

Title	放電加工における加工特性の向上と難加工材の高効率加工に関する研究
Author(s)	岡田, 晃
Citation	大阪大学, 1998, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3144189
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

放電加工における加工特性の向上と 難加工材の高能率加工に関する研究

平成9年10月

岡田 晃

目次

序論

1. 放電加工の原理と特徴	1
2. 本研究の背景と目的	6
3. 本論文の構成	8
参考文献	9

第1編 放電加工における加工特性の向上

第1章 緒論	11
第2章 高速極性切替による放電加工の高能率化	17
2.1 緒言	17
2.2 高速極性切替が放電加工特性に及ぼす影響	18
2.2.1 極性による加工特性の違い	18
2.2.2 高速極性切替装置	19
2.2.3 実験方法	20
2.2.4 実験結果および考察	21
2.3 結言	27
参考文献	28
第3章 粉末混入放電加工における加工面生成機構と加工面性状の向上	29
3.1 緒言	29
3.2 シリコン粉末混入放電加工	30
3.2.1 シリコン粉末混入加工液	30
3.2.2 実験装置および実験方法	30
3.2.3 実験結果および考察	33
3.2.3.1 単発放電痕形状の解析	33
3.2.3.2 極間距離の測定	36

3.2.3.3	加工の安定化	38
3.2.3.4	加工面性状	39
3.2.3.5	加工面生成機構	42
3.2.3.6	工作物の炭化物分布の影響	45
3.3	結言	51
	参考文献	52
第4章	回転円板電極を用いた放電溝加工の高精度化	53
4.1	緒言	53
4.2	放電溝加工	54
4.2.1	実験方法	54
4.2.2	平板電極による加工	55
4.2.3	回転円板電極による加工	57
4.2.4	電極消耗による加工溝深さの変化	62
4.2.5	加工溝深さの補正	67
4.3	結言	72
	参考文献	73
第5章	CVD炭素電極による高精度放電加工	75
5.1	緒言	75
5.2	電極低消耗放電加工の原理	76
5.3	CVD炭素	78
5.3.1	CVD炭素の構造および物性	78
5.3.2	CVD炭素電極	80
5.4	CVD炭素電極の放電加工特性	80
5.4.1	電極消耗特性	80
5.4.2	板状CVD炭素電極の加工特性	85
5.4.3	炭素被覆グラファイト電極	87
5.5	結言	91
	参考文献	92
第6章	結論	93

第II編 放電加工における難加工材の高効率加工

第1章 緒論	95
第2章 耐熱性合金の高効率放電加工	99
2.1 緒言	99
2.2 耐熱性合金	100
2.2.1 チタン合金の材料特性	100
2.2.2 ニッケル基合金の材料特性	102
2.2.3 耐熱性合金の被加工性	104
2.3 チタン合金の放電加工における加工状態の安定化と高効率化	106
2.3.1 単発放電実験	106
2.3.1.1 実験方法および三次元形状測定装置の試作	106
2.3.1.2 単発放電痕形状の解析	106
2.3.1.3 単発放電痕外周の盛り挙動	109
2.3.1.4 単発放電加工特性	112
2.3.2 連続放電実験	114
2.3.2.1 放電加工装置	115
2.3.2.2 放電加工特性および加工状態	116
2.3.3 加工の安定化と高効率化	120
2.4 ニッケル基合金の放電加工特性	124
2.4.1 実験方法および加工条件	124
2.4.2 実験結果および考察	124
2.5 結言	129
参考文献	130
第3章 高熱伝導銅合金の放電加工特性	133
3.1 緒言	133
3.2 シェル金型用銅合金の放電加工	134
3.2.1 シェル金型用銅合金	134
3.2.2 実験方法および加工条件	135
3.2.3 実験結果および考察	136
3.2.3.1 放電加工特性	136
3.2.3.2 加工面性状	141

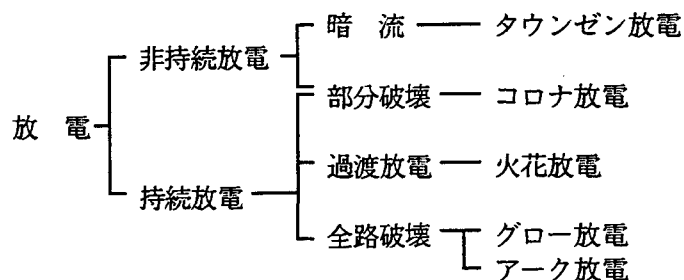
3.3	アルミニウム青銅の放電加工	145
3.3.1	アルミニウム青銅	145
3.3.2	実験方法および加工条件	145
3.3.3	実験結果および考察	146
3.3.3.1	放電加工特性	146
3.3.3.2	ニッケル粉末混入放電加工による加工面の高機能化	148
3.4	結言	157
	参考文献	158
第4章	アルミニウム合金の放電加工特性	159
4.1	緒言	159
4.2	アルミニウム合金の放電加工	160
4.2.1	プラスチック金型用アルミニウム合金	160
4.2.2	アルミニウム合金の単極性放電加工特性	160
4.2.3	高速極性切替放電加工の効果	163
4.3	結言	172
	参考文献	173
第5章	結論	175
総括		177
謝辞		179

序 論

1. 放電加工の原理と特徴

放電加工は、放電という高エネルギー密度の現象を利用し、工作物材料を溶融除去させて所要の寸法形状を得る電氣的除去加工法の一つである。放電現象そのものはかなり古くから研究されており、我々に身近な雷も放電現象である。また工業界への身近な応用としてアーク溶接、静電塗装、蛍光灯、電気集塵、放電管など様々である。しかしながら金属加工への積極的な活用となると比較的新しく、1943年に旧ソ連のラザレンコ夫妻が金属に穴をあけたことが最初とされている¹⁻¹⁾。これを契機として第二次世界大戦後、旧ソ連および世界各国が放電加工の研究に取り組みはじめた。当時は電源にコンデンサ放電回路を用いており加工速度が遅いことや、電極消耗が大きいことなど欠点が多く、超硬合金や硬質難削材料の穴あけ加工などの特殊な分野に使用されるに止まっていた。しかしながらエレクトロニクス技術の著しい発展に伴ってトランジスタスイッチング方式による加工用電源が開発され、加工速度が著しく飛躍するとともに、電極消耗の極めて小さい条件を得ることが可能となったために、急激にその加工性能が向上した。さらに加工機のNC（数値制御）化、制御技術の向上によってもその発展が加速された。我が国では当初よりその加工精度を重視し、金型製作の汎用機として著しい発展を遂げた。現在ではスイスと世界の市場を二分する情勢となっており、また研究開発も活発に行われている。そして特殊加工法の中では最も広く利用される加工法となっている。

放電とは電氣的絶縁破壊であり、絶縁性の物質中を電流が流れる現象である。放電現象は図I-1のように分類される¹⁻¹⁾。まず電子の補給がなく発光を伴わない非持続放電（暗流、タウンゼン放電）と電子の補給が続く持続放電とに大別される。持続放電はさらに、電界の強い箇所だけに起こる部分破壊であるコロナ放電、電極間の全路破壊に移る過渡現象で強烈な光と音を発生する火花放電（スパーク放電）、安定した全路破壊のグロー放電、アーク放電に分けられる。



図I-1 放電現象の分類¹⁻¹⁾

放電加工では1発の放電のエネルギー供給時間は $10^{-6} \sim 10^{-3}$ sec程度であり、火花放電に伴う過渡アーク放電（短アーク放電）を利用し、過渡アーク放電の発生に伴う極間の熱的作用と力学的作用により材料除去が行われる。実際には、灯油や脱イオン水など絶縁性の加工液中に工具電極と工作物を数 μm から数 $10\mu\text{m}$ の間隙を介して対向させ、1秒間に数100～数10万回のパルス性放電を発生させ、それぞれの単発放電によって生成される放電痕（クレータ）の集積によって加工が進行する。

図I-2に一発の放電により工作物が除去される過程を示す^{1,2)}。

(1)電子放出過程

まず両極間に約100Vの電圧を印加し、両者を徐々に接近させる。工具電極および工作物表面は完全に平滑な面ではなく常に無数の微小な凹凸があるため、場所により電界強度が異なる。そのため陰極表面上の電界強度が十分大きい箇所では電子が放出される。

(2)電離過程

陰極表面から放出された電子は電界によって陽極の方向へ加速される。この際電子は、極間に存在する絶縁液の中性分子に衝突し、中性分子は電離する。電子は陽極に向かいながら次々と衝突電離を起こし、いわゆる電子なだれ現象によって電子数は急激に増加する。電離作用により生じた陽イオンは、電界によって陰極方向に加速される。やがて電子および陽イオンはそれぞれ陽極および陰極表面に衝突する。このようにして絶縁が破壊される。陽極および陰極表面は電子および陽イオンの衝突エネルギーにより加熱され高温となる。この際陰極表面ではその温度上昇により熱電子放出が生じ、電子の供給が急激に増大しアーク放電状態となる。

(3)蒸発・溶融過程

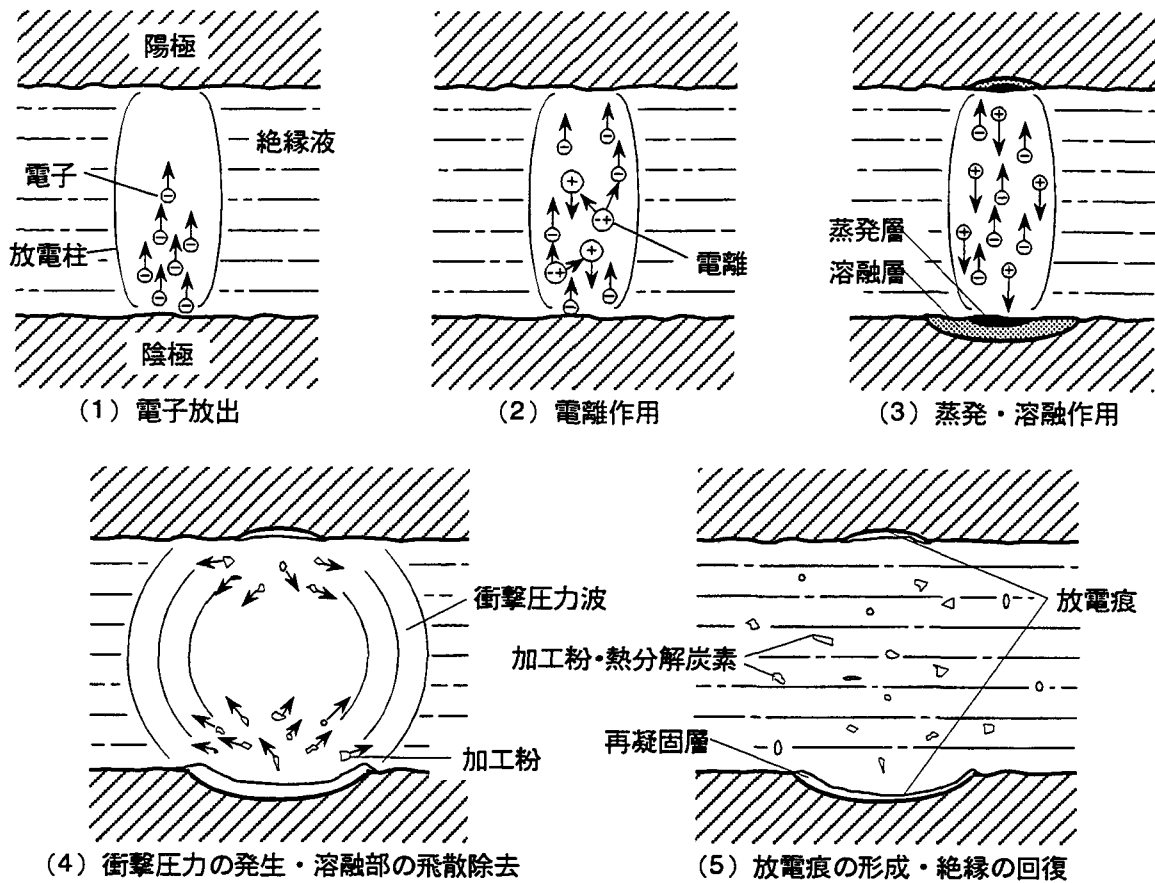
アーク柱は加工液の慣性、冷却作用による熱ピンチ効果によって細く絞られ、アーク脚部でのエネルギー密度は非常に大きくなる。このため陽極および陰極材料は非常に高温となり、両極材料の溶融・蒸発が起こる。

(4)衝撃圧力の発生・溶融部の飛散除去過程

極間の絶縁液の急激な気化膨張によって衝撃的な圧力波が生じ、両極の溶融部分を飛散除去させる。飛散した材料は、周囲の絶縁液によって急速に冷やされ加工粉となる。飛散しなかった金属は両極表面で盛り上がりや再凝固層を形成する。

(5)放電痕の形成・絶縁回復過程

放電が長く続くとアーク放電に移行するが、アーク放電になると放電域が広がりエネルギー密度が小さく、加工が不可能となるので、短い時間の過渡アーク放電にとどめるようにする。このため短時間のパルス性放電を断続的に極間に供給することが重要となる。電圧の印加を停止すると放電は終了する。放電部分には周りから冷たい絶縁液が入り込んで残留する熱を奪い取り、プラズマが消沈し、極間の絶縁が回復する。そして再び電圧が印加され次の放電が発生する。



図I-2 放電による除去メカニズム^{1,2)}

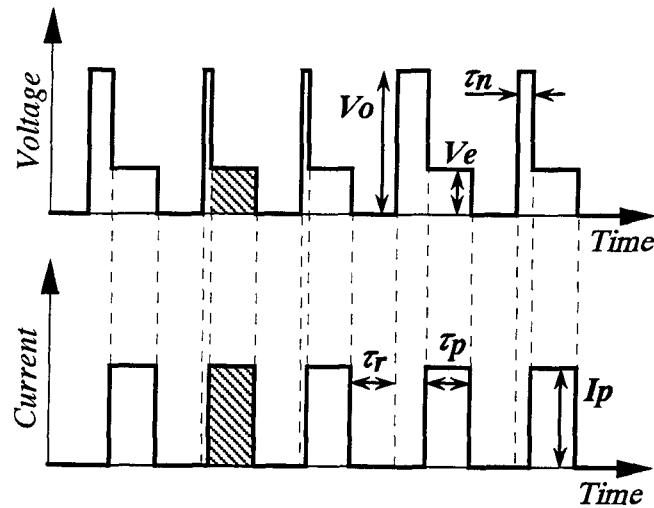
以上のような過渡アーク放電の発生に伴う、極間の熱的作用および力学的作用を繰り返すことによって加工が進行していく。

図I-3に放電加工の際の極間電圧および放電電流波形を模式的に示す。まず加工液の絶縁破壊を起こすため無負荷電圧 V_0 が極間に印加される。放電が生じると極間の電圧は放電電圧 V_e に低下し、放電電流 I_p が極間を流れる。パルス幅 τ_p の間放電が続き、放電が終了すると極間電圧および放電電流は0となる。放電休止時間 τ_r を経て再び極間に無負荷電圧が印加され、次の放電が生じる。なお極間に無負荷電圧が印加されて放電が生じるまでの時間を無負荷電圧印加時間 τ_n とする。さらに全加工時間に対する放電が生じている時間の割合をDuty factor (D.F.)とし、本論文では以下のように定義する。

$$D.F.=100 \cdot \tau_p / (\tau_p + \tau_r) \quad (\%) \quad \dots \dots \dots (I-1)$$

また放電一発当たりのエネルギーは

$$E = \int_0^{\tau_p} i(t) \cdot v(t) dt \quad \dots \dots \dots (I-2)$$



図I-3 極間電圧および放電電流

で表され、図I-3のような矩形パルスの場合には

$$E = V_e \cdot I_p \cdot \tau_p \dots \dots \dots (I-3)$$

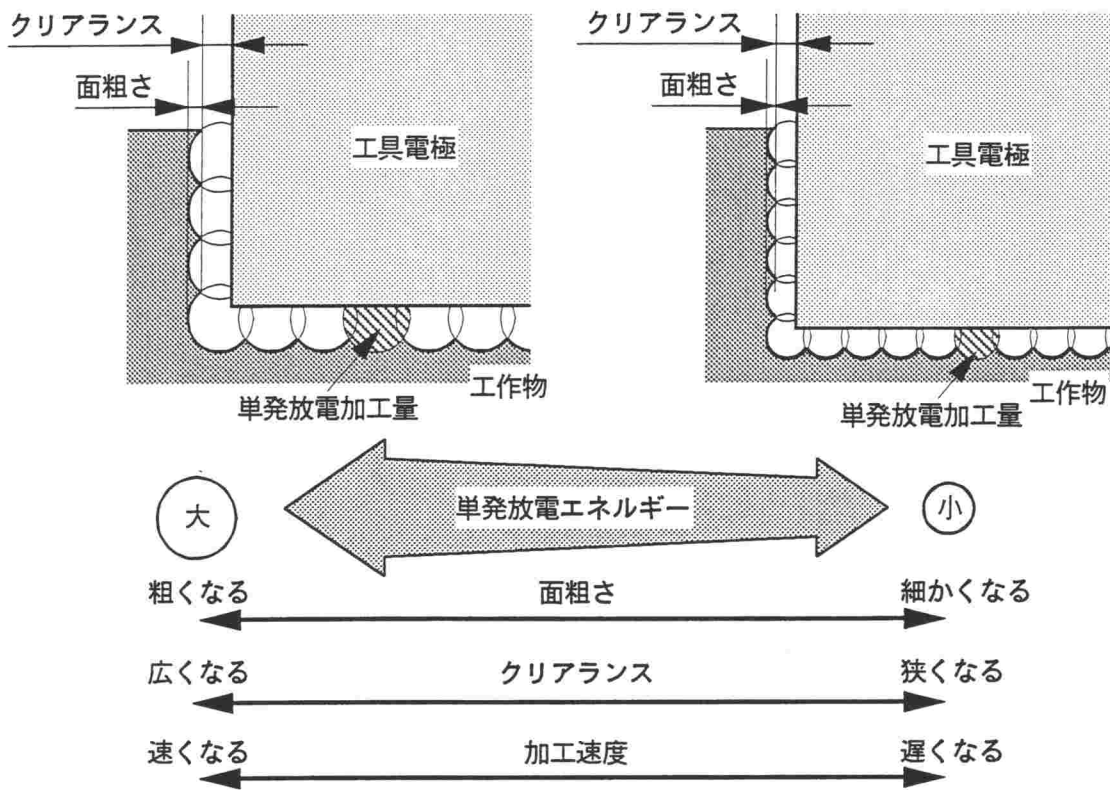
となる。

実際の放電加工では多数の放電痕の累積によって加工が行われる。このため図I-4に示すように放電加工特性は、一発の放電（単発放電）のエネルギーに大きく依存する。すなわち単発放電エネルギーが大きい場合には除去体積が大きいので、加工面粗さ、クリアランスおよび加工速度は大きくなることが理解できる。

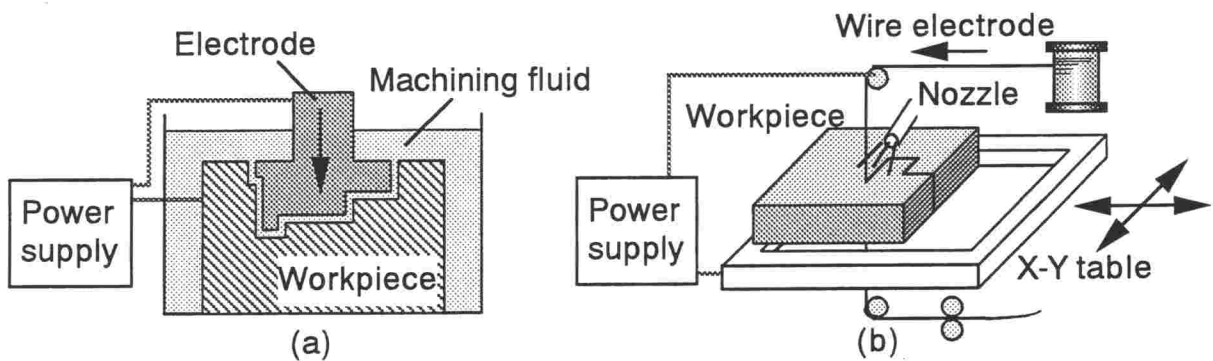
一般に放電加工は加工方式からみると、図I-5に示すように二つの方式に大別される。一つは総形電極を用いてその形状を反転投影する型彫り放電加工であり、もう一つはワイヤ電極を走行させ、糸鋸式に2次元輪郭を加工するワイヤ放電加工である。本研究ではトランジスタスイッチング電源回路の型彫り放電加工を対象としている。

放電加工は、バイトによる切削加工、砥石による研削加工、液圧やプレスによる塑性加工などのように機械力を直接加工に利用する機械的加工とは異なり、高温の放電現象を利用する非接触加工であるために、様々な利点がある。それらを総括すると以下のようなものである。

- (1) 過渡アーク放電現象を利用した熱加工であるため、導電性であれば工作物の硬度、靱性などの機械的性質に関係なく加工が可能である。そのため焼入硬化された鋼や焼結合金など高硬度の難削材も、容易に加工できる。
- (2) 一定の極間距離を保ちながら加工が進行するため、型彫り放電加工では電極形状を反転した形状が工作物に転写される。つまり、電極さえ製作できればどんな複雑形状の加工も容易にできる。



図I-4 加工特性に及ぼす単発放電エネルギーの影響



図I-5 型彫り放電加工機 (a) とワイヤ放電加工機 (b)

- (3) 放電が生じている微小部分には、かなりの力が作用していると考えられるが、電極あるいは工作物全体に作用する力は機械加工に比べると著しく小さい。従って薄い板や管、細い線に対する加工が容易となり、また微細な孔やスリットの加工が容易である。
- (4) 放電加工の仕上げ面には全く方向性がなく、本質的には梨地面になるが、放電エネルギーを小さくすることによって、 $1\ \mu\text{m} R_{\text{max}}$ 以下の仕上げ面が得られる。また最近開発された

粉末混入放電加工においては鏡面も得ることができる。

- (5) 電極は銅，黄銅，グラファイトなど安価な材料でつくられる。型彫放電加工では電極の成形が必要となるがこれらの材料は加工しやすく，複雑形状も比較的容易に得られる。

以上のような利点がある反面，次のような問題点もある。

- (1) 放電加工の加工速度は，汎用工作機械が重切削できるような場合に比べると著しく遅い。従って適用範囲は難削材料，複雑形状や微細形状に制限される。材料除去は放電の熱による溶融作用が主であるため，高融点材料ではさらに加工速度は小さくなる。また加工速度を大きくすると，その原理上仕上げ面が粗くなることは不可避である。
- (2) 電極消耗の問題は電源回路の改良により著しく改善され，電極消耗率が1%以下という低消耗加工も可能となった。しかし低消耗加工は，パルス幅の比較的長い条件においてのみ可能となるため，加工面粗さの増大がまぬがれない。従って加工面粗さを重視するような仕上げ加工ではある程度の電極消耗を犠牲にせざるを得ない。
- (3) 放電加工では，加工速度，電極消耗率，加工面粗さの三つの加工特性は原理上相反関係にあり，二つの特性を向上させれば他の一つの特性の低下が避けられない。

2. 本研究の背景と目的

放電加工が開発されて約半世紀が経過し，その基本的性能の向上とともに微細放電加工^{1-3)~1-6)}，粉末混入放電加工^{1-7)~1-8)}，創成放電加工^{1-9)~1-10)}など新たな加工技術も開発され確立されようとしている。しかしながら加工現象そのものについては未だ完全に解明されたとはいえず，課題が山積みとなっているのが現状である。特に加工速度，電極消耗についてはその開発当初から問題とされていた。

加工の高効率化に関する研究報告は数多くあるが，トランジスタスイッチング回路が開発されてからは，放電電流を制御することによって放電エネルギーをより増大させることやDuty factorの制御が可能となり，ある程度の加工速度を得ることが可能になった¹⁻¹¹⁾。しかし加工条件により加工速度の増加を図るには加工形状などにより限界があり，また原理上，電極消耗や加工面粗さなど他の加工特性の悪化につながる。高効率化の点では電極を陰極とする正極性加工を見直す研究が行われているが，電極の消耗が避けられないため底付形状の型彫り放電加工ではほとんど用いられず，電極の消耗が許容できる貫通穴や，微細放電加工にのみ用いられている。これまで加工能率の著しい向上につながるような研究報告，技術開発はなく，高効率化の問題に対しては現在足踏み状態である。

また放電加工の高精度化においては電極消耗は重大な課題である。現在のところ，電極側を陽極とする逆極性でパルス幅を長くとることによって電極消耗1%以下の低電極消耗が実現されるようになり¹⁻¹²⁾，銅やグラファイトのような安価な材料を電極として用いることが可能と

なった。Xiaら¹⁻¹³⁾は加工中の電極の温度変化を把握することによって陽極と陰極のエネルギー配分を明らかにしており、さらに灯油系加工液の熱分解によって生じるカーボンの電極端面への付着が電極消耗において最も影響が大きいことも報告されている¹⁻¹⁴⁾。しかしながら、その生成、付着機構はほとんど明らかにされていない。

ところで、近年新たに開発された放電加工技術のなかで粉末混入放電加工は最も革新的な技術であるといえる。開発当初は加工面粗さの改善を主な目的としていたが、粗さの改善に加え加工面特性の点でも優れた効果を有することが次第に明らかにされている^{1-7) 1-15)}。また粉末を混入することによって放電が分散し、安定した放電状態が得られることも報告されており^{1-7) 1-8)}、仕上げ条件だけでなく粗加工条件においても粉末混入加工液を用い、高速加工を実現させる研究も行われている。この加工技術は新たな表面処理技術としても最も発展の期待される技術の一つである。しかしながら得られる加工面の状態は工作物の材質によって差があり、鏡面の得られるものは数種の工作物材質のみである。そしてその表面生成機構についても未だ不明な点が多く、その説明が重要な課題となっている。

さらに近年では航空宇宙産業、原子力産業、半導体産業など最先端の産業において新たな技術開発が急速に進められる中で、優れた特性を有する様々な新素材が開発されている。それらの材料はその優れた特性ゆえに従来の機械加工では難削材であることが多い。放電加工は従来金型のマザーマシンとして発展してきたため、金型材料とくに鉄鋼材料についての研究報告が中心であったが、その原理上、難削材の加工に対しても非常に有効な加工法であると考えられる。しかし放電加工は熱加工であるため、工作物の熱物性値、特に融点および熱伝導率によってその加工特性が大きく左右される¹⁻¹⁶⁾。すなわち耐熱性材料については放電加工においても難加工であると推測される。斎藤ら¹⁻¹⁷⁾はチタン材料に対し放電加工を行い、加工状態が不安定になりやすく、また電極消耗も大きく放電加工においても難加工であることを明らかにしている。

一方、金型材料においても従来の鉄鋼材料に代わり、特殊銅合金やアルミニウム合金がシェルモールド用金型、プラスチック金型に一部使用されはじめているが^{1-18) 1-19)}、未だ体系だった研究報告はなく、生産現場では試行錯誤的に行われているのが現状である。また熱伝導率の大きいこれらの金型材料は放電加工においては難加工であると予測される。

このような背景のもとで放電加工技術の発展のためには、高能率化および電極消耗などに対するさらなる検討、加工面の高機能化技術の進展が不可欠であり、また同時にそれらに関する基礎的な現象を体系的に説明することが重要と考えられる。さらに放電加工において難加工と考えられる耐熱合金および高熱伝導合金に対してその加工特性の説明も重要な課題といえる。

本研究では放電加工における加工特性の向上を目的とし、基礎的な放電加工現象の説明および高能率化、高精度化などに対するいくつかの新たな加工技術を提案し、その有用性を示している。また放電加工において難加工と考えられる耐熱合金、高熱伝導合金などの放電加工特性を説明するとともにそれらの加工技術確立の指針を示している。

3. 本論文の構成

本論文は二つの編および序論，総括より構成されている。

まず「序論」では，まず放電加工の原理と特徴について述べた。また本研究の背景として放電加工の現状と課題について言及し，高能率化，電極の低消耗化，加工表面の高機能化などの加工特性の向上および難加工材の加工特性解明の必要性について指摘した。さらに本研究との関連および本論文の構成について述べている。

第Ⅰ編「放電加工における加工特性の向上」では，基礎的な放電加工現象の解明をもとに高能率化，高精度化などに対するいくつかの新たな加工技術を提案している。まず第2章では，極性の違いによる加工特性の違いを明確にするとともに，高速で極性を切り替えて加工を行う高速極性切替放電加工法を提案し，加工速度の増大に効果のあることを示している。続いて第3章では，粉末混入放電加工における表面生成機構を体系的に解明している。また第4章では，極間状態が悪化しやすく加工が難しいとされる溝加工において，回転円板電極を用いた新たな加工法について検討を行い，その有用性を確認している。さらに第5章では，電極無消耗加工の原理について言及するとともに，新たに開発したCVD炭素電極の可能性について検討し，仕上げ加工用の電極として優れた特性を有することを明らかにしている。

第Ⅱ編「放電加工における難加工材の高能率放電加工」では，放電加工において難加工とされる高融点材料，高熱伝導材料などの材料の加工を行い，難加工となる要因を明らかにし，その対策について検討し，これらの材料の加工技術確立の指針を示している。第2章では，最先端産業分野で需要の高まる耐熱性合金であるチタン合金およびニッケル基耐熱合金の放電加工について検討を行っている。また第3章では，従来の金型材に代わり使用されるようになった特殊銅合金の放電加工特性を明らかにするとともに，金型としての加工面特性についても考察している。また従来より金型寿命改善のため行われているニッケルメッキ表面処理にかわって放電加工による表面処理技術として，加工液中にニッケル粉末を混入し加工を行うことによって，加工面粗さを向上させるとともに加工面に耐食性の優れたニッケル含有層を形成することを試みている。さらに第4章では，プラスチックモールド金型として用いられはじめた高強度アルミニウム合金に対して極性切替放電加工を行い，その有効性を確認している。

「総括」では，本研究によって得られた知見を総括し，今後の放電加工の課題および展望について述べている。

参考文献

- I-1) 井上潔：放電加工の原理，ジャパックス（株）（1979）1.
- I-2) 向山芳世：型彫り・ワイヤ放電加工マニュアル，大河出版（1989）9.
- I-3) 倉藤尚雄，増沢隆久：超硬合金の放電による微細加工，電気加工学会誌，2，3（1968）1.
- I-4) T.Masaki, K.Kawata, T.Sato, T.Mizutani, K.Yonemoti, A.Shibuya and T.Masuzawa：Micro Electro-Discharge Machining, Proc. of ISEM-9（1989）26.
- I-5) 河田耕一，佐藤健夫，正木健，増沢隆久：微細放電加工の研究（第1報），電気加工学会誌，28，57（1994）32.
- I-6) 増沢隆久：微細放電加工，精密工学会誌，57，6（1991）963.
- I-7) 毛利尚武，斎藤長男，成宮久喜，河津秀俊，尾崎好雄，小林和彦，恒川好樹：粉末混入放電加工液による放電仕上げ加工，電気加工学会誌，25，49（1991）47.
- I-8) H.Narumiya, N.Mohri, N.Saito, H.Ootake, Y.Tsunekawa, T.Takawashi and K.Kobayashi：EDM by Powder Suspended Working Fluid, Proc. of ISEM-9（1989）5.
- I-9) 今野廣，小室克弘，佐藤真，岸浪建史，斎藤勝政：多軸NC放電加工機による形状創成加工法に関する研究（第1報），精密機械，49，10（1983）1364.
- I-10) 金子勉，土屋政光：単純形状電極による創成放電加工，精密工学会誌，57，6（1991）949.
- I-11) 佐藤敏一：特殊加工，養賢堂（1981）12.
- I-12) 木本保夫，田宮勝恒，平田勝己：液中過渡アーク放電の電極消耗の研究，電気学会雑誌，89，964（1969）133.
- I-13) Heng Xia, M.Kunieda and N.Nishiwaki：Removal Amount Difference between Anode and Cathode in EDM Process, IJEM, 1（1996）45.
- I-14) K.K.B.Hon and S.C.Li：An Experimental Study of Electrode Built-up Phenomenon in EDM, Proc. of ISEM-9（1989）321.
- I-15) 上田順弘，佐藤幸弘，増井清徳，宮谷保太郎：シリコン粉末添加放電加工による加工面の機能性向上，電気加工技術，19，62（1995）19.
- I-16) W.Ullman：Reducing Electrode Wear in Spark Machining, Metalworking Production, 102（1968）489.
- I-17) 松浦徹，堀武雄，斎藤長男，毛利尚武，大竹廣定：チタン材料に対する放電加工の研究，昭和63年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集（1988）185.
- I-18) 熊谷敦：プラスチック成型用金型材料，型技術，10，8（1995）49.
- I-19) 山田定男：アルミニウム合金，型技術，8，12（1993）45.

第1編 放電加工における加工特性の向上

第1章 緒 論

放電加工は、放電現象に伴う熱的作用と力学的作用により所望の加工形状を得る加工法である。放電という高エネルギー密度の現象を利用するため、従来の機械加工とは異なる特性を有する。その特徴を生かし我が国では金型加工のマザーマシンとして急速な発展を遂げ、第2次世界大戦後創始された特殊加工の代表的加工法となった。放電加工が開発されて約半世紀が経過し、その基本的性能の向上とともに微細放電加工^{1-1)~1-5)}、粉末混入放電加工^{1-6)~1-8)}、創成放電加工^{1-9) 1-10)}など新たな加工技術も開発され確立されようとしている。しかしながら加工現象そのものについては未だ不明な点が多く、課題が山積みとなっているのが現状である。特に加工速度、電極消耗についてはその開発当初から問題とされていた。

加工の高効率化に関しては盛んに研究が行われてきたが、トランジスタスイッチング回路が開発されてからは、放電電流を制御することによって放電エネルギーをより増大させることやDuty factorの制御が可能となり、ある程度の加工速度を得ることが可能になった¹⁻¹¹⁾。同時にスイッチング回路により強制的に放電電流を遮断できるため、アークを防止し安定した加工が可能となり、さらなる加工効率の向上をもたらした。しかし加工条件により加工速度の増加を図るには加工形状などにより限界があり、また電極消耗や加工面粗さなど他の加工特性の悪化につながる。一方、水や不燃性加工液を用いたグラファイト電極による放電加工が三水¹⁻¹²⁾、大泉ら¹⁻¹³⁾やKonigら¹⁻¹⁴⁾によって試みられ、著しく加工速度が向上することが明らかにされた。この加工法は一部実用化されており、火災発生の危険もないために長時間の無人運転をも可能にした。しかしやはり他の加工特性、特に電極消耗を大きく悪化させるといった問題がある。高効率化の点では電極を陰極とする正極性加工を見直す研究が行われているが、電極の消耗が避けられないため底付形状の型彫り放電加工ではほとんど用いられず、電極の消耗が許容できる貫通穴や、微細放電加工にのみ用いられている。また今井ら¹⁻¹⁵⁾は新たに開発した高速電極駆動装置を用い加工状態を良好にすることによって加工速度が増大することを明らかにしている。しかしながら加工能率の著しい向上につながるような研究報告、技術開発はなく、高効率化の問題に対しては現在足踏み状態である。

放電加工の高精度化においては電極の消耗を抑えることが重大な課題である。初期のコンデンサ回路を用いていた放電加工では、貫通穴加工の場合には長い電極を用いて消費してない箇

所で仕上げ加工を行う方法がとられ、底付形状の加工には同じ電極を数個用意して仕上げを新たな電極で行う方法がとられていた¹⁻¹⁶⁾。また極端に消耗を嫌う場合には銅タングステン、銀タングステンのような高価な電極材料を使用しなければならなかった。トランジスタ放電回路が出現してからは、電極側を陽極とする逆極性でパルス幅を長くとることによって電極消耗1%以下の低電極消耗が実現されるようになり¹⁻¹⁷⁾、銅やグラファイトのような安価な材料を電極として用いることが可能となった。電極消耗に影響を与える主な要因としては次の三つが挙げられる¹⁻¹⁸⁾。一つは電極と工作物材料の熱物性値である。放電加工は熱加工であるため、融点と熱伝導率の積の小さい材料が加工されにくいとされており、そのような材料を電極として用いれば、電極消耗が小さく電極として有効であるとされている。元木ら¹⁻¹⁹⁾やUllman¹⁻²⁰⁾は電極と工作物の熱物性値の組み合わせにより電極消耗を低減させる効果について明らかにしている。二つめは陰極と陽極へのエネルギー配分である。極間に与えられるエネルギーは陰極と陽極に配分されるわけであるがその配分の割合は電極と工作物の組み合わせ、加工条件によって大きく異なる。放電加工では陰極からの電子放出現象に対し、従来より電子放出と電界放出を同時に取り扱うT-F理論^{1-21)~1-23)}が適用されており、Motokiら¹⁻²⁴⁾は陰極表面における電子電流とイオン電流の割合を計算し、パルス幅が長い場合はイオン電流の割合が増加し、陰極に配分されるエネルギーが多くなるという結果から電極消耗率の変化を定性的に説明している。一方、Xiaら¹⁻²⁵⁾は電極の温度変化を把握することによってエネルギー配分を明らかにし、三つめの要因である電極端面への熱分解カーボンの付着が電極消耗において最も影響が大きいと報告している。熱分解カーボンの付着現象は逆極性で比較的パルス幅の長い条件で観察されるものであり、電極消耗の変化によく対応している。これは熱分解カーボンの電極保護作用によることが西村ら¹⁻²⁶⁾やHonら¹⁻²⁶⁾により明らかにされている。さらに鈴木ら^{1-28) 1-29)}は熱分解カーボンの構造、工作物材料のカーボン生成に対する触媒作用について検討を行っている。このほかパルス電流波形や噴流状態が電極消耗に及ぼす影響^{1-30) 1-31)}についても検討されている。現在のところ熱分解カーボンの付着現象が電極低消耗加工を実現する主要因とされているが、その生成、付着機構はほとんど明らかにされていない。

ところで、近年新たに開発された放電加工技術のなかで粉末混入放電加工は最も革新的な技術であるといえる。開発当初は加工面粗さの改善を主な目的としていたが、粗さの改善に加え加工面特性の点でも優れた効果を有することが次第に明らかにされている^{1-6) 1-32)}。すなわち粉末混入加工液中で放電加工を行うことによって加工を行うと同時に加工表面に粉末の成分が拡散し、耐食性、耐摩耗性など所望の表面特性を得られるというものである。また粉末を混入することによって放電が分散し、非常に安定した放電状態が得られることも報告されており^{1-6) 1-7)}、仕上げ条件だけでなく粗加工条件においても粉末混入加工液を用い、高速加工を実現させる研究も行われている。この加工技術は新たな表面処理技術としても最も発展の期待される技術の一つである。しかしながら得られる加工面の状態は工作物の材質によって差があり、鏡面の得られるものは数種の工作物材質のみである。そしてその表面生成機構についても未だ不明な点

が多く、その解明が重要な課題となっている。

このような背景のもとで放電加工技術の発展のためには、加工の高能率化および電極消耗などの問題に対するさらなる検討、加工面の高機能化技術の進展が不可欠であり、また同時にそれらに関する基礎的な現象を体系的に解明することが重要と考えられる。

本編では放電加工における加工特性の向上を目的とし、高能率化、高精度化および加工面の高機能化に対しいくつかの新たな加工技術を提案するとともに、放電加工の基礎的現象の解明を行っている。本編は緒論および結論を含め6章から構成されている。

第2章「高速極性切替による放電加工の高能率化」では、放電加工中に任意に極性を切り替えて加工を行う新たな加工法について提案している。放電加工において正極性加工と逆極性加工ではその特性が大きく異なり、両者の加工特性は相反するものである。そこで互いの極性を適当におりませることにより加工特性、特に加工速度および電極消耗の改善を検討している。

第3章「粉末混入放電加工における加工面生成機構と加工面性状の向上」では、シリコン粉末混入放電加工において、放電痕形状、放電発生時の極間距離、加工中の極間状態および加工面性状に及ぼす影響について検討し、その表面生成機構を体系的に明らかにしている。また工作物により得られる加工面粗さに違いが生じる要因についても考察を行い、工作物内の炭化物の大きさ、分布状態が加工面粗さに及ぼす影響についても明らかにしている。

第4章「回転円板電極を用いた放電溝加工の高精度化」では、極間状態が悪化しやすく加工が難しいとされる溝加工において、新たな加工法を提案している。従来極間の加工粉、気泡の排出は電極のジャンプ動作や加工液の噴出、吸引によって行われているが、効率の点で問題がある。そこで電極と工作物間の相対運動を与える回転円板電極を用い、その加工特性、加工機構について検討を行っている。また電極の消耗を補正することによって所望の溝形状を高精度に得る方法についても考察している。

第5章「CVD炭素電極による高精度放電加工」では、仕上げ条件における電極無消耗加工の実現を目的とし、新たに開発した炭素電極の可能性について検討している。電極無消耗加工は灯油系加工液の熱分解によって生じるカーボンの電極端面の付着によって実現される。この現象はパルス幅の長い条件においてのみ起こるため、仕上げ条件における電極無消耗加工は従来不可能とされている。そこでこの熱分解カーボンと同じ乱層構造を有する炭素材料をCVD法によって作成し、その放電加工特性について検討している。そしてこのCVD炭素電極が仕上げ加工用の電極として優れた特性を有することを明らかにしている。

第6章「結論」では、本編によって得られた知見をまとめている。

参考文献

- 1-1) 倉藤尚雄, 増沢隆久: 超硬合金の放電による微細加工, 電気加工学会誌, 2, 3 (1968) 1.
- 1-2) 増沢隆久, 佐田登志夫: 微小エネルギーRC放電加工における持続アーク発生機構, 電気加工学会誌, 5, 9 (1971) 35.
- 1-3) 河田耕一, 佐藤健夫, 正木健, 増沢隆久: 微細放電加工の研究 (第1報), 電気加工学会誌, 28, 57 (1994) 32.
- 1-4) 増沢隆久: 微細放電加工, 精密工学会誌, 57, 6 (1991) 963.
- 1-5) T.Masaki, K.Kawata, T.Sato, T.Mizutami, K.Yonemoti, A.Shibuya and T.Masuzawa: Micro Electro-Discharge Machining, Proc. of ISEM-9 (1989) 26.
- 1-6) 毛利尚武, 斎藤長男, 成宮久喜, 河津秀俊, 尾崎好雄, 小林和彦, 恒川好樹: 粉末混入放電加工液による放電仕上げ加工, 電気加工学会誌, 25, 49 (1991) 47.
- 1-7) 斎藤長男, 毛利尚武: 大面積放電加工における仕上面粗さの向上, 精密工学会誌, 57, 6 (1991) 955.
- 1-8) H.Narumiya, N.Mohri, N.Saito, H.Ootake, Y.Tsunekawa, T.Takawashi and K.Kobayashi: EDM by Powder Suspended Working Fluid, Proc. of ISEM-9 (1989) 5.
- 1-9) 今野廣, 小室克弘, 佐藤真, 岸浪建史, 斎藤勝政: 多軸NC放電加工機による形状創成加工法に関する研究 (第1報), 精密機械, 49, 10 (1983) 1364.
- 1-10) 金子勉, 土屋政光: 単純形状電極による創成放電加工, 精密工学会誌, 57, 6 (1991) 949.
- 1-11) 佐藤敏一: 特殊加工, 養賢堂 (1981) 12.
- 1-12) 三水篁: 水を利用した高速放電加工, 応用機械工学, 30, 1 (1989) 125.
- 1-13) 大泉敏郎: 不燃性加工液による放電加工の高速化, 応用機械工学, 30, 12 (1989) 112.
- 1-14) Konig.W, Klocke.F and Sparrer.M: EDM-Sinking Using Waterbased Dielectrics and Electro-polishing-A New Manufacturing Sequence in Toolmaking, Proc. of ISEM-11 (1995) 225.
- 1-15) 今井祥人, 佐竹彰, 種田淳, 小林和彦: 高速電極駆動装置による放電加工速度の改善, 電気加工学会誌, 27, 55 (1993) 23.
- 1-16) 佐藤敏一: 特殊加工, 養賢堂 (1981) 17.
- 1-17) 木本保夫, 田宮勝恒, 平田勝己: 液中過渡アーク放電の電極消耗の研究, 電気学会雑誌, 89, 964 (1969) 133.
- 1-18) 斎藤長男: 放電加工の仕組みと100%活用法, 技術評論社 (1979) 56.
- 1-19) 元木幹雄, 佐藤隆一, 橋口清人, 徳山赫淇: 放電加工の電極消耗, 精密機械, 27, 4 (1961) 1608.
- 1-20) W.Ullman: Reducing Electrode Wear in Spark Machining, Metalworking Production, 102 (1968)

489.

- 1-21) W.W.Dolan and W.P.Duke : Temperature-and-field Emission of Electrons from Metals, *Phys. Rev.*, **95**, 2 (1954) 327.
- 1-22) E.L.Murphy and R.H.Good : Thermionic Emission, Field Emission and the Transition Region, *Phys. Rev.*, **102**, 6 (1956) 1464.
- 1-23) T.H.Lee : T-F Theory of Electron Emission in High-current Arcs, *Journal of Appl. Phys.*, **30**, 2 (1959) 166.
- 1-24) M.Motoki and K.Hashiguchi : Energy Distribution at the Gap in Electric Discharge Machining, *Annals of the CIRP*, 14 (1967) 485.
- 1-25) Heng. Xia, M.Kunieda and N.Nishiwaki : Removal Amount Difference between Anode and Cathode in EDM Process, *IJEM*, 1 (1996) 45.
- 1-26) 西村重志, 土屋政光 : 低電極消耗放電加工の研究-電極表面の黒化層について-, *電気加工学会誌*, **1**, 2 (1968) 71.
- 1-27) K.K.B.Hon and S.C.Li : An Experimental Study of Electrode Built-up Phenomenon in EDM, *Proc. of ISEM-9* (1989) 321.
- 1-28) 鈴木政幸, 毛利尚武, 斎藤長男, 武沢英樹 : 放電加工における電極低消耗の研究 (第1報), *電気加工学会誌*, **26**, 52 (1992) 47.
- 1-29) 鈴木政幸, 毛利尚武, 斎藤長男, 武沢英樹 : 放電加工における電極低消耗の研究 (第2報), *電気加工学会誌*, **27**, 56 (1993) 50.
- 1-30) 小林和彦, 大泉敏郎 : 電流波形制御による加工特性, *電気加工学会誌*, **8**, 16 (1975) 20.
- 1-31) 土屋八郎, 井上友一, 大森正己 : 放電加工の加工精度に関する研究 (第2報), *電気加工学会誌*, **9**, 18 (1976) 29.
- 1-32) 上田順弘, 佐藤幸弘, 増井清徳, 宮谷保太郎 : シリコン粉末添加放電加工による加工面の機能性向上, *電気加工技術*, **19**, 62 (1995) 19.

第2章 高速極性切替による放電加工の高効率化

2.1 緒言

放電加工においては、工具電極を陰極とする正極性加工と、その逆の工作物を陰極とする逆極性加工とではその加工特性が大きく異なる。一般にグラファイト電極を用いて鋼を加工する場合、正極性加工では加工速度は大きいですが、工具電極の消耗も大きくなる。また加工を妨げる要因となる炭素生成物も加工表面に付着しやすくなる²⁻¹⁾。これに対して逆極性加工は加工速度は小さいが電極消耗は少なく、パルス幅を長くした場合には電極無消耗加工も可能となる²⁻²⁾。一般に金型加工においては形状精度の点で電極の消耗を嫌うため、加工能率をある程度犠牲にして逆極性加工が用いられている。このようなことから放電加工においては加工能率の向上が重要な課題といえるが、加工条件によって加工速度の向上を図るには限界があり、また他の加工特性の悪化につながる。

極性による放電加工特性の違いは、主に陽極と陰極に配分される放電エネルギーの違いや加工液の熱分解生成物の付着などに起因するといわれている^{2-3) 2-4)}。このように両者の特性は相反するものであるため、それぞれの欠点は互いの極性を適当に混合することによって改善できるのではないかと考えられる。

そこで本章では、高速で極性を切り替えることのできる高速極性切替装置を用いて、加工中に任意に極性を切り替えた場合の加工特性について検討を行った^{2-5) 2-6)}。

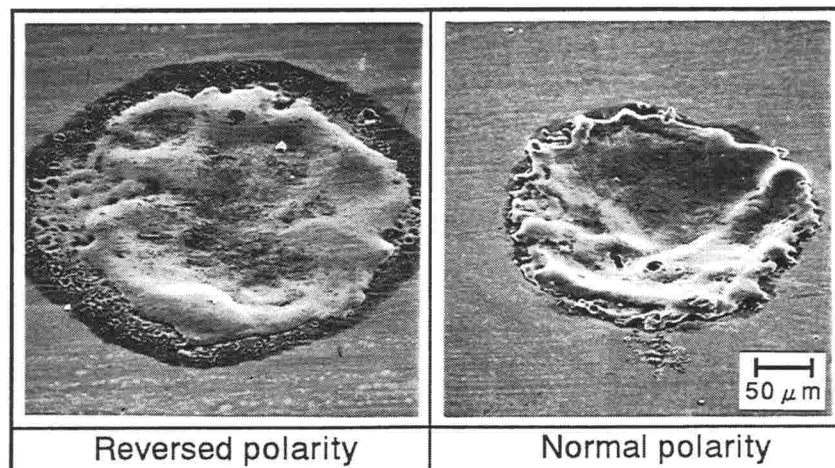
2.2 高速極性切替が放電加工特性に及ぼす影響

2.2.1 極性による加工特性の違い

放電加工において工具電極を陰極とする正極性加工と、その逆の工作物を陰極とする逆極性加工とでは加工特性が大きく異なる。

図2-1は工作物SKD11に対しグラファイト電極を用いた同一加工条件での逆極性放電および正極性放電によって形成された単発放電痕のSEM写真である。図より明らかなように逆極性放電の場合、放電痕の深さはあまり大きくなく、工作物はほとんど除去されていない。また放電痕表面は再凝固した工作物によって覆われている。これに対して正極性放電の場合は逆極性放電のそれよりも放電痕の直径は若干小さいものの底の深いクレータとなっており、除去体積は逆極性放電のそれよりも大きいことがわかる。

また図2-2は放電電流 $I_p=30A$ 、デューティ・ファクタD.F.=50%の条件でパルス幅 τ_p を変化させた場合の加工速度および電極消耗率の変化を示す。図中○は正極性加工の、●は逆極性加工の加工速度をそれぞれ示している。どちらの極性においても加工速度は放電時間の増加とともに増加し、 $100\mu s$ 付近で最大値をとる。これはこの加工条件で放電の状態が最も安定するためである。しかし逆極性加工の加工速度は正極性の場合の3分の1から4分の1とかなり小さいことがわかる。また△は正極性加工の、▲は逆極性加工の電極消耗率をそれぞれ示す。電極消耗率は両者ともパルス幅の増加とともに小さくなっている。逆極性加工の場合電極消耗率は $100\mu s$ 付近で0となり、それ以上では電極が成長し、マイナスの値を示す。これはパルス幅の増加



Gr/SKD11, $I_p=40A$, $\tau_p=40\mu s$,
In kerosine type fluid

図2-1 極性による単発放電痕の違い

とともに加工液の熱分解によって生じるカーボンの電極端面への付着量が多くなるためである。これに対して正極性加工ではパルス幅の長い条件でも15%と非常に大きな値を示す。

以上のように極性による加工特性の違いは明らかである。特にパルス幅の長い条件で両者の違いはより明確に現れる。このような極性の違いによる放電加工特性の違いは、両極に配分される放電エネルギーの違いや、電極端面に付着する熱分解炭素の付着現象に起因すると言われており²³⁾²⁴⁾、グラファイト電極を用いた場合にはその差は大きい。

2.2.2 高速極性切替装置

前述のように極性による加工特性の違いは相反するものであるため、それぞれの欠点は互いの極性を適当に混合することによって改善できるのではないかと推測される。本実験では極性を切り替えるための回路として高速極性切替装置（High Speed Polarity Changer : HSPC）を用いた。これは、加工中に加工機の電源装置から出力されるトリガ信号を取り込み、設定したパルス数を計数したのち極性を強制的に反転させる装置である。

図2-3に高速極性切替装置を用いて放電加工を行った場合の極間電圧および放電電流の測定例を示す。この装置では正極性設定パルス数 T_n および逆極性設定パルス数 T_r はそれぞれ0から255まで任意に設定することが可能である。図は正極性設定パルス数を3、逆極性設定パルス数を

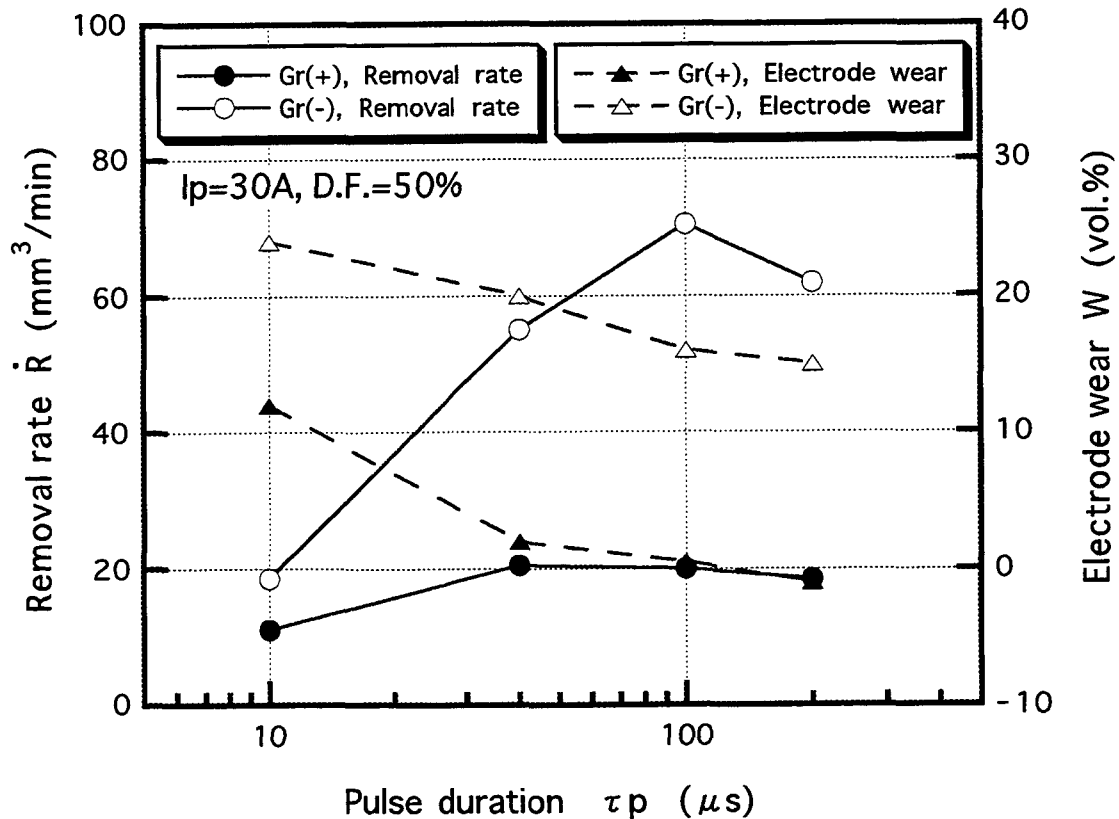


図2-2 極性による加工速度および電極消耗率の違い

2とした場合の波形である。最初に逆極性で2回放電が生じた後、極性が反転し、前の放電とは逆に電圧が印加され、正極性放電が3回生じている。さらに再び逆極性放電が2回と続いていき、このサイクルが繰り返される。本実験では、両放電の比率を表す指標として、全放電回数に対する正極性放電回数の割合を正極性放電割合Nとして、以下のように定義する。

$$N = 100 \cdot T_n / (T_n + T_r) \quad (\%) \quad \dots \dots \dots (2-1)$$

例えば図2-3に示す波形の場合正極性放電割合Nは60%となる。またN=0%は通常の逆極性加工を、N=100%は正極性加工を示すことになる。本実験ではそれぞれの放電回数を0から255と変化させ、それぞれの放電回数および正極性放電割合Nが加工特性に及ぼす影響について検討した。

2.2.3 実験方法

図2-4は実験装置を模式的に示す。高速極性切替装置をトランジスタ電源装置と電極および工作物間に設置している。工具電極には直径10mmのグラファイト棒を、また工作物には冷間金型鋼SKD11を用いた。加工液には灯油系加工液（比抵抗 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上）および比較のためイオン交換樹脂を通した脱イオン水（比抵抗 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上）を使用した。表2-1は加工条件を示しており、前述の図2-2で正極性加工、逆極性加工での特性の違いがより明確であった加工条件を採用している。

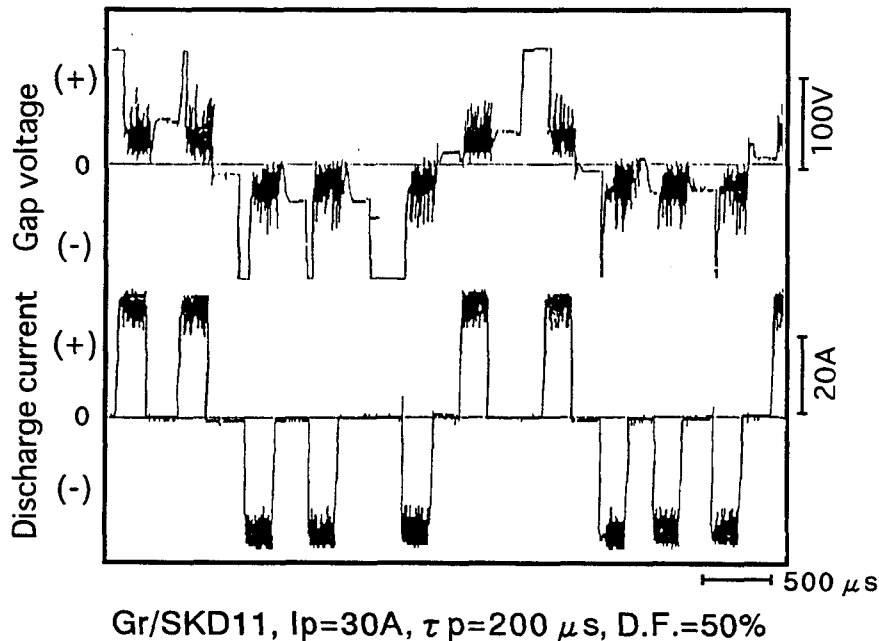


図2-3 高速極性切替放電加工における極間電圧および放電電流波形

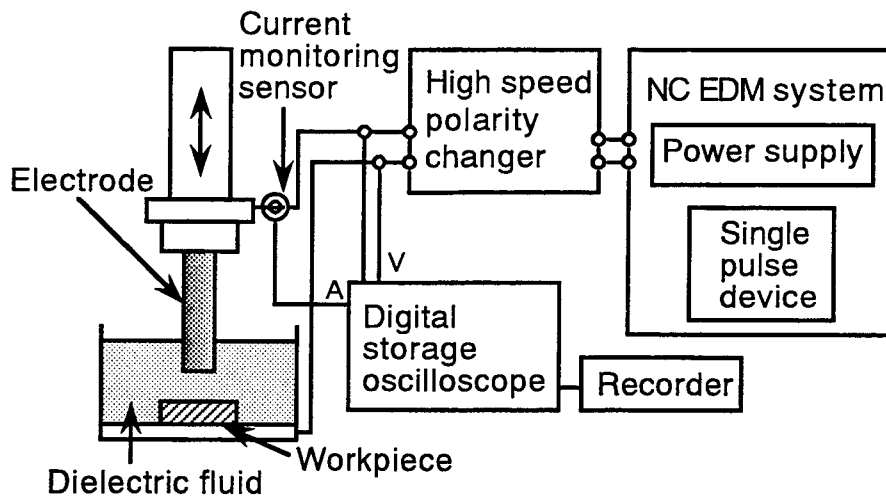


図2-4 実験装置模式図

表2-1 加工条件

No-load voltage	$V_0=120V$
Discharge current	$I_p = 30A$
Pulse duration	$\tau_p = 200 \mu s$
Duty factor	D.F. = 50%
Machining fluid	Kerosine, Deionized water

2.2.4 実験結果および考察

図2-5は灯油系加工液中で高速極性切替加工を行った場合の加工速度と正極性放電割合 N の関係を示す。図中の $N=0\%$ および $N=100\%$ はそれぞれ逆極性加工および正極性加工の結果を示している。またそれぞれの記号は逆極性放電の回数 T_r を示している。例えば $N=50\%$ における□の記号は正極性放電回数 T_n が10回、逆極性放電回数 T_r が10回の場合の加工結果を表している。図より明らかなように、正極性放電割合 N が0から50%までは N の増加とともに加工速度は徐々に減少し、50%を超えると急激に増加する。そして80%付近で最大値をもつ。つまり加工速度は正極性加工($N=100\%$)よりも正極性加工に少し逆極性放電を混合した場合のほうが大きくなるのがわかる。これは正極性加工において加工の妨げとなる何らかの要因が逆極性放電を混合することによって改善されたためと考えられる。またこれらの傾向は正極性放電回数および逆極性放電回数にはほとんど左右されず、両者の比率 N によってのみ決定されることがわかる。すなわち正極性放電1回と逆極性放電1回の組み合わせの加工でも、正極性放電100回と逆極性放電100回の組み合わせの加工でも($N=50\%$)、ほぼ同程度の加工速度となっている。

図2-6は加工液に脱イオン水を用いた場合の加工速度とNの関係を示す。灯油系加工液の場合とはその傾向は大きく異なり、加工速度はN=0%から100%までほぼ直線的に増加する。すなわち加工速度は放電痕除去体積の大きい正極性放電と、除去体積の小さい逆極性放電との回数の割合のみで決定されているといえる。脱イオン水の場合は灯油系加工液のように熱分解生成物は生じないことから考慮すると、図2-5のNに対する加工速度の特異な変化は次のように推察さ

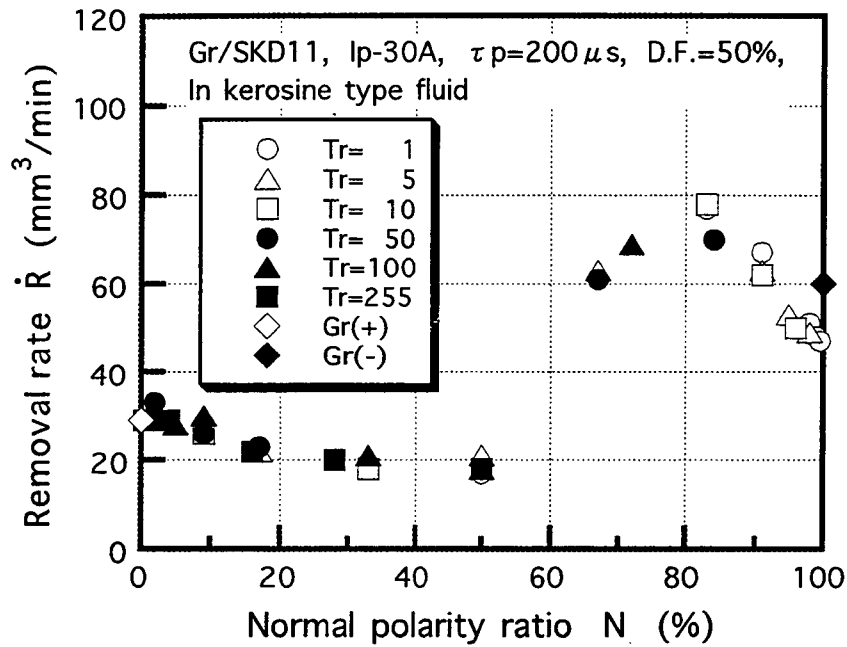


図2-5 加工速度と正極性放電割合の関係

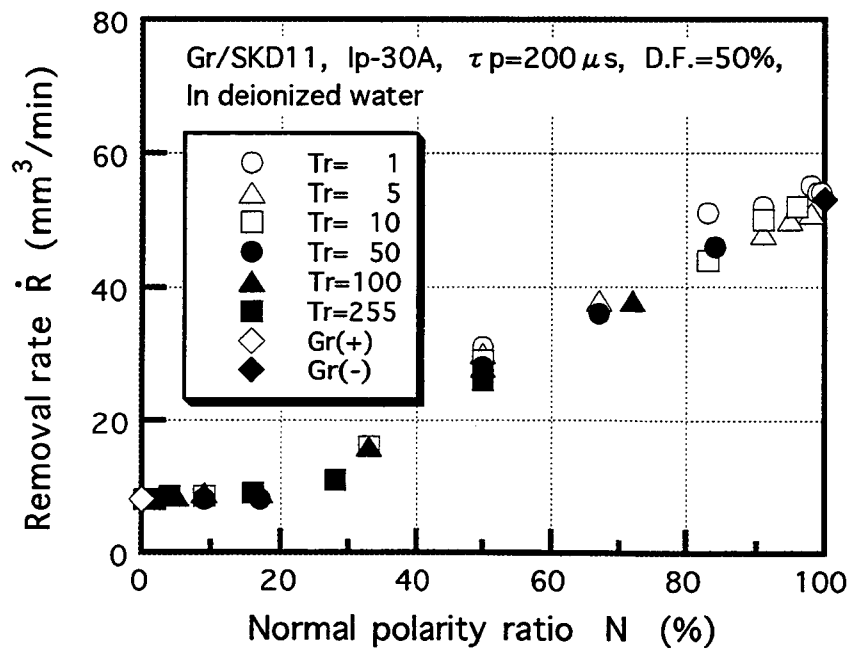
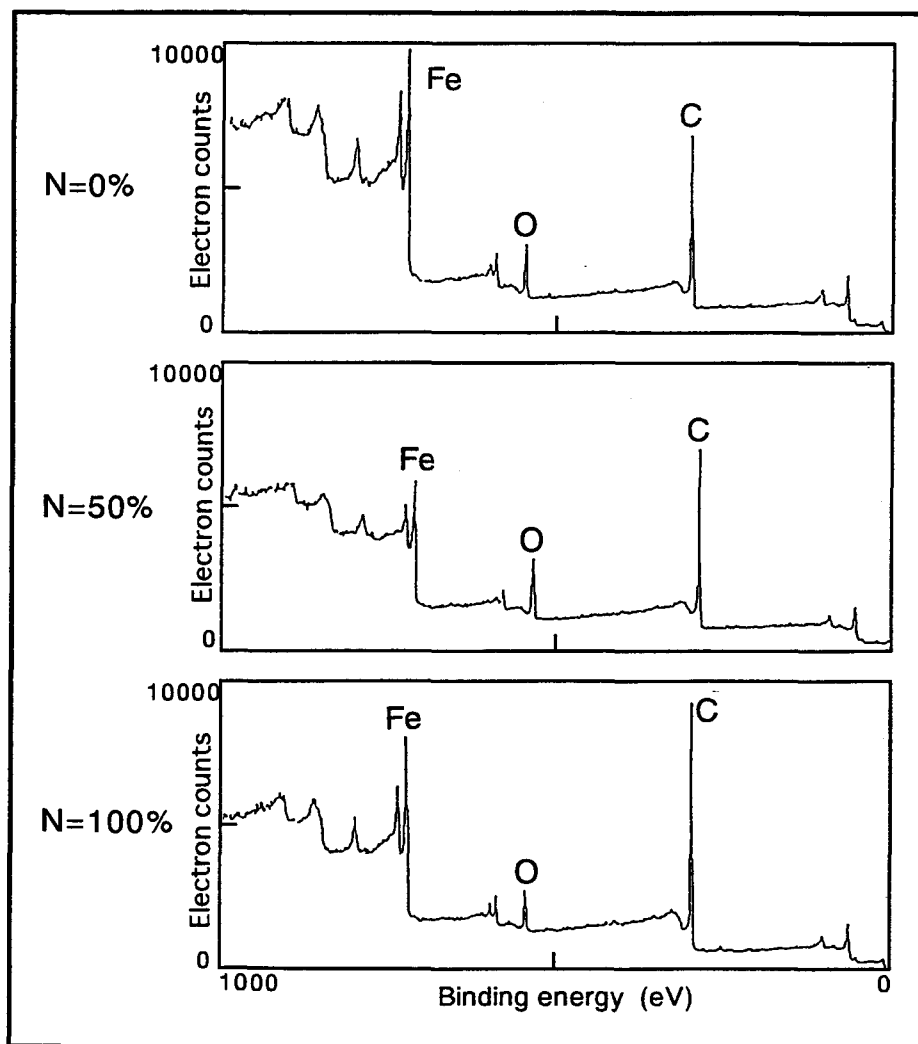


