

レーザー加工機による 微細加工法

微細穴加工特性

指導教員 小林和彦教授

知能機械システム工学科

1010211 松井 浩

目次

| | |
|---------------|----|
| 第1章 | |
| 緒言 | 2 |
| 第2章 | |
| 従来技術 | 4 |
| 第3章 | |
| 調査実験 | 6 |
| 3.1 実験目的 | 6 |
| 3.2 実験機器 | 6 |
| 3.3 実験方法 | 10 |
| 3.4 実験結果、及び考察 | 10 |
| 第4章 | |
| レーザー加工特性実験 | 12 |
| 4.1 実験目的 | 12 |
| 4.2 実験機器 | 12 |
| 4.3 材料説明 | 15 |
| 4.4 実験方法 | 16 |
| 4.5 実験結果、及び考察 | 17 |
| 第5章 | |
| 結言 | 29 |
| 謝辞 | 30 |
| 参考文献 | 30 |
| 付録 | 31 |

第1章 緒言

現在機械加工の中で最も大きな比率を占める穴加工は、ドリルによる加工が主流で、最近ではマシニングセンタのような NC 工作機械が普及している。マシニングセンタはその名称が示すとおり、穴加工をはじめとして、フライス切削による平面や曲面加工、溝加工などの広範囲な加工を行う能力を有する。

しかしこれらの方法は、機械が材料に接触して加工を行うため、刃物が摩耗してしまう。また材料に直接機械的力が伝わるため、材料が変形することがある。以上のことから、新しい穴加工法として様々な研究が行われている。この新しい加工方法の中で、レーザー加工機を用いた加工方法がある。本研究室に設置されている YAG レーザ加工機は、レーザーの励起に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。しかし一般に、励起のために入力される電気エネルギーからレーザーエネルギーへの変換効率は 1%程度と非常に低く、大部分のエネルギーを熱として消費している。YAG レーザではパルス的な高出力を発振しやすく、特に Q スイッチパルス（数 kW のピーク出力を有するノーマルパルスとレーザーの蓄積エネルギーを一旦ためておいて一気に出力させる操作）では数百 kW の高ピーク出力も容易に得られる（ただしパルス幅が短いので平均出力は小さい）。しかし、連続発振では現在のところ 1.5kW 程度が最高である。

YAG レーザ光は波長が 1.06 μm (CO₂ レーザの約 1/10) であり、可視光の光学材料を使用できる場合が多く、ビームの搬送には安価な光ファイバが使用できることから非常に柔軟な加工システムを構築できるといった長所がある。本研究で使用するレーザー加工機は、レーザー光の伝送に光ファイバを用いた加工機を使用する（図 3.2～図 3.4、および表 3.2、表 3.3 参照）。しかしこのファイバ光学系は、レーザー光をレーザー発振機から加工ヘッドまで伝送する間に、レーザー光がある程度減衰する。したがって発振機のモニタに表示される出力値は、発振機内部で検出されるため、発振機のモニタに表示される出力値と加工ヘッド出口の出力値に誤差が生じる。

そこで、加工物にどれだけのエネルギーが伝わったのかを正確に調べるため、各電流値での加工ヘッド出口の出力値を測定した。

次にレーザー加工の長所と短所を、箇条書きにしてわかりやすく説明すると、長所としてはまず、

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。

レーザー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、材料の合成など様々な加工を行える。

レーザー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出来る。

他の加工法、例えば機械加工との複合加工（レーザ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。

透明体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。

つづいて短所については、

溶接を伴う加工では、加工物中に熱影響層が残留する。

装置のコストが高い。

また、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要である。

このようにレーザ加工は、加工要因が多いため加工条件の一般化が非常に困難だが、加工条件を見いだすことが出来れば、加工精度は飛躍的に向上する。

そのような理由から、本研究はレーザ加工における照射するエネルギーと加工穴の大きさおよび加工精度との関係を求めるために、一般的に機械材料として用いられる SUS304 をレーザ加工機によって加工する基礎研究を行った。

第2章 従来技術

従来の穴加工は、ドリルやボーリング工具などを使用するものが多かった。しかし最近になり NC 工作機械が普及し、その中でマシニングセンタは中心的な存在となっている。図 2-2 に従来の穴あけ加工方式を示す。(a)は、ドリルなどの切削工具の回転により加工物を送り加工する方式。(b)は、加工物の回転により切削工具を送り、加工する方式。(c)は、エンドミルとマシニングセンタの組み合わせで、工具を回転させて円弧送りにより加工する方式(コンタリング加工)。(d)は、放電加工による方法であり、パイプ形状の電極を回転すると同時に、パイプ内径より加工液を噴出しながら高速穴あけを行う方式。(e)も放電加工であり、ワイヤ電極により穴加工を行う方式である(図 2.1 参照)。

マシニングセンタは、加工物の 2 面以上の面に各種の加工を自動的に実施できる機能を有する。すなわち、工具の自動交換機能や、加工物の加工面を自動的に割り出せる機能などを備えている。今や、機械加工工場における自動化、無人化などには不可欠な機械であ

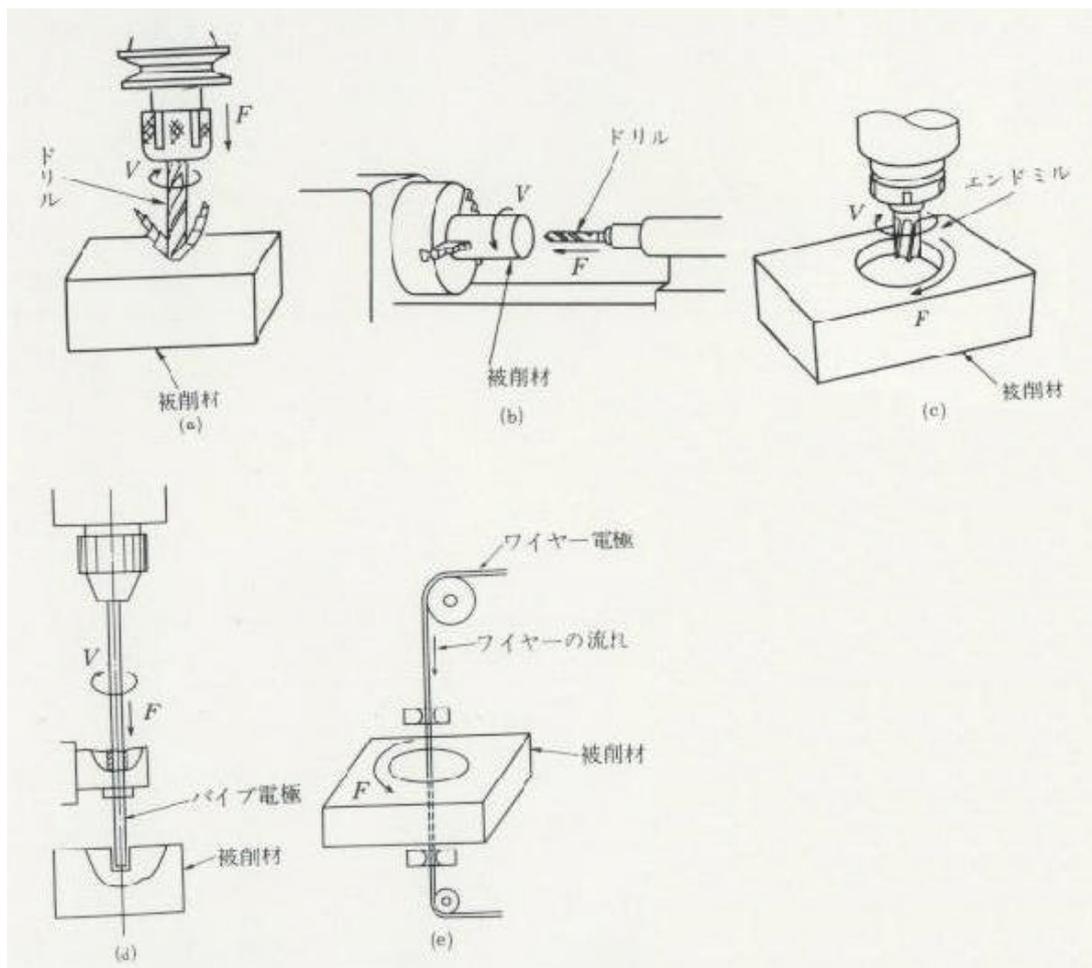


図 2.1 各種穴あけ加工方式

り、FNS（フレキシブル生産システム）化や、FA（ファクトリオートメーション）化するうえで主役ともいえる存在である。

比較的大径の穴加工では、マシニングセンタの有する、コンタリング機能を利用したエンドミルによる穴加工も行われるようになった。コンタリング切削（エンドミルを回転させながら、円弧に沿った送りで加工を行う加工法）の利点は、エンドミル径に関係なく、任意の穴径が高効率加工できること、さらに、交差のある比較的高精度な穴の加工も可能である。

仕上げ加工用工具では、リーマ、ボーリング工具、および砥石工具などが適用されている。深穴の加工には、ガンドリル、深穴用ドリルが適用されている。仕上げよう工具としては、ガンリーマやボーリング工具が使用されている。また、穴の直径が 5mm 程度以下の微小径穴には、マイクロドリルが適用される。

特殊な加工法として放電加工機による加工法がある。放電現象を利用した金属加工技術は、特に金型加工分野で広く適用している。

放電加工は、一般的に切削加工と比較して加工速度は低いが、切削加工が困難な焼入れ後の高硬度鋼や、超硬合金などの加工に便利である。

現在使用されている放電加工機は、穴あけ加工用に NC 操作細穴放電加工機、微細穴放電加工機が使用され、大径穴の加工にはワイヤ放電加工機が使用されている。細穴放電加工機や微細穴放電加工機は、型彫放電加工機が加工速度の遅いこと、深穴になると加工屑の排出が悪くなり、アークして加工が進行しなくなるなどの欠点から、開発されたものである(図 2.2 参照)。

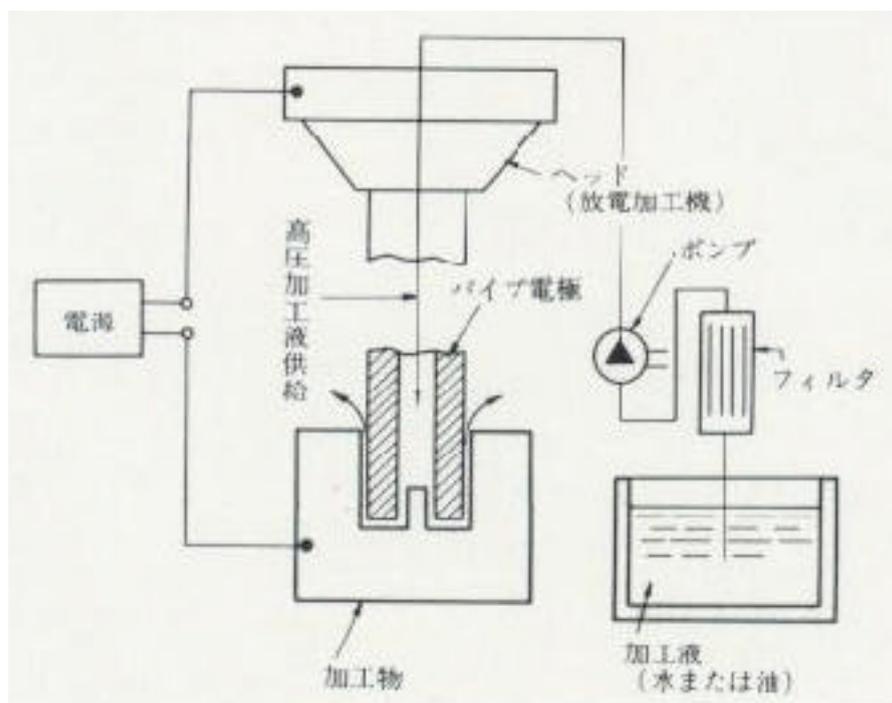


図 2.2 微細穴放電加工機の構成図

第3章 調査実験

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、この電流値によって決まる。

本実験で使用するレーザ加工機の加工システムは、レーザ光の伝達には光ファイバを用いた光学系の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機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。したがって発振機のモニタに表示される出力値は、発振機内部で検出されるため、発振機のモニタに表示される出力値と加工ヘッド出口の出力値に誤差が生じる。

