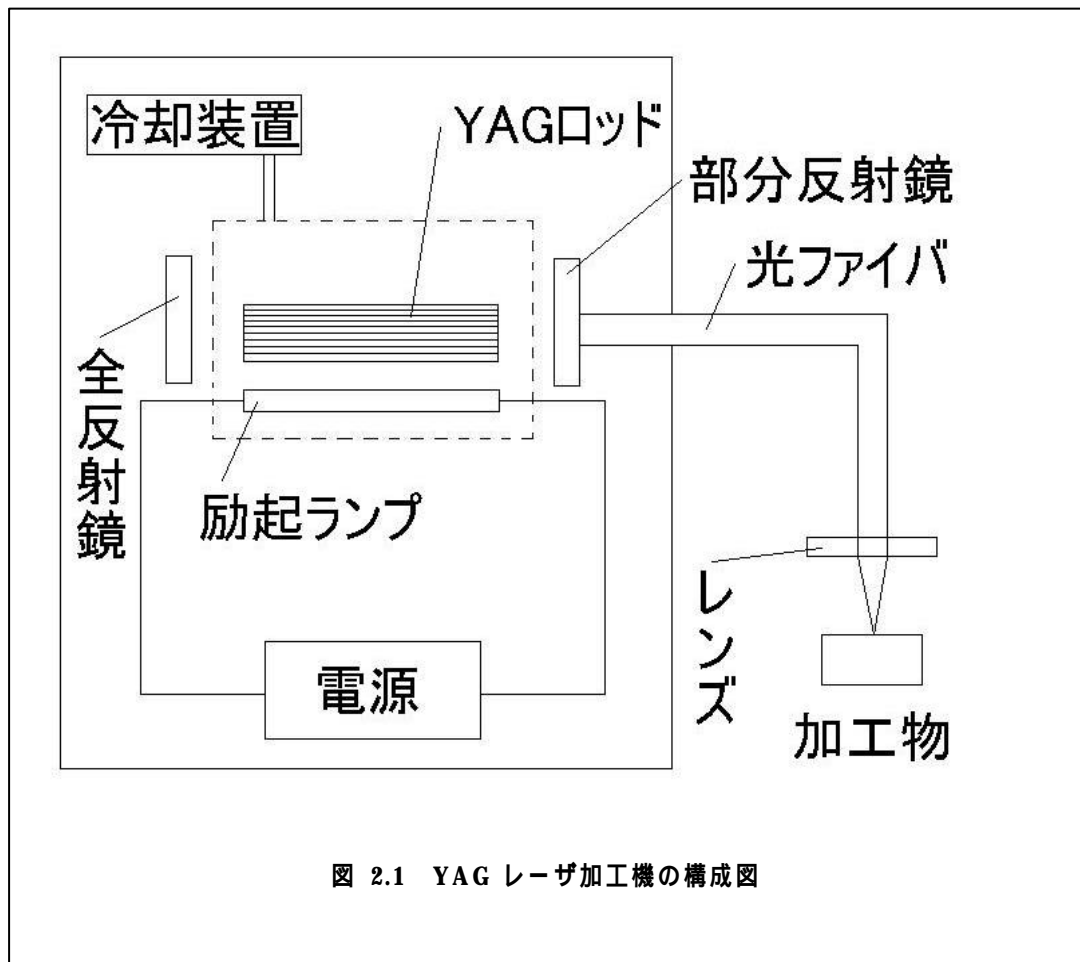
熱処理を効果的に行うためには、金属表面でのレーザービームの吸収率を向上させる必要がある。金属表面にレーザーを照射したとき、表面に溶融現象が伴う場合はビーム吸収率が高くなることが知られている。しかし、表面の溶融を伴わない方法の場合、例えば試料表面が研磨されているような場合はビームの吸収率が低く(吸収率 10%程度以下)、そのままでは効率が悪い、そこで金属表面でのビーム吸収率を向上させるための手段として、表面に金属酸化物やグラファイト等を塗布する方法などがある。

このような点で、本研究の目的は、ステンレス鋼板を用いて溶接部分の引張り強さ、溶け込み深さ、硬度の測定を行い、YAG レーザの基本特性とする溶接法の諸特性を求めると、炭素鋼(S50C)を用いてレーザー表面焼入れを行い硬度の上昇を目的とする研究である。

第2章 レーザ溶接および加工について

2.1 YAG レーザ発振の原理

この章では、YAG レーザの発振原理について説明する。まず励起ランプにより YAG ロッド部分に自然放出光が発生する。この自然放出光は電灯の光のように四方八方に向かうため、そのほとんどは YAG ロッドの中をほんの少し進むと共振器の外に出てしまう。自然放出光のうちごく僅かであるが共振器の光軸に平行なものだけが、共振器鏡で反射されて何度も往復する。反転分布した YAG ロッドの中を何度も往復するあいだに誘導放出(同じ波長の光が入射されると、この入射光とまったく同じ性質を持つ光が放出されること)を繰り返して、とてつもなく高い強度に増幅される。このとき 2 枚の反射鏡のうち片側が部分透明であると、増幅した光の一部は外部に取り出すことができる(図 2.1 の構成図を参照)。このように取り出されたものがレーザービームで、波長、位相、方向、偏光がよく揃っている。



2.2 レーザ溶接の特徴

レーザー溶接法の特徴として次のようなことがある。

- (1) 深い溶け込み溶接：同一入力熱の TIG やアーク溶接と比べて数倍から十数倍もの深い溶け込みが得られる。
- (2) 高速溶接：高パワー密度を得られるため、瞬時に溶融を生じさせるので高速溶接ができる。
- (3) 低溶接歪み：パワー密度が高いので入熱が少なくすみ、周辺部への熱影響が少なく、溶接歪みが少ない。
- (4) 複雑形状部品の溶接：ビームの照射位置を精密に制御できるので、複雑形状部品でも比較的簡単に溶接できる。
- (5) 多数箇所同時溶接：YAG レーザの場合は、光ファイバを有効に利用すれば複数箇所が同時に溶接できる。
- (6) ガラス容器内の部品の溶接：YAG レーザではガラスを通じた溶接ができる。
- (7) 異種金属の溶接：入熱を精密に制御できるので比較的多くの異種金属間の溶接が可能である。
- (8) 溶接雰囲気：大気中溶接である。一般には、セールドガスを使用する。
(電子ビームのように真空を要しない)。

つづいて、溶接のメカニズムとして、レーザー溶接では必要とする溶け込み深さによって加工のメカニズムが異なる。すなわち、溶け込みが浅い溶接は比較的lowパワー密度の条件で使用して、加熱・溶融する加工であるのに対して、溶け込みが深い溶接は高パワー密度の条件で使用し、蒸発も加わった加工である。

2.3 レーザ加工の特徴

レーザー光の特徴として次のような特徴がある。

- (1) 単色性が良い(波長が単一である)
- (2) 可干渉性が高い(位相が揃っている)
- (3) 指向性が良い(ビームが1方向に進み、拡がり小さい)

