

平成14年度
修士学位論文

天然材料のマイクロ構造物への応用

Application of natural materials to the micro structure

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
知能機械システム工学コース 知能精密機構研究室
1055059 福本 泰章

指導教員 河田 耕一教授

目次

| | |
|----------------------------|--------------------------|
| 1 . 緒言 | |
| 1 . 1 | 研究の目的 2 |
| 1 . 2 | マイクロマシンの現状 2 |
| 1 . 2 . 1 | マイクロマシン研究の現状 2 |
| 1 . 2 . 2 | 微細放電加工の現状 3 |
| 1 . 3 | 炭素材料の現状 3 |
| 1 . 4 | 本研究の内容 4 |
| 2 . 炭素材料 | 5 |
| 2 . 1 | 実験材料 5 |
| 2 . 1 . 1 | 素材 5 |
| 2 . 1 . 2 | 炭化素材 5 |
| 2 . 1 . 3 | 高配向性グラファイト 9 |
| 3 . 加工実験 | 10 |
| 3 . 1 | 実験方法 10 |
| 3 . 2 | 放電加工油による加工 12 |
| 3 . 3 | 純水による加工 16 |
| 3 . 4 | 高配向性グラファイト 20 |
| 4 . マイクロデバイスへの応用 | 21 |
| 5 . 結言 | 22 |
| 参考文献 | 23 |
| 謝辞 | 24 |
| 付属資料 | 25 |

1 緒言

1.1 研究の目的

近年、加工技術の高度化により超微細加工が可能となり、それに対する需要が増大してきている。超精密な機構・機能を持ったデバイスを作製することが可能となることにより、情報・通信関係、自動車関係、産業機械関係、医学・バイオ関係、環境監視関係など多種多様な分野において利用の可能性があるのである。それに従い微細加工によるマイクロ構造物の生産技術も確立されつつある。特に半導体プロセス、LIGAプロセス、微細放電加工といった複数の加工技術により、様々な素材を用いたマイクロ構造物の製作が可能となってきた。しかし、いずれの加工技術についても一長一短であり、生産性、加工性能などに問題点を残しているのが現状である。

一方、天然の素材は木材に代表されるように材料自体が微細な構造を持っている。その構造を利用することにより、従来の加工手段では作製が困難であったマイクロ構造物の作成を行うことが考えられ、本研究の目的とした。

1.2 マイクロマシンの現状

1.2.1 マイクロマシン研究の現状

マイクロマシンとは、日本が作り出した言葉であり大きさが数ミクロンからサブミリのスケールにある技術あるいは機械、部品をさすこともあるが、一般的には、広い意味で数ミリ以下の機能部品からなる微小な機械としてナノオーダーのものを含める。このようなオーダーの場合、摩擦や粘性抵抗といった既存の設計では重視されない要素が支配的な要因となるため従来の機械設計に基づいて小型化を進めることは難しい。そのため、現在のマイクロマシン作製手法としては半導体プロセス、LIGAプロセス、微細放電加工などを用いて行われている。

半導体プロセスは半導体の製造プロセスを利用してマイクロマシンの加工、製作を行う方法である。主として化学薬品を用いたエッチング等が用いられ、複雑な表面形状の加工も可能であるが、加工時間が長く、加工できる材質に制限が多い。

エッチングに用いる薬剤によってウェットエッチング、ドライエッチングに分類される。ウェットエッチングにはエッチング薬剤（エッチャント）として主にフッ酸、硝酸、KOH、アンモニア類が使われ、基板材料と化学反応を起こして材料を除去するのが一般的である。ドライエッチングではエッチャントにガス（XeF₂, BrF₃）ラジカル（F）、イオン（Ga, Ar, Cl, フッ化炭素）アトムビーム（Ar）等が用いられることが多く、反応性の高いガス、ラジカル、イオンはウェットエッチング同様に化学反応を起こして加工が進み、反応性の低いイオンやアトムビームでは加速した粒子をぶつけることで物理的に材料を除去する。

また、エッチャントによる区分以外に、エッチングプロセスの加工特性によっても分類することができ、マスク開口部から法線方向に加工が進行すると同時に、マスク下部にも加工が及び（サイドエッチング）長時間の加工でマスクパターンの情報が失われやすい等

方性エッチングと、マスク下部への加工が進行しにくくマスクパターンの情報が保存されやすい異方性エッチングといった特性が見られる。

これらの特性を利用し、エッチャントやマスク剤、被加工物等を積層させる事により、比較的単純な三次元形状をもつマイクロ構造物の大量生産などが可能であるという利点を持つが、複雑な三次元形状を持つマイクロ構造物の作成などには不向きである。

LIGA プロセス (Lithographic Galvanoformung Abformung プロセス) は放射光 (SR : Synchrotron Radiation) を用いてディープ X 線リソグラフィにより微細パターンを生成、レジストを現像した後、電鍍により金属を堆積させて金型を作り精密成型というプロセスで加工を行う方法である。樹脂、金属、セラミックなど材料のバリエーションが豊富で精密な加工が可能であり、大量生産に向くという特徴がある。

しかし、平行度の高い光源を用いてパターンを生成するため深さ方向に対する成形が難しいことや、パターン成形技術に対して金型や成形技術の立ち後れが問題となっている。¹⁾

マイクロ EDM (Micro Electro Discharge Machining) は低電圧、低電流で小規模な放電を起こし、それによって加工を行う方法である。複雑な形状の加工が可能であり、主に金属の加工が中心であるものの、被加工物に導電性を付与することで加工できる材料が多岐にわたるのが特徴である。加工時間が被加工物の材質に大きく影響される事や、広範囲の加工が難しい事から大量生産には向いていない等の欠点がある。

1.2.2 微細放電加工の現状

放電加工法は広義には両極間 (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、片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。

放電加工においては、加工機械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であり、通常、これを電極と略称しており、被加工物を対極として使用する。

放電加工は1回の放電 (単発放電) による除去現象の累積であり、単発放電の除去結果が加工特性などのベースとなる。単位時間あたりの加工量が下降速度であり、加工量は除去重量 (g) で表示するほかに、体積 (mm³) や面積 (mm²) で表示する場合もあるが、片彫り放電加工では、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 · 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。²⁾

1.3 炭素材料の現状

炭素材料は古くから利用されてきた材料の一つであり、古くは木炭、石炭、すすを燃料

や色料として使うことから始まり、コークスによる冶金技術が生まれた。また、近年の技術革新により、コールタール、ピッチ等の粘結材の使用による成形技術の発展や、高温黒鉛化技術による人造黒鉛の製造が可能となったことから、電極等に使用されるようになった。さらに原子炉用高密度黒鉛や高性能炭素繊維、生体用バイオカーボンなどの新しい炭素材料が開発され、新しい用途が拡大してきている。³⁾また、活性炭を濾材として利用し河川や湖沼、上下水道の水質を改善する研究や、炭のもつ微細構造中に分子などを吸着させることで消臭剤やフィルターなどへ利用する研究も進められており、空気清浄装置や、有機溶剤や有毒ガスの回収、遮蔽用フィルターといった目的に利用されている。これらの活性炭は用途に応じて繊維状、粒状、粉末などに加工、分類される。一般に活性炭を用いたフィルターの場合、主としてファンデルワールス力による活性炭表面への物理的な吸着作用による可逆的な吸着であり、フィルターの再利用が容易という特徴がある。⁴⁾近年ではカーボンナノチューブの発見により、更なる注目を集めている。

1.4 本研究の内容

天然の素材は水分を多く含んでいるため不安定であり、また精密な加工も難しい。本研究では炭化処理を施し、加工を行う事とした。これにより素材が安定となる上、グラファイト化が進むため抵抗率が小さくなり微細放電加工が可能になると考えられる。また、微細放電加工は非接触で進行するため、素材が持っている微細構造を損なうことなく加工することが可能ではないかと思われる。これらの推測に基づき炭化処理を施した天然材料に微細放電加工を試みるとともに、従来の加工方法では制作困難な微細構造を持つマイクロ構造物作成の可能性を探求した。

2 炭素材料

2.1 実験材料

2.1.1 素材

本研究ではリグナムバイタ、ウバメガシ、タケ、スギ、セイタカアワダチソウを用いて実験を行った。各素材の特徴は次の通りである。

リグナムバイタ

南アメリカ原産。ハマビシ科。比重約1.3の最も重い木材で油脂分が多く、古くは船の軸受け等に利用された。無磨耗であり、腐食耐久性も高い。加工には金属加工機械を用いる必要がある。

ウバメガシ

日本や中国が原産。ブナ科アカガシ属。備長炭の材料として知られる。腐食耐久性、磨耗耐久性ともに高く、加工は困難である。

タケ

中国原産。イネ科マダケ属。古くから生活用具の材料として利用されている。腐食耐久性、磨耗耐久性ともに低く、加工は容易である。

スギ

日本原産。スギ科スギ属。日本各地に広く育成しており、数多く植林されている。腐食耐久性は高いが磨耗耐久性は低く、加工も容易である。

セイタカアワダチソウ

北アメリカ原産の多年草。キク科アキノキリンソウ属。帰化植物であり、日本各地に広く生育している。⁵⁾

2.1.2 炭化素材

各素材に炭化処理を施した各素材のSEM画像を図2.1～2.5に示す。なお、各素材は予備焼成として窒素雰囲気にて管状炉を用いて600℃で予備焼成を施した後、アルゴン雰囲気にて管状炉を用いて1000℃で本焼成を実施した。

予備焼成は10℃/minで1時間かけて温度を上昇させ、600℃の状態を2時間保持した後、自然冷却した。本焼成では8.3℃/minで2時間かけて温度を上昇させ、1000℃の状態を1時間保持した後、自然冷却した。