図2-6 脱イオン水中における加工速度と正極性放電割合の関係

れる。すなわち灯油系加工液の場合N=80%付近で加工速度が最大となるのは、工作物表面の加工を妨げる炭化層や熱分解カーボンの層が一定の割合で逆極性放電を混合することによって取り除かれたのではないかと推測される。またN=50%付近までは加工速度が逆極性よりも低下するのは、頻繁な極性の反転によって熱分解したカーボンが工作物表面および電極端面に付着、除去を繰り返すために加工が不安定になることが要因と考えられる。

以上の推論を確かめるため、灯油系加工液中で加工した工作物表面のXPS分析を行った。図2-7はその結果を示す。分析試料表面に形成される大気等による酸化層、炭化層の汚染吸着層は装置内でArイオンエッチングにより除去している。これによって約500nmの表面除去が行われた(三次元表面構造解析顕微鏡ZYGO New View 100によって確認)。グラフの横軸は原子の結合エネルギーを示しており、それぞれのピークは右から炭素、酸素および鉄である。工作物として用いたSKD11にはもともと1.4%の炭素が含まれているがその割合はNの変化に対しては無関係



Gr/SKD11, $I_p=30A$, $\tau_p=200 \mu s$, D.F.=50%,
In kerosine type fluid

図2-7 加工表面XPS分析

である。図より正極性放電割合Nによってそれぞれの元素のピーク強度は異なることがわかる。

図2-8はXPS分析によって得られた加工表面の炭素および酸素のピーク値の正極性放電割合Nに対する変化を示す。図より明らかなようにN=0から80%までは酸素、炭素ともNの変化に対しほとんど変化していないが、N=100%すなわち正極性加工の場合には、炭素が増加し酸素が減少していることがわかる。このことから正極性放電のみの加工では、加工表面に熱分解カーボンの層あるいは炭化層が形成されているといえる。そしてこの層を逆極性放電によって除去することで前述のように加工速度が増加するものと考えられる。

図2-9は正極性放電割合Nの変化に対する電極消耗率の変化を示す。電極の消耗率はNの増加とともに増加する。N=0%すなわち逆極性加工の場合は電極無消耗の条件となっていることがわかるが、N=30%程度までは電極の消耗はマイナスの値を示しており、少し正極性放電をおりませても電極無消耗加工が可能であることがわかる。また加工速度の場合と同様に、電極消耗率はそれぞれの放電回数には依存せず、正極性放電割合Nのみによって決定されている。

図2-10は加工後のグラファイト電極端面のSEM写真である。図より明らかなようにN=0%すなわち逆極性加工の場合のグラファイト端面には、工作物および熱分解カーボンの付着が全面にわたり認められる。またN=20%すなわち、逆極性加工に少し正極性放電を混合した加工の場合にも電極端面には工作物および熱分解カーボンの付着が認められるが、図に見られるようにグラファイト端面が円形に露出しているところも見られる。これは端面の付着物が正極性放電によって除去された痕跡であると考えられる。そして正極性放電の割合が増加するにつれてグラファイト電極端面の露出の割合が多くなっている。さらに正極性放電の割合の多いN=80%およびN=100%の場合には付着物はほとんど見られなくなる。電極無消耗加工は工作物および熱分解

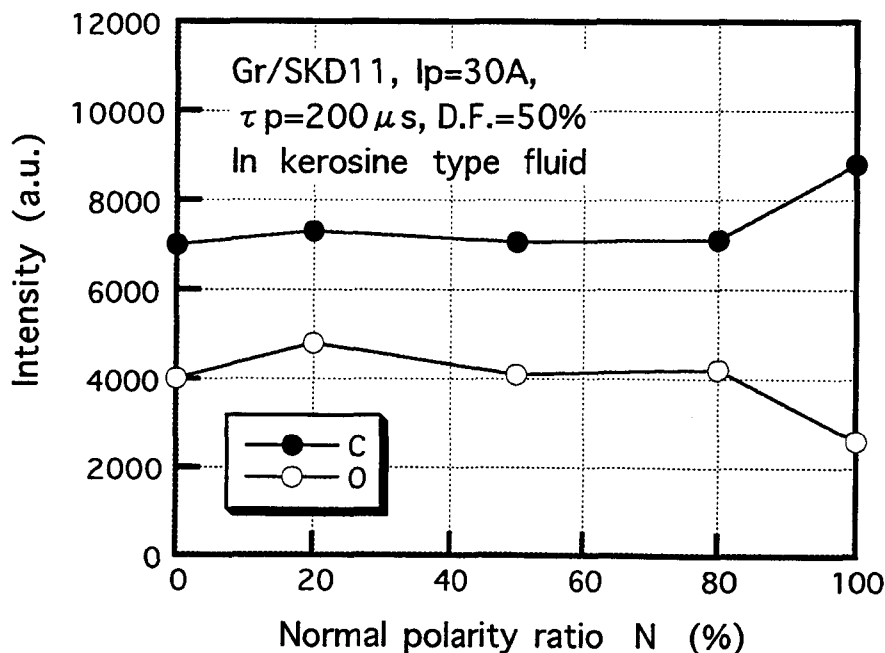


図2-8 XPS分析における炭素と酸素のスペクトル強度と正極性放電割合の関係

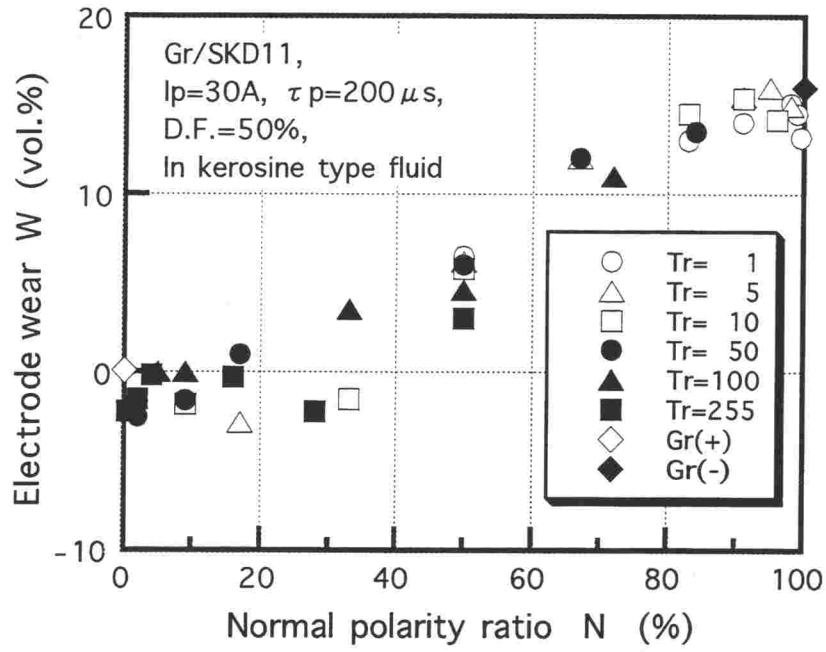


図2-9 電極消耗率と正極性放電割合の関係

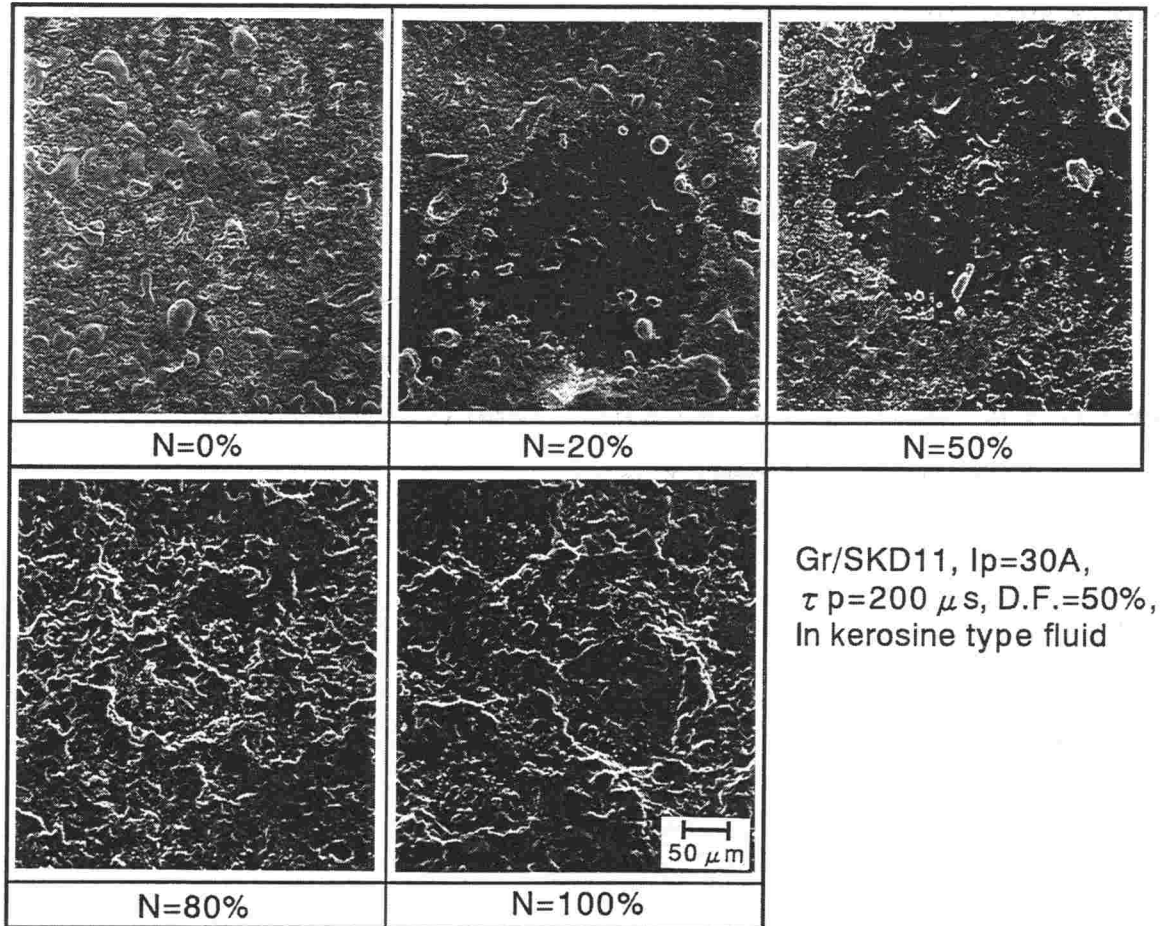


図2-10 加工後の電極端面のSEM写真

カーボンの電極端面への付着によって実現されるわけであるが^{2-7)~2-10)}、図に見られるような電極端面への工作物および熱分解カーボンの付着の状態は、前述の電極消耗率のNに対する変化とよく対応している。

図2-11はNの変化に対する加工面粗さの変化を示す。図より明らかなように加工面粗さはN=0から50%ではほぼ一定でその後Nの増加とともに緩やかに増加している。図2-1の単発放電痕の写真で見られたように、逆極性放電によるクレータは正極性のそれよりも放電痕深さが小さいため、逆極性放電の割合の多い50%までは正極性放電で生成される粗い面を逆極性放電によって多少平滑にする作用があると考えられる。また加工速度、電極消耗と同様、加工面粗さも正極性放電割合Nによってのみ決定される。

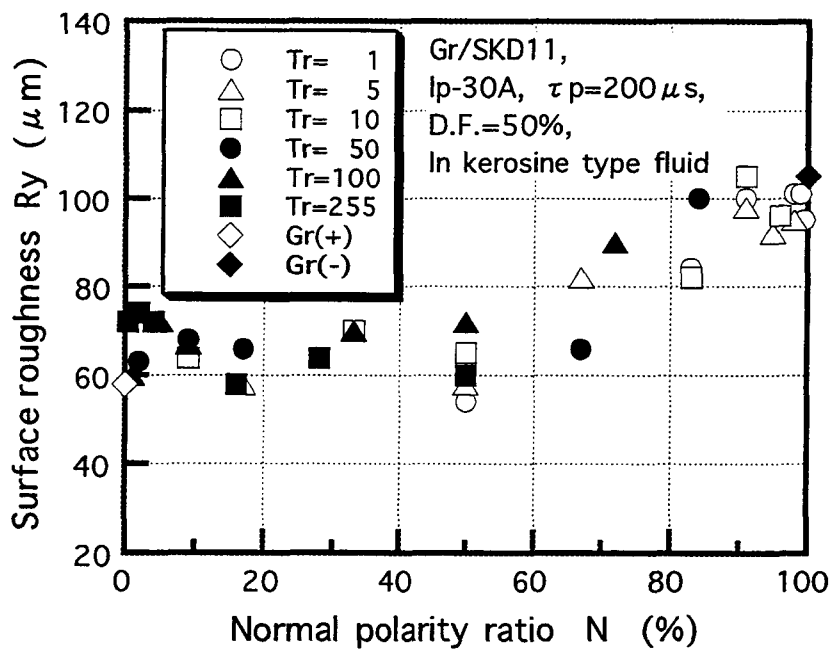


図2-11 加工面粗さと正極性放電割合の関係

2.3 結 言

本研究では高速極性切替装置を用いて、加工中に任意に極性を切り替えた場合の加工特性について検討を行った。本章で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 灯油系加工液を用いた場合の加工速度は、正極性加工よりも正極性加工に逆極性放電を少し混合した場合のほうが大きい。これは正極性加工で形成された加工表面の炭化層あるいは熱分解炭素生成物を逆極性放電によって取り除くことができるためである。
- (2) 脱イオン水中で加工を行った場合の加工速度は、正極性放電の比率の増加とともに直線的に増加する。
- (3) 高速極性切替放電加工では加工速度、電極消耗率および加工面粗さは、1サイクル中の正極性および逆極性の放電回数には影響されず、両者の比率のみによって決定される。
- (4) 灯油系加工液を用いた場合の電極消耗率および加工面粗さは、正極性放電の比率が大きいほど大きくなる。

参考文献

- 2-1) 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, 17, 57 (1993) 27.
- 2-2) M.Motoki and K.Hashiguchi: Energy Distribution at the Gap in Electric Discharge Machining, Annals of the CIRP, 14 (1967) 485.
- 2-3) 斎藤長男: 放電加工の仕組みと100%活用法, 技術評論社 (1979) 56.
- 2-4) 本木康雄: 電気・電子応用精密加工, オーム社 (1982) 17.
- 2-5) 宇野義幸, 岡田晃, 伊藤満, 高木俊: 高速極性切替放電加工に関する研究, 電気加工学会誌, 29, 60 (1995) 22.
- 2-6) Y.Uno, A.Okada and M.Itoh: The Effect of High Speed Polarity Changing on EDM Performance, Proc. of ISEM-11 (1995) 241.
- 2-7) 土屋政光, 西村重志: 低電極消耗放電加工の研究-電極表面の黒化層について-, 電気加工学会誌, 1, 2 (1968) 71.
- 2-8) K.K.B.Hon and S.C.Li: Experimental Study of Electrode Built-up Phenomenon in EDM, Proc. of ISEM-9 (1989) 321.
- 2-9) 鈴木政幸, 毛利尚武, 斎藤長男, 増沢隆久: 型彫放電加工における電極消耗, 電気加工技術, 19, 62 (1995) 1.
- 2-10) H.Takezawa, N.Mohri, M.Suzuki and N.Saito: Electrode Wear Phenomena in Electrical Discharge Machining, Proc. of ICMT in Asian and Pacific Region (1993) 218.

第3章 粉末混入放電加工における 加工面生成機構と加工面性状の向上

3.1 緒言

放電加工では、多数の単発放電痕の累積によって加工が進行するために、生成される面は一般に凹凸のある梨地面となる。また加工面積が大きい場合には、加工粉や気泡が極間に滞留しやすいため放電集中³⁻¹⁾や加工粉を介した二次放電が起こりやすくなり加工面を悪化させたり、工具電極と工作物間に形成される静電容量によるコンデンサ放電が付加されたりするために、放電エネルギーを小さくしても加工面粗さは小さくならない場合がある。しかしながらプラスチックモールド金型のように光沢面を必要とするものや、抜型や押出型などのように側面の摩擦係数の小さいことが望ましいものは、クラックのない平滑な面を必要とする。このため、実際には放電加工後に最終工程として人手による磨き作業やサンドブラストなどによる表面処理が行われている。

斎藤ら^{3-2)~3-4)}は加工液にシリコンやアルミニウムなどの金属粉末を混入し加工を行うことによって、表面粗さが $1\mu\text{m}$ 以下の鏡面加工が可能となることを明らかにしている。またその後の研究で、大面積加工においても放電集中が起こりにくく加工状態が安定していることやその加工面にはクラックの発生がなく、耐食性、耐摩耗性に非常に優れていること^{3-5) 3-6)}も明らかにしている。この粉末混入放電加工法は既に実用化されており、一部の金型加工では最終の仕上げ工程まで放電加工で行われている。

しかしながら、このような優れた仕上げ面が得られるのは、SKD61やSKH51など数種類の工作物に限られている。すなわち加工面粗さは工作物の種類によって大きな差があり、その表面生成機構については未だ十分に明らかにされていないのが現状である。

そこで本章では、加工液中のシリコン粉末の有無による単発放電痕形状の違い、放電加工状態および加工面形状の変化を観察し、シリコン粉末混入が表面生成機構に及ぼす影響について実験的に検討を行った^{3-7) 3-8)}。さらに工作物内の炭化物の大きさ、分散状態が加工面粗さに及ぼす影響についても検討を行った。

3.2 シリコン粉末混入放電加工

3.2.1 シリコン粉末混入加工液

シリコンは酸化物，炭化物，ケイ酸塩などの形で岩石中に多く産し，地殻構成成分で酸素に次いで多量に存在する元素である．ケイ砂にコークスなどを混合し，アーク炉中で還元溶解させ冷却固化させると，金属シリコンが得られる．純度は97～98%で不純物としてFe，C，B，P，Sなどを含む．図3-1に加工液中に混入した金属シリコン粉末のSEM写真を示す．粒径は15 μm以下であり，形状，大きさは様々である．本章で使用した加工液は灯油系加工液（KHS社製，VITOL2）とそれに金属シリコン粉末を混入したシリコン粉末混入加工液（Silicon Powder Mixed Fluid：以下SPMFと記す）である．シリコン粉末の混入率は実用化されている加工液に準拠し，23.28g/lとした．またそれぞれの比抵抗は $7.81 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ， $6.16 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ であり，SPMFは基油に比べて極端に小さな値をとっている．なお加工液の比抵抗の測定は以下のように行った．

図3-2は試作した加工液の比抵抗測定装置である．示すようにL cmの距離を隔てて，表面積S cm²の銅の極板を対向させたとき，銅極板，銅線等の抵抗は無視できるものと考えると，加工液の比抵抗 ρ と電気抵抗値Rには式（3-1）の関係が成り立つ．

$$\rho = R \cdot S / L \quad \dots \dots \dots (3-1)$$

実際にはL=0.1cm，S=71.6cm²として抵抗を測定し，それぞれの加工液の比抵抗を算出した．

3.2.2 実験装置および実験方法

本実験に用いた実験装置の概略を図3-3に示す．電源装置にはトランジスタスイッチング式の

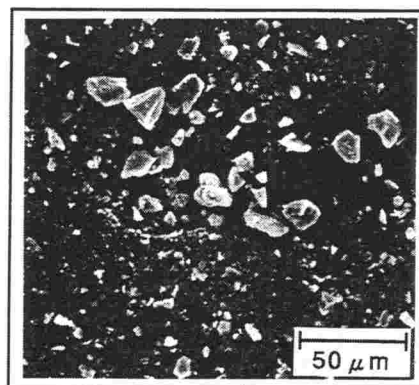


図3-1 シリコン粉末の顕微鏡写真

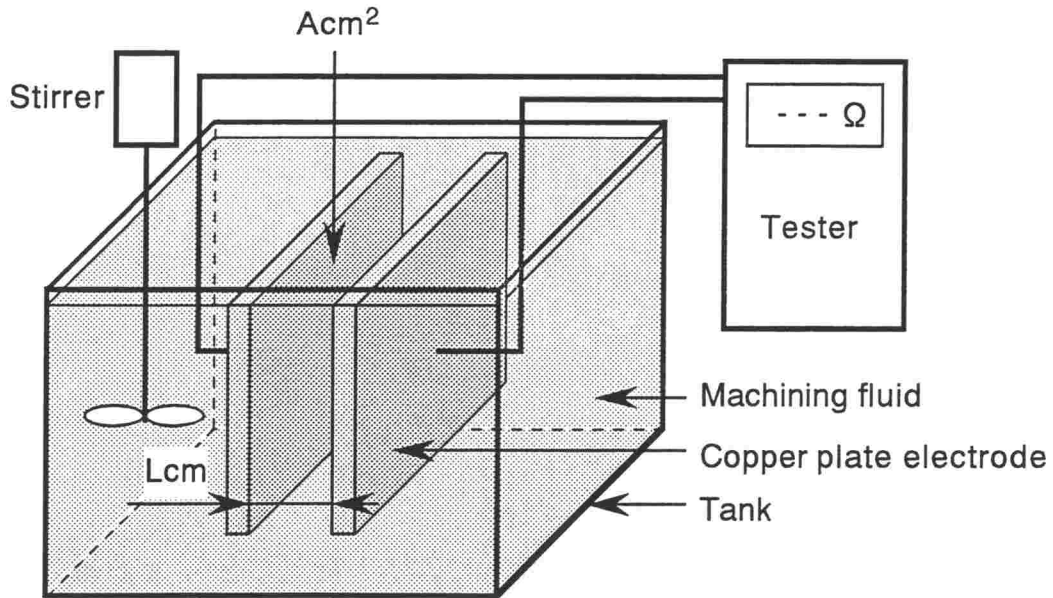


図3-2 比抵抗測定装置の概略

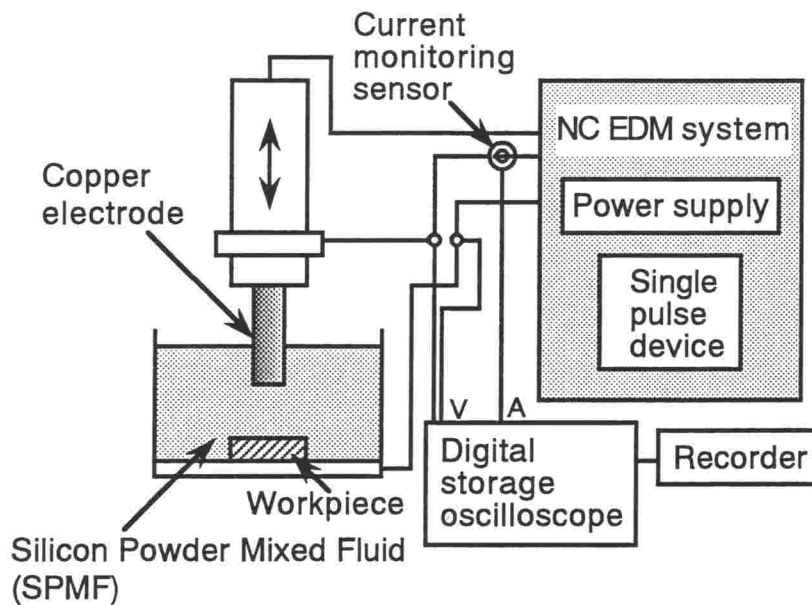


図3-3 実験装置の概略

放電回路を用いた。工具電極は直径15mmの銅棒であり、通常仕上げ条件で行われているように電極に揺動運動を与えた(6.2sec/cycle, $r=150\mu\text{m}$)。電極の揺動運動は、加工粉およびシリコン粉末の滞留防止に効果があるとされている³⁻⁹⁾。また単発放電実験では、安定して放電が生じるように電極先端を円錐状に成形した後実験に使用した。

本章ではより良好な仕上げ面を得ることを目的としている。放電加工において一般に面粗さを小さくするためには次のような方法が採られる。

- (1) 工作物形状は電極の形状が反転投影されるため、工具電極の表面粗さを小さくする。
- (2) 放電エネルギーを小さくする。すなわち放電電流およびパルス幅を小さくする。
- (3) 使用する電極、工作物材質の組み合わせによって加工に適した極性を使用する。すなわち電極が銅、工作物が鋼の場合表面粗さを小さくするには、工作物側の除去量の小さい、正極性（電極：(-)）が適している。

以上のことを考慮し、表3-1に示すような一般に粉末混入放電加工に用いられる加工条件で実験を行った。また電極端面はエメリー紙によって研磨した後、バフ研磨によって鏡面（ $R_y=0.5\mu\text{m}$ 以下）にまで仕上げたものを用いた。なお加工中は加工液中のシリコン粉末の沈殿を防ぐためにポンプによって液を攪拌させた。工作物には熱間金型鋼SKD61、冷間金型鋼SKD11および炭素工具鋼SK3を使用した。これらの化学組成を表3-2に示す。SK3は不純物以外の合金元素を含まない鋼種であるため、熱間加工性は良好で、タップ、ダイス、ゲージ、プレス型などに用いられる。またSKD61、SKD11はいずれも合金工具鋼の一種であるが、熱間加工性は炭素工具鋼にはやや劣る。SKD系材料は焼入れ、焼戻しにより二次硬化するため、プレス型、ダイキャスト型など用途が広い。特にSKD61は熱疲労特性を改善した鋼種でダイキャスト型として多用されている。またSKD11は炭素およびクロムを多く含み、焼入れ後の変形が少なく、炭素量も工具鋼中最も多く耐摩耗性も高い。従ってゲージ、線引きダイス、冷間鍛造型などに用いられる³⁻¹⁰⁾。

表3-1 粉末混入放電加工における加工条件

No-load voltage	$V_0 = 90\text{V}$
Polarity	Electrode : (-)
Discharge current	$I_p = 3\text{A}$
Pulse duration	$\tau_p = 2\mu\text{s}$
Duty factor	D.F. = 10%
Machining fluid	SPMF, Kerosine

表3-2 工作物材料の化学組成

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
SKD 61	0.39	0.93	0.41	5.20	1.28	0.54	Bal.
SK3	1.08	0.37	0.96	0.46			Bal.
SKD11	1.45	0.24	0.40	11.95	0.83	0.24	Bal.

3.2.3 実験結果および考察

3.2.3.1 単発放電痕形状の解析

放電加工は単発放電痕の累積によって加工が進行するために、加工面は放電痕の積み重なった形状となる。図3-4は連続放電面の形成理論を示す模式図である。ある一定範囲内で第n層の加工が終了した後、最後の放電が第n+1層に起こると考える。その時加工面の表面粗さ R_y は、第n層の放電痕の外周部盛り高さ H_2 と放電痕深さ H_1 および第n+1層の放電痕深さ H_1 との和で表される³⁻¹¹⁾。すなわち、

$$R_y = 2H_1 + H_2 \quad \dots \dots \dots (3-2)$$

よって粉末混入放電加工の加工面粗さ、材料除去メカニズムの特性を基礎的に把握するためには、放電痕形状の解析が重要である。そのためまず単発放電実験を行った。

図3-5は加工液に灯油系加工液およびSPMFを用いて単発放電を行ったときの放電痕の表面写真である。加工条件は特徴をより明確にするために放電電流 $I_p=40A$ 、パルス幅 $\tau_p=40\mu s$ と放電エネルギーの大きい条件とした。工作物はSK3である。図より明らかなように、灯油系加工液中

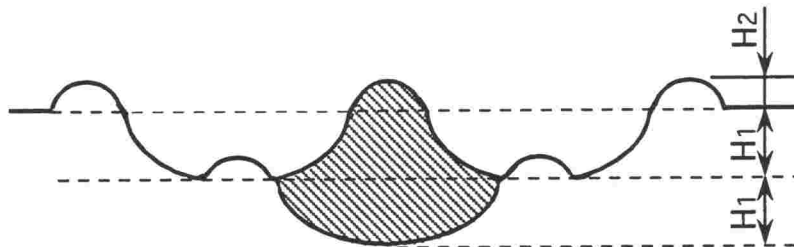
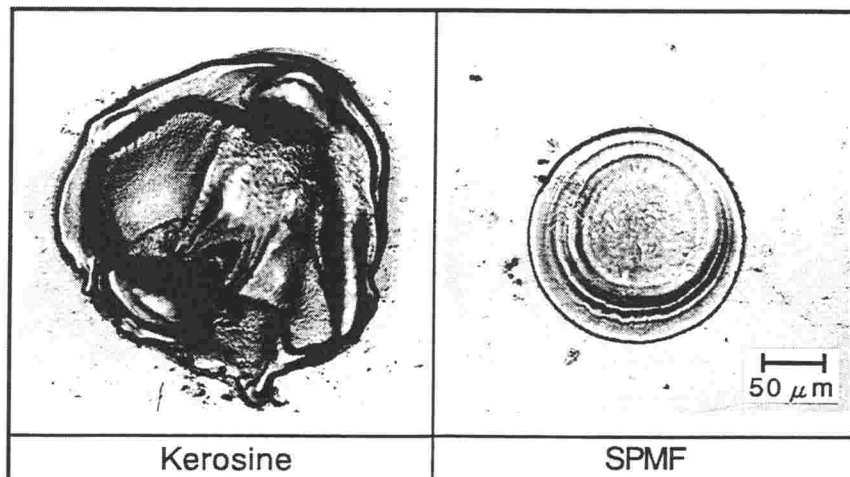


図3-4 放電痕形状が加工面粗さに及ぼす影響³⁻¹¹⁾



SK3, $I_p=40A$, $\tau_p=40\mu s$

図3-5 灯油系加工液およびSPMFを用いた場合の単発放電痕写真

での放電痕は外周の盛り上がり高さが大きく、起伏の激しい形状をしている。これに対してSPMF中の放電痕はきれいな円形になっており、起伏も緩やかで放電痕直径も灯油系加工液中のそれに比べかなり小さくなっていることがわかる。さらにその放電痕は独特の形状をしており、外周の盛り上がり部分の内側にもいくつか盛り上がり部が存在している。従って放電痕の中心から波紋が広がっているように見える。なおここでは示していないが、工作物にSKD11およびSKD61を用いた場合の放電痕もSK3と同様の形状であった。

図3-6は放電痕の三次元図である。これは前章で試作した三次元形状測定機によって測定したものであり、図3-5の顕微鏡写真にそれぞれ対応している。この図からも灯油系加工液中で形成される放電痕の直径はSPMF中のそれよりもかなり大きいことが確認できる。また盛り上がり部分の高さも灯油系加工液の場合にはかなり大きいことがわかる。

図3-7は放電痕深さ H_1 に放電痕外周部盛り上がり高さ H_2 を加えたものと、放電痕盛り上がり部分の直径 D_1 との比 $(H_1+H_2)/D_1$ を示したものである。この値が大きいほど起伏の激しい放電痕であることを示している。図よりSPMFの放電痕は灯油系加工液の放電痕の約3分の1の値になっており、起伏がかなり緩やかになっていることがわかる。また工作物について比較した場合、この値の違いはほとんど見られない。

図3-8はSK3の放電痕を半分に切断したときの表面写真および断面写真である。断面はナイトール液（エチルアルコール90%，硝酸10%）によって腐食を施している。断面写真に現れている放電痕上部の白色部分は白層と呼ばれるもので、工作物が放電にともなって発生する熱によって一度熔融し、その後加工液によって冷却され再凝固した層である。鉄鋼材料では灯油系加工液中の放電によって加工液が分解して生じた炭素が高温高圧の下で工作物へ浸炭し、また放電の熱によって熔融した材料の加工液による急激な冷却により硬度の高い白層³⁻¹²⁾を形成する。これはマルテンサイトおよび未溶解炭化物からなっている³⁻¹³⁾。図より明らかのように灯油系加工液の放電痕は、放電によって熔融部分が吹き飛ばされて工作物が除去されている。これに対し

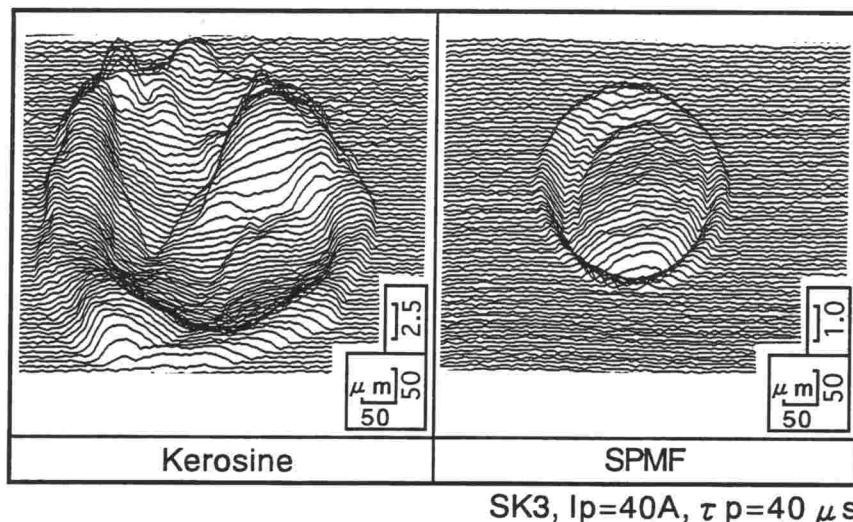


図3-6 単発放電痕の三次元図

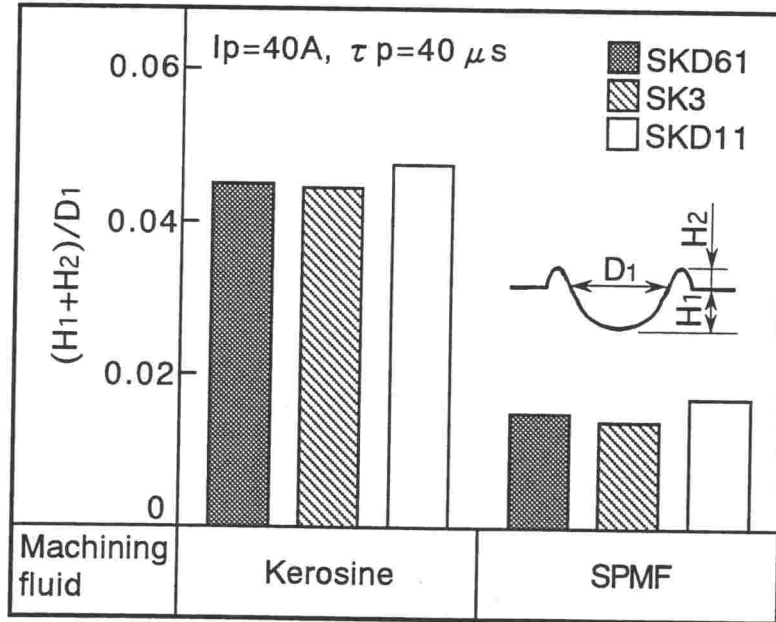
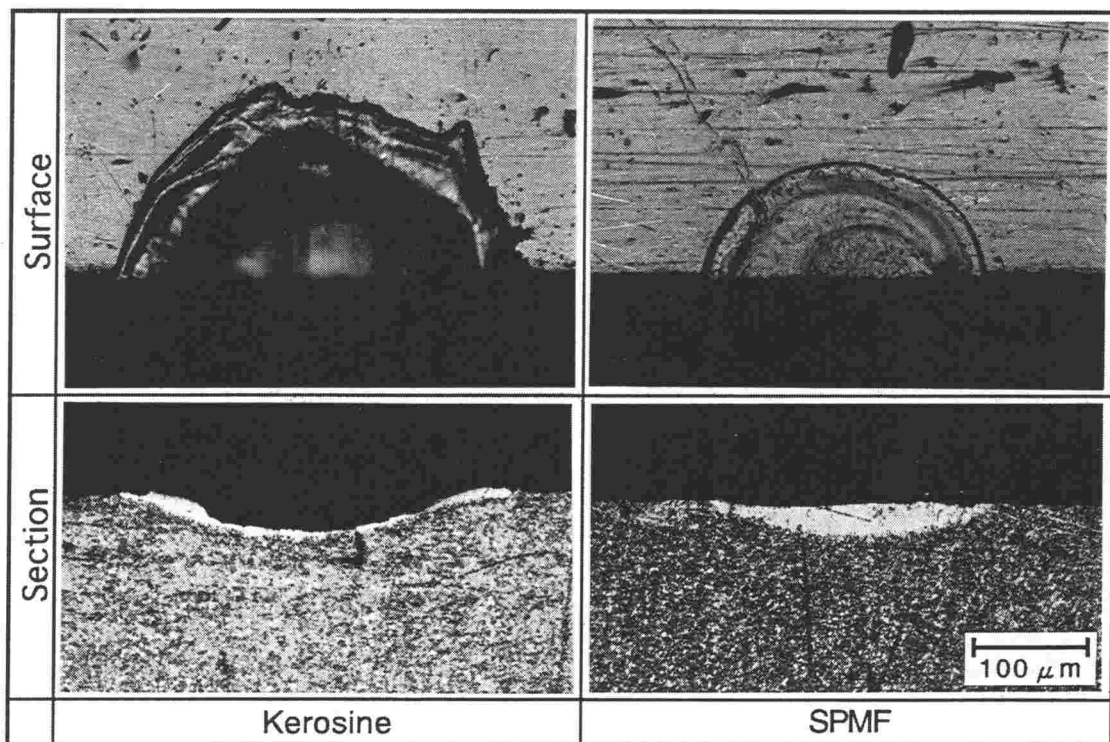


図3-7 加工液による放電痕形状の比較



SK3, $I_p=40A$, $\tau_p=40 \mu s$

図3-8 放電痕表面および断面写真

てSPMFの放電痕は溶融部分がほとんど除去されておらず、その結果厚い白層部分が多く残存していることがわかる。

3.2.3.2 極間距離の測定

同一の加工条件においても灯油系加工液中とSPMF中では、放電痕形状に前述のような差異が生じる要因について次に検討を行った。

図3-9は、単発放電実験において放電が生じた際の工具電極と工作物の位置関係を模式的に表したものである。加工条件は後述する連続放電実験条件である放電電流 $I_p=2A$ 、パルス幅 $\tau_p=3\mu s$ とした。図より明らかなように、灯油系加工液の場合は極間距離が $17\mu m$ 、SPMFの場合が $92\mu m$ となっており、SPMFの場合は極間距離が約5.4倍に広がったことがわかる。SPMFは前述のように灯油系加工液と比較すると比抵抗が小さいことや、電界中の微粒子の往復運動および柱状集積のため^{3-14) 3-15)}、このように極間距離が大きくなると考えられる³⁻¹⁶⁾。さらにこのため、放電の際に加工液の気化膨張に伴って工作物に作用する衝撃力も大きく異なるものと考えられる。すなわち極間に投入される同じエネルギー量に対して灯油系加工液の場合は、極間距離が小さいため工作物に与える単位面積当たりの衝撃力が大きく、溶融部分を吹き飛ばして放電痕を形成するために、起伏の激しい不規則な形状のクレータとなるのに対して、SPMFの場合極間距離が大きいため、溶融部分を十分に飛散させるだけの衝撃力が得られず、溶融部分を外周方向に押しやるだけとなり、きれいな円形になると考えられる。

この推論を検証するため、単発放電の際に工作物に作用する衝撃力の測定を試みた³⁻¹⁷⁾。図3-10はその測定装置の模式図である。衝撃力の測定には水晶圧電式動力計（Kistler社製 9211、固有振動数200kHz）を用いた。図に示すように工作物に作用する放電衝撃力をプラスチックの板（板厚1mm）を通して動力計で検出する。またこの際の放電電流も同時に測定した。なお衝撃力の違いをより明確にするために、加工条件を放電電流 $I_p=40A$ 、パルス幅 $\tau_p=40\mu s$ と放電エネルギーの大きい条件とした。

図3-11は衝撃力 F と放電電流 I_p の時間的变化を示している。図より明らかなように、放電電流の波形は両者ともほとんど同じであるが、衝撃力には大きな差が認められる。すなわち灯油系加工液の場合は放電が開始されると約 $3\mu s$ 後に衝撃力が作用し始め、時間とともに急激に増加

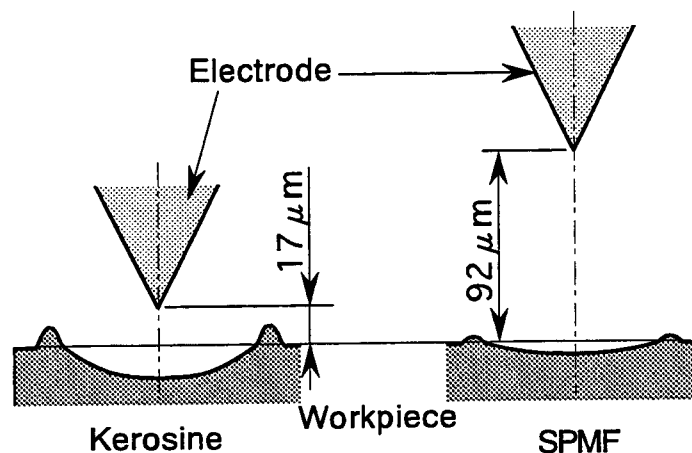


図3-9 放電発生時の極間距離

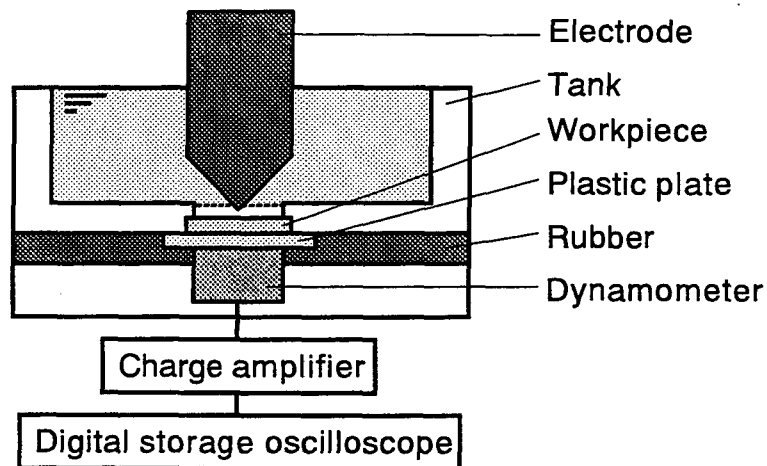


図3-10 放電衝撃力測定装置

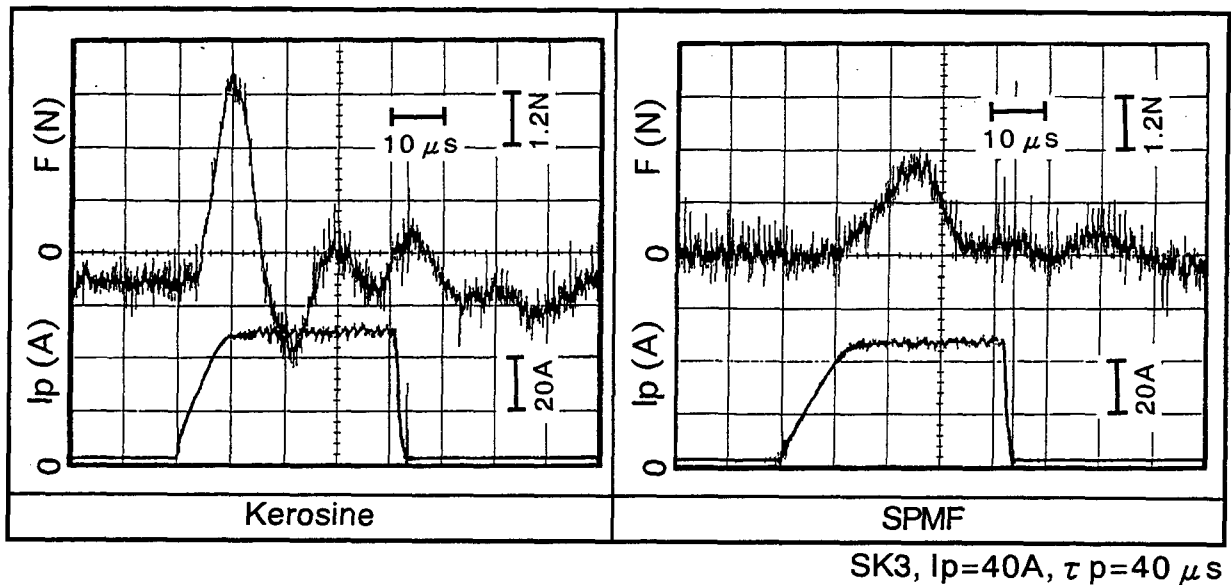


図3-11 衝撃力および放電電流波形

し、放電開始から約 $10\mu s$ 後に衝撃力は最大となる。一方SPMFの場合は放電が開始されると約 $10\mu s$ 後に衝撃力が作用し始め、放電開始から約 $25\mu s$ 後に最大衝撃力をとる。また灯油系加工液の場合の最大衝撃力はSPMFのそれよりも大きくなっている。以上のように極間距離が異なることによって、工作物に作用する衝撃力には大きな違いを生じることが確認された。

以上の単発放電における結果から、加工液にSPMFを使用すると工作物に作用する衝撃力が減少するため、起伏の小さい滑らかなクレータが得られることが確認された。また工作物材質の相違による放電痕形状の変化はほとんどないため、連続放電においても加工液にSPMFを用いれば、いずれの工作物においても粗さの小さいきれいな加工面を得ることができるものと推測される。

3.2.3.3 加工の安定化

図3-12はそれぞれの工作物，加工液における加工速度を示す。いずれの工作物においても加工液にSPMFを使用したほうが灯油系加工液の場合よりも加工速度は大きいことがわかる。前述の単発放電実験においては，SPMF中の放電痕は溶融部分が飛散されず，灯油系加工液中のそれよりも除去体積は小さかった。その結果から考慮すると，加工速度はSPMFを用いた場合のほうが小さいはずである。しかし実際には逆の傾向を示している。その原因は以下のように考えられる。

図3-13は連続放電の際に観察された極間電圧および放電電流波形である。加工条件は放電電流 $I_p=3A$ ，パルス幅 $\tau_p=2\mu s$ ，D.F.=10%である。なお工作物はSK3であるが，SKD61，SKD11の場合の波形もこれと同様のものではあった。図より明らかなように，灯油系加工液の場合は設定値どおりの波形とはいえず，加工状態が不安定である。仕上げ条件においては放電エネルギーの小さい条件で加工を行うために極間距離が小さく，加工粉や気泡によって極間の状態は悪化しやすい。そのため図に見られるように，放電が不安定となりやすい。これに対しSPMFの場合は設定値どおりの波形が確認でき，非常に安定した加工状態であるといえる。これはシリコン粉末が極間に存在することによって前述したように極間距離を広げ，さらに放電の集中を防止している効果であると考えられる。従ってSPMF中のほうが灯油系加工液中より放電痕一発当たりの除去量は小さいが，単位時間当たりの放電発生回数も多く，また加工状態が非常に安定しているため，図3-12に見られたように，SPMF中のほうが加工速度が大きくなると考えられる。

図3-14はそれぞれの工作物，加工液における電極消耗率を示す。いずれの工作物においても灯油系加工液中よりもSPMF中のほうが電極消耗率は大きい。これについてはその要因は明らかで

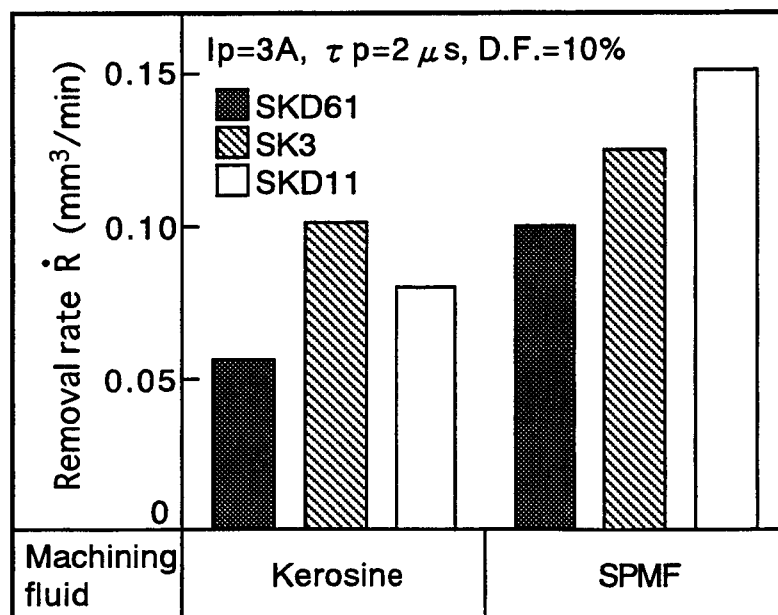


図3-12 加工液および工作物による加工速度の違い

ないが、加工液中にシリコン粉末が存在するため、あるいはそれによって極間距離が増大するために、電極側へ配分される放電エネルギーが大きくなるのではないかと考えられる³⁻⁹⁾。

3.2.3.4 加工面性状

図3-15は加工面の10点平均粗さを示す。図より明らかなようにSPMFの場合のSKD61の加工面は $Rz=0.44\mu\text{m}$ と非常に粗さの小さい滑らかな面となっており、灯油系加工液のそれと比較して

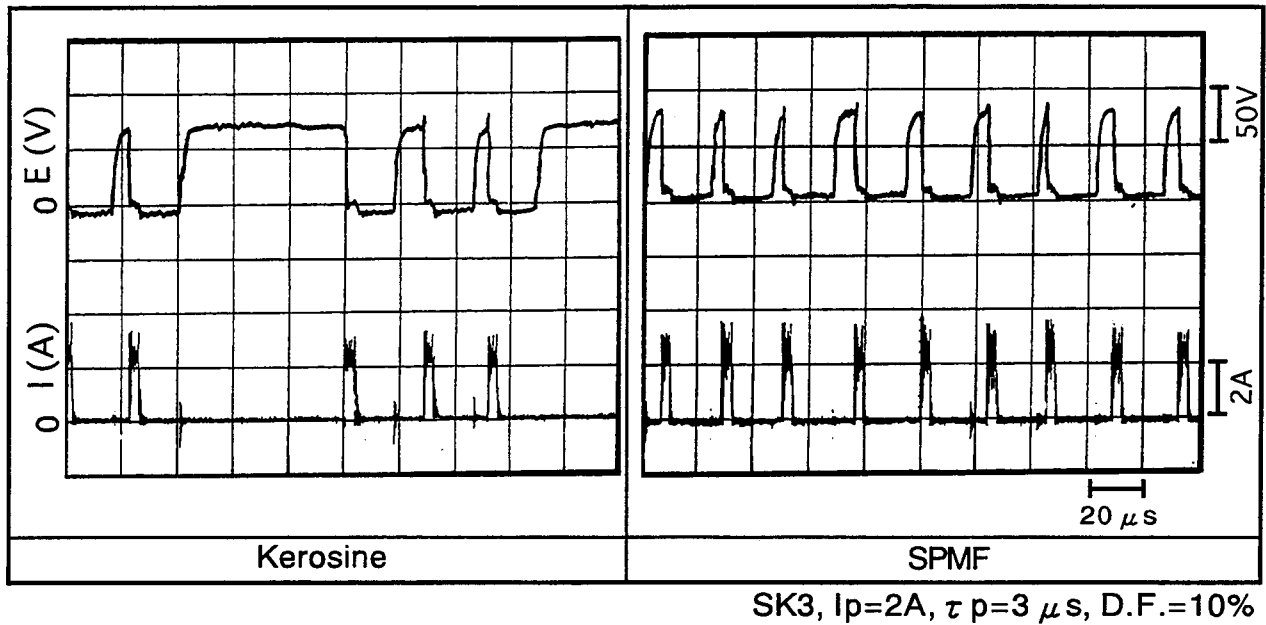


図3-13 加工液による極間電圧および放電電流波形の違い

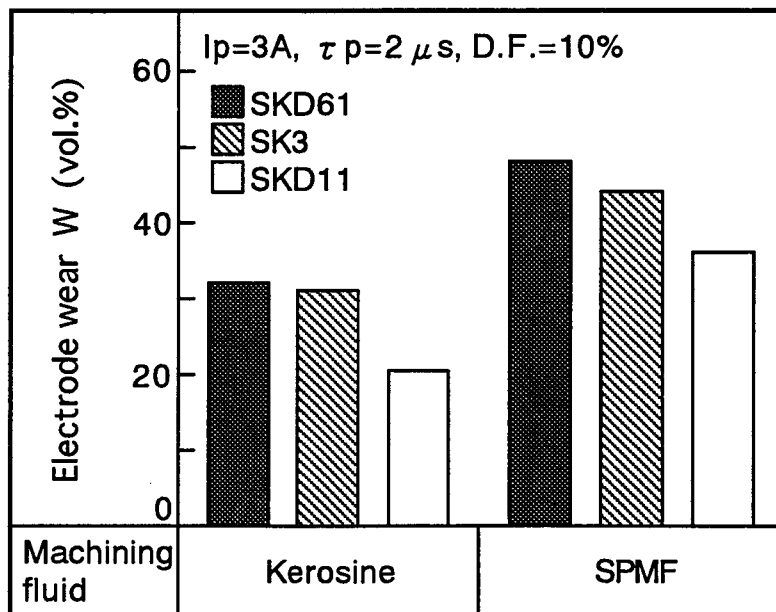


図3-14 加工液および工作物による電極消耗率の違い

約4分の1になっている。またSK3, SKD11についてもSPMF中で加工を行った場合のほうが加工面粗さは7~8割程度改善されている。単発放電実験においては、その放電痕形状に工作物材質による差は見られなかったのに対して、連続放電の場合には図に見られるように、工作物によってその粗さは大きく異なる。すなわちSPMF中で加工を行った場合、SKD61の値が最も小さく、次いでSK3, SKD11の順に大きくなり、SKD11ではSKD61の約8倍の大きさとなっている。

図3-16はそれぞれの工作物、加工液で加工を行った場合の加工断面写真である。いずれの工作物においても加工面上部には白層が形成されている。そしてSPMFを使用することによって灯油系加工液よりも厚い白層が得られることがわかる。特にSKD61, SK3の白層は均一で、クラックのほとんどない良好な加工面である。しかし灯油系加工液を使用した場合の白層は不均一で、しかもいずれの工作物においてもクラックが観察される。SKD11のSPMFを使用した場合の加工面には大きな凹み部分が存在し、均一であるとはいえない。

図3-17はSPMF中で連続放電後の、各々の工作物の加工表面写真および断面曲線である。表面写真上の中央の横線は触針式検出子の軌跡を示しており、それぞれの断面曲線に対応している。図よりSKD61の加工面は粗さの小さい非常に滑らかな面であり、表面写真からもその様子が確認できる。また単発放電実験の際に観察された多重円の放電痕も観察される。これに対してSK3, SKD11の加工面には黒色の陥没部分が多数存在している。特にSKD11の加工面には陥没部分が多く、これが表面粗さを大きく悪化させている要因になっていることが明らかである。

以上より連続放電においてはSPMF中であっても、工作物の材質によって加工面粗さや面性状が大きく異なり、必ずしも面粗さが大きく改善され、均一な白層が得られるわけではないことが明らかとなった。以下この原因について考察を行った。

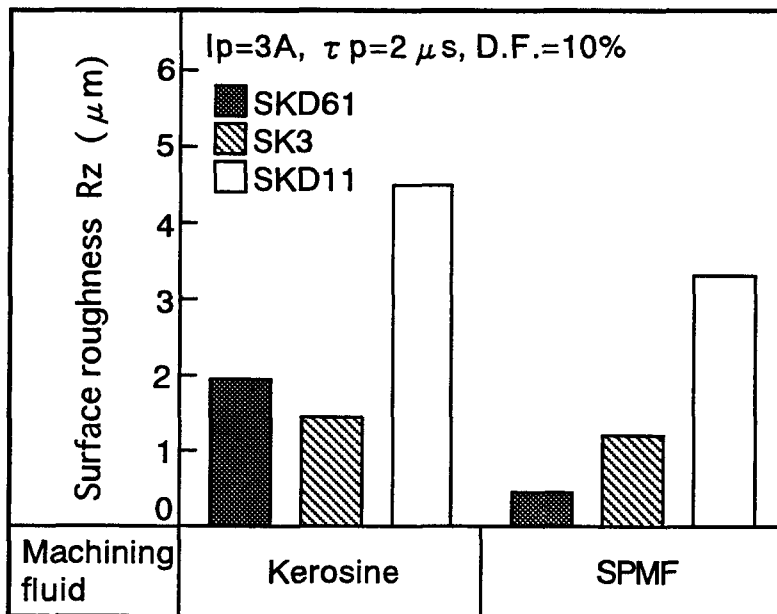


図3-15 加工液および工作物による加工面粗さの違い

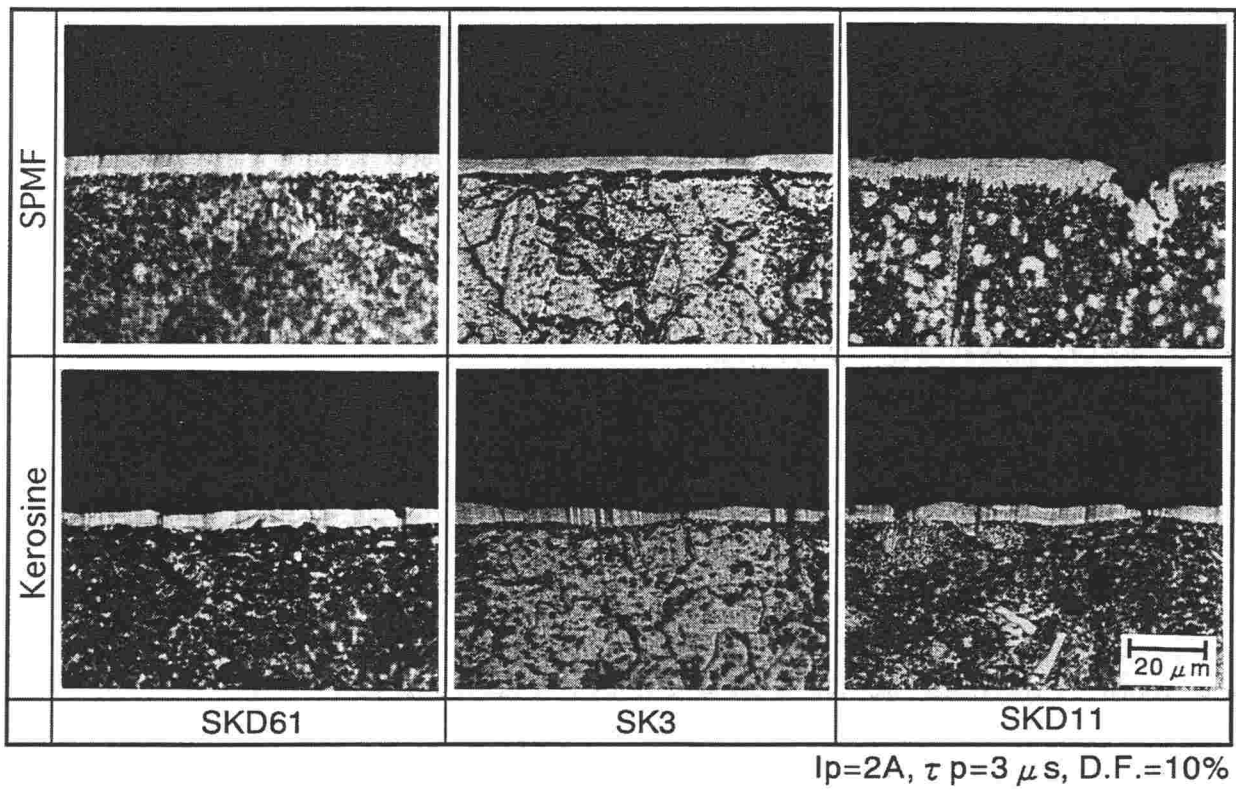


図3-16 各種工作物の放電加工断面

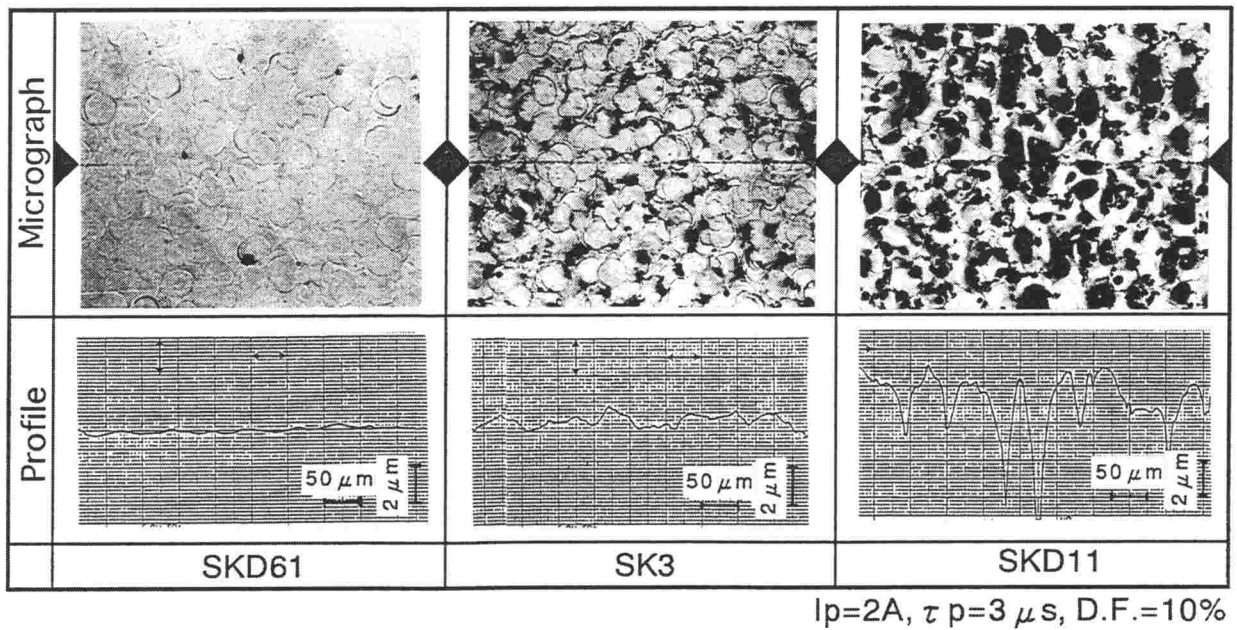
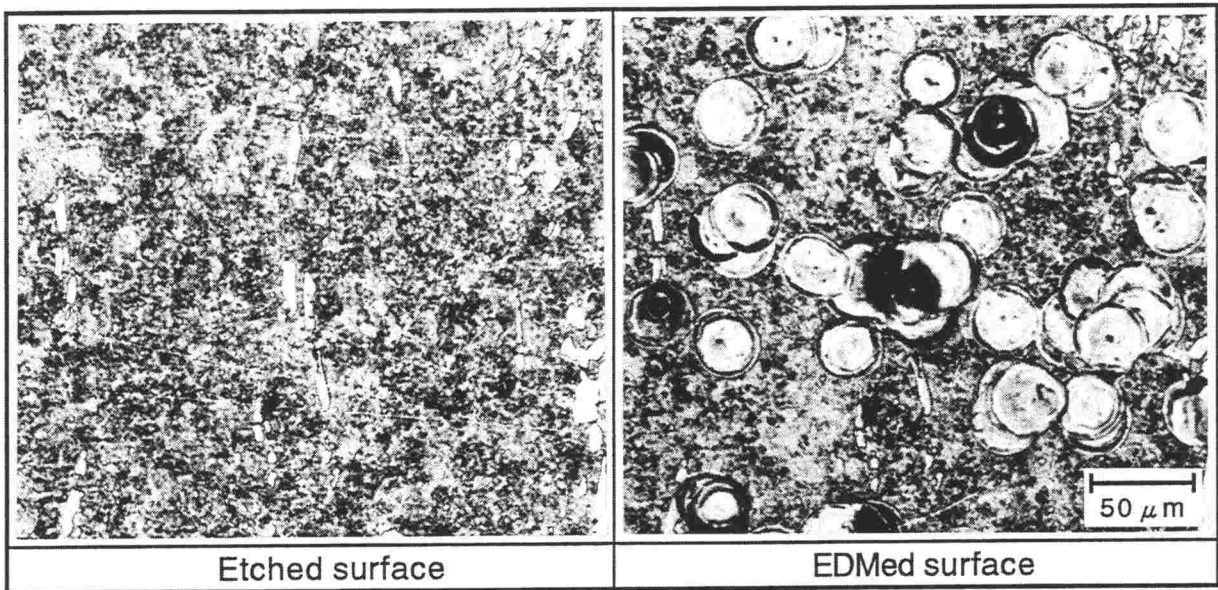


図3-17 粉末混入放電加工における各種工作物の加工面写真と表面プロファイル

3.2.3.5 加工面生成機構

図3-18はSKD11の加工前の腐食面写真および同一場所の30秒間加工後の放電面写真である。腐食面にみられる白色部分は炭化物である。この二つの写真を詳細に比較検討すると、もともと炭化物が存在していた地点付近にいくつかの放電が発生した場合、炭化物が脱落していることがわかる。放電痕の重なり具合から判断すると、図3-19に示すような過程で炭化物が脱落すると考えられる。すなわち3つの放電痕が生成され、これらの放電痕生成過程のうち、どこかの段階で炭化物が脱落していると推定することができる。

図3-20は、SKD11の放電加工面および腐食後の断面写真である。図より黒色の陥没部分には白層がなく、その深さは放電の熱によって溶融除去されるクレータの深さよりもかなり深い。従って炭化物は放電の熱によって溶融除去されるのではなく、放電によって工作物に作用する衝撃力によって脱落したものと考えられる。



