

## 研究課題名

電解放電加工による無機絶縁物の3次元加工

豊田工業大学／古谷克司

### 1. はじめに

ファインセラミックスは一般に、高硬度で高温領域での機械的強度の低下が少ない、耐熱性、耐摩耗性や耐食性に優れるという特徴を持つため、金型への適用分野拡大が期待されている。切削加工では高硬度であるためダイヤモンド工具でも摩耗が激しく、レーザ加工では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<sup>①</sup>のような小型の生産加工機械として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、小型の装置の構築も容易である。しかし、加工精度が低く、放電による熱が蓄積して局所的に熱膨張することによりクラックが発生しやすいという問題があった。

細穴用電解放電加工機が市販された例はあるが、まだ一般的でない。放電加工や電解加工に比べて研究例が少ないため、加工現象が明らかになっておらず、加工特性の改善が進まないことも要因の一つであるが、装置面では、微小な押し付け力を与える機構が開発されていないことが原因である。

微小な押し付け力を与えるためには、工具電極の自重をこの先に付けたおもりでキャンセルする方法<sup>②</sup>や、片持ちはり型平行板ばねによる方法が使用された例<sup>③</sup>がある。前者は、装置が大型になる、後者はねじれやあおり方向の剛性が低いという問題点がある。

### 2. 目的

著者のグループでは、旋盤型の加工機に電解放電加工法を適用し、放電点を強制的に移動、分散させる方法を開発した<sup>④</sup>。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。その結果、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。複数の電極を用いて放電点を分散させることでも同様の効果を得ている<sup>⑤</sup>。

本研究では、電解液中で放電を起こすことで絶縁体に微細形状加工に適用する電解放電加工法を用いて、3次元形状加工を実現するための装置を開発することを目的とし、あわせて基礎実験を行った。

電解放電加工の原理を図1に示す<sup>⑥</sup>。NaOH、NaClなどの電解質を水に溶かした電解液中に絶縁性の工作物を浸す。負側は工具電極でタンゲステ

ンや鋼などの硬質の金属とし、正側の電極はグラファイトとし、加工点から少し離して設置する。工具電極を工作物に10mNオーダーの力で押し当てて直流電圧を印加すると、工具電極の周りで電気分解が起り、約40V以上では工具電極表面全体が泡に包まれ、その中で放電が発生する。工作物表面近傍で発生する放電による熱で、電解液と工作物との化学反応が促進されるとともに、熱自体による昇華などにより工作物が除去される。

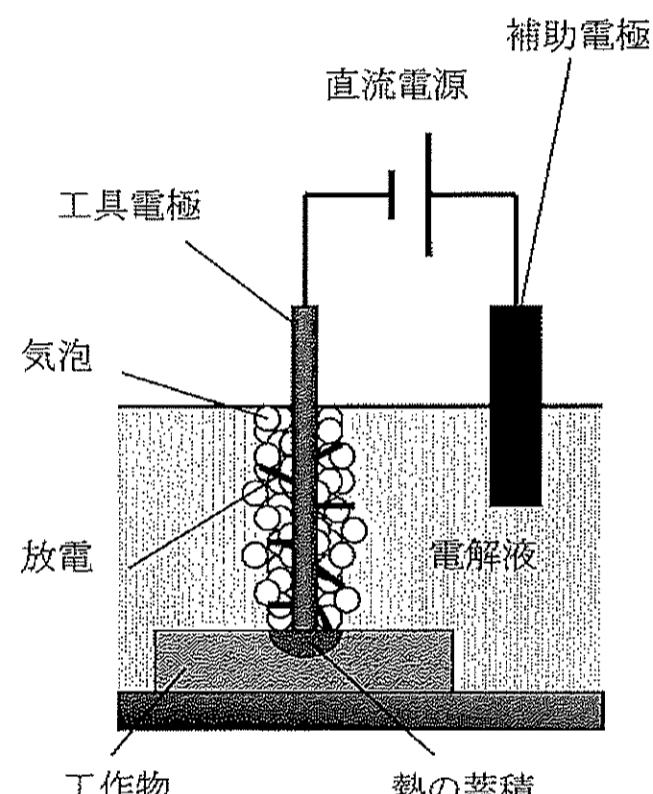


図1 電解放電加工法の原理<sup>⑥)</sup>

### 3. 実用的な価値、実用化の見込など

金属の微細加工法は切削や放電加工以外にもさまざまな方法が開発されている。しかし、硬せい材料、特に、絶縁性材料は、切削加工や研削加工のような機械加工では加工反力が大きいため、微細加工が困難である。また、放電加工では、補助電極法と呼ばれる表面に加工油が分解した炭素を付着させながら加工する方法が提案されているが、加工後の表面には、炭素が強固に付着するという問題点がある。

