

第1章 緒言

ダイヤモンドはその硬度、強度からマイクロマシンに理想的な条件を備えている。焼結ダイヤモンドは焼結助材が導電性のあるコバルトであるので良好な微細放電加工が可能である。また、単結晶ダイヤモンドでも YAG レーザ切断面のように表面が高温下でグラファイト化されている場合、それを足がかりにして微細放電加工が可能であることを見出した¹⁾。しかし、これらダイヤモンド材料の微細放電加工では金属材料と比べ電極の消耗が大きい。このため効率的な加工を目指し、ダイヤモンド材料、加工条件と電極消耗の関係を求めた。

第 2 章 関連する研究の現状

2.1 放電加工²⁾

放電加工法は、両極間（工具電極と工作物）に直接放電を発生させて、放電に伴う熱的作用や力学的作用などを利用して加工の目的を達成する方法を総称しているが、このなかで、現状において広く利用されているのは、形彫り放電加工法とワイヤ放電加工法であり、この両者を狭義の放電加工法として取り扱っている。

形彫り放電加工法は、総型電極を使っての形彫り加工が最初に開発、実用化され、これを放電加工法と呼称していたが、その後、NC 機能をもった形彫り放電加工機が出現して、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 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・応用分野は拡大している。

放電加工においては、機械加工におけるバイトとか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、これを電極と略称しており、加工素材である工作物と対極して使用する。

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している。

実際の加工において、電源および加工回路、電極と工作物の材質的組合せ、加工（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、電極消耗率、加工面粗さ、加工拡大代）の電極効果があるので、加工目的に適合する極性加工を選択する必要がある。

放電加工は 1 回の放電（単発放電）による除去現象が繰返し、すなわち累積であり、単発放電の除去結果が加工特性などのベースとなる。単位時間当りの加工（除去）量が加工速度であり、加工量は除去重量で表示するほかに、体積や面積で表示する場合もあるが、形彫り放電加工では、重量加工速度で表示する場合が多い。

また、加工速度に対し電極消耗（除去）速度が問題になるが、両者の比（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。

放電は非常に複雑な現象であり、まだ十分に解明されていないことが多い分野であるが、簡単にいうと、普通の状態では絶縁物であるもの、例えば空気、紙、純度の高い水、油などのなかを電流が流れるようになる現象であり、雷やネオンサインなどは身近な具体例である。

曲率の大きい針状電極とか、細い導線電極に電圧を印加していくと、電極間の電界分布が著しく不均一なので、電極付近、すなわちとがった部分に局部的に強い電界が存在するようになり、その部分だけが電離を受けて絶縁破壊が発生する。この局部的破壊の状態をコロナ放電とよんでいる。

平板電極のような平等電界で電圧をあげていくと、ある電圧で急に電極間の全長にわたって絶縁破壊が発生する。これが全路破壊であり、全路破壊が安定した状態で発生している場合の持続放電がグロー放電とアーク放電ということになり、局部的な絶縁破壊であるコロナ放電から、全路破壊に移行する瞬間 $[10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ s}]$ に強烈な光と音を発する現象が火花放電である。これは定常的に存在しない現象であり、この顕著な例が大気中の雷である。全路放電でグロー放電になるか、アーク放電になるかは、電源や加工回路の条件、極間の圧力などによっても異なる。

グロー放電はネオンサインにみられるような放電でやわらかい光を伴い、比較的低気圧中（0.1～数 mmHg 程度）で起こりやすく、放電電圧が 200～300V から数百 V、放電電流が数 μA ～数十 mA 程度で、比較的高電圧低電流の放電である。

グロー放電よりさらに電流が増大すると、ある電流値で突然電圧が低下する。このように低電圧大電流の放電がアーク放電である。これら大気中における放電現象は、電氣的条件が満たされれば、液中においても同様な現象が発生する。

