



KEK-78-28

March 1979

I

PROCESSING A FINE SLIT BY MEANS OF ELECTRIC DISCHARGE (in Japanese)

S. KASAHARA, H. INOUE and T. HONGO



NATIONAL LABORATORY FOR
HIGH ENERGY PHYSICS
OHO-MACHI, TSUKUBA-GUN
IBARAKI, JAPAN

D

KEK Reports are available from

Technical Information Office
National Laboratory for High Energy Physics
Oho-machi, Tsukuba-gun
Ibaraki-ken, 300-32
JAPAN

Phone: 0298-64-1171
Telex: 3652-534 (Domestic)
(0)3652-534 (International)
Cable: KEKOH0

Abstract

Among fabrication methods using electricity, the electric discharge processing is widely used for fabrication of forms and dies.

If one notes however features proper to the electric discharge processors and minds their effective utilization, it is possible to fabricate pieces of very special shapes or of high precision as such.

This paper reports on our trial to process a fine slit by means of electric discharge, whose fabrication is impossible by the conventional methods.

1 はじめに

放電加工法によって加工を試るモリブデンスリットは、物理系泡箱部門の実験・研究に用いるものであるが、使用目的は、ある基板上に定まった型の薄膜を真空蒸着、又はスパッターリングによって製作する為に同スリットを基板上に置き基板を部分的に覆う為に用いられるものであり真空蒸着用マスクと呼ぶ。

薄膜の精度を決定するのは、使用するマスクの加工精度と基板への密着性である。高精度のマスクを製作する為には硬くて薄い金属板を使う必要がある。

軟かい材質は加工中、又は加工後の取扱いによって変形し易く基板への密着性を悪くする。

このように変形したマスクを使用すると、マスクと基板との間に間隙が生じて、蒸着物質の回り込みの原因となり縁をダレさせることになる。

厚い材料は加工が困難で、極細($\sim 50\mu\text{m}$ 程度)のスリットを作る場合には、厚さ方向の一様性に問題が生じ蒸着時には、変形したマスクと同様に縁をダレさせる原因となる。

蒸着した薄膜は In ・ Nb ・ Nb-Ge などの超電導物質をターゲットとして、スパッターリング法によって製作され超電導薄膜を利用した粒子検出器の開発・研究に供されるものである。

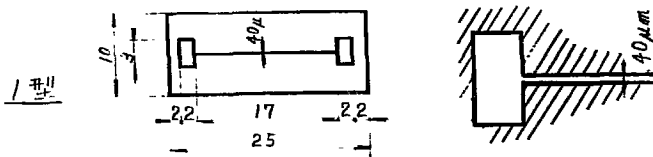
以上から今回は、 0.1mm のモリブデン板をマスクの材料として選んだ。

今回製作したマスクの使用目的は、硝子、又は石英板の上に幅 $40\mu\text{m}$ ・長さ $14\text{mm} \sim 17\text{mm}$ の薄膜 ($1000 \sim 2000 \text{ \AA}$) を $100\mu\text{m}$ 間隙に3本作ることであり、Fig-1 に示す。

この目的に叶うマスクを、モリブデン鋼を用いて、精度よく製作する為には、放電加工が最適であるが、本機は放電エネルギー、電極送り機構からも、中・大型の製品を加工するのに適しているため、放電電極(工具)の加工、放電加工の条件(パルス幅・電流)の設定などに高度の技術を必要とするものである。

2 スリット仕様と製作

2-1 スリットの設計は次のようである



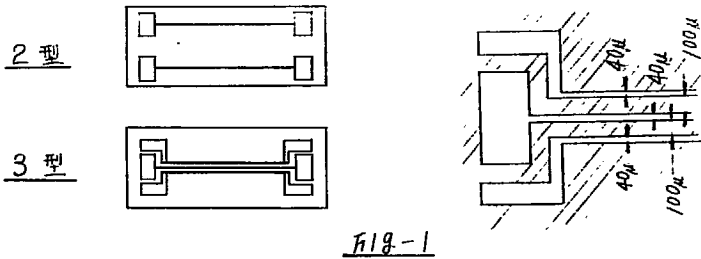


Fig-1

2-2 使用機械

加工機 ジャパックスDP-40型 放電加工機
 電極送り機構 油圧サーボ系
 電源 交流電源(半導体パルス電源)

パルス幅(μs) 2-1800
 パルス休止時間(μs) 3-200
 電流波高値(A) 2.2-50

加工液 放電加工油 スーパーJELオイル

3 放電現象の基礎

Fig-2は、最も基礎的な放電加工用の回路図である。
 電源Eは、大気中に配置された金属極間Gに抵抗Rが接続されている。電源Eに電圧を、しだいに加圧すると絶縁破壊電圧と電流特性の関係は Fig-3に示すようになる。

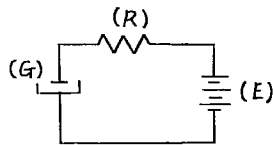


Fig-2

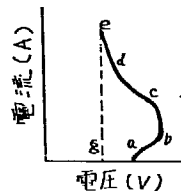
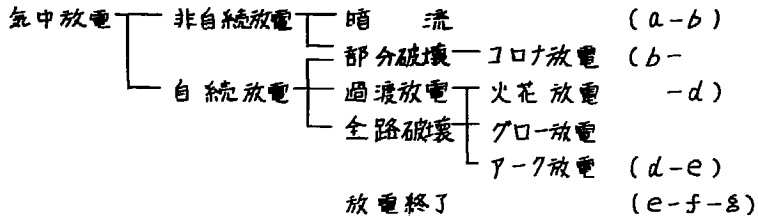


