

令和 3 年 5 月 6 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03885

研究課題名(和文)形状フィードバック式旋盤型電解放電加工による絶縁材料の高精度非円形状加工

研究課題名(英文) Precision machining of non-circular section on insulated materials with lathe-type electrochemical discharge machine by shape-feedback

研究代表者

古谷 克司 (Furutani, Katsushi)

豊田工業大学・工学部・教授

研究者番号：00238685

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：電解液中で放電を起こすことでガラスなどの絶縁体に微細形状を加工する旋盤型電解放電加工法において、非円形状を加工する方法を開発することを目的とした。平行板ばねで支持された工具電極に対して10mNオーダの押し付け力を付加しながらボイスコイルで変位させた。印加電圧をオン・オフ制御することにより、非円形状断面を加工することができた。一例として、正方形断面を加工し、加工精度を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電解放電加工では電解液中で放電を起こすことで絶縁体に微細形状を創成することができ、かつ、装置を小型に構成できる。旋盤型電解放電加工では、放電点が強制的に分散されるため、熱ひずみによるクラックを抑制することができる。これにより、ガラス、圧電セラミックスなどの無機絶縁体への微細加工が可能となる。本研究により、円形断面を持つ形状だけでなく、非円形状の加工も可能となったため、適用範囲が広がると考えられる。

研究成果の概要(英文)：On the lathe-type electrochemical discharge machine for machining insulated materials by discharge in electrolyte, a machining method of a non-circular section in a cylindrical glass rod was developed. A tool electrode suspended with a set of parallel thin leaf springs was pressed on the glass rod at a thrust of 10-mN order by controlling with a voice coil motor while the electrode was moved. By an on-off control of the applied voltage to the tool electrode, a non-circular section was machined. Machining a square section was demonstrated and the machining accuracy was evaluated.

研究分野：精密加工，メカトロニクス

キーワード：電解放電加工 非円形状 フィードバック 絶縁体 力制御 板ばね 泡 電流波形

1. 研究開始当初の背景

ナノテクノロジー、バイオテクノロジー、情報通信のためのデバイスの研究が盛んに行われている。これらの分野では、ガラス、圧電セラミックスなどの無機絶縁体が重要な役割を果たすが、金属などの導電体の加工法に比べ、無機絶縁体への微細加工は進展が遅れている。イオンビームを用いた加工法などにより微細加工は可能であるが、加工速度が nm/s 程度と小さく、装置が大きく高価であり、製作可能な 3 次元構造体の自由度は低い。このような理由から、小型部品用の加工機でもマイクロファクトリのような小型の生産加工機械を構築することは困難である。

電解放電加工では電解液中で放電を起こすことで絶縁体に微細形状を創成することができる。しかし、加工精度が低く、クラックが発生しやすいという問題があった。研究代表者らは、旋盤型の加工機で電解放電加工法を行い、放電点を強制的に移動、分散させた。これにより、工作物上のある一点で発生する放電の時間間隔が広がり、加工液による冷却が促進されるため、加工点の部分的な温度上昇を防ぐことができ、クラックを低減することが可能になる[1][2]。

2. 研究の目的

電解液中で放電を起こすことでガラスなどの絶縁体に微細形状を加工する旋盤型電解放電加工法において、非円形状を加工する方法を開発することを目的とした。工具電極の追従性が低い場合を想定し、工具電極と工作物との距離と印加電圧とが加工範囲に与える影響を実験的に調べた。また、工作物の折損をふせぐために、工具電極の押し付け力を 10mN オーダに保つ工具電極ホルダを製作した。

3. 研究の方法

実験装置の構造を図 1 に示す。装置は電極ホルダ、電極ホルダを移動させるステッピングモータ駆動の XZ ステージ、工作物回転主轴で構成される。工具電極は厚さ 0.01mm のステンレス鋼箔の板ばねで保持されており、ボイスコイルモータ (VCM) に流す電流により押し付け力を制御する。VCM を用いたことで消費電力が少なくなり、発熱の影響が低減できた。工具電極変位 x に応じて VCM 電流 i を変化させ、押し付け力 f を目標値に到達させるセミクローズドループ制御とした。事前に測定したこれら 3 変数の関係を多項式近似すると、式 (1) になる。

