

YAG レーザビームによる 形彫放電加工面の表面改質

電気加工研究室

指導教員 小林和彦

知能機械システム工学科

1030101

緒方亮文

目次

第1章 緒論

1.1 レーザ加工の特徴	p2
1.2 レーザ表面改質技術	p3
1.3 本研究内容	p4

第2章 調査実験

2.1 YAG レーザ加工機	p5
2.2 焦点出し	p7
2.3 出力換算表	
2.3.1 実験目的	p7
2.3.2 実験に使用する機器	p8
2.3.3 実験方法	p8
2.3.4 実験結果	p9

第3章 YAGレーザビームによる放電加工面の表面改質

3.1 緒言	p10
3.2 実験方法及び装置	
3.2.1 実験材料	p10
3.2.2 照射方法	p11
3.2.3 レーザ光照射条件	p12
3.2.4 測定方法	p13
3.3 実験結果および考察	
3.3.1 表面粗さ	p16
3.3.2 硬度	p23
3.4 検討	
3.4.1 放電加工面の表面改質について	p27
3.4.2 アモルファス合金	p27

第5章 結論

謝辞	p31
参考文献・資料	p32

1 章 緒言

1.1 レーザ加工の特徴

レーザー加工機は産業機械としてはまだ新しいものであるが、その適用範囲は大きく成長している。レーザー光は、誘導放出と呼ばれる特異な光放出現象を利用して得られる人工光源であり、基本的には以下の特徴を持っている。

単色性が良い(波長が単一である)

可干渉性が高い(位相が揃っている)

指向性が良い(ビームが1方向に進み、広がり角が小さい)

このような光をレンズなどの光学系を通して集光すると、 $10^9\text{W}/\text{cm}^2$ 以上にも達する高密度エネルギーが得られるので、ほとんどあらゆる材料を溶融もしくは蒸発させることが出来る⁽¹⁾。またエネルギー密度や集光面積を適度に調節すれば、局所的な加熱や表面処理などの加工にも応用できる。こうしたことからレーザー加工機は一台で切断、穴あけ、溶接、表面処理などきわめて多種類の加工ができるため、幅広い適用性を持つ。またレーザー加工機のフレキシビリティは他の点でもみられる。例えば金属・非金属を問わず、ほとんどの種類の材料を加工できる点や、指向性が良く、また伝送空間における減衰が少ないのでレーザー発振機から離れたところでも加工できること、非接触であるので工具磨耗がなく、工具交換も不要であることなどの利点を持つ。逆に、次のような欠点も認められている。加工機が高価であることや発振器の電力変換効率が(通常 10%以下)低いこと、また加工特性への霧響因子が多数でしかも規格化しにくく、加工データの再現性に難があることなどである。

このような性能をもつレーザー加工機が直接的に競合すると思われるのは、電子ビーム加工及び放電加工であろう。しかし、電子ビーム加工は金属主体、真空が必須という大きな制約があり、また放電加工は通電材料のみ、液中低遠加工が基本という不利がある。したがって、上記したようにフレキシビリティの大きいレーザー加工の優位性は明らかである。

さらに現在では、加工用途に対して様々な種類のレーザー加工機が開発されており、YAG レーザ、ルビーレーザーなどの固体レーザーや炭酸ガスレーザー、エキシマレーザーなどの気体レーザーなどといった種類がある。例えば加工における質量変化の有無といった観点から各種加工方法に対するレーザー照射条件の適用性を見てみると、質量変化のない熱処理では材料を溶融する必要のないことから、YAG レーザやエキシマレーザーなど低パワー密度、長パルス幅レーザーの使用が適当である。また、穴あけや切断などの除去加工では大出力が容易に得られることから炭酸ガスレーザーが適しているなど、用途に応じたレーザー加工機を選択する必要がある。

また、レーザー加工のメリットを活かすもう一つの局面として、レーザーでないとい

ない加工といったような「高付加価値化が可能であるか」、「難加工材料への適用が可能であるか」などが挙げられる。例えば、レーザ PVD 法により従来の薄膜形成法より、極めて激密な硬質セラミック膜を高能率に形成できることが見出されている。また、従来の機械加工が苦手とするセラミックスは YAG レーザ光や炭酸ガスレーザ光をよく吸収するので、むしろ金属よりも加工しやすくなる。これらの「レーザ加工の優位性」「高付加価値化が可能」といった点からも、レーザ加工の今後の成長が高いことが予測される。

1.2 レーザ表面改質技術

本研究室に設置されている YAG レーザ加工機は、レーザ光の波長が $1.06 \mu\text{m}$ と短く浸透性に優れていることから、被加工物深く加工することが出来る。この点で主として溶接や表面改質に向いている加工機である。レーザ光による表面改質は、加工プロセスとしての高付加価値が期待される新しいレーザ加工技術で、焼入れ、肉盛り、溶射、合金化、セラミックス化、PVT(物理蒸着)、CVT(化学蒸着)などの方法がある(図 1.1 参照)。

このような表面処理技術の中でレーザ焼入れは、すでに生産現場でも導入されており、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、従来の焼入れ方である拡散浸炭法や高周波焼入れ法などにかわり使われている。しかしレーザ光による焼入れは、規格化しにくく、一般的な加工条件がないために各企業は独自の条件を選定している。

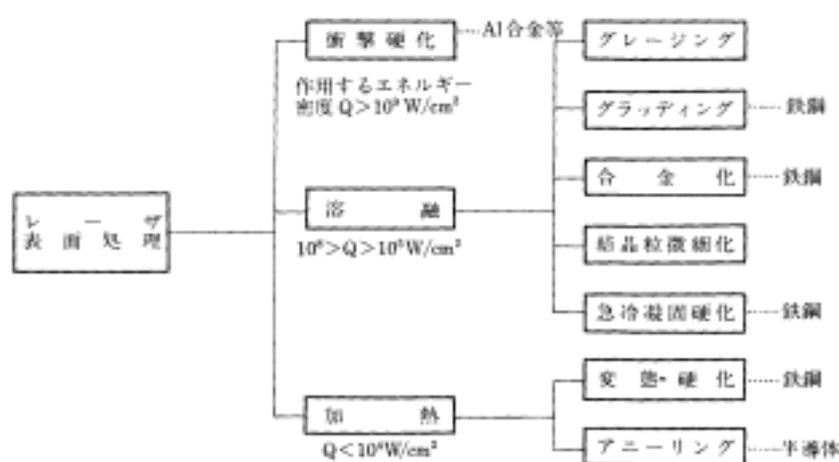


図 1.1 レーザ表面処理

1.3 本研究内容

近年、レーザ加工は多種多様な利用が考えられ、各所で新しい応用技術の開発研究が進められている。機械加工をはじめ従来の加工法はいずれもその用途が限定されているが、レーザ加工は切断、溶接、表面改質など様々な加工が行うことができ、幅広い分野で使用されている。そこで本研究では、レーザビームによる放電面の表面改質について研究を行なった。形彫り放電加工機で加工した金属表面にレーザビームを照射し溶融する。それで表面を滑らかにするというものだが、表面粗さを短時間で改善させることができれば新たな加工方法として生産技術の発展につながると思われる。

今回使用した材料は一般的に広く用いられている機械構造用炭素鋼 S50C、工具用炭素鋼材 SK-5、合金工具鋼材 SKD-11 の 3 種類を用いた。多く使われる材料だけに意義があると考えた。また、本研究は「YAG レーザによる金属の表面改質特性」の結果をもとに進めていく。

第2章 調査実験

2.1 YAG レーザ加工機

本実験では、最大出力 400W の YAG レーザ加工機を使用した。表 2.1 にその性能を示す。YAG レーザの YAG とは、Yttrium、Aluminum、Garnet の頭文字をとったものである。レーザ励起にはクリプトンランプを用いており、CO₂ レーザと比べると装置は小型である。励起のために入力される電気エネルギーからレーザエネルギーへの変換効率は 1% と低く、大部分のエネルギーを熱として消費している。ビームの搬送に反射鏡を用いず、ファイバを使用し、任意の位置へビームを照射できるフレキシブルな光学系である。発振形態は、Continues Wave (以下、CW とする。)、Pulse Wave (以下、PW とする。) があり、状況に応じて選択できる。波長は 1.06 μm と比較的短く、各種金属材料に対する吸収率は 2~40% である。CO₂ レーザは、波長 10.6 μm で吸収率が 1~5% 程度であるから、YAG レーザの場合かなり高い。

表 2.1 YAG レーザ加工機の構成

項目		仕様		
型名		0202SC		
発振励起方式		Kr ランプによる連続励起方式		
性能	レーザ出力	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	

YAG レーザ加工機のシステム図を図 2.1 に示す。本レーザでは、この YAG ロッドに励起ランプより光を照射し、中で反転分布状態が生じることで、波長 $1.06\ \mu\text{m}$ の光の誘導放出が起きる。これが 2 枚の反射鏡の間を往復し、往復しながら次々と誘導放出を繰り返し、光の量はどんどん増加していく。その後、あるエネルギー状態に達した光が部分反射鏡を透過し、光ファイバケーブルを通りレーザービームとして照射される。