Fig-3

即ち、Fig-3の絶縁破壊電圧と電流特性との関係はつぎのように説明される。



以上は、放電が絶縁体(気中)中でおこなわれる場合の現象を追ったものであるが、気体と液体との単位長さ当りの分子数 気体/液体は $\approx 1/1000$ であるから 放電間隙は変化するけれども、放電の特性そのものはほぼ同様と考えることができる。

実際の放電加工でのエネルギー供給時間は、一般的な条件では $10^{-7} - 10^{-5}$ Sec であり火花放電にもなる短アーク放電の現象を利用して加工がおこなわれる。

4 加工電源の基本原理

放電加工は、工作物と工具電極に加工電源を接続してパルス的に電気エネルギーを供給し、放電を発生させて加工を行うものである。

加工電源の電気的構造は、パルスエネルギー量とパルスエネルギー時間が変化できるようなスイッチング回路で行なわれているが、その内容は、

- (1) 蓄積素子(コンデンサー・インダクタンス)と抵抗とを組合せ、放電間隙の導通(放電)と不導通(放電終了)によって発振させる方法。
- (2) スwitching素子(半導体)を用い、この信号を増幅して利用する方法。

算がある。前者は言替れば放電間隙が発振器と考える水、一般にコンデンサー方式と言われる方法である。この電源は放電間隙の状態にしたがって、充放電を繰返す為、従属型電源と呼ぶ。後者のパルス電源は間隙の状態には無関係に、放電エネルギーを供給するために、独立型電源と呼ばれる。Fig-4 にその基礎的な回路図を示す。

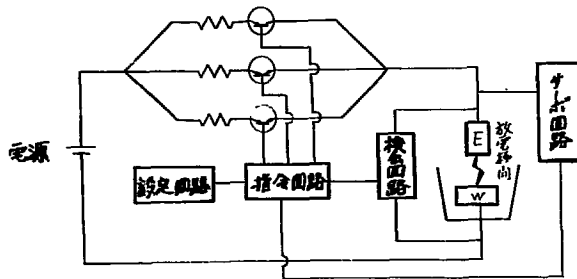


Fig-4

5 加工条件の選定

5-1 Vi電源を用いた最小放電エネルギーによる加工

前記微細スリットを放電加工で行うにあたり、Vi電源を使用した。加工条件の設定を、(1)式を利用して加工を試みた。

$$I_a = I_p \cdot \frac{Z_{on}}{Z_{on} + Z_{off} + Z_w} \cdot 1/s \text{ (A/cm}^2\text{)} \text{----- (1)}$$

加工面積 $S : 0.0051 \text{ cm}^2 \text{ (} 0.03 \text{ mm} \times 17 \text{ mm)}$
 最小電流波高値 $I_p : 2.2 \text{ A}$
 最小パルス幅 $Z_{on} : 2 \text{ } \mu\text{s}$
 $Z_w : \approx 0.3 Z_{on}$ (放電開始まで要する時間)
 最大電流密度 $I_a : \text{Table-1より低消費領域の} 10 \text{ (A/cm}^2\text{)とする}$

材 電極-工作物	消費領域	最大電流密度(A/cm ²)
CU - St	低消費	10 ~ 15
CU - St	有消費	15 ~ 20

Table-1

I_a の数值は、液処理の難易によって変る。

液処理が十分に理想的に行われるような場合は高い電流密度を取ることができる。

パルス休止時間 $Z_{off} : (1)の式よりZ_{off}は、\approx 84 \mu\text{s}ですが、Vi電源のパルス休止時間設定ノブより、117ツツの80 \mu\text{s}とした。$

加工電極上昇速度 $: 0.83 \text{ mm/s}$
 加工電極下降速度 $: 0.1 \text{ mm/s}$

5-2 加工結果と抵抗・インダクタンスの利用

5-1で示すVi電源を用いた加工条件で、放電加工をおこなったが、Table-2に示す結果となった。

この結果から、Vi電源だけによる微細加工は、加工拡大率が異常に大きくなり微細加工は不可能であると、判断した。

即ち、30 μ mの電極を用いた場合、スリットは60 μ mとなり、加工拡大率が15 μ mとなっている(微細加工の場合は2~3 μ m)。

尚、加工拡大率については、(2)式のような基本式がある。

$$\text{加工拡大率 } \delta_{out} = K_{\delta 0} \cdot Z_{on}^{0.3} \cdot I_p^{0.3} \text{ (mm)} \text{ ----- (2)}$$

$K_{\delta 0}$ は電極・工作物の材質により定まる定数

材 質 電極-工作物	電極の端面消耗	スリット幅	加工時間	平均電流
⊕ Cu-⊖ MO	3 mm / 0.1 mm		2.75 h	40 mA
⊖ Cu-⊕ MO	0.16 mm / 0.1 mm	60 μ	0.5 h	40 mA

