

YAG レーザによる表面改質

電気加工研究室

指導教員 小林和彦

知能機械コース

1055061

松井 浩

目次

第1章 緒論	
1.1 レーザ加工の特徴	2
1.2 レーザ表面改質	3
1.3 本研究の内容	4
第2章 レーザ加工による金属焼入れ特性についての実験	
2.1 実験目的	5
2.2 実験方法、及び実験装置	
2.2.1 レーザ処理方法	5
2.2.2 レーザ光照射条件	6
2.2.3 測定方法	7
2.3 実験結果および考察	
2.3.1 レーザ処理後の表面性状	10
2.3.2 デフォーカス値変化に伴う表面硬度の変化	12
2.3.3 デフォーカス値変化に伴う変質深さへの影響	20
第3章 レーザ加工と放電加工の複合加工実験	
3.1 実験目的	27
3.2 実験方法、及び実験装置	
3.4.1 試料作成	28
3.4.2 レーザ処理方法	28
3.4.3 レーザ光照射条件	29
3.4.4 測定方法	29
3.3 実験結果および考察	
3.3.1 表面粗さ	31
3.3.2 表面硬度	38
第4章 結論	42
謝辞	43
参考文献・資料	43
付録	43

第 1 章 緒言

1.1 レーザ加工の特徴

レーザー加工機は、わずか数年前から普及し始め、産業機械としては一番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できる⁽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り、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ことや、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ことができる。

また、レーザ加工のメリットを活かすもう一つの局面として、レーザでないと出来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効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変わり使われている。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。

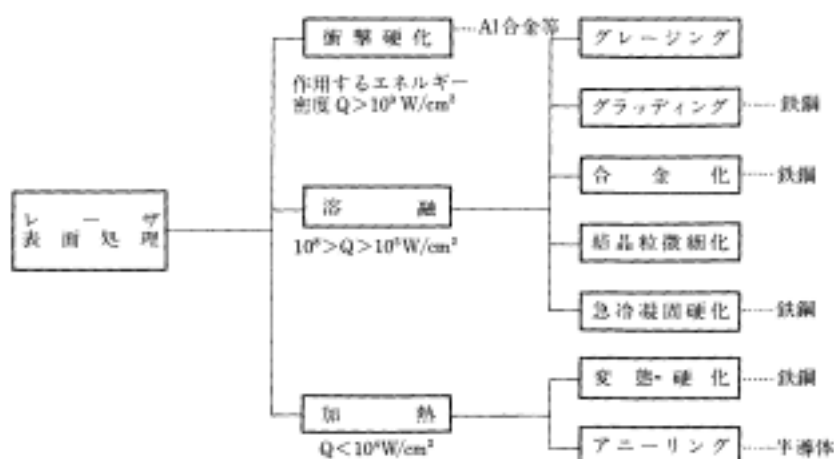


図 1.1 各表面処理の種類⁽⁴⁾

1.3 本研究内容

近年、レーザー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、レーザー加工は切断、溶接、表面改質など様々な加工が行え、幅広い分野で使用されている。

金型製作では、より強度剛性に優れ耐摩耗性を向上させることが求められ、熱による焼入れは重要なものである。従来では高周波焼入れ、浸炭などの技術が利用されているが、これらは製品全体を焼入れしてしまうため効率が悪い。これをレーザー光により局所的に焼入れ処理を行うことが出来れば、非常に効率が良い。

そこで本研究では、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、3種類の金属材料を用い、第3章で YAG レーザ加工による焼入れ特性の調査実験を行い、焼入れについてのメカニズムの解明を行った。また形彫放電加工で加工した放電面をレーザー処理により、表面荒さを短時間で改善させるレーザー処理と形彫放電加工の複合加工を第4章で行った。

第 2 章 レーザ加工による表面改質特性についての実験

2.1 実験目的

従来、鋼材の焼き入れには、拡散浸炭法や高周波焼入れ法などが主に使われているが、最近では自動車産業などを中心に、レーザ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。そこで本実験では、焼入れ可能な金属に対してレーザ光による焼入れ処理を行い、各加工条件が加工結果にどのような影響を及ぼすかを調査した。

2.2 実験方法、及び実験装置

2.2.1 レーザ処理方法

本実験では、実験材料として S50C、SK-5、SKD-11 を、それぞれワイヤ放電加工機により 20×20 mm角に切断した試料を用いた。この試料にレーザ光を照射するため、最大出力 400W の YAG レーザ発振器(図 2.8 参照)を使用した。図 2.1 に構成図を示す。発振器より生成されたレーザ光を光ファイバケーブルによって、アームロボット先端に取り付けた加工ヘッドノズルに誘導し、X-Y テーブル(図 2.9 参照)上に固定した試料に照射条件(以下の 2.2.2 レーザ光照射条件に示す。)を変化させて照射した。このときファイバケーブルから出射したレーザ光が金属表面で反射し、反射光が加工ヘッド側のファイバケーブルに入射してファイバケーブルを破損させる危険があるため、レーザ光を射出する加工ヘッドノズルを進行方向に対して 5 度の角度をつけた状態で反射光の再入射を防いだ。

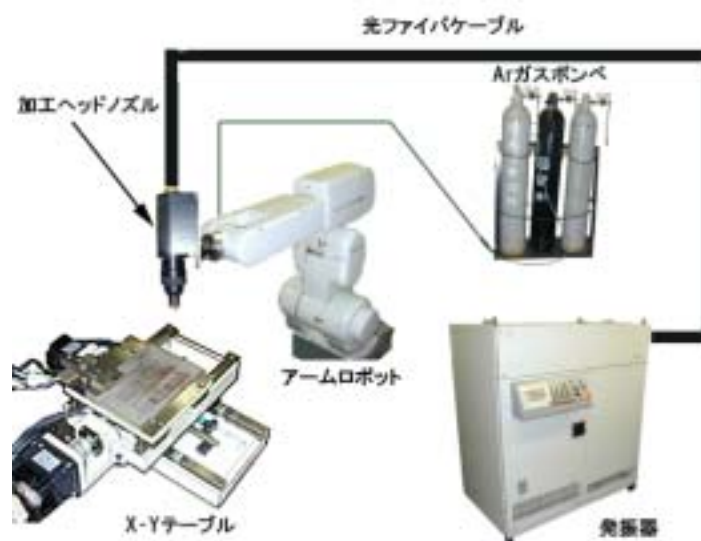


図 2.1 構成図

2.2.2 レーザ光照射条件

レーザ光の照射条件は、発振形態、レーザ出力、送り速度、デフォーカス値を変化させてレーザ照射を行った。各パラメータについて以下に説明する。

まず発振形態は、Continues Wave (以下、CW とする。)、Pulse Wave (以下、PW とする。) の 2 種類を用いた。図 2.3 に示す CW 発振は、レーザ光を連続的に発振する方式で、一方 図 2.4 に示す PW 発振は断続的に発振する方式であり、周波数 100Hz、デューティ 50%とした。レーザ出力は、平均出力 100W、140W とした。ここでのレーザ光の出力値は、光ファイバケーブルによるレーザ光の減衰を考慮して、図 2.2 に示したパワープローブ



図 2.2 パワープローブ

によって加工ヘッドノズル先端で測定した値である。試料送り速度は 5~20 mm/sec の 4 段階で変化させた。最後にデフォーカス値であるが、これは試料の上部表面に集光レンズの焦点を合わせ、試料表面から上方向に加工ヘッドノズルを移動させた値である(図 2.5 参照)。

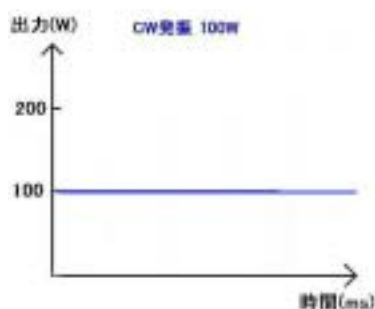


図 2.3 CW 発振

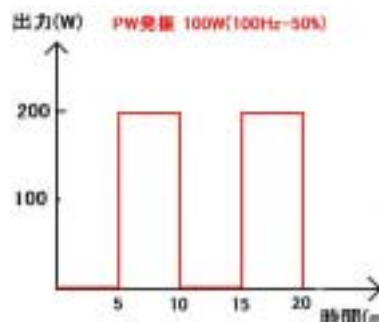


図 2.4 PW 発振

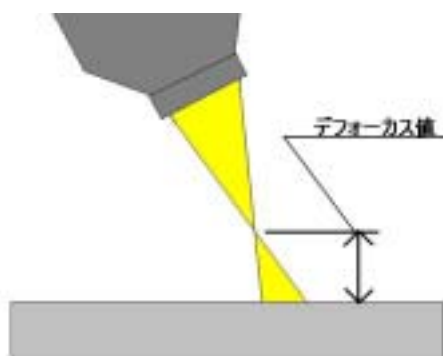


図 2.5 デフォーカス値

2.2.3 測定方法

評価方法について、処理表面の硬度と変質層深さの測定を行った。処理表面の硬度測定は、図 2.6 に示すようにレーザー光を照射した部分の中心部に微小硬度計(図 2.11 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。また変質層深さの観察については、前処理として加工処理を行った試験片をワイヤ放電加工機によりレーザー光照射方向に対して垂直方向に切断し、樹脂に埋めこんだ。その後、切断面を四段階(#400,#600,#800,#1000)に分けて耐水ペーパーにより研磨した後、3 μm のアルミナ粉末でバフ研磨を行い、さらに1 μm のアルミナ粉末で仕上げのバフ研磨を行った。最後に 3% の硝酸アルコール(硝酸 3%+エタノール 97%)によりエッチング処理を行った。観察前処理を終えた試料を光学顕微鏡(図 2.10 参照)により、変質した断面の観察を行った(図 2.7 参照)。

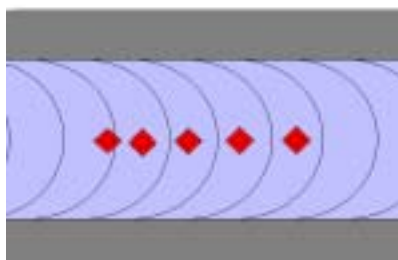


図 2.6 硬度測定

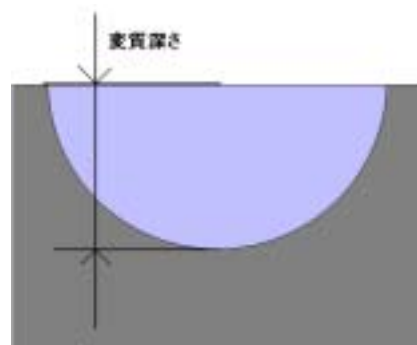


図 2.7 変質深さ

YAG レーザ発振器 三菱電機社製 ML0202SC

Kr ランプによる連続励起方式

定格出力 250W

パルスピーク出力 400W

波長 1.06 μm

ビームモード 低次マルチ



図 2.8 YAG レーザ発振器の外観

精密位置決め X-Y テーブル AX1010P6BY THK 製

テーブル寸法 150 mm \times 150 mm

有効ストローク 100 mm \times 100 mm

ボールねじリード 5 mm

繰り返し位置決め精度 ± 0.003 mm

位置決め精度 0.03 mm

送り真直度 0.01 mm

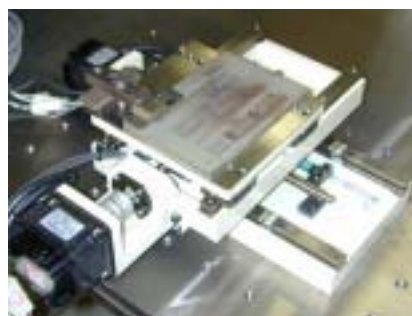


図 2.9 X-Y テーブルの外観

光学顕微鏡 TF-501F ミットヨ製

形式	支柱直立型
接眼鏡筒 俯角	30°
対物レンズ倍率	×3、×10
接眼レンズ倍率	×10、×50
透過照明装置	反射照明装置



図 2.10 光学顕微鏡の外観

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 2.11 微小硬度計の外観

2.3 実験結果および考察

2.3.1 レーザ処理後の表面性状

レーザー処理を行った表面の光学顕微鏡写真(100倍)を図 2.12 ~ 2.16 に示す。レーザー処理を行った結果、S50C、SK-5、SKD-11 共に試料表面にはレーザー照射痕が残り、デフォーカス値を大きくしていくことで、レーザー光のスポット径が徐々に大きくなり、スポット面でのレーザー光密度が小さくなるため照射痕は薄れていった。また図 2.17 ~ 2.28 に照射表面の組織写真(500倍)を示す。S50C は、デフォーカス値を小さくするに従いフェライト+パーライト組織から微細マルテンサイト組織へと変化し、SK-5 はフェライト組織から微細マルテンサイト組織へと変化した。一方 SKD-11 は、パーライト+セメンタイト組織から微細マルテンサイト+残留オーステナイト組織へと変化した。