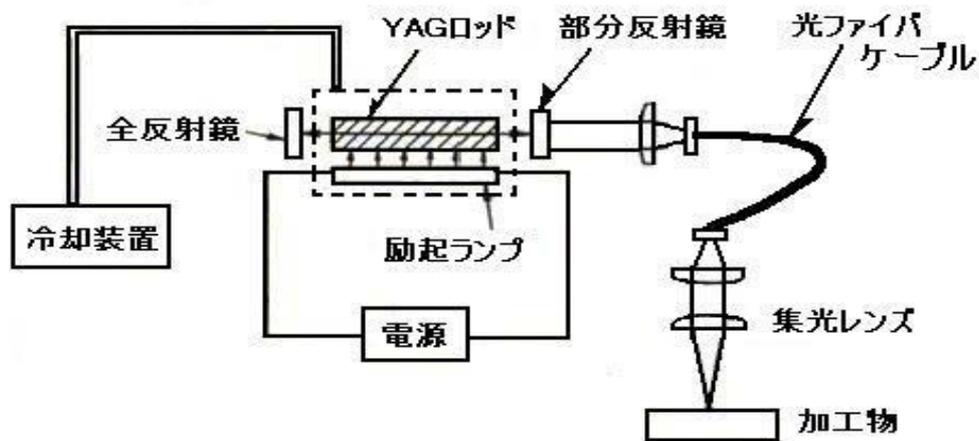


図 2.1 YAG レーザ加工機のシステム図

次に、実験を進めていく上で必要なものの調査実験を行なった。レーザで最もエネルギーが強い焦点位置を知ることが必要である。したがって、まずレーザビームの焦点出しを行なった。また、光ファイバケーブルを通して照射するとエネルギーが 10%~20%減衰する。そこで次に、モニタに表示される出力と加工ヘッド出口の出力の換算表を作成した。

2.2 焦点出し

1. ステンレス鋼 (2 mm以上) を治具台にセットする。
2. ノズルと鉄板との間が 1 mmになるよう加工ヘッドを下げる。
3. レーザ光を出しながら、加工ヘッドが、

+Z 方向へ 10 mm

+Y 方向へ 100 mm

移動し、-X 方向に 5 mm移動し、さらに

-Z 方向へ 10 mm

-Y 方向へ 100 mm

移動する。

4. 加工ヘッドが+Z 方向へ移動する時 (図 2.2 中 1) に、光 (ブルーフレーム) の輝度が最も明るいビード位置に印をつけ、加工ヘッドが-Z 方向へ移動する時 (図 2.2 中 3) に、印をつけた位置から平行移動した位置で停止させる。

以上の手順で行なう (図 2.2 参照)。光 (ブルーフレーム) の輝度が最も明るい時、焦点の位置はワーク表面にあるので、スタートした地点から印をつけた位置までを計測して、Z 軸方向移動量を Z として三角比で求める。

$$100:10=55:Z$$

$$Z=55 \times 10/100=5.5(\text{mm})$$

最初に表面から 1 mmの位置までノズルを上げていたので、焦点は Z に 1 mmを足したもののになる。したがって、

$$\text{焦点距離} = 1+5.5=6.5(\text{mm})$$

となる。この方法の場合、誤差は ± 0.3 mmほどである。

2.3 出力変換表

2.3.1 実験目的

本研究で使用する YAG レーザ加工機のレーザ出力の設定は、レーザ媒体の励起のために使用するクリプトンランプに与える電流値によって設定されている。そのため

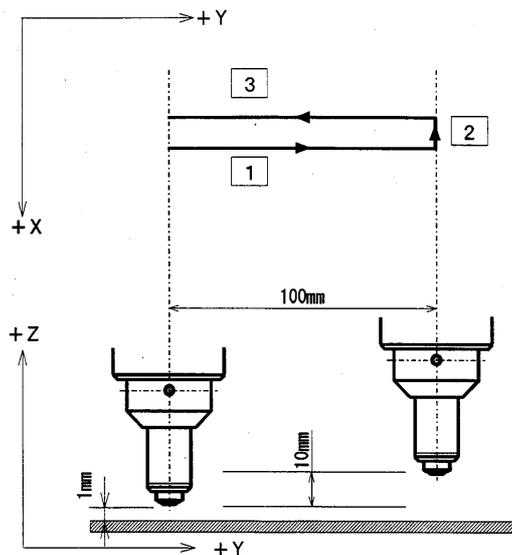


図 2.2 焦点出し

加工ヘッド出口におけるレーザ光の出力は、この電流値により決まる。

また、本実験で使用するレーザ加工機の加工システムは、レーザ光の伝達に光ファイバを用いた加工システムを採用している。そのためレーザ光をレーザ発振器から加工ヘッドまで伝送する間に、レーザ光がある程度減衰する。電流値と発振器のモニタに表示される出力値は発振器内部で検出されるため、発振器のモニタに表示される出力値と加工ヘッドの出口の出力値の間に誤差が生じる。

そこで、被加工物にどれだけのエネルギーが伝わっているのかを正確に知るため、各電流値のモニタ出力値と加工ヘッド出口の出力値を測定する。

2.3.2 実験に使用する機器

測定には、MACKEN INSTRUMENTS 製 P500Y パワープローブを使用する。(図 2.3 参照) 加工機は上記した三菱 YAG レーザ加工機を使用する。このパワープローブは、測定面(黒色の先端部)でレーザ光を吸収し、レーザ光の温度を測定するものである。この測定した温度に係数(0.991)を掛けることで出力(W)を求めることができる。



図 2.3 パワープローブ

2.3.3 実験方法

加工ヘッドノズル出口からレーザビーム光軸上方向に 100 mm の位置にパワープローブの測定面がくるようにする(図 2.4 参照)

レーザを 20 秒間照射してパワープローブで測定を行う。このとき受光部分が一点に集レーザ発振器の電源を投入する。

中しないように少し受光部全体を円状にまわしながら測定を行う。

20 秒間照射が終わったら速やかにプローブ光路から抜き取る。

照射後、メーターの指針は、緩やかに上昇するので指針の動きが落ち着いたときの値を読み取る。読み取った後に、係数(0.991)をかけて出力を計算する。この作業を 3 回繰り返し、平均を読み取る。



図 2.4 測定方法

2.3.4 実験結果

27.0A から電流の最高設定値 41A まで 1.0 ごとにレーザ光出力を設定し、3 回行った測定の平均値の結果を表 2.2 に、グラフ化したものを図 2.5 に表す。このグラフは、横軸に設定電流(A)、縦軸にレーザのモニタ出力(W)と加工ヘッド出口の出力(W)を取ったものである。

結果としてレーザ光は、設定電流が 28.0A より下の値では出力されず、レーザ光を出力させるためには 28.0A 以上あたえる必要があることがわかった。また、加工ヘッド出口から照射されるレーザはモニタに表示される出力よりおよそ 10%~20%の間で減衰しており、光ファイバを通過する間に減衰する事が確認された。また、当然の結果ながら、ランプ励起用の電流を上げていくと加工ヘッド先端の出力は増加した。今後、この測定した値を基に金属の表面改質に関する研究を進めていく。

表 2.2 出力換算表

電流値(A)	ノズル出口での出力(W)	モニタ出力(W)
28	無	無
29	79.7	90
30	99	110.7
31	107.3	122
32	119.3	134.7
33	125	143.7
34	134	153.7
35	142	164.7
36	142.7	168
37	150	178.3
38	159.7	192
39	169.3	205.7
40	173.3	214

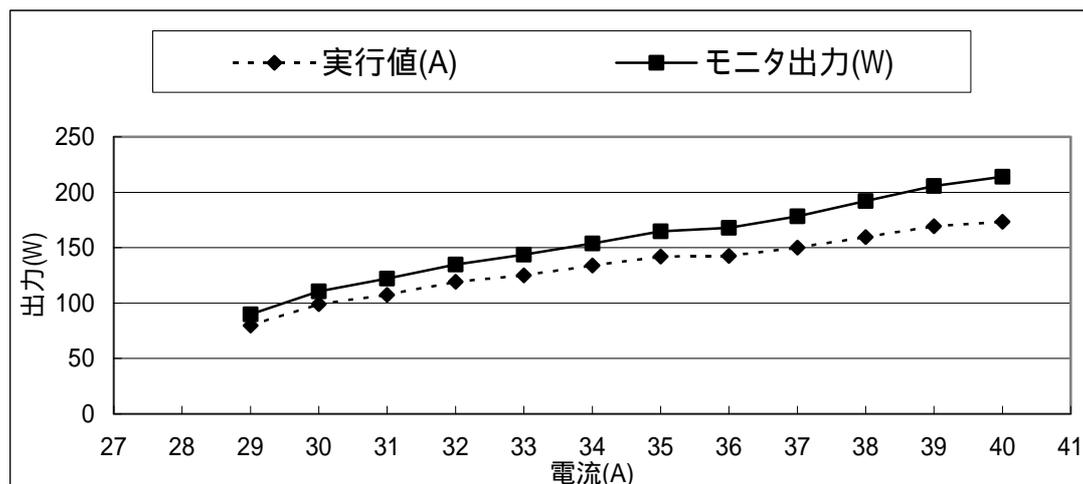


図 2.5 モニタ出力とノズル出口出力との比

第3章 YAGレーザービームによる放電加工面の表面改質

3.1 緒言

放電面の荒さを改善する方法として、形彫り放電加工時に電気条件や速度などのパラメータを変化させる方法はあるが、それでは $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ の大きさで荒さ $10\text{ }\mu\text{m/Ry}$ の加工を行なうのに約 15 分かかる。また、途中まで放電加工で荒加工をし、その後マシニングセンタなどで切削加工を行うことで大幅な時間の短縮をはかる研究が本研究室の和田、静岡氏により行なわれている。その研究結果によるとボールエンドミルを使用した場合同じ加工時間で表面粗さが $2.5\text{ }\mu\text{m/Ry}$ まで抑えることができると報告されている。

このように、形彫り放電加工とマシニングセンタを組み合わせた複合加工により、加工方法の向上が模索されている。そこで本研究では、一層の向上の可能性があると考えられるレーザーを用いた表面改質について検討していく。レーザーの場合は、形彫り放電加工の様に放電により削り取るでもなく、エンドミルの様に機械的抵抗がかかる切削を行うのでもなく、放電面を溶融することで表面荒さを改善することになる。