SKD11, $I_p=3A$, $\tau_p=2 \mu s$, D.F.=10%

図3-18 加工前の腐食面と放電加工面

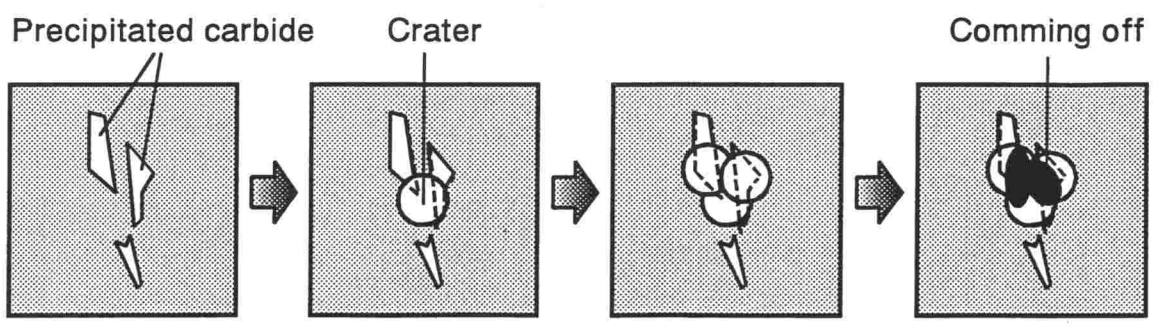


図3-19 炭化物脱落メカニズム

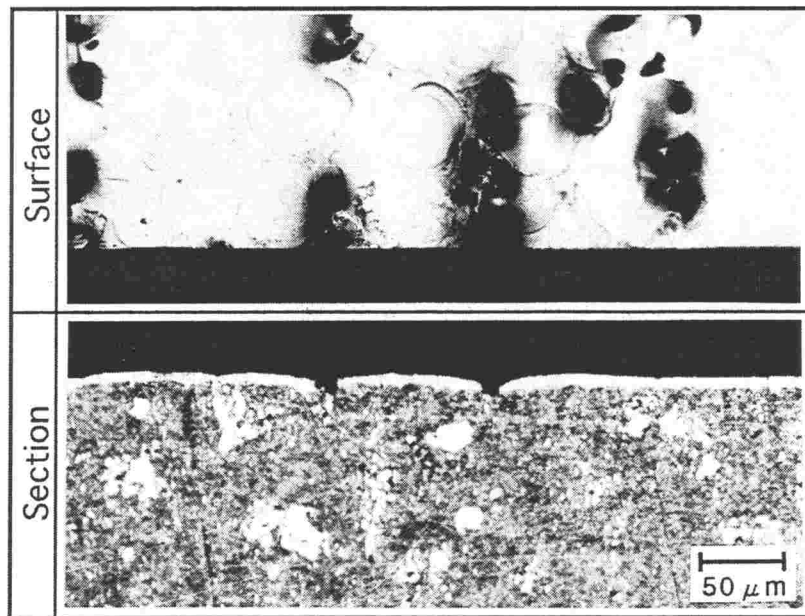
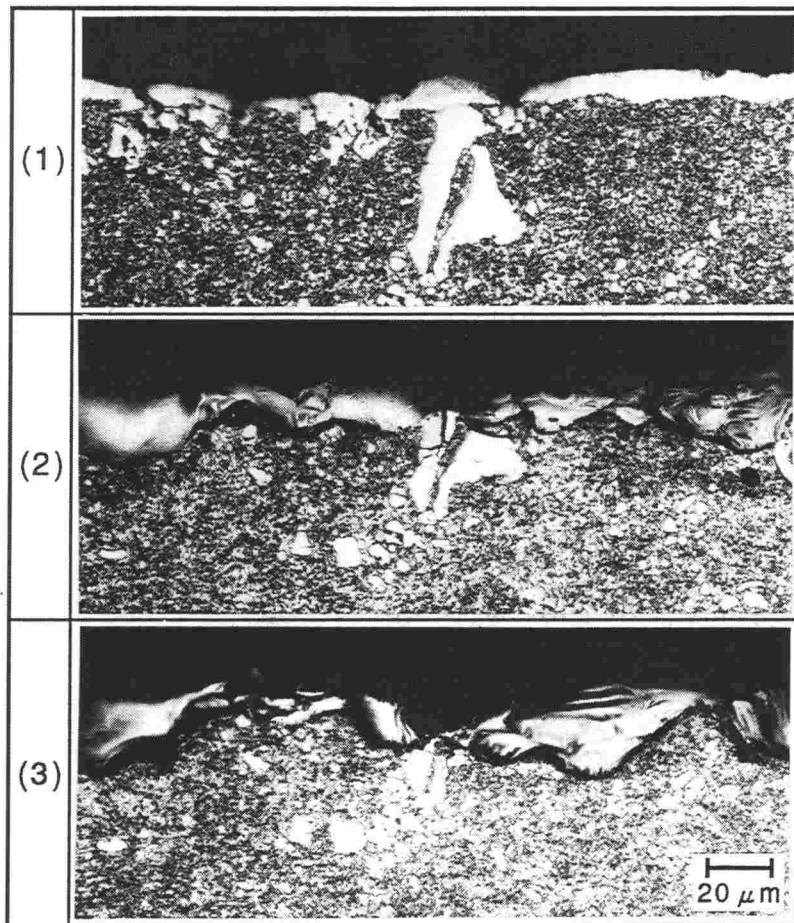
SKD11, $I_p=3A$, $\tau_p=2 \mu s$, D.F.=10%

図3-20 放電加工面と加工断面

図3-21はSKD11において炭化物が脱落していく過程を実際に観察したものである。この図は同一試料を時間を追って観察したものであり、あらかじめ断面を腐食していた試料に対し、表面の加工、断面の観察を繰り返して行ったものである。まず(1)に見られる中央の大きな炭化物に注目する。1分間加工を行った(2)の段階で、炭化物にクラックが生じているのが確認できる。そしてさらに1分間加工を行った後の(3)の段階では炭化物が脱落し、その部分は陥没している。このことから、放電の際の急激な温度上昇によって炭化物と母材の間には大きな熱膨張の差が生じ、その結果として生じる熱応力によって炭化物と母材との境界あるいは炭化物中にクラックが発生する。そして次にこの炭化物周辺に放電が起こった際、その衝撃力によってクラック部分から炭化物が脱落すると考えられる。

図3-22は放電加工面に任意に $500 \mu m$ 四方をとり、その領域において陥没部分が占める面積の割合を示したものである。図より明らかなように、SKD61は加工液にSPMFを用いた場合、ほとんど陥没部分は存在しない。しかし灯油系加工液の場合は陥没部分が幾分見られる。また陥没部分が最も多いSKD11でも、SPMFを用いたほうが陥没部分は減少する。

図3-23は各工作物の腐食面写真である。SKD61は凝集した大きな炭化物の存在しない細かい組織をしているのに対し、SK3およびSKD11には炭化物の塊が見られる。特にSKD11には大きな炭化物の塊が存在している。このような炭化物の分布状態が、粉末混入放電加工面の性状に大きな影響を与えていることがわかる。



SKD11, $I_p=3A$, $\tau_p=2\mu s$, D.F.=10%

図3-21 炭化物脱落の様子

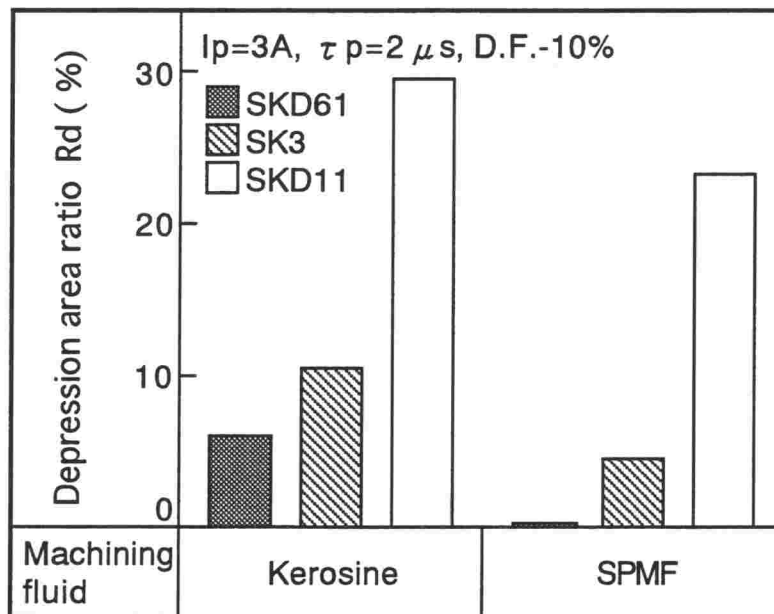


図3-22 陥没部分面積率

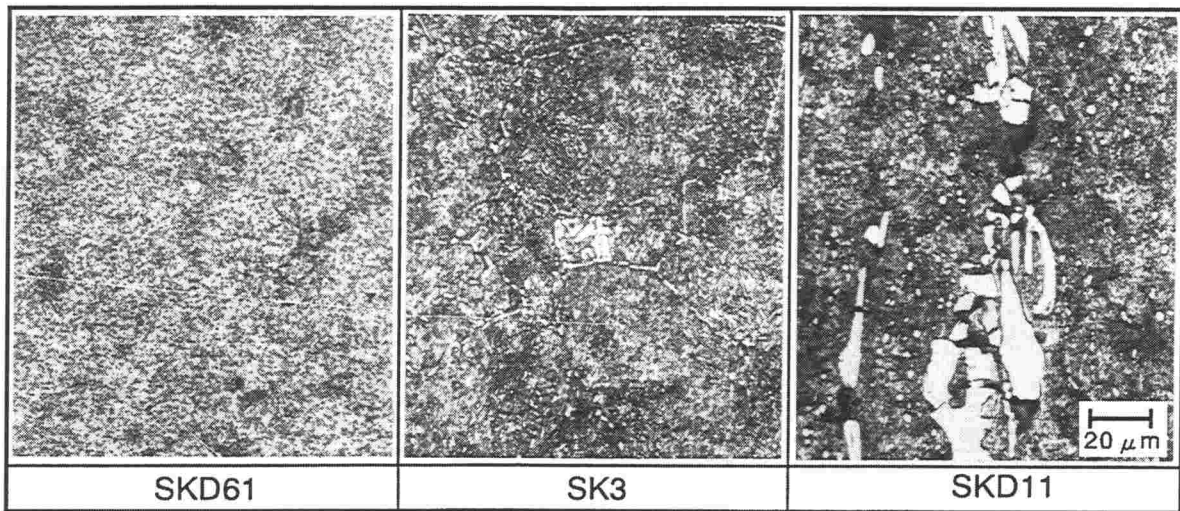


図3-23 工作物表面の腐食面

3.2.3.6 工作物の炭化物分布の影響

前述のように、工作物材質によるシリコン粉末放電加工における仕上げ面性状の違いは、工作物の炭化物の分布状態に大きく依存する。そこで次に工作物中の炭化物の大きさ、含有量、分散状態が加工面特性に及ぼす影響について検討を行った。

表3-3に使用した工作物の炭素含有量および炭化物の大きさを示す。DC53（大同特殊鋼製）、SLDおよびSLD2（日立金属製）はいずれも冷間金型鋼SKD11に相当するものであり、工作物中の炭化物を微細化するなどの組織的な改良が施されている。表より明らかのように、炭素含有量はDC53では多少少ないが、SLDおよびSLD2はSKD11と同等である。また図3-24はそれぞれの工作物の腐食面写真である。図より明らかのように炭化物の大きさはDC53が最も小さく、また偏りが少なく分散している。次いでSLD、SLD2順に炭化物の大きさは小さい。SKD11の場合は大きな炭化物が認められ、さらにそれらは偏って存在している。

まず、通常の灯油系加工液を用いた比較的放電エネルギーの大きい条件で放電加工を行い、これらの工作物の加工特性について検討した。その加工条件を表3-4に示す。

図3-25は通常の加工条件下での加工速度とパルス幅の関係を示す。図より工作物の違いによる加工速度の明確な違いは見られない。いずれの工作物もパルス幅の増加とともに加工速度は増

表3-3 工作物材料の炭素含有率および炭化物の大きさ

	DC53	SLD	SLD2	SKD11
Carbon content rate (%)	0.95	1.40	1.45	1.40
Size of carbide (μm)	5~15	8~20	10~30	10~70

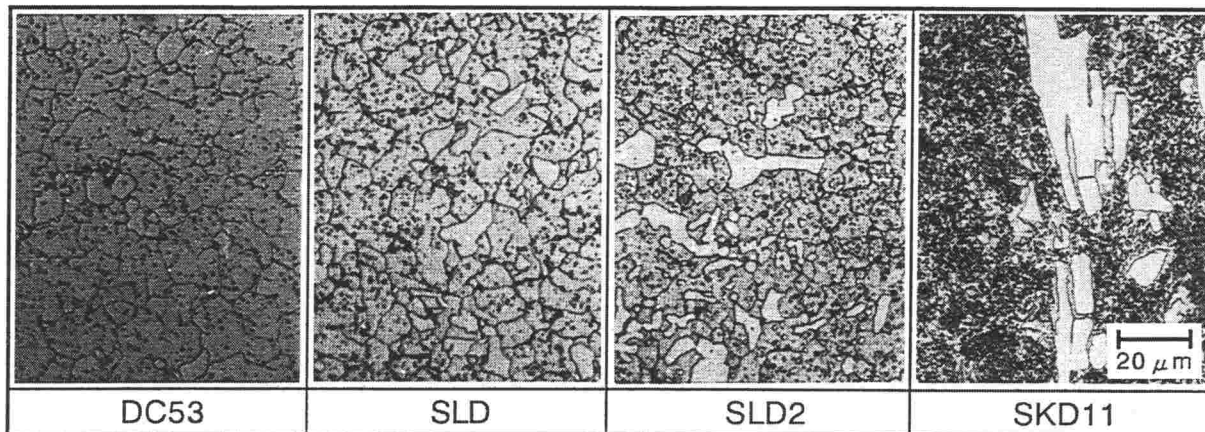


図3-24 各種工作物の炭化物の大きさ

表3-4 加工条件

No-load voltage	$V_0 = 120V$
Polarity	Electrode : (+)
Discharge current	$I_p = 30A$
Pulse duration	$\tau_p = 4 \sim 100 \mu s$
Duty factor	D.F. = 50%
Machining fluid	Kerosine

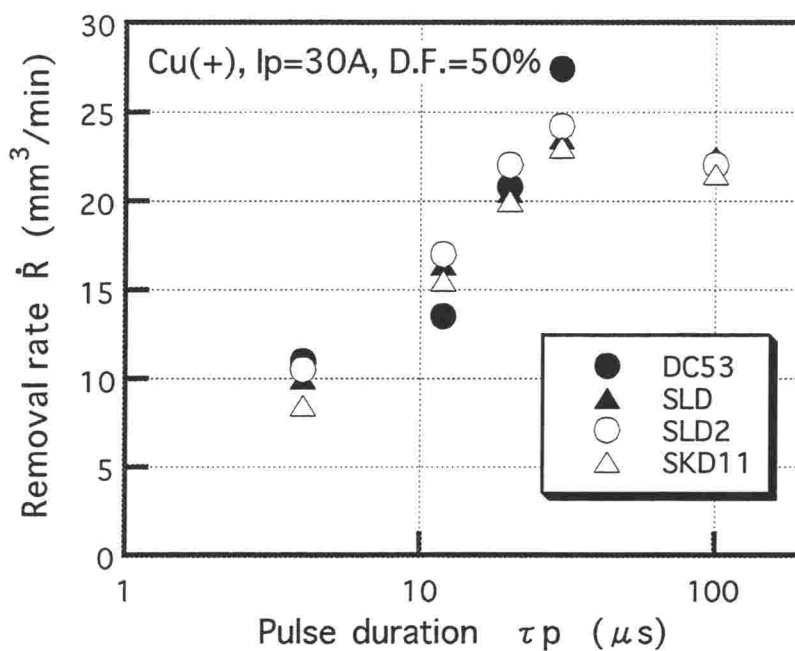


図3-25 各種工作物の加工速度とパルス幅の関係

加し、 $30\ \mu\text{s}$ 付近で最大となる。また図3-26は電極消耗率の変化を示す。電極消耗率においても工作物材質による違いは認められず、いずれの工作物においてもパルス幅の増加とともに低下していき、パルス幅が $100\ \mu\text{s}$ で約1%の電極低消耗加工が可能となっている。

以上のように、灯油系加工液を用いた通常の加工条件においては、工作物中の炭化物の大きさ、分散状態の加工特性に及ぼす影響はほとんどない。

次に、シリコン粉末混入加工条件下での工作物材質による加工特性の違いについて検討した。加工条件は表3-2と同様であるが、ここでは電極には揺動運動を与えていない。また加工液の攪拌をより良好にするために、攪拌機を用いた。

図3-27は加工速度の違いを示す。図より明らかなように、すべての工作物においてSPMFを用いることによって灯油系加工液よりも加工速度が約2倍になっている。これは前述のしたように、SPMFを用いることによって、加工速度低下の要因である放電の集中を防止し、放電の分散した安定した加工状態によるものと考えられる。また工作物について比較した場合、DC53の加工速度が他と比較して特に小さいことがわかる。これは炭化物を有する工作物の場合、放電による溶融除去とともに放電の際の衝撃力による炭化物の脱落除去によって加工が進行するため、炭化物の少ないDC53の場合、炭化物の脱落による除去が必然的に減少し、相対的に加工速度が小さくなったものと考えられる。

図3-28は同条件下での電極消耗率を示す。いずれの工作物においてもSPMFを用いることで電極消耗率は若干増加する。またDC53のみ消耗率が40%程度と大きいことがわかる。DC53の場合、炭化物の脱落が少なく、加工速度が相対的に少ないために、加工量に対する電極消耗率は大きくなると考えられる。

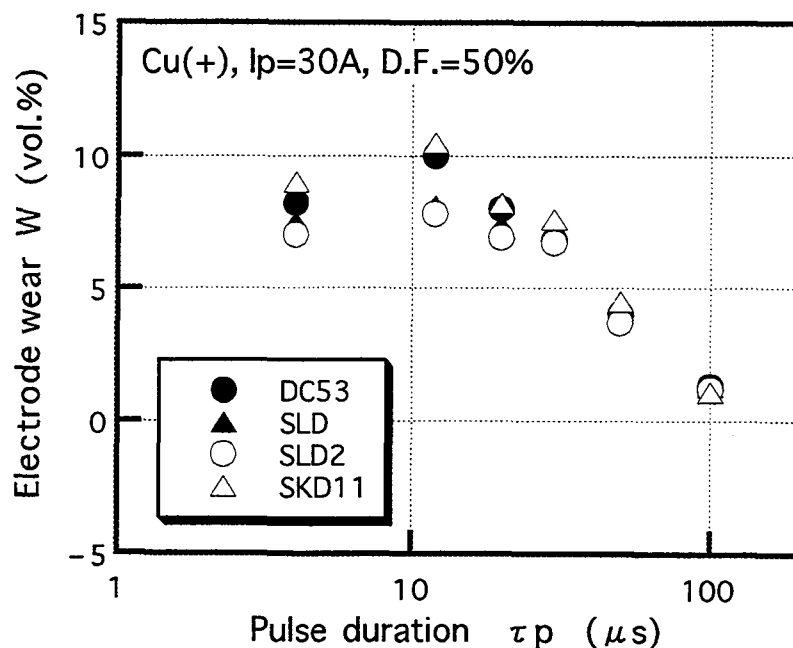


図3-26 各種工作物の電極消耗率とパルス幅の関係

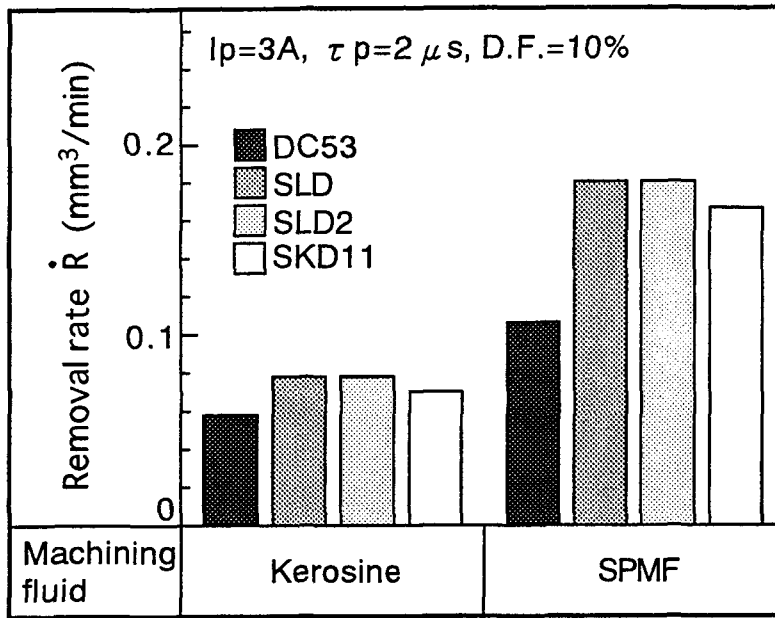


図3-27 仕上げ条件における加工速度の違い

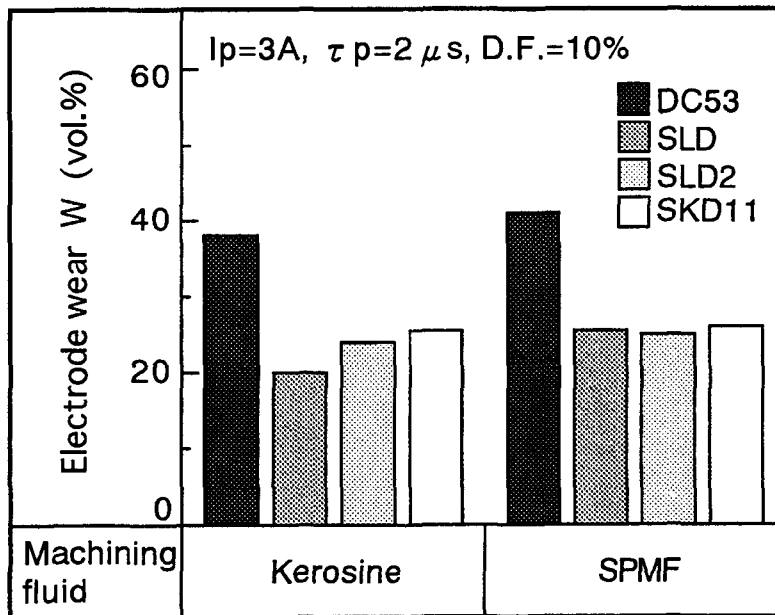


図3-28 仕上げ条件における電極消耗率の違い

図3-29は加工面の10点平均粗さを示したものである。図より明らかなようにいずれの加工液においてもDC53が最も粗さが小さく、次いでSLD, SLD2, SKD11の順に粗さが大きくなっている。この粗さの傾向は炭化物の大きさとよい対応を見せている。すなわち、放電エネルギーの小さい加工条件では放電一回の材料除去量は小さく、炭化物の脱落による加工面形成が加工面粗さに大きく影響してくるため、炭化物の大きさに比例した加工面粗さが得られるものと考えられ

る。またDC53以外はSPMFを用いても著しい加工面粗さの改善は図れないことがわかる。このことから放電の熱による熔融除去よりも、炭化物の脱落によって粗さが形成されることが明らかである。

図3-30は、灯油系加工液およびSPMF中で加工を行った場合のそれぞれの工作物の加工断面写真である。灯油系加工液を用いた場合には、いずれの工作物においても炭化物の存在しない部分の再凝固層中にマイクロクラックが発生しているが、SPMFを用いるとこのマイクロクラックの発生を抑えることができる。しかし大きな炭化物の存在する部分ではSPMFを用いても炭化物の脱落が観察される。また、炭化物を微細化してもその脱落を防ぐことはできないが、微細化、

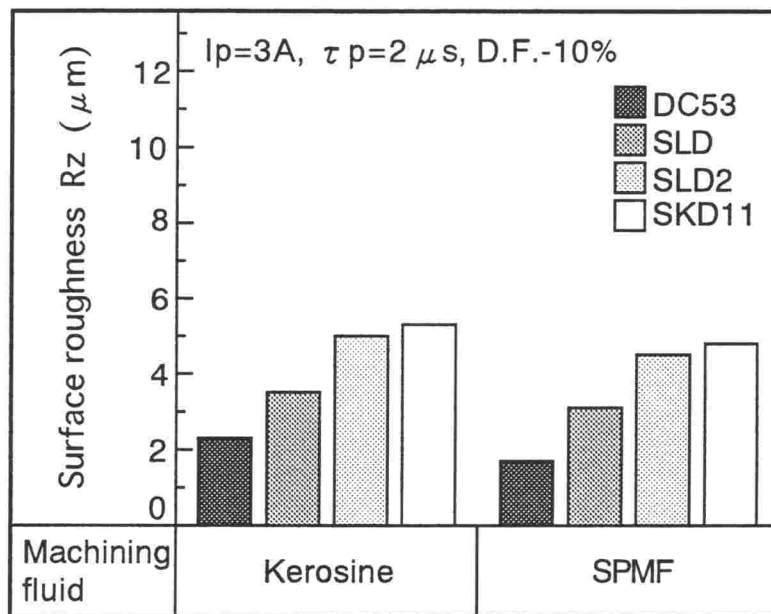


図3-29 仕上げ条件における加工面粗さの違い

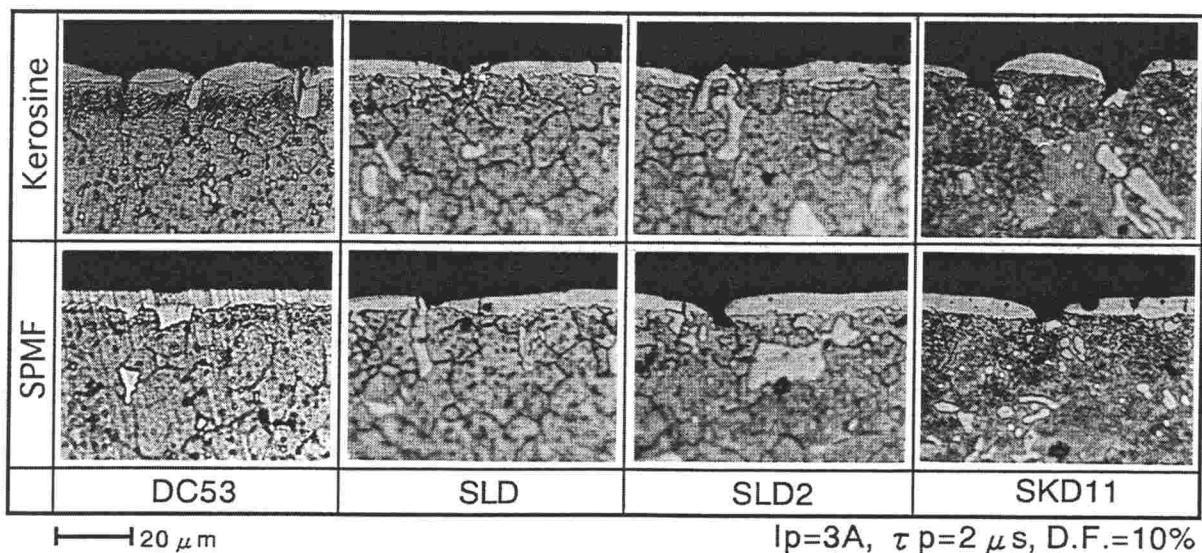


図3-30 各種工作物の放電加工断面

分散化される分、陥没深さは浅く、陥没部分を減少させることが可能である。DC53においては炭化物が存在する部分においても脱落が起こっていない部分が若干存在する。

図3-31は、SPMFによって粗さの改善の効果を示さなかったSLD、SLD2およびSKD11を用いて加工を行った場合の、加工液中のシリコン粉末濃度が加工面粗さに及ぼす影響を示す。図より明らかなように、いずれの工作物においても加工液中のシリコン粉末濃度を変化させても加工面粗さはほとんど変化せず、それぞれある一定値をとる。そしてそれらの値は炭化物の大きさによく対応している。

以上のようにSKD11相当の各種金型鋼では炭化物を微細にし分散させることによって、加工面粗さを多少向上させることができるが、炭化物の量自体が減少しなければ、シリコン粉末混入放電加工による鏡面加工の実現は困難であることが明らかとなった。

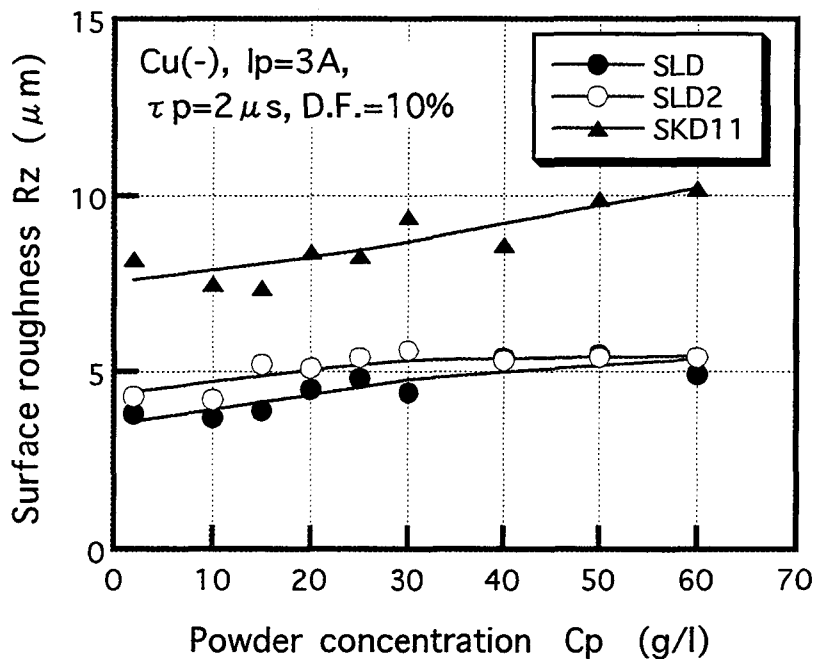


図3-31 粉末混入放電加工における加工面粗さと粉末濃度の関係

3.3 結 言

本章では加工液にシリコン粉末を混入した加工液を用い、その加工特性、加工メカニズムについて実験的検討を行った。また工作物中の炭化物の大きさ、分散状態が粉末混入放電加工特性に及ぼす影響についても検討を加えた。本章で得られた結論は以下の通りである。

- (1) シリコン粉末混入加工液の比抵抗が灯油系加工液よりも低いことや電界中の微粒子の往復運動および柱状集積のため、シリコン粉末混入放電加工では極間距離は大きくなる。
- (2) シリコン粉末混入加工液の場合、極間距離の増大のために工作物に作用する放電衝撃力が小さくなる。このため単発放電痕は起伏の小さいきれいな円形状になるとともに加工表面に残留する再凝固層も厚くなる。
- (3) 工作物中の炭化物の塊が多いほど表面粗さは大きくなる。これは放電加工中の熱衝撃によるクラック伝播のために炭化物が工作物から剥がれ落ち、その部分が陥没するためである。
- (4) 炭化物を多量に含む工作物においては、加工液中のシリコン粉末の濃度は加工面粗さに影響を与えない。
- (5) シリコン粉末混入放電加工では、極間距離を広げることができ、それによって放電の集中が起こりにくく安定した加工が可能となり、加工速度の増大を図ることができる。

参考文献

- 3-1) 國枝正典：放電加工における放電点分布の観察，精密工学会誌，**57**，6（1991）941.
- 3-2) 毛利尚武，斎藤長男，成宮久喜，河津秀俊，尾崎好雄，小林和彦，恒川好樹：粉末混入加工液による放電仕上加工，電気加工学会誌，**25**，49（1991）47.
- 3-3) 斎藤長男，毛利尚武：大面積放電加工における仕上げ面粗さの向上，精密工学会誌，**57**，6（1991）954.
- 3-4) H.Narumiya, N.Mohri, N.Saito, H.Ootake, Y.Tsunekawa, T.Takawashi and K.Kobayashi：EDM by Powder Suspended Working Fluid, Proc. of ISEM-9（1989）5.
- 3-5) 鈴木正彦，毛利尚武，斎藤長男：放電加工による金属表面の改質，精密工学会誌，**53**，2（1987）51.
- 3-6) 上田順弘，佐藤幸弘，増井清徳，宮谷保太郎，山崎雄司：シリコン粉末添加放電加工による加工面の機能性向上，電気加工技術，**19**，62（1995）19.
- 3-7) 宇野義幸，岡田晃，亀川出：粉末混入放電加工における表面生成機構の研究，電気加工学会誌，**29**，62（1995）9.
- 3-8) A.Okada and Y.Uno：Surface Generation Mechanism in Electrical Discharge Machining with Silicon Powder Mixed Fluid, Proc. of ICPE'95（1995）537.
- 3-9) 佐藤敏一：特殊加工，養賢堂（1981）28.
- 3-10) 日本金属学会：金属便覧，丸善株式会社（1960）508.
- 3-11) 斎藤長男：放電加工メカニズム，精密機械，**29**，10（1963）691.
- 3-12) 井上潔：放電加工の原理，ジャパックス（1979）123.
- 3-13) 斎藤長男：放電加工の仕組みと100%活用法，技術評論社（1979）60.
- 3-14) 須田孝，佐藤登志夫：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，**7**，14（1974）19.
- 3-15) M.Kunieda and K.Yanatori：Study on Debris Movement in EDM Gap, IJEM, **2**（1997）43.
- 3-16) 増沢隆久，佐田登志夫，木下夏夫：放電微細加工における加工屑の役割，精密機械，**37**，9（1971）680.
- 3-17) 宇野義幸，遠藤修，中島利勝：単発放電痕の生成機構に関する基礎的研究，電気加工学会誌，**25**，49（1991）9.

第4章 回転円板電極を用いた放電溝加工の高精度化

4.1 緒言

放電加工では工具電極と工作物間の間隙が非常に狭いため、加工により生じる加工粉や気泡が極間に滞留しやすく、これが異常アークの発生や炭素生成物の成長などを引き起こして、放電状態が不安定になりやすい。特に深穴やアスペクト比の大きい形状の場合には、この傾向が著しくなり、所要の形状を得るのが困難となる。このため何らかの対策が必要となる。一般的には、工具電極や工作物に加工液を強制的に流すための小孔を設けて加工液の噴出、吸引を行ったり、工具電極を間欠的に上下させるジャンプ動作を行い、その時のポンプ作用を利用して加工粉や気泡を排除してきた。しかしながら、これらの方法は穴加工に手間がかかったり加工能率が低下するなどの欠点がある。三水ら⁴⁻¹⁾は回転円板電極を用いた放電溝加工を試み、グラファイト電極と不燃性加工液を用いて良好な結果を得たと報告している。この方法は電極と工作物間の相対運動により加工粉、気泡の排出が良好に行われるという特長を有しており今後の発展が期待されるが、その溝形状の生成メカニズムの詳細は明らかにされていない。

そこで本章では、回転円板電極を用いた溝形状加工における加工特性と溝生成機構を平板電極の場合と比較しながら実験的に検討を行った。さらに電極消耗を補正することによって所望の溝形状を得る方法についても検討を行った⁴⁻²⁾⁴⁻³⁾。

4.2 放電溝加工

4.2.1 実験方法

図4-1は実験装置の概略を示す。実験は単発放電回路を備えたトランジスタスイッチング式NC放電加工機で行われた。工作物は炭素工具鋼SK3であり、加工液には灯油系加工液（比抵抗 10^{10} $\Omega \cdot \text{cm}$ 以上）を使用している。電極には円板状および平板状の2種類を使用し、材質には銅およびグラファイト（イビデン(株)・ED-3）を用いた。また電極厚さは3mmとし、設定切り込み量Dを9mmとした。回転円板電極加工では加工機ヘッドに電極回転装置を備えたホルダ（Sodick:TPH23-80F）を用いた。回転電極は円板状に旋削した後、放電加工機上に電極を取り付けた状態でWA砥石により研削を行い、偏心を数 μm 以内に抑えた。電極直径は50mmとした。加工条件を表4-1に示す。回転円板電極加工では回転数Nを0から1100rpmまで変化させてその影

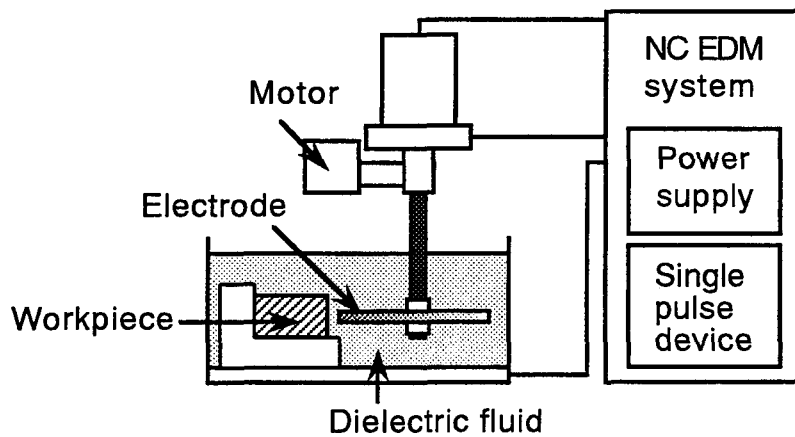


図4-1 放電溝加工実験装置

表4-1 加工条件

No-load voltage	$V_0 = 280\text{V}$
Polarity	Electrode : (+)
Discharge current	$I_p = 20\text{A}$
Pulse duration	$\tau_p = 40 \sim 1000 \mu\text{s}$
Duty factor	D.F. = 50%
Machining fluid	Kerosine

響をみた。なお噴流および電極のジャンプ動作は行っていない。

図4-2は本実験で用いた電極の形状と加工の進め方を示している。(a)の平板電極加工は工作物表面に対して垂直に電極を送り込んで加工を進めるが、(b)の回転円板電極加工は円板電極を回転させながら工作物表面に対し平行に送りを与えて加工を進める。またどちらの場合においても、加工粉が良好に排出されるといわれている水平方向に加工を行った⁴⁻⁴⁾。二つの加工方法で加工面生成に関して最も大きな相違点は、(a)の平板電極加工では溝の底面は全体が同時に仕上がるが、(b)の回転円板電極加工の場合には電極の再下点が到達した位置から順に底面が形成されていくということである。すなわち回転円板電極加工では、加工位置が加工時刻と一対一に対応している点に大きな特徴がある。両者とも加工体積は一定（加工溝長さ：36.5mm、加工深さ：9mm、加工溝幅：3mm）であるため、加工に要した時間Tを加工能率の評価に用いた。また電極消耗量 V_w (mm^3)は加工前後の電極直径の差により算出した。加工溝底面の形状は電気マイクロメータで、また表面粗さは触針式表面検査機により計測を行った。

4.2.2 平板電極による加工

まず一般的に用いられる平板電極加工について検討を行った。

図4-3は平板電極を用いて行った結果生成された溝の底面形状を示す。図中の破線は工作物表面からの設定切り込み量を示しており、実際の溝の深さが設定切り込み量に達していないのは電極が消耗してしまうためである。この方法では、加工間隙で加工液の流れによる淀みが発生するために工作物上加工位置によって放電状態が異なり、その影響で図に見られるような左右対称の大きなうねりが発生する。さらに加工液の流れの悪化により加工粉が停滞しやすくなり、加工粉を介した二次放電で間隙が増加し、うねりの割合も大きくなる。

そしてこのうねりは図4-4に見られるように設定切り込み量Dの増加につれて大きくなる。この図は電極端面が工作物端面からはみ出している場合であるが、両端面が一致している場合に

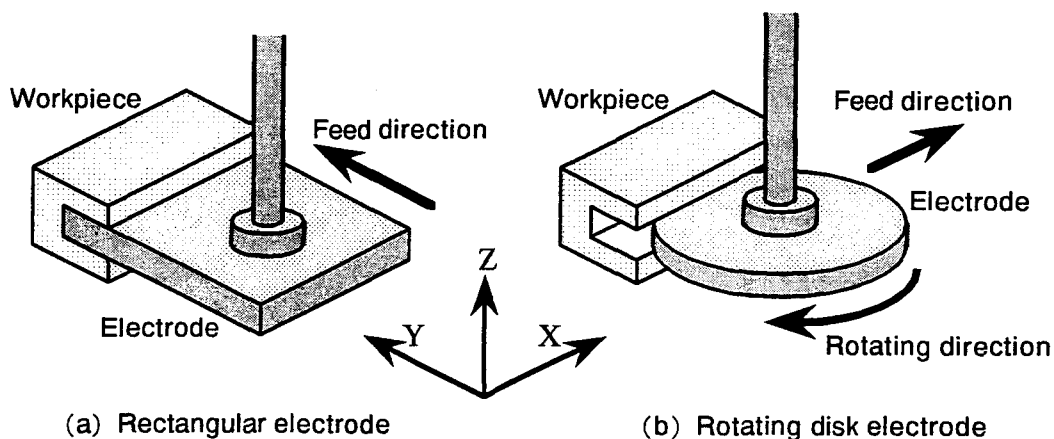


図4-2 電極形状と加工の進め方

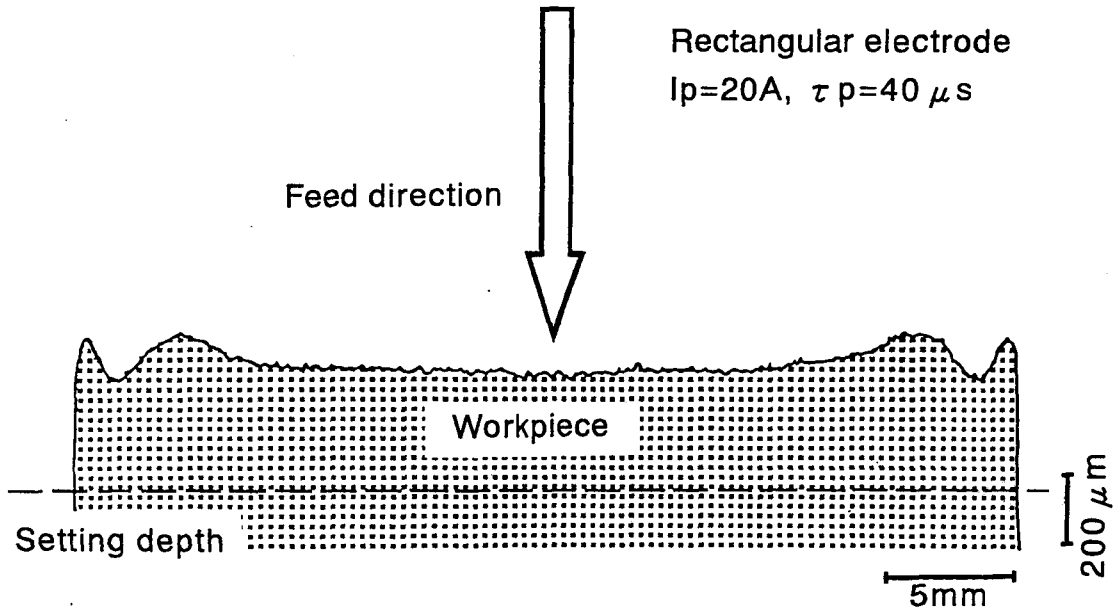
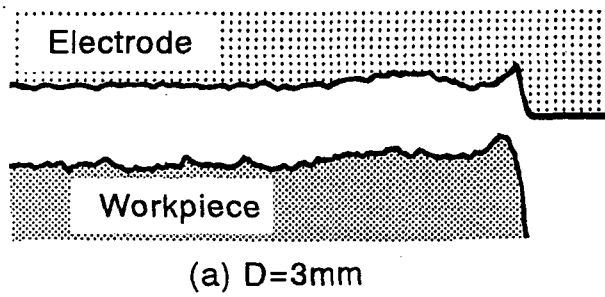
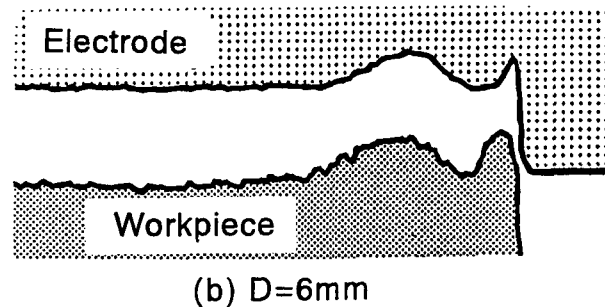


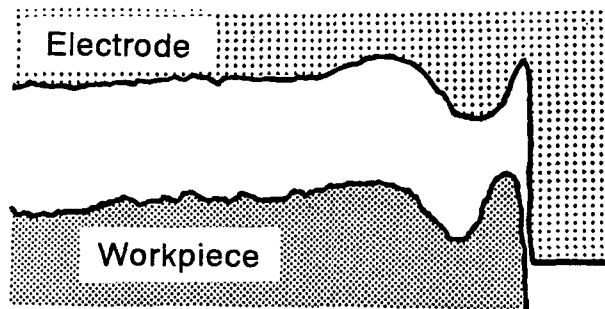
図4-3 平板電極加工で得られた溝底面形状



(a) D=3mm



(b) D=6mm



(c) D=9mm

図4-4 溝底面および電極形状の変化

も溝底面のうねりが生じることを確認している。これは溝の深さの増加に伴い加工液の流れがより大きく妨げられるためであると考えられる。また平板電極を用いた溝加工では加工条件によっては異常放電が起こり、加工液の熱分解カーボンが堆積、成長する場合もある。

図4-5はその炭素生成物のSEM写真である。これはグラファイトの平板電極で溝加工を行った後、上部を取り除いて撮影している。加工液の分解によって生じるカーボンは加工液の流れの小さい溝中央部に堆積している。これは加工の進行を妨げるだけでなく、垂直方向に加工を進める場合には放電点が加工液面にまで上昇し、火災発生の原因ともなりたいへん危険である。これらの炭素生成物の成長はグラファイト電極を用いた場合に生じやすく、ほとんどの条件で加工が進行しなくなった。

以上のように平板電極加工では、加工液の流れの悪化とそれに伴う加工粉排出不全により加工溝の底面はうねりを生じ、加工条件によっては熱分解炭素生成物が堆積することが確認された。

4.2.3 回転円板電極による加工

平板電極を用いた加工の欠点は、先に述べたように主に加工液の流れの悪化が原因であると考えられる。そこでこれを解消するための試みとして、電極と工作物の間に相対運動を発生さ

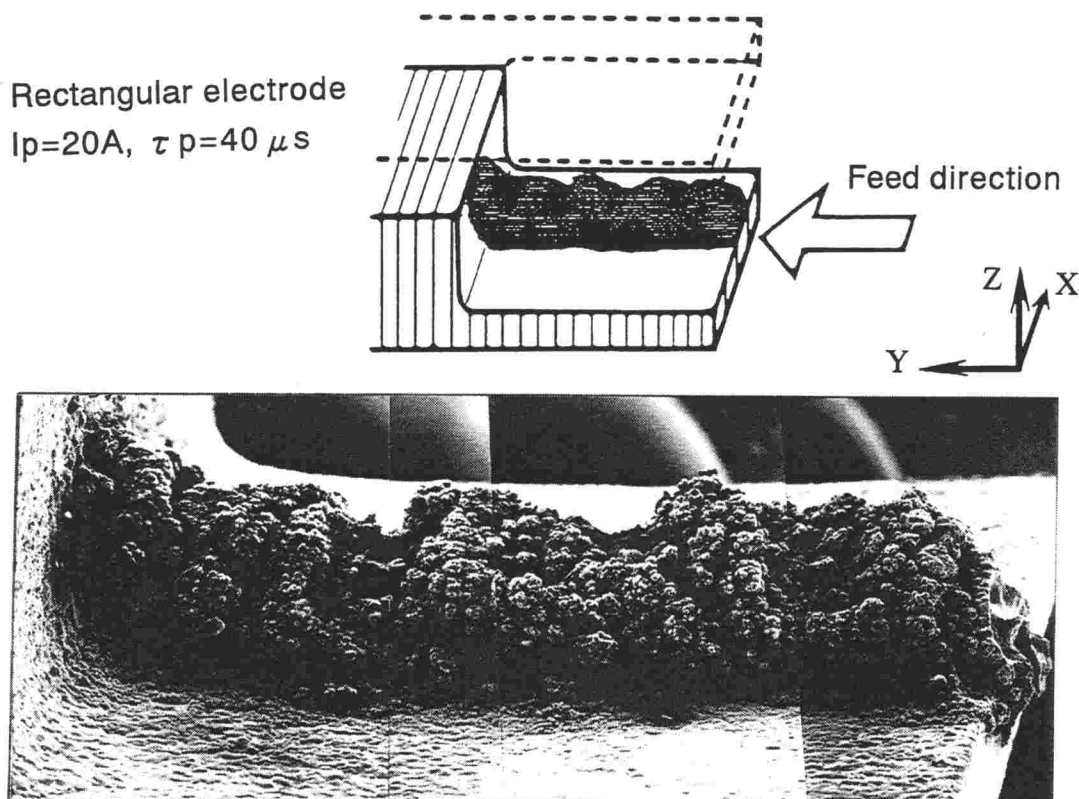


図4-5 炭素生成物SEM写真

せる回転円板電極を用いた加工を行った。

図4-6は回転円板電極を用いて行った放電加工で得られた溝の底面形状を示す。但しこの図はその溝形状の特徴を明確にするために、電極消耗の大きい条件での加工例を示している。この図より平板電極加工の際に見られたような局所的な凹凸は見られず、かわりに傾きが徐々に減少する斜面が形成されていることがわかる。加工の進行とともに電極の直径が減少するために加工面は傾いており、電極と工作物の干渉量（対向面積）も変化するためその傾きも変化する。

図4-7は、銅の回転円板電極を用いた加工においてパルス幅と放電電流を変化させた場合の電極消耗量、加工時間および加工面粗さの変化を示すものである。電極の回転数は600rpmとした。また加工面粗さは溝の底面の測定結果を示す。なお溝の側面の加工面粗さは底面のそれとほぼ同程度であることを確認している。図より明らかなように、電極消耗量は放電電流によってそれぞれの電極消耗が最小となるパルス幅が存在する。パルス幅の短い場合に電極消耗が大きいのは通常の放電加工における傾向と同様であり、パルス幅の長い場合に電極消耗が大きくなるのは加工時間のグラフで見られるように、パルス幅が長くなるほど加工時間が長いためであると考えられる。加工時間について見ると、放電電流が大きいほど加工時間は当然短くなる。またパルス幅が長い領域では加工時間が長くなる。この傾向は電極が回転することによる電極と工作物の相対運動に関係していると考えられ、その要因については後の単発放電実験の際に述べる。加工面粗さはパルス幅および放電電流の増加とともに増加する傾向にあるが、放電電流が小さい場合にはパルス幅が長いほうが若干減少する。

図4-8は回転円板電極の回転数と加工時間および電極消耗量の関係を示す。回転数0rpmの値は円板電極を回転させないまま加工した場合の結果を示しており、グラフ中の□の記号および破線は銅平板電極での加工結果を表している。なおグラフフェイト平板電極加工では、前述したように熱分解炭素生成物が形成され加工は不可能であった。またこれらの回転円板電極加工の実

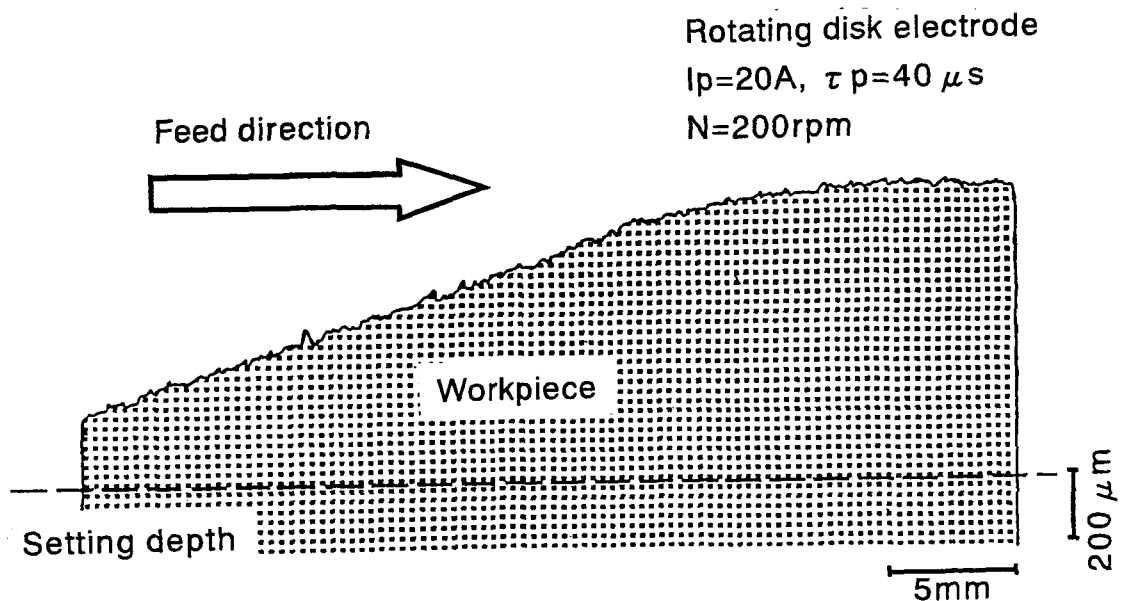


図4-6 回転円板電極加工で得られた溝底面形状

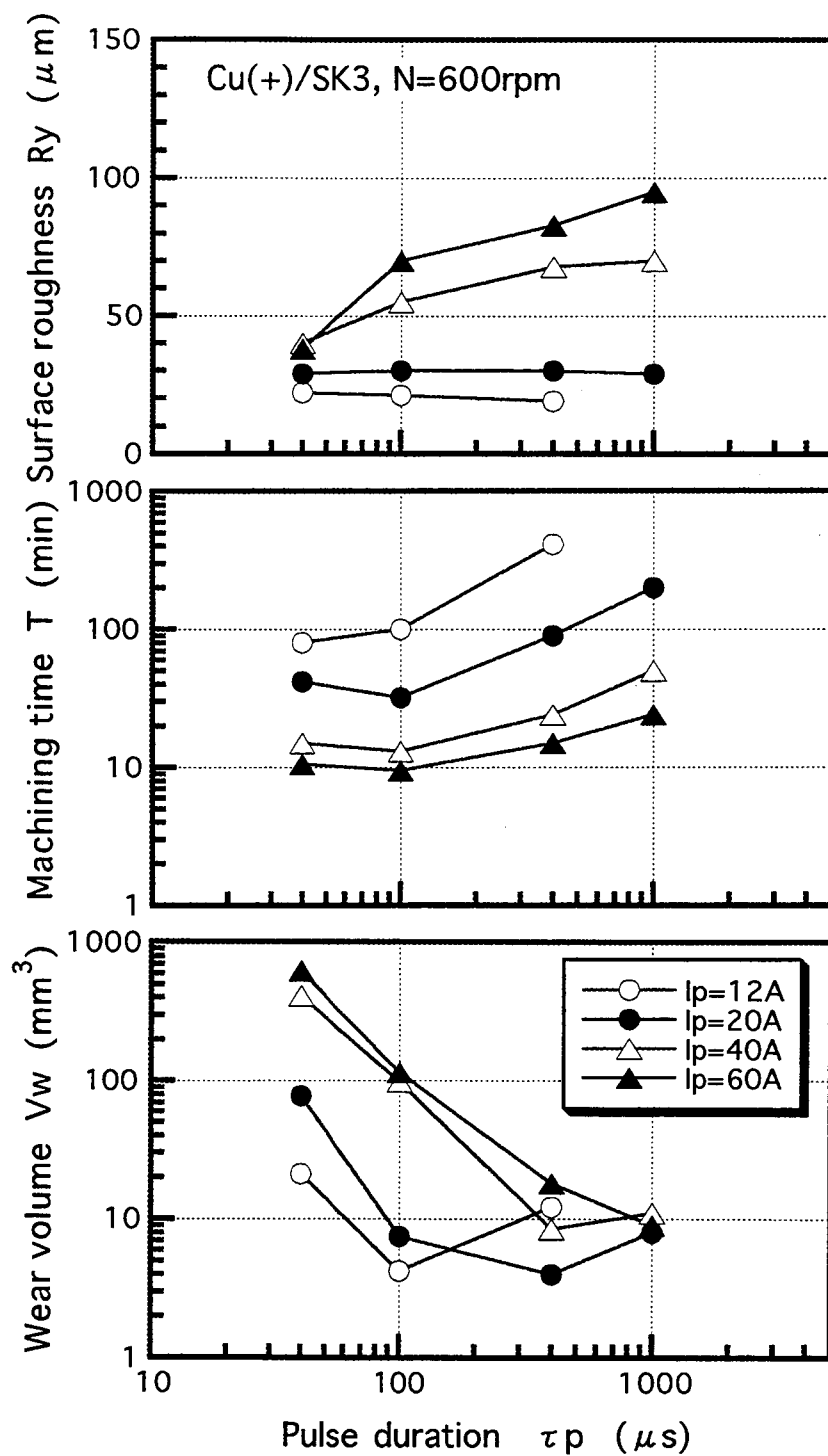


図4-7 回転円板電極加工において放電電流およびパルス幅を変化させた場合の電極消耗量、加工時間および加工面粗さの変化

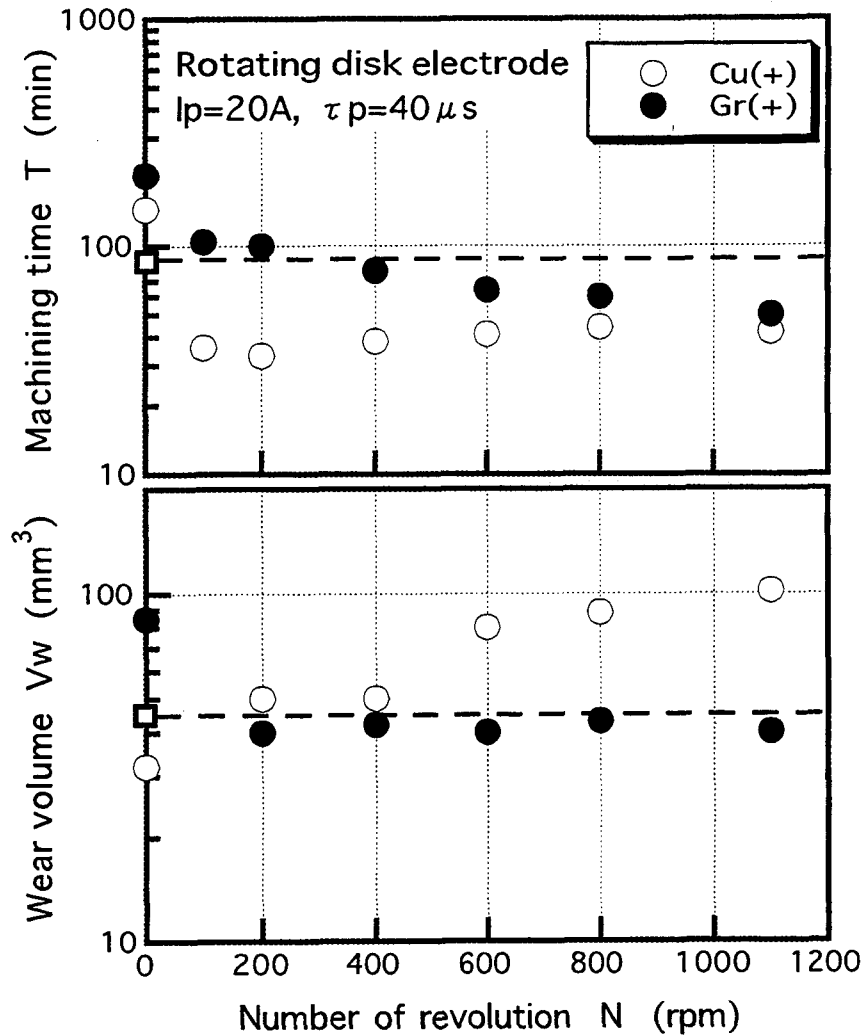


図4-8 電極回転数が電極消耗量および加工時間に与える影響

実験結果は進行方向に対し回転方向が上向き（図4-2参照）の加工結果を示しているが、その逆の下向き加工でもそれぞれの値に差異は認められなかった。図より明らかのように、グラファイト電極では電極の回転数の増加とともに加工時間、電極消耗とも減少している。一方銅電極では回転数の増加とともに電極消耗は増加し、また加工時間は200rpm付近で最小値をとっている。これらの結果から回転円板電極加工において電極を回転させることによって平板電極による加工よりも加工時間を短縮できることがわかる。

以上のような回転数に対する加工特性の変化の要因を明らかにするため、次に回転円板電極を用いた単発放電実験を行った。電極と工作物間に相対運動がある場合の相対速度が放電痕形状に及ぼす影響については屋宮ら^{4,5)}の報告があるが、それは陽極、陰極ともに軟鋼SS41を用いた場合のものであり、今回は電極に銅およびグラファイトを用い、両者の差異について改めて実験を行った。

図4-9は単発放電実験によって得られた工作物側の放電痕のSEM写真である。形状の特徴をよ

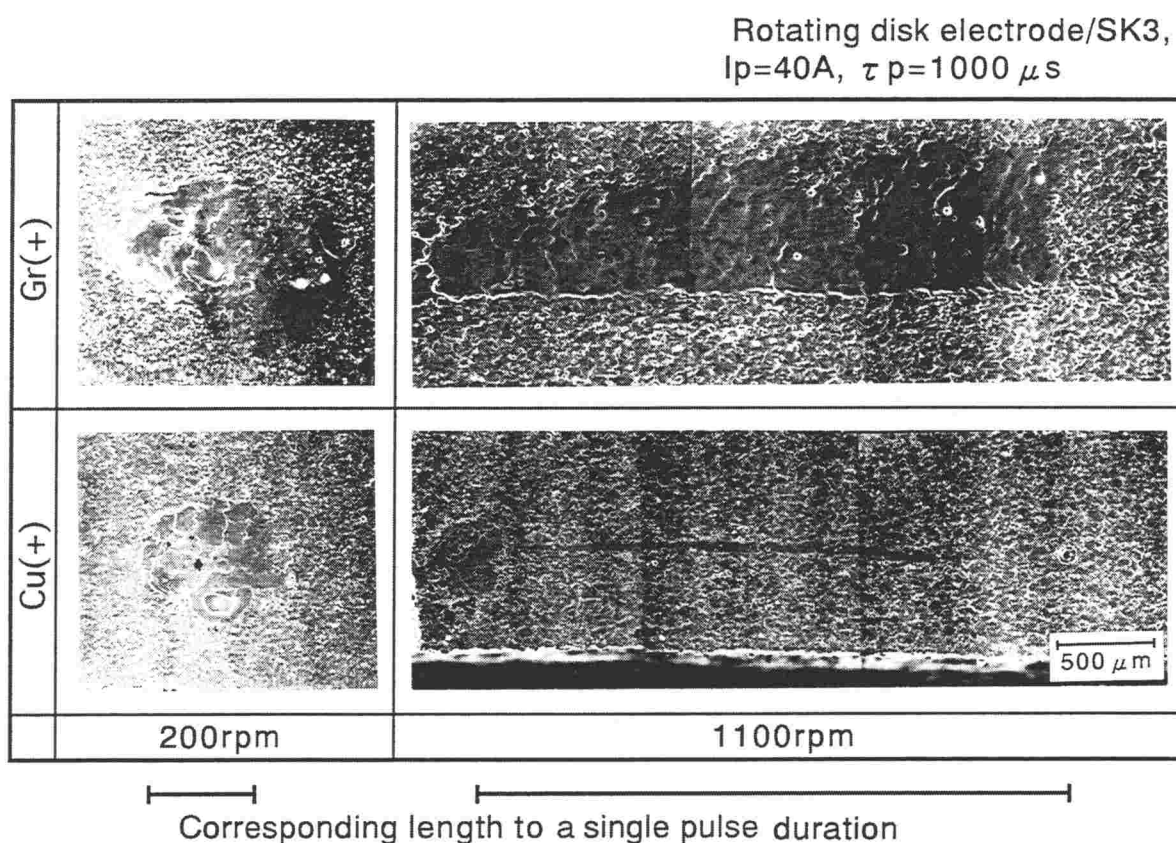


図4-9 単発放電痕形状の違い

り明確にするために、パルス幅を1000 μsと長くとり電極の回転数を200rpm, 1100rpmと変化させた。また放電痕が途中で途切れないように、工作物に前加工を施してどの位置においても極間距離が一定となるように成形して実験を行った。写真より放電痕は、どの条件においてもほぼ1回のパルス幅における円周移動距離に相当する長さに伸びていることがわかる。また電極の回転数を増加させると、各電極による放電痕形状の特徴がより明確に現れてくる。すなわちグラファイト電極を用いた場合の単発放電痕の長さは、写真に見られるように回転数にほぼ比例している。従って前述の図4-8に見られたように、電極回転数が高くなるほど加工時間が減少すると考えられる。一方銅電極で得られる放電痕は最初に大きな凹みが生成され、その後は直線上の細かい痕が続いているが、この細かい痕はあまり深くなく工作物の除去にはほとんど関与していないと考えられる。これは放電による衝撃力が放電の初期のみに大きく作用し⁴⁻⁶⁾、また電極と工作物の相対運動によって工作物側のアーク柱脚部が銅電極の場合には細くなるためと考えられる。そして実際に除去が行われていると考えられる先端のクレータ部分の大きさは回転数の増加とともにやや小さくなっている。従って銅電極の場合回転数の増加とともに加工に要する時間が増加するものと考えられる。なおここでは示していないが電極側の放電痕はほとんど伸びていないことを確認している。これらの結果は屋宮ら⁴⁻⁵⁾の報告と定性的に一致している。

図4-10は加工面粗さと回転数の関係を示す。図中の記号□および破線は銅平板電極の結果を示

している。図より明らかなように電極を回転させると面粗さは増加してほぼ一定値をとる。そしてこの値は銅平板電極加工で得られた面粗さと同程度となる。また0 rpmでの値は円板電極を回転させずに加工を行った場合のものであるが、グラファイト、銅いずれの電極材質においてもかなり小さくなるのがわかる。これは電極と工作物間に放電が生じる最後の領域での放電が、それ以前に形成された放電面の山の部分を溶融させ凹凸を平滑にするように作用しているためと考えられる。

図4-11は回転円板電極加工で得られた加工面のSEM写真と粗さ計による測定結果を示す。電極の回転数が高くなるにつれて面の凹凸が激しくなっていることがわかる。また写真より回転数が高い場合は加工面の山の部分がはっきりと確認できる。これは次のように考えられる。すなわち電極の回転は加工液の循環を良好にするが同時に極間の冷却も促進する。そのために放電の際に溶融して盛上った放電痕の山の部分が急速に冷却され再凝固することによって、加工面粗さが大きくなったものと考えられる。

4.2.4 電極消耗による加工溝深さの変化

次に回転円板電極を用いた加工における溝底面形状の変化について考察を行った。

図4-12は回転円板電極加工における電極と工作物の干渉状態を示す。電極は図のX方向に移動するが電極と工作物の干渉量および電極の消耗によって図4-6に見られたような曲面となる。回転円板電極加工では、前述のようにある時刻に形成されている部分は電極の位置から特定できるという特徴を有する。従って電極の消耗比が予めわかっているならば、各放電位置での除去体積よりその位置での電極消耗量および電極直径を算出することができる。また放電面積は電極の位置および径と密接に関わっており、放電面積がXの増加とともに増加するA-B間、電極消耗分

