

卓上型放電微細穴加工装置の試作

○熊澤 克芳^{A)}, 御厨 照明^{A)}, 増田 俊雄^{A)}, 立花 一志^{A)}, 中木村雅史^{A)}

^{A)} 名古屋大学全学技術センター (工学系)

1. はじめに

近年、電子部品、医療用機器などの分野において超微細、マイクロ・ナノ部品などのニーズが増加しつつあり、それに伴う加工技術開発が課題となっている。一方、工学系分野においても研究対象がナノ・原子レベルに至っており、今後そういった微細加工の工作依頼も予想される。そこで我々は、将来の微細加工依頼に対応することができるよう卓上型放電微細穴加工装置の設計・試作を提案し、技術研修として行った。試作した装置は、Z軸に市販の高精度小型直動スライダを用い、アジャスターパット付のテーブルに垂直に取り付け、コントローラで制御する。それに電極軸が付く構造とし、加工物及び加工液を入れるための加工槽を装備している。放電回路はRC回路を基本とした。装置の評価のため、直径 300 μm のタングステン電極を用いて銅板 (厚さ 120 μm) への穴あけ加工実験を行った。その成果について報告する。

2. 卓上型放電微細穴加工装置の設計・製作

2-1. 装置の設計

微細穴加工装置を製作するにあたり、次の2点の目標を設定した。まず、「短時間できれいな微細穴を開ける」ということであり、もう一点は「放電による微細溝彫り加工を行う」ということである。これらを達成するため以下の条件を考慮して設計した。まず、高い精度で電極を上下方向に移動させる必要があるため、ステッピングモータ付きのスライダを電子制御により駆動させる方法を採用し、オリエンタルモーター製 SR40B1-07SK (ストローク : 75mm, 分解能 ; 0.1 μm) のスライダを選択した。図 1 に微細穴加工装置の 3DCAD図, 図 2 に装置外観を示す。スライダ制御回路の設計・作製およびその制御に関しては後に詳しく述べる。次に、真円に近い穴を開けるためには電極を回転させながら放電加工を行うことが望ましいと考え、電極を支える軸受けにはベアリングを装着できるように直径 30mm, 深さ 9mmの段を設けた。電極の固定軸には市販のピンバイスを使用した。また、ベースは装置全体の安定を考慮して十分に大きく設計し(300mm \times 400mm), 常に水平に調節できるようにベースの底部5箇所のアジャスターパットを装着した。さらに、微細溝彫り加工の際には、加工物の入った浴槽を2軸方向の可動テーブルにより可動させる必要があるため、可動範囲に適した加工槽サイズ(100mm \times 150mm)を決定した。また、加工槽中の加工物を固定できるように多数のねじ穴を開けたテーブル (ステンレス製) を加工槽中に設置した。なお、材質は、装置軽量化のため、

