

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 9 月 7 日現在

機関番号：52605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06032

研究課題名(和文) 透明性絶縁体の放電加工による極間隙の直接観察と絶縁体穿孔放電加工機の開発

研究課題名(英文) Direct Observation of Machining Gap by EDM of Transparent Insulator and Development of Insulator Drilling EDM

研究代表者

吉田 政弘 (Yoshida, Masahiro)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・教授

研究者番号：80220680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：石英ガラスの放電加工現象と放電波形の同期観察を行い、さらに、XYZの3軸方向からの極間の観察により遷移領域の導電性皮膜形成を調べた。最後に絶縁体の微細穿孔放電加工機に要求される仕様をまとめた。まず、絶縁体放電加工特有の長パルス放電の役割と絶縁体放電加工メカニズムを明らかにした。絶縁体放電加工形状の悪化は、長パルス放電時に生成される炭素量が多く、集中放電が生じるためである。そこで、熱分解炭素が減少する条件で放電加工を試みた。その結果、放電加工の形状精度が向上した。次に、遷移領域の導電性皮膜形成の調査から、絶縁体放電加工の安定した持続には工具電極面積と放電電流の適切な設定が必要ながかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって絶縁体工作物の放電加工の加工メカニズムが解明され、絶縁体工作物の放電加工を安定して持続するための加工条件の設定が容易に推定できるようになった。これによって、絶縁体工作物の放電加工法として補助電極法が広く利用されることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The EDM phenomenon of silica glass and the electric discharge waveform were observed synchronously, and further, the observation of the machining gap by the XYZ axes was observed to investigate the formation of the conductive film in the transition region. Finally, we have summarized the specifications required for a micro-hole EDM for insulators. First, the role of long pulse discharge, which is unique to insulator EDM, and the mechanism of insulator EDM were clarified. The deterioration of the insulator EDM shape is due to the large amount of pyrolytic carbon generated during the long pulse discharge, which causes concentrated discharge. We tried EDM under the condition that the amount of pyrolytic carbon was reduced. The shape accuracy of EDM was improved. Next, from the investigation of the process of forming the conductive film in the transition region, it is necessary to properly set the tool electrode area and the discharge current in order to maintain stable EDM of insulator.

研究分野：工学

キーワード：放電加工 絶縁体工作物 補助電極法 放電波形と放電現象の同期観察 XYZ軸の同時観察 導電性皮膜 遷移領域 微細穿孔放電加工機

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 1. 研究開始当初の背景

絶縁体の放電加工技術である補助電極法は 1995 年に福澤らによって開発された<sup>1)</sup>。これは、絶縁体の加工面に銅箔の設置や銅メッキなどを施して導電性を有する面を作成（以降、導電化処理と称する）し、通常の放電加工と同じように灯油などの油加工液中で放電加工を行う方法である。放電は、まず作成した導電体と工具電極との間で生じる。油加工液中で放電が発生すると、高温の放電アーク柱と触れた油加工液が熱分解して炭素が生成される<sup>2)</sup>。この炭素が放電面に付着することで炭素を主成分とした導電性皮膜が形成される<sup>3)</sup>。そして、放電が導電体から絶縁体表面に放電が移行する遷移領域を経て絶縁体で放電が生じるようになる。しかし、補助電極法による絶縁体の放電加工は広く利用されていない。それは、放電加工条件の設定が非常にシビアなためと放電加工面の形状精度が悪化する問題があるためである。これらの問題を解決するには絶縁体の放電加工メカニズムの解明と導電性被膜の形成過程の調査が必要となる。ところで、絶縁体の放電加工では、通常の放電加工では見られない設定したパルス幅よりも非常に長いパルス幅の放電波形（以降、長パルス放電と称する）が出現することが知られている<sup>1)3)4)</sup>。この長パルス放電によって導電性被膜が形成されていると予想<sup>4)</sup>されているが、直接的な観察は行われておらず詳細は不明である。絶縁体の放電加工の極間を直接的に観察ができれば、長パルス放電の役割を含む絶縁体の放電加工メカニズムと導電性被膜の形成過程の解明につながる事が期待できる。