レーザー加工で利用しているのはそのうちの(1)であり、幾何光学において平行光線はレンズによって焦点に集めることができるという原理である。すなわち、ごく微小な面積にパワーを集中でき、非常に高いパワー密度(W/cm²)が得られ、材料の加工が可能となる。

以上のレーザー光特性からレーザー加工の特徴を列挙してみると、
長所

- ・ 材料表面の一部分のみに高パワー密度を実現できるため、レーザービームを吸収する材料はほとんど加工できる。
- ・ 非接触加工であり、材料に機械的力を及ぼさない。
- ・ レーザの集光状態および発振状態(連続発振やパルス発振)の制御、補助ガスの利用などによって、除去、付加、接合、材料の合成など種々の加工を行える。
- ・ レーザビームは平行性が良いため、遠方まで伝達でき、1台の発振器をタイムシェアリングすれば、複数の場所で作業を行うことができる。
- ・ 他の加工法、例えば機械加工との複合加工(レーザービームによって材料を軟化させて切削するなど)の可能性もある。
- ・ 透明対を通してエネルギーを伝達できるので、例えば密封容器中の加工も行える。

短所

- ・ 溶融を伴う加工では、加工物中に熱影響層が残留する。
- ・ 措置のコストが高い。

まだ加工の一般化された条件は決まっておらず、各装置によって試行錯誤が必用である。

2.4 レーザ表面焼入れの特徴

レーザー焼入れは、

- (1) 真空槽や浸炭炉などが不要であり、大気中で大型部品の必要な部分のみに焼入れできる。
- (2) レーザ照射後の自己急冷効果で焼入れするので、冷却媒体としての水や油を必ずしも必要としない。
- (3) 処理時間が短く、オンラインでの連続処理も可能。
など、プロセスとしての特色を有している。

表面改質の目的は、基盤となる材料がもつ本来の特性を犠牲にすることなく、材料の表面のみをさらに高機能化することにある。

レーザー表面改質の一般的な特徴をまとめると次のようになる。

- (1) 局部処理性：必要な部分のみ、選択的に処理できる。
- (2) 処理領域の制御性：処理面積が精密に制御できる。
- (3) 複雑形状への対応性：複雑な形状の一部だけや、パイプの内面のみの処理ができる。
- (4) 高パワー密度・低エネルギー処理：熱歪みが極めて小さく、処理後の機械加工は不要な場合が多い。
- (5) 自己冷却：冷却は母材内部への急速な熱伝導によってなされるので、水や油等の冷却手段が不要である。
- (6) オンライン化：処理の自動化が容易であり、オンラインに組み込むことができる。

以上に加えて特に「蒸発を伴う方法」または「化学反応を伴う方法」を採用した場合は、基盤の表面状態(うねりや表面粗さ)を劣化することなく、基盤表面に機械的、電氣的、化学的あるいは光学的に特徴のある数ミクロン程度のごく薄いファインセラミック層の形成も可能である。

第3章 レーザ溶接実験

3.1 実験目的

レーザ溶接には、炭酸ガスレーザ加工機や YAG レーザ加工機が用いられる。高出力である炭酸ガスレーザは、一般的に厚板の溶接に用いられるが、熱影響が大きいいため加工物に歪みが発生してしまう。逆に YAG レーザ加工機は、出力が低いため比較的熱影響も少なく、かつ集光性、出力制御がよいため、微細かつ熱影響の少ない溶接が可能である。

しかし、レーザ加工機による溶接は、レーザ切断加工に比べ実用技術としてあまり普及していない。そこで本研究により、レーザ溶接の諸特性を調べることを目的とした。

3.2 実験に使用した材料

加工に使用する材料は、大きさ 60 mm × 20 mm のステンレス鋼 SUS304 と SUS430 の板厚 1.0 mm を使用した。

ステンレス鋼は、種々の腐食環境において優れた耐食性を持つことから、機械材料として数多く用いられている。ステンレス鋼は 11% 以上のクロム Cr を含有する鋼で、ステンレス鋼の耐食性は主として合金元素の Cr の効果である。クロムは材料の表面に酸化物の不導体皮膜を形成し、内部の酸化を防止する。ステンレス鋼は、主として Ni と Cr 量により、フェライト系、マルテンサイト系、オーステナイト系、フェライト・オーステナイト二相系、析出硬化型に分けられる。

加工に使用する SUS304 は、オーステナイト系のステンレス鋼である。オーステナイト系のステンレス鋼は、高温から急冷処理（溶体化処理、solution heat treatment）によって炭化物が固溶するため他のフェライト系やマルテンサイト系のステンレス鋼よりも耐食性がよい。しかしこの合金は、溶接などで加熱されて 870 ~ 600 の温度域で除冷されると Cr 炭化物が粒界に析出するために粒界腐食を起こしやすくなる。以上の性質から、化学工場や石油精製をはじめ、家電製品、建築、車両、船舶、低温用、原子炉機器に幅広く用いられている。

つづいて SUS430 は、この合金に用いられる熱処理によって得られる組織がフェライトであることから、フェライト系ステンレス鋼と呼ばれている。フェライト系ステンレス鋼は、Ni を含有していないので比較的安価であり、タービンブレード、熱交換器、家庭用厨房用、ガス電気器具、自動車外装用、自動車排気系、高温海水熱交換器など化学工場用などに用いられる。

表 3.1 加工材料の性質

鋼種	密度 (kg/m ³)	比熱 (kJ/kg·K)	熱伝導 (W/m·K)	熱膨張係数 (× 10 ⁻⁶)
SUS304	7930	0.5	16.3	17.3
SUS430	7700	0.46	26.3	10.4

3.3 実験方法および装置

今回、実験に使用した装置は、加工機に MITSUBISHI YAG レーザ加工機(表 3.2、図 3.3 参照)を使用した。このレーザ加工機の加工システムは、レーザ発振器から発振されたレーザ光を光ファイバケーブルによって、アーム口ポット(表 3.3、図 3.4 参照)先端に取り付けた加工ヘッドに伝送するファイバ光学系である。

まず、実験前に加工ヘッドと材料の垂直度と集光レンズの焦点を求めた。レーザ加工の場合、レーザ光は材料に対して垂直に照射しなければならない。そこで加工ヘッドと加工対象物を垂直にするために、芯だしを行った。これは、黒色のアクリル板を加工物とし、上部 2 ~ 3 mm からレーザ光を照射する。これによって加工痕の周囲にガス噴射痕が形成される。加工痕がガス噴射痕の中心にきたところが、ちょうど加工ヘッドと加工対象物が垂直となるので、中心になるまでこの工程を繰り返した(図 3.1 参照)。