3.2 実験方法及び装置

3.2.1 実験材料

レーザー光による熱処理を行うにあたり用いた材料は、焼入れ効果のある S50C、SK-5、SKD-11 を用いた。以下にこれら材料の一般的な説明を行う。

まず機械構造用炭素鋼材 S50C は、鉄と約 0.5%の炭素からできた合金である。主としてクランクシャフト、カムシャフト、コネクティングロッド、ボルト、ギア、車軸などに用いられる。次に炭素工具鋼材 SK-5 は、上記の S50C に比べ炭素含有量が 0.8%と多く、また SK-5 は SK 材の中で一番焼きがはいりやすく、耐磨耗性やじん性に優れている。主な用途としては、刻印、プレス型、ぜんまい、帯のこ、治工具、刃物、丸のこ、ゲージ、針などである。最後に合金工具鋼材 SKD-11 は、SK 材に W、Cr、Mo、V などの特殊元素を添加して、耐磨耗性、耐衝撃性、不変形成、耐熱性などをそれぞれ発揮させるようにした工具鋼である。また、炭素量 1.5%、クロム量 12%と高炭素、高クロム材であり機械加工性が悪く難削材の一種であるが、焼き入れ・焼きもどしによって著しい耐磨耗性を発揮するので、超耐磨耗鋼として活用される。主な用途としては、ゲージ、ねじ転造ダイス、金属刃物、プレス型などである。表 3.1 に、各材料の成分表を示す。

今回は $20 \times 20 \times 10\text{ mm}$ のサイズのものを使用した。

表 3.1 各材料における化学成分

種類の記号	化学成分 (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Mo	V
S50C	0.47 ~ 0.53	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.90	0.030 以下	0.035 以下	無	無
SK 5	0.80 ~ 0.90	0.35 以下	0.50 以下	0.030 以下	0.030 以下	無	無
SKD 11	1.40 ~ 1.60	0.40 以下	0.60 以下	0.030 以下	0.030 以下	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50

3.2.2 照射方法

まず加工を行う前に形彫放電加工機で表面粗さ $Ry60\mu m$ と $80\mu m$ の放電痕を形成し、各材料でそれぞれ試料を作製した。サイズは直径 20 mm で深さ 0.5 mm の放電痕だが、今回サイズは特に関係ないのでこれ以上触れない。この試料を X-Y ステージに固定して、加工ヘッドノズルを 5 度傾け反射光の再入射を防いだ状態で試料上部に固定した。これはファイバケーブルから出射したレーザー光が加工物表面で反射し、加工ヘッド側のファイバケーブルに入射してしまい、ファイバケーブルを破損させる危険があるためである。

そして X-Y ステージ(図 3.2 参照)をパソコンでデジタル制御して、X 軸方向に 10 mm 走らせるごとに Y 軸方向に 0.5 mm 動かし 30 秒間レーザー処理を施した(図 3.1 参照)。これで、試料表面に面上の表面改質層を生成した。X-Y ステージを使用した理由は、アームロボットでこのような操作を行なった場合、振動などの影響で動きが安定せずまっすぐに照射されず、一定のデフォーカス値が得にくいためである。そこで、できるだけ一定の条件で実験を行うために X-Y ステージを使用し高精度の制御を行った。

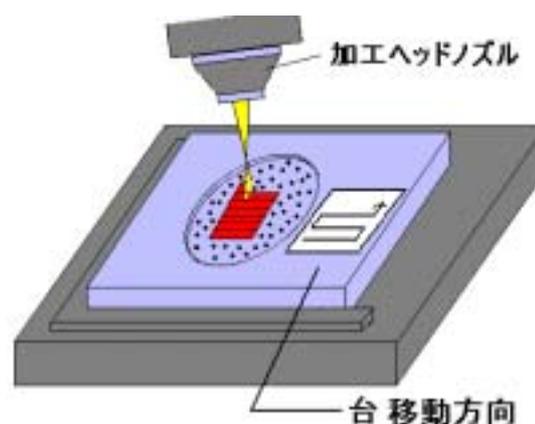


図 3.1 照射方法

精密位置決め X-Y テーブル AX1010P6BY THK 製

テーブル寸法	150 mm × 150 mm
有効ストローク	100 mm × 100 mm
ボールねじリード	5 mm
繰り返し位置決め制度	± 0.003 mm
位置決め制度	0.03 mm
走り真直度	0.01 mm



図 3.2 X-Y テーブルの外観

3.2.3 レーザ照射条件

今回は、金属を溶融させることが求められるので出力 140W、送り速度 10 mm/sec とレーザービームのエネルギーの大きい条件を選択した。また発振形態には、Continues Wave (以下、CW とする。) 、Pulse Wave (以下、PW とする。) の 2 つを用いた。CW(図 3.3 参照)はレーザー光を連続的に発振する方式であり、PW(図 3.4 参照)は断続的に発振する方式で、周波数 100Hz、デューティ 50%とした。

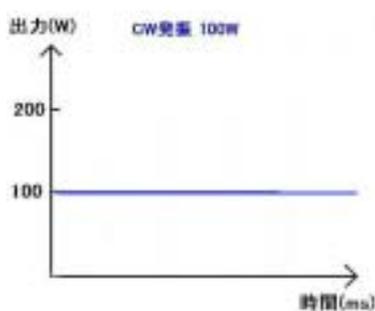


図 3.3 CW 発振

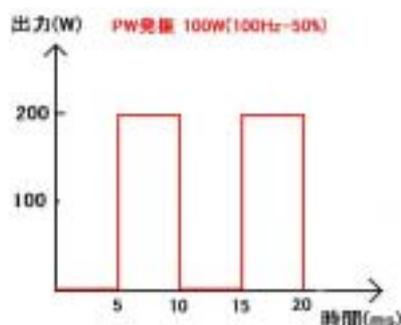


図 3.4 PW 発振

平均出力を同じ 100W にした場合、ピーク出力は CW では 100W のままであるが PW では 200W にもなる。これは、次式で求められるものである。

$$P_p = P_a / D$$

Pp:ピーク出力(W)

Pa:平均出力(W)

D:デューティ(%)

したがって今回用いる平均出力 140W のときのピーク出力は、CW が D=100%、PW=50%であるのでそれぞれ次の通りである。

$$CW : Pp=140(W)/100(\%)=140/1=140(W)$$

$$PW : Pp=140(W)/50(\%)=140/0.5=280(W)$$

最後のパラメータはデフォーカス値である。デフォーカス値は、焦点から表面と逆の方に移動させた量である(図 3.5 参照)。焦点の決定については第 2 章の調査実験に示したとおりである。そしてデフォーカス値は +Z 軸方向に、CW のとき 0~6 mm まで、PW では 2~7 mm まで 1 mm 毎に移動させた。以上照射条件を表 3.2 に一覧で表す。

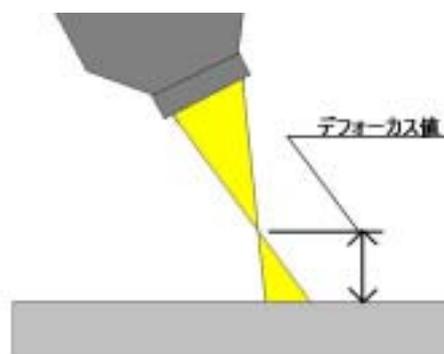


図 3.5 デフォーカス値

表 3.2 照射条件一覧

平均出力	140W	
送り速度	10 mm/sec	
発振形態	CW	PW
デフォーカス値	0 ~ 6 mm	2 ~ 7 mm

3.2.4 測定方法

(1) 表面粗さ測定

表面粗さは、図 3.6 に示すようにレーザ照射痕と垂直方向に走らせ、表面粗さの測

定を行なった。測定には、面粗さ測定器(図 3.8 参照)を使用した。このとき、カットオフ値を 0.8 とし、4 mm 走らせた。

(2) 硬度測定

処理表面の硬度測定は、図 3.7 に示すようにレーザ光を照射した部分の中心部に微小硬度計(図 3.9 参照)により硬度を測定した。微小硬度計の試験条件は、試料に 0.98N の荷重を 10 秒間加え、ビッカース硬さで求めた。

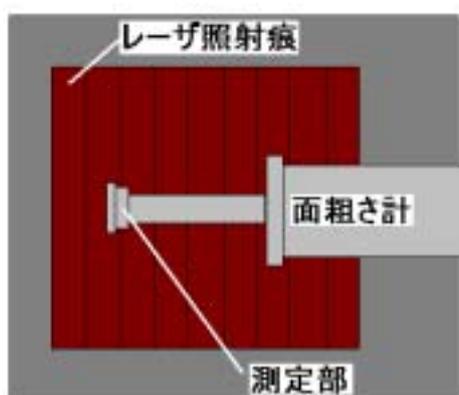


図 3.6 粗さ測定

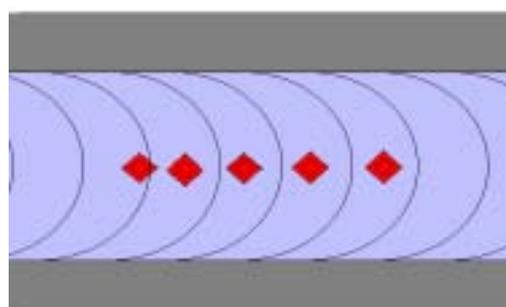


図 3.7 硬度測定

表面粗さ形状測定器ハンディサーフ E-35A 東京精密製

触針先端	ダイヤモンド 90° 円錐 5 μ m R
測定力	4mN(0.4gf)以下
パラメータ	Ra,Ry,Rz,Sm,Rq,Rp,Rt,Rc,tp
測定範囲	160 μ m



図 3.8 表面粗さ形状測定器の外観

微小硬度計 HMV-2000 形 島津製

荷重	0.049、0.098、0.14、0.24、0.49、0.98、1.96、2.94、4.9、9.8、19.61N の 11 種類
荷重保持時間	5 ~ 60 秒
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
測定モード	ピッカース、ブリネル、ヌーブ、三角錐、硬さ、長さ



