

平成 1 3 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
- 加工特性 -

学籍番号：1020100

氏 名：掛水 大介

指導教員：河田 耕一

-目次-

第1章 緒論	3
1.1 マイクロマシンの現状	3
1.2 精密加工の現状	3
1.3 MEMSに対する加工の現状	4
1.4 微細放電加工の現状	6
1.5 ダイヤモンドのマイクロマシンへの適用	7
1.6 本研究の内容と目的	7
第2章 実験装置・実験方法	8
2.1 微細放電加工機	8
2.2 電極成型	11
2.3 実験条件	12
2.4 実験材料	12
2.5 実験手順	12
2.6 測定方法	12
第3章 単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド、純チタンの加工特性の比較	14
3.1 電極送り時間	14
3.2 電極消耗長さ	14
3.3 消耗比	14
3.4 放電ギャップ	14
3.5 加工穴と電極のSEM画像	15
3.6 放電波形	15
3.7 考察	15
第4章 各種の放電導電層を設けた単結晶ダイヤモンドの放電加工	35
第5章 CVDダイヤモンドへの放電加工	37
第6章 結言	40
謝辞	41
参考文献	42

第1章 結論

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¹⁾。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と言ってもそのサイズは $10^{-2} \sim 10^{-9}$ 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1 mm以上の大きさの領域は従来形の精密加工技術の延長で最も実現可能に近い第1世代MEMS (Micro Electro Mechanical System) であり、1 mm～数 μ 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 μ 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²⁾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。最近の医療現場では、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、内視鏡手術のように外科的手術から内科的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。現在の最先端では、マイクロカテーテル³⁾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 精密加工の現状

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。半導体加工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。フォトファブリケーション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実現できる。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(リソグラフィ)する除去加工だけでなく、窓の部分に金属を電解メッキ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。レジストの凹部に金属メッキすることで、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、被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 MEMSに対する加工の現状

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²⁾。

ワイヤカット放電加工

型彫り放電加工

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 μm ~0.35 μm)を用い、糸のこ状に被加工材を切り抜いていくもので、ワイヤが細ければより精密な加工可能であり、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が高いが、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なく無人化運転が可能であるなどの利点がある。

型彫り放電加工

型彫り放電加工は総型電極を用いての型彫り(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したが、その後NC機能をもった型彫り放電加工機が出現して、総型彫り電極での加工だけでなく、エンドミル加工のように、単純形状電極での複雑な3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になってきて、その利用・応用分野は拡大されている。3次元形状を加工することができるが、加工形状の大きさや精度は用意できる電極製作如何にかかわってくる。

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、通常これを電極といい、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は、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。放電加工で一般に使用されているエネルギー供給方法には大きくわけて蓄勢式と非蓄勢式がある。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勢式加工回路が主流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って、現在でもコンデンサ回路が使用されている。

加工電極として $10^{-7} \sim 10^{-3} s$ のオーダのパルス電源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溶解あるいは蒸発して微小なくぼみ（クレータ）が生じる。この過程を繰り返して多数の放電を起こさせれば、電極の端面の形に対応した被加工材部分にクレータが生じ、さらに電極を送り込んでいくと電極形状が被加工材に転写される。これと似た現象は電極側にも生じて電極消耗がおきるが、加工条件の選択により、被加工材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政局性加工と呼称し、電極が陽極に、加工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している。

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的組み合わせ、放電エネルギーの供給状態などによって、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、加工拡大代）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。

形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。

電極材質としては、放電加工特性が良好であることが第1条件であるが、特に、電極消耗率が低いこと、放電の安定性が確保できること、電極制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最も多く用いられている。超鋼合金の加工や微細放電においては、AgWまたはCuW焼結合金が用いられることがある。電極形状は加工物を反転したもの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隔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出も考慮して、油の中でも比較的粘性の低い灯油が加工液としては好都合となる。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、酸化防止などのために種々の添加物を混入したものが加工液として用いられる。

加工液は高温状態になった。加工部の冷却、熔融状態で飛散されて材料を冷却して微細

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って、加工部へのエネルギー供給密度を高くして、加工効率を上げることに役立つ。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0.01～50g/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100～200g/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1μm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±10～20μm、高精度の場合±5μm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、すなわち蓄積であり、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、加工量は除去重量(g)で表示するほかに、体積(m³)、面積(m²)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)で表示するケースが多い。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、両者も比(電極消耗速度/加工速度×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⁴⁾⁵⁾。

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化し、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、製作には主に半導体プロセス技術が応用されている。これは、高精度な形状をつく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、流用制御用オリフィス、ワイヤードットプリンターのガイド穴金型加工、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費量が大きいという点、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
- 化学的に安定な材料
- 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化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。しかし、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、精密な放電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 μm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むことがわかり、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⁶⁾⁷⁾。

1.6 本研究の内容と目的

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。さらにダイヤモンドをマイクロマシンに広く利用するには、加工効率や加工精度を向上させる必要があり、そのためには加工特性をより明らかにすることが望まれる。

本研究では、単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド、純チタンの微細放電加工を比較し、その加工特性を明らかにした。YAGレーザ切断面以外の方法で単結晶ダイヤモンドの表面に導電層を設けた場合について加工を試みた。そして、単結晶ダイヤモンド以外のダイヤモンドということで、CVDダイヤモンドへの加工を試みた。

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出来る。RC 回路を放電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なう必要があるが、実際には図 2.3 に示すように、放電回路中のコンデンサ容量 C 以外に各構成部品間に浮遊容量 C'1、C'2、C'3、C'4 などが存在し、これらの合成容量を加えた(C+C')が加工を行な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 10⁻⁶ ~ 10⁻⁷J 程度まで小さくする必要があり、容量は数 ~ 数百 pF の範囲となる。従って、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決定する。

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 の超微細加工が出来る。また導電性材料(比抵抗値 1 cm)以下なら高度材質を選ばずに加工を行なう事ができ、高アスペクト比加工は 5 ~ 10 倍程度になる。

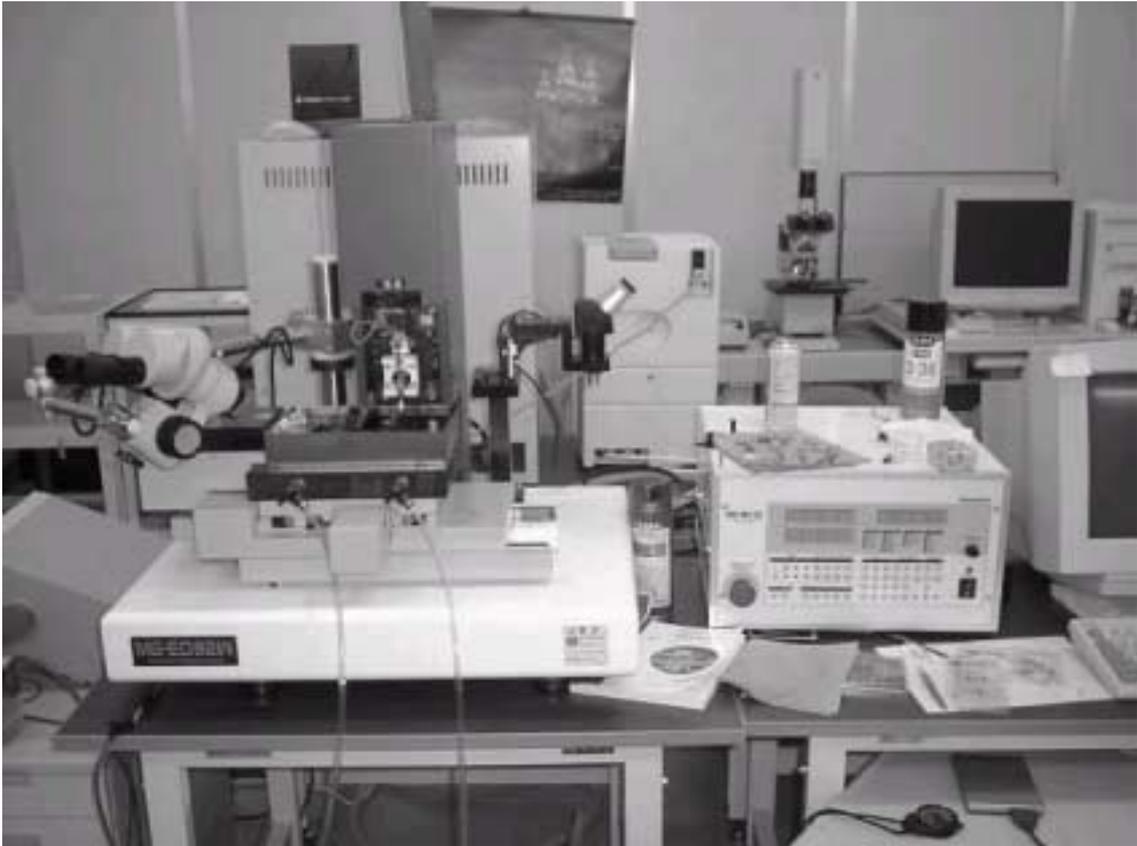


図 2.1 松下電器製 MG-ED82W

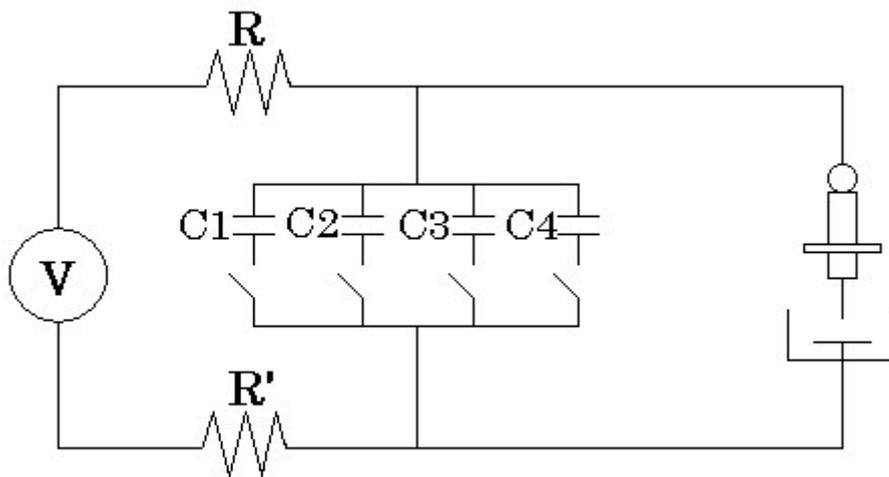


図 2.2 放電回路

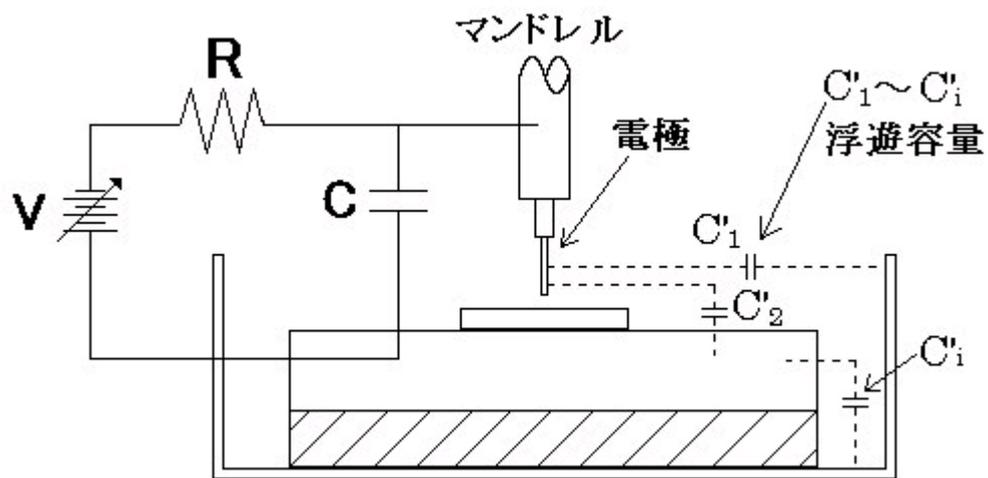


図 2.3 浮遊容量

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 2.4 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。

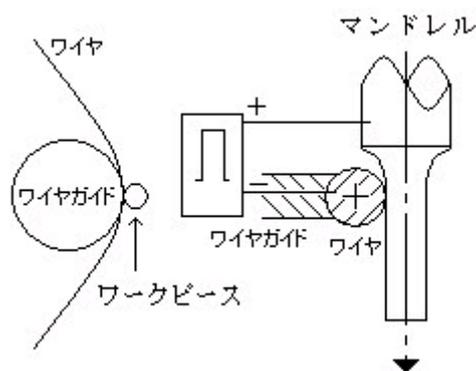


図 2.4 WEDG の原理図

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=1kΩ)
加工電圧	100V
コンデンサ容量	10pF,100pF,220pF,3300pF
電極	純タンゲステン線
電極送り量	100μm
電極径	50μm

2.4 加工材料

- 1) 単結晶ダイヤモンド (YAG レーザ切断面と厚さ 1 μm の金蒸着面)
- 2) 焼結ダイヤモンド (焼結助材 Co 含有量 10% 粒径 15 μm)
- 3) 純チタン (板厚 50 μm 純度 99.5%)
- 4) CVD ダイヤモンド (シリコン基板上の厚さ 5 ~ 10 μm の上に厚さ 1 μm の金蒸着)