## 2. 研究の目的

筆者らは、透明性が高い石英ガラスに穿孔放電加工を成功させた。これにより、放電加工が生じている極間の直接的観察が可能となった。そこで、本研究は石英ガラスの穿孔放電加工の極間の直接観察と放電波形の同期観察を試みる。これにより、絶縁体の放電加工で特有に生じる長パルス放電の役割を解明するとともに、放電加工メカニズムの解明を行う。また、絶縁体の放電加工の問題である加工面の形状精度が悪化する問題の解決も試みる。さらに、極間を XYZ の 3 軸方向から同時に観察することで、放電加工中の放電の分散状況の観察と遷移領域における導電性皮膜の形成過程の調査を行い、安定した導電性皮膜を形成するための加工条件設定の指標を明らかにする。その上で、絶縁体への微細穿孔放電加工機に求められる基本的仕様をまとめる。

## 3. 研究の方法

### 3-1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。加工には絶縁体用小型トランジスタ電源式放電加工機(特殊電気加工技研)を用いた。極間の観察には高速度カメラ(Photron, FAST CAM SA-5)、高倍率レンズ(Photron, L-X003)、高輝度照明(SUMITA, LS-M210)を用い、放電波形の観察にはオシロスコープ(LeCroy, Wavepro 7Zi)、電流の測定にはカレントトランス (Pearson Electronics, MODEL 110/0.1)を用いた。被加工物として厚さ 10mm×幅 50mm×奥行き 10mm の石英ガラスを用い、放電開始面には銅で導電化処理を施した。加工条件を Table 1 に示す。被加工物である石英ガラスを陽極とし、陰極には、φ1.0mm の銅丸棒を 60rpm で回転させた。加工液には VITOL2(Sodick)を用いた。高速度カメラの撮影条件を Table 2 に示す。この条件の場合、約 1.85s の映像がカメラに記録される。シャッタースピードは映像の光量を確保することと、放電 1 回毎の映像と放電波形を同期できるように、放電持続時間と休止時間を基に 10μs に設定した。これにより正常放電とパルス幅 20μs 以上の放電を映像から区別することが

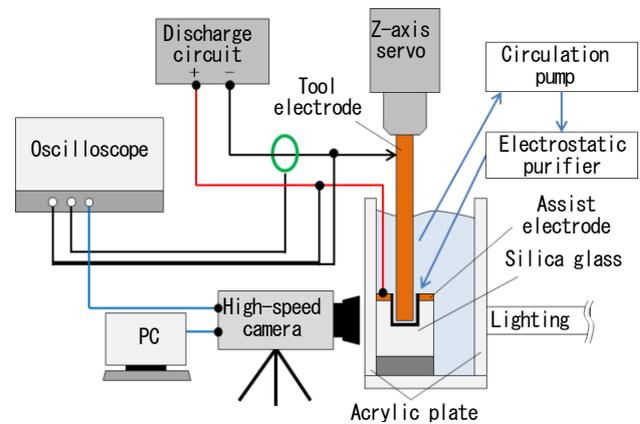


Fig. 1 Outline of experiment equipment

Table 1 Processing conditions

Work piece	Silica glass (+)
Tool electrode	Cu φ1mm (-)
Discharge duration [μs]	5
Off time [μs]	43
Current [A]	2.5
Open voltage [V]	100

Table 2 Recording conditions

Frame rate [fps]	100000
Shutter speed [μs]	10
Filmed area [mm <sup>2</sup> ]	0.84 × 0.51