そこで、加工物にどれだけのエネルギーが伝わったのかを正確に調べるため、各電流値での加工ヘッド出口の出力値を測定する。

3.2 実験機器

測定に関しては、MACKEN INSTRUMENTS 製 P500Y パワープローブを使用する(図 3.1、表 3.1 参照)。加工機は三菱 YAG レーザ加工機を使用する(図 3.3、図 3.4 と表 3.2、表 3.3 を参照)。

このパワープローブは、測定面(黒色の先端部分)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 3.1 パワープローブの外観

表 3.1 パワープローブの仕様

| Item | Unit | |
|----------------|-------|-------------|
| Model | | P500Y |
| Power Range | Watts | 0-500 |
| Exposure Time | Sec | 20 |
| Watts/Division | | 5 |
| Absorbing Head | | 5.08cm dia. |
| Overall Length | cm | 22 |
| Weight | gm | 183 |
| Accuracy | | ± 5 |
| Repeatability | | ± 1.5% |

また YAG レーザの発振原理について、まず 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も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 3.2 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。

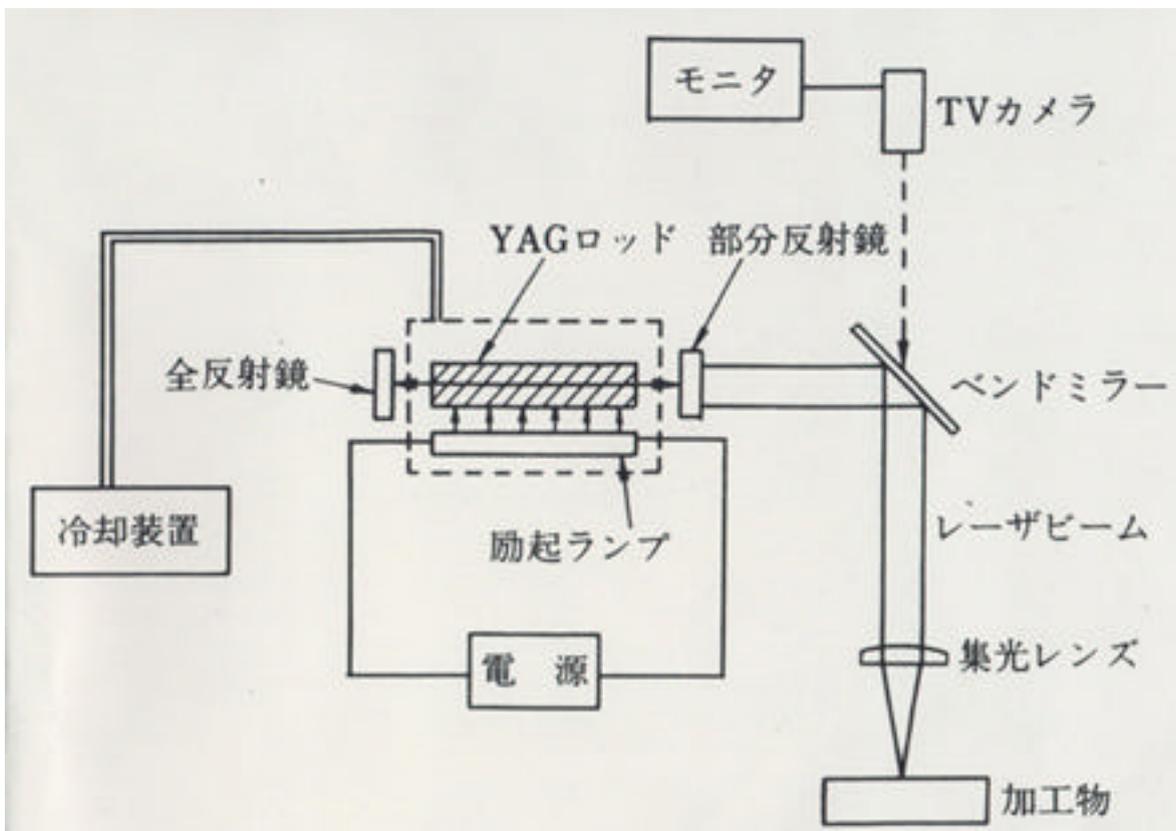


図 3.2 YAG レーザ加工機の構成図

表3.2 YAG レーザ発振器の仕様

| 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) | | 約600 | |



図 3.3 YAG レーザ発振器の外観

表3.3 6軸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 アームロボットの外観

3.3 実験方法



図 3.5 測定方法

- (1)レーザー発振機の電源を投入する。
- (2)加工ヘッドノズル出口からレーザー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 3.5 参照)。
- (3)レーザーを 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中しないように少し受光部全体を円状に回しながら測定を行う。
- (4)20 秒間照射が終わったら速やかにプローブを光路から抜き取る。
- (5)照射後メータの指針は、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。
- (6)読み取った値に、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、平均を取る。

3.4 実験結果および考察

最初、設定電流 27.0A から電流の最高設定値 41.0A まで 1.0A ごとにレーザー光出力を測定したところ、28.0A と 29.0A の値に 50W 程の大きな差が生じたため、新たに 28.0A から 0.1A ごとに測定を行った。3 回行った測定の平均値の結果を表 3.4 に表し、グラフ化したものを図 3.6 に表した。このグラフは、横軸に設定電流(A)、縦軸にレーザー出力(W)を取ったものである。

結果としてレーザー光は、設定電流が 28.0A より下の値では出力されず、レーザー光を出力させるためには、電流を 28.0A 以上与える必要があることがわかった。

また当然の結果ではあるが、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。

この測定した値を第 4 章の加工特性実験で用い、材料に与えた総エネルギーを求める。

表3.4 加工ヘッド先端の出力測定値の結果

| 電流(A) | 測定値() | | | | 計算値(W) |
|-------|--------|-----|-----|--------|--------|
| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 平均値 | 平均値 |
| 27.0 | 測定不能 | | | | |
| 28.0 | 11 | 19 | 20 | 16.67 | 16.52 |
| 28.1 | 15 | 20 | 20 | 18.33 | 18.17 |
| 28.2 | 22 | 24 | 24 | 23.33 | 23.12 |
| 28.3 | 30 | 32 | 31 | 31.00 | 30.72 |
| 28.4 | 34 | 31 | 35 | 33.33 | 33.03 |
| 28.5 | 40 | 45 | 44 | 43.00 | 42.61 |
| 28.6 | 42 | 42 | 46 | 43.33 | 42.94 |
| 28.7 | 54 | 55 | 48 | 52.33 | 51.86 |
| 28.8 | 55 | 53 | 54 | 54.00 | 53.51 |
| 28.9 | 55 | 58 | 55 | 56.00 | 55.50 |
| 29.0 | 61 | 66 | 62 | 63.00 | 62.43 |
| 30.0 | 75 | 74 | 75 | 74.67 | 73.99 |
| 31.0 | 105 | 96 | 100 | 100.33 | 99.43 |
| 32.0 | 109 | 105 | 110 | 108.00 | 107.03 |
| 33.0 | 111 | 114 | 123 | 116.00 | 114.96 |
| 34.0 | 120 | 120 | 125 | 121.67 | 120.57 |
| 35.0 | 134 | 132 | 135 | 133.67 | 132.46 |
| 36.0 | 134 | 135 | 136 | 135.00 | 133.79 |
| 37.0 | 141 | 146 | 147 | 144.67 | 143.36 |
| 38.0 | 151 | 150 | 155 | 152.00 | 150.63 |
| 39.0 | 167 | 155 | 150 | 157.33 | 155.92 |
| 40.0 | 179 | 180 | 178 | 179.00 | 177.39 |
| 41.0 | 186 | 184 | 188 | 186.00 | 184.33 |

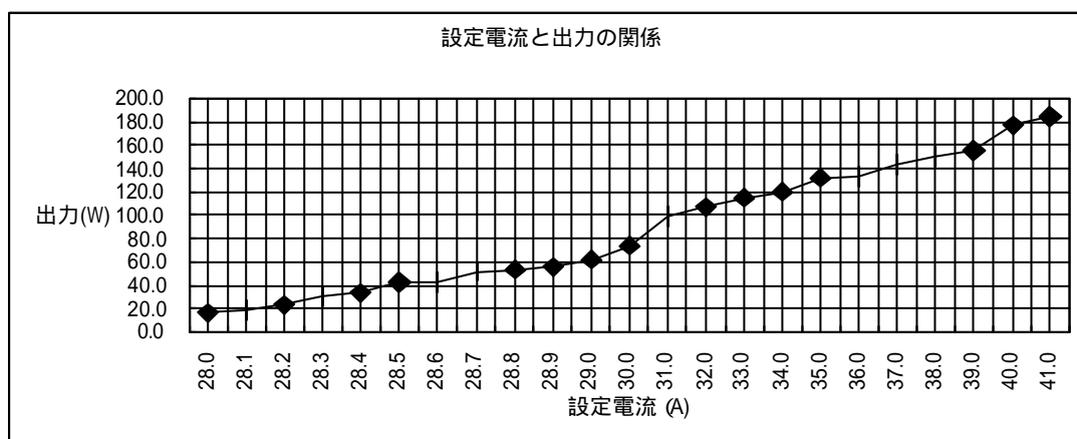


図 3.6 設定電流と出力の関係

第4章 加工特性実験

4.1 実験目的

YAG レーザ光による加工は、平行性が良くレンズによって焦点に集めることができるため、高パワー密度が得られることや、非接触で加工物に機械的力を及ぼさない、平行性が良いことから遠方まで伝送できるといったさまざまな利点がある。このような利点の中で、特に高パワー密度が得られるということから YAG レーザは、穴加工に適している。他のレーザ、例えば炭酸ガスレーザは、ほとんどの金属材料で反射されてしまう。

レーザ加工機を用いて穴加工を行うことで、これらの利点を活用し穴加工技術の向上をはかるため、YAG レーザ加工機によるレーザ加工の特性を調べることを目的とする。

4.2 実験機器

実験に使用する装置は、加工機に MITSUBISHI YAG レーザ加工機を使用する。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によってアームロボット先端に取り付けた加工ヘッドに伝送するファイバ加工光学系のシステムを使用する。

つづいて測定器については、ミットヨ製測定顕微鏡 TF-510F (図 4.1、表 4.1 参照) と METTLER TOLEDO 社製 AG 天秤 (図 4.2、表 4.2 参照) を使用した。

表 4.1 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 | 72.5mm |
| | 実視野 | 8 |
| | 開口数 | 0.07 |
| | 焦点深度 | 0.056mm |
| | 倍率精度 | ±0.1% |
| 接眼レンズ | 倍率 | 10× |
| | 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フィルタ内蔵 |
| | 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蔵 |
| | 輝度 | 無段階調光式 |
| 消費電力 | 最大200VA | |



図 4.1 測定顕微鏡の外観

図 4.2 AG 天秤の仕様

| 項目 | 仕様 |
|----------------|---------------|
| 読取限度 | 0.1mg |
| 最大秤量範囲 | 210g |
| 風袋差引範囲 | 0 ~ 210g |
| 再現性 | 0.1mg |
| 直線性 | ± 0.2mg |
| 校正分銅(内蔵) | 200g |
| 対振動アダプタ | 設定: 3段階 |
| ディスプレイ | LCD(液晶表示) |
| 秤量皿 | 85mm |
| 天秤寸法(幅/高さ/奥行き) | 205/330/310mm |
| 質量 | 4.9kg |
| 周囲許容温度 | 5 ~ 40 |
| 最高相対湿度 | 30 にて相対湿度80% |



