

博士論文

透明体電極を用いた放電加工現象の解明

北村 朋生

平成 26 年度 博士学位論文



透明体電極を用いた放電加工現象の解明
**Clarification of EDM Gap Phenomena Using
Transparent Electrodes**

指導教員 国枝 正典 教授

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻

北村 朋生

Clarification of EDM Gap Phenomena Using Transparent Electrodes

Tomoo KITAMURA

This paper describes the observation of EDM gap phenomena through a transparent electrode from the direction normal to the machining surface using a high-speed video camera. In electrical discharge machining (EDM), electrical discharge occurs at a high frequency between the tool electrode and workpiece in dielectric fluids such as oil. Although EDM is widely applied for making molds and dies, machining difficult-to-cut materials, and micro machining, many phenomena remain unclear and need to be clarified in order to improve the processing characteristics of EDM. However, gap phenomena are difficult to observe because electrical discharge occurs in a very narrow gap space between the electrodes filled with liquid, and because the duration of each pulse discharge is significantly short. To resolve this problem, use of transparent electrodes is considered the most effective solution, because it enables direct observation of these gap phenomena. Pure SiC single crystal is colorless and transparent, and its electrical conductivity is almost zero. Increasing the impurity concentration however increases electrical conductivity while decreasing transparency. Hence, the SiC single crystal semiconductor was used as the electrode material because it has a sufficiently high electrical conductivity to be machined by EDM and optical transparency enabling the direct observation.

In consecutive pulse discharges, the proportion of area occupied by bubbles over the working surface was obtained. In addition, the atmosphere in which discharge may occur was clarified, and the correlation between the locations of subsequent discharges was investigated. It was found that more than 70% of the working surface was occupied by bubbles after a few hundred pulse discharges from the start of machining. And it was found that electrical discharges occur not only in liquid but also in bubble and at the interface between liquid and bubble. The probability of discharge occurrence per unit area at the boundary of bubbles is highest. This is based on the fact that debris particles generated by discharge are mostly concentrated at the boundary of bubbles. Moreover it was found that the distribution of discharge locations is not random even when machining is stable. The probability of discharge occurrence through debris particles located at the boundary of the bubble generated by the last discharge was highest.

Next, using transparent electrodes made of SiC or Ga₂O₃ single crystal, expansion of plasma in the EDM gap was observed using a high speed video camera. The image of the discharge spot showed a brown area at the center and blue area in the circumferential area, corresponding to the molten region in the transparent electrode and the plasma region, respectively. It was found that plasma diameter expands within a few microseconds after dielectric breakdown and the plasma diameter is much larger than the discharge crater. From the measured diameter of the crater, the heat source diameter was obtained by solving the inverse problem of heat conduction analysis, and it was found that the heat

source diameter is smaller than the plasma diameter but larger than the crater diameter.

On the other hand, it is known that the material removal rate of EDM with deionized water is higher than that with oil. To clarify the reason, the removal volume of single pulse discharge was measured for both working fluids. Then, the arc plasma temperature both in oil and water was measured to investigate its influence on the material removal volume. It was found that removal volumes of single pulse discharge generated in oil and in deionized water are almost equivalent. This is because, temperatures of arc plasma generated in oil and in deionized water area equivalent. Next, the stability of consecutive discharges both in oil and water was investigated. Especially, the correlation between discharge locations of consecutive discharges were investigated. It was found that the distribution of discharge locations generated in deionized water is more dispersed compared with in oil. This result indicates that the stability of EDM in deionized water is higher than that in oil. Hence, it is considered that the cooling performance of deionized water is higher than that of oil.

目次

第 1 章 序論	1
1.1 放電加工.....	1
1.2 放電加工の加工原理.....	3
1.2.1 アーク放電の発生.....	3
1.2.2 放電痕の形成と気泡の発生.....	3
1.2.3 絶縁回復.....	4
1.3 加工液の役割.....	6
1.4 放電回路と放電波形.....	8
1.5 サーボ送り制御.....	10
1.6 放電加工間隙の可視化がもたらす現象解明.....	12
1.6.1 気泡挙動に関する研究の動向.....	12
1.6.2 放電点分布に関する研究の動向.....	16
1.6.3 アークプラズマに関する研究の動向.....	19
1.6.4 油と水加工液の加工特性の比較に関する研究の動向.....	22
1.6.5 これまでの放電加工モデルと先行研究による予測モデル.....	25
1.7 透明体電極.....	28
1.8 本研究の目的と本論文の構成.....	30
第 2 章 透明体電極を用いた連続放電現象の解明	35
2.1 はじめに.....	35
2.2 連続放電加工中の極間現象の観察.....	36
2.2.1 実験装置.....	36
2.2.2 実験方法.....	39
2.2.3 連続放電の極間現象の観察結果.....	40
2.2.4 極間を占める気泡の割合と放電の発生する雰囲気.....	45
2.2.5 パルス列前後の放電点発生間距離の相関.....	53
2.3 フラッシングが加工現象に及ぼす影響.....	65
2.3.1 ノズルによる噴射法.....	65
2.3.1.1 実験方法.....	65
2.3.1.2 ノズル噴射法を用いた場合の極間現象の観察結果.....	66
2.3.2 工具電極穴による噴流法.....	69
2.3.2.1 実験方法.....	69

2.3.2.2 工具電極穴による噴流法を用いた場合の極間現象の観察結果.....	70
2.3.3 電極ジャンプ法による噴流法.....	72
2.3.3.1 実験方法.....	72
2.3.3.2 電極ジャンプ法を用いた場合の極間現象の観察結果.....	73
2.4 透明体電極を用いることによる可視化への影響.....	79
第 2 章 まとめ.....	81
第 3 章 単発放電現象の解明.....	83
3.1 はじめに.....	83
3.2 単発放電による気泡の生成と加工くず飛散現象の観察.....	84
3.2.1 実験方法.....	84
3.2.2 単発放電の観察結果.....	85
3.3 単発放電現象の拡大観察.....	90
3.3.1 実験装置.....	90
3.3.2 電極極性が放電現象に及ぼす影響.....	91
3.3.2.1 実験方法.....	91
3.3.2.2 観察結果.....	92
3.3.3 透明体電極の分光透過率.....	94
3.3.3.1 実験方法.....	95
3.3.3.2 実験結果.....	96
3.3.4 アークプラズマの観察.....	97
3.3.4.1 実験方法.....	98
3.3.4.2 アークプラズマの観察結果.....	99
3.3.5 溶融域外周の発光領域の温度測定.....	102
3.3.5.1 分光測定原理.....	102
3.3.5.2 実験方法.....	104
3.3.5.3 実験結果.....	106
3.4 熱源直径.....	107
3.4.1 アークプラズマ直径と放電痕直径の関係.....	107
3.4.2 単発放電の熱伝導解析.....	109
3.4.2.1 解析モデルと解析手順.....	110
3.4.2.2 材料中の温度場の解析結果.....	113
3.4.3 プラズマ中の熱流束分布.....	116
3.5 透明体電極を用いることによる可視化への影響.....	120
第 3 章 まとめ.....	121

第 4 章 油と水加工液が加工速度に及ぼす影響の観察	123
4.1 はじめに.....	123
4.2 単発放電除去量の違い.....	125
4.2.1 油中と水中の単発放電除去量の比較.....	125
4.2.1.1 実験方法.....	125
4.2.1.2 油中と水中の単発放電除去量の比較.....	127
4.2.2 油中と水中におけるアークプラズマ温度の比較.....	128
4.2.2.1 実験方法.....	128
4.2.2.2 油中と水中におけるアークプラズマの温度の比較.....	128
4.3 気泡発生量と放電の発生雰囲気の違い.....	130
4.3.1 単発放電による気泡量の比較.....	130
4.3.1.1 実験方法.....	130
4.3.1.2 油中と水中における単発放電の気泡量の比較.....	131
4.3.2 連続放電による気泡量と放電発生雰囲気の違い.....	133
4.3.2.1 実験方法.....	133
4.3.2.2 実験結果.....	134
4.4 加工の安定性.....	137
4.4.1 油中と水中の加工速度の比較.....	137
4.4.1.1 実験方法.....	137
4.4.1.2 実験結果.....	138
4.4.2 油中と水中におけるパルス列前後の放電発生間距離の相関の比較.....	141
4.4.2.1 実験方法.....	141
4.4.2.2 実験結果.....	142
4.4.3 気泡の挙動が加工安定性に及ぼす影響.....	145
4.5 加工液の粘性が気泡挙動に及ぼす影響.....	146
4.5.1 気液二相流の非圧縮性粘性流体解析.....	146
4.5.1.1 解析方法.....	146
4.5.1.2 解析結果.....	147
4.5.2 圧縮性粘性流体解析.....	153
4.5.2.1 極間の圧力波の伝播.....	153
4.5.2.2 解析方法.....	155
4.5.2.3 解析結果.....	156
第 4 章 まとめ.....	159

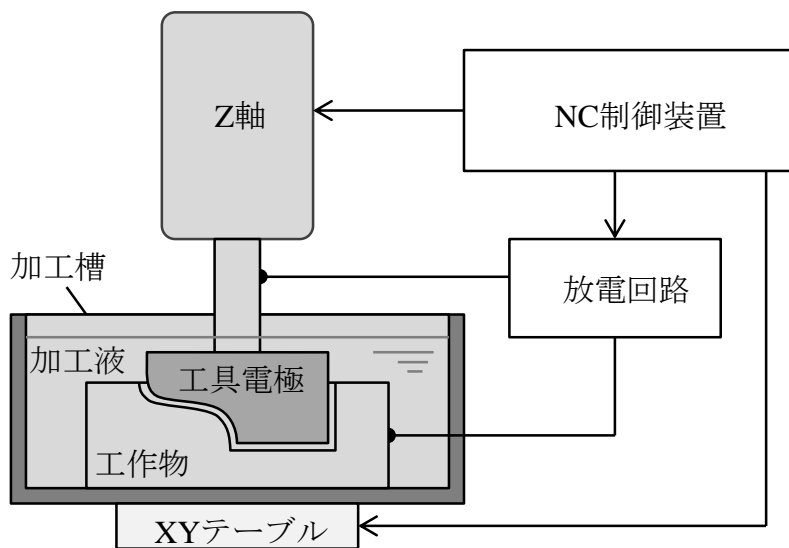
第 5 章 結論.....	161
参考文献.....	169
謝辞.....	173
本研究に関して発表した論文リスト.....	175

第1章 序論

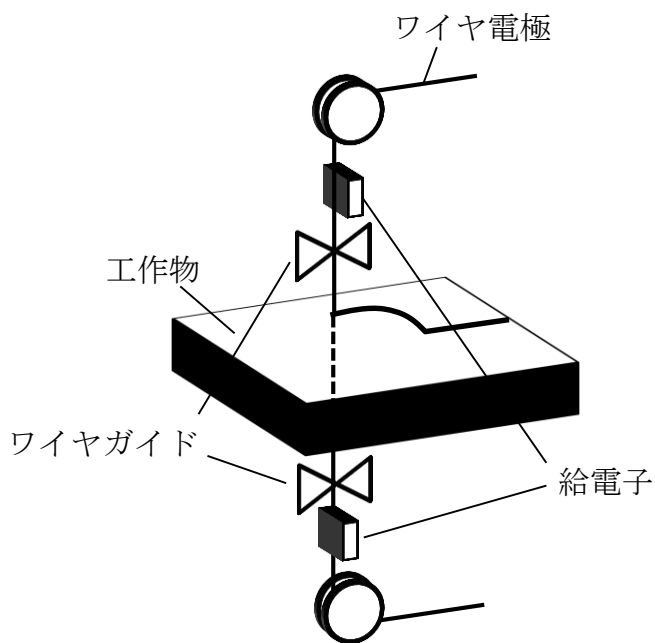
1.1 放電加工¹⁾²⁾

放電加工とは、油や脱イオン水等の絶縁性の加工液中で、工具電極と工作物を数マイクロ～数十マイクロメートルという狭い距離を隔てて対向させ、両者の間にパルス状の電圧を印加することによってアーク放電を生じさせ、この放電のエネルギーの熱的作用によって、工作物を微量ずつ溶融、あるいは蒸発させ除去する熱加工法である。一発の放電により工作物の加工面上に放電痕と呼ばれるクレータ状の溶融除去部が生じ、この放電を一秒間の間に数千から数万回の頻度で繰り返し生じさせることで、放電痕の累積によって加工が進行していく。なお、工作物と同様に工具電極面上にも放電痕が形成され、除去される。従って、工具電極は、加工中に消耗する。放電加工には、加工形態から分類して形彫り放電加工とワイヤ放電加工がある。形彫り放電加工は、図 1.1 (a) に示すように、切削などで成形した銅やグラファイトの総形工具電極の形状を転写するか、あるいは単純形状の工具電極を三次元的に動かして形状を創成する。一方、ワイヤ放電加工は、図 1.1 (b) に示すように、直径 0.03～0.3mm の黄銅、あるいは細径の場合はタングステンからなるワイヤを工具電極として、糸鋸のようにして所望の形状を切り抜く加工である。加工中はボビンから常に一定速度で新しいワイヤ電極が供給されるために、放電によるワイヤの電極消耗は無視できる。

放電加工の特徴は、熱的な加工であるために、導電性のある材料ならば、硬さによらずに加工できるという点である。そのため例えば、機械加工が困難な、焼入れ鋼、ステンレス鋼、チタン合金、超硬合金などが加工可能である。また、非接触加工であるため、機械加工に比べて加工反力が非常に小さいという特徴がある。さらに、加工可能な形状に制限が少ないことも大きな特徴である。従って、硬い材料に対して、溝や細い深穴の加工は、機械加工では工具の剛性に限界あり困難であるが、放電加工では可能である。また、機械加工と異なり工具を回転させる必要が無いため、アールの非常に小さいポケットの角部や異形状を容易に加工できる。そのため、用途としては高付加価値の加工、特に金型の製作や高アスペクト比の微細穴加工等に広く用いられている。



(a) 形彫り放電加工



(b) ワイヤ放電加工

図 1.1 放電加工

1.2 放電加工の加工原理

前節で述べたように放電加工は、毎秒数千から数万回の頻度で放電を繰り返し極間隙で発生させ、一発の放電によって工作物面上に形成されるクレータ状の放電痕の累積によって加工が進行する。この加工の進行において、極間隙では図 1.2 に示すような過程を繰り返していると考えられている。ここでは、電極間で単発放電を発生させ、その際の極間現象を対象とした研究等を参考に、放電加工の加工原理について述べる。

1.2.1 アーク放電の発生¹⁾³⁾

絶縁性の加工液中で、数マイクロ～数十マイクロメートルの距離を隔てて対向させた工具電極と工作物に 100V 程度の電圧が印加されると、極間に存在する電子と陽イオンが電界によって加速される。電子は陽極に向かって加速され、加工液の中性粒子と衝突することで、中性粒子はイオンと電子に電離される。これを衝突電離作用という。電離した電子は電界によってさらに陽極に加速され、他の中性粒子と衝突し、衝突電離の連鎖反応が始まる。一方、陽イオンは陰極に向かって加速され、高いエネルギーで陰極表面に衝突し、表面からは陽イオンのエネルギーをもらって二次電子が放出される。このようにして極間の絶縁破壊が生じる。さらに電流密度が増大すると、陽イオンの衝突によって陰極が加熱され高温となり、陰極表面からは大量の熱電子が放出されるほか、陰極表面上の電界によっても電子が放出される。これらの電子は、電界によって陽極に加速され、さらに衝突電離を繰り返し、電離度の高いプラズマが形成される。従って、アーク柱は加工液の蒸気、あるいはそれが解離して生成した分子や原子、ならびに陽極、陰極材料の原子などの中性粒子と、それらが電離することによって生じたイオン、そして電子から成っている。

1.2.2 放電痕の形成と気泡の発生

工具電極と工作物間で放電が生じると、そこに放電電流が集中してアーク柱を形成する。アーク柱に接した両電極表面は、局所的に 10^9W/m^2 という大きなパワー密度にさらされ、この電流密度の高い放電アークプラズマからの熱流束によって、陽極と陰極の材料表面が加熱され、熔融、あるいは蒸発が生じる¹⁾。さらに、蒸発して気化した材料は、体積が急激に膨張する。また、放電点近傍の加工液は、アークプラズマの熱によって蒸発、解離して体積が急激に増加する。これがアーク柱を囲んで高圧の気泡を形成し、周囲に存在する加工液の慣性や粘性に抗して膨張する。この気泡の初期圧力は数十万気圧⁴⁾にも達するといわれ、気泡は 25m/s もの速度で膨張し、放電が終了した後も膨張を続け、最終的にはアーク柱を中心に、半径数ミリメートルに達する。その後、減衰しながら膨張収縮運動を繰り返すことが知られ

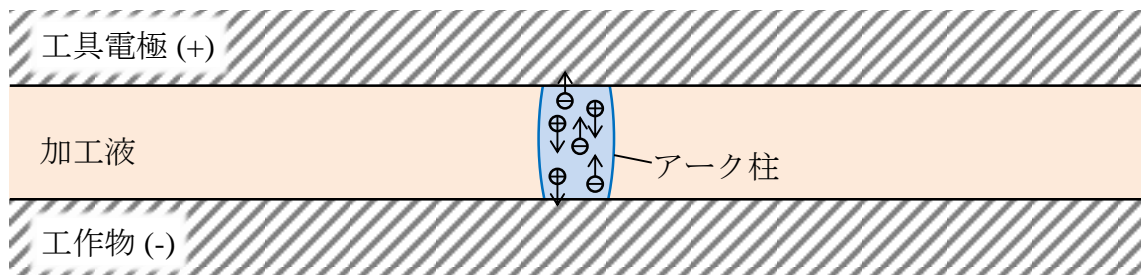
ている⁵⁾。

陽極と陰極表面の熔融金属を飛散させる力学的要因は、従来多くの推論がある。一つ目は、放電中に熔融した金属は気泡の高い圧力によって除去が抑えられている過熱状態にあり、その後の気泡圧力の低下によって大気圧下における沸点を超えた熔融領域が一挙に除去されるという過熱による除去作用⁶⁾、二つ目は、放電の熱エネルギーと気泡の高圧力によって一時は材料が高温の液体状態を保つが、その後の気泡膨張による圧力低下によって熔融部内部で沸騰するキャビテーション現象によって熔融材料を吹き飛ばされるとする説⁷⁾、三つ目は、放電のエネルギーにより金属の温度が沸点以上に急上昇することで突沸現象が起こり、熔融材料を飛散させる突沸現象による除去作用¹⁾⁸⁾、四つ目は、放電により生じた気泡の半径方向へ膨張する気泡流れが作るせん断力による除去作用¹⁾等が提唱されている。これらの現象は、加工液の存在により生じ得る除去作用であるが、Yoshida ら⁹⁾は、大気中で単発放電を行い除去が生じることを示し、その際に生じる加工くずの体積は、放電持続時間が100 μ s 以上の場合は液中で生じる放電の場合と変わらないことを実験的に明らかにし、除去は加工液が存在することによる気泡圧力の現象を伴わなくても生じ得ることを示した。さらに Yang ら¹⁰⁾は、放電痕の形成過程における熔融域の圧力と熱応力の三次元分子動力学シミュレーションを行い、電極中の圧力分布は表面に向かって圧力が小さくなる勾配を持っており、静水圧が材料表面よりも内部の方が大きいことにより、熔融領域が排出される方向に加速され、これが除去をもたらす材料移動の原動力であることを定性的に示している。

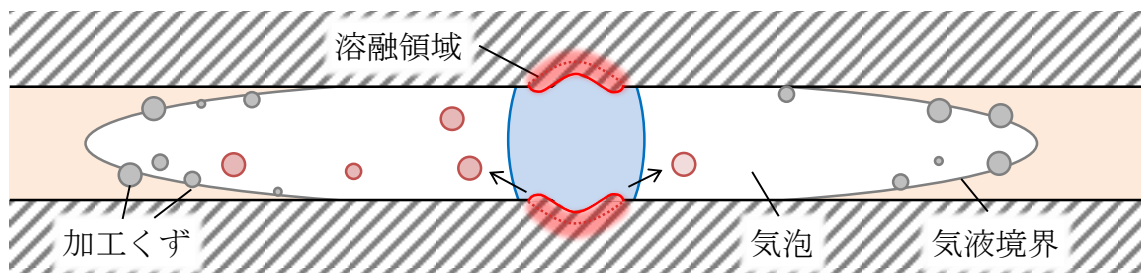
一発の放電で材料表面に形成される放電痕は図 1.3 に示すようになっており、放電のエネルギーや放電持続時間に応じて、直径は数マイクロメートルから数百マイクロメートルほどの微小な放電痕が形成される。放電の熱流束により熔融した部分が、完全に除去されることは稀で、残留した熔融部は再凝固して、放電痕の表面や周りに盛り上がりとなって変質層として形成される。熔融し放電点から飛散・除去された材料は、表面張力により球状となって凝固し、加工くずとなる。加工くずは、加工液中を漂い、加工液の噴流や工具電極のジャンプ動作制御等によって極間外へ排出される。

1.2.3 絶縁回復¹⁾

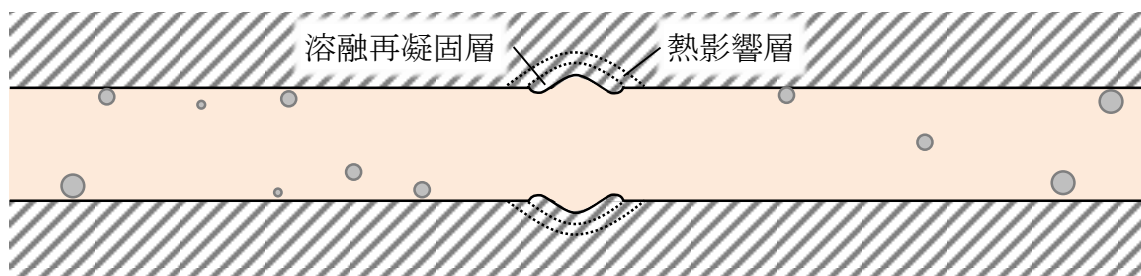
放電をパルス状に生じさせ、放電点を分散させることは、放電加工を安定して進行するために本質的に重要なことである。仮に放電をパルス化せずに、電極間に電圧を印加したまま連続して放電させた場合、最初に発生した放電の放電点の温度がいつまでも下がらないために絶縁が回復せず、放電点が他の箇所に移動しない。従って、工具電極形状が転写できないばかりか、一箇所に放電が集中して大きな熱的ダメージを残すだけの結果となる。そこで放電をパルス化し、エネルギーの供給を停止する。これにより、放電点の温度が低下し、陽イオンと電子が再結合することで導電率が低下し、プラズマが消沈して極間の絶縁が回復する。そして、極間の絶縁が回復した頃に再び電圧を印加する。次の放電が同じ位置に生じる確率は小さく、放電点が他の場所に分散し、加工を安定して進めることができる。



(a) アーク放電の発生



(b) 放電痕の形成と気泡の発生



(c) 放電の終了と絶縁回復

図 1.2 極間現象のモデル図

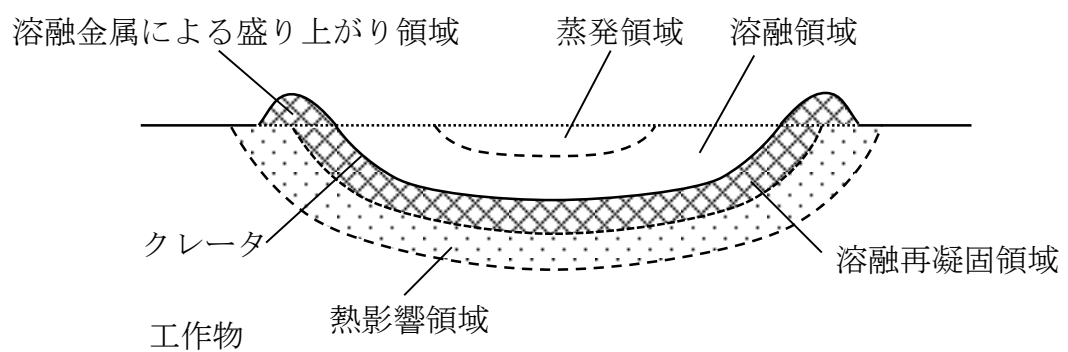


図 1.3 放電痕の断面の概略

1.3 加工液の役割

放電加工を安定して行うためには、熔融金属が工作物母材から除去された際にそれらを瞬時に冷却し加工面への加工くずの付着を防止する加工くず付着防止作用¹¹⁾、極間に漂う加工くずを極間外に排出する排出作用、アークプラズマを素早く消沈させて極間を再び絶縁状態にする冷却作用¹²⁾が必要である。加工液は、これらの役割を担っており、放電加工にとって加工液は必要不可欠なものと考えられている。以下に、加工液が果たす役割について述べる。

(a) 加工くずの付着防止作用

放電の熱流束により熔融した金属は、非常に高温の状態です融融部から飛散する。吉田ら¹³⁾は、気中で放電を行った際に、溶けた加工くずが飛散し加工面に再付着している様子を観察した。そのため、飛散した熔融金属が瞬時に冷却されなければ、せっかく除去された加工くずが凝固する前に電極面に再付着してしまい、加工くずとして排出されないために加工が進行しなくなってしまう。従って、加工液は融融部から除去された加工くずを冷却して加工面に付着することを防止する役割を担っている。

(b) 加工くずの排出作用

極間では放電により除去された加工くずが加工液中を漂っているが、その濃度が適切で加工面に均一に分散していれば放電が分散し、極間距離も広くなるため放電加工を安定して行うことができる。報告されている¹⁴⁾¹⁵⁾。すなわち、極間に加工くずが存在しなければ、極間距離が数ミクロン程度まで狭くならないと放電が生じない。極間距離が極端に狭い状態では、電極のサーボ送り制御を安定して行うことが困難となり、工具電極と工作物が直接接触して短絡を引き起こし、加工状態が不安定となる。一方、極間に適切な濃度の加工くずが存在すれば、適度な極間隙が確保され、加工状態は安定する。しかし、加工くず濃度が局所的に濃くなりすぎると放電の偏在や集中が起こり¹⁶⁾、加工速度や加工精度に悪影響を及ぼす。従って、極間の過大な加工くずは極間外に排出される必要があり、加工液はその排出作用の役割を担っている。

(c) プラズマ消沈の冷却作用と極間の絶縁回復作用

電源からアークプラズマへのエネルギー供給が遮断され放電が終了した時点で、アークプラズマを速やかに消沈させることが放電を安定して行ううえで重要である。アークプラズマの消沈は、プラズマ温度が低下し、電離したイオンと電子が再結合することによって促進されるが、プラズマの温度を低下させる冷却作用にも加工液が関与していると考えられている。また、プラズマを速やかに消沈させた後は、極間の絶縁破壊強度を高く維持する役割も加工液が担っている。

加工液は以上に示した役割を担っており、放電加工において必要不可欠なものとなっている。絶縁性の加工液として、例えば炭化水素、アルコール、エーテル、エステル、水など、多くの液体中で放電加工を行うことが可能である¹⁷⁾が、経済性、加工性能、人体への有害性、安全性、装置類への有害性、取り扱いやすさ等を一応満足するものとして、現在では一般的に、灯油系の放電加工油と比抵抗値を $100\text{k}\Omega\text{cm}$ 程度まで高めた脱イオン水が放電加工の加工液として用いられている。また、加工特性の観点から、形彫り放電加工では、灯油系の放電加工油、ワイヤ放電加工では脱イオン水が用いられるのが一般的である。その理由は、以下の通りである。

放電が発生した際のエネルギー配分は、陽極の方が陰極への配分より大きいことが、実験と解析の逆問題解法によって明らかにされている¹⁸⁾。従って、エネルギー配分から考えれば、工具電極側を陰極とし、工作物側を陽極とするのが妥当である。しかしそれでも、工具電極消耗は生じてしまう。形彫り放電加工は、工具電極の形状を工作物に転写する加工法であるが、工具消耗が生じると加工精度を低下させてしまう。そこで形彫り放電加工では、油中で加工を行い、極性は工具電極を陽極、工作物を陰極とする。その理由は、油中で放電加工を行うと、油の中の炭素が放電の熱によって分解され陽極表面に付着し、陽極を消耗から防護するからであると考えられている¹⁸⁾¹⁹⁾。これにより、エネルギー配分は陽極の方が大きいにもかかわらず、油中で生成される熱分解カーボンの保護作用により、工具電極消耗を非常に小さく抑えて加工することが可能となっている。

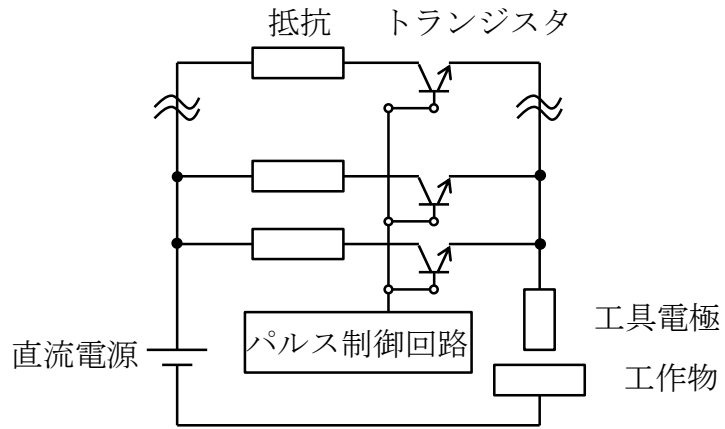
一方、ワイヤ放電加工では、ワイヤ工具電極を陰極、工作物を陽極として、脱イオン水中で加工が行われる。その理由は、加工中において常に新しいワイヤが供給され、ワイヤ工具電極の消耗が問題にならないためである。従って、油中におけるカーボンの保護作用を必要としないために脱イオン水が用いられ、エネルギー配分に従って極性が選択される。

1.4 放電回路と放電波形

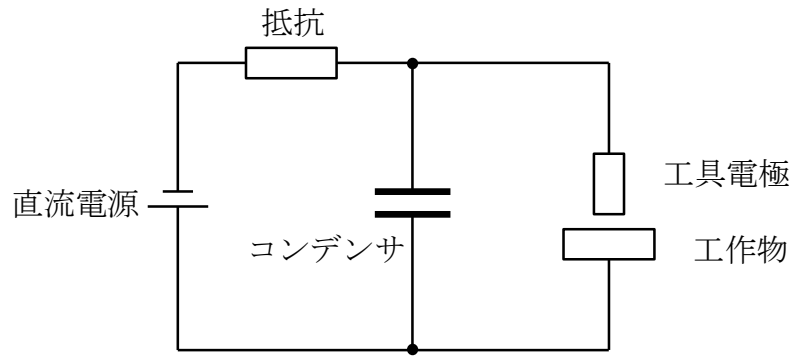
断続的な過渡アーク放電を発生させるためのエネルギー供給の方法として、大きく分けて図 1.4 (a) に示すトランジスタ放電回路と図 1.4 (b) に示すコンデンサ放電回路がある。ここでは、一般的な放電加工において多く用いられるトランジスタ放電回路について述べる。

トランジスタ放電回路は、電流制御用の抵抗とトランジスタの組が直流電源と極間の間に並列に多数つながれている。トランジスタの ON・OFF (導通・不導通) を繰り返すことによって、矩形波電圧が極間に加えられ、放電の発生によって、矩形波電流が流れる。図 1.5 にトランジスタ放電回路を用いた際の極間の電圧波形と電流波形の一例を示す。トランジスタが ON になると、直流電源の電圧が極間に印加され、極間に電位差が生じる。この電圧は、およそ 100~200V に設定され、無負荷電圧と呼び、本論文では u_0 と表記する。極間に無負荷電圧が印加されてもすぐに放電は発生しない。統計的にばらつく遅れ時間を経て絶縁破壊が生じる。この時間を放電遅れ時間と呼び、本論文では t_d と表記する。絶縁破壊が生じると、直流電源によって極間に一定の電流が流れ、極間の電位差はおよそ 20V まで低下する。このときの電流を放電電流、電圧を放電電圧と呼び、それぞれ i_e , u_e と表記する。放電電流値は、電流制御用の抵抗の組み合わせによって制御される。放電電流が極間に流れ始めたことをパルス制御回路によって検出し、設定した時間をカウントした後に、トランジスタを OFF にすることで強制的に電流を遮断し、放電を終了させる。この任意に設定できる放電している間の時間を放電持続時間と呼び、 t_e と表記する。トランジスタを OFF にしてから設定した休止時間後に再びトランジスタが ON となり、極間に無負荷電圧が印加される。この休止時間を放電休止時間と呼び、 t_o と表記する。このように放電休止時間を強制的に設けることで、放電休止時間中にプラズマを消沈させ極間の絶縁を回復させることで、次の放電の発生箇所を他の場所に分散させることができる。また、放電持続時間と放電電流値を一定に制御できるため、放電エネルギーを一定にすることができ、均一な放電痕が得られる。無負荷電圧を印加してから放電が発生するまでの放電遅れ時間は、放電毎にばらつき、放電持続時間、放電休止時間とは異なりパルスごとに制御することができない。単位時間あたりの放電回数である放電頻度 f と、放電持続時間 t_e 、放電休止時間 t_o 、および平均放電遅れ時間 \bar{t}_d の間には式 (1.1) の関係がある。

$$f = \frac{1}{t_e + t_o + \bar{t}_d} \quad (1.1)$$



(a) トランジスタ放電回路



(b) コンデンサ放電回路

図 1.4 放電加工電源回路の概略

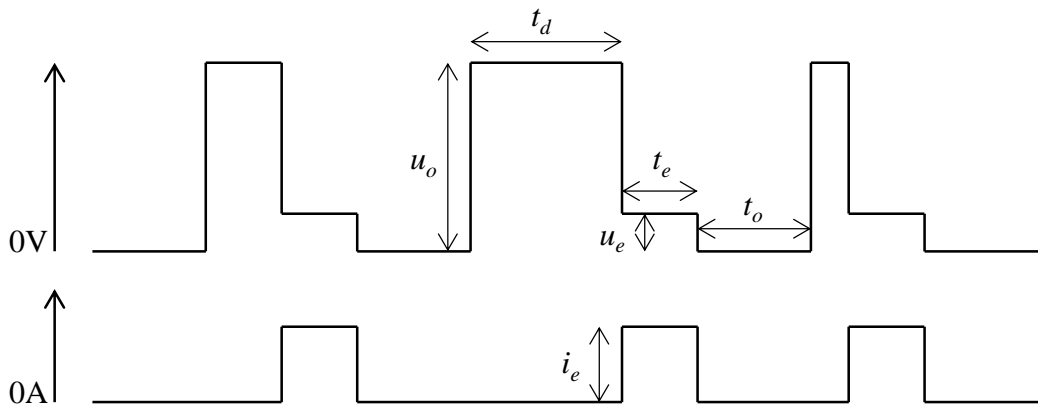


図 1.5 形彫り放電加工時の放電波形

1.5 サーボ送り制御

放電加工では、工具電極の加工方向への送りが速いほど、極間の距離が狭くなり放電が生じやすくなるため、放電頻度が増加して加工速度が速くなる。従って、加工速度を大きくするためには、送り速度を速くするのが望ましい。しかし、送りを速くしすぎると、極間距離が狭くなり、加工くず等の排出性が悪くなるため、加工が不安定になりやすい。また、加工能率が工具電極の送り速度に追いつかなければ、工具電極と工作物が短絡し、加工が進行しなくなる。そのため、放電加工では、一定の放電頻度が保たれるように加工の進行に合わせて工具電極の送りが行われる。これは、サーボ送り制御と呼ばれる。図 1.6 にサーボ送り制御の原理を示す。加工の進展に対して工具電極の送り速度が遅ければ、極間距離は広がる。極間距離が大きければ、極間の絶縁耐力が大きいため、放電が生じにくくなり、放電遅れ時間の長い電圧波形が続く。このとき、極間電圧の平均値は大きくなる。逆に、加工の進展に対して工具電極の送りを速くすると、極間距離が小さくなり、極間の絶縁耐力が小さくなるために、放電が生じ易くなり、放電遅れ時間の短い電圧波形が続く。このときの極間の平均電圧は小さくなる。従って、極間の平均電圧が加工中常に一定になるように工具電極の送りを制御すれば、平均放電遅れ時間を制御でき、放電頻度と極間距離を一定に保つことができる。そのため、加工機の制御回路は、加工中の極間電圧の平均値を数十ヘルツの頻度でモニタリングし、作業者が設定するサーボ基準電圧の値と常に比較し、それに従うように工具電極のサーボ送りを行う。よって、サーボ基準電圧を低く設定すると、放電頻度が高くなり、加工速度が向上する。ただし、極間距離が小さくなることで、加工くずの排出性が悪くなり、加工が不安定になり易い。本論文では、サーボ基準電圧を SV と表記する。ここで、無負荷電圧を V_o 、放電持続時間を t_e 、放電休止時間を t_o 、サーボ基準電圧を SV と設定したとき、サーボ送り制御が適切になされていると、次式が成り立つ。

$$SV = \frac{V_o \times \bar{t}_d + u_e \times t_e}{\bar{t}_d + t_e + t_o} \quad (1.2)$$

極間の放電電圧 u_e は約 20V であることが知られている¹⁾。従って、このときの平均の放電遅れ時間 \bar{t}_d は次式で与えられる。

$$\bar{t}_d = \frac{u_e \times t_e - SV(t_e + t_o)}{SV - V_o} \quad (1.3)$$

よって、無負荷電圧、放電持続時間、放電休止時間、サーボ基準電圧の設定により、適切にギャップ制御がなされれば、放電遅れ時間の平均値は加工中一定の値となり、これにより放電頻度が一定に保たれる。

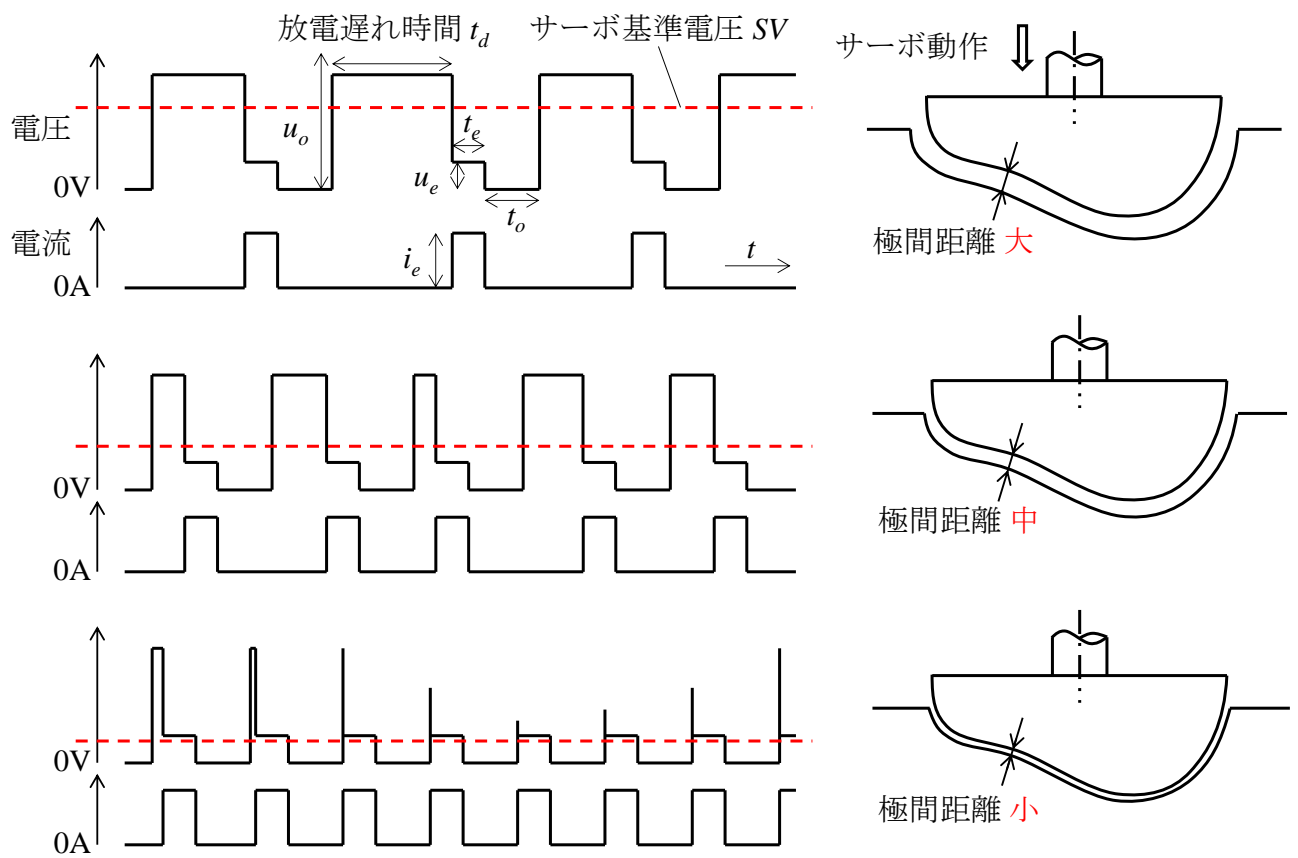


図 1.6 サーボ送り制御の原理¹⁾

1.6 放電加工間隙の可視化がもたらす現象解明

前節で述べたように、放電加工は、油等の絶縁性の加工液中で、工具電極と工作物を数マイクロ～数十マイクロメートルという狭い距離を隔てて対向させ、微小な放電を毎秒数千から数万回の高い頻度で発生させ、工作物を微量ずつ溶解、あるいは蒸発させ除去する加工である。また、工具電極の進行により、加工領域が工作物内に入り込んでしまう等の理由により、加工の現象を直接観察することは困難であり、放電加工現象は従来ほとんど解明されていなかった。しかし、加工の高効率化、加工速度や加工表面粗さ等の加工特性の向上には、加工現象の解明が不可欠である。そのためこれまでに、放電加工間隙の加工現象の把握のために、様々な手法により加工間隙の可視化による研究が行われたので、その研究動向について述べる。

1.6.1 気泡挙動に関する研究の動向

極間で生成される気泡は、前節で述べたように放電点で圧力変動や圧力勾配を生じさせ溶解領域の除去を促す役割を担うと推論され、また極間の加工くず等を極間隙から外部に排出するための原動力であり²⁰⁾、極間隙の清浄化に影響を及ぼしているとも推測されている。その一方で、気泡が極間隙に多く残留すると、極間隙の加工液の量が減少し、加工液による電極表面の冷却効果が低くなり、絶縁回復効果の低下が予想される。いずれにしても、極間における気泡の挙動や気泡分布を調べることは、加工現象の解明に重要であり、気泡挙動に関する多くの研究報告がなされている。

池田⁵⁾は、平行平板間で単発放電により発生する気泡の挙動を調べるために、図 1.7 に示すように、ガラス製の二つの円板を平行に対向させ、二つのガラスに開けた細い穴から細線電極を挿入し、細線電極間で単発放電を発生させることで、平行平板間の放電を模して、ガラスを通して気泡の挙動を観察した。これにより、放電で発生する気泡は、急激な膨張、収縮運動をすることが捉えられており、気泡の最大直径は間隙幅より数十倍も大きい数ミリメートルに達することを明らかにした。

一方、連続放電加工中は、加工の進行により加工領域が工作物内に入り込んでしまうため、加工中の極間における気泡の占有体積や気泡の分布を直接観察することは困難である。そこで、宮島ら²¹⁾は、図 1.8 に示すように、金属製の工具電極と工作物の一部にアクリル板を埋め込み放電加工を行い、二つのアクリル板に挟まれた間隙を観察した。アクリル板上では放電が生じないために、この領域は実際の極間隙ではないが、金属間で発生した気泡や加工くずがアクリル板間隙の周囲から流れ込むために、金属間隙で起こる現象の影響を直接的に受けている。これにより、アクリル板を通して加工液中の多量の加工くずや生成された気泡を観察し、特に気泡の境界部で加工くず濃度が高いことを観察した。さらに宮島ら²¹⁾は、図 1.9 に示すように、同じ径の円筒電極同士の突合せ加工において、加工を中断させて主軸

をゆっくりと上にあげ、極間に残留する気泡を観察した。これより、加工面中心部に大きな気泡が残留しており、仮に加工中の極間距離を $60\mu\text{m}$ とすると、加工面積の 70% 以上も気泡が占めていることを確認した。宮島ら²¹⁾は、これらの結果から図 1.10 に示すような、極間隙のほとんどが気泡で占められ、気泡と気泡の境界部分の加工くず濃度が非常に高い、加工中の極間状態を予想した。

そこで Takeuchi ら²²⁾は、放電の発生する極間中の気泡挙動の具体像を明らかにするために、極間の流れ場解析により、図 1.11 に示すように、平行平板における連続放電の気泡運動シミュレーションを行い、極間現象のコンピュータグラフィックス化を図った。解析は、同じ径の円筒電極同士を加工液中で突合せ加工し、工具電極中心に設けた穴から一定流量の加工液を噴流させた場合をモデル化し、極間を占める気泡の体積率を調べた。その結果、極間は放電開始からわずか 100ms で 85% が気泡で満たされることを報告し、通常の連続放電における極間は、加工開始直後に大部分が気泡で満たされると予測している。

図 1.12 は、加工中の極間距離の分布²³⁾と加工くず直径の測定結果から、Schumacher²⁴⁾と Kunieda ら²⁵⁾によって描かれた極間の想像図である。極間距離に対して加工くず直径が無視できないほど大きく、極間のほとんどが気泡で満たされ、気泡と気泡の境界に存在するわずかな加工液中に加工くずが密に存在することが推測されている。

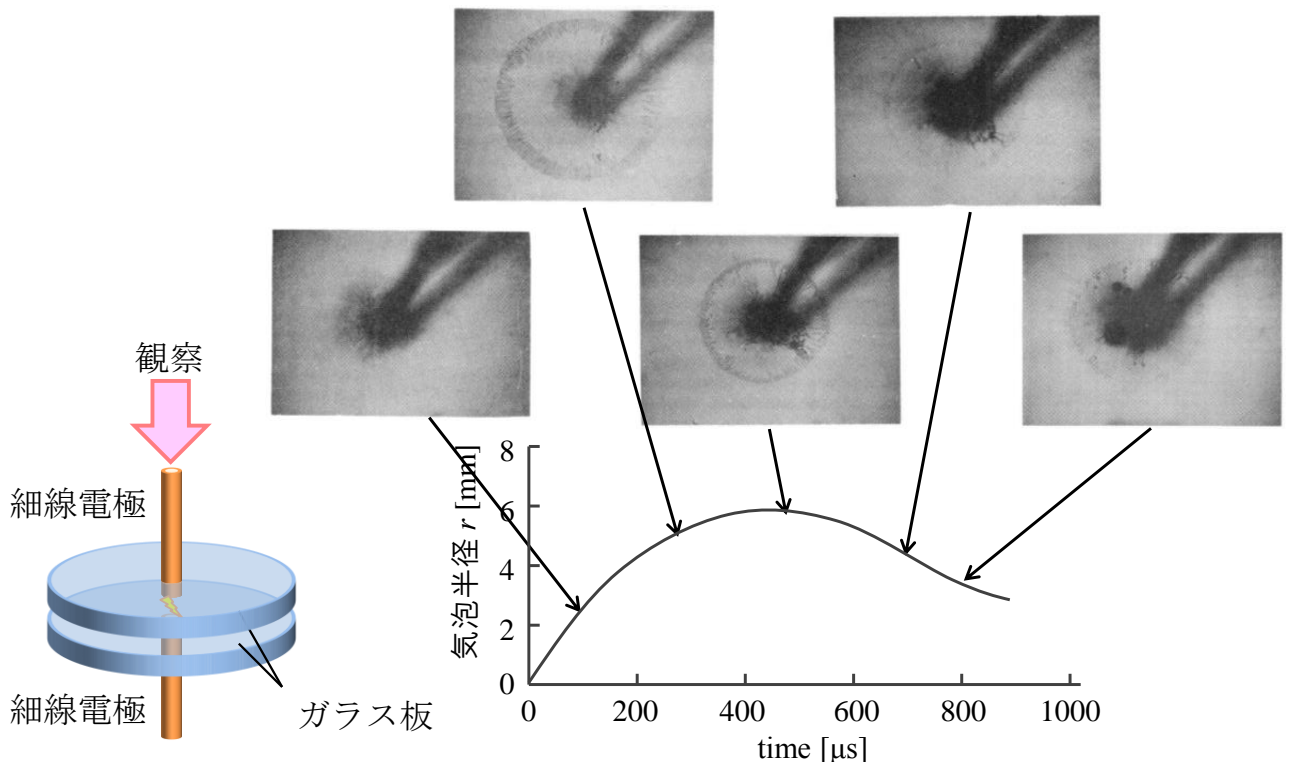


図 1.7 単発放電による平行平板間の気泡挙動の観察⁵⁾

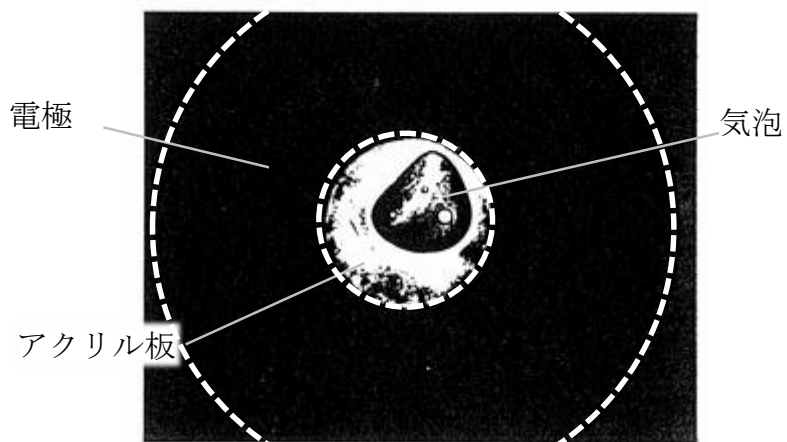


図 1.8 アクリル板を通した連続放電の観察 ²⁾

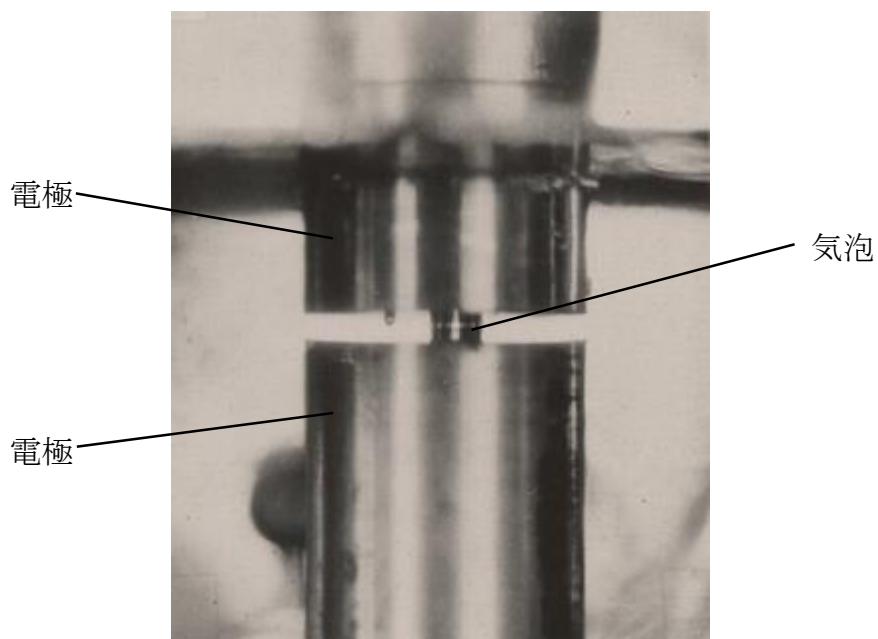


図 1.9 加工を中断して主軸をゆっくり上げた際に観察された極間に残留する気泡 ²⁾

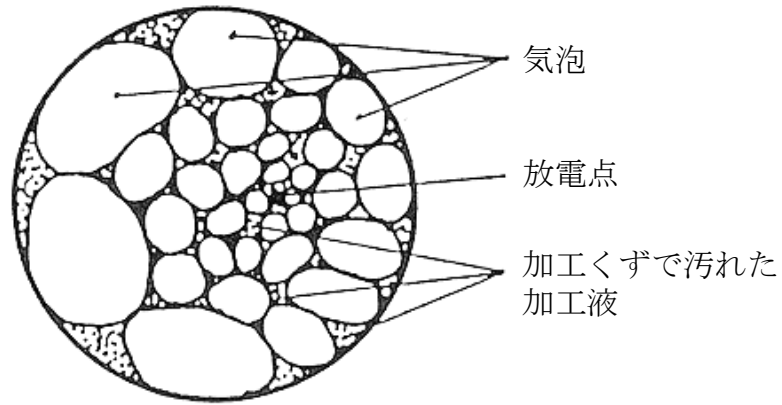


図 1.10 加工中の極間状態の予想図²¹⁾

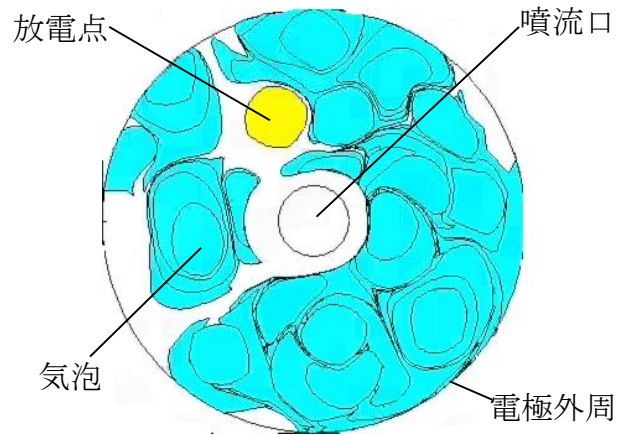


図 1.11 連続放電の気泡運動シミュレーション (噴流流量 0.1l/min)²²⁾

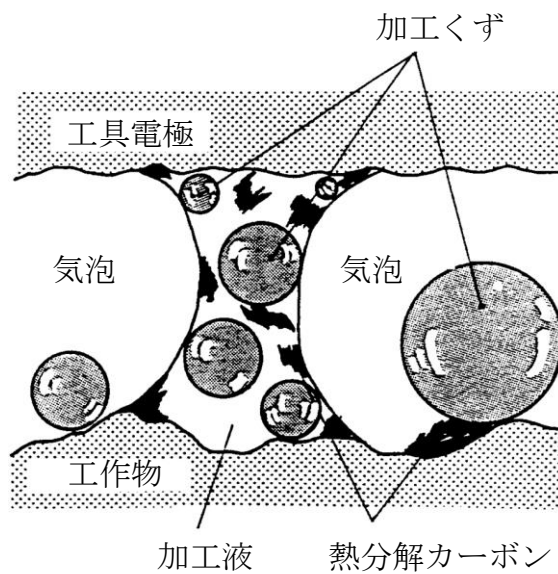


図 1.12 Schumacher²⁴⁾ と Kunieda ら²⁵⁾ による極間の想像図

1.6.2 放電点分布に関する研究の動向

放電加工では、放電の発生をパルス化し、放電休止時間中に前の放電で生成されたプラズマを十分に消沈させた後に、次のパルスを立ち上げる。これにより、エネルギー密度の高い放電を短い時間で発生させて微小な放電痕を加工面に形成し、これを高い頻度で繰り返すことによって、工具電極形状が工作物に転写される。その際に、次の放電の発生位置がどのような規則に従って、決定されるのかを考察することは、加工現象の把握にとって非常に重要である。なぜならば、放電点が偏る放電偏在現象は、加工を安定して進めるうえで問題となるためである。何らかの要因で局部的に電極や極間の温度が上昇すると、その領域では放電休止時間中にプラズマが消沈しにくくなり、前に生じた放電と同じ箇所に続けて放電が生じやすくなる。プラズマが完全に消沈する前に、同じ箇所に続けて放電が発生すると、プラズマ中に放電柱が形成され、その場合のアークプラズマの直径は大きく、エネルギー密度が低くなるために、除去効率が減少し加工速度の低下を招き、また工作物の熱影響層を拡大するだけの結果となる。

放電の偏在や集中現象の発生は、極間の絶縁耐力が部分的に低下することに起因するが、その絶縁耐力の低下に至る原因として、主に二つの要因が考えられている¹⁾。一つは、熱的な原因である。早川ら²⁶⁾は、放電プラズマが消沈するのに要する時間を実験と数値解析によって求め、放電終了後のプラズマ中心部の温度は、 $5\mu\text{s}$ 以内に $5,000\text{K}$ 以下にまで低下し、極間の絶縁が十分に回復することを報告している。しかし、何らかの要因で放電点が一箇所に集中した場合、その点の電極表面温度が上昇し、放電休止時間中にプラズマの消沈が不完全となり、ますます放電点が集中しやすくなる悪循環に陥る。二つ目は、加工くずの影響である。加工くずは導電体の球であり、図 1.12 でも示したように極間距離に比べて無視できないほど大きいことが報告されている。従って、極間中の加工くず濃度の高いところでは、加工くずを介して放電が生じやすいと推測され、そこではますます加工くずが生産され、局部的に加工くず濃度が増加し、放電点の偏在が加速し、負の連鎖が続く。

Kunieda ら²⁷⁾と Obara ら²⁸⁾は、図 1.13 に示すような放電点位置の検出方法を考案した。この放電点検出の原理は、工具電極への給電線を二つ以上に分割して給電することで、放電の発生位置によって分割された各給電線を通る電流の配分比が異なることを利用し、各給電線を通る電流を測定することで、放電の生じた位置を計測するものである。加工電源から工具電極への給電線を、分岐点 O で電極の両端の給電点 Q_1 と Q_2 に分けて行う。分岐点 O から各給電点 Q_1, Q_2 までの給電線の抵抗 r_0 と、給電線と電極との接触抵抗 r_c は等しいが、放電点の発生位置により給電点 Q_1, Q_2 から放電点 P までの抵抗 R_1, R_2 は変化するため、分割した給電線に通る i_1 と i_2 の配分比から放電点の位置が検出できる。図 1.14 は、上述の方法を用いて小島ら¹⁶⁾によって測定された放電点分布である。横軸はサンプル回数、縦軸は電極長軸方向の放電点の 1 次元分布であり、各点がひとつの放電点を指す。(a) から (c) は、各加工深さでの放電点分布である。加工深さが浅く加工くずの排出が容易と思われるときは、放電点が加工面全域に均一に分布しているが、加工深さが深くなるに従って、放電の偏在が生じ、偏在箇所が電極の左右に周期的に移動する現象が確認された。さらに加工深さ

が深くなると、偏在領域が狭まり、偏在箇所が不連続になる現象を観測した。このような偏在のメカニズムは、図 1.15 のように説明されている²⁷⁾。つまり、加工くずが排出されにくい状態になると、加工くず濃度の高いところの絶縁破壊強度が低下して偏在が生じる (a)。偏在箇所ではますます加工くずが生産され、極間距離が増大しても放電し続ける (b)。しかし、ある瞬間に極間距離の狭い他の箇所に放電点が移動すると、主軸が後退し (c)、(b) から (e) の過程が繰り返される。

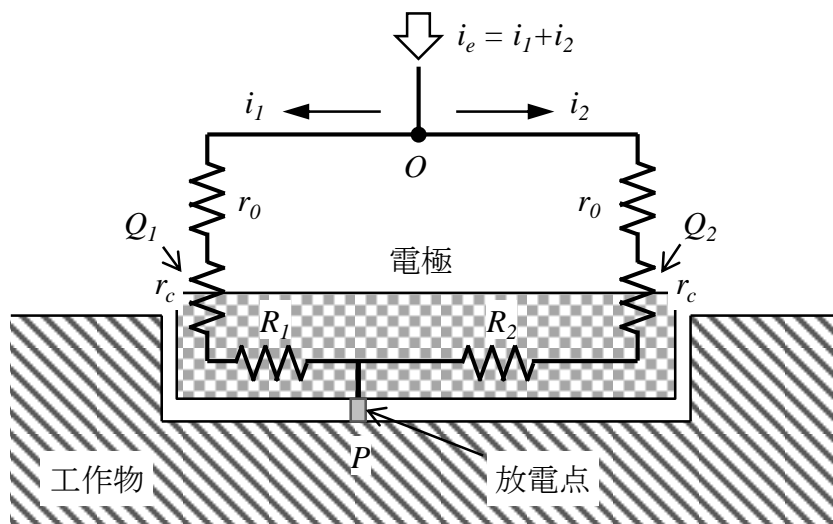
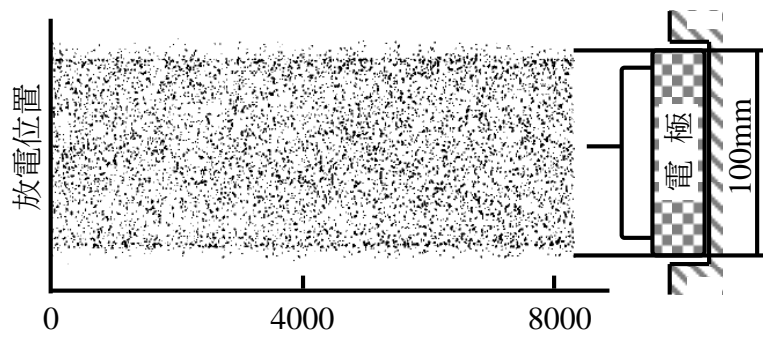
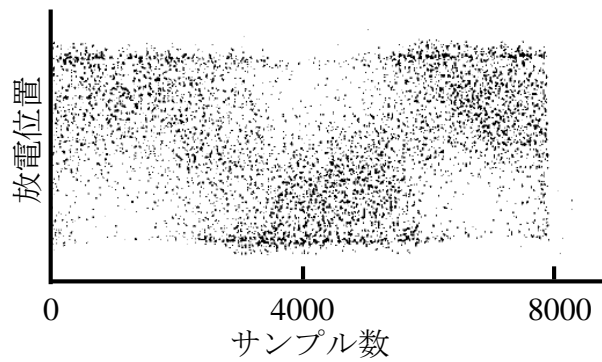


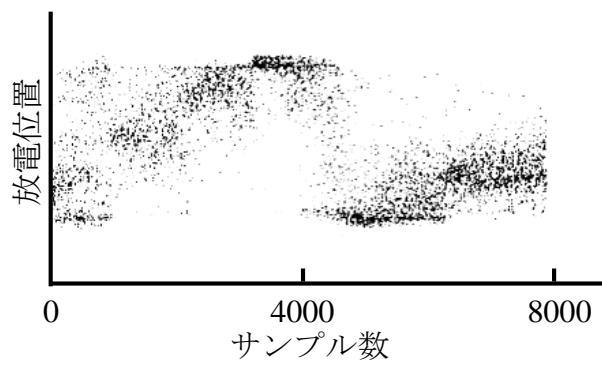
図 1.13 放電点位置の検出原理²⁷⁾



(a) 放電が安定しているとき (加工深さ0.1mm)



(b) 周期的な偏在 (加工深さ2.2mm)



(c) 局所的な偏在 (加工深さ3.5mm)

図 1.14 各加工深さにおける放電点分布¹⁶⁾

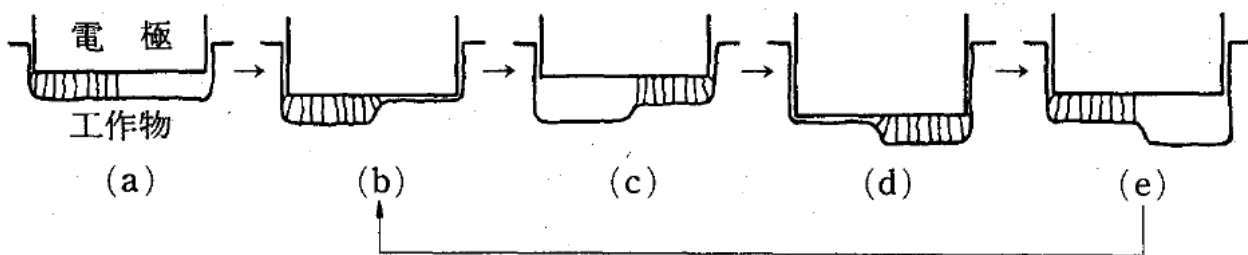


図 1.15 放電点分布の偏在メカニズム²⁷⁾

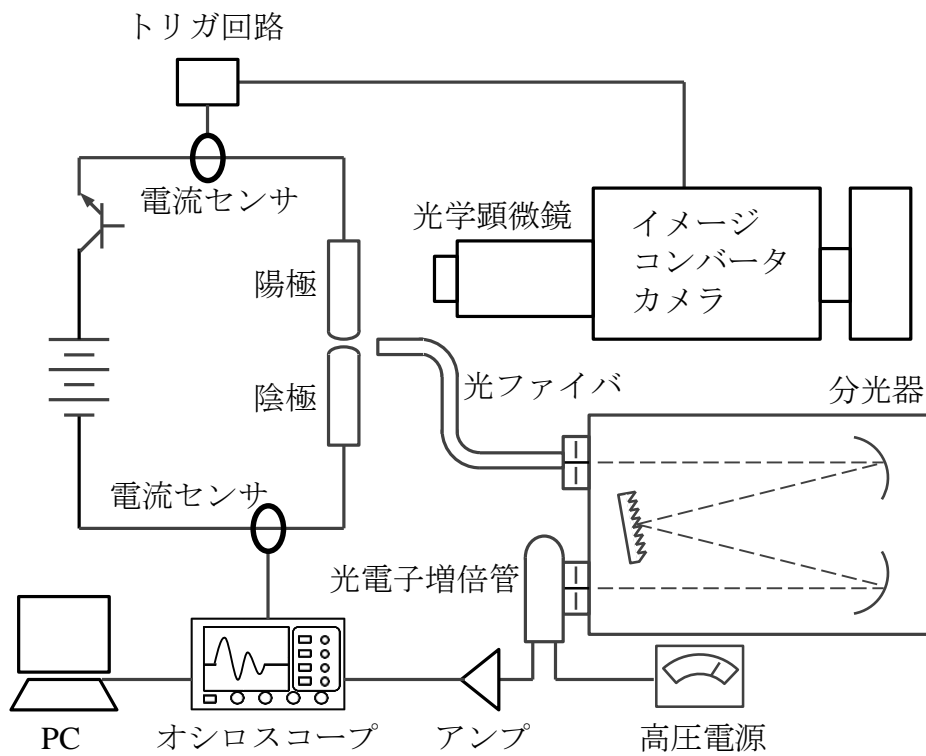
1.6.3 アークプラズマに関する研究の動向

放電加工において、放電によって生じるアークプラズマは加工の熱源であり、アークプラズマの挙動やその温度を明らかにすることは、除去メカニズムの解明のために重要である。しかし、放電は加工液中の工具電極と工作物のおよそ数十マイクロメートルの狭い間隙で生じ、また非常に短い時間の間に生じる過渡現象であるために、放電加工のアークプラズマの温度測定やその挙動の直接観察は非常に困難である。