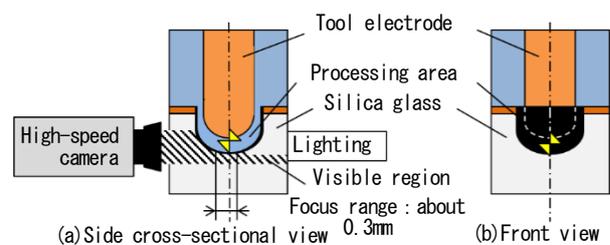


Fig. 2 Filmed area

出来る。また、今回使用したレンズの被写界深度は約0.3mmであり、Fig. 2(a)に示すように中央手前付近に合わせている。高速度カメラ側からの観察例はFig. 2(b)に示すように、放電加工により除去された加工領域と、石英ガラスが光を透過している部分からなる。絶縁体の放電加工では炭素が通常の放電加工より多く生成され、加工屑としても加工液中に多く漂う。通常の循環装置では加工屑が十分に排除できずに安定加工と撮影に影響を及ぼすため、加工液の循環には静電浄油機(KLEENTEK, EDC-R3P)を用いた。また、クリアな撮影を実現するために、被加工物の石英ガラス側面はラップ盤(亜鉛定盤, 0.5 $\mu$ mダイヤモンド砥粒)を用いて研磨し、治具を用いて透明アクリル製の加工槽側面に密着させ撮影を行った。

#### 4. 研究成果

Fig. 3に加工中の加工現象の観察例を示す。放電加工により除去された加工領域は黒く不透明になっていることから、この部分には導電性被膜が形成されていると推測される。それ以外の部分は、石英ガラスが光を透過している部分と、加工領域外側の影が生じている部分が存在する。ガラスなどの透明体に影が生じるのは、応力や熱が加わった場合である<sup>5)6)</sup>。

Fig. 3(a)は影が生じた直後、(b)は影が発生してから2.3ms後の画像である。放電点が移動した後、影は減少し、やがて消えた。よって、この影は放電点に発生していると言える。放電点に発生する応力として考えられるのは、加工反力とアーク柱の熱による熱応力である。実験で用いた被加工物を両端単純支持梁の力学モデルに落とし込み、中央部に荷重が加わった場合の系の固有振動数を算出すると、約53.3MHzとなる。この結果から、応力が解除されたとき歪がもとに戻る時間はシャッタースピード10 $\mu$ sよりも十分早い。すなわち、加工反力によって生じる影は、最大でも2コマの画像にしか写り込まないと言える。また、加工反力はアーク柱発生後数十 $\mu$ sでピーク値を取り、その後100 $\mu$ s程度で0となる<sup>7)</sup>。よって、影は加工反力によるものとは言い難い。次に、工具電極と被加工物が接触し、その応力により影が発生する場合を考えると、加工機の主軸の応答性は数十Hz程度であることから影は数百msに亘って撮影領域の全域に発生すると考えられるが、そのような現象は観察されていない。よって、この影は熱によるものと思われる。Fig. 4に撮影中の加工領域の増加域を示す。加工領域の増加分を示すために、加工領域増加後の画像に、増加前の画像を色反転することで加工領域を白くし、加工領域外を透過した画像を合成する処理を行った。以降、増加分を比較する画像にも同様の処理を行っている。Fig. 4からわかるように、工具電極を回転させているにも関わらず、一か所が大きく加工されているのが見られる。記録された映像から、約0.185sの間に、長パルス放電が発生後、同じ箇所集中放電の1か所集中(以降、正常集中と称する)が生じる現象が高確率で生じていることが分かった。また、このとき発生する波形は開放電圧まで立ち上がらない一般的な集中放電波形ではなく、補助電極部分の加工時に比べて、極めて放電遅れ時間の短い正常放電波形が集中して生じていることが観察された。

#### 5. 放電加工の形状精度向上の試み

絶縁体の放電加工で形状精度が悪化するのには、生成カーボンの過剰による正常放電の集中によるものと推測された。そこで、長パルス放電時に生成されるカーボン生成量を減らす加工条件で加工を行い、放電加工の形状精度の向上を試みた。加工条件をTable 3に示す。Fig. 5は加工条件の変更によって生じる放電種類の変化を示し