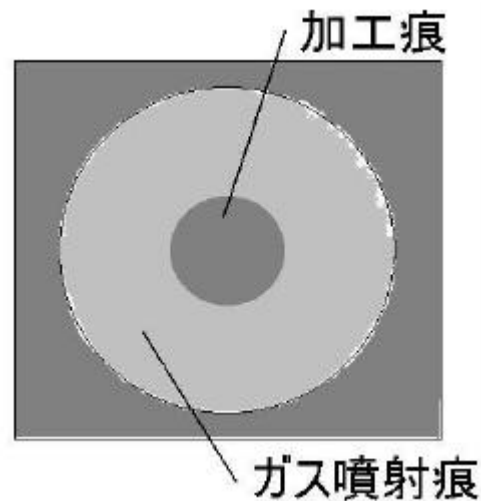


図 3.1 垂直度

つづいてレンズ焦点の求め方について、上記に述べた垂直度を求めた後、加工ヘッドから可視光を照射して加工物の表面より少し下に焦点を配置する。そうしてレーザ光を照射しながら、X 軸に 100 mm、Z 軸に 10 mm動かして加工していく。こうしてできた加工痕を測定して加工物表面に焦点がくるように求める(図 3.2 参照)。また加工物表面に焦点があるとき、その位置から上下に焦点位置をずらすことを焦点はずしと言い、上部に移動するなら +、下部に移動するなら - と定義した。

以上の実験準備を終えた後、ワイヤ放電加工機により 60 mm × 20 mmの大きさに加工した材料を加工台に固定し YAG レーザ光を照射して溶接を行った。

つづいて測定内容について、測定する項目としては、溶け込み深さ、引張り強さ、溶接部の硬度を測定した。溶け込み深さは、レンズの焦点位置と送り速度を変化させて溶接したものを、ワイヤ放電加工機により溶接部を切断し、切断面を光学顕微鏡で観察した。つづいて引張り強さは、溶接したものを引張り試験機で測定し、引張り強度を調べた。最後に溶接部の硬度は、微小硬度計により測定した。

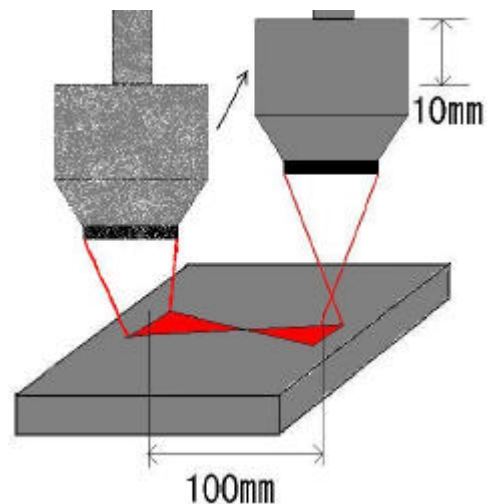


図 3.2 焦点

表 3.2 YAG レーザ発振器の仕様

性能	レーザー出力	定格出力(W)		250
		パルス出力	ピーク出力(W)	400
			設定周波数(Hz)	10 ~ 500
			設定デューティ (%)	0 ~ 100 可変
		出力可変範囲(%)		50 ~ 100(定格出力 100 として)
	出力ビーム特性	波長(μm)		1.06
		ビームモード		低次マルチ
ビーム集光性(M ²)		30 以下(定格出力時)		
付属機能	ビームシャッタ		外部シャッタ 応答時間約 1 秒	
	可視光レーザー装置		赤色 出力 1.0mW 以下、調整用	
	パワーモニタ		応答時間 5 秒	
外径	外径寸法		1250 × 800 × 1452	
	質量(kg) [質量(kgf)]		約 600	



図 3.3 YAG レーザ発振器の外観

表 3.3 アームロボットの仕様

項目	単位	仕様値		備考	
形名		RV-N4			
仕様識別コード		AS6-314004			
自由度・構造		6 自由度・垂直多関節形			
アーム長	肩シフト	mm	160		
	上腕	mm	315		
	前腕	mm	400		
動作範囲(最大速度)	J1	度 (度/S)	± 170	180	腰旋回
	J2		240	113	上腕旋回
	J3		150	150	前腕旋回
	J4		± 160	270	手首振り
	J5		± 130	300	手首曲げ
	J6		± 180	432	手首ひねり
最大合成速度	m/S	4.5			
定格負荷	N	39.2(ハンド重量を含む)			
位置繰り返し精度	mm	± 0.05			
駆動方式		AC サーボモータによる電動サーボ駆動		全自動ブレーキ付き	
周囲温度		0 ~ 40			
湿度	%	40 ~ 85(結露なきこと)			
本体重量	N	約 960			



図 3.4 アームロボット外観

溶け込み深さの測定方法

溶け込み深さの測定には、ミットヨ製測定顕微鏡 TF-510F(表 3.4、図 3.8 参照)を使用した。下の図 3.5 と図 3.6 は、溶け込みの断面形状の絵と写真で、色が変わっている所が溶接後の材料にどれだけ溶け込みが入ったかを表している。この色が変わっている部分の上下部を、溶け込み深さとして測定する。

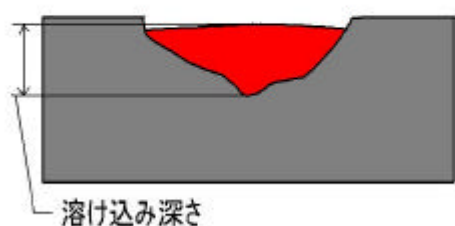


図 3.5 溶け込みの断面形状

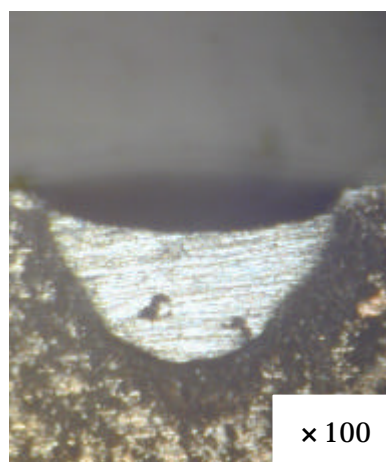


図 3.6 溶け込みの断面形状の
顕微鏡写真

引張り試験

引張り試験機には島津オートグラフ AG100KNG (表 3.5、図 3.9 参照)を使用し、右の図 3.7 は、引張り試験の状態を簡単に表したものである。引張り試験の条件は次のとおりである。まず溶接した材料の両端を 10kN の力で 1mm/min の速度で引張っていく。そして材料が破断された時点の荷重を測定する。

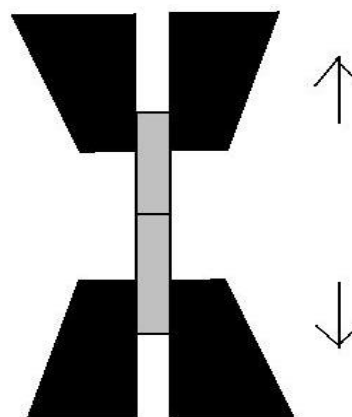


図 3.7 引張り試験による測定

溶接部硬度の測定方法

硬度の測定には、島津微小硬度計 HMV-2000 形(表 3.6、図 3.10 参照)を使用し、レーザー加工機で溶接を行った材料表面(SUS304、SUS430)を微小硬度計により測定する。

