

# メタルジェット放電制御装置の改良

小林勝司<sup>\*</sup>、布目清成<sup>\*\*</sup>

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、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応用したエッチングや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、三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になってしまう。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たものを二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三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。今回、以前製作したメタルジェット放電制御装置を基本にさらにいくつかの改良を行った。

## 1. はじめに

名古屋大学工学部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。以前、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、製作した装置は手動制御方式であった。今回、コンピュータからも制御できること、放電電流最大値を100mAまで拡大との要請があり前回製作した装置の検討すべき課題の改善と新規追加内容を含む改良型の制御装置を製作したので以下に報告する。

## 2. メタルジェットのしくみ

メタルジェットは、図1、2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3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

---

\*電子・情報技術系技術長

\*\*計測・制御技術系前任専門技術職員

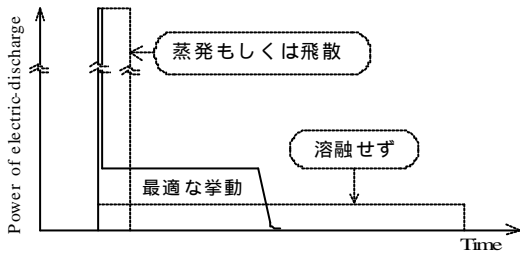


図1 放電における電力模式図

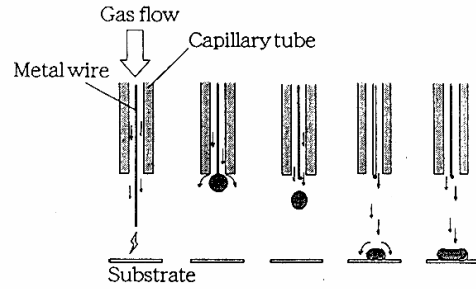


図2 熔融金属粒子付着までの経過モデル

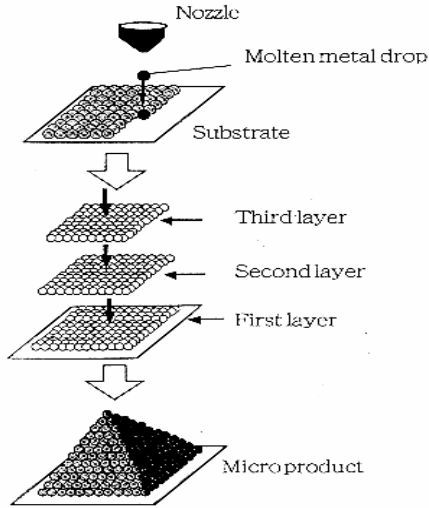


図3 熔融金属ジェットを用いた三次元造形の基本原理

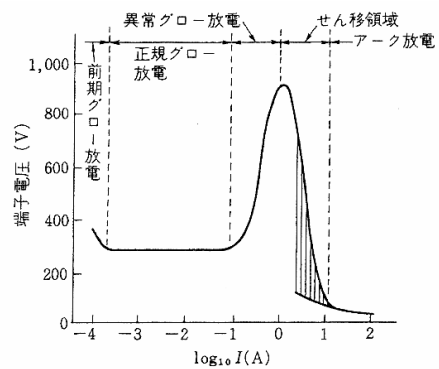


図4 約1mmHgの低気圧中放電における電圧 - 電流特性

印加するかによって異なるが、1cm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程度であることから放電開始電圧は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4からわかるように電流容量(1mAから100mA)から正規グロー放電となる。グロー放電は真空中(1mmHg)において放電に要する電圧降下が約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4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しており、詳しく研究すると興味ある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

