

平成 14 年度
修士学位論文

体内作業機構材料の加工性に関する研究

Electro-discharge machining of metals for medical use

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻

知能機械システムコース 知能精密機構研究室

1055066 森岡 昌人

(Masato Morioka)

指導教員 河田 耕一教授

目次

第1章	緒論	
1.1	緒言	1
1.2	微細放電加工技術の現状	1
1.3	低侵襲手術の現状	2
1.4	ステント	6
1.5	眼科への低侵襲手術用ツールの利用	8
1.6	結言	9
第2章	各種金属材料の微細放電加工特性の研究	
2.1	研究の目的	10
2.2	材料の応用例	10
2.3	実験方法	10
2.4	実験装置	11
2.5	実験結果	
2.5.1	加工時間	
2.5.1.1	コンデンサ容量と加工時間の関係	15
2.5.1.2	融点と加工時間の関係	17
2.5.1.3	熱伝導率と加工時間の関係	19
2.5.1.4	融点と熱伝導率の積と加工時間の関係	21
2.5.1.5	まとめ	21
2.5.2	電極消耗量	17
2.5.2.1	コンデンサ容量と電極消耗量の関係	23
2.5.2.2	融点と電極消耗量の関係	23
2.5.2.3	まとめ	23
2.5.3	放電ギャップ	26
2.5.4	加工面	28
2.5.5	各種金属材料の微細放電加工特性のまとめ	28
第3章	体内作業機構の試作	34
第4章	結論	35
	参考文献	37
	謝辞	38
	付属資料	39

第1章 緒論

1.1 緒言

近年になるまで機械工学、及び精密工学の分野においてマイクロマシンやその超小型機構についてはあまり重要視されていなかった。しかしながら、近年の目覚ましい加工技術の発達により超微細な加工になるとともに、その利用可能分野の広さに注目が集まっている。超精密な機構を持った様々なデバイスが作成可能であり情報通信機器分野、計測分野の他に環境分野への応用など、その範囲はこれまでに発展してきた工学分野全てといっても過言ではないだろう。

特に注目されているのは医療分野への利用である。マイクロマシンはその機能性や大きさから機械と生体の中間領域にある機械技術であると言え、これまでの工学技術では成し得なかった治療を可能とすることができる。一方、医療側からも内視鏡を利用した低侵襲手術の利用が盛んになり、外科的手術を内科的手術に転換しようとする動きが見られる。すでに低侵襲手術として、内視鏡、腹腔鏡を用いたガンの早期治療や胆内結石症といった体腔内の手術が行われ、今後さらに血管・尿管の内部、皮膚科や眼科での利用が考えられる。しかし、これについては現在利用されている内視鏡や手術用ツールよりもさらに微細な体内運動機構を有したメカニズムが求められ、マイクロマシン技術、超微細放電加工技術がそれを実現することができる可能性を秘めている。だが、体内で動作、作業させる機器を製作するためには多岐にわたる材料が必要であり、その加工性の検討が必要である。

1.2 微細放電加工技術の現状

微細放電加工とは従来の加工方法を微細化したものである。

以下に特徴を挙げる。

- (1) 放電エネルギーを微小にすることによって微細な形状を高い精度で加工することが可能。
- (2) 使用する工具と工作物が非接触であることから被加工物に作用する加工力が非常に小さくなる。製作する加工物が微細なものであっても、工具、加工物を変形させることなく加工が可能。
- (3) 導電性のある材料ならば硬度によらず3次元形状の製作が可能。

これらの点から従来の機械的な加工方法では困難であった材料に大しても微細加工を行うことができ、マイクロマシン製作には欠かせない技術であると言える。

しかしながら、以下に挙げる欠点が存在するのも現状である

- (1) 絶縁体材料への加工が困難
- (2) 条件によって加工時間が長くなる
- (3) 被加工材料である電極の消耗が大きい
- (4) 加工精度への信頼性に不安がある

以上の欠点から見ても大量生産に向いている加工法であるとは言えないが、微細な 3 次元形状を加工するには必要不可欠な技術である。また、微細穴加工技術については既にインクジェットプリンタのノズル、光通信部分、電子顕微鏡電子銃アパーチャーといったものに利用されている。今後も高精度、高品質が求められる分野であり、微細穴加工技術は 3 次元形状のキーテクノロジーでもある。したがって、微細放電加工技術はさらに発展する分野であり、マイクロマシンへの応用が期待される。

1.3 低侵襲手術の現状

低侵襲術の理念として「患者と術者の負担を極力減らした手術」というものがある。以前の医療分野では使用していたツールの大きさから作業空間を確保するために切開が必要であり、「大きな手術の傷をつける外科医ほど良い」といった考えのもと患者に大きな傷を残すことが普通であった。しかし、加工技術の発展によりツールの小型化、内視鏡の開発により必要な作業空間の縮小が始まると、切開部分及び侵襲度が小さい方が患者の負担が少なく、回復も早くなることが科学的にも実証された。これにより、低侵襲手術の考えが外科手術の分野で広まり、外科手術を内科的手術へ転換することも可能であるとされている。

現在行われている低侵襲手術は主に内視鏡を利用できる体腔内である。図 1.1 は内視鏡の適用部位¹⁾を示したものだ。また、主に利用されている低侵襲手術用のツールは図 1.2 に示すようなものである。

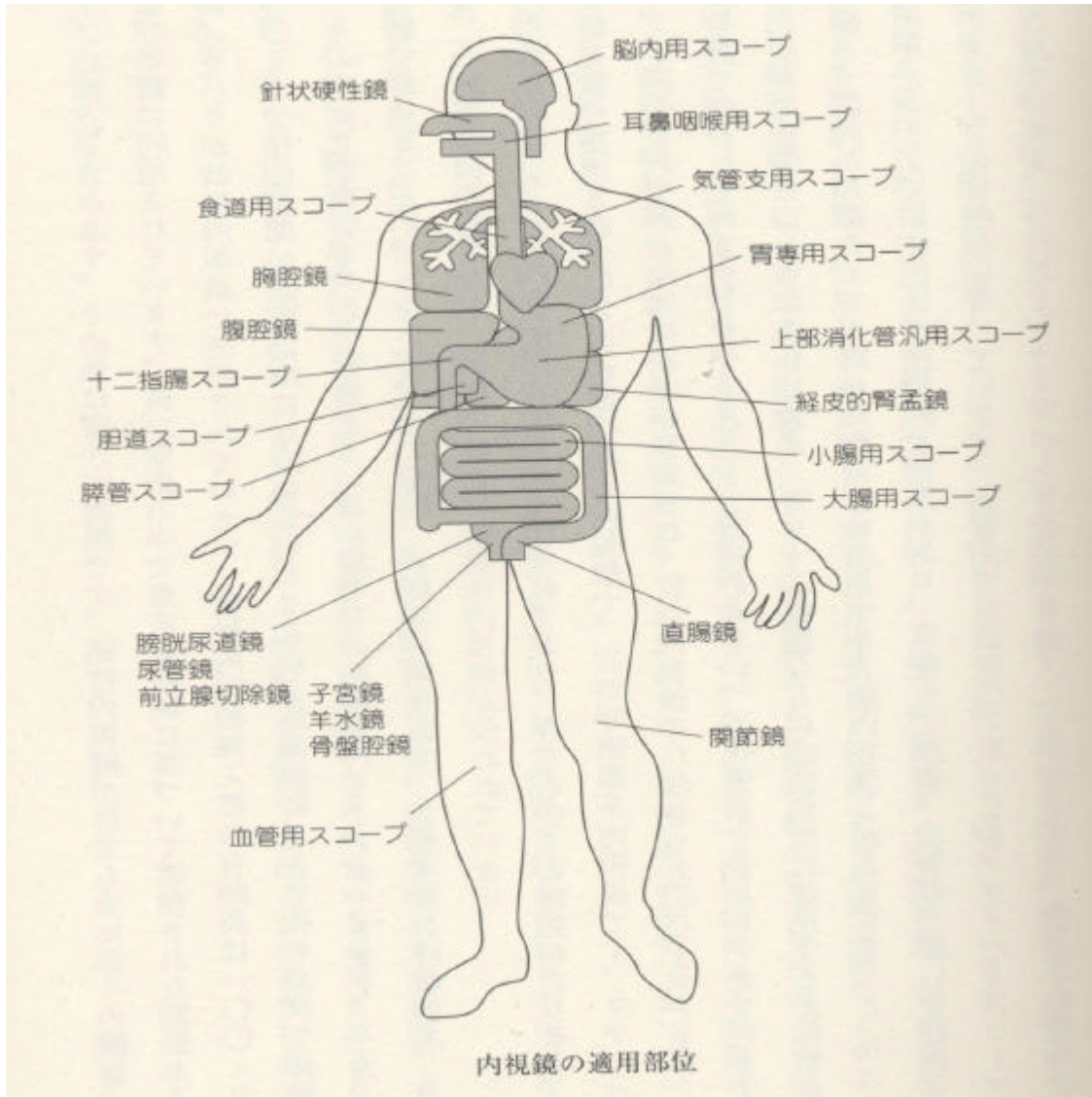


図 1.1 内視鏡の適用部位

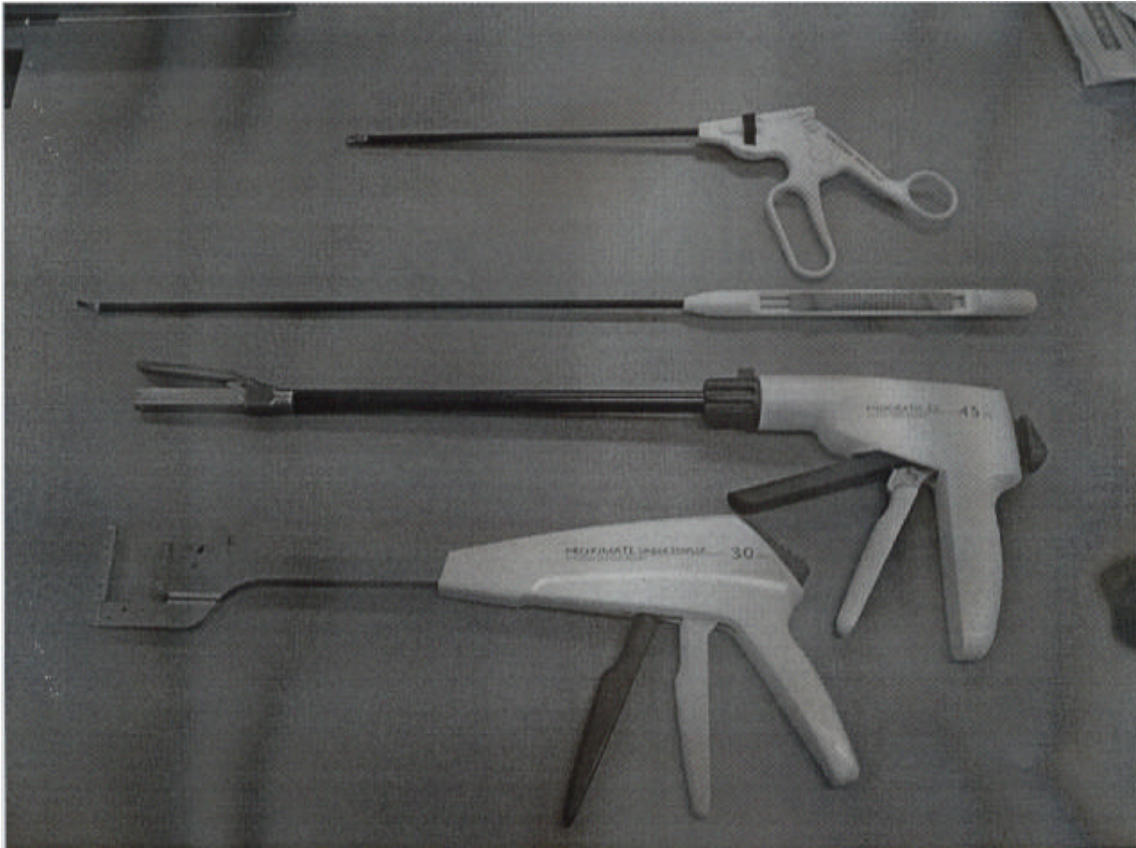


図 1.2 現在利用されている主な低侵襲手術用ツール

現在の内視鏡下における低侵襲手術のメリットを以下にまとめる。

- 1) 患者に手術後の痛みが少ない
- 2) 患部付近の癒着が起きにくい
- 3) 傷が小さいため感染の危険性が少ない
- 4) 患部周辺及び腹壁の機能低下の減少
- 5) 入院期間が短いための医療費の低減及び、社会への早期復帰
- 6) 患者の精神的不安の低減
- 7) 美容的に優れる

このように患者側のメリットが多いことが分かる。しかしながら、内視鏡手術の制約として以下のようなことも挙げられる。

- 1) 遠近感のつかみにくさ
- 2) 色の識別の難しさ
- 3) 術中の触診が不可能
- 4) とっさの止血ができない
- 5) ツールのメンテナンスが困難
- 6) ツールが高価
- 7) 手技が困難

1) 、 2) については術者に視野が 2 次元の辺面画面で提供されるためであり、 3) 、 4) については機器による間接的な接触によるものである。現在の内視鏡による低侵襲手術は見る、触るといった外科手術における基本的行為が全て間接的接触となってしまおうというデメリットがあるのだ。また、現在のツールとしては病巣の切除や掴むといった単純な作業を行うものがほとんどであり、縫合を行うにしてもホッチキスの要領に近い。さらにツールの扱いのトレーニング体制も整っているとは言えないのが現実だろう。ツール先端付近も 5mm ~ 10mm 程度の大きさのため、作業領域は限られている。現在の内視鏡、ツールでも以前よりは患者の負担が劇的に軽減され、胆内結石症や肝腫瘍、肝ガンの切除のような手術においては日帰り手術も一般化されつつあるが、これらのことを踏まえると、術者側の負担が増えており、理念である「患者と術者の負担を極力減らした手術」にはまだ遠い。また、医療の現場では低侵襲手術用のツールとして以下のような要望が挙げられている。

- 1) 侵襲手術の際にはツールを扱う術者は必ずしも繊細な操作が行えるとは限らず、また現在のツールは挿入した方向においてしか作業ができないため、ツールの先端部にさらなるフレキシビリティが必要である。

- 2) 駆動系手元付近にあるためツールが単純な動作しか出来ない。よってツール先端部に駆動系を備える必要があるが、これには機械と臨床のマッチングも必要である。
- 3) 現在の内視鏡による視野は限られているため、ツールから何らかのフィードバックが必要である。
- 4) ツールの取り替え・使い捨てによってコストが高くなることを衛生面の対策によるツールの複数回の使用によって解決。

低侵襲手術の発展にはさらに様々な手術に対応する微細な作業を行える機構が必要であるが、上記のような要望を実現し、術者側の負担を減らすことも重要である。術者の負担を減らすことはそのまま患者の負担を減らすことに繋がるため、利用領域の拡大にはまずここから解決していく必要がある。それにはマイクロマシン技術が不可欠であり、神経を扱うような手術や皮膚科、眼科などのさらなる微細な領域での利用を可能とするには超微細放電加工が有効であるとされ、期待されている。

1.4 スtent

また、低侵襲手術のツールとして改良の余地があるものにstentが挙げられる。

stentとは冠動脈の内壁を支えることを目的としたツールの一種²⁾である。心筋梗塞や狭心症は心臓を養う冠動脈が動脈硬化によって狭くなることが原因となる。治療には狭窄部を拡張・切除することが必要となり、これにstentが用いられる。図 2.1 の通り、通常stentはバルーンの表面に縮んだ状態で装着されていて、このバルーンを膨らませることでstentを膨らませる。これまでの POBA (風船療法) による冠動脈形成術の最大の弱点であった再狭窄を防止する方法であり、バルーンによって拡張された血管が元に戻ろうとする (再狭窄) のをstentで支えるのである。POBA のみでは再狭窄率は一般的に 40 ~ 30 % であるが、stentを設置することによりその再狭窄率を 10 % 程度に抑えることができ、術者の手技から見ても POBA と共通な部分が多く、特別な装置を必要としないというメリットがある。しかしながら、現在のstentは

- 1) 一度stentを拡張して固定した後は位置の変更ができず、回収も困難である。
- 2) 体内に異物を設置することから、stentに血栓が生じて血管を詰まらせてしまう可能性がある。(stentによる急性冠閉塞)
- 3) stentの網目をくぐって血管内膜が増殖して狭窄することが稀にある。(stent内再狭窄)

といったデメリットも挙げられる。現在stentに使用されているのはステンレスなどの金属材料である。これらに変わる材料の利用によって現在のデメリットを解消できる可能性がある。



図 2.1 ステンツ（上部：通常時 下部：バルーンで膨らませた状態）

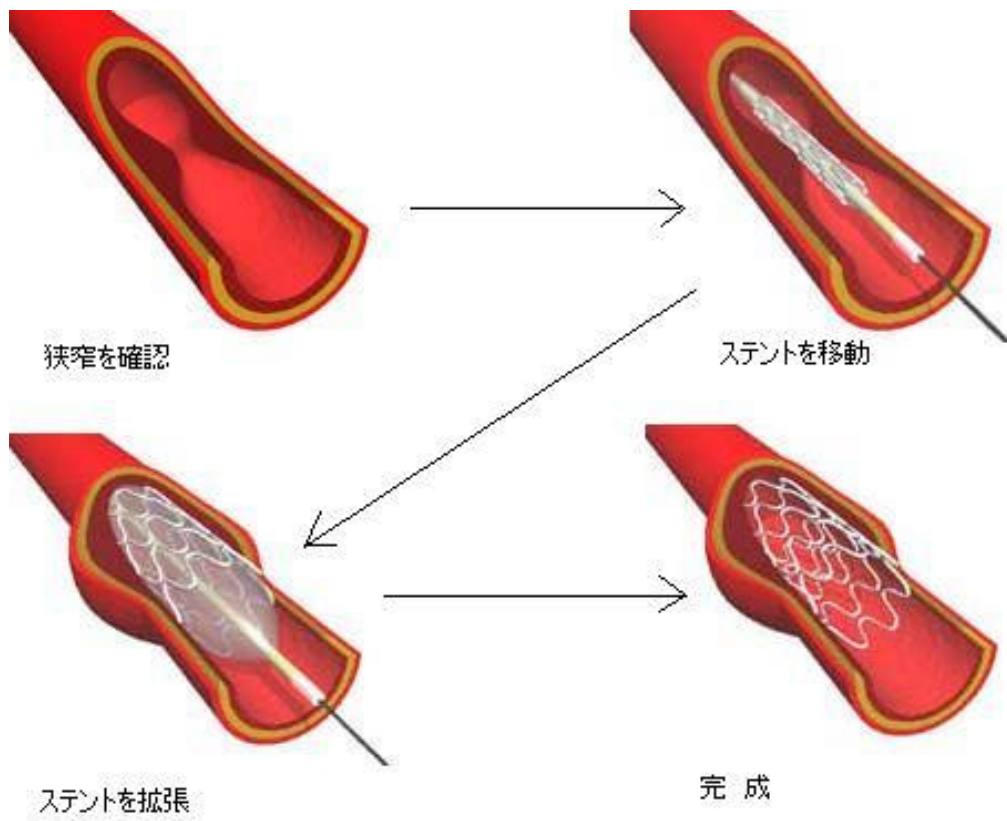


図 2.2 ステンツ留置法

1.5 眼科への低侵襲手術用ツールの利用

眼科への低侵襲手術の応用例として白内障の手術が挙げられる。現在の白内障手術は図3³⁾のように複数のツールを用いている。超音波振動によって患部の水晶体を破碎した後に、別々のツールを用いて患部の切除、吸引を行っている。眼球の手術という狭い手術領域において順番にこの作業を行うのはなかなか難しい。

しかし、こういった手術でもツールの改善を図れば患者、術者ともに負担を減らすことができるだろう。

例えばこの場合、患者に施す手術のための傷を1つに減らすことができるだけでも患者への負担は術後の回復という点で減る。図3で言えば術野の視認のための内視鏡を切除用のツール側に持たせることができれば傷は1つにすることができるだろう。また、破碎、切除、吸引といった動作を1つのツールで行うことができれば、術者の作業は簡略化し、また手術そのものが一瞬で終わることになる。

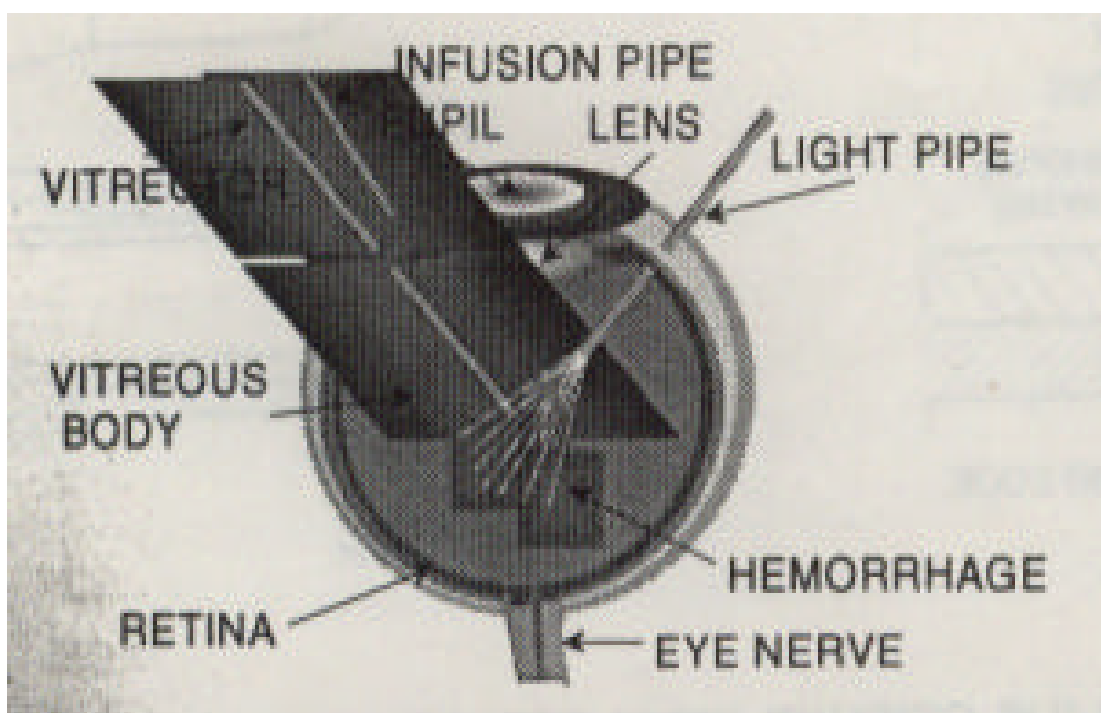


図3 現在の白内障手術

1.6 結言

以上のことから低侵襲手術用ツールの開発には体内動作が可能であることが求められている。それにはマイクロマシン技術と超微細放電加工が有効であり、そのための生態適合性も含む体内作業機構に適した材料の選択には加工性の調査が必要である。

これまでにステンレスや Ti などの高硬度、高強度の材料について微細放電加工の研究が行われてきた。しかし体内作業機構では摺動、回転に対応する材料や、結合、充てん、変形に対応する材料など、より広い範囲の材料が必要である。

本研究では貴金属、低融点金属の微細放電加工特性に関して検討し、マイクロ手術器具の原型の試作を行った。

第2章 各種金属材料の微細放電加工特性の研究

2.1 研究の目的

近年、低侵襲手術が拡大しているが、今後は血管・尿管の内部、皮膚科や眼科の領域での利用が考えられることはすでに述べた。

実現には体内でさらに微細な作業を可能にするツールの開発が不可欠であり、その作成には微細で高次元な加工が必要となる。微細放電加工機による加工はそれに有効な加工法の一つと考えられる。これまでにステンレスやTiなどの高硬度、高強度の材料については微細放電加工の研究が行われてきた。しかし、体内作業機構では摺動、回転に対応する材料や、結合、充てん、変形に対応する材料など、より広い範囲の材料が必要である。応用例としてはステントと呼ばれる冠動脈の内壁を支える目的のツールといった体内での変形が求められ、且つ変形後にその形状を維持することへの応用が考えられる。

本研究では主として貴金属、低融点金属の微細放電加工特性についての検討を行った。

2.2 材料の応用例

具体的に材料の応用例として、まず単純な動作のものとしてステントなどが挙げられる。現在のステントはデメリットもあり、現在ステントに使用されているのはステンレスなどの金属材料である。これらに変わる材料の利用によって現在のデメリットを解消できる可能性があり、例えば、ステント単体で膨らむ・縮むといったことができれば回収が容易になると考えられる。

また、複雑な動作としてはアクチュエータが挙げられる。体内作業には微細なアクチュエータの開発も必要であるが、体内で動作させる場合は高電圧の駆動原理のアクチュエータは人体に与える影響を考えると利用が難しい。そして微細化に際してはより単純な原理で動作することが有利である。具体的には形状記憶合金といった既存の材料の利用が考えられるが、摺動、回転に対応する材料や、結合、充てん、変形に対応する材料といった様々な特性を持つ材料の組み合わせによって全く新しい駆動原理の開発が可能になると考えられる。

2.3 実験方法

実験に用いた材料は銀(Ag)、アルミニウム(Al)、インジウム(In)、パラジウム(Pd)、白金(Pt)、錫(Sn)、ジルコニウム(Zr)である。その材料の物理特性を表1.1に示す。板厚は50 μm とし、微細放電加工によって100 μm 径の貫通穴加工を行い、加工時間、電極消耗量、放電ギャップを比較した。

加工液は放電加工油と純水を用い比較した。純水を使用した場合は比抵抗値を一定に保つため、電極及び被加工物に常時流下させながら加工を行った。電極の送り込み量は100 μm とし、加工時間は放電開始から電極の引き上げの開始までとした。電極消耗量はn個目の加工開始時における電極の絶対位置とn-1個目の加工開始時の絶対値との差で求めた。放

電ギャップは加工前の電極の径と、加工された穴径をレーザ顕微鏡で測定し、比較することで求めた。

微細放電加工の加工条件は表 1.2 に示す。

2.4 実験装置

使用した放電加工装置は松下電器製 MG-ED82Wである。その外観を図 4.1 に示す。純水製造装置はヤマト化学社製WG200を使用し、Millipore社製RQ500を用いた。外観をそれぞれ図 4.2(a), (b) 示す。測定に用いたレーザ顕微鏡はレーザーテック株式会社製の 1LM21D である。図 4.3 にてその外観を示す。

表 1.1 材料の物理特性

金属	融点 ()	熱伝導率(W/m・K)	引張り強さ(MPa)
銀 (Ag)	960.5	428	125
アルミニウム (Al)	660	236	100
インジウム (In)	156.4	84	-
パラジウム (Pd)	1555	72	206
白金 (Pt)	1755	72	123
錫 (Sn)	231.85	68	-
ジルコニウム (Zr)	1750	-	296

表 1.2 加工条件

加工機	松下電器製 MG - ED 8 2 W
加工液	放電加工油 (三井スペースカット), 純水 (比抵抗 1 8 M - c m)
放電回路	RC 回路 (R = 1 K)
加工電圧	1 0 0 V
コンデンサ容量	1 0 pF , 1 0 0 pF , 2 2 0 pF , 3 3 0 0 pF
電極	純タングステン線

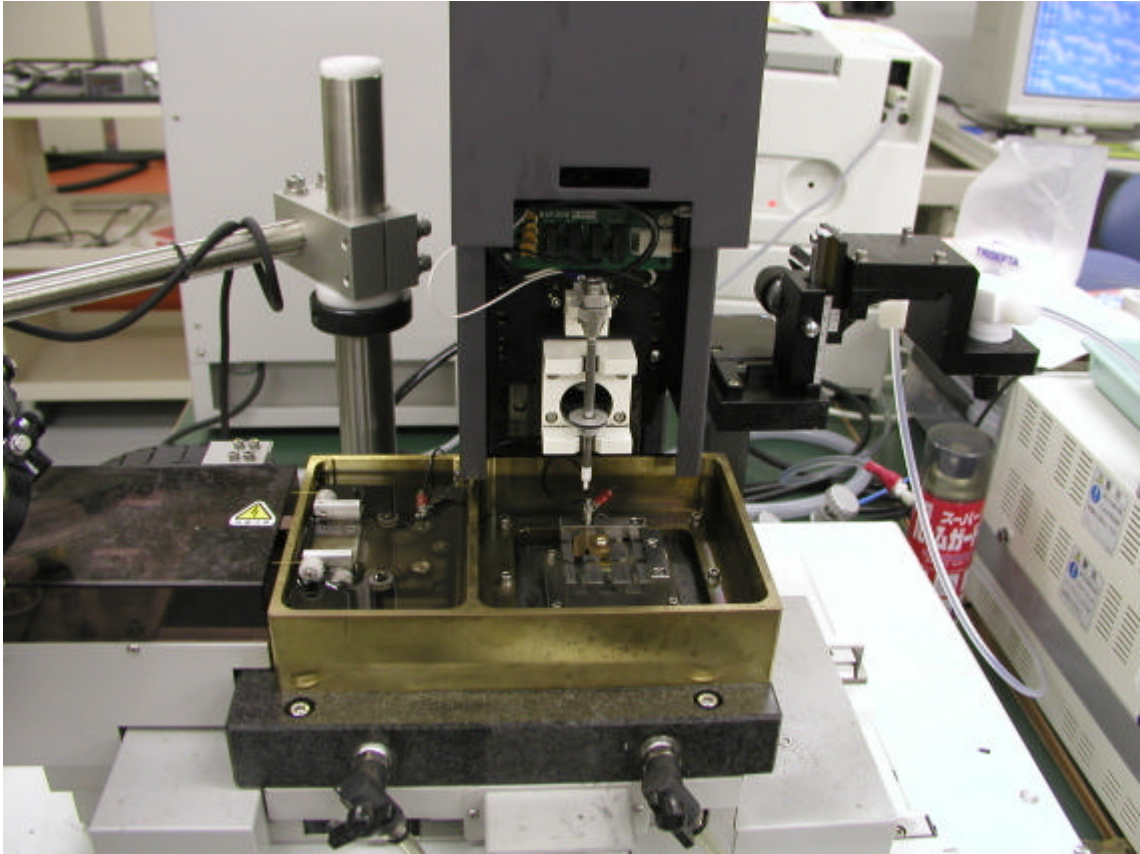


图 4.1 放电加工装置 MG-ED82W



図 4.2 (a) 純水製造装置 MG-ED82W



図 4.2 (b) 純水製造装置 RQ500

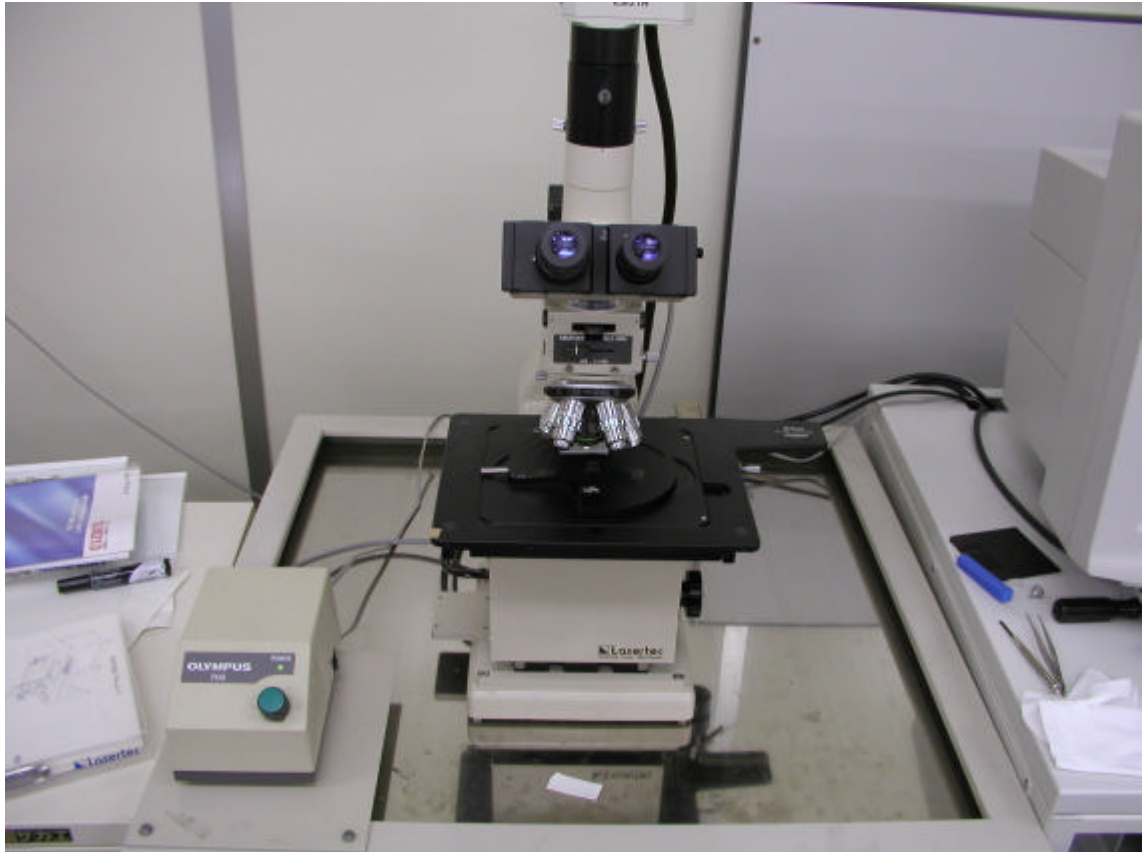


図 4.3 レーザ顕微鏡 1LM21D

2.5 実験結果

2.5.1 加工時間

2.5.1.1 コンデンサ容量と加工時間の関係

(1) 放電加工油の場合

放電加工油を加工液に使用した場合のコンデンサ容量と加工時間の関係を図 5.1 に示す。放電加工油を使用した場合は全体的に放電エネルギーの増大にともない加工時間が短くなるという安定した結果が得られた。