本研究で対象とする電解放電加工法は、絶縁性材料に対しても有効であり、表面における化学反応や昇華などが加工原理となるため、加工反力が非常に小さいという特徴がある。そのため、2章で述べた表面に発生するクラックが低減できれば、適用範囲が大きくなることが期待できる。

### 4. 研究内容の詳細

#### 4. 1 フライス型電解放電加工機の構成

試作したフライス型電解放電加工機の外観を図 2 に示す。工具電極押付力制御機構、XY ステージ、コントローラ、ファンクションジェネレータ、フィルタ、差動アンプ、加工電流を供給する直流電源、加工槽から構成される。本体の外形寸法は約 W325mm × D300mm × H500mm である。

コントローラには DSP(MTS 製 sBoxII)を用いた。工具電極の押付力制御のためのボイスコイルモータ(VCM; 新電元メカトロニクス製 MM30C-06)制御、工具電極押付力制御機構全体を変位させるためのステッピングモータ駆動 Z ステージ(中央精機製 ALS-6012-G0M)の制御、ステッピングモータ駆動 XY ステージ(中央精機製 PSU-60XY)の移動指令を行う。Z ステージは 1 ステップあたりの変位量を  $0.2 \mu\text{m}$  とし、500pps でファンクションジェネレータからパルスを与えた。XY ステージは 1 ステップあたりの変位量を  $1 \mu\text{m}$  とし、RS-232C 経由で目標位置をコントローラに送信し、直線補間しながら送った。

