

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月31日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009年度～2011年度

課題番号：21560134

研究課題名（和文） 絶縁物による小型部品製作のための旋盤型電解放電加工法の開発

研究課題名（英文） Development of lathe-type electro-chemical discharge machining for small insulated parts manufacturing

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

研究成果の概要（和文）：

絶縁性材料を軸対称形状に加工する旋盤型電解放電加工機を用いて、小型部品を製作する技術を開発することを目的とする。放電により化学反応が促進され、加工液中のナトリウムイオンがガラスと反応し、ケイ酸ナトリウムに変化する。これが加工液中に溶出することで除去が進むことが明らかになった。電極を一定速度で送ることで、加工面プロファイルをなめらかにすることができた。部品加工の一例として、加速度センサを試作した。

研究成果の概要（英文）：

A machining process by using the lathe-type electro-chemical discharge machine was developed for the fabrication of small parts made from insulated materials. After the chemical reaction of glass to sodium ion in electrolyte is accelerated by discharge heat, sodium silicate was generated. The dissolution in the electrolyte causes the removal. When an electrode was fed at a constant speed, the machined surface was smooth. A prototype of an acceleration sensor was made in trial as an example.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：絶縁体，精密加工，放電，電解，ケイ酸ナトリウム，水溶性，泡，液膜

1. 研究開始当初の背景

近年、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法は進

展が遅れている。これまでに、研究代表者らはガラスやセラミックなどの絶縁性材料を軸対称形状に加工する旋盤型電解放電加工機を試作している。

2. 研究の目的

本研究では、旋盤型電解放電加工法により、

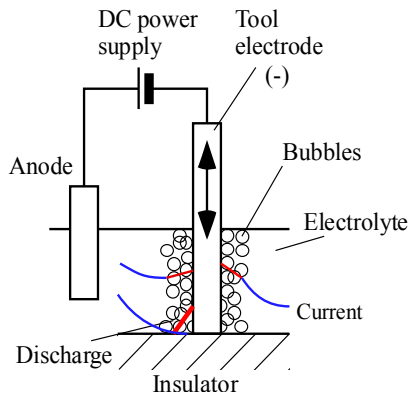
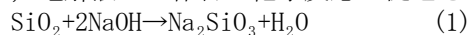


図1 電解放電加工の原理

絶縁体による小型部品を製作する方法を確立することを目的とする。そのために、以下の事項を検討した。切削加工における旋盤加工による加工現象の解析と同様に、2軸力センサを用いて主分力と背分力を同時に測定し、電解放電加工の加工メカニズムを解析した。次に、細軸加工を行うための電極送り法として、定速送りと定圧送りを比較した。そして、圧電セラミックを電解放電加工することで加速度センサを試作した。

3. 研究の方法

NaOH, NaClなどの電解質を水に溶かした電解液中に電極を設置する。陰極である工具電極を工作物に押し当て直流電圧を印加する。電圧が低い状態では泡の発生が少ないため電流は電解液中を流れる。工具電極表面全体が泡に包まれるまで電圧を上昇させると、泡の中で放電が発生する(図1)。この放電の熱で、電解液と工作物の化学反応が促進され



となり、ガラスより軟質なケイ酸ナトリウムが生成されると言われている。また、旋盤型電解放電加工では電極が接触しながら工作物が回転するため、ケイ酸ナトリウムの機械的な除去も起こっている可能性が高い。

4. 研究成果

(1)加工メカニズムの解明

①実験装置の構成

実験装置の概略を図2に示す。装置はDC電源、2軸力センサ、工作物回転装置で構成した。回転数可変範囲は0~30min⁻¹である。軸心の偏芯は0.06mmであった。電極の押付け力が0.06~0.08Nの範囲になるように背分力の値をフィードバックしてXYステージを制御した。

図3にひずみゲージを用いた2軸力センサの構造を示す。設計仕様として垂直方向に0.05N印加した時のひずみ量が20μ ϵ になるように有限要素法(FEM)により寸法を決定した。アルミニウムを用いる場合には、八角

