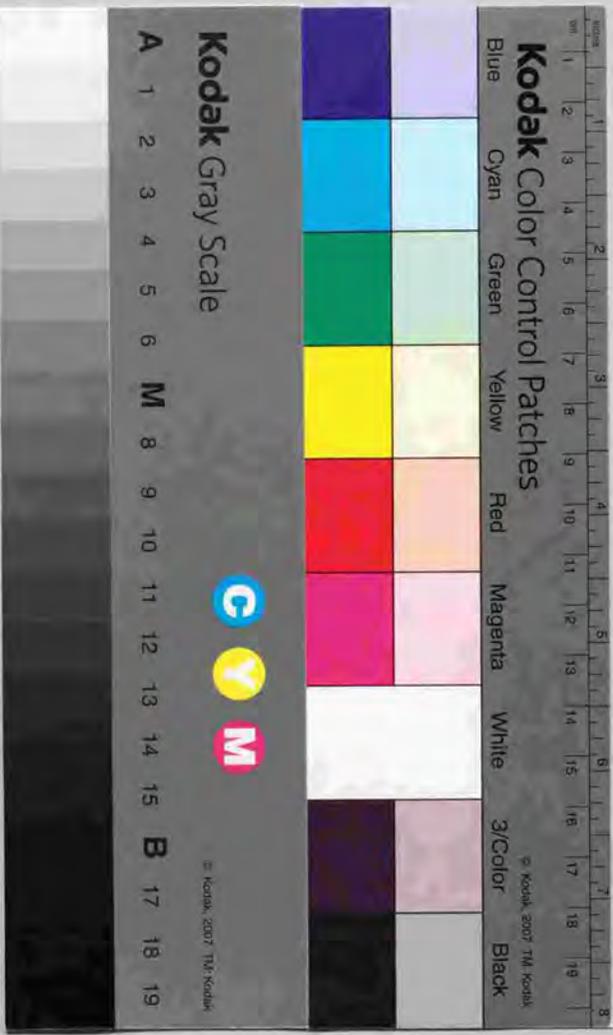


放電加工における
放電生成物の状態制御と利用に関する研究

後藤昭弘



放電加工における
放電生成物の状態制御と利用に関する研究

後藤昭弘

放電加工における放電生成物の状態制御と利用に関する研究

目次

1 序論	1
1.1 放電加工の現状	1
1.2 放電加工の歴史	1
1.3 放電加工の加工原理	4
1.4 本研究の背景と目的	9
1.4.1 本研究に関する先行研究	9
1.4.2 背景と目的	9
1.5 本論文の構成	13
1.5.1 用語の定義	13
1.5.2 本論文の構成	16
2 油系加工液を用いた場合の加工屑制御-I	
2.1 放電状態の制御	18
2.1.1 はじめに	18
2.2 加工屑状態の把握	20
2.2.1 加工電圧波形と加工状態との関係 (特徴量の定義と実験方法)	20
2.2.2 実験装置	20
2.2.3 加工深さの推移	23
2.2.4 特徴量の分析	26
2.2.5 放電状態が放電状態検出パラメータに及ぼす影響	37
2.3 仕上げ面への影響	41
2.3.1 放電中の電圧分散値 V_{sv} と高周波成分 V_{shf} の関係	41
2.3.2 高周波成分 V_{shf} の検出回路	46
2.3.3 実時間での加工状態検出	52
2.3.4 NGパルスおよびARパルスの作用	56

2. 3. 5 高周波成分の意味	59
2. 4 高周波成分フィードバックによる安定化	61
2. 4. 1 不安定状態の検出	61
2. 4. 2 高速休止制御	61
2. 4. 3 他の適応制御との併用	64
2. 5 まとめ	70

3 油系加工液を用いた場合の加工屑制御— I —

— 短絡現象の解消 —	71
3. 1 はじめに	71
3. 2 短絡状態の把握	73
3. 2. 1 短絡時の極間状態	73
3. 2. 2 加工屑に作用する力	75
3. 2. 3 短絡ブリッジの観察	78
3. 2. 4 加工面品質への影響	83
3. 2. 5 ピーク電流値 i_e と短絡頻度	83
3. 3 電流制御による短絡の解消	86
3. 3. 1 極間短絡の検出原理	86
3. 3. 2 短絡電流防止回路の効果1	
— グラファイト電極への付着物 —	88
3. 3. 3 短絡電流防止回路の効果1	
— 電極・工作物の傷 —	92
3. 3. 4 短絡電流防止回路のまとめ	96
3. 4 ブリッジ破壊による短絡の解消	96
3. 4. 1 短絡ブリッジ除去の原理	97
3. 4. 2 短絡ブリッジ除去回路の構成	99
3. 4. 3 短絡ブリッジ除去パルスの最適化	102
3. 4. 4 短絡ブリッジ除去回路の効果1	
— 短絡解消率 —	106
3. 4. 5 短絡ブリッジ除去回路の効果2	

— 短絡発生率 —	109
3. 4. 6 短絡ブリッジ除去回路の効果3	
— 仕上加工速度および電極消耗率 —	111
3. 4. 7 短絡ブリッジ除去回路のまとめ	111
3. 5 まとめ	114

4 不燃性加工液を用いた場合の分解生成物制御

4. 1 はじめに	115
4. 2 加工状態の解析と分解生成物の同定	116
4. 2. 1 実験条件	116
4. 2. 2 不燃性液を用いた放電加工におけるタールの生成	118
4. 2. 3 極間短絡の発生	118
4. 2. 4 タールの分析	118
4. 2. 5 極間電圧の低下	120
4. 2. 6 不燃性液放電加工におけるタールの発生機構	124
4. 2. 7 タールの工作物面への付着	127
4. 3 タール付着の抑制	130
4. 3. 1 両極性加工の原理	130
4. 3. 2 大面積での加工結果	132
4. 3. 3 短絡の減少と極間電圧低下の防止	135
4. 4 まとめ	138

5 放電生成物を利用した硬質被膜の形成

5. 1 はじめに	139
5. 1. 1 従来の表面処理技術	139
5. 1. 2 放電現象を利用した表面処理技術の背景	140
5. 2 工作物表面の硬化現象	141
5. 2. 1 実験方法	141
5. 2. 2 Ti電極による放電表面処理	141
5. 2. 3 被膜形成プロセス	141

5. 3	生成被膜の特性分析	144
5. 3. 1	硬質被膜の性質	144
5. 3. 2	パルス幅と膜厚の関係	147
5. 3. 3	処理時間と膜厚の関係	147
5. 3. 4	磨耗試験	152
5. 3. 5	圧粉体電極による処理	152
5. 3. 6	処理時間による被膜の推移	155
5. 3. 7	面あらし改善の方法	159
5. 3. 8	硬質被膜の密着性	159
5. 3. 9	その他の特長	163
5. 4	任意形状の領域表面硬化と工具改質への応用	163
5. 4. 1	単純形状電極による走査法	163
5. 4. 2	被膜生成の例	165
5. 4. 3	プレス型への適用	165
5. 4. 4	ドリルへの応用	169
5. 5	まとめ	173
6	結論と展望	175
6. 1	本研究により得られた成果	175
6. 1. 1	放電状態の解析結果	175
6. 1. 2	短絡状態の解析結果	176
6. 1. 3	不燃性加工液を使用した場合の放電現象の解析結果	176
6. 1. 4	放電生成物の硬質被膜形成への利用	177
6. 1. 5	まとめ	178
6. 2	展望	178
	謝辞	180
	参考文献	182
	本論文に関する公表文献	189

第1章 序論

1. 1 放電加工の現状

1940年代に旧ソビエト連邦のラザレンコ夫妻により発明された放電加工は今では、金型等の加工技術として確固たる地位を築いている。放電加工は、主として自動車産業、家電産業、半導体産業などの金型加工の分野において利用されてきた。日本の産業の発展は金型なしにはあり得なかったといっても過言ではない。図1-1は日本における放電加工機の生産台数と生産高を示したグラフである¹⁾。1975年以來、急速な生産高の伸びを示している。1990年には、国内の放電加工機生産高は930億円に達し、全工作機械生産高の10%弱を占めるまでに到った。その後、バブル崩壊の影響を受け、1993年には生産台数・生産高とも半減したが、1997年には800億円近くまで回復している。

1. 2 放電加工の歴史

放電が製造技術に利用されたのは古く、1919年頃に金属の微粉末を製造するのに使用されている^{1) 2)}。その後、金属材料に対して特定の形状を高い精度で加工する目的に放電現象を利用したのが、1940年代のラザレンコ夫妻によるRC発振回路であり^{1) 3) 4)}、これが現在の放電加工の始まりといわれている。日本における放電加工の研究は、鳳により1949年に発表された論文^{1) 5)}が始まりである。

その後各国で放電加工に関する研究が行われたが、(1)放電加工電源に関する研究、(2)放電状態のセンシング技術・適応制御技術、(3)放電加工の応用技術、と分けて概観する。

(1) 放電加工電源に関する研究

ラザレンコ夫妻によるRC発振回路が発明された後、しばらくの間電源の主流はRC発振回路であった。1960年代になると半導体技術の進歩により、スイッチング素子

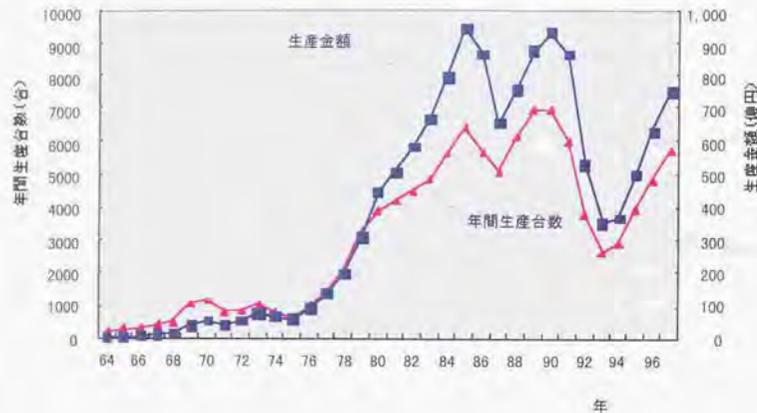


図1.1 放電加工機の生産台数・生産金額

を利用した電源へと発展した。このため、電極消耗を著しく少なくすることが可能となり、精密加工法としての放電加工が確立されるに至った。電極消耗率で比較すると、RC発振回路では数10%であったのに対し、スイッチング素子による矩形波の電流パルスでは1%以下と大きな進歩を達成できた。

さらに、1960年代後半になると、スイッチング素子を用いた電源の電流波形の改良により、電極消耗率0.1%以下という電極超低消耗加工が発明された。De Bruyn¹⁾はプラズマが膨張してもプラズマ中の電流密度が一定値を保つように台形状の放電電流波形を用いると、電極消耗率が大幅に向上する事を報告し、slope controlと名づけている。また、小林ら^{2), 3), 4)}は立ち上がりあるいは立ち下がりに傾きをつけた電流波形を作り、加工特性の関係を調べている。現在の形彫放電加工機において主として用いられている電源は、これらの研究に基づくところが大きい。

その後、夏ら⁵⁾は、陽極である電極へのカーボン付着量の時間的な変化により1回の放電の中で陽極と陰極の除去速度の比が時間とともに変化することを利用して、1回の放電の途中で電極と工作物の極性を反転させる反転パルスを考案し、電極消耗率を低減させている。

(2) 放電状態のセンシング技術・適応制御技術

放電加工の際の加工品質に影響を与える最大の問題は定常アークと呼ばれる放電の集中である。そのため、放電加工の研究では、電源特性の研究とともに、定常アークを検出し防止するためのセンシング技術・適応制御の研究が多くの研究者により行われてきた。

1970年に放電加工初の適応制御が齋藤、小林^{1), 10)}らにより開発された。この技術は放電パルスの電圧波形の放電遅れ時間を調べ、放電遅れ時間の無い放電がある期間続いた場合に休止時間を延ばすというものである。その後、Snoeyers^{11), 12)}は、様々な加工条件のもとでiso-frequent電源を用いた加工実験を行い、一定以上の放電遅れ時間を持ったパルス(normal spark)の放電時間の合計と計測時間の比が加工速度を反映していることを見いだした。他方、元木ら^{13), 14)}は休止中の極間抵抗と、極間電圧波形に含まれる高周波成分が異常放電状態の場合には小さくなることを示し、これらを用いた加工状態検出の可能性を示唆している。同様の研究には、電圧・電流波形に含まれる高周波成分^{15), 16), 17)}、極間から放射される電磁波¹⁸⁾

を用いる研究がある。

3) 放電加工の応用技術

放電加工の応用技術としての研究として、通常の金属の放電加工とは異なる研究について概観する。

まず、通常の放電加工で得られる加工面とは異なった面を得る技術として、1980年代の後半に粉末混入放電加工法が毛利・齋藤ら^{1) 20), 1) 21)}により発明された。放電加工はパルス状の電流のエネルギーにより工作物を除去していく加工方法であるため、一般的に加工面は梨地状になり、金型として使用するためには磨きの工程を行う必要があった。しかし、仕上げ加工において加工液中にシリコン粉末を混入すると光沢のある加工面が得られ、500cm²程度の面積でも鏡面を得ることができるようになった。

また、放電加工において工作物は一般に導電性材料であるが、倉藤ら^{1) 22)}は電解液中での放電を利用してルビーに小孔加工を行っている。さらに、福沢ら^{1) 23), 1) 24)}は補助電極としてセラミックス上に銅電極を置くことにより、絶縁性セラミックスの加工を行えることを発見した。

放電加工を加工以外の目的に利用できることを示す研究として、鈴木ら^{1) 25), 1) 26)}はステンレスの溶接部分にシリコン電極で放電加工を行うことにより、王水に浸しても腐食しないほどの耐蝕性を得ることができたと報告している。

また、放電加工の特徴を生かして微細形状の加工を行う研究として、増沢ら^{1) 27), 1) 28)}は、走行させたワイヤ電極と棒状電極との間に放電を発生させ ϕ 数 μ m～ ϕ 数10 μ mの微細な電極を製作するワイヤ放電研削法(WEDG: Wire Electrodischarge Grinding)を提案している。さらに余ら^{1) 29), 1) 30)}は、ワイヤ放電研削法により形成された微細電極を用いて創成加工を行い、微細モールドを製作できることを示している。

1. 3 放電加工の加工原理

放電加工法は、銅やグラファイトなどの導電性材料を工具電極とし、銅などの工

作物の間にパルス状の放電を発生させて工作物を溶融除去する加工法である。一般に、特定形状の総型を利用して転写加工を行う形彫放電加工と、ワイヤ状電極を利用して輪郭のくり抜き加工を行うワイヤ放電加工に大別されている。本論文では、このうちの形彫放電加工を研究の対象としている。

放電加工のメカニズムは、図1. 2に示すように、(1)放電の発生によるアーク柱の形成と放電熱エネルギーによる局部的溶融、(2)(3)加工液の気化爆発力の発生とそれによる溶融部の飛散、(4)(5)加工液による溶融部の冷却、凝固、極間の絶縁回復というプロセスからなる。これらのサイクルを高い頻度で繰り返す、工作物の加工が進行する。放電加工ではパルス状の電流が使用されるが、加工効率の良さや制御の容易さから、一般的に、方形波電流パルスが用いられる。加工速度を重視する荒加工では、電流値が高くパルス幅の長い電流パルスが使用され、仕上げ面あらさを重視する仕上げ加工では、電流値が低くパルス幅の短い電流パルスが使用されて、エネルギーが大きな条件から、小さな条件へと順次条件を切り換えながら加工を行う。

電極と工作物の対抗する極間間隙は数 μ mから数十 μ mと非常に狭く保たれており、これが、高精度加工の重要な要因になっている。

放電加工は導電性材料ならば、材料の硬度や形状の複雑さによらず自動加工が可能であり、任意の形状を精度よく転写加工できるため、金型製作のマザーマシンとしての地位を確立している。

図1. 3、図1. 4に現在ひろく用いられている放電加工の電源回路を示す。図1. 3の回路はラザレンコ夫妻により発明されたRC発振回路と基本的に同じであり、コンデンサに充電された電荷が放電により放出される方式の回路となっている。現在では、主に仕上げ加工に利用されることが多く、加工面粗さ2～10 μ mRy程度の加工面を得るために使用される。また、図1. 4の回路は荒加工から仕上げ加工まで使用される回路方式であり、ピーク電流値 i_e とパルス幅 t_e を変化させることにより面粗さを変えることができる。現在の放電加工機では、以上の回路あるいは、図1. 4の回路を改良して電流の立ち上がりを緩やかにし、電極消耗を抑えた回路方式が主流である。

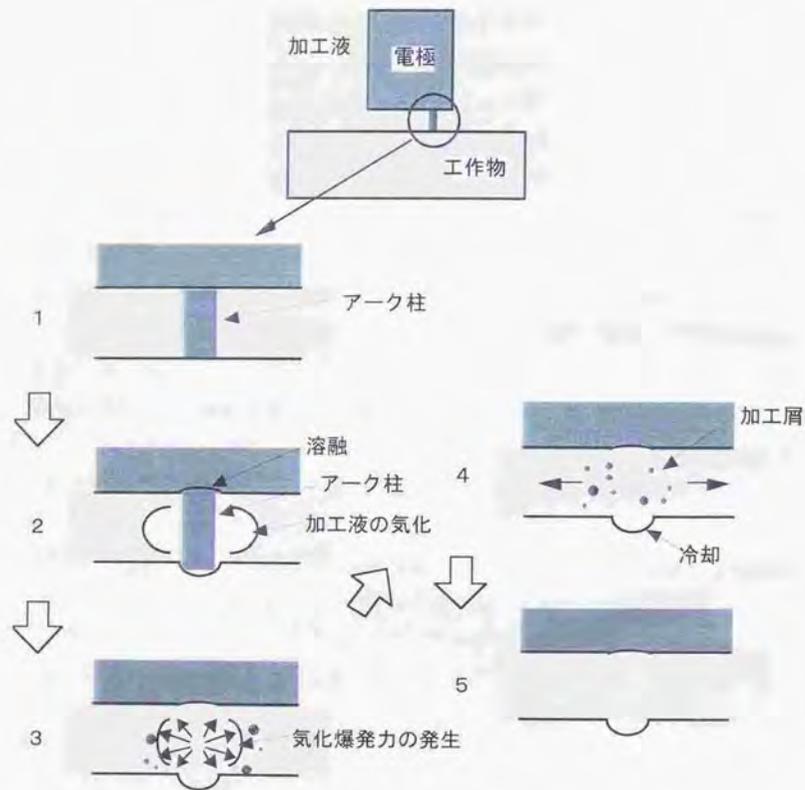


図1. 2 放電加工の原理

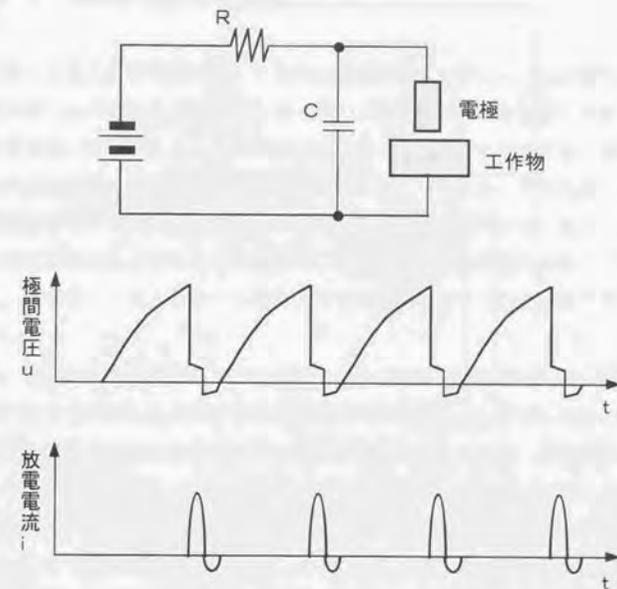


図1. 3 コンデンサ方式放電回路

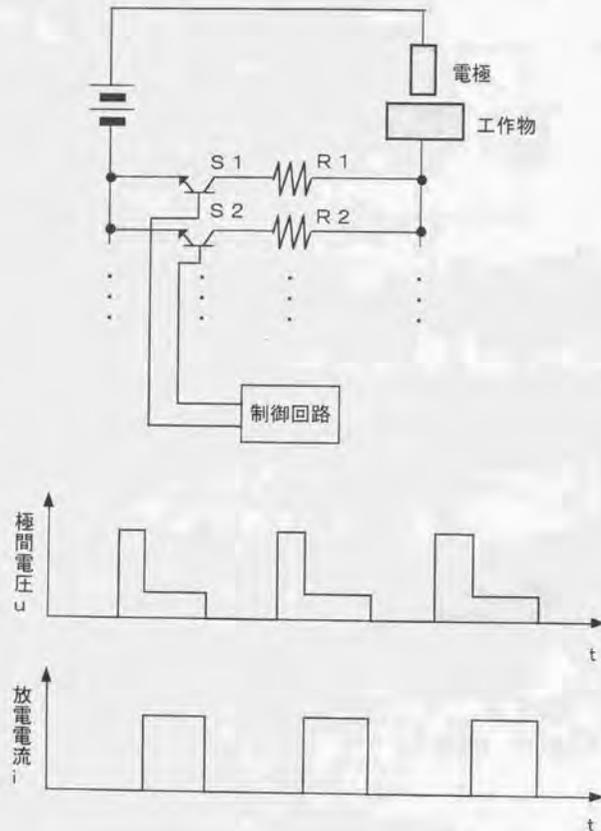


図 1. 4 トランジスタ方式電源回路

1. 4 本研究の背景と目的

1. 4. 1 本研究に関する先行研究

放電加工により極間に生成される放電生成物に関する研究について概説する。
 放電状態における放電生成物の影響に関しては、放電生成物により放電加工の特性が影響を受けるということは経験的には以前よりよく知られている。極間における放電生成物の濃度が高くなると放電の集中をもたらすため、その対策として古くから電極のジャンプ動作、加工液のフラッシングが行われている。また一方で放電特性と電圧波形のある特徴量との関係について調べた研究は見られる^{1) 11) 13) 14)}。しかし、放電特性と電圧波形の特徴量と放電生成物の関係について調べた研究はない。

また、放電生成物の極間における挙動について研究された例は多い。須田ら^{1) 22)}は極間に電圧を印加したときの加工屑の挙動について調べ、帯電した加工屑が電極と工作物を行き来しながら電極あるいは工作物に付着していき、それが放電を誘発していることを見出した。元木ら^{1) 23)}は、放電のイオン消沈について、加工屑と関連して述べている。平ら^{1) 24)}は、不燃性加工液における除去機構について研究し、極間の加工屑や橋絡が放電の引き金になっていると述べている。国枝ら^{1) 25)}は極間に電圧を印加したときの加工屑の挙動についてシミュレーションを行っている。

放電生成物を積極的に利用する点については、毛利・齋藤らの豊田工業大学の研究チームにより始められた^{1) 26)}。毛利らは放電加工に使用する電極の熱伝導率を下げることで電極消耗を増やすことができることに注目し、粉末を圧縮成形した圧粉体電極を用いて、工作物表面に電極材質を付着させることを行った。その他、気中放電を利用した表面処理としては、旧ソビエト連邦などで行われた^{1) 27)}。

1. 4. 2 背景と目的

最近では、加工能率を良くするというだけでなく、より細かく均一な仕上げ面を得ることが望まれている。従来、金型製作などに放電加工が使用される場合には、その後磨きの工程を行い放電加工面を除去するのが通例であった。しかし、

昨今、粉末混入放電加工の開発などに見られるように、放電加工の仕上げ面がそのまま製品として使用されるまでに進歩した。その結果、放電加工の面性状に対する要求も厳しくなり、少しのしみ、傷なども許されないような状況となっている。

また、近年切削加工の技術が進み、切削速度が向上するとともに、従来難削材といわれていた材料でも切削できるようになった。その結果、従来放電加工でも行われていた荒加工は徐々に切削加工へと移行しており、荒加工は切削、仕上げ加工あるいは複雑形状は放電加工という加工方法の住み分けがなされるようになってきている。このことも放電加工の面品質に対する要求が厳しくなってきた理由であると考えられる。

放電加工の現在の性能上問題となっている代表的な例について説明する。図1.5は、放電加工によりスラッジが工作物の加工面に付着した写真である。このスラッジは拭き取っても完全には除去できず、しみが残る。また、図1.6は工作物の加工面に小穴ができた場合の例である。このような小穴の形成には放電加工により生成される加工屑が大きく影響している。加工面にこのような小穴ができると、面を仕上げるために穴の深さまで磨きを行う必要があり、生産性の面で大きな問題となる。以上の例は油の加工液を使用した場合の例であるが、図1.7は水系の加工液を使用した場合の例である。水系の不燃性加工液を使用すると荒加工において加工速度を上げることができるが、仕上げ加工では、図のように加工面にタール状生成物が付着して加工特性が劣化するという問題がある。

以上のような状況を踏まえ、本論文では放電加工の加工性能の向上させるため、また、放電加工の用途拡大のため、以下の2点を目的とする。

1. 極間における放電生成物が加工特性の劣化に対して与える影響の解析および、加工特性の劣化の防止について明らかにする。
2. 放電により生ずる物理的現象の表面改質への利用について検討する。

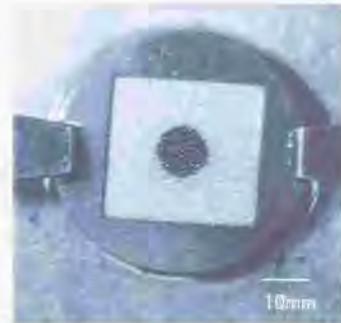


図1.5 放電加工によるしみ



図1.6 仕上げ面の小穴

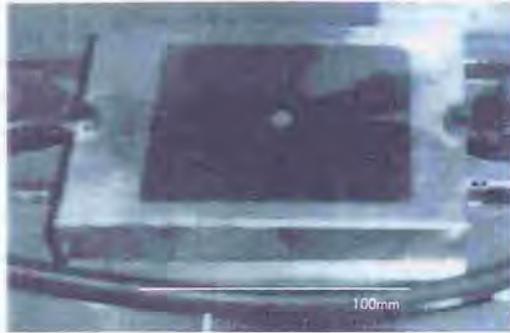


図1.7 水系加工液を使用した場合のタール付着

1.5 本論文の構成

1.5.1 用語の定義

本論文では、特に断らない限り図1.4に示すようなスイッチング素子方式の回路を基本とした電源回路を使用する。図の電源の電圧を「電源電圧」とよぶ。図1.8に図1.4の回路での放電電圧電流波形を示す。図に示すように、スイッチング素子がオンして電圧が立ち上がってから放電が発生するまでの時間を「放電遅れ時間 t_d 」またその時の電圧を「無負荷電圧 u_i 」とよぶ。また、放電電流パルスの持続時間を「パルス幅 t_e 」、放電電流パルスが終了してから、次のパルスの電圧が印加されるまでの時間を「休止時間 t_o 」、電流パルスの波高値を「ピーク電流値 u_e 」と定義する。本論文の実験で使用する電源は、パルス幅 t_e が一定となるiso-energetic電源であり、「パルス幅 t_e 」「休止時間 t_o 」をあらかじめ設定することができる。電極の送りは平均電圧サーボ方式を使用し、平均電圧が40Vとなるよう設定しており、「放電遅れ時間 t_d 」は平均的にはその条件で決る値となる。

また、放電加工中の電極定時引き上げ動作は「ジャンプ」とよぶ。「ジャンプ」は図1.9に示すように電極の引き上げ量とその時間、および、その間の加工時間で定義する。電極の引き上げ量を「ジャンプアップ量 d_j 」、引き上げから戻しまでの時間を「ジャンプ時間 t_j 」、ジャンプの間の加工時間を「ジャンプインターバル t_{ji} 」とする。

また、本論文では、放電生成物について扱うが、主に工作物である鉄などの金属粉末を指すときには「加工屑」、金属粉末に加工液の分解物であるカーボンを含んだものを指すときには「スラッジ」、また、水系の不燃性加工液を使用した場合のタール状生成物を「タール」と呼んで区別する。

電極形状に関して、1辺 a mmの正方形の断面形状の電極の場合、「□ a mm」、また、1辺 a mmで他の1辺 b mmの長方形の断面形状の電極の場合、「□ $a \times b$ mm」と記す。

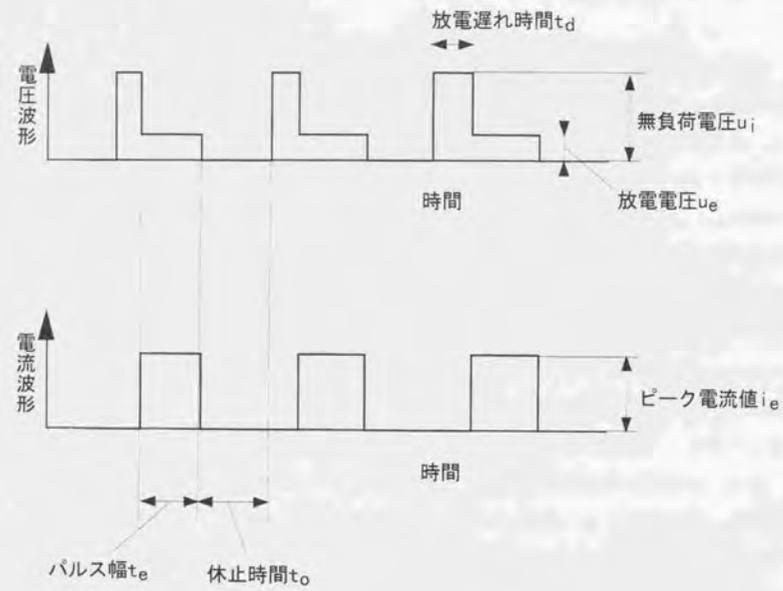


図 1. 8 放電電圧電流波形

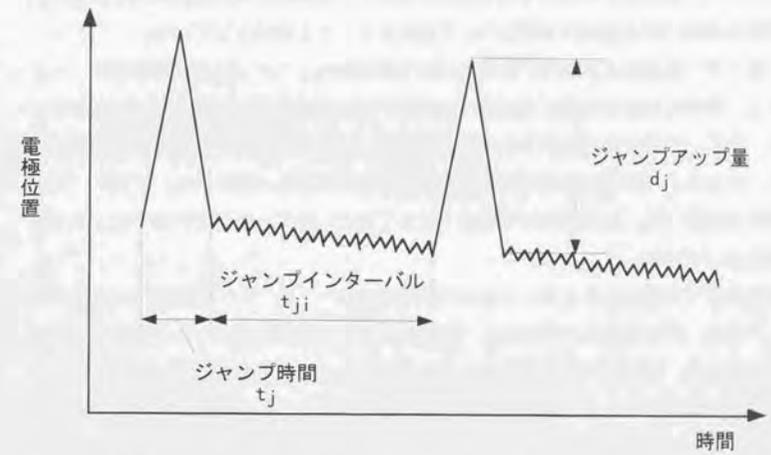


図 1. 9 ジャンプパラメータの定義

1. 5. 2 本論文の構成

本論文は6章から構成されている。

放電加工に伴い、極間には様々な物質が生成される。本研究はこれら放電生成物について、放電加工特性に与える影響を調査し、加工特性を向上させるとともに、放電生成物の新たな利用方法について提案することを目的としている。

第2章「油系加工液を用いた場合の加工屑制御-I - 放電状態の制御 -」では、放電生成物が放電加工速度・加工面の傷などに与える影響について調査する。まず、放電状態を反映する特徴量を見出し、放電生成物の検出方法を検討する。さらに、特徴量と放電生成物の挙動と放電加工状態の関係について調べ、その結果を利用して、放電生成物を検出して加工速度の低下・加工面の傷を防止する方法について示す。

第3章「油系加工液を用いた場合の加工屑制御-II - 短絡現象の解消 -」では、放電生成物の中で最も一般的なものである加工屑について検討する。加工屑の挙動、特に極間短絡時の加工屑の挙動に注目し、短絡時に加工屑が加工面品質・加工速度に与える影響について考察する。さらに、極間短絡時に放電加工の電流波形を制御することにより加工屑の挙動を制御し、加工特性を改善する方法について検討する。

第4章「不燃性加工液を用いた場合の分解生成物制御」では、加工液に高分子系不燃性液を用いた場合の放電加工における現象を調査する。高分子系不燃性液を加工液として使用すると、極間にタールが生成する。タールは特に仕上げ加工において、加工速度低下・仕上げ面性状の劣化などに見られるように、加工性能を大きく劣化させる。これらの加工現象について調査し、加工特性の改善方法について検討する。

第5章「放電生成物を利用した硬質被膜の形成」では、放電加工による放電生成物を利用する新しい技術について検討する。通常、放電生成物は、放電加工においては無用の代物であったが、特定の材料を電極として用いると放電生成物により硬質膜を形成することができることを示す。さらに、その被膜の特性および成膜の状況について調査する。さらに、新しい被膜形成プロセスを応用して、工具・金型などの寿命延長に適用した例を紹介する。

第6章「結論」では、第2章から第5章までに得られた新たな知見を要約し、本論文の結論を述べる。さらに、本研究の成果に基づき、今後の放電加工の展望について述べる。

第2章 油系加工液を用いた場合の加工屑制御— I

— 放電状態の制御 —

本章では、放電電圧波形の様々な特徴量と加工速度の関係について解析した。その結果、放電期間中の電圧の分散値が最も加工状態を表すことがわかった。この結果より、放電電圧の分散値によって放電パルスを分類するために、電圧の分散値とほぼ同等の意味を持つ放電電圧高周波成分を検出する回路を制作した。本回路により、放電パルスを分類し、スラッジの状態と高周波の関連について調べた。さらに、放電加工の適応制御に応用した。

2. 1 はじめに

一般に、形彫放電加工においては、加工深さの増大に伴って徐々に加工速度が低下し、最後には加工が全く進行しなくなる。このような状態では定常アーク放電の発生により加工面が損傷することも少なくない。したがって加工速度および加工面品質を向上させるには加工の状態を良好に維持する必要がある。ここで、「放電状態」を極間の電圧波形などにより検出される放電1パルス毎のミクロな状態とし、「加工状態」を加工速度や加工面の損傷の発生などマクロに観測される状態とすれば、放電加工の場合には加工状態をリアルタイムで直接検出することは困難な場合が多いため、検出された放電状態から加工状態を推定する方法が一般的である。

例えばSnoeysら²⁾は、様々な加工条件のもとでiso-frequent電源を用いた加工実験を行い、一定以上の放電遅れ時間を持ったパルス(normal spark)が放電した時間の計測時間にしめる割合が加工速度を反映していることを見いだした。さらに、上記割合をオンラインで計測可能な加工速度の指標として加工条件を制御し、最大加工速度を得る適応制御を行っている。このように、リアルタイムで計測可能で、加工結果と関係のあるパラメータを用いて適応制御を行う研究は数多く報告されている^{2) - 7)}。これらの研究ではiso-frequent電源が用いられているが、De Bruyn²⁾は放電遅れ時間がない場合に強制的にパルスを終了させるように改造したiso-

energetic電源で実験を行い、放電遅れ時間の有無は加工速度や電極消耗と無関係であるとの結果を得ている。したがって、iso-energetic電源が広く用いられている現状では、加工状態とセンシングパラメータの関連について、再度検討が必要と思われる。また、これらの研究では、あるしきい値で放電パルスを分類して放電状態を決定することが一般的であるが、決定されたしきい値の根拠を示した研究はなく、この点を明らかにする必要がある。さらに、これらの研究ではセンシングパラメータを見いだす際にサーボパラメータなどの加工条件は変化させているが、加工状態の変化は考慮されていない。加工状態が悪化すれば極間の距離やインピーダンスが変化するため、センシングパラメータと加工結果との関係も変化することが考えられる。したがって、加工状態が良好な場合と不良な場合におけるセンシングパラメータの比較検討が必要と考えられる。

他方、元木ら^{8) - 9)}は休止時間中の極間抵抗と、極間電圧波形に含まれる高周波成分が異常放電状態の場合には小さくなることを示し、これらを用いた加工状態検出の可能性を示唆している。同様の研究には、電圧/電流波形に含まれる高周波成分^{10) - 12)}、極間から放射される電磁波^{13) - 15)}を用いる研究がある。また、Milickaら^{2) - 17)}は放電電圧やその高周波成分と加工状態との関連について、陽極点の安定性の観点からの解釈を試みている。しかし、当該放電状態検出方法の有効性を確認するには、検出した放電状態と得られた加工結果とを対照する必要があるが、こうした検討はなされていない。また、放電状態を判別するしきい値の存在を明確にした研究はない。

そこで本研究では、広く用いられているiso-energetic電源を用いた形彫放電加工において、まず極間電圧波形から加工状態の変化を反映する特徴量を抽出し、加工状態検出に適する放電状態検出パラメータと、そのしきい値を求め、次に、極度に加工状態が悪化した場合についてさらに検討を加える。最後に、全放電パルスについての放電状態検出結果と加工結果とを対照して、本研究における放電状態検出方法の能力を評価する。

2. 2 加工屑状態の把握

本節では、放電加工時の極間電圧波形の中から特徴量を定義し、それらが放電加工の進行とともにどのように変化するかについて調べる。その結果から放電加工状態を的確に判別することができる特徴量を見出すことを目的とする。

2. 2. 1 加工電圧波形と加工状態との関係 (特徴量の定義と実験方法)