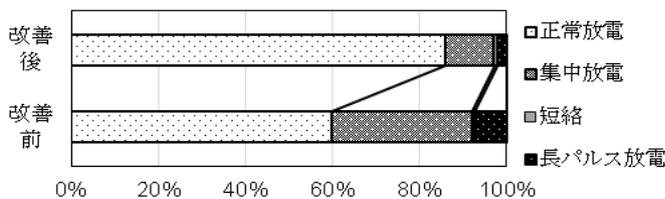


Fig. 5 Improvement of rate of concentration discharge

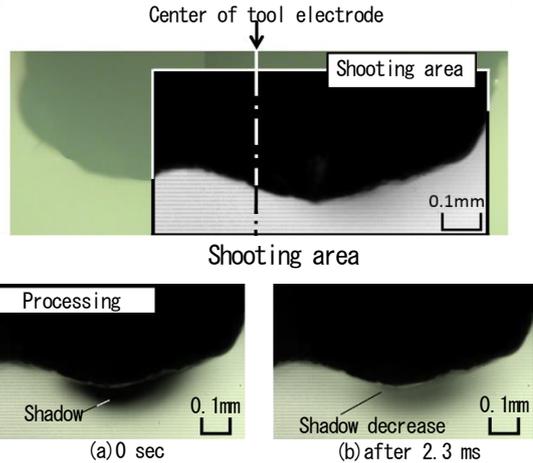


Fig. 3 Photograph example

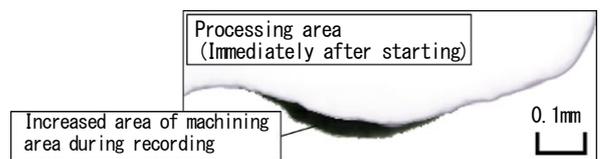


Fig. 4 Increased area of machining area during recording

Table 3 Changing processing conditions

Discharge duration[ $\mu$ s]	5→10
Off time[ $\mu$ s]	43→86
Current [A]	2.5→1.7
Open voltage [V]	100
Servo voltage [V]	55→85

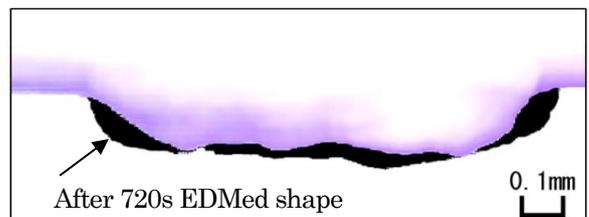


Fig. 6 Result of machining progress

たものである。長パルス放電と正常放電の集中の割合が減少し、正常放電の割合が増加していることが分かる。Fig. 6に720秒間加工した後の加工進行状況を示した。放電が分散的になり加工形状もフラットになっている。よって、絶縁体放電加工の形状精度を向上させるには、長パルス放電時に生成されるカーボン量を減少させ、正常放電の集中を少なくすれば効果があることが分かった。

