

# メタルジェット放電制御装置の製作「 」

名古屋大学工学部・工学研究科技術部

小林勝司、布目清成

要旨： 近年、医療、情報、バイオなど様々な分野において、微小機械や微小構造物のいわゆるマイクロストラクチャの開発・研究が注目を集めている。マイクロマシンの構成要素であるミクロンオーダーの大きさを持つアクチュエータやマイクロモーター、スライダー、リンク機構などを製作するための代表的な方法として、半導体プロセスのリソグラフィ技術を用いたエッチングやS O R光を用いたL I G Aプロセス、レーザーアシストエッチングなどが研究されている。しかし、いずれの方法も高アスペクト比（高さ／幅）を持つ形状の製品を製作することは出来るが、3次元形状を製作することができず、大規模な装置が必要となりコストが高いものとなってしまう。メタルジェットによる三次元創成加工技術は、金属を溶融し微小球として生成しものを2次元画像的に描画し、これを高さ方向にも積層することで3次元構造物を製作することが出来る。この方法は融点が高い金属にも応用できる方法である。グロー放電を用いたメタルジェットによる三次元創成加工技術開発には、0.2～5mmの可変電極間に数mA～数十mAのグロー放電電流と数ms～数百msの放電時間を制御出来る装置が必要である。前回、「メタルジェット放電制御装置の製作」について報告したが課題が多く残った。その後、課題を克服しほぼ満足すべき結果が得られた。

## 1. はじめに

名古屋大学工学研究科超精密工学講座では、超精密加工と超微細加工の新技术開発を行っている。前回、研究に必要なグロー放電を用いたメタルジェットによる三次元創成加工技術開発のため放電加工制御装置を製作し報告したが、検討すべき課題が多く残った。また、前回報告時の検討課題以外にも改善・改良すべき内容がありこれを列挙すると以下ようになる。1) 高電圧制御S Wの高速化並びに遮断時の高抵抗化、2)制御信号伝達方法の変更、3)フィルター挿入による過渡現象抑制、4)外部抵抗付加による安定化。以上を改善し性能を満足する内容が得られたので以下に報告する。

## 2. 制御装置の課題改善内容

図1に改良した装置の高圧放電制御関係ブロックダイアグラム、表1に電氣的仕様を示す。

### 2.1 メタルジェットのしくみ

メタルジェットは、図2、3に示すように溶融電極と固定電極との間に火花放電を起こし電路を形成する。形成された電路を初端としてグロー放電を継続させ電極を溶融させる。溶融させた金属粒子を用いて図4に示すように三次元的造形物を作ることが出来る。金属を溶融させる場合、火花放電初期に高電流を流すと電極は蒸発もしくは飛散してしまい電路が形成できないのでグロー放電には移行しない。また、電流が少なすぎるとグロー放電に

移行しても溶融するだけの熱エネルギー量が不足し溶融しないこととなる。一般に大気中に電路を形成する場合、平等電界中では1cm当たり30kVで短絡すると言われている。また、不平

表1 電氣的仕様

項目	仕様
1)電極間隔	0.2～5mm可変
2)電極材料	W A u N 池
3)放電電流	30±30mA可変(7桁)
4)導通時間	1～99ms可変 デジ外2桁
5)停止時間	1～99ms可変 デジ外4桁
6)繰り返し回数	1～99回 デジ外3桁
7)外部入力	START, STOP(External)

等電界中（平板電極 - 針電極）ではどちらの電極を正極又は負極として電圧を印加するかによって異なるが、1 cm 当たり 5kV とされている。メタルジェット放電制御装置は、針電極 - 針電極間で用いられること、初期電極間隔が最大でも 2mm 程度

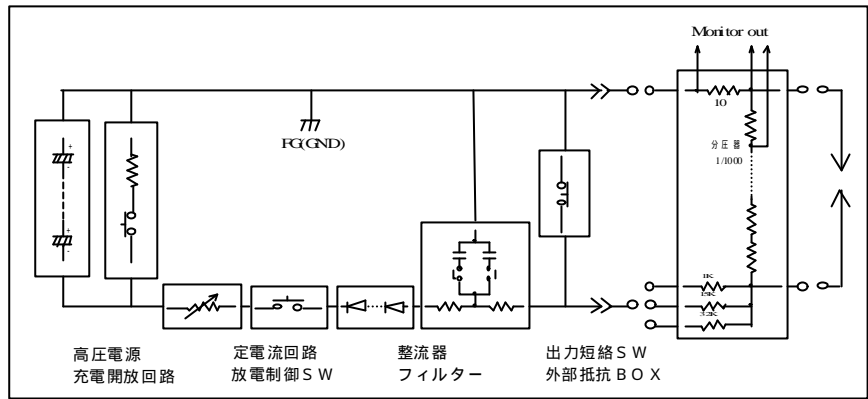


図 1 高圧放電制御系のブロックダイアグラム

度であること等から 2.5kV 程度で良いこととなる。火花放電に引き続いて行う放電は、図 6 からわかるように電流容量から正規グロー放電となる。グロー放電は真空中 (1mm Hg) において放電に要する電圧降