手順として、

溶接された材料の表面に 50N の力で 5s 間、圧子を打ち込む。

圧子によってひし形状のくぼみを付ける。

ひし形状にできたくぼみの縦横の長さを測定し、ビッカース硬度を求める。

表 3.4 測定顕微鏡の仕様

項目	仕様		備考
形式	支柱直立型		
接眼鏡筒	俯角	30°	十字線レクチル付き
対物レンズ	倍率	3×、10×	
	作動距離	72.5 mm	
	実視野	8	
	開口数	0.07	
	焦点深度	0.056 mm	
	倍率精度	±0.1%	
接眼レンズ	倍率	10×	視度調整可能
	視野数	24	
	像	正立像	
透過照明装置	光源	12V,50W ハロゲンランプ	テレセントリック照明熱線 線フィルタ内臓
	輝度	無段階調光式	
反射照明装置	光源	12V,50W ハロゲンランプ	垂直反射熱 線フィルタ内臓
	輝度	無段階調光式	
消費電力	最大 200VA		



図 3.8 測定顕微鏡の概観

表 3.5 引張り試験機の仕様

項目	仕様	
形式	AG100KNG	
負荷方式	AC サーボモータによる PC コントロール高精度定速ひずみ方式	
速度精度	0.5 ~ 250 mm/min	
荷重計測装置	測定倍率 ×1,2,5,10,20,50,100 7 段切換え	
	荷重測定精度	標準精度形 指示値の ±1.0
		高精度形 指示値の ±0.5
荷重校正	引張および圧縮	
クロスヘッドポジション計測装置	計測方式	光学式エンコーダによる計測
	測定分解能	0.001 mm
	計測原点設定	任意の位置に設定可能
試験機大きさ	1110 × 700 mm	



図 3.9 引張り試験機の概観

表 3.6 島津微小硬度計の仕様

項目	仕様
荷重	0.04903,0.09807,0.1471,0.2452,0.4903,0.9807,1.961,2.942,4.903,9.807,19.61N の 11 種類
負荷装置	荷重自動変換・自動負荷方式
荷重保持時間	5～60 秒 秒単位で任意設定
圧子	対面角 136°ダイヤモンド正四角錐圧子
計測顕微鏡	対物レンズ ×10、×50 2 種
	接眼レンズ ×10 1 種
	観察と撮影の光路切換え可能
測長装置	エンコーダとつまみ直結型
	視準方式 両サイド個別視準方式
	検出器 オプチカルエンコーダ
	有効測定長さ 200 μm 最小表示 0.1 μm
測定モード	ピッカーズ、ヌープ、プリネル、三角錐硬さ、長さ
統計計算	1 ロット当り、および全体のロットの統計計算
	平均、標準偏差、変動係数、最大値、最小値
メモリー保護機能	約 1 週間
外形寸法・質量	外形寸法 400×470×520
	質量 約 42kg



図 3.10 微小硬度計の概観

3.4 実験結果、および考察

溶接部の写真

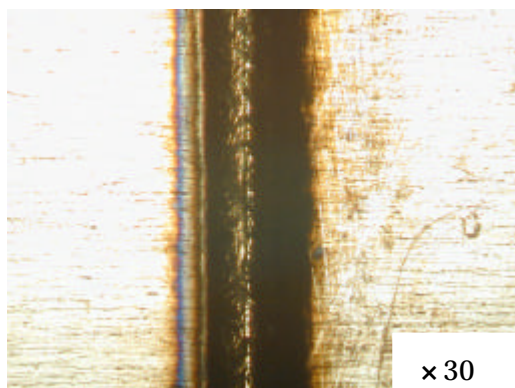


図 3.11 焦点はずし - 3.0 mm



図 3.12 焦点

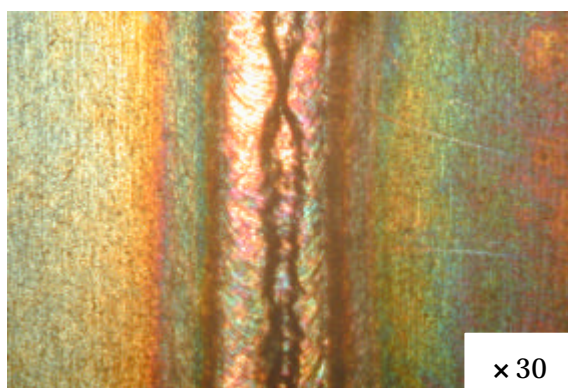


図 3.13 焦点はずし +3.0 mm

これは、レーザ光の出力を一定にして、材料と板厚が同じ物を YAG レーザ加工機で溶接し、それを 30 倍で撮った写真である。

焦点はずし - 3.0 mm の時には、溶接部の表面が見た目ではきれいにならなかった(図 3.11 参照)。焦点の時には、溶接部の表面が細く見た目でもきれいにできリードもしっかりとついていた(図 3.12 参照)。焦点はずし + 3.0 mm の時には、溶接部の表面は焦点と比べると少し太くなるが見た目はさほど変わらずきれいにでき、焦点と同様、リードもしっかりとついていた(図 3.13 参照)。

3.4.1 溶け込み深さ

材料 SUS304

溶け込み深さは、速度が遅い時ほど溶け込みが深く、速度が速くなるにつれて、溶け込みが浅くなるという結果が得られた(図 3.14 参照)。

焦点外し - 3.0 mmの時のグラフを見ると、そこまでのばらつきが無く一定した結果が得られた。焦点と焦点外し + 3 mmの時のグラフを見てみると、溶け込みに少しばらつきが見られるが、比較的平均的な深い溶け込み結果が得られた。

焦点外し - 3.0 mmの時は、材料表面よりも下に焦点があるので、焦点部分よりも上の部分がレーザー光により蒸発除去され、比較的浅い溶け込みになるということがわかった。しかし、溶け込みの状態だけを見てみると安定した結果が得られるということがわかった。

焦点の時は、材料表面に焦点があるので、溶接部の幅が狭くきれいな溶接ができ、深い溶け込みができることがわかった。

焦点外し + 3.0 mmの時は、材料表面よりも上に焦点があるので、溶接部の幅が広がるが焦点はずし - 3.0 mmの時よりも深い溶け込みが得られた。

焦点の時と焦点外し + 3.0 mmの時には、溶接の際のビードがきれいにできることがわかった。

総合的に比較すると、溶接部の見た目や溶け込み深さを見てみると、焦点の時が一番溶接に適していることがわかった。

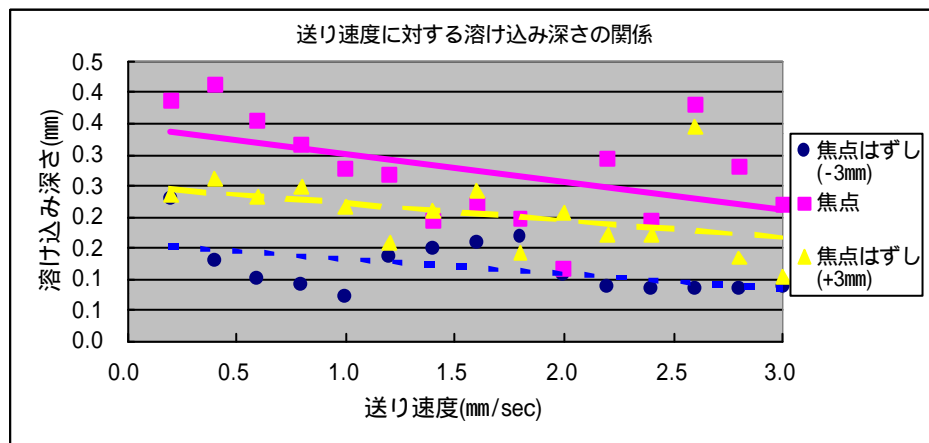


図 3.14 SUS304 の溶け込みの結果

材料 SUS430

SUS430 の場合も SUS304 の場合と同様に、速度が遅い時に溶け込み深さが深く、速度が遅くなるにつれ溶け込み深さが浅くなるという結果が得られた(図 3.15 参照)。しかし、SUS304 と比べるとばらつきが多く見られるという結果になった。

