放電現象を利用した絶縁性セラミックスの新加工法

福澤 康・谷 貴幸*・岩根英二*・毛利尚武**

長岡技術科学大学機械系, 940-21 長岡市上富岡町 1603-1

*長岡技術科学大学大学院, 940-21 長岡市上富岡町 1603-1

**豊田工業大学機械システム工学科, 468 名古屋市天白区久方 2-12-1

A New Machining Method for Insulating Ceramics with an Electrical Discharge Phenomenon

Yasushi FUKUZAWA, Takayuki TANI*, Eiji IWANE* and Naotake MOHRI**

Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology, 1603-1, Kamitomioka-cho, Nagaoka-shi 940-21

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Nagaoka University of Technology, 1603-1, Kamitomioka-cho, Nagaoka-shi 940-21

**Department of Mechanical Engineering System, Toyota Technological Institute, 2-12-1, Hisakata, Tenpaku-ku, Nagoya-shi 468

[Received October 13, 1994; Accepted July 6, 1995]

As the electro discharge phenomena can only occur between electro conductive materials and electrodes, the insulating materials could not be machined by electrical discharge machining (EDM) method. In this report, the new machining system is proposed and the machining characteristics of Sialon insulating ceramics are discussed. It is clarified that the insulating ceramics are also able to be machined using the standard EDM technique with the adhesive metal plate and soft metal electrodes. It is accomplished by using one of the surface modification techniques for continuously making an electro conductive surface layer on the insulating surface.

Key-words : Electrical discharge machining, Insulating sialon ceramics, Machining condition, Surface modification, Machined powder

1. 緒 言

一般にセラミックス材料は、高強度、耐熱性、耐食性、耐摩耗性等の機能性に優れているが、高硬度であることや耐衝撃性や延性に欠けるため切断や複雑な最終形状への加工がかなり困難である。このため加工の点からも応用範囲が限られることもある。切断加工や表面研磨等はダイヤモンド砥粒を用いても行えるが、加工時間が長く高価な研削盤を使用することが必要である。更に、複雑な形状は、機械加工ではなく各種の near net shape 法により作製されているが、その装置や手法の複雑さを考えると、簡単な加工手段の開発が必要である。このためレーザー、超音波といった特殊な装置が必要とされる方法が実施されてきた^{1),2)}。これに対して放電加工方法は、導電性材料を用いるかぎりではこれらの需要に適した方法である。しかしながら、現在注目されている多くの構造的及び機能性セラミックスは、絶縁性である。このため、これまでにも放電加工機で絶縁体を加工する幾つかの方法が試みられてきた。例えばガラスやサファイヤ等を電解水溶液中での放電

加工による微細穴加工や^{3),4)}、酸素や水素が発生する放電現象を応用したワイヤ放電加工機による電解水溶液中での加工がある⁴⁾。しかしながら、厚さが数 mm 以上の絶縁体の切断加工、数 mm 径の穴を貫通させる加工及び複雑形状加工等は、困難な場合が多い。また、通常の放電加工機を用いた方法としては、被加工物であるセラミックス材料表面を蒸着法などにより導電状態にして加工する方法がある⁵⁾。著者らもこの方法を試みたが、表面層が薄い場合には、この層と電極間で放電は生じるが、いったん加工されてその層が絶縁体表面から剝離してしまうと、その後は放電が発生しなくなり、ごく短い時間内で加工は停止した。このため加工できる深さは数百 μm 程度が限界であり、その面積も非常に小さいものであった。しかしながら、このように絶縁物でも電気的手法により加工が全くできないわけではないことが分かる。そこで本論文では、これまでほとんど行われていない、形彫放電加工機による絶縁性セラミックス材料加工の可能性を調べることを目的としていくつかの新しい加工法を試みた⁶⁾。