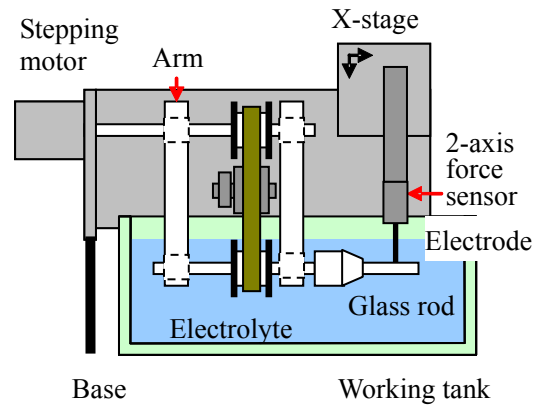


図2 電解放電加工機の構造

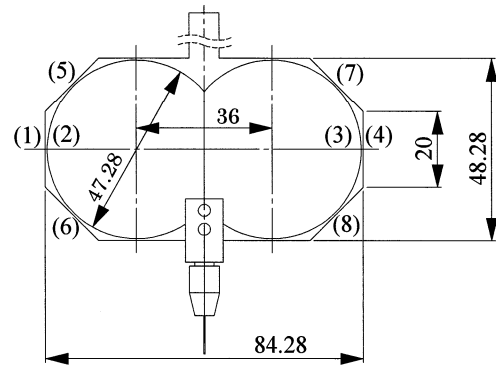


図3 2軸力センサ

形の1辺を20mmにすると半径が23.6mmとなる。これの厚みを5mm、最薄部の肉厚を0.5mmにすると、FEM解析の結果では17μ ϵ となった。かっこ付き数字の位置にひずみゲージを貼り付けた。(1)~(4)が鉛直方向、(5)~(8)が水平方向用である。実測では力を加えたのと垂直な方向にも出力されたので、データ処理時に非干渉化を行った。感度は主分力方向で433μ ϵ /N、背分力方向で466μ ϵ /Nとなった。この出力を動ひずみアンプを(周波数帯域500Hz)増幅した。共振周波数は主分力方向で35Hz、背分力方向で62Hzであった。

実験手順は、まず、印加電圧40Vで30min加工し、測定面を製作した。その後、校正したひずみゲージ式2軸力センサにより電解放電加工中の電極の背分力と主分力とを同時に測定した。

②実験結果及び考察

3回測定を行い主分力の平均と、その最大最小をエラーバーで表示したグラフを図4に示す。ここでの主分力は、30秒間の絶対値の最大値とした。印加電圧38V以上で放電が発生し、主分力が増加した。図5に印加電圧を1周目は0V、2周目は40V、3周目は0Vにして主分力を連続で測定した結果を示す。3周とも背分力が0.06~0.08Nの範囲で一定になるように制御したが、主分力は40Vの時だけ

