

平成 14 年度

高知工科大学 工学部 知能機械システム工学科

卒業論文

---

単結晶ダイヤモンドの微細放電加工  
- 加工条件 -

---

学籍番号：1030148

氏 名：藤村 秀樹

指導教員：河田 耕一

## - 目次 -

第1章	緒言	
1.1	マイクロマシンの現状	2
1.2	マイクロマシン加工の現状	2
1.3	放電加工加工の現状	3
1.4	微細放電加工の現状	4
1.5	ダイヤモンドの特性	5
1.6	ダイヤモンドのマイクロマシンへの適用	5
1.7	従来の研究成果	5
1.8	本研究の内容と目的	6
第2章	実験装置・実験方法	
2.1	微細放電加工機	7
2.2	電極成型	10
2.3	実験条件	11
2.4	実験材料	11
2.5	測定方法	11
第3章	加工条件の検討	
3.1	単結晶ダイヤモンドの加工機構	12
3.2	電極材料の検討	14
3.3	加工液中に導電性粉末の混入	24
3.4	逆極性での加工	28
3.5	導電性膜の検討	29
第4章	結言	36
	謝辞	
	参考文献	

## 第1章

### 1.1 マイクロマシンの現状

マイクロマシンテクノロジー、超微細精密技術は今後必要不可欠な技術として注目されている。超微細精密な機構を持ったデバイスの作成が可能になることにより、医療分野、情報通信機器分野、自動車分野、メンテナンス分野、環境分野、航空宇宙分野など様々な分野での需要が考えられる<sup>1)</sup>。現在マイクロマシン技術は開発の初期段階にある。マイクロ世界では各種のスケール効果の影響が無視できない場合が多くある。熱、流体、摩擦、吸着などの表面効果、材料物性、運動制御などについて、機械要素のマイクロ化に起因する特性変化が顕著になってくる。現在これらの具体的な検討はされていないが、マイクロマシンの実用化には不可欠な分野であるため、今後あらゆる各基礎分野からのアプローチが必要になってくる。マイクロマシンと一言でいってもそのサイズは  $10^{-2} \sim 10^{-9} \text{m}$  の広範囲に涉ため、実際には大きさの程度により動作原理も研究の実現の方法も異なってくる。

例えば 1mm 以上の大きさの領域は従来形の精密加工技術の延長でも最も実現可能に近い第 1 世代 MEMS (Micro Electro Mechanical System) であり、1mm ~ 数  $\mu\text{m}$  の領域は半導体技術の活躍の場であり、微小化の特徴が強く現れた原理・構造を持つ第 2 世代 MEMS、最後に数  $\mu\text{m}$  以下のバクテリア大の機械の領域は生物の機構の研究成果に負い、製造方法も分子から構成される第 3 世代 MEMS という 3 つの領域<sup>2)</sup> が考えられる。マイクロマシンとしては上述のような特別な制限はなく、数 mm 以下のどのような機械でも開発研究の対象とされている。

マイクロマシンが活躍する分野の一つとして医療分野での場合を挙げる。現在の医療現場では、体を傷つけることの少ない低侵襲診断・手術が求められている。したがって、内視鏡のように外科的手術から内科手術へと体内での手術に転換され、医療機器と医療技術は飛躍的に進歩している。現代の最先端では、マイクロカテーテル<sup>3)</sup> と呼ばれる血管内を移動し患部を検知、治療するデバイスなどのマイクロマシンが研究開発されていて、今後更なる発展が期待できる。

### 1.2 マイクロマシン加工の現状

現在の精密加工は広く分けて 2 つに分類できる。1 つは半導体技術を利用した精密加工で、もう 1 つは従来の機械加工技術のマイクロ化である。半導体技術はエッチングや LIGA プロセスなどがあり、現在のマイクロマシンの多くは、この半導体技術を使用しているのが現実である。フォトファブ리케이션によるプリアセンブリは工学的に複雑なシステムを可能にする有力な手段で、微細で複雑な平面構造を現実できる。この場合にフォトレジストに開けた窓から下の基盤をエッチング (リングラフィ) する除去加工だけでなく、窓の部分に金属を電解めっきする付着加工なども行われる。シンクロトロンからの放射光 (X 線) で厚いフォトレジストにパターンを転写することによって深い加工もすることができる。レジストの凹部分に金属めっきすることで、アスペクト比の大きな形状を作り、これにプラスチックを射出成形することも行われている。しかしながら、この方法は、2 次元形状の微細加工は可能である反面、アスペクト比の大きい 3 次元形状の創成は困難であり、非加材が一般にシリコンに限られる。一方、従来の加工技術はレーザ加工や放電加工がある。これは半導体技術に比べ加工精度が劣るところが見受けられる。しかし、放電加工には 3 次元形状の微細パーツ加工する可能性がある。

### 1.3 放電加工の現状

放電加工は金型の加工を主目的として広く用いられているが、大別すれば次の2つの種類になる<sup>2)</sup>。

ワイヤカット放電加工

形彫り放電加工

ワイヤカット放電加工

ワイヤカット放電加工は電極として走行ワイヤ黄銅、銅、タングステン、モリブデンなどの細いワイヤ(0.2~0.35)を用い、糸のこ状に被加工物を切り抜いていくもので、ワイヤが細ければかなり微細な加工も可能である。また、ワイヤが連続して繰り出されるため、電極の消耗の影響がなく加工精度も高いが、ワイヤ方向に形状の変化しているものは加工できない。加工液としては比抵抗を管理した水を用いるため火災の心配が無く無人化運転が可能であるなどの利点がある。

形彫り放電加工

型彫り放電加工は総型電極を使つての型彫り(転写)が最初に開発、実用化(1948年)され、これを放電加工機と呼称されていた。その後、NC機能をもつた型彫り放電加工機が出現し、必ずしも総型電極での加工のみでなく、エンドミル加工のように、単純形状電極での複雑三次元形状の加工(創成加工、輪郭加工)や、揺動機構(装置)の開発によるテーパ加工、ヘリカル加工、ねじ加工、球面加工などが可能となりはじめ、その利用、応用分野は拡大されている。また、三次元形状を加工することは出来るが、加工形状の大きさ、精度は用意できる電極製作如何に関わってくる。放電加工においては、機械加工におけるバイトや砥石に相当するものが、工具電極または加工電極であるが、通常、これを電極と言ひ、加工素材である工作物と対極して使用する。電極は固定されているので、その消耗は加工精度に影響する。

電源、加工回路では極間において繰り返し放電と、これに伴う放電現象を発生させるために、放電エネルギーを断続的に極間に供給しなければならない。放電加工で一般的に使用されるエネルギー供給方式には大きく分けて蓄勢式と非蓄勢式とがある。優れた半導体素子が登場するにつれて、順次トランジスタによる非蓄製方式加工回路が大半を占めるようになってきたが、きわめて短いパルス幅で、比較的放電電流ピーク値の大きいパルスを得ることが必要な微細加工の分野ではトランジスタにスイッチング特性などの関係もあり、現在でもコンデンサ加工回路が使用されている。

加工電源として $10^{-7} \sim 10^{-3}$ sのオーダーのパルス電圧を供給するものを用いるため、アーク放電は短時間に消滅する。パワー密度がごく限られた面積に集中するため、放電の起こった部分が融解あるいは蒸発して微小なくぼみ(クレータ)を生じる。この過程を繰り返すことでより多数の放電を起こせば、電極の端面の形に対応したクレータが被加工物部分に生じ、さらに電極を送り込んでいくと電極形状が被加工物に転写される。これと似た現象は電極側にも生じて電極消耗が起こるが、加工条件の選択により、被加工物の除去量より電極消耗の方を十分小さくすることができる。

電極が陰極に、工作物が陽極に接続された状態で加工を行う場合を正極性または正極性加工、逆に、電極が陽極に工作物が陰極に接続された場合を逆極性または逆極性加工と呼称されている。

実際の加工において、電源及び加工回路、電極と工作物の材質の組み合わせ、放電エネルギーの供給形態などによって、加工特性(加工速度、電極消耗量、放電ギャップ、テーパ、加工面粗さ、加工広大代)の極性効果があるので、加工目的に適合する極性加工を選択する必要がある。

放電加工では、加工を安定に行うために加工ギャップ長を常に適正に制御する必要があり、そのためにいろいろな方法が実用されており、最近是最適加工状態に近づけるための適応制御方式が多く用いられてい

る。

型彫り放電加工での電極の役割はきわめて重要であるが、特に総型電極利用の場合は電極の材質的選定、設計、製作の点に不具合があれば、加工の目的達成は不可能になる。

電極材料としては、放電加工特性が良好であること、電極製作上での加工性が良いことが必要であり、沸点、融点が高く、熱伝導が良好で電気抵抗が低く、機械的強度が大きく、安価であるものが適合材料となる。電極の材質としては、銅あるいはグラファイトがもっとも多く用いられている。超鋼合金の加工や加工物形状を反転したものをを用いるのが一般的であるが、最近では、エンドミル加工のように、単純な形状の電極を揺動させて形状を創成していく揺動加工法も広く用いられている。

加工液は、絶縁、消イオン、冷却特性、加工屑の排除など加工の促進に大きな影響を持つのでその役割は無視できない。放電エネルギーの利用効率からみると、放電が発生する電極間隙は小さいほうが極間でのエネルギー損失は小さくなる。そこで絶縁耐力の大きい液を用いれば、この要求を満たすことになる。

加工液中に飛散されて混在する加工屑の排除も考慮し、油の中でも比較的サラサラした灯油が加工液としては好都合になる。通常灯油をベースとして、引火点をあげたり、臭気やかぶれの防止、酸化防止のなどのために種々の添加物を混入した物が加工液として用いられている。

加工液は高温状態になった加工部の冷却、溶解状態で飛散されて材料を冷却し、微細な固体粒子にし加工部からの除去、排出を容易にするとともに、放電柱を冷却することにより、加工部へのエネルギー供給密度を高くし、加工能率を高めることに役立つ。この効果は冷却性の大きい液ほど高く、水加工液の場合は通常の放電加工油と比較して電流密度が1.5倍になるといわれている。

加工速度は、パルス電流値が大きいほど、またパルス幅が長いほど速くなり0.01~50 g/min程度が通常であるが、加工液に導体粉を混入することによって100~200 g/minという値が得られている。加工面は通常方向性の梨地面となるが加工条件によっては1 μm以下の仕上げ面粗さ、及び鏡面が得られる。寸法精度は普通 $\pm 10 \sim 20 \mu\text{m}$ 、高精度の場合 $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内となる。

放電加工は、1回の放電(単発放電)における除去現象の繰り返し、すなわち累積であり、単発放電の除去結果が加工特性のベースとなる。単位時間当たりの加工量が加工速度であり、加工除去重量(g)で表示するほかに、体積( $\text{mm}^3$ )や面積( $\text{mm}^2$ )で表示する場合もあるが、型彫り放電加工では、重量加工速度(g/min)で表示するが多い。

また、加工速度に対して電極消耗速度(g/min)が問題になるが、両者の比(電極消耗速度/加工速度 $\cdot 100$ )が電極消耗率(%)であり、この値が小さいほど良好な加工ということになる<sup>4)5)</sup>。

#### 1.4 微細放電加工の現状

近年、情報端末などの電子機器の小型化、高性能化に伴い、マイクロ部品を製作する技術は日々進歩し、要求される精度もより厳しいものになっている。現在、マイクロ部品の微細加工技術、製作には半導体プロセス技術が応用されている。これは、高精度な形状を作るとともにデバイスとしての機能を付加することができ、かつ大量に製作することができるためである。

3次元形状加工を実現するためのキーテクノロジーである微細穴加工技術は、インクジェットプリンタノズル、光通信部品、マイクロコネクタ、流用制御オリフィス、ワイヤードットプリンターのガイド穴成型加工、X線測定用ピンホール、電子顕微鏡電子銃アパーチャー、機械的センサ可動部加工などへ広く応用され、より高精度、高品質が求められている。

放電加工は、放電エネルギーを微小にすることにより、微細形状を高い寸法精度で加工することが可能で微細加工に適した特徴を有している。また、工具と工作物が非接触であることから被加工材に作用する加工力が非常に小さいため、微細な工具、工作物を変形させることができない。また、導電体または半導体ならば、硬度に関係なく加工できるので、従来の機械的加工法では加工困難な材料に対しても微細加工が可能である。

微細放電加工技術は、インクジェットプリンタのノズル穴加工をはじめとして、主に微細穴加工法として用いられてきたが、近年急速にその応用分野が広がってきた。

複雑な3次元形状のマイクロマシンなどを実現する有効な加工法の一つとして微細放電加工が挙げられる。しかしながら、逆に欠点として絶縁体の材料は加工ができないという点と、条件にもよるが加工時間が長いという点、そして被加工材料である電極の消耗が大きいという点、加工精度の信頼性の不安という点などが挙げられる。

### 1.5 ダイヤモンドの特性

ダイヤモンドは地球上に存在する物質中で、硬さやヤング率が最も大きく、熱伝導率の最も高い物質である。また赤外から紫外までの広い範囲にわたって光を透過し、屈折率や反射率の大きい特徴がある。さらに科学的に安定で、耐磨耗性及耐溶着性に優れている。しかも不純物を添加することにより禁制帯幅の大きい半導体になる。

これらの種々の優れた特性を持ったダイヤモンドは、工業的に有益な材料で、超高压セルや測定用圧子、線引きダイス、耐磨部材、ガラス切り、メス、切削工具、砥粒などに使われている。