図 2.12 デフォーカス値 1.0 mm



図 2.15 デフォーカス値 4.0 mm



図 2.13 デフォーカス値 2.0 mm

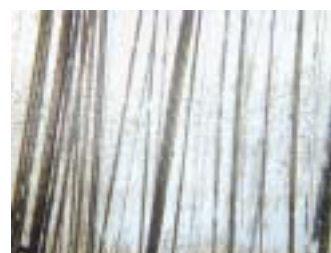


図 2.16 デフォーカス値 5.0 mm



図 2.14 デフォーカス値 3.0 mm

S50C

SK-5

SKD-11



図 2.17 処理前
フェライト+パーライト

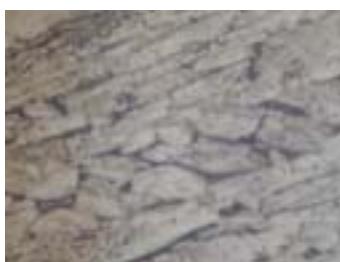


図 2.21 処理前
パーライト



図 2.25 処理前
パーライト+セメンタイト



図 2.18 デフォーカス値 7 mm
微細マルテンサイト
+ 微細パーライト



図 2.22 デフォーカス値 7 mm
微細マルテンサイト
+ 微細パーライト



図 2.26 デフォーカス値 7 mm
微細パーライト
+セメンタイト



図 2.19 デフォーカス値 5 mm
微細マルテンサイト
+ 微細パーライト



図 2.23 デフォーカス値 5 mm
微細マルテンサイト
+ 微細パーライト



図 2.27 デフォーカス値 5 mm
微細マルテンサイト
+残留オーステナイト



図 2.20 デフォーカス値 3 mm
微細マルテンサイト



図 2.24 デフォーカス値 3 mm
微細マルテンサイト



図 2.28 デフォーカス値 3 mm
微細マルテンサイト
+残留オーステナイト

2.3.2 デフォーカス変化に伴う表面硬度の変化

試験材料 S50C、SK-5、SKD-11 についてレーザー光による焼入れ処理を行った表面硬度の結果について記述する。レーザー焼入れ処理を行った表面の硬度を測定したものを縦軸にビッカース硬度(HV)、横軸にデフォーカス値(mm)を取り、各速度における変化をグラフに表したものを図 2.31 ~ 2.42 に示す。焼入れ処理により試料表面の最高硬度は、S50C - HV900 程度(処理前の 2.9 倍)、SK-5 - HV1100 程度(処理前の 5.5 倍)、SKD-11 - HV800 程度(処理前の 2.8 倍)の硬度が得られた。グラフを見ての通り各処理条件ともに S50C、SK-5 についてはデフォーカス値が徐々に大きくなるにつれて、ほぼ一定の硬度を保ってそこから徐々に低下していき処理前の硬度となる傾向にある。一方、SKD-11 についてはデフォーカス値が、大きくなるにつれて一定の硬度から増加し、さらにそこから減少して処理前の硬度となる傾向にある。ここで S50C、SK-5 と SKD-11 に分けて、それぞれの傾向について説明を行う。

まず S50C、SK-5 について、それぞれの条件で見られるようにデフォーカス値を徐々に大きくしていくと、あるデフォーカス値までは一定の硬度を保ち、そこから徐々に低下し処理前の硬度の値となる傾向にある。各条件別に比較してみると、発振形態の違いでは平均出力が同じであってもピーク出力が大きい PW 発振のほうが CW 発振よりも硬度の低下が始まる部分がデフォーカス値をみると大きい。また当然のことながらレーザー出力が高いと試料への入熱量が増えて、硬度の低下が始まる部分のデフォーカス値は大きくなる。さらに送り速度についても同じことが言え、送り速度を遅くするとレーザー光を照射する時間が増えて、より高いデフォーカス値まで一定の硬度を得ることが分かった。

次にグラフ(図 2.31 の送り速度 5 mm/s-デフォーカス値 6.0 mmを参照)とレーザー照射痕の写真(図 2.29 参照)を見比べると、写真ではレーザー照射痕が見られないが、グラフの硬度はデフォーカス値 8.0 mmまで一定の値を保っている。デフォーカス値 5.5 mmまでは溶融して再凝固したことで焼が入ったことがわかり、デフォーカス値 6.0 mm ~ 8.0 mmまではレーザー光の熱影響により硬化したことが分かった。このほかの条件でも同じ結果が得られた。

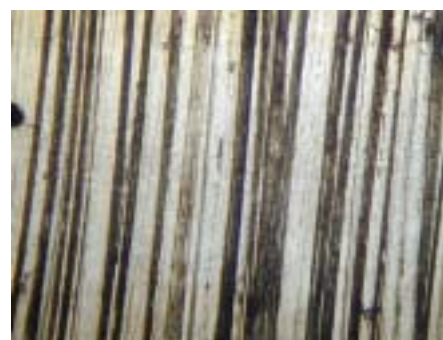


図 2.29 S50C 材 表面写真
CW100W 5 mm/s
デフォーカス値 6.0 mm

つづいて SKD-11 について、各条件に関しては上記の S50C、SK-5 と同じ結果が得られたが、デフォーカス値の変化に伴う硬度の変化は、デフォーカス値を大きくするにつれて一定の硬度を保った後、徐々に硬度が増加して減少し処理前の硬度値となる S50C、SK-5 とは異なった結果が得られた。またグラフとレーザー痕の写真を見比べると、こちらも S50C、SK-5 とは異なり

レーザ痕が確認される部分では HV400 程度の一定した硬度が得られ、レーザ照射痕が消えた部分から硬度が増加する結果となった。こうしたことから SKD-11 は、レーザ光により溶融した部分よりも、熱影響を受けた部分の硬度が高いという結果が得られた。

以上の結果を考察すると S50C、SK-5 と SKD-11 の傾向の違いは、残留オーステナイト(硬度低下の原因となり、またこの組織は不安定で時間がたつにつれて徐々に安定化への変化が起こり、寸法変化を生ずる。)が原因であると考えられる。通常、焼入れではオーステナイト組織の状態まで熱し、その後マルテンサイト変態を起こすため Mf 点(マルテンサイト変態終了点)以下に急冷する。このときオーステナイト組織は、マルテンサイト組織に変態するのだが、100%変化するのではなく、ある程度は残って残留オーステナイト組織となる。この残留オーステナイト組織は、マルテンサイト変態点まで冷却しない場合に発生する。一定の焼入れ条件では、炭素含有量 0.8% から炭素含有量が増えるに従い Mf 点が低くなっていくことから、SKD-11 は Mf 点が S50C、SK-5 に比べて低いいため、残留オーステナイト組織が現れたと考えられる。したがって S50C、SK-5 は、SKD-11 に比べ炭素含有量が少なく、あまり残留オーステナイト組織の影響を受けず溶融部では高い硬度(Hv1000)が得られ、逆に SKD-11 は、多くの炭素を含んでおり溶融部では、Hv400 程度と残留オーステナイト組織の影響を受けて低い硬度となった。つぎに熱影響部について考えると、S50C、SK-5 は状態図(図 2.30 参照)を見ての通りオーステナイト変態点が低いため熱影響部でもマルテンサイト変態が起こり、溶融部と同じく高い硬度が得られた。しかし SKD-11 は前者と異なり、オーステナイト変態点が高く、オーステナイト組織とセメンタイト組織にまでしか温度が到達せず、レーザ処理後は、マルテンサイト組織とセメンタイト組織となる。セメンタイト組織は非常に硬いため、グラフの途中から硬度が高くなるのは、このためである。