Table-2

(2)式から、加工拡大率を小さくする方法として、 $K_{\delta 0}$ 、 Z_{on} 、 I_p 、それぞれを変化させることにより、加工拡大率の制御はできるが、 $K_{\delta 0}$ は材質によって決定され、 Z_{on} は、 V_i 電源の機能上、制御は技術的に困難である。

このことから、 I_p の制御をおこなった、Fig-5のように、 V_i 電源と工作物・電極間に、抵抗(R)とインダクタンス(L)を入れた。

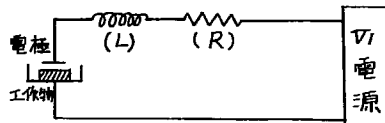


Fig-5

抵抗とインダクタンスも回路に使用するにあたって、 I_p 、 Z_{on} のタップもそれぞれ、最小にし、その時の抵抗と Z_{on} が Table-3 に示す関係においては、電極と工作物の間で短絡が生じた時に、加工電極送り速度が停止する直前の条件とした。

Table-3 は、次の条件によるものである。

- I_p : 2.2 A (パルス幅微調整用ボリウム最小)
- Z_{on} : 2 μ S
- 抵抗 : 可変抵抗器 (0~2k Ω 、インダクタンス測定用)
- インダクタンス : 1044 μ H

Z_{OFF} (MS)	抵抗 (Ω)	短絡時 電圧 (V)	短絡時 平均電流 (mA)	短絡時 I_p (mA)
6	200	50	250	650
10	360	50	150	520
15	500	50	100	520
20	800	50	70	520
25	1000	50	60	440
30	1500	50	45	440

Table-3

以上のように、抵抗 200 Ω ~ 1500 Ω の範囲では、0.65 ~ 0.44 と I_p も絞ることかてきた。

6 電極送り機構

放電加工中に、安定な放電の繰返しが出来なくなり、極めて不安定な放電現象をおこす事があるが、それは短絡現象による場合が多い。

短絡現象は、次のような場合におこる。

- (1) 放電により生成された加工屑、加工液の熱分解によるガス、ターブルで満たされる。
- (2) 放電の際に生ずる噴山。
- (3) 電極と工作物の直接接触。

等が主な原因である。このような場合は放電しないか、あるいは加工効率が低下するからである。

放電間隔が、最適であれば定められた一定量のエネルギーが、放電で消費される。しかし不適当な狭い間隙となれば、放電間隙で消費されるエネルギーは、少なくなつて加工効率は低下する。

良好な加工を維持するには、常に放電する上で算術的に放電間隙も一定に保つように電極を維持し、しかも電極、及び工作物の消耗にしたがつて電極を工作物に接触させないように、送る必要がある。

電極間のような微小間隙を、常に、消耗に比例して送り、常に、一定に保つことは現在の、サーボ機構では、不可能であり、 V 電源は短絡現象が発生した時に、電極を上昇させ、正常な放電間隙になるまで下降させる、制御を行なっている。

DP40 加工機の電極送りは、油圧リンガーで制御されているため、正常放電間隙に対し、泥管戻水等から多少の過・干足が生ずることがある。

本機の送り速度は、上昇 0.83 ~ 2.5 mm/s、下降 0.1 ~ 4 mm/s であるが、

気温の高・低温により、油圧の粘性が変り、送り速度も多少変化する。

<u>機械精度</u>	ラムの上下運動真直度	0.01/250 cm
	ラムの位置と作業台精度	気温の変化で ±5μm 程度の 偏差が生ずる事がある。

7 加工液

放電加工中は、石油等の加工液を使用するが、その役割は、次のようである。

(1) 放電柱に対しての冷却作用。

これにより放電柱が絞られ、放電点の電流密度を上げる作用をする。その結果、放電点の金属を飛散させ、また、酸化した金属蒸気を飛散させる。

(2) 加工屑に対しての冷却作用。

放電後に、放電点より飛散された加工屑を冷却して、すみやかに固体とし、電極部への付着を防ぎ、かつ加工屑の移動を容易にして、放電点の移動の繰返しをうながす働きがある。

(3) 加工液の放電残留物に対する冷却作用。

放電間隙の電気絶縁の回復を早める作用(消イオン効果)があり、これにより、放電の繰返し数を上げることが出来る。

電気的には絶縁耐力をほぼ一定にすることにより、放電開始間隙長さを一定にする。

(4) 加工液による加工屑等の輸送作用。

おちに、放電休止時間のおいだに、加工液は、その流速によって分解ガス、加工屑、タール、などを放電間隙外排出し、放電の繰返しの持系統に寄与する働きである。

使用した加工液

放電加工油	スーパーJEOイル
粘 度	1.702 CST (40°C)
発 火 点	75°C

加工液の流速方

電極の材質が銅、厚さが30μmと非常に薄く、軟い材質であるから、加工液の流速によっては、電極の曲げ、又は振動を早えること、等により電極と工作物の接触をきれく場合も生ずるので、特に注意した。

具体的には、噴流ノズルから電極に直接噴射する事を避け、加工面に軽く流れる程度の流量を選んだ。

8 電極ホルダー

電極として使用した材料は、Cu-MO-Fe 等であるが、厚さが30μmであり、特にCuの場合は軟質であることから、ホルダー Fig-6 のA-A面が電極に影響し、曲り等の原因となる。