2.5 実験手順

- 1) 松下電器製 MG-ED82W 超微細放電加工機付属の電極成形ソフトにより直径 50 μm 誤差 ± 5% の電極を作成した。(電極成形はワイヤー放電加工による)
- 2) 同放電加工機を使用し、単結晶ダイヤモンド及び焼結ダイヤモンドにめくら穴加工を行い、純チタンに貫通穴加工を行なった。なお、単結晶ダイヤモンドは、導通のためにアルミホイルで包んだ。加工条件(コンデンサ容量)を変化させ電極送り時間、電極消耗長さ、放電ギャップ、消耗比、SEM 画像、放電波形を比較した。
- 3) 単結晶ダイヤモンド金蒸着面にめくら穴加工を行った。このとき、導通のためダイヤモンドをアルミホイルで包んだ。
- 4) CVD ダイヤモンド面にめくら穴加工を行った。このとき、導通のためダイヤモンドをアルミホイルで包んだ。

2.6 測定方法

計測方法を下記に示す。

- 1) 電極送り時間：加工開始から電極送り量 10 μm ごとに加工終了の 100 μm までストップウォッチを用いて測定した。
- 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 μm 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) 消耗比 : 電極消耗長さを実測した加工穴の深さの比である。
- 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。
- 6) 電流波形 : 電極付近の放電回路を Agilent 社製電流プローブ N2774A ではさみ検出し、Agilent 社製オシロスコープ 54622A により出力した。

第3章 単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド、純チタンの加工特性の比較

3.1 電極送り時間

図 3.1～図 3.9 に電極送り時間の比較を示す。純チタンへは板厚 50 μm のものへの加工であったため、すべてのコンデンサ容量で焼結ダイヤモンドと純チタンは、ほぼ同等であると言ってよい。しかし、単結晶ダイヤモンドの電極送り時間は焼結ダイヤモンドのコンデンサ容量 10pF で 4 倍、100pF で 5 倍、220pF で 5 倍、3300pF で 13 倍の時間を要している。25 μm ごとの電極送り時間の比較をみると、すべてのコンデンサ容量において、焼結ダイヤモンドでは、電極送り深さによる加工への影響はほとんどみられないが、単結晶ダイヤモンドでは、電極送り深さが深くなるにつれて加工時間が長くなっている。単結晶ダイヤモンドの加工は導電性の関係から放電エネルギーが低く、電極送り深さが深くなると加工穴底部に溜まる加工屑が除去されにくくなるために、それが加工の妨げとなり加工時間が増大すると考えられる。

3.2 電極消耗長さ

図 3.10 に電極消耗長さの比較を示す。電極消耗長さでは、単結晶ダイヤモンドは焼結ダイヤモンドの 1.5～2.5 倍である。純チタンは放電エネルギーが増大すると電極消耗長さは減少したが、単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンドでは放電エネルギーの増大とともに電極消耗長さも増大している。

3.3 消耗比

各材料のコンデンサ容量と消耗比の関係を図 3.11 に示す。焼結ダイヤモンドは 0.2～0.8 で、純チタンは 0.1～0.5 であるが、単結晶ダイヤモンドは電極消耗が大きく 2.8～3.5 である。単結晶ダイヤモンドは平均値としてはコンデンサ容量との関係は少ないが、加工ごとの電極消耗長さ、加工深さのばらつきが大きい。また単結晶ダイヤモンドではコンデンサ容量の増大に伴い、消耗比が小さくなる傾向がみられる。これは、単結晶ダイヤモンドへの放電加工は放電エネルギーを大きくすれば、電極消耗長さは大きくなるが、加工量も増大することを示している。単結晶ダイヤモンドの加工効率を上げるためには、放電エネルギーを大きくするという方法が考えられる。

3.4 放電ギャップ

図 3.12 に放電ギャップの比較を示す。放電ギャップの大きさは、純チタンは 2.5～7 μm 、焼結ダイヤモンドは 3～5 μm 、単結晶ダイヤモンドは 1～2 μm となる。単結晶ダイヤモンドへの放電加工は、放電プラズマの発生が小さいので放電ギャップも小さくなると考えられる。単結晶ダイヤモンドは、放電エネルギーの増大に伴い、加工効率が上がる傾向が考えられるが、放電エネルギーを大きくして加工を行った場合でも、放電ギャップはあまり大きくなり、十分に精度が高い加工が行えると考えられる。

3.5 加工穴と電極のSEM画像

図 3.13～図 3.16 に単結晶ダイヤモンドの加工穴と電極を示す。

図 3.17～図 3.20 に焼結ダイヤモンドの加工穴と電極を示す。

図 3.21～図 3.24 に焼結純チタンの加工穴と電極を示す。

単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド純チタンの加工穴を比較すると、加工精度は、加工穴の壁面を見ると、純チタンと焼結ダイヤモンドではコンデンサ容量が大きくなるにつれ精度も悪くなっているが、単結晶ダイヤモンドではコンデンサ容量 10pF、100pF、220pF はほぼ同等である。加工深さは、3300pF が一番深く、次いで 220pF、100pF、10pF の順であった。コンデンサ容量 10pF、100pF、220pF では加工穴に異物の付着があるが、3300pF では異物の付着は少ない。3300pF は放電エネルギーが大きいため、異物が飛散したと考えられる。単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンドともに、コンデンサ容量 10pF、100pF、220pF では加工穴の中央部分が加工されずに盛り上がり、電極も中央部が凹んでいる。純チタンも同様に電極の中央部が凹んでいる。これは電極を回転させて加工を行っているため、穴の中央部分に加工屑が溜まり、その屑が放電の妨げとなり加工がされにくくなっていると考えられる。

3.6 放電波形の比較

図 3.25a)～c)に各材料の放電加工を示す。加工の良好な純チタン、焼結ダイヤモンドでは安定した放電波形になっていて、出力電圧のピーク値も高い。一方、単結晶ダイヤモンドではピーク値が低く、また放電の不安定さがみられる。放電を良くするためには、加工の時の放電エネルギーの増大や、加工面のグラファイト化の促進などの加工条件、加工環境の追求が必要である。

3.7 考察

単結晶ダイヤモンドの微細放電加工は、純チタンと焼結ダイヤモンドに比べ加工時間が長く、電極消耗量も大きく、加工深さも不安定で加工ごとに加工深さにもばらつきがみられた。しかし、放電加工が難しいとされていた単結晶ダイヤモンドに対して放電加工が確実に行えた。そして放電ギャップが小さく、放電エネルギーの増大に伴い、消耗比が減少するが傾向がみられた。今後、単結晶ダイヤモンドの加工効率を向上させるためには、より強固な導電層の生成、放電エネルギーを増大させるなどの加工条件の最適化、加工屑の除去効率の向上が必要であると考えられる。

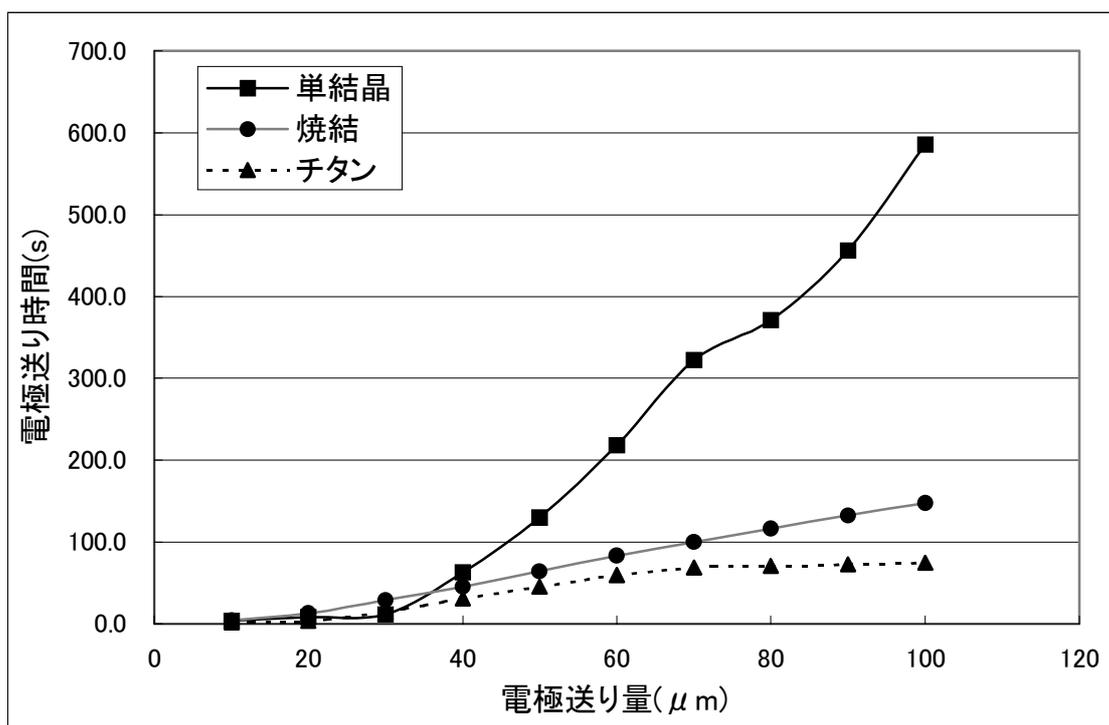


図 3.1 単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド、純チタンの電極送り時間の比較 (10pF)

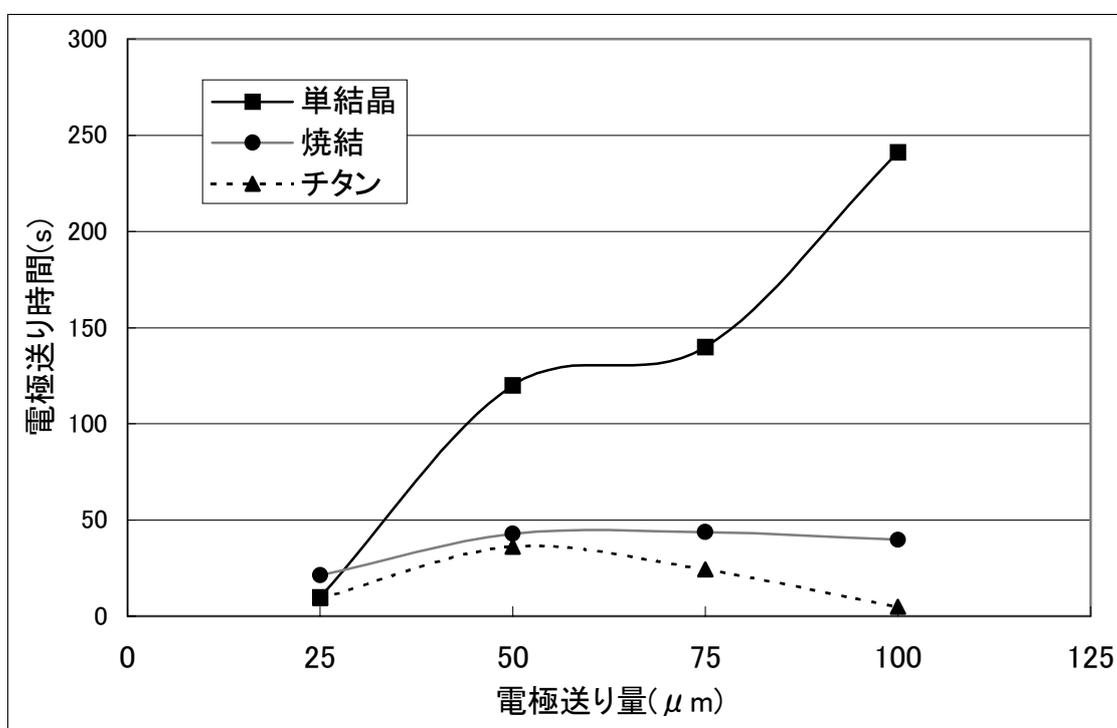


図 3.2 25 μm ごとの電極送り時間の比較 (10pF)

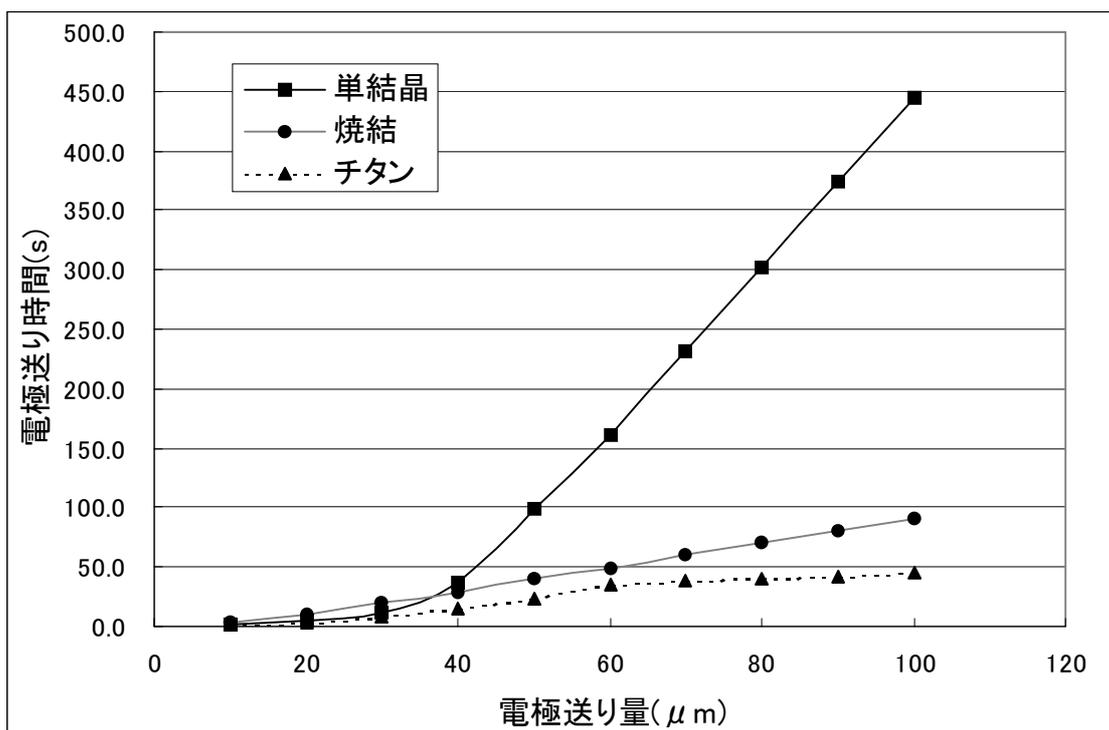


図 3.3 単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド、純チタンの電極送り時間の比較 (100pF)