細かい部分について述べると、ほぼ融点と同じである Zr と Pt を見てみると結果に差が出ていることが分かる。Zr は今回使用した材料の中では加工時間が最も長く、Pt は Zr と比較すると短くなっている。これは加工時間には融点の他にも材料の物理特性が影響しているためである。

融点の非常に低い In、Sn については加工が早く進行するため、今回の実験の範囲では放電エネルギーの大小による差が現れることがなかった。この 2 種類の材料ではどのコンデンサ容量においても約 20 秒で加工が終了しているが、これは加工時間を放電開始から電極の引き上げの開始までとして計測したことと、電極の送り速度が $5\ \mu\text{m/s}$ であるためであることも影響していると思われる。

3300pF においてもどの材料もほぼ 20 秒で加工が終了しているが、高放電エネルギー領域では材料に影響せず、高速で加工が進むという結果である。しかしながら、高放電エネルギー時は加工面が粗く、溶融したような形状となるため、加工精度の点からは有利であるとは言えない。

(2) 純水の場合

加工液に純水を使用した場合のコンデンサ容量と加工時間の関係を図 5.2 に示す。これまでに行われた実験の結果では高硬度、高融点の Ti、Fe、Ni などの金属の加工においては純水を用いることで加工時間が短縮される傾向が見られたが⁴⁾、本研究に用いた材料では、純水を加工液に用いた場合、放電加工油の場合との比較では材料によって大きく異なる結果が得られた。

Sn、In については放電加工油の場合と同様、放電エネルギーによる差が現れなかった。Zr は付属資料の図 22.5~22.8 を見れば分かるように加工がほとんど不可能であった。Al、Pt では放電エネルギーが小さいときに放電加工油の場合よりも加工時間が長くなる。Ag は放電加工油とほぼ同じ加工時間となった。Pd では放電加工油に比べ $1/3$ の加工時間に短縮される。

純水の場合でも放電エネルギーが大きくなれば加工時間は短くなるという傾向はあるが、安定した放電加工油に比べると材料ごとの変化が大きく不安定な結果となっている。

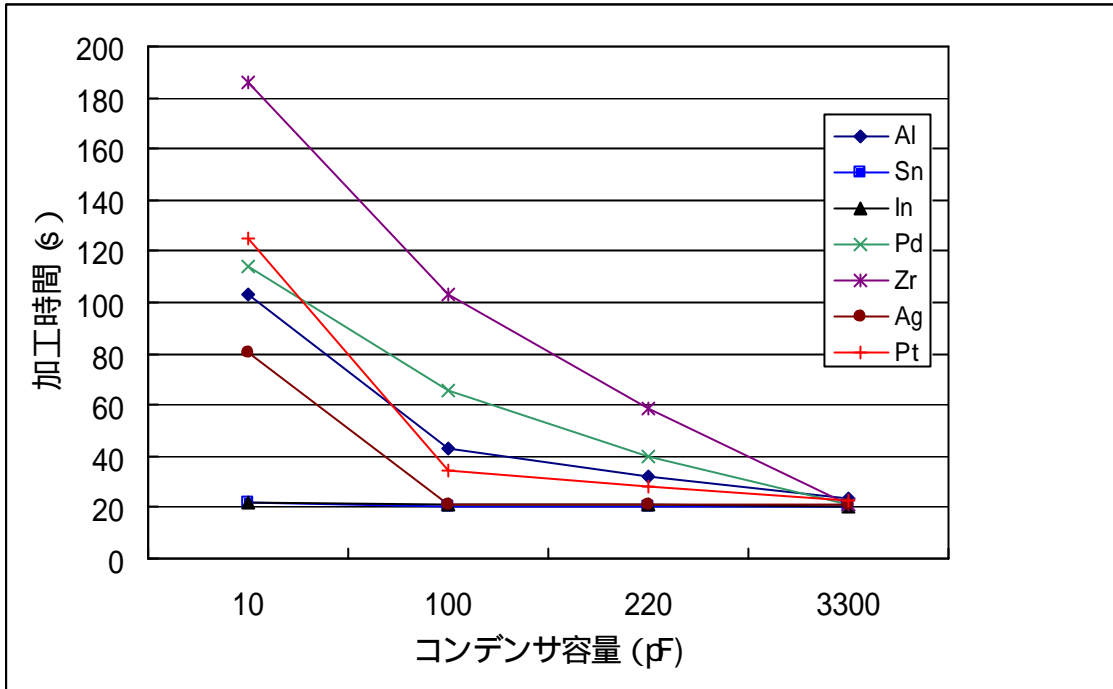


図 5.1 コンデンサ容量と加工時間の関係（放電加工油）

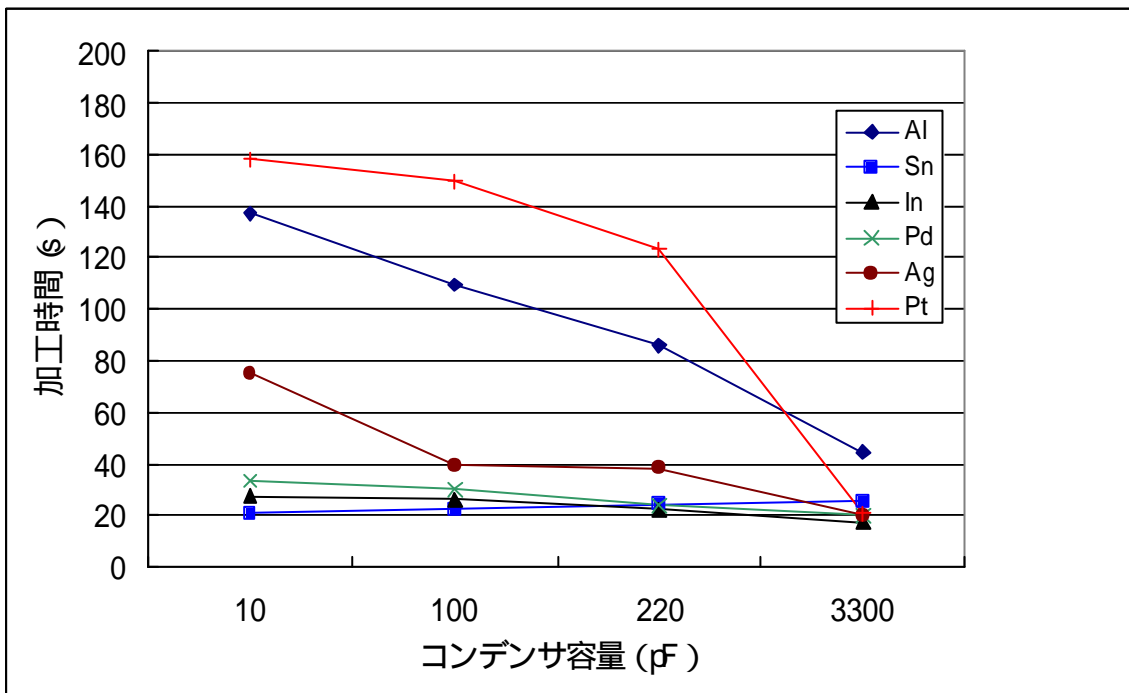


図 5.2 コンデンサ容量と加工時間の関係（純水）

2.5.1.2 融点と加工時間の関係

(1) 放電加工油の場合

次に融点と加工時間の関係を示したのが図 6.1 である。

融点が高くなると加工速度は低下するという関係が得られた。また、放電エネルギーは 10pF と 220pF について示してあるが、加工時間の点から見れば 220pF 時の方が材料による差が小さく安定していると言える。

(2) 純水の場合

図 6.2 は純水時の融点と加工時間の関係である。

放電加工油に比べ、ばらつきが大きいのが分かる。純水では加工時に電解効果があり、材料の物理特性に加え電気化学特性に影響されていると考えられる。

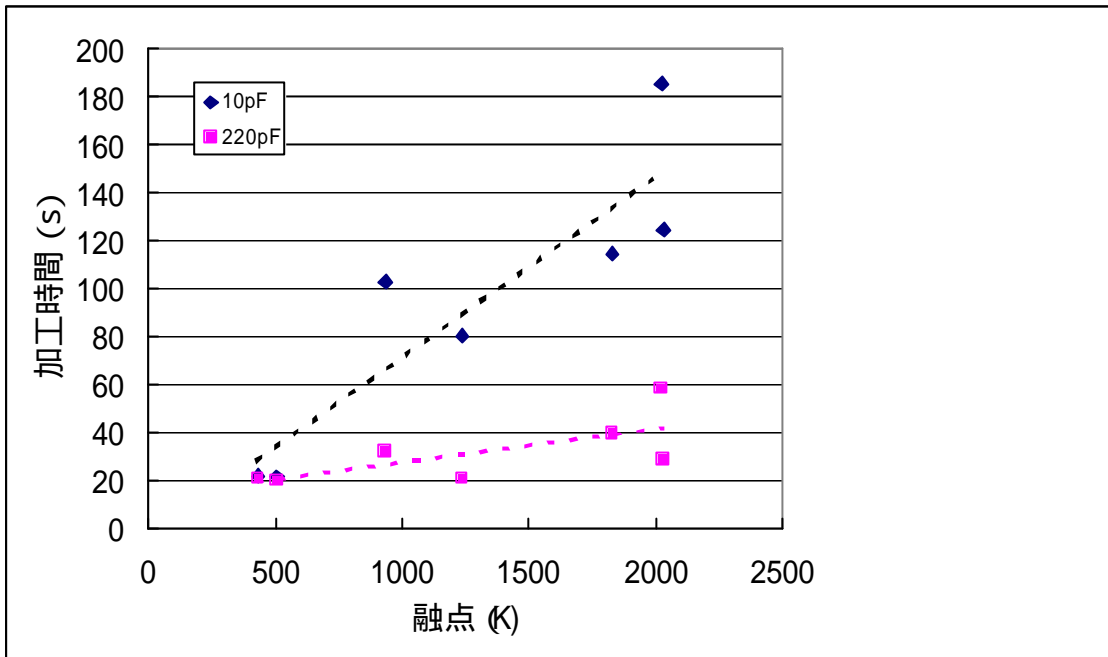


図 6.1 融点と加工時間の関係 (放電加工油)

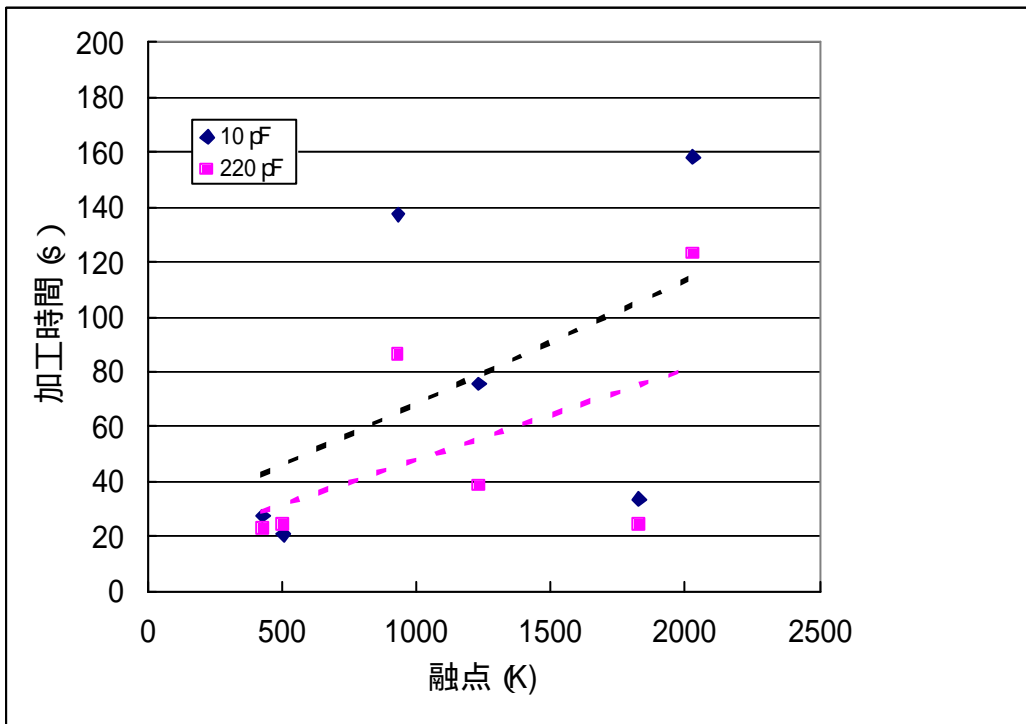


図 6.2 融点と加工時間の関係 (純水)

2.5.1.3 熱伝導率と加工時間の関係

(1) 放電加工油の場合

図 7.1 は熱伝導率と加工時間の関係である。極端に融点の低い In、Sn について除いてあるが、熱伝導率が大きくなると加工時間が若干短くなる傾向が現れている。熱伝導率から見た場合は Ag、Al が非常に高く、In、Sn は Pt、Pd とあまり変わらない。しかし、融点の低い場合はたとえ熱伝導率が高く、熱が分散したとしても一度の放電でかなり加工が進行するのではないかと推測される。逆に高融点の場合を考えると、高熱伝導率による分散は不利ではないかと思われる。

(2) 純水の場合

図 7.2 は純水の場合であるが、加工油の場合と比べるとやはりばらつきが大きい。熱伝導率の影響という点では一定の関係を認めることはできなかった。

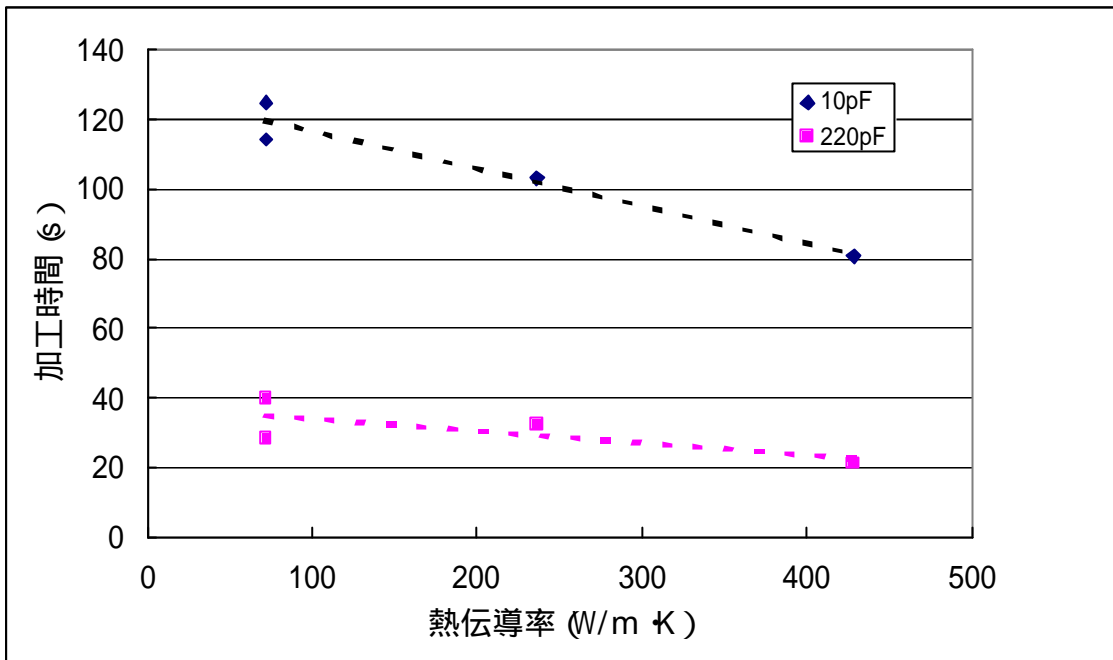


図 7.1 熱伝導率と加工時間の関係（放電加工油）

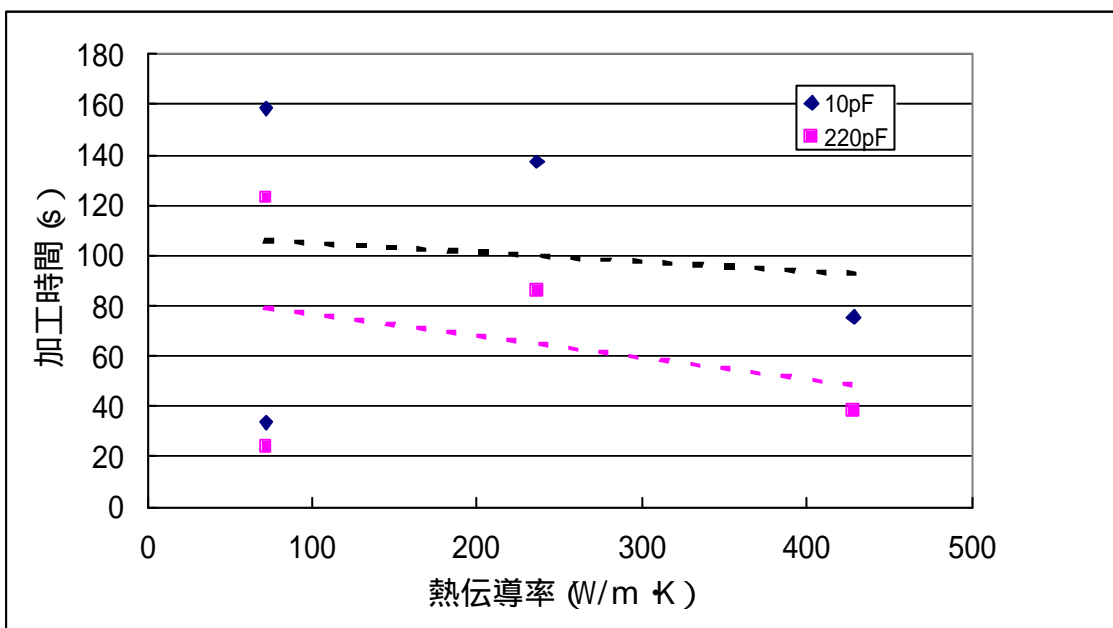


図 7.2 熱伝導率と加工時間の関係（純水）

2.5.1.4 融点と熱伝導率の積と加工時間の関係

(1) 放電加工油の場合

図 8.1 は、これは図 6.1、7.1 の結果より融点と熱伝導率の積との関係を求めたものである。放電加工の加工速度には融点と熱伝導率との積が関係しているとする研究結果がある⁵⁾。この図を見ても、融点と熱伝導率の積が大きくなると加工時間は短くなるという結果が出ているように、微細放電加工においても類似の関係があることが認められる。

(2) 純水の場合

図 8.2 は放電加工油と同様に図 6.2、7.2 より融点と熱伝導率の積との関係を求めたものである。ばらつきがあり、放電加工油の場合とは違って融点と熱伝導率の積との関係を認めることはできなかった。

2.5.1.5 まとめ

放電加工油を使用した場合、どの材料についても安定した加工結果が得られた。また、材料の加工特性に関しては融点や熱伝導率などの物理特性が影響しているため、加工結果の予測も容易であると言える。

純水の場合は材料によって加工結果が安定しない。材料の物理特性に加え、電気化学的特性も影響していると見られる。

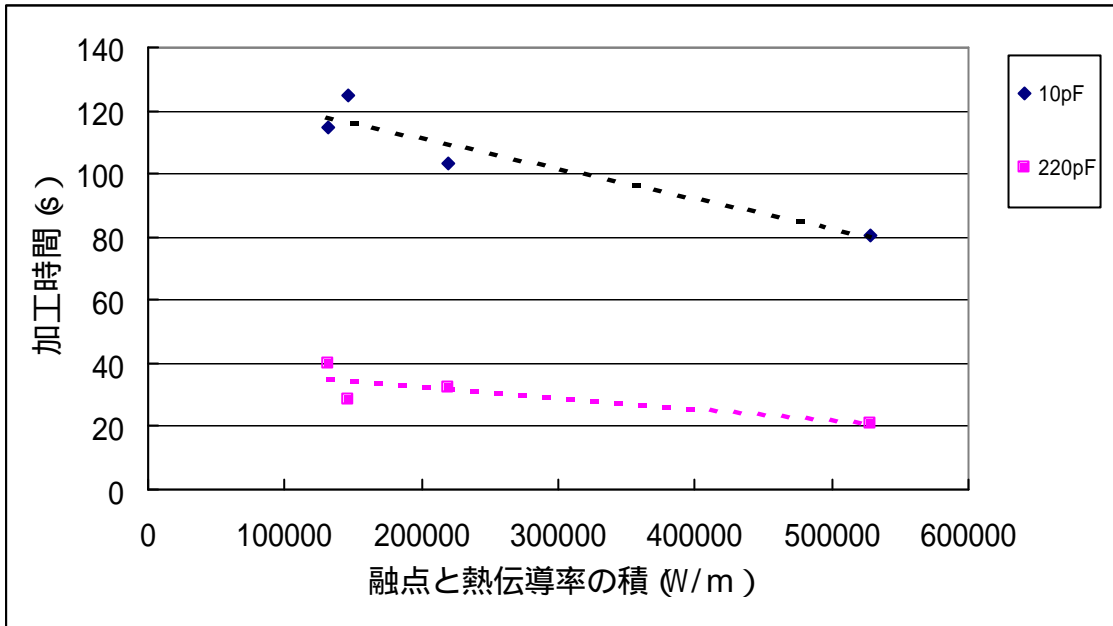


図 8.1 融点と熱伝導率の積と囲う時間の関係（放電加工油）

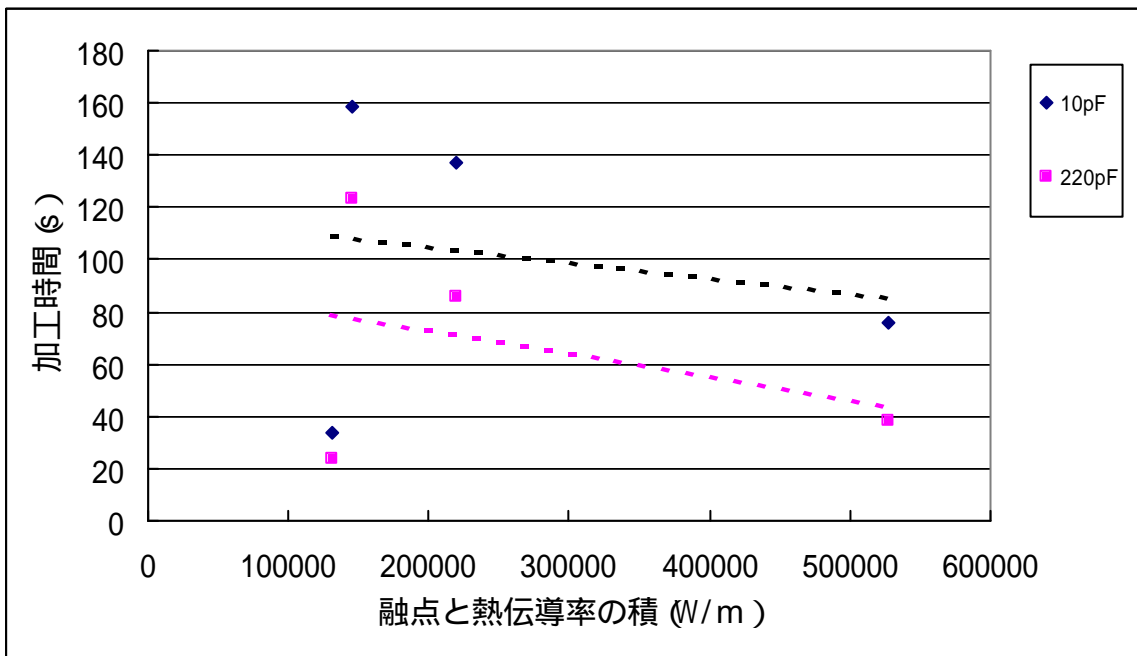


図 8.2 融点と熱伝導率の積と囲う時間の関係（純水）

2.5.2 電極消耗量

2.5.2.1 コンデンサ容量と電極消耗量の関係

図 9.1(a)、(b)はコンデンサ容量と電極消耗量の関係である。

放電加工油の場合は Sn、Al、In の低融点金属を除けば、放電エネルギーが大きくなると電極消耗量は小さくなる。また Pt、Pd では 220pF で放電エネルギーの最適値があることが分かる。

純水の場合、放電加工油と比べて全体に電極消耗が小さく、Pt、Pd は 1/3 程度に小さくなっている。また 100pF 付近に最適値があるように放電加工油とは放電エネルギーの最適値に差が出ていることが分かる。

2.5.2.2 融点と電極消耗量の関係

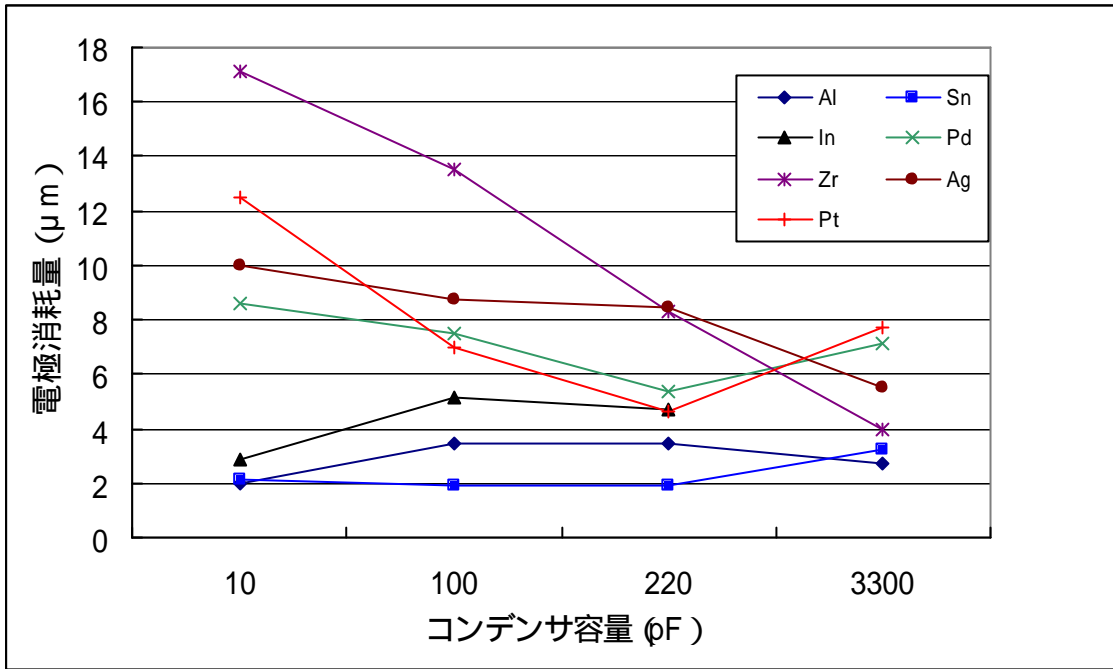
図 9.2(a)、(b)は融点と電極消耗量の関係であり、放電加工油、純水とも融点が高くなれば電極消耗量は増大する傾向が認められる。コンデンサ容量との関係で見ると融点 700～800K 付近で逆転している。これは Pt と Pd のように放電加工油の場合と純水の場合とで放電エネルギーの最適値に違いがあるためと思われる。

