

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

パルスレーザ発振機を用いた高速・微細穴あけ加工機の研究開発

研究開発成果等報告書

平成 22 年 3 月

委託者 近畿経済産業局

委託先 テクノロジーシードインキュベーション株式会社



## 目 次

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| <b>第1章 研究開発の概要</b> .....             | <b>1</b>   |
| <b>1-1 研究開発の背景・経緯・研究目的及び目標</b> ..... | <b>1</b>   |
| (1) 背景.....                          | 1          |
| (2) 経緯.....                          | 1          |
| (3) 目的.....                          | 2          |
| (4) 目標.....                          | 3          |
| <b>1-2 研究体制</b> .....                | <b>6</b>   |
| <b>1-3 成果概要</b> .....                | <b>6</b>   |
| <b>1-4 プロジェクト連絡窓口</b> .....          | <b>7</b>   |
| <b>第2章 本論</b> .....                  | <b>8</b>   |
| <b>2-1 加工機の光学装置の設計</b> .....         | <b>8</b>   |
| (1) 光学装置の設計.....                     | 8          |
| <b>2-2 加工機の製作</b> .....              | <b>8</b>   |
| (1) 加工機の設計・製作.....                   | 8          |
| (2) パワーチェック.....                     | 9          |
| <b>2-3 加工システムの開発</b> .....           | <b>9</b>   |
| (1) 全体構成の設計.....                     | 10         |
| (2) インターフェイス仕様の設計.....               | 10         |
| (3) 下位関数～主処理の開発.....                 | 11         |
| (4) 固定サイクルの開発.....                   | 11         |
| (5) ユーザインターフェイスの開発.....              | 12         |
| (6) ユーティリティプログラムの開発.....             | 12         |
| <b>2-4 加工条件の調査</b> .....             | <b>14</b>  |
| (1) 加工手順.....                        | 14         |
| (2) 穴あけ加工試験.....                     | 15         |
| (3) ドロス除去.....                       | 16         |
| <b>2-5 今後の研究課題</b> .....             | <b>17</b>  |
| <b>最終章 全体総括</b> .....                | <b>188</b> |
| (1) 成果の評価.....                       | 188        |

## 第 1 章 研究開発の概要

平成 21 年度の戦略的基礎技術高度化支援事業である“パルスレーザ発振機を用いた高速・微細穴あけ加工機の研究開発”の概要は、次の通りである。

### 1-1 研究開発の背景・経緯・研究目的及び目標

#### (1) 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。従来、網フィルタが多く使用されていたが、破損した場合、微小な金属片が食品などに混在してしまうため、徐々に微細穴のフィルタに置き換えられている。

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。

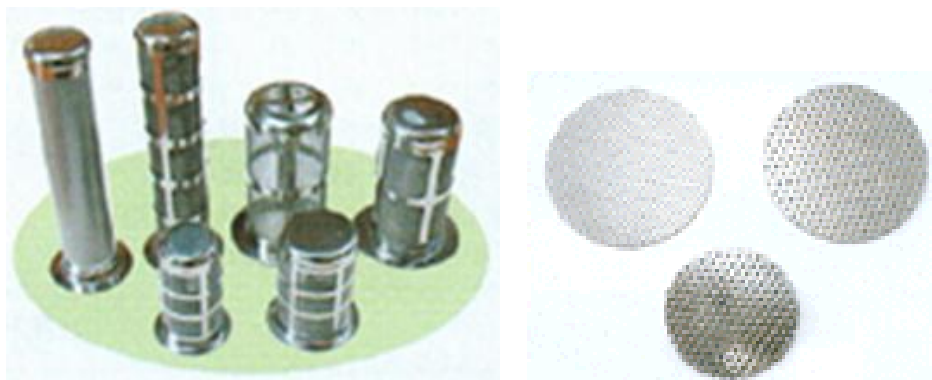


図 1 サニタリー規格のフィルタ製品例

#### (2) 経緯

微細穴のフィルタの穴の特徴は、

##### 1) 数が多いこと

最小間隔のもので 1200 個/cm<sup>2</sup>、φ40mm の円形のフィルタで約 16000 個

##### 2) アスペクト比（縦横比）が大きいこと

最大の比率のもので 7 倍、厚さ 0.5mm のものに対して穴径 φ0.07mm

##### 3) テーパー角度が小さい

約 3.4°、厚さ 0.5mm のものに対して片側の穴径 φ0.07mm の商品で、反対側は φ0.13mm であり、汎用の加工機を用いると、膨大な加工時間を要することになる。

現在市販されているフィルタ板のラインナップを**図 2**に示す。穴径の小さいもの、アスペクト比の高いものほど加工が困難であり、加工の付加価値も高くなる。

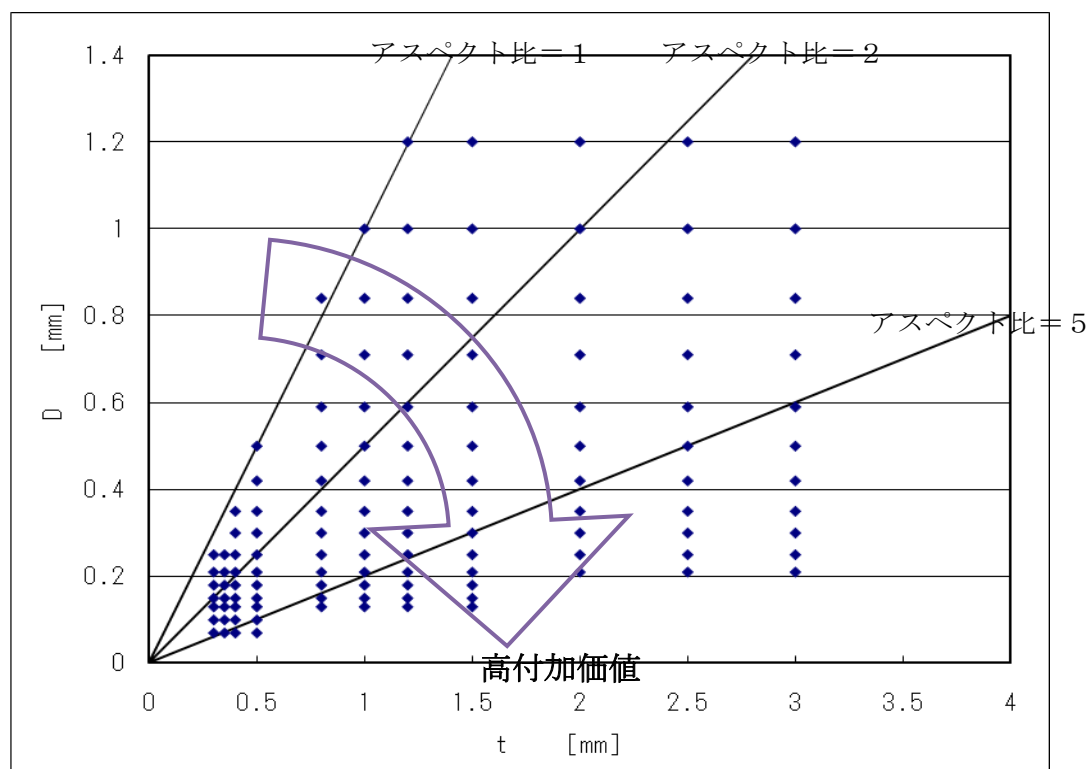


図2 フィルタ製品のラインナップ

金属の穴加工方法は、ドリル加工、フォトリソ、形彫り放電加工、創成放電加工、パンチプレス、レーザ加工（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、本研究開発では、パルスレーザ発振機を用いた高速・微細穴あけ加工機の研究開発を行う。