それらを防ぐ為、ホルダー一面をラッピング仕上（酸化アルミナ^{*}2000）として、平面度0.1μm程度、面粗0.1μm以下に作り電極をホールドした。

材料は比抵抗μΩ·cm (Cu 1.67, Fe 9.71, Cr 12.9) の少ない銅を選んだ。

形状を Fig-6 に示す。

電極取付時の真直性、及び取付の再現性を求める為、A//B, B⊥C 等に充分注意を払い製作した。

9 工作物固定具

工作物は、0.1^tmm X 10mm X 25mm であるが、注意点としては、固定具に取り付けた時、MO板が重まないこと、又取付時に再現性があること等を考慮し、形状は Fig-7 のようにした。

AB面は、各加工点の基準面として使用できるように、平面度、直角度、等に充分注意した。

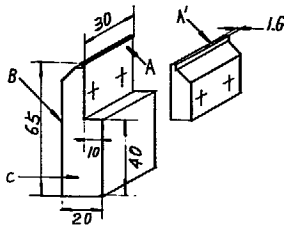


Fig-6

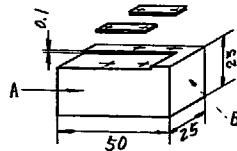


Fig-7

10 工作物の材質

前述のように硬度、及び取扱等を考慮し、MOを使用した。

一般的性質は Table-4 のようである

融点[°C]	2622±10	熱伝導度[cal/cm ² /°C/sec]	0.38
沸点[°C]	4800	熱膨張係数	4.9×10 ⁻⁶
密度[g/cc]	10.2	引張強さ[kg/mm ²]	52
結晶形	体心立方	伸び[%]	55

Table-4

(9)

MO板は、ロール時の残留歪があり、放電加工後に、形状が大きく歪を生ずる。したがって焼なましが必要である。

また、MOの再結晶温度は、 1200°C であり、容易に 1000°C 以上加熱すると結晶が粗大となり極めて脆くなる。

真空、 980°C で焼なましをすると、MO板の製造上の問題であるラミネーション(層状割れ)を防ぐ特性があるところから、今回の歪りは次の要領で行なった。

略図 Fig-8 に示すような、コイル状に巻いたニオブに、AC 12V を印加して、熱源とし、プレステンパーを行なった。

5×10^{-5} Torr の真空中における放射熱を利用したものである。

温度測定は、熱電対(アルメル-クロメル)を利用し、 $980^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ でおこなった。

焼鈍した材料は、放電加工もおこなっても、ラミネーションがなく、したがって、放電加工時間を短縮することができた。

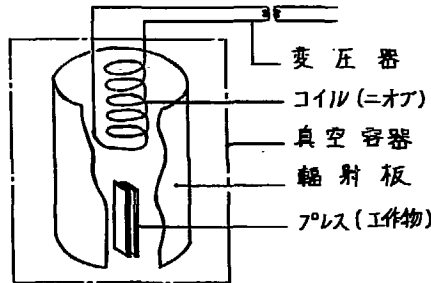


Fig-8

// 電極材料極性について

電極材料は、機械加工における切削工具と同様に、放電加工ではきわめて重要な部分である。

加工する工具電極と加工される工作物電極とが誘電体液中において、数 μm から数 $10\mu\text{m}$ のきわめて狭い間隙でエネルギー密度の高い放電が、極短い時間のあいだ加わる。そして、この放電が反復されることにより工具電極と工作物電極とは、ほぼ同じような物理的条件におかれる。ただし、工具電極と工作物電極とのあいだの大きな違いは、電気的極性が異なることと、材質が異なることである。

電極間に電圧を印加して一定以上の高い電位傾度になれば、陰極より電子が放出されて電流のキャリアのもととなる。そしてこの電子が電極間に介在する原子に衝突し、多数の電流キャリアを作って陽極に到達することにより主放電が開始され、設定したエネルギーを放出して放電が完了するわけである。

一般に、電極材料として用いられるものは、グラファイト・銅、及び銅合金などであり、また、焼結体として、タングステン、銅、銀のおのおのとグラファイト、あるいはタングステンとの混合焼結体、さらに亜鉛系の低溶融合金などが採用されている。

その他、アルミニウム、銅カーボン、鉄(同材質による加工)類も利用される。

今回のモリブデン加工用電極材料を加エテックより、入手しやすさ、消耗が少ない、加工速度が早い、等のことからCuを用いた。

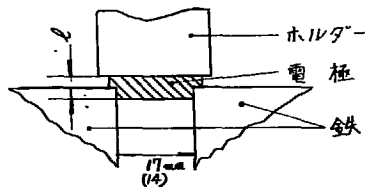
12 電極の製作

スリット幅の寸法が40μmという製作内容から、圧延ロールを用いて厚さ30μm±2μmの平行リボンをきざり用いた。

幅14.及び17mmに切断する場合、取扱いが困難であり、又機械的切断は新たな加工歪を生ずることから、Fig-9のように所定の寸法より大きめの電極から、放電加工の逆極性を利用して所定寸法に仕上げた。