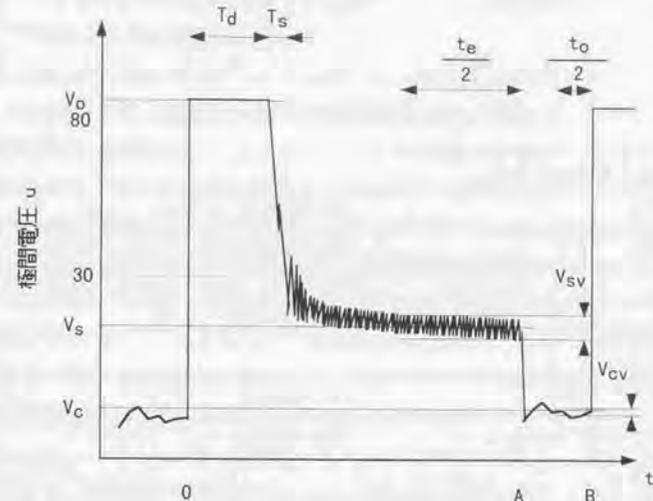
加工予備実験における極間電圧波形の観察により、以下に示す7種の特徴量を放電状態検出特徴量として検討する(図2. 1)。

- (1) 放電遅れ時間(T_d): 極間に電圧を印加してから、極間電圧が80Vを下回るまでの時間
- (2) 放電時立ち下がり時間(T_s): 放電遅れ時間後、極間電圧が30Vを下回るまでの時間
- (3) 無負荷電圧平均値(V_0): 放電遅れ時間中の極間電圧の平均値
- (4) 放電電圧平均値(V_s): 放電時間の後半における極間電圧の平均値
- (5) 放電電圧分散値(V_{sv}): 放電時間の後半における極間電圧の分散値
- (6) 休止電圧平均値(V_c): 休止時間の後半における極間電圧の平均値
- (7) 休止電圧分散値(V_{cv}): 休止時間の後半における極間電圧の分散値

ここで、休止電圧平均値および分散値とは、極間に直列に1k Ω の抵抗を介して15Vの直流電圧源を接続した場合の休止時間中の極間電圧の平均値及び分散値のことであり、極間抵抗値の平均及び分散に対応する。

2. 2. 2 実験装置

本章での実験では、三菱電機(株)製形彫放電加工機M35Kを使用した。形彫放電加工機M35Kの主な仕様を表2. 1に示す。表に示すように電源はトランジスタ回路方式のものであり、機械系はX軸、Y軸、Z軸の3軸を有する。ただし、本節での実験は、Z軸のみの加工であり、X座標、Y座標は動かさずに行った。本



$$V_0 = \frac{NT_d \sum_{n=0} u}{NT_d} \quad V_s = \frac{NA \sum_{n=NA-Nte/2} u}{Nte/2} \quad V_c = \frac{NB \sum_{n=NB-Nto/2} u}{Nto/2}$$

$$(NT_d = T_d / \Delta t) \quad V_{sv} = \frac{NA \sum_{n=NA-Nte/2} (u - V_s)^2}{Nte/2} \quad V_{cv} = \frac{NB \sum_{n=NB-Nto/2} (u - V_c)^2}{Nto/2}$$

$$\left(\begin{array}{l} Nte = te / \Delta t \\ NA = A / \Delta t \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{l} Nto = to / \Delta t \\ NB = B / \Delta t \end{array} \right)$$

図2. 1 放電状態検出パラメータ

表 2. 1 形彫放電加工機M35Kの仕様

トランジスタ方式加工電源

パルス幅 t_e	2~4096 μ s
休止時間 t_o	2~4096 μ s
電源電圧 u_i	80~320V (ただし、80V以上の電圧は高圧重畳回路による)

ジャンプ

ジャンプアップ量 d_j	0~1800 μ m
ジャンプインターバル t_{ji}	250~2250ms

駆動系

駆動軸	X, Y, Z軸
ストローク	350 × 250 × 350mm
NC制御装置	16bit

節での実験は、前項でも述べたように、標準の形彫放電加工機M35Kに対して、休止中の休止電圧平均値および分散値を測定するため、極間に直列に1K Ω の抵抗を介して15Vの直流電圧源を接続した。

次に電圧波形の測定方法について説明する。加工中の極間電圧波形は(株)エヌエフ回路設計ブロック製ウェーブメモリ5822型を使用して測定した。ウェーブメモリ5822型の主な仕様を表2. 2に示す。加工中の極間の電圧は100:1の電圧プローブを通してウェーブメモリに記録される。測定のワード長を1MWord、サンプリング周波数を10MHzに設定し、1回の測定でジャンプインターバル t_{ji} の開始から100ms後から100ms間の電圧波形を測定した。なお、A/D変換器の分解能は10bitであり、フルスケールで200V(電圧プローブで100分の1の電圧に変換されてウェーブメモリに入力される)に設定した。電圧波形と同時に放電加工機電源のトランジスタ駆動信号も記録した。こうして得られた波形データをトランジスタ駆動信号を手がかりにして1パルス毎に切り分けて、各パルス毎に特徴量を抽出した。

2. 2. 3 加工深さの推移

銅電極による荒加工条件での加工試験結果を示す。表2. 3に示す加工条件によりZ方向の加工を行い、2分毎にNCの現在位置による電極送り深さを記録した。パルス幅 t_e 、休止時間 t_o は放電加工機の設定値を所定の値に設定しておき、テクトロニクス製デジタルオシロスコープTektronix2440により測定して確認した。また、ピーク電流値 i_e はピアソン製電流変圧器(Current Transformer)により測定した。図2. 2は電極送り深さ推移を示すグラフである。グラフの横軸は加工開始からの時間、縦軸はNCの現在位置による電極送り深さである。図より、加工開始後しばらくの間は加工速度が速いが、加工開始42分後を境に加工速度が低下していることがわかる。このことから、これ以降は加工状態が悪化していると考えられる。他の加工条件においてもほぼ同様の傾向が見られ、加工開始後しばらくは加工速度が速く、その後加工速度が低下した状態でしばらく加工が進行するという現象が観察される。

ここでは、加工速度低下前の代表点として加工開始10分後(Point A)と34分後(Point B)を、低下後の代表点として46分後(Point C)と60分後(Point D)の4点を取

表 2. 2 ウェーブメモリの仕様

アナログ入力部	
チャンネル数	2
周波数特性	DC~20MHz(-3dB)
入力電圧レンジ	0.1,0.2,0.5,1,2.5,10 V _{p-p}
A/D変換部	
分解能	10bit
サンプリング	
周波数	1kHz~100MHz
変換精度	±1LSB
デジタル入力部	
チャンネル数	4
入力電圧	TTLレベル

表 2. 3 加工条件 (荒加工)

ピーク電流値 i_e : 25A	電極材質 : 銅	極性 : 電極=プラス
パルス幅 t_e : 384 μ s	電極形状 : □10mm	ジャンプアップ量 d_j : 600 μ m
休止時間 t_o : 64 μ s	電源電圧 : 85V	ジャンプインターバル t_{ji} : 250 μ s

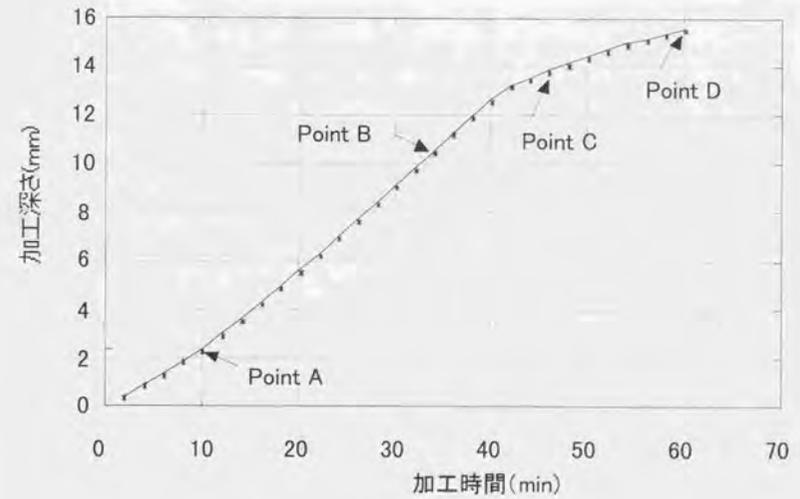


図 2. 2 電極送り深さ推移

り上げ、各特微量の加工進行に伴う推移を検討した。

2. 2. 4 特微量の分析

まず、放電発生以前に測定できる3種類(T_d, T_s, V_0)についてPoint BおよびDでのヒストグラムを図2. 3, 図2. 4, 図2. 5に示す。

図2. 3は加工速度低下前 (Point B) と加工速度低下後 (Point D) における放電遅れ時間 T_d の分布を示したヒストグラムである。横軸は放電遅れ時間 T_d 、縦軸はその割合である。横軸は $5\mu s$ 間隔であり、 $200\mu s$ 以上は区別していない。図より、加工速度低下前 (Point B)、加工速度低下後 (Point D) とともに放電遅れ時間 T_d は $0\mu s$ 以上 $5\mu s$ 未満のパルスの比率が約33%であり、それ以上の長さのものはほぼ均一に分布しており、 $200\mu s$ 以上のパルスが30%~40%存在することが分かる。すなわち、加工速度の低下前後においてほとんど分布に変化が見られない。

図2. 4は加工速度低下前 (Point B) と加工速度低下後 (Point D) における放電立ち下がり時間 T_s の分布を示したヒストグラムである。横軸は放電立ち下がり時間 T_s 、縦軸はその割合である。横軸は $2\mu s$ 間隔であり、 $50\mu s$ 以上は区別していない。図より、加工速度低下前 (Point B)、加工速度低下後 (Point D) とともに $0\mu s$ 以上 $50\mu s$ 未満の長さのパルスがほぼ均一に分布しており、 $50\mu s$ 以上のパルスが約18%~23%存在することが分かる。すなわち、放電立ち下がり時間 T_s も加工速度の低下前後においてほとんど分布に変化が見られない。

図2. 5は加工速度低下前 (Point B) と加工速度低下後 (Point D) における無負荷電圧平均値 V_0 の分布を示したヒストグラムである。横軸は無負荷電圧平均値 V_0 、縦軸はその割合である。横軸は2V間隔であり、100V以上は区別していない。本実験における放電加工機の電源電圧は約85Vである。図より、加工速度低下前

(Point B)、加工速度低下後 (Point D) とともに無負荷電圧平均値 V_0 は81V~85Vに集中しており、無負荷電圧平均値 V_0 は加工速度の低下前後においてほとんど分布に変化が見られないことがわかる。

以上より、上記3種類の特微量は加工速度低下の前後で分布に変化が見られないことが確認できた。

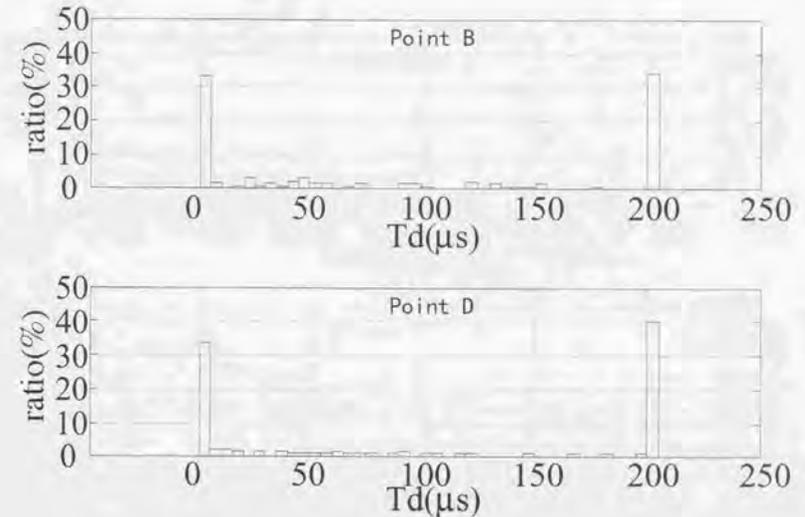


図2. 3 加工速度低下前後の放電遅れ時間分布

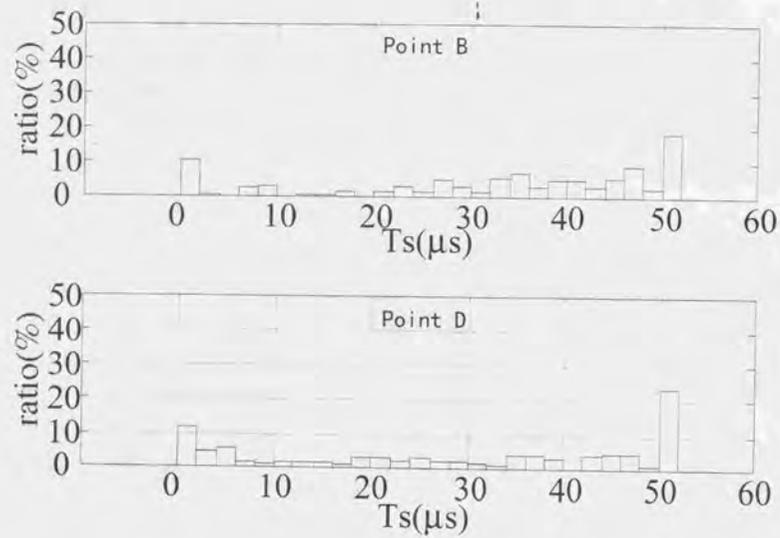


図2.4 加工速度低下前後の放電立ち下がり時間分布

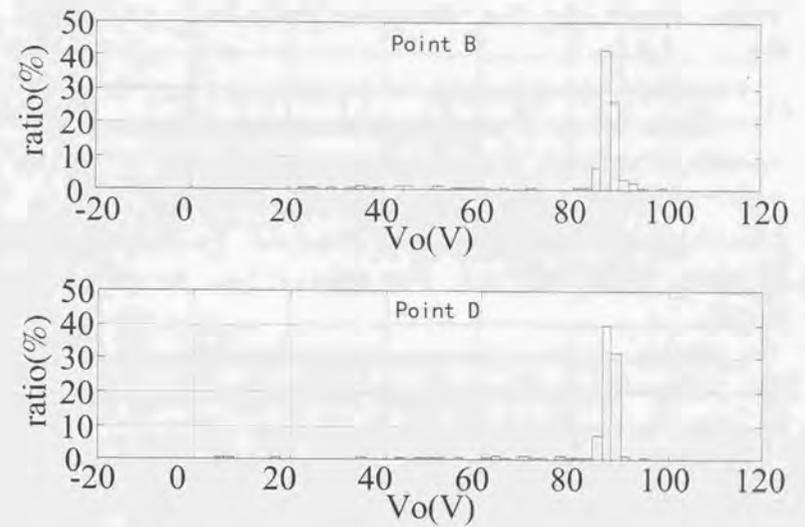


図2.5 加工速度低下前後の無負荷電圧平均値の分布

次に放電中に測定される2種類の特徴量(V_s, V_{sv})について検討する。

図2. 6に放電電圧平均値 V_s の測定結果を示す。Point A~Dの各ポイントについてそれぞれ放電電圧平均値 V_s の分布のヒストグラムを示す。それぞれ横軸は放電電圧平均値 V_s 、縦軸はその割合である。横軸の間隔は1Vである。図より以下のことがわかる。

- (1) 約23V程度をしきい値として放電パルスが2種類に分類できる。
- (2) 2種類のパルスのうち、加工速度の低下前には放電電圧平均値 V_s の低い方のパルスはほとんど発生せず、低下後に20%から30%程度発生する。

図2. 7に放電電圧分散値 V_{sv} の測定結果を示す。Point A~Dの各ポイントについてそれぞれ放電電圧分散値 V_{sv} の分布のヒストグラムを示す。それぞれ横軸は放電電圧分散値 V_{sv} 、縦軸はその割合である。横軸の間隔は1V²である。図より以下のことがわかる。

- (1) 1V²程度をしきい値として放電パルスが2種類に分類できる。
- (2) 2種類のパルスのうち、加工速度の低下前には放電電圧平均値 V_s の低い方のパルスの発生率は数%と少なく、低下後に30%程度発生する。

次に、休止時間中に測定される2種類の特徴量(V_c, V_{cv})について検討する。

図2. 8に休止電圧平均値 V_c の測定結果を示す。図はPoint A~Dにおける休止電圧平均値 V_c のヒストグラムである。それぞれ横軸は休止電圧平均値 V_c 、縦軸はその割合である。横軸の間隔は2Vである。Point Aでは、ほとんどのパルスにおいて休止電圧平均値 V_c が14V以上の値を示しているが、Point Bでは、休止電圧平均値 V_c が14V以上のパルスは15%程度にまで減少している。以上より、加工速度低下前のPoint AとPoint Bにおけるヒストグラムを比較しても特に共通点は見られない。次に、Point A、Point BにおけるヒストグラムとPoint CとPoint Dにおけるヒストグラムを比較すると、明確な分布の形態の差異はなく、徐々に平均値が下がっていることがわかる。以上をまとめると、以下のことがいえる。

(1) 休止電圧平均値 V_c の分布は放電電圧平均値 V_s や放電電圧分散値 V_{sv} でみられたように2グループには分かれておらず、パルスを分類する明確なしきい値は存在しない。

(2) 休止電圧平均値 V_c は加工速度の変化との対応は明確でないが、加工深さの増

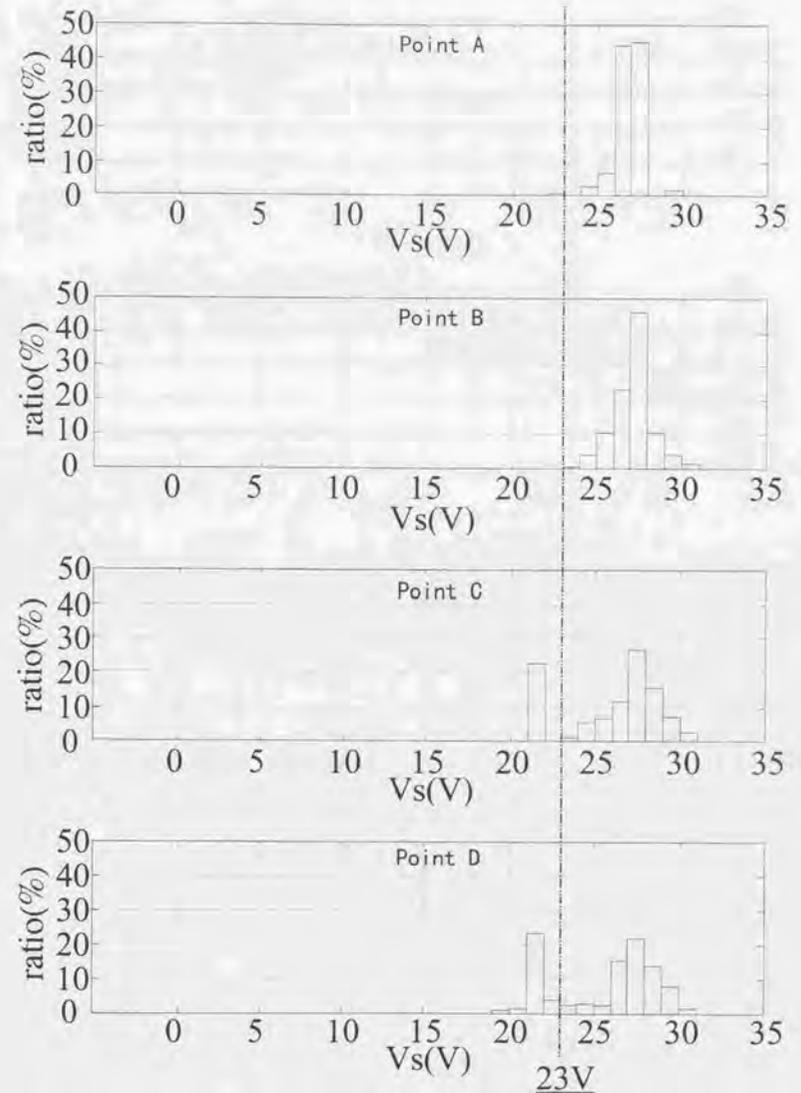


図2. 6 放電電圧平均値分布の推移

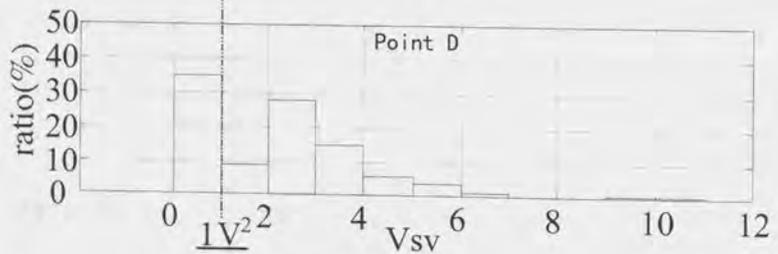
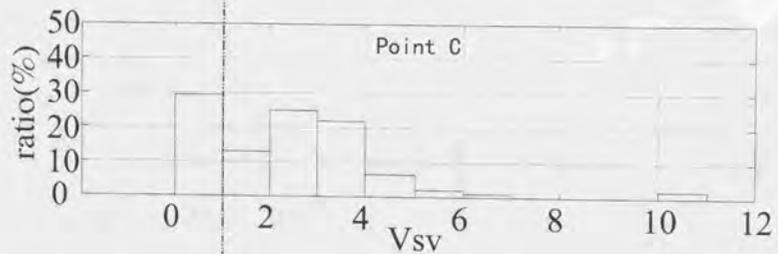
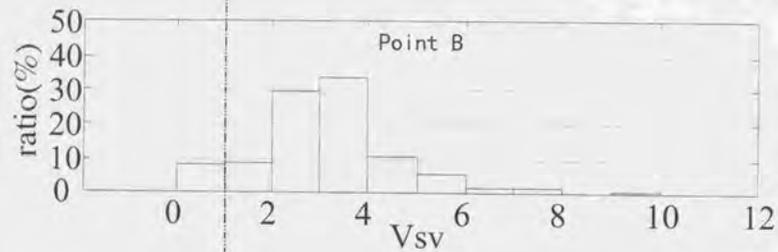
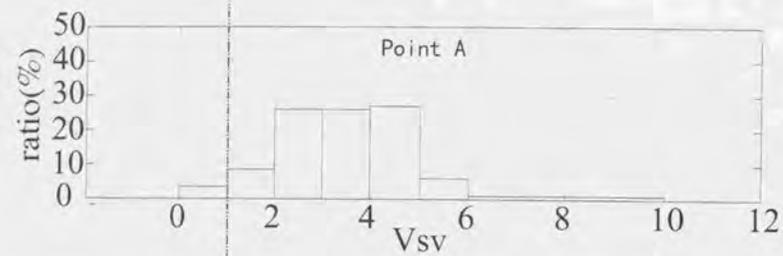


図2. 7 放電電圧分散値分布の推移

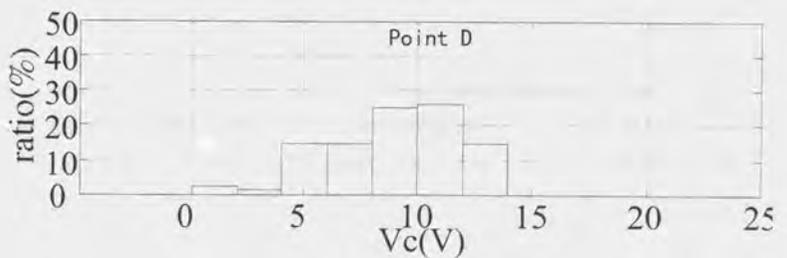
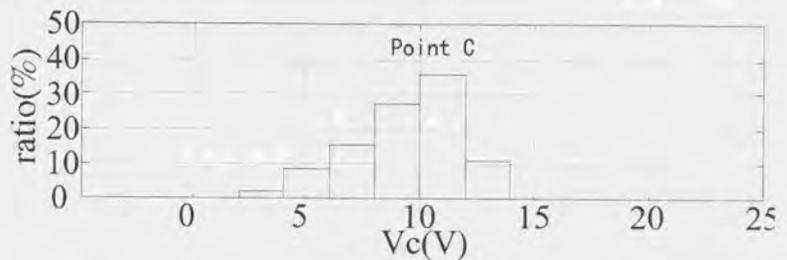
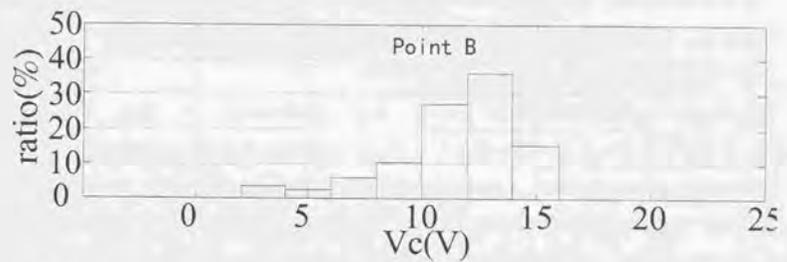
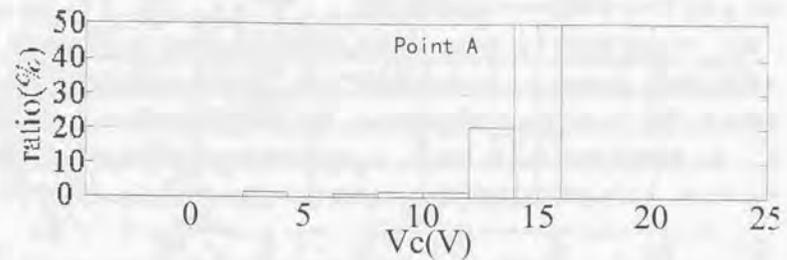


図2. 8 休止電圧平均値分布の推移

加とともにピークの位置が一方向に移動する。

図2. 9は加工速度低下前 (Point B) と加工速度低下後 (Point D) における休止電圧分散値 V_{cv} の分布を示したヒストグラムである。横軸は休止電圧分散値 V_{cv} 、縦軸はその割合である。横軸は $1V^2$ 間隔である。図より加工速度低下前 (Point B)、加工速度低下後 (Point D) とともに、休止電圧分散値 V_{cv} は $1V^2$ 以上 $4V^2$ 未満に集中して分布しており、加工速度低下前後において特に差異は認められない。

以上の結果から、加工速度低下の前後で変化の大きい放電電圧平均値 V_s 、放電電圧分散値 V_{sv} 、休止電圧平均値 V_c が、加工状態を反映する放電状態検出パラメータに適している可能性が高いと考えられる。

次に、これら3種類の特徴量について、相互の関係を検討した。図2. 10、図2. 11はそれぞれ加工状態が悪化した場合の放電電圧平均値 V_s と放電電圧分散値 V_{sv} および放電電圧平均値 V_s と休止電圧平均値 V_c の関係である。図2. 12から、少数の例外 (122パルス中10パルス) を除き、放電電圧分散値 V_{sv} のしきい値 ($1V^2$) によるパルスの分類は、放電電圧平均値 V_s のしきい値 (23V) による分類と同じ結果が得られることがわかる。したがって、この2つの特徴量は同種の状態を反映していると考えられる。また、図2. 11から、放電電圧平均値 V_s と休止電圧平均値 V_c の間には関係がなく、休止電圧平均値 V_c は放電電圧平均値 V_s や放電電圧分散値 V_{sv} とは別種の状態を反映していると推察される。放電電圧平均値 V_s 、放電電圧分散値 V_{sv} 、休止電圧平均値 V_c の加工進行に伴う分布の推移を併せて考慮すると、放電電圧平均値 V_s と放電電圧分散値 V_{sv} は放電1パルス毎の状態を反映し、休止電圧平均値 V_c は例えば極間の汚染状況などの緩やかに変化する状態を反映していると推察される。

同様の実験・解析を銅電極を用いた中、仕上げ加工、グラファイト電極を用いた荒、中、仕上げ加工について行なった。図示しないが、それぞれの加工条件における放電電圧平均値 V_s 、放電電圧分散値 V_{sv} の加工速度低下前後のヒストグラムから、電極材料、加工電気条件により特徴量の値は異なっているが、放電パルスが2種類に分類され、明確なしきい値が存在する点は銅電極荒加工の場合と同様であることを確認した。また、各加工条件での休止電圧平均値 V_c の分布の推移も銅電極荒加工の場合と同様であることを確認した。

以上から、放電電圧平均値 V_s 、放電電圧分散値 V_{sv} は幅広い加工条件において、1

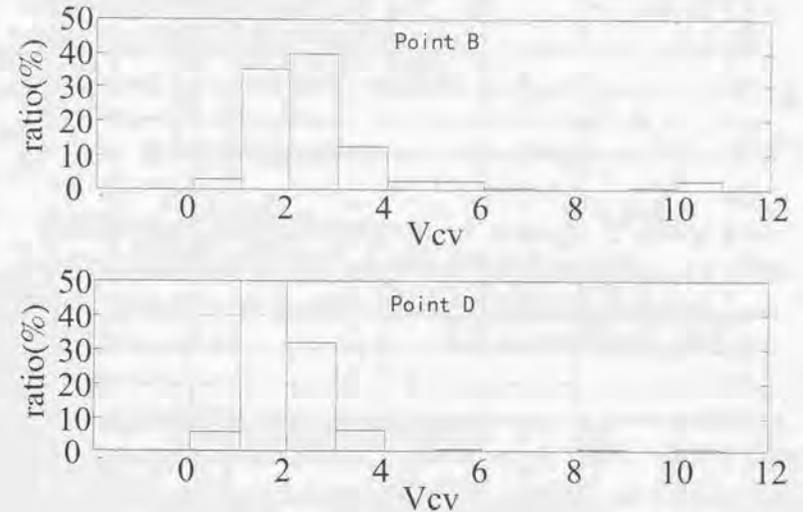


図2. 9 加工速度低下前後の休止電圧分散値の分布

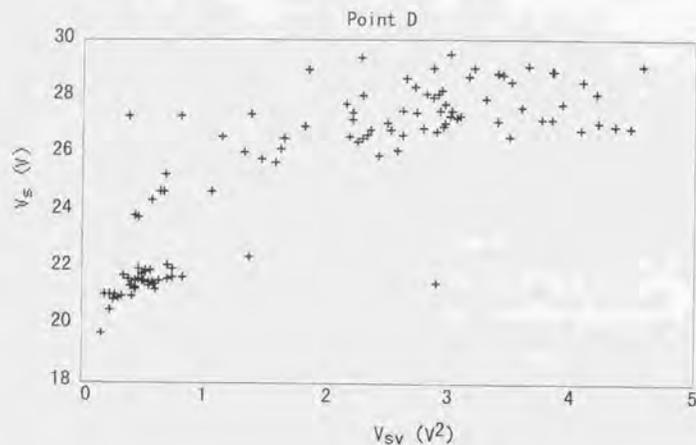


図2. 10 放電電圧平均値と分散値の関係

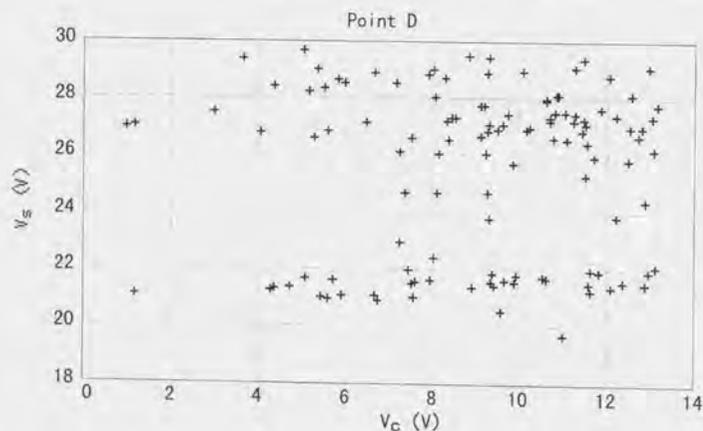


図2. 11 放電電圧平均値と休止電圧平均値の関係

パルス毎の放電状態の検出に適した特徴量と考え、加工速度が低下すると放電電圧平均値 V_S 、放電電圧分散値 V_{SV} の小さいパルスが出現することから、放電電圧平均値 V_S 、放電電圧分散値 V_{SV} の大きいパルスを良放電パルス、小さいパルスを不良放電パルスと考えることとし、さらに検討を加える。

2. 2. 5 放電状態が放電状態検出パラメータに及ぼす影響

放電電圧平均値 V_S と放電状態の関連については、Milickaら²⁾により放電点の安定性の立場から検討されていることはすでに述べたが、極間抵抗によっても影響を受けるであろうことは容易に想像がつく。そこで、極度に加工状態が悪化し、極間抵抗が変化した場合について、放電電圧平均値 V_S 、放電電圧分散値 V_{SV} が受ける影響を検討した。

実験方法は前章と同様である。使用した実験条件を表2. 4に示す。加工条件は前章の中加工条件とほぼ同等であるが、休止時間 t_0 とジャンプアップ量 d_j を短く、ジャンプインターバル t_{ji} を長く設定したので、加工状態が悪化しやすくなっている。

次に結果を示す。図2. 12は電極送り深さ推移を示すグラフである。加工開始59分後から加工が進行していないので加工状態が極度に悪化している。また、この時点で送り深さが減少していることから、極間距離が長くなったと考えられる。なお、図中の▼は測定された放電パルス数が極端に少ない測定点を示し、測定された放電パルス数を併記した。通常は100ms間に200~400パルス程度測定されるので、通常の1/10以下のパルスしか発生していないことになる。図2. 13は各測定点での平均の放電電圧平均値 V_S と放電電圧分散値 V_{SV} の関係を示すグラフである。横軸は放電電圧平均値 V_S の平均、縦軸は放電電圧分散値 V_{SV} の平均であり、各点に付記した番号は加工開始からの時刻であり、電極送り深さ推移グラフ(図2. 12)の横軸に対応する。各点は図2. 13に示す5つの群に分けられる。各群は次のように解釈できる。

まず、A群は $(V_S, V_{SV}) = (20, 0)$ と $(25, 7)$ を通る直線上に存在しているので、放電電圧平均値 V_S が24V前後、放電電圧分散値 V_{SV} が6V²前後の良放電パルスと放電電圧平均値 V_S が20V、放電電圧分散値 V_{SV} が0V²前後の不良放電パルスが任意の割合で発生して

表 2. 4 加工条件 (中加工)

ピーク電流値 i_e : 10A	電極材質 : 銅	極性 : 電極=プラス
パルス幅 t_e : 128 μ s	電極形状 : ϕ 10mm	ジャンプアップ量 d_j : 400 μ m
休止時間 t_o : 2 μ s	電源電圧 : 85V	ジャンプインターバル t_{ji} : 500 μ s

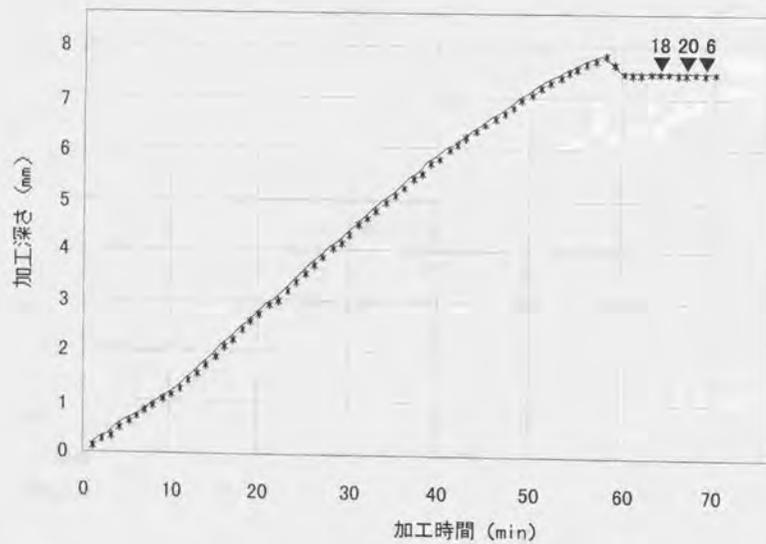


図 2. 1 2 電極送り深さの推移

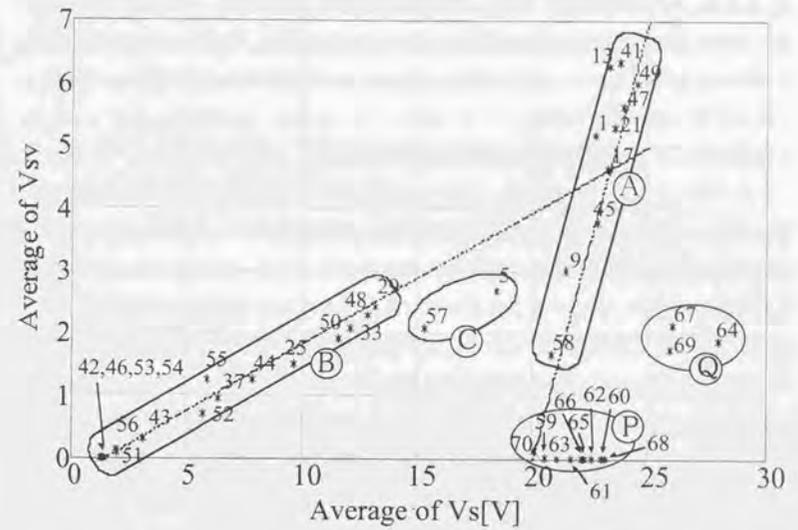


図 2. 1 3 平均Vsと平均Vsvの関係

いる状態と解釈できる。なお、A群に属する測定点は加工開始からあまり時間が経過していない加工初期の測定点が多く、初期には短絡がほとんど発生していないと考えられる。次にB群は $(V_s, V_{sv})=(0, 0)$ と $(25, 5)$ を通る直線上に存在している。ここで、 $(V_s, V_{sv})=(0, 0)$ の短絡パルスと、良放電パルスが混在している状態と解釈できる。B群に属する測定点は加工開始から30分程度経過し、加工不能となる以前の点が多いためであるから、加工中期には短絡が多く発生したと考えられる。また、C群はB群に加えて不良放電パルスも発生しているため、点の位置が $(0, 0)$ と $(25, 5)$ を通る直線より下へ若干ずれていると解釈できる。