レーザ発振機単体を調べると、近年、多くの種類の発振機が開発されており、0.07mmの穴を高速に加工できるものが存在している。これらの発振機を用いて、高速に微細穴あけをおこなう加工システムと加工方法の開発をおこなう。

### (3) 目的

電子ビーム加工機による従来加工方法は、サブブロックと呼ばれる 1800mm×900mm のワークを円筒状に曲げ、全面を加工したのち、ワークを平らに戻し、必要な外形に切り出している。このため、1ロットが非常に大きくなり、納期がかかる要因となっている。また、加工にかかる手順も多く、コストアップの要因の1つとなっている。電子ビーム加工機は真空チャンバー内で加工するため、真空維持のために大きくエネルギーを消費しているが、低炭素社会実現に向けた省エネルギー性の向上が求められている。

本研究の目的は、パルスレーザ発振機を用いた加工システムを開発し、高速に微細穴あけをおこなう加工法を確立し、食品・化粧品・医薬品などの製造ラインの配管で使用されているフィルタの安定供給を可能にすることである。

本研究で開発・製作する加工システムは、必要な外形に切り出したワークを直接加工することで、1個ずつの加工を可能にし、納期短縮、小ロット化、省エネルギー化をめざす。(図3)

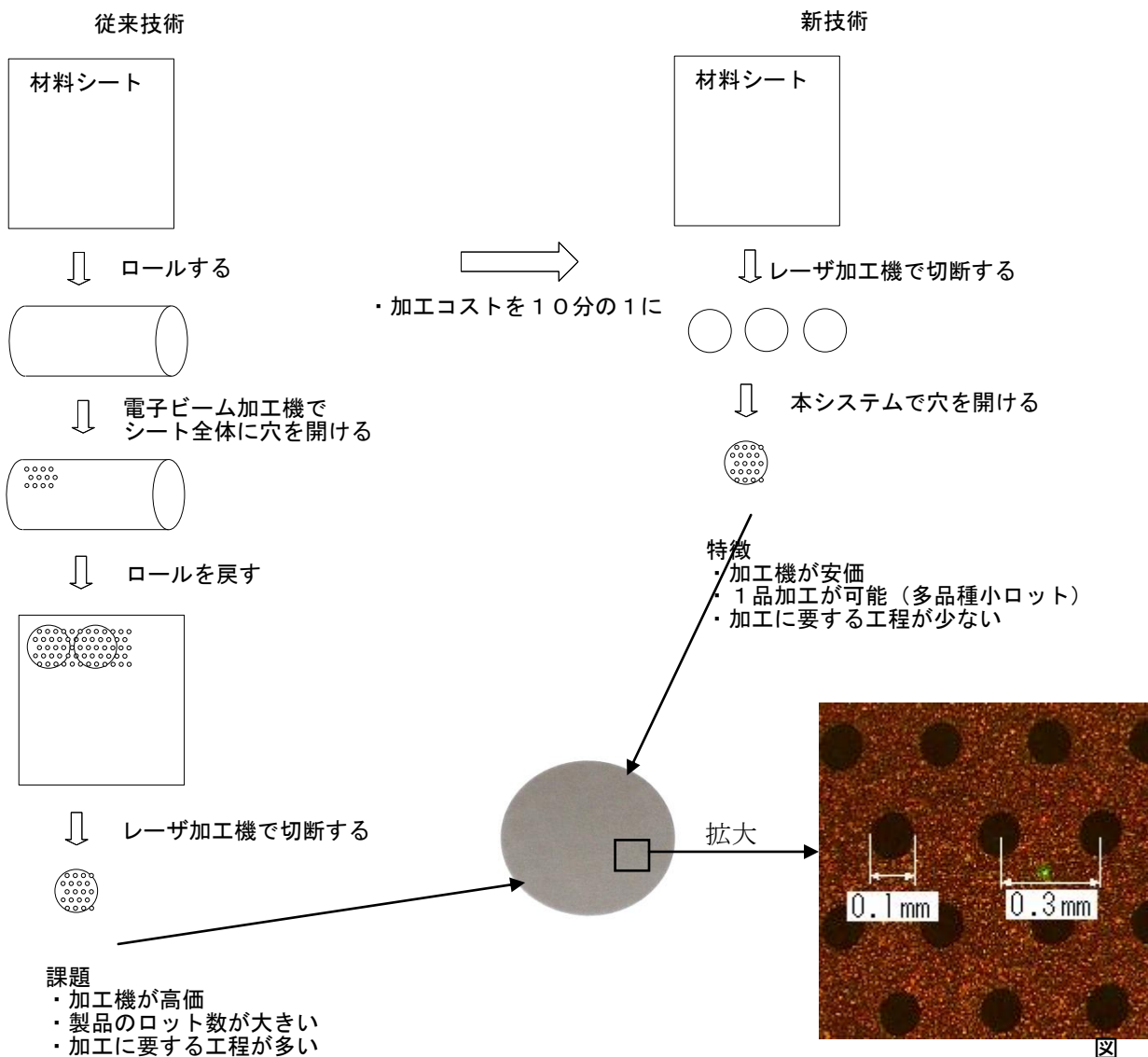


図3 従来技術と新技術のフィルタ製造方法の違い

#### (4) 目標

本研究では、従来技術の問題点を解決するために以下の目標をもつ。

##### 1) 高速化

本プロジェクトではパルスレーザー発振機とガルバノメータを用いて、高速位置決め、高速穴あけ加工をおこなう技術を研究開発し、 $\phi 0.07\text{mm} \sim 0.5\text{mm}$ の微細穴を100holes/secと高速で開ける加工システムを開発する。

従来のレーザー加工機と比較して、ガルバノメータを用いることで、位置決め速度は向上するが、レーザー光の照射範囲は狭くなる。このため、ワークを固定したテーブルの位置決めと、ガルバノメータによるレーザー光の位置決めを併用する。

ガルバノメータはドライバと呼ばれるPC上のソフトウェアによる制御、テーブルはCNCによる制御のため、FANUC社のCNCの持つCNC=PC間のインターフェイスを用いて、加工中にCNC=PC間のデータ授受をおこなうプロトコルを開発する。これにより、 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ のワークまで加工できるようにする。