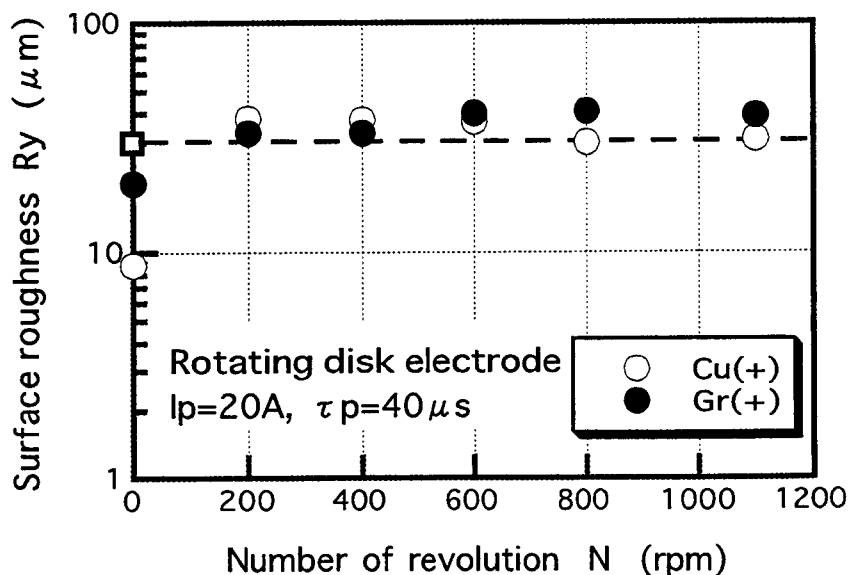


図4-10 加工面粗さと電極回転数の関係

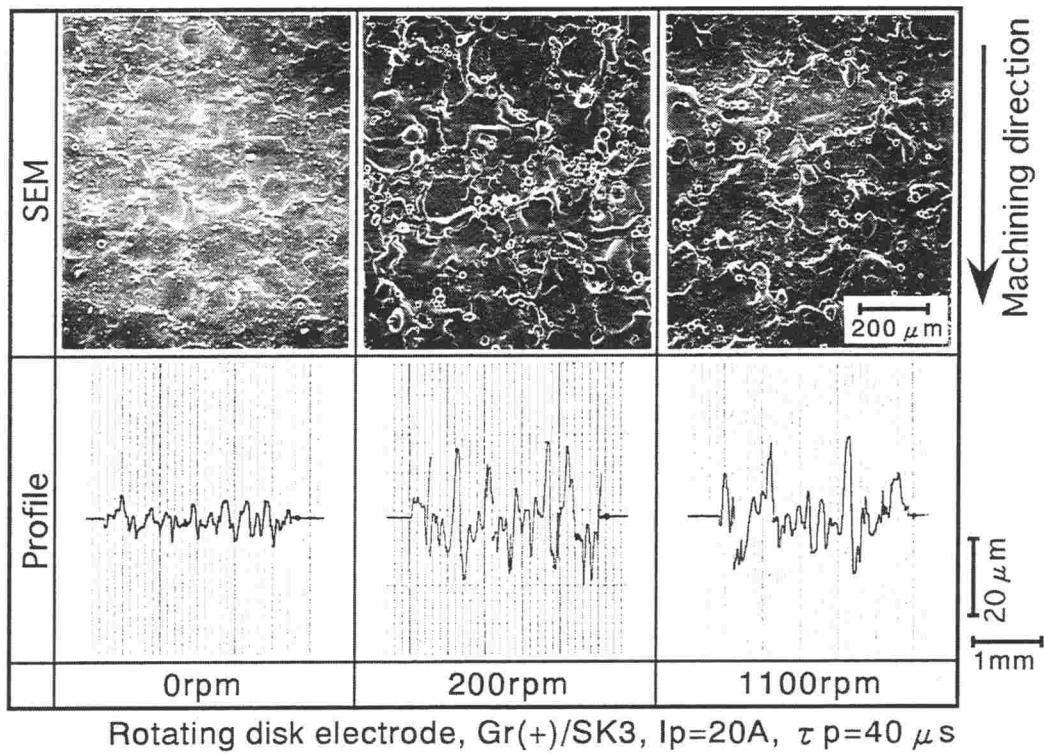


図4-11 電極回転数の変化に対する加工面形状の変化

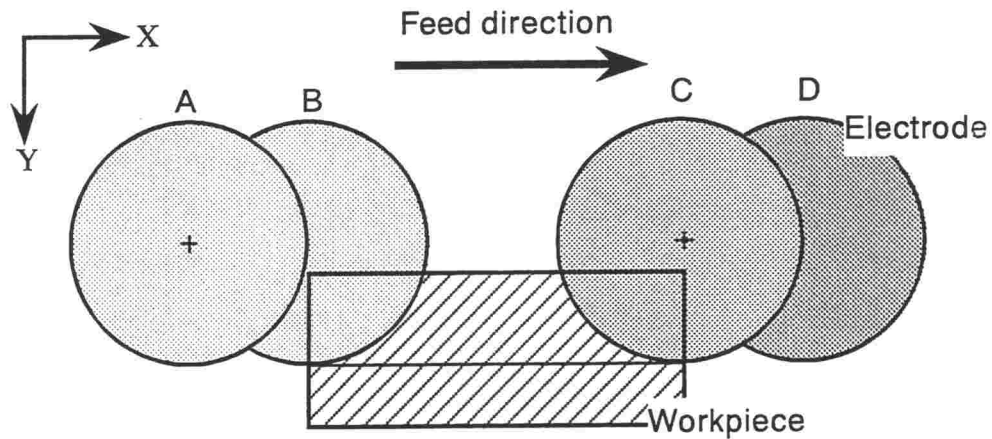


図4-12 電極と工作物の干渉状態

だけ減少するB-C間、さらに放電面積が減少していくC-D間では、それぞれ異なる関係を有する。これらのことを考慮し、任意の電極位置における電極半径の算出を行った。

任意の位置における電極半径の算出（図4-13参照）

(1) A-B間における位置 x_1 （加工開始点A点からの移動量）と電極半径 $R_1(x_1)$ の関係

初期の電極半径を R_A 、電極の設定切込み量（溝深さ）を D_A とすると、電極中心と工作物表面との距離は、

$$R_A - D_A$$

であり、工作物端面と電極中心との距離は、

$$\{D_A(2R_A - D_A)\}^{1/2}$$

となる。電極が χ_1 移動したとき、電極中心と工作物端面との距離は、

$$\{D_A(2R_A - D_A)\}^{1/2} - \chi_1$$

また、電極中心から図中P点までの距離は、

$$\{R_1^2(\chi_1) - (R_A - D_A)^2\}^{1/2}$$

である。ここで電極外周形状は x 軸、 y 軸（ y 軸は常に電極中心を通る）を図のようにとると、

$$x^2 + \{y + (R_A - D_A)\}^2 = R_1^2(\chi_1)$$

である。すなわち、

$$y = \{R_1^2(\chi_1) - x^2\}^{1/2} - (R_A - D_A)$$

で表される。よってA-B間での除去体積 V_{W1} は、溝幅を W_W とすると、

$$V_{W1} = W_W \cdot \int_{\{D_A(2R_A - D_A)\}^{1/2} - \chi_1}^{\{R_1^2(\chi_1) - (R_A - D_A)^2\}^{1/2}} [\{R_1^2(\chi_1) - \xi^2\}^{1/2} - (R_A - D_A)] d\xi \quad \dots \dots \dots (4-1)$$

となる。さらにこのとき電極消耗量は $W_E \cdot \pi \{R_A^2 - R_1^2(\chi_1)\}$ であるから、次式が成り立つ（ ε ：体積電極消耗率、 W_E ：電極幅）。

$$V_{W1} = W_E \cdot \pi \{R_A^2 - R_1^2(\chi_1)\} / \varepsilon \quad \dots \dots \dots (4-2)$$

(2) B-C間における位置 χ_2 （B点からの移動量）と電極半径 $R_2(\chi_2)$ の関係

A-C間での加工形状を図に示すように V_1 と V_2 に分けて考える。また x 軸、 y 軸（電極中心をO点）を図のようにとると、

$$V_1 = W_W \cdot \int_0^{\chi_2} R_2(\xi) d\xi - (R_A - D_A) \cdot \chi_2 \quad \dots \dots \dots (4-3)$$

$$V_2 = W_W \cdot \int_{R_A - D_A}^{R_2(\chi_2)} [\{R_2^2(\chi_2) - \zeta^2\}^{1/2}] d\zeta \quad (\text{Yで積分}) \quad \dots \dots \dots (4-4)$$

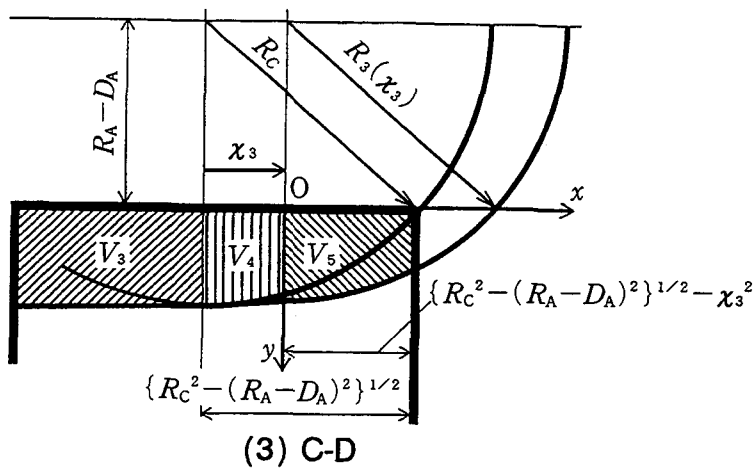
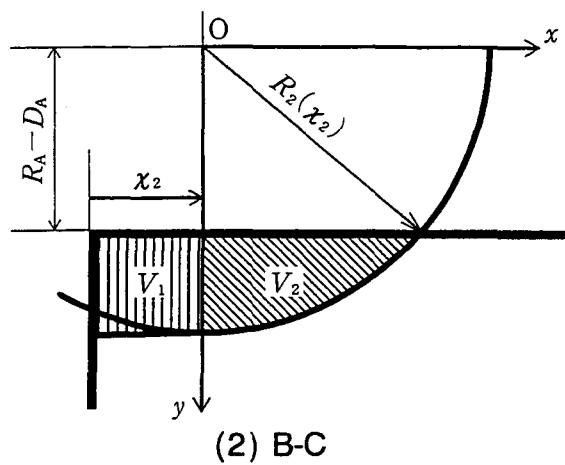
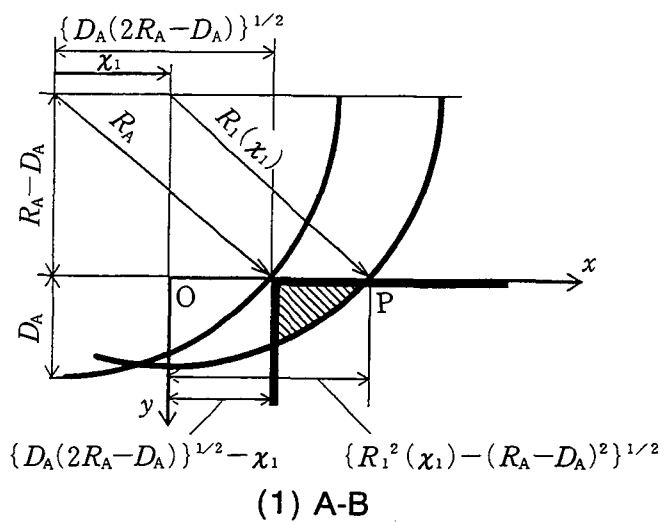


図4-13 電極半径算出モデル

となる。この和と電極消耗量との間には先ほどと同様に次式が成り立つ。

$$V_{W2} = V_1 + V_2 = W_E \cdot \pi \{R_A^2 - R_2^2(\chi_2)\} / \varepsilon \quad \dots \dots \dots (4-5)$$

(3) C-D間における位置 χ_3 (C点からの移動量) と電極半径 $R_3(\chi_3)$ の関係

C点での電極半径を R_C とする。A-D間での加工形状を図に示すように V_3 , V_4 および V_5 に分けて考える。ここでB-C間の距離 L_2 は、

$$L_2 = \{R_C^2 - (R_A - D_A)^2\}^{1/2}$$

であり、電極形状は、

$$x^2 + \{y + (R_A - D_A)\}^2 = R_3^2(\chi_3)$$

であるから、

$$V_3 = W_W \cdot \int_0^{L_2} R_2(\xi) d\xi - (R_A - D_A) \cdot L_2 \quad \dots \dots \dots (4-6)$$

$$V_4 = W_W \cdot \int_0^{\chi_3} R_3(\xi) d\xi - (R_A - D_A) \cdot \chi_3 \quad \dots \dots \dots (4-7)$$

となる。図中の電極中心位置から工作物終端面までの距離は、

$$\{R_C^2 - (R_A - D_A)^2\}^{1/2} - \chi_3$$

であるから、

$$V_5 = W_W \cdot \int_0^{\{R_C^2 - (R_A - D_A)^2\}^{1/2} - \chi_3} [\{R_3^2(\chi_3) - \xi^2\}^{1/2} - (R_A - D_A)] d\xi \quad \dots \dots \dots (4-8)$$

となる。そして先ほどと同様、これらの和と電極消耗量との間には次式が成り立つ。

$$V_{W3} = V_3 + V_4 + V_5 = W_E \cdot \pi \{R_A^2 - R_3^2(\chi_3)\} / \varepsilon \quad \dots \dots \dots (4-9)$$

(4-1) ~ (4-9) 式によって χ_1 と $R_1(\chi_1)$, χ_2 と $R_2(\chi_2)$ および χ_3 と $R_3(\chi_3)$ の関係が決定される。なお、実際の値の算出にはニュートン・ラプソン法を用いた。

計算で得られた加工溝深さの予想値と実際の加工面とを重ねて図4-14に示す。両者の誤差は10 μ m程度であり、ほぼ一致している。これにより加工によって消耗する回転円板電極の軌跡は予測可能であることが明らかとなった。

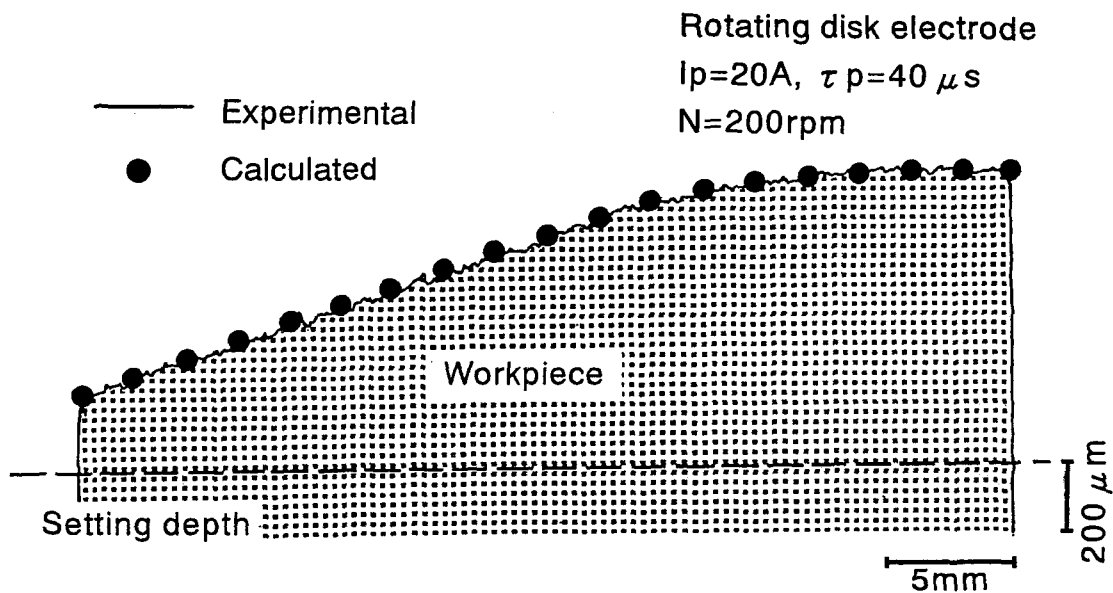


図4-14 加工溝深さの実測値と計算値

4.2.5 加工溝深さの補正

次に各位置での電極消耗を考慮に入れ、所望の設定面が形成されるために必要な電極の軌跡の計算を行った。

補正を行った場合の電極軌跡の算出（図4-15参照）

(1) A-B間における位置 χ_1 （加工開始点A点からの移動量）と電極補正量 $C_1(\chi_1)$ の関係

設定深さを得るために、随時電極半径消耗分を切り込み量に加えていくものとする。電極消耗長さを $C_1(\chi_1)$ とすると、

$$C_1(\chi_1) = R_A - R_1(\chi_1)$$

すなわち、

$$R_1(\chi_1) = R_A - C_1(\chi_1) \quad \dots \dots \dots (4-10)$$

となり、放電開始点での電極中心と工作物端面との距離は、

$$\{D_A(2R_A - D_A)\}^{1/2}$$

である。電極が χ_1 移動したとき、電極中心と工作物端面との距離は、

$$R_A - D_A - C_1(\chi_1)$$

となり、電極中心と工作物端面との距離は、

$$\{D_A(2R_A - D_A)\}^{1/2} - \chi_1$$

となる。また電極中心と図中P点との距離は、

$$[R_1^2(\chi_1) - \{R_A - D_A - C_1(\chi_1)\}^2]^{1/2}$$

である。ここでx軸、y軸（y軸は常に電極中心を通る）を図のようにとると、電極外周形状は、

$$x^2 + [y + \{R_A - D_A - C_1(\chi_1)\}]^2 = R_1^2(\chi_1)$$

である。すなわち、

$$y = \{R_1^2(\chi_1) - x^2\}^{1/2} - \{R_A - D_A - C_1(\chi_1)\}$$

で表される。よってA-B間での除去体積 V_{W1} は、溝幅を W_W とすると、

$$V_{W1} = W_W \int_{\{D_A(2R_A - D_A)\}^{1/2} - \chi_1}^{\{R_1^2(\chi_1) - \{R_A - D_A - C_1(\chi_1)\}^2\}^{1/2}} [\{R_1^2(\chi_1) - \xi^2\}^{1/2} - \{R_A - D_A - C_1(\chi_1)\}] d\xi \quad \dots \quad (4-11)$$

となる。さらにこのとき電極消耗量は $W_E \cdot \pi \{R_A^2 - R_1^2(\chi_1)\}$ であるから、次式が成り立つ（ ε ：体積電極消耗率、 W_E ：電極幅）。

$$V_{W1} = W_E \cdot \pi \{R_A^2 - R_1^2(\chi_1)\} / \varepsilon \quad \dots \quad (4-12)$$

(2) B-C間における位置 χ_2 （B点からの移動量）と電極補正量 $C_2(\chi_2)$ の関係
電極半径消耗長さを $C_2(\chi_2)$ とすると、

$$C_2(\chi_2) = R_B - R_2(\chi_2)$$

すなわち、

$$R_2(\chi_2) = R_B - C_2(\chi_2) \quad \dots \quad (4-13)$$

となる。A-C間での加工形状を図に示すように V_1 と V_2 に分けて考える。またx軸、y軸（電極中心をO点）を図のようにとると、

$$V_1 = W_W \cdot D_A \cdot \chi_2 \quad (D_A = D_B) \quad \dots \quad (4-14)$$

$$V_2 = W_W \cdot \int_{R_A - D_A - C_2(\chi_2)}^{R_2(\chi_2)} [\{R_2^2(\chi_2) - \zeta^2\}^{1/2}] d\zeta \quad (Yで積分) \quad \dots \quad (4-15)$$

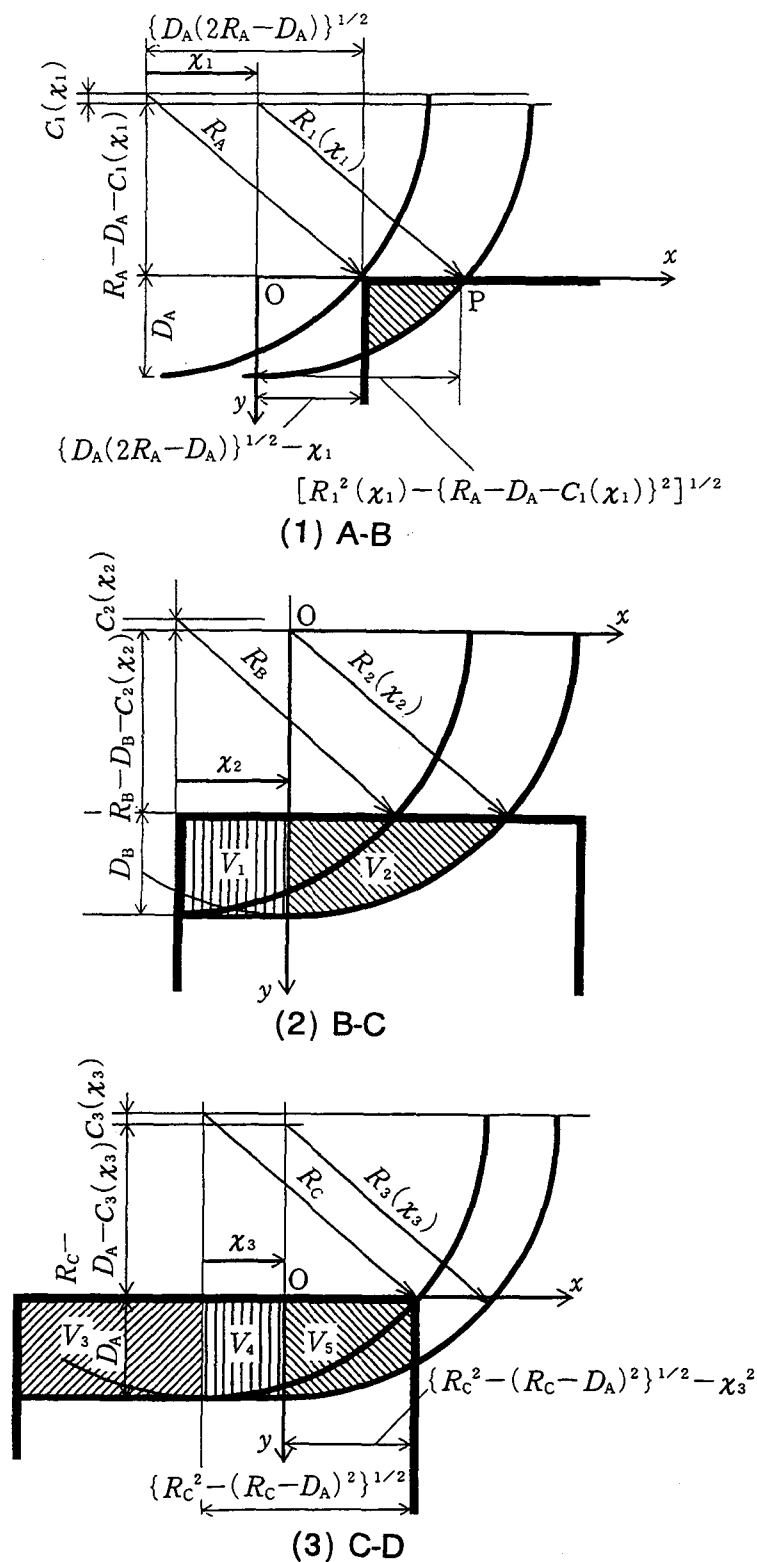


図4-15 切り込み補正を行う場合の電極軌跡算出モデル

となる。さらに先ほどと同様、この和と電極消耗量との間には次式が成り立つ。

$$V_{W2} = V_1 + V_2 = W_E \cdot \pi \{R_A^2 - R_2^2(\chi_2)\} / \epsilon \quad \dots \dots \dots (4-16)$$

(3) C-D間における位置 χ_3 (C点からの移動量) と電極補正量 $C_3(\chi_3)$ の関係
電極半径消耗長さを $C_3(\chi_3)$ とすると、

$$C_3(\chi_3) = R_C - R_3(\chi_3)$$

すなわち、

$$R_3(\chi_3) = R_C - C_3(\chi_3) \quad \dots \dots \dots (4-17)$$

となる。A-D間での加工形状を図に示すように V_3 , V_4 および V_5 に分けて考える。ここでB-C間の距離 L_2 は、

$$L_2 = \{R_C^2 - (R_C - D_A)^2\}^{1/2}$$

であり、電極形状は、

$$x^2 + [y + \{R_C - D_A - C_3(\chi_3)\}]^2 = R_3^2(\chi_3)$$

であるから、

$$V_3 = W_W \cdot D_A \cdot L_2 \quad \dots \dots \dots (4-18)$$

$$V_4 = W_W \cdot R_A \cdot \chi_3 \quad \dots \dots \dots (4-19)$$

となる。図中の電極中心位置から工作物終端面までの距離は、

$$\{R_C - (R_C - D_A)^2\}^{1/2} - \chi_3$$

であるから、

$$V_5 = W_W \cdot \int_0^{\{R_C^2 - (R_C - D_A)^2\}^{1/2} - \chi_3} [\{R_3^2(\chi_3) - \xi^2\}^{1/2} - \{R_C - D_A - C_3(\chi_3)\}] d\xi \quad \dots \dots \dots (4-20)$$

となる。そして先ほどと同様、これらの和と電極消耗量との間には次式が成り立つ。

$$V_{W3} = V_3 + V_4 + V_5 = W_E \cdot \pi \{R_A^2 - R_3^2(\chi_3)\} / \epsilon \quad \dots \dots \dots (4-21)$$

(4-10) ~ (4-21) 式によって χ_1 , χ_2 および χ_3 での補正量 $C_1(\chi_1)$, $C_2(\chi_2)$ および $C_3(\chi_3)$ が決定

される。なお、実際の値の算出にはニュートン・ラプソン法を用いた。

図4-16は設定切り込み量制御加工後の溝底面形状の計測結果を示す。図より前図に見られた傾斜部分は解消されていることがわかる。すなわち予め設定切り込み量を電極消耗に見合った分補正しておくことによって、ほぼ設定値深さに近い溝が精度よく形成できることが明らかとなった。

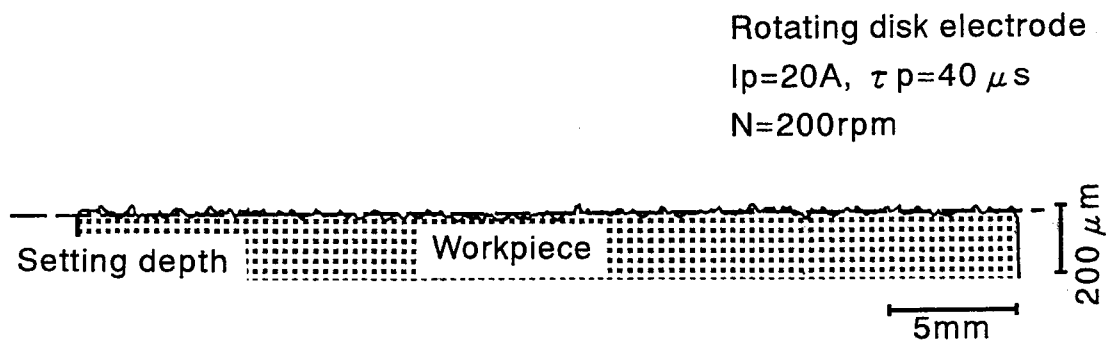


図4-16 切り込み補正を行った場合の溝底面形状

4.3 結 言

本章では、加工粉排出が良好であると考えられる回転円板電極を用いた溝加工を行い、電極の回転が加工特性に及ぼす影響について検討を行った。また電極消耗を補正することによって所望の溝形状を得る方法についても検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 平板電極で放電加工した溝の底面には局所的なうねりが生成される。これは極間の加工液の流れの悪化が原因である。
- (2) 回転円板電極を用いれば、加工液の循環がスムーズになり、加工粉および気泡が効率的に排出されるので安定した溝加工が可能となる。
- (3) 回転円板電極を用いた加工では、回転数を増加させることによって平板電極を用いた場合よりも加工時間を短縮することができる。
- (4) 回転円板電極を用いて電極の設定切り込み量を制御することによって、設定深さ通りの溝形状を得ることができる。

参考文献

- 4-1) 三水篁：不燃性加工液とグラファイト円板電極によるリブ成形溝放電加工法の開発，電気加工技術，**14**，47（1990）20.
- 4-2) 宇野義幸，岡田晃，伊藤満，山口毅：回転円板電極による放電溝加工の研究，電気加工学会誌，**28**，58（1994）24.
- 4-3) Y.Uno, A.Okada, M.Itoh and T.Yamaguchi：Electrical Discharge Machining of a Groove with a Rotating Disk Electrode, IJEM, **1**（1996）13.
- 4-4) M.Kunieda and Y.Masuzawa：A Fundamental Study on a Horizontal EDM, Annals of the CIRP, **37**，1（1988）187.
- 4-5) 屋宮良一，吉田政弘，国枝正典：放電加工中の極間の相対滑りが放電柱に与える影響，精密工学会春季学術講演会講演論文集（1991）455.
- 4-6) 宇野義幸，遠藤修，中島利勝：単発放電痕の生成機構に関する基礎的研究，電気加工学会誌，**25**，49（1991）9.

第5章 CVD炭素電極による高精度放電加工

5.1 緒言

放電加工においては加工速度、電極消耗率および加工面粗さが加工の良否を評価する重要な指標であり、それらの特性は互いに深く関係している。そして高精度加工を実現するためには、加工面粗さを低減させるだけでなく工具電極の消耗を抑えることが極めて重要となる。低電極消耗加工は、灯油系加工液の熱分解によって生ずるカーボンや飛散した工作物の電極端面への付着により可能となることはよく知られており、これは耐熱性の大きい熱分解カーボンによる電極保護作用によると報告されている⁵⁻¹⁾⁵⁻²⁾。そして適切な条件下では電極無消耗加工も可能である。しかしながら熱分解カーボンの付着現象は、電極を陽極とする逆極性加工でしかもパルス幅が比較的長い領域のみにおいて見られるものであり⁵⁻³⁾、精度の要求される仕上げ加工の条件下すなわち、パルス幅の短い領域においてはこのような現象は見られない。従って銅、グラファイトなど従来の電極では仕上げ条件での電極無消耗加工は事実上不可能であり、実際には電極の消耗を犠牲にして面粗度の向上を図っている。

ところで電極端面に付着する加工液の熱分解カーボンはグラファイト構造とは異なり、炭素の六角網平面が不規則に配列した乱層構造であると報告されている⁵⁻⁴⁾。よってこの乱層構造カーボンを電極として用いれば、仕上げ条件においても電極無消耗加工が可能となるのではないかと考えられる。

そこで本章では仕上げ条件下における電極無消耗加工の実現を目指して新たに開発した乱層構造を有するCVD炭素電極を用いた場合の放電加工特性を解明し、高性能放電加工用電極としての可能性について検討を行った⁵⁻⁵⁾⁵⁻⁶⁾。

5.2 電極低消費放電加工の原理

放電加工では、放電に伴う熱と圧力によって工作物材料の除去が進行していくが、それとともに電極も消耗していく。放電加工が開発された当初はコンデンサ放電回路を用いており、電極消耗が大きいという欠点のため、一部の特殊な分野のみに使用されていた。その後トランジスタスイッチング式電源が開発されて電極消耗が1%以下の低電極消耗加工が実用になり、今日の放電加工の飛躍的發展をもたらした。一般に電極低消費を可能にする要因は次の三つであると考えられている。

(1) 最低エネルギー密度

放電加工では電気エネルギーの形でエネルギーが供給されるが、これが熱エネルギーに変換されて実際の加工作用が生じる。一般にこのような熱加工においては、加工に必要な最低エネルギー密度は材料の融点 θ_m と熱伝導率 λ の積 $\theta_m \cdot \lambda$ に比例する⁵⁻⁷⁾ことが知られている。したがって鉄やステンレス鋼のように $\theta_m \cdot \lambda$ が小さい材料は低いエネルギー密度でも加工されやすく、逆に銅やタングステンのように $\theta_m \cdot \lambda$ の大きい材料は高いエネルギー密度を与えないと加工されにくい。そこで最低エネルギー密度の大きい銅、銅タングステン、グラファイトなどの電極によって、最低エネルギー密度の小さい鉄鋼系材料を、両者の中間のエネルギー密度で加工すれば、電極の消耗を小さく抑えることができる⁵⁻⁸⁾。

(2) 陽極と陰極のエネルギー配分の変化

銅電極によって銅を加工するような同一材料の組み合わせ加工でも、パルス幅が短い場合は陽極側の加工量が多くなり、パルス幅が長くなると陰極側の加工量が多くなる傾向がある。このパルス幅の長短による陽極と陰極の除去量の変化は、パルス幅によって陽極と陰極へのエネルギー配分が変化するためである。これは放電電流が電子電流とイオン電流から成り立ち、パルス幅の短い条件では電子電流の割合が多く、パルス幅が長くなるにつれイオン電流の割合が多くなるためであると報告されている⁵⁻⁹⁾⁵⁻¹⁰⁾。

(3) 熱分解カーボンの電極端面への付着

灯油系加工液を用いる型彫り放電加工では、加工液の熱分解によって生じるカーボンや飛散した工作物材料が電極端面へ付着する。これらの付着量は電極材質、工作物材質、加工条件により異なるが、一般に電極を陽極とする逆極性で、パルス幅の比較的長い条件で観察される。西村ら⁵⁻¹⁾、元木ら⁵⁻¹¹⁾、Hon⁵⁻²⁾らは電極端面に付着したカーボンや工作物材料の電極保護作用によって電極消耗が小さくなると報告している。この効果は銅やアルミニウムを電極に用いた場

合顕著に現れる⁵⁻¹²⁾。これは耐熱性の大きいカーボン層が電極端面に存在するために電極の蒸発・溶融範囲が小さくなるとともに、表面層以外は熱伝導率の大きい銅やアルミニウムであるために熱の拡散がよく、両者の相乗効果によって電極の消耗が低減されると考えられている⁵⁻¹²⁾。

以上の三つの要因により、電極を陽極とする逆極性加工でパルス幅を長くすることにより、電極無消耗加工が実現される。

近年高精度加工の需要が高まる中で、放電加工においてもさらに高精度の加工が要求されている。型彫り放電加工では電極形状が転写されるために、高精度の加工を実現するためには電極の消耗を抑えることが重要となる。しかしながら、先に述べたように電極無消耗加工はパルス幅の長い条件においてのみ可能である。よって、銅、グラファイトなど従来の電極では仕上げ条件であるパルス幅の短い条件での電極無消耗加工は不可能であり、実際には電極の消耗を犠牲にして面粗度の向上を図っている。

ところでXiaら⁵⁻¹³⁾は電極低消耗を実現する最も重要な要因は熱分解カーボンの電極端面への付着であることを明らかにしている。また毛利ら⁵⁻⁴⁾は電極端面に付着する熱分解カーボンは、乱層構造であると報告している。図5-1は乱層構造について模式的に示す⁵⁻¹⁴⁾。炭素原子はいわゆる無定形炭素、規則的結晶構造を有するグラファイト構造およびダイヤモンド構造と各種の構造をとる。このうち無定形炭素には、木炭、活性炭、コークス、カーボンブラックなどがある。また無定形炭素から完全グラファイト構造までの間には様々な中間的構造が存在する。乱層構造はその中間的構造の一つである。図に示すように、グラファイト構造、乱層構造とも六炭素

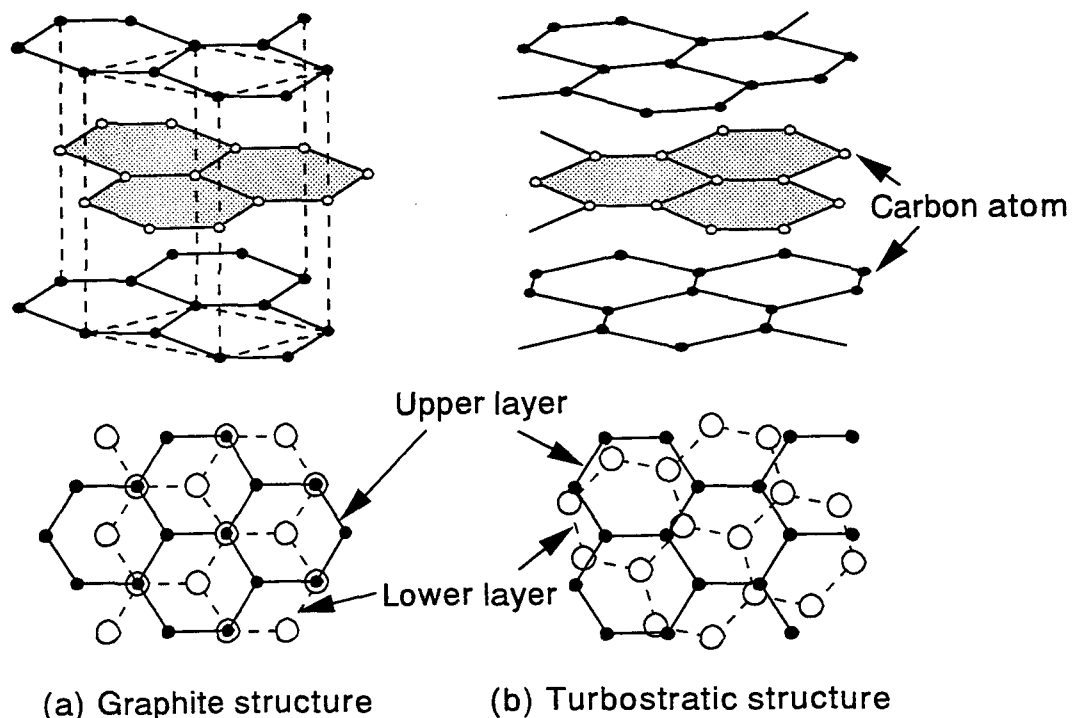


図5-1 グラファイト構造と乱層構造

環が連なって一つの平面，すなわち六角網平面を成し，それが堆積した構造となっている。両者とも上下層の結合はファンデルワールス力によるものである。グラファイト構造の場合，下層と上層の炭素は規則的に配列された構造となっている。これに対して乱層構造の場合，上層と下層の炭素は全く無秩序に配列された構造となっている。放電加工において電極端面に付着する熱分解カーボンはこの乱層構造である。

以上のようなことから，この乱層構造を有する炭素材料を電極として用いれば，従来不可能とされた仕上げ条件下における電極無消耗加工が可能となるのではないかと考えられる。そこで本章では，化学蒸着法によって乱層構造を有する炭素材料を作成し，その可能性について検討を行った。

5.3 CVD炭素

5.3.1 CVD炭素の構造および物性

本研究に使用した炭素電極は化学蒸着法（CVD法）により作成したものである。図5-2にその装置の概略を示す。気相として用いた1，2-ジクロロエチレンは500℃付近から分解し始め，数秒の滞留時間で多量のすすを発生する，最も低温で炭素化しやすい化合物の一つである。これを図のような横型の管状炉で，高周波等の加熱方法により約600℃に熱されたグラファイト基材上にアルゴンガスをキャリアガスとして送ると，ガス噴出口付近の上流部分には1時間に数

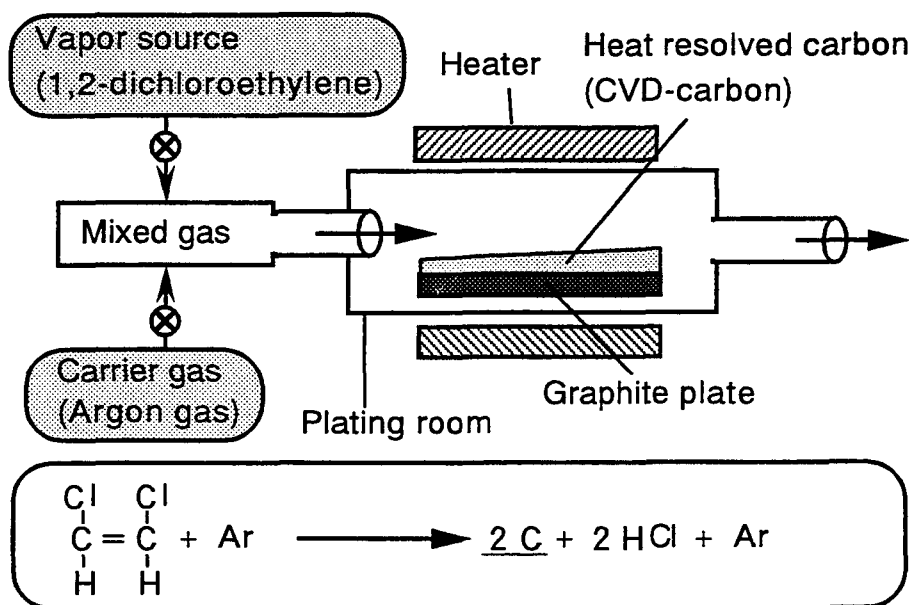


図5-2 化学蒸着（CVD）法

十 μm の堆積速度で、図5-3に示す構造をした熱分解炭素（以下、CVD炭素と記す）が生成される⁵⁻¹⁵⁾。図中下部の黒い部分がグラファイト基材であり、その表面にCVD炭素が生成堆積する。層状構造（Laminar）は、炭素の六角網平面がグラファイト基材表面に堆積したものである。すなわちその構造は乱層構造である。また円柱状構造（Columnar）は、基材表面またはその表面に固定された気相分解生成物が核となり、それを中心として生成が行われたものである。気相の温度、濃度が高いほど、また滞留時間が長いほど気相中で核が生成しやすく円柱状構造になりやすくなる。本研究で電極として用いた炭素はこの層状構造と円柱状構造が混成されたものである。すなわちこの電極材料は、生成過程は異なるが放電加工において油加工液中で生成される熱分解カーボンと構造は酷似している。

CVD炭素の物性値を表5-1に示す。図5-3に示したように組織が主に層状であるため、堆積方向と堆積面内の方向とでは比抵抗値および熱伝導率が大きく異なる。すなわち、堆積面内では電流が流れやすく、熱の伝わりもよい。これに対し堆積方向では電流は流れにくく、熱も伝わりにくいという非常に異方性の強い構造となっている。

また通常の放電加工用グラファイト焼結体の電極（イビデン(株)：ED-3）と比較すると、C V

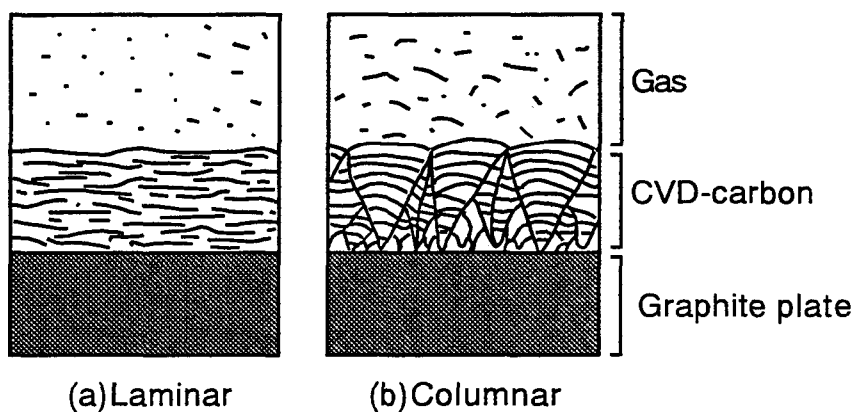


図5-3 CVD炭素の構造

表5-1 CVD炭素の物性値

	Specific gravity [g/cm ³]	Resistivity [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]	Heat conductivity [W/(m \cdot K)]
CVD-carbon	2.0	(\perp) 50000 (//) 700	2 300
Graphite	1.8	1400	75.4

(\perp) Thickness direction
(//) Layer direction

D炭素のほうが比重が大きくなっている。このことからCVD炭素電極は、グラファイト電極と比較すると気孔が少なく、構造が密であると考えられる。

5.3.2 CVD炭素電極

CVD炭素電極の形状および構造を図5-4に示す。この電極は中心部に $\phi 5 \mu\text{m}$ のカーボンファイバーを束にして約 $\phi 1 \text{mm}$ の基材とし、CVD炭素を半径方向に成長させたものである。電極直径は 6mm である。炭素の成長堆積方向が半径方向であるために図に示すように、半径方向の比抵抗 ρ は $50000 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ であり、軸方向の比抵抗は $700 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ となる。また熱伝導率 λ はそれぞれ $2 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $300 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ である。すなわち電極の軸方向で電流が流れやすく、熱の伝わりのよい方向となっている。加工実験には比較のため同形状のグラファイト（イビデン(株)：ED-3）も電極として用いた。また、工作物には炭素工具鋼SK3を用いた。

実験はトランジスタスイッチング式の放電加工機によって行われた。加工条件は表5-2に示すような仕上げ加工の条件とした。

5.4 CVD炭素電極の放電加工特性

5.4.1 電極消耗特性

図5-5はパルス幅を変化させたときの体積電極消耗率を示したもので、電極の変化量は加工前後の電極長さの変化により算出した。図より明らかなように、両電極ともパルス幅の増加とともに電極消耗は小さくなっていることがわかる。またグラファイト電極を用いた場合、パルス

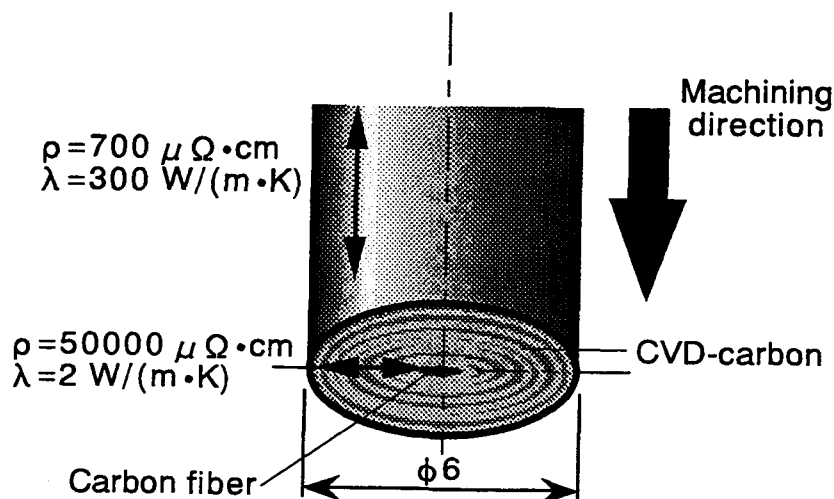


図5-4 CVD炭素電極の形状および構造

表5-2 放電加工条件

No-load voltage	$V_0 = 120V$
Polarity	Electrode : (+)
Discharge current	$I_p = 5A$
Pulse duration	$\tau_p = 4 \sim 100 \mu s$
Duty factor	D.F. = 50%
Workpiece	Carbon tool steel SK3
Machining fluid	Kerosine type fluid

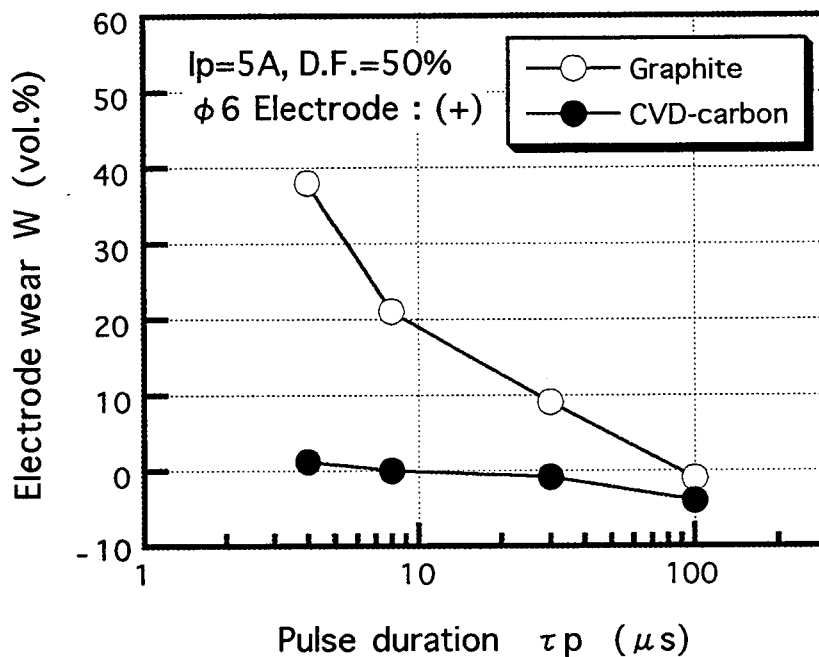


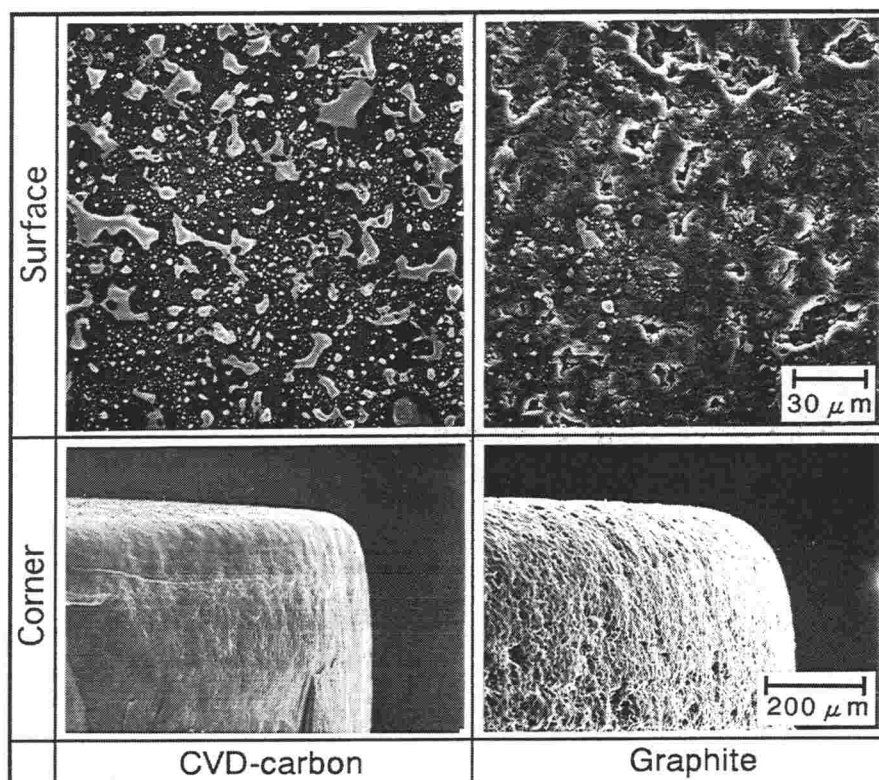
図5-5 電極消耗率とパルス幅の関係

幅が短い領域では消耗は20%以上とかなり大きくなっている。これに対してCVD炭素電極を用いた場合には、パルス幅が短くても電極はほとんど消耗せず、パルス幅4 μs でも電極消耗率は1.2%程度と、ほぼ無消耗加工が可能となっている。すなわち従来仕上げ加工の領域では無消耗加工は不可能であり、ある程度の消耗を犠牲にして加工面粗度の向上を図っていたが、この電極はその限界を打破できる可能性があると考えられる。これは前述の表5-1に示されるように、CVD炭素の場合軸方向の熱伝導率が大いいため（グラファイト電極の約4倍）、放電によって電極側に与えられる熱が軸方向に分散しやすいためであると考えられる。しかしながらパルス幅の短い領域においてもほとんど消耗していないことや、CVD炭素はその生成方法は異なるものの、加工によって生ずる熱分解カーボンと同様に乱層構造を有していることから考

慮すると、この条件においても加工液の熱分解カーボンが電極端面に付着し、電極を保護しているのではないかと推測される。

そこで加工後の電極端面および電極角部の観察を行った。図5-6は、 $\tau p=8 \mu s$ と短いパルス幅の加工条件の場合のSEM写真である。図より明らかなように、グラファイト電極端面にはグラファイトの素地組織が観察され、加工により消耗していることがわかる。これに対してCVD炭素電極端面には、工作物および熱分解カーボンの付着が多く認められる。通常熱分解カーボンの付着はパルス幅の長い領域においてのみ観察されるものであり、それによって電極無消耗加工が可能となる。この図に見られるようなパルス幅の短い領域で熱分解カーボンが付着する現象は極めて特異であり、これによって、パルス幅の短い領域においても電極低消耗加工が可能になったものと考えられる。また消耗しやすい角部を比較すると、グラファイト電極の角部はかなり消耗が大きく角が丸くなっているのに対して⁵⁻¹⁶⁾、CVD炭素電極は角部が比較的良く残っている。CVD炭素電極の場合は消耗が小さいだけでなく、比抵抗および熱伝導率が半径方向と軸方向とで大きく異なることも消耗特性に影響していると考えられる。

次に加工前後の電極端面のXPS分析（Fisons Instruments社製 SSX-100Sを使用）を行った。図5-7はその際の炭素 1s軌道の光電子スペクトルである。この分析結果は表面から約10nmの極表面の情報であり、表面に形成される大気による酸化層、炭化層等の汚染吸着層は測定前に装置内でArイオンエッチングにより除去している。加工前のスペクトルは破線で示されているがC V



$I_p=5A, \tau p=8 \mu s, D.F.=50\%$

図5-6 加工後の電極端面および角部

D炭素、グラファイトともほぼ同じ結合エネルギーとなっている。またスペクトルはCVD炭素のほうが強度が高く、広がりもわずかに小さくなっている。これはCVD炭素が層状の均一な組織を有しているためである。図中実線は放電加工後の分析結果を示す。この場合、長いパルス幅での加工のため両電極端面にはかなり加工液の熱分解カーボンが付着していた。つまりこの結果は電極端面に付着した熱分解カーボンのスペクトルである。図より明らかなように、CVD炭素に付着した熱分解カーボンのほうがグラファイトの場合よりも結合エネルギーが大きくなっている。XPS分析における結合エネルギーは原子核と電子の静電力を表しており、この図のように高エネルギー側にシフトする場合、炭素の内殻電子である1s軌道電子が原子核に近づいたことを意味する⁵⁻¹⁷⁾。同一の元素で結合エネルギーがこの図のように異なる結果に対して二つの要因が考えられる。ひとつはその構造自体が異なる場合、もう一つは炭素以外の電気陰性度の大きい原子と結合している場合である⁵⁻¹⁷⁾。分析された両電極端面には熱分解カーボン以外に飛散した工作物も付着しており、後者の影響が考えられる。しかしグラファイトの場合、その影響は全く見られない。したがって付着する熱分解カーボン自体の構造がCVD炭素とグラファイトでは異なっていると考えられる。すなわちCVD炭素に付着する熱分解カーボン自体もグラファイトの場合よりも耐消耗性が大きいのではないかと考えられる。

図5-8はパルス幅を変化させたときの加工面粗さを示す。両電極ともパルス幅の増加とともに粗さは増加し、100 μ sで再び減少する。パルス幅の長い条件では値は同程度であるが、パルス幅の短い場合には、CVD炭素電極を用いたほうがグラファイト電極より加工面粗さが若干小さくなっている。前述の電極消耗率の結果と合わせて考慮すると、CVD炭素電極はパルス幅の短い仕上げ条件において非常に有効であるといえる。

図5-9はパルス幅を変化させたときの加工速度の変化を示したものである。図より明らかなよ

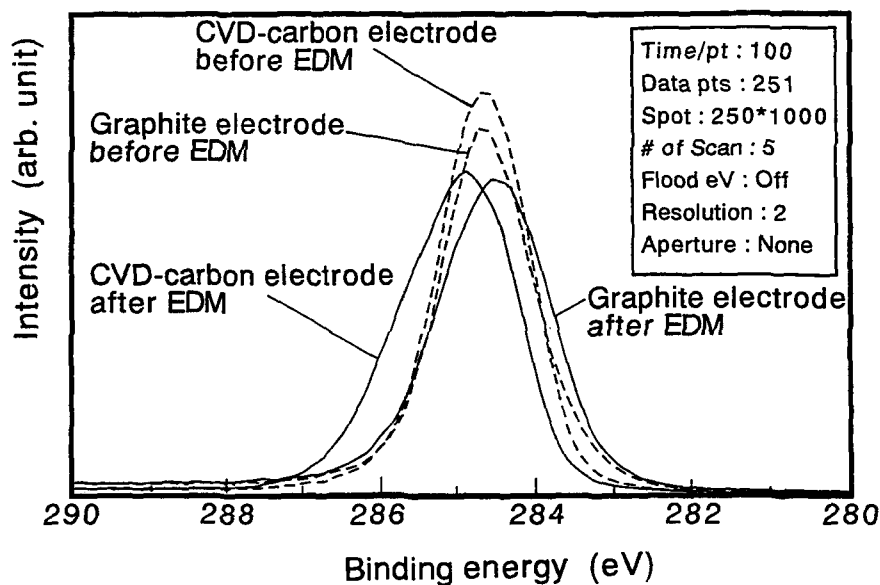


図5-7 加工前後のCVD炭素およびグラファイト電極端面のXPS分析（C1s軌道スペクトル）

うに両電極とも $\tau_p=10\mu s$ 付近で加工速度は最大となる。またCVD炭素電極を用いたほうがグラファイト電極より加工速度は小さくなっている。特にパルス幅の短い場合にその差が大きく、CVD炭素電極の加工速度はグラファイト電極の半分程度となる。CVD炭素電極を用いた場合、加工中に放電が断続的に発生することがあり、加工速度が小さいのは加工状態の安定

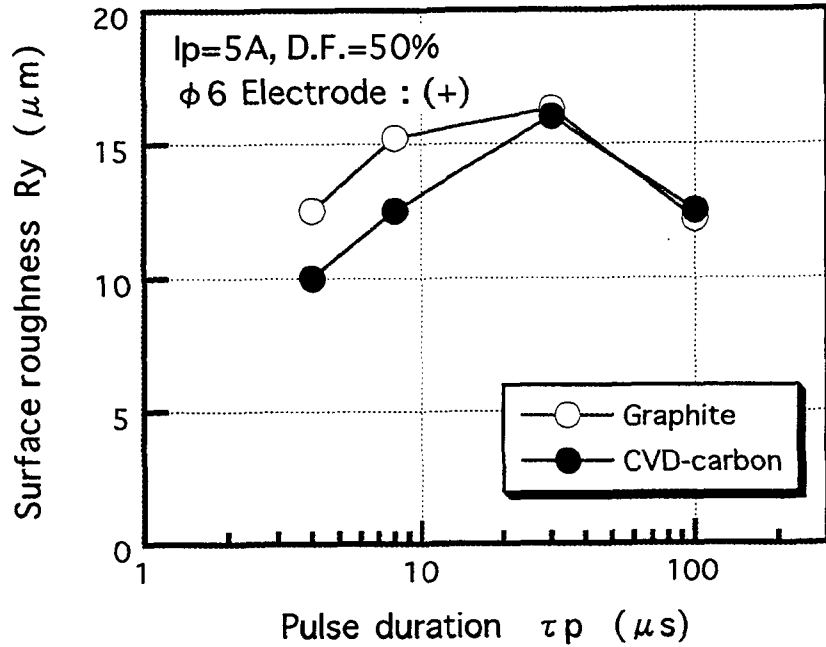


図5-8 加工面粗さとパルス幅の関係

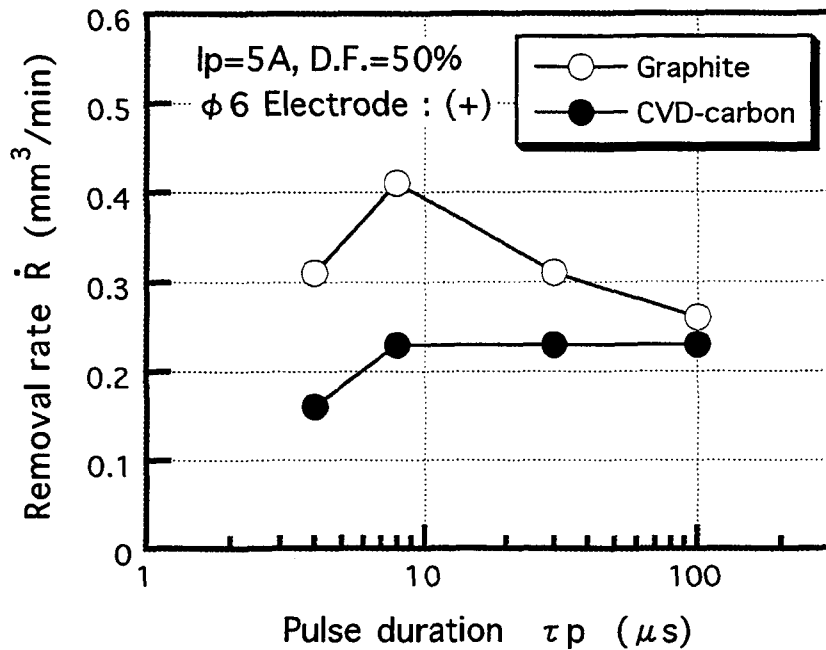


図5-9 加工速度とパルス幅の関係

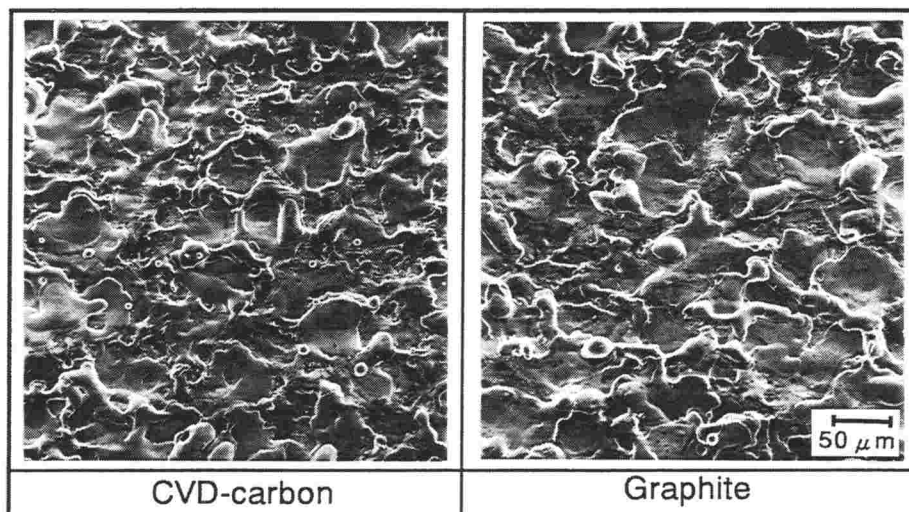
性に原因があると考えられる。

図5-10は、加工表面のSEM写真である。図より明らかなようにグラファイト電極を用いた場合と比較するとCVD炭素の場合の加工表面はひとつひとつの放電痕の大きさが小さくなっていることが確認できる。加工条件は同じであるため極間に与えられるエネルギーは同じであると考えられる。とすれば電極の構造が異なることによって、工作物側へ配分されるエネルギーがCVD炭素の場合にはより小さいのではないかと考えられる⁵⁻¹⁸⁾。またCVD炭素電極の半径方向では比抵抗が大きいため電流は半径方向へ広がりやすく、アーク柱半径がグラファイト電極を用いた場合よりも小さいのではないかと推測される。そのため先ほど示したように、CVD炭素の場合は加工速度が小さくなり、また加工面粗さも小さくなると考えられる。

以上のようにCVD炭素を用いることで粗さが小さく電極低消耗の加工が可能となる。しかしながら、CVD炭素電極では図5-11に見られるような欠陥が加工後の電極に確認された。この図は加工後の電極中心部および角部のSEM写真である。図より電極中心部に大きな窪みが生じていることがわかる。この部分はもともとカーボンファイバー基材の部分であり、窪みはCVD炭素に比べカーボンファイバーの消耗が大きかったために生じたものと考えられる。また角部では図のように層状に剥がれているところも観察された。これはその構造上、層と層とはファンデルワールス力による結合であり、その結合力が弱いため放電の衝撃によって剥がれたものと考えられる。

5.4.2 板状CVD炭素電極の加工特性

CVD電極を用いることで仕上げ条件においても電極無消耗加工が可能となることが明らかとなった。しかしながら前述の電極では、CVD炭素の成長の基点となる基材部分が存在する



$I_p=5A, \tau p=8 \mu s, D.F.=50\%$

図5-10 放電加工面SEM写真

ためその部分の消耗が大きいという問題があった。そこで基材部分の存在しない図5-12に示すような板状のCVD炭素電極を作製して検討を行った。この電極は、グラファイトプレート基材として表面にCVD炭素を生成堆積させたのち、基材部分を取り除いて成形したものである。図に示すように、電極の送り方向は比抵抗が小さく、熱伝導のよい表面方向と同じ方向である。

図5-13および図5-14は板状の電極を用いた場合の電極消耗率および加工面粗さを示す。比較のため同形状のグラファイト電極の結果も示す。図より明らかなように前述の棒状電極の場合と同様、パルス幅の短い領域においてもCVD炭素を使用するとほとんど消耗がなく、粗さもグラファイト電極に比べ若干小さくなっている。

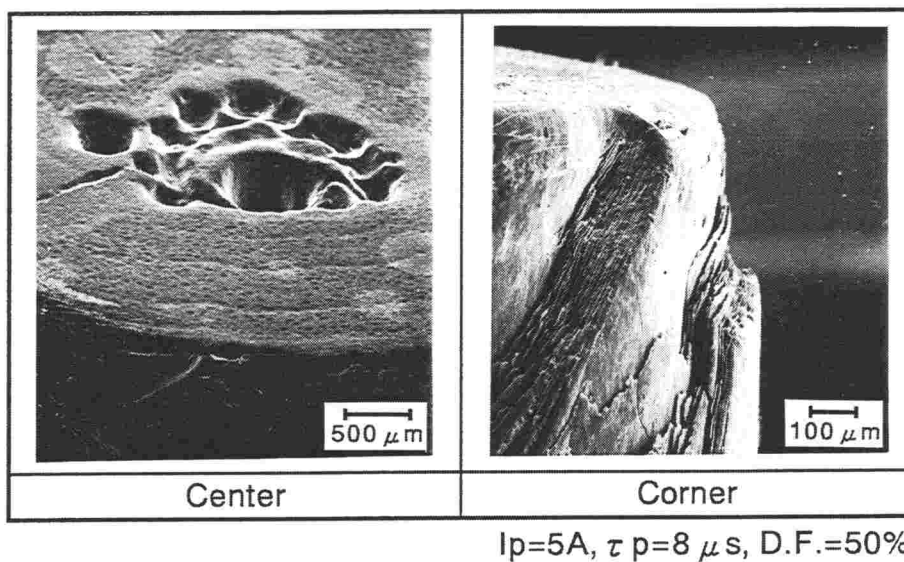


図5-11 加工後のCVD炭素電極中央部および角部

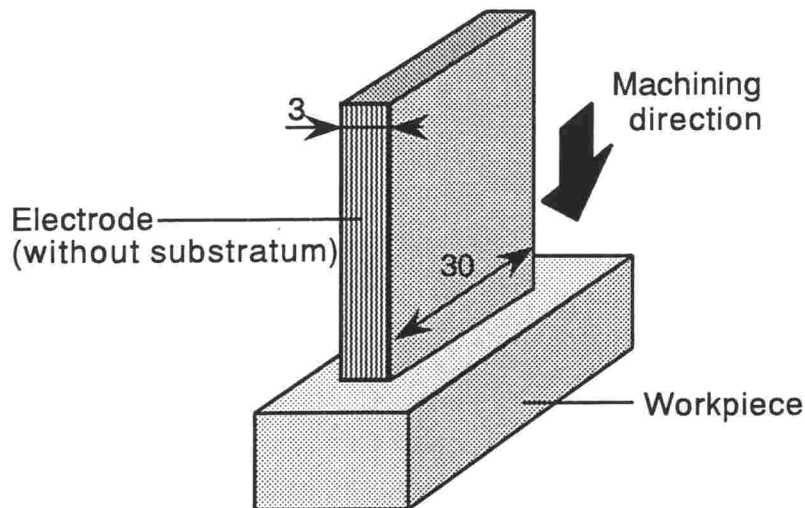


図5-12 板状CVD炭素電極

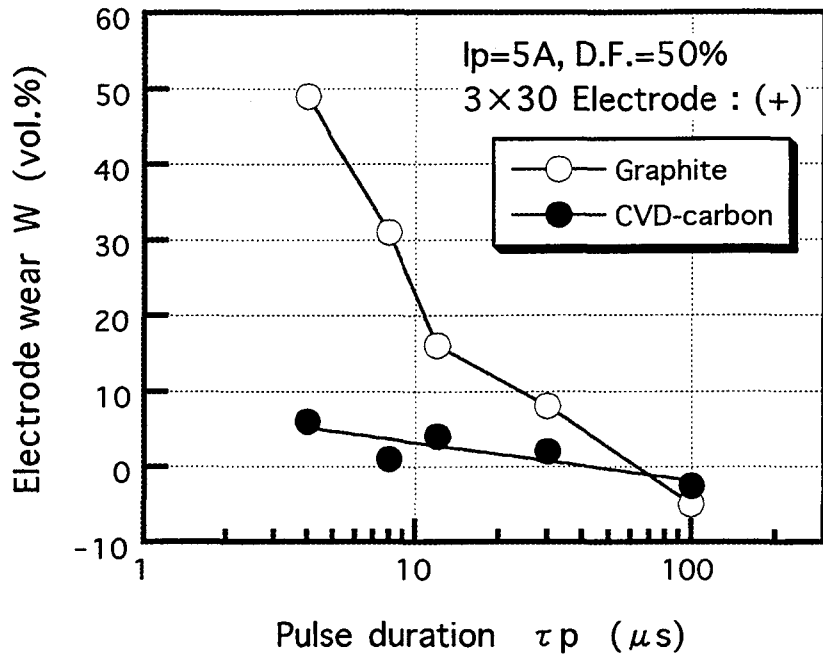


図5-13 板状CVD炭素電極における電極消耗率

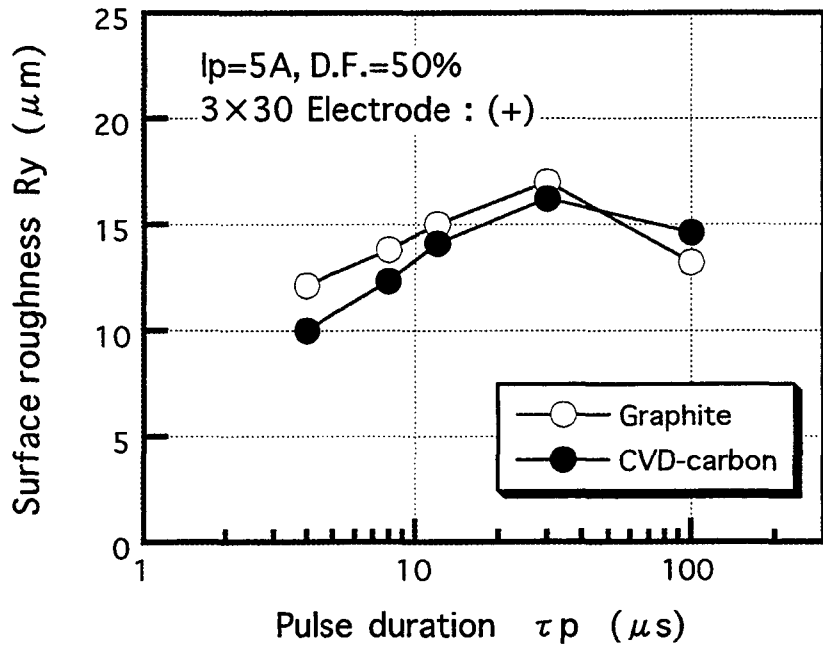


図5-14 板状CVD炭素電極における加工面粗さ

5.4.3 炭素被覆グラファイト電極

以上の結果より無垢のCVD炭素電極の堆積方向を、加工方向に対して垂直に用いることに

よって、従来不可能であった仕上げ加工域での電極低消耗放電加工が可能であることが明らかとなった。しかしながら、これらの電極の作成においては、CVD炭素の生成堆積速度が一時間に数十 μm と非常に遅いため、製作に時間がかかることやコストの点で実用化には問題がある。そこで次に、無垢のCVD炭素電極とは異なり、グラファイト電極表面にCVD炭素を被覆した電極（以下、炭素被覆グラファイト電極と記す）を用いた場合の加工特性について検討を行った。その電極の概略を図5-15に示す。直径は6mmで最初に用いたCVD炭素電極と形状は同じである。被覆したCVD炭素の厚みは約50 μm であり、CVD炭素電極に比べ短時間で安価に作成が可能である。また、堆積方向は各部分で外向きとなっており、加工表面では堆積方向と加工送り方向は同じである。すなわち加工面では電極の軸方向で電流が流れにくく、熱伝導率も小さくなっており、前述の無垢のCVD炭素電極とは異なる。