アーク放電は、従来からアーク溶接加工などにも多く利用されているが、放電加工に最も関係の深い放電形式である。なお、非金属の放電加工にはコロナ放電を利用する方法がある。

放電加工は、液中での短間隔[数～数十 μm 程度]における極短時間 $[10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ s}]$ の断続放電による除去現象の繰返し[数千～数十万回 / s]を利用したものであり、この放電の形態を、通常、液中過渡アーク放電と呼称している。

放電加工の現象は液中であること、極間距離が極微小であること、一発の放電除去現象がきわめて短時間であることなどのほかに、極間の様相がイオン、加工くず、加工液燃焼生成炭素物質などの不確定要素の影響を大きく受け、かつ加工の進行につれ

てこれらが複雑な変化をするがために、液中放電除去現象に関する極間状態の定量的把握と説明を困難にしている。

アーク溶接加工は気中で放電を持続させ、材料の接合を目的とする加工法であるが、放電加工（法）は液中断続放電除去現象を利用して材料の余分なところを除去することにより加工が成功する方法であり、アーク溶接加工とは大きな違いがある。

放電の発生に伴い陽極側は陰極から飛び出した電子に、陰極側は陽イオンの衝突により加熱されるとともに、狭い放電点に大電流が集中するためジュール熱も作用して、陽極および陰極は高温になり、蒸発・溶融現象が起こる。この状態になった加熱部は、放電が止むと気体中では蒸発した一部を除き、大部分がそのまま冷却・凝固して材料の接合に役立つ。

しかし、材料の不要な部分を除去することによって加工の目的（除去加工）を達成するためには、加工部が溶融状態にある時間内に大きな力を作用させ、その溶融部分を飛散させて除去してやらなければならない。この力（圧力）の発生には極間に液体の存在が必要であり、これがために液中での放電が有効になる。

パルス（断続）放電を液中で発生させると、液体の急激な蒸発作用により、材料の溶融部分を除去するに十分な衝撃的な圧力が生じる。この液体が加工液であり、衝撃力発生に必要なであるとともに、飛散した溶融部の冷却（加工くず）や極間外への排除、加工（加熱）部の冷却などに効果がある。また、絶縁性をもつ加工液は極間を断続的に絶縁する（消イオン効果）ことによって、極間に有効な断続的放電の発生を促進する。

このように材料を加熱し蒸発・溶融状態にして、溶融部分を強制的に除去していく一連の作用の繰返しを有効に、効率よく行っていくために放電の発生、加工部の加熱作用ならびに力の発生の繰返しが必要になってくる。このためには、極間に発生する放電を断続的にしなければならない。したがって放電（加工）エネルギーを極間に繰返し断続して供給することが大切になる。

通常、放電時間は加工エネルギー供給源である電源パルスの幅で示す場合が多いが、厳密には電源から極間までの回路定数などによってパルス幅と放電時間は異なる。しかし、一般的に大きな差異がないので加工条件の設定などにはパルス幅を採用している。

一方、電源からのエネルギー供給に対し、極間での放電の発生には時間的な遅れが

ある場合が多くある．これは放電面の凹凸の程度や極間での加工くず、じんあいなどにより、放電状態が大きく影響を受けるためである．極間において、電源（供給）パルス数に対し有効な断続放電が繰り返し発生しない場合を放電（加工）が不安定だという．

加工エネルギーが断続的に極間に供給されて発生する放電が断続放電、またはパルス供給であるが、断続しない放電は持続放電、または定常放電であり、断続しない放電、短絡現象、もしくは断続放電が加工面全般に分散せずに、局部的に特定の場所に集中して繰り返し発生する場合（通称アーク）などは安定な放電（加工）状態とはいえず、加工効率の低下をきたすのみならず加工精度、加工品質に悪影響を与えるので、これらを防止するために、加工液の噴出・吸引、電極のクイックジャンプなどの対策が必要になる．