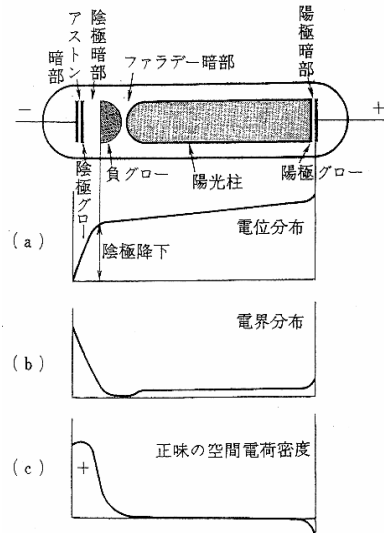


図5 グロー放電の外観と電位分布

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。

### 3. 改良型制御装置の内容

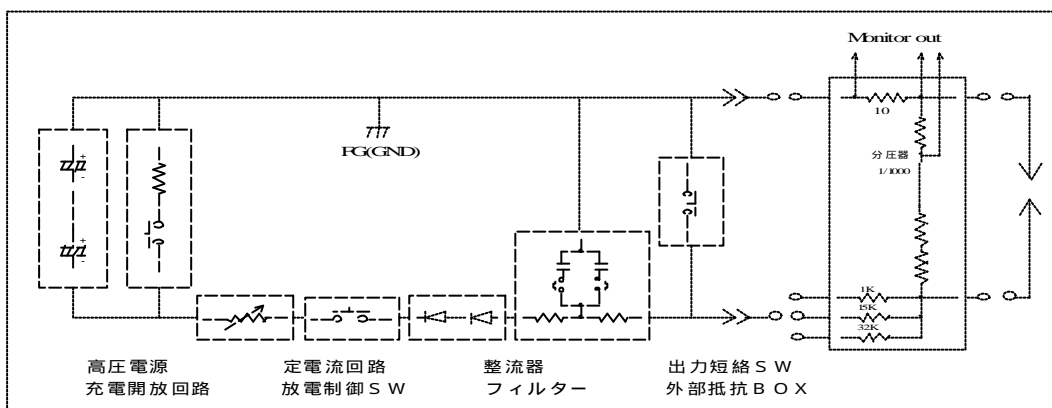


図6 高圧放電制御系のブロックダイアグラム

表1 メタルジェット放電制御装置の基本仕様

図6に改良した装置の高圧放電制御系のブロックダイアグラムを、表1に基本仕様を示す。また、表2にコンピュータからハンドシェイクする仕様を掲載している。基本仕様では、放電電流が最大100mA流せることのほか、放電終了時より遡って事前に溶融粒子飛翔用信号の送出。溶融粒子飛翔用信号から一定時間後に溶融電極繰り出し用線送信号の送出も求められている。

コンピュータからの制御はインターフェイス社の電源内蔵32/32点デジタル入出力ボード(PCI-2732C)を経由して制御する。コンピュータから

基本仕様	
電極間隔	0.1~10(5)mm の可変電極間に1~100mAの放電電流を流せる制御装置の製作。通電初期には高電圧を投入し、パイロットアークを生成した後、グロー放電電流が流れるようにする。グロー放電により、電極材料(Au, Ni等、太さ25μm~200μm、マイナス電極)を溶融・球状化することが目的。
電極間隔	: 0.1~10(5)mm
電極材料	: (-) Au, Ni 他 (+) W 固定電極側...GND設置
放電電流	: 1~99mA 可変(デジタル)
導通時間	: 1~99mS 可変(デジタル)
停止時間	: 1~999mS 可変(デジタル)
繰返回数	: 1~9999回 可変(デジタル)
外部入力	: パソコンよりプログラム制御
手動入力	: マニュアル操作可であること
外部出力	: (-) 電極送り スパニングモーター駆動信号 放電終了時点 + 0~99mS AIR ジャックの動作信号
放電(イオンアーク) 溶融 飛翔 線送り 放電 (溶融後ジャックを開とし放電の直前で閉とする)	
時間カウンターのスタート点:	閉 開: グロー放電終了時点 + 9mS(μSオーダー?) 開 閉: 開時点 + 1~99mS
その他	: 1)メインの電源スイッチ(表示ランプ付)を付ける 2)非放電時に微弱電流の漏洩無きこと 3)終了時、高圧電源コンデンサ電荷の解放すること 4)ストップスイッチにて緊急停止が可能であること