### 1.6 ダイヤモンドのマイクロマシンへの適用

医療分野で使用するマイクロマシンの材料として望まれることは、

生体に害を与えない材料

科学的に安定な材料

機械的強度が高い材料

高硬度で磨耗が少ない材料

高温で殺菌が可能な材料

であることが望まれる。これらの条件を満たす材料の一つとして、ダイヤモンドの使用が考えられる。ダイヤモンドは高硬度で科学的に非常に安定しており、高温にも耐えうるからである。したがって、過酷な使用状況でも長いライフラインを見越せる。

### 1.7 従来研究成果

従来ダイヤモンドの加工は研磨かレーザに限られ、微細で高精度な加工は困難であった。微細放電加工は精密な加工が可能である。しかし、ダイヤモンドは導電性を持たないため（絶縁体）精密な加工は難しいとされていた。ところが、焼結ダイヤモンドや表面に5 $\mu$ m程度のグラファイト層があるとされている単結晶ダイヤモンドのYAGレーザ切断面では加工が進行することがわかり、ラマン分光分析によっても放電プラズマによるグラファイトの生成が確認された<sup>6)7)</sup>。

## 1.8 本研究での内容と目的

ダイヤモンドをマイクロマシンの材料として使用するためには、3次元形状などを微細で精密に加工できなければならないが、表面に放電の開始となる導電層があれば、高温な放電プラズマにより次々とダイヤモンドがグラファイト化し微細放電加工が可能となり微細・精密な形状が成形できるということが従来の研究によりわかっているが、電極消耗、加工時間が大きい問題があるので加工条件の検討が望まれる。

本研究では、モリブデンメッシュ上に CVD ダイヤモンドを生成したものに加工を行いダイヤモンドの加工機構を調べ、加工条件に変化をつけ焼結ダイヤモンドに加工を行い良好な加工結果が得られるか検討し、単結晶ダイヤモンドの表面に導電層を設けたものに加工を試みた。

## 第2章 実験装置・実験方法

### 2.1 微細放電加工機

本研究において加工装置は松下電器製 MG-ED82W を使用した。装置の外観を図 2.1 に示す。加工回路は図 2.2 に示す RC 回路である。単発放電あたりのエネルギーを微小化し、かつ放電のくり返し周波数を高くすることができる。放電電圧は 1V 単位でデジタル設定ができる。設定できる範囲は 0 ~ ±110V で、極性は + が通常の穴加工、- が電極加工である。コンデンサ C は、コンデンサ切り替え回路に取り付けられた 4 個のコンデンサ ( 10pF, 100pF, 220pF, 3300pF ) をリレーによって切り替え選択ができる。RC 回路とした場合には、単発放電エネルギー E ( J ) は、絶縁破壊電圧が低い場合の近似として下式で与えられる

$$E=1/2 \cdot CV^2$$

ここで、C : コンデンサ容量、V : 極間の印加電圧

C あるいは V によって放電エネルギーは変化するが、電圧 V が高すぎると電極消耗が極端に大きくなり、逆に小さすぎると放電が不安定となるため範囲は限られる。また、放電電圧は放電を発生するために 40V 以上にする必要があり、一方最大でも 110V が設定範囲となっている。このため、主として容量 C によりエネルギーの調整を行う必要があるが、実際には図 2.3 に示すように、放電回路中のコンデンサ C 以外に各構成部品間に浮遊容量 C' <sub>1</sub>、C' <sub>2</sub>、C' <sub>3</sub>、C' <sub>4</sub> などが存在し、これらの合成容量を加えた ( C+C' ) が加工を行う上で実際の容量となる。微細加工領域では、使用するエネルギー E を 10<sup>-6</sup> ~ 10<sup>-7</sup> J 程度まで小さくする必要があり、容量は数 ~ 数 pF の範囲となる。したがって、浮遊容量をどれだけ低減できるかが放電エネルギーの微小限度を限定する。

本加工機では最良の加工条件では最小穴径 5 μm が可能であり表面粗さは Rmax0.1 μm の超微細放電加工ができる。また、導電性材料 ( 非抵抗値 1 cm ) 以下なら高度材質を選ばずに加工を行うことができ、高アスペクト比加工は 5 ~ 10 倍程度になる。



図 2.1 松下電器製 MG-ED82W

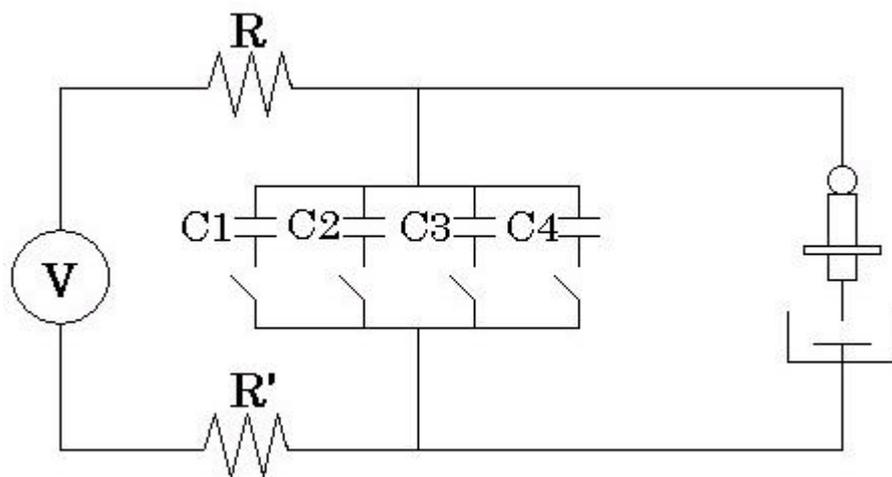


図 2.2 放電回路

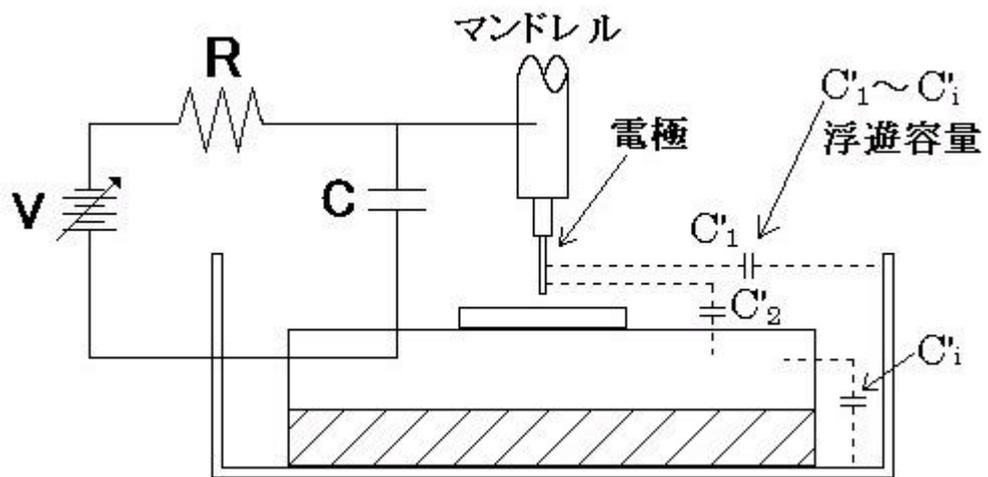


図 2.3 浮遊容量

## 2.2 電極成型

微細放電加工を行なうためには希望の寸法の電極となる軸の加工が必要になる。前述したように型彫り放電加工において加工形状の大きさや精度は用意できる電極の製作如何に決まってくる。そのためには電極の組み立ても重要になってくる。電極材料としては純タングステン線が用いられている。タングステンを挿入する穴と外周の同心度を正確に加工したセラミクス製ワイヤガイドをアライニングスリーブに介してマンドレルの先端に取り付ける。

微細軸加工を行なう方法の一つとして WEDG ( Wire Electro-Discharge Grinding ) がある。WEDG の原理を図 1.4 で示す。

WEDG は 2 次電極となるワイヤを被加工軸と対向して配置したワイヤガイド上に走行させ、被加工軸に回転と送り運動を与えつつ、ワイヤ、被加工軸間に放電を行なわせ、目的の形状、寸法に軸加工を行なうため、見かけ上電極消耗量を無視できる。したがって高精度の軸加工が可能である。

走行ワイヤ上に電極がくるように原点を設定し X 軸テーブルの動きによって軸径を定め Z 軸方向の動きによって軸方向の長さを定める。

WEDG による微細軸加工は自動的に進行するが、次の手順に従う。

最初に軸の端面加工を行なうと同時に、Z 軸の原点を設定して軸の長手方向の基準とする。引き続いて径方向の加工を行なうが、電極製作時間、仕上げ面荒さを向上させるためにまず、コンデンサ容量の高い領域で荒加工を行い、次にコンデンサ容量の低い領域で仕上げ加工を行なう。

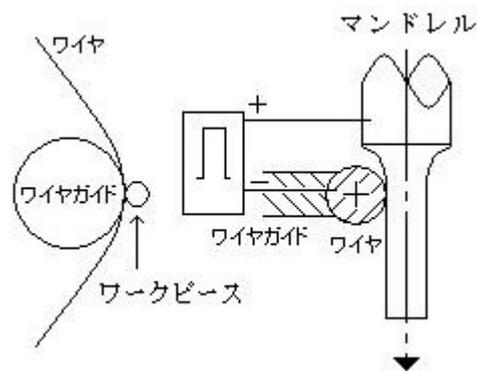


図 2.4 WEDG の原理図

### 2.3 実験条件

表 2.1 に実験条件を示す。

表 2.1 実験条件

加工機	松下電器製 MG-ED82W
加工液	三井スペースカット
放電回路	RC 回路(R=1k $\Omega$ )
加工電圧	100V
コンデンサ容量	10pF,100pF,220pF,3300pF
電極	純タングステン線
電極送り量	100 $\mu$ m
電極径	50 $\mu$ m

### 2.4 実験材料

- 1) 単結晶ダイヤモンド (約 0.5  $\mu$ m 厚さのチタンを蒸着、約 5  $\mu$ m 厚さのチタンをめっきした面)
- 2) 焼結ダイヤモンド (焼結助材 Co 含有量 10% 粒径 15  $\mu$ m)
- 3) モリブデンメッシュ (CVD ダイヤモンドを表面に生成したもの)
- 4) チタン粉末 (325 メッシュ以下)
- 5) モリブデン、チタン、鉄電極 (直径: 300  $\mu$ m)

### 2.5 測定方法

計測方法を下記に示す。

- 1) 加工時間 : 放電が開始されてから電極を目標量送った後に引き上げ開始を行うまでの時間をストップウォッチによって測定した。
- 2) 電極消耗長さ : 加工前の電極長と加工後の電極長を Lasertec 社製レーザ走査顕微鏡 1LM21W により測定した。
- 3) 放電ギャップ : WEDG によって 50  $\mu$ m に製作された加工前の電極径と電極入り口側の加工穴径をレーザ走査顕微鏡によって測定しその差より求めた。
- 4) 加工深さ : Lasertec 社製レーザ走査顕微鏡 1LM21W により加工深さを測定した。
- 5) SEM 画像 : 穴加工後の材料と使用した電極を philips 社製電子走査型顕微鏡(SEM)XL20 により撮影した。

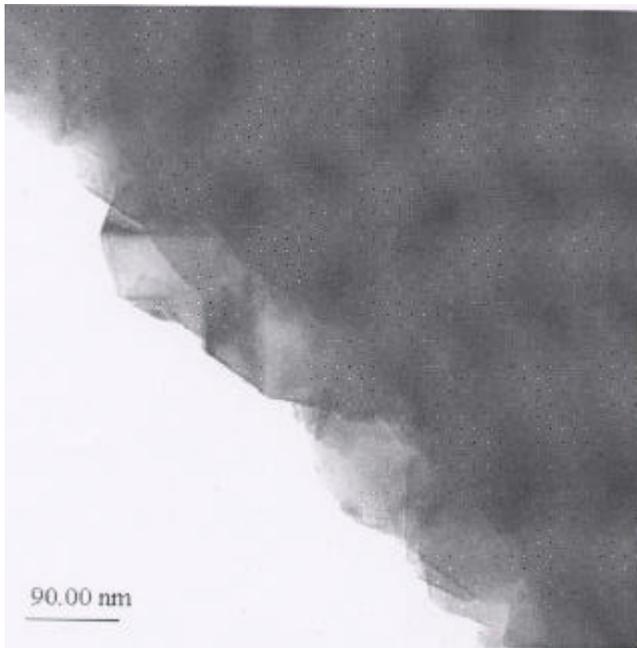
### 第3章 加工条件の検討

#### 3.1 ダイヤモンドの加工機構

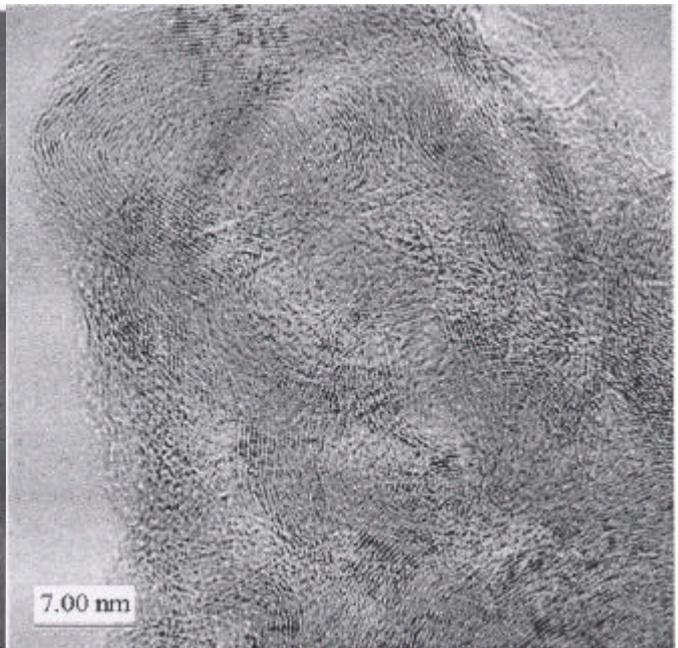
従来の研究により、単結晶ダイヤモンドの微細放電加工において放電が進むには連続的に導電層の生成として、ダイヤモンドは 1300 - 2100 K の加熱でグラファイト化が始まるとされているので、放電アーク柱内では十分到達することができる。グラファイトが生成されるとそれを足がかりに放電が発生し、その放電がまたさらなるグラファイトを生成して連続的に加工が進むことが考えられる。また、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  などの絶縁性セラミックスの表面に TiN などの導電層を設けることで放電加工が可能になることが福沢、毛利らによって報告され<sup>8)</sup>、放電の機構はセラミックス表面に加工油の熱分解カーボンの主成分とした導電性表面層が形成されて常に導電性が維持されることによると説明されている<sup>9)</sup>。ダイヤモンドの加工でも同様の現象が生じていると考えられる。ダイヤモンドの加工機構を調べるために、モリブデンメッシュ上に CVD ダイヤモンドを生成したものにタングステン電極（直径：150  $\mu\text{m}$ ）で貫通加工を行い、未加工の部分、加工部分の縁部、加工部分の近傍を TEM にて測定を行った。それぞれの TEM 写真を図 3.1 (a~c) に示す。