図5-16は電極消耗率とパルス幅の関係を示す。参考のためCVD炭素およびグラファイト電極の結果を示す。図より明らかなように炭素被覆グラファイト電極ではパルス幅の増加とともに電極消耗は小さくなるものの、CVD炭素のようにパルス幅の短い領域においても消耗が小さいわけではなく、かなり消耗している。この炭素被覆グラファイト電極に蒸着させた炭素の厚みは約50 μm であるため、加工初期の段階で被覆炭素層はほとんど消耗してしまったと考えられる。すなわちこの電極の場合、炭素の積層方向が加工方向と平行であり、構造上積層方向の結合力が弱いため、放電にともなう衝撃力によって被覆炭素が剥がれやすいと考えられる。さらに被覆炭素部分の軸方向の熱伝導率が小さく、放電により発生した熱が伝わりにくいことや、比抵抗が大きいためジュール発熱によるいくらかの温度上昇が影響していると考えられる⁵⁻¹⁹⁾。その結果、電極消耗の傾向はグラファイト電極に類似したものとなる。

被覆炭素層の脱落を確認するため、図5-17に示すように電極端面の一部で加工するようにして加工を行い、その様子を観察した。図より明らかなように被覆炭素は時間の経過Tとともに徐々に脱落消耗していくことがわかる。この加工条件では60秒後に50 μm ある被覆炭素層の約半

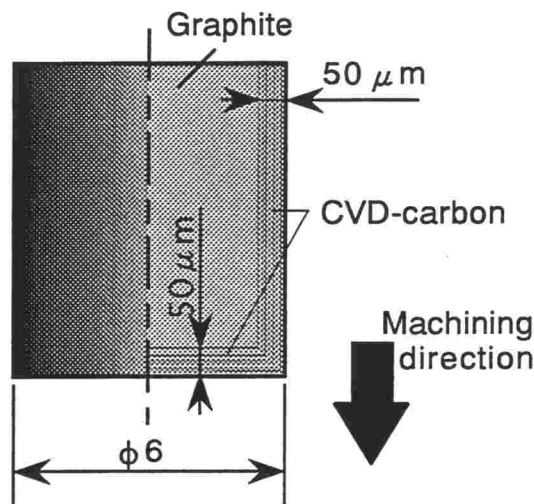


図5-15 炭素被覆グラファイト電極

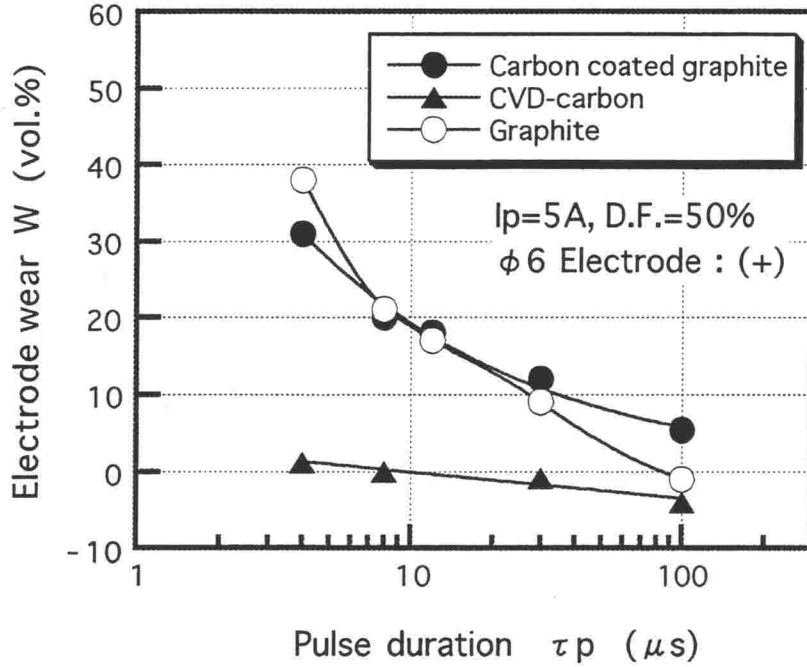


図5-16 炭素被覆グラファイト電極における電極消耗率

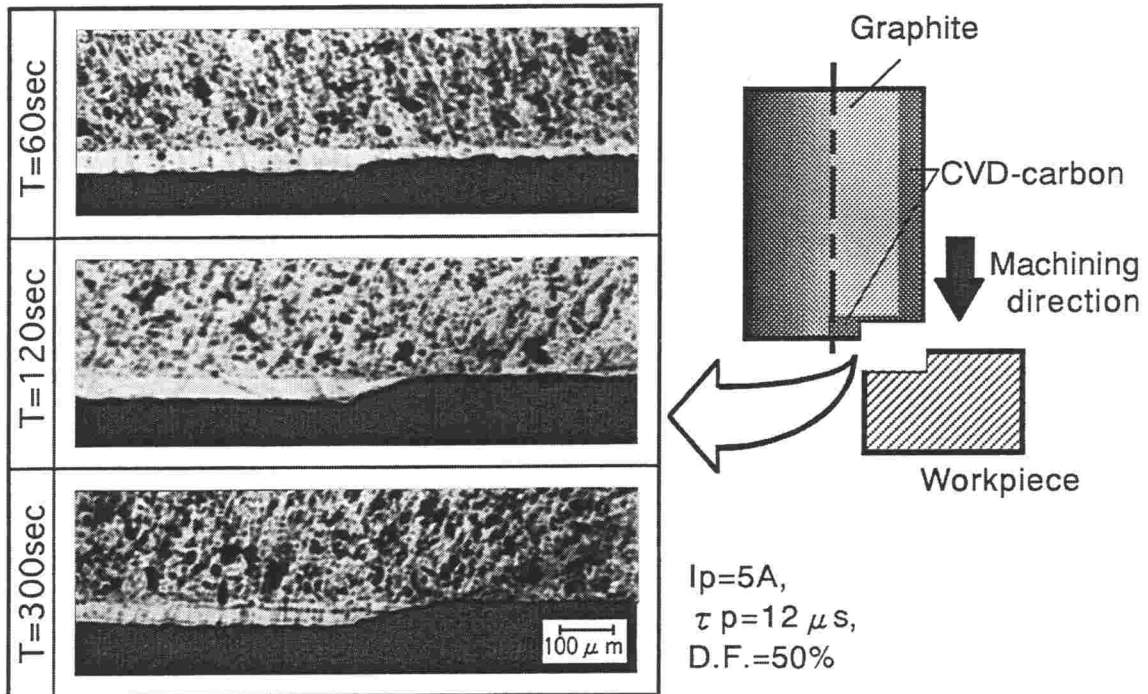


図5-17 被覆炭素の消耗過程

分、120秒後ではほぼすべての被覆層はなくなってしまふ。しかしながらその後300秒後の場合には、残ったグラファイト部分はあまり消耗しておらず、被覆炭素部分の消耗速度はグラファイト部分に比べかなり速いことがわかる。

図5-18は炭素被覆グラファイト電極を用いた場合の加工面粗さの変化を示す。炭素被覆グラファイト電極の場合は、前述のように加工初期の段階で加工表面の被覆炭素は消耗してしまい、実際にはグラファイト部分で加工が行われるために、グラファイトと同程度の粗さを示す。

以上のように、炭素被覆グラファイト電極では、被覆した部分が早急に消耗してしまうために所期の目的を達成することはできなかった。今後、炭素被覆グラファイト電極の消耗を低減させるための方策の検討が必要である。

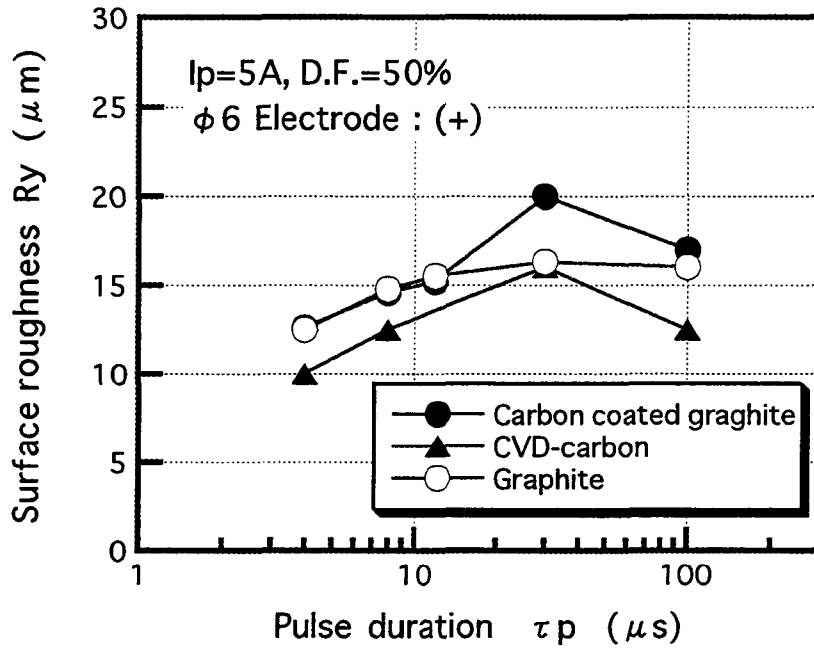


図5-18 炭素被覆グラファイト電極における加工面粗さ

5.5 結 言

本研究では加工液の熱分解によって生ずるカーボンと同じ乱層構造を有するCVD炭素を電極として用い、仕上げ条件における電極無消耗加工実現の可能性について検討を行った。本章で得られた結論は以下の通りである。

- (1) CVD炭素電極を用いた加工では、パルス幅の短い仕上げ条件においても電極端面に灯油系加工液の熱分解カーボンが付着する。
- (2) (1)の理由により、CVD炭素電極を用いれば従来不可能とされた仕上げ条件下における電極無消耗加工が可能となる。
- (3) CVD炭素電極は、現状ではCVD層の堆積方向の結合力が弱いために、一部で剥離が起きるといった欠点を有する。
- (4) 炭素被覆グラファイト電極を用いた加工では、電極消耗の低減は認められない。これは加工初期に端面の被覆炭素が脱落・消耗してしまうためである。

参考文献

- 5-1) 西村重志, 土屋政光: 低電極消耗放電加工の研究—電極表面の黒化層について—, 電気加工学会誌, **1**, 2 (1969) 71.
- 5-2) K.K.B.Hon and S.C.Li: An Experimental Study of Electrode Built-up Phenomenon in EDM, Proc. of ISEM-9 (1989) 321.
- 5-3) 斎藤長男: 放電加工のしくみと100%活用法, 技術評論社 (1979) 59.
- 5-4) 鈴木政幸, 毛利尚武, 斎藤長男, 武沢英樹: 放電加工における電極低消耗の研究 (第1報) -放電除去現象の観察-, 電気加工学会誌, **26**, 52 (1992) 47.
- 5-5) 宇野義幸, 岡田晃, 中西洋人, 郭常寧, 岡本康寛, 高木俊: CVD炭素電極の放電加工特性, 電気加工学会誌, **30**, 65 (1996) 1.
- 5-6) Y.Uno, A.Okada, C.Guo and T.Takagi: Newly Developed CVD-Carbon Electrode for Higher Performance EDM, Proc. of 3th ICPCG (1996) 386.
- 5-7) 谷口紀男: ナノテクノロジーの基礎と応用, 工業調査会 (1988) 292.
- 5-8) W.Ullman: Reducing Electrode Wear in Spark Machining, Metalworking Production, **102** (1968) 489.
- 5-9) M.Motoki and K.Hashiguchi: Energy distribution at the gap in electric discharge machining, Annals of the CIRP, **14** (1967) 485.
- 5-10) 木本保夫, 田宮勝恒, 平田勝己: 液中過渡アーク放電による電極消耗の研究, 電気学会雑誌, **89**, 964 (1969) 133.
- 5-11) 元木幹雄, 李賛中, 谷村毅: 過渡アーク放電の電極消耗, 電気学会雑誌, **89**, 943 (1967) 793.
- 5-12) 向山芳世: 型彫・ワイヤ放電加工マニュアル, 大河出版 (1989) 77.
- 5-13) H.Xia, M.Kunieda and N.Nishiwaki: Removal Amount Difference between Anode and Cathode in EDM Process, IJEM, **1** (1996) 45.
- 5-14) 放電加工技術研究会: 放電加工技術便覧, 日刊工業新聞社 (1963) 135.
- 5-15) 石川敏功, 長沖通: 新・炭素工業, 近代編集社 (1980) 56.
- 5-16) 鈴木政幸, 毛利尚武, 斎藤長男, 武沢英樹: 放電加工における電極低消耗の研究 (第2報) -消耗状態の時間的推移の観察-, 電気加工学会誌, **27**, 56 (1993) 50.
- 5-17) 山科俊郎, 福田伸: 表面分析の基礎と応用, 東京大学出版会 (1991) 116.
- 5-18) 木本康雄: 電気・電子応用精密加工, オーム社 (1992) 21.
- 5-19) 佐伯雄文, 国枝正典, 植木正憲, 佐藤裕: 高抵抗材料の放電加工におけるジュール発熱を考慮した工作物表面温度の非定常解析, 精密工学会誌, **62**, 3 (1996) 443.

第6章 結 論

本編では放電加工における加工特性の向上を目的とし、高能率化、高精度化および加工面の高機能化に対しいくつかの新たな加工技術を提案するとともに、放電加工の基礎的現象の解明を行った。以下に本編で得られた知見をまとめる。

第2章「高速極性切替による放電加工の高能率化」では、放電加工中に任意に極性を切り替えて加工を行う高速極性切替放電加工法について提案した。放電加工において正極性加工と逆極性加工ではその特性が大きく異なり、両者の加工特性は相反するものであるため、互いの極性を適当におりませることにより加工特性、特に加工速度および電極消耗の改善について実験的検討を行った。その結果、灯油系加工液を用いた場合の加工速度は、正極性加工よりも正極性加工に逆極性放電を少し混合した場合のほうが大きいことが明らかとなった。そしてこれは正極性加工で形成された加工表面の炭化層あるいは熱分解炭素生成物を逆極性放電によって除去できるためであることがわかった。また高速極性切替放電加工では、加工速度、電極消耗率および加工面粗さは、1サイクル中の正極性および逆極性放電回数には影響されず、両者の比率のみに依存することが判明した。

第3章「粉末混入放電加工における加工面生成機構と加工面性状の向上」では、シリコン粉末混入放電加工における加工面生成機構について検討を行った。その結果、シリコン粉末混入加工液の比抵抗は灯油系加工液よりも小さいことや電界中の微粒子の往復運動および柱状集積のため、シリコン粉末混入放電加工では極間距離が大きくなることが判明した。これにより工作物に作用する放電衝撃力が小さくなり、単発放電痕は起伏の小さいきれいな円形状になるとともに、加工表面に残留する再凝固層も厚くなることを明らかにした。またシリコン粉末混入放電加工では、極間の増大および放電の分散により短絡の少ない安定した加工状態が得られ、加工速度の増大が可能となることが明らかとなった。さらに工作物中の炭化物状態が加工面粗さに及ぼす影響についても考察を行い、粉末混入放電加工では工作物中の炭化物の塊が大きいほど表面粗さは大きくなることを明らかにした。そしてこれは放電加工中の熱衝撃によるクラック伝播のために炭化物が工作物から剥離・脱落するためであることを明らかにした。

第4章「回転円板電極を用いた放電溝加工の高精度化」では、極間状態が悪化しやすく加工が難しいとされる溝加工において、新たな回転円板電極による放電加工法を提案し、従来の平板電極による加工と比較しながら、その加工特性および加工機構について実験的に検討を行った。その結果、従来の平板電極で放電加工した場合、溝の底面には、極間の加工液の流れの悪化により局所的なうねりが生成されるが、回転円板電極を用いた加工では、加工液の循環がスムーズになり、加工粉および気泡が効率的に排出され安定した溝加工が可能となることを明ら

かにした。また回転円板電極加工法では平板電極加工法よりも加工速度が増大することが明らかとなった。さらに回転円板電極ではある時刻に形成される溝部分は電極の位置から特定できるという特徴を有していることに着目し、電極半径消耗量を計算によって予測、補正することによって所望の溝形状を精度よく得られることを明らかにした。

第5章「CVD炭素電極による高精度放電加工」では、従来不可能とされる仕上げ条件における電極無消耗加工の実現を目的とし、新たな炭素電極を開発するとともにその可能性について検討を行った。まず電極低消耗の原理について言及し、加工液の熱分解によって生じるカーボンの電極端面への付着現象の重要性を指摘した。これに基づき、化学蒸着法によって熱分解カーボンと同じ乱層構造を有するCVD炭素電極を開発し、その材料特性を把握した。そしてCVD炭素電極の放電加工特性について実験的に検討した結果、CVD炭素電極を用いた加工では、パルス幅の短い仕上げ条件においても電極端面の熱分解カーボンが付着し、これによって従来不可能とされた仕上げ条件下における電極無消耗加工が可能となることを明らかとした。また加工面粗さが低減することも判明し、仕上げ加工用電極として優れた特性を有することが明らかとなった。さらに板状のCVD炭素電極によりリブ形状の加工を試み、同様に良好な結果を得た。

第II編 放電加工における難加工材の高エネルギー加工

第1章 緒 論

近年、航空・宇宙産業、原子力・エネルギー産業、海洋開発産業、半導体産業など最先端の産業において新たな技術開発が急速に進められている。これらの開発にともない、耐熱性、高温強度、耐食性、耐摩耗性などに優れた特性を有する様々な新素材が開発され、その応用が有望視されている。しかしながらこれらの材料はその優れた特性ゆえに従来の機械加工では難削材であることが多い。一方放電加工は放電という高密度のエネルギーを利用し非接触で加工を行うもので、その原理上材料の硬度、強度、靱性などの機械的特性に左右されないため、難削材の加工に対しても非常に有効な加工法であると考えられる。斎藤ら¹⁻¹⁾はチタン材料に対し放電加工を行い、加工状態が不安定になりやすく、また電極消耗も大きく放電加工においても難加工であることを明らかにしている。また半導体材料である単結晶シリコンの加工への適用¹⁻²⁾、導電性セラミックスの放電加工特性^{1-3)~1-5)}についても報告されている。福澤ら^{1-6)~1-8)}は絶縁性セラミックス材料に対して補助電極を用いることによって放電加工が可能であることを明らかにしている。しかしこれらの新素材に対する加工法の確立が求められる現在、その可能性を有する放電加工の研究は十分なものとはいえない。

一方、金型材料においても製品の多様化とともにその製作方法の改善だけでなく、金型材料そのものの組織的な改良や従来の鉄鋼材料に代わる新たな材料の使用が検討されている。特にシェルモールド用金型、プラスチック金型に特殊銅合金やアルミニウム合金などが一部使用されはじめている^{1-9) 1-10)}。しかしながら未だそれらの金型材に関する体系だった研究報告はなく、生産現場では試行錯誤的に行われているのが現状である。

放電加工は熱加工であるため、工作物の熱的特性、特に融点および熱伝導率はその加工特性を大きく左右する¹⁻¹¹⁾。すなわち放電により生じる熱エネルギーに対し、高融点材料ほど溶融量が少なく、また高熱伝導材料ほど熱が拡散し、加工速度の低下や電極消耗の増大を招く。従って新素材の中でも耐熱性に優れた材料、また熱伝導率が大きい銅合金やアルミニウム合金などの新たな金型材においては放電加工が困難な材料であると予測される。

本編では放電加工における難加工材の高エネルギー加工を目的とし、放電加工において難加工と考えられる耐熱合金、高熱伝導合金などの放電加工特性を解明するとともにそれらの加工技術確立のための指針を示している。本編は緒論および結論を含め5章から構成されている。

第2章「耐熱性合金の高能率放電加工」では、最先端産業分野で需要の高まる耐熱性合金の放電加工について検討を行っている。代表的な耐熱性材料であるチタン合金およびニッケル基耐熱合金の放電加工特性を明らかにし、また放電加工においても電極消耗が大きく難加工とされるチタン合金についてその要因を解明するために、単発放電における形状の解析、盛り部分の挙動などの基礎的な現象について詳細な検討を行っている。そしてこれらの材料の高能率放電加工実現のための指針を明らかにしている。

第3章「高熱伝導銅合金の放電加工特性」では、金型の多様化に伴って従来の金型材に代わり使用されるようになった特殊銅合金の放電加工特性を明らかにするとともに、金型としての加工面特性についても考察している。またアルミニウム青銅についてもその加工特性について検討を行っている。さらに従来より金型寿命改善のため行われているニッケルメッキ表面処理にかわって放電加工による表面処理技術として、加工液中にニッケル粉末を混入し加工を行うことによって、加工面粗さを向上させるとともに加工面に耐食性の優れたニッケル含有層を形成することを試みている。

第4章「アルミニウム合金の放電加工特性」では、プラスチックモールド金型として用いられた高強度アルミニウム合金の放電加工について検討を行っている。アルミニウム材の放電加工では加工表面に酸化被膜、炭化層が形成されやすく、加工状態が悪化しやすいとされている。本章ではその現象を確認するとともに、前編で検討を行った高速極性切替放電加工を適用し、その有効性を示している。

第5章「結論」では、本編によって得られた知見をまとめている。

参考文献

- 1-1) 松浦徹, 堀武雄, 斎藤長男, 毛利尚武, 大竹廣定: チタン材料に対する放電加工の研究, 昭和63年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集 (1988) 185.
- 1-2) 河田耕一, 正木健, 佐藤健夫, 増沢隆久: 微細放電加工の研究 (第3報), 電気加工学会誌, **28**, 59 (1994) 1.
- 1-3) 斎藤長男, 毛利尚武: ファインセラミックスの放電加工および超音波加工, 電気加工技術 **13**, 40 (1989) 18.
- 1-4) 中村守: セラミックスの放電加工-炭化珪素焼結体について-, 電気加工学会誌, **19**, 37 (1985) 1.
- 1-5) 鈴木俊雄, 尾崎好雄, 高鷲民生: 放電加工による導電性セラミックスの加工特性, 電気加工技術, **10**, 30 (1986) 13.
- 1-6) 福沢康, 谷貴幸, 岩根英二, 毛利尚武: 放電加工機を用いた絶縁性材料の加工, 電気加工学会誌, **29**, 60 (1969) 11.
- 1-7) 谷貴幸, 福澤康, 毛利尚武, 斎藤長男: 絶縁性セラミックスの放電加工特性に及ぼす補助電極材料の影響, 電気加工学会誌, **30**, 65 (1996) 17.
- 1-8) Y.Fukuzawa, T.Tani, Y.Itoh, Y.Ichinose and N. Mohri : Electrical Discharge Machining of Insulator Ceramics with a Sheet of Metal Mesh, ISEM-11 (1995) 173.
- 1-9) 熊谷敦: プラスチック成型用金型材料, 型技術, **10**, 8 (1995) 49.
- 1-10) 山田定男: アルミニウム合金, 型技術, **8**, 12 (1993) 45.
- 1-11) 斎藤長男: 放電加工の仕組みと100%活用法, 技術評論社 (1979) 56.

第2章 耐熱性合金の高エネルギー放電加工

2.1 緒言

近年、航空・宇宙産業、原子力産業、海洋開発産業など最先端の科学技術分野においては高度な技術開発が急速に進められている。それらの産業で用いられる構造用部材は超真空、超高压、超高温、極低温、超高速、厳しい腐食環境下や放射線被爆下など極限状態で使用されることが多く、材料に要求される性能はますます過酷なものとなりつつある。特に耐熱性、高温強度を備えた合金の需要が急速に高まっている。このような背景のもとで、その代表的材料であるチタン合金やニッケル基合金に対する加工の需要も増加している。チタン合金の場合、構造用部材だけでなくスポーツやレジャーなど身近な分野、さらには人体に無害でなじみがよいという特徴を有しているために人工歯根や人工骨など生体用構造部材の分野にも広く利用されている。しかしながらこれらの材料はその優れた特性のために、一般に切削加工や研削加工など工具が工作物と接触するような従来の機械的加工法においては難削材として位置づけされており、高エネルギー・高精度加工法の確立が求められている。

これに対して放電加工は、放電という高エネルギー密度を利用した極微小部熱加工であるため、導電性材料であれば、工作物の硬度、靱性、強度などの機械的性質にほとんど影響されず加工が可能である。このため従来の機械加工では困難であった高硬度難削材料、特に金型の加工には広く利用されており、またその特性から考えればチタン合金やニッケル基合金の加工にも効果的的加工法であると考えられる。しかしながら、これまでの放電加工に関する研究報告は鉄鋼系金型材料についてのものがほとんどであり、ここで対象とするチタン合金、ニッケル基合金などについては未だ体系だった研究は少なく、生産現場では熟練者の勘と経験に頼っていることが多い。

チタン合金の放電加工に関する若干の研究報告によれば²⁻¹⁾、チタン合金の放電加工では加工状態が非常に不安定で加工能率が悪いことや、さらには電極消耗が大きいなど放電加工においても難加工であることが明らかにされている。

そこで本章では、チタン合金およびニッケル基合金の放電加工メカニズムを単発放電痕形状の解析、連続放電における加工状態観察など基礎的現象の解明をもとに体系的に把握し、耐熱性合金の高エネルギー放電加工実現のための指針を明らかにしている²⁻²⁾²⁻³⁾。

2.2 耐熱性合金

2.2.1 チタン合金の材料特性

チタンは周期律表で第4周期IV-a族に位置する原子番号22の遷移金属である。1155 Kに同素変態点をもち、それより低温側では最密六方晶 (hcp) の α 相、高温側では体心立方晶 (bcc) の β 相となる。チタンに合金元素を添加すると元素の種類により α/β 変態温度が変動し、また変態温度に幅を生じて($\alpha + \beta$)二相領域が現れるようになる。その結果チタン合金は室温において安定に存在する相によって α 合金、 $\alpha + \beta$ 合金および β 合金に大別される。 α 型合金はチタンにAl, C, Oなどの α 安定化元素を添加し、変態温度を上昇させて α 領域を広げた合金でTi-5Al-2.5Sn合金で代表される。この合金は高温強度に優れ、溶接性がよいが、組織は α 相のみで焼入れ硬化性はない。一方V, Nb, Moなどの β 安定化元素をチタンに添加すると変態温度を低下させて β 相領域を拡大する。この場合室温におけるミクロ組織は α 相と β 分解相が共存し、熱処理可能となる。これがTi-6Al-4Vで代表される $\alpha + \beta$ 型合金であり、構造用部材として一般によく用いられている。さらに β 安定化元素の添加量を増大させ、室温においても β 相が100%残留する合金が β 型合金である。また少量の β 相を含み大部分が α 相であるNear α 型と、少量の α 相を含み、大部分が β 相からなるNear β 型も存在する。表2-1に合金元素の種類と添加量による α 型から β 型への変化、代表的な合金組成および各種の性質を示す²⁴⁾。

表2-2に純チタンと他の金属材料の物理的性質を示す²⁵⁾。一般的に純チタンやチタン合金の特性をあげると、

- (1) 融点が高い。
- (2) 比重が鉄とアルミニウムの間であり、鉄の約60%である。
- (3) 熱伝導率が小さく、ステンレス鋼なみである。因みにチタン合金 (Ti-6Al-4V) ではさらにその二分の一以下である。
- (4) 電気抵抗が大きい。
- (5) ヤング率が小さく、鉄、ステンレス鋼の二分の一である。
- (6) 熱膨張係数が小さい。

となる。そのほかの特徴として、

- (7) 塩化物、酸化性の酸 (硝酸、クロム酸など)、有機酸 (酢酸、酒石酸など)、塩素や次亜塩素酸を含む水溶液に対して優れた耐食性を示す。
- (8) チタンもチタン合金も非磁性である。
- (9) 比強度が大きく、特にチタン合金は実用合金中最大の値を示す。
- (10) 化学的に活性で酸素や窒素と反応しやすい。

表2-1 チタン合金の組成と特性²⁻⁴⁾

型	組成	添加元素	性質
α 型	Ti Ti-5Al-2.5Sn	α 安定化元素 (Al, O, Nなど) 量増大 ↑ 中間的元素 (Si, Zr) ↓ β 安定化元素 (V, Mo, Feなど) 量増大	比重増大 ↓ 熱処理性向上 ↓ クリープ強度増大 ↑ ひずみ速度感受性増大 ↓ 塑性加工性向上 ↓ 溶接性向上 ↑
near α 型	Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.2Si Ti-8Al-1Mo-1V Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo		
$\alpha + \beta$ 型	Ti-6Al-4V Ti-6Al-6V-2Sn Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo Ti-8Mn		
β 型	Ti-13Al-11Cr-3Al Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr(β C) Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn(β III)		

表2-2 純チタンと他の金属の物理的性質²⁻⁵⁾

	Specific gravity [g/cm ³]	Melting point [K]	Coefficient of linear expansion [1/°C]	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Resistivity [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]	Young's modulus [kg/mm ²]
Titanium	4.5	1,941	8.4×10^{-6}	17	55	10,850
Iron	7.9	1,803	11.8×10^{-6}	83	9.7	21,000
Stainless steel	7.9	1,673	17.0×10^{-6}	203	72	20,400
Aluminium	2.7	933	23.1×10^{-6}	236	2.7	7,050
Copper	8.9	1,356	16.8×10^{-6}	403	1.7	11,000

などが挙げられる。これらの性質の中で特に耐食性、比強度は他の金属に比して極めて優れている。欧米ではチタン材料は、比強度の大きさに当初から注目され、航空機用材料として主に合金の形で強度材として広く使用されてきた。一方日本では、第二次大戦後航空機産業が抑制されたこともあって、その耐食性を生かして耐食材料として使用されたため、特に純チタンの使用が多く、今日もその傾向は続いている。現在チタン材料は、航空・宇宙産業、原子力産業、海洋開発産業など最先端の科学技術分野から、医療分野、スポーツ、レジャーなどの身近な分野まで広く利用されている。その使用例を表2-3に示す²⁻⁶⁾。

表2-3 チタン材料の応用例²⁻⁶⁾

用途・業種	使用される箇所
航空・宇宙産業	ジェットエンジン部品 航空機フレーム, ファスナー 人工衛星, ミサイル, ロケット部品
電力	原子力・火力発電所のコンデンサチューブ, 管板, タービンブレード
石油化学・ 一般化学工業	プラントの反応塔, 蒸留塔, 凝縮器, 熱交換器, バルブ等の機器材料 海水冷却熱交換器材料 船用各種熱交換器材料
メッキ, 表面処理	治具 電極 熱交換器
自動車, 船舶	レーシングカーのクランクシャフト, コンロッド, バルブ等 船内配管, 船用部品
医療材料	人工骨 ペースメーカー 歯科材料
レジャー関連	自転車のフレーム, スポーク テニスラケットフレーム スキーストック 釣り具 ヨットのマスト ゴルフクラブ 馬蹄 スパイク 登山具
装身具	時計 眼鏡フレーム ネクタイピン
エネルギー関連	地熱発電, 石油掘削関連機器, 原子力燃料廃棄物処理機器材料
海洋開発, 水産	海洋温度差発電 深海艇 水産養殖用器具
超伝導, 極低温	磁気浮上列車 クライオスタット 画像診断装置
形状記憶	バネ センサ 継手 シール材 アクチュエータ
水素吸蔵	水素貯蔵容器 ヒートポンプ 廃熱利用貯蔵システム 水素エンジン

本章ではチタン材料として純チタンとTi-6Al-4V合金を用いた。これらの腐食面写真を図2-1に示す。純チタンは α 型の代表的合金であり、組織をみると粒界が確認できる。またTi-6Al-4V合金は代表的な $\alpha + \beta$ 型合金であり、熱処理性、加工性、溶接性など全般的によくバランスのとれた安定した性質を有している。この合金は工業的に使用されるチタン合金の約80%を占めている。図中白色部分が α 相、黒色部分が β 相であり、針状 α 組織を成していることがわかる。

2.2.2 ニッケル基合金の材料特性

一般に500℃以上で使用される合金を耐熱合金と呼称している。それらに要求される主な性質を挙げると²⁻⁷⁾,

- (1) 高温で化学的に安定であること、すなわち空気中で酸化しにくく各種のガスなどにも侵されないこと、脱炭、浸炭、窒化などをうけて変質しないこと。
- (2) 高温で機械的性質がよいこと、すなわち高温での引張り強さが大きいだけでなく、ク

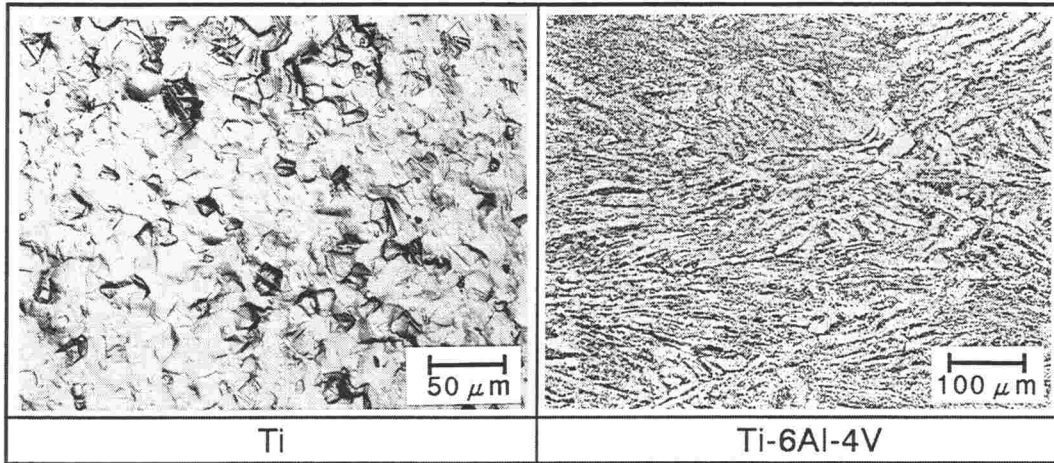
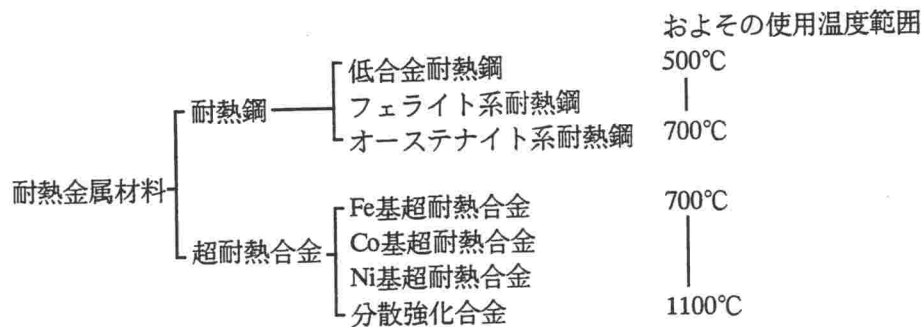


図2-1 純チタンおよびTi-6Al-4V合金の腐食面写真

図2-2 耐熱合金の分類²⁻⁸⁾

リープ強度も大であること。

(3) 使用温度で組織変化を起こさないこと，また使用温度以下に変態点のないこと。

(4) 溶接性， casting性， 加工性， 耐食性などが良好であること。

などである。この中で特に耐酸化性と高温強度が重要である。ジェットエンジン，ロケット，原子炉などの急速な発展にともない，現在様々な耐熱合金が使用されている。それらを分類すると図2-2のようになる²⁻⁸⁾。この中で超耐熱合金 (superalloy) はさらに高温 (一般に700°C以上) で高強度を保つ合金であり，その化学組成からFe基，Ni基およびCo基に大別される。現在はその優れた高温強度によってNi基合金が多用されている。

ニッケル自体は銀白色の金属で，耐熱性，耐食性ともに優れ，淡水，海水アルカリにはほとんど侵されない。硝酸には速やかに侵されるが，塩酸，硫酸には相当の耐食性を有する。表2-4にニッケルの物理的性質を示す²⁻⁹⁾。また表2-5に代表的ニッケル基合金の化学組成を示す²⁻¹⁰⁾。

ニッケル基超耐熱合金はNiを主成分とし，それにCr，Co，Moなどを多く含んだ合金であるが，その特徴はほとんどの合金がTiとAlを含んでいることである。すなわちfccの規則配列をした γ' (ガンマプライム) 相である $Ni_3(Al, Ti)$ の析出を利用した強析出硬化型合金である。鑄造合金，

表2-4 ニッケルの物理的性質²⁻⁹⁾

Specific gravity [g/cm ³]	Melting point [K]	Specific heat [J/(kg·K)]	Coefficient of linear expansion [1/°C]	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Resistivity [$\mu\Omega$ cm]	Young's modulus [kg/mm ²]
8.9	1,728	439	13.3×10^{-6}	92	9.5	21,000

表2-5 代表的ニッケル基耐熱合金の化学組成²⁻¹⁰⁾

Alloys	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Fe	B	Others
Hastellooy X	0.10	0.50	0.50	22.0	47.3	1.5	9.0			18.5		0.6W
Inconel 718	0.04	0.20	0.30	19.0	52.5		3.0	0.80	0.60	18.0		5.20Nb, 0.10Cu
X	0.04	0.70	0.30	15.0	73.0			2.50	0.80	6.7		0.85Nb, 0.05Cu
Rene 41	0.09			19.0	41.8	11.0	10.0	3.10	1.50		0.010	
Waspaloy	0.07	0.50	0.50	19.5	55.0	13.5	4.3	3.00	1.40	2.0	0.006	0.09Zr, 0.10Cu, 0.03S
Udimet 500	0.08	0.75	0.15	19.0	46.7	19.5	4.0	2.90	2.90	4.0	0.010	
700	0.15			15.0	67.2	18.5	5.2	3.50	4.25	1.0	0.050	
Nimonic 75	0.01			20.0	74.9			0.04		5.0		
115	0.20			15.0	57.3	15.0	3.5	4.00	5.00			
No.64 BC	0.15			12.0	52.5	20.0	5.0	4.00	6.00		0.300	

鍛造合金など目的、用途によって種々のものがある。ことに鑄造合金では、鍛造性を必要としないので、Ti、Al以外にも添加元素の量と種類を大幅に増加して強化できる。そのため鑄造用ニッケル基合金が現在では最も高温強度の大きい合金とされており、その高温強度は年代とともに急速に向上している。このような特徴から、航空機、工業用ガスタービンのブレードまたはディスク、燃焼室など高温高負荷にさらされる主要部品に広く用いられている。

本章で工作物として使用した耐熱合金は代表的なNi基超耐熱合金であるInconel 718である。

2.2.3 耐熱性合金の被加工性

前述のように優れた特性を有するチタン合金、ニッケル基合金であるが、これらの合金はその特性ゆえに一般に切削加工や研削加工においては難削材料である。切削加工の難易には多くの要因が関与しているが、一般に難削性を与えるであろうと考えられる材料特性を挙げると以下のようである²⁻¹¹⁾。

- (1) 硬度が高い。

- (2) 加工硬化性が大きい.
- (3) 強度が高い.
- (4) 熱伝導性が小さい.
- (5) 切削工具, 砥粒との反応性, 親和性が高い.
- (6) ヤング率が小さい.

チタン合金では, 特に(3)による工具のチッピング, (4)による切削温度の上昇, その熱による工具摩耗, (5)による工具摩耗, 仕上げ面の悪化や切り屑処理性の悪化などのトラブルが発生しやすい. またニッケル基超耐熱合金では(2), (3)による工具摩耗が激しい. 研削加工においても両者は特に(4), (5)によって研削温度が高温になりやすく, また砥石と工作物との化学反応にともなって異常摩耗を起こしやすい.

図2-3は円筒プランジ研削を行った場合の研削比 G に及ぼすプランジ速度 V_p の影響を各種被削材について示す²⁻¹²⁾. 図より明らかなように, 炭素鋼S45Cは最も研削比が高くプランジ速度の大きいところで約40である. またステンレス鋼SUS304は約10で炭素鋼よりも削りにくいことがわかる. しかしチタン合金とニッケル基超耐熱合金はこれらに比べて極端に研削比が低く, WaspaloyとRené 41 (ニッケル基超耐熱合金)は1~2, Ti-6Al-4V (チタン合金)は1以下の値となっている. すなわちチタン合金やニッケル基超耐熱合金は砥石摩耗量と同程度かそれ以下の研削量しか得られない. このように研削においても両者は難加工である.

以上のようにチタン合金, ニッケル基超耐熱合金は機械加工においては代表的な難削材とされている. このためこれらの高能率, 高精度加工法の開発が求められている.

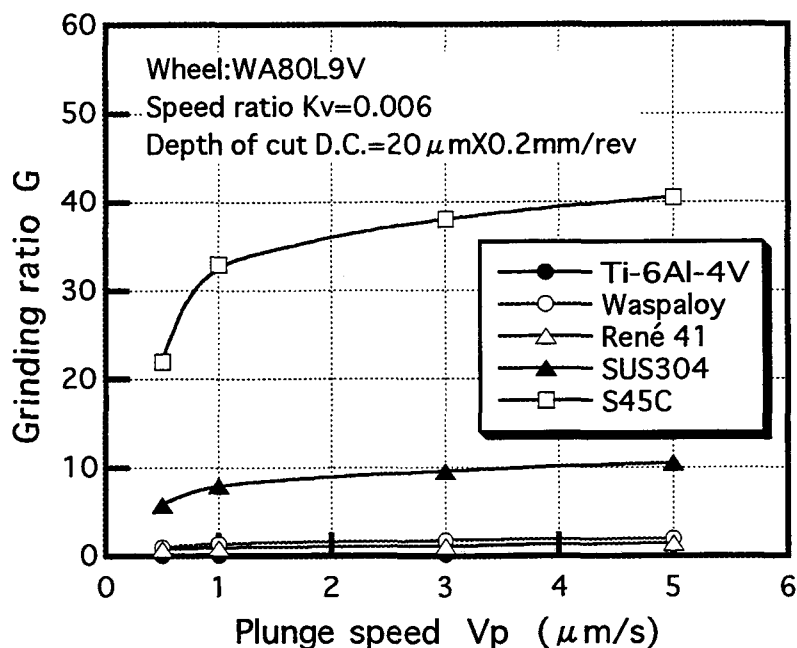


図2-3 各種被削材の研削比に及ぼすプランジ速度の影響²⁻¹²⁾

2.3 チタン合金の放電加工における加工状態の安定化と高能率化

2.3.1 単発放電実験

放電加工は多数の単発放電痕の累積によって加工が進行するため、放電加工特性の基礎的な究明には単発放電による加工特性を把握する必要がある。従ってまず単発放電実験を行い、放電痕の観察、形状等の解析を行った。

2.3.1.1 実験方法および三次元形状測定装置の試作

実験はトランジスタスイッチング式のNC放電加工機を用い、別途に取り付けた単発放電回路からトリガー信号を送ることにより、極間に単発放電を発生させた。工具電極には直径5mmのグラファイトおよび銅棒を用い、任意の位置に放電痕を形成し、安定して放電が発生するように電極先端を約40度の円錐状に成形して使用した。加工液には灯油系加工液（比抵抗 $10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上）を使用した。工作物は純チタンおよびTi-6Al-4V合金である。また比較のために冷間金型材として用いられるSKD11（Chemical composition(%) / C:1.40, Si:0.31, Mn:0.38, P:0.025, S:0.008, Cr:12.09, Mo:0.86, V:0.24）を用いた。これらの工作物は前加工として加工表面をWA砥石により平面研削し、エメリー紙により研磨した後、粒径 $1\mu\text{m}$ アルミナによる湿式ラップ加工を施し、表面粗さを $1\mu\text{mRy}$ 以下としている。

一般に単発放電痕形状を測定する際に用いられている触針式表面検査機は、測定対象物である一断面を測定するのみであり、二次元的形状しか得られない。実際の放電痕形状は三次元であり、二次元形状だけから判断すると重要な情報を見落とすことも考えられる²⁻¹³⁾。このため本研究では、放電痕形状を三次元的に評価するために三次元形状測定装置²⁻¹⁴⁾を試作して測定に用いた。図2-4にその概略を示す。本装置ではダイヤモンドスタイラスおよびアンプは一般の粗さ計のものを使用し、測定にあたっては傾斜調節機構を備えたX-Yステージ上に測定物を水平に設置した後、ステージコントローラによりX軸およびY軸のパルスモータを駆動させることによって、 100×100 の点のZ座標の粗さ計からの信号をADコンバータを通して汎用コンピュータに取り込むようにしている。

加工条件は無負荷電圧を120V一定とし、放電痕形状をより明確に把握するために放電電流 $I_p=40, 60\text{A}$ 、パルス幅 $\tau_p=40\sim 1000\mu\text{s}$ と放電エネルギーの比較的大きい条件とした。実験は工具電極を負極とする正極性、および工具電極を正極とする逆極性の両極性で行った。

2.3.1.2 単発放電痕形状の解析

図2-5は、単発放電を行った場合のチタン合金およびSKD11に生成された放電痕のSEM写真で

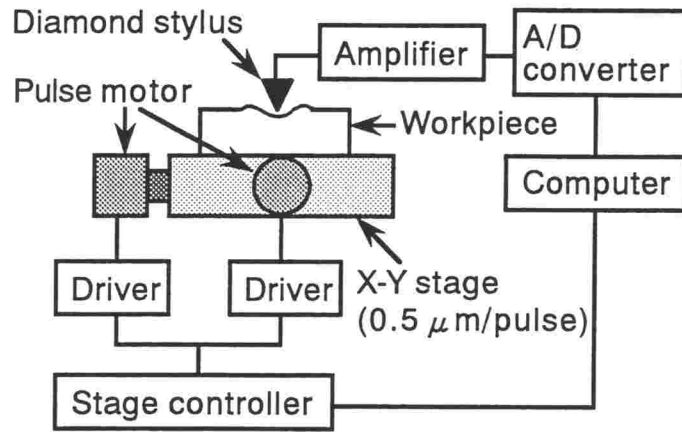


図2-4 三次元形状測定装置

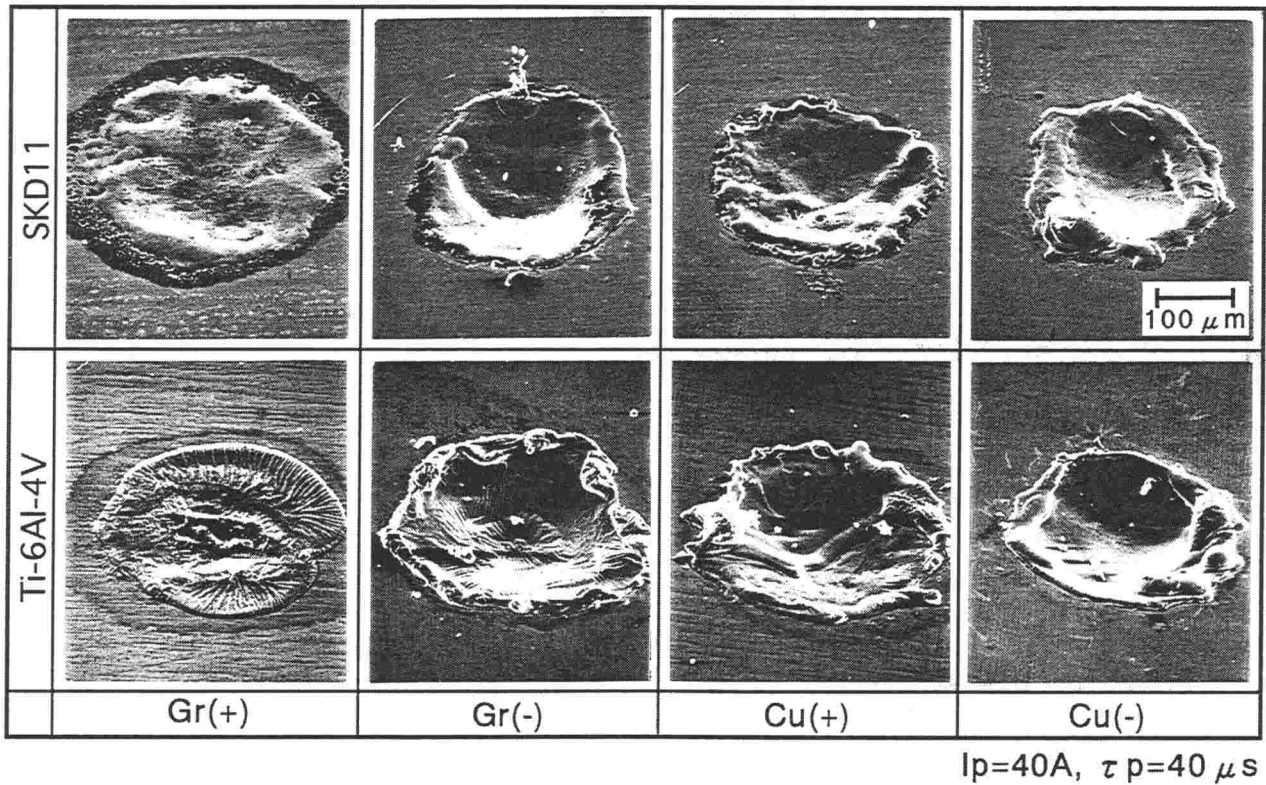
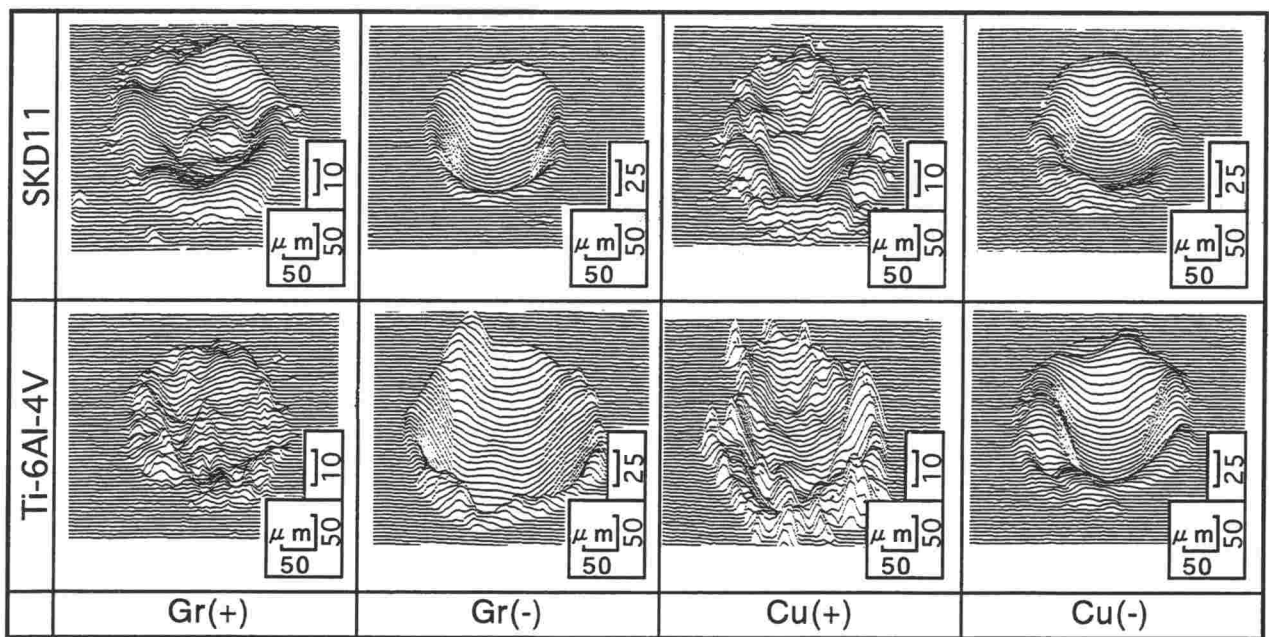


図2-5 単発放電痕のSEM写真

ある。約45度の傾斜をつけて撮影している。加工条件は放電電流 $I_p=40A$ 、パルス幅 $\tau_p=40 \mu s$ である。図より明らかなように、チタン合金の放電痕表面にはしわのような形状が観察される。特に逆極性の条件で多く発生している。この形状は、純チタンに対して単発放電を行った場合や加工条件を変化させた場合にも同様に観察された。しかしながらSKD11の場合には放電痕表面は滑らかで、このような形状は全く確認できない。これは放電の熱により一度溶融した工作

物材料がゆっくり冷却され、凝固する場合に発生したものと考えられる。すなわちチタン材料の場合、鋼と比較すると熱伝導率が低いことと沸点が高いことによって、工作物が熔融状態である割合が大きく、その熔融状態の工作物があまり飛散されずに表面に残留し、放電終了後低い熱伝導率のため加工液によりゆっくりと冷却されて、体積収縮によりこのような形状になったものと推測される。図2-6は純チタンおよびSKD11の単発放電痕の三次元図である。図よりいずれの電極材質、極性の条件においても純チタンの放電痕はSKD11に比べて盛上りが大きく、凹凸の激しいものとなっていることが明確に捉えられる。また放電痕の内径、くぼみ部分の深さも純チタンのほうが大きいようである。ここでは示していないが、チタン合金においても純チタンと類似した結果が得られた。

図2-7は放電痕における外周の盛り高さ H_2 と放電痕深さ H_1 との比 H_2/H_1 の値を示したものである。この値は相対的な盛り高の割合、起伏の激しさを表している。図より明らかなように、いずれの工作物材料においても銅電極・逆極性の条件で盛り高の割合が最も大きい。特にチタン合金の場合には放電痕深さの約60%も盛上る。一方、グラファイト電極・正極性の場合にはかなり小さく、SKD11の場合でも8%程度である。また、工作物材料について比較すると、いずれの条件においてもSKD11より両チタン材料のほうが盛り高の割合が大きく、起伏に富んだ放電痕を形成することがわかる。図2-8は放電痕における放電痕深さ H_1 と放電痕内径 D_1 との比 H_1/D_1 を表したものである。この値が大きいほど底の深いクレータとなることを示しており、いずれの工作物においてもグラファイト電極・正極性、銅電極・正極性の順に大きく、逆極性の場合には相対的に小さいことがわかる。すなわち正極性放電の場合には深さ方向への熔融、除去が進行し、



$I_p=40A, \tau_p=40\mu s$

図2-6 単発放電痕の三次元図

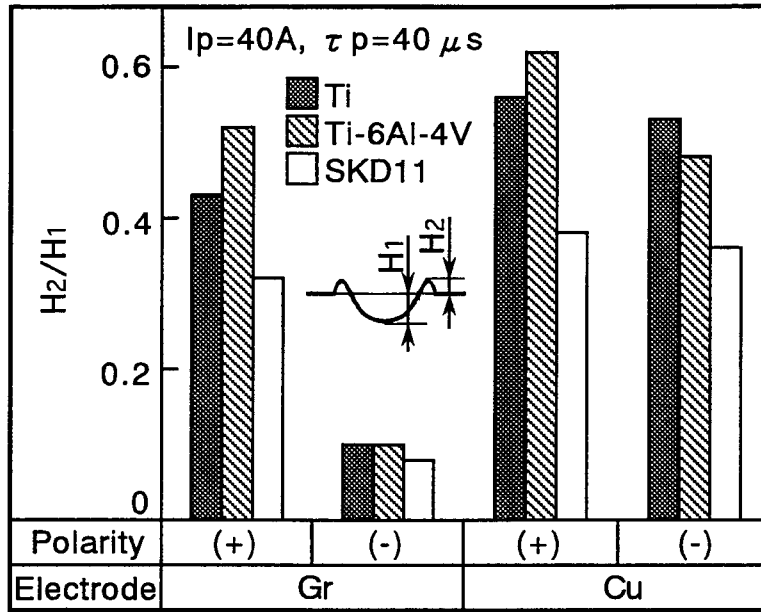


図2-7 放電痕深さに対する盛り高さの割合

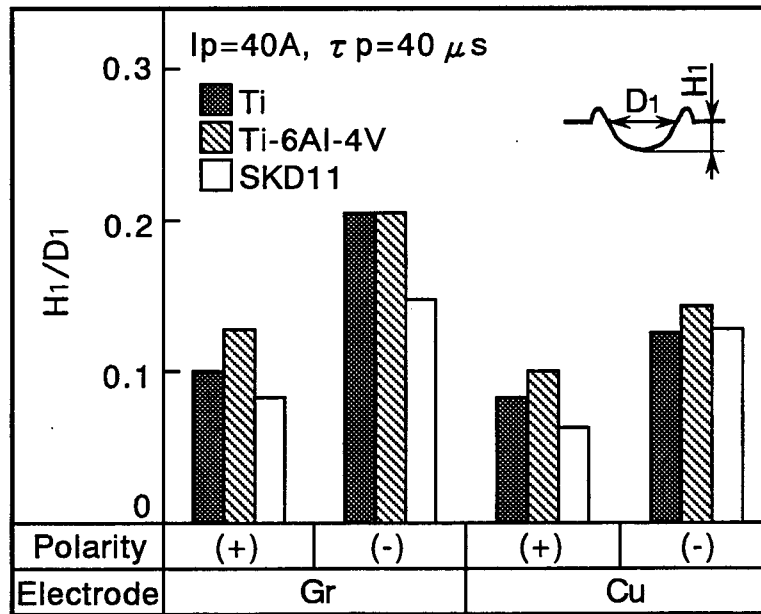


図2-8 放電痕直径に対する放電痕深さの割合

溶融金属の放電痕表面への残留が比較的少ないのではないかと推測される。またいずれの電極材質、極性の条件においてもSKD11に比べチタン材料のほうが底のより深い放電痕形状になることがわかる。

2.3.1.3 単発放電痕外周の盛り挙動

チタン材料の単発放電実験では放電を行った直後はほとんどの場合、工具電極と工作物は短

絡している²⁻¹⁵⁾。これは前述のようにチタン材料の場合は放電痕の外周部分の盛り上がりが大きく、工具電極と工作物が互いに接触してしまうためである。ここではこの現象を利用して放電痕外周の盛り上がり時間（短絡時間）の測定を試みた。

まず電極端面と工作物表面を平行に固定し、極間距離を設定し単発放電を行う。この際電極と工作物間の電圧波形をオシロスコープにより記録する。その記録例を図2-9に示す。本放電加工機には接触感知用として工具電極と工作物が接触していない場合には、極間に約5Vの電圧 E_b が印加されている。図より明らかなように、放電前は120Vの無負荷電圧 E_o がかけられているが、放電が開始されると極間の電圧は放電電圧 E_p に低下し、パルス幅 τ_p の時間維持される。放電が終了するとしばらくの間（工具電極と工作物が接触していない間）は接触感知用電圧 E_b が負荷されているが、短絡が生じ工具電極と工作物が接触すると極間の電圧は0Vとなる。ここで放電開始時刻から短絡が生じるまでの時間を盛り上がり時間 T_s と定義する。しかしながら盛り上がり時間 T_s は極間距離 d により変化するものと予測される。すなわち加工条件が同じ場合には極間距離が小さいほど盛り上がり時間は短く、極間距離が大きい場合には盛り上がり時間は長くなると考えられる。そこで極間距離 d を変化させた場合の極間電圧波形の変化について検討した。図2-10はその結果を示すものである。極間距離 d が小さい場合（ $d=10\mu\text{m}$ ）には電圧が負荷されるとすぐに放電が発生し、放電終了直後に短絡が生じる。つまり極間距離が小さいため完全に放電痕外周部分が盛上がる前に電極に接触してしまう。一方極間距離 d が大きい場合（ $d=30\mu\text{m}$ ）には放電終了後、短絡は生じない。この場合は極間距離が盛り上がりよりも大きいため電極に接触しない。この結果からこの条件では、放電痕の周囲の盛り上がりの高さ H_2 が $20\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$ の間にあることが理解できる。従って盛り上がり時間の測定には極間距離の設定が重要となる。

図2-11は単発放電実験で得られた放電痕盛り上がり高さ H_2 とパルス幅 τ_p の関係を示す。放電痕の盛り上がりはパルス幅 τ_p が長いほど大きいことがわかる。これはパルス幅 τ_p が長いほど放電エネ

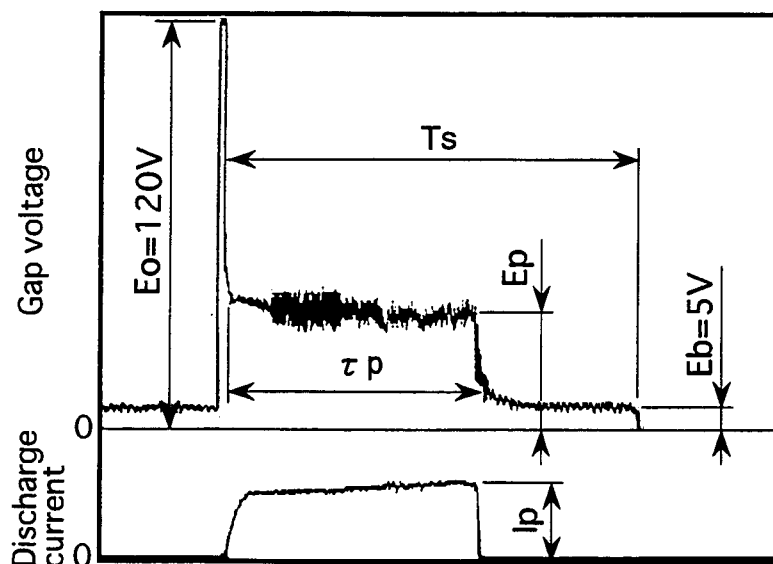


図2-9 短絡波形記録例

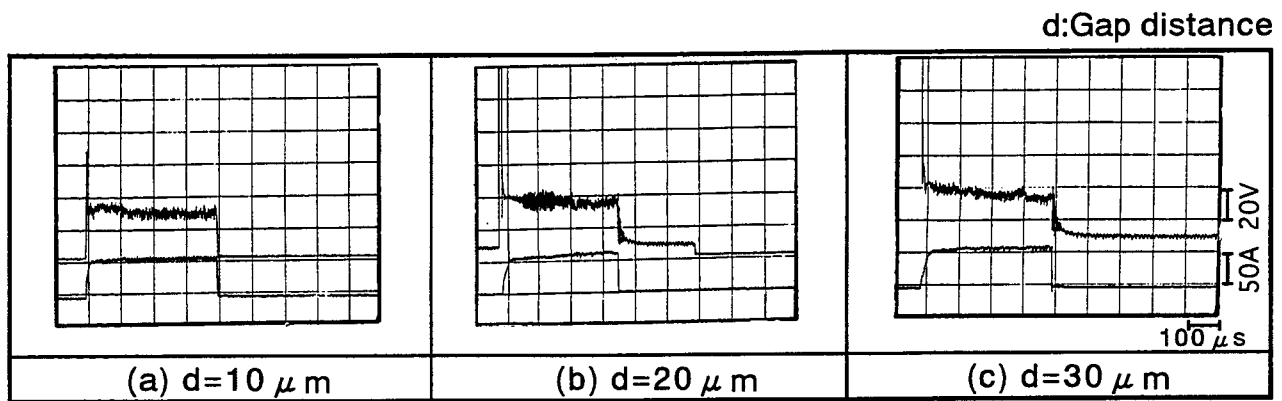


図2-10 極間電圧波形に及ぼす極間距離の影響

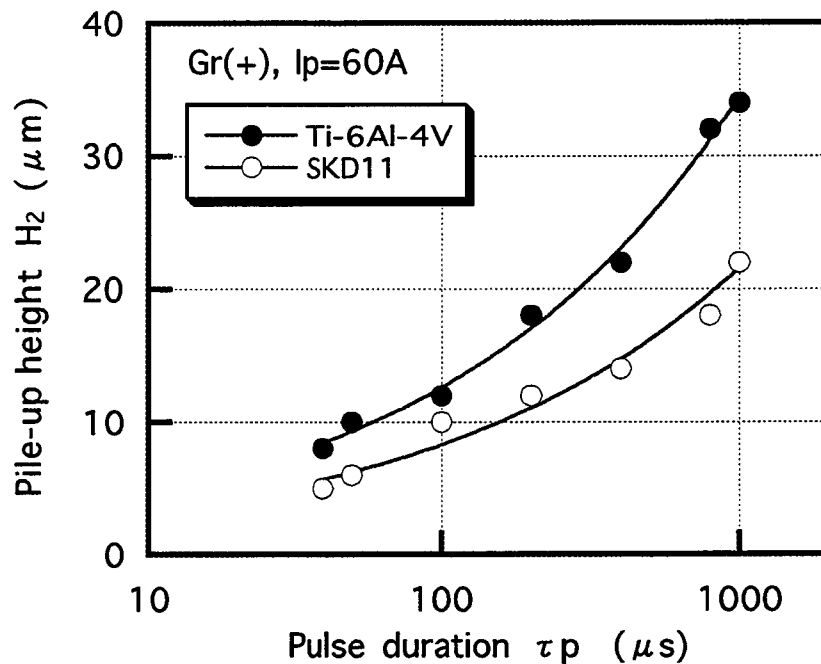


図2-11 盛り高さとはパルス幅の関係

ルギーが増加し、溶融体積が増加するためそのぶん盛りが大きくなるためと推測される。またSKD11と比較するとチタン合金はかなり盛り高さ大きいことがわかる。これらのデータを基に極間距離 d を放電痕盛り高さ H_2 と等しく設定し、放電痕外周の盛り時間の測定を行った。

図2-12は放電痕外周盛り時間 T_s とはパルス幅 τ_p の関係を示す。図中鎖線は $T_s = \tau_p$ の場合、すなわち放電終了と同時に短絡が生じる場合を示している。図より明らかなように、いずれのパルス幅においても放電時間中に短絡が発生するわけではなく、放電終了後しばらくして短絡が発生している。すなわち放電痕外周の盛りは放電終了後も増加し続けることがわかる²⁻¹⁶⁾。パ

ルス幅 τ_p が増加するにともなって盛り時間 T_s も当然増加するが、放電時間 τ_p に対する盛り時間 T_s の割合 T_s/τ_p はパルス幅の増加とともに減少する。またチタン合金とSKD11を比較すると、チタン合金のほうが盛り時間は長くなっている。しかしながらこの実験では極間距離をそれぞれの材料の盛り高さに応じて設定しているため、両者を比較することはできない。そこで次に盛り速度を算出した。

図2-13は平均盛り速度とパルス幅の関係を示す。ここで平均盛り速度は、それぞれの材料の放電痕外周の盛り高さ H_2 を盛り時間 T_s で除した値である。両材料ともパルス幅が長くなるほど平均盛り速度は小さくなる。パルス幅が短い場合には電流密度が大きく、すなわちエネルギー密度が大きく、さらに加工液および工作物の気化にともなって工作物に作用する衝撃力大きい²⁻¹⁷⁾ため、熔融金属を外周へ押しやり、盛りを助長していると考えられる。一方パルス幅が長くなると放電柱半径が増大し²⁻¹⁸⁾、気泡による圧力は低下し、盛り速度は低下すると思われる。またSKD11と比較するとチタン合金の盛り速度は小さいことがわかる。特に放電加工に通常用いられる $100\ \mu\text{s}$ 以下の条件ではSKD11の60~70%の値となっており、チタン合金は放電痕外周の盛りがかなり遅い材料であるといえる。