は、指示データと選択データとを個別に指定しそれらのデータは、2種類の制御パルスによって行うこととしてある。選択データの上位3bitは動作指定(stop, start, AIR, WIRE)を下位4bitは指示場所(放電電流、放電時間、停止時間、線返回数、AIR時刻、線送時刻)を指定することとした。

この改良では、入力データ値がどの指定場所のデータであっても0の場合は動作しないように保護回路を挿入してある。

表2 コンピュータからのハンドシェイク仕様

制御装置側の仕様	
outputポート	1)指示データ 8bit OUT1~8 放電電流(8)、放電時間(8)、停止時間(12)、線返周期(16) AIR時刻(8)、線送時刻(8)...0は「bit数」、データ「BCDコード」 2)選択データ 8bit OUT9~16 or OUT17~24 指示データレフト(4)、R/M(1)、動作レフト(3) 指示(16ヶ所...予備も含む)、動作(4種類...予備も含む)
制御パルス	2種類 1)指示データ書き込みパルス(Puls.OUT1 1mS) 2)選択データ動作パルス(Puls.OUT2 1mS)
IN1~32、STB1.2、IR.IN1.2、ACK1.2、RSTOUT、P.OUT、RSTIN	は使用しない。
指示データ(8bit)	out8 out7 out6 out5 out4 out3 out2 out1 (MSB) (LSB)
選択データ(8bit)	out8 out7 out6 out5 out4 out3 out2 out1 (MSB) (LSB) D2 D1 D0 R/M d3 d2 d1 d0 (動作レフトアドレス) 1=R (指示場所レフトアドレス) 0=M
動作	000(0) stop 指示場所 0000(0) 放電電流 001(1) start 0001(1) 放電時間 010(2) AIR 0010(2) 停止時間(上位) 011(3) WIRE 0011(3) 停止時間(下位) 100(4) 以下予備 0100(4) 線返周期(上位) 0101(5) 線返周期(下位) 0110(6) AIR時刻 0111(7) 線送時刻 1000(8) 予備 1001(9) 以下予備
注意:	選択データの内、動作レフトアドレスのデータはPuls2に対し動作し、指示場所レフトアドレスのデータはPuls1に対し動作する。従って指示場所設定の場合、D2~D0のデータは何でも良い。また、動作指示の場合指示場所レフトアドレスのd3~d0データは前記同様何でも良い。

### 3.1 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。しかし、ベース電流を止めてもベースは「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。これは、ベースに過剰な電流を注入するとベース内にキャリアが蓄積されるため、ベース電圧を「off」(0V)しても、この蓄積されたキャリアが消費されるまでの間はコレクタ電流が流れ続けるからである。この電流が止まらない期間をストレージ・タイム(蓄積時間)  $t_s$  と呼び回路の動作周波数が上がってくると損失の原因なり大きな障害となる。

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の回路を示す。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

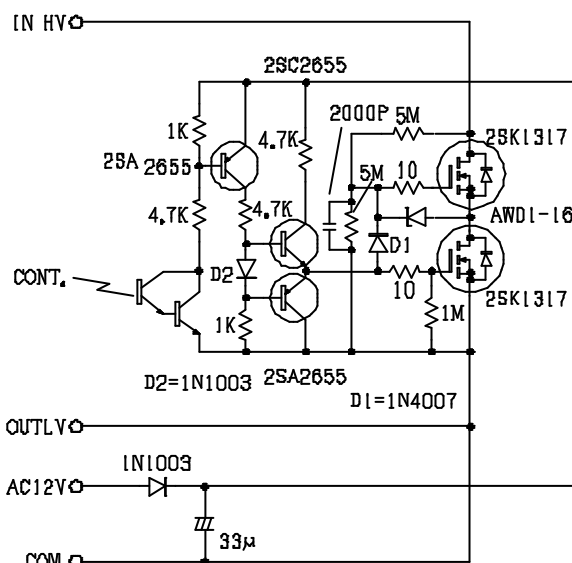


図7 高電圧制御SW

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12V、ゲート抵抗は10Ω。使用している。FET素子の特性は 2SK1317 Vds=1500V Id=2.5A Id(pulse)=7A Pch=100W 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4.7MΩとなり前回問題となった遮断時の漏れ電流を押さえることが出来た。