次にP群およびQ群であるが、これらの群に属する測定点はすべて加工状態が極度に悪化した場合である。また、通常と同等の数の放電パルスが測定された点はすべてP群に属し、極端に少数の放電パルスしか測定されない場合はQ群に属している。図には示さないが、P群、Q群に属する測定点における放電パルスは、A、B、C群のように数種に分類される放電パルスが混在しているのではなく、平均値で代表される (V_s, V_{sv}) を持つ1種類の放電パルスが発生していることを確認した。したがって、加工状態が極度に悪化した場合には2種類の状態があり、通常と同等の頻度で放電が発生している場合（P群）には放電電圧平均値 V_s が良放電パルスと同等に大きく放電電圧分散値 V_{sv} は不良放電パルスと同等に小さい放電パルスが発生し、極端に発生する放電パルス数が少ない場合（Q群）には放電電圧平均値 V_s が良放電パルスと同等かそれ以上で放電電圧分散値 V_{sv} が良放電パルスの半分程度の放電パルスが発生している。以上から、放電電圧分散値 V_{sv} により、加工状態が良い放電パルス（A群）、加工状態が悪い放電パルス（B群、C群）および極度に加工状態が悪化したパルス（P群）の分類が可能であり、加工状態を反映する検出パラメータとしては放電電圧平均値 V_s よりも放電電圧分散値 V_{sv} の方が適していると考えられる。

2. 3 仕上げ面への影響

加工状態を最もよく反映する放電状態パラメータは放電電圧分散値 V_{sv} であるといえることがわかった。本節では、放電電圧分散値 V_{sv} による実時間での加工状態検出を行う方法について検討し、放電電圧分散値 V_{sv} により分類された各放電パルスが仕上げ面に与える影響について検討する。

2. 3. 1 放電電圧分散値 V_{sv} と放電電圧高周波成分 V_{shf} の関係

前節までの結果から、放電電圧分散値 V_{sv} が加工状態を最もよく反映する放電状態検出パラメータといえる。しかし、放電電圧分散値 V_{sv} の算出には複雑な計算が必要であり、電子回路などのハードウェアを用いて検出することも難しいので、実時間で放電状態を検出することは非常に困難である。一方、放電電圧分散値 V_{sv} と同等と考えられる状態量として、放電中の電圧波形に含まれる高周波成分の大きさ（以後、放電電圧高周波成分 V_{shf} と記す）がある。放電電圧高周波成分 V_{shf} の計算は放電電圧分散値 V_{sv} 以上に複雑であるが、フィルタなどの電子回路を用いてハードウェア的に検出することは比較的容易である。そこで、放電電圧分散値 V_{sv} と放電電圧高周波成分 V_{shf} との関係を検討し、放電電圧高周波成分 V_{shf} の実時間放電状態検出パラメータとしての可能性を検討した。

まず、放電中の電圧波形1パルス分に対して周波数分析を行なった。銅電極を用いた荒、中、仕上げ加工において、放電電圧分散値 V_{sv} が大きいパルスと小さいパルスの各1パルスずつに対する周波数分析結果を図2.14（加工条件は表2.3に示す）、図2.15（加工条件は表2.4に示す）、図2.16（加工条件は表2.5に示す）に示す。放電電圧分散値 V_{sv} が大きいパルスと小さいパルスは、図2.7に示したしきい値により分類した2種類のパルスの中から1パルスずつ選んだ。それぞれの図において、横軸は周波数、縦軸はパワースペクトルを表している。この図から、どの加工条件においても放電電圧分散値 V_{sv} が大きいパルスは小さいパルスに比べて高周波成分が多く含まれていることが分かるので、例えば1MHz以上の高周波成分の大きさを各パルスについて評価すれば、放電電圧分散値 V_{sv} と同様

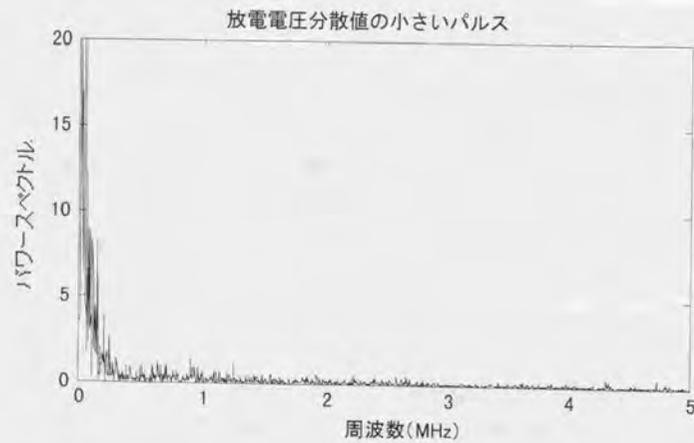
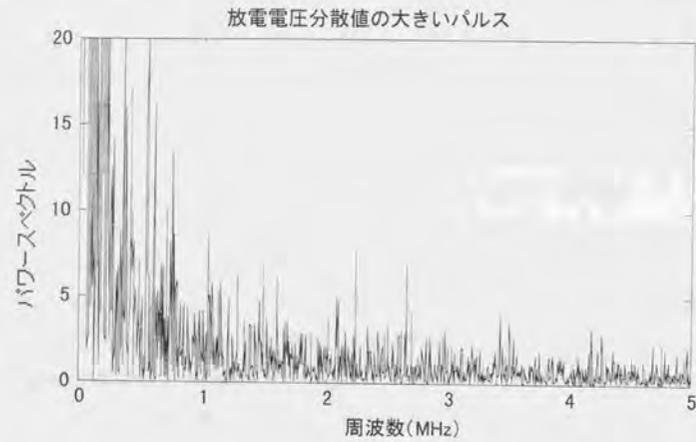


図 2. 14 V_{SV} と周波数分布の関係 (銅電極荒加工条件)

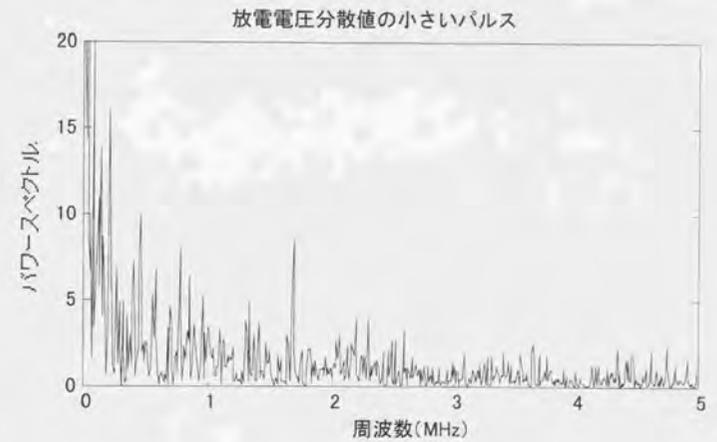
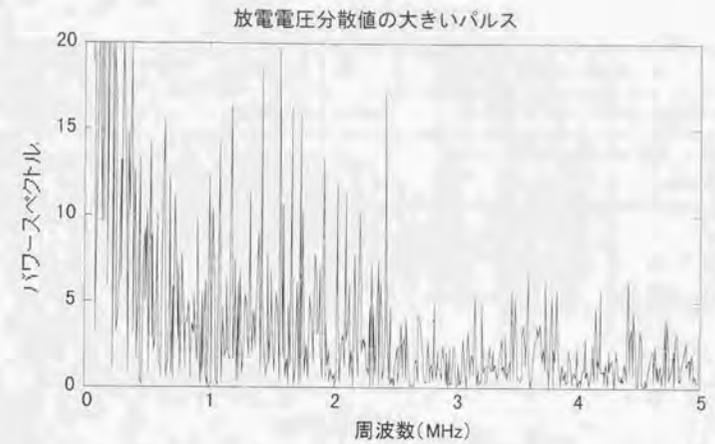


図 2. 15 V_{SV} と周波数分布の関係 (銅電極中加工条件)

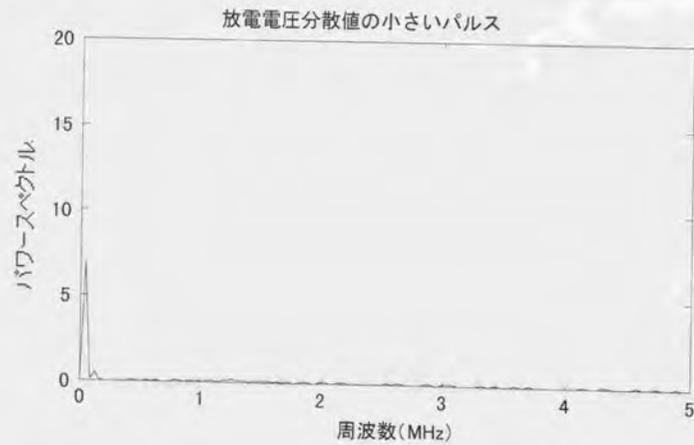
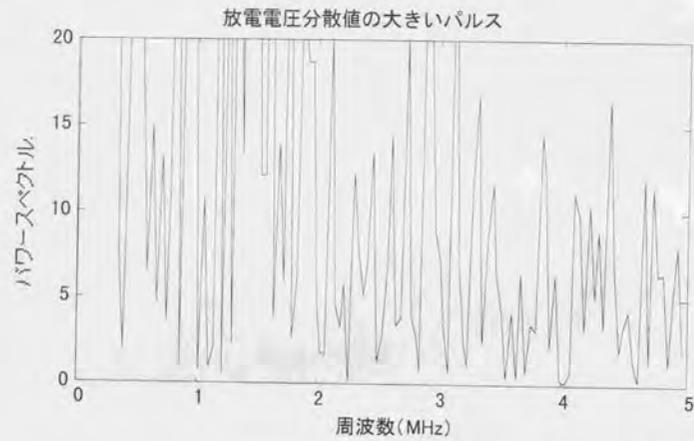


図 2. 16 V_{SV} と周波数分布の関係 (銅電極仕上げ加工条件)

表 2. 5 仕上げ加工の加工条件

ピーク電流値 i_e : 4.5A	電極材質 : 銅	極性 : 電極=プラス
パルス幅 t_e : 32 μ s	電極形状 : ϕ 5mm	ジャンプアップ量 d_j : 600 μ m
休止時間 t_o : 8 μ s	電源電圧 : 110V	ジャンプインターバル t_{ji} : 250 μ s

の放電状態が検出できると考えられる。

次に、2.2節で示した実験(図2.2)の、PointDにおいて測定された全放電パルスについて、放電電圧分散値 V_{sv} と放電電圧高周波成分 V_{shf} の関係を図2.17に示す。なお、放電電圧高周波成分 V_{shf} は周波数分析結果の1MHz~5MHzの成分の総和とした。図から、放電電圧分散値 V_{sv} の大きいパルスは放電電圧高周波成分 V_{shf} も大きい傾向にあることがわかる。この場合、放電パルスを放電電圧分散値 V_{sv} により分類してその時のしきい値 $1V^2$ とした際の判別と、放電電圧高周波成分 V_{shf} により分類してその時のしきい値を200前後とした場合の判別は、少数の例外(122パルス中6パルス)を除いて同じ結果が得られることがわかる。同様の結果は中加工、仕上げ加工条件においても確認した。以上から、放電電圧高周波成分 V_{shf} による放電状態検出方法は放電電圧分散値 V_{sv} による放電状態検出方法とほぼ等価と考えられる。

2.3.2 放電電圧高周波成分 V_{shf} の検出回路

放電電圧高周波成分 V_{shf} を検出するための回路を製作した。図2.18に回路構成を示す。図中(a)のような放電中の極間電圧を、まずハイパスフィルター回路に通す。ハイパスフィルター回路の出力電圧は図中(b)のようになる。ここでは、1MHzのカットオフ周波数をもつハイパスフィルターを使用した。その後、半波整流回路を通過させ(c)のような電圧を出力させる。最後に、積分回路を通す。ただし放電発生直後には極間電圧が無負荷電圧から放電電圧まで急激に降下するため、ハイパスフィルターから大きな負の値が出力される。この出力は放電状態には関係なく発生するものであり積分してはならない。このためには放電発生を検出した後、少なくともフィルターの時定数程度の期間をおいてから積分を開始するように構成する必要がある。また、入力信号に含まれるランダムノイズを軽減するために積分時間は長いほどよい。そこで今回の実験では図中(d)に示すように、放電を検出後、パルス幅 t_p の半分の時間が経過した時点で積分回路をスタートさせ、放電時間の後半における高周波成分を検出するようにした。

本回路により検出される放電電圧高周波成分 V_{shf} の出力を測定した。図2.19に測定装置の構成を示す。放電電圧高周波成分 V_{shf} の検出回路の出力は、2.2で使用したものと同一の(株)エヌエフ回路設計ブロック製ウェーブメモリ5822型に

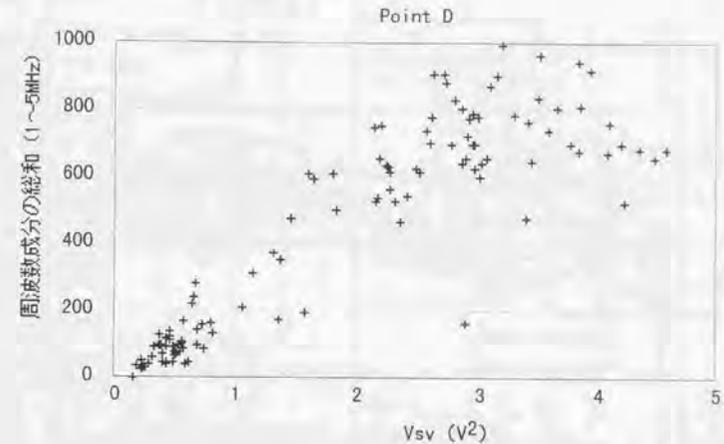


図2.17 V_{sv} と V_{shf} の関係

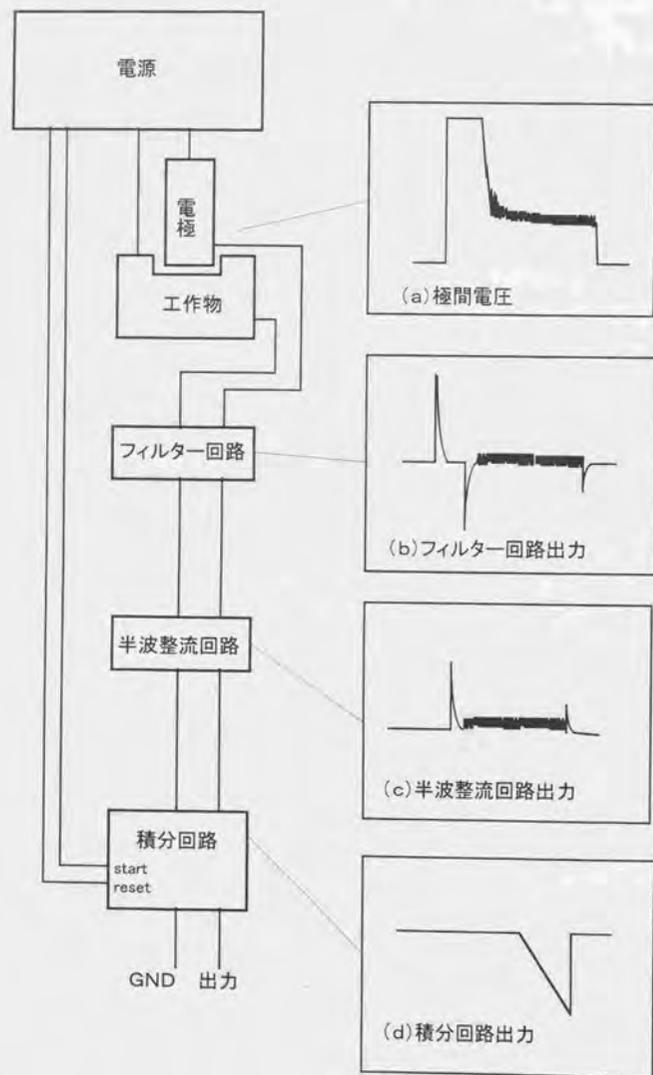


図2. 18 高周波成分 (V_{shf}) の検出回路

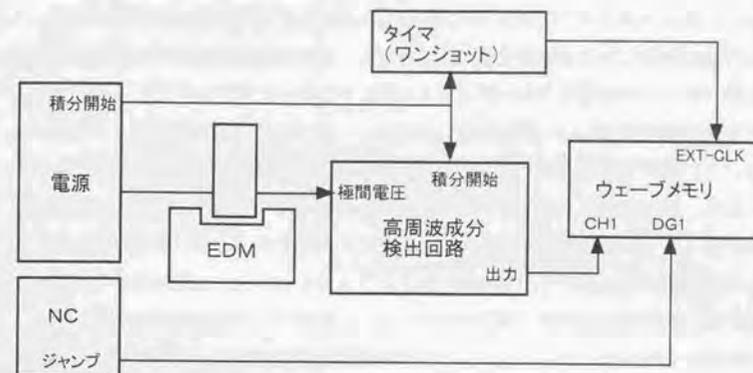


図2. 19 測定装置の構成

入力した。一方、放電電圧高周波成分 V_{shf} の検出回路内の積分回路がスタートしてから一定時間後にチェックパルスを発生するタイマ（ワンショット）を設け、このチェックパルスをウェーブメモリの外部サンプリングクロックへ入力する。したがって、ウェーブメモリはチェックパルスが入力される毎に放電電圧高周波成分 V_{shf} の検出回路の出力を内部メモリに記録する。さらに放電加工機のNC制御装置からのジャンプの信号をウェーブメモリのデジタルチャンネルへ入力し、測定した放電電圧高周波成分 V_{shf} の検出回路の出力をジャンプ毎に分離できるようにした。

2. 2において加工進行に伴う放電電圧分散値 V_{sv} の変化を調査したのと同様の実験により、本回路により検出される放電電圧高周波成分 V_{shf} の出力の変化を調べた結果を図2. 20に示す。実験条件は2. 2での実験と同一のピーク電流値 $i_e=25A$ の条件である。図において、3つのヒストグラムはそれぞれ、安定加工時（下降速度低下前）、不安定加工時（加工速度低下後）、定常アーク状態時におけるジャンプインターバル1回における全パルスの放電電圧高周波成分 V_{shf} の検出回路の出力値の分布を示している。横軸はそれぞれ放電電圧高周波成分 V_{shf} の検出回路の出力値、縦軸はその割合である。放電電圧高周波成分 V_{shf} の出力値は、積分回路のゲイン、積分時間などにより変わるため、積分回路の入力電圧1Vで $1\mu s$ 積分したときに1Vの出力が得られるような積分ゲインにおける出力に換算した。以下で用いるすべての放電電圧高周波成分 V_{shf} の出力は、このような換算を行った後の値である。図より、安定加工時（加工速度低下前）と不安定加工時（加工速度低下後）において、高周波成分 V_{shf} にしきい値が存在することが確認できる。また、不安定加工を続けて定常アーク状態に至った際には、さらに1つしきい値が存在することがわかる。本実験では、短絡パルスを分離していないので、放電電圧高周波成分 V_{shf} の検出回路の出力値の低いパルスには短絡パルスも含まれているが、定常アーク状態に至った場合のパルスでは、短絡でなくとも放電電圧高周波成分 V_{shf} の検出回路の出力値が短絡と同じ出力であるパルスが多数発生する。

以上の結果より、放電電圧高周波成分 V_{shf} のヒストグラムは、放電電圧分散値 V_{sv} のヒストグラムとほぼ同様の傾向を示すことがわかる。これ以降、放電電圧高周波成分 V_{shf} により3種類に分類される放電パルスをそれぞれOKパルス、NGパルス、ARパルス（定常アーク時に発生の意、NGパルスに含まれる）と呼ぶ。放電電圧高周波成分 V_{shf} の分布は他の条件についても、3種類にパルスが分類できるような分布を

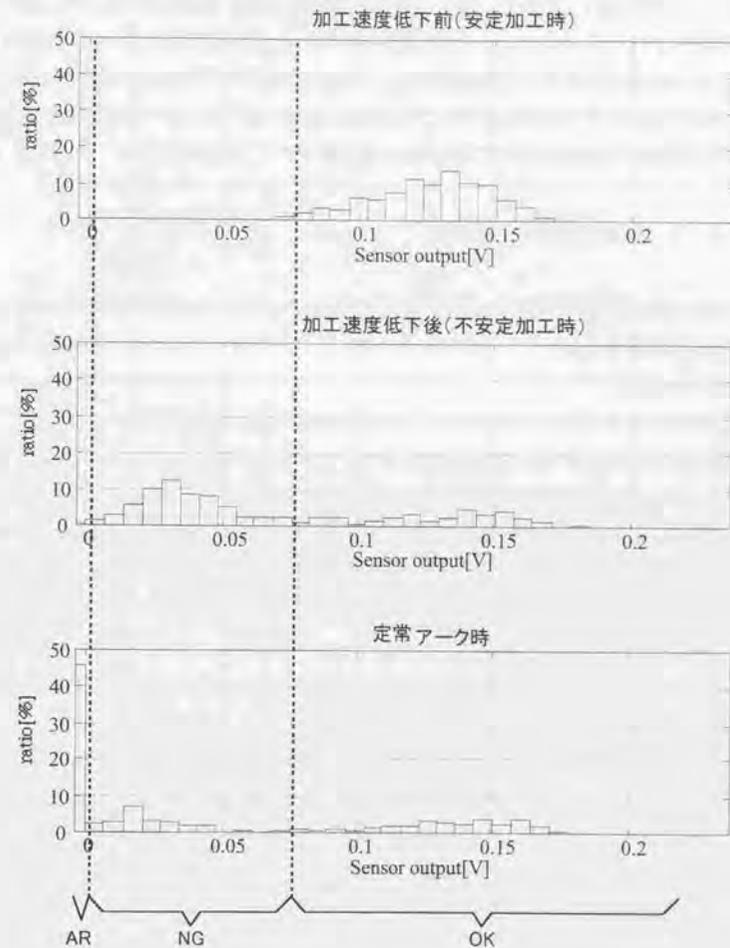


図2. 20 荒加工 ($i_e=25A$)での放電センサ出力ヒストグラム

示す。図2. 21はピーク電流値 $i_e=10A$ の場合のヒストグラムである。加工条件は表2. 4の条件と同一である。図2. 20の場合と同様に、安定加工時（加工速度低下前）の分布と不安定加工時（加工速度低下後）の分布との間に1つしきい値が存在し、不安定加工時（加工速度低下後）の分布と定常アーク状態の分布との間にさらに1つのしきい値が存在することがわかる。以上より、ピーク電流値 $i_e=10A$ の場合も同様に、放電パルスが3種類に分類できることが確認できる。

2. 3. 3 実時間での加工状態検出

放電中の電圧波形に含まれる放電電圧高周波成分 V_{shf} による放電状態検出方法の能力を評価するため、加工中の全パルスについての実時間で放電状態を検出し、加工結果と比較対照した。

実験装置の構成を図2. 22に示す。放電加工機の極間電圧を2. 3. 2に示した放電電圧高周波成分 V_{shf} の検出回路に通す。次に検出回路の出力を2. 3. 2において議論したOKパルスとNGパルスのしきい値と比較器により比較し、OKパルス判断した場合、NGパルスと判断した場合それぞれに判定パルスを発生させる。さらに、OKパルス、NGパルスそれぞれの判定パルスをカウンタにて計数し、ボードコンピュータで記憶する。ボードコンピュータでは、100ms毎にカウンタの値を読み込み、実験終了後にそのデータをワークステーションに転送して解析した。この加工実験により得られた計数結果を別途記録した電極送り深さ推移と対照し、放電状態検出能力を評価した。

電極送り深さの推移を図2. 23に示す。図において、横軸は加工時間、縦軸はNCの現在位置による電極送り深さである。図より、加工開始後しばらくの間は加工速度が速いが、加工開始28分後から加工速度が低下しており、加工状態が悪化していることがわかる。また、加工開始55分後からは加工が進行していないので、極度に加工状態が悪化したと考えられる。

図2. 24にこの実験で測定したOKパルスおよびNGパルスの累積数を示す。図において、横軸は加工時間、縦軸は加工開始からのOKパルスおよびNGパルスの累積数である。図よりOKパルス累積数は加工開始後約28分間は毎分約 4×10^4 パルスの割合で増加しており、加工開始後28分以降は毎分 10^4 パルスの増加になっていることがわ

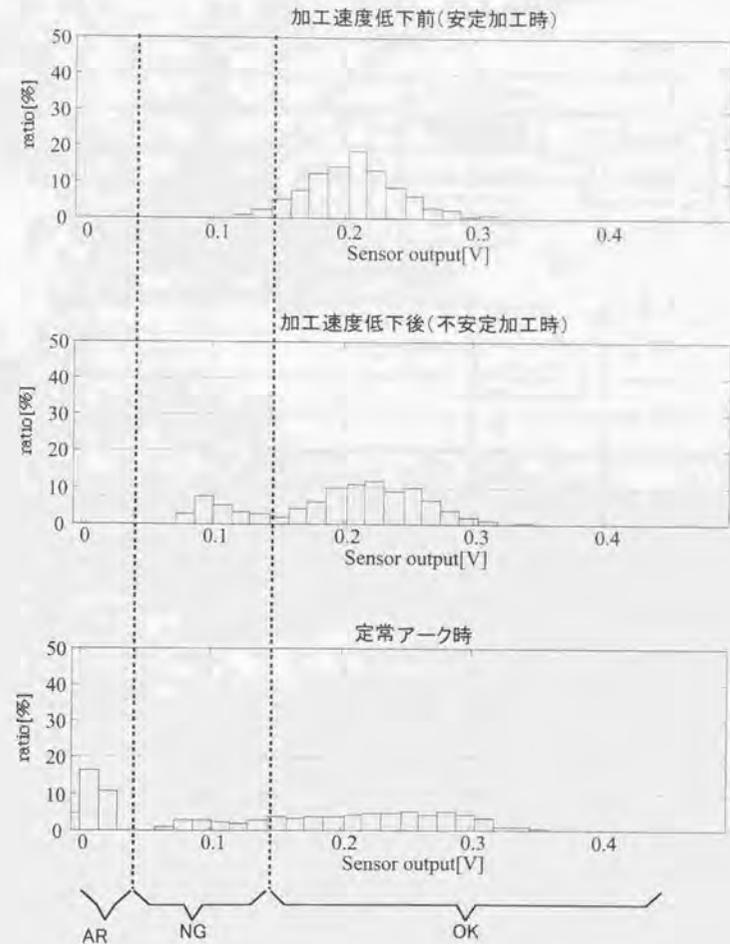


図2. 21 中加工 ($i_e=10A$)での放電センサ出力ヒストグラム

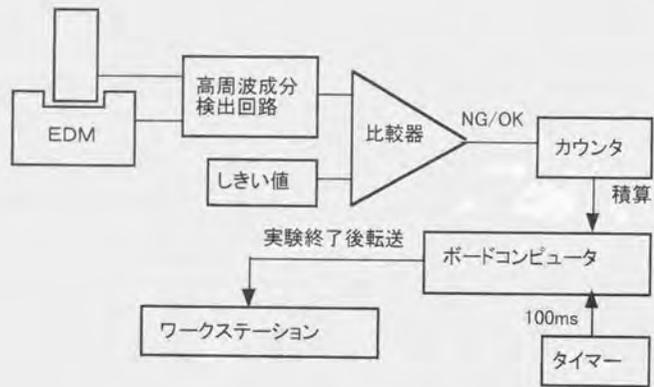
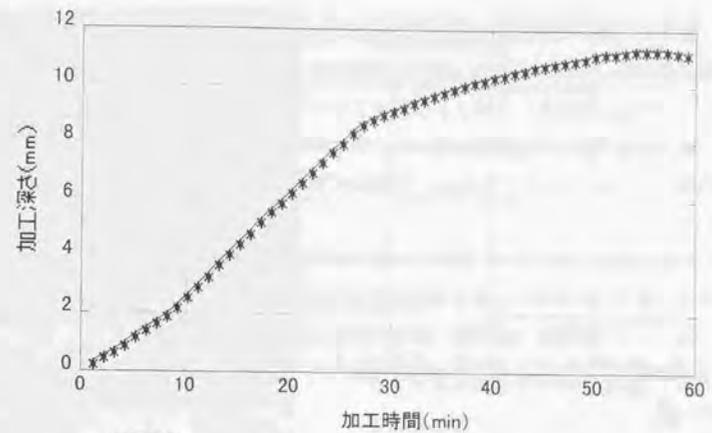


図 2. 2 2 実験装置の構成



加工条件
 電極：銅 (□10mm) パルス幅 $t_e=384 \mu s$
 ピーク電流 $i_e=25A$ 休止時間 $t_o=64 \mu s$
 ジャンプアップ量 $d_j=400 \mu m$ ジャンプインターバル $t_{ji}=500ms$

図 2. 2 3 電極送り深さ推移

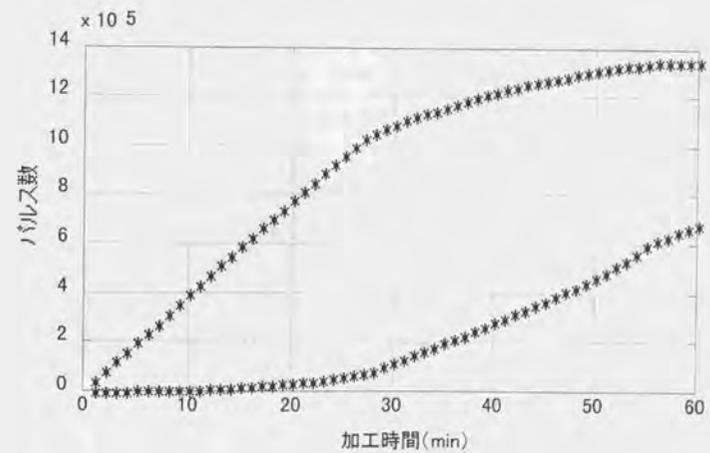


図 2. 2 4 パルス累積数

かる。反対にNGパルスの累積数は、加工開始後約23分間はほとんど増加しないが、加工開始後28分以降は毎分約 2×10^4 パルスの割合で増加するようになっている。

図2. 23および図2. 24より以下のことが考察できる。

(1) 加工状態が悪化する時期とOKパルス発生数が減少し、NGパルス発生数が増加する時期とが一致していることから、本放電状態検出方法は加工状態を適切に反映している。

(2) 加工が進行しなくなった時期にはOKパルスは計数されないことから、加工状態が極度に悪化した場合にも加工状態を適切に検出できる。

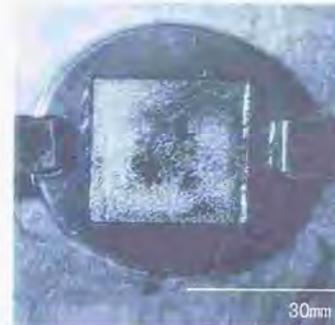
(3) OKパルスの累積数は電極送り深さの推移と同様の傾向を示していることから、加工はほぼOKパルスのみによって進行し、NGパルスは加工に寄与していないと推察される。

2. 3. 4 NGパルスおよびARパルスの作用

前項の結果より、放電加工はほぼOKパルスのみにより進行していると推察された。そこで、本項ではNGパルスおよびARパルスがどのような影響を加工に対して与えているかについて検討する。

実際の加工は、OKパルス、NGパルス、ARパルスが混在しながら進行するため各パルスの影響を特定する事は困難である。しかし、NGパルスあるいはARパルスが発生した瞬間に加工を停止し、工作物の面の様子を調べることによりある程度各パルスの作用を判断できると考えられる。

そこで、各パルスが発生した時点で加工を停止し、加工面の様子を観察した。図2. 25はOKパルスが発生しているときに停止した場合、図2. 26はNGパルスが連続して2発生した瞬間に加工を停止した場合の様子である。OKパルスが発生している状態で加工停止した場合には、極間に滞在するスラッジが加工液を流すことにより容易に除去することが可能である。しかし、NGパルスが発生した状態で加工停止した場合は、工作物にスラッジ（カーボン）が付着し、加工液を流しても除去できない、布でふき取るとスラッジはふき取ることができるが、工作物表面にしみが残る。ARパルスが2発生した状態で加工停止した場合は、スラッジの状態はNGパルスの場合と同様であるが、工作物に付着したスラッジを布でふき取った後に小



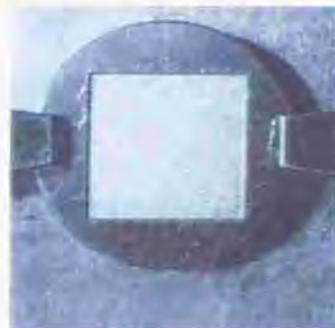
(1) 加工終了後、電極を移動させたままの加工面の状態

スラッジが存在している。



(2) 加工面に残ったスラッジを加工液を掛けて流し去ったときの状態

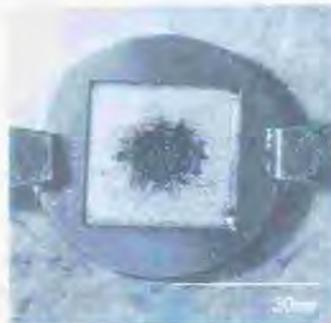
加工液を掛けるとスラッジは流れ去ってしまう。



(3) ウエスで残ったスラッジを拭き取った後の状態

加工面に痕はない。

図2. 25 OKパルスで加工停止時の加工面の様子



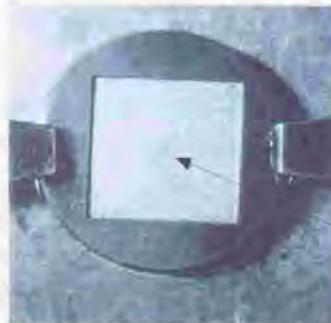
(1) 加工終了後、電極を移動させたままの加工面の状態

スラッジが存在している。



(2) 加工面に残ったスラッジを加工液を掛けて流し去ったときの状態

加工液を掛けても流れずに加工面に付着しているスラッジがある。



(3) ウェスでスラッジを拭き取った後の状態

スラッジが付着していた部分にしみが残る。

しみ

図2. 26 NGパルスで加工停止時の加工面の様子

大きな凹みが残った。

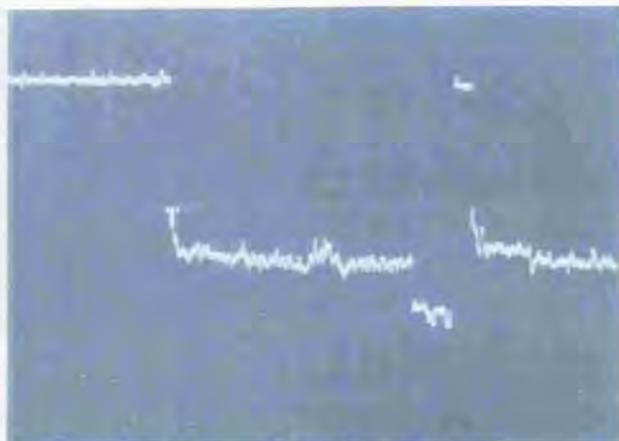
以上の結果より、NGパルスは工作物にしみを作り、ARパルスは工作物にアーク痕を作るパルスであると推察できる。

2. 3. 5 高周波成分の意味

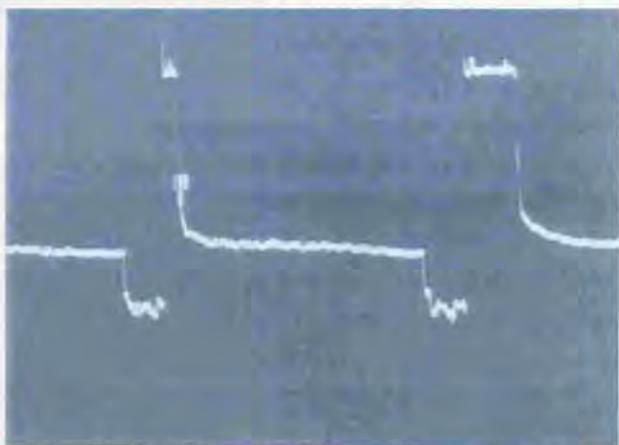
放電時の極間電圧波形に高周波成分が重畳される原因については解明されていない。しかし、前項の結果から工作物に付着するカーボンとの関係があることは推察される。そこで、工作物として鋼材の代わりにグラファイト（カーボン）を用い放電を発生させたときの極間電圧波形を観察した。図2. 27に工作物を鋼材とグラファイトの場合で比較した極間電圧波形を示す。加工条件は、ピーク電流値 $i_e=25A$ 、パルス幅 $t_e=384\mu s$ 、休止時間 $t_0=64\mu s$ であり、電極は、銅の $\square 10mm$ 電極を使用した。放電中の電圧を比較すると、工作物を鋼材とした場合には高周波成分の振幅が大きな波形となっているが、グラファイトを工作物とした場合には高周波成分が少ない波形になっている。これは、鋼材を工作物とした場合の定常アークと呼ばれる集中放電の場合と同様の電圧波形である。工作物が鋼材の場合にも定常アークの場合には工作物にカーボンが付着している。

以上のことから、極間電圧の高周波成分は工作物側がカーボンである場合に小さくなると推察できる。放電加工では、放電の集中が工作物に損傷を与えるため回避しなければならないが、放電の集中は、スラッジ濃度の高い部分や加工液が分解して生成したカーボンの濃度の高いところに起きると考えられるので、放電の集中と極間電圧の高周波成分が小さくなる現象はほぼ同一とみなしてよいと考えられる。本節で論じた放電電圧高周波成分 V_{shf} の検出回路は、極間電圧の高周波成分が小さくなる現象をとらえることにより、集中放電を検出するような検出器になっていると考えることができる。

尚、加工が安定な場合に放電電圧の高周波成分が大きく、不安定な場合に小さくなる現象は、本実験に使用した放電加工機に限らず一般的に観察される現象である。



(a) 電極 = 銅, 工作物 = 鋼材の場合
(縦軸: 20V/div, 横軸: 100 μ s/div)



(b) 電極 = 銅, 工作物 = グラファイトの場合
(縦軸: 20V/div, 横軸: 100 μ s/div)

図 2. 27 放電電圧波形の比較

2. 4 高周波成分フィードバックによる安定化

放電パルス进行分类する回路により, パルスの良否を判断することが可能となった. そこで, 本節では, パルスの分類に基づき放電加工の加工状態を判断し, 加工を安定化させるための制御方法について検討する.