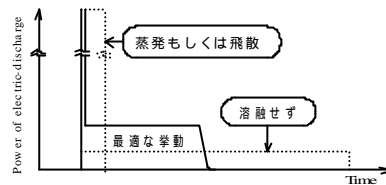


図 2 放電における電力モード

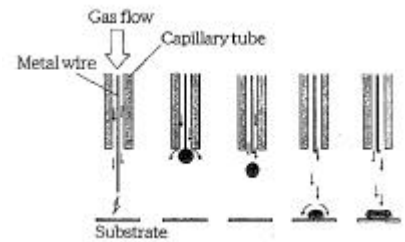


図 3 溶融金属粒子付着モデル

下が約 300V となることが文献より明らかとなっているが、

大気中でもほぼ同様であることが前回の報告でも確かめられている。図 6 では、異常グロー放電領域、正規グロー放電領域とも一本の直線で表しているが、実際の現象はかなり複雑であると参考文献からも述べられている。従って放電現象に関しては、教科書などの記述は大勢を平明にモデル化して表現

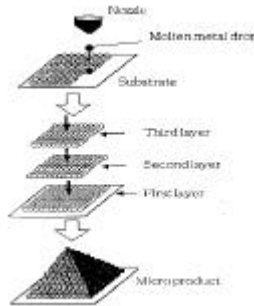


図 4 金属ジェット三次元造形

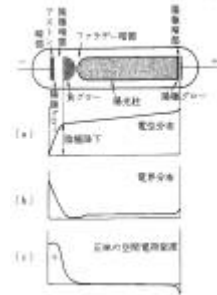


図 5 グロー放電電位分布

物理現象を見出せるとも述べている。グロー放電は、図 5 で示すように陰極降下電圧が大きく作用し電極が溶融し電極間隔が大きくなると陰極降下電圧も増大する。溶融粒子の大きさは放電電流と放電時間の関係から決まる。したがって溶融粒子の大きさを一様に保つためには電流値を一定を保つ必要があり定電流回路が必要となる。このため必要な高電圧電源値は最大陰極降下電圧と制限抵抗による電圧降下及び定電流回路での制御電圧降下の合算値となる。火花放電からグロー放電に移行させるにはその電流格差が少ない方がスムーズに行く、この為、内部に

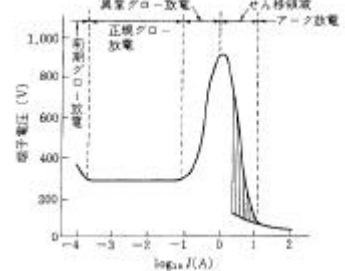


図 6 約 1mmHg V-I 特性

配置した制限抵抗の他外部に放電安定抵抗を付加するが、電源電圧が決まっているのでむやみに大きくできない。このため我々は外部放電安定抵抗をいくつか用意し状況に応じて切り替える方式とした。従って、溶融金属粒子を大きくしたい場合、太い溶融電極を用い放電電流を大きくし電極間が広がりすぎないように選定する事が要求される。また、溶融電極粒子が小さくてよい場合は、初期放電時の影響を少なくするため放電間隔が許される限り低電流・長放電時間の方がより均一な粒子が得られると考察する。

## 2.2 高電圧制御 SW の高速化並びに遮断時の高抵抗化

従来、トランジスタをカスケード接続し SW を構成していた。トランジスタは、ベースに電流を注入するとコレクタ電流が流れる。すると、ベースは「off」なのにコレクタ電流が流れ続ける。これが、トランジスタの最大の欠点である。また、素子に流れる漏れ電流の影響を押しさえられず回路遮断時の出力インピーダンス上昇を妨げている。今回の改良では、電圧駆動型パワー MOSFET を用いて SW を構成した。図 7 に高電圧制御 SW 回路を示す。高電圧制御 SW は、電源(負荷)電圧に対して FET 素子の耐圧が不足するため 2 段構成(カスケード)で駆動している。FET 素子の駆動には、高速充電並びに高速放電を行う為スピードアップ回路方式とした。なお、ゲートバイアス電圧は 12 V、ゲート抵抗は 10 を使用している。FET 素子の特性は 2SK1317  $V_{ds}=1500V$   $I_d=2.5A$   $I_d(pulse)=7A$   $P_{ch}=100W$  である。高電圧制御 SW を FET 化出来たことで、電流遮断時のインピーダンスは約 4.7 M となり前回問題となった遮断時の漏れ電流を押しさえることが出来た。