### 3.2 定電流電源

電源（負荷）電圧に対してTr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。図8に定電流回路図を示す。誤差電流の検出には演算増幅器を使用し出力を1KΩとダイオードを通して1段目のベースへ接続している。回路に流れる電流値を決める基準信号は、制御回路から光ファイバーを通して送られてくる周波数を、電圧変換して与えている。電流検出抵抗は10Ωとしてある。なお、ベースバイアス電圧は約17V、ベース抵抗は全て2KΩとしている。これは、回路電流最大100mAであること。使用トランジスタの「hfe」が約10と小さいためバイアス電流を考慮した値である。

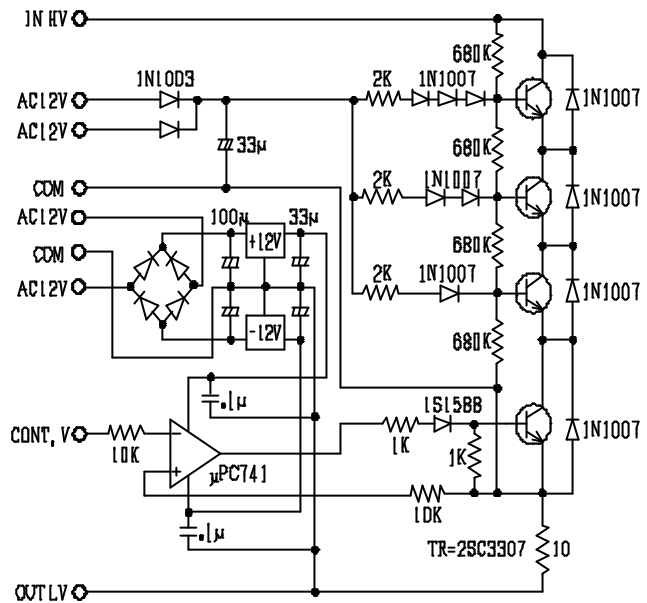


図8 定電流制御回路

使用トランジスタは全て 2SC3307 Vcbo=900V Ic=10A Pw=150W である。基本的に前回製作時と大幅な変更はない。

### 3.3 高電圧整流部

定電流電源に必要な高圧整流部は入手しやすいコンデンサ耐圧を考慮して製作した。変更点は、変圧器を800Vとしたこと。制御回路用に別途変圧器を用意し個別にフローティングで制御するための電源を用意した。主高圧回路は倍電圧整流で実現している。入力タップを90V,100V,110Vと設けてあり90Vタップを使用して2,500Vを得ている。使用している電界コンデンサの容量は、450WV33μFと450WV22μFを用いて構成している。なお、電源電圧を考える場合、以下のことを考慮して設計した。

放電開始電圧 不平等電界下においては5KV/1cmで放電すると言われている。グロー放電の陰極降下電圧 最低約300Vであり放電間隔に比例して増加する。制限抵抗は火花放電時に電源を保護するために挿入

#### 試算例

	制限抵抗 20K	制限抵抗 10K
電源電圧 2500V		
ショート時	125mA	250mA
陰極降下電圧(max)	1000V	1000V
放電電流(max)	75mA	150mA