2. 4. 1 不安定状態の検出

図 2. 28 は安定加工時 (加工速度低下前), 不安定加工時 (加工速度低下後) における NG パルスの連続個数について調べた結果である. サンプルング区間における 65000 パルスの中で所定の連続個数の NG パルスが何組あるかを示している. 図より, 安定加工時においても単発の NG パルスは全パルスの数% 存在することがわかる. しかし, 2 発以上連続する確率はほぼ 0% である. 一方, 不安定加工時は, NG パルスの発生個数が増加するとともに, 2 発以上連続する確率が増加する. 以上より, NG パルスが連続で 2 発発生した点を不安定加工になった点と判断することが可能であると考えられる.

2. 4. 2 高速休止制御

前項の結果に基づき, NG パルスが 2 発連続発生した場合に休止時間を 2 倍に延ばし (図 2. 29), OK パルスが 2 発連続して発生した場合に $1/2$ に戻すという制御を行った. この制御を以後, 高速休止制御と呼ぶ. 高速休止制御では, NG パルスが 2 発連続する毎に休止時間を 2 倍にするため, 例えば, NG パルスが 4 発連続した場合には, はじめの 2 発で休止時間が 2 倍になり, 次の 2 発でさらに 2 倍すなわち 4 倍になる. 休止時間の延びる上限は 4096 μ s とした. また, 休止時間をあらかじめ設定した値より短い値に変更することは行わない.

この高速休止制御の効果を確認するために, 比較加工実験を行った. 使用した条件は次の通りである.

電極: $\phi 10$ mm の銅電極
ピーク電流値 $i_e = 10$ A

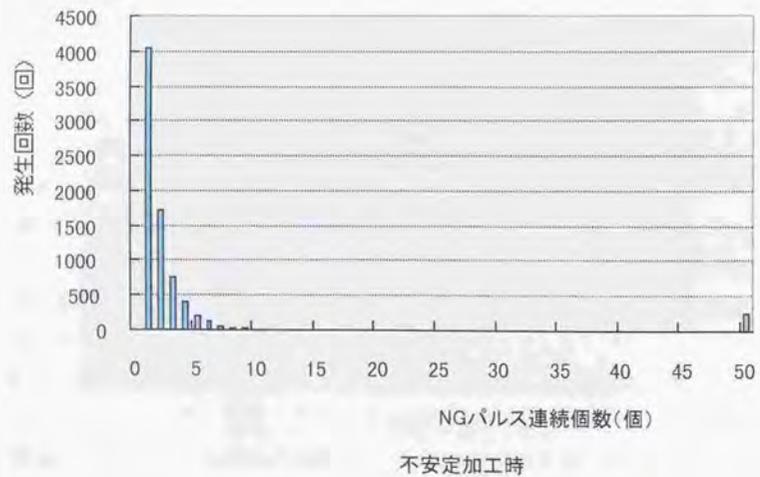
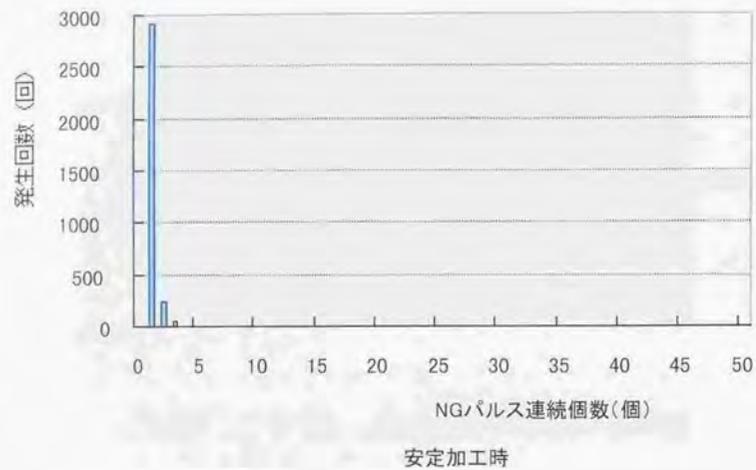


図 2. 28 NGパルスの連続個数

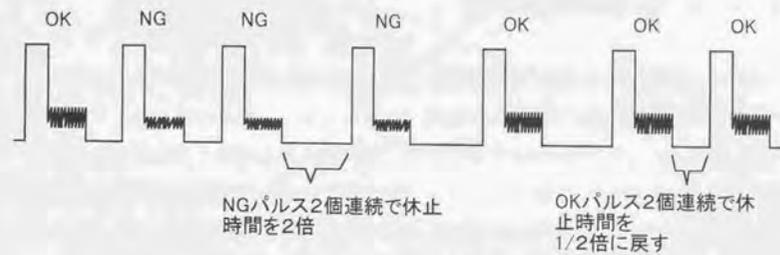


図 2. 29 高速休止制御

パルス幅 $t_e = 96 \mu s$

休止時間 $t_o = 64 \mu s$

結果を図2.30に示す。

高速休止制御を行わない場合は、7mmの深さで定常アーク状態となり加工が進まなくなった。一方、高速休止制御を行った場合は12mmの深さまで良好に加工する事ができた。以上より、高速休止制御の耐アーク性に対する効果が確認できた。

2.4.3 他の適応制御との併用

高速休止制御は加工状態の悪化を検出して高速に休止時間を制御する方法であり、アークの回避効果があることが確認できた。しかし、休止時間を長くするだけでは、制御として不十分な場合も存在する。特に加工深さが深くなる場合には休止制御だけで十分な効果が望めず、ジャンプ動作変更により加工間隙の状態を改善する必要がある。また、あらかじめ設定した加工条件が低エネルギー加工条件である場合には、加工条件を高エネルギーなものにすることにより加工速度を上げることができる。そこで加工状態の安定度に応じて、設定休止、ジャンプ等の条件を制御することを検討した。

高速休止制御は、不良な放電パルスが発生した段階で動作するので、高速休止制御の動作頻度により加工状態を把握することが可能であり、これを加工条件の制御に利用することができる。ここでは、ファジィ適応制御に組み込むこと試みた²⁾、³⁾、⁴⁾。適応制御全体の構成を図2.31に示す。OKパルスは加工に寄与し、NGパルス・ARパルスは加工に寄与せず、工作物にシミやアーク痕を作るということが前節においてわかった。この結果より、適応制御全体としての方向付けが可能となる。すなわち、シミやアーク痕を作るNGパルス・ARパルスを発生させず、加工に寄与するOKパルスの数を増やすことが適応制御の目的となる。図2.31では、高速休止制御がNGパルス・ARパルスを抑える部分であり、ファジィ適応制御部分がOKパルスを増加させるための役割の部分であるという意図のもと適応制御が構成されている。

まず、高速休止制御の動作頻度を見るための指標として以下に示す ΔOFF というパラメータを導入した。

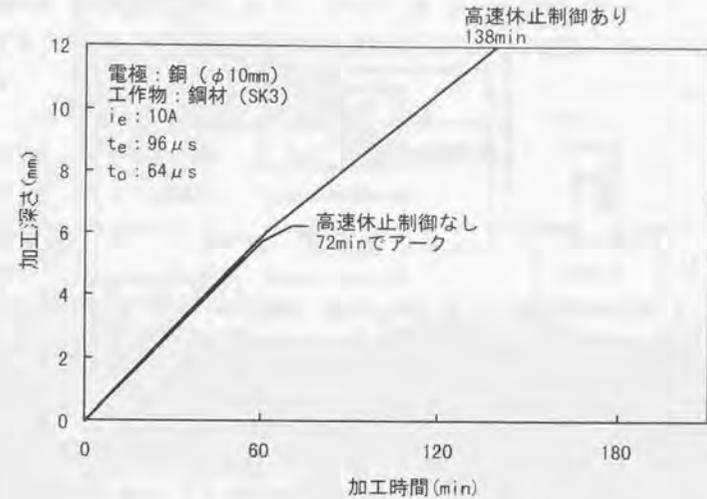


図2.30 高速休止制御の効果

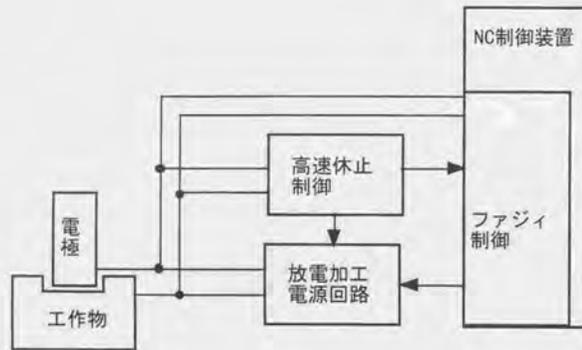


図2. 31 適応制御の構成

$$\Delta OFF = (\log_2 (\text{実際の休止時間の平均値}) - \log_2 (\text{設定休止時間}))$$

ΔOFF が大きいときは加工が不安定であり、0に近ければ安定に加工していることを示す。この ΔOFF を図2. 32に示すメンバーシップ関数で表わし、ファジィ適応制御のルールに組み込んだ。図2. 32の示す意味について簡単に説明する、ファジィルールでは、次のように基準とする状態量や安定度が定性的に表現されている。

- ルール1 : IF ΔOFF が大きい THEN 加工が大変不安定
- ルール2 : IF ΔOFF が中くらい THEN 加工が不安定
- ルール3 : IF ΔOFF が小さい THEN 加工が安定

図3. 32のメンバーシップ関数は、これらのルールを定量化するのに用いる。加工の安定度は図3. 33に示すメンバーシップ関数により定量化する。

以上の制御方法の効果を確認するため、以下の6通りの加工を行い加工時間を比較した。

- (1) 高速休止制御 + ΔOFF ルール追加ファジィ適応制御
- (2) 高速休止制御 + ファジィ適応制御
- (3) 従来のファジィ適応制御
- (4) 高速休止制御
- (5) 固定条件1
- (6) 固定条件2

$\phi 10\text{mm}$ の銅電極を用いた加工で比較した結果を図2. 34に示す。設定の加工条件はピーク電流値 $i_e=10\text{A}$ 、パルス幅 $t_e=96\mu\text{s}$ 、休止時間 $t_0=64\mu\text{s}$ 、ジャンプアップ量 $d_j=600\mu\text{m}$ 、ジャンプインターバル $t_{ji}=512\text{ms}$ 、フラッシング条件は無噴流である。ただし、(6)は休止時間 t_0 を $128\mu\text{s}$ とし、ジャンプアップ量 $d_j=800\mu\text{m}$ 、ジャンプインターバル $t_{ji}=256\mu\text{s}$ とした。高速休止制御だけでもアーク回避の効果はあるが、ファジィ適応制御により適切な加工条件を選択した方がより速く加工が進むことがわかる。

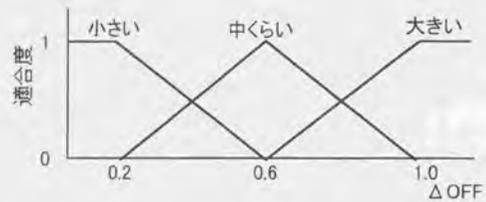


図 2. 3 2 メンバーシップ関数

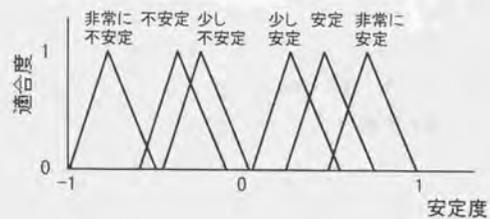


図 2. 3 3 メンバーシップ関数 (安定度)

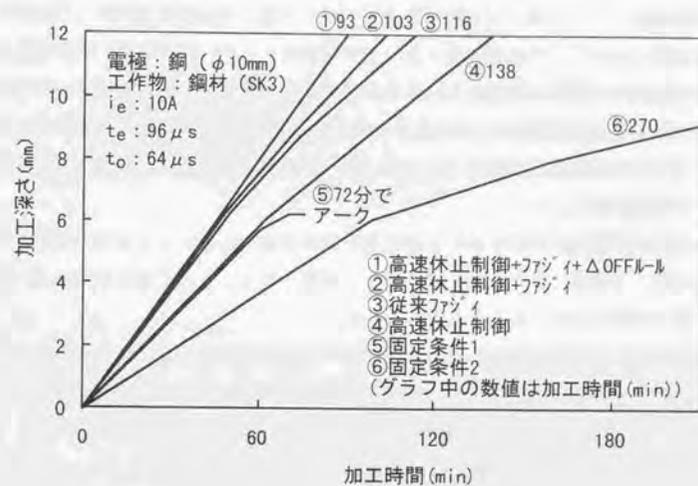


図 2. 3 4 加工速度の比較

2. 5 まとめ

本章では、放電電圧波形の様々な特徴量について解析し、加工状態の検出、および、加工状態改善への利用技術について検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

1. 放電中の極間電圧波形から抽出した様々な特徴量のうち、放電中の極間電圧分散値(V_{sv})が最もよく加工状態を反映することがわかった。
2. 放電中の極間電圧分散値(V_{sv})により放電のパルスを分類することができることがわかった。
3. 放電中の電圧波形に含まれる放電電圧高周波成分 V_{shf} による放電状態検出方法は、分散値による検出とほぼ等しい結果を得ることができ、実時間で検出が可能な方法であることがわかった。
4. 放電電圧高周波成分 V_{shf} による検出は、加工状態の推移をよく反映し、加工に寄与する放電パルスと加工に寄与しない放電パルスとを判別できることがわかった。
5. 放電中の極間電圧分散値 V_{sv} と同様に放電電圧高周波成分 V_{shf} により放電パルスは、3種類(OKパルス、NGパルス、ARパルス)に分類することができることがわかった。また、OKパルスは加工に寄与し、NGパルスは工作物にシミを作り、ARパルスは工作物にアーク痕を作るパルスであると推察できることがわかった。
6. 放電電圧高周波成分 V_{shf} による放電パルス分類に基づいた高速な加工条件制御(高速休止制御)を実加工に適用した結果、耐アーク性向上に効果があることがわかった。

第3章 油系加工液を用いた場合の加工屑制御 - 1 -

- 短絡現象の解消 -

本章では、極間生成物の中で最も一般的なものである加工屑について検討する。加工屑が電極・工作物間(以下、極間とする)に大量に停滞すると短絡の原因となる。極間に短絡が発生したときの加工屑の挙動について解析し、加工面品質・加工速度に与える影響について考察する。さらに、加工特性の改善方法について加工電流の制御の点から検討する。

3. 1 はじめに

放電加工は、数十 μm の間隔を隔てて電極と工作物を対向させ、パルス状の放電電流を供給することにより、各々の放電による除去の累積として加工を行う方法である。したがって、加工を安定に進行させるためには極間距離を一定に保てることが重要である。そのためにはサーボ系等様々な観点から検討される必要があるが、加工に伴い生成される加工屑が極間距離に対して大きな影響を与える。これは、加工屑が極間に介在することにより実質の極間距離が変化するためである。そこで、安定な加工のためには、加工屑を速やかに極間から排出し実際の極間距離を一定に保てることが重要となる。しかし、加工形状が複雑になったり、加工深さが深くなると加工屑の排出は困難になり、極間が短絡しやすい状態になる。

前章では放電加工によるスラッジの生成により放電状態が悪化する現象について調査し、放電電圧の高周波成分により放電パルスをOKパルス・NGパルス・ARパルスに分類できることを示した。しかし、この分類で区別できないパルスが短絡パルスである。短絡は電極と工作物との電氣的接触であり、NGパルス・ARパルスと異なり、ある程度まとまって発生する。本章ではこのように発生する極間短絡現象に注目し、放電加工における影響について調べる。

放電加工の際に電極と工作物が短絡すると放電が発生せず短絡電流が流れるが、短絡電流が加工面品質に及ぼす影響等については従来あまり関心がはらわれておら

ず、不明な点が多かった。この理由として、放電加工は前述のように放電の電流により加工を行う方法であり、短絡電流が実際の加工に寄与しないと考えられるために無視しても加工に影響はないと思われていたことが挙げられる。また、NGパルスやARパルスの場合と異なり、短絡パルスは加工特性との関係が明確化されていなかったことも理由の一つである。

しかし最近の加工事例によると、極間短絡時に以下のような問題点が生じることが経験的に知られるようになってきた。

(1) 一度発生した短絡は長時間継続する傾向があるため、それだけ加工速度の低下につながる恐れがある。

(2) 電極に傷が付いたり、異常消耗が起きるとき、あるいは、工作物に傷が付くときには極間が短絡している場合が多い。

以上のような現象は、放電加工により生じる加工屑の挙動が関わっていると考えられる。放電加工の際の加工屑の挙動について研究された例は多い。須田ら^{9) 11)}は極間に電圧を印加したときの加工屑の挙動について調べ、帯電した加工屑が電極と工作物を行き来しながら電極あるいは工作物に付着していき、それが放電を誘発していることを見出した。元木ら^{3) 21)}は、放電のイオン消沈について、加工屑と関連して述べている。平ら^{4) 21) 22) 23)}は、不燃性加工液における除去機構について研究し、極間の加工屑や橋絡が放電の引き金になっていると述べている。国枝ら^{2) 24)}は極間に電圧を印加したときの加工屑の挙動についてシミュレーションを行っている。また、土屋ら^{3) 25)}は放電中の加工屑の挙動について、高速度ビデオカメラで観察し、放電により発生するガスにより加工屑が極間から排出されることを確認している。

以上のように極間に電圧を印加した時、あるいは、放電加工中における加工屑の挙動についての研究は行われているが、極間短絡時の加工屑の挙動について研究された例はない。本章では、上記の問題の原因を明らかにするとともに、良好な仕上げ加工を行うための方法について検討する。

3. 2 短絡状態の把握

本節では極間が短絡した場合の現象について解析する。放電加工における電極と工作物の短絡は直接電極と工作物が接触する場合もあるが、ほとんどの場合、放電加工により生じた加工屑を極間に挟んだ短絡であると考えられる。電極と工作物が加工屑を介して短絡すると、電極から加工屑を通し工作物へと短絡電流が流れる。この電流が極間現象、特に極間に存在する加工屑に及ぼす作用について極間のモデルを用いて考察する。また、その作用を実際に確認するため、極間短絡状態を模擬的に作りだし、短絡時の極間現象を観察する。

3. 2. 1 短絡時の極間状態

本項では、放電加工中の極間の短絡現象について観察する。尚、本章での実験では、三菱電機(株)製形彫放電加工機V35Fを使用した。形彫放電加工機V35Fの主な仕様を表3. 1に示す。表に示すように電源はトランジスタ回路方式のものであり、機械系はX軸、Y軸、Z軸の3軸を有する。実験で使用した加工条件は、パルス幅 t_p 、休止時間 t_0 は放電加工機の設定値を所定の値に設定しておき、テクトロニクス製デジタルオシロスコープTektronix2440により測定して確認した。また、ピーク電流値 i_e はピアソン製電流変圧器(Current Transformer)により測定した。

放電加工中の極間電圧を観察すると、いったん電極と工作物が短絡すると、数10ms~数100msという長時間にわたり継続する傾向があることがわかる。図3. 1は放電加工中の極間電圧波形の一例を示したものである。波形はテクトロニクス製デジタルオシロスコープTektronix2440の画面を写真撮影したものであり、横軸は時間、縦軸は電圧を表している。横軸に関しては図中に示す矢印の長さが100msを表しており、縦軸に関しては図中に0Vと80Vを図示している。電極は $\square 10\text{mm}$ の銅、工作物材質は鋼材であり、加工条件は、ピーク電流値 $i_e=5.5\text{A}$ 、パルス幅 $t_p=64\mu\text{s}$ 、休止時間 $t_0=16\mu\text{s}$ である。図に示す横軸のスケールでは放電のパルス毎の電圧波形は判別できないが、放電が発生しているか短絡しているかを見分けるような大まかな判断は可能である。図中に示した電圧が0Vの部分は短絡中であり、それ以外のところは

表 3. 1 形彫放電加工機V35Fの仕様

トランジスタ方式加工電源

パルス幅 t_a	2~4096 μ s
休止時間 t_o	2~4096 μ s
電源電圧 u_i	80~320V (ただし、80V以上の電圧は高圧重畳回路による)

ジャンプ

ジャンプアップ量 d_j	0~1800 μ m
ジャンプインターバル t_{ji}	250~2250ms

駆動系

駆動軸	X, Y, Z軸
ストローク	350 x 250 x 350mm
NC制御装置	32bit

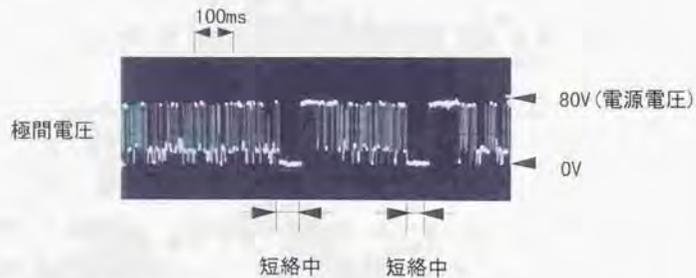


図 3. 1 短絡時の極間電圧波形

放電が発生している時間である。図では100ms近い時間短絡が継続しているのが観察される。

放電加工では極間距離を制御するためのサーボにより、放電加工中に短絡が発生すると極間距離が広がり短絡が解消されるように動作する。例えば、通常100msの時間では数10 μ m極間距離が広がる。極間の短絡が単純に電極と工作物の接触、あるいは、加工屑を介した電極と工作物の接触だけであるならば、数 μ mも極間距離が広がれば解消されと考えられる。ところが、実際には短絡が数10ms~数100ms継続しており、これは、短絡電流が流れる事により、電極間に存在する加工屑に何らかの作用が働くためであると考えられる。その作用について以下に解析を行う。

図 3. 2 は、加工屑を介して短絡電流が流れている状態を示した図である。図 3. 2 (a) は側面から見た様子、図 3. 2 (b) は図 3. 2 (a) 中のA-A'断面を上からみた様子を示したものである。この場合、短絡電流の影響により磁界が生じる。加工屑が図のように円形に存在するとした場合の円周上における磁界Bの値は次式のように表すことができる。

$$B = \mu I / (2\pi a) \tag{2.1}$$

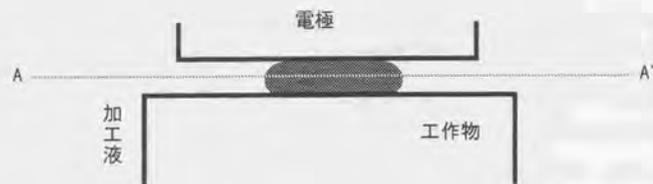
(a : 短絡電流が流れる部分(円)の半径, I : 短絡電流, μ : 加工液の透磁率)

ただし、極間距離はaの値に比べて、十分に大きい場合で近似している。

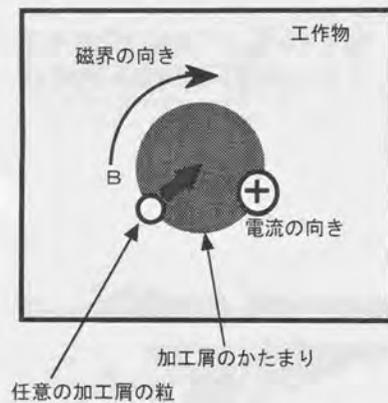
3. 2. 2 加工屑に作用する力

前節で述べた磁界Bにより、短絡電流が流れる領域の外周では、加工屑に対して電流領域の中心に向かう方向に力が作用する。任意の加工屑1つが受ける力Fの値は、次式ようになる。

$$F = B \cdot i \cdot 2r \tag{2.2}$$



(a) 極間の様子 (側面図)



(b) 極間の様子 (A-A' 断面)

図3.2 加工屑の粒が受ける力

(i : 加工屑1つを通して流れる電流, r : 任意の加工屑1つの半径)

式(2.2)に磁界 B の値を代入することで, F は次式のように表される.

$$\begin{aligned}
 F &= B \cdot i \cdot 2r \\
 &= \mu \frac{l}{2\pi a} \frac{l\pi r^2}{\pi a^2} 2r \\
 &= \mu \frac{l^2 r^3}{\pi a^3}
 \end{aligned}$$

(2.3)

ただし, 短絡電流 I は加工屑の部分全体に均一に流れると仮定して i を計算している.

さらに, 加工屑1つに与えられる加速度 α は, 次式のように求められる.

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \frac{F}{m} \\
 &= \frac{F}{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho} \\
 &= \mu \frac{l}{2\pi a} \frac{l\pi r^2}{\pi a^2} 2r \frac{3}{4\pi r^3 \rho} \\
 &= \mu \frac{l^2 r^3}{\pi a^3} \frac{3}{4\pi r^3 \rho} \\
 &= \frac{3\mu l^2}{4\pi^2 \rho a^3}
 \end{aligned}$$

(2.4)

(m : 任意の加工屑1つの質量, ρ : 加工屑(鉄)の比重)

このように、加速度は加工屑の粒径によらず、電流値により決る値となる。a=1mmとしたときの短絡電流Iと加速度 α の関係を図3.3に示す。

一例として、I=5A、a=1mmを式(2.3)、(2.4)に代入すると、

$$\alpha = 0.3 (\text{m/s}^2)$$

となる。

この結果からも、短絡電流が流れることにより、加工屑が集中するのに十分大きな加速度が、加工屑に作用することがわかる。加速度は粒径によらないので、加工液が分解してできたカーボンの微粉も、これにより短絡点に向かって集中することになる。以上の議論は基本的な原理としては、平行電流が流れた場合に互いに力を受けあう現象、あるいは、放電のアーク柱が自らの電流により発生する磁界から受ける力により電流路を縮めるピンチ効果と同一の現象である。

このように短絡電流が流れているときは、電流が流れている部分の加工屑が中心方向に引き寄せられるため、その間たとえ加工機のZ軸が上昇して極間距離が広がっても、加工屑の集中が電流路の維持として作用し、短絡は解消されにくい。この様子を示したのが図3.4である。

3.2.3 短絡ブリッジの観察

前項での解析結果を確かめるための実験を行った。実験方法を図3.5に示す。まず、ピーカーの中に工作物を入れ、その上に加工屑を載せる。次に電極を工作物に近づけ、加工屑と接触(短絡)する位置で停止させる。その位置で加工電流を流す。ただし、短絡しているので放電は発生せず、短絡電流が流れた状態になる。そしてそのまま短絡電流を流した状態でZ軸を引き上げ、極間距離を広げた。

図3.6は、実験の様子を示す写真および写真部分のイラストである。電極は \square 20mmの銅電極である。このときの加工条件はピーク電流値 $i_e=5.5\text{A}$ 、パルス幅 $t_e=16\mu\text{s}$ 、休止時間 $t_0=16\mu\text{s}$ の条件を使用した。極間状態を観察するため、工作物と電極を入れたピーカの背面から光を当てている。イラストに示したように、電極と工作

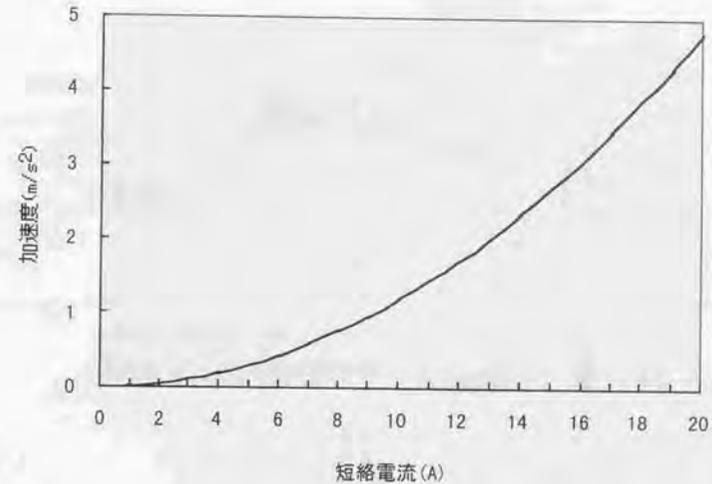


図3.3 加工屑に加わる力

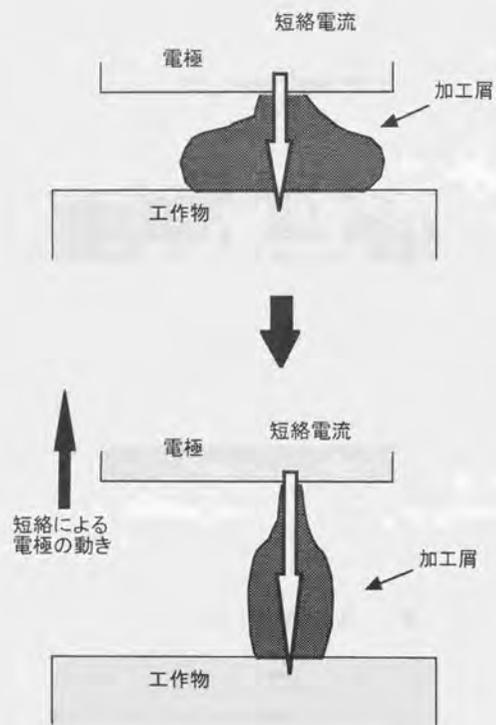


図3. 4 短絡時の様子

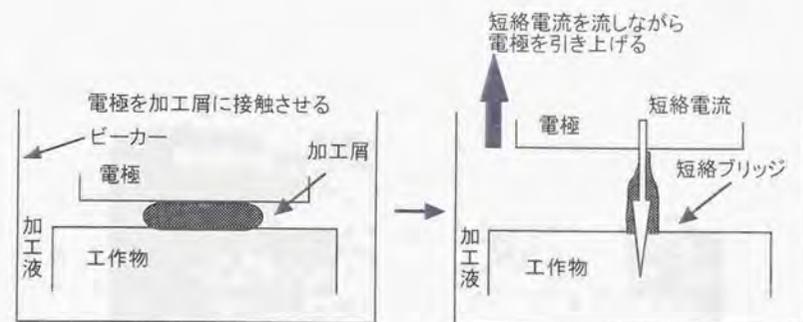


図3. 5 短絡ブリッジの成長

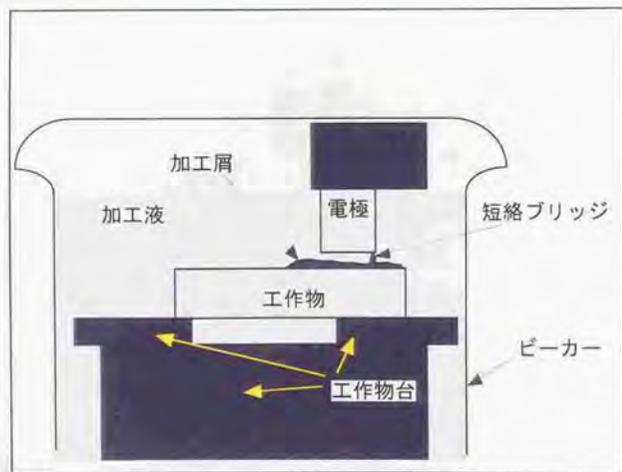


図3.6 加工屑による短絡状態

物の間に加工屑があり、その加工屑の中に電極につながる橋絡が観察される。この場合、電極をはじめの位置から1mm以上上昇させている。このように極間が短絡すると、Z軸を上げ極間距離を広げても短絡状態が解消できず、加工屑による橋絡が形成されていることが確認できる。以後この橋絡を「短絡ブリッジ」と呼ぶ。

次に短絡ブリッジの成長を防止する方法について実験した。図3.6の短絡ブリッジができた状態で、電流をいったん停止した。その後再び電源をオンしたが、極間はオープン状態となり、短絡を解消することができた。その様子を図3.7に示す。

以上より、短絡電流が極間に流れている間は、加工屑が極間に引き寄せられているため、たとえ電極を上げて極間を広げても、短絡は容易に解消できないことが確認できた。さらに、極間短絡時に電流を止めることにより、短絡ブリッジの成長を防止できることが確認できた。

3.2.4 加工面品質への影響

短絡ブリッジが形成された場合の加工面品質への影響について考察する。極間が短絡した場合には極間が広がるので、短絡ブリッジの長さが限界になった時点で短絡が解消される。しかし、短絡が解消されても短絡ブリッジ部分の加工屑の濃度は高いので、その部分に放電が集中しやすくなる。図3.8にその様子を示す。このように短絡ブリッジができた部分に放電が集中するので、加工面が荒れると考えられる。

3.2.5 ピーク電流値 i_e と短絡頻度

短絡電流が流れることにより加工屑のブリッジ（短絡ブリッジ）を形成することを確認した。短絡ブリッジを形成する作用は3.2.2項での解析によると短絡電流が大きいほど大きいと考えられる。そこで本節ではピーク電流値 i_e と短絡頻度の関係について調べた。

図3.9はピーク電流値 i_e と短絡頻度の関係について測定した結果を示したグラフである。□10mmの銅電極で加工を行い2mm毎に全印加パルス数に占める短絡パルス

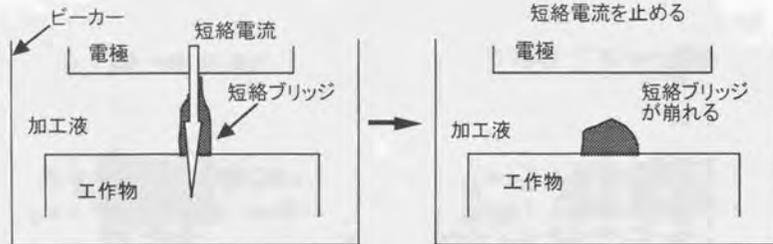


図3.7 短絡ブリッジの崩壊

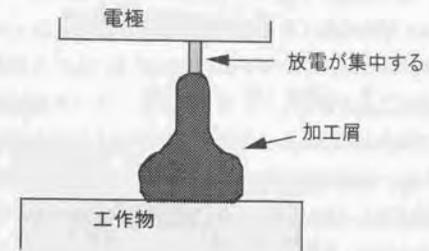


図3.8 放電の集中

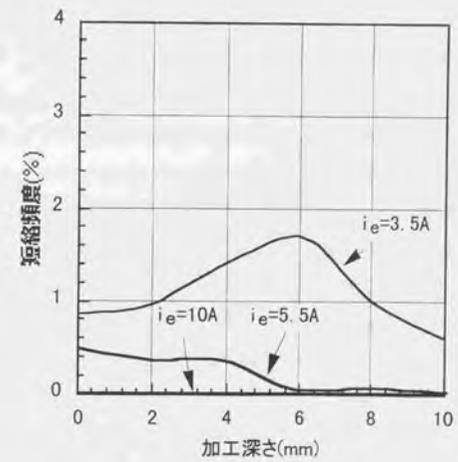


図3.9 短絡頻度

数の比率を測定した。ピーク電流値 i_e は3.5A, 5.5A, 10Aの3通り, パルス幅 $t_e=64\mu s$, 休止時間 $t_0=16\mu s$ の条件で実験を行った。

短絡の頻度はピーク電流値 i_e が小さい仕上条件ほど多くなるのがわかる。ピーク電流値 i_e が大きいほど極間短絡した場合に加工屑を引き寄せられる力が大きくなるにもかかわらずピーク電流値 i_e が小さい方が短絡頻度が多いという結果となった。これは以下の2つの理由によると推察している。第1に、ピーク電流値 i_e が大きい条件では、クリアランスが大きくなるため加工屑のはげがよくなり短絡の頻度が下がると考えられる。第2に、短絡電流は加工屑を集中させて「短絡ブリッジ」を作る働きをする一方で、熱により「短絡ブリッジ」を破壊する働きをするため、ピーク電流値 i_e が大きい条件で短絡した場合には加工屑を引き寄せられる力も大きくなるが、それ以上に「短絡ブリッジ」を破壊する力が大きくなり短絡頻度が減ると考えられる。加工深さが浅い場合には第1の理由が支配的で、加工深さが深くなるに従い第2の理由の影響が大きくなると考えられる。以上より短絡電流による加工特性への影響は仕上加工条件において顕著になると考えられる。

3. 3 電流制御による短絡の解消

前節の実験により極間短絡の際に短絡電流が流れると短絡ブリッジが形成されること、さらに、短絡電流を停止すると短絡ブリッジの形成を止めることができることを確認できた。本節では、この原理を利用して放電加工中における短絡ブリッジの形成を抑制して加工面品質を向上させる方法について検討する。

以下に本節で行った実験の実験の条件を示す。放電加工機は三菱電機(株)製放電加工機V35Fを使用した。加工条件は、トランジスタ回路による矩形波の電流パルスと電流の立ち上がりにはスロープのある電流パルスを用いた。本節の実験で共通な加工条件を表3. 2に示す。

3. 3. 1 極間短絡の検出原理

以上考察したように放電加工の際、短絡時に電流をそのまま流すと、短絡が長時

表3. 2 加工条件

電源電圧	80V
ピーク電流値 i_e	3.5A~15A
パルス幅 t_e	16 μs ~256 μs
極性	逆極性(電極:プラス, 工作物:マイナス)
電極	鋼, Poco製グラファイト 電極(EDM3)
工作物	鋼材

