

形彫り放電加工における絶縁油が  
加工特性に与える影響に関する研究

岩手大学大学院工学研究科  
機械・社会環境システム工学専攻

岩田 知樹

# 目 次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.1.1 日本の製造業と金型.....	1
1.1.2 形彫り放電加工の必要性.....	4
1.1.3 形彫り放電加工の歴史.....	4
1.2 形彫り放電加工の原理と主な特性.....	5
1.2.1 形彫り放電加工の原理.....	5
1.2.2 形彫り放電加工の主な特性.....	9
1.3 本研究の目的.....	12
1.4 本論文の構成.....	16
第1章 参考文献.....	17
第2章 絶縁油による加工速度の違い.....	19
2.1 はじめに.....	19
2.2 絶縁油による加工速度の違い.....	21
2.2.1 加工速度の定義.....	21
2.2.2 加工速度の測定方法.....	22
2.2.3 加工速度の測定条件.....	24
2.2.4 加工速度の測定再現性.....	26
2.2.5 加工速度の測定結果.....	27

2.3	絶縁油による表面性状の違い	30
2.3.1	表面輪郭の測定方法と表面粗さの定義	30
2.3.2	表面粗さの測定結果	31
2.3.3	負荷曲線とコア部中空体積	36
2.4	第2章のまとめ	41
	第2章 参考文献	42
	第3章 絶縁油による除去効率の違い	43
3.1	はじめに	43
3.2	総溶融量と除去効率	45
3.2.1	総溶融量と除去効率の推定方法	45
3.2.2	再凝固層平均厚さ	46
3.2.3	除去効率	49
3.2.4	1放電パルス当りの溶融体積	53
3.3	第3章のまとめ	55
	第3章 参考文献	56
	第4章 非定常熱伝導解析による	
	エネルギー配分率と実効熱入力半径の推定	57
4.1	はじめに	57
4.2	エネルギー配分率	59
4.2.1	これまでの研究	59

4.2.2	絶縁油の熱拡散率 .....	60
4.3	熱入力半径 .....	61
4.4	熱入力の分布形状 .....	63
4.5	工作物の熱物性値 .....	65
4.5.1	工作物の熱物性値 .....	65
4.5.2	潜熱の取り扱い .....	68
4.6	解析モデルと支配方程式 .....	72
4.6.1	解析モデル .....	72
4.6.2	支配方程式 .....	73
4.6.3	解析条件 .....	76
4.7	解析結果 .....	77
4.8	実験結果の整理 .....	80
4.8.1	1パルス当りの工作物溶融体積 .....	80
4.8.2	工作物表面での溶融半径 .....	80
4.9	エネルギー配分率と実効熱入力半径の推定 .....	85
4.10	第4章のまとめ .....	90
	第4章 参考文献 .....	91
	第5章 加工速度に影響する新しいパラメータの検討 .....	93
5.1	はじめに .....	93
5.2	これまでの研究 .....	93
5.3	気泡拡大を抑制する流体力学的パラメータ .....	95

5.3.1	気泡拡大と気泡周囲での絶縁油の流れ	95
5.3.2	気泡拡大を抑制するパラメータ	97
5.3.3	圧力勾配の影響	99
5.4	流動コンダクタンスの算出	107
5.4.1	絶縁油の粘度	107
5.4.2	放電ギャップとサーボ基準電圧	111
5.4.3	加工中の放電ギャップの測定	113
5.4.4	流動コンダクタンスの算出	116
5.5	流動コンダクタンスと加工速度	117
5.5.1	流動コンダクタンスと加工速度	117
5.5.2	放電ギャップ・粘度と加工速度	122
5.5.3	修士論文における加工速度差の原因	124
5.6	第5章のまとめ	126
	第5章 参考文献	127
	第6章 結論	128
6.1	各章で得られた結論の総括	128
6.2	本研究の意義	133
	謝辞	135

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 日本の製造業と金型

日本社会が経験してきた 20 世紀の後半を振り返ってみると、この時代は人口増加、モノ不足（需要旺盛）、規格品大量生産、年功序列・終身雇用の時代であり、経済が年々拡大する右肩上がりの時代であった（図 1.1 [1]）。製造業においても自動車やエレクトロニクスを中心として、新製品開発と大量生産により目覚ましい進歩を遂げてきた。その後時代は 21 世紀に入り、情報通信・資本移動・サプライチェーンの地球規模での展開が進んでいるが、一方では地球環境の保護が大きな課題となっている。製品の製造過程では様々な生産設備が使用されているが、品質（Q）・価格（C）・数量や納期（D）に対する顧客要求への対応と環境保護を両立させていくためには、最小のインプットで生産性の高いアウトプットを得られる生産設備を実現し、より長く利用可能なものにしていく必要がある[2]。

生産設備にはさまざまな種類があるが金型はその代表的なものであり、上述の自動車やエレクトロニクス製品以外にも、電子部品・事務用品・家庭雑貨・建築資材など、様々な製品の生産に使用されている。金型は、金型自身の形状を被加工材に転写する役割を持っており、金型形状の出来栄が金型で作られる製品の品質を左右することになる。そのような重要なツールの金型であるが、金型自体も別の工作機械によって加工されて生みだされたものである。つまり品質の高い製品を生産するためには、精度の高い金型加工が必須であり、高精

度金型加工は日本のものづくりを支える基盤技術といえる。

我が国における金型事業所数の推移と、その中に占める従業員 20 名以下の事業所比率を図 1.2 に示す[3]。図 1.2 を見ると、事業所数は年を追うごとに漸減してきているが、従業員 20 名以下の事業所比率は 90%前後の値から大きくは低下していないことがわかる。この少人数経営が金型事業の特徴の一つであるといえる。経営規模が小さいという事はそれだけ投資力も小さいと考えられ、この点からも金型生産設備を能力の高い状態で長い期間使い続けることが求められる。

一方、人材育成という観点から考えると、特に少人数経営の現場においては新規に採用した人材にできるだけ早く生産戦力になってもらう必要がある。そのためにこれまでは、実際の業務を通して現場の先輩が後輩の技能指導を OJT (On the Job Training) という形で行ってきた。しかしながら、競合会社の技術向上や市場からの Q・C・D 要求の高難度化を踏まえた長期的な視点で考えた場合、現在の業務をこなすだけでなく、予測される将来の環境下でも競争力を発揮できる人材となっていなければならない。そのためには、金型製作現場での体験や経験を蓄積するとともに、金型材料・熱処理・加工法などに関する知識も蓄え、現場で起きている現象のメカニズムが頭の中でモデル化されている必要がある。そのように現象が理解できていれば、予期せぬ事態であるとか高難易度の顧客要求が生じても対応を取っていくことが可能となる。

これからの金型事業の競争力維持を考えた場合、金型加工者の技能レベルを上げて行くことが重要であるが、畑村[4]は、加工者のレベルを上げて行くためには、現場で経験を積むことにより体で感覚を覚えていくことのほかに、起きている加工現象の因果関係を科学的に理解できている必要があると述べている。

つまり、競争力維持のためには、現場での経験・生産設備能力の有効活用・加工現象の理論的理解の 3 つが重要になってくる。

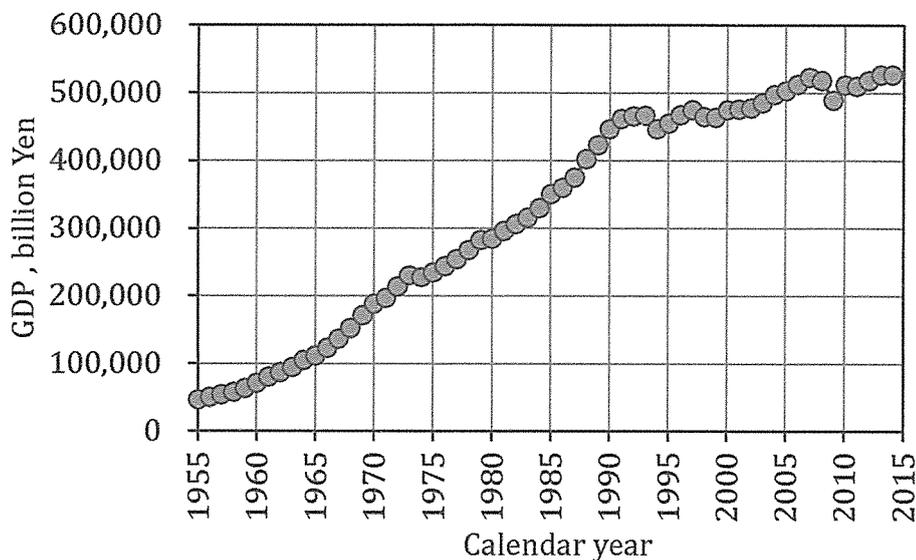


Fig. 1.1 Gross domestic product at constant price [1]

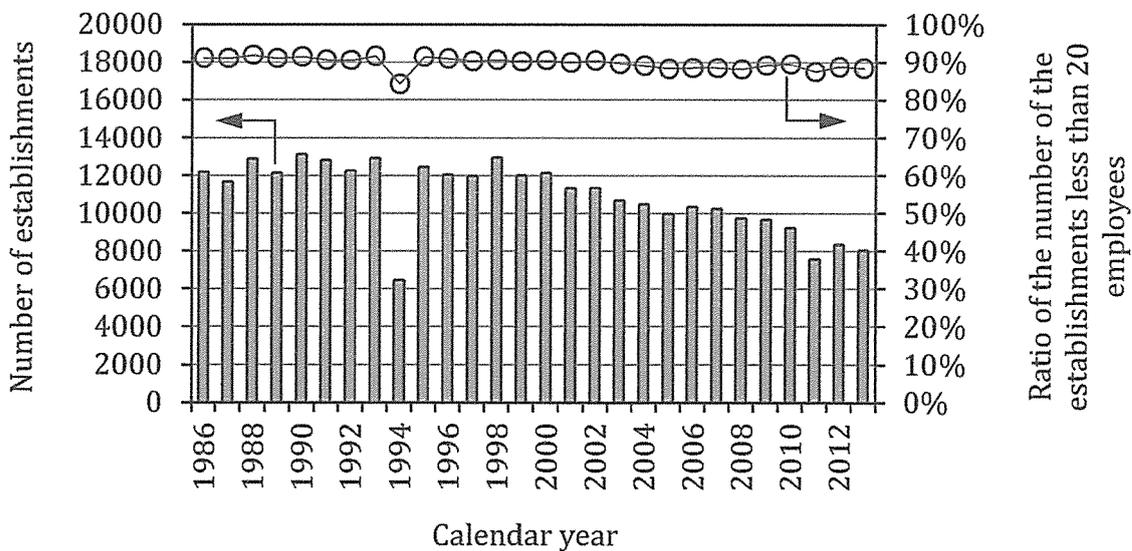


Fig. 1.2 Number of domestic die and mold manufacturing establishments and the ratio of the number of the establishments less than 20 employees [3]

### 1.1.2 形彫り放電加工の必要性

環境保護に関する社会的要請を受け、省エネ性能や耐久性の改善への取り組みは製造業にとって必須となっている。この要請にこたえるために自動車業界では軽量化のために使用部品のプラスチック化[5]を進めてきている。また、エレクトロニクス業界では低価格化への市場要求にこたえるために、使用部品のプラスチック化[6,7]が進められている。プラスチック部品の生産には主として射出成形金型が用いられ、この金型はプラスチックを流し込むための凹形状を有している。円形の凹みであればエンドミルを使用した切削加工で加工できるが、多角形の凹み形状を作ることは切削加工では困難である。このような角形状を作る場合は形彫り放電加工が適している。形彫り放電加工は工具電極と工作物の間に放電を生じさせ、工作物を熔融・除去する加工法であり、凸形の工具電極の形状が工作物側へ凹形状として転写される。工具電極に角形状を持たせておけば、その形が凹み形状として工作物へ転写形成されることになる。また、放電加工は熱的な加工法であるため工作物の硬さに制約はなく、導電性の材質であればどのような硬いものでも加工可能である。但し、形彫り放電加工では工具電極が必要であり、必要な形状の工具電極を作成しなければならない。

プラスチック部品に対するニーズは今後ますます増えると考えられ、その生産に使用される射出成形金型には、より高品質・低価格・短納期で製作されることが求められる。このような金型製作を実現していく上で、形彫り放電加工の能力改善は重要な要素の1つとなる。

### 1.1.3 形彫り放電加工の歴史

上述のように、形彫り放電加工は放電によって生じる熱を利用した加工法である。放電によるエロージョンを最初に観察したのは Priestly (1768 年) であり[8]、放電により生じる熱の工業的利用のルーツは米国における電気ペンで、1878 年に米国で特許となっている。その後 1943 年ごろにソ連のラザレンコ夫妻が放電を金属加工に応用することを提唱したのが放電加工の始まりであり、1944 年には金属の放電加工に関する論文を発表し、この功績により 1946 年にスターリン賞を受賞している。日本では 1948 年から東京大学の鳳博士が孔あけの研究を始めたのが放電加工研究の草分けであり、1949 年にはうまく加工できるようになり放電加工法と命名された[8]。加工機械は 1953 年～1954 年に始まり、当時のメーカーとしては池貝鉄工—ジャパックス、三菱造船—三菱電機、小池酸素工業、富士放電などがあつた。1960 年代後半になってトランジスタパ

ルス電源，電極低消耗加工回路，適応制御回路が開発され本格的に金型加工への適用が始まった[9]．その後 1970 年代に入って NC 制御が導入され[9]，1980 年代以降は CAD/CAM との連携，ロボットを利用したシステム化などの開発を経て現在に至っている[9]．

## 1.2 形彫り放電加工の原理と主な特性

### 1.2.1 形彫り放電加工の原理

形彫り放電加工の概念図を図 1.3 に示す．形彫り放電加工は，工具電極と工作物の間に生じさせたプラズマの熱により，工作物を溶融・除去する加工法である[10]．プラズマとは，気体となった物質が電子と正イオンに電離した状態を指すことばであり，語源はギリシア語で母体・基盤を意味するものである．電離気体に対して名付けたのはアメリカ GE 社の研究者で，ノーベル化学賞を受賞した Langmuir である[11]．大気圧中で熱平衡状態になったプラズマ温度は数千度に達する[12]．

形彫り放電加工では油などの絶縁性の液体中で，工具電極と工作物の間に毎秒数千～数万回の頻度でパルス状に放電を発生させ，放電により生じるプラズマの熱的作用により工作物が微量ずつ溶融・除去されることを利用した加工法である．形彫り放電加工は工具電極を数十  $\mu\text{m}$  程度の間隔で対向させ数十～数百  $\mu\text{s}$  という短い期間だけ放電させる加工法であり，加工現象を直接観察することは困難であるが，高速度カメラを使用して加工点周辺を巨視的に捉えた結果を図 1.4 に示す[13]．これは直径 0.5mm の銅製工具電極と炭素鋼 (S45C) を対向させて放電持続時間 250 $\mu\text{s}$  のパルスを印加して撮影したものである．放電が開始する直前を 0 $\mu\text{s}$  としている．この図から絶縁破壊の瞬間の様子を確認することはできないが，放電開始後数十  $\mu\text{s}$  で放電点周辺が絶縁油の気化による気泡で覆われ，気泡の内部にプラズマ発光が存在していることがわかる．この加工過程は，絶縁破壊・工作物の溶融・溶融部の除去・絶縁回復という 4 つのプロセスに分解できる．この 4 つのプロセスを図解したものを図 1.5 に示す．

次にこれらの 4 つのプロセスに対する従来の研究について述べる．まず絶縁破壊についてであるが，絶縁性液体の絶縁破壊についてこれまでに多くの研究がなされてきたが，液体の絶縁破壊機構はまだ完全には解明されていない．多くの研究によりいろいろな理論が提案されているが，電子論的破壊と気泡的破

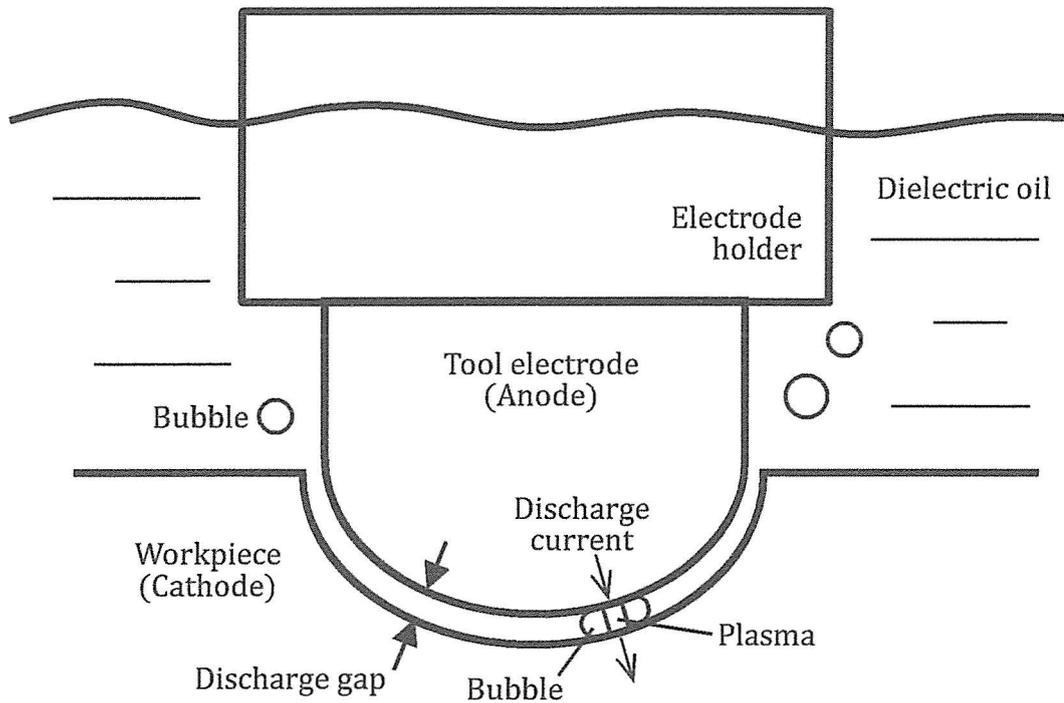


Fig. 1.3 Schematic diagram of electrical discharge machining

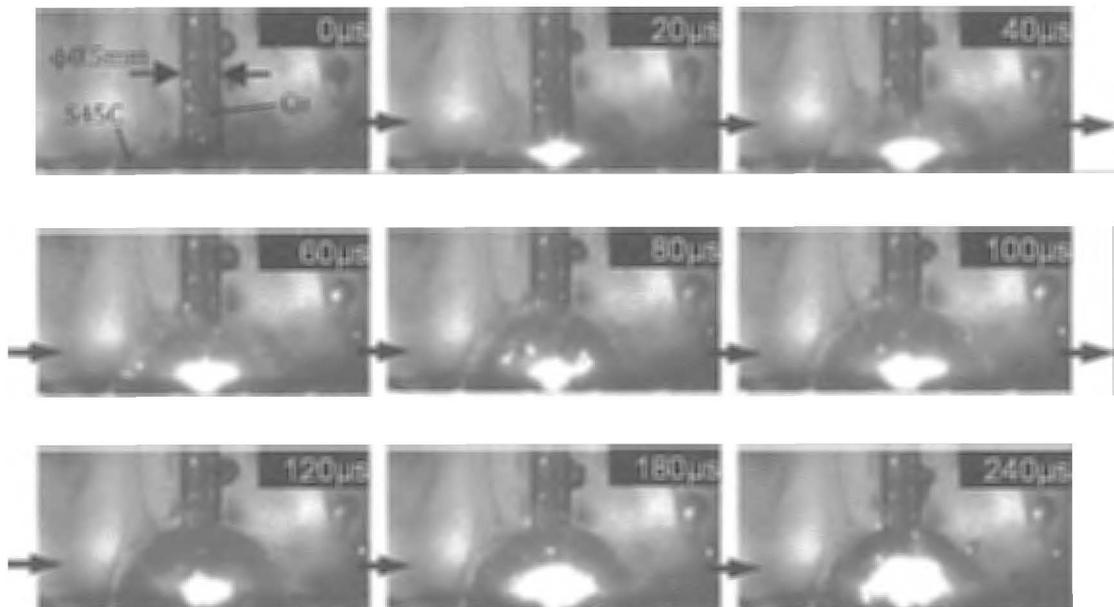


Fig. 1.4 Observation around the discharge point by high speed video camera [13]