図 3.9 微小硬度計の外観

3.3 実験結果および考察

3.3.1 表面粗さ

(1)S50C 材

S50C のデフォーカス値と硬度の関係のグラフを図 3.10、図 3.11 に示す。図 3.10 は元の放電面の粗さが $60 \mu\text{m/Ry}$ のもの、図 3.11 は放電面荒さが $80 \mu\text{m/Ry}$ のグラフである。

a)放電面粗さが $Ry60 \mu\text{m}$ のとき

図 3.10 のグラフは、放電面の最初の粗さが $60 \mu\text{m/Ry}$ である。まず、連続発振で一度照射した場合デフォーカス値が 2.0mm のときに最もよく $15.50 \mu\text{m/Ry}$ まで改善した。さらに二度の照射をした場合も、デフォーカス値が 2.0mm のときに最大で $9.2 \mu\text{m/Ry}$ まで改善が行なわれた。次に、パルス発振の場合デフォーカス値が 3.0mm のとき最もよく $11.32 \mu\text{m/Ry}$ まで荒さが減少し、連続の場合と同様二度のレーザー照射により $6.68 \mu\text{m/Ry}$ まで改善を行うことが出来た。以上のことは図 3.10 から明らかで、表面粗さが連続発振よりもパルス発振、1 回よりも 2 回レーザーを照射したほうが表面粗さは良くなっている。結果、 $60 \mu\text{m/Ry}$ では $6.68 \mu\text{m/Ry}$ まで改善することが出来た。

図 3.12 の放電面は、放電により生成された放電痕からなる。そしてその放電痕は溶融飛散部や溶融残留盛り上がり部からなっている。レーザーを照射することでこの溶融残留盛り上がり部が溶融し滑らかになった面が、2 回目の照射によりさらに溶融が進行し表面が整えられたと思われる。(図 3.13、図 3.14 参照)はデフォーカス値が 2mm のものだが、そのことがよく分かる。

また照射後の表面を顕微鏡で観察したとき黒く見えるのは炭化物の析出も考えられるが、溶融により表面が水面の様に波立っているため光のあたり具合でそのように見るとも考えられる。この波の大きさには、1 度液体化していることや送りを与えていること、ガス圧そしてレーザーのエネルギー密度などの影響があると考えられる。例えば、水面に小さな石より大きな石を落とした方が大きく波打つように、この表面でもレーザーのエネルギーやガス圧などが大きいほど大きく波打つようになるという



図 3.12 放電面



図 3.13 1 回照射後の面



図 3.14 2 回照射後の面

ことである。したがって、2回照射を繰り返した後さらに溶融が行なわれる範囲内でデフォーカス値をあげ、ガス圧を下げて照射した場合、さらに表面粗さが改善されると推測される。

b)放電面粗さ 80.8 μm/Ry

図 3.11 のグラフは、放電面の最初の粗さが平均で 80 μm/Ry である。傾向は放電面荒さが 60 μm/Ry の時と同じで、連続発振よりもパルス発振、1回よりも2回レーザを繰り返し照射したほうが表面粗さの改善が見られた。最もよい結果で、80 μm/Ry が 10 μm/Ry まで改善することが出来た。

しかし放電面荒さは 60 μm/Ry のものより全体的に荒くなっている。60 μm/Ry のときは、連続発振で一回の照射の場合、最も良くて 15.48 μm/Ry であったものが放電面荒さ 80 μm/Ry になると 19.84 μm/Ry と荒くなった。これは他の条件の下でも同様で、連続発振で二度の照射の場合 9.17 μm/Ry であったものが 13.26 μm/Ry まで荒くなっている。またパルス発振の場合も一度の照射の場合で、11.32 μm/Ry であったものが 15.92 μm/Ry まで、二度の照射の場合で 6.68 μm/Ry であったものが 10.00 μm/Ry まで荒くなったことがわかる。以下に示す表 3.3 は、放電面の荒さが 60 μm/Ry と 80 μm/Ry のものから、それぞれの条件で出された最も良いあらさをピックアップし、比較したものである。また、放電加工面とレーザ照射後の写真と粗さ曲線を図 3.25、図 3.26 に示す。放電痕の山や谷が溶融により滑らかになっており、表面粗さが著しく改善できたことがよく分かる。

表 3.3 各条件における最大改善値

放電面荒さ (Ry)	連続発振 1回	連続発振 2回	パルス発振 1回	パルス発振 2回
63.4 μm	15.48 μm	9.17 μm	11.32 μm	6.68 μm
80.8 μm	19.84 μm	13.26 μm	15.92 μm	10.00 μm

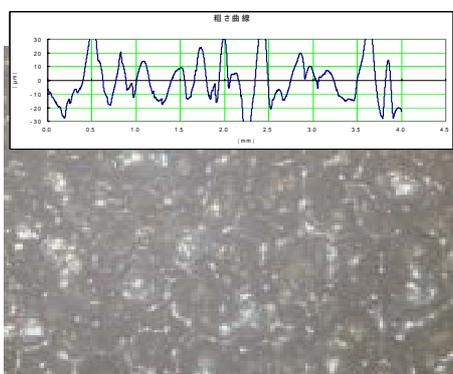


図 3.25 放電加工面の写真と荒さ曲線

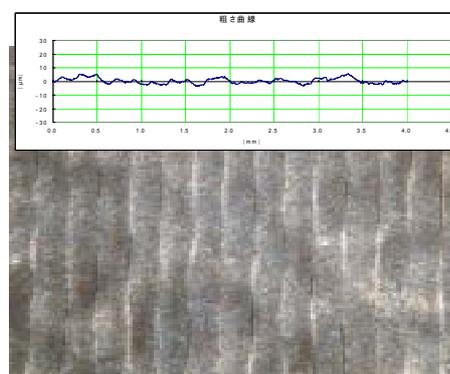


図 3.26 レーザ照射後の写真と荒さ曲線

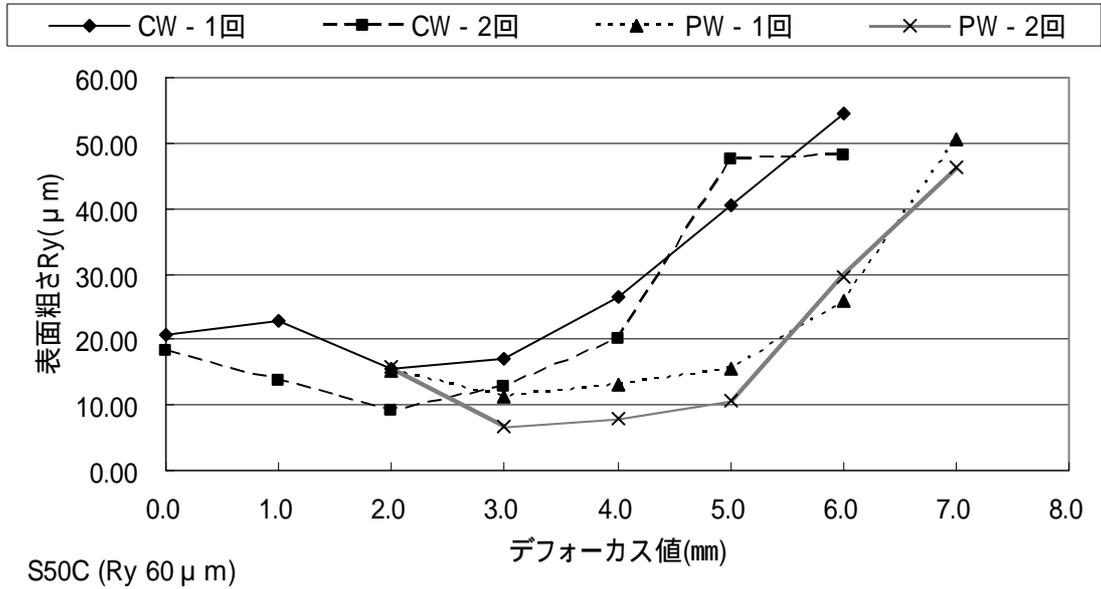
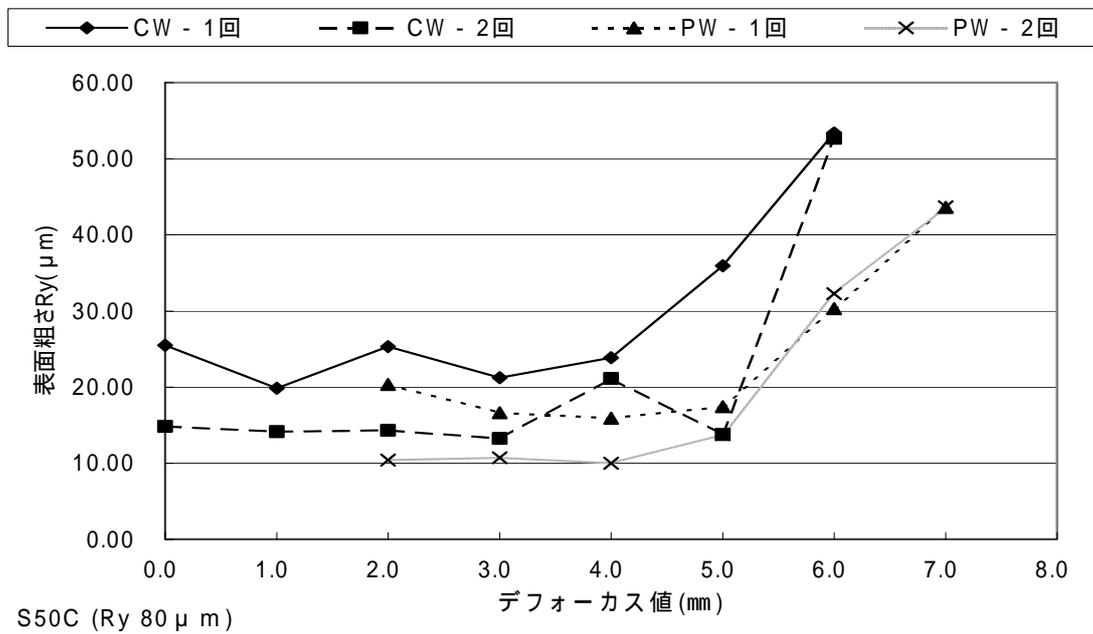