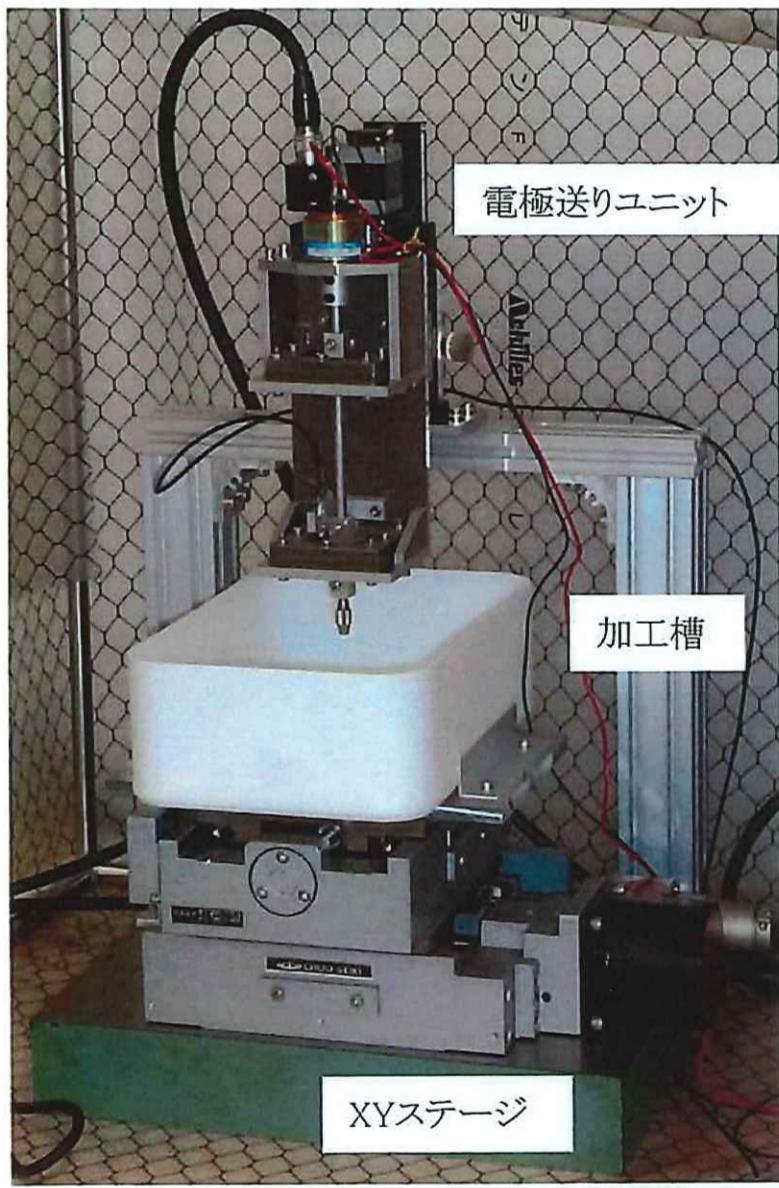


図 2 フライス型電解放電加工機外観

工作物には厚さ約 1.7mm のソーダ石灰ガラス板を用いた。ガラスの電解放電加工では電解液中のナトリウムイオンが加工に寄与する<sup>6)</sup>。そのため、電解液には 10wt%の塩化ナトリウム(NaCl)水溶液を用いた。補助電極には電解放電加工の化学反応に影響しないグラファイトを、工具電極には電解放電加工の化学反応に影響せず、放電による消耗の少ない直径 0.5mm のタンクステン棒を用いた。

加工槽はポリプロピレン製とし、工作物を固定するベース板には PEEK を用いた。

#### 4. 2 工具電極押付力制御機構

電解放電加工では、工具電極が工作物に接触している必要はあるが、強い力で押し付ける必要はない。そのために、押付力を制御する機構を製作した。

製作した押付力制御機構の外観を図 3 に示す。XY 軸方向の剛性が大きく、Z 軸方向の剛性を小さくするために、プランジャーの上下を平行ばねで支持した。板ばねは 0.01mm の SUS304 箔で、ばね押さえで箔の上下から挟み込んで張力を与えながら固定した。

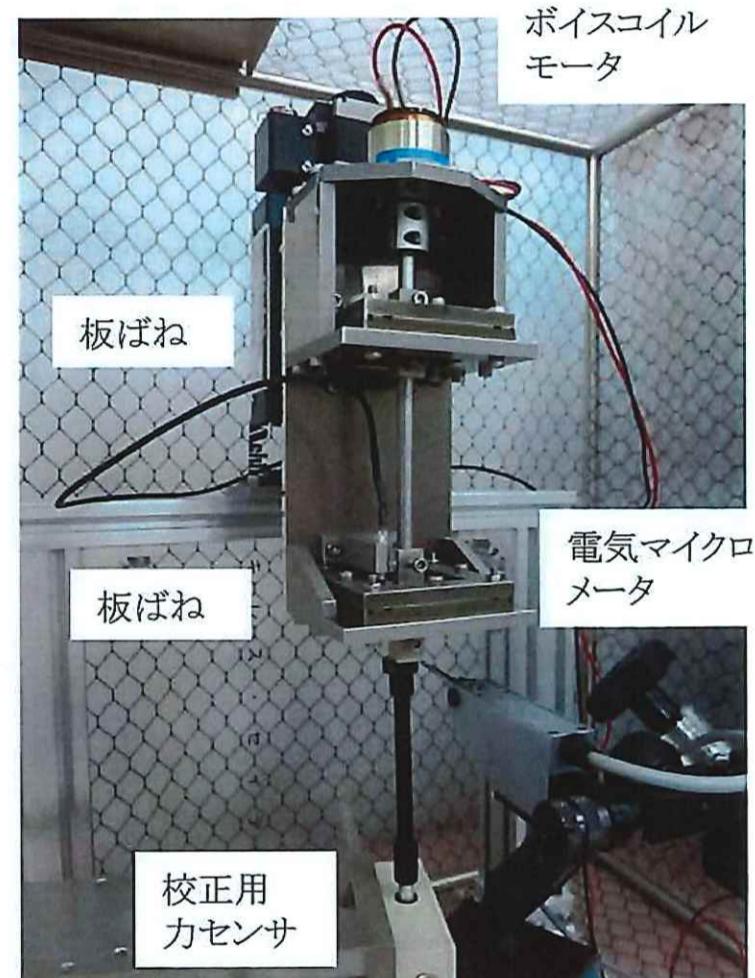


図 3 工具電極押付力校正時

VCM に電流を流すとジュール熱で抵抗が変化する。VCM の推力は電流に比例するため、電流を電流アンプで駆動して制御することで、押付力を制御した。VCM 軸の回転を抑えるための補助軸を取り除き、摩擦が発生しないようにしたため、図 4 に示すように、駆動電流を増減させても変位のヒステリシスは生じなかった。