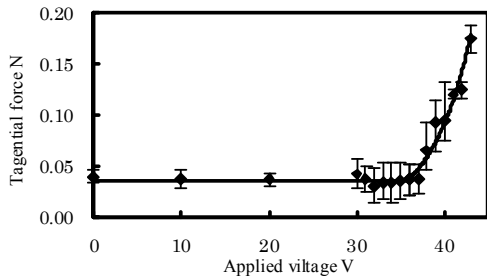


図4 印加電圧と主分力との関係

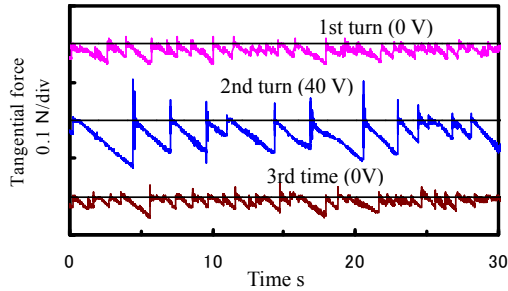


図5 印加電圧変化時の主分力

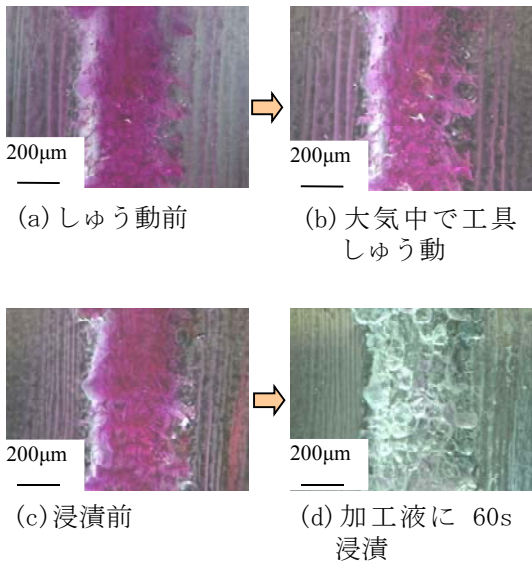
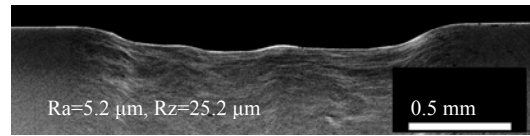
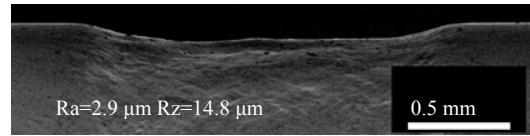


図6 ケイ酸ナトリウムの除去過程

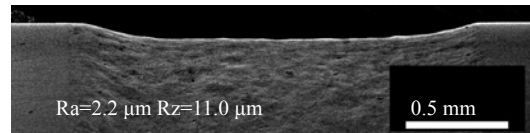
大きい値を示した。また、0Vの時は主分力波形が似ているのに対して、40Vの時は電極の戻る周期が大きく異なった。これは、印加電圧を増加させることで化学反応が促進され、加工溝に軟質のケイ酸ナトリウムが生成され、加工溝に付着することで電極が戻りにくくなるので、主分力が増大すると考えられる。ケイ酸ナトリウムの除去プロセスを検討するために、ケイ酸ナトリウムを加工溝に塗布した。ケイ酸ナトリウムはアルカリ性なのでフェノールフタレインを用いて赤紫色に着色される。図6(a)、(c)はケイ酸ナトリウ



(a) 定圧送り，センサで支持



(b) 定速送り，センサで支持



(c) 定速送り，高剛性支持

図7 加工面

ムを塗布した状態である。画像処理ソフトで赤成分だけを抽出し濃淡画像とした。そのため、黒いほどアルカリ性が強いことを表す。同図(b)は(a)を大気中で工具電極を0.06~0.08Nで押し当てながら、ガラス棒を3回転させた時の表面である。部分的に剥ぎ取られたが、大部分にケイ酸ナトリウムが観察された。同図(d)は(c)を電解液に60秒漬けた後である。ケイ酸ナトリウムが表面に観察されなかった。ケイ酸ナトリウムは水溶性であり、電解液によってガラス棒表面から除去されたためであると考えられる。

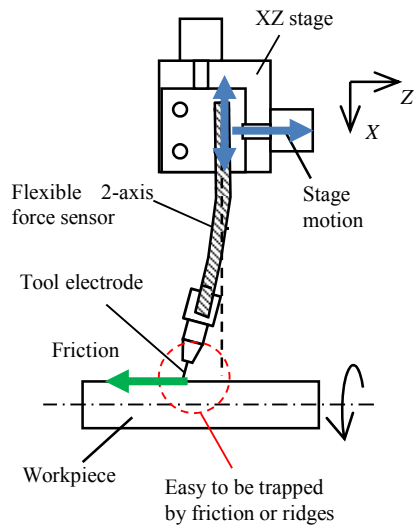
(2) 電極送り法の検討

① 実験方法

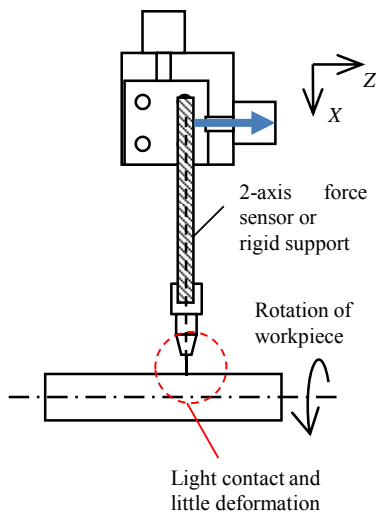
3通りの細軸加工法を試した。工具電極を工作物に約60mNの一定荷重で押し付ける定圧制御および工具電極先端の位置を重視した2軸力センサまたは高剛性の板を工具電極保持具に使用した定速制御を行った。定速制御のX軸送り量は $2\mu\text{m}$ とした。工作物には直径5mmの石英ガラス、工具電極には直径0.3mmのタングステンを用いた。加工液は20wt%NaCl水溶液とし、印加電圧40V、工作物回転数 30min^{-1} 、Z軸送り平均速度 $20\mu\text{m/s}$ で60分加工した。そして、それぞれの方法によって得られる加工面形状を比較した。