### 3.4 制御回路

制御回路は、コンピュータから制御出来ること。放電終了時に以前に飛行用駆動信号出力並びに飛行用駆動信号出力後所定の時間経過後に線送制御信号出力も求められている。コンピュータから制御並びに手動制御を行う上で放電電流設定値は、バイナリ又はデジマル値があるが操作性を考慮するとデジマル値となる。設定値を定電流回路に転送するためには幾つかの方法があるが、当初デジマル値をバイナリ値に変換する。さらにパラレル - シリアル変換した後、シリアル転送を行う。受信側ではデータをラッチした後、D / A 変換し定電流回路の基準信号とする方法であったが、放電時の雑音でデータラッチがスムーズに行えない様子を図9に示す。この為、以下の方法に変更した。図10に定電流データ転送ブロックダイアグラムを示す。

タイトル: Nagoya-u 放電装置「II」  
 規模: 10mA 10mS 10u 32K

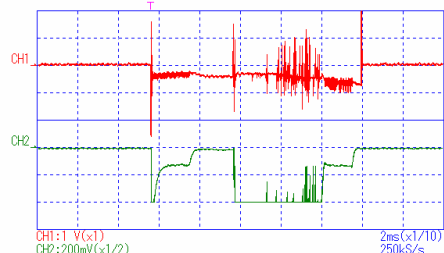


図9 データが雑音で変化した例

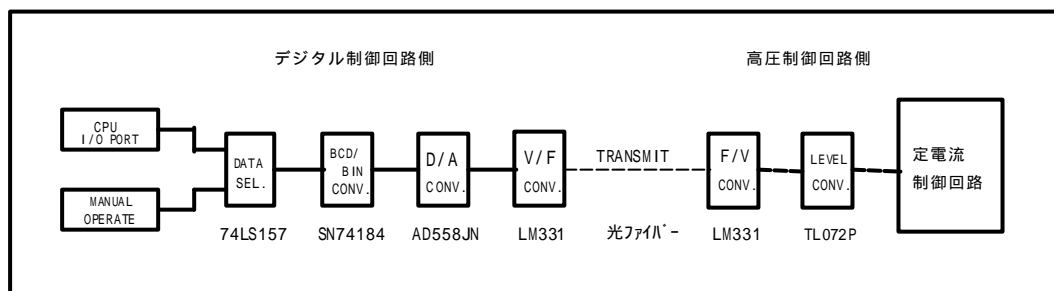


図10 定電流データ転送ブロックダイアグラム

デジマル値をバイナリ値に変換した後、最上位ビットを「H」としD / A 変換を行う。変換された電圧はV / F 変換し周波数としたものを高圧側に転送。転送された周波数はF / V 変換し送信側で加えられた「ゲタ」を差し引いて定電流回路の基準信号とした。この変更で放電時に発生する雑音による誤動作は皆無となり、また周波数に紛れ込む雑音成分は基準信号に大きく影響しないことが分かった。高圧制御回路への信号伝達にプラスチック光ファイバーを用いた。以前は、高電圧回路とのアイソレーションにフォトカプラを使用していた。しかし、電圧的に耐圧があっても素子パッケージ間の沿面距離が不十分であり制御回路に高電圧遮断並びに放電時等に発生する高周波ノイズが伝搬し誤動作の原因を作り出していた。この現象は、抵抗負荷では問題が無く、放電を伴う高雑音環境時に影響していることがいえる。光ファイバーは他の研究室廃棄処分の中から見つけ使用しているが、コネクタが無いため短く切断して使用出来ず5 mのまま用いた。問題点は、光伝達率が極端に低いためトランジスタを1段挿入しダーリントン結合とし「hFE」を稼いで使用している。この結果、放電に伴う雑音による制御系の誤動作は皆無となった。

### 3.5 改良に当たって検討した事項

- 1)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ようなものである。実験時に電流計測用抵抗を用い計測中、電流容量が不足し損傷した。損傷発見時直前まで比較的良好的な特性であったものが、損傷した抵抗を交換した結果好ましい結果が得られなかった。損傷した抵抗の実測抵抗値に近い値を挿入したところ良好的な結果が得られた。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的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現象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負荷電流等により 32K 、 15K 、 1K が選択できるようにしてある。