2.5.2.3 まとめ

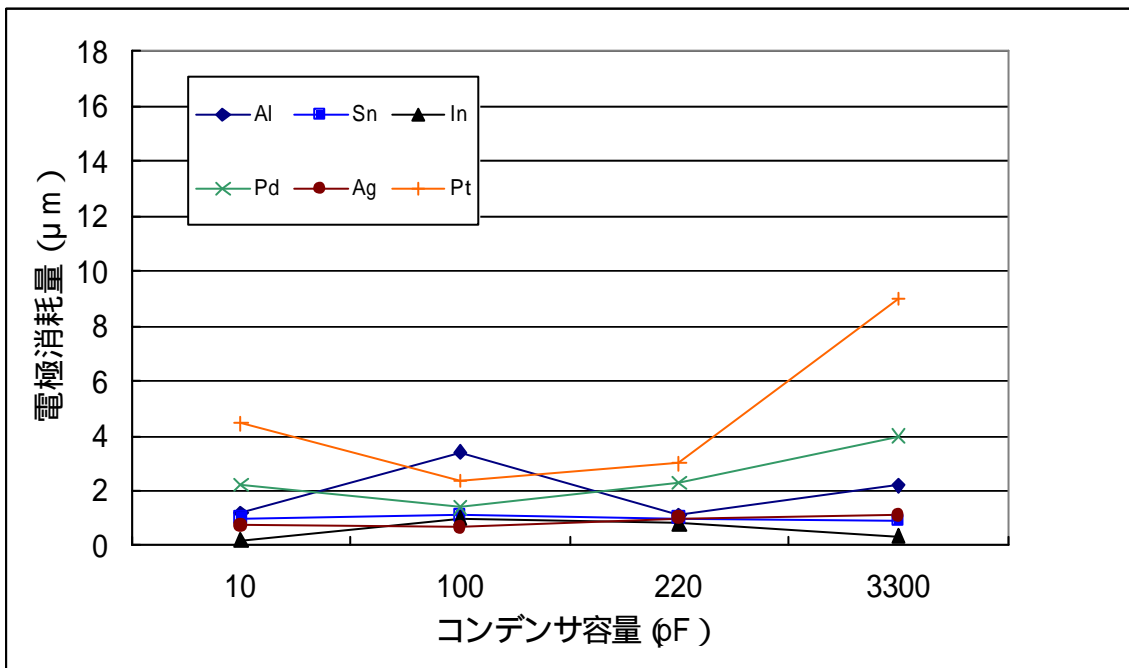
放電加工油の場合は一般的に放電エネルギーが大きくなると電極消耗は小さくなる。

純水の場合では放電加工油を使用した場合よりも電極消耗は小さくなる。

材料の融点が大きくなれば電極消耗量は増大する。

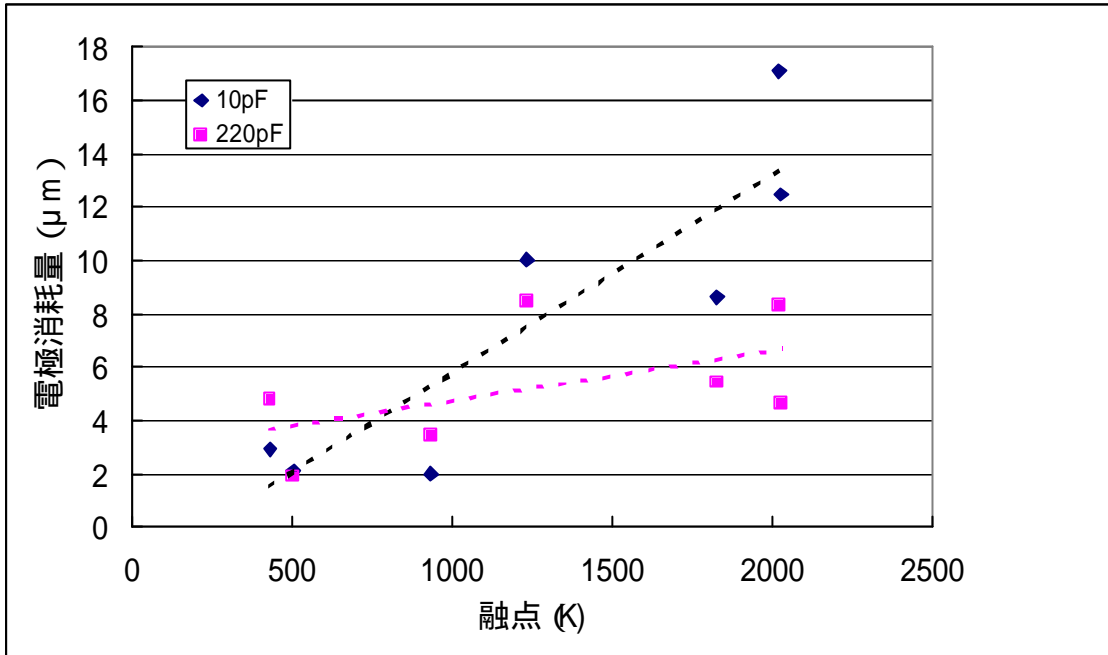


(a) 放電加工油

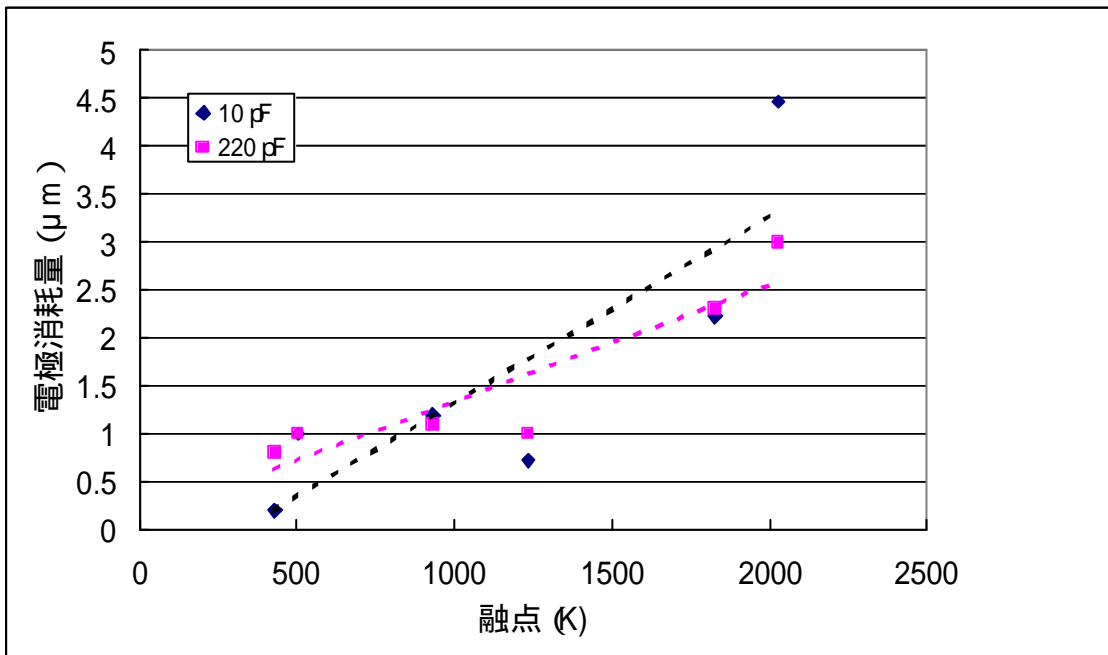


(b) 純水

図 9.1 コンデンサ容量と電極消耗量の関係



(a)放電加工油



(b)純水

図 9.2 融点と電極消耗量の関係

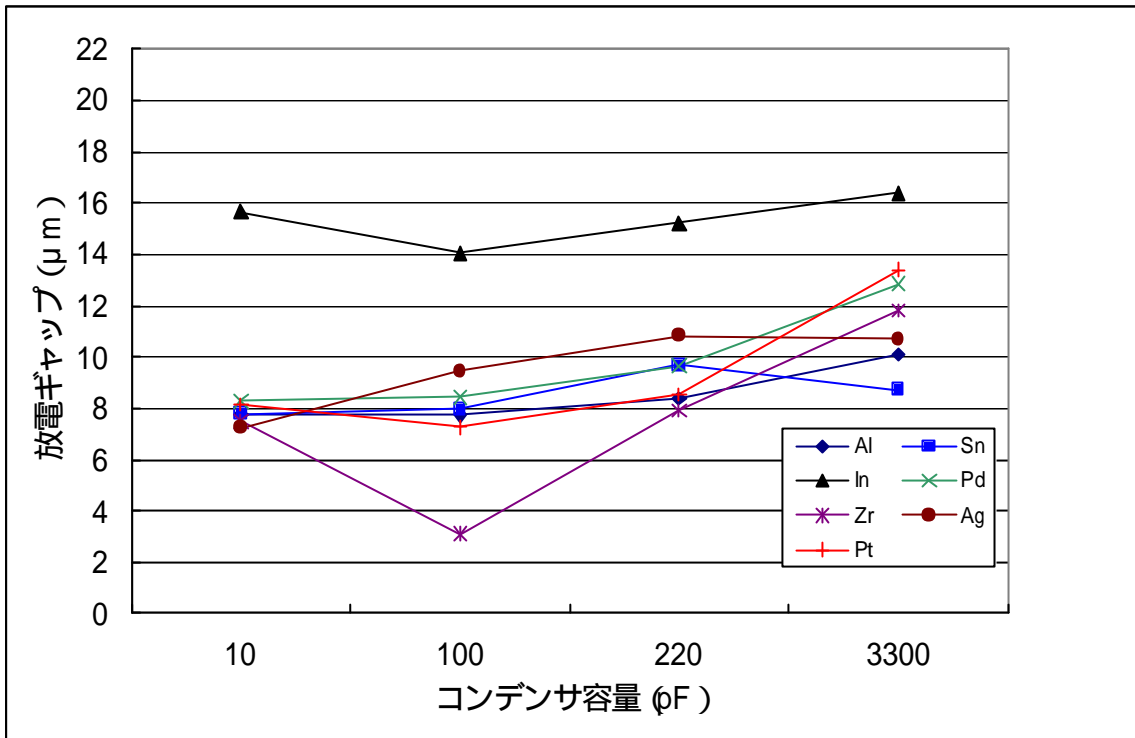
2.5.3 放電ギャップ

コンデンサ容量と放電ギャップの関係を図 10(a)、(b)に示す。

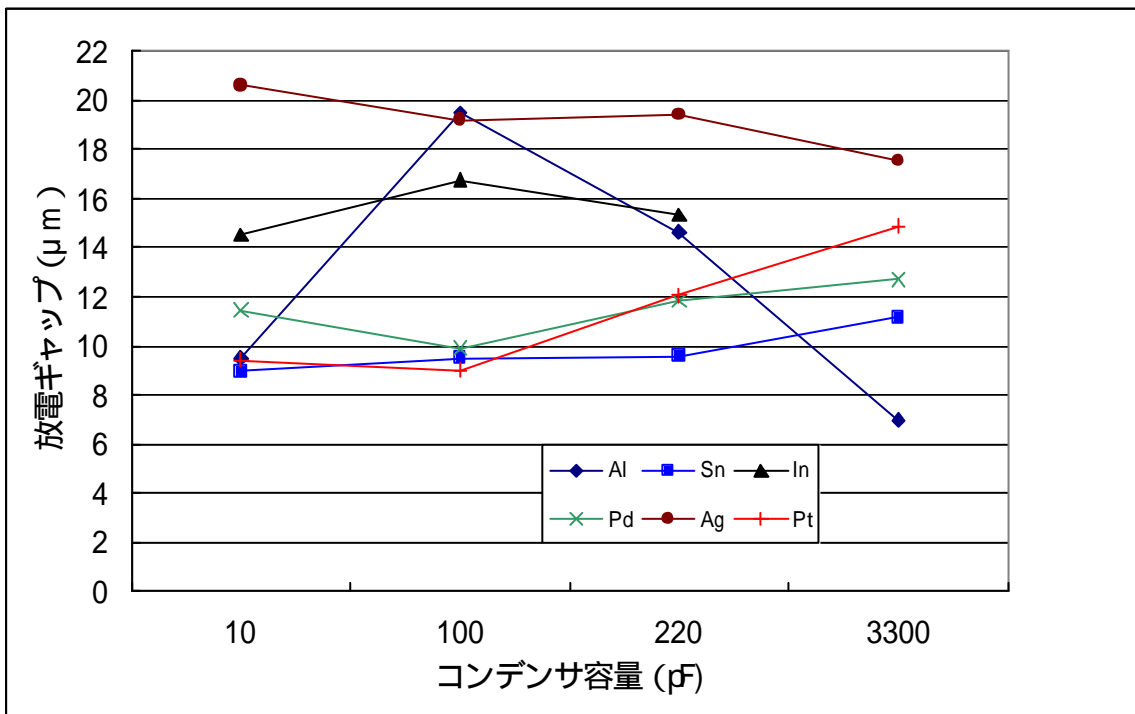
放電加工油では放電エネルギーが大きくなると放電ギャップは大きくなる傾向があり、低融点の In を除くと 8~12 μm の範囲にある。

純水の場合は全体にばらつきが大きい。Pt、Pd、Sn は 10~13 μm の範囲であり放電加工油の場合よりもやや大きい。特に Ag では 20 μm 程度と 1.5~3 倍となっている。

したがって加工精度の点から見た場合、加工液に純水を使用した場合は放電加工油の場合よりも放電ギャップが全体的に大きくなるため不利であると言える。



(a) 放電加工油



(b) 純水

図 10 コンデンサ容量と放電ギャップの関係

2.5.4 加工面

ここでは比較対照としてコンデンサ容量 10pF で貫通穴加工を行った Pd、Pt、Ag、Sn の加工面の SEM 像を示す。

Pd の加工面は図 11.1、Pt は図 8.11、Ag は図 11.3、Sn は図 11.4 に示した。それぞれ(a)が放電加工油による加工、(b)が純水による加工のものである。

放電加工油の場合、どの材料においても良好な加工面が得られている。しかし純水においては材料によって大きく状態が異なるという結果が得られた。

まず、Pd についてだが、図 11.1 (b) のように純水の場合でも良好な加工結果が得られているように見える。しかし、図 11.1 (c) は Pd の同一加工条件による 5 個の穴の加工結果であるが、見て分かるように穴径とその形状に明らかな差が認められる。これは電解作用によるものと考えられ、また電解作用が毎回発生しているのではないことから分かるように、加工結果が安定してない。

Pt では表面に付着物が堆積している。Pt は通常、貴金属として非常に安定していると考えられているが、この結果からも分かるように純水を加工液に使用した場合は安定していないと考えられる。また、この時の加工に用いた電極にも付着物が見られた。この点から考えても何らかの化学変化が起きているように思われる。

Ag ついては加工面が滑らかだが、だれが非常に大きい。

Sn は縁部が溶融している。

2.5.5 各種金属材料の微細放電加工特性のまとめ

実験の結果を以下にまとめる。

(1) 貴金属、低融点の金属に対して放電加工油では良好な加工が可能であるとともに、加工結果が安定している。

(2) 純水での加工では材料によって加工特性、加工結果が大きく異なる。

以上より、低侵襲手術用マイクロツールのような高い加工精度が求められるものの加工に貴金属、低融点の材料と微細放電加工機を用いる場合は、加工液に放電加工油を用いた方が有利であると言えるだろう。一方、純水を用いた加工では材料の加工特性に注意が必要である。

しかしながら、体内作業機構材料としては生体適合性の点から見ても純水による加工が可能であることが望ましい。また、逆に純水加工時の特徴的な加工特性の利用も考えられる。特に Ag のように滑らかに加工が可能であるという材料は体内作業機構材料に非常に有効であると思われる。したがって今後の課題として様々な材料の純水使用時の加工特性についてのデータ採取を行う必要である。

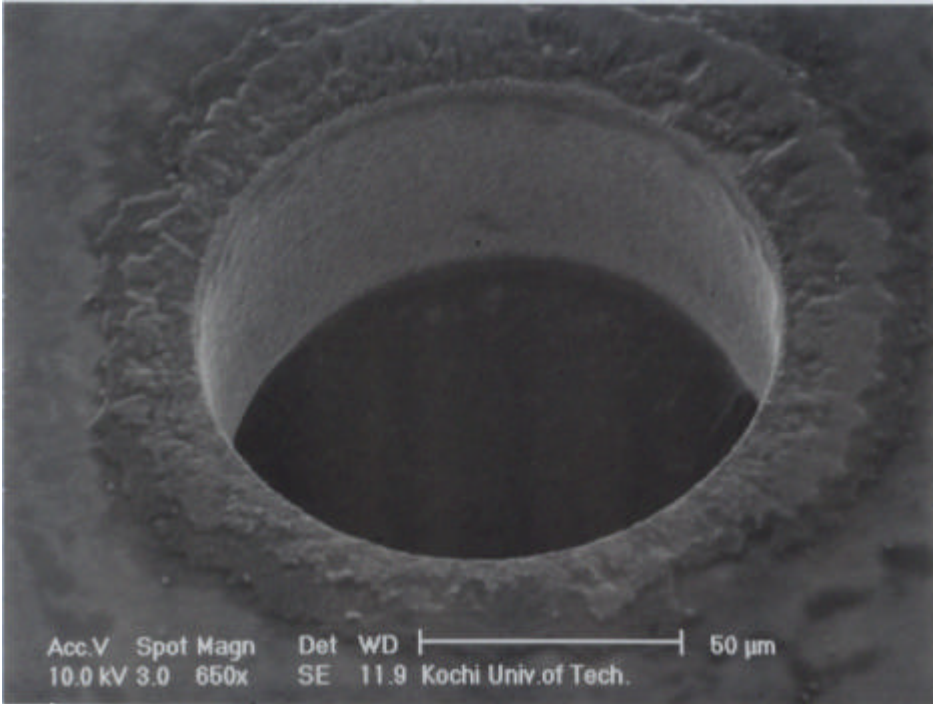


図 11.1(a) Pd 放電加工 10pF

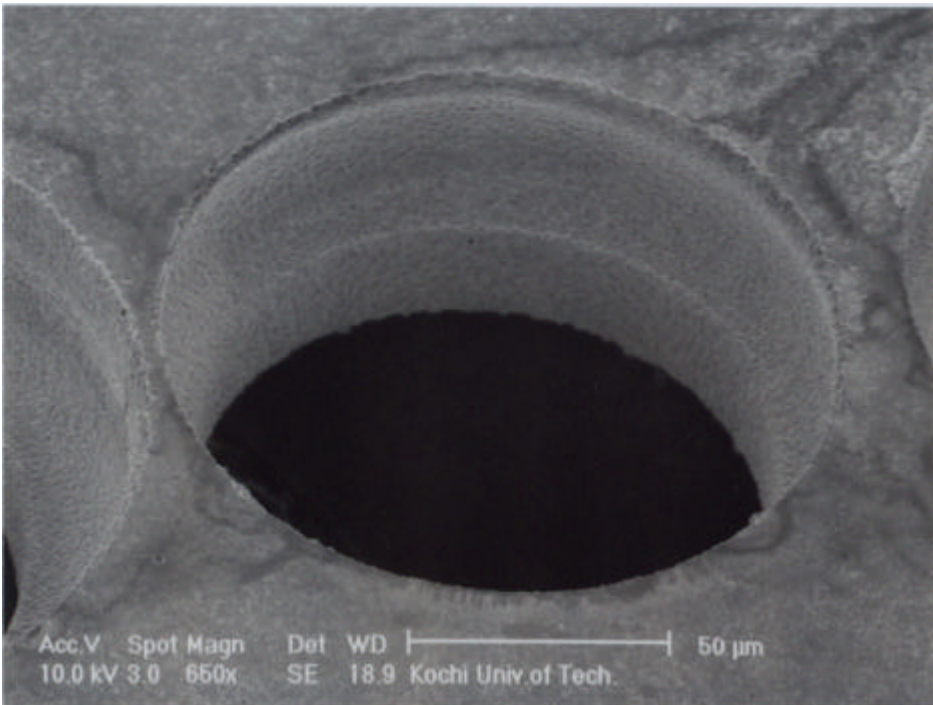


図 11.1(b) Pd 純水加工 10pF

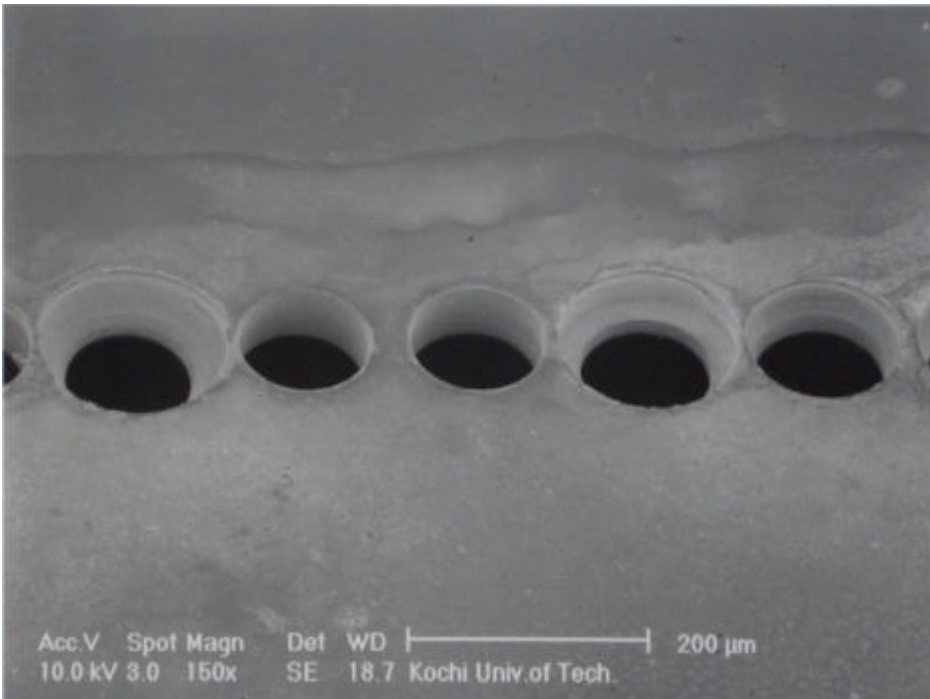


図 11.1(c) Pd 同一加工条件による純水加工面 (10pF)

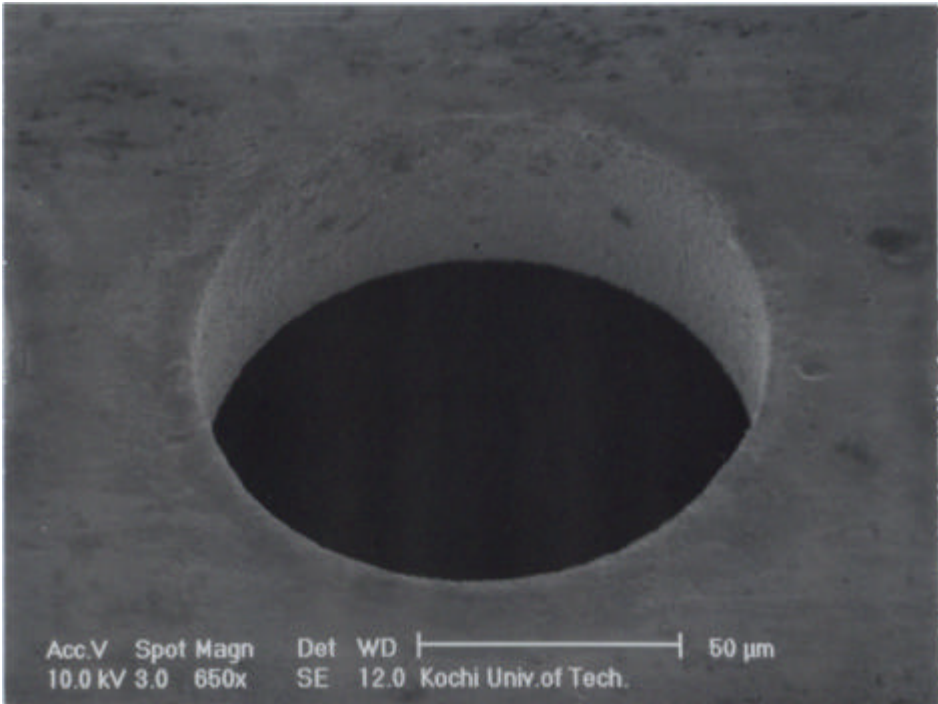


図 11.2(a) Pt 放電加工 10pF

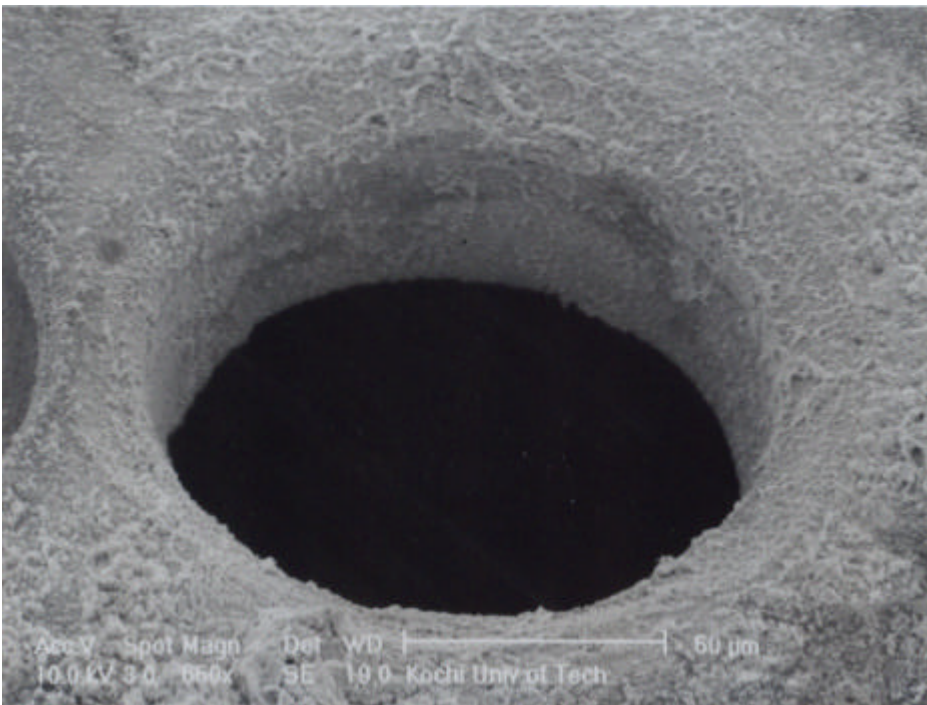


図 11.2(b) Pt 純水加工 10pF

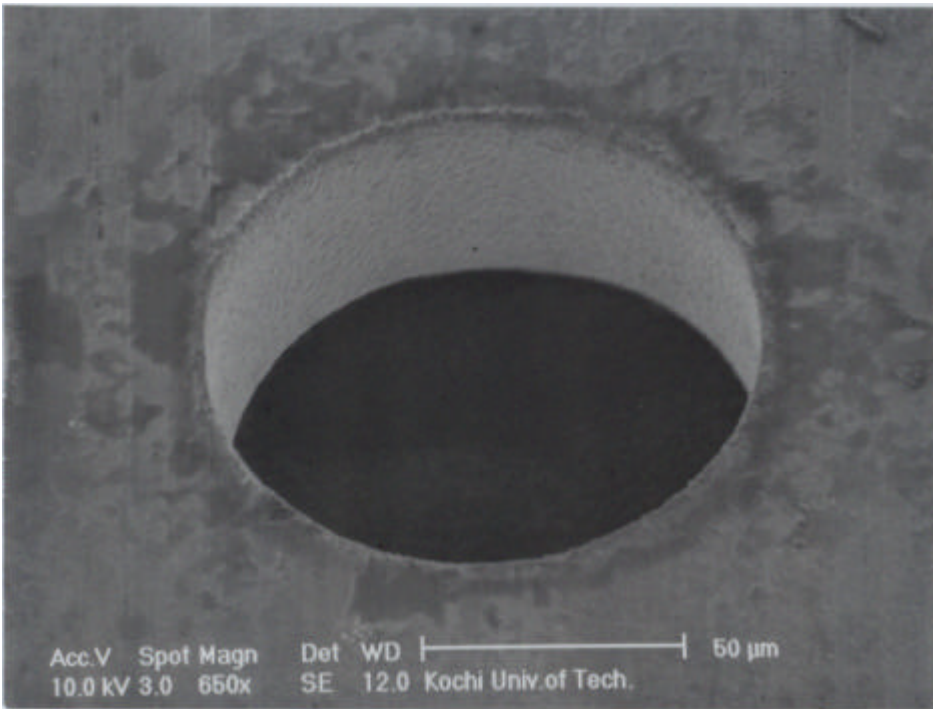


図 11.3(a) Ag 放電加工 10pF

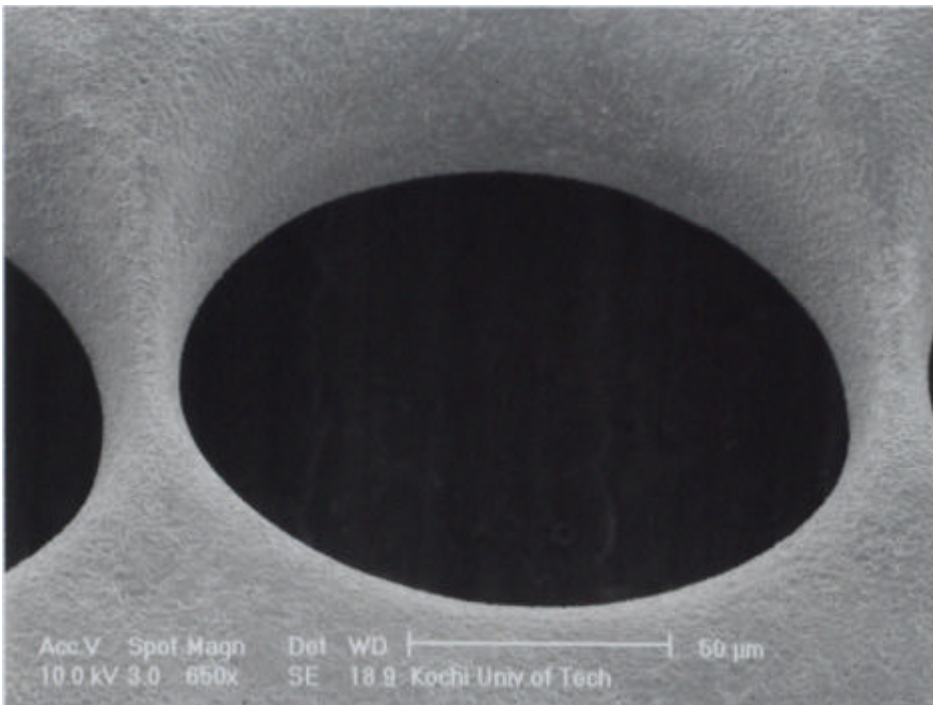


図 11.3(b) Ag 純水加工 10pF

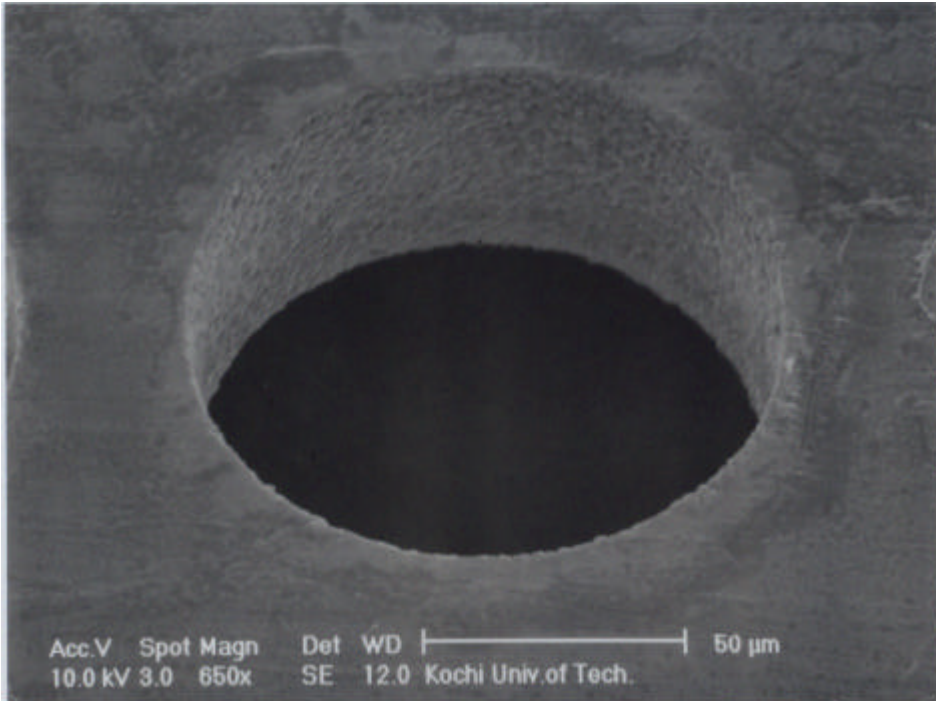


図 11.4(a) Sn 放電加工 10pF

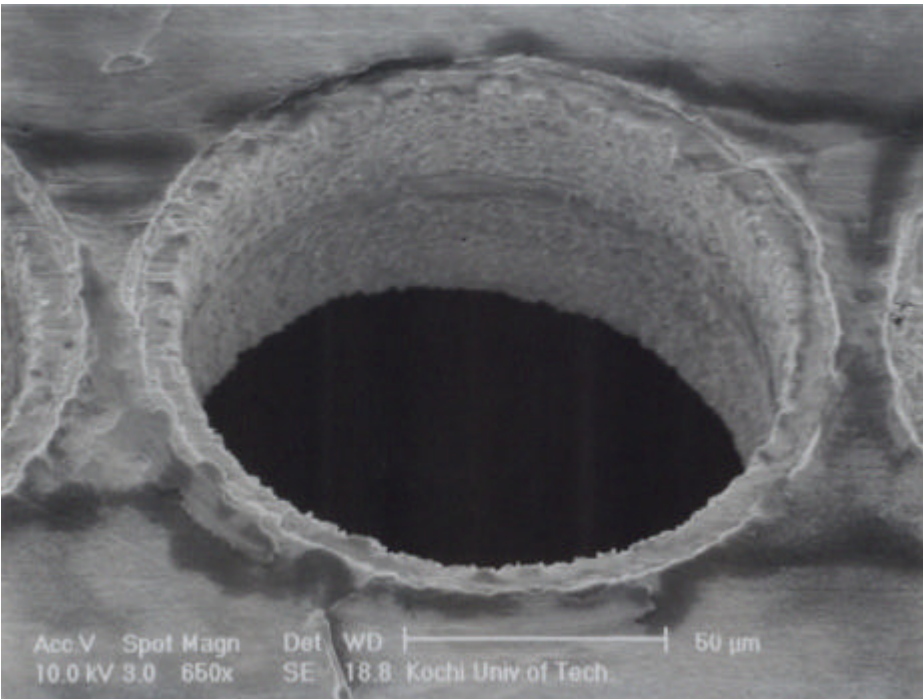


図 11.4(b) Sn 純水加工 10pF

第3章 体内作業機構の試作

マイクロマシン技術、及び微細放電加工技術の医療分野への応用として、眼科における低侵襲手術に利用するための手術器具の原型を放電加工機を用いて試作した。

図12はその白内障手術器具の原型である。

外筒の径は0.88mm、内筒の径は0.55mmとなっている。

従来は超音波振動によって患部の水晶体を破砕した後に別のツールを使用して患部を切除することを順番に行っていたが、このツールには新しい構想⁶⁾が盛り込まれており、破砕と同時に外筒端部の刃部と内筒部に設けた斜めの穴の刃部によって切除し、さらに内筒の穴を通じて患部を吸引する。

今後は材料とアクチュエータ機構などを検討する必要がある、またツールの内筒先端部を眼球に差込やすいように改良する必要がある。しかしながら体内で動作させる場合は高電圧のアクチュエータは人体に与える影響を考えると利用が難しい。人体に影響を与えない高周波の使用、低電圧による駆動が望ましいと考えられる⁷⁾。