電極の長さは、加工液の流速の影響を受けやすく、振動を防ぐ為に変更の結果から1.0mmとした。

電極の先端については、加工形状、平均電流密度、等の関係で、加工速度、等に影響するため、側面と同様に逆極性を利用して端面仕上げをした。



13 位置出し方法

Fig-9

(1) DP40加工機には、リセット放電による位置出しが可能である。

精度は、10μmであるが習熟度により5μmまで充分可能であり、繰返し精度は、エンコーダの読み取りで5μmの精度で加工する事が出来た。

(2) 電極の取付状況の観察は、KONICA・EDSCOPEを利用し、電極の加工機取付精度を調べた。

(3) 電極ホルダーに固定された状態については、万能測定器を用い、電極を取付た時の垂直精度を調べた。測定精度は±1μmである。

14 製品を加工した時のデータ(3型)

加工材料 モリブデン板(焼鈍)
厚さ (0.1mm)

加工順序

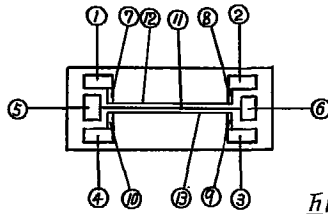


Fig-10

先ず、製品を加工するにあたり、Fig-10の通りに、ブロックに分けて、それぞれ電極を作り、①～⑩番の順序で加工した。

①～⑩番までの加工条件、及び面あさり、加工拡大倍、電極消耗は、V_r電源で充分加工できるので説明は、Table-7に止め、⑪～⑬番のスリット部の加工については、Table-8で述べる。

⑪～⑬番の加工条件 抵抗値：800Ω
インダクタンス：1044μH
極性：正極性

番号	V _r 電源(9V7)	平均加工電流(mA)	平均加工時間(min)	その他
①～⑥番	1 / 1 / 2	500	2	V _r 9V7-6用
⑦～⑩番	1 / 1 / 5	90	20	

Table-7

番号	電極寸法 No. X M.M.	V _r 電源(9V7)	平均加工電流(mA)	加工時間 (min)	スリット幅 (μm)
⑪	30 X 17	1 / 1 / 5	40	14	32
⑫	30 X 14	1 / 1 / 5	40	12	34
⑬	30 X 14	1 / 1 / 5	40	13	35
⑪	30 X 17	1 / 1 / 5	40	17	33
⑫	30 X 14	1 / 1 / 5	40	13	35
⑬	30 X 14	1 / 1 / 5	40	10	35

Table-8

15 加工拡大代

放電加工は、電極の転写であるので、同一電極を用い同じ条件で加工した場合には、同じ精度の加工がおこなわれるべきであるが、顕微鏡観察によると必ずしも、同一精度に加工ができない場合がある。

加工拡大代は、放電開始間隙と放電の際に工作物の溶融蒸発部が機械的圧力により飛散して拡大される間隙との総量である。

加工拡大代と加工深さとの関係を差ると、側面加工拡大代は、加工の進行にしたがって放電間隙から排出される加工屑を介しての放電によって拡大される。

また、放電が極度に不安定で電極の昇降の頻度のはげしい場合は、加工拡大代はさらに大きくなる。

これは機械的な要因によるもので、機械案内面の間隙・電極・取付具の振動によるもののほか、電極の機械的強度が小さいと加工液圧等により、電極の振動、或は、一方に寄せられて、加工拡大代が大きくなる。筈の電極に与える影響はあるが、加工液の流速を大きくすると、加工液に含まれる加工屑濃度は低下するため、二次放電の単位時間発生量が少なくなり、加工拡大代は小さくなる。これらの事が影響しているためである。

16 加工速度

加工速度を早める手段としては、放電繰返し数を増加することが考えられる。

それにはまず安定したサーボを得ることが重要である。これは、放電加工機の機械的設計、及び電気的設計に帰因するものである。

さらに加工により生成した加工屑、タールを電極と工作物の間隙から排出するための加工排出機構が必要である。それには加工深さ、電極形状などにより、加工屑の排出状態も変化させる必要がある。

放電繰返しに影響する要因として、 $ZORN$ があり、 $ZORN$ を少なくし、放電繰返し数を上げることにより、加工速度を上げることが可能である。しかし、上げ過ぎると消休時間の問題のほか加工屑、タール、ガスなどの量が多くなり、アーク放電に移行しやすくなるので充分注意しなければならない。

同じ加工条件・電極でも、加工時間のバラツキが生じているか、それらは、加工屑等排出の不安定及び電極取付精度(曲り・傾き)、また電極を1~2回スリット加工して使用する、サーボゲイン上下微調整、冬期・夏期の気温変化による加工電極送り速度の影響を受ける事、筈が見られた。

17 電極消耗

$$Y_0 = \frac{e_0}{w_0} = \frac{K_{e0} \cdot Z_{0q} \cdot I_p}{K_{w0} \cdot Z_{0m} \cdot I_p}$$

e_0 : 理論的推定による単一パルス放電の電極消耗量

w_0 : 理論的推定による単一パルス加工量

$K_{e0} \cdot K_{w0}$: 定数

電極消耗比は、電気条件の影響を受けない、このことは、電極材料とか、電極間隙、長さとかの物理的要素によって電極消耗比が定まることを意味する。

すなわち電極消耗比は、基本的に電極材料の組合せでおのずから決まってくる。熱伝導率・固有抵抗・融点・粘性などの物理定数により定まる部分と、放電繰返しLの値を变化する要素とか組み合わせさせて、この消耗比率を形成しているものと考えられる。

