

パルスファイバーレーザーによる微細穴あけの基礎研究

滋賀県立大学 工学部 機械システム工学科

教授 中川平三郎

(平成 22 年度 一般研究開発助成 A F -2010203)

キーワード：パルスファイバーレーザー、微細穴、ステンレス、アスペクト比、形状

1. 研究の目的と背景

現在、食品・化粧品・医薬品などの製造ラインの配管設備では、**図 1** のようなサニタリー規格の微細穴のフィルタが多用されている。これらの微細穴のフィルタ板は電子ビーム加工機¹⁾²⁾³⁾でしか製造できず、高価で納期が長くなっている。このため、サニタリー配管業界からは、電子ビーム加工機に代わる加工機、加工方法が望まれている。このフィルタ板の特徴は、材質は SUS316L などのステンレス材であること、**図 2** のように、 $\phi 0.07 \sim 0.1 \text{mm}$ の穴が 0.3mm 間隔と狭ピッチで並んでおり、外形が $\phi 40 \text{mm}$ の円形フィルタの場合、約 16000 個と膨大な数の穴が開いていること、穴のアスペクト比が $5 \sim 7$ と細長いことで、価格競争力を考えると 100 holes/sec 以上の加工速度が必要であることである。

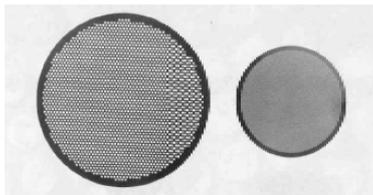


図 1 サニタリー用フィルタ

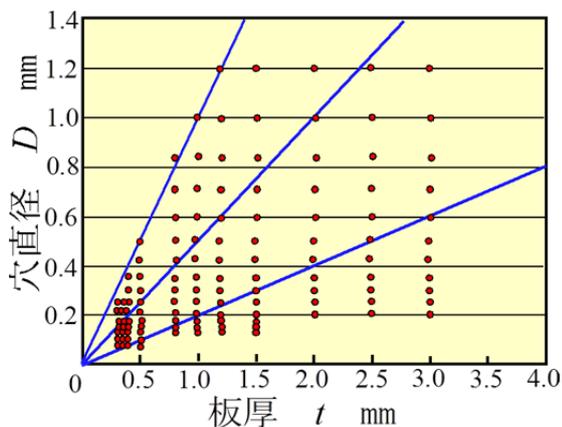


図 2 フィルタのラインアップ規格

その他金属の穴加工方法は、ドリル加工、フォトエッチング、形彫り放電加工、創成放電加工、パンチプレス、レーザー加工（汎用機）などがあるが、以下の理由により適した加工方法はなく、本研究では、パルスレーザー発振器を用いた高速・微細穴あけ加工機の研究開発を行う。

A) ドリル加工：汎用のマシニングセンタと回転工具を用いて切削加工する方法。 $\phi 0.1 \text{mm}$ の工具を使用する場合、回転数は 10 万回転 (毎分) 以上必要。一般的なマシニングセンタの主軸回転数では足りないため、エアスピンドルなどが必要。高精度のストレート穴加工が可能であるが、裏側にバリが出る。加工時間が最低でも $1 \text{ 穴 } 2 \text{ 秒}$ かかるため製品コストには見合わない。

B) フォトエッチング：表面に光硬化する物質を塗り、防食加工を行い、残りの部分を腐食させる加工法。加工コストは $\phi 40 \text{mm} \times 1000 \text{ 枚}$ で 10 万円程度 と安い。アスペクト比 1.0 程度が限界で、板厚より細い穴加工ができない。

C) 形彫り放電加工：穴と反対の形状（剣山状）の電極を事前に作成して加工する方法。直径 0.07mm の剣山状の電極を作成する時間が膨大にかかる。また、放電加工では電極も消耗するため、剣山のように細い電極であれば、1回加工すると使えなくなる。

D) 創成放電加工：棒状、またはワイヤ状の電極を用いた汎用の穴あけ加工機が発売されている。加工時間は $\phi 0.1 \text{mm}$ 、 $t=0.5 \text{mm}$ で $1 \text{ 穴 } 5 \text{ 秒}$ 以上かかる。