この結果、放電加工中に連続的な導電膜形成現象が生じると、加工は可能であることが判明したので、本論文でこの新手法の加工方法と特性について論ずる。

2. 実験方法及び供試材

2.1 供試材

本研究で加工に用いた絶縁性セラミックスは、主に Sialon であり、比較のため Al_2O_3 、 ZrO_2 及び市販の陶器等も用いた。表 1 に供試材 Sialon の機械的特性及び物性値を示す。電気抵抗値は $2.5 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ であり、予備的に行った通常の加工油中での放電加工ではまったく加工できなかった。電極材料としては主に市販の $\phi 1 \text{ mm}$ の銅線、穴径を大きくする場合には 5 mm 径の銅線を用い、更に電極材料による加工特性を調べるためタングステン (W)、アルミニウム (Al)、ニッケル (Ni) 及びチタン (Ti) の電極材料も用いた。また、切断加工の場合には厚さ 1

Table 1. Physical Properties of Insulating Sialon Ceramics

Density	3.22
Hardness (Hv)	1300
Toughness (K _{IC})	6 MPa√m
Elastic (Young's Modulus) (E)	290 GPa
Thermal Expansion Coefficient (α)	3×10 ⁻⁶ /K
Specific Heat	0.6 J/g.K
Thermal Conductivity (λ)	21 W/mK
Porosity	less than 0.6%
Resistivity (R)	2.5×10 ¹⁶ Ω·cm

mm, 被加工絶縁体と同じ幅の銅板を用いた。後述する本方法の特徴であるセラミック表面に補助的に密着させる金属板は、主に Cu を用い、一部比較のためにニッケル (Ni) も用いた。この金属の厚さは 1~10 mm の間で変化させた。

2.2 放電加工法

絶縁性セラミックスの加工は、通常の形彫放電加工機により加工油中で行った。図 1 に、放電加工機内の浴槽における電極と被加工物試料設置の概念図を示す。導電性材料における通常の加工と異なる点は、被加工物上に電極よりも大きな金属板を密着させることにある。加工はこのままの状態金属板上方表面からセラミックスの深さ方向へ行った。表 2 に本論文で行った放電加工条件を示す。放電条件は、電極極性を (-) に、放電電流値 (I_p) を 5~35 A の間、放電パルス幅 (持続時間, τ_p) は 2~1024 μ s の間で変化させた。また Duty Factor ($\tau_p/\tau_p+\tau_r$) は 0.2~99.8% の範囲で変化させた。ここで、 τ_r は休止時間である。

加工状態の調査は、小型ビデオカメラ (CCD カメラ)

Fig. 1. Schematics illustrate of new EDM technique on insulating ceramics.

Table 2. Machining Conditions

Peak current (I_p)	5,10,15,20,25,30,35 (A)
Pulse duration (τ_p)	2,4,8,16,32,64,128,256,512,1024 (μ s)
Electrode polarity	(-)
Atmosphere	Work oil

を用いた放電現象のその場観察、加工表面の粗さ、X 線回折、X 線マイクロアナライザー (EPMA) 及び走査型電子顕微鏡 (SEM) による加工表面、断面観察により行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 加工条件

図 2 に Sialon の切断加工における放電発生状況を示す。ここで加工物は、加工油中にどぶ漬けてある。図は、1 mm 厚さの Cu 板を上部電極に用い、端部の電極先端と Sialon 表面間で生じた放電を CCD カメラで観察した結果である。導電性である上部金属の加工が終了しても、電極材端部と Sialon の間で放電が継続して発生し、絶縁体が加工されていることが観察できた。次に穴加工の可能性を調べるため、上部金属に 5 mm 厚さの Cu 板を用いて、金属板上部から密着した下部の Sialon の厚さ方向に、1 mm 径の Cu 線電極で加工した。上部金属板を貫通後更にセラミックス内へ 5 min 間穴加工した場合の加工表面及び加工穴の縦断面とその加工穴表面粗さを図 3 (a), (b), (c) にそれぞれ示す。図 3 (a) では、表面に電極径とほぼ等しい円状の放電加工跡と周囲の剝離した形態を示す領域及びその領域内に小数の微細亀裂が認められた。また、図 3 (b) の縦断面図から、1 mm 程度の深さの穴が加工され、加工痕表面には全体的に黒い生成物が付着していることが観察できた。この断面写真において、表面近傍以外には目視できる亀裂は観察されなかった。図 3 (a) で観察された亀裂は金属からセラミックスへと加工が変化する段階で発生したと考えられる。図 3 (c) の粗さ測定結果から分かるように、加工表面全体は黒色生成物の付着物のため $R_{max}=80 \mu$ m 程度とかなり粗くなった。

Fig. 2. Typical discharge behavior between insulating ceramics and electrode material in machining oil.