間継続し、電極の傷や異常消耗を引き起こす恐れがある。したがって、短絡電流により加工屑が集められないようにする必要があるが、3. 2. 3項の実験の結果より、短絡ブリッジの成長を抑制するためには電極と工作物が加工屑を介して短絡した場合に電流を停止することが効果的であると考えられる。そこで、放電の休止時間 t_0 中に短絡状態かどうかを判定し、短絡時には電流を流さないという方法を採用し、試作回路を製作した。この短絡時に電流を流さないための回路を、以下では「短絡電流防止回路」と呼ぶ。図3. 10に短絡電流防止の原理を示す。図に示すように休止時間中に電圧を印加して極間が短絡かどうかを判定し、極間が短絡していない場合は次のパルスを印加し、短絡時には次のパルスを印加しないという制御を行った。極間が短絡した場合の短絡電流について、従来の回路と短絡電流防止回路との比較を図3. 11に示す。図に示すように短絡電流防止回路では短絡時に電流が流れない。

3. 3. 2 短絡電流防止回路の効果1

— グラファイト電極への付着物 —

短絡電流防止回路において、その効果を調べるための実験を行った。

実験内容は、実際の加工事例における、短絡電流による様々な問題を具体的に選定したものである。それぞれ通常回路と短絡電流制御回路との比較を行い、その効果の検討を行った。

(1) 加工内容および実験条件

短絡電流防止回路は、加工屑を介した極間の短絡に起因する問題を改善することを目的としている。そのため、短絡電流防止回路の効果が顕著な加工例は、電極形状が複雑な場合などのように加工屑の排出が困難な場合が多い。

例として、図3. 12に示すようなテーパ形状のグラファイト電極により鋼材(SKD11)を加工する場合がある。このようなテーパのある形状の場合、電極のジャンプ動作を行っても加工屑が排出されにくいという問題がある。表3. 3に加工条件等を示す。

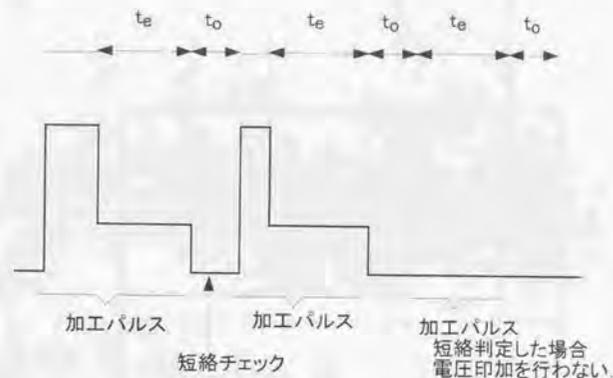


図3. 10 短絡電流防止の考え方

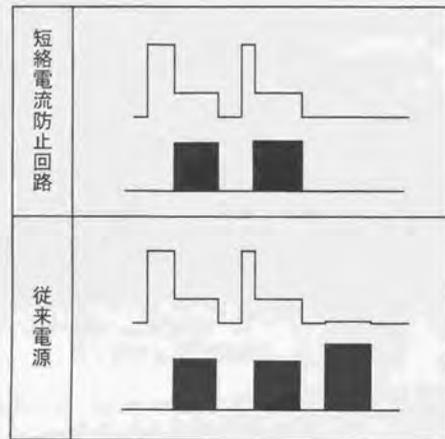
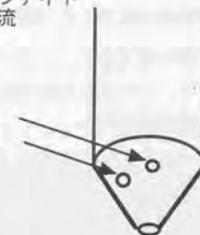


図3. 11 電流波形の比較

電極材質：グラファイト
液処理：無噴流

テーパの面に
粒が付着する



10mm

図3. 12 グラファイトテーパ電極

表3. 3 加工条件

工作物材質	鋼材 (SKD11)
電極	テーパ形状グラファイト電極 (図3. 12)
加工条件	$i_e=15A, t_e=48\mu s, t_o=64\mu s$ $i_e=15A, t_e=48\mu s, t_o=64\mu s$ $i_e=10A, t_e=32\mu s, t_o=16\mu s$ $i_e=5.5A, t_e=16\mu s, t_o=16\mu s$ $i_e=5.5A, t_e=4\mu s, t_o=8\mu s$ の多段加工
フラッシング	無噴流

(2) 実験結果

上記の条件により加工した結果、電極のテーパ部分に油（加工液）の分解物と考えられるカーボンの付着現象が発生した（図3. 12）。電極にこの付着物が付くため工作物に転写された凹みができる。この付着物は痙蓋状のものであり、引っかくと容易に剥がれてしまう。このような付着現象は、休止時間 t_0 やジャンプの条件等の実験パラメータを変更しても、なくすことができない。これはこの付着物が一般に定常アークと呼ばれる集中放電によりできたものとは異なり、加工屑あるいは油（加工液）の分解物が集中したことによりできたものと考えられる。加工中には短絡が頻繁に発生している。本例は短絡電流防止回路を用いることで、電極に付着物が付かないようにすることができた。

図3. 13に加工結果の写真を示す。短絡電流防止回路を使用した場合は傷の無いきれいな面に仕上がっているが、短絡電流防止回路を使用しない場合は、加工面に凹みができているのが観察される。この凹みは荒加工の段階でできたので、仕上げ加工は行っていない。

3. 3. 3 短絡電流防止回路の効果 2

— 電極・工作物の傷 —

(1) 加工内容および実験条件

次に、電極・工作物の傷を減らす効果について検討した。図3. 14に示すような電極において、予め荒加工を行い、その後、荒加工電極より少し大きい仕上げ電極で仕上げ加工を行う。液処理として、加工液を電極の側面より噴射する。仕上げ電極は荒加工電極より少し大きいので、仕上げ加工の始めは電極の側面で放電する。表3. 4に加工条件等を示す。

(2) 実験結果

本加工では、図3. 15に示すように、特に加工液の出口側になる位置において加工屑が停滞し、電極に傷が付き、工作物に転写されてしまう。加工状態を観察していると、加工屑によると思われる短絡が頻繁に発生する。短絡電流防止回路を適用した場合と適用しない場合の工作物加工面の拡大写真を図3. 16に示す。短絡

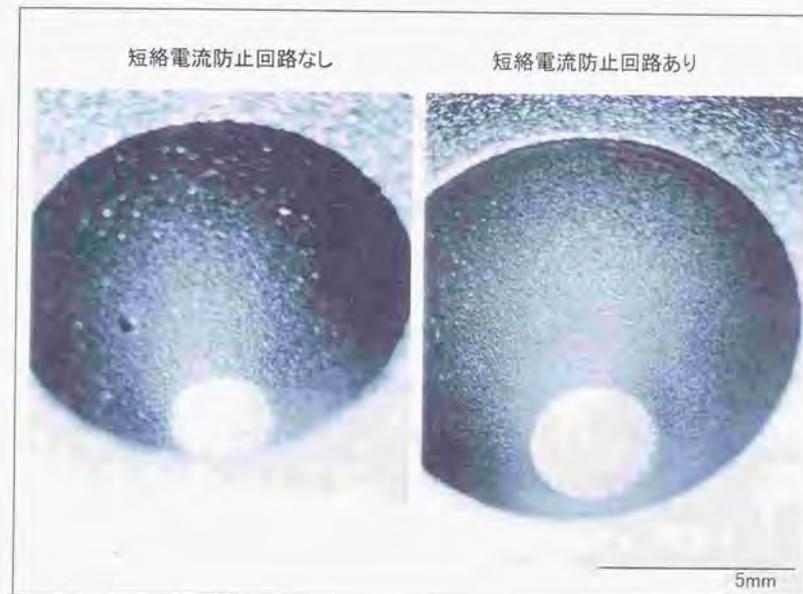


図3. 13 グラファイトテーパ電極による加工結果

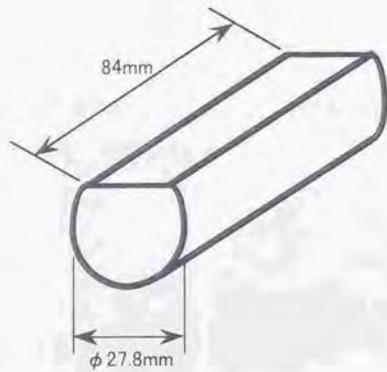


図3. 14 半円筒銅電極

表3. 4 加工条件

工作物材質	鋼材 (SKD61)
電極	半円筒銅電極 (図11)
加工条件	$i_e=9A, t_e=96\mu s$
電極本数	2本 (荒加工用, 仕上げ加工用)
フラッシング	無噴流

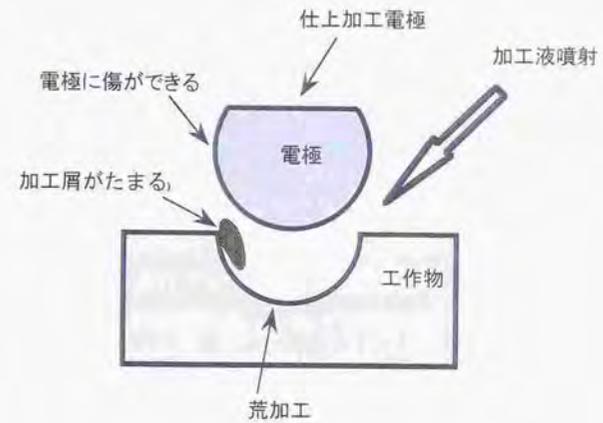
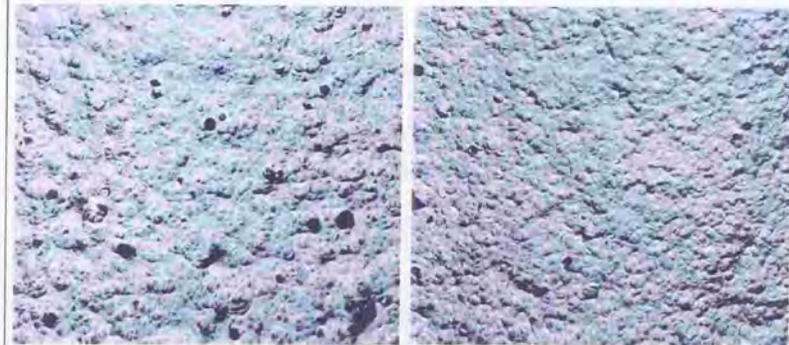


図3. 15 半円筒電極での加工

短絡電流防止回路なし

短絡電流防止回路あり



200 μm

図3. 16 銅半円筒電極による加工結果

電流防止回路を使用しない場合工作物に小さな傷ができていますが、短絡電流防止回路を使用した場合は傷がなく、短絡電流防止回路の効果が確認できた。

3. 3. 4 短絡電流防止回路のまとめ

以上の結果より極間短絡時に電流の流れるのを停止する短絡電流防止回路の効果が確認できた。短絡電流防止回路は加工屑がつくる短絡ブリッジの成長をいかに抑えるかを検討した回路であるため、極間からの加工屑の排出が困難な加工事例において効果があることがわかる。3. 3. 2項、3. 3. 3項の事例とも加工形状により加工屑が極間から出にくい形状である。3. 3. 2項の事例はテーパ形状であるため、電極のジャンプ動作を行っても極間の体積の変化量が小さい上に途中まで出た加工屑がテーパの部分で重力により逆戻りし、加工屑の排出性は悪い。

3. 3. 3項の事例は加工液を噴射させながらの加工であるが、加工屑のよどみ点が存在する場合である。加工形状が複雑なものではこのような現象が多いと考えられる。以上どちらの例も加工中に極間の短絡が頻繁に観察される。前節での考察のように、加工屑を介した短絡現象に起因する加工面の悪化の抑制に対し、短絡電流防止回路が効果的であることがわかった。

3. 4 ブリッジ破壊による短絡の解消

前節において、短絡電流に起因する問題点を解決するため極間短絡時に加工電流を停止する「短絡電流防止回路」を試作しその効果について確認した。本節では、前節での結果をふまえて、短絡電流を停止する場合の効果を保ちつつ、さらに極間の短絡状態を積極的に解消して加工速度を向上する方法について検討を行う。

前節において試作した短絡電流防止回路は、電極・工作物間の短絡状態を放電パルスの休止時間中に検出し、短絡の場合に電流を流さないという受動的な方法である。つまり、短絡電流を流さないようにし短絡ブリッジの成長を抑制はするが、積極的に短絡状態を解消するための制御は行っていない。そのため短絡電流防止回路は短絡に起因する加工速度の低下にはほとんど効果がない。これは、短絡電流防止

回路が短絡ブリッジの成長を抑えるという事実と一見矛盾するが、次の理由によると思われる。すなわち、極間が短絡して短絡電流が流れると短絡ブリッジを成長させて極間短絡時間が長くなるために加工速度が低下するということがある一方で、加工屑が極間にわずかに触れた程度の軽い短絡状態の場合には、短絡電流が流れることによる熱エネルギーにより短絡が解消してしまうため短絡電流を停止する場合より早く回復する場合があるためであると考えている。

本節ではこのような観点から、短絡ブリッジの成長を防止すると同時に、加工速度の向上を実現するため、極間の短絡現象を積極的に取り除く方法について検討を行う。

3. 4. 1 短絡ブリッジ除去の原理

短絡状態の原因は、前述のように多くの場合電極と工作物との間に存在する加工屑を介した短絡であると考えている。そのため短絡状態がしばらく続くと、極間距離が広がり、図3. 17のように、短絡ブリッジの径は小さくなると思われる。

3. 2節において考察したように、極間短絡時には短絡電流が流れることにより、次の2つの作用が働くと考えられる。

- (1) 短絡電流により発生する電磁力により加工屑が集中する力
- (2) 短絡電流のエネルギーにより短絡ブリッジを破壊する力

加工屑が集まり短絡ブリッジが成長するというのは、(2)の作用より(1)の作用による影響が大きい状態であると考えられる。一方、短絡ブリッジが細くなり破壊しやすくなった状態で電流を流せば、(2)の影響が(1)の作用を上回り、電流のエネルギーにより短絡ブリッジを破壊できると考えられる。

加工屑の集中を抑えて短絡ブリッジを成長を止めるためには、短絡電流を停止することが必要であるが、その一方で短絡ブリッジを成長させないようなタイミングで電流を流せば短絡解消に効果があると考えられる。以下の項において、短絡ブリッジを積極的に破壊する方法について具体的に検討を行う。

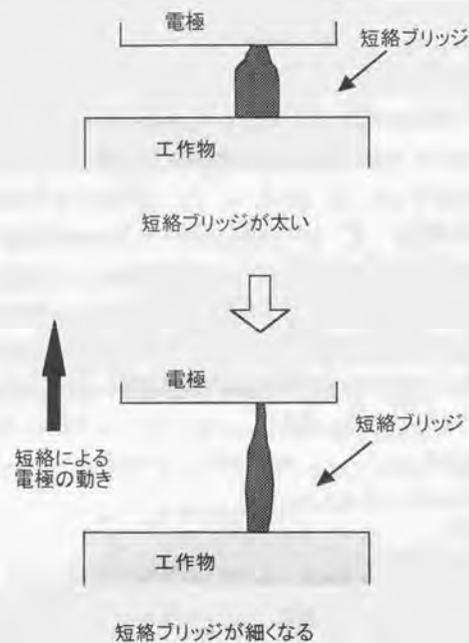


図3.17 短絡ブリッジ

3.4.2 短絡ブリッジ除去回路の構成

本項では短絡ブリッジを積極的に破壊する方法について具体的に検討する。前項での考察に基づき、極間の短絡時に短絡ブリッジを破壊することを目的とした電流（以下、短絡ブリッジ除去パルスとよぶ）を流す回路を試作した。以下この回路を短絡ブリッジ除去回路と呼ぶ。この短絡ブリッジ除去パルスの電流により短絡ブリッジを成長させることがあってはならないので、短絡ブリッジ除去パルスは短絡ブリッジを成長させないタイミングで印加する必要がある。そこで、短絡ブリッジ除去回路は短絡電流防止回路に、短絡ブリッジ除去パルスの発生機能を付け加えた形とした。以後、両者の機能を併せて短絡電流制御回路と呼ぶ。

以下に短絡電流制御回路の動作を述べる。まず、休止時間中に電圧を印加して極間が短絡かどうかを判定し、極間が短絡していない場合は次のパルスを印加し、短絡時には次のパルスを印加しないという制御を行う（短絡電流防止回路）。次に極間が短絡していた場合にパルスの印加を停止すると同時に短絡の継続時間をカウントする。そして、カウンタが設定値に達したときに、極間に短絡ブリッジ除去パルスを印加する（図3.18、図3.19）。De Bruyn³⁾により高ピークでパルス幅の短い電流パルスを印加することにより加工の安定化を実現できるという報告があるが、極間短絡時に電流を流すことは短絡ブリッジの成長につながるため、短絡ブリッジ除去のためのパルスは、極間短絡が十分長い期間継続した後で破壊しやすくなった短絡ブリッジに対して印加するのがより効果的である。短絡ブリッジを破壊する原理は次の2点であると考えられる。

- (1) 細い短絡ブリッジに高ピークの電流を流すことで短絡ブリッジが溶融破壊する。
- (2) 短絡ブリッジ除去パルスの電流で加工液が気化し、その勢いで短絡ブリッジが破壊される。

図3.20に短絡電流制御回路による加工の際の短絡発生時の極間電圧・電流波形の例を示す。加工条件は、ピーク電流値 $i_e=5.5A$ 、パルス幅 $t_e=64\mu s$ 、休止時間 $t_0=16\mu s$ であり、電極は $\square 10mm$ の銅、工作物材質は鋼材である。極間が短絡が発生

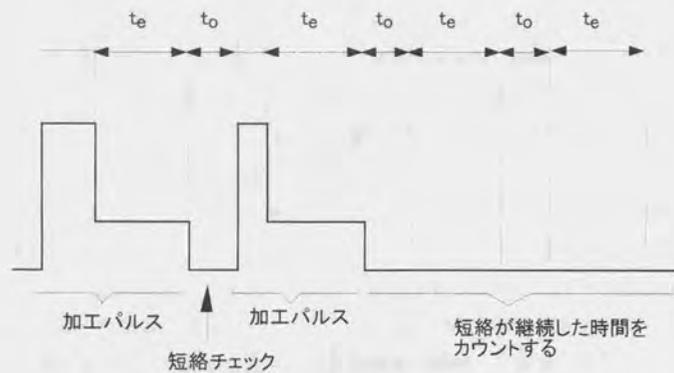


図3. 18 短絡パルスのカウント

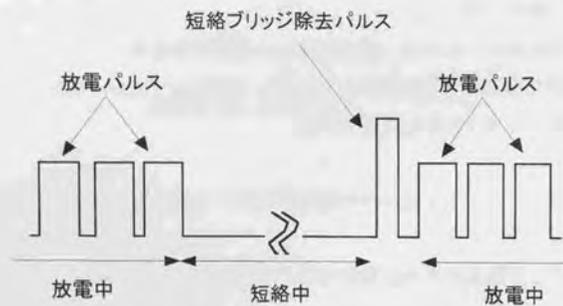


図3. 19 短絡ブリッジ除去パルス

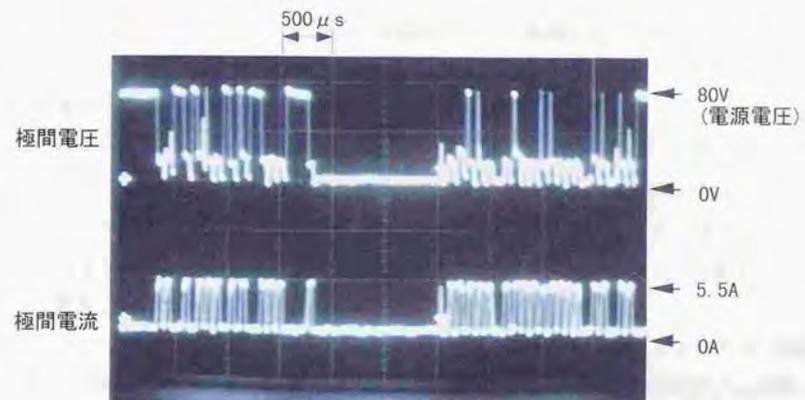


図3. 20 ブリッジ破壊時の極間電圧・電流波形

した際に短絡電流が停止されているが、ある時間（15パルス分の時間）経過した後には短絡ブリッジ除去パルスが印加され、短絡が解消されていることが確認できる（測定器の表示精度のため短絡ブリッジ除去パルスのピーク電流値が低く見えるが、15Aの電流パルスである）。

3. 4. 3 短絡ブリッジ除去パルスの最適化

次に短絡ブリッジ除去パルスの最適化を行う。短絡ブリッジ除去パルスは短絡ブリッジの破壊だけが目的であり、工作物を加工することは望ましくない。それは、短絡ブリッジ除去パルスはパルス幅が短く、ピーク電流値が高いパルスであるため、電極消耗が大きくなるためである。そこで、ブリッジを破壊できて加工速度が速く、電極にダメージ与えない、すなわち電極消耗率の小さいようなパルス波形にする必要がある。そこで短絡ブリッジ除去パルスの電流値を変化させ、加工速度と電極消耗率を測定した。

使用した加工条件を表3. 5に示す。短絡ブリッジ除去パルスを15A、25A、55Aの3種類でテストした。ただし、短絡ブリッジ除去パルスのピーク電流値は短絡ブリッジの抵抗値によりある程度ばらつきがある。表3. 6、図3. 21に各短絡ブリッジ除去パルスを使用したときの加工速度（ mm^3/min ）と電極消耗率（%）を示す。短絡ブリッジ除去パルスのエネルギーが小さい場合（15A）には電極消耗率は小さいが加工速度が遅い。短絡ブリッジ除去パルスのピーク電流値を25Aまで上げると電極消耗率をほとんど増加させずに加工速度を上げることができる。しかし、55Aまで上げて加工速度は25Aのときと変わらず電極消耗率が増加する傾向にある。

このような傾向になるのは以下の理由によると思われる。すなわち、短絡ブリッジ除去パルスのエネルギーが大きいくほど短絡ブリッジは破壊され易く、加工速度は短絡ブリッジが破壊される割合により決まる。したがって、短絡ブリッジ除去パルスのエネルギーを大きくしていくと、短絡ブリッジの破壊の頻度が上がる間は加工速度が上がるが、短絡ブリッジの破壊の割合が100%に近くなると加工速度は飽和すると考えることができる。また、電極消耗率は、短絡ブリッジ除去パルスにより短絡ブリッジが破壊された後の放電に移行する部分の電流波形により決まると考えることができる（図3. 22）。すなわち短絡ブリッジ除去パルスのエネルギーが大き

表3. 5 加工条件

工作物材質	鋼材（SK3）
電極	□10mm銅電極
加工条件	$i_e=15\text{A}$, $t_e=256\mu\text{s}$, $t_o=48\mu\text{s}$
フラッシング	無噴流

表 3. 6 短絡ブリッジ除去パルスの最適化

短絡ブリッジ除去パルス ピーク電流値	パルス幅 (μ s)	加工速度 (mm^3/min)	電極消耗率 (%)
15A	2	17.02	0.078
25A	10	19.30	0.070
55A	10	19.43	0.093

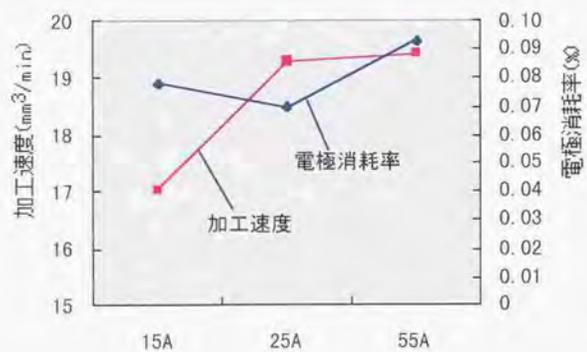


図 3. 2 1 加工速度と電極消耗率に対する短絡ブリッジ除去パルスの影響

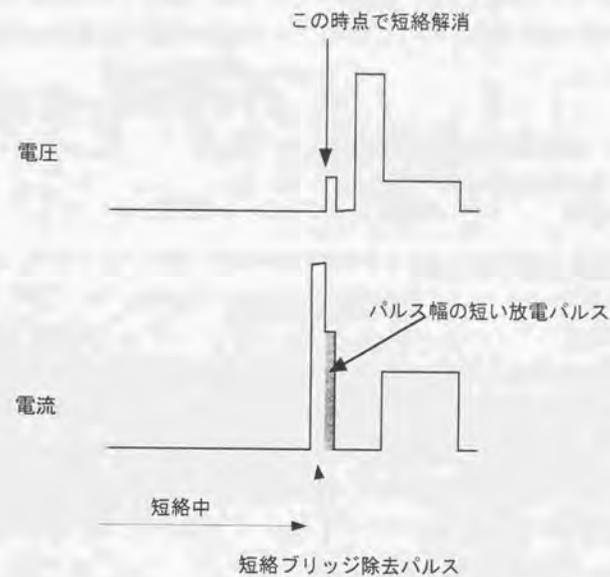


図 3. 2 2 短絡解消後の短絡ブリッジ除去パルス

すぎる場合には、短絡ブリッジ除去パルスの途中の段階で短絡ブリッジが破壊されて放電に移行し、ピーク電流値が高くパルス幅の短い放電パルスが混入するおそれとなるために電極消耗率が増加すると考えられる。

以上より、短絡ブリッジ除去パルスは、加工速度が上限に達し、電極消耗率が低い値が最適であると結論できる。この条件においては、短絡ブリッジ除去パルスのピーク電流値は25Aが最適値であり、短絡ブリッジのみを破壊できていると考えることができる。

3. 4. 4 短絡ブリッジ除去回路の効果 1

— 短絡解消率 —

次に短絡ブリッジ除去パルスによる短絡状態の解消の効果について示す。まず、短絡ブリッジ除去パルスによる短絡状態の解消率について調べた。

(1) 実験条件

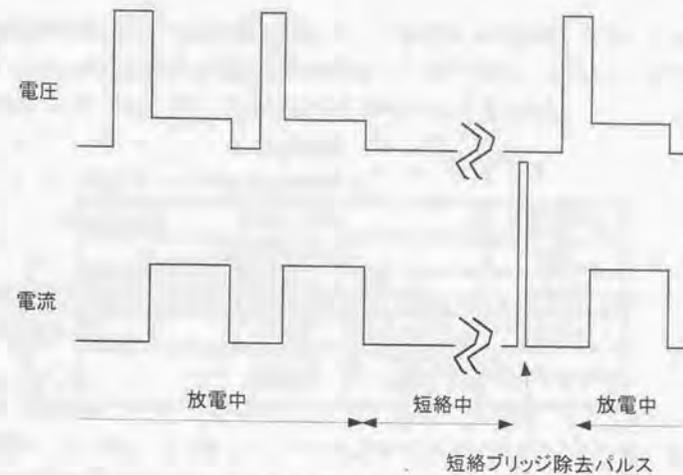
極間短絡時に短絡ブリッジ除去パルスを印加し、その直後に短絡が解消されているかどうかの頻度を調べた。図3. 23に示すように、短絡ブリッジ除去パルスの直後のパルスが放電している場合に短絡が解消できたと判断し、短絡している場合に短絡が解消できなかったと判断した。すなわち、ここで論じる短絡解消率は以下の式で定義する。

$$\text{短絡解消率 (\%)} = \frac{\text{(短絡ブリッジ除去パルス直後に短絡が解消できた場合の数)}}{\text{(短絡ブリッジ除去パルスが発生された回数)}} \times 100 \%$$

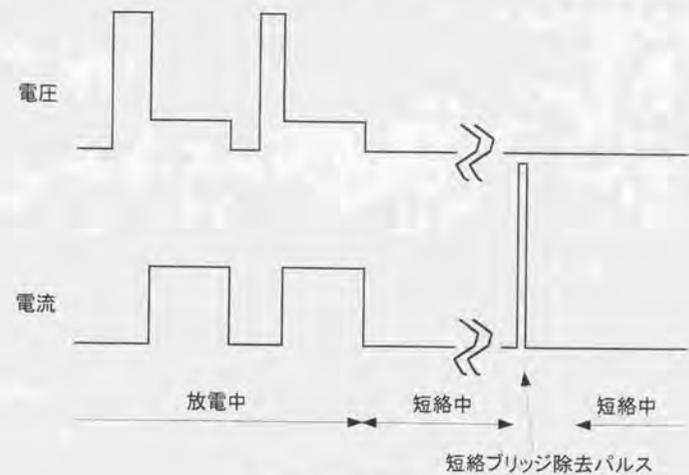
なお、計測は加工深さ2mm毎に行った。表3. 7に加工条件等を示す。

(2) 実験結果

短絡ブリッジ除去パルスが、継続状態にある短絡の解消に、どの程度効果があるのかを調べるため、加工深さごとに短絡解消率を測定した。短絡解消率の推移を図3. 24に示す。図において、横軸は加工深さ、縦軸は短絡解消率を示している。



短絡が解消できた場合



短絡が解消できなかった場合

図3. 23 短絡ブリッジ除去パルスによる短絡解消の判定

表 3. 7 加工条件

工作物材質	鋼材 (SK3)
電極	□10mm銅電極
加工条件	$i_e=15A, t_e=256\mu s, t_o=48\mu s$
加工深さ	10mm
フラッシング	無噴流

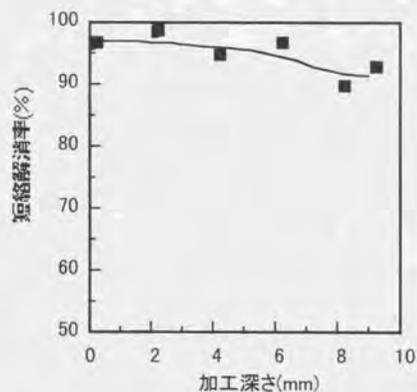


図 3. 24 短絡解消率 ($i_e=15A$)

加工深さが深くなるにつれ短絡解消率が低下する傾向にはあるが、短絡ブリッジ除去パルスにより、90%以上短絡状態を解消することができた。これにより短絡状態が継続することを防止でき、加工速度が向上できると考えられる。

3. 4. 5 短絡ブリッジ除去回路の効果 2

— 短絡発生率 —

次に短絡ブリッジ除去回路により短絡パルスの発生率がどのように改善されるかについて調べた。

(1) 実験条件

短絡ブリッジ除去パルスにより、短絡発生率がどの程度変化するかを調べるため、短絡電流防止回路のみの場合と、さらに短絡ブリッジ除去回路を付加した場合において、その比較を行った。全パルス信号と短絡パルスをカウンタにより計測する。なお、計測は加工深さ2mm毎に行った。全パルス数と短絡パルス数との比により、短絡発生率が求められる。

$$\text{短絡発生率 (\%)} = \frac{\text{短絡パルス数}}{\text{全パルス数}} \times 100 \%$$

である。表 3. 8 に加工条件等を示す。

(2) 実験結果

短絡電流防止回路のみを用いた場合と、短絡電流防止回路と短絡ブリッジ除去回路を併用した場合において、短絡発生率の頻度を測定した結果を、図 3. 25 に示す。図において、横軸は加工深さ、縦軸は短絡解消率を示す。図中の○は短絡ブリッジ除去パルスのない回路を使用した場合の短絡発生率を示し、●は短絡ブリッジ除去回路を使用した場合の短絡発生率を示している。短絡ブリッジ除去パルスを適用することにより、特に加工深さの浅いところでは、短絡発生率を低下させる効果があることがわかる。加工深さが深くなるにつれ、短絡ブリッジ除去回路ありの場合となしの場合との間で短絡発生率の差が小さくなる傾向があるが、これは、加

表 3. 8 加工条件

工作物材質	鋼材 (SK3)
電極	□10mm鋼電極
加工条件	$i_e=10A, t_e=128\mu s, t_o=16\mu s$
加工深さ	8mm
フラッシング	無噴流

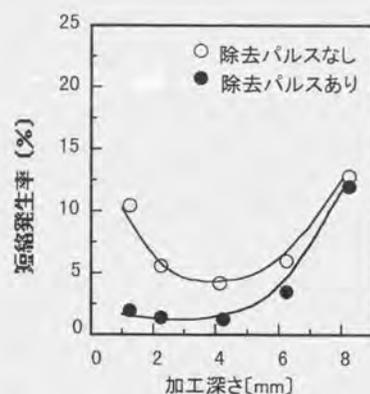


図 3. 25 短絡ブリッジ除去パルスによる短絡頻度減少効果

工深さが深くなるに従い、極間の加工屑濃度が上昇し、短絡を解消してもすぐに短絡現象を再発するためである。

3. 4. 6 短絡ブリッジ除去回路の効果 3

— 仕上加工速度および電極消耗率 —

次に短絡ブリッジ除去回路による加工速度の向上効果について調べる。併せて電極消耗に対して悪影響を与えないかどうか調べる。

(1) 実験条件

仕上加工条件により、短絡電流制御回路（短絡電流防止回路、短絡ブリッジ除去回路）を搭載した電源と搭載しない電源において加工を行い、加工速度 (mm^3/min) と電極消耗率 (%) を求め、その比較を行った。表 3. 9 に加工条件等を示す。

(2) 実験結果

短絡電流防止回路、短絡ブリッジ除去回路を付加した電源と付加しない電源において、測定した加工速度と電極消耗率の結果を表 3. 10 に示す。短絡電流制御回路を付加した場合は、付加しない場合と比較して、仕上加工速度が大幅に向上し、電極消耗はほとんど変化がなかった。

3. 4. 7 短絡ブリッジ除去回路のまとめ

極間の短絡現象を積極的に取り除く方法について検討を行い、短絡ブリッジを破壊することを目的とした短絡ブリッジ除去パルスが発生させる短絡ブリッジ除去回路を試作した。短絡ブリッジ除去パルスは短絡ブリッジを破壊することのみを目的とした電流パルスであり、適切なエネルギーに設定することにより電極消耗に悪影響を与えることなく短絡解消の効果を持ち、加工速度を向上させることがわかった。

また、短絡ブリッジ除去パルスのエネルギーは加工のための放電パルスに比較して小さいため、加工面性状に与える悪影響は特には無かった。特に、短絡ブリッジを破壊するのみで短絡ブリッジ除去パルスが放電に移行しなかった場合は、工作物

表 3. 9 加工条件

工作物材質	鋼材 (SK3)
電極	中空円筒銅電極 (図 3. 26 に示す.)
加工条件	表 3. 10 に示す.
加工時間	1 時間
フラッシング	電極からの噴出 (噴出圧 0.98kPa)



図 3. 26 加工速度比較テスト電極 (材料: Cu)

表 3. 10 加工速度・電極消耗率の比較

加工パルス条件	短絡電流制御回路なし		短絡電流制御回路あり	
	電極消耗率 (%)	加工速度 (mm ³ /min)	電極消耗率 (%)	加工速度 (mm ³ /min)
$i_e=3.5A$, $t_e=16\mu s$, $t_o=16\mu s$	3.5	1.36	3.8	2.17
$i_e=5.5A$, $t_e=32\mu s$, $t_o=32\mu s$	1.8	3.16	2.1	4.85
$i_e=15A$, $t_e=256\mu s$, $t_o=256\mu s$	0.26	22.2	0.33	29.7

を加工しないので、加工面性状には影響を与えないと考えられる。短絡ブリッジ除去パルスの途中で短絡ブリッジが破壊されて、放電に移行した場合においても、その放電により形成される放電痕は、通常の加工のための放電パルスにより形成される放電痕に比べ小さいので加工面性状を悪化させることはないと考えられる。

3. 5 まとめ

放電加工の仕上加工特性に顕著な影響を与える短絡電流に関して実験および考察を行った結果以下の結論を得た。

1. 短絡電流により加工屑が集まり短絡ブリッジを形成する。そのため短絡が長時間継続し、加工速度の低下・電極の異常消耗などを引き起こす。
2. 短絡電流防止回路により、加工屑の排出不良による極間短絡に起因する電極の異常消耗、および工作物へのダメージ（ピンホール、ピット）の発生を防止することが確認できた。
3. 短絡ブリッジ除去パルスにより、極間短絡現象を解消できることが確認できた。
4. 短絡ブリッジ除去パルスにより、極間短絡の頻度を減らすことができた。
5. 短絡ブリッジ除去回路により短絡を回避することで、仕上加工が安定し、加工速度が大幅に向上した。

第4章 不燃性加工液を用いた場合の分解生成物制御

本章では、加工液に高分子系不燃性液を用いた場合の放電加工における現象を調べる。高分子系不燃性液（水に高分子化合物を混合した液）を加工液として使用すると、極間にタール状の生成物（以下単にタールとする）を生ずる。タールは特に仕上加工において、加工性能を大きく劣化させる。この放電加工時のタール付着現象について調査し、タール付着を防止するための両極性電源を考案しその効果について検証する。

4. 1 はじめに

形彫放電加工における火災の危険性の排除という観点から、灯油系加工液に代わるものとして水を主成分とする加工液（以下、不燃性液とする）の研究がなされてきている。不燃性液を加工液とする形彫放電加工機の割合は現在のところ比較的小さいが、様々な利点があることから今後ある程度の割合で灯油系の加工液に置き換わっていくことが考えられる。

純水を形彫放電加工の加工液とした研究についてはこれまでにいくつかの報告がある^{1) 11) 14) 21)}。これらの研究において、純水は灯油に比べて加工速度が遅いという問題があることが示された。その後、純水に高分子化合物を混合した加工液を用いることにより、純水と比べて加工速度が著しく向上することが明らかとなっている^{1) 21)}。上記のような水を主成分とした加工液は、灯油系の加工液に比べて定常アークになりにくいので、加工電流を上げることができ、その結果灯油系加工液よりも高い加工速度が得られる。このため、現在の不燃性放電加工に使用される加工液としては、純水に親水性の高分子化合物を混合したものをを用いる場合が多い。

