

ものづくりプロジェクト “卓上型微細放電加工機の製作”

○松田樹也、山室賢輝、有吉剛治、大嶋康敬、神澤龍市

熊本大学工学部技術部

概要

本学においては、平成17年度よりものづくり創造融合工学教育事業を実施しており、技術部では平成20年度において“工学基礎技術の融合と実践型教育による未来の創造”と題した4つのテーマを、平成21年度においては“工学基礎技術の融合と創造教育の実践”と題した5つのテーマを掲げプロジェクトを遂行した。本稿は20年度より引き続き21年度にわたり取り組んだ「卓上型微細放電加工機の製作」について報告する。

1 はじめに

現在、様々な分野において微細化が進められており、マイクロから、ナノオーダーでのデバイスの開発への移行など微細加工の需要が増加している。そこで、本プロジェクトにより製作した「卓上型微細放電加工機」は、簡素なシステムにも関わらず、マイクロオーダーでの穴あけ加工を実現し、研究・開発に貢献することが期待できる。

熊本大学工学部にて実施されたものづくり創造融合工学教育事業の支援を受けて、平成20年度“工学基礎技術の融合と実践型教育による未来の創造”、平成21年度“工学基礎技術の融合と創造教育の実践”と題したプロジェクトを遂行した。本プロジェクトは、学科の実験・実習の垣根を越えた専門域外の学生も対象に、ものづくりを通して基本的な技術および知識を習得することにより、参加者の好奇心を涵養し、学習意欲の向上と創造する楽しさを発見してもらうことを目的としたプロジェクトである。前年度に引き続き行った本プロジェクトの「卓上型微細放電加工機の製作」では、機械設計、機械加工、電気電子回路、制御理論、材料評価などの本装置製作に必要な分野を専門とする学生や技術職員が集まり、多方向からの見識により、高度な技術が融合した装置開発を目指した。これにより、学生だけでなく技術職員自身のスキルアップと共に他分野の技術の学習および学生への教育・指導力の向上などを図ることができる。また作製を通じ、PDCAサイクル（計画・実施・評価・改善）という一連の流れを体験することにより、「ものづくり」の手法を習得することができる。

2 プロジェクト実施方法

工学部の学生および教職員から学科を問わず本プロジェクトの参加者を募集し、1. 設計、2. 製作（機械）、3. 製作（制御）、4. 評価 の4つのグループに分け、学生は各グループ2～4名とリーダーには技術職員を配置し作業を遂行した。製作する装置は、名古屋大学技術部での取り組み^{[1],[2]}を参考にし、加工穴直径が数百～数十 μm の加工を可能とする1軸（Z軸）制御での加工装置の製作、さらには自動X-Yステージ制御による連続多数穴あけ加工およびスリット（長穴）加工の実現を目標とした。

3 設計・製作（機械）グループ

設計グループでは、設計構想・アイデアスケッチにて構築後、3Dモデリング・部品図面作成を3DCADソ

フトの **Solid Works** を用いて設計を行った。本ソフトは、製作した部品・アセンブリ・図面は各々データがリンクしているのが特徴で、同一部品のどのファイルに修正を行っても他のファイルに修正が反映される。**Solid Works** により製作したすべての部品をアセンブリ機能により、ねじ穴の位置や各部品の干渉および可動部分の範囲などのチェックを行い（図 1）、さらに製作（機械）グループも交えて適切な加工が可能かどうかを確認後、製作した図面により部品の加工および組み立てを行った。図 2 に製作した部品を組み立て完成した装置の外観を示す。