焦点と焦点外し +0.3 mm のグラフを見てみると、溶け込み深さに違いはあるが比較的形としては似たグラフであることがわかった。この理由として考えられることは、両方の場合焦点が材料表面もしくは、それより上にあるということより、レーザ光が同じように照射されることが考えられる。また、焦点外し -3.0 の場合には、焦点が材料表面よりも下にあるので違うグラフになったと考えられる。

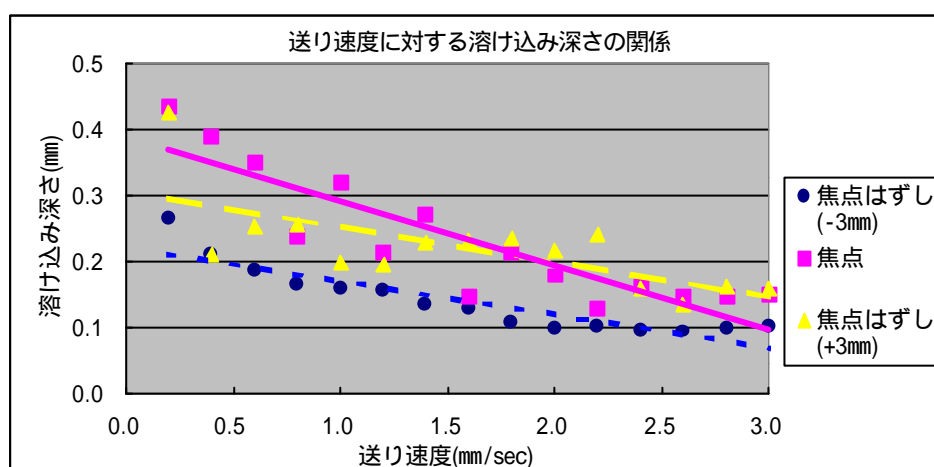


図 3.15 SUS430 の溶け込みの結果

3.4.2 引張り強さ

SUS304

SUS304 の引張り試験についての結果は、横軸にレーザー光の送り速度を取り、縦軸に荷重(最大点荷重、破断点荷重)を取ったものを図 3.16 ~ 図 3.18 に示す。

縦軸の荷重には、最大点荷重と破断点荷重があり、最大点荷重とは材料に対して一番荷重がかかった時のことで、破断点荷重とは材料が破断された時のことである。

最大点荷重と破断点荷重は、どのグラフを見ても分かるようにほぼ同じような結果となった。また、焦点の時が一番平均的に高く(図 3.17 参照)、焦点はずし +3.0 mm と -3.0 mm の時は焦点の時に比べると低くなり(図 3.16 と図 3.18 参照)、似たような結果となった。理由として考えられることは、焦点の時には、溶接の際に一番深く安定した溶け込みが入り、焦点はずしの場合と比べてみても荷重が高く安定した結果になったと考えられる。

荷重と送り速度の関係を見てみるとわかるように、荷重に対して送り速度はそこまでの影響がなくほぼ一定した結果となった。理由として考えられることは、引張り強さには、溶接の際に溶け込んだ深さが関係していて、送り速度が遅くても速くても、必要な溶け込み深さが同じだけ得られれば送り速度にはそこまでの影響は無いと考えられる。