## 2) 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。

## 3) 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さえられるが、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。このフィルターの時定数が大きすぎるとグロー放電終了時に遅延が起きる。装置では、フィルターの時定数を 0 マイロ秒、10 マイロ秒、20 マイロ秒で選択できるようにしてあり本装置では、10 マイロ秒としてある。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、10mA, 10mS、フィルターの時定数は 20 マイロ秒、外部放電安定抵抗は 32K となっている。

タイトル: Nagoya-u「Type II」放電制御装置  
 条件: 10mA 10mS Diode 32K (Tr)

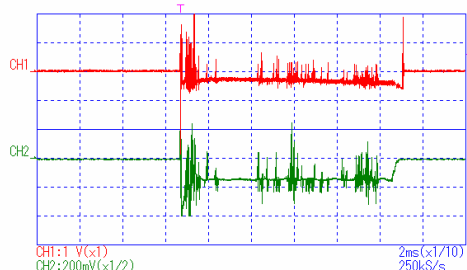


図10 フィルターなし

タイトル: Nagoya-u「Type II」放電制御装置  
 条件: 10mA 10mS D+F 32K 20u (Tr)

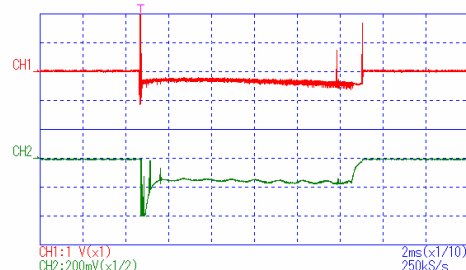


図11 フィルターあり(10マイクロ秒)

## 4 . 放電制御装置動作

- 1) 出力短絡 S W が「on」から「off」となると、放電出力端子間には出力短絡 S W 「off」インピーダンスと放電制御 S W 「off」インピーダンスとで分圧された約 1/2 の電源電圧が出力される。この時、定電流回路は、見かけ上負荷抵抗が変わらないので設定電流を流そうとする「on」状態である。
- 2) 約 100 マイロ秒の時間において放電制御 S W が「on」となる。放電出力端子間には、ほ

ば電源電圧に等しい電圧が出力される。この時、一定電圧を超えると端子間に接続されている電極間で火花放電が起こり電極間は導通（短絡）状態となる。

- 3) 電極間に流れる電流は、定電流回路が「on」状態であるので制限抵抗(20K )を通して瞬間約 120mA 程度が流れる。この為、定電流回路は設定電流を維持しようとするため電流制限動作を行う。この事によって、電極間の電流が減少し火花放電による導通（短絡）状態からグロー放電に移行する。その為、グロー放電の陰極降下電圧が発生し（約 300V）電極間に流れる電流は更に減少する。
- 4) グロー放電に移行した後、定電流回路は設定値の電流とするため安定化の動作を行う。
- 5) 放電制御 S W が「off」、出力短絡 S W が「on」になるとグロー放電は停止する。定電流回路は放電制御 S W が「off」した時点で高負荷状態となり、電流を多く流そうと「on」状態となる。放電制御 S W 「off」、出力短絡 S W 「on」の状態では放電出力端子間は約 1/2 の電源電圧となるが出力短絡 S W が「on」になる約 100 マイロ秒間グロー放電が持続するかは不明である。