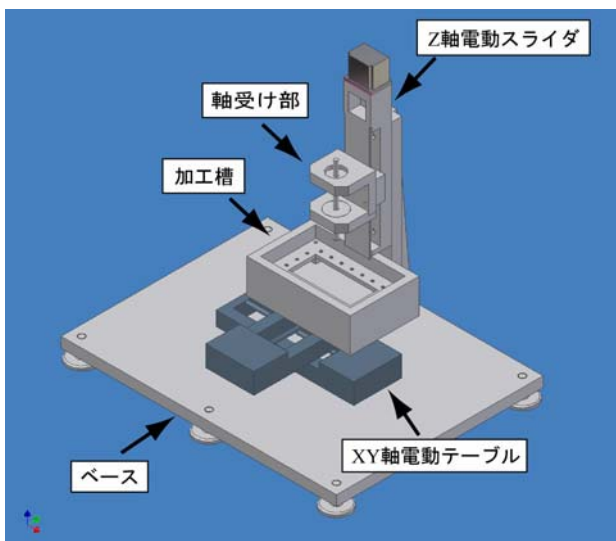


図 1 微細穴加工装置の 3DCAD 図

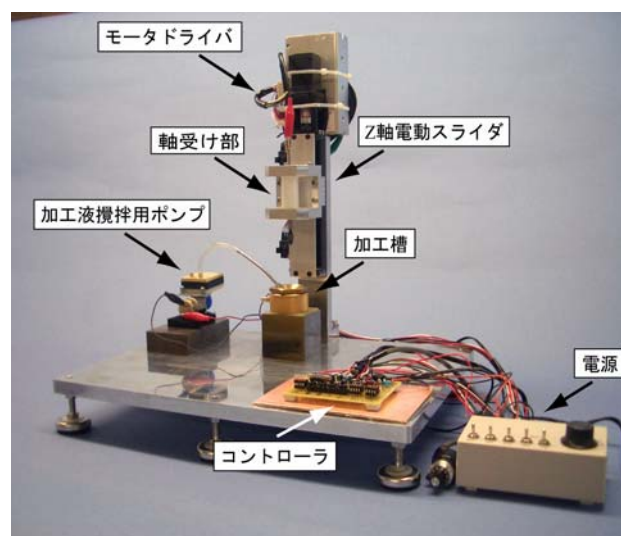


図 2 微細穴加工装置の装置外観

加工槽（アクリル樹脂製）以外の他の部品はアルミ合金とした。

設計には、Autodesk製 3DモデリングソフトInventor Professional 9 を用い、各部品の 3DCADデータを作成し、図面作成機能により 2D図面を得た。また、アセンブリ機能により各部品を組合せた全体図も同様に作成した。Inventorにはこれらの機能以外にもアニメーション機能、構造解析機能などが備わっており、多様な方面の需要に応えられるものとなっている。3DCADデータの作成は、システム設計技術班熊澤による指導の下、同班員の立花、中木村が分担して行った。立花がスライダ・ベース・柱・軸受、中木村が加工槽・ねじ穴付テーブルをそれぞれ担当し、上記の設計案に基づいて忠実にモデリングを行った。図面完成後には改めて班員が図面をチェックし、細部の修正を行い、装置の完成度の向上に努めた。

2-2. 装置の製作と組立て

装置部品は、システム設計技術班の 4 名が分担して各部品を製作した（表 1）。なお、電極を回転させる機構および 2 軸可動テーブルは来年度以降に設置を予定している。そのため、本来ベアリングが収められる軸受部分にはベアリング外径と同サイズの絶縁性部品（ナイロン製）を装着した。また、これらの部品に加えて、動作実験を円滑に行うためのミニサイズの真鍮製加工槽を作製した（設計、製作は立花）。全部品製作後、装置の組立ての際は電極の上下可動方向とベースが垂直になるように、ダイヤルゲージで観察しながら慎重に組立てた。

表 1 部品製作の分担

御厨	ねじ穴付テーブル 柱
熊澤	加工槽
立花	ベース
中木村	軸受

2-3. 装置の制御システム

スライダの制御等の装置の制御システムの構築は電子・情報技術班の増田が担当した。図 3 にコンデンサ電源式EDMの概念図を示す。放電加工を行うための電源回路には、コンデンサ放電回路（RC電源）を用いた。コンデンサ放電回路は、電極と加工物との間に接続されたコンデンサと、これに抵抗を通して接続される直流電源で構成される。コンデンサへの充電が進み電圧が上がると、電極との絶縁が破れ放電によって電圧が下がる。この充電～放電の繰返しで加工が進行する。加工用コンデンサ電源の電圧供給源として、小型のDC/DCコンバータ（出力電圧 0～130V）を製作した。直流電源電圧の調整と、出力側に配したスイッチで抵抗・コンデンサの組合せを切り替えることで、加工条件を選択できる。