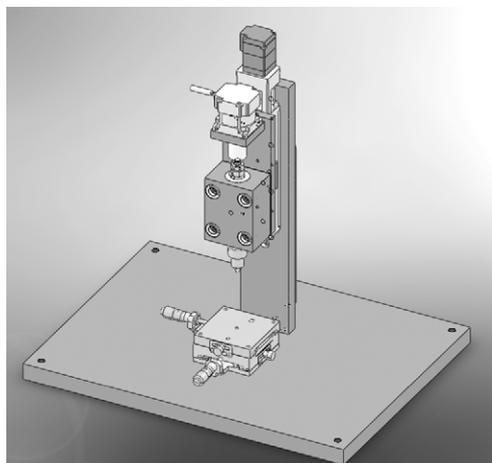


図 1. Solid Works により作製した 3D-CAD 図

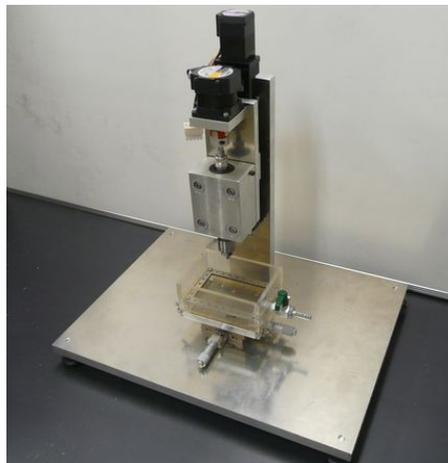


図 2. 組み立てた装置の外観

4 製作（制御）グループ

4.1 加工方式

放電加工を行うために本プロジェクトでは、構造および動作が簡単なコンデンサ自己放電回路方式（RC 回路）を採用した。本装置の充放電回路は、図 3 のように直流電源 E と抵抗 R およびキャパシタ C を直列接続させ、キャパシタの両端に接続される針電極と平板電極とみなした試料による簡素な回路で構成される。加工方法は、電源により充電キャパシタに充電抵抗を介して充電し、針電極と試料間の絶縁破壊電圧超えたときの放電により掘削するキャパシタ放電回路方式である。

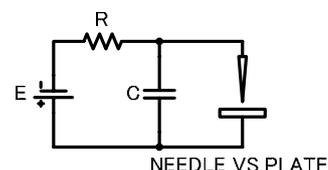


図 3. 充放電回路図

4.2 制御手法

安定した充放電で動作させるため、図 4 に示すように、本装置ではオペアンプ（LM358）とワンチップマイコン（PIC16F84A）によるフィードバック制御を備えた自動位置制御により、最適な放電状態を維持しながら加工動作を行っている。

充電電圧を抵抗分圧器によりドロップし、キャパシタで包絡線を生成した参照電圧 V_{ref} を高い方の閾値電圧 V_H と低い方の閾値電圧

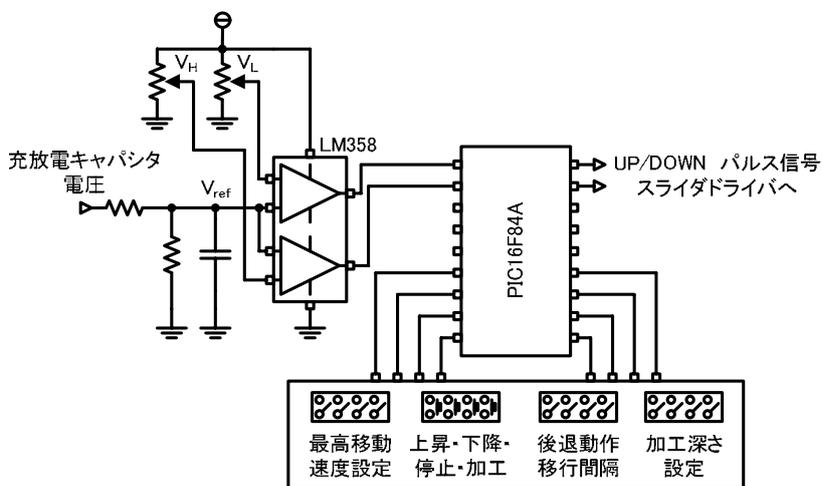


図 4. 制御回路図

V_L の 2 つの基準電圧に対してオペアンプを用いて比較する。図 5 に示すように、 V_{ref} が V_H と V_L の間で充放電するように針電極-試料間の距離を変化させて制御する。 V_{ref} が V_H より高い電圧のときは放電開始電圧を下げるために電極間距離を短くする（針電極を下方へ動作）。一方、 V_{ref} が V_L より低い電圧のときは放電開始電圧を上げるために電極間距離を長くする（針電極を上方へ動作）。