変位は下側の板ばねの上のプランジャーholdderに貼り付けた磁石の磁界の変化をホールICで測定することで求めた。磁石には、温度変化による自己減磁が少なく、経年劣化を起こしにくいサマリウムコバルト磁石とした。出力は差動アンプで 10 倍に増幅してからカットオフ周波数 1000Hz のローパスフィルタを通した。全体としての感度は  $5.18 \mu\text{m}/\text{V}$  となった。

振幅が一定の正弦波電流を工具電極押付力制御機構に与えて測定した周波数特性を図 5 に示す。

共振周波数は 105Hz であった。減衰部分がないため、Q 値は 43 であった。別途行ったハンマリング試験でも同様の結果となった。

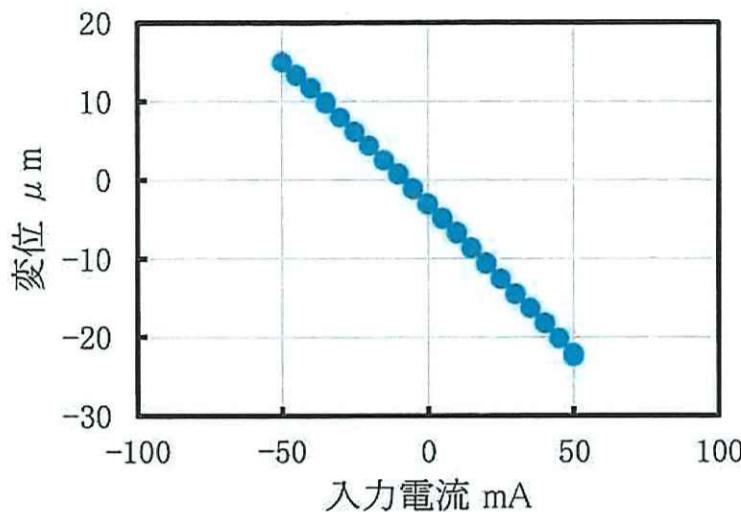


図 4 VCM 駆動電流と変位

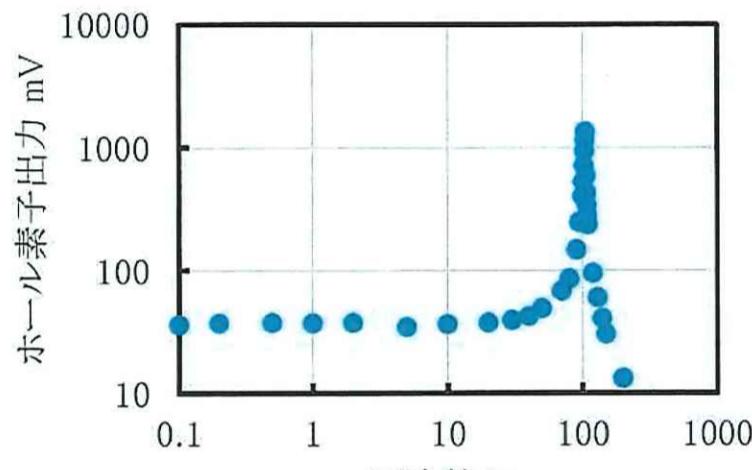


図 5 周波数特性

板ばねは弾性体であり、微小変形しかしないため、押付力はプランジャの変位と比例すると考えられる。そのため、まず、プランジャ変位、VCM 駆動電流と押付力の関係を求めた。VCM 電流を一定とした状態で、プランジャを下側からフォースゲージ(イマダ製 ZTA-DPU-5N)で押して、押付力の定常値を測定した。フォースゲージを変位させるためには、差動マイクロメータで送る手動ステージを用いた。図 6 に示すように、電流値が一定の下では、押付力は直線的に変化した。