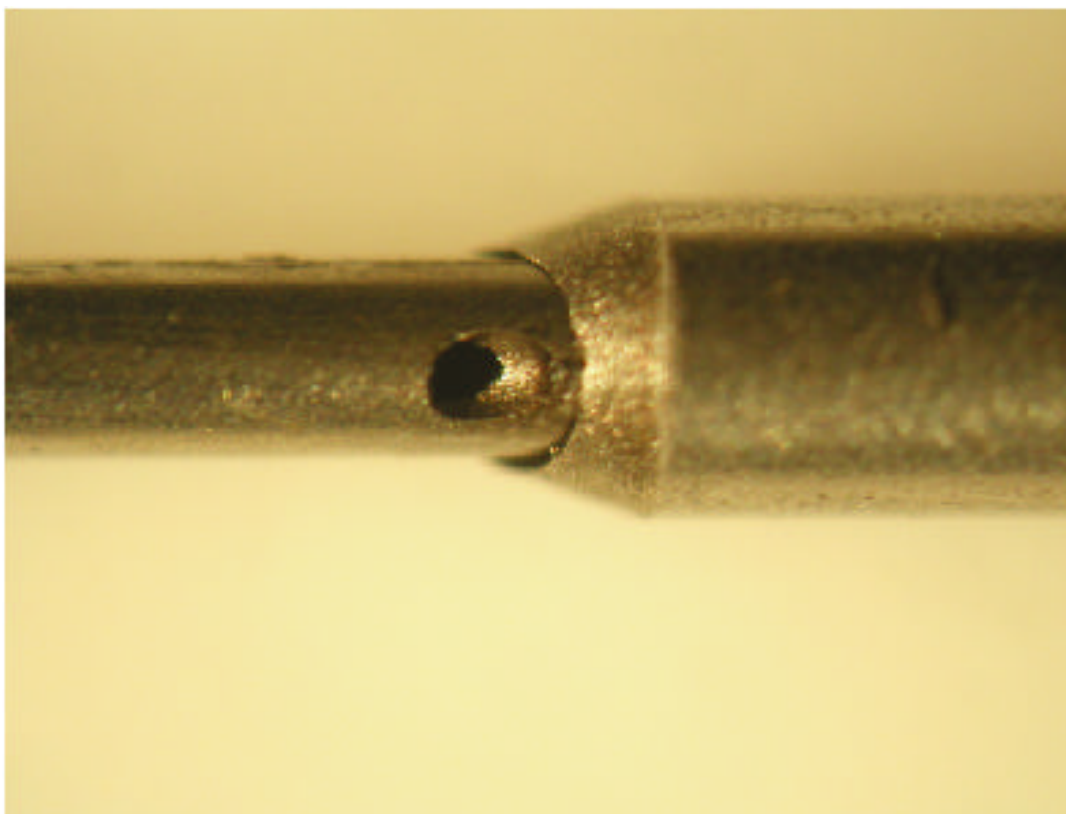


図12 白内障手術器具の原型

第4章 結論

本研究では低侵襲手術用マイクロツールの開発のために体内作業機構材料の加工性に関する実験を生態適合性も考慮し、加工液に放電加工油と純水を使用して行い比較した。実験対象である金属材料は Ag、Al、In、Pd、Pt、Sn、Zr である。また、マイクロマシン技術の医療分野への応用として白内障手術器具の原型試作を行った。

以下にそれぞれの結果についてまとめる。

4.1 貴金属、低融点金属の微細放電加工

- 1) 放電加工油を使用した場合、加工時間については極端に融点の低い Sn、In を除く金属ではコンデンサ容量の増大とともに加工時間が短くなる傾向がみられたが、純水を使用した場合は材料によって大きく異なる結果が得られた。
- 2) 放電加工液を使用した場合、融点と加工時間の関係、融点と熱伝導率の積と加工時間の関係に一定の関係が認められるが、純水の場合はばらつきが大きくその関係が認められなかった。
- 3) 電極消耗量は放電エネルギーが大きくなると小さくなる傾向があるが、純水の場合は放電加工油の場合に比べ全体的に小さくなる。また、Pt、Pd の放電エネルギーの最適値が放電加工油による加工時に 220pF、純水による加工時に 100pF にあるという違いが認められた。
- 4) 電極消耗量については放電加工油、純水の場合ともに、融点が増大すると電極消耗量は増大する傾向が見られたが放電エネルギーの最適値の違いから融点 700~800K 付近で逆転する現象が見られた。
- 5) 放電加工油では放電エネルギーが大きくなると放電ギャップは大きくなる傾向があり、純水の場合は全体にばらつきが大きい放電加工油の場合に比べ大きくなる傾向にある。
- 6) 加工面については放電加工油を使用した場合にどの材料でも良好な加工面が得られたが、純水の場合では材料によって大きく状態が異なった。
- 7) 微細放電加工においては加工液に放電加工油を使用する方が安定した加工を行うことが可能であり、材料の物理特性から加工結果が予測しやすく、純水を使用するよりも加工精度が良い。
- 8) 純水を使用した場合は材料の物理特性の他に電気化学特性も影響し、電解作用の発生により安定した加工結果が得られず、加工結果の予測が難しい。
- 9) 純水を使用する場合は材料による加工特性に注意が必要であるが、逆に Ag のような特徴的な加工特性を生かした利用が考えられる。また、生態適合性を考慮した場合、純水で加工できる材料は体内作業に有効であるため今後も様々な材料を用いた加工データの採取が必要である。

4.2 マイクロマシン技術の医療分野への応用

- 1) 医療分野への微細放電加工技術の応用として白内障手術器具の原型試作を行った。低侵襲手術の利用を考え、新しい構想として従来の超音波振動による患部の水晶体の破碎と切除を複数のツールで順番に行っていたのを1つのツールで同時に行うことが可能としている。
- 2) 今後の課題として材料、アクチュエータ機構などを検討する必要があるが、体内で動作させる場合高電圧のアクチュエータは人体に影響を与えるため利用が難しい。人体に影響を与えない高周波の使用、低電圧による駆動、形状記憶合金の使用が望ましいと考えられる。
- 3) 低侵襲術の理念である「患者と術者の負担を極力減らした手術」を考慮すると、衛生面や扱いやすさなど医療機関と密接に協力しながらの研究・開発が必要である。

参考文献

- 1) 諸隈肇：内視鏡テクノロジー、豪華房、111、(1999)
- 2) 心臓血管センター北海道大野病院 Web Site
(<http://www.cvc-ohno.or.jp/web/open-anime.html>)
- 3) 6)L.Kudla:Proc.3rd euspen Int'l Conf, 407, (2002).
- 4) 山岡正和、寺田研一郎、佐藤健夫、河田耕一：2001年度精密工学会春季大会講演論文集、259、(2001)。
- 5) 齋藤長男、毛利尚武、高鷲民生、古谷政典：放電加工技術、日刊工業、39、(1997)。
- 7) 森岡昌人：知能精密工学研究室平成13年度卒業論文集、(2001)。

謝辞

本研究に対し終始ご親切にご指導賜りました高知工科大学院知能機械システムコース
河田耕一 教授に謹んで感謝の意を表せて頂くととも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ご協力してくださった同大学院 山岡 正和君に心から
厚く御礼申し上げます。

2003年2月18日

森岡 昌人

付属資料

- 図 13.1 ~ 13.6 融点と加工時間、電極消耗量、放電ギャップの関係
- 図 14.1 ~ 14.6 熱伝導率と加工時間、電極消耗量、放電ギャップの関係
- 図 15(a) , (b) 融点と熱伝導率の積と加工時間の関係
- 図 16.1 ~ 図 22.8 各種金属材料のコンデンサ容量別加工面

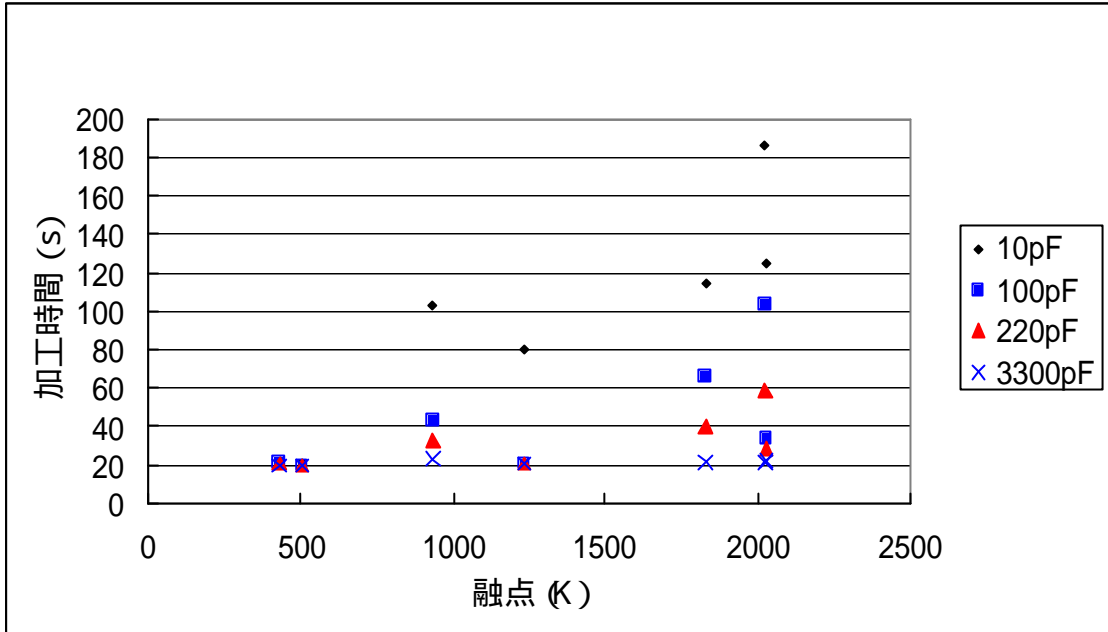


図 13.1 融点と加工時間の関係 (加工油)

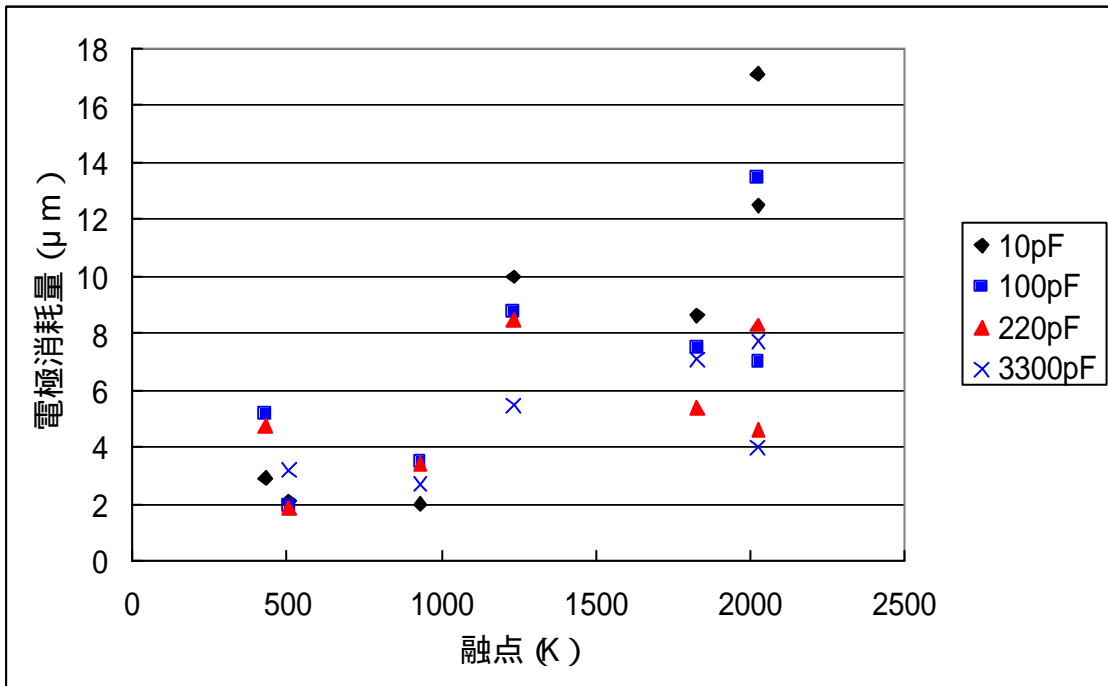


図 13.2 融点と電極消耗量の関係 (加工油)

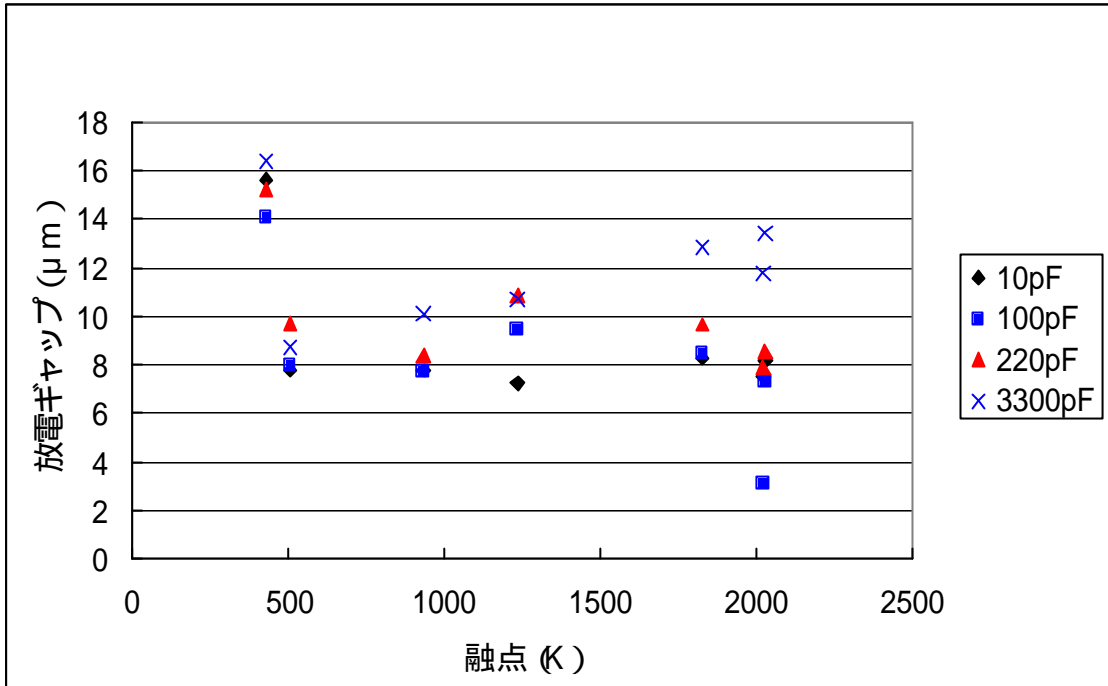


図 13.3 融点と放電ギャップの関係 (加工油)

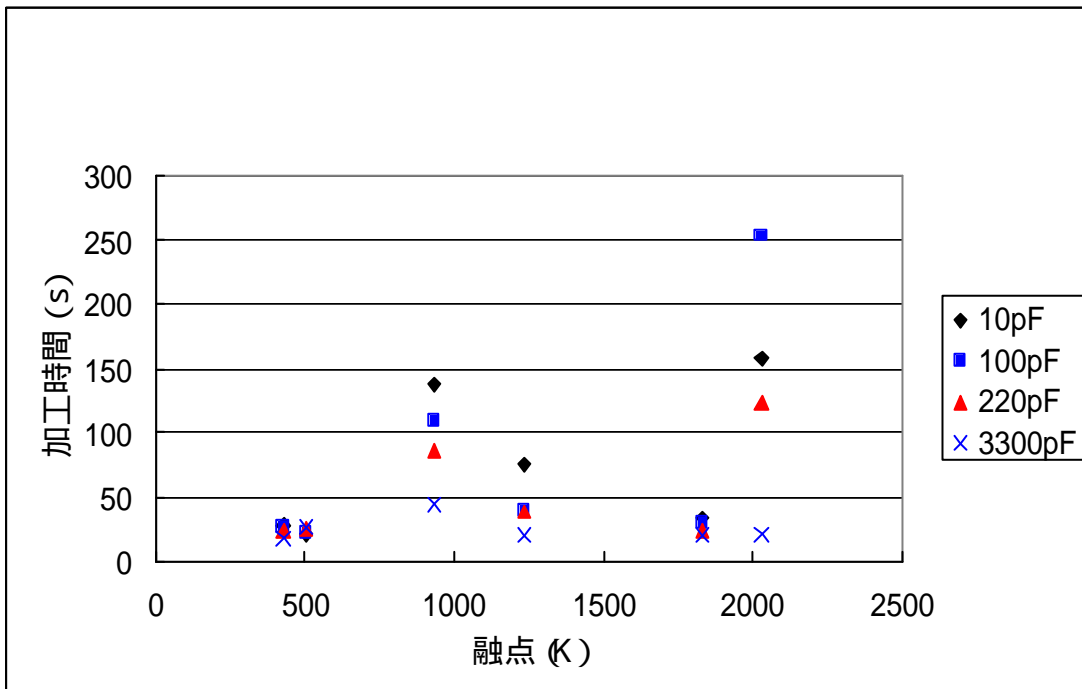


図 13.4 融点と加工時間の関係 (純水)

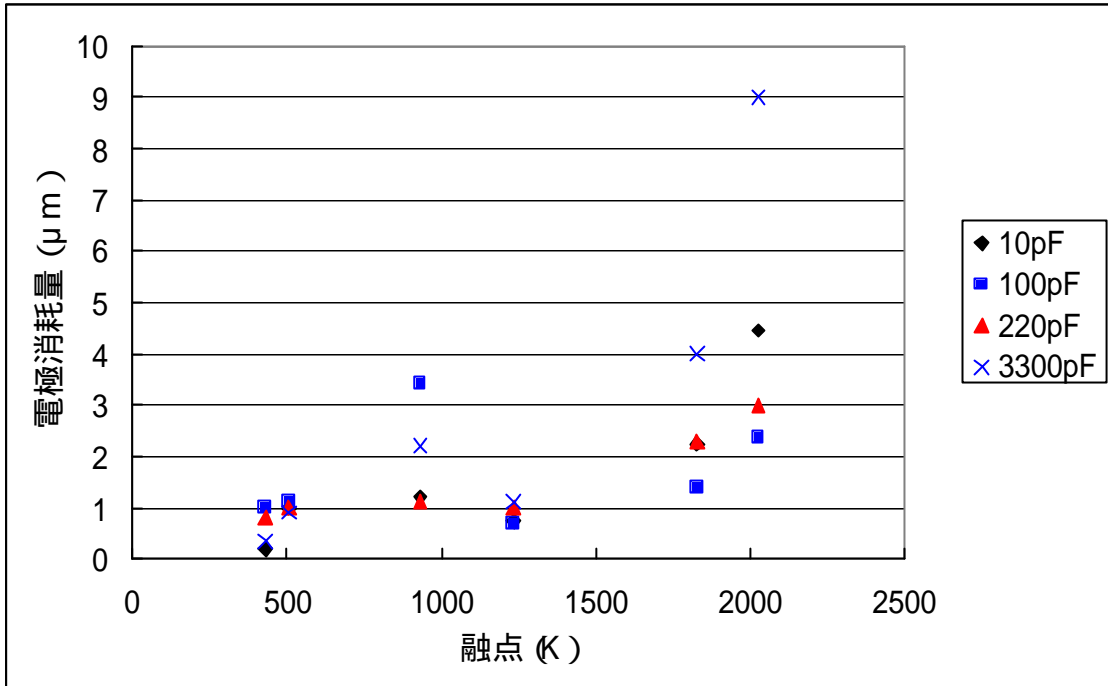


図 13.5 融点と電極消耗量の関係（純水）

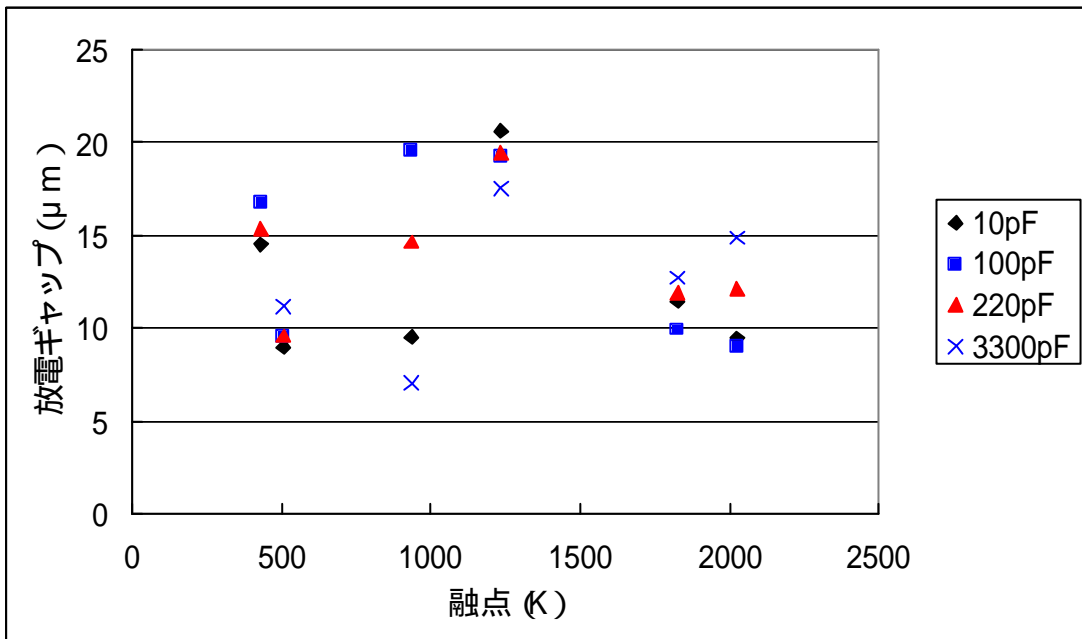


図 13.6 融点と放電ギャップの関係（純水）

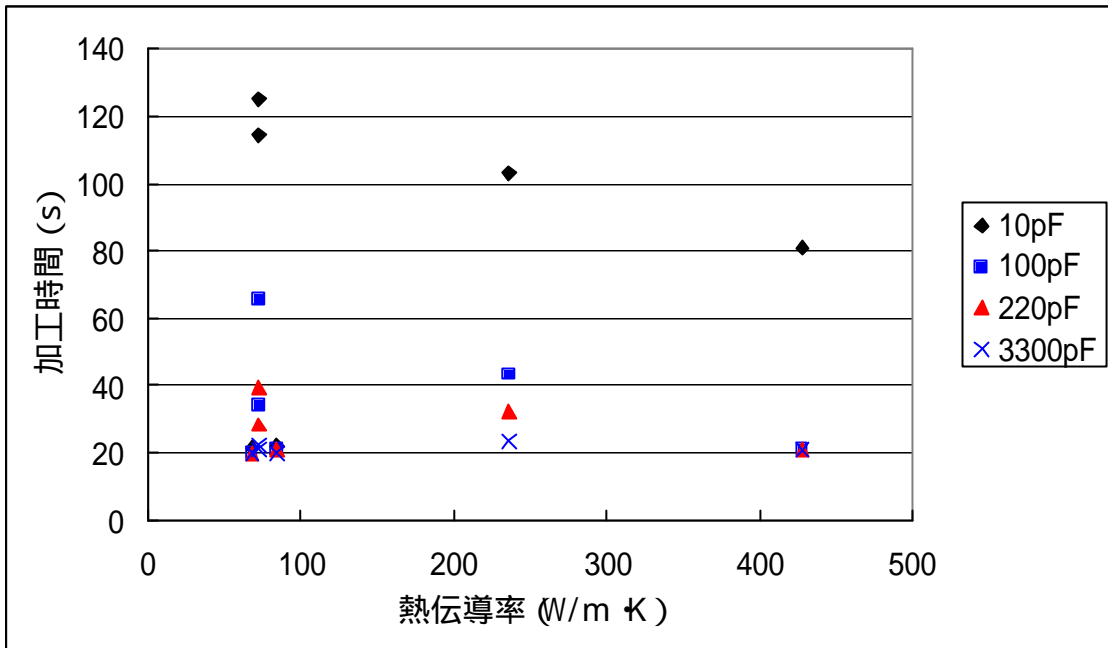


図 14.1 熱伝導率と加工時間の関係 (加工油)

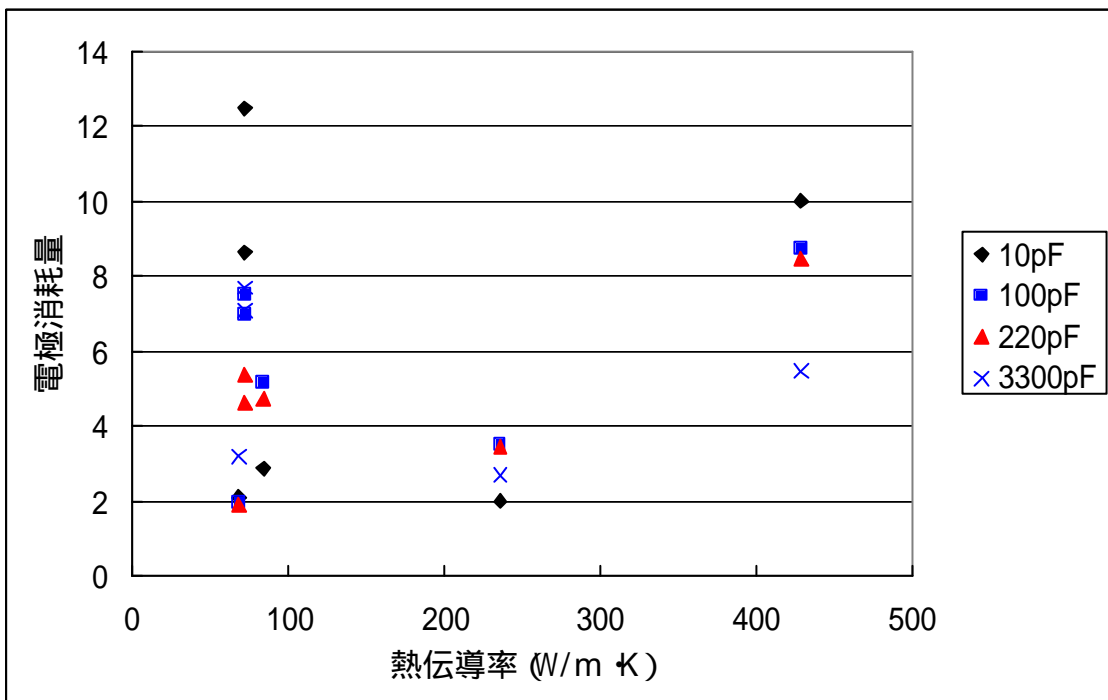


図 14.2 熱伝導率と電極消耗量の関係 (加工油)

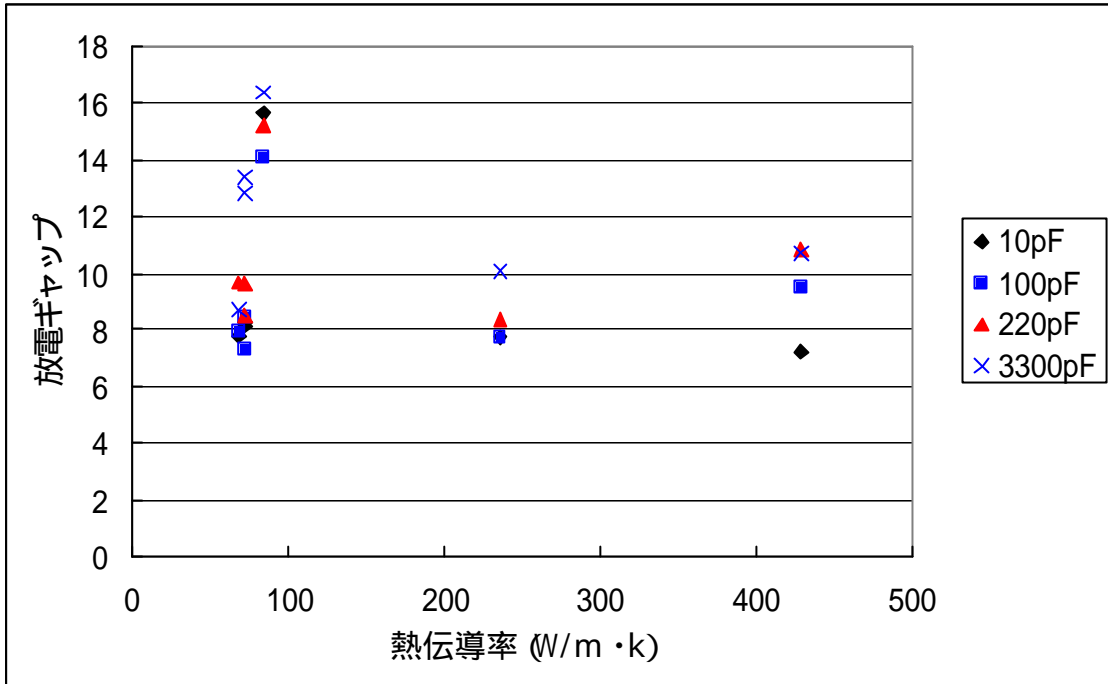


図 14.3 熱伝導率と放電ギャップの関係 (加工油)

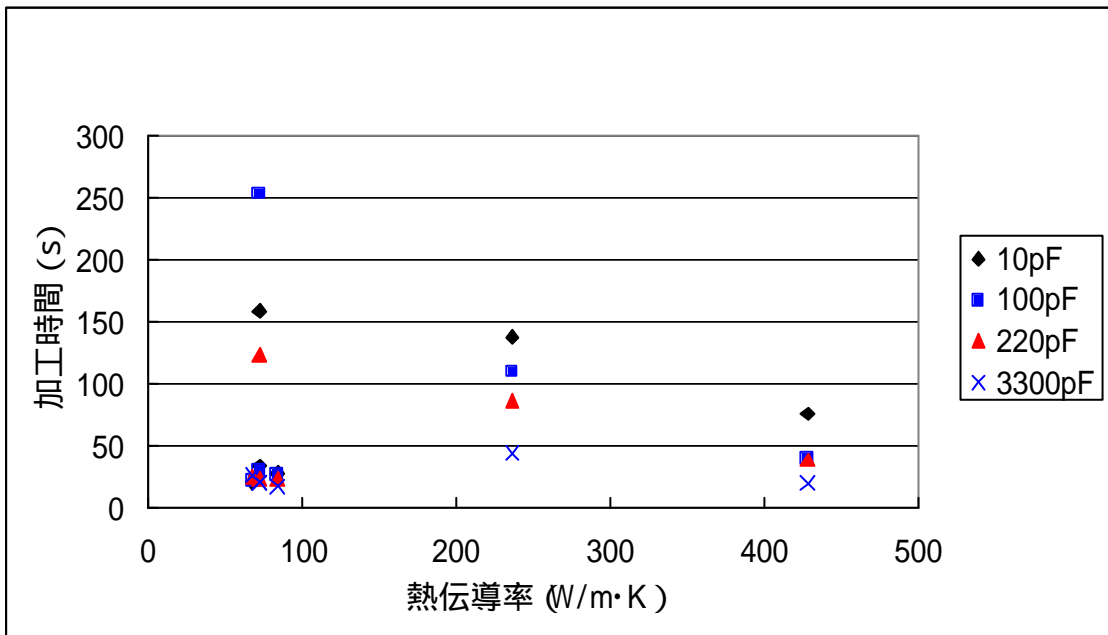


図 14.4 熱伝導率と加工時間の関係 (純水)