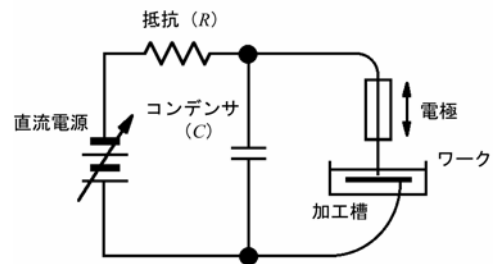


図 3 コンデンサ電源式 EDM の概念図

図 4 に制御回路（コントローラ）の概略図を示す。放電加工の進行にともなって、電極の位置を細かく制御する必要がある。電極の制御内容として、①放電開始電圧が上昇または放電頻度が下がれば下降、②電圧が低下または一時的に短絡状態になれば上昇、③適当に放電が続いた後には加工屑排出のために一時的に後退させ再度放電開始位置に戻す、等である。位置制御回路は、1 チップマイコン（PIC 16F84A）とデュアルオペアンプIC各 1 個、その他若干の部品で試作した。放電用電圧の絶対値とその変動監視には、電極電圧を分圧（低減）したものと微分したものをオペアンプICによる比較・積分回路経路で制御用マイコンに入れている。これにより、加工開始時の電極とワークとの接触検出および加工進行のための基本動作を実現している。操作用スイッチ類は、加工前の調整用移動速度設定（最大 2mm/s）、上昇/下降/停止/加工の各押しボタン、後退動作移行判断用の可変抵抗器および待ち時間設定（0～6ms）、加工深さ設定（20μm～1400μm）を用意した。さらに、放電が開始する電圧の最低値（ディスクリ値：Discriminate

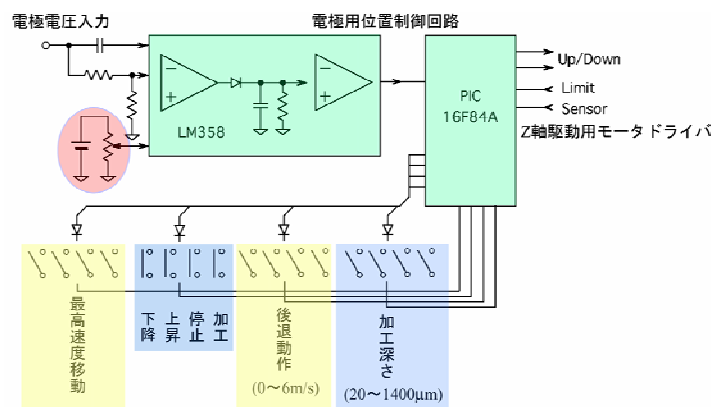


図 4 制御回路（コントローラ）の概略図

)を設定し、この値より低い電圧で放電したときは電極を上昇させた。

3. 穴あけ加工実験

3-1. 実験方法

加工装置の評価のため銅板（板厚 $120\mu\text{m}$ ）への穴あけ加工実験を行った。まず予備実験として、コンデンサ容量 $C = 0.024\mu\text{F}$, $R = 130\text{k}\Omega$ の条件で同じ電極を用いて3個の穴を作製し、その加工時間と穴の直径を求め、電極の消耗具合を光学顕微鏡で観察した。3個の穴の加工時間、直径の表面と裏面ともにその違いは5%以内であり、顕微鏡観察から電極の消耗具合も軽微であることが確認された。以上の結果から、本実験においては、同一条件の下で2つの穴を作製し、その平均値を加工データとした。また、加工時間が1時間を過ぎても穴が貫通しないときは、その時点で実験を中止した。穴直径の測定には、まずワーク表面を #2000 のエメリーペーパーで軽く研磨してから超音波洗浄を行って、加工時に生じた加工屑を除去した。その後穴をSEMで撮影し、画像処理で加工面積を特定してから平均直径を求めた。加工条件を表2に示す。加工液は当初ワイヤー放電加工機（三菱電機社製FX-10）の加工液を使う予定であったが放電が不安定であったため、型彫り放電加工用加工液メタルワークEDF-K（新日本石油製）を使用したところ良好な加工ができた。図5に電極先端部のSEM画像を示す。先端はなるべく平坦となるようワイヤー放電加工機で加工した。

表2 加工条件

電源	$E = 130\text{V}$
電極	タングステン W : $\phi = 300\mu\text{m}$
加工物	銅板 Cu : $t = 120\mu\text{m}$
Discriminate	40 V
加工液	メタルワーク EDF-K