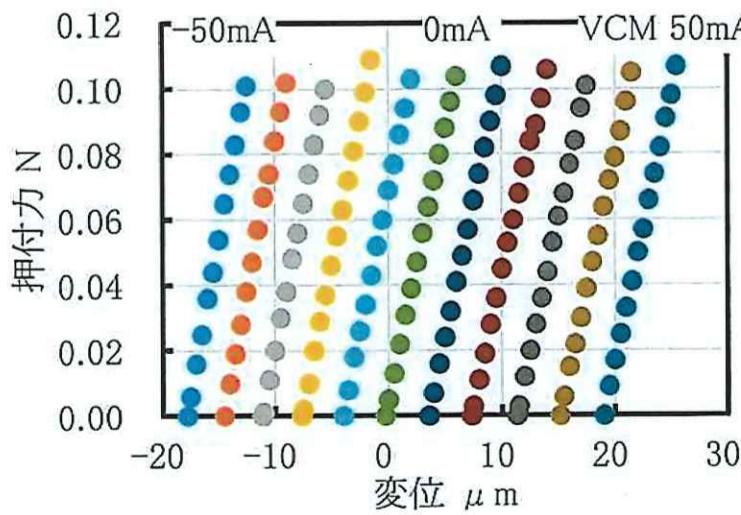


図 6 押付力、プランジャ変位、VCM 電流の関係

この特性を用いて押付力を制御するためには、ブ

ランジャーの変位をフィードバックして、目標とする押付力となる電流を VCM に供給すればよい。押付力は直接測定することができないため、セミクローズドループ制御となる。

図 6 の特性から目標とする押付力  $f$  を与える VCM 電流  $i_{VCM}$  を求めるためには、変位を  $z$  として 2 次までの多項式で表現すると、

$$i_{VCM} = \sum_{k=1}^2 \sum_{j=2}^2 a_{kj} z^k f^j \quad (1)$$

となる。最小二乗法で求めた各項の係数  $a_{kj}$  は表 1 となった。

表 1 VCM 駆動電流を求める式の各項の係数

項	係数	項	係数	項	係数
$z^0 f^0$	0.640	$z^1 f^0$	2.70	$z^2 f^0$	-0.00669
$z^0 f^1$	-157	$z^1 f^1$	0.136	$z^2 f^1$	0.0198
$z^0 f^2$	-24.4	$z^1 f^2$	-4.14	$z^2 f^2$	0.116