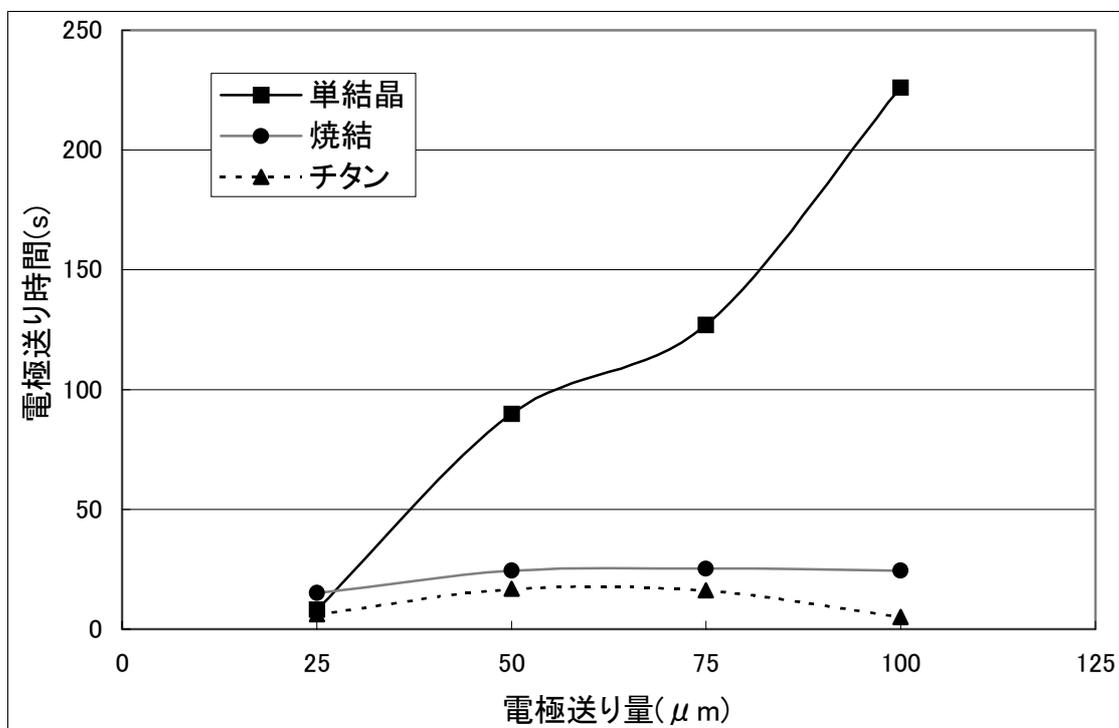


図 3.4 25 μmごとの電極送り時間の比較 (100pF)

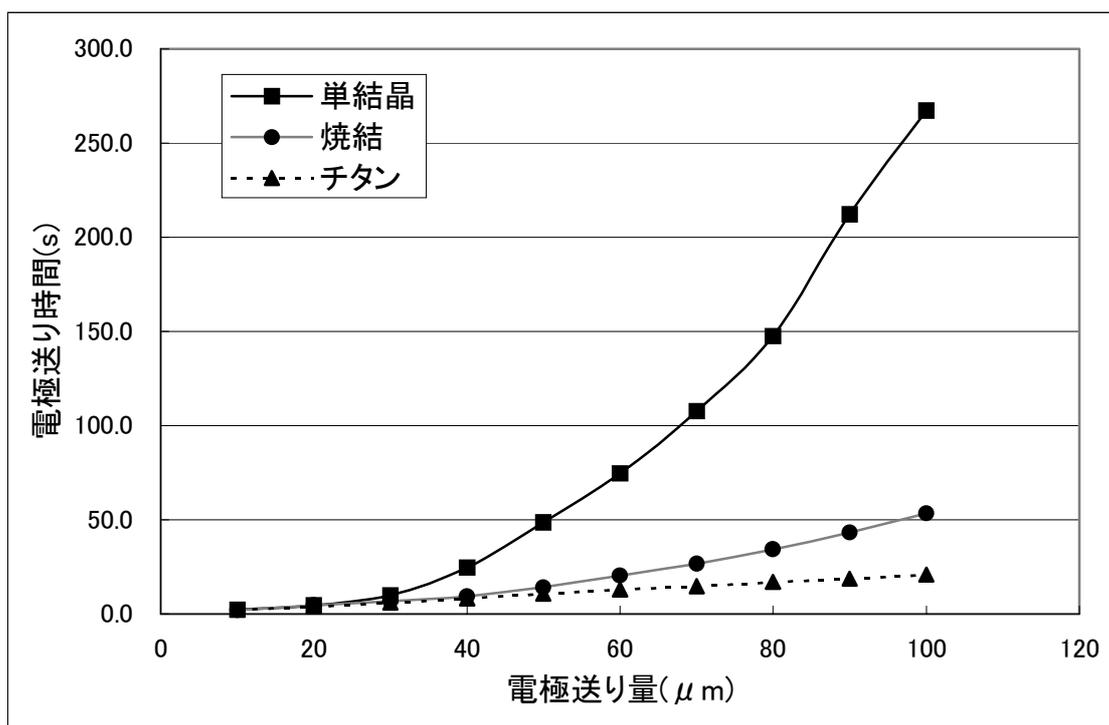


図 3.5 単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド、純チタンの電極送り時間の比較 (220pF)

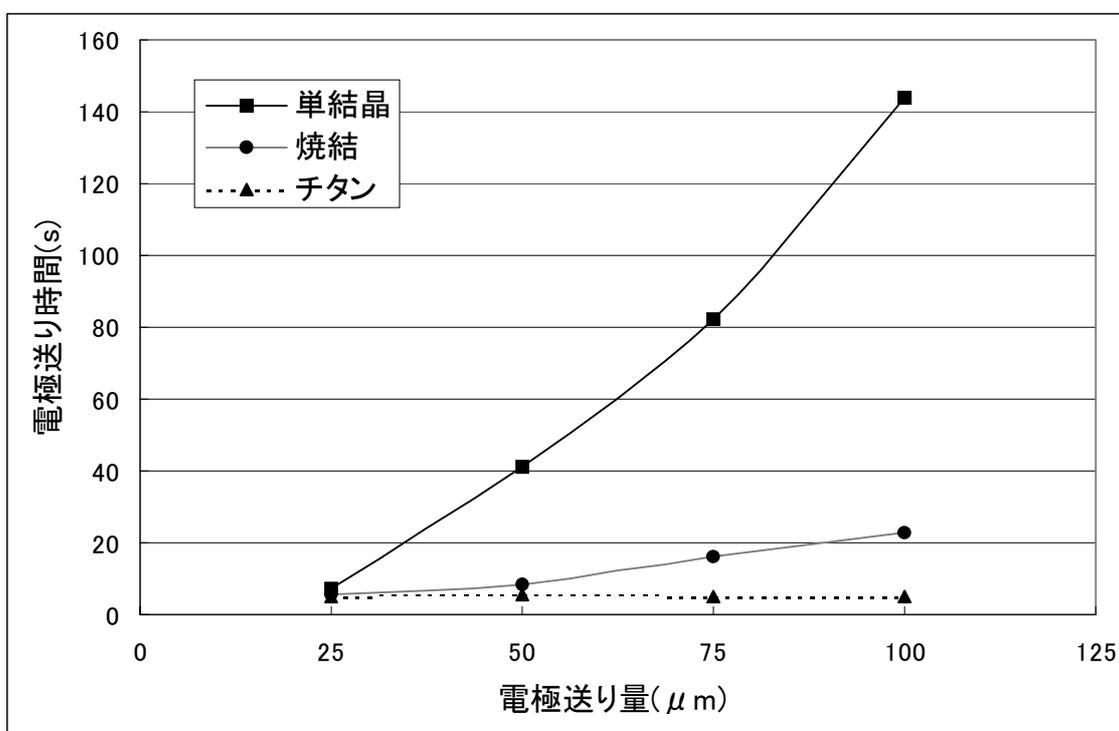


図 3.6 25 μmごとの電極送り時間の比較 (220pF)

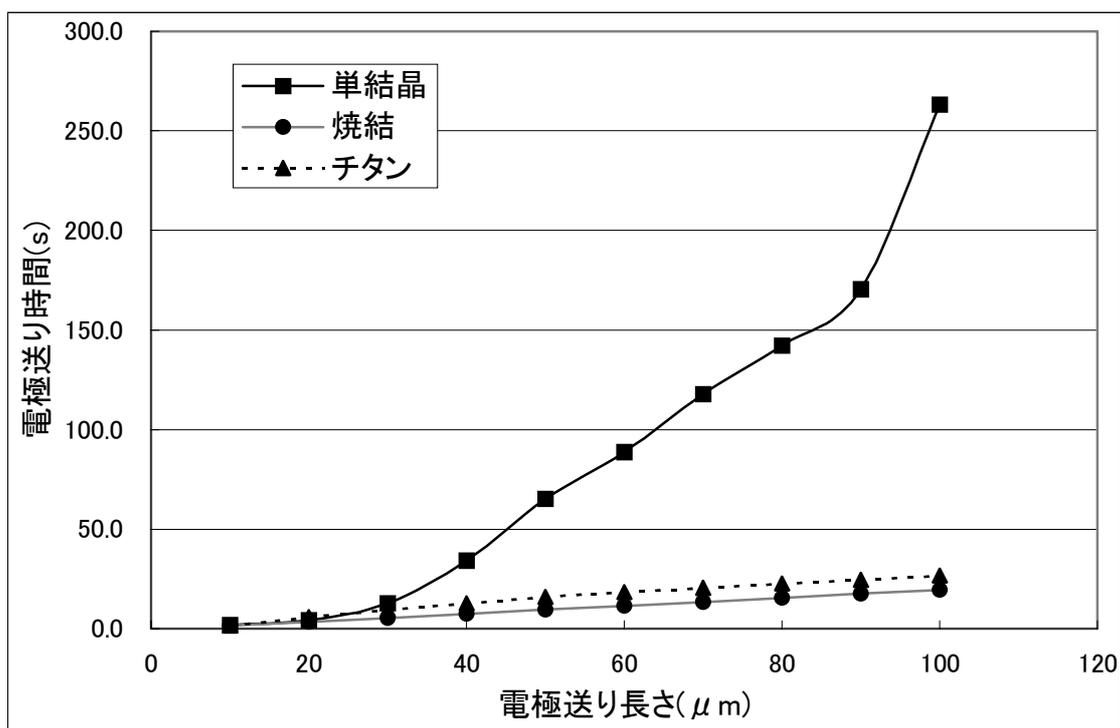


図 3.7 単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド、純チタンの電極送り時間の比較 (3300pF)

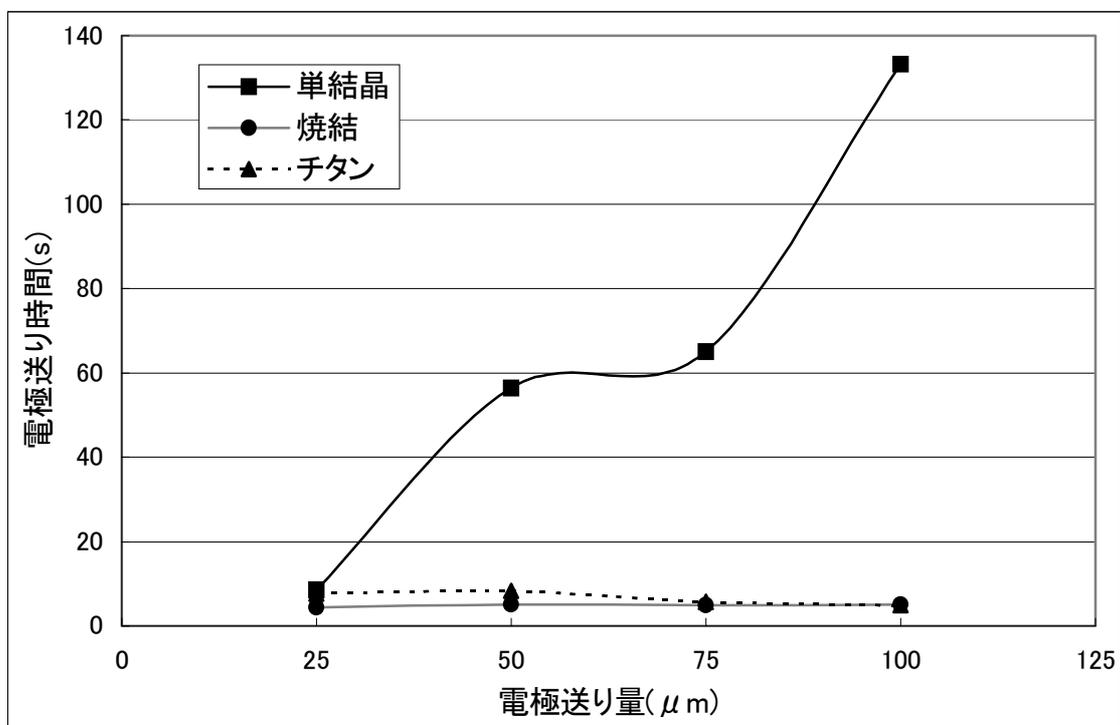


図 3.8 25 μmごとの電極送り時間の比較 (3300pF)

