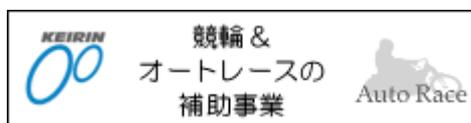


財団法人 JKA 2020 年度  
超音波振動を援用した高アスペクト比  
マイクロ加工に関する研究の補助事業  
報告書

新潟大学教育学部金属加工研究室  
平尾 篤利



# 目次

|       |                     |    |
|-------|---------------------|----|
| 第1章   | 序論                  | 4  |
| 1.1   | 放電加工法               | 4  |
| 1.1.1 | はじめに                | 4  |
| 1.1.2 | 放電加工の原理             | 5  |
| 1.1.3 | パルス幅とピーク電流          | 6  |
| 1.2   | 気泡の形成               | 7  |
| 1.2.1 | 単発放電加工における気泡の形成     | 7  |
| 1.2.2 | 連続放電加工における気泡の形成     | 8  |
| 1.3   | 超音波振動付与加工           | 9  |
| 1.3.1 | 超音波振動の原理            | 9  |
| 1.3.2 | 超音波振動を応用した様々な加工     | 9  |
| 1.3.3 | 超音波振動付与放電加工         | 9  |
| 1.4   | 本研究の目的              | 10 |
| 1.4.1 | 本研究の背景および従来研究との関連性  | 10 |
| 1.4.2 | 本研究の目的              | 10 |
| 1.4.3 | 本論文の構成              | 10 |
| 第2章   | 電極および振動子の振幅計測       | 11 |
| 2.1   | 緒言                  | 11 |
| 2.2   | 実験装置・方法             | 11 |
| 2.2.1 | 振動付与装置概要            | 11 |
| 2.2.2 | ランジュバン型振動子および銅電極    | 12 |
| 2.2.3 | ファンクションジェネレータ       | 14 |
| 2.2.4 | 渦電流変位センサ            | 15 |
| 2.2.5 | オシロスコープ             | 17 |
| 2.3   | 実験結果および考察           | 18 |
| 2.3.1 | 共振周波数測定             | 18 |
| 2.4   | 第2章結言               | 19 |
| 第3章   | 深穴放電加工における側面ギャップの観察 | 20 |

|       |                            |    |
|-------|----------------------------|----|
| 3.1   | 緒言 .....                   | 20 |
| 3.2   | 実験装置・方法.....               | 20 |
| 3.2.1 | 放電加工機.....                 | 20 |
| 3.2.2 | トランジスタ回路.....              | 25 |
| 3.2.3 | 制御システム .....               | 26 |
| 3.2.4 | 観察装置 .....                 | 31 |
| 3.3   | 実験条件および実験方法 .....          | 37 |
| 3.3.1 | 気泡による加工屑排出効果.....          | 37 |
| 3.3.2 | アスペクト比ごとの観察 .....          | 38 |
| 3.3.3 | 気泡占有部比較 .....              | 40 |
| 3.3.4 | 気泡の合一.....                 | 41 |
| 3.3.5 | 放電波形 .....                 | 42 |
| 3.3.6 | 底面部と側面部の関係 超音波振動付与無し ..... | 43 |
| 3.4   | 結言 .....                   | 44 |
| 第4章   | 超音波振動付与放電加工 .....          | 45 |
| 4.1   | 緒言 .....                   | 45 |
| 4.1.1 | 底面部と側面部の関係 超音波振動付与有り ..... | 45 |
| 4.2   | 実験装置・方法.....               | 46 |
| 4.2.1 | 超音波振動付与装置概要 .....          | 46 |
| 4.3   | 実験結果および方法 .....            | 48 |
| 4.3.1 | 電極に超音波振動付与.....            | 48 |
| 4.3.2 | 加工液に超音波振動付与 .....          | 51 |
| 4.4   | 第4章 結言 .....               | 52 |
| 第5章   | 回転電極放電加工 .....             | 53 |
| 5.1   | 緒言 .....                   | 53 |
| 5.2   | 実験装置・方法.....               | 53 |
| 5.2.1 | 回転付与装置概要.....              | 53 |
| 5.3   | 実験結果および考察 .....            | 56 |
| 5.3.1 | 回転電極実験結果.....              | 56 |

|       |              |    |
|-------|--------------|----|
| 5.4   | 結言 .....     | 59 |
| 第 6 章 | 結論 .....     | 60 |
| 6.1   | 本研究のまとめ..... | 60 |
| 6.2   | 今後の課題.....   | 62 |
| 参考文献  | .....        | 63 |

---

---

# 第1章 序論

---

---

## 1.1 放電加工法

### 1.1.1 はじめに

放電加工は、被加工物の硬度や靱性といった材料の特性に左右されない利点がある。一方で、放電加工の問題点として、加工速度が遅いということがあげられる。特に加工時間の短縮が望まれる現場では大きな課題となっている。

放電加工は、加工法によって分類することができ、一般的に知られているのは形彫放電加工とワイヤ放電加工の2種類である。

形彫放電加工は、あらかじめ作製された特定形状の工具電極を用いて、その形状を被加工物に対して転写加工を行う加工法である。複雑な形状でも加工が可能であり、一般の機械加工では、切削できない超硬材、難削材に対しても加工できるという特徴がある。

ワイヤ放電加工は、直径が数十～数百[ $\mu\text{m}$ ]の細いワイヤを工具電極に用いて、プログラムした軌跡に沿ってワイヤを走査し、糸鋸で加工したようなくり抜き加工を行う加工法である。主に歯車加工や焼入れ部品の後加工など、ブロック加工に用いられる。

本研究では、形彫放電加工について議論を進める。

### 1.1.2 放電加工の原理

図 1.1 に放電加工の原理を示す。以下に放電加工の原理について、簡単に説明する。

放電加工は、水や油を加工液とし、加工液中で電極と被加工物を数[ $\mu\text{m}$ ]~数十[ $\mu\text{m}$ ]まで接近させ、極間にアーク柱を発生させる。このアーク柱の熱的作用と加工液の気化爆発により、熔融した被加工物を除去し、放電痕を形成させることを繰り返して加工する。一発の放電によって加工物に形成される放電痕の大きさは、材料の物性や加工時の電気条件などによって異なる。また、放電に使われるエネルギーが大きいくほど大きくなり、表面粗さは悪化する。放電エネルギーとは、パルス幅  $t_e$  (放電が発生している時間) とピーク電流  $i_e$  (極間に流れる電流) の積によって表される。

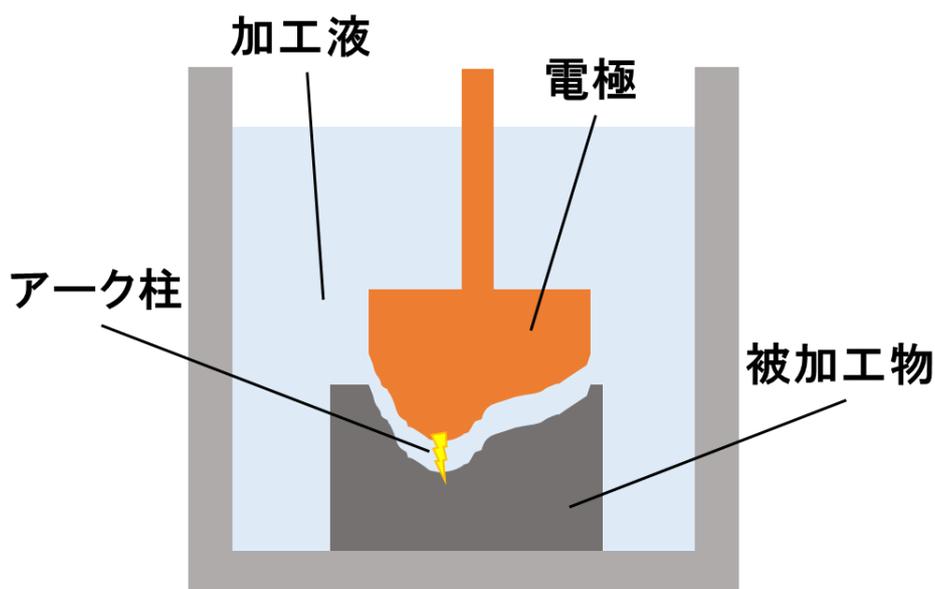


図 1.1 放電加工の原理

### 1.1.3 パルス幅とピーク電流

図 1.2 に典型的な放電における電圧・電流の波形を示す。放電における波形は、主に 4 種類ある。正常放電が理想的な放電における波形で、無負荷電圧がかかってから電流が流れる。無負荷電圧とは、放電回路における電源電圧であり、正常放電において負荷がかかっていない部分である。また、放電しない状態と同じ電圧が出力される。極間距離が広がると放電することができず、反対に極間距離が 0 [mm]になると短絡する。また、一発一発の放電が局所に集中することを集中放電と呼び、高熱を持つ。

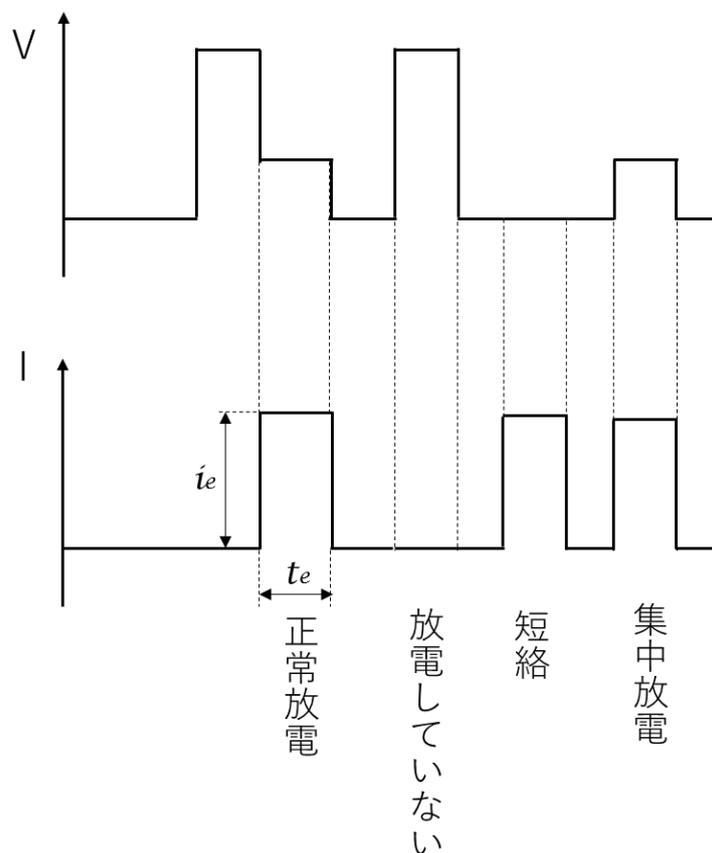


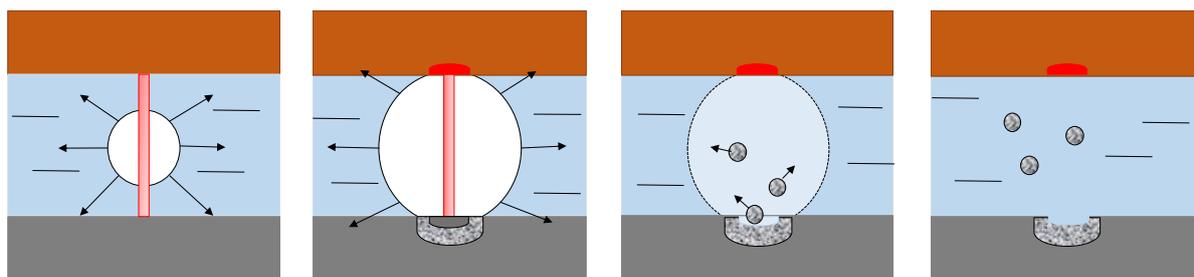
図 1.2 放電による波形

## 1.2 気泡の形成

### 1.2.1 単発放電加工における気泡の形成

単発放電加工における気泡の形成についてまとめた。図を図 1.3 に示す。

電極と被加工物が近づき、絶縁が破壊される。電極と被加工物はアーク柱で電氣的につながり、同時に、極間に存在する加工液が気化爆発を起こす。放電の時間が続くと、気泡は大きくなり、被加工物表面および電極表面にエネルギーが投入され、材料の融点を超えると溶け出す。設定した放電の時間が終了すると、その後気泡は収縮崩壊する。収縮崩壊時の気泡の運動により、溶けた部分は、被加工物から引きはがされ、加工屑となり飛散する。気泡の崩壊が落ち着き、極間は再び加工液で満たされる。吹き飛ばされた加工屑は、加工液の中に飛び散り、液中に浮遊する。単発放電では、この(1)~(4)の流れを繰り返す。



(1)絶縁破壊 (2)気化爆発 (3)収縮崩壊 (4)絶縁回復

図 1.3 単発放電における気泡の形成

### 1.2.2 連続放電加工における気泡の形成

連続放電加工における気泡形成についてまとめた。図を図 1.4 に示す。単発放電の気泡形成と同様に、電極と被加工物が近づき、絶縁が破壊される。電極と被加工物はアーク柱で電氣的につながり、同時に、極間に存在する加工液が気化爆発を起こす。放電の時間が続くと、気泡は大きくなり、被加工物表面および電極表面にエネルギーが投入され、材料の融点を超えると溶け出す。しかし、連続放電では隣り合った気泡が合一し、極間に滞留する<sup>1)</sup>。この極間に滞留した気泡は、放電によって新たに形成された気泡と合一し、大きな気泡が形成される。この時の放電加工の極間では約 70 パーセントが気泡で満たされているという報告されている<sup>2)3)</sup>。この合一された気泡の滞留により、加工液が極間に流れ込まず、加工屑が加工面に付着したままとなる<sup>4)</sup>。このため、工具電極と被加工物が加工屑により導通してしまう短絡現象や加工屑が同一箇所に密集して発生する集中放電、異常放電が発生し、加工効率が低下すると考えられている。

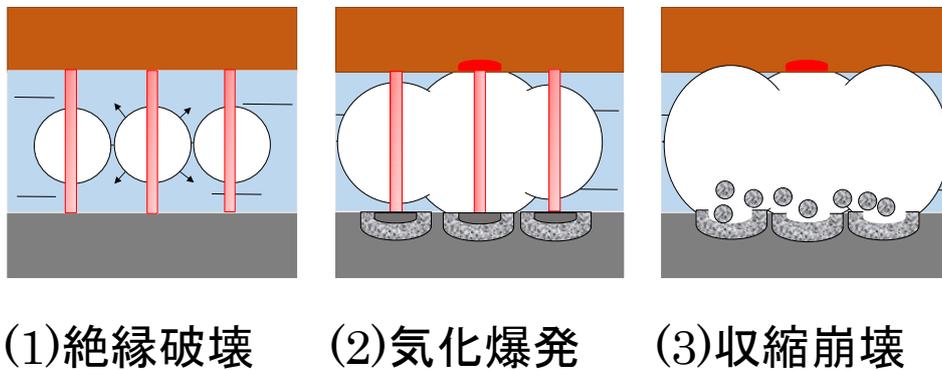


図 1.4 連続放電における気泡の形成

## 1.3 超音波振動付与加工

### 1.3.1 超音波振動の原理

超音波とは、一般に 20 [kHz]を超える「人間の可聴周波数以上の音域」と定義されている。超音波は、電気エネルギーを振動のエネルギーに変えることで発生させることができる。本研究では、ランジュバン型振動子を使用し、高速伸縮を繰り返すことで超音波振動を発生させる。