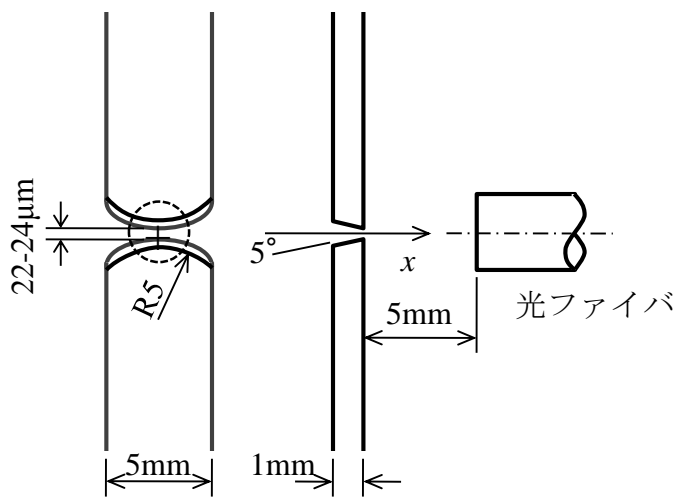
そこで吉田ら²⁹⁾は、図 1.16 に示すように、電極形状を工夫するとともに、時間分解能に優れたモノクロメータを用いた分光法を採用し、大気中で発生する放電加工アークプラズマの温度の実測を行った。プラズマ温度の測定は、相対強度法の原理³⁰⁾³¹⁾に基づき、プラズマ構成原子の二つの線スペクトルの強度比を測定することによって行った。測定方法は、テーパの付いた電極間で放電を発生させ、アークプラズマからの発光を、光ファイバを通して分光器に導き、分光器で設定した波長のみを光電子増倍管に入射し、出力された電流を抵抗器によって電圧に変換しオシロスコープによって放射強度を測定した。これにより、放電加工のアークプラズマの温度は、およそ 6,000K から 8,000K の間にあることが明らかとなった。

Kojima ら³²⁾は、大気中で直径 2mm の丸棒電極間で単発放電を行い、高速度ビデオカメラを用いて、放電のアークプラズマを側方から観察した。その結果、図 1.17 に示すように、発光領域は絶縁破壊直後に急激に膨張することを観察した。しかし、この発光領域は、カメラの絞りや露光時間等の撮影条件によって変化するために、この発光領域のみからプラズマ領域を決定することはできない。そこで、Kojima ら³²⁾は前述した分光分析による相対強度法を用いて、図 1.18 に示すように放電の発生する領域を分割し、各領域内の温度測定を行うことで、プラズマ直径の経時変化を求めた。ただし、ここでは測定精度の改善を図るために図 1.16 の測定法を改良し³³⁾、分岐型の光ファイバと二台の分光器を同時に用いることで、一度の放電から同時に二波長の線スペクトル強度の測定を可能にしている。その結果、図 1.19 に示すようにプラズマは絶縁破壊直後急激に膨張し、その直径はおよそ 0.5mm に達し、その後放電中は一定の直径を維持することを明らかにした。また、このアークプラズマ直径は、放電痕直径に比べて 5 倍以上も大きいことを明らかにしている。

一方、従来より単発放電における放電痕の形成メカニズムの仮説の一つに、アーク柱が電極面上を静止しておらず、動き回ることによって放電痕が形成されるという説がある³⁴⁾³⁵⁾。そこで、Kunieda ら³⁶⁾は、単発放電におけるアーク柱の挙動を調べるために、図 1.13 に示す原理を応用し、図 1.20 に示すような、厚さ 0.1mm の箔の各端面に、四つに分割した給電を取り付け、各給電線を通る電流を電流センサにより測定した。その結果、図 1.21 に示すように、アーク柱中の電流密度分布の重心が、電極表面を高速に運動しており、その際に形成された電極面上の放電痕は、アーク柱の運動の軌跡に似通った形状をしていることを明らかにした。



(a) 実験装置の構成



(b) 電極形状

図 1.16 分光分析による大気中で発生する放電加工アークプラズマの温度測定²⁹⁾

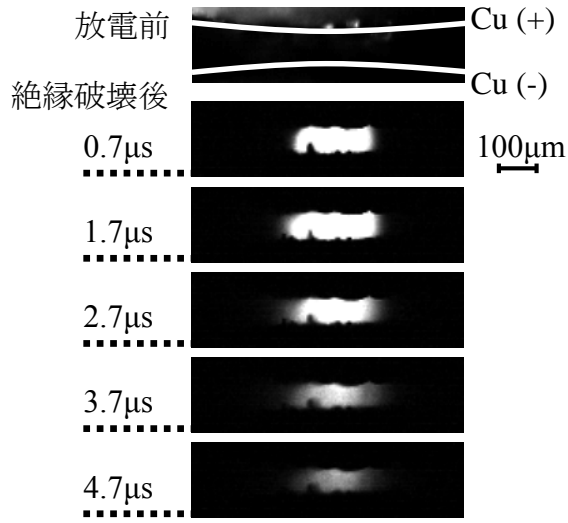


図 1.17 大気中の単発放電アークプラズマの高速度ビデオカメラによる側方からの観察 ³²⁾

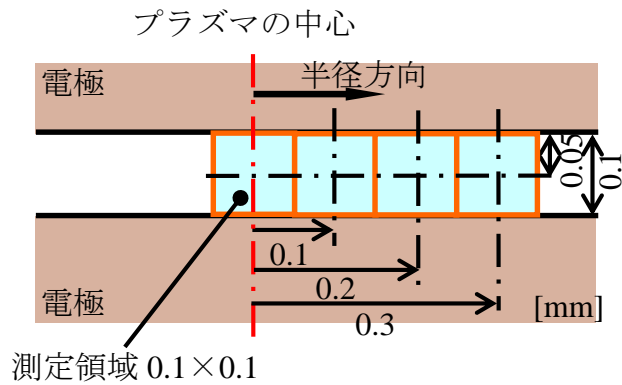


図 1.18 アークプラズマ温度の測定領域区分 ³²⁾

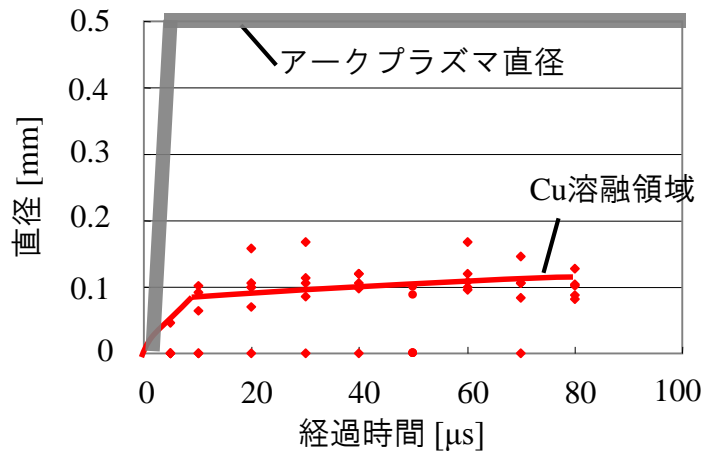


図 1.19 アークプラズマ直径と放電痕直径の関係 ³²⁾

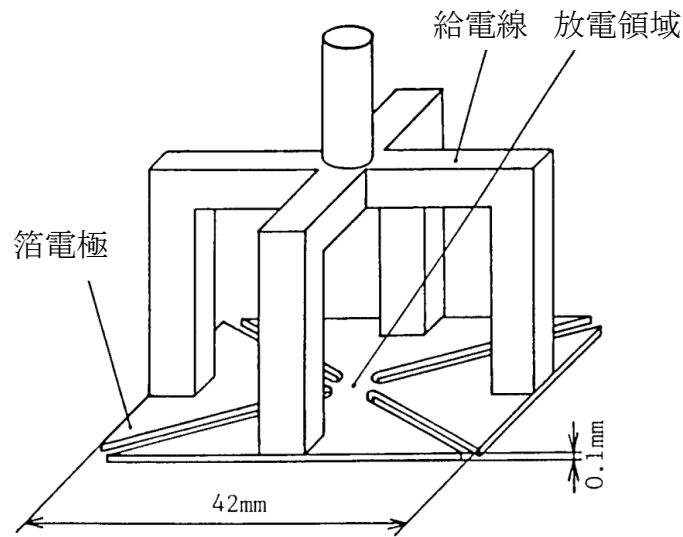
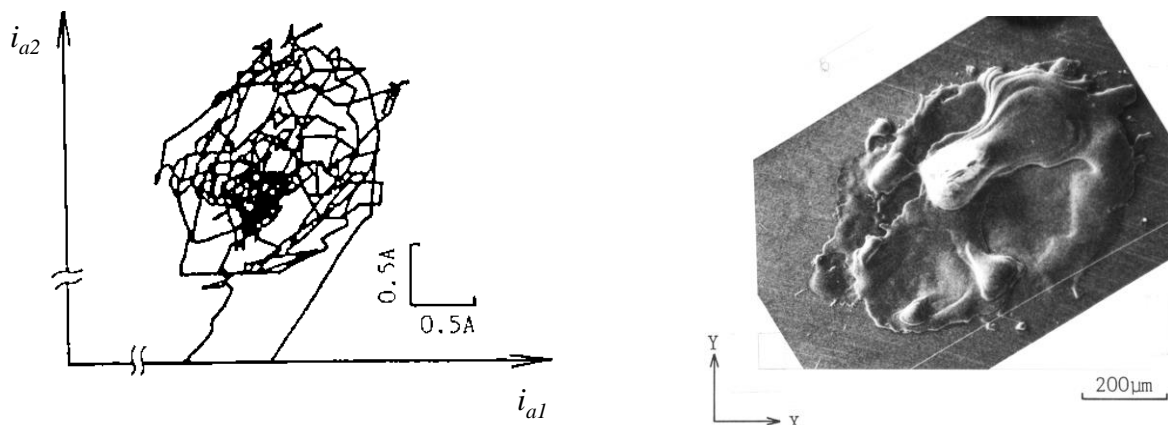


図 1.20 単発放電におけるアーク柱挙動の測定装置 ³⁶⁾



(a) アーク柱の挙動

(b) 放電痕形状

図 1.21 単発放電におけるアーク柱の挙動と放電痕形状 ³⁶⁾

1.6.4 油と水加工液の加工特性の比較に関する研究の動向

放電加工において、加工液として脱イオン水を用いた方が、油を用いるより加工速度が速いことが知られている ³⁷⁾。特に、マイクロ放電加工領域で、水中の方が、加工速度が速いことが多く報告されている ³⁸⁾³⁹⁾⁴⁰⁾。正木ら ³⁹⁾ は、脱イオン水中の RC 放電回路によるマイクロ放電加工では、油中と比較して加工速度が 150 倍である可能性を示している。しかし、加工液として脱イオン水を用いた方が、油を用いるより加工速度が速い要因は未だ解明されていない。この要因が解明されれば、例えば加工速度を向上させるためには、どのような加

工液を用いればよいのか、その指針を得ることができる。これまでに、油中と脱イオン水中における放電加工現象の違いを明らかにするために、高速度ビデオカメラによる気泡挙動の観察や、油中と脱イオン水中で発生する気泡成分の成分分析の比較等がなされている。

Kunieda ら⁴¹⁾は、図 1.22 に示すように、油中と脱イオン水中において、平行平板間で単発放電によって生じる気泡の挙動を、加工間隙の側方から高速度ビデオカメラによって観察した。その結果、池田⁵⁾が加工面に対して垂直方向から観察した際と同様に、気泡の膨張・収縮運動を観察し、膨張時には、放物線状の気泡断面形状を観察した。また、油中と脱イオン水中の気泡直径の変化を比較すると、最初の気泡最大直径は両者でほぼ等しいことを明らかにした。

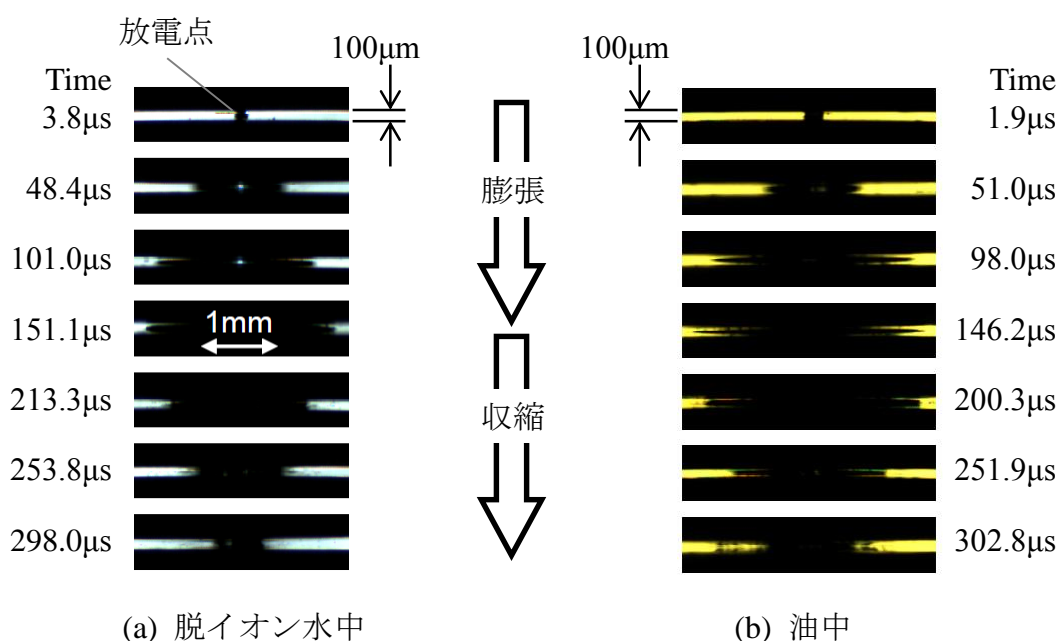


図 1.22 脱イオン水中と油中における単発放電の気泡挙動の観察⁴¹⁾

しかし、続いて油中と脱イオン水中で連続放電を行い、発生する気泡を置換法により採集し、その発生量の違いを調べると、図 1.23 に示すように、水中の加工で発生する気泡量は、油中の場合に比べて著しく少ないことがわかった⁴¹⁾。この要因を調べるために Kunieda ら⁴¹⁾は、置換法により採集した気泡を、ガスクロマトグラフを用いて成分分析した。その結果、図 1.24 に示すように、油中の加工では、油加工液の炭化水素系高分子が分解された水素、アセチレン、エチレン、メタン等の低分子炭化水素が生成されているのに対して、水中の加工では、水加工液が分解された水素と酸素が生成されていることを明らかにした。これらのことから、単発放電で発生した気泡の最初の最大直径がほぼ等しいにもかかわらず、連続放電中に発生する気泡が、油中に比べて水中の方が著しく少ない要因は、油中の放電加工で生成される低分子炭化水素はほとんどが常温で比較的安定な気体であるのに対して、水中の場合

は、分解した水素と酸素が再び反応して水に戻るためであると考察している。また、図 1.24 (b) より水中では、放電エネルギーにより分解された水素と酸素が生成されていることが認められるが、酸素の割合が化学量論値より少ないことを明らかにした。これは、加工面や加工くずが酸化燃焼反応によって酸素が消費されるためであると考察している。以上のことから、Kunieda ら⁴¹⁾は、脱イオン水を用いた方が、油を用いるより加工速度が速い要因は、連続放電中の極間を占める気泡の割合が、油中に比べて水中の方が小さく、それにより液中で発生する放電の割合が多くなることで、放電一発あたりの除去量が増加するためであると推測している。

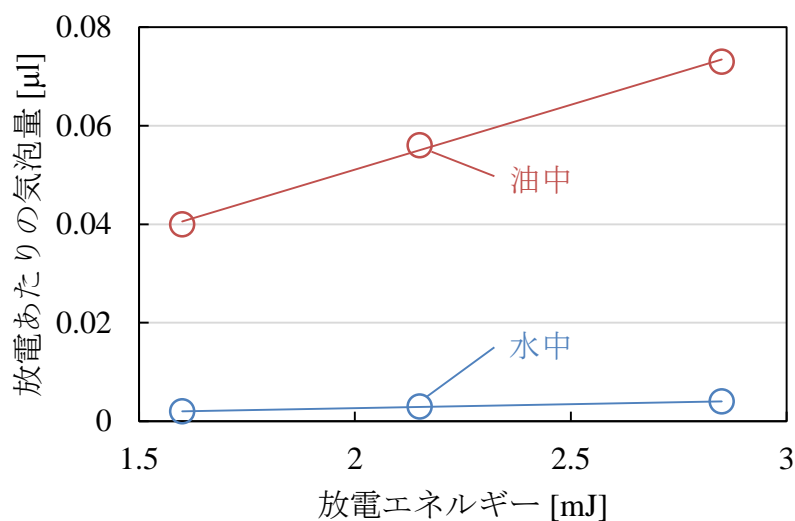
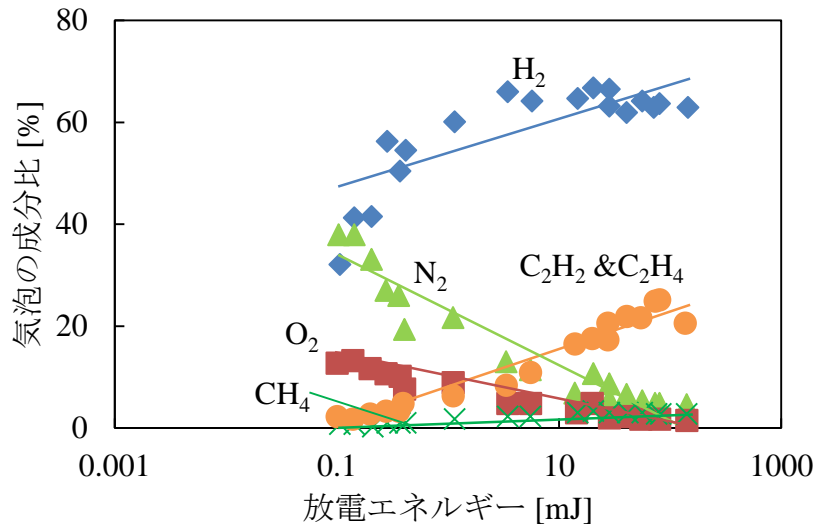
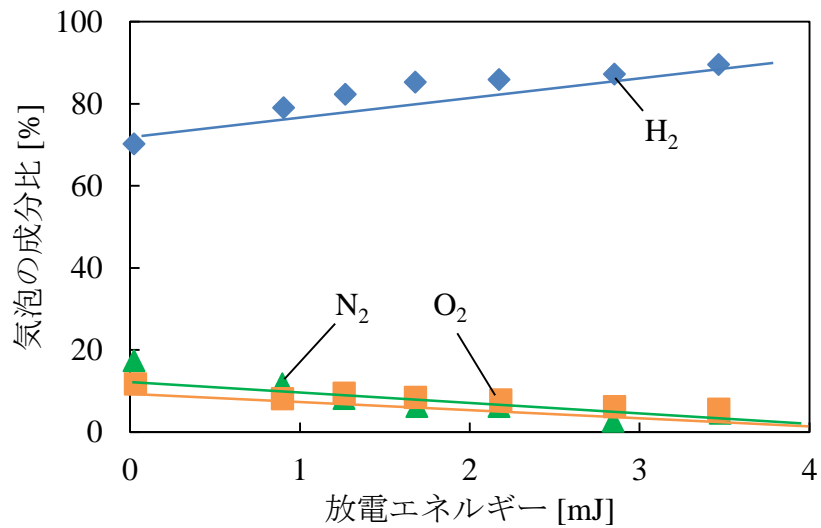


図 1.23 油中と脱イオン水中の連続放電中に生じる気泡発生量⁴¹⁾



(a) 油中加工



(b) 脱イオン水中加工

図 1.24 連続放電中に発生した気泡のガスクロマトグラフによる成分分析⁴¹⁾

1.6.5 これまでの放電加工モデルと先行研究による予測モデル

ここまで、図 1.25 に示すように、放電加工現象の解明のために、様々な手法により行われた極間隙の可視化による研究動向について述べた。放電加工は絶縁性の加工液中にて工具電極と工作物を対向させて加工を行う。極間隙では、放電の熱エネルギーによって加工液が蒸発、あるいは解離し、気泡が生成される。絶縁破壊直後の気泡中の圧力は非常に高いために

気泡は急激に膨張し、その最大直径は極間距離の数十倍も大きい数ミリメートルに達し、膨張と収縮を繰り返すことが明らかにされている。また、極間の気泡運動のシミュレーション等により、加工中の極間隙は、ほとんどが気泡で満たされていることが推測されている。また、加工液にゼラチンを用いて単発放電を行い、それにより生成された加工くず分布を調べることにより、加工くずは気泡の境界に密に分布していることも明らかにされている。放電加工では、放電は一秒間に数千から数万回繰り返し発生するが、電極への給電線を分割し各給電線を通る電流の比を測定することにより、放電点の発生位置の検出が行われ、加工深さが浅く比較的安定して加工が進行している場合は、放電点は加工面全域に均一に分散して発生していることが明らかにされている。また、放電を大気中で発生させることにより、高速ビデオによるアークプラズマの観察も行われ、プラズマは絶縁破壊後に急激に膨張し、その直径はおよそ 0.5mm まで達し、それは電極に形成される放電痕直径よりも大きいことが明らかにされている。一般的に放電加工では、加工液として灯油系の放電加工油あるいは比抵抗値を 100kΩcm 程度まで高めた脱イオン水が用いられる。両者では加工速度が異なることが多くの論文で報告されているが、その要因は未だ解明されていない。しかし、ガスクロマトグラフによる発生した気泡の成分分析や、置換法による気泡の採集によって、両者では加工中に発生する気泡の量が異なることが明らかにされている。

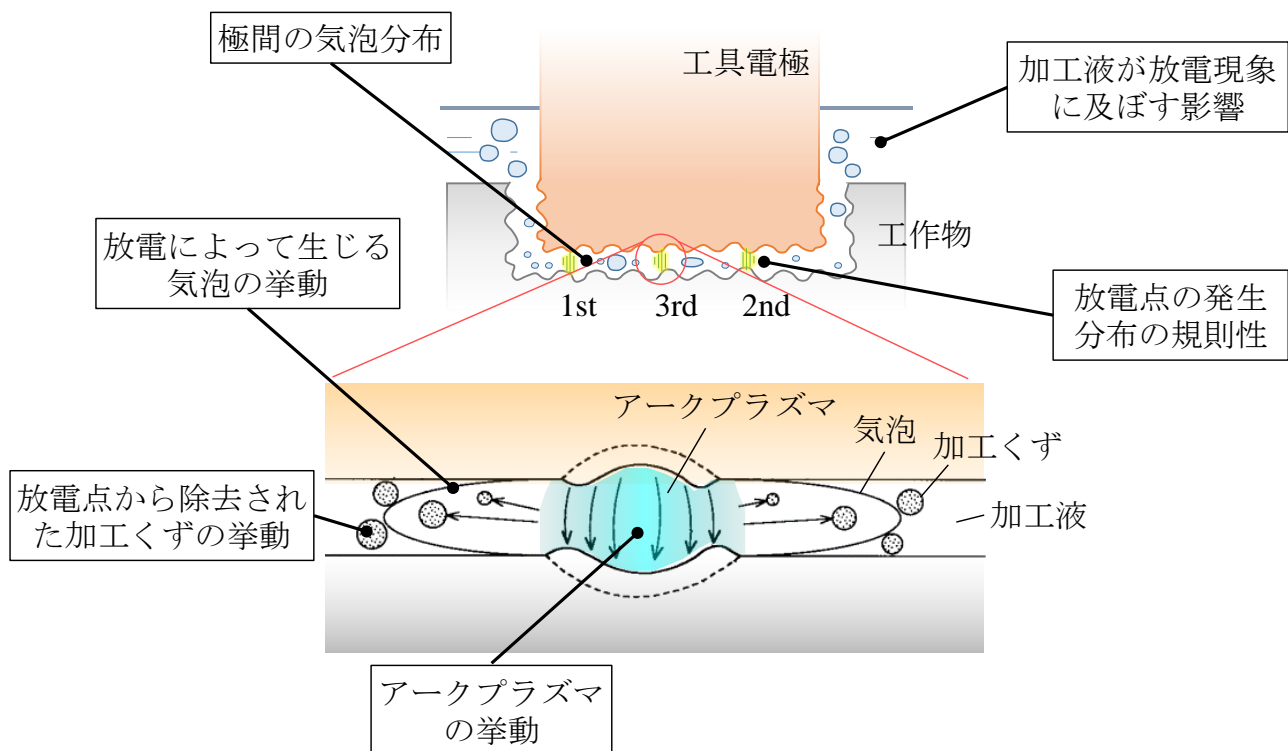
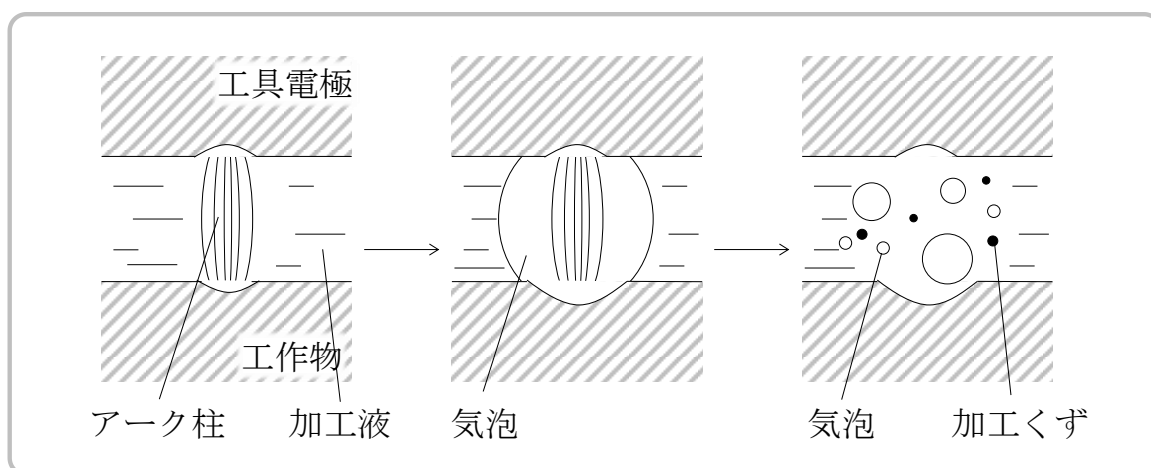
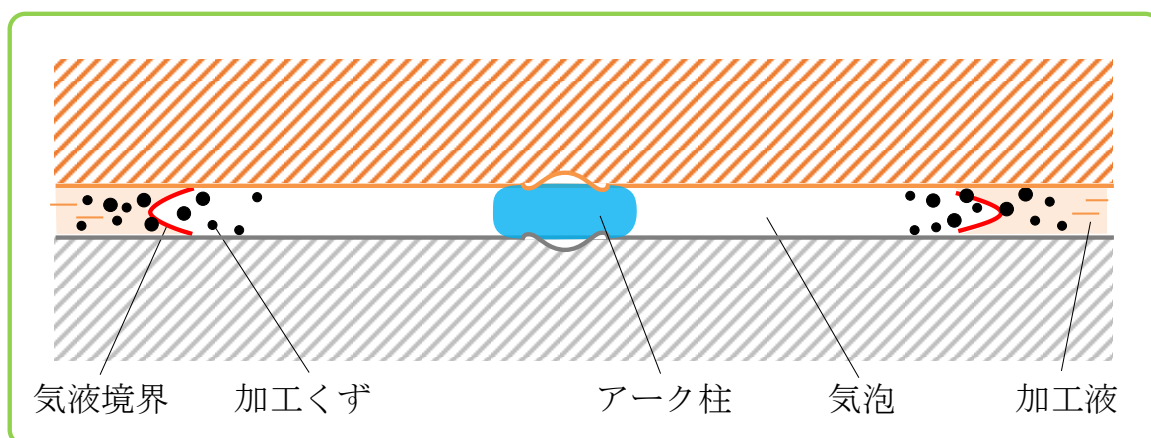


図 1.25 極間隙の可視化による研究動向

従来、放電加工の極間隙の様子はしばしば図 1.26 (a) のように示されてきた⁴²⁾。アーク柱は極間距離に比べて細く、気泡直径はおよそギャップ距離と同じオーダーで、加工くずは塵のように小さく、また小さな気泡が極間を漂っているように描かれている。また放電は、その前に発生した放電により形成されたクレータの盛り上がりによって次々と発生すると考えられてきた。一方、極間隙の可視化による先行研究等によって極間隙の様子は、従来のモデルとは全く異なることが示されている。先行研究による放電加工間隙の予想モデルは、図 1.26 (b) に示すように、アーク柱は極間距離や放電痕直径と比べて太く、また気泡直径は極間距離の数十倍も大きい数ミリメートルに達し、加工中の極間はほとんどが気泡に満たされている。また、加工くず直径は極間距離に比べて無視できないほど大きく、気泡と加工液の境界に密に分布している様子が推測されている。また、放電点分布は、加工が比較的安定しているときは、比較的ランダムに加工面全域で発生していることが示されている。



(a) 従来の放電加工極間隙のモデル



(b) 先行研究による放電加工極間隙の予想図

図 1.26 放電加工のモデル

1.7 透明体電極^{43) 44)}

前節では、これまでの放電加工現象の解明に向けた加工間隙の可視化による研究動向について述べた。仮に放電加工の電極材料が透明であれば、実際の加工中における極間現象を、透明な電極を通して直接観察することが可能となり、先行研究による予想モデルの裏づけ、またこれまで解明し得なかった現象の解明と、加工速度や加工面性状といった加工特性の向上を目指すための指針を得ることができると考えられる。

放電加工では電極に、導電性を有する金属が用いられる。金属は、金属光沢を帯びており、光を通さないことが知られている。これは、可視光が波長およそ 380 ~ 680nm の電磁波で、金属結晶の自由電子にこの波長の電磁波が作用すると、電子は共振し電磁波を吸収し、一旦は高いエネルギー状態に遷移するが、吸収した電磁波はすぐに放出され、安定な基底状態へと戻るためである。従って、金属は可視光線に対して、高い反射率を持ち、光を通さない。

一方、バンドギャップの大きい物質は、光子によって電子が励起されにくく、そのまま光子が通過するため、バンドギャップが可視光の光子エネルギーよりも大きければその物質は透明となる。波長を λ 、振動数を ν 、真空中の光速を c とすると、光子一つの持つエネルギー E は次式で与えられる。

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

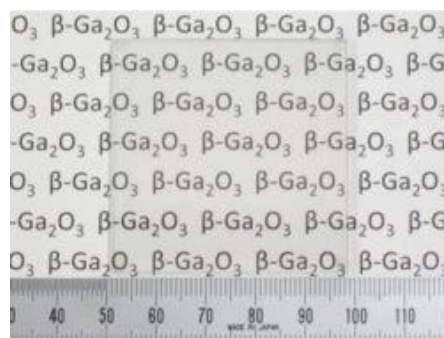
よって、最も短波長の紫色の光子は 3.3eV、最も長波長の赤色の光子は 1.8eV のエネルギーをもつ。そのため、バンドギャップが 3.3eV よりも広い物質は可視光を透過し、透明である。代表的な半導体材料であるシリコン (Si) は、バンドギャップがおよそ 1.1eV であり、可視光を吸収してしまうため、透明ではない。一方近年、耐電圧性と耐熱性の両面で、単結晶 Si を上回る特性を持つ単結晶シリコンカーバイド (SiC) や単結晶酸化ガリウム (Ga_2O_3) が、次世代パワーデバイス用の半導体材料として注目されている (図 1.27)。SiC や Ga_2O_3 は、シリコンに比べてバンドギャップが広く、それぞれ SiC が 3.0eV、 Ga_2O_3 が 4.8eV 程であり、可視光の大部分を透過するため透明な半導体材料である。このようなバンドギャップの大きい半導体は、ワイドギャップ半導体と呼ばれる。ワイドギャップ半導体は、低いエネルギーでは電子が励起されないため、室温の熱エネルギー程度の小さなエネルギー (数十ミリ eV 程) においても励起されるように、ドナーやアクセプターをドーピングし導電性を制御することで、室温で透明かつ電気を良く通す半導体が得られる。

透明で導電性を有する他の代表的な材料としては、酸化インジウム (In_2O_3)、酸化スズ (SnO_2)、酸化亜鉛 (ZnO)、酸化カドミウム (CdO) などがある。とくに、 In_2O_3 に少量の Sn をドーピングした酸化インジウムスズ (Indium Tin Oxide, ITO) や ZnO は、高い導電性と透明性を兼ね揃えていることから、液晶ディスプレイや太陽電池の透明電極として現在最も広く利用されている透明導電膜材料である^{45) 46)}。例えば ITO は、ガラス基板上に成膜された透明導電膜ガラス基板として、容易に入手が可能である。しかし、その膜厚はおよそ数十ナノから数百ナノメートル程度であり、一般的な荒加工条件での一発の放電痕深さが数マイクロから数十マイクロメートル程度であることから、放電加工を行う上で十分な厚さとは言えない。

また、ガラス基板上に成膜されていることからバルク材料を加工する一般的な放電加工と比較して材料中の熱伝導の形態や電流経路等もやや異なるものと考えられる。一方、単結晶 SiC 、単結晶 Ga_2O_3 は、数百マイクロメートル厚の半導体基板として市販されている。そこで本研究では、可視光域で透明かつ放電加工を行う上で十分な導電性を有する単結晶 SiC ウェハ、単結晶 Ga_2O_3 ウェハを放電加工の電極材料として用いることで、この透明体電極を通して放電加工の極間現象の直接観察を行う。



(a) 単結晶 SiC ウェハ⁴⁷⁾



(b) 単結晶 Ga_2O_3 ウェハ⁴⁸⁾

図 1.27 ワイドギャップ半導体

1.8 本研究の目的と本論文の構成

前述のように、放電加工は、絶縁性の加工液で満たされた極間距離が数十マイクロメートルと非常に狭い空間で生じる現象であることから、極間における加工現象の直接観察は困難であり、現象解明が十分なされていない。池田⁵⁾は、ガラス円板に開けた細い穴から細線電極を挿入し、細線電極間で単発放電を発生させることで、ガラスを通して平行平板間の気泡の膨張収縮運動を観察した。これにより、気泡は25m/sもの速度で膨張し、最大直径は極間幅よりも数十倍大きい数ミリメートルに達することを明らかにした。しかし、放電の発生箇所は一箇所であり、連続放電中の気泡運動の観察には至っていない。そこで、宮島ら²¹⁾は、電極の一部に透明なアクリル板を埋め込み放電加工を行うことで、連続放電中にアクリル間隙に流れ込む気泡や加工くずを観察し、極間のほとんどが気泡で満たされていることを推測した。また、気泡の境界部で加工くず濃度が高い様子を観察した。しかし、アクリル板上には放電が生じないため、実際の放電加工面上の気泡分布は観察できていない。また、Takeuchiら²²⁾は、極間の流れ場の解析により極間現象のコンピュータグラフィックス化を図り、平衡平板における連続放電の気泡運動シミュレーションを行った。このシミュレーションによって、連続放電によって極間のほとんどが気泡で満たされていく過程が示されたが、シミュレーションによる解析に留まっている。さらに、放電点分布の偏在は加工の安定性に影響を及ぼすことから、放電位置を検出する方法が考案された²⁷⁾²⁸⁾。この原理は、工具電極への給電線を分割し、給電線に流れる電流の比を測定することによって放電の位置を検出するものであるが、その分解能は辺長の約5%に留まり、また一パルスの放電が同時に複数個所で生じる可能性も否定できないが、上記の電気的方法ではこの現象を捉えられず、さらに各放電が加工液中で発生しているのか、気泡中で発生しているのか、またはその境界で発生しているのか、区別することは困難である。放電加工の除去メカニズムを解明するためには、熱源であるアークプラズマの挙動を調べるのが非常に重要であり、アークプラズマの高速度ビデオカメラを用いた観察³²⁾や、分光分析を用いたプラズマの温度測定²⁹⁾³³⁾がなされてきた。しかし、側面からの観察が可能であるのは、棒状電極を用いた突合せ加工の場合に限られ、電極面積が大きい場合の観察は困難である。また、大気中での放電の観察は容易であるが、加工液中での放電は加工液による光の吸収が大きいことから、アークプラズマの直接観察は困難である。

そこで本研究では、透明かつ放電加工を行う上で十分な導電性を有する半導体材料を用いて極間の放電加工現象を直接観察し、加工現象を解明することを目的とする。これにより、これまで不可能であった平行平板間における連続放電の極間現象の直接観察を可能とし、極間で生成される気泡の加工面上の分布や気泡が極間を占める割合、また放電の発生する雰囲気を明らかにすることを目的とする。さらに、加工液中で発生する放電のアークプラズマの直接観察とプラズマの温度測定を行い、観察したプラズマの直径を境界条件として単発放電の熱伝導解析を行い、除去メカニズムの解明を行うことを目的とする。また、油中と水中の放電加工の極間現象を直接観察し、比較を行うことで、加工特性の異なる要因を明らかにするとともに、加工液の加工特性を向上させるための指針を得ることを目的とする。

本論文は全5章で構成されている。

第1章の「序論」では、放電加工の原理を説明した後に、放電加工間隙の可視化がもたらす加工現象の解明に関する先行研究について述べた。また、透明体電極を用いた放電加工現象の解明に関する概要を説明した後に、本研究の目的を述べた。

第2章の「透明体電極を用いた連続放電現象の解明」では、放電加工の極間現象を解明することを目的として、連続放電加工中の極間現象の直接観察を行った。放電加工において、極間における加工現象を解明することは、加工の高効率化、加工特性の向上の面で非常に重要である。しかし放電加工は、加工液中の非常に狭い極間で放電を発生させ加工を行う。また、放電の発生から消滅までは非常に短い時間の過渡現象であり、また電極材料の除去を伴うことなどの理由により、放電加工現象の直接観察は極めて困難であり、その加工現象については未解明な部分が多い。本研究では、放電加工の電極に、透明で放電加工を行うのに十分な導電性を有する単結晶 SiC ウェハを用いることで、この透明体電極を通して極間隙の直接観察を可能にした。また、極間では毎秒数千から数万回の放電が発生し、極間の状態の変化は急峻であるため、高速度ビデオカメラを用いることにより現象の観察を行った。放電加工の極間では、加工液の蒸発や解離、電極材料の蒸発によって気泡が生成される。これまでの先行研究では、電極の一部に透明なアクリル板を埋め込んでアクリル板を通した気泡の観察、置換法により加工中に気泡を採集し気泡発生体積の測定、極間の流れ場解析等により、加工中は極間のほとんどが気泡に満たされていることが推測されてきた。しかし、実際の加工中の電極面上における気泡分布や極間を占める気泡の割合は明らかにされていない。また、透明なアクリル板上には放電は発生しないため、放電が加工液中で発生しているのか、気泡中で発生しているのかは判別できない。そこで、連続放電中に極間を占める雰囲気加工液中、気液境界、気泡中に分類し、それぞれの雰囲気が極間を占める面積割合、また各雰囲気発生した放電の発生割合について調査した結果を述べる。また、放電の発生位置は加工の安定性に影響することから、放電の発生位置の規則性を明らかにすることは重要である。先行研究によって、工具電極への給電線を分割し、各給電線に流れる電流の比を測定することによって放電の発生位置を検出するシステムが考案されているが、この手法における測定分解能は辺長の約5%に留まっている。そこで、透明体電極を用いて放電点位置を観察することによって、より高い精度での放電点位置測定を可能にした。これにより、連続する放電点の発生間距離の規則性を気泡半径と比較して調査した結果について述べる。また、実加工では、加工の安定性を保つことを目的に、加工液を極間に供給するフラッシングが行われる。フラッシングには、加工間隙の外に配置したノズルから加工液を加工間隙に向けて噴流する噴射法、工具電極や工作物に設けられた穴から加工液を極間隙に直接噴流する噴流法、工具電極を周期的にジャンプさせ極間の汚れた加工液と清浄な加工液の置換を行う電極ジャンプ法などがある。そこで、ノズルによる噴射法、電極穴による噴流法、電極ジャンプ法の三通りのフラッシングを用いて加工を行い、透明体電極を通して極間を直接観察することで、各フラッシングが加工現象に及ぼす影響を調査した結果について述べる。

第3章の「単発放電現象の解明」では、放電加工の単発放電現象を解明することを目的として、透明体電極を用いて高速度ビデオカメラによる単発放電中の極間現象の直接観察を行った。放電加工は、一発の放電によって工作物面上に形成される放電痕の累積によって加工が進行する。また、この放電痕は、放電のアーク柱からの熱流束により工作物が溶融・蒸発し除去されることによって形成されるために、加工特性の向上や加工現象の解明には、単発放電における放電現象、また放電痕の生成メカニズムを明らかにすることが重要である。特に、熱源であるアーク柱の挙動は放電痕の形成に深く関係する。これまでの先行研究では、単発放電により発生する気泡の挙動や加工くずの飛散の観察では、透明なアクリル板に穴を開けて細線を通し、細線同士で単発放電を行い、アクリル板を通して観察する方法等により行われた。しかし、放電は電極面上で発生するために、放電点における放電現象を直接捉えることはできていない。しかし、透明体電極を用いることで、より現実の加工に近い平行平板間の加工液中における単発放電現象の観察が可能である。そこで、透明体電極を用いて単発放電を行い、気泡の膨張過程、加工くずの飛散現象を観察した結果について述べる。また、極性を変更して単発放電を行い、放電点の現象を観察し、陰極と陽極の放電現象の違いについて調査した結果について述べる。また従来、単発放電のアークプラズマの観察では、加工液による光の吸収や発生した気泡の界面における光の屈折があるために、大気中で単発放電を発生させて電極の側方からの観察が行われた。そこで本研究では、液中で発生する放電のアークプラズマの膨張過程を明らかにするために、透明体電極として SiC に比べて波長依存性が小さく透過率の高い単結晶 Ga_2O_3 を用い、光学レンズによって放電点のアークプラズマを拡大観察することで、アークプラズマの挙動や直径、その時間変化を調べた結果について述べる。さらに、アークプラズマ直径と単発放電により実験的に得られる放電痕直径との関係を調査した結果について述べる。また、観察によって得られたアークプラズマ直径を円形の一様熱源として、材料中の温度分布を熱伝導解析することによって得られる溶融領域直径と、実験的に得られる放電痕直径を比較した結果について述べる。

第4章の「油と水加工液が加工速度に及ぼす影響の観察」では、放電加工油中と脱イオン水中で放電加工速度が異なる要因を明らかにすることを目的として、放電一発当たりの除去量の違い、放電発生雰囲気割合の違い、加工の安定性の違いについて調査を行った。放電加工では、一般的に加工液として、放電加工油あるいは脱イオン水が用いられるが、両者の加工速度を比較すると、脱イオン水を用いた方が、加工速度が速いことが多く報告されているが、その要因は未だ解明されていない。油中と水中の放電では、アークプラズマの構成粒子が異なるために、プラズマの温度に影響を及ぼし、放電一発当たりの除去量が異なると思われる。そこでまず、油中と水中の単発放電の除去量の違いを比較した。さらに、油中と水中で発生した放電のアークプラズマの温度を測定して比較することで、油中と水中で放電一発当たりの除去量の違いが加工速度に及ぼす影響を調査した結果について述べる。一方、先行研究によって、油中と水中の放電加工では、加工中に発生する気泡量が異なり、油中に比べて水中の方が著しく少ないことが明らかにされている。また、液中と気中では単発放電

除去量が異なり、液中の方が、除去量が多いことも明らかにされている。このことから、極間を占める加工液と気泡の割合の違いにより、液中と気泡中で発生する放電の割合が変化することで、加工速度に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、油中と水中で単発放電と連続放電を行い、透明体電極を用いて発生する気泡量の違いを直接観察した。また、連続放電中において各雰囲気での放電発生割合の違いを比較し、加工速度の違いに及ぼす影響を調査した結果について述べる。一方、放電点の発生分布が偏在すると、除去効率が減少し加工速度の低下を招くと考えられる。油中と水中では、極間を占める気泡の割合が異なると考えられ、極間を占める加工液の割合の違いにより、極間の冷却特性が異なり、放電点分布、また加工速度に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、油中と水中で加工条件を比較的安定な状態から不安定な状態に変化させて放電加工を行い、加工速度の変化を比較した。さらに、透明体電極を用いて放電点分布を観察し、連続する放電の発生間距離を測定することで、加工の安定性の比較を行った。また、油中と水中で加工の安定性が異なる要因として、極間の気泡の振動や移動量の違いによる冷却特性の違いによるものと考え、極間の気泡挙動の流体シミュレーションを行い、加工液の物性が気泡の挙動に及ぼす影響を調査した結果について述べる。

第5章の「結論」では、第2章から第4章までに得られた知見を要約して本論文の結論を述べる。

第2章 透明体電極を用いた連続放電現象の解明

2.1 はじめに

本章では、透明で放電加工を行う上で十分な導電性を有する材料を放電加工の電極として用いて加工を行い、高速度ビデオカメラにより極間現象を直接観察することで極間の可視化を行い、極間を占める気泡割合の変化、放電の発生する雰囲気、放電点発生分布の規則性等を調べた。放電加工において、極間における加工現象を解明することは、加工の高効率化、加工特性の向上の面で非常に重要である。現在、放電加工は、金型の製造や特殊な複雑形状加工、難削材の加工、マイクロ加工の分野において幅広く用いられているが、その加工現象については、未解明な部分が多い。しかし序論でも述べたように、放電加工は、油等の加工液中にて工具電極と工作物を極間距離数十マイクロメートル程度に対向させて放電を発生させ加工を行う。また、放電の発生から消滅までは非常に短時間の過渡現象であり、また電極材料の除去を伴うことなどの理由によって、放電加工現象の直接観察は極めて困難である。これまで、極間の加工現象の把握のため、さまざまな手法により極間現象の可視化やシミュレーション、実験がなされてきた。しかし、いずれも平行平板の加工面領域における極間の様子の直接観察には至っていない。一方で、仮に電極材料が透明であれば、放電加工の実加工における極間現象を透明な電極を通して直接観察することが可能である。半導体である単結晶 SiC 材料は、不純物濃度によって電気導電率、また光の透過率が変化する。純粋な単結晶 SiC は可視光域で無色透明であることが知られており、電気導電性はほとんどゼロである。しかし、不純物元素の添加量が多いほど光の透過率は低くなるが、電気伝導性は高くなる。そこで本研究では、透明かつ放電加工をするうえで十分な導電性を有する単結晶 SiC 材料を放電加工の電極として用い、加工液中における連続放電現象を高速度ビデオカメラにより撮影し、放電加工間隙の可視化を行った。放電の熱によって加工液が分解生成される気泡の挙動を観察し、加工中に極間を占める気泡の割合を調べた。また、連続放電中に放電の発生する雰囲気を、液中、気液境界、気泡中に分類し、各雰囲気での放電発生割合を調べた。また、連続する放電の前後の発生位置と放電によって発生する気泡径との関係を調べ、放電点分布の規則性を明らかにした。さらに、実加工で加工中に行われるフラッシング法を用いて加工を行い可視化することで、フラッシングが加工現象に及ぼす影響を調査した。

2.2 連続放電加工中の極間現象の観察

本節では、透明体電極を用いて、高速度ビデオカメラにより加工面に対して垂直な方向から放電加工の極間現象の可視化を行った。放電加工は、加工領域を加工液中に沈めて加工を行うが、放電の発生とともに気泡が生成される。極間隙でこの気泡割合が多くなると、加工液による加工くずの冷却効果、加工くずの排出性能、絶縁回復効果等の低下が懸念される。従って、極間における気泡の存在は、加工の安定性と密接に関係していると考えられる。そこで、放電の発生に伴って生成される気泡を観察し、極間を占める気泡割合の変化を調べた。また、極間に気泡が存在すれば、放電は液中のみでなく気泡中や気液境界でも発生し得ると推測される。実加工において放電がどのような雰囲気で発生しているのかを明らかにすることは加工現象の理解のために重要である。そこで、放電の発生する雰囲気を液中、気液境界、気泡中に分類し、各雰囲気での放電発生割合を調べた。一方、放電点分布の偏在は、除去効率の低下や加工面への熱的ダメージの拡大に繋がることから、放電点の発生位置の規則性を明らかにすることも重要である。そこで、連続する放電点の発生間距離と放電により生成される気泡の半径との関係を調べ、その規則性を調査した。

2.2.1 実験装置

図 2.1 に実験装置の構成図を示す。実験装置は、形彫り放電加工機、加工用セル、高速度ビデオカメラ、オシロスコープ、電流センサ、パーソナルコンピュータで構成される。加工機は、ソディック製の形彫り放電加工機 C32 を用いた。本実験では、本加工機に搭載されるトランジスタ放電回路を用いて加工を行った。この形彫り放電加工機は、XYZ の 3 軸加工機であり、X、Y 軸はボールねじ駆動、Z 軸はリニアモーター駆動となっており、いずれの軸も最小の位置決め指令値は 0.1 マイクロメートルである。高速度ビデオカメラによる観察を容易にするために、アクリル製の透明な加工セルを作成し、加工セルの中を加工液で満たし、放電加工機の加工槽である XY テーブルに設置した。本実験では、加工液としてソディック製の放電加工油 バイトル-2 を用いた。一般的に形彫り放電加工では、工具電極材料に銅やグラファイトが用いられる。そこで本実験では、工具電極材料に銅 (Cu) を用い、透明体電極を工作物と見立てて加工を行った。透明体電極には、新日鉄住金マテリアルズ製の単結晶 SiC ウェハを用いた。表 2.1 に本実験で用いた単結晶 SiC ウェハの仕様を示す⁴⁷⁾⁴⁹⁾。Cu 電極は、加工機の Z 軸に取り付け、単結晶 SiC 電極は加工機の XY テーブルに固定した加工槽に取り付けた。Kunieda ら⁵⁰⁾ は、放電の発生直後には瞬間的に 50N 近い衝撃力が電極に作用することを明らかにしている。力積は大きくないが、単結晶 SiC ウェハが加工中の加工反力に耐えうるように、またウェハのたわみによる極間距離の変動を抑制するために、単結晶 SiC ウェハを加工セルの側面を構成する板厚 3mm の透明なアクリル板に密着させて固定した。加工中の極間電圧は電圧プローブを用いて、また放電電流は、電流センサを用い

て測定し、オシロスコープに記録した。高速度ビデオカメラは、500 万画素・最高 130 万コマ/秒・カラーである nac 製の MEMRECAM HX-3 を使用した。

高速度ビデオカメラは、撮影モードに切り替えると撮影を開始し、外部からのトリガ信号を待ちながら、カメラ自身が持つメモリに録画を行う。メモリが一杯になると、古い時間の撮影データから随時上書きしながら常に新しい時間の撮影結果を録画し、外部からのトリガ信号を待つ。外部からトリガ信号が入力されると、その瞬間からメモリの容量分だけ最後の上書きを行い、撮影を終了する。本撮影では、放電開始のタイミングを電流センサによって検出し、オシロスコープのトリガ機能により高速度ビデオカメラにトリガ信号として送信し、加工開始から数秒間の撮影を行った。さらに、高速度ビデオカメラの各撮影フレームの露光タイミング信号をオシロスコープで記録し、露光信号と放電電流・電圧波形の同期を取った。また、パーソナルコンピュータにより、高速度ビデオカメラの撮影条件の設定と、撮影後に高速度ビデオカメラのメモリに一時保存された撮影データのバックアップを行った。

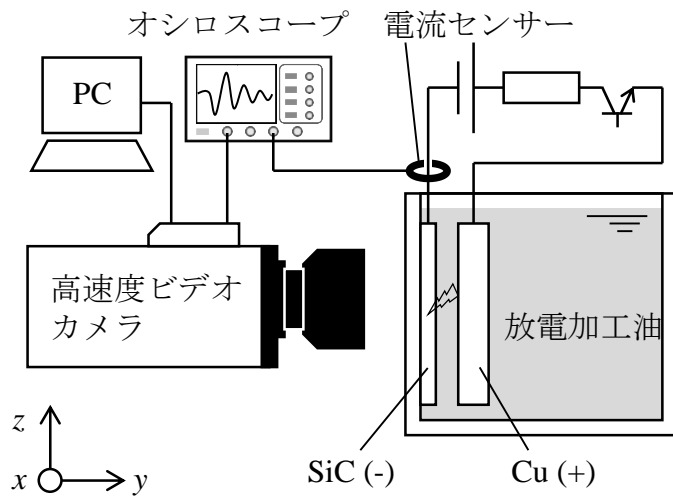
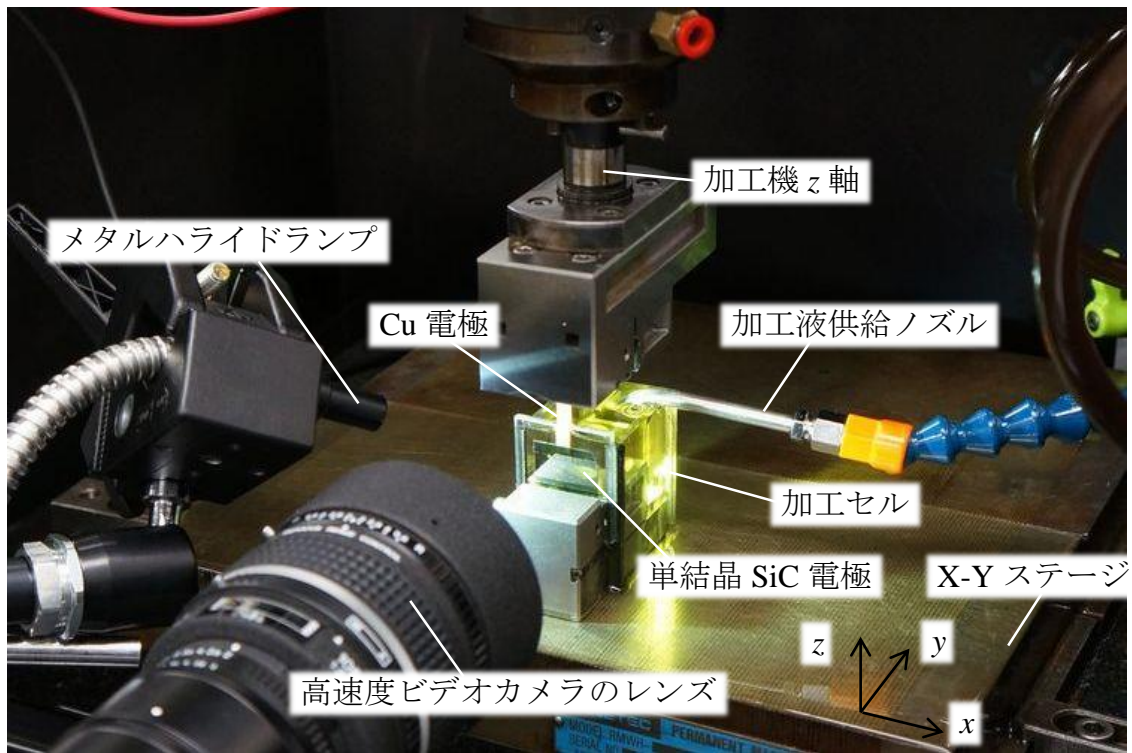


図 2.1 連続放電現象の高速度撮影のための実験装置の外観と構成図

表 2.1 単結晶 SiC ウェハの仕様⁴⁷⁾⁴⁹⁾

厚さ [μm]	380
比抵抗 [Ωcm]	0.013 ~ 0.025
熱伝導率 [W/mK]	490
分解温度 [K]	3000

2.2.2 実験方法

本実験では、板状の Cu 電極と単結晶 SiC 電極を放電加工油で満たされた加工セル中で平行に対向させ、Y 軸方向にサーボして加工を行い、平行平板間の放電加工現象を、透明体電極を通して高速度ビデオカメラにより直接観察した。陽極側の Cu 電極は、板厚 2mm のものを用い、横幅が 5mm となるようにワイヤ放電加工で切断した。また、陰極側の単結晶 SiC 電極は、板厚 0.38mm のものを用い、長方形にワイヤ放電加工で切断し、両者に対向させて幅 5mm×縦 5mm の面を放電加工面とした。観察方法は、図 2.1 の外観図に示すように、カメラレンズの横から観察面に向かって斜めに光を照射する側射照射により行った。光源には、メタルハライドランプを用いた。本実験で用いた放電加工条件を表 2.2 に示す。加工条件は、一般的な形彫り放電加工の荒加工条件を想定して決定し、加工パラメータの放電持続時間を変化させて、三通りの加工条件で加工を行った。また、高速度ビデオカメラの撮影条件を表 2.3 に示す。本実験の加工では、放電持続時間を 10, 50, 100 μ s、放電休止時間を 50 μ s としており、最短の放電周期は、放電持続時間を 10 μ s、放電休止時間を 50 μ s とした 60 μ s である。そこで一枚の撮影フレーム内に、二発以上の放電が写り込まないように、高速度ビデオカメラの撮影フレームを 20,000fps に決定した。

表 2.2 放電加工条件

極性	Cu (+), SiC (-)
放電持続時間 [μ s]	10, 50, 100
放電休止時間 [μ s]	50
放電電流 [A]	10
開放電圧 [V]	120

表 2.3 高速度ビデオカメラの撮影条件

解像度 [pixel]	640 × 640
フレームレート [fps]	20,000
露光時間 [s]	1/20,000

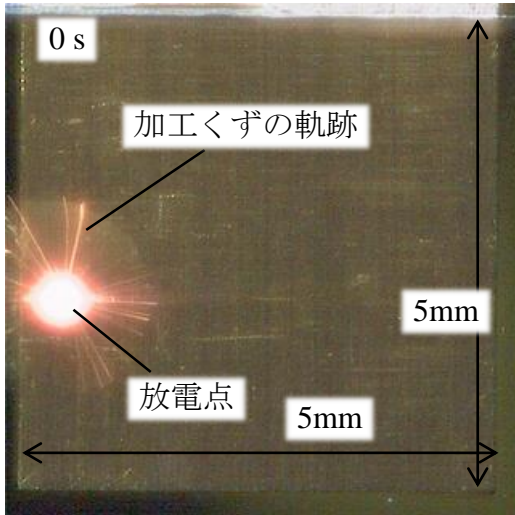
2.2.3 連続放電の極間現象の観察結果

図 2.2 に放電持続時間を $10\mu\text{s}$ とした際の加工開始から、100, 200, 300, 400, 500 発の放電が発生した後の放電加工極間隙の撮影フレームを示す。高速度ビデオカメラの露光中に放電が発生すると、そのフレームにおける放電点では発光が観察された。この発光は、アークプラズマからの発光あるいは電極材料がアーク柱からの熱流束によって高温となり放射された光であると考えられる。ただし、放電後は単結晶 SiC 電極の放電点表面で単結晶性が失われ、表面が粗くなり、光の透過性が損なわれた不透明な放電痕が形成される。さらに、放電の熱によって加工液が気化、解離することによって発生した気泡を観察し、放電の累積に伴って気泡が次々と生成され、気泡同士が合体していく様子を観察した。連続放電中に気泡が合体していく過程は、アクリル板に細線電極を挿入して細線電極同士で連続放電を行うことで、今井ら⁵¹⁾によっても観察されている。また、加工開始から 0.1 秒間もたないうちに、極間のほとんどが気泡で満たされていく過程を観察した。この結果は、電極の一部に透明なアクリル板を埋め込み放電加工を行い、アクリル板に挟まれた間隙を観察することで、極間隙のほとんどが気泡で占められていることを報告した宮島ら²¹⁾の推測、また連続放電中の極間の気泡運動シミュレーションを行い、加工開始からわずか 100ms で 85%が気泡で満たされることを解析した Takeuchi ら²²⁾の報告を裏付けている。以上のことから、放電加工における加工中の極間隙は、加工領域を加工液中に沈めて加工を行っているにもかかわらず、ほとんどが気泡で満たされていることが明らかになった。

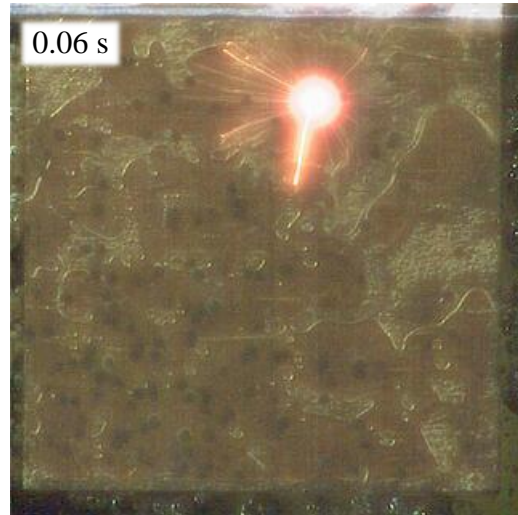
また、放電点を中心として多量の高温に赤熱した加工くずが放射状に飛散する軌跡を捉えた。図 2.3 に加工くずの飛散範囲を示す。飛散した範囲を破線で囲って示している。また、比較のため未処理の画像も合わせて示す。加工開始直後は、極間を占める加工液の割合が多く、放射状に飛散した加工くずは、その放電により生成された気泡の境界まで飛散している様子が観察される。一方、加工が進行するに従い、極間を占める気泡の割合が多くなると、放電により生成された気泡がその周囲に存在する気泡と合体することで、加工液による障壁が無くなり、加工くずがより遠くまで飛散する様子を捉えた。

さらに、放電点から放射状に飛散した高温の加工くずを起点として放電が生じる様子を観察した。図 2.4 に、その様子を捉えた撮影フレームを時系列で並べて示す。フレーム①で放電 A が発生し、放電 A により生成された加工くずの飛散がフレーム②で観察される。フレーム③では、次のパルスの放電 B が発生するが、放電 A により生成された高温の加工くずも同時に観察される。フレーム④では、放電 A の加工くずと同じ箇所に放電 C が発生した。従って、放電 C は、放電 A の加工くずを起点に発生したものと考えられる。さらに、放電 C によって生成された加工くずは、次のパルスの放電 D の起点となっており、放電 D の加工くずは、3 パルス後の放電 G の起点となっていることを観察した。高温の加工くずは、その周囲の気体の温度を上昇させ、電離度も高くなっているものと考えられる。従って、高温の加工くずは、その周囲の絶縁破壊強度を低下させ、これを介して放電が発生しやすいことが推測される。また、Schumacher²⁴⁾と Kunieda ら²⁵⁾は、極間距離の分布と加工くず直径の測定結果から、1.6.1 節の図 1.12 に示すように極間の想像図を描いており、加工くず直径は

極間距離に対して無視できないほど大きく、これらの加工くずを介して放電が発生することを推測した。従って、本観察結果は、Schumacher²⁴⁾とKuniedaら²⁵⁾の推測を裏付ける結果であり、放電加工では放電の発生は、以前の放電によって生成された加工くずを介して発生し得ることが、本実験の直接観察によって明らかとなった。