図 4.2 AG 天秤の外観

4.3 加工材料

加工に使用する材料は、50mm×50mm の板厚 0.1mm、1.0mm、2.0mm ステンレス鋼 SUS304 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 18Cr-8Ni の 18-8 ステンレス鋼に代表される Ni-Cr-Fe 三元合金で Mo (モリブデン) が添加される鋼もある。

SUS304 の熱的な性質については、表 4.3 に示す。

オーステナイト系のステンレス鋼は、他のステンレス鋼に比べ耐食性に優れているので、化学工業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。

表 4.3 SUS304 の性質

| 鋼種 | 密度 (kg/m ³) | 比熱 KJ/kg·K | 熱伝導率 (W/m·K) | 熱膨張係数 (×10 ⁻⁶) |
|--------|-------------------------|------------|--------------|----------------------------|
| SUS304 | 7930 | 0.50 | 16.3 | 17.3 |

4.4 実験方法

材料をワイヤ放電加工機で切れ込みを入れた加工台に固定する。この切れ込みは、レーザ光が材料を貫通した際に、貫通した光を分散させて材料以外を加工しないようにするために行う。またワイヤ放電加工で加工することにより精密な加工が行え、限りなく平面に近い状態にする。このようにして材料を固定して、上部から垂直にレーザを照射する（図 4.3 参照）。しかし加工ヘッドがアームロボット先端に取り付けているので、ノズル先端が 3 軸方向に移動可能なため、材料とノズル先端を垂直にするために“芯だしプログラム”を使用する。これは、加工物を黒いアクリル板にして上部 2-3 ミリからシングルパルスを照射する。これによって加工痕が、加工ガス噴射痕の中心にくるまで繰り返し垂直度を求める（図 4.4 参照）。

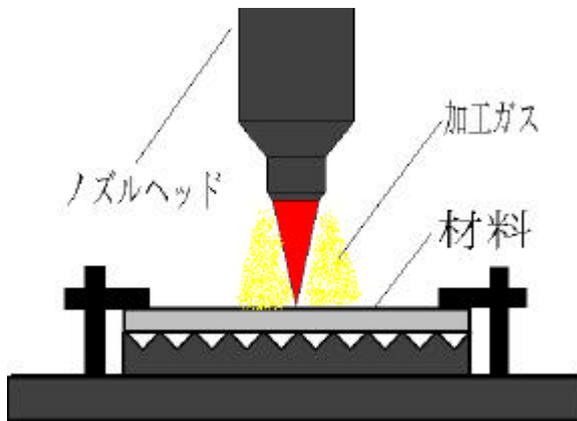


図 4.3 加工方法

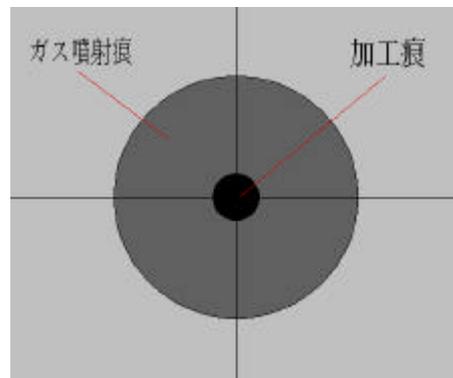


図 4.4 垂直度の求め方

つづいて測定する項目については、加工痕の穴径、加工痕の真円度、加工痕断面の形状、除去量を測定する。測定方法については、加工痕を楕円として近似し、測定顕微鏡により楕円の長径及び短径を測定して、それぞれの長さの平均をとり穴径を測定する（図 4.5 参照）。加工痕の真円度については、測定顕微鏡で調べた長径、及び短径を用いてグラフ化して調べる。加工痕断面についても、材料表裏の穴径を測定顕微鏡により測定し、材料表裏の穴径の差により調べる。

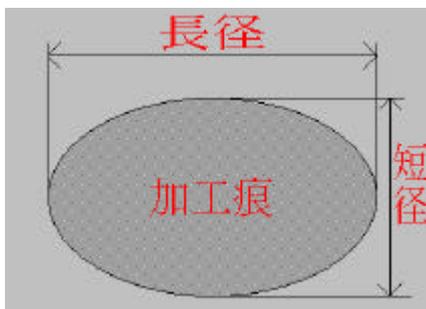


図 4.5 測定方法

また、材料の除去量の測定に AG 天秤を用い、加工前後の質量を測定して変化量を調べる。除去量については、10 回加工を行って測定し、10 回分の平均をとる。

4.5 実験結果、及び考察

加工痕の穴径の結果

まず板厚 0.1mm の結果について、加工条件として設定電流 28.1A~29.0A、加工ガスを酸素として、材料と加工ヘッド間の高さ、パルス幅をそれぞれ変化させて加工を行った。これらの結果をグラフ（横軸に材料に与えた総エネルギー、縦軸に加工痕の穴径を取り、パルス幅の変化を 2 つの項目に分けてグラフ化したもの）に表したものを図 4.8 ~ 図 4.10 に示す。

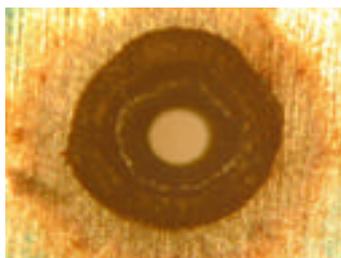


図 4.6 加工痕写真



図 4.7 加工痕写真

当然のように出力エネルギーを大きくしていくと、穴径は大きくなると予想していた。しかし加工を行った結果、エネルギーに比例して穴径が大きくなり、出力を大きくしたにもかかわらず穴径が小さくなる部分があった。

これは板厚 0.1mm が、非常に薄く、除去する部分が少ないため、レーザ光を照射した部分の周囲を余分に加工しない場合(図 4.6 参照)と加工する場合(図 4.7 参照)があり、加工が安定しなかった。続いて材料と加工ヘッド間の高さを変化させたときの違いについて、高さ 3.5mm と 4.5mm の場合は加工が不安定だったものの、高さ 4.0mm の場合は比較的予想していた結果となった。

また材料と加工ヘッド間の高さを変えた 3 つのグラフに共通して、材料に与える総エネルギーが一定でも、設定電流を大きくしてパルス幅を短くした方が、エネルギー効率が良いことがわかった。

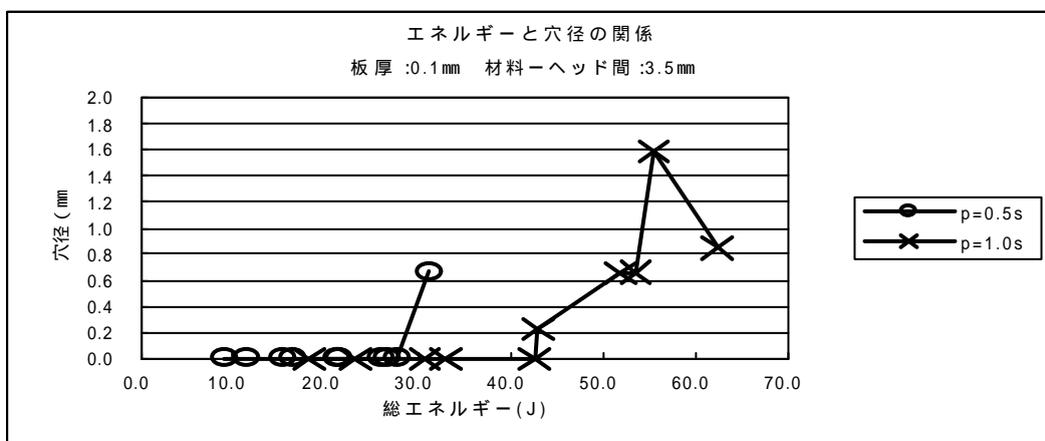


図 4.8 板厚0.1mm のエネルギーと穴径の関係

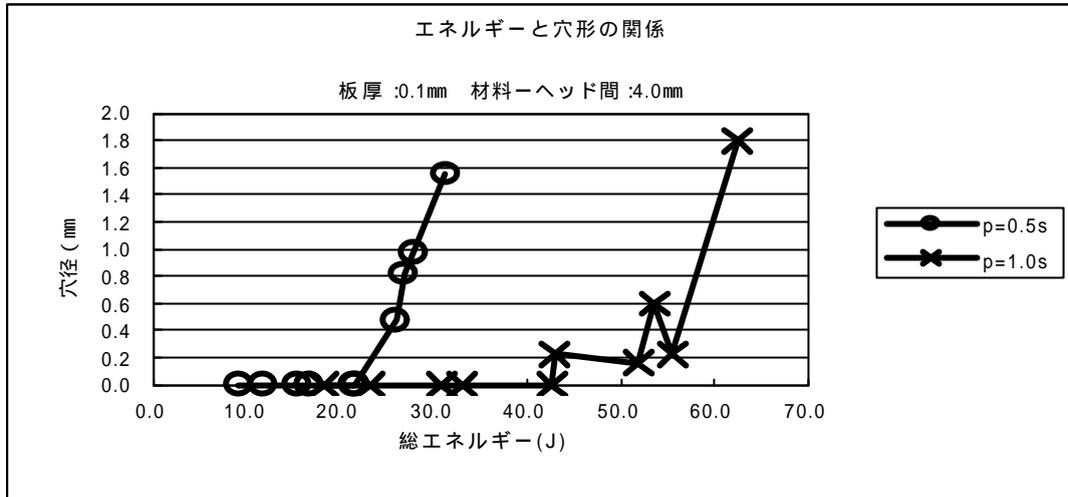


図 4.9 板厚0.1mm のエネルギーと穴径の関係

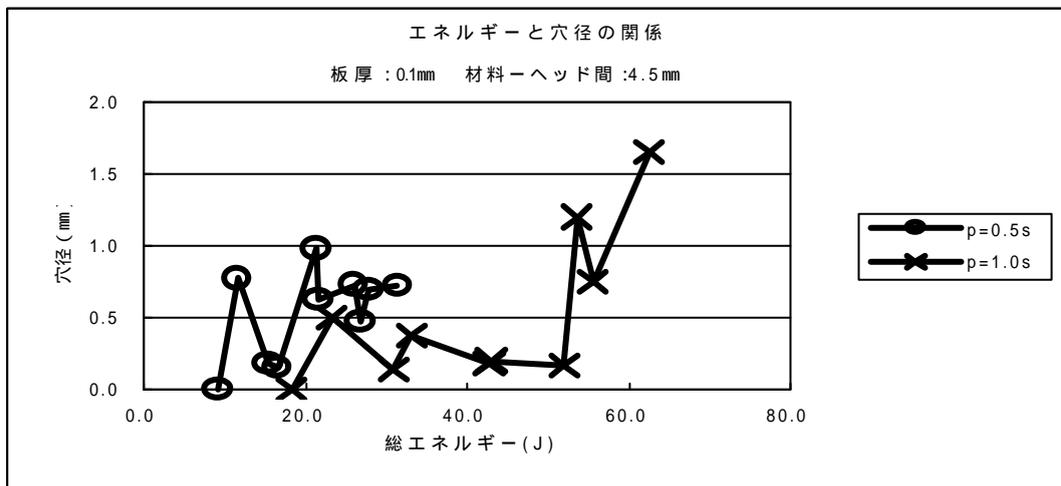


図 4.10 板厚0.1mm のエネルギーと穴径の関係

続いて板厚 1.0 ミリの結果について、加工材料の表裏(材料表をレーザー光入口径、材料裏を出口径とする。)の穴径が違うためそれぞれの穴径を測定し、2 種類のパルス幅の項目を表した結果を、グラフに表したものを図 4.15 ~ 図 4.17 に示す。