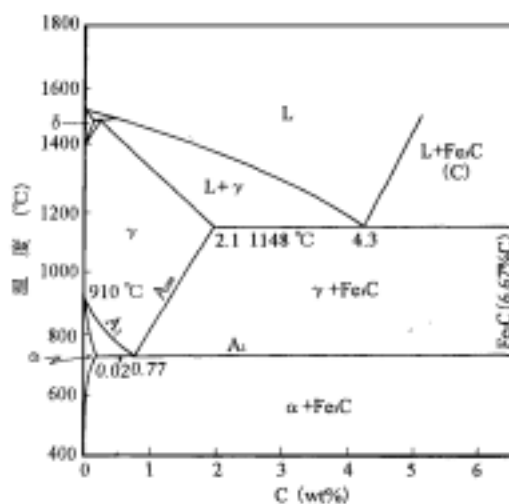


図 2.30 Fe-C 状態図

S50C 材

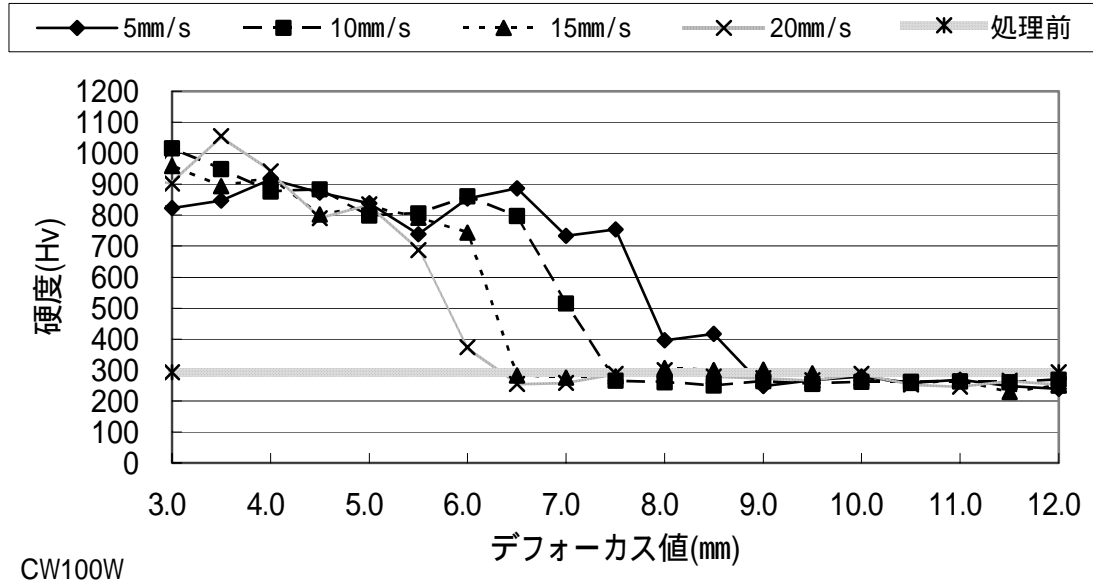


図 2.31 CW100W での各速度におけるデフォーカス値と硬度の関係

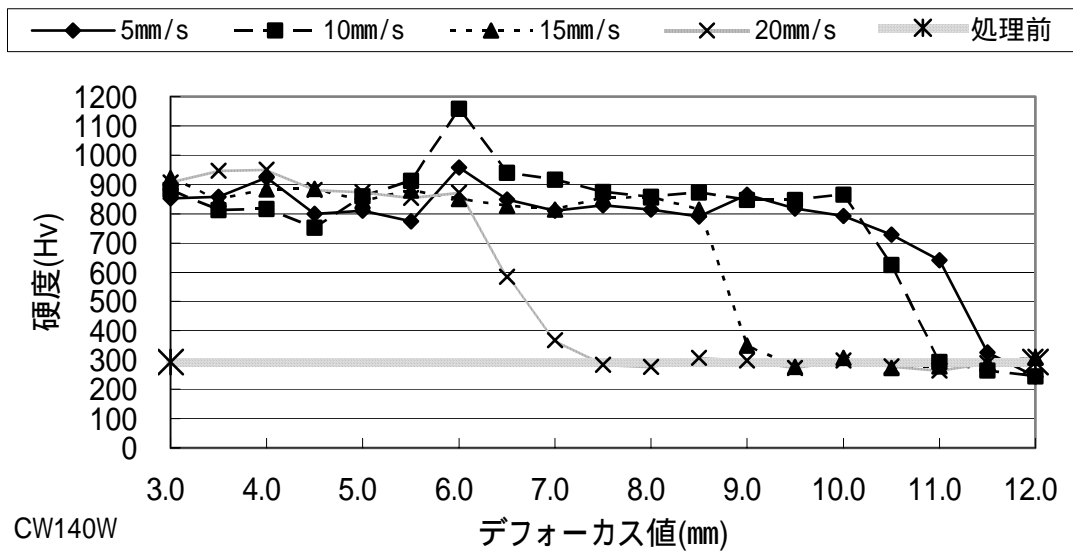


図 2.32 CW140W での各速度におけるデフォーカス値と硬度の関係

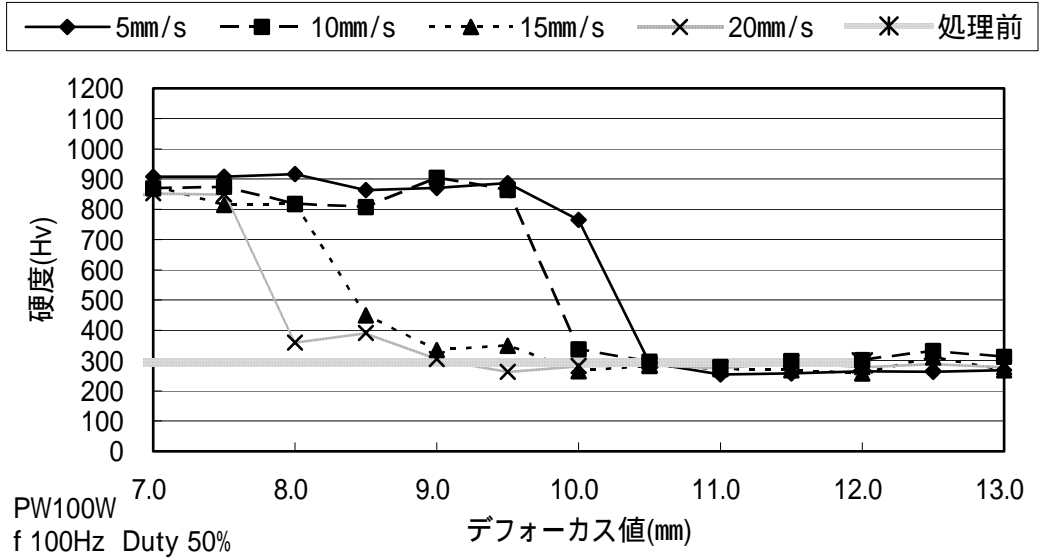


図 2.33 PW100W での各速度におけるデフォーカス値と硬度の関係

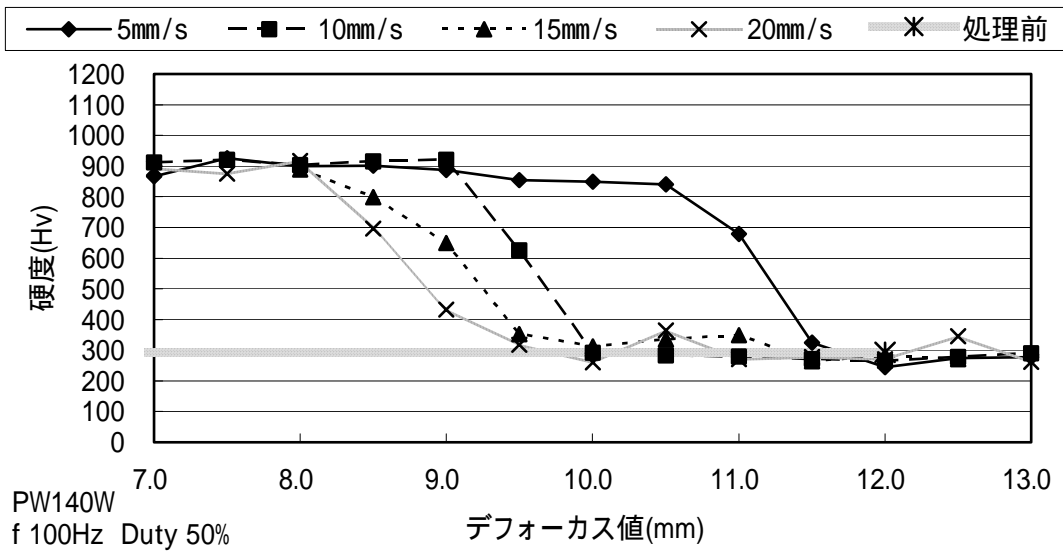


図 2.34 PW140W での各速度におけるデフォーカス値と硬度の関係

SK - 5 材

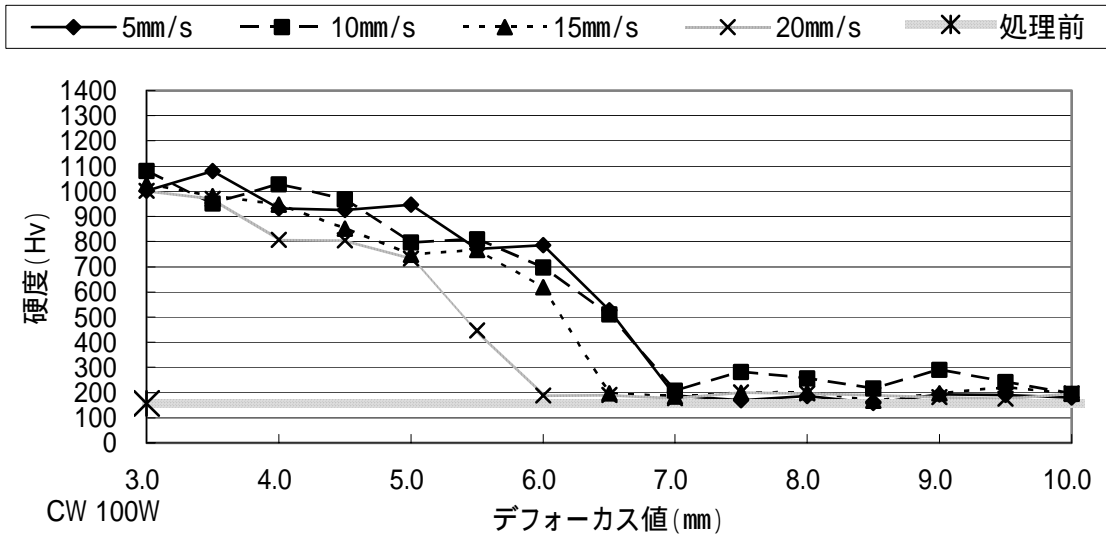


図 2.35 CW100W での各速度におけるデフォーカス値と硬度の関係

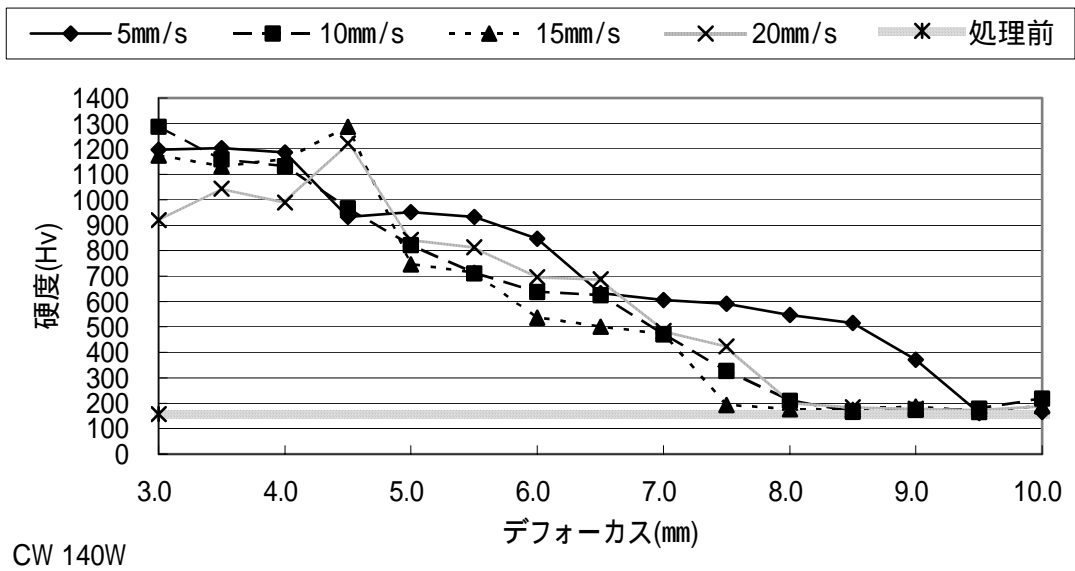


図 2.36 CW140W での各速度におけるデフォーカス値と硬度の関係

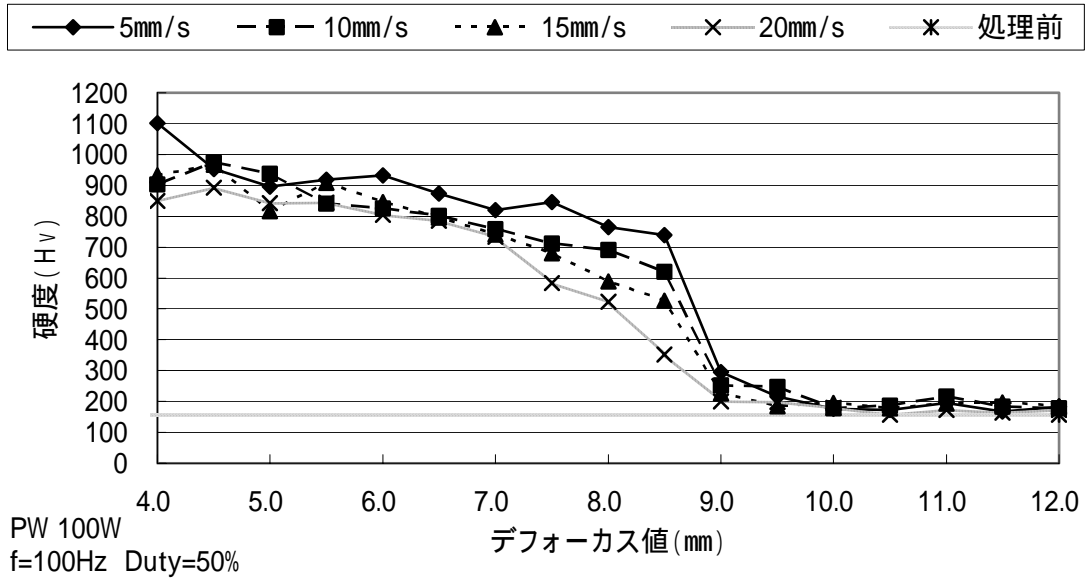


図 2.37 PW100W での各速度におけるデフォーカス値と硬度の関係

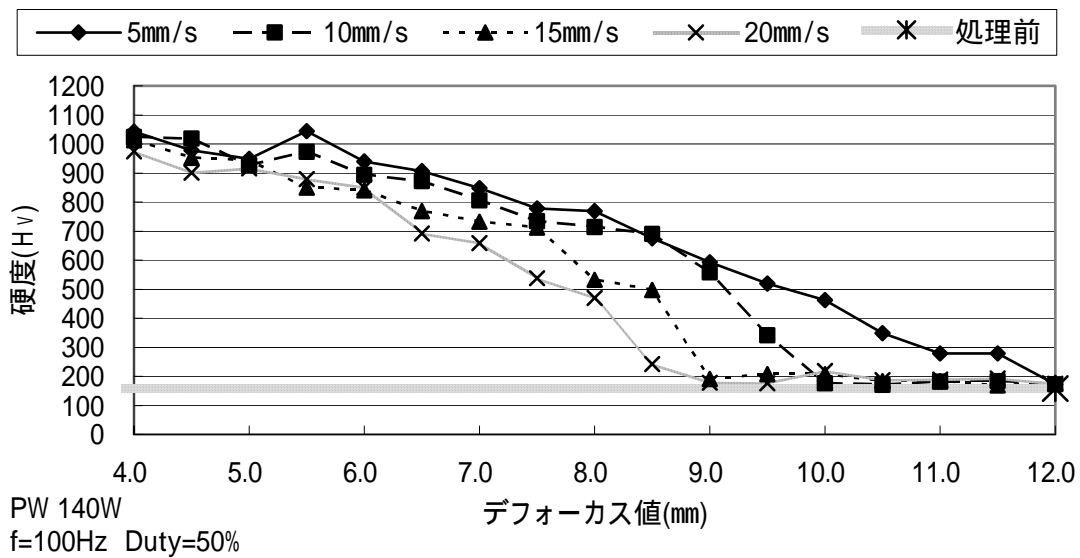


図 2.38 CW140W での各速度におけるデフォーカス値と硬度の関係

SKD - 11 材