② 実験

加工面を走査電子顕微鏡(SEM)で観察した結果を図7に示す。あわせて 90° ずつ回転させて、区間長さ0.8mmで4か所で測定した粗さの平均値を図中に示す。同図(a)に示す力センサを用いて定圧制御で加工した場合には凹凸形状となった。一方、同図(b)に示す定速制御で力センサを用いた場合、平坦形状であった。そして同図(c)に示す定速制御で高剛性の支持具を用いた場合、さらに平坦な



(a) 定圧送り



(b) 定速送り

図8 電極送り中の支持具の変形

形状となった。

加工中の工具電極保持状態を図8に示す。同図(a)の定圧制御を行うためには力センサで工具電極を保持しなければならない。しかしその剛性が低いため、工具電極先端が工作物との接触で変位しやすくなる。いったん溝が深い部分が生じると、その部分に工具電極が引っかかり、その溝がさらに深くなる。したがって、平坦な形状を得ることが難しかったと考えられる。定速送りでは切り込み方向の送りを非常に小さくしたため、工具電極が接触していない可能性もある。そのため、定速送りでは定圧送りより加工量が小さくなったと考えられる。力センサの剛性が高ければ図7(a)で示したような加工面のうねりを防ぐことができる。しかし、接触力を100mN以下まで小さくする必要があるため、高剛性の力センサを使用することは困難であると

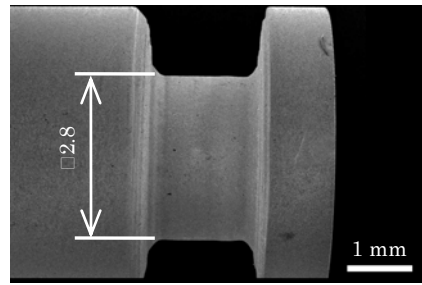


図9 圧電セラミックの加工結果

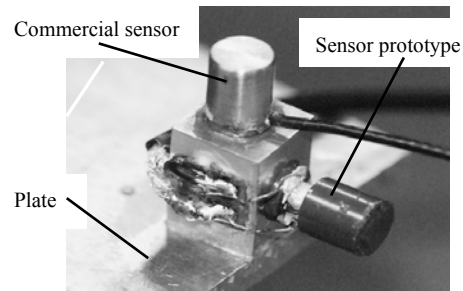


図10 加速度センサの特性試験

考えられる。重力による送りでは電極ホルダの質量を補償する必要があるため、てこなどの機構を付加する必要がある。

(3) 加速度センサの試作

図9にPZTロッドの加工結果を示す。直径は2.8mmであり、表面はなめらかであった。クラックが観察されなかったため、衝撃的な加速度を与えた場合でも破損しにくいことが期待できる。除去量に応じた電極送り量になっていないため、加工速度は非常に小さかった。加工後の加工液中には、粒径数 μm のPZTの角ばった結晶粒が観察された。電解放電加工中には、熱による昇華による除去ではなく、粒界を起点としたはく離が起こって除去されている可能性がある。

PZTロッドの細軸部の曲げにより発生する電荷により加速度を検出するように、細軸部に導電性接着剤により電極を形成し、シリコンオイル中で分極処理した。この時の印加電圧は2kV、時間は20分、油温は111°Cであった。インピーダンスアナライザで測定した結果、最低の共振周波数は150kHzであった。

幅33mm、厚さ3mmのジュラルミン板を約70mm突き出した片持ちはりとなるよう固定し、その先端に市販センサ(固有振動数85kHz)と試作センサを取り付けた(図10)。板の根元にインパクトを与え、加速度をFFT解析した結果を図11に示す。板の1次および2次の固有振動周波数において、市販センサおよび試作センサの両方でピークが観察された。