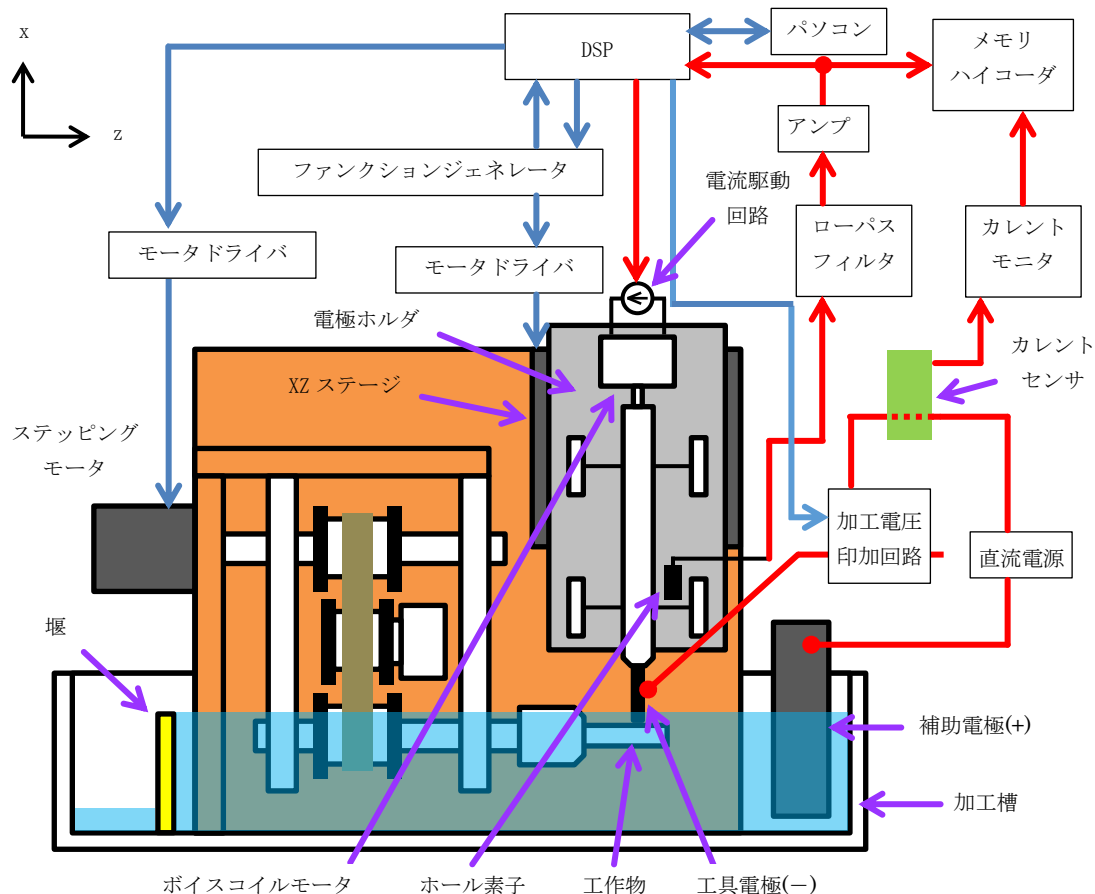


図 1 旋盤型電解放電加工機

表 1 加工条件

工具電極(陰極)	φ 0.3mm タングステン
補助電極(陽極)	グラファイト
工作物	φ 5mm ソーダ石灰ガラス
電解液	15wt% NaCl 水溶液
加工用印加電圧	50V
工作物回転速度	3min ⁻¹
電極ジャンプ	500μm, 7 度回転毎
装置動作時間	530min
実加工時間	約 110min

$$i = -0.00 - 125.19f - 8.50f^2 + 1.65x - 0.04xf + 0.20x^2 - 0.00x^2 + 0.00x^2f - 0.02x^2f^2 \quad (1)$$

力制御中には、目標押付力と現在の電極変位から、流すべき VCM 電流を決定した。

±5μm 以内の変位に対しては VCM で、それを超える変位に対してはステージを移動させることにより、押し付け力を一定に保った。目標押付力を 0.05N に設定して力制御を行ったところ、押し付け力は目標値に対して±5%以内であった。

装置の工作物の取り付け誤差により加工誤差が生じる可能性があるため、加工前だけでなく、加工中にも随時電極を接触させて形状を測定し、補正を行った。円柱状の工作物に対し、工作物中心と回転中心の座標、主軸回転と工作物の取り付けの角度を変数として、生じる誤差をモデル化した。任意形状の加工時には、目標形状の各頂点の座標から誤差を補正した目標切込み量を求める式を作った。

加工機上の座標はステージのリミットセンサを原点とし、電極先端の変位は、電極ホルダ内でのプランジヤの移動量と、電極ホルダを動かすステージ移動のパルス数から求めた。

工具電極変位の測定精度を評価するために、回転する工作物の表面を押し付け力 0.05N で力制御しながら、工作物外形の変位を測定した。電気マイクロメータで工作物の真円度を測定して比較したところ、加工機では 177μm、電気マイクロメータでは 176μm であり、ほぼ一致した。