予備焼成、本焼成の際の温度変化を図2.6および図2.7に示す。

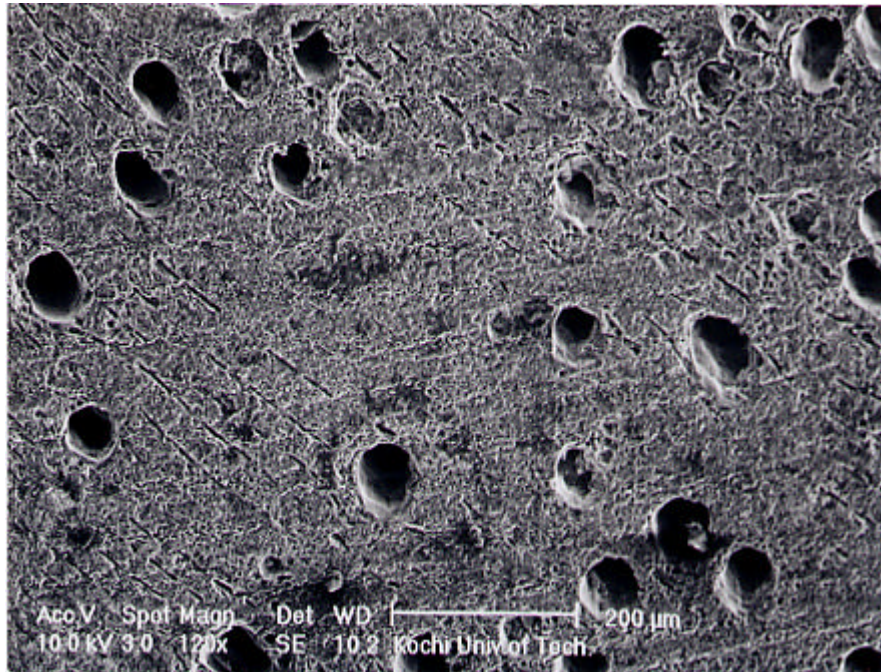


図 2.1 リグナムバイタ炭化処理表面

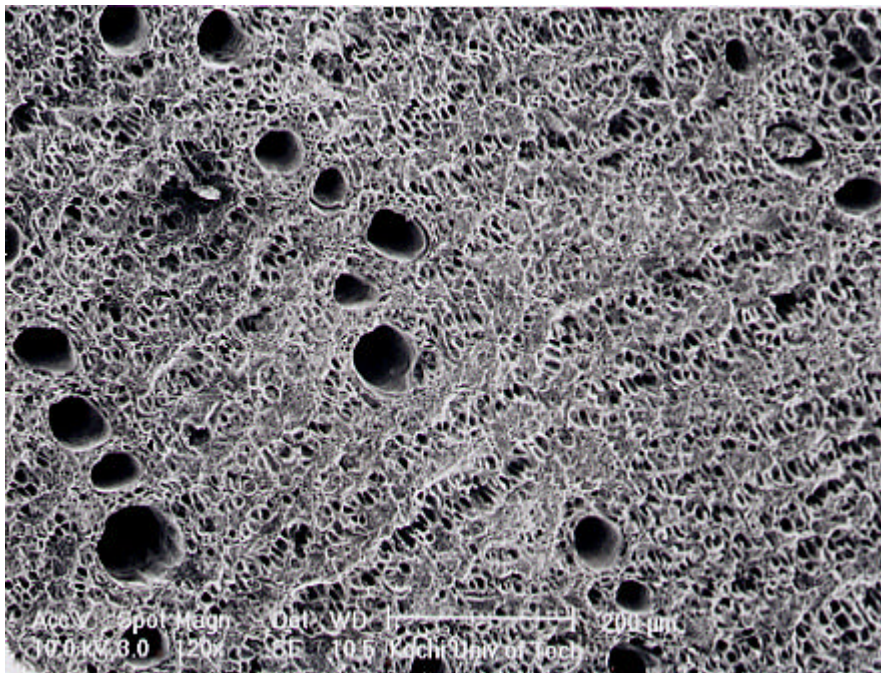


図 2.2 ウバメガシ炭化処理表面

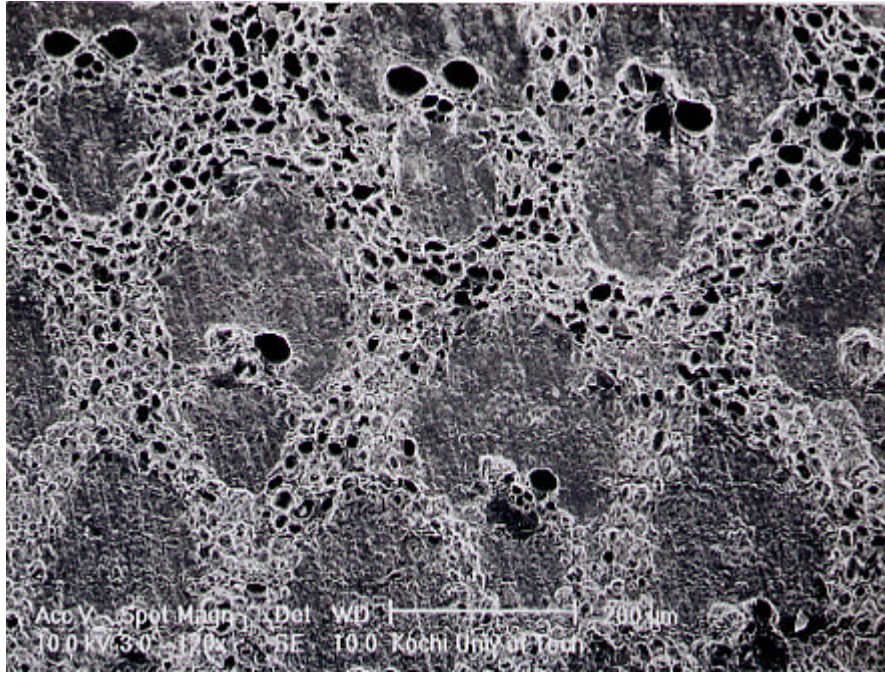


図 2.3 タケ炭化処理表面

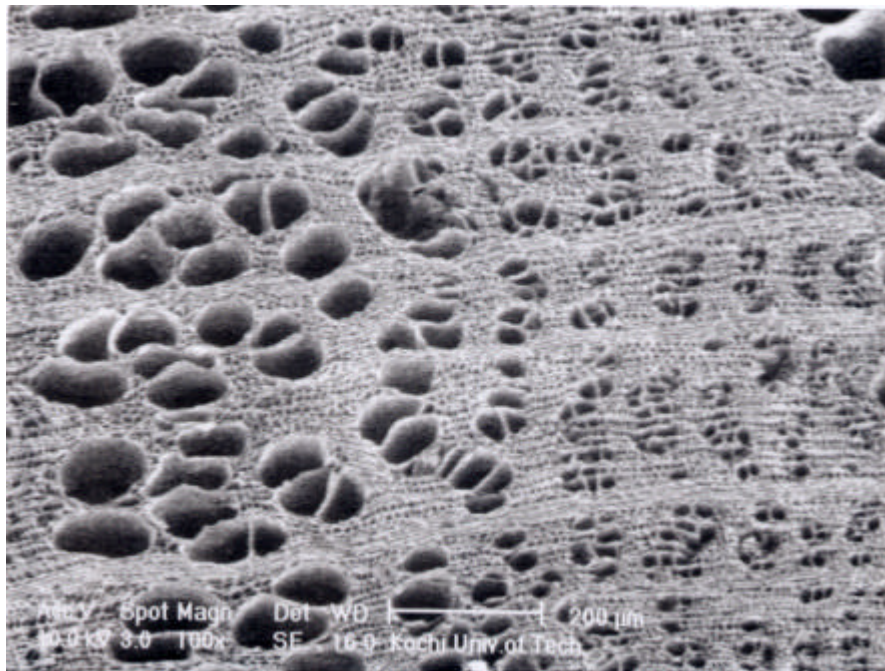


図 2.4 スギ炭化処理表面

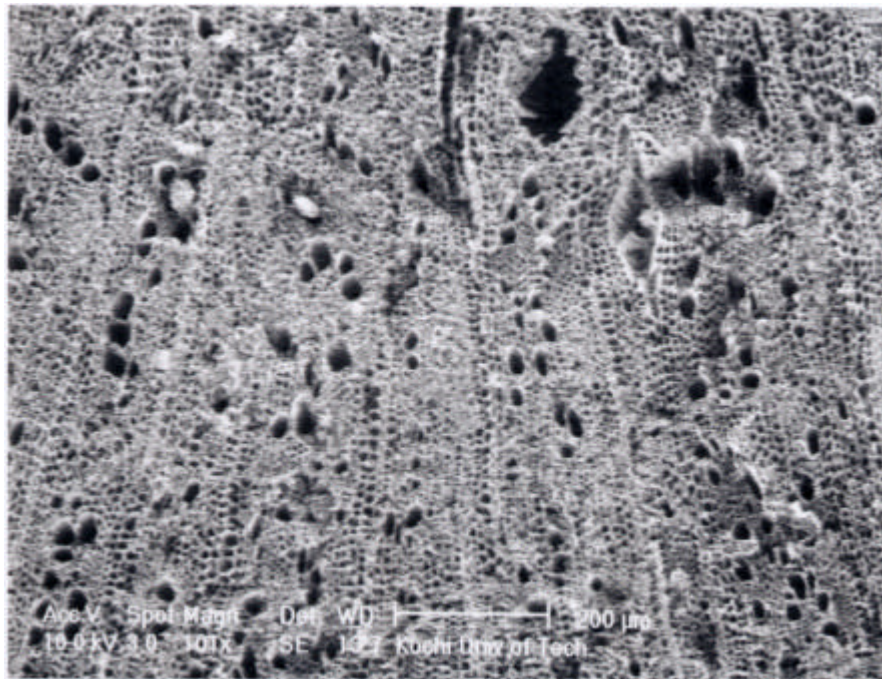


図 2.5 セイタカアワダチソウ炭化処理表面

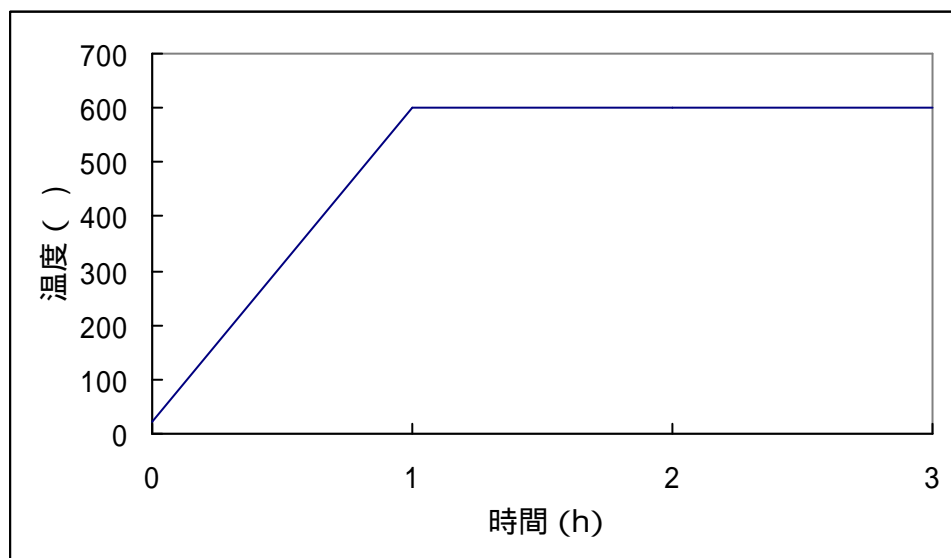


図 2.6 予備焼成時の温度変化と時間の関係

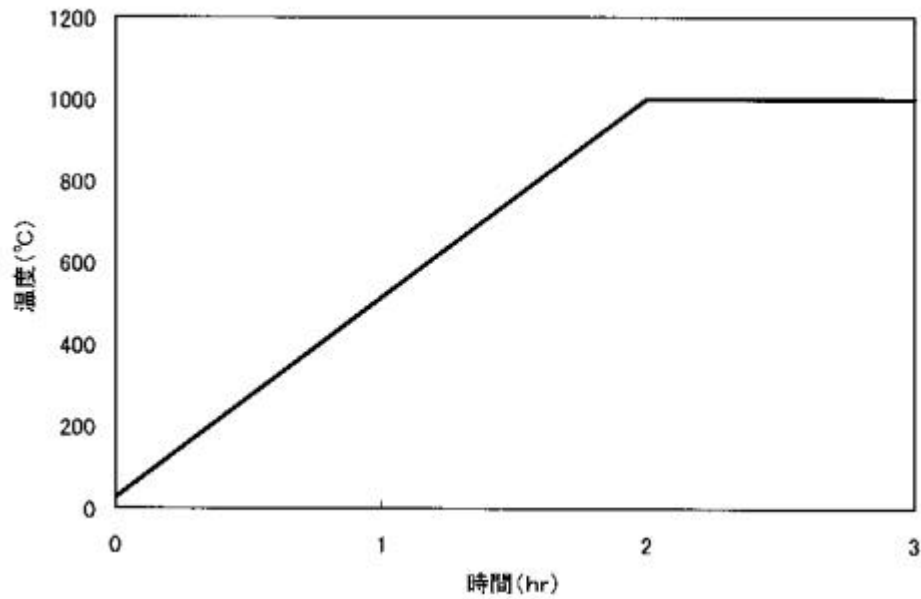


図 2.7 本焼成時の温度変化と時間の関係

2.1.3 高配向性グラファイト

高配向性グラファイトは数十 μm 厚のPIまたはPODフィルムを400~600の不活性ガス環境にて予備焼成を行い、その後2400~3000で焼成し、完全にグラファイト化させたものである。

電気伝導度は a-b 面で 2,300,000 S/m、c 軸方向で 500~600S/m、熱伝導度は a-b 面で 1000W/(m·K)、c 軸方向で 5 W/(m·K)と異方性が見られる。

3 . 加工実験

3 . 1 実験方法

実験はは松下電器製型彫り放電加工機 MG-ED82W を用い、純タングステン線をワイヤ放電加工により $90\ \mu\text{m}$ 径に加工して電極として使用した。放電加工機の外観を図 3 . 1 に示す。加工は送り速度 $5\ \mu\text{m}/\text{s}$ 、深さ $100\ \mu\text{m}$ のめくら穴加工とし、コンデンサ容量、すなわち放電エネルギーを変えて加工を行い、加工時間および放電ギャップの測定、SEM による加工面の観察を行った。

加工時間の測定は加工開始から電極が引き上げられるまでの時間をストップウォッチにより測定し、放電ギャップはレーザーテック社製レーザー顕微鏡 1LM21W を用いて加工穴径を計測し、電極径との差により求めた。レーザー顕微鏡の外観を図 3 . 2 に示す。

加工液は放電加工油と純水を比較した。純水製造装置はヤマト化学製 WG200 と Millipore 社製 RQ500 を用いた。その外観を図 3.3 および図 3.4 に示す。

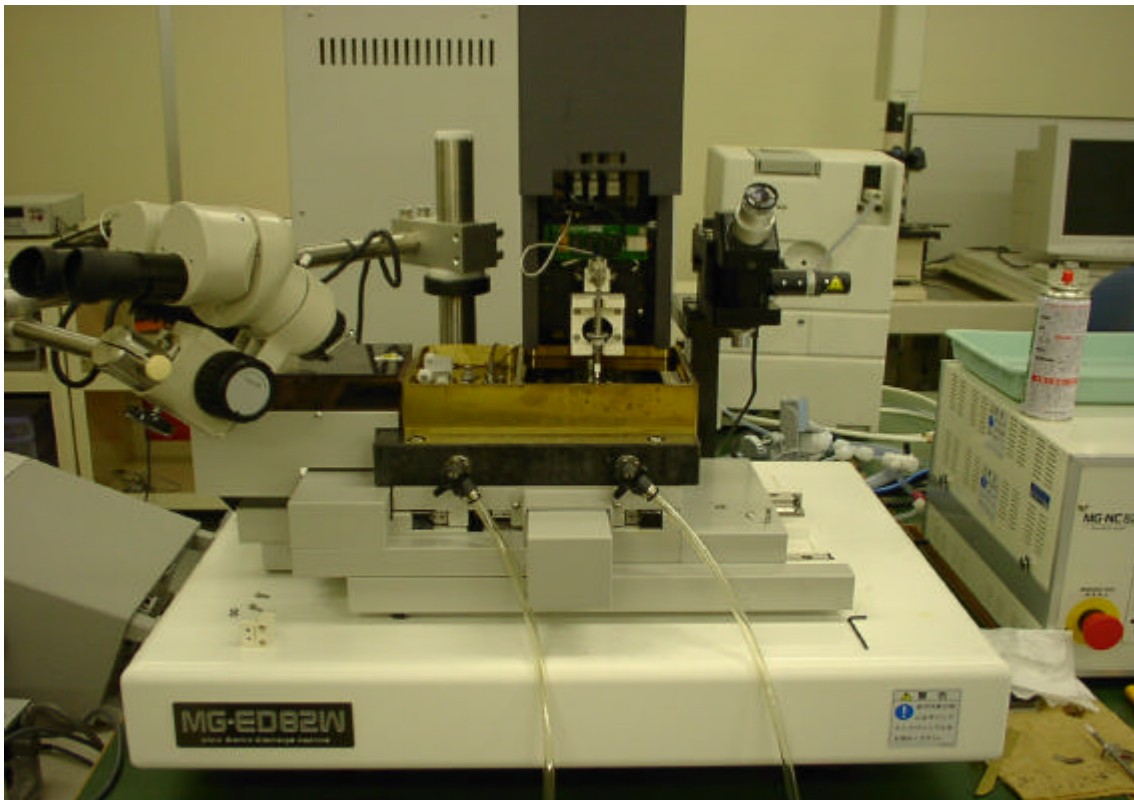


図 3.1 MG-ED82W 外観

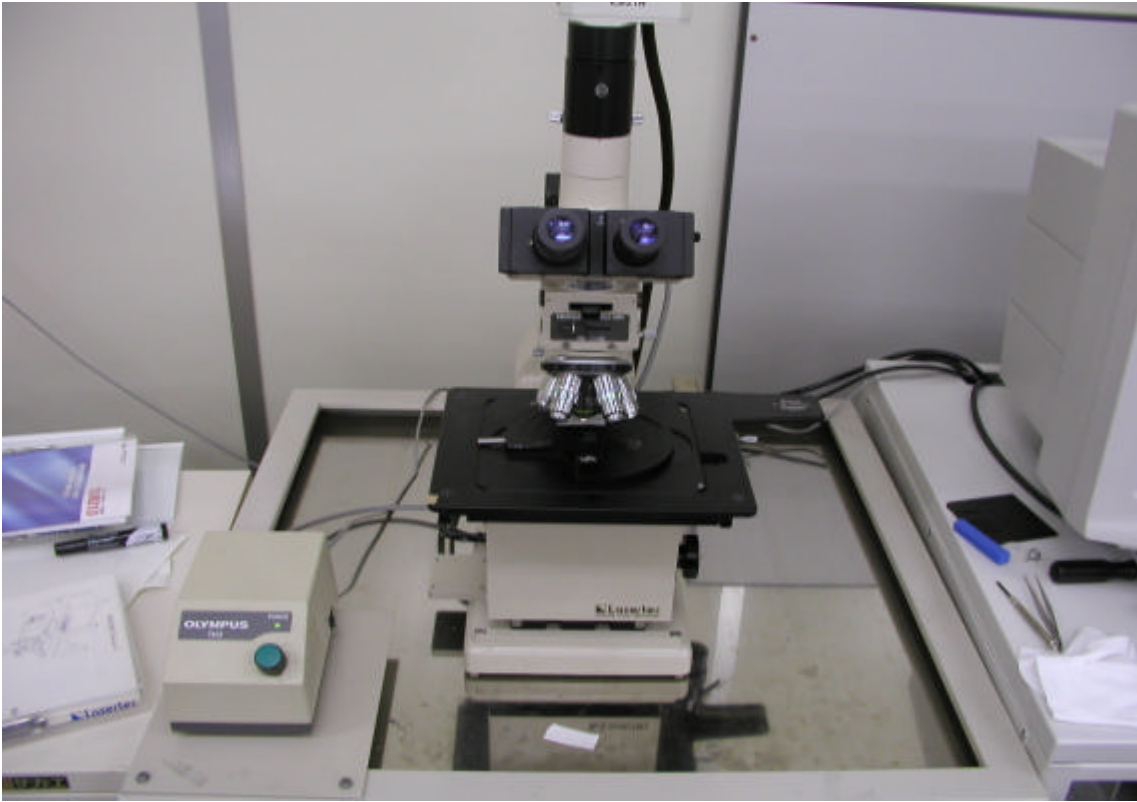


図 3.2 1 LM 2 1 W 外観



図 3.3 WG 2 0 0 外観



図 3.4 RQ500 外観

3.2 放電加工油による加工

加工液に放電加工油（三井スペースカット）を用いて各材料に微細放電加工を試みた。

リグナムバイタ、ウバメガシ、タケ、スギ、セイタカアワダチソウの加工結果の SEM 画像を図 3.5 ~ 3.9 に示す。図は全てコンデンサ容量を 3300 pF とした場合の加工結果である。いずれの材料についても本来持っている微細構造を損なうことなく加工が行われている。

図 3.10 はそれぞれの材料についてのコンデンサ容量と加工時間の関係である。全体に加工の進行は早く、リグナムバイタ以外ではコンデンサ容量によらず 20 ~ 40 s で加工が完了する。リグナムバイタは加工時間が長く、ばらつきも大きい。加工時間が長い場合、気泡の発生が多くアーク放電も見られ、時に発煙も認められた。リグナムバイタは構造が密であり空孔が小さく複雑な構成となっていることから内部に空気が残りやすく、微細な空孔内に残った空気により放電が阻害されているのが原因と推測される。

一方、その他の材料は空孔が大きく規則的な配置となっているため、加工液に浸漬した際の空気の残存が少なくなることにより、加工がスムーズに進むものと思われる。

しかし、材料上の位置によってまれに加工時間がばらつくことがあった。これはリグナムバイタと同様の理由によるものと思われ、加工前に加工液を含浸させるなどの考慮が必要と考えられる。なお、電極の消耗はいずれの材料においても非常に小さく測定範囲を超

え、認められなかった。

図3.11はそれぞれの材料について求めたコンデンサ容量と放電ギャップの関係である。セイタカアワダチソウ、スギ、タケの順に放電ギャップが大きくなり、全体にコンデンサ容量が大きくなると放電ギャップは増大し、コンデンサ容量に大きく影響される。ウバメガシ、リグナムバイタは放電ギャップが5～10 μmと小さい。