### 1.3.2 超音波振動を応用した様々な加工

超音波振動を付与した加工法は、切削加工、研削加工、さらには遊離砥粒加工などといった様々な加工に用いられている。超音波振動を付与したこれらの加工法はすでに実用化されており、ダイヤモンドへの穴あけ加工など重要な位置を占め研究されている。

### 1.3.3 超音波振動付与放電加工

放電加工には加工速度が遅いといった課題がある。この問題の解決策として、工具電極や加工液に超音波振動を付与した放電加工が提案され、効果が確認されている<sup>5)6)</sup>。

## 1.4 本研究の目的

### 1.4.1 本研究の背景および従来研究との関連性

放電加工の加工現象の解明を目的として、極間における気泡挙動に関する研究が行われている。しかし、ほとんどが電極底面部の気泡の挙動観察であり、底面部から抜け、側面部に現れた気泡については、詳細な観察がされていない。

### 1.4.2 本研究の目的

本研究では、アクリル加工槽とハイスピードマイクロスコープを用いて、深穴放電加工時、超音波振動付与加工時における極間および側面ギャップの気泡挙動の観察を行ったので報告する。

### 1.4.3 本論文の構成

ここでは、本論文の構成を説明する。本論文は第 1 章から第 6 章で構成されており、本論文の構成を示す。

第 1 章では、本研究の背景および目的を述べ、放電加工法について簡単に説明する。

第 2 章では、実験装置の振幅計測を行った結果を示し、その結果および考察について述べる。

第 3 章では、放電加工において極間および側面ギャップについて観察し、その結果および考察について述べる。

第 4 章では、超音波振動が極間および側面ギャップにおよぼす影響について観察し、その結果および考察について述べる。

第 5 章では、回転電極が極間および側面ギャップにおよぼす影響について観察し、その結果および考察について述べる。

第 6 章では、本研究の結論を述べ、今後の課題について考察する。

---

---

## 第2章 電極および振動子の振幅計測

---

---

### 2.1 緒言

電極に超音波振動を付与すると電極が縦方向に振れる。このとき、電極の振幅が不安定であると、被加工物と電極が接触して短絡や異常放電が頻発する。そのため、ここでは安定した振幅を得るために、超音波振動が電極および振動子の振幅に与える影響について調査する。

### 2.2 実験装置・方法

#### 2.2.1 振動付与装置概要

超音波振動付与の流れを表したものを図 2.1 に示す。ファンクションジェネレータからアンプに正弦波を送り、アンプを用いて、増幅する。アンプで増幅した正弦波を振動子に送り、超音波振動を発生させる。渦電流変位センサを用いることで電極の変位をオシロスコープによってモニタリングする。

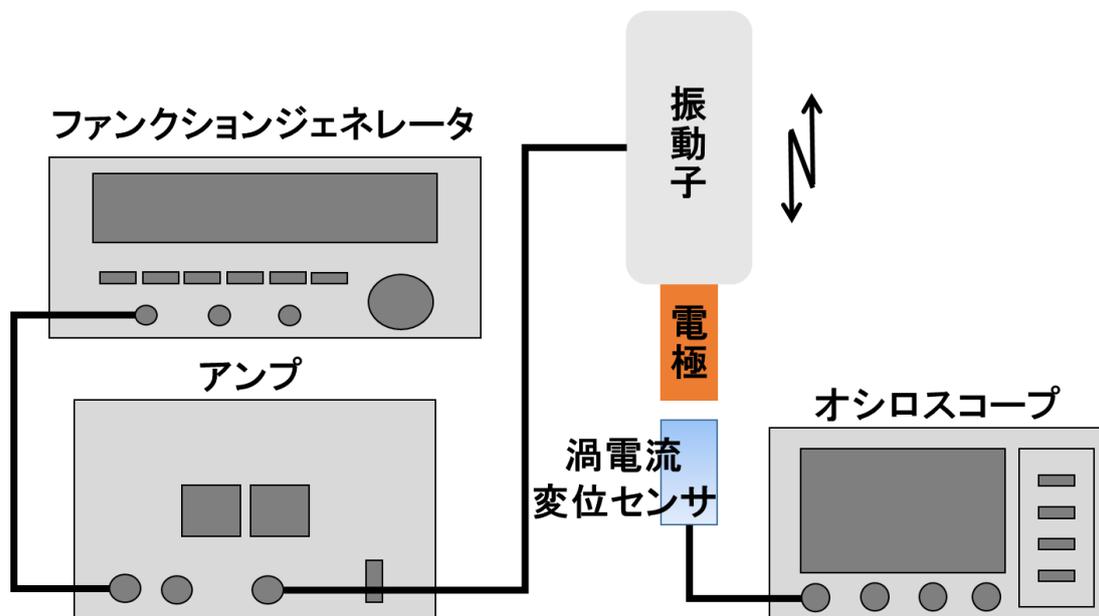


図 2.1 超音波振動付与の流れ

## 2.2.2 ランジュバン型振動子および銅電極

ランジュバン型振動子の仕様を表 2.1 に示す. ランジュバン型振動子は, 駆動端子(+)とアース端子(-)に交流電圧を加えることで, 振動子が伸び縮みを繰り返して高速振動を起こし, 超音波振動を発生させる. 本研究で使用したランジュバン型振動子を図 2.2 に示す.

表 2.1 ランジュバン型振動子の仕様

|        |                |
|--------|----------------|
| モデル    | 1540P2BF       |
| 直径     | $\phi 15$ [mm] |
| 全長     | 67 [mm]        |
| 周波数    | 40 [kHz]       |
| 測定電圧   | 10 [Vrms]      |
| アドミタンス | 10 [mS]        |



図 2.2 ランジュバン型振動子

銅電極の仕様を表 2.2 に示す. 銅電極は, 振動子に 1 つのナットで固定する.  
その概略を図 2.3 に示す.

表 2.2 銅電極の仕様

|     |               |
|-----|---------------|
| 全長  | 45 [mm]       |
| 直径  | $\Phi 3$ [mm] |
| ねじ部 | 15 [mm]       |

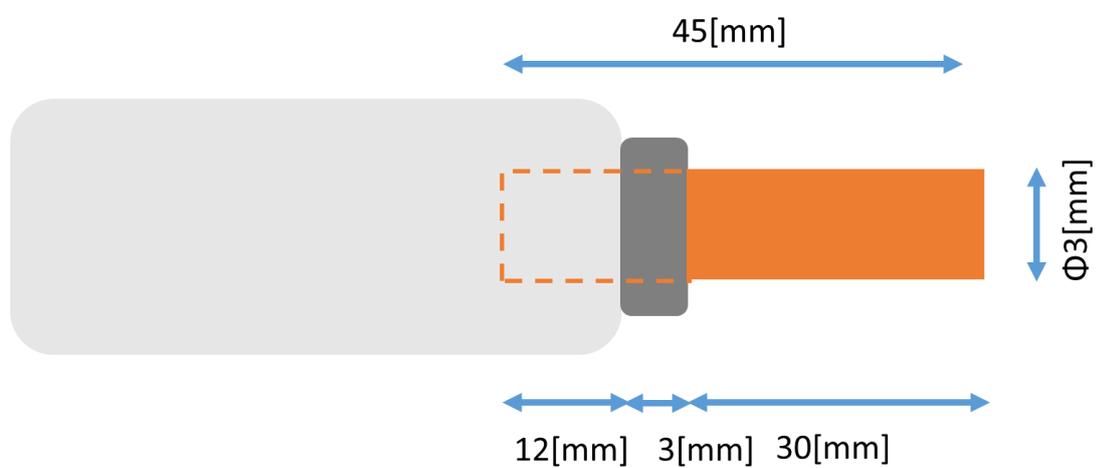


図 2.3 電極概略

### 2.2.3 ファンクションジェネレータ

電極に超音波振動を付与するために、ファンクションジェネレータを使用した。図 2.4 にファンクションジェネレータを示し、その仕様を表 2.3 に示す。



図 2.4 ファンクションジェネレータ

表 2.3 ファンクションジェネレータの仕様

|       |                     |
|-------|---------------------|
| モデル   | SG-4115 (IWATSU)    |
| 発振電圧  | 50 [mV] ~ 10 [V]    |
| 発振周波数 | 10 [mHz] ~ 15 [MHz] |
| 発振モード | CONT, TRIG, GATE    |
| 周波数確度 | ±10 [ppm]           |
| 備考    | BURST 可             |

#### 2.2.4 渦電流変位センサ

超音波振動付与による，銅電極の振幅は極めて微小である．そのため，本研究では，高い分解能と精度での測定が可能である渦電流変位センサを用いて計測する．表 2.4 に渦電流変位センサの仕様を示す．

表 2.4 渦電流変位センサの仕様

|       |                                  |
|-------|----------------------------------|
| メーカー  | LION PRECISION                   |
| 型式    | ECL101                           |
| レンジ   | 50 ~ 500 [ $\mu\text{m}$ ]       |
| 感度    | 10 [ $\text{mV} / \mu\text{m}$ ] |
| 分解能   | 12.7 ~ 12.9 [ $\text{nm}$ ]      |
| ターゲット | 銅 (Cu)                           |

本研究で使用した渦電流変位センサおよび原理を図 2.5 に示す．渦電流変位センサでは，電界ではなく，磁界を使用してターゲットまでの距離を検知する．センシングコイルに交流が流れることで検知が始まり，これによって，コイルの周囲に交流磁場が発生する．この交流磁場が導電性ターゲットと相互作用すると，ターゲットの材料に過電流と呼ばれる電流が発生する．この過電流が，センシングコイルの磁場と対立する，独自の磁場を生成する．

このセンサは，センシングコイルの周囲に一定の磁場を作るように設計されており，ターゲットでの過電流は検知フィールドとは反対であるため，元の磁界を維持するために，センサはセンシングコイルへの電流を増加させる．ターゲットのプロブからの距離が変化すると，磁界を維持するために必要な電流の量も変化する．センシングコイルの電流が処理されて出力電圧が発生し，プロブに対するターゲットの位置を検知する．また，今回は銅  $\phi 3[\text{mm}]$  であるため，感度は  $20[\text{mV} / \mu\text{m}]$  となる．その際に読み取った波形を図 2.6 に示す．

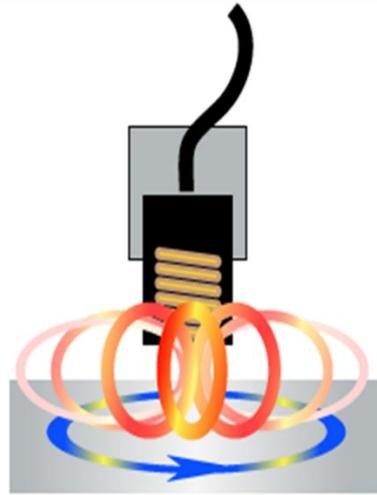


図 2.5 渦電流変位センサおよび原理

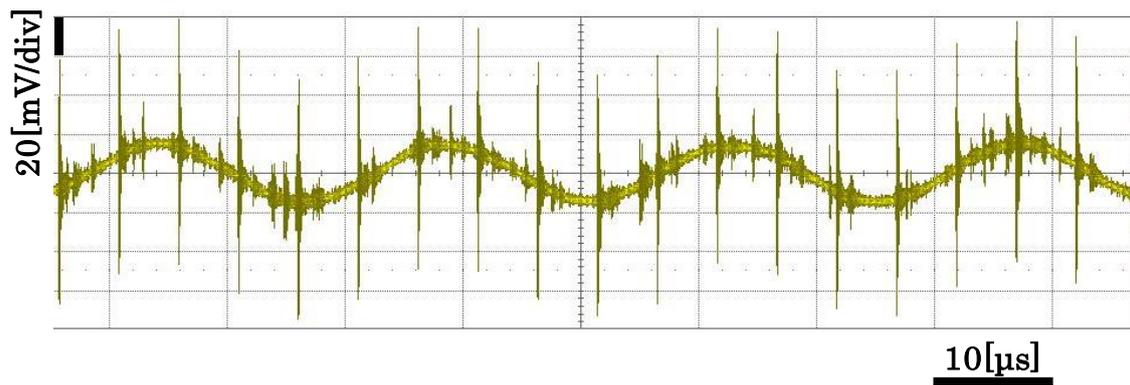


図 2.6 振幅の波形

## 2.2.5 オシロスコープ

オシロスコープを使用し、モニタリング検証を行う。図 2.7 に使用したオシロスコープを示し、表 2.5 にその仕様を示す。



図 2.7 オシロスコープ

表 2.5 オシロスコープの仕様

|           |                 |
|-----------|-----------------|
| メーカー      | LeCroy          |
| 型式        | WaveSurfer 3024 |
| CH        | 4               |
| 帯域        | 200 [MHz]       |
| サンプリングレート | 4[GS / s]       |

## 2.3 実験結果および考察

### 2.3.1 共振周波数測定

ファンクションジェネレータに出力を 1 [V] に固定し、20~100 [kHz] の周波数を付与し、オシロスコープで読み取れる変位の変化が大きい周波数を調査したところ 37・44・64 [kHz] 付近で確認した。これらの結果をもとに 3 つの周波数付近の値  $\pm 1$  [kHz] の範囲で、ヒステリシスを考慮し、低周波から高周波にのみ周波数を 0.05 [kHz] ずつ動かす動作を行い、振幅の変位を読み取った。測定結果を図 2.8 に示す。図 2.8 より、37[kHz]、64[kHz] 付近と比較し、44[kHz] 付近の振幅が 1.5~2.1 [ $\mu\text{m}$ ] と安定している。そのため、以降の実験では、44[kHz] 付近の周波数を選択する。これは、ランジュバン型振動子の共振周波数が 40[kHz] であるため、安定かつ最大の振幅が得られたと予想される。

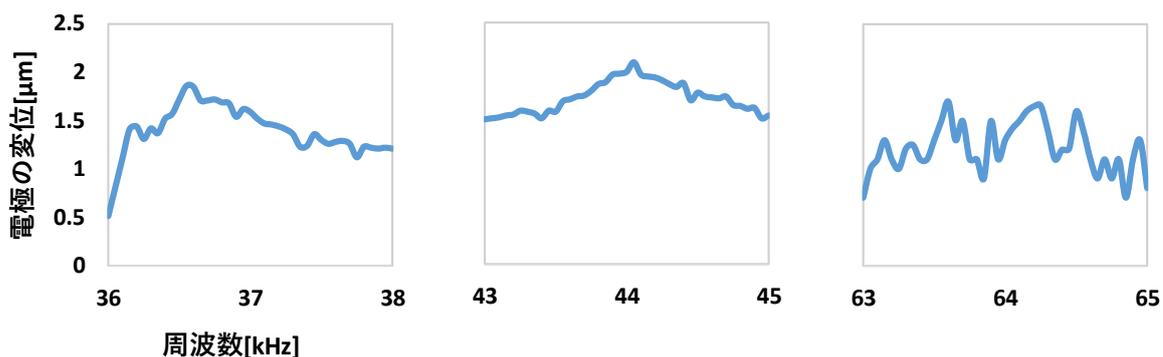


図 2.8 電極の振幅

## 2.4 第 2 章結言

本章では，渦電流変位センサを用い，超音波振動を付与した実験装置の電極および振動子の振幅測定を行った．本章で得られた内容を以下にまとめる．

- (1) ファンクションジェネレータの電圧を 1[V]に固定し，共振周波数測定を行ったところ 37・44・64[kHz]近傍で大きな変位が確認された．
- (2) 振幅の変位は，44[kHz]近辺で最大で 2.1[ $\mu\text{m}$ ]と確認された．