これを図示すると、図 7 となる。加工中の押付力制御のためには式(1)を用いて、リアルタイムで計算した。

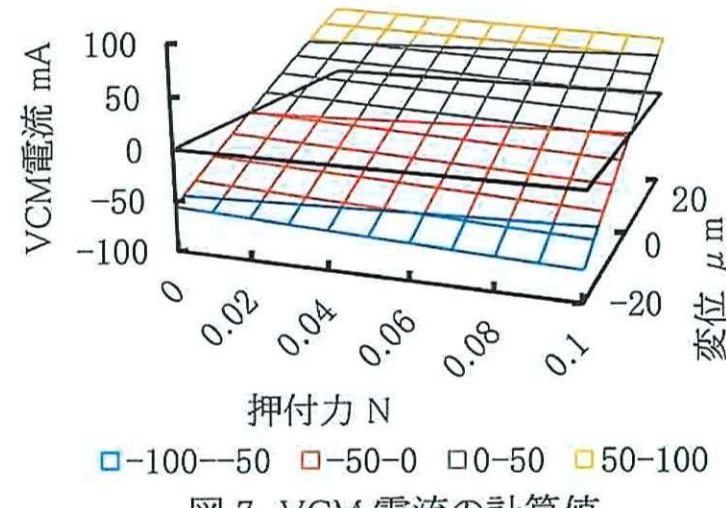


図 7 VCM 電流の計算値

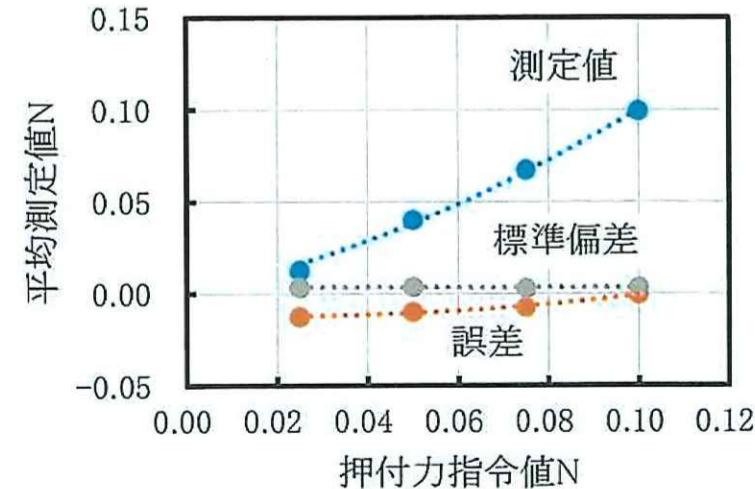


図 8 押付力の制御結果

本研究では、押付力を 0.05N とすることを目標とするため、その付近での動作特性を測定した。10 回ずつステップ応答させた場合の定常値を図 8 に

示す。平均値では、押付力が小さいほど目標値へ到達できず、誤差が大きくなつた。標準偏差(ばらつき)は目標値にかかわらず 0.003N 程度であった。

#### 4.3 加工電流の制限

電解放電加工では、放電を発生させるために工具電極の周りに泡を発生させる必要がある[2]。除去に寄与する放電は工作物表面近傍のものだけであるので、上方で放電することは効率が悪くなる<sup>7)</sup>。そのため、工具電極側面を絶縁して加工電流を低減した。工具電極側面に絶縁層を形成するために高耐熱塗料を試したが、表面積が小さく、電流を流すとすぐにはがれてしまった。そこで、フッ素樹脂チューブを用いることにした。チューブの肉厚は 0.15mm で、使用する工具電極の直径と内径を合わせた。放電が発生しない範囲の電圧を印加した場合の平均電流を図 9 に示す。工具電極には直径 0.5mm のタンゲステン棒を用いた。全く露出させない場合には、工具電極底面だけからしか電流が流れないと考えられるが、実際には泡が発生して電流を阻害するため、電流の比は表面積比以下となつた。

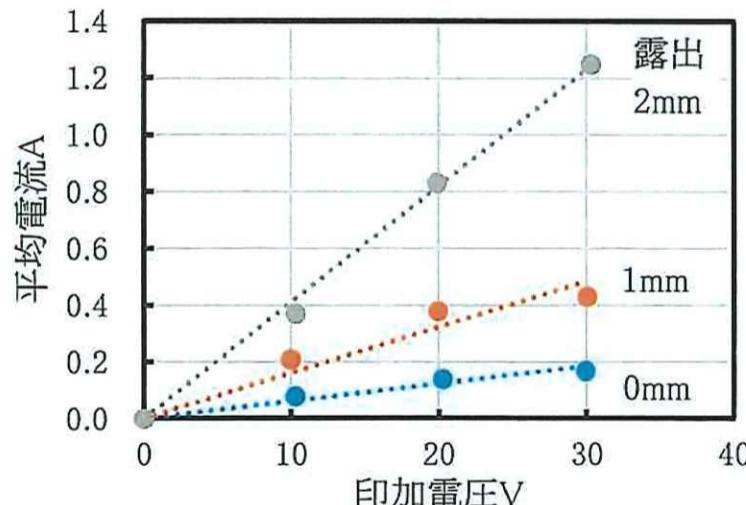


図 9 放電が発生する電圧以下の電流

#### 4.4 加工実験

工作物を送ることで工具電極との相対変位を起こして電解放電加工した。加工条件は以下の通りである。

工具電極: 直径 0.5mm タングステン棒  
突出し長さ 20mm  
陽極: 直径 20mm グラファイト  
工作物: ソーダ石灰ガラス  
印加電圧: 50–60V  
押付力: 0.05N  
加工範囲: 5mm × 5mm  
ピックフィード: 0.5mm  
電極露出長さ: 1mm  
加工液: 10wt% NaCl 水溶液  
加工液深さ: 2, 7mm  
電極送りステップ: XY 方向 1 μm, 50–1000pps