これは素材の構造の差によるものであり、構造が粗である材料では単発の放電によって除去される体積の影響を受けやすく、放電エネルギーの影響が大きいものと推測される。

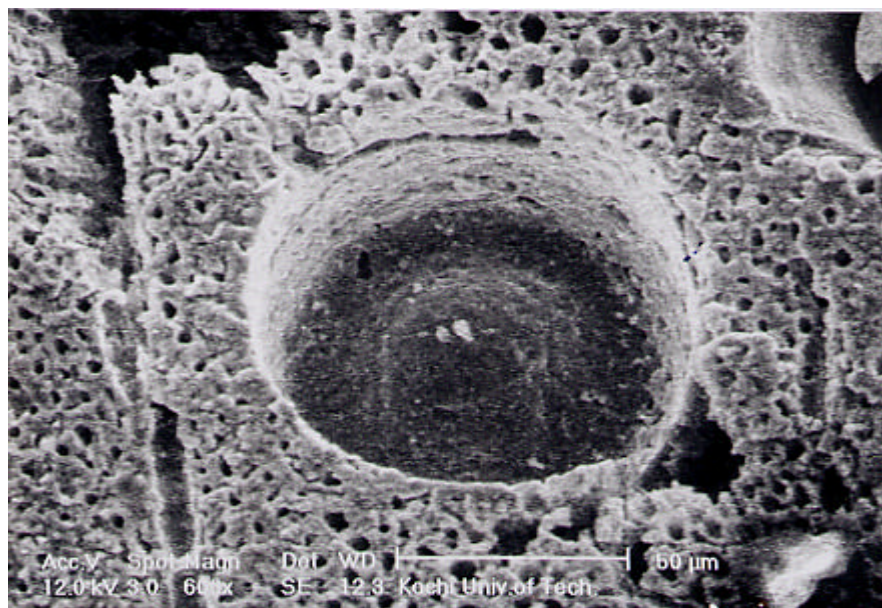


図3.5 リグナムバイタ加工結果

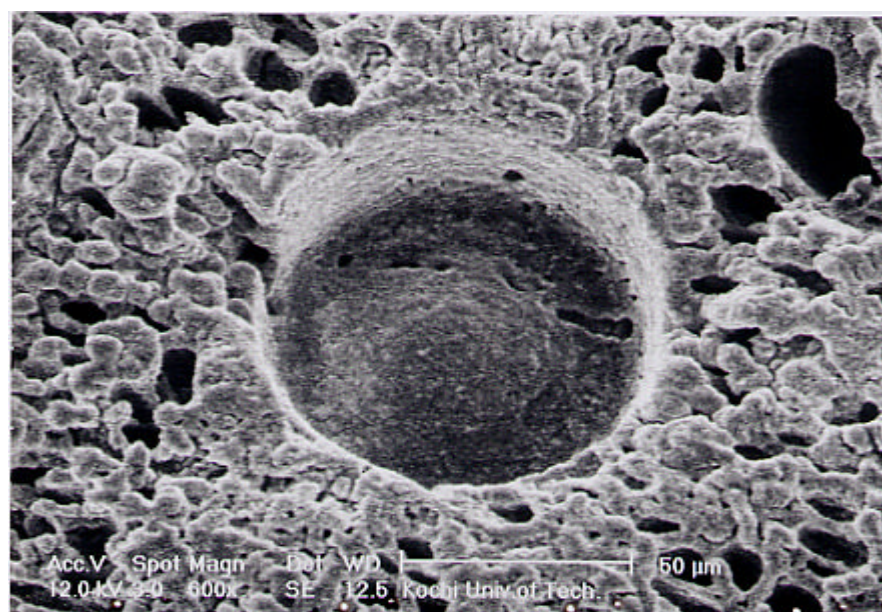


図3.6 ウバメガシ加工結果

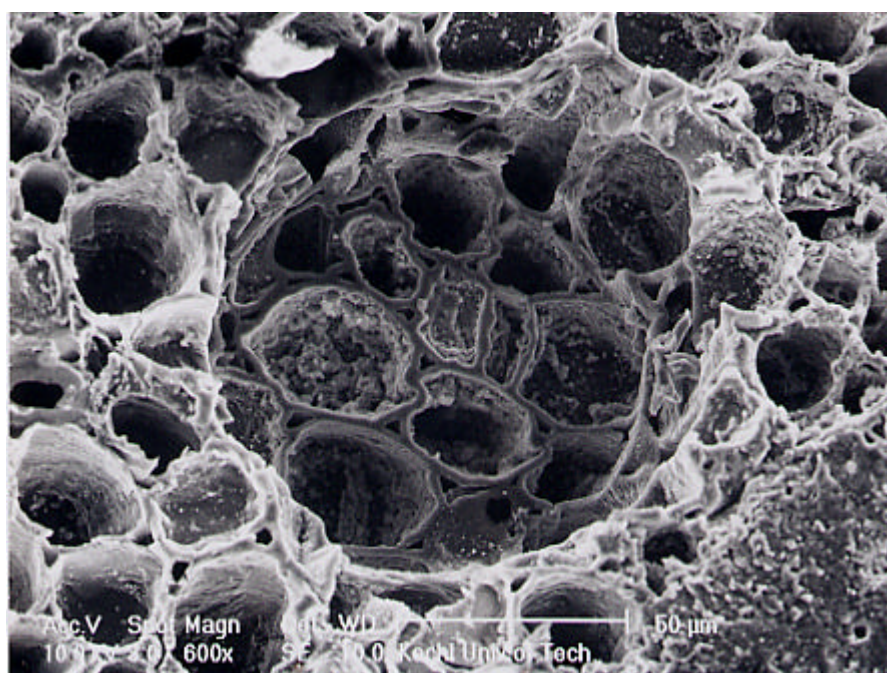


図 3.7 タケ加工結果

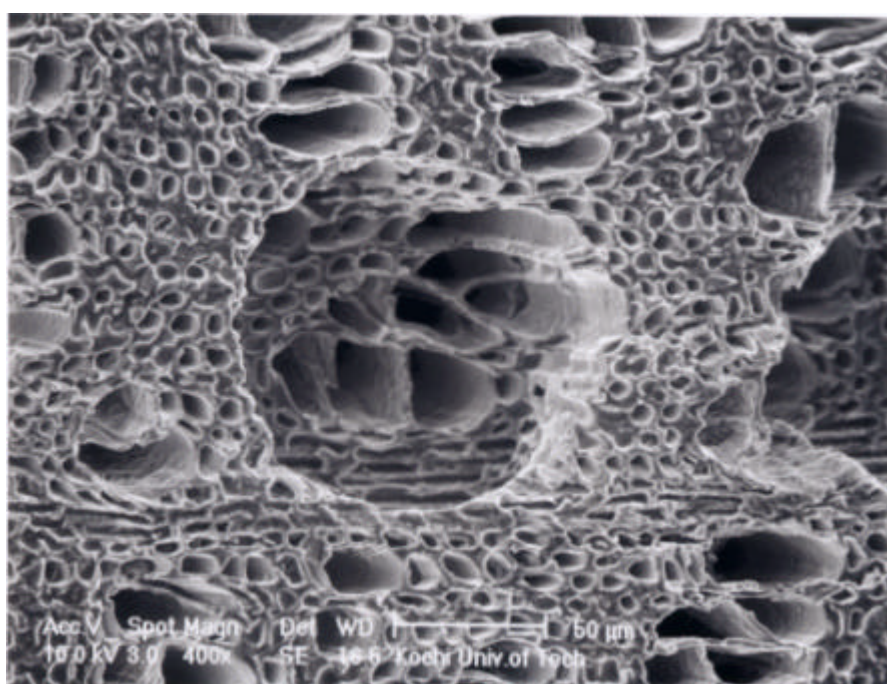


図 3.8 スギ加工結果

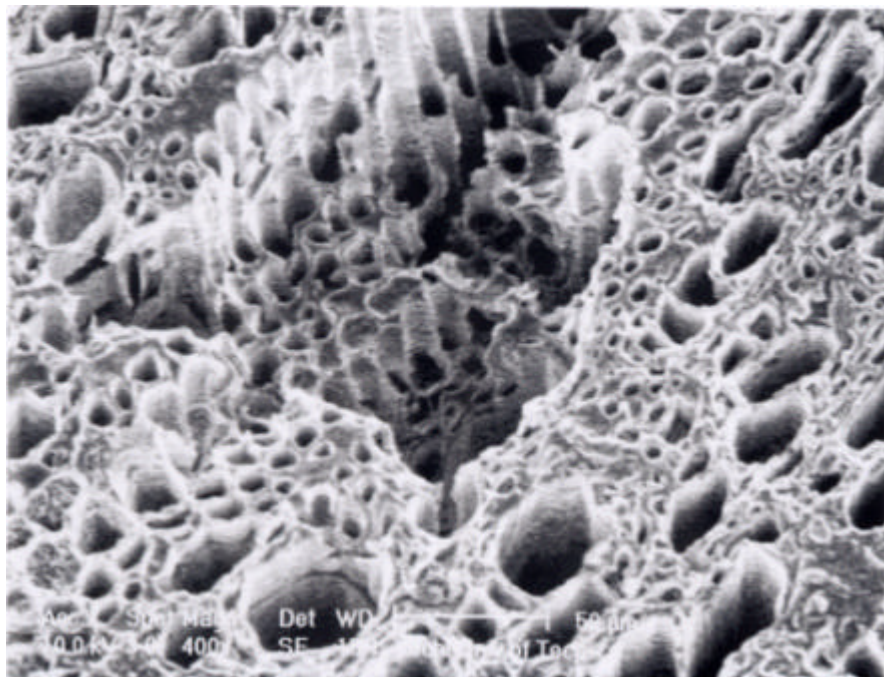


図 3.9 セイタカアワダチソウ加工結果

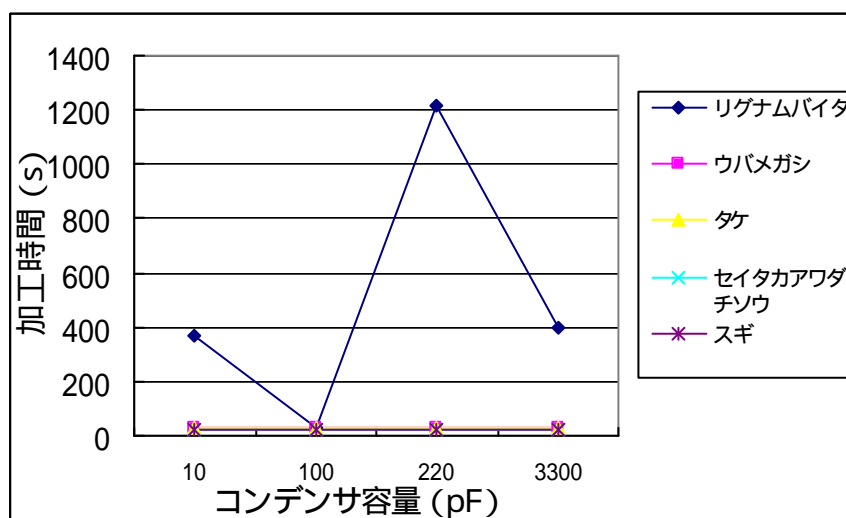


図 3.10 コンデンサ容量と加工時間の関係 (放電加工油)

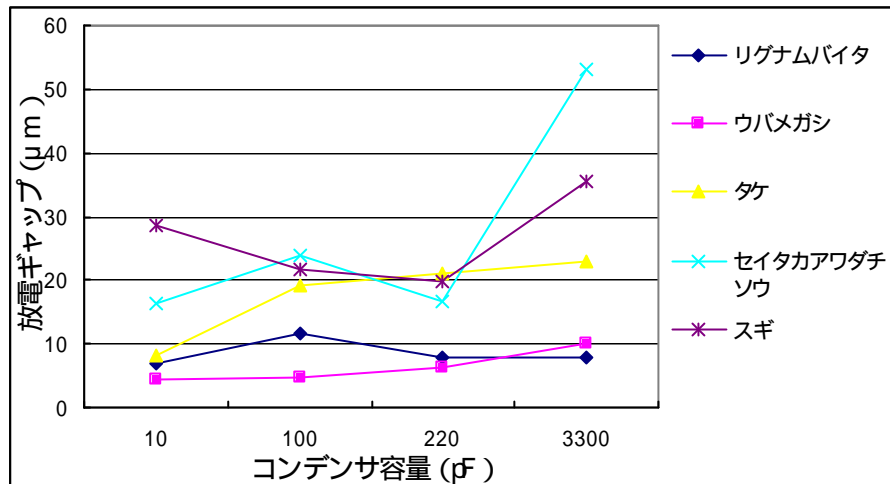


図 3.1 1 コンデンサ容量と放電ギャップの関係 (放電加工油)

3.3 純水による加工

放電加工油を用いると微細構造中に浸入した加工液の除去が困難である。このため、純水を加工液に用いることを検討した。

図 3. 1 2 ~ 3. 1 6 は純水中で加工を行った場合の SEM 画像である。図は全てコンデンサ容量を 3 3 0 0 p F とした場合の加工結果である。いずれの材料についても放電加工油と同様に素材自体の微細構造を損なうことなく加工が可能であったが、放電加工油で加工したものと比較するとクラック等が発生している。

図 3. 1 5 は純水中で加工した場合のコンデンサ容量と加工時間の関係である。加工時間は放電加工油とほぼ同等であった。放電加工油の場合と同様、リグナムバイタに多少加工時間のばらつきがみられたが、加工自他はスムーズで、放電加工油より加工時間が短い。気泡の発生が見られたが、発煙は認められなかった。

図 3. 1 6 は純水中で加工した場合のコンデンサ容量と放電ギャップの関係である。放電ギャップは放電加工油の場合と比べ、3 0 ~ 4 0 μ m と大きくなる傾向にあり、加工精度の低下が認められた。

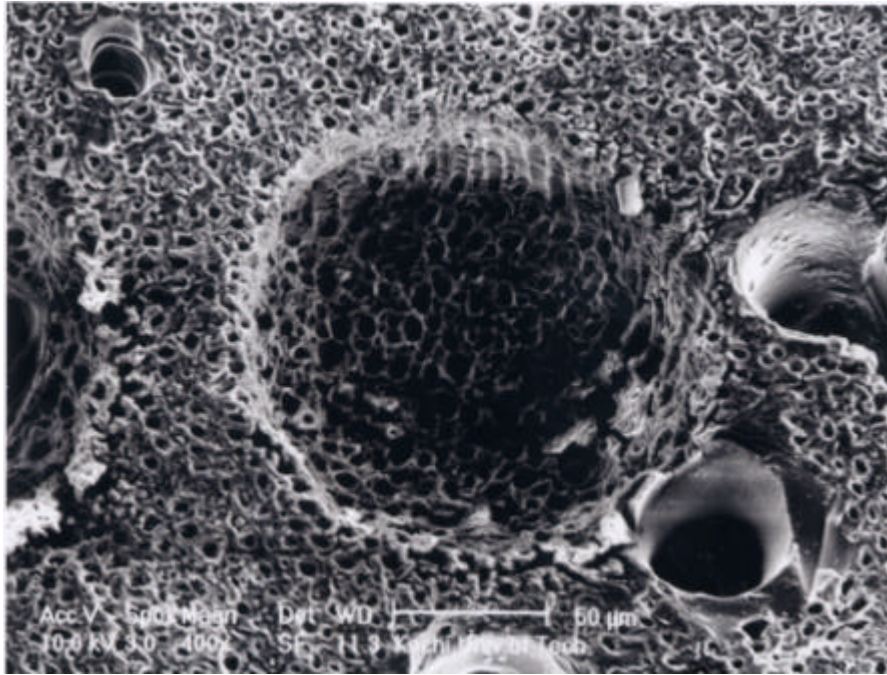


図 3.1 2 リグナムバイタ加工結果

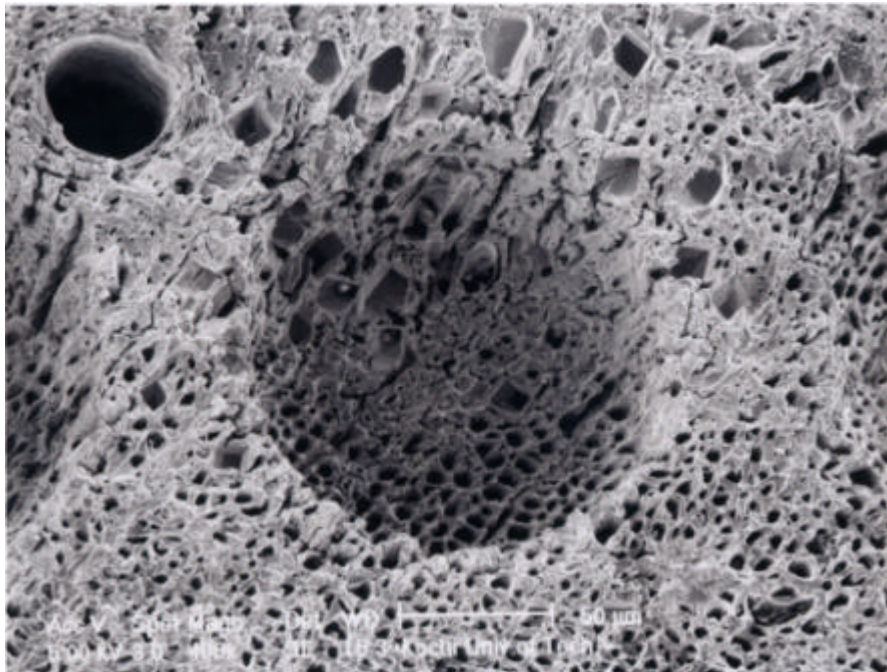


図 3.1 3 ウバメガシ加工結果

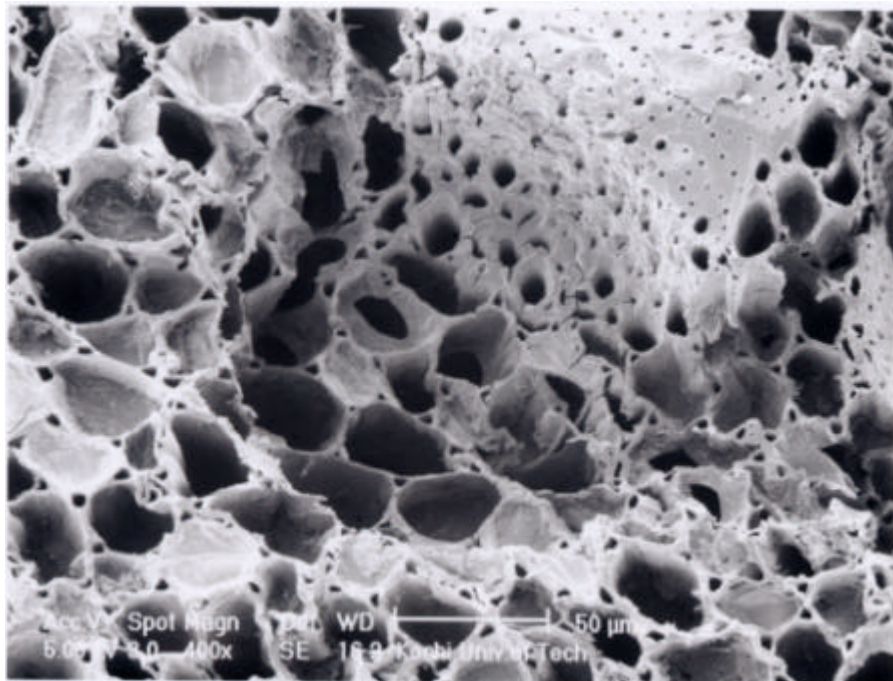


図 3.1 4 タケ加工結果

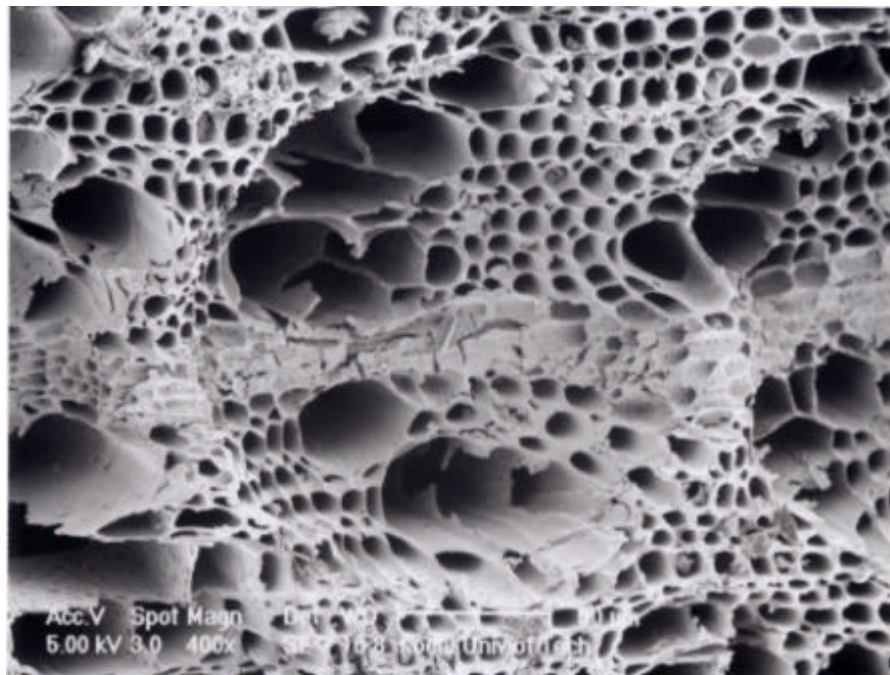


図 3.1 5 スギ加工結果

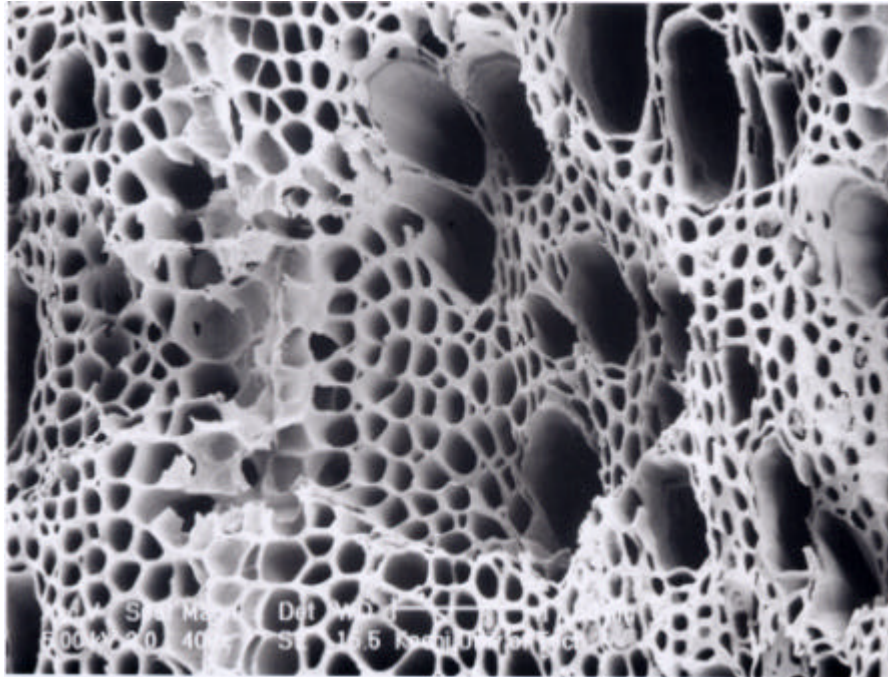


図 3.1 6 セイタカアワダチソウ加工結果

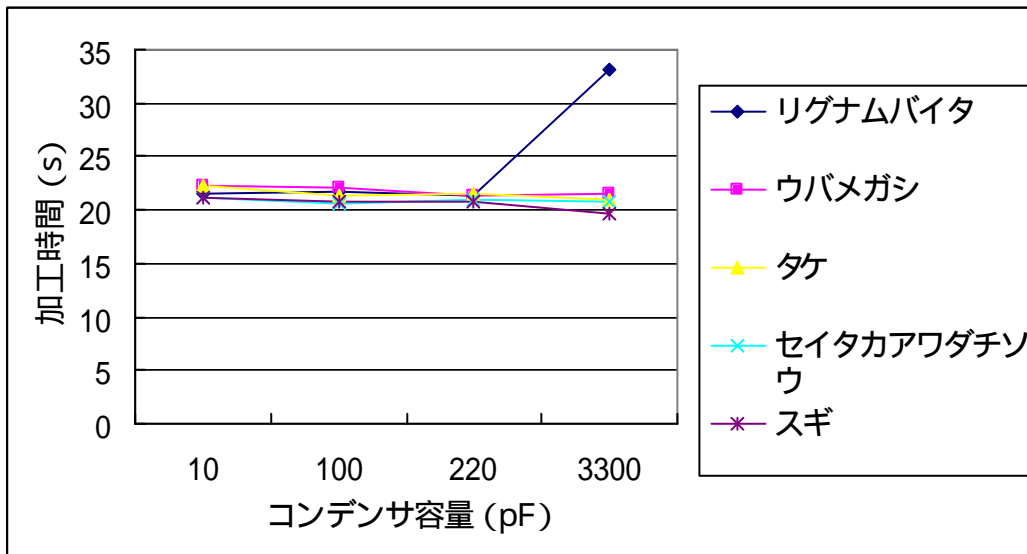


図 3.1 7 コンデンサ容量と加工時間の関係 (純水)

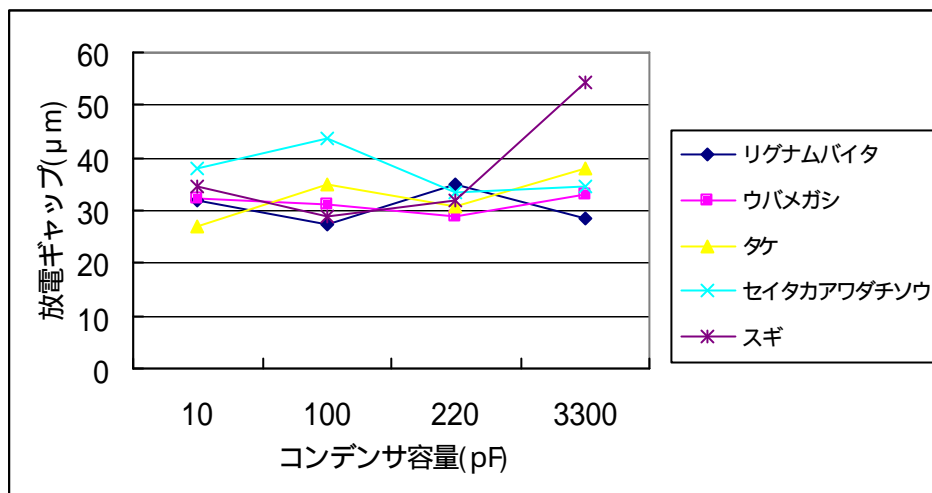


図 3.1 8 コンデンサ容量と放電ギャップの関係 (純水)