図 3.10 デフォーカス値と表面粗さの関係 (60 μm/Ry)



(2)SK-5 材

材料 SK-5 におけるデフォーカス値と表面粗さ Ry の関係を示したグラフを図 3.15、図 3.16 に示す。図 3.15 は、放電面の荒さが $60 \mu\text{m/Ry}$ のものであり、図 3.16 は放電面の荒さが $80 \mu\text{m/Ry}$ のものである。S50C のグラフと比較してみてもほぼ変わらない結果が得られた。

放電面荒さが $60 \mu\text{m/Ry}$ のものが最高で $6.4 \mu\text{m/Ry}$ まで、 $80 \mu\text{m/Ry}$ のものが $7.92 \mu\text{m/Ry}$ まで良くする事が出来た。いずれも、パルス発振で 2 回照射した時のものであり、S50C と同じである。

以下に示す表 3.4 は、放電面の荒さが $60 \mu\text{m/Ry}$ のものと $80 \mu\text{m/Ry}$ のもので、それぞれの条件の下で出された最も良いあらさをピックアップし比較したものである。

この表からも、連続発振よりもパルス発振、1 回よりも 2 回の方がよりよい結果を得られるという傾向が同じであることがわかる。また、それぞれのデフォーカス値における表面粗さを比べてみても、表面粗さが S50C と際立った違いがないことがわかる。また、S50C 同様放電加工面とレーザー照射後の写真と粗さ曲線を図 3.27、図 3.28 に示す。

表 3.4 各条件における最大改善値

放電面荒さ (Ry)	連続発振 1 回	連続発振 2 回	パルス発振 1 回	パルス発振 2 回
$60.6 \mu\text{m}$	$14.26 \mu\text{m}$	$8.02 \mu\text{m}$	$11.03 \mu\text{m}$	$6.4 \mu\text{m}$
$81.7 \mu\text{m}$	$16.86 \mu\text{m}$	$10.16 \mu\text{m}$	$16.08 \mu\text{m}$	$7.92 \mu\text{m}$

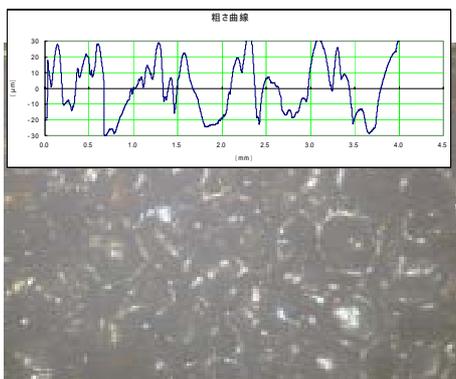


図 3.25 放電加工面の写真と荒さ曲線

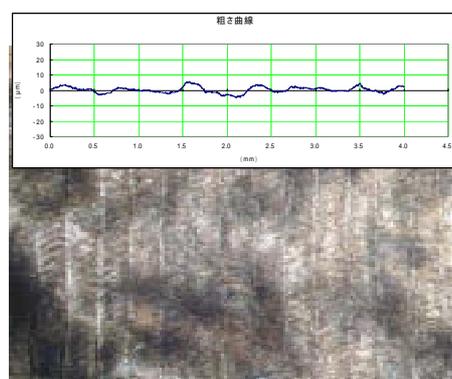


図 3.26 レーザ照射後の写真と荒さ曲線

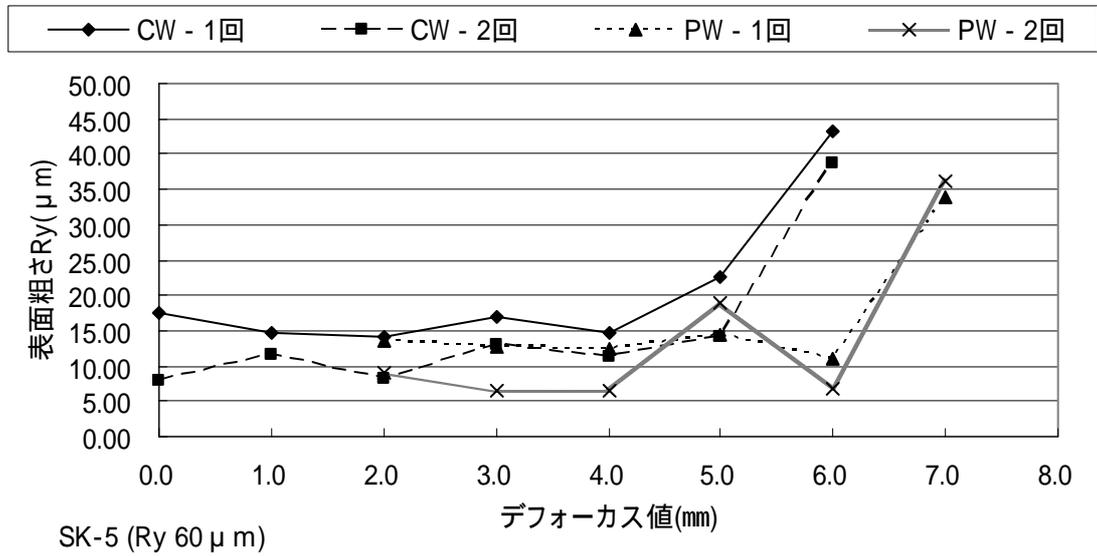


図 3.15 デフォーカス値と表面粗さの関係 (60 μm /Ry)

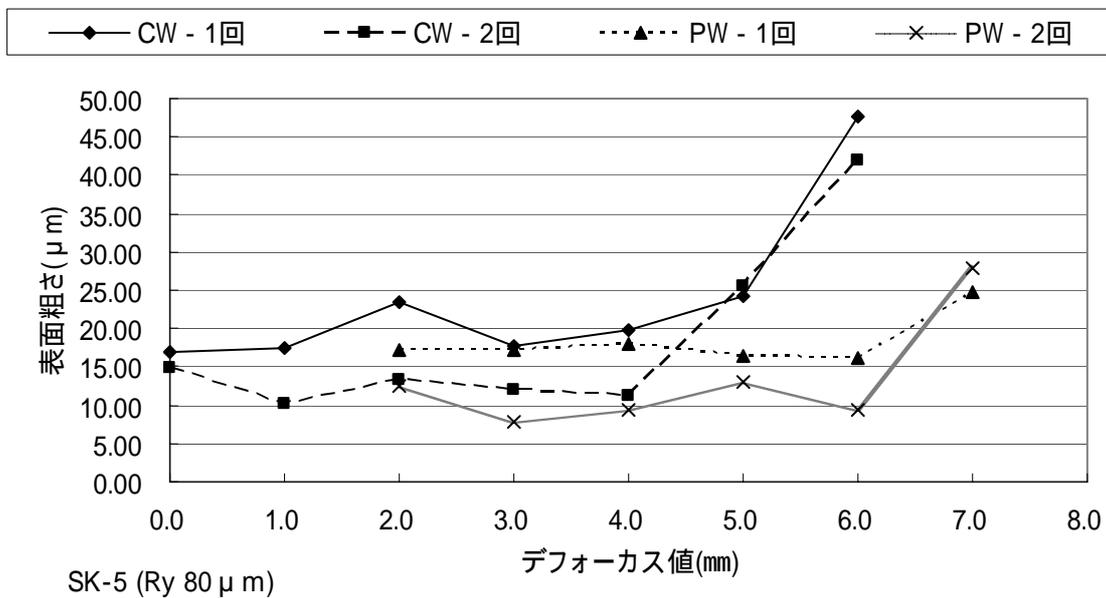


図 3.16 デフォーカス値と表面粗さの関係 (Ry80 μm)

(3)SKD-11 材

材料 SKD-11 におけるデフォーカス値と表面粗さの関係を示したグラフを 図 3.17、図 3.18 に示す。図 3.17 は、放電面の荒さが $60 \mu\text{m/Ry}$ のものであり、図 3.18 は、放電面の荒さが $80 \mu\text{m/Ry}$ のものである。それぞれデフォーカス値と Ry の関係を示したものである。これも S50C とほぼ変わらない結果が得られた。

放電面荒さが $60 \mu\text{m/Ry}$ のものが最高で $3.74 \mu\text{m/Ry}$ まで、 $80 \mu\text{m/Ry}$ のものが $6.9 \mu\text{m/Ry}$ まで良くする事が出来た。いずれも、パルス発振で 2 回照射した時のものであり、S50C と同じである。

以下に示す表 3.5 は、放電面の荒さが $60 \mu\text{m/Ry}$ のものと $80 \mu\text{m/Ry}$ のもので、それぞれの条件の下で出された最も良いあらさをピックアップし比較したものである。また、S50C 同様放電加工面とレーザー照射後の写真と粗さ曲線を 図 3.29、図 3.30 に示す。

表 3.5 各条件における最大改善値

放電面荒さ (Ry)	連続発振 1 回	連続発振 2 回	パルス発振 1 回	パルス発振 2 回
60 μm	11.12 μm	5.46 μm	9.24 μm	3.74 μm
80 μm	15.06 μm	8.21 μm	13.04 μm	6.9 μm