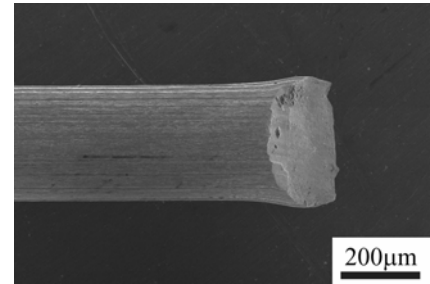
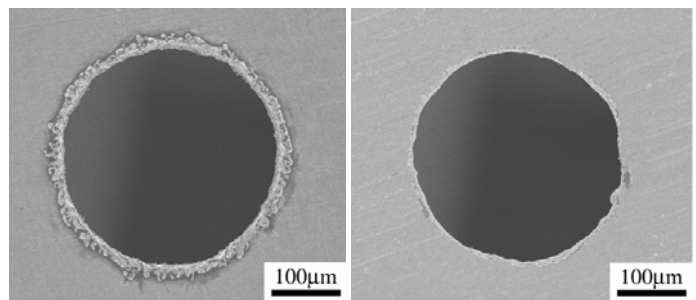


図5 W電極先端部のSEM画像

3-2. 実験結果

抵抗 $R=130\text{k}\Omega$ 一定, $C=(a)0.01\mu\text{F} \cdot (b) 0.001\mu\text{F}$ で加工した穴のSEM画像を図6に示す。穴の縁周辺に付着しているバリのようなものは加工時に生じた加工屑と思われる。Cが大きいと加工屑も大きいことが分かる。



(a) $0.01\mu\text{F}$ ($\phi = 362.59\mu\text{m}$)
(b) $0.001\mu\text{F}$ ($\phi = 338.37\mu\text{m}$)

図6 抵抗一定で加工した穴のSEM画像

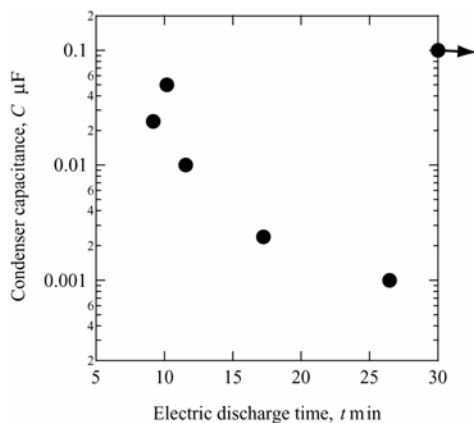


図7 コンデンサ容量と加工時間の関係
(抵抗一定)

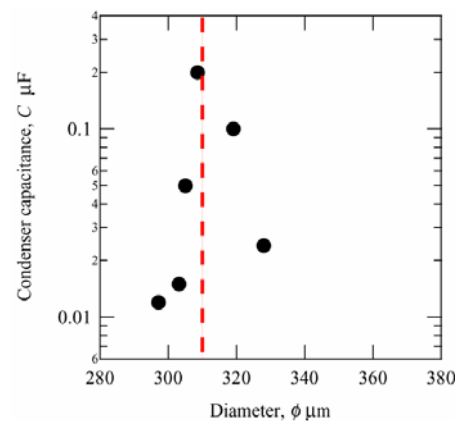


図8 コンデンサ容量と穴直径の関係
(抵抗一定)

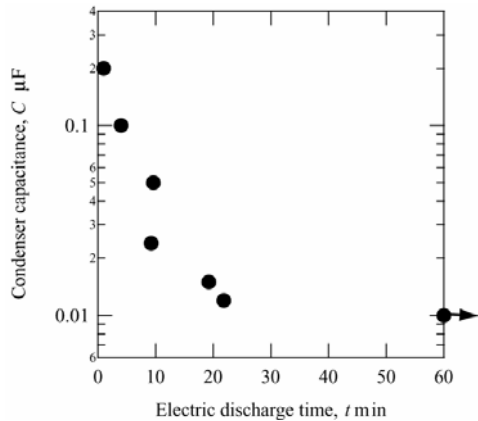


図9 コンデンサ容量と加工時間の関係
(時定数一定)