材料と穴径の関係は、材料と加工ヘッドの各高さともに材料に与えた総エネルギーに比例し、穴径が大きくなった。加工痕が貫通したエネルギーの値は、約 700J であった。しかし高さ 4.0mm と 4.5mm の各項目の高エネルギー部分だけ、穴の空かないものがあった(図 4.11 参照)。これは、高エネルギーを出力したレーザー光により、材料の溶融した部分が非常に多いため、加工ガスの圧力により除去されず、再凝固したものと考えられる。この現象の対策として、加工ガスの圧力を上げること、または流量を増やすことが考えられる。以下に加工痕の写真(図 4.12 ~ 図 4.14 参照)を示す。

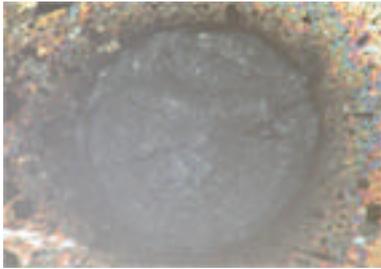


図 4.11 加工痕写真

入口痕

良い結果

悪い結果

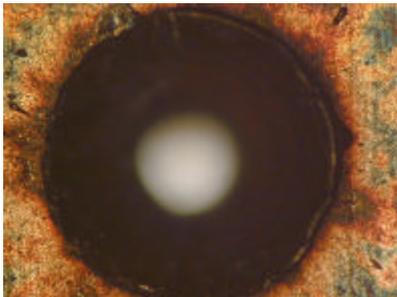


図4.12 加工痕写真

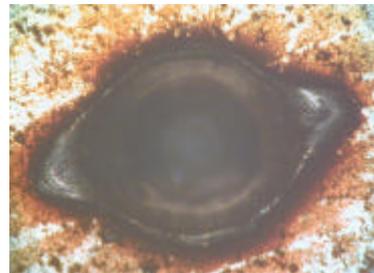


図4.13 加工痕写真

出口痕

良い結果

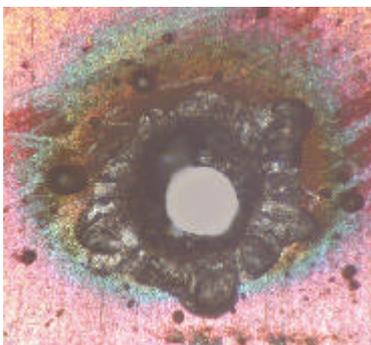


図4.14 加工痕写真

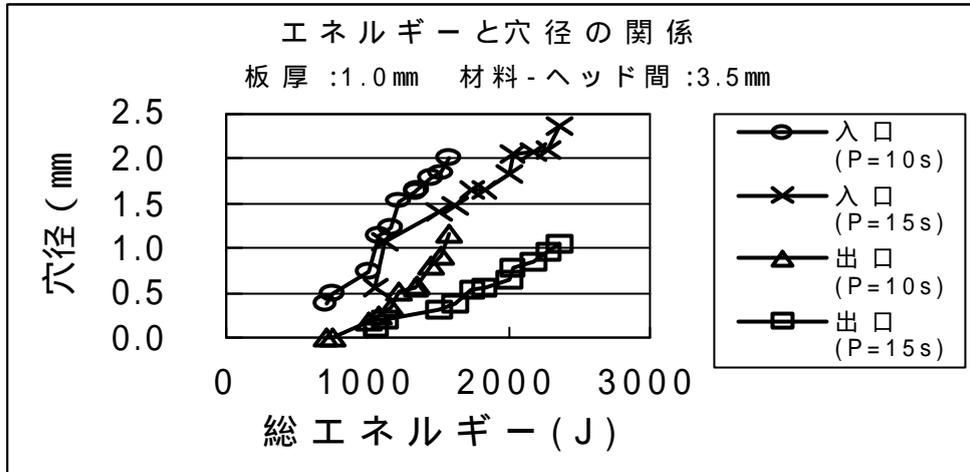


図 4.15 板厚1.0mm のエネルギーと穴径の関係

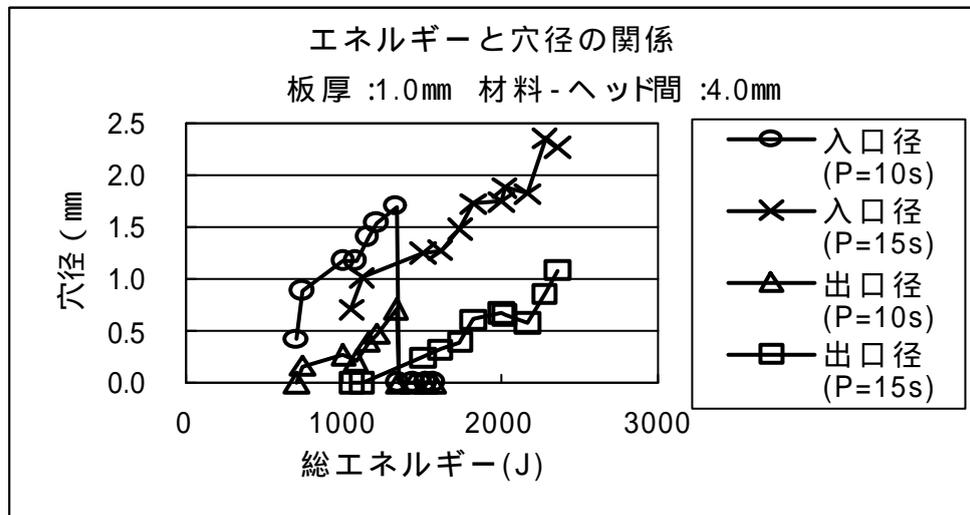


図 4.16 板厚1.0mm のエネルギーと穴径の関係

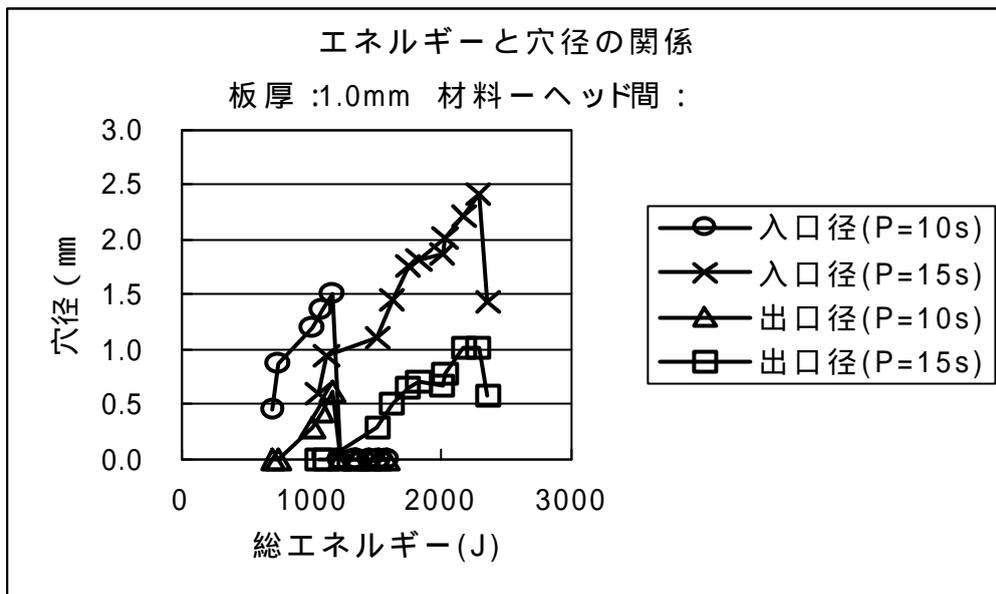


図 4.17 板厚 1.0mm のエネルギーと穴径の関係

板厚 2.0mm の場合、材料に 3000J ほどエネルギーを与えはじめたところから、貫通した穴を形成することができた。穴径と材料に与えた総エネルギーの関係も、板厚 1.0mm 同様に比例する結果となった（図 4.22～図 4.24 参照）。グラフの形式は、板厚 1.0mm の場合のグラフと同様のものである。