極間に供給されたエネルギーによって、放電柱周辺の加工液および工作物と電極のエネルギー伝達部（放電点）近傍は加熱され、この熱が順次内部に伝達して一部を蒸発・溶融する．したがって、加工(除去)機構や加工特性を明確に把握するには、放電点からの材料内部への熱の伝導、すなわち温度分布と蒸発・溶融状態などの関係を知ることが重要になる．

放電衝撃（圧）力の発生は、おもに放電柱の急激な膨張と放電柱からの熱の伝達による加工液の蒸発現象に基因するものである．加工液の蒸発・膨張に関係の深い放電柱の温度は放電エネルギー量、工作物および電極材質、放電発生時の状態などによっても異なるが、その中心部温度は約 3500～18000 と非常に高温であり、これによって放電柱周辺の加工液は急激な沸騰伝熱現象を起こし、蒸気泡の生成、膨張、収縮により爆発的な圧力（放電衝撃力）が発生する．

放電衝撃力の測定には水晶、チタン酸バリウム、ジルコン・チタン酸鉛などのピエゾ受圧子を利用して、直接圧力波形を検出する方法が多く採られている．液中放電のさいの衝撃力の大きさは、放電のさいの電気条件のほか、液中の粘性とか、液中への圧力などによっても変わってくるが、全作用力の最大値が数十 fkg 程度というのがだいたいの結論であり、この力が数 mm² 以下の小面積である溶融部に作用するので、材料の溶融部分を吹き飛ばす値としては十分な大きさである．しかし材料を破壊したり塑性変形したりする大きさではないから、溶融部以外は変形したり除去されることはない．

2.2 ダイヤモンド材料とその加工

1.2.1 ダイヤモンドの特性³⁾

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、耐磨耗性や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。

2.2.2 ダイヤモンドの加工法³⁾

ダイヤモンドの切断に古くから行われていた方法に、へき開加工がある。単結晶のダイヤモンドにはへき開性があるからである。

また、ダイヤモンド膜の切断には、レーザが用いられる。レーザにはエキシマレーザ、YAG(Yttrium Aluminum Garnet)レーザ、CO₂レーザがあるが、ダイヤモンドを精密に切断でき、かつランニングコストの低いYAGレーザが通常用いられる。YAGレーザの波長は1.06 μmで、ダイヤモンドはこの波長の光を大部分透過するはずだが、不純物などの存在でわずかに吸収される。したがって、YAGレーザビームの焦点をダイヤモンド表面に合わせ、大きいエネルギー密度で照射すると、ダイヤモンド表面が除去されて溝が生じる。それとともに、ダイヤモンド表面がわずかにグラファイト化してレーザビームの吸収率が大きくなることも効率よく切断される理由である。

YAGレーザによるダイヤモンド膜の切断加工は、レーザ光をレンズにより集光して大気中でダイヤモンド表面に照射しながら、ビームと直角方向に試料を移動することによって行われる。YAGレーザは、超音波Qスイッチを併用することにより、1kHz程度の周波数でパルス発振されるようになり、平均出力が2Wと小さくても、尖頭出力(パルス中の瞬間最大出力)は25kWと高くなる。これによって、連続的にレーザを照射しながら加工するのと比較して、高速に、かつ切断部分の周囲に熱影響層を残さないように加工することができる。

単結晶ダイヤモンドのYAGレーザ切断面は光学的観察によれば5 μm程度の深さがグラファイト化されていると見積られている。グラファイトは導電性を有するので放

電加工性を有し，それを足がかりとして加工が進行すると考えられる．

2.2.3 単結晶ダイヤモンドの変性

単結晶ダイヤモンドは大気中では660℃付近から表面の酸化が始まり，多量の酸素が存在すれば900℃以上では安定に存在し得ない．また不活性ガス雰囲気中では1500℃程度から黒鉛化が始まるとされている⁴⁾．