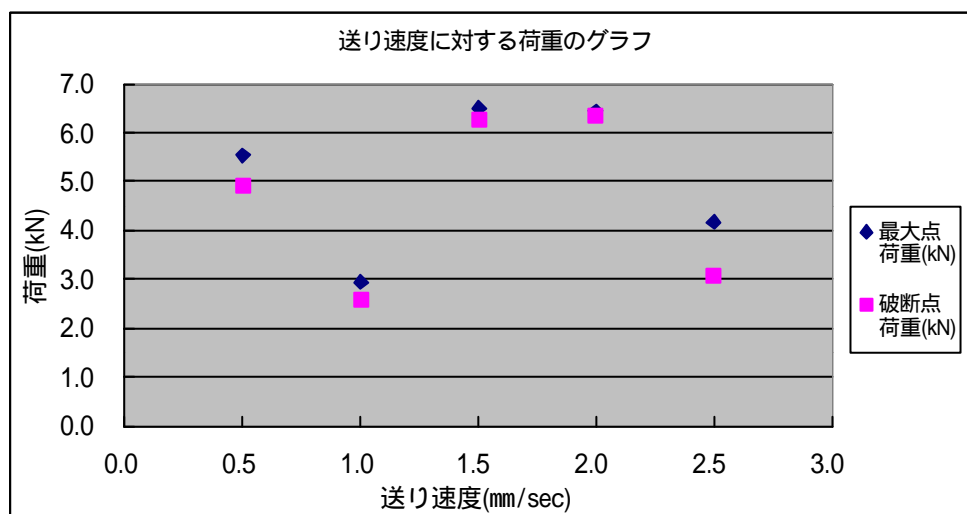


図 3.16 焦点はずし(-3.0 mm)の引張り結果

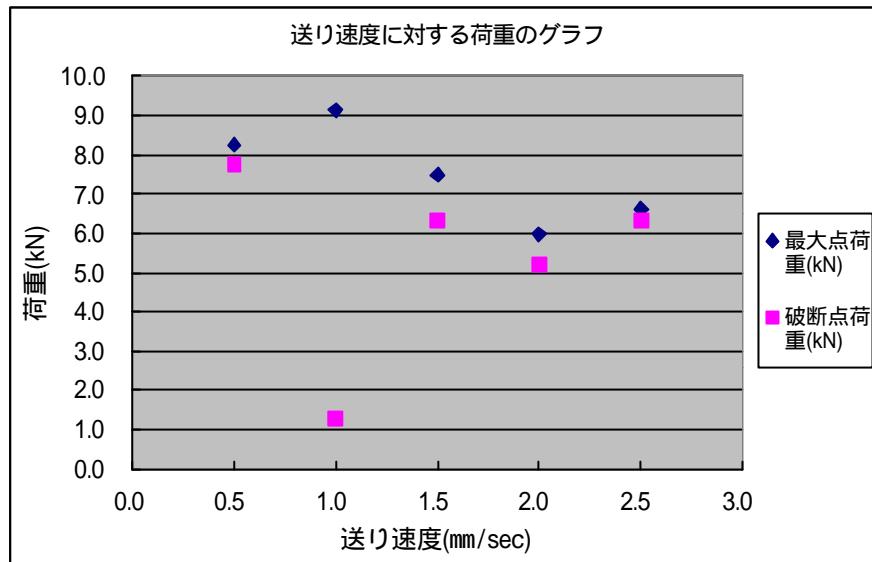


図 3.17 焦点の引張り結果

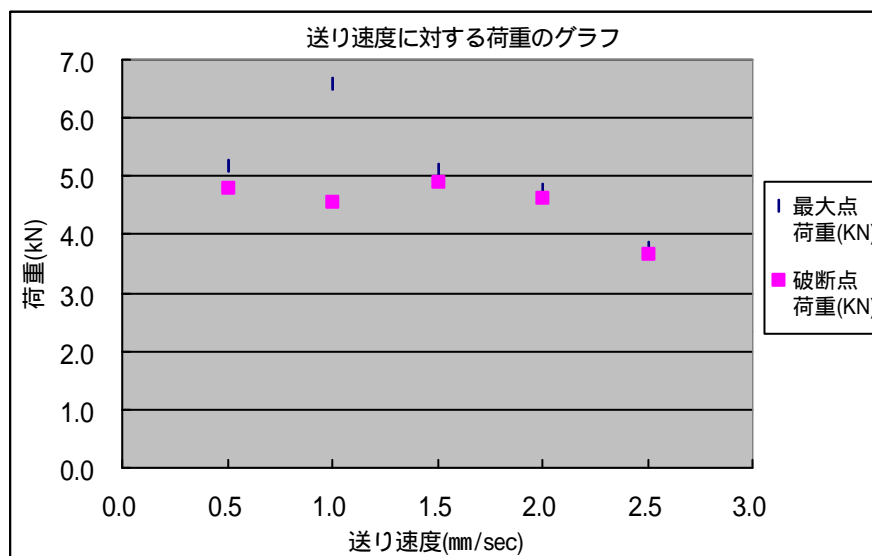


図 3.18 焦点はずし (+3.0 mm) の引張り結果

SUS430

次に、SUS430 の引張り試験の結果も、SUS304 と同様に横軸にレーザー光の送り速度を取り、縦軸に荷重(最大点荷重、破断点荷重)を取ったものを図 3.19 ~ 図 3.21 に示す。

SUS430 の場合も SUS304 の場合と同様に、最大点荷重と破断点荷重は、どのグラフでもほぼ同じような結果となり、また同じく、焦点の時が一番平均的に高く、焦点はずし + 3.0 mm と - 3.0 mm の時は焦点の時に比べると低くなるという結果が得られた。理由としても、SUS304 の場合と同様のもので考えられる。そこで考えられるのが、最大点荷重や破断点荷重は材料の性質の違いによって変わってくるが、グラフの形としては同じような物ができるといことがわかった。

