導電性ジルコニア系セラミックスの ワイヤ放電加工特性について*

松尾哲夫** 大島栄一** 富重定三*** 早川 一† 北尾秀昭†

Wire Electro-discharge Machining of the Conductive Zirconia Ceramics

Tetsuo MATSUO, Eiichi OSHIMA, Sadami TOMISHIGE,
Hajime HAYAKAWA and Hideaki KITAO

Conductive zirconia ceramics, which contain 22.5 to 45% NbC, were machined by a wire electro-discharge machining. The zirconia containing 27.5% TiC and the alumina containing 27.5% TiC were also machined. The machining rate and surface roughness were measured for different pulse durations and D. F. values, and cutting mechanism in the zirconia ceramics was investigated by a micrographic analysis of machined surface. It is obvious that there exists an optimum duty factor from a standpoint of machining rate. As NbC content is increased, machining rate increases and reaches a maximum, while the surface roughness becomes better with NbC content. A large number of tiny discharge craters were observed in the machined surface, and due to this tiny craters the surface roughness does not increase so much even at high machining rates.

Key words: wire-EDM, zirconia ceramics, machining rate, surface roughness, NbC content, duty factor

1. 緒 言

ワイヤ放電加工法は打抜き金型などの高能率精密加工法の一つとして広く利用されている。もともと放電加工法は金属の加工に限られていたが、最近ではTiC, NbC, TiNなどを含むいわゆる導電性セラミックスの加工にも応用されるようになってきた。したがって、これまでに導電性サイアロン, ZrB_2 , Si_3N_4 などのセラミックスの放電加工特性に関する研究や解説が見られる^{1)~9)}が、ワイヤ放電加工に関する研究は今のところきわめて少ない^{10)~13)}。また、これらの研究は主として加工速度や加工面粗さなどのワイヤ放電加工特性に及ぼす基本的加工条件の影響を検討したもので、導電性添加剤やデューティファクタの影響あるいはワイヤ放電加工メカニズムに関する検討はいまだ不十分である。

そこで、本研究は代表的構造用ファインセラミックスとして知られる導電性ジルコニア系セラミックス(ZrO_2 にNbCやTiCを加えたもの)を中心にワイヤ

放電加工実験を行い、加工特性や加工メカニズムに及ぼす基本的因子並びに導電性添加剤の種類・添加量の影響を追究したものである。

2. 実験方法

本実験に使用したワイヤ放電加工機はTAPECUT-L (FUNAC製)で、図1に加工方法及び測定装置の概略を示す。すなわち、黄銅ワイヤ(−電極)とセラミックス(+電極)の間に生ずる放電現象によって加工が行われ、このときの電流、電圧をホール素子電流

Fig. 1 Set-up of the wire EDM

* 原稿受付 平成3年5月29日

** 正会員 熊本大学工学部(熊本市黒髪2-39-1)

*** 正会員 熊本県工業技術センター(熊本市東町3-11)

† 学生会員 熊本大学大学院

Table 1 Properties of work ceramics

Composition and electric conductor contents vol%	Density g/cm ³	Hardness HV	Fracture toughness K_{Ic} MN/m ^{3/2}	Bending strength MPa
ZrO ₂ -NbC (27.5)	6.54	1350	6.5	1270
ZrO ₂ -TiC (27.5)	5.71	1340	7.3	1170
ZrO ₂ -Cr ₃ C ₂ (30.0)	6.88	—	—	—
Al ₂ O ₃ -TiC (27.5)	6.54	2000	6.5	880

Fig. 2 Relationship between electric conductivity and electric conductor content

Table 2 Machining conditions in the wire EDM

Voltage (no load)	100-110 V
Pulse duration τ_{on}	0.9-3.2 μ s
Peak current I_p	9.0-30 A
Duty Factor D. F.	2.3-25.6%
Fluid	Pure water (6.0 l/min)
Wire	Brass (diameter ; 0.25 mm)
Wire tension	4.9 N

プローブとデジタルオシロスコープで構成されるシステムによって測定した。使用した導電性セラミックスの組成と物性を表1に示す。また、図2に今回使用した3種類のセラミックスについて測定した導電率と導電剤量の関係を示す。この場合の電気抵抗測定は四探針法によった。本図より導電率は導電剤の量の増加に伴い上昇すること、そして添加量が22.5~45%において導電率の変化が顕著なことが分かる。そこで、本ワイヤ放電加工実験ではこの範囲の添加量のセラミックスを対象とした。なお、加工材(40×60×5~10 mm)は、あらかじめダイヤモンド砥石によって平板状に研磨した。

次に、表2にワイヤ放電加工条件を示す。表中のデューティファクタ(D. F.)は放電パルス幅 τ_{on} 及び休止時間 τ_{off} より次式によって表される。

$$D. F. = \frac{\tau_{on}}{(\tau_{on} + \tau_{off})} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

なお、加工速度(mm²/min)は端面の影響を考慮し、端面から5 mm 切り込んだ位置から30 mm まで

Fig. 3 Effect of peak current on machining rate

加工するのに要する時間を基準に求めた。加工面粗さは小坂式触針表面形状測定機によって測定した。また、加工面の観察には走査型電子顕微鏡JXA-733(日本電子製)を使用した。

一方、単発放電実験による加工メカニズムの検討には形彫り放電加工機DM-250 N(三菱電機製)を使用した。この場合の加工条件は加工電圧80 V、加工電流3~23 A、パルス幅3~35 μ s、電極間隙10 μ m、針電極(SK 5)であった。

3. 実験結果および考察

3.1 放電加工特性に及ぼす加工条件の影響

3.1.1 加工電流の影響

図3はピーク電流を増加させた場合のワイヤ放電加工速度の変化であるが、本図より加工速度はピーク電流の上昇につれ増大し、ある値でピークを持ち、その後減少することが分かる。この理由は供給エネルギーが大きく休止時間の短い方(2.6 μ s, D. F. 15%)が加工速度も遅くピーク後の減少も顕著であることから、加工材の冷却不足による不良放電(高融点材料の複合材では介在する絶縁物のため放電領域が限られ放電の集中が起こりやすく¹³⁾、また、放電冷却係数 λ/θ が小さいため³⁾放電点は高温となり、熱電子放出形アークにより消イオンされにくく、かつ再点弧現象も生じやすくなる状態¹⁴⁾が生じているためと思われる。また図4の電顕写真から、よりぜい性破壊の様相が観察される導電性アルミナでは導電性ジルコニアに比べ、加工速度(図3)は速く、また、同じ導電性ジルコニアでもパルス幅の短い方(0.95 μ s)が急熱急冷のためぜい性破壊が起こりやすくなり(図8参照)、加工速度は速くなったものと思われる。

次に表面粗さは図5に示す通り、導電性ジルコニアではピーク電流の上昇にもかかわらずほとんど変化していない。このことは図6の加工面写真からも明らかである。また、導電性アルミナでは図4で見られたよ

 Fig. 4 SEM micrographs of cut surface of ZrO_2 and Al_2O_3 ceramics

Fig. 5 Effect of peak current on surface roughness

 Fig. 6 Effect of peak current on micrograph of cut surface of ZrO_2 ceramic

うに加工面のほとんどがぜい性破壊面のため、本図のように導電性ジルコニアに比べ面粗さは極端に悪くなっており、しかもピーク電流の上昇に伴って減少している。これらの傾向は通常の金属加工の場合とは異なっている（例えば鋼の場合供給エネルギーの増加に伴って面粗さは悪くなる¹²⁾）。この理由を単発放電によって検討した結果（図13に後述）、原因は放電の分散にあるように思われる。

3.1.2 パルス幅の影響

図7はパルス幅を変えた場合の加工速度と面粗さの変化をD.F. 4, 8および15%について調べたものであるが、いずれのパルス幅においてもD.F. が大きくな

Fig. 7 Effect of pulse duration on machining rate and surface roughness

 Fig. 8 Effect of pulse duration on micrograph of cut surface of ZrO_2 ceramic

ると単位時間当たりの加工エネルギーは大きくなるが、パルス幅の短いところでは、加工エネルギーの増大よりもむしろ休止時間の短いことによって不良放電が発生して加工速度が遅くなる。一方、パルス幅が長いところでは、そのような不良放電等の発生が少なく加工エネルギーの増大がそのまま加工速度の増大につながる。このように加工速度に及ぼすD.F. とパルス幅の関係は複雑であるが、加工速度がピーク値をとる休止時間はD.F. にかかわらず、いずれも約20μsである。

一方、面粗さのD.F. による差異はほとんど認められないが、パルス幅の影響はその増加と共に面粗さはわずかに増大している。これはパルスエネルギーの増加（1パルスによって作られるクレータの増大）のためである。この場合の電顕写真を図8に示すが、これによるとパルス幅0.95μsではぜい性破壊の加工面が見られるのに対し3.20μsではかなり熔融的な加工面となっている。この面を詳細に見たのが図9であるが、これによると加工表面には放電の衝撃あるいは再凝固の際生じたと思われる多数の網目状のクラックが見られる。特に、パルス幅が長いほどクラックも大きい、断面を見る限りクラックの深さは熔融層内にと

Fig. 9 Crack generated near the surface of ZrO_2 ceramic

Fig. 10 Effect of duty factor on machining rate

どまり、母材までは達していないようである。

3.1.3 デューティファクタの影響

図10は加工速度に及ぼすD.F.の影響をパルス幅を変えて調べたものである。加工速度はD.F.の増加に伴って速くなると考えられるが、前述の通りD.F.があまり大きくなると、休止時間の不足による不良放電のためピークを持った後減少する。また、パルス幅が長いほど同じD.F.でも休止時間が長くなるため、加工速度のピーク値はD.F.の大きい方に移動する。加工速度の減少は休止時間約20 μs 以下から始まるため、パルス幅が短いほど急激な変化パターンを示す。なお、この場合の加工面粗さはパルス幅が同じであれば、D.F.によっては変化しないはずであるが、図11で見られるように不良放電のため、D.F.の増加に伴ってわずかに悪化する。

3.1.4 単発放電加工実験における放電メカニズム

単発放電加工実験はワイヤ放電加工と同レベルの条件での実験が望ましいが、残念ながら本実験では条件

Fig. 11 Effect of duty factor on surface roughness

Fig. 12 Cross section of the craters generated by single electro-discharge

を近づけることは出来なかった。本論文でも参考までにそれらの結果について述べる。

図12(a)はピーク電流を一定にしてパルス幅を変化させたときの単発放電痕の形状を、また、(b)はピーク電流の異なる場合の形状を示す。同図(a)からパルス幅によって放電痕の直径や深さは異なるが、放電痕そのものの形状は類似していることが分かる。一方、図(b)の電流値を変えた場合は放電痕の形状が明らかに異なっている。このことは放電の分散に影響を及ぼす主な因子は加工電流値であって、パルス幅の影響は小さいことを意味している。ここで、放電痕中の微小孔(分散放電(放電痕が同時に複数個形成される現象¹⁵⁾)の跡と思われる)の縁をZrとNbについて特性X線分析を行った結果を図13に示す。これによると微小孔の縁ではNbの強度が強く、内部ではZrの強度が強く出ている。これは微小孔の部分に存在していたNbC粒子が放電のため除去され、跡に ZrO_2 のみが残存したものと考えられる。また、図14の放電痕の写真を見ると、パルス幅が長い場合の放電痕外周には熔融による顕著な盛り上がりが見られる。以上の現象よりワイヤ放電加工における面粗さの変化(パルス幅が長くなれば面粗さは悪くなるが、加工電流の増加に対しては変化しないか導電性アルミナのように減少する)について類推できる。

3.2 放電加工特性に及ぼす導電剤の影響

Fig. 13 X-ray micro-analysis for Zr and Nb elements

Fig. 14 Observation of the crater generated by single electro-discharge

Fig. 15 Relationship between electric conductivity vs. machining rate or surface roughness

3.2.1 導電率の影響

図15は導電剤添加量を22.5~45%まで変えることによって導電率を変化させた場合の加工速度と面粗さの変化を、パルス幅0.95と2.60 μsに対して調べたものである。加工速度は導電率150 S/cm付近までは導電率の増加に伴って上昇するが、ピークを示した後減少することが分かる。これは、導電率の上昇につれ放電が起きやすくなるため、ある導電率までは加工速度は速くなるが、その後導電剤の物性（例えば、ZrO₂の融点2710°Cに比べ導電剤NbCの融点が3610°Cと約1000°Cも高くなっている）の影響を強く受け、

Fig. 16 Effect of NbC content on micrograph of cut surface

Fig. 17 Relationship between electric conductivity vs. machining rate or surface roughness

導電剤自体の加工速度に近づくためと思われる。また、パルス幅の影響は導電率が低い領域で、よりぜい性破壊的加工である0.95 μsの方が速くなっているが、導電率が高くなるに従い、1パルス当たりのエネルギーの大きい2.60 μsの方が逆に速くなっている。

一方、面粗さは導電率の増加につれ減少している。これは、図16で見られるように、ぜい性破壊的加工面から金属に近い溶融的加工面に変化したためである。なお、供給熱量の多いパルス幅2.60 μsで、添加量45%近くのものは再凝固面に多数のクラックが見られた。