Z 方向 0.2 μm, 500pps

VCM 電流: ±20mA 以内

加工にあたっての電極送り制御は以下の通りとした。まず、Z ステージを下向きに駆動して、工具電極が工作物と接触し、自由位置から 2 μm 押し込んだ位置で停止させる。この時点では、押付力は目標値 0.05N を超えない。次に、VCM も併用して、工具電極の押付力を目標値に制御する。押し込み量が 5 ± 3 μm の範囲を超える場合にはステージも駆動することとし、1.5 μm のヒステリシスを持たせることで、VCM のストローク上下限近くでステージが微小な往復運動を繰り返すことを防いだ。

XY 方向への送りの概念図を図 10 に示す。ピックフィードは工具電極直径と一致させて 0.5mm とした。Y 方向送りは加工量が少ないことを考慮して 50pps とした。X 方向へは 1000pps で早送りして、X 方向送り時の加工量が小さくなるようにした。1 面を加工するごとに 1 回ずつ往復回数を減らしながら、5mm × 5mm の領域を加工した。走査回数が多いほど深くなるため、理想的には原点側から階段状に浅くなる形状となる。

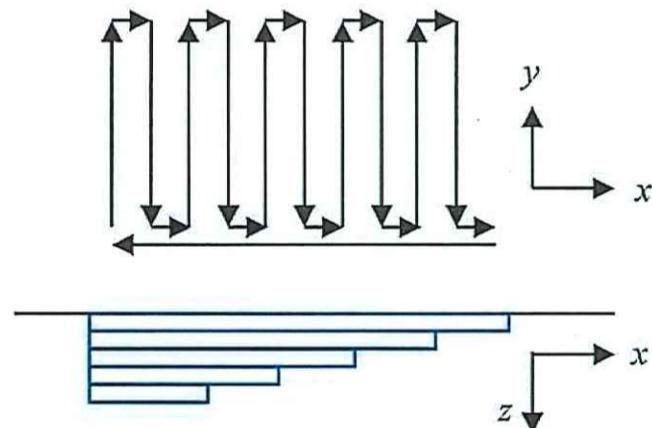


図 10 工具軌跡と期待される形状

印加電圧を 50V、加工時の Y 方向送り速度を 0.05mm/s(50pps)、加工液深さを 2mm とした場合の加工結果の例を図 11 に示す。X 方向は同じ位置を何度も走査することになるため、1mm/s(1000pps)で送った。加工時間は 3093s であった。加工範囲は、X 方向で 5.36mm、Y 方向で 5.86mm となった。

触針式表面粗さ計で測定した断面形状の例を図 12 に示す。Y 方向中央付近で X 方向に測定した。走査回数が多い左側ほど深くなつた。側面からの放電が少なくなるよう絶縁被覆を付けたため、加工範囲が電極投影面およびその近傍に限定され、特に、工具電極中心が深くなつた。ピックフィードと谷部のピッチが一致したため、工具電極は XY ステージの送りの通りに操作したと考えられる。旋盤型電解放電加工機では直径 0.3mm のタンゲステン棒を工具電極に用いており、いったん深い加工溝ができると、電極が曲がってさらに加工溝を深くする現象が起きていた。断面 2 次モーメントは直径の 4 乗に比例するため、剛性が 7.7 倍になっている。これにより工具電極の曲がりが抑えられて、ピックフィー