2.3.1.4 単発放電加工特性

図2-14は、単発放電痕形状を模式的に示したものである。ここで熱により熔融する凹部分の形状を球の一部とみなすと放電痕凹み部分の体積 V_L は近似的に次式で表される²⁻¹⁹⁾。

$$V_L = (1/6) \cdot \pi H_1 \{3(D_1/2)^2 + H_1^2\} \dots \dots \dots (2-1)$$

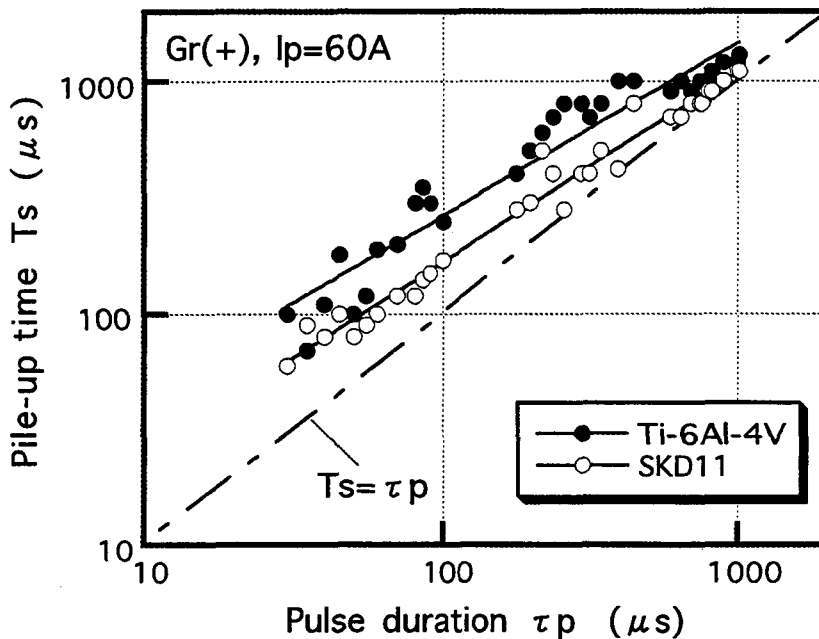


図2-12 盛り時間とパルス幅の関係

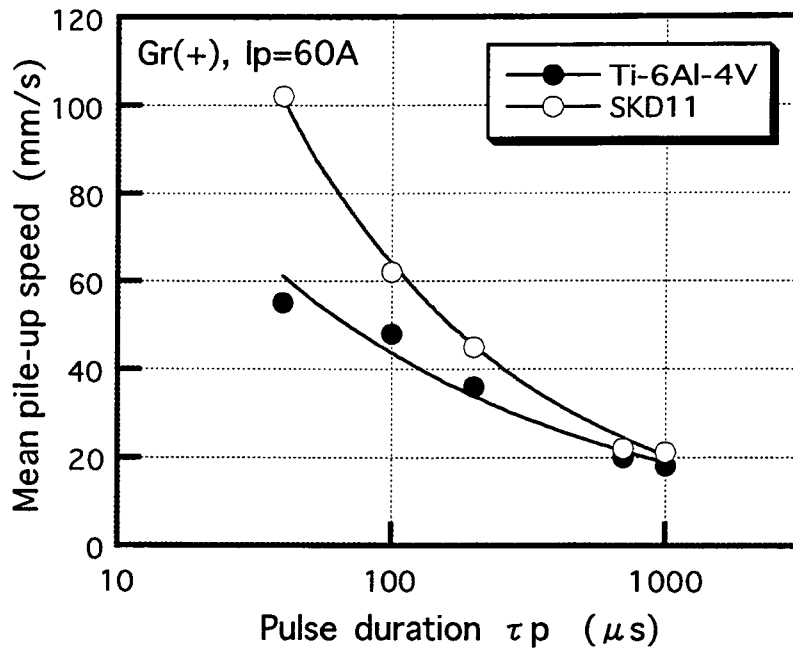


図2-13 盛り速度とパルス幅の関係

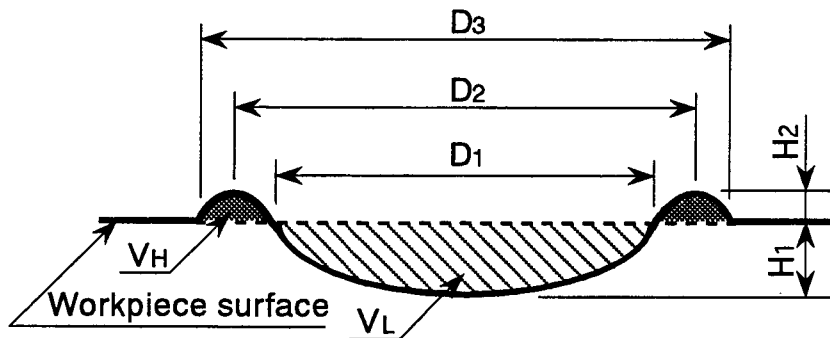


図2-14 放電痕形状模式図

さらに溶融金属が除去されず外周部に残留し、再凝固して形成される放電痕盛り部分体積 V_H を底辺 $(D_3 - D_1)/2$ 、高さ H_2 の三角形断面の回転体 (D_3 : 放電痕外径, D_2 : 放電痕盛り部直径) であるとみなし次式で近似し、放電痕凹み部分の体積 V_L から放電痕盛り部分体積 V_H を差し引いた値を放電痕除去体積 V_R とする。

$$V_H = (1/8) \cdot \pi H_2 (D_3^2 - D_1^2) \quad \dots \dots \dots (2-2)$$

$$V_R = V_L - V_H \quad \dots \dots \dots (2-3)$$

放電加工は基本的には放電エネルギーを利用した熱加工である。熱加工の場合、異なる工作物に対する放電加工特性は、加工に必要な最低エネルギー密度の大小に大きく影響される。そ

してそれは工作物の融点 θ_m と熱伝導率 λ によってほぼ決定される。そこで一般に放電加工では両者の積 $\theta_m \cdot \lambda$ が放電加工のしやすさの指標として従来より用いられている²⁻¹⁸⁾。すなわち $\theta_m \cdot \lambda$ の値の小さい工作物は低いエネルギー密度で加工されやすく、 $\theta_m \cdot \lambda$ の値の大きいものは高いエネルギー密度を与えなければ加工されにくいといわれている。本実験で用いた工作物の融点 θ_m 、熱伝導率 λ およびその積 $\theta_m \cdot \lambda$ を表2-6に示す。表より明らかなようにSKD11と比較すると両チタン材料は熱伝導率が低く、 $\theta_m \cdot \lambda$ の値も小さい。すなわち放電加工においてチタン材料は加工しやすいと推測される。因みに電極として用いられる銅およびグラファイトは $\theta_m \cdot \lambda$ の値が大きいことがわかる。これらの材料は最低エネルギー密度が高く、放電加工されにくい。すなわち電極として優れていることが理解できる。

図2-15は放電痕除去体積 V_R と工作物の $\theta_m \cdot \lambda$ の関係を示す。加工条件は放電電流 $I_p=40A$ 、パルス幅 $\tau_p=40 \mu s$ である。いずれの電極材質、極性の条件においても、 $\theta_m \cdot \lambda$ の値の大きい銅、SKD11に比べ、 $\theta_m \cdot \lambda$ の値の小さい純チタンおよびチタン合金のほうが除去体積 V_R が大きく、従来の説によく対応していることがわかる。電極材質、極性の条件によって放電痕除去体積が大きく異なるのは、電極材質と工作物の組み合わせおよび極性による電子電流とイオン電流の割合の変化等によって、両極に配分されるエネルギーが変化するためである。

以上の結果より、チタン材料は鉄鋼材料と比較すると放電痕の盛上りが大きく、盛上りに要する時間も長いものの、放電痕除去体積が大きく、単発放電実験からみる限りでは放電加工性のよい材料であることが明らかとなった。

2.3.2 連続放電実験

次に実際にチタン材料に対し従来の加工条件で放電加工を行い、その加工特性の解明を行った。また得られる加工面、加工粉や加工状態を観察し、前述の単発放電における特性との関連を考察するとともに、チタン材料の放電加工メカニズムについて検討を行った。

表2-6 工作物の融点 θ_m と熱伝導率 λ の積 $\theta_m \cdot \lambda$

Workpiece material	Melting point θ_m [K]	Thermal conductivity λ [W/(m·K)]	$\theta_m \cdot \lambda$ $\times 10^5$ [W/m]
Ti	1,941	17	0.33
Ti-6Al-4V	1,873	7.3	0.14
SKD11	1,803	45	0.81
Cu	1,357	403	5.47

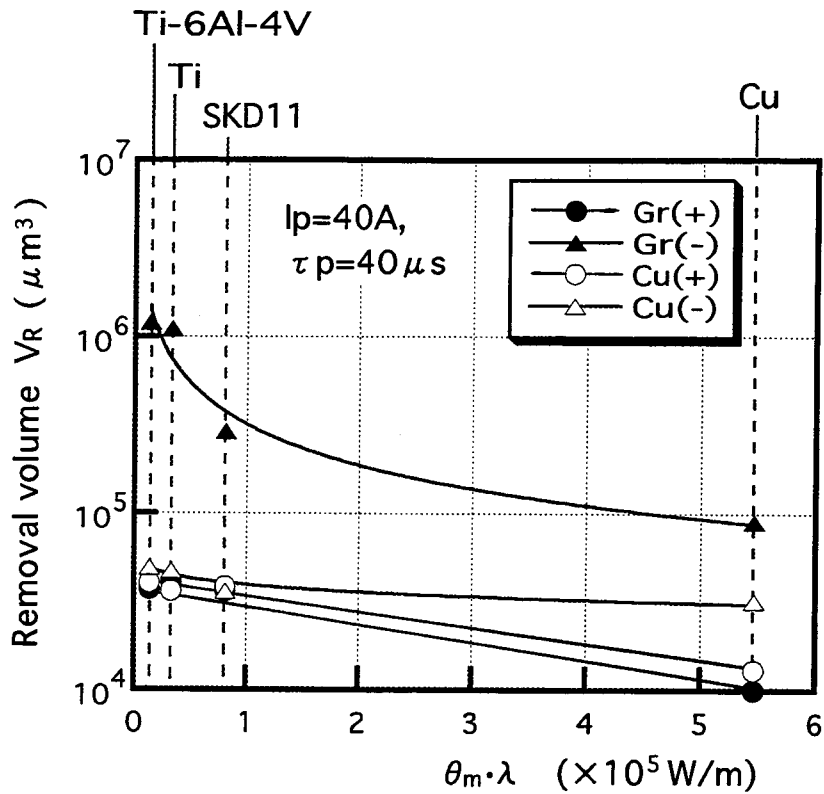


図2-15 放電痕除去体積と $\theta_m \cdot \lambda$ の関係

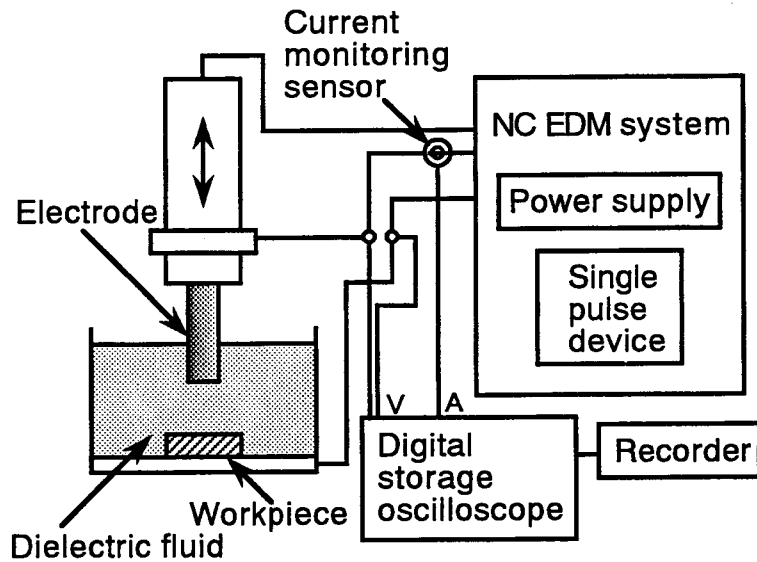


図2-16 連続放電実験装置

2.3.2.1 放電加工装置

実験装置の概略を図2-16に示す。この加工機は単発放電実験で用いたトランジスタスイッチング式のNC加工機である。工具電極には直径5mmのグラファイトおよび銅棒を、加工液には灯油系加工液を使用した。加工条件は無負荷電圧を120V一定とし、放電電流 $I_p=4\sim 60\text{A}$ 、パルス幅

$\tau p=4\sim 300\ \mu\text{s}$ と変化させ、その影響をみた。極性は正極性および逆極性の両極性で実験を行った。またデューティ・ファクタD.F.は通常用いられる50%とした。

2.3.2.2 放電加工特性および加工状態

図2-17は、チタン合金の放電加工における時間当たりの放電エネルギー p に対する加工速度 \dot{R} を示す。図より明らかなように放電エネルギー増加にともなって加工速度は増加する。そして銅電極・逆極性、グラファイト電極・正極性の条件で加工速度は大きくなる。純チタンの加工においても同様の結果が得られた。

図2-18は、銅電極・逆極性で加工を行った場合の時間当たりの放電エネルギー p に対する加工速度 \dot{R} の変化を示す。いずれの材料においても放電エネルギー増加にともなって加工速度は増加するのは当然であるが、SKD11の場合の加工速度と比較すると、純チタンおよびチタン合金の加工速度は半分以下とかなり小さくなる。他の電極材質・極性、加工条件においても同様の傾向がみられた。すなわち、チタン材料は単発放電実験では単発放電による除去体積が大きく、加工性が良いものと推測されたが、実際には加工速度が小さく難加工であることがわかる。

図2-19は、グラファイト電極を用い、比較的電極消耗の小さいとされる逆極性で加工を行った場合の、パルス幅 τp が電極消耗率 W に及ぼす影響を示す。ここで電極消耗率は電極消耗体積を加工体積で除した値で表している。図よりパルス幅の増加とともに両材料とも電極消耗は減少する。しかし、一般に電極低消耗加工が可能となるパルス幅の長い条件では、SKD11の場合0に近い値を示しているのに対して、チタン合金の場合大きくなっている。パルス幅の短い条件では100%を超えているところがみられる。このように電極消耗が数十%以上の条件では実用は

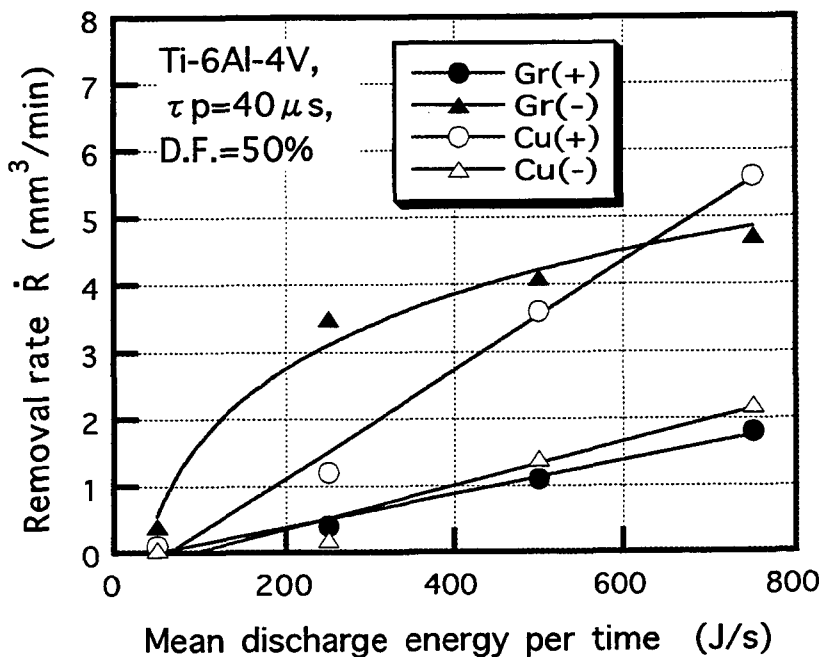


図2-17 平均放電エネルギーに対する加工速度の変化

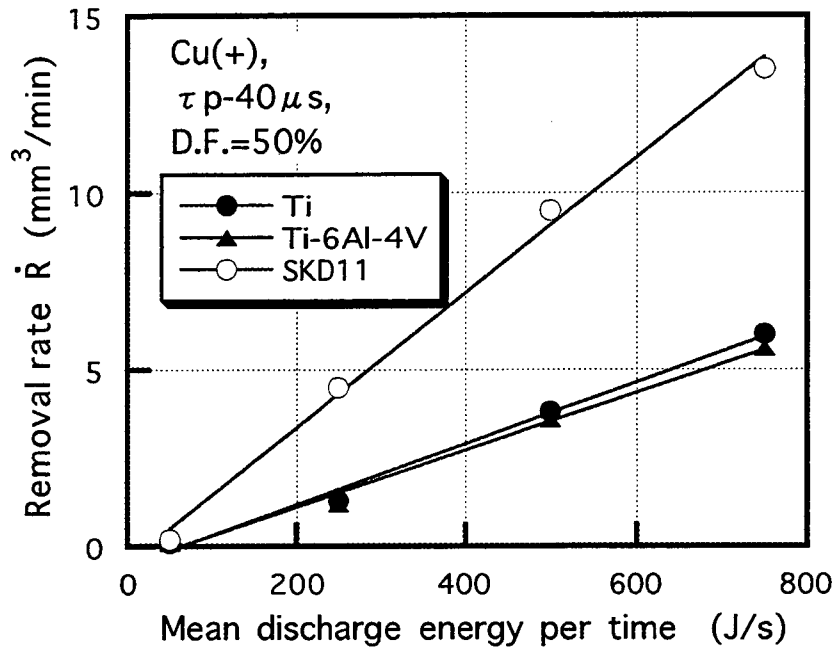


図2-18 各種工作物における加工速度の変化

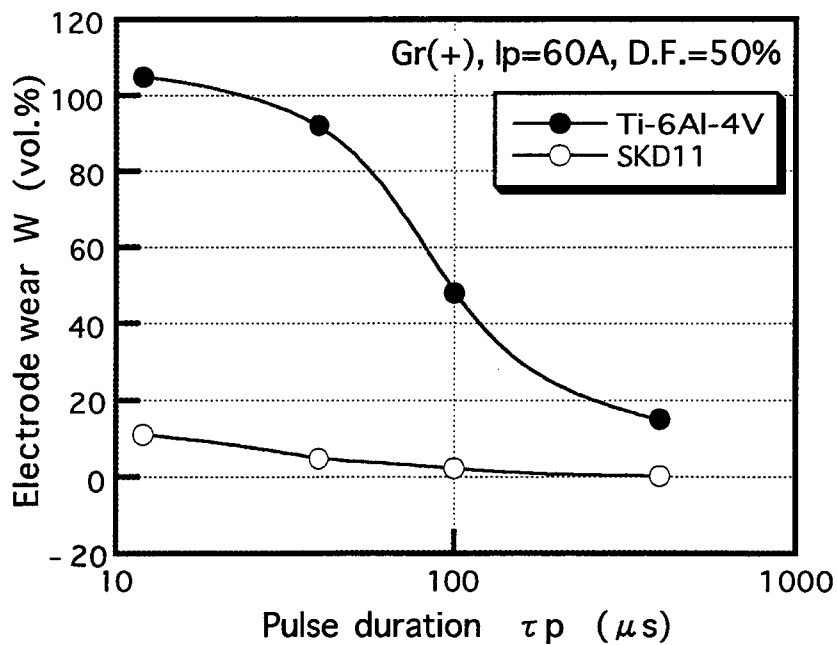


図2-19 電極消耗率とパルス幅の関係

かなり難しい。一般に電極低消耗加工は、灯油系加工液の熱分解によって生じるカーボンや飛散した工作物材料の電極端面への付着によって実現される。加工後の電極端面を観察すると、両者とも工作物の付着は観察されたが、熱分解カーボンの付着はチタン合金の場合にはほとんど確認されなかった。従って電極消耗の違いは熱分解カーボンの付着量、付着の形態などに影響していると考えられる。

図2-20はチタン合金およびSKD11の加工面粗さ R_y を示す。図より明らかなように両者ともパルス幅、放電電流の増加とともに加工面粗さは増加する。また放電電流の大きい場合にはチタン合金の粗さは多少大きくなるが、仕上げ条件として用いられる放電電流の小さい条件ではほとんど差がないことがわかる。

次に加工面の観察を行った。図2-21はそのSEM写真である。SKD11の放電面は一つ一つの放電痕が明確に判断でき、一発一発の放電が良好に行われ、加工状態が安定しているといえる。また表面も比較的滑らかである。これに対しチタン合金の場合、一つ一つの放電痕は明確ではなく、また表面には単発放電実験の際に観察されたしわの形状が多数みられる。さらに材料の溶融が不完全なまま除去されたような形状もみられる。図2-22は放電加工において生じた加工粉である。図より明らかなようにSKD11の加工粉がほとんど完全な球状であるのに対し、チタン合金の加工粉は変形したものや断片状のものが多く観察される。これらの変形した加工粉は、EPMA分析によるCu $K\alpha$ およびTi $K\alpha$ 像から主に工作物のチタン合金から生じたものであることがわかる。このような加工粉形状の違いは、その生成機構の違いに起因するものと考えられる。すなわちSKD11の場合には、一度完全に溶融した金属が表面張力によって球状になり、再凝固するのに対し、チタン合金の場合には工作物の溶融が不完全なまま飛散し、凝固するものと考えられる。

図2-23は放電加工時の極間電圧および放電電流波形を示している。加工条件は放電電流 $I_p=40A$ 、パルス幅 $\tau_p=100\mu s$ であり、デューティ・ファクタD.F.の設定値は50%である。SKD11の波形を観察すると、実際のD.F.の値がほぼ50%であるのに対して、チタン合金の場合、放電が生じず、波形がとんでいるために設定値よりかなり小さくなっていることがわかる。このこと

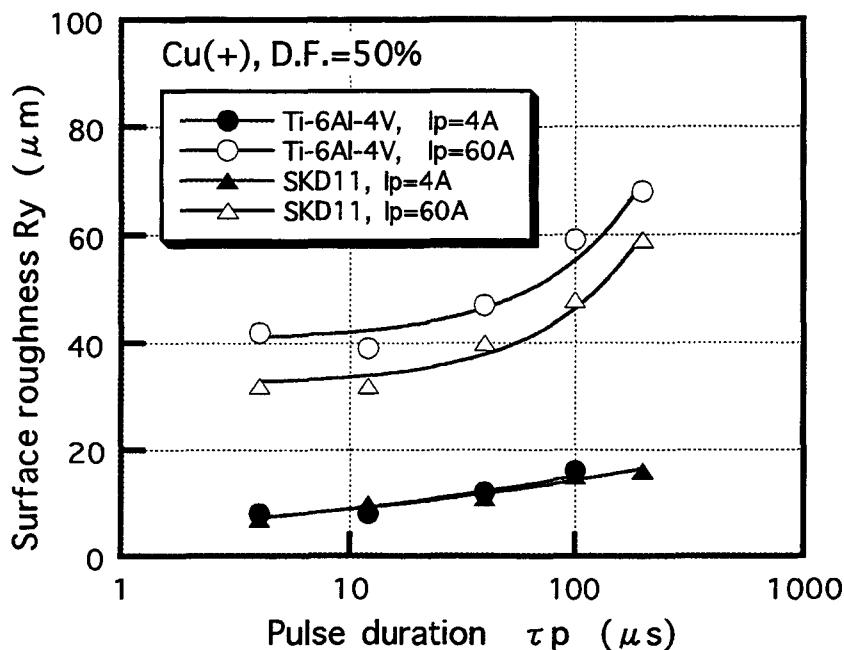
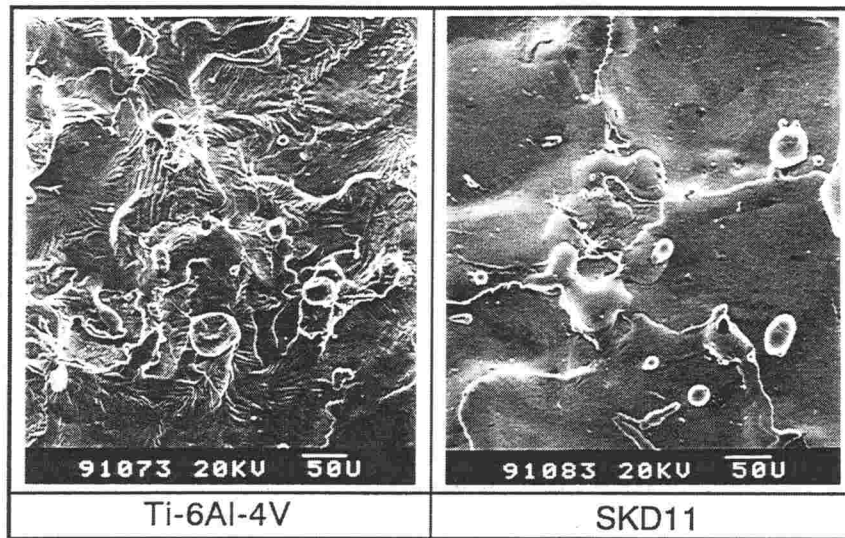
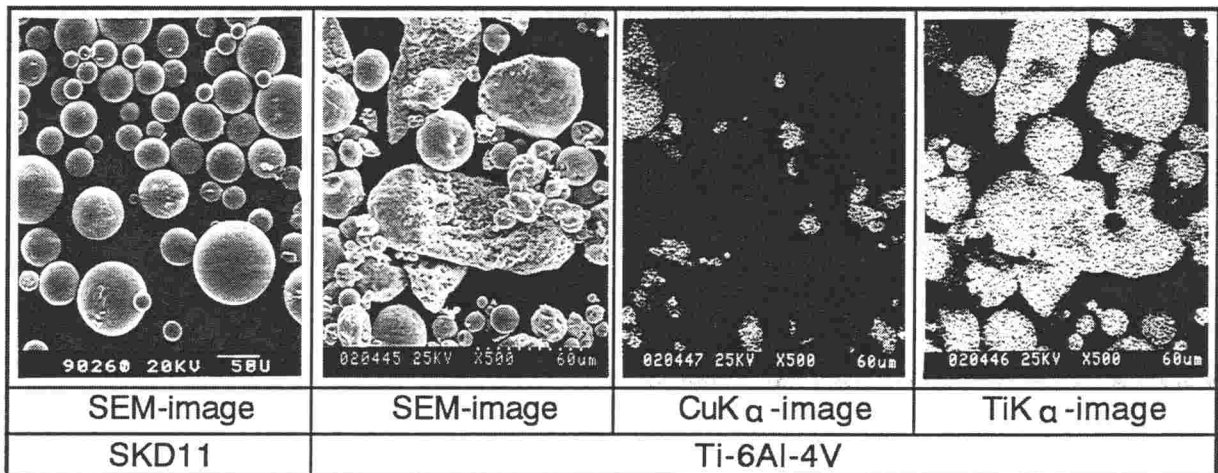


図2-20 加工面粗さとパルス幅の関係



Gr(+), $I_p=40A$, $\tau_p=40 \mu s$, D.F.=50%

図2-21 放電加工面SEM写真



Cu(+), $I_p=40A$, $\tau_p=100 \mu s$, D.F.=50%

図2-22 加工粉SEM写真および, CuKα, TiKα像

からチタン合金の加工では加工状態が不安定で、実際のデューティ・ファクタが小さくなるため、単発当たりの放電痕除去体積が大きいにも関わらず前述のように加工速度が小さくなるものと推測される。

以上、単発放電における特性、放電加工面および加工粉の観察、さらに放電波形による加工状態の観察をあわせて考慮すると、チタン合金の場合は、放電痕の外周の盛り上がり大きいこと、また盛り上がり時間が長いことによって短絡が発生しやすく、無効放電が多くなるために加工状態が著しく不安定で、同時に実質的なD.F.が低下するため、加工速度が低下し、電極も異常に消耗すると考えられる。

2.3.3 加工の安定化と高効率化

前述の考察から、チタン合金の放電加工を安定した能率のよいものにするためには、十分な休止時間を与えることが必要であると考えられる。すなわち一発の放電の後、その放電による放電痕外周部の盛り上がり部分が完全に形成され、極間の絶縁が完全に回復されてから、次の放電が発生するようにパルス幅および放電休止時間を制御する必要があると考えられる。

図2-24はデューティ・ファクタD.F.を変化させたときの加工速度の変化を示す。一般に鉄鋼材料の場合デューティ・ファクタを大きくすると加工速度は大きくなるが、チタン合金の場合デュ

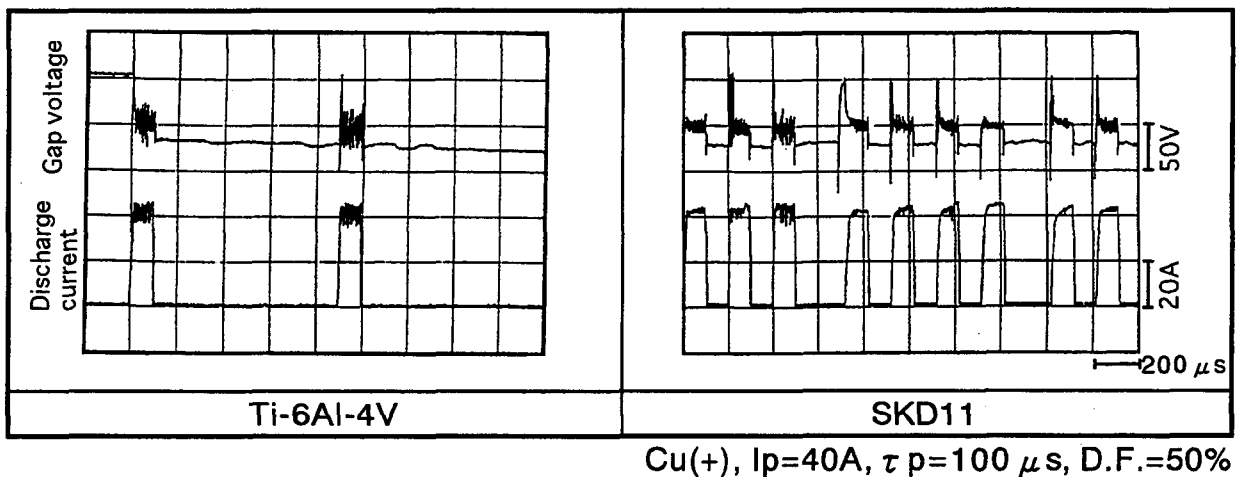


図2-23 極間電圧および放電電流波形 (D.F.=50%)

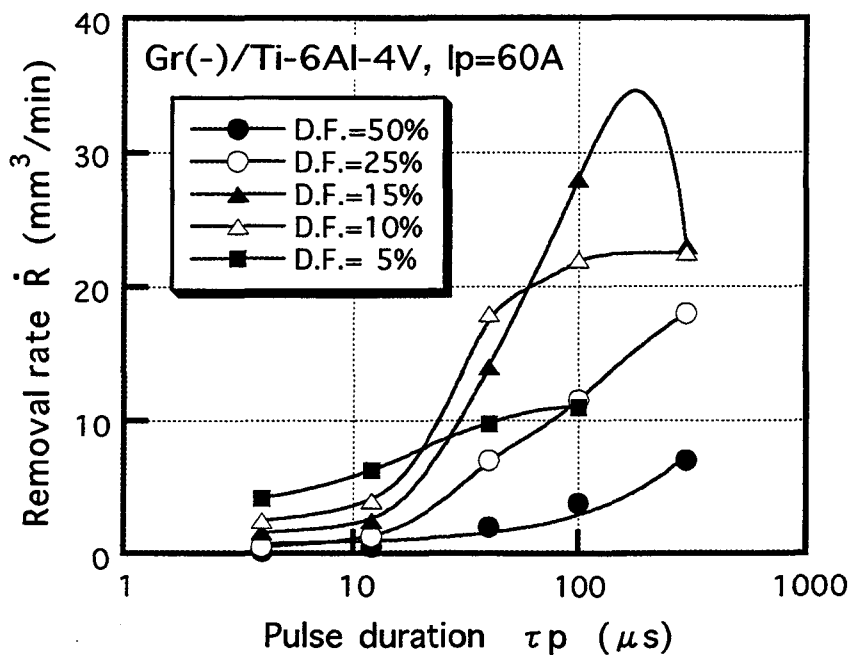


図2-24 加工速度に及ぼすデューティ・ファクタの影響

ーティ・ファクタが大きいほど加工速度は大きくなるわけではなく、パルス幅によって加工速度が最大となるデューティ・ファクタが存在することがわかる。他の加工条件においても同様の傾向がみられた。図2-11および図2-12に示したように、パルス幅によって放電痕外周の盛りりの高さ、盛りる時間が異なりそれに応じた放電休止時間を与えることで安定した加工状態が得られ、加工速度が増大すると考えられる。またその場合の単発当たりの工作物除去体積を算出してみると、単発放電実験による除去体積とほぼ一致していることもわかる。

図2-25はデューティ・ファクタD.F.を変化させたときの体積電極消耗率Wを示す。一般に電極消耗率はデューティ・ファクタにはほとんど影響しないが、チタン合金の加工では、デューティ・ファクタが小さいほど電極消耗率は小さくなっている。これはデューティ・ファクタが小さいほど放電状態が安定したものとなり、異常放電による消耗を減少できたためであると考えられる。

これらの結果から、適当な加工条件を選択すれば、鉄鋼材料に劣らない加工速度を得られ、かつ電極消耗も低減させることができることが明らかとなった。

図2-26はデューティ・ファクタD.F.=10%の場合のチタン合金の放電加工における極間電圧および放電電流波形を示す。前述の図2-23の場合と比較するとこの場合は、確実に設定値どおりの波形が得られており、短絡の少ない良好な加工状態であるといえる。

図2-27は電極消耗率の比較的小さい、グラファイト電極・逆極性、パルス幅 $\tau_p=300\mu s$ の条件でデューティ・ファクタD.F.を変化させた場合の加工速度 \dot{R} および電極消耗率Wの変化を示す。図より明らかなようにこの条件においてはデューティ・ファクタを小さくすることによって加工速度を増加させ、電極消耗率を低減させることができる。特にデューティ・ファクタを10%とし

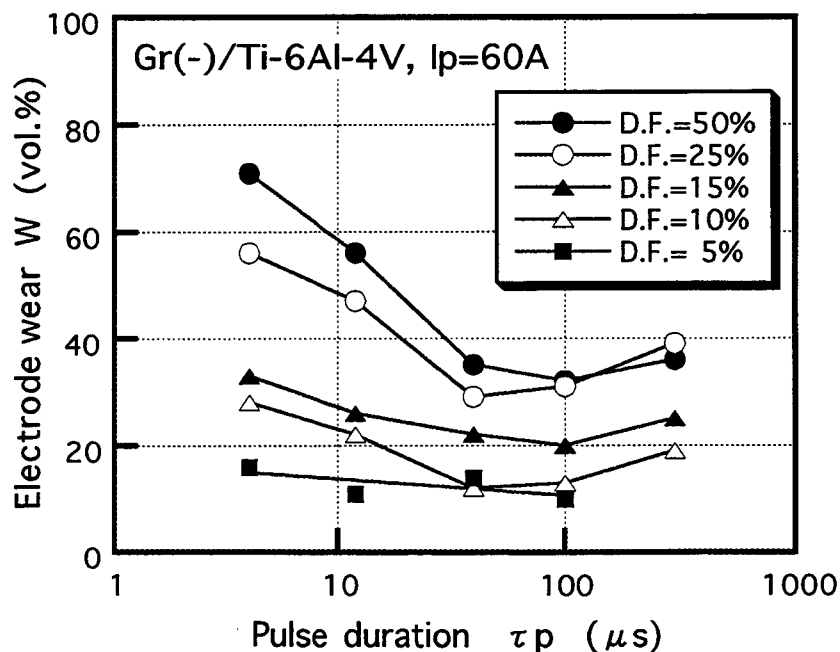
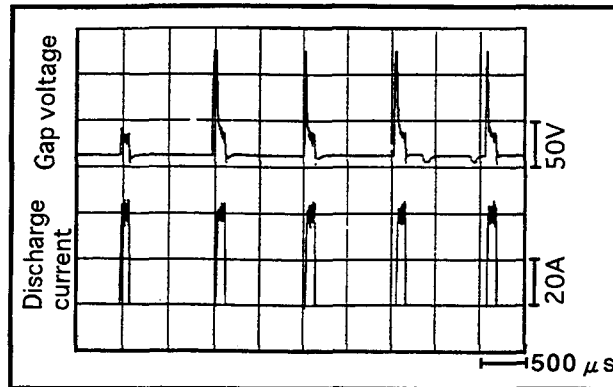


図2-25 電極消耗率に及ぼすデューティ・ファクタの影響



Cu(+)/Ti-6Al-4V,
 $I_p=40A, \tau_p=100 \mu s, D.F.=10\%$

図2-26 極間電圧および放電電流波形 (D.F.=10%)

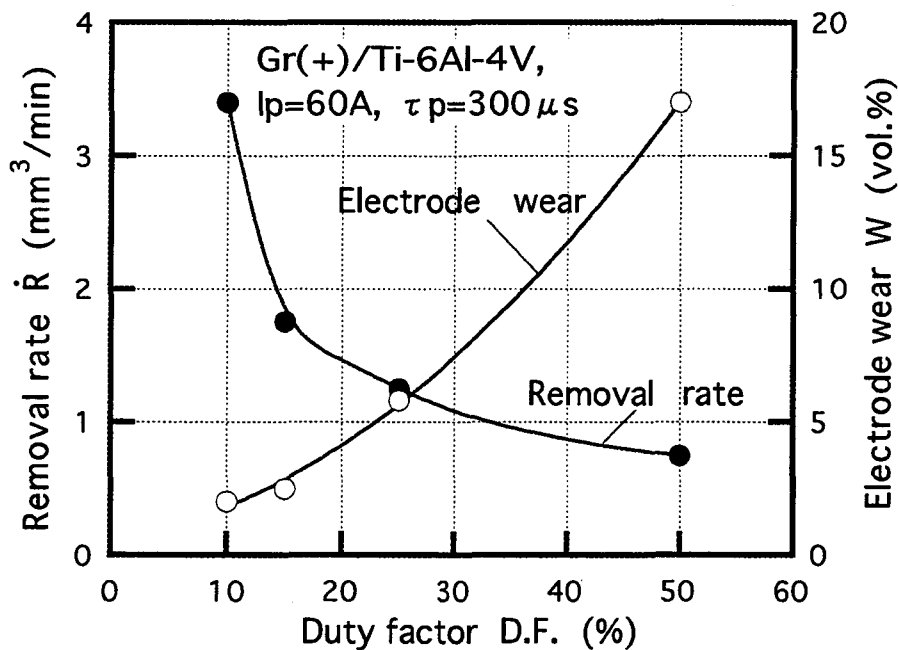


図2-27 仕上げ条件における加工速度および電極消耗率の変化

た場合の体積電極消耗率は2.4%とかなり小さい。また銅電極を用いた別の加工実験によれば、逆極性、放電電流 $I_p=4A$ 、パルス幅 $\tau_p=100 \mu s$ 、デューティ・ファクタ $D.F.=25\%$ の条件下で体積電極消耗率 $W=0.55\%$ と無消耗に近い結果も得られた。これらは仕上げ加工用の条件として適用可能と考えられる。

図2-28は加工深さ1mmとした場合の加工後の電極角部の形状を示すものである。放電加工は電極形状を反転した形状が加工形状となる転写加工であるため、電極消耗に伴う電極形状の変化を低減させることが重要となる。特に角部は形状くずれが大きい²⁻²⁰⁾。ここでは角部の形状くずれを半径Rで示している。なお加工前の角部半径は $50 \mu m$ 以下としている。図より明らかなよ

うにグラファイト電極, 銅電極, いずれの電極を用いた場合にも角部の半径はデューティ・ファクタが小さいほど小さくなる. デューティ・ファクタを小さくすることによって電極の形状くずれも低減できることが明らかとなった.

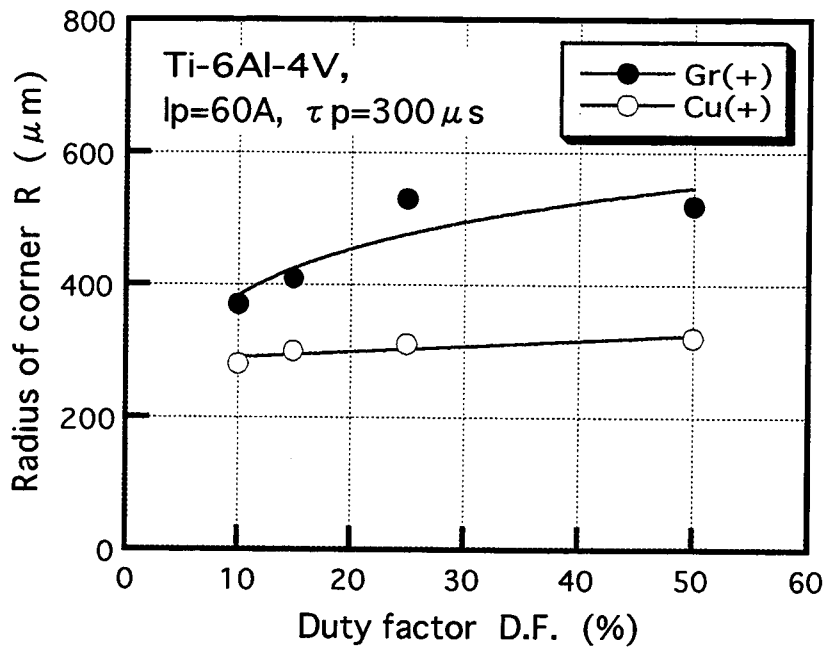


図2-28 加工後の電極角部の形状変化

2.4 ニッケル基合金の放電加工特性

2.4.1 実験方法および加工条件

実験方法は前述のチタン合金の実験同様、トランジスタスイッチング式のNC放電加工機によって行われた。加工条件は無負荷電圧を120V一定とし、放電電流 $I_p=4\sim 60A$ 、パルス幅 $\tau_p=4\sim 200\mu s$ 、デューティ・ファクタD.F.=50%とした。極性は正極性および逆極性、両極性で実験を行った。電極には直径5mmの銅およびグラファイトを使用した。

2.4.2 実験結果および考察

まず単発放電特性について検討した。

図2-29はニッケル基合金の単発放電痕のSEM写真である。加工条件は放電電流 $I_p=40A$ 、パルス幅 $\tau_p=40\mu s$ である。図より明らかなようにいずれの電極材質、極性の条件においても放電痕表面は非常に滑らかであり、SKD11の放電痕と類似している（図2-5参照）。また放電痕の大きさも比較的大きく、典型的な放電痕形状となっている。

図2-30は単発放電痕における放電痕外周部盛り高さ H_2 と放電痕深さ H_1 との比 H_2/H_1 の値を示したものである。比較のため前述のチタン合金およびSKD11の値も同時に示す。図より明らかなようにグラファイト電極・正極性の条件でニッケル基合金の盛りが大きい。しかし他の条件では盛り割合はチタン合金ほどは大きくなく、SKD11よりわずかに大きい程度である。また電極材質、極性条件についてみると、他の材料と同様、グラファイト・逆極性、銅・逆極性の場合に値が大きく、グラファイト・正極性の場合には相対的に小さいことがわかる。

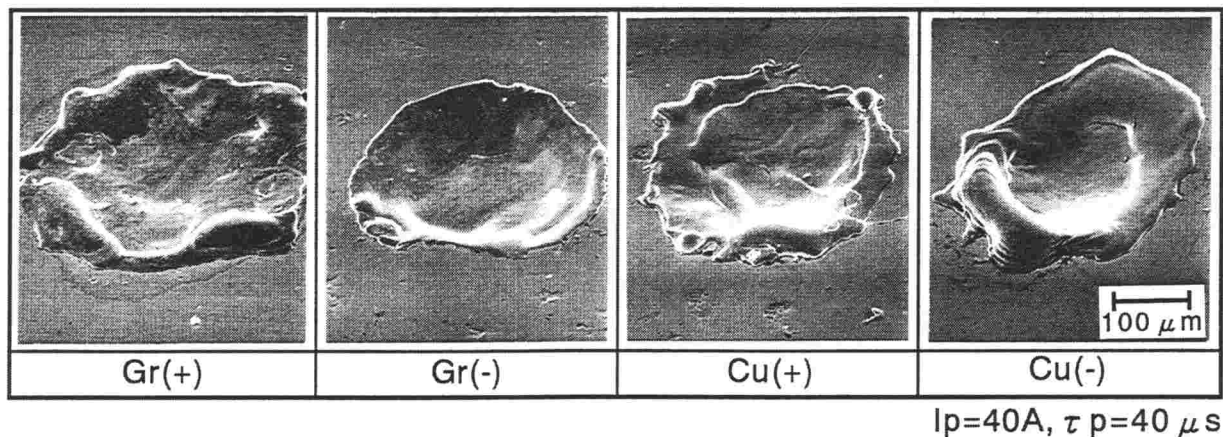


図2-29 Inconel 718の単発放電痕

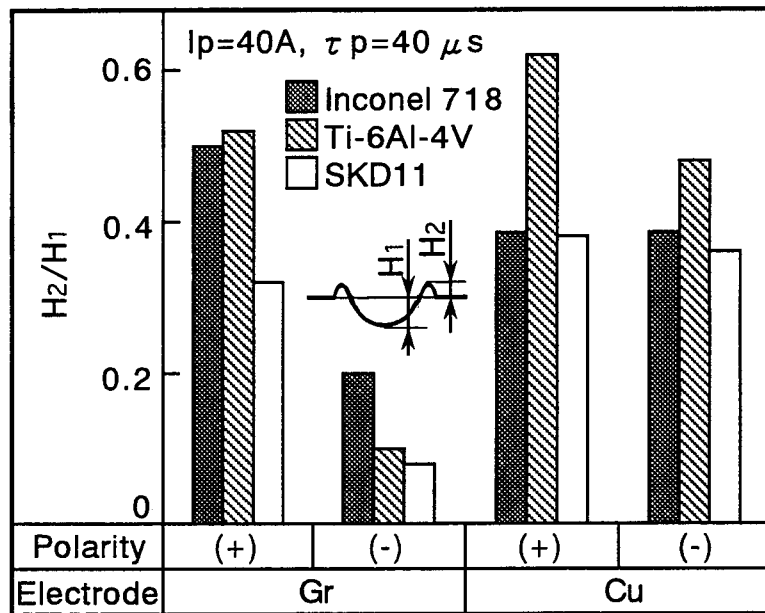


図2-30 Inconel 718の放電痕深さに対する盛り高さの割合

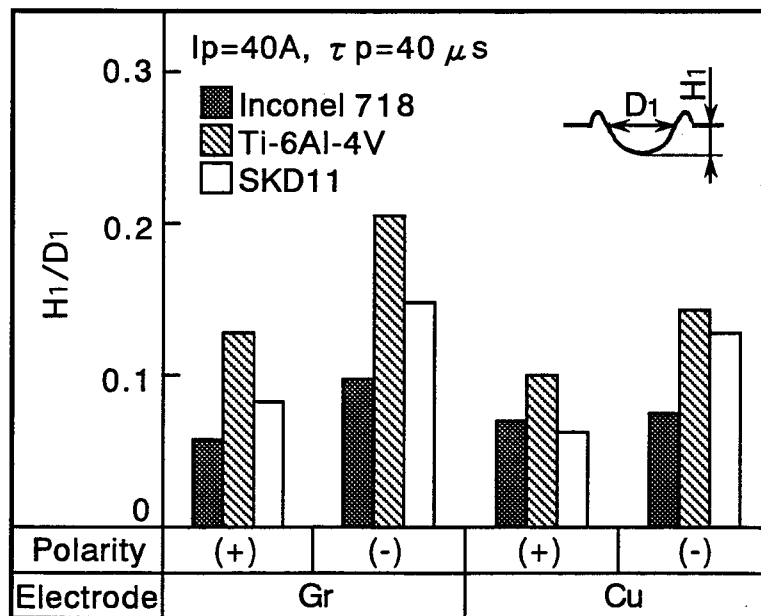


図2-31 Inconel 718の放電痕直径に対する放電痕深さの割合

図2-31は、単発放電痕における放電痕深さ H_1 と放電痕内径 D_1 との比 H_1/D_1 を表したものである。図より明らかなようにほとんどの電極材質・極性の条件においてニッケル基合金の値はチタン合金、SKD11に比べ値が小さくなっている。この値が小さいということは、相対的に底の浅い放電痕形状であることを示している。また放電痕内径 D_1 の絶対値も他の工作物よりも大きいと

いう結果を得ている。

図2-32は、放電痕除去体積 V_R と工作物の融点 θ_m と熱伝導率 λ の積 $\theta_m \cdot \lambda$ との関係を示す。異なる工作物に対する放電加工特性については $\theta_m \cdot \lambda$ の値が小さいほど加工性がよいといわれているが、ニッケル基合金の場合、 $\theta_m \cdot \lambda$ の値はSKD11よりわずかに大きく、正極性の場合には従来の理論に良い一致をみせている。しかし逆極性の場合グラファイトおよび銅電極いずれの場合でも除去体積は非常に大きくなっている。一般に逆極性の場合、正極性と比較すると工作物側の除去体積は小さいが、ニッケル基合金と銅およびグラファイト電極の組み合わせにおいては逆極性の場合放電エネルギーがニッケル基合金側により多く配分されるのではないかと²⁻²¹⁾と考えられる。エネルギー配分については、両極にニッケルを用いた場合、パルス幅が50~100 μs の条件では両極の除去量はかなり大きいという報告²⁻²²⁾もあり、そういった現象も要因の一つであると考えられるが、詳細な検討はここでは行っていない。

以上の単発放電の結果からニッケル基合金は、特に逆極性の条件で放電痕除去体積が大きく、加工性が良いものと推測される。

次に単発放電実験の結果から加工速度が大きいと予測される、グラファイト・正極性、銅・逆極性の条件で連続放電実験を行った。図2-33はその結果を示す。図より明らかなように、ニッケル基合金の加工速度はSKD11と同程度の値となっている。単発放電実験における放電痕除去体積から考慮すればSKD11よりも加工速度が大きくなると推測されるが、実際のニッケル基合金の放電加工では、加工を妨げる何らかの要因があると考えられる。しかしSKD11に劣らない

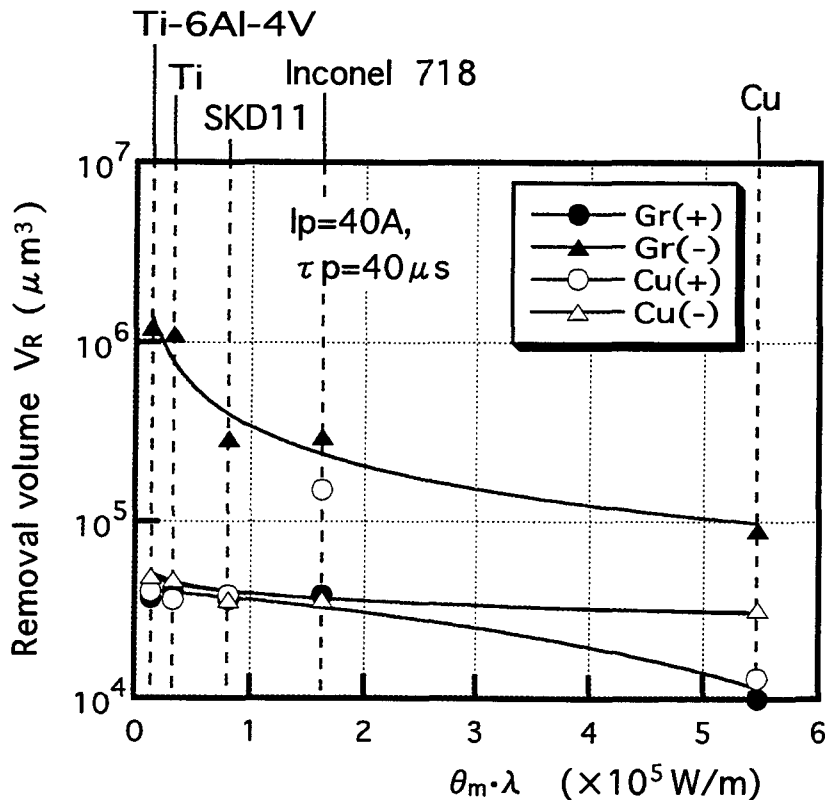


図2-32 Inconel 718の放電痕除去体積

加工速度を得られるため、実用上ほとんど問題はないといえる。

図2-34は、一般に電極消耗が小さいとされる逆極性で放電電流 $I_p=4A$ として加工を行った場合の電極消耗率 W を示す。図よりパルス幅の増加とともに両電極とも電極消耗は減少していく。グラファイト電極の場合パルス幅 $100\mu s$ で電極消耗はほぼ0となり、 $200\mu s$ では電極が成長しマイナスの値を示す。銅電極の場合もパルス幅 $200\mu s$ ではほぼ無消耗となる。この結果からニッケ

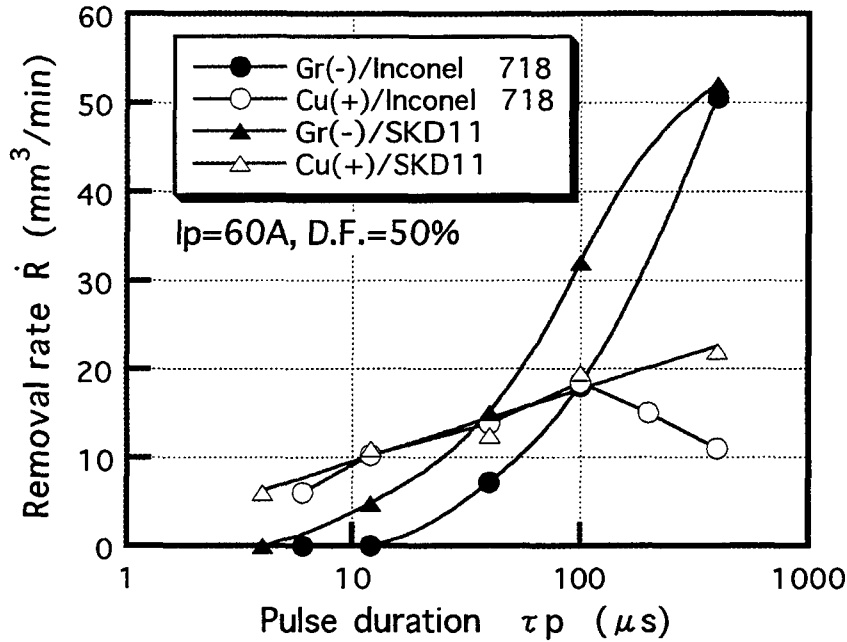


図2-33 Inconel 718の加工速度の変化

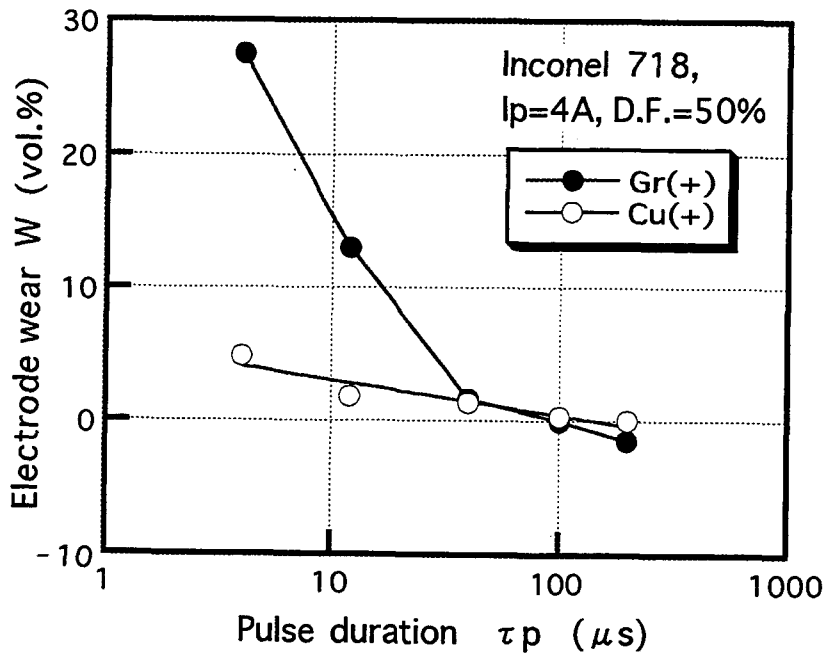


図2-34 Inconel 718の電極消耗率の変化

ル基合金の放電加工ではパルス幅を長くすれば電極無消耗加工も可能となる。

さらに図2-35は銅電極・逆極性の条件で加工を行った場合の加工面粗さの変化を示す。図より明らかなように加工面粗さは放電電流およびパルス幅の増加とともに増加する。SKD11と比較するとほとんど差がなく、放電電流、パルス幅の小さい条件では粗さを小さくすることが可能となる。

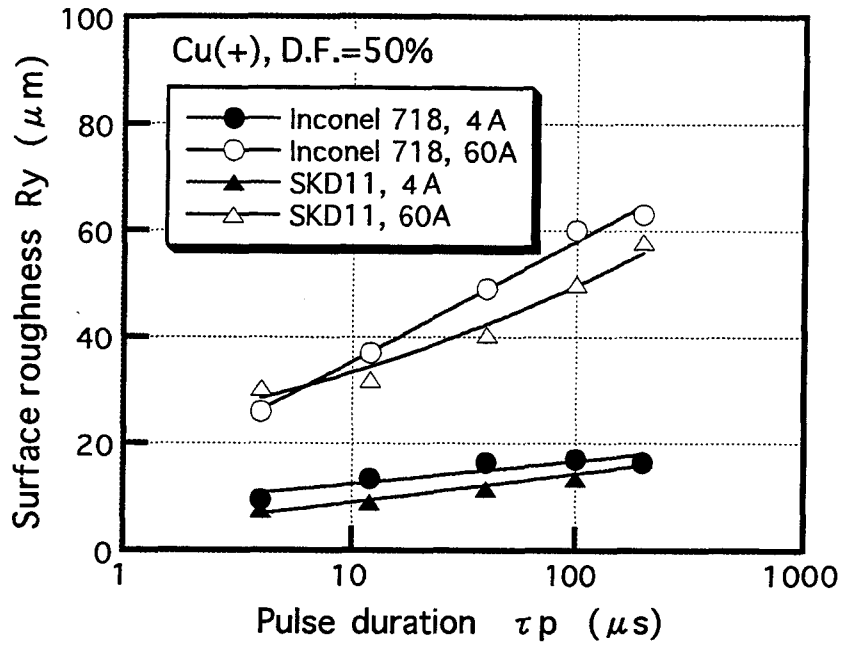


図2-35 Inconel 718の加工面粗さの変化

2.5 結 言

耐熱性合金の高能率放電加工を確立するため、代表的なチタン合金およびニッケル基合金を用い、基礎的な実験を基にその加工特性、加工メカニズムについて体系的な解明を行った。本章で得られた結論は以下の通りである。

- (1) チタン合金における単発放電痕の盛りりは鉄鋼材料の場合よりも大きく、またその盛りり速度はチタン合金のほうが小さい。
- (2) 単発放電における放電痕除去体積は鉄鋼材料よりもチタン合金のほうが大きく、工作物の融点と熱伝導率の積が小さい材料ほど放電加工されやすいとする従来の説に対応する。
- (3) チタン合金の連続放電加工では鉄鋼材料よりも加工速度が小さく、電極消耗が大きくなる。チタン合金が難加工となるのは、放電痕の盛りりが大きく、盛上る速度が小さいために、短絡が頻繁に発生し、放電状態が非常に不安定となるためである。
- (4) デューティ・ファクタを小さくし十分な休止時間を与えることによって、短絡を減少させ加工状態を安定化することができる。これによりチタン合金の高能率放電加工が可能となる。さらに電極低消耗加工も可能である。
- (5) ニッケル基合金の放電加工では加工速度は鉄鋼材料と同程度であり、逆極性で適当な加工条件を選択すれば、電極無消耗加工も可能となる。

参考文献

- 2-1) 松浦徹, 堀武雄, 斎藤長男, 毛利尚武, 大竹廣定: チタン材料に対する放電加工の研究, 昭和63年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集 (1988) 185.
- 2-2) Y.Uno and A.Okada: High Efficient Electrical Discharge Machining of Titanium Alloy, Proc. of 8th ASPE Annual Meeting (1993) 313.
- 2-3) 宇野義幸, 岡田晃, 中島利勝, 高木俊: チタン合金の高効率放電加工に関する研究, 電気加工学会誌, **27**, 56 (1993) 1.
- 2-4) 草道英武, 村上陽太郎, 木村啓造, 和泉修: 金属チタンとその応用, 日刊工業新聞社 (1983) 51.
- 2-5) 鈴木敏久, 森口康夫: チタンのおはなし, 日本規格協会 (1995) 61.
- 2-6) 芦浦保之, 本西英: チタン加工技術シリーズ1, チタニウム・ジルコニウム, **35**, 3 (1987) 134.
- 2-7) 武井英雄: 金属材料学, 理工学社 (1987) 143.
- 2-8) 島村昭治: 未来を拓く先端材料, 工業調査会 (1982) 43.
- 2-9) 高橋昇, 浅田千秋, 鎌田重夫: 金属材料学, 森北出版 (1971) 315.
- 2-10) 錦織清治, 浅田千秋, 藤原達雄: 特殊鋼便覧, 理工学社 (1979) 8.
- 2-11) 鳴瀧則彦, 難削材の切削加工概論, 精密工学会誌, **58**, 12 (1992) 1949.
- 2-12) 中島利勝, 宇野義幸, 茅原雅之: 難削材の円筒プランジ研削加工の研究, 精密機械, **49**, 10 (1983) 1358.
- 2-13) 向山芳世, 河田明義, 植松司: 放電面の三次元評価の研究 (第二報), 1990年度精密工学会春季学術講演会講演論文集 (1990) 175.
- 2-14) 宇野義幸, 中島利勝, 山口毅: 放電加工面粗さ生成機構に関する考察, 電気加工学会誌, **26**, 51 (1992) 29.
- 2-15) 斎藤長男: 放電加工の研究-放電痕の挙動について 鋼対六四黄銅の場合, 精密機械, **26**, 3 (1960) 155.
- 2-16) 木本康雄: 電気電子応用精密加工, オーム社 (1982) 36.
- 2-17) 宇野義幸, 遠藤修, 中島利勝: 単発放電痕生成機構に関する基礎的研究, 電気加工学会誌, **25**, 49 (1991) 9.
- 2-18) 斎藤長男: 放電加工のしくみと100%活用法, 技術評論社 (1979) 43.
- 2-19) 井上潔: 放電加工の原理, 未踏加工技術協会 (1979) 11.
- 2-20) 鈴木政幸, 毛利尚武, 斎藤長男, 武沢英樹: 放電加工における電極消耗の研究 (第2報) - 消耗状態の時間的推移の観察 -, 電気加工学会誌, **27**, 56 (1993) 50.
- 2-21) H.Xia, M.Kunieda and N.Nishiwaki: Removal Amount Difference between Anode and Cathode in

EDM Process, IJEM, 1 (1996) 45.

2-22) 木本康雄：電気電子応用精密加工，オーム社（1982）27.