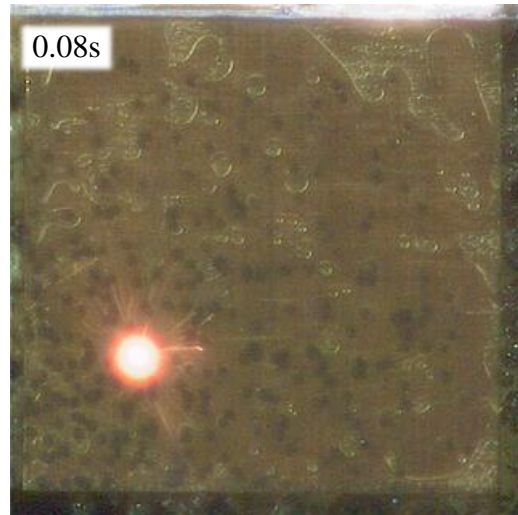
(a) 放電 1 発目



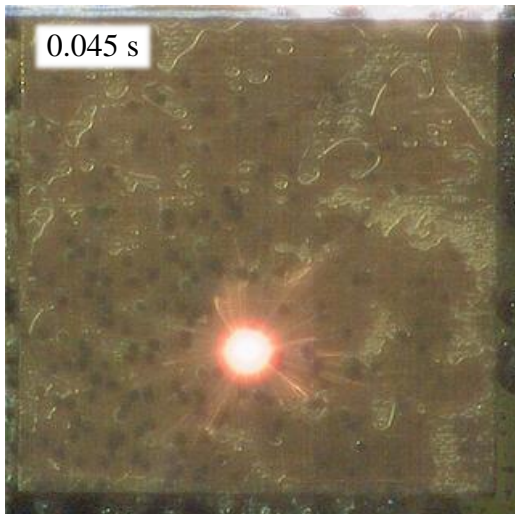
(d) 放電 300 発目



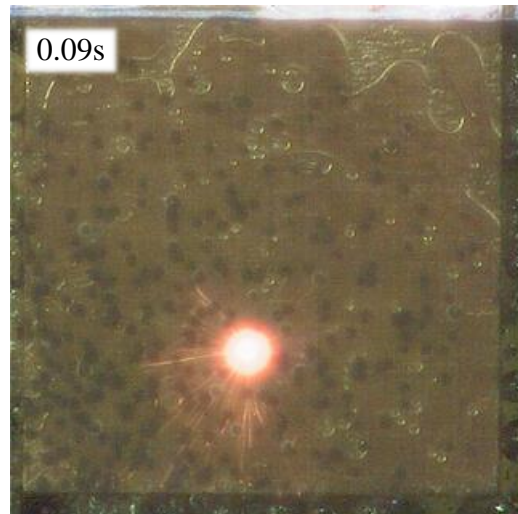
(b) 放電 100 発目



(e) 放電 400 発目

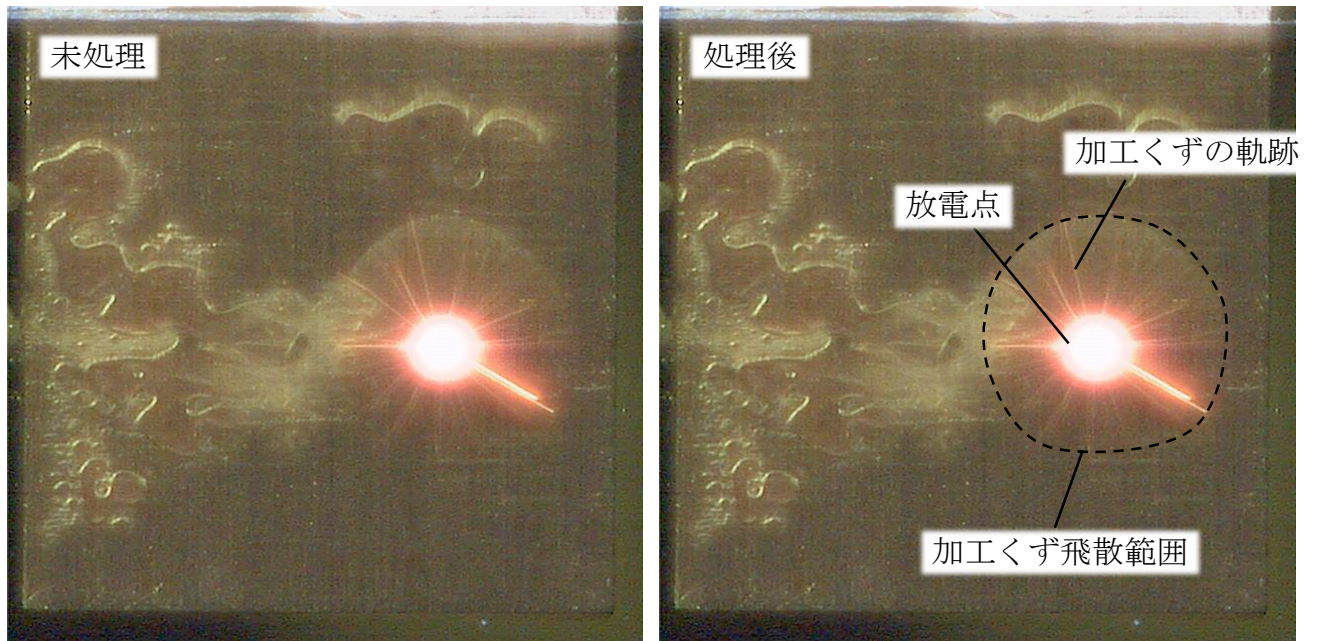


(c) 放電 200 発目

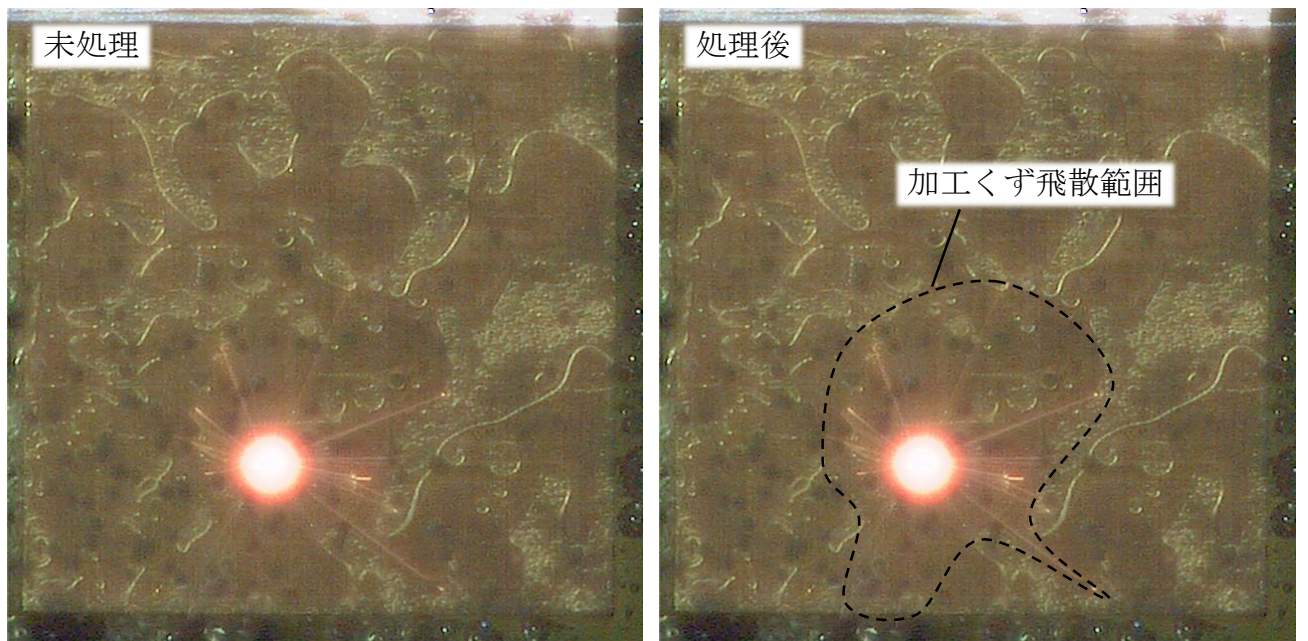


(f) 放電 500 発目

図 2.2 連続放電中における極間の放電現象の高速撮影結果



(a) 加工開始後 0.006 s 経過時



(b) 加工開始後 0.04 s 経過時

図 2.3 加工くずの飛散範囲

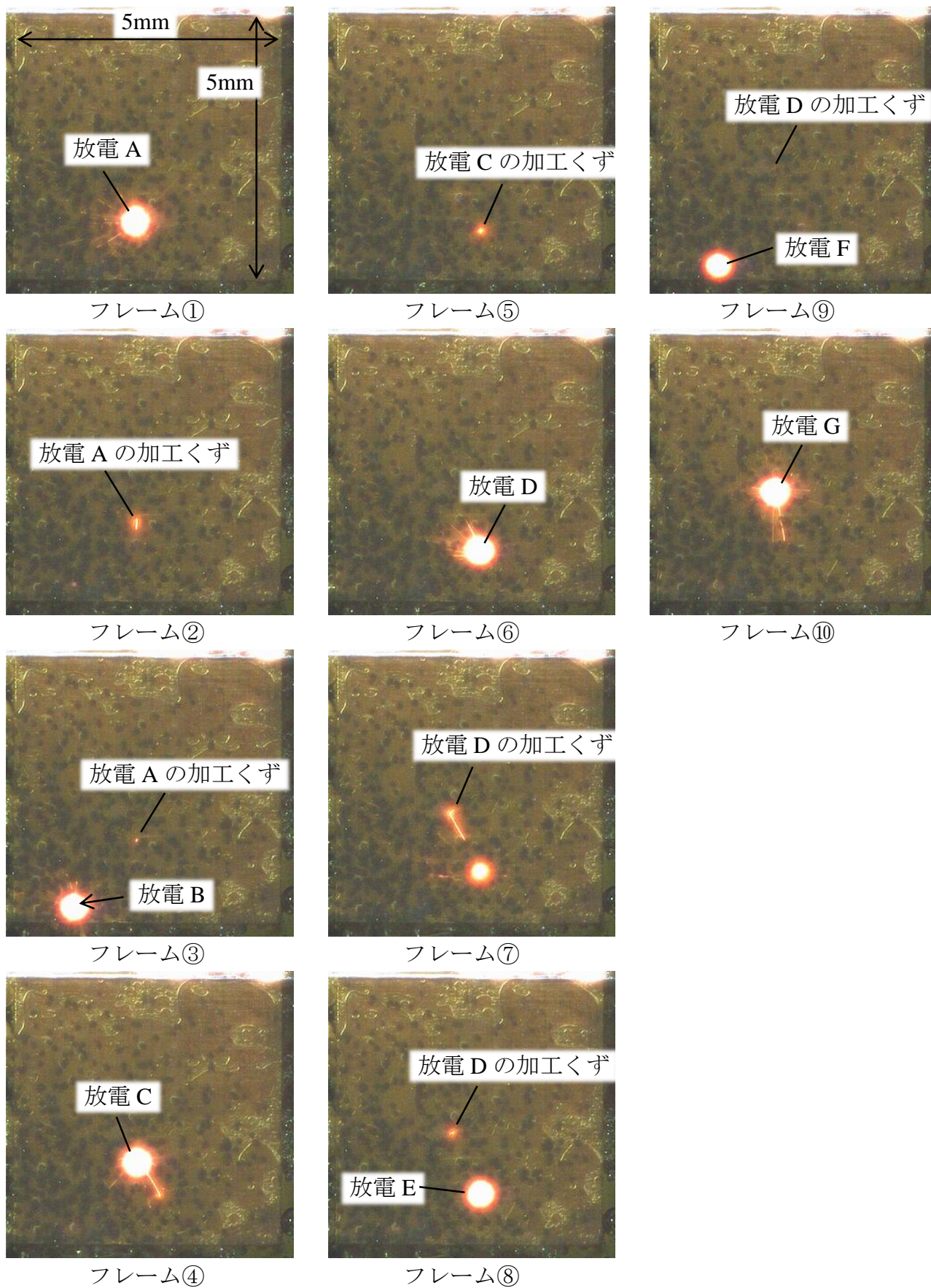


図 2.4 高温の加工くずを起点に発生する放電の観察結果

2.2.4 極間を占める気泡の割合と放電の発生する雰囲気

実加工において放電がどのような雰囲気で発生しているか明らかにすることは、加工現象の把握にとって重要な問題である。1.6.1 節の図 1.12 で示したように、Schumacher²⁴⁾、Kunieda²⁵⁾ は、極間のほとんどは気泡で満たされていと予想している。また Yoshida⁹⁾ は単発放電を液中で生じさせ、加工くずの飛散状況を観察することで、放電直後の加工くずは発生した気泡の境界に集中していることを明らかにした。従って、放電加工は一般に加工液中で加工が行われるが、放電は液中のみではなく、気泡中、またはその境界に多く存在する加工くずを介して発生していることが推測される。

そこでまず、撮影フレームから、放電の発生雰囲気を液中、気液境界、気泡中に分類し、各雰囲気が極間を占める面積割合を調査した。気液境界は曲線であり、有限の面積を持った領域ではない。そこで、気液境界線から片側距離 0.05mm 以内の帯状エリアで放電が生じた際は、その放電の発生雰囲気を気液境界とした。この気液境界の幅 0.1mm は放電痕のサイズを根拠に設定した。また、極間で観察される各気泡の周囲長を全て足し合わせた長さに幅 0.1mm を掛けることで、気液境界面積とした。放電持続時間をそれぞれ 10 μ s、50 μ s、100 μ s と設定して加工した際の放電の累積に伴う、加工液、気液境界、気泡の面積割合の変化を図 2.5 に示す。これらの結果より放電加工面は、加工開始後、数百発の放電発生の際に 70%以上が気泡で占められることがわかった。Takeuchi²²⁾ は、極間の気泡運動シミュレーションを行い、加工中は極間のほとんどが気泡で満たされていると報告している。従って、1.6.1 節の図 1.11 に示す竹内らのシミュレーション結果は、本実験により実験的に実証された。また、放電持続時間が長い条件ほど、放電の累積に対して気泡の占める割合が急激に増加していることが認められる。これは、放電エネルギーが大きいことによる、一発の放電で生成される気泡量が多くなったためであると考えられる。

続いて、加工開始から放電の累積数を、1～50 発、51～100 発、101～150 発、・・・のように 50 発ずつで区切り、各区間における各雰囲気での放電の発生割合を調べた。その結果を図 2.6 に示す。ただし、放電の発生に伴う気泡膨張により気液境界の移動速度が速いため境界の認識ができず、発生雰囲気の分類が不可能であったケースも存在したため、これを不明な場合に分類した。放電持続時間を 10、50、100 μ s としたいずれの加工条件においても、加工開始直後は液中で発生する放電の割合が多く気泡中でほとんど発生していないのに対し、放電の累積に伴い液中での発生割合が減少し、定常状態では 10%以下となる。そして、気泡中での放電の発生割合が増加し、気液境界での放電の発生割合は、放電の累積に伴い減少傾向にあるものの、その割合は気泡中の次に多いことが認められる。これらの要因は、放電の累積にともない極間を占める各雰囲気の割合が変化しているためであると考えられる。加工初期は極間のほとんどを加工液が占めているのに対し、放電の累積に伴い急激に気泡の占める割合が増加している。また、気液境界については、極間を占める気泡の割合が増加するのにともない各気泡同士が合体し、境界が徐々に消滅していくために、その発生割合が減少傾向にあるものと考えられる。また、放電持続時間を 10、50、100 μ s とした場合を比較すると、放電持続時間を長く設定した方が、加工開始後急激に気泡中で発生する放電の割合が増

加する傾向にあることが認められる。これは、放電エネルギーの増加により極間で生成される気泡量が多くなり、極間を占める気泡割合が多くなったためであると考えられる。

上記の結果から各雰囲気での放電の発生割合と、各雰囲気の面積割合が既知であるため、各雰囲気の放電発生割合をその面積で除することにより、各雰囲気での単位面積当たりの放電発生割合を計算した。その結果を図 2.7 に示す。気泡中における単位面積当たりの放電発生割合が、時間とともに増加する傾向が認められる。これは、気泡中の成分ガスの変化や温度変化などに伴い、ガスの絶縁破壊強度が低下することが原因として考えられる。また、放電持続時間を 10, 50, 100 μ s としたいずれの条件においても、単位面積当たりの放電発生割合は、気液境界が最も高いことが認められる。この結果は、加工くずが、同じ放電により生成された気泡の境界に密に分布するという観測結果⁹⁾と照合すると、気泡境界に密に分布する加工くずを介して放電が生じ易いという推測²⁴⁾²⁵⁾が裏付けられる。一方、異種の誘電体が接する境界面に沿って放電が生ずる沿面放電という現象がある³⁾。この沿面放電は、火花放電を起こす電圧より低い電圧で生じる。そのため、放電加工においても、誘電体である気泡と加工液の境界に沿って沿面放電が生じ、その後アーク放電に移行していることも考えられる。従って、気液境界で放電が生じ易いという現象は、気液境界に密に存在する加工くずの影響のみでなく、沿面放電により誘発される可能性も否定できない。しかし、導電性を有する加工くずが、極間距離に対して無視できないほど大きい²⁵⁾という測定結果から、加工くず濃度分布が放電の発生位置に及ぼす影響は大きいものと考えられる。

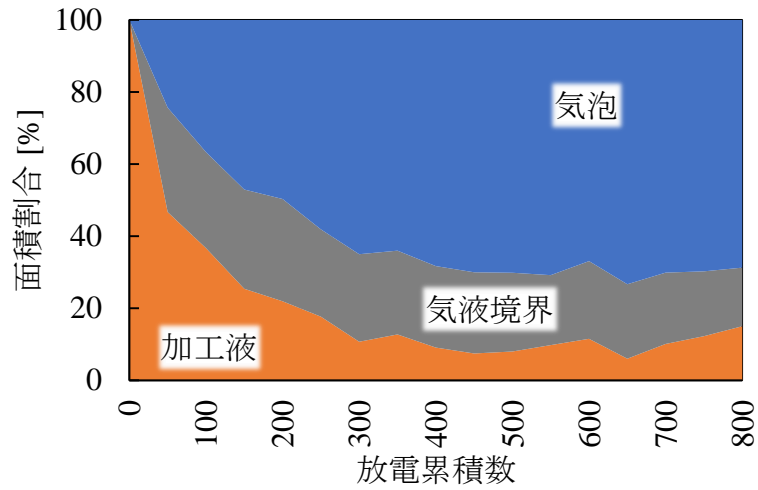
続いて、液中で発生した放電、気液境界で発生した放電、気泡中で発生した放電それぞれについて、放電電流・電圧波形の違いを調査した。図 2.8 に各発生雰囲気で発生した放電の電流波形・電圧波形を示す。これは各発生雰囲気で 10 発の電流値・電圧値を平均した波形である。液中で発生した放電は、電流波形の立ち上がりと電圧波形の立ち下がりが遅く、気泡中で発生した放電は、電流波形の立ち上がりと電圧波形の立ち下がりが速い傾向にあることが認められる。放電加工におけるアークプラズマの直径は、絶縁破壊後の時間経過とともに大きくなることが知られている⁴⁾⁵²⁾。これは、極間のインピーダンスに反映されるものと考えられる。つまり、絶縁破壊直後は、アーク柱は細く、プラズマ中の抵抗が大きい、アーク柱の膨張とともに低下し、放電電圧は減少すると考えられる。早川ら²⁶⁾は、放電休止時間を極端に短くして故意に二発の放電を同じ位置で発生させたときの放電電流・電圧波形を調べており、一発目の放電の電流波形の立ち上がりは遅いが、二発目の放電は、前のプラズマが十分消沈しないうちに再び形成されるために、アーク柱直径ははじめから大きく極間のインピーダンスが小さいために、放電遅れ時間が現れず、電流波形の立ち上がりが一発目の放電に比べて速いことを明らかにしている。さらに、Kojima ら³²⁾は、大気中と、極間に油を染み込ませた油中で生じる単発放電のアークプラズマを、電極の側方から高速度ビデオカメラにより観察しており、液中での放電は、プラズマの周囲に存在する加工液の慣性によってプラズマの膨張が抑制されるために、プラズマ膨張スピードが大気中で生じる放電より遅いことを報告している。これらのことから、連続放電中において、液中で生じた放電の電流波形の立ち上がりと電圧波形の立ち下がりが遅い要因は、絶縁破壊直後のアークプラズマの直径が気泡中で生じた場合よりも細く、プラズマ中の抵抗が大きいためであると考えら

れる。ここで、測定された極間電圧値が、電極材料を金属とした通常の場合に比べて、高いことが認められる。これは、電極材料に金属を用いた場合は、電極内の電圧降下が極僅かであるため、測定される極間電圧は、およそ 20V の放電電圧に等しくなるが、電極材料に金属に比べて比抵抗の高い SiC を用いると、SiC 内の電圧降下が極間電圧の測定値に含まれるためである。さらに、SiC の比抵抗が高いために、表 2.2 に示す設定した放電電流より、電流値が小さいことが認められる。

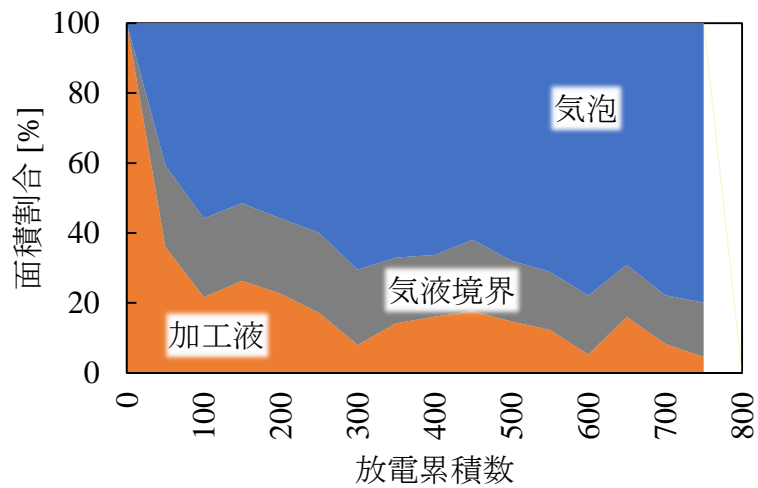
連続放電中において放電は、液中のみではなく、気泡中あるいは気液境界でも発生し得ることがわかった。また、放電の発生する各雰囲気中でプラズマ周囲に存在する流体の慣性が異なるために、プラズマ膨張スピードが異なり、放電波形に違いが現れることがわかった。このことから、放電の発生する雰囲気によってプラズマの膨張スピードが異なれば、電極に加えらる熱流束も異なり、放電痕の大きさに影響を及ぼすことが考えられる。そこで、液中、気液境界、気泡中の各雰囲気中で発生した放電痕直径を比較し、連続放電中において、放電の発生雰囲気が放電痕形状に及ぼす影響を調べた。

図 2.9 に、液中、気液境界、気泡中の各雰囲気中で発生した放電の SiC 電極面に形成された放電痕の例を示す。また、比較のため液中単相と気中単相中で発生させた放電の SiC 面上に形成された放電痕も合わせて示す。液中単相と気中単相の単発放電痕を比較すると、液中の場合はおよそ円形の放電痕であるのに対し、気中の場合は非軸対称な形状が観察された。連続放電における放電痕形状は、液中で発生した場合は液中単相の単発放電痕に、気泡中で発生した場合は気中単相の単発放電痕に似通った形状をしており、気泡境界はその中間に位置していることが認められた。連続放電中の各雰囲気中で発生した放電痕と液中単相、気中単相の放電痕の面積を測定した結果を図 2.10 に示す。この結果より、連続放電における液中、気液境界、気泡中の放電痕面積は、液中単相、気中単相の単発放電痕面積の中間に分布し、各雰囲気における放電痕面積の平均値は、発生雰囲気が気中の条件に近づくにつれ大きくなる傾向にあることがわかった。Takeuchi ら²²⁾は、液中、大気中の単発放電痕径と、連続放電中に生じた放電痕径を測定し、連続放電における放電痕径は加工液中と大気中の中間に分布していることを明らかにしている。さらに、Yoshida ら⁹⁾は液中と大気中で放電持続時間を変化させて単発放電を行い、各放電持続時間で放電痕の直径を比較している。その結果、いずれの放電持続時間においても、液中に比べて大気中で発生した放電痕の直径の方が大きいことが、除去量は液中で生じた放電痕の方が大きいことを明らかにした。これは、液中の単発放電では、加工液の質量や粘性が大きくプラズマの膨張が抑制され、エネルギー密度が異なることに起因すると考察している。従って、本実験結果の傾向は、Yoshida ら⁹⁾、Takeuchi ら²²⁾の結果と一致する。

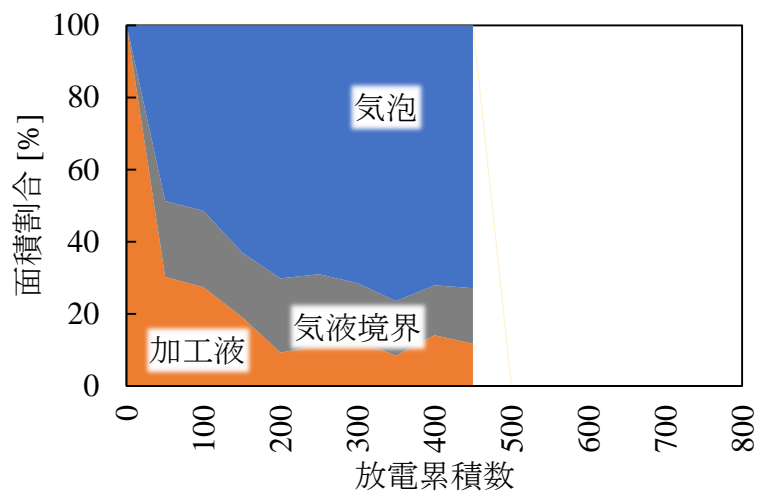
以上のことから、液中で発生する放電の発生割合を増加させることにより、加工速度の向上が見込まれる。また、各雰囲気中で発生する放電波形には、図 2.8 に示すような特徴を有することがわかっている。そこで、加工中の放電波形をリアルタイムで分析し、各雰囲気中で発生した放電の発生割合をモニタリングするとともに、加工液のフラッシング動作と連動させることで、液中で発生する放電の割合を増加させるようなシステムの導入により、より効率的な加工が可能となり、加工速度の向上に繋がるものと考えられる。



(a) 放電持続時間: 10 μ s

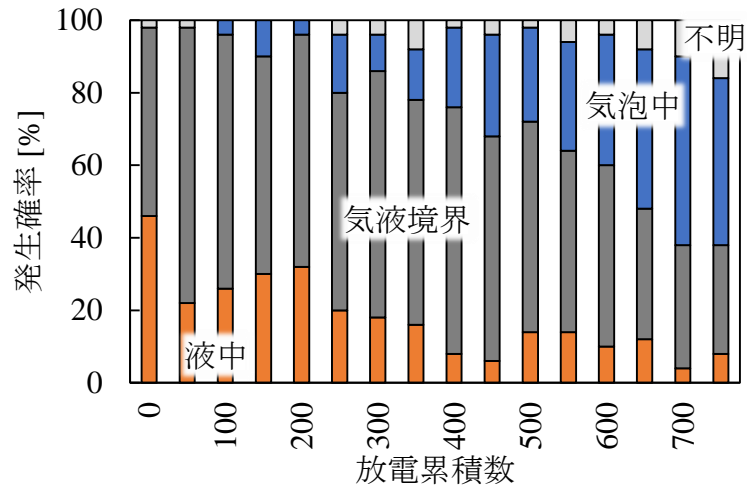


(b) 放電持続時間: 50 μ s

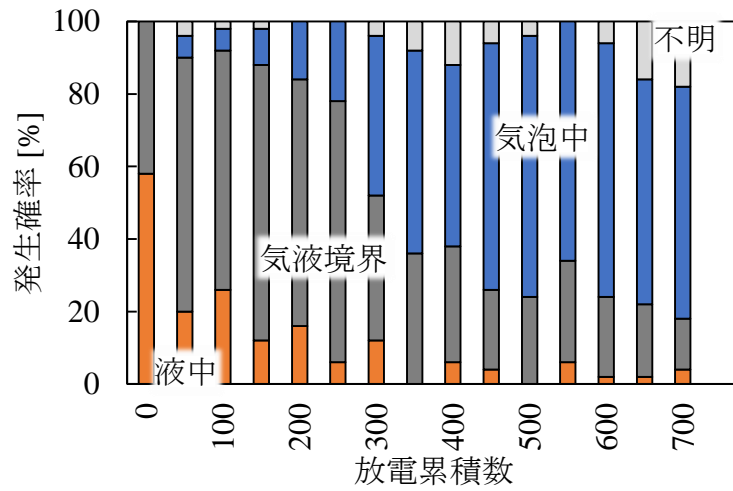


(c) 放電持続時間: 100 μ s

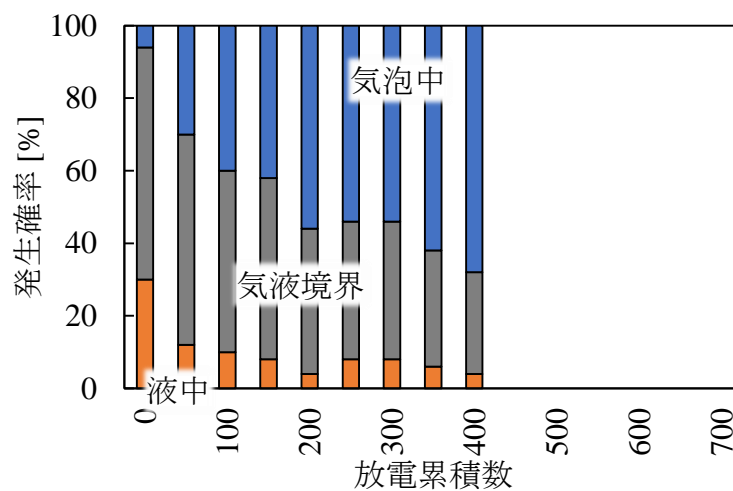
図 2.5 放電の累積にともなう放電加工間隙の各雰囲気面の面積割合の変化



(a) 放電持続時間: 10 μ s

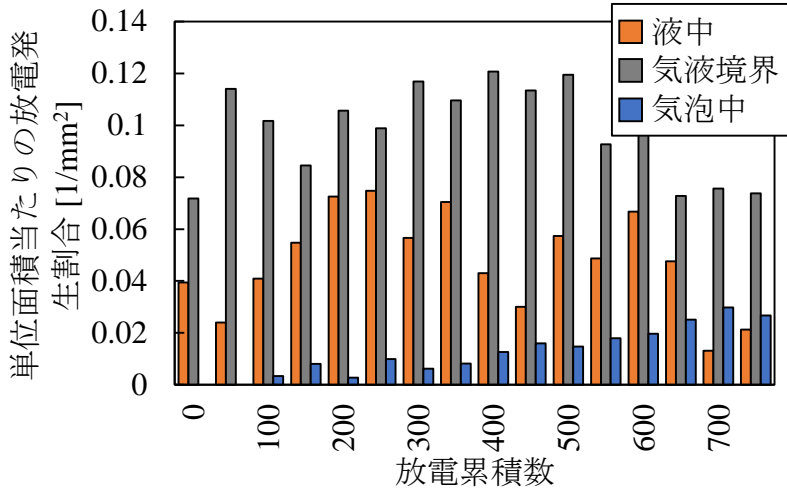


(b) 放電持続時間: 50 μ s

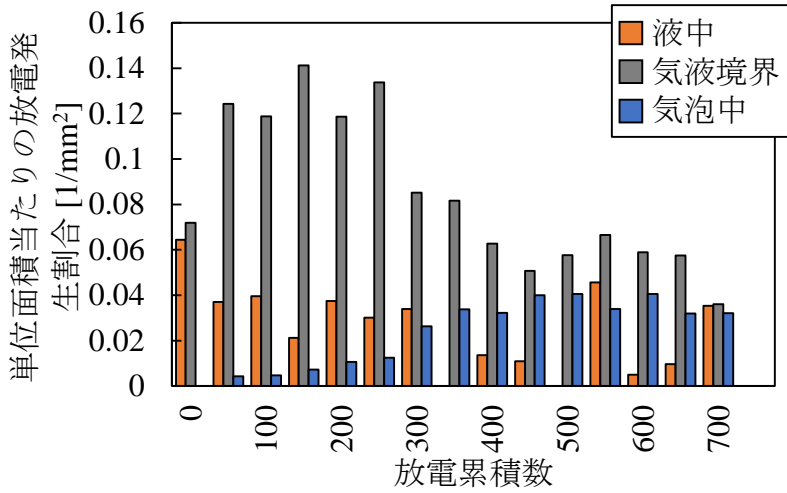


(c) 放電持続時間: 100 μ s

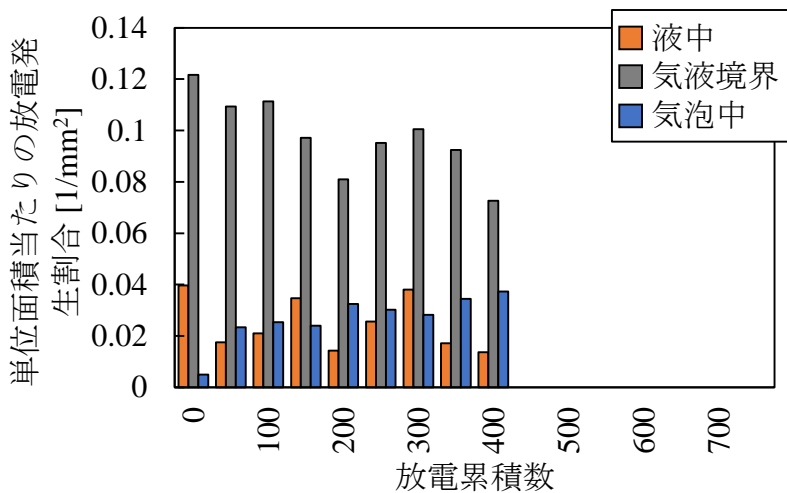
図 2.6 放電の累積にともなう各雰囲気での放電発生割合の変化



(a) 放電持続時間: 10μs

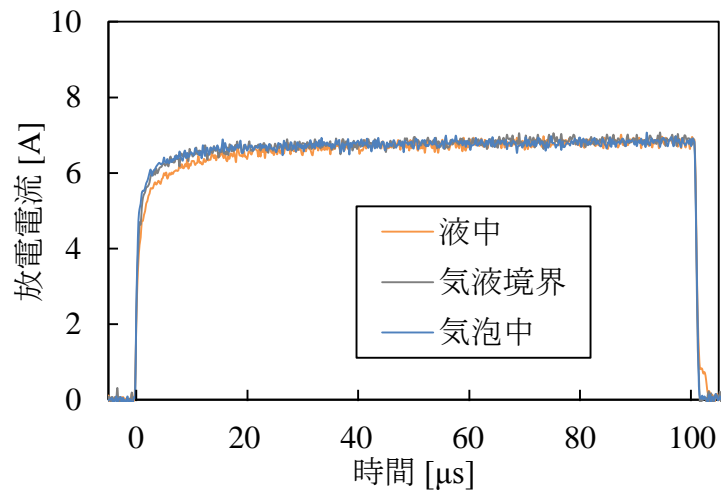


(b) 放電持続時間: 50μs

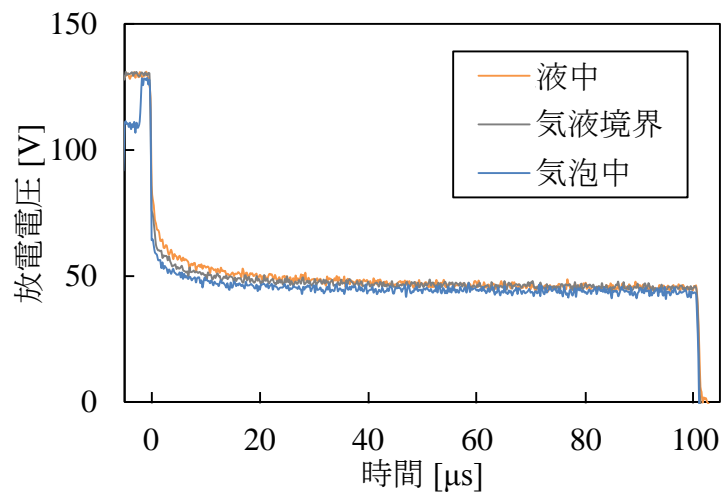


(c) 放電持続時間: 100μs

図 2.7 単位面積当たりの各雰囲気での放電発生割合



(a) 放電電流波形



(b) 極間電圧波形

図 2.8 液中，気液境界，気泡中で発生した放電の電流・電圧波形の比較

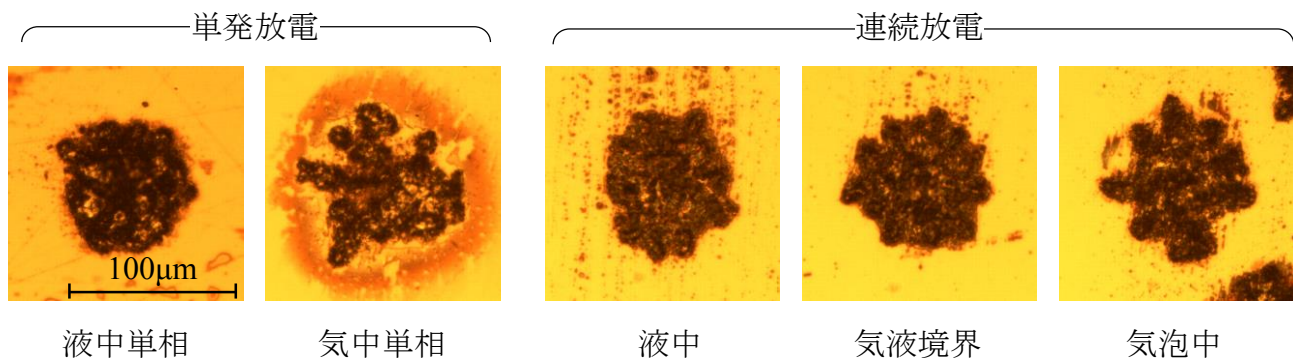


図 2.9 各発生雰囲気における陰極 (SiC) 面上の放電痕

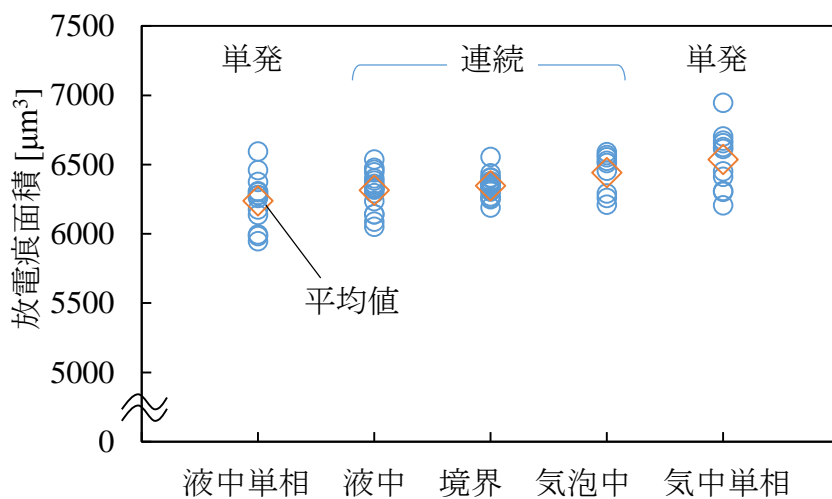


図 2.10 各発生雰囲気における陰極 (SiC) 面上の放電痕面積の比較

2.2.5 パルス列前後の放電点発生間距離の相関

小島ら²³⁾は、工具電極への給電線を分割し、各給電線に流れる電流の比を測定することによって放電点の位置を検出するシステムを考案し、加工深さが浅く加工くずの排出が良好なときは、放電点が加工面全域に均一に分散して発生し、放電点分布はランダムであることを明らかにした。しかし、この方法による測定分解能は、辺長の約5%に留まっている。従って、極間の直接観察が可能である本手法を用いて、連続する放電点間の相対距離の相関性を注意深く調査する必要がある。早川ら²⁶⁾は、銅電極の平行平板間で発生するアークプラズマの温度変化を電磁流体力学解析しており、放電休止時間中における極間の絶縁回復時間を計算した。これにより、プラズマは、放電終了後、数マイクロ秒で消沈することを明らかにした。そこでさらに、放電休止時間を5 μ sより短く設定して連続放電を行うと、放電が同じ箇所に連続して発生する確率が増加することが分割給電法¹⁶⁾を用いることで実験的にわかった。一方、加工が安定して進行している際の放電点分布は、一見ランダムであるように見受けられてきたが、Hanら⁵³⁾はカオス理論を用いることで、加工が安定しているときでさえ放電点分布はランダムではなく、カオスであることを明らかにした。さらに、放電点分布はアトラクタ次元で8次元程度の自由度を持つ現象であることが分かった。そこで本研究では、透明体電極を通して極間を直接観察し、撮影フレームから放電点の位置を測定し、放電点の前後の発生位置の相関と放電によって発生する気泡径との関係を調べ、極間における気泡分布が放電発生位置に及ぼす影響を調査した。本手法の放電点位置の測定精度は0.05mmである。

本実験では、電極に加工面が鏡面に研磨された単結晶SiCウェハを用いており、加工開始直後は鏡面である加工面に形成された放電痕の凹凸が次に発生する放電の発生位置に及ぼす影響は大きいと考えられる。そこで本実験では、加工面が全て放電痕で覆われるまで加工を行った後に、加工を停止させずに加工の定常状態を撮影して、連続放電中の放電点分布を観察した。本実験の加工では、後述するフラッシング法の一つである電極ジャンプ法を用いた。電極ジャンプ法は、ある一定の時間間隔で、加工中に工具電極をジャンプさせ、極間の汚れた加工液と清浄な加工液の置換を行い、気泡や加工くずの排出を促進している。図2.11に、加工面が全て放電痕で覆われた後の連続放電中の観察結果の一例を示す。単結晶SiC加工面が放電痕で覆われると、透過性が損なわれて不透明になるが、材料中の単結晶性は損なわれていないために、放電痕面上に再度放電が発生した場合においても高温になった放電痕からの発光は観察可能である。

図2.12に、加工面が全て放電痕で覆われるまで加工した後の、工具電極がジャンプ動作した直後から測定した800発の放電の放電点分布を示す。放電点分布の横軸と縦軸は、電極横方向、縦方向に沿った放電点の位置を示している。放電が加工面上でおよそ均一に分散して発生しており、安定した加工状態であることが認められる。図2.13(a), (b), (c)に放電持続時間を10 μ s, 50 μ s, 100 μ sと変更して加工を行った場合の*i*番目に発生した放電と*I+1*番目に発生した放電点の発生間距離のヒストグラムを示す。横軸は放電点の発生間距離を示し、縦軸は800発分の放電のうちの各放電点発生間距離における頻度を示している。また、実験

結果である(a),(b),(c)との比較のために、仮に5mm×5mmの正方形領域内で放電がランダムに発生した場合について、(a),(b),(c)と同じ統計処理を行った結果を図2.13(d)に示す。つまり、x座標とy座標のそれぞれに対して乱数を放電数分だけ発生させ、相前後する放電点間の相対距離を計算して作成したシミュレーション上の分布である。また、このような問題に対する理論的な解析解は既に得られており⁵⁴⁾、その理論曲線を破線で図2.13(d)に合わせて示す。この結果より、乱数を発生させてヒストグラムを作成すると、その発生頻度分布は裾野の広い緩やかな山なりのヒストグラム形状を描いており、数学的に得られる理論曲線とおおよそ一致していることが認められる。一方、放電持続時間を10 μ s、50 μ s、100 μ sとした実際の放電点発生間距離のヒストグラムでは、それぞれ放電点発生間距離0.6mm、0.75mm、1mm付近にピークを有するヒストグラム形状であり、乱数を発生させた場合のヒストグラム形状とは明らかに異なることがわかる。ここで、図2.14に各放電持続時間で連続放電中に発生した気泡をランダムに50発選択し、気泡半径を測定した結果を示す。この発生間距離のピーク値と各放電持続時間における気泡半径を比較すると、その値がおおよそ一致していることが認められる。従ってこの結果は、放電点の発生位置分布は完全なランダムではなく、連続放電中の相前後する放電の発生位置に関して、 $i+1$ 番目の放電は、 i 番目の放電によって生成された気液境界で発生する確率が高いことを示していると考えられる。

また、連続放電中の極間を観察すると、放電が極間で次々に発生することで、気泡同士の合体や新しい気泡の発生によって気泡の形状は刻々と変化していく様子を観察した。従って、気液境界に集中していた加工くずは、次々と発生する気泡による加工液の流れによって、気液境界から拡散したり、あるいは気液境界の変形にともなって移動していくことが考えられる。そこで、放電持続時間を10 μ sとした場合において、 i 番目に発生した放電点と $i+n$ 番目に発生した放電点との発生間距離の相関を調べた結果を図2.15に示す。この結果より、 n の値が大きくなるほど図2.13(d)に示すランダムに発生した場合のヒストグラム形状に近づくことが分かる。この要因は、 i 番目の放電によって生成された加工くずの分布が、次々と発生する放電の気泡膨張圧力によって変化するためであると考えられる。

一方、2.2.3節の図2.2、図2.3で示したように、連続放電を行うと、極間では気泡が次々と生成され、放電の累積にともなってこれらの気泡が徐々に合体していき、数百発の放電の発生うちに極間のほとんどが気泡で満たされ、極間中では気液境界がほとんど消滅している様子が観察された。従って、図2.13では放電800発に対して統計処理を行ったが、800発の放電が累積して発生する間に極間のほとんどは気泡で満たされ、連続する放電点の発生間距離の規則性は、徐々に変化することが推測される。そこで、図2.13(a)に示した放電持続時間10 μ sとした結果について、ジャンプ動作した直後から200発、201~400発、401~600発、601~800発のように、放電の累積を200発ごとに区切り、各区間でヒストグラムを作成して比較した。結果を図2.16に示す。これらの結果より、放電の累積にともなう、連続する放電点の発生間距離のピーク値に変化は認められなかった。この結果は、上述の推論とは異なる結果である。森本ら⁵⁵⁾は、極間隙の流体解析と放電点探索の連成により形彫り放電加工シミュレーションを行っている。その際の放電点探索のアルゴリズムは、極間隙での加工くず挙動をシミュレーションし、加工くず濃度分布を予測することにより行われている。

この加工くずは、放電で生じる気泡の運動にともなって移動するとし、放電がもたらす流れ場を解析している。その結果、加工くずは放電の発生にともない放電点から半径方向に移動し、加工くず濃度分布は極間隙で不均一になることを示した。ここで、加工開始からおよそ0.8秒程度経過した際の極間の観察画像を図2.17に示す。この観察フレームは、加工開始直後を観察した図2.2に比べて長時間加工した際の極間の様子であり、図2.2では観察できなかった加工くずと考えられる黒い靄のような領域を観察した。図2.17に示すように、放電が発生すると、放電の気化爆発により加工くずを多く含む不透明なスラリーが半径方向に吹き飛ばされることで、放電点近傍の透過率が高くなり、その周囲にリング状の加工くず濃度分布の高い領域を形成している様子が観察された。また、次の放電が加工くず濃度分布の高い領域で発生し、その放電点の周囲にリング状の加工くず濃度の高い領域が再度形成された。従って、図2.16の傾向は、以下のように説明されるものと考えられる。つまり、図2.18に示す模式図のように、放電の累積によって極間を占める気泡割合は上昇するが、加工くずも極間に多く存在する。極間の気泡割合が増加しても、加工表面は、加工液と加工くずの混ざり合ったスラリー状の薄い層で覆われているものと推測される(図2.18(a))。放電の発生により気化爆発力が生じると、スラリーは放電点を中心に半径方向に押し流され、放電点を中心にリング状の加工くず濃度分布の高い領域を形成し(図2.18(b))、その領域が次の放電点となる確率が高いものと考えられる。この半径が、液中で放電が発生した際に形成される気泡半径とおおよそ等しいために、図2.16のような結果が得られたものと考えられる。

以上の結果より、放電加工では、加工が安定して進行しているときでさえ、放電点の発生分布は完全なランダムではないことがわかった。これは、極間における加工くず濃度の不均一分布に依存しているものと考えられる。また、放電は、直前の放電によって発生した気泡の境界に密に存在する加工くずを介して発生する確率が高いことがわかった。

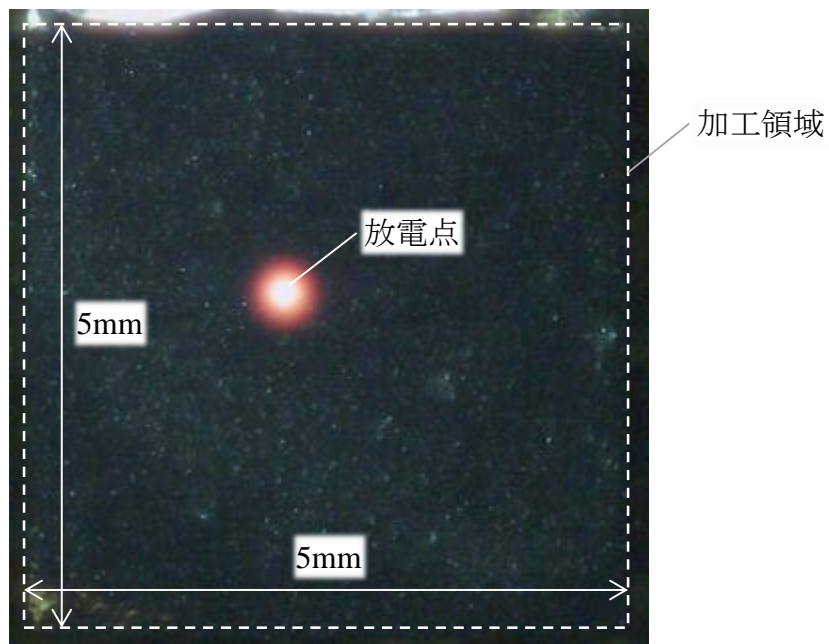


図 2.11 加工面が全て放電痕で覆われた後の連続放電の観察結果

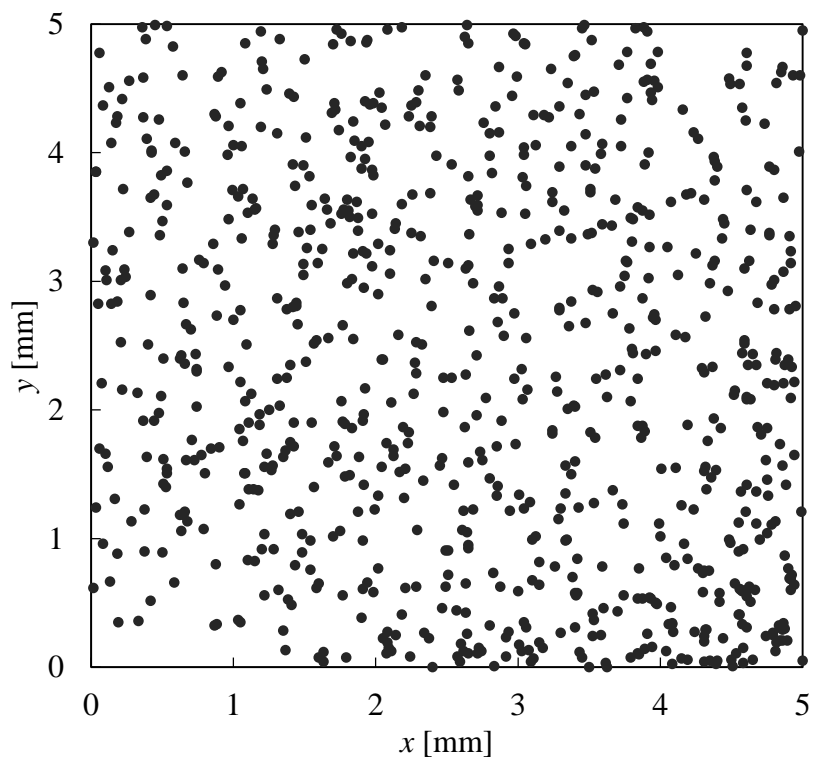
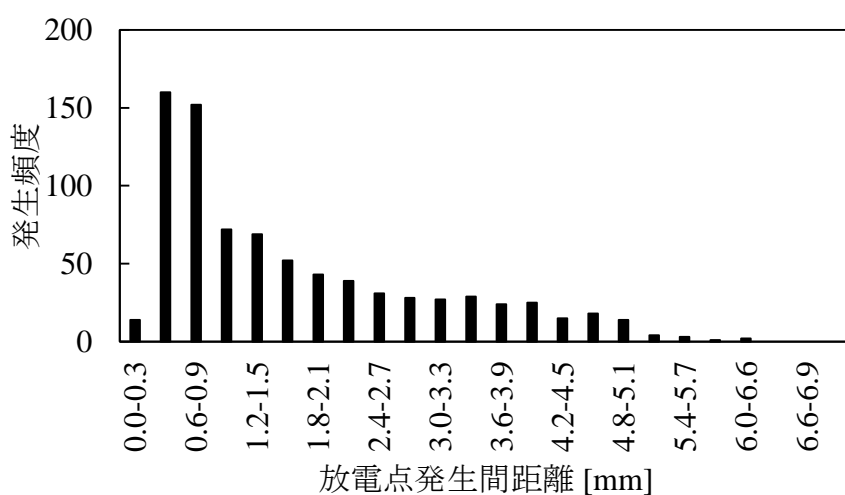
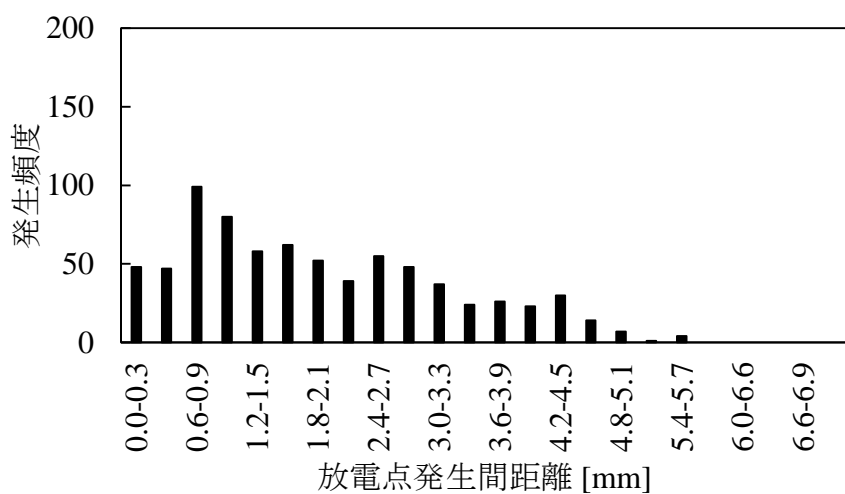


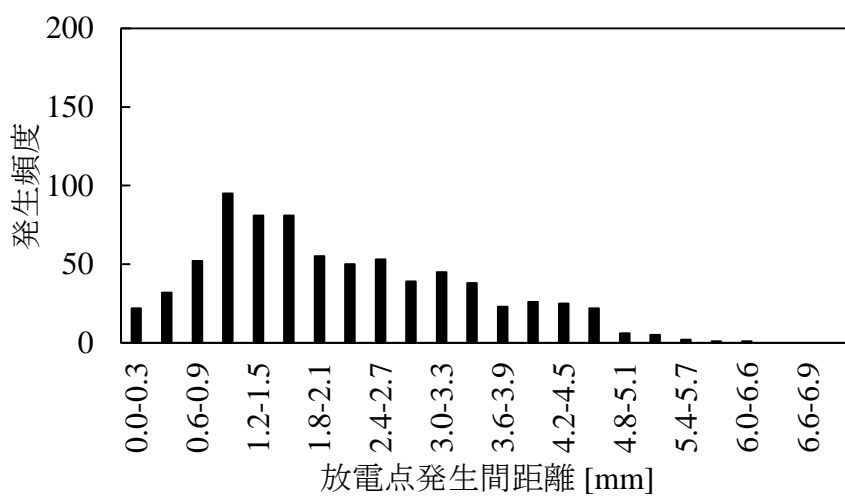
図 2.12 加工面が全て放電痕で覆われるまで加工した後に測定した 800 発の放電点分布



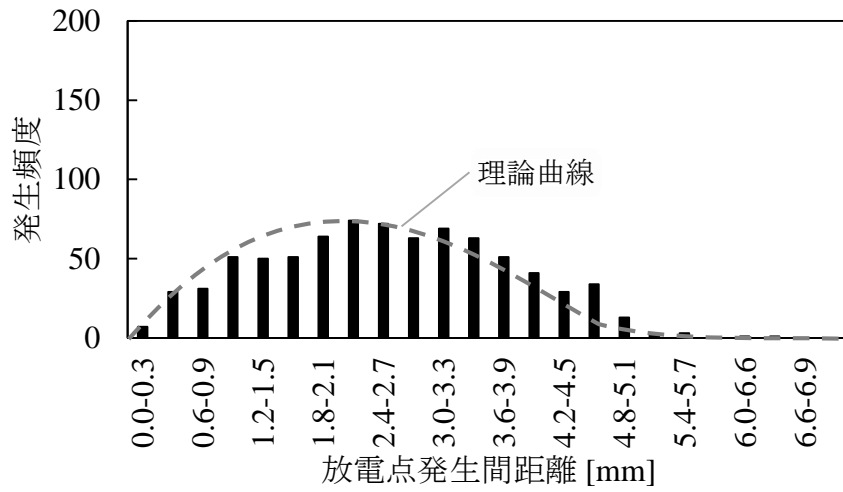
(a) 放電持続時間: 10 μ s



(b) 放電持続時間: 50 μ s



(c) 放電持続時間: 100 μ s



(d) 乱数を発生させたランダム分布

図 2.13 i 番目と $i+1$ 番目に発生した放電点の発生間距離のヒストグラム

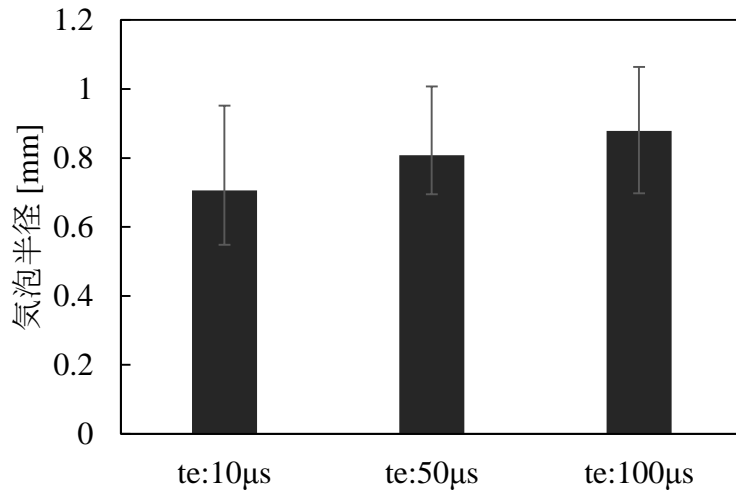
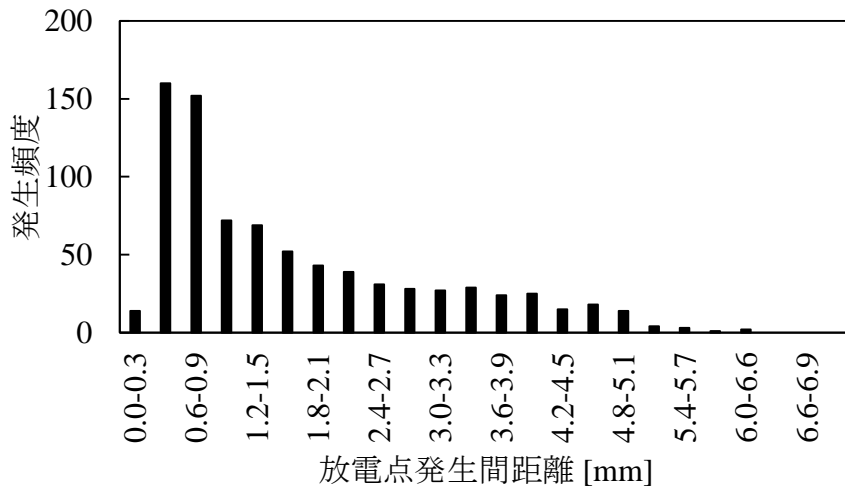
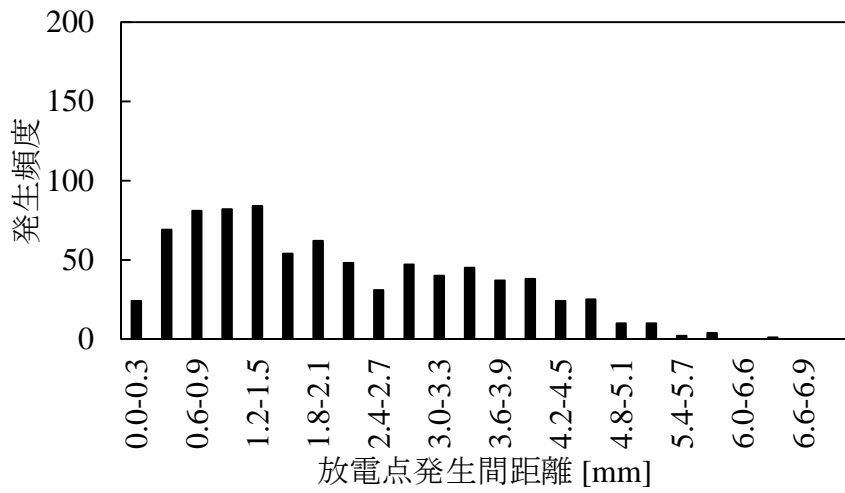


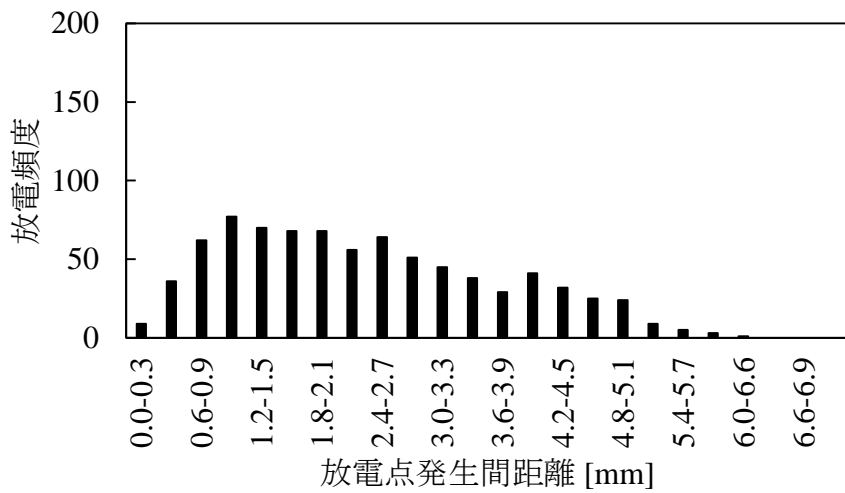
図 2.14 連続放電中の各放電持続時間の気泡半径



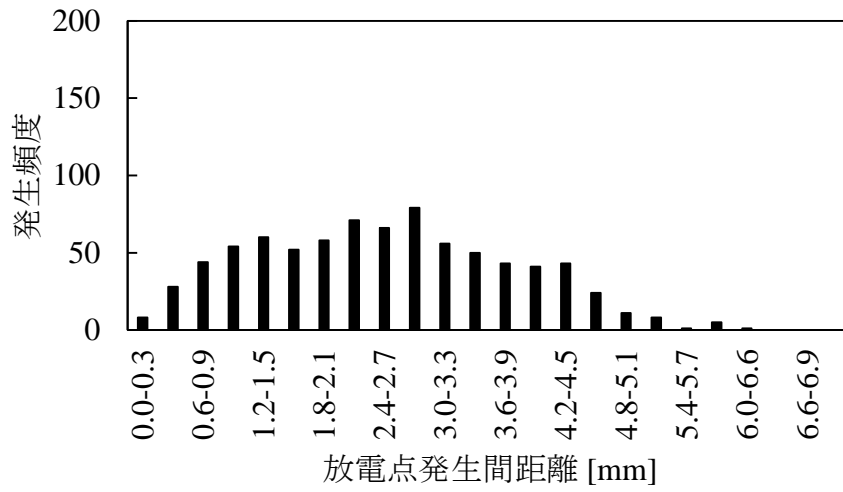
(a) i 番目と $i+1$ 番目の間の相関



(b) i 番目と $i+5$ 番目の間の相関

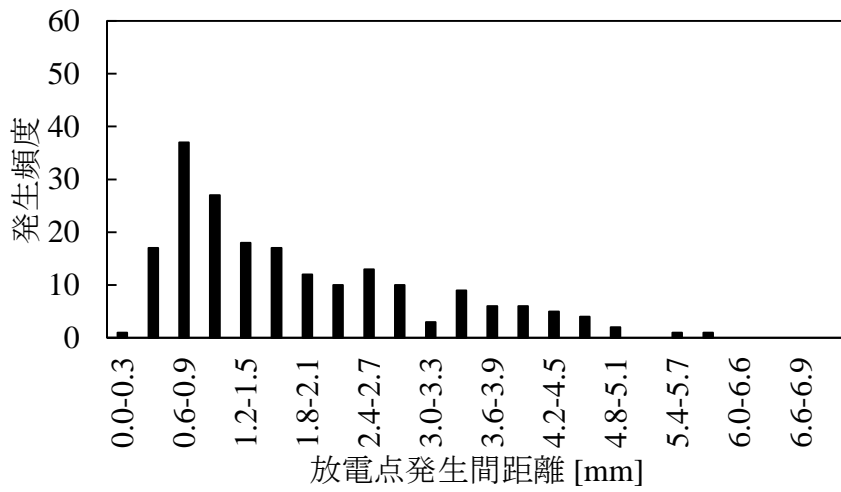


(c) i 番目と $i+10$ 番目の間の相関

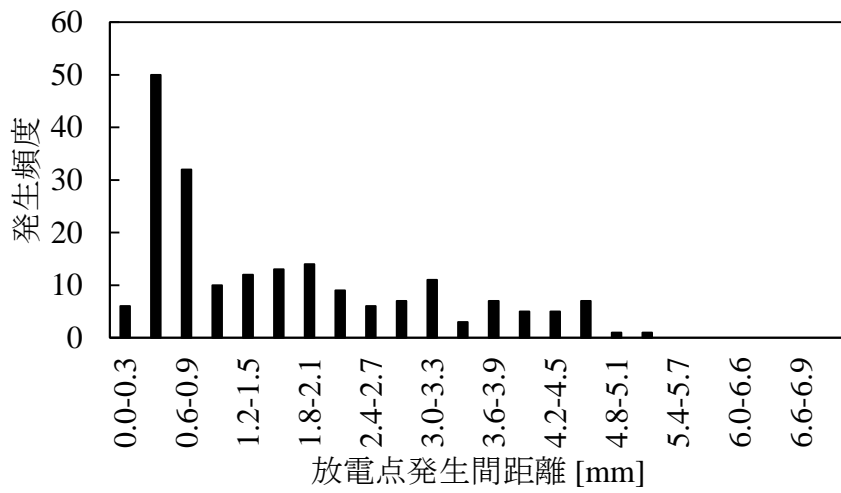


(d) i 番目と $i+20$ 番目の間の相関

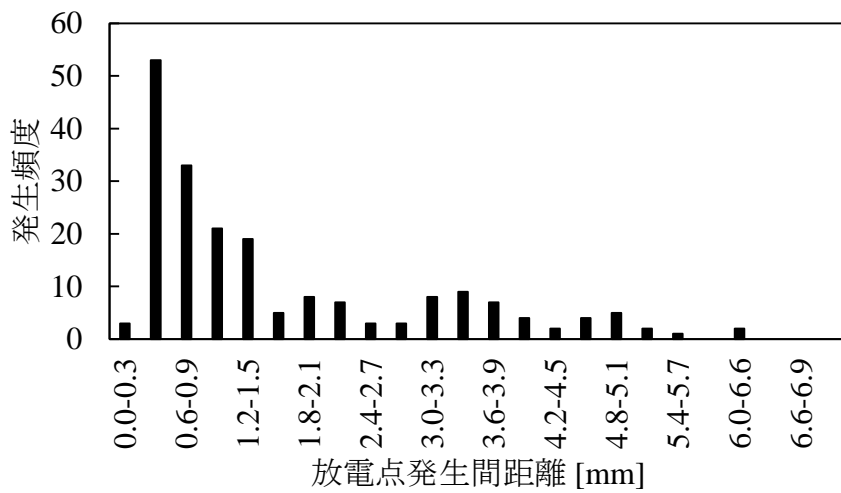
図 2.15 i 番目と $i+n$ 番目の放電点発生間距離のヒストグラム ($t_e = 10\mu\text{s}$)



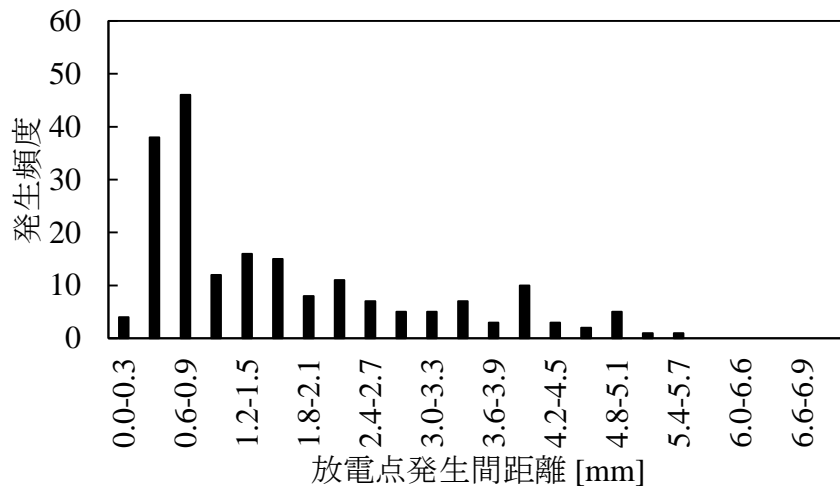
(a) 放電累積数 1 ~ 200 発



(b) 放電累積数 201 ~ 400 発



(c) 放電累積数 401 ~ 600 発



(d) 放電累積数 601 ~ 800 発

図 2.16 放電の累積にともなう放電点発生間距離のヒストグラムの変化 ($t_e = 10\mu\text{s}$)