不燃性液を用いた放電加工には、上記のような利点がある反面、次のような欠点がある。

- (1) 仕上面あらかさが油と比べて悪い。
- (2) 大面積の仕上加工が困難である。

(3) 電極消耗が油系加工液に比べて多い。

本章では、不燃性液を用いた放電加工における加工特性の向上を目的としている。特に不燃性液を加工液とした場合に工作物に付着するタールについて注目する。不燃性液を用いた仕上げ加工では、OKパルスによる加工を行っていてもタールの付着が発生し放電加工特性を劣化させる。本章では、その加工特性の劣化について調べるとともに、上記の問題を改善する方法について検討する。

4. 2 加工状態の解析と分解生成物の同定

本節では、加工液に高分子系不燃性液を用いた場合の放電加工における現象を調べる。高分子系不燃性液を加工液として使用して放電加工を行うと、極間にタールが生成し工作物に付着する。タールは特に仕上げ加工において、加工性能を大きく劣化させる。ここではタール付着による加工性能の劣化現象について調べる。

4. 2. 1 実験条件

以下に本節で行った実験の実験条件を示す。

一般に、最近の放電加工液としての不燃性液は、高分子系不燃性液が用いられる。水に混合される高分子化合物の液体は、水に溶解しなければならないので、一般に鎖状炭化水素基Rに水酸基-OH基が結合したアルコールR-OHが用いられる。-OH基には極性があり、水分子と結合する傾向が強いため水によく混ざる(図4.1)。また、最近では放電の際の爆発力を増すため、分子量の大きな高分子化合物を用いる傾向にある。本章では加工液として、ジョンソン(株)製のグリコール系高分子化合物の液体(HSU-70)を水で50%に希釈したものを、電気伝導度を $0.9 \mu S/cm \sim 1.0 \mu S/cm$ に制御した。

放電加工機は三菱電機(株)製放電加工機M35Kを使用した。加工条件は、トランジスタ回路による矩形波の電流パルスを用いた。詳細を表4.1に示す。

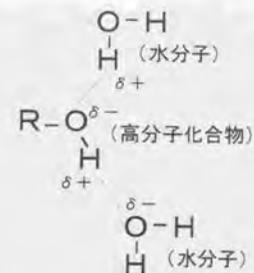


図4.1 不燃性液の溶解状態

表4.1 加工条件

電源電圧	80V
ピーク電流値 i_e	13A~55A
パルス幅 t_e	$15 \mu s \sim 1024 \mu s$
極性	電極 : プラス 両極性の場合は、休止時間中に電極にマイナスの電圧を印加
電極	イビデン製グラファイト電極(ED-3)
工作物	鋼材(SK3)

4. 2. 2 不燃性液を用いた放電加工におけるタールの生成

図4. 2に、不燃性液を用いた放電加工による加工面の写真を示す。この加工に使用した電極はイビデン製のグラファイト電極 (ED-3)、工作物は炭素工具鋼 (SK3) である。加工面積は約 100cm^2 であり、電極に液穴を設けてフラッシング (液圧 $10\text{N}/\text{cm}^2$ で噴出) を行った。加工条件は、ピーク電流値 $i_e=10\text{A}$ 、パルス幅 $t_e=15\mu\text{s}$ の条件を最終条件とした多段条件による加工であり、最終条件で20分の加工を行った。図より、加工面にタールが付着しているのが観察できる。これは、加工液中の高分子化合物が放電の熱で分解し、黒色のタール状の物質が生成したものと考えられる。

4. 2. 3 極間短絡の発生

ここでは、タールの付着によって加工状態がどのように変化するか調査した。図4. 3は、不燃性液中で放電加工を行った場合の有効放電パルス数、短絡パルス数を10分毎に10秒間ずつカウントしたものである。図において、横軸は加工時間、縦軸はパルス数を示している。■は有効放電パルス数、○は短絡パルス数である。ここでいう有効放電パルスとは、電圧を印加して放電したパルス (OKパルスおよびNGパルス) である。加工条件は、電極面積 100cm^2 、ピーク電流値 $i_e=10\text{A}$ であり、仕上げの範囲の条件である。加工液の電気伝導度は $0.9\mu\text{S}/\text{cm}$ であった。この条件で加工すると、加工後直ちに工作物加工面にタールが付着し始める。図4. 3からわかるように、全印加パルスのうちの約7%が短絡パルスである。極間の短絡が発生すると極間サーボの働きにより電極と工作物が離れ、次に放電が発生するまでの時間が長くなるため加工速度が遅くなる。

4. 2. 4 タールの分析

次に、前項で観察した極間短絡現象の原因について調べる。

タールは炭化水素化合物であることが知られている。炭化水素化合物であるタールは絶縁物であり、したがって、タールにより直接短絡が発生しているとは考えに

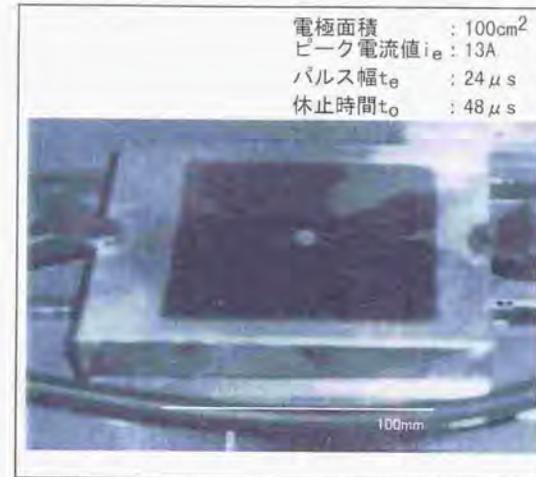


図4. 2 加工面へのタールの付着

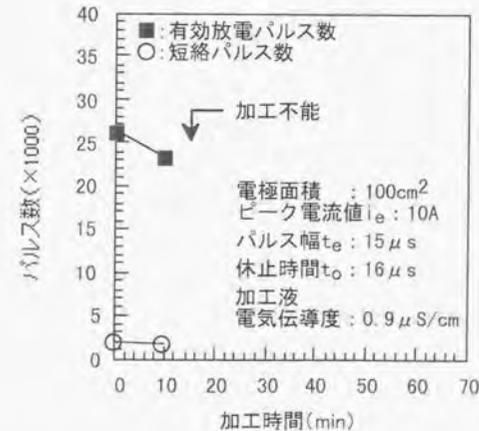


図4. 3 単極性加工の場合の放電パルス数

く、図4. 4に工作物に付着したタールをEPMA分析した結果を示す。図より、Fe-K α 、Fe-K β のピークの存在が確認でき、タール中に鉄が含まれていることがわかる。そこでタールを面分析した結果が図4. 5である。図4. 5に上記タールのSEI像、同じ部分のFe-K α 像を示す。図より、タール中に、放電加工によってできたと考えられる細かい鉄粉が混ざっているのが観察される。このことから、タールが工作物に付着するときに放電加工により生じた加工屑である鉄粉が混ざり、この鉄粉により、極間の短絡が引き起こされているということが推測される。

4. 2. 5 極間電圧の低下

水系の不燃性加工液を使用した放電加工に特有の現象として、仕上げ加工条件になると放電が発生しなくなり加工が進行しなくなるということが起きる。ここでは、このような現象の原因を調べる。

図4. 6に4. 2. 3項と同一の加工条件で加工を行ったときの20分後の極間電圧波形の写真を示す。写真の波形は、放電していない期間のものであるが、極間電圧は電源の電圧(80V)まで立ち上がらず、30V程度の電圧で発振した状態になっていることがわかる。これは、加工液を通して電流が流れて極間の電圧が下がったために、放電が発生したと誤検出し、休止が挿入されたためである。

一般に、不燃性加工液を用いた場合、電極の面積が大きくなると極間の抵抗が小さくなり、電流制限抵抗(図1. 4のR1、R2等)が大きく電流ピーク値 i_e の小さな条件では、極間の電圧が低下する。このため、あるピーク電流値 i_e 以下の加工条件では、もれ電流によって電圧がドロップし、図4. 6に示すような状態に陥り、加工不能となる。

以下、さらに詳細に考察する。図4. 7は放電加工の回路の概略を示している。図において、電極面積をS、加工液の比抵抗を ρ 、極間距離をdとすると、電極・工作物間の抵抗 R' は

$$R' = \rho \cdot d/S$$

と表される。電源電圧を E_0 、電流制限抵抗をRとすると、極間電圧Vは

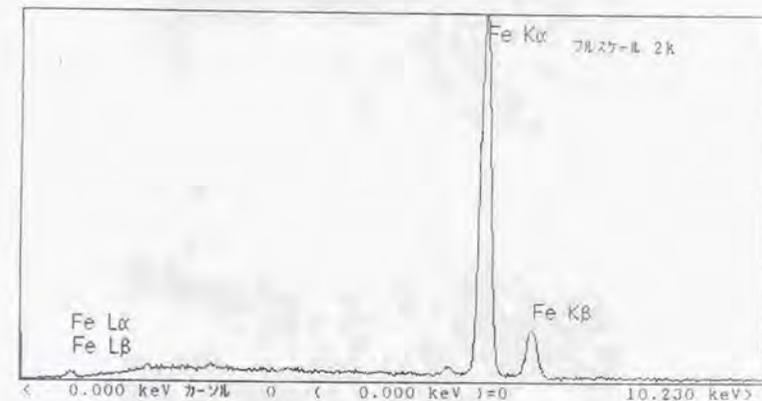


図4. 4 タールのEPMA分析

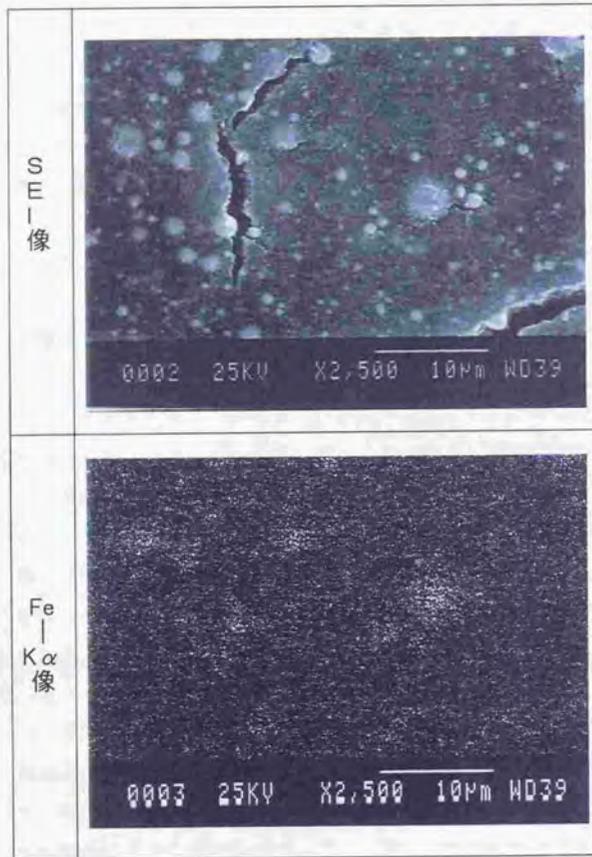


図 4. 5 タールの面分析

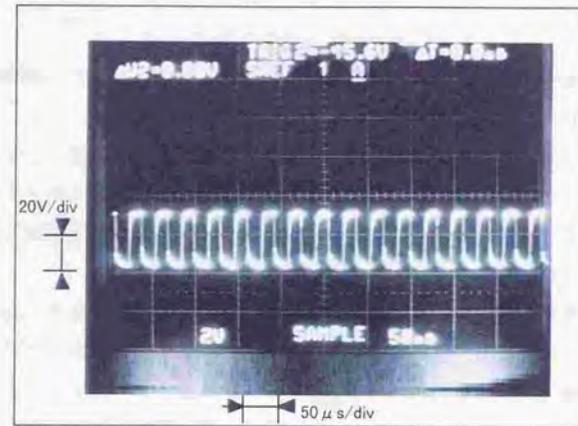


図 4. 6 加工不能時の極間電圧波形

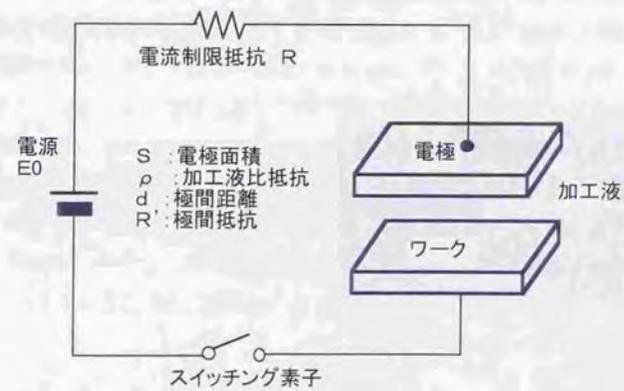


図 4. 7 極間抵抗の原理

$$V = E_0 \cdot R^2 / (R + R')$$

となり、電極面積が大きい場合、あるいは、極間距離が小さい場合に極間電圧が低下することがわかる。

一般に、高分子のような分子量の大きな物質は水よりも絶縁破壊が起きにくいことが知られている⁴⁾。上記のようなタールが工作物の加工面に付着すると、絶縁破壊が起きにくくなるため、極間間隙は狭くなる。よって前述の極間抵抗が小さくなり、電圧低下を増長するため加工不能となるものと推測される。

図4. 8は放電加工時の放電位置の移動の概要を示したものである。図は放電の発生しやすいところを示すため電極・工作物の縦方向の形状を強調して示している。一般に放電加工は、初めに放電の発生しやすいところから放電が始まり、その後、放電により生じた加工屑の濃度の高い部分で放電が発生しやすくなる（以後、放電圏と呼ぶ）。加工屑の濃度の高い位置付近で放電が発生するため電極と工作物の距離が厳密にいちばん近い場所でも放電が発生することができると考えられている。放電加工はこの放電圏が移動しながら進むことが知られている^{4) 5)}。

一方、不燃性液を用いた放電加工では、一般の油を用いた放電加工と同様に、初めに放電の発生しやすいところから放電が始まるが、放電の発生した場所付近で、工作物にタールが付着してしまうため、放電の位置が移動する前に放電が発生しなくなる。一般的な平均電圧サーボ送り制御では、放電が発生しない場合には極間距離が短くなるように制御される。その際、他の場所で放電が発生するならば加工が継続し、放電が発生する前に極間の抵抗が下がった場合には加工不能状態に陥るものと考えられる（図4. 9）。これが、図4. 3において、途中で加工不能になっている原因であると考えられる。図4. 6の状態において、工作物の加工面に付着したタールを除去すると再び放電が発生するようになる。このことからタールが放電の発生を阻害していることがわかる。

4. 2. 6 不燃性液放電加工におけるタールの発生機構

加工特性を悪化させる不燃性液放電加工におけるタールの発生機構は次のように

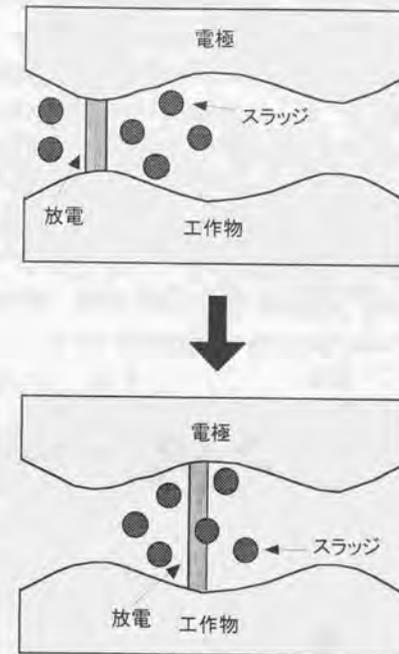


図4. 8 放電位置の移動

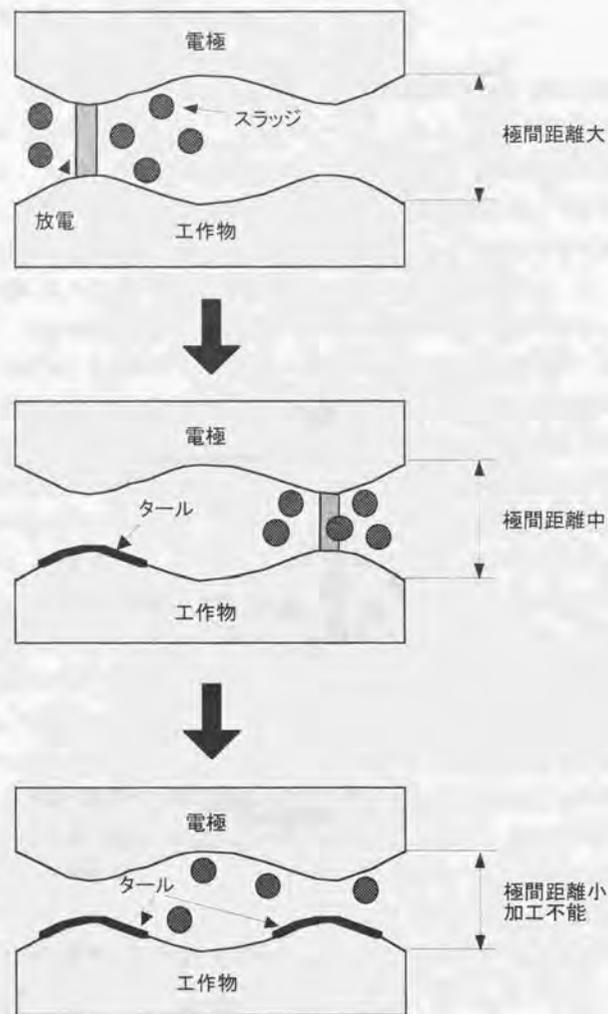


図4.9 加工不能状態への移行

考えられる。前述のように水に混合される高分子化合物の液体は、水に溶解しなければならないので、一般に鎖状炭化水素基Rに水酸基-OHが結合したアルコールR-OHが用いられる。炭化水素基Rは疎水性の基であり、水酸基-OHは親水性の基である。放電加工の際に、この高分子化合物の熱分解が起きる。炭化水素の熱分解としては、一般的に、原子間結合の分解、重合等が知られているが⁴⁾、タールの生成に関係するものとしては、次の2点が考えられる。図4.10に概要を示すように、

(1) 親水性の-OH基が除去され、疎水性の炭化水素基Rが分離してタールとして析出する。

(2) 親水性の-OH基が除去された炭化水素基の重合により、大きな分子量となり析出する。

タールの析出は不燃性液に顕著な現象であり、灯油系加工液の場合には目立たない。これは分離した炭化水素が水には溶けないが、油には溶けるため液中に分散するためと考えられる。

4.2.7 タールの工作物面への付着

形彫放電加工では電極をプラスとして加工が行われるのが一般的である。不燃性液を用いた加工の場合、加工液の熱分解により生成したタールは工作物の加工面に付着する。これはタールがプラス極性に帯電しており、マイナス極性である工作物側に引き寄せられるために起きるものと推測される。このことは、電極極性をマイナスとして加工するとタールが電極側に付着することからも裏付けることができる。タール付着のメカニズムは図4.11のように推測される。図において、熱分解された高分子化合物は、一時的に遊離基R⁺として存在しマイナスの極性である工作物面に引き寄せられて、図4.2のようにタールとして工作物に付着するものと考えられる。タールの工作物面への付着は極間距離の狭い仕上げ加工条件のときの方が顕著であり、加工状態を不安定にし、加工面あらかさが悪化するなど加工に悪影響を与える。

タールの析出・付着を防ぐための方法の一つとして、加工液に溶剤を混入する方法がある。灯油系の加工液を使用したときにタールの析出・付着が目立たないのは生成したタールが加工液の中にとけ込むためであり、不燃性液の場合にも溶剤を混

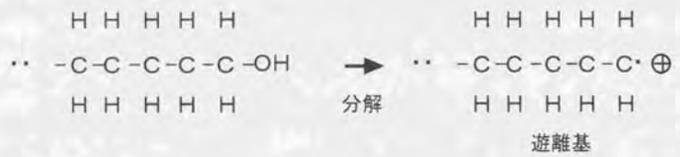


図4. 10 タールの生成メカニズム

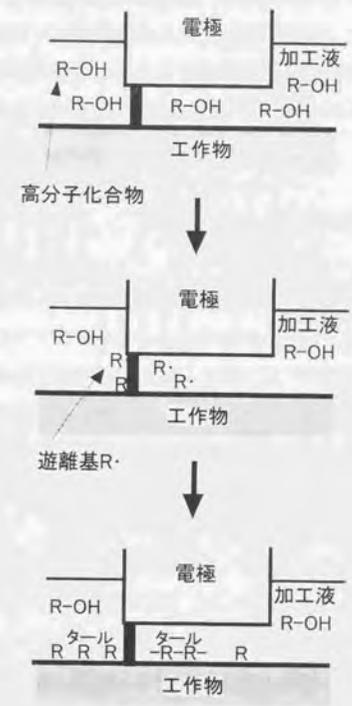


図4. 11 タール付着のメカニズム

入ることによって、同様に加工液にタールが溶け込み易くすることができる。この方法は確かにタールの付着を減らすことはできるが、放電加工機の塗装の塗料が溶ける、臭いが強いなどの欠点がある。また別の手段として、炭素原子の結合が細かくなるように加工液に分散剤（重合の禁止剤、抑制剤）を混入する方法がある。この方法もタールの付着を減らす効果があるが、加工液の濾過により分解物を除去することができず、加工液の汚れがめだつようになるのであまり行われていない。

4. 3 タール付着の抑制

本節では、前節の結果に基づき工作物加工面へのタール付着を防止する方法について検討する。タールの工作物への付着は、タールがプラスに帯電しているためにマイナスの極性である工作物に引き寄せられるのが原因である。そこで、極間の電圧を見かけ上0Vにする両極性電源を試作し、その効果について検証する。

4. 3. 1 両極性加工の原理

プラスに帯電したタールの工作物への付着を防止するために、極間の平均電圧を低くできる電源の方式について検討した。工作物面へのタールの付着が、帯電したタールのマイナス極性である工作物への移動に起因するものであれば、工作物の電位を0Vに近づけることにより防止できると考えられる。極間の平均電圧を0Vに近づける方法として、主に次の2点が考えられる。

- (1) 適当な時間間隔で電極と工作物の極性を切り換える（図4. 12）
- (2) 電極がプラスの状態で加工し、その休止時間中に電極にマイナスの電圧を印加する。

(1)の方法は、極間の平均電圧を十分下げするためには電極をマイナスとして加工する時間が長くなり、この場合電極消耗率が増えるという問題がある。また、電極がマイナスの極性で加工する時間が長くなると工作物材質が溶け出し、電解腐食

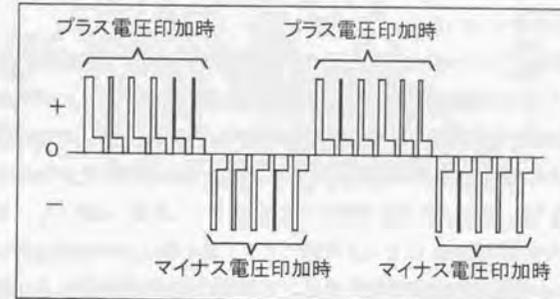


図4. 12 電極極性切り換え方式電源の極間電圧波形

がおきる可能性が高くなる。

(2) の放電加工の休止時間中に加工の際の電圧と反対の極性の電圧を印加する方法は、主にワイヤ放電加工機の電解腐食対策として有効であることが報告されている⁵⁾。ワイヤ放電加工は一般的にワイヤ電極をマイナスの極性にして工作物を切断する加工法であるため、プラス側の工作物が電解により溶出する。この現象を防止するために休止時間中に加工中と反対の極性の電圧を印加し極間の平均電圧を下げることを目的としている。

本研究では帯電したタールの付着を防止するために、(2)の方法である休止時間に電極にマイナスの電圧を印加する方法を採用した。図4.13に両極性加工における実験回路および極間の電圧波形の概略を示す。ここでは休止時間に電極にマイナスの電圧を印加し、極間の平均電圧を0Vにした。休止時間中に印加する電極マイナスの電圧を70V、加工のために印加する電極プラスの電圧は80Vとし、電極マイナス側の電圧を低くすることによって電極マイナス側の電圧での放電を防いだ。また、電極マイナス側の電流制限抵抗を電極プラス側の電流制限抵抗よりも大きくすることにより、電極マイナス側で放電した場合でも放電が容易に中断するようにした。この実験では、電極マイナス側の電流制限抵抗を電極プラス側の電流制限抵抗の2倍の値とした。

4.3.2 大面積での加工結果

図4.14は、炭素工具鋼(SK3)について両極性加工、単極性加工(電極:プラス, 工作物:マイナス)を行ったときの工作物加工面のタールの様子を比較したものである。図4.14(a)に単極性加工, 図4.14(b)は両極性加工した加工面を示す。電極はイビデン製のグラファイトを使用し、加工面積は約1000cm²である。電極に液穴を明けてフラッシング(液圧10N/cm²で噴出)を行った。加工液の電気伝導度は1.0μS/cmに制御した。

単極性加工では、加工面の一面にタールが付着しており、このタール付着はフラッシングを行っても防ぐことができないほど強固に付着している。一方、両極性加工の場合、タール付着が全くなく、加工も安定であった。また、電極面についてもタールの付着は見られなかった。ピーク電流値 $i_e=13A$ の加工条件を最終条件とし

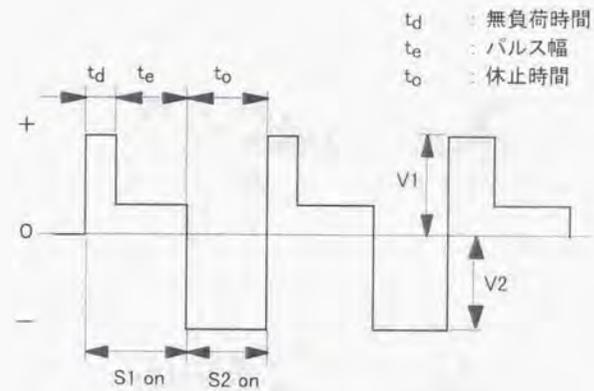
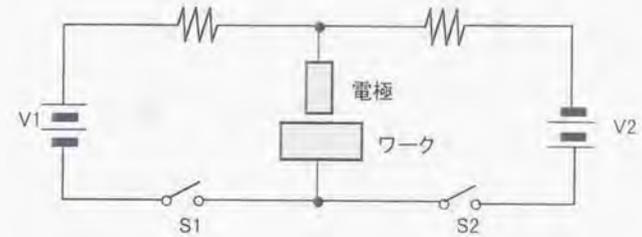
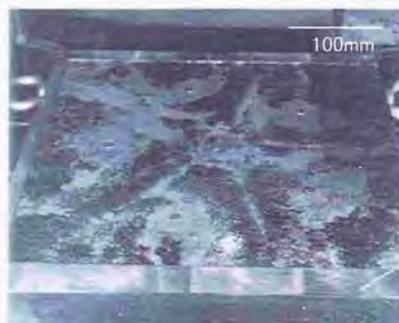
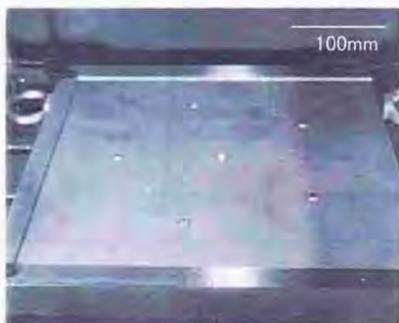


図4.13 両極性加工の回路と電圧波形の概略



(a) 単極性加工



(b) 両極性加工

図4. 1 4 加工面へのタール付着の比較

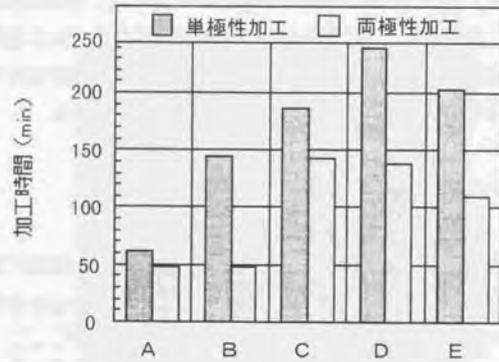
て、単極性加工では加工面あらし $23\mu\text{mRz}$ までしか仕上がらなかったのに対し、両極性加工では同一条件で $19\mu\text{mRz}$ まで仕上げることができた。また、仕上げ加工に要した加工時間は単極性では13.9時間、両極性加工では8.2時間と、両極性加工の大きな効果が確認できた。加工時間と加工面あらしの比較の詳細および加工速度の比較をグラフにしたものを図4. 1 5に示す。すべての条件において両極性加工の方が単極性加工よりも加工速度が速く、面粗さが細かいことが確認できる。

4. 3. 3 短絡の減少と極間電圧低下の防止

前項での単極性加工と両極性加工について、加工速度に大きな差が生じたが、これはタールの有無による加工の安定度に差が生じたことによるものと考えられる。そこで、加工中における放電パルス数の測定を行った。

図4. 1 6に4. 2. 3項で示した加工条件で両極性加工を行ったときの有効放電パルス数、短絡パルス数のカウント数を示す。図において、横軸は加工時間、縦軸はパルス数を示している。■は有効放電パルス数、○は短絡パルス数である。単極性加工である図4. 3と比較して、短絡パルス数がほとんど無く、有効放電パルス数が増えているのがわかる。両極性加工により工作物へのタールの付着がなくなり、短絡が発生しなくなっているものと推測される。

また、図4. 6で示したような、加工進行にともなって発生した電圧低下は両極性加工においては発生しなかった。これは、タールの加工面への付着がないことで、適正な極間距離が維持されること、加工液の循環が適正に行われるので極間部分の加工液比抵抗の低下が比較的少ないことなどによるものと推測される。



	加工条件,送り量	単極性加工	両極性加工
A	$i_e=35A, t_e=256\mu s$ 送り量 $150\mu m$	1h 02min	0h 49min
B	$i_e=25A, t_e=256\mu s$ 送り量 $130\mu m$	2h 25min 41 μmRz	0h 49min 39 μmRz
C	$i_e=25A, t_e=70\mu s$ 送り量 $120\mu m$	3h 06min 38 μmRz	2h 23min 36 μmRz
D	$i_e=25A, t_e=24\mu s$ 送り量 $50\mu m$	4h 00min 27 μmRz	2h 19min 24 μmRz
E	$i_e=13A, t_e=24\mu s$ 送り量 $50\mu m$	3h 23min 23 μmRz	1h 50min 19 μmRz

加工面積: $1000cm^2$

図4. 15 大面積加工の比較

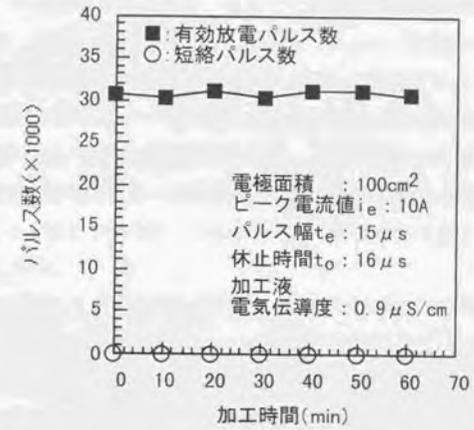


図4. 16 両極性加工の場合の放電パルス数

4. 4 まとめ

高分子系不燃性液を加工液とした放電加工法について、工作物加工面へのタール付着に起因する放電加工特性の劣化現象について調査・考察を行った。さらに、タール付着を防止するための両極性加工用電源を試作し、その効果について検証した。その結果、以下の結論を得た。

1. タールはプラスに帯電しており、通常の単極性の放電加工でマイナスの極性である工作物面に付着する。
2. タールが工作物に付着すると、極間の短絡が増加する。タールが絶縁物であるにもかかわらず短絡を引き起こすのは、タールが工作物に付着する際に放電加工により生じた鉄粉がタールに混ざり、工作物に付着することが原因である。
3. 仕上げ加工条件での加工では、放電が発生することにより徐々に工作物にタールが付着して、やがて加工不能となる。これは、工作物に付着したタールにより放電の発生が阻害され、極間距離が狭くなるためと推測できる。
4. 休止時間中に加工パルスと反対の極性の電圧を印加する両極性電源を製作した。この電源を使用して両極性加工を行い、極間の平均電圧を0Vにすると、工作物の加工面へのタール付着を防ぐことができた。
5. 両極性加工により工作物へのタール付着を防止すると、極間の短絡がなくなり、タール付着による加工不能現象も現れなかった。
6. 大面積の加工において両極性加工と単極性加工を比較し、特に仕上げ加工条件での加工速度・加工面あらさ向上には両極性加工の効果があつた。

第5章 放電生成物を利用した硬質被膜の形成

本章では、放電加工による放電生成物を利用する新しい技術について検討した。放電加工は工作物の除去加工を行うための技術であるが、高温高圧環境を作り出すため他の技術への応用が考えられる。本章では放電加工技術を被膜形成に利用することを検討する。通常、極間生成物は、放電加工においては無用の代物であったが、これを積極的に利用して、硬質膜を形成することができることを示す。さらに、この硬質被膜の特性について調査するとともに、本方式による被膜形成を実際に適用した事例について述べる。

5. 1 はじめに

5. 1. 1 従来の表面処理技術

工具や金型の長寿命化のために様々な表面処理方法が開発されており、大きな効果を上げています。これらの表面処理方法の大きな問題点として、装置の導入の費用が極めて高価であること、また、外部の業者に作業を託す場合の納期の問題がある。また、処理方法に係る様々な問題がある。以下にPVDとCVDを例に概略を説明する。

例えば、PVD(physical vapor deposition)^{5, 11}は工作物を専用の真空炉に入れ、蒸発させた材料を工作物表面に付着させて被膜を形成する方法であるが、被膜の付着をよくするためには、処理前に工作物表面の酸化膜の除去、脱脂などの念入りな洗浄工程が必要であり、また、深い穴の部分や陰になる部分には被膜の形成が困難であるため、それを解決するための様々なノウハウが必要となる。さらに、工作物を真空炉に入れるため、部分処理は不可能であり、不要な部分まで被膜を形成せざるを得ない場合が少なくない、などの問題がある。

また、広く使用されている他の処理方法として、化学反応を利用して工作物表面に被膜を形成する方法であるCVD(chemical vapor deposition)がある。CVDでは、処

理温度が極めて高いため(1000K程度)、処理の際の工作物の変形が大きく、精度の問題がある。また、焼き入れを行った鋼材に対して処理を行うと硬さが低下する等の問題がある。

5. 1. 2 放電現象を利用した表面処理技術の背景

本研究ではこれらの問題点を解決する新しい表面処理技術として、放電加工の技術をベースとした液中放電による表面処理技術(以下、放電表面処理 Electrical Discharge Coating と呼ぶ)を提案する。

通常の放電加工は工具である電極と工作物との間に加工液中でパルス状の放電を発生させ、工作物を除去加工することを目的としている。それに対し、放電表面処理においては、工作物の除去ではなく、工作物表面に電極成分を溶融付着させ、電極成分を主体とした被膜を形成することを目的とする。

放電現象を利用して表面改質に利用する研究は、空中放電を利用する方法が以前より知られている。焼結炭化物を電極として工作物と短絡開放を繰り返し、そのときに発生する放電により溶融した電極材料を工作物に付着させるという方法であり、旧ソビエト連邦などで行われた^{5, 21)}。最近では、放電肉盛り装置として市販されている^{5, 21)}。

液中放電を利用して工作物に被膜を形成する研究は、毛利・齋藤らの豊田工業大学の研究チームにより始められた^{5, 4)}。毛利らは放電加工に使用する電極の熱伝導率を下げることで電極消耗を増すことができることに注目し、粉末を圧縮成形した圧粉体電極を用いて、工作物表面に電極材質を付着させることを行った。さらに、WCを主成分とした圧粉体電極で工作物にWCの付着物を堆積させた後に銅電極により放電加工を行うことにより、付着物を緻密な膜にできると報告している^{5, 5)}。

本章の研究は、これらの豊田工業大学での研究結果に基づき加工液中での放電現象により被膜を形成する方法について進めたものである。

本章では、まず、Ti等の金属電極を使用して1つの工程により硬質被膜を形成する方法について述べる。次に、豊田工業大学の研究結果を応用し、電極消耗を大きくして被膜形成速度を向上させることを目的とした圧粉体電極を使用する方法について検討する。さらに、切削工具・金型などに本処理方法を適用する方法について検

討する。

5. 2 工作物表面の硬化現象

5. 2. 1 実験方法

本節の実験では、電極として金属Tiを用いた。また、工作物は、超硬合金(三菱マテリアル製GTi-30)を使用した。放電加工機は三菱電機(株)製形彫放電加工機M35Kを使用した。加工液は灯油系の加工液である三菱石油(株)製EDF-Kを使用した。加工条件は、トランジスタ回路による矩形波の電流パルスの条件を用いた。詳細を表5. 1に示す。

5. 2. 2 Ti電極による放電表面処理

一般に放電加工は、工具用の電極と工作物の間に放電を発生させ、工作物を除去するための方法であり、通常電極消耗は少ないほどよい。しかし、本章の放電表面処理では、電極材料を積極的に消耗させ、工作物に付着させることを目的としている。放電表面処理を行った例を図5. 1、図5. 2に示す。図5. 1は処理した部分の概略、図5. 2はその被膜のSEM写真である。超硬に対して金属Ti電極により放電表面処理を行っている。処理の条件はピーク電流値 $i_e=10A$ 、パルス幅 $t_e=128\mu s$ 、休止時間 $t_0=2048\mu s$ 、電源電圧 $u_j=80V$ である。写真はピン形状の超硬に放電表面処理を行った境の部分である。写真上の部分は処理がなされており、写真下の部分は母材の超硬である。膜の部分が盛り上がり、放電により被膜を付着させることが確認できる。このような被膜はTi以外の電極、例えば、W等でも形成することができ、また、工作物は超硬以外にも鋼材等に対しても形成できることを確認している^{5, 6), 5, 7)}。