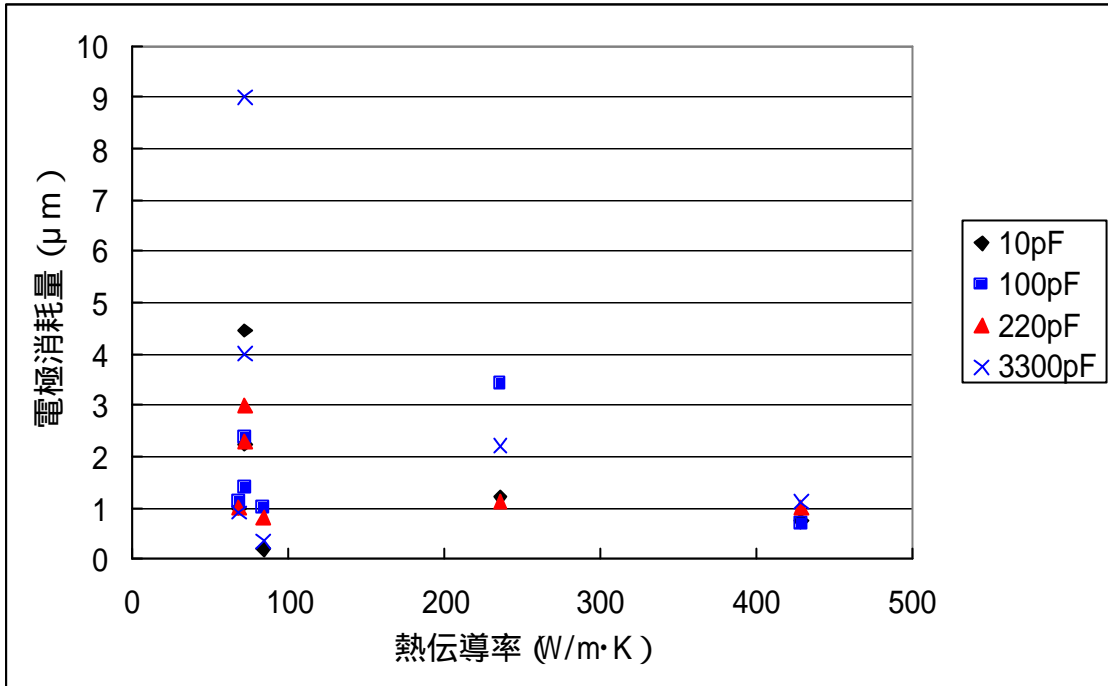


図 14.5 熱伝導率と電極消耗量の関係（純水）

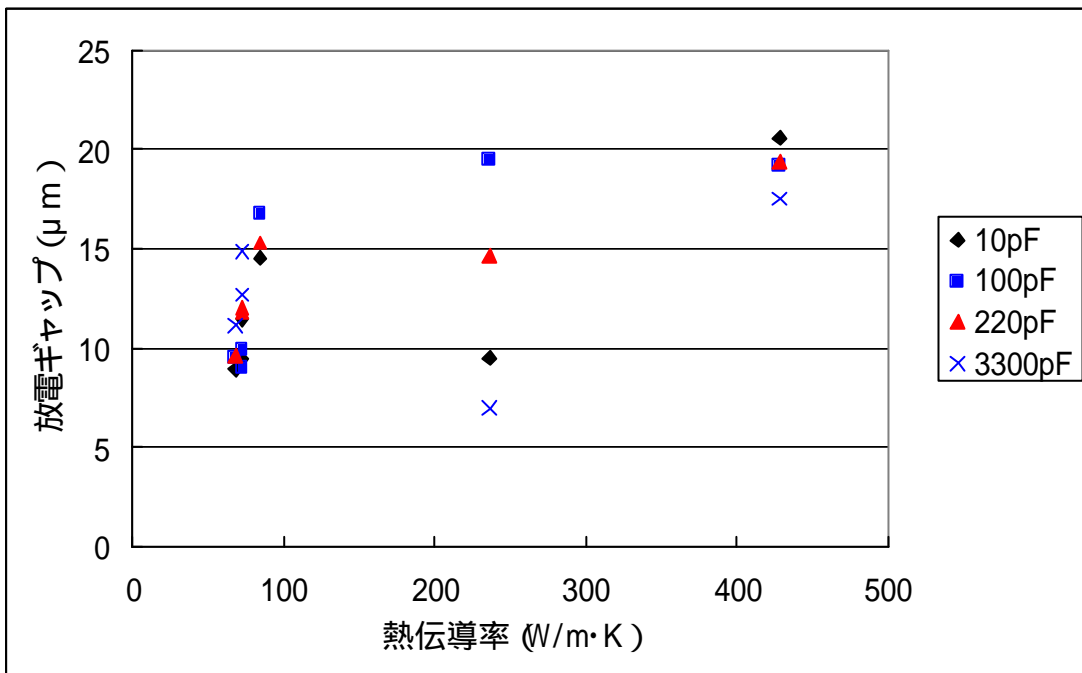
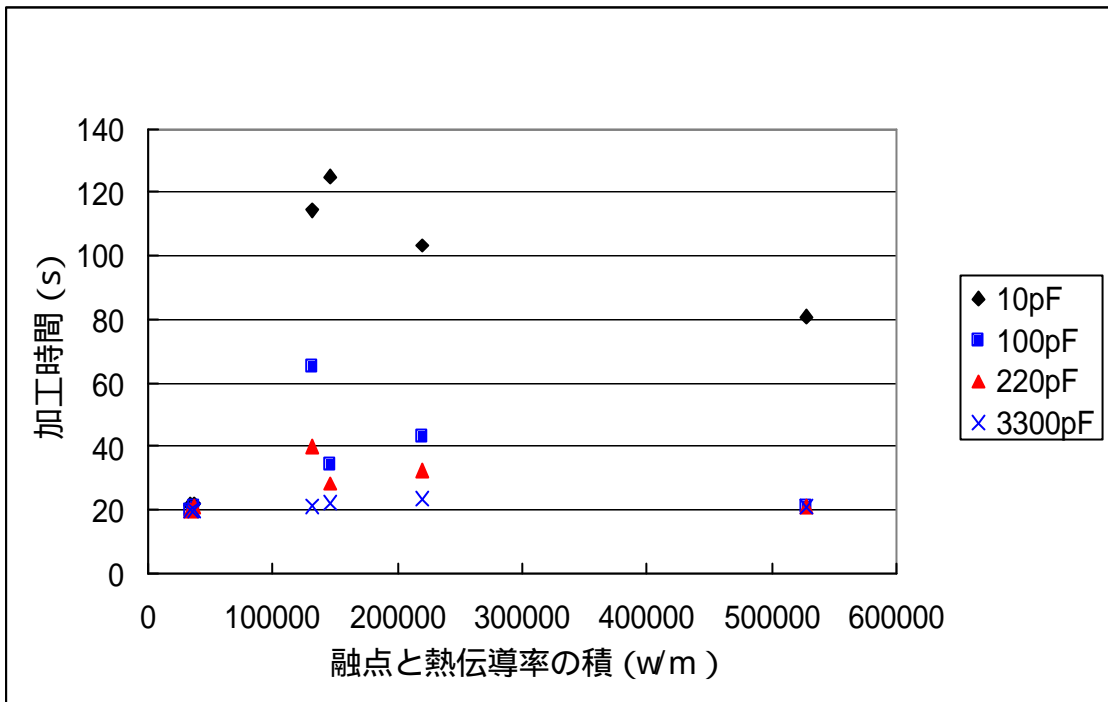
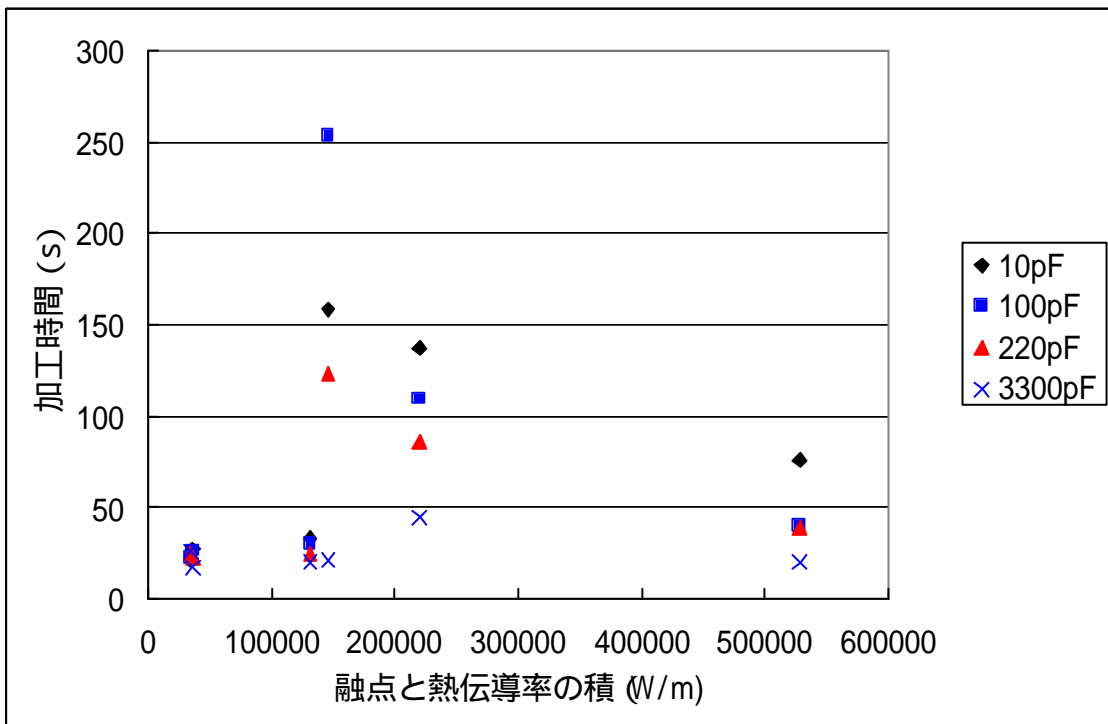