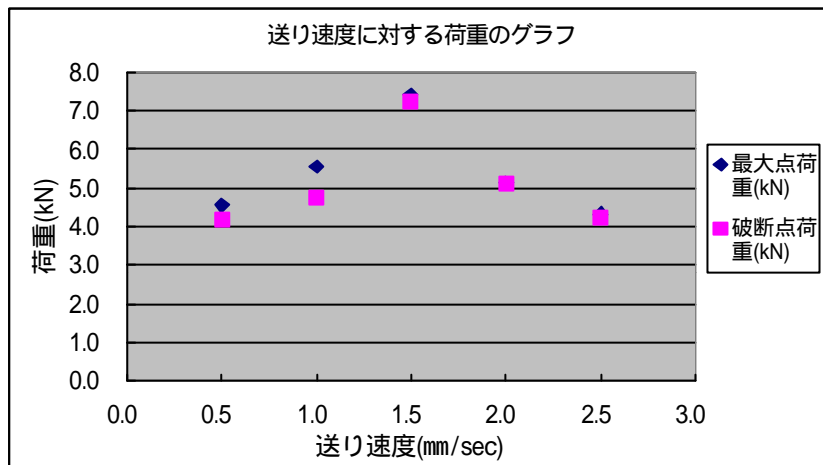


図 3.19 焦点はずし (- 3.0 mm) の引張り結果

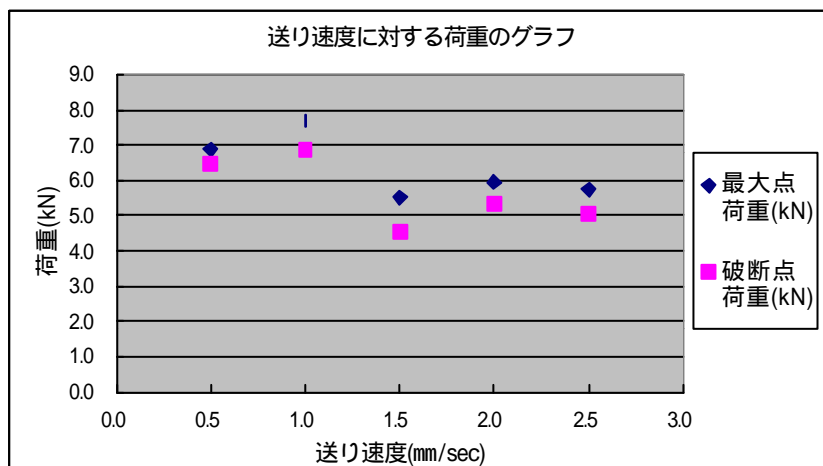


図 3.20 焦点の引張り結果

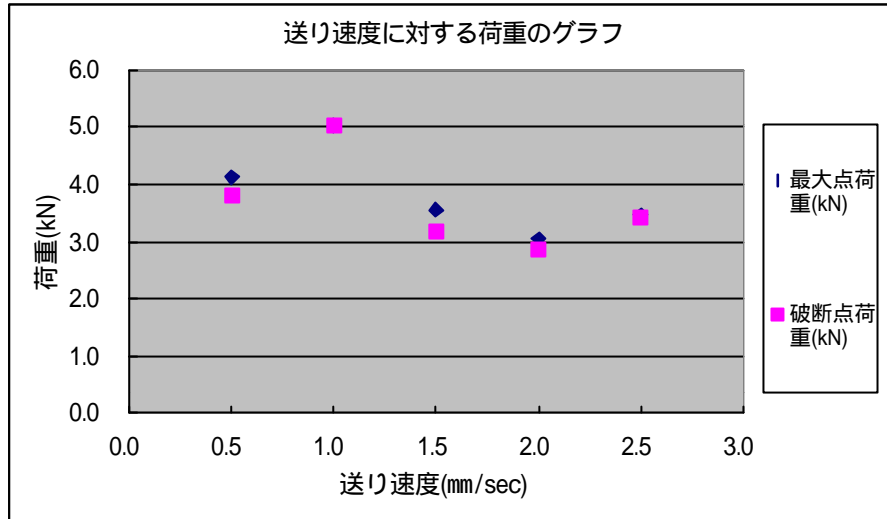


図 3.21 焦点はずし(+3.0 mm)の引張り結果

3.4.3 溶接部硬度

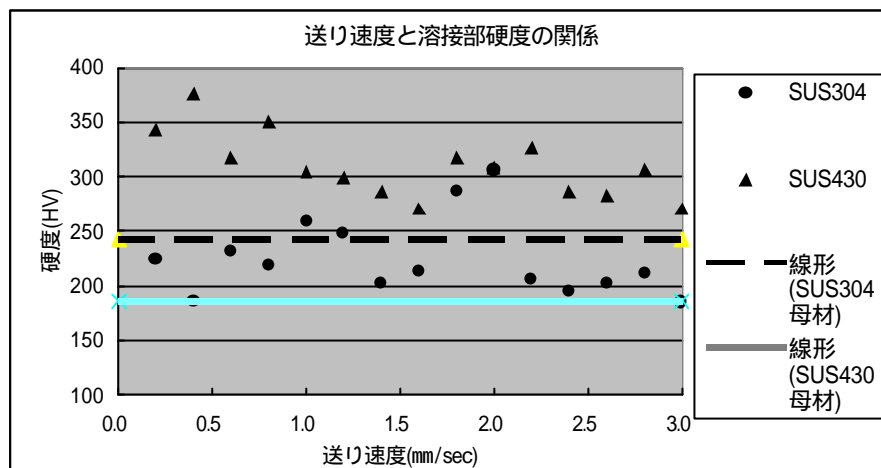


図 3.22 溶接部硬度の結果

SUS304 では、硬度にあまり変化がなく若干母材よりも硬度が低くなるという結果が得られた。SUS430 では、溶接された部分の硬度が、母材の硬度よりも高くなっている。中には2倍近くも高くなっているという結果が得られた。

SUS304 と SUS430 を対比してみると、SUS430 の方が明らかに硬度が高くなっている。その理由として考えられることは、SUS304 はもともと母材の硬度が高いため、溶接をしてもそこまでの変化が見られず、SUS430 では母材の硬度があまり高くないということが関係してくると考察できる。また SUS430 は、SUS304 に比べ熱伝導が高いことから、熱の伝わり方が良く均一に溶接できたと考えられ、逆に SUS304 は、熱伝導が低いことで溶接部に熱がこもり、母材を脆くしたため硬度が低下したものと考えられる。したがって溶接の際に硬度が関係する場合であれば、SUS304 よりも SUS430 の方が適していることがわかった。

第4章 レーザ表面焼入れ

4.1 実験目的

金属材料の焼入れは、鋼材中の炭素の含有量により硬度が高くなる。しかしながら炭素量が同じでも加工法によって硬度は異なる。従来の水焼入れよりもレーザー焼入れのほうが高い硬度が得られることがわかっている。そこで本章では、レーザー焼入れの特性を調べ、加工条件がどのように結果に反映されるかを求めることを目的とした。

4.2 実験に使用した材料説明

加工に使用する材料は、大きさ 10 mm × 10 mm の炭素鋼 S50C を用いた。炭素鋼 S50C は、鉄と約 0.5% の炭素からできた合金である。

炭素鋼は焼入れをした場合、炭素の含有量により硬度が変化する金属である。したがって炭素含有量が多ければ硬くなる性質をもっている。主に使用される物としては、機械的材料もしくは工具鋼として使用される。

4.3 実験方法

レーザー焼入れも溶接と同様に加工機に MITSUBISHI YAG レーザ加工機(表 3.2、図 3.3 参照) とアームロボット(表 3.3、図 3.4 参照) を使用し、硬度の測定には島津微小硬度計 HMV-2000 形(表 3.6、図 3.10 参照) を使用した。

実験方法として、まず、第 3 章で述べたように溶接の場合と同様に、芯だしと焦点だしを行う。それから、材料の炭素鋼(S50C)をレーザー光が垂直にあたるように加工台に固定し、溶接と同様レーザー光を照射する(図 4.1 参照)。レーザー焼入れを行った後、材料表面の硬度を微小光度計で測定する。

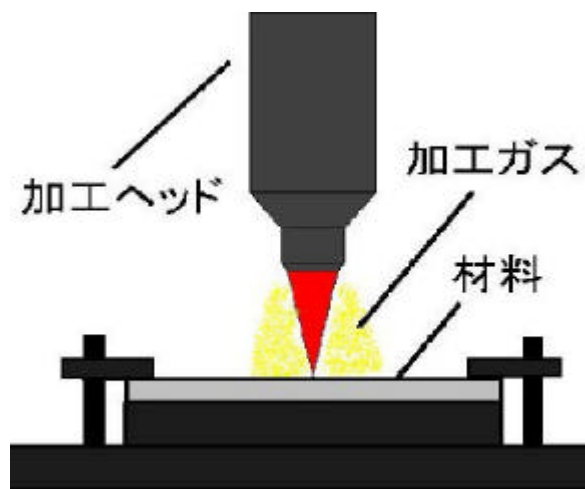


図 4.1 表面焼入れ

4.4 実験結果および考察

炭素鋼(S50C)にレーザー表面焼入れを行うと、非常にきれいなビードができていることが肉眼でも見てわかる(図 4.2 参照)。

照射エネルギーを 120W 固定とし、送り速度を変化させた各焦点はずしの場合の表面硬度を測定した。この結果をグラフ(横軸に送り速度、縦軸に硬度を取り、各焦点はずし距離をグラフ化したもの)に表したものを図に示す(図 4.3 参照)。グラフ化したものを見る限り、それぞれ表面硬度が向上していることがわかった。その中でも焦点はずし距離が - 2 mm のものが一番上昇しており、最大で 2300(母材の硬度の約 5 倍)に達した。その反面、焦点はずし距離が 0 mm に近づくと、速度を変化させても安定した硬度が得られる傾向にあることがわかった。