しかし、電極の消耗量は、特定の加工条件のもとでは、消耗量が極端に少なくなる現象がある。

この現象を利用した加工を一般に低消耗加工と云ひ、電極消耗比は1%以下になる。

特定の加工条件とは、まず電極材料には、銅-グラフイトを用い、電気的な条件としては、電極を陰極として、パルス幅(Z_{0m})が広く、かつピーク電流(I_p)の低い領域である。

スリットを加工した時の電極の消耗量は、電極をはずして測定する事は位置出し精度上の問題から不可能である。

消耗量の少ない極性は、実験の結果からも正極性である事がわかった。また、逆極性の消耗量の比較は、70倍であった。

今回の加工条件では、低消耗加工領域での加工は出来なかった。また、加工条件を一定にして加工した場合でも、 $35\mu\text{m}/0.1\text{mm} \sim 20\mu\text{m}/0.1\text{mm}$ の範囲で消耗量が違って、一定にする事が出来なかった。

原因として、特に感じた事は、加工中の平均電流が変動するためであると思う。

18 面あうさ

Fig-11の火花放電現象によって繰返して放電された場合、放電点の蒸発飛散したものと、溶融飛散により、加工屑として生成された重量の1分間の量の集積が放電加工量(g/mm)であり、噴山と噴口深さの差が放電加工における面あうさ(μR_{max})となる。

また、加工面は、溶融屑が表面をおおっている状態なので、脆性材料のような場合は、加工条件を硬定しないとクラックの発生をおこすので注意しなければならぬ。

実際の連続した放電による加工面は、単発放電の放電痕の深さよりも小さく、放電

の重なりを幾何学的に検討すると、連続放電の放電痕の深さRとはつぎのような関係がある。

$$H > R > H/3$$

Rの高さを測定したものを面あうさとし、一般に μR_{max} であらわす。

Fig-12は放電痕の重なり状態と面あうさとの関係を示したモデルである。

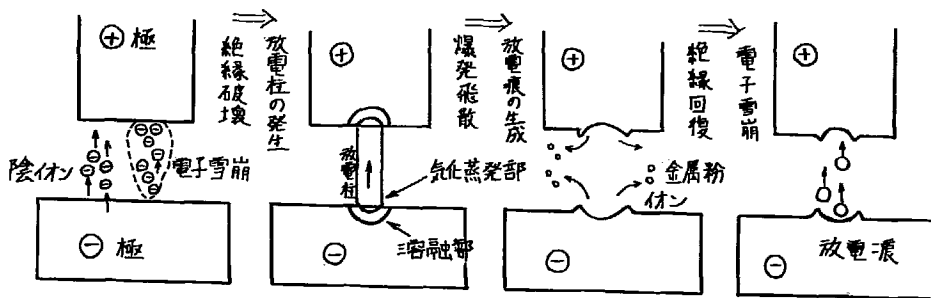


Fig-11



Fig-12

19 インダクタンス(L)の効果についての実験

今回のスリット加工を行うについて、RC回路の放電回路に適当な値のインダクタンスを挿入することによって、クレータを小さく、消耗を少なくし、しかも安定した頻度の高いパルス放電による加工ができるという実験報告を応用して、Tr回路に1044μHを入れて加工を試みたが、ここにその効果を報告する。