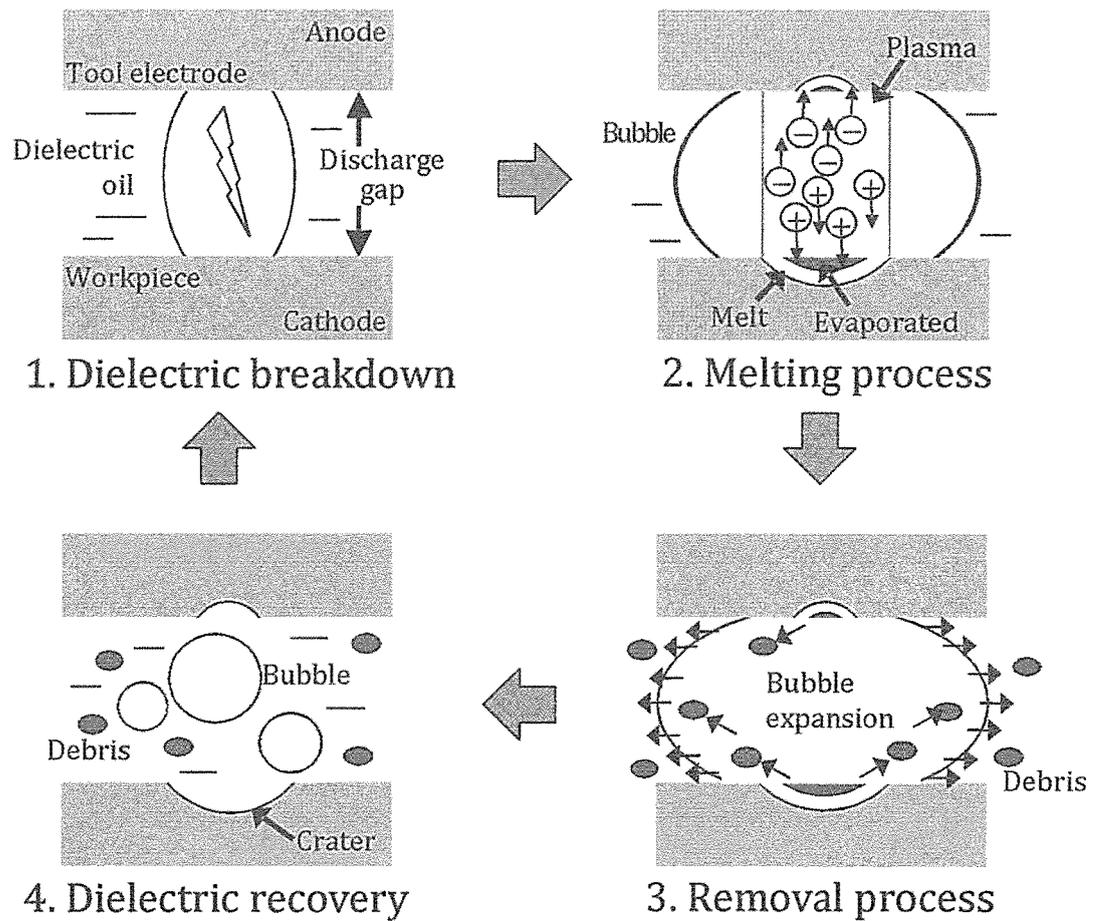


Fig. 1.5 Basic process of electrical discharge machining

壊に大別される[14]. 電子論的破壊とは、電界からエネルギーをもらった電子によって液体分子が解離され、液体が部分的に導電性を帯びることを意味している[14]. もう一方の気泡的破壊理論は、液体中の微小気泡内で絶縁破壊が起き、それに伴って気泡が成長し液体全体の破壊が導かれるというものである[14].

工作物の溶融はプラズマからの熱流束により工作物が加熱され、加熱された領域が融点を越えることで起きる. 1Vの電位差で加速された電子は1eVの運動エネルギーを持つことになる. 電子の電荷は約 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ なので、1eVは約 $1.6 \times 10^{-19} \text{J}$ のエネルギーに相当する. これをボルツマン定数 ( $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ) で温度に換算すると $1.16 \times 10^4 \text{K}$ に達する. 気圧が低い場合は、電子とイオンとの衝突頻度が低いので電子は高温でもイオン温度は室温に留まり、非熱平衡プラズマ (或いは低温プラズマ) と呼ばれる状態であるが、大気圧の環境になると電子はイオンと頻繁に衝突するようになり、電子温度とイオン温度が等しい状態になりプラズマ温度は数千度になる[12]. 生島ら[15]は、形彫り放電加工において分光分析によりプラズマ温度を測定し、直径2mmの銅電極同士を対向させて電流40A、放電持続時間300 $\mu\text{s}$ で放電させた場合、プラズマ温度は6000~7000Kになることを報告している. このようなプラズマエネルギーのある割合が、工作物表面の微小領域に熱流束として与えられ、工作物が加熱され溶融する. また、このプラズマの直径は放電持続時間の経過とともに拡大することが知られている[16].

溶融部の除去について、Singhら[17]は放電持続時間が短い場合は静電力が溶融部除去の主な機構であるとし、HOCKENBERRYら[18]は放電終了直後に絶縁液が溶融部に向かって衝突していくことで溶融部が除去されると報告している. またZolotykh[19]は、気泡直下の圧力が高い環境下で過熱された溶融領域が、気泡圧力の低下に伴い沸騰することで除去されると報告しており、Eubankら[20]も同様に過熱が工作物除去の主要な機構であると報告している.

絶縁回復プロセスは工作物の溶融・除去には関係しないように思えるが、絶縁が回復しない状態の時に次のパルス電圧が印加されると、直前のパルスで放電が起こった付近で再び放電が生じてしまい、放電点が偏在することになり均一な加工面が得られなくなる. 早川ら[21]は、銅電極同士を使用して単発放電した場合を非定常解析し、プラズマが消沈するのに要する時間が数 $\mu\text{s}$ であることを報告している.

### 1.2.2 形彫り放電加工の主な特性

形彫り放電加工の最も重要な特性として、加工速度・表面粗さ・工具電極消耗率の3つがある。

加工速度は工作物が単位時間当りに除去される量である。形彫り放電加工においては1分間当たりの除去質量または1分間当たりの除去体積で表わされる。

表面粗さは加工終了後の工作物表面の粗さである。形彫り放電加工ではパルス状の放電を繰り返し行うことで工作物を欲しい形状に加工していくが、1つひとつの放電パルスは小さなクレータ状に工作物を除去していく。加工終了時にはこのクレータ状の放電痕が加工面全域に形成され、クレータの凹凸形状が表面粗さとして計測される。

工具電極消耗率は単位時間当りに工具電極が消耗した体積と単位時間当りに工作物から除去された体積の比で表される。工具電極消耗率が大きいと、工作物が欲しい形状に仕上がらないことになる。

これらの特性に影響を与える加工条件を電氣的な条件と非電氣的な条件に分けて整理した一覧を図 1.6 に示す。代表的な電氣的な条件である放電電圧と放電電流の波形を図 1.7 に示す。図 1.7 からわかるように、放電電流は矩形パルスとして印加されるのでその波形は放電電流値と放電持続時間で特徴づけられる。放電電流波形と3つの特性との関係[10]を表 1.1 に示す。表 1.1 において○は相対的に良好な特性（加工速度：大，表面粗さ：小，工具電極消耗率：小）が得られることを、×はその逆を表す。表 1.1 から3つの特性すべてを良好にする矩形パルスは存在しないことがわかる。

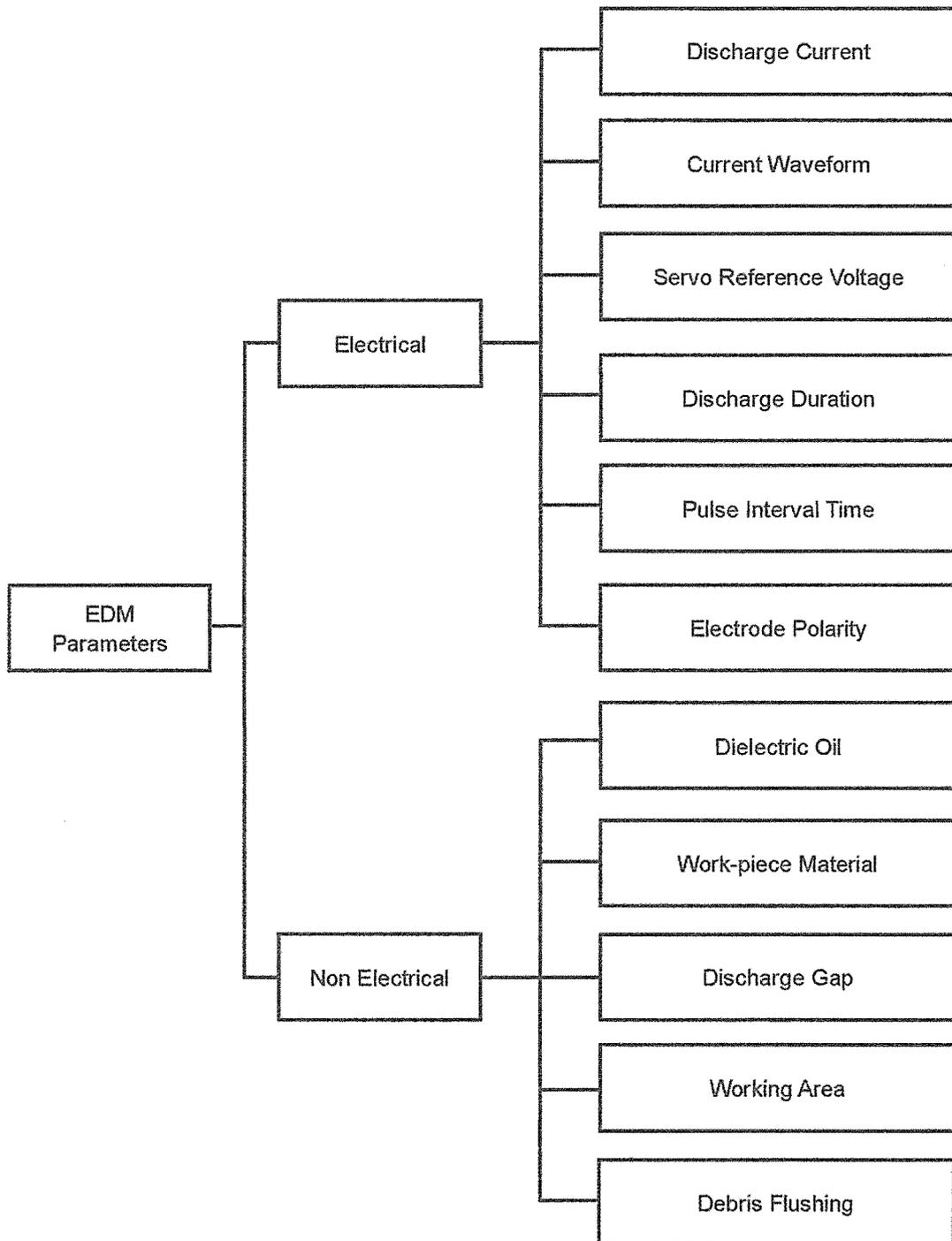


Fig. 1.6 Machining parameters of electrical discharge machining

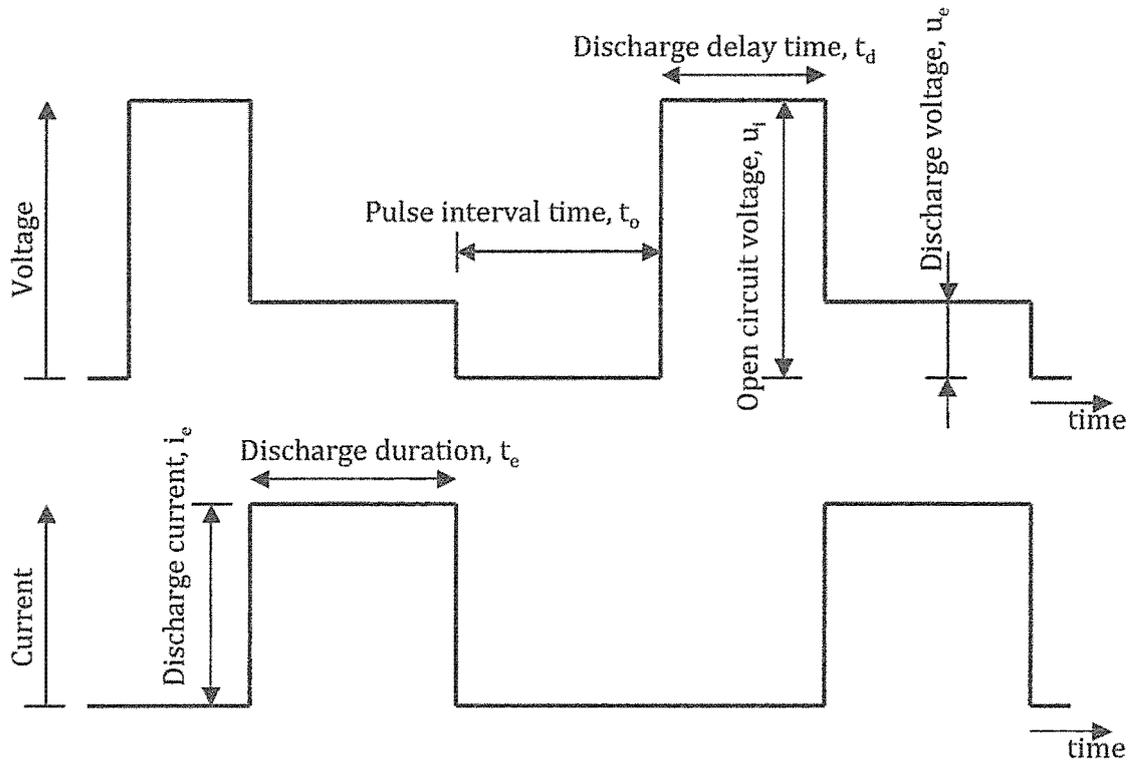


Fig. 1.7 Waveform of discharge voltage and discharge current

Table 1.1 Relation between discharge current waveform and machining characteristics

	Current waveform		Machining characteristics		
	Discharge current	Discharge duration	Material removal rate	Surface roughness	Electrode wear
a	Lower	Shorter	×	○	○
b	Lower	Longer	×	○	○
c	Higher	Shorter	○	○	×
d	Higher	Longer	○	×	○

( ○:better, ×:worse )

加工速度を大きくする手段としては、入力エネルギーを大きくすることと放電頻度を高くすることが考えられる。表 1.1-c と表 1.1-d はどちらも加工速度が大きい条件であるが、前者は放電頻度が高いことで、後者は入力エネルギーが大きいことで加工速度が大きくなっている。表 1.1-b の条件は同表-c の条件と入力エネルギーは同等であるが、放電頻度を高くできないので加工速度が大きくなる。表面粗さを小さくするためには 1 回当りの放電で除去される量を小さくすればよい。表 1.1-a,b,c はそのような条件であり、いずれの条件も放電 1 回当りの除去量は小さい。工具電極消耗率については、工具電極表面へ絶縁油から分解されたカーボンが付着することで工具電極が消耗から保護される[22,23]と言われている。銅工具電極を用いた場合、絶縁破壊直後は銅蒸気密度が高くカーボンが工具電極表面に接近できないため、放電持続時間が短い条件では工具電極消耗が大きくなる[23]。表 1.1-c で工具電極消耗率が大きいのはこの理由による。表 1.1-a ではそもそも工具電極へ入力されるエネルギーが小さく、工具電極消耗率も大きくなる。表 1.1-c は加工速度が大きいという特性と表面粗さが小さいという特性を実現しているが、電極消耗率を考慮する必要のないワイヤー放電加工ではこの特性を積極的に活用し、例えば放電電流数百 A で放電持続時間  $1\mu\text{s}$  というような条件で加工を行っている[10]。

実際の形彫り放電加工では、例えば荒加工・中仕上げ加工・仕上げ加工のように段階を踏んで加工を行っている。荒加工では加工速度重視の加工条件とし、仕上げ加工では表面粗さを重視した加工条件の設定としている。要求される加工品質レベルによっては加工段階を増やして、より多いステップを踏んで加工を行う場合もある。

### 1.3 本研究の目的

形彫り放電加工の加工特性に影響する加工条件を図 1.6 に示したが、これらの条件の加工特性に対する作用についてより細かく分析し、新たな工夫を加えたりより良い特性を得るための加工条件の組み合わせを見出したりすることで、より品質が高く、原価は低く、生産速度が速い加工が実現できれば、製造業への貢献も大きくしていくことができると考えられる。筆者[24]は修士課程において、加工条件の中の絶縁油を取り上げて、絶縁油が加工速度に与える影響について研究を行い、もともとは同じ品番の絶縁油でも使用期間の長短（新品・2年

使用・5年使用)によって,加工速度が異なることを明らかにした. その結果[24]を図 1.8 に示す. 放電電流 10A の場合, 5年間使用した絶縁油は未使用のものに比べ加工速度が 1.13 倍になっている. これらの3つの絶縁油についていくつかの物性値と絶縁油中の金属イオン濃度を分析した結果[24]を表 1.2 に示したが, 修士論文においては, 表 1.2 の分析結果と図 1.8 の加工速度差との関係について明確にすることが出来なかった.