図 3.1 (a) では加工を行っていない部分であるのでダイヤモンドの結晶が見られる。(b)は放電加工がなされた部分で、グラファイトの存在が認められる。また(c)は加工近傍に見られた不定形のカーボンであり、加工油の分解生成物あるいは加工屑と考えられる。

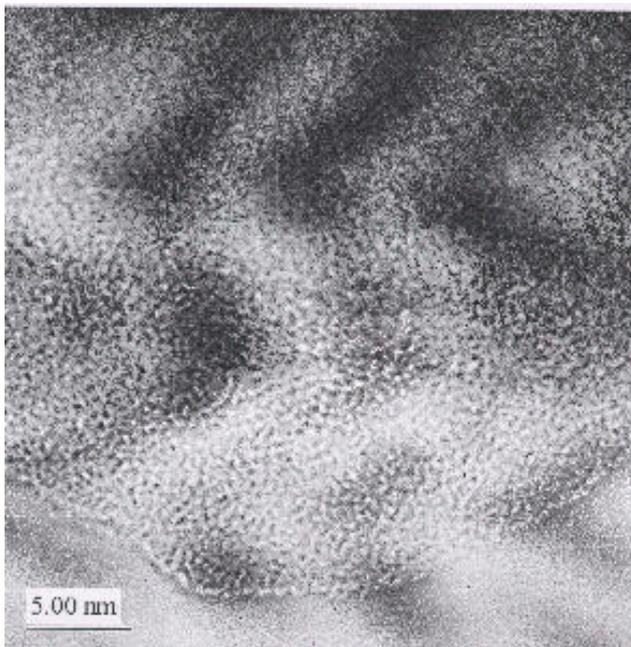
これらのことから、放電プラズマによってグラファイトあるいはアモルファスカーボンに変質した部分が除去、生成の繰り返しで加工が進行すると考えられる。



(a) 未加工の部分



(b) 加工部分の縁部



(c) 加工部分の近傍

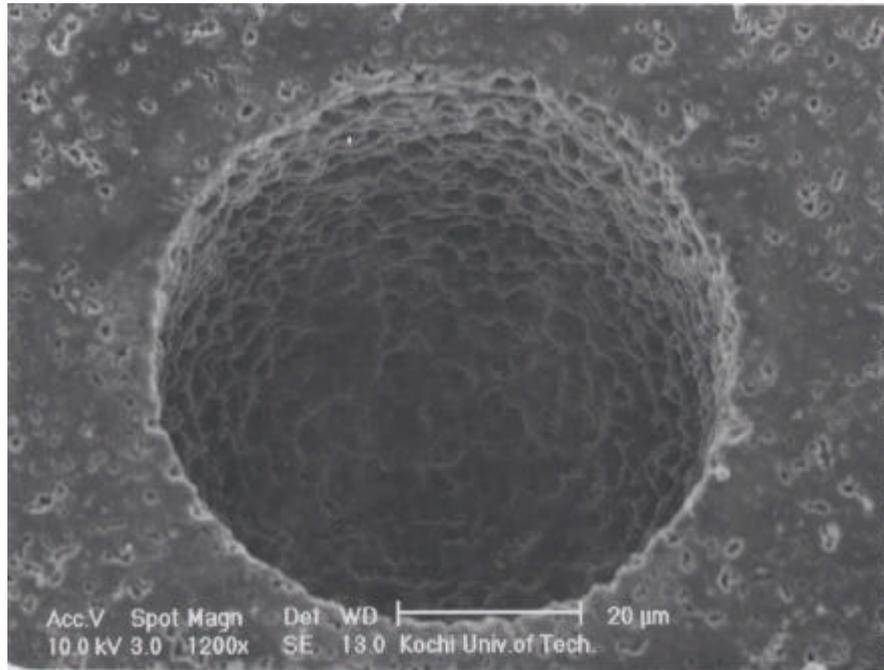
図 3.1 各部分での TEM 写真

### 3.2 電極材料の検討

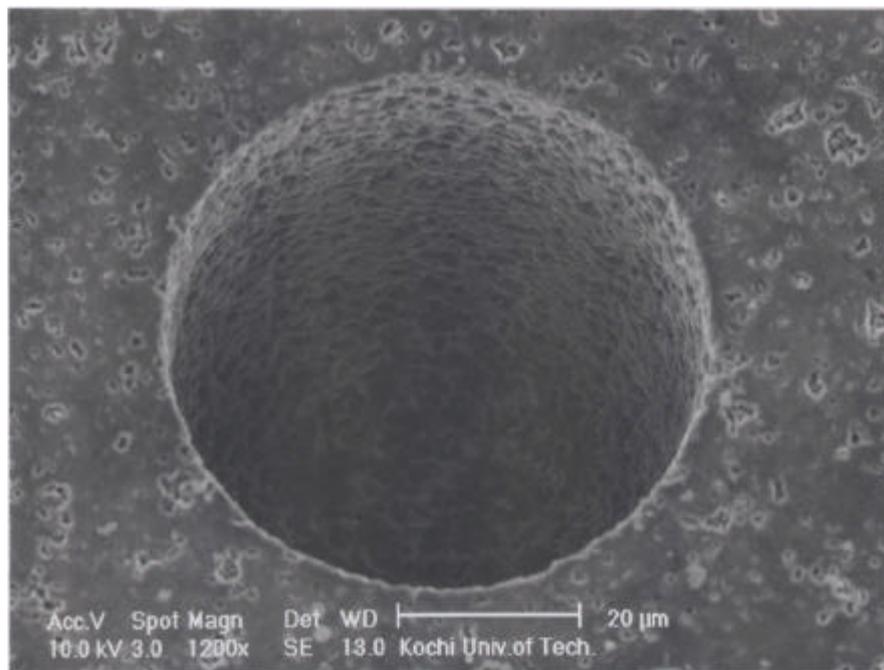
従来の加工ではタングステンをを用い実験を行ってきたが、タングステンより融点の低い電極材料を用いることにより加工特性が高まるか検討してみた。タングステン線より融点の低い電極材料として、モリブデン、チタン、鉄を用い、電極径 50  $\mu\text{m}$ 、電極送り量 100  $\mu\text{m}$  でめくら穴加工を行った。図 3.2 から図 3.5 はそれぞれの電極で加工した焼結ダイヤモンド各 (a) ~ (d) に各コンデンサ容量での SEM 写真、図 3.6 の (a) に電極消耗量 (b) に加工時間、(c) に放電ギャップを各電極材料と比較して示す。

図 3.3 から図 3.5 のようにタングステンよりも融点の低いモリブデン、チタン、鉄でも焼結ダイヤモンドに加工が可能であることがわかった。加工特性が高まったか各電極での加工を比べてみると、図 3.6(a) の電極消耗量では、融点の高いタングステンが小さい。(b) の加工時間では高放電エネルギーの場合、どの電極も加工時間は変化がみられなかったが、低放電エネルギーの場合、チタンの電極とタングステンの電極を比較してみると約 2 倍タングステンの電極がチタンの電極に比べ加工時間が長かった。(c) の放電ギャップでは、高放電エネルギー領域の場合タングステンが小さいが、低放電エネルギーの場合はタングステンより融点の低い電極のほうがギャップが小さいことがわかった。

このことから、融点の低い材料を使うことにより一部加工特性が高まるが、電極消耗量だけを考えると従来のタングステンをを用いての加工がよい。今後は、単結晶ダイヤモンドの加工においても電極材料の検討の余地がある。