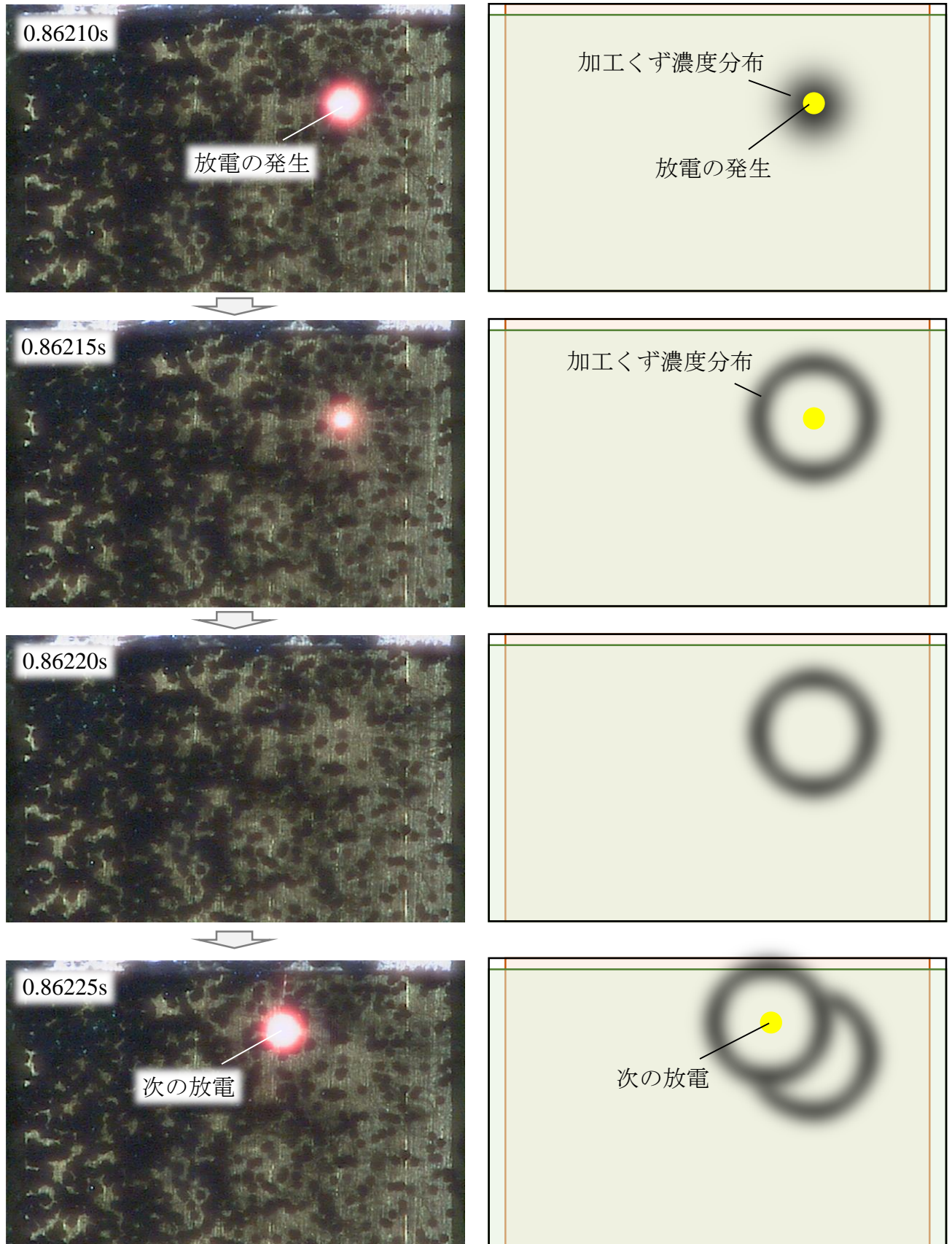
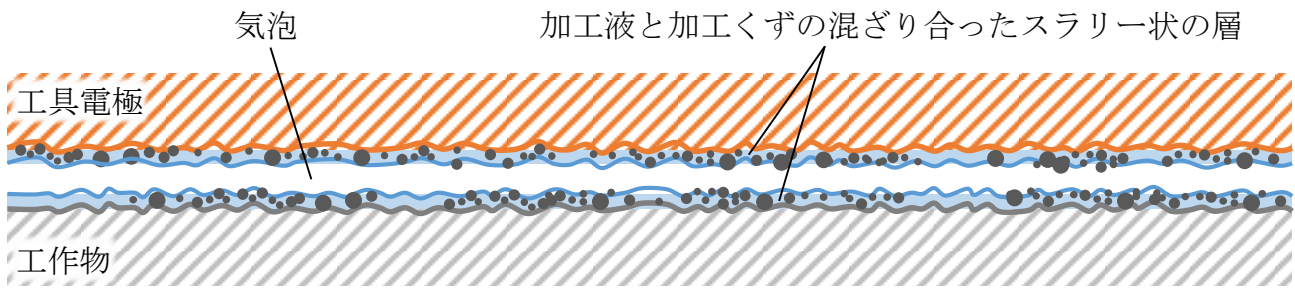
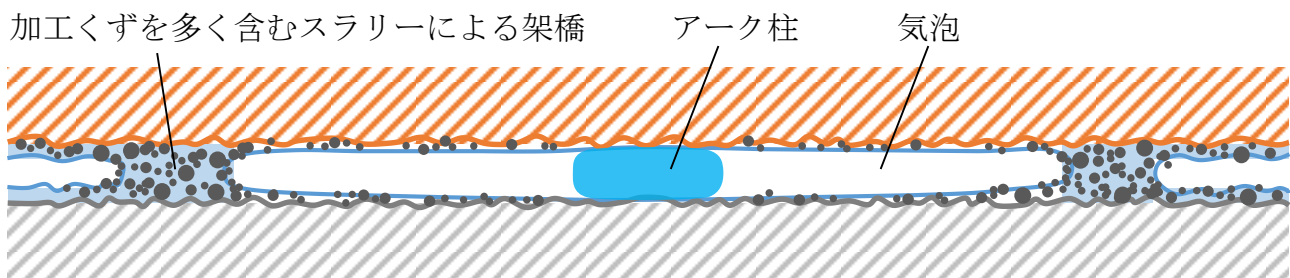


図 2.17 放電の発生にともなう加工くず濃度分布の変化



(a) 気泡で満たされた極間隙



(b) 放電の発生後

図 2.18 放電の発生による加工くず濃度分布の変化

2.3 フラッシングが加工現象に及ぼす影響

形彫り放電加工では、加工面積が大きい場合や、加工間隙の狭い仕上げ加工条件下、また加工の進行にともない加工深さが深くなると、異常放電の発生や放電の偏在が生じ、加工が停滞してしまう現象が問題となっている。その原因としては、極間で発生した加工くずの停滞や、冷却性能の影響が考えられており、これに対して実加工では、加工の安定性を保つことを目的に、加工液を極間隙に供給するフラッシングが行われている。フラッシングには、加工間隙の外に配置したノズルから加工液を加工間隙に向けて噴流する噴射法、工具電極や工作物に設けられた穴から加工液を極間隙に直接噴流する噴流法、工具電極を周期的にジャンプさせ極間の汚れた加工液と清浄な加工液の置換を行う電極ジャンプ法などがある。これらは、極間の冷却作用や、気泡や加工くずの排出作用を促進する役割を担っていると考えられる。しかし一方で、工具電極の穴から加工液を噴流した場合に、加工速度や加工精度が噴流を行わなかった場合に比べてむしろ低下することも報告されている⁵⁶⁾。また、ノズルによる噴射法では、噴射ノズルの位置によって効果が偏在することから、均一な加工面を得るために、工作物の左側と右側に設置したノズルを加工間隙に沿って前後に往復運動させることによって、加工くずの分散・排除を促進させる方法が Masuzawa ら⁵⁷⁾によって開発されている。今井ら⁵¹⁾は、透明樹脂版に複数の金属細線を挿入した工作物と丸棒電極を対向させて加工液中で連続放電を行い、平行平板間を流動する気泡を高速度ビデオカメラで観察するとともに、鉛直方向にジャンプ動作を行った際の気泡の排出過程の観察を行っている。これにより、ジャンプ降下時の加工液の流れによって加工面の縁に追いやられた気泡が一気に排出される過程や、それにともない気泡周囲に無数に存在していた加工くずの一部が排出される様子、また加工面の中心付近が淀み点となり、ジャンプ終了後も排出されずに極間に残留する気泡が存在することも観察している。

そこで本実験では、上述したノズルによる噴射法、工具電極に設けた穴から行う噴流法、工具電極のジャンプ動作による電極ジャンプ法の三通りのフラッシング方法を用いて加工を行い、透明体電極を用いて極間を可視化することで、各フラッシングが極間の放電現象に及ぼす影響を調査し、その効果を比較した。

2.3.1 ノズルによる噴射法

2.3.1.1 実験方法

図 2.19 に実験装置の構成図を示す。本実験では、板状の Cu 電極と単結晶 SiC 電極を放電加工油で満たされた加工セル中で平行に対向させ、Y 軸方向にサーボして加工を行い、平行平板間の放電加工現象を、透明体電極を通して高速度ビデオカメラにより直接観察した。フラッシングは、放電加工油を加工間隙の側方に配置した噴射ノズルを用いて噴射することに

より行った。噴流流量は、6.5ml/s の一定流量で行った。陽極には板厚 2mm、横幅 5mm の Cu 電極を、陰極には板厚 0.38mm の単結晶 SiC 電極を用い、両者を対向させて幅 5mm×縦 5mm の面を放電加工面とした。観察方法は、カメラレンズの横から観察面に向かって斜めに光を照射する側射照射によって行った。光源には、メタルハライドランプを用いた。放電加工条件は、2.2.2 節の表 2.2 に示す条件を用いた。放電持続時間は 10 μ s とした。また、高速度ビデオカメラの撮影条件も 2.2.2 節の表 2.3 に示す条件を用いた。

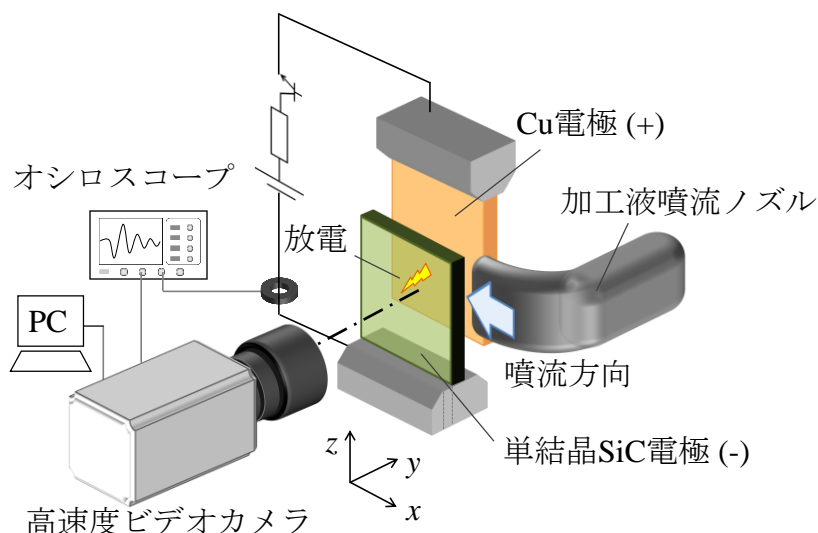


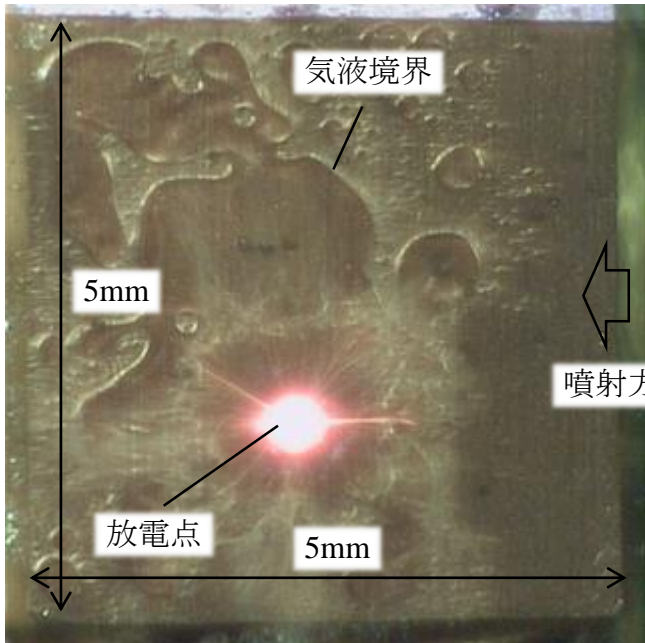
図 2.19 ノズル噴射法のための実験装置の構成図

2.3.1.2 ノズル噴射法を用いた場合の極間現象の観察結果

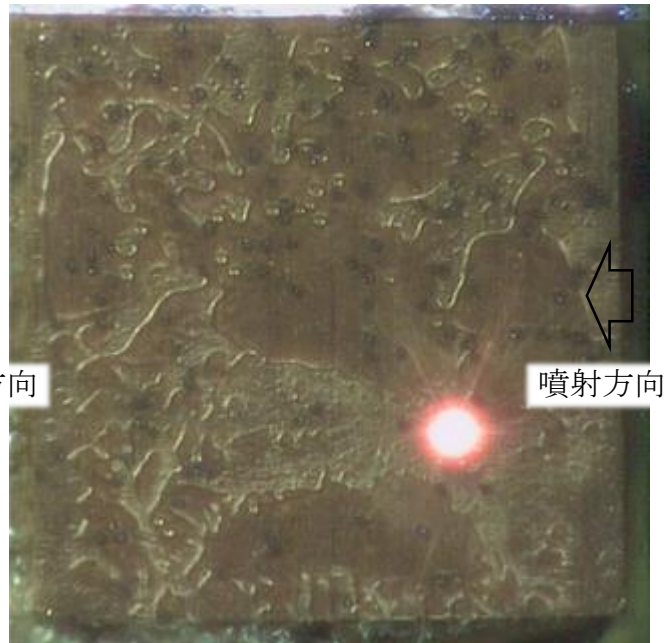
図 2.20 に観察画像に対して右側方から加工間隙に向けて噴流を行った場合の連続放電中の各時刻における撮影結果を示す。ノズル噴射を行った場合、特に図 2.20 (a) の撮影画像からわかるように、放電により極間で生成された気泡が、側方からの加工液噴射によって下流に向かって移動する様子が観察された。しかし、その移動速度は遅く、図 2.20 (b), (c), (d) からわかるように、加工開始後 0.1 秒も満たないうちに連続放電によって極間のほとんどが気泡で満たされていることを確認した。このことから、放電中にノズル噴射によるフラッシングが、極間に存在する気泡等の介在物の除去に十分に寄与しているとは考え難い。図 2.21 に、放電の累積にともなう極間を占める気泡の面積割合の変化を示す。また比較のため、ノズル噴射を行わなかった場合の結果も合わせて示す。これらの結果より、ノズル噴射の有無に関わらず、加工開始後数百発の放電で極間のおよそ 70% が気泡で満たされており、本実験においてはノズル噴射による放電中の極間の気泡排出効果はほとんど認められなかった。この要因は、放電中の加工間隙の幅がおよそ数十マイクロメートル程度と非常に狭いために、ノズル噴射による加工液が加工間隙に流れ込み難いためであると考えられる。一方、同撮影フレームから、放電により生成された加工くずの挙動を追跡することは困難であるが、加工

くずは気泡の境界に密に分布しているものと考えられ、気泡の排出効果が低いことから、ノズル噴射による加工くずの排出効果も低いものと考えられる。加工開始から 0.8s 経過 (図 2.20 (d)) すると、放電点分布の偏在が確認され、放電波形を確認すると、異常放電がおおよそ 100ms ほど続いていることがわかった。この現象は、ノズル噴射による加工くずの排出効果が小さいために、極間で加工くず濃度が上昇し、放電の偏在に至ったものと考えられる。

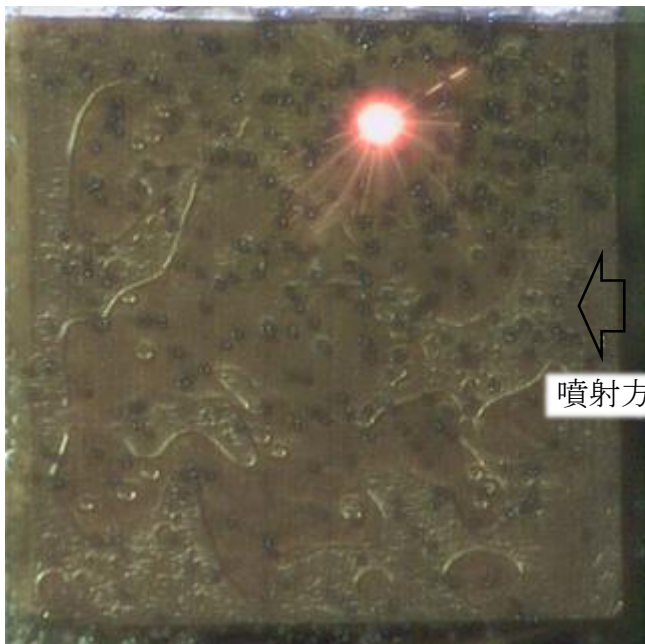
以上の結果から、本実験条件下においては、ノズル噴射によるフラッシングが、極間の流れ場に及ぼす影響は小さく、放電中における極間の介在物の排出効果はあまり認められなかった。ただし、後述の電極ジャンプ法と併用すれば、電極ジャンプ動作時のノズル噴射によるフラッシング効果は有効であると考えられる。



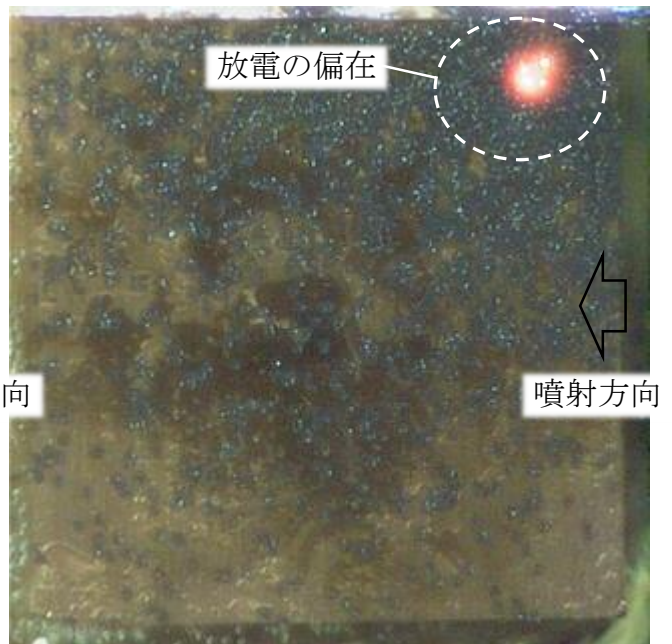
(a) 経過時間 : 0.02s



(b) 経過時間 : 0.05s



(c) 経過時間 : 0.10s



(d) 経過時間 : 0.80s

図 2.20 ノズル噴射法を用いた場合の連続放電中の極間現象の高速度撮影結果

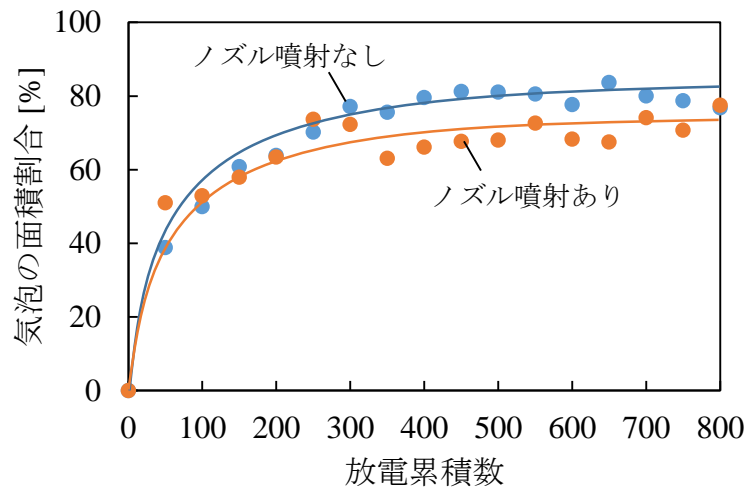


図 2.21 ノズル噴射の有無による極間を占める気泡の面積割合の違い

2.3.2 工具電極穴による噴流法

2.3.2.1 実験方法

図 2.22 に実験装置の構成図を示す．本実験では，板状の Cu 電極と単結晶 SiC 電極を放電加工油で満たされた加工セル中で平行に対向させ，Y 軸方向にサーボして加工を行い，平行平板間の放電加工現象を，透明体電極を通して高速度ビデオカメラにより直接観察した．フラッシングは，工具電極の加工領域中心に設けた直径 1mm の噴流穴から加工間隙に放電加工油を噴流することにより行った．噴流流量は一定とし，1.0ml/s と 2.0ml/s の二通りで実験を行った．陽極には板厚 2mm，横幅 5mm の Cu 電極を，陰極には板厚 0.38mm の単結晶 SiC 電極を用い，両者に対向させて幅 5mm×縦 5mm の面を放電加工面とした．観察方法は，カメラレンズの横から観察面に向かって斜めに光を照射する側射照射によって行った．光源には，メタルハライドランプを用いた．放電加工条件は，2.2.2 節の表 2.2 に示す条件を用いた．放電持続時間は 10 μ s とした．また，高速度ビデオカメラの撮影条件も 2.2.2 節の表 2.3 に示す条件を用いた．

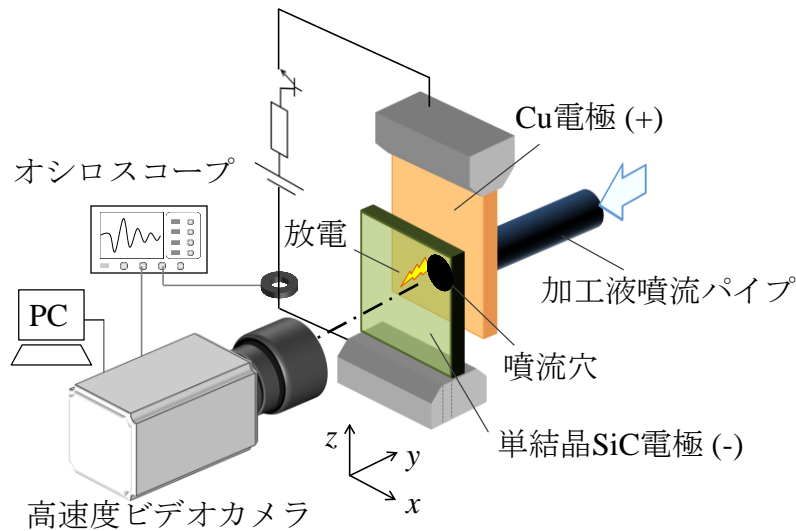


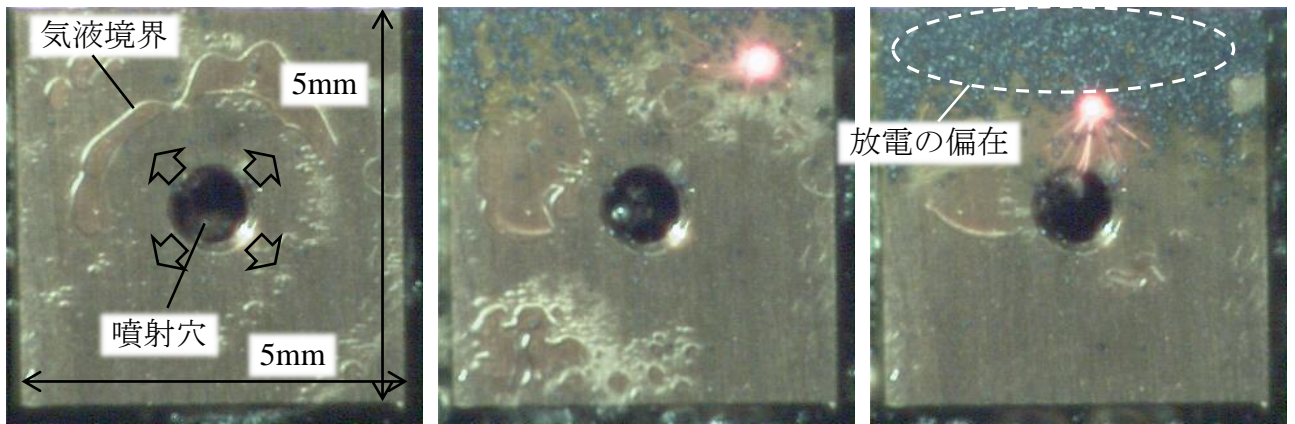
図 2.22 工具電極穴による噴流法のための実験装置の構成図

2.3.2.2 工具電極穴による噴流法を用いた場合の極間現象の観察結果

図 2.23 と図 2.24 に工具電極に設けた穴から噴流を行った場合の連続放電中の各時刻における撮影結果を示す。工具電極の噴流穴から噴流を行った場合、放電により発生した気泡は、加工液の放射状の流れ場によって徐々に潰れながら下流側に移動し、極間隙の外へ排出される様子が観察された。Takeuchi ら²²⁾は、工具電極中心の設けた穴から一定流量の加工液を噴流させた場合の極間の流れ場を解析し、1.6.1 節の図 1.11 に示すように放電により生じた気泡のシミュレーションを行っており、気泡の形状や排出過程が本実験の観察結果とよく一致した。しかし本実験では、図 2.23 と図 2.24 からわかるように、いずれの流量においても、放電の発生位置が加工領域の下流側に偏在する現象が観察された。この要因は、加工くず濃度の偏在によるものと考えられる。Schumacher²⁴⁾とKunieda ら²⁵⁾は、極間距離の分布と加工くず直径の測定結果から、1.6.1 節の図 1.12 に示すように極間の想像図を描いており、加工くず直径は極間距離に対して無視できないほど大きく、気泡と気泡の間に僅かに存在する加工液中に密に存在し、これらの加工くずを介して放電が発生することを推測している。また小島ら¹⁶⁾は、1.6.2 節の図 1.14 に示すように、加工中の放電点分布を測定しており、加工くず濃度分布の隔たりによって放電点分布の偏在が生じることを報告している。さらに、Morimoto ら⁵⁸⁾は、円柱形状電極の中心に噴流穴を設けた突合せ加工の形彫り放電加工シミュレーションを行っており、加工くずが噴流によって下流に集中することによって、ギャップ距離が半径方向に増加することを示している。本実験では、工具電極中心に設けた穴から噴流を行うことで、加工間隙で放射状の流れ場が形成される。噴流穴中心から距離 r の地点の半径方向の流速は、噴流穴中心からの距離 r に反比例し、噴流穴付近では半径方向の流速は非常に速い。このことから、清浄な加工液が噴流穴から加工間隙に流れ込むことで、放電により発生した加工くずが噴流穴付近から下流に向かって瞬時に排出されることで、加

工くず濃度分布が下流の方が高くなり、放電発生の起点となり得る加工くずが加工面全体に散布されないために、放電点分布の偏在が生じたものと考えられる。

以上の結果から、工具電極穴による噴流法は、ノズルによる噴射法と比較して極間の介在物の排出効果は大きいですが、噴流によって加工領域内で加工くず濃度分布に隔たりが生じ、むしろ放電点分布が偏在してしまう場合があることがわかった。従って、実加工においては、工具電極形状や加工領域の大きさによって、適切な噴流流量や噴流穴径、配置を設計検討する必要があると考えられる。



(a) 経過時間：0.2s

(b) 経過時間：0.5s

(c) 経過時間：1.0s

図 2.23 工具電極穴から噴流を行った場合の連続放電中の極間現象の高速度撮影結果
(流量：1.0ml/s)



(a) 経過時間：0.2s

(b) 経過時間：0.5s

(c) 経過時間：1.0s

図 2.24 工具電極穴から噴流を行った場合の連続放電中の極間現象の高速度撮影結果
(流量：2.0ml/s)

2.3.3 電極ジャンプ法による噴流法

2.3.3.1 実験方法

図 2.25 に実験装置の構成図を示す。本実験では、板状の Cu 電極と単結晶 SiC 電極を放電加工油で満たされた加工セル中で平行に対向させ、Y 軸方向にサーボして加工を行い、平行平板間の放電加工現象を、透明体電極を通して高速度ビデオカメラにより直接観察した。フラッシングは、電極を Y 軸方向にジャンプさせることにより行った。また、ジャンプ動作のタイミングと電極位置を測定するために、電気マイクロメータを主軸に当て、オシロスコープによりその変動を記録した。陽極には板厚 2mm、横幅 5mm の Cu 電極を、陰極には板厚 0.38mm の単結晶 SiC 電極を用い、両者を対向させて幅 5mm×縦 5mm の面を放電加工面とした。観察方法は、カメラレンズの横から観察面に向かって斜めに光を照射する側射照射によって行った。光源には、メタルハライドランプを用いた。放電加工条件は、2.2.2 節の表 2.2 に示す条件を用いた。放電持続時間は $10\mu\text{s}$ とした。また、高速度ビデオカメラの撮影条件も 2.2.2 節の表 2.3 に示す条件を用いた。ジャンプ動作のパラメータは、図 2.26 に示すように、ジャンプ上昇時間、ジャンプスピード、加工時間の 3 つがある。ジャンプ上昇時間は電極が上昇する時間、ジャンプスピードは電極の上昇速度、加工時間はジャンプとジャンプの間に加工を行う時間を意味し、ジャンプ距離はジャンプ上昇時間とジャンプスピードによって決定される。本実験で用いたジャンプ条件を表 2.4 に示す。加工機メーカーが提供する荒加工時に推奨されるジャンプ条件をもとにジャンプ上昇時間を変更し、ジャンプ動作量が大きいもの、中程度のもの、小さいものの 3 つのジャンプ条件を用いて、ジャンプ動作時の極間現象を観察し比較した。

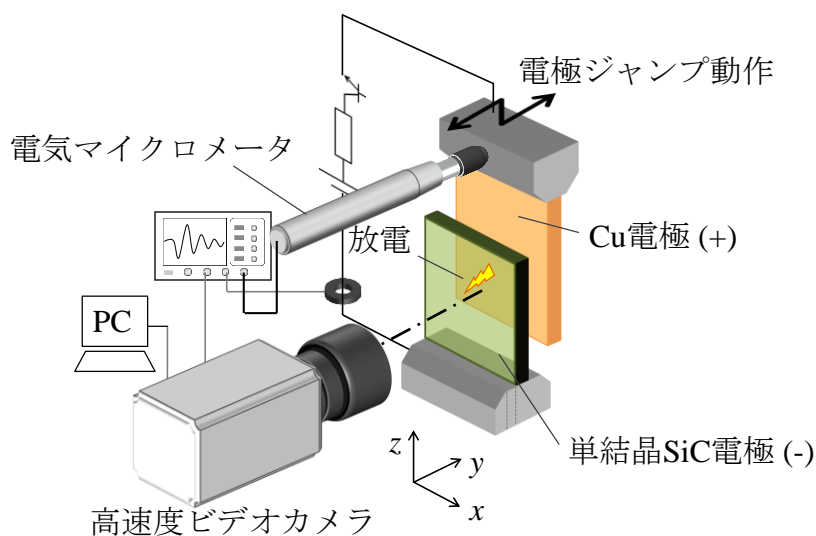


図 2.25 電極ジャンプ法のための実験装置の構成図

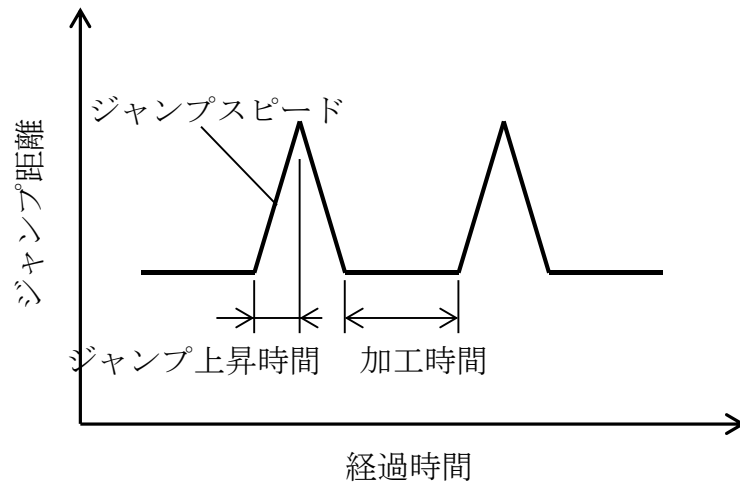


図 2.26 ジャンプ動作のパラメータ

表 2.4 電極のジャンプ条件

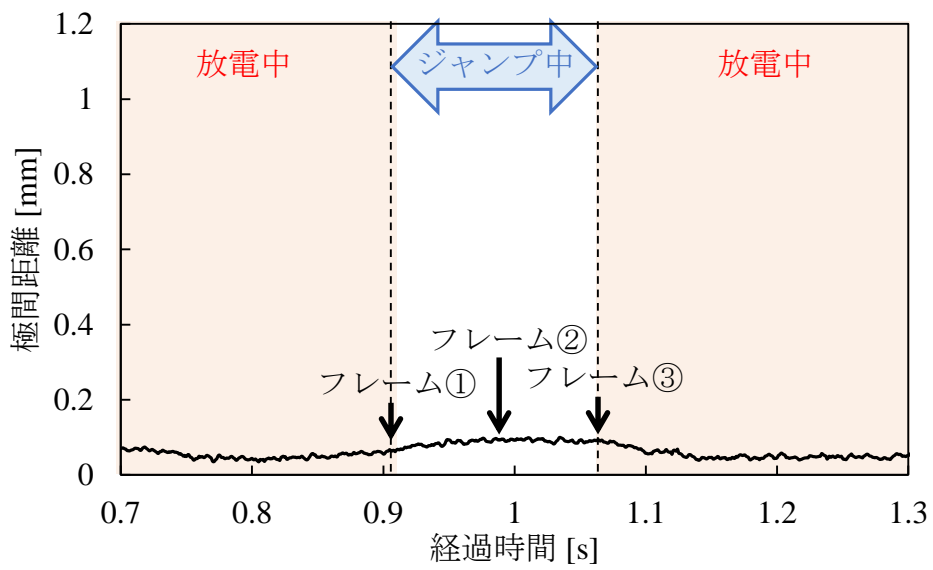
ジャンプ上昇時間 [s]	0.05, 0.1, 0.2
ジャンプスピード [m/min]	5.0
加工時間 [s]	0.2

2.3.3.2 電極ジャンプ法を用いた場合の極間現象の観察結果

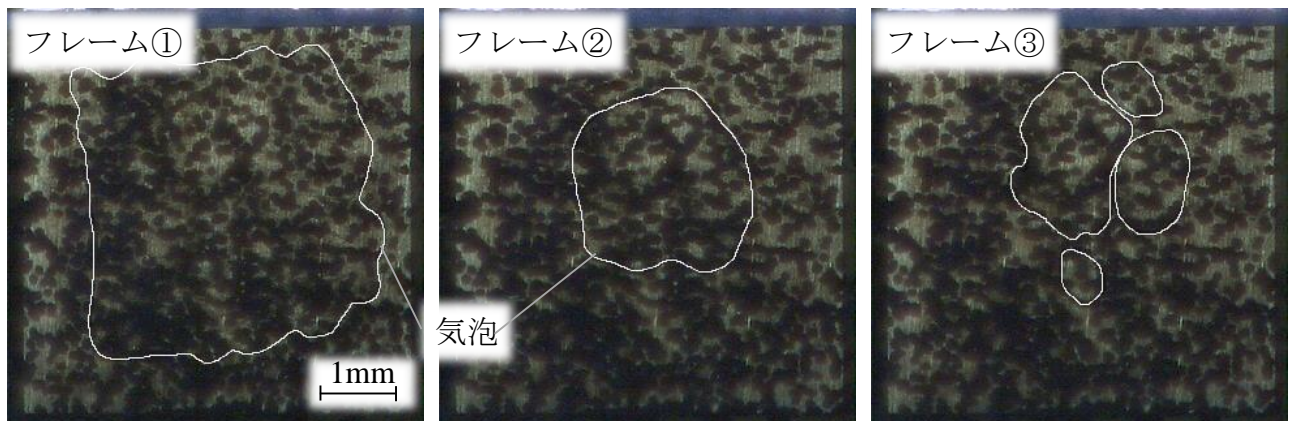
図 2.27, 2.28, 2.29 に、ジャンプ上昇時間を変更した際の、ジャンプ動作による極間距離の変動と各タイミングにおける極間の撮影結果を示す。極間距離は、Cu 電極と単結晶 SiC 電極が短絡した状態をゼロとして計測した。図 2.27~2.29 (a) の赤色の区間は、図 2.26 に示す加工時間に相当し、その区間で放電が発生していたことを示している。また図中のフレーム①はジャンプ上昇する直前、フレーム②はジャンプが最大に達した地点、フレーム③はジャンプ終了時の各タイミングの撮影結果である。本撮影結果では、加工面に放電痕が無数に形成されており、気液境界が見つらいために、画像処理により気液境界を白線でなぞり強調して示している。また、図 2.30 に各ジャンプ条件におけるジャンプ前とジャンプ後の極間を占める気泡割合を示す。これらの結果より、ジャンプ上昇時間を変更することで、ジャンプ距離が変わり、ジャンプ上昇時間が 0.05s のときはおよそ 0.07mm, 0.1s のときはおよそ 0.3mm, 0.2s のときはおよそ 1mm のジャンプ距離であることがわかる。さらに、電極のジャンプ動作で極間距離が広がると、加工間隙の周囲より加工液が流入し、極間に存在していた気泡が加工領域の中心付近に集まり、また表面張力の影響で円形に近い形状に変形していく様子が

観察された。また、本実験では電極を水平方向に送り、極間隙を鉛直方向に沿わせるような横方向の加工を行っており、加工面に淀み点が存在しないために、気泡は浮力の影響を受ける。ジャンプ上昇時間を 0.05s としたジャンプ動作量が小さい場合、ジャンプ動作前の極間に存在する気泡は、ジャンプ終了後においても極間に一部が残留していることが認められる。ジャンプ上昇時間を 0.1s とした場合においても同様に気泡の残留が確認された。一方で、ジャンプ上昇時間を 0.2s としたジャンプ動作量が大きい場合、ジャンプ動作前の極間に存在した気泡は、極間距離が 1mm まで広がることでほぼ球形状となり、浮力によって上昇し、極間外へ排出される様子を観察し、ジャンプ終了後には気泡のほとんどが極間外に排出されることがわかった。図 2.30 からわかるように、ジャンプ動作量が大きいほうが、極間に残留する気泡割合が小さいことがわかる。ただし、一般的な鉛直方向に電極を送る形彫り放電加工では、加工面の中心付近が淀み点となるために、浮力による気泡の排出効果は、本実験結果と比較して小さいものと考えられる。放電点分布を観察すると、いずれのジャンプ条件においても、撮影記録時間である 2 秒間の間に放電の偏在は観察されず、加工面全域で分散して放電が発生しており、安定して加工が継続している様子が観察され、放電波形においても異常放電の発生は認められなかった。国枝ら⁵⁹⁾は、形彫り放電加工において、工作物の一部に透明なアクリル板を用い、アクリル板を通して加工間隙を観察することで、気泡の発生や気泡の浮上が加工くずの排出の大きな原動力となっていることを明らかにしている。本観察結果からは、加工くずの詳細な挙動を観察することは困難であったが、放電の偏在が生じなかった要因は、電極のジャンプ動作中に、気泡境界に密に分布する加工くずが気泡とともに極間外へ排出されることで、極間の加工くず濃度が過分にならなかったためであると推測される。

以上の結果から、ノズルによる噴射法では、放電中は極間距離が狭いために加工液噴射流が極間の流れ場に及ぼす影響は小さく、放電中に限り極間の介在物の排出効果は小さいことがわかった。また、電極穴による噴流法は、極間の介在物の排出効果は大きいですが、極間の加工くず濃度分布に隔たりが生じやすく、放電点分布が偏在してしまうことがあることがわかった。また、電極ジャンプ法は、加工面が鉛直方向に沿うような横方向の加工であれば、気泡が浮力の影響を受けるために、極間の介在物の排出効果が大きく、安定した加工が継続できることがわかった。一方実験は行わなかったが、電極を鉛直方向に送る縦方向の加工の場合には、電極ジャンプ法にノズルによる噴射法を組み合わせ、電極ジャンプ時にノズルによって極間をフラッシングすることで、淀み点を消滅させてより効果的な極間の介在物の排出効果が期待できるものと考えられる。

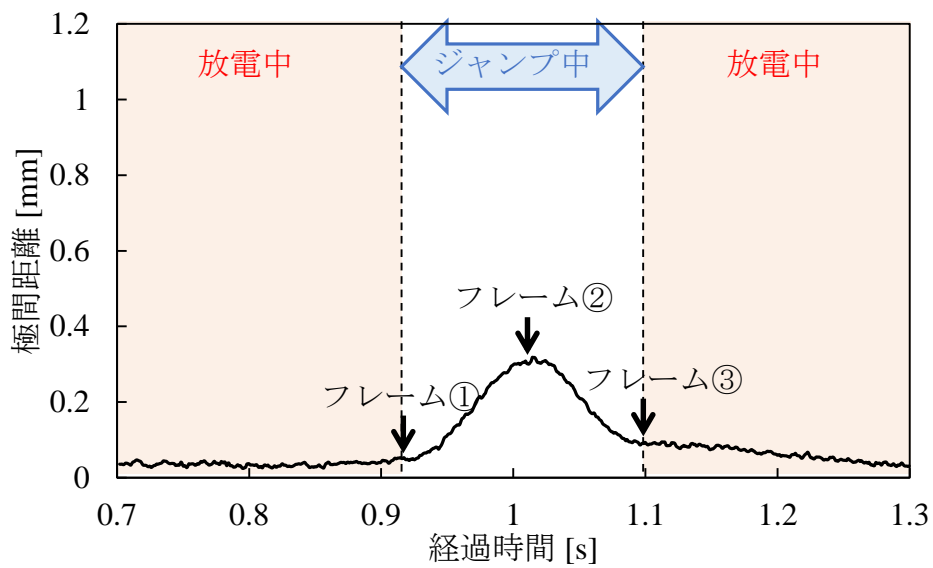


(a) ジャンプ動作による極間距離の変動

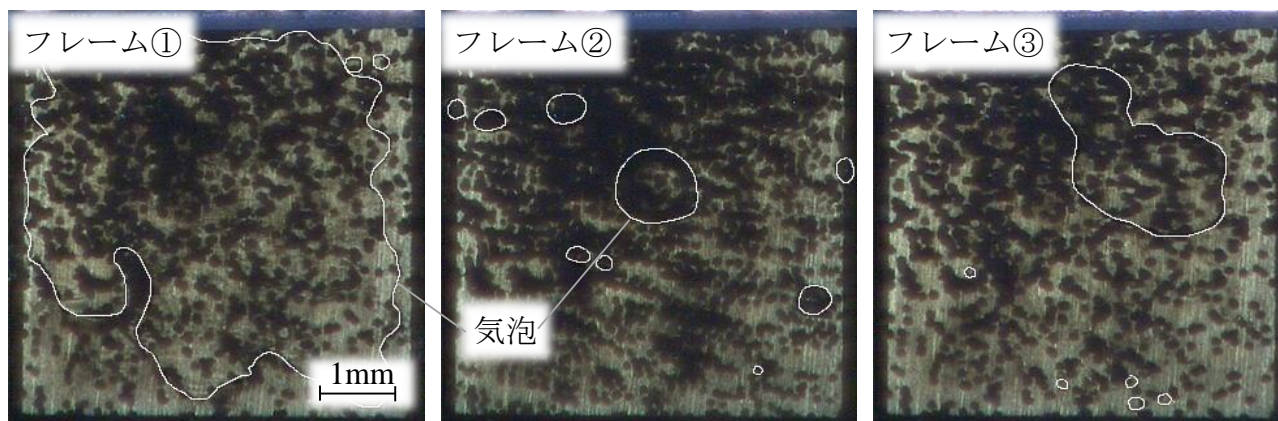


(b) ジャンプ中の極間の様子

図 2.27 電極ジャンプ法を行った場合の連続放電中の極間現象
(ジャンプ上昇時間 : 0.05s)

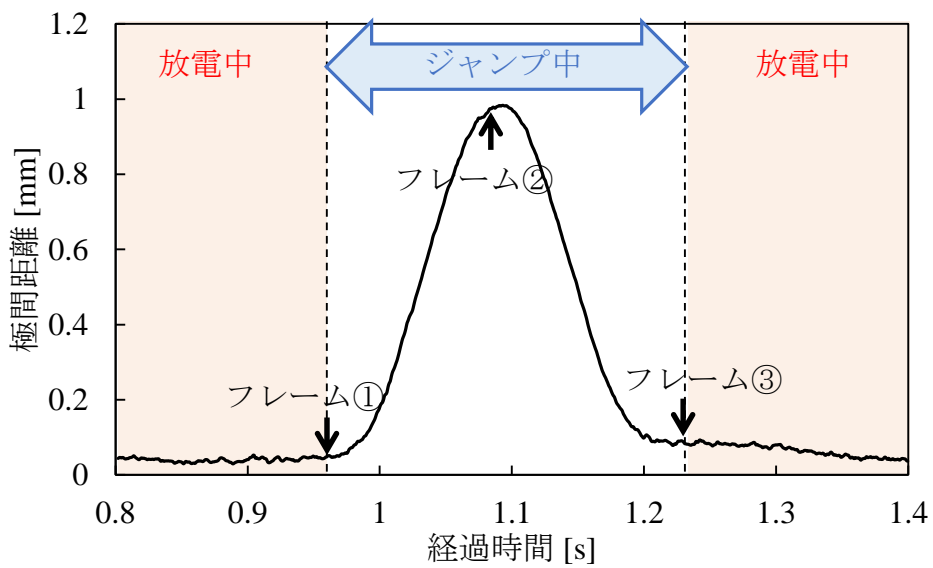


(a) ジャンプ動作による極間距離の変動

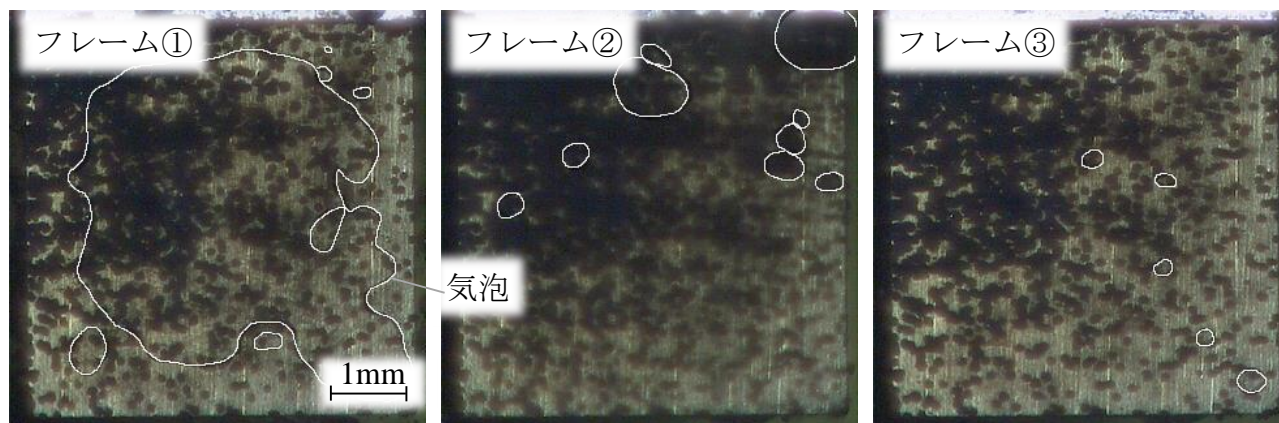


(b) ジャンプ中の極間の様子

図 2.28 電極ジャンプ法を行った場合の連続放電中の極間現象
(ジャンプ上昇時間 : 0.1s)



(a) ジャンプ動作による極間距離の変動



(b) ジャンプ中の極間の様子

図 2.29 電極ジャンプ法を行った場合の連続放電中の極間現象
(ジャンプ上昇時間 : 0.2s)

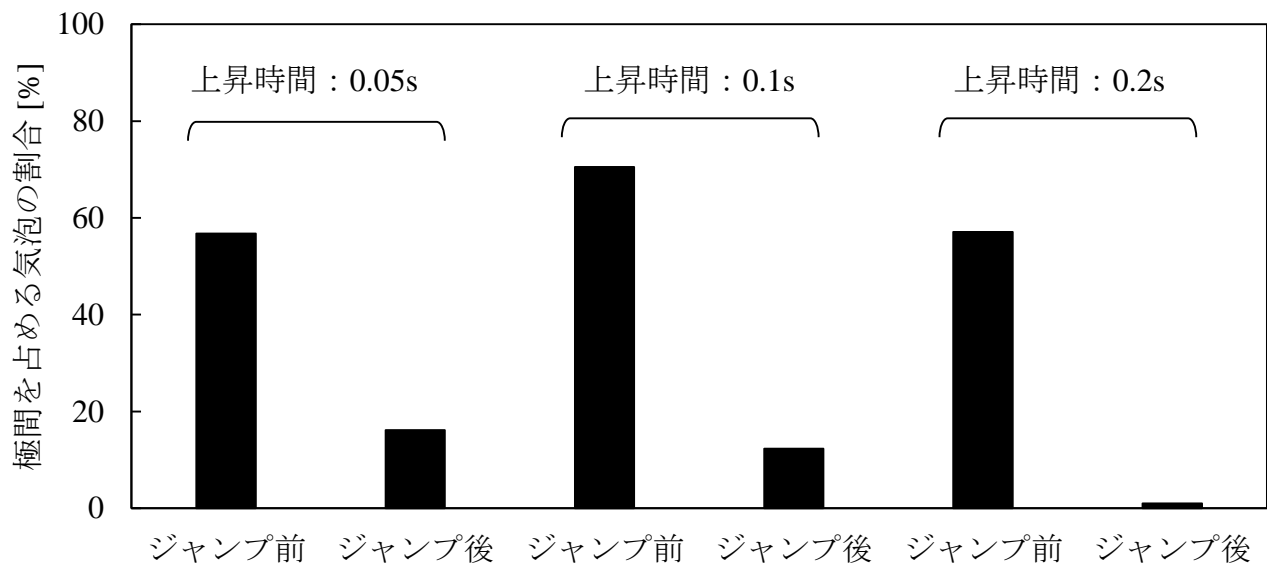


図 2.30 各ジャンプ条件におけるジャンプ前後の極間を占める気泡割合

2.4 透明体電極を用いることによる可視化への影響

本研究では、透明かつ放電加工を行う上で十分な導電性を有する半導体材料を、放電加工の電極として用いることによって、加工中の極間現象を直接観察することに成功した。しかし、本観察結果は、次に示すような一般的な放電加工の条件とは異なる条件下のもとで行った観察であるために、現象の解釈には注意が必要である。

一つ目は、材料の影響である。本研究では透明体電極として単結晶 SiC ウェハを用いているが、単結晶 SiC は一般的な金属材料に比べて熱伝導率が高い。放電加工は熱加工であるために、加工速度等の加工特性は材料の融点、熱伝導率、比熱、密度等の熱物性に依存することが知られている^{60) 61)}。従って、熱伝導率の違いは、材料の除去速度や極間の冷却性能に影響を及ぼすものと考えられる。しかし、一般的な放電加工では、例えば工具電極材料としては熱伝導率の高い銅 (Cu の熱伝導率: 401W/m・K⁶²⁾) や、工作物材料として熱伝導率の低いチタン (Ti の熱伝導率: 21.9W/m・K⁶²⁾) 等が用いられ、放電加工に用いられる材料の熱伝導率の幅は広い。単結晶 SiC の熱伝導率は 490W/m・K^{47) 49)} であり、Cu と比較してやや高い程度である。従って、単結晶 SiC の熱伝導率の高さが通常の放電加工で用いられる金属の熱伝導率から逸しているとは考え難く、熱伝導率の高さが可視化に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

一方、単結晶 SiC 材料は、高抵抗材料であり、比抵抗値は通常の金属のおよそ数千倍ほどであるために、ジュール発熱の影響は無視できないと考えられる。このジュール発熱の影響により、一般的な金属材料に比べて、放電点での冷却性能の低下、あるいは気泡の発生量の増加、放電除去量の増加が考えられる。しかし、仮にジュール発熱の影響が大きく、放電点での冷却性能が低下すれば、放電点分布の偏在割合が多くなることが推測されるが、本実験結果では、放電点分布は気液境界に密に分布する加工くずを介して発生しやすいという結果を得ており、そのような傾向はあまり見受けられなかった。従って、ジュール発熱が可視化に及ぼす影響も小さいものと考えられる。

単結晶 SiC は脆性材料であるために、放電の除去機構が異なることも考えられる。Zhao⁶³⁾ は、単結晶 SiC 材料を放電加工し、加工くずを採取し顕微鏡で観察した結果、加工くず形状は材料が破砕したような多角形状をしており、一般的に金属を加工した際に観察される球形の加工くずとは異なることを明らかにしている。これは、SiC が硬脆材料であり、熱応力によるクラックの進展によって発生するものと考えられる。このことから、単結晶 SiC を電極として用いた場合、一般的な放電加工の場合と比較して加工くず形状は異なるものの、加工くず形状の違いが、本実験結果により得られる知見に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

以上に示したように、本実験で用いた単結晶 SiC の材料特性は、通常の金属材料と熱伝導率、比抵抗、破壊特性の面で異なり、除去速度、加工の安定性、極間の気泡割合、加工くず形状等に影響を及ぼしているものと推測されるが、それらが本知見に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

二つ目は、極間の観察手法の影響である。一般的な形彫り放電加工では、加工面を水平面

に沿うように配置し、鉛直方向に工具電極を送り加工を行うが、本実験では観察を容易にするために、加工面を鉛直方向に沿うように電極を配置し、水平方向に工具電極を送り加工を行った。そのため、一般的な形彫り放電加工では、加工面の中心付近に淀み点が存在するが、本実験方法では加工面に淀み点が存在せず、気泡の受ける浮力の影響が大きくなる。従って、加工面の配置の方向が、気泡の排出効果の大小に影響を及ぼしていることが推測される。ただし、その影響はフラッシング時に留まり、放電中における影響は小さいものと考えられる。

また、本実験において極間現象の観察では、加工面に放電痕が形成されると、単結晶性が損なわれ不透明となるために、加工開始直後の観察を行った。一般に放電加工では、加工開始直後の極間は加工液が清浄で加工くずが存在しないために、放電が発生し辛く極間距離が小さくなり、短絡や集中放電が多発する不安定な状態に陥りやすいことが知られている。本実験の観察においても、加工開始時は、極間は清浄な加工液で満たされ、加工くずや気泡が存在せず、また加工面は表面粗さの小さいポリッシングされたウェア面を使用しており、加工面が放電痕で覆われていないために、一般的な定常状態の加工現象とは異なることが考えられる。ただし、これらの影響が顕著となると考えられる放電点分布の調査では、加工面が放電痕で全て覆われるまで加工を行った後の観察を行っており、加工初期の現象の観察が、本研究の知見に及ぼす影響は限定的であると考えられる。

さらに、一般的な放電加工では、加工の進展にともない加工領域が工作物内に入り込むが、本観察では加工深さが浅く、加工領域が工作物内に入り込んだ状態の観察には至っていない。これは、気泡や加工くずの排出過程に影響を及ぼしているものと推測される。このような極間隙が三次元形態となる場合の観察においては、今後の研究課題である。

以上に示したように、本実験では、加工方向が水平方向であるために浮力の影響を受け、気泡の排出効果の大小に影響を及ぼしている。また、加工開始直後の観察結果においては、放電点分布や気泡の排出過程が、一般的な形彫り放電加工の定常状態とは異なると考えられる。しかし、これらの観察手法が本研究の知見に及ぼす影響は限定的である。

第2章 まとめ

本章では、透明で放電加工を行う上で十分な導電性を有する単結晶 SiC ウェハを放電加工の電極として用いることで、この透明体電極を通して高速度ビデオカメラにより、液中で生じる極間の連続放電現象を直接観察した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 加工開始後、数百回の放電の発生の中に、加工面のおよそ 70%以上が気泡で満たされる。
- (2) 放電は、液中のみではなく、気液境界、気泡中においても生じ得る。ただし、放電の累積に伴い極間では加工液の分解により気泡が生成され、その割合が急激に上昇するため、液中で生じる放電の割合は減少し、定常状態では 10%以下となる。
- (3) 単位面積当たりの放電発生割合は、液中、気泡中に比べて気液境界が最も高い。これは、加工くずが放電により生成された気泡の境界に密に分布することで、加工くずを介して放電が生じやすいという推論を裏付けている。
- (4) 加工が安定している場合においても、放電点の発生分布は完全なランダムではない。放電は、直前の放電によって発生した気泡の境界に密に存在する加工くずを介して発生する確率が高い。
- (5) 放電が液中で発生した場合は、電流波形の立ち上がりと電圧波形の立ち下がり速度が遅い。これは、液中で発生する放電は、プラズマの周囲に存在する加工液によってプラズマの膨張が抑制されるために、プラズマ膨張スピードが気泡中の放電に対して遅く、アークプラズマ中の抵抗が気中に比べ大きいためである。
- (6) 実加工で用いられるフラッシング法のうち、ノズルによる噴射法は、電極ジャンプを伴わない場合は、加工液噴流が加工間隙に流れ込み難く、極間の介在物の排出効果は小さい。電極穴による噴流法は、極間の介在物の排出効果は大きい。極間の加工くず濃度分布に隔たりが生じやすく、放電点分布が偏在してしまう場合がある。電極ジャンプ法は、加工面が鉛直方向に沿うような横方向の加工であれば、極間の介在物の排出効果が大きく、安定した加工が継続できる。一方、電極を鉛直方向に送る縦方向の加工の場合には、電極ジャンプ法にノズルによる噴射法を組み合わせ、電極ジャンプ時にノズルによって極間をフラッシングすることで、淀み点を消滅させてより効果的な極間の介在物の排出効果が期待できるものと考えられる。

上記の結論から、放電加工の極間現象に関して、従来の説、先行研究により明らかにされたこと、本研究によって明らかになったことを以下に簡潔にまとめる。

(a) 加工中の極間の様子

- ✓ 従来の説
 - 放電により生成される気泡直径は、およそ極間距離と同じオーダーであり、また加工くずは塵のように小さく、小さな気泡が極間を漂っている⁴²⁾。
- ✓ 先行研究
 - 電極の一部に透明なアクリル板を埋め込み、電極間で放電加工を行い、アクリル板を通して気泡を観察することで、放電加工の極間のほとんどは気泡で満たされ、気泡と気泡の間に僅かに存在する加工液中に加工くずが密集していることを推測した²¹⁾。
 - 放電加工の極間の流れ場解析により、加工開始後すぐに極間はすぐに気泡で満たされることを予測した²²⁾。
- ✓ 本研究による知見
 - 放電により生成される気泡は数ミリメートルに達する。また連続放電では、加工開始後、数百発の放電で極間の70%以上が気泡で満たされることがわかった。本結果は、従来の極間モデルとは異なり、宮島ら²¹⁾、Takeuchiら²²⁾の推論を裏付けるものである。
 - 放電は、液中のみでなく、気液境界、気泡中の雰囲気においても発生し得ることが新たに明らかとなった。また、放電の累積にともない、極間を占める各雰囲気の割合が変化するため、各雰囲気で発生する放電の割合も変化し、定常状態では、液中で生じる放電の割合は10%以下となることがわかった。

(b) 放電点分布の規則性

- ✓ 従来の説
 - 放電は、その前に生じた放電痕の盛り上がりによって次々と放電が発生していく。
- ✓ 先行研究
 - 工具電極への給電線を分割し、各給電線に流れる電流の比を測定することにより、放電点位置の検出を行い、加工深さが浅く、加工が比較的安定しているときは、放電点分布はランダムであることを明らかにした¹⁶⁾。
 - 放電点分布は一見ランダムであるように見受けられるが、カオス理論の導入によって、加工が安定しているときでさえ、放電点分布は完全なランダムではなく、カオスであることを明らかにした⁵³⁾。
- ✓ 本研究による知見
 - 放電点分布を測定し、連続する放電の発生間距離を調べることで、放電は直前の放電で発生した気液境界に密に分布する加工くずを介して発生する確率が高いことを明らかにした。本結果は、従来の説、また放電点分布がランダムであるとする説を否定するものである。一方、連続する放電点の発生間距離に規則性が存在することを発見したことから、放電点分布がカオスであるという説を追認するものである。

第3章 単発放電現象の解明

3.1 はじめに

放電加工は、一発の放電によって工作物面上に形成されるクレータ状の放電痕の累積によって加工が進行する。またこの放電痕は、放電のアーク柱からの熱流束により工作物が溶融・蒸発し除去されることによって形成されるために、加工特性の向上や加工現象の解明には、単発放電における放電現象、また放電痕の生成メカニズムを明らかにすることが重要である。特に、熱源であるアーク柱の挙動は放電痕の形成に深く関係する。

単発放電における放電痕の形成メカニズムの仮説の一つに、アーク柱が電極面上で静止しておらず、動き回ることによって放電痕が形成されるという説がある^{34) 35)}。Kunieda ら³⁶⁾は単発放電におけるアーク柱の挙動を、四つの分割給電とその給電子に取り付けられた各電流センサの測定より調べ、電極表面におけるアーク柱の電流密度の重心が高速に運動していることを明らかにしている。しかし、細いアーク柱が動き回るのか、直径の大きなアーク柱の中の電流密度分布が変動しているのかは判別できなかった。

また、アーク柱の直径とその時間変化は、電極へ流入する熱流束を決定する重要な因子である。アークプラズマの温度やその直径については多くの研究がなされている。例えば Kojima ら³²⁾は、高速ビデオカメラによって側面からアークプラズマを観察しており、アークプラズマの直径は放電痕の数倍大きいことを明らかにした。しかし、側面からの観察が可能であるのは、棒状電極を用いた突合せ加工の場合に限られ、電極面積が大きい場合の観察は困難である。また、大気中での放電の観察は容易であるが、液中での放電は加工液による光の吸収が大きいことから、アークプラズマの直接観察は困難である。

一方、透明体電極を用いれば、液中で発生する放電現象を直接観察することが可能である。そこで、透明体電極を用いて単発放電による気泡の生成と加工くずの飛散現象、また単発放電のアークプラズマを観察し、アーク柱の挙動や直径、その時間変化を調べた。さらに、熱源直径を得るために、測定したプラズマ直径に基づいて、単発放電の材料中の温度分布を熱伝導解析した。

3.2 単発放電による気泡の生成と加工くず飛散現象の観察

放電加工は、パルス放電の累積によって加工が進行するために、一発の放電現象を詳細に観察することは、加工現象の把握のために重要である。そこで、透明体電極を用いて油中で単発放電を行い、放電により生成される気泡の膨張過程、加工くずの飛散現象を観察した。

3.2.1 実験方法

図 3.1 に実験装置の構成図を示す。2.2 節では、連続放電加工中の極間現象の観察を行った。その際の撮影フレームレートは、一発の放電周期に近い速さで高速度撮影を行った。しかし、一発の放電の極間現象を詳細に捉えるためには、高速度ビデオカメラの撮影フレームレートを 2.2 節のさらに 10 倍程度上げる必要がある。しかし、フレームレートを高くしてしまうと、一フレームあたりの露光時間が短くなるために、観察が困難となる。そこで本実験では、2.2 節で陽極の電極材料に用いていた Cu 電極の代わりに、単結晶 SiC 電極を用い、陽極と陰極ともに透明体電極とすることで、観察面の背面から照明を行う透過照明を行った。これにより、カメラレンズの光軸と光源による光軸を一致させ、より強い光を高速度ビデオカメラに入射可能にすることで、撮影フレームを高く設定し、単発放電現象の高速度撮影を行った。高速度ビデオカメラは、フレームサイズ固定 8 万 1 千画素・最高 1,000,000 コマ/秒・モノクロである島津製作所製の HyperVision HPV-1 を使用した。本高速度ビデオカメラは、高解像度を維持したまま、高いフレームレートを設定できる特徴を有するが、撮影フレーム枚数が 100 枚に固定されている。本実験では、幅 5mm×縦 5mm の面を放電加工面とし、放電加工油中で単発放電を行い、極間現象を観察した。本実験で用いた放電加工条件を表 3.1 に、高速度ビデオカメラの撮影条件を表 3.2 に示す。露光時間を $0.5\mu\text{s}$ と短く設定することで、高速な動的現象の撮影を行った。

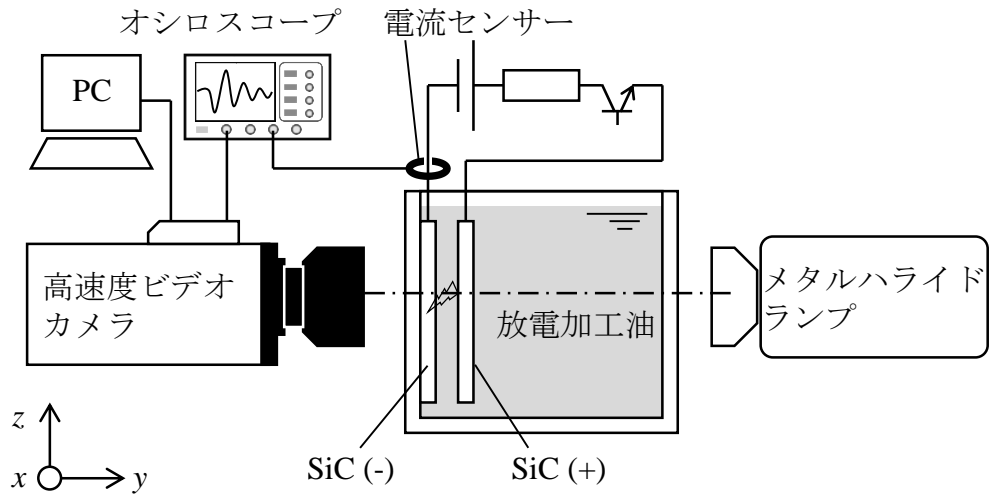


図 3.1 単発放電現象の高速度撮影のための実験装置構成図

表 3.1 放電加工条件

極性	SiC (+), SiC (-)
放電持続時間 [μs]	100
放電電流 [A]	20
開放電圧 [V]	120

表 3.2 高速度ビデオカメラの撮影条件

解像度 [pixel]	312 × 260
フレームレート [fps]	1,000,000
露光時間 [s]	1/2,000,000

3.2.2 単発放電の観察結果

図 3.2 に油中における単発放電の高速度撮影結果を時系列で並べて示す。各フレームに絶縁破壊後からの経過時間を示す。フレーム中に見られる黒い点の痕跡は、以前の放電で形成された放電痕である。絶縁破壊と同時に放電点で発光が観察された。この発光点は時間の経過に伴い徐々に大きくなっており、アークプラズマからの発光、あるいは電極材料が高温と