## 6. 放電加工の極間隙のXYZ 3軸方向同時観察

### 6-1 3軸方向の同時観察装置

Fig. 7にXYZの3軸方向から同時に極間隙を観察する実験装置を示す。XY軸方向のカメラの取り付け位置はシムにより調整可能で、工作物の大きさが変化しても注目点に焦点を合わせられる。工作物のXY軸方向の移動はマイクロメータ調整式のXYステージを用いた。Z軸は放電加工が進んでもZ軸方向のカメラの焦点を合わせられるように工作物の位置を加工深さに応じてマイクロメータヘッドで上下させる構造となっている。放電加工機は特殊加工技研製を使用し、加工油にVAITOL2 (Sodick)、浄油機は静電浄油機(KLEENTEK EDC-R3P)を用いた。Table 4に本実験で用いるカメラの諸元を示す。前節までの実験では、個々の放電点と放電波形を同期して観察するため、前出のTable 1の放電持続時間 $5\mu\text{s}$ 、休止時間 $43\mu\text{s}$ では100000fpsのフレームレートが要求された。しかし、本実験では放電点の分布が分かれば良いので個々の放電点を観察する必要はない。今回のカメラのフレームレート(30fps)の場合、シャッターが開いている0.3s間の撮影像がパソコンに記録され、後述するTable 5の条件Bでは約6000発の放電が1フレームに記録される。すなわち、6000回の放電がどの位置で飛んだかが分かり、放電点の分散状況を調べることが可能である。撮影倍率は加工部分を詳細に確認するため200倍とした。撮影領域は $2\text{mm}\times 1.5\text{mm}$ で、 $\phi 1\text{mm}$ のCu工具電極を用いて加工した場合は、加工部分と工具電極が撮影範囲内に収められる。

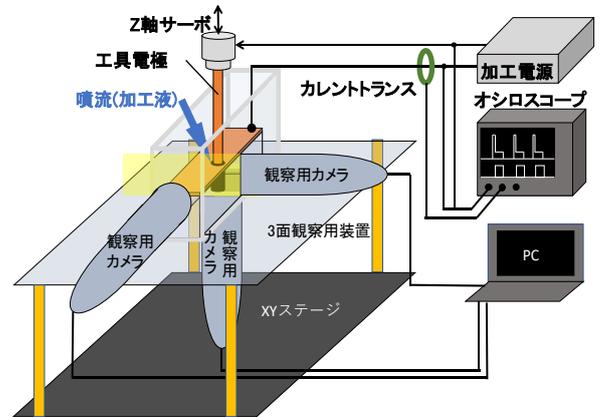


Fig. 7 Experimental equipment set up

Table 4 Specimens of camera

Frame rate	30fps
Magnification	$\times 10\text{--}230$
Resolution	1.3 million pixels

Table 5 Machining conditions

Tool electrode	$\phi 1\text{ Cu}$	
Condition	A	B
Workpiece	Silica glass	
Assisting electrode	Silver paste	
Polarity (-)	Tool electrode	
Tool revolution	use	
Open voltage	100V	
Discharge current	1.7A	2.5A
Pulse time	$10\mu\text{s}$	$5\mu\text{s}$
Off time	$86\mu\text{s}$	$43\mu\text{s}$
Jump motion	use	

### 6-2 放電点分布の観察

放電エネルギーの違いが放電の分散状態に及ぼす影響を調べた。加工条件をTable 5に示す。加工条件Bは前出のTable 1と同じ加工条件で、加工条件Aは放電電流値を下げ、極間隙に与える放電エネルギーを小さくしてアーク柱の熱量を下げることで加工油の熱分解炭素の生成量の減少を狙った条件で