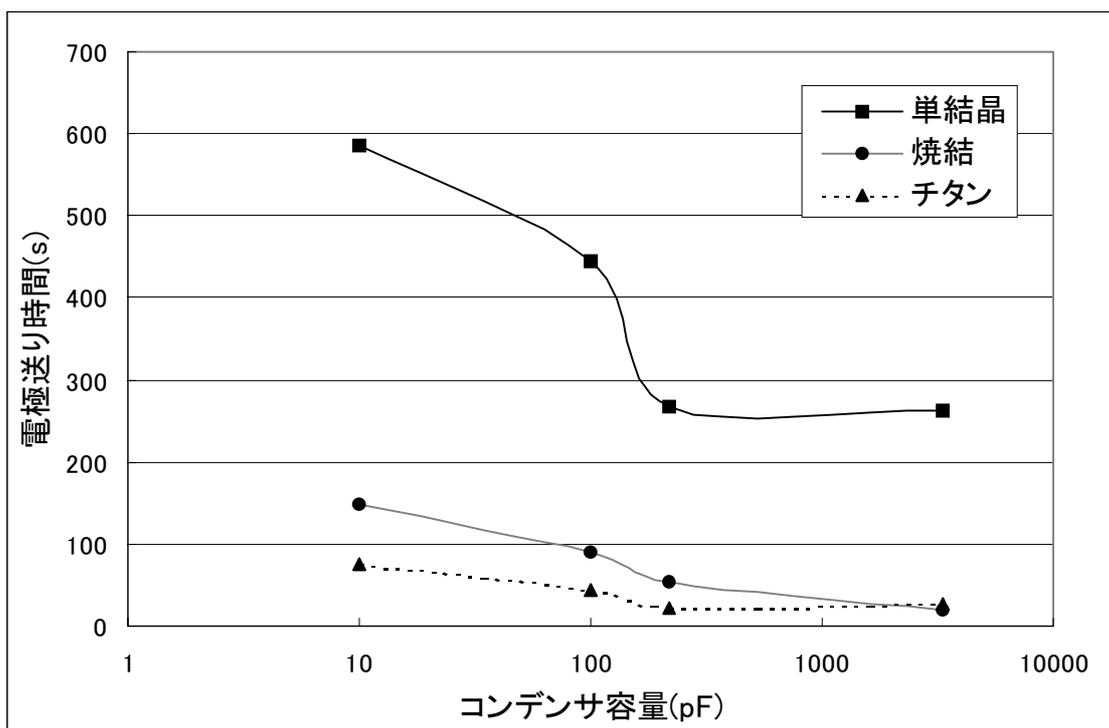


図 3.9 単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド、純チタンのコンデンサ容量と電極送り時間の関係