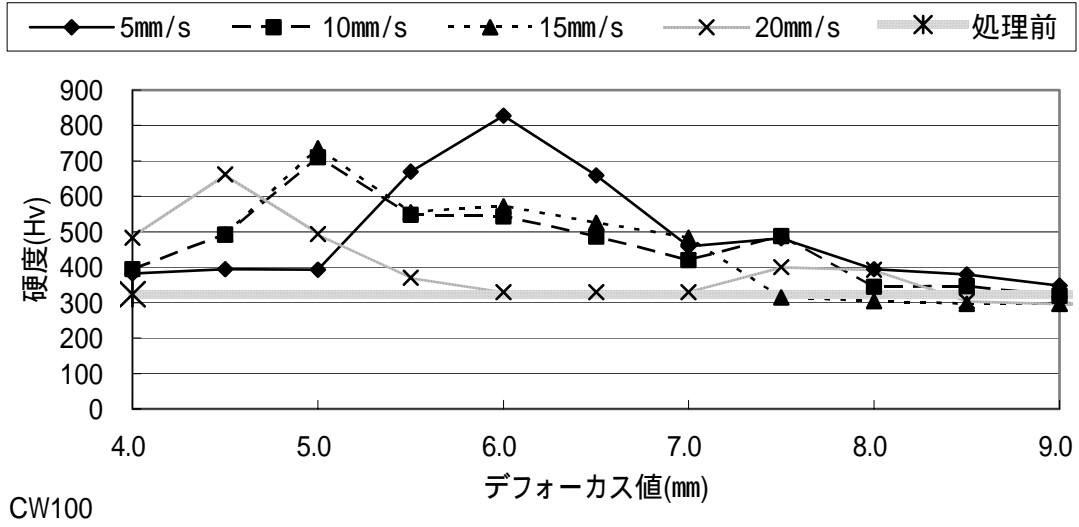


図 2.39 CW100W での各速度におけるデフォーカス値と硬度の関係

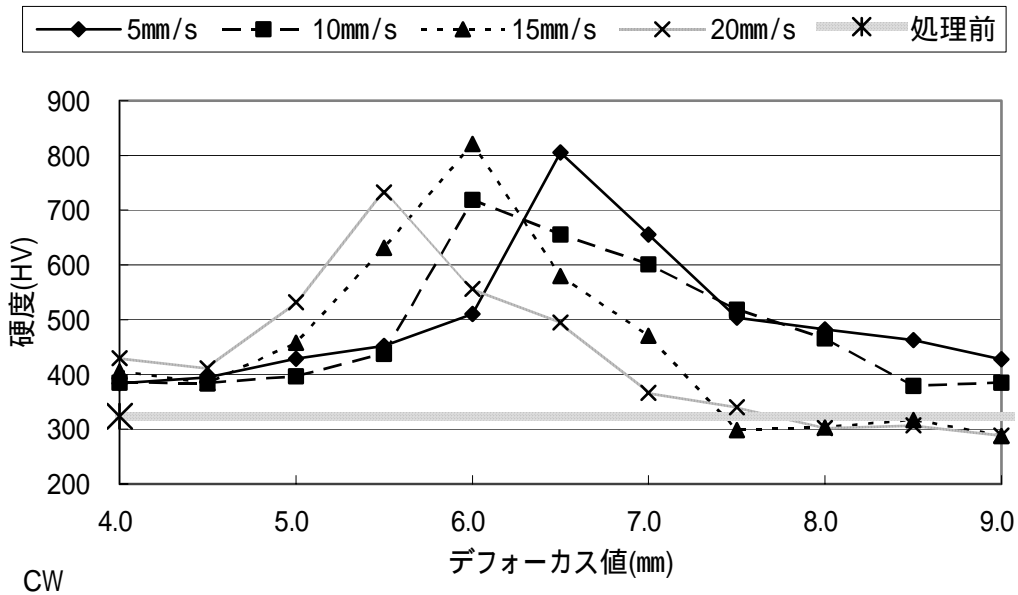


図 2.40 CW140W での各速度におけるデフォーカス値と硬度の関係

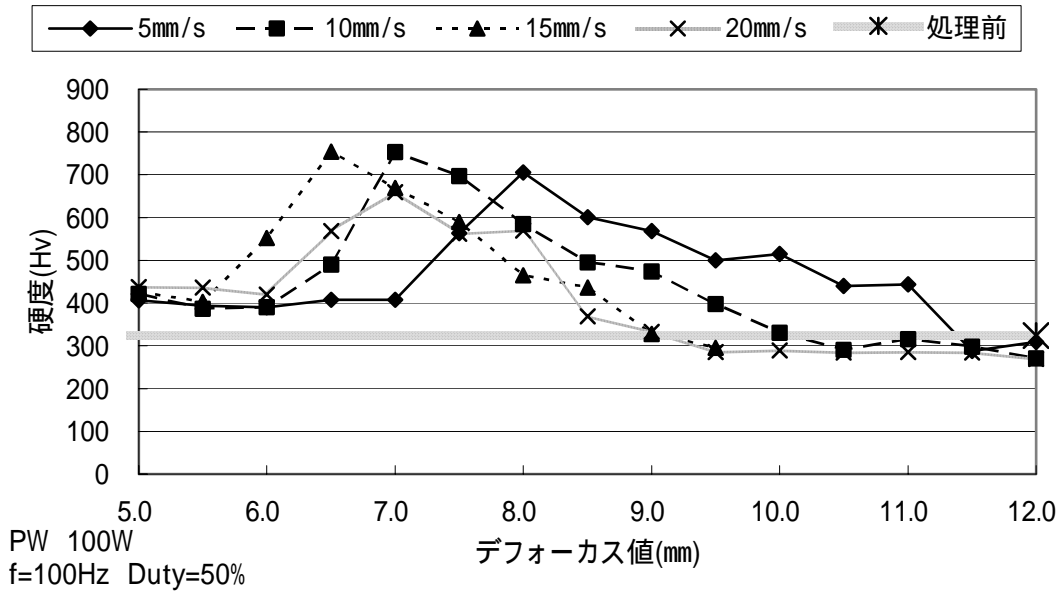


図 2.41 PW100W での各速度におけるデフォーカス値と硬度の関係

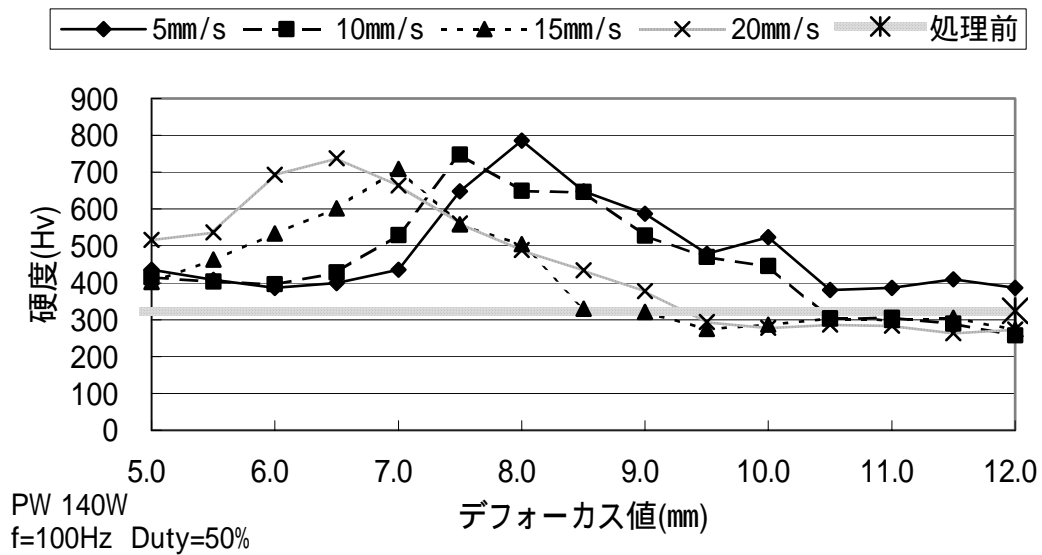


図 2.42 PW140W での各速度におけるデフォーカス値と硬度の関係

3.3.3 デフォーカス変化に伴う変質深さへの影響

レーザ照射部分の断面形状を図 2.43 ~ 2.48 に示し、縦軸に変質深さ、横軸にデフォーカス値を取り、各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係を図 2.49 ~ 2.60 にしめす。当然のことながら各材料ともにデフォーカス値を大きくするに従い変質深さは浅くなった。

各条件別に見ると、発振形態の違いでは CW 発振よりもピーク出力の大きい PW 発振の方が変質した部分が深くなり、また各材料とも PW 発振ではデフォーカス値が約 2 mm のところで急激に浅くなり、以降 CW 発振のように滑らかに浅くなった。図を見ての通り、PW 発振はデフォーカス値が 2 mm 以下の部分で断面形状が CW 発振とは異なり逆三角形状となっていた。速度変化に関しては、多少深さが変化するものの、大きな変化は見られなかった。