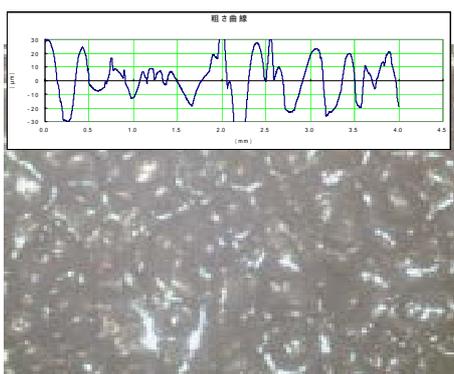


図 3.29 放電加工面の写真と荒さ曲線

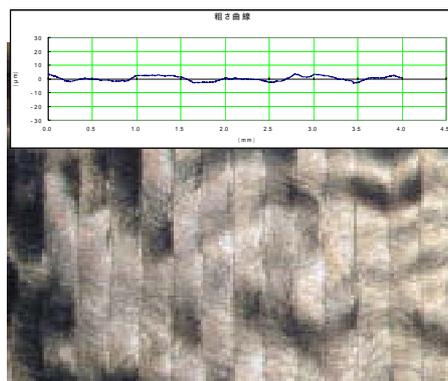


図 3.30 レーザ照射後の写真と荒さ曲線

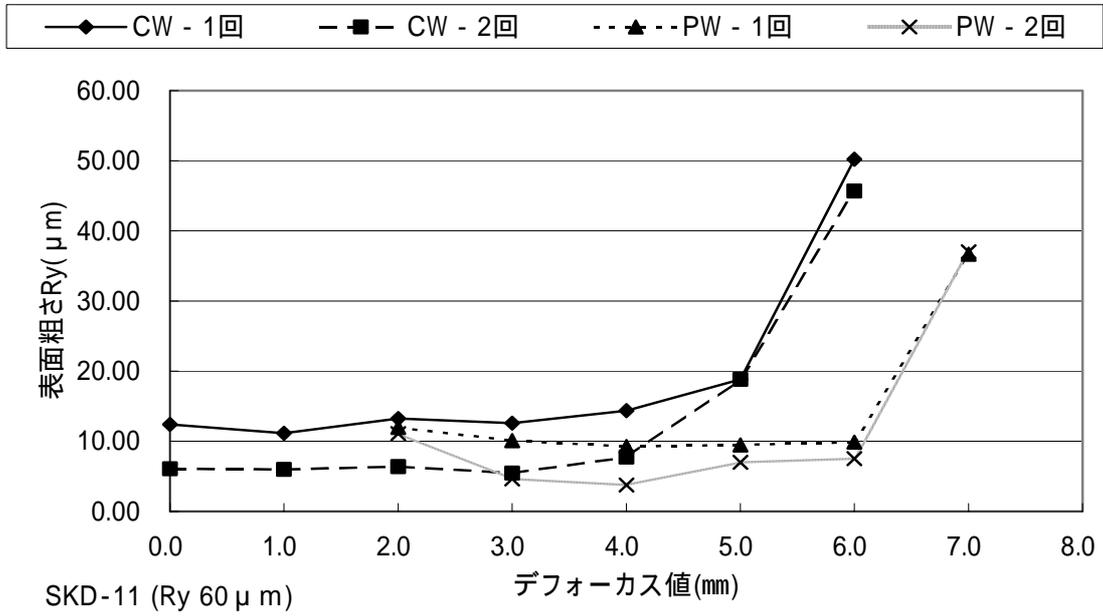


図 3.17(SKD-11 材)デフォーカス値と表面粗さの関係(60 μm/Ry)

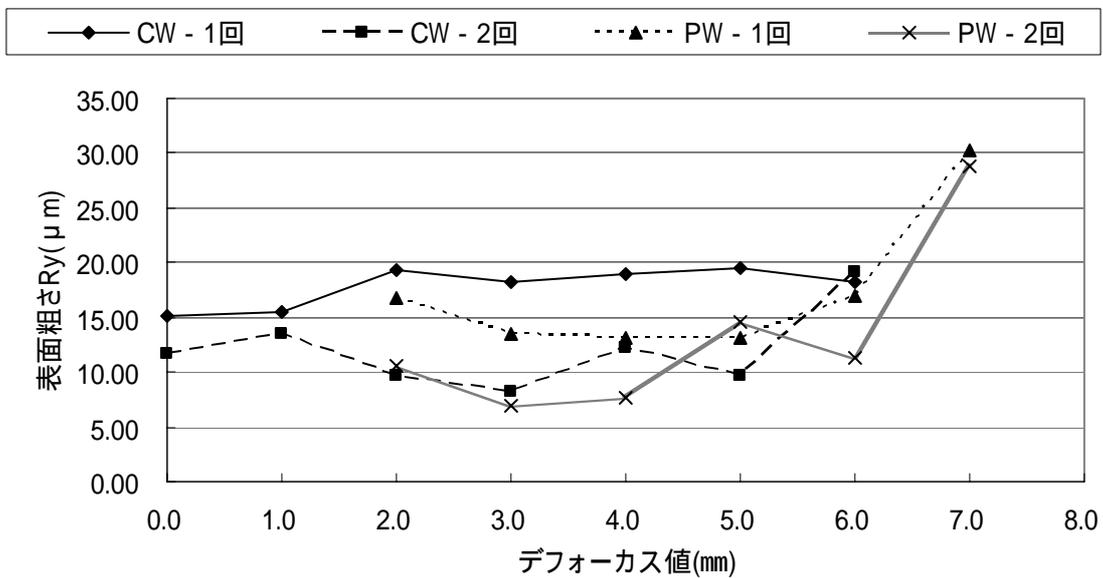


図 3.18(SKD-11 材)デフォーカス値と表面粗さの関係(80 μm/Ry)

3.3.2 硬度
(1)S50C 材

デフォーカス値と硬度の関係をグラフでしめす。図 3.19 は表面粗さが $60 \mu\text{m/Ry}$ のとき、図 3.20 は表面粗さが $80 \mu\text{m/Ry}$ のグラフである。

まずこのグラフを見てすぐわかることは、レーザー照射を 1 回で済ませた場合とその後から 2 回目の照射をした場合とで硬度に大きな変化は見られない。多少のばらつきはあるが、ほぼ等しい硬度である。したがって、今後は照射 1 回も照射 2 回も同じものとみなして進めていくことにする。

次に、粗さとの関係を検討する。「レーザーによる金属の表面改質特性」の結果によると、S50C の溶融部では炭素が固溶されることで硬化が進んだ。しかしこのグラフを見てみると連続発振でデフォーカス値が 3 mm、4 mm、パルス発振でデフォーカス値が 5 mm の時に、もっとも小さな値で Hv380 程度となっている。放電加工面の硬度が Hv600 程度であるので軟化されているといえる。今回はレーザー光のオーバーラップ値を 0.2 mm と設定しているため照射部に繰り返しレーザーが照射される。上記したように溶融部では硬化がおこっているはずだが、照射部が重なることで焼き戻しがおこっているためと考えられる。しかし、一方で Hv800 程度まで硬化しているものも見られる。したがって、一概に焼き戻しとは言えず、ここで何が起きているのかまでは今回よく分からなかった。

(2)SK-5

デフォーカス値と硬度の関係をグラフでしめす。図 3.21 は表面粗さが $60 \mu\text{m/Ry}$ のとき、図 3.22 は表面粗さが $80 \mu\text{m/Ry}$ のグラフである。これも一回照射と 2 回照射の間で大きな硬度の違いはない。また、放電面の硬度が Hv600 程度であるので一部の条件では大幅な軟化も見られる。しかし硬化している点も見られ、S50C と同様の結果となった。ただ、S50C と異なる点も見られ、レーザーを照射した溶融部が磁性を帯びていることが確認された。

(3)SKD-11

デフォーカス値と硬度の関係をグラフでしめす。図 3.23 は表面粗さが $60 \mu\text{m/Ry}$ のとき、図 3.24 は表面粗さが $80 \mu\text{m/Ry}$ のグラフである。これも S50C、SK-5 と同じで一回照射と 2 回照射の間で大きな硬度の違いはない。しかしこのグラフは、先に取り上げた S50C、SK-5 と少し異なる。溶融が十分に行われている点条件では硬度が Hv400~500 の間にあり一定となっている。また SK-5 同様磁性を帯びていることが確認された。

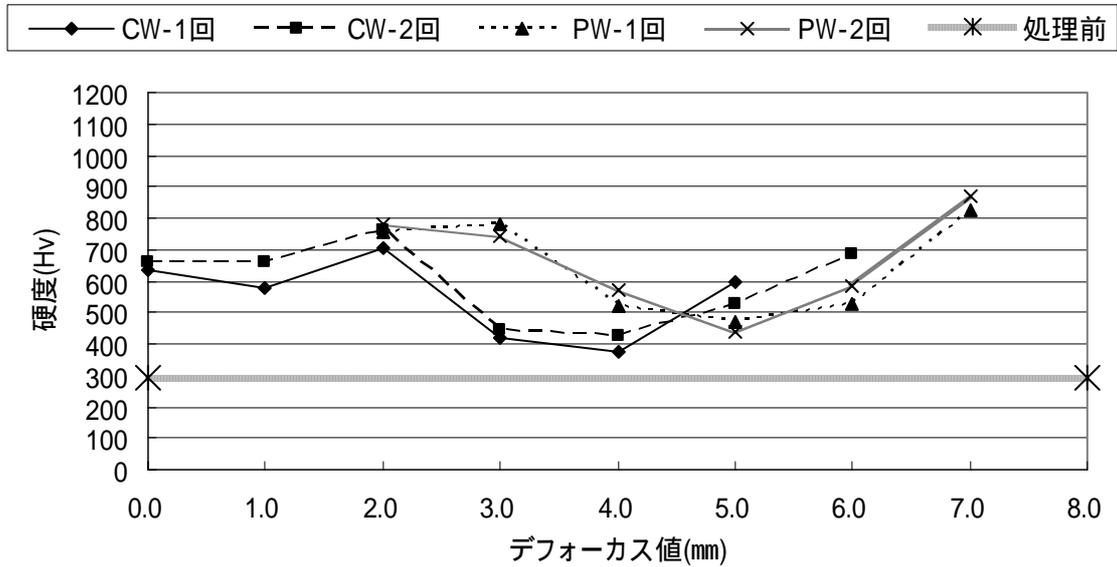


図 3.19 S50C : のデフォーカス値と硬度の関係 (60 μm/Ry)