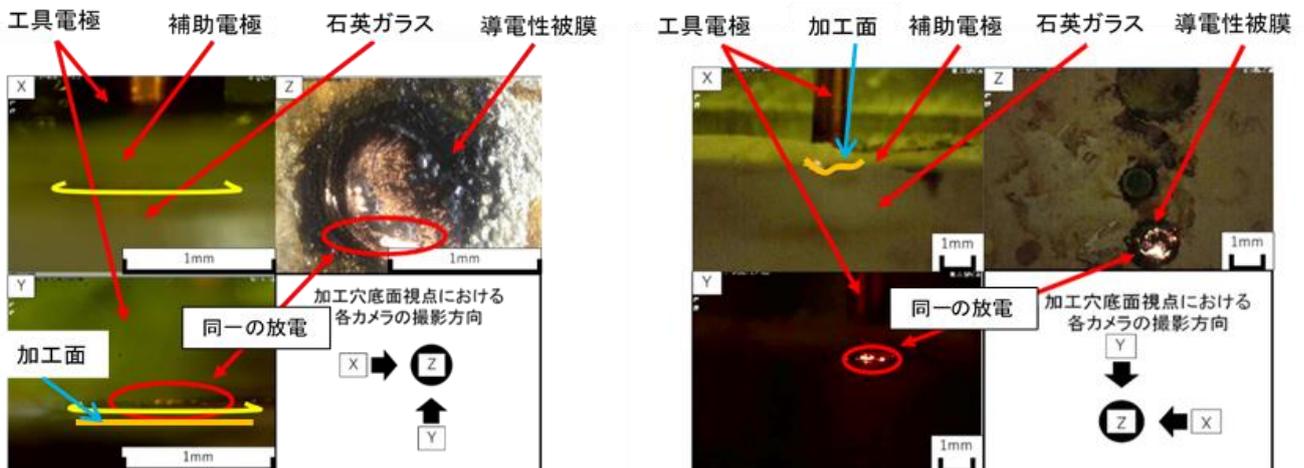


Fig. 8 Result of low energy discharge (1.7A)

Fig. 9 Result of high energy discharge

ある。Fig. 8に条件A, Fig. 9に条件Bでの加工中の観察の例を示す。これらの結果から、条件Bに比べ条件Aでは放電点群が分散することが観察できた。加工面の形状に注目すると、Fig. 9の条件Bでは、図中の橙色の線で示したように大きな凹凸が見受けられる。それに対して、放電点が分散したFig. 8の条件Aではほぼフラットな良好な加工面が得られていることが観察された。このことから、放電電流値が比較的大きな条件Bでは加工油から生成される熱分解炭素量が過多となり、極間隙にカーボンの濃度の高い部分が生じたため加工面が凸凹になったものと考えられる。一方、条件Aは放電電流が小さく熱分解炭素の生成量が多すぎず、放電点が分散したので加工が一樣に進展したものと考えられる。よって、4節で述べた絶縁体の放電加工の加工精度悪化の原因は過剰な熱分解炭素の生成のためであることが裏付けられた。

## 7. 絶縁体工作物に対応した微細穿孔放電加工に要求される仕様

絶縁体の放電加工では、放電時に生成される導電性皮膜の状態が放電加工を左右する。導電性皮膜の状態は長パルス放電で生成される炭素量に大きく依存する。長パルス放電で生じる炭素量が過多になると形成される導電性皮膜の厚さが厚くなりすぎて加工が進行しなくなってしまう。一方、逆に長パルス放電で生成される炭素量が少なくなると、導電性皮膜が薄く、工具電極と導電性皮膜が軽く接触しただけでも皮膜が剥がれ放電が継続できなくなる。導電性皮膜の厚さを適切にするためには、放電加工条件を加工する絶縁体材質と加工面積に合わせて設定する必要がある。特に放電電流の影響が大きく、放電電流値をきめ細やかに調整が可能にすることが重要である。さらに、工具電極と導電性皮膜が接触した場合、すぐに工具電極を上昇させるためZ軸の応答性を高める必要がある。以上のことを踏まえて、微細穿孔放電加工機に要求される仕様を以下にまとめる。

- ① 放電電流値の細やかな設定が可能なこと（設定電流値は0.1Aから5A程度まで、0.1A刻みで調整可能とする）。
- ② Z軸の応答性を高めるため、ピエゾ素子などを用いた補助工具電極送り機構をZ軸に備えること。
- ③ 加工中の放電検出電圧のサンプリングタイムを通常の1/10以下に短くして、放電加工状態をよりリアルタイムで捉えること。
- ④ 極間の広さを制御するファクターであるサーボ電圧の設定を0.1V刻みで行えるようにすること。