連続(CW)発振



図 2.43



図 2.44



図 2.45

パルス(PW)発振



図 2.46



図 2.47



図 2.48

S50C 材

各速度におけるデフォーカスと変質深さの関係

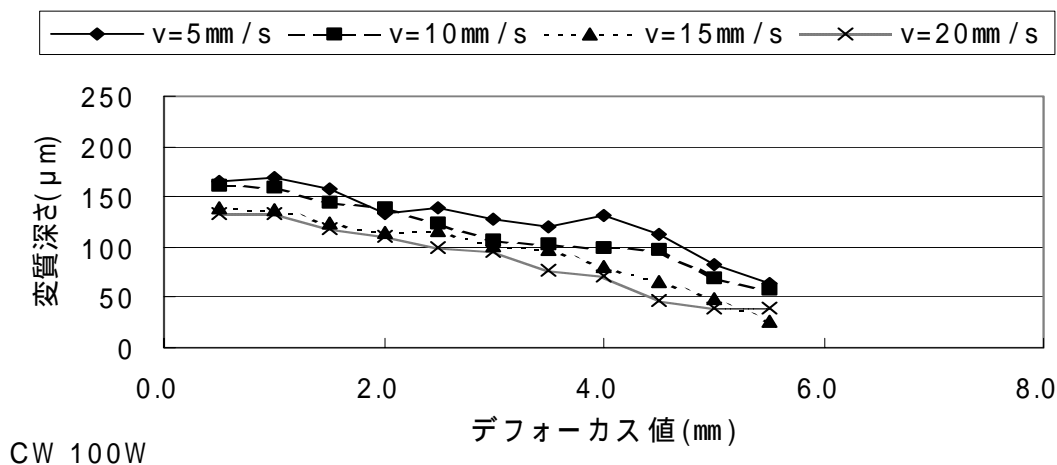


図 2.49 各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係

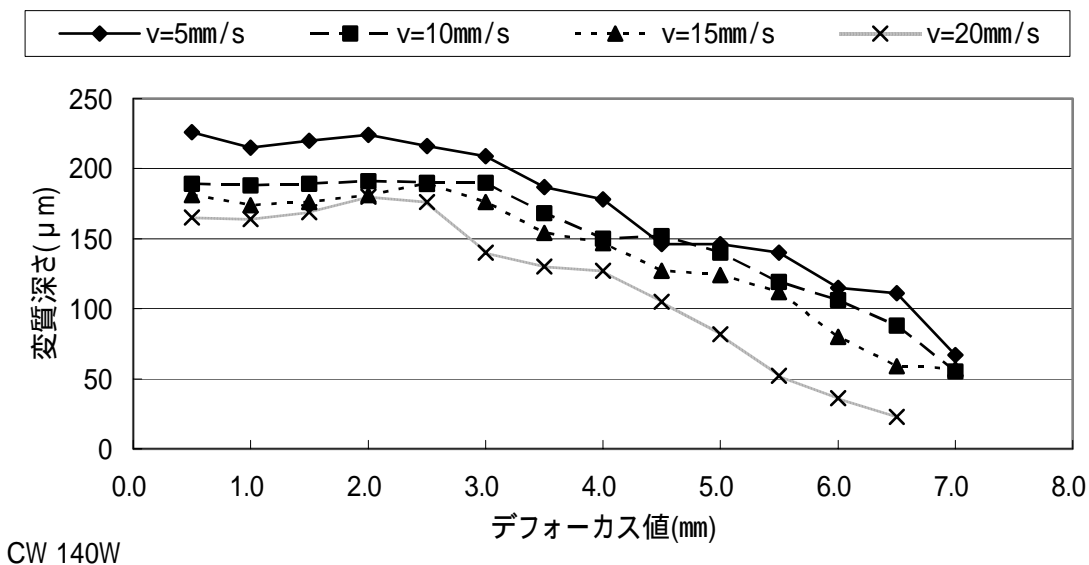


図 2.50 各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係

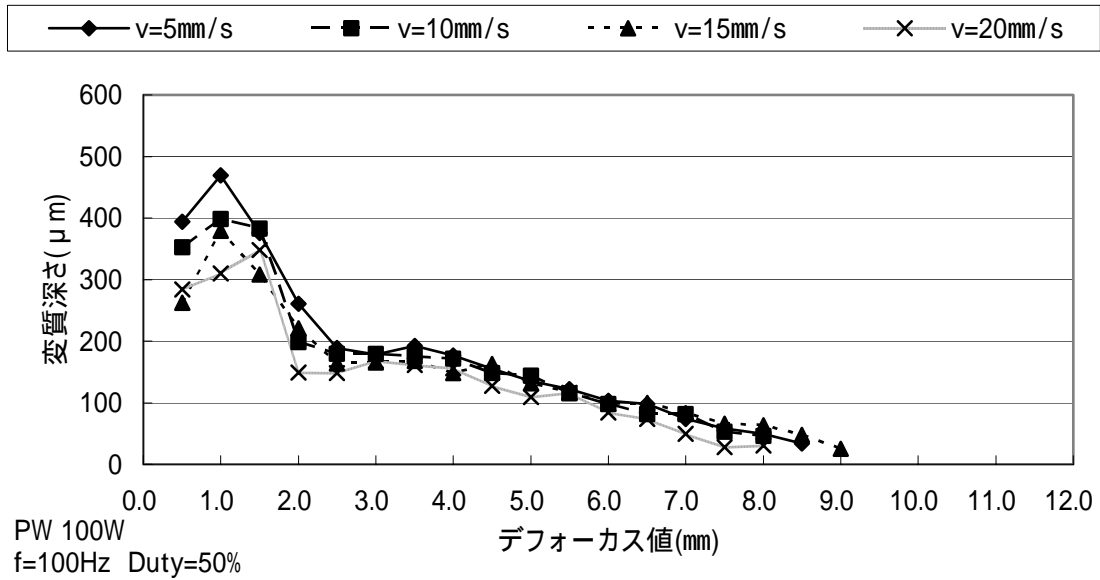


図 2.51 各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係

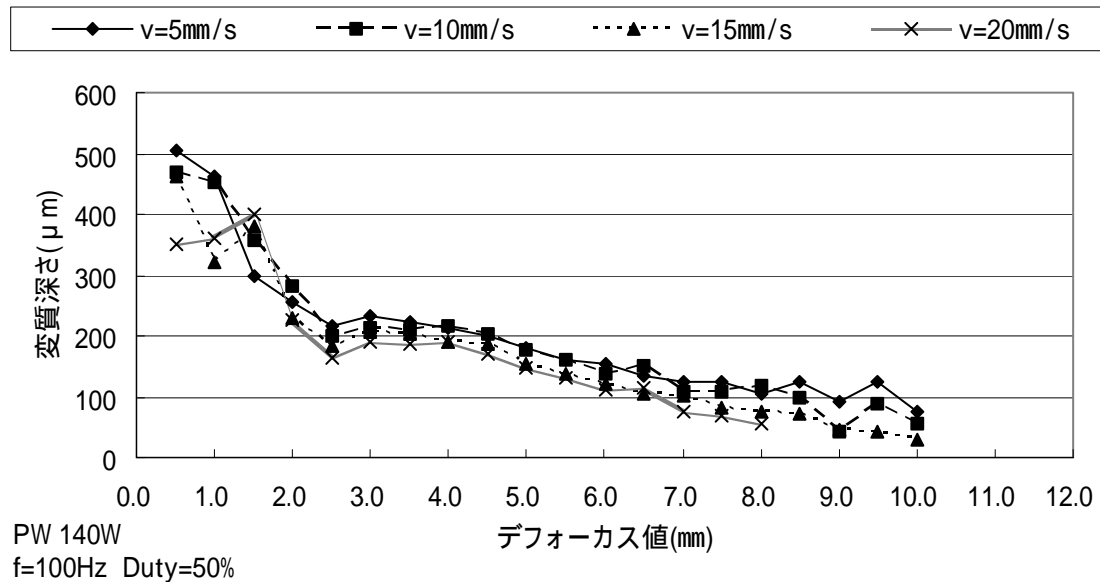


図 2.52 各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係

SK-5 材

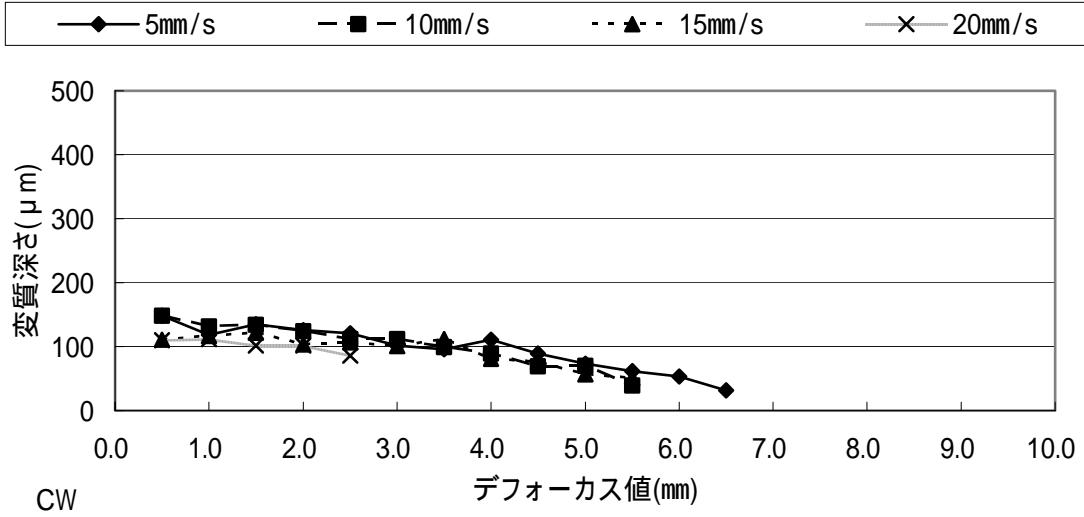


図 2.53 各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係

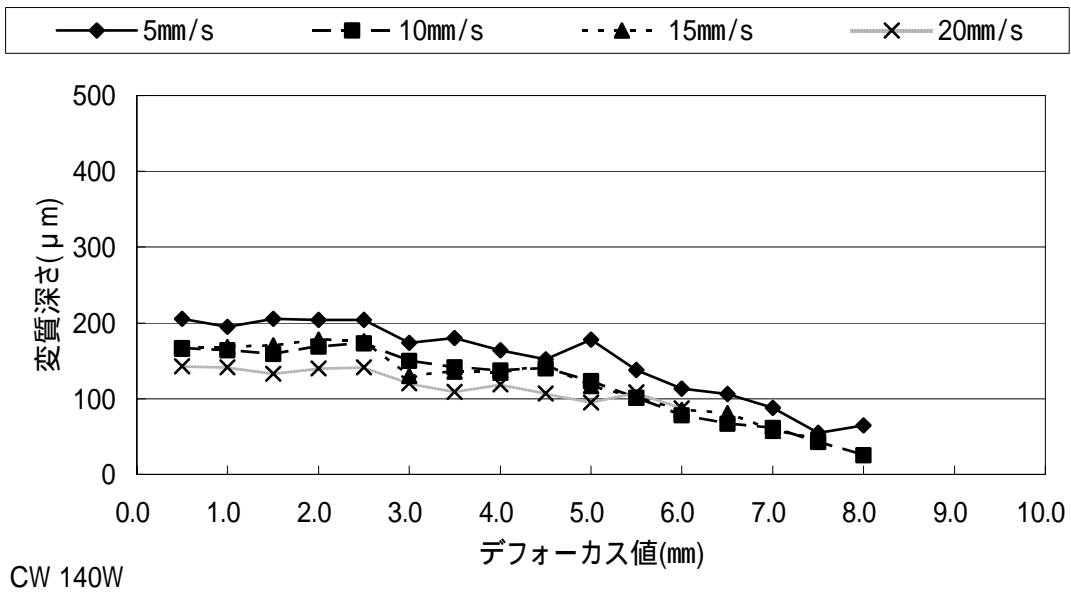


図 2.54 各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係

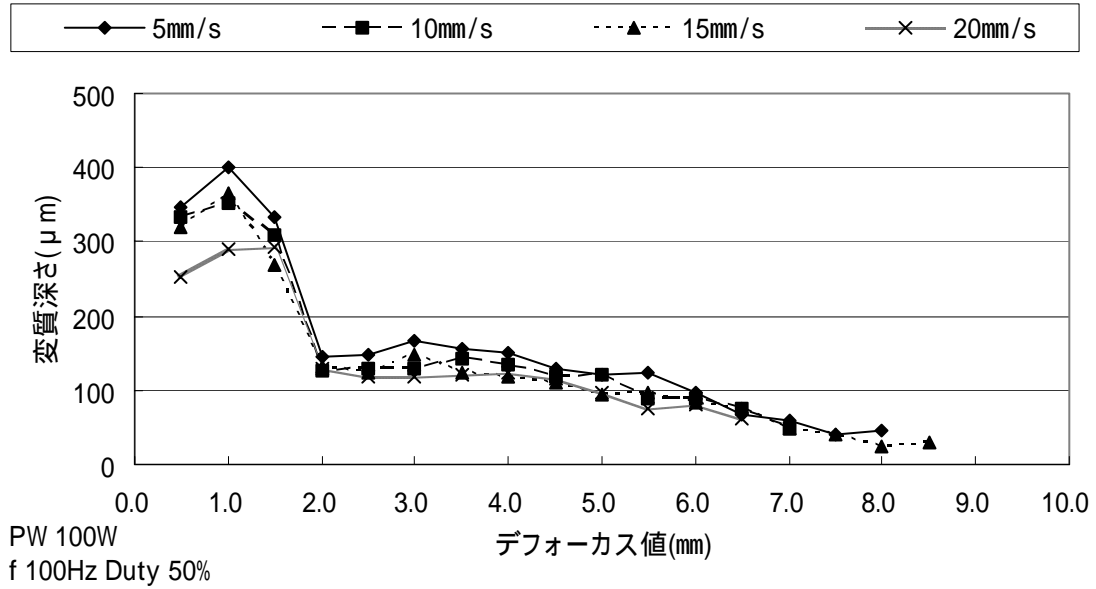


図 2.55 各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係

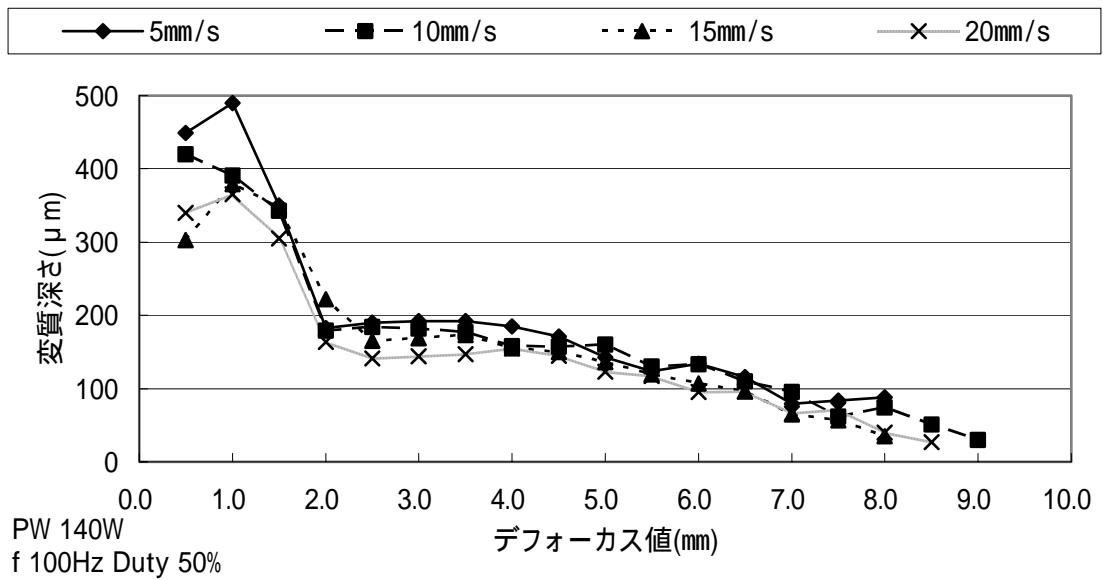


図 2.56 各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係

SKD-11 材

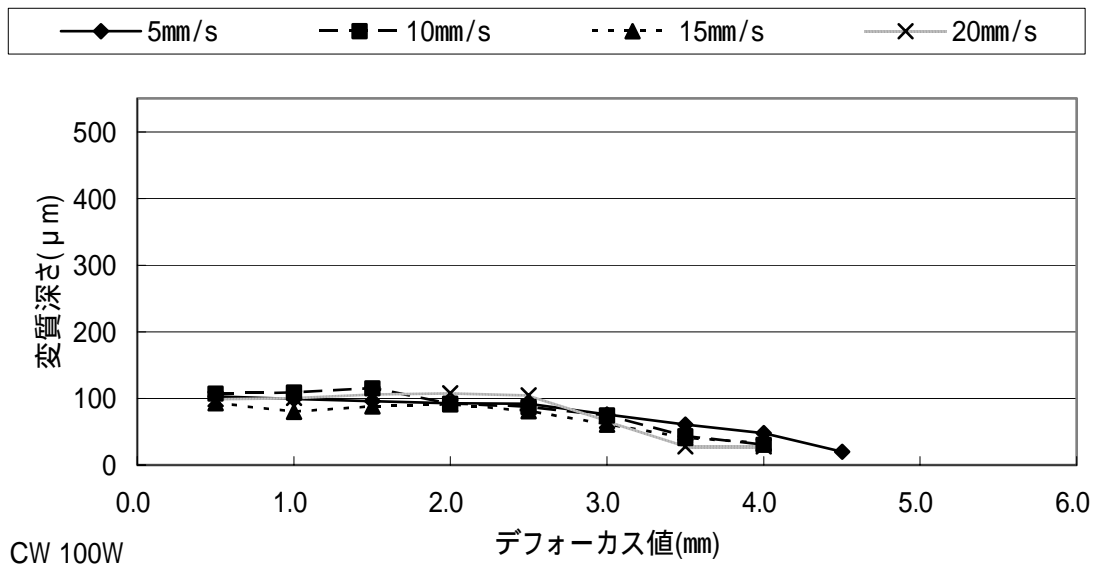


図 2.57 各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係

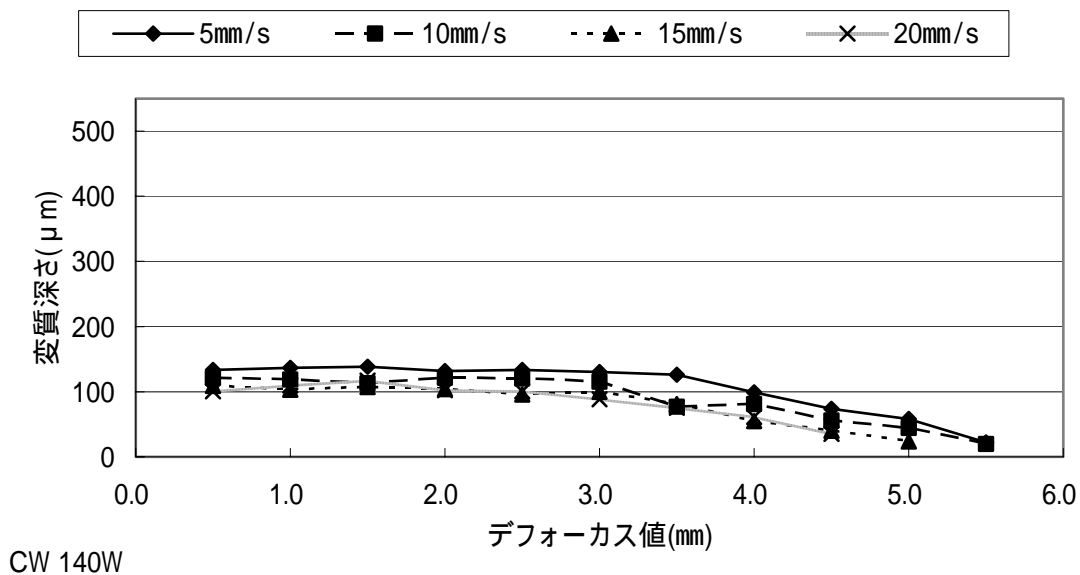


図 2.58 各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係

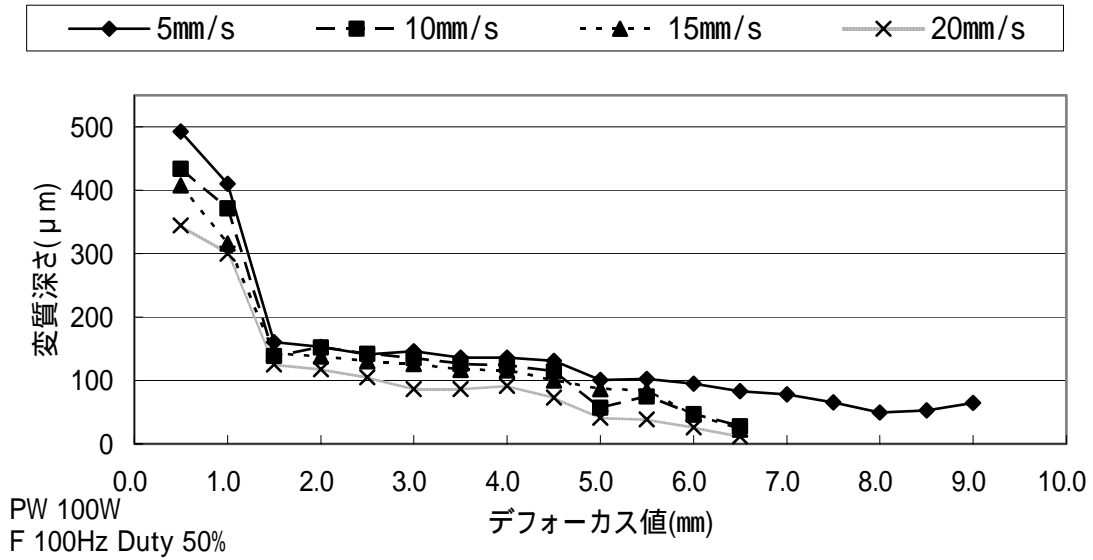


図 2.59 各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係

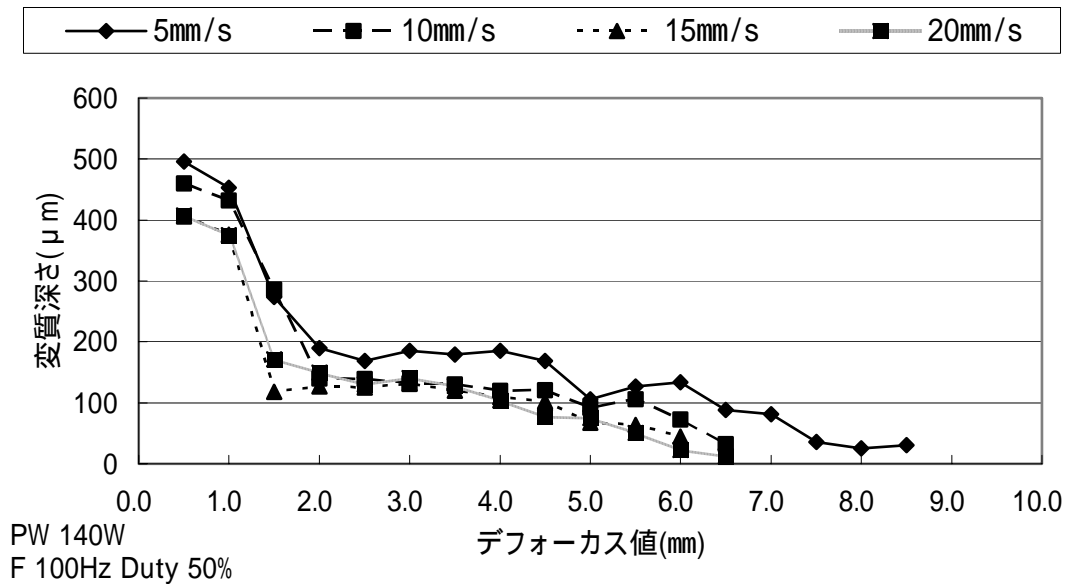


図 2.60 各速度におけるデフォーカス値と変質深さの関係

第3章 レーザ加工と形彫放電加工機の複合加工

3.1 実験目的

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 mm×10 mmの大きさで荒さ10 μmの加工を行うのに約15分かかる。また、途中まで放電加工で荒加工をして、その後マシニングセンタなどで切削加工を行い大幅な時間の短縮をはかる方法もあり研究されている。例えば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 μmまで抑えることができる。

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、一層の向上の可能性があると考えられるレーザを用いた表面粗さの改善について検討する。

レーザの場合は、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。したがって、出力、発振形態、送り速度、デフォーカス値などのパラメータを選択する場合、金属を溶融する条件を選択する必要がある。そこで、第3章で調査した「レーザによる表面改質特性」を参考として選択した条件を以下の3.2.3に記す。

3.2 実験方法、及び実験装置

3.2.1 試料作製

実験材料は、第2章同様に S50C、SK-5、SKD-11 材を用いた。これらの材料に対して形彫放電加工機(図 3.3 参照)により荒加工を行い、各材料に表面粗さ $60 \mu\text{m Ry}$ 、 $80 \mu\text{m Ry}$ の放電痕を形成した(図 3.1 参照)。形彫放電加工による加工条件については、表 3.1 に示す。



図 3.1 形彫放電加工による
荒加工面($80 \mu\text{m Ry}$)

表 3.1 形彫放電加工

$60 \mu\text{m Ry}$	I_p	P on	P off
1 段階	5.5	10	10
2 段階	4.5	9	5

$80 \mu\text{m Ry}$	I_p	P on	P off
1 段階	5.5	10	10
2 段階	4.5	9	5
3 段階	3.5	8	4

3.2.2 加工方法

上記の 3.2.1 で作製した試料を X-Y ステージに固定して 2 章の実験同様、加工ヘッドノズルを 5 度傾けた状態で試料上部に固定した。そして X-Y ステージをジグザグに制御して試料表面に面上のレーザ処理を施した(図 3.2 参照)。

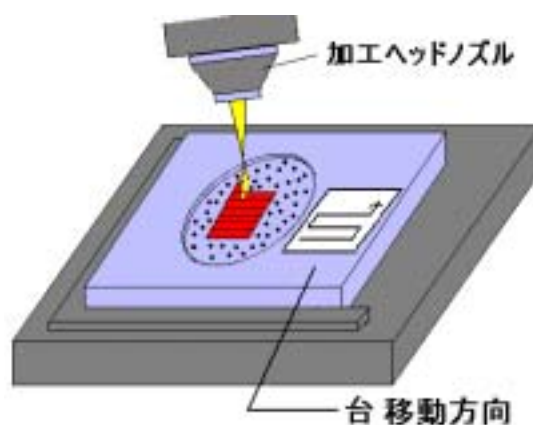


図 3.2 照射方法

3.2.3 レーザ光照射条件

放電面荒さが 約 $60\ \mu\text{m Ry}$ 約 $80\ \mu\text{m Ry}$ の2つの場合で、レーザを照射し表面粗さの改善を図った。レーザ光照射条件は送り速度 $10\ \text{mm/sec}$ と一定とし、発振形態、出力そしてデフォーカス値のみを変化させた。連続発振とパルス発振、2つの発振形態のもとで出力は 140W として、デフォーカス値を連続発振(以下、CW とする。)の場合 $0\ \text{mm}$ から $6\ \text{mm}$ まで、パルス発振 (以下、PW とする。)の場合 $2\ \text{mm}$ から $7\ \text{mm}$ までとした。以上の条件のもとで照射を1回と2回行うことで、さらに2種類のデータを取ることにした。

3.2.4 測定方法

測定に関しては、加工処理後の表面硬度と表面粗さについて行った。表面硬度は、第2章同様に微小硬度計(図 2.11 参照)を使用してビッカース硬度を測定した。また表面粗さは、表面粗さ形状測定器(図 3.4 参照)を使用し、レーザ照射方向に対して垂直方向に測定を行い、5回測定後の平均値を求めた。

形彫放電加工機 VX10 三菱電機社製

最小指令単位	0.1 μm
最小駆動単位	0.1 μm
駆動方式	AC サーボモータ
位置検出方式	ロータリーエンコーダ
電極	25 mm 銅電極
加工液	放電加工油



図 3.3 形彫放電加工機の外観

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 μmR
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 μm



図 3.4 表面粗さ形状測定器の外観

3.3 実験結果および考察

3.3.1 表面粗さ

(1)S50C の実験結果