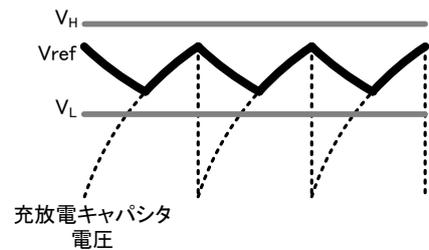


図 5. 参照電圧 V_{ref} と閾値電圧 $V_H \cdot V_L$

針電極の下降および上昇は、ワンチップマイコンからのパルス信号により動作する。電源 ON 後に動作速度や加工深さ等の初期設定を行う。初期設定直後はボタンでの手動上昇・下降のみ可能とし、加工ボタン ON 後は、手動上昇・下降を優先とし、前述した 1 軸制御による放電加工を行う。加工時、掘削屑除去のため指定ループ回数後に一旦上昇する。指定深さまで加工が進むと、電極を上昇させ停止し加工終了というシンプルな動作で加工を実現する。

自動 X-Y ステージ制御による連続での多数穴あけ加工は、穴あけ進行方向、穴間隔、個数を指定後、1 軸制御による穴あけ加工が終了ごとに自動 X-Y ステージにより試料を移動して加工を行う。スリット加工は、現在、3 つの加工工程を比較評価している段階にあり、最良の加工手法を今後採用する予定である。図 6 に 3 つのスリット加工工程推移を示す。1 つは、1 軸制御による穴あけ加工後、針電極を貫通した状態で放電しながら指定方向へ移動して加工する（図 6(a)）。2 つ目は、1 軸制御による穴あけ加工終了後、少し移動して穴あけ加工を行い、何度もこの作業を繰り返して、穴を広げてスリットを作製する（図 6(b)）。3 つ目は、微小の深さだけ掘削し、その状態で X-Y 平面で移動しながら溝を作るように加工していく。指定された地点で再び微小な深さだけ掘削し、折り返して最初の地点まで加工し、さらに深い溝を構築する。この微小な深さの溝を作る工程を繰り返してスリット加工を実現する（図 6(c)）。

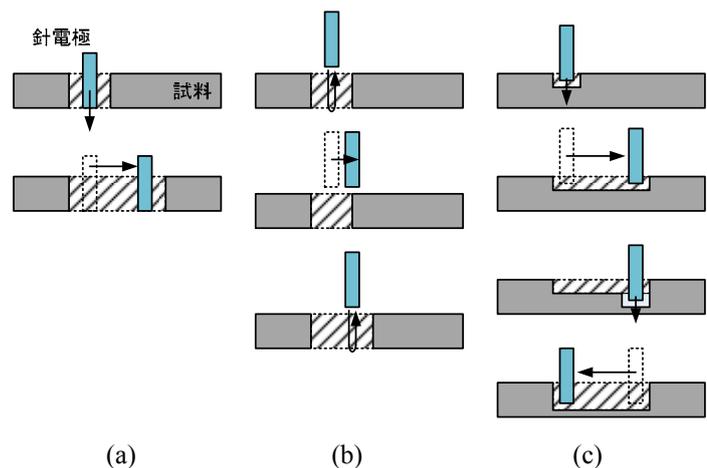


図 6. スリット加工方法

4.3 製作・加工動作試験

制御方法決定後、グループ内で回路製作グループとプログラム製作グループに分かれて製作に取り掛かった。ワンチップマイコンのプログラムは MPLAB-IDE 上で C 言語を用いて製作した。両グループの作業完了後に、実機にて回路とプログラムの動作確認を行い、細かなミス修正を行いながら製作を遂行することにより、本装置による穴あけ加工ができることを確認した。

次に本装置に加工状況を表示できるように改良を行った。表示項目は、加工条件のパラメータに重要な 2 つの閾値電圧 $V_H \cdot V_L$ と、加工状況を把握できるように電極の位置を表示することとした。2 つの閾値電圧 $V_H \cdot V_L$ は割り込み機能より一定時間ごとに A/D 変換で得た電圧値を表示し、電極位置はパルス数と電動スライダの単位パルスあたりの移動距離により算出した。回路は A/D 変換が可能なワンチップマイコン PIC16F877A に変更し、表示デバイスには LCD (SC1602BSLB) を付加した回路を製作した。連続での多数穴あけ加工およびスリット加工は、製作および検討中であることを付与しておく。