本加工システムによりフィルタの穴あけは1分程度と短時間で加工でき、電子ビーム加工機と比較しても、安価、高速にフィルタを製造することができるようになる。

レーザー光は、ガルバノメータによって向きを変えられた後、F $\theta$ レンズによってワーク表面に集光照射される(図4)。

レーザー光がF $\theta$ レンズのどの位置に入射しても、同径に絞り照射できるように、F $\theta$ レンズを設計する。

F $\theta$ レンズの使用できる範囲が広ければ広いほど、ガルバノメータのみで加工できる面積が広くなり、穴位置の精度を向上し、トータルの加工時間が短縮できる。

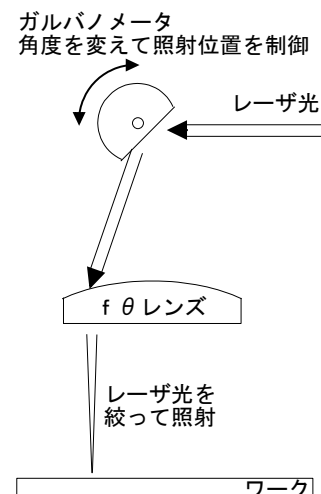


図4 ガルバノメータとF $\theta$ レンズ

## 2) 高精度化

本加工システムを設計するにあたり、集光をおこなうF $\theta$ レンズの研究をおこない、側面角度を1°まで小さくし、より精密な穴加工をおこなう。これにより、穴間距離を小さくできるのでより高密度な穴あけが可能となる。

また、本プロジェクト終了後は、レーザーをより細く集光できる発振機を用い、その発振機にあわせてF $\theta$ の研究開発をおこない、従来は加工できなかった $\phi$ 0.07mm未満の超微細穴加工の研究をおこなう。

## 3) 省エネルギー性の向上

パルスレーザー発振機は、板金切断向けのCO<sub>2</sub>、Yag等の発振機に比べて小電力で使用できる。また、電子ビームのように真空設備も不要なため、省エネルギー性の向上が実現できる。

また本システムは小ロット・1品加工が可能となるため、加工するワークも無駄がなく、経済性・環境性が非常に良い。LCA（ライフサイクルアセスメント）解析により、フィルタ生産に要する総エネルギーをCO<sub>2</sub>排出量に換算して定量的に評価する。電子ビーム加工機をレーザー加工機に置き換えた場合、レーザー加工機を一般的に使用されているCO<sub>2</sub>レーザーやYAGレーザーからファイバレーザーに置き換えた場合、ファイバレーザーを用いてフィルタ製造する上で、どの工程でエネルギー消費が大きいかを分析し、環境負荷の観点から開発の方向性を決める。

本研究で開発する加工システムの技術的目標値は、

### ①高速化

#### -加工条件

材質：SUS316L、板厚：0.5mm、外形： $\phi$ 25.4mm円形のワークに、0.3mm間隔で直径0.07mmの穴を均等に開ける。穴個数は約6000個である。

## -目標値

60 秒

## -目標値の算出根拠

パルスレーザ発振機の穴あけ速度は、加工条件の場合、最速で1穴あたり約5msecである。位置決め時間が穴あけと同等にかかると考え、1秒あたり100個の穴あけを目標値とした。加工機の年間ランニングコスト（減価償却＋電気代＋設置費用など）と人件費の総額は約3600万円である。実稼働時間が年間1000時間とすると、1時間あたり3万6000円、フィルタ1枚の加工コストは600円になる。

## -従来技術との比較

従来技術である電子ビーム加工機の加工時間は公開されていないが、加工条件のフィルタの販売価格は1万円以上するため、加工原価600円であれば、じゅうぶん競争力があると考えられる。

## ②高精度化（穴の側面角度）

## -加工条件・測定方法

材質：SUS316L、板厚：0.5mmのワークに、0.07mmの穴を均等に開ける。  
顕微鏡を用いて、両側の穴半径を測定して、三角関数を用いて計算する。  
表側の直径をDa、裏側をDbとすると、テーパ角度 $\theta$ は

$$\theta = \tan^{-1}(|Da - Db| \div 2t) \quad (\text{板厚 } t = 0.5 \text{ [mm]}) \quad \text{となる。}$$

## -目標値

1.0°

## -従来技術との比較

電子ビーム加工機でのテーパ角度 3.4°  
加工条件の直径0.07mmの穴は裏側では直径0.13mmまで変形してしまっている。  
フィルタのユーザからは、よりストレートな穴のニーズがある。

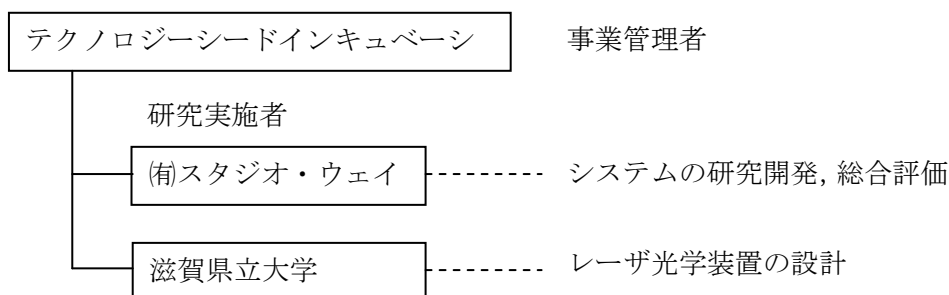
## ③小ロット化

従来技術では、900mm×1800mmのワークを加工して、小さいワークの外形に合わせて切断するため、外形がφ25.4mmのフィルタ板の場合、1ロット1000個以上であったが、本加工システムでは、ワークを固定するジグを制作し、φ25.4mmのフィルタに対して、1ロット1個のみの加工をおこなう。



## 1-2 研究体制

(有) スタジオ・ウェイズと滋賀県立大学を研究実施者として研究開発を進める。また、加工機の製作については(株) レーザックスの協力を得る。加工システムの最下位のソフトウェアであるドライバーについては(株) デジオスの協力を得る。



## 1-3 成果概要

本年度は(1)～(5)の研究を行った。その結果、次のことが明らかになった。

### (1) 光学装置の設計

机上計算で加工点での照射スポット径の計算をおこない、照射スポット径が約0.07mmになる光学装置の設計をおこなった。簡易的な事前試験で設定の調整をおこない、より最短時間で加工できる機器構成を選定した。最適な構成は以下のとおりである。

|              |          |
|--------------|----------|
| f θ レンズ・焦点距離 | : 100mm  |
| 発振機の出力       | : 10mJ   |
| アパーチャ径       | : 20.5mm |
| ビーム・エキスパンダ倍率 | : 2.5 倍  |

### (2) 加工機の開発

マシニングセンタをベースに主軸の代わりに、(1)で設計した光学装置を取り付け、レーザー加工機を開発した。またワークの熱変形を低減するジグの開発をおこない、加工ができることを確認した。