5. 2. 3 被膜形成プロセス

表 5. 1 加工条件

電源電圧	80V
ピーク電流値 i_e	8A
パルス幅 t_e	$2\mu s \sim 128\mu s$
極性	電極 = マイナス, プラス
電極	Ti
工作物	超硬合金 (三菱マテリアル製GTi-30)

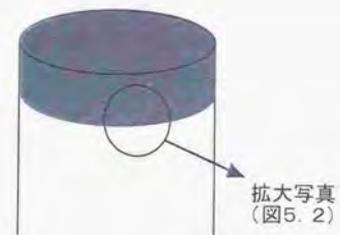


図 5. 1 被膜形成の例

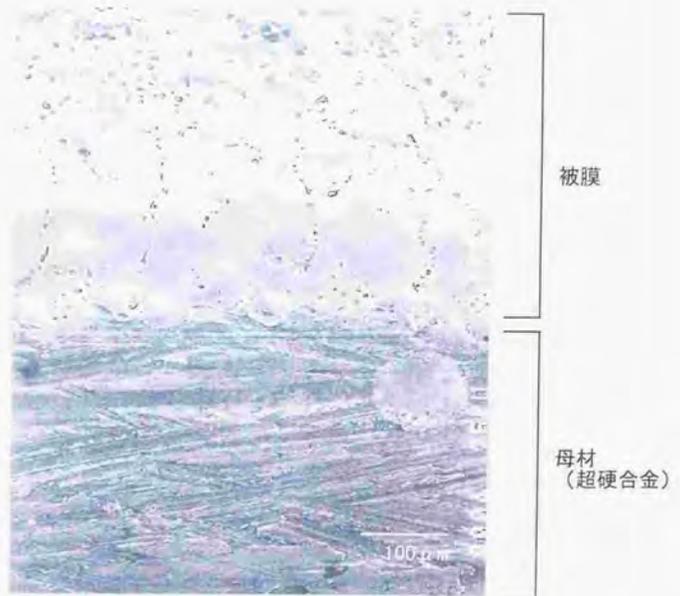


図 5. 2 放電加工による硬質被膜

以上の結果より、放電表面処理による硬質被膜の形成の原理は次のようなプロセスによると考えられる(図5.3)。放電により電極であるTiが消耗し、極間に放出される。このTiが放電の熱により分解された加工液構成元素である炭素と反応してTiCとなり、工作物に付着して被膜となる。この場合、電極が純Tiであるため炭素を含んでおらず、加工液中にしか炭素が存在しないことから、生成したTiCの炭素が加工液から供給されていることは明らかである。この反応の過程で電極Tiの表面もTiCとなり硬化する。塚原ら^{9,10)}はTiに対し銅電極で放電加工を行うことにより、Tiの表面を硬化できることを示しているが、本研究のようにTiを電極として放電表面処理を行う場合にも、電極であるTiの表面も硬化する現象が見られることがわかった。

5.3 生成被膜の特性分析

5.3.1 硬質被膜の性質

放電表面処理により形成された被膜の性質について調べた。図5.4に超硬合金に放電表面処理により硬質被膜を形成したときの硬さを示す。□10mmの電極を用いた。また、処理の条件はピーク電流値 $i_e=10A$ 、パルス幅 $t_e=128\mu s$ 、休止時間 $t_0=2048\mu s$ 、電源電圧 $u_i=80V$ である。硬さはマイクロビッカース硬さ計により荷重1mN(10gf)で測定した。超硬合金母材の硬さは約HV1300である。それに対し、硬質被膜硬さはHV2500~HV3000であり、極めて硬質の膜が形成されていることが確認できる。図5.5に示すように、X線回折による回折線の分析により、被膜の成分はTiCであることがわかる。図5.4に示すように、PVDによるTiCの硬さはHV3200程度であり^{9,10,10)}、放電表面処理による硬質被膜の硬さよりさらに硬い。硬質被膜がTiCと考えられるにもかかわらず、TiCの硬さより若干軟らかいのは以下の理由によると考えている。

(1) 被膜がポーラスになっている。図5.2に観察されるように、被膜に気孔が存在する。被膜中の気孔の存在が硬さに影響を与えていることが考えられる。

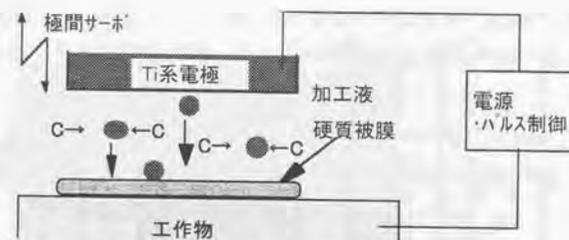


図5.3 硬質被膜の形成の原理

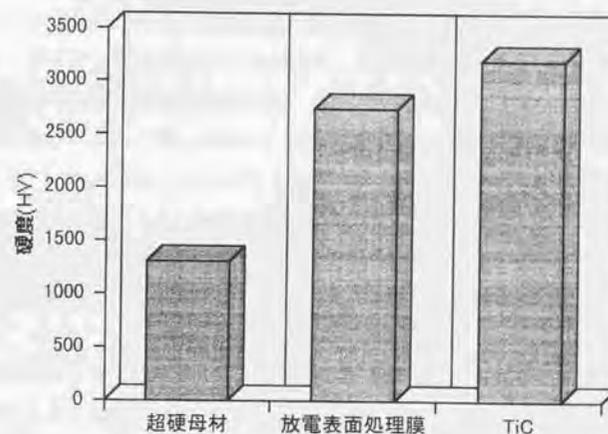


図5.4 硬質被膜の硬度

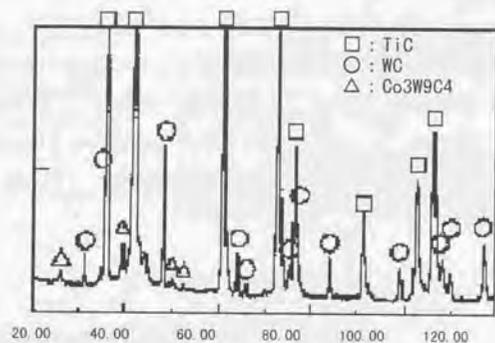


図 5. 5 硬質被膜の X 線回折

(2) 硬質被膜の成分が完全なTiCではなく、母材のWC, Coあるいは、それらの金属間化合物が被膜に混在しているために硬さが低下している。

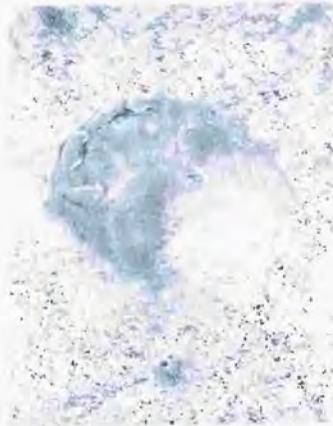
次に硬質被膜の形成過程について調べた。図 5. 6 は単発放電痕のSEM写真と同一部分のTi-K α 像である。処理の条件は、ピーク電流値 $i_e=10A$ 、パルス幅 $t_e=128\mu s$ 、電源電圧 $u_j=80V$ である。放電痕の部分にTiが観察されている。また、この単発放電痕の硬さは、高く、TiCとなっている。このことより、本研究での被膜の生成は工作物の表面全体に徐々に進むのではなく、放電が発生する毎に放電が発生した位置において、反応してTiCになったTiが付着していくことがわかる。

5. 3. 2 パルス幅と膜厚の関係

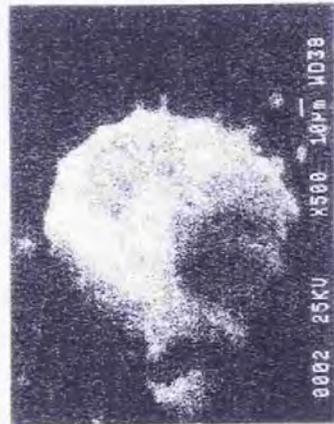
次に硬質被膜形成のための電気条件について調査した。図 5. 7 は放電パルス幅 t_e と膜厚の関係を示したグラフである。□10mmの金属Ti電極を使用し、超硬を工作物として処理を行った。超硬は三菱マテリアル株式会社製GTi-30を使用した。電気条件は、ピーク電流値 $i_e=10A$ 、極性は電極がマイナス、工作物がプラスであり、デューティファクター τ は一定($\tau=0.0625$)、電源電圧 $u_j=80V$ とし、同じ時間(10分間)処理を行った後の膜厚を測定した。ここでの膜厚は、面あらし成分を除いた平均の膜厚である。パルス幅 t_e が約 $30\mu s$ 以上の場合、膜厚がプラスとなり工作物が盛り上がるが、パルス幅 t_e が $30\mu s$ 以下では膜厚が負、すなわち、工作物を除去加工し、被膜は形成されなかった。一般的に矩形波の放電電流パルスではパルス幅 t_e が長くなるほどマイナス極性側の金属が消耗しやすくなることが知られている。放電表面処理では、電極となる材料をより消耗させる条件が厚い膜を形成できる条件になる。

また、電極をプラス、工作物をマイナスとして処理を行った場合、工作物の表面に膜を付着させることはできるが、膜は脆く、電極をマイナスにして形成したような強固な膜にはならない。

5. 3. 3 処理時間と膜厚の関係

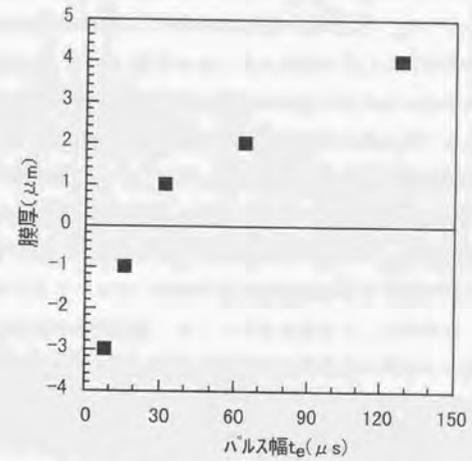


SEI像



Ti-K α 像

図5.6 単発放電痕



処理時間10分 (デューティファクタ $\tau=0.0625$)

図5.7 パルス幅と膜厚の関係

処理時間が膜厚にどのように影響するか調べた。□10mmの金属Ti電極を用いて、ピーク電流値 $i_e=10A$ 、電極極性がマイナス、パルス幅 $t_e=128\mu s$ 、休止時間 $t_o=2048\mu s$ 、電源電圧 $u_j=80V$ の条件で処理を行った。図5. 8は処理時間と膜厚の関係を示すグラフである。図より、処理時間5分で膜厚が $4\mu m$ になり、20分処理を行っても膜厚が $4\mu m$ で変化がなかった。すなわち、短時間のうちに被膜はある程度の厚みになり、その後は処理時間を長くしても膜厚が厚くなってはいかず、ある限界値が存在することがわかる。前述したように被膜は放電が発生した場所に形成されるため、工作物の全面に発生してはじめて全体に被膜が形成された状態になるが、その後は放電が発生しても被膜を厚くすることには作用していない。放電表面処理では、被膜形成の速度は放電により工作物が除去される量と電極材料が電極側から工作物側に移動する量により決まる。処理開始から短時間である程度厚い膜が形成できるということは、はじめは電極材料が電極側から工作物側に移動する量が多いということができる。また、処理時間がある程度経過すると、電極材料が電極側から工作物側に移動する量が減少するか、あるいは、放電による工作物の除去量が増えると考えられる。工作物表面は、表面処理を行うと、母材のWC-CoからTiCに変化するのので、工作物が除去されると考える場合にはTiCが除去されることを意味する。これら2つの影響を調べるため、以下の実験を行った。内容は図5. 8の実験と同様であるが、電極を新品のTi電極ではなく、処理前に他の工作物に対して、ピーク電流値 $i_e=10A$ 、電極極性が負、パルス幅 $t_e=128\mu s$ 、休止時間 $t_o=2048\mu s$ 、電源電圧 $u_j=80V$ の条件で、10分間放電させた電極を使用した。あらかじめ放電させることにより電極表面がTiCに変化している。図5. 9にあらかじめ放電させた電極により処理を行った時の処理時間と膜厚の関係を示す。処理時間5分で形成された被膜の厚さは $2\mu m$ であり、処理時間を長くしても膜厚は増加しない。図5. 8と同一の条件での実験にもかかわらず、一度放電表面処理用の電極として使用した金属Ti電極を使用した場合は被膜の形成速度が遅いことがわかる。TiCはTiより融点が高く、放電が発生したときの消耗が小さいと考えられる。金属Ti電極で放電を発生させたとき電極が消耗して工作物表面にTiC被膜を形成すると同時に、電極表面もTiCになり、そのことにより、被膜形成速度が低下すると推察できる。被膜厚さの限界が存在する原因については5. 3. 6項で論じる。

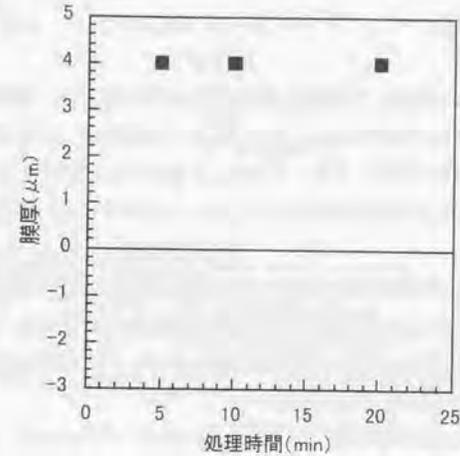


図5. 8 処理時間と膜厚との関係

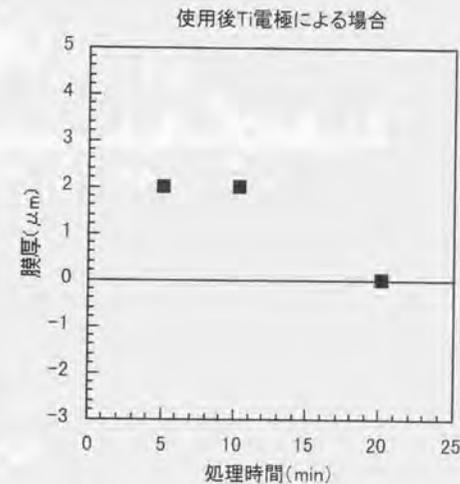


図5. 9 処理時間と膜厚との関係

5. 3. 4 磨耗試験

放電表面処理により形成した硬質膜の耐磨耗性を調べるため、磨耗試験を行った。図5. 10に試験の概要を示す。図のように本試験で行った方式はピンオンディスク方式の磨耗試験であり、プレート状の工作物の上を一定荷重で押さえつけたピン状の工作物を滑らせて磨耗量を評価するという方法である。磨耗試験の条件を表5. 2に示す。

ピンは三菱マテリアル製の超合金GTi-30、ディスクはSK-3の生材を使用した。ディスクは無処理のまま使用し、ピンに対し放電表面処理を施した。放電表面処理の条件は、ピーク電流値 $i_p=10A$ 、電極極性がマイナス、パルス幅 $t_p=128\mu s$ 、休止時間 $t_0=2048\mu s$ 、電源電圧 $u_j=80V$ である。

図5. 11に磨耗試験の結果を示す。無処理の超硬のピンの場合、25kmスライドさせると2.2mg磨耗した。PVDによるTiNコーティングを施したピンの場合は、1.5mgまで磨耗を減少させることができた。しかし放電表面処理では、さらに磨耗量を減少させることができ、無処理のピンの約1/3である0.7mgに抑えることができた。この結果より放電表面処理の耐磨耗性に対する効果が確認できた。

5. 3. 5 圧粉体電極による処理

以上、金属Ti電極により被膜を形成することについて検討したが、ここでは、被膜形成の高速化を目的として、粉末を圧縮成形した圧粉体について検討する。

放電加工を利用して工作物表面に硬質の被膜を形成する方法については、前述のように粉末を固めた圧粉体電極を使用した液中でのパルス放電により硬質被膜を形成する方法が報告されている。毛利ら^{5) 4)}は、電極消耗の大きい圧粉体電極を用いることにより、炭素鋼表面に比較的厚い合金層の形成が可能であることを報告した。また、恒川ら^{5) 13) 5) 12)}は、ダイカストAl合金基材の表面硬化法として、Ti粉末とAl粉末を使用した圧粉体電極を使用してTiCとTiAlの複合表面改質層を形成している。

放電表面処理では、電極材料が被膜となるため、放電により電極材料が容易に消耗することが望ましい。圧粉体電極は電気抵抗が大きく、熱伝導率が悪い、しか

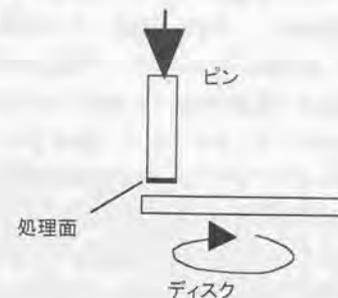


図5. 10 摩擦磨耗試験機の原理

表5. 2 磨耗試験条件

方式	ピンオンディスク方式
ピン形状	φ7.98mm (面積0.5cm ²)
押しつけ力	5N (0.05MPa)
速度	1m/s (ディスク回転数478rpm)

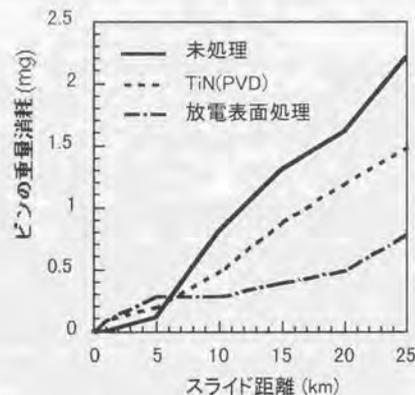


図5. 11 磨耗試験結果

も、脆いため、放電のエネルギーにより容易に消耗する。図5. 12に圧粉体電極の製造方法を示す。図に示すように、金型にTi系粉末を入れ、プレスし取り出すという方法で圧粉体電極を製造した。金型キャビティの断面形状は $\phi 16\text{mm}$ であり、5gのTi粉末で1つの圧粉体電極を作った。粉末は平均粒径 $3\sim 5\mu\text{m}$ のものを使用した。図5. 13は同一条件における金属Ti電極を使用した場合とTi系粉末を使用した場合の被膜形成速度の比較である。処理の条件はピーク電流 $i_e=10\text{A}$ 、パルス幅 $t_e=32\mu\text{s}$ 、休止時間 $t_0=512\mu\text{s}$ 、電源電圧 $u_j=80\text{V}$ 、ジャンプアップ量 $d_j=800\mu\text{m}$ 、ジャンプインターバル $t_{ji}=500\mu\text{s}$ である。 $\square 10\text{mm}$ の金属Ti電極の場合、10分間の処理で約 $1\mu\text{m}$ 程度の厚さの被膜が形成されるが、圧粉体電極の場合には $20\sim 30\mu\text{m}$ の被膜が形成できる。以上より、金属Ti電極による被膜形成速度に比べ、Ti粉末による被膜形成速度は約数10倍程度の速度が得られることがわかる。

また、圧粉体電極を使用した場合には、金属Ti電極の場合に彫り込みとなった条件においても被膜形成が可能であることがわかった。図5. 7に示しているように金属Ti電極の場合にはパルス幅 $t_e=30\mu\text{s}$ 程度以下では被膜形成ができず、工作物を除去加工してしまうが、圧粉体電極を使用した場合には $2\mu\text{s}$ 程度のパルス幅 t_e においても成膜が可能である。

そこで、被膜形成速度がより速いTi系圧粉体電極を用いた場合の被膜の形成について調べた。図5. 14にTi系圧粉体電極を使用した場合の処理時間と被膜膜厚との関係を示す。工作物は鋼材(S45C)電極はTi系粉末(粒径 $3\sim 5\mu\text{m}$)を圧縮の圧力は $5\text{ton}/\text{cm}^2$ で圧縮成形したものをワイヤ放電加工で切り出し断面積 20mm^2 としたものを使用した。処理の電気条件は、ピーク電流値 $i_e=8\text{A}$ 、パルス幅 $t_e=8\mu\text{s}$ 、休止時間 $t_0=128\mu\text{s}$ の条件を使用した。図より処理時間とともに膜厚が大きくなるが、金属Ti電極の場合と同様に被膜形成速度は低下する傾向にあることがわかった。

5. 3. 6 処理時間による被膜の推移

前項の実験において被膜の形成速度が時間とともに低下する原因について被膜の断面を観察することで分析した。図5. 15は処理時間8秒、30秒、4分における被膜断面写真である。8秒から30秒になるまでは被膜の厚さが増しているが、4分では被膜にクラックが入り表面が崩れていることが観察できる。この結果より、処理時

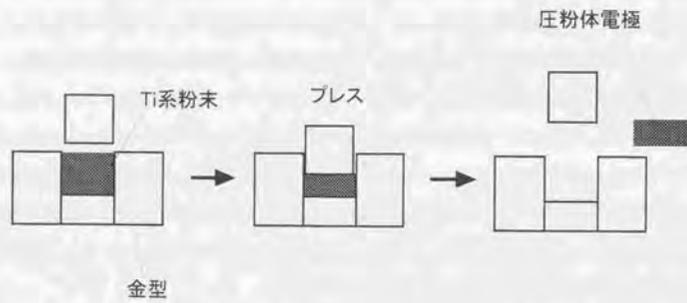


図5. 12 圧粉体電極の製造方法

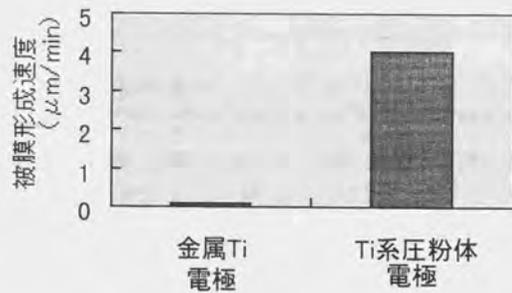


図5. 13 電極による被膜形成速度の比較

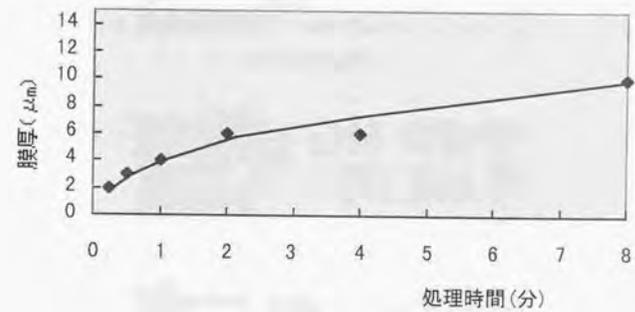
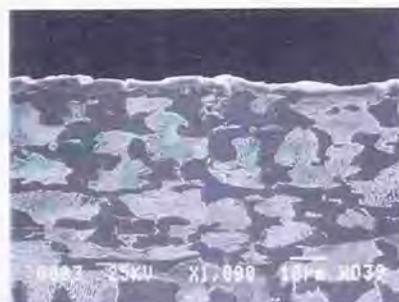
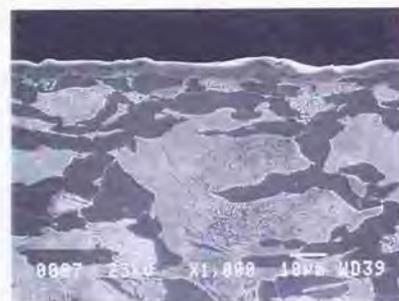


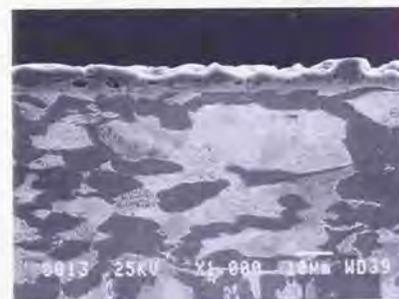
図5. 14 処理時間と被膜膜厚との関係



(a) 処理時間8秒



(b) 処理時間30秒



(c) 処理時間4分

図5. 15 被膜の断面写真

間が長くなると、被膜の形成に加え、被膜の除去が起こり、その結果、被膜の成長速度が低下すると考えられる。処理時間が長く、表面が崩れた場合でも、表面を除去すると、内部には緻密な硬質被膜が形成できていることが確認できている。

5. 3. 7 面あらし改善の方法

放電表面処理の問題点として、処理面の面あらしがある。放電表面処理は放電のパルスにより被膜を形成する方法であるため、放電パルスのエネルギーにより決る面あらしの限界が存在する。

切削工具の処理など数 μm 程度の面あらしで使用できる用途には処理したままの状態でもよいが、機械部品の摺動部分などでは、面あらしを向上させる必要がある。そのための方法として、放電表面処理を施した面を研削することを行った(図5. 16)。被膜を形成した後に研削を行うと被膜を取り去ってしまう恐れがあるが、放電表面処理の場合、母材と被膜の境界が溶け合っていることが期待できるので研削した後でも被膜が残ると考えられる。

図5. 17は放電表面処理を行った後に研削加工を行い面あらしを $1\mu\text{m}$ 以下に仕上げた面の断面SEM写真と同一部分のTi-K α 像である。SEM写真を観察すると母材と被膜の境界が目視においてはほとんどわからない。同一部分のTi-K α 像を観察すると厚さ $5\mu\text{m}$ 程度の被膜が形成されていることがわかる。これは、エッチングを施していたためであるがPVD・CVDによる被膜では明らかな境界が観察されることを考慮すると、被膜の密着性がよいことが推察される。傾斜性の被膜になっており、密着力が強いことを表していることを示していると考えられる。研削した後の表面の硬さはHV2000~HV2500と極めて硬い。

5. 3. 8 硬質被膜の密着性

被膜の密着性を評価するためにスクラッチ試験を行った。比較としてPVDによるTiN被膜の試験も行った。図5. 18は硬質被膜のスクラッチ試験の結果である。PVDによるTiN被膜の場合、47N程度の荷重が掛かったところでAE信号が検出されており被膜が剥離したが、放電表面処理の場合はAE信号が全く検出されなかった。これ

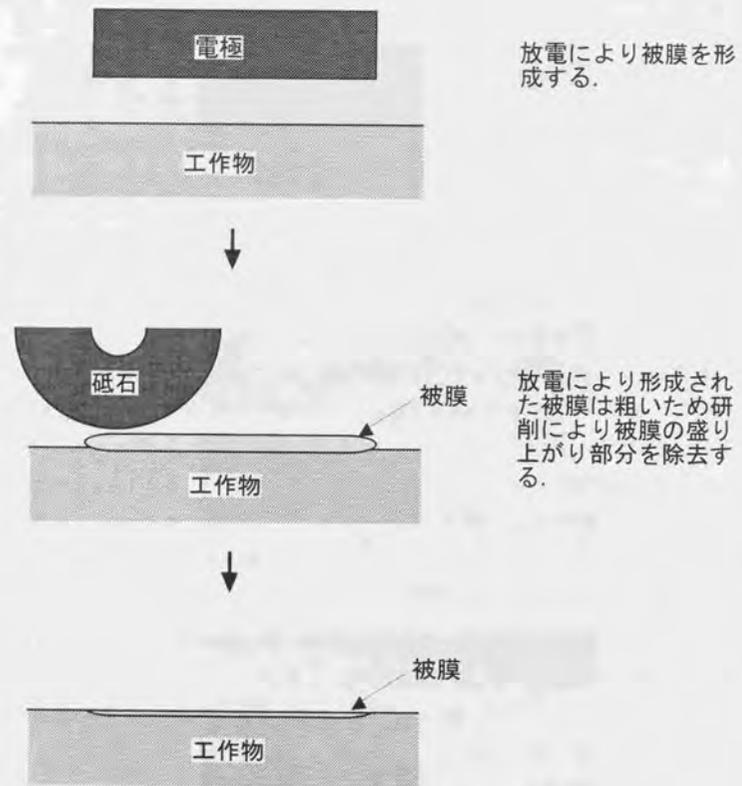


図5. 16 放電表面処理面の研削の方法



図5. 17 放電表面処理面の断面写真

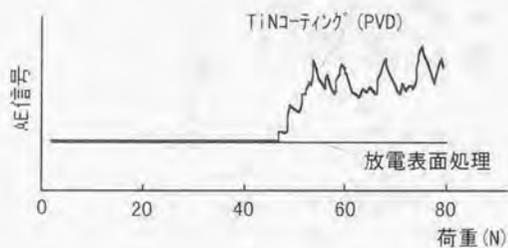


図5. 18 スクラッチ試験の結果

は、被膜と母材との密着力強いためと考えられる。

5. 3. 9 その他の特長

放電表面処理の上記以外の特長について考察を行う。従来の表面処理技術としてPVD、CVDがあるがこれらの処理では、工作物を数百℃以上の温度にする必要がある。このため工作物の精度が悪化する問題がある。また特にスチール系の工作物の場合には、焼き入れして高くした硬さが低下する問題があり、使用を控えている分野も多い。これに対して放電表面処理では、工作物の温度を上昇させる必要はないため精度の問題も熱処理の問題もない。また、必要な部分にのみ容易に被膜を形成することが可能であり、処理の際のマスクも不要である。さらに、PVDのように真空装置のような大掛かりな装置が不要であり、パルス状の放電を発生させる簡単な装置で処理が可能である。

5. 4 任意形状の領域表面硬化と工具改質への応用

前節までに、金属Tiを電極とした放電加工により、工作物に耐磨耗性に優れた硬質被膜を形成できることがわかった。そこで本項では、放電加工による表面処理のアプリケーション技術として複雑な形状の工作物、微細な形状の工作物に対して部分的に硬質被膜を形成する方法について検討する。

5. 4. 1 単純形状電極による走査法

金属Tiによる放電表面処理では、電極と工作物の間に放電を発生させることにより硬質の膜を形成するため、被処理物の形状が複雑になると電極の作成が困難になる。そこで、単純形状のTi電極を用いた創成放電加工^{5.13)}により複雑形状の工作物に硬質被膜を形成する方法について検討した。図5. 19に創成放電加工による硬質被膜の形成の原理を示す。電極を工作物上の必要な位置に移動させ、電極・工作物間に放電を発生させる。放電が発生した位置に硬質の被膜が付着されるので、電

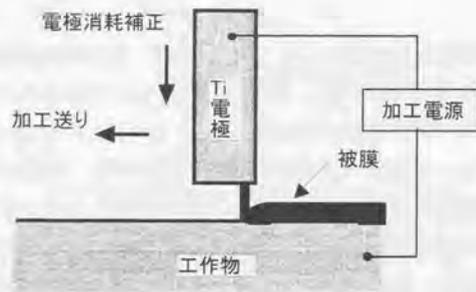


図5. 19 創成放電加工による硬質被膜形成の原理

極を移動させることにより任意の形状に硬質被膜を作ることができる。

5. 4. 2 被膜生成の例

図5. 20に示す方法で電極走査を行い被膜を形成する試験を行った。図5. 21は超硬合金の表面に電極走査により硬質被膜を形成した部分の写真である。使用した電極は $\square 0.5\text{mm}$ のTi電極、工作物は超硬合金である。処理条件は、電極=マイナス、ピーク電流値 $i_e=5.5\text{A}$ 、パルス幅 $t_e=128\mu\text{s}$ 、休止時間 $t_0=4096\mu\text{s}$ である。図5. 21(a)は電子顕微鏡写真、(b)は同一場所のTi-K α 像である。放電が発生した箇所にきれいに被膜が形成できていることがわかる。母材硬さはピッカース硬さ約HV1300、被膜部分は約HV2500であり、極めて硬質な被膜が形成できている。本方法は、放電が発生した部分にのみ被膜が形成できる方法であり、短時間で無駄なく表面処理が可能な方法であると考えられる。

5. 4. 3 プレス型への適用

放電表面処理は工作物の大きさによらず処理が可能な方法であることが大きな特徴である。PVDやCVDでは装置の大きさの制約から処理可能な工作物の大きさに限界がある。しかし、放電表面処理では、工作物に油中で放電を発生させさえすれば被膜が形成できる。また、工作物への部分的な処理も可能である。このような特徴を生かし、プレス型に対して放電表面処理を適用する実験を行った。

電極走査による処理を順送打ち抜きプレス金型に適用した。図5. 22に使用したプレス金型ダイの写真、図5. 23にダイの切り刃部分の拡大写真を示す。このプレス金型は同時に製品を4個打ち抜く型である。材質は鋼材 (SKD11) であり、HRC60程度の焼き入れを行った。ダイの4個の切り刃のうちの2個に対して切り刃上面部に放電表面処理を行った。処理の概略を図5. 24に示す。ダイの残りの2個の切り刃については処理を行わず、処理したものと無処理のものとの型の摩耗の様子を比較した。図5. 23の切り刃の色の異なる部分が放電表面処理を行った部分である。図よりわかるように切り刃の部分のみへの処理を行っている。処理に使用した電極は5. 3. 5項に示したTi系の圧粉体電極、処理条件は、電極=マイナ

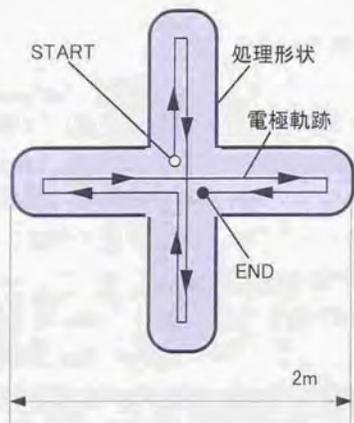
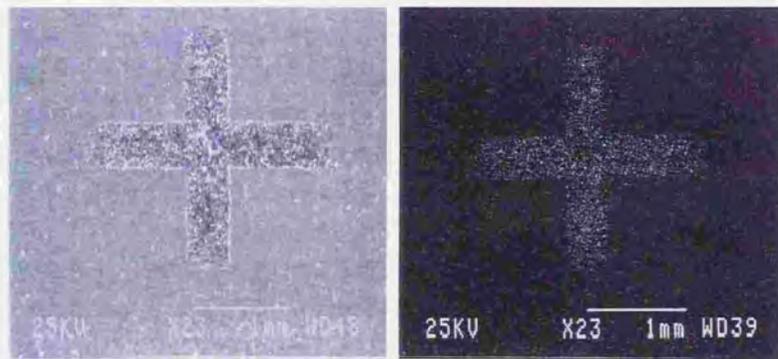


図5. 20 電極走査の方法



(a) SEI像

(b) Ti-K α 像

図5. 21 電極走査法による被膜



図5. 22 プレス金型 (全体)



図5. 23 プレス金型 (切り刃部分)

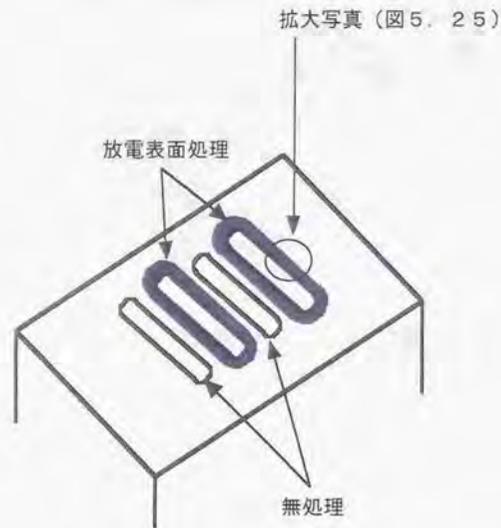


図5. 24 プレスへの処理方法

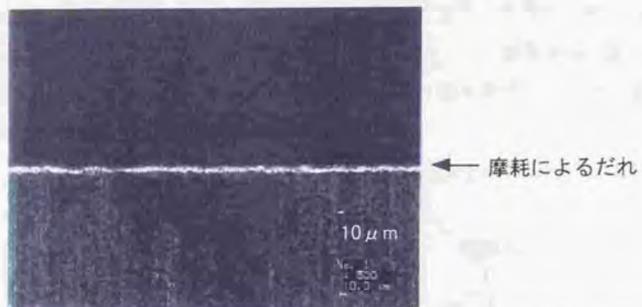
ス、ピーク電流値 $i_e=8A$, パルス幅 $t_e=2\mu s$, 休止時間 $t_0=128\mu s$ である。

以上の処理を行ったプレス金型により、板厚0.5mmの珪素鋼板を35万回打ち抜いた。図5. 25に35万回打ち抜いた後のダイの切り刃の写真を示す。図5. 25 (a)は無処理の切り刃、(b)は放電表面処理を行った切り刃の写真である。写真はダイの真上から撮影した。図より無処理の切り刃(a)は約 $20\mu m$ 程度摩耗してだれているのに対し、放電表面処理を行った切り刃(b)は摩耗がほとんどない。以上より放電表面処理は打ち抜きプレス型のダイの切り刃の上面部に行うだけで型の寿命延長効果があることが確認できる。

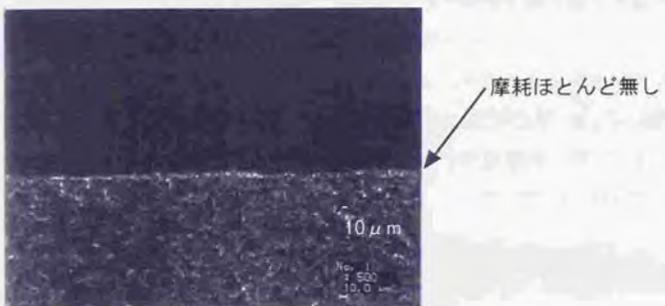
5. 4. 4 ドリルへの応用

放電表面処理被膜の評価として、ハイスドリルによる切削試験を行った。図5. 26に処理の方法の様子を示す。電極をドリルの刃先の角度にあわせて固定し、ドリルの刃を片側ずつそれぞれ約20秒間処理した。処理に使用した電極は5. 3. 5項に示したTi系の圧粉体電極、処理条件は、電極=マイナス、ピーク電流値 $i_e=8A$, パルス幅 $t_e=2\mu s$, 休止時間 $t_0=128\mu s$ である。切削試験の条件を表5. 3に示す。