なった熔融領域からの発光であると考えられる。また、絶縁破壊後 $3\mu\text{s}$ 経過後から徐々に気泡の境界が見えはじめ、 $5\mu\text{s}$ 後には放電点を囲うように気泡の境界が鮮明に観察された。またこの気泡は、絶縁破壊後 $10\mu\text{s}$ で直径が 1mm まで膨張しており、絶縁破壊直後の気泡膨張速度は 50m/s に達することがわかった。この気泡膨張速度は、ガラス円板を通して単発放電時の気泡の膨張収縮運動を観察した池田の結果⁵⁾ とほぼ一致している。

さらに、例えば図中の $10\mu\text{s}$ 、 $30\mu\text{s}$ 経過時のフレームに示すように、高温の加工くずが放電点から放射状に気泡中を飛散する様子を観察した。本撮影結果の動画をコマ送りで確認したところ、このような加工くずは、放電中に常に放電点から飛散しており、確認できるものでも数十個もの加工くずの飛散を観察した。この加工くずの発生は、放電の終了時まで常に観察された。また、Hayakawa ら⁶⁴⁾ も、平行に対向させたガラス円板の中心に開けた穴に細線電極を通して、細線電極間で放電させることで、ガラス円板を通して放射状に飛散する加工くずを高速度ビデオカメラにより観察しており、材料の除去は放電中や放電が終了した後にも生じることを明らかにしている。これらのことから、放電による材料の除去は、放電開始から放電中に生じていることが明らかとなった。これまでに、材料の除去メカニズムにはいくつかの説が提唱されている。一つ目は、絶縁破壊直後は気泡の圧力が高く、過熱状態の熔融金属は除去が抑えられ、放電終了後の気泡の膨張にともなう圧力の低下によって大気圧下における沸点を超えた熔融領域が一挙に除去されるという説⁶⁾、二つ目は、放電の熱エネルギーと気泡の高圧力によって一時は材料が高温の液体状態を保つが、その後の気泡膨張による圧力低下によって熔融部内部で沸騰するキャビテーション現象によって熔融材料を吹き飛ばされるとする説⁷⁾、三つ目は、放電のエネルギーにより金属の温度が沸点以上に急上昇することで突沸現象が起こり、これにより熔融領域が除去されるという説¹⁾⁸⁾、四つ目は、気泡の半径方向へ膨張する気泡流れが作るせん断力により除去される説¹⁾ などである。一方 X. Yang ら¹⁰⁾ は、分子動力学シミュレーションにより単発放電による材料中の圧力分布を解析し、圧力勾配は材料表面に向かって小さくなることを示しており、この圧力勾配が熔融領域の除去の原動力であることを定性的に明らかにしている。この除去理論は、上記の過熱理論やキャビテーション理論、突沸理論を包含するものである。本観察結果では、絶縁破壊直後から材料の除去が観察されたことから、放電終了後に過熱された材料が一挙に除去される説は否定される。また、気液境界は絶縁破壊後急激に膨張し、数マイクロ秒で放電点から遠ざかり、気泡中で加工くずが発生していることから、三つ目の膨張する気泡流れが作るせん断力により材料が除去される説も否定されるものと考えられる。一方、突沸現象により材料が除去される説、キャビテーション現象によって材料が除去される説、つまり材料の深さ方向に圧力勾配が生じることにより材料が除去されるという過熱説は、放電中にも材料の除去が生じ、本観察結果と矛盾がなく、材料の除去メカニズムとして最も有力であると考えられる。

Yoshida ら⁹⁾ は、ゼラチン水溶液を加工液として用いて単発放電を行い、放電後に装置を冷却し加工液を固化させて放電終了直後の加工ギャップの情報を固定することで、単発放電により生じた加工くずの飛散状況を観察した。その結果、放電後の加工くずは、図 3.3 に示すように発生した気泡の境界に集中して分布していることを明らかにした。本実験では、放

電中に高温の加工くずが放電点から放射状に気泡中を飛散する様子を直接観察した。放電点から飛散した加工くずは、その後膨張する気泡境界に追いつき気液境界に留まる様子、また気液境界を突き破っている様子をそれぞれ観察した。従って本観察結果は、放電後の加工くずは気泡境界に密に分布しているという Yoshida らの結果⁹⁾を裏付けた。また、飛散した加工くずのうちいくつかは、膨張する気液境界の手前で、加工液で濡れた加工面に着地する様子を観察した。Kunieda ら⁴⁾は、平行平板間で単発放電によって生じる気泡の挙動を、加工間隙の側面から高速度ビデオカメラで観察した。すると、1.6.4 節の図 1.22 に示したように、急激に膨張する気泡と加工液の境界は、放物線状の形状をしており、気泡の形成領域内においても加工面は加工液の薄い層で濡れていることを示している。従って、加工液は、気泡の形成領域内においても加工表面に僅かながらも存在することで、飛散してきた高温の加工くずが加工面に付着することを防止する役割を担っているものと考えられる。

一方、放電点の周囲を詳しく観察すると、90 μ s 経過時のフレームに示すように、放電点中心部の発光領域より一回り大きい円形の境界が観察された。この境界内は、放電痕より直径の大きいアークプラズマの熱によって加工面の加工液が完全に気化したドライな領域を示しているものと考えられる。

以上のことから、材料の除去は放電中に生じており、生成された加工くずは、放電点から放射状に飛散し、気液境界で加工液によって冷却されるとともに気液境界に集中して留まり、また加工面に着地した加工くずは加工面に存在する加工液によって冷却されることがわかった。

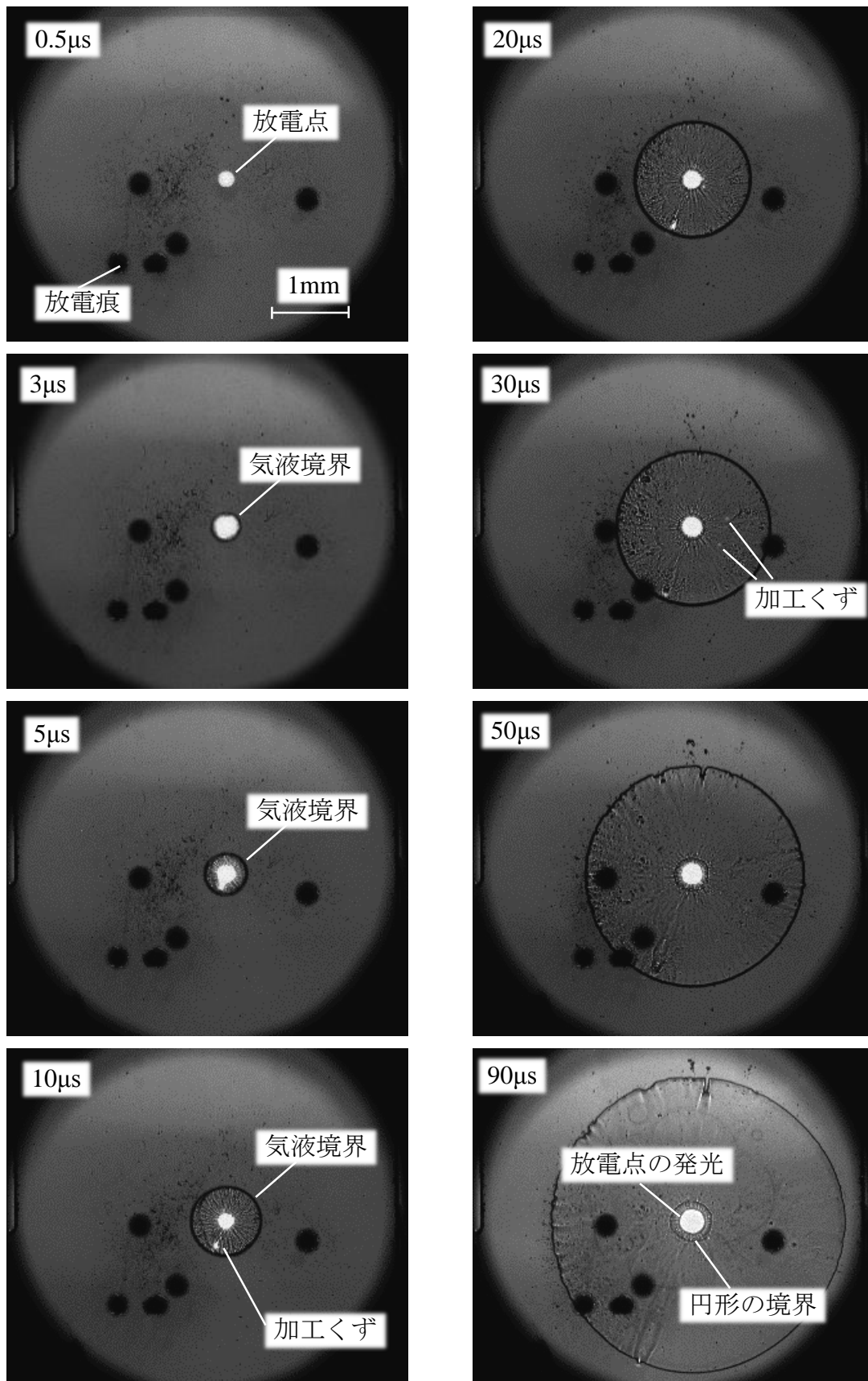


図 3.2 単発放電現象の高速度撮影結果

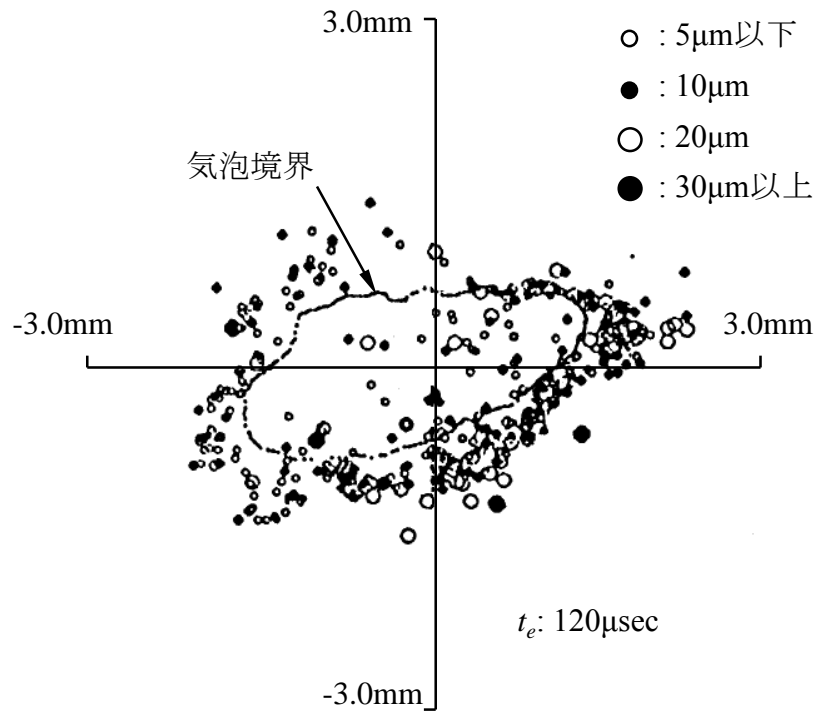


図 3.3 単発放電による加工くずの飛散状況⁹⁾

3.3 単発放電現象の拡大観察

前節では、単発放電により生成される気泡の膨張過程、加工くずの飛散現象を観察したが、放電点中心部のアークプラズマが鮮明に捉えられていない。そこで本節では、放電点における放電現象やアークプラズマをより詳細に捕らえるために、放電点中心部を光学レンズによって拡大して観察を行った。

3.3.1 実験装置

図 3.4 に単発放電現象の拡大観察のための実験装置の構成図を示す。実験装置は、形彫り放電加工機、加工用セル、高速度ビデオカメラ、オシロスコープ、電流センサ、パーソナルコンピュータで構成される。加工機は、ソディック製の形彫り放電加工機 C32 を用いた。本実験では、本加工機に搭載されるトランジスタ放電回路を用いて加工を行った。高速度ビデオカメラによる観察を容易にするために、アクリル製の透明な加工セルを作成し、加工セルの中を加工液で満たし、放電加工機の加工槽である XY テーブルに設置した。また、加工液としてソディック製の放電加工油 バイトル-2 を用いた。本実験では、板状の透明体電極を加工機の XY テーブルに固定した加工槽に取り付け、先端の曲率半径を約 3mm の球状に成形した $\phi 3\text{mm}$ の金属丸棒電極を加工機の Z 軸に取り付けた。これにより、放電の発生する位置を金属丸棒電極の中心に限定し、透明体電極を通して高速度ビデオカメラにより、単発放電現象の拡大観察を行った。単発放電中の極間電圧は電圧プローブを用いて、また放電電流は、電流センサを用いて測定し、オシロスコープに記録した。本撮影では、放電開始のタイミングを電流センサによって検出し、オシロスコープのトリガ機能により高速度ビデオカメラにトリガ信号として送信して撮影を行った。さらに、高速度ビデオカメラの各撮影フレームの露光タイミング信号をオシロスコープで記録し、露光信号と放電電流・電圧波形の同期を取った。また、パーソナルコンピュータにより、高速度ビデオカメラの撮影条件の設定と、撮影後に高速度ビデオカメラのメモリに一時保存された撮影データのバックアップを行った。

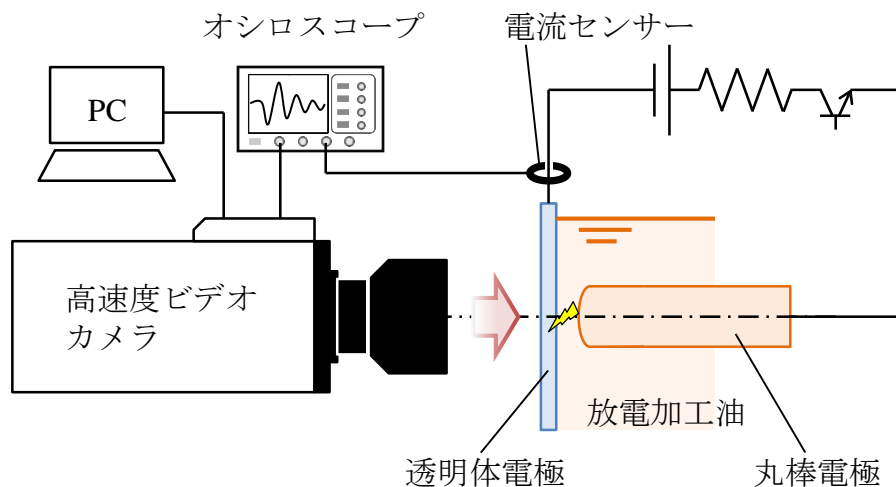


図 3.4 単発放電現象の拡大観察のための実験装置の構成図

3.3.2 電極極性が放電現象に及ぼす影響

一般的に放電加工では、放電持続時間が数マイクロ秒以上であり、電流密度は $10^8 \sim 10^9 \text{A/mm}^2$ に達することから、放電の形態はアーク放電であると考えられる³⁾。陽イオンと電子は、プラズマ中で放電電流のキャリアの役割を担っており、アーク放電は、陽イオンが陰極表面に衝突することによる陰極点からの二次電子放出のみでなく、陰極表面からの熱電子放出、電界電子放出によって維持される。従って、陰極側における電流密度は、プラズマ中の陽イオンの密度および表面温度に依存する。その一方、陽極側のキャリアは、電界によって陽極へ運ばれてきた電子のみであり、プラズマ構成粒子と陽極表面間での相互作用はない。従って、放電点現象は、陽極と陰極で異なると考えられ、これらの放電点現象は、放電痕の形成過程に影響を及ぼすと考えられる。そこで、極性を変更して、単発放電現象の拡大観察を行った。

3.3.2.1 実験方法

本実験では、銅丸棒電極と板状の透明体電極を放電加工油で満たされた加工セル中で対向させ、Y 軸方向にサーボして加工を行い、両電極間で発生する単発放電現象を、透明体電極を通して高速度ビデオカメラにより直接観察した。板状の透明体電極には、2.2.1 節で示した比抵抗 $0.01 \sim 0.025 \Omega \text{cm}$ 、厚さ $380 \mu\text{m}$ の透明な SiC 単結晶ウェハ (新日鉄住金マテリアルズ製) を用いた。本観察では、放電点の自発光現象を観察するために照明は行わなかった。

本実験で用いた放電加工条件を表 3.3 に示す。極性を変更した二通りの加工条件で単発放電を行った。高速度ビデオカメラは、フレームサイズ固定 8 万 1 千画素・最高 1,000,000 コマ/秒・モノクロである島津製作所製の HyperVision HPV-1 を使用した。また、高速度ビデオカメラの撮影条件を表 3.4 に示す。

表 3.3 放電加工条件

極性	Cu (+) , SiC (-) Cu (-) , SiC (+)
放電持続時間 [μ s]	100
放電電流 [A]	30
開放電圧 [V]	120

表 3.4 高速度ビデオカメラの撮影条件

解像度 [pixel]	312 × 260
フレームレート [fps]	500,000
露光時間 [s]	1/1,000,000

3.3.2.2 観察結果

図 3.5 に、極性を変更してそれぞれ撮影した場合の各タイミングにおける単発放電の拡大観察フレームを時系列に並べて示す。また、撮影した際に SiC 面に形成された放電痕の顕微鏡の観察画像を図 3.5 に合わせて示す。ただし、高速度カメラによる観察時と撮影後の顕微鏡による放電痕の観察時とでは、観察方向が表と裏で逆であるため、顕微鏡観察画像を画像処理により反転させて示している。

放電点では、単結晶 SiC 電極を通して発光が観察された。この発光領域は、時間の経過にともない拡大していく様子が観察される。また、極性を変更した両条件で、放電終了直前のフレームと SiC 電極側に形成された放電痕の観察画像を比較すると、その発光領域と放電痕の大きさ、形状が一致した。従って、この発光は、アークプラズマからの熱流束によって SiC 表面の温度が融点あるいは沸点を超えて高温となった放電点から放射されたものであると考えられる。

SiC 電極側を陰極とした場合、放電点の発光強度は不均一で、発光強度の強い複数のポイントが不規則かつ高速に移動している様子を観察した。しかし SiC 電極側を陽極とした場合、発光の強度分布は軸対称かつ均一な発光が観察された。従来より、陽極面上に形成され

る放電痕形状は単調で軸対称なクレータ形状をしているのに対し、陰極面上に形成される放電痕形状は複雑で、複数の小さなクレータの集合体のような形状をしていることから、陰極面上では細いアーク柱が電極面上を走り回ることによって放電痕が形成されるという説³⁴⁾³⁵⁾があった。陰極点では、陰極シースの強い電界によって加速されたエネルギーの高い陽イオンの陰極面への衝突によって、二次電子が放出される。また、陰極点の温度上昇により熱電子が、陰極シースの強い電界によって電界電子が放出される。さらに、これらの放出電子は、陰極シースで加速され、プラズマ中の中性粒子と衝突し、衝突電離によって陽イオンが生成されイオン密度が上昇する。これらの陽イオンは、さらに陰極に向かって加速され衝突し、陰極点ではますます温度が上昇し熱電子が放出される。このような正帰還によって、陰極点では電極蒸気の激しい上昇や突沸が複数個所で発生し、陰極面での不均一かつ不規則な電流密度分布を形成しているものと考えられる。一方、陽極点では、放電電流のキャリアは全て電子であり、陽極は電子の収集機能を果たすのみである。そのため、陽極点では、陰極点のような正帰還は働かない。これが、陽極点において発光の強度分布が均一である要因と考えられる。

以上のことから、陰極面と陽極面に形成される放電痕形状が異なる要因は、電極面上における放電現象の違いに由来するものであると考えられる。陰極面上では、局所的な電子放出の増大が電流密度を増大させる正帰還が働き、複数個所で電極蒸気の激しい上昇や突沸が発生し、不均一かつ不規則な電流密度分布が形成されるために、複雑形状の放電痕が形成される。一方陽極面上では、陰極のような正帰還のない均一な電流密度分布であるために単調で軸対称な放電痕が形成されるものと考えられる。

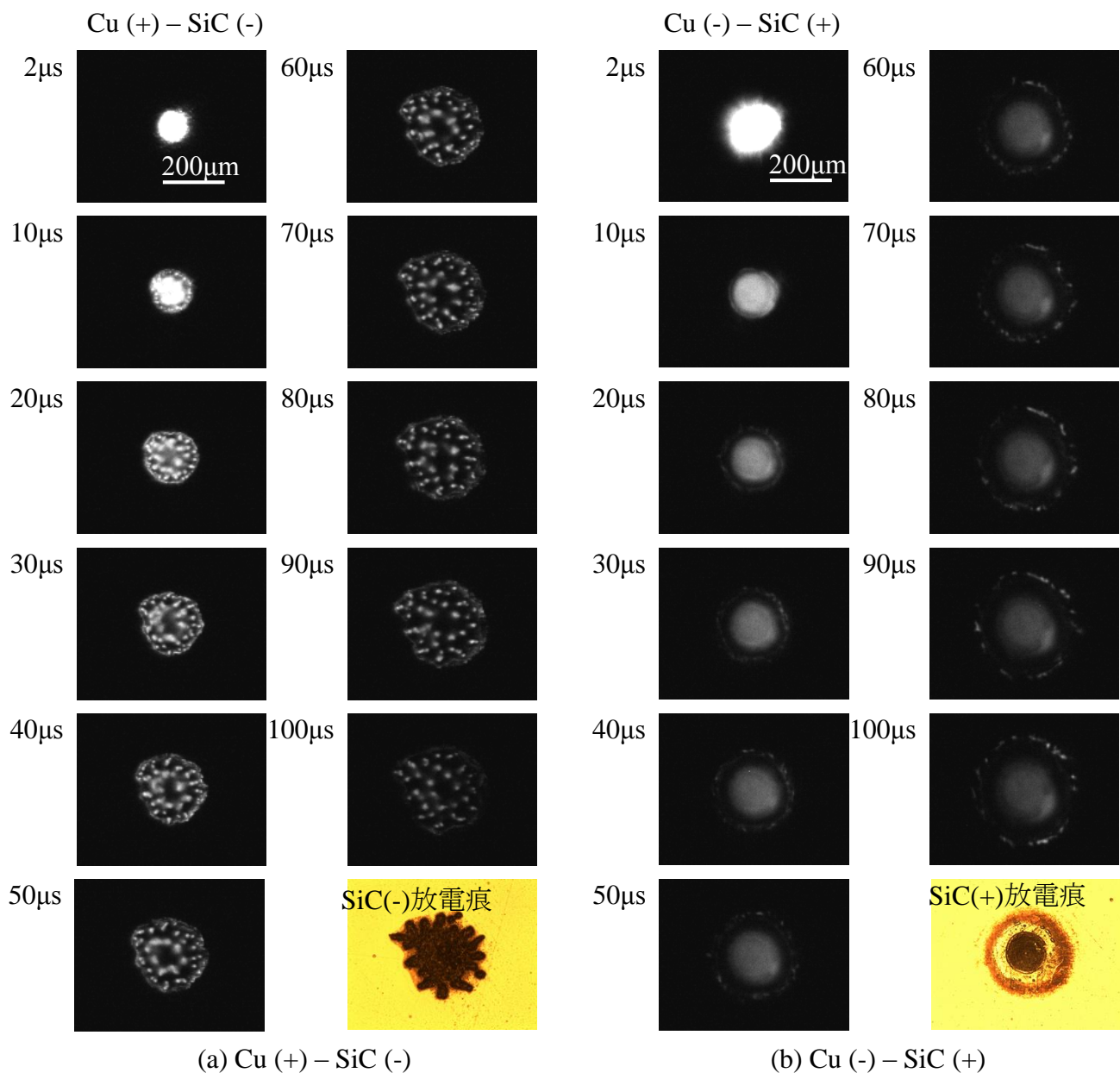


図 3.5 極性を変更した場合の単発放電現象の拡大観察による高速度撮影結果

3.3.3 透明体電極の分光透過率

図 3.5 において、放電点では強い発光が観察される。これらの発光は、SiC 表面の温度が融点あるいは沸点を超えて高温となった放電点から放射された光、またアークプラズマからの発光であると考えられる。しかし、アークプラズマからの発光は、鮮明に観察できていない。吉田ら²⁹⁾は、銅電極の間で発生させた単発放電のアークプラズマの温度測定の際に、分光分析のために銅の中性原子線の波長として 465.1nm, 510.5nm, 521.8nm を用いた。これ

らは、銅からの放射スペクトルのうち、比較的放射強度の強い波長である。そこで、単結晶 SiC ウェハの分光透過率を、分光器を用いて測定した。一方で、単結晶 SiC と同様に次世代パワーデバイス用の半導体として注目されている材料に単結晶 Ga₂O₃ がある。この単結晶 Ga₂O₃ も放電加工を行う上で十分な導電性を有する材料である。そこで、単結晶 Ga₂O₃ についても、その分光透過率を調べた。表 3.5 に本実験で用いた単結晶 Ga₂O₃ ウェハの仕様⁴⁸⁾を示す。

表 3.5 単結晶 Ga₂O₃ ウェハの仕様⁴⁸⁾

厚さ [μm]	400
比抵抗 [Ωcm]	0.1
熱伝導率 [W/mK]	13.6 [100]
融点 [K]	1998

3.3.3.1 実験方法

単結晶 SiC ウェハと単結晶 Ga₂O₃ ウェハの分光透過率測定のために実験装置の構成図を図 3.6 に示す。実験装置は、メタルハライドランプ、光ファイバ、分光器、光電子増倍管、オシロスコープから構成される。光源には、住田光学ガラス製 LS-M250 のメタルハライドランプを用いた。分光器には、ジョバン・イボン社製ツェルニターナー型モノクロメータ HR320 を用いた。また、光電子増倍管には、浜松ホトニクス製サイドオン型光電子増倍管 R955 を用いた。光源から放射される放射束は、光ファイバの受光面で受光される。受光された光は分光器に導かれ、回折格子により波長成分ごとに分解される。測定波長成分の放射束のみを光電子増倍管の光電面に入射する。光電子増倍管は入射光の放射束の大きさに比例した電流を出力するため、負荷抵抗を用いて電圧に変換し、オシロスコープによって測定波長の放射束を測定する。波長のサンプリング間隔は 2nm とした。まず、光源がない場合のバックグラウンドの分光特性を調べた。続いて、光源と光ファイバ間には何も介さず、メタルハライドランプ自身の分光特性を調査した。その後、単結晶 SiC ウェハ、単結晶 Ga₂O₃ ウェハを光源と光ファイバ間に設置して、各ウェハの分光特性を調査した。

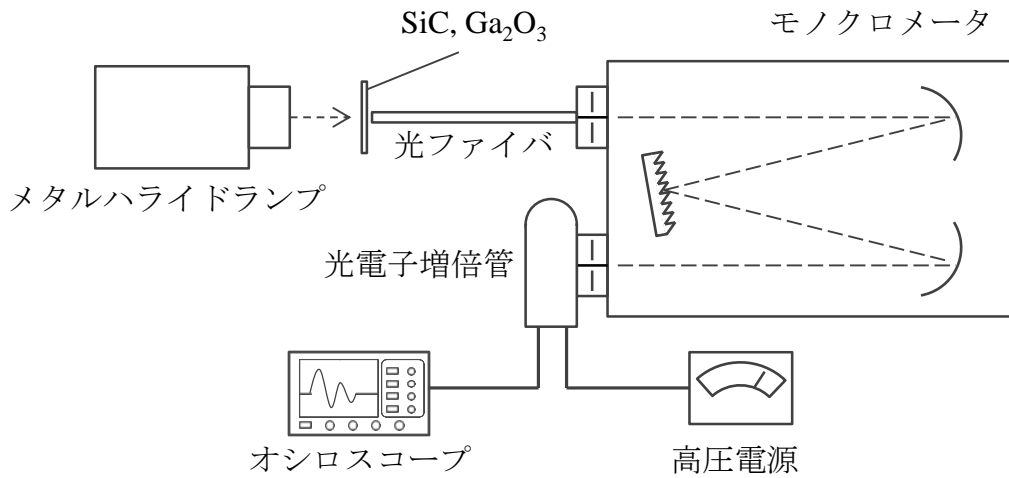


図 3.6 分光透過率測定のために実験装置の構成図

3.3.3.2 実験結果

図 3.7 に光源のみ，また単結晶 SiC ウェハ，単結晶 Ga₂O₃ ウェハを設置した場合の放射束の測定結果を示す．この結果はバックグラウンドの放射束を差し引いている．メタルハライドランプの放射束は，波長 400nm 以下，波長 700nm 以上において弱かったために，波長 400nm から 700nm 間を対象に単結晶 SiC ウェハと単結晶 Ga₂O₃ ウェハの分光透過率を測定した．メタルハライドランプの放射束を V_M ，単結晶 SiC ウェハを通した場合の放射束を V_S ，単結晶 Ga₂O₃ ウェハを通した場合の放射束を V_G ，バックグラウンドの放射束を V_B としたとき，各ウェハの透過率は以下の式より得られる．

$$\tau_{SiC} = \frac{V_S - V_B}{V_M - V_B} \times 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

$$\tau_{Ga_2O_3} = \frac{V_G - V_B}{V_M - V_B} \times 100 \quad [\%]$$

図 3.8 に単結晶 SiC ウェハと単結晶 Ga₂O₃ ウェハの分光透過率を示す．単結晶 SiC ウェハの分光透過率は，波長 460nm 付近ではほぼゼロである．また，他の波長領域においてもおよそ 30 ~ 40% 程度の透過率である．一方，単結晶 Ga₂O₃ ウェハの分光透過率は，波長 400nm から 700nm 間で透過率が 60% 以上であり SiC よりも透過率が高く，また波長依存性が低いことが認められる．従って，放電のアークプラズマを観察のためには，透明体電極として単結晶 Ga₂O₃ が適していると考えられる．

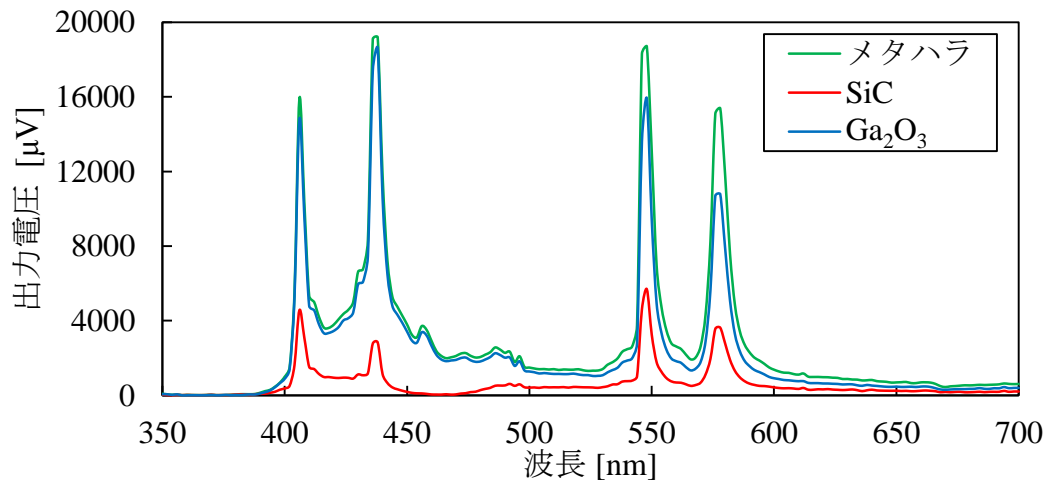


図 3.7 メタルハライドランプと SiC, Ga₂O₃ を介した際の放射束測定結果

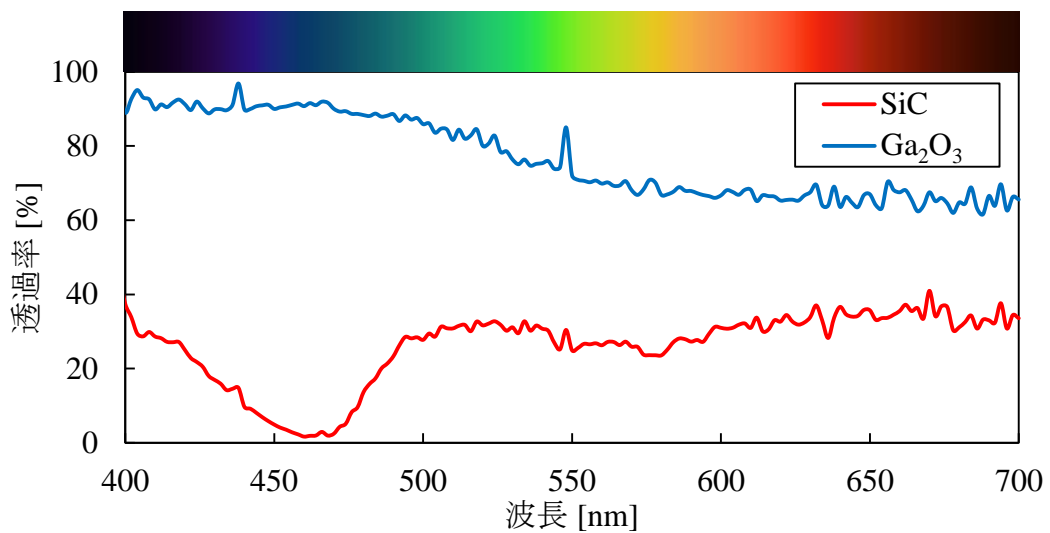


図 3.8 単結晶 SiC ウェハと単結晶 Ga₂O₃ ウェハの分光透過率

3.3.4 アークプラズマの観察

放電加工は、アーク柱からの熱流束により工作物を溶融・蒸発させ除去するとともに、これにより形成される放電痕の累積によって加工が行われるため、単発放電による電極材料中の熱伝導解析が重要であるが、電極中の正確な温度分布を得るためには、適切な境界条件を用いる必要がある。最も重要な境界条件は、放電のエネルギーの陽極と陰極へのエネルギー配分と熱源の直径である⁶⁵⁾。

エネルギー配分は、全体の放電エネルギーのうち、陽極と陰極へ伝わったエネルギーの割

合であり、それは温度測定と熱伝導解析の逆問題解法によって得ることができる¹⁸⁾。

もう一方の重要な境界条件は、放電点における熱源の直径である。これまでは、熱源の直径は、プラズマの直径と等しいと考えられてきた。放電は、非常に狭い極間隙中で非常に短い時間に生じる過渡現象であるために、プラズマ直径を測定することは困難である。多くの論文では、放電の陰極の熱源を点熱源と見なしている⁶⁶⁾。また一方で、プラズマの直径は、放電痕の直径と等しいという仮説が広く用いられている⁶⁷⁾⁶⁸⁾⁶⁹⁾。これらの論文では、それらの仮説に基づいて計算された放電痕の直径と実験結果が一致することを報告している⁶⁶⁾⁶⁸⁾。しかし、それらの解析では、放電のエネルギー配分は、仮定のもとで計算されている。一方、Kojima ら³²⁾は、高速度ビデオカメラを用いて、大気中で発生させた放電のアークプラズマを電極の側方から観察している。その結果、放電のアークプラズマ直径は、放電痕直径あるいは加工間隙幅の 5 倍以上大きい 0.5mm であることを報告している。しかし、側面からの観察が可能であるのは、棒状電極を用いた突合せ加工の場合に限られ、電極面積が大きい場合の観察は困難である。また、大気中での放電の観察は容易であるが、液中での放電は加工液による光の吸収が大きいことから、アークプラズマの直接観察は困難である。

一方で、透明体電極を用いれば、液中で発生する放電現象を直接観察することが可能である。そこで、透明体電極を用いて液中で生じる放電のアークプラズマを直接観察した。

3.3.4.1 実験方法

本実験では、図 3.4 に示す実験装置の構成を用いて、陽極を銅 (Cu) と炭素鋼 (S45C) の丸棒電極、陰極を単結晶 SiC ウェハ (新日鉄住金マテリアルズ製) と単結晶 Ga₂O₃ ウェハ (タムラ製作所) の透明体電極として、加工セル中で対向させ、Y 軸方向にサーボして加工を行い、両電極間で発生する単発放電現象を、透明体電極を通して高速度ビデオカメラにより直接観察した。加工は、放電加工油中と大気中の二種類で行った。また透明体電極を通して観察した場合と比較するために、先端の曲率半径を約 3mm の球状に成形した φ3mm の Cu 丸棒電極を陽極、板厚 2mm の板状の Cu 電極を陰極として両者の間で、大気中において単発放電を行い、側方から高速度ビデオカメラによってアークプラズマを直接観察した。本観察では、放電点の自発光現象を観察するために照明は行わなかった。本実験で用いた放電加工条件を表 3.6 に示す。高速度ビデオカメラは、500 万画素・最高 130 万コマ/秒・カラーである nac 製の MEMRECAM HX-3 を使用した。高速度ビデオカメラの撮影条件を表 3.7 に示す。

表 3.6 放電加工条件

工具電極 (+)	銅 (Cu), 炭素鋼 (S45C)
透明体電極 (-)	SiC, Ga ₂ O ₃
放電持続時間 [μs]	100
放電電流 [A]	20
開放電圧 [V]	120
加工雰囲気	放電加工油, 空気

表 3.7 高速度ビデオカメラの撮影条件

解像度 [pixel]	320 × 240
フレームレート [fps]	100,000
露光時間 [s]	1/1,000,000

3.3.4.2 アークプラズマの観察結果

図 3.9 に例として、油中において陽極を Cu、陰極を SiC と Ga₂O₃ とした場合について、撮影された単発放電現象の拡大観察フレームを時系列で並べた結果を示す。ただし、陰極を Ga₂O₃ とした場合については、大気中の単発放電の観察結果も合わせて示す。さらに、透明体電極を通した観察結果との比較のために、大気中で側方から観察した結果も合わせて示す。また、撮影の際に陽極と陰極に形成された放電痕の観察結果も合わせて示す。本観察では、照明を行っていないため、気泡の膨張過程は観察されない。SiC 電極に形成される放電痕は、Ga₂O₃ のそれに比べて小さい。その要因は、Ga₂O₃ に比べて SiC の熱伝導率が極端に高く、放電により加えられた熱が放電点から素早く散逸してしまったためであると考えられる。Cu の放電痕は、放電点中心付近に熔融再凝固した小さなクレータ、またその周囲に非常に小さな無数の凹凸を有する熱影響領域が観察された。

撮影フレームにおいて、放電点で観察されるオレンジ色から茶色い領域は、放電終了後の透明体電極に形成された放電痕の形状と大きさが一致したことから、放電中のこの領域はアークプラズマからの熱流束により高温となり熔融した領域であり、その周囲に観察される発光領域はプラズマ領域であると考えている。

陰極に SiC を用いた場合、熔融領域内では発光強度が不均一であり、局所的に発光強度の強いポイントが多数、観察される。これは、3.3.2 節の図 3.5 (a) における観察結果と一致す

る。陰極に Ga_2O_3 を用いた場合も SiC の場合と同様に、放電点での発光強度の不均一分布が観察されるが、 SiC の場合に比べて一点の発光面積が大きく観察される。この現象の違いは、透明体電極の熱物性値やジュール発熱の違いによる放電点での熱電子放出現象等の放電現象の違いが影響を及ぼしているものと考えられる。

アークプラズマの発光領域は、時間とともに膨張していく様子が観察される。 Cu の代表的な中性原子の輝線スペクトルは、465.112, 510.554, 515.324, 521.820nm 等である。図 3.8 より、 Ga_2O_3 は短波長領域でおよそ 90% と高い透過率を示す。従って、 Ga_2O_3 を通して放電点を観察するとプラズマ領域は青色に観察される。一方、 SiC は短波長領域で透過率が低いために、 SiC を通して観察すると、プラズマ領域は青色が吸収され緑色に観察される。観察された発光領域は、カメラの露光時間や絞り等の撮影条件によって変化するため、アークプラズマ領域の大きさからアークプラズマの直径等の絶対値を決定することはできないが、発光領域の大きさの変化は、アークプラズマの大きさの変化を反映していると考えられる。また、露光時間や絞り等の撮影条件が同じであれば、大小の比較は可能である。透明体電極を Ga_2O_3 とした場合において、油中と大気中のアークプラズマの膨張過程を比較すると、油中のアークプラズマの方が、大気中に比べて絶縁破壊直後の膨張速度が遅いことが認められる。これは、プラズマの周囲に存在する加工液の慣性によってプラズマの膨張が抑制されるためであると考えられる³²⁾。大気中の放電において、側方からアークプラズマを観察すると、放電により青色を呈したアークプラズマの発光が観察された。この発光領域は、絶縁破壊直後に半径方向に急激に膨張している。また、側方から観察したアークプラズマの発光領域と Ga_2O_3 を通して観察されたアークプラズマの発光領域の大きさは概ね一致した。

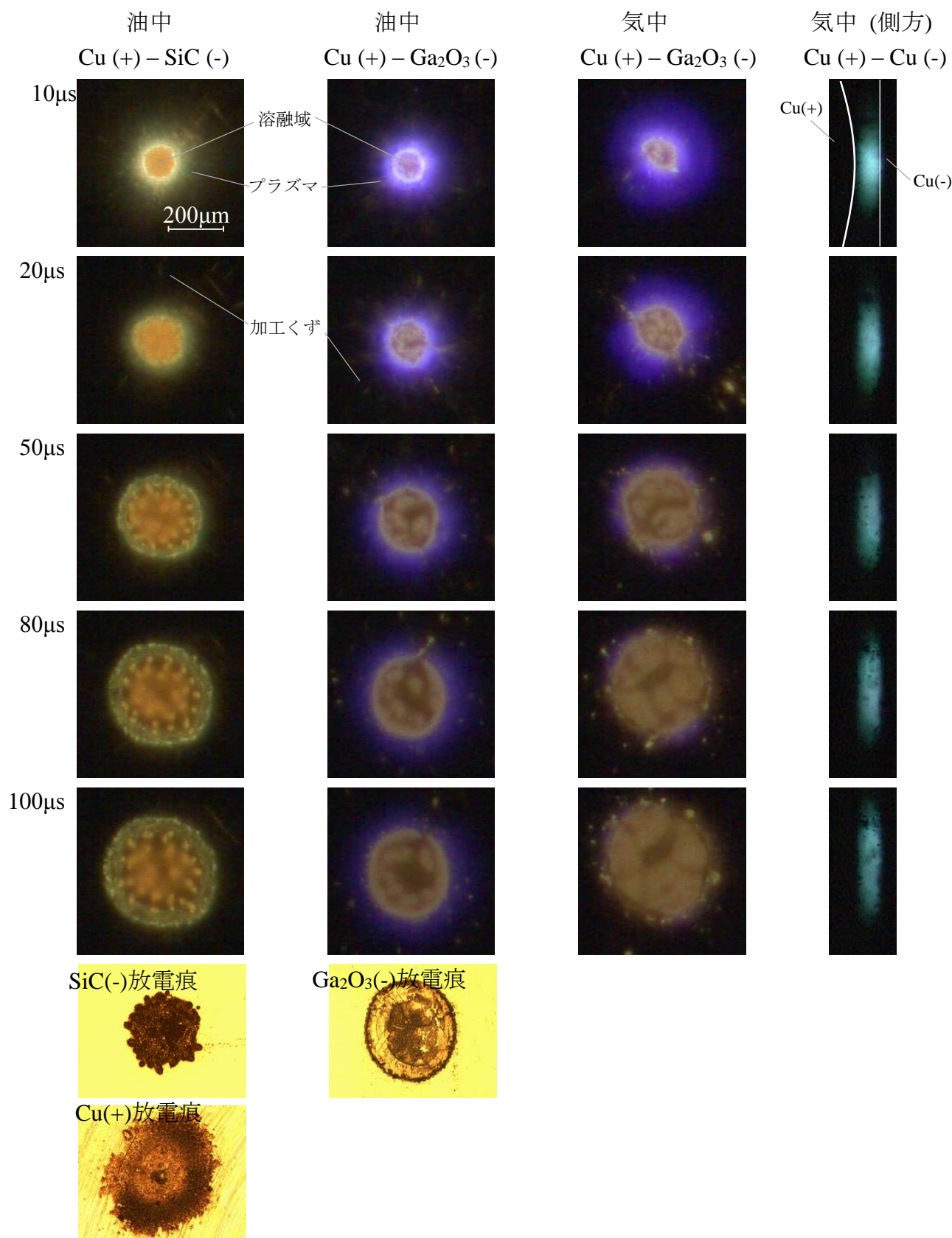


図 3.9 放電アークプラズマの高速度撮影結果

3.3.5 溶融域外周の発光領域の温度測定

透明体電極を通して、加工面に対して垂直方向から単発放電のアークプラズマの発光を観察したが、この発光はプラズマから放射される光エネルギー $h\nu$ によって周囲の中性原子がラジカルになり、その後エネルギー準位が下がる際に放射された光を観察していることも考えられる。つまり、電離気体からの発光であるとは限らず、電流が流れている領域とは断定できない。そこで、本実験では、透明体電極を通して分光分析により溶融領域外周に観察される発光領域の温度測定を行い、この領域がプラズマ領域であることを確認することを目的とする。この場合、放電中は、透明体電極にアークプラズマからの熱流束により溶融領域が形成され、中心部のプラズマの発光が遮蔽されるため、溶融域の外周のみの温度を測定することができる。

3.3.5.1 分光測定原理

本実験において使用する放射量は、放射束と放射強度⁷⁰⁾である。

(a) 放射束： ϕ

放射束とは、ある断面を単位時間当たり通過する放射エネルギー、つまり放射のパワーであり、単位時間当たりの放射エネルギーで表される。単位はジュール毎秒[J/s]、つまりワット[W]である。

(b) 放射強度： I

放射強度とは、単位立体角当たりの放射束で、単位はワット毎ステラジアン[W/sr]である。

熱平衡状態にあるプラズマの温度は、相対強度法³⁰⁾を用いて測定することができる。相対強度法とは、プラズマから放射される光のうち、波長の異なる二つの発光の間の放射強度の比を用いて温度を求める方法である。以下にその原理を述べる。

励起準位 m に存在する原子の数密度 (単位体積当たりの原子の数) を N_m [1/m³]、原子一個が単位時間に準位 m から準位 l へ遷移する自発遷移確率を A_{ml} [1/s] とすれば、単位体積当たり、単位時間当たりの遷移の数は $N_m A_{ml}$ [1/m³・s] であり、この際に放出される光子一個当たりのエネルギーは、プランク定数を h [J・s]、光の振動数を ν_{ml} [Hz] とすれば、 $h\nu_{ml}$ [J] である。従って、プラズマ中のある電子のエネルギー準位 m から準位 l への遷移に伴って放射される、振動数 ν_{ml} の単位時間当たり、単位立体角当たりのエネルギーである放射強度 I_m [W/sr] は、全立体角が 4π [sr] であるため次式で表すことができる。

$$I_m = \frac{1}{4\pi} A_{ml} h \nu_{ml} N_m \quad (3.2)$$

A_{ml} [1/s]: 単位時間に準位 m から準位 l へ遷移する自発遷移確率

h [J·s]: プランク定数

ν_{ml} [Hz]: 光の振動数

N_m [1/m³]: 励起準位 m に存在する原子の数密度

また、熱平衡プラズマではボルツマン分布が成立しているため、励起原子数密度 N_m と全原子数密度 N_n との関係は次式で表すことができる。

$$N_m = N_n \frac{g_m}{U(T)} \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) \quad (3.3)$$

g_m : 励起準位 m の統計的重率

T [K]: プラズマ温度

$U(T)$: プラズマ温度 T における状態和

E_m [J]: 準位 m の励起エネルギー

k [J/K]: ボルツマン定数

N_m : 励起原子数密度

N_n : 全原子数密度

ここで、 $U(T)$ は次式で求められる。

$$U(T) = \sum_i g_i \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \quad (3.4)$$

式 (3.3) を式 (3.2) へ代入すると、次式が得られる。

$$I_m = \frac{1}{4\pi} A_{ml} h \nu_{ml} N_n \frac{g_m}{U(T)} \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) \quad (3.5)$$

同様に、ある電子のエネルギー準位 k から準位 j への遷移に伴って放射される振動数 ν_{kj} の線スペクトル放射強度 I_k は、次式で表すことができる。

$$I_k = \frac{1}{4\pi} A_{kj} h \nu_{kj} N_n \frac{g_k}{U(T)} \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right) \quad (3.6)$$

ここで、ある特定の元素に着目すれば、ある時刻のある点における N_n および $U(T)$ また T は共通であるから、式 (3.5) と式 (3.6) より放射強度 I_m と I_k の比は次式で表される。

$$\frac{I_m}{I_k} = \frac{A_{ml} \nu_{ml} g_m}{A_{kj} \nu_{kj} g_k} \exp\left(-\frac{E_m - E_k}{kT}\right) \quad (3.7)$$

これより次式が得られる。

$$T = \frac{E_m - E_k}{\left(\ln \frac{A_{ml} g_m \nu_{ml}}{A_{kj} g_k \nu_{kj}} + \ln \frac{I_k}{I_m} \right) k} \quad (3.8)$$

従って、アークプラズマ内の同じ領域から放射される光の二つの異なる波長の放射強度成分を、二台の分光器を用いて同時に測定することで、式 (3.8) より特定の元素のプラズマ温度を求めることができる。

なお、本実験で使用している測定装置では、ある波長における光ファイバの断面積と開口角で決まるある断面を通過する放射束を測定することができるが、単位立体角当たりの放射束である放射強度を求めることはできない。しかし、同じ測定装置を用いてことなる二波長を同時に測定していることから、測定された放射束の比は、受光立体角の影響を受けず、放射強度の比と等しいものとなる。そこで、本実験では測定される放射束の比を用いて、相対強度法によってプラズマ温度測定を行った。

3.3.5.2 実験方法

図 3.10 に熔融域外周の発光領域の温度測定のための実験装置の構成図を示す。実験装置は、拡大レンズ、光ファイバ、分光器、光電子増倍管、オシロスコープで構成される。分光器には、時間分解能と波長分解能に優れたモノクロメータを採用し、ジョバン・イボン社製のツェルニターナー型モノクロメータ **HR320** を用いた。光電子増倍管は、浜松ホトニクス製のサイドオン型光電子増倍管 **R955** を用いた。分光器と光電子増倍管を二組用い、さらに分岐型光ファイバ束を用いることによって、一回の放電から二波長を同時に測定可能にしている。Cu 電極と透明体電極の間で単発放電を行い、アークプラズマから放射される放射束は、拡大レンズにより分岐型光ファイバ束の受光面で結像され受光される。受光された光は、光ファイバ束により途中で二等分され、二台の分光器に導入され、回折格子により波長成分毎に分解される。そして、測定波長成分の放射束のみを光電子増倍管の光電面に入射させる。光電子増倍管は入射光の放射束の大きさに比例した電流を出力するため、負荷抵抗を用いて電圧に変換して、各測定波長の放射強度をオシロスコープによって測定した。SiC 電極に形成される放電痕は、図 3.9 に示すように Ga_2O_3 のそれに比べて小さい。従って、より高い放射エネルギーを用いて測定を行うために、透明体電極として SiC を用いた。陽極を Cu 丸棒電極、陰極を単結晶 SiC 電極として、油中で単発放電を行い、プラズマ内の Cu 原子の温度測定を行った。ここで、相対強度法を用いてプラズマの絶対温度を算出するためには、測定する線スペクトルにおける励起エネルギー E 、遷移確率と統計的重率の値が既知である必要がある。文献⁷¹⁾より参照した Cu の線スペクトルにおける諸定数を表 3.8 に示す。SiC は短波長領域において透過率が低いために、測定波長として 510.554nm と 521.820nm を用いた。また、表 3.9 に単発放電の放電条件を示す。

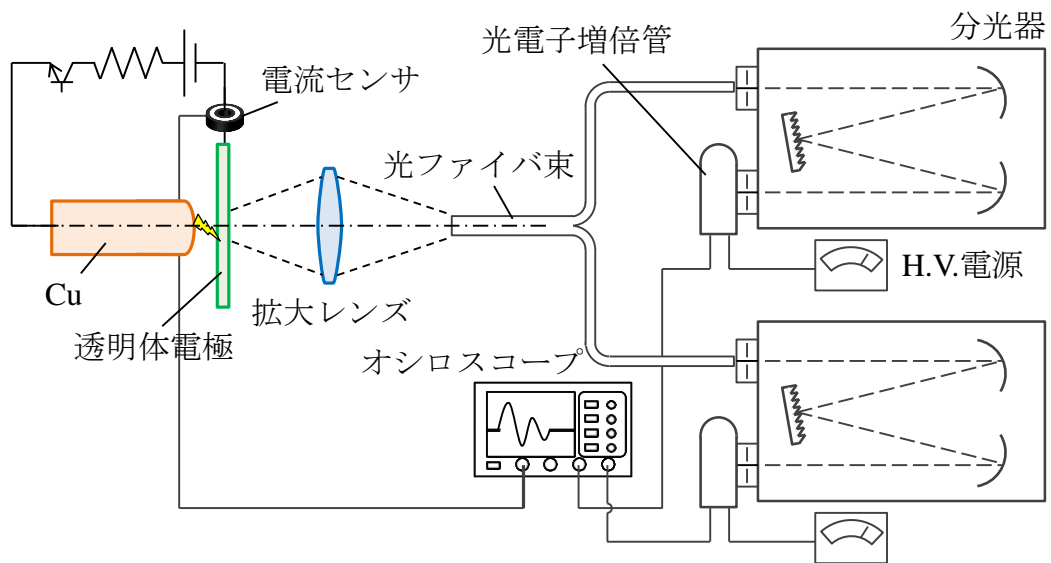


図 3.10 溶融域外周の発光領域の温度測定のための実験装置の構成図

表 3.8 Cu の線スペクトルの諸定数 ⁷¹⁾

波長 λ [nm]	遷移確率 A [sec^{-1}]	統計的重率 g	励起エネルギー E [J]
465.112	3.8×10^7	8	1.240×10^{-18}
510.554	2.0×10^6	4	6.115×10^{-19}
515.324	6.0×10^7	4	9.920×10^{-19}
521.820	7.5×10^7	6	9.921×10^{-19}

表 3.9 放電加工条件

工具電極 (+)	Cu
透明体電極 (-)	SiC
放電持続時間 [μs]	100
放電電流 [A]	20
開放電圧 [V]	120
加工雰囲気	放電加工油

3.3.5.3 実験結果

放電中における放電痕外周領域の温度測定結果を図 3.11 に示す。このグラフでは、光電子増倍管の出力を $10\mu\text{s}$ ごとに平均して温度を算出している。一般に電離度は 5000K 以上で顕著に高くなる³⁾ことが知られている。橋本ら³³⁾は放電終了後の放電休止時間中のプラズマ温度を測定し、放電終了後 $5\mu\text{s}$ 経過すれば、 5000K 以下となり、次のパルスを印加しても同じ箇所には放電が生じないことを示している。この結果は 5000K が電離の閾値であることを示している。図 3.11 より、放電中の熔融域外周の発光領域の温度はおよそ $6000\sim 7000\text{K}$ であり、 5000K 以上であることから、この領域はプラズマ領域であることが明らかとなった。従って、放電中のプラズマ直径は、熔融領域に比べて大きいことから、プラズマ直径は SiC 上に形成される放電痕の直径に比べて大きいことがわかった。また、このときに陽極である Cu 電極面上に形成された放電痕の直径は、後述のように SiC 上の放電痕よりもさらに $1/4$ 程度小さかった。Kojima ら³²⁾は、分光分析により、Cu 電極の側方からプラズマ中の温度分布を調べ、プラズマ直径は Cu 電極面上に形成される放電痕の 5 倍に達することを報告している。従って、本実験結果は Kojima ら³²⁾の結果を裏付ける結果である。

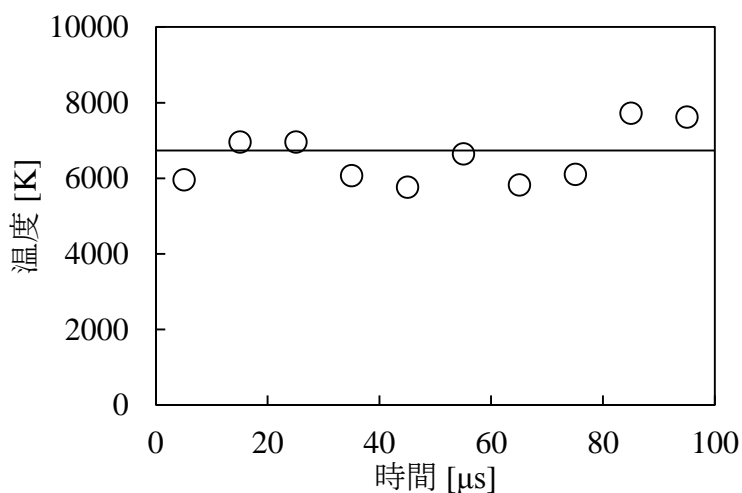


図 3.11 放電痕外周領域のアークプラズマ温度

3.4 熱源直径

前節では、透明体電極を用いることで、液中で生じる放電のアークプラズマを直接観察した。大気中と同様に液中においても、アークプラズマは絶縁破壊後に急激に膨張することがわかった。そこでここでは、観察されたアークプラズマの直径を測定し、プラズマ直径の変化を時間の関数として近似式を導いた。さらに、このプラズマ直径の妥当性を検討するために、この直径の近似式を円盤状の熱源として単発放電における材料中の温度分布を熱伝導解析し、実験的に得られる放電痕直径と比較した。

3.4.1 アークプラズマ直径と放電痕直径の関係

図 3.12 に例として、陽極を Cu、陰極を Ga₂O₃ とした場合について、単発放電中の撮影フレームと図中の破線断面におけるビデオカメラからの Red・Green・Blue 各色成分についてそれぞれ 256 階調でその輝度を合わせて示す。プラズマ直径は、Ga₂O₃ の放電点における青色発光分布から測定可能である。ここでは、発光強度ピーク値の 20% 以上の領域をプラズマ領域と見なし、プラズマ直径の時間変化を調べた。さらに、プラズマ直径と放電痕直径との関係を調べるために、放電持続時間 100 μ s の間を 10 μ s 間隔で変化させて単発放電を行い、その際に形成された放電痕の大きさを調べた。一般に単発放電痕は図 3.13 に示すように、材料表面より窪んだ領域と熔融金属が残留して再凝固し盛り上がった盛り上がり領域が存在する。本実験では、図 3.13 のように盛り上がり領域を含めた領域を放電痕直径とみなして測定した。油中の単発放電において、陽極を Cu 電極と Steel 電極、陰極を Ga₂O₃ とした場合について、図 3.9 の撮影結果よりアークプラズマ直径と各放電持続時間における放電痕直径の変化の測定結果を図 3.14 に示す。この結果より、アークプラズマの直径は絶縁破壊直後約 10 μ s 以内に急激に膨張し、その後一定の直径を維持していることが認められる。Kojima ら³²⁾ は、大気中放電のアークプラズマは約 2 μ s 以内に膨張を完了することを報告している。従って、液中の場合は、プラズマの膨張に必要な時間は、大気中の場合に比べて多少長い。また、電極を Cu、Steel とした場合でアークプラズマの直径とその時間変化に大きな違いは認められない。さらに放電中のアークプラズマの直径は各電極に形成される放電痕直径に比べて大きいことがわかる。従来は、放電加工におけるアークプラズマの直径は放電痕の直径と等しいとされていたため、放電痕の大きさからアークプラズマの直径が推測された^{72), 73)}。しかし、Natsu ら⁷⁴⁾ は側方から高速度ビデオカメラによりアークプラズマを観察し、プラズマ直径と放電痕直径は大きさもその時間変化も異なることを明らかにしている。また、Kojima ら³²⁾ はアーク柱の温度分布を測定することによりプラズマ直径は放電痕径より大きいことを明らかにしている。従って、本結果は Natsu⁷⁴⁾ ら、Kojima ら³²⁾ の結果を裏付ける結果であり、プラズマ直径と放電痕径が等しいという従来の定説を覆すものである。

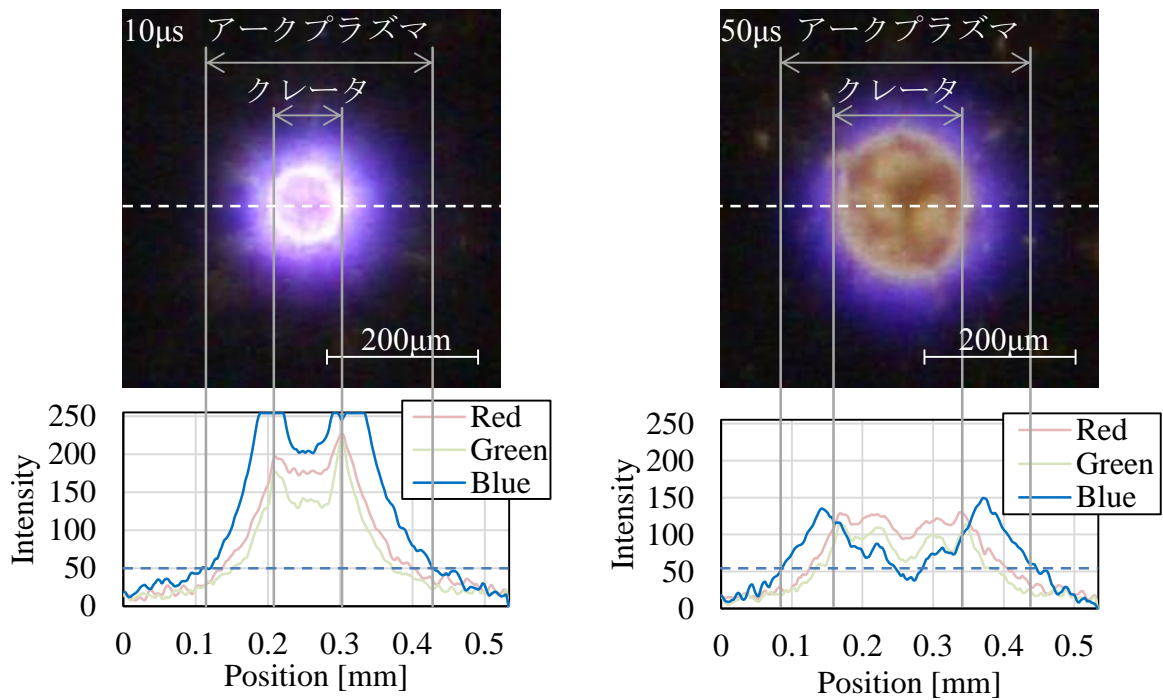


図 3.12 プラズマ直径の測定

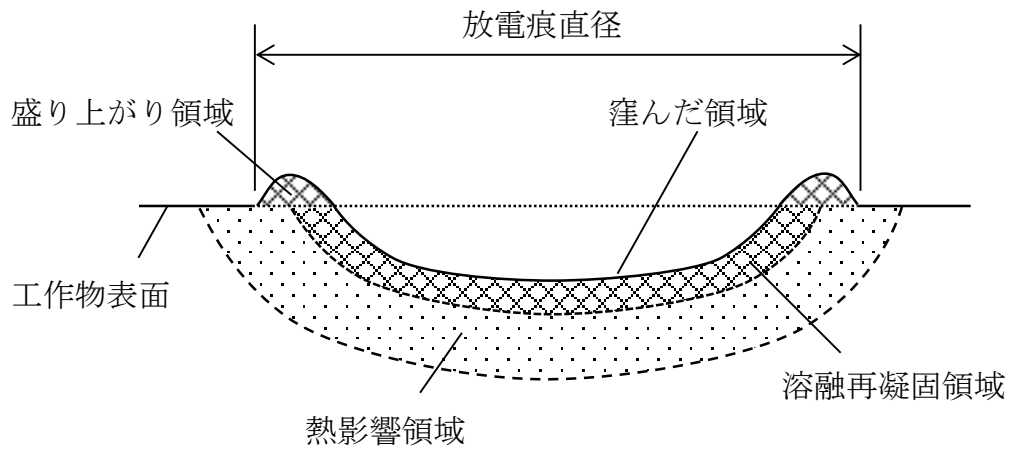
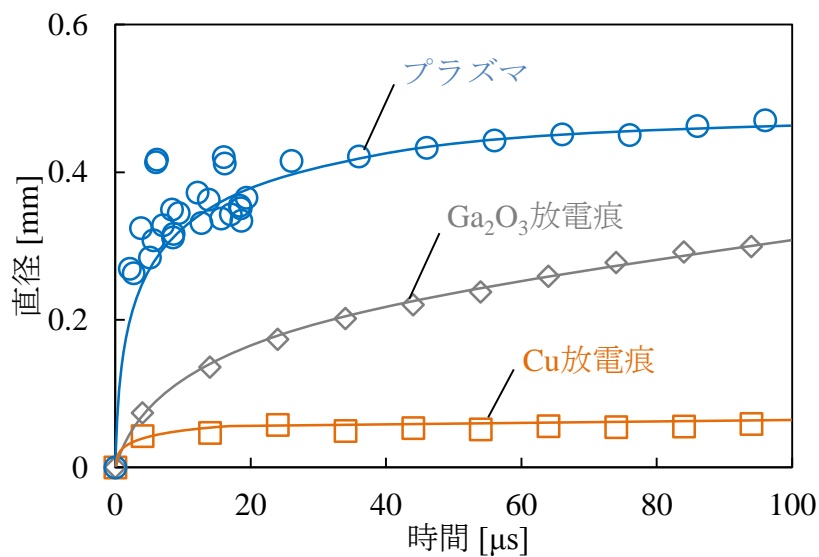
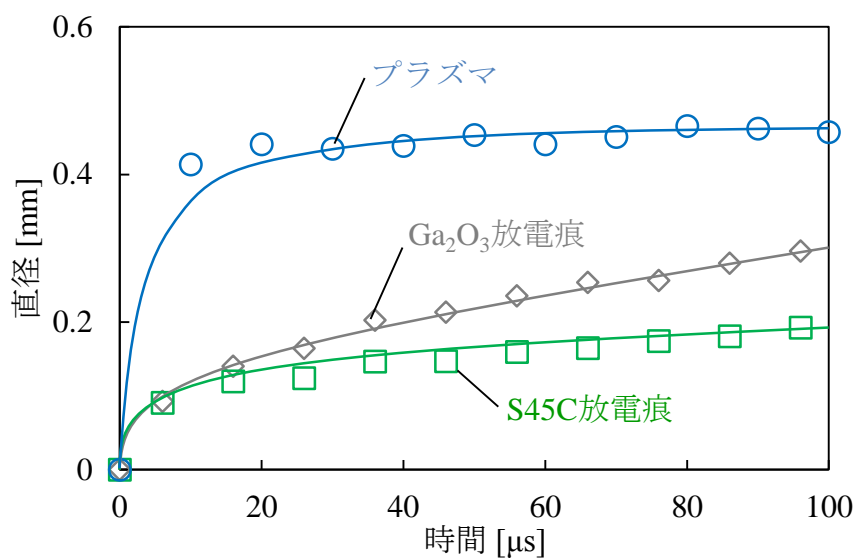


