放電加工の基礎と将来展望 - II 将来展望 -

Fundamentals and Future in Electrical Discharge Machining - II Future Prospect - / Masanori KUNIEDA

東京農工大学 国枝正典

5. 加工条件の選び方

5.1 放電条件と加工特性¹¹⁾

放電加工の性能を評価するにあたって最も重要な特性は、図 13 に示す加工速度、表面粗さ、工具電極消耗率の 3 特性である。工具電極消耗率は工作物除去体積に対する工具電極の消耗体積の比で定義され、加工精度に直接影響を及ぼす特性値である。3 特性のうち、任意の 2 つの組合せを満足させる放電電流波形は図中に示すような波形である。しかし、残念ながら 3 つのすべての加工特性を満足させる電流波形は存在しない。

例えば、放電電流、放電持続時間ともに大きなパルスを用いると加工速度を大きくできる。また、放電持続時間が長い場合は加工油中のカーボンが陽極である工具電極表面上に付着し工具電極を消耗から守るので消耗率が低く抑えられる^{12)~14)}。しかし、パルス当たりの放電痕が大きいので表面粗さは良くない。従って、荒加工条件として用いられる。

一方、放電持続時間は長く保って放電電流を小さくすると、やはりカーボンは付着するので消耗を低く抑えることができる。しかも表面粗さが良くなる。しかし、アーク柱の電流密度が低いので熱流束 (W/m^2) が小さい。従って、同じパルスのエネルギーで比較すると、ピーク電流が高くてパルス幅が短い場合に比べエネルギー効率が悪い。すなわち、工作物が溶融蒸発する領域が少なく、ほとんどが熱伝導で工作物内に逃げてしまう。よって、パルス当たりの除去量が少ない。しかも、放電持続時間が長いと単位時間当たりの放電回数を増やせない。従って、両方の理由で加

工速度は非常に小さい。よって、仕上げ加工に適している。

最後に、放電持続時間を短くして放電電流を大きくすると、パルス当たりの放電痕は小さく表面粗さは良好である。パルス当たりの除去量が小さいといっても、熱流束が大きいのでエネルギー効率は良く、同じエネルギーならば放電持続時間が長く放電電流が小さいパルスより除去量は大きい。しかも、単位時間当たりの放電回数を増やせるので加工速度が大きい。しかし、放電持続時間が短いためカーボンの保護作用がなく消耗率が大きくなる。従って、工具電極の消耗が問題とならないワイヤ放電加工では形彫り放電加工に比べて極端に放電持続時間の短い波形、例えば 1μ 秒の放電持続時間に数百 A の放電電流を流す様な波形を用いる。

5.2 工具電極消耗率の決定要因

5.2.1 極性の影響(エネルギー配分とカーボンの付着)

本来陽極へのエネルギー配分 (30 ~ 40 %) の方が陰極への配分 (20 ~ 30 %) より大きい¹²⁾。それにもかかわらず、形彫り放電加工では放電持続時間の設定が特に短い場合を除いて工具電極を陽極にして加工する。この理由は、前述のように油性加工液を使用した放電加工では油が分解してカーボンが陽極表面に付着し、陽極を消耗から防護するからであると考えられている。そして、このカーボンの付着が放電持続時間が長いほど多いことが、放電持続時間が長い条件下では工具電極を陽極にした方が消耗が少ない理由と考えられている。逆に、放電持続時間が短い仕上げ加工やマイクロ加工、あるいは加工液が水なのでカーボンの付着があり得ないワイヤ放電加工の場合は、エネルギー配分通り工具電極を陰極にして加工する。

5.2.2 電極材料の熱物性値の影響

放電加工の加工作用は熱的であるから、工具電極や工作物材料の熱物性値が除去量に及ぼす影響は大きい。アーク柱からの熱流束が同じ場合、熱伝導率が高いほど電極表面温度は低くなる。従って、熱伝導率が高いほど加工されにくいので工具電極材料に適していることが分かる。また、材料内の温度分布が同じであっても、表面温度が融点や沸点に到達していなければその点の材料は除去されない。従って、熱伝導率が等しくても、融点や沸点の高い材料は除去され難いことが分かる。単発放電のアーク柱にさらされた材料内部の熱伝導解析を行うと、銅は炭素鋼より融点が高いにもかかわらず、図 14 に示すように融点を超

図 13 放電加工における主要な加工特性とそれらを満足するための放電電流波形

図 14 単発放電時の陰極内温度分布の計算結果(放電電流 30 A, 放電開始後 10 μs)