○ Lの種類と値

今回、使用したインダクタンスの種類は、最大値102.2mH～最小値483μHまで90種類製作した。

設計内容は、φ0.5mmのエナメル線を、39層にアクリルコイルポピンに巻いて、アライグイトでコイルを保持した筒状のものであり、Fig-13のようである。

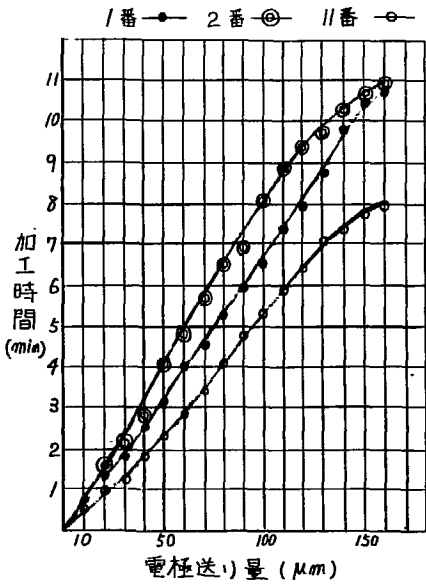


Fig-14

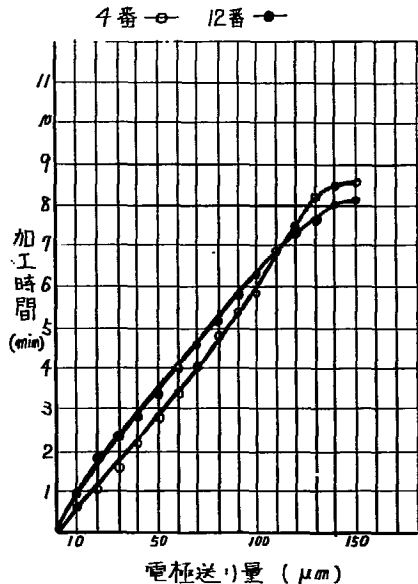


Fig-15

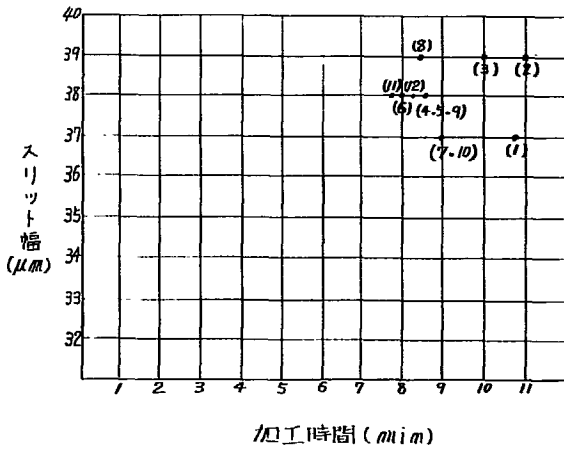


Fig-16

実験内容は、加工条件を一定、又電極は同一電極とし、インダクタンス値を変えた時の加工時間、スリット幅の相関を調べたものである。

加工時間を測定する時は、同時に電極送り深さも測定した。

ここに、実験に使用したインダクタンス値と抵抗値を挙げると Table-9 のようである。

加工条件 T_{on} : $2\mu s$ 抵抗値 : 800Ω
 T_{off} : $20\mu s$ 極性 : 正極性
 I_p : $2.2A$
 電極 : 銅 $32\mu m \times 14mm$
 工作物 : モリブデン $0.1mm$

順序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L 値	0	1044 μH	1044 μH	8.06 mH	1044 μH	329 mH	1044 μH	504 mH	1044 μH	594 mH	1044 μH	1022 mH
R 値	0	22 Ω		63 Ω		11.5 Ω		16.6 Ω		18.2 Ω		260 Ω

Table-9

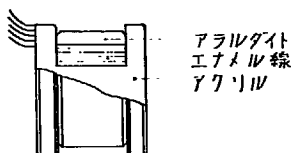


Fig-13

加工結果

実験は、Table-9の順序で試みた。

インダクタンス値0と1044 μH の、加工時間・電極送り量は、Fig-14の結果となり、3・5・7番は、2番と11番の範囲に含まれている。

インダクタンス値を大きくした場合でも、Fig-15の結果となり、変化のないことが解る。

又、6・8・10番は4番と12番の範囲に含まれている。

インダクタンス値に対する、スリット幅と加工時間の関係は、Fig-16の結果となり、時間約は3分、スリット幅は約2 μm の範囲におさまっている。

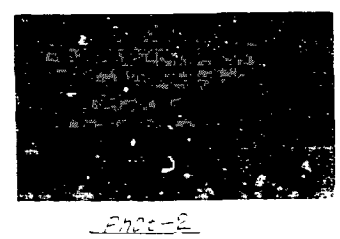
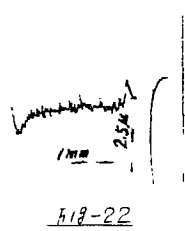
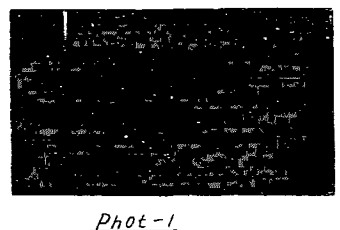
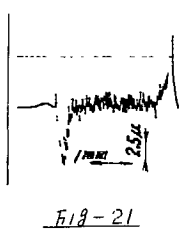
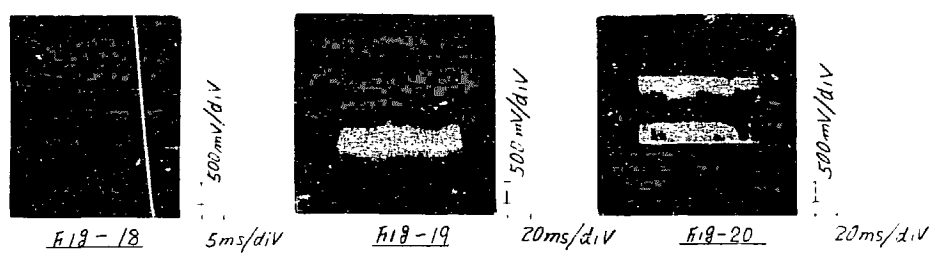
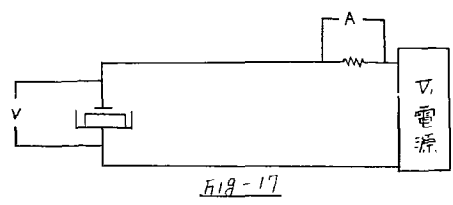
Lの効果については、Lの値による変化はほとんどない事がわかった。