E) パンチプレス：穴径 0.5mm 以上、アスペクト比 1.0 程度が限界で、板厚以上の穴径でないとう加工ができない。加工速度は、穴径や間隔にもよるが、汎用加工機で 2000 穴 / 毎分 程度が可能。

しかしレーザー穴あけ加工は、極めて高いエネルギー密度を有するレーザー光をレンズを用いて集光し、材料を局部的に高温にすることで材料を蒸発もしくは熔融させて飛散除去する加工方法である。熱を用いた加工であるため材料の機械的性質によらず加工が可能であるが、熱源によって引き起こされる現象は複雑であり、そのことが加工現象の理

解や加工条件の選定を難しくさせている。

本研究では微細穴のフィルタの加工に必要な高速かつ多数の穴あけ加工を実現するために、基礎実験として板厚0.5mmのステンレス鋼板に対して種々のレーザ照射条件を変化させてレーザ照射実験を行なった後、穴形状、穴径、穴深さおよびドロスについて評価し、ステンレスにおけるレーザ穴あけ加工の除去過程をモデル化し、適切な照射条件について検討する。

2. 加工方法の検討

電子ビーム加工機は、真空室内で加工を行うために、標準サイズの工作物を円筒状にロール加工したのち、全体を同じ穴径で加工する。その後、再度工作物を平らにし、レーザ加工機などで必要な外形に切断している。

本報では、あらかじめ外形を切断した工作物に対して穴加工を行うことで、外形が変形であるフィルタや、小ロットの加工にも対応できるようにする加工方法の研究を行う。(図3)

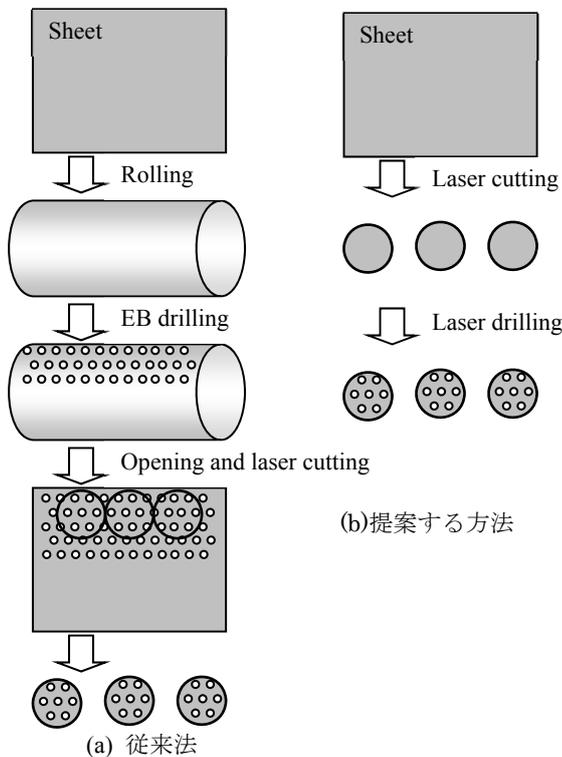


図3 電子ビーム法とレーザ法

3. 光学装置の設計および実験方法

3.1 光学装置の設計

加工機の開発にあたり、発振機、 $f\theta$ レンズの選定、および、アパーチャ、ビームエキスパンダの設定の検討を行った。光学装置の構成を図4に示す。1秒あたり100箇所以上の位置決め速度を実現するために、加工ヘッドはガルバノメータを用いて位置決めを行うこととした。加工点スポット径 d は式(1)で計算できる。

$$d = 4\lambda \cdot f \cdot M_2 / (\pi \cdot D) \quad (1)$$

ここで、 λ は波長 ($\lambda=1.06\mu\text{m}$)、 f は焦点距離、 D は入射

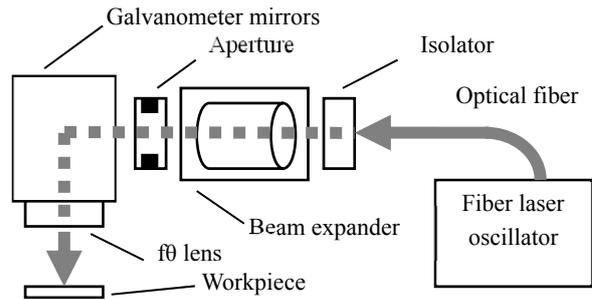


図4 光学系の構成

ビーム径、 M_2 はビーム品質 ($M_2=1\sim 10$)である。入射ビーム径を0.1mm以下にするために、発振機は $M_2=10$ の機種を選択し、 $f\theta$ レンズの焦点距離は100mmとし、ビームエキスパンダは2~3の倍率で使用する。