ドの通りに加工溝が形成されたと考えられる。

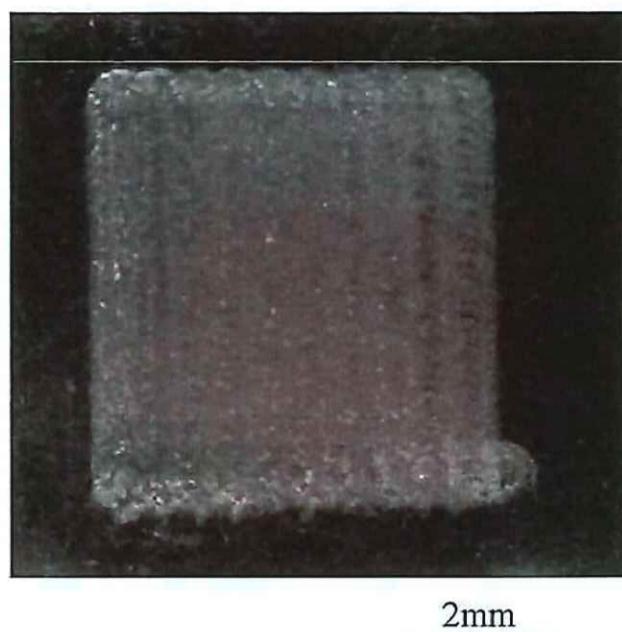


図 11 加工結果の例

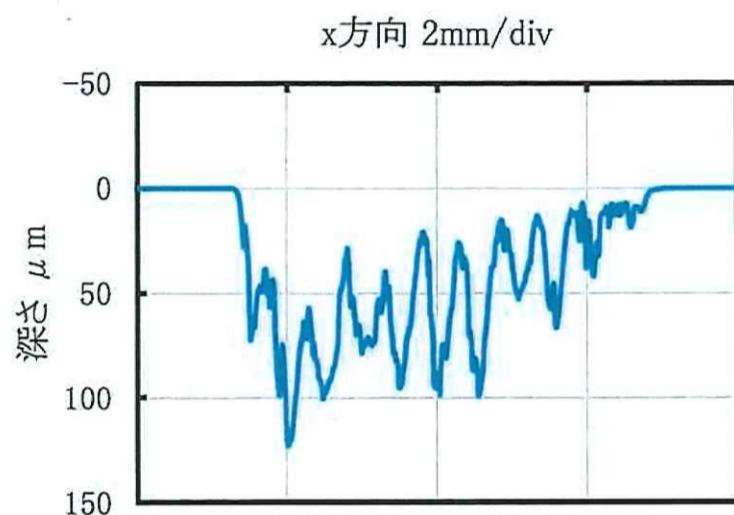


図 12 Y 方向中央付近の断面形状

表面の拡大写真を図 13 に示す。工具電極を走査したことにより加工面に蓄積される放電の熱が少なくなり、クラックが減少した。加工液を 7mm まで深くするとさらにクラックが減少したが、泡が工作物表面に滞留しにくくなるため、加工速度が低下した。



図 13 加工面の拡大写真

## 5. まとめ(結言)

本研究では、絶縁性硬せい材料の微細加工のた

めに、フライス型電解放電加工機を試作し、加工を試みた。工作物上で工具電極を走査する回数を増加させることで除去量が増加するため、三次元形状の加工へも適用可能であると考えられる。

コロナ禍や半導体不足等の影響により、当初想定していた機器や部品の入手が困難もしくは不可能になり、何度か設計変更を余儀なくされた部分があった。

研究の途中経過として文献 8)を発表した。また、関連研究である旋盤型電解放電加工法についての解説<sup>9)</sup>が公開される予定である。

## 6. 参考文献等

- 1) 岡崎祐一:マイクロファクトリ, 精密工学会誌, 68, 4, pp. 491–494 (2002)
- 2) H. Kurafuji, K. Suda, Electrical Discharge Drilling of Glass, Annals of CIRP, 16, pp. 415–419 (1968).
- 3) J. D. Abou Ziki, R. Wüthrich, Forces exerted on the tool-electrode during constant-feed glass micro-drilling by spark assisted chemical engraving, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 73, pp. 47–54 (2013).
- 4) K. Furutani, K. Arai: Removal Mechanism of Glass Using Lathe-Type Electrochemical Discharge Machine, International Journal of Electrical Machining, 23, pp. 1–8 (2018).
- 5) K. Furutani, H. Shintani, Y. Murase, S. Arakawa: Performance of Electrochemical Discharge Machining by Forced Discharge Dispersion (2nd Report) Monitoring of Machining Current, International Journal of Electrical Machining, 23, pp. 16–23 (2018).
- 6) K. Furutani, H. Maeda: Machining a glass rod with a lathe-type electro-chemical discharge machine, Journal of Micro-mechanics and Microengineering, 18, 6, 065006, pp. 1–8 (2008).
- 7) 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).
- 8) 古谷克司, 秋保優作:電解放電加工における電流波形からの主成分分析による特徴量抽出, 第 19 回国際工作機械技術者会議ポスターセッション論文集, pp. 44–45 (2022).
- 9) 古谷克司:旋盤型電解放電加工によるガラスの加工, 砥粒加工学会誌, 67, 5, pp. 257–260 (2023)[印刷中].