---

---

## 第3章 深穴放電加工における側面ギャップの観察

---

---

### 3.1 緒言

ここでは、放電加工において穴深さが側面ギャップにおける気泡、加工層におよぼす影響について調査した。

### 3.2 実験装置・方法

#### 3.2.1 放電加工機

図 3.1 に本研究で使用する実験装置の概略を示す。赤枠の電気回路については 3.2.3 項にて、記載する。

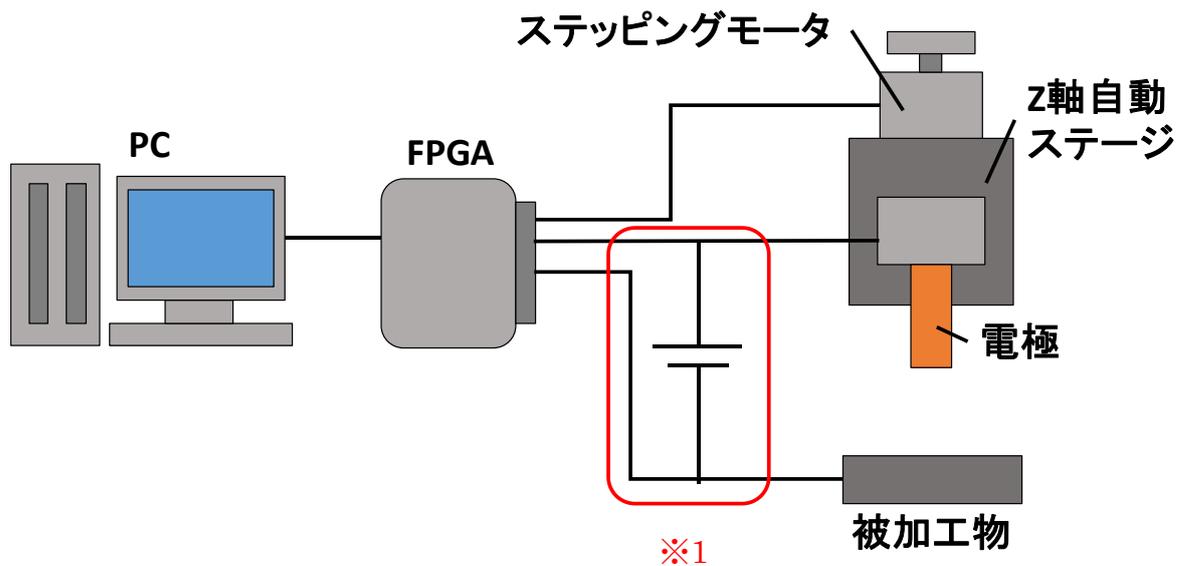


図 3.1 実験装置概略

本研究で使用する放電加工機を図 3.2 に示す。本加工機は、ステッピングモータを用いて Z 軸を制御している。Z 軸ステージの最小分解能が 4 [μm]であるため、4 [μm]の微細制御が可能である。加工槽はアクリル製の箱型のものを使用し、中心には被加工物を固定するための精密デバイスを設置している。また、静電浄油機によって油の放出と吸引を同時に行い、油を流動させている。電極には、2.2.2 節で示したものを使用する。被加工物には、SUS304 φ3 を用いた。

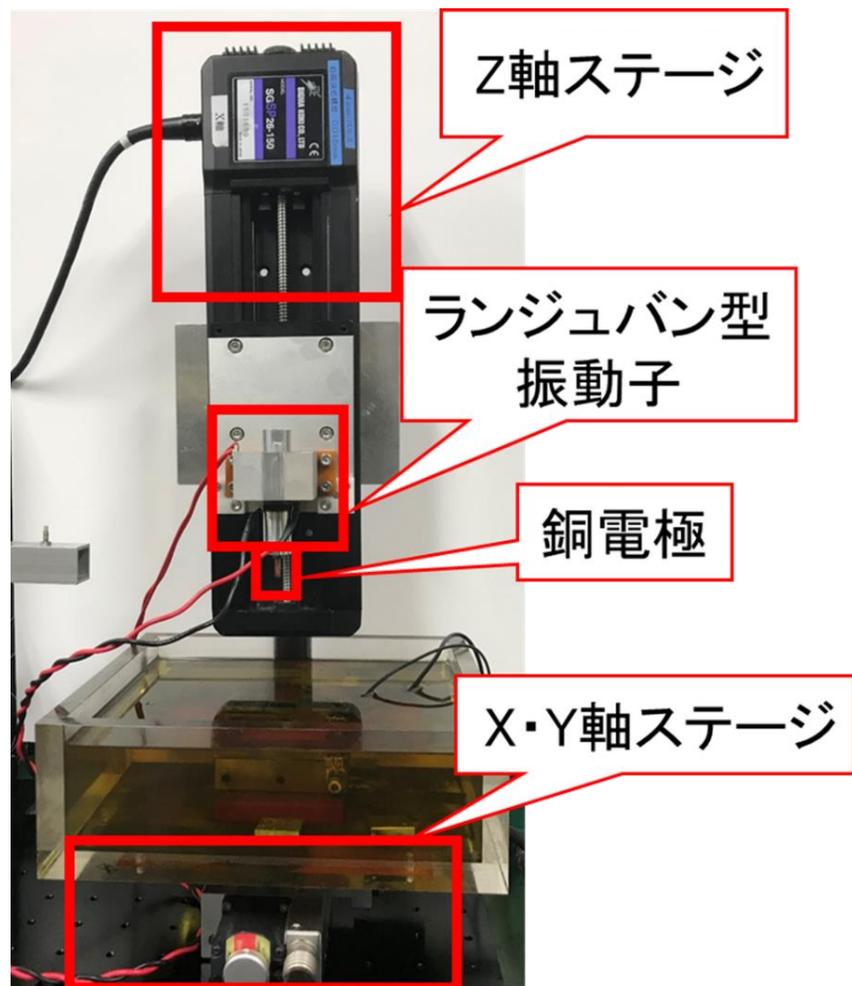


図 3.2 放電加工機

以下に、(1) 被加工物、(2) 静電浄油機、(3) XY 軸ステージ、(4) Z 軸ステージの仕様を示す。

(1) 被加工物

本研究で使用した SUS304 を図 3.3 に示し、その組成を表 3.1 に示す。

SUS304 は耐食性、溶接性、機械的性質が良好材料である。

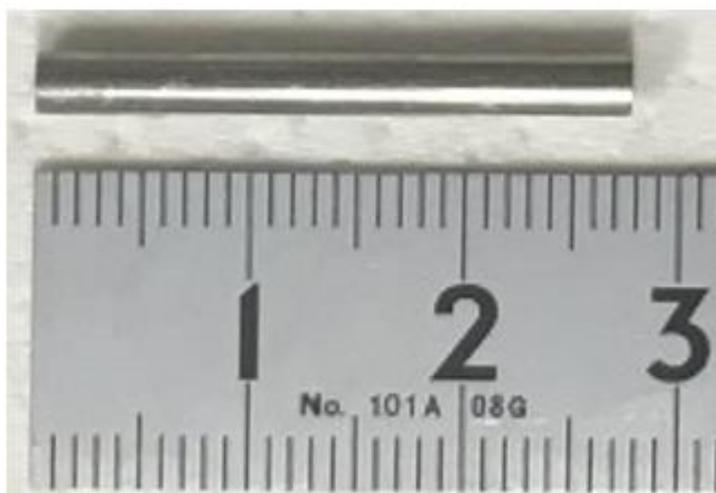


図 3.3 SUS304

表 3.1 SUS304 の組成

|        | C[%] | Si[%] | Mn[%] | P[%]  | S[%]  | Ni[%] | Cr[%]  |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| SUS304 | 0.08 | 1.00  | 2.00  | 0.045 | 0.030 | 8.00~ | 18.00~ |
|        | 以下   | 以下    | 以下    | 以下    | 以下    | 10.50 | 20.00  |

## (2) 静電浄油機

本研究で使用した静電浄油機を図 3.4 に示し、その仕様を表 3.2 に示す。



図 3.4 静電浄油機

表 3.2 静電浄油機の仕様

|            |                       |         |
|------------|-----------------------|---------|
| モデル        | EDC-R3P (株式会社クリーンテック) |         |
| 消費電力       | 200 [W]               |         |
| 寸法 (L×W×H) | 245×340×530 [mm]      |         |
| 重量         | 20 [kg]               |         |
| 浄油対象油量     | ISO 粘度 / 32           | 400 [ℓ] |
|            | 46                    | 280 [ℓ] |
|            | 56                    | 230 [ℓ] |
|            | 68                    | 190 [ℓ] |

### (3) XY 軸ステージ

XY 軸ステージおよび使用しているステッピングモータの仕様を表 3.3 に示す。

表 3.3 XY 軸ステージの仕様

| ステージ      |                          |
|-----------|--------------------------|
| モデル       | MMU-60X (中央精機)           |
| 移動量       | ±10 [mm]                 |
| 分解能       | 1 [μm / パルス]             |
| 送りネジリード   | 0.5 [mm]                 |
| 位置決め精度    | 0.02 [mm]                |
| 繰り返し精度    | ±0.001 [mm]              |
| ステッピングモータ |                          |
| モデル       | PH553-NB (Orientalmotor) |
| 静止角度誤差    | ±5 [min]                 |

### (4) Z 軸ステージ

Z 軸ステージの仕様を表 3.4 に示す。

表 3.4 Z 軸ステージの仕様

|         |                        |
|---------|------------------------|
| モデル     | SGSP26-150 (SIGMAKOKI) |
| 移動量     | 150 [mm]               |
| 分解能     | 4 [μm / パルス]           |
| 送りネジリード | 2 [mm]                 |
| 位置決め精度  | 0.015 [mm]             |
| 繰り返し精度  | 6 [μm]                 |

### 3.2.2 トランジスタ回路

本研究で使用するトランジスタ回路の概略を図 3.5 に示す。また、トランジスタ回路で使用した n-MosFET の仕様を表 3.5 に示す。

FET (Field Effect Transistor)は、電源から送られた電圧をスイッチングする素子である。放電加工における電気回路は、トランジスタ回路およびコンデンサ回路がある。トランジスタ回路による放電は、1.1.3 項の図 1.2 で示した正常放電の波形となる。

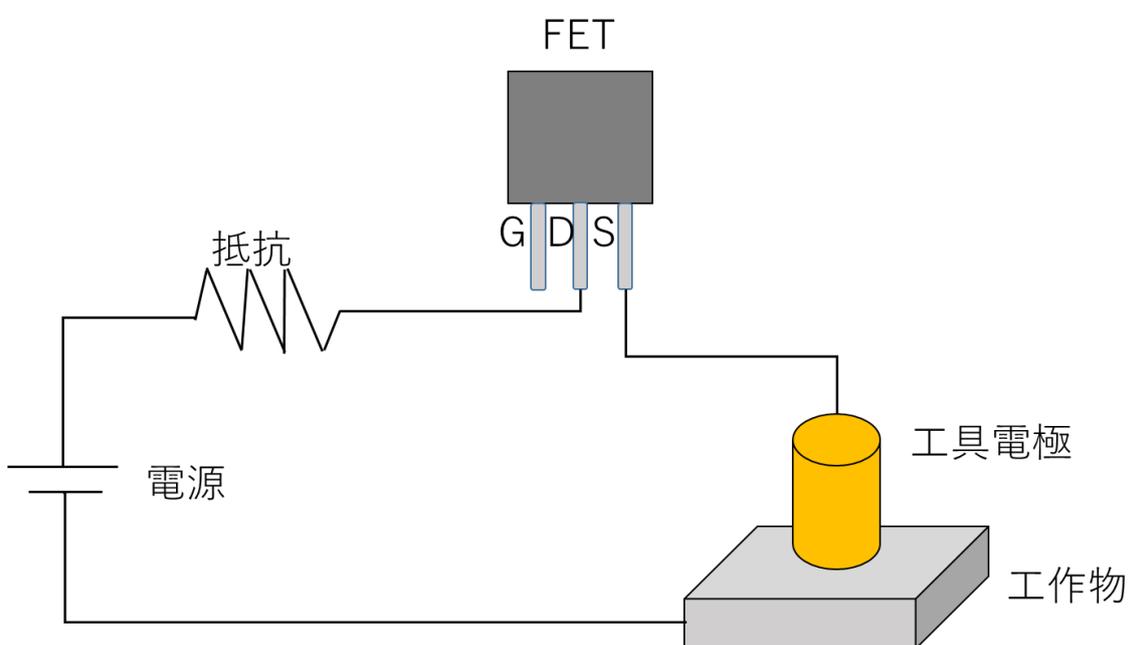


図 3.5 トランジスタ回路概略

表 3.5 n-MosFET の仕様

|         |            |
|---------|------------|
| モデル     | K1519      |
| 定格電流    | 30 [A]     |
| ターンオン時間 | 235 [nsec] |
| ターンオフ時間 | 615 [nsec] |

### 3.2.3 制御システム

図 3.1 の※1 について，電極昇降の制御システムにおける電子回路の概略を図 3.6 に示す。

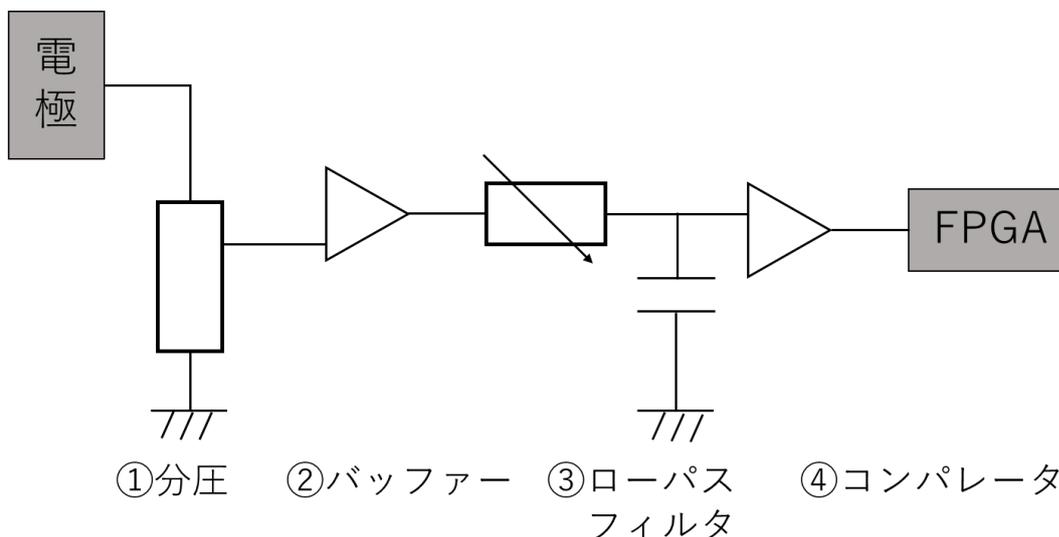


図 3.6 電子回路概略

#### ① 分圧

極間にかかる電圧を利用するが，100 [V]の電圧をそのままかけると回路への付加が大きくなり壊れてしまうので，可変抵抗を用いて 10 [V]へ電圧を分圧する。

#### ② バッファ

分圧した電圧を信号とし，その信号を主軸制御へ送る。

#### ③ ローパスフィルタ

放電の入力波形は高周波であるため，ステッピングモータに直接入力ができない。ローパスフィルタでは，遮断周波数より高い周波数を遮断し，波形を低周波化(平均化)することで，ステッピングモータが読み取れる波形にして出力する。

ステージの応答速度は数十[Hz]なので，遮断周波数は数十[Hz]に収める必要がある。遮断周波数は以下の式により求められる。

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

ここでは、R=100 [kΩ], C=0.047 [μF]を用い、遮断周波数を約 33 [Hz]に設定している.