4. 研究成果

予備実験として、印加電圧と初期の工具電極と工作物との距離が加工範囲に与える影響について調べるために、直径 0.3mm のタングステン製工具電極をガラスに押し付けて穴加工を行った。印加電圧が 40, 45V では泡の量が多かったが、放電はあまり観察されなかった。50, 55V では泡の量が減ったが、放電は非常に激しかった。3つの量ともに、45V の場合が最大となった。放電は 55V の場合が最も激しかったが、加工量は最低となった。電流はパルス状になった。40, 45V の場合にはピーク値が 3~4A 程度となったが、頻度は低かった。一方、50, 55V の場合には、2A 以下のピーク値であったが、頻度は高かった。工具電極の底面積は浸漬部の側面積に比べて無視できるくらい小さいので、初期間隙の電流波形への影響はなかった[3][4]。これらの状態は、主成分分析により分類できることが明らかになった[5]。

次に、旋盤型電解放電加工機を用いて加工実験を行った。

電極を旋盤の送り方向に動かし、各点で工作物の外形を測定した。この測定結果に合致するように取り付け誤差の各係数を求め、これをもとに目標切込み量を補正した。

加工条件を表 1 に示す。加工時には、2 周加工を行うごとに形状を 1 周測定した。目標変位に達した領域では印加電圧を OFF にし、まだ加工が必要な領域でのみ加工を続けた。角部のある形状では電極が引っかかることがあったため、主軸が 7 度回転するごとに回転を止め、電極を 500μm ジャンプさせた。これにより、3mm 角の正方形を目標形状として突っ切り加工を

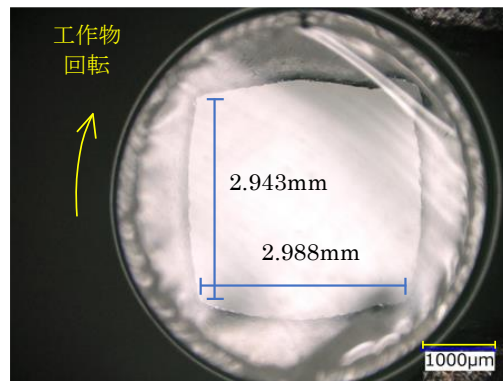


図 2 加工結果

表 2 評価結果

真直度	最小 91μm, 最大 198μm
平行度	215μm, 268μm
直角度	最小 222μm, 最大 406μm
辺間角度	91.6°, 88.7°, 89.0°, 90.5°

行った。

加工後の工作物断面を図 2 に示す。破断したガラス棒を端面から観察しているため、端面の凹凸によって像に歪みが生じている。

工作物を装置から取り外し、加工結果の評価を電気マイクロメータによって行った。加工溝の幅は細いため、先端にマイクロドリルを取り付けて接触プローブ代わりにして測定した。各辺を直線で近似し、評価した結果を表 2 に示す。真直度から、辺は最大で 200 μ m 程度膨らんでいた。これは装置が動作中に熱膨張し加工機座標の原点が移動したこと、電極先端が消耗して測定変位にオフセットが付いたことが原因であると考えられる。

<引用文献>

- [1] K. Furutani, S. Kojima: Prototyping of Acceleration Sensor by Using Lathe-type Electro-chemical Discharge Machine, *Procedia CIRP*, 42, pp. 772-777 (2016).
- [2] K. Furutani, H. Maeda: Machining glass rod with lathe type electro-chemical discharge machine, *J. Micromech. Microeng.*, 18, 6, 065006, 8 p. (2008).
- [3] 古谷克司: 印加電圧が電解放電加工特性に与える影響, 平成 31 年電気学会全国大会講演論文集, p. 128 (2019).
- [4] 古谷克司: 電解放電加工における印加電圧と電流波形との関係, 日本機械学会第 13 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, pp. 168-171 (2019).
- [5] 古谷克司: 電解放電加工における印加電圧と電流波形との関係, 日本機械学会論文集, 86, 892, 20-00197, 12 p. (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 古谷克司	4. 巻 86
2. 論文標題 電解放電加工における印加電圧と電流波形との関係	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 20-00197, 12 p.
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.20-00197	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 古谷克司
2. 発表標題 電解放電加工における印加電圧と電流波形との関係
3. 学会等名 日本機械学会第13回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古谷克司
2. 発表標題 印加電圧が電解放電加工特性に与える影響
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------