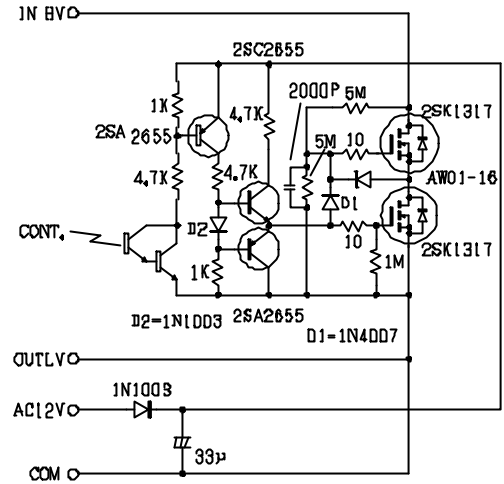


図 7 高電圧制御 SW

## 2.3 定電流回路及び高電圧整流部

電源(負荷)電圧に対してトランジスタ素子の耐圧が不足するため 4 段構成(カスケード)で駆動している。誤差電流の検出は演算増幅器(741)を使用し出力に 1K とダイオードを通して 1 段目のベースへ接続している。基本的回路構成は前回報告と同じである。高圧整流回路についてもコンデンサ容量を再計算し、小さな容量に変更した以外は変わらない。

## 2.4 制御信号伝達方法の変更

放電制御 SW 並びに出力短絡 SW 等の高電圧制御信号は、従来光カプラを用いて絶縁し信号伝達を行っていた。しかし、カプラ素子沿面を通して伝達された雑音が制御回路に影響を及ぼしていた事が判明したため光ファイバー方式に変更した。この結果雑音混入が皆無となった。

## 2.5 過渡応答抑制フィルターの挿入

火花放電の発生により実質的に放電端子間の抵抗が零になる。その後、火花放電からグロー放電へスムーズに移行できれば過渡現象は最小に押しえられるが、グロー放電に移行できなかった場合、再度火花放電が繰り返される。その結果引き起こされる正負の過渡現象を抑制するために挿入。本装置では、制限抵抗を利用してフィルターを構成している。なお、フィルターの時定数は 0

マイク秒、10 マイク秒、20 マイク秒で選択できるようにしてあり、本装置では、10 マイク秒としてある。図10 は、フィルター無し、図 11 は、フィルターを挿入した結果である。測定条件は、20mA、10mS、フィルターの時定数は 10 マイク秒、外部放電安定抵抗は 15K となっている。

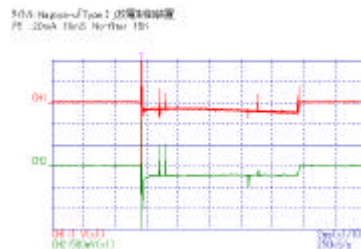


図 10 フィルター無し

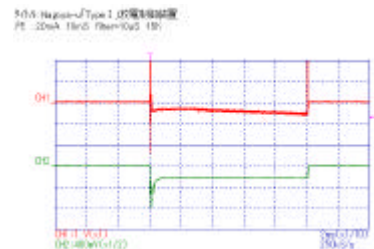


図 11 フィルター有り(10 マイク秒)

秒で選択できるようにしてあり、本装置では、10 マイク秒としてある。図10 は、フィルター無し、図 11 は、フィルターを挿入した結果である。測定条件は、20mA、10mS、フィルターの時定数は 10 マイク秒、外部放電安定抵抗は 15K となっている。