図 15 WEDG (Wire Electro-Discharge Grinding) 法¹⁵⁾

図 16 ブロック電極を用いた微細軸の機上放電成形

えている領域がかなり狭い計算結果となる。これは熱伝導率の影響の方が融点の違いの影響よりも大きいことを示す。こうして銅の工具電極を用いて炭素鋼を加工する場合に、前項の極性の影響との相乗効果により消耗率が数%未満の加工が可能となる。

6. 微細化への挑戦

6.1 WEDG 法に見るマイクロ加工の要点

放電加工はエンジンの燃料噴射ノズル、繊維の成形ノズル、電子部品、光ファイバ関連部品、微細ギヤ、ならびにそれらの成形金型などの微細加工に広く用いられている。特に、増沢ら¹⁵⁾の開発による WEDG 法は、図 15 に示すようにワイヤガイド上を走行するワイヤ電極を用いて旋盤のようにして細軸を放電加工する方法であり、数 μm の微細軸や微細穴の加工が熟練を要することなく簡単に行える。増沢らは以下の 5 項目に示すマイクロ加工の特殊性を明らかにし、WEDG 法の開発によってそれらを解決した。

(1) 機上電極成形

ほかの装置で製作した工具電極をマイクロ放電加工機に持ってきてチャッキングしてもセンタずれが必ず生じる。しかし、WEDG 法では機上で工具電極を放電成形し、そのまま極性を反転させ、成形した軸を工具電極として穴加工を行ったり、輪郭加工を行ったりするので芯ずれの問題がない。

図 17 浮遊容量に溜まった電荷も一緒に放電する

(2) 工具電極消耗

図 16 に示すようにブロック電極を用いても微細軸の機上成形は行えるが、ブロック電極の消耗が加工精度に影響する。一方、WEDG ではワイヤ電極を使用するので工具電極の消耗の問題がない。また、ワイヤがガイド溝に支持されているので、ワイヤ放電加工の場合のようなワイヤ振動による精度低下がない。

(3) 加工反力

放電加工といえども加工反力はゼロではない。ブロック電極を用いると微細軸の先端にも放電が生じるので加工した微細軸が振動する。しかし、WEDG の場合は成形された微細軸の根元でのみ放電が生じるので、細くなった部分に曲げモーメントがかからない。

(4) コンデンサ放電回路

マイクロ放電加工では図 1(前号)あるいは図 17 に示す、発明当時のコンデンサ放電回路がいまだに使用されてお

図 18 超硬合金(WC 径: 0.4 μm)の微細化限界

り、普通の加工に一般的に用いられる前号の図 5 に示したトランジスタ放電回路は使用されていない。この理由は、放電の発生を検出する回路、検出信号を受け取ってからパワートランジスタをオフにするための制御信号を作る回路、そしてパワートランジスタ自体に遅れ時間があるため、実際に電流がゼロになるまでに数十 ns を要する。従って、放電持続時間をマイクロ加工に必要な数十あるいは数 ns 以下の一定の値に制御することが困難だからである。

(5) 浮遊容量

図 17 のコンデンサ放電回路では、加工がマイクロになるほどコンデンサの容量を小さくしなければならない。しかし、現実の加工機では、プラス側とマイナス側の配線間、電極ホルダと加工テーブル間、工具電極と工作物間などに浮遊容量が存在し、そこに充電された電荷が、回路に接続された本来のコンデンサの電荷とともに極間に放電される。従って、マイクロの領域ほど浮遊容量が支配的となるので、配線をなるべく短くしたり、ホルダやテーブルを絶縁体で作ったりするなどの工夫が必要である。また、最も小さい放電エネルギーで加工するとき、回路にコンデンサを接続せずに浮遊容量だけで加工を行う。WEDG では、ブロック電極を用いる方法に比べ、工具電極と工作物との対向面積が小さく、極間の浮遊容量が小さいことも微細化にとって有利な点である。

さらに、増沢らは WEDG により成形した治具、エンドミル、パンチ、振動子などを工具として用い、同じ WEDG 装置の中で組立¹⁶⁾、切削¹⁷⁾、打ち抜き¹⁸⁾、超音波加工¹⁹⁾などを試み、WEDG 法を中心にあらゆる加工や組立てを 1 つの加工機内で行うことの有効性を示している。