絶縁油を研究対象として取り上げた理由は, 絶縁油に対する工夫で加工特性を改善できるならば, 1台数千万円もするような高額な加工機械を買い替えることなく, 多少の費用だけでより高品質・低原価・短納期の形彫り放電加工が実現できる可能性があると考えたからである. 電氣的な条件を大幅に変更しようとした場合や制御方式を変えようとした場合, 加工機械の大掛かりな改造あるいは買い替えが必要となり, 生産現場での対応は不可能であり多額の投資が発生することになる.

また, 工学的な視点で見た場合, 加工特性に対し絶縁油が作用するメカニズムは完全には明らかになっておらず, このメカニズムを解明していくことは, 形彫り放電加工技術の今後の発展に対し大いに貢献すると考えたからであり, そのメカニズムを明らかにすることにより, 生産現場で働く金型加工者の加工現象に対する理解を深め, より競争力の高い加工を可能にしていくと考えたからである.

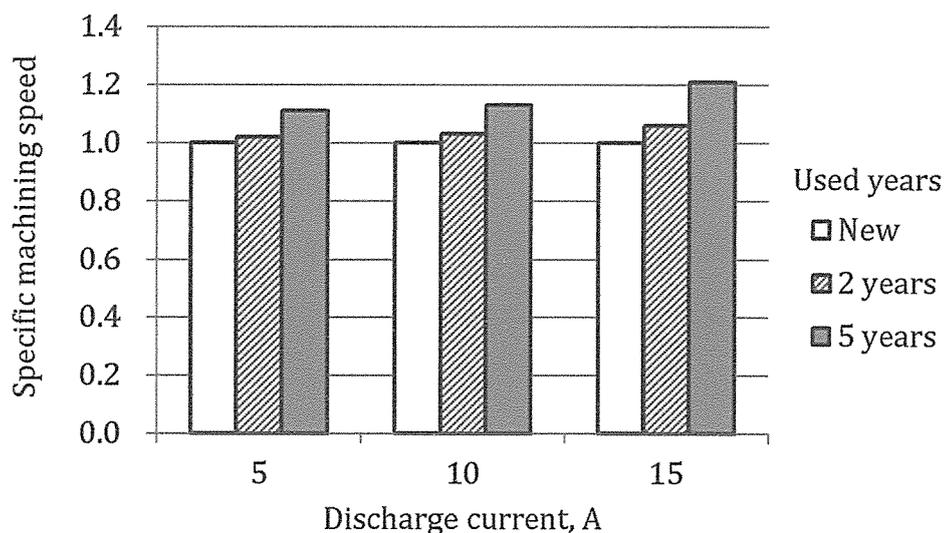


Fig. 1.8 Increase of specific machining speed due to long-term use of dielectric oil [24]

Table 1.2 Analysis of dielectric oils [24]

		Used years of the oil			
		New	2 years	5 years	
Kinematic viscosity (313K)	mm <sup>2</sup> /s	1.88	2.06	2.19	
Acid value	mgKOH/g	0.01	0.03	0.01	
Density (288K)	g/cm <sup>3</sup>	0.763	0.768	0.769	
Volume resistivity	TΩm	53	10	4	
Surface tension	mN/m	25.3	25.6	25.6	
Quantitative analysis	Al	ppm	< 1	< 1	< 1
	Ba	ppm	< 1	< 1	< 1
	Ca	ppm	< 1	< 1	< 1
	Cr	ppm	< 1	< 1	< 1
	Cu	ppm	< 1	< 1	< 1
	Fe	ppm	< 1	< 1	< 1
	Mg	ppm	< 1	< 1	< 1
	Mo	ppm	< 1	< 1	< 1
	Na	ppm	< 5	< 5	< 5
	Ni	ppm	< 1	< 1	< 1
	P	ppm	< 5	< 5	< 5
	Pb	ppm	< 5	< 5	< 5
	Sn	ppm	< 1	< 1	< 1
	Zn	ppm	< 1	< 1	< 1
SiO <sub>2</sub>	ppm	< 1	< 1	< 1	

一般に絶縁油の役割としては、極間の絶縁、工作物や工具電極の冷却、除去された加工層の極間からの排出、含有しているカーボンによる工具電極の消耗低減などがあると言われている。通常、形彫り放電加工では絶縁油を使用し工具電極の消耗を抑制しているが、そのほかにもイオン交換水、粉末を添加した絶縁液、気体を利用したものなどがあり、これらを使用したときの加工特性の研究が行われている[25]。虞ら[26]は、陽極・陰極ともに銅を使用し、イオン交換水を使用した場合と絶縁油を使用した場合の放電 1 回当たりの除去体積を比較して、陽極はイオン交換水を使用したほうが大きく、陰極は絶縁油を使用したほうが大きいと報告している。毛利ら[27]は、絶縁液に粉末を混入させる研究を行っており、表面粗さや加工速度が改善されることを報告している。国枝ら[28]は、気中での放電加工の特長について、工具電極消耗率が小さい、加工面のダメージが少ない、環境汚染が少ないことなどを報告している。絶縁油によって加工速度が変化する現象に対しては、例えば花岡ら[29]の報告があるが、現象発生のメカニズムはまだ明らかにされていない。

本論文では、筆者[24]の修士論文での研究を更に進め、加工メカニズムの解明とより競争力の高い形彫り放電加工の実現を目指し、工作物の除去に対する絶縁油の作用について、主に溶融量・除去効率・加工速度という視点から研究を行った。研究に当たっては、小型電子部品用射出成形金型の荒加工用として用いられている放電電流 10A、放電持続時間 250 $\mu$ s という条件を主に使用した。

## 1.4 本論文の構成

本論文は以下の6章から構成される。

第1章「序論」では、本論文の背景、形彫り放電加工の原理と主な特性、そして本論文の目的について述べた。

第2章「絶縁油による加工速度の違い」では、市販されている形彫り放電加工用絶縁油の中から9種類を準備し、加工速度を測定した結果について述べる。また、表面性状の分析結果と、加工速度と表面性状の関係についても述べる。

第3章「絶縁油による除去効率の違い」では、第2章で得られた絶縁油によって加工速度が異なる現象の原因を探るために、代表的な絶縁油を使用したときの工作物溶融量について調べた結果と、溶融部から除去された割合（除去効率）について調べた結果を述べる。

第4章「非定常熱伝導解析によるエネルギー配分率と実効熱入力半径の推定」では、第3章で示した工作物溶融量が違うことの原因を調べるために非定常熱伝導解析を行った。その結果得られたエネルギー配分率と実効熱入力半径について述べる。

第5章「加工速度に影響する新しいパラメータの検討」では、工作物と工具電極間の絶縁油に対する流体力学的考察を行い、流動コンダクタンスというパラメータを導出した。そしてこのパラメータと加工速度との関係について調べた結果を述べる。

第6章「結論」では、第2章から第5章までの実験結果および考察をまとめ、本論文の工学的意義と工業的な意義について述べる。

## 第1章 参考文献

- [1] 内閣府, 国民経済計算,  
[http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data\\_list/sokuhou/files/2001/qe011/gdemenuja.html](http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data_list/sokuhou/files/2001/qe011/gdemenuja.html) (閲覧日: 2016年1月24日)  
[http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data\\_list/sokuhou/files/2011/qe113/gdemenuja.html](http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data_list/sokuhou/files/2011/qe113/gdemenuja.html) (閲覧日: 2016年1月24日)  
[http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data\\_list/sokuhou/files/2014/qe144\\_2/gdemenuja.html](http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data_list/sokuhou/files/2014/qe144_2/gdemenuja.html) (閲覧日: 2016年1月24日)
- [2] 竹内忍, 小物電子部品用精密射出成形金型にみる金型製作の現状, 応用機械工学, No.12 (1987) pp.112-116
- [3] 一般社団法人日本金型工業会, 金型製造業の事業所の推移,  
[http://www.jdmia.or.jp/toukei/kogyo/jigyo\\_suii\\_m.pdf](http://www.jdmia.or.jp/toukei/kogyo/jigyo_suii_m.pdf) (閲覧日: 2016年1月24日)
- [4] 畑村洋太郎, 失敗学のすすめ, 講談社 (2009)
- [5] 長島泰雄, 自動車用市場とポリアミド樹脂, 有機合成化学協会誌, Vol.40, No.5 (1982) pp.442-445
- [6] 加藤和男, 佐藤隆志, 千葉宗男, 射出成形プラスチックロータを用いた超音波モータと電動ポテンショメータへの応用, 電子情報通信学会論文誌 C-II, Vol.J82-C-II, No.11 (1999) pp.609-617
- [7] 天野道之, 柳秀一, 首藤義人, 佐藤弘次, 住田真, 東野俊一, 射出成形による通信光学部品の作製, 精密工学会誌, Vol.66, No.10 (2000) pp.1514-1517
- [8] 鳳誠三郎, 倉藤尚雄, 改訂放電加工, コロナ社 (1961)
- [9] 酒井洋三, 小林和彦, 大泉敏郎, 齋藤長男, 金型加工における放電加工の役割とその進化, 日本機械学会第6回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, pp.277-278
- [10] 日本機械学会編, 生産加工の原理, 日刊工業新聞社 (2004)
- [11] 畠山力三, 飯塚哲, 金子俊郎, プラズマ理工学基礎, 朝倉書店 (2012)
- [12] 行村建, 放電プラズマ工学, オーム社 (2008)
- [13] 秋山尚紀, 形彫り放電加工における絶縁油が加工特性に与える影響に関する研究, 岩手大学大学院工学研究科博士前期課程金型・鋳造工学専攻修士論文 (2012)
- [14] 吉野勝美, 山下久直, 鎌田譲, 室岡義広, 液体エレクトロニクス, コロナ社 (1996)
- [15] 生島聡之, 国枝正典, EDM アークプラズマ内温度分布の分光分析, 精密工学会誌, Vol.66, No.3 (2000) pp.399-403
- [16] A. Kojima, W. Natsu, M. Kunieda, Spectroscopic measurement of arc plasma diameter in EDM, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol.57 (2008) pp.203-207
- [17] A. Singh, A. Ghosh, A thermo-electric model of material removal during electric discharge

- machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.39, No.4 (1999) pp.669-682
- [18] T. O. Hockenberry, E. M. Williams, Dynamic Evolution of Events Accompanying the Low-Voltage Discharge Employed in EDM, *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, Vol.IGA-3, No.4 (1967) pp.302-309
- [19] B. N. Zolotkykh, The Mechanism of Electrical Erosion of Metals in Liquid Dielectric Media, *Soviet Physics-Technical Physics*, Vol.4, No.12 (1959) pp.1370-1373
- [20] P. T. Eubank, M. R. Patel, M. A. Barrufet and B. Bozkurt, Theoretical models of the electrical discharge machining process. III. The variable mass, cylindrical plasma model, *Journal of Applied Physics*, Vol.73, No.11 (1993) pp.7900-7909
- [21] 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
- [22] 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), *電気加工学会誌*, Vol.26, No.52 (1992) pp.47-55
- [23] 小林輝紀, 国枝正典, 放電加工アークプラズマ内蒸気密度の分光測定による工具電極消耗率の決定メカニズムの解明, *電気加工学会誌*, Vol.36, No.82 (2002) pp.11-17
- [24] 岩田知樹, 形彫放電加工における絶縁油が加工速度に与える影響, 岩手大学大学院工学研究科博士前期課程金型・鋳造工学専攻修士論文 (2009)
- [25] S. Chakraborty, V. Dey, and S. K. Ghosh, A review on use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics, *Precision Engineering*, Vol.40 (2015) pp.1-6
- [26] 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
- [27] 毛利尚武, 齋藤長男, 成宮久喜, 河津秀俊, 尾崎好雄, 小林和彦, 恒川好樹, 粉末混入加工液による放電仕上加工, *電気加工学会誌*, Vol.25, No.49 (1991) pp.47-60
- [28] 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.1735-738
- [29] 花岡大生, 渡邊利行, 福澤康, 北村友彦, 形彫り放電加工特性に及ぼす放電加工油物性の影響 (第1報), *電気加工学会誌*, Vol.47, No.115 (2013) pp.81-87

## 第2章

### 絶縁油による加工速度の違い

#### 2.1 はじめに

形彫り放電加工における加工条件と加工速度の関係については、例えば Shabgard ら[1]が工具電極に銅，工作物に AISI H13 (JIS SKD61 相当) を使用して調べており，放電電流の増加あるいは放電持続時間の増加により加工速度が大きくなることを報告している．加工速度とは単位時間当たりの工作物除去量であり，これは 1 放電パルス当たりの工作物除去量と単位時間当たりのパルス数によって左右される．1 放電パルス当たりの除去量について斉藤ら[2]は，先端を円錐状に加工した銅棒工具電極を陽極とし，鋼の平面を工作物（陰極）とした場合の単発放電を用いた実験により，工作物除去量  $m(\mu\text{g})$  は  $m=0.15t_e \cdot i_e^{1.5}$  で表されることを明らかにしている．ここで  $t_e$  は放電持続時間(ms)， $i_e$  は放電電流値(A)を表す．この式からも放電電流が大きいほど，また放電持続時間が長いほど 1 パルス当たりの工作物除去量が大きくなることがわかる．ただしこの式は先端が円錐状の棒銅工具電極を使用した単発放電実験の結果から導いたものであり，図 1.3 に示したような実際の加工現場で用いられる形彫り用の工具電極を用いた繰り返し放電による加工とは状況が異なる．猪飼ら[3]は，繰り返し放電における 1 パルス当たりの工作物除去量と単発放電による工作物除去量は異なり，前者と後者の比は 0.38 程度が予測されると報告している．一方，繰り返し放電における単位時間当たりのパルス数（放電頻度）は絶縁破壊の起きやすさによって変化すると考えられる．代表的な電圧電流波形を図 2.1 に示す．この図において放電持続時間 (discharge duration) と休止時間 (pulse interval time)

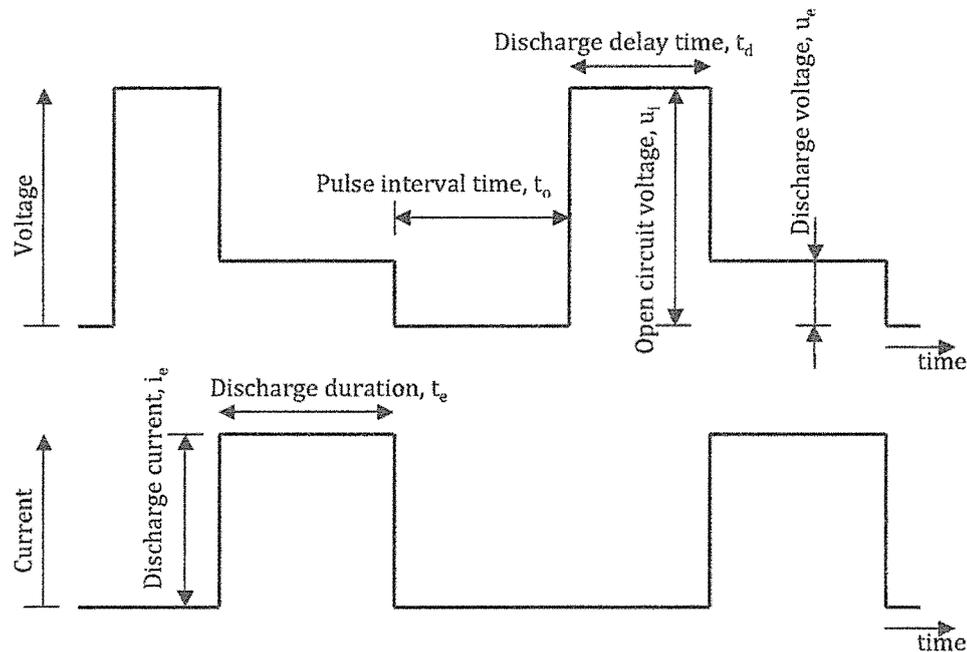


Fig. 2.1 Waveform of discharge voltage and discharge current

は加工者の設定によって決まるもので、加工中に多少の変動はあったとしても大きく変化することはない。しかし、放電遅れ時間（discharge delay time）は加工者が設定するパラメータではなく、工具電極と工作物間（極間）に電圧を印加してから絶縁破壊が起きるまでの時間なので、電圧を印加したときの極間の状態によって 1 パルスごとに異なる値となる。絶縁液の絶縁回復が十分でないとき絶縁破壊が起り易い状態なので放電遅れ時間は短くなるし、極間距離が狭い場合も同様に放電遅れ時間は短くなる。放電持続時間や休止時間の設定が同じでも、放電遅れ時間が短いほうが放電頻度は高くなる。

大きな加工速度が欲しい場合、1 放電パルス当たりの除去量が大きく且つ放電頻度が高くなる条件を実現できればよい。実際に金型を加工する立場で考えると、総加工時間（総放電持続時間+総休止時間+総放電遅れ時間）の間に除去される加工量が多くなれば加工効率が上がったことになる。上述の Shabgard ら[1]が報告している加工速度（MRR, Material Removal Rate）はこの総加工時間で工作物除去量を除いたものである。しかし、本研究は材料除去に対する絶縁油の作用を調べることを目的の 1 つとしているので、現象をもう少し細かく見る必要がある。実際に工作物が溶融されるのは主として放電電流が流れている期間と考えられるので、本研究では総放電持続時間で工作物除去量を割った値を加