図 3.13 放電痕直径の測定



(a) Cu (+) - Ga₂O₃ (-)



(b) S45C (+) - Ga₂O₃ (-)

図 3.14 アークプラズマ直径と放電痕直径の関係

3.4.2 単発放電の熱伝導解析

本節では、プラズマ直径の変化を時間の関数として近似式を導いた。また、このプラズマ直径の妥当性を検討するために、この直径の近似式を円盤状の熱源として単発放電における材料中の温度分布を熱伝導解析し、実験的に得られる放電痕直径と比較した。

3.4.2.1 解析モデルと解析手順

齋藤⁶⁹⁾は、単発放電より得られた放電痕から、放電痕直径を放電電流ピーク値 i_e と放電持続時間 t_e を用いて次式のように表現しており、アーク柱の電流密度を求める際もこの直径を用いている。

$$d(t) = 2.4 \times 10^{-3} \times t^{0.4} \times i_e^{0.4} \quad [\text{m}] \quad (3.9)$$

また、猪飼ら⁶⁸⁾も上式と同様の関数形を用いて単発放電の熱伝導解析を行っている。そこで本研究ではこの式の関数形をもとに、図 3.14 よりアークプラズマ直径を表す近似式として次式を求めた。

$$d(t) = 2.5 \times 10^{-3} \times t^{0.18} \quad [\text{m}] \quad (3.10)$$

式 (3.9), (3.10) のグラフを、アークプラズマ直径の測定結果と合わせて図 3.15 に示す。本解析では、式 (3.10) のアークプラズマの観察結果より得られた直径の変化を熱源の直径として、単発放電における材料中の温度分布の非定常熱伝導解析を行い、得られた結果と実験的に得られた単発放電痕の直径と比較を行った。

図 3.16 に、軸対称の円柱座標系の二次元熱伝導解析モデルを示す。熱源は円形で、中心軸上にあり、式 (3.10) に従って時間とともに直径 $d(t)$ が膨張し、次式で計算される熱流束が円盤内に一様に流入する場合を考える。

$$q'' = \frac{\eta P}{\pi \cdot d(t)^2 / 4} \quad (3.11)$$

q'' : 熱源からの熱流束

η : エネルギー配分率

P : 一回の放電で極間に投入されるエネルギー

ここでエネルギー配分 η は、Xia ら¹⁸⁾ によって測定された結果を参考に $\eta = 0.3$ とした。また、簡単のため熱流束 q'' は直径 $d(t)$ の領域内で一様であり、それ以外の工作物表面では断熱を仮定する。また、熱源から十分遠い半径 $r=R$ 、深さ $z=Z$ では工作物の温度は室温 (300K) に保たれるとする。また工作物中の温度が 300K である状態を初期条件として、軸対称の非定常熱伝導解析を差分法により行った。解析時間は全体を 120 μs とし、そのうち熱入力時間は、時刻 0s から 100 μs の間とした。材料中の温度が融点、沸点を超えても除去は生じないと仮定した。材料の熱物性値の温度依存性を無視したが、溶融と蒸発の潜熱は考慮した。工作物材料は、Cu と Steel の二種類として熱伝導解析を行った。表 3.10 に各材料の物性値⁶²⁾を示す。

放電痕を上方から観察すると、その表面は溶融再凝固層で覆われている。一方、宇野ら⁷⁵⁾は図 3.17 に示すように、液中で発生させた単発放電痕の断面をエッチングして観察している。図中に溶融金属が残留した白色の溶融再凝固層が観察される。ただし、この溶融再凝固層は薄く、溶融した領域の直径を放電痕直径とみなすことが可能と考えられる。そこで、本

研究では図 3.18 に示すように、熱伝導解析により得られた材料中の温度分布において、材料表面で融点を超えた領域の直径を放電痕直径と見なし、実験的に得られる放電痕と比較した。

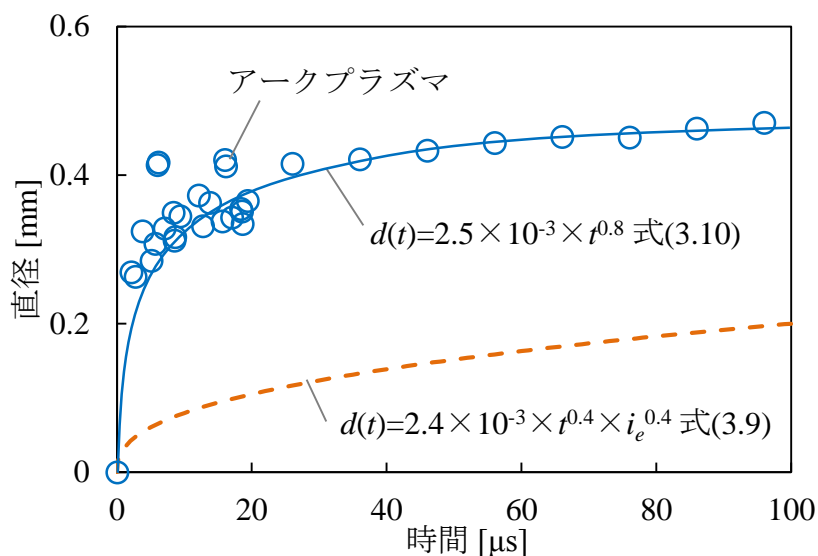


図 3.15 プラズマ直径の時間変化

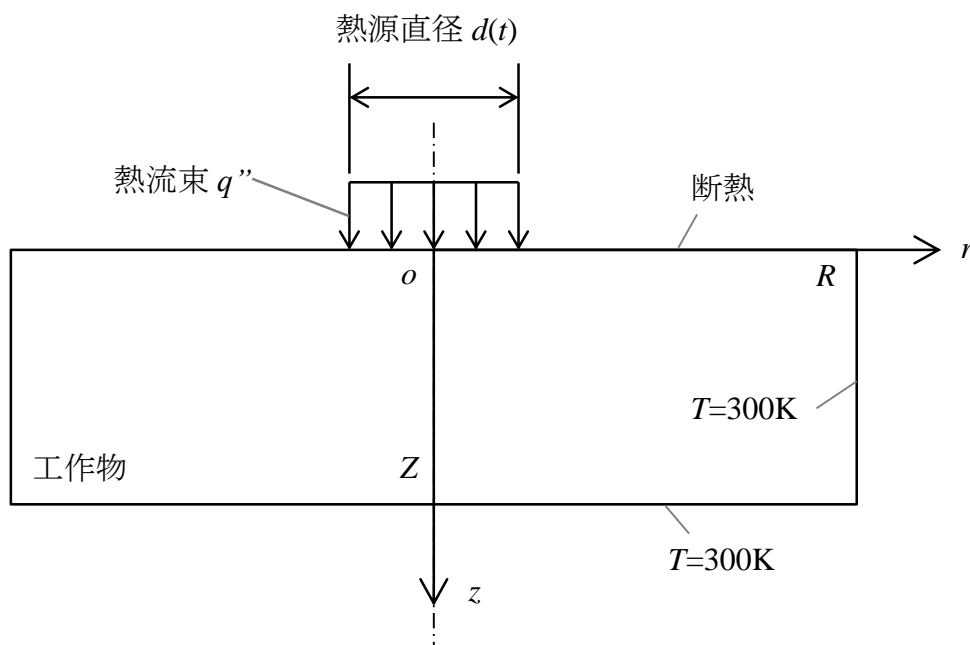


図 3.16 単発放電における材料中の温度分布の非定常熱伝導解析のための軸対称の円柱座標系二次元モデル

表 3.10 熱伝導解析で用いた材料の物性値 ⁶²⁾

	銅 (Cu)	炭素鋼 (Steel)
融点 [K]	1357	1808
熱伝導率 [W/mK]	401	50
密度 [kg/m ³]	8930	7870
比熱 [J/kg·K]	385	449

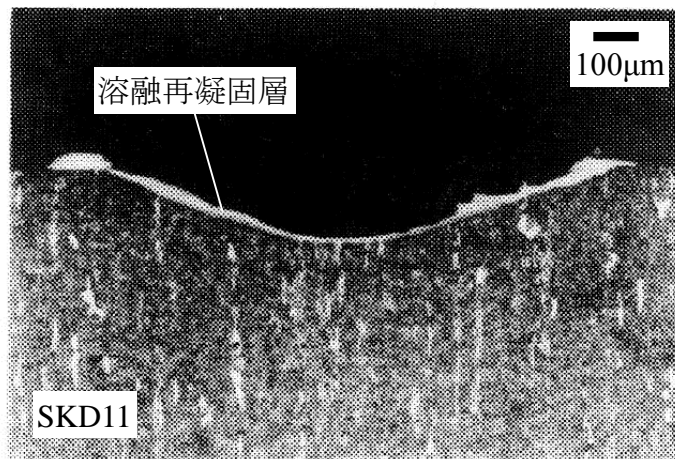


図 3.17 単発放電痕の断面写真 ⁷⁵⁾

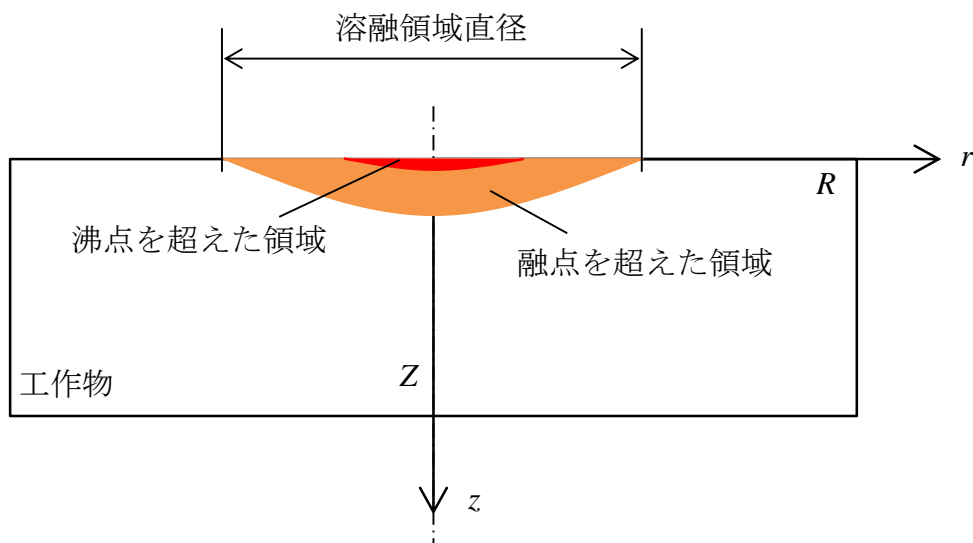


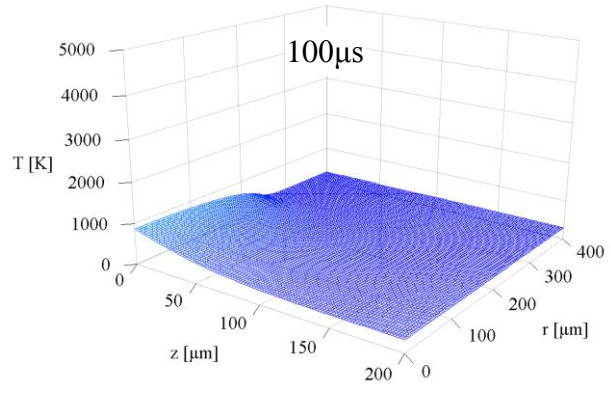
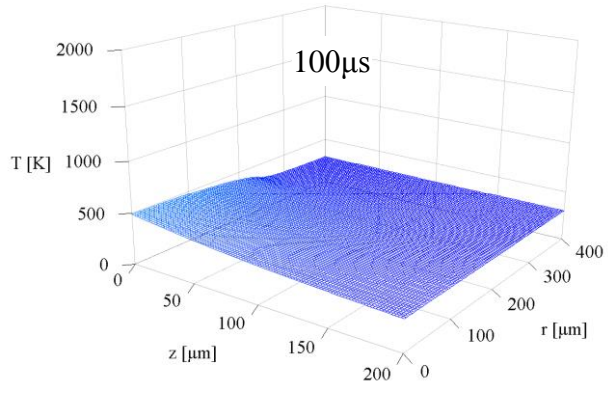
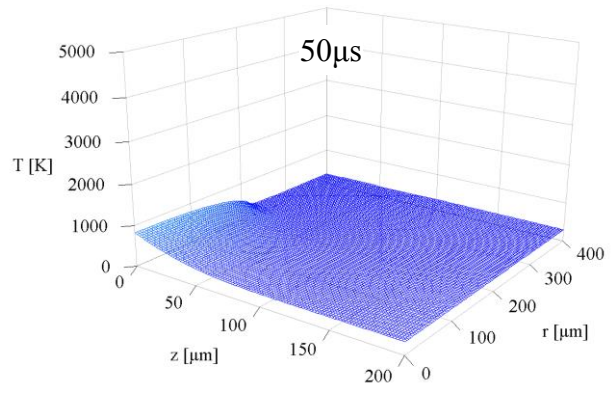
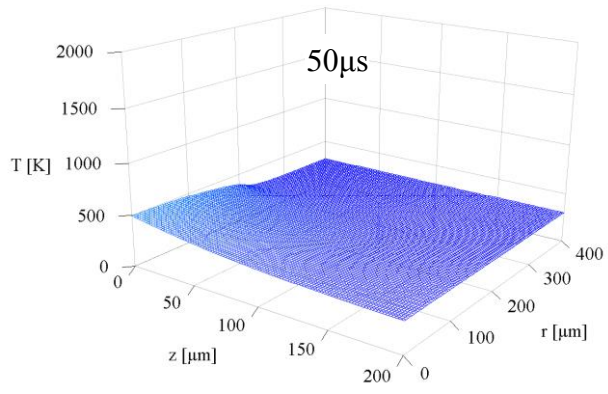
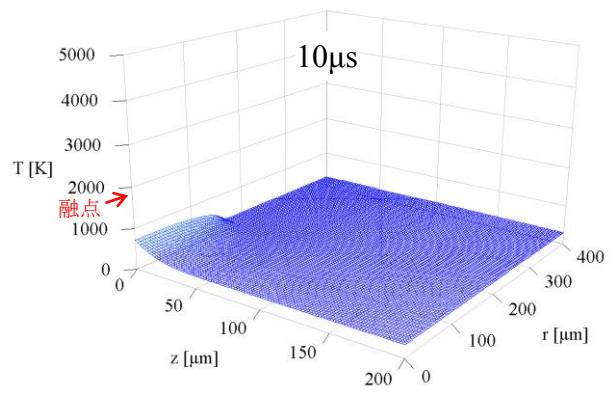
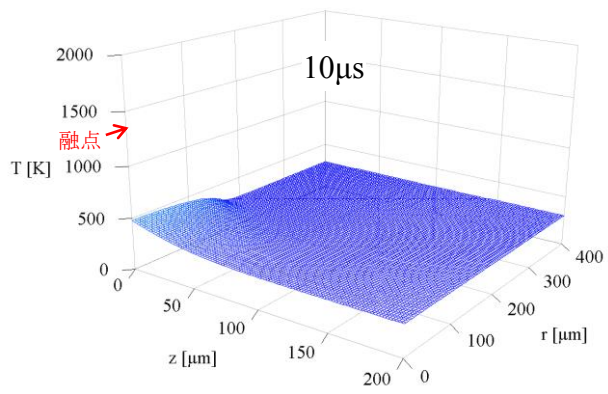
図 3.18 熱伝導解析による得られる熔融領域直径

3.4.2.2 材料中の温度場の解析結果

図 3.19 に式 (3.10) を熱源直径とした場合の、材料中の温度分布変化の解析結果を示す。これらの結果より、放電の熱流束によって材料中の温度は上昇しているものの、いずれの時刻においても Cu と Steel とともに材料中の温度は各材料の融点に全く達していないことが認められる。これらのことから、観察したプラズマ直径を一様熱源直径と仮定すると、実験的に得られる放電痕と一致せず、実際の熱源直径は、プラズマ直径より小さいことが考えられる。そこで、図 3.14 で示した実験的に得られる Cu と Steel の放電痕直径と、解析結果における材料表面の熔融領域直径が一致するように、式 (3.10) を修正した。式 (3.10) の修正によって得られた式を以下に示す。

$$d(t) = 7.95 \times 10^{-3} \times t^{0.4} \quad [\text{m}] \quad (3.12)$$

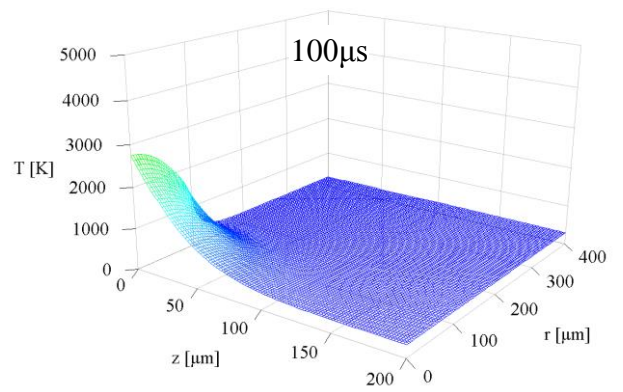
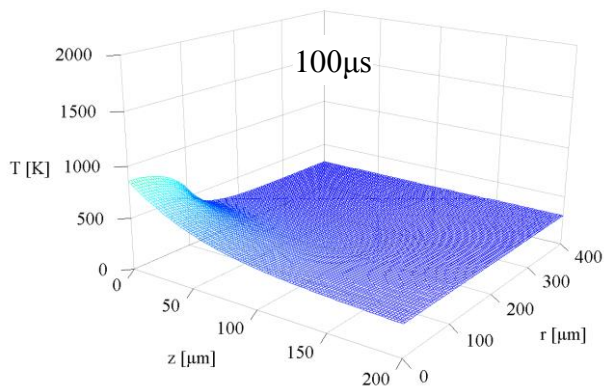
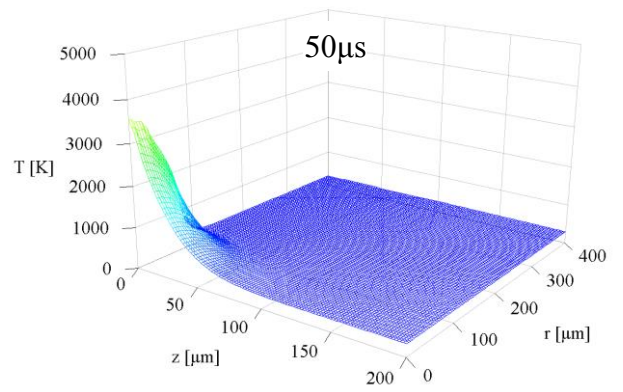
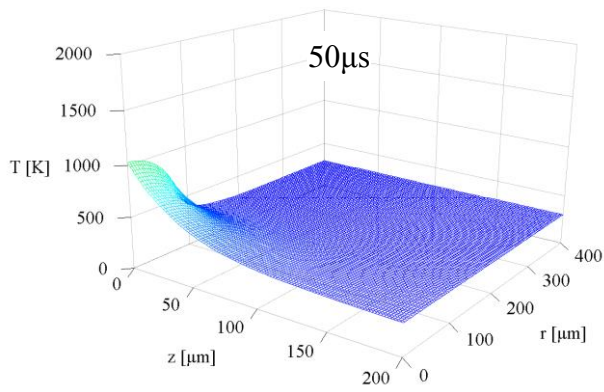
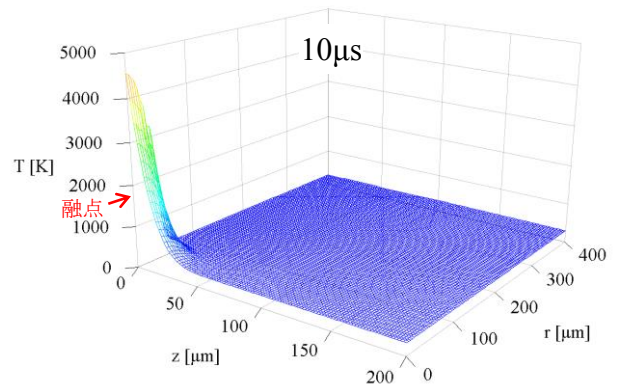
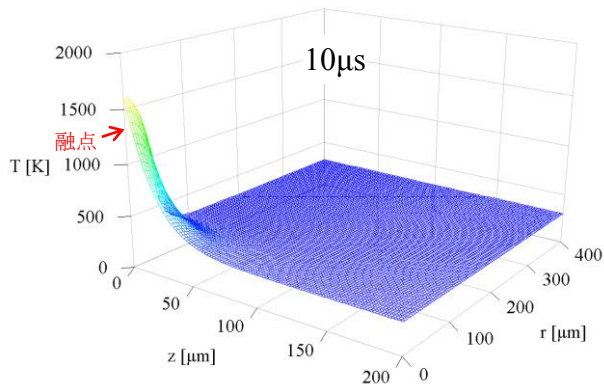
式 (3.12) を熱源直径とした場合に得られる材料中の温度分布変化の結果を図 3.20 に示す。式 (3.12) を熱源直径とした場合、放電開始直後の熱源直径は細く熱流束が大きいため、Cu と Steel とともに表面温度は融点を大きく上回っていることが認められる。その後、熱源直径が時間とともに大きくなるために熱流束が低下し、熱伝導率の高い Cu の場合は、材料表面温度が融点を下回るのに対して、熱伝導率の低い Steel は、材料表面温度は徐々に低下するものの、融点を超える領域が半径方向に緩やかに増加していることが認められる。図 3.21 に式 (3.12) を熱源直径としたときの材料表面の熔融領域直径の変化と実験的に得られる放電痕直径との関係を示す。この図に示すように、修正した熱源直径を用いた場合の熔融領域直径と実際の放電痕直径を一致させた。工作物が Cu の場合、放電痕直径は放電持続時間 10 μ s 以内に膨張し、その後一定の直径を維持している。一方、解析による熔融領域直径は 10 μ s 以降に小さくなりゼロとなる。この結果は、放電開始直後は熱流束が最大で材料表面で熔融領域が拡大し放電痕が形成されるが、その後熱源直径が膨張し熱流束が低下することで表面温度が低下し、放電痕直径の拡大が止まるとともに、表面温度が融点を下回るためであり、実験結果と解析結果に矛盾はない。ここで、プラズマ直径である式 (3.10) と修正した熱源直径である式 (3.12) の関係を図 3.22 に示す。修正した熱源直径は、観察されたプラズマ直径より小さいことがわかる。このことから、プラズマ中の熱流束分布は均一ではなく、また円盤一様熱源を仮定した場合の熱源直径は、プラズマ直径より小さいことがわかった。しかし、それにもかかわらず、熱源直径は、銅電極面に形成される放電痕直径に比べて大きいことがわかった。



(a) Cu 電極

(b) Steel 電極

図 3.19 プラズマ直径 (式 3.10) を熱源直径としたときの材料中の温度分布



(a) Cu 電極

(b) Steel 電極

図 3.20 修正した熱源直径 (式 3.12) を用いたときの材料中の温度分布

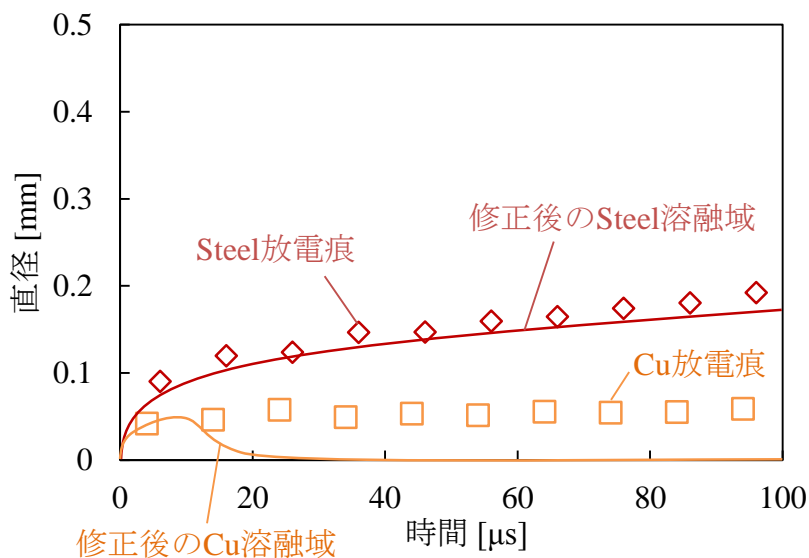


図 3.21 修正された熱源直径を用いた場合の材料表面の溶融直径と放電痕直径の関係

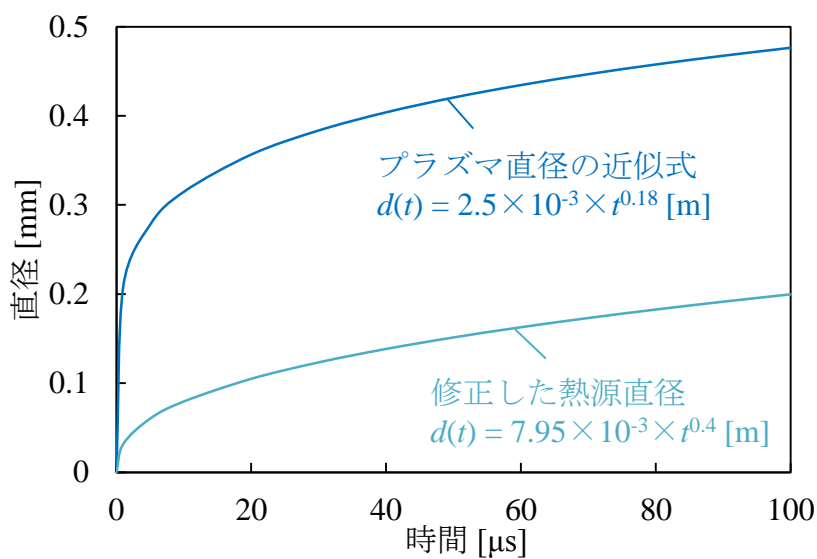


図 3.22 プラズマ直径と修正された熱源直径の関係

3.4.3 プラズマ中の熱流束分布

アークプラズマから工作物への熱流束は、プラズマ中の温度分布ではなく、電流密度分布が大きく影響するものと考えられる。これは、プラズマ中の荷電粒子が電圧によって加速され、運動エネルギーを持って電極表面に衝突し、熱エネルギーに変換されるためである。さ

らに電流は、イオン、電子によって運ばれるため、電離度の上昇、すなわち電子密度の増加はプラズマ中の導電率を向上させ、電流密度が増加する。そこでアークプラズマ中の電離度を考える。電離度は温度の関数であり、次式の Saha の式⁷⁶⁾を用いて数値的に評価することができる。

$$\frac{n_i n_e}{n_n} = 2 \left(\frac{2\pi m_e k T}{h^2} \right)^{3/2} \frac{g_i}{g_n} \exp\left(-\frac{eV_i}{kT}\right) \quad (3.12)$$

n_i : イオン密度, n_e : 電子密度, n_n : 中性粒子密度
 g_i : イオンの統計学的重率, g_n : 原子の統計学的重率
 m_e : 電子の質量, k : ボルツマン定数, h : プランク定数
 eV_i : イオン化エネルギー

ここで、電離度 D は、次式で表される。

$$D = \frac{n_i}{n_n + n_i} \quad (3.13)$$

また、状態方程式は、次式で表される。

$$p = (n_n + n_i + n_e)kT = (n_n + 2n_i)kT \quad (3.14)$$

p : 圧力

式 (3.13) と式 (3.14) を考慮すると、次式が得られる。

$$\frac{D^2}{1-D^2} = 2k \left(\frac{2\pi m_e k}{h^2} \right)^{3/2} \frac{T^{5/2}}{p} \frac{g_i}{g_n} \exp\left(-\frac{eV_i}{kT}\right) \quad (3.15)$$

式 (3.15) より、電離度 D は温度の関数であることがわかる。ここで仮に、プラズマの構成粒子が全て Cu で占められていると考えると、式 (3.15) より Cu プラズマにおける温度 T と電離度 D の関係が得られる。図 3.23 に、Cu プラズマの温度 T と電離度 D の関係を示す。低温では電離度がほぼゼロであるが、5,000K 付近から急激に電離度が増加していることが分かる。Natsu ら⁷⁷⁾ は、図 3.24 に示すように、分光分析によりアークプラズマの半径方向の温度分布を測定しており、アークプラズマの温度は中心軸上で高く、半径方向に向かって温度が緩やかに低下していくことを明らかにしている。そこで、図 3.23 の温度に対する電離度の変化と図 3.24 のプラズマ半径方向の温度分布を用いて、図 3.25 にプラズマ半径方向の電離度分布を示す。これらの図より、プラズマ半径方向の温度低下は緩やかであるが、温度に対して電離度が非線形的に変化することから、プラズマ中心付近に電離度の高い領域が集中しており、アークプラズマの外周では温度が低いことにより、電離度が大幅に下がっていると考えられる。従って、熱流束分布はアークプラズマ中で均一ではなく、プラズマ中心

部に集中していると考えられる。

以上のことから、観察したアークプラズマ直径を一様熱源の直径として、熱伝導解析により単発放電の溶融領域を計算すると、材料中の温度は融点を越えず、放電痕が形成されない結果となり、実験結果と一致しなかったものと考えられる。この要因は、プラズマ中の外周領域の温度が低いことにより、この領域で電離度が大幅に低下しているためである。従って、アークプラズマ中では熱流束分布は均一ではなく、プラズマ中心部に集中しており、円形一様熱源を仮定した場合の熱源直径は、プラズマ直径より小さいことがわかった。

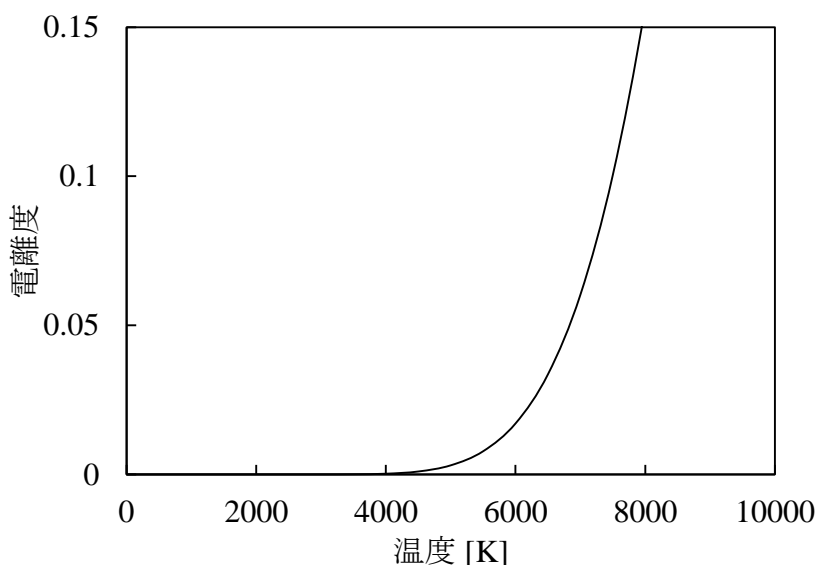


図 3.23 Cu 蒸気が熱プラズマを構成している場合の温度 T と電離度 D の関係

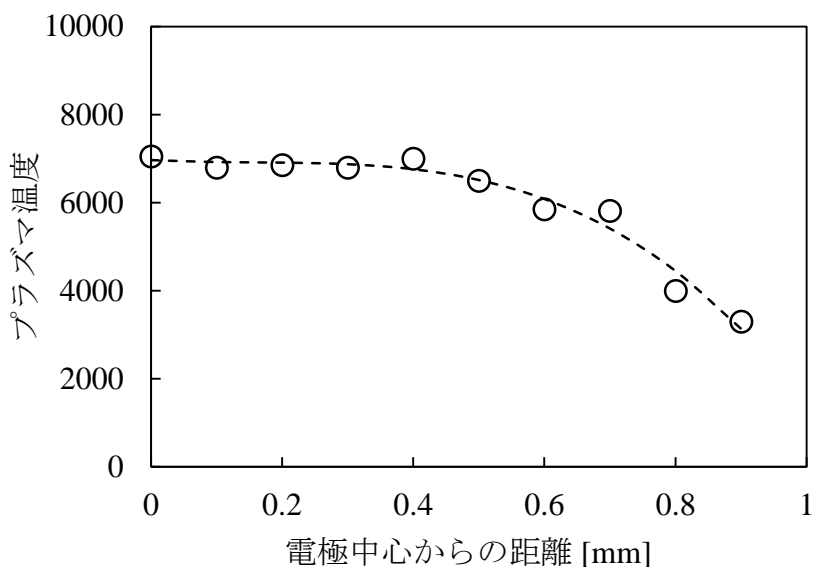


図 3.24 分光分析によるアークプラズマの半径方向の温度分布 ⁷⁾

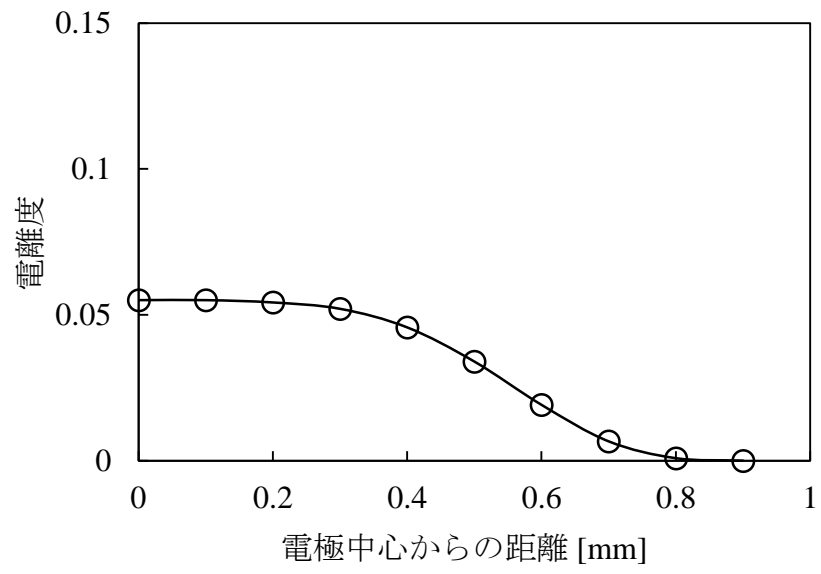


図 3.25 プラズマ半径方向の電離度分布

3.5 透明体電極を用いることによる可視化への影響

本研究では、透明かつ放電加工を行う上で十分な導電性を有する半導体材料を、放電加工の電極として用いることによって、単発放電現象を直接観察した。しかし、半導体材料は、一般的な放電加工で用いられる金属材料とは特性が異なるために、現象の解釈には以下の注意が必要である。

本研究では、透明体電極として単結晶 SiC ウェハと単結晶 Ga₂O₃ を用いた。2.4 節でも述べたが、単結晶 SiC は一般的な金属材料に比べて熱伝導率が高い。一方、単結晶 Ga₂O₃ の熱伝導率は 13.6W/m・K⁴⁸⁾ であり、一般的な金属に比べて熱伝導率が低い。しかし Ti (熱伝導率: 21.9W/m・K⁶²⁾) と比較してやや低い程度であり、単結晶 SiC と同様に熱伝導率の高低が通常の放電加工で用いられる金属の熱伝導率から逸しているとは考え難い。また、これらの半導体は高抵抗材料であり、比抵抗値は金属のおよそ数千倍ほどで、ジュール発熱の影響が無視できないと考えられるが、2.2.5 節における連続放電中の放電点分布の実験結果において、放電点の偏在がほとんど見受けられなかったことから、ジュール発熱の影響も小さいものと考えられる。

以上のように、本実験で用いた単結晶 SiC、単結晶 Ga₂O₃ は一般的に放電加工で用いられる金属材料と比較して材料特性は異なるが、その影響は小さく、物性値の高低が通常の放電加工で用いられる金属材料から大きく逸してはいないものと考えられる。しかし、放電加工は熱加工であるために、材料の熱物性値は加工速度等の加工特性に影響を及ぼし、各金属材料によって放電加工速度は大きく異なる。また、熱物性値の違いやジュール発熱は、放電点における熱電子放出現象等の放電現象にも影響を及ぼしていることが推測される。従って、材料物性の違いが放電現象に及ぼす影響を調査することは重要であると考えられる。そのため、単結晶 SiC、単結晶 Ga₂O₃ に留まらず、さまざまな物性値の異なる透明体電極を用いることにより、これらの影響を明らかにすることは、今後の研究課題としたい。

第3章 まとめ

本章では、透明で放電加工を行う上で十分な導電性を有する単結晶 SiC ウェハと単結晶 Ga₂O₃ ウェハを放電加工の電極として用いることで、この透明体電極を通して高速度ビデオカメラにより、放電加工のアークプラズマの膨張過程を観察した。また、分光分析により、透明体電極を通して観察されたプラズマ温度を測定した。さらに、単発放電の熱伝導解析の逆問題解法により、プラズマ直径と熱源直径の関係を調べた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 透明体電極を通して放電の陰極点を観察すると、発光強度分布は不均一で、発光強度の強い複数のポイントが時間経過とともに不規則かつ高速に移動している様子が観察された。一方、放電の陽極点を観察すると、発光強度分布は軸対称かつ均一な発光が観察された。これらの要因は、陰極点では、二次電子放出に加え、熱電子放出、電界電子放出が盛んに起きており、局所的な電子放出の増大が電流密度を増大させる正帰還が働いている。従って、電極蒸気の激しい上昇や突沸が複数個所で発生し、陰極面での不均一かつ不規則な電流密度分布を形成しているものと考えられる。一方陽極点では、陽極は電子の収集機能を果たすのみであり、正帰還は働かない。従って、陽極面では均一な電流密度分布を形成しているものと考えられる。
- (2) 放電アークプラズマの観察は、単結晶 SiC 電極に比べて単結晶 Ga₂O₃ 電極の方が容易である。これは、単結晶 SiC ウェハは波長 460nm 付近で透過率がほぼゼロであり、その他の波長領域でも 30~40%程度であるのに対し、単結晶 Ga₂O₃ ウェハは透過率が高く、波長依存性が少ないためである。
- (3) 液中で発生したアークプラズマは、絶縁破壊後 10μs 以内に急激に膨張し、その後ほぼ一定の直径を維持する。ただし、気中で発生するアークプラズマに比べて膨張速度は遅い。これは、プラズマの周囲に存在する加工液の慣性によってプラズマの膨張が抑制されるためである。
- (4) 分光分析より、溶融域外周に観察される発光領域は、温度がおよそ 6,000 ~ 7,000K であり、5,000K 以上であることから、この領域はプラズマ領域である。従って、アークプラズマ直径は、放電痕直径より大きい。これは、放電加工におけるアークプラズマの直径は放電痕の直径と等しいとされた従来の定説と異なる。
- (5) 熱伝導解析により、円形一様熱源を仮定した場合の熱源直径は、プラズマ直径より小さいことがわかった。この要因は、プラズマ中の外周領域の温度が低いことにより、この領域で電離度が大幅に低下しているためである。従って、アークプラズマ中では熱流束分布は均一ではなく、プラズマ中心部に集中している。それにもかかわらず、円形一様熱源を仮定した場合の熱源直径は、銅電極面上に形成される放電痕直径よりも大きいことがわかった。

上記の結論から、放電加工の極間現象に関して、従来の説、先行研究により明らかにされたこと、本研究によって明らかになったことを以下に簡潔にまとめる。

(a) アークプラズマの挙動

- ✓ 従来の説
 - アーク柱は極間距離に比べて細く、放電痕直径とほぼ等しい。
- ✓ 先行研究
 - 空気中で放電を行い、高速度ビデオカメラで観察し、また分光分析によるプラズマ半径方向の温度分布を測定することにより、大気中における放電のアークプラズマは絶縁破壊直後に急激に膨張し、その後一定の直径を維持する。その直径は放電痕直径より大きく、0.5mm に達することを明らかにした³²⁾。
- ✓ 本研究による知見
 - 液中放電のアークプラズマも絶縁破壊直後に急激に膨張し、直径は気中放電の場合と同等であるが、膨張スピードはやや遅い。プラズマ中の熱流束分布は均一ではなく、中心部に集中している。それにもかかわらず熱源直径は放電痕直径より大きい。

第4章 油と水加工液が加工速度に及ぼす影響の観察

4.1 はじめに

放電加工において、加工液として脱イオン水を用いた方が、油を用いるより加工速度が速いことが知られている³⁷⁾。特に、マイクロ放電加工領域で、水中の方が、加工速度が速いことが多く報告されている³⁸⁾³⁹⁾⁴⁰⁾が、その要因は未だ解明されていない。油中と水中で加工速度が異なる要因として、以下の四つが考えられる。

- (a) プラズマ温度の違いによる放電一発当たりの除去量の違い
- (b) 放電の発生雰囲気の違いによる放電一発当たりの除去量の違い
- (c) 加工の安定性の違い
- (d) 水中加工における電解溶出の影響

(a) のプラズマ温度の違いによる放電一発当たりの除去量の違いについては、油中と水中の放電では、アークプラズマの構成粒子が異なるために、プラズマの温度に影響を及ぼし、一発当たりの除去量が異なると考えられる。(b) の放電の発生雰囲気の違いによる放電一発当たりの除去量の違いについては、Kunieda ら⁴¹⁾は、油中と水中の放電加工で生じる気泡量を置換法により採集して比較しており、水中で発生する気泡量は、油中に比べて著しく少ないことを明らかにしている。また、Yoshida ら⁹⁾は、液中と気中の単発放電除去量を加工くずの発生体積より測定しており、比較的放電持続時間が短い領域で、液中の方が、除去量が多いことを明らかにしている。これらのことから、極間を占める加工液の割合の違いにより、液中と気泡中で発生する放電の割合が異なれば、放電一発当たりの除去量の違いにより加工速度に影響を及ぼすと考えられる。(c) の加工の安定性の違いについては、放電点の発生分布が偏在すると、除去効率が減少し加工速度の低下を招くと考えられる。油中と水中では、極間を占める気泡の割合が異なると考えられ、従って極間を占める加工液の割合の違いにより、極間の冷却特性が異なり、放電点分布、また加工速度に影響を及ぼすことが考えられる。(d) の水中加工における電解溶出の影響については、水中加工において、放電遅れ時間中の漏れ電流による電解溶出の影響により、油中に比べて加工速度が速いことが考えられる。しかし、虞ら⁷⁸⁾は、水中加工での漏れ電流を実測し、電解溶出による除去体積を見積もった結果、電解溶出が加工速度に及ぼす影響は小さいことを報告している。そのため、本研究では水加工における電解溶出の影響は考慮しないこととする。

そこで本研究では、まず、油中と水中の単発放電の除去量の違いを比較する。また、油中と水中で発生した放電のアークプラズマの温度を測定し比較を行い、単発放電の除去量の違いに及ぼす影響を調査する。続いて、油中と水中で単発放電と連続放電を行い、透明体電極を用いて発生する気泡量の違いを直接観察する。また、連続放電中において各雰囲気での放電発生割合の違いを比較し、加工速度の違いに及ぼす影響を調査する。続いて、実際に油中

と水中で放電加工を行い、加工条件を比較的安定な状態から不安定な状態に変化させ、加工速度の変化を比較する。また、油中と水中で連続放電を行い、透明体電極を用いて放電点分布を観察し、連続する放電の発生間距離を測定することで、放電の安定性の比較を行う。また、油中と水中における極間の気泡挙動のシミュレーションを行うことで、加工液の物性が気泡の挙動に及ぼす影響を明らかにし、加工液物性に関して、加工速度を向上させるための指針を得ることを目的とする。

4.2 単発放電除去量の違い

本実験では、まず油中と水中で単発放電を行い、単発放電除去量の違いを比較した。また、油中と水中で発生した放電のアークプラズマの温度を測定し比較を行い、単発放電の除去量の違いに及ぼす影響を調査した。

4.2.1 油中と水中の単発放電除去量の比較

4.2.1.1 実験方法

実験装置の構成図を図 4.1 に示す。本実験では、形彫放電加工機 (ソディック製 C32) を用いて油中と脱イオン水中で単発放電を行い、放電持続時間を変化させて、その際の単発放電痕の除去体積を求めた。単発放電の除去量を調べるに当たり、融点の低い材料を工作物として用いれば、比較的除去量の大きな放電痕が形成され、計測が容易になると考えられる。そこで本実験では低融点の材料である亜鉛 (Zn) を工作物として、単発放電の除去量を測定した。工具電極は $\phi 0.5\text{mm}$ の Cu 細線電極、工作物は加工面をバフ研磨により鏡面にした板厚 5mm の Zn を用いた。加工条件を表 4.1 に示す。加工液には、ソディック製の放電加工油 バイトル-2 と、イオン交換樹脂で比抵抗値を $1\text{M}\Omega\text{cm}$ まで高めた脱イオン水を使用した。本実験では、電極極性と放電持続時間を変更し、各条件でそれぞれ 6 回の単発放電を行った。レーザ顕微鏡により、得られた放電痕の三次元プロファイルを取得して単発放電の除去体積を測定し、その平均値を求めた。

平坦な加工面に対して単発放電を行うと、図 4.2 に示すような放電点中心付近に窪んだ領域とその周囲に盛り上がり領域を生じる。その断面を見ると、放電痕表面は放電により熔融された材料の一部が除去されずに残留した熔融再凝固面で覆われており、盛り上がり領域もその一部である。そのため、単発放電痕の除去量を調べる際は、除去されずに残留した盛り上がり領域を考慮に入れて、窪んだ領域から盛り上がり領域を差し引いた体積を除去量とするのが妥当である。そこで窪んだ領域、盛り上がり領域の体積をそれぞれ測定し、単発放電除去量を算出した。

トランジスタ放電回路

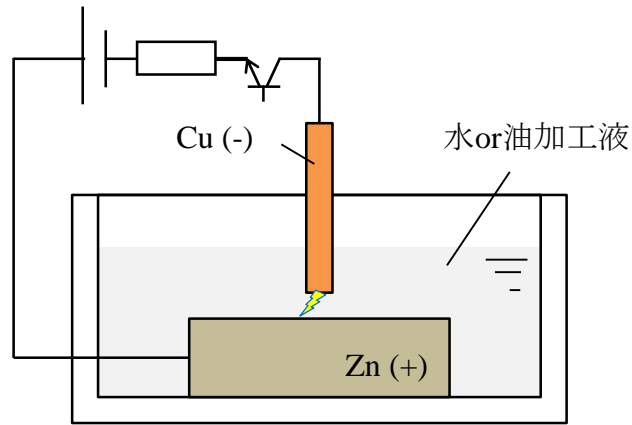


図 4.1 油中と水中の単発放電のための実験装置の構成図

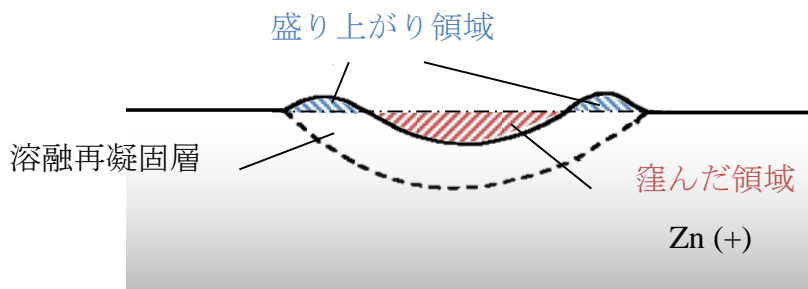


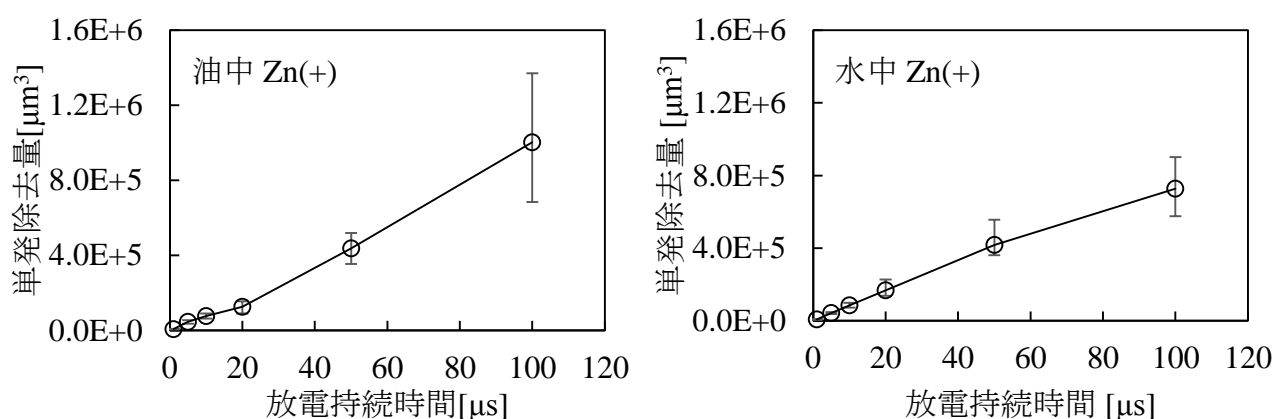
図 4.2 単発放電痕の断面図

表 4.1 放電加工条件

極性	Cu (-) , Zn (+)
放電持続時間 [μ s]	1, 5, 10, 20, 50, 100
放電電流 [A]	20
開放電圧 [V]	120
加工雰囲気	放電加工油, 脱イオン水

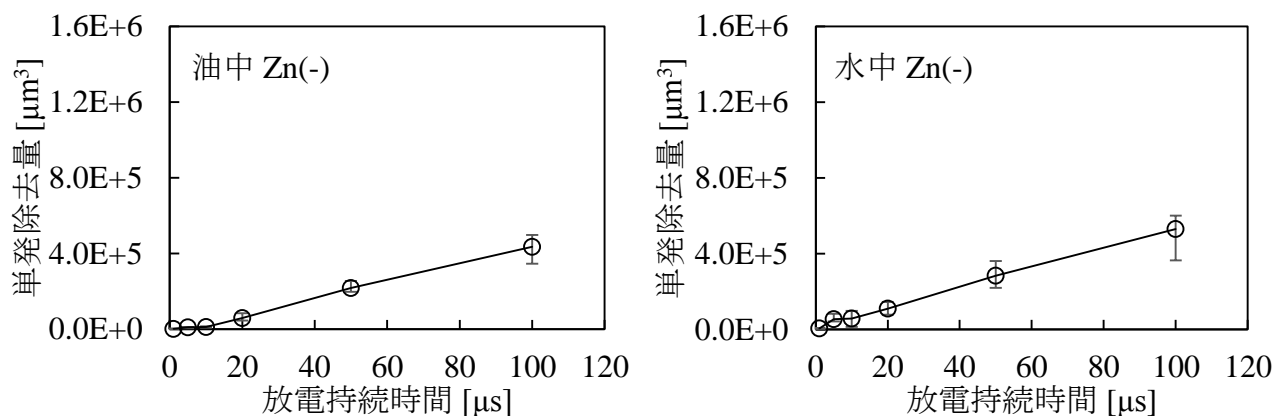
4.2.1.2 油中と水中の単発放電除去量の比較

図 4.3 に油中と水中における工作物 (Zn) 側の単発放電の除去量をそれぞれ示す。油中と水中ともに、またどちらの極性においても、放電持続時間を長く設定するほど、除去量が多くなっていることがわかる。これは、放電エネルギーが大きくなったためである。また、油中と水中の両条件で工作物側を陽極とした方が、いずれの放電持続時間においても除去量が多いことがわかる。これは、放電の陽極と陰極へのエネルギー配分¹⁸⁾の違いによるものであると考えられる。油中と水中の除去量を比較すると、工作物側を陰極、陽極としたどちらの場合も、各放電持続時間で除去量がほぼ等しいことがわかる。このことから、放電一発当たりの除去量の違いが、油中と水中の加工速度の違いに及ぼす影響は小さいと考えられる。



(a) 油中で Cu (-) - Zn (+) における Zn の単発放電除去量

(b) 水中で Cu (-) - Zn (+) における Zn の単発放電除去量



(c) 油中で Cu (+) - Zn (-) における Zn の単発放電除去量

(d) 水中で Cu (+) - Zn (-) における Zn の単発放電除去量

図 4.3 油中と水中における単発放電除去量の比較

4.2.2 油中と水中におけるアークプラズマ温度の比較

油中と水中で発生する単発放電のプラズマ温度を比較するために、プラズマの分光分析による温度測定を行った。

4.2.2.1 実験方法

本実験では、液中で生じるアークプラズマの温度を測定するため、3.3.5.2 節に示した実験装置の構成を用い、透明体電極を通して放電痕外周に観察されるプラズマの発光領域の温度測定を行った。陽極を Cu 丸棒電極、陰極を単結晶 SiC 電極として、脱イオン水中で単発放電を行った。単発放電の放電条件を表 4.2 に示す。脱イオン水は、イオン交換樹脂で比抵抗値を $1\text{M}\Omega\text{cm}$ まで高めたものを使用した。ここで、相対強度法を用いてプラズマの温度を算出するために、3.3.5.2 節と同様に、銅の中性原子線である 510.554nm と 521.820nm を測定波長に用いた。

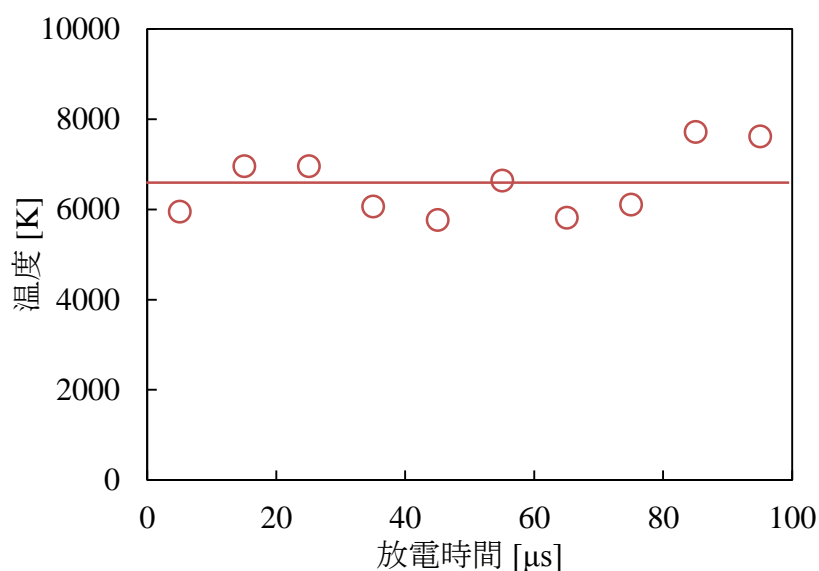
表 4.2 放電加工条件

極性	Cu (+), SiC (-)
放電持続時間 [μs]	100
放電電流 [A]	20
開放電圧 [V]	120
加工雰囲気	脱イオン水

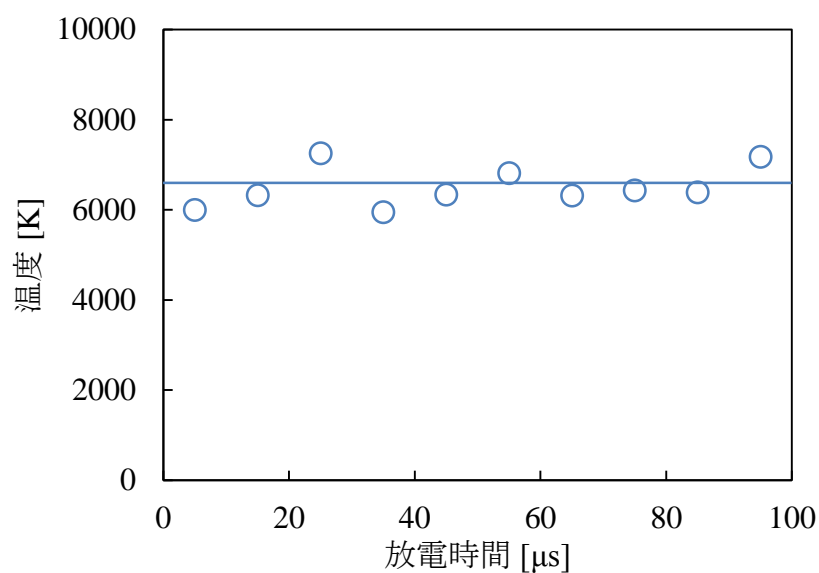
4.2.2.2 油中と水中におけるアークプラズマの温度の比較

図 4.4 に、水中における放電持続時間 $100\mu\text{s}$ 中のアークプラズマ外周領域の温度変化を示す。また、比較のために 3.3.5.3 節で得られた油中の放電のプラズマ温度の測定結果も合わせて示す。外周領域からの放射強度は弱いために、光電子増倍管の出力は $10\mu\text{s}$ ごとに平均して示している。油中と水中で発生したアークプラズマの温度は、およそ $6,000\sim 7,000\text{K}$ でほぼ一定であり、両者の温度はほぼ等しいことがわかる。この要因は、放電発生直後はアークプラズマを構成する粒子が加工液の気化あるいは解離した成分が多くを占めているのに対して、その後は放電点を中心に気泡が急激に膨張し、油中、水中ともにガスがアークプラズマを取巻いた環境であり、また電極蒸気の発生により、電極材料成分の占める割合

が多くなったためであると考えられる。従って、油中と水中で発生したアークプラズマの温度に違いはないと考えられる。さらにこの結果は、単発放電の除去量が油中と水中で等しいことを裏付ける結果であると考えられる。また、このことから、油中と水中の単発放電の除去量の違いが、放電加工速度の違いに及ぼす影響は小さいと考えられる。



(a) 油中



(b) 水中

図 4.4 油中と水中で発生した放電のプラズマ温度の比較

4.3 気泡発生量と放電の発生雰囲気の違い

続いて、油中と水中で単発放電と連続放電を行い、透明体電極を用いて放電によって発生する気泡量の違いを直接観察して比較した。また、連続放電中において液中、気液境界、気泡中の各雰囲気での放電発生割合の違いを比較し、加工速度の違いに及ぼす影響を調査した。

4.3.1 単発放電による気泡量の比較

4.3.1.1 実験方法

本実験では 2.2.1 節と同様の実験装置の構成を用い、Cu の板状電極と透明体電極を放電加工油、また脱イオン水で満たされた加工セル中で対向させ、Y 軸方向にサーボして加工を行い、両電極間で単発放電を発生させ、放電により発生する気泡の挙動を、透明体電極を通して高速度ビデオカメラにより直接観察した。透明体電極には、2.2.1 節で示した比抵抗 $0.01 \sim 0.025\Omega\text{cm}$ 、厚さ $380\mu\text{m}$ の透明な SiC 単結晶ウェハ（新日鉄住金マテリアルズ製）を用いた。本実験で用いた放電加工条件を表 4.3 に示す。放電持続時間を変更した二通りの加工条件で単発放電を行った。加工液には、ソディック製の放電加工油 バイトル-2 と、イオン交換樹脂で比抵抗値を $1\text{M}\Omega\text{cm}$ まで高めた脱イオン水を使用した。高速度ビデオカメラは、500 万画素・最高 130 万コマ/秒・カラーである nac 製の MEMRECAM HX-3 を使用した。また、高速度ビデオカメラの撮影条件を表 4.4 に示す。

表 4.3 放電加工条件

極性	Cu (+), SiC (-)
放電持続時間 [μs]	10, 50
放電電流 [A]	20
開放電圧 [V]	120
加工雰囲気	放電加工油, 脱イオン水

表 4.4 高速度ビデオカメラの撮影条件

解像度 [pixel]	384 × 384
フレームレート [fps]	50,000
露光時間 [s]	1/100,000

4.3.1.2 油中と水中における単発放電の気泡量の比較

図 4.5 に油中と水中で単発放電により発生した気泡の膨張収縮過程の観察結果を示す。気泡の膨張収縮運動は、気泡をばね、それを取り囲む加工液を質量、加工液の粘度をダンパーとするバネマスダンパー系と考えることができる。放電の発生により加工液や電極材料が蒸発、解離、電離して高圧の気泡が発生する。この気泡は、最初は周りに存在する加工液の慣性や粘性に抗して膨張し、周りの加工液は放電点から放射状に加速され、気泡内部が大気圧となった後も、加工液の慣性によってさらに膨張を続け、気泡内が負圧となる。その後、気泡は収縮に転じ、加工液の粘性によって徐々に減衰しながら膨張・収縮運動を繰り返す⁵⁾⁴⁾。透明体電極を通して加工面に対して垂直方向から観察した本結果は、1.6.4 節の図 1.22 に示す Kunieda ら⁴⁾ が側方から観察した油中と水中の気泡膨張収縮運動の気泡最大直径や膨張、収縮のタイミングが一致していることが認められた。

図 4.6 に、図 4.5 に示した観察フレームをもとに測定した油中と水中の気泡直径の時間変化を示す。比較のため、放電持続時間を $10\mu\text{s}$ 、 $50\mu\text{s}$ と変化させた。気泡は、絶縁破壊後およそ $100\mu\text{s}$ で最大直径となることが認められる。また、油中で発生した気泡の振動は、水中のそれに比べて速く減衰していることがわかる。これは、油の方が水に比べて粘性が大きいためであると考えられる。放電持続時間 10 、 $50\mu\text{s}$ の場合を比較すると、油中と水中の両条件で $50\mu\text{s}$ とした方が常に気泡の直径が大きいことが認められる。これは、放電持続時間が長いことにより多くの熱エネルギーが極間に加えられることで加工液の気化量が多くなったためであると考えられる。さらに、図 4.5 からわかるように、油中と水中で絶縁破壊後の最初の気泡最大直径はほぼ等しいが、振動が減衰した後の絶縁破壊後 0.5 秒経過した気泡は、油中に比べて水中の方が小さいことが認められる。この要因は、油中では比較的常温で安定した低分子炭化水素が生成されるのに対して、水中では水蒸気が凝縮して水に戻るとともに、分解された水素と酸素が再び反応して水に戻るためであると考えられる。

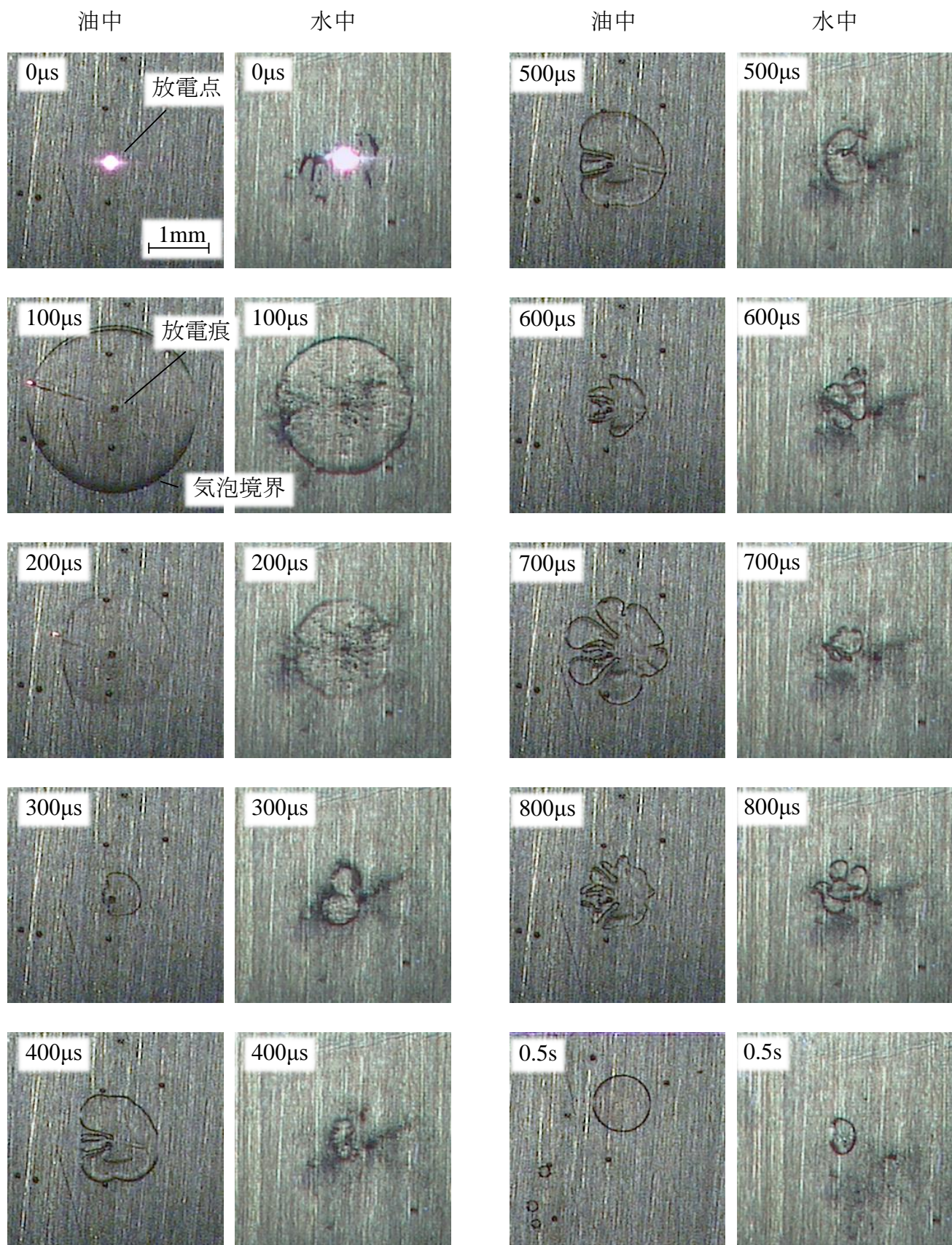
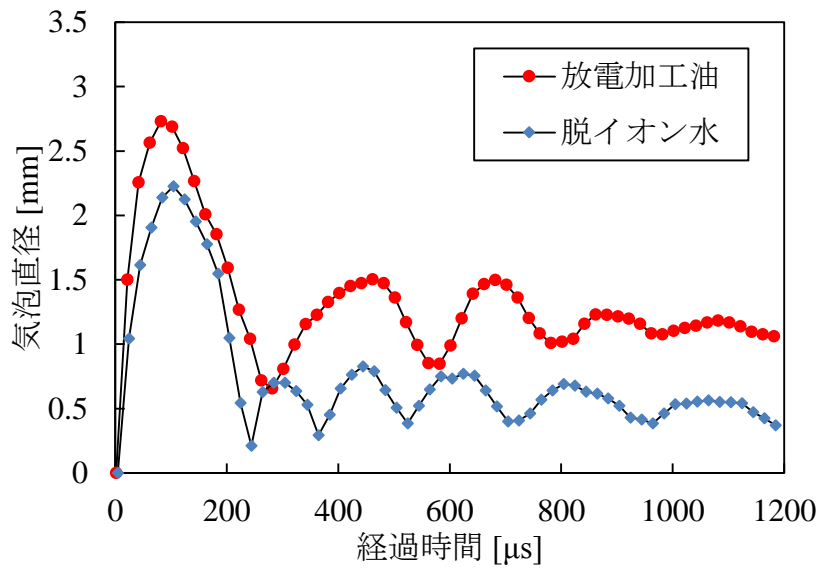
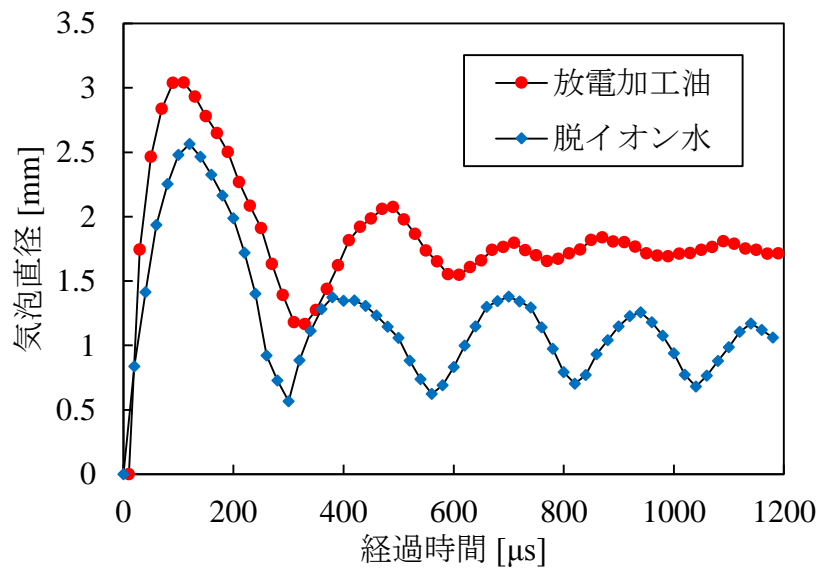