第3章 実験

3.1 実験方法

実験には松下電器製 ED82W 微細放電加工機を使用し穴加工を行った。加工は各種の焼結ダイヤモンドと単結晶ダイヤモンドの YAG レーザ切断面に対して行った。実験条件を表 1 に示す。加工する時、電極は回転しているが穴の中心に向かうにつれて切屑の排出が困難となり 2 次放電の頻度が高まるため加工が進行しにくくなって中央部に凸起を生じる。加工後の電極は逆の形状となり中央部が凹む。焼結ダイヤモンドと単結晶ダイヤモンドの加工面のプロファイルをレーザ顕微鏡（レーザテック社製 1LM21W）によって測定した。（別紙参照）プロファイルより最深部を求め加工深さとした。また、顕微鏡付属のソフトウェアによって領域を指定し除去された体積を算出した。電極消耗長は n 個目の加工開始の電極の絶対位置を n-1 個目の加工開始絶対位置と比較することで求めた。従って穴最深部に対応する消耗長を測定していることになる。消耗比は電極消耗長を加工深さで除した値とした。

表 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(R=1k)
加工電圧	100V
コンデンサ	10pF, 100pF, 221pF, 3300pF
電極	純タングステン線
電極送り量	焼結ダイヤモンド 50 μm 単結晶ダイヤモンド 100 μm
加工穴径	100 μm

3.2 レーザ顕微鏡による測定

レーザー顕微鏡とは、レーザーを照明光源に用いた共焦点走査型顕微鏡である。普通の顕微鏡との違いとしては、普通の顕微鏡では、サンプル上の特定の面に照明を当て結像させるのに対して、共焦点を用いた顕微鏡では、対物レンズを照明側と結像側で2回集光させる。そのため、解像度がアップする、精度の高い計測が可能になる。といった利点が生まれる。従って、共焦点を用いた顕微鏡は普通の顕微鏡にくらべて、フレアーのない高解像度の画像を得ることができる。しかし、サンプルの2次元画像を得るためには、これらの点をサンプル上で走査させ、テレビの画面に表示させなければならない。点の走査原理としては、X方向はAOD(音響光学素子)による周波数偏光、Y方向はガルバノミラーによってレーザーを走査させている。共焦点光学系の特徴としてはフォーカス深度が浅く、最大輝度を得ることができ、Z位置を精度よく検出できる原理を利用している。

測定方法はまずレーザー顕微鏡で加工した穴を探し、画面に取り込む。それをスキャナで読み込み、フィルタをかぶせ画像処理を行う。次に、加工穴の中心線を決め、加工深さ(高度差)を測定する。それが終わると、加工した穴の領域を指定して、レーザー顕微鏡付属のソフトウェアによって体積を測定する。

3.3 加工量測定結果

3.3.1 焼結ダイヤモンド

ダイヤモンドの粒径を 0.5, 15, 50 μm とし、焼結助材の焼結含有量(wt%)を 5 ~ 10% にして電極送り量を一定にし、コンデンサ容量を変化して加工を行ない加工深さと加工体積を測定した。測定結果を図 1 に示す。コンデンサ容量の増大とともに加工深さ、加工体積とも増加することが分かった。逆にいえば電極消耗が相対的に小さいということである。粒径による著しい差は見られないが、粒径 50 μm の場合、コンデンサ容量の大きい高放電エネルギー領域で加工が進行しにくい傾向が見られる。なお、電極消耗は金属材料に比して 2 ~ 10 倍大きい。

3.3.2 単結晶ダイヤモンド

単結晶ダイヤモンドの YAG レーザ切断面に電極送り量を 50 μm として加工を行った。測定結果を図 2 に示す。加工深さ、加工体積ともにコンデンサ容量 221pF の時に最適な条件が見られた。また、加工面の SEM 像でも良好な加工面が得られていることが観察できた。コンデンサ容量 10pF では、加工深さは小さいが加工体積は相対的に大きいので断面に対して均一に加工が進んでいることが分かる。コンデンサ容量 3300pF のような高放電エネルギー領域ではむしろ加工が困難になっている。