## 2.6 逆起電圧抑制ダイオードの挿入

逆起電圧抑制ダイオードを、高電圧を高速で開閉する際発生する逆起電圧が正極側に振れ

るとグロー放電に移行しないために挿入した。

## 2.7 外部放電安定抵抗

外部に放電安定抵抗を挿入する方法を採用したが、そのきっかけは以下のである。実験時、電流計測用抵抗を用い計測中に電流量が不足し損傷した。損傷発見時直前まで比較的良好な特性であったものが、損傷した抵抗を交換したところ好ましい結果が得られなくなった。損傷した抵抗の実測抵抗値に近い値の抵抗を挿入したところ良好な結果が得られた。また、この抵抗を装置内に組み込んだところ測定結果が思わしくなく、放電電極近傍に配置すると良好であった。外

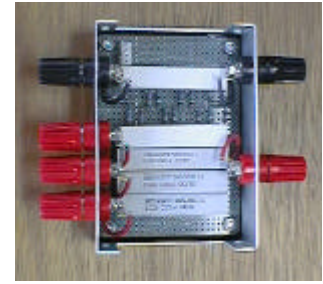


写真1 外部抵抗BOX

部放電安定抵抗の挿入は制限抵抗と同様の働きがあるので、通電電流に配慮して抵抗値を加減する必要がある。この抵抗を挿入する事によって火花放電電流と設定グロー放電電流との電流ギャップが小さくなりスムーズに移行できるものと思われる。なお、放電電極近傍に設置した場合良好な結果が得られるのは、装置からのリード電極に絡む様々なラインインダクタンスや寄生容量の影響が関係するものと考えられる。放電安定抵抗は放電電極の近傍で設定放電電流等により32K、15K、1Kが選択できるようにしてある。

## 3. まとめ

放電制御装置を改良した結果、以下のような測定結果が得られた。図中上のデータが放電電極間電圧を、下が放電電流を表示している。図12上左は、従来から研究室に設置してある市販装置の放電電圧 - 電流特性であり、放電電流は10mA、放電時間10mSである。図上右は05mA、図中左10mA、図中右20mA、図下左30mA、図下右40mAであり、放電時間はいずれも10mSの状態である。フィルター時定数は10 $\mu$ s、外部安定抵抗に05mAは32K、それ以外は15Kを用いている。

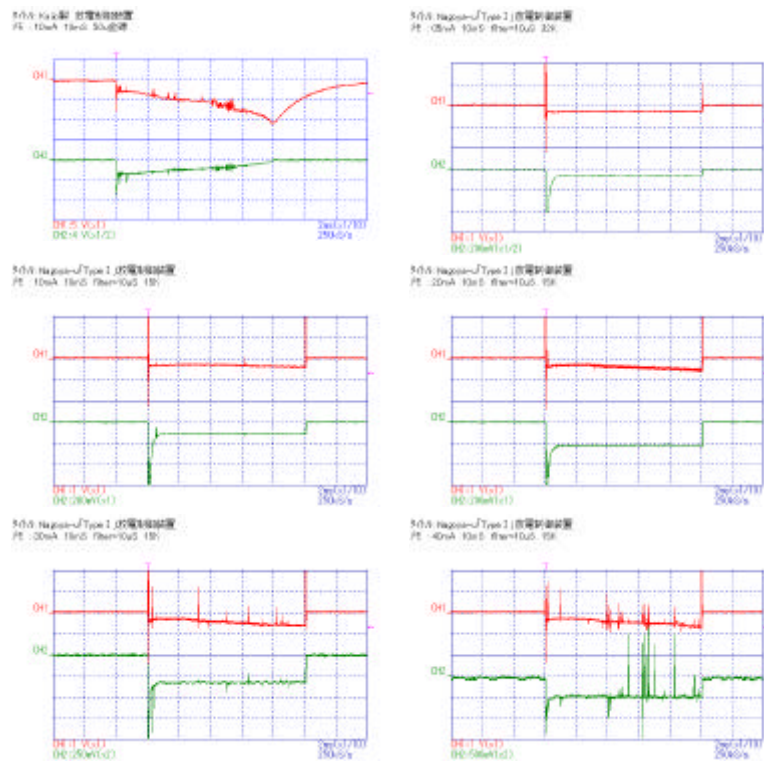


図12 放電電圧 - 電流特性

## 謝辞

この装置製作に当たり、装置全体の構成並びに機能について機械工学研究科超精密工学講座中本剛助教授の協力並びに助言、科学技術振興事業団金属噴射プリンタ研究開発事業部夏目康男研究員、洪 秀明研究員に助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 電気学会ハンドブック
- [2] 電子回路 吉田典可他 朝倉書店
- [3] 新版 高電圧工学 河野照哉 朝倉書店
- [4] 高電圧大電流工学 電気学会
- [5] トランジスタ技術増刊 パワー-MOSFET の実践活用法