3.2 可能性試験結果

前節の光学装置を、組込んでレーザによる穴あけの可能性試験を行った。使用した装置の外観を図5に示す。汎用のマシニングセンタの主軸を取り外し、前節で設計した光学装置とガルバノミラーを組み込んでいる。レーザ発振器は後部配電盤の上に設置し、光ファイバーで光学系まで導光している。その他雰囲気ガス、レーザ発振器の冷却装置を装備している。

レーザ穴あけには、Ybファイバレーザ(波長:1.06 μm , スポット径:約80 μm)を用いた。レーザ照射条件は、パルス幅とパルス周波数を固定(可能な限り短パルス幅・高ピーク出力となるような条件)し、平均出力と照射時間を変化させた。被加工材はステンレス鋼SUS316Lとし、レ



図5 パルスファイバレーザの実験装置

表1 レーザ穴あけの照射条件

Laser type	Yb fiber laser (Pulse oscillation)
Average output power P_{ave} W	30-120
Irradiation time T ms	3-40
Pulse repetition rate f kHz	20
Pulse duration T_d ns	60

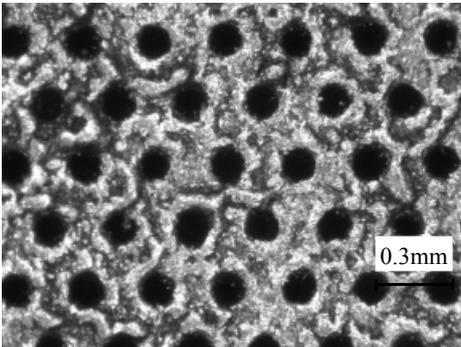
ーザ照射時は焦点を工作物（板厚 $t=0.5, 1.0 \text{ mm}$ ）表面に合わせた。穴形状として、レーザ入射側および出射側の穴径と穴深さを測定して評価した。その他の加工条件を表 2 に示す。

先ずレーザ出力・1穴あたりの照射時間、周波数、デューティ比の4条件を変化させ、穴加工形状を比較した。レーザ出力を 175W、1穴あたりの照射時間を 10msec で 100穴を加工した場合の結果を表 2 に示す。図中の数値は加工穴径[μm]、記号○とした条件は照射面・裏側とも加工できているが光が通過しない穴がある場合、記号△とした条件は、一部の穴が加工できていない場合、■はすべての穴が加工できていない場合である。

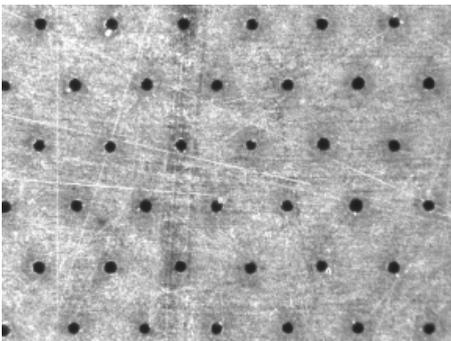
表 2 穴加工試験結果

Frequency (kHz)	Pulse width (ns)				
	400	200	100	60	30
20	123	△	△	■	■
30	108	△	△	△	△
40	○	○	△	△	△
50	○	○	△	△	△

レーザ出力を 60W、1穴あたりの照射時間を 6msec、周波数 50kHz で約 $\phi 0.06\text{mm}$ の穴加工ができる(図 6)。位置決め速度は 1か所あたり約 2msec であり、1穴あたり 8msec で加工でき、125holes/sec の速度である。現在、外形 $42 \times 42\text{mm}$ のフィルタまでが加工できる。