3.4 消耗比

電極消耗長の測定結果とあわせて計算し、消耗比を求めた。結果を図 3,4 に示す。焼結ダイヤモンドではコンデンサ容量の増大に伴い消耗比は小さくなるが、粒径が大きくなると消耗比は 0.5~0.8 に増加し、加工が困難になっていることがわかる。単結晶ダイヤモンドではコンデンサ容量 10pF での消耗比は 2 とまずまずの値を示している。最適条件ではほぼ 1 を示しているが、コンデンサ容量 3300pF では 5 と非常に大きい値を示している。

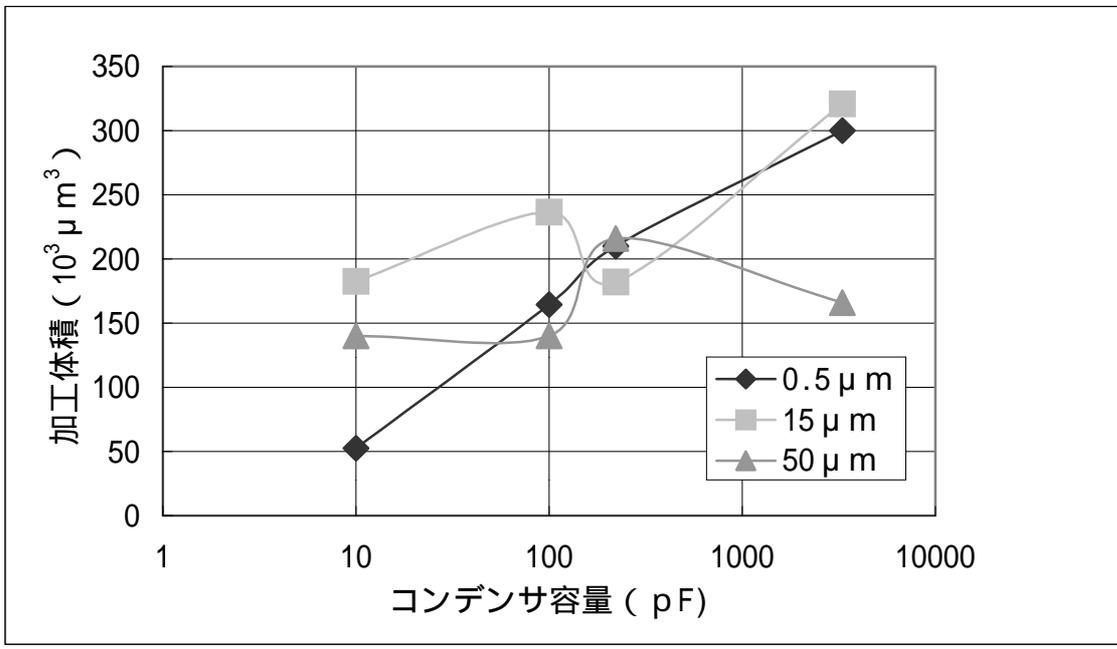
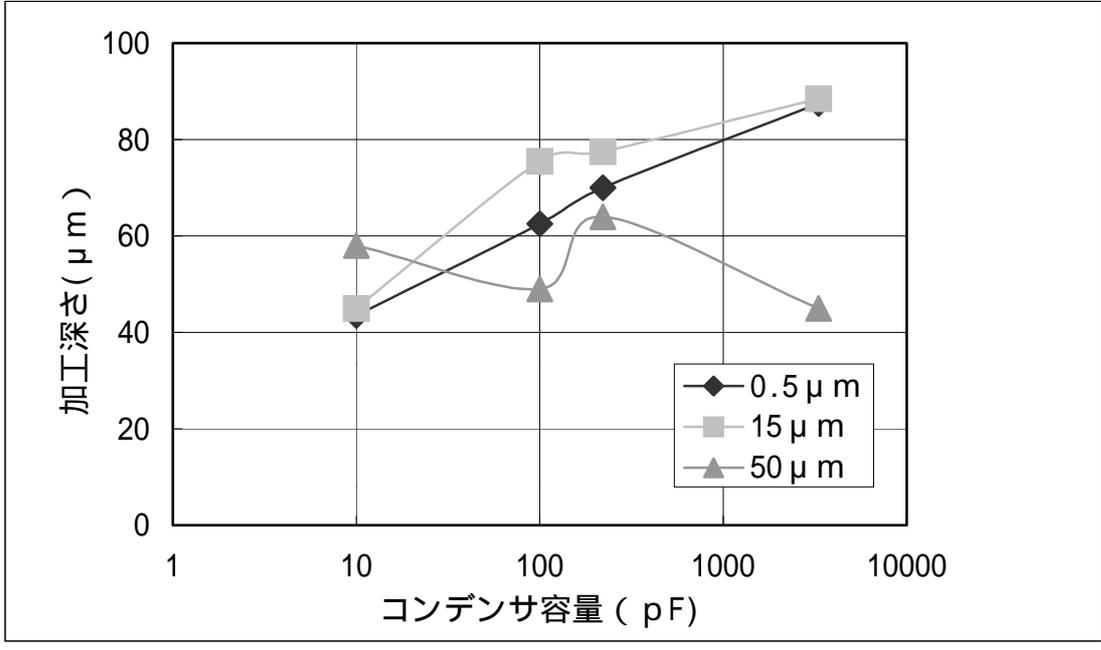