### (3) 加工システムの開発

加工機のテーブルを動作するCNCのインターフェイスと、レーザー光学装置による位置決めをおこなう加工ヘッドのドライバとのインターフェイスを開発し、それらをつなぐ主処理アプリケーションを開発した。

これにより、CNCの操作で加工ヘッドも動作させられるようになることを確認した。

### (4) 加工条件の調査

板厚0.5mmのワークに対して、φ0.07mmの穴をあける最適な条件を調査した。最速の条件で1秒あたり125個の穴が開けられることができた。また、板厚1.0mmのワークに対し

て、 $\phi 0.07\text{m}$  の穴をあける最適な条件を調査した。最速の条件で 1 秒あたり 71 個の穴を開けられることができた。ワークは熱変形をするが、充分修正可能であり、大きな問題はなかった。

レーザ照射面側に、ドロスが堆積した。ワイヤブラシ・サンドペーパーでは半分程度しか除去できなかったため、今後、研削方法などの研究が必要である。

フィルタ面が  $220\text{mm} \times 220\text{mm}$  の大きいワークを加工する場合、熱変形が大きく、安定して加工することができなかった。今後、熱変形を低減する加工法、ジグなどの開発が必要である。

#### (5) 加工評価

テーブルの移動と加工ヘッドを連動させて加工した。システムとして連動することができた。この結果、加工ヘッドの指令値と実際に加工している位置の誤差を測定することができ、調整のための手法の検討をおこなった。今年度中に、調整をおこない、位置誤差を低減する。

以上、本年度の、「パルスレーザ発振機を用いた高速・微細穴あけ加工機の研究開発」においては、大きな進展があり、事業化にむけて、技術的にも、経済的にも問題点が明確になるレベルにまで研究開発を進めることができた。第 2 章では、本年度に行った研究内容について述べる。

## 1-4 プロジェクト連絡窓口

### ■ 事業管理者：テクノロジーシードインキュベーション（株）

〒600-8427 京都市下京区松原通烏丸西入玉津嶋町 316-2 川南ビル 6F

電話：075-352-2091 FAX：075-352-2092

担当者：奥村 幸司 (koji-okumura@tsi-japan.com)

### ■ プロジェクトリーダー

西田 晋 (susumu3@jcom.home.ne.jp)

(本社所在地)

(有) スタジオ・ウェイズ

〒167-0042 東京都杉並区西荻窪 3-28-8

電話：03-3394-5322 FAX：03-3394-5322（自動切替）

### ■ サブリーダー

中川 平三郎 (nakagawa@mech.usp.ac.jp)

公立大学法人 滋賀県立大学 工学部教授

小川 圭二 (ogawa@mech.usp.ac.jp)

公立大学法人 滋賀県立大学 工学部助教

〒522-8533 滋賀県彦根市八坂町 2500

電話：0749-28-8390 FAX：0749-28-8478

## 第2章 本論

### 2-1 加工機の光学装置の設計

#### (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おこなった．

光学装置の構成を図5に示す．

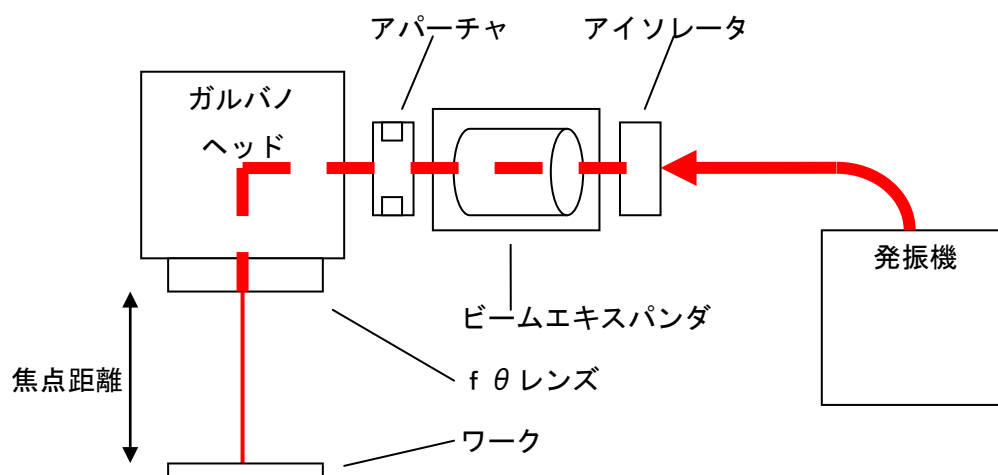


図5 光学装置の構成

### 2-2 加工機の製作

加工機本体はマシニングセンタとして設計された加工機に対して，主軸モータの代わりに，レーザ光学装置を取り付けて製作する．

加工するワークサイズが最大で 300mm×300mm であり，ワーク取り付け台を考慮すると，テーブルの可動範囲は 400mm×400mm 以上必要である．また制御装置は外部のパーソナルコンピュータとデータの授受をおこなうため，FANUC 社の FOCAS2 というプロトコル対応の機種を使用する．