図 4.18～図 4.21 に加工痕の写真に掲載する。

入口痕

良い結果

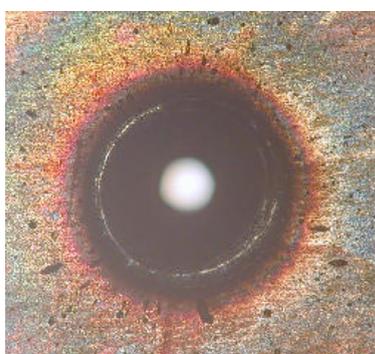


図 4.18 加工痕写真

悪い結果

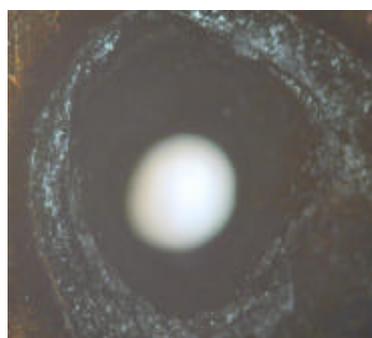


図 4.19 加工痕写真

出口痕

良い結果

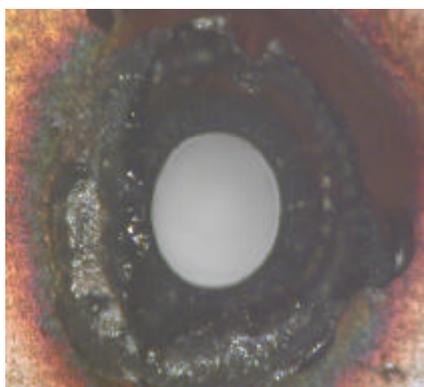


図 4.20 加工痕写真

悪い結果

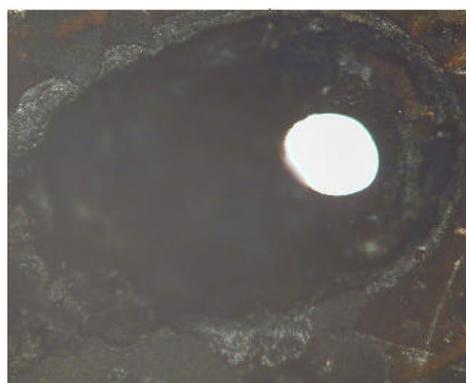


図 4.21 加工痕写真

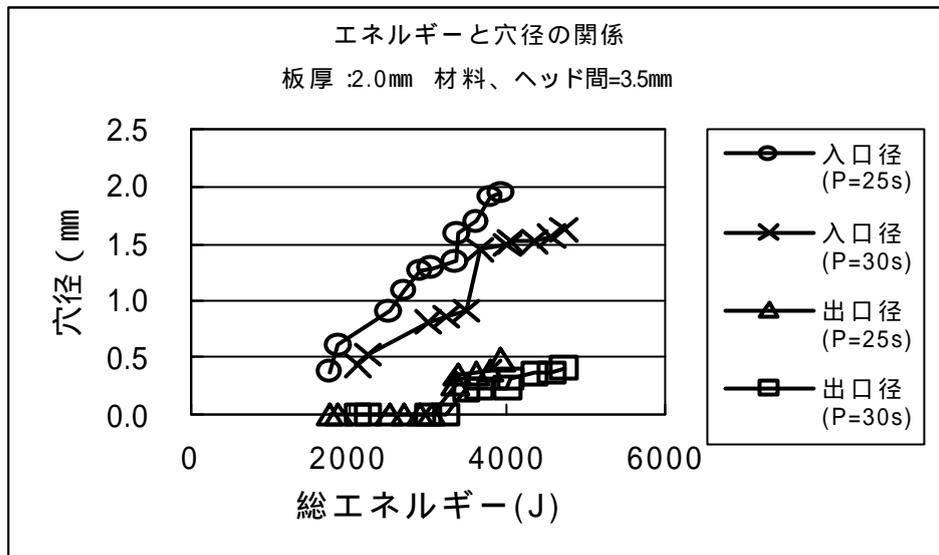


図 4.22 板厚2.0mm エネルギーと穴径の関係

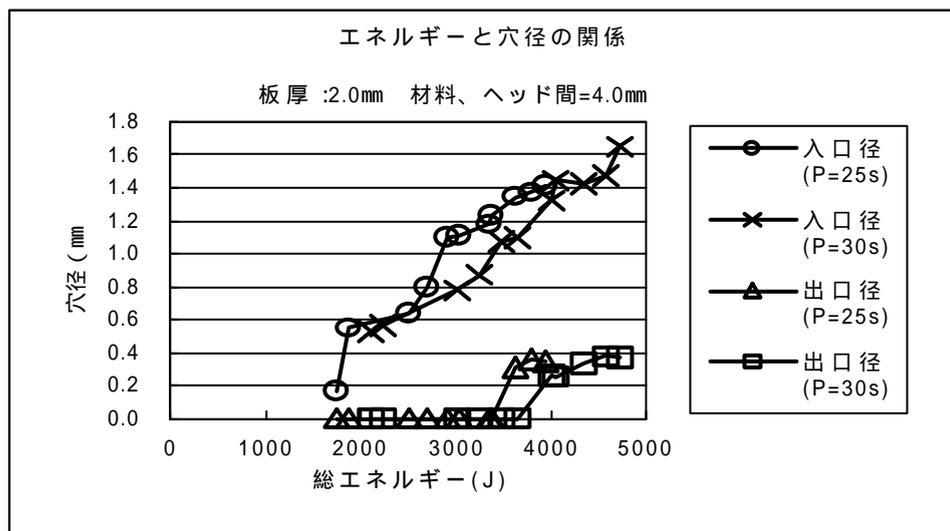


図 4.23 板厚2.0mm エネルギーと穴径の関係

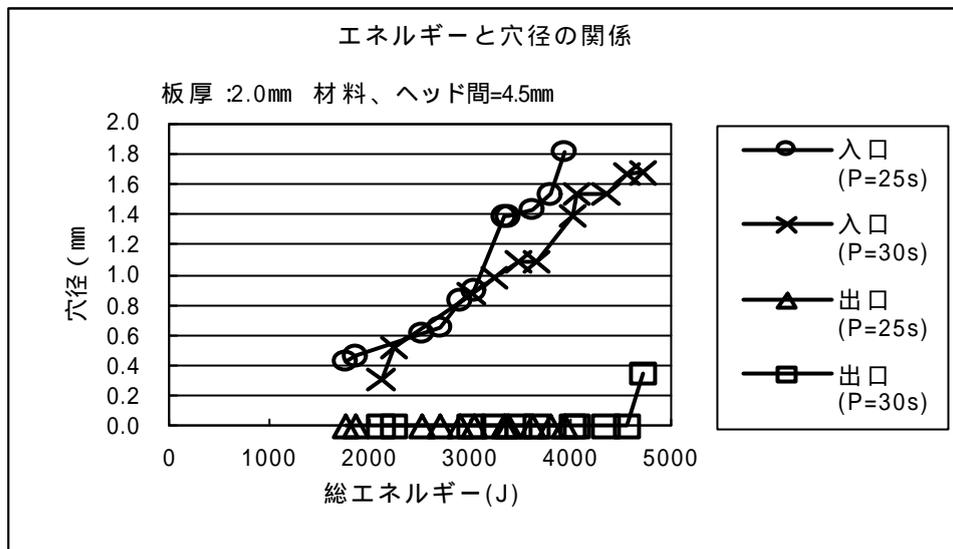


図 4.24 板厚2.0mm エネルギーと穴径の関係

加工痕の真円度

真円度についての結果は、横軸に楕円の長径を取り、縦軸に短径を取りグラフ化したものを図 4.25 ~ 図 4.27 に示す。このグラフ中に示した直線は、長径と短径の値が同一のもので、この直線に近いほど加工痕が真円に近くなる。

板厚 0.1 mm という非常に薄い板を加工した場合、穴の径が大きくなるにしたがってデータにばらつきが生じ、逆に穴径が小さくなるほど真円に近い形状となった(図 4.25 参照)。

穴径が大きいのということは、上記に記した出力と穴径の関係より、高エネルギーのレーザー光を照射し、加工を行ってできた加工痕ということなので、必要以上のエネルギーを材料に与えると加工痕の形状は真円にならないことがわかる。

続いて板厚 1.0 mm と 2.0 mm の結果は図 4.26、図 4.27 に示す。1.0 mm と 2.0 mm は厚みがあるので材料表裏のレーザー光入り口と出口の穴形状の測定を行った。結果として板厚 1.0 mm、2.0 mm はレーザー光入り口、出口ともに板厚 0.1 mm に比べ比較的真円に近い加工結果となった。

レーザー光による加工では、板厚が厚くなるにしたがって加工痕が真円の形状に近くなることがわかった。

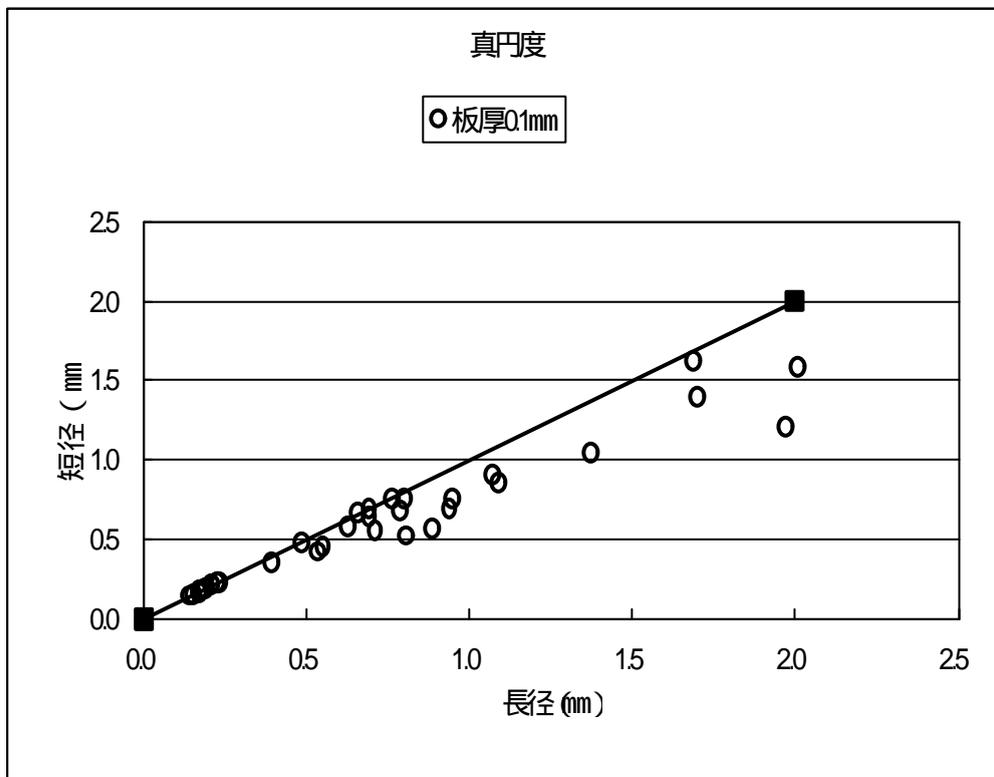


図 4.25 板厚0.1mm の真円度

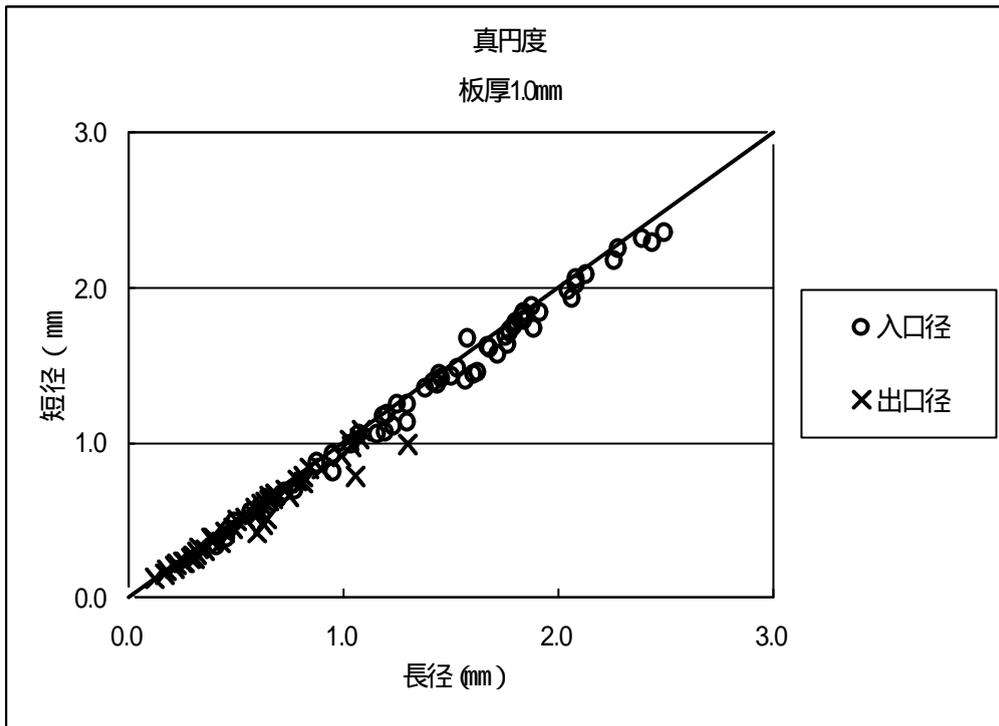


図4.26 板厚1.0mm の真円度

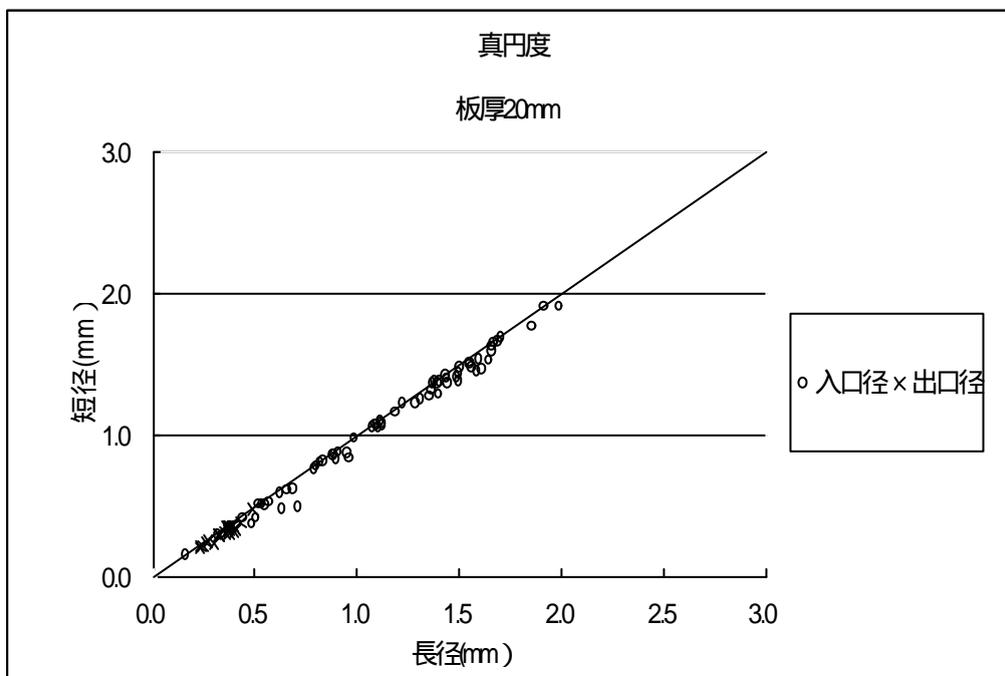


図 4.27 板厚 2.0mm の真円度

加工痕の断面形状

加工断面形状についての結果は、図 4.29 に示す。板厚 0.1mm については、板厚が非常に薄いため、このたび測定用に用いた測定顕微鏡では測定できなかった。そのため板厚 1.0mm と 2.0mm のものを測定した。図 4.29 のグラフは、横軸にレーザー光が材料に入射してできた入口痕の径、縦軸にレーザー光が材料を貫通して出てきた出口痕の径をとったものである。グラフ中の直線は、入口痕と出口痕が同じ値の径で断面の形状が垂直になる場合のもので、この直線に近い値のものほど