S50C のデフォーカス値と硬度の関係のグラフを図 3.8、図 3.9 に示す。図 3.8 は元の放電面の粗さが $60\ \mu\text{m Ry}$ のもの、図 3.9 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 $60\ \mu\text{m Ry}$

図 3.8 のグラフは、放電面の最初の Ry が約 $60\ \mu\text{m}$ 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 $2.0\ \text{mm}$ のときに最もよく約 $15.50\ \mu\text{m}$ 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 $2.0\ \text{mm}$ のときに最大で約 $9.2\ \mu\text{m}$ 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 $3.0\ \text{mm}$ のとき最もよく約 $11.32\ \mu\text{m}$ 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約 $6.68\ \mu\text{m}$ まで改善を行うことが出来た。以上のことは図 3.8 から明らかで、 Ry の値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、 $60\ \mu\text{m}$ では $6.68\ \mu\text{m}$ まで改善することが出来た。

図 3.5 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 3.6、3.7 参照) はデフォーカス値が $2\ \text{mm}$ 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えるとも考えられる。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 3.5 放電面



図 3.6 1 回照射後の面



図 3.7 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 $\mu\text{m Ry}$

図 3.9 のグラフは、放電面の最初の Ry が平均で 80 μm である。傾向は放電面荒さが 60 $\mu\text{m Ry}$ の時と同じで、連続発振よりもパルス発振、1回よりも2回レーザー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 $\mu\text{m Ry}$ が 10.00 $\mu\text{m Ry}$ まで改善することが出来た。

しかし放電面荒さ 60 $\mu\text{m Ry}$ のものより全体的に荒くなっている。60 $\mu\text{m Ry}$ のときは、連続発振で一回の照射の場合、最も良くて約 15.48 $\mu\text{m Ry}$ であったものが放電面荒さ 80 $\mu\text{m Ry}$ になると約 19.84 $\mu\text{m Ry}$ 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約 9.17 μm であったものが約 13.26 μm 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 であったものが 15.92 μm まで、二度の照射の場合で 6.68 μm であったものが 10.00 μm まで荒くなったことがわかる。以下に示す表 3.2 は、放電面の荒さが 60 $\mu\text{m Ry}$ と 80 $\mu\text{m Ry}$ 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。

80 $\mu\text{m Ry}$ の放電面は、粗さというより形状と表現した方が適当なぐらい凹凸が激しい。

表 3.2

放電面荒さ	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 $\mu\text{m Ry}$	15.48 $\mu\text{m Ry}$	9.17 $\mu\text{m Ry}$	11.32 $\mu\text{m Ry}$	6.68 $\mu\text{m Ry}$
80 $\mu\text{m Ry}$	19.84 $\mu\text{m Ry}$	13.26 $\mu\text{m Ry}$	15.92 $\mu\text{m Ry}$	10.00 $\mu\text{m Ry}$

(2)SK-5 の実験結果

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 3.10、図 3.11 に示す。図 3.10 は、放電面の荒さが約 60 $\mu\text{m Ry}$ のものであり、図 3.11 は放電面の荒さが約 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 μm まで、80 $\mu\text{m Ry}$ のものが 7.92 μm 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 3.3 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、Ry が S50C と際立った違いがないことがわかる。

表 3.3

放電面荒さ	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 $\mu\text{m Ry}$	14.26 $\mu\text{m Ry}$	8.02 $\mu\text{m Ry}$	11.03 $\mu\text{m Ry}$	6.4 $\mu\text{m Ry}$
80 $\mu\text{m Ry}$	16.86 $\mu\text{m Ry}$	10.16 $\mu\text{m Ry}$	16.08 $\mu\text{m Ry}$	7.92 $\mu\text{m Ry}$

(3)SKD-11 の実験結果

材料 SKD-11 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 3.12、図 3.13 に示す。グラフ図 3.12 は、放電面の荒さが約 60 $\mu\text{m Ry}$ のものであり、図 3.13 は、放電面の荒さが約 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 μm まで、80 $\mu\text{m Ry}$ のものが 6.9 μm 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 4.3 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。

表 3.4

放電面荒さ	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 $\mu\text{m Ry}$	11.12 $\mu\text{m Ry}$	5.46 $\mu\text{m Ry}$	9.24 $\mu\text{m Ry}$	3.74 $\mu\text{m Ry}$
80 $\mu\text{m Ry}$	15.06 $\mu\text{m Ry}$	8.21 $\mu\text{m Ry}$	13.04 $\mu\text{m Ry}$	6.9 $\mu\text{m Ry}$