④ コンパレータ

極間電圧と基準電圧を比較し、FPGA へデジタル信号として送る.

電子回路から送られた信号は、FPGA ( Field Programmable Gate Array )を用いて、PC の制御プログラム(Lab VIEW )で制御する。

FPGA とは、プログラマブルロジックデバイス的一种であり、製造後にユーザーの手元で内部論理回路を定義・変更することができる集積回路である。プログラマブルロジックデバイスの中で、特に再書き換え可能であるものを FPGA と呼ぶ。

本研究で使用した、NATIONAL INSTRUMENT 社製の NI cRIO-9030 を図 3.7 に示す。これはデジタル信号、アナログ信号の入出力が可能である。



図 3.7 NI cRIO-9030

制御プログラム(LabVIEW)のフロントパネルを図 3.8 に示し、そのブロックダイアグラムを図 3.9 に示す。

基準電圧とは、主軸を制御する時の閾値である。閾値より極間電圧が高い場合に主軸を降下し、低い場合に主軸を上昇させるプログラムを組むことで、極間距離の制御を行っている。このプログラムを用いて、極間距離を広く維持したい場合は基準電圧を高くし、逆に狭く維持したい場合は基準電圧を低く設定する。

パルス幅(ON)は放電時間を意味し、パルス幅(OFF)は休止時間を意味する。本研究では、パルス幅および休止時間を 5 [μsec] に設定している。

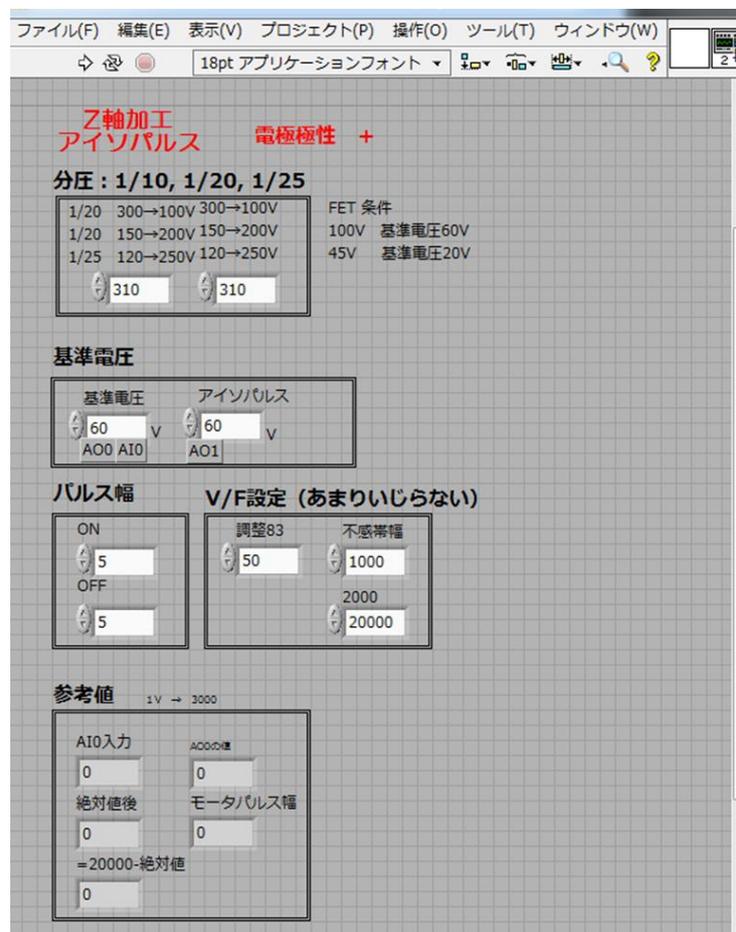


図 3.8 LabVIEW フロントパネル

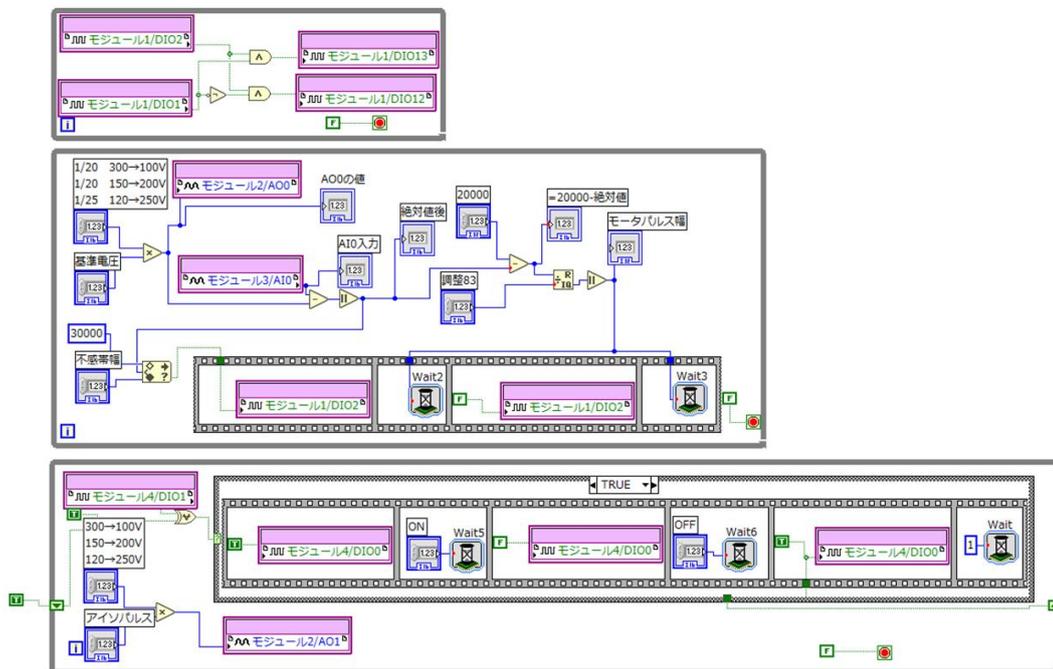


図 3.9 LabVIEW ブロックダイアグラム

### 3.2.4 観察装置

図 3.10 に本研究で使用する観察部の装置の概略を示す。

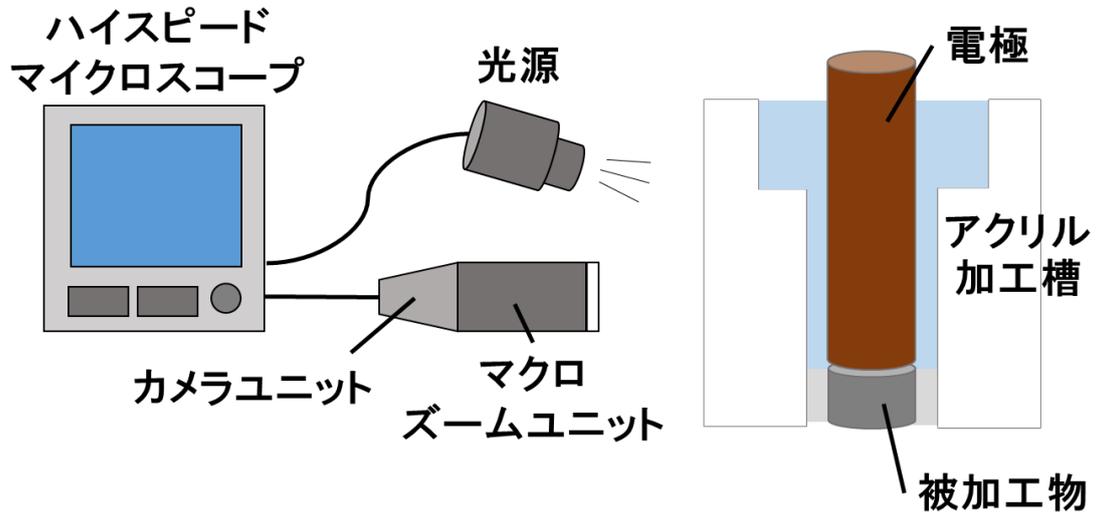


図 3.10 観察部概略

以下に、(1) ハイスピードマイクロスコープ、(2) カメラユニット、(3) マクロズームユニット、(4) アクリル加工槽の仕様を示す。

(1) ハイスピードマイクロスコープ

本研究で使用したハイスピードマイクロスコープを図 3.11 に示し、その仕様を表 3.6 に示す。



図 3.11 VW-9000

表 3.6 VW-9000 の仕様

|      |                    |
|------|--------------------|
| メーカー | KEYENCE            |
| 型式   | VW-9000            |
| 種類   | ハイスピード<br>マイクロスコープ |

(2) カメラユニット

本研究で使用したカメラユニットを図 3.12 に示し，その仕様を表 3.7 に示す．



図 3.12 VW-600C

表 3.7 VW-600C の仕様

| メーカー             |           | KEYENCE     |             |         |
|------------------|-----------|-------------|-------------|---------|
| 型式               |           | VW-600C     |             |         |
| 種類               |           | 高速カメラユニット   |             |         |
| 最大解像度<br>(動画保存時) | 30[fps]   | 640×480     | 10000[fps]  | 640×192 |
|                  | 60[fps]   |             | 12000[fps]  | 320×240 |
|                  | 125[fps]  |             | 15000[fps]  |         |
|                  | 250[fps]  |             | 23000[fps]  | 320×160 |
|                  | 500[fps]  |             | 35000[fps]  | 256×128 |
|                  | 1000[fps] |             | 57000[fps]  | 160×112 |
|                  | 2000[fps] |             | 80000[fps]  | 160×80  |
|                  | 4000[fps] |             | 120000[fps] | 160×42  |
|                  | 6000[fps] | 150000[fps] |             |         |
|                  | 8000[fps] | 640×320     | 230000[fps] | 160×32  |

(3) マクロズームユニット

本研究で使用したマクロズームユニットを図 3.13 に示し、その仕様を表 3.8 に示す。



図 3.13 VW-Z2

表 3.8 VW-Z2 の仕様

|               |                      |                |           |
|---------------|----------------------|----------------|-----------|
| メーカー          |                      | KEYENCE        |           |
| 型式            |                      | VW-Z2          |           |
| 種類            |                      | マクロズームユニット     |           |
| 視野サイズ<br>H(横) | 倍率<br>WIDE 側<br>(×1) | 観察距離 WD : 2000 | 284.4[mm] |
|               |                      | 観察距離 WD : 1000 | 136.2[mm] |
|               |                      | 観察距離 WD : 500  | 64[mm]    |
|               |                      | 観察距離 WD : 200  | 19.9[mm]  |
|               | 倍率<br>TELE 側<br>(×4) | 観察距離 WD : 2000 | 71[mm]    |
|               |                      | 観察距離 WD : 1000 | 34.4[mm]  |
|               |                      | 観察距離 WD : 500  | 16[mm]    |
|               |                      | 観察距離 WD : 200  | 5[mm]     |

#### (4) アクリル加工槽

本研究で使用した加工槽を図 3.14 に示す. 一辺 10[mm], 長さ 50[mm]のアクリルの角棒に  $\phi 5$ [mm], 深さ 3[mm]の加工槽を製作した. 加工槽の中心部には, 放電ギャップを考慮し,  $\phi 3.1$ [mm]の貫通穴をあけた. またマイクروسコープの光を反射させるためにアルミホイルを巻いた.  $\phi 3.0$ [mm]の被加工物を用いているため,  $\phi 3.1$ [mm]の穴では, 放電加工の際, 加工屑が隙間に沿って下に流れ出てしまった. そこで, 被加工物の側面にセメダインを塗ることで, 隙間を埋めた.

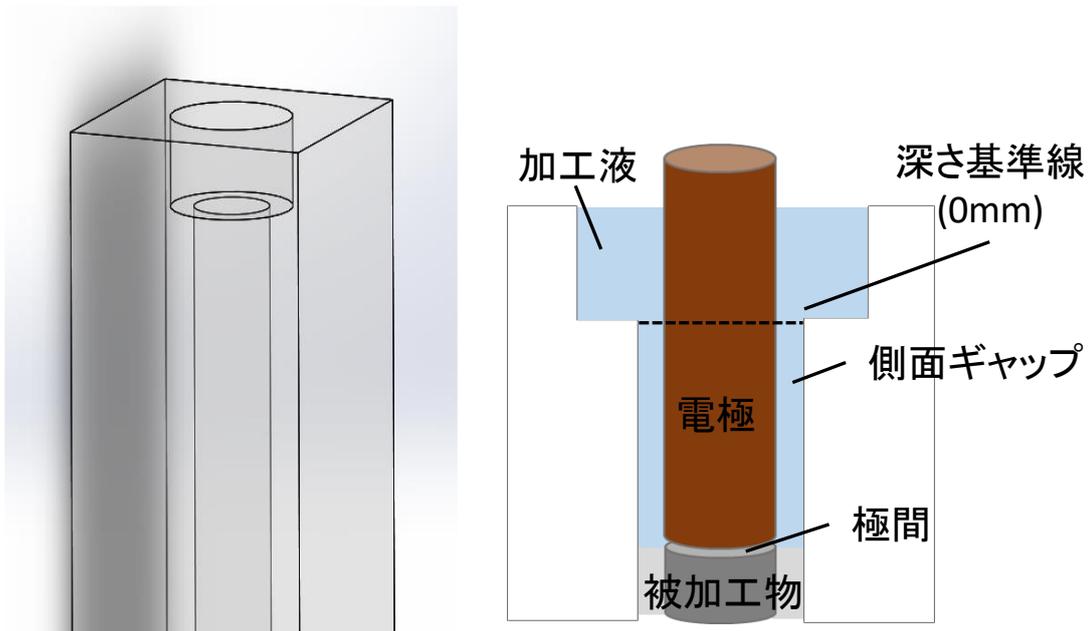


図 3.14 観察用加工槽

放電加工条件を表 3.9 に示す.

超音波振動付与の周波数および振幅の条件を表 3.10 に示す.