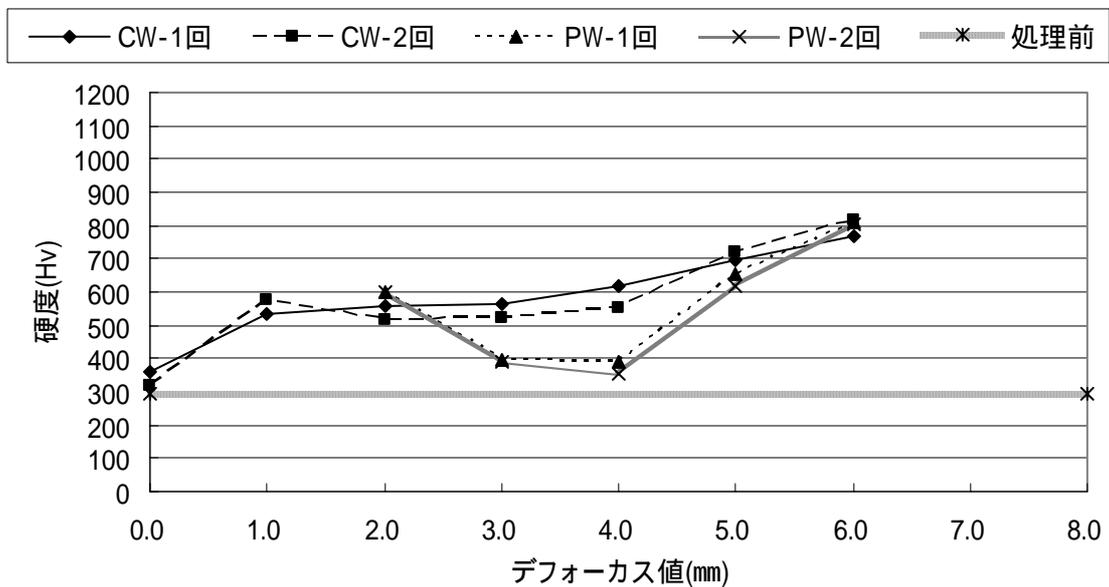


図 3.20 S50C : のデフォーカス値と硬度の関係 (80 μm/Ry)

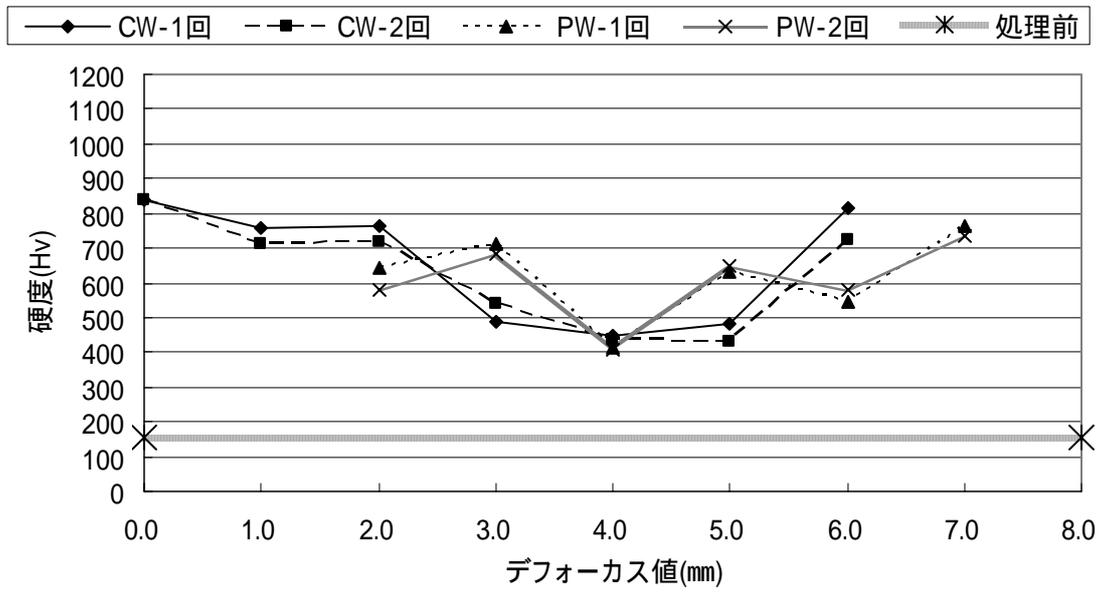


図 3.21 SK-5 : デフォーカス値と硬度の関係 (60 μm/Ry)

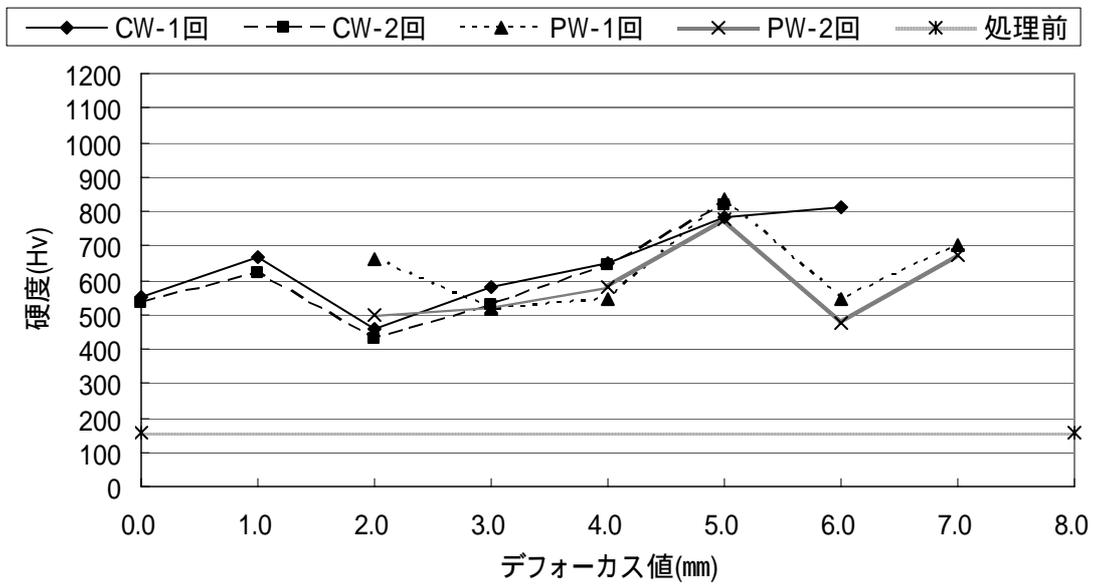


図 3.22 SK-5 : デフォーカス値と硬度の関係 (80 μm/Ry)

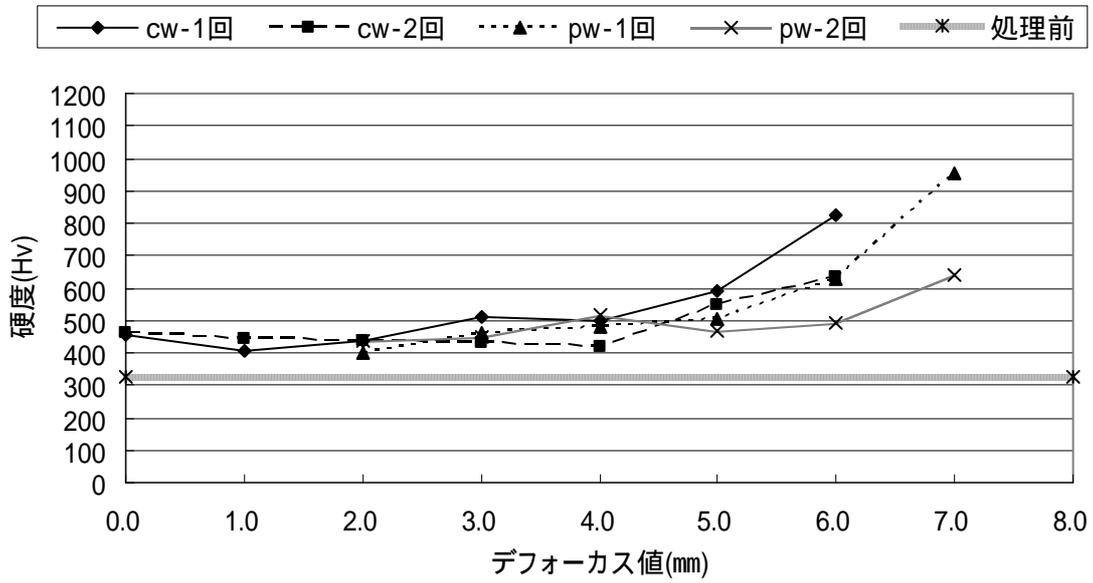


図 3.23 SKD-11 : デフォーカス値と硬度の関係 (60 μm/Ry)

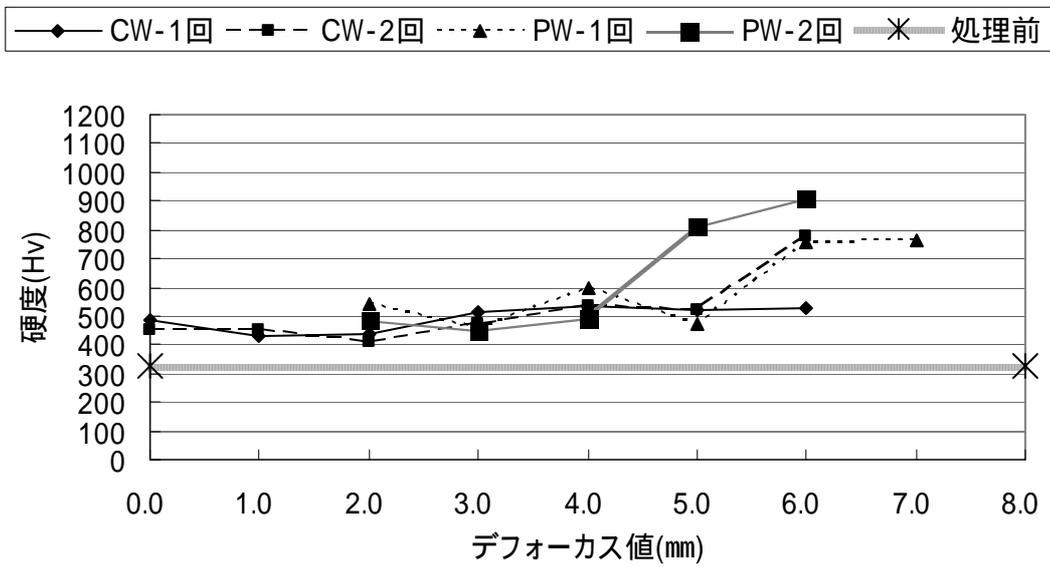


図 3.24 SKD-11 : デフォーカス値と硬度の関係 (80 μm/Ry)