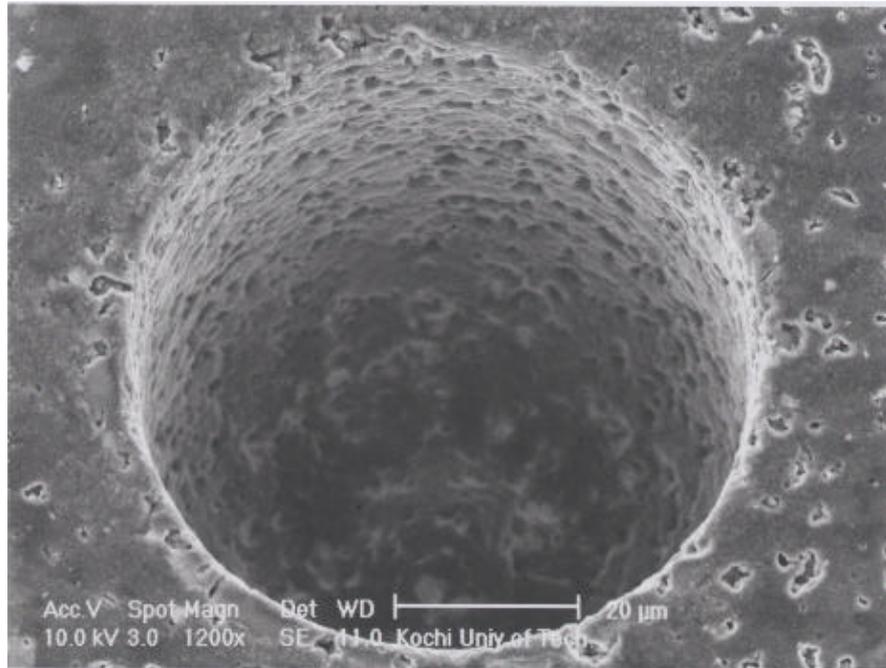


(a) コンデンサ容量 : 3300pF

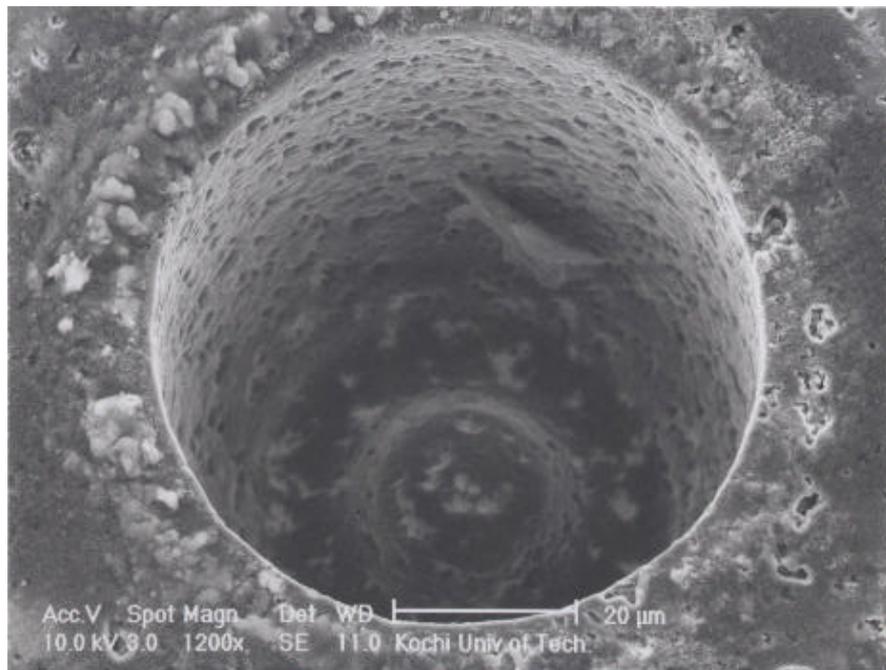


(b) コンデンサ容量 : 220pF

図 3.2 (a、b) 電極材料 : タングステン  
コンデンサ容量 : 3300、220pF

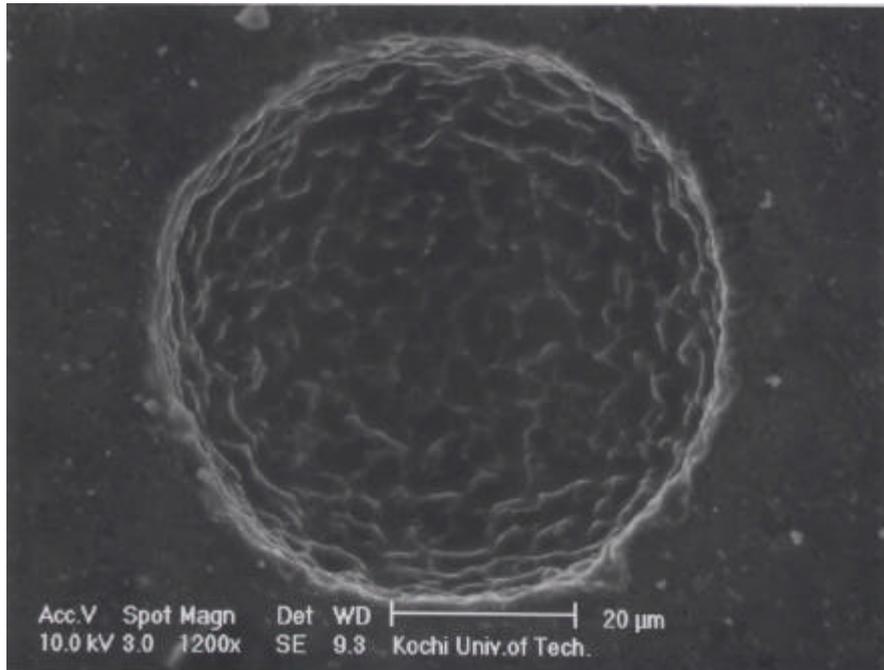


(c) コンデンサ容量 : 100pF

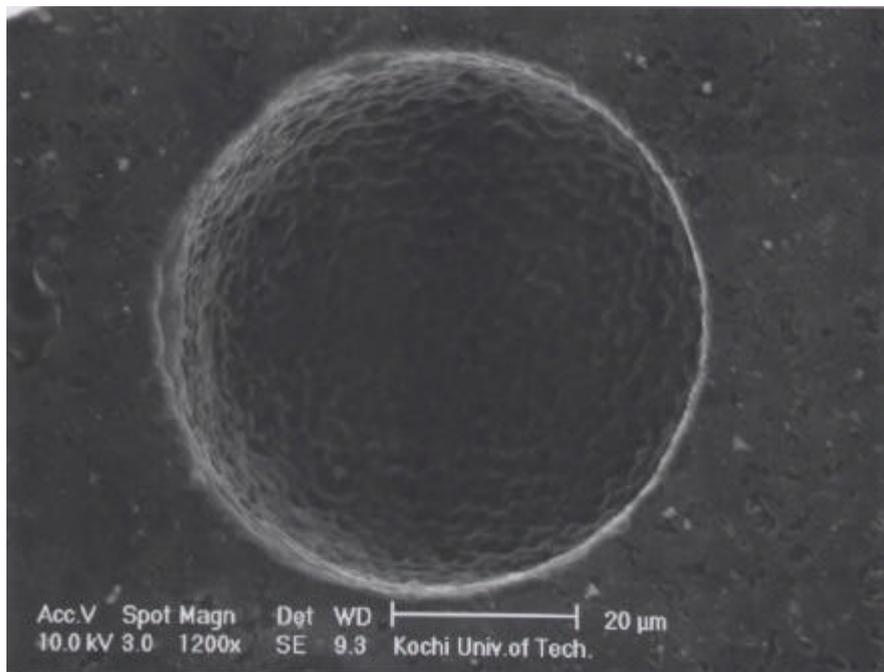


(d) コンデンサ容量 : 10pF

図 3.2 (c、d) 電極材料 : タングステン  
コンデンサ容量 : 100、10pF

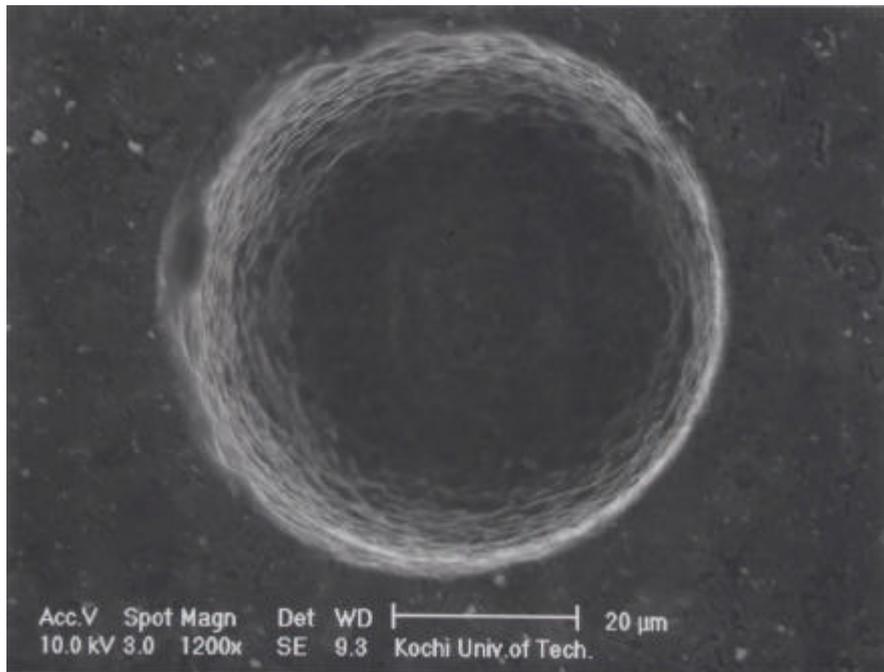


(a) コンデンサ容量 : 3300pF

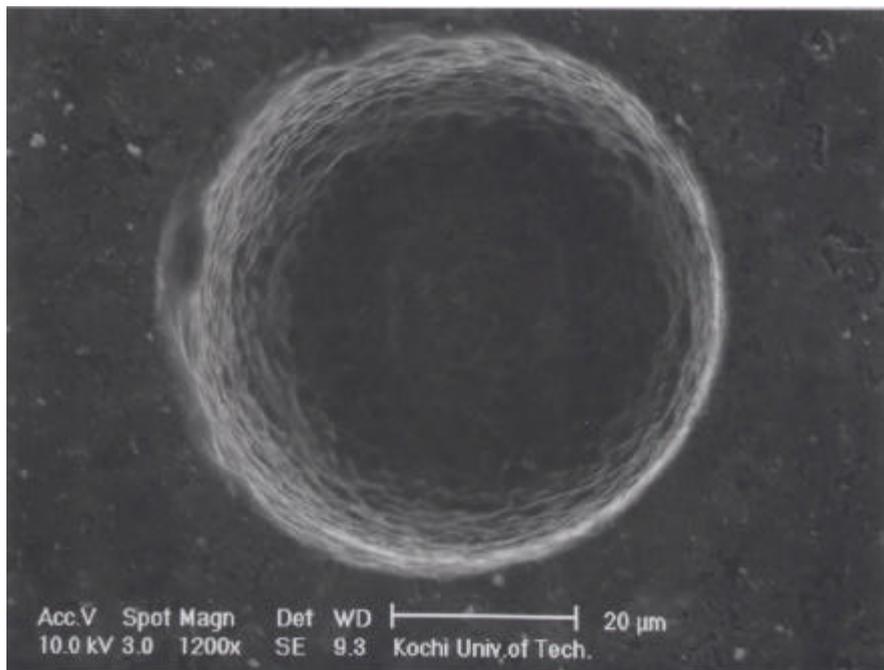


(b) コンデンサ容量 : 220pF

図 3.3 (a、b) 電極材料 : モリブデン  
コンデンサ容量 : 3300、220pF

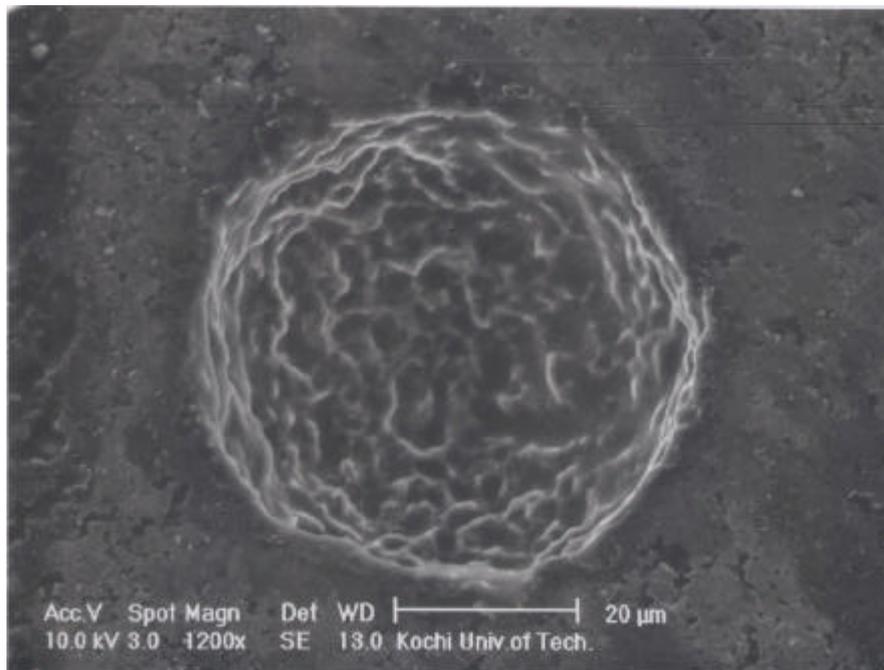


(c) コンデンサ容量 : 100pF

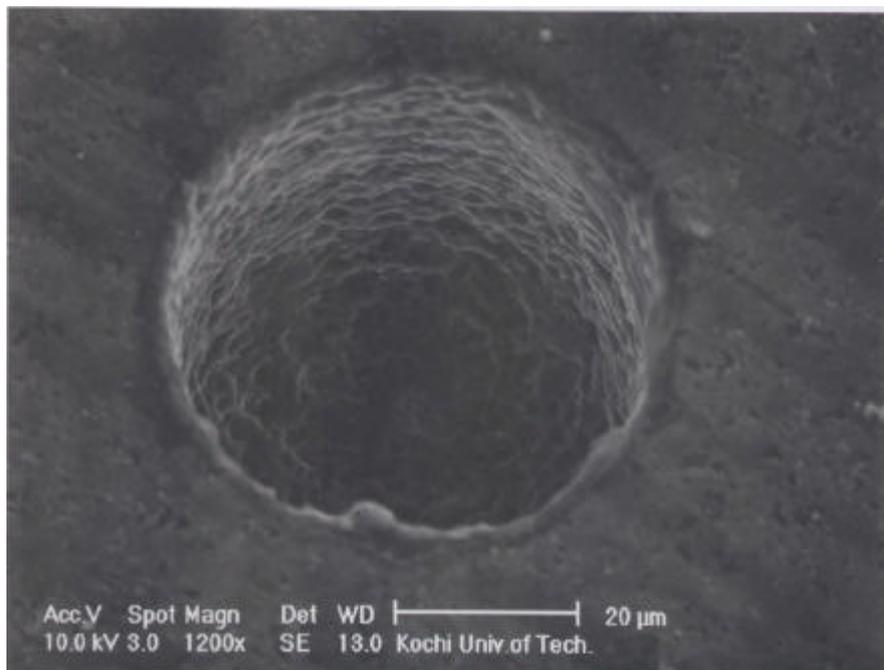


(d) コンデンサ容量 : 10pF

図 3.3 (c、d) 電極材料 : モリブデン  
コンデンサ容量 : 100、10pF