3.4 高配向性グラファイト

天然材料との比較として高配向性グラファイトをコンデンサ容量 3 3 0 0 p F で加工した結果を図 3.1 7 に示す。放電の衝撃により素材が破碎、分離している。高配向性グラファイトは天然材料の炭化処理に比べて焼成温度が高くグラファイト化が著しく進んでいることから、炭化処理によるグラファイト化には適切な範囲が存在すると考えられる。

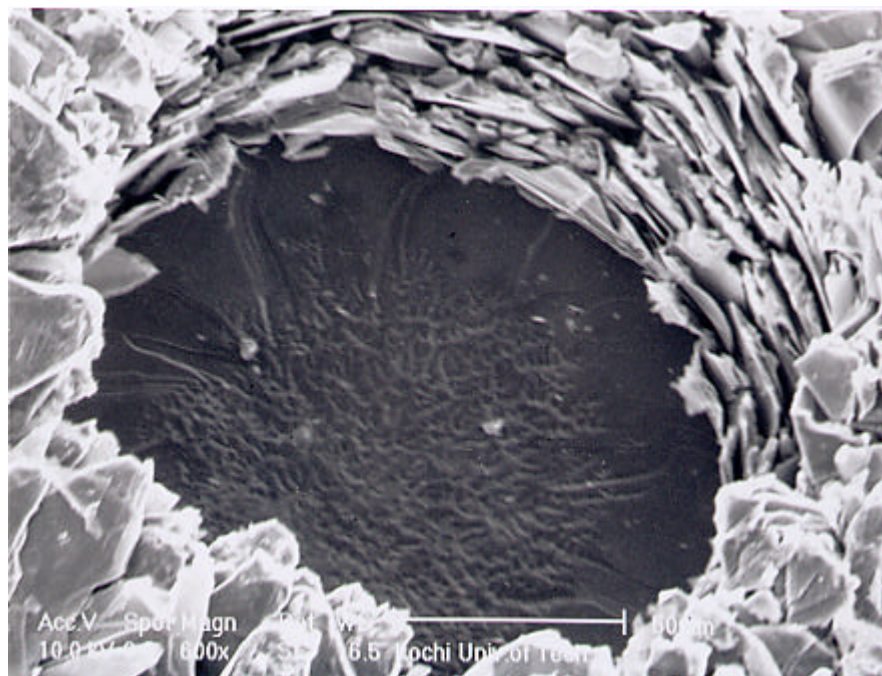


図 3.1 9 高配向性グラファイト加工結果

4. マクロデバイスへの応用

加工実験結果に基づき試作した湿度センサの外観を図 4.1 に示す。ガラス管内に電極を取り付けた焼成処理済みウバメガシを挿入してセンサ部とし、電気抵抗の変化を測定した。

電気抵抗の測定には Agilent Technologies 社製 HP34420A を用い、湿度の測定および試作センサとの比較には佐藤計量器製作所社製 SK-110TRH を用いた。

湿度を SK-110TRH で測定しつつ 20% から 90% まで変化させ、試作センサの電気抵抗の変化を測定し、その後湿度計の数値が 90% から 20% となるまでの時間と試作センサの電気抵抗の変化を測定した結果、今回試作した湿度センサは市販されているものと同程度の性能を見せた。その結果を図 4.2 に示す。

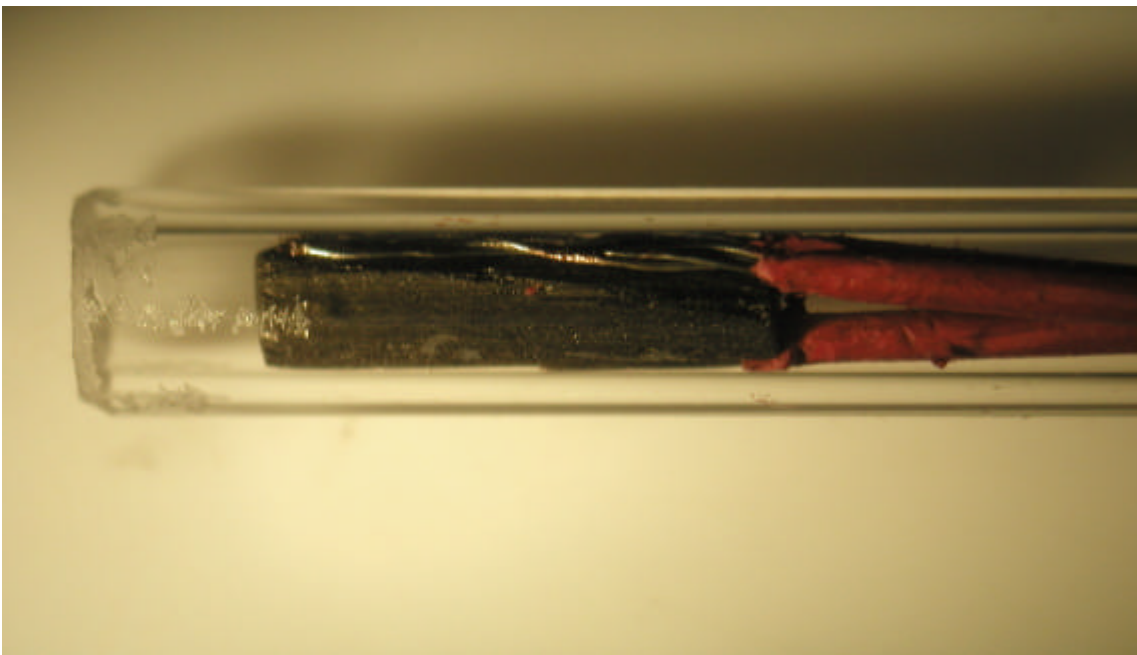


図 4.1 試作湿度センサ外観

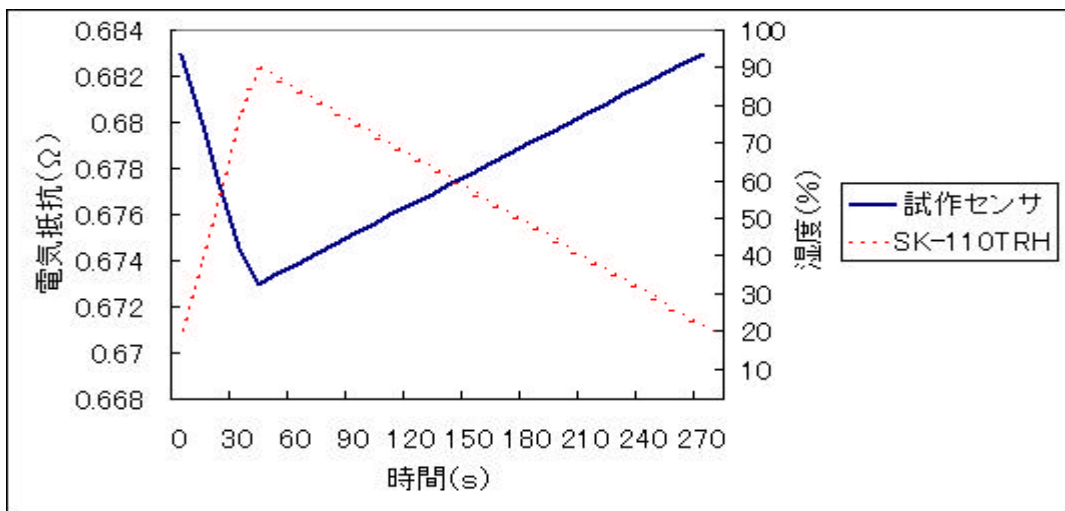


図 4.2 試作センサおよび市販湿度センサの性能比較

5 . 結言

天然材料に炭化処理を施すことで素材自体が持つ微細構造を損なうことなく微細放電加工が可能であり、素材自体の構造が密であるものほどコンデンサ容量の影響を受けにくく、放電ギャップが縮小し加工精度が高くなるが、加工時間のばらつきを抑えるために加工液を効果的に含浸させるなどの対策が必要となる。加工液に純水を用いた場合は加工時間を短縮することができるが、クラックの発生や放電ギャップの拡大といった加工精度の低下が認められた。

また、炭化処理にともなう素材のグラファイト化について適切な範囲が存在すると思われる、過度のグラファイト化を進めないよう炭化処理温度の管理が重要となる。

以上のことより、適切な温度範囲内で炭化処理を施した天然材料は、その微細構造を生かしたマイクロ構造物への応用が可能であり、その一例として湿度センサの試作を行った。試作湿度センサは市販の高精度湿度センサに近い特性をもち、試作としては十分な成果が得られた。

今後の課題としては焼結温度の違いによるグラファイト化の適正範囲や、最適な加工条件の決定、湿度センサ以外のセンサやフローチャネルなどの試作といったものが挙げられる。

参考文献

- 1) 精密工学会編,精密工作便覧,コロナ社,(1992).
- 2) 江刺正喜,マイクロマシン,産業技術サービスセンター,(2002)
- 3) 岡部敏弘,木質系多孔質炭素材料ウッドセラミックス,内田老鶴圃,(1996)
- 4) 立本英機,おもしろい活性炭のはなし,日刊工業新聞社,(1997)
- 5) <http://prowd.mboso.ne.jp/1100-01treesname-list.htm>,木材詳細図鑑.

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大学院知能機械システム工学コース 河田耕一 教授に謹んで感謝の意を表させていただくとともに、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協力くださった高知県工業技術センター資源環境部 河野 敏夫 様、高知工科大学大学院物質・環境システム工学コース 坂輪 光弘 教授、三浦工業株式会社 石黒 真路君に心から厚く御礼申し上げます。