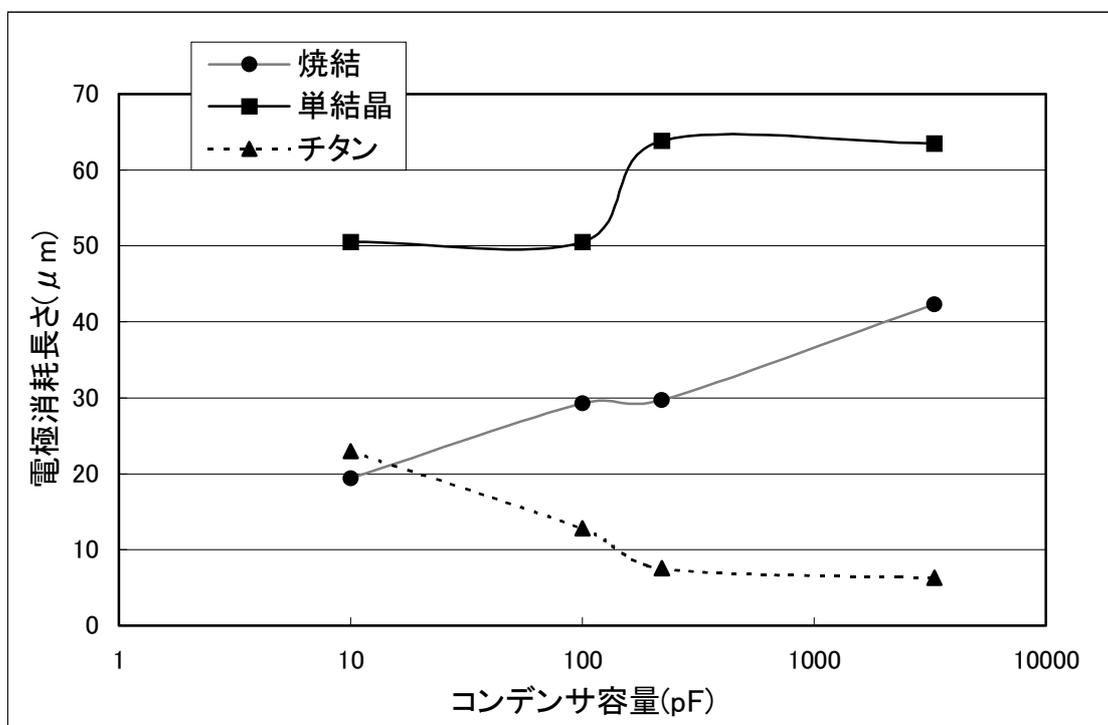


図 3.10 単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド、純チタンの電極消耗量長さの比較

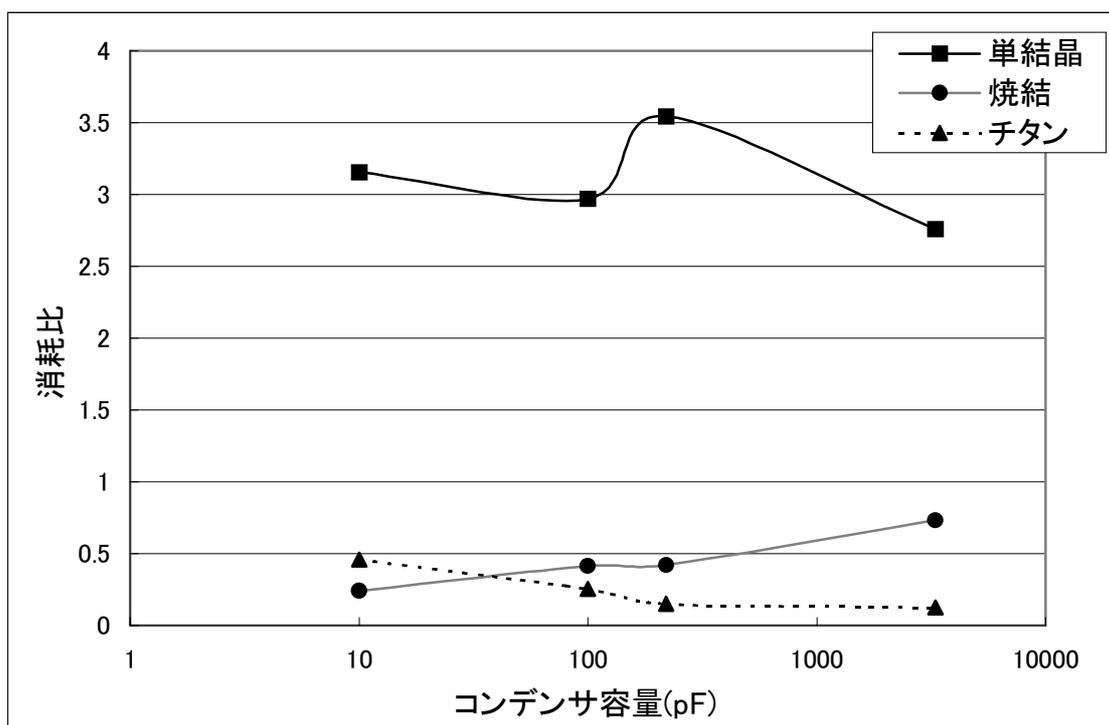


図 3.11 単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド、純チタンの消耗比の比較

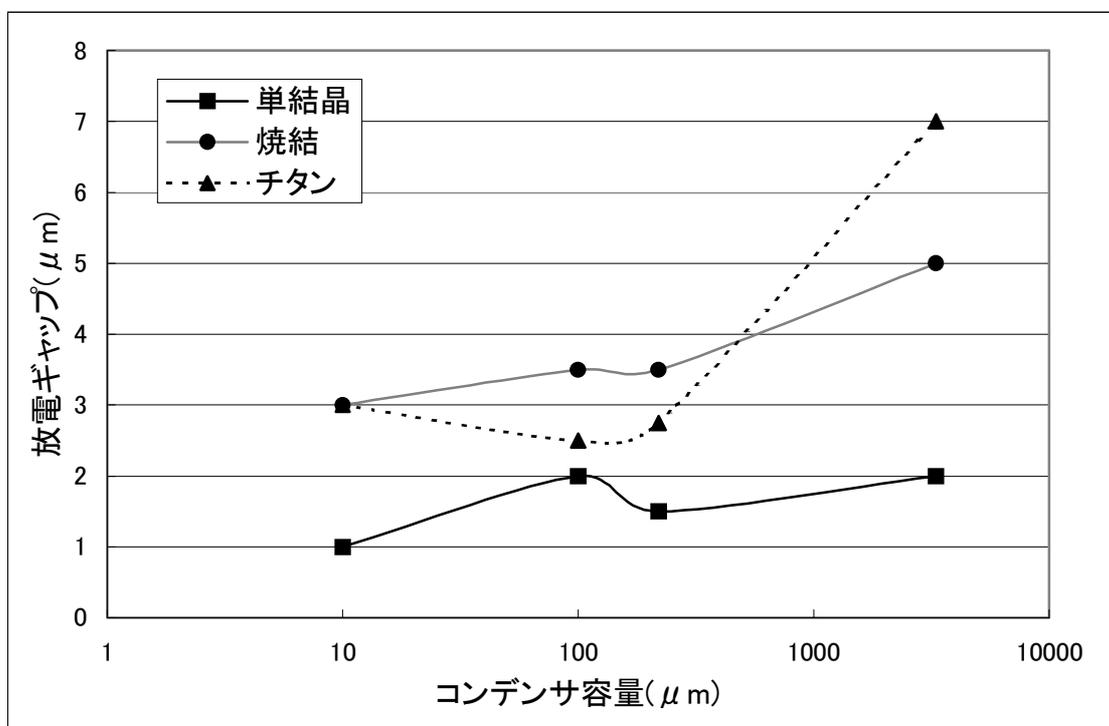


図 3.12 単結晶ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド、純チタンの放電ギャップの比較

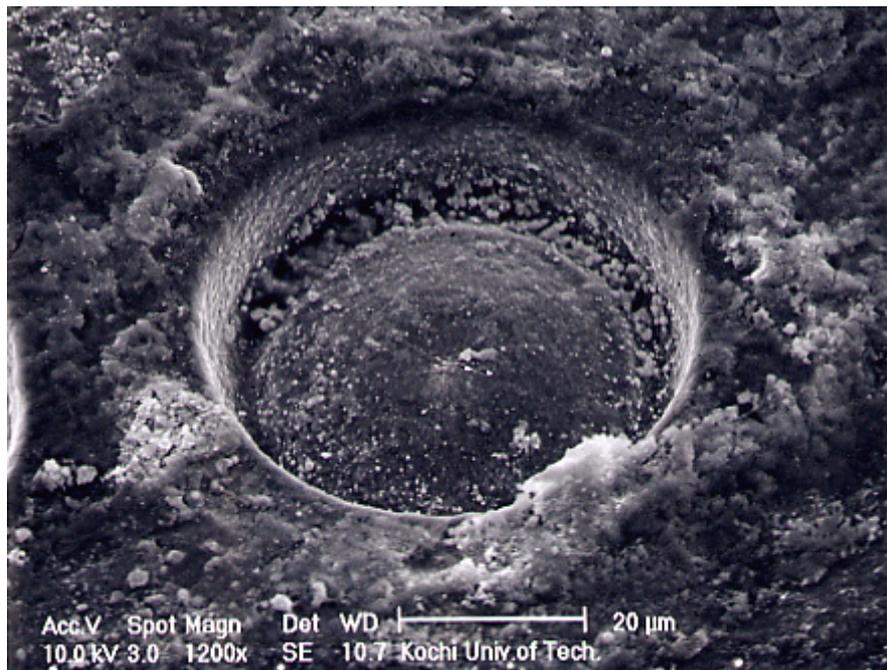
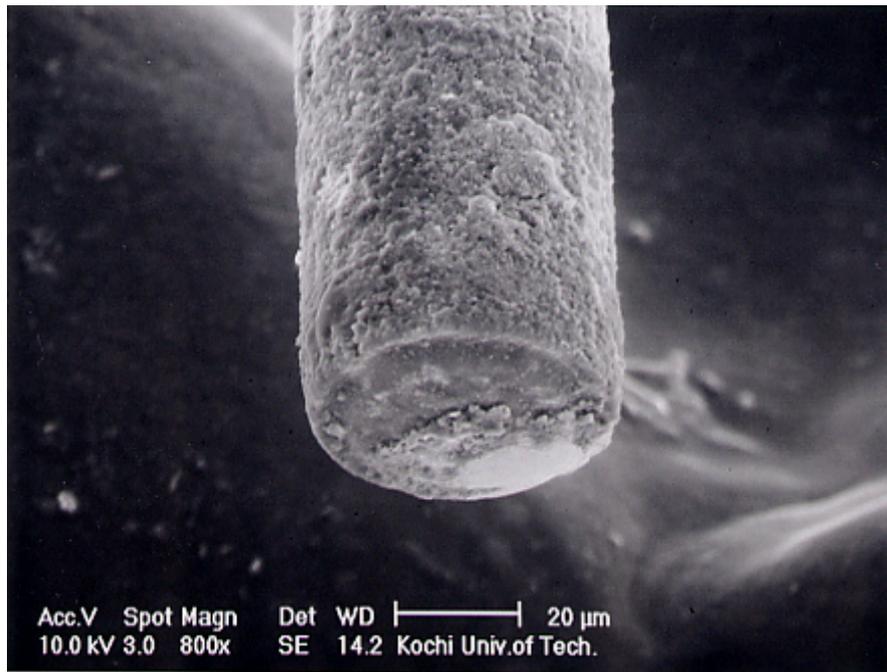


図 3.13 単結晶ダイヤモンド 10pF
電極と加工穴

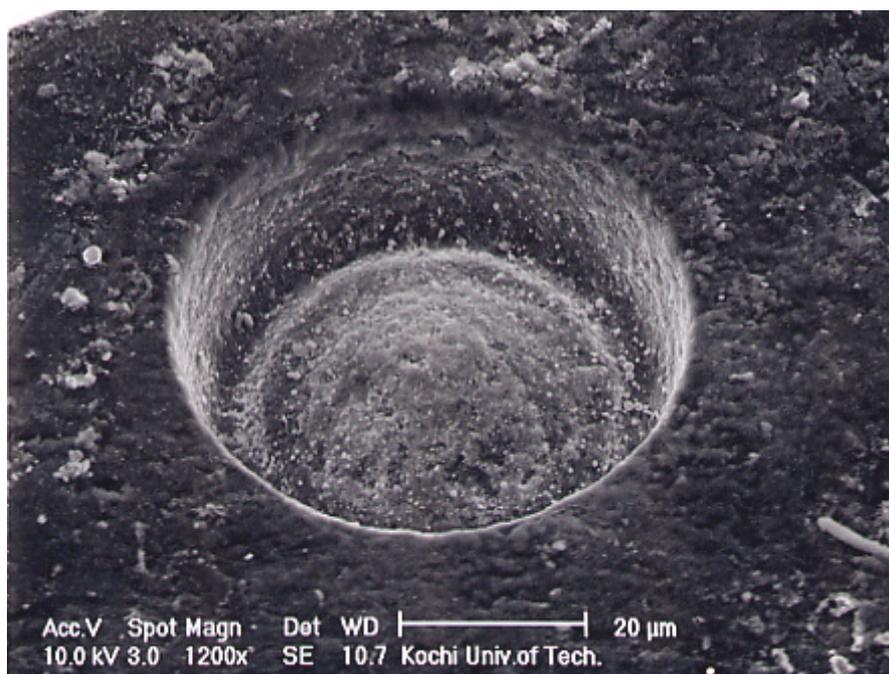
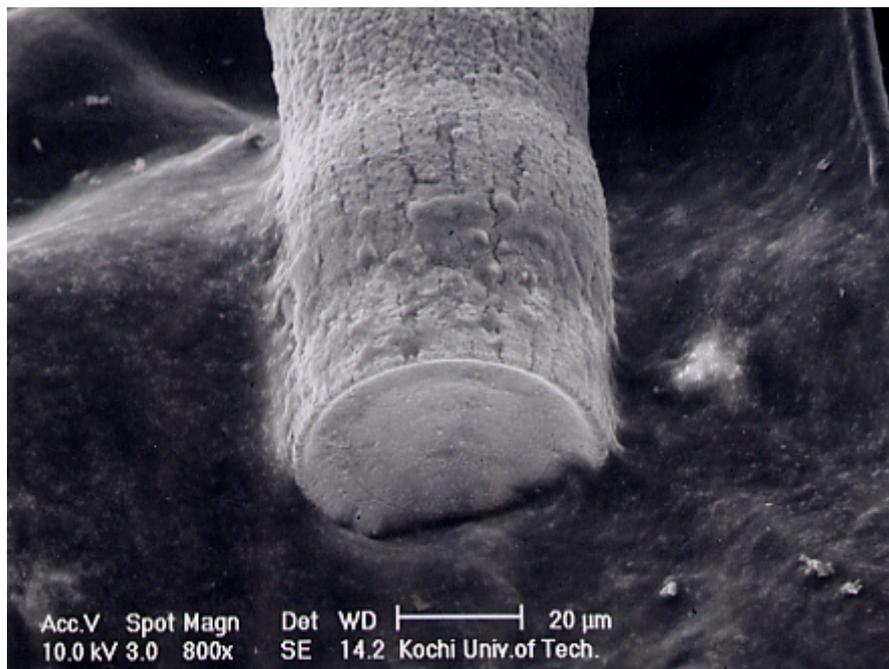


図 3.14 単結晶ダイヤモンド 100pF
電極と加工穴

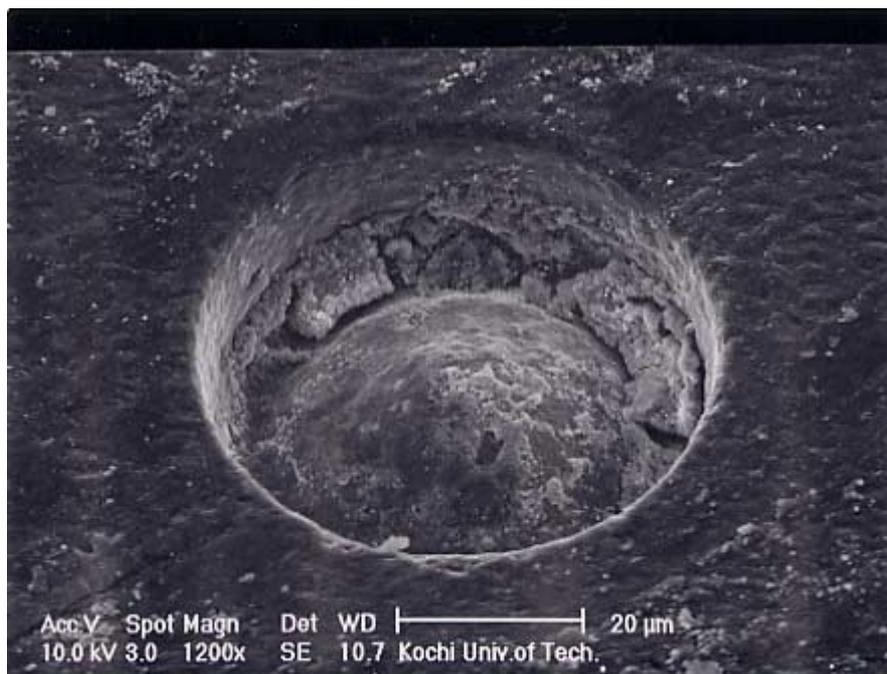
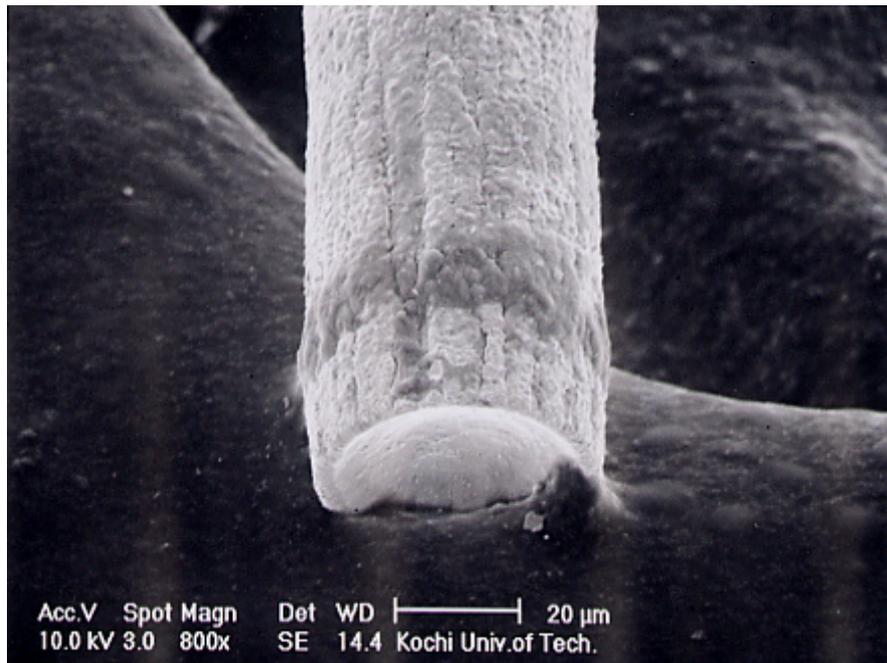