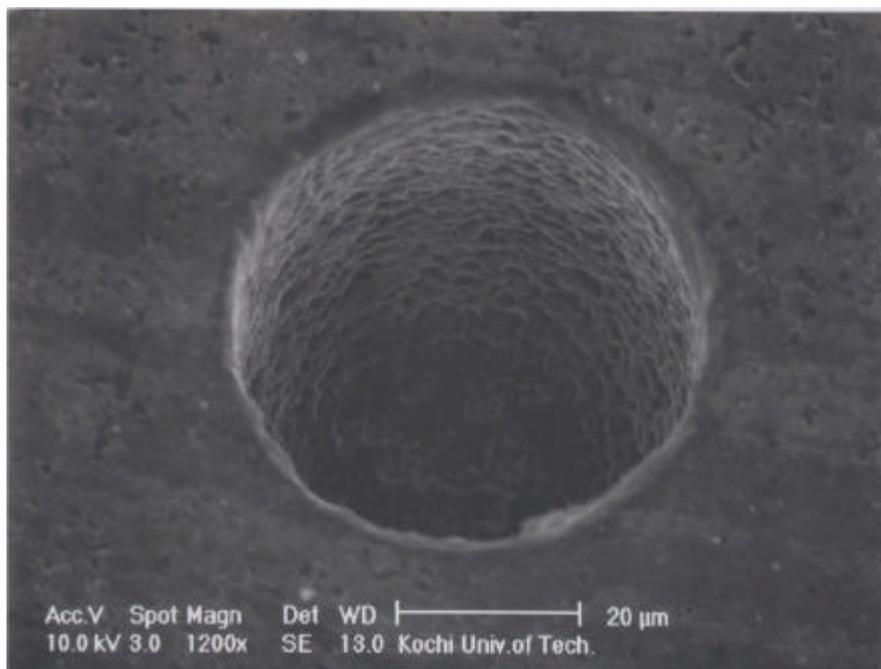


(a) コンデンサ容量 : 3300pF

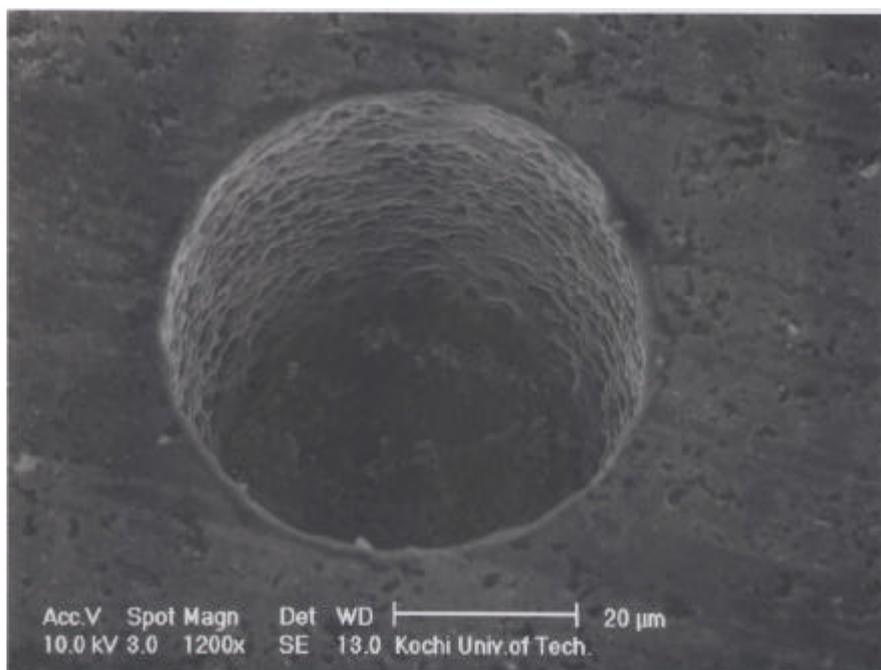


(b) コンデンサ容量 : 220pF

図 3.4 (a、b) 電極材料 : チタン  
コンデンサ容量 : 3300、220pF

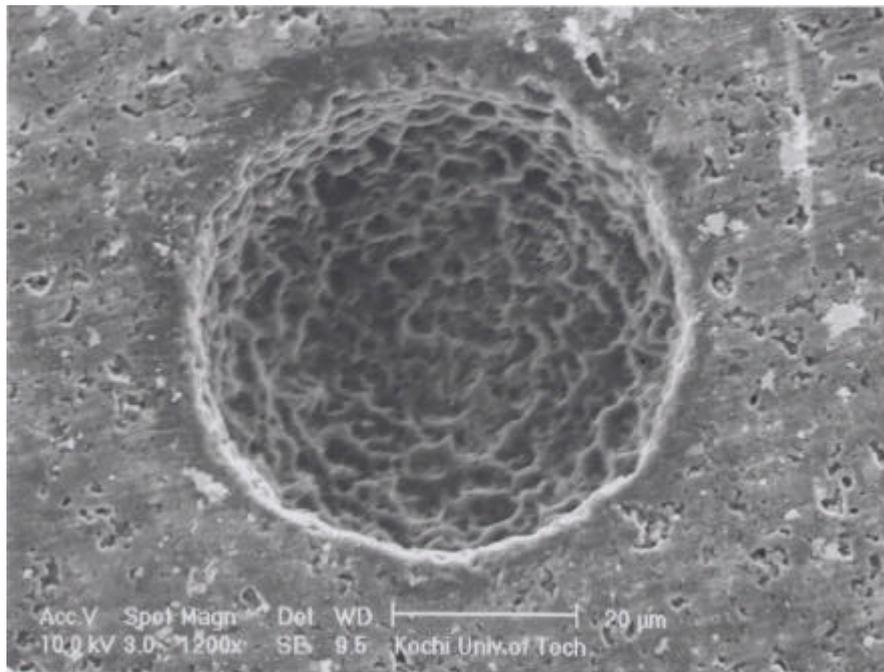


(c) コンデンサ容量 : 100pF

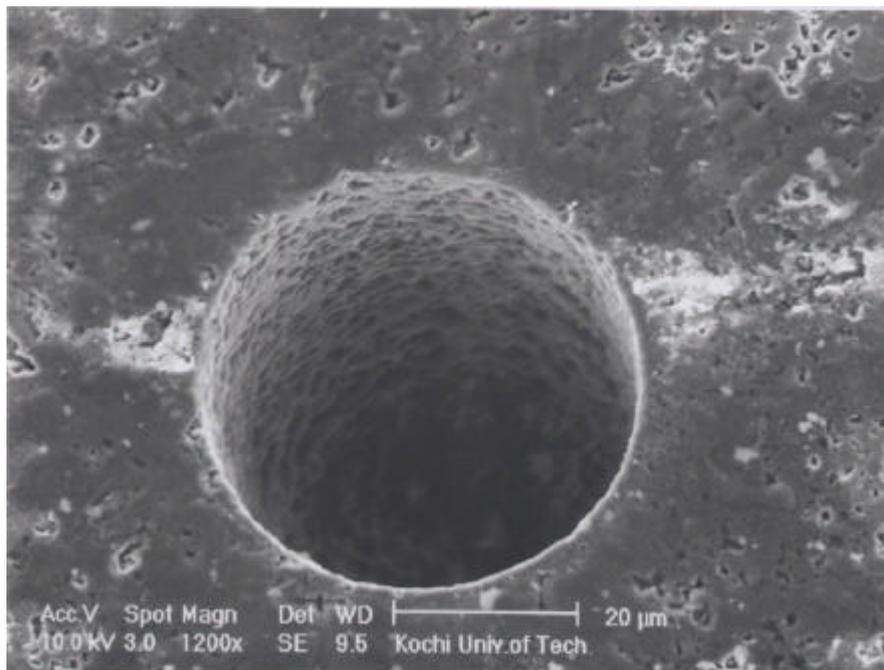


(d) コンデンサ容量 : 10pF

図 3.4 (c、d) 電極材料 : チタン  
コンデンサ容量 : 100、10pF

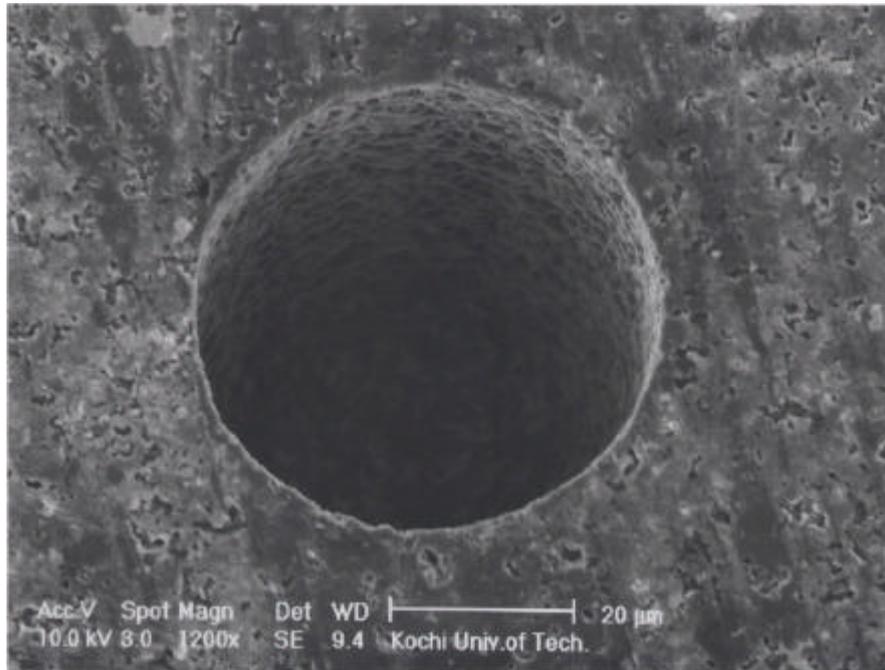


(a) コンデンサ容量 : 3300pF

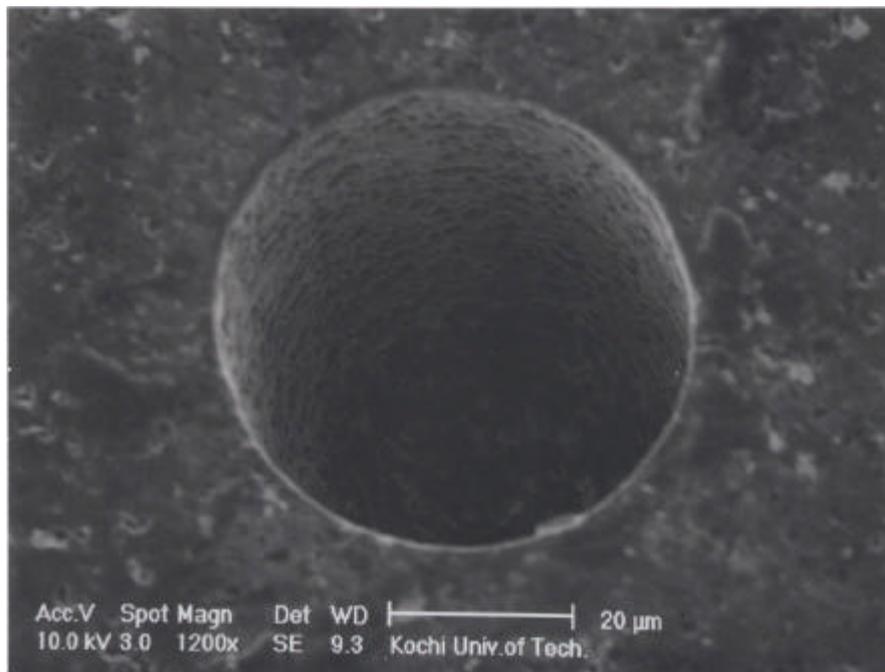


(b) コンデンサ容量 : 220pF

図 3.5 (a、b) 電極材料 : 鉄  
コンデンサ容量 : 3300、220pF

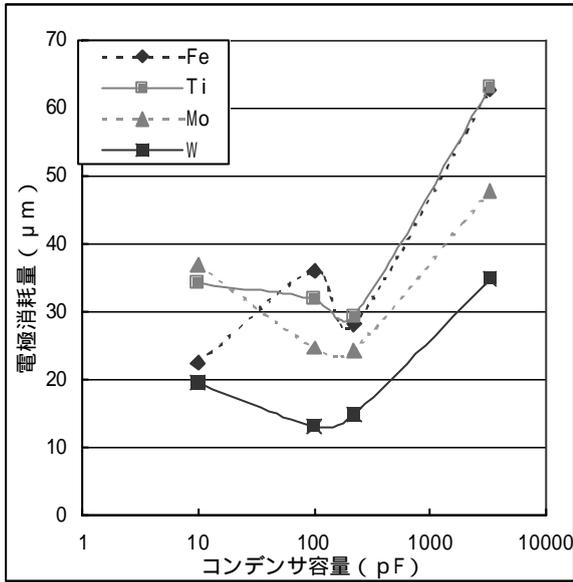


(c) コンデンサ容量 : 100pF

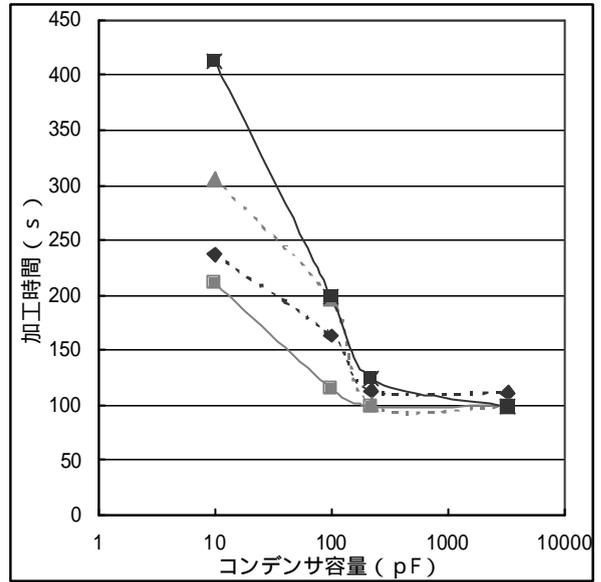


(d) コンデンサ容量 : 10pF

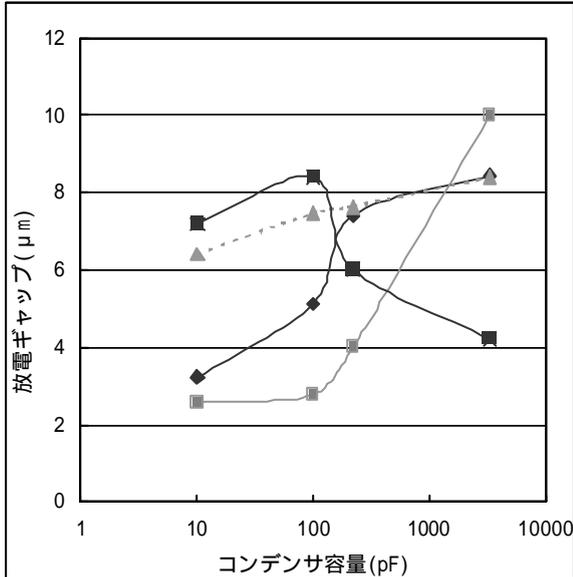
図 3.5 (c、d) 電極材料 : 鉄  
コンデンサ容量 : 100、10pF