表 3.9 加工条件

|            |           |
|------------|-----------|
| 電源電圧       | 100 [V]   |
| 放電電流       | 4 [A]     |
| パルス幅 (ON)  | 5 [μsec]  |
| 休止時間 (OFF) | 5 [μsec]  |
| 工具電極 (+)   | Cu φ3     |
| 被加工物 (-)   | SUS304 φ3 |
| 加工液        | EDF-K2    |

表 3.10 周波数および振幅条件

| 周波数     | 振幅[μm] |
|---------|--------|
| 44[kHz] | 2      |

### 3.3 実験条件および実験方法

#### 3.3.1 気泡による加工屑排出効果

ここでは、側面ギャップにおいて気泡が加工屑排出へおよぼす影響を観察した。図 3.15 に、超音波振動付与無しの側面ギャップでの気泡の観察結果を示す。電極の位置は、図 3.14 に示した深さ基準線から 3[mm]としている。また、各図に示した時間は、時間  $t$  からの経過時間である。加工屑は気泡の境界に多く存在していることが確認された。気泡は、膨張しながら動き、加工屑をより外側に押し出し、気泡周囲に加工屑を蓄積する。一方、図 3.15(4)に示すように、気泡上部において、気泡が抜けると加工屑も抜けていく。これは、加工屑排出において、気泡が大きな役割を果たしているといえる。蓄積した加工屑を気泡とともに排出することで、加工効率および加工精度を向上させることが期待される。

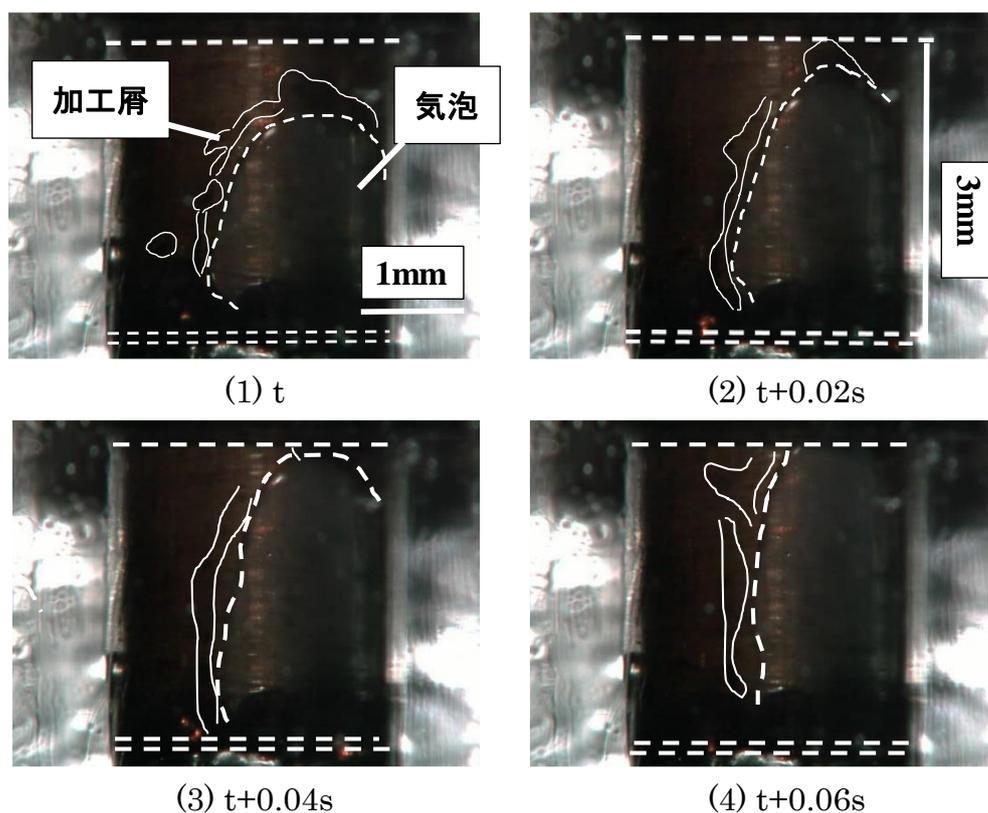
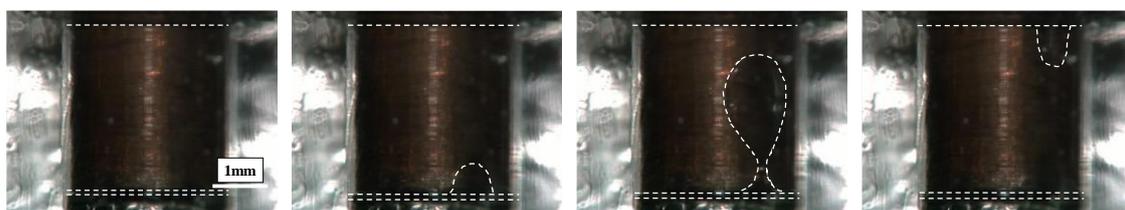


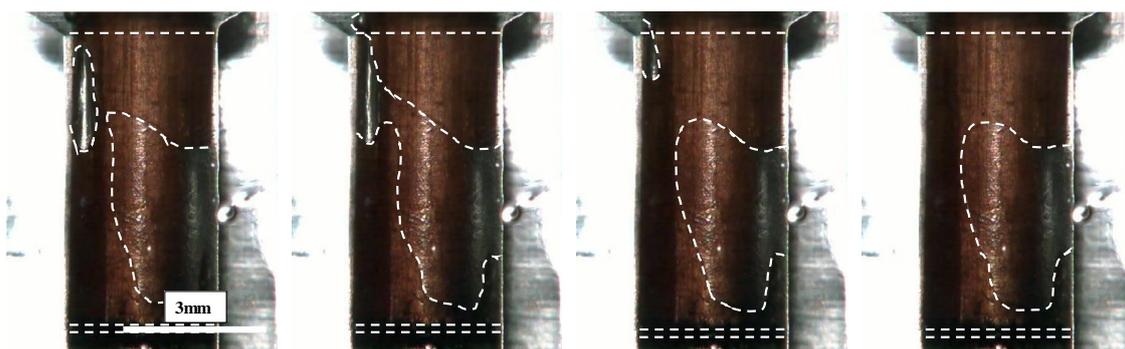
図 3.15 気泡による加工屑排出効果

### 3.3.2 アスペクト比ごとの観察

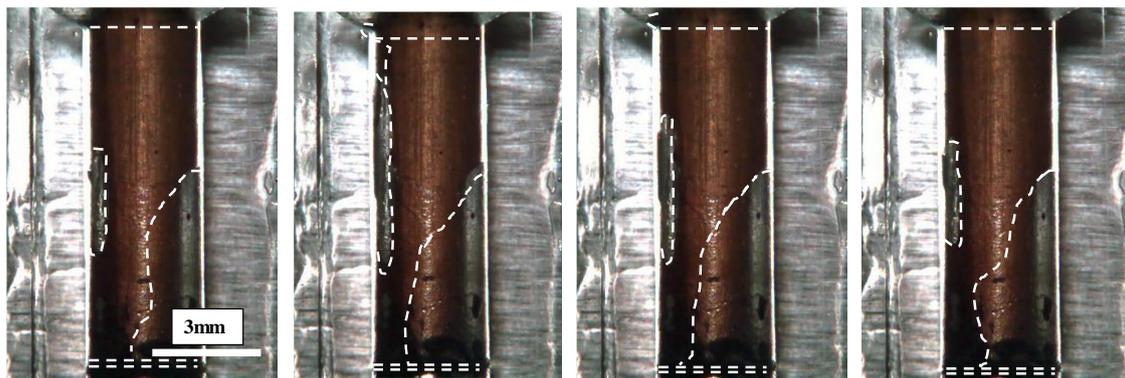
深穴放電加工( $L/D=5$  以上の穴加工)における側面ギャップの気泡挙動を観察した。図 3.16 に、超音波振動付与無しで、アスペクト比ごとの側面ギャップの観察結果を示す。 $L/D=1$  では、図 3.16 右上から気泡の排出が確認できた。極間および側面ギャップに気泡の滞留は見られない。 $L/D=2$ ,  $L/D=3$  では、図 3.16 左上から気泡の排出が確認された。しかし、極間および側面ギャップに気泡の滞留が確認された。 $L/D=4$  においては、 $(2)t+0.07s$  で図 3.16 左上から気泡が排出したのち、気泡排出が繰り返されることなく極間および側面ギャップに気泡が滞留してしまった。 $L/D=5$  では、ハイスピードマイクروسコープで観察可能な時間の間、一度も気泡の排出を確認することはできなかった。実際の加工において、 $L/D=5$  を超えると加工効率が著しく低下することが報告されている<sup>7)</sup>。これらより、極間および側面ギャップにおける気泡の滞留は、アスペクト比に影響を与えていると考えられる。



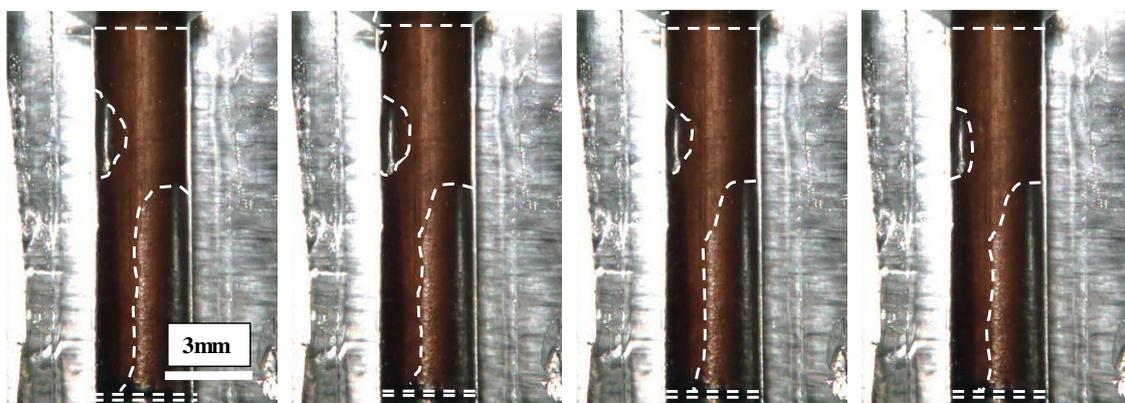
L/D=1



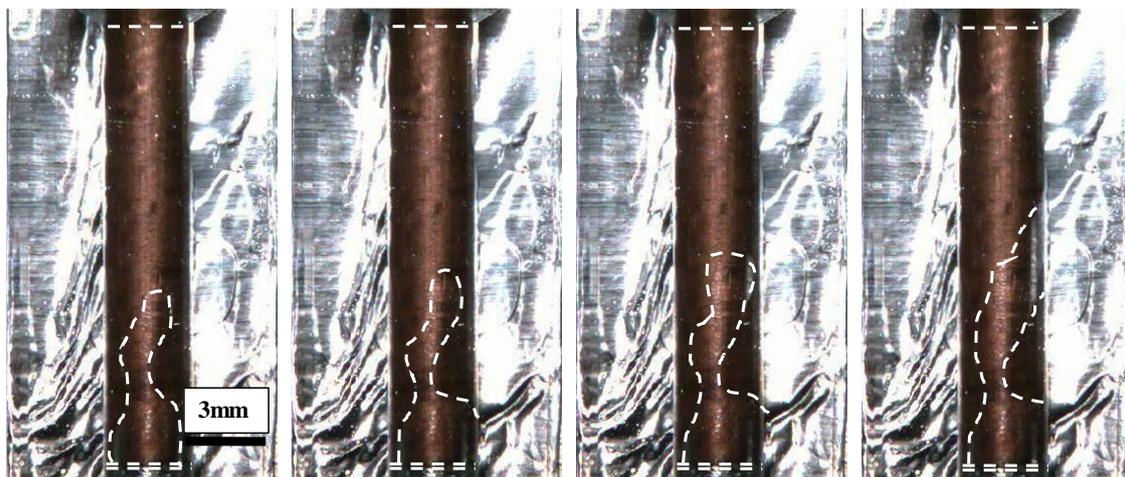
L/D=2



L/D=3



L/D=4



L/D=5

(1)t

(2)t+0.07

(3)t+0.14

(4)t+0.21s

図 3.16 アスペクト比ごとの観察

### 3.3.3 気泡占有部比較

ここでは、 $L/D=1$ 、 $L/D=5$  の気泡占有部を比較した。図 3.17 に比較した図を示す。観察結果から気泡占有部は、加工穴が深くなればなるほど広がる傾向にあることが分かった。 $L/D=1$  においては、加工穴が浅い。つまり、気泡が排出するまでの経路が短いため、気泡は側面ギャップからすぐに排出される。しかし、 $L/D=5$  では、加工穴が深くなるため、気泡排出までの経路が長くなる。結果として、気泡は、側面ギャップを抜けるまでに、より多くの時間を必要となり、気泡が排出するよりも先に気泡同士が合一することで、蓄積され、大きな気泡として極間および側面ギャップに滞留すると考えられる。

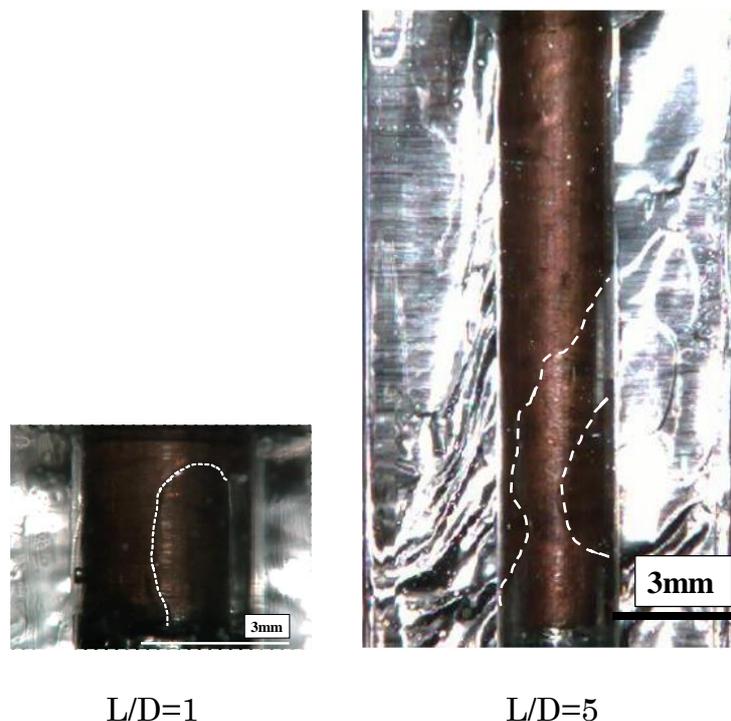


図 3.17 気泡占有部比較

### 3.3.4 気泡の合一

放電加工において、多くの気泡は極間で生成される。このため、加工穴が深くなるにつれて気泡は、極間および側面ギャップからすぐに抜け出せなくなる。ここでは、 $L/D=5$  とし、超音波振動付与有無しにおける気泡挙動を観察した。超音波振動付与無しにおける観察結果を図 3.18 に示す。図 3.18(1)の気泡は、図 3.18(3)に示すように時間が経過すると一つの大きな気泡となっている。気泡の合一は、気泡の占める範囲の増加を引き起こし、気中雰囲気を作り出す。このため、極間距離が減少し、短絡が多くなり、加工効率および加工精度を低下させると考えられる。また、加工液が占めていた範囲の減少と移動を制限された加工層によって加工層の濃度が増大すると考えられる。