図 3.15 単結晶ダイヤモンド 220pF
電極と加工穴

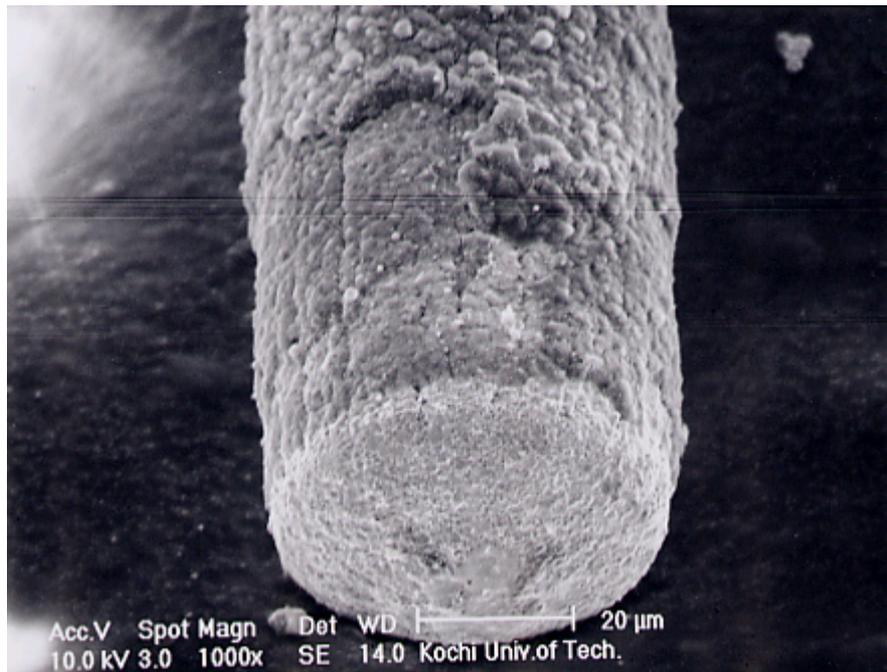


図 3.16 単結晶ダイヤモンド 3300pF
電極と加工穴

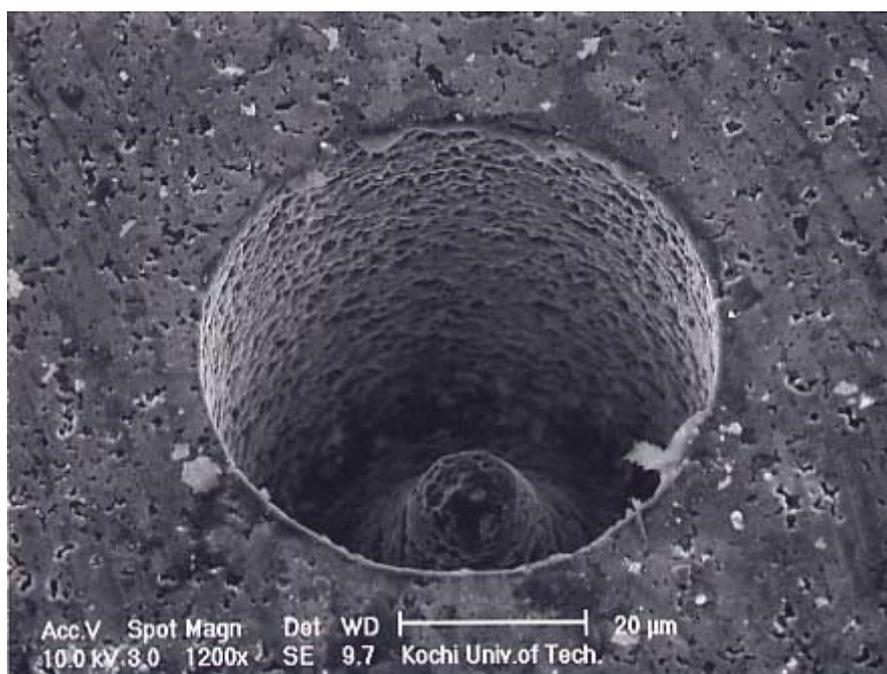
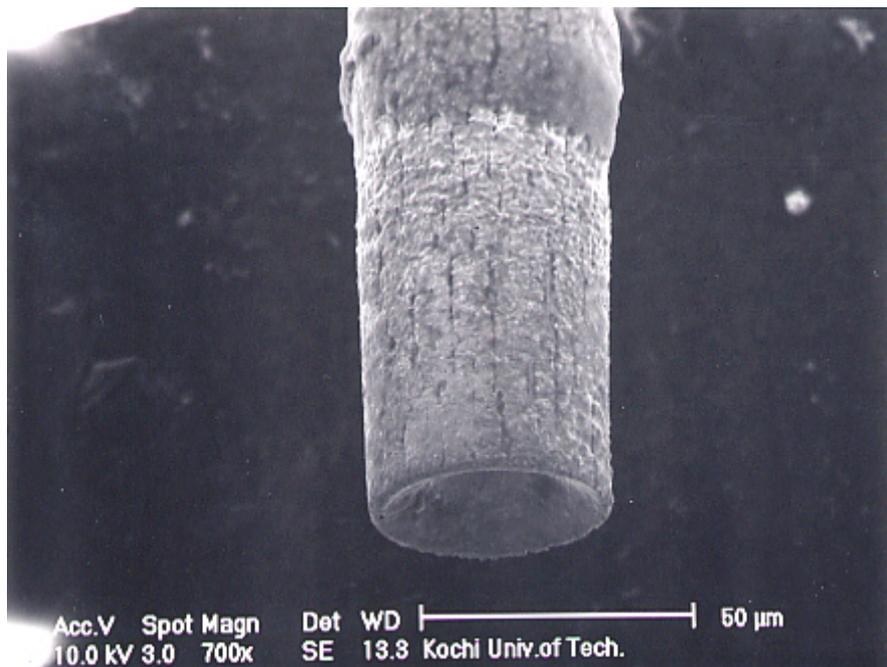


図 3.17 焼結ダイヤモンド 10pF
電極と加工穴

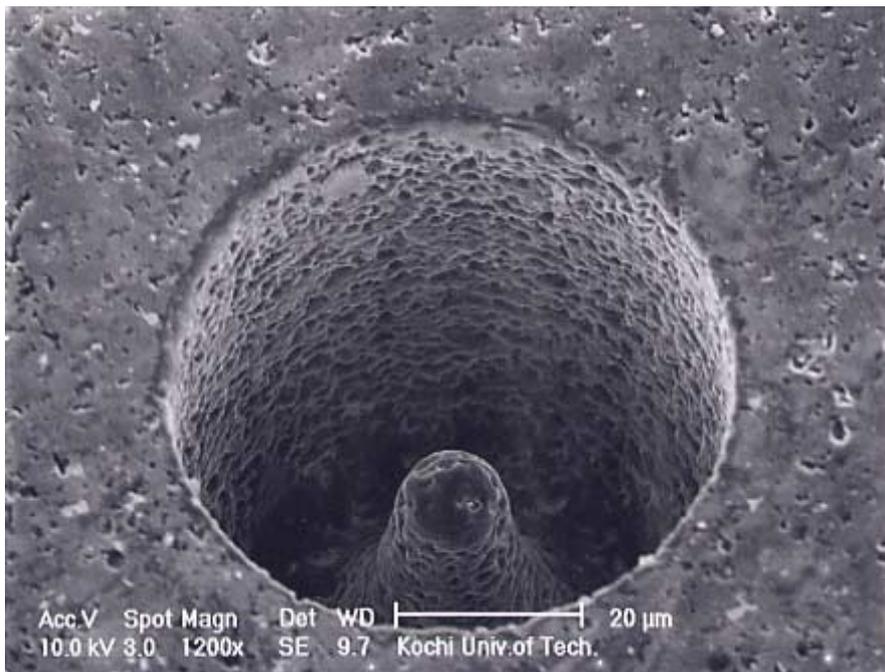
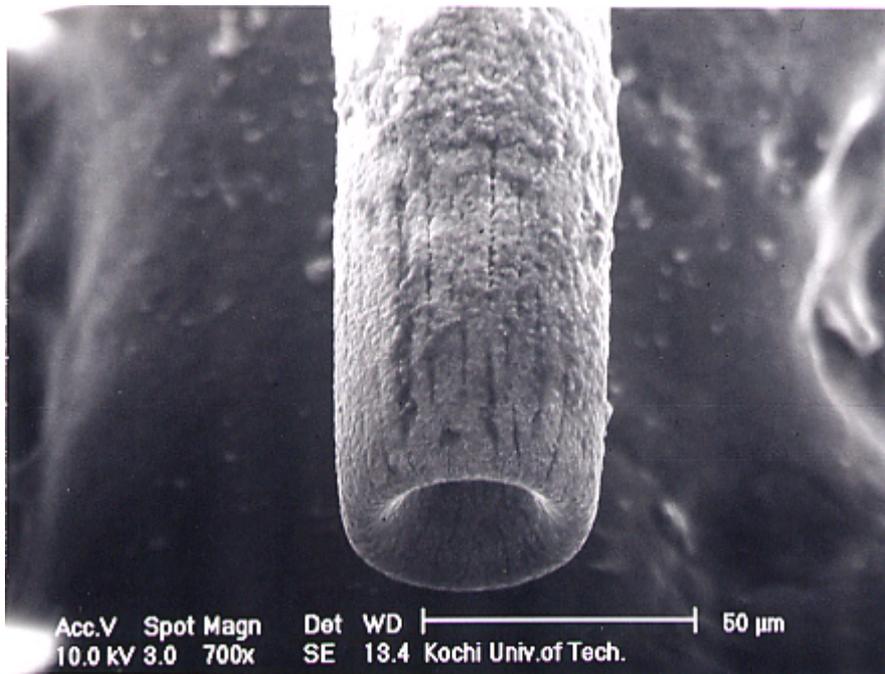


図 3.18 焼結ダイヤモンド 100pF
電極と加工穴

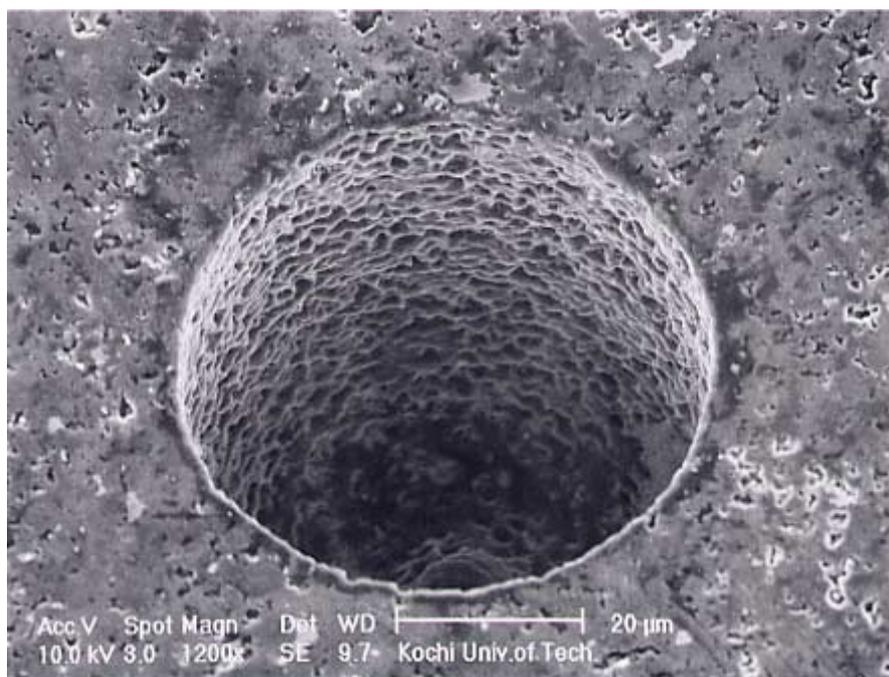
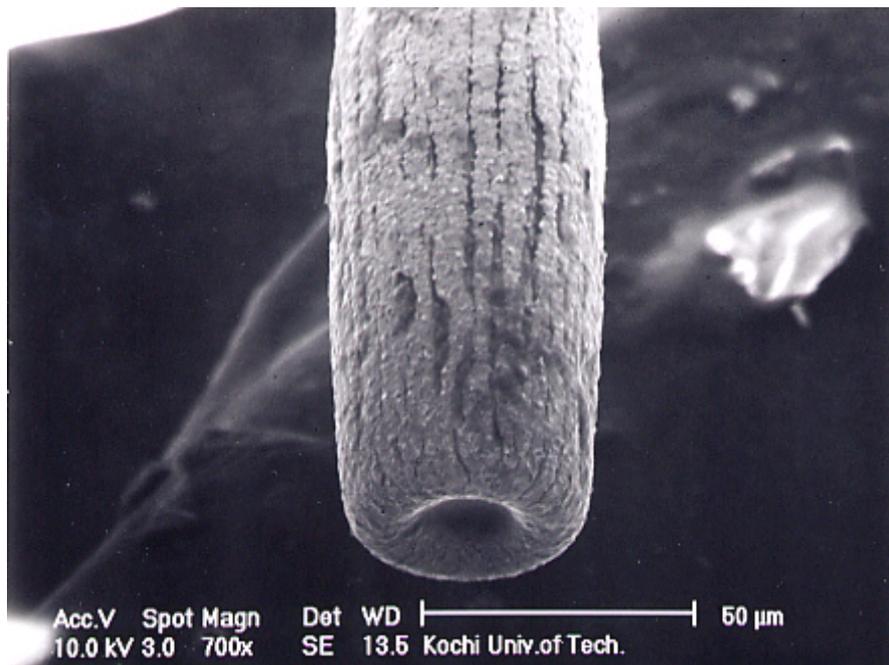


図 3.19 焼結ダイヤモンド 220pF
電極と加工穴

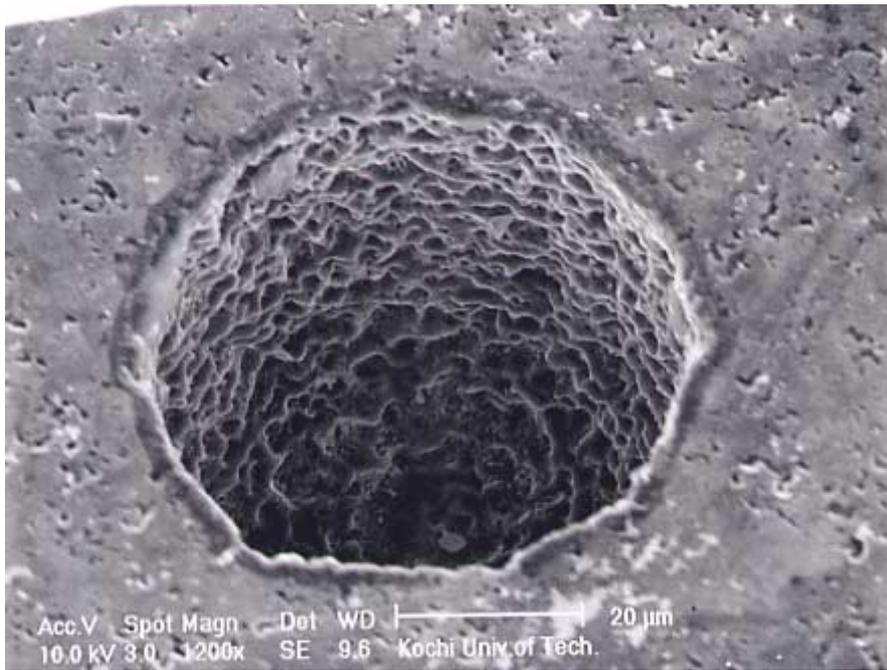
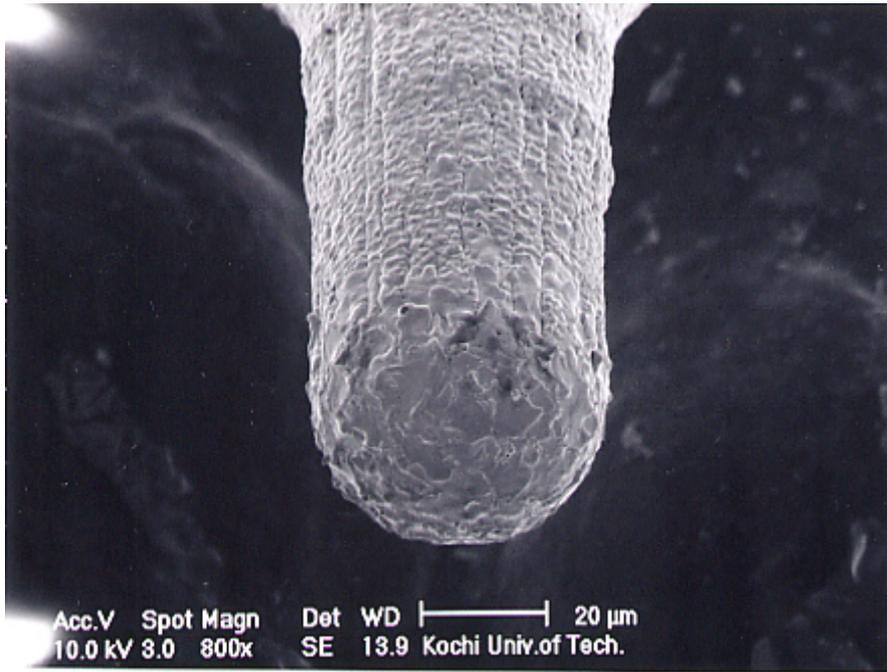