($I_p=25A, \tau_p=16\mu s, D.F=50\%$, Electrode $\phi 1mm$,
Worked times 5min, Metal plate thickness 5mm)

Fig. 3. SEM image of machined surface (a), cross section of machined surface (b), and surface roughness of machined surface for hole machined Sialon ceramics (c).

このように、超硬材等の導電性難加工材料の加工と同様に、軟質金属であるCu等の電極を用いて加工油中で、これまで不可能とされてきた絶縁性セラミックスの穴及び切断加工が、著者らの提案する加工方法で放電加工が可能であった。そこで、次に加工原理を明らかにするために、(1)加工面の表面状態と付着層の元素分析、(2)電極材料と加工速度との関係を調べた。電極材料にはW, Cu, Al, Ni及びTiの丸棒、上部金属材料としてはCuを用いた。すべての加工は、 $I_p=25A$, $\tau_p=16\mu s$ の条件で実施した。

図4にはCu電極-上部金属Cuの組み合わせで60s加工表面の(a)SEM観察及び(b)EDS分析の結果を示す。また、図5には、加工表面のX線回折結果を示す。図4(a)に示すように、加工表面には、導電性材料のような明確な放電痕は認められないが、微細な加工粉が全体に付着していた。EDS分析及びX線回折結果から、加工表面には、電極又は上部金属成分からなる生成物及び被加工物と加工油の熱分解によると考えられる炭化物(α -SiC)と乱層カーボンからなる表面層の存在が確認できた。また、表面層の電気抵抗は、 $50\sim 80\Omega\cdot m$ 程度の導電性を有し、黒色の部分は機械的な手法により簡単に除去できた。そこで電極材料が加工状態に及ぼす影響を明らかにするために、W, Cu, Al, Ni, Tiを電極材料とし、各材料と加工速度との関係を

($I_p=25A, \tau_p=16\mu s, D.F=50\%$, Electrode 1mm,
Worked times 5min, Metal plate thickness 5mm)

Fig. 4. SEM micrographs of machined surface (a) and EDS analysis (b), for machined Sialon ceramics.

Fig. 5. XRD patterns of Machined Sialon surface.

調べた。上部金属材料には5mm厚さのCuを用いて、すべて同じ次の条件で加工した： $\tau_p=16\mu s$, $I_p=25A$, Duty Factor=50%, 加工時間 (W_t)=7min. 結果を図6に示す。加工速度は電極と上部金属材料が同一のCuの場合が最大となり、Al, Ni, Wの順になった。電極材料の加工特性の傾向を、融点、熱伝導率などの物理定数から放電エネルギーを求めて関連づけることを試みたが、必ずしも一定の関係を見いだすことはできなかった。いずれにしても本実験の材料の組み合わせではCu-Cuが最適であったので、この材料組み合わせで加工条件による加工特性に及ぼす影響を調べた。

既に述べたように、予備実験として行った蒸着膜のような薄い導電層との放電では、加工できる深さはごくわずか

Fig. 6. Machining rate results of various electrode materials in the first machining stage.