3.4 検討

3.4.1 放電加工面の表面改質について

今回の研究は「形彫り放電加工機との複合加工の可能性」ということを目的として、まず形彫り放電加工機で荒加工した放電面をレーザーで照射して表面粗さの改善を図った。これに関しては非常に良い結果が得られた。発振形態は連続発振よりもパルス発振の方が表面粗さの改善に適しており、各材料共に最大で 1/10~1/15 まで改善することが出来た。また材料別では、多少ではあるが SKD-11 が一番改善されており、光沢を持っていた。また、その照射面の硬度を計測した結果、硬度が上がるものや、ほとんどもとの硬度まで下がるものが確認された。これは、レーザーを重ね合わせたことで焼き戻しがおこったと考えられる。しかし、焼き戻しは A1 変態点 (S50C: 約 810、SK-5: 約 723、SKD-11: 約 950) 以下の温度で行なわれるものである。今回は溶融する条件で行なったため最低でも 1340 以上まで上がっている。したがって、焼き戻しが行われたためというのは可能性が低い。これについては更なる検討が必要である。

硬度が低下した、あるいは高上したメカニズムは未だ明らかではないが、1 回照射したときと、2 回照射したときの硬度に違いがほとんどないことから、少しでも表面荒さが改善される 2 回照射の条件が有効であると思われる。また、合金工具鋼である SKD-11 には、溶融後に磁性がみられた。強磁性体であるセメンタイトがあるためとも考えられるが、500 倍の光学顕微鏡で表面状態をみると 1 部分で鏡面のようになり組織が見られなかった事などから表面でアモルファス化がおこったのではと考えた。そこで、次にアモルファス合金の可能性について検討する。

3.4.2 アモルファス合金

アモルファスとは、非晶質とも呼ばれ、結晶構造を持たない物質の状態を示す言葉で、固体を形成している原子が液体状態の配列のまま不規則に並んでいる状態をいう。通常、金属は固体状態でエネルギーが一番低く安定した状態の結晶構造をとるが、一部の合金系は非結晶状態すなわちアモルファス化することにより、従来の合金では得られなかった特異な性質を持たせることができる。このアモルファス合金の特徴としては、磁気特性や強度、耐食性に優れていることで、磁気特性を生かした磁気ヘッド、磁気センサー、電子機器部品などの他、強度を高める目的でテニスラケット、ゴルフクラブ、釣竿などに応用されている。このように、アモルファス合金はその優れた高強度などの特性から新素材として期待されている。まず、アモルファス化の生成方法として急速凝固法が挙げられる。今回の場合、レーザー照射はすべて溶融条件の下で行なわれたので、溶融部は 1 度液体化している。そして、ms オーダーの YAG レーザをもってすれば金属表面を溶融した後、自己冷却のみによっても、アモルファス化に必要な冷却速度である 10^6 K /sec 程度は容易に達成できるとされている。したがって、形成方法である急速凝固が行なわれていたと考えられる。

次に、急速凝固法によりアモルファス合金を生成した場合、磁性を持つという特性があるが、これはレーザー照射面を切断した時に溶融部で確認された。ただし、きちんとした測定をしたわけではなく切断面を近づけたり遠ざけたりして確認しただけのもので、どの条件下で溶融したものが磁性を帯びたのかまではわからないが、S50Cは磁性が確認されず、SK-5、SKD-11の一部は低保持力を有していることが分かった。

3つ目に、金属成分におけるアモルファス合金の形成条件がある。形成条件には共晶型合金における共晶組成付近、原子半径が著しく異なる元素の組み合わせなどがいわれており、Cr-C系合金では10~13%Cの時に多く報告されている。今回使用したS50C、SK-5、SKD-11の中でこれらの条件に相当だと思われるのは、SK-5、SKD-11である。実際に、磁性や高い電気抵抗値などの特性を有していたものもこの2つの材料であり、この条件と一致している。このように、アモルファス合金の形成条件にほぼ共通していることが今回わかった。また、簡単な実験により溶融部はアモルファスの特性である、高い電気抵抗や耐食性なども有していることが分かった。電気抵抗値は、始め $181(\mu \cdot \text{cm})$ であったものが、 $6.5 \times 10^6(\mu \cdot \text{cm})$ まで高くなっており、耐食性に関しても、1時間以上エッジングさせても腐食があまり見られず、高い耐食性を持っていると想像される。以上のことから、今回の「YAGレーザービームによる放電加工面の表面改質」の研究過程で形成されたSK-5、SKD-11の溶融部組織がアモルファス合金である可能性は十分に高いといえるだろう。中でも合金工具鋼であるSKD-11はMo、Cr、Vなどの合金元素を初めから有しているので、よりアモルファス化が行われる可能性がある。しかし、まだこれだけではアモルファス合金が形成されたとは断定できないので以下に示すような調査が必要である。

1. X線、電子線などの回折像が幅広く明確でない(ハローパターンと呼ぶ)こと
2. 電子顕微鏡の透過像に粒界が見られないこと
3. 加熱により結晶化状態に変化し、この際に発熱現象や電気抵抗に大きな変化が生じること(示差熱分析(DTA)や示差走査熱量分析(DSC))

しかし、今回は時間がなくこれらの実験を行なうことができなかった。したがって、これについては今後の課題とする。

第5章 結論

レーザの溶融による表面粗さの改善で影響がある要因は、デフォーカス値、発振形態などで、材料の炭素の量は特に影響しないことがわかった。また、他にも影響する要因として出力、送り速度、ガス圧なども考えられ、これらを上手く扱うことで更なる荒さ改善が見込まれる。しかし、表面粗さの改善に関しては極めて良い結果が得られた。発振形態で連続発振よりもパルス発振の方が面粗さの改善に適しており、各材料共に最大で 1/10 ~ 1/15 まで改善することが出来た。また材料別では、多少ではあるが SKD-11 が一番改善されており、光沢を持っていた。したがって、炭素鋼の表面粗さの改善に関しては十分にレーザが有効であるといえるだろう。

この溶融面は使用方法によっては粗さ改善後の硬度が関係してくると考えられる。このまま使用するなら硬度を高くし、マシニングセンタなどでミーリングを行う場合硬度を下げる必要がある。それについては今回の結果より、条件によって硬度が上がるものや、下がるものが確認されたので、粗さを改善し、状況に応じて必要な硬度値も選択できる可能性はあると思われる。しかしその硬度変化に関してはメカニズムを解明することは出来ず、このままでは実用化は難しい結果となった。これについては、更なる追求が必要である。

つぎに形彫放電加工機のみで行った場合との時間的な比較をしたところ、大幅な改善が認められた。形彫り放電加工のみで仕上げ加工 $10 \mu\text{m/Ry}$ まで行うのに約 15 分かかかるが、同じ $10 \mu\text{m/Ry}$ の粗さにするのに仕上げにレーザを用いれば、レーザ照射による粗さ改善時間は 1 回行うのに約 1 分、形彫り放電加工による荒加工は約 3 分といったところなのであわせても約 4 分ですむ。したがって、加工時間だけを見れば 15 分から 4 分へと大幅な時間の短縮が可能であるといえるだろう。

最後に予想外な結果として、YAG レーザによる表面の溶融により、試料が磁性を持ったことでアモルファス組織が生成されているのではないかと推測した。結果は、SK-5、SKD-11 に関してはアモルファスが形成された可能性がある。しかし、アモルファス合金の形成に関しては今後の課題として追求していくひつようがある。

以上の様に今回は表面改質の一つである表面粗さ改善を試みたが、表面改質としてはまだいくつも方法が考えられる。その中でも、今回の実験をしていく上で考えられたことについて箇条書きする。

- (ア) 溶融条件でのレーザ重ね合わせによる硬度低下のメカニズムの解明
- (イ) アモルファス合金形成の有無
- (ウ) アモルファス合金に水素を添加すると振動を防ぐ性質が出てくるとあった。今回アモルファス合金が生成されていた場合この研究も考えられる
- (エ) 今回は何も添加することなく金属表面にレーザを照射するだけで初めから含んでいる元素により合金化が行なわれる方法であったが、この他に金属粉末の

塗布による合金化がある

このように、本研究で多くの課題が出てきた。今後、これらについて更なる研究が必要である。

謝 辞

本研究及び修士論文は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。終始ご指導いただきました同教授に厚くお礼申し上げます。

また、高知県工業技術センター 材料技術部の南 典明様、毛利謙作様には技術指導ならびに実験試料の作製にあたり切断機、研磨装置をお借りしましたこと、深く感謝を申し上げます。

参考文献・資料

- 1) 宮崎俊行 宮沢 肇 村川正夫 吉岡俊郎：レーザー加工技術、p.11
- 2) 村上陽太郎 亀井 清 山根壽己 長村光造：金属材料学、p.11
- 3) 安永暢男：レーザーが変える加工技術、p.91
- 4) 伊藤邦夫：材料テクノロジー 7 材料の組織と機能
- 5) 大和久重雄：熱処理技術マニュアル
- 6) 日本材料科学会編：熱処理と材料
- 7) 日本材料科学会編：表面処理と材料