(a) 電極消耗量



(b) 加工時間



(c) 放電ギャップ

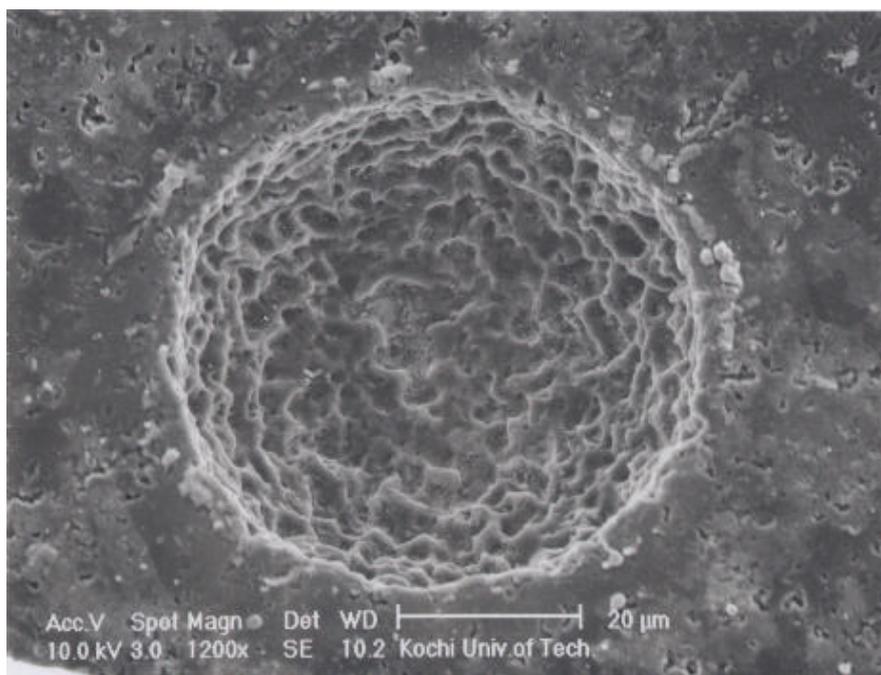
図 3.6 各電極材料での加工結果

### 3.3 加工液中に導電性粉末の混入

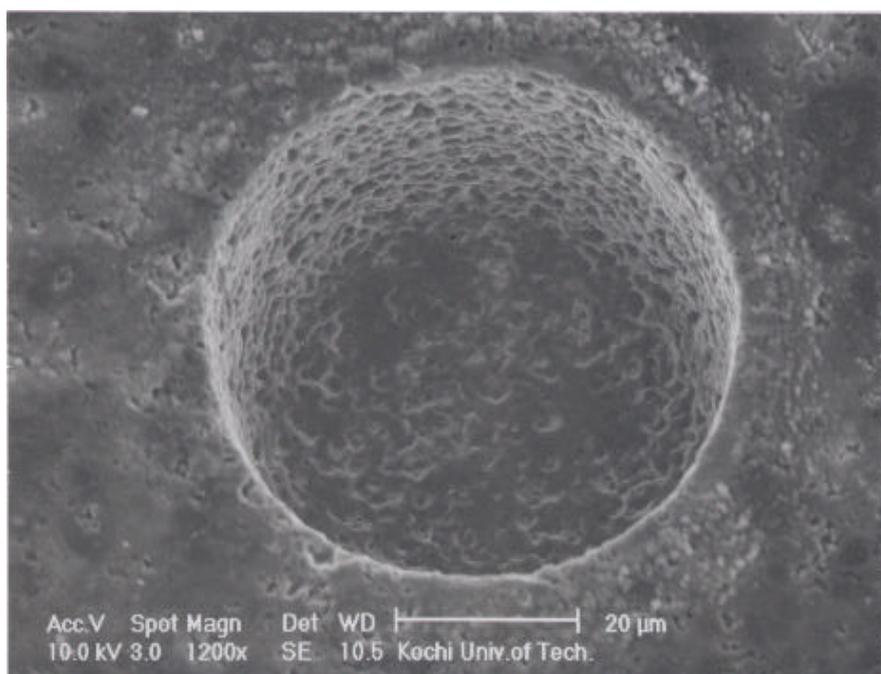
加工液中に導電性の粉末を混入することにより放電が促進されることが考えられる。ここでは 325mesh (約 40~50  $\mu\text{m}$ ) 以下の Ti 粉末を放電加工油に混入し加工を行った。しかし、工作物上にチタン粉末をのせ加工を行ったところ、電極の回転でチタン粉末が飛び散ってしまい加工が導電性粉末により促進されるかがわからなかった。そこで、焼結ダイヤモンド上にチタン粉末をのせアルミホイルで包むことにより、チタン粉末が飛び散ることを防ぎ加工液中に導電性粉末が混入された状態として、タングステンで電極径 50  $\mu\text{m}$ 、電極送り量 100  $\mu\text{m}$  のめくら穴加工を行った。図 3.7 (a) ~ (d) に各コンデンサ容量での SEM 写真、図 3.8 の (a) に電極消耗量、(b) に加工時間、(c) に放電ギャップを加工油のみで加工した結果と比較して示す。

図 3.8 (a) の電極消耗量では、高放電エネルギーの場合加工油のみのほうがチタン混入より大きい。低放電エネルギーの場合では変化がみられなかった。(b) の加工時間ではさほど変化がみられなかった。(c) の放電ギャップではチタンを混入したもののほうが全体的に放電ギャップが小さくなっている。

このことから、一部加工特性が高まってはいるが導電性粉末の材質などの検討が必要である。

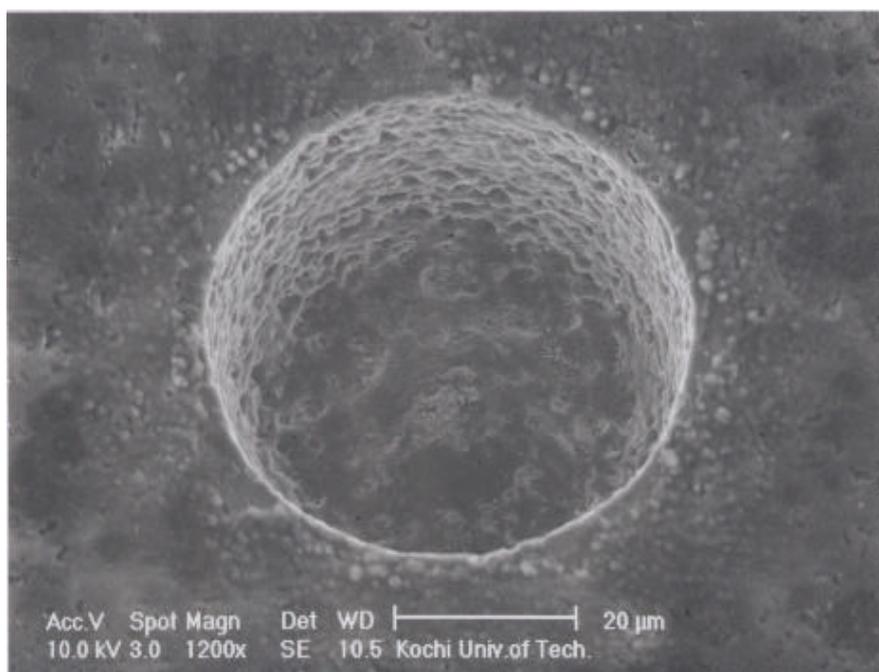


(a) コンデンサ容量 : 3300pF

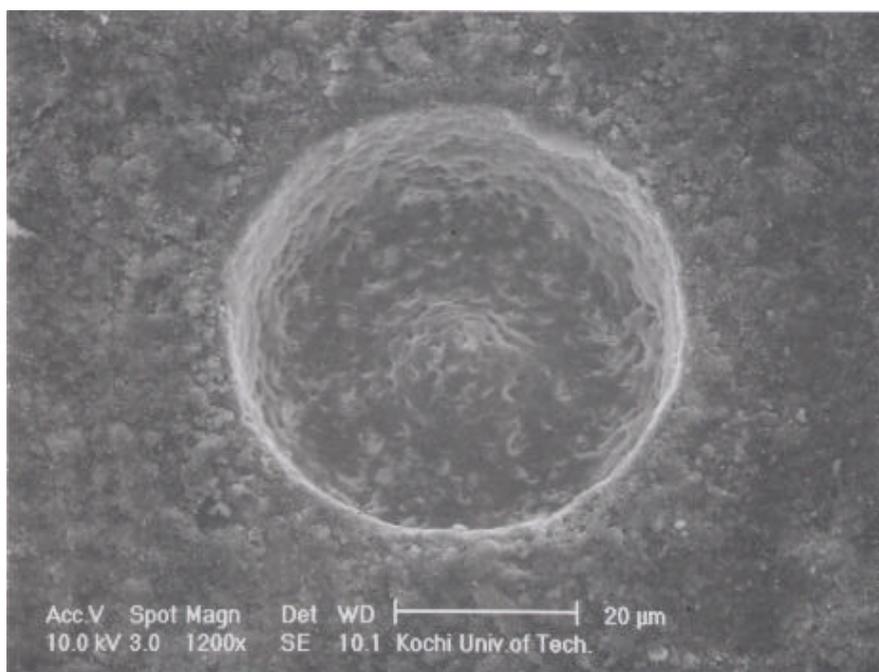


(b) コンデンサ容量 : 220pF

図 3.7 (a、b) 加工液中にチタン粉末を混入し加工した  
焼結ダイヤモンド  
コンデンサ容量 : 3300、220pF

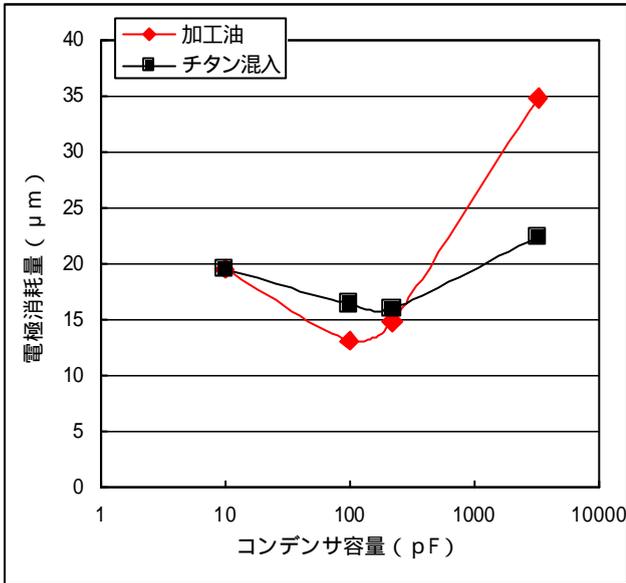


(c) コンデンサ容量 : 100pF

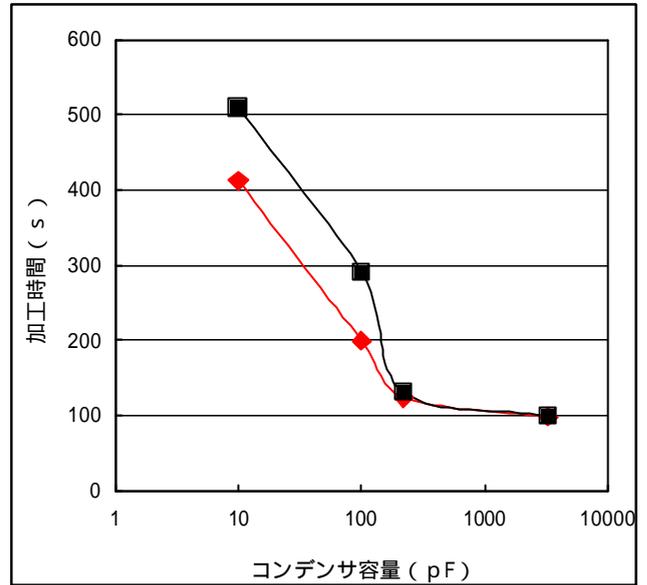


(d) コンデンサ容量 : 10pF

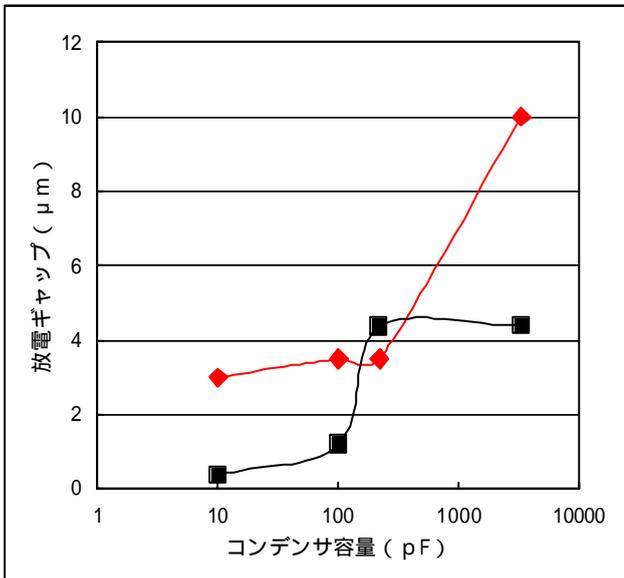
図 3.7 (c、d) 加工液中にチタン粉末を混入し加工した  
焼結ダイヤモンド  
コンデンサ容量 : 100、10pF



(a) 電極消耗量



(b) 加工時間



(c) 放電ギャップ

図 3.8 加工液中に 325mesh (約 40~50 μm) 以下のチタン粉末を混入し加工した結果

### 3.4 逆極性での加工

一般に微細放電加工では、コンデンサ回路が用いられている。これは、微細放電加工においては加工面積が小さいため、アーク柱の膨張を防ぐためにピーク値が高くパルス幅の短い電流を発生させるコンデンサ回路が有効となるからである。また、このような RC 回路を用いた放電加工の場合、一般に電極消耗は工具電極を陰極とする正極性の方が小さく、工具電極を陽極とする逆極性は大きいとされている。そこで所望の形状を得るための加工は正極性で行い、電極端面の成形時に電極消耗の大きい逆極性を使用している。

そこで電極消耗量の大きい逆極性で加工を行い加工結果にどのような変化がみられるか検討した。図 3.9 は 3300pF を用いて加工した SEM 写真である。3300 pF では正極性の約 1/2 の加工時間で加工が進行したが、10 ~ 220pF では加工が進行しなかった。これは、加工中の不燃性加工液中において電極表面に多くの付着物が付着してしまい加工特性が低下するためではないかと思われる。

このことから、逆極性での加工は高放電エネルギーでは可能だが低放電エネルギー領域では加工が困難であるので、正極性での加工が極性としては良いことがわかった。

### 3.5 導電性膜の検討

従来の研究ではYAG レーザ切断面の $5\mu\text{m}$ のグラファイト層を放電の足がかりとして加工を行ってきたが、単結晶ダイヤモンド上に導電層を設けることにより加工が進行し、また良好な加工結果が得られないかタングステンで、電極径 $50\mu\text{m}$ 、電極送り深さ $100\mu\text{m}$ で加工し検討してみた。