第3章 高熱伝導銅合金の放電加工特性

3.1 緒言

一般に金型材としては鉄鋼材料が使用されているが、製品の多様化にともなって金型の製作方法や金型材も多様化している^{3-1) 3-2)}。例えば従来シェルモールド用金型としては鉄鋼材料が使用されているが、熱伝導率が低いいため焼ムラが生じやすい、高温下での組織変化による熱歪みを生じるためバリが発生したり寸法精度が低下する、脱炭や油の付着により離型性が悪くなる、シェル砂による摩耗、腐食が生じメンテナンスが必要であるなどの問題がある。これらの欠点を改善するため、近年耐歪み性、熱伝導性、耐摩耗性に優れた銅-ニッケル-アルミニウム系の特殊銅合金が用いられはじめている。さらに高強度で耐食性、鑄造性などに優れたアルミニウム青銅の使用も検討されている。しかしながら銅合金、アルミニウム青銅の放電加工に関する研究報告はなく、その加工特性の解明が急務となっている。

このように新たな金型材の開発が進められている一方で、金型寿命の改善のために窒化処理、クロムメッキ、ニッケルリンメッキなどの表面処理が多用されている³⁻³⁾。特にシェルモールド用金型においては、シェル砂に対する耐摩耗性、耐食性の向上を図るために金型表面にニッケルメッキを施す方法が採られている。しかしメッキ層と母材との密着性が弱く剥離しやすい、液処理の負荷が大きいといった点で問題がある。一方近年開発された粉末混入放電加工においては、粉末材質が加工表面に拡散するため加工面の耐食性、耐摩耗性が向上すると報告されており^{3-4) 3-5)}、ニッケルメッキ処理にかわる放電加工による表面処理技術の可能性が考えられる。

そこで本章では、金型材として需要が高まりつつある銅合金およびアルミニウム青銅の放電加工特性について解明し、その加工表面を金型として用いる場合の表面特性について検討を行った³⁻⁶⁾。さらにニッケル粉末混入加工液を用いたアルミニウム青銅の放電加工を行い、加工面粗さを向上させるとともに、加工面に耐食性に優れたニッケル含有層を形成することを試みた。

3.2 シェル金型用銅合金の放電加工

3.2.1 シェル金型用銅合金

近年、高温で加熱冷却が繰り返されるシェルモールド用金型として耐歪み性、熱伝導性、耐摩耗性などに優れた銅-ニッケル-アルミニウム系特殊銅合金³⁻⁷⁾が開発され、一部採用されている。従来より用いられているFC材（ねずみ鉄）は3.2~3.8% C, 1.4~2.5% Siの成分で組織はフェライト、パーライトおよびグラファイト（片状）からなっており³⁻⁸⁾、铸造性は良好であるが比較的脆いことや、耐歪み性にやや劣る、バリ取り処理や型のメンテナンスに手間がかかるなど問題を抱えている。これに対し特殊銅合金（ミタックス（株）社製MS46）は以下のような特徴を有する³⁻⁷⁾。

（1）耐歪み性

高温で熱変形を起こしても常温で原型に復する性質を有する。従って金型としては常にスキ間の生じない状態を保つことが可能であり、バリのないシェル中子の製造が可能となる。

（2）離型性

特殊銅合金はFC材とは異なり耐食性の大きい非常に緻密な組織であり、FC材における脱炭のような問題がないため、型表面に油分などが残留しない。従ってシェル砂の離型性が良好で全く問題がない。すなわち離型材は不要であり、環境改善にも有効である。

（3）熱伝導性

特殊銅合金はFC材と比較して特に高温で熱伝導率が大きいため、金型の温度が均一である。すなわち焼きムラのないシェル中子の製造が可能となる。また型の昇温時間が短いため焼成時間の短縮（約50%）、エネルギーコストの低減（約20%）につながる。

（4）硬度

FC材と比較し、約20%硬く、シェル砂による傷が付きにくい。

（5）耐摩耗性、耐食性

シェル砂に対する耐摩耗性、耐食性（酸、アルカリ）が高い。

この特殊銅合金MS46は65% Cu, 15% Niおよび少量のAl, Zn, Feを成分とし、その組織はNi, Alからなる κ 相と、Cu, Znからなる α 相から成っている。切削性は良好であり、金型の加工は、もっぱら超硬工具による高速切削によって行われているが、特殊形状や複雑形状部分には放電加工が用いられる。また細穴加工などにも放電加工が用いられている。しかしながら銅合金の放電加工についての報告はこれまでほとんどなく、その放電加工特性の解明が重要な課題となっている。

3.2.2 実験方法および加工条件

図3-1は実験装置および電極形状の概略を示す。実験は、単発放電回路を備えたトランジスタスイッチング式のNC放電加工機で行われた。工具電極は図に示すように断面形状が20×20mmの正方形のもので、その中心にφ2mmの小孔を設け、 $4.9 \times 10^4 \text{ Pa}$ (0.5 kgf/cm^2)の圧力で加工液を噴出させ、極間の加工粉、気泡の排出を行った。単発実験の際には電極先端を円錐状に成形した丸棒を用いた。電極材質は銅およびグラファイト（イビデン（株）、ED-3）である。加工液には灯油系加工液（KHS, VITOL2, 比抵抗 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上）を用い、工作物には前述の特殊銅合金MS46と、従来シェル用金型として使用されているFC250およびプレス用金型として使用される炭素工具鋼SK3を比較のために用いた。それらの主な材料特性を表3-1³⁻⁷⁾に示す。また加工条件を表3-2に示す。加工深さは1mm一定として、加工速度、電極消耗率を評価した。工具電極のジャンプ動作については噴流穴を設けたため行っていない。

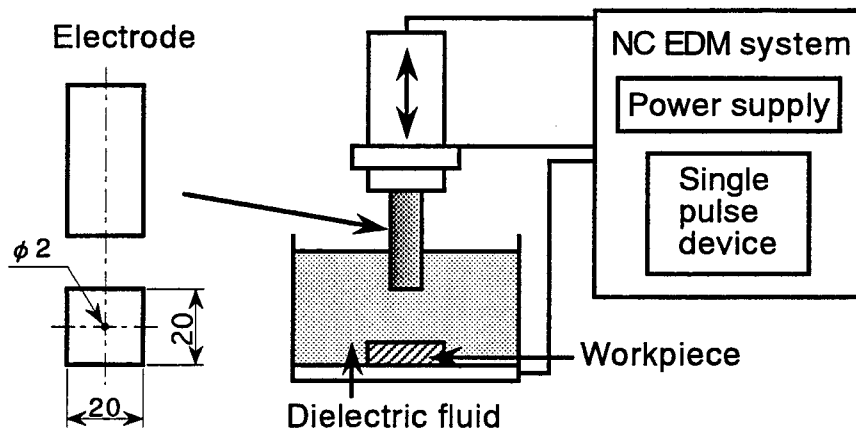


図3-1 実験装置および電極形状

表3-1 工作物の材料特性³⁻⁷⁾

Materials	Specific gravity [g/cm ³]	Melting point [K]	Specific heat [J/(kg·K)]	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Coefficient of linear expansion [°C]
Copper alloy(MS46)	7.6	1,458	460	58.3	16.9×10^{-6}
Cast iron(FC250)	7.3	1,523	544	46.0	12.0×10^{-6}
Carbon tool steel(SK3)	7.8	1,731	502	45.2	10.6×10^{-6}

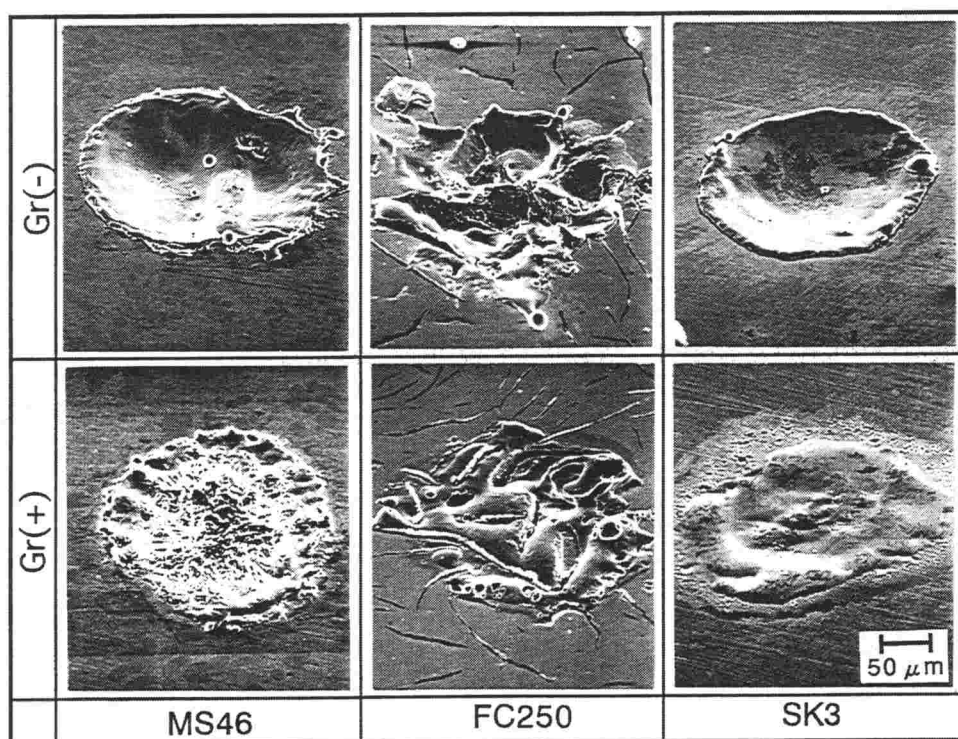
3.2.3 実験結果および考察

3.2.3.1 放電加工特性

図3-2は同一加工条件下でグラファイト電極を使用し、電極の極性を変えて単発放電を行った場合の銅合金MS46、FC250およびSK3の放電痕のSEM写真である。図より明らかなように、FC250の場合に正、逆両極性において他の工作物とは著しく異なる特異な形状をしていることがわかる。FC250の組織はフェライト、パーライトおよびグラファイトからなっているが、図中黒く線状に観察されるグラファイトの部分が除去されず残っている。フェライト、パーライト

表3-2 加工条件

No-load voltage	$V_0 = 120V$
Polarity	Electrode : (+), (-)
Discharge current	$I_p = 4 \sim 60A$
Pulse duration	$\tau_p = 4 \sim 100 \mu s$
Duty factor	D.F. = 50%
Machining fluid	Kerosine



$I_p = 40A, \tau_p = 40 \mu s$

図3-2 放電痕のSEM写真

組織の部分は比較的融点が高いため、放電の熱により溶融除去されるが、グラファイトの部分は融点（昇華温度）が高く、除去されにくいいため、図に見られるような形状になるものと考えられる。このような形状は銅電極を用いた場合や、加工条件を変化させた場合にも確認された。また逆極性加工の場合、銅合金MS46の放電痕中央部分では表面の凹凸の激しい箇所が観察される。この部分は再凝固層がほとんど存在しないように見られる。

図3-3は単発放電痕における放電痕盛り部高さ H_2 と放電痕深さ H_1 との比 H_2/H_1 を示すもので、相対的な盛り部の割合を示している。図より明らかなように、グラファイト正極性の条件で、いずれの工作物においても盛り部が非常に小さいことがわかる。また工作物について比較すると、大きな差は認められない。

図3-4は単発放電痕における放電痕深さ H_1 と放電痕内径 D_1 との比 H_1/D_1 を示す。この値が大きいほど底の深い放電痕形状となること示しており、いずれの工作物においてもグラファイト正極性の条件で値が大きい。またグラファイト逆極性、銅逆極性の条件ではFC250の放電痕は他に比べ、多少深いクレータとなることがわかる。

図3-5はグラファイト正極性の条件下で単発放電を行ったときの放電痕除去体積³⁻⁹⁾と放電エネルギーとの関係を示す。いずれの工作物においても、放電エネルギーの増加とともに除去体積は増加する。またSK3および銅合金MS46の除去体積が大きく、FC250はかなり小さいことがわかる（対数目盛）。これは図3-2に見られたように、グラファイト組織の部分が除去されにくいためであると考えられる。なお他の電極材質、極性の条件においても同様の傾向がみられた。

図3-6は、前述の結果から比較的加工速度が大きいと考えられるグラファイト正極性、放電電流 $I_p=60A$ で連続放電を行ったときの加工速度とパルス幅の関係を示したものである。図より明らかなように銅合金MS46、FC250およびSK3は同様の変化曲線とな

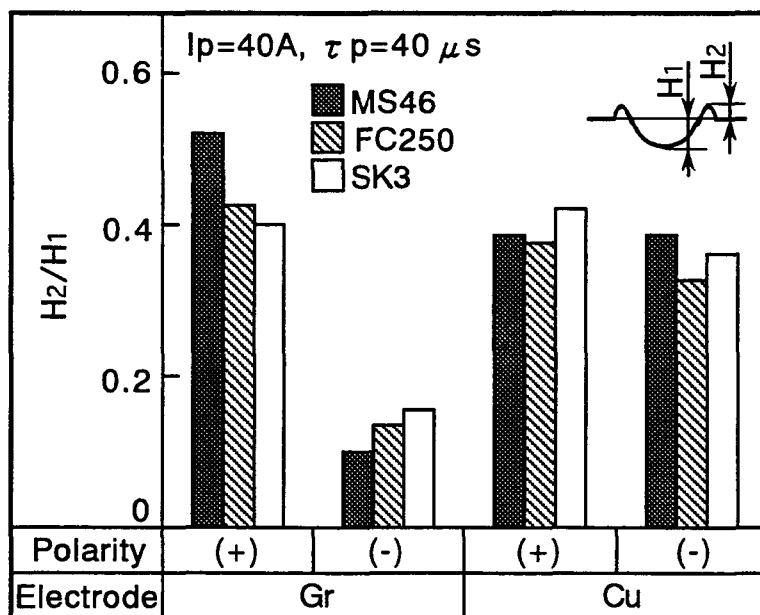


図3-3 放電痕深さに対する盛り高さの割合

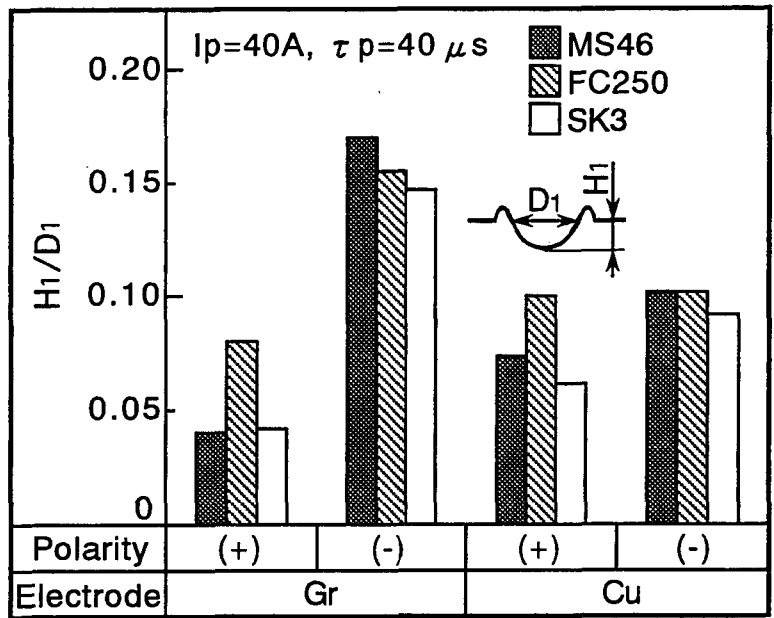


図3-4 放電痕直径に対する放電痕深さの割合

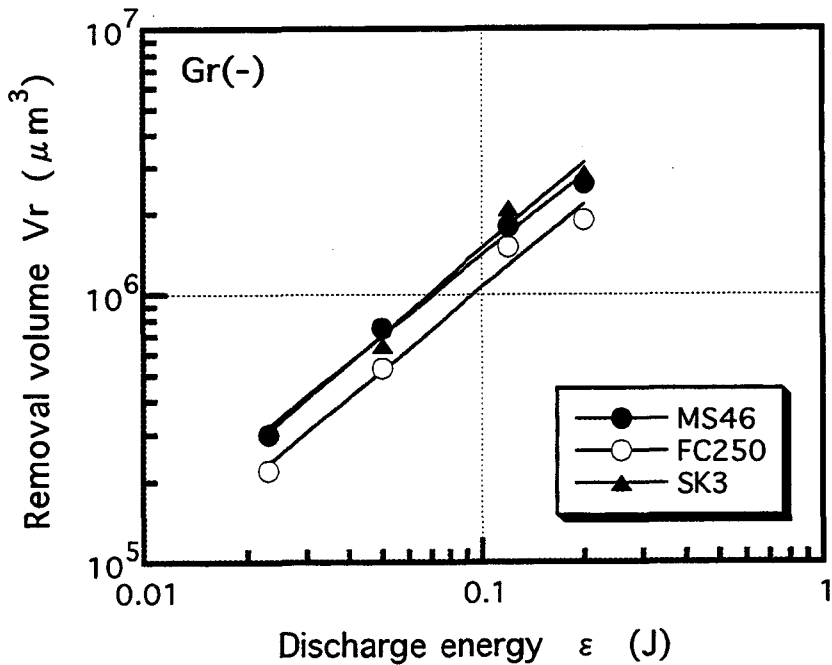


図3-5 放電痕除去体積と放電エネルギーの関係

るが、SK3の加工速度に比べると銅合金MS46、FC250の加工速度は半分程度である。FC250の加工速度が小さいのは前述の単発放電における除去体積が小さいことから予測されることであるが、銅合金MS46の加工速度が小さくなる要因については以下のように考えられる。図3-7はそれぞれの工作物についての熱伝導率と温度の関係を示す³⁷⁾。図からFC250、SK3の場合は温度の上昇とともに熱伝導率は緩やかに減少することがわかる。これに対し銅合金MS46の場合は、温度

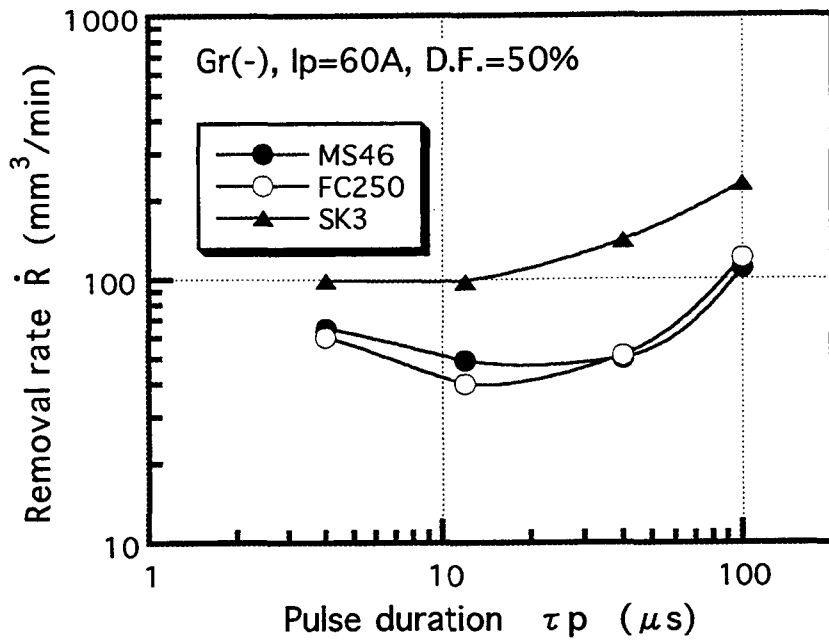


図3-6 加工速度とパルス幅の関係

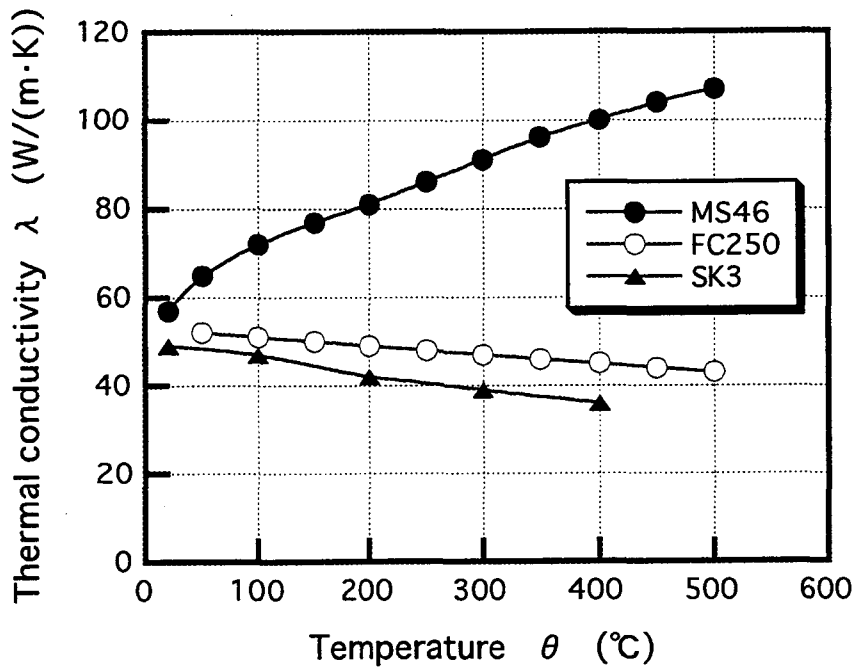


図3-7 各工作物材料における熱伝導率と温度の関係⁴⁻⁷⁾

の上昇とともに熱伝導率の値は増加する。一般に異なる工作物材料に対する放電加工特性は工作物の融点 θ_m と熱伝導率 λ の積 $\theta_m \cdot \lambda$ の値に左右され、その値が小さいほど加工性がよいと言われている³⁻¹⁰⁾。銅合金MS46の常温での $\theta_m \cdot \lambda$ の値はSK3とほぼ同じ(表3-1参照)であり、被加工性にあまり差がないと考えられる。また前述の単発放電における除去体積においてもSK3

とほぼ同様であった。しかし連続放電においては加工物表面近傍は放電に伴う熱によって高温となり、熱伝導率が高くなる。このために連続放電では $\theta_m \cdot \lambda$ の値は高くなり、その結果加工速度は低下するものと考えられる。

図3-8は、比較的電極消耗が小さいとされる銅電極逆極性、放電電流 $I_p=4A$ の条件で加工を行った場合の電極消耗率とパルス幅との関係を示す。いずれの工作物においてもパルス幅が長くなるにつれ、電極消耗率は低下することがわかる。FC250の場合パルス幅 $100 \mu s$ で電極が成長し、マイナスの値を示す。SK3の場合も $100 \mu s$ でほぼ0となる。鋼の放電加工では逆極性でパルス幅の長い場合電極無消耗加工が実現するとされており、それに準じた結果が得られた。しかし銅合金MS46の場合、他の工作物より消耗はやや大きく、 $100 \mu s$ では1%近く消耗する。

図3-9はそれぞれの工作物を加工した後の電極端面のSEM写真である。工具電極にはグラファ

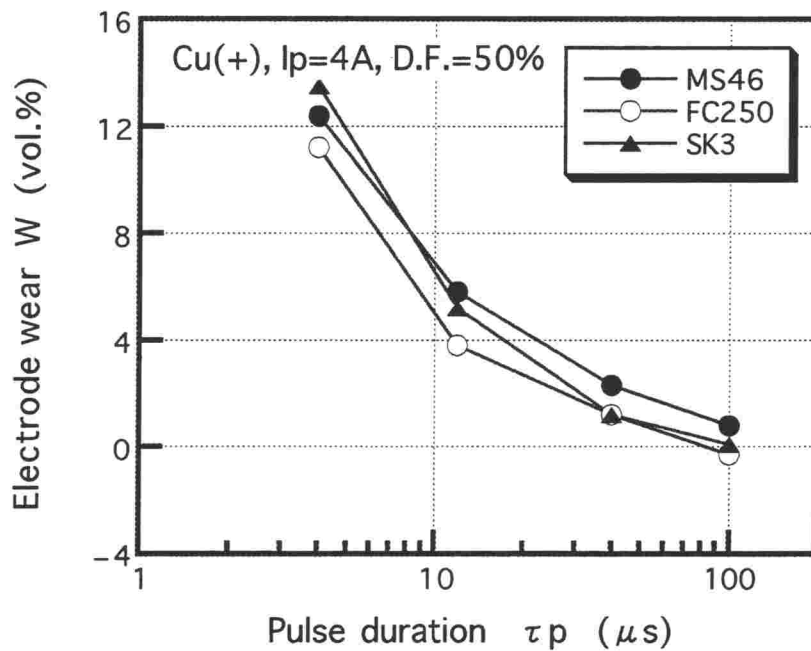
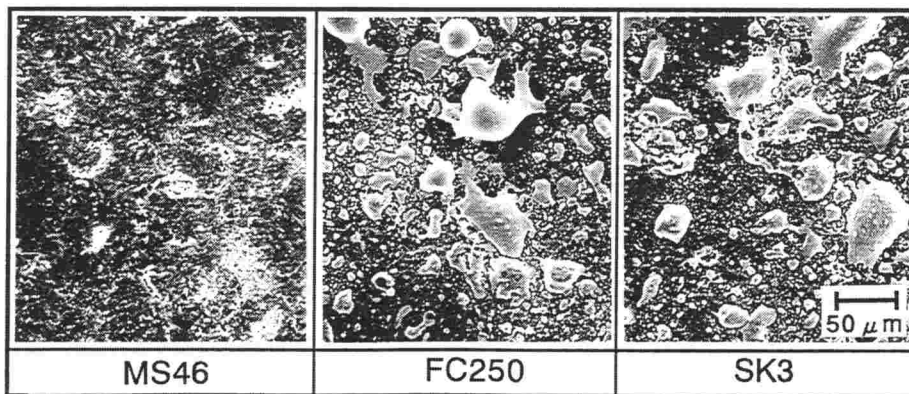


図3-8 電極消耗率とパルス幅の関係



Gr(+), $I_p=60A$, $\tau_p=100 \mu s$, D.F.=50%

図3-9 加工後の電極端面のSEM写真

イトを用いた。図より明らかなように、FC250、SK3の場合には工作物が塊状に多数付着しているのが確認できる。しかし銅合金MS46の場合付着物はほとんど見られず、また電極素地のグラファイトが露出しているところも見られる。電極無消耗加工は工作物および灯油系加工液の熱分解によって生じるカーボンの電極端面への付着によって実現されるが³⁻¹¹⁾、銅合金MS46の場合電極消耗が大きいのはこうした工作物材料の電極端面への付着が少ないことによるものと考えられる。なお、銅電極を用いた場合や放電電流を変化させた場合にも同様の現象が確認された。

3.2.3.2 加工面性状

図3-10は銅電極、逆極性の条件下での工作物の加工面粗さを示す。図よりいずれの工作物においてもパルス幅の増加とともに粗さも増加する。また銅合金MS46の粗さは非常に小さく、次いでSK3が大きい。それと比較しFC250の粗さは非常に大きく、パルス幅の長い条件では銅合金MS46の約2倍もあることがわかる。

図3-11は、放電加工後のそれぞれの工作物の加工表面のSEM写真である。銅合金MS46の場合非常に細かな凹凸が見られる。これは単発放電痕において放電痕中央付近で観察された形状が現れているものと考えられる。また放電痕の外周部の盛り部分の形状がほとんど見られず、ひとつひとつの放電痕の特定は困難である。これは銅合金MS46の場合、融点が比較的低いため、近傍で放電が生じた場合放電痕外周部の盛り部分はその熱により熔融除去されるためではないかと考えられる。その結果銅合金MS46の場合前図に見られたように加工面粗さが非常に小さくなると推測される。またFC250の表面はグラファイト組織の部分が熔融せず残っているのが確

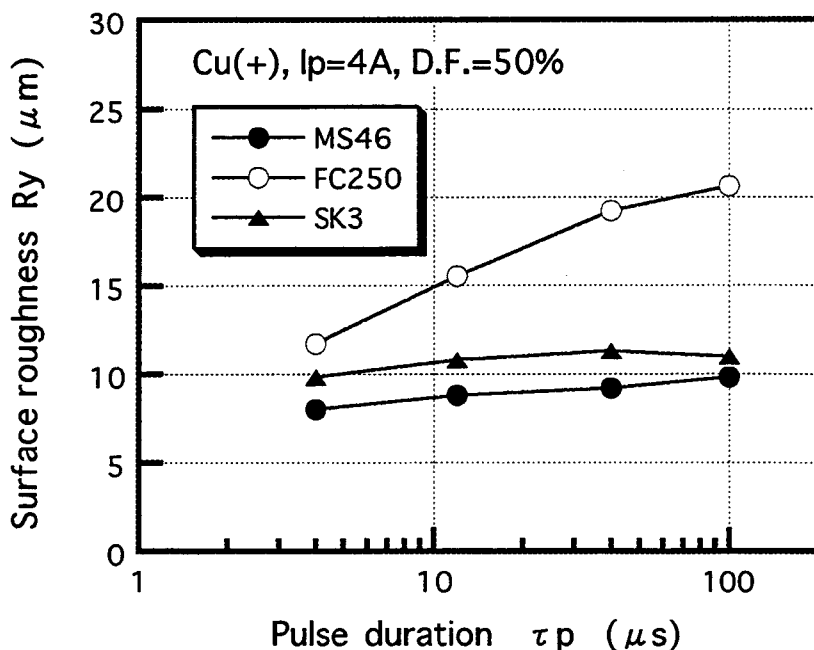
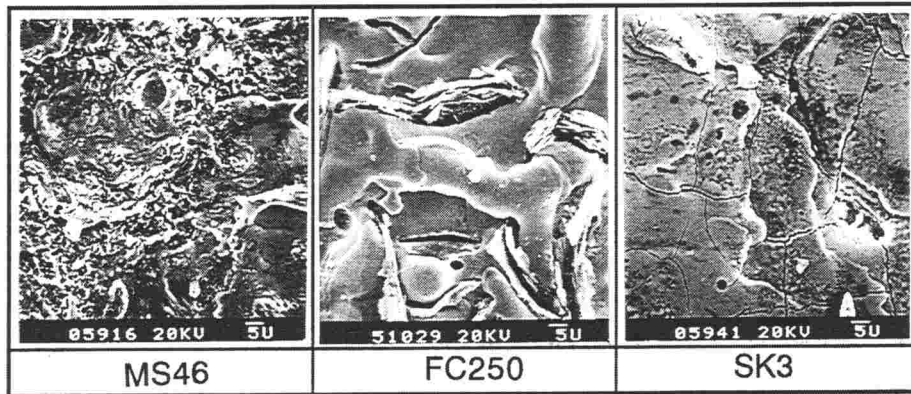


図3-10 加工面粗さとパルス幅の関係

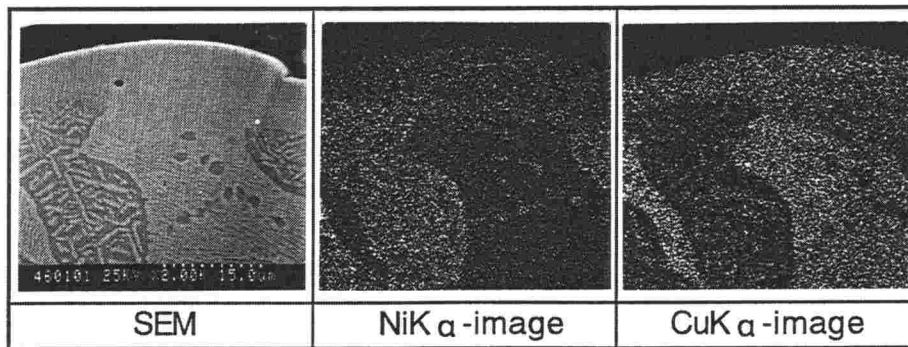
認できる。これは単発放電の際にも見られた形状であり、これによって加工面粗さも非常に大きくなると考えられる。さらにグラファイト組織とフェライト、パーライト組織との境界部分には比較的大きな溝が生じている。これはフェライト、パーライト部分の熱収縮によって生じたものと考えられる。SK3の場合加工表面は比較的滑らかであるが、至るところにクラックが観察される。パルス幅の長い加工条件のため再凝固層が厚くなり、このようにクラックが発生するのであるが、パルス幅の比較的短い条件の加工面においてもクラックの存在を確認している。金型の製作ではクラックの存在する表面層は強度、耐摩耗性が極端に減少するため加工後に表面層を除去する作業が必要となる。しかし銅合金MS46の場合、図に示すパルス幅の長い条件においてもクラックは全く存在せず、粗さを小さくすることができれば加工後の磨き作業が不要となるため、実用上極めて有利であると考えられる。

図3-12は放電加工後の銅合金MS46の加工断面のSEM写真およびNiK α 、CuK α 像である。また図3-13は各組織中の1 μ m角のEPMAによる分析結果である。銅合金MS46の組織は図中黒く見える κ 相と白く見える α 相から成る。 κ 相はNiとAl、 α 相はCuとZnを多く含んでいる。SEM写真より明らかなように放電加工後の表面には、 κ 相とも α 相とも組織の異なる再凝固層が形成さ



Gr(+), Ip=4A, $\tau p=100 \mu s$, D.F.=50%

図3-11 放電加工面のSEM写真



Gr(+), Ip=60A, $\tau p=100 \mu s$, D.F.=50%

図3-12 銅合金MS46の加工断面のSEM写真およびNiK α 像、TiK α 像

れている。そしてこの層の成分はNiK α 、CuK α 像および図13の分析結果から二つの相の中間程度の化学成分となっている。これは一度溶融した工作物が急激に冷却されて生じるもので、非常に微細な組織を形成しているものと考えられる。

図3-14は銅合金MS46の放電加工面の再凝固層と母材のビッカース硬度を示す。グラフ中の点はそれぞれ左図中のビッカース痕に対応している。図より明らかなように、母材の α 相の部分は約200、 κ 相は約300程度の値を示している。これに対して表面の再凝固層の値は350以上の値を示し、母材の α 相および κ 相よりも高くなっている。

以上のように銅合金MS46の放電加工では加工面粗さが小さいこと、加工表面にクラックが存在しないことに加え、表面に硬化層が形成されるために金型材として優れた表面特性を有することが明らかとなった。

しかし、実際のシェル用金型として放電加工面を磨き作業なしでそのまま使用するためには、

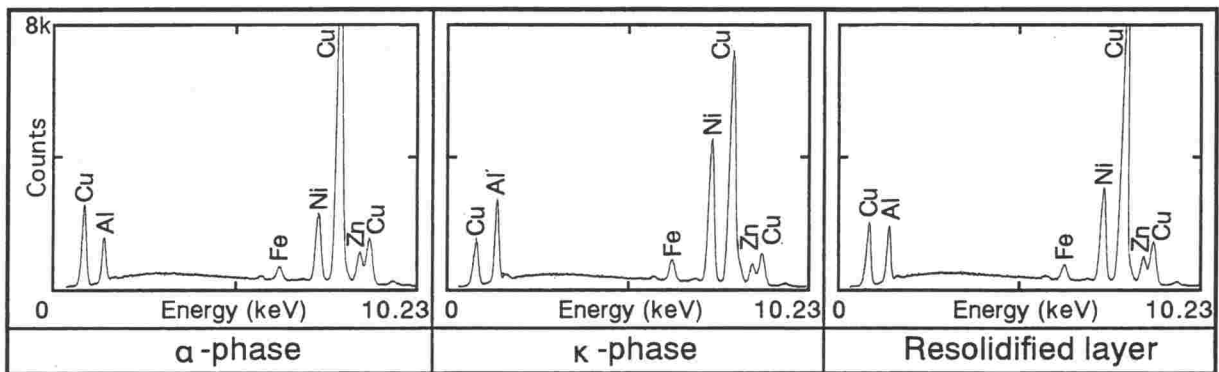


図3-13 銅合金MS46の放電加工面のEPMA分析

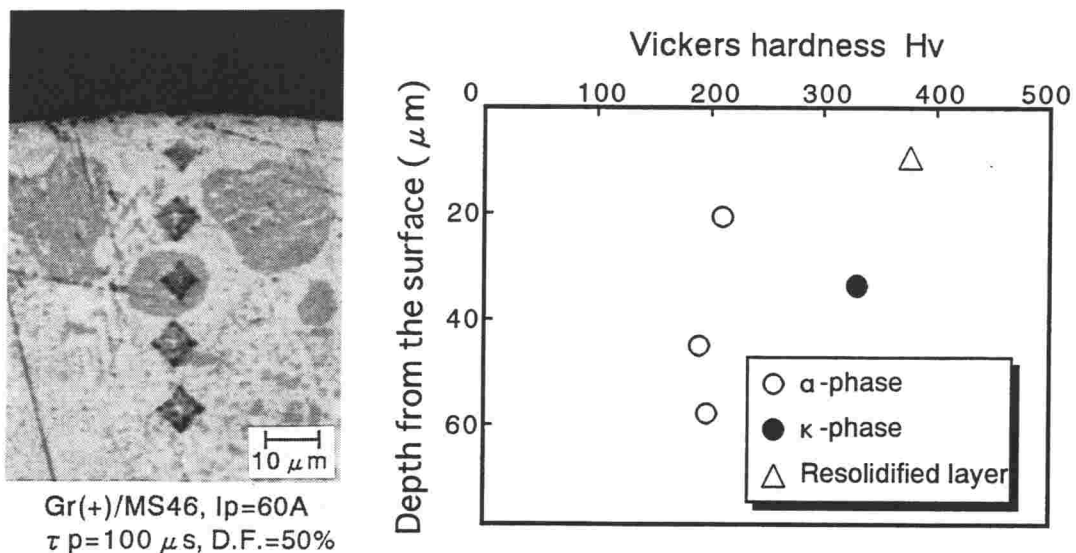


図3-14 α 相、 κ 相および再凝固層のビッカース硬さ

加工面粗さを数 μm に低減する必要である。そこで工具電極に揺動運動を与え³⁻¹²⁾、加工面粗さの改善を図った。今回用いた円形および十字形の二つの揺動のパターンを図3-15に示す。揺動半径はいずれも $150\mu\text{m}$ であり、周期は 6.2sec/cycle である。

図3-16は揺動加工を行った場合の加工面粗さを示す。図より明らかなように、グラファイト電極逆極性、銅電極逆極性いずれの場合においても、揺動運動をを与えたほうが揺動なしの場合よりも加工面粗さは6～8割小さくなっている。特にグラファイト電極を用いた場合に効果が大きい。これは揺動運動を与えることによって、極間に停滞する加工粉や気泡を良好に排出し、放電の偏在を減少できたためと考えられる。また揺動のパターンによる加工面粗さの違いは本実験ではほとんど認められない。放電エネルギーのさらに小さい条件によってさらなる加工面粗さの改善が可能になるものと考えられる。

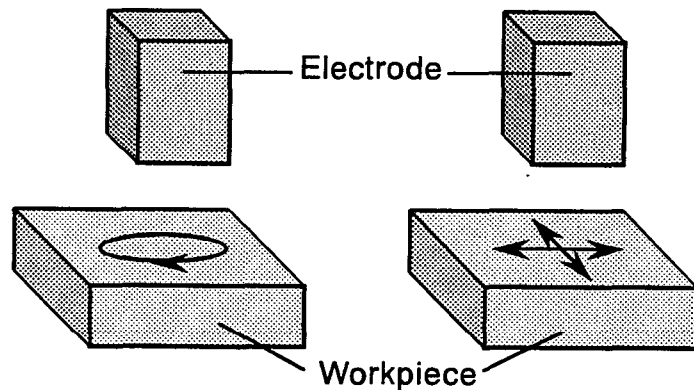


図3-15 電極揺動パターン

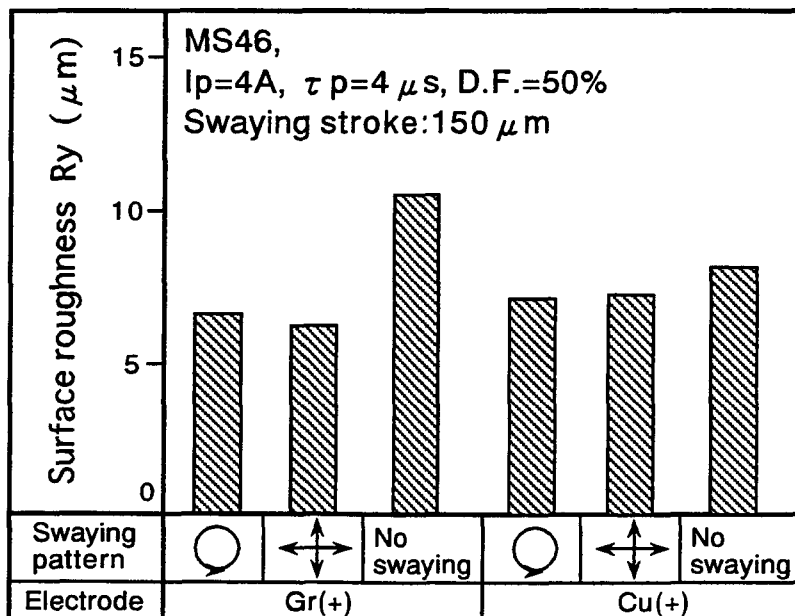


図3-16 電極揺動加工における加工面粗さ

3.3 アルミニウム青銅の放電加工

3.3.1 アルミニウム青銅

アルミニウム青銅は銅にアルミニウムを添加した合金であり、少量のFe, Ni, Mnなどを含む。従来鋳物、熱間加工などにより船用プロペラなどの船舶用推進器部品に用いられている。これは耐食性、耐キャビテーションエロージョンに優れ強度が大きいなどの特徴を有しているためである。また鍛造品、板、棒などとしても利用されている。この種の用途に供される銅合金の中でアルミニウム青銅は耐力に最も優れており、耐熱性、耐摩耗性もよいため塑性加工品としてもさらに発展が期待され、特に高温用の構造材料として利用が増加している。さらにプラスチック成形用金型やシェルモールド用金型として、従来の鋼材にかわり銅合金やアルミニウム合金が一部使用されはじめているが、高強度で耐食性、铸造性などに優れたアルミニウム青銅の使用も検討されている。表3-3に本研究で工作物として用いたアルミニウム青銅3種(AIBC3)の化学成分を示す。

3.3.2 実験方法および加工条件

実験はトランジスタスイッチング式のNC放電加工機により行った。図3-17にその概略を示す。工具電極には直径15mmの銅棒を用いた。加工液には灯油系加工液を用いた。また後述のニッケル粉末混入放電加工実験では、灯油系それにニッケル粉末（福田金属箔粉工業（株）製、カーボニルNI287）を混入したニッケル粉末混入加工液（Nickel Powder Mixed Fluid: 以下NPMFと記す）を用いた。使用したニッケル粉末の粒度は#3000（粒径約5 μ m）である。なお両者の比抵抗を測定したところ、灯油系加工液の比抵抗は $1.23 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 、NPMF(粉末混入率：40g/l)のそれは $1.43 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ であった。NPMFを用いた加工では、ニッケル粉末の沈殿を防ぐためにポンプ、攪拌機によって加工液を循環、攪拌させた。

表3-3 アルミニウム青銅3種AIBC3の化学組成

(%)								
Cu	Al	Fe	Ni	Mn	Zn	Sn	Si	Pb
Bal.	10.1	4.8	4.6	0.9	0.3	0.005	0.005	0.005

3.3.3 実験結果および考察

3.3.3.1 放電加工特性

まずアルミニウム青銅の放電加工特性について検討を行った。この際の加工条件を表3-4に示す。なお比較のために冷間金型鋼SKD11を工作物として用いた。

図3-18はパルス幅を変化させたときの加工速度の変化を示す。図より明らかなように、両者ともパルス幅の増加とともに加工速度は増加し、パルス幅30 μ s付近で最大となる。またいずれのパルス幅においても、アルミニウム青銅はSKD11と同等の加工速度となっていることがわかる。

図3-19は電極消耗率とパルス幅の関係を示す。図よりSKD11と比較するとアルミニウム青銅の場合の電極消耗率はパルス幅の短い場合多少大きく、パルス幅の長い場合には小さくなっている。また両者ともパルス幅の増加とともに電極消耗率は変化し、パルス幅100 μ sで両者ともその値は1%以下となっている。加工後の両電極を観察したところ、電極端面には加工液の熱分

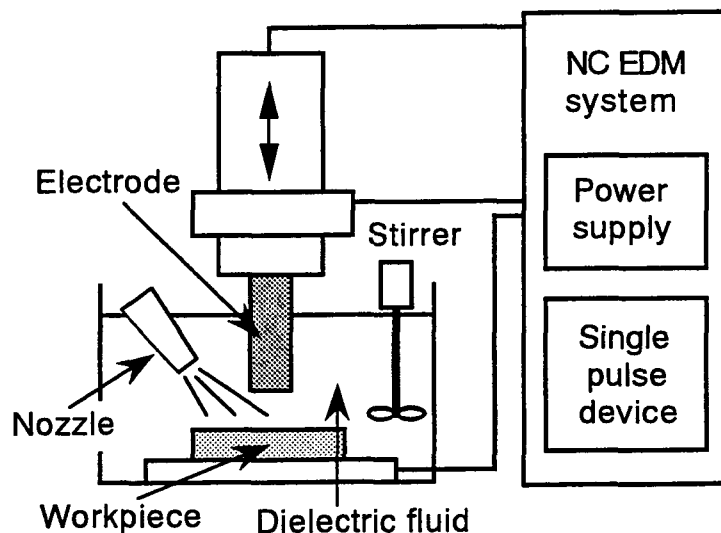


図3-17 実験装置模式図

表3-4 加工条件

No-load voltage	$V_0 = 120V$
Polarity	Electrode : (+)
Discharge current	$I_p = 30A$
Pulse duration	$\tau_p = 4 \sim 100 \mu s$
Duty factor	D.F. = 50%
Machining fluid	Kerosine

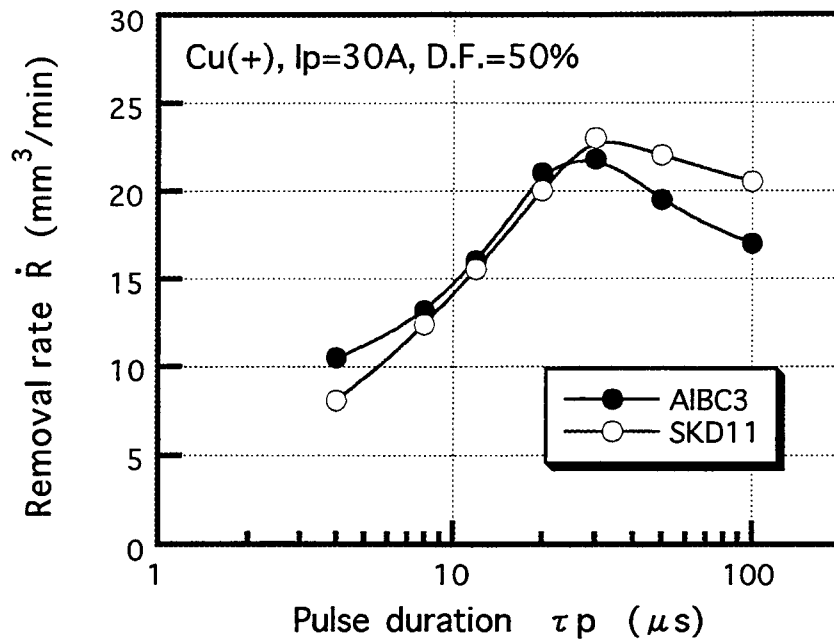


図3-18 加工速度とパルス幅の関係

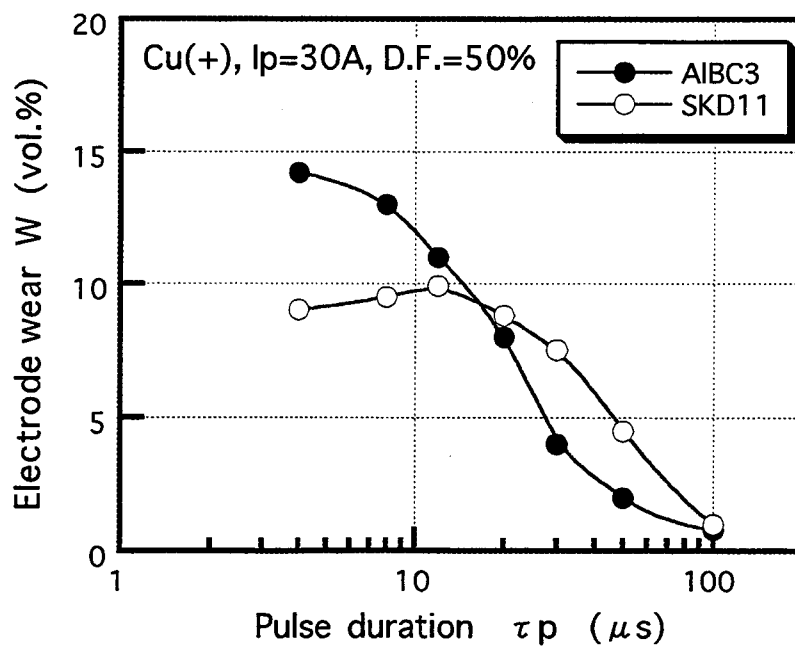


図3-19 電極消耗率とパルス幅の関係

解によって生じたカーボンが付着しており、それによって低消耗が可能となったといえる。また、パルス幅がさらに長い条件では電極無消耗加工も可能となる³⁻¹³⁾と考えられる。

以上のように、通常の放電加工条件においてアルミニウム青銅は、従来の金型材とほぼ同様の放電加工特性を示すことが明らかとなった。

3.3.3.2 ニッケル粉末混入放電加工による加工面の高機能化

従来より金型の寿命改善のために窒化処理、クロムメッキ、ニッケルリンメッキ等の表面処理が行われている。特にシェル用金型においては耐食性、耐摩耗性の向上を図るために、金型表面にニッケルメッキを施す方法が多用されている。しかしながらメッキ層と母材の密着性が弱くメッキ層が剥離する、液処理の負荷が大きいといった問題がある。一方粉末混入した加工液を用いた放電加工においては、粉末金属が放電加工表面に拡散し加工面の耐食性、耐摩耗性が向上することが報告されており^{3-4) 3-5)}、ニッケルメッキにかわる放電加工による表面処理技術が考えられる。

そこで加工液中にニッケル粉末を混入し加工面粗さを向上させるとともに、加工面に耐食性に優れたニッケル含有層を形成することを試みた。まずニッケル粉末混入加工液中で単発放電実験を行い、ニッケル粉末濃度が放電痕形状に及ぼす影響などについて検討を行った。

図3-20は加工液のニッケル粉末濃度を変化させて単発放電を行った際の、放電痕写真を示す。なおこの際の加工条件は、放電電流 $I_p=40A$ 、パルス幅 $\tau_p=40\mu s$ とした。図より通常の灯油系加工液(0g/l)では放電痕の中央部分が大きく窪んでいる。そしてニッケル粉末の混入率を増加させると放電痕はきれいな円状になっていき、凹凸も小さくなっていることがわかる。

図3-21は単発放電における放電痕深さ H_1 と放電痕高さ H_2 の和 H_1+H_2 、およびそれと放電痕の盛り部分の直径 D との比 $(H_1+H_2)/D$ を示したものである。図より明らかなようにニッケル粉末濃度の増加とともに放電痕深さ H_1 が小さくなり、40g/lの場合は灯油系加工液の場合の約3分の1となっている。また盛り高さ H_2 はニッケル粉末濃度の増加とともにやや減少している。 $(H_1+H_2)/D$ は相対的な起伏の激しさを示しているが、放電痕直径はあまり変化しないため、 $(H_1+H_2)/D$ の値もニッケル粉末濃度の増加とともに減少し、40g/lでは灯油系加工液の場合の半分程度と起伏が緩やかになっていることがわかる。

図3-22は灯油系加工液とNPMF(40g/l)を用いて単発放電を行った際の放電痕断面写真である。放電痕上部に黒ずんで見えるのが工作物が一度溶融し再凝固した部分である。灯油系加工液における放電痕は中央部分が深くなっており、放電によって溶融除去されたことが確認できる。

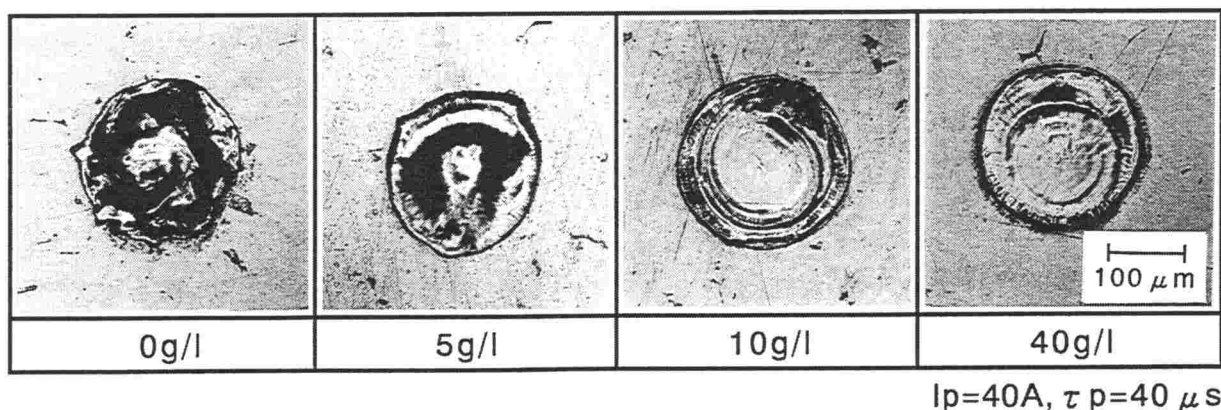


図3-20 Ni粉末濃度を変化させたときの放電痕

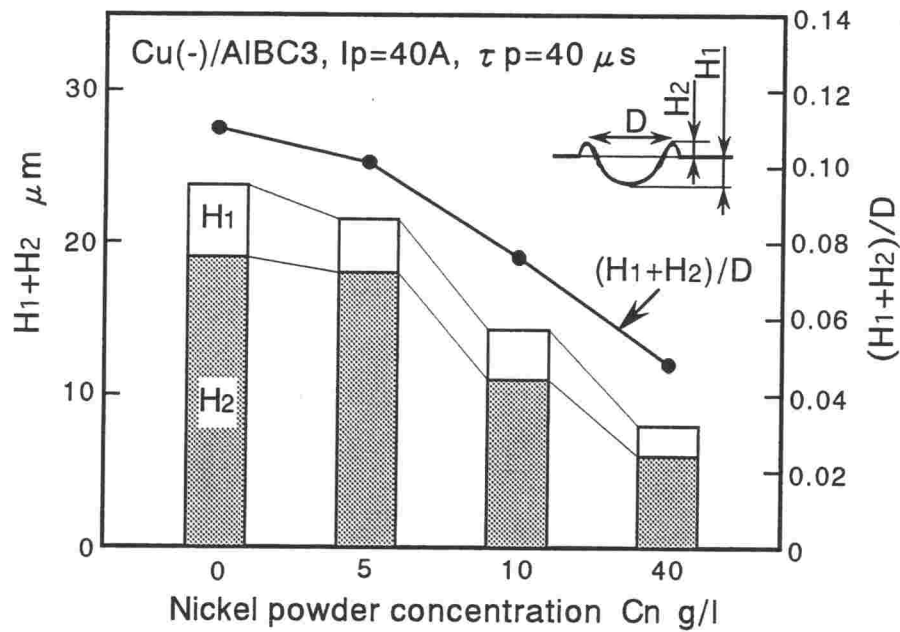


図3-21 放電痕盛り高さとは放電痕深さ

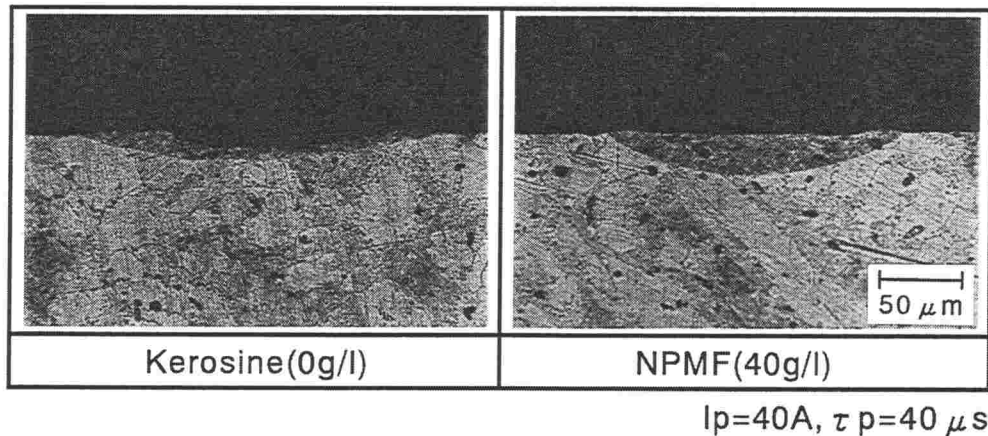


図3-22 放電痕断面

そして再凝固部分はほとんど認められない。これに対してNPMFを用いた場合には、熔融部分はほとんど除去されておらず、表面に残っていることがわかる。このため前述のように粉末混入液では除去量の少ない起伏の緩やかな放電痕を形成するといえる。

次に放電の際の極間距離の測定を行った。図3-23は加工液のニッケル粉末濃度を变化させたときの極間距離の変化を示す。加工液中にアルミニウム粉末やニッケル粉末を混入すると極間距離が増大することが報告されている^{3,4)}が、本実験の場合も同様に加工液中のニッケル粉末濃度の増加にともない極間距離が増大することがわかる。ニッケル粉末濃度15g/l程度までは極間距離は急激に増加し、それ以降は徐々に増加率は小さくなる。そして40g/l混入した時点で、極間距離は約180 μm となり、未混入の場合の約12倍となる。すなわち加工液に粉末を混入すること

により、加工液の比抵抗が小さくなることや電界中の微粒子の配列の影響^{3-14) 3-15)}を受けるために極間距離が増大する。その結果、放電の際に加工液の気化膨張にともなって工作物に作用する衝撃力が小さくなり、前述のように凹凸の少ない放電痕が形成されるものと考えられる。以上の結果からニッケル粉末を加工液に混入することによって、連続放電においても粗さの小さい良好な加工面が生成されると推測される。

次にニッケル粉末混入加工液を用いて、粉末混入が加工特性に及ぼす影響について検討を行った。本加工における加工条件を表3-5に示す。この際電極にX-Y平面内で円形の揺動運動(6.2sec/cycle, r=150 μm)を与え、ニッケル粉末の循環、拡散を促進させた。

図3-24はアルミニウム青銅のニッケル粉末混入加工における加工速度とニッケル粉末濃度の関係を示す。図より明らかなように、ニッケル粉末濃度を変化させても加工速度は0.08mm³/minと

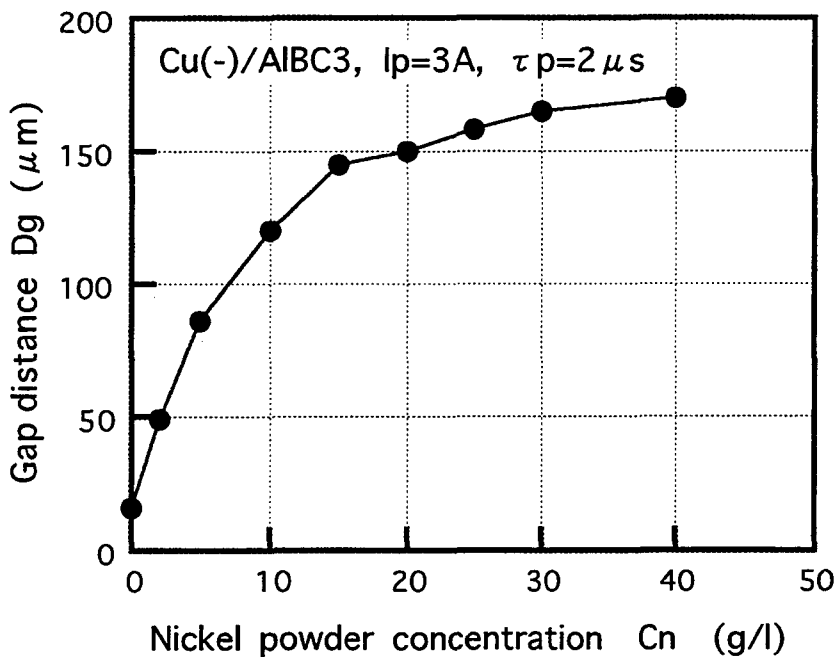


図3-23 極間距離とニッケル粉末濃度の関係

表3-5 ニッケル粉末混入放電加工における加工条件

No-load voltage	Vo = 90V
Polarity	Electrode : (-)
Discharge current	Ip = 3A
Pulse duration	τp = 2 μs
Duty factor	D.F. = 10%
Machining fluid	NPMF

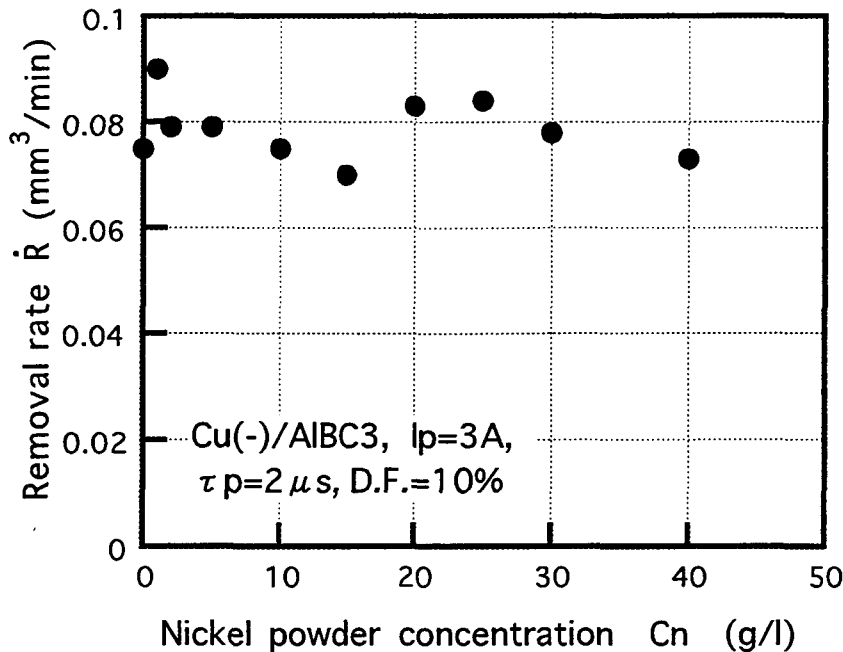


図3-24 ニッケル粉末濃度と加工速度の関係

ほぼ一定であることがわかる。前述の単発放電では未混入の場合のほうが単発放電の除去量は大きかったが、この図に見られるように連続放電では粉末の有無によらず、加工速度が一定であるのは、粉末混入によって放電が分散し³⁻⁴⁾、非常に安定した加工状態が得られるためであると考えられる。

図3-25は、ニッケル粉末濃度の変化に対する加工面の10点平均粗さを示したものである。図よりニッケル粉末濃度の増加とともに加工面粗さは減少することがわかる。40g/l混入した場合には約 $1.7\mu\text{m}$ となり、灯油系加工液(0g/l)の場合の約半分となる。放電加工面は放電痕の集積によって形成されるため、単発放電痕形状が表面粗さに大きく影響することを考慮すると、前述の図3-21の傾向とよい一致を見せている。

図3-26は、加工面写真と断面曲線を示す。灯油系加工液の場合、加工表面の放電痕形状は乱れており、加工面の起伏を激しくする原因となっている。一方NPMF(40g/l)を用いて加工を行った場合、表面はきれいな円形の放電痕の集積になっており、凹凸の少ない滑らかな面を形成していることがわかる。

図3-27は、ニッケル粉末混入濃度を変化させた場合の加工断面写真である。再凝固層の状態を明確にするため断面には腐食を施している。灯油系加工液の場合では再凝固層は表面に数 μm しか存在せず、その下部に約 $10\mu\text{m}$ の厚さの熱影響層が存在していることがわかる。しかしニッケル粉末混入濃度を増加させるにしたがって再凝固層が厚みを増し、均一になっていくことがわかる。また、一般に再凝固層には熔融部分の急冷却によりマイクロクラックが発生するが、

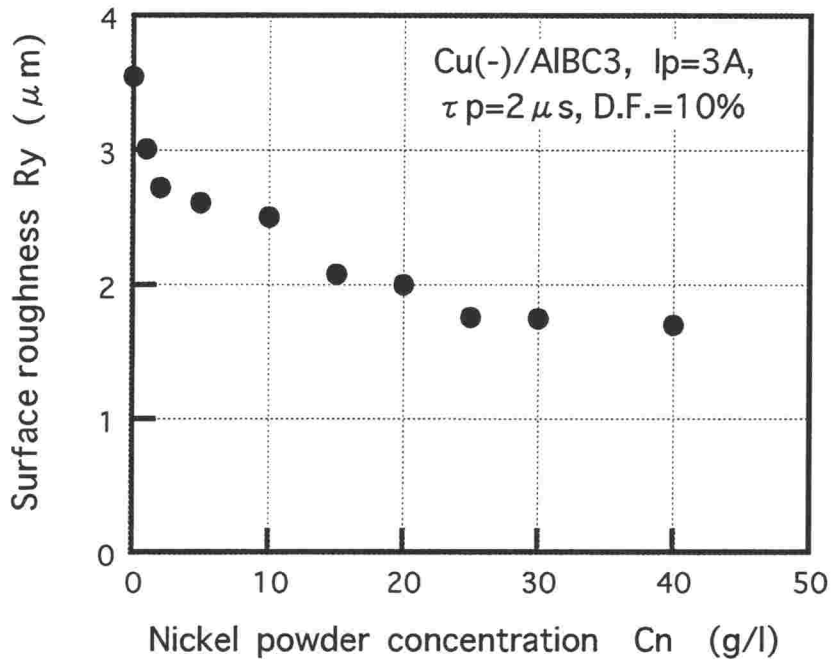
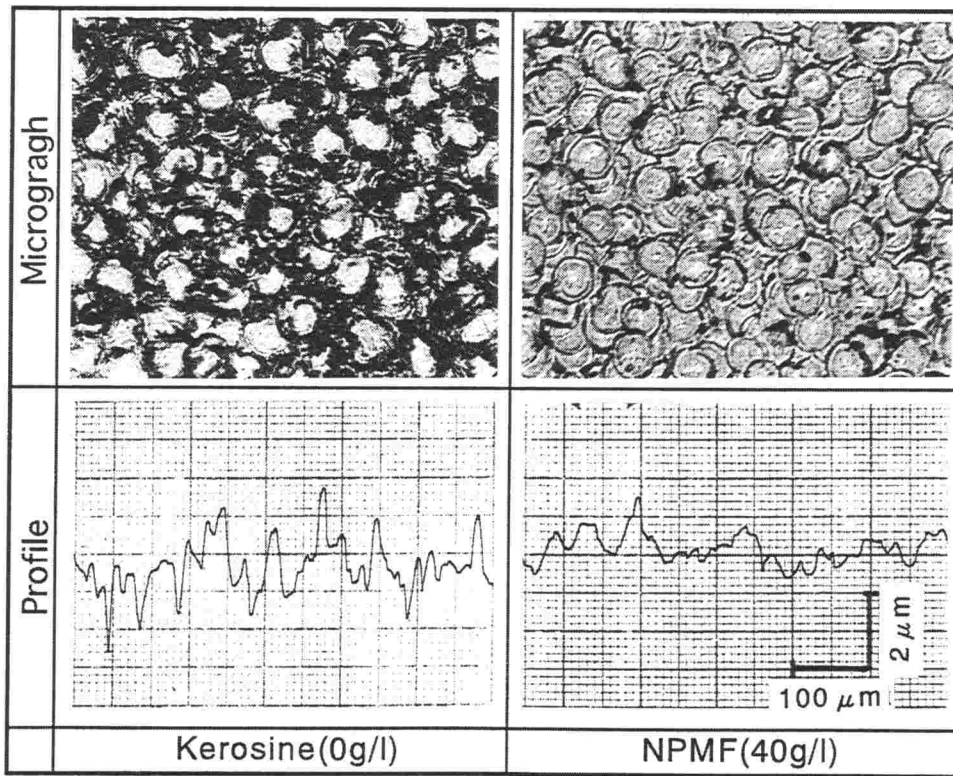


図3-25 ニッケル粉末濃度と加工面粗さの関係



$I_p=3A, \tau_p=2 \mu s, D.F.=10\%$

図3-26 加工面写真と断面プロファイル

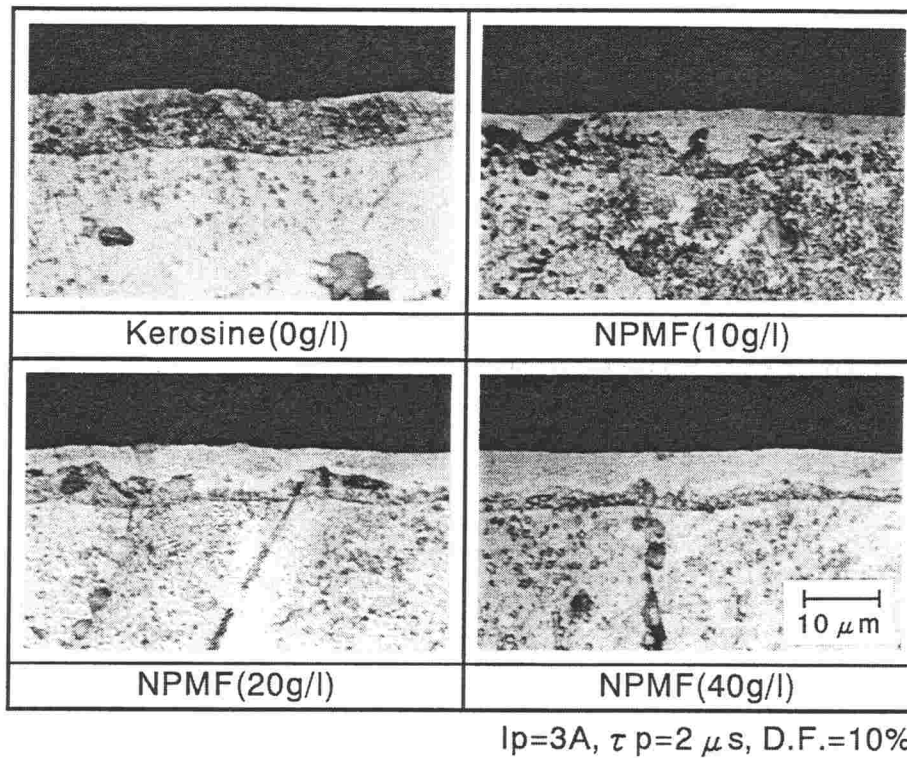


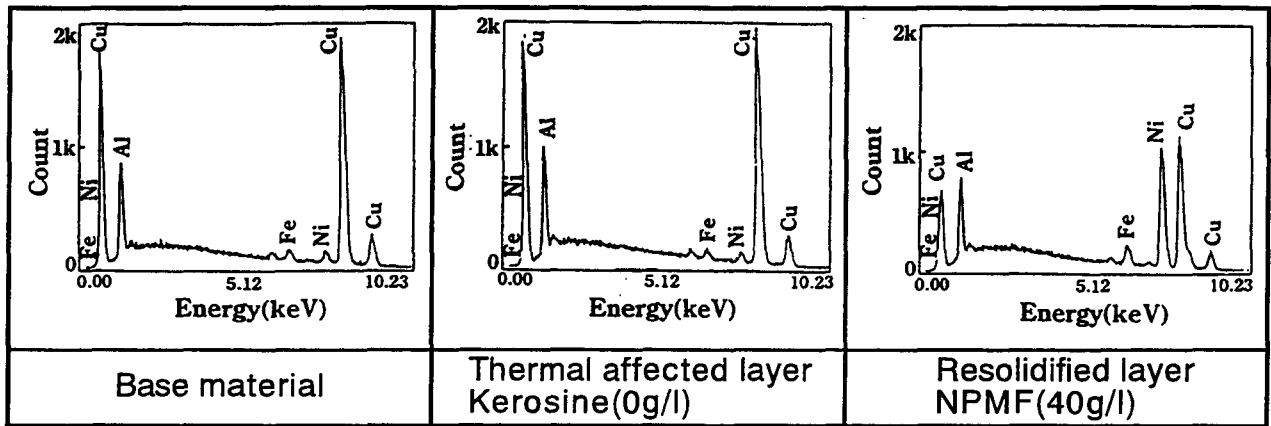
図3-27 粉末濃度による加工断面の違い

NPMFを用いて加工を行った場合にはマイクロクラックは確認されず、良好な加工面を形成していることがわかる。

以上のように、加工液にニッケル粉末を混入することによって加工面粗さは向上し、加工表面にはマイクロクラックの存在しない均一な再凝固層が形成されることが明らかとなった。この再凝固層は一度熔融し、加工液により冷却され再凝固した部分であるため、加工液のニッケル粉末を含む合金層を形成しているものと推測される。そこで次に加工表面の成分分析を行った。