図 4.5 油中と水中で単発放電により発生した気泡の膨張収縮運動



(a) 放電持続時間 t_e : 10 μ s



(b) 放電持続時間 t_e : 50 μ s

図 4.6 単発放電による気泡直径の変化

4.3.2 連続放電による気泡量と放電発生雰囲気との比較

4.3.2.1 実験方法

本実験では 2.2.1 節と同様の実験装置の構成を用い、Cu の板状電極と透明体電極を放電加工油、また脱イオン水で満たされた加工セル中で対向させ、Y 軸方向にサーボして連続放電

を行い、透明体電極を通して高速度ビデオカメラにより直接観察した。透明体電極には、2.2.1節で示した比抵抗 $0.01 \sim 0.025\Omega\text{cm}$ 、厚さ $380\mu\text{m}$ の透明な SiC 単結晶ウェハ (新日鉄住金マテリアルズ製) を用いた。本実験で用いた放電加工条件を表 4.5 に示す。加工液には、ソディック製の放電加工油 バイトル-2 と、イオン交換樹脂で比抵抗値を $1M\Omega\text{cm}$ まで高めた脱イオン水を使用した。高速度ビデオカメラは、500 万画素・最高 130 万コマ/秒・カラーである nac 製の MEMRECAM HX-3 を使用した。また、高速度ビデオカメラの撮影条件を表 4.6 に示す。

表 4.5 放電加工条件

極性	Cu (+), SiC (-)
放電持続時間 [μs]	10
放電電流 [A]	10
開放電圧 [V]	120
加工雰囲気	放電加工油, 脱イオン水

表 4.6 高速度ビデオカメラの撮影条件

解像度 [pixel]	640×640
フレームレート [fps]	20,000
露光時間 [s]	$1/20,000$

4.3.2.2 実験結果

図 4.7 に、油中と水中において連続放電を行った際の、加工開始後 100 発の放電が発生した後の極間の撮影結果を示す。加工は、加工機のサーボ機構を用いて行った。従って、ギャップ距離は油中と水中で異なると考えられる。水中のギャップ距離は、油中に比べて大きいことが知られている。油中と水中ともに極間に多くの気泡が分布している様子が観察される。図 4.8 に放電の累積にともなう極間を占める気泡の面積割合を示す。油中、水中ともに数百発の放電が生じるうちに急激に極間を占める気泡の割合が増加しているが、油中に比べて水中の方がその割合が低いことがわかる。この要因は、単發放電によって発生する気泡量が油中に比べて水中の方が少ないこと、また連続放電中のギャップ距離が油中に比べて水中の方が大きいためであると考えられる。Kunieda ら⁴¹⁾ は、油中と水中で連続放電を行い、発生する気泡を置換法によって採集し、その発生量の違いを調べ、水中の加工で発生する気泡量は、

油中のそれに比べて著しく小さいことを明らかにし、極間を占める気泡割合は、油中に比べて水中の方が小さいことを推測した。従って本観察結果は、Kunieda ら⁴⁾の推測を裏付ける結果であり、連続放電中において、極間を占める気泡の割合は、油中に比べて水中の方が小さいことがわかった。

図 4.9 に、2.2.4 節と同様の統計処理により、水中加工において加工開始から放電の累積数を、1～50 発、51～100 発、101～150 発、・・・のように 50 発ずつで区切り、区間ごとにおける液中、気液境界、気泡中の各雰囲気での放電発生割合を示す。また、2.2.4 節で得られた油中の結果も合わせて示す。油中と水中の各雰囲気での放電発生割合を比較すると、液中で発生する放電の割合が、油中に比べて水中の方が僅かに多い。また、気泡中で発生する放電の割合が、油中に比べて水中は僅かに少ない。これは、図 4.8 で示したように、水中加工における極間を占める気泡の面積割合が、油中のそれに比べて小さいためである。従って、加工速度が油中に比べて水中の方が速い要因は、極間を占める気泡割合の違いにより、液中で発生する放電の割合が油中より水中の方が多く、一発当たりの除去量が多くなったためである可能性は否定できないが、両者における各雰囲気の放電発生割合の違いは僅かであり、油中に比べて水中の方が、加工速度が 150 倍速い可能性を示した正木ら³⁹⁾の結果を裏付けるには、十分な違いではないと考えられる。

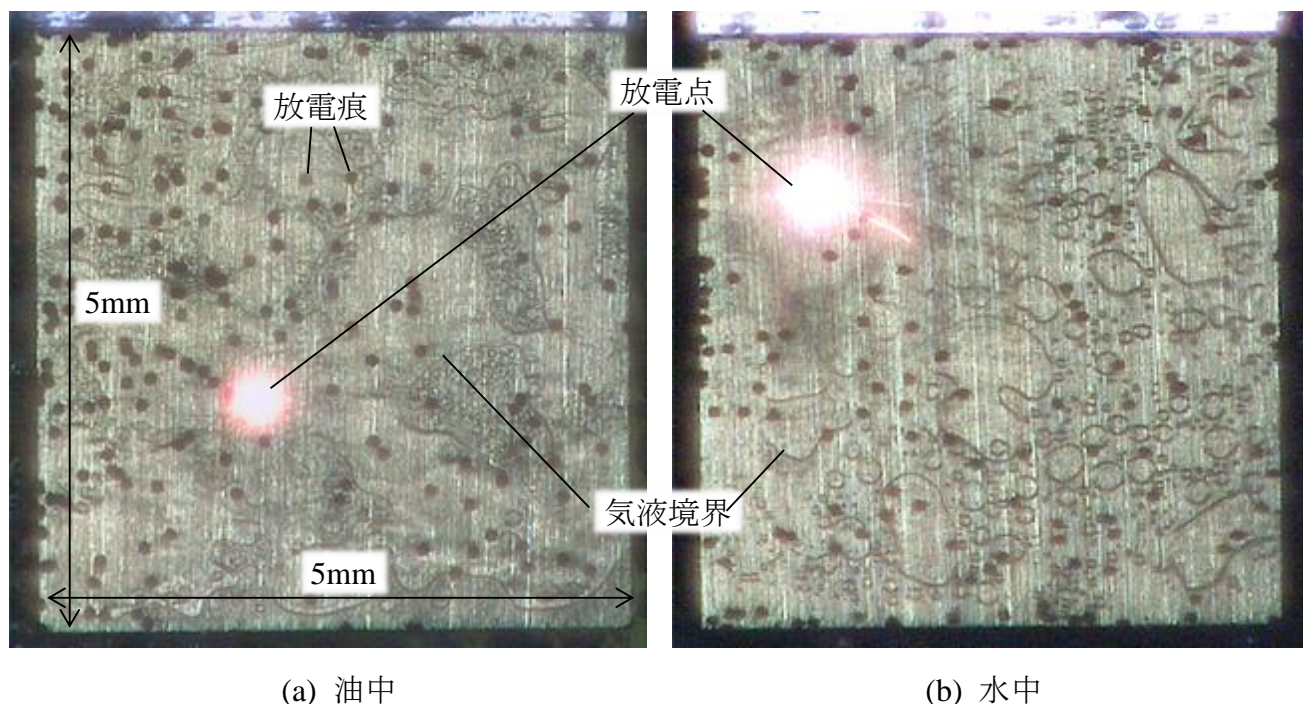


図 4.7 加工開始後放電が 100 発生じた後の極間の高速度撮影結果

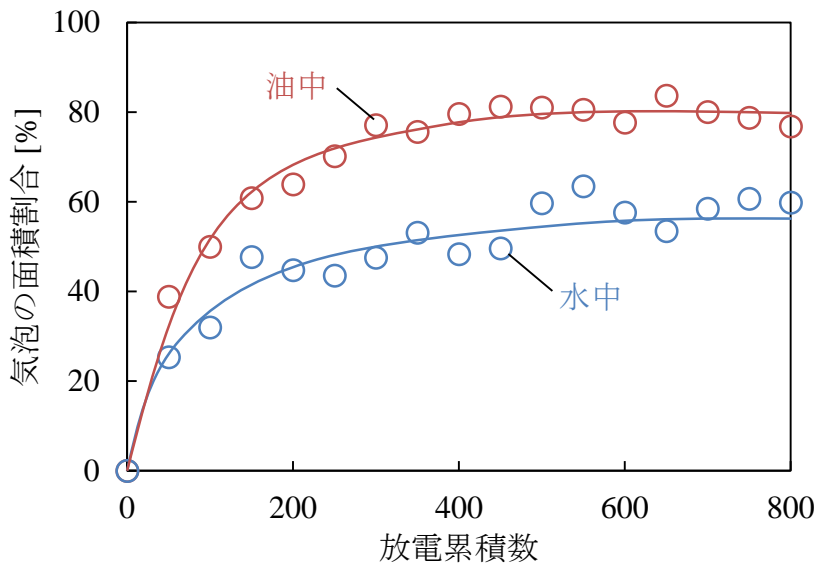


図 4.8 油中と水中における極間を占める気泡割合の比較

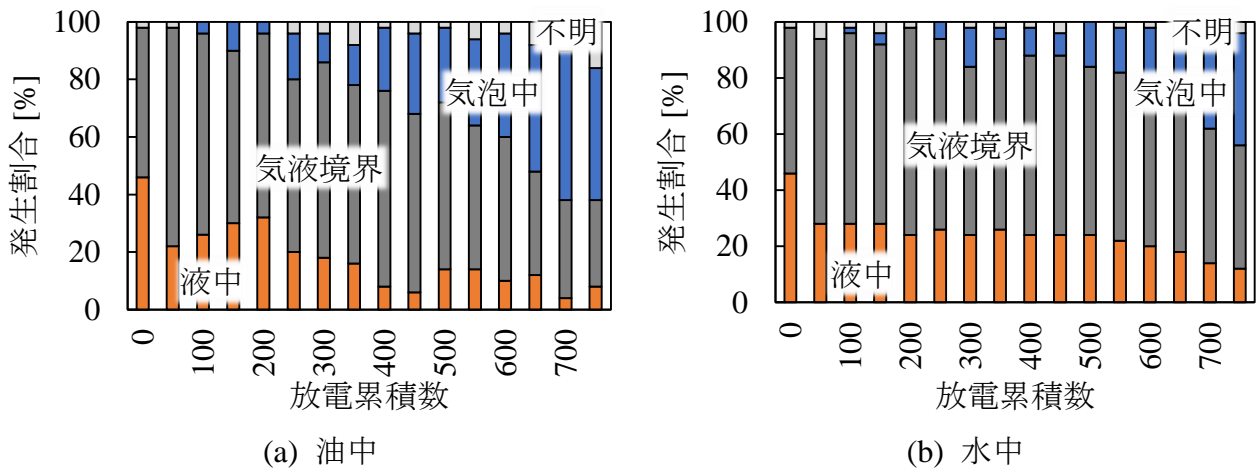


図 4.9 放電の累積にともなう各雰囲気での放電発生割合の変化

4.4 加工の安定性

続いて、油中と水中の放電加工における加工の安定性を調べるために、加工条件を比較的安定な条件から不安定な条件に変化させ、加工速度の変化を比較した。さらに、透明体電極を用いて放電点分布を観察し、連続する放電点の発生間距離を測定することで、放電の安定性を調査した。

4.4.1 油中と水中の加工速度の比較

4.4.1.1 実験方法

本実験では、油中と脱イオン水中で底付き穴加工を行い、加工時間と総放電数を調べた。図 4.10 に実験装置の構成図を示す。加工には、形彫放電加工機 (Sodick 製 C32) を用い、直径 2mm の Cu 丸棒を陰極、板厚 5mm の Steel (S50C) を陽極として、油中と脱イオン水中で深さ 1mm の底付き穴加工を行った。加工パラメータを放電休止時間とサーボ基準電圧の二つとして、加工に要する時間、加工量、総放電数、放電頻度を調査した。放電電流は、電流センサを用いて測定し、ユニバーサル周波数カウンタによって加工中の放電電流パルス数を測定した。また放電頻度は、100ms あたりに発生する放電数を 8 回分カウントし、その平均とした。加工条件を表 4.7 に示す。加工は、放電一発当たりのエネルギーを固定し、放電休止時間、サーボ基準電圧を減少させていくことにより、加工が比較的安定な状態から不安定な状態に変化させた。放電加工油には、ソディック製の放電加工油 バイトル-2 を用いた。脱イオン水は、水仕様ワイヤ放電加工機の加工液循環装置の一部を流用し、加工槽内の加工液を循環させ、比抵抗値を $0.1\text{M}\Omega\text{cm}$ に保った。

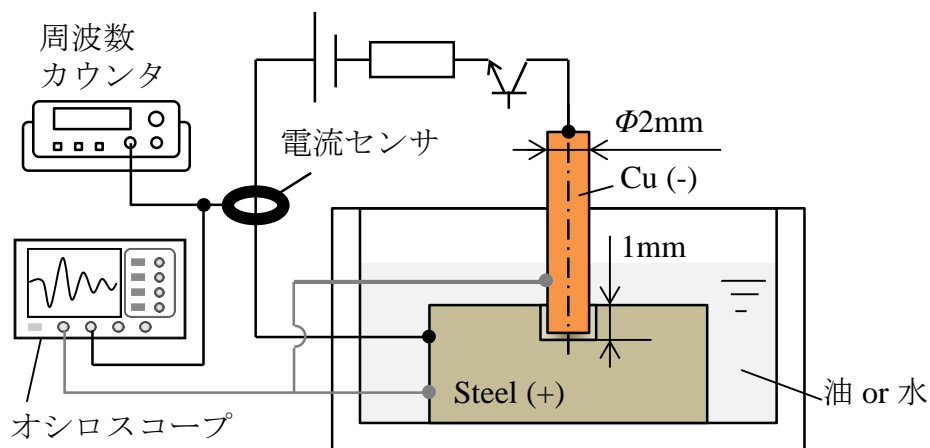


図 4.10 油中と水中の加工速度の比較のための実験装置の構成図

表 4.7 放電加工条件

工具電極 (-)	Cu (φ 2mm)
工作物 (+)	Steel (S50C)
放電持続時間 [μs]	1
放電休止時間 [μs]	10, 30, 50
放電電流 [A]	10
開放電圧 [V]	120
サーボ基準電圧 [V]	30, 50, 70
加工雰囲気	放電加工油, 脱イオン水

4.4.1.2 実験結果

放電休止時間とサーボ基準電圧を変化させた場合の油中と水中における加工速度を図 4.11 に、放電頻度を図 4.12 に、また深さ 1mm 加工した際の総放電数を図 4.13 に、加工した体積を総放電数で除した加工中の平均的な放電一発あたりの除去量を図 4.14 に示す。一般的に放電加工速度は、放電頻度と放電一発あたりの除去量の積で与えられる。このうち、放電頻度は加工条件の設定により決定される。従って、図 4.12 に示すように、放電休止時間を短くするほど、またサーボ基準電圧を低く設定するほど、放電頻度は上昇しており、油中と水中ともに同加工条件で放電頻度がほぼ等しいことが認められ、適切にギャップ制御がなされていることが認められる。比較的安定して加工できると考えられる放電休止時間を 50μs と長く設定した場合の油中と水中の加工速度は、ほぼ等しいことが認められる。これは、油中と水中で放電頻度が等しく、また加工中の平均的な放電一発あたりの除去量が等しいためである。この結果は、4.2.1 節の油中と水中で行った単発放電の除去量の比較結果と一致する。一方、放電休止時間を 50μs から 30μs、10μs と短くし、さらにサーボ基準電圧を 70V から 50V、30V と低くして、放電頻度を上昇させて加工を行うと、水中の場合は、放電頻度に比例して加工速度が向上していることが認められる。このとき平均的な放電一発あたりの除去量に変化はない。しかし、油中の場合は、水中と同様に放電頻度が上昇しているにもかかわらず、加工速度が上昇していないことがわかる。油中の総放電数は、放電頻度の上昇にともない急激に増加しており、加工中の平均的な一発あたりの除去量が低下していることがわかる。この要因は、油中加工では放電頻度の上昇にともない集中放電の発生割合が増加したためと考えられ、前の放電によるプラズマ中に次の放電柱が形成され、その場合のアークプラズマ直径は大きくエネルギー密度が低いために、除去効率が減少することにより、加工速

度が向上しなかったものと考えられる。ここで、図 4.11 と図 4.12 をもとに、放電頻度と加工速度の関係を図 4.15 にまとめる。この結果より、放電休止時間、サーボ基準電圧を変更して放電頻度を上昇させると、水中では加工速度がほぼ線形的に向上するが、油中では放電頻度を高く設定し過ぎると加工が不安定となり、むしろ加工速度が低下していることがわかる。

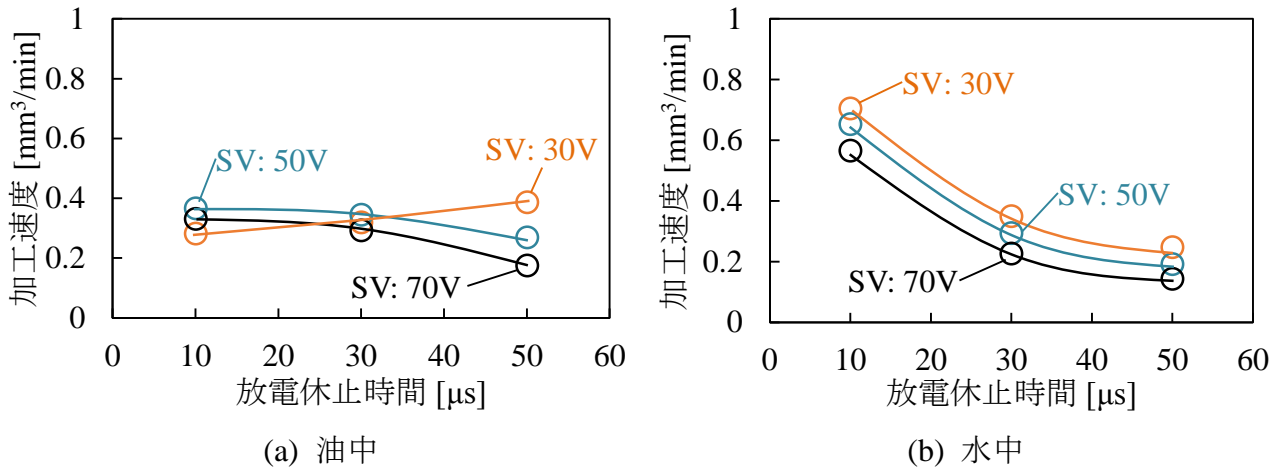


図 4.11 油中と水中における加工速度の比較

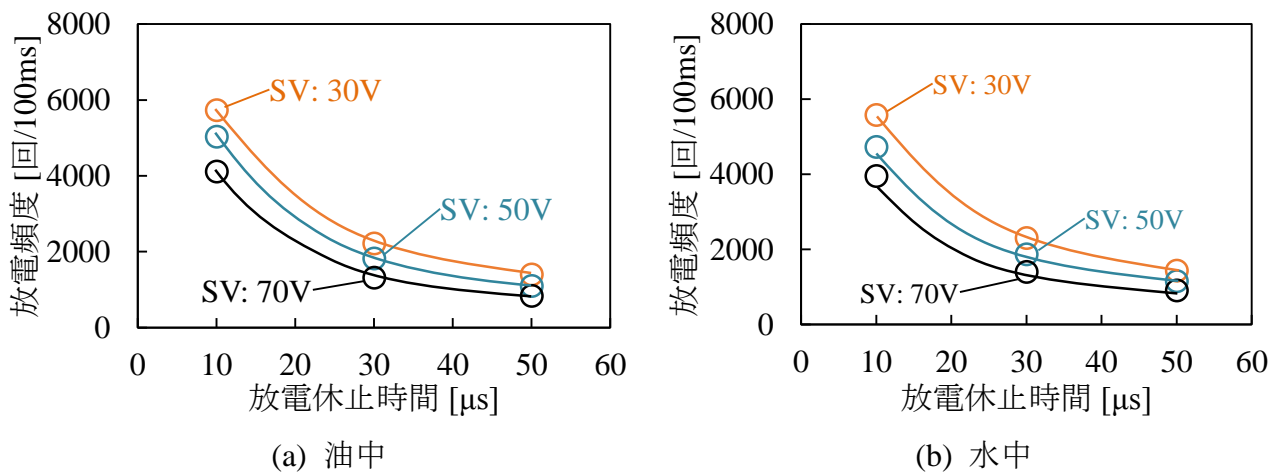


図 4.12 油中と水中における放電頻度の比較

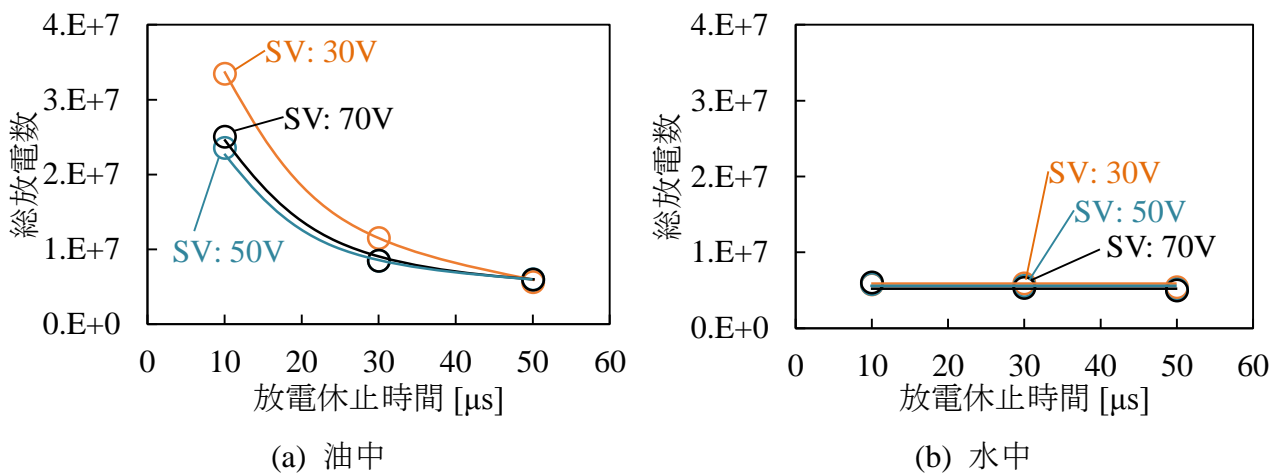


図 4.13 油中と水中における総放電数の比較

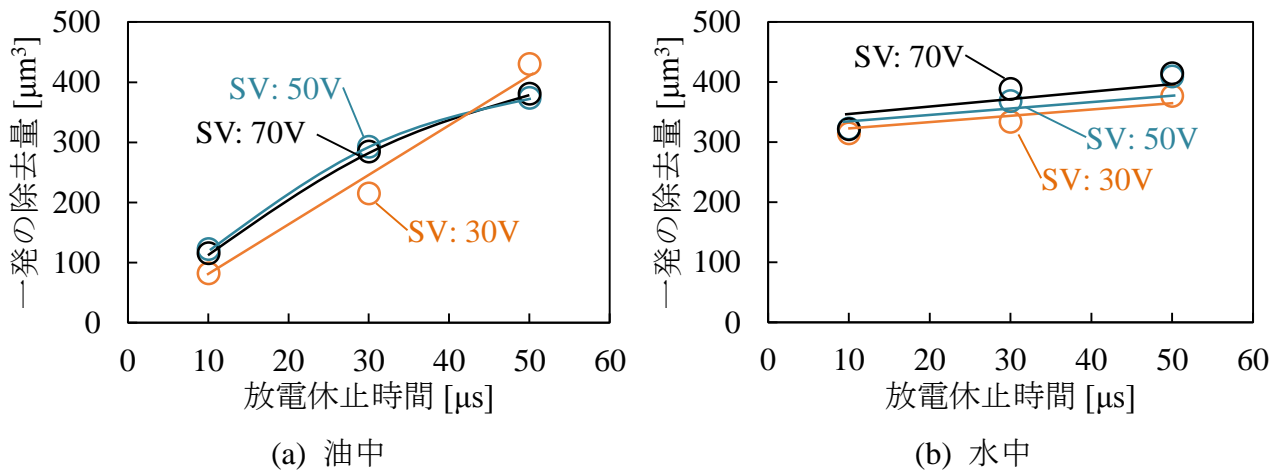


図 4.14 油中と水中における加工中の平均的な放電一発あたりの除去量の比較

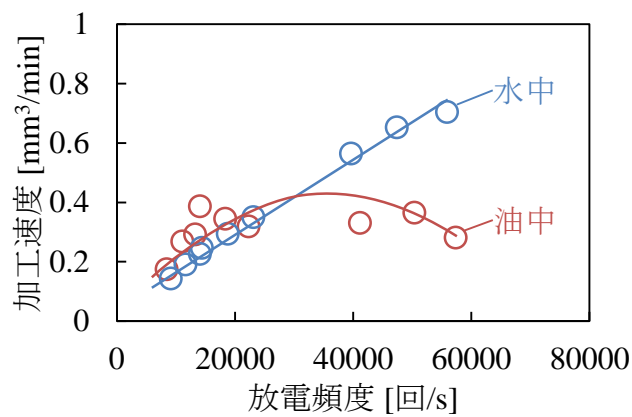


図 4.15 油中と水中における放電頻度と加工速度の関係

4.4.2 油中と水中におけるパルス列前後の放電発生間距離の相関の比較

4.4.2.1 実験方法

本実験では、2.2.1 節で示した実験装置の構成を用いて、透明体電極を通して油中と水中における加工中の放電点分布を測定した。加工は、比較的安定して加工が行える放電休止時間を $50\mu\text{s}$ と長く設けた条件と、加工が不安定になり易い放電休止時間を $10\mu\text{s}$ と短くした条件で加工を行い、2.2.5 節と同様の統計処理を用いて、 i 番目、 $i+1$ 番目のように連続する放電点の発生間距離を 1,000 発の放電に対して調べ、加工の安定性を調査した。加工機には、ソディック製の形彫り放電加工機 C32 を用い、陽極を単結晶 SiC 電極、陰極を Cu 電極として、幅 2mm ×縦 2mm の領域を加工面として、油中と水中で連続放電を行った。高速度ビデオカメラによる撮影は、加工面が全て放電痕で覆われるまで加工を行った後に、加工を停止させずに撮影を開始し、連続放電中の放電点分布を観察した。本実験で用いた放電加工条件を表 4.8 に示す。加工液には、ソディック製の放電加工油 バイトル-2 と、イオン交換樹脂で比抵抗値を $0.1\text{M}\Omega\text{cm}$ まで高めた脱イオン水を使用した。高速度ビデオカメラは、500 万画素・最高 130 万コマ/秒・カラーである nac 製の MEMRECAM HX-3 を使用した。また、高速度ビデオカメラの撮影条件を表 4.9 に示す。

表 4.8 放電加工条件

極性	Cu (-), SiC (+)
放電持続時間 [μs]	1
放電休止時間 [μs]	10, 50
放電電流 [A]	10
開放電圧 [V]	120
サーボ基準電圧 [V]	70
加工雰囲気	放電加工油, 脱イオン水

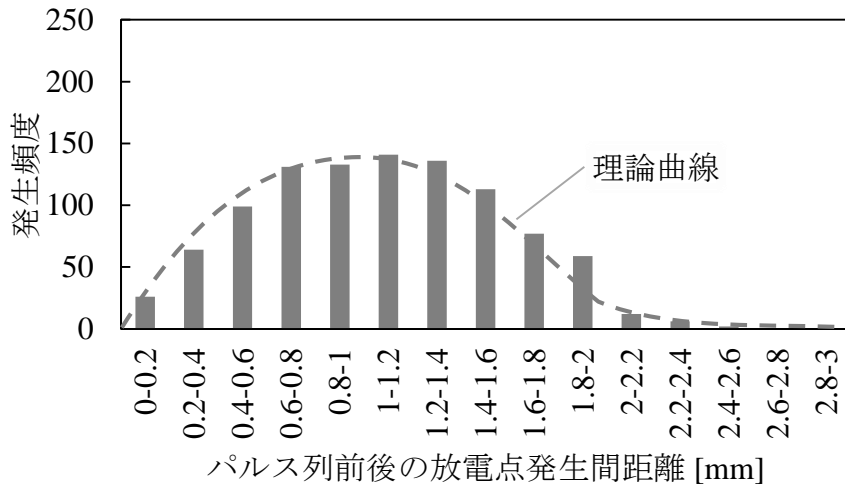
表 4.9 高速度ビデオカメラの撮影条件

解像度 [pixel]	320×240
フレームレート [fps]	100,000
露光時間 [s]	$1/100,000$

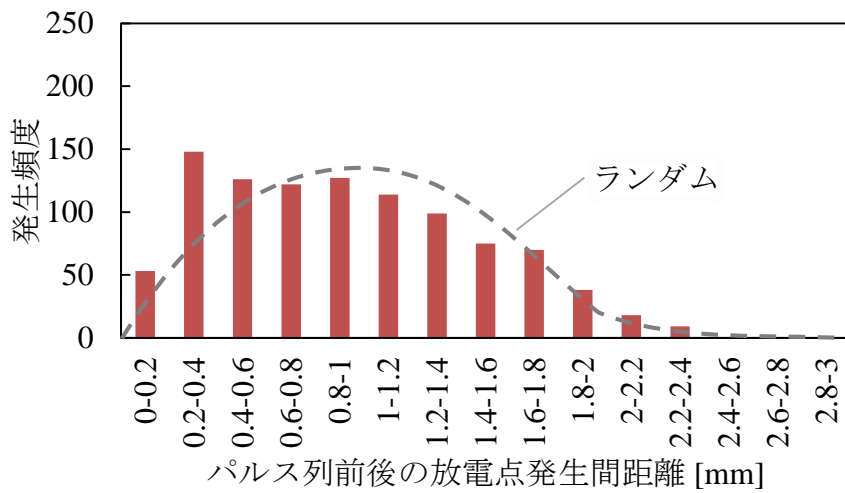
4.4.2.2 実験結果

図 4.16 に、油中と水中における放電休止時間を変更した場合のパルス列前後の放電点間距離のヒストグラムを示す。図 4.16 (a) は、実験結果との比較のため、仮に放電が $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ の加工領域内でランダムに発生した場合を想定して、 x 座標と y 座標のそれぞれに対して乱数を放電数分だけ発生させ、相前後する放電点間の相対距離を計算したシミュレーション上のヒストグラムである。ランダムに放電が発生すると、連続する放電の発生点間距離がおおよそ $1 \sim 1.2\text{mm}$ の発生頻度の高い、山なりのヒストグラムの形状になることが認められる。放電休止時間を $50\mu\text{s}$ と比較的長く設定した場合の放電点間距離のヒストグラムは、油中と水中ともに、放電がランダムに発生した場合のシミュレーション結果に近い分布をしている。ただし、ランダムな分布と完全には一致しない。これは、2.2.5 節で明らかにしたように、放電により生成される加工くずが次の放電点分布に影響を及ぼしているためであると考えられる。一方、放電休止時間を $10\mu\text{s}$ と短くした場合は、水中ではヒストグラム形状が $50\mu\text{s}$ の場合とほとんど違いが認められないのに対して、油中では、ヒストグラム分布が右肩下がりの傾向を示しており、放電が同じ箇所、あるいは非常に近い箇所に連続して発生する頻度が高いことを示している。従って、油中の加工では、放電休止時間を短くしていくと、放電点分布が偏在し集中放電の割合が増加することで、加工が不安定になると考えられる。

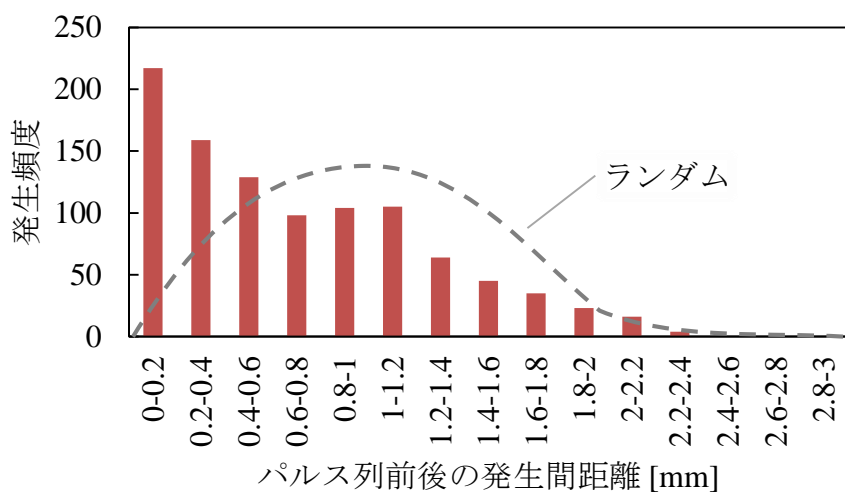
一方、前の放電のプラズマが完全に消沈する前に、次の放電の電圧が印加されると、その電離気体を介して同じ箇所に次のパルスの放電電流が流れると考えられ、このような場合には、放電遅れ時間の無い、あるいは非常に短い放電波形が観察されると推測される。そのため、実加工では放電波形を観察して、放電遅れ時間のほとんどない放電パルスで放電の偏在と認識し、集中放電として分類している。しかし、放電が偏在した際の放電遅れ時間が実際にどれだけの長さであるのか、その閾値は曖昧である。そこで、油中の加工において、放電休止時間を $10\mu\text{s}$ とした条件について、200 発の放電を対象に放電遅れ時間と放電点発生間距離の関係を調べた。図 4.17 に、放電遅れ時間と放電点発生間距離の関係のヒストグラムを示す。放電遅れ時間が $1.0\mu\text{s}$ 以下である放電は、ほとんどが放電点発生間距離 $0 \sim 0.2\text{mm}$ の放電であり、偏在して発生していることがわかる。また、放電点発生間距離が $0 \sim 0.2\text{mm}$ の放電のほとんどは、放電遅れ時間が $2.0\mu\text{s}$ 以下の放電であることがわかる。一方で、放電遅れ時間を数マイクロ秒以上有する放電は、分散して発生し得ることがわかる。以上の結果から、偏在の起きている放電のほとんどは、放電遅れ時間が $2\mu\text{s}$ 以下であることがわかった。よって、実用的に加工機の適応制御を行う場合、放電遅れ時間 $2\mu\text{s}$ 以下の放電が生じた場合に放電の偏在と判断し、偏在を回避する手段を取ることが有効であると考えられる。



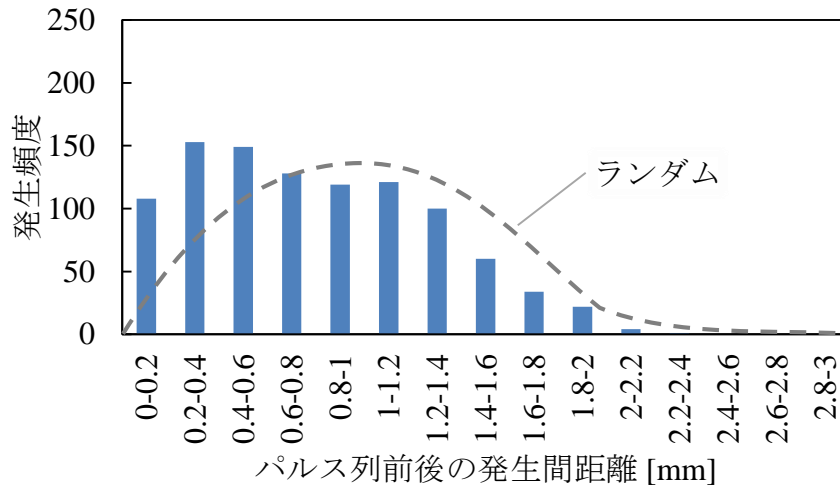
(a) 放電がランダムに発生した場合



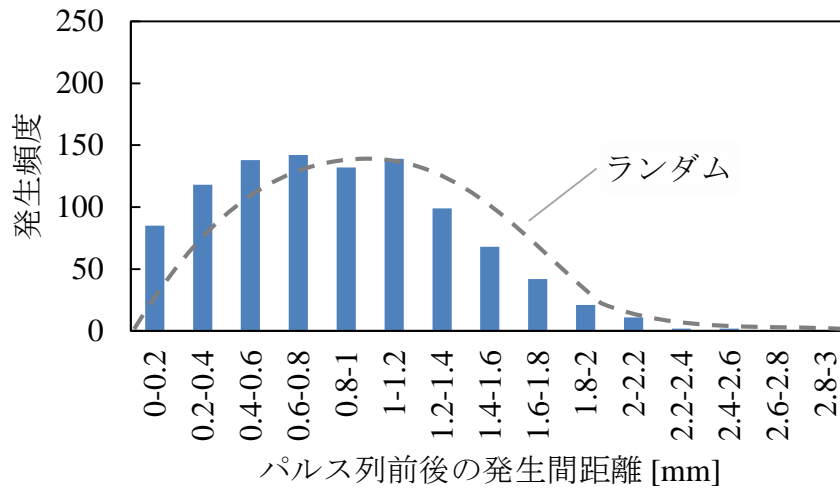
(b) 油中 放電休止時間 $t_0 : 50 \mu s$



(c) 油中 放電休止時間 $t_0 : 10 \mu s$



(d) 水中 放電休止時間 t_o : 50 μ s



(e) 水中 放電休止時間 t_o : 10 μ s

図 4.16 パルス列前後の放電点発生間距離のヒストグラム

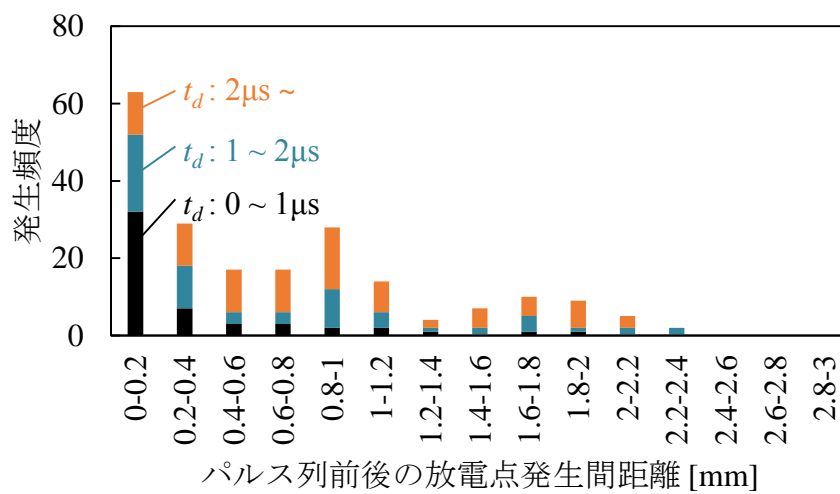


図 4.17 放電遅れ時間と放電点発生間距離の関係

4.4.3 気泡の挙動が加工安定性に及ぼす影響

油中と水中で加工の安定性が異なる要因を調べるために、油中と水中における極間の加工現象を比較した。4.3.2 節で撮影した透明体電極を用いた極間の撮影結果を、極間に存在する気泡運動に着目して観察すると、水中では放電の発生に伴い生成される気泡の膨張圧力によって、加工面全域に分布する気泡が大きく振動、あるいは移動する様子を観察したが、油中では生成された気泡はその場に長時間滞在し続け、他の放電の気泡膨張圧力等の外力に鈍感で、水中に比べ振動や移動量が小さいことを観察した。気泡の振動や移動は、放電後の放電点近傍の電離気体の拡散や、放電点への加工液の流入に深く関わると考えられ、この違いは放電点の冷却特性に影響を及ぼすと推測される。そこで、気泡の振動や移動量の大小を目安として、放電の発生後に、その放電点に加工液が流入するまでの時間を考えた。本実験では、油中と水中で 100 発の放電を対象にこの時間を調べ、両者を比較した。図 4.18 に、油中と水中における、放電発生後、その放電点に加工液が流入するまでの時間を示す。この結果より、放電点に加工液が流入するまでの時間は、水中に比べ油中の方が 10 倍もの非常に長い時間を有することがわかった。従って、水中に比べて油中の方が、加工速度が遅い要因の一つは、油中では気泡の振動や移動量が小さく、電離気体の拡散や、放電後の放電点への加工液の流入が遅く、冷却特性が低いためであると考えられる。

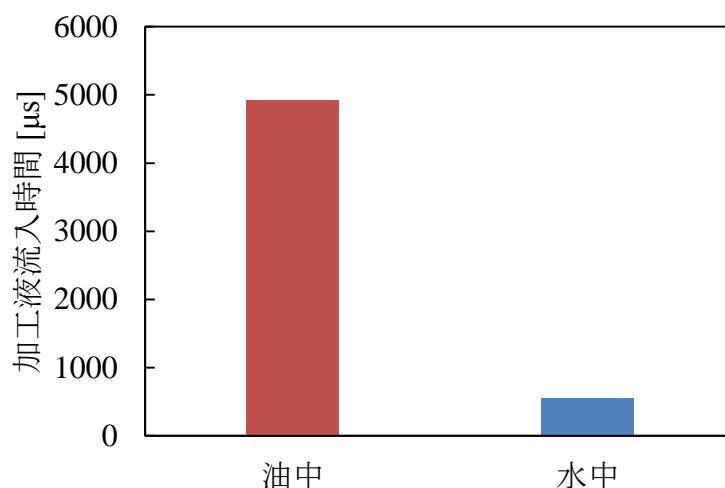


図 4.18 放電後に放電点に加工液が流入するまでの時間

4.5 加工液の粘性が気泡挙動に及ぼす影響

流体の運動には、流体の密度、粘度、表面張力等の物性が影響する。ここで、加工液である油の粘度は $2.4\text{mPa}\cdot\text{s}$ 、水の粘度は $1.0\text{mPa}\cdot\text{s}$ であり、両者を比較すると、水に比べて油の粘度がおよそ 2.4 倍も高いことがわかる。従って、加工液の粘性の違いが、極間における気泡挙動の違いに影響を及ぼしていると考えられる。そこで、気泡挙動の違いのメカニズムを解明するために、極間の流れ場解析を行い、加工液の粘度が気泡挙動に及ぼす影響を調査した。

4.5.1 気液二相流の非圧縮性粘性流体解析

4.5.1.1 解析方法

加工液の粘度が気泡挙動に及ぼす影響を調べるために、まず加工液と気泡の気液二相流の非圧縮粘性流体のシミュレーションを行った。ここでは、図 4.19 に示すように、油あるいは水で満たされた円柱状電極の平行平板間に単一気泡を初期配置し、他の場所で放電が発生した際の気泡の膨張運動により、初期配置した気泡の挙動が粘性の影響を受けてどのような挙動を示すのかを調査した。

解析には、三次元熱流体解析ソフトである PHOENICS を用いた。解析モデルを図 4.20 に示す。油あるいは水で満たされた円盤状の平行平板間の中心で単発放電が生じた場合を想定して気泡の湧き出しを設け、初期配置した気泡がどのような挙動を示すのかを、気液二相流の自由表面流解析により調べた。加工液、気泡ともに非圧縮の粘性流体として非定常解析した。解析領域は円柱座標系で、半径を 1mm 、ギャップ距離を 0.1mm の円盤状とした。また、図 4.20 に示すように単一気泡を初期配置した。境界条件は、 $R = 1\text{mm}$ の下流端面で大気圧、電極表面上のすべりをゼロとした。また、中心には単発放電で発生する気泡の湧き出しを設けた。単発放電により発生する気泡の湧き出し体積流量は一定ではない。そこで透明体電極を通して単発放電による気泡の膨張過程を直接観察し、膨張する気泡半径を測定した。さらにその半径の時間変化から計算される湧き出しの体積流量の時間変化を求めた。得られた気泡膨張過程の気泡半径の変化と、体積流量の変化を図 4.21 と図 4.22 に示す。体積流量 Q に関しては、二次の多項式近似を行い、次式を得た。

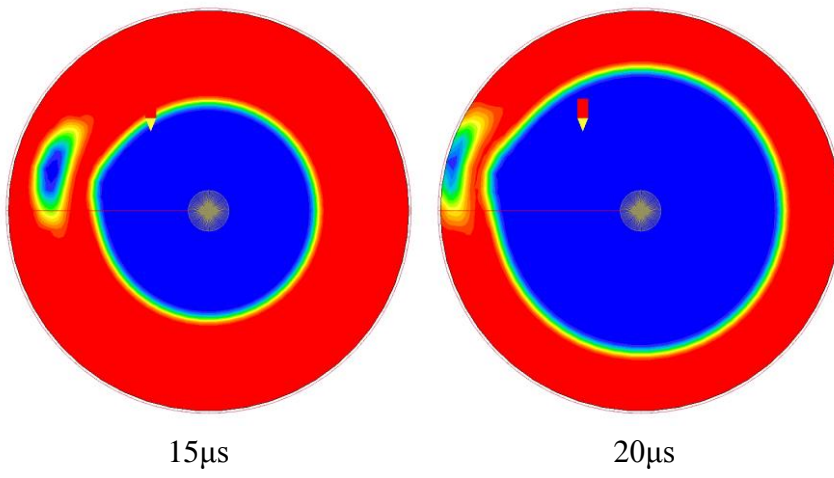
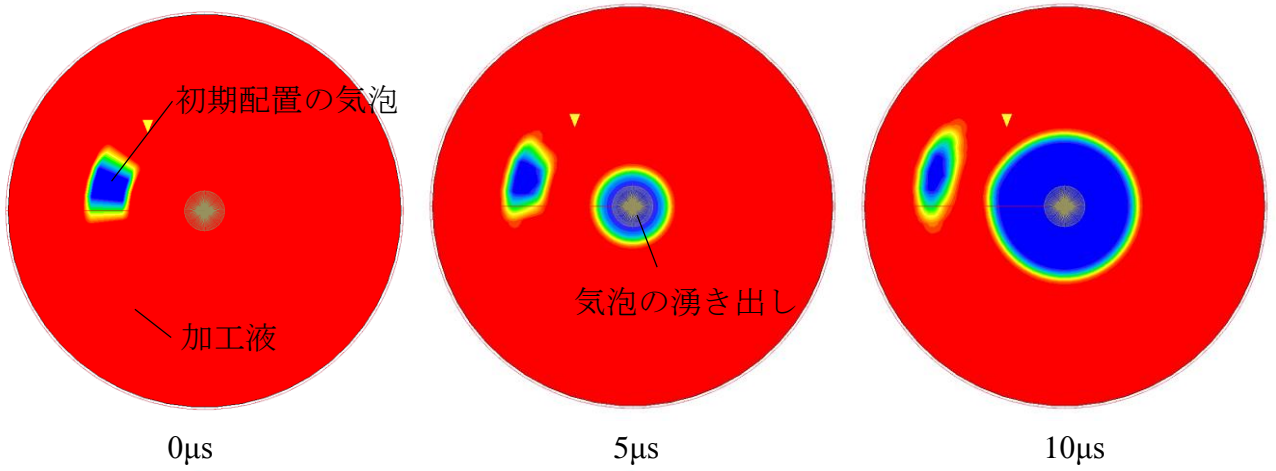
$$Q = -7000t^2 + 0.7t \quad [\text{m}^3 / \text{s}] \quad (4.1)$$

上式を気泡湧き出しの体積流量として解析を行った。解析時間は、 $0\mu\text{s}$ から $20\mu\text{s}$ として、また気相を空気、液相を油と水として非定常解析を行った。重力は無視した。

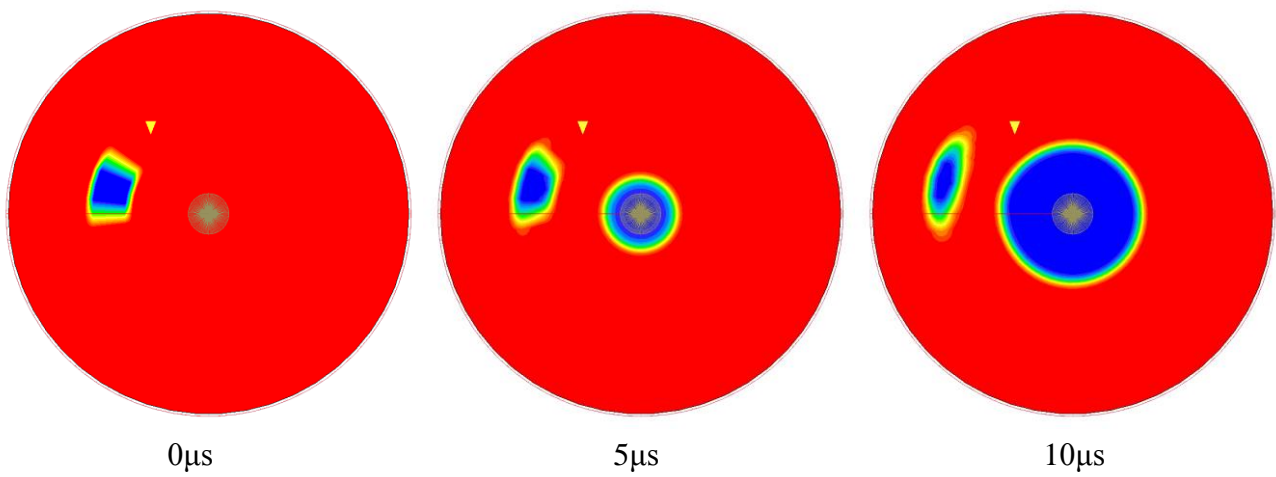
ないことがわかる。

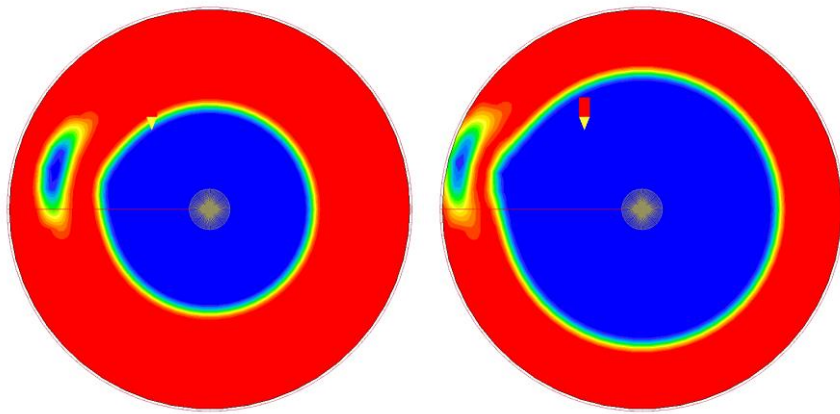
実際の極間では、加工液中に多数の気泡が分散している。上述の解析では、初期配置の気泡は一つであったが、その気泡が複数となれば、気泡挙動の違いが顕著になることが考えられる。そこで、上述と同じ解析手法で、初期配置の気泡を4つに増やして解析を行った。その結果を図4.24に示す。この結果から、図4.23の解析結果と比較して、膨張する気泡の凸形状の歪みはより顕著となったものの、いずれの時刻においても油中と水中で初期配置した気泡の挙動は概ね等しく、加工液の粘性による気泡挙動の違いはほとんど認められないことがわかる。

上記の解析では、解析領域半径が1mmと小さく、初期配置した気泡の位置は、中心の湧き出し点の近くとなっていた。放電点付近では流速が非常に速いために、粘性に対して慣性力の影響が大きくなってしまっていたために、顕著な違いが見られなかったのではないかと考えられる。そこで、解析領域を半径2.5mmと大きくし、初期配置の気泡を放電点から離して配置し、また流速をこれまでの1/10として再度解析を試みた。結果を図4.25に示す。この結果からも、油中と水中における初期配置した気泡挙動は概ね等しいことがわかる。以上の結果から、非圧縮性の流体を仮定して解析を行うと、粘度の違いによって気泡挙動の違いがあらわれないことがわかった。



(a) 液相：油



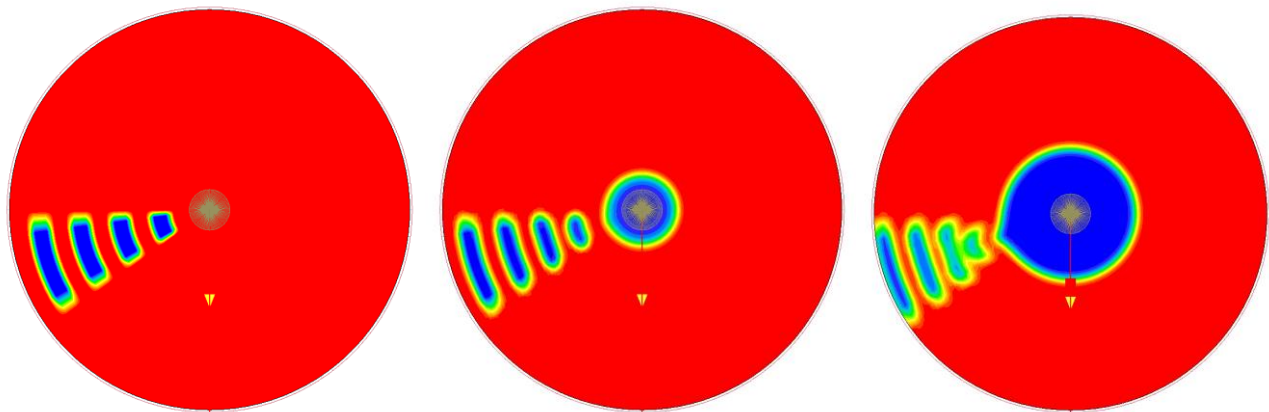


15 μ s

20 μ s

(b) 液相：水

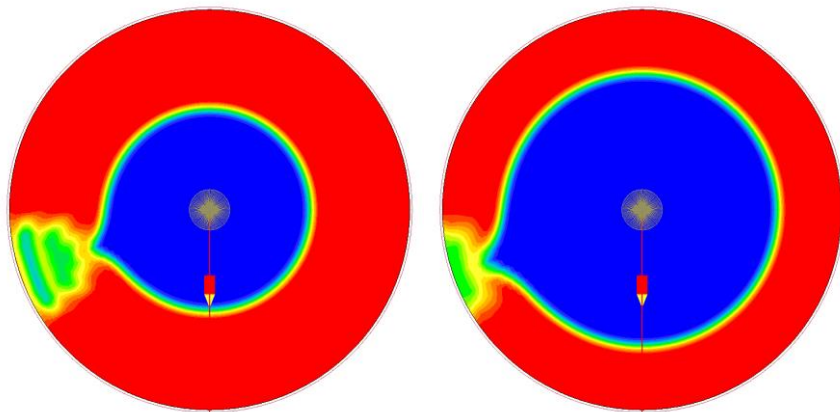
図 4.23 気泡の湧き出しにともなう初期配置気泡の挙動 (初期気泡 1 つ)



0 μ s

5 μ s

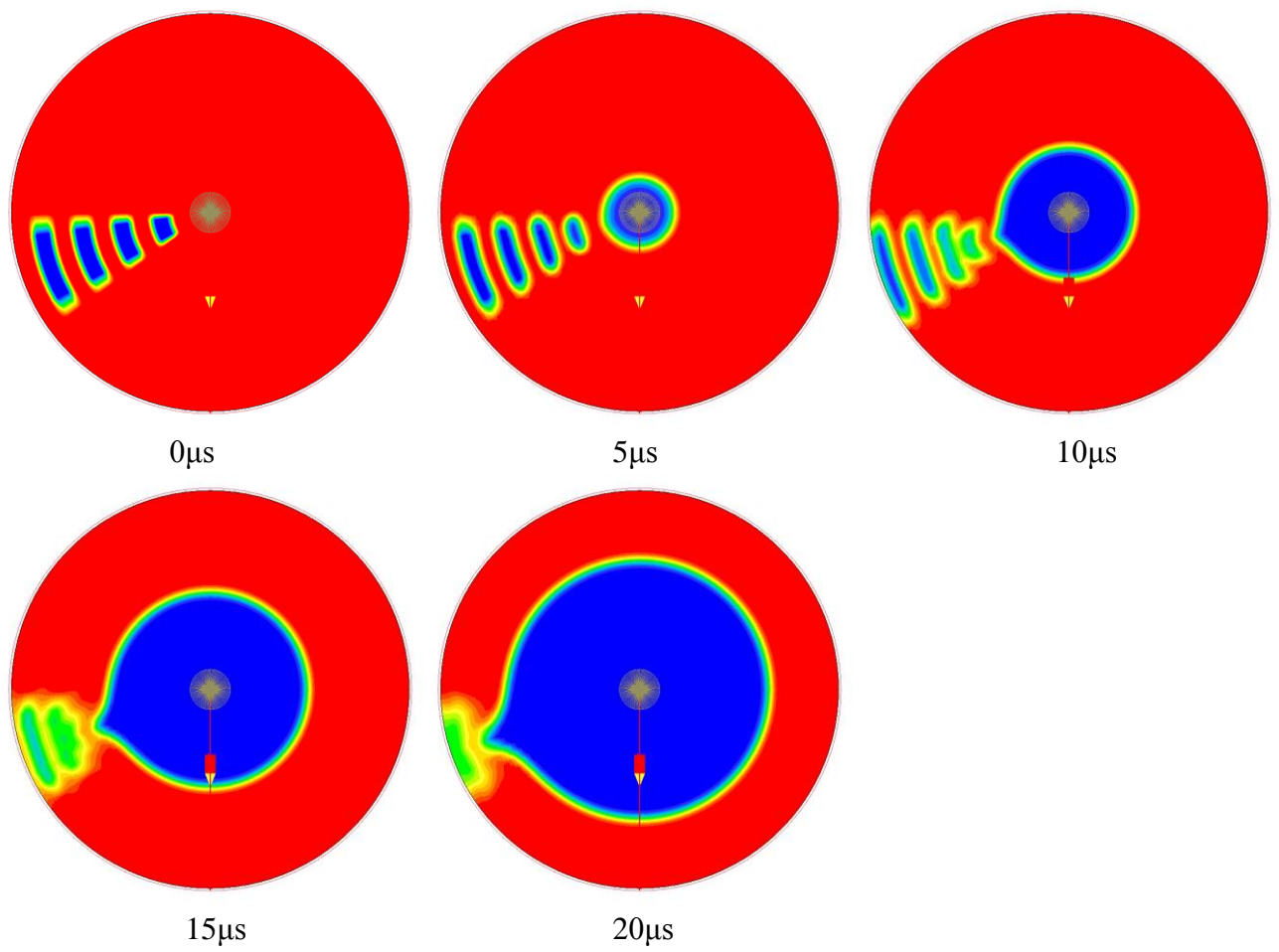
10 μ s



15 μ s

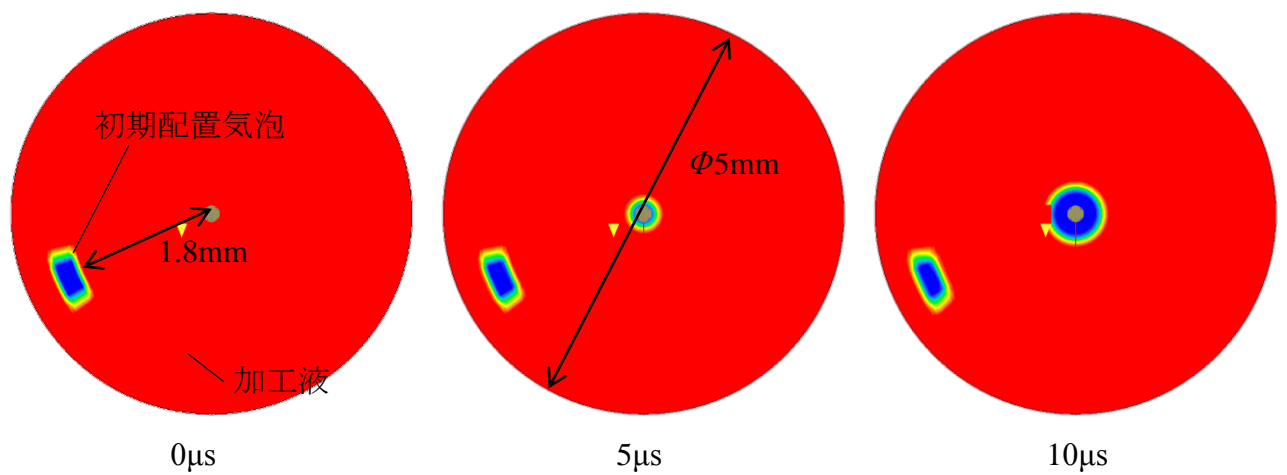
20 μ s

(a) 液相：油



(b) 液相：水

図 4.24 気泡の湧き出しにともなう初期配置気泡の挙動 (初期気泡 4 つ)



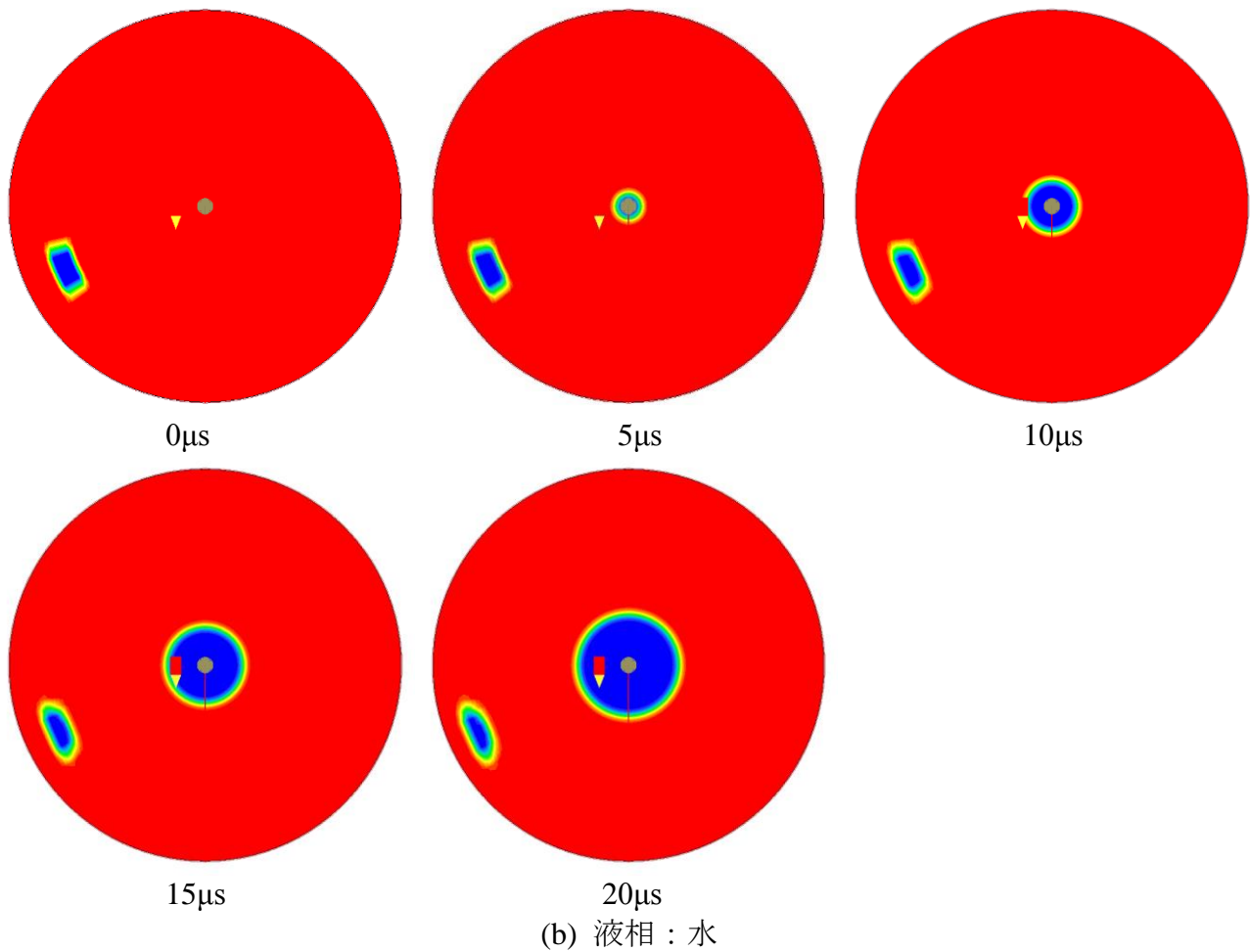
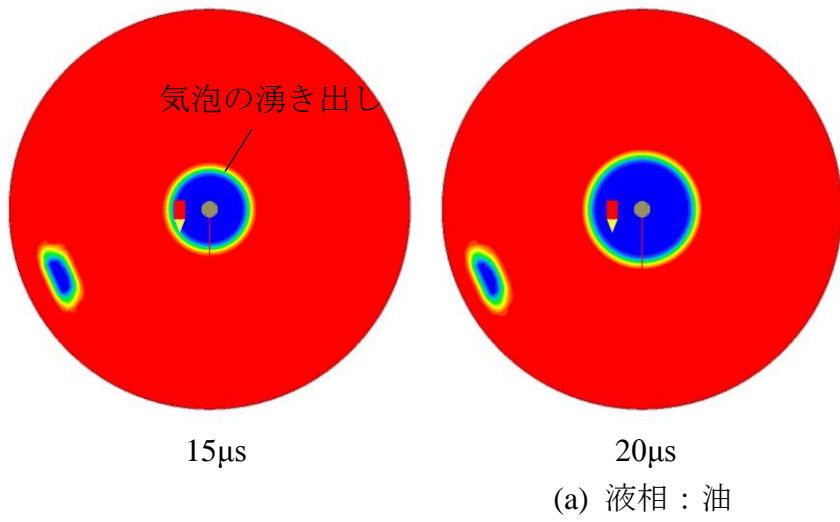
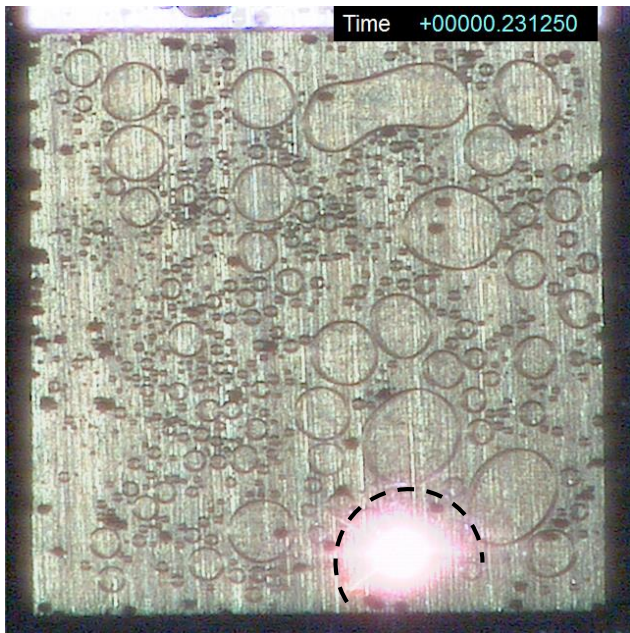