6.2 微細化を妨げる要因

放電加工で得られる微細軸の最小径はどれくらいなのだろうか。筆者ら²⁰⁾が WEDG を用い、目標とした軸径と実際に得られた軸径との関係を調べた結果を図 18 に示す。図中の失敗軸とは、成形の途中で折れたりして意図した長さの軸が得られなかった場合を示す。また、目標軸径に対して実際に得られた軸径のバラツキは $\pm 2 \mu\text{m}$ である。注目すべきは、 $2.3 \mu\text{m}$ 以下の領域が空白であり成功例が見られないことである。その原因が加工機の位置決め精度や熱変形、主軸の回転精度、あるいはワイヤ電極の直

(a) 荒加工 (3300 pF)

(b) 仕上げ加工 (浮遊容量のみ)

図 19 陽極(タングステン)上に形成されたマイクロ放電加工の単発放電痕

(a) 素材軸に分布する残留応力の影響 (b) 放電加工による残留応力の影響

図 20 残留応力の影響 (タングステン, 3300 pF)

径のバラツキにあるとすれば、加工を繰り返すうちに空白域を埋める成功例が必ず出現するはずである。しかし、何度も加工を繰返したが空白が埋まることはなかった。したがって、放電加工のマイクロ化の限界を決める原因はほかにあると考えられる。

6.2.1 放電痕の大きさ

図 19(a) は、3300 pF のコンデンサを用いた場合にタングステンの工作物上に形成された、マイクロ放電加工における荒加工の単発放電痕である。また、図 19(b) はコンデンサを取り付けずに浮遊容量のみで放電した場合である。最小の放電エネルギーでも放電痕直径が $2 \mu\text{m}$ あり、放電痕の大きさが微細化の限界にとって影響が大きいことが予想できる。5.2 節で述べたようにエネルギー配分は陽極の方が大きいので、マイクロ加工では工作物を陽極として加工する。図 19 も工作物が陽極の場合である。加工速度を犠牲にすれば、極性を逆にして工作物を陰極とすれば直径 $1 \mu\text{m}$ の単発放電痕が得られる²¹⁾。

また、図 17 のコンデンサ放電回路の場合、1 回の放電のエネルギーは $1/2(CV^2)$ である。従って、電源電圧を低くすると放電痕が小さくなり、加工反力も小さいので微細化に有効である。そこで、江頭ら²²⁾は電源電圧を 20 V にまで下げる実験を行い、 $1 \mu\text{m}$ 径の軸径を達成している。

6.2.2 残留応力の影響

素材軸を主軸のスピンダルにチャックするとき、必ずしも回転中心が素材軸のセンタと一致しない。従って、一般に微細軸は素材軸のセンタからずれた位置に形成される。一方で、タングステンなどの線材は引抜き加工で製作されるため、塑性変形による残留応力が存在し、軸方向応力が半径方向に不均一に分布している。このような素材軸に対してセンタからずれた位置に微細軸が形成されると、図 20(a) に示すように屈曲が生じることが報告されている²³⁾。また、素材に残留応力が存在しない場合でも、放電加工によって新たに加工表面上に生じる引張り残留応力の影響で、

図 21 Si_3N_4 のワイヤ放電加工例 (Tani T., et al.³⁵⁾)

図 20(b)に示すように微細軸が屈曲する²³⁾。WEDG 法を用いて仕上げ加工条件で軸径 $100\ \mu\text{m}$ まで加工した後、軸の回転を止めて側面に切込み $80\ \mu\text{m}$ で荒加工を行い、肉厚 $20\ \mu\text{m}$ の梁を形成した結果である。

6.2.3 材料組織の影響

超硬合金はタングステンカーバイド(WC)の微粒子をコバルトをバインダとして焼結して製造される。そこで、超硬合金を微細加工する場合、WC 粒子径が最小軸径に及ぼす影響について調べた。その結果、WC 粒子径を $2\ \mu\text{m}$ から $0.4\ \mu\text{m}$ にすると得られる最小径が $3\ \mu\text{m}$ から $2.3\ \mu\text{m}$ に減少した²⁴⁾。

また、Almond ら²⁵⁾は素材組織に内在する欠陥がマイクロ放電加工に及ぼす影響を調べ、Han ら²¹⁾はマイクロ放電加工によって生じる加工変質層について調べている。また、川上ら²⁶⁾は多結晶タングステンと単結晶タングステンでマイクロ加工の加工特性を比較し、単結晶の方が微細化の限界は広がるが、加工速度に結晶方位の影響が現れると報告している。