工速度と定義し、本章ではこの加工速度と放電頻度の 2 つの尺度で評価を行った。加工実験には市販の形彫り放電加工用絶縁油の中から 9 種類の絶縁油（油 A～油 I）を調達して使用した。実際に放電加工を行って総除去量，総放電持続時間，総放電回数を測定し，加工速度の比較を行った。また加工表面の表面性状についても調べた。

## 2.2 絶縁油による加工速度の違い

### 2.2.1 加工速度の定義

加工速度について明確に定義している文献は少ないが，これは単位時間当たりの工作物除去量[4]であり，単位時間とは単位加工時間のことである[5]。加工時間とは 2.1 節で述べたように放電持続時間・休止時間・放電遅れ時間の総和であり，実際にパルス電流が流れていない時間も含めて放電加工機が加工モードに入っている時間のことである。実際の金型加工における効率を考えた場合，短い加工時間で所定の加工を完了できることが重要なので，加工速度の定義は上述のとおりで問題ない。この定義による加工速度を上げることで金型加工の効率を改善できる。本研究の最終的な目的も競争力の高い金型加工であるが，それと同時に加工メカニズムの解明も目的の 1 つとしている。そのために本研究では，実際に放電電流が流れている時間の総和を分母として，次の式(2.1)，(2.2)により加工速度（removal rate） $V_m$ を定義する。

$$V_m = \frac{M_r}{t_m} \quad (2.1)$$

$$t_m = \sum t_e \quad (2.2)$$

ここで， $M_r$ は加工により除去された質量， $t_m$ は総放電持続時間， $t_e$ は個々のパルスの放電持続時間を示す。繰り返しになるが，本研究では絶縁油が工作物溶解にどのように作用しているか調べようとしているので，熱流束を与えて工作物溶解に作用している期間である総放電持続時間を分母として，式(2.1)のとおり加工速度  $V_m$ を定義した。

### 2.2.2 加工速度の測定方法

式(2.1)で定義した加工速度を求めるためには、加工前後の工作物質量の測定と総放電持続時間の計測が必要になる。このうち工作物質量の測定は測定分解能  $0.1\text{mg}$  の電子天秤により測定した。総放電持続時間は専用のカウンタにより計測した。カウンタのブロック図を図 2.2 に示す。電流プローブで放電電流を検出しアナログ信号としてこのカウンタに入力する。入力されたアナログ信号は  $2.5\text{A}$  をしきい値として TTL レベルのデジタルデータに整形される。整形されたパルスをゲート信号とし、カウンタ IC で  $10\text{MHz}$  のクロックをカウントすることで放電電流が流れている時間（放電持続時間）を積算計測している。 $10\text{MHz}$  のクロックを使用しているのでこのカウンタの測定分解能は  $0.1\mu\text{s}$  である。カウンタの外観を図 2.3 に示す。このカウンタは放電パルス数のカウントもできるようにしてある。

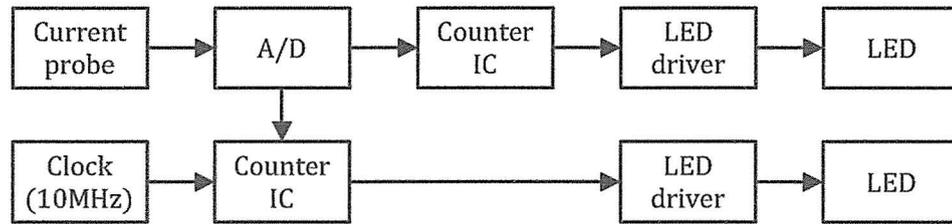


Fig. 2.2 Block diagram of pulse counter

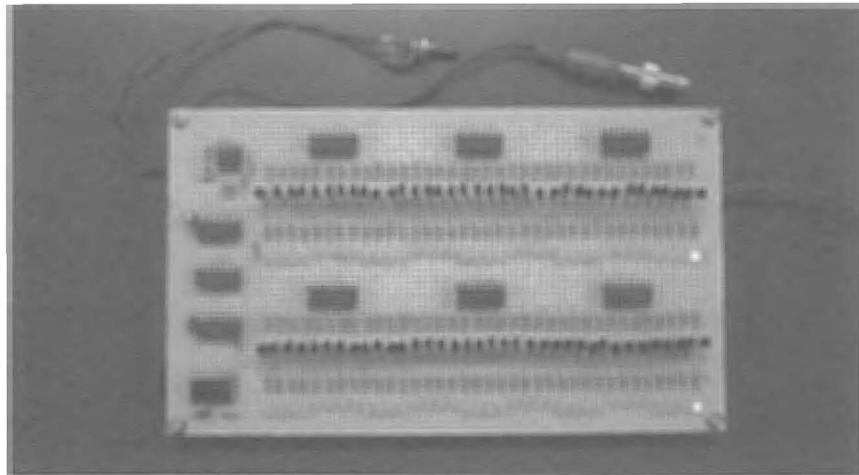


Fig. 2.3 Appearance of pulse counter

### 2.2.3 加工速度の測定条件

加工にはソディック社の形彫り放電加工機 AQ-35L を使用した。絶縁油を替えながら加工するために小型の水槽を放電加工機のベッドの上に設置し、この水槽の中に絶縁油を 2000cc 入れてこの中で加工を行った。加工条件を表 2.1 に示す。電気的な条件は、小型電子部品用射出成形金型の加工に使用されている条件に準じて設定した。セットアップの様子を図 2.4 に、工作物と工具電極を図 2.5 に示す。工作物の加工面（工具電極と対向する面）の大きさは 5mm×9mm とした。

Table 2.1 Machining conditions

Tool electrode material	Copper (C1100)
Workpiece material	S45C
Open circuit voltage ( $u_i$ )	90V
Discharge current ( $i_e$ )	10A
Discharge duration ( $t_e$ )	250 $\mu$ s
Pulse interval ( $t_o$ )	250 $\mu$ s
Workpiece polarity	Cathode
Machining time	4min.
Servo reference voltage	40V

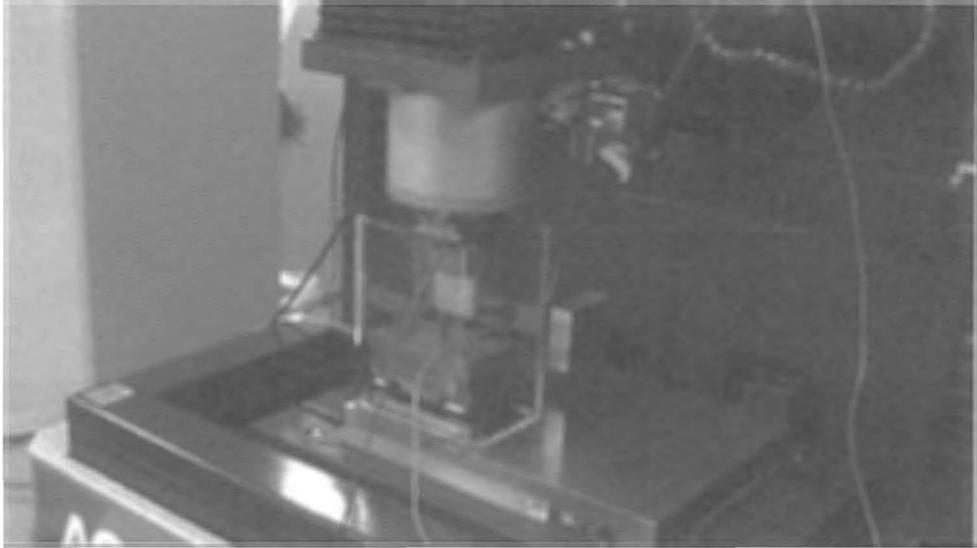


Fig. 2.4 Setup of machining experiment

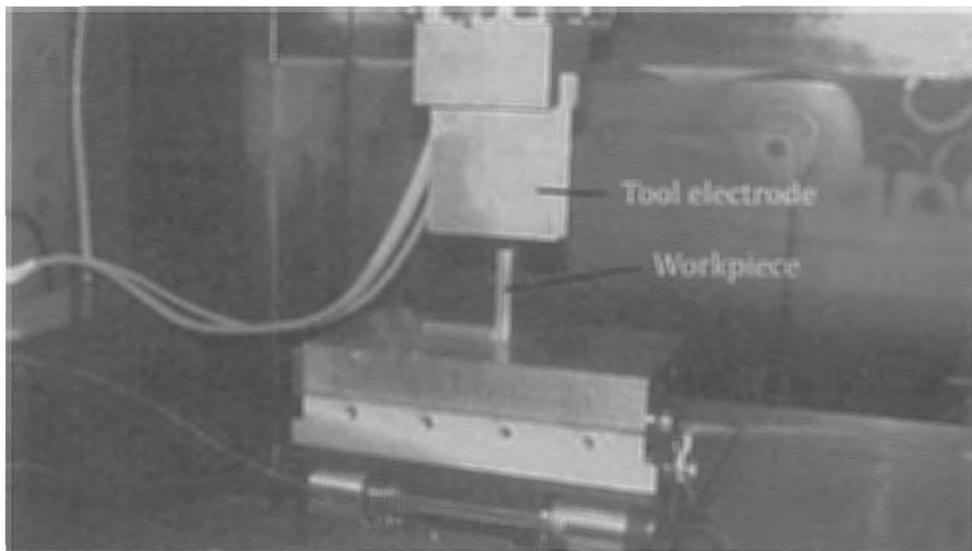


Fig. 2.5 Workpiece and tool electrode

#### 2.2.4 加工速度の測定再現性

9種類の絶縁油（油A～油I）を使用して加工速度を測定する前に、絶縁油を1つの種類に固定して繰り返し加工速度  $V_m$  を測定した場合の測定値再現性を調べた。油Dを使用して表2.1の条件で加工速度を5回測定した。この実験には1つの工作物を使用し、工作物の加工面はあらかじめ表2.1の条件で放電加工を施しておいた。この工作物を研削仕上げした工具電極面と対向させて加工した。絶縁油は1回の実験ごとに新しいものと入れ替えた。実験結果を図2.6に示す。5回の測定値の最小値は2.491mg/s、最大値は2.525mg/sである。5回の測定値の平均値2.509mg/sに対し最小値と最大値は±0.8%の範囲に納まっており、再現性として問題ないことを確認した。

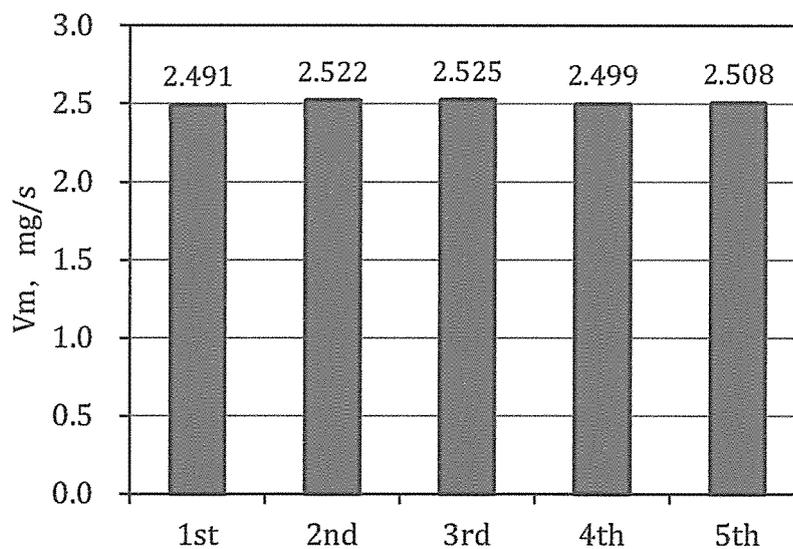


Fig. 2.6 Reproducibility of removal rate  $V_m$

### 2.2.5 加工速度の測定結果

次に9種類の絶縁油を使用して表 2.1 の条件で加工実験を行った。4 分間の加工により除去された工作物の質量を図 2.7 に、4 分間の加工時間内での総放電回数を図 2.8 に、式(2.1)に従って計算した加工速度を図 2.9 に示す。図 2.7 において最も除去量が多かったのは油 I で 196.4mg、最も少なかったのは油 B で 133.8mg となっておりその差は 62.6mg となっている。図 2.8 において最も放電回数が多いのは油 G で 236,534 回、最も放電回数が少ないのは油 I で 229,148 回となっていて両者の比は 1.03 である。それに対し図 2.9 において加工速度が最も大きいのは油 I で 3.44mg/s、最も小さいのは油 A で 2.32mg/s、両者の比は 1.48 となっている。放電回数の比 1.03 に対し加工速度の比は 1.48 と大きな値を示しており、しかも放電回数が最も少ない油 I が最も大きな加工速度となっている。このことは、絶縁油による放電 1 回当たりの除去量の差が大きいことを意味しているが、図 2.7 の総除去量を図 2.8 の放電回数で割って放電 1 回当たりの除去量を求めたものを図 2.10 に示す。

以上のように、9 種類の絶縁油を使用して加工実験を行った結果、絶縁油によって最大 1.48 倍の加工速度差があり、その差は放電 1 回当たりの除去量の違いに起因していることがわかった。

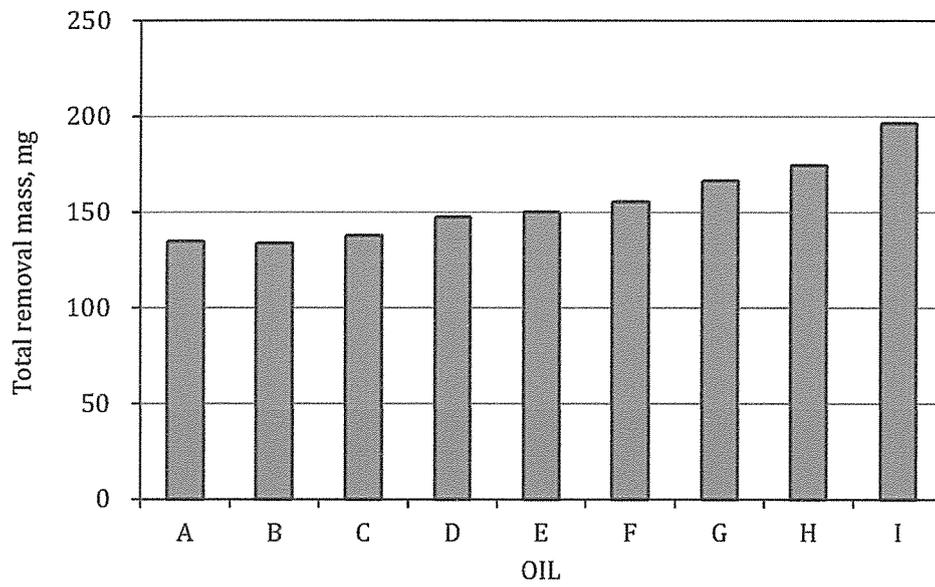


Fig. 2.7 Total removal mass from workpiece

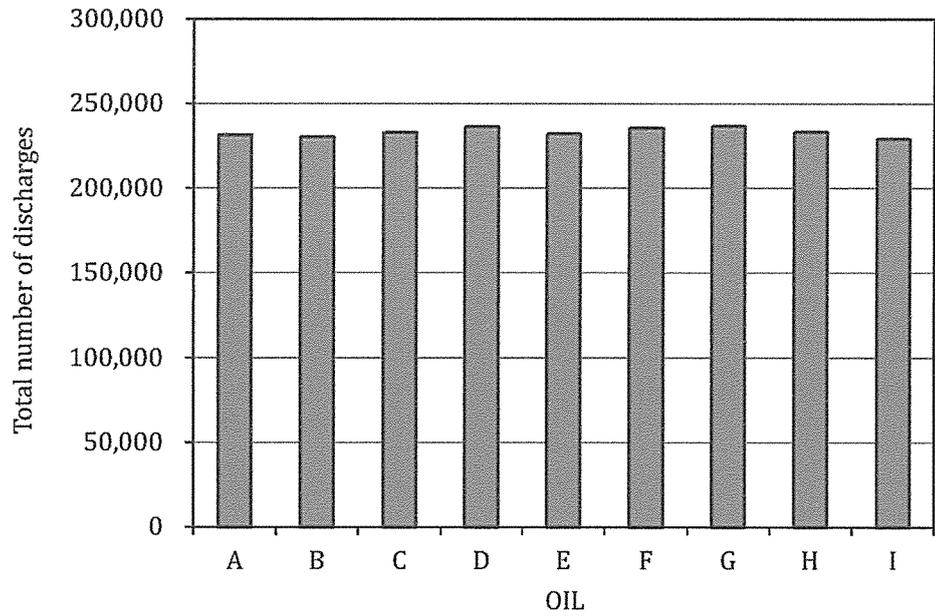


Fig. 2.8 Total number of discharges

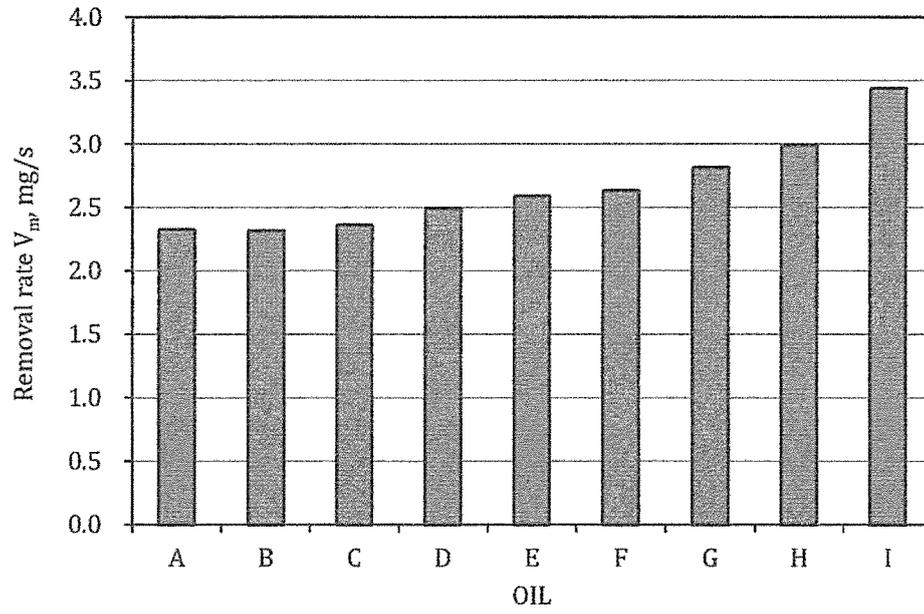
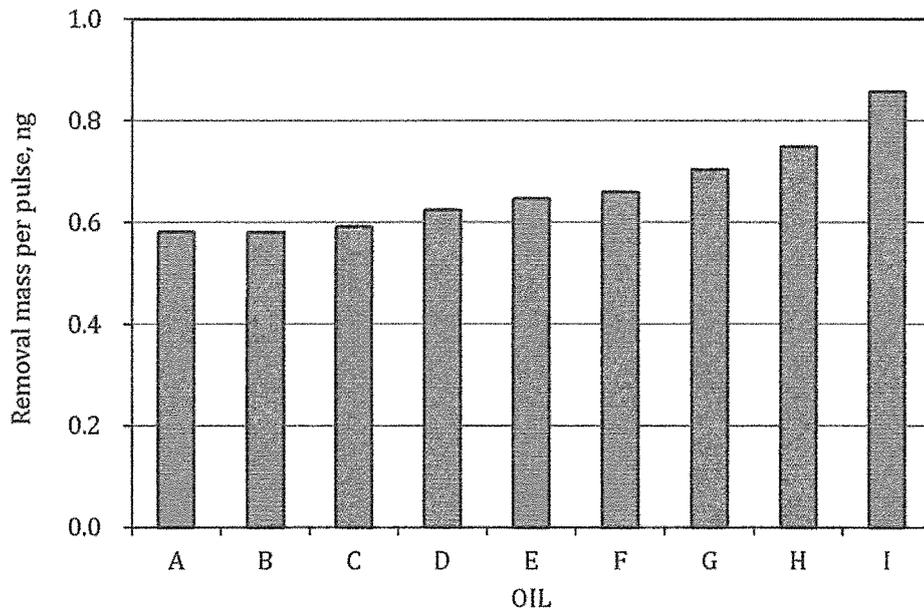
Fig. 2.9 Removal rate  $V_m$ 