S50C

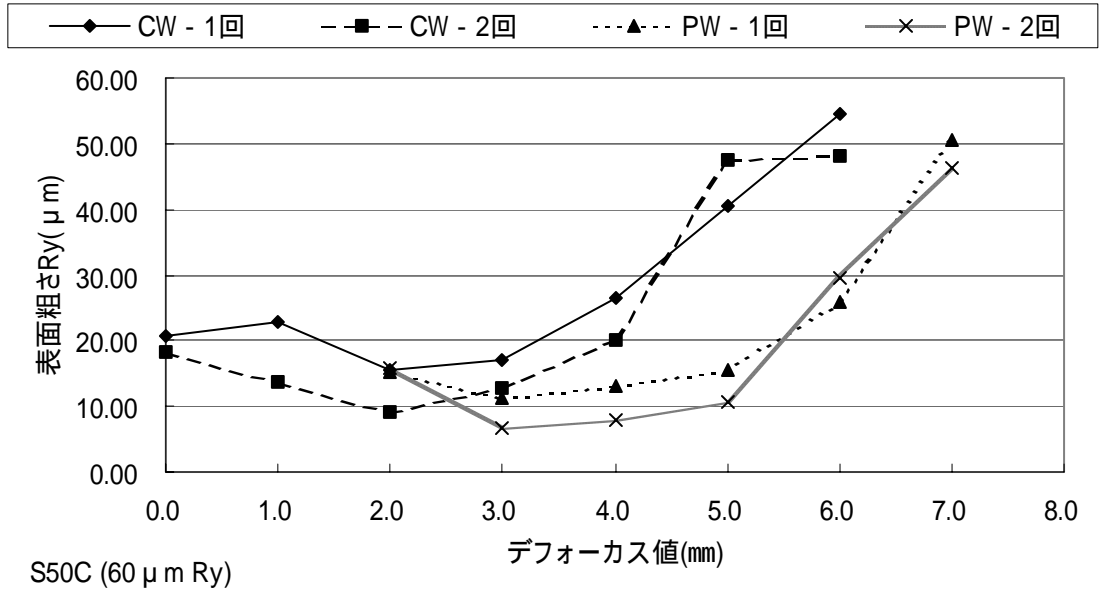


図 3.8 デフォーカス値と表面粗さ 60 μm Ry の関係

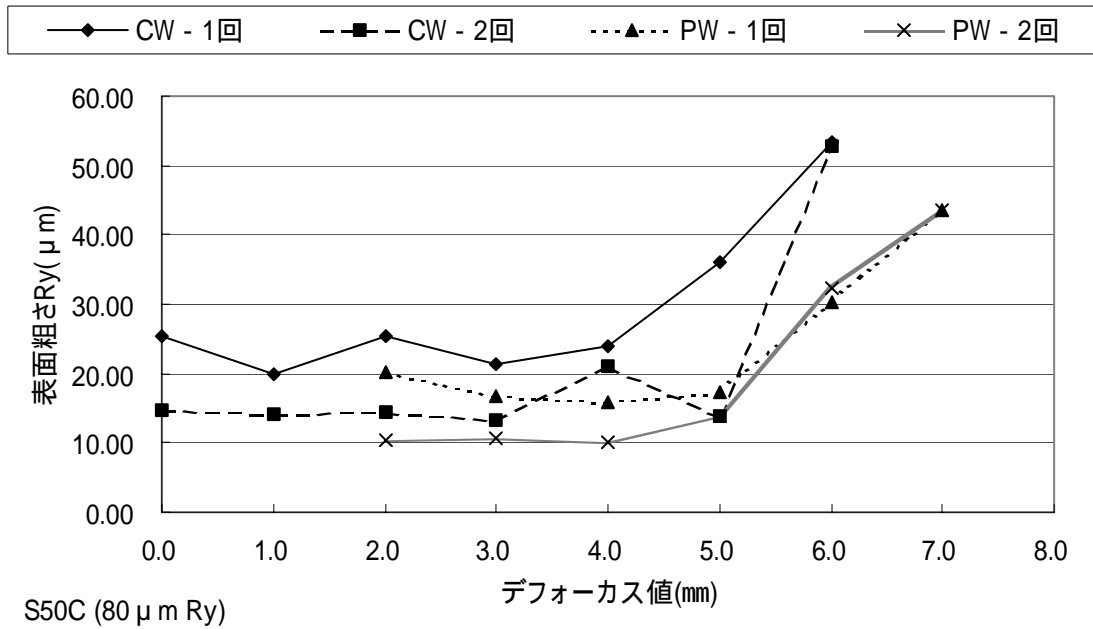


図 3.9 デフォーカス値と表面粗さ 80 μm Ry の関係

SK-5

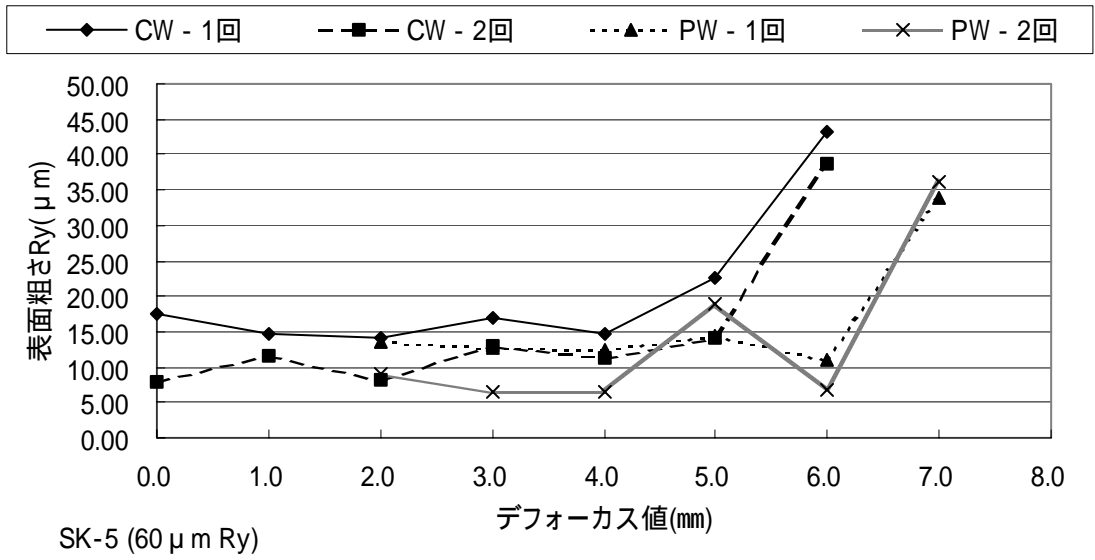


図 3.10 デフォーカス値と表面粗さ 60 μm Ry の関係

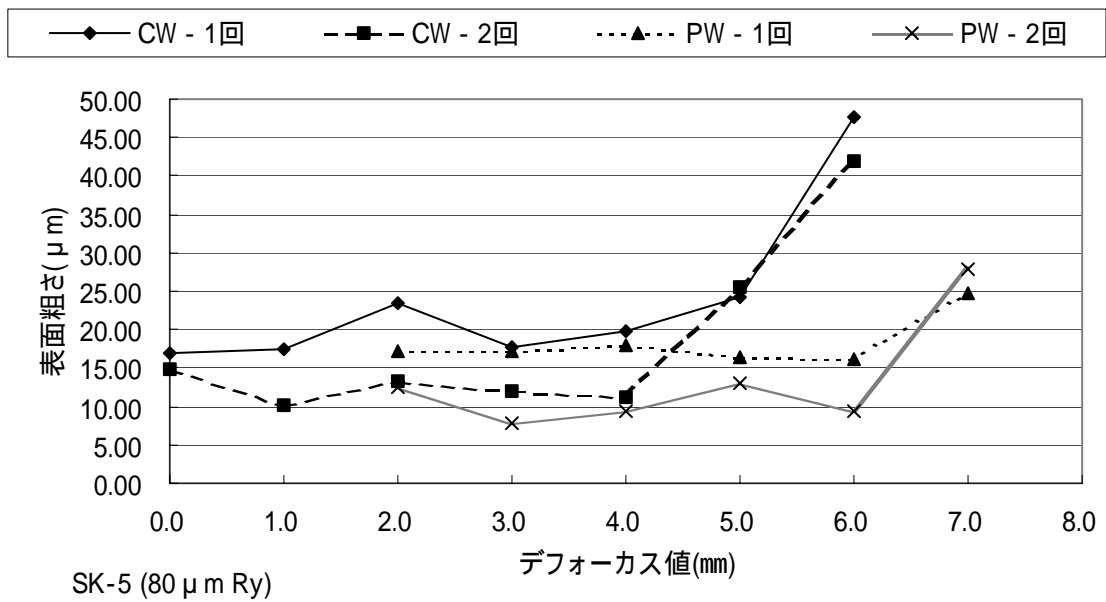


図 3.11 デフォーカス値と表面粗さ 80 μm Ry の関係

SKD-11

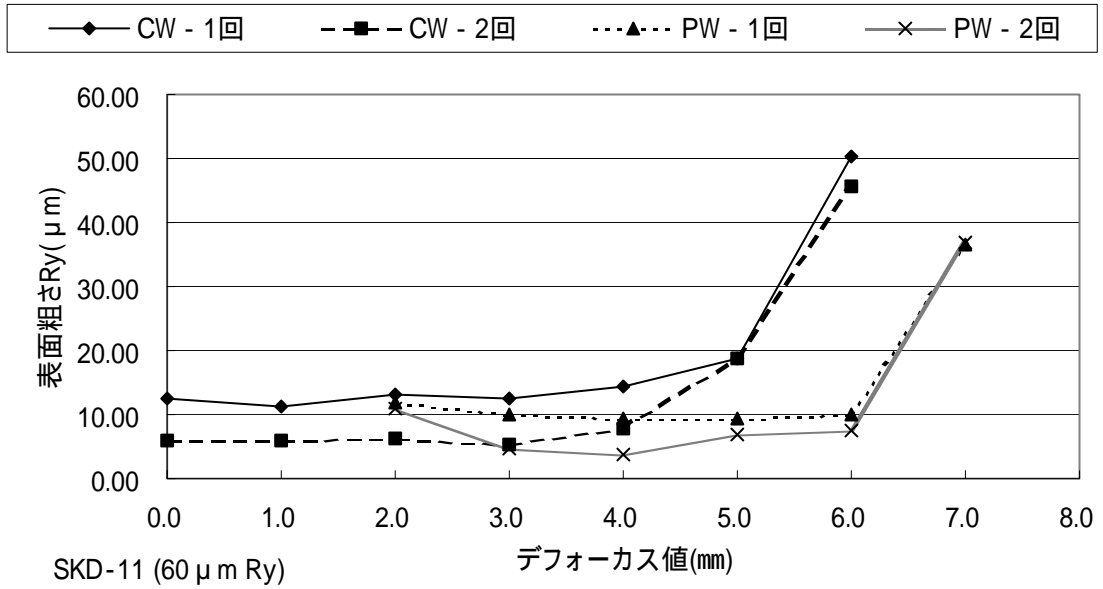


図 3.12 デフォーカス値と表面粗さ 60 μm Ry の関係

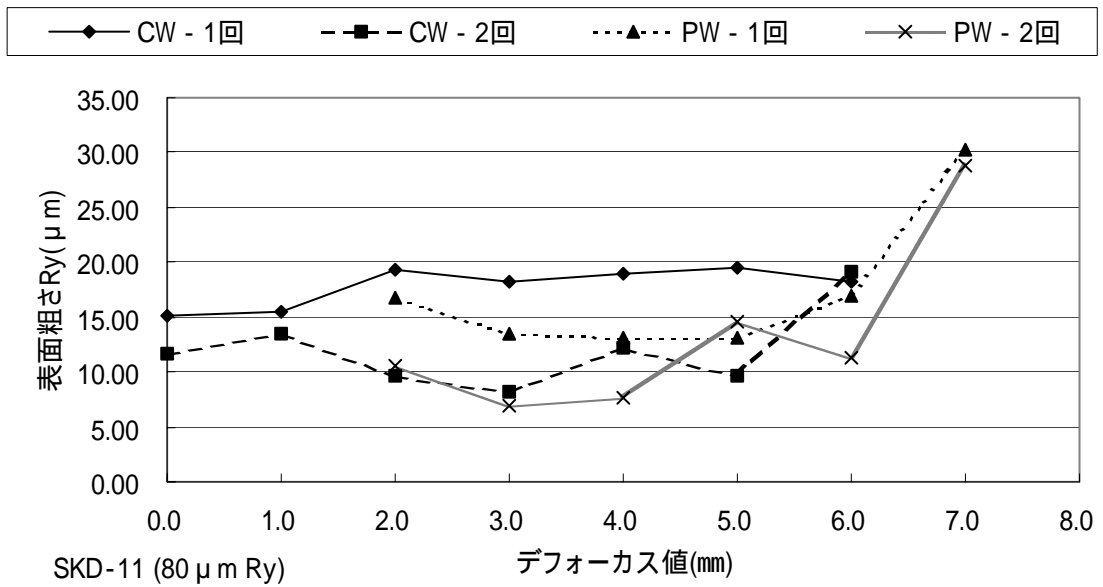


図 3.13 デフォーカス値と表面粗さ 80 μm Ry の関係

4.3.2 表面硬度

(1) S50C について

デフォーカス値と硬度の関係をグラフでしめす。図 3.14 は表面粗さが $60\ \mu\text{m Ry}$ のとき、図 3.15 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。第 2 章では、S50C の溶融部では(組織の微細化) が起こり硬化が進んだ。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 の時に大きな硬化現象が起きている。1 番小さな値で Hv380 ぐらいである。S50C 自体の硬度が約 Hv293 であるので、処理前の硬度付近まで下がってきている。これはマルテンサイトの焼き戻しによるものだと考えられる。上記したように溶融部ではマルテンサイト化がおこっているが、今回はレーザ光のオーバーラップ値を 0.5 mm と設定しているため照射部に繰り返しレーザが照射される。このように照射部が重なることで焼き戻しがおこっていると考えられる。

(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 3.16 は表面粗さが $60\ \mu\text{m Ry}$ のとき、図 3.17 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。一部の条件では焼き戻しがおこり材料自体の硬度まで大幅な軟化も見られるが、これもレーザの重ね合わせによるものである。このように、SK-5 には硬度変化に関して S50C と同じ特徴が出ている。

また、レーザ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 3.18 は表面粗さが $60\ \mu\text{m Ry}$ のとき、図 3.19 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 と少し異なる点をもつ。S50C、SK-5 では各デフォーカス値における硬度の変化が第 2 章の実験で得た硬度変化とは異なるものであった。SKD-11 は溶融部で約 Hv(100)400 で、約 Hv(100)480 とほぼ同じ硬度で変化が見られず、第 3 章の硬度変化と同様の傾向がみられた。