図 14.6 熱伝導率と放電ギャップの関係（純水）



(a) 加工油



(b) 純水

図 15 融点と熱伝導率の積と加工時間の関係

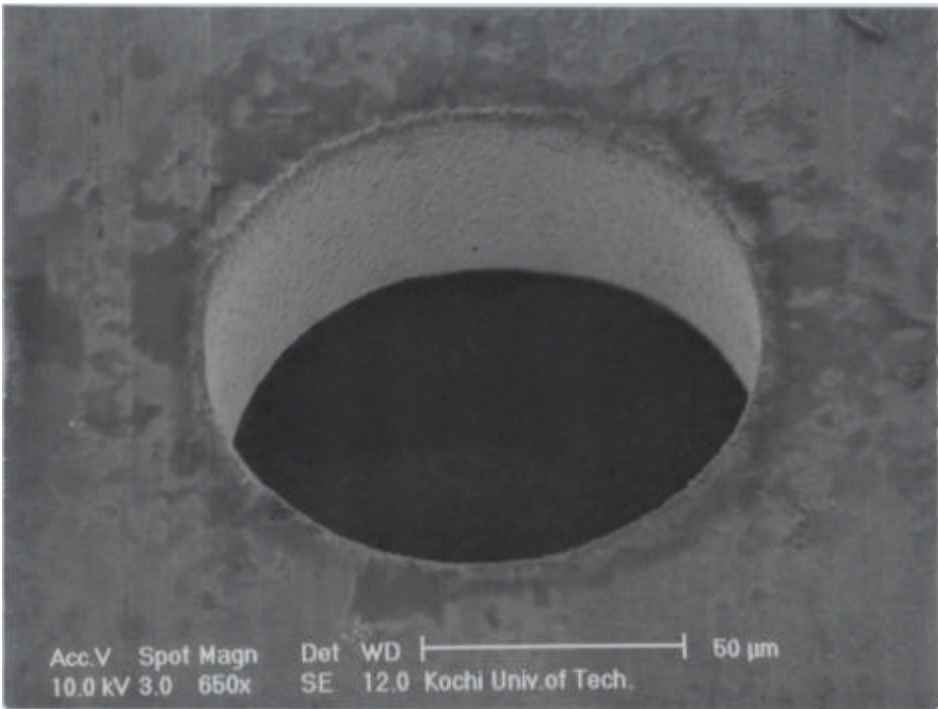


图 16.1 Ag 10 pF 加工油

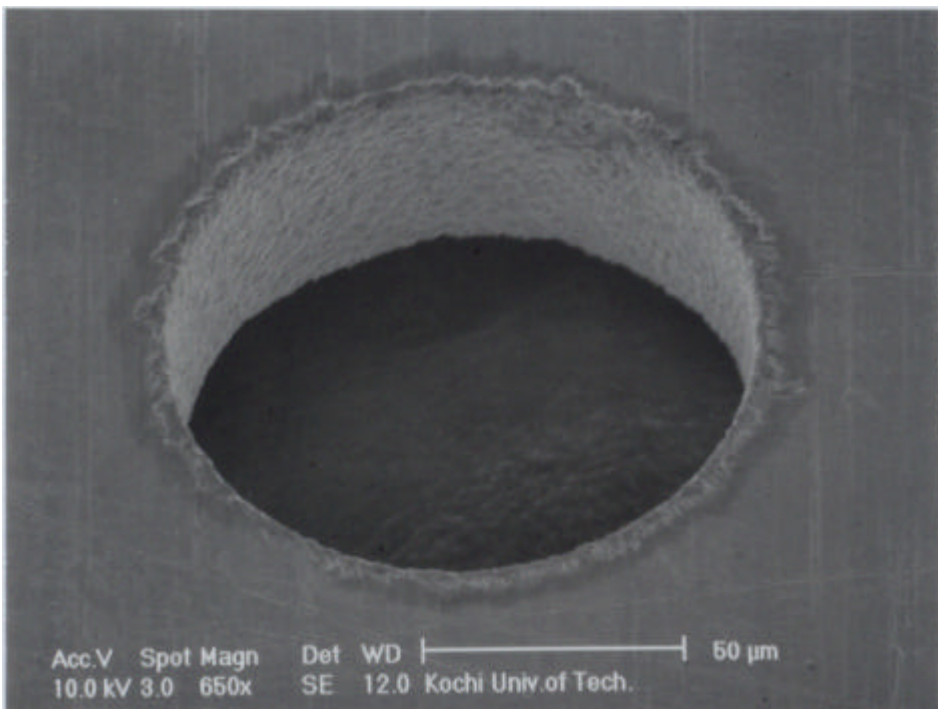


图 16.2 Ag 100 pF 加工油

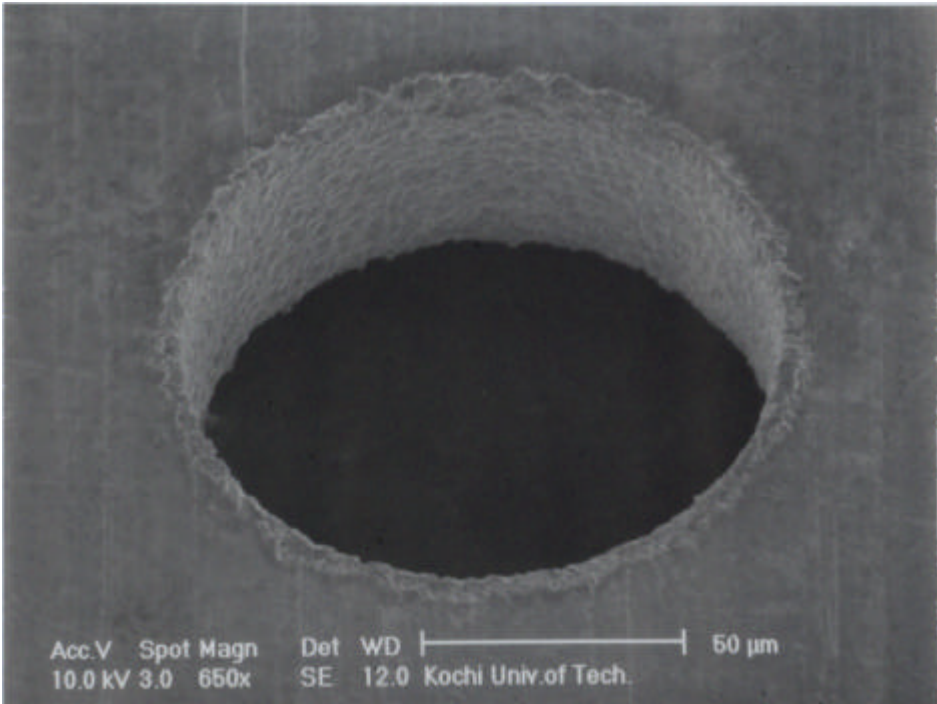


图 16.3 Ag 220pF 加工油

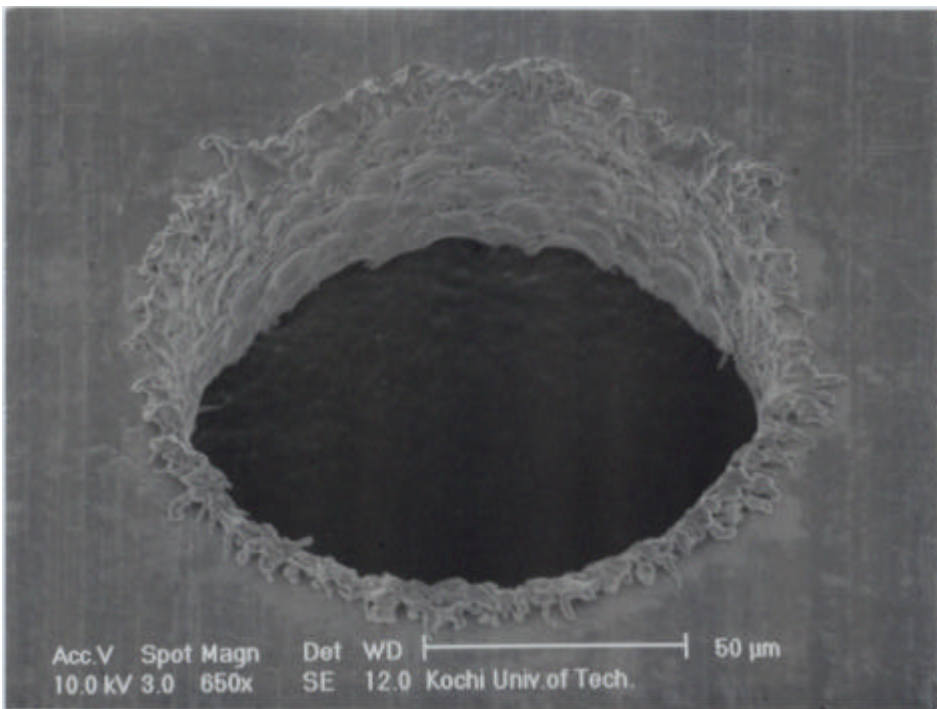


图 16.4 Ag 3300pF 加工油

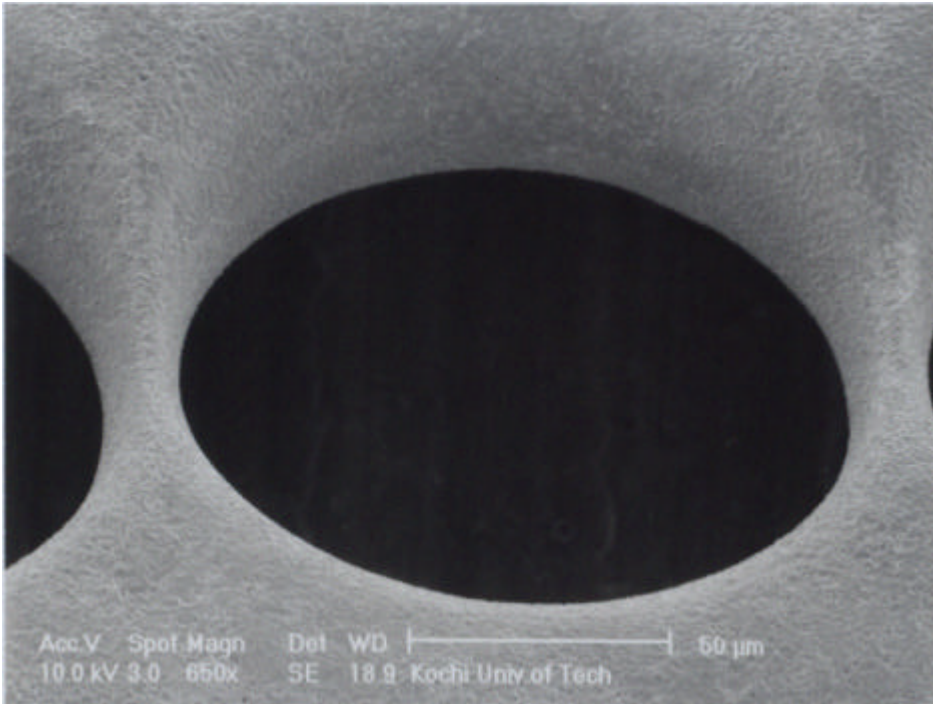


図 16.5 Ag 10pF 純水

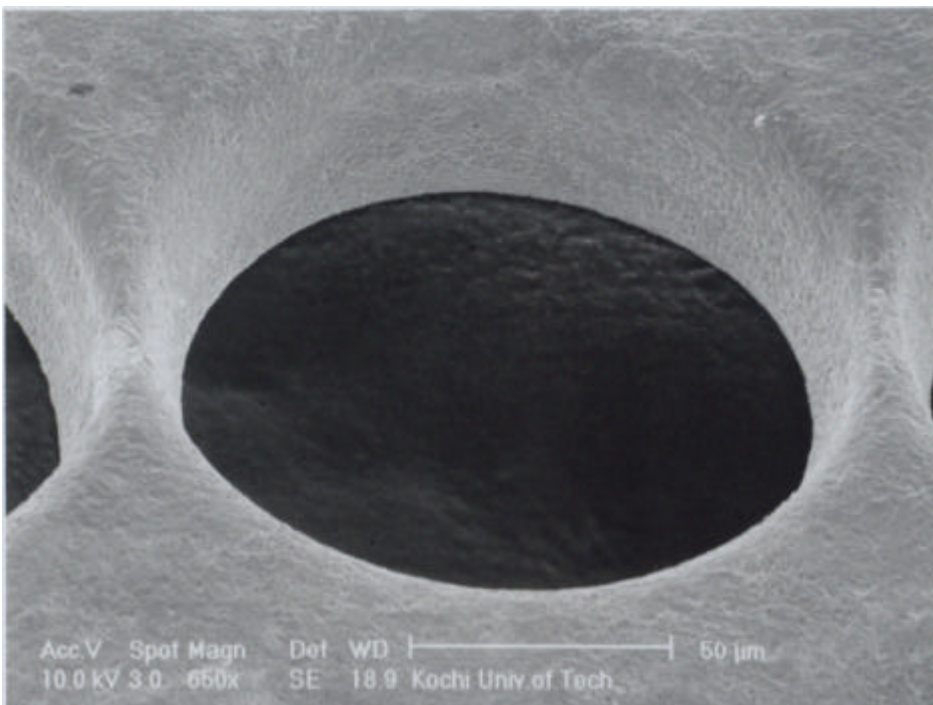


図 16.6 Ag 100pF 純水

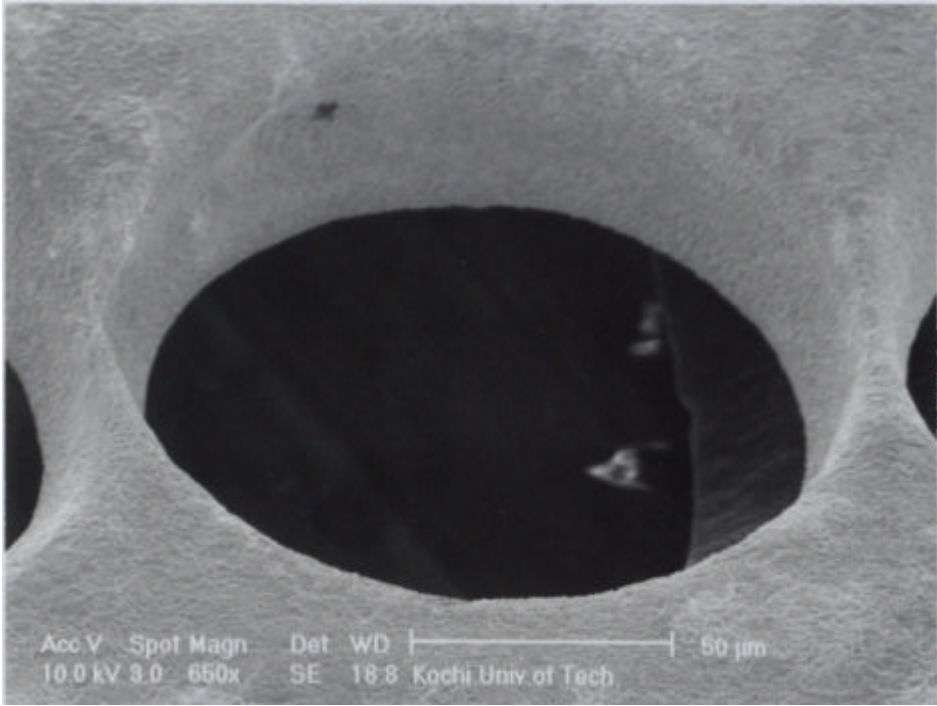


図 16.7 Ag 220pF 純水

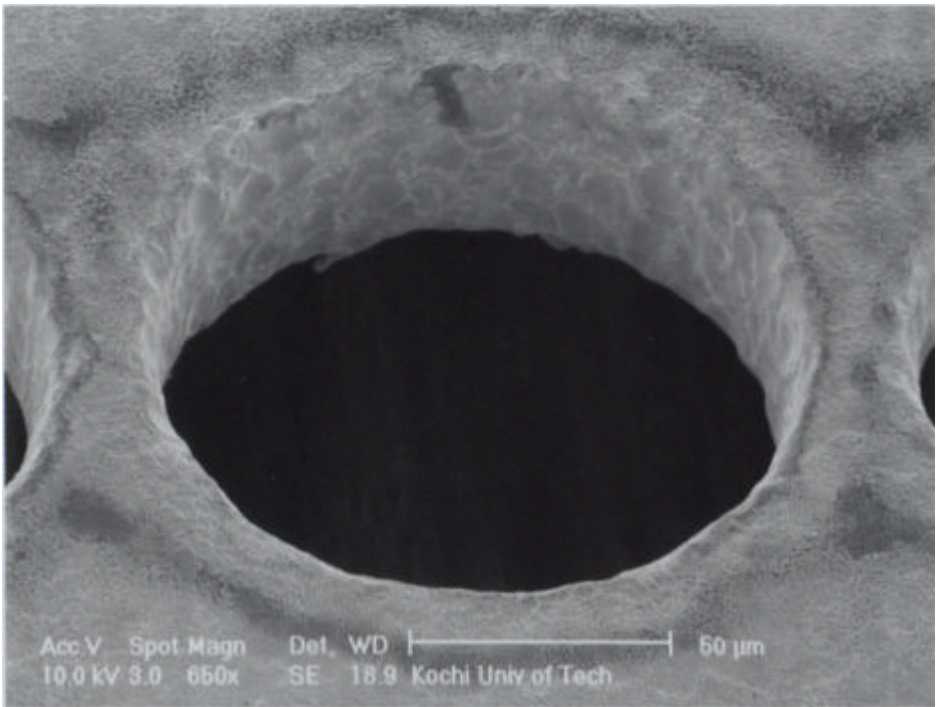


図 16.8 Ag 3300pF 純水

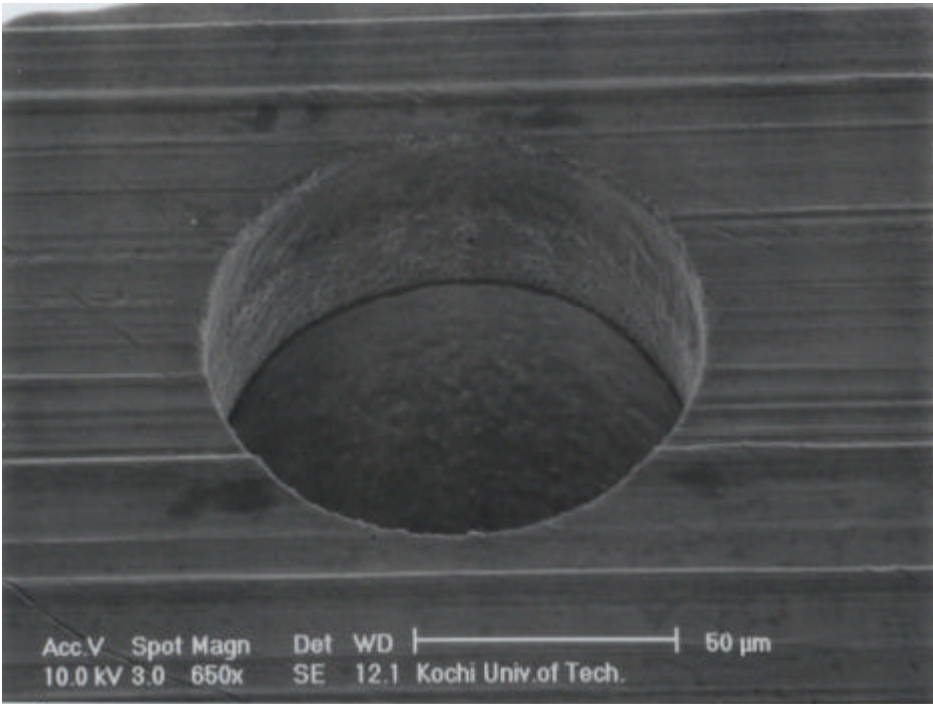


图 17.1 Al 10pF 加工油

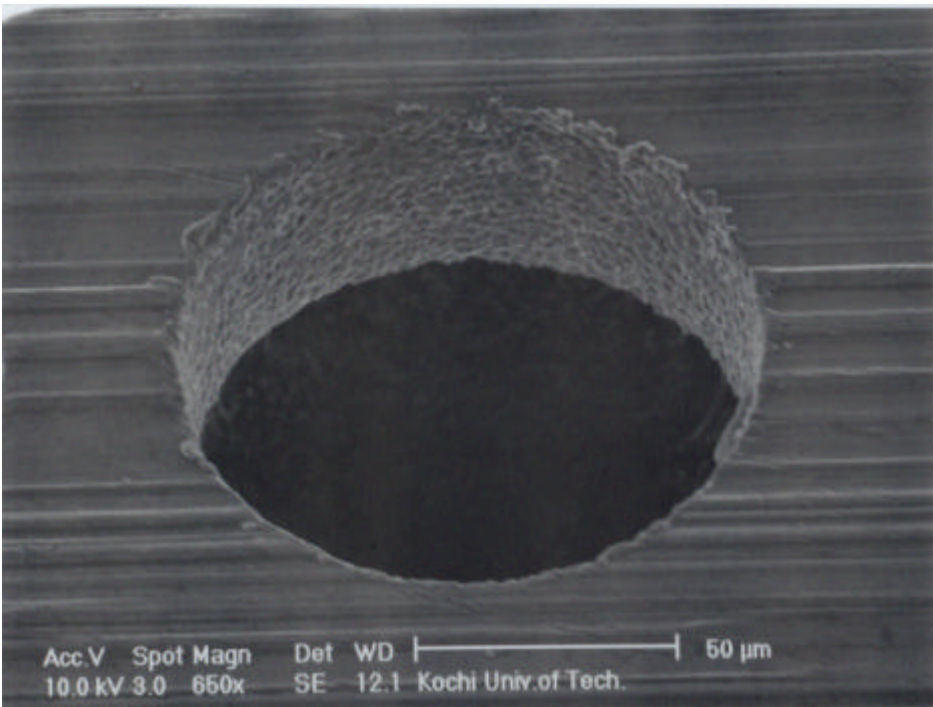


图 17.2 Al 100pF 加工油

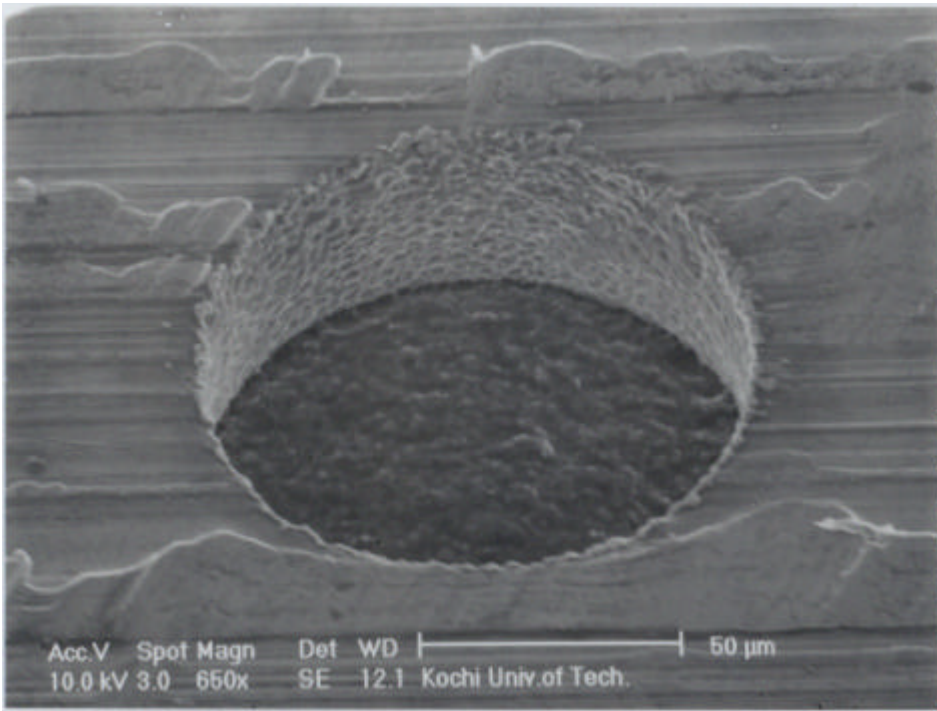


图 17.3 Al 220pF 加工油

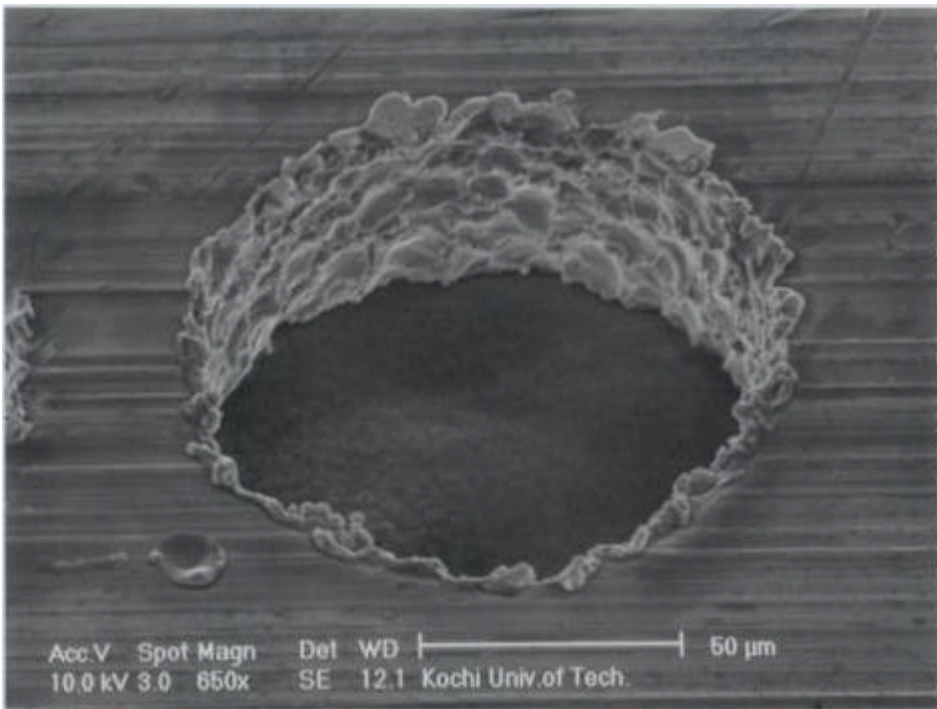


图 17.4 Al 3300pF 加工油

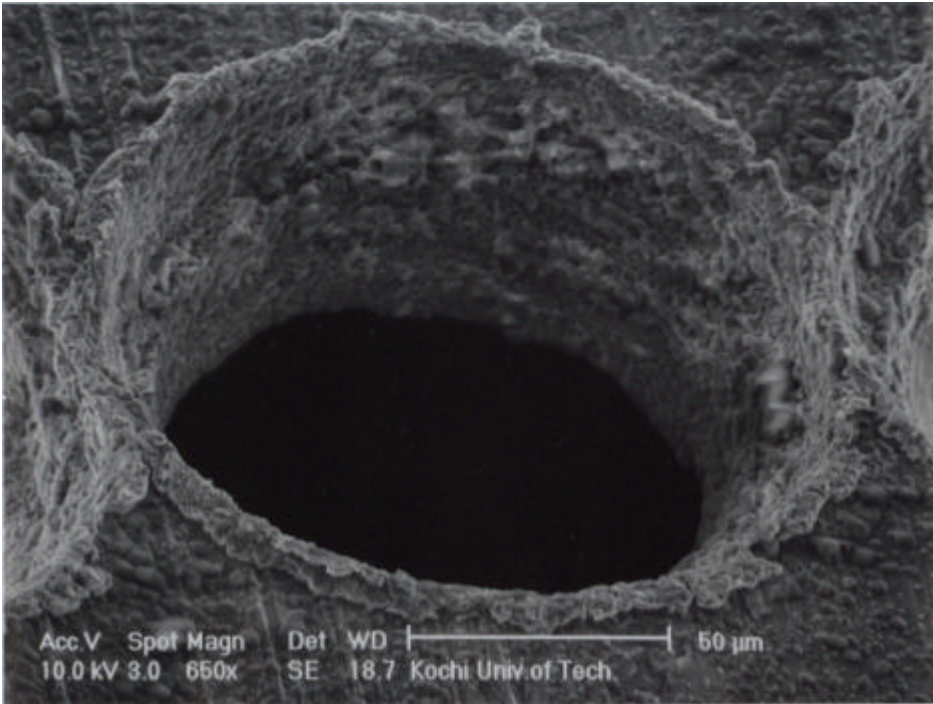


図 17.5 Al 10pF 純水

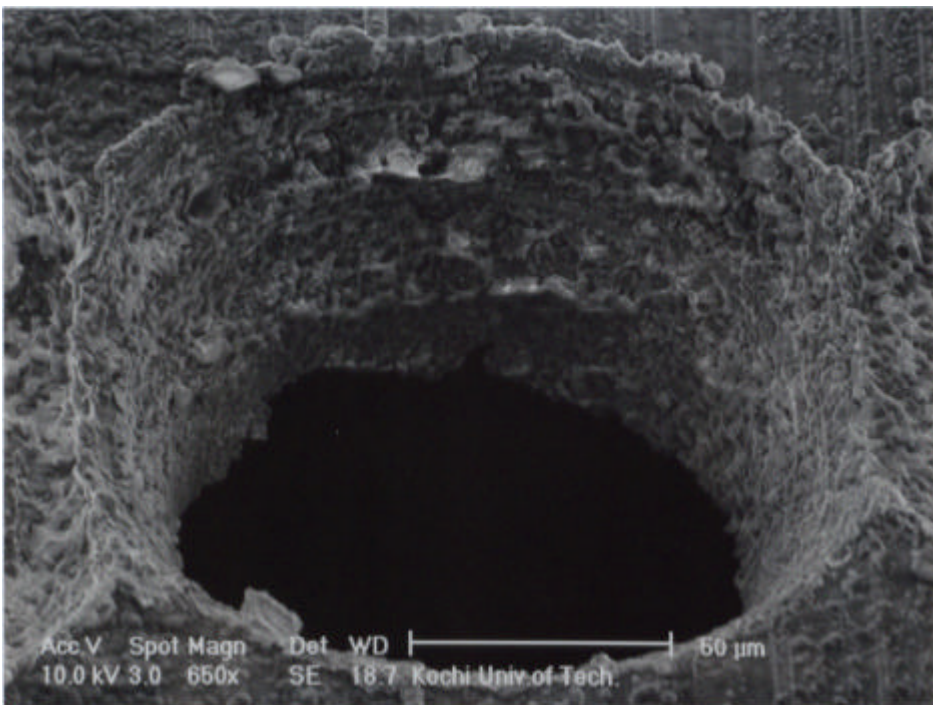


図 17.6 Al 100pF 純水

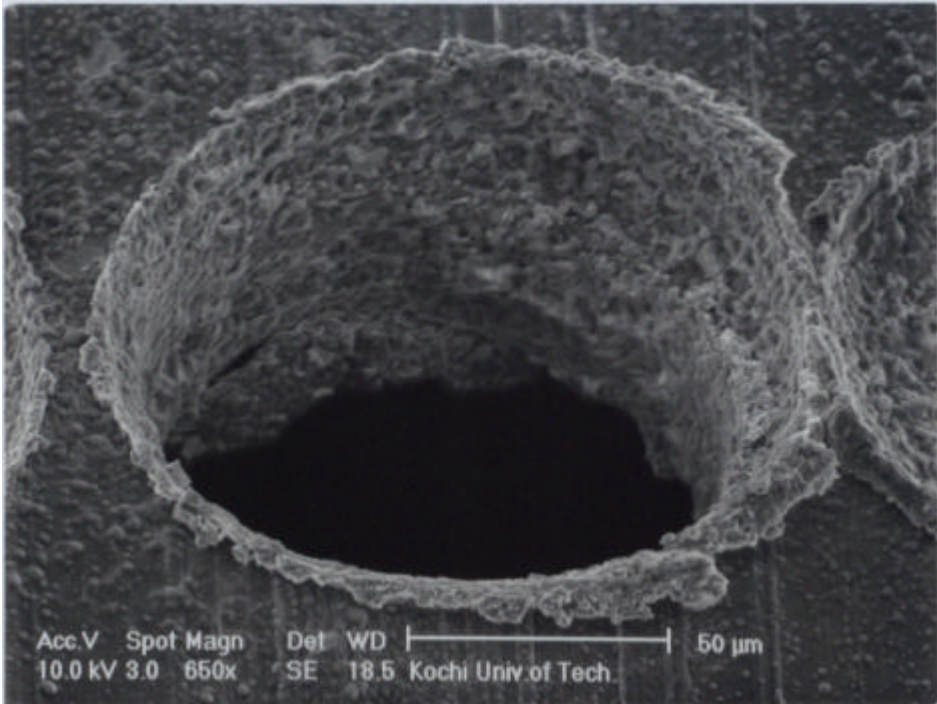


図 17.7 Al 220pF 純水

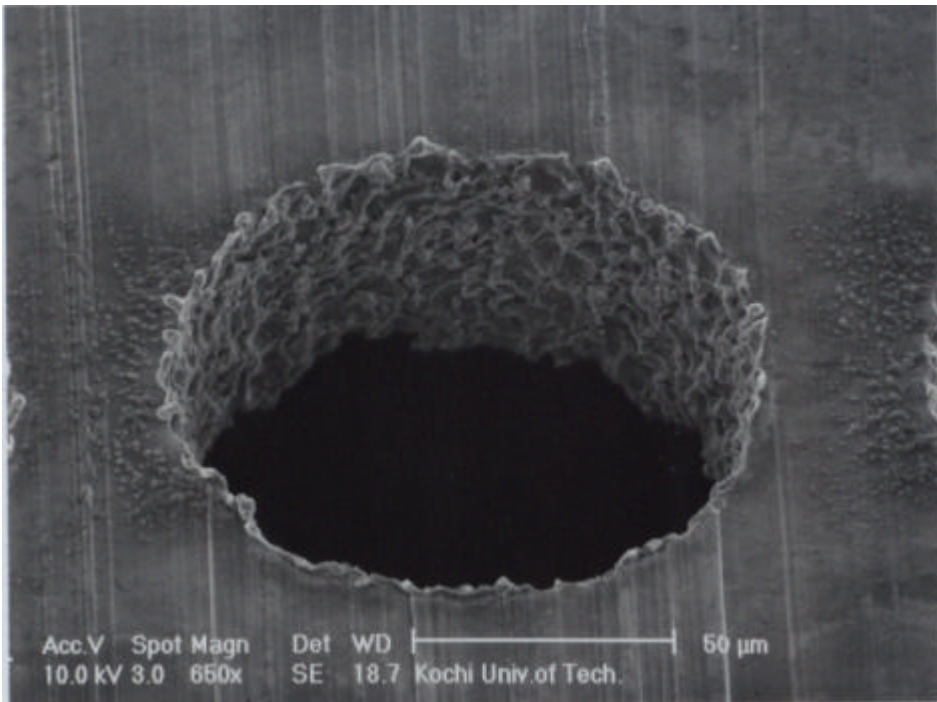


図 17.8 Al 3300pF 純水

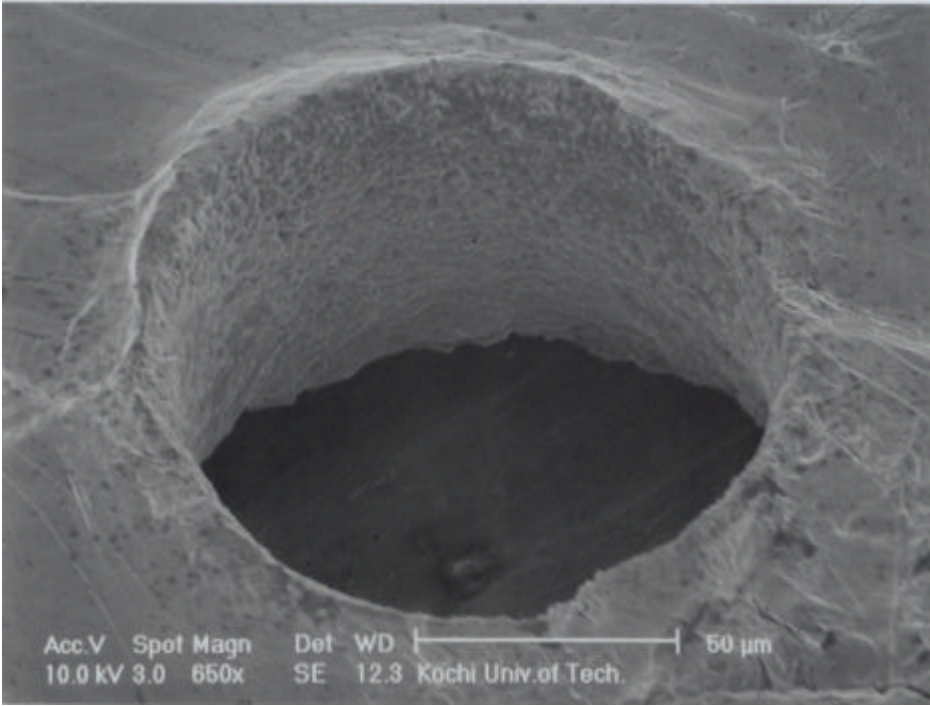


图 18.1 In 10pF 加工油

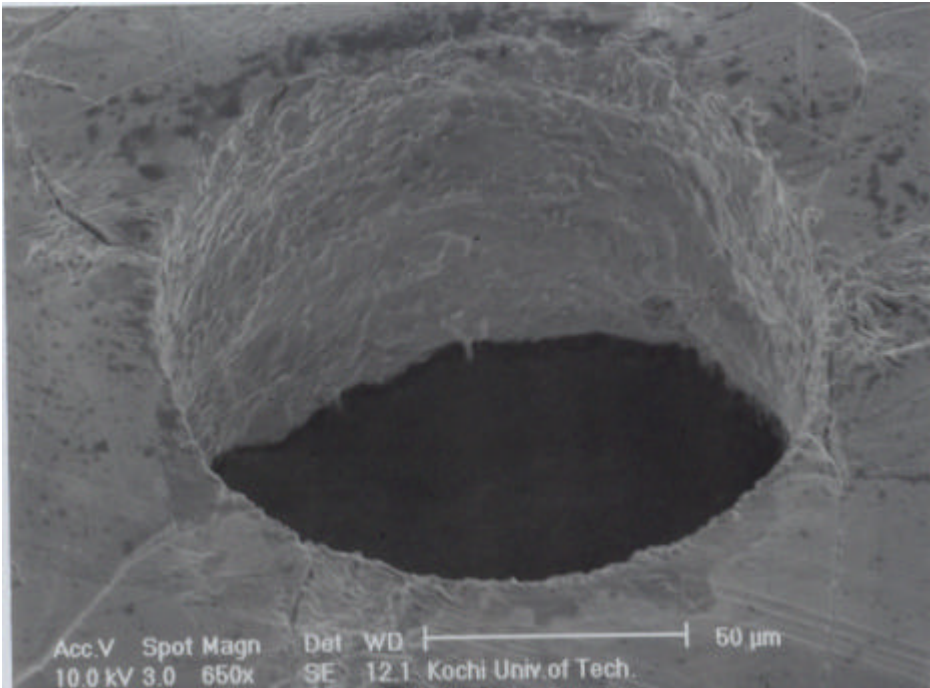


图 18.2 In 100pF 加工油