(a) レーザ照射面ワイヤブラシ加工



(b) レーザ出射面の研磨加工

図 6 フィルタの表面・裏面観察

3.3 照射条件設定の考え方

前節では微細な穴あけが可能であることを明らかにしたが、加工例からもわかるように、レーザの入り口と出口で穴径が異なること（テーパ穴）、ドロスの発生を抑える必要があること、アスペクト比の高い深穴加工の検討などを行っていかなければならない。ここでは照射条件を変化させた実験をして、基本的な知見を得る。

図 7 は、パルスレーザの照射条件を図式化したものである。パルスレーザの照射条件は、平均出力 P_{ave} 、照射時間 T 、パルス周波数 f およびパルス幅 T_d の 4 つである。これらが照射するパルスの形状を決定し、またこれらの内、平均出力、パルス周波数およびパルス幅からピーク出力 P_{peak} が、

$$P_{peak} = \frac{P \times f}{T_d}$$

と決定される。図 8 は、各パラメータを変化させた場合のパルス形状を示す。

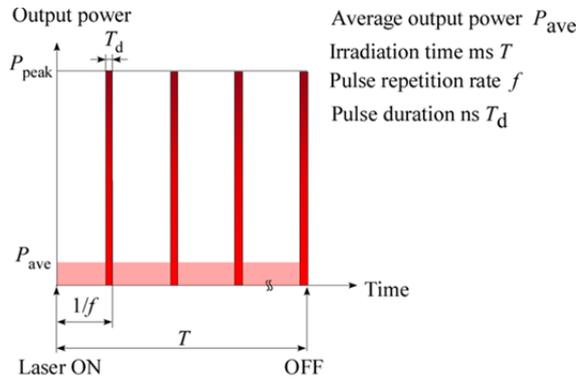


図 7 レーザ照射条件のパラメータの定義

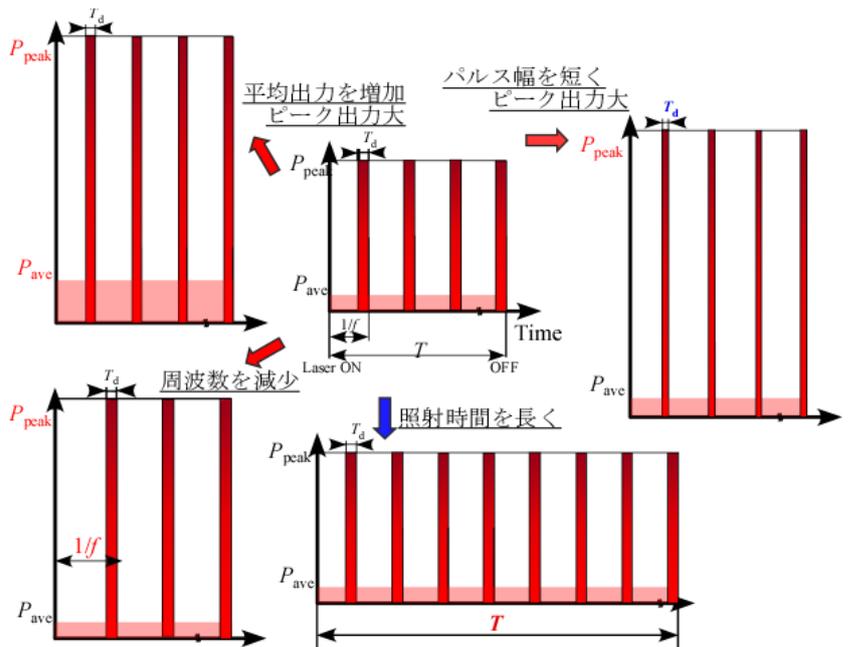


図 8 パルス条件を変化させた時のピーク出力

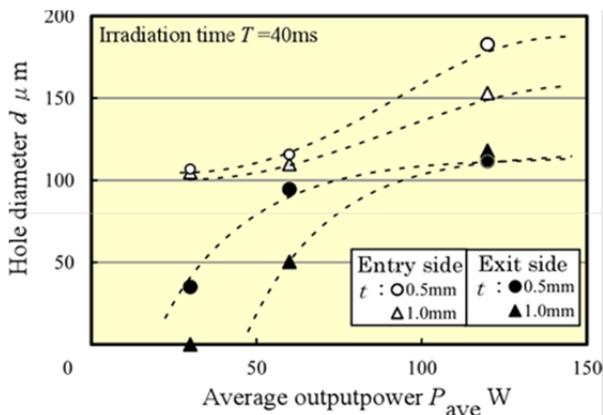
- ・平均出力を増加させた場合、比例してピーク出力が増加する
- ・照射時間を増加させた場合、比例して加工時間およびパルス数が増加する