図 4.25 気泡の湧き出しにともなう初期配置気泡の挙動 (解析領域直径 2.5 倍, 湧き出し流量 1/10 倍)

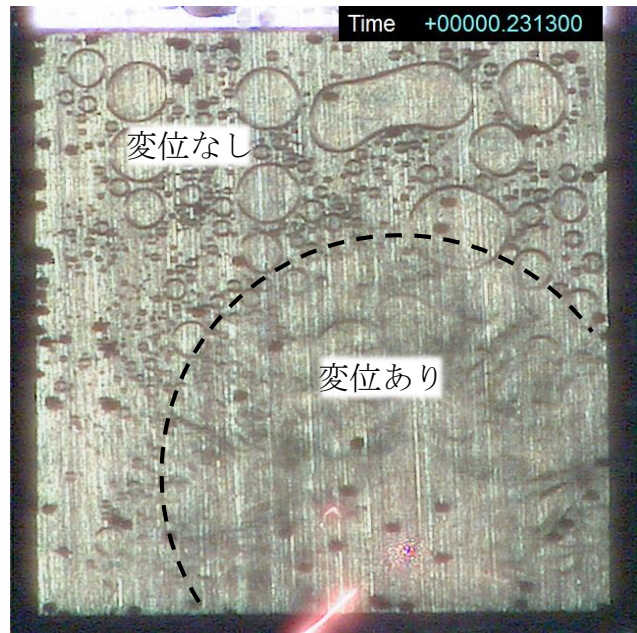
4.5.2 圧縮性粘性流体解析

4.5.2.1 極間の圧力波の伝播

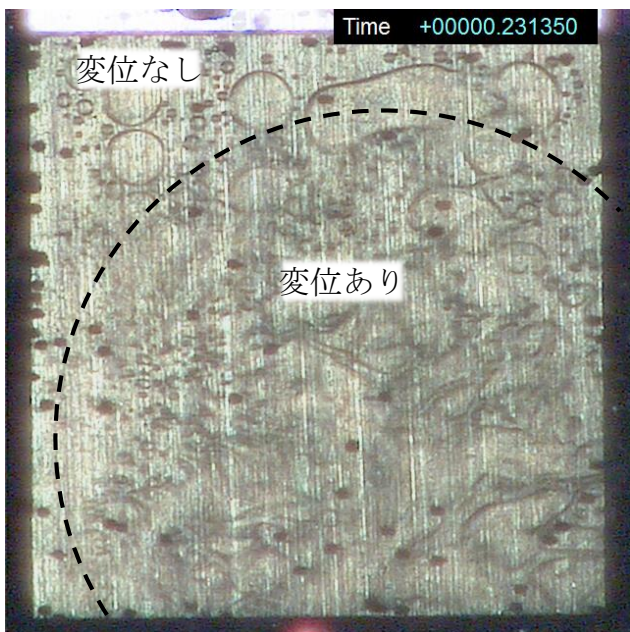
前節では、加工液と気泡に非圧縮性流体を仮定し、二相流の粘性流体解析により、加工液の粘性による気泡挙動の違いを調べたが、油と水で顕著な違いは認められなかった。連続放電中の放電発生時の様子を慎重に観察すると、放電の発生とともに生成される気泡の膨張収縮時の圧力波と考えられる波が、放電点から放射状に広がる様子を確認した。図 4.26 に例として水中における放電発生時の極間の撮影フレームを時系列で示す。図 4.26 (a) において、放電発生直後の極間に分散する多数の気泡はほぼ静止した状態であるが、(b) のフレームでは破線で示した円形領域内の気泡は放電点から半径方向に変位している様子が観察される。また、(c), (d) のフレームでは徐々にその領域が拡大していき、気泡の膨張による圧力波が、多数の気泡が分散する加工液中を伝播しているように観察された。これは、加工液中に多数の気泡が分散することにより、質量の大きい加工液が体積弾性率の小さい気泡をばねとして振動しており、放電点を中心に圧力波が伝播していると考えるのが妥当と思われる。従って、極間の気泡の挙動を調べるためには、圧縮性を考慮する必要があると考えられる。そこで、加工液の粘性が圧力波の伝播に及ぼす影響を調べるために、一流体の圧縮性粘性流体を仮定して、極間の流速分布の時間変化を調べた。



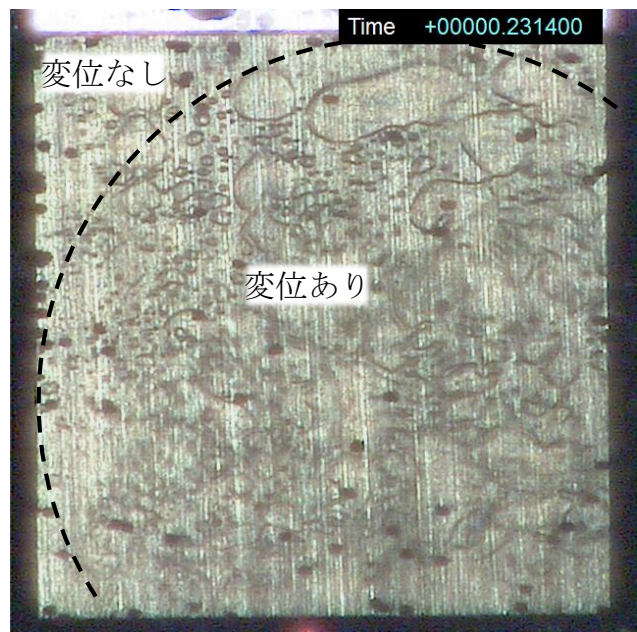
(a) 0.23125s



(b) 0.23130s



(c) 0.23135s



(d) 0.23140s

図 4.26 放電発生時の圧力波伝播の様子

4.5.2.2 解析方法

図 4.27 に示すように平行平板の中心で放電が発生した際の、その周囲に存在する気泡の挙動を調べるために、ある一点の半径方向の速度の時間変化を調べた。本来であれば、加工液を非圧縮性、気泡を圧縮性流体とした二相流の流れ場解析が適切であると考えられるが、圧縮性を考慮した二相流解析は複雑であるために、ここでは一流体の圧縮性粘性流体を仮定した。非圧縮性流れを解くための支配方程式は、質量保存則と運動量保存則 (ナビエ・ストークス方程式) であるが、圧縮性流れの場合は熱力学的変数を含むために新たにエネルギー保存則を導入し、またこれと理想気体の状態方程式を連立して解く必要がある。流体は、液体に対して気体が体積割合で 50% 混合した仮想の流体を仮定し、水と空気の密度から平均密度を計算してこれを用いた。このとき、流体の粘度のみを変更して、粘性の影響を調査した。粘度は水と油の粘度をそれぞれ用いた。解析モデルを図 4.28 に示す。解析には、三次元熱流体解析ソフトである PHOENICS を用いた。半径 2.5mm、ギャップ長 0.1mm の平行平板間の中心で単発放電が発生し気泡の湧き出しがあった際の中心から 2mm の地点における流速の時間変化を調べた。電極表面をすべりなしの断熱、下流端面を大気圧とした。中心の湧き出し体積流量は、前節の式 (4.1) では解の収束が困難であったために次式を用いた。

$$Q = -3000t^2 + 0.3t \quad [m^3 / s] \quad (4.2)$$

このときの気泡半径の時間変化と湧き出し体積流量を図 4.29 と図 4.30 にそれぞれ示す。解析時間は全体で 1ms として、最初の 0.1ms の間に気泡の湧き出しを設けた。

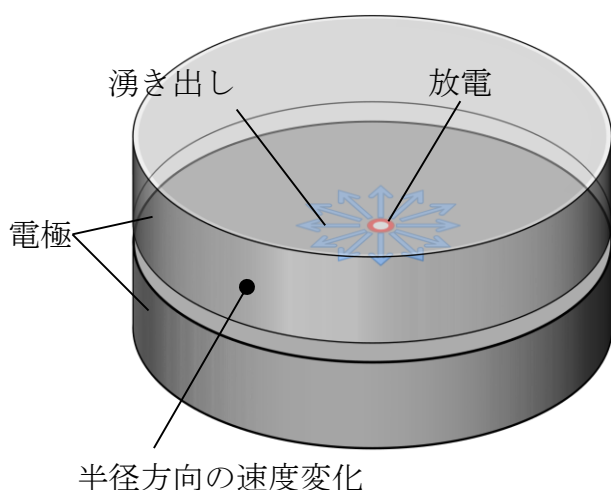


図 4.27 圧縮性流体解析の概略図

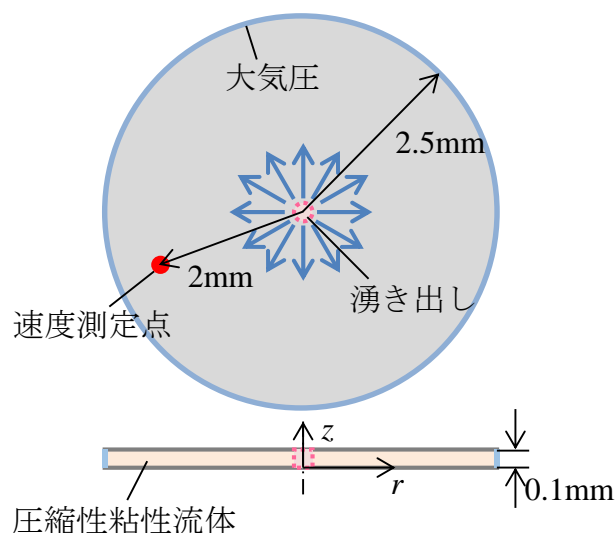


図 4.28 圧縮性流体解析モデル

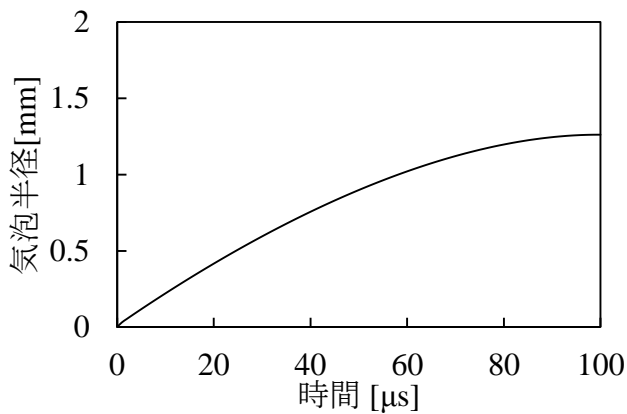


図 4.29 気泡半径の経時変化

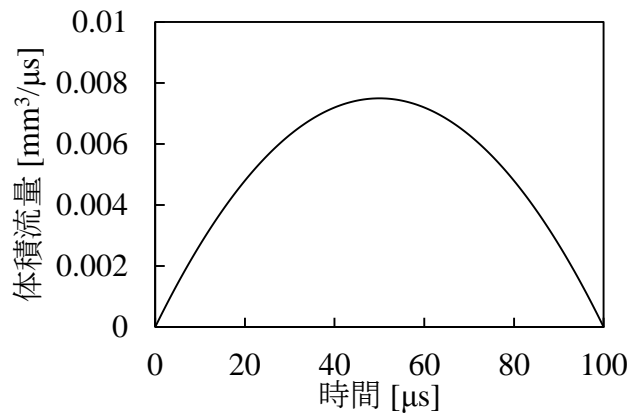


図 4.30 気泡の湧き出し体積流量

4.5.2.3 解析結果

図 4.31 に例として水の粘度を用いた場合の半径方向の速度変化を示す．速度の速い領域が時間とともに下流方向に移動しており，圧力波の伝播が観察される．また，湧き出し終了(0.1ms)後は，極間の流体が下流方向に速度成分を持っているために，中心付近で圧力が負となり，今度は中心方向に向かって流体が加速され，減衰しながら振動している様子が確認できる．図 4.32 に油と水の粘度を用いた場合の中心から 2mm の地点における半径方向の速度の時間変化を示す．圧縮性流体のために中心から 2mm の地点では湧き出し開始からおおよそ 100 μ s 遅れて圧力波が到達していることがわかる．

ここで，この解析結果の妥当性を検討するために，簡単な理論計算を行った．圧力波が距離 2mm を 100 μ s で伝播したと考えると伝播速度は 20m/s と換算できる．連続体中の音速は，次式で表される．

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (4.3)$$

ここで， K は体積弾性率， ρ は密度である．流体が理想気体で，断熱変化で伝播したとすると，そのときの体積弾性率は， $K = \gamma \cdot p$ で表される．ここで， γ は比熱比， p は圧力である．従って式 (4.3) より，伝播速度は 16.7m/s と概算でき，解析結果とおおよそ一致していることが確認できた．

中心から 2mm の地点に圧力波が到達した後，中心付近で負圧となり，中心に向かって流体が加速されるために速度がマイナスとなり，粘性の影響で減衰しながら振動していることがわかる．流体の粘度を油と水にした場合を比較すると，粘度が高い油の場合の方が流速のピーク値が小さいことがわかる．これは，粘性が高いことによるエネルギー損失の影響と考えられ，その地点における振動量も小さいものと考えられる．従って水中と油中における気泡の振動量の違いは，圧力波が極間を伝播する際の粘性摩擦によるエネルギー損失の相違が

要因の一つであることが明らかとなった。また、このことから粘度の低い加工液の開発により、冷却特性の向上が図れ、加工速度の向上に繋がることが考えられる。

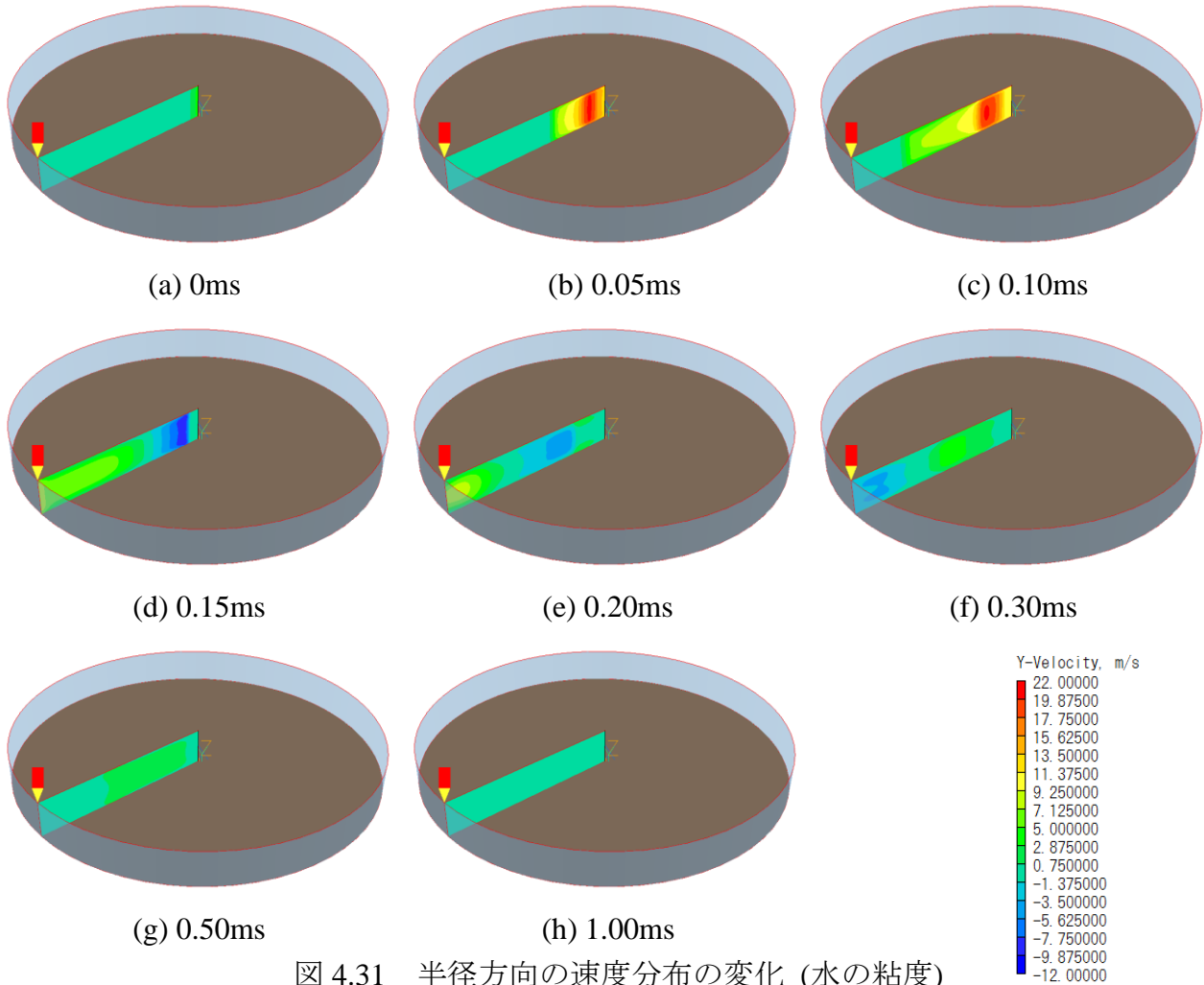


図 4.31 半径方向の速度分布の変化 (水の粘度)

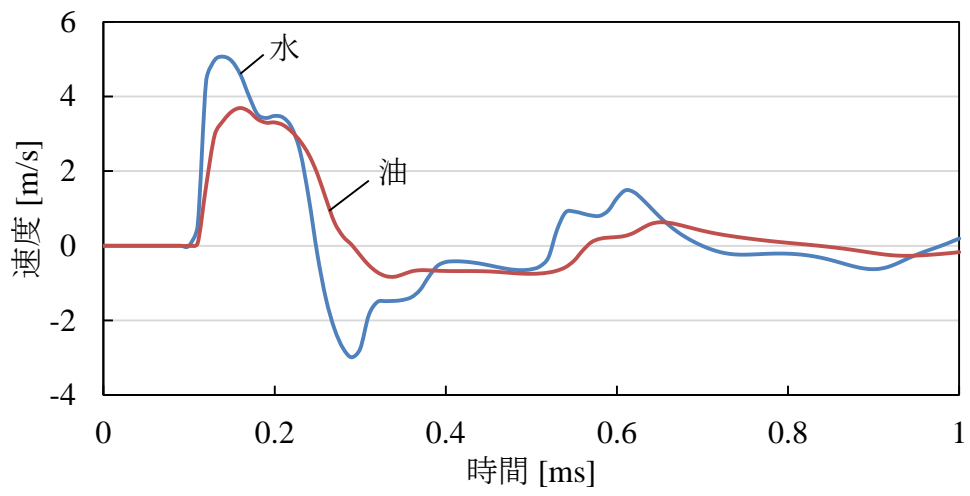


図 4.32 中心から 2mm の地点における半径方向の速度変化

第4章 まとめ

本章では、油中と水中の放電加工速度が異なる要因を調査するために、単発放電の除去量を油中と水中で比較した。また、加工中に極間を占める気泡の割合と放電の各雰囲気での発生割合を油中と水中で比較した。さらに、連続する放電点の発生間距離を調べ、加工安定性の違いを調査した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 油中と水中で単発放電を行った結果、両者の除去量はほぼ等しいことがわかった。これは、油中と水中で生じたアークプラズマ温度が等しいことが要因の一つである。
- (2) 油中と水中で生じる単発放電の気泡の膨張収縮運動を比較した結果、絶縁破壊後の最初の気泡最大直径は油中と水中ともほぼ等しいが、振動が減衰した後の気泡直径は、油中に比べて水中の方が顕著に小さい。これは、油中では常温で安定した低分子炭化水素が生成されるのに対して、水中では分解された水素と酸素が再び反応して水に戻るとともに、水蒸気が凝縮して水に戻るためであると考えられる。さらに、気泡の膨張収縮運動は、水中より油中の方が速く減衰する。これは、水に比べて油の方が、粘度が高いためである。
- (3) 油中と水中で連続放電を行うと、両者ともに加工開始後、数百発の放電で極間のほとんどが気泡で満たされる。ただし、油中と比べて水中の方が気泡の占める割合は小さい。この傾向は、油中と水中の単発放電で生じる気泡の発生量の違いの傾向と一致する。
- (4) 油中と水中の連続放電で、液中、気液境界、気泡中の各雰囲気での放電発生割合を比較すると、液中で発生する放電の割合が、油中に比べて水中の方が僅かに多く、また気泡中で発生する放電の割合が、油中に比べて水中は僅かに少ない。これは、極間を占める気泡の割合が、油中に比べて水中が小さいためである。従って、加工速度が油中に比べて水中の方が速い要因は、液中で発生する放電の割合が油中より水中の方が多く、一発当たりの除去量が多くなったためである可能性は否定できないが、両者における各雰囲気の放電発生割合の違いは僅かであり、加工速度の違いを説明するには十分な違いではない。
- (5) 油中と水中の形彫り放電加工において、安定した加工条件下では、油中と水中の放電加工速度はほぼ等しい。これは、油中と水中で放電一発当たりの除去量が等しいためである。一方、放電頻度を高く設定すると、水中は放電頻度に対して線形的に加工速度が上昇するが、油中は集中放電の発生割合が上昇し、放電が偏在することで除去に寄与する放電数が減少し、加工速度が低下する。

- (6) 放電が続けて同じ位置に生じる放電の多くは、放電遅れ時間が $2\mu\text{s}$ 以下の場合がほとんどである。逆に、異なる場所に生じる場合は、遅れ時間が $1\mu\text{s}$ 以上の場合がほとんどである。
- (7) 水中における放電点分布は、油中に比べて分散して発生する。これは、極間の気泡の振動や移動量が、油中に比べて水中の方が大きく、放電後の電離気体の拡散や加工液の素早い流入等による冷却特性の高いことが、放電の安定性に影響を及ぼしているためであると考えられる。
- (8) 放電加工の極間隙では、加工液中に多数の気泡が分散することにより、質量の大きい加工液が体積弾性率の小さい気泡をばねとして振動しており、放電の発生にともなって気泡の膨張圧力による圧力波の伝播が生じる。また、この圧力波のエネルギー損失は、加工液の粘度が高いほど大きく、粘度の高い加工液のほうが、振動量が小さく、冷却特性が低いものと考えられる。

第5章 結論

本研究は、従来困難であった放電加工の極間現象の可視化を、透明体電極を用いることにより可能にし、連続放電現象、単発放電現象、油と水加工液の加工現象の違いの解明を試みた。放電加工は、絶縁性の加工液の中で工具電極と工作物を数十マイクロメートルの距離で対向させ、この非常に狭い空間で毎秒数千から数万回もの頻度でパルス放電を生じさせて加工を行うために、極間の加工現象の直接観察が困難であり、加工現象の解明が十分なされてこなかった。

先行研究では、電極の一部に透明なガラス板やアクリル板を用いることで、実際の加工間隙を模して、これらを通して極間の様子を観察する研究が行われているが、ガラス板やアクリル板上で放電が発生するわけではないため、実際の加工面領域における極間の様子の直接観察には至っていない。また、工具電極への給電線を分割し、給電線に流れる電流の比を測定することによって放電の発生位置を検出する手法も考案されているが、位置の検出精度は高くなく、また放電が加工液中で発生しているのか、気泡中で発生しているのか、またはその境界で発生しているのか区別することはできない。また、放電加工の熱源であるアークプラズマを高速度ビデオカメラにより直接観察する研究が行われているが、棒状電極の突合せ加工による側面からの観察に限られ、電極面積が大きい場合の観察は困難である。また、大気中での放電の観察は容易であるが、加工液中で生じる放電は加工液の光の吸収や放電によって生成される気泡と加工液との界面での光の屈折があることから、加工液中で生じる放電の現象解明は十分になされていない。

本研究は、可視光域で透明かつ放電加工を行う上で十分な導電性を有する単結晶 SiC、単結晶 Ga₂O₃ 材料を放電加工の電極として用い、高速度ビデオカメラにより加工面に対して垂直な方向から放電加工間隙を直接観察し、従来困難であった加工液中における加工現象の可視化を行い、放電加工の極間現象の解明を行った。

第2章では、放電加工の極間現象を解明することを目的として、連続放電加工中の極間現象の直接観察を行い、極間を占める気泡割合の変化、放電の発生する雰囲気、放電点の発生位置の規則性、実加工で用いられるフラッシング法の効果を調べた。

放電加工は、加工領域を加工液中に沈めて加工を行うが、放電の発生とともに気泡が生成される。気泡の存在は、加工くずの冷却効果、絶縁回復効果、加工くずの排出効果等に影響を及ぼし、加工の安定性と密接に関係していると考えられる。そこで連続放電において、極間を占める雰囲気を加工液、気液境界、気泡に分類し、それぞれの雰囲気が極間を占める面積割合、また各雰囲気で発生した放電の発生割合について調査した。その結果、次のことがわかった。

(1) 放電加工の極間隙では、放電の発生とともに気泡が発生し、加工開始後、数百発の放電

の発生の際に気泡割合が急激に上昇し、定常状態では極間隙のおよそ70%以上が気泡で満たされている。

- (2) 放電は、加工液中のみではなく、気液境界、気泡中においても生じ得る。ただし、放電の累積にともなって気泡割合が急激に上昇するために、加工液中で生じる放電の割合は減少し、定常状態では10%以下となる。
- (3) 液中、気液境界、気泡中での単位面積当たりの放電発生割合は、液中、気泡中に比べて気液境界が最も高い。これは、加工くずが気泡の境界に密に分布することで、加工くずを介して多くの放電が生じるという推論を裏付けている。
- (4) 放電が液中で発生した場合は、電流波形の立ち上がりと電圧波形の立ち下がり速度が遅い。これは、液中で発生する放電は、プラズマの周囲に存在する加工液の慣性によってプラズマの膨張が抑制されるために、プラズマ膨張速度が気泡中の放電に対して遅く、アークプラズマ中の電気抵抗が気中に比べ大きいためである。

放電点分布の偏在は、除去効率の低下や加工面への熱的ダメージの拡大に繋がることから、放電点の発生位置の規則性を明らかにすることは重要である。そこで、連続する放電点の発生間距離と放電により生成される気泡の半径との関係を調べ、放電点分布の規則性を調査した。その結果、次のことがわかった。

- (1) 加工深さが浅く、比較的安定して加工が継続している場合においても、放電点は加工面全体に均一に分散して発生するが、その発生分布は完全なランダムではない。
- (2) 放電は、直前の放電によって発生した気泡の境界に密に分布する加工くずを介して発生する確率が高い。

実加工では、加工の安定性を保つことを目的に、加工液を極間に供給するフラッシングが行われる。フラッシングには、加工間隙の外に配置したノズルから加工液を加工間隙に向けて噴流する噴射法、工具電極や工作物に設けられた穴から加工液を極間隙に直接噴流する噴流法、工具電極を周期的にジャンプさせ極間の汚れた加工液と清浄な加工液の置換を行う電極ジャンプ法等がある。そこで、ノズルによる噴射法、電極穴による噴流法、電極ジャンプ法を用いて加工を行い、透明体電極を通して極間を直接観察することで、各フラッシングが加工現象に及ぼす影響を調査した。その結果、次のことがわかった。

- (1) ノズルによる噴射法は、電極のジャンプを伴わない場合は、加工液噴射流が加工間隙に流れ込み難く、極間隙の流れ場に及ぼす影響が小さいために、極間の介在物の排出効果は小さい。
- (2) 電極穴による噴流法は、極間の介在物の排出効果は大きいですが、極間の加工くず濃度分布に隔たりが生じやすく、放電点分布が偏在してしまう場合がある。
- (3) 電極ジャンプ法は、加工面が鉛直方向に沿うような横方向の加工であれば、極間の介在物の排出効果が大きく、安定した加工が継続できる。
- (4) 実験は行っていないが、電極を鉛直方向に送る縦方向の加工の場合には、電極ジャンプ法にノズルによる噴射法を組み合わせ、電極ジャンプ時にノズルによって極間をフラッ

シングすることで、淀み点を消滅させてより効果的な極間の介在物の排出効果が期待できるものと考えられる。

第3章では、放電加工の単発放電現象を解明することを目的として、単発放電中の極間現象の直接観察を行い、気泡の膨張過程、加工くずの飛散現象、陽極と陰極の放電現象の違い、液中におけるアークプラズマの膨張過程を調べた。

放電加工は、パルス放電の累積によって加工が進行するために、一発の放電現象を詳細に観察することは、加工現象の把握のために重要である。そこで、単発放電を行い、気泡の膨張過程、加工くずの飛散現象を観察した。その結果、次のことがわかった。

- (1) 絶縁破壊直後から放電点を中心に気泡が膨張しはじめ、絶縁破壊後 10 μ s の間に気泡直径が 1mm まで膨張しており、気泡膨張速度は 50m/s に達することがわかった。
- (2) 高温の加工くずが、放電発生直後から放電点から放射状に気泡中を飛散する様子が観察された。撮影動画より、確認できるものでも数十個もの加工くずの飛散が確認された。また、飛散した加工くずが、膨張する気液境界に追いつき境界に突入する様子や、その手前で加工液によって濡れた加工面に着地する様子が観察された。
- (3) 本観察結果は、放電の発生中に加工くずが飛散する様子を観察しており、放電中は過熱状態の熔融金属は除去が抑えられ、材料の除去は放電終了後に一挙に起きるという従来の定説を覆すものである。

従来より、陰極と陽極で放電痕形状は異なり、陰極の放電痕は複雑で複数の小さなクレータの集合体のような形状であるのに対して、陽極の放電痕は単調な放電痕形状であることが知られている。この要因として、陰極面上では細いアーク柱が電極面上を走り回ることによって放電痕が形成されるという説がある。そこで、極性を変更して単発放電を行い、透明体電極を通して放電点を拡大観察することで、極性の違いが放電痕の形成過程に及ぼす影響を調べた。その結果、次のことがわかった。

- (1) 陰極点では、発光強度分布は不均一で、発光強度の強い複数のポイントが時間経過とともに不規則かつ高速に移動している様子が観察された。これは陰極点において、二次電子放出に加え、熱電子放出、電界電子放出が盛んに起きており、局所的な電子放出の増大が電流密度を増大させる正帰還が働いているためであると考えられる。従って、電極蒸気の激しい上昇や突沸が複数個所で発生し、陰極面では不均一かつ不規則な電流密度分布が形成されることで、複雑形状の放電痕が形成されると考えられる。
- (2) 陽極点では、発光強度分布は軸対称かつ均一な発光が観察された。これは陽極が電子の収集機能を果たすのみであり、陽極面では正帰還は働かない均一な電流密度分布であると考えられる。そのため、陽極面では単調で軸対称な放電痕が形成されるものと考えられる。

放電加工の熱源であるアークプラズマの挙動を明らかにすることは重要である。先行研究

により、アークプラズマを高速度ビデオカメラで直接観察する研究が行われているが、棒状電極の突合せ加工による側面からの観察に限られ、電極面積が大きい場合の観察は困難である。また、大気中での放電の観察は容易であるが、加工液中で生じる放電は加工液の光の吸収や放電によって生成される気泡と加工液との界面での光の屈折があることから、加工液中で生じる放電の現象説明は十分になされていない。そこで、液中で発生する放電のアークプラズマの直接観察を行った。その結果、次のことがわかった。

- (1) 液中で発生したアークプラズマは、絶縁破壊後 $10\mu\text{s}$ 以内に急激に膨張し、その後ほぼ一定の直径を維持する。ただし、気中で発生するアークプラズマに比べて膨張速度は遅い。これは、プラズマの周囲に存在する加工液の慣性によってプラズマの膨張が抑制されるためであると考えられる。
- (2) 透明体電極を通して観察された発光がアークプラズマからの発光であることを確認するために、分光分析により発光領域の温度測定を行った。その結果、発光領域の温度はおよそ $6,000\sim 7,000\text{K}$ であり、 $5,000\text{K}$ 以上であることからプラズマ領域であることがわかった。
- (3) 単発放電における熱伝導解析の逆問題解法によって、円板一様熱源を仮定した場合の熱源直径は、観察されたアークプラズマ直径に比べて小さいことがわかった。これは、アークプラズマ中では熱流束分布は均一ではなく、プラズマ中心部に集中しているためである。それにもかかわらず、円形一様熱源を仮定した場合の熱源直径は、Cu 電極面上に形成される放電痕直径よりも大きいことがわかった。

第4章では、放電加工油中と脱イオン水中で放電加工速度が異なる要因を明らかにすることを目的として、放電一発当たりの除去量の違い、放電発生雰囲気割合の違い、加工の安定性の違いを調べた。

油中と水中の放電では、アークプラズマの構成粒子が異なるために、プラズマの温度に影響を及ぼし、放電一発当たりの除去量が異なると考えられる。そこで、油中と水中の単発放電の除去量の違いを比較した。さらに、油中と水中で発生した放電のアークプラズマの温度を測定して比較することで、油中と水中で放電一発当たりの除去量の違いが加工速度に及ぼす影響を調査した。その結果、次のことがわかった。

- (1) 油中と水中において、極性、放電持続時間を変更して単発放電を行い、除去量を比較した結果、両者の単発放電除去量はほぼ等しいことがわかった。
- (2) 油中と水中で発生する放電のアークプラズマの温度はほぼ等しいことがわかった。従って、油中と水中の単発放電の除去量の違いが、放電加工速度の違いに及ぼす影響は小さいと考えられる。

油中と水中では、極間を占める加工液と気泡の割合が異なり、液中と気泡中で発生する放電の割合が変化することで、加工速度に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、油中と水中で単発放電と連続放電を行い、発生する気泡量の違いを直接観察した。また、連続放電中

において各雰囲気での放電発生割合の違いを比較し、加工速度の違いに及ぼす影響を調査した。その結果、次のことがわかった。

- (1) 油中と水中で生じる単発放電の気泡直径の変動を観察すると、最初の気泡最大直径は油中と水中ともほぼ等しいが、減衰後は油中に比べて水中の方が顕著に小さいことを確認した。
- (2) 油中と水中で連続放電を行い、極間を占める気泡割合を比較した結果、定常状態において油中に比べて水中の方が、気泡割合が小さいことがわかった。この傾向は、油中と水中の単発放電で生じる気泡量の違いと一致している。
- (3) 油中と水中の連続放電で放電発生割合を比較すると、液中で発生する割合は、油中に比べて水中の方が僅かに多く、また気泡中で発生する割合は、油中に比べて水中は僅かに少ない。これは、極間を占める気泡割合が、油中に比べて水中が小さいためである。従って、加工速度が油中に比べて水中の方が速い要因は、液中で発生する放電の割合が水中の方が多く、一発当たりの除去量が多くなったためである可能性は否定できないが、両者の放電発生割合の違いは僅かであり、加工速度の違いを説明するには、十分な違いではないと考えられる。

放電点の発生分布が偏在すると、除去効率が減少し加工速度の低下を招くと考えられる。油中と水中では、極間を占める気泡割合が異なり、極間の冷却特性、放電点分布、また加工速度に影響を及ぼしていることが推測される。そこで、油中と水中で加工条件を比較的安定な状態から不安定な状態に変化させて放電加工を行い、加工速度の変化を比較した。さらに、透明体電極を用いて放電点分布を観察し、連続する放電の発生間距離を測定することで、加工の安定性の比較を行った。その結果、次のことがわかった。

- (1) 安定した加工条件では、両者の加工速度はほぼ等しいことがわかった。これは、油中と水中で放電一発当たりの除去量が等しいためである。
- (2) 放電頻度を高く設定すると、水中は放電頻度に対して線形的に加工速度が上昇するが、油中はむしろ低下することがわかった。これは、集中放電の発生割合の上昇により、放電が偏在することで除去に寄与する放電数が減少したためであると考えられる。
- (3) 水中における放電点分布は、油中に比べて分散して発生することがわかった。さらに、極間の気泡挙動を比較すると、油中に比べて水中の方が気泡の振動や移動量が大きく観察された。従って、油中と水中の放電分散性の違いは、気泡の振動や移動量が、油中に比べて水中の方が大きく、放電後の電離気体の拡散や加工液の素早い流入等による冷却特性の高いことが、放電の安定性に影響を及ぼしているためであると考えられる。

油中と水中で気泡の振動や移動量が異なる要因は、加工液の粘性の違いであると考え、加工液と気泡の気液二相流の非圧縮性粘性流体解析、また一流体の圧縮性粘性流体解析を行い、加工液の粘度が極間の気泡挙動に及ぼす影響を調査した。その結果、次のことがわかった。

- (1) 流体に非圧縮性を仮定して計算を行うと、粘度の違いによって気泡挙動に違いがあらわれないことがわかった。

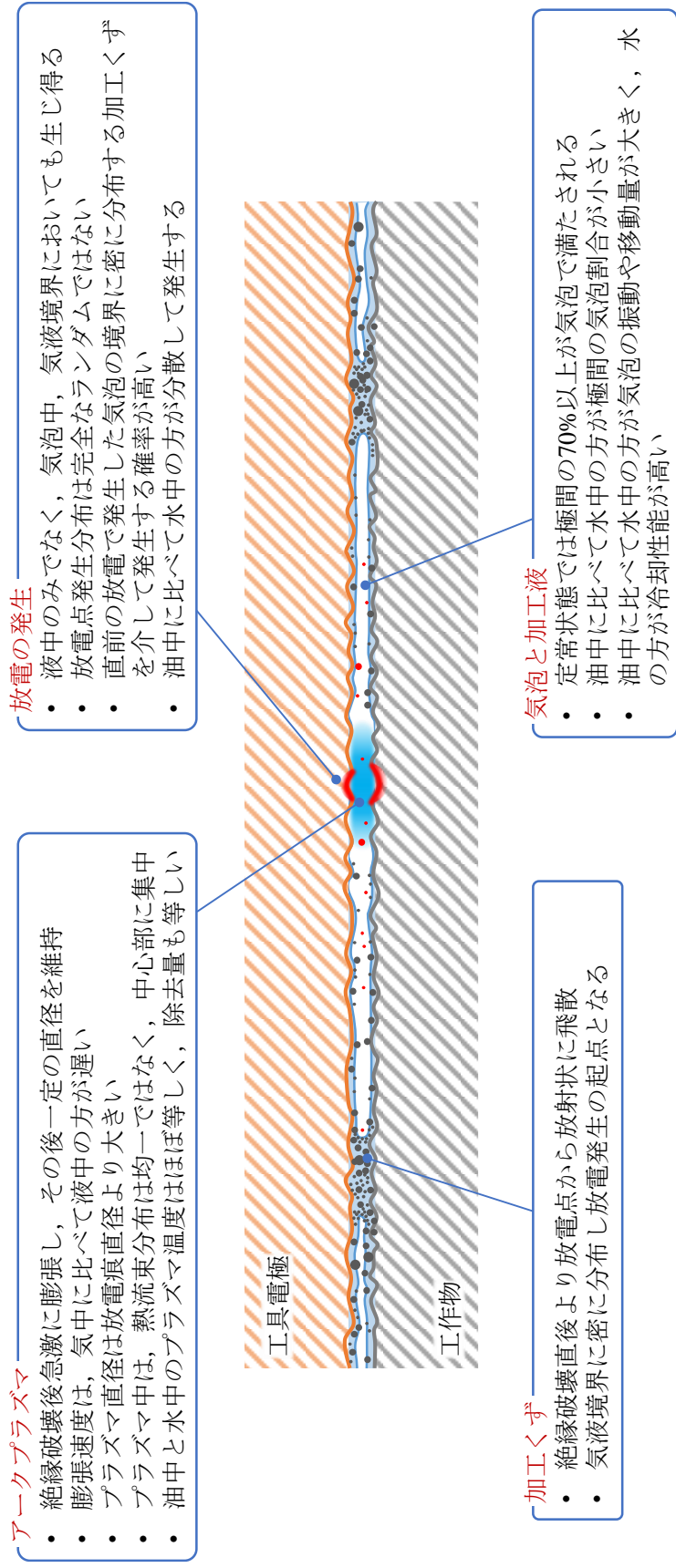
- (2) 放電が発生した際の極間現象を観察すると、気泡の膨張圧力による圧力波が、極間を伝播する様子が観察された。このような現象は非圧縮性流体では観察し得ない現象であり、極間の流れ場解析には、圧縮性を考慮する必要があることがわかった。
- (3) 一流体の圧縮性粘性流体解析により、粘性の高い流体の方が、圧力波が伝播する際に粘性摩擦によるエネルギー損失が大きく、気泡の振動量に影響を及ぼしていることがわかった。従って、粘性の低い加工液ほど、極間における気泡の移動量や振動が大きくなり、放電点の冷却性能に優れるものと考えられる。

以上、本研究では、放電加工の電極材料に、透明で放電加工を行う上で十分な導電性を有する材料を用いることで、従来困難であった極間現象の直接観察を可能にし、連続放電現象、単発放電現象の解明を行い、また未解明であった油中と水中における加工速度の違いの要因として、有力である原因を示した。図 5.1 に本研究成果を簡潔にまとめて、放電加工の極間の模式図と合わせて示す。

本研究の成果は、放電加工の極間の直接観察により、正しい加工現象の理解を可能にしており、工業的にも大きな意義をもっていると思われる。加工中は、放電は加工液中のみでなく、気泡中、気液境界でも発生し得るが、各発生雰囲気で放電の電圧・電流波形に特徴があることが本研究によってわかった。そこで、加工速度を向上させるための一つの手法として、加工中の放電波形をリアルタイムで分析し、各雰囲気で発生した放電の発生割合をモニタリングするとともに、加工液のフラッシング動作と連動させることにより、加工液中で発生する放電の割合を増加させることで、加工速度の向上が図れるものと考えられる。

また、現在の放電加工機では、放電電圧・電流波形における微小な波形の変動から安定な状態と不安定な状態を識別することで、パルスの適応制御がなされている。しかし、この安定な状態の波形、不安定な状態の波形とは、実際にどのような加工状態を意味するのか、解明が十分でないまま、経験的に正常な波形、異常な波形のように放電波形を分類し、制御を行っているのが実情である。従って、極間で起きている現象と放電波形とを同期し、正常な放電や異常な放電はどのような状態を意味するのか、その関連性が明らかにできれば、より効果的な適応制御の可能性が期待でき、また効率的な加工を実現するための指針が得られるものと考えられる。

また、放電加工の加工液として用いられる放電加工油と脱イオン水について、両者の加工速度が異なる要因は、加工液の粘度の違いで説明できることが本研究によってわかった。これは、加工液の粘性の高低が、極間を伝わる圧力波の伝播の減衰量に影響を及ぼし、またそれが放電点の冷却性能に影響を及ぼすためである。しかし、極間を伝わる圧力波の伝播の減衰には、極間に存在する気泡の大きさや、極間を占める気泡割合等も影響していることが推測される。従って、これらが極間における圧力波の伝播に及ぼす影響が明らかとなれば、加工液開発に関してさらなる加工速度向上のための指針が得られるものと考えられる。



アーックプラズマ

- 絶縁破壊後急激に膨張し、その後一定の直径を維持
- 膨張速度は、気中に比べて液中の方が遅い
- プラズマ直径は放電痕直径より大きい
- プラズマ中は、熱流束分布は均一ではなく、中心部に集中
- 油中と水中のプラズマ温度はほぼ等しく、除去量も等しい

放電の発生

- 液中のみでなく、気泡中、気液境界においても生じ得る
- 放電点発生分布は完全なランダムではない
- 直前の放電で発生した気泡の境界に密に分布する加工くずを介して発生する確率が高い
- 油中に比べて水中の方が分散して発生する

加工くず

- 絶縁破壊直後より放電点から放射状に飛散
- 気液境界に密に分布し放電発生起点となる

気泡と加工液

- 定常状態では極間の70%以上が気泡で満たされる
- 油中に比べて水中の方が極間の気泡割合が小さい
- 油中に比べて水中の方が気泡の振動や移動量が大きく、水の方が冷却性能が高い

図 5.1 放電加工の極間現象

参考文献

- 1) 日本機械学会編, 生産加工の原理, 日刊工業新聞社, (1998).
- 2) 齋藤長男, 高鷲民生, 毛利尚武, 古谷政典: 放電加工技術 -基礎から将来展望まで-, 日刊工業新聞社, (1997).
- 3) 電気学会編: 放電ハンドブック, オーム社, (1991).
- 4) P. K. Eckman and E. M. Williams: Plasma Dynamics in an Arc Formed by Low-Voltage Sparkover of a Liquid Dielectric, *Appl. sci. Res., B*, 8, (1960), pp. 299 - 320.
- 5) 池田光知: 単発放電により細隙に発生した気泡の挙動についての第 1 報, 電気加工学会誌, Vol. 6, No. 11, (1972), pp. 12 - 26.
- 6) F. Van Dijck: Physico-mathematical analysis of the electro discharge machining process, Dissertation of Kotholieke Universiteit, Leuven, (1973).
- 7) S. Hayakawa, T. Doke, F. Itoigawa, T. Nakamura: Observation of Flying Debris Scattered from Discharge Point in EDM Process, *Proc. ISEM XVI*, pp. 121 - 125.
- 8) Philip T. Eubank, Mukund R. Patel, Maria A. Barrufet, Bedri Bozkurt: Theoretical models of the electrical discharge machining process. III. The variable mass, cylindrical plasma model, *Journal of Applied Physics*, 73, 11, (1993), pp. 7900 - 7909.
- 9) M. Yoshida, M. Kunieda: Study on the Distribution of Scattered Debris Generated by a Single Pulse Discharge in EDM Process, *IJEM*, No. 3, (1998), pp. 39 - 47.
- 10) X. Yang, J. Guo, X. Chen, M. Kunieda: Molecular dynamics simulation of the material removal mechanism in micro-EDM. *Precision Engineering*, 35, 1, (2011), p. 51 - 57.
- 11) 国枝正典, 吉田政弘: 気中放電加工, 精密工学会誌, Vol. 64, No.12, (1998), pp. 1735 - 1738.
- 12) 鳳誠三郎: 放電加工のメカニズム, 精密機械, Vol. 29, No. 10, (1963), p. 11.
- 13) 吉田政弘, 国枝正典: 単発放電における加工屑の飛散の観察, 電気加工学会誌, Vol. 30, No.64, (1996), pp. 27 - 36.
- 14) 増沢隆久, 佐田登志夫, 木下夏夫: 放電微細加工における加工くずの役割, 精密機械, Vol. 37, No.9, (1971), pp. 52 - 58.
- 15) 須田孝, 佐田登志夫: 放電加工の極間における導体粒子の挙動, 電気加工学会誌, Vol. 7, No. 14, (1974), pp. 19 - 28.
- 16) 小島弘之, 国枝正典: 形彫り放電加工における放電点分布の観察, 精密工学会誌, Vol. 57, No. 9, (1991), pp.1603 - 1608.
- 17) 増沢隆久: 放電加工用加工液としての水の利用, 生産研究, Vol. 32, No. 11, (1980), pp. 519 - 525.
- 18) H. Xia, M. Kunieda, N. Nishiwaki: Removal amount difference between anode and cathode in EDM process. *IJEM* 1, (1996), pp. 45 - 52.
- 19) 鈴木政幸, 毛利尚武, 恒川好樹, 齋藤長男: 放電加工における電極低消耗の研究 (第 4 報), 電気加工学会誌, Vol. 29, No. 60, (1995), pp. 1 - 10.

- 20) 国枝正典, 増沢隆久: 放電加工における加工間隙の直接観察, 昭和 61 年度精密工学会春季大会講演論文集, (1986), p. 989.
- 21) 宮島譲治, 国枝正典, 増沢隆久: 放電加工間隙の気泡挙動の観察, 昭和 62 年度精密工学会春季大会講演論文集, (1987), pp. 723 - 724.
- 22) H. Takeuchi, M. Kunieda: Effects of Volume Fraction of Bubbles in Discharge Gap, Proc. of ISEM XV, (2007), pp. 63 - 68.
- 23) 小島弘之: 放電点検出による放電加工現象の解明, 東京農工大学博士学位論文, (1993).
- 24) Schumacher BM. About the Role of Debris in the Gap During Electrical Discharge Machining, Annals of the CIRP, 39, 1, (1990), pp. 197 - 199.
- 25) M. Kunieda, B. Lauwers, K. P. Rajurkar, B. M. Schumacher: Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process, Annals of the CIRP, 54, 2, (2005), pp. 64 - 87.
- 26) 早川伸哉, 小島弘之, 国枝正典, 西脇信彦: 放電加工における加工安定性とプラズマ消沈の関係, 精密工学会誌, Vol. 62, No. 5, (1996), pp. 686 - 690.
- 27) M. Kunieda, H. Kojima: On-line Detection of EDM Spark Locations by Multiple Connection of Branched Electric Wires, Annals of the CIRP, 39, 1, (1990), pp. 171 - 174.
- 28) H. Obara: Detection of Discharging Position on Wire EDM, Proc. ISEM 10, (1992), pp. 404 - 409.
- 29) 吉田英史, 国枝正典: 分光分析による放電加工アークプラズマの温度測定, 精密工学会誌, Vol. 62, No. 10, (1996), pp. 1464 - 1468.
- 30) 河口広司: 線強度比法による分光分析用光源の温度測定法, 分光研究, Vol. 13, No. 1, (1964), pp. 1 - 6.
- 31) 宮地巖, 鬼頭幸生, 岡田勝男: 電カアークにおける温度および電極蒸気密度のアークスペクトル線強度による決定, 電気学会雑誌, 87, 6, (1967), pp. 1227 - 1234.
- 32) A. Kojima, W. Natsu, M. Kunieda: Spectroscopic measurement of arc plasma diameter in EDM, Annals of the CIRP, 57, (2008), pp. 203 - 207.
- 33) 橋本浩明, 国枝正典: 分光分析による放電加工アークプラズマの温度変化の観察, 電気加工学会誌, Vol. 31, No. 68, (1997), pp. 32 - 40.
- 34) J.E. Daalder: Erosion Structures on Cathodes Arced in Vacuum, J. Phys. D: Appl. Phys., 12, (1979), pp. 1769 - 1779.
- 35) S.S. MacKeown: The Cathode Drop in an Electric Arc, Phys. Rev., 34, (1929), pp. 611 - 614.
- 36) M. Kunieda, H. Xia, N. Nishiwaki: Observation of Arc Column Movement during Monopulse Discharge in EDM, Annals of the CIRP, 41, 1, (1992), pp. 227 - 230.
- 37) 平晋一郎, 向山芳世, 佐野正明: 水性加工液中の放電除去現象について, 電気加工技術, 16, 53, (1992), pp. 26 - 31.
- 38) T. Masuzawa, J. Tsukamoto, M. Fujino: Drilling of Deep Microholes by EDM, Annals of the CIRP Vol. 38, 1, (1989), pp. 195 - 198.
- 39) 正木健, 厨川常元: 脱イオン水によるマイクロ放電加工の研究, 電気加工学会全国大会 (2008)講演論文集, pp. 65 - 68.
- 40) 李莎, 夏恒, 正木健: マイクロ放電加工の加工特性に及ぼす加工液の影響, 2012 年度精密

工学会春季大会学術講演会論文集, pp. 135 - 136.

- 41) M. Kunieda, H. Takeuchi, U. Kusakabe: Clarifying EDM Gap Phenomena by Gas Chromatography Analysis of Bubbles, IJEM, No.16, (2011), pp. 15 - 18.
- 42) 形彫・ワイヤ放電加工マニュアル, 向山芳世 監修, 大河出版, (1989).
- 43) 岡村知暁, 稲垣憲治: 画期的機能を実現する透明な太陽電池, 電気学会誌, Vol. 124, No. 6, (2004), pp. 333 - 336.
- 44) 産総研ホームページ, 透明な太陽電池の試作に成功,
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2003/pr20030625/pr20030625.html
- 45) 松原浩司: 新しい透明導電膜としての酸化亜鉛薄膜, New Glass 75, Vol.19, No.4, (2004), pp. 10 -16.
- 46) 尾山卓司: 透明導電膜の現状と将来, 表面技術, Vol. 60, No. 10, (2009), pp. 616 - 621.
- 47) 新日鉄住金マテリアルズ株式会社 SiC 単結晶ウェハホームページ,
<http://nsmat.nssmc.com/product/sic.php>
- 48) タムラ製作所 単結晶酸化ガリウム基板ホームページ,
<http://www.tamura-ss.co.jp/release/20131122/>
- 49) 松波弘之, 木本恒暢, 中村孝, 大谷 昇 編著: 半導体 SiC 技術と応用 第 2 版, 日刊工業新聞社, (2011).
- 50) M. Kunieda, M. Tohi, Y. Ohsako: Reaction Forces Observed in Pulse Discharges of EDM, IJEM, 8, (2003), pp. 51 - 56.
- 51) 今井進也, 早川伸哉, 糸魚川文広, 中村隆: 放電加工の極間隙における気泡の合一と加工現象の関係, 電気加工学会誌, Vol. 48, No.117, (2014), pp. 22 - 27.
- 52) A. Erden, B. Kaftanoglu: Thermo-Mathematical Modeling and optimization of Energy Pulse Forms in Electric Discharge Machining, Int. J. MTDR, 1, 21, (1981), pp. 11 - 22.
- 53) F. Han, M. Kunieda: Chaos Found in Distribution of EDM Spark, Proc. of ISEM XIII, (2001), pp. 185 - 192.
- 54) J. PHILIP: The probability distribution of the distance between two random points in a box, TRITA MAT, 7, 10, (2007).
- 55) 森本賢治, 国枝正典: 極間隙の流体解析と放電点探索の連成による形彫り放電加工シミュレーション, 精密工学会誌, Vol. 74, No. 4, (2008), pp. 380 - 384.
- 56) 土屋八郎, 井上友一, 大森正己: 放電加工の加工精度に関する研究 (第 2 報)-円筒工具電極による加工精度-, 電気加工学会誌, Vol. 9, No. 18, (1975), pp. 29 - 38.
- 57) T. Masuzawa, X. Cui, N. Taniguchi: Improved Jet Flushing for EDM, Annals of the CIRP Vol. 41, 1, (1992), pp. 239 - 242.
- 58) K. Morimoto, M. Kunieda: Sinking EDM simulation by determining discharge locations based on discharge delay time, Annals of the CIRP, Vol. 58, 1, (2009), pp. 221 - 224.
- 59) 国枝正典, 増沢隆久: 放電加工における加工間隙の直接観察, 昭和 61 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, pp. 989 - 992.
- 60) 鈴木政幸, 毛利尚武, 齋藤長男, 武沢英樹: 放電加工における電極低消耗の研究 (第 1

- 報) -放電除去現象の観察-, 電気加工学会誌, Vol. 26, No. 52, (1992), pp. 47 - 55.
- 61) 山下正英, 北村朋生, 山下健, 福澤康: 形彫り放電加工の加工速度に及ぼす材料物性の影響, 電気加工学会誌, Vol. 45, No. 109, (2011), pp71 - 79.
- 62) John Emsley: The Elements, Oxford Chemistry Guides.
- 63) Y. Zhao, M. Kunieda, K. Abe: Study of EDM cutting of single crystal silicon carbide, Precision Engineering, 38, (2014), pp. 92 - 99.
- 64) S. Hayakawa, Y. Sasaki, F. Itoigawa, T. Nakamura: Relationship between occurrence of material removal and bubble expansion in electrical discharge machining, Procedia CIRP 6, ISEM 17, (2013), pp. 174 - 179.
- 65) S. Hinduja, M. Kunieda: Modelling of ECM and EDM processes. Annals of the CIRP, 62, 2, (2013), pp. 775 - 797.
- 66) DiBitonto DD, Eubank PT, Patel MR, Barrufet MA: Theoretical models of the electrical discharge machining process I. A simple cathode erosion model. J Appl. Phys. 66, 9, (1989), pp. 4095 - 4103.
- 67) Zingerman AS: Propagation of a discharge column. Soviet Phys. Tech. Phys.1, 1, (1956), pp.992 - 996.
- 68) 猪飼健夫, 藤田一郎, 橋口清人: 放電加工における放電痕形成の熱入力半径, 電気学会論文誌D, Vol. 112, No. 10, (1992), pp. 943 - 949.
- 69) 齋藤長男: 放電加工のしくみと 100%活用法, 技術評論社, (1979).
- 70) 中原勝儼編, 分光測定入門, 学会出版センター, (1987), 66.
- 71) NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov>
- 72) 元木幹雄, 上出諭吉: 低消耗放電加工における陽光柱の電界強度と電流密度, 電気学会論文誌. A, 100, 5, (1980), pp.271 - 276.
- 73) 橋口清人: 放電加工における電極へのエネルギー配分, 電気学会論文誌. A, 105, 8, (1985), pp.451 - 457.
- 74) W. Natsu, M. Shimoyamada, M. Kunieda: Study on Expansion Process of EDM Arc Plasma. JSME Series C, 41, 2, (2007), pp.600 - 605.
- 75) 宇野義幸, 遠藤修, 中島利勝: 単発放電痕の生成機構に関する基礎的研究, 電気加工学会誌, Vol. 25, No. 49, (1991), pp. 9 - 22.
- 76) M. Mitchner, C.H.kruger, Jr, Partially Ionized Gases, John Wiley and Sons, (1973) 12.
- 77) W. Natsu, S. Ojima, T. Kobayashi, M. Kunieda: Temperature Distribution Measurement in EDM Arc Plasma Using Spectroscopy, JSME series C, 47, 1, (2003), pp. 384 - 390.
- 78) 虞戦波, 国枝正典: 水中放電加工の除去速度に関する研究, 電気加工学会誌, Vol. 33, No. 72, (1999), pp.28 - 36.

謝辞

本論文は、東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻国枝研究室で研究した成果をまとめたものです。執筆にあたり多くの方々に多大なるご指導とご協力を頂きました。ここに、私を支えていただいた方々に感謝の意を表します。

本研究の遂行や論文作成にあたり、多大な御指導、御鞭撻を賜りました国枝 正典 教授に深く感謝の意を表します。

本論文の審査にあたり副査をお引き受け頂いた、東京大学教授 横井 秀俊 先生、教授 金範峻 先生、准教授 山本 晃生 先生、名古屋工業大学准教授 早川 伸哉 先生に深く感謝の意を表します。

本研究遂行にあたり、多大なるご協力を頂きました濱田重工株式会社 阿部 耕三 氏に深く感謝の意を表します。

特殊電気加工技研株式会社 福澤 康 先生、長岡技術科学大学助教 山下 健 先生には、博士後期課程進学以前から現在にわたり、研究に関わる様々な面でご指導を賜りました。ここに心より感謝し厚くお礼申し上げます。

豊田工業大学名誉教授 齋藤 長男 先生、東京大学名誉教授 増沢 隆久 先生、東京農工大学教授 夏 恒 先生、工学院大学教授 武沢 英樹 先生、岡山大学教授 岡田 晃 先生、長岡技術科学大学教授 伊藤 義郎 先生ならびに多くの先生方には、精密工学会、電気加工学会、国際会議等の場で多大な御助力、御指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

株式会社ソディック殿には、加工機や実験装置など実験遂行に必要な設備に関しまして多大なるご協力を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。また、株式会社ソディック 金子 雄二 氏、原田 武則 氏、山田 邦治 氏、安達 章浩 氏ならびに社員の方々には有益なご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

株式会社放電精密加工研究所殿には、本研究遂行に必要な実験装置に関しまして多大なるご支援を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

株式会社タムラ製作所殿には、本研究遂行に必要な資材に関しまして多大なるご支援を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

東京大学准教授 三村 秀和 先生には、合同研究会の場などにおいて多くのご助言を頂きました。心より感謝し厚く御礼申し上げます。

東京大学技術専門職員 齋 治男 氏には、装置の製作や資材発注等において多大なるご協力を頂きました。心より感謝し厚く御礼申し上げます。

国枝教授の秘書として、研究室の生活をサポートして下さった田辺 寿美子 氏に心より感謝し厚く御礼申し上げます。

金沢大学助教 小谷野 智広 先生には、国枝研究室に在学中から丁寧なご指導を頂き、大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

国枝研究室の趙 永華 氏，川中 拓磨 氏には、3年間にわたり研究生活を共にし、日頃から大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

国枝・三村研究室の後輩として、日頃から大変お世話になりました Norliana Binti Motto Abbas 氏，韓 偉 氏，森 あづ実 氏，藤枝 隆一郎 氏，島崎 奉文 氏，三好 晃太郎 氏，武井 良憲 氏，斎藤 貴宏 氏，久米 健大 氏，本山 央人 氏，江川 悟 氏，竹尾 陽子 氏，東隆裕 氏に心より厚くお礼申し上げます。

なお、本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金の援助を受けて行われました。ここに謝意を表します。

- 科学研究費補助金 挑戦的萌芽研究 透明体電極を用いた可視化による電気加工現象の解明 No. 25630020
- 科学研究費補助金 特別研究員奨励費 透明体電極を用いた放電加工現象の解明 No. 269131

最後に、いつも心配をしてくれ、暖かく見守って下さった両親に深く感謝し、厚く御礼申し上げます。

平成 27 年 2 月
北村 朋生

本研究に関して発表した論文リスト

学術論文

- 1) T. Kitamura, M. Kunieda, Clarification of EDM gap phenomena using transparent electrodes, Annals of the CIRP, Vol. 63, Issue 1, pp. 213 - 216. 2014. (3 章)
- 2) T. Kitamura, M. Kunieda, K. Abe, Observation of relationship between bubbles and discharge locations in EDM using transparent electrodes, Precision Engineering, DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.09.009, (2014). (2 章)

国際会議論文

- 1) T. Kitamura, M. Kunieda, K. Abe, High-Speed Imaging of EDM Gap Phenomena Using Transparent Electrodes, 17th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), Leuven, Belgium, April 2013. (2 章)
- 2) T. Kitamura, M. Kunieda, K. Abe, Observation of Arc Plasma in EDM Using Transparent Electrodes, 5th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2013), Taipei, Taiwan, November 2013. (3 章)
- 3) T. Kitamura, M. Kunieda, K. Abe, Comparison of Gap Phenomena between EDM in Oil and Deionized Water Using Transparent Electrodes, 15th International Conference on Precision Engineering (ICPE 2014), Kanazawa, Japan, July 2014. (4 章)

国内講演論文

- 1) 北村朋生, 趙永華, 国枝正典, 阿部耕三, 単結晶 SiC の放電加工の基礎研究, 第 205 回電気加工研究会, 東京, 2012 年 6 月 (2 章)
- 2) 北村朋生, 国枝正典, 阿部耕三, 透明体電極を用いた放電加工現象の観察, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会, E44, 福岡, 2012 年 9 月 (2 章)
- 3) 北村朋生, 国枝正典, 阿部耕三, 透明体電極を用いた放電加工間隙の高速度ビデオ観察, 電気加工学会全国大会(2012), 10, 福岡, 2012 年 12 月 (3 章)
- 4) 北村朋生, 国枝正典, 阿部耕三, 透明体電極を用いた放電加工アークプラズマの観察, 2013 年度精密工学会春季大会学術講演会, H17, 東京, 2013 年 3 月 (3 章)
- 5) 北村朋生, 国枝正典, 阿部耕三, 透明体電極を用いた水中と油中における放電加工現象の比較, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会, Q47, 大阪, 2013 年 9 月 (4 章)
- 6) 北村朋生, 国枝正典, 阿部耕三, 透明体電極を用いた単発放電現象の観察, 電気加工学会全国大会 (2013), A05, 愛知, 2013 年 12 月 (3 章)
- 7) 北村朋生, 国枝正典, 透明体電極を用いた放電加工アークプラズマの温度測定, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会, P02, 東京, 2014 年 3 月 (3 章)
- 8) 北村朋生, 国枝正典, 阿部耕三, 水と油加工液を用いた放電加工間隙の観察, 2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会, E04, 鳥取, 2014 年 9 月 (4 章)
- 9) 北村朋生, 国枝正典, 阿部耕三, 透明体電極を用いた油と水が放電加工の冷却特性に及ぼす影響の観察, 電気加工学会全国大会(2014), 新潟, (2014 年 12 月) (4 章)