Fig. 2.10 Removal mass per pulse

## 2.3 絶縁油による表面性状の違い

工作物に対する加工特性には2つあり、1つは2.2節で述べた加工速度であり、もう1つは表面性状である。表面性状を評価するパラメータには多くのものがあり、JIS[6]やISO[7]で規定されている。もっとも一般的な表面性状パラメータは、加工表面の高さ方向の平均的な凹凸量を表す算術平均粗さ[6]であろう。プラスチック射出成形金型においては金型表面の粗さが直接製品表面に転写されるので、製品の表面品質は金型の表面粗さで左右される。また、金型の表面粗さは離型抵抗力と関係がある[8,9]と言われており、離型性が悪くなると製品の生産性に悪影響を及ぼす。金型に要求される離型性以外の表面機能としては、気密性や潤滑特性、摩擦特性、剛性などがあり、これらの機能の評価には負荷曲線を用いたパラメータ[7,10-12]が使用されている。

これらの表面性状パラメータは、工作物から材料が除去された結果生成される工作物表面輪郭の形態を表す指標である。表面性状パラメータは加工速度と異なり直接的に工作物除去能力をあらわすものではないが、工作物が除去された結果生成される加工表面の形態を示しており、1回の放電パルスで除去される体積が同じだとしても、1パルス当たりで除去される形状が異なれば表面の形態も変わってくる。本研究は工作物の熔融・除去プロセスに対して絶縁油がどのように作用しているかという観点で行っているが、本節では、9種類の絶縁油を使用した場合の表面性状についての評価を行い加工速度との関係を調べた。評価する表面性状パラメータは、表面粗さと負荷曲線から求めるコア部の中空体積の2つとした。

### 2.3.1 表面輪郭の測定方法と表面粗さの定義

工作物表面輪郭の測定は表面粗さ測定機によって行った。測定機の外観を図2.11に示す。この測定機は検出器に作動トランスを使用しており、被測定面をトレースするスタイラスの上下動を電気信号に変換して測定するものである。測定はx方向とy方向にトレースして2次元的に行った。x方向へ1000 $\mu\text{m}$ トレースしたあと、y方向へ5 $\mu\text{m}$ 送りながらx方向へのトレースを201回繰り返した。x方向へのトレース中1 $\mu\text{m}$ ごとに表面高さのデータを測定した。表面高さ測定の分解能は0.001 $\mu\text{m}$ である。本研究では表面粗さを式(2.3)[10]のように定義して評価を行った。

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |z(x_i, y_j)| \quad (2.3)$$

ここで、 $S_a$ は表面粗さ、 $M$ は $x$ 方向の測定ポイント数、 $N$ は $y$ 方向の測定ポイント数、 $z(x_i, y_j)$ は座標 $(x_i, y_j)$ における表面高さを示す。測定終了後に、全表面高さデータの平均値を求め、これをゼロ点として式(2.3)により表面粗さを求めた。



Fig. 2.11 Surface roughness measuring instrument

### 2.3.2 表面粗さの測定結果

表面粗さの測定結果を図 2.12 に示す。図 2.12 より加工条件が同じであっても使用する絶縁油によって表面粗さが異なっていることがわかる。また、図 2.13 には図 2.9 に示した加工速度と図 2.12 に示した表面粗さの散布図を示す。図 2.13 から、両者の間には寄与率 73.8% (相関係数 0.859) の良好な相関関係があることがわかる。これは、放電 1 パルス当たりで除去される工作物の形状を考えた時に、絶縁油によって除去深さが異なっており、深く除去できる絶縁油ほど加工速度が速くなっていると考えられることができる。それぞれの絶縁油を使用した場合の表面高さコンター図と測定表面の鳥瞰図を図 2.14 に示した。