これは、DP40加工機本体が大きく、その金属によって、コンデンサーを形成し、その影響を強く受けているためと思はれる。

V_i電源による面あらし 放電波型

加工条件 t_{on} : 2 μ s 工作物 : モリブデン
 t_{off} : 80 μ s 電極 : 銅
 I_p : 2.2 A

放電波型の測定は Fig-17 のような位置に測定器(シンクロスコープ)を取付た。
 気中放電電流 (Fig-18)・液中放電電流(放電電流 Fig-19)を測定する場合は
 抵抗(240 Ω)の両端をそれぞれ測定した。Fig-20は 極間の電圧波型である。
 面あらしについては 正極性で Fig-21・Phot-1 となり 逆極性は Fig-22 Phot
 -2 のようであった。



V電源に抵抗とインダクタンスを加えた場合の面あうさ 放電波型

加工条件	$T_{om} : 2 \mu s$	抵抗値 :	800Ω
	$T_{off} : 20 \mu s$	インダクタンス :	$10.34 \mu H$
	$I_p : 22 A$	工作物 :	モリブデン
		電極 :	銅

放電波型の測定は Fig-23のような位置に測定器を取り付けた。

ショート電流 (Fig-24) 放電電流 (Fig-25) を測定する場合は 抵抗 ($240 m\Omega$) の両端をそれぞれ測定した。Fig-26は 極間の電圧波型である

面あうさについては 正極性で Fig-27 Phot-3となり 逆極性は Fig-28 Phot-4のようであった。

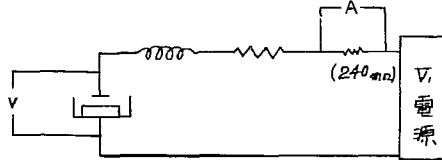


Fig-23



Fig-24

200mV/div
5ms/div

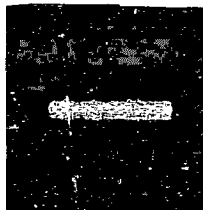


Fig-25

500mV/div
20ms/div

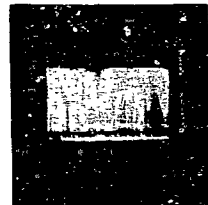


Fig-26

500mV/div
20ms/div

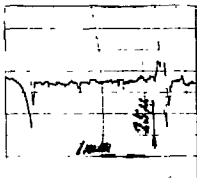


Fig-27

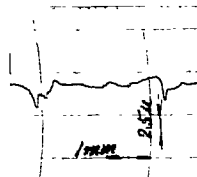
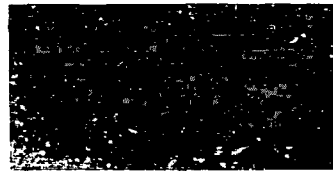


Fig-28



Phot-3

x400



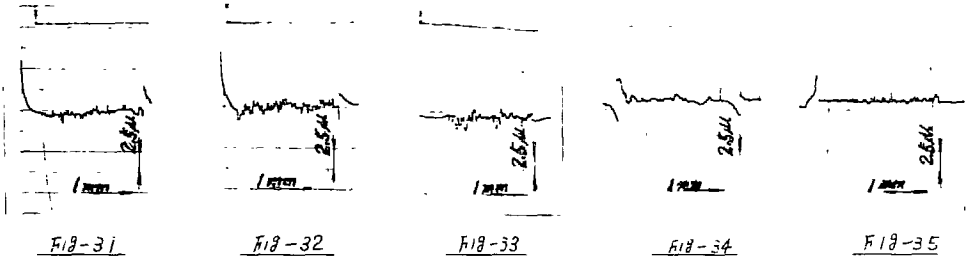
Phot-4

x400

電極材料の違いによる面あうさ

加工条件	Zon : 2 μ s	抵抗値 : 800 Ω
	Zoff : 20 μ s	1:777.2 : 1044 μ m
	IP : 22 A	工作物 : モリブデン
		極性 : 正極性

電極材料を 銅 銀 モリブデン タンタル 鉄まで 5種類の 面あうさは 銅(Fig-31) 銀(Fig-32)・モリブデン(Fig-33)・タンタル(Fig-34)・鉄(Fig-35)のようになっていた。



20 製品



10 mm



10 mm



10 mm

結言

微細加工を放電加工法によって加工した技術報告は数多く出版されているが、それらの論文は微細加工に適した型式の放電加工機を使用した場合のことが多い。

今回我々が使用した放電加工機は中型加工機であり必ずしも微細加工に適した機種ではない、この事から特に放電条件の設定に実験を積み重ねた。その実験過程で抵抗、インダクタンス等を試作し微細加工に適した機能を作ることができた。

又微細加工には電極の製作に高度の技術が要求される。それは電極の材質、熱処理加工及び取付等に細心の注意を払ながら試作を進めなければならぬ。我々はその結果一応初期の目的を達することができた。

本試作を進めるにあたり東北大学科学計測研究所 楯垣、大石両先生及び当研究所の石丸助教の御指導と御協力をいただいた事に感謝の意を表します。

参考資料

- 1) 放電微細加工 東京大学生産技術研究所 増沢隆久
第34回精密工作講習会
- 2) E.D.Mによる微細スリットの製作 東北大学、科学計測研究所報告 25(1976)
- 3) 放電加工の基礎 井上潔