## 8. 結言

補助電極法を用いた絶縁体の放電加工の加工プロセスの解明を目的として、極間の放電加工現象と放電波形の同期観察システムの構築と、石英ガラスへの放電加工時の加工現象と放電波形の同期観察を行った。さらに、放電加工の極間隙をXYZの3軸方向から同時観察できる実験装置を用いて放電の分布と遷移領域における導電性皮膜の形成過程の観察を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 同期観察システムを構築して放電波形と加工現象の同期観察が可能となった。
- (2) 同期観察システムを用いて長パルス放電に注目し観察を行った。その結果、石英ガラスへの放電加工では、長パルス放電のあとに遅れ時間の極めて短い正常放電の1か所集中が発生することが分かった。加工プロセスとして、この正常放電の1か所集中により加工が進展する場合はほとんどである。長パルス放電単発で加工が進展する場合はごくわずかである。
- (3) 加工形状精度の向上には、長パルス放電時に生成するカーボン量を減らし、正常放電の集中を減少させると果がある。
- (4) 絶縁体の放電加工の極間隙をXYZの3軸方向から同時観察できる実験装置を用いて観察を行った結果、放電エネルギーを小さくして加工を行った場合、放電の局所的な集中が減少するため加工精度が向上する。
- (5) 遷移領域における導電性皮膜を安定して形成させるためには、工具電極の加工面の面積に応じて放電加工条件をきめ細かく設定する必要がある。

## 参考文献

- 1) 福澤康, 谷貴幸, 岩根英二, 毛利尚武: 放電加工機を用いた絶縁性材料の加工, 電気加工学会誌, Vol.29, No.60 (1995) pp.11-21.
- 2) 鈴木政幸, 毛利尚武, 斎藤長男, 武沢英樹: 放電加工における電極低消耗の研究(第一報), 電気加工学会誌, Vol.26, No.52 (1992) pp.47-55.
- 3) Yasushi Fukuzawa, Naotake Mohri and Takayuki Tani: Electrical Discharge Machining Method of Insulating Ceramics, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.71, No.5 (2005) pp.541-544.
- 4) 後藤啓光, 谷貴幸, 毛利尚武: 絶縁性  $\text{Si}_3\text{N}_4$  セラミックスの放電加工メカニズム, 放電加工技術, Vol.34, No.108 (2010) pp.9-14.
- 5) 若月正通, 小森田藤夫: 光学ガラスの屈折率の温度依存性, 光学ニュース, Vol.1968, No.98 (1968) pp.12-15.
- 6) 梅崎栄作: 光弾性法による応力分布測定技術の現状と展望, 精密工学会誌, Vol.79, No.23 (2013) pp.607-611.
- 7) 藤村明勝, 安孫子直樹, 吉田政弘, 国枝正典: 放電加工における単発放電の気泡モル量の測定, 2015年度精密工学会春季大会講演論文集 pp.49-50.

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 0件）

1. 著者名 佐藤涼介, 花岡大生, 吉田政弘	4. 巻 51, No. 127
2. 論文標題 透明性絶縁体放電加工時の加工現象と放電波形の同期観察の試み	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電気加工学会誌	6. 最初と最後の頁 438-444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 吉田政弘, 倉門孝太, 花岡大生
2. 発表標題 透明性絶縁体放電加工の極間隙の3軸 (XYZ) の同時観察の試み
3. 学会等名 電気加工学会2019全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro YOSHIDA, Daiki HANAOKA and Ryosuke SATO
2. 発表標題 Attempts at Synchronized Observation of Processing Phenomenon and Discharge Waveform in Electrical Discharge Machining of Transparency Insulators.
3. 学会等名 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 23-27 April 2017, Bilbao, Spain (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤涼介, 吉田政弘, 花岡大生, 福澤康
2. 発表標題 透明性絶縁体放電加工時の加工現象と放電波形の同期観察の試み
3. 学会等名 精密工学会2016秋季大会
4. 発表年 2016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
--	---------------------------	-----------------------	----