#### (1) 加工機の設計・製作

加工ヘッドなど光学装置は，図5で示した装置を使用する．

当初 PC と加工ヘッドの接続は図7のように制御カードを使用する構成を考えていたが，現在は図6の構成が一般的であることがわかったため，図6の構成に変更した．

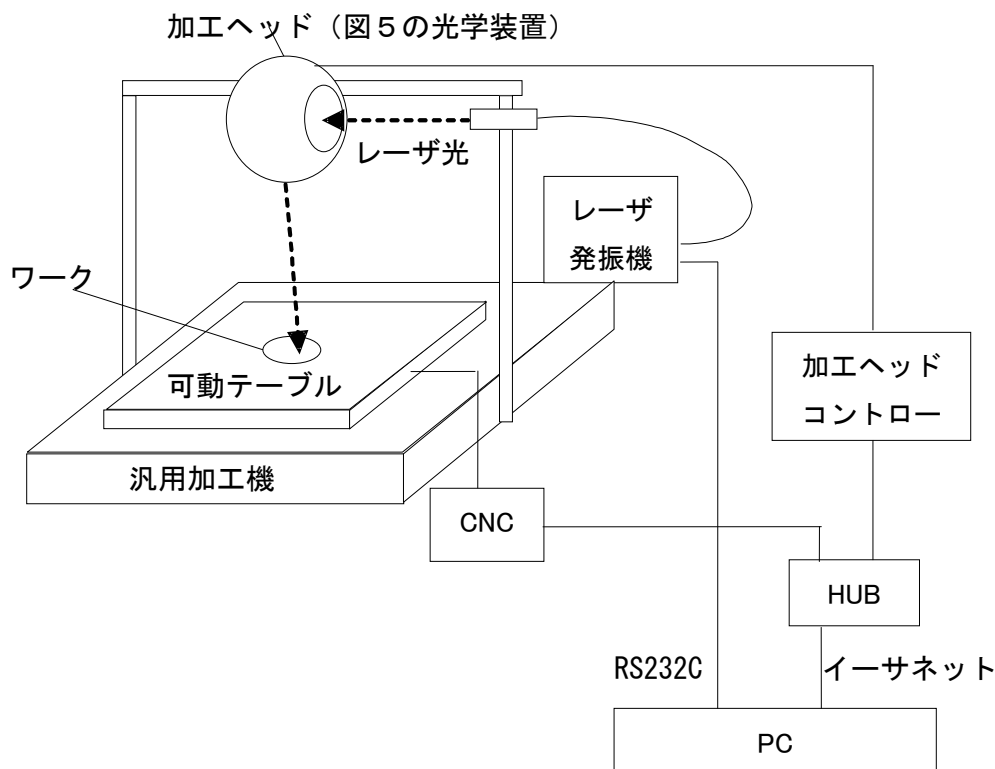


図6 加工システムの概要



図7 加工システムの概要（当初案）

## （2）パワーチェック

発振機のパワーチェックでは照射位置で約23%のパワーロスが測定された。

特に問題はないが、経年変化、季節要因などの影響があるため、今後も照射位置で測定する。

## 2-3 加工システムの開発

従来、加工ヘッドの制御プログラムは、加工ヘッドのコントローラに接続されたPCで形状入力し事前に加工プログラムとして登録しておかないと動作させられなかった。今回開発した加工システムでは、加工機本体のCNCに入力したNCプログラムを拡張し、CNCの操作で加工ヘッドも動作させることを可能とする。これにより、テーブルの動作と加工ヘッドの動作を総合的に判断することができるようになり、操作性の向上、段取りの削減により、総加工時間を短縮することができる。

以下に、本年度最終の仕様を記述する。

### (1) 全体構成の設計

ソフトウェアの全体構成を図8に示す。赤い線で囲まれた部分が新たに開発した部分である。

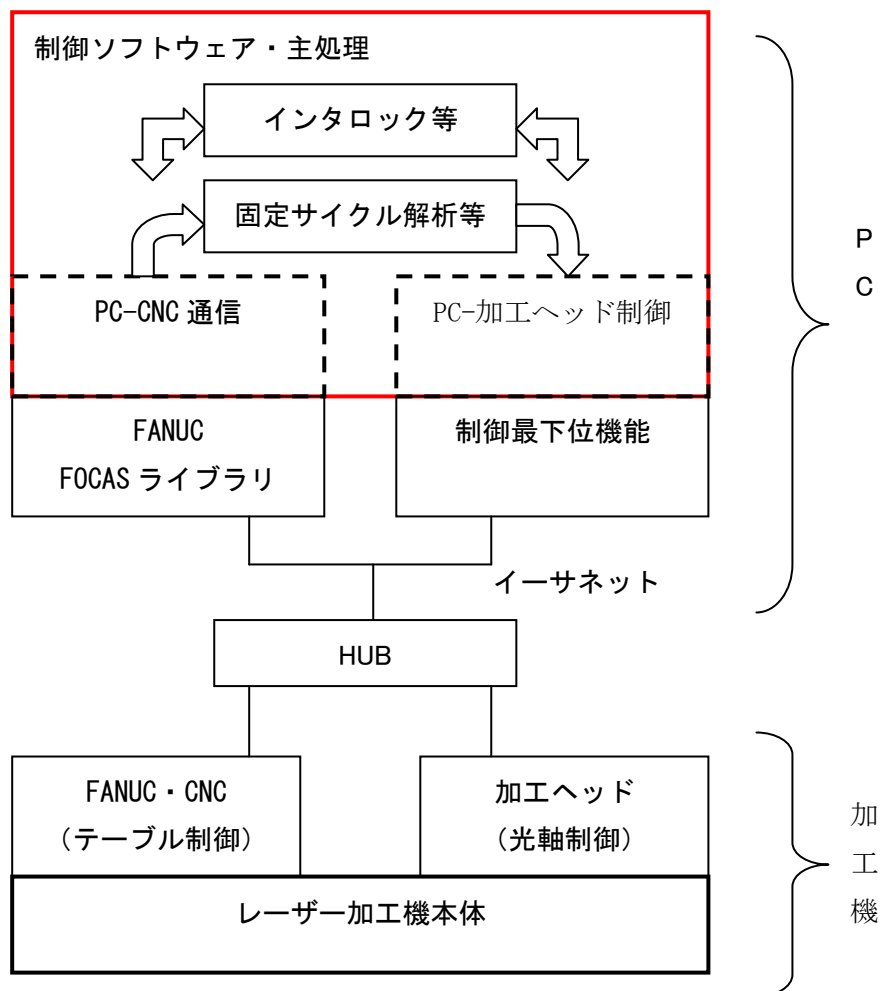


図8 加工システムの構成

### (2) インターフェイス仕様の設計

加工システムの開発にあたり、内部処理の手順を検討し、PC=CNC間と、PC=加工ヘッドコントローラ部分のインターフェイスを開発した。

#### 1) PC=CNC インターフェイス

PC=CNCのインターフェイスの最下位の機能は、FANUC社のFOCAS2 (FANUC Open CNC API Specification Version 2) ライブラリを使用した。FOCAS2はCNCが内部で持つ情報を入出力する関数群であるが、それらに対してメモリ管理が正しくできるように、C++インターフェイスを開発した。

#### 2) PC=加工ヘッドコントローラインターフェイス

加工ヘッドコントローラの外部からの操作は、製造元のArges社から一部しか公開されていないため、一部のインターフェイスは加工ヘッドコントローラに標準添付のアプリ

リケーションを、デバイスドライバとして操作するための、下位ドライバを開発した。

この下位ドライバでは、従来、標準添付のアプリケーションの加工開始ボタンを内部で自動的に押して加工開始をおこなうなど、従来、人為的におこなっていた操作をすべて自動的におこなう機能を持っている。

### (3) 下位関数～主処理の開発

開発環境は、Microsoft 社 VisualStudio2005/C++OS を用いて、WindowsXP/ServicePack3 上で動作するアプリケーションプログラムを開発した。

#### 1) 加工ヘッドコントローラ動作準備 OK 信号の読み取り

加工ヘッドから CNC に動作準備 OK 信号が入るので、CNC 経由で信号を読み取る。

#### 2) CNC の運転モードの読み取り

CNC のシステムステータスを読み取り、メモリ運転モードに入った段階で、CNC 内部のプログラムを読み込み、NC プログラムの解析をおこなう。

NC プログラムの解析方法については「(4) 固定サイクルの開発」に記載する。

#### 3) 加工データの作成

2) で解析した固定サイクルから計算した加工穴位置を記述した DXF ファイルや JOB ファイルを作成する。DXF ファイルは CAD で使用される一般的なファイルフォーマットで、図形の幾何情報だけでなく色や図形の太さなどの属性情報を持つ。JOB ファイルは加工ヘッドコントローラの Arges 社独自のフォーマットで、図形の幾何情報、加工条件などをもつ。