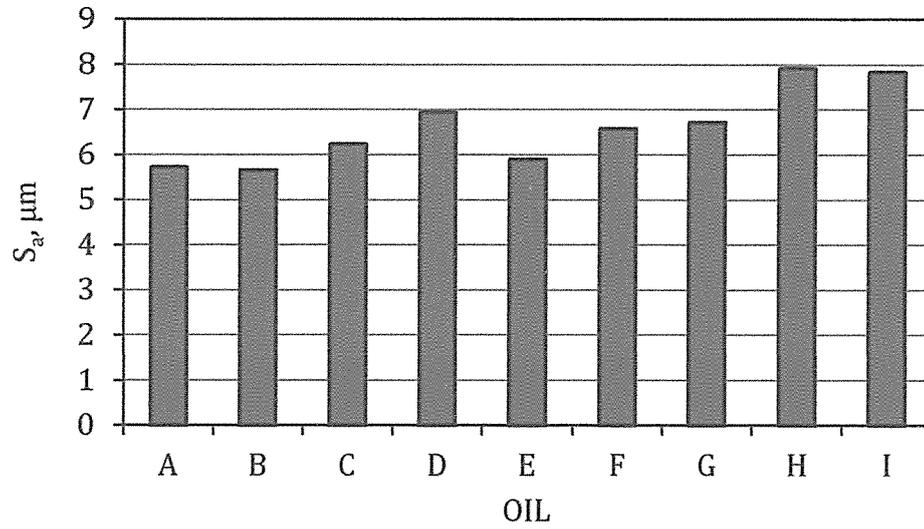


Fig. 2.12 Surface roughness  $S_a$  for oils

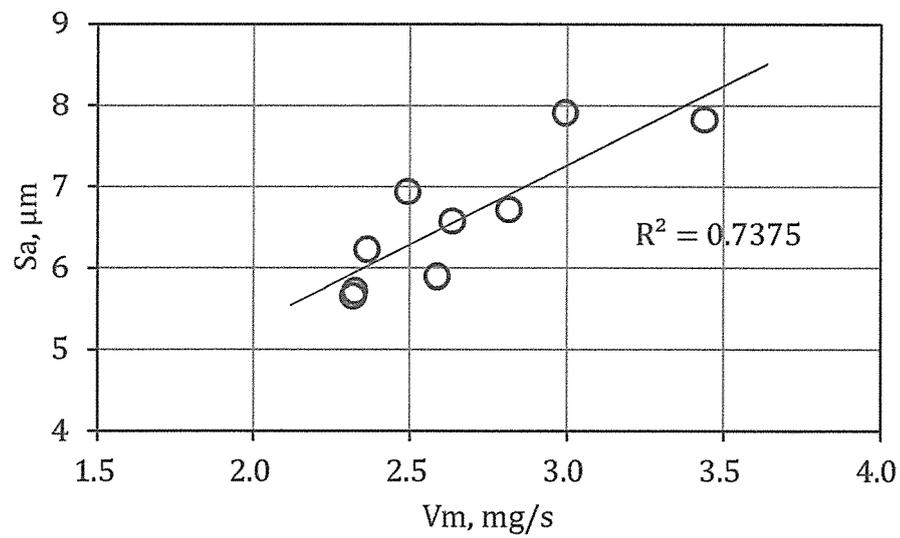


Fig. 2.13 Relationship between removal rate  $V_m$  and surface roughness  $S_a$

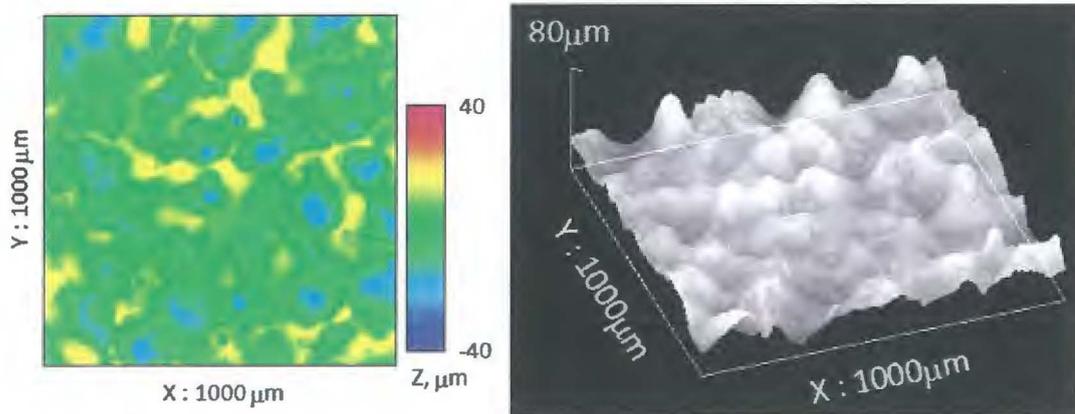


Fig. 2.14a Machined surface using oil A

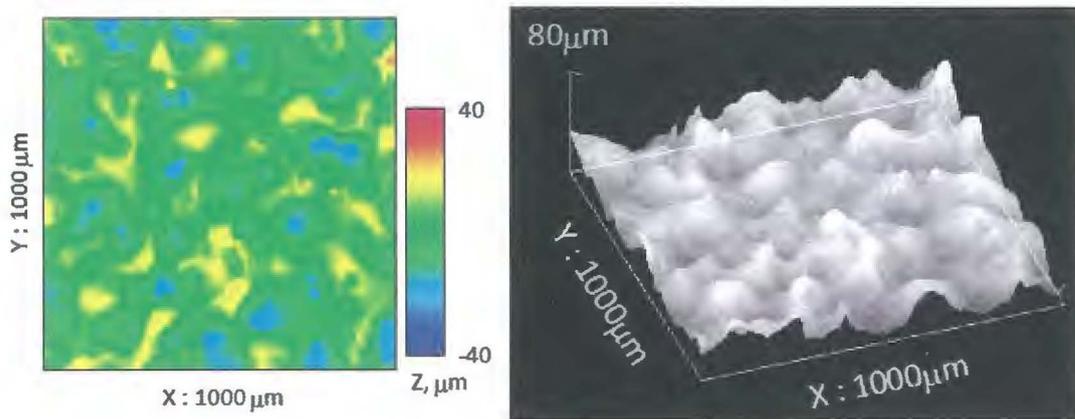


Fig. 2.14b Machined surface using oil B

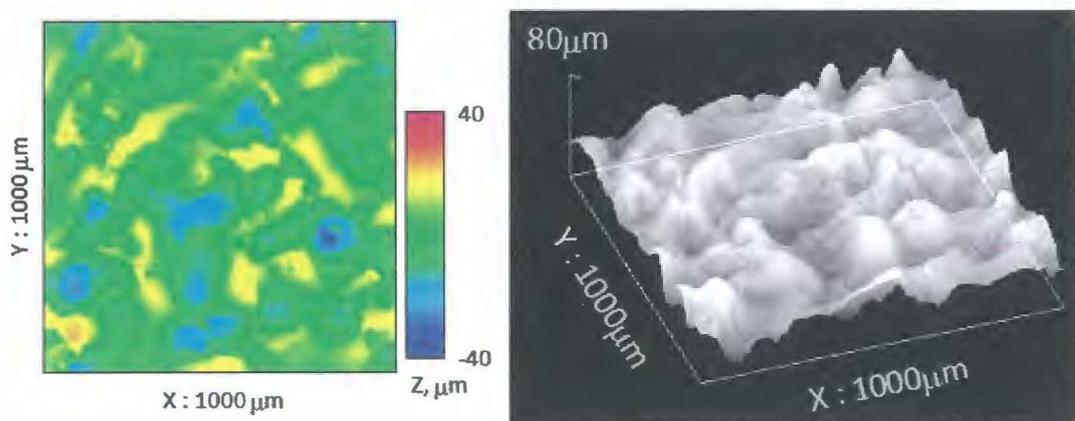


Fig. 2.14c Machined surface using oil C

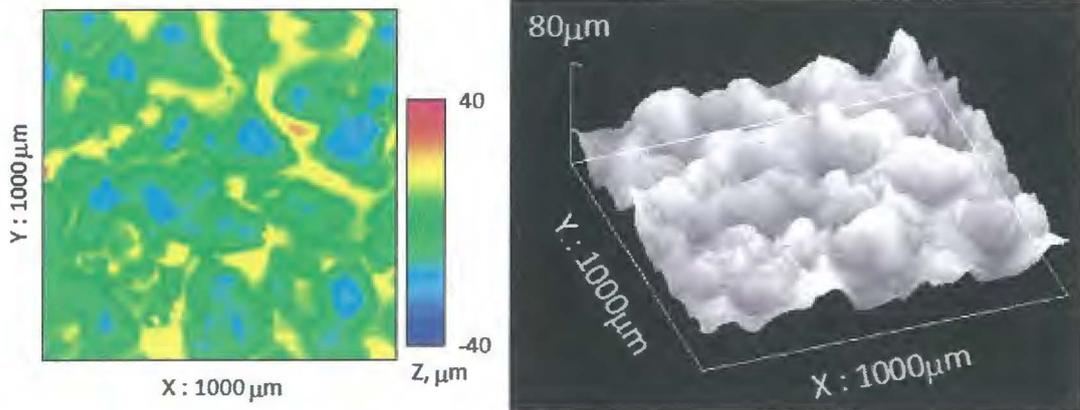


Fig. 2.14d Machined surface using oil D

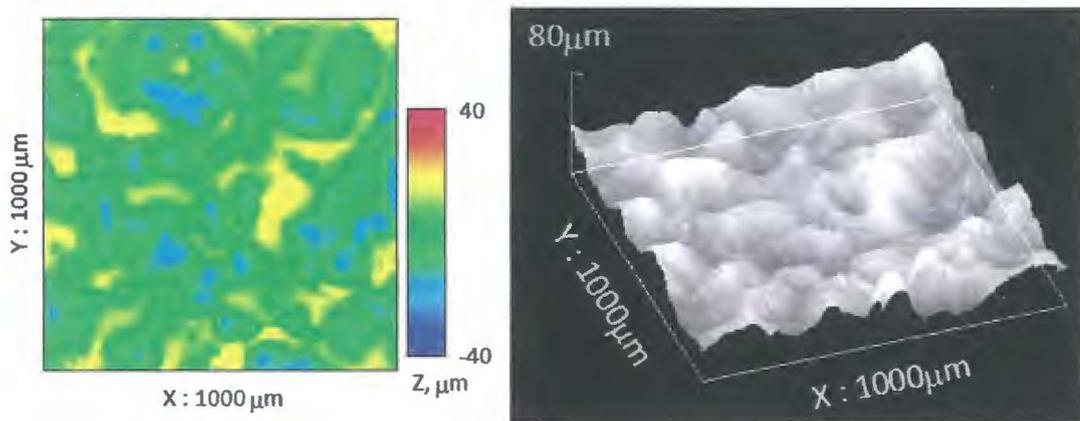


Fig. 2.14e Machined surface using oil E

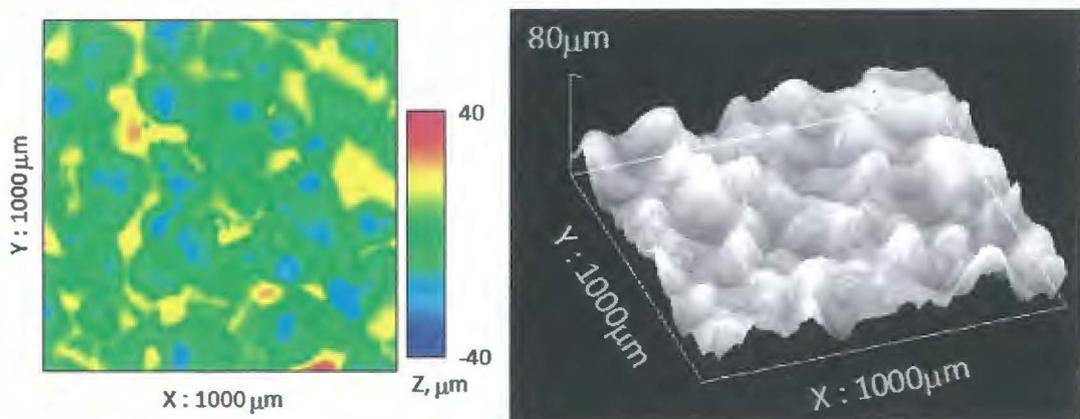


Fig. 2.14f Machined surface using oil F

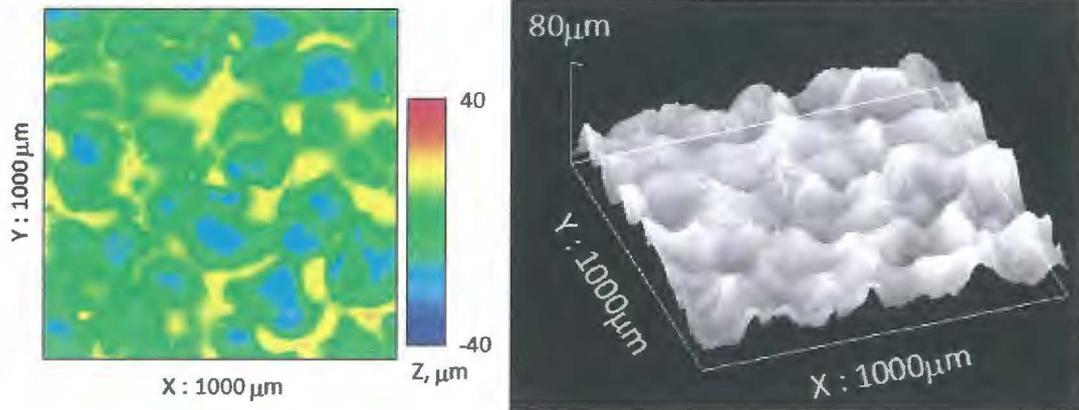


Fig. 2.14g Machined surface using oil G

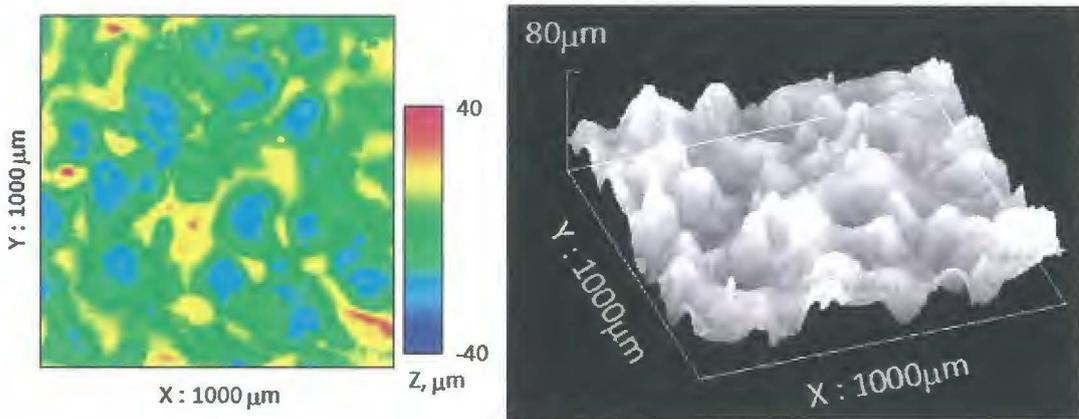


Fig. 2.14h Machined surface using oil H

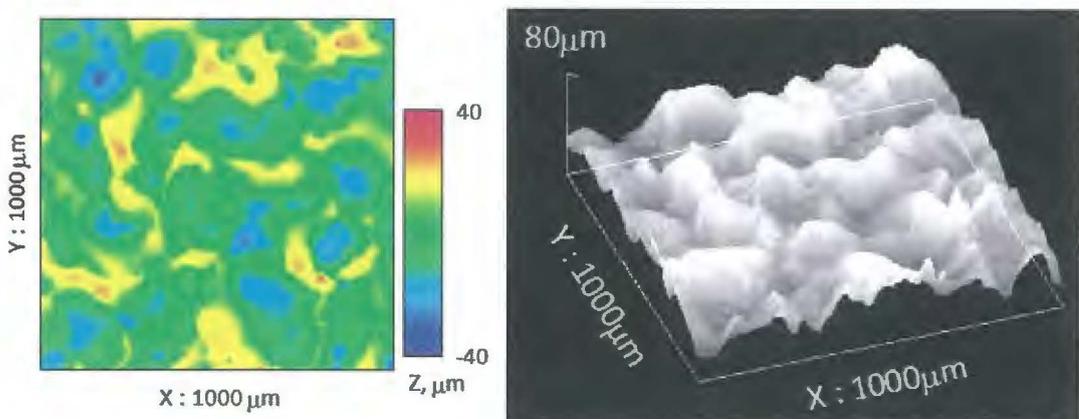


Fig. 2.14i Machined surface using oil I

### 2.3.3 負荷曲線とコア部中空体積

前項では、加工速度が速いほど表面粗さが大きくなる傾向があることを示し、その理由として、放電 1 パルスにより除去される形状の凹みが深いことを挙げた。本節では、負荷曲線により加工面の表面形態を調べ、以下に説明するコア部の中空体積を評価した。高さ(z)方向に凹凸のある輪郭曲線に対し、ある高さレベルで x 軸に平行な仮想線を引いて輪郭曲線を切断しこの仮想線に沿って切断断面を辿ると、工作物の実体の部分と加工により除去されて中空になっている部分が交互に現れる。負荷曲線とは、高さレベルに対する表面凹凸の実体部分と中空部分の比を表現した曲線である[13]。JIS 規格では負荷曲線と呼ばれているが、ISO 規格では Material Ratio Curve (MRC)や Bearing Curve, Abbott-Firestone Curve などと呼ばれる。負荷曲線の例を図 2.15 に示す。図 2.15(a)は輪郭曲線、図 2.15(b)は負荷曲線である。図 2.15 をみると高さレベル 5 $\mu\text{m}$  における実体部分の割合は 0.27 であり、中空部分の割合は 0.73 であることがわかる。

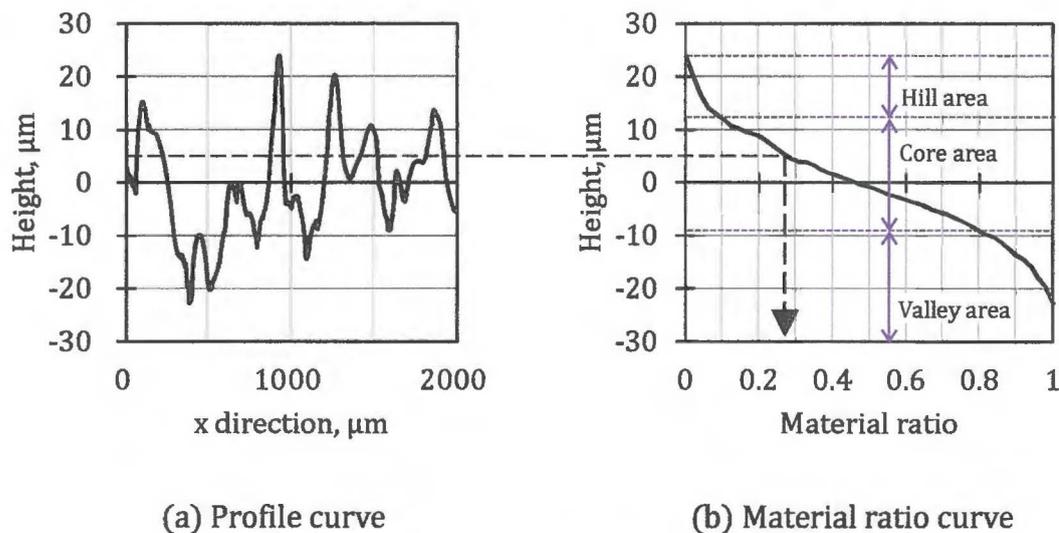


Fig. 2.15 Explanation of material ratio curve

また負荷曲線において、Material Ratio が  $a$  未満の高さ範囲は山部と呼ばれ、 $a$  から  $b$  のあいだにある高さ範囲はコア部、 $b$  より大きい高さ範囲は谷部と呼ばれている (図 2.15(b))。ISO 25178[7,11]ではデフォルトの設定として  $a=0.1$ 、 $b=0.8$  としており、本研究でもこの値を採用した。コア部のうち中空部分の面積 ( $V_{vc}$  と呼ぶ) は、表面の単位投影面積当りの中空体積 ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ) を表している。

図 2.16 に負荷曲線の評価結果を、図 2.17 に  $V_{vc}$  と加工速度の散布図を示す。

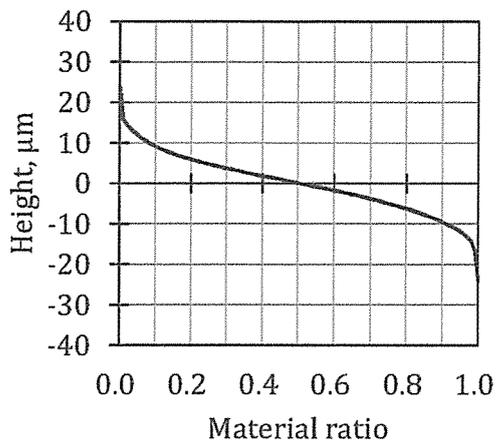


Fig. 2.16a MRC of oil A

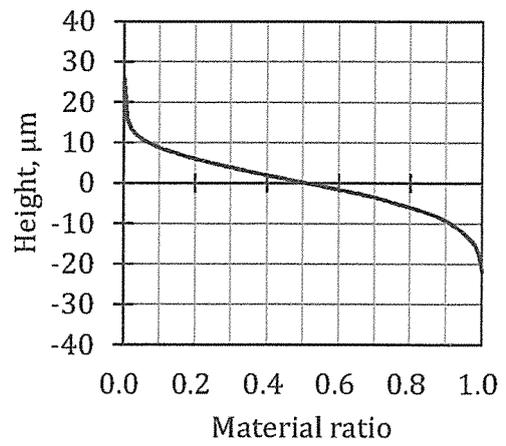


Fig. 2.16b MRC of oil B

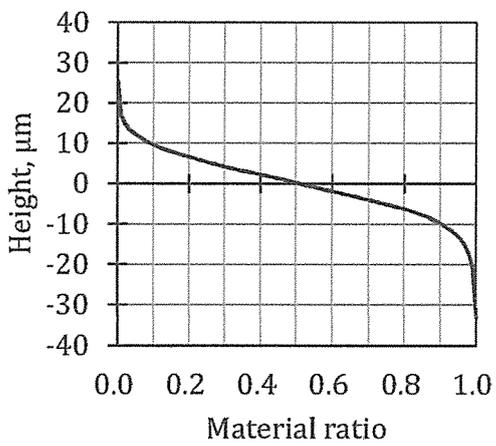


Fig. 2.16c MRC of oil C

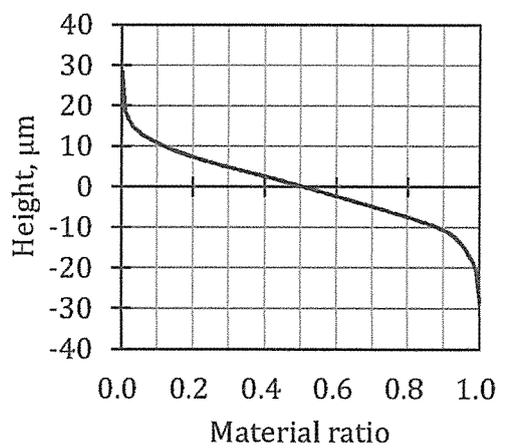


Fig. 2.16d MRC of oil D

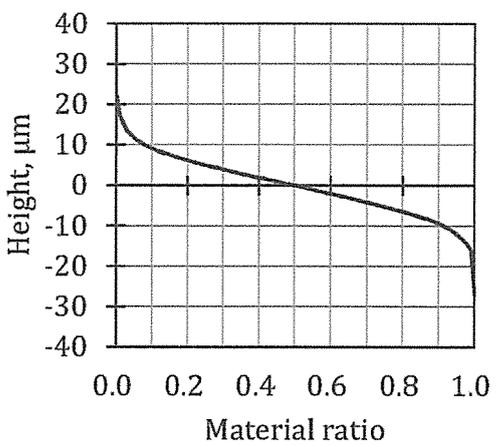


Fig. 2.16e MRC of oil E

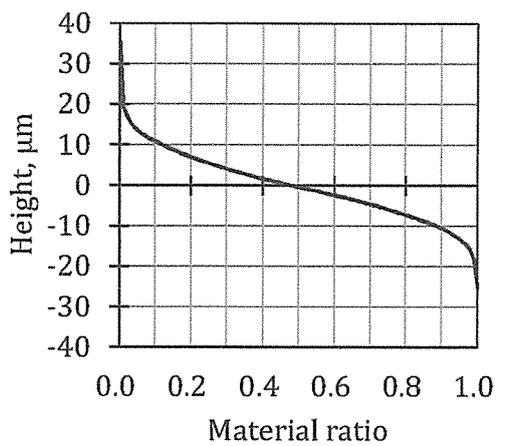


Fig. 2.16f MRC of oil F

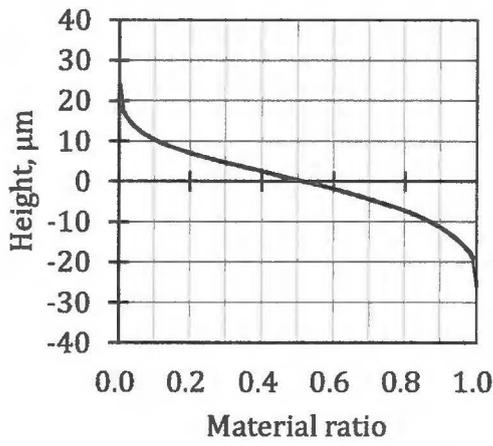


Fig. 2.16g MRC of oil G

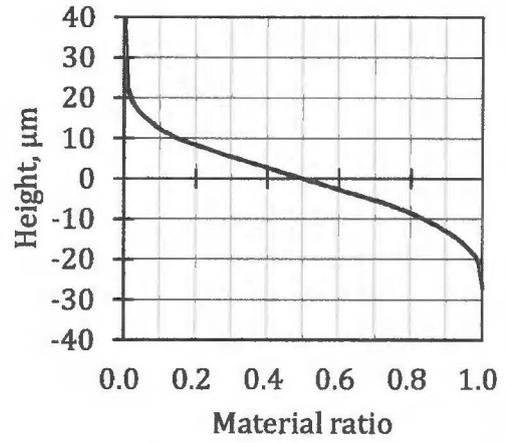


Fig. 2.16h MRC of oil H

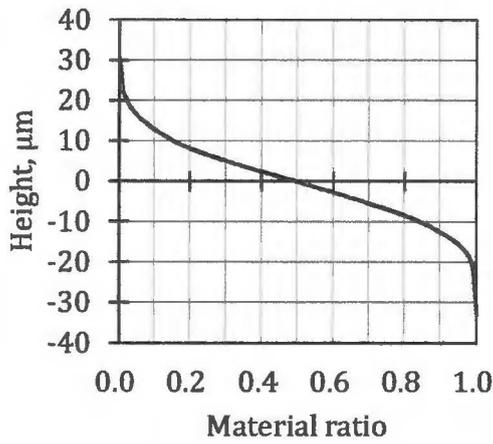


Fig. 2.16i MRC of oil I

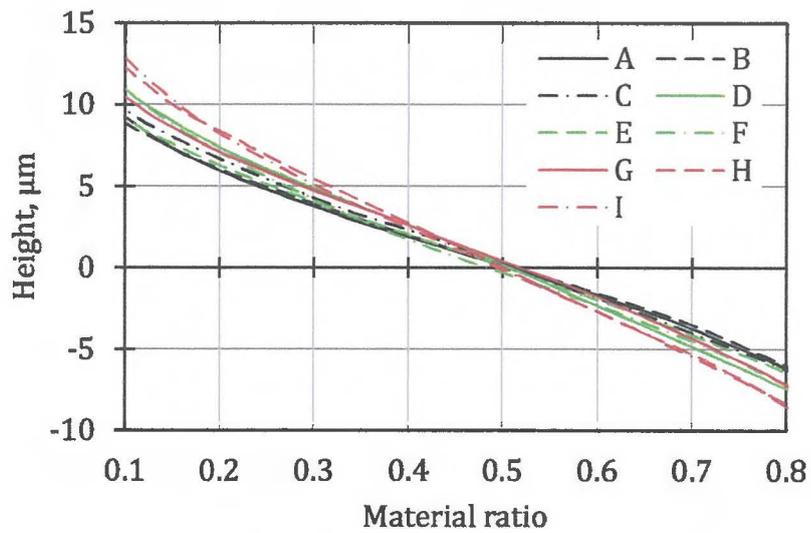


Fig. 2.16j MRC of all oils

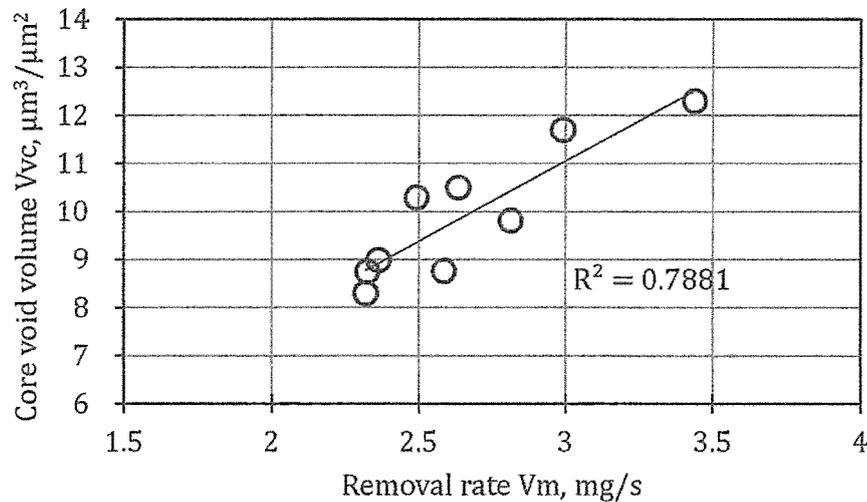


Fig. 2.17 Relationship between removal rate  $V_m$  and core void volume  $V_{vc}$

図 2.16j は油 A～油 I のコア部の負荷曲線を比較したものである。加工速度の大きい絶縁油ほど高低差が大きく、負荷曲線の傾きも大きくなっていることがわかる。また図 2.17 では加工速度と  $V_{vc}$  の間に良好な相関関係（寄与率 78.8%，相関係数 0.888）があることがわかる。工作物表面付近のある領域はプラズマからの熱によって熔融され、熔融された領域の一部は工作物の母体から除去されるが残りの部分は工作物表面に残留する。この様子をモデル化した放電痕断面を図 2.18 に示す。除去された凹部の周囲にある工作物表面の盛り上がりは、この一度熔融した領域が工作物から除去されずに表面に残留したものである。負荷曲線の  $V_{vc}$  は、この放電痕モデルの盛上った山部頂上側の一部を横切る水平面と、除去された中空部の谷底側の一部を横切る水平面に挟まれた、工作物除去後の中空部の空間体積を表している。このため  $V_{vc}$  は大よその除去量を表しており、加工速度との相関関係が良好になっていると考えられる。