## 5 . まとめ

製作した装置の正面並びに装置内部の様子を写真 1 から 4 に示す。



写真 1 装置正面

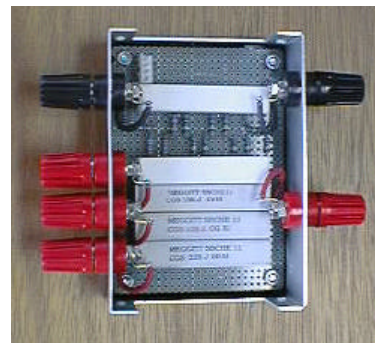


写真 2 外部放電安定抵抗

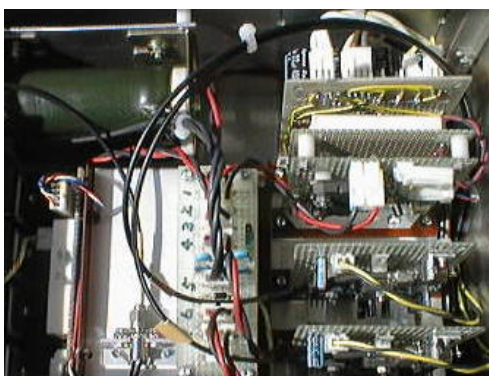


写真 3 高電圧制御 S W 群

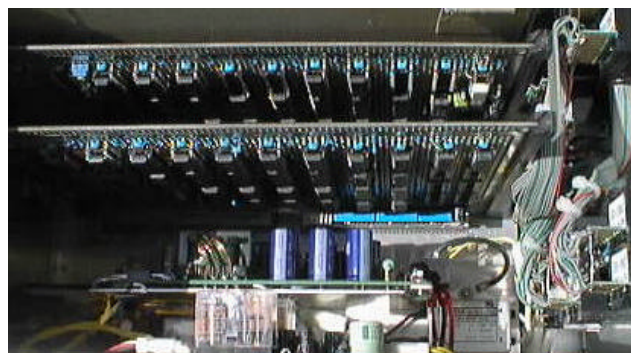


写真 4 制御回路及び直流電源

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12,13は、放電



タイトル: Nagoya-u「Type II」放電制御装置  
 条件: 05mA 80mS Diode+Filter 10u 32K

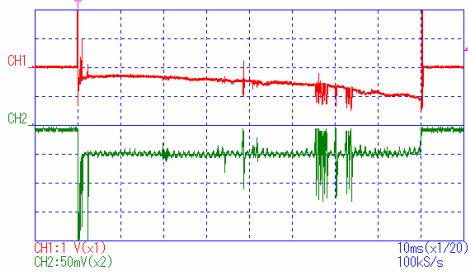


図12 5mA、80mS放電

タイトル: Nagoya-u「Type I」放電制御装置  
 条件: 20mA 20mS filter=10uS 15K

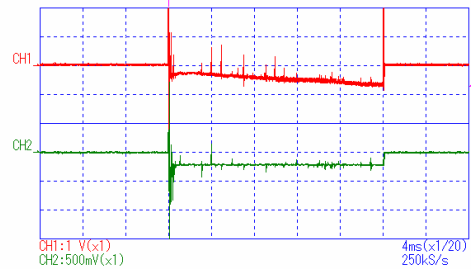


図13 20mA 20mS放電

特性のデータであり、溶融電極が溶融し電極間が増大し陰極降下電圧が増大している様子を、図14は非溶融電極の場合であり、電極が溶融しないため陰極降下電圧の増大は認められない。なお、図12は、5mA80mS 図13は、20mA20mSであり図12と図13のエネルギー量は同じである。なお、図14は放電電流10mA、放電時間30mSである。

タイトル: Nagoya-u「Type II」放電制御装置  
 条件: 10mA 30mS Diode 32K

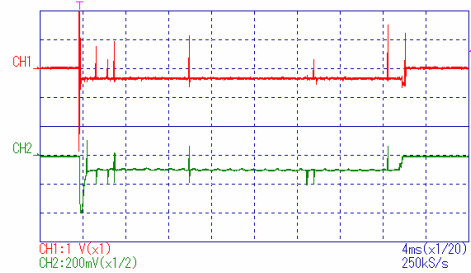


図14 非溶融電極使用時

図15は、従来から研究室に設置してある市販装置の放電電圧、放電電流特性であり、放電電流10mA、放電時間10mSである。図16は放電電流05mA、図17は10mA、図18は15mA、図19は20mA、図20は30mA、放電時間はいずれも10mSの状態制限抵抗を利用したフィルター時定数10マイクロ秒、外部安定抵抗は15Kを用いている。