- ・パルス周波数を減少させた場合、反比例してピーク出力が増加し、反比例してパルス数が減少する
- ・パルス幅を減少させた場合、比例してピーク出力が増加する

4. 実験結果および考察

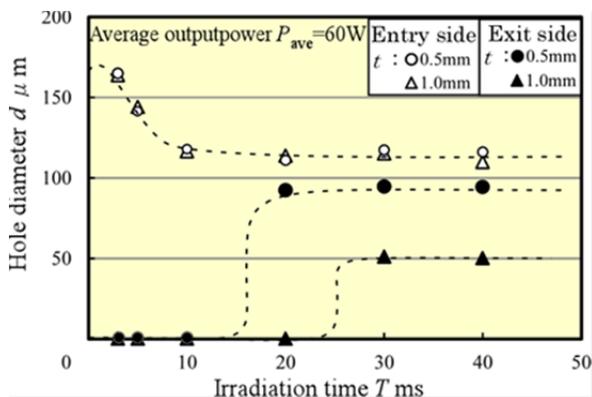
4.1 レーザ照射条件の影響

レーザー照射条件が穴形状に及ぼす影響を明らかにし、適切な条件設定の指針を示すことを目的にした実験を行った。

図9は、平均出力および照射時間と穴径の関係を示す。図(a)より、平均出力が高くなると入射側・出射側穴径ともに大きくなり、出射側穴径で0.05~0.1mm程度まで加工できることがわかる。同じ平均出力の場合は、入射側穴径の方が出射側穴径よりも大きい。入射側穴径は板厚が厚い方が大きく、出射側穴径は板厚が厚い方が小さい傾向にある。図(b)より、穴貫通後は、照射時間が長くなっても入射側・出射側ともに穴径はほぼ同じであることがわかる。同じ照射時間の場合は、入射側穴径の方が出射側穴径より



(a) 平均出力 P_{ave} の影響

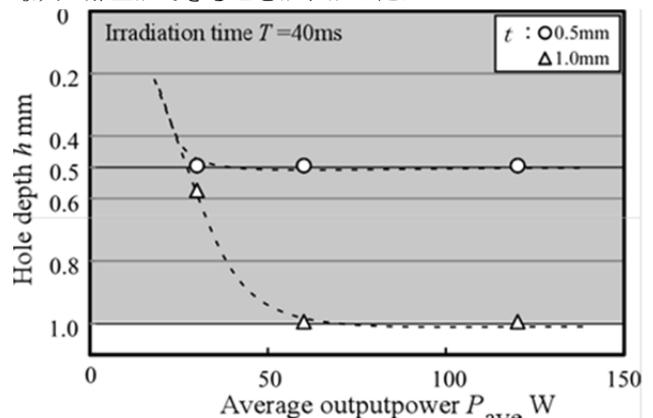


(b) 照射時間 T の影響

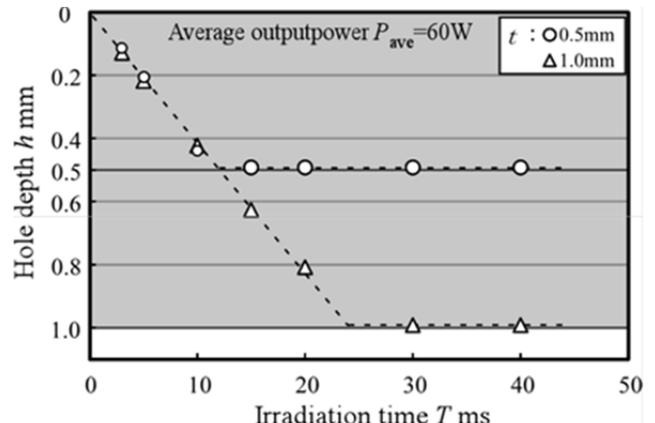
図9 入・出射側穴径に及ぼす平均出力と照射時間

も大きい。入射側穴径は板厚が厚い方が大きく、出射側穴径は板厚が厚い方が小さい。以上より、穴径は、照射時間よりも平均出力の影響を大きく受け、小径穴あけ加工には穴が貫通する範囲内で低平均出力化することが有効であることがわかった。