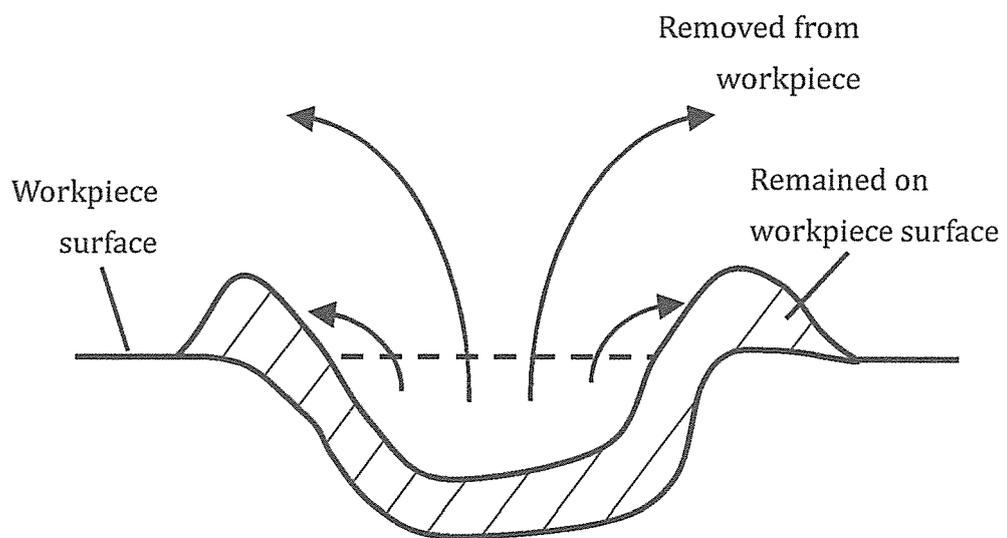


Fig. 2.18 Cross section image of discharge crater

## 2.4 第2章のまとめ

本章では，市販されている中から 9 種類の絶縁油を準備して加工速度と加工後の表面性状について調べた。

加工速度は除去量と加工時間の比で表わされる。これまでの研究ではこの加工時間を加工機械が加工モードに入っている総時間としており，放電電流が流れていない休止時間や放電遅れ時間も含めていたが，本研究では放電電流が流れている時間だけを積算計測し除去量との比を求めた。加工条件は，放電電流 10A，放電持続時間 250 $\mu$ s，休止時間 250 $\mu$ s，工作物は S45C，工具電極は銅とした。表面性状については表面粗さと負荷曲線におけるコア部中空体積の 2 つのパラメータについて評価した。その結果，以下の結論を得た。

- (1) 加工速度は絶縁油によって最大で 1.48 倍の差があり，その差は 1 放電パルス当たりの除去量の違いに起因している。
- (2) 加工速度と表面粗さの間には寄与率 73.8%（相関係数 0.859）の良好な相関関係が確認できた。
- (3) 加工速度と負荷曲線のコア部中空体積 ( $V_{vc}$ ) の間には寄与率 78.8%（相関係数 0.888）の良好な相関関係が確認できた。

上記(1)で述べているように，加工速度が速いということは放電 1 パルス当たりで除去される量が多いということである。形彫り放電加工は熱的な加工法であり，工作物表面の一部が熔融されて，その後，その熔融部が除去される。従って，除去される量が多いという事は，熔融量に差があるか，熔融量は同等でも除去される効率に違いがあるか，或いは熔融量も除去される効率も異なるか，のいずれかである。次の第 3 章ではこの点を明らかにするために，熔融量と除去効率の絶縁油による違いを調べる。

## 第2章 参考文献

- [1] M. Shabgard, M. Seyedzavvar, S. N. B. Oliaei, Influence of Input Parameters on the Characteristics of the EDM Process, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol.57 (2011) pp.689-696
- [2] 斉藤長男, 小林和彦, 放電加工の加工原理と加工特性, *三菱電機技報*, Vol.41, No.10 (1967) pp.1222-1230
- [3] 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
- [4] 形彫りワイヤ放電加工マニュアル, 大河出版 (2006)
- [5] 山崎実, 鈴木岳美, モノづくりのための放電加工, 日刊工業新聞社 (2007)
- [6] JIS B 0601:2001, 製品の幾何特性仕様 (GPS) – 表面性状: 輪郭曲線方式 – 用語, 定義及び表面性状パラメータ, 財団法人日本規格協会
- [7] ISO 25178-2:2012, Geometric product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters
- [8] 小林義和, 白井健二, 佐々木哲夫, 射出成形におけるコア表面粗さと離型抵抗力の関係, *精密工学会誌*, Vol.67, No.3 (2001) pp.510-514
- [9] 北田良二, 日置裕彦, 岡田晃, 宇野義幸, 型彫り放電加工面の離型性に関する基礎的研究, *電気加工学会誌*, Vol.44 No.106 (2010) pp.52-59
- [10] JIS B 0671-2:2002, 製品の幾何特性仕様 (GPS) – 表面性状: 輪郭曲線方式; プラトー構造表面の特性評価 – 第2部: 線形表現の負荷曲線による高さの特性評価, 財団法人日本規格協会
- [11] François Blateyron, Characterisation of Areal Surface Texture, Chapter 2 The Areal Field Parameters (2013) pp.15-43, ISBN978-3-642-36457-0
- [12] Luiz Alberto Franco, Amilton Sinatora, 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of  $S_{pk}$  and its relationship to  $V_{mp}$ , *Precision Engineering*, Vol.40 (2015) pp.106-111
- [13] 吉田一朗, はじめての精密工学 表面粗さ – その2 ちょっとレアな表面性状パラメータの活用方法 –, *精密工学会誌*, Vol.79, No.5 (2013) pp.405-409

## 第3章

# 絶縁油による除去効率の違い

### 3.1 はじめに

第2章では、市販の9種類の絶縁油を使用して放電加工実験を行った結果、一番加工速度の速い絶縁油を使用した場合、一番加工速度の遅い絶縁油の1.48倍の加工速度となることを示した。また第2章では、9種類の絶縁油を使用して加工した工作物の加工表面の表面粗さを測定し、加工速度が速い絶縁油ほど表面粗さが粗くなる傾向があることを示した。これらの加工速度と表面粗さの測定結果は、加工速度の速い絶縁油を使用した場合、工作物のより深い領域まで溶融されている可能性があることを示唆している。そこで本章では、第2章で放電加工を行った試料の総溶融量の推定を行うと共に、溶融した領域のうち工作物から除去された割合を求めた。

工作物から除去された量は放電加工前後の工作物質量を測定することで求められるが、これがプラズマによって溶融された量のすべてではない。溶融された領域のなかの一部は工作物から除去されずに工作物表面に残留する。この残留した部分は再凝固層（white layer）とよばれ、工作物の断面を研磨してナイタルでエッチングすることで観察できる。再凝固層を走査電子顕微鏡で観察した例を図3.1に示す。絶縁油中で放電加工した工作物の再凝固層には、絶縁油分子の分解により生成された炭素が入り込み、母材よりも炭素含有量が増加し硬さも増す[1]という特徴がある。工作物の総溶融量は、工作物から除去された量と再凝固層の量の和により求めることができる。

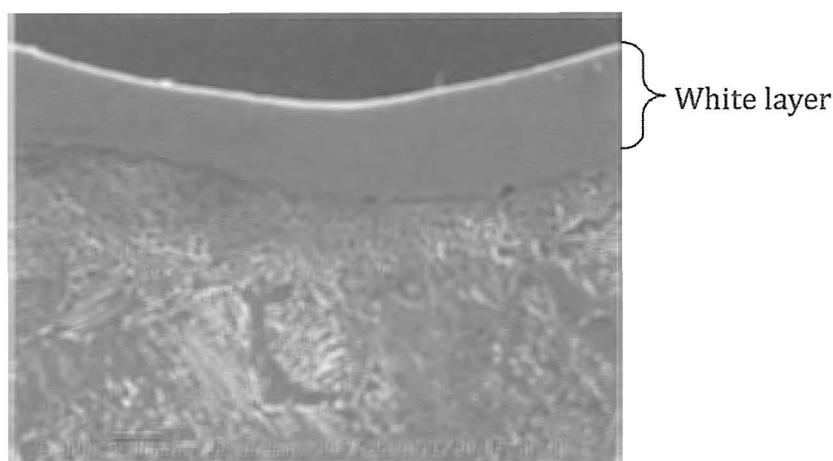


Fig. 3.1 Cross section view of EDMed surface

工作物から除去された量と総溶融量の比を本研究では除去効率と呼ぶ。除去効率（MRE: Material Removal Efficiency）の定義式を式(3.1)に示す。

$$\text{MRE} = \frac{V_{\text{remv}}}{V_{\text{melt}}} \quad (3.1)$$

ここで、 $V_{\text{remv}}$  は加工中に除去された総除去体積、 $V_{\text{melt}}$  は加工中に溶融された総溶融体積を示す。この除去効率についてはこれまでも研究が行われてきた。除去効率について Marafona ら[2]は material removal efficiency と呼び、Shabgard ら[3]は plasma flushing efficiency と呼んでいるがその定義は本研究の除去効率と同じである。ただし Marafona ら[2]も Shabgard ら[3]も、工作物からの除去量は繰り返し放電パルスを使用した実験結果を 1 パルス当たりの除去量に換算して求めているが、総溶融量は単発放電パルスを想定した数値計算により求めている。Shabgard ら[3]はいくつかの加工条件を使用して plasma flushing efficiency を求めており、plasma flushing efficiency について、放電電流値によって変化することおよび放電持続時間が 12.8 から 25 $\mu\text{s}$  の範囲では放電持続時間の設定によって変化するが、放電持続時間が 50 から 100 $\mu\text{s}$  の範囲ではほぼ一定であることを報告している。しかしながら、猪飼ら[4]は単発放電による除去量と繰り返し放電による 1 パルス当たりの除去量には違いがあることを指摘しており、Marafona ら[2]や Shabgard ら[3]の方法では求めた除去効率の値の誤差が大きくなっている恐れがある。

本章では、繰り返し放電パルスにより加工した工作物の再凝固層の観察を行ったうえで、図 2.7 に示した除去量のデータを使用して総溶融量と除去効率の推

定を行った。

## 3.2 総溶融量と除去効率

### 3.2.1 総溶融量と除去効率の推定方法

式(3.1)に示した除去効率の定義式における総除去体積  $V_{\text{remv}}$  は式(3.2)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} V_{\text{remv}} &= \frac{W_0 - W_m}{\rho} \\ &= D_{\text{remv}} \cdot S_m \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで、 $W_0$ は加工前の工作物質量、 $W_m$ は加工後の工作物質量、 $\rho$ は工作物の密度、 $D_{\text{remv}}$ は平均除去深さ、 $S_m$ は工作物加工面の面積を表す。第2章で使用した工作物の加工面の大きさはすべて  $9\text{mm} \times 5\text{mm}$  一定なので、式(3.2)は  $D_{\text{remv}}$  を求める式として式(3.3)のように表現できる。

$$D_{\text{remv}} = \frac{W_0 - W_m}{\rho \cdot S_m} \quad (3.3)$$

一方、総溶融体積は総除去体積と再凝固層体積の和で求められるので、式(3.1)の  $V_{\text{melt}}$  は、

$$V_{\text{melt}} = V_{\text{remv}} + V_{\text{WL}} \quad (3.4)$$

となる。ここで、 $V_{\text{WL}}$ は再凝固層体積を示し、

$$V_{\text{WL}} = \text{WLT} \cdot S_m \quad (3.5)$$

と表わされる。ここで、 $\text{WLT}$ は再凝固層平均厚さを示す。従って式(3.1)、式(3.2)、式(3.4)、式(3.5)より除去効率 MRE は、

$$\text{MRE} = \frac{D_{\text{remv}}}{D_{\text{remv}} + \text{WLT}} \quad (3.6)$$

と表され，平均除去深さと再凝固層平均厚さによって計算できる．平均熔融深さ，平均除去深さ，再凝固層平均厚さの関係を模式的に表したものを図 3.2 に示す．平均除去深さは，図 2.7 に示した除去量のデータを用いて式(3.3)により計算できるので，再凝固層平均厚さがわかれば式(3.6)により除去効率を求めることができる．

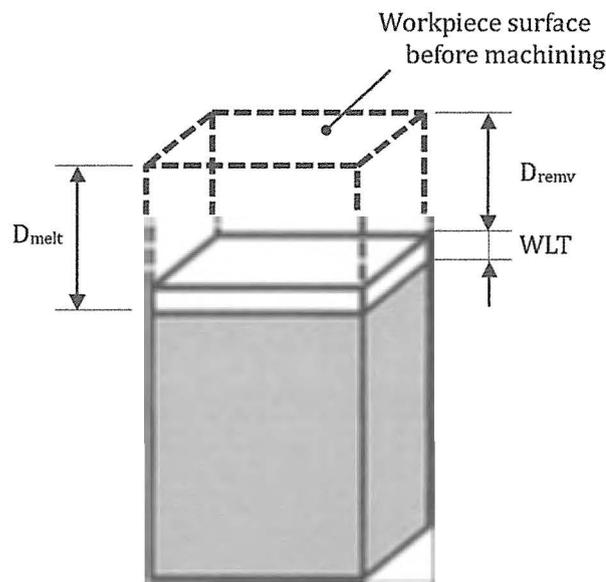


Fig. 3.2 Explanation of  $D_{\text{melt}}$ ,  $D_{\text{remv}}$  and WLT

### 3.2.2 再凝固層平均厚さ

工作物の加工面は  $9\text{mm} \times 5\text{mm}$  のサイズであるが，この加工面の再凝固層を観察するための切断位置を図 3.3 に示す．図 3.3 に示した切断位置で工作物を切断したあと切断面を鏡面研磨し，その後ナイタルでエッチング処理をして再凝固層を観察した．図 3.4 に絶縁油 A を使用して加工した工作物の再凝固層観察例を示す．図 3.4a に示した 5 つの領域（エリア 1～エリア 5）を使用して再凝固層平均厚さ（WLT）を計算した．計算式を式(3.7)に示す．

$$\text{WLT} = \frac{1}{5 \cdot L} \sum_{i=1}^5 S_i \quad (3.7)$$

ここで、Lは1つの領域のx方向長さ（本観察実験ではL=282 $\mu\text{m}$ ）、 $S_i$ は各領域の再凝固層面積を示す。このようにして測定した9種類の絶縁油を使用した場合の再凝固層平均厚さを図3.5に示す。再凝固層平均厚さは9.2 $\mu\text{m}$ から12.6 $\mu\text{m}$ の範囲でばらついており平均値は10.1 $\mu\text{m}$ となっている。

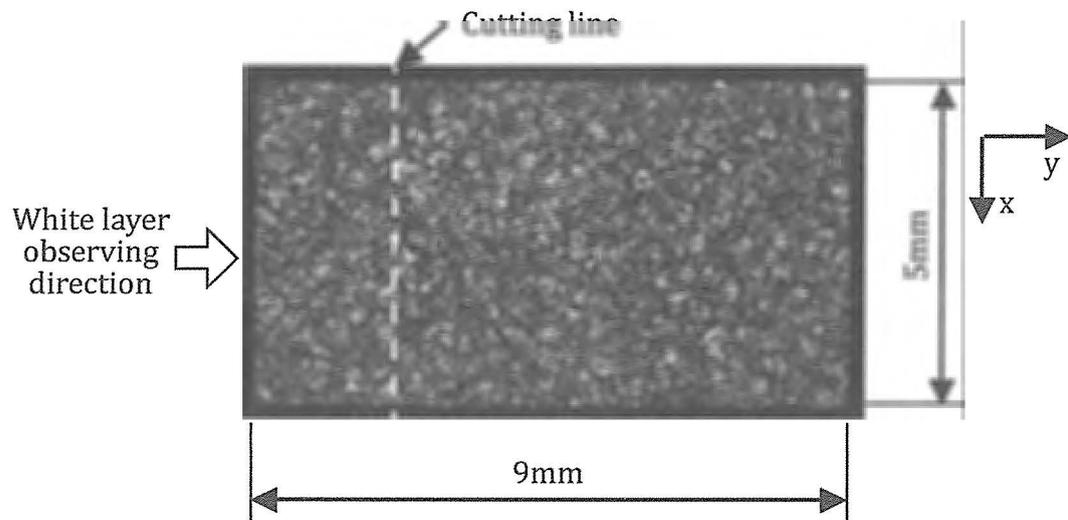


Fig. 3.3 Cutting line on the workpiece surface to observe the white layer

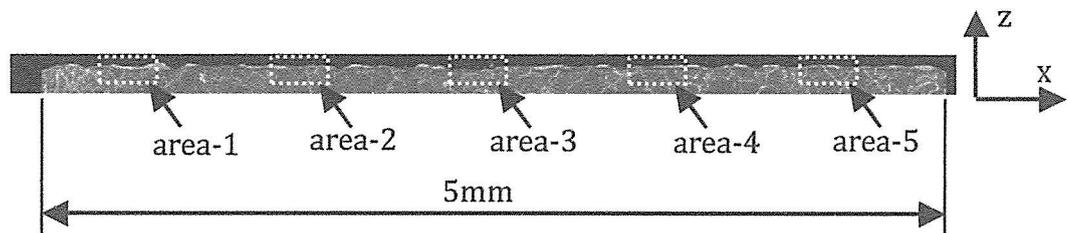


Fig. 3.4a Whole white layer view at the cross section

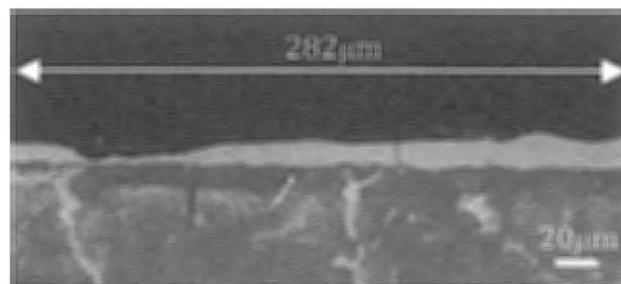


Fig. 3.4b Enlargement of area-4 of Fig. 3.4a

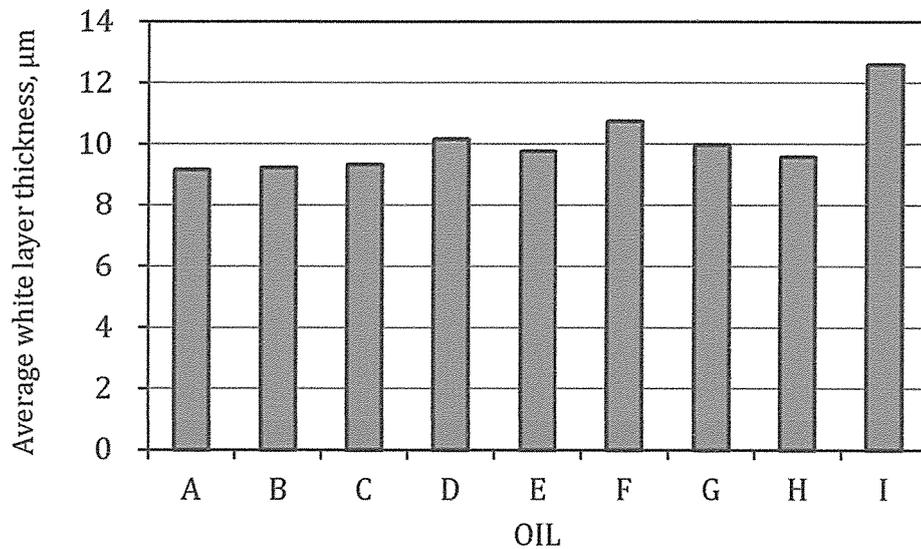


Fig. 3.5 Average white layer thickness for oils

### 3.2.3 除去効率

図 2.7 に示した除去量のデータを使用し、式(3.3)によって求めた平均除去深さ  $D_{remv}$  を図 3.6 に示す。図 3.6 より平均除去深さは  $381\mu\text{m}$  から  $557\mu\text{m}$  の間で変化していることがわかる。この平均除去深さと図 3.5 に示した再凝固層平均厚さ WLT を用いて式(3.6)により除去効率が求められる。求めた除去効率を図 3.7 に示す。図 2.9 に示した絶縁油の違いによる加工速度は最大値と最小値の比が 1.48 あったのに比べ、図 3.7 の除去効率は絶縁油によって殆ど変化しないことがわかる。図 3.7 に示した除去効率は 97.6% から 98.1% の間に収まっており、そのばらつき範囲はわずか 0.5 ポイントしかない。ここで、式(3.6)の右辺の分母と分子を  $D_{remv}$  で割ると式(3.8)が得られる。

$$\text{MRE} = \frac{1}{1 + \frac{\text{WLT}}{D_{remv}}} \quad (3.8)$$

つまり除去効率 MRE は、再凝固層平均厚さ WLT と平均除去深さ  $D_{remv}$  の比で決まるということがわかる。図 3.5 に示した再凝固層平均厚さは  $10\mu\text{m}$  前後の値