断面が垂直な形状に近いということになる。

結果として実際に加工した加工痕の断面形状は、入口痕の径が出口痕の径に比べ大きくなり、形状としては逆円錐形状になった。この特性は、レーザー光の焦点が材料よりも下の部分にあるために起こるものである(図 4.28 を参照)。

断面形状を垂直に加工するためには、常にレーザー光の焦点位置を加工材料の表面部分にくるようにして、加工を行うことで垂直な断面形状を形成できると考えられる。

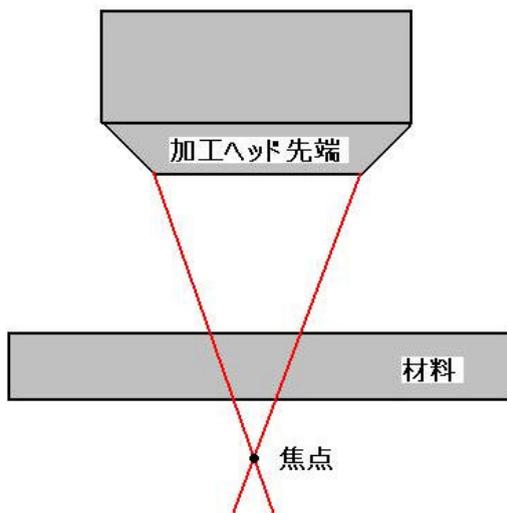


図 4.28 焦点位置

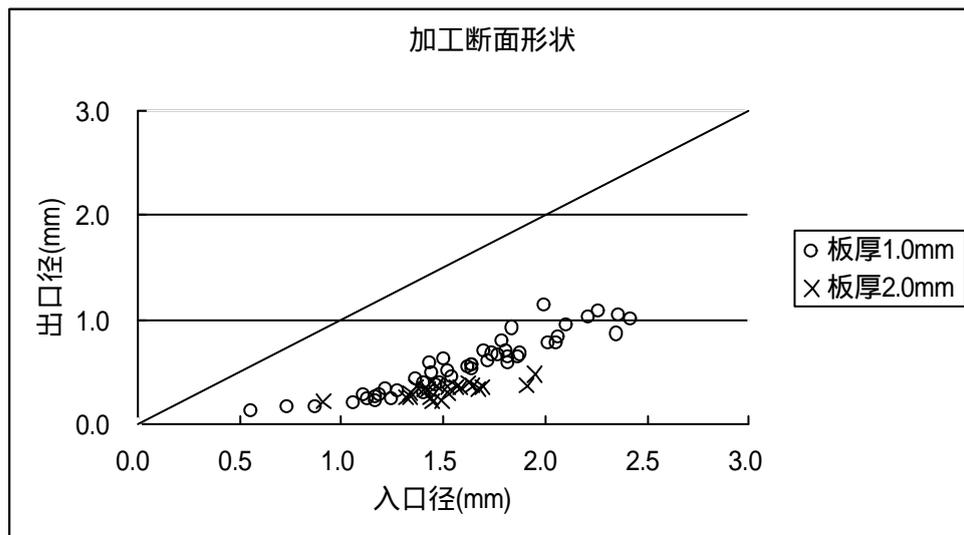
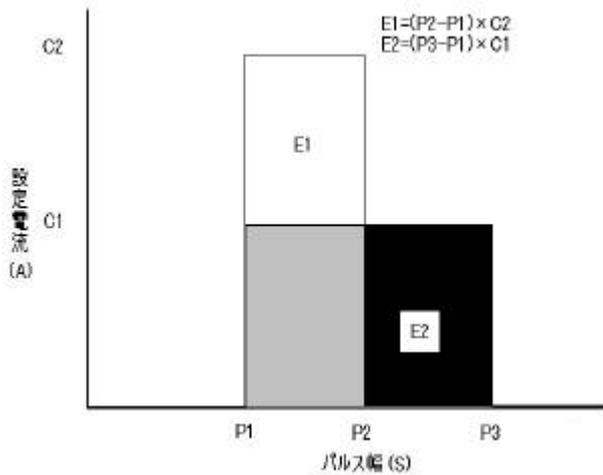


図 4.29 加工痕の断面形状

除去量

材料に与えた総エネルギーと除去量の関係のグラフ（横軸に材料に与えた総エネルギー、縦軸に除去量を取り、3 パターンのパルス幅をグラフ化したもの）を、図 4.31 に示す。

設定電流 30.0A ~ 39.0A まで 1.0A ごと変化させて、各パルス幅の除去量をもとめた。その結果材料に与える総エネルギーが一定のとき、設定電流を大きくしてパルス幅を短くした場合のほうが、



設定電流を小さくしてパルス幅を長くする場合に比べ、エネルギー効率が良いことがわかった。これを図 4.30 により説明すると、材料に与えた総エネルギー $E1$ と $E2$ が同じ値の場合、 $E1(=$ 設定電流 $C2 \times$ パルス幅 $P2-P1)$ は、 $E2(=$ 設定電流 $C1 \times$ パルス幅 $P3-P1)$ に比べてエネルギー効率が良いということになる。

図 4.30 設定電流とパルス幅の関係

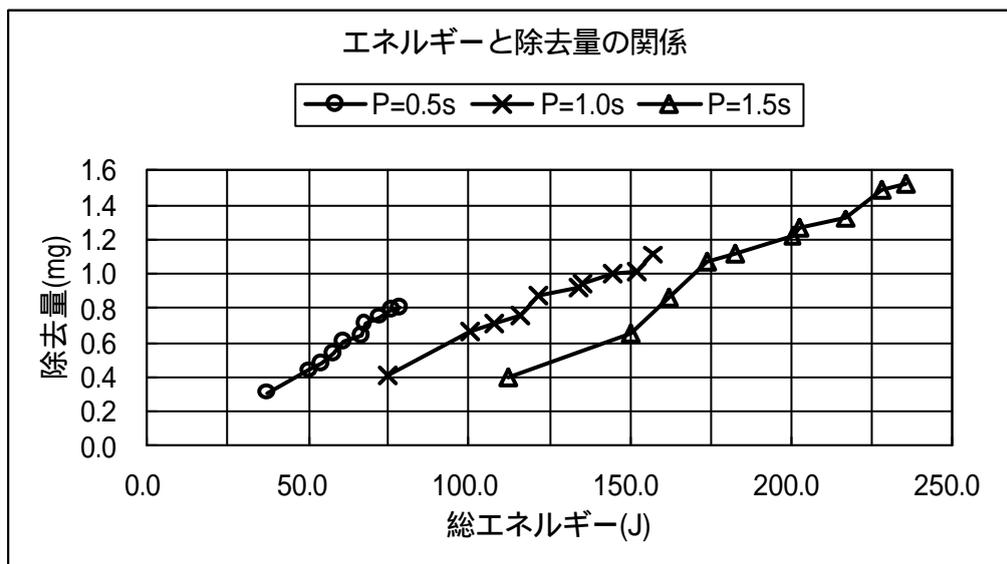


図 4.31 エネルギーと除去量の関係

第5章 結言

レーザー光による材料の加工をするには、まず材料にどのくらいのエネルギーを与えればよいかを知る必要があるため、レーザー光の出力調査を行った。

レーザー発振機のモニタに表示される出力値は、発振機内部で検出されるために、加工ヘッドから実際に出力されるエネルギーは減衰し、モニタの値と加工ヘッドから出力される値には誤差が生じてしまう。そこで加工ヘッド先端からの正確なレーザー光出力を調査したことにより、レーザー光を励起する電流値により、加工ヘッドから出力されるエネルギーを知ることができるようになった。

しかしレーザー光を出力させるための励起用のランプは、加工機を使用していくうちに光量が減衰していくために、定期的な測定が必要となる。

レーザーの加工システムがファイバ光学系の場合、上記にも述べたようにレーザー光が光ファイバを伝送するときに減衰するので、この加工システムの場合レーザー光の検出器を加工ヘッドに取り付けることが望まれる。こうして加工ヘッド先端の出力を求めて穴加工を行い、次のようなことが分かった。

材料に与えるエネルギーが大きいほど穴の径は大きくなるが、板厚 0.1mm のような非常に薄い板に必要以上に与えると除去量が少ないため、レーザー光が照射された部分の周囲も加工され加工痕の形状が歪になったり、加工痕の径も変化して不安定な加工になってしまう。また高出力のレーザー光を加工物に照射すると、加工物が高熱により歪む。板厚 1.0mm、2.0mm のように比較的厚い板は、除去量も多いため真円に近い加工痕が形成された。このようなことから板厚の厚いものほど、真円に近い形状の加工痕が形成される特徴がある。しかし板厚 0.1mm の結果同様に、高エネルギーを与えてしまうと材料の融解する体積が多くなる。そのため加工ガスによる融解物の除去が行われず、レーザー光が加工物を貫通しても融解したものがその場に残り再凝固して穴が塞がる。

パルス幅と設定電流の関係に関して、材料に与えた総エネルギーが一定の場合、設定電流を大きくしてパルス幅を短くすると、穴径が大きくなりエネルギーの効率が良く、除去量に関しても同じ事がいえる。しかし上記で述べたように設定電流を大きくしすぎると加工不安定となり、設定電流を大きくするには限度がある。そのためエネルギー効率は悪いが、パルス幅を長くして設定電流を小さくする方が安定した加工が行える。また加工痕の断面形状は、レーザー光の材料への入口痕が出口痕に比べ穴径が大きくなり、形状としては逆円錐形状となった。これはレーザー光の焦点の位置が材料表面よりも下の位置にあるために、このような形状となる。レーザー加工機は、レーザー光を集光レンズにより焦点に集めて高密度のパワーを出力している。そのためレーザー光の経路は、加工物に対して垂直に入射しない。そのためシングルパルスで加工を行

って、垂直な断面の加工は難しいと思われる。垂直な断面の加工を行うための対策として、材料と加工ヘッド間の高さを変化させるたびにレーザー光の照射を行う方法が考えられる。著者は、この方法だと常に加工物の表面に焦点をセットし加工を行えば、限りなく微小な穴の形成も可能であると考えられる。

謝辞

本研究と本稿の完成は、高知工科大学工学部小林和彦教授のご指導のもとに行ったものであります。御指導御援助を賜った同教授に対し厚く御礼申し上げます。

また本研究の実験に関し、数々のご助力を頂いた高知工科大学工学部安部康祐氏、橋本高志氏、浜口英愛氏に謝意を表します。

参考文献

- 新井武二 宮本勇：レーザー加工の基礎、マシニスト出版、(1993.3)
- 宮崎俊行 宮沢肇 村川正夫 吉岡俊朗：レーザー加工技術、産業図書株式会社(1991.5)
- 平川賢爾 大谷泰夫 遠藤正浩 坂本東男：機械材料学、朝倉書店(1999.3)
- 松岡甫篁：新しい穴加工技術、工業調査会(1987.7)