であったので、本実験の手法においても限界加工量が上部金属の厚さに依存する可能性があると思われた。そこで上部金属のCu板の厚さを1~10 mmまで変化させて、1 mm径の穴加工をした。その結果、上部金属板厚さにより加工が進まなくなる限界深さが存在し、図7に示すように板厚が5 mm以下の領域では、加工限界深さは上部金属厚さに依存し、板厚が5 mm以上となると加工深さは5 mmを限界としてそれ以上の加工は不可能となった。図の上部金属厚さと限界加工深さとの関係から、本論文で提唱した加工方法を用いて、Sialonを穴加工する場合には、上部金属が加工に寄与する厚さ（有効厚さ）が、加工限界深さ5 mmとほぼ一致することが分かった。そこで、この加工限界は、穴加工のみに存在するの否かを検証するため、厚さ1 mm、長さ30 mmのCu板を使用して同一の方法で切断加工を試みた。図8に10 mm程度までの深さまで加工した場合の切断面を示す。加工条件は穴加工と同じであるが、この場合には、穴加工のような限界値は本実験の範囲では存在せず更に深い加工ができ、現状では板厚20 mm程度までの切断加工が可能である。図9に穴加工における上部金属板厚5 mmの場合の加工時間と加工深さの関係を示す。加工条件は図7と同じである。加工深さは加工開始直後は、2 mm程度まで数分で急速に加工できたが、それ以後は加工速度は減少し、加工限界値まで数時間の加工時間を要した。加工限界深さを過ぎて放電現象は継続するので、加工穴内部での放電状態は初期とは変化し、導電層表面と電極間には、放電が発生するが、この放電現象にはもはやセラミックスを加工する現象は存在していないと考えられる。

次に各電気条件と加工特性との関係を以下の項目について、Cu-Cuの組み合わせの穴加工で調べた。(1)電流値： I_p 、(2)放電時間： τ_p 、(3)Duty Factor：D.F.と加工速度との関係。ただし、加工時間は7 minでいずれも加工速度の早い領域である。

図10に電流値 I_p と加工速度の関係を示す。この場合には25 A程度で加工速度が極大となった。 τ_p 及びDuty Factorと加工速度との関係も調べた結果、 τ_p は4 μs と短い条件で加工速度は最大となり、Duty Factorは、いずれの τ_p

Fig. 7. Effects of the upper metal thickness for the limit machined depth on the Sialon ceramics.

EDMed conditions
 $I_p=25(A)$, $\tau_p=16(\mu s)$
 $\tau_p=16(\mu s)$, Electrode polarity(-)
Machining time $1.8 \times 10^4(sec)$
Cu Electrode thickness $t=1mm$, Cu plate

Fig. 8. Photograph of the cutting machined shape for Sialon ceramics.

Fig. 9. Correlation between machined depth and worked time.

Fig. 10. Current peak (I_p) dependence of machining rate.

の条件においても D.F.=50% が最大であった。この結果、穴加工で加工物、電極及び上部金属の組み合わせを含み加工速度を上昇させる最適の電気条件が存在することが分かった。

3.2 加工原理に関する考察

図11に、これまでの実験結果から推定される加工過程の概略を示す。図11(a)は、通常の導電体金属の加工状態で、セラミックス表面に近付いた状態を示す。(b)は、加工初期の速度が速い状態、(c)は加工限界に達した状態を示す。また図12に図11の(b)、(c)に対応する底面での表面層付着状態を示す。図12から、加工速度が速い(a)の段階では100 μm 程度まで形成されるのに対して、(b)の段階では30 μm 程度まで減少した。以上の結果から加工過程は次のように遷移していると推定している。

図11(a)で十分に発生した金属加工粉は、図11(b)に加工が進むと瞬時にセラミックス表面に付着し薄い膜を形成する。この表面層と電極間に放電が継続して発生することにより加工が継続される。図11(b)の段階では、加工穴全体に付着した導電膜と上部金属が接着して外部と通電状態になり、通常の導電性材料の放電加工と同様な加工が継続するものと考えられる。

加工能力は、セラミックスが加工され新しい表面が形成された後、この領域に適当な導電性を持つ膜が再び付着しなければ連続した加工はできなくなるので、生成物の成分とその付着力に依存することになる。ここで、穴加工で加工限界が生じる原因としては、加工粉が外部へ排出されやすいと考えられる切断加工では、本実験の範囲内では加工深さに限界が認められなかったことから、穴加工では剥離した絶縁体セラミックスの加工粉が電極と被加工物との隙