図 3.20 焼結ダイヤモンド 3300pF
電極と加工穴

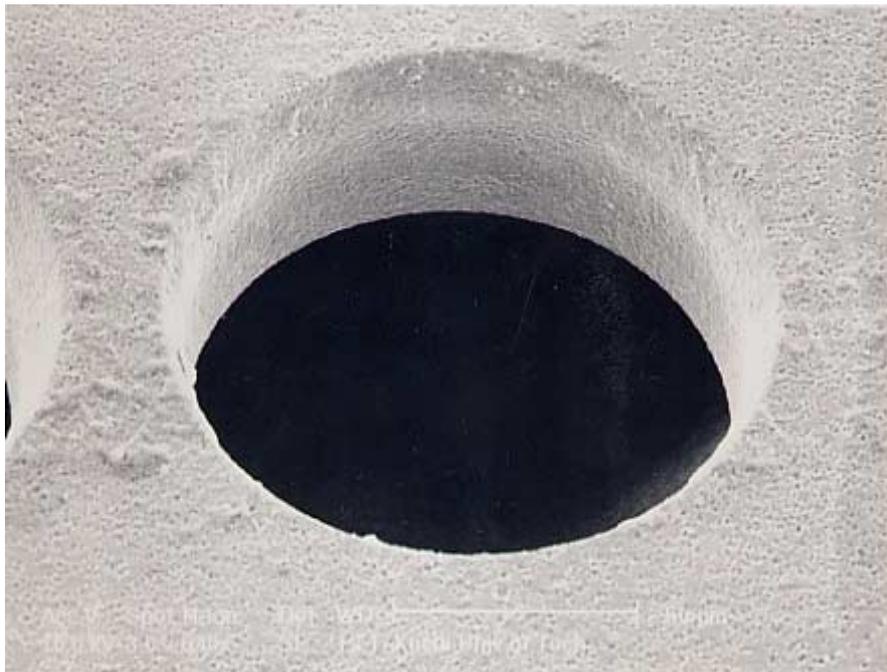
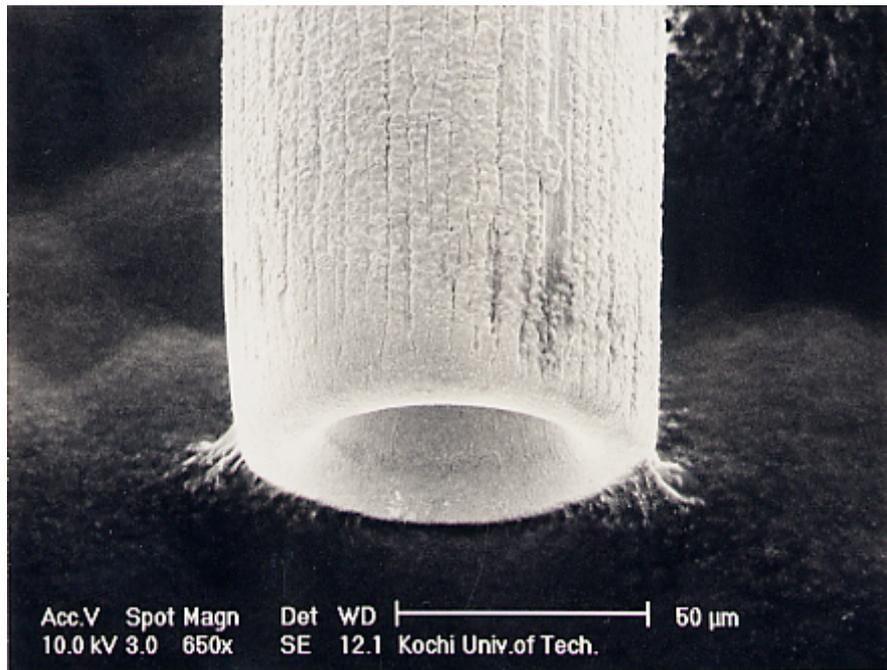


図 3.21 純チタン 10pF 電極と加工穴

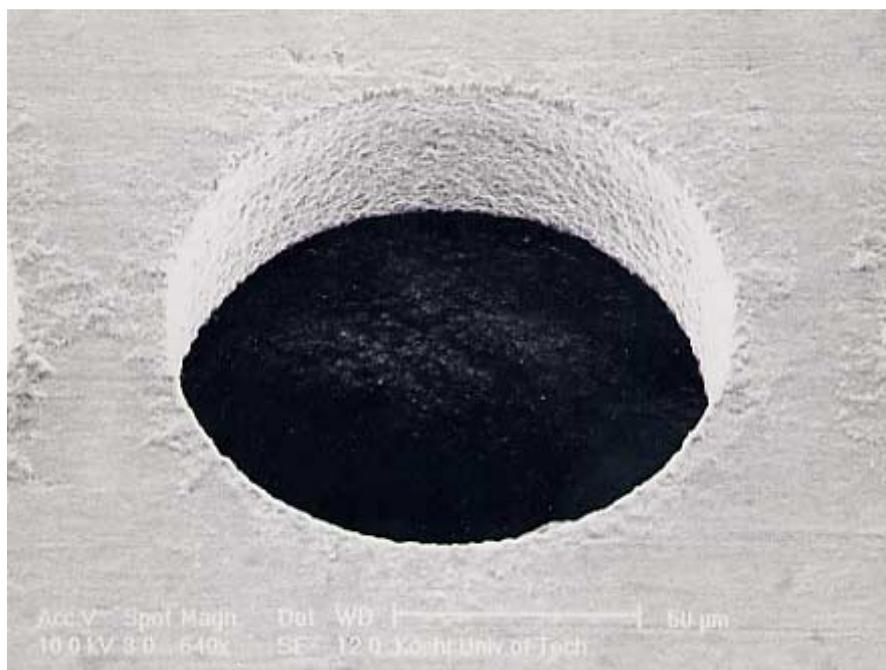
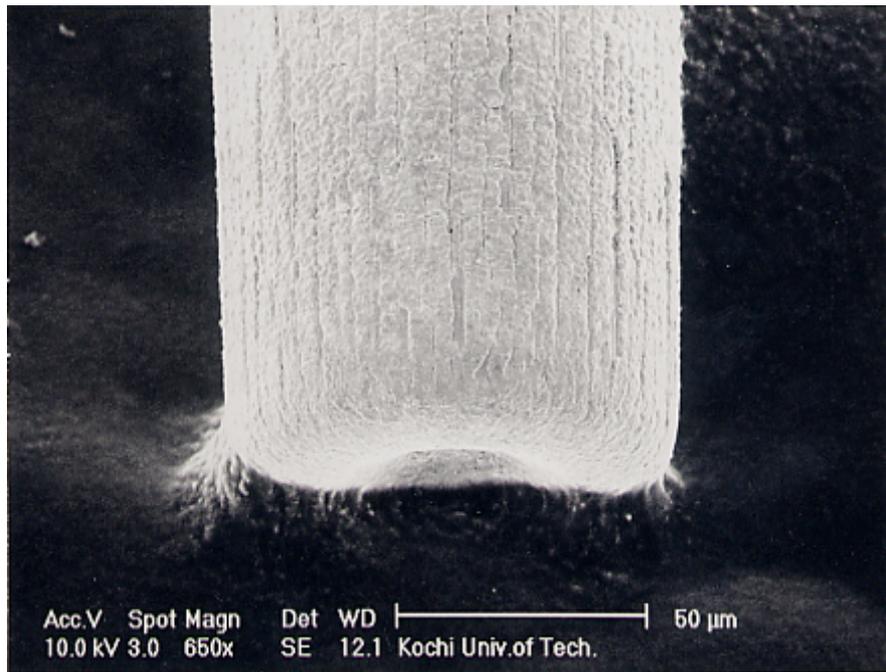


図 3.22 純チタン 100pF 電極と加工穴

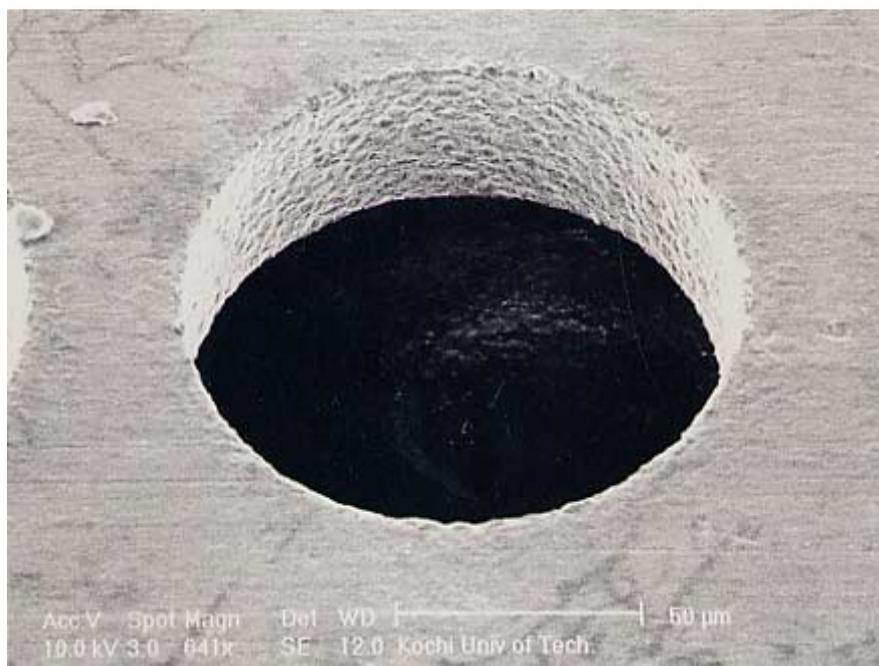
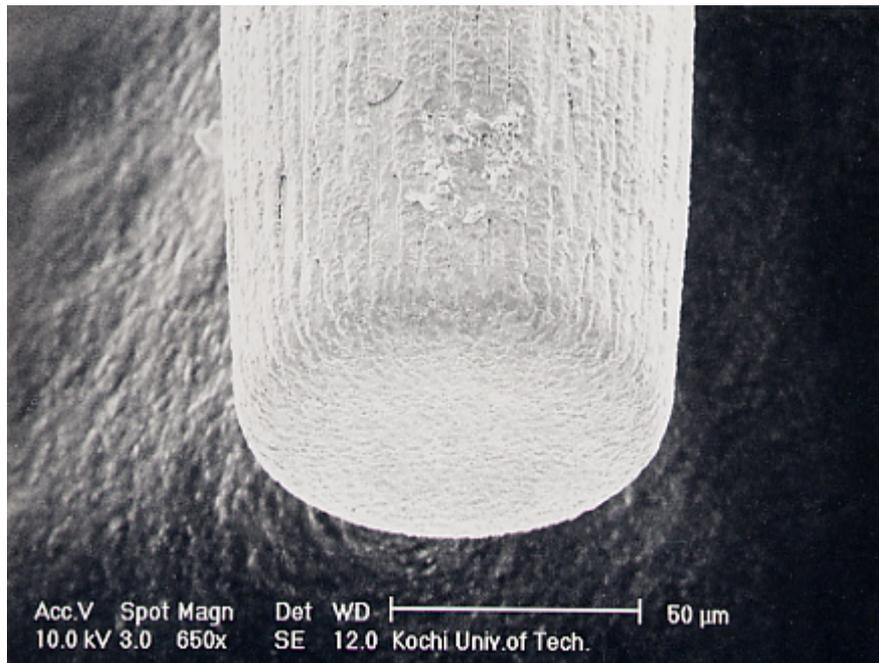