いずれも、加工ヘッドで使用する場合は、幾何情報のみを使用する。

#### 4) 加工ヘッドコントローラへ加工開始指示

3) で作成したファイルの座標位置を加工するよう、下位ドライバに指示をする。

#### 5) 加工終了の監視

加工ヘッドから CNC に加工終了信号が入るので、CNC 経由で信号を読み取る。

### (4) 固定サイクルの開発

#### 1) 固定サイクルの制限事項

追加した固定サイクルはすべて標準の CNC には存在しない G コードであり、そのまま CNC に実行させようとするすると CNC 上でエラーが発生する。このため、CNC にエラーが出ないようにするために、同じ番号の G コードを追加しなくてはならない。これら G コードを追加するまでは、以下の制限を設けることとする。

制限①：固定サイクル行は括弧でかこむ

制限②：固定サイクル行の後に、加工を開始する M コードを追加する。

|    |                                        |        |
|----|----------------------------------------|--------|
| 例) | G01 X120.0 Y200.0 F1000                | テーブル動作 |
|    | (G200 X10.0 Y11.0 I40.0 J35.0 P0.3 D0) | 固定サイクル |
|    | M136                                   | 加工開始   |

## (5) ユーザインターフェイスの開発

加工システム起動直後は、FOCAS2 の初期設定のパラメータ設定をおこなうダイアログを表示する。各、パラメータは初期設定ファイルに保持しており、最後に入力された値が次回以降も使用できるようにしている。

初期設定画面を終了すると、モニタ画面が表示される。モニタ画面では、常時 CNC の状態を監視しており、加工ヘッドから CNC の状態の来歴を表示している (図 9)。

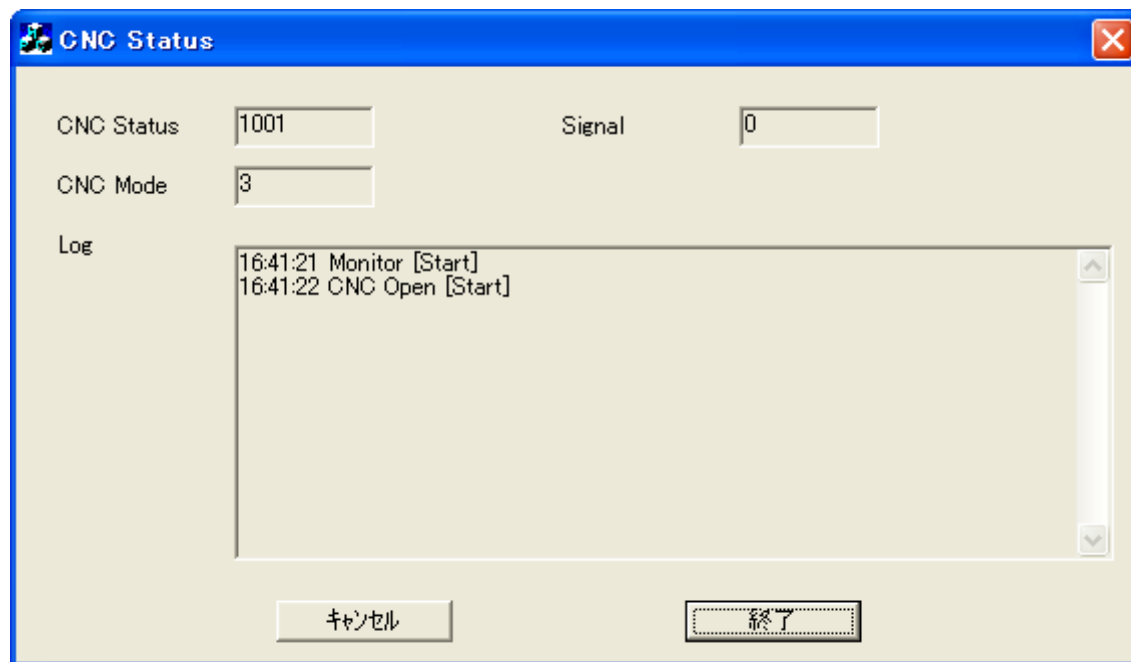


図 9 加工システムのモニタ画面

モニタ表示された内容は、ログファイル (LaserGUI.log) に追記し、すべて残す。

## (6) ユーティリティプログラムの開発

主処理開発時、また、テストデータ作成時に、作業効率化のために、ユーティリティプログラムを開発した。

### 1) 加工試験用メインプログラム作成アプリケーション (CreateMain.exe)

加工ヘッドの照射面積より大きいフィルタを加工する場合、テーブルを動作させて何度か固定サイクルを実行しないと加工できない。このため、矩形のフィルタの外形を入力することで、テーブル動作のためのメインプログラムを作成するアプリケーションプログラムを開発した。

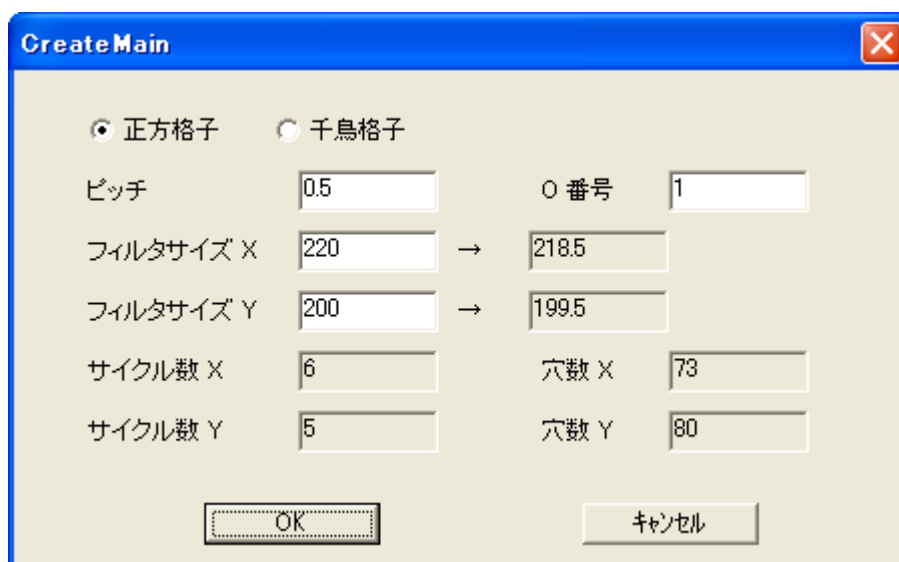


図 1 0 CreateMain.exe の表示例

## 2) DXF ファイル中の点座標確認アプリケーション (DxfToTxt.exe)

固定サイクル開発時に、正しく DXF ファイルが作成できていることを確認するためのアプリケーション。起動前のダイアログは無く、終了時に DXF ファイルに含まれていた点数をダイアログ表示するのみである。