まず、単結晶ダイヤモンドに約 $0.5\mu\text{m}$ のチタン膜を蒸着したものに加工を行ったが、チタン膜が薄かったのか、放電エネルギーでチタン膜がのいてしまい偶発的にしか加工が行われなかった。しかし、YAG 切断面のグラファイト層と同じぐらいの層を設けてやることにより、膜がのくこともなく加工が進行されるのではないかと考え、単結晶ダイヤモンドに厚さ約 $5\mu\text{m}$ のチタン膜をめっきしたものに加工を行った。約 $0.5\mu\text{m}$ のチタン膜を蒸着したものに比べ良好な加工結果が得られた。図 3.10 に厚さ約 $0.5\mu\text{m}$ のチタン膜を蒸着したものの SEM 写真、図 3.11 (a~d) に厚さ約 $5\mu\text{m}$ のチタンをめっきしたものと YAG レーザ切断面の単結晶ダイヤモンドに加工した SEM 写真、図 3.12 (a) は厚さ約 $5\mu\text{m}$ のチタンをめっきしたものの電極消耗量、(b) は加工時間、(c) は放電ギャップ、(d) は加工深さを YAG レーザ切断面の単結晶ダイヤモンドに加工した結果と比較して示す。また、図 3.13 に YAG レーザ切断面の単結晶ダイヤモンドに加工した SEM 写真を示す。

図 3.10 と図 3.11 を比べてみると YAG レーザ切断面よりチタン膜を設けた単結晶ダイヤモンドの加工の方がきれいに加工されている。しかし、10、100、220 pF を用いてのチタン膜を設けた単結晶ダイヤモンドの加工は可能であったが、3300 pF を用いての加工では電極だけが消耗してしまったのかきれいな穴加工がされなかった。単結晶ダイヤモンドの YAG レーザ切断面への加工とチタン膜を設けた単結晶ダイヤモンドの加工を比べてみると、図 3.12 の(a) の電極消耗量では、10 pF の場合約 2 倍消費している。(b) の加工時間では、約 2 倍から 3 倍チタン膜を設けた単結晶ダイヤモンドの加工時間が長い。(c) の放電ギャップでは、約 2 倍から 3 倍チタン膜を設けた単結晶ダイヤモンドの放電ギャップが大きい。(d) の加工深さでは、3300pF では YAG レーザ切断面の方が深く加工されているが、220、100pF を用いた場合ではチタン膜を設けた単結晶ダイヤモンドのほうが約 2 倍深く加工されている。10pF を用いた場合では加工深さは変わらなかった。

このことから、YAG レーザ切断面のグラファイト層の $5\mu\text{m}$ 程度の導電性膜を単結晶ダイヤモンド上に設けることにより単結晶ダイヤモンドに加工が可能であることがわかったが、加工時間が非常に大きい、加工深さは YAG レーザ切断面より深く加工できるといった長所と短所が発見できたので、導電性膜についても検討の余地があるとみられる。

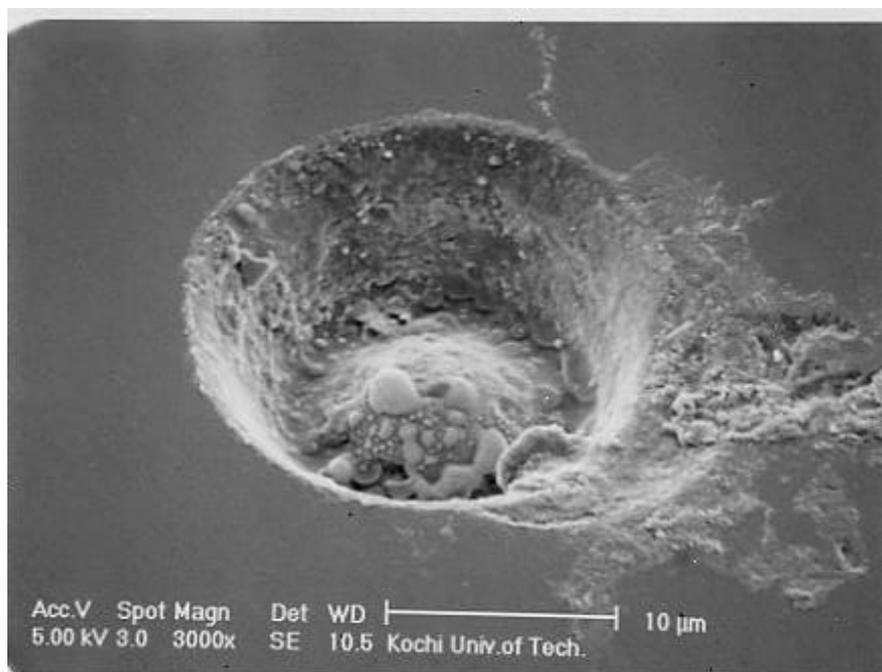
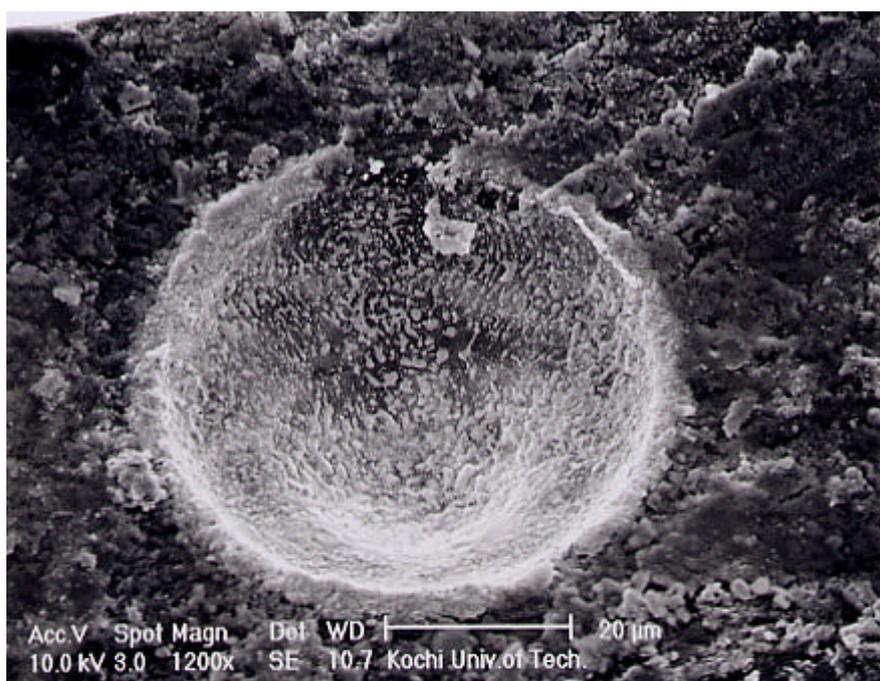