図1 焼結ダイヤモンドの高度差、体積

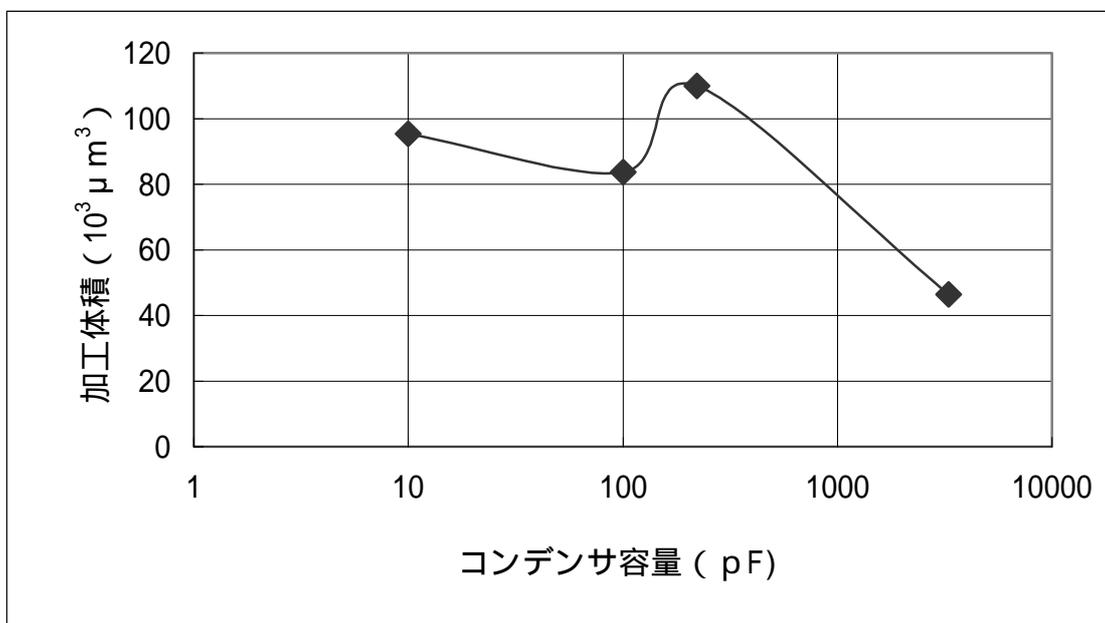
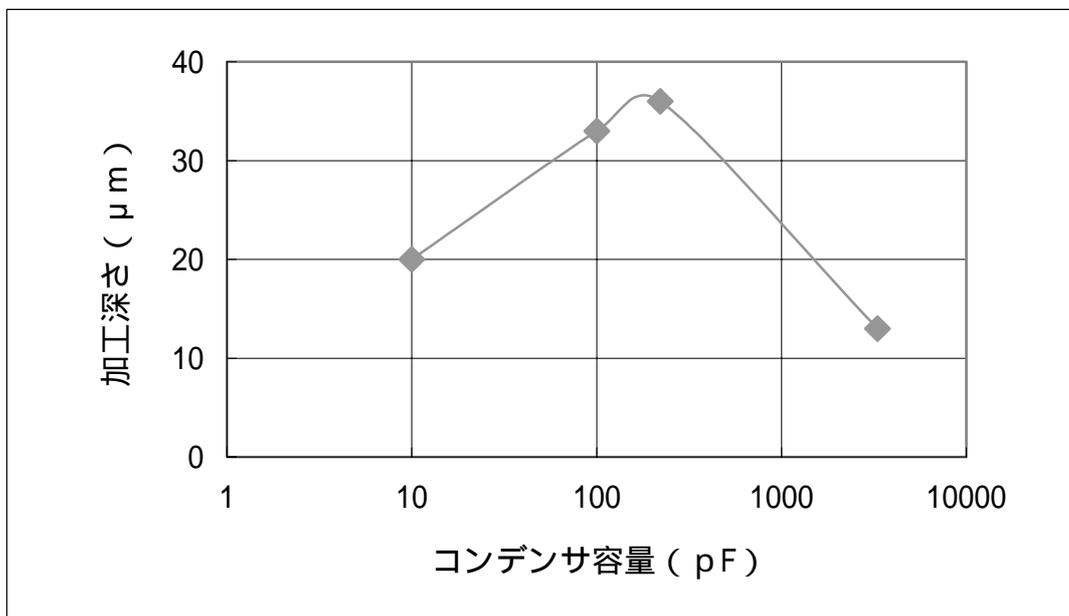