図10は、平均出力および照射時間と穴深さの関係を示す。図(a)より、照射時間40msでは、板厚0.5mmの場合は平均出力30Wでも穴が貫通するが、板厚1.0mmの場合は平均出力50W程度以上でないと貫通しないことがわかる。図(b)より、板厚によらず、照射時間が長くなると穴深さは比例的に深くなる。以上より、平均出力一定で照射時間を長くすることで、穴径はほぼ一定のまま穴深さを深くできる、すなわち高アスペクト比な穴の加工ができることがわかった。



(a) 平均出力 P_{ave} の影響



(b) 照射時間 T の影響

図10 穴深さに及ぼす平均出力と照射時間の影響

4.2 穴生成機構と穴品質

図11は、入射側と出射側の表面を観察した例である。入射側は穴径も大きく多くのドロスが堆積している。出射側は穴径も小さく、ドロスはほとんど見られない。となると穴品質を保証するためにも、内部の形状(円筒度、真円度)とこれらの形状を生成する過程を明らかにする必要がある。そこで、同じ照射条件であけた多数の穴をワイヤ放

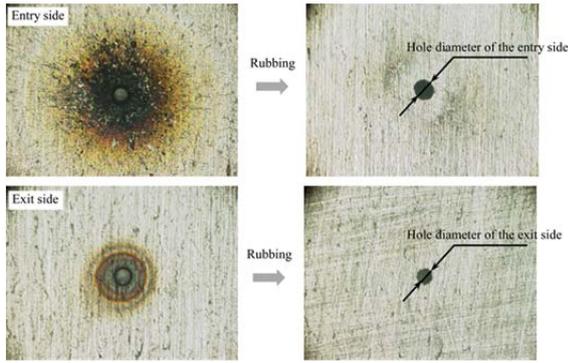
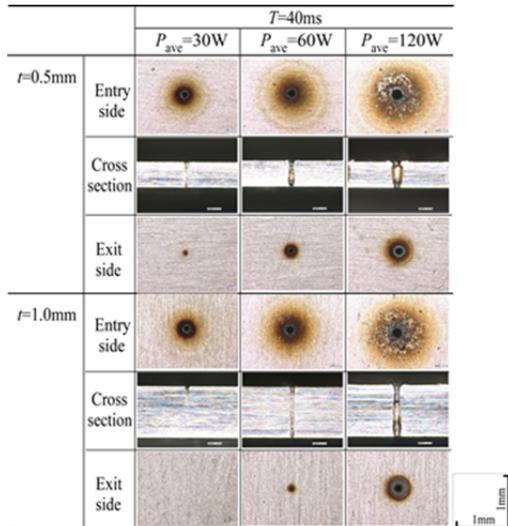