間から十分に放出されなくなり、この隙間に充満して次第に放電発生場所が減少して行く現象が考えられる。実際に、加工限界深さに達した加工時間では、図13に示すように、1 mm 以上に成長した加工粉の塊の存在が確認できた。ここで、導電性材料の加工においても、加工粉の排出が不十分であると、加工粉との放電集中により生成物が成長して被加工物は加工されにくくなる傾向があるので⁷⁾、本方法においても、加工粉末の排出が加工限界に大きな影

Fig. 12. SEM micrographs of machined surface profile. Figures (a) and (b) correspond to the machining stage of Figs. 11 (b) and (c), respectively.

Fig. 11. Model of the EDM process for insulating ceramics on the new method.

Fig. 13. Typical growing machined powder on the slow machining rate condition (a) and fast machining rate condition (b).

響を与えている可能性は大きいと推定される。

図11(c)の領域では、図12に示したように加工層の厚さは、図11(b)のときよりも薄くなった。次に、図14に各加工段階による電極消耗量の変化を示す。図11(c)の段階では電極の消耗がほぼなくなるので、電極成分からの導電性の加工粉の供給はなくなり、新たに導電性の加工層を生成させる現象はほとんどないと考えられる。この結果、極間での放電は既に存在する導電性の加工膜を除去する放電と累積した加工粉との放電だけとなり、絶縁体の加工に寄与する放電現象は、ほぼなくなったと考えられる。このほか、金属-絶縁性セラミックス接合体の界面近傍の加工において、導電性を有する界面から離れた所まで絶縁体表面が加工可能であることから⁸⁾、加工因子として絶縁体の表面近傍にのみ流れる表皮電流効果も考慮する必要があると思われる。

以上、述べてきた実験結果から、本方法は電極又は上部金属の加工粉及び加工油の熱分解から生じる炭素成分からなる導電性を有する薄膜を絶縁体表面に連続的に付着させるといった放電による表面改質⁹⁾を伴う加工方法であると考えられる。

Fig. 14. Wear amount of electrode on each machining stage of Figs. 11 (a), (b) and (c).

4. 結 言

本論文では、従来不可能とされてきた絶縁体を、通常の放電加工機で加工する方法を確立し、その性能と加工原理について調査した。以下に結果を要約する。

(1) 絶縁体セラミックス Sialon を、表面に導電体金属板を密着させることにより、通常の放電加工機を用いて加工できる方法を確立した。

(2) 本実験の範囲では、穴加工においては深さ 5 mm 程度に加工限界が生じたが、切断加工では、20 mm 程度まで加工可能であった。

(3) 上部金属の材質、放電条件により、加工速度及び加工表面状態が大きく変化した。

(4) 加工された絶縁体表面には、加工により生成された導電性膜の付着が確認できた。

文 献

- 1) 後藤英和, 土屋八郎, 片岡秀直, 電気加工学会誌, 25, No. 50, 13-21 (1991).
- 2) 中村 守, 電気加工学会誌, 19, No. 37, 1-11 (1985).
- 3) 土屋八郎, 後藤英和, 宮崎 真, 井上友一, 電気加工学会誌, 20, No. 40, 24-31 (1987).
- 4) 土屋八郎, 後藤英和, 宮崎 真, 高田暢茂, 小野 潔, 電気加工学会誌, 21, No. 41, 1-11 (1988).
- 5) 二村昭二他, 特許, 昭和63年, 150109.
- 6) 福澤 康, 岩根英二, 毛利尚武, 第3回電気加工学会全国大会講演論文集 (1993) pp. 63-66.
- 7) 斎藤長男監修, “放電加工のしくみと100%活用法”, 技術評論社 (1979).
- 8) 福澤 康, 岩根英二, 毛利尚武, まてりあ, 33, 823-25 (1994).
- 9) Y. Fukuzawa, Y. Kojima, E. Sekiguchi and N. Mohori, *ISIJ International*, 33, 996-1002 (1993).