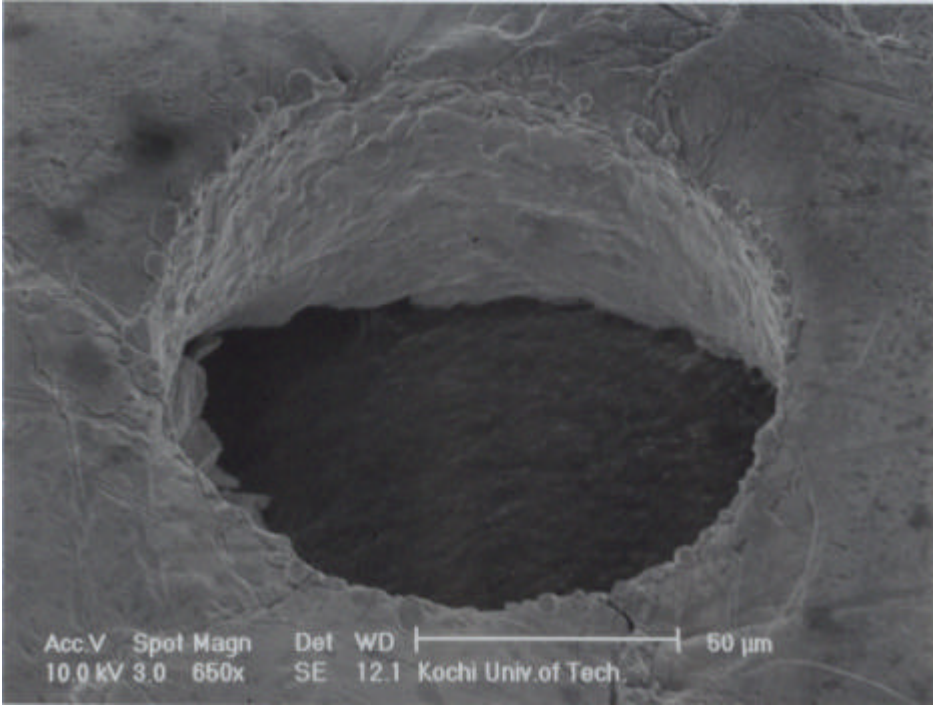


图 18.3 In 220pF 加工油

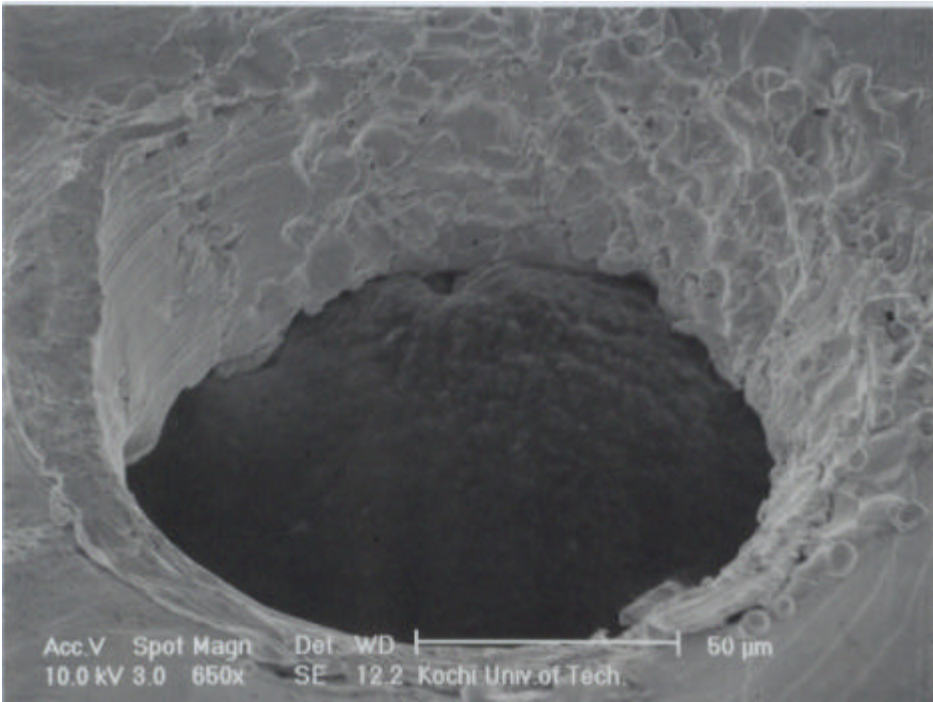


图 18.4 In 3300pF 加工油

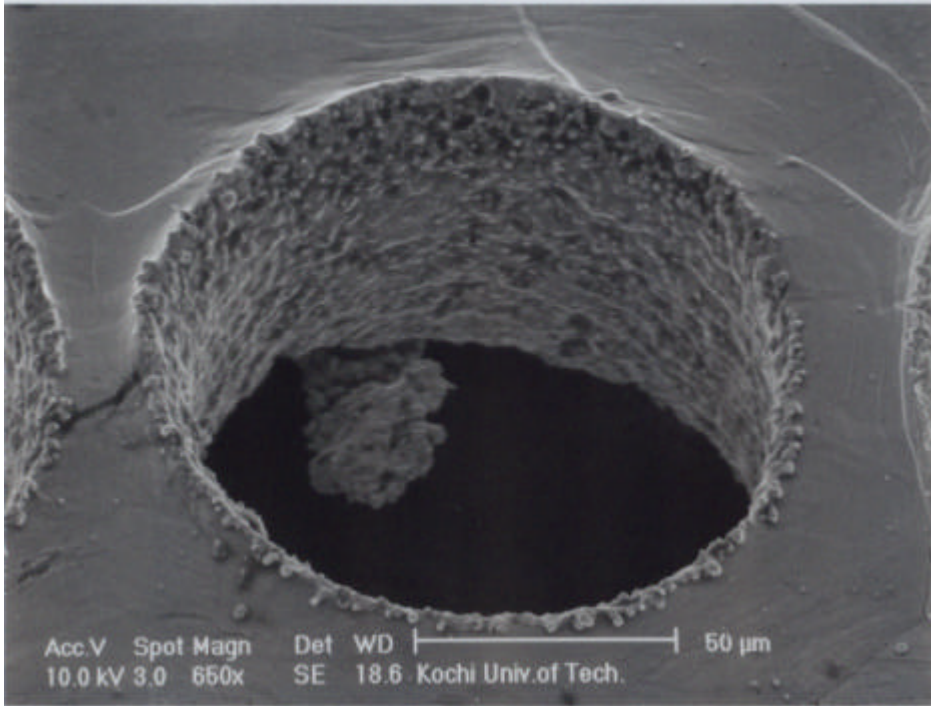


図 18.5 In 10pF 純水

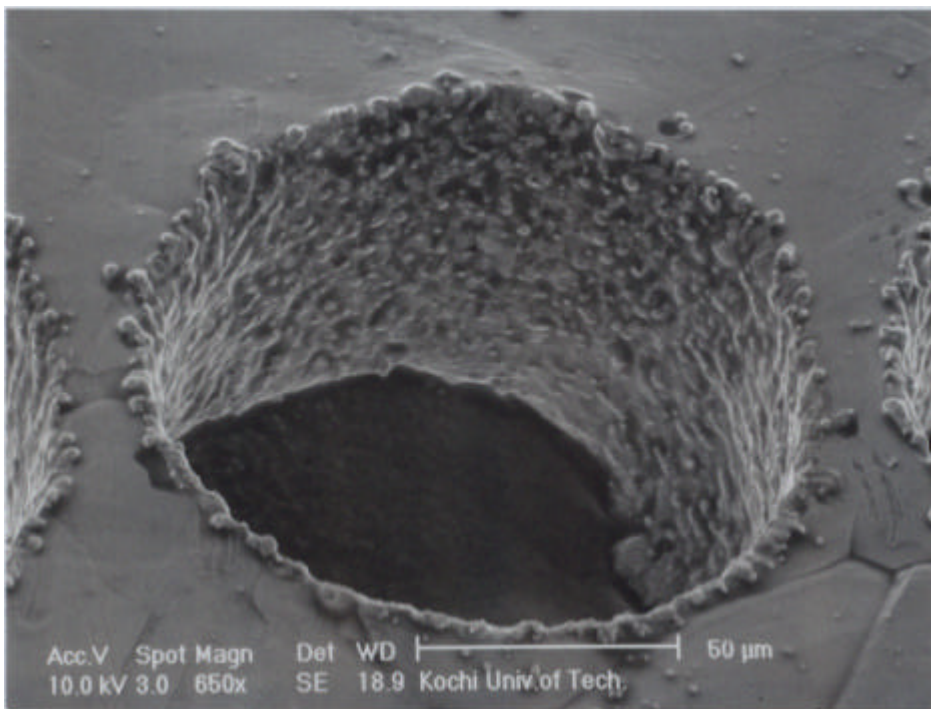


図 18.6 In 100pF 純水

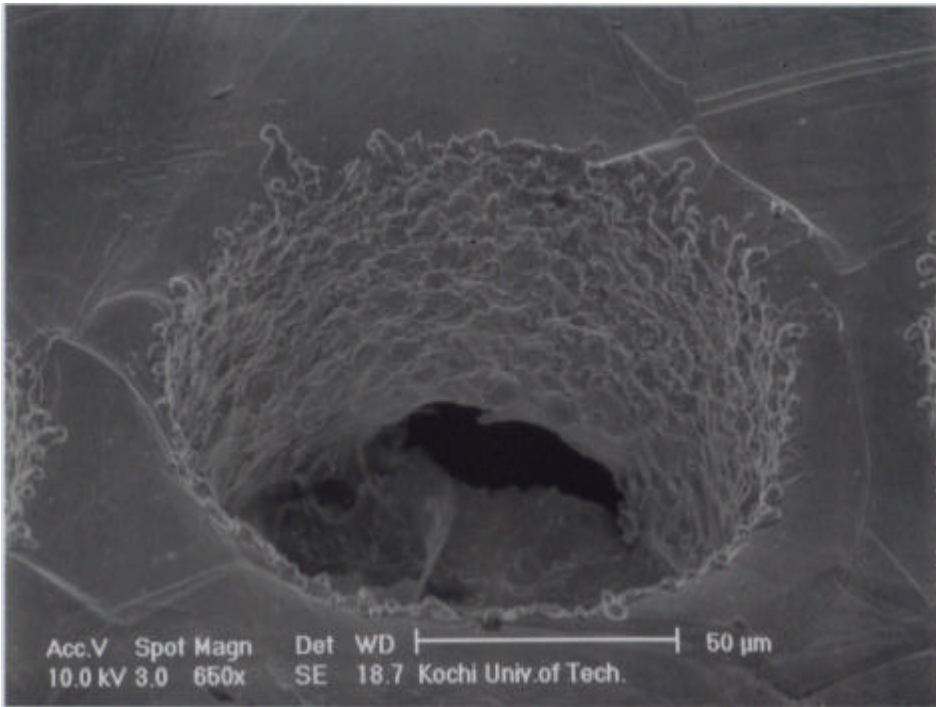


図 18.7 In 220pF 純水

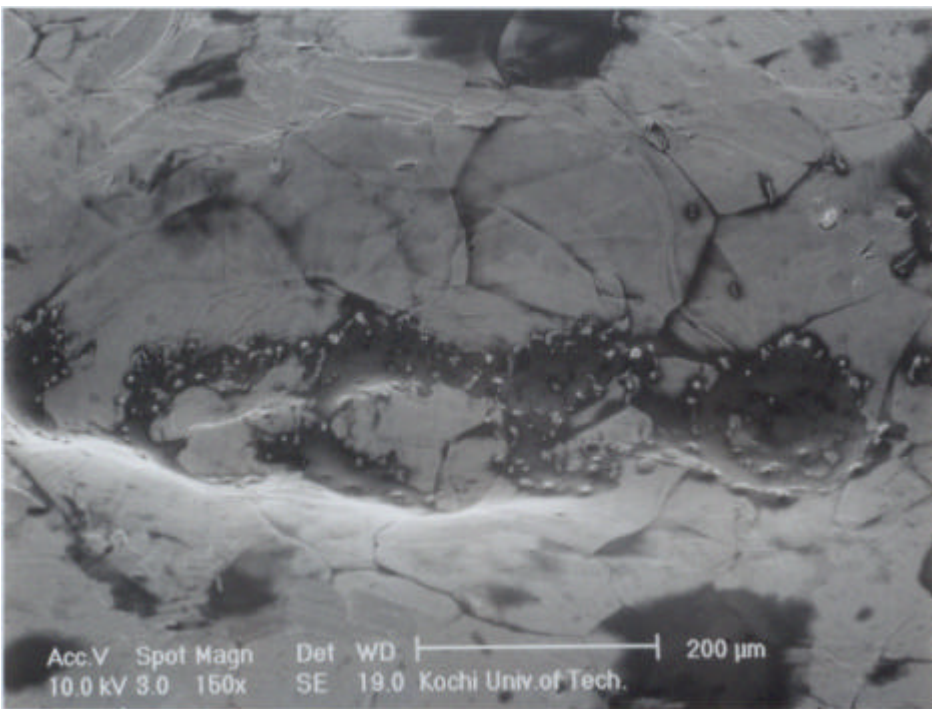


図 18.8 In 3300pF 純水

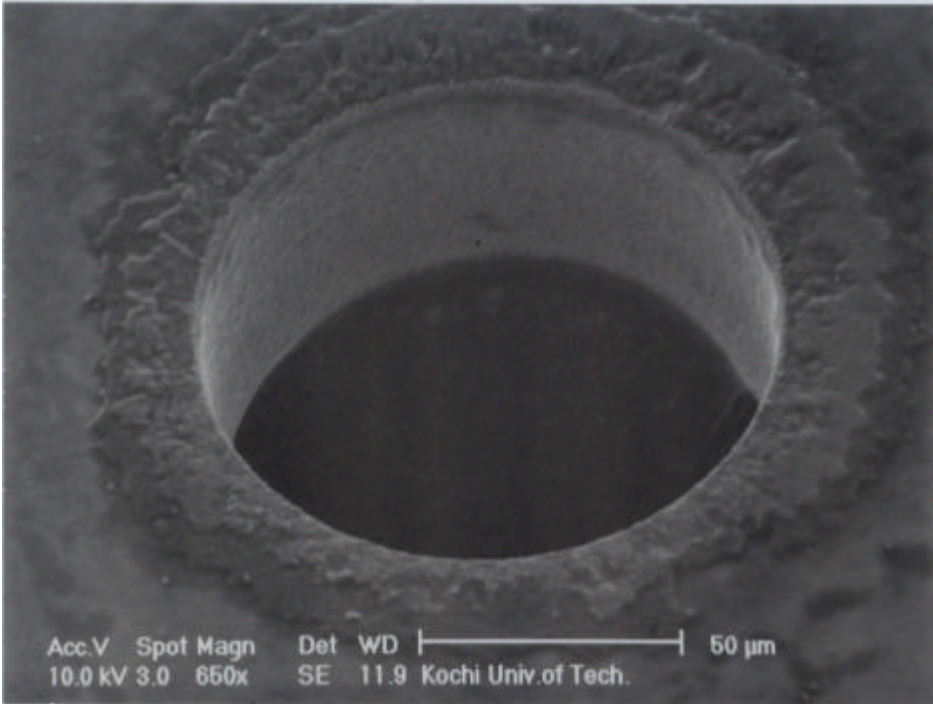


图 19.1 Pd 10pF 加工油

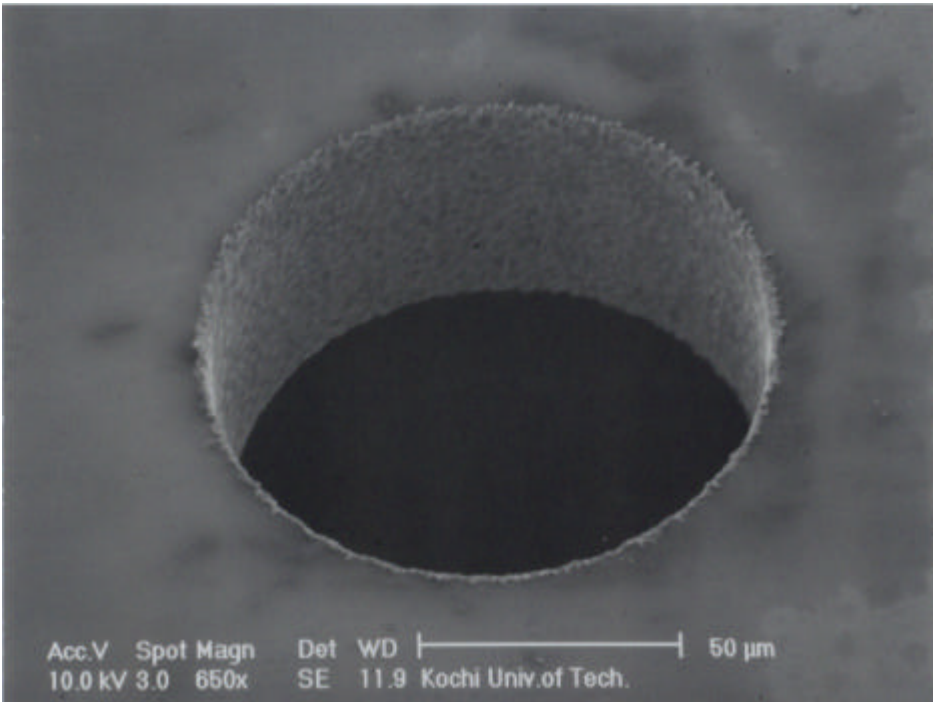


图 19.2 Pd 100pF 加工油

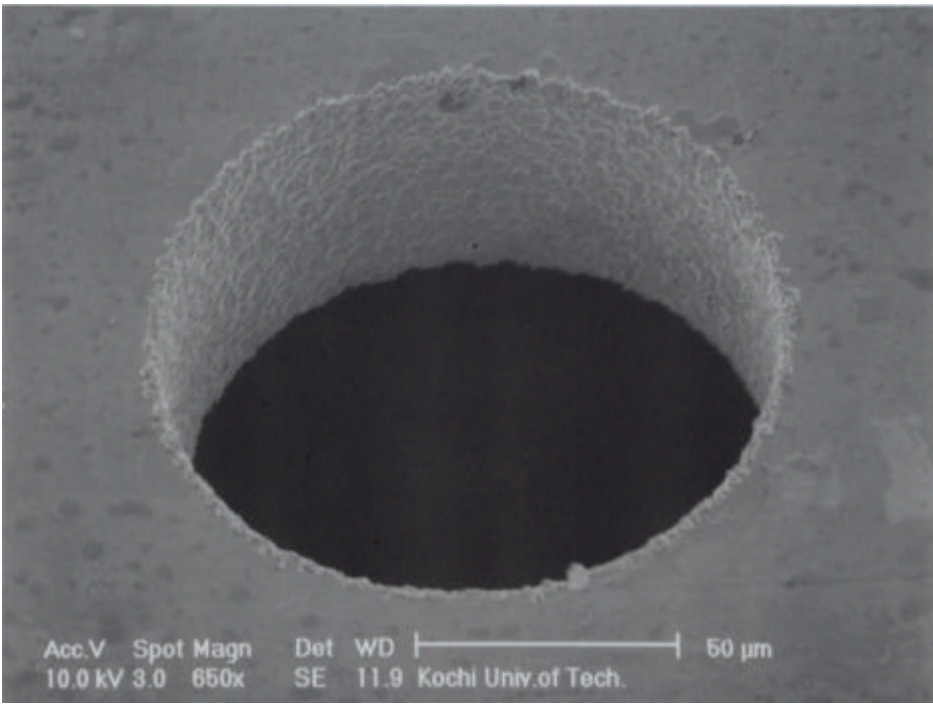


图 19.3 Pd 220pF 加工油

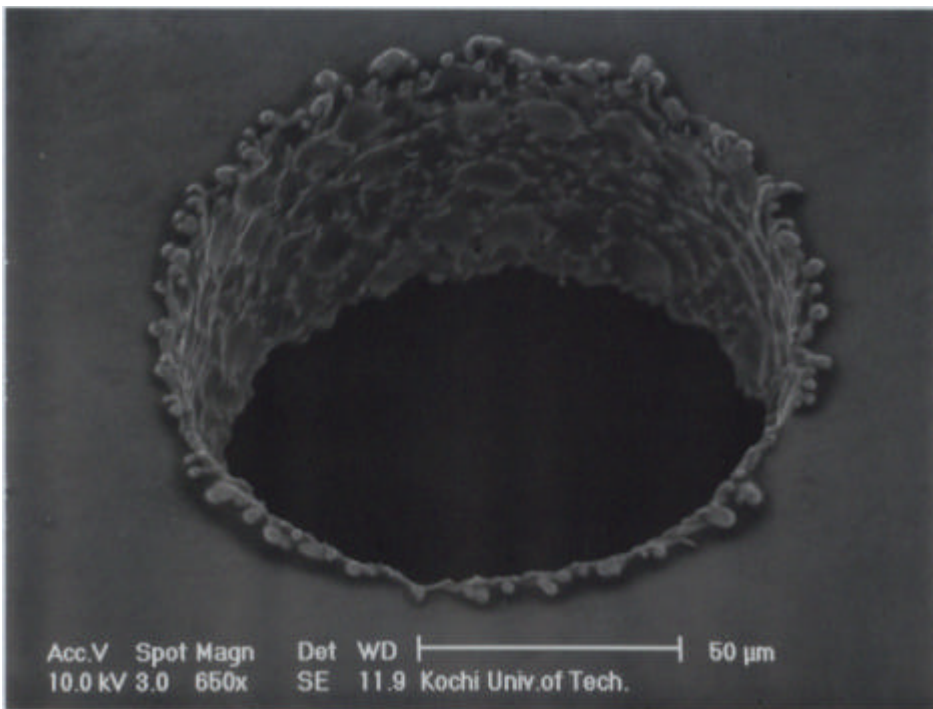


图 19.4 Pd 3300pF 加工油

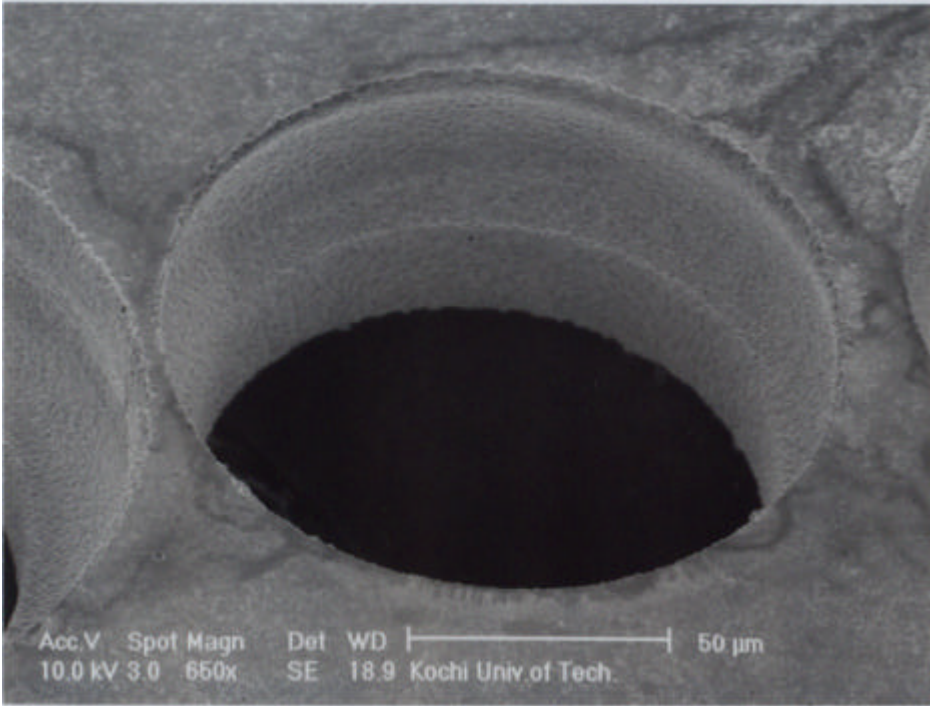


図 19.5 Pd 10pF 純水

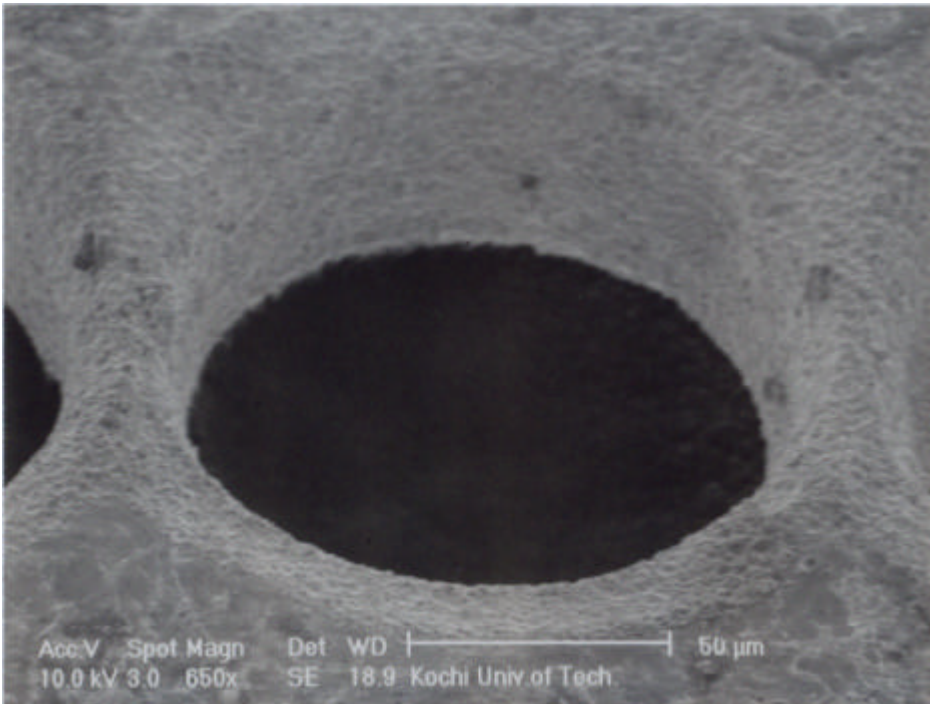


図 19.6 Pd 100pF 純水

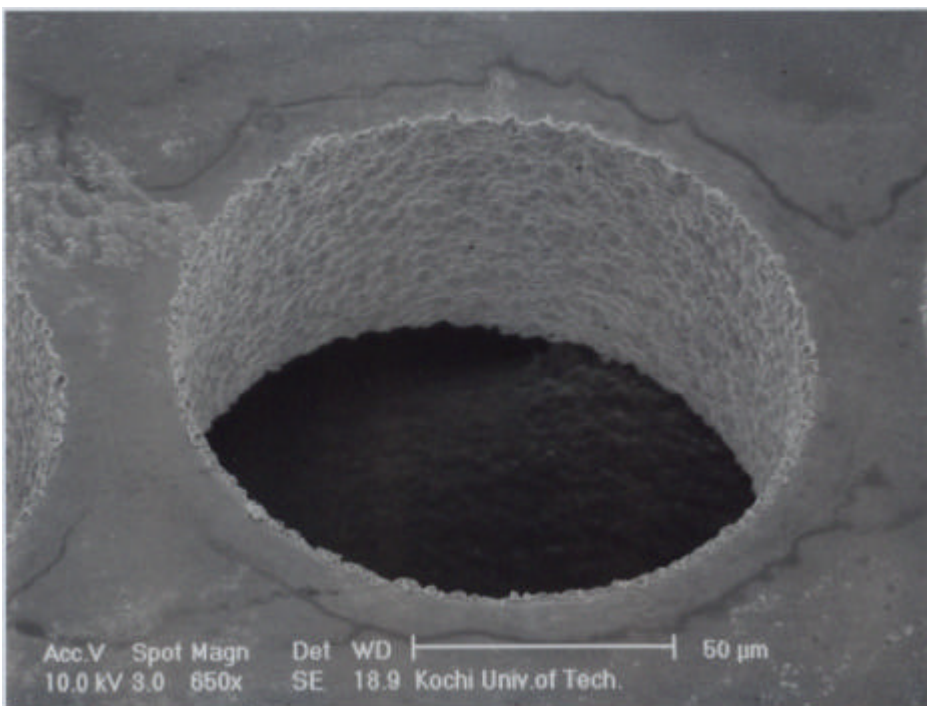


図 19.7 Pd 220pF 純水

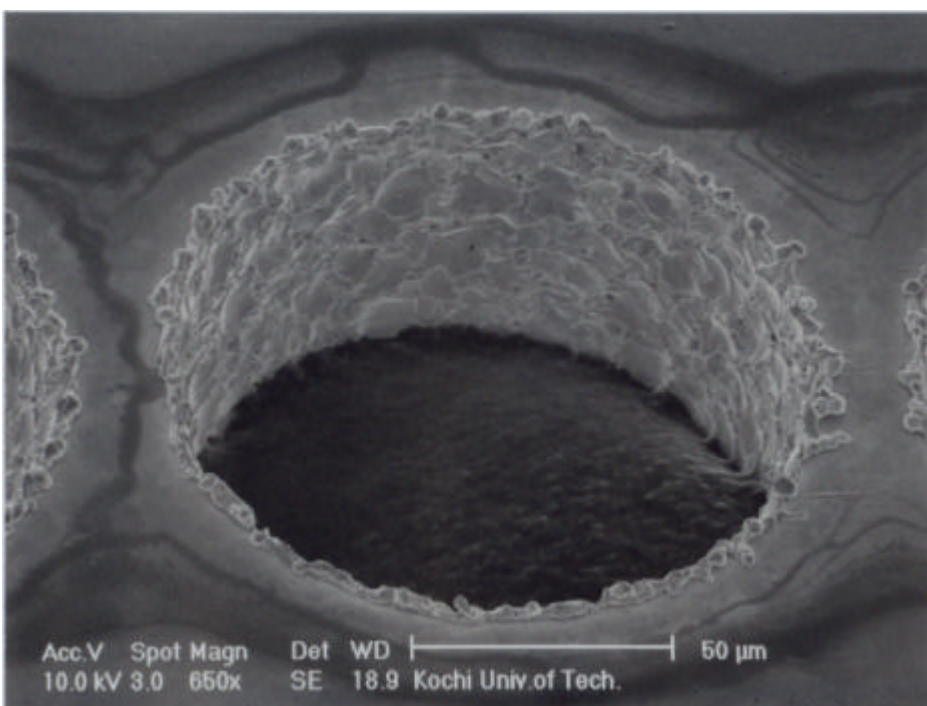


図 19.8 Pd 3300pF 純水

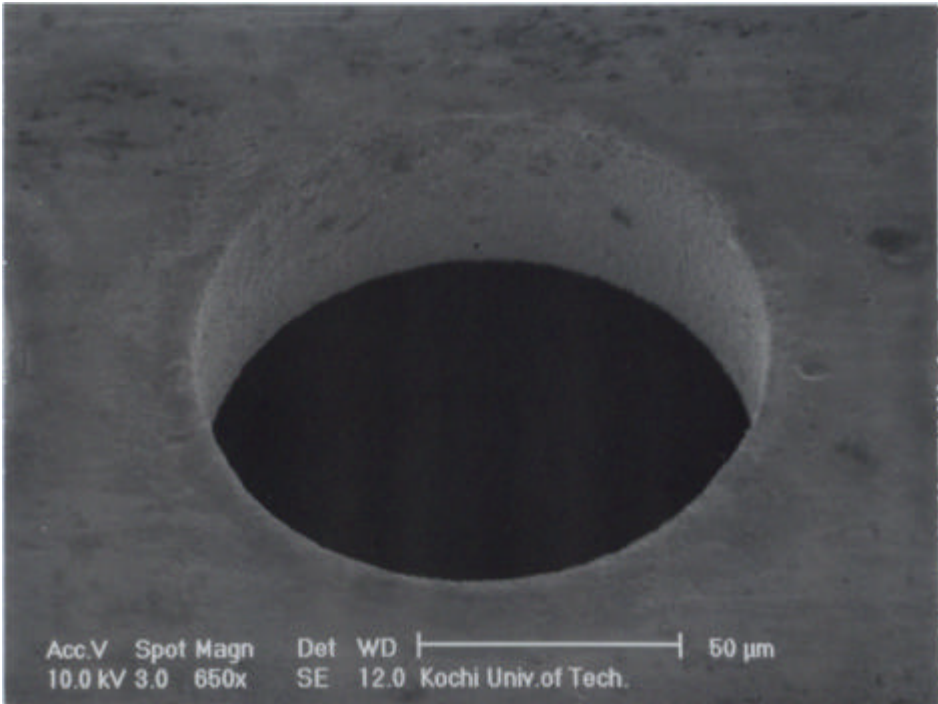


図 20.1 Pt 10pF 加工油

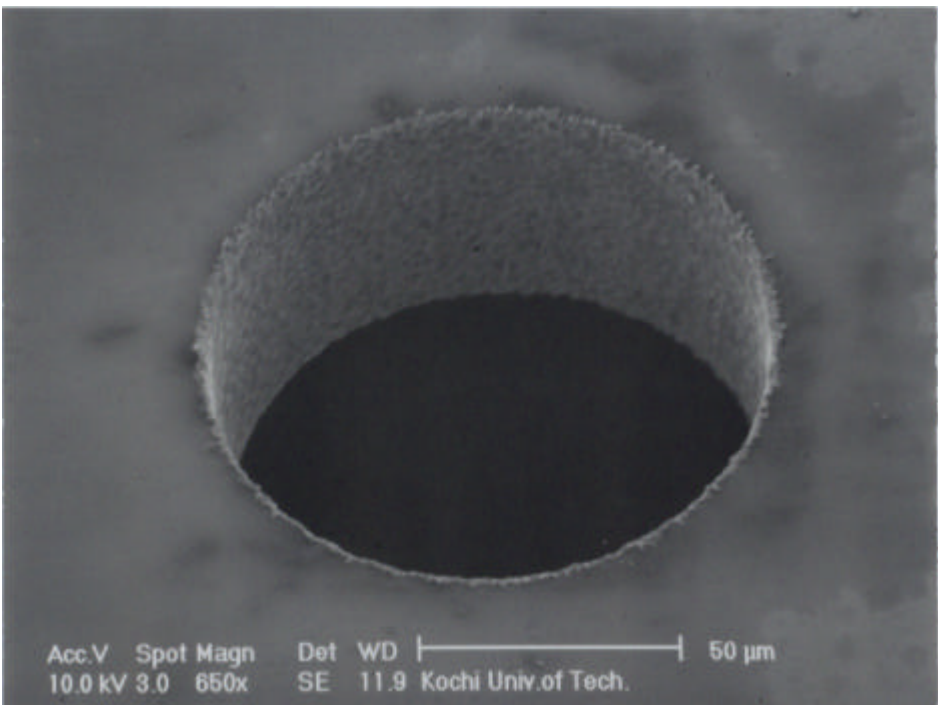


図 20.2 Pt 100pF 加工油

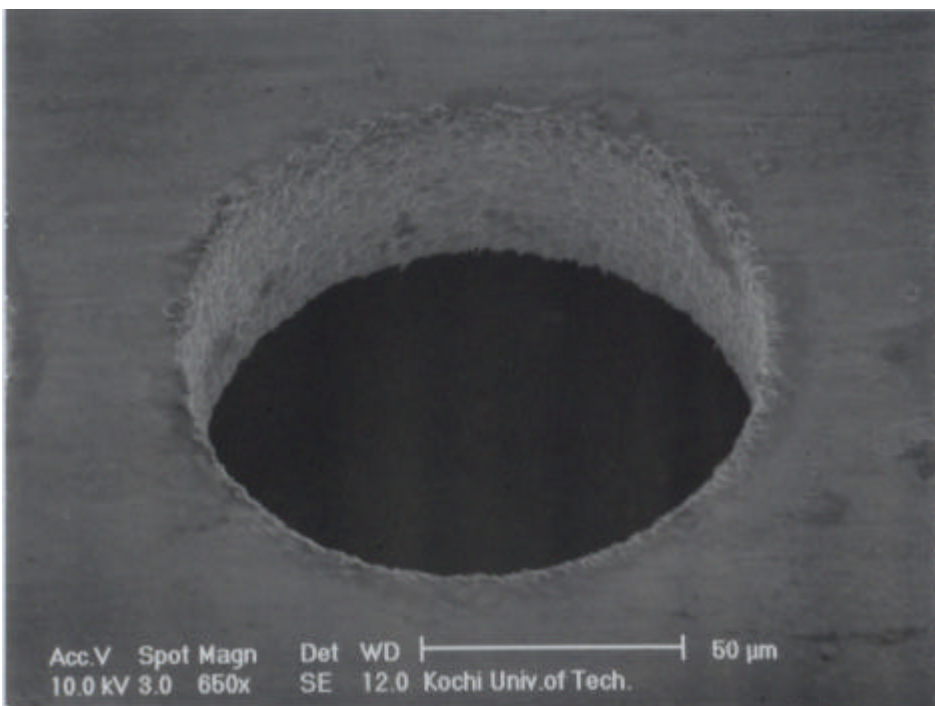


图 20.3 Pt 220pF 加工油

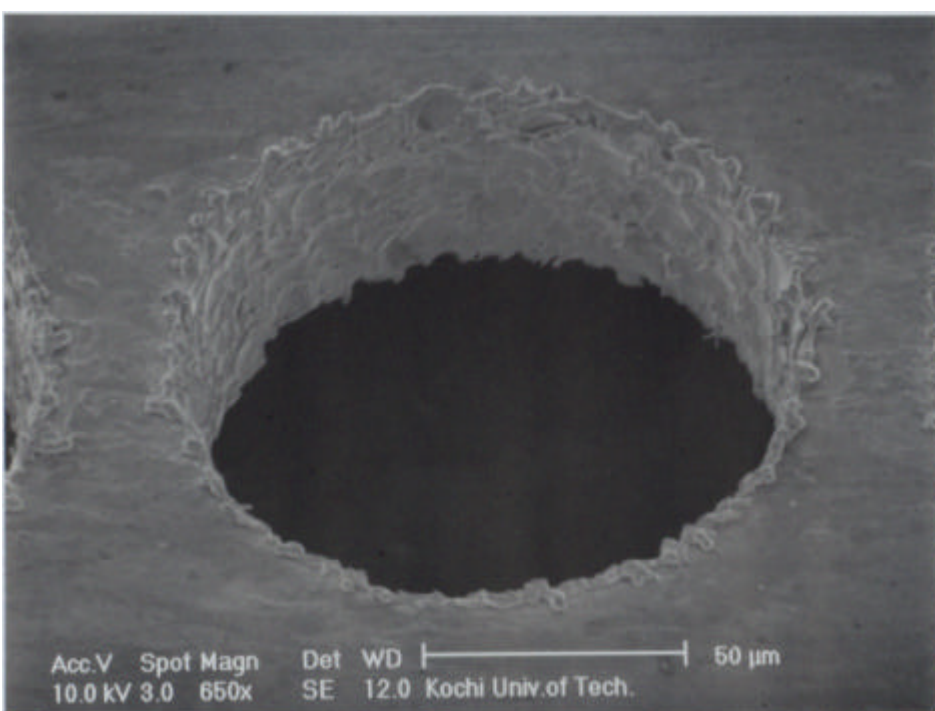


图 20.4 Pt 3300pF 加工油

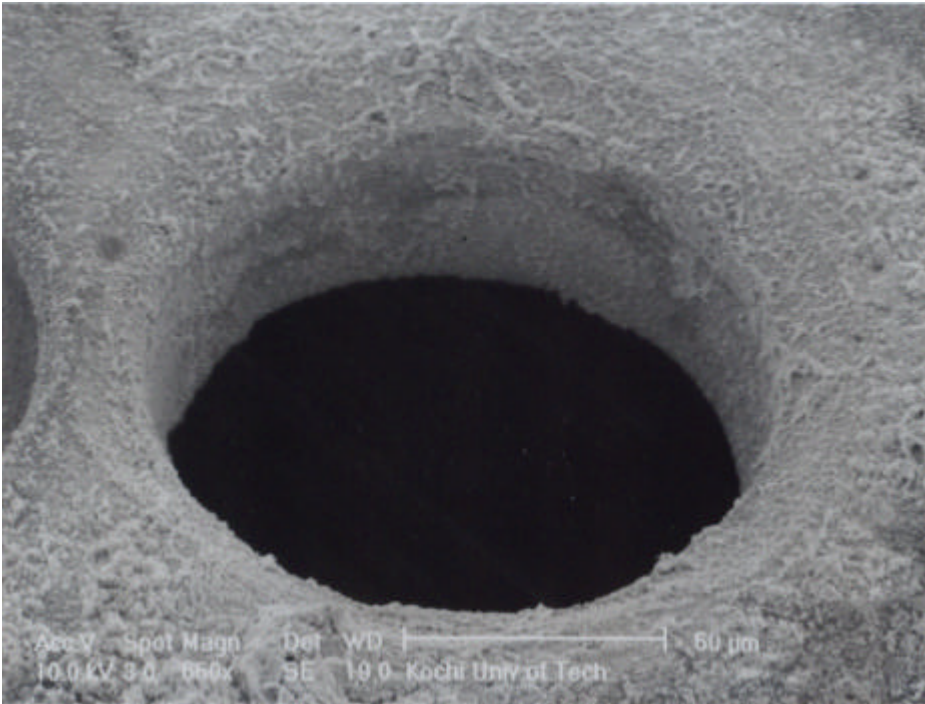


図 20.5 Pt 10pF 純水

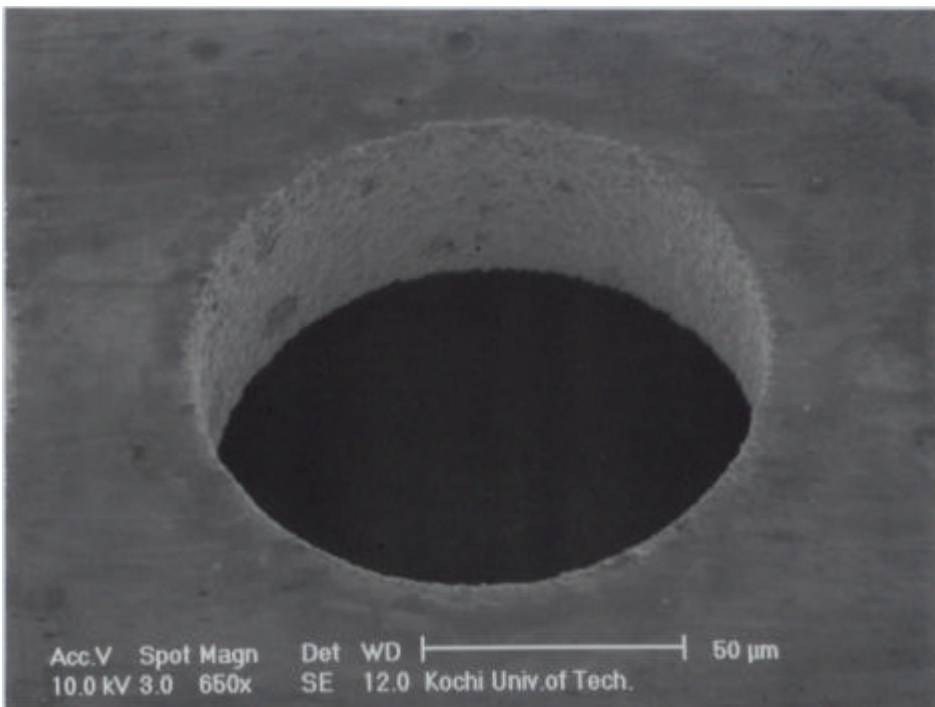


図 20.6 Pt 100pF 純水

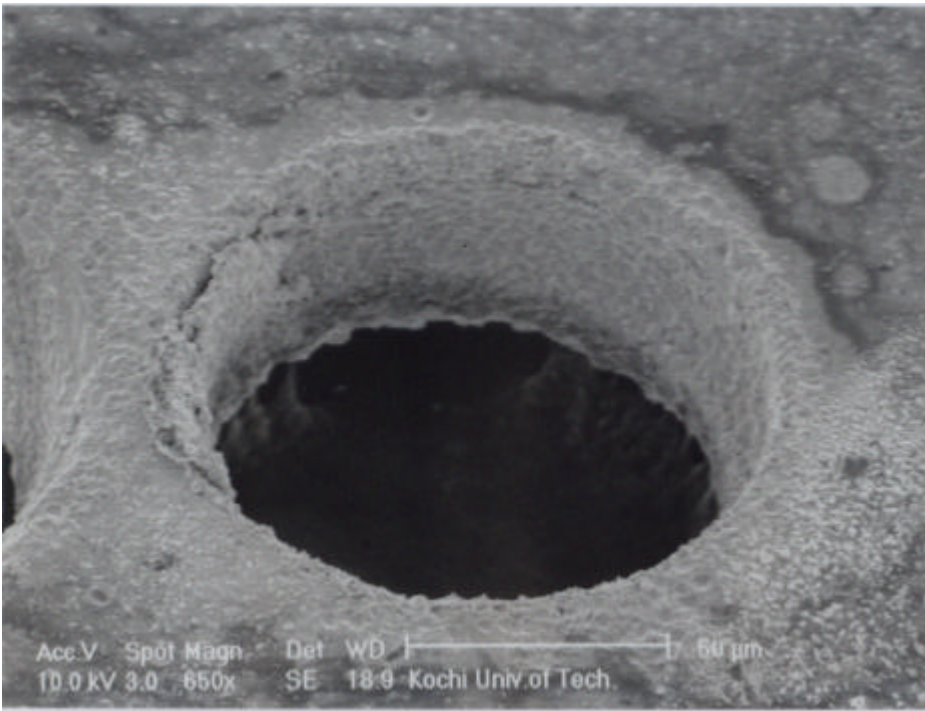


図 20.7 Pt 220pF 純水

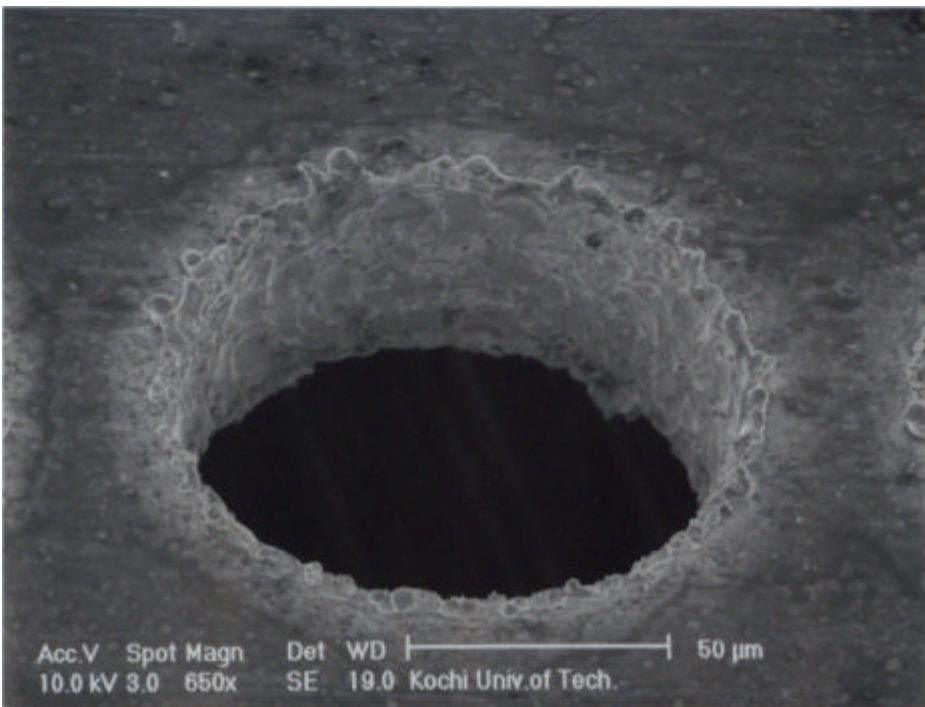


図 20.8 Pt 3300pF 純水

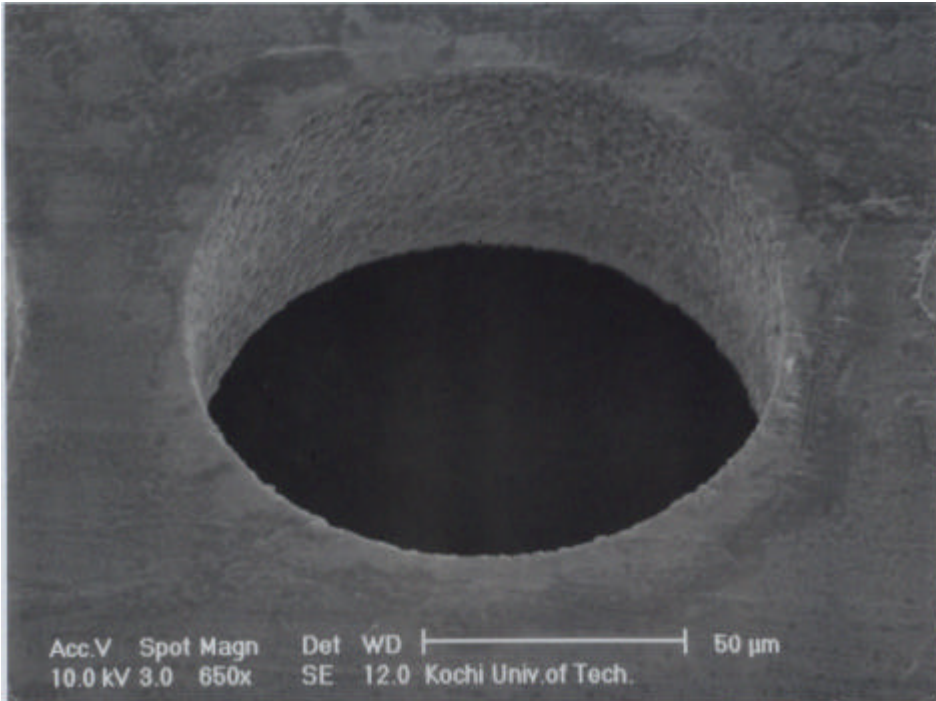


图 21.1 Sn 10pF 加工油

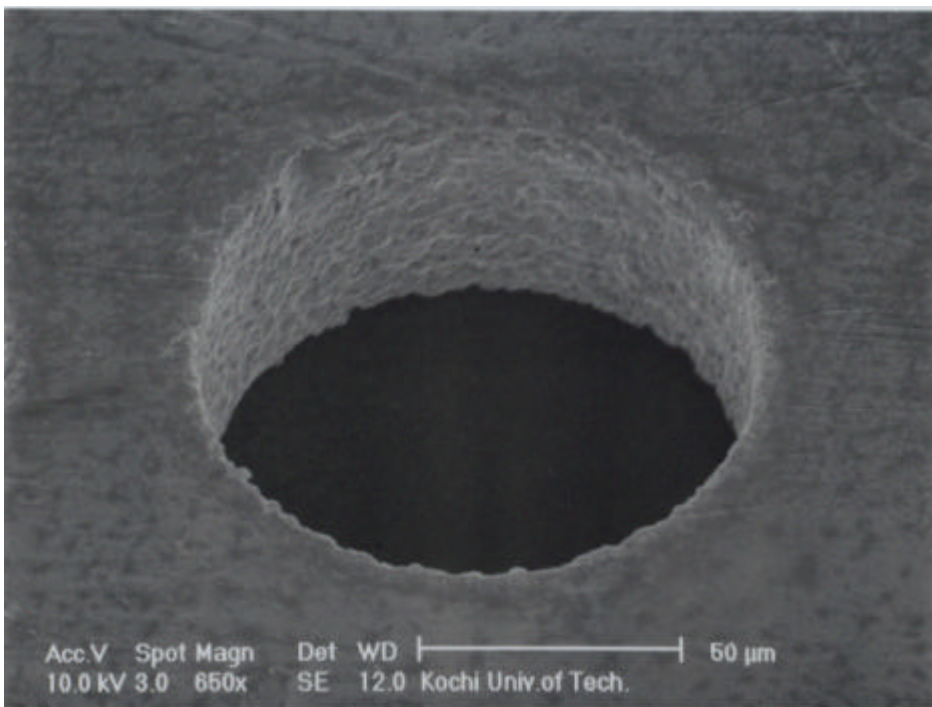


图 21.2 Sn 100pF 加工油

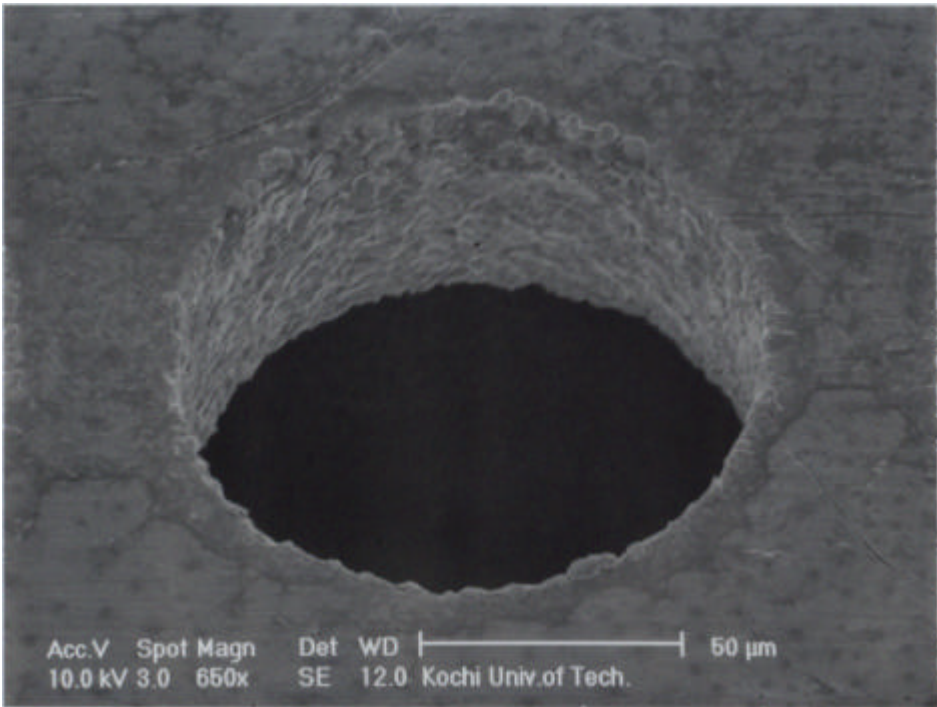


图 21.3 Sn 220pF 加工油

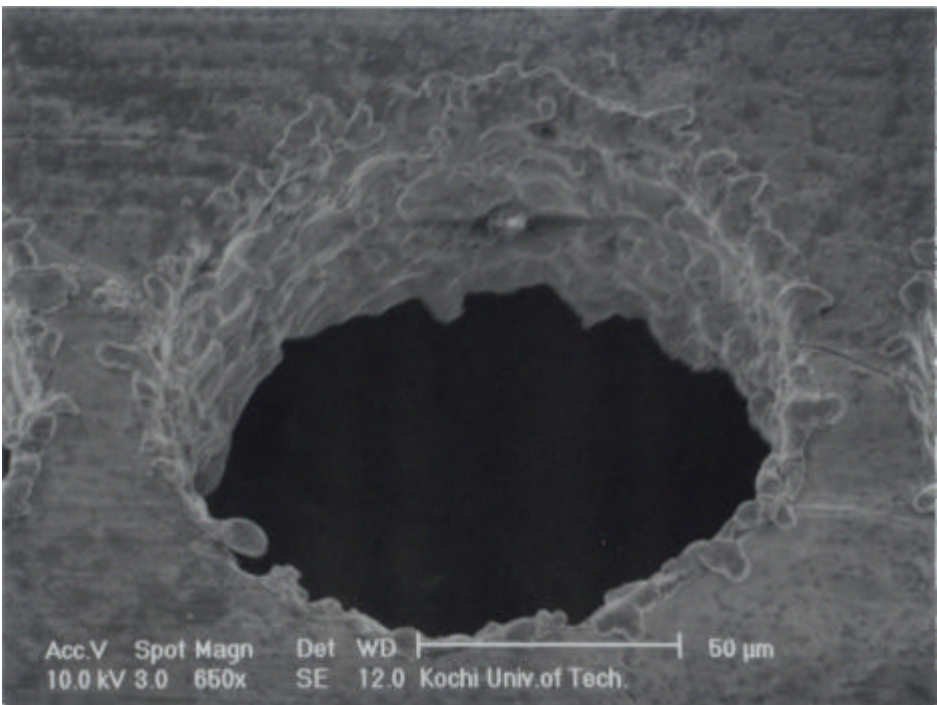


图 21.4 Sn 3300pF 加工油

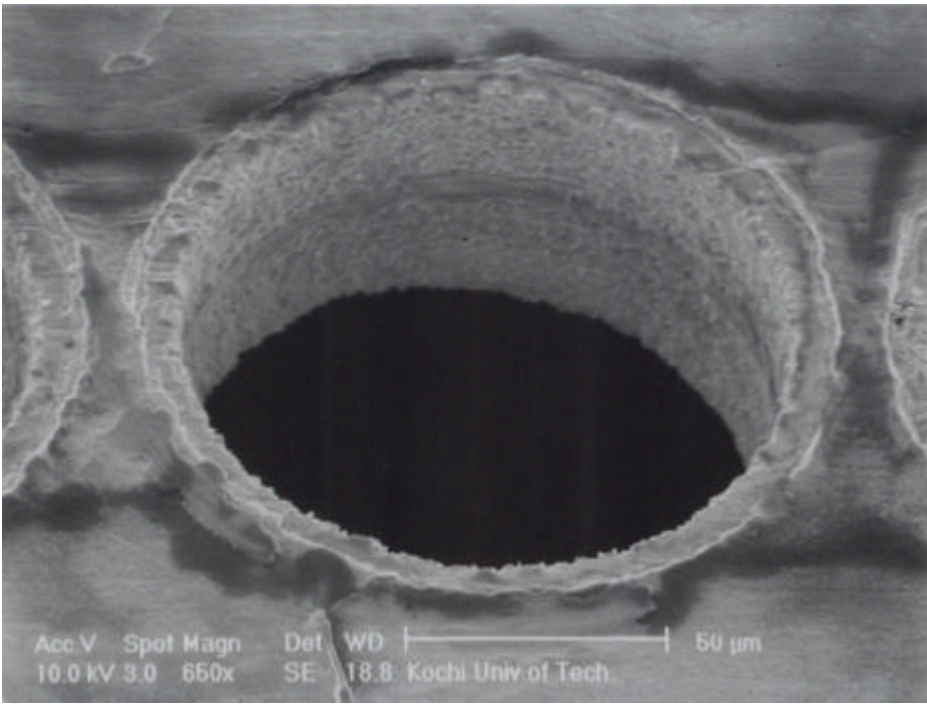


図 21.5 Sn 10pF 純水

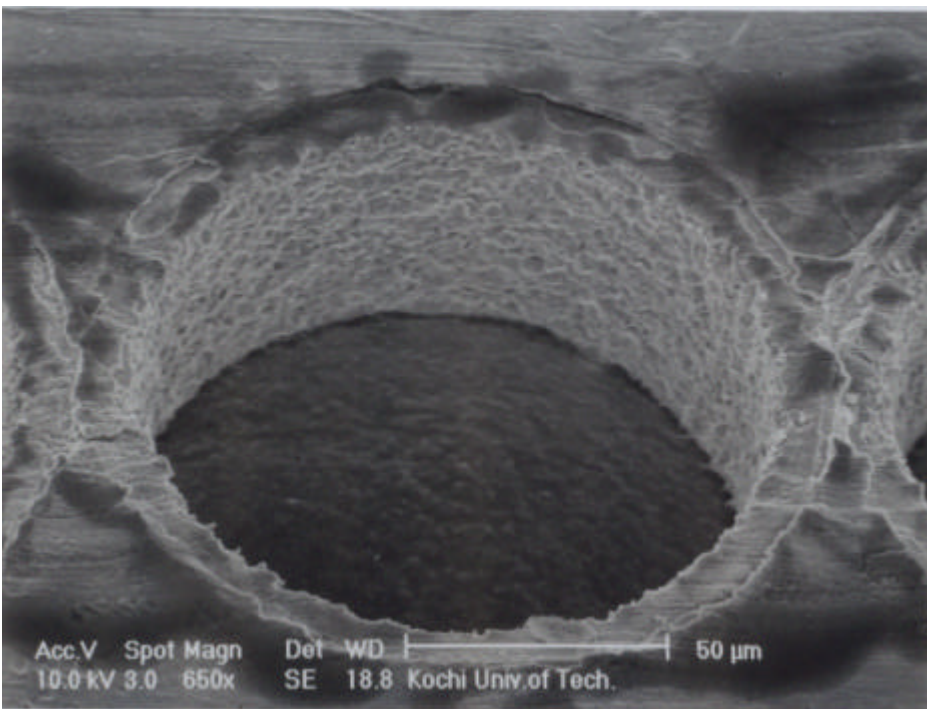


図 21.6 Sn 100pF 純水

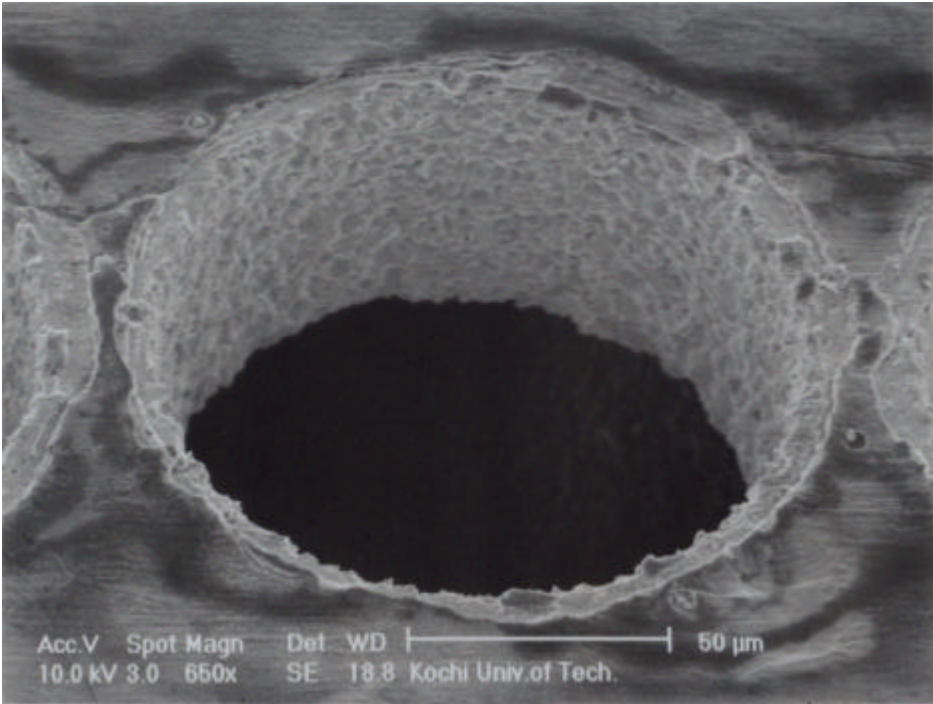


図 21.7 Sn 220pF 純水

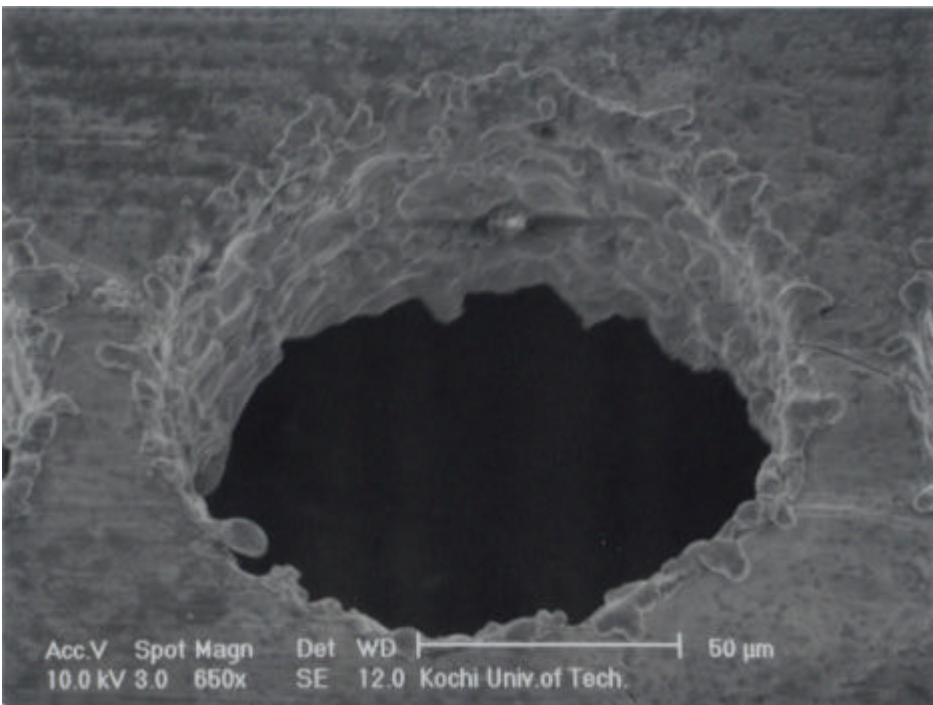


図 21.8 Sn 3300pF 純水

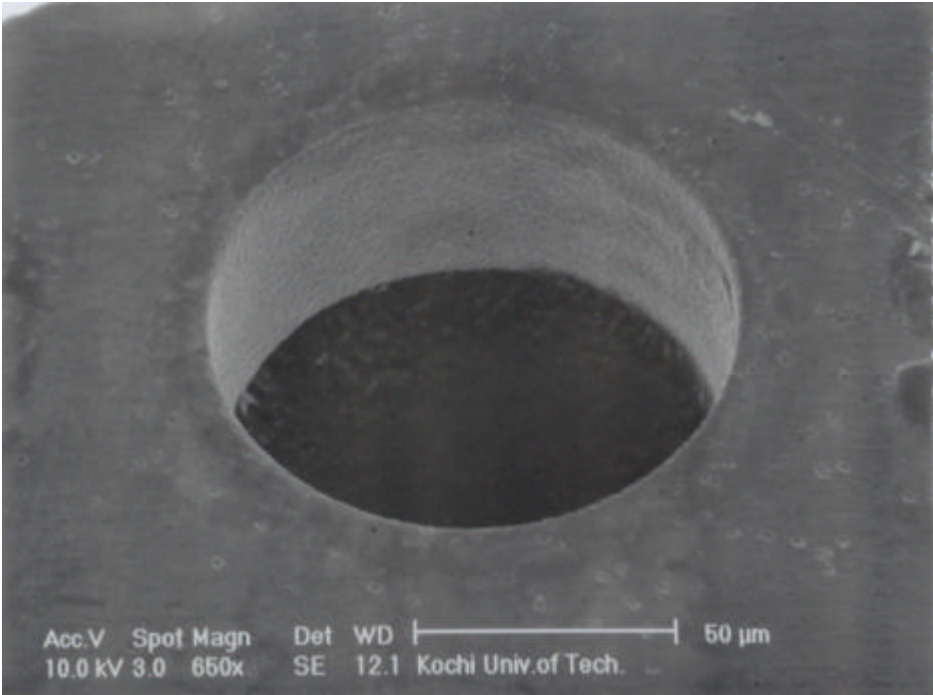


图 21.1 Zr 10pF 加工油

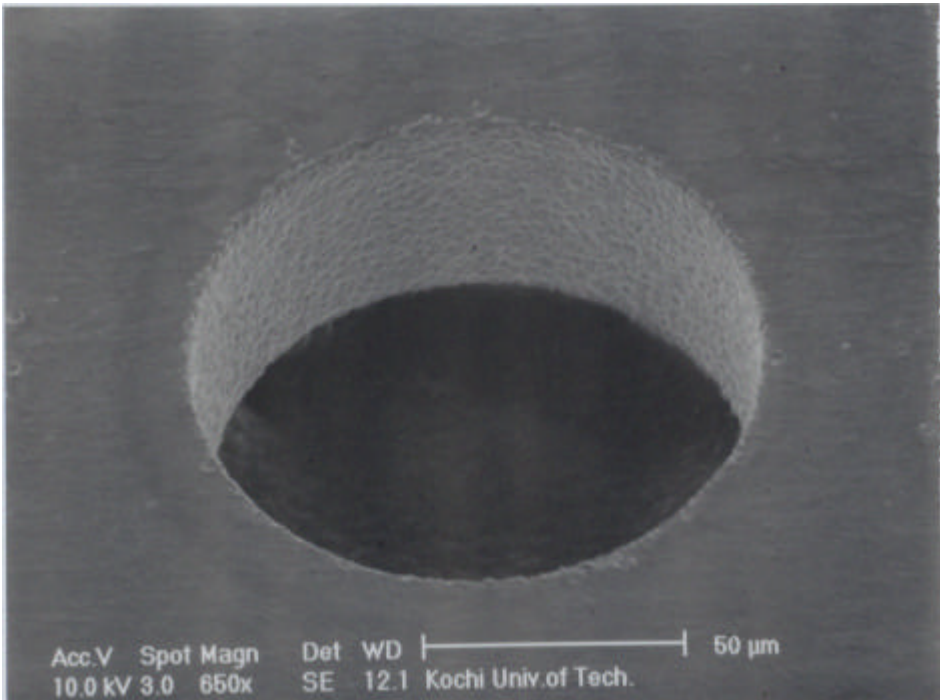


图 21.2 Zr 100pF 加工油

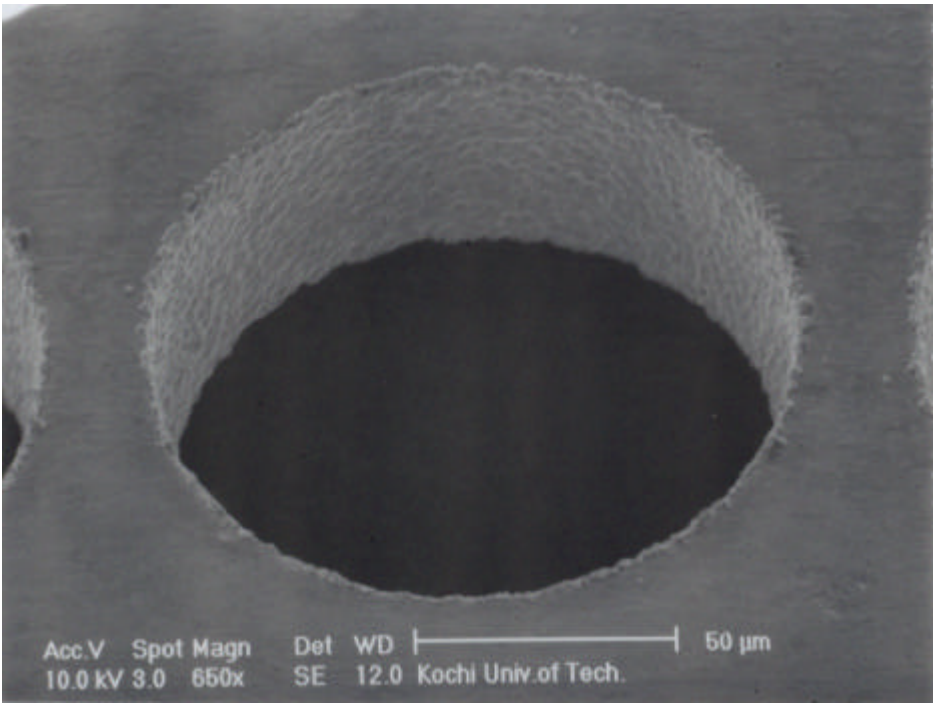


图 21.3 Zr 220pF 加工油

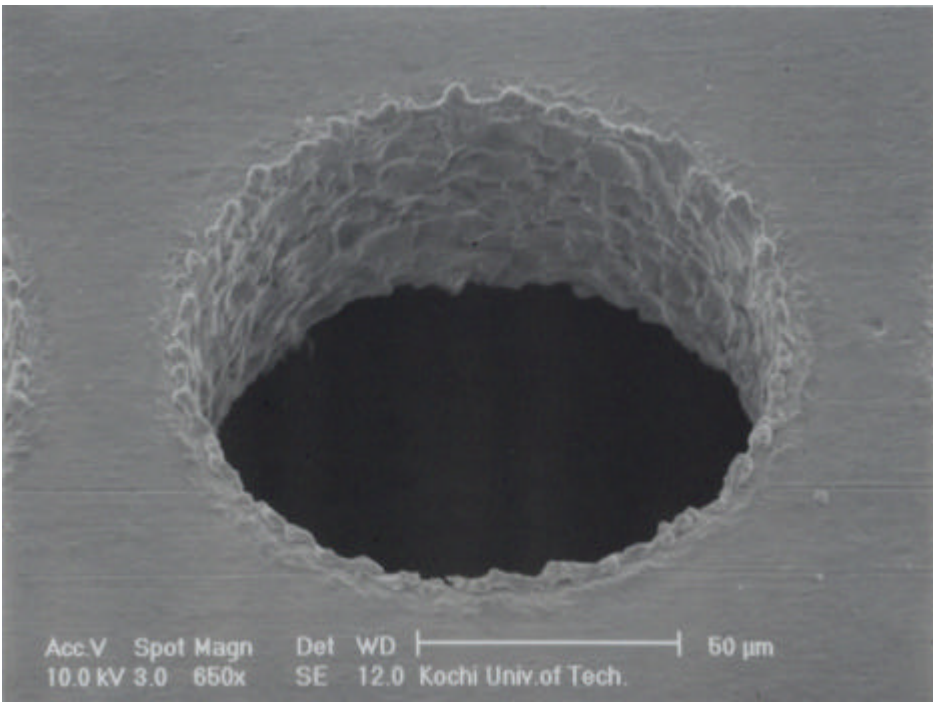


图 21.4 Zr 3300pF 加工油

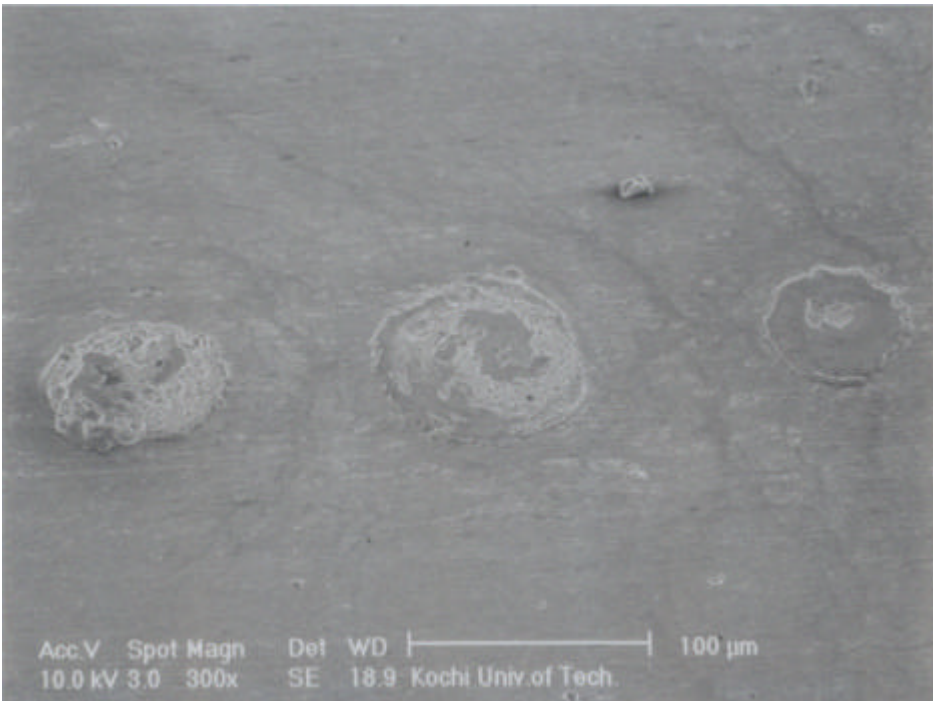


図 22.5 Zr 10pF 純水

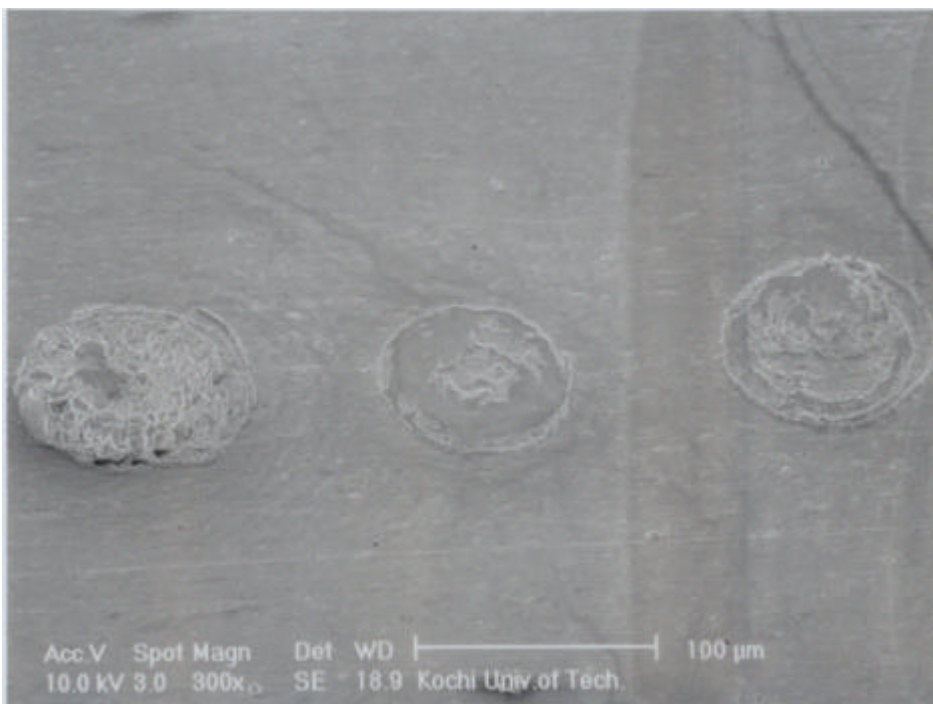


図 22.6 Zr 100pF 純水

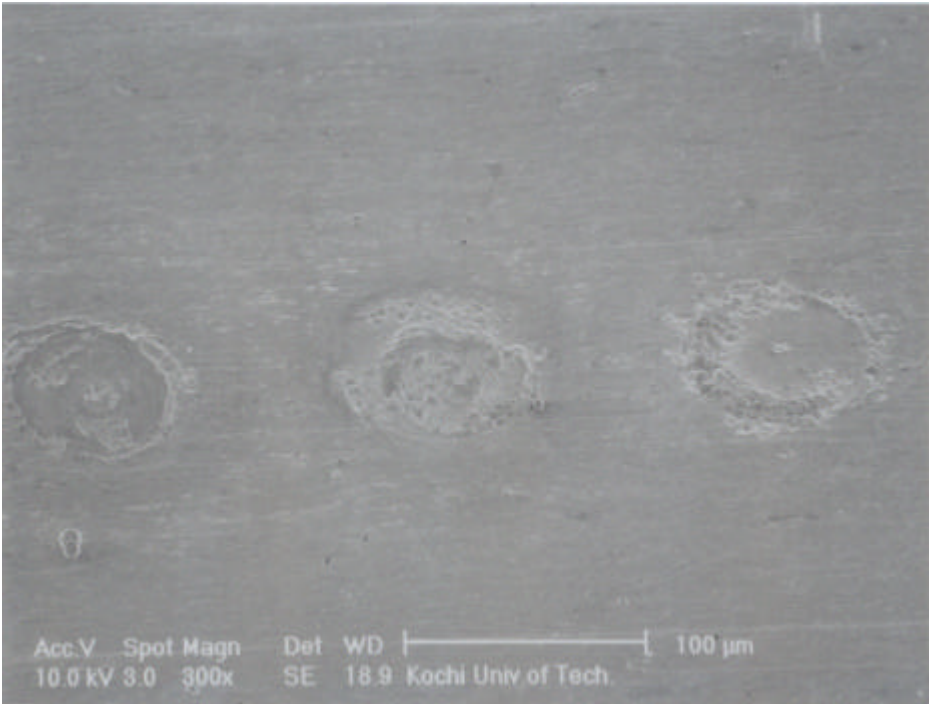


図 22.7 Zr 220pF 純水

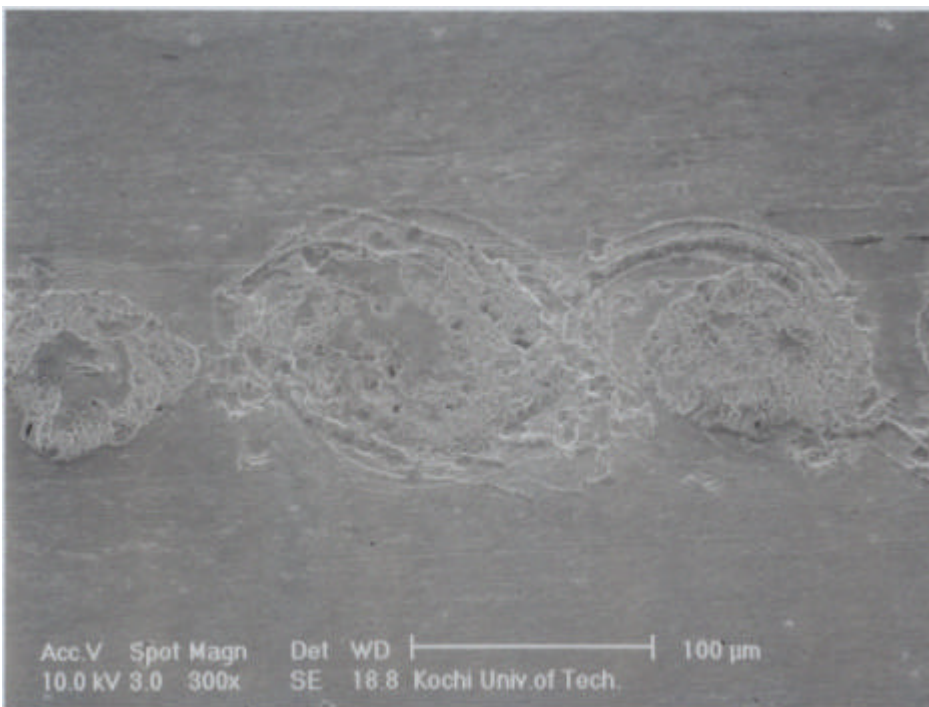


図 22.8 Zr 3300pF 純水