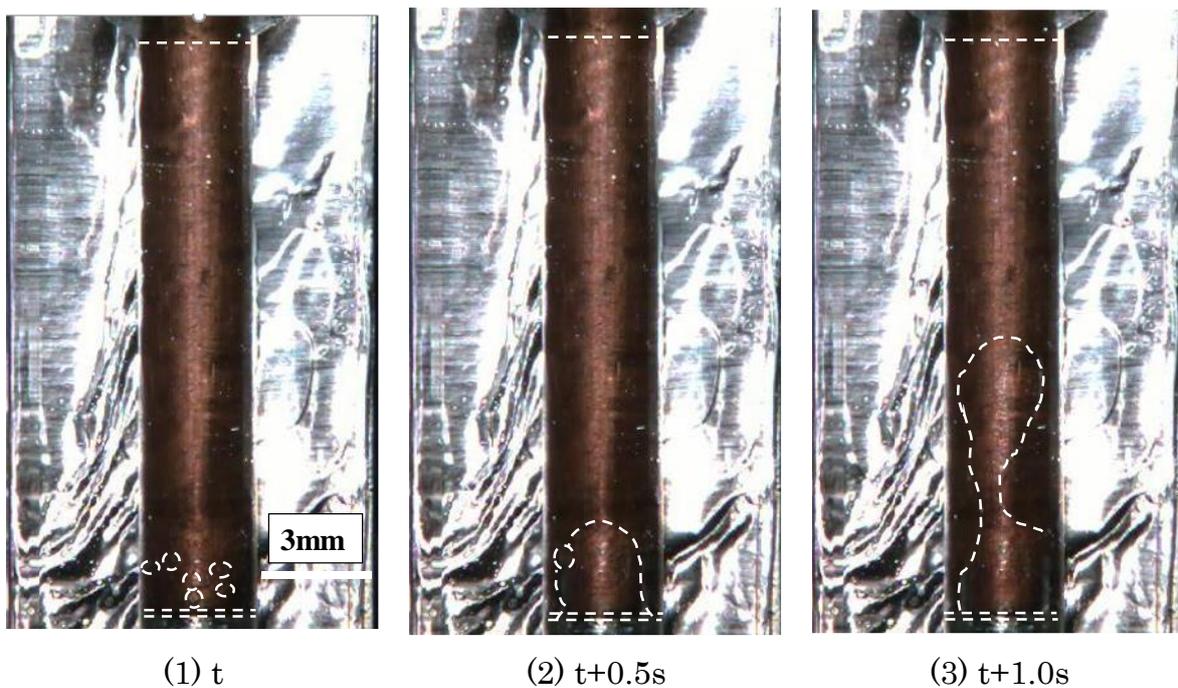


図 3.18 気泡の合一

### 3.3.5 放電波形

ここでは、超音波振動無しで  $L/D=5$  における放電波形について観察した。連続放電の波形および各時間における側面ギャップを観察した結果を図 3.19 に示す。

放電開始直後に極間で形成された気泡が側面ギャップに現れ、徐々に大きくなり側面ギャップを占めていく様子を観察することができた。気泡が極間および側面ギャップを大きく占める約 12[s]~16[s]で、短絡が起こっている。図 3.18(3)のように気泡が滞留してしまうことで、極間および側面ギャップに気泡が流れ込まず、気中雰囲気を作り出し、極間距離を減少させ、長時間の短絡を引き起こしている。その後、基準電圧を 60[V]に設定しているため、電極が上に引き戻され、再び 100[V]の電圧がかかっている。

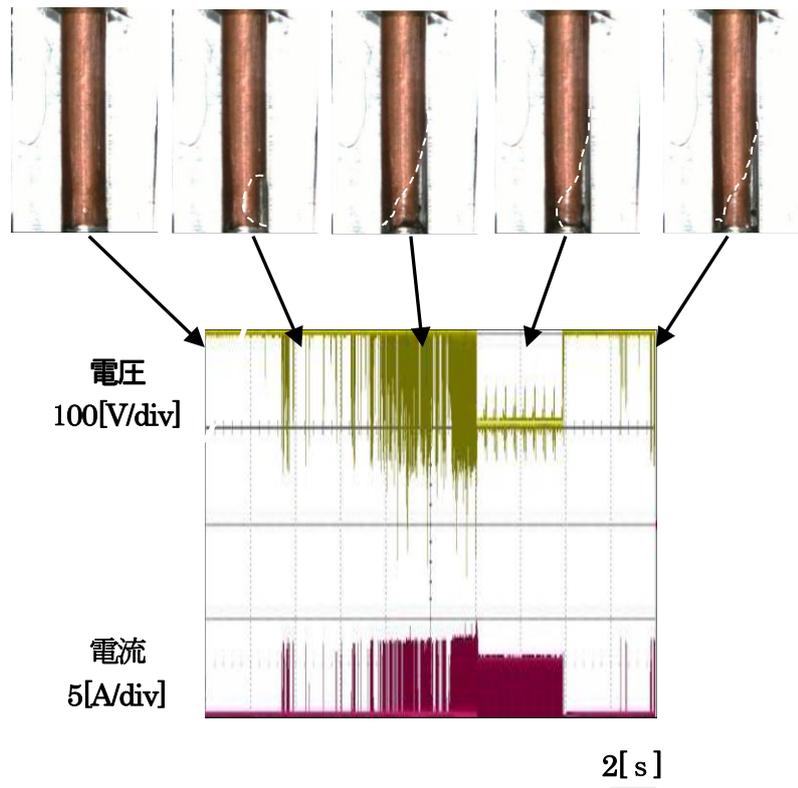


図 3.19 放電波形

### 3.3.6 底面部と側面部の関係 超音波振動付与無し

アスペクト比向上に直接寄与するのは、底面部の放電である。そのため、ここまでの観察において、底面部と側面部の関係を考察し、概略図を図 3.20 に示す。(1)放電が開始されると底面部で小さな気泡が発生(2)気泡が膨張し、加工面の淵に達すると(3)気泡は底面から抜け側面部に現れる。その後再び放電が開始、(4)膨張、淵に達し、排出されるが、(5)側面ギャップでは気泡が滞留しており、さらに気泡の合一が進む。(6)これが繰り返されることにより側面部に加工液が流入できなくなり、底面部においても加工液が流入せず、極間の気中雰囲気が解消されない。このため、加工液流入がアスペクト比向上に重要となる。

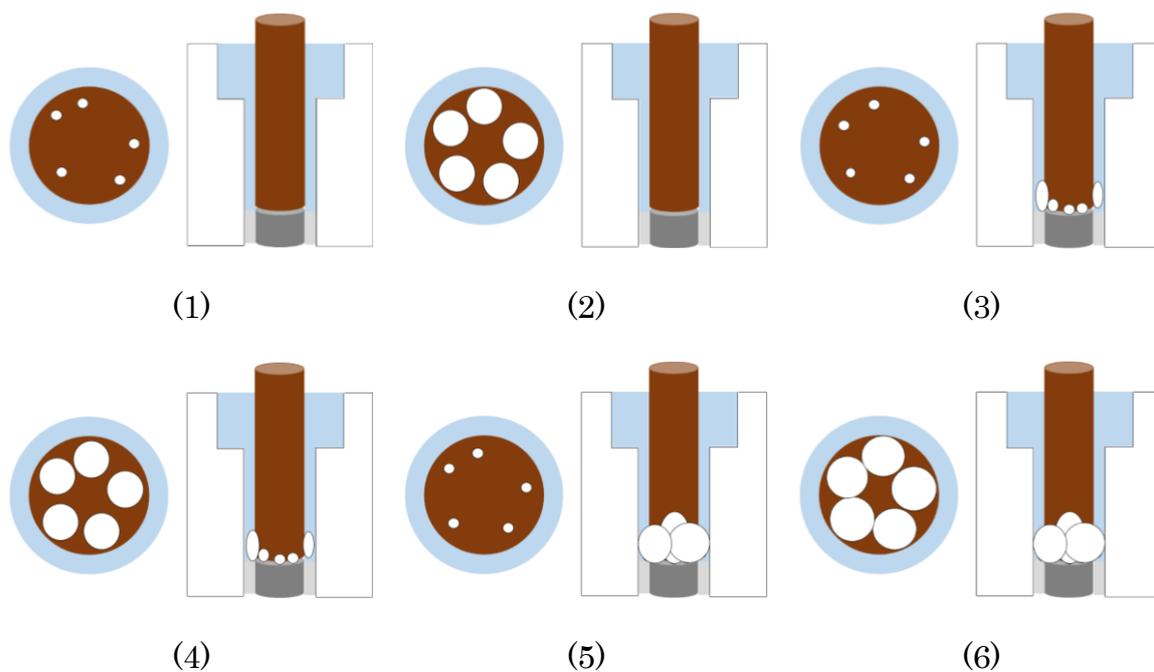


図 3.20 底面部と側面部の関係 (超音波振動付与無し)

### 3.4 結言

本章では、ハイスピードマイクロスコープとアクリル加工槽を用い、放電加工中の極間および側面ギャップを観察した。本章で得られた内容を以下にまとめる。

- (1) 側面ギャップにおいて、気泡は加工屑排出に影響を与える。
- (2)  $L/D=5$  における極間および側面ギャップの気泡の滞留が、実加工における  $L/D=5$  付近での加工速度低下への影響の可能性を示した。
- (3) 加工穴が深くなると排出までの経路が長くなるため、気泡占有部が拡大する傾向にある。
- (4) 加工穴が深くなると、気泡はほかの気泡と合一し、一つの大きな気泡となる。そして、側面ギャップにおける気泡占有部を拡大させ、気中雰囲気をつくりだす。
- (5) 短絡時に極間および側面ギャップが気泡で満たされていることを確認した。

---

---

## 第4章 超音波振動付与放電加工

---

---

### 4.1 緒言

#### 4.1.1 底面部と側面部の関係 超音波振動付与有り

ここでは、USV を付与した際の底面部と側面部の関係を考察し、概略図として図 4.1 に示す。

3.3.6 項と同様、(1)放電が開始されると底面部で小さな気泡が発生、(2)気泡が膨張し、加工面の淵に達すると(3)気泡は底面から抜け側面に現れる。USV によって縦方向に加工液を攪拌しているため、気泡が上昇しやすい状態であり、気泡が合一しにくい。再び放電が開始して、(4)膨張、底面の淵に達すると(5)気泡が排出し、上昇が繰り返されるため、(6)底面部および側面部に加工液が流入しやすい状態になり、極間の気中雰囲気を解消できると考えられる。

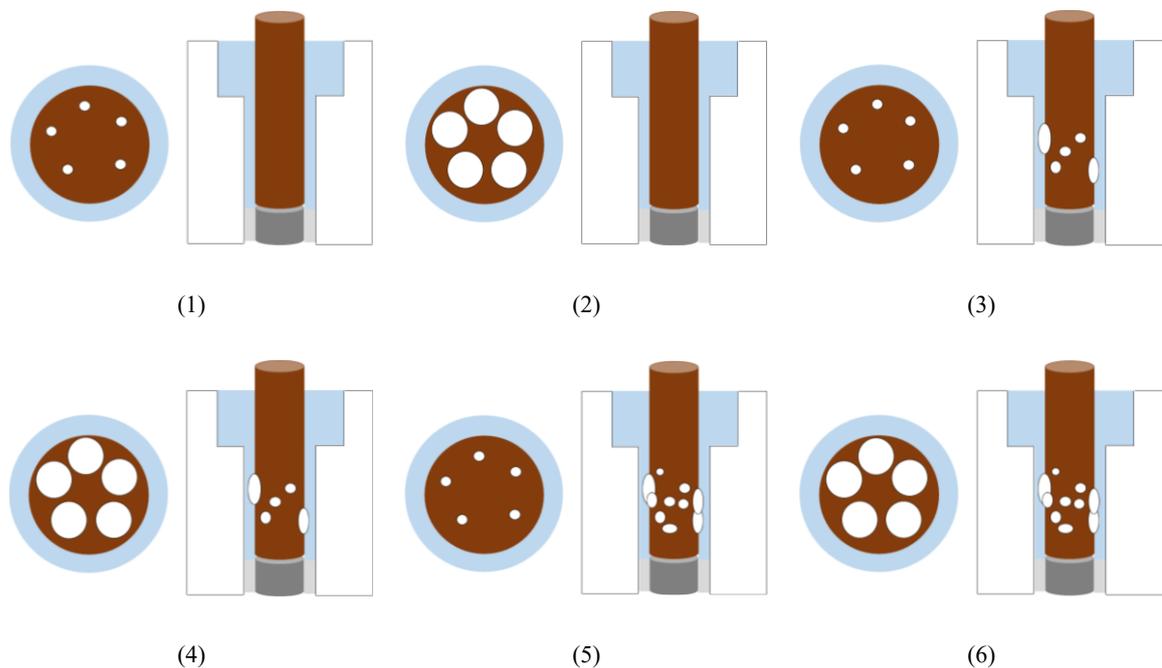


図 4.1 底面部と側面部の関係 (超音波振動付与有り)

## 4.2 実験装置・方法

### 4.2.1 超音波振動付与装置概要

ここでは、電極および加工液へ超音波振動を付与し、効果を検証する。電極への超音波振動装置の概要を図 4.2 に、加工液への超音波振動付与装置概要を図 4.3 に示す。

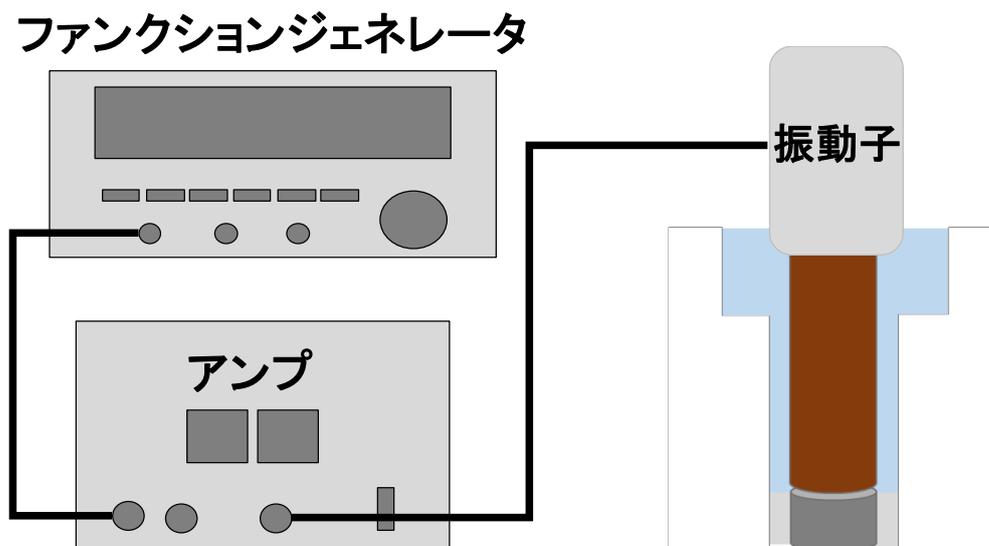


図 4.2 電極への超音波振動付与概略図

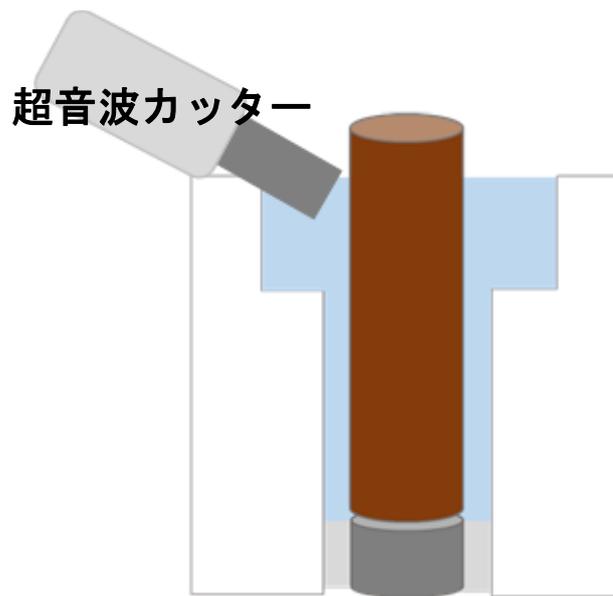


図 4.3 加工液への超音波振動付与概略図

以下に(1)超音波カッターの図 4.4 を示し、その仕様を表 4.1 に示す。

(1) 超音波カッター



図 4.4 Z0-41

表 4.1 超音波カッターの仕様

|       |            |
|-------|------------|
| メーカー  | エコーテック株式会社 |
| 型式    | Z0-41      |
| 種類    | 超音波カッター    |
| 発振周波数 | 40[kHz]    |