付録1 設定電流と加工ヘッドの出力測定値

| 電流(A) | 測定値() | | | | 計算値(W) |
|-------|--------|-----|-----|--------|--------|
| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 平均値 | 平均値 |
| 27.0 | 測定不能 | | | | |
| 28.0 | 11 | 19 | 20 | 16.67 | 16.52 |
| 28.1 | 15 | 20 | 20 | 18.33 | 18.17 |
| 28.2 | 22 | 24 | 24 | 23.33 | 23.12 |
| 28.3 | 30 | 32 | 31 | 31.00 | 30.72 |
| 28.4 | 34 | 31 | 35 | 33.33 | 33.03 |
| 28.5 | 40 | 45 | 44 | 43.00 | 42.61 |
| 28.6 | 42 | 42 | 46 | 43.33 | 42.94 |
| 28.7 | 54 | 55 | 48 | 52.33 | 51.86 |
| 28.8 | 55 | 53 | 54 | 54.00 | 53.51 |
| 28.9 | 55 | 58 | 55 | 56.00 | 55.50 |
| 29.0 | 61 | 66 | 62 | 63.00 | 62.43 |
| 30.0 | 75 | 74 | 75 | 74.67 | 73.99 |
| 31.0 | 105 | 96 | 100 | 100.33 | 99.43 |
| 32.0 | 109 | 105 | 110 | 108.00 | 107.03 |
| 33.0 | 111 | 114 | 123 | 116.00 | 114.96 |
| 34.0 | 120 | 120 | 125 | 121.67 | 120.57 |
| 35.0 | 134 | 132 | 135 | 133.67 | 132.46 |
| 36.0 | 134 | 135 | 136 | 135.00 | 133.79 |
| 37.0 | 141 | 146 | 147 | 144.67 | 143.36 |
| 38.0 | 151 | 150 | 155 | 152.00 | 150.63 |
| 39.0 | 167 | 155 | 150 | 157.33 | 155.92 |
| 40.0 | 179 | 180 | 178 | 179.00 | 177.39 |
| 41.0 | 186 | 184 | 188 | 186.00 | 184.33 |

付録2 穴加工における加工条件および測定値

| No. | 加工条件表 | | | | | 測定入口痕 | | 測定出口痕 | |
|-----|----------------------|-------|-------------|------|--------------|------------|------------|------------|------------|
| | 材料 - ヘッド間 (mm) | 電流(A) | パルス幅 (s) | 加工ガス | 材料板厚 (mm) | 長径 (mm) | 短径 (mm) | 長径 (mm) | 短径 (mm) |
| 1 | 3.5 | 29.1 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 2 | 3.5 | 29.2 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 3 | 3.5 | 29.3 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 4 | 3.5 | 29.4 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 5 | 3.5 | 29.5 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 6 | 3.5 | 29.6 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 7 | 3.5 | 29.7 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 8 | 3.5 | 29.8 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 9 | 3.5 | 29.9 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 10 | 3.5 | 30.0 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.693 | 0.637 | | |
| 11 | 4.0 | 29.1 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 12 | 4.0 | 29.2 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 13 | 4.0 | 29.3 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 14 | 4.0 | 29.4 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 15 | 4.0 | 29.5 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 16 | 4.0 | 29.6 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 17 | 4.0 | 29.7 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.534 | 0.417 | | |
| 18 | 4.0 | 29.8 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.939 | 0.691 | | |
| 19 | 4.0 | 29.9 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 1.091 | 0.847 | | |
| 20 | 4.0 | 30.0 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 1.702 | 1.395 | | |
| 21 | 4.5 | 29.1 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 22 | 4.5 | 29.2 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.800 | 0.753 | | |
| 23 | 4.5 | 29.3 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.182 | 0.177 | | |
| 24 | 4.5 | 29.4 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.154 | 0.149 | | |
| 25 | 4.5 | 29.5 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 1.072 | 0.897 | | |
| 26 | 4.5 | 29.6 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.711 | 0.546 | | |
| 27 | 4.5 | 29.7 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.786 | 0.673 | | |
| 28 | 4.5 | 29.8 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.487 | 0.473 | | |
| 29 | 4.5 | 29.9 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.693 | 0.692 | | |
| 30 | 4.5 | 30.0 | 0.5 | 酸素 | 0.1 | 0.887 | 0.560 | | |
| 31 | 3.5 | 29.1 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 32 | 3.5 | 29.2 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 33 | 3.5 | 29.3 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 34 | 3.5 | 29.4 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 35 | 3.5 | 29.5 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 36 | 3.5 | 29.6 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.236 | 0.220 | | |
| 37 | 3.5 | 29.7 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.657 | 0.654 | | |

| 加工条件表 | | | | | | 測定入口痕 | | 測定出口痕 | |
|-------|----------------------|-------|-------------|------|--------------|------------|------------|------------|------------|
| No. | 材料 - ヘッド間 (mm) | 電流(A) | パルス幅 (s) | 加工ガス | 材料板厚 (mm) | 長径 (mm) | 短径 (mm) | 長径 (mm) | 短径 (mm) |
| 38 | 3.5 | 29.8 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.804 | 0.517 | | |
| 39 | 3.5 | 29.9 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 1.974 | 1.198 | | |
| 40 | 3.5 | 30.0 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.951 | 0.751 | | |
| 41 | 4.0 | 29.1 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 42 | 4.0 | 29.2 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 43 | 4.0 | 29.3 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 44 | 4.0 | 29.4 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 45 | 4.0 | 29.5 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 46 | 4.0 | 29.6 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.229 | 0.218 | | |
| 47 | 4.0 | 29.7 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.174 | 0.151 | | |
| 48 | 4.0 | 29.8 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.627 | 0.576 | | |
| 49 | 4.0 | 29.9 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.227 | 0.214 | | |
| 50 | 4.0 | 30.0 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 2.011 | 1.585 | | |
| 51 | 4.5 | 29.1 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.000 | 0.000 | | |
| 52 | 4.5 | 29.2 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.551 | 0.445 | | |
| 53 | 4.5 | 29.3 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.140 | 0.137 | | |
| 54 | 4.5 | 29.4 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.396 | 0.347 | | |
| 55 | 4.5 | 29.5 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.192 | 0.183 | | |
| 56 | 4.5 | 29.6 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.207 | 0.205 | | |
| 57 | 4.5 | 29.7 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.171 | 0.166 | | |
| 58 | 4.5 | 29.8 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 1.375 | 1.034 | | |
| 59 | 4.5 | 29.9 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 0.763 | 0.745 | | |
| 60 | 4.5 | 30.0 | 1.0 | 酸素 | 0.1 | 1.690 | 1.620 | | |
| 61 | 3.5 | 29.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.412 | 0.333 | 0.000 | 0.000 |
| 62 | 3.5 | 30.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.500 | 0.489 | 0.000 | 0.000 |
| 63 | 3.5 | 31.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.774 | 0.692 | 0.177 | 0.173 |
| 64 | 3.5 | 32.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.193 | 1.067 | 0.250 | 0.232 |
| 65 | 3.5 | 33.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.303 | 1.132 | 0.356 | 0.310 |
| 66 | 3.5 | 34.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.604 | 1.442 | 0.600 | 0.420 |
| 67 | 3.5 | 35.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.584 | 1.670 | 0.625 | 0.482 |
| 68 | 3.5 | 36.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.723 | 1.568 | 0.644 | 0.507 |
| 69 | 3.5 | 37.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.802 | 1.778 | 0.814 | 0.778 |
| 70 | 3.5 | 38.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.839 | 1.837 | 1.059 | 0.785 |
| 71 | 3.5 | 39.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 2.066 | 1.928 | 1.304 | 0.993 |
| 72 | 4.0 | 29.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.461 | 0.382 | 0.000 | 0.000 |
| 73 | 4.0 | 30.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.952 | 0.806 | 0.174 | 0.155 |
| 74 | 4.0 | 31.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.182 | 1.162 | 0.294 | 0.250 |
| 75 | 4.0 | 32.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.237 | 1.106 | 0.226 | 0.215 |
| 76 | 4.0 | 33.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.424 | 1.388 | 0.398 | 0.385 |

| 加工条件表 | | | | | | 測定入口痕 | | 測定出口痕 | |
|-------|----------------------|-------|-------------|------|--------------|------------|------------|------------|------------|
| No. | 材料 - ヘッド間 (mm) | 電流(A) | パルス幅 (s) | 加工ガス | 材料板厚 (mm) | 長径 (mm) | 短径 (mm) | 長径 (mm) | 短径 (mm) |
| 77 | 4.0 | 34.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.627 | 1.456 | 0.485 | 0.447 |
| 78 | 4.0 | 35.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.768 | 1.631 | 0.727 | 0.696 |
| 79 | 4.0 | 36.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 80 | 4.0 | 37.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 81 | 4.0 | 38.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 82 | 4.0 | 39.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 83 | 4.5 | 29.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.471 | 0.440 | 0.000 | 0.000 |
| 84 | 4.5 | 30.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.882 | 0.866 | 0.000 | 0.000 |
| 85 | 4.5 | 31.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.203 | 1.183 | 0.314 | 0.253 |
| 86 | 4.5 | 32.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.383 | 1.346 | 0.448 | 0.417 |
| 87 | 4.5 | 33.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 1.532 | 1.474 | 0.637 | 0.612 |
| 88 | 4.5 | 34.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 89 | 4.5 | 35.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 90 | 4.5 | 36.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 91 | 4.5 | 37.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 92 | 4.5 | 38.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 93 | 4.5 | 39.0 | 10.0 | 酸素 | 1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 94 | 3.5 | 29.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 0.575 | 0.546 | 0.126 | 0.124 |
| 95 | 3.5 | 30.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.076 | 1.057 | 0.213 | 0.198 |
| 96 | 3.5 | 31.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.441 | 1.370 | 0.316 | 0.288 |
| 97 | 3.5 | 32.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.508 | 1.427 | 0.384 | 0.376 |
| 98 | 3.5 | 33.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.672 | 1.621 | 0.543 | 0.512 |
| 99 | 3.5 | 34.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.684 | 1.607 | 0.582 | 0.539 |
| 100 | 3.5 | 35.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.841 | 1.793 | 0.655 | 0.623 |
| 101 | 3.5 | 36.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 2.087 | 2.022 | 0.789 | 0.758 |
| 102 | 3.5 | 37.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 2.081 | 2.053 | 0.846 | 0.834 |
| 103 | 3.5 | 38.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 2.126 | 2.081 | 0.992 | 0.911 |
| 104 | 3.5 | 39.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 2.437 | 2.285 | 1.070 | 1.032 |
| 105 | 4.0 | 29.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 0.733 | 0.678 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 4.0 | 30.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.034 | 0.991 | 0.000 | 0.000 |
| 107 | 4.0 | 31.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.251 | 1.243 | 0.265 | 0.231 |
| 108 | 4.0 | 32.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.303 | 1.250 | 0.327 | 0.324 |
| 109 | 4.0 | 33.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.568 | 1.400 | 0.432 | 0.356 |
| 110 | 4.0 | 34.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.757 | 1.685 | 0.615 | 0.597 |
| 111 | 4.0 | 35.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.771 | 1.716 | 0.686 | 0.664 |
| 112 | 4.0 | 36.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.910 | 1.837 | 0.656 | 0.652 |
| 113 | 4.0 | 37.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.831 | 1.804 | 0.593 | 0.572 |
| 114 | 4.0 | 38.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 2.389 | 2.317 | 0.896 | 0.832 |
| 115 | 4.0 | 39.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 2.281 | 2.253 | 1.085 | 1.079 |