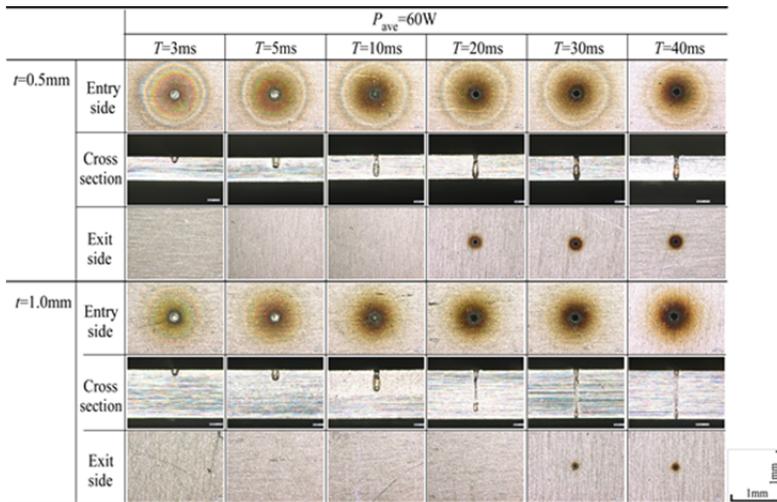
図 11 入射側，出射側の表面観察

電加工機で切断を行い，ちょうど半割にされた穴を選びだして，断面観察を行った。

図 12 は，板厚を変化させた際の穴の観察写真を示す。図(a)は， $T=40\text{ms}$ で平均出力を変化させた場合の観察写真である。 $P_{\text{ave}}=30\text{W}$ で， $t=0.5\text{mm}$ では貫通しているが，



(a) 平均出力の影響



(b) 板厚を変化させた時の穴断面形状の照射時間変化

図 12 穴表面および断面形状の時間変化過程

$t=1.0\text{mm}$ では貫通しなかった。また， $P_{\text{ave}}=60, 120\text{W}$ では， 0.5mm から 1.0mm に板厚を増加させると，定性的にみて円筒度の良い形状に変化することがわかる。

図(b)は， $P_{\text{ave}}=60\text{W}$ で照射時間を変化させた場合の観察写真である。 $T=10\text{ms}$ までは板厚によらずほぼ同一の形状となっている。 $t=0.5\text{mm}$ では，穴の内部に溶融物によって形成されたくびれを生じさせたまま $T=20\text{ms}$ で貫通し，その後は形状の変化はほとんどみられない。 $t=1.0\text{mm}$ では照射時間の増加とともに， $T=10\text{ms}$ ではみられた穴内部のくびれが消失し，徐々により直線的な穴形状に変化していく傾向がみられる。

図 13 は，板厚を変化させた場合の材料の除去過程のモデルを示す。照射時間が短い条件($T=5, 10\text{ms}$)では，断面形状は板厚によらずほとんど同じ形状になる。特に断面を見ると，穴の内部に残った溶融物が，入射側の穴を塞ぐような形状になっている。 $T=20\text{ms}$ で，板厚が薄い条件($t=0.5\text{mm}$)では穴の内部にくびれを残したまま貫通し，それ以降出力密度の高いビーム中心付近のレーザーが穴を通り抜けるため，照射時間を増加させてもほとんど断面形状は変化しない。一方で，板厚が厚い条件($t=1\text{mm}$)では， $T=20\text{ms}$ でさらに穴が深くなるとともに，生成する溶融物の量も増加する。さらに加工点が焦点から離れ，レーザーの出力密度が低下し穴底部で生じる圧力も低下するため，ほとんど溶融物を穴の外部に排出できないようになる。加工は出力密度の高いビーム中心で，生成された溶融物を穴の側面に押し出すことで進む。穴の内部はビームの中心付近以外は溶融物が堆積しており，そのため板厚が薄い場合と比較して断面形状は直線的であり，穴径は小さくなる。

5. 結言

本研究では，ナノ秒パルスレーザー加工機的设计と試験機の構築を行い，サニタリー用フィルタでよく使われるステン

レス鋼板を対象に，レーザー穴あけ加工を行い，レーザー照射条件の設定指針を明らかにした。次にその結果を踏まえて板厚と穴の生成過程について検討した結果，以下に示す結論を得た。