2003年1月30日

福本 泰章

付属资料

図 1 ~ 4 4 炭素素材の加工结果

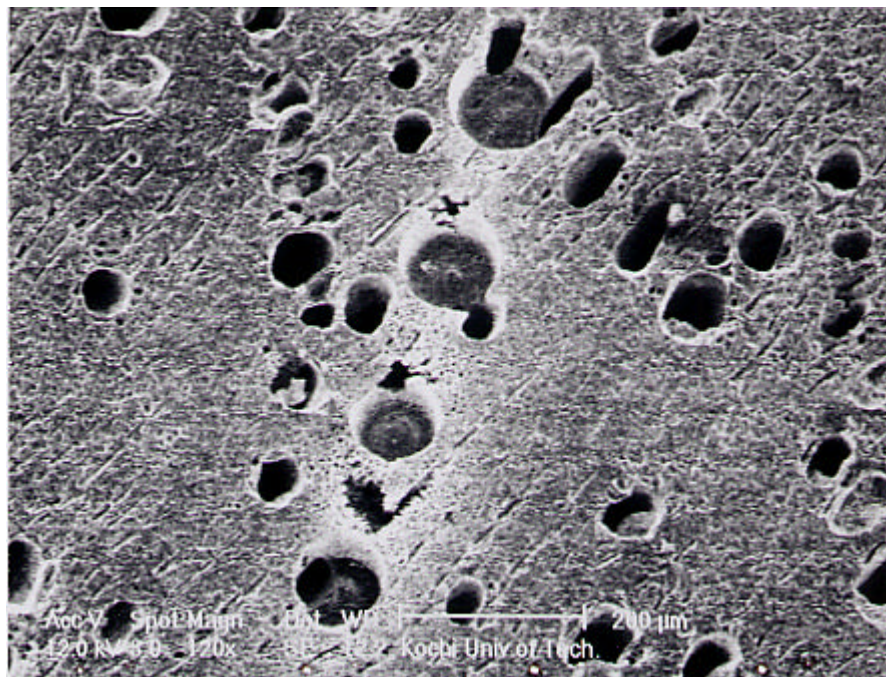


図1 リグナムバイタ加工結果（放電加工油 コンデンサ容量3300 pF）

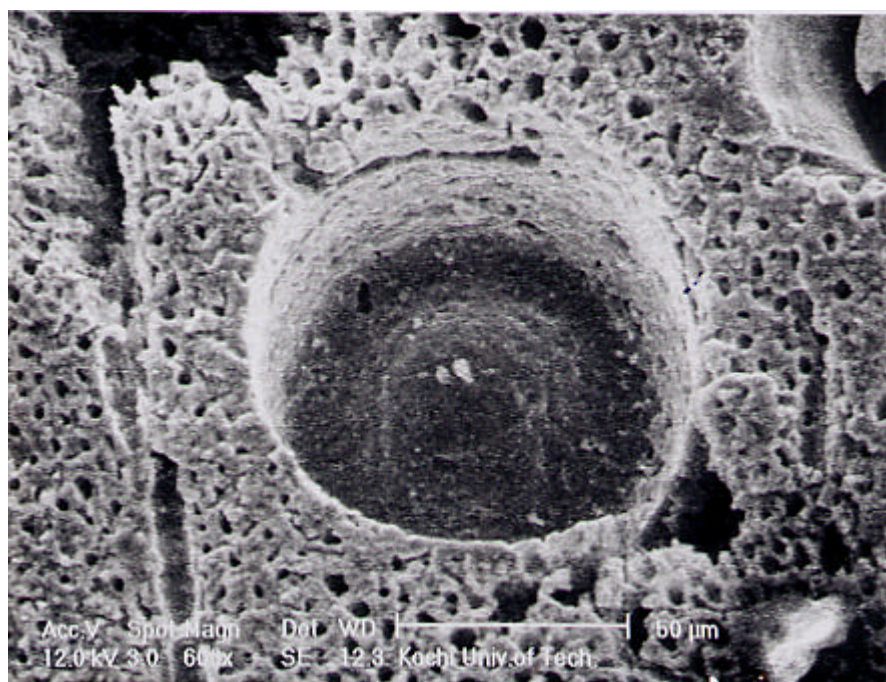


図2 リグナムバイタ加工結果（放電加工油 コンデンサ容量3300 pF）

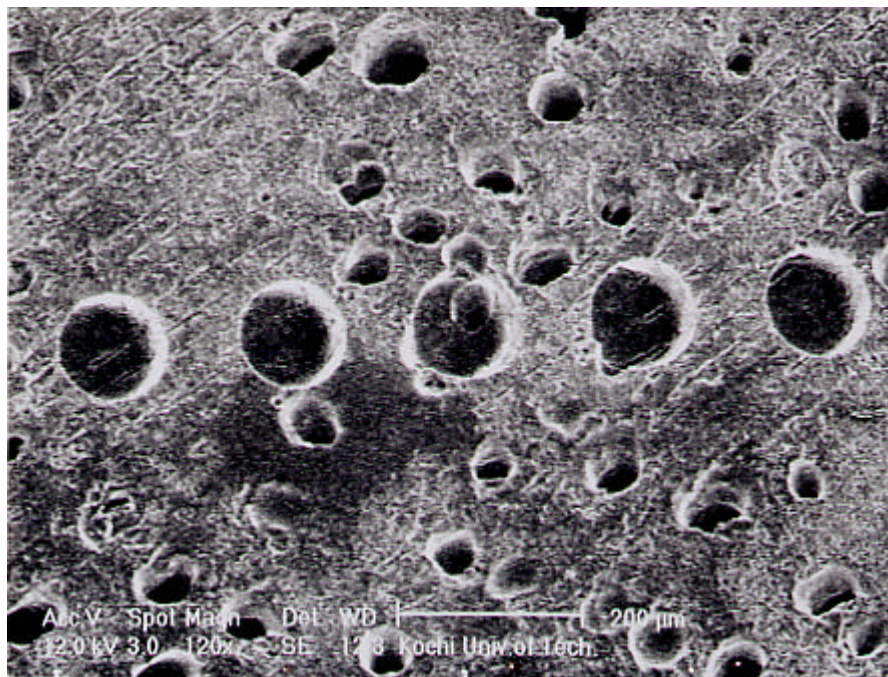


図3 リグナムバイタ加工結果（放電加工油 コンデンサ容量10 pF）

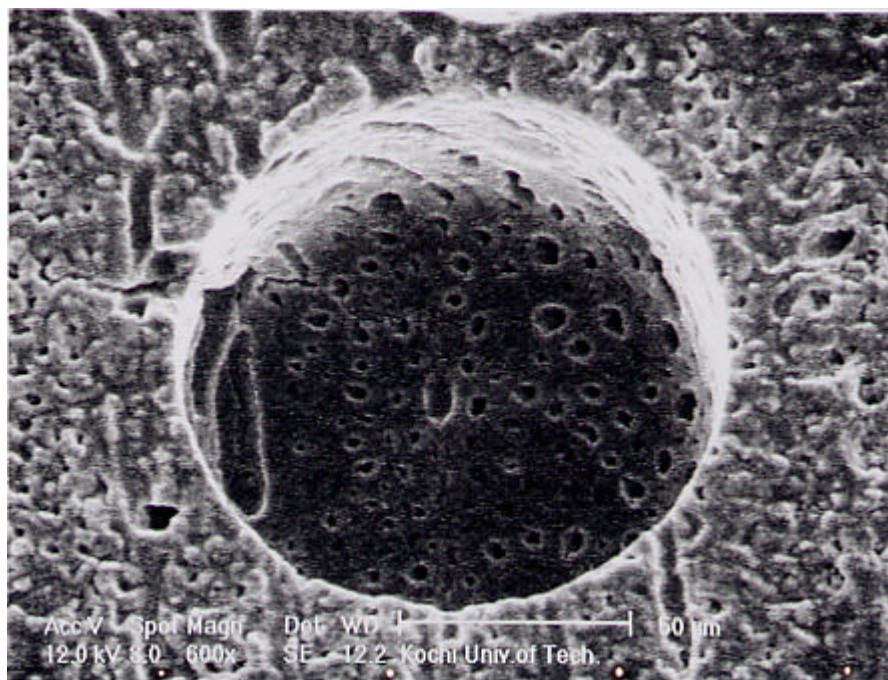


図4 リグナムバイタ加工結果（放電加工油 コンデンサ容量10 pF）

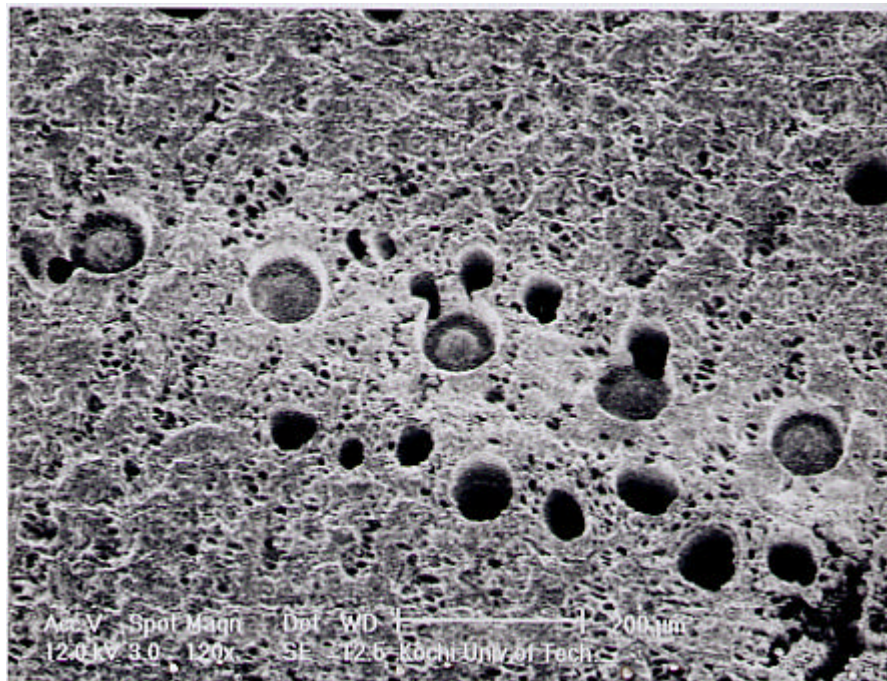


図5 ウバメガシ加工結果（放電加工油 コンデンサ容量3300 pF）

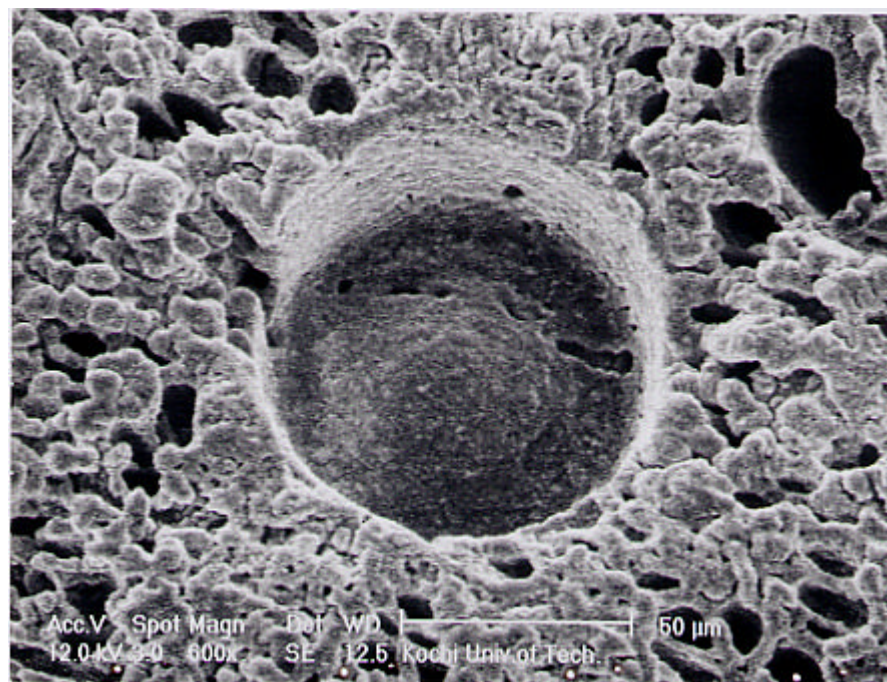


図6 ウバメガシ加工結果（放電加工油 コンデンサ容量3300 pF）

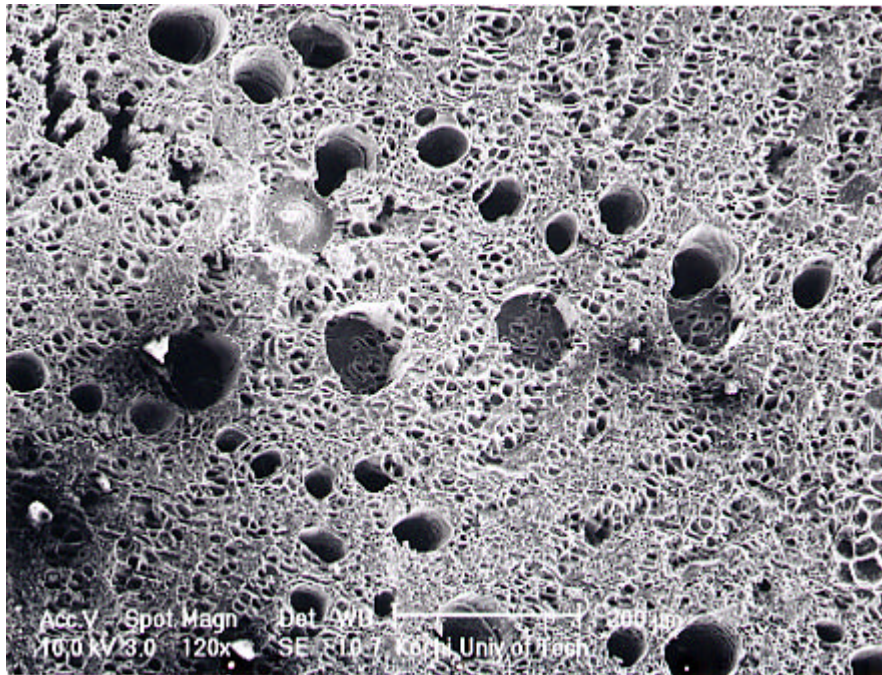


図7 ウバメガシ加工結果（放電加工油 コンデンサ容量10 pF）

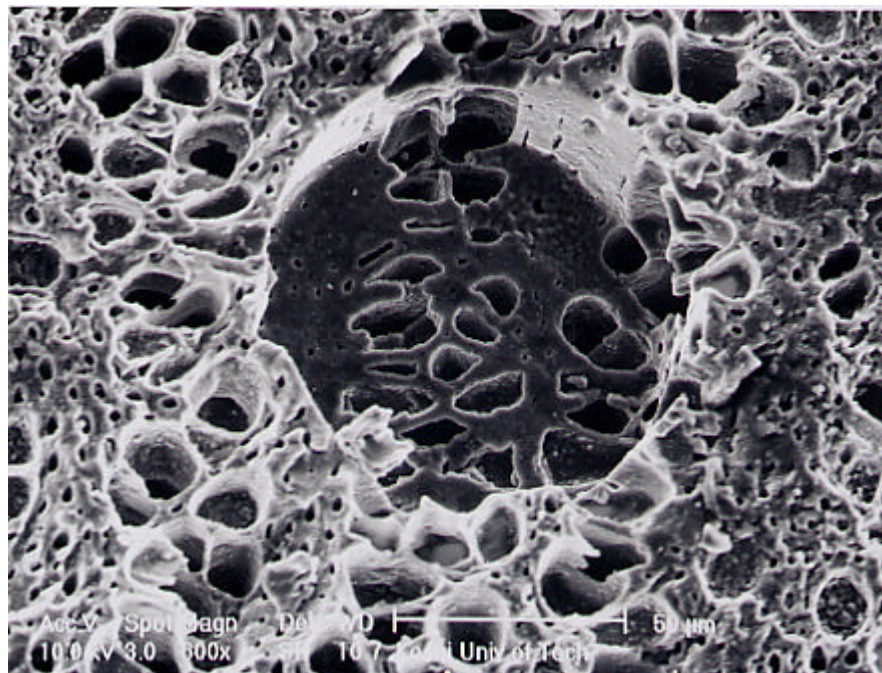


図8 ウバメガシ加工結果（放電加工油 コンデンサ容量10 pF）

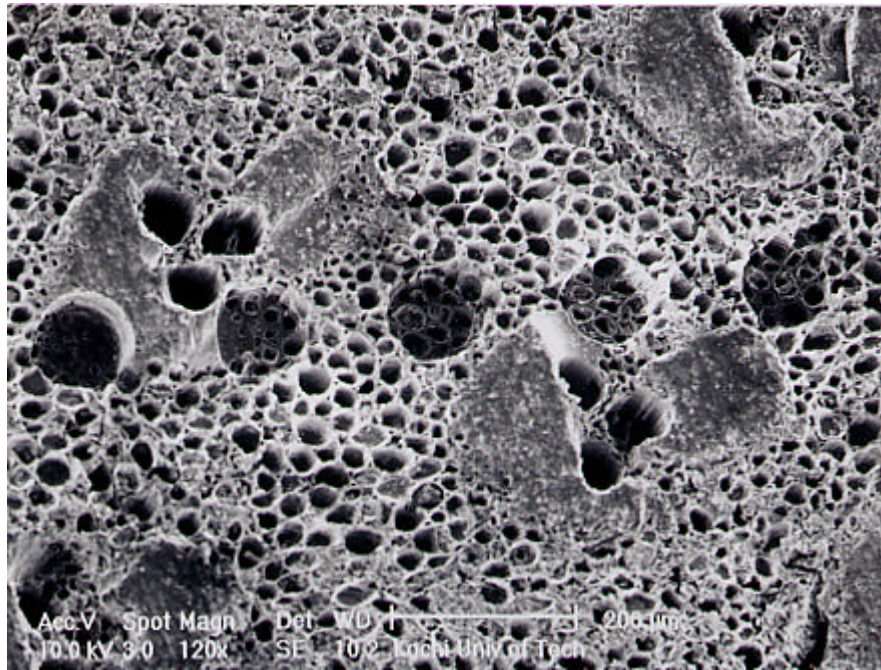


図9 タケ加工結果 (放電加工油 コンデンサ容量 3300 pF)

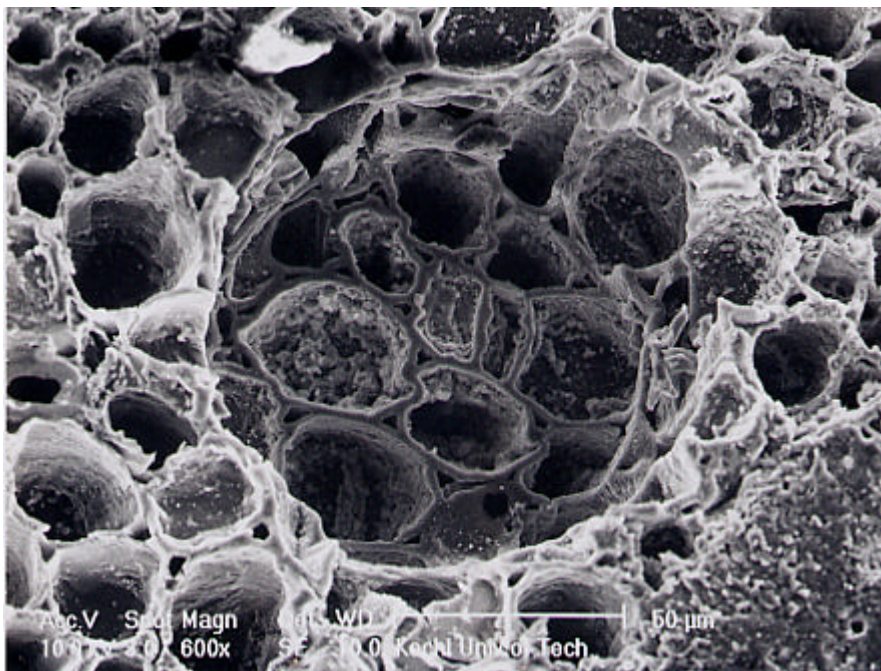


図10 タケ加工結果 (放電加工油 コンデンサ容量 3300 pF)