図 3.10 厚さ約  $0.5 \mu\text{m}$  のチタンを単結晶ダイヤモンド上に蒸着したもの

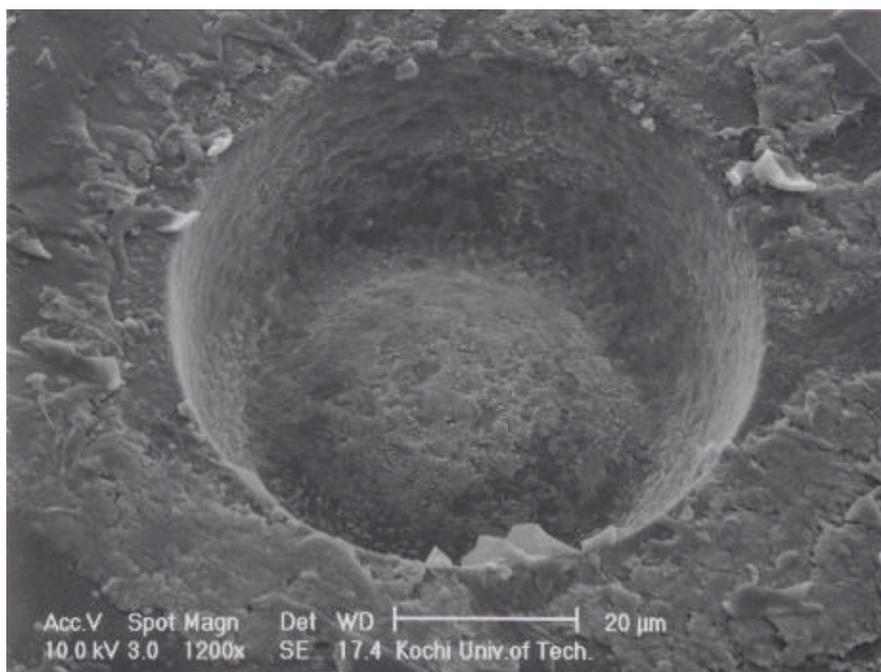


チタン膜

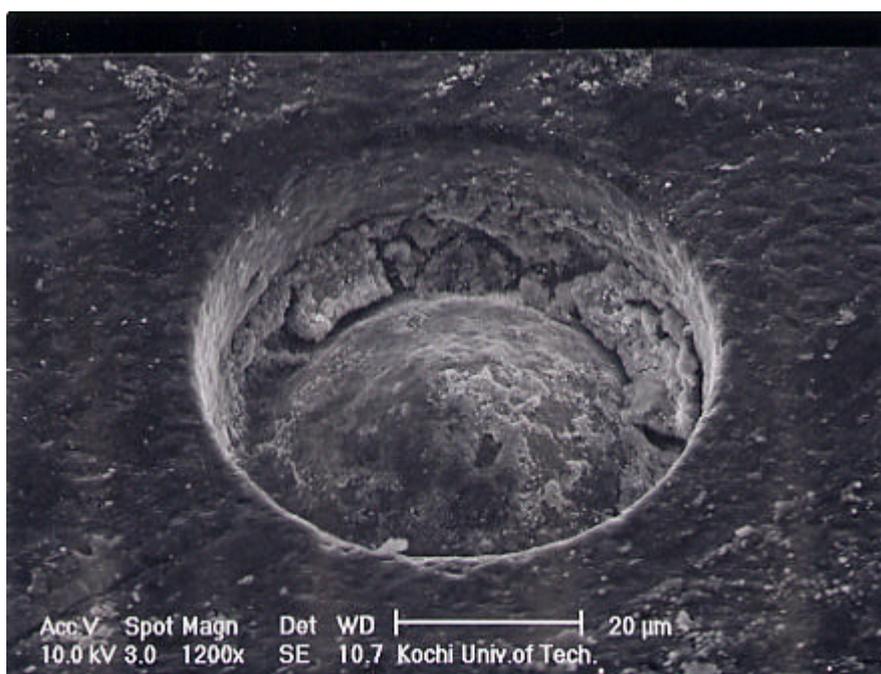


YAG 切断面

図 3.11 (a) チタン膜と YAG レーザ切断面への加工した SEM 写真  
コンデンサ容量 : 3300 pF

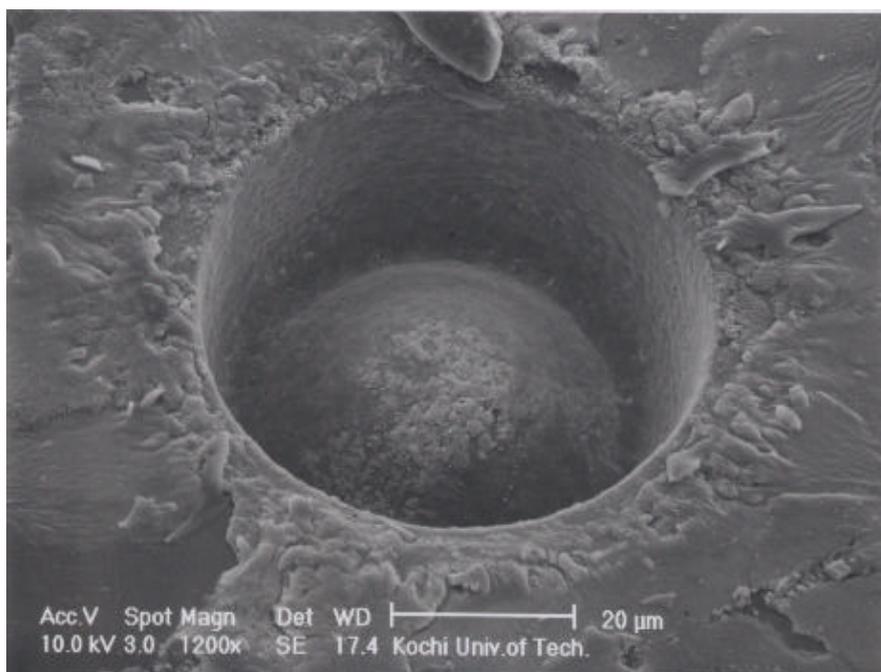


チタン膜

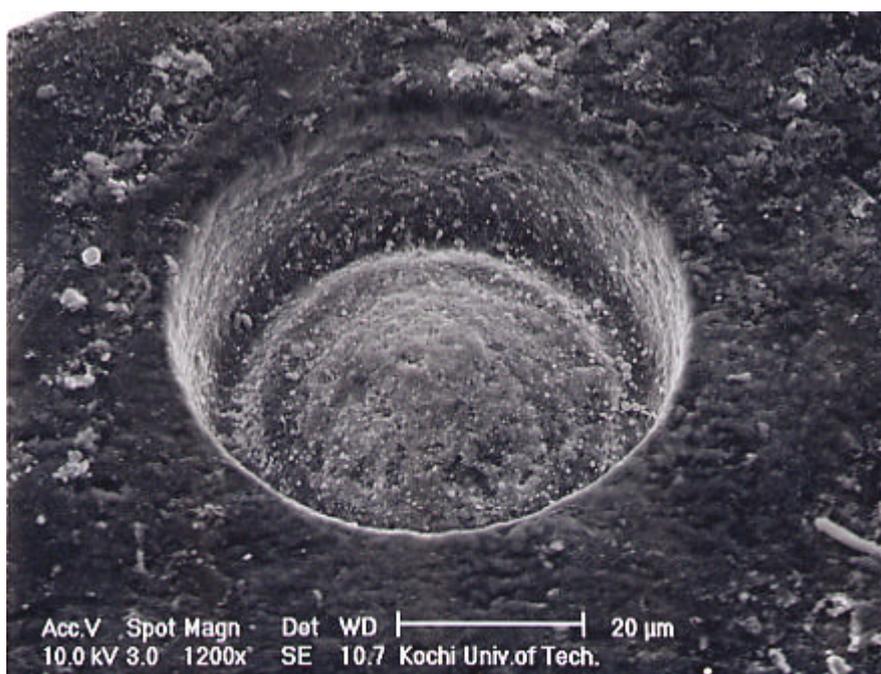


YAG 切断面

図 3.11(b) チタン膜と YAG レーザ切断面への加工した SEM 写真  
コンデンサ容量 : 220 pF

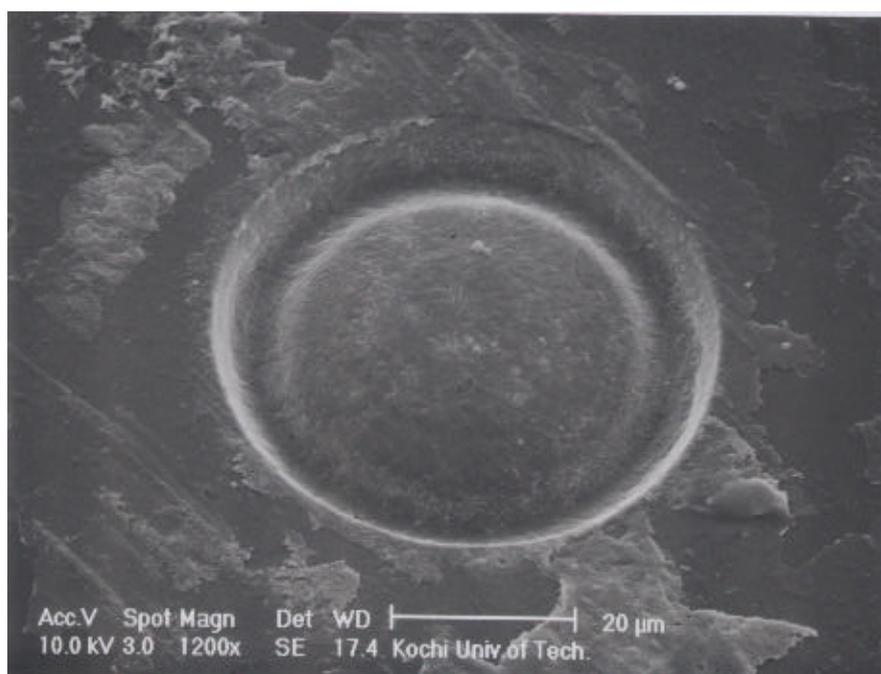


チタン膜

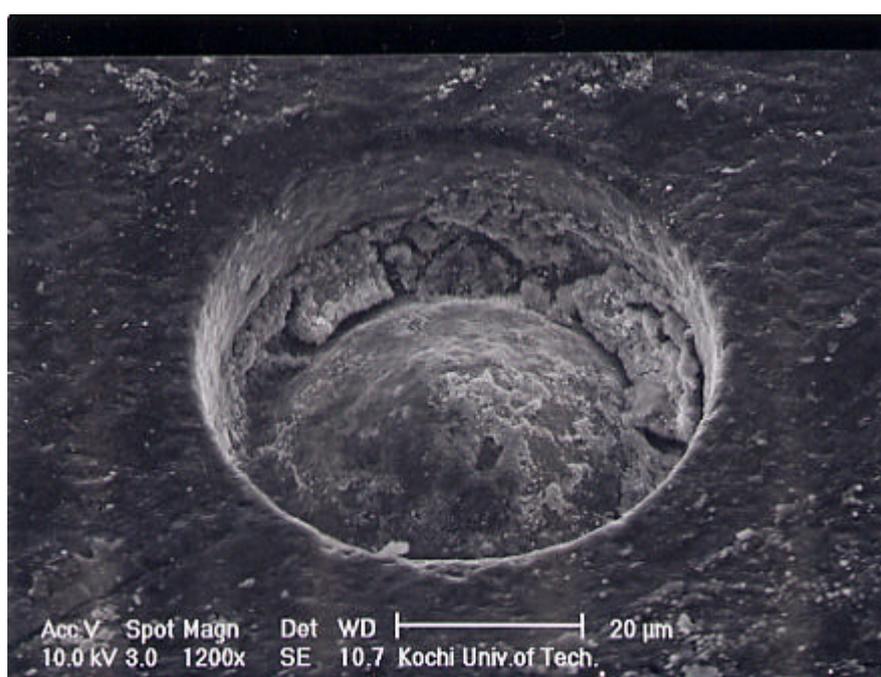


YAG レーザ切断面

図 3.11(c) チタン膜と YAG レーザ切断面への加工した SEM 写真  
コンデンサ容量 : 100 pF

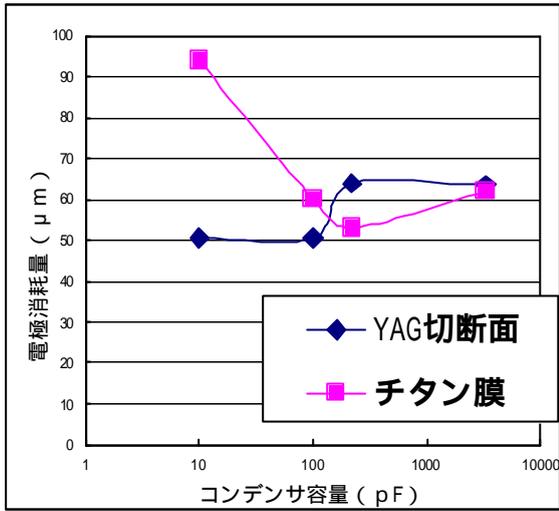


チタン膜

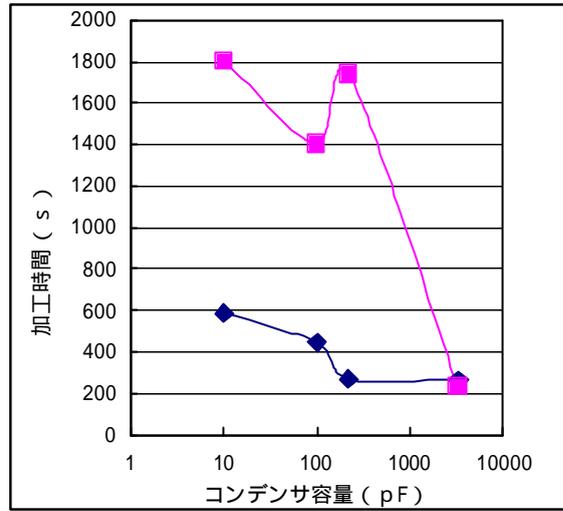


YAG レーザ切断面

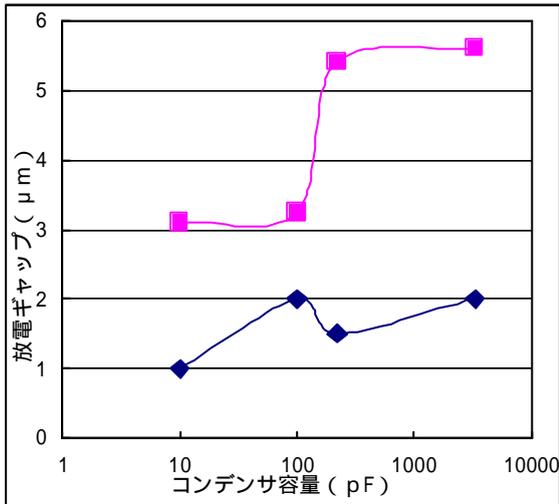
図 3.11(d) チタン膜と YAG レーザ切断面への加工した SEM 写真  
コンデンサ容量 : 10 pF



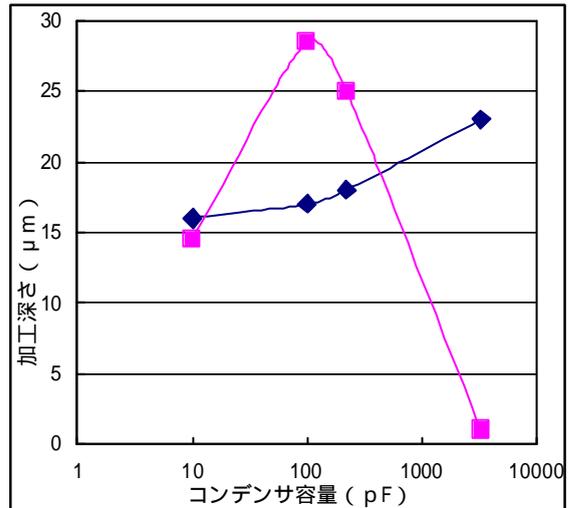
(a) 電極消耗量



(b) 加工時間



(c) 放電ギャップ



(d) 加工深さ

図 3.12 厚さ約  $5\mu\text{m}$  のチタンを単結晶ダイヤモンド上にめっきしたものと YAG レーザ切断面の単結晶ダイヤモンドに加工した比較

## 第4章 結論

- 1) 単結晶ダイヤモンドの加工は、放電プラズマによってダイヤモンドがグラファイトあるいはアモルファスカーボンに変質した部分が除去され、生成され加工が進行していくと考えられる。
- 2) ダイヤモンドの加工特性を高めるために加工条件の検討を行った結果、長所、短所がそれぞれの加工条件での結果にみられた。電極材料の検討では、タングステンより融点の低いチタン、鉄が低放電エネルギー領域では加工時間が短かったこと、加工液に導電性粉末としてチタンを混入し加工した結果では、電極消耗量、加工時間は変化がみられなかったが、放電ギャップでは全体的にギャップが小さくなっていたこと、極性の検討では 3300pF でしか加工ができなかったが、加工時間が約 1/2 短くなっていたこと、導電性膜の検討では、厚さ約 5  $\mu\text{m}$  のチタンの膜を単結晶ダイヤモンド上に設けてやることにより加工が可能であり、加工時間、放電ギャップは大きい加工深さはコンデンサ容量 100、220pF を用いて加工した場合、チタン膜を設けた単結晶ダイヤモンドの加工のほうが深いことがわかった。
- 3) 今後の研究として、本研究での加工条件の検討を単結晶ダイヤモンドを用いて加工特性が高まるかを調べるとともに、加工液中に混入する粉末材料を変えての実験、導電性膜材料を変えての実験を行っていき、マイクロマシン材料となるダイヤモンドの部品を製作したい。

## 謝辞

本研究に対し終始熱心にご指導いただいた高知工科大学知能機械システム工学科河田耕一教授らに心から厚く御礼申し上げます。

また、本研究を進めるにあたり御指導を頂いた高知県工業技術センター西村一仁氏に心から厚く御礼申し上げます。

本研究のためにモリブデンメッシュ上にCVDダイヤモンドの生成、TEM測定を行っていただいた徳島大学江南教授に心から厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、御指導、ご協力して下さった京都大学寺田研一郎氏、高知工科大学大学院知能機械システムコース山岡正和先輩、掛水大介先輩に心から厚く御礼申し上げます。

## 参考文献・図書

- 1 ) (財) マイクロマシンセンター監修：マイクロマシン革命、日刊工業新聞社、(1999)。21-52。
- 2 ) 林 輝也：マイクロマシンと材料技術、シーエムシー、(1991)。4.5.196。
- 3 ) 諸隈 肇：内視鏡テクノロジー、シーエムシー、(1999)。
- 4 ) 精密工学会編：精密工作便覧、コロナ社、(1992)。455。
- 5 ) 「マイクロマシン技術による製品小型化・知能化辞典」編集委員会：マイクロマシン技術による製品小型化・知能辞典、産業調査会 辞典出版センター、(1992)。32。
- 6 ) 寺田研一郎、河田耕一、西村一仁、佐藤健夫、広瀬和也、田中律子：ダイヤモンドの微細放電加工（第1報）- 加工の可能性 -、2002年度精密工学会春季大会学術講演論文集。
- 7 ) 広瀬和也、田中律子、寺田研一郎、河田耕一、佐藤健夫、西村一仁：ダイヤモンドの微細放電加工、2000年度精密工学会中四国支部・九州支部共催学術講演会論文集、(2000)。37-38。
- 8 ) 福澤康、岩根英二、毛利尚武：放電加工機を用いたセラミックスの加工、第3回電気加工学会全国大会講演論文集、18、(1993)。
- 9 ) 谷貴幸、福澤康、古谷克司、毛利尚武：絶縁体セラミックスの放電加工プロセス、精密工学会誌、63、9、1310、(1997)。
- 10 ) 掛水大介、寺田研一郎、河田耕一、西村一仁、佐藤健夫：ダイヤモンドの微細放電加工（第2報）- 加工特性 -、2002年度精密工学会春季大会。

## 本研究にかかわる講演

藤村秀樹、山岡正和、掛水大介、河田耕一、西村一仁：ダイヤモンドの微細放電加工、2002年度精密工学会中四国支部徳島地方学術講演会論文集、31、(2002)。