7. 極間の化学反応とその応用

7.1 極間の化学現象

放電加工は熱加工に分類される。しかし、化学的な作用が存在することも認識すべきである。古くから放電現象は金属微粉末を製造するのに使用された²⁷⁾とのことであるが、現在でも RESA 法²⁸⁾ (The Reactive-Electrode Submerged-Arc Method)と呼ばれ、電極材料と周辺の溶液を反応させ、超微粒子を製造する方法として研究が続けられている。また、ダイヤモンドライクカーボン²⁹⁾やカーボンナノチューブ³⁰⁾がアーク放電によって生成されることは良く知られている。

放電加工においても、加工油が分解したカーボン被膜が陽極面上に生成することによって低消耗加工が成り立っている^{12)~14)}ことは前述の通りである。また、水溶性加工液中に酸素を導入すると加工速度が向上する例³¹⁾や、後述の気中放電加工³²⁾において酸素を用いると加工速度が

図 22 気中放電加工による形状創成加工

大きいこと、さらに、油中の加工より水中加工の方が加工速度が大きいこと³³⁾なども極間での化学反応の重要性を示す例であろう。以下に化学反応を積極的に利用した画期的な放電加工技術を紹介する。

7.2 絶縁体の放電加工

導電性の材料しか加工できないと考えられてきた放電加工だが、福澤ら^{34) 35)}によって絶縁体のセラミックスでも加工可能な方法が見い出された。その原理は、加工したいセラミックスの上に金属板を密着させるか、あるいは TiN 薄膜を蒸着し、最初は金属板と工具電極との間に放電を生じさせる。そうすると、放電により加工油が熱分解することによって導電性のカーボン皮膜が生成されるので、金属板が除去され尽くした後でもセラミックス表面の導電性が保たれる。こうして除去と同時にカーボンが堆積し、放電が持続することによって加工が進行する。図 21 は Si_3N_4 のワイヤ放電加工の例³⁵⁾である。

7.3 気中放電加工

放電加工では加工液の使用が不可欠と考えられてきた。しかし、従来の液中での放電加工において、極間隙のどれだけを加工液が満たしているかを宮島ら³⁶⁾や Imai ら³⁷⁾は調べ、そのほとんどは気泡で満たされていると推論した。実際、Tanimura ら³⁸⁾は加工液の供給はミスト程度で十分であることを示し、ミスト中でも液中と同等の加工特性が得られることを報告している。また、Karasawa ら³⁹⁾は工作物を加工槽中に浸漬せずに、放電部に加工液をかけ流して加工する方が加工くずの排出が促進されて加工速度が大きいことを示している。いずれも加工作用そのものに極間を十分満たすほどの加工液は必要ないことを示している。

また、前号で 4.2 節で述べたように、吉田ら⁷⁾は単発放電において発生する加工くずの総体積を液中と、液体のまったく存在しない気中とで比較した結果、両者に大きな違いがないことを示した。この結果はレーザー切断が空気中で行われることを考えれば驚きではない。しかし、実際に液体のまったくない気中で加工しようとするとき、せっかく除去された加工屑が固まらないうちに工具電極の表面に再付

図 23 TiC 半焼結体電極を用いた TiC 被膜のコーティング (Mohri N., et al.⁴²⁾)

着する。従って、加工屑として排出されないので加工はまったく進まない。

そこで筆者らは図 22 に示す気中放電加工³²⁾を考案した。薄肉のパイプ電極からガスを噴出させ、加工液を用いずに放電加工を行う方法である。高速ガス噴流の作用により、溶融した加工屑が工具電極に再付着する前にギャップの外に排出される。また、高速ガス噴流が熱伝達を促進し、ギャップが冷却されることにより加工が安定化する。ガスには酸素を用い工作物の酸化反応を援用することにより、単純形状電極を用いた形状創成加工においては液中加工以上の加工速度が得られる。また、気中加工は工具電極の消耗が少ない、加工変質層が少ない、加工反力が小さいためワイヤ放電加工ではワイヤ振動が少なく真直度の高い加工が可能である⁴⁰⁾などの利点を有している。

8. 新しい応用

8.1 除去加工以外への応用

除去加工の 1 つに分類される放電加工であるが、毛利ら^{41) 42)}によって除去加工以外の応用分野に活路が開かれた。Ti など硬質の化合物を形成する金属、あるいはそれらの圧粉体を工具電極として用い、工具電極と工作物の間にパルス放電を発生させると、工作物表面に図 23 に示すように硬質膜が形成されることを原理とした新しい表面処理技術である。簡単に速く極めて硬度の高い硬質膜を、しかも強固に形成できることが特長で、切削工具や金型へ応用し大きな寿命延長の効果が確認されている。また、焼結体などの消耗しやすい材料を工具電極に用いたり、消耗しやすい放電条件を選んだりすると、膜厚を限りなく増大させることができる。従って、付着加工として用いて構造物を 3 次元造形することもできる^{42) 43)}。