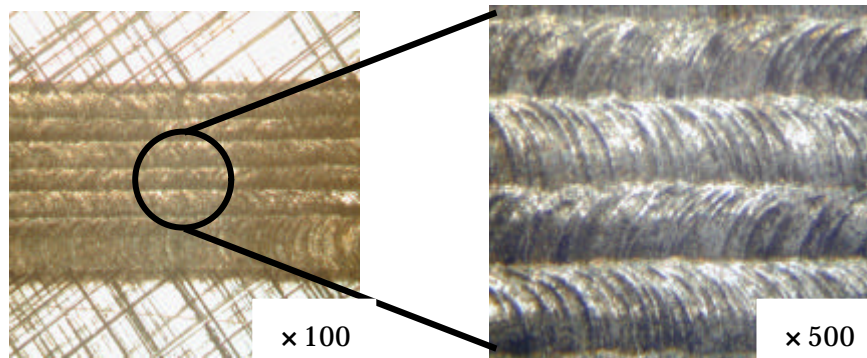


図 4.2 加工後の表面写真

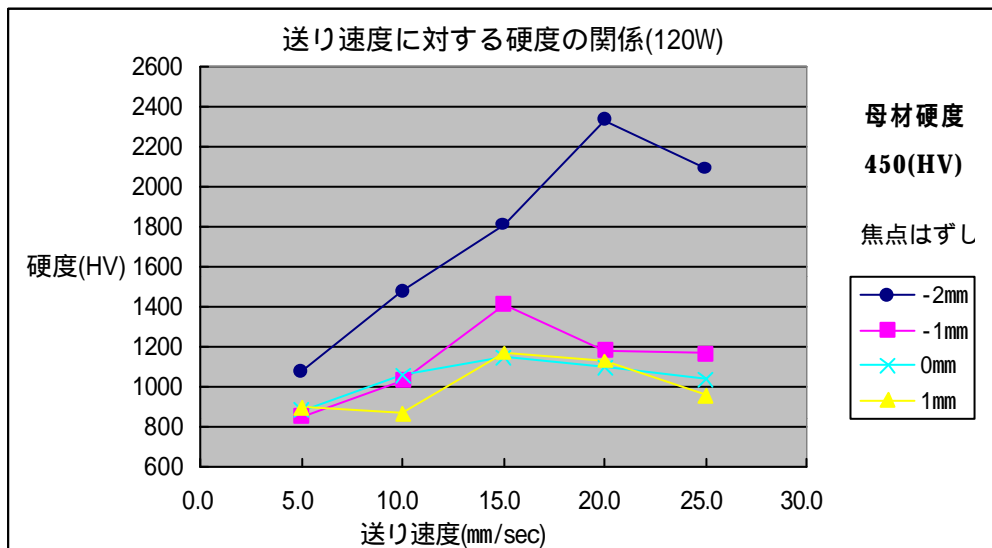


図 4.3 表面焼入れ硬度の結果

第5章 結言

現在の電気産業では YAG レーザによる精密溶接が広く利用されるようになり、溶接の技術は常に進歩してきている。そういった中で今回の本研究では、レーザ溶接の諸特性を知るということを目的として研究を行った。まず、溶接を行うにあたって第 2 章で述べたように YAG レーザの原理を知る必要がある。その次にレーザ溶接の特徴、レーザ加工の特徴を知る必要がある。

最初に、溶け込み深さの研究を行った結果は以下の通りである。

(1)レーザ光の送り速度が遅い時ほど溶け込み深さが深く、速度が速くなるにつれ溶け込み深さが浅くなる。

(2)焦点の時に平均的に溶け込みが深く溶接部の幅が狭く綺麗な溶接ができる。

以上のようなことが結果としてわかった。

まず、(1)の場合、レーザ光の送り速度が遅いということは、材料に対してよく熱が伝わるということなので深い溶け込みが得られ、速度が速くなるということは材料に対して熱が伝わりにくくなるので溶け込みが浅くなるということが考えられる。次に、(2)の場合、材料表面に焦点があるということなので、レーザ光が一番いい状態で材料にあたるということが考えられる。また、焦点はずし + 3.0 mm の時には焦点の時よりも溶け込み深さは浅いが、焦点はずし - 3.0 mm よりも深い溶け込みが得られる。しかし、焦点の時に比べると溶接部の幅が広がってしまった。この場合焦点が材料表面よりも上にありレーザ光のあたる幅が広がったからだと考えられる。焦点はずし - 3.0 mm の時は他のものと比べても溶け込み深さが一番浅く、溶接部の状態が汚くなってしまふ。焦点が材料表面よりも下にあるということは、焦点までの材料が溶接の際に蒸発除去されたからだと考えられる。

こういったことにより、溶け込み深さを深くしつつ溶接部の幅を狭く綺麗にするためには、焦点を材料表面に合わせ速度を遅くさせることが必要である。

次に、溶接部の引張り試験を行った結果は以下の通りである。

(1)焦点の時に一番荷重が高くなる。

(2)焦点はずし + 3.0 mm と - 3.0 mm の時はそこまでの差はできない。

以上のことから考えられるのは、引張り強さには、溶接の際に溶接材料に対して溶け込みがどれだけ入っているかが関係してくる。つまり、必要な溶け込み量が送り速度の遅い時でも速い時でも、同じ量だけ得られることができれば荷重に対して送り速度の影響はあまり無いということがわかった。しかし、材料の厚みが太くなると、送り速度が速い場合では綺麗に溶接できないので、送り速度を遅くする必要がある。そういった場合には、送り速度も関係してくると考えられる。

最後に、溶接部硬度の結果として、SUS304 の場合、硬度変化はそこまで見ることはできなかった。それに対し、SUS430 の場合では、母材の硬度より 2 倍近く硬度が上昇しているところもあった。これは SUS304 よりも SUS430 の方が、もともと母材の硬度が低いと

ということと、熱伝導率が高いため SUS430 に硬度変化が見られたと考えられる。

今回、溶け込み深さ、引張り試験、溶接部硬度の研究を行った結果、レーザ溶接についての諸特性としては、材料表面に焦点を合わせ、レーザ光を送る速度を遅くすることによって、溶け込みが深く綺麗なビードができ尚且つ強い溶接ができることがわかった。

つづいて、レーザ表面焼入れについてだが、まず全体的に硬度の上昇がみられた。結果として、S50C にレーザ焼入れを行うと焦点位置に関係なく硬度が上昇するということがわかった。その中でも焦点はずし距離が - 2.0 mmの時に、一番硬度の上昇が見られ高いところで約 2300(母材の硬度の約 5 倍)近くまで上昇するという結果が得られた。これは焦点が材料表面よりも下にあるので、レーザ光の熱が材料内に良く伝わるということである。しかし、この場合レーザ光の送り速度を遅くしすぎると、材料に対して熱が伝わりすぎ材料表面が傷つきそこまでの硬度の上昇が見られず、安定した焼入れを行うことができない。逆に、焦点の場合には焦点はずし距離 - 2.0 mmの時に比べると、そこまでの硬度の上昇は見られないが、レーザ光の送り速度に関係なく平均的に安定した焼入れをすることができる。

つまり、レーザ焼入れを行う場合、焦点はずし距離が焦点に近づくと、送り速度に関係なく安定した焼入れを行うことができるが、硬度の上昇はあまり見られない。逆に焦点はずし距離を焦点から遠ざけてレーザ焼入れを行うと、非常に高い硬度の上昇は見られるが、安定した焼入れを行うことができないということがわかった。

謝辞

本卒業研究及び研究論文は高知工科大学工学部小林和彦教授のご指導の元に行われ、完成するに至りました。終始ご指導ご援助を賜った同教授に対し厚く御礼申し上げます。

また、高知工科大学工学部楠川量啓教授には本研究に使用した引張り試験機の取り扱いに関しご指導して頂き深く感謝を申し上げます。

最後に、同研究室の松井浩氏には、本卒業研究及び研究論文の完成に至るまで多大なるご協力をして頂き大変厚く御礼申し上げます。

参考文献

安永暢男

「レーザが変える加工技術」 海文堂出版株式会社 (1992.5)

新井武二 沓名宗春 宮本勇

「レーザ加工の基礎(下巻)」 マシニスト出版株式会社 (1993.5)

宮崎俊行 宮沢肇 村川正夫 吉岡俊朗

「レーザ加工技術」 産業図書株式会社 (1991.5)