DXF ファイルに含まれていた点座標は、DXF ファイルと同じフォルダに TXT ファイルを作成する。

## 3) 発振機のパラメータ設定アプリケーション (HeadParam.exe)

発振機に標準添付の照射設定アプリケーションは、1 サイクルあたりの照射時間が 5 段階でしか選択できない。RS232C 経由で設定コマンドを送るとナノ秒単位で設定ができるようになっているため、細かく設定するためのアプリケーションを開発した。(図 1 1)

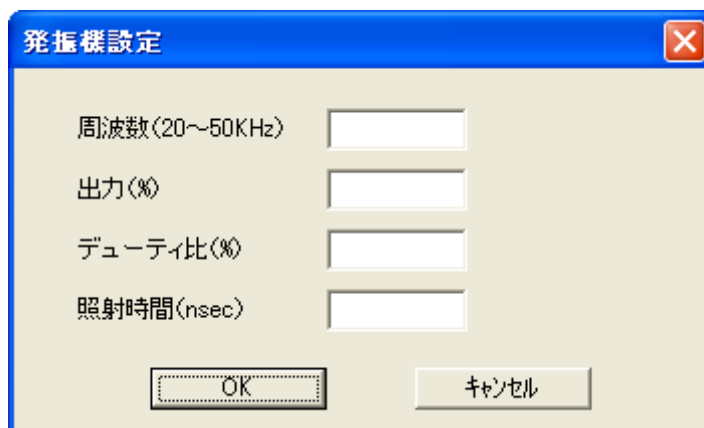


図 1 1 HeadParam.exe 起動直後

## ・ 周波数

発振機の周波数。 20.0～50.0 の値を入力する。(現在、未対応)

## ・ 出力

発振機の出力を%で指定する。 照射位置で 100%が 200W 弱となる。(現在、未対応)

## ・ デューティー比



発振機のデューティ比を入力する． 照射時間  $= 1 \div \text{周波数} \times \text{デューティ比}$  で計算された値が，下記の照射時間のエリアに入力される．（現在，未対応）

- ・照射時間（パルス幅）

- 1 サイクルあたりの照射時間をナノ秒単位で入力する．

## 2-4 加工条件の調査

加工機を用いて，微細穴加工のための加工条件を調査した． 加工条件とは，

- 1) 発振機の出力
- 2) 発振機の周波数
- 3) パルス幅（1 サイクルあたりの照射時間）
- 4) 1 穴あたりの照射時間

である．

### （1）加工手順

加工は以下の手順でおこなう． 焦点位置がずれると加工できないため，焦点合わせは繰り返しおこなう必要がある．

#### 1) 焦点合わせ

- ・発振機には，発振機と同軸の位置に赤色のガイド光を出力する機能がある．ガイド光は，レーザの照射位置，だいたいの焦点位置を確認するための代用光で，加工はおこなえない．まず，ガイド光でワークの表面とだいたいの焦点位置とを合わせる．

- ・焦点合わせ用の加工プログラムで加工する．

Z を 0.5mm ずつ上昇させて，穴を 10 か所あけるプログラムで，10 か所の中で最適な穴を探し，その穴を加工した際の Z 位置が焦点にあっていると判断する．（図 12）

- ・焦点合わせ加工の場合は，発振機の出力を 20 % 程度に下げ，1 穴あたりの照射時間を 0.5 秒に変更しておこなう．最適な穴が見つかるまで何度か繰り返す．なお，焦点合わせに用いたワークは，以降，使用できないので廃棄する．

#### 2) 加工基準位置合わせ

- ・加工機には，発振機と同軸の位置の表示がおこなえる CCD カメラを取り付けているため，カメラ画像を用いて，ワークの中心点を検出する．

- ・ワークの X+方向の端位置をカメラ画像に表示するよう，テーブルの X 軸を動かし，その時の X 座標値を読み取る．

- ・ワークの X-方向の端の座標値も同様に読み取る．

- ・ワークの Y+方向の端位置をカメラ画像に表示するよう，テーブルの Y 軸を動かし，その時の Y 座標値を読み取る．

- ・ワークの Y-方向の端の座標値も同様に読み取る．

- ・以上より +端と -端の中心位置がワークの中心点と考え，その位置にテーブルを移動する．

#### 3) 発振機の設定

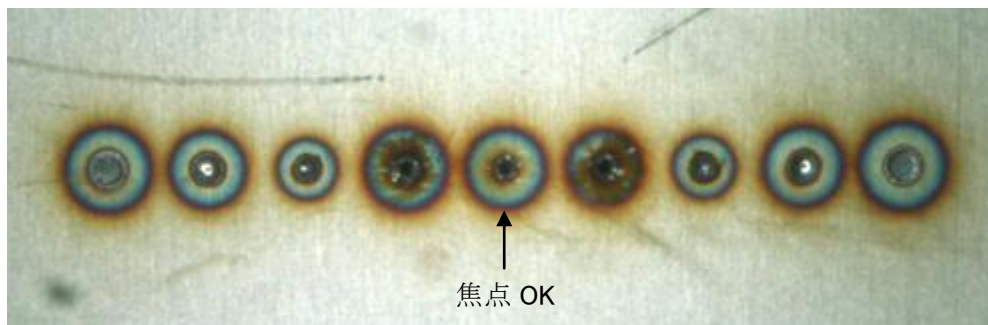
加工条件に合わせて、発振機の出力、周波数、パルス幅を設定する。

4) 1 穴あたりの照射時間設定

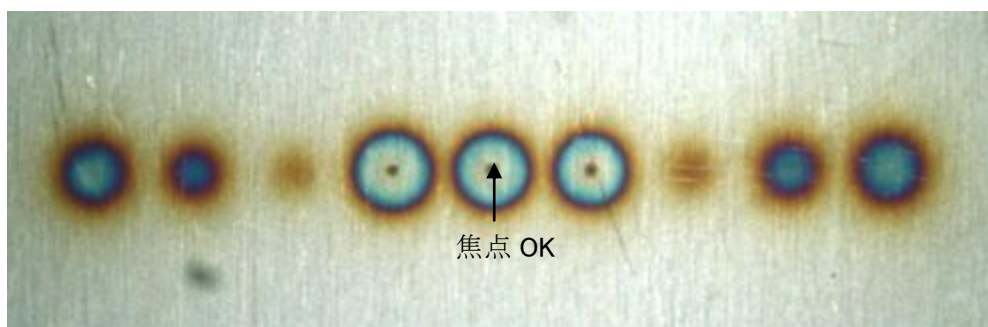
加工ヘッドの設定アプリケーションを用いて 1 穴あたりの照射時間を設定する。

5) 加工開始

CNC をメモリ運転モードに変更して、START ボタンを押下する。



(a) 表面（照射側）



(b) 裏面

図 1 2 焦点合わせ加工結果

## (2) 穴あけ加工試験

### i) 位置決め速度

穴あけ加工をおこない、位置決め速度の計算をおこなった。1 穴あたり約 2msec で位置決めをおこなえることがわかった。また、1 穴あたりの照射時間を 6ms で加工した場合、目標値の 1 秒あたり 100 個を超え、125 個加工できることがわかった。