タイトル: Kaijo製 放電制御装置  
 条件: 10mA 10mS 50u金線

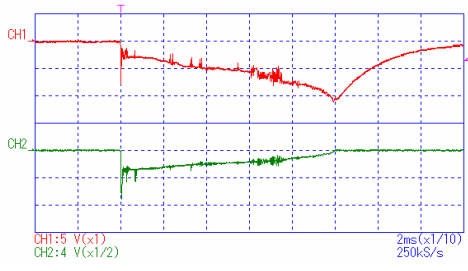


図15 既存市販装置放電特性

タイトル: Nagoya-u「Type II」放電制御装置  
 条件: 05mA 10mS Diode+Filter 15K

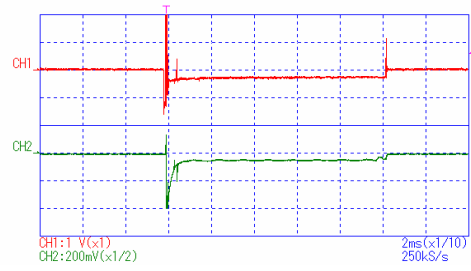


図16 放電特性 1

タイトル: Nagoya-u「Type II」放電制御装置  
 条件: 10mA 10mS Diode+Filter 15K

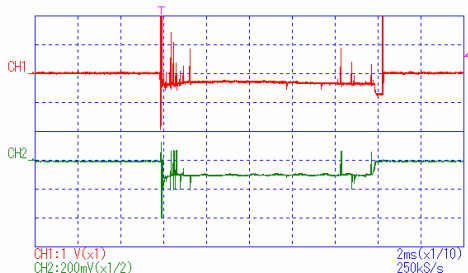


図17 放電特性 2

タイトル: Nagoya-u「Type II」放電制御装置  
 条件: 15mA 10mS Diode+Filter 15K

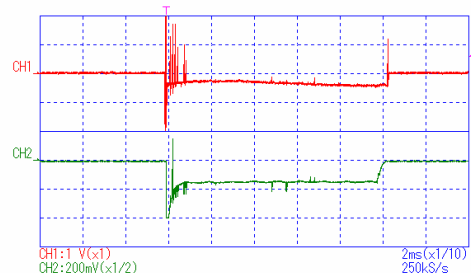


図18 放電特性 3

タイトル: Nagoya-u「Type II」放電制御装置  
条件: 20mA 10mS Diode+Filter 15K

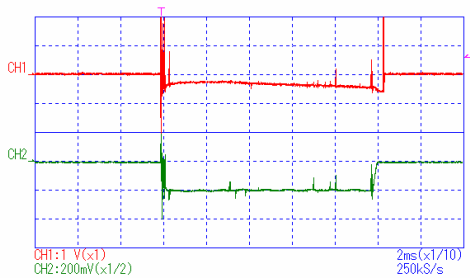


図19 放電特性 4

タイトル: Nagoya-u「Type II」放電制御装置  
条件: 30mA 10mS Diode+Filter 15K

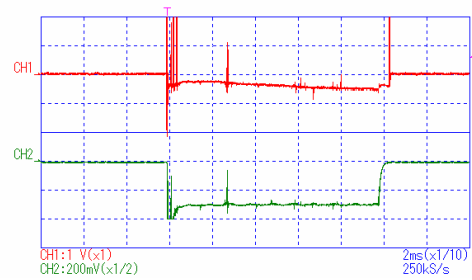


図20 放電特性 5

以上の測定結果から、当初の目的とした仕様はほぼ満足できる装置が製作できたものと考えている。

## 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