3.2.2 導電剤の種類の影響

図17は加工速度と面粗さに与える導電剤の影響を調べたものである。導電剤としてTiCを用いたものの加工速度もNbC同様ピーク値が見られるが、その値は全体的に低くなっている。このことは添加剤の物性、特に融点と密接な関係があるように思われる（TiCの融点はNbCに比べ500°C程度低い）。そこで、更に融点の低いCr₃C₂（NbCより約1800°C低く、母材であるZrO₂より約900°C低い）を添加剤としたものについてワイヤ放電加工を行ってみたところ、Cr₃C₂含有量30、35%では加工不能であったが、40%含有量のものはときどき安定した加工が可能で

あった。しかし、再現性がなく加工速度などの測定は出来なかった。

4. 結 言

本研究で得られた結果は次のように要約される。

- (1) ピーク電流の上昇とともに加工速度は上昇し、ある値で最高値を示し、その後低下する。また、加工面粗さはピーク電流が上昇してもジルコニア系セラミックスではほとんど変化しない。
- (2) パルス幅や D. F. の増大とともに加工速度は上昇し、その後最大値を経て漸次低下するが、その最大加工速度は τ_{on} によって変わらず 40 mm²/min 程度である。また、面粗さはパルス幅及び D. F. の増大とともにわずかながら悪くなる。なお、加工面の様相はパルス幅が短い場合はぜい性破壊的であり、長い場合は溶融的である。
- (3) ジルコニア系セラミックスの加工面粗さは鋼の場合と異なり、加工速度の上昇にもかかわらずほとんど変化しない。これはぜい性破壊や放電分散というセラミックス特有の加工メカニズムによる。
- (4) 単発放電実験より、パルス幅の増加とともに放電痕の直径や深さが比例的に大きくなる。しかし、ピーク電流の増加によっては直径や深さは変わらず、また断面底部に放電分散による多数の凹凸(微細クレータ)が発生する。
- (5) ジルコニア系セラミックスでは NbC の増加すなわち導電率の上昇とともに、加工速度は高くなり導電率 150 S/cm あたりで最高値を取り、その後急速に低下する。また、加工面粗さは導電率の上昇とともに改善される。
- (6) 導電剤 TiC に比べ融点の高い NbC を含むジルコニアセラミックスの加工速度は高く、反対に

融点の極めて低い(基材のそれよりも低い)

Cr₃C₂ を含むものは安定した加工ができない。

本研究を遂行するにあたり、導電性セラミックスをご提供頂いた日本タングステン(株)佐々木豊重氏に深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 中村 守, 久保勝司, 平井幸男: 反応焼結炭化ケイ素(RB-SiC)の放電加工, 窯業協会誌, **92**, 11 (1984) 55.
- 2) 鈴木俊雄, 尾崎好雄, 高鷲民雄: 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.
- 3) 斎藤長男: ファインセラミックスの放電加工, 機械と工具, **33**, 5 (1989) 121.
- 4) 中村 守, 金山公三, 平井幸男: セラミックスの放電加工(第2報)—— β -サイアロン-窒化チタン複合焼結体の放電加工, 日本セラミックス協会学術論文誌, **96**, 9 (1988) 901.
- 5) W. König, D. F. Dauw, G. Leve & U. Panten: EDM - Future Steps towards the Machining of Ceramics, Ann. CIRP, **37**, 21, (1988) 1.
- 6) 橋口清人: 放電加工の単発放電加工による電極点の分散, 精密機械, **41**, 8 (1973) 89.
- 7) 増沢隆久, 田中勝也, 原 義彦: ダイヤモンド焼結体の放電加工, 電気加工技術, **10**, 27 (1986) 14.
- 8) 久保田 護, 田村祐二: 導電性セラミックスの放電加工特性, 昭和 61 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1986) 345.
- 9) H. Tsuchiya, T. Inoue & M. Miyazaki: Wire Electrochemical Discharge Machining of Glasses and Ceramics, Proc. 5th ICPE, (1984) 413.
- 10) 斎藤長男, 毛利尚武: ファインセラミックスのワイヤ放電加工, 電気加工技術, **110**, 30 (1986) 1.
- 11) 万波和夫, 酒井恒蔵, 奥宮正太郎: ZrB₂ 複合焼結体の放電加工, 窯業協会誌, **94**, 1 (1986) 214.
- 12) 松尾哲夫ほか: 導電性セラミックスのワイヤ放電加工の研究, 熊本大学工学部研究報告, **38**, 1 (1989) 13.
- 13) 沖山義治: 導電性セラミックスの放電加工, 機械と工具, **35**, 6 (1991) 75.
- 14) 元木幹雄: 放電応用装置, 日刊工業新聞社, (1966).
- 15) 橋口清人: 放電の分散現象, 機械技術, **34**, 5 (1976) 38.