図5. 27に切削試験後のドリルの写真を示す。放電表面処理を施したドリルは摩耗量が半分以下になった。



(a) 無処理



(b) 放電表面処理

図5. 25 プレス切り刃の摩耗の比較

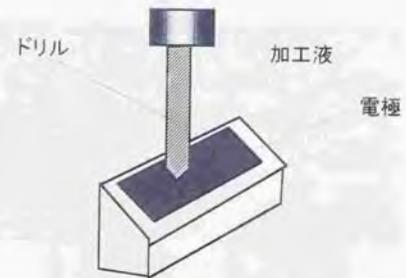


図5. 26 ドリルの処理方法

表5. 3 切削試験条件

ハイスドリル	KOBELCO φ10mm
穴数	600穴(25mm深さ)
切削条件	V=30m/min(955rpm) f=0.25mm/rev (F=240mm/min)
被削材	鋼材(S55C)



図5. 27 ドリル試験の結果

5. 5 まとめ

放電による硬質膜の形成方法について検討を行った結果以下の結論を得た。

1. 硬質炭化物をつくる金属 (Ti) を電極として油中で放電を発生させると、工作物に硬質炭化物被膜を形成することができる。
2. 放電表面処理による被膜の形成は放電パルス毎にTiCが工作物に溶融付着しながら進行する。
3. 矩形波電流パルスを使用した場合、電極をマイナス極性とし、パルス幅が長いほど厚い膜を形成することができる。
4. 処理時間を長くしても、膜厚には限界がある。
5. ピンオンディスクの摩耗試験を行ったところ、放電表面処理の硬質被膜は耐摩耗性に優れることがわかった。
6. 硬質被膜の形成速度は電極の消耗が多いほど速く、電極消耗を多くした圧粉体電極では、金属Ti電極の数10倍程度の被膜形成速度が得られた。
7. 本処理方法により得られた被膜は母材内部にも浸透しており、表面を研削しても高い硬さを保つことができる。そのため、機械部品の摺動部分など細かい面あらしが必要な部分に対しても使用することが可能である。
8. 本処理方法により得られた被膜は母材との境界がわからないほど溶融密着しており、スクラッチ試験でも剥離が起きない。
9. 本処理方法は、真空装置のような特別な装置を必要とせず、母材の温度を上昇させる必要もない簡便な表面処理方法である。

単純形状のTi系電極を使用した創成放電加工により、超硬合金への硬質被膜の形成方法について検討した結果次の結果を得た。

1. 放電させながら電極を走査することにより、微細領域に硬質被膜を形成することが可能である。
2. 本方法により複雑形状の工作物に対して硬質被膜を形成できる可能性を示した。

3. 本方法により、打ち抜きプレスに処理を行い、型の摩耗を低減できることを確認した。
4. ハイスドリルに放電表面処理を適用して穴あけ試験を行った結果、無処理のドリルに対して摩耗量が 1/2 以下になった。

第6章 結論と展望

6. 1 本研究により得られた成果

放電加工に伴い、極間には様々な物質が生成される。本研究はこれら放電生成物について、放電加工特性に与える影響を調査し、加工特性を向上させるとともに、放電生成物の新たな利用方法について提案した。

6. 1. 1 放電状態の解析結果

本項では、本論文で得られた放電状態の解析結果についてまとめる。放電加工の状態を判断する指標には様々な状態量が考えられるが、本研究においては、まず放電中の極間電圧波形により加工状態を判断することを検討した。放電電圧波形より、放電遅れ時間、放電時立下り時間、無負荷電圧平均値、放電電圧平均値、放電電圧分散値、休止電圧平均値、休止電圧分散値について放電加工状態との関連で調べた。以下に放電状態の解析によりえられた知見をまとめる。

1. 放電中の極間電圧波形から抽出した様々な特徴量のうち、放電中の極間電圧分散値(V_{sv})が最もよく加工状態を反映し、放電のパルスを加工状態に応じて分類することができる。
2. 放電中の電圧波形に含まれる高周波成分(V_{shf})による放電状態検出方法は、分散値による検出とほぼ等しい結果を得ることができ、実時間での検出が可能であり、加工に寄与する放電パルスと加工に寄与しない放電パルスを判別できる。
3. 放電中の極間電圧の高周波成分(V_{shf})により放電パルスは、3種類 (OKパルス、NGパルス、ARパルス) に分類することができ、OKパルスは加工に寄与し、NGパルスは工作物にシミを作り、ARパルスは工作物にアーク痕を作るパルスであると推察できる。これは工作物へのカーボン付着に関係があると推察した。

4. 高周波成分(Vshf)による放電パルス分類に基づいた高速な加工条件制御(高速休止制御)を実加工に適用した結果、耐アーク性向上に効果があった。

放電電圧高周波成分の大小の原因については未だ明らかとはなっていない点も多い。本論文では上記知見に基づき、工作物へのカーボン付着と関連があり、工作物のカーボンが付着している場所に放電が発生した場合には高周波成分が小さくなると結論づけた。すなわち、この放電状態検出装置は工作物へのカーボン付着を初期段階からの確に検出することができ、定常アークに至るのを防止することができた。

6. 1. 2 短絡状態の解析結果

次に短絡現象に付いて論じた。前項に述べたように工作物へのカーボン付着が加工状態に影響を与えるが、短絡現象は、工作物へのカーボン付着の大きな原因の1つと考えられる。短絡現象の発生メカニズムについては様々な研究があるが、本論文では、短絡現象が発生した後の現象について解析した。以下に短絡状態の解析によりえられた知見をまとめる。

1. 短絡電流により加工屑が集まり短絡ブリッジを形成する。そのため短絡が長時間継続し、加工速度の低下・電極の異常消耗などを引き起こす。
2. 短絡電流防止回路により、加工屑の排出不良による極間短絡に起因する電極の異常消耗、および工作物へのダメージ(ピンホール、ピット)の発生を防止することが確認できた。
3. 短絡ブリッジを破壊する短絡ブリッジ除去パルスにより、極間短絡現象を解消でき、加工速度を上げることができた。

6. 1. 3 不燃性加工液を使用した場合の放電現象の解析結果

次に不燃性加工液を使用した場合の放電現象の解析により得られた知見をまとめる。不燃性加工液を使用した場合の現象は灯油系の加工液を使用した場合とは異なる

点が多い。それは放電生成物の中の加工液の分解生成物が絶縁物である点と加工液の抵抗が小さい点が主な理由である。以下に得られた知見を示す。

1. タールはプラスに帯電しており、通常の単極性の放電加工でマイナスの極性である工作物面に付着し、極間の短絡が増加し、さらには、工作物に付着したタールにより放電の発生が阻害され、放電が発生しなくなる。
2. 両極性加工を行い、極間の平均電圧を0Vにすると、工作物の加工面へのタール付着を防ぐことができ、極間の短絡がなくなり、タール付着による加工不能現象も現れなくすることができる。

6. 1. 4 放電生成物の硬質被膜形成への利用

次に放電生成物を硬質被膜の形成へ利用する方法について検討した。その結果以下の知見を得た。

1. 硬質炭化物をつくる金属(Ti)を電極として油中で放電を発生させると、工作物に硬質炭化物被膜を形成することができる。被膜の形成は放電パルス毎にTiCが工作物に溶融付着しながら進行する。
2. ピンオンディスクの摩耗試験を行ったところ、放電表面処理の硬質被膜は耐摩耗性に優れることがわかった。
3. 本処理方法により得られた被膜は母材内部にも浸透しており、表面を研磨しても高い硬さを保つことができる。そのため、機械部品の摺動部分など細かい面あらかさが必要な部分に対しても使用することが可能である。また、被膜と母材は溶融密着しており、スクラッチ試験でもAE信号を発生しない。
4. 本処理方法は、真空装置のような特別な装置を必要とせず、母材の温度を上昇させる必要もない簡便な表面処理方法であり、金型・切削工具などへの処理が容易に可能であることを示した。

6. 1. 5 まとめ

本論文では、放電加工により生じる放電生成物が加工特性の劣化に与える影響の解析と加工特性の劣化の防止方法について明らかにすること、および、放電生成物の表面改質への利用を目的とした、前者に対しては、放電による工作物へのカーボンの付着、加工屑による放電の障害、不燃性液を使用した場合に生じるタールによる加工特性への影響という観点から論じ、それぞれの現象を解析し、具体的な加工特性の劣化防止方法を提示した。また、後者に対しては、放電生成物を利用して工作物に硬質被膜を形成するメカニズムについて示し、その応用例を提示した。

6. 2 展望

本論文で得られた成果は1992年より順次製品化され、1998年までに約3000台の形彫放電加工機に搭載され出荷されている。その間、形彫放電加工の技術は、粉末混入放電加工の開発などに見られるように、放電加工の仕上げ面がそのまま製品として使用されるまでに進歩した。その結果、放電加工の面性状に対する要求が厳しくなっている。本論文での成果は、放電加工に対するこのような技術的要求に答えるものであると考えている。

近年切削加工の技術が進み、切削速度が大幅に向上するとともに、従来難削材といわれていた材料でも切削できるようになった。そのため、従来、放電加工でも行われていた荒加工は徐々に切削加工へと移行している。今後ますます、荒加工は切削に置き換わることが予想される。一方、放電加工は、仕上げ加工あるいは複雑形状の加工・微細な形状の加工を中心に利用されるようになっていくと思われる。切削加工は、高速の加工が可能であるが、現状では数 μ mRyの面粗さが限界であり、特定の用途を除けば加工後の仕上げである磨き工程を省略することは困難である。そこで、加工後の磨き工程の省略ということで放電加工が注目されている。放電加工による磨き工程の省略は、鍛造金型等一部の分野では既に実現できており、プラスチック型などのように1 μ mRy以下の面粗さを要求されるような分野においても近い将来実現できるものと思われる。このような高品位な加工面を実現するためには、

放電パルスのエネルギーの微細化等多くの技術課題があるが、本論文で考察した放電の集中・加工屑による加工面の荒れを防ぐことが不可欠である。この意味において本研究の成果は今後の放電加工の発展に寄与するものと考えている。

また、放電加工は他の加工法と異なり、放電特有の局所的な熱現象・高圧現象を利用した加工法であり、除去加工以外の技術への展開が期待できる。本論文では、硬質被膜を形成する技術について提案したが、被膜形成においても硬質被膜だけでなく、様々な機能を持った被膜形成の可能性がある。本論文の方法では、被膜の原料を電極成分として供給するため、被膜の材質を比較的容易に調整可能である。例えば、潤滑作用を有した材料を電極に混入することにより自己潤滑作用のある被膜の形成などが期待できる。尚、本方法は既に放電表面処理装置として一部商品化されており、今後新たな技術として育っていくことが期待されている。

現在、放電加工の用途は金型製作が中心であるが、本論文で得られた新たな知見は、金型製作の能力を向上させるとともに、金型以外の用途に放電加工技術を展開することに貢献できると考えられる。

謝辞

本論文は1990年から1997年の8年間にわたり、三菱電機(株)名古屋製作所にて行った研究を、東京大学生産技術研究所 増沢隆久教授のご指導のもとまとめたものであります。本論文をまとめるに当り、終始ご親切なご指導とご教授を賜りました同教授に心より感謝申し上げます。

本論文をご査読いただき、数々のご教示、ご指導を賜りました東京大学生産技術研究所 中川威雄教授、同 横井秀俊教授、東京大学工学系研究科精密機械工学専攻 樋口俊郎教授、東京大学先端科学技術研究センター 須賀唯知教授に感謝いたします。

放電加工の研究に関し、長年にわたりご指導ご教授いただきました東京大学 木下夏夫名誉教授(現、東京電機大学教授)、東京工科大学 福井雅彦教授、高知工科大学 小林和彦教授、豊田工業大学 齋藤長男名誉教授、同大学 毛利尚武教授に感謝いたします。

本論文の研究を進める機会を与えていただき、数々のご教示、ご助言をいただきました三菱電機(株)名古屋製作所 所長 三木尚道氏、同所 副所長 富本直一氏、同所 放電システム部 部長 新開勝氏、同部 毛呂俊夫氏、尾崎好雄氏、赤松浩二氏、真柄卓司氏、同所 レーザーシステム部 部長 高鷲民生氏、開発部 次長 弥富剛氏、三菱電機大連機器有限公司 大泉敏郎氏に感謝いたします。

本研究に関し、適切なお助言を賜りました(株)松岡技術研究所 代表取締役松岡甫篁氏に感謝いたします。

また、実験の遂行および論文の発表に際し、ご指導いただきました三菱電機(株)名古屋製作所 放電システム部 鈴木俊雄氏、種田淳氏、中村和司氏、山田久氏、杉山和永氏、佐藤清待氏に感謝いたします。

実験にご協力いただくとともに有益なご助言をいただきました三菱電機(株)名古屋製作所 放電システム部 小島純一氏、森松俊明氏、和田光悦氏、湯沢隆氏、小川元氏、堀江勇二氏、菱電工機エンジニアリング(株) 田中秀彦氏、三菱電機エンジニアリング(株) 山本政博氏、産業システム研究所 今井祥人氏、佐藤達志氏、三宅英孝氏に感謝いたします。

豊田工業大学助手 太田勝氏には、放電表面処理の実験および圧粉体電極の製作について多くの貴重なご意見をいただきました。感謝いたします。

不燃性加工液に関してご教示いただきましたカストロール(株) 白木春夫氏、早乙女浩保氏に感謝いたします。

本研究の一部は、科学技術振興事業団の委託開発費によって行われたものです。記して感謝申し上げます。

1998年12月

参考文献

1. 1) 通産省機械統計
1. 2) Kohlschutter, V. : Über Entladungselektrolyse zur Kenntnis der Electricischen Kollidsynthesen, Zeitschrift für Elektrochemie, Bd. 25, Oktober, (1919) 309-312
1. 3) 久保田護訳 ベ・エルおよびエヌ・イ・ラザレンコ : 電蝕加工, Stanki i Instrument (U. S. S. R.), Vol. 17, (1946)
1. 4) Lazarenko, B. R. , Lazarenko, N. I. : Machining by Erosion, American Machinist, December 18 (1947)
1. 5) 鳳誠三郎 : 放電加工法の研究, 電気日本, (1949) 574
1. 6) De Bruyn, H. E. : Slope control, a great improvement in spark erosion, Annals of the CIRP, 16 (1967) 183-191
1. 7) 小林和彦, 大泉敏郎 : 電流制御波形 (特殊電流波形) による加工特性, 電気加工学会誌, Vol. 8, No. 16, (1975) 20-33
1. 8) 小林和彦 : 放電加工における加工特性とその制御に関する研究, 大阪大学学位論文, (1975) 159-181
1. 9) 夏恒 : 電極消耗率決定因子の解明と放電加工特性の向上に関する研究, 東京農工大学学位論文, (1995) 150-166
1. 10) Saito, N. , Kobayashi, K. : A method for adaptive control in EDM process, Proceedings of ISEM 3, (1970)
1. 11) Snoeys, R. , Cornelissen, H. , Kruth, J. P. : Analysis of the EDM Process, Proceedings of ISEM 5, (1977)
1. 12) 元木 幹雄, 寄神 茂之 : 放電加工の異常対策, 精機学会昭和45年度関西地方学術講演会前刷, (1970)
1. 13) 岩田 篤, 木下 夏夫 : 放電加工の極間現象, 第7回電気加工研究会資料, (1974) 1-21
1. 14) Bhattacharyya, S. K. , El-Menchawy, M. F. : Identification of the Discharge Profile in E. D. M. , Sixth North American Metalworking

Research Conference, (1978)

1. 15) Wang, W. M. , Rajurkar, K. P. , Ahmed, M. S. : Improvement in EDM Tool Wear Ratio and Material Removal Rate With Modified R. F. Control Unit., Trans. North Am. Manuf. Res. Inst. SME, Vol. 18, (1990) 244-249
1. 16) Bhattacharyya, S. K. , El-Menchawy, M. F. : Monitoring and Controlling the E. D. M. Process, Trans. ASME J. Eng. Ind., Vol. 102, (1980) 189-194
1. 17) Wang, W. M. , Liu, J. , Huang, C. , Li, S. : Spectrum Analysis of Radiofrequency Signal in EDM and Its Application, Proceedings of ISEM 8, (1986) 59-63
1. 18) Hon, K. K. , Razavi, E. S. : A Contribution to the Monitoring and Control of EDM Based on High Frequency Methods, Manuf. Technol. Rev., Vol. 1987, (1987) 413-417
1. 19) Ahmed, M. S. : Adaptive Control of the EDM Process Using RF, ASME PED (Am. Soc. Mech. Eng., Prod. Eng. Div.), Vol. 34, (1988) 7-19
1. 20) 成宮久喜, 毛利尚武, 齋藤長男, 大竹廣定, 恒川好樹 : 粉末混入加工液による放電加工, 1989年精密工学会学術講演論文集, (1989) 1103-1104
1. 21) 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加工, 電気加工学会誌, Vol. 25, No. 49, (1991) 47-60
1. 22) 倉藤尚雄, 増沢隆久, 古明寺繁樹 : ルビーの放電小孔加工, 電気加工学会誌, Vol. 3, No. 6, (1979) 33-40
1. 23) 福沢康, 岩根英二, 毛利尚武 : 放電加工を用いたセラミックスの加工, 第3回電気加工学会全国大会講演論文集, (1993) 63-66
1. 24) 福沢康, 谷貴幸, 毛利尚武 : メッシュ金属を用いた絶縁性セラミックスの放電加工, 第4回電気加工学会全国大会講演論文集, (1994) 31-34
1. 25) 鈴木正彦, 毛利尚武, 齋藤長男 : 放電加工による金属表面の改質, 精密工学会誌, Vol. 55, No. 2, (1987) 243-248
1. 26) Mohri, N. , Saito, N. , Suzuki, M. , Takawashi, T. , Kobayashi, K. :

SURFACE MODIFICATION BY EDM — AN INNOVATION IN EDM WITH SEMI-CONDUCTIVE ELECTRODE —, The American Society of Mechanical Engineers, Research and Technological Development in Nontraditional Machining, Vol. 34, (1988) 21-30

1. 27) 増沢隆久, 藤野正俊: 高精度微細軸加工の研究 (第1報) — ワイヤ放電研削法の開発 —, 電気加工学会誌, Vol. 24, No. 48 (1991) 14-23
1. 28) 藤野正俊, 増沢隆久, 金澤勝則: 高精度微細軸加工の研究 (第2報) — 各種微細軸の加工 —, 電気加工学会誌, Vol. 25, No. 49 (1991) 1-8
1. 29) 余祖元, 増沢隆久, 藤野正俊: 単純成形電極による三次元微細放電加工 (第1報) — シャープコーナキャビティの加工および電極消耗補正 —, 電気加工学会誌, Vol. 31, No. 66 (1997) 18-24
1. 30) 余祖元, 増沢隆久, 藤野正俊: 単純成形電極による三次元微細放電加工 (第2報) — 円錐台状および半球状キャビティの加工と誤差の分析 —, 電気加工学会誌, Vol. 31, No. 67 (1997) 14-22
1. 31) 岸 雅一, 鈴木 靖夫, 大森 篤: 放電加工の自動化の研究 (第1報) — 形彫り放電加工の最適制御 —, 電気加工学会誌, Vol. 16, No. 31, (1982) 25-34
1. 32) 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) 19-28
1. 33) 元木幹雄, 小野雅章, 上出諭吉: 放電加工のギャップ現象, 電気加工学会誌, Vol. 8, No. 15, (1974) 44-53
1. 34) 平晋一郎, 向山芳世: 不燃性加工液における放電除去機構の解明 (第2報) — 極間現象の観察 —, 第1回電気加工学会全国大会講演論文集, (1991) 57-58
1. 35) 国枝正典, 森正裕: 放電加工における加工精度のシミュレーション, 電気加工技術, Vol. 17, No. 56, (1993) 11-23
1. 36) 毛利尚武, 斎藤長男, 恒川好樹, 初山英教, 宮川昭彦: 放電加工による表面処理 — 複合構造体電極法 —, 精密工学会誌, 59, (1993) 625-630
1. 37) Avsievich, O. I. : Use of electrospark hard facing for improving the wear resistance of the surface layer of cast iron parts

subjected to wear, Electrosark machining of metals (volume 3) authorized translation from the Russian, (1965) 119-121

2. 1) Snoeys, R. , Cornelissen, H. , Kruth, J. P. : Analysis of the EDM Process, Proceedings of ISEM 5, (1977)
2. 2) 岸 雅一, 鈴木 靖夫, 大森 篤: 放電加工の自動化の研究 (第1報) — 形彫り放電加工の最適制御 —, 電気加工学会誌, Vol. 16, No. 31, (1982) 25-34
2. 3) Dauw, D. , Snoeys, R. , Jennes, M. , Vanherck, P. , Coenegracht D. : High Speed Pulse Discrimination for Real-Time EDM Analysis, Proceedings of ISEM 7, (1983) 9-20
2. 4) Dauw, D. , Snoeys, R. , Dekeyser, W. : Advanced Pulse Discriminating System for EDM Process Analysis and Control, Annals of the CIRP, Vol. 32, No. 2, (1983) 541-549
2. 5) Wong, Y. S. , Noble, C. F. : A PC-based EDM pulse-type recording system for process monitoring and analysis, Tech. Pap., Soc. Manuf. Eng, (1988) 15
2. 6) Cogun, C. : Discrimination and analysis of pulses in electric discharge machining, Microtechnic, No. 3, (1989) 36-39
2. 7) Weck, M. , Dehmer, J. M. : Analysis and Adaptive Control of EDM Sinking Process Using the Ignition Delay Time and Fall Time as Parameter., Annals of the CIRP, Vol. 41, No. 1, (1992) 243-246
2. 8) De Bruyn, H. E. : Has the <<Delay Time>> Influence on the EDM-Process?, Annals of the CIRP, Vol. 31, No. 1, (1982) 103-106
2. 9) 元木 幹雄, 寄神 茂之: 放電加工の異常対策, 精機学会昭和45年度関西地方学術講演会前刷, (1970)
2. 10) 岩田 篤, 木下 夏夫: 放電加工の極間現象, 第75回電気加工研究会資料, (1974) 1-21
2. 11) Bhattacharyya, S. K. , El-Menchawy, M. F. : Identification of the Discharge Profile in E. D. M., Sixth North American Metalworking Research Conference, (1978)

2. 1 2) Wang, W.M. , Rajurkar, K.P. , Ahmed, M.S. : Improvement in EDM Tool Wear Ratio and Material Removal Rate With Modified R.F. Control Unit., Trans. North Am. Manuf. Res. Inst., SME, Vol.18th, (1990) 244-249
2. 1 3) Bhattacharyya, S.K. , El-Menshaw, M.F. : Monitoring and Controlling the E.D.M. Process, Trans. ASME J. Eng. Ind., Vol.102, (1980) 189-194
2. 1 4) Wang, W.M. , Liu, J. , Huang, C. , Li, S. : Spectrum Analysis of Radiofrequency Signal in EDM and Its Application, Proceedings of ISEM 8, (1986) 59-63
2. 1 5) Hon, K.K. , Razavi, E.S. : A Contribution to the Monitoring and Control of EDM Based on High Frequency Methods, Manuf Technol Rev, Vol.1987, (1987) 413-417
2. 1 6) Ahmed, M.S. : Adaptive Control of the EDM Process Using RF, ASME PED (Am. Soc. Mech. Eng., Prod. Eng. Div.), Vol.34, (1988) 7-19
2. 1 7) Milicka, E. , Zimanyi, J. : Correlation between Pulse Parameters and Technological Characteristics in EDM, Proceedings of ISEM 6, (1980) 83-89
2. 1 8) 後藤 昭弘, 赤松 浩二, 微崎 好雄, 佐藤 達志, 今井 祥人, 小林 和彦, 弥富 剛, 森田 温 : 形彫り放電加工機のパラメータ制御 (第2報), 第2回電気加工学会全国大会講演論文集, (1992) 61-64
2. 1 9) 森田温, 今井祥人, 野田哲男, 丸山寿一, 小林和彦 : 形彫り放電加工機のパラメータ制御, 電気加工技術, Vol.13, No.41, (1989) 25-31
3. 1) 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) 19-28
3. 2) 元木幹雄, 小野雅章, 上出論吉 : 放電加工のギャップ現象, 電気加工学会誌, Vol.8, No.15, (1974) 44-53
3. 3) 平晋一郎, 向山芳世 : 不燃性加工液における放電除去機構の解明 (第2報) - 極間現象の観察 -, 第1回電気加工学会全国大会講演論文集, (1991) 57-58

3. 4) 平晋一郎, 向山芳世 : 不燃性加工液における放電除去機構の解明 (第3報) - 加工液特性の影響について -, 第2回電気加工学会全国大会講演論文集, (1992) 13-14
3. 5) 国枝正典, 森正裕 : 放電加工における加工精度のシミュレーション, 電気加工技術, Vol.17, No.56, (1993) 11-23
3. 6) 土屋政光, 金子勉, 安部 : 放電加工における加工屑の挙動 (第1報) - 側面間隙の観察 -, 第3回電気加工学会全国大会講演論文集, (1993) 35-38
3. 7) De Bruyn, H.E. : A stable process with trapezoidal pulses, Proceedings of ISEM 7, (1983) 77-86
4. 1) 増沢隆久 : 放電加工液としての水の利用, 生産研究, Vol.32, No.11, (1980)
4. 2) 増沢隆久 : 水を加工液とする放電加工の研究 (第1報), 電気加工学会誌, Vol.14, No.27, (1980) 50-57
4. 3) 増沢隆久 : 水を加工液とする放電加工の研究 (第2報), 電気加工学会誌, Vol.15, No.30, (1982) 21-29
4. 4) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編 : 改訂新版放電ハンドブック, 電気学会, (1987)
4. 5) 小島他 : 分割給電によるEDM放電点の推移の観察, 第1回電気加工学会全国大会講演論文集, (1991) 63-66
4. 6) 日本化学会編 : 化学便覧 応用編 改訂2版, 丸善株式会社, (1973) 609-612
4. 7) 真柄卓司, 山田久, 佐藤清侍, 弥富剛, 小林和彦 : 非電解ワイヤ放電加工による加工面の高品質化, 電気加工技術, Vol.16, No.53, (1992) 1-7
5. 1) 鈴木壽編著 : 超硬合金と焼結硬質材料, 丸善株式会社, (1986) 231
5. 2) Avsievich, O. I. : Use of electrospark hard facing for improving the wear resistance of the surface layer of cast iron parts subjected to wear, Electrospark machining of metals (volume 3) authorized translation from the Russian, (1965) 119-121
5. 3) 例えば, テクノコート (株) カタログ, スパークデポ, (1998)
5. 4) 毛利尚武, 斎藤長男, 恒川好樹, 初山英教, 宮川昭彦 : 放電加工による表

面処理 — 複合構造体電極法 —, 精密工学会誌, 59, (1993) 625-630

5. 5) 諸石弘司, 毛利尚武, 齋藤長男, 鈴木政幸: 複合構造体電極法による放電表面処理 — 繰り返し加工による効果 —, 電気加工学会全国大会講演論文集, (1992) 37-40
5. 6) 後藤昭弘, 真柄卓司, 齋藤長男, 毛利尚武, 渡辺一樹, 竹内昭伸: 液中放電法による切削工具への表面処理, 型技術, Vol.12, No.8, (1997) 98-99
5. 7) 公開特許公報, 平09-19829
5. 8) 塚原秀和, 南久, 増井清徳, 出水敏, 曾根匠: 放電加工による高融点金属の表面改質, 電気加工学会全国大会講演論文集, (1996) 115-118
5. 9) 日本金属学会編: 金属データブック, 丸善, (1984)
5. 10) 精密工学会表面改質に関する調査研究分科会編: 表面改質技術, 日刊工業新聞社, (1988)
5. 11) 恒川好樹, 奥宮正洋, 毛利尚武, 小杉利彦, 新美裕: 放電融合によるダイカストアルミニウム合金へのTiC/TiAl生成複合層の形成, 鋳物, 65, (1993) 783-788
5. 12) Tsunekawa, Y., Okumiya, M., Mohri, N.: Surface modification of aluminum by electrical discharge alloying, Materials Science and Engineering, A174, (1994) 193-198
5. 13) 湯沢隆, 真柄卓司, 後藤昭弘: 小径電極による微細輪郭放電加工, 電気加工技術, Vol.19, No.63, (1995) 1-6

本論文に関する公表文献

研究論文

1. 後藤昭弘, 和田光悦, 尾崎好雄, 真柄卓司, 小林和彦: 高分子系不燃性液を用いた放電加工における加工面品質の向上, 電気加工学会誌, Vol.29, No.61, (1995) 11-18
2. Goto, A., Wada, M., Ozaki, Y., Magara, T., Imai, Y., Kobayashi, K.: Study on High-Quality Finishing by EDM with Nonflammable Dielectric Fluid, Proceedings of ISEM 11, (1995) 455-464
3. 佐藤達志, 今井祥人, 赤松浩二, 後藤昭弘, 尾崎好雄, 小林和彦: 放電電圧波形に基づく加工状態検出, 電気加工学会誌, Vol.29, No.62, (1995) 27-39
4. 後藤昭弘, 湯沢隆, 真柄卓司, 小林和彦: 放電加工屑による加工特性の劣化とその防止に関する研究, 電気加工学会誌, Vol.29, No.62, (1995) 49-58
5. Goto, A., Yuzawa, T., Magara, T., Kobayashi, K.: Study on deterioration of machining performance by EDMed sludge and its prevention, International Journal of Electrical Machining (IJEM), No.3, (1998) 1-6
6. 後藤昭弘, 真柄卓司, 三宅英孝, 今井祥人, 齋藤長男, 毛利尚武: 放電加工による硬質被膜の形成, 電気加工学会誌, Vol.31, No.68, (1998) 26-31
7. Goto, A., Magara, T., Moro, T., Miyake, H., Saito, N., Mohri, N.: Formation of hard layer on metallic material by EDM, Proceedings of ISEM 12, (1998) 271-278

講演論文

1. 佐藤達志, 今井祥人, 赤松浩二, 後藤昭弘, 尾崎好雄, 小林和彦, 弥富剛, 森田温 : 放電パルス波形による放電状態の判別, 第2回電気加工学会全国大会講演論文集, (1992) 3-6
2. 後藤昭弘, 赤松浩二, 尾崎好雄, 佐藤達志, 今井祥人, 小林和彦, 弥富剛, 森田温 : 形彫放電加工機のファジィ適応制御 (第2報), 第2回電気加工学会全国大会講演論文集, (1992) 61-64
3. 佐藤達志, 今井祥人, 赤松浩二, 後藤昭弘, 尾崎好雄, 小林和彦 : 放電電圧波形に基づく加工状態検出とその加工制御への応用, 電気加工技術, Vol.17, No.56, (1993) 1-10
4. 後藤昭弘, 和田光悦, 尾崎好雄, 小林和彦 : 不燃性液放電加工における加工面品質の向上, 電気加工技術, Vol.17, No.57, (1993) 25-29
5. 後藤昭弘, 湯沢隆, 真柄卓司, 小林和彦 : 放電加工屑による加工特性の劣化とその防止に関する研究 (第1報), 電気加工技術, Vol.18, No.60, (1994) 1-7
6. 後藤昭弘, 湯沢隆, 真柄卓司, 小林和彦 : 放電加工屑による加工特性の劣化とその防止に関する研究 (第2報), 第4回電気加工学会全国大会講演論文集, (1994) 43-46
7. 後藤昭弘, 湯沢隆, 真柄卓司, 小林和彦 : 放電加工屑による加工特性の劣化とその防止に関する研究, 日本機械学会東海支部第44期総会講演会講演論文集, No.953-1, (1995) 194-195
8. 湯沢隆, 真柄卓司, 後藤昭弘, 今井祥人, 佐藤達志, 千代知子, 小林和彦 :

小径電極による微細輪郭放電加工 (第1報), 精密工学会春季大会論文集, (1995) 965-966

9. 湯沢隆, 後藤昭弘, 真柄卓司, 今井祥人, 佐藤達志, 千代知子 : 小径電極による微細輪郭放電加工, 電気加工技術, Vol.19, No.63, (1995) 1-6
10. 砂田洋尚, 毛利尚武, 齋藤長男, 恒川好樹, 真柄卓司, 後藤昭弘 : 圧粉体電極を用いたWC-Co及びTiC放電表面コーティングの研究, 精密工学会春季大会論文集, (1996) 249-250
11. 後藤昭弘, 真柄卓司, 今井祥人, 三宅英孝, 齋藤長男, 毛利尚武 : 放電加工による硬質被膜の形成, 精密工学会春季大会論文集, (1997)725-726
12. 後藤昭弘, 湯沢隆, 真柄卓司, 小林和彦 : 放電加工屑による加工特性への影響とその防止方法, 精密工学会春季大会論文集, (1997)737-738
13. 後藤昭弘, 真柄卓司, 今井祥人, 三宅英孝, 齋藤長男, 毛利尚武 : 創成放電加工による微細領域への表面処理, 1997年精密工学会秋季大会論文集, (1997)334
14. 後藤昭弘, 真柄卓司, 毛呂俊夫, 三宅英孝, 齋藤長男, 毛利尚武 : 液中放電法による硬質被膜の形成, 1997年電気加工学会全国大会講演論文集, (1997) 1-4

その他の論文

1. 後藤昭弘, 尾崎好雄, 赤松浩二 : MFアダプタによる加工性能の向上, 型技術, Vol.8, No.8, (1993) 2-3

2. 尾崎好雄, 後藤昭弘, 富沢文夫, 河津秀俊 : 形彫放電加工特性と加工技術, 三菱電機技報, Vol.67, No.8, (1993) 737-741
3. Ozaki, Y., Goto, A. : Processing Technology and Characteristics of Die-sinking EDM, Mitsubishi Electric Advance (Mechatronics Edition), Vol.65, (1993) 10-12
4. 後藤昭弘, 和田光悦, 尾崎好雄, 真柄卓司 : TN電源による不燃性液放電加工特性の向上, 型技術, Vol.9, No.7, (1994) 26-27
5. 湯沢隆, 後藤昭弘, 真柄卓司, 今井祥人, 佐藤達志, 千代知子, 小林和彦 : 小径電極を用いた微細輪郭放電加工, 型技術, Vol.10, No.12, (1995) 84-85
6. 和田光悦, 後藤昭弘, 真柄卓司 : Si粉末混入放電加工における高品位加工, 型技術, Vol.11, No.8, (1996) 116-117
7. 山田久, 真柄卓司, 湯沢隆, 後藤昭弘, 佐藤清侍 : 高速・高精度を実現する最新の放電加工技術, 機械技術, Vol.44, No.5, (1996) 37-41
8. 後藤昭弘 : 最新のNC形彫放電加工機とその技術動向, ツールエンジニア, Vol.37, No.8, (1996) 50-53
9. 後藤昭弘, 和田光悦 : 金型の磨きレスを実現した粉末混入放電加工法による表面改質, 特殊鋼, Vol.45, No.9, (1996) 32-34
10. 後藤昭弘, 真柄卓司 : シリコン粉末混入放電加工による磨きレスの実現, 型技術, Vol.11, No.12, (1996) 29-32
11. 赤松浩二, 後藤昭弘, 種田淳, 今井祥人, 河津秀俊, 金原好秀 : 最近の汎用形彫放電加工機, 三菱電機技報, Vol.71, No.4, (1997) 359-364

12. 齋藤長男, 毛利尚武, 古谷克司, 太田勝, 島本講平, 真柄卓司, 後藤昭弘, 渡辺一樹 : 放電現象を応用した表面処理, 型技術, Vol.12, No.8, (1997) 94-95
13. 後藤昭弘, 真柄卓司, 齋藤長男, 毛利尚武, 渡辺一樹, 竹内昭伸 : 液中放電法による硬質被膜の形成, 型技術, Vol.12, No.8, (1997) 96-97
14. 後藤昭弘, 真柄卓司, 齋藤長男, 毛利尚武, 渡辺一樹, 竹内昭伸 : 液中放電法による切削工具への表面処理, 型技術, Vol.12, No.8, (1997) 98-99
15. 湯沢隆, 後藤昭弘, 真柄卓司 : 形彫り放電加工の最新技術, 機械と工具, Vol.41, No.12, (1997) 56-60
16. 後藤昭弘, 真柄卓司 : 熱間用金型の寿命改善 - 放電加工 -, 型技術, Vol.13, No.3, (1998) 100-105
17. 後藤昭弘, 毛呂俊夫, 山田久, 三宅英孝, 齋藤長男, 毛利尚武 : 放電表面処理(EDC:Electrical Discharge Coating)の適用事例, 型技術, Vol.13, No.8, (1998) 70-71

特許

1. 後藤昭弘, 尾崎好雄, 種田淳, 佐藤達志, 今井祥人 : 放電加工方法およびその装置, 特願平04-311963, 特開平05-293714, (1992)
2. 後藤昭弘, 和田光悦, 尾崎好雄 : 放電加工機, 特願平05-162725, 特開平07-9257, (1993)

3. 後藤昭弘, 湯沢隆, 真柄卓司 : 放電加工装置, 特願平05-298540, 特開平07-156019, (1993)
4. 斎藤長男, 毛利尚武, 真柄卓司, 後藤昭弘 : 放電加工による表面処理方法および装置, 特願平07-168636, 特開平09-19829, (1995)
5. 斎藤長男, 毛利尚武, 砂田洋尚, 真柄卓司, 後藤昭弘 : 液中放電による表面処理方法, 特願平08-5560, 特開平09-192937, (1996)