ワイヤ放電加工においては加工液に水を使用するため、ワイヤ電極と工作物の間には放電による電流のほかに電解による漏洩電流が流れる。南ら⁴⁴⁾はこの現象に注目し、ワイヤ放電加工中の電解作用によってチタンの工作物表面に形成される陽極酸化皮膜により、切断と同時に加工面に任意色の着色を可能にする技術を開発した。光の干渉によ

図 24 曲り穴の加工例 (Goto A., et al.⁴⁵⁾)

って発色するので、酸化皮膜の膜厚によって色が変わる。従って、ワイヤの送り速度を変えるか、あるいは加工電圧を変化させるなどして連続して色調を変化させ得る。

8.2 曲り穴加工

射出成形やダイカストにおいては金型は熱交換器の役割を果たしている。従って、成形サイクルの短縮や、成形精度向上のためには金型の温度制御が欠かせない。そのために冷却用の水路を成形面近くに自在に配置することが要求されるが、機械加工では曲り穴加工の実現は困難である。そこで、最近になって放電加工による曲り穴加工の試み^{45) 46)}がなされ、例えば図 24⁴⁵⁾に示すように実用に耐え得る段階に到っている。

9. ま と め

放電加工の極間現象は、非常に狭い空間で生じ、非常に短い時間の過渡現象であり、熱平衡状態ではなく、気体・液体・固体の 3 相間の変態があり、化学反応が存在し、物質移動(除去)があり、境界移動を伴うので、放電現象の中でも最も観察や解析が困難な現象であると思われる。従って、完全な現象の解明には長い道のりがあるが、各種表面分析装置、顕微鏡、高速度ビデオ、数値解析ソフトなどが身近に使用できるようになり、着実に解明は進んでいる。また、未知の部分が多いからこそ、絶縁体の加工や表面処理、付着加工、着色加工、気中加工、曲り穴加工のような革新的な技術が今後も継続して生まれてくるものと確信している。

参 考 文 献

- 11) 日本機械学会編: 生産加工の原理, 日刊工業新聞社, (1998).
- 12) H. Xia, M. Kunieda and N. Nishiwaki: Removal Amount Difference between Anode and Cathode in EDM Process, IJEM, 1, (1996) 45-52.
- 13) 鈴木政幸, 毛利尚武, 恒川好樹, 斎藤長男: 放電加工における電極低消耗の研究(第 4 報), 電気加工学会誌, **29**, 60, (1995) 1-10.
- 14) 小林輝紀, 国枝正典: 放電加工アークプラズマ内蒸気密度の分光測定による工具電極消耗率の決定メカニズムの解明, 電気加工学会誌, **36**, 82, (2002) 11-17.
- 15) T. Masuzawa, M. Fujino and K. Kobayashi: Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining, Annals of the CIRP, **34**, 1, (1985)