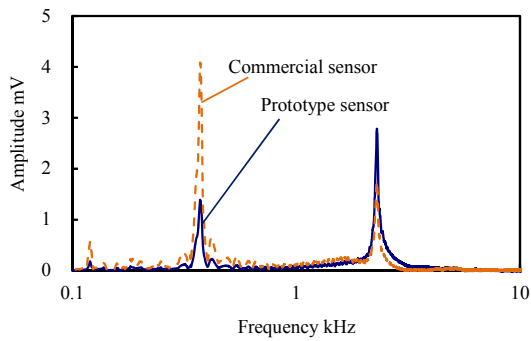


図 11 市販センサとの特性比較

(4) まとめ

本研究の結果をまとめると、以下のようになる。

- ① 電解放電加工中だけ主分力が大きくなることから、加工中にケイ酸ナトリウムが生成されたと考えられる。そして、ケイ酸ナトリウムは、工具電極による機械的除去よりも、水に溶けることによる除去の方が支配的であると考えられる。
- ② 細軸加工においては、工具電極を軸方向にスキャンするごとに切り込みを与える定速送り加工にする方が、確実になめらかな面が得られた。加工速度の改善のためには、剛性の高い工具支持法で、定圧送りができるような機構を用いる必要があると考えられる。
- ③ 電解放電加工による圧電セラミックスの加工では、なめらかな加工面が得られ、分極後は加速度センサとして使用することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① M. Rusli, K. Furutani: Performance of Micro-hole Drilling by Ultrasonic-assisted Electro-chemical Discharge Machining, Adv. Mater. Res. (Mater. Manuf. Technol. XIV), 445, pp. 865-870, 2012, ISBN: 978-3-03785-346-7, 査読有。

[学会発表] (計 9 件)

- ① K. Furutani, M. Tomoto: Performance of Wire-Sawing of Glass Assisted by Electro-Chemical Discharge, Proc. 15th Int. Conf. Precis. Eng., Awaji, Hyogo, Japan, November 2012 (印刷中)
- ② 古谷克司, 小嶋俊介: 旋盤型電解放電加工機を用いた加速度センサの試作, 平成 24 年電気学会産業応用部門大会予稿, 千葉県習志野市, 1057, 2012 (印刷中)

- ③ 古谷克司, 小嶋俊介: 旋盤型電解放電加工によるガラスの加工(第 3 報)細軸加工のための電極送り, 2012 年度精密工学会春季予稿, 東京都八王子市, pp. 113-114, 2012

- ④ M. Rusli, K. Furutani: Performance of Micro-hole Drilling by Ultrasonic-assisted Electro-Chemical Discharge Machining, Proc. 14th Int. Conf. Adv. Mater. Process. Technol., Istanbul, Turkey, OP0009, pp. 1-6, 2011

- ⑤ K. Furutani, K. Arai: Measurement of Machining Force in Lathe Type Electro-chemical Discharge Machine, Proc. 11th Int. Conf. European Soc. Precis. Eng. Nanotechnol., Como, Italy, pp. 220-223, 2011

- ⑥ K. Furutani, H. Shintani, Y. Murase, S. Arakawa: Measurement of current in electro-chemical discharge machining by forced discharge dispersion, Proc. 2010 Ann. Meet. Am. Soc. Precis. Eng., Atlanta, Georgia, USA, pp. 356-359, 2010

- ⑦ 荒井和行, 古谷克司: 旋盤型電解放電加工機によるガラスの加工(第 2 報)加工力の測定, 2010 年度精密工学会春季予稿, さいたま市桜区, pp. 549-550, 2010

- ⑧ 古谷克司, 新谷啓之, 村瀬靖男, 荒川修一: 強制放電分散型電解放電加工の加工特性(第 3 報)加工形状の観察, 2010 年度精密工学会春季予稿, さいたま市桜区, pp. 547-548, 2010

- ⑨ K. Furutani, Y. Murase, H. Shintani, S. Arakawa: Machining performance of electro-chemical discharge machining by forced discharge dispersion, Proc. Int. Conf. European Soc. Precis. Eng. Nanotechnol., San Sebastian, Spain, pp. 138-141, 2009

[その他]

ホームページ等

<http://www.toyota-ti.ac.jp/Lab/Kikai/5k60/furutani/>

で論文リストを公開している。

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし