セラミック材料の放電研削複合加工

近藤 巖^{*} 戸倉 和^{*} 中林孝夫^{*} 鈴木峰明^{**} 吉川昌範^{*}

Electro Discharge Grinding of Ceramic Materials

Iwao KONDO, Hitoshi TOKURA, Takao NAKABAYASHI,
Mineaki SUZUKI and Masanori YOSHIKAWA

Abstract

This paper is describing chiefly the characteristic and performance of electro discharge grinding. Grindstone is vitrified bond diamond wheel (No. 140/170 GE RGV). Workpiece have used alumina, alumina sintering additive silicon nitride (ASN) and partial stabilized zirconia (ZrO_2). Electrolyte contains 5 weight percentage caustic soda.

A full wave rectified commercial alternative current (DC 80V, 120V) is supplied from generator. It is concluded from this experiment.

- 1) It is certain that the light by generation in gap is an arc discharge light.
- 2) The wear of ceramics by the combination of electrochemical machining and discharge machining is very little compared to grinding.
- 3) One of the effect of discharge on this kind of grinding is a decreased electric driving power.

We can say that decrease of driving power has been caused by automatic dressing of grindstone.

* 東京工業大学 機械工学科

** 元東京工業大学機械工学科 (現ソニー)

- 4) At the small depth of cut of alumina, driving power is not decreased compare with non discharge grinding time.
- 5) In both cases either discharge grinding or not, the sharpness of edge becomes blunt.
To keep the sharpness of grindstone, traditional dressing must be used.

1. 緒 言

近年新素材として、セラミックスが注目されている。一方に於てセラミックスは難削材であるため、それ等の加工法もまた注目を浴びる結果となった。この様な要請に基づいて本論文はセラミックスの加工に放電加工と研削加工を重畳した放電研削複合加工について論述しその加工メカニズムと特性を考察しようとするものである。

セラミックスの研削加工に放電加工を重畳すると効果的であると言う報告がある¹⁾。又一方に於てこれ等意見に批判的な報告もある²⁾。後者の意見はセラミックスに対する放電加工と研削加工のメカニズムが解明されていない点が論争点である様に思われる。

筆者はこの問題点を解明する目的でまずセラミックスと砥石間で発生する火花はどのような放電であるかから検討した。次に加工物と砥石間で発生する電圧と電流の波形をリサーチ図形として観察しその特性を吟味した。次に機械的研削を零とした液中放電のみの場合について放電加工を行い、セラミックスの損耗について吟味した。最後に自作したビトリファイドダイヤモンド砥石によるセラミックスの放電研削実験を行い、放電研削複合加工のメカニズムとその有効性を論じた。

2. 針状電極とセラミック間の放電

針状電極とセラミックスを微小間隙で対峙させるか又は接触させ、この電極間隙を深さ1mm前後の導電性の液中に浸し、電極相互間に直流電圧を印加すると、電極間で放電が発生する事は、よく知られている³⁾。この際電極ならびにセラミックスを損耗する。しかしながらこの放電は単なるジュール熱により電極が赤色に加熱されているものなのかアーク放電等で知られている様な非弾性衝突による狭義の放電で赤熱化しているのかは明らかでない。そこで筆者等は通称ミーク加工等で知られている通電研削複合加工の砥石と被研削物との間で発生する火花がどのような形態

Fig.1 Spectrum of electric bulb

に基づく通電なのかを検討する必要があると考えた。もし通電が非弾性衝突によるものでなければ通電によるスペクトルは図1に示す白熱電球のスペクトルの様に連続した形となる。^{注)}一方通電が非弾性衝突をとともなうものであれば、スペクトルは物質特有の輝線を発するものになるはずである。図2に実験結果を示す。図2から明らかな様に針状電極とセラミックス（サファイヤ）間で発する光はナトリウム特有な輝線である事が解った。ここでナトリウムの輝線（D線 589 nm）が得られた理由は加工液に水酸化ナトリウム 5%水溶液を用いたからである。その他の輝線のレベルはナトリウムに比べて $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 倍低い。この結果からミーク加工で代表される通電研削複合加工は間違いなく放電研削複合加工であり、その放電の形態は電流の大きさから考えてもアーク放電である事が明らかになった。

Fig.2 Spectrum of electro-discharge

3. 放電電圧波形とリサージュ図形

針状電極（負極性、ニッケル）とSiC、アルミナ、サファイヤ等の研削物（加工物）を2mm深さの苛性ソーダ5%の水溶液中で対峙させ、セラミックの保持体すなわちグラファイト容器（正極性）との間に電圧を印加し、その間で発生する電圧、電流波形ならびにリサージュ図形を観察した。

上記静止した電極間に50Hzを全波整流した電圧を印加すると、電流が流れる。この電流は電解放電液が5%NaOH水溶液である事を考慮すると、電極間の電圧が小さい時、電解電流となる（図3中A及びCの部分）。この電解電流は電極間の電圧増加にともなって増加する。セラミックの表面をこの電解電流が流れてもセラミックは損耗しない。

図3中矢印Bの部分は放電部分であると考えられる。この部分の通電は電極間の電圧が上昇すると電極間電流が減少する負性抵抗域と放電部分より成り立っている。負性抵抗域は電解研磨等によく知られているものと同一であり、電流減少の原因は気泡の発生であると考えられる（図4中B1）。気泡が発生して電極間電流が下降する時、電極間電圧はなお上昇するので電極表面のガス膜の絶縁は破壊されて放電に至る。この部分がアーク放電の状態であると考えられる（図4中B2）。次に電極間電圧が下降すると、電極間の絶縁はある時点で急速に回復し再び放電間隙はガス膜で被われる。このため電極間の

注) 実験に用いたスペクトロメータはトプコン製SR-1形である。従って図1の白熱電球の様な連続したスペクトルを観察しても出力がチャンネル毎に分割されて出力されるので出力は輝線スペクトルの束になった様な感じのグラフとなる。

Fig.3
Wave form of
voltage and
current

電圧は電極間電流の小さいまま急上昇する（図4中C1）。なお一層電極間電圧が下降すると、電極間に発生したガスは減少し、遂に電解状態となる。ここで再び電極間に大きな電解電流が流れる（図中C）。電極間電圧が零になれば電解電流も零となり、50Hz半周期の通電は終了する。

図4は横軸に電極間電圧と縦軸に電極間電流を取ったリサーチ図形の1例を示す。図中に示した記号A, B, Cは図3の電圧一時間, 電流一時間波形の記号A, B, Cと対応する。

Specimen ; Al_2O_3
Electrolyte ; 5% Na OH aq
Voltage ; 100 V

Fig.4 Lissajous' figure

4. 電解及び放電のみによるセラミックの 損耗

電解及び放電によるセラミックの放電研削複合加工に於て電解や放電が単独でどのような作用をするかは複合研削のメカニズムを解明する上で非常に重要な課題である。そこで回転電極材料（ $\phi=100\text{mm}$, $t=6\text{mm}$ ）に鋳鉄を選んだ時、鋳鉄と加工物セラミック（ Al_2O_3 ）表面近傍で液中通電を行い、電解ならびに放電を発生させると、鋳鉄円盤及びセラミックス両者ともに損耗する。この値は電極間に存在する電解放電液の性質と重要な関係を持つ。

放電又は電解によるセラミックスの損耗量が機械研削による損耗量と比べてどの程度の割合なのかも検討しておく必要がある。一つの結論として電極間の電圧電流波形が図5の様な正弦波に近い波形を示す時、電極間では電解のみが発生し放電は発生していない。このため加工物であるセラミック(+)や鋳鉄円盤(-)は両者とも損耗しない。すなわち本加工法に於て、電解による両者の損耗は無視してよい。従って以後電解放電液は放電液又は研削液と称する。

筆者等は放電液の電気電導度が変化すると加工物や電極がどの様に変化するかを実験した。ここで電導度の変化は放電液中の苛性ソーダの量を可変して行った。また円盤状の回転電極(2200rpm)の切り込みは零とした。放電は同一試料上を四回繰返して行った。その結果を図6に示す。横軸に電導度を、縦軸に単位面積あたりの損耗重量(g/cm^2)を取っ

た。その結果放電液の電導度が大きい程セラミックスの損耗量が多い事が解った。また放電液の電導度を $0.157(\text{s}/\text{cm})$ に下げて放電を行ったところ、ほとんど放電火花は発生せず、損耗量も零となった。したがって放電を発生させるには図6の左端程度の電導度が必要である。また一方に於て電導度の大きいWCやセンダストの様な導電性材料の方が放電によって損耗し易い事が解った。WCやセンダストは窒化硅素やアルミナの様な高抵抗材料に比べて5~10倍の損耗量が得られた。この事は加工物の比重の

Fig.6 Relation between conductivity of electrolyte and material removed

差を考慮しても、表面放電型の Si_3N_4 や Al_2O_3 の様な材料は電導度の大きな導電型材料(WC, センダスト)に比べて加工速度が遅い事を示している。この原因には種々の要因が考えられるが、一因として表面放電型加工物(Si_3N_4 , Al_2O_3)の方が加工液による冷却が良く、加工物の放電点における温度が低いため損耗量も小さくなるものと考えられる。

5. 放電を重畳した研削加工

A) 実験方法

以上述べた様に電解又は放電単独ではセラミックスの除去量が零又は非常に小さい。之に研削加工を重畳して漸く実用的な加工法となるのではなかろうか。

そこで筆者等はホウ珪酸ガラスを結合剤とした外径100mm厚さ6mmのビトリファイドボンド砥石を試作し、この砥石を用いて放電を重畳したセラミックスの研削を行い、放電研削複合加工の諸特性を吟味した。試作した砥石の砥粒にはイレギュラな形状をした粒度140/170のダイヤモンド砥粒(GE, RGV)を用い、集中度は100とした。表1にその組成ならび

に焼成条件を示す。放電用電極には厚さ1mmと0.1mmの銀板電極を用い、放射状に12又は20本配置した。砥石に埋められた電極の状態を図7に示す。焼成温度を両者共800℃に選んだ理由はホウ珪酸ガラスの軟化温度が700℃前後であるからである。またボンドにホウ珪酸ガラスを使用した理由はレジンボンドの砥石では苛性ソーダによってふくらみ、結合力を失うからである。被削材セラミックスにはアルミナを焼結助材とした窒化珪素(ASN)とアルミナ(アルコア社製A16SG)を用いた。表2に研削条件を示す。

Table 2 Grinding condition

Grinding fluid	NaOH 5% aq.
Conductivity	0.2 S/cm
Wheel rotation	2200 rpm
Wheel speed	700m/min
Applid voltage	0,80,120V

Table 1 Composition of a segement(w%)

	Hot	Cold
Diamond (#140/170)	29.1	35.9
Alumina (#120)	33.0	33.2
Boro-silicate glass	37.9	26.0
Water glass		4.9

Compacting and firing condition

	Temperature ℃	Pressure MPa	Time min
Hot	800	20	30
Cold	800	20	120

Fig.7 Outside view of wheel

砥石ならびに研削物の損耗量を測定するため、図8に示す様に砥石巾6mmのうち3mmだけで研削を行った。セラミックスの除去量は図9に示す原理の測定器で測定した。この際測定箇所は試料の両端及び中央部を2回ずつ測定し、その平均値を採用した。