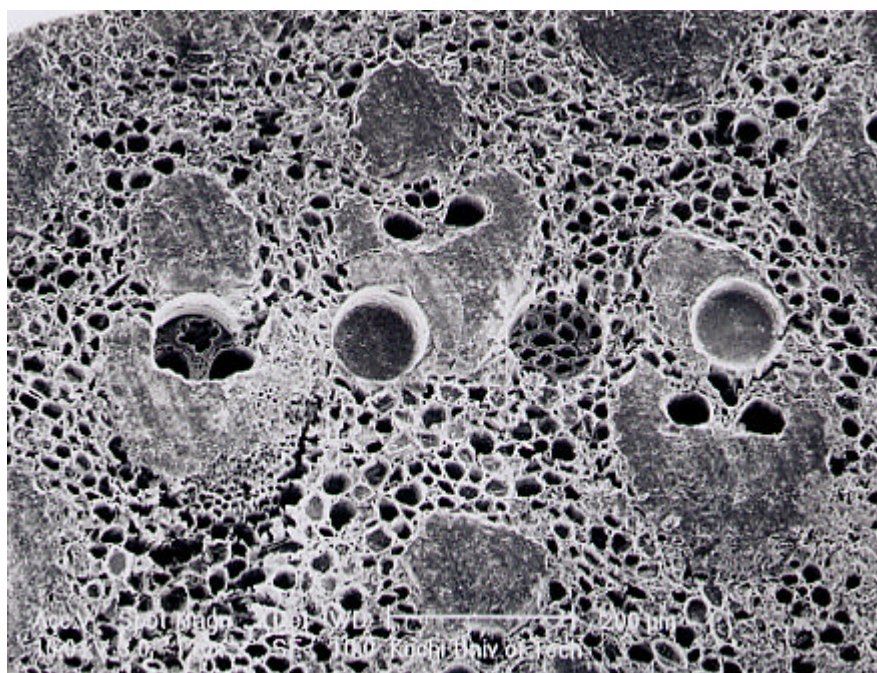


図1 1 タケ加工結果（放電加工油 コンデンサ容量10 pF）

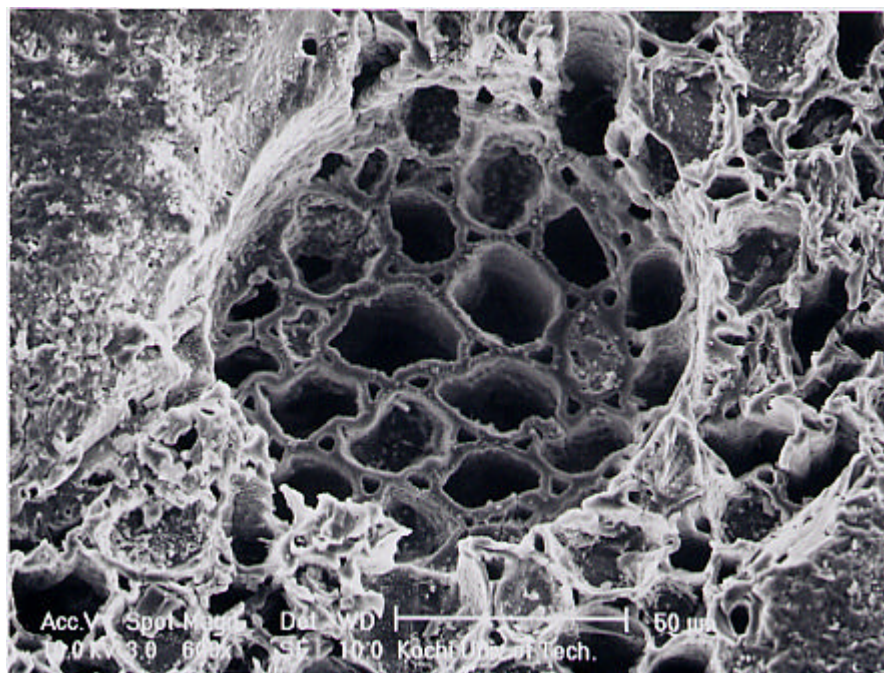


図1 2 タケ加工結果（放電加工油 コンデンサ容量10 pF）

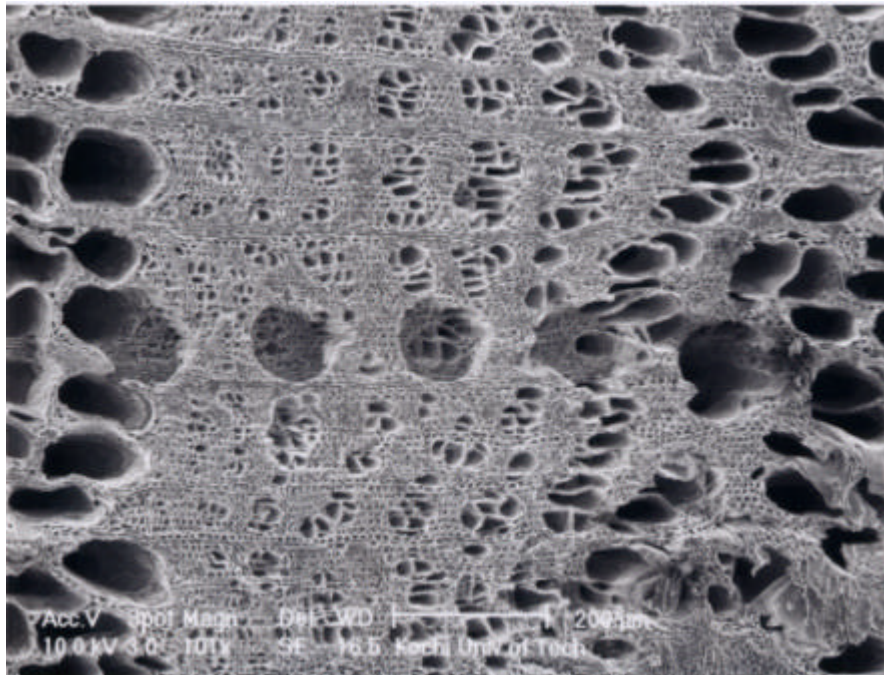


図 1 3 スギ加工結果 (放電加工油 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

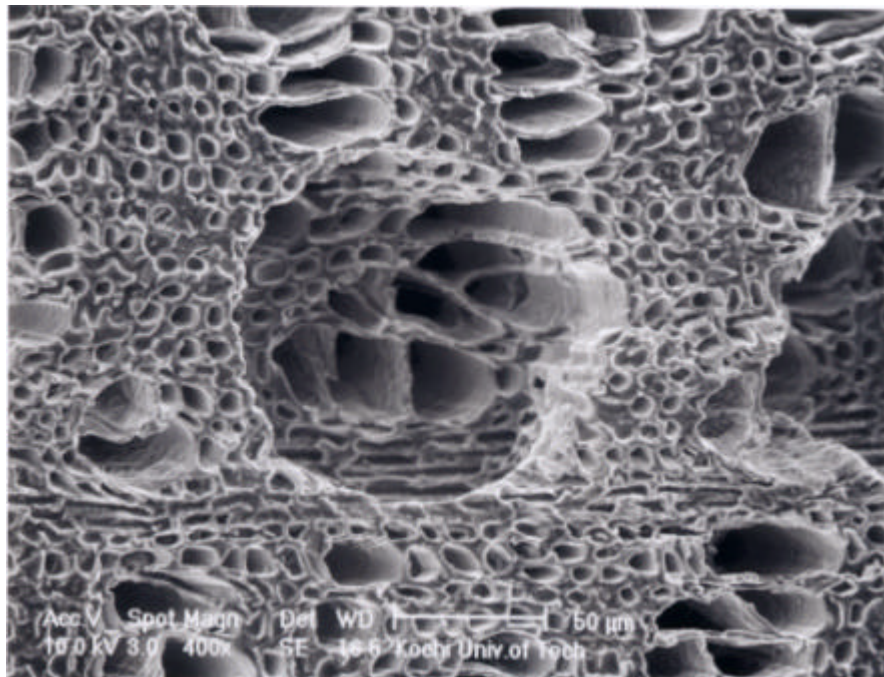


図 1 4 スギ加工結果 (放電加工油 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

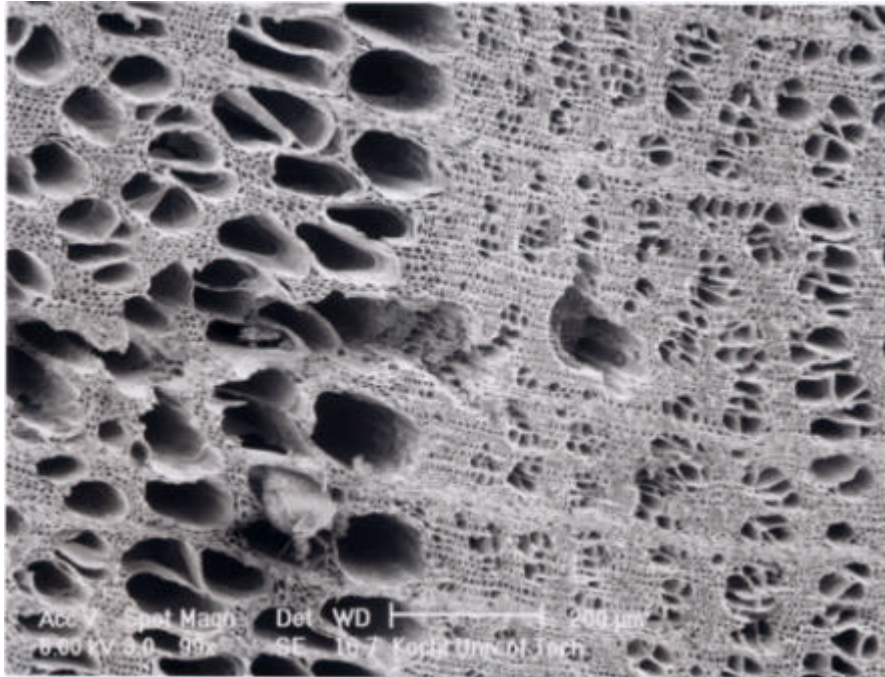


図15 スギ加工結果（放電加工油 コンデンサ容量10 pF）

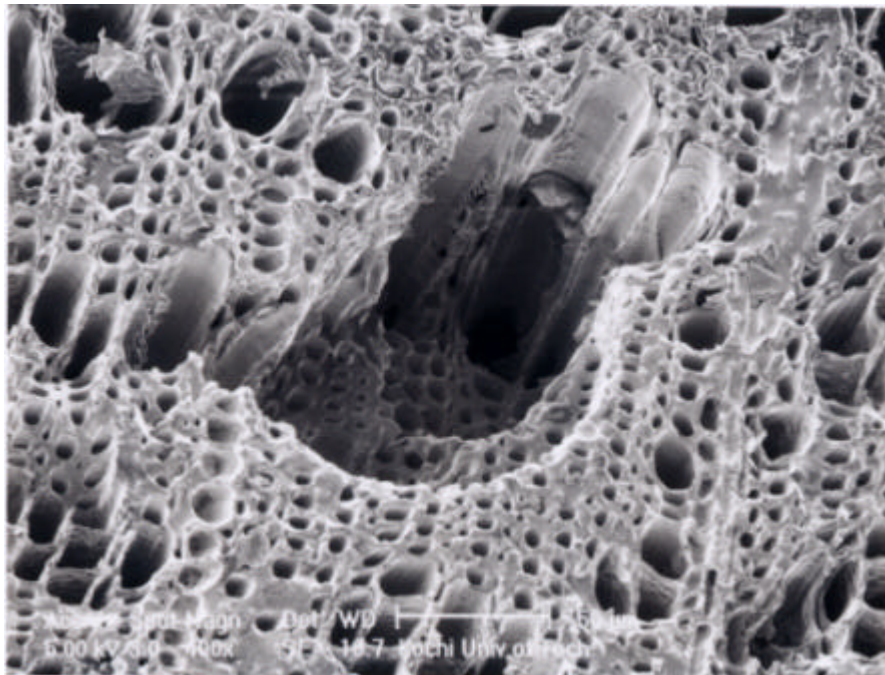


図16 スギ加工結果（放電加工油 コンデンサ容量10 pF）

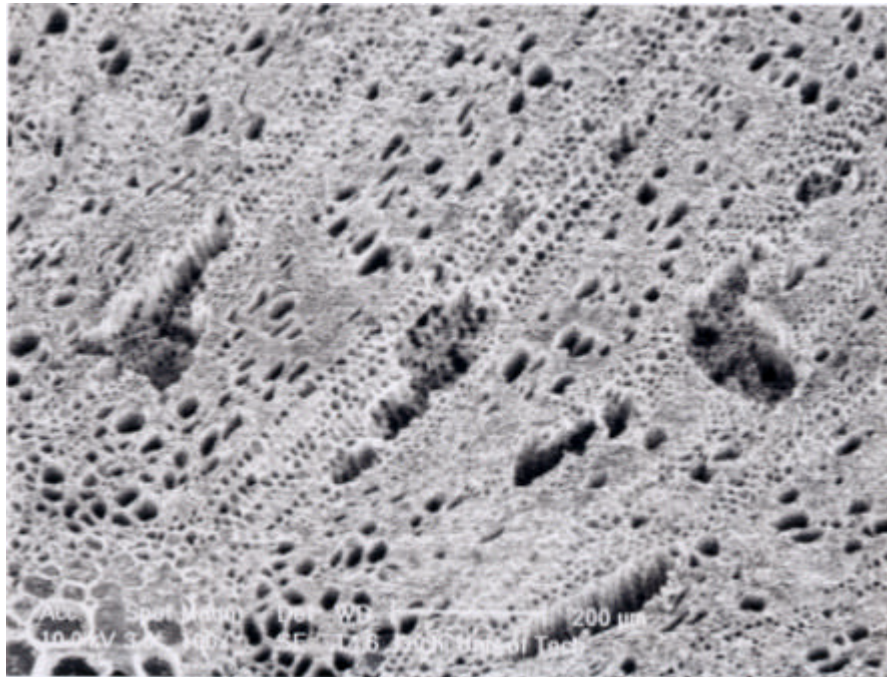


図 1 7 セイタカアワダチソウ加工結果 (放電加工油 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

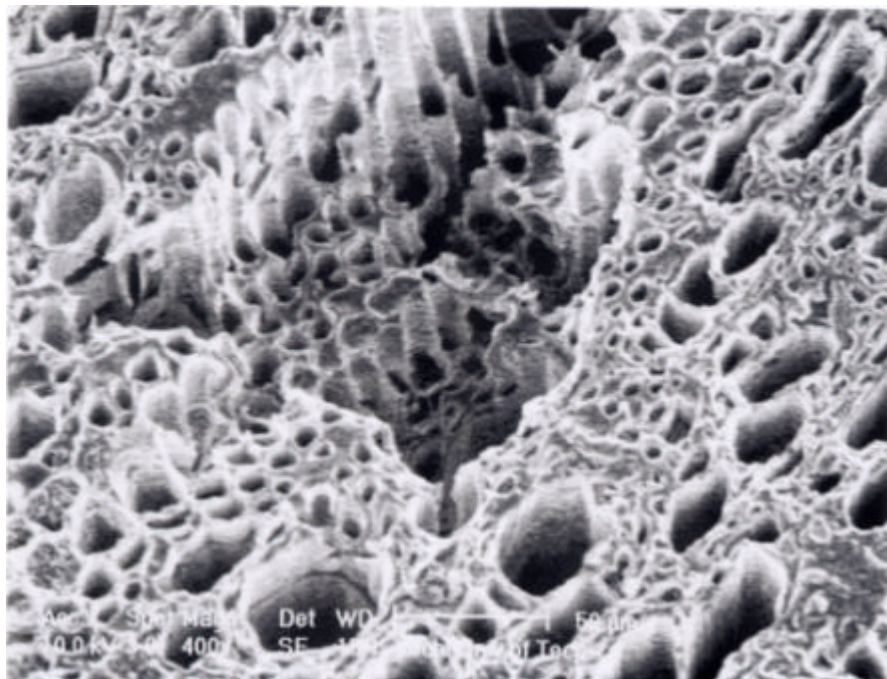


図 1 8 セイタカアワダチソウ加工結果 (放電加工油 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

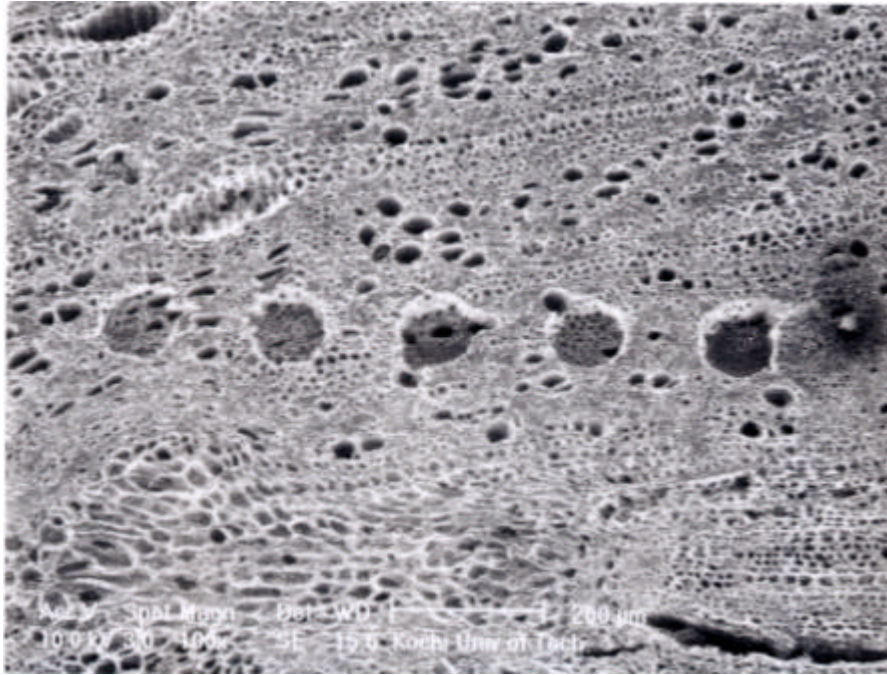


図 1 9 セイタカアワダチソウ加工結果 (放電加工油 コンデンサ容量 1 0 p F)

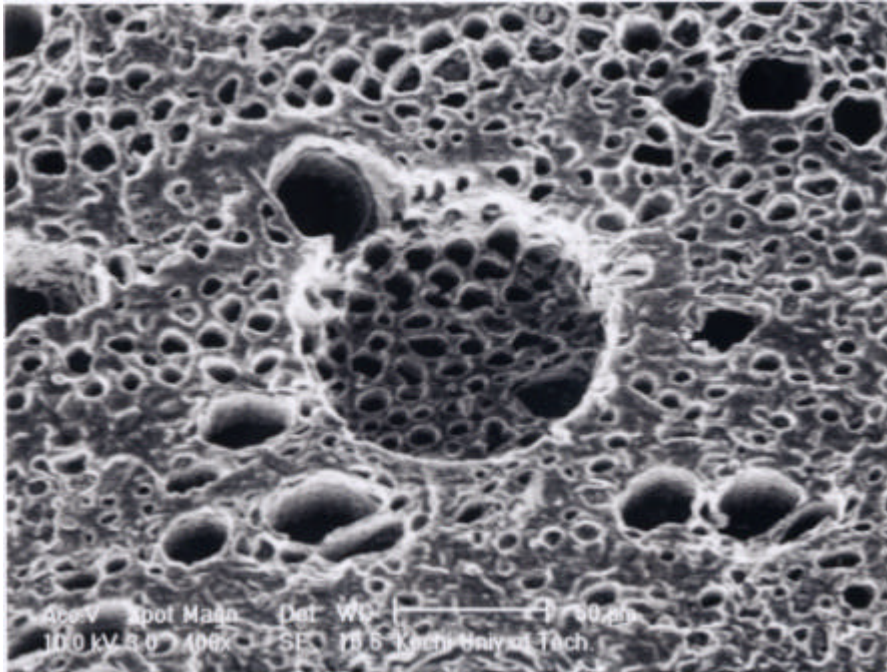


図 2 0 セイタカアワダチソウ加工結果 (放電加工油 コンデンサ容量 1 0 p F)

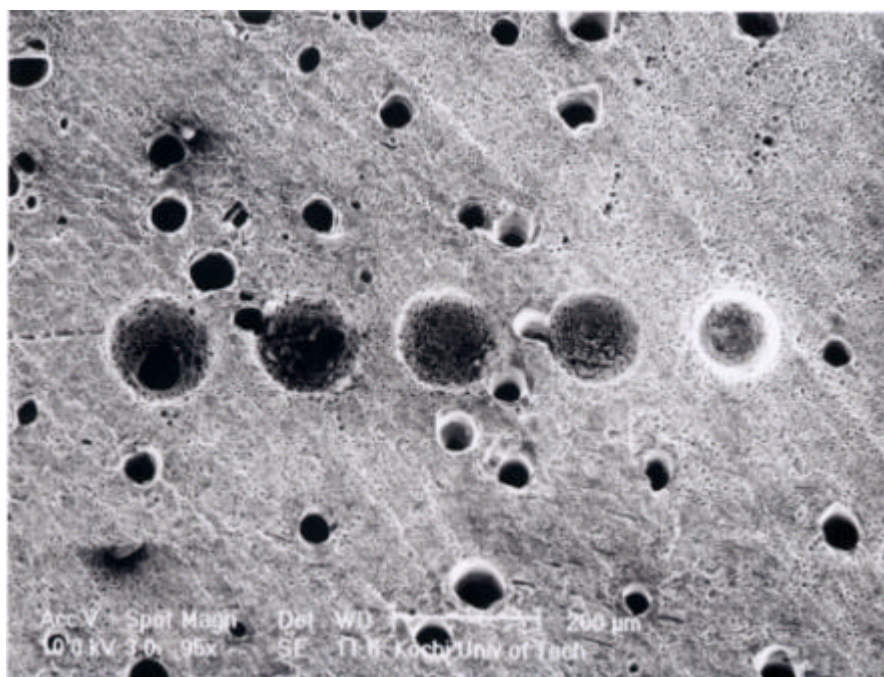


図 2 1 リグナムパイタ加工結果 (純水 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

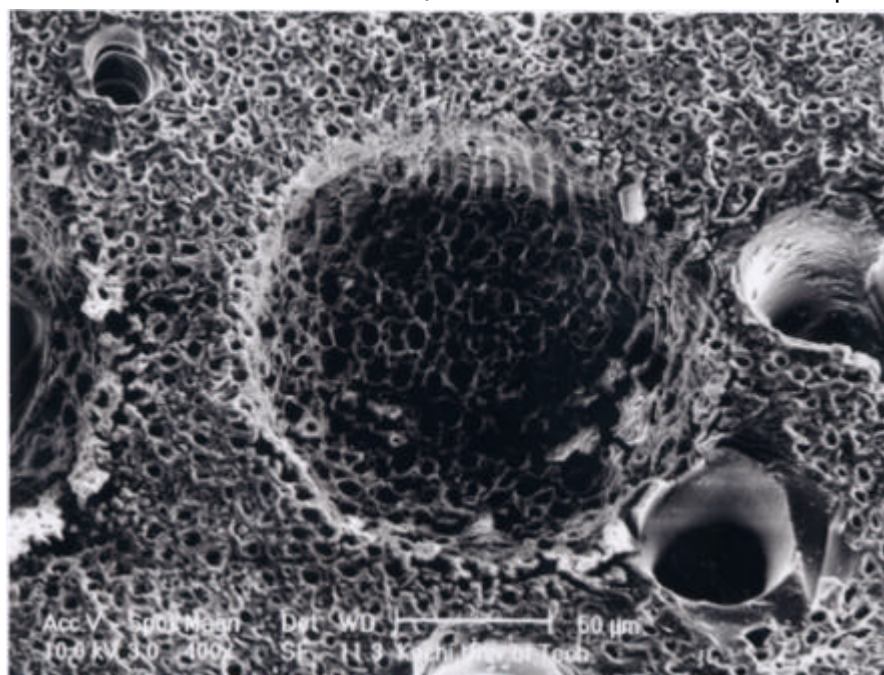


図 2 2 リグナムパイタ加工結果 (純水 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

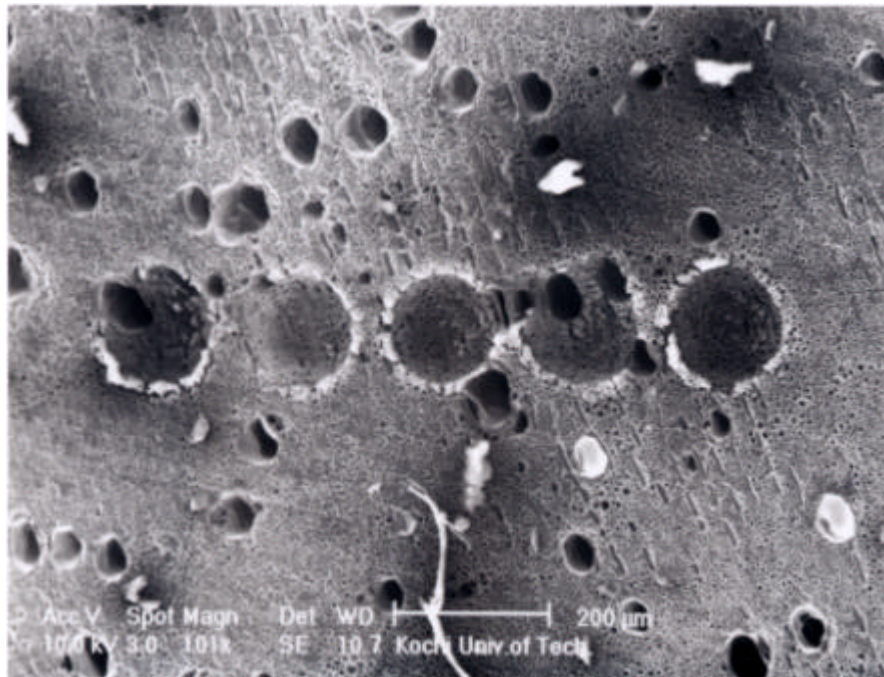


図 2 3 リグナムバイタ加工結果 (純水 コンデンサ容量 10 pF)

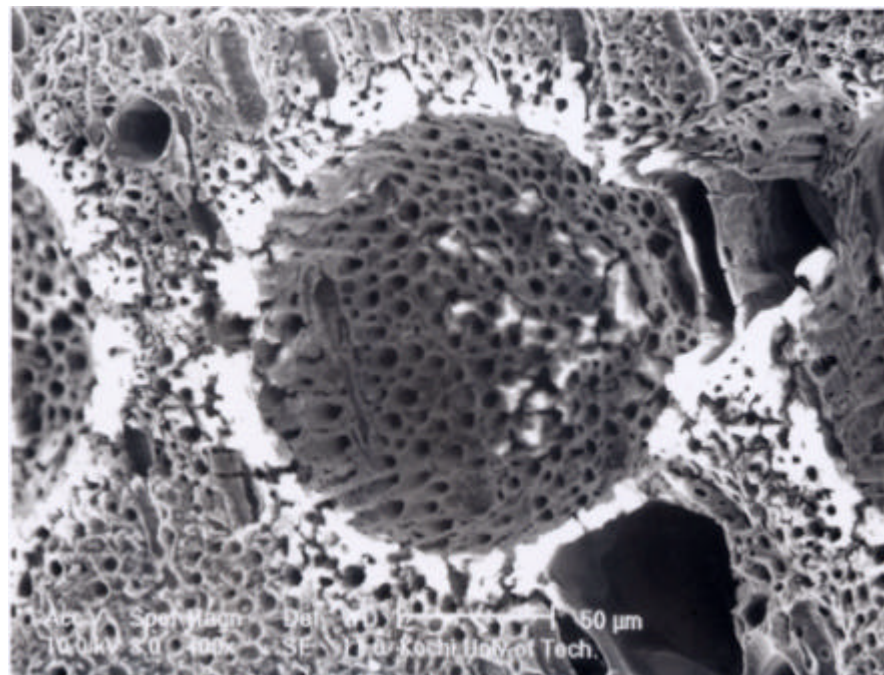


図 2 4 リグナムバイタ加工結果 (純水 コンデンサ容量 10 pF)

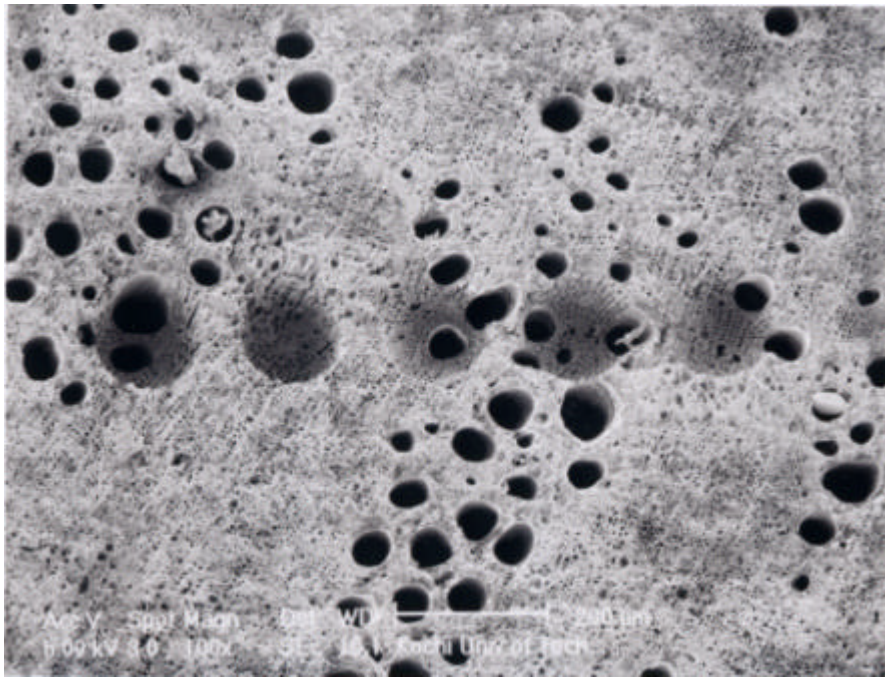


図 2 5 ウバメガシ加工結果 (純水 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

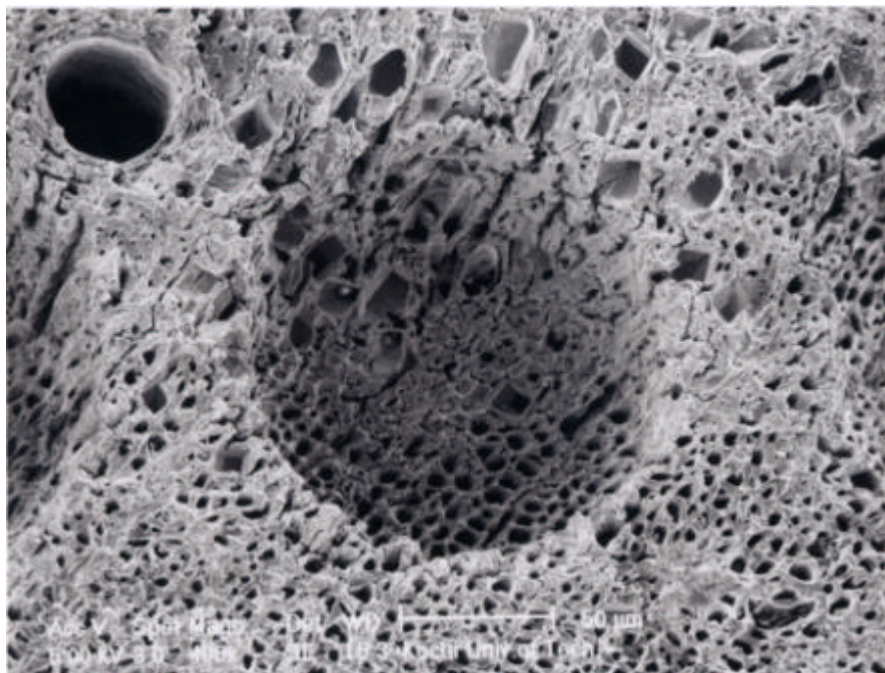


図 2 6 ウバメガシ加工結果 (純水 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

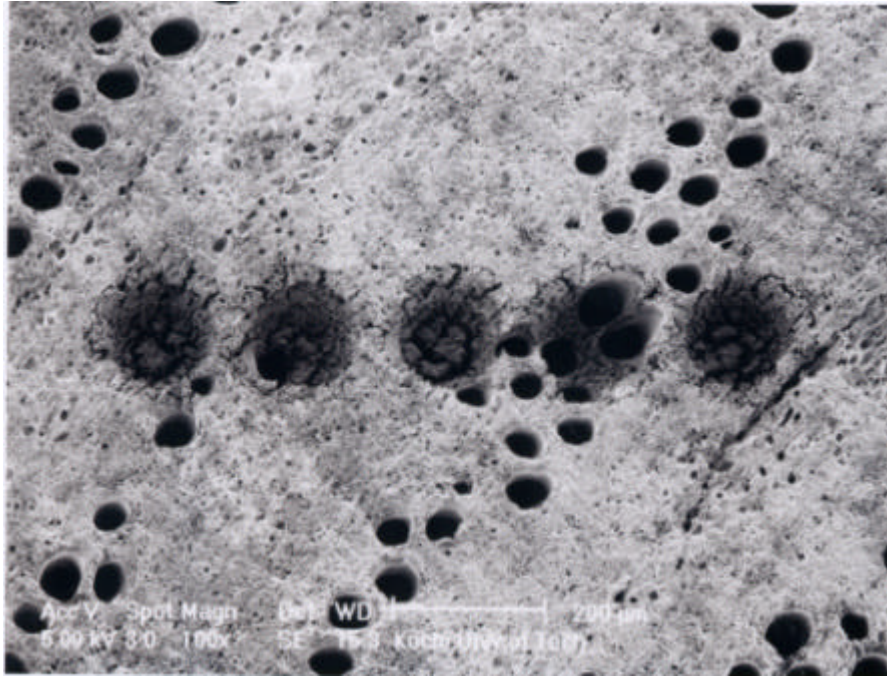


図 2 7 ウバメガシ加工結果 (純水 コンデンサ容量 1 0 p F)

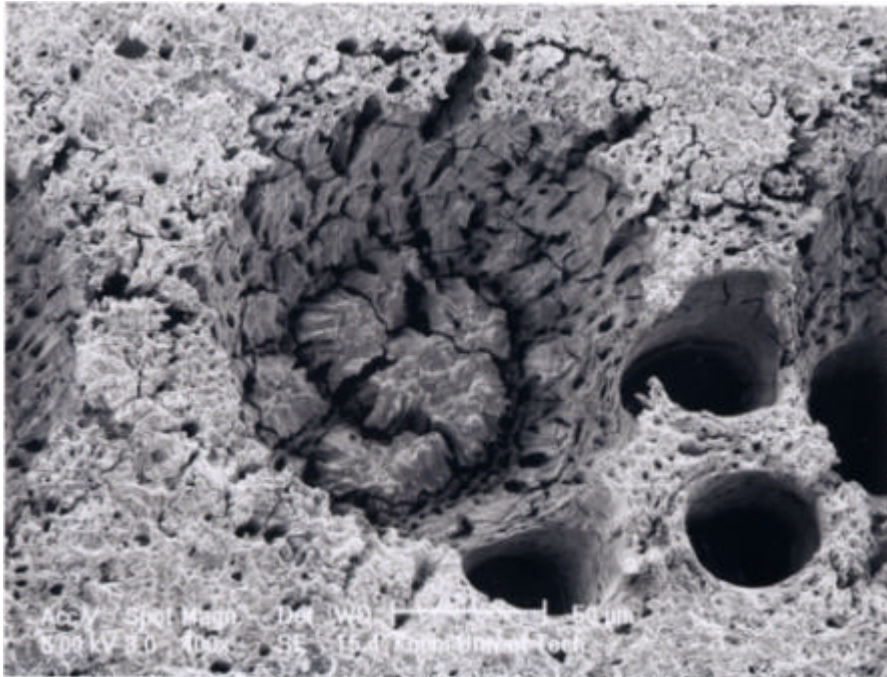


図 2 8 ウバメガシ加工結果 (純水 コンデンサ容量 1 0 p F)

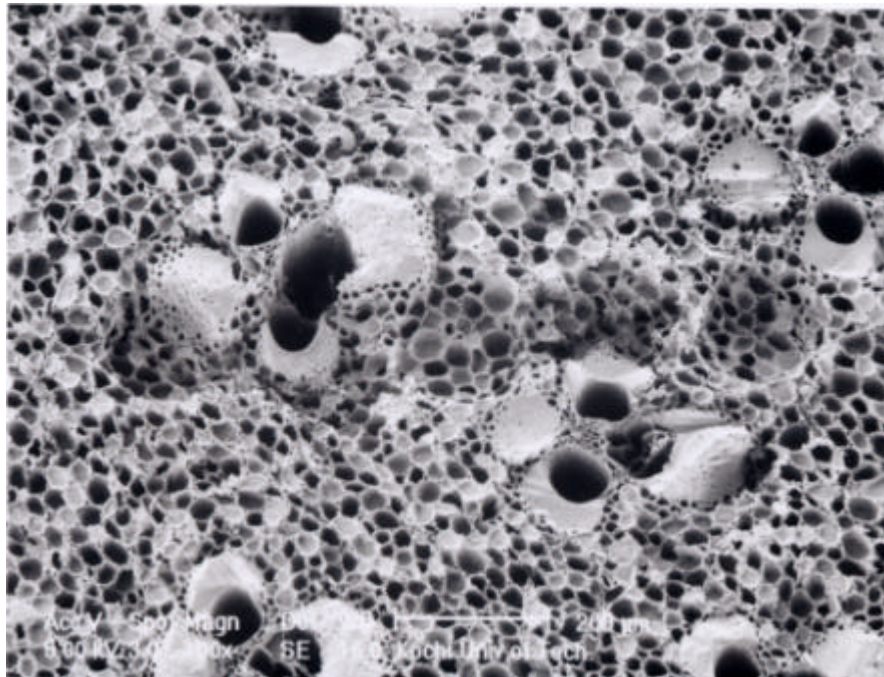


図 2 9 タケ加工結果 (純水 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

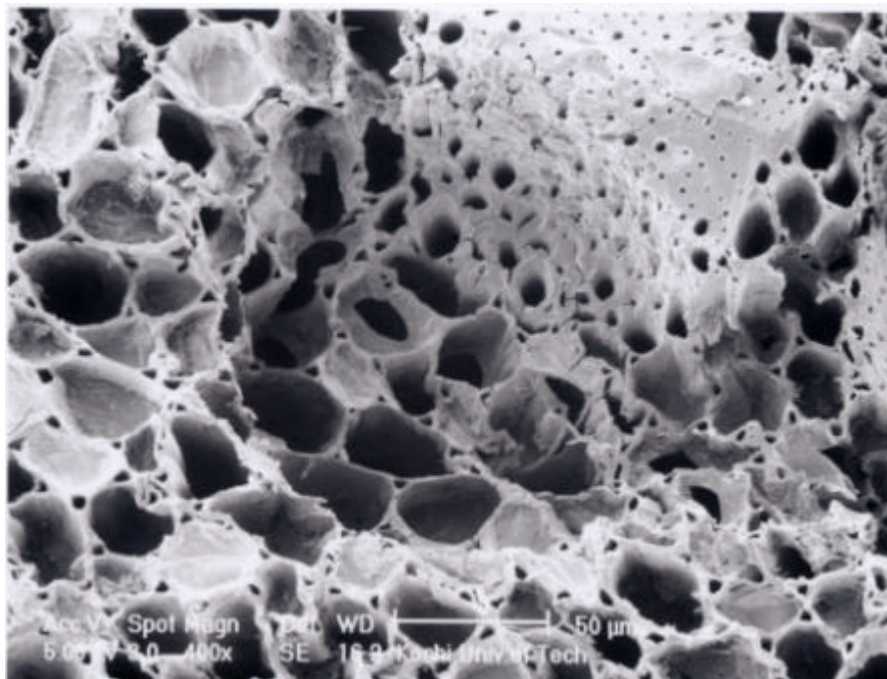


図 3 0 タケ加工結果 (純水 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

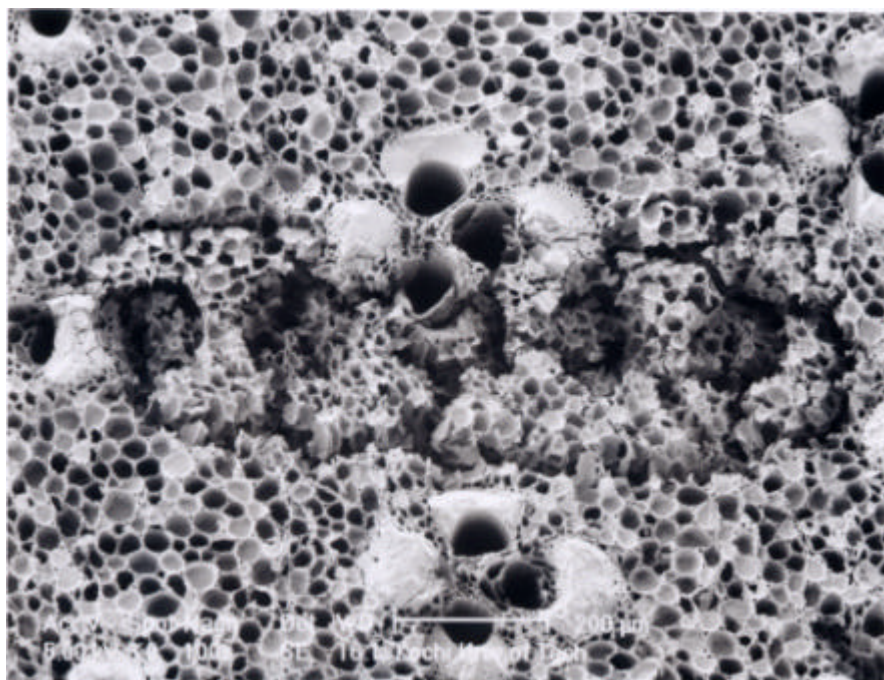


図 3 1 タケ加工結果 (純水 コンデンサ容量 1 0 p F)

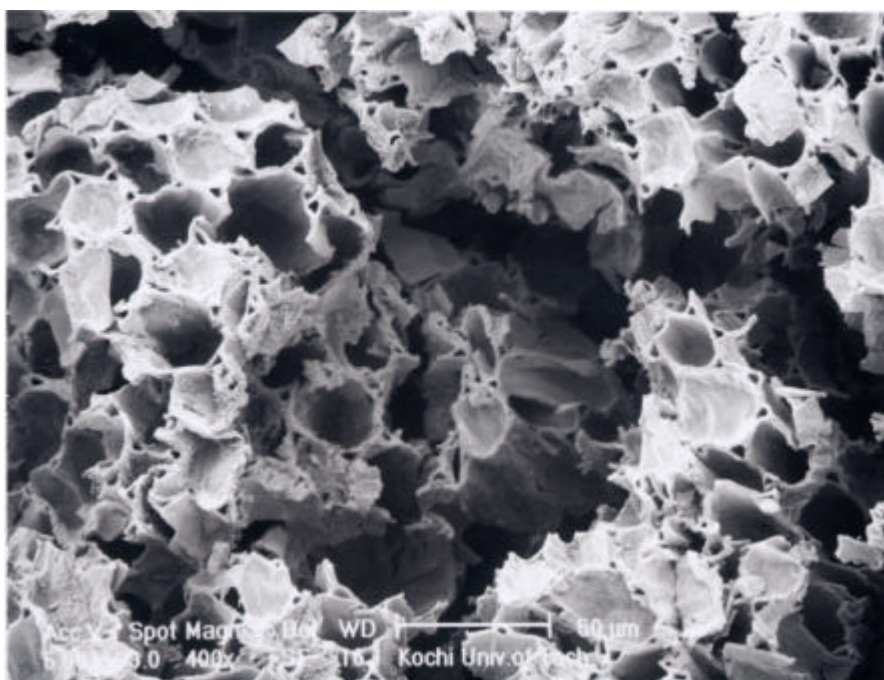


図 3 2 タケ加工結果 (純水 コンデンサ容量 1 0 p F)

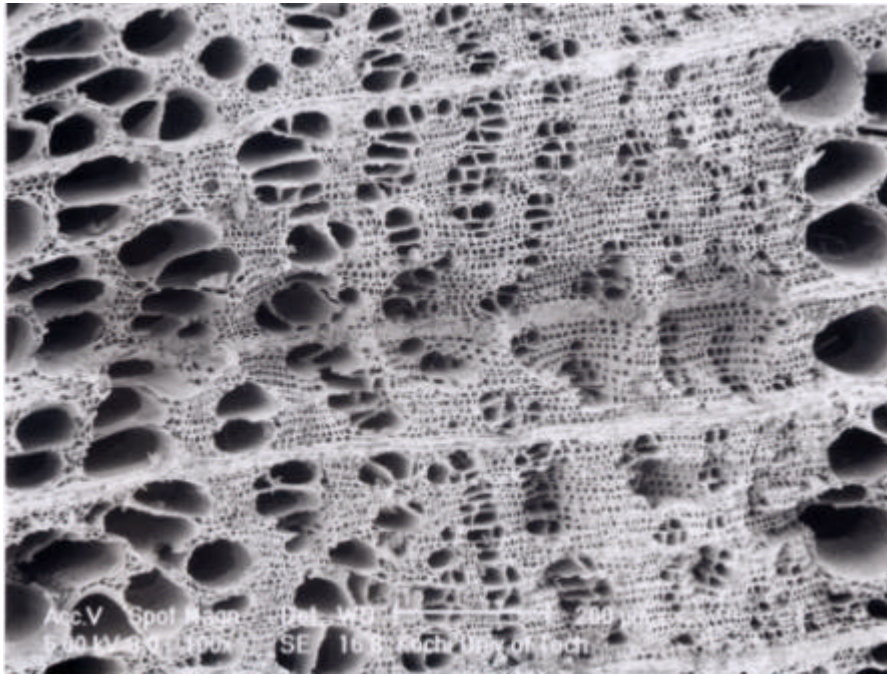


図 3 3 スギ加工結果 (純水 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

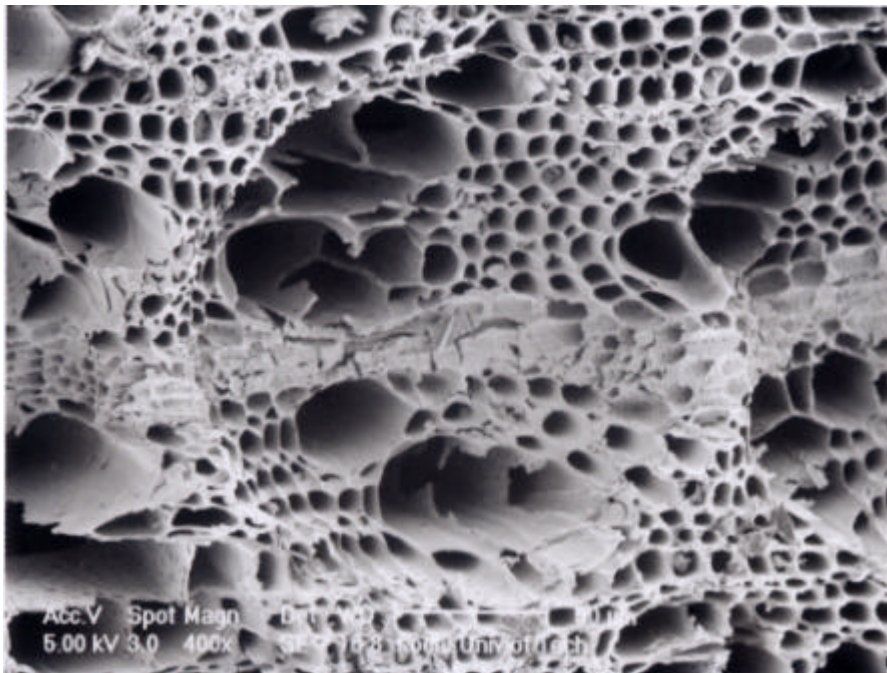


図 3 4 スギ加工結果 (純水 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

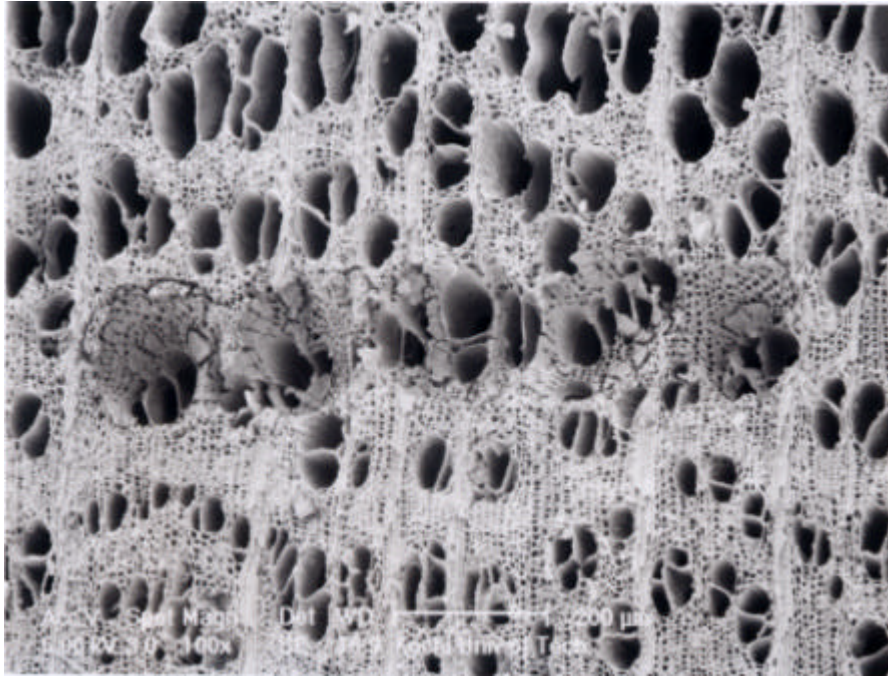


図35 スギ加工結果（純水 コンデンサ容量10 pF）

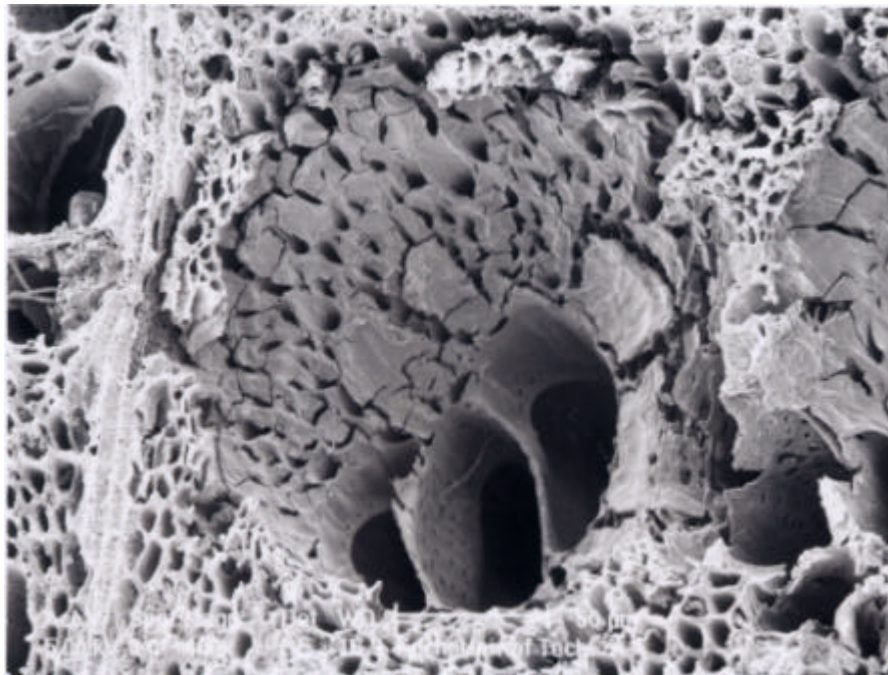


図36 スギ加工結果（純水 コンデンサ容量10 pF）

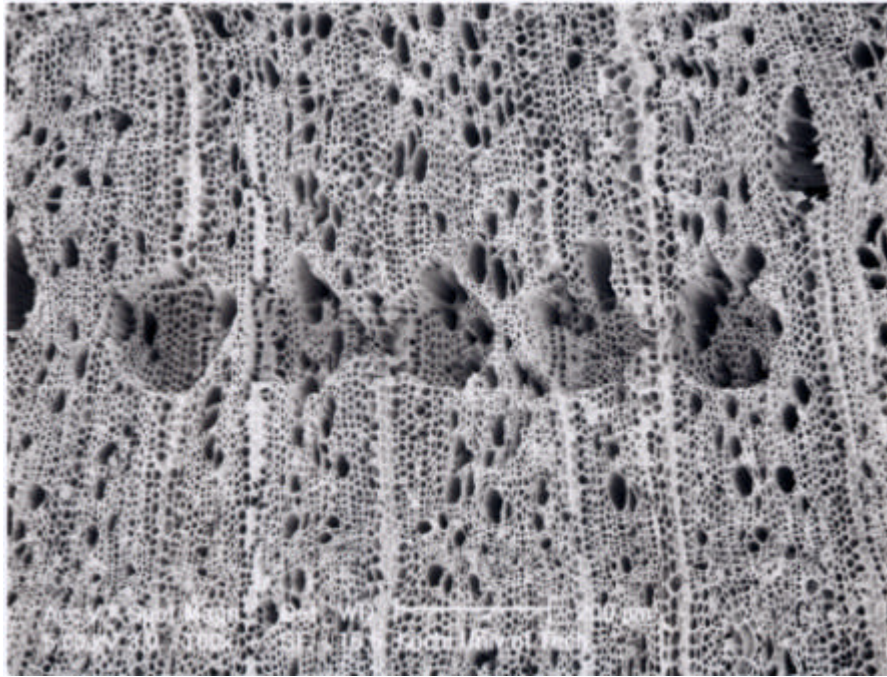


図37 セイタカアワダチソウ加工結果（純水 コンデンサ容量3300 pF）

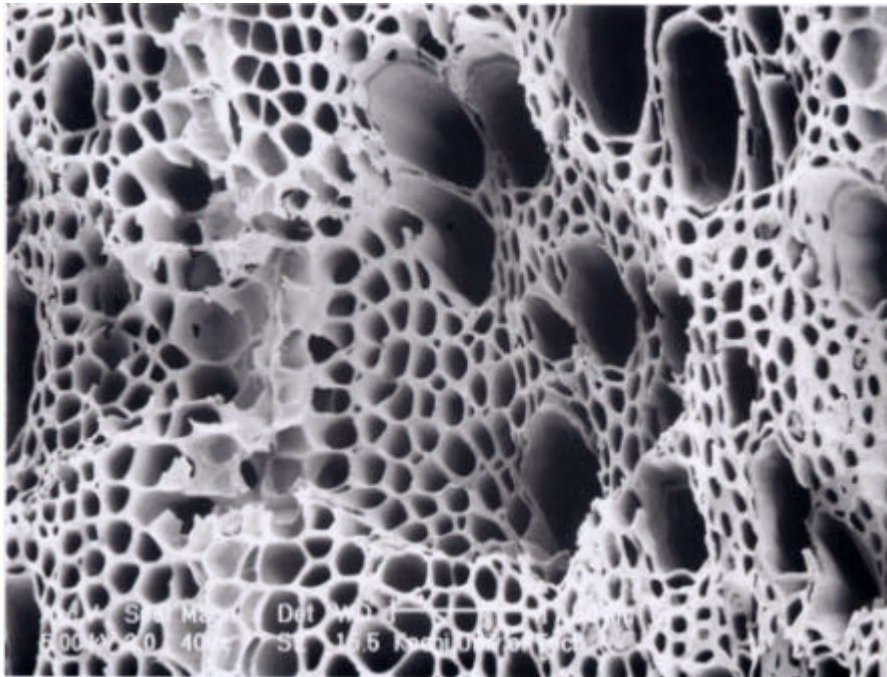


図38 セイタカアワダチソウ加工結果（純水 コンデンサ容量3300 pF）

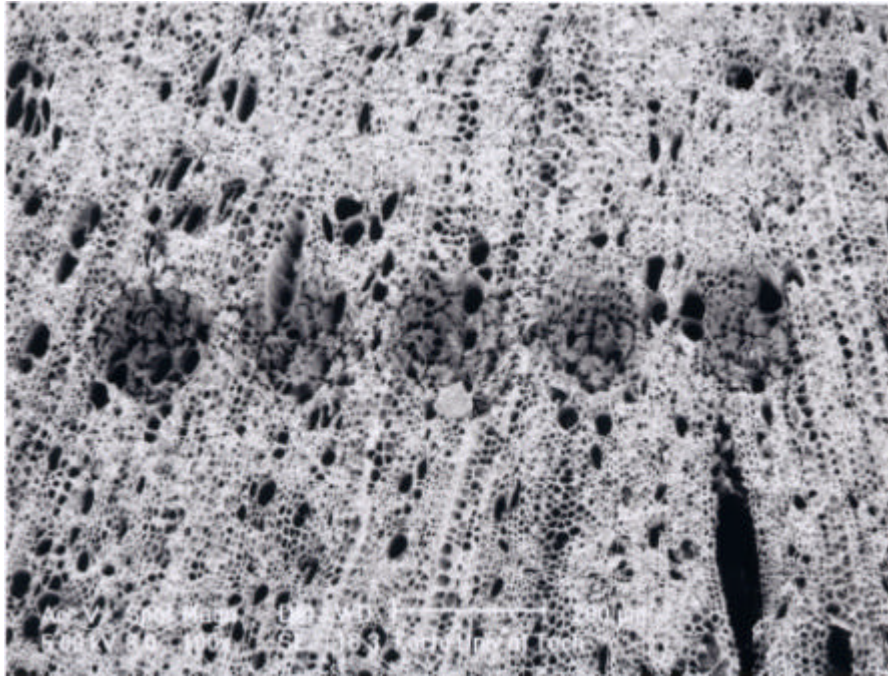


図39 セイタカアワダチソウ加工結果（純水 コンデンサ容量10 pF）

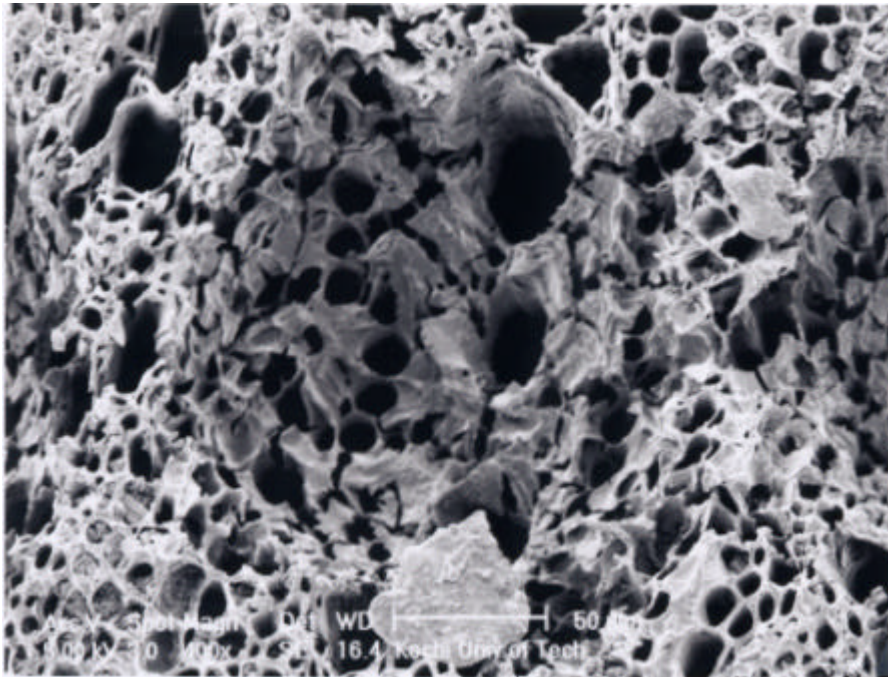


図40 セイタカアワダチソウ加工結果（純水 コンデンサ容量10 pF）

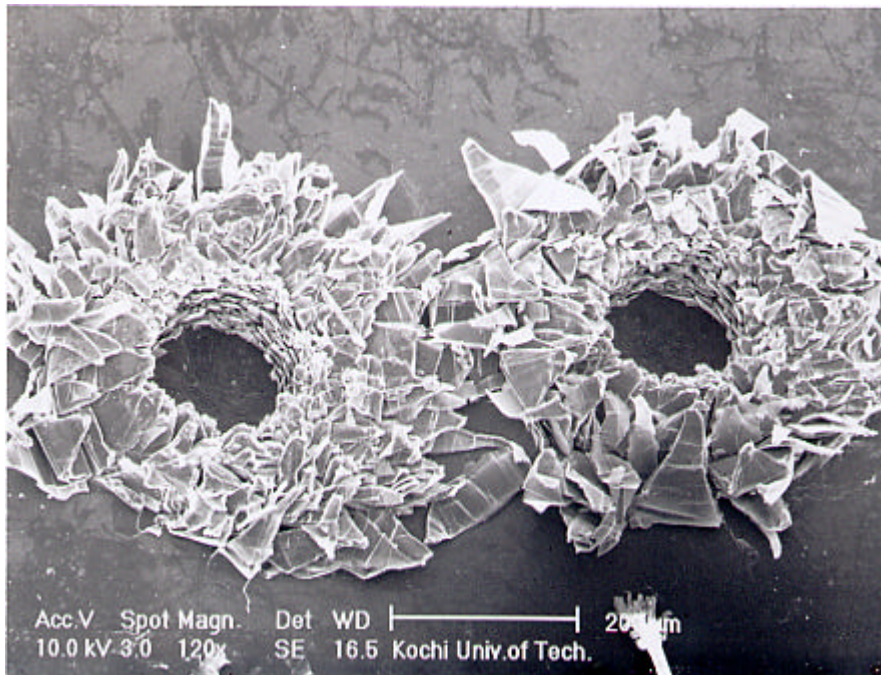


図 4 1 高配向性グラファイト加工結果 (放電加工油 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

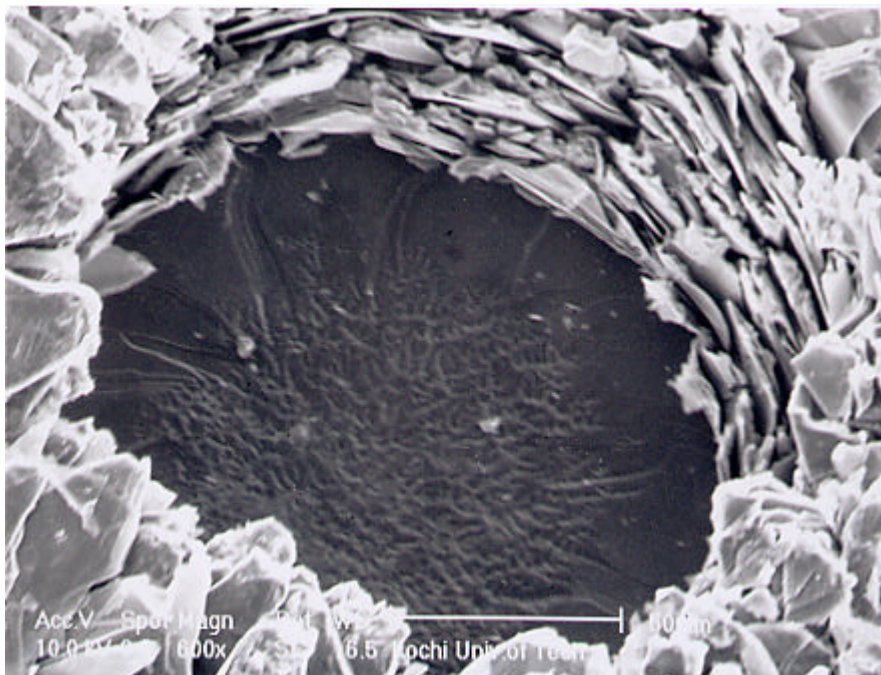


図 4 2 高配向性グラファイト加工結果 (放電加工油 コンデンサ容量 3 3 0 0 p F)

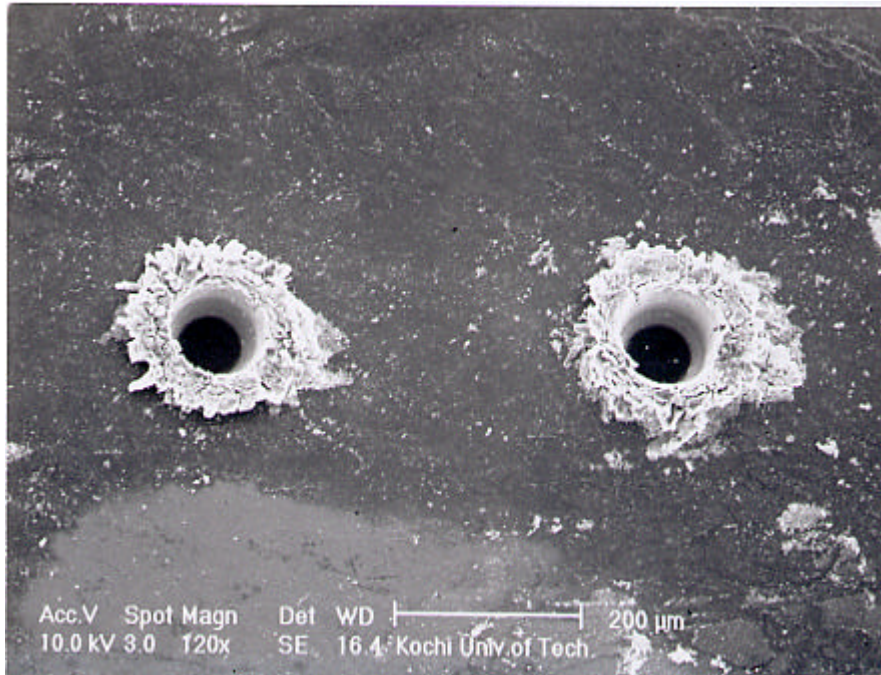


図 4 3 高配向性グラファイト加工結果（放電加工油 コンデンサ容量 1 0 p F ）

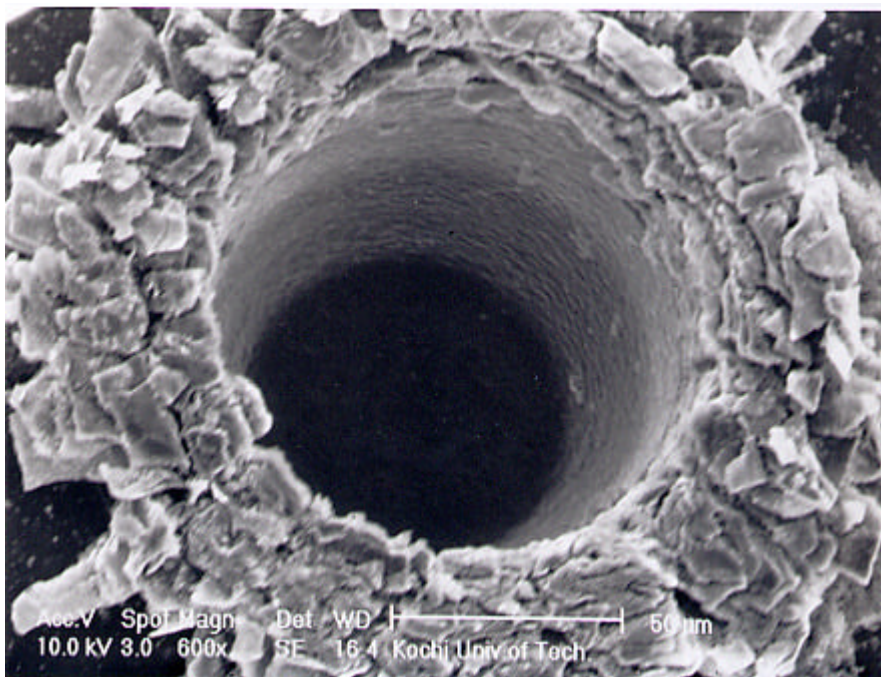


図 4 4 高配向性グラファイト加工結果（放電加工油 コンデンサ容量 1 0 p F ）