図3-28は、アルミニウム青銅母材、灯油系加工液中で加工を行った場合の熱影響層及びNPMF中で加工を行った場合の再凝固層のEPMA分析結果である。図より灯油系加工液中で加工を行った場合での加工表面の成分は母材とほとんど変化がないが、ニッケル粉末混入加工液を用いた場合の再凝固層では銅のピークが低下し、それにかわってニッケルのピークがかなり増加しており、母材に比べニッケルが多量に含まれていることがわかる。

図3-29は、加工液中のニッケル粉末濃度と加工表面のニッケルの含有率の関係を示す。加工表面のニッケル含有率の測定は発光分光分析により行った。図より明らかのように、加工液中のニッケル粉末濃度の増加とともに加工表面層のニッケル含有率は急激に増加している。これはニッケル粉末濃度の増加によって、ニッケルの含有した再凝固層が厚みを増して均一になるとともに、再凝固層に含まれるニッケル自体の含有量も増加しているためであると考えられる。



$I_p=3A, \tau_p=2 \mu s, D.F.=10\%$

図3-28 表面層のEPMA分析

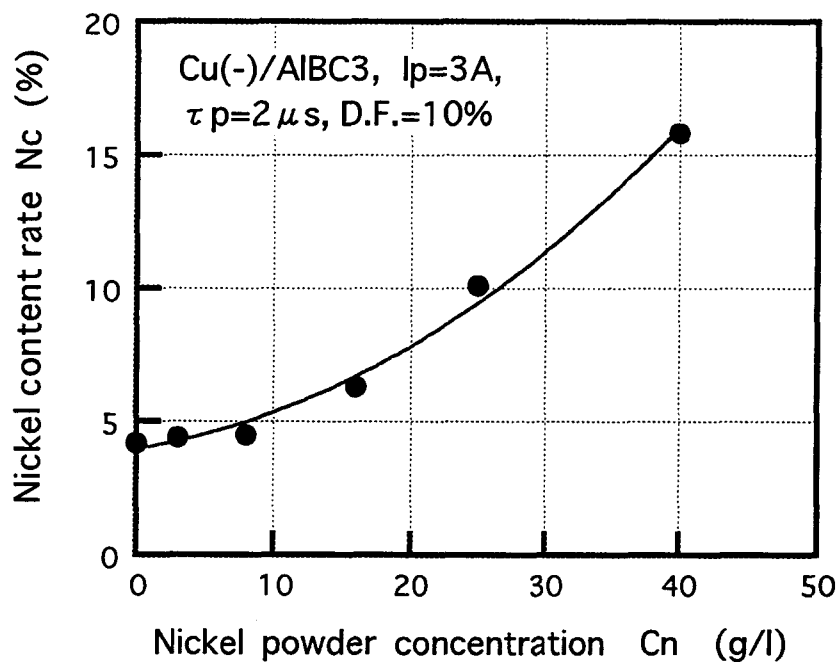


図3-29 ニッケル粉末濃度と再凝固層のニッケル含有率

アルミ青銅の成分から考慮すると、ニッケルはアルミニウムと結合し合金化している可能性が非常に高く、さらに放電による急冷却によって結晶粒が微細化された構造をしていると推測される。

図3-30は、加工表面のビッカース硬度を示す。ニッケル粉末混入加工液の場合の再凝固層の硬さは母材の約2倍、灯油系加工液の表面層の約1.4倍となることがわかる。このように、ニッケル粉末混入放電加工によって、従来の加工面よりも高硬度な表面層を形成することが可能となった。

一般にシェルモールドの製作では、金型内にシェル砂を高速に充填させるため、その際の砂

による摩耗が、型形状崩れの大きな要因となる。そこでニッケル粉末混入放電加工によって形成されたニッケル層のシェル砂に対する耐摩耗性を調べるために、砂摩耗試験を行った。図3-31は、砂摩耗試験の概略を示す。図に示すように二つの試料を対向させて、その間隙を5 mmに固定する。摩耗試験面（放電加工面）はシェル砂の噴出方向に対して30°傾いており、 $1.96 \times 10^5 \text{ Pa}$ の圧力で60秒間シェル砂（FTA60）を吹き付けける。この試験条件は実際のシェル砂充填数万サイクルに相当する。

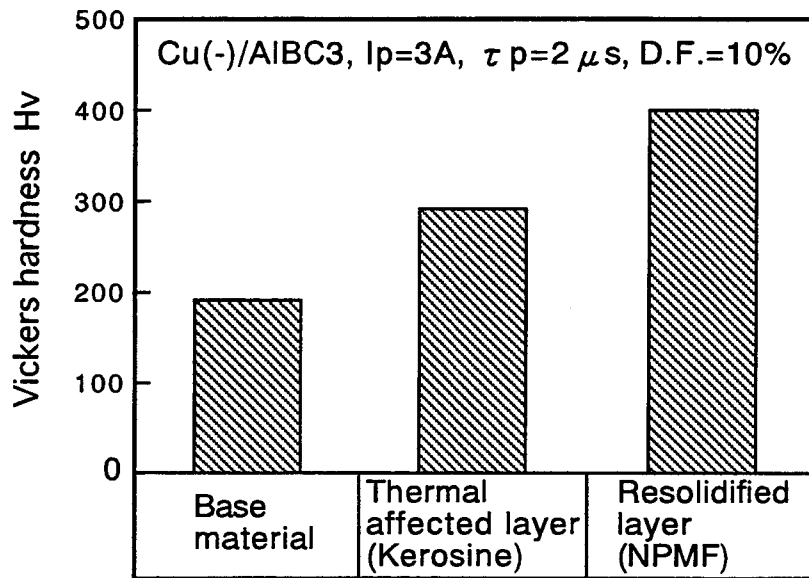


図3-30 表面層の硬さの違い

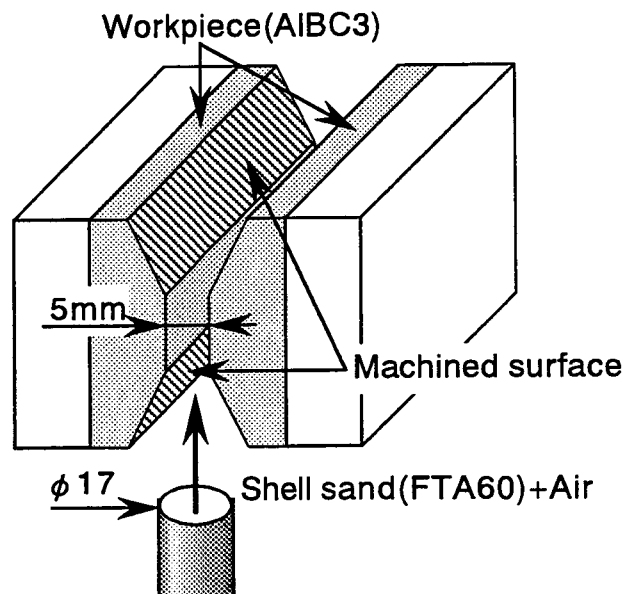


図3-31 砂摩耗試験の概略

図3-32に砂摩耗試験の結果を示す。縦軸の摩耗深さは、摩耗箇所の最大深さを表す。図より明らかなように、母材と比較すると放電加工面の摩耗は小さいことがわかる。そしてニッケル粉末混入放電加工による加工面はさらに摩耗が小さく、母材の場合の7割以下となっている。以上のように表面に形成されたニッケル合金層によって加工表面の耐摩耗性が向上することが明らかとなった。

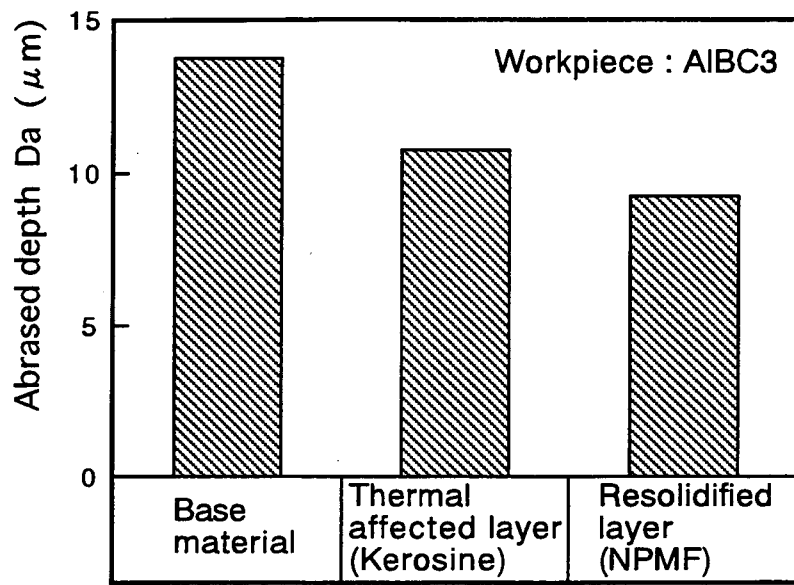


図3-32 砂摩耗試験結果

3.4 結 言

本研究ではシェル金型用特殊銅合金およびアルミニウム青銅の放電加工特性を解明するとともに、ニッケル粉末混入加工液を用い、加工面の改質について検討を行った。本章で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 特殊銅合金およびアルミニウム青銅の加工速度は鋼材と同程度であり、アルミニウム青銅においては電極無消耗加工も可能となる。
- (2) 特殊銅合金の放電加工面は従来の鋼材に比べ面粗さが小さいこと、クラックが生じないこと、表面の再凝固層が母材より硬くなることなど金型材として優れた特性を有する。
- (3) アルミニウム青銅のニッケル粉末混入放電加工では従来の灯油系加工液を用いた場合よりも加工面粗さが向上する。
- (4) ニッケル粉末混入放電加工では、ニッケルを含有する再凝固層を加工表面に形成することができ、その厚さは加工液中のニッケル粉末濃度の大きいほうが厚くしかも均一となる。
- (5) ニッケル粉末混入放電加工における加工面は、灯油系加工液を用いた場合よりも硬度が高く、耐砂摩耗性も大きい。

参考文献

- 3-1) 熊谷敦：プラスチック成型用金型材料，型技術，**10**，8（1995）49.
- 3-2) 山田定男：アルミニウム合金，型技術，**8**，12（1993）45.
- 3-3) 日原政彦：金型寿命における管理技術と最近の動向，型技術，**12**，1（1997）97.
- 3-4) H.Narumiya, N.Mohri, N.Saito, H.Ootake, Y.Tsunekawa, T.Takawashi and K.Kobayashi：EDM by Powder Suspended Working Fluid, Proc. of ISEM-9（1989）5.
- 3-5) 宮谷保太郎，山崎雄司，上田順弘，佐藤幸弘，増井清徳：シリコン粉末添加放電加工による加工面の機能性向上，電気加工学会誌，**19**，62（1995）21.
- 3-6) 銅合金（MS46）の放電加工特性，電気加工学会誌，**28**，57（1994）1.
- 3-7) (株)ミタックス MS46技術資料
- 3-8) 武井英雄：金属材料学，理工学社（1977）160.
- 3-9) 井上潔：放電加工の原理，未踏加工技術協会（1979）11.
- 3-10) 斎藤長男：放電加工の仕組みと100%活用法，技術評論社（1979）56.
- 3-11) 土屋政光，西村重志：低電極消耗放電加工の研究-電極表面の黒化層について-，電気加工学会誌，**1**，2（1968）71.
- 3-12) 高鷲民生：微小エネルギーによる放電加工の研究，電気加工技術，**5**，13（1982）9.
- 3-13) 鈴木政幸，毛利尚武，斎藤長男，武沢英樹：放電加工における電極低消耗の研究（第一報）-放電除去現象の観察-，電気加工学会誌，**26**，52（1992）47.
- 3-14) 須田孝，佐藤登志夫：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，**7**，14（1974）19.
- 3-15) M.Kunieda and K.Yanatori：Study on Debris Movement in EDM Gap, IJEM, **2**（1997）43.

第4章 アルミニウム合金の放電加工特性

4.1 緒言

金型製作においては、良質の製品を効率よく成形できる金型を安価に短時間で製作することが求められており、金型の製作方法はますます多元化している。このような中で、ショットサイクルの短縮を目的として、高強度アルミニウム合金がプラスチックモールドや射出成形用金型材として一部採用されつつある^{4-1) 4-2)}。従来アルミニウム合金は、低コストで試作、少量生産用という概念であったが、いまや射出成型用金型では数十万ショット以上の使用実績もあり⁴⁻²⁾、その利用範囲は広まりつつある。またプラスチック成型品は車両、ボートなど大型化が進んでいるために、それに対応する金型の軽量化が求められるようになってきている。このためアルミニウム合金の放電加工特性を十分把握する必要がある。金型用アルミニウム合金は切削、研磨などにおいて鋼の数倍の加工速度が得られ、優れた加工性を有することはよく知られている。しかしながら放電加工においては、化学的に反応しやすいため加工表面が変質したり、表面に絶縁性の生成物が形成され加工状態が安定しないなどの問題がある。そこで本章では超々ジュラルミンと呼ばれ、高圧射出成型用金型に用いられる高強度アルミニウム合金A7075を工作物として用い、その加工特性について実験的に検討を行った。また炭化層、酸化層など加工を妨げる層が加工表面に生成する現象に対して、前編にて検討を行った高速極性切替放電加工を用い、その効果についても検討を行った⁴⁻³⁾。

4.2 アルミニウム合金の放電加工

4.2.1 プラスチック金型用アルミニウム合金

近年金型の多様化、大型化が進む中で金型の軽量化、ショットサイクルの短縮化を目的として、高強度アルミニウム合金がプラスチックモールド型や射出成型用金型として採用されはじめている。従来アルミニウム合金は試作・少量用金型という概念があったが、10万ショット以上の実績をあげるようになり軽量化のニーズからプレス金型にも使用されはじめるなど、その利用範囲も飛躍的に広まりつつある⁴²⁾。アルミニウム合金はJISによって大きく7系統に大別されており、2000および7000系が高強度アルミニウム合金の代表的なものである。金型材としてはもっぱらAl合金中最大の強度を有するA7075合金が使用されている。超々ジュラルミンとも呼ばれるAl-Zn系合金で、MgZn₂化合物の析出に基づく時効硬化性が著しく引張り強さが約60kg/mm²にも達する⁴⁴⁾。またこの合金は航空機用部材にも使用されており、耐食性にも優れている。本実験で工作物として使用したA7075合金の化学組成を表4-1に示す。

4.2.2 アルミニウム合金の単極性放電加工

まず通常使用される逆極性加工条件下でのアルミニウム合金の放電加工特性について検討を行った。図4-1は各条件における単発放電痕の除去体積を示す。図より明らかなように銅電極、グラファイト電極いずれの電極においても、アルミニウム合金の除去体積はSK3の2倍以上と非常に大きいことがわかる。これはアルミニウム合金の融点がSK3に比べて半分以下と低く、溶融体積が大きいためであると考えられる。

図4-2はアルミニウム合金の放電加工における加工深さと加工時間の関係を示す。図より明らかなようにこの条件では、加工初期のアルミニウム合金の加工速度はSK3の約3倍もあることがわかる。これは前述の単発放電痕の除去体積からも予測できる結果である。しかし、加工時間が増加するにつれ、傾きが緩やかになり、加工速度が低下していくのがわかる。そして加工深さが約2mmに達すると、加工はほとんど進行しなくなってしまう。これは主に極間の加工粉排出の悪化によると考えられるが、アルミニウム合金の場合は、それ以外に加工表面への酸化物

表4-1 アルミニウム合金A7075の化学組成

(%)								
Cu	Mg	Mn	Cr	Si	Fe	Ti	Zn	Al
1.56	2.67	0.05	0.21	0.10	0.17	0.02	5.96	Bal.

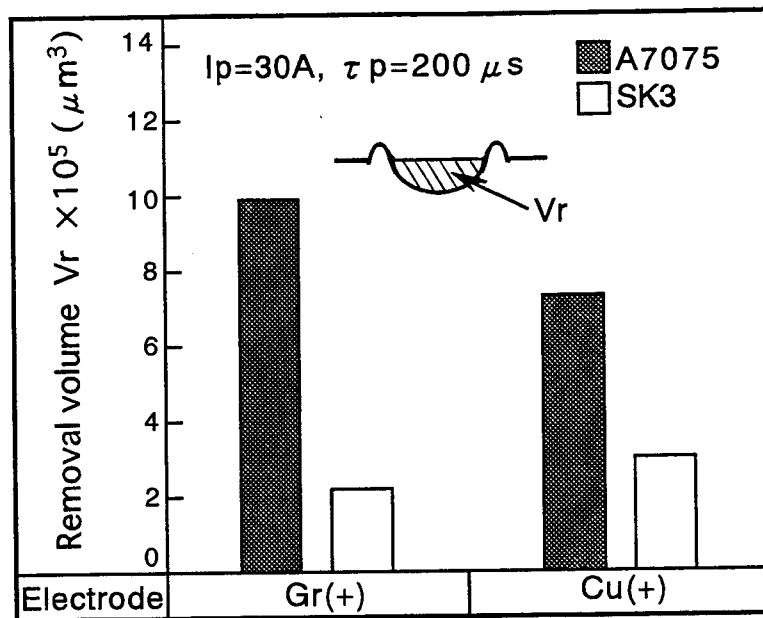


図4-1 放電痕除去体積の違い

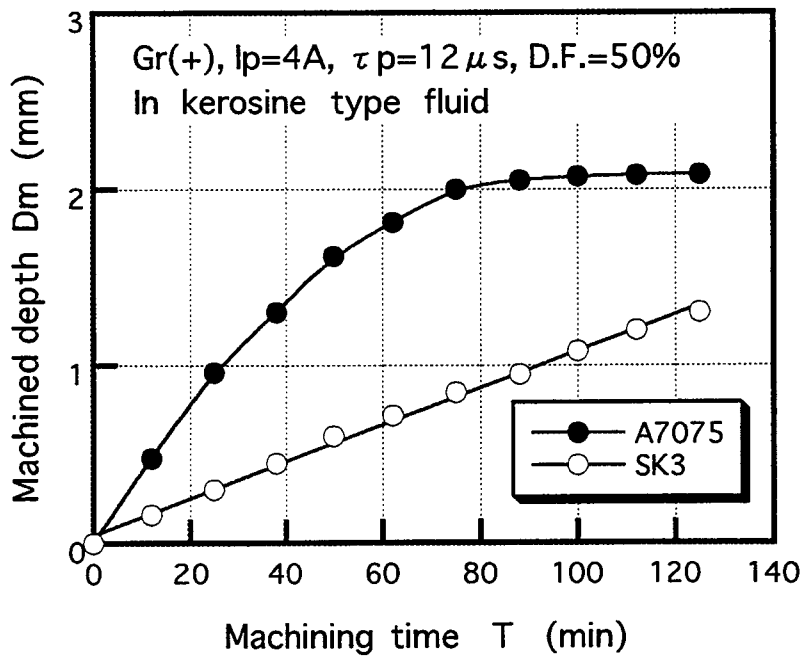


図4-2 加工深さと加工時間の関係

や炭化物の付着によることも考えられる。なお他の加工条件においても同様に加工速度低下の傾向が見られた。

図4-3はアルミニウム合金の加工表面のSEM写真である。加工初期 ($T=25\text{min}$) の加工面では、工作物が溶融・蒸発し、飛散した様子が確認できる。これに対して加工が進行しなくなった場合 ($T=100\text{min}$) の加工面には炭化物あるいは炭素生成物が堆積していることがわかる。この生

成物はさほど大きいものではないが、粒子が堆積した形状をしており、肉眼で観察しても表面が黒ずんでいることが確認できた。このような加工表面への生成物の付着は加工速度を低下させる一因と考えられる。なお加工深さの増加により加工速度が低下するため、以下の実験では加工深さを1mmとして実験を行っている。

図4-4は加工速度とパルス幅の関係を示す。図よりアルミニウム合金およびSK3とも、銅電極、グラファイト電極いずれの場合においてもパルス幅の増加に伴って加工速度は大きくなり200 μ s

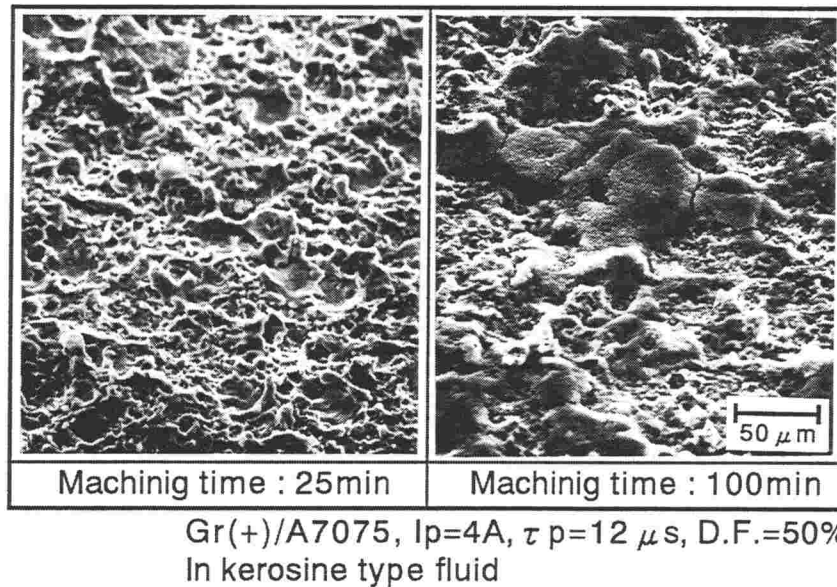


図4-3 アルミニウム合金の加工表面

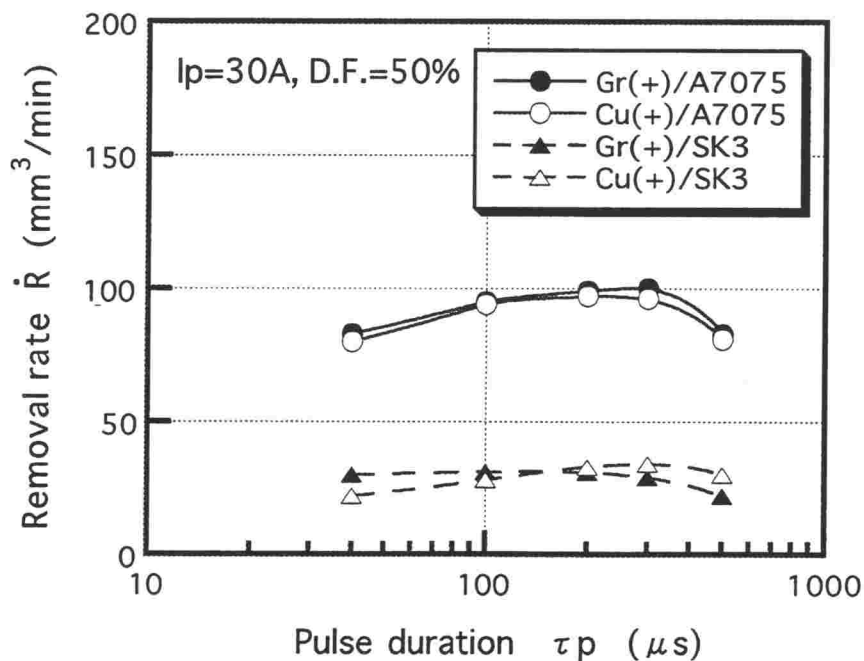


図4-4 加工速度とパルス幅の関係

で最大となる。またSK3と比較するとアルミニウム合金の加工速度はかなり大きいことがわかる。前図に見られたような加工速度の低下現象がなければアルミニウム合金は放電加工性に優れた材料であるといえる。

図4-5はパルス幅を変化させた場合の電極消耗率の変化を示す。図より明らかなようにパルス幅が短い場合には電極消耗率は銅、グラファイトいずれの電極でも大きいがパルス幅の増加とともに電極消耗は減少し、アルミニウム合金の場合、パルス幅が $100\mu\text{s}$ でほぼ0かマイナスとなる。すなわちアルミニウム合金の放電加工においても鋼の場合と同様に放電時間を長くすれば、電極無消耗加工が可能となることがわかる。この図は放電電流が大きい場合であり、グラファイト電極でも銅電極でも無消耗加工が可能となっているが、放電電流の小さい場合には銅電極のみで無消耗加工が可能であった。電極無消耗加工は電極端面への工作物および熱分解カーボンの付着により実現されることはよく知られている^{4-5) 4-6)}が、アルミニウム合金においても加工後の電極端面を観察したところかなりの量の熱分解カーボンおよび工作物の付着が認められた。

図4-6はパルス幅と加工面粗さの関係を示す。アルミニウム合金、SK3いずれの場合にも粗さはパルス幅が短いほど小さいことがわかる。またアルミニウム合金の加工面粗さはSK3よりも大きい。これは図4-1で示したようにアルミニウム合金の放電痕深さが大きいことと対応している。

4.2.3 高速極性切替放電加工の効果

前述の結果からアルミニウム合金を放電加工した場合には、加工速度が大きく、電極無消耗

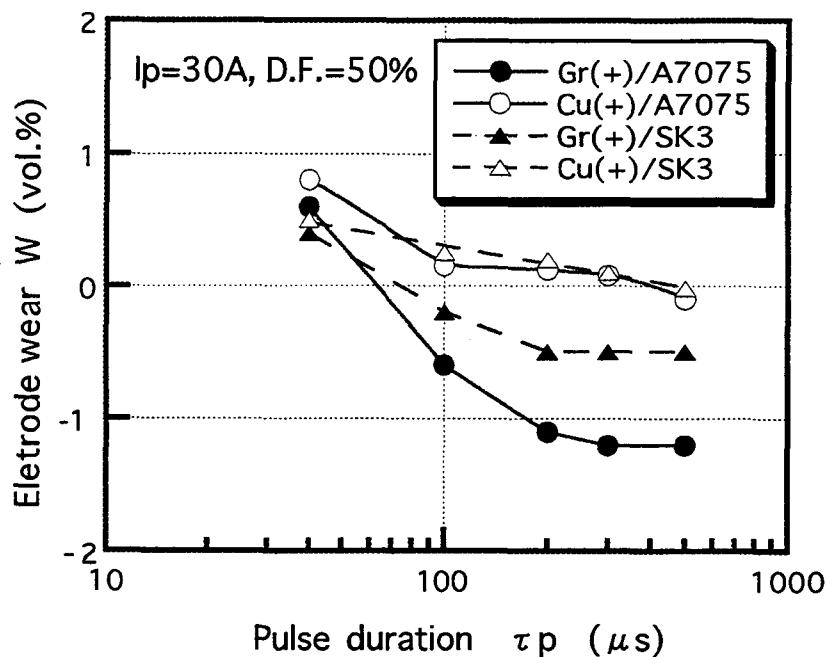


図4-5 電極消耗率とパルス幅の関係

加工も可能であることが明らかとなった。しかし加工の進行に伴い加工表面に加工されにくい酸化被膜あるいは炭化層が形成されるため加工速度が低下する。そこでこれを改善するために高速極性切替加工を試みた。これは工作物表面に形成されるこれらの層を、極性を切り替えて加工を行うことで除去することを目的としている。

図4-7は高速極性切替放電加工を行った場合の加工深さと加工時間の関係を示す。加工条件は

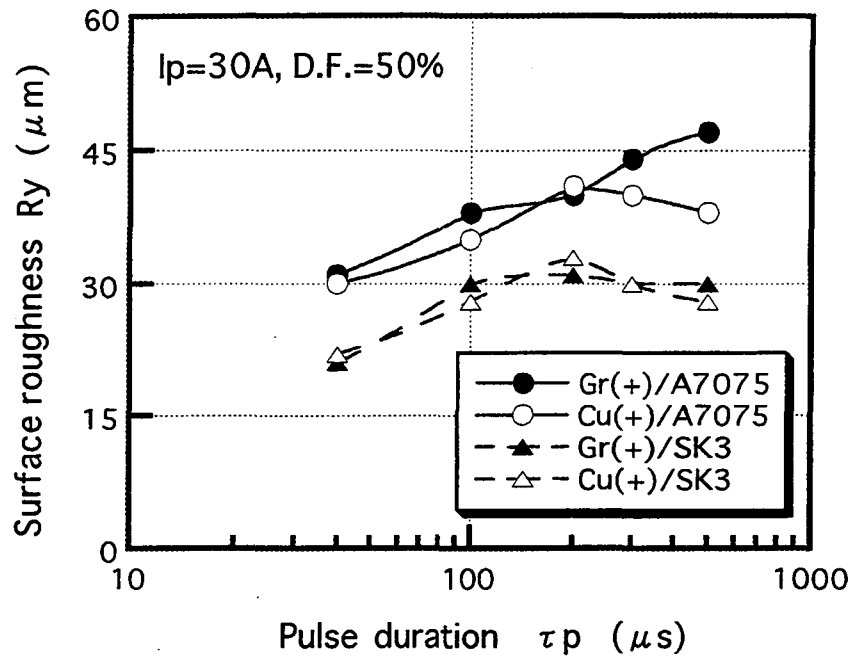


図4-6 加工面粗さとパルス幅の関係

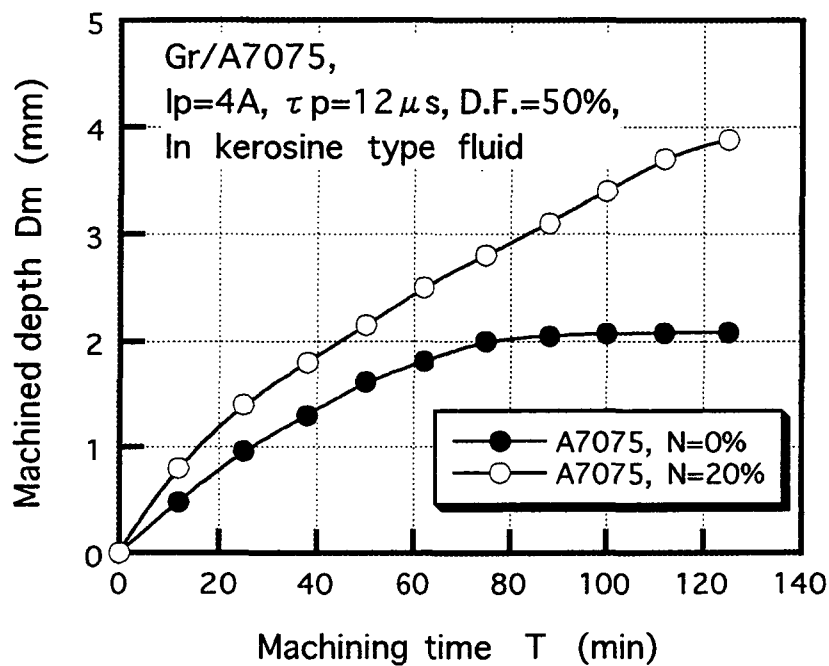


図4-7 高速極性切替放電加工における加工深さと加工時間の関係

放電電流 $I_p=4A$ 、パルス幅 $\tau_p=12\mu s$ で $N=20\%$ すなわち逆極性加工に少し正極性放電を混合した場合を示す。また通常の逆極性加工の場合($N=0\%$)を比較のために示す。図より明らかなように通常の加工における加工速度の低下が解消されているとともに、初期の加工速度も大きいことがわかる。すなわち高速極性切替放電加工を行うことによって加工速度の低下を改善できることが明らかとなった。

図4-8は加工速度と正極性放電割合 N の関係を示す。図より明らかなように $N=100\%$ すなわち通常の正極性加工よりも $N=40\sim 95\%$ すなわち正極性加工に逆極性放電を混合した加工のほうが加工速度が大きくなることがわかる。また $N=30\%$ 程度までは $N=0\%$ すなわち逆極性加工と同程度の加工速度となっている。さらに加工速度はそれぞれの極性の放電回数には左右されず、両者の比率 N のみによって決定されている。前編で行った鋼に対する極性切替放電加工においても $N=80\%$ 付近で加工速度が増大する現象が見られた。アルミニウム合金の場合も鋼の場合と同様に、加工表面に生成される炭化層あるいは熱分解カーボン層など加工の進行を妨げる表面層を逆極性放電を混合することで取り除くことができたためではないかと考えられる。また鋼の場合 $N=0$ から 50% では通常の逆極性加工よりも速度が低下する現象が見られたが、アルミニウム合金の場合そのような加工速度の低下はなく、極性切替放電加工はアルミニウム合金に対しては加工速度の点で非常に有効であるといえる。

図4-9は比較的放電エネルギーの小さい条件下での加工速度と N の関係を示す。加工速度は正極性放電割合 N によってのみ決定されるため、ここでは $T_n+T_r=100$ の条件での結果を示している。エネルギーの大きい条件の図4-8の場合と比較すると、加工速度が増大するという同様の現象が確認できる。そしてこの場合は、その増大の割合が正極性加工の1.5倍以上とかなり加工速度が

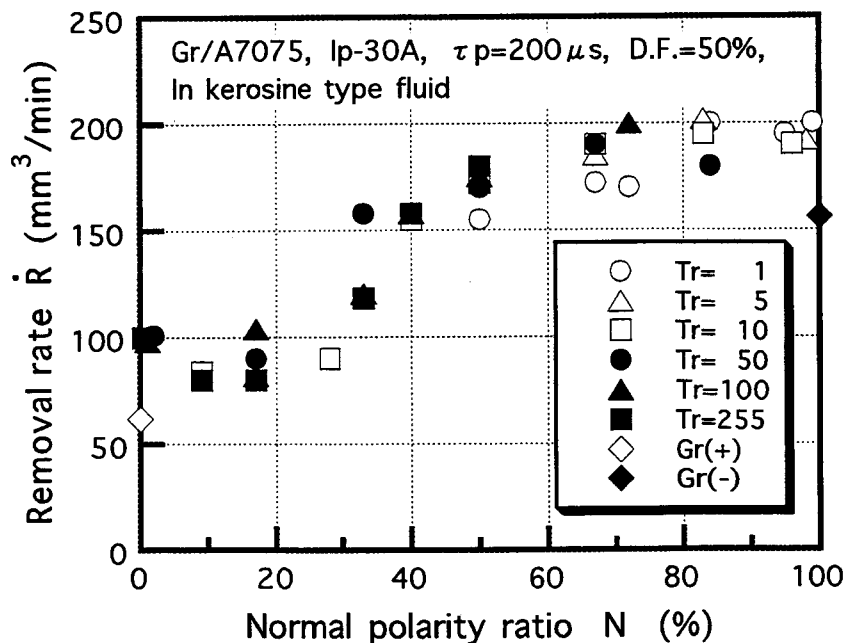


図4-8 アルミニウム合金の高速極性切替放電加工における加工速度と正極性放電割合の関係

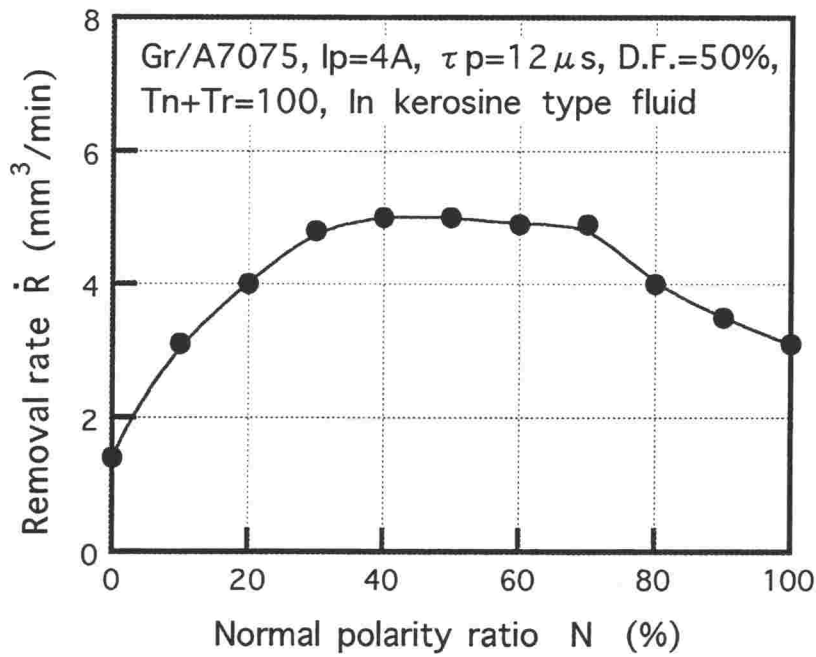


図4-9 仕上げ条件における加工速度の変化

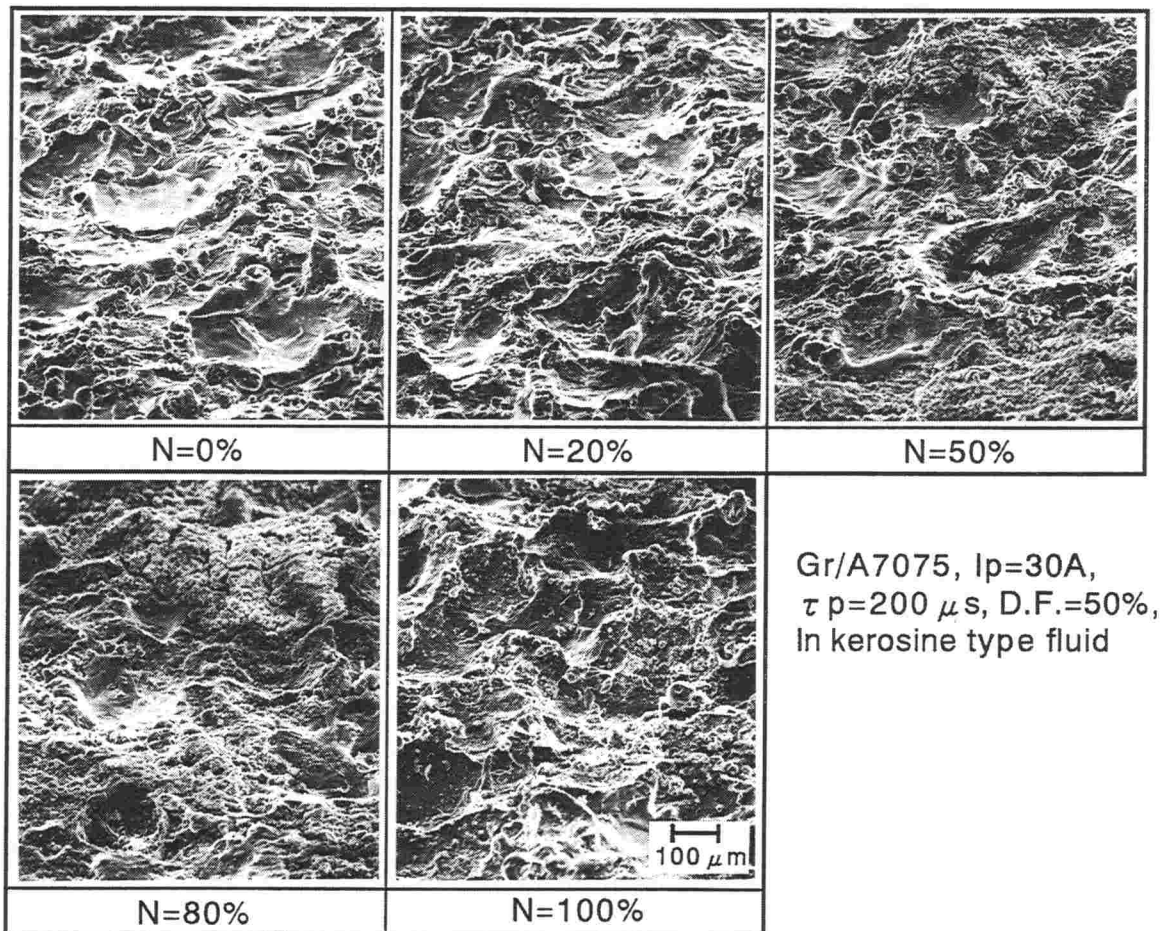


図4-10 正極性放電割合による加工面の変化

増大している。また前図ではN=0から30%では逆極性加工の場合と加工速度は同程度であるが、この条件では正極性放電を少し混合した場合でも加工速度が増大し、仕上げ条件においても極性切替は加工速度の増大に対し非常に有効と考えられる。

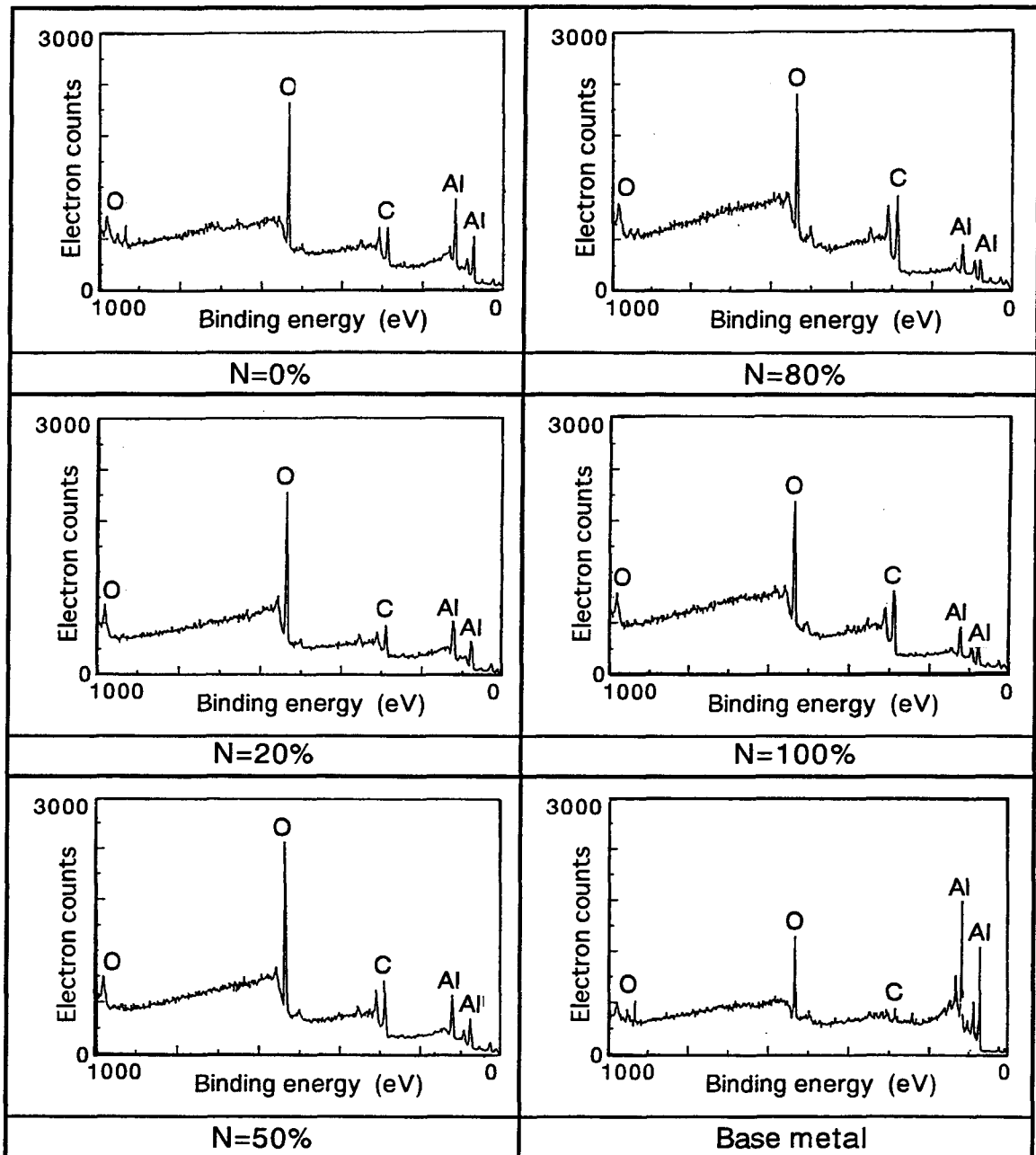
図4-10は加工表面のSEM写真である。アルミニウム合金の加工面では放電による工作物の溶解の痕跡がみられ、起伏の激しい形状となっている。特にN=0%, 20%の場合にその様子が顕著であり、加工粉の付着も多く確認できる。そして正極性放電の割合が増加するにつれ、表面には工作物とは異なる生成物の付着が確認できる。

図4-11は加工面のXPS分析による成分分析結果である。分析範囲は $250 \times 1000 \mu\text{m}$ である。図より明らかなように加工面は素地と比較すると酸素、炭素の割合が大きく、またアルミニウムの割合は小さくなっている。従って加工面には酸化層、炭化層、熱分解カーボン層など母材とは異なる加工されにくい層が形成されていると考えられる。そして炭素はNの増加とともに増加しており、正極性放電の割合が多いほうが加工表面への電極材料のグラファイトあるいは熱分解カーボンの付着が多くなると考えられる。一方酸素は加工面のほうが母材に比べて強度が高く、またNに対してはほとんど変化していない。このことから正極性放電割合Nに関係なく、アルミニウム合金では放電加工することにより必ず加工表面で酸化が起こっていると考えられる。

図4-12はNに対する電極消耗率の変化を示す。図よりN=0%すなわち通常の逆極性加工よりもN=0~20%すなわち逆極性加工に少し正極性放電を混合した加工のほうが電極消耗は小さくなるという特異な変化がみられる。逆極性加工に少し正極性放電を混合した加工のほうが電極端面への工作物および熱分解カーボンの付着量が増加するのではないかと考えられる。そしてそれ以降は、電極消耗はNの増加とともに直線的に増加していることがわかる。

図4-13は加工後の電極端面のSEM写真である。N=0%, 20%では電極端面に工作物および熱分解カーボンの付着が多く確認できる。しかし、これらの場合その付着物の形状、その付着状態に大きな差は見られない。N=50%の場合には工作物の付着はほとんどなく、熱分解カーボンの付着が見られるが、素地のグラファイトが露出している箇所も若干見られる。N=80, 100%になると付着物はなくなり、端面はグラファイトの組織となっている。これらの電極端面の状態は電極消耗の変化とよい対応を見せている。

図4-14は加工後の電極端面のXPS分析による成分分析結果である。図より明らかなように電極端面には炭素、酸素が存在していることがわかる。またN=100%以外の場合には工作物の主成分であるアルミニウムも確認され、逆極性放電により工作物が電極端面へ付着することと対応している。炭素は電極のグラファイトと熱分解カーボンであると考えられるが、N=20%すなわち逆極性加工に正極性放電を少し混合した加工の場合には、他に比べ炭素のピークがかなり大きいことがわかる。すなわちN=20%の場合、電極端面には熱分解カーボンが付着しやすい状態になると考えられる。これが先ほどの電極消耗率の図に見られたようにN=0~20%で電極消耗率がかなり小さくなる要因と考えられる。



Gr/A7075, $I_p=30A$, $\tau p=200 \mu s$, D.F.=50%,
In kerosine type fluid

図4-11 正極性放電割合による加工表面の成分変化

図4-15はNに対する加工面粗さの変化を示す。加工面粗さはNの増加とともにわずかに増加している。また加工速度、電極消耗と同様にその値はそれぞれの放電回数には左右されず、両者の比率のみによって決定される。

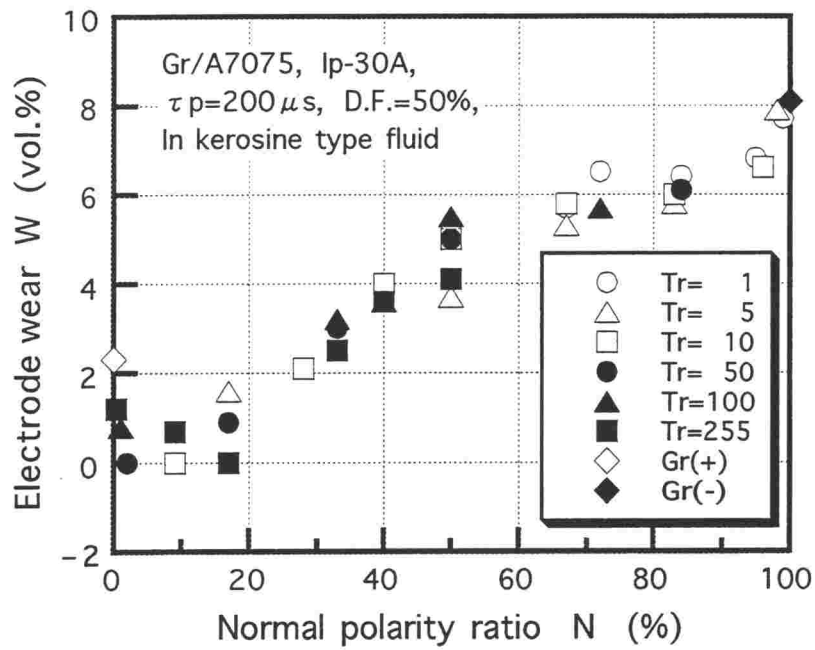


図4-12 高速極性切替放電加工における電極消耗率と正極性放電割合の関係

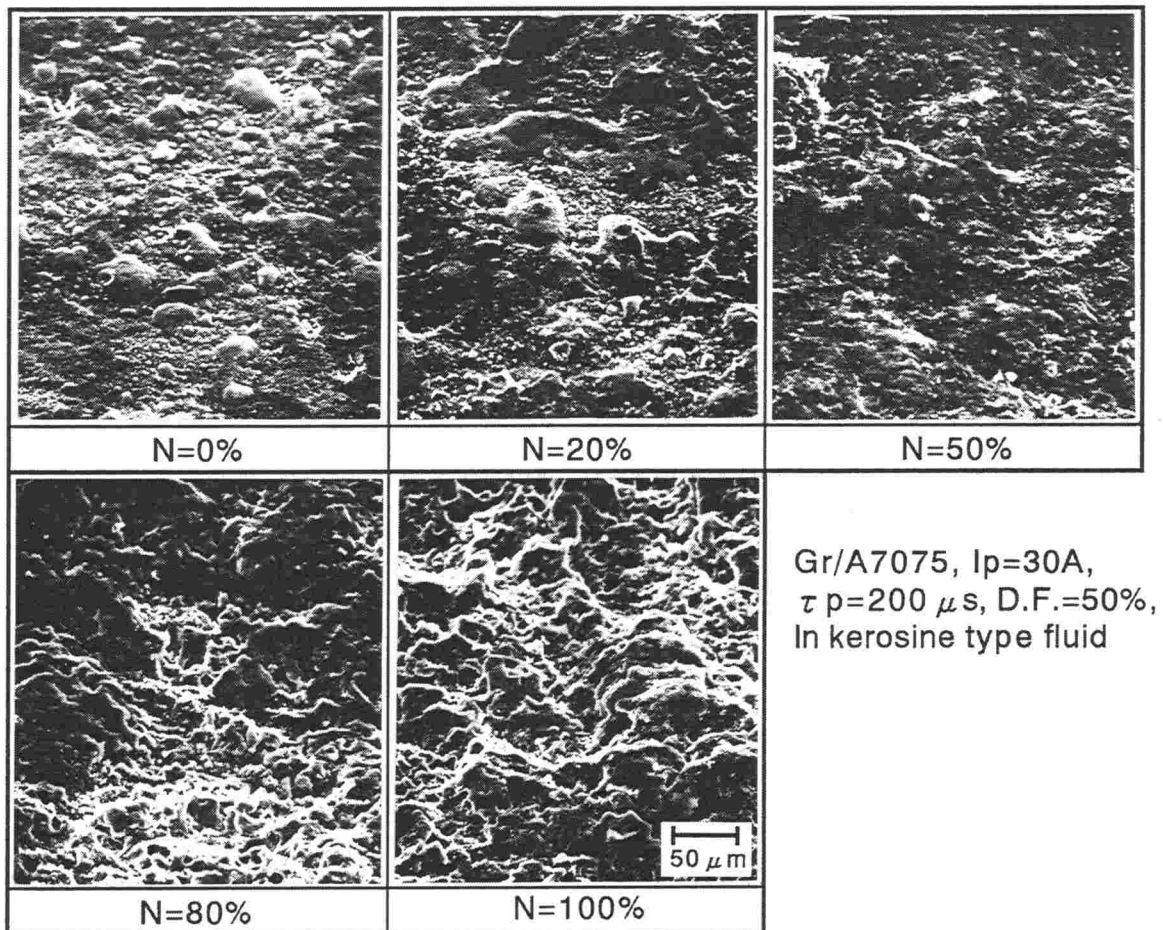
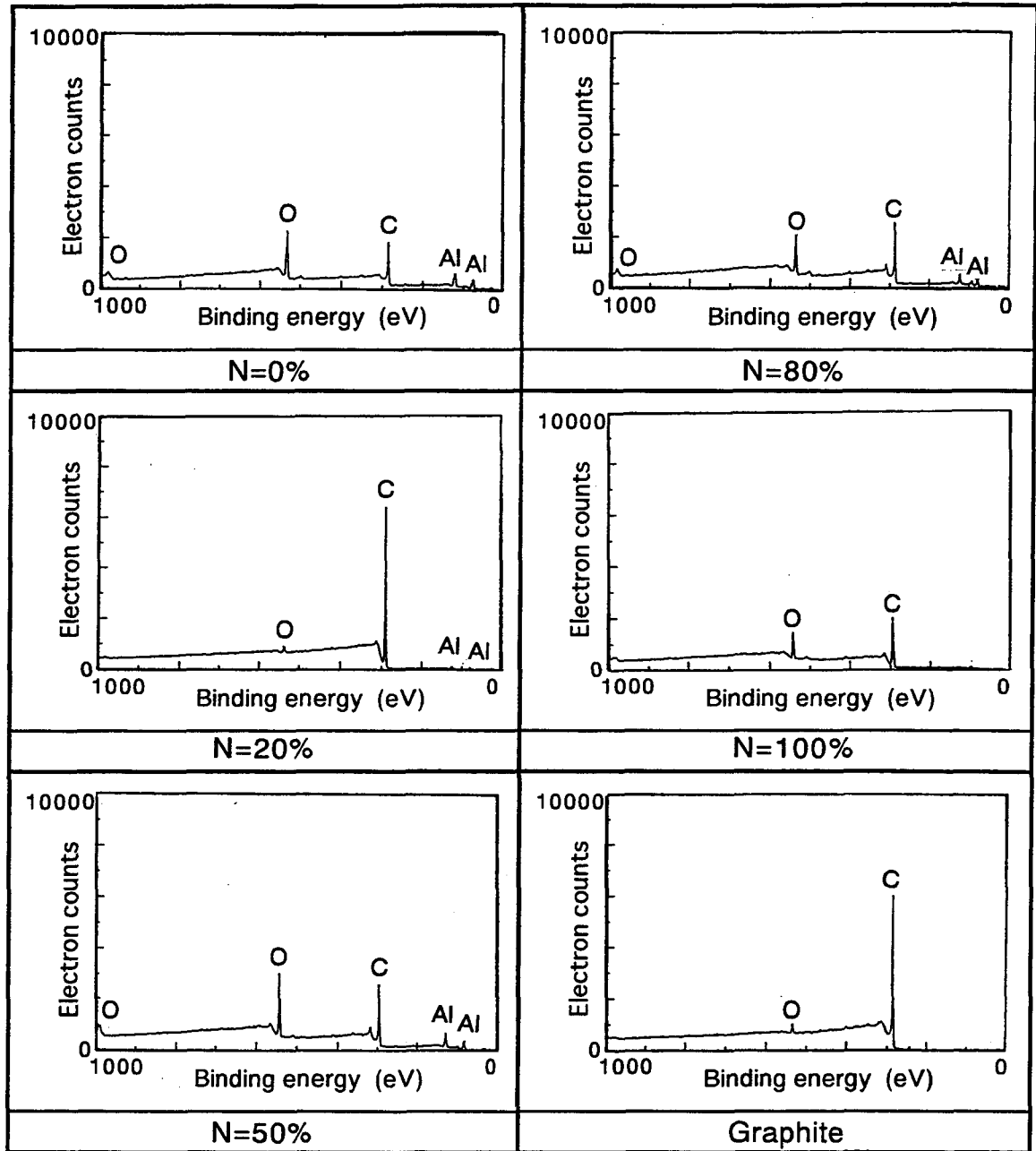


図4-13 正極性放電割合による加工後の電極端面の変化



Gr/A7075, $I_p=30A$, $\tau_p=200 \mu s$, D.F.=50%,
In kerosine type fluid

図4-14 正極性放電割合による電極端面の成分変化

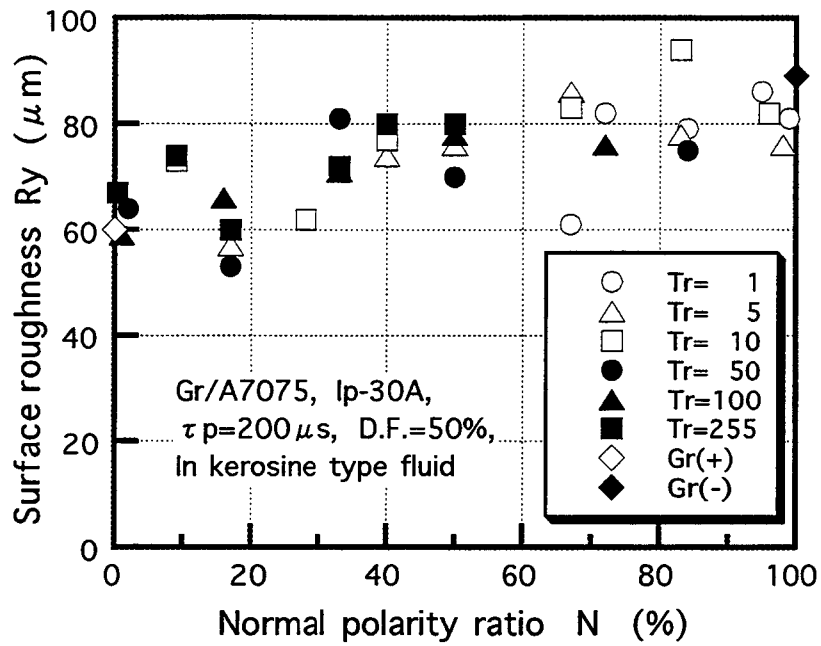


図4-15 高速極性切替放電加工における加工面粗さと正極性放電割合の関係

4.3 結 言

本研究ではプラスチックモールド金型に使用されるアルミニウム合金の放電加工特性を解明するとともに、高速極性切替が加工特性に及ぼす影響についても検討した。本章で得られた結論は以下の通りである。

- (1) アルミニウム合金の融点が低いため、単発放電による除去体積は鉄鋼材料よりも大きい。このため加工速度は鉄鋼材料よりもかなり大きくなる。
- (2) アルミニウム合金の単極性加工では、加工の進行とともに加工速度が低下し、加工表面に絶縁物が生成されるなど加工表面状態が悪化しやすいが、極性切替放電加工を用いてこれを除去することによって、加工状態を大幅に改善できる。
- (3) アルミニウム合金の極性切替放電加工においては、正極性加工よりも正極性加工に逆極性放電を少し混合したほうが加工速度は大きい。
- (4) アルミニウム合金の極性切替放電加工において、電極消耗率は逆極性加工に正極性放電を少し混合した場合に最小となる。
- (5) アルミニウム合金の高速極性切替放電加工では鉄鋼材料の場合と同様、加工速度、電極消耗率および加工面粗さは、1サイクル中の正極性および逆極性の放電回数には影響されず、両者の比率のみによって決定される。

参考文献

- 4-1) 熊谷 敦：プラスチック成型用金型材料，型技術，**10**，8（1995）49.
- 4-2) 山田定男：アルミニウム合金，型技術，**8**，12（1993）45.
- 4-3) 宇野義幸，岡田晃，森田剛，高木俊：プラスチック金型用アルミニウム合金の放電加工特性，電気加工学会誌，**30**，63（1996）11.
- 4-4) 武井英雄：金属材料学，理工学社（1977）212.
- 4-5) 土屋政光，西村重志：低電極消耗放電加工の研究-電極表面の黒化層について-，電気加工学会誌，**1**，2（1968）71.
- 4-6) 鈴木政幸，毛利尚武，斎藤長男，増沢隆久：型彫放電加工における電極消耗，電気加工技術，**19**，62（1995）1.

第5章 結 論

本編では放電加工における難加工材の高能率加工を目的とし、放電加工において難加工と考えられる耐熱合金、高熱伝導合金などの放電加工特性を解明するとともにそれらの加工技術確立のための指針を示した。以下に本編で得られた知見をまとめる。

第2章「耐熱性合金の高能率放電加工」では、最先端産業分野で需要の高まる耐熱材料として代表的なチタン合金およびニッケル基耐熱合金の放電加工特性を体系的に解明し、これらの材料の高能率放電加工実現のための指針を明らかにした。まずチタン合金における単発放電における形状の解析、盛り部分の挙動などの基礎的な現象について詳細な検討を行った。その結果、チタン合金における単発放電痕の盛りは鉄鋼材料の場合よりも大きく、その盛り速度はチタン合金のほうが小さいことを明らかにした。また単発放電痕除去体積は鉄鋼材料よりもチタン合金のほうが大きく、工作物の融点と熱伝導率の積が小さい材料ほど放電加工されやすいとする従来の説に対応することを示した。しかしながら従来加工条件下での連続放電加工を行ったところ、鉄鋼材料よりも加工速度が小さく、電極消耗が大きくなることなど、単発放電実験から予測される結果とは異なることが明らかとなった。これらの結果および加工中の極間の電圧、電流波形などから、チタン合金が難加工となるのは、放電痕の特異な盛り挙動によって加工状態が著しく不安定となることに起因することが判明した。そこでデューティ・ファクタを小さくし、十分な休止時間を与える条件での加工を試みた結果、安定した加工状態が得られ、同時にチタン合金の高能率放電加工が可能となること、電極低消耗加工が可能となることを明らかにした。さらにニッケル基耐熱合金の放電加工特性についても実験的検討を行い、加工速度は鉄鋼材料と同程度であり、逆極性で適当な加工条件を選択すれば、電極低消耗加工も加工であることを明らかにした。

第3章「高熱伝導銅合金の放電加工特性」では、金型の多様化に伴って従来金型材に代わり使用が検討されている特殊銅合金およびアルミニウム青銅の放電加工特性について実験的検討を行った。その結果、銅合金およびアルミニウム青銅の加工速度は鉄鋼材料と同程度であり、アルミニウム青銅においては電極無消耗加工も可能となることを明らかにした。また銅合金の放電加工面は鋼材に比べて加工面粗さが小さいこと、クラックが生じないこと、表面の再凝固層が母材より硬くなることなど金型材として優れた加工面特性を有することが明らかとなった。さらに従来より金型寿命改善のため行われているニッケルメッキ表面処理にかわって放電加工による表面処理技術として、加工液中にニッケル粉末を混入し加工を行うことによって、アルミニウム青銅の加工面粗さを向上させるとともに、加工面に耐食性の優れたニッケル含有層を

形成することを試みた。その結果、アルミニウム青銅のニッケル粉末混入放電加工では従来の灯油系加工液を用いた場合よりも加工面粗さが向上すること、ニッケルを含有する再凝固層を加工表面に形成でき、その厚さは加工液中のニッケル粉末濃度の大きいほうが厚く均一になることを明らかにした。またその加工面は硬度が高く、耐砂摩耗性も向上することを確認し、その有用性を示した。

第4章「アルミニウム合金の放電加工特性」では、プラスチックモールド金型として用いられた高強度アルミニウム合金の放電加工について検討を行った。その結果、アルミニウム合金の放電加工では加工表面に酸化被膜、炭化層が形成されやすいこと、またこのため加工状態が悪化しやすく、加工の進行とともに加工速度が低下する現象を確認した。そして前編で検討を行った高速極性切替放電加工を適用したところ、加工表面の加工を妨げる酸化被膜、炭化層を除去できることを明らかにした。そして、加工速度を大幅に改善できることが明らかとなり、高速極性切替放電加工の有効性を確認した。

総 括

本研究は、放電加工における加工特性の向上を目的とし、基礎的現象の解明および高能率化、高精度化、加工面の高機能化に対し、いくつかの新たな放電加工技術を提案し、その有用性を確認した。また放電加工において難加工と考えられる耐熱合金、高熱伝導合金などの放電加工特性を解明するとともにそれらの加工技術確立のための指針を示した。以下に本研究で明らかになった事項を総括し、さらに放電加工における将来の展望を述べる。

「序論」では、放電加工の原理と特徴について述べた後、本研究の背景として放電加工の現状と課題について言及し、高能率化、電極の低消耗化、加工表面の高機能化などの加工特性の向上および難加工材の加工特性解明の必要性について指摘した。さらに本研究との関連および本論文の構成について述べた。

第Ⅰ編「放電加工における加工特性の向上」では基礎的な放電加工現象の解明をもとに高能率化、高精度化などに対するいくつかの新たな加工技術を提案した。まず第2章では、極性の違いによる加工特性の違いを明確にするとともに、高速で極性を切り替えて加工を行う高速極性切替放電加工法を提案し、加工速度の増大に効果のあることを示した。続いて第3章では、粉末混入放電加工における表面生成機構について体系的に解明を行った。また第4章では、極間状態が悪化しやすく加工が難しいとされる溝加工において、回転円板電極を用いた新たな加工法について検討を行い、その有用性を確認した。さらに第5章では、電極無消耗加工の原理について言及するとともに、新たに開発した炭素電極の可能性について検討し、仕上げ加工用の電極として優れた特性を有することを明らかにした。

第Ⅱ編「放電加工における難加工材の高能率放電加工」では、放電加工において難加工とされる高融点材料、高熱伝導材料などの材料の加工を行い、難加工となる要因を明らかにした。そしてその対策について検討し、これらの材料の加工技術確立のための指針を示した。第2章では、最先端産業分野で需要の高まる耐熱性合金であるチタン合金およびニッケル基耐熱合金の放電加工について検討を行った。また第3章では、従来の金型材に代わり使用されるようになった特殊銅合金の放電加工特性を明らかにするとともに、金型としての加工面特性についても考察を行った。また従来より金型寿命改善のため行われているニッケルメッキ表面処理にかかわって放電加工による表面処理技術として、加工液中にニッケル粉末を混入し加工を行うことによって、加工面粗さを向上させるとともに、加工面に耐食性の優れたニッケル含有層を形成できることを明らかにした。さらに第4章では、プラスチックモールド金型として用いられはじめた高強度アルミニウム合金に対して極性切替放電加工を行い、その有効性を確認した。

放電加工が開発されて約半世紀が経ち、その加工技術は成熟度を高め、金型産業におけるキ

ーテクノロジーとしての地位を確立する一方、様々な新素材への対応およびマイクロマシニング、表面処理技術など新しい加工技術も続々と誕生し、複雑多岐に分かれつつある。従来の加工法とは原理の異なる放電加工は、未知の可能性を有する加工法として、ますますその重要性が認識されてきている。放電加工の加工特性の向上、革新的技術の開発が期待される今日、本研究において得られた知見は、未だ不明な点の多い放電現象、材料除去メカニズムおよび電極低消費メカニズムなどの基礎的現象の解明、あるいは新素材に対する加工技術の確立や新たな加工技術の基礎的資料として、大いに貢献できるものと考えられる。しかしながら本文中にも述べたように放電加工における諸現象は電気的、力学的、金属組織学的要素の入り混じった、超高速、高エネルギー密度の複雑な現象であり、まだまだ解明されなければならない問題も多い。放電加工の加工特性向上における革新的展開のためにはそれらの基礎的かつ体系的な解明が期待される。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、終始ご懇切なご指導を賜りました大阪大学大学院工学研究科教授 森勇藏先生に深甚なる謝意を表します。また、適切にご教示とご指導を賜りました大阪大学教授 岸田敬三先生、森田瑞穂先生、芳井熊安先生に厚く御礼申し上げます。大阪大学教授 青野正和先生、梅野正隆先生、片岡俊彦先生、広瀬喜久治先生には有益なご討論ならびにご教示を頂きました。深く感謝致します。さらに、本論文に対してご懇切なご教示ならびにご助言を賜りました京都工芸繊維大学教授 土屋八郎先生に心から御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり、研究の機会を与えて頂き、終始熱意あふれるご指導、ご鞭撻を賜りました恩師 岡山大学工学部教授 宇野義幸先生に深甚なる感謝の意を表します。さらには精密工学会、電気加工学会等を通じて有益なご教示、ご助言を賜りました諸先生方に対し厚く御礼を申し上げます。

本研究を進めるにあたり、多くの便宜を図って頂きました(株)ソディック、イビデン(株)ならびに(株)ミタックスに深く感謝致します。

実験の遂行に際して、岡山大学工学部機械工学科特殊加工学研究室に在籍された大学院生および学部学生に多大なご協力を頂きました。心から感謝申し上げます。