### 4.3 実験結果および方法

#### 4.3.1 電極に超音波振動付与

深さ 1[mm]で超音波振動付与有無での気泡の挙動を観察した。それぞれの観察結果を図 4.5 に示す。超音波振動付与無しでは、(1)放電開始後、(2)1.2s 後は小さな気泡が発生、徐々に気泡が合一していき、(4)1.6s 後には気泡が極間を大きく占めている様子が確認された。超音波振動付与有りでは、放電開始から、(2)1.2s 後ギャップから気泡が抜けていく様子が確認できた。また、極間に気泡の存在は確認できなかった。(3)1.4s 後、(4)1.6s 後も同様であった。これは、超音波振動のキャビテーション効果によって気泡の崩壊が促されたためだと考えられる。このような超音波振動付与の効果によって、気泡の残留がなくなり、加工初期において、加工効率が向上すると考えられる。

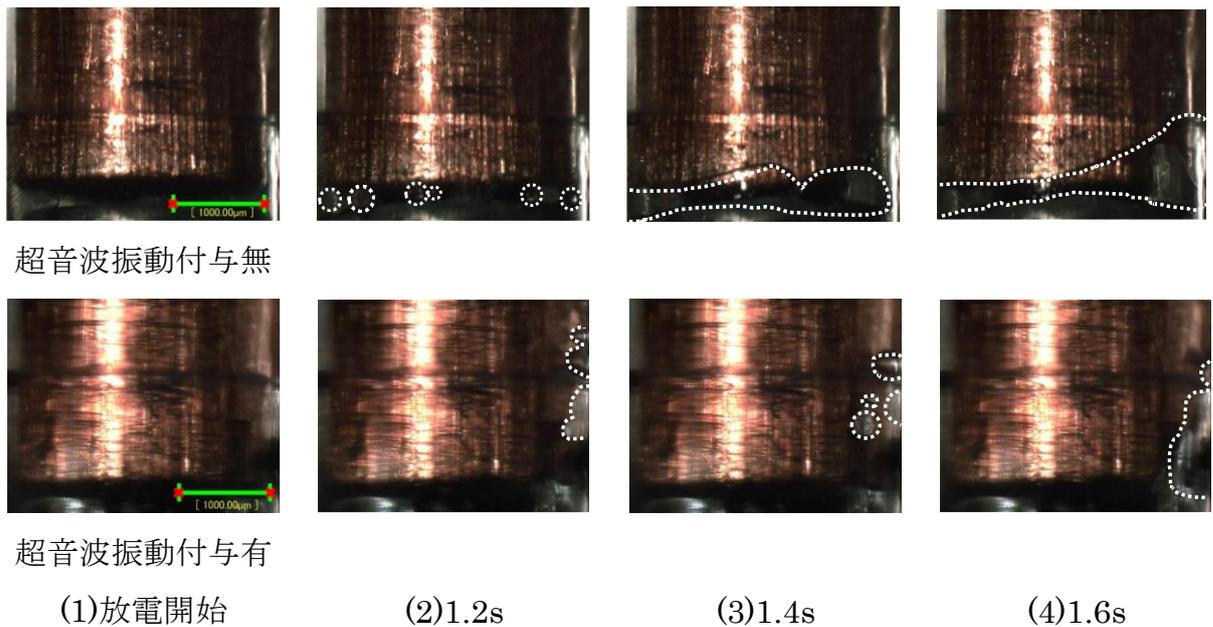


図 4.5 加工初期における極間の観察

側面ギャップでの気泡の滞留を解消するために、 $L/D=5$  における放電加工中に、超音波振動を付与した加工を試みた。図 4.6 に、超音波振動付与における気泡挙動の観察結果を示す。超音波振動無しの穴加工では、図 3.16  $L/D=5$  (4) に示したように、時間が経過しても合一した気泡は、側面ギャップに滞留したままであった。一方、超音波を付与することで、図 4.6 (3)に示すように、気泡が抜けている様子が確認された。ある程度大きくなった気泡は、超音波振動付与によるキャビテーション効果では崩壊しなかった。そのため、正面から見える側面ギャップに気泡が滞留している。超音波振動を付与すると、キャビテーション効果だけではなく、電極が振動することによるポンピング効果も発生する。キャビテーション効果によって崩壊しなかった気泡は、ポンピング効果が作り出す加工液の流れによって、流動され、深さ基準線に達することで、排出されると予想される。また、別の撮影では、図 4.6(a)~(c)のように観察することができた。図 4.6(1)~(3)では、図の下部で気泡の滞留が観察されたが、図 4.6(a)~(c)では、気泡の滞留は観察されなかった。これは、キャビテーションによる気泡の崩壊に加え、ポンピング効果が効率的に働き、気泡が合一する前に、側面ギャップから排出していると考えられる。図 4.6(1)~(3)の裏側では、図 4.6(a)~(c)のように気泡が滞留しない状態になっていると考えられる。そのため、極間および側面ギャップに加工液が流れ込み、超音波振動付与中において、 $L/D=5$  を超えても加工が進んでいると考えられる。

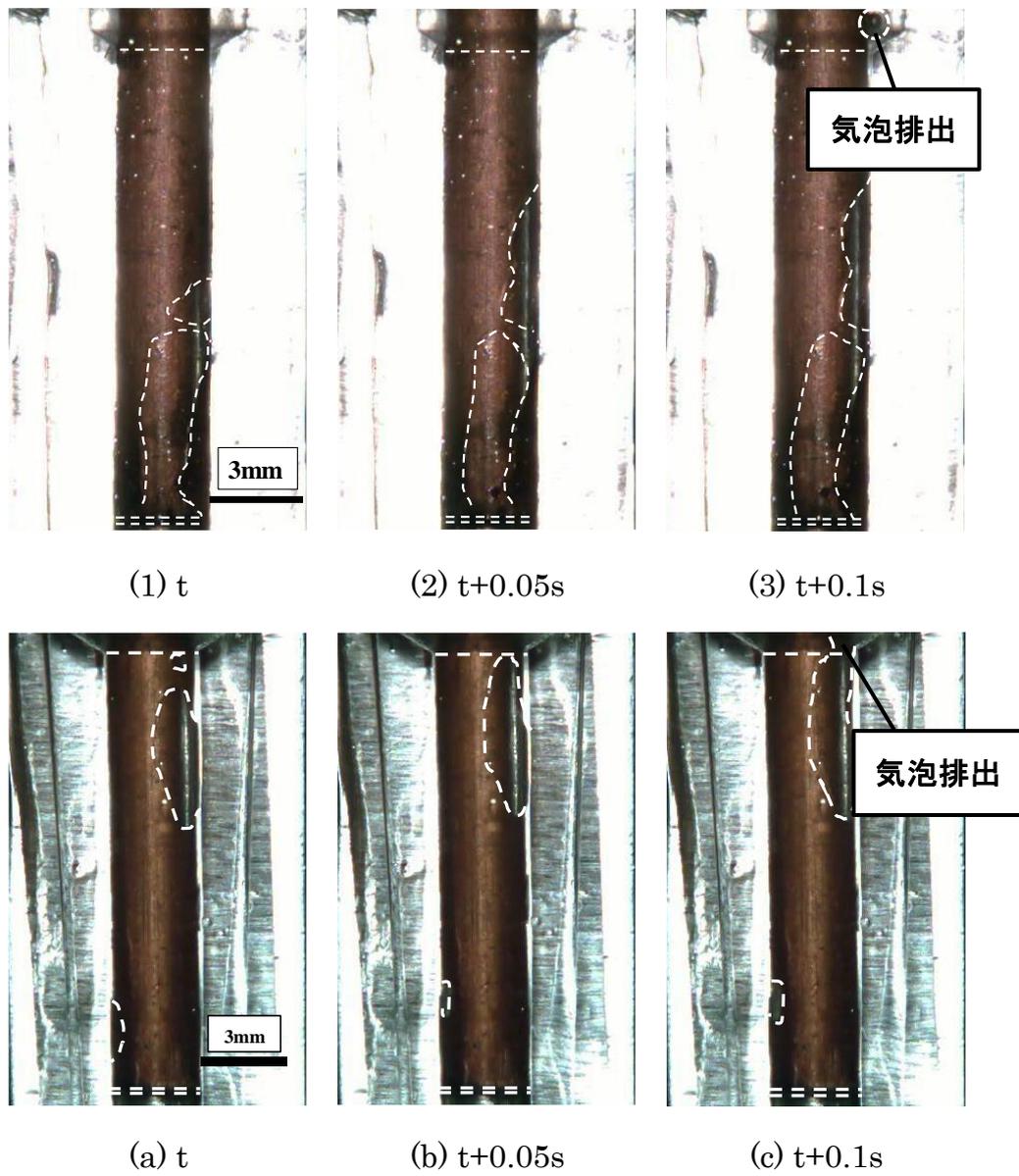


図 4.6 電極への超音波振動付与

### 4.3.2 加工液に超音波振動付与

観察結果を図 4.7 に示す。加工液に超音波振動を付与することでも、アスペクト比が向上することが確認されている<sup>8)</sup>。図 4.7(3)に示すように気泡の排出が確認された。超音波振動によるキャビテーション効果で、加工液が攪拌され、気泡が排出したと考えられる。しかし、電極への超音波振動付与と異なり、加工液に超音波振動を付与したときは、別の撮影でも極間および側面ギャップに気泡の滞留が確認された。これは、深さ基準線付近の加工液は、超音波振動によって攪拌されているが、加工穴底部においては、超音波振動が減衰し、加工液攪拌の影響が小さくなることで気泡の排出が促されずに、合一し、滞留していると考えられる。

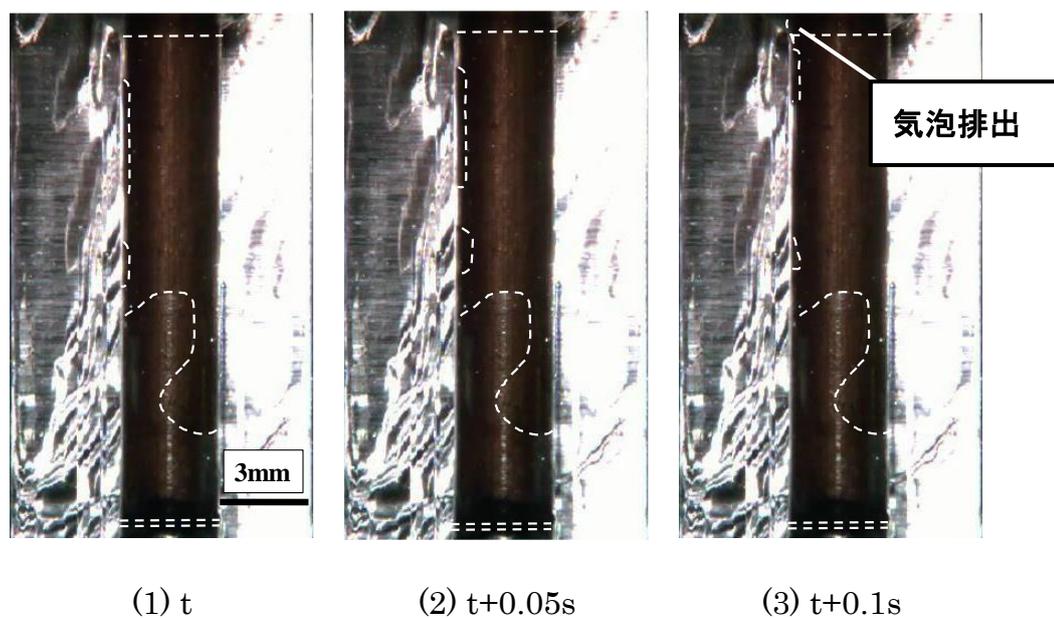


図 4.7 加工液への超音波振動付与

#### 4.4 第4章 結言

本章では，電極および加工液に超音波振動を付与し，その効果を検証した。本章で得られた内容を以下にまとめる。

- (1) 電極に超音波振動を付与することで，気泡の排出が促進する。
- (2) 加工液に超音波振動を付与することで，気泡の排出が促進する。ただし，側面ギャップの滞留が確認されているため穴底部において，超音波振動減衰の可能性がある。

---

---

## 第5章 回転電極放電加工

---

---

### 5.1 緒言

電極を回転させることで、加工液による加工層の排出や極間に加工液が流れこみやすくなることによって、極間の冷却が促進され、集中放電や異常放電、短絡が抑制されると報告されている<sup>9)</sup>。ここでは、側面ギャップにおける効果を検証する。

### 5.2 実験装置・方法

#### 5.2.1 回転付与装置概要

本装置では、動力伝達の方法として非接触方式を採用した。非接触伝達機構の概略図を図 5.1 に示す。モーターの動力を、S 極と N 極が交互に着磁された磁石を介して、主軸・電極へと伝える仕組みである。主軸にコレットチャックを用いたので、電極を取り付けることで放電加工が可能になる。Z ステージにより電極を昇降し、X, Y ステージにより被加工物を移動させる。

非伝達機構をしようするメリットとして、まず一つ目に、放電加工の際の放電電流がモーターに流れないため、モーターを壊すことがない。

二つ目として、ギアなどと違い磨耗などがないため、半永久的に使用することができる。金属磨耗がないため、動力伝達部だけを見るとメンテナンスが少なくてすむことである。

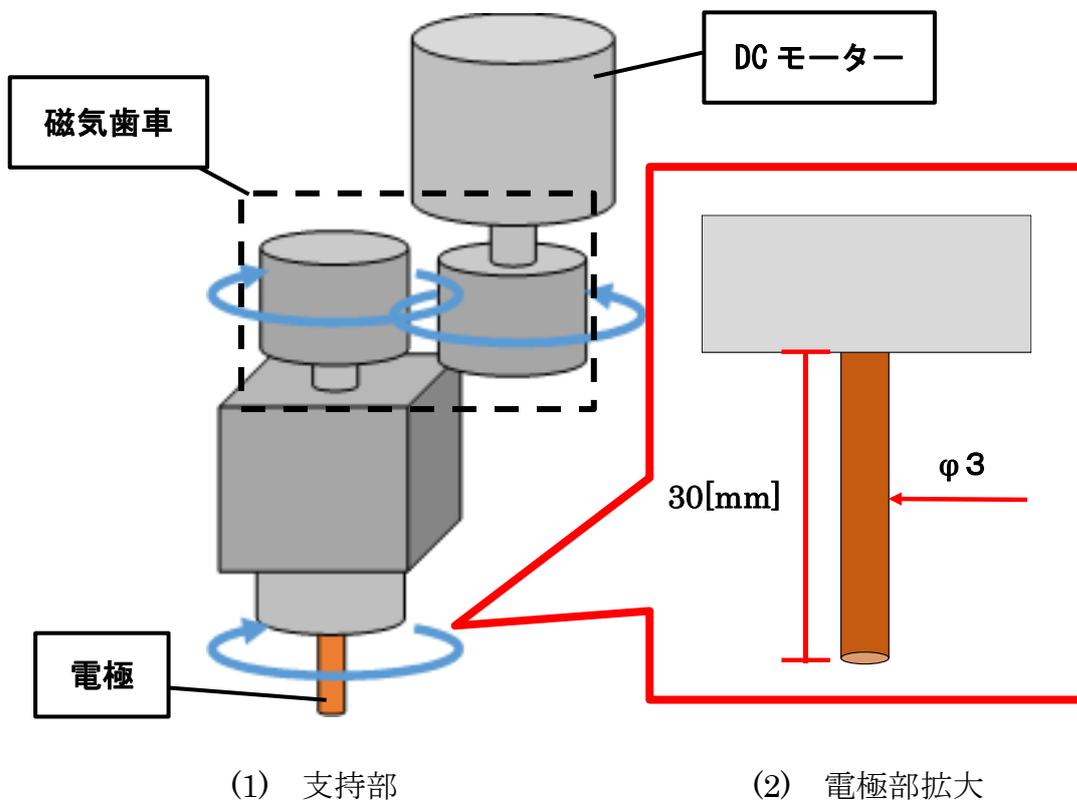


図 5.1 回転動力部

使用した DC モーターを図 5.2 に、仕様を表 5.1 に示す.