図2 単結晶ダイヤモンドの高度差、体積

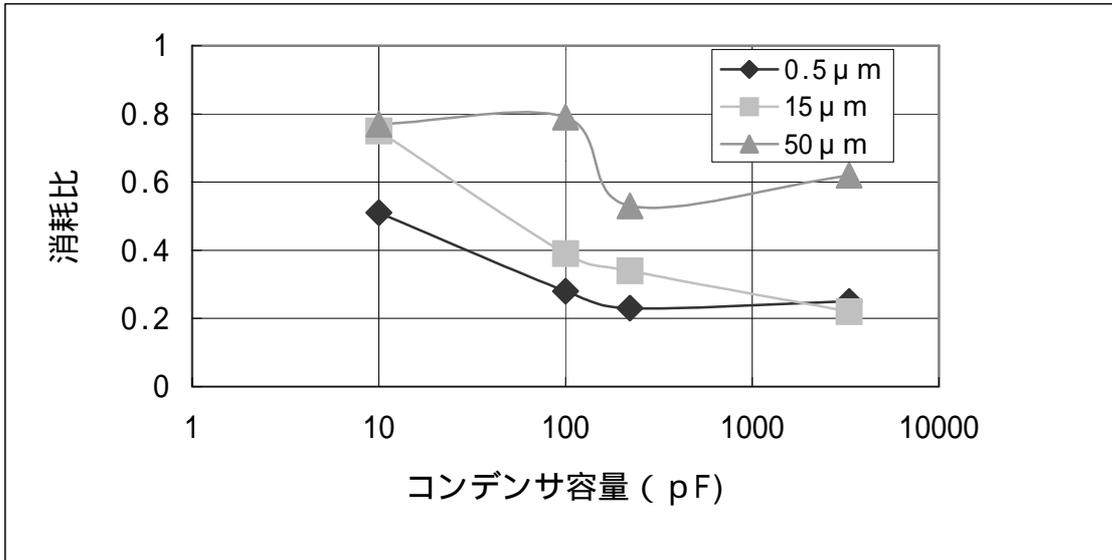


図3 焼結ダイヤモンドの消耗比

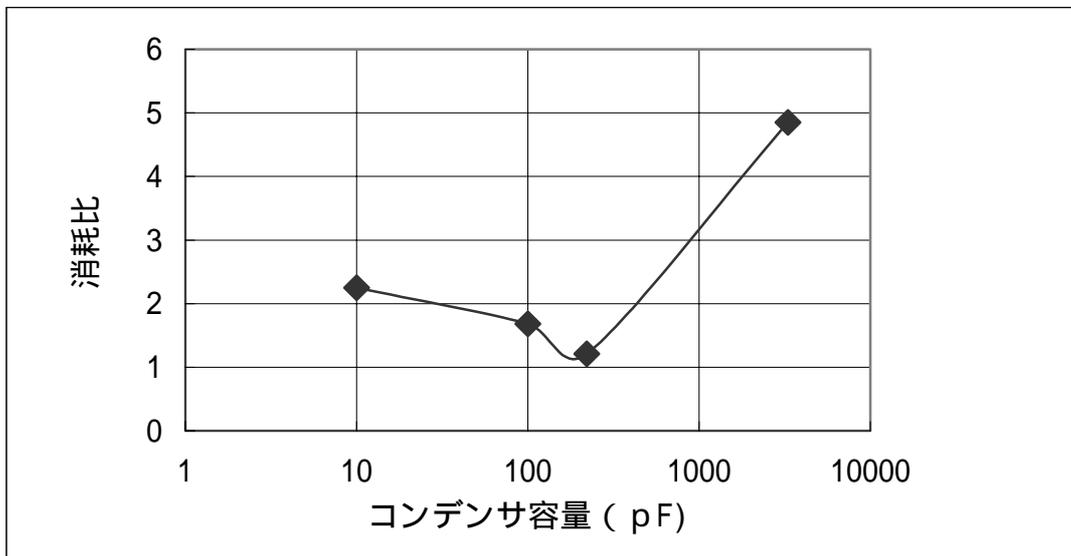


図4 単結晶ダイヤモンドの消耗比

第3章 結言

- 1) 焼結ダイヤモンド消耗比はコンデンサ容量の増大に伴い小さくなり、0.2 ~ 0.3 となる。また粒径が大きくなると増大する。
- 2) 単結晶ダイヤモンドでは、消耗比 1 程度が得られるがコンデンサ容量に対する最適値がある。
- 3) ダイヤモンド材料の微細放電加工での電極消耗について、その特徴と傾向に関し多くの知見が得られた。本研究を基盤にしてさらに詳細な実験を行うことで、より高能率、高精度な加工が可能になると考える。

謝辞

本論文を草するにあたり、終始ご懇切なご指導を賜りました高知工科大学知能機械システム工学科、河田耕一教授につつしんで感謝の意を表させていただきます。

参考文献

- [1] 広瀬和也，田中律子，寺田研一郎，佐藤健夫，河田耕一，西村一仁：2000年度精密工学会中国四国支部・九州支部共催学術講演会講演論文集，(2000)，37 - 38 .
- [2] 精密工作便覧 精密工学会編
- [3] 吉川 昌範、大竹 尚登「気相合成ダイヤモンド」，オーム社，(1995) .
- [4] J . E . Field : The properties of diamond , Academic press , (1979) .