- 431-434.
- 16) H. H. Langen, T. Masuzawa and M. Fujino: Modular Method for Microparts Machining and Assembly with Self-Alignment, *Annals of the CIRP*, **44**, 1, (1995) 173-176.
- 17) M. Fujino, N. Okamoto, T. Masuzawa: Development of Multi-Purpose Microprocessing Machine, *Proc. of ISEM XI*, (1995) 613-620.
- 18) T. Masuzawa, M. Yamamoto and M. Fujino: A Micro-punching System using Wire-EDG and EDM, *Proc. of ISEM IX*, (1989) 86-90.
- 19) K. Egashira, T. Masuzawa, M. Fujino and X.-Q. Sun: Application of USM to Micromachining by On-the-machine Tool Fabrication, *IJEM* **2**, (1997) 31-36.
- 20) 川上太一, 国枝正典, 韓福柱: マイクロ放電加工における微細化限界の決定因子の解明, *電気加工技術*, **28**, 89, (2004) 1-8.
- 21) F. Han, Y. Yamada, T. Kawakami and M. Kunieda: Investigations on Feasibility of Sub-micrometer Order Manufacturing Using Micro-EDM, *ASPE 2003 Annual Meeting*, **30**, (2003) 551-554.
- 22) 江頭 快, 水谷勝己, 低電源電圧による放電加工, *電気加工学会誌*, **37**, 85, (2003) 18-23.
- 23) 川上太一, 韓福柱, 山崎 実, 国枝正典: マイクロ放電加工における残留応力の影響について, 2003 年度精密工学会秋季大会講演論文集, (2003) 592.
- 24) 川上太一, 国枝正典: 材料組織がマイクロ放電加工における微細化限界に及ぼす影響, 2004 年度精密工学会秋季大会講演論文集, (2004) 581-582.
- 25) Almond H., Allen D. and Logan P.: Examination of the Internal Profiles of Micro-Electrodischarge Machined Holes and the Detection of Material Defects, *IJEM*, **5**, (2000) 29-34.
- 26) 川上太一, 国枝正典: マイクロ放電加工における微細化を妨げる因子の解明, *電気加工学会全国大会*, (2004) 講演論文集, (2004) 15-18.
- 27) R. Zsigmondy, *Zur Erkenntnis der Kolloide*, Fisher Verlag, Jena, 1905.
- 28) A. Kumar and R. Roy: RESA-A Wholly new process for fine oxide powder preparation, *J. Mater. Res.* **3**, 6, (1988) 1373-1377.
- 29) 滝川浩史, 武富浩一, 榎原建樹: 真空アーク蒸着法を用いたダイヤモンドライカーボン膜の生成とその表面形状, *電学論 A*, **113**, 9, (1993) 654-659.
- 30) S. Iijima: Helical Microtubules of Graphitic Carbon, *Nature*, **354**, 7, (1991) 56-58.
- 31) M. Kunieda and S. Furuoya: Improvement of EDM Efficiency by Supplying Oxygen Gas into Gap, *Annals of the CIRP*, **40**, 1, (1991) 215-218.
- 32) 国枝正典, 吉田政弘: 気中放電加工, *精密工学会誌*, **64**, 12, (1998) 1735-1738.
- 33) 虞 戦波, 国枝正典, 水中放電加工の除去速度に関する研究, *電気加工学会誌*, **33**, 72, (1999) 28-36.
- 34) 福澤 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, (1995) 11-21.
- 35) Tani T., Fukuzawa Y., Mohri N., Saito N. and Okada M.: *Journal of Materials Processing Technology*, **149**, (2004) 124-128.
- 36) 宮島謙治, 国枝正典, 増沢隆久: 放電加工間隙の気泡挙動の観察, 昭和 62 年度精密工学会春季大会講演論文集, (1987) 723-724.
- 37) Y. Imai, M. Hiroi and M. Nakano: Measurement of ratio of area occupied by bubbles using ultrasonic waves, *ISEM* **13**, (2001) 109-116.
- 38) T. Tanimura, K. Isuzugawa, I. Fujita, A. Iwamoto and T. Kamitani: Development of EDM in the Mist, *Proc. IJEM* **9**, (1989) 313-316.
- 39) T. Karasawa and M. Kunieda: EDM Capability with Poured Dielectric Fluids without a Tab, *Bull. JSPE*, **24**, 3, (1990) 217-218.
- 40) M. Kunieda and C. Furudate: High Precision Finish Cutting by Dry WEDM, *Annals of the CIRP*, **50**, 1, (2001) 121-124.
- 41) 毛利尚武, 齋藤長男, 恒川好樹, 初山英教, 宮川昭彦: 放電加工による表面処理, *精密工学会誌*, **59**, 4, (1993) 93-98.
- 42) N. Mohri, Y. Fukusima, Y. Fukuzawa, T. Tani and N. Saito: Layer Generation Process on Work-Piece in Electrical Discharge Machining, *Annals of the CIRP*, **52**, 1, (2003) 157-160.
- 43) S. Hayakawa, I. R. Ori, F. Itoigawa, T. Nakamura and T. Matsubara: Fabrication of Microstructure using EDM Deposition, *ISEM* **13**, (2001) 783-793.
- 44) 南 久, 増井清徳, 塚原秀和, 萩野秀樹: 放電加工によるチタン合金の着色仕上げ, *電気加工学会誌*, **32**, 70, (1998) 32-39.
- 45) A. Goto, K. Watanabe and A. Takeuchi: A Method to Machine a Curved Tunnel with EDM, *IJEM*, **7**, (2002).
- 46) T. Ishida, S. Kogure, Y. Miyake and Y. Takeuchi: *J. Materials Processing Technology*, **149**, 157-164.