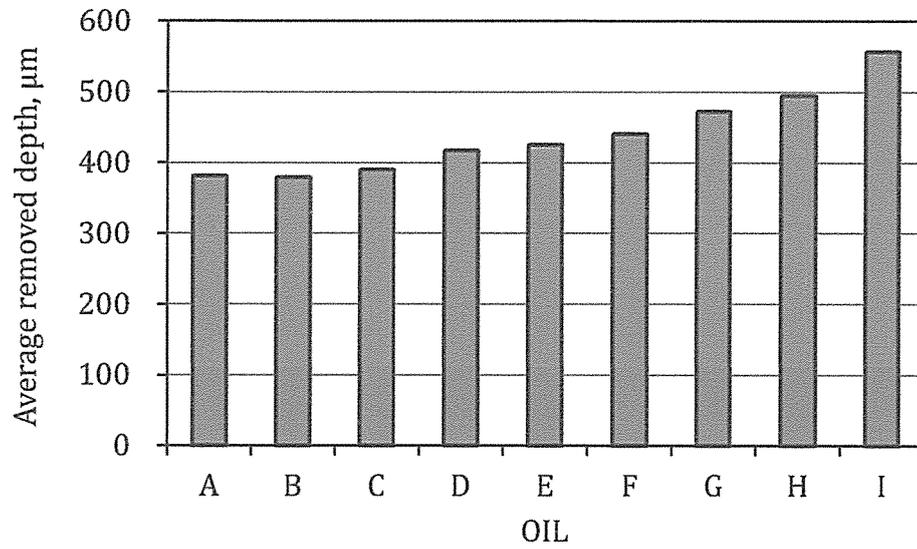


Fig. 3.6 Average removed depth for oils

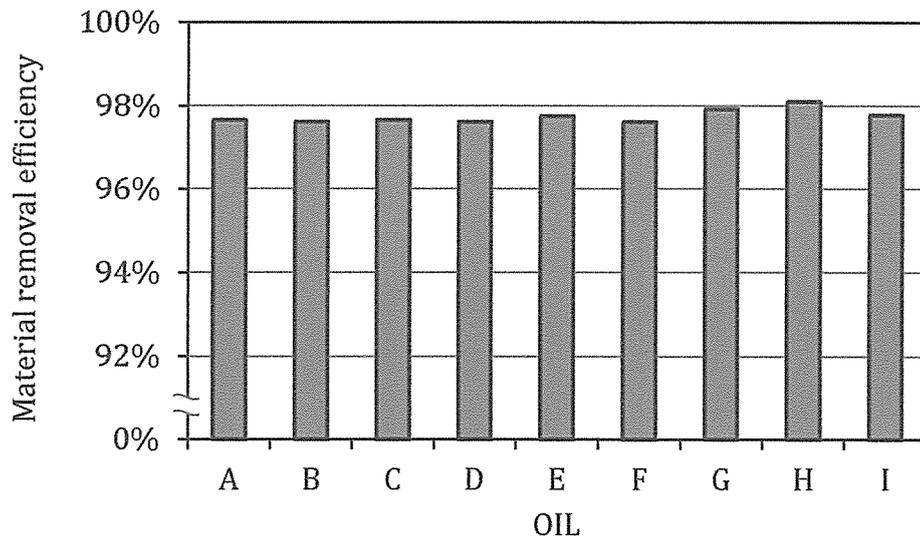


Fig. 3.7 Material removal efficiency for oils

であるのに対し、図 3.6 に示した平均除去深さは  $381\mu\text{m}$  から  $557\mu\text{m}$  なので、その比は 0.02 前後の値となり 1 と比べて 2 桁小さくなっている。油 A を例にとってみると、油 A の再凝固層平均厚さは  $9.2\mu\text{m}$  で平均除去深さは  $381\mu\text{m}$  なので、その比は 0.024 である。油 I の場合はそれぞれ  $12.6\mu\text{m}$  と  $557\mu\text{m}$  でその比は 0.023 となっている。図 3.7 に示した除去効率がいずれの絶縁油を使用した場合でも殆ど同じ値を示しているのは、再凝固層平均厚さと平均除去深さの比が絶縁油によって大きくは変化していないためである。そこで、平均除去深さが小さくなる条件で加工を行い除去効率がどう変化するか調べてみた。表 2.1 に示した加工条件の中の放電持続時間を短くし、 $50\mu\text{s}$  と  $100\mu\text{s}$  とすることで平均除去深さの低減を試みた。放電休止時間は表 2.1 と同じ  $250\mu\text{s}$  とし、絶縁油は油 A・油 G・油 I の 3 つを使用した。各放電持続時間に対する平均除去深さを図 3.8 に示す。各絶縁油共、放電持続時間の減少に伴い平均除去深さが小さくなっていることが分かる。油 I の場合、放電持続時間  $250\mu\text{s}$  のときの平均除去深さに比べ、同  $50\mu\text{s}$  のときの平均除去深さは 31%に減少している。次に、各放電持続時間に対する除去効率を図 3.9 に示す。放電持続時間が短くなり平均除去深さが小さくなくても、除去効率は大きく変動することはない。図 3.7 の結果と合わせてみても除去効率は 97.0%から 98.1%の範囲に収まっていることがわかる。

除去効率についてはこれまでもいくつかの研究が行われている [2,3]。Shabgard ら [3] は、繰り返し放電パルスにより実際に加工実験を行いその結果から 1 パルス当たりの除去量を求め、数値計算により求めた 1 パルス当たりの溶融量との比を計算して除去効率を推定している。この Shabgard ら [3] の研究では、陽極材質と陰極材質にそれぞれ銅と SKD61 を用いている。陰極 SKD61 の除去効率推定結果をみると、放電電流が 8A で放電持続時間が  $100\mu\text{s}$  の場合は 15.7%、放電電流が 16A で放電持続時間が  $100\mu\text{s}$  の場合は 32.0%と報告されており、本研究における放電電流 10A で放電持続時間  $100\mu\text{s}$  のときの結果である 97.6%から 98%という数値と大きく異なっている。この理由として 2 つの可能性が考えられる。1 つは 1 パルス当たり溶融量の計算方法であり、もう 1 つは加工実験時の実験条件である。前者について Shabgard ら [3] は単発放電実験により求められた熱入力半径を計算に採用しているが、これを使用して計算した溶融体積が繰り返し放電により得られるものよりも大きくなっている可能性がある。それは、猪飼ら [4] が繰り返し放電による 1 パルス当たりの放電痕体積について、単発放電による放電痕体積の 0.38 倍と推定しているからである。後者については、本研究で使用したサーボ基準電圧が 40V であるのに対し、Shabgard ら [3] は 70V の設定で行っており、この違いが影響している可能性がある。

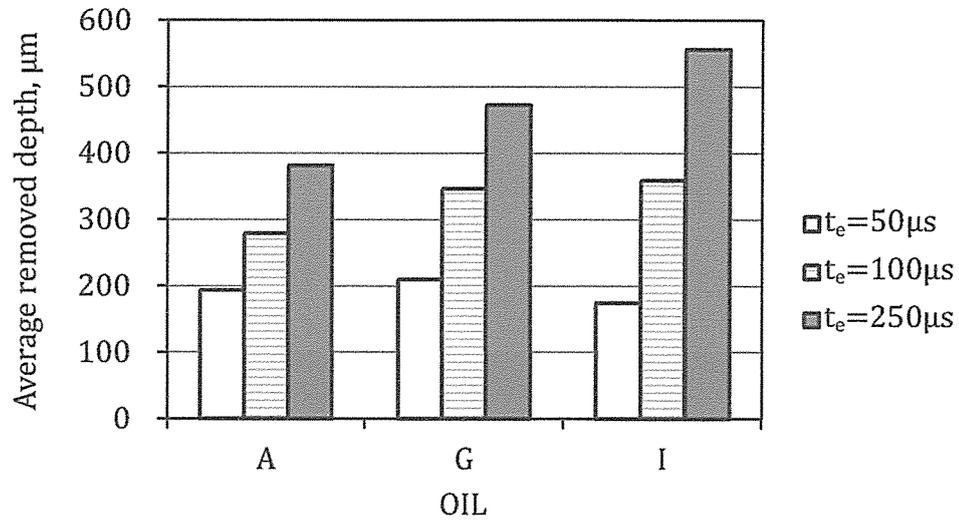


Fig. 3.8 Average removed depth for various discharge durations

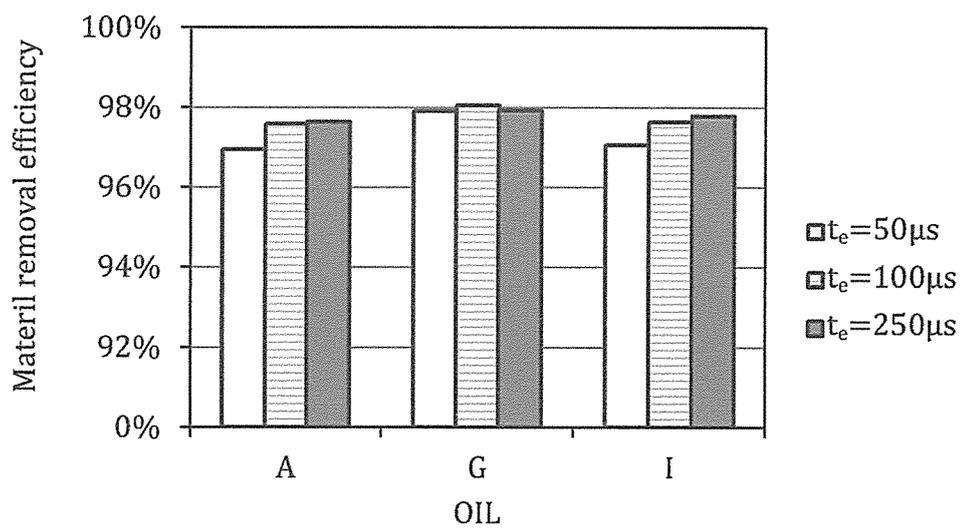


Fig. 3.9 Material removal efficiency for various discharge durations

### 3.2.4 1 放電パルス当りの溶融体積

ここで、図 3.5 の平均再凝固層厚さと図 3.6 の平均除去深さから、式(3.2)，式(3.4)，式(3.5)を用いて総溶融体積を求め、さらに、その溶融体積を図 2.8 の放電回数で割って 1 放電パルス当りの溶融体積を求めた結果を図 3.10 に示す。また、1 放電パルス当りの溶融体積と加工速度の関係を図 3.11 に示す。

結局、除去効率も放電回数も絶縁油による差が小さいという事実からの当然の帰結であるが、図 3.11 に示したように、本研究での加工条件では、1 放電パルス当りの溶融量によって加工速度が左右されているということになる。

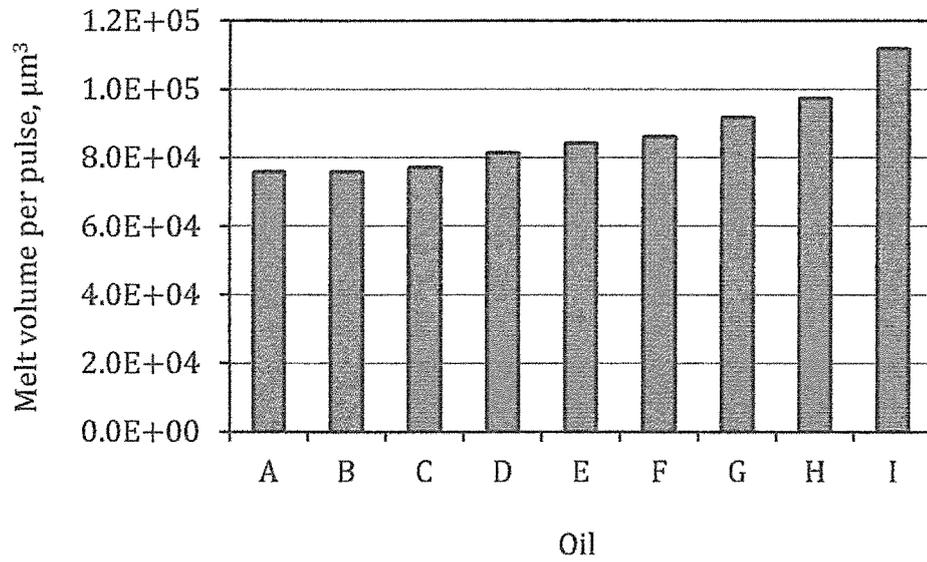


Fig. 3.10 Melt volume per pulse

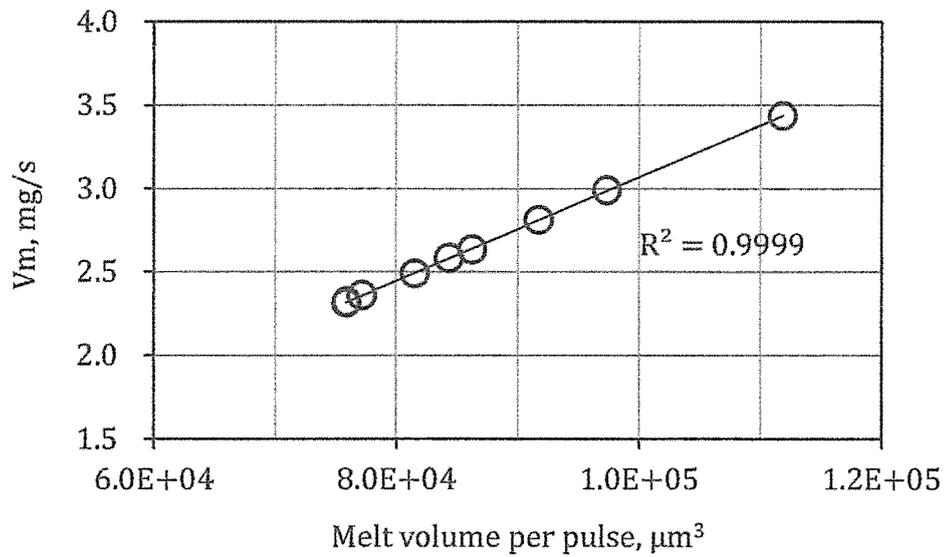


Fig. 3.11 Relationship between melt volume per pulse and removal rate  $V_m$

### 3.3 第3章のまとめ

第2章では、使用する絶縁油によって加工速度に最大で1.48倍の差があり、その差は1放電パルス当りの除去量の違いに起因していることを示した。1放電パルス当りの除去量が異なる原因としては、1放電パルス当りの溶融量の違い、あるいは除去効率の違いが考えられる。そこで本章では、第2章で示した絶縁油による加工速度差の原因を探るために、溶融量と除去効率について調べた。溶融量は再凝固層の平均厚さを計測しこれを除去深さに加えることで算出した。除去効率は除去深さと溶融深さの比によって求めた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 除去効率は絶縁油によって差が無い。
- (2) 加工速度は1放電パルス当りの溶融量で支配されている。

次の第4章では絶縁油によって溶融量が異なる原因について、非定常熱伝導解析を用いて調べる。

## 第3章 参考文献

- [1] P. Kruth, L. Stevens, L. Froyen, B. Lauwers, Study of the White Layer of a Surface Machined by Die-Sinking Electro-Discharge Machining, *Annals of CIRP*, Vol.44, No.1, (1995) pp.169-172
- [2] J. Marafona, J.A.G. Chousel, A finite element model of EDM based on the Joule effect, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol.46 (2006) pp. 595-602
- [3] M. Shabgard, R Ahmadi, M. Seyedzavvar, S.N.B. Oliaei, Mathematical and numerical modeling of the effect of input-parameters on the flushing efficiency of plasma channel in EDM process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol.65 (2013) pp. 79-87
- [4] 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