### ii) エネルギー消費量

1000 個のフィルタを生産に要する消費電力の観点で従来の電子ビーム加工と比較評価した。加工に要する時間は 2100 分（35 時間）、待機時間を 1200 分（20 時間）として、各装置の消費電力を試算する。

・従来の電子ビーム加工では、

電子ビーム照射時の電力が不明のため、CO<sub>2</sub> レーザに置き換えて考えると、

照射時の電力：1700W \* 35 = 59.5KWh（コヒレント社製品）

真空引きに要する電力：650W \* 55 = 35.75KWh（KNF 社真空ポンプ）

合計 95.25KWh

・本加工システムは

照射時の電力：1200W \* 35 = 42KWh ( $42/95.25 \approx 0.56$ )

で、56%削減できることがわかった。さらに、各装置の生産に要するエネルギーを含めたLCAにより、従来の電子ビーム装置（真空装置含む）に比べて非常に大きい省エネ効果が期待できる。

### (3) ドロス除去

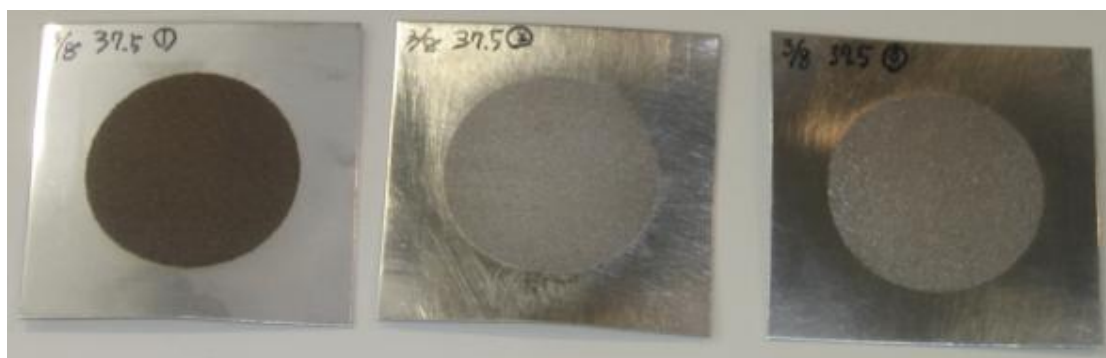
#### 1) 表面研磨

フィルタの裏面に付着したドrossを研磨によって除去した。ステンレスは粘性が高く、加工直後にサンドペーパーで磨くと、ドrossは除去できずに折れ曲がるのみで、フィルタ穴につまってしまう。このため、高速に除去する方法が効果的と考え、硬質のワイヤブラシを使用した。

- i) 穴あけ加工をおこなった  $t=0.5\text{mm}$  のワークの表面を、ワイヤブラシで削った後、エアブラシでフィルタ穴に詰まった削りカスを吹き飛ばした。ワイヤブラシではドrossが除去しきれなかった。
- ii) i) のワークに対して、金属研磨材で研磨した。研磨後、フィルタ穴に詰まった研磨材をエアブラシで吹き飛ばそうとしたが、一部はこびりついていて除去できなかった。
- iii) ii) のワークに対して細目の耐水サンドペーパーで磨いた後、金属研磨材で研磨した。ii) 同様に研磨材をエアブラシで吹き飛ばそうとしたが除去しきれなかった。
- iv) フィルタの裏面を、金属研磨材のみで研磨した。
- v) 穴あけ加工後の  $t=1.0\text{mm}$  のワークの表面を、ワイヤブラシで削り、i) のワークと比較した。

図16に i)～iv) で研磨したワークの全体画像を示す。

裏面は上記 i) ii) iii) の工程をおこなっても、面粗度は粗すぎる。また、 $t=1.0\text{mm}$  のワークは  $t=0.5\text{mm}$  のワークと比較すると、さらに面粗度は粗くなっている。表面研磨の手法については今後、効率の良い方法について研究をすすめることとする。



(a) 表面、左より 研磨前、ワイヤブラシ加工後、ワイヤブラシ+研磨材加工後

図16 研磨途中のワーク

## 2) 窒素加工

窒素ガスの吹き付けによる酸化防止効果でドロスの低減を狙った。

加工中は火花の量がじゃっかん減っているが、加工後のワークに違いはなかった。通常の固定光学装置においてはレーザ照射部直近にノズルを配置し、集中的に不活性ガス（窒素）を吹き付けることでその効果は見られる。しかし、今回のガルバノ- $f\theta$  レンズ系においては、それが不可能なため、レーザ照射部より離れたところから、拡散した窒素ガスを吹き付けるしかなかったため、その効果が発現されなかったものと考えられる。窒素を利用した加工方法については今後も研究を継続する。

## 2-5 今後の研究課題

上述のように、加工試験をおこない、いくつかの問題点が明らかになった。これらは、来年度以降、研究を継続し解決してゆきたい。

### (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

- 1) 熱の発生を抑えた加工条件の調査
- 2) 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）
- 3) 加工時の冷却方法の検討
- 4) 熱変形を抑えるジグの開発（エアで吸着、障子の栈型など）
- 5) 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。

- 1) 研削加工で除去する方法の研究
- 2) 除去工具の比較
- 3) 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

- 1) 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）
- 2) 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

- 1) データベースの構築による安定加工
- 2) 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) さらに高精度加工

- 1)  $\phi 40 \sim 60 \mu\text{m}$  の穴が安定して加工できる発振機の研究
- 2) 穴側面のテーパ角度を小さくする加工方法の研究

## 最終章 全体総括

### (1) 成果の評価

今年度、高速・微細穴あけ加工機の設計製作、加工システムの開発、加工試験を行った。それにより得られた結果は次の通りである。

- i. パルスレーザ発振機を用いた高速・微細穴あけ加工機を開発した。板厚 0.5mm のステンレス板に対して、0.3mm ピッチで  $\phi 70\mu\text{m}$  を加工することができた。加工速度は目標値の 100 穴/秒に対して、125 穴/秒を実現できた。穴側面のテーパ角度は、目標値  $1.0^\circ$  に対して  $2.9^\circ$  であった。
- ii. CNC から加工ヘッドを制御するための、加工システムアプリケーションプログラムを開発し、CNC に固定サイクルの指示をおこなうことで、加工ヘッドを動作させられることを確認した。
- iii. i, ii を用いて小型フィルタ板の加工をおこなった。直径 40mm のフィルタ板を約 2 分で加工することができ、1 ロット 1 個のみの加工ができることがわかった。また、表面に堆積したドロスを削り取らないといけないことがわかった。
- iv. i, ii を用いて中型フィルタ板の加工をおこなった。160mm×160mm の矩形フィルタは加工中の熱変形が大きく、変形を低減しないと穴加工が正しくおこなえないことがわかった。また、加工ヘッドの加工位置誤差を測定する方法を考案した。