また SK-5 同様に磁性を帯びていることも確認された。

S50C

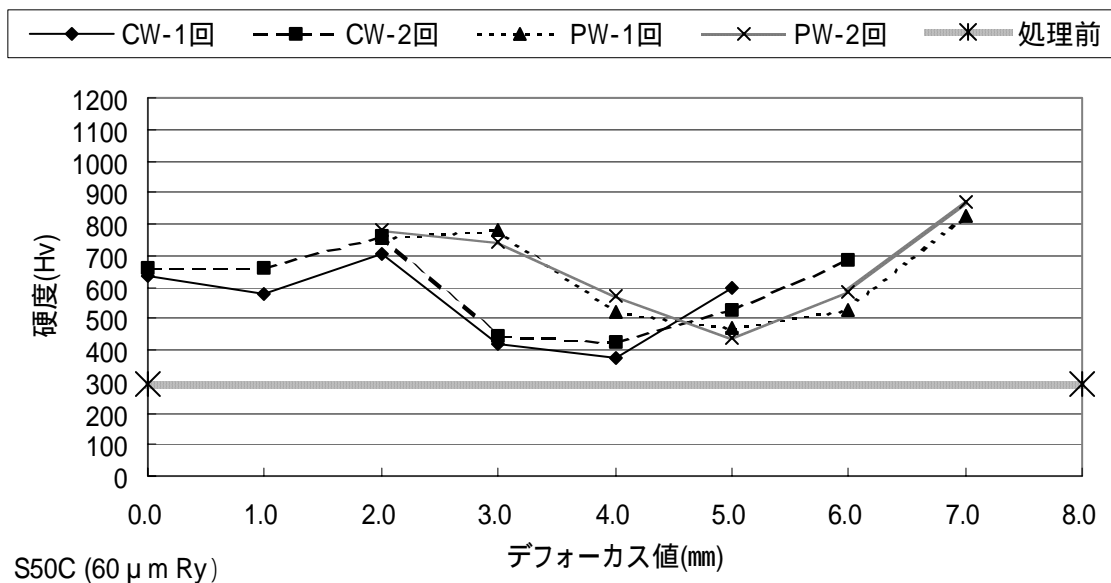


図 3.14 S50C : 60 μm Ry のデフォーカス値と硬度の関係

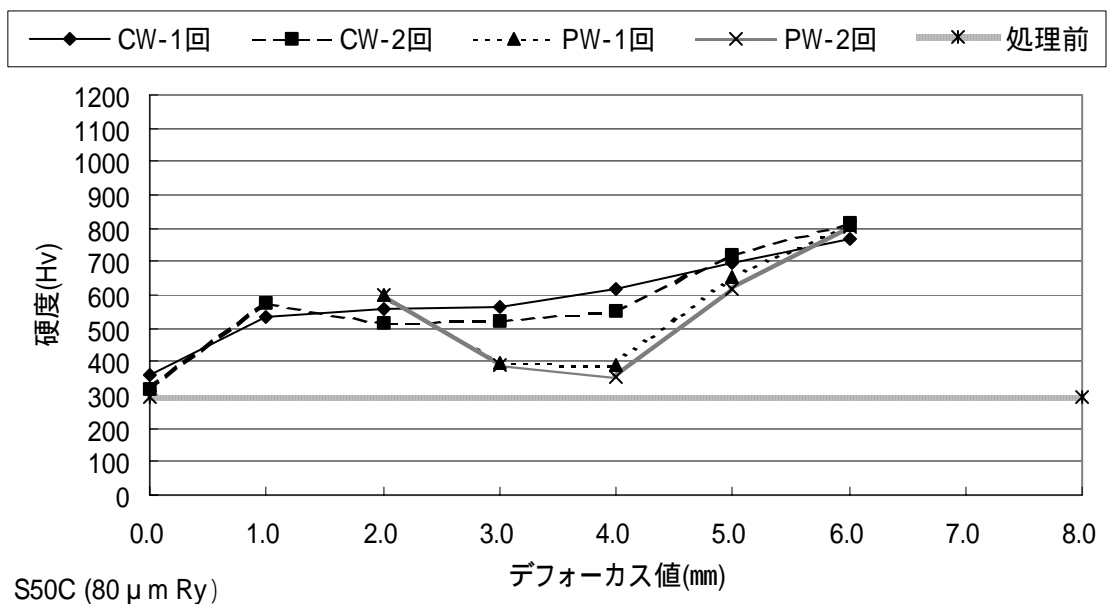


図 3.15 S50C : 80 μm Ry のデフォーカス値と硬度の関係

SK-5

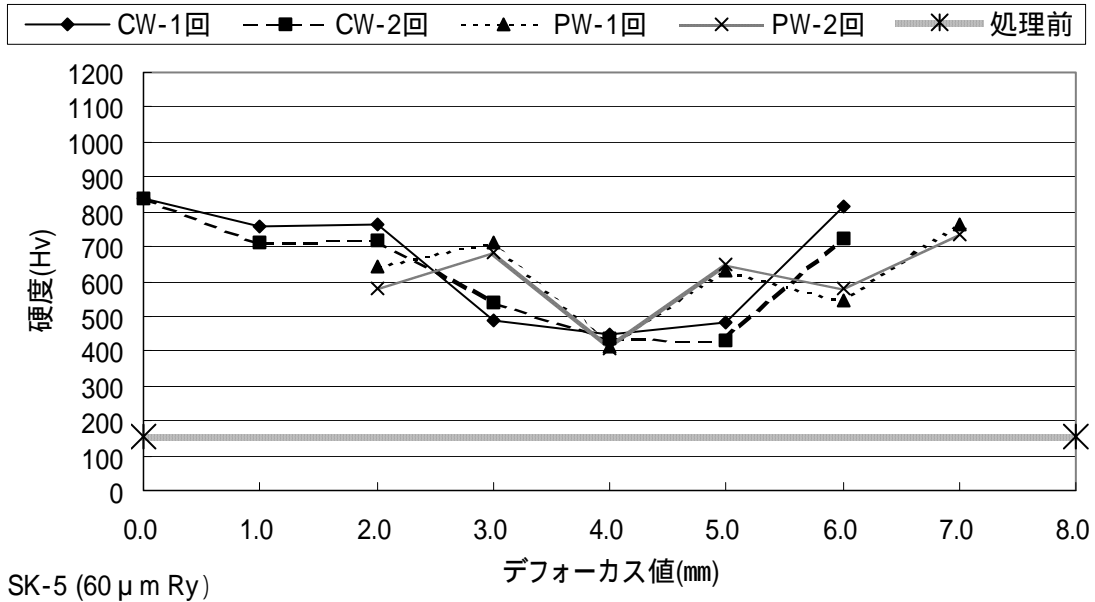


図 3.16 SK-5 : 60 μm Ry デフォーカス値と硬度の関係

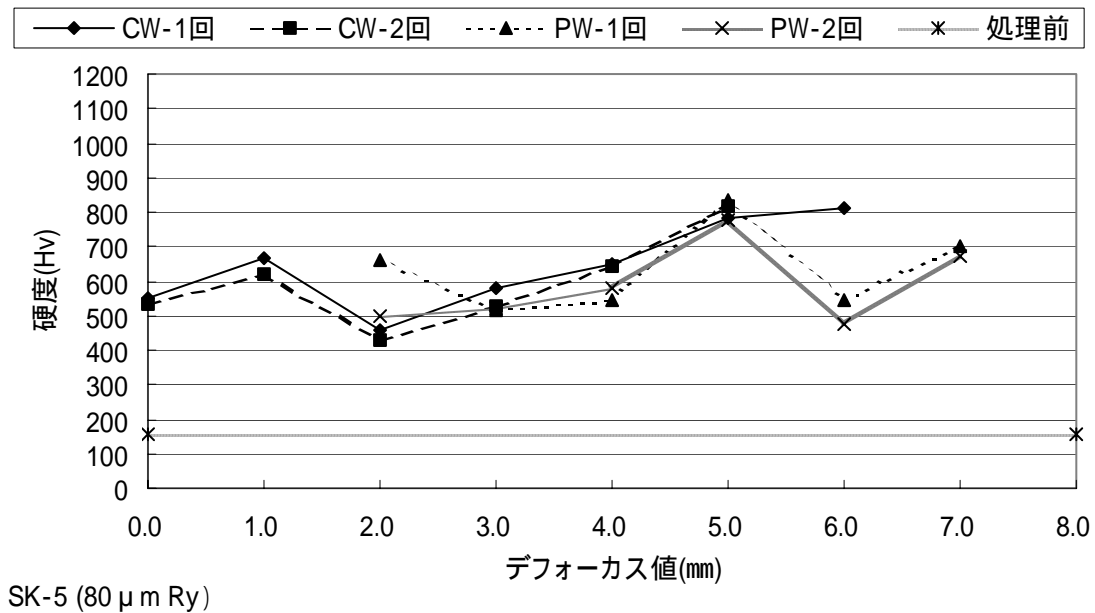


図 3.17 SK-5 : 80 μm Ry デフォーカス値と硬度の関係

SKD-11

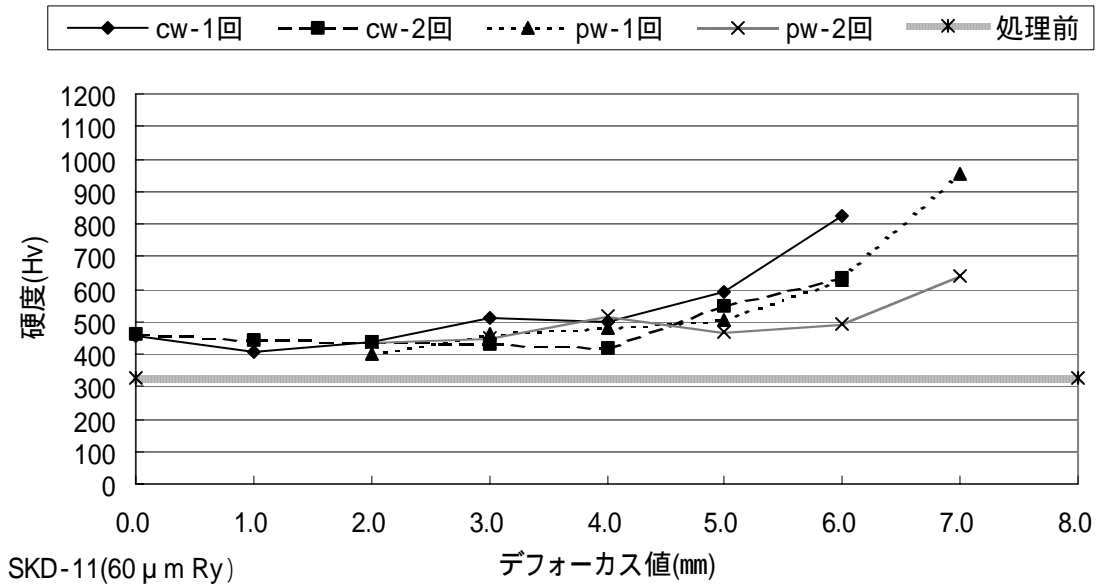


図 3.18 SKD-11 : 60 μm Ry デフォーカス値と硬度の関係

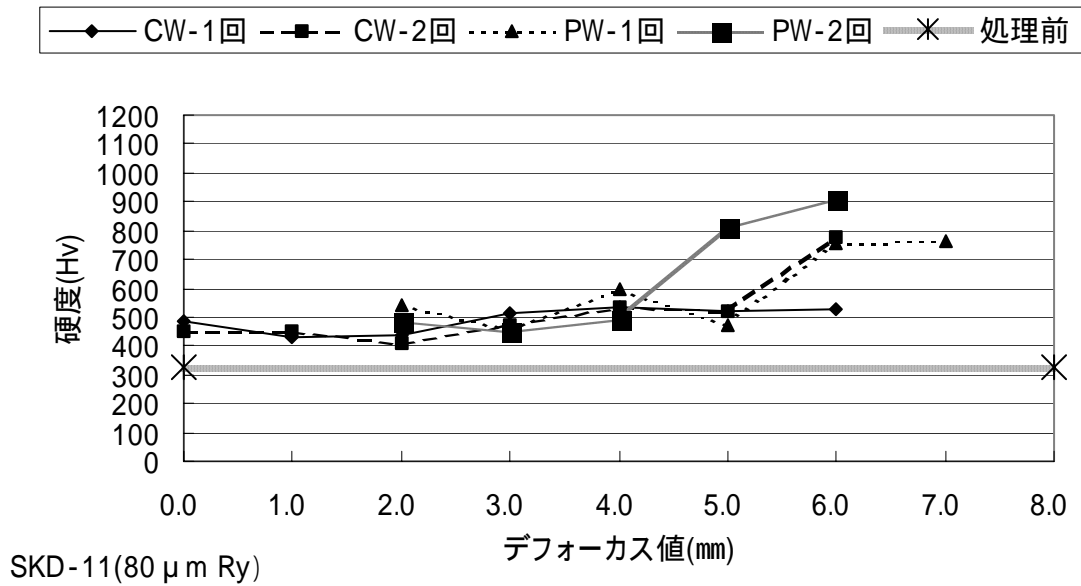


図 3.19 SKD-11 : 80 μm Ry デフォーカス値と硬度の関係

第4章 結論

レーザ表面改質において、金属表面への焼入れ特性に関する各種加工パラメータの影響について以下の結果が明確になった。

炭素を含有する3種類の材料 S50C、SK-5 および SKD-11 について、レーザ光による硬化が認められた。実験の結果、S50C、SK-5 はレーザ光の照射によって形成された溶融部及び熱影響部については、ほぼ一定の硬度をえることができた。また SKD-11 については、材料中の残留オーステナイト組織により、溶融部よりも残留オーステナイトの少ない熱影響部の方が高い硬度を得られることがわかった。レーザ出力を高くすることで、この度の実験で設定した送り速度よりもさらに早くすることができ、改質処理時間をさらに短くすることが出来るであろう。

つづいてレーザ加工と形彫放電加工の複合加工実験について以下に示す。

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る。炭素鋼の表面粗さの改善に関してはレーザが有効であるといえる。しかし、使用方法によっては粗さ改善後の硬度が関係してくる。

表面粗さの改善に関しては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 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。しかし、この時の硬度に関してはその（現象、理論）の解明には至らなかった。これについては、更なる追求が必要である。しかし、今回は硬度が上がる条件や、もとの硬度まで下がる条件が確認されたので、状況に応じて粗さを改善し、必要な硬度値も選択できる可能性があると思われる。

つぎに形彫放電加工機との時間的な比較をしたところ、形彫り放電加工のみで仕上げ加工 10 μm まで行うのに約 15 分かかる。しかし同じ 10 μm 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。加工時間だけを見れば 15 分から 4 分へと大幅な改善が認められた。

最後に、意外な結果として、今回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。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 10⁶W/s 程度は容易に達成できるとされている。しかし、未だアモルファス組織であると断言するには不十分であるといえる。

今後、レーザ光の照射によりアモルファス組織の生成が行われているのかどうか、更なる研究が必要であり課題となる。

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