図 3.23 純チタン 220pF 電極と加工穴

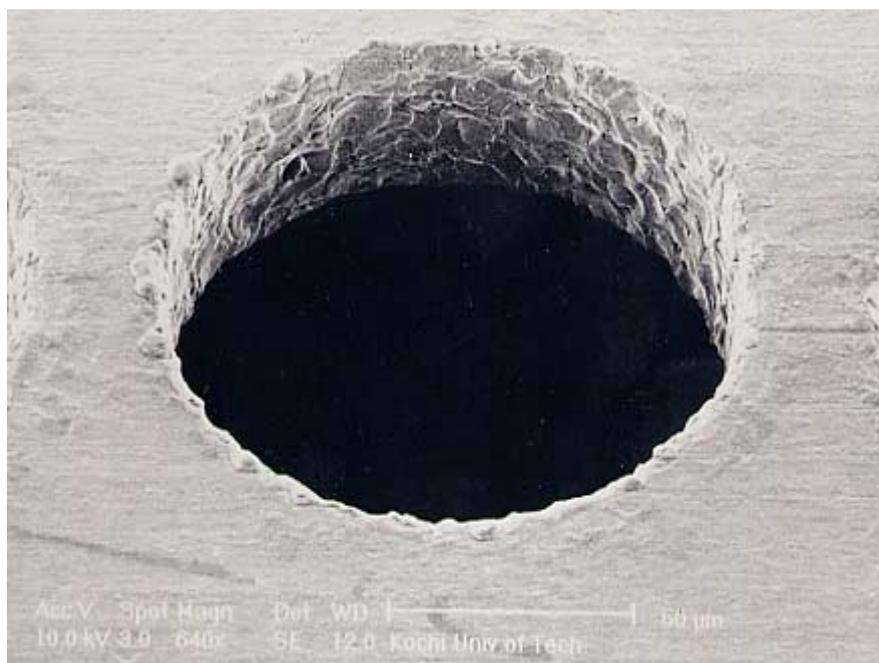
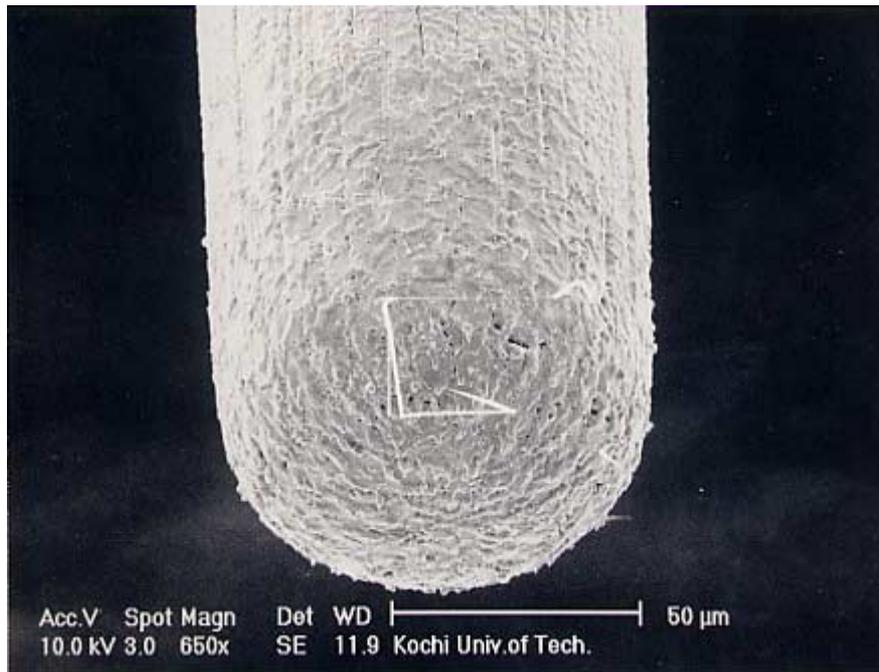
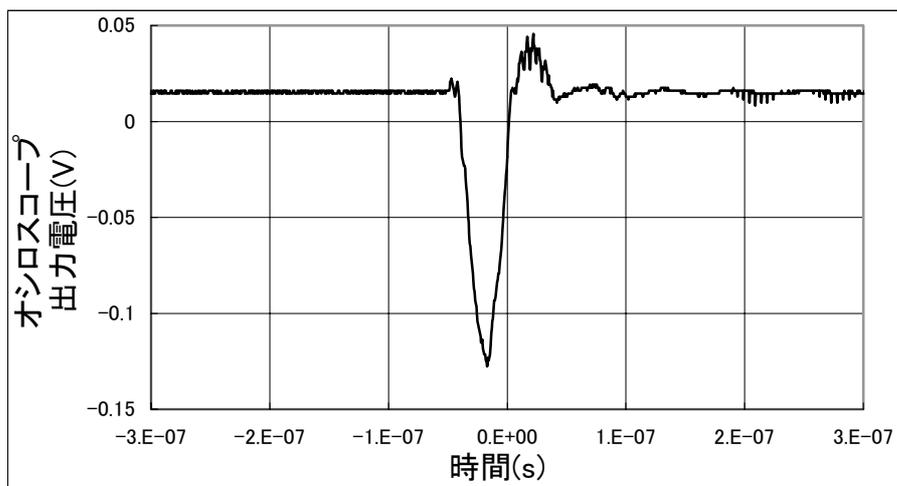
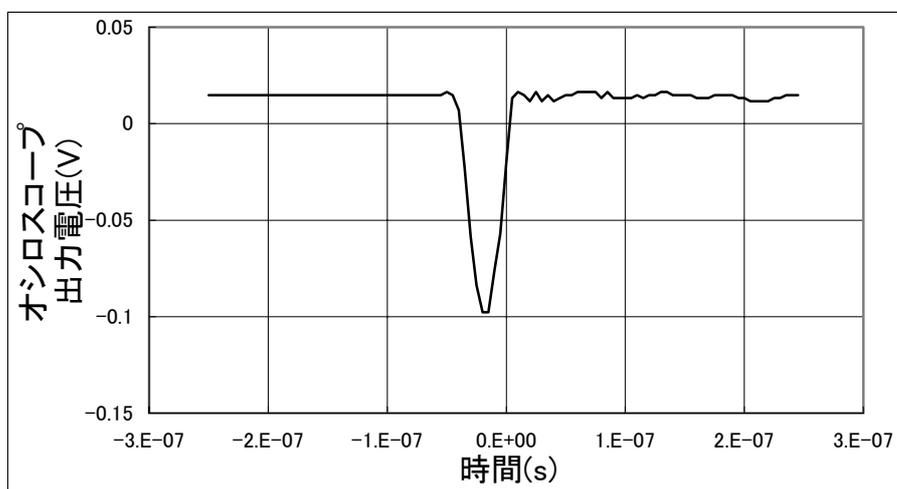


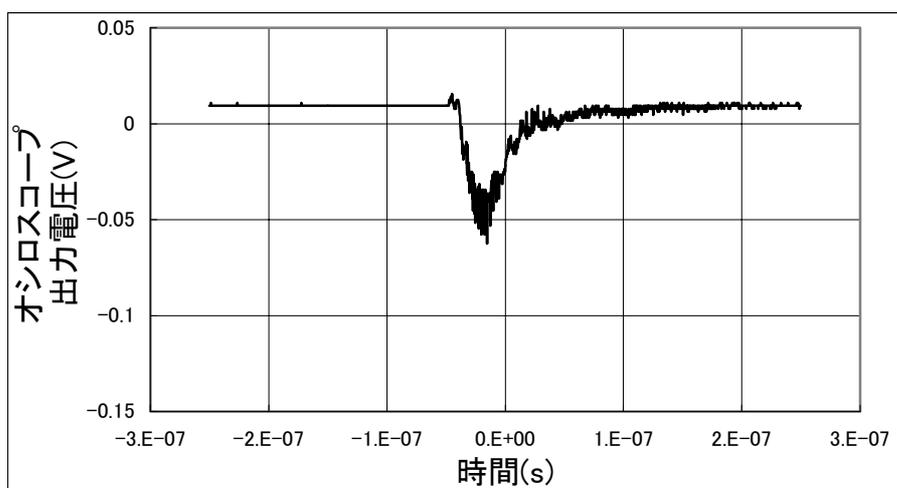
図 3.24 純チタン 3300pF 電極と加工穴



a) 純チタン



b) 焼結ダイヤモンド



c) 単結晶ダイヤモンド

図 3.25 放電波形

第4章 各種の表面に導電層を設けた単結晶ダイヤモンドの放電加工

単結晶ダイヤモンドのYAGレーザー切断面を放電開始点として放電加工が可能であることはすでにわかった。そこで、YAGレーザー切断以外の方法で表面に導電層を生成した場合の加工を試みた。図4.1は単結晶ダイヤモンドに厚さ1 μm の金を蒸着させた面に穴加工を施した結果である。周辺で金の剥離はあるが加工はされていることを確認した。しかし、今回の加工では金の蒸着が弱く金が剥がれてしまい、加工は不安定であった。

図4.2は単結晶ダイヤモンドにTi-Al-Nbを溶着させた面に穴加工を施した結果である。こちらでも放電加工は可能であった。Ti-Al-Nbの溶着が荒く、表面全体に均一に溶着されていないために加工が不安定であり、加工深さも浅い。

以上の結果より、単結晶ダイヤモンドのYAGレーザー切断面以外の方法で表面に導電層を設けた場合であっても、放電加工が可能であることがわかった。しかし、加工は不安定で、安定した加工のためには、より強固な導電層の生成が必要であると考えられる。



図 4.1 単結晶ダイヤモンド金蒸着面への穴加工



図 4.2 単結晶ダイヤモンド Ti-Al-Nb 溶着面への穴加工

第5章 CVDダイヤモンドへの放電加工

単結晶ダイヤモンドへの放電加工は表面に何らかの導電層を設けることで、加工が可能であることがわかった。次に単結晶ダイヤモンド以外のダイヤモンドへの放電加工を試みた。図 5.1~5.3 にシリコン基板上に作られた厚さ 5~10 μm のCVDダイヤモンド面に、厚さ 1 μm の金を蒸着させた面に対して穴加工を施した結果である。金の剥離や周辺の異物付着はあるが、放電加工できることを確認した。CVDダイヤモンドの放電加工は、コンデンサ容量が大きい方が加工深さは深くまで加工されている。しかし、コンデンサ容量 3300pF では加工ができなかった。これは放電エネルギーが大きいため、CVDダイヤモンドの表面が十分にグラファイト化する前に蒸着した金が飛散してしまうためと考えられる。

CVDダイヤモンドにも微細放電加工は可能であった。こちらにもコンデンサ容量を大きくしても飛散しない強固な導電層を設けてやることで、より安定した加工が可能になると考えられる。



図 5.1 CVDダイヤモンドへの穴加工 10pF



図 5.2 CVDダイヤモンドへの穴加工 100pF

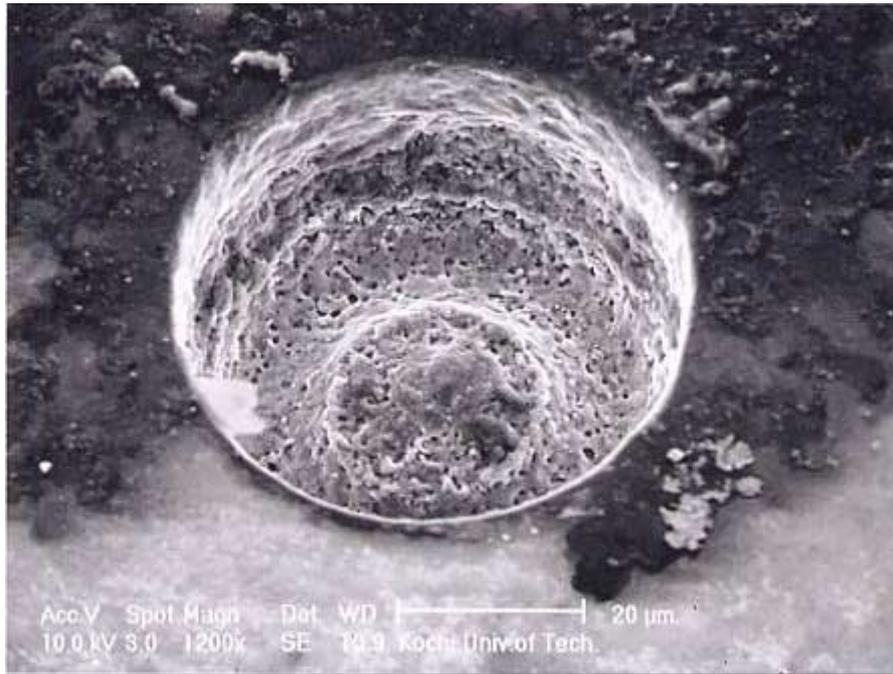


図 5.3 CVDダイヤモンドへの穴加工 220pF

第6章 結論

- 1) 単結晶ダイヤモンドの微細放電加工は、純チタンや焼結ダイヤモンドと比較し加工時間が長く、電極消耗長さ、消耗比も大きい。しかし、単結晶ダイヤモンドの放電ギャップ小さく、コンデンサ容量の増大に伴い消耗比が減少する傾向がみられた。今後、放電エネルギーを増大させるなどの手段で加工条件を最適化することにより加工効率を上げうる可能性があると考えられる。
- 2) 単結晶ダイヤモンドの金蒸着面、Ti-Al-Nb 溶着面への微細放電加工は可能であった。しかし、金の蒸着が弱いためや、Ti-Al-Nb の溶着が粗いため放電の開始は不安定であった。今後、加工を安定させ、加工効率を向上させるためには、より強固な導電層の生成が必要であると考えられる。
- 3) CVD ダイヤモンドにも微細放電加工が可能である。CVD ダイヤモンドに関しても、放電加工を安定して行うためには、より強固な導電層の生成が必要であると考えられる。

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親切に御指導を頂いた高知県工業センター西村一仁氏、松下通信工業（株）佐藤健夫氏に心から厚く御礼申し上げます。

本研究のためのサンプルをご提供して下さったトーメイダイヤ（株）細見暁専務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、ご指導、ご協力して下さった高知工科大学大学院知能機械システムコース寺田研一郎先輩に心から厚く御礼申し上げます。

2002年2月28日

掛水 大介

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 輝他：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・知能化辞典、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 .

本研究にかかわる講演

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 .