(1) ステンレス鋼板に対してレーザー穴あけ加工実験を行い，その実験結果から材料の除去過程のモデルを示し，穴が貫通するまでの材料除去過程を説明した。

(2) ステンレス鋼板のレーザー穴あけ加工では，加工中に生成した溶融物同士が穴の内部で結合し，穴がふさがり可能性がある。

そのため生成した溶融物を穴の外部に除去する必要があり，加工点をより高圧にする増加させた照射条件が望ましい。

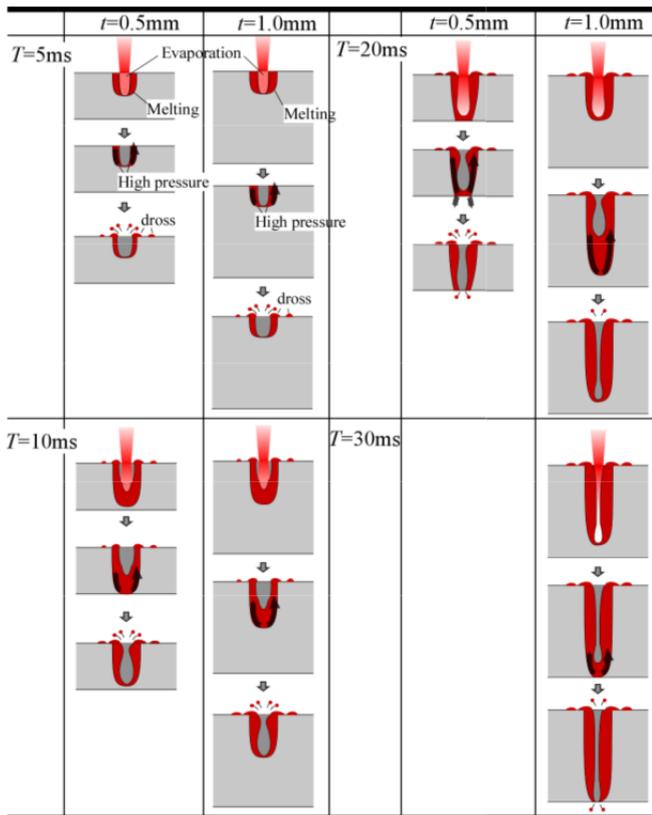


図 13 パルスレーザーによる材料除去過程(60W)

- (3) 2種類の板厚に対してレーザー穴あけ加工実験を行い、その実験結果から板厚が加工穴形状に及ぼす変化を材料除去過程のモデルを用いて説明した。
- (4) 板厚の増加とともにアスペクト比は急激に増加する傾向にあり、今回行った実験条件内ではアスペクト比20(板厚1mm, 穴径50 μ m)の穴あけ加工を行うことができた。

6. 今後の課題

上述のように、加工試験を行い、いくつかの問題点が明らかになった。

(1) 熱変形の低減

加工途中に発生する熱により、ワークは変形する。これにより、中型のフィルタはまだ加工できていない。熱変形の低減する方法としては以下の対策案がある

- ・熱の発生を抑えた加工条件の調査
- ・熱が1か所に集中しない位置決め方法の研究(ランダム位置決め, らせん状位置決めなど)
- ・加工時の冷却方法の検討
- ・熱変形を抑えるジグの開発(エアで吸着, 障子の棧型など)
- ・熱変形を抑えるワークの保持方法(大きいワークをロールして加工する)

(2) ドロス研磨方法の研究

加工後のドロスを除去しないとフィルタとしては使用

できない。

- ・研削加工で除去する方法の研究
- ・除去工具の比較
- ・研磨後にフィルタ穴に詰まった研磨剤の除去(高周波洗浄, スチーム洗浄など)

(3) ドロスの低減

- ・ドロスを発生しにくくする。(真空ボックスにワークを入れて加工, アクリルではさんで加工)
- ・ドロスをワークにこびりつかないようにする。(吹き飛ばし方の研究, 窒素の利用法など)

(4) 加工条件のデータベース

- ・データベースの構築による安定加工
- ・加工条件をCNCから指示できるアプリケーションの開発

(5) さらなる高精度加工

- ・ $\phi 0.04 \sim 0.06$ の穴が安定して加工できる発振器の研究
- ・穴側面のテーパ角度を小さくする加工方法の研究
- ・焦点追従型レーザー照射

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成を受けて行われたものである。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)山崎正：電子ビーム穴あけ加工技術とその応用，砥粒加工学会誌，53，6（2009）12.
- 2)西田，中川，小川：サニタリー規格のフィルタ板の高速加工法の研究開発，精密工学会関西地方定期学術講演会講演論文集，(2010)68.
- 3)K. Ogawa, H. Nakagawa, F. Murase and S. Nishida：Fabrication of Fine Mesh Filter Screen with Pulsed Laser, Key Engineering Materials, 516, (2012)54.