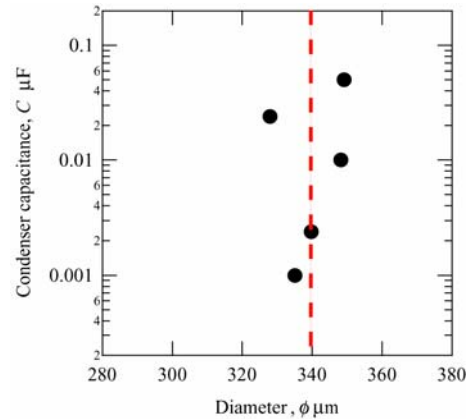
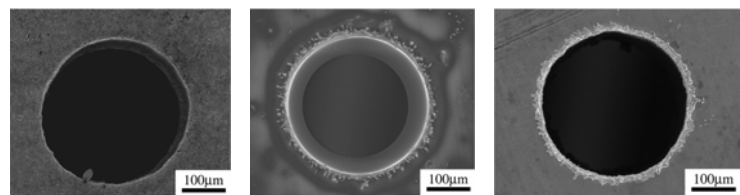


図10 コンデンサ容量と穴直径の関係
(時定数一定)

抵抗 $R=130\text{k}\Omega$ 一定で C を 0.1, 0.05, 0.024, 0.01, 0.0024, 0.001 μF と種々変えて実験を行い、貫通までの時間と加工穴直径を求めた。 C と t の関係を図7に示す。また、 C と ϕ の関係を図8に示す。グラフより電源電圧 120V, 抵抗 $R=130\text{k}\Omega$ の条件では $C=0.024\mu\text{F}$ 近傍に最短加工時間点があることがわかった。また、 $C=0.1\mu\text{F}$ では1時間を過ぎても貫通しなかった。各 C で若干バラつきはあるものの平均直径は破線で示すように、 $340\mu\text{m}$ であった。次により精密な円を加工するため時定数(RC)一定の実験を行った。図9に時定数($RC=3.12$)を一定として加工したときの C と t の関係および図10に容量 C と ϕ の関係のグラフを示す。 $C=0.01\mu\text{F}$ では1時間を過ぎても貫通しなかった。これらの実験中極間電圧をオシロスコープでモニタしたところ、加工時間が長くなる条件では充電-放電の間隔が長くなることがわかった。よって、コンデンサへの充電時間が長くなったことが原因と思われる。

表3 その他の加工例

電極:W($\phi=300\mu\text{m}$) 加工条件:0.1 $\mu\text{F} \times 31.2\text{k}\Omega$		Discriminate	加工時間 t	直径 ϕ
加工物 ($t=1000\mu\text{m}$)	銅	40V	92分	325 μm
		5V	24分	315 μm
	超硬合金	5V	23分11秒	330 μm



(a) 銅 (40V) (b) 銅 (5V) (c) 超硬合金 (5V)

図11 加工した穴のSEM画像

表3にその他の加工例として銅・超硬合金の板材($t=1000\mu\text{m}$)に穴加工したときの t と ϕ の結果を、図11に加工した穴のSEM画像を示す。おのおの同じ加工条件でディスクリ値を変えて加工したものである。ディスクリ値を調節することによりこのような厚みのある板材を短時間で加工できた。また、紙面の都合で掲載できないが銅板($120\mu\text{m}$)に直径 $70\mu\text{m}$ の電極での穴加工ができた。詳細は、今年度名古屋大学工学研究科技術部が発刊予定の「技報」Vol. 8, に掲載する。

4. まとめ

試作した卓上型放電微細穴加工装置はまだ完成品ではなくこれから改良を加え、より真円に近い穴が加工できる装置にする予定である。これまでの成果をまとめると以下のようになる。

1. 3次元CAD Autodesk Inventorの基本操作を習得し、その成果を加工装置の設計に反映させることが出来た。
2. 抵抗値一定・時定数一定の実験における加工時間は、コンデンサ容量の固有の値を境にして長くなる。
3. 直径 $300\mu\text{m}$ のW電極で作製した、厚さ $120\mu\text{m}$ の銅板の穴直径のクリアランスは、 $5\sim 20\mu\text{m}$ であった。
4. 厚さ $1000\mu\text{m}$ のワークの加工および直径 $70\mu\text{m}$ の電極での加工が、可能なことがわかった。