| 加工条件表 | | | | | | 測定入口痕 | | 測定出口痕 | |
|-------|----------------------|-------|-------------|------|--------------|------------|------------|------------|------------|
| No. | 材料 - ヘッド間 (mm) | 電流(A) | パルス幅 (s) | 加工ガス | 材料板厚 (mm) | 長径 (mm) | 短径 (mm) | 長径 (mm) | 短径 (mm) |
| 116 | 4.5 | 29.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 0.619 | 0.592 | 0.000 | 0.000 |
| 117 | 4.5 | 30.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 0.957 | 0.921 | 0.000 | 0.000 |
| 118 | 4.5 | 31.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.161 | 1.054 | 0.300 | 0.274 |
| 119 | 4.5 | 32.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.449 | 1.443 | 0.506 | 0.499 |
| 120 | 4.5 | 33.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.796 | 1.741 | 0.674 | 0.647 |
| 121 | 4.5 | 34.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.890 | 1.740 | 0.747 | 0.657 |
| 122 | 4.5 | 35.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.876 | 1.876 | 0.684 | 0.668 |
| 123 | 4.5 | 36.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 2.050 | 1.978 | 0.810 | 0.743 |
| 124 | 4.5 | 37.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 2.262 | 2.173 | 1.025 | 1.013 |
| 125 | 4.5 | 38.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 2.490 | 2.348 | 1.036 | 0.980 |
| 126 | 4.5 | 39.0 | 15.0 | 酸素 | 1.0 | 1.456 | 1.414 | 0.606 | 0.558 |
| 127 | 3.5 | 29.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.380 | 0.365 | 0.000 | 0.000 |
| 128 | 3.5 | 30.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.712 | 0.500 | 0.000 | 0.000 |
| 129 | 3.5 | 31.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.964 | 0.841 | 0.000 | 0.000 |
| 130 | 3.5 | 32.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.089 | 1.080 | 0.000 | 0.000 |
| 131 | 3.5 | 33.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.289 | 1.228 | 0.000 | 0.000 |
| 132 | 3.5 | 34.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.314 | 1.260 | 0.000 | 0.000 |
| 133 | 3.5 | 35.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.363 | 1.319 | 0.300 | 0.235 |
| 134 | 3.5 | 36.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.646 | 1.528 | 0.375 | 0.336 |
| 135 | 3.5 | 37.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.703 | 1.689 | 0.370 | 0.353 |
| 136 | 3.5 | 38.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.917 | 1.910 | 0.392 | 0.364 |
| 137 | 3.5 | 39.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.990 | 1.911 | 0.488 | 0.478 |
| 138 | 4.0 | 29.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.164 | 0.160 | 0.000 | 0.000 |
| 139 | 4.0 | 30.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.569 | 0.529 | 0.000 | 0.000 |
| 140 | 4.0 | 31.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.658 | 0.614 | 0.000 | 0.000 |
| 141 | 4.0 | 32.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.801 | 0.785 | 0.000 | 0.000 |
| 142 | 4.0 | 33.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.127 | 1.075 | 0.000 | 0.000 |
| 143 | 4.0 | 34.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.112 | 1.105 | 0.000 | 0.000 |
| 144 | 4.0 | 35.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.189 | 1.165 | 0.000 | 0.000 |
| 145 | 4.0 | 36.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.225 | 1.225 | 0.000 | 0.000 |
| 146 | 4.0 | 37.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.400 | 1.285 | 0.326 | 0.295 |
| 147 | 4.0 | 38.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.372 | 1.370 | 0.396 | 0.324 |
| 148 | 4.0 | 39.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.447 | 1.368 | 0.376 | 0.315 |
| 149 | 4.5 | 29.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.486 | 0.376 | 0.000 | 0.000 |
| 150 | 4.5 | 30.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.506 | 0.419 | 0.000 | 0.000 |
| 151 | 4.5 | 31.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.623 | 0.595 | 0.000 | 0.000 |
| 152 | 4.5 | 32.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.686 | 0.622 | 0.000 | 0.000 |
| 153 | 4.5 | 33.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.836 | 0.820 | 0.000 | 0.000 |
| 154 | 4.5 | 34.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 0.908 | 0.882 | 0.000 | 0.000 |

| 加工条件表 | | | | | | 測定入口痕 | | 測定出口痕 | |
|-------|----------------------|-------|-------------|------|--------------|------------|------------|------------|------------|
| No. | 材料 - ヘッド間 (mm) | 電流(A) | パルス幅 (s) | 加工ガス | 材料板厚 (mm) | 長径 (mm) | 短径 (mm) | 長径 (mm) | 短径 (mm) |
| 155 | 4.5 | 35.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.396 | 1.368 | 0.000 | 0.000 |
| 156 | 4.5 | 36.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.383 | 1.382 | 0.000 | 0.000 |
| 157 | 4.5 | 37.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.435 | 1.422 | 0.000 | 0.000 |
| 158 | 4.5 | 38.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.555 | 1.498 | 0.000 | 0.000 |
| 159 | 4.5 | 39.0 | 25.0 | 酸素 | 2.0 | 1.853 | 1.770 | 0.000 | 0.000 |
| 160 | 3.5 | 29.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.441 | 0.416 | 0.000 | 0.000 |
| 161 | 3.5 | 30.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.533 | 0.512 | 0.000 | 0.000 |
| 162 | 3.5 | 31.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.818 | 0.813 | 0.000 | 0.000 |
| 163 | 3.5 | 32.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.897 | 0.830 | 0.000 | 0.000 |
| 164 | 3.5 | 33.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.952 | 0.874 | 0.231 | 0.209 |
| 165 | 3.5 | 34.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.491 | 1.408 | 0.233 | 0.219 |
| 166 | 3.5 | 35.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.500 | 1.480 | 0.244 | 0.224 |
| 167 | 3.5 | 36.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.588 | 1.450 | 0.321 | 0.297 |
| 168 | 3.5 | 37.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.561 | 1.481 | 0.359 | 0.358 |
| 169 | 3.5 | 38.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.597 | 1.533 | 0.374 | 0.363 |
| 170 | 3.5 | 39.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.663 | 1.591 | 0.431 | 0.387 |
| 171 | 4.0 | 29.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.549 | 0.508 | 0.000 | 0.000 |
| 172 | 4.0 | 30.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.636 | 0.486 | 0.000 | 0.000 |
| 173 | 4.0 | 31.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.790 | 0.763 | 0.000 | 0.000 |
| 174 | 4.0 | 32.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.882 | 0.862 | 0.000 | 0.000 |
| 175 | 4.0 | 33.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.078 | 1.061 | 0.000 | 0.000 |
| 176 | 4.0 | 34.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.118 | 1.085 | 0.000 | 0.000 |
| 177 | 4.0 | 35.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.357 | 1.279 | 0.268 | 0.257 |
| 178 | 4.0 | 36.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.497 | 1.382 | 0.265 | 0.246 |
| 179 | 4.0 | 37.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.440 | 1.405 | 0.355 | 0.316 |
| 180 | 4.0 | 38.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.497 | 1.436 | 0.389 | 0.361 |
| 181 | 4.0 | 39.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.661 | 1.632 | 0.405 | 0.335 |
| 182 | 4.5 | 29.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.319 | 0.293 | 0.000 | 0.000 |
| 183 | 4.5 | 30.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.523 | 0.513 | 0.000 | 0.000 |
| 184 | 4.5 | 31.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.890 | 0.865 | 0.000 | 0.000 |
| 185 | 4.5 | 32.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 0.986 | 0.984 | 0.000 | 0.000 |
| 186 | 4.5 | 33.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.094 | 1.076 | 0.000 | 0.000 |
| 187 | 4.5 | 34.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.105 | 1.056 | 0.000 | 0.000 |
| 188 | 4.5 | 35.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.403 | 1.386 | 0.000 | 0.000 |
| 189 | 4.5 | 36.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.555 | 1.515 | 0.000 | 0.000 |
| 190 | 4.5 | 37.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.610 | 1.465 | 0.000 | 0.000 |
| 191 | 4.5 | 38.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.667 | 1.662 | 0.000 | 0.000 |
| 192 | 4.5 | 39.0 | 30.0 | 酸素 | 2.0 | 1.686 | 1.665 | 0.365 | 0.329 |

付録3 除去量測定のため、加工を行った加工条件および測定値

| 加工条件表 | | | | | 測定値 | | |
|-------|---------------------|-------|-------------|------|--------|-----------|------|
| No. | 材料- ヘッド間 (mm) | 電流(A) | パルス幅 (s) | 加工ガス | 出力(W) | 総エネルギー(J) | 除去量 |
| 1 | 3.5 | 30.0 | 0.5 | 酸素 | 74.67 | 37.34 | 0.31 |
| 2 | 3.5 | 31.0 | 0.5 | 酸素 | 100.33 | 50.17 | 0.44 |
| 3 | 3.5 | 32.0 | 0.5 | 酸素 | 108.00 | 54.00 | 0.48 |
| 4 | 3.5 | 33.0 | 0.5 | 酸素 | 116.00 | 58.00 | 0.54 |
| 5 | 3.5 | 34.0 | 0.5 | 酸素 | 121.67 | 60.84 | 0.61 |
| 6 | 3.5 | 35.0 | 0.5 | 酸素 | 133.67 | 66.84 | 0.64 |
| 7 | 3.5 | 36.0 | 0.5 | 酸素 | 135.00 | 67.50 | 0.71 |
| 8 | 3.5 | 37.0 | 0.5 | 酸素 | 144.67 | 72.34 | 0.75 |
| 9 | 3.5 | 38.0 | 0.5 | 酸素 | 152.00 | 76.00 | 0.79 |
| 10 | 3.5 | 39.0 | 0.5 | 酸素 | 157.33 | 78.67 | 0.80 |
| 11 | 3.5 | 30.0 | 1.0 | 酸素 | 74.67 | 74.67 | 0.41 |
| 12 | 3.5 | 31.0 | 1.0 | 酸素 | 100.33 | 100.33 | 0.66 |
| 13 | 3.5 | 32.0 | 1.0 | 酸素 | 108.00 | 108.00 | 0.71 |
| 14 | 3.5 | 33.0 | 1.0 | 酸素 | 116.00 | 116.00 | 0.76 |
| 15 | 3.5 | 34.0 | 1.0 | 酸素 | 121.67 | 121.67 | 0.87 |
| 16 | 3.5 | 35.0 | 1.0 | 酸素 | 133.67 | 133.67 | 0.92 |
| 17 | 3.5 | 36.0 | 1.0 | 酸素 | 135.00 | 135.00 | 0.94 |
| 18 | 3.5 | 37.0 | 1.0 | 酸素 | 144.67 | 144.67 | 1.00 |
| 19 | 3.5 | 38.0 | 1.0 | 酸素 | 152.00 | 152.00 | 1.01 |
| 20 | 3.5 | 39.0 | 1.0 | 酸素 | 157.33 | 157.33 | 1.11 |
| 21 | 3.5 | 30.0 | 1.5 | 酸素 | 74.67 | 112.01 | 0.40 |
| 22 | 3.5 | 31.0 | 1.5 | 酸素 | 100.33 | 150.50 | 0.65 |
| 23 | 3.5 | 32.0 | 1.5 | 酸素 | 108.00 | 162.00 | 0.86 |
| 24 | 3.5 | 33.0 | 1.5 | 酸素 | 116.00 | 174.00 | 1.07 |
| 25 | 3.5 | 34.0 | 1.5 | 酸素 | 121.67 | 182.51 | 1.12 |
| 26 | 3.5 | 35.0 | 1.5 | 酸素 | 133.67 | 200.51 | 1.22 |
| 27 | 3.5 | 36.0 | 1.5 | 酸素 | 135.00 | 202.50 | 1.27 |
| 28 | 3.5 | 37.0 | 1.5 | 酸素 | 144.67 | 217.01 | 1.32 |
| 29 | 3.5 | 38.0 | 1.5 | 酸素 | 152.00 | 228.00 | 1.49 |
| 30 | 3.5 | 39.0 | 1.5 | 酸素 | 157.33 | 236.00 | 1.52 |

* [総エネルギー(J)]=[出力(W)]×[パルス幅(S)]