図 5.2 DC モーター

表 5.1 DC モーターの仕様

|      |            |
|------|------------|
| メーカー | 澤村電気工業株式会社 |
| 型式   | MM16G      |
| 種類   | DC モーター    |
| 定格出力 | 14W        |
| 回転速度 | 4000rpm    |
| 電圧   | 24V        |

### 5.3 実験結果および考察

#### 5.3.1 回転電極実験結果

ここでは、 $L/D=5$  において、電極に回転を加えた側面ギャップの観察を行った。観察結果を図 5.3 に示す。図 5.1(1)に示すように、モーターの軸とベアリングで支持した軸に磁気歯車を設置することで動力の伝達を行い、電極を高速回転させる。また、一般に軸の重心が軸の中心線に、軸を工作することは困難であり、若干の偏芯がある。このような軸が高速回転すると、偏芯により遠心力が発生し、たわみが生じる。ある速度に達すると、遠心力が剛性抵抗力に打ち勝って、それに生じるたわみは偏芯を強め、軸の破壊に至る。この軸が破壊に達する速度を危険速度という<sup>10)</sup>。本研究で使用する軸は、図 5.1(2)のような寸法である。ここでは、片持ち梁と仮定して、本電極の固有振動数と危険速度を式(5.1)、式(5.2)より計算した。その結果、この電極の固有振動数  $f[\text{Hz}]$  は、 $1742[\text{Hz}]$  であり、危険速度  $N_c[\text{rpm}]$  は、 $104546[\text{rpm}]$  であるため、本回転装置では危険速度に至らない。ここでは、電極の回転数を  $2000[\text{rpm}]$  とする。

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

$$N_c = 60 \cdot f \quad \dots \dots \dots (5.2)$$

$$\lambda = 1.875$$

$l$  : 軸の長さ[m]

$E$  : ヤング率[N/m<sup>2</sup>]

$I$  : 断面二次モーメント[m<sup>4</sup>]

$\rho$  : 比重[kg/m<sup>3</sup>]

$S$  : 軸の断面積[m<sup>2</sup>]

観察の結果，図 5.3 に示すように図左上の部分から気泡の排出を確認した．また，側面ギャップに気泡の滞留が見られない．電極に回転を加えることで，危険速度に達する前にも電極が触れ回る．このとき，側面ギャップが変動することで，加工液のポンプ効果が働き，気泡が合一する前に排出を促しているものと考えられる．

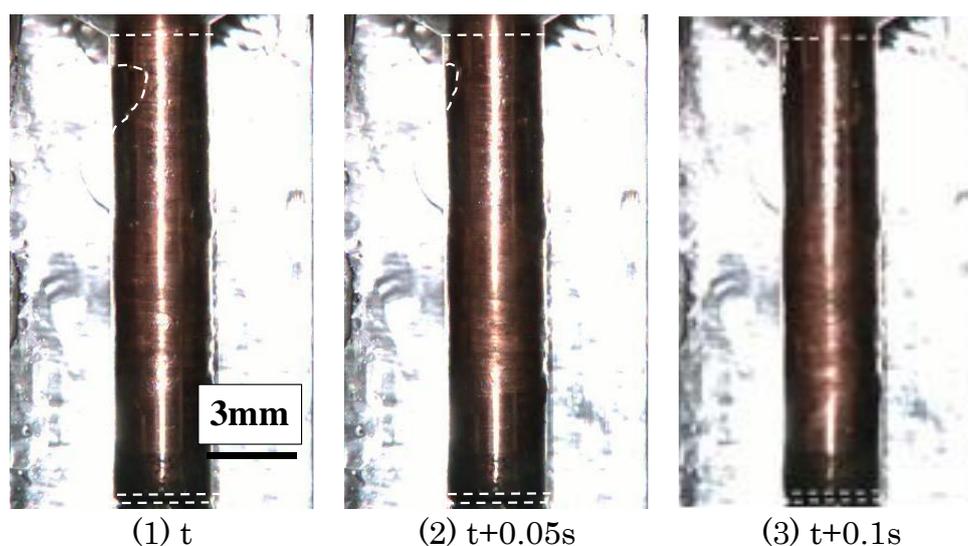


図 5.3 回転電極

加工層に着目した観察結果を図 5.4 に示す．白実線で囲まれている部分が加工層が集中して存在している部分である．加工層は，上下に少しずつ移動しているものの，図の中央部の加工層は，回転し続け，深さ基準線に達して抜けていく様子を確認することはできなかった．超音波振動付与放電加工では，このような加工層の滞留は確認されなかった．超音波振動付与においては，上下方向の運動が主であるため，加工層が上部もしくは下部に流れ，側面ギャップに滞留していないと考えられる．一方，回転電極においては，回転方向の運動が主であるため，加工層が上昇していく要因が少ない．極間に存在する加工層は，気泡によって持ち上げられ排出するが，排出までの経路が長いと気泡側部から流れ出て，加工液自体の回転流動の遠心力によって側面に滞留してしまうと考えられる．側面ギャップに存在する加工層は二次放電を引き起こし，穴加工において真円度に影

響を与えると考えられる。また、観察の結果から加工層が滞留しているのにもかかわらず、回転電極を用いるとアスペクト比の向上が確認されているのは、極間および側面ギャップの気泡の滞留がないためであると考えられる。

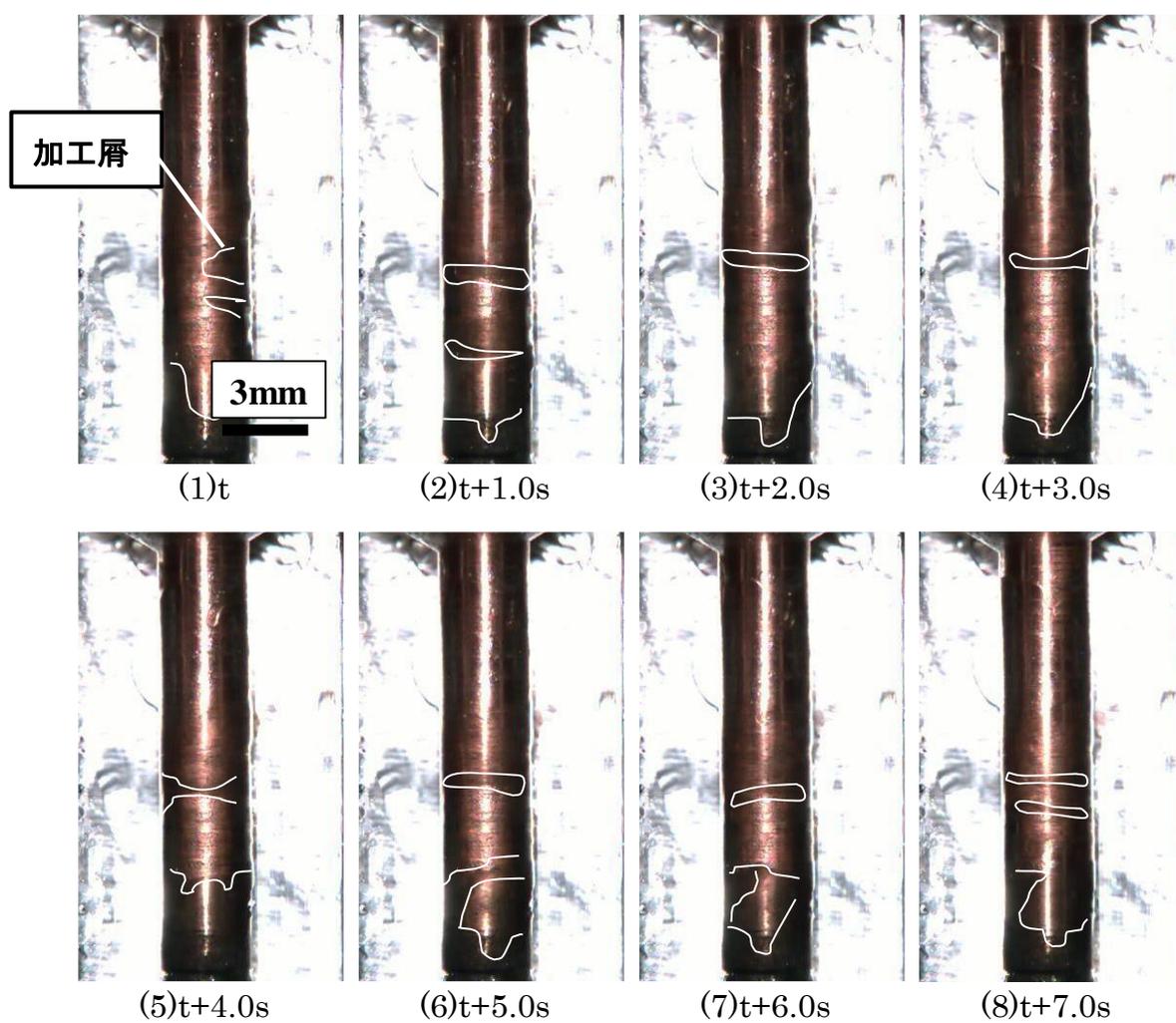


図 5.4 回転電極における加工層

#### 5.4 結言

本章では，電極に回転を付与し，その効果を検証した。本章で得られた内容を以下にまとめる。

- (1) 電極に回転を付与することで気泡の排出が促進する。
- (2) 加工穴中央部において加工屑の滞留を確認した。

---

---

## 第6章 結論

---

---

### 6.1 本研究のまとめ

本研究では、放電加工時の極間および側面ギャップの観察、工具電極、加工液に超音波振動を付与、電極に回転を付与し、その効果を検証した。

#### 1) 放電加工における側面ギャップの観察

加工屑排出において、気泡が大きな役割を果たしていることを確認した。また、 $L/D=5$ では、気泡排出までの経路が長くなる。そのため、気泡が排出する前に気泡同士が合一し、滞留する。その結果、極間および側面ギャップは、気中雰囲気状態を作り出し、加工効率および加工精度を低下させている。

#### 2) 超音波振動付与放電加工

##### a) 電極への超音波振動

深さ 1[mm]で、超音波振動によるキャビテーション効果によって気泡の崩壊が促され、極間での気泡の合一が解消された。

$L/D=5$ では、キャビテーション効果による気泡の崩壊に加え、ポンピング効果によって、極間および側面ギャップから排出された。このため、加工液が流入することで、超音波振動付与加工における  $L/D=5$  以上において、加工が進んでいると考えられる。

##### b) 加工液への超音波振動

$L/D=5$ において、超音波振動によるキャビテーション効果で加工液が攪拌され、側面ギャップから気泡が排出した。しかし、加工穴底部において、気泡の滞留が確認されたことから、超音波振動が減衰していると考えられる。

### 3) 回転電極放電加工

L/D=5 において，電極が回転し，振れることによる側面ギャップの変動でポンプ効果が働き，気泡の排出が促進された．また，加工液自体の回転流動による遠心力によって，加工屑が加工穴中央部に滞留している様子を確認した．

## 6.2 今後の課題

### 1) 加工穴底部での超音波振動減衰の可能性

加工液に超音波振動付与時、深さ基準線から気泡の排出がみられたが、加工穴底部では、気泡の滞留が見られた。この滞留が、加工効率にどの程度影響するか数値化されたデータが得られていない。例えば、超音波振動付与有無での放電頻度の変化、周波数を変えることによる放電頻度の変化を調査していく必要がある。

### 2) 気泡の排出効率

本研究では、条件を変えず超音波振動付与放電加工、回転電極放電加工の気泡挙動の観察を行った。そのため、条件を変更した場合の気泡の排出効率の違いについて、データが得られていない。例えば、周波数、回転数を変えた際に排出された気泡を集め、体積を比較することで調査していく必要がある。

### 3) 他形状電極での気泡挙動の観察

本研究では、無垢電極に超音波振動付与、回転付与を行った。そのため、ドリル型電極など、他形状での気泡挙動の調査はできていない。電極形状を変えた気泡挙動の観察を行い、気泡排出効率がより良い形状を調査していく必要がある。

## 参考文献

- [1] 池田光和, 単発放電により細隙に発生した気泡の挙動について 第1報, 電気加工学会, Vol.6, No.11(1972), pp.12-26
- [2] 今井進也, 早川伸哉, 糸魚川文, 中村隆, 放電加工の極間隙における気泡の合一と加工現象の関係, 電気加工学会誌, Vol.48, No.117(2014), pp.22-27
- [3] 北村朋生, 国枝正典, 透明体電極を用いた放電加工極間現象の直接観察, 精密工学会誌, Vol.81, No.11, (2015)pp.983-986
- [4] S.Hayakawa, S.Yamada, F.Itoigawa, T.Nakamura, T.Kitamura, M.Yamanaka : Effect of Bubble Coalescence on Materials Removal Rate in Electrical Discharge Machining Process, IJEM, No.16(2011), pp.33-39
- [5] 小川仁, 坂東和宏, 常本佳生 : 放電加工における加工液超音波振動援用の効果(第1報), 電気加工学会誌, Vol.41, No.98(2007), pp.163-168
- [6] 倉ヶ谷翼, 花岡大生, 山下健, 永澤茂, 福沢康, 超音波援用放電加工における振幅の加工特性への影響, 2014年度精密工学会春季大会, (2014), pp.1179-1180
- [7] 小川仁, 放電加工における超音波キャビテーションの効果, 電気加工学会誌.Vol.51, No.127(2017), pp348-353
- [8] 夏恒,加工液への超音波振動付与による微細深穴放電加工特性の向上, 精密工学会誌, Vol.82.No.5, (2016), pp413-417
- [9] 矢萩優名, 小谷野智広, 国枝正典, 楊曉冬, 静電誘導給電による高速回転電極を用いた微細放電加工, 精密工学会誌 Vol.77, No, 4(2011)pp.394-399
- [10] <http://d-engineer.com/Mechanics/frequency.html>