5 評価グループ

評価グループでは、仕上がり形状の確認、加工部での内部組織への影響を調査する。評価は、走査型電子顕微鏡（SEM）および集束イオンビーム加工装置（FIB）を用いて、加工穴の観測・分析を行った。直径 $400\mu\text{m}$ のタングステン製の針電極により、アルミ板へ加工した微細穴の SEM 画像を図 7 に示す。このときの電源電圧は、 120V で加工した。加工穴の直径は電極より 10%ほど大きな穴となっている。電源電圧を上げて加工を行うと穴の直径は大きくなるが、加工時間は短くなる。一方、電源電圧を下げて加工を行うと穴の直径は小さくなるが、加工時間が長くなる傾向にあった。これは、電源電圧を上げると充放電サイクルが短くなるため加工時間が短縮されたと考える。また、コンパレータやフォトカプラ等による電動スライダへの動作の遅延等により、電源電圧を上げると電圧が高い状態で放電することが増加するため、穴の直径が大きくなったと推測する。更に形状の観察後は、加工穴の縁を FIB 断面加工することで、内部組織への影響を調査した。通常は電子線を用いた SEM 像の観察が一般的であるが、結晶粒の状態を確認するため Ga イオンビームを用いた走査イオン顕微鏡像（SIM 像）により観察した。図 8 より、穴の縁から $2\mu\text{m}$ 程度の領域に再結晶粒の生成が観察されることから、放電加工による熱影響部は $2\mu\text{m}$ 程度であると言える。

6 まとめ

本装置による穴あけ加工は成功したが、充電電圧、充放電キャパシタ容量、充電抵抗などをパラメータとして、加工特性を調査し、最適値を導出する必要がある。また、本プロジェクトの実施期間が卒業研究の追い込み時期と重なったため、学生が十分に取り組むことができなかった。今後は、学生が作業に従事できるような環境の整備が必要である。学生の中には回路部品を知らない学生や工具の使い方がわからない学生も存在し、指導を行い製作できるようになった学生は、本プロジェクトの参加により今後の活動の場で役に立ちそうで満足したという意見があった。また、学生の専門分野外についての質問も多く見られ、ものづくりに興味を抱いて参加・作業を行っているとの印象を受けた。本プロジェクトの実施により、技術職員のスキルアップや専門域外の知識・技術の習得および教育・指導技術の習熟ができ、この取り組みの有効性が示された。

参考文献

- [1] 立木 一志 他, 「卓上型放電微細穴・溝加工装置の開発（設計製作と制御システム）」, 平成 18 年度名古屋大学総合技術研究会 機械・ガラス工作技術研究会報告集, pp.1-4
- [2] 御厨 照明 他, 「卓上型放電微細穴・溝加工装置の開発（微細加工と評価）」, 平成 18 年度名古屋大学総合技術研究会 機械・ガラス工作技術研究会報告集, pp.5-8
- [3] 山室 賢輝 他, 「学生とつくる卓上型微細放電加工機」, 日本工学教育協会 第 57 回工学・工学教育研究講演会

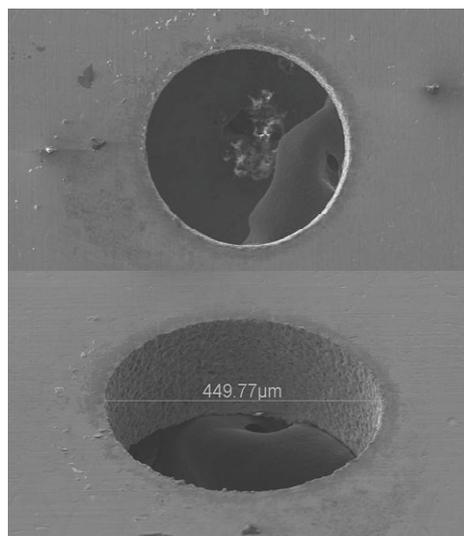


図 7. 加工穴の SEM 像

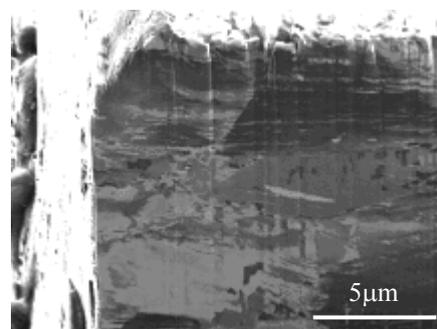


図 8. 加工穴断面の SIM 像