Fig.8 Schematic drawing of grinding operation

Fig.9 Measuring way of material removed

研削抵抗の評価は変流器と電力トランスデューサを用いて、電動機の消費電力の増分から測定した。

ここで研削回数とは巾3mm長さ90mmのセラミックスを所定切込で研削を行なった回数を云う。

砥石の損耗量を図10に示す様に厚さ5mmのアクリル樹脂板を深さ0.5mm研削し、砥石の外形をアクリル樹脂に転写し、その形状を表面試験機で測定した。

Fig.10 Wheel wear measuring method

B) 実験結果

B-1) 窒化珪素の研削

以上の条件に基づいて実験を行うと下記の様な結果を得た。自作したホットプレス法による砥石（銀電極厚さを1mm、電極本数12本）を用いて、やはり自作した窒化珪素（ASN）を研削した結果、研削動力は図11に示す様な変化を生じた。すなわち研削物と砥石間に120Vの電圧を印加した時、研削動力が電圧を印加しない場合に比べて小さくなった。また研削動力は両者とも研削回数が増える程大きくなっている。これは後述の如く砥石側面と加工物間の摩擦によるものではなかろうかと考える。また印加電圧80Vの場合の傾向は図示していないが、0Vと

Fig.11 Effect of electro-discharge on grinding power

120Vの中間の値を示す。

B-2) 電極の厚さを変化した場合

次に図11と同一の条件で銀電極の厚さを0.1mmとした場合を図12に示す。図12から解る様に放電による研削動力の低下はほとんどない。観察の結果電極巾を0.1mmとした場合の方が放電による火花も小さく、放電電流も少ない。すなわち放電が弱いと研削動力の低下は期待出来ない。

B-3) 研削回数と研削除去量の関係

放電による研削動力低下の原因をしらべるため研削回数と研削除去量の関係を調べ図13に示す。両者共ほぼ同一の直線上にあり、研削動力減少の原因は材料除去量の大小に起因するものではない事が解った。

B-4) アルミナの研削

つぎに被削材にアルミナを用いて研削実験を行った。前記ASNと同じ設定切込量0.2mm、テーブル送り速度60mm/minでは研削動力も小さく、放電電圧を印加した場合としない場合、研削動力の差は明確に現われなかった。この原因はアルミナがASNに比べて研削動力が小さいのも一因と考えられる。そこで動力の差を明確に出すため、設定切込量を1.0mm テーブル送り速度240mm/minで研削を行った。この結果を図14に示す。この場合もASNと同様に電圧を印加した場合の方が研削動力が小さい。この事は放電研削複合加工は通常の研削に比べて研削動力を小さくする効果がある事が解った。

B-5) 放電を起す位置を変化した場合

これまでの実験はすべて放電液を砥石と研削物間に掛け、電圧はテーブル（放電液）と砥石間に印加した場合について述べた。ここではこの様な研削液（放電液）の掛け方と電圧の印加位置を変更して、図15(b)に示す位置から研削液を印加するばかりでなく、写真では白く見える放電部分の様に研削液と

Fig.12 Relation between grinding power and grinding times Thickness of electrode : 0.1mm

Workpiece ; ASN
Set depth ; 0.2mm
Table speed ; 60mm/min

Fig.13 Relation between material removal and grinding times

砥石の間で放電を発生させた。研削を行った結果、研削動力は砥石と研削物間に電圧を印加した。(a)の方が研削動力も小さくなった(図16参照)。図15(a)の方が、(b)の場合より研削動力が小さく出た理由は、(b)の方が(a)に比べて研削部分に研削液が流入しにくいためであると考えられる。すなわち(b)の場合砥石と研削物との間の摩擦が増えるためと考えられる。研削回数を殖しても研削動力が殖えないのは両者とも放電による目立てがよく行なわれている事を示すものと考えられる。

Fig.14 Effect of electro-discharge on grinding power

Fig.15 Difference of electro-discharge position

B-6) 研削回数の多い場合

放電研削複合加工の研削メカニズムを究明するため研削回数を多くして実験を行った。下記の様な実験を行った理由はビトリファイドダイヤモンド研削砥石の砥石損耗が少なく、前記迄の実験では放電による効果を明確にとらえる事が難しいからである。被削材には長さ 90mm のジルコニアを用いた。砥石には電極の厚さを 1mm、電極本数 12 本のものを用いた。加工条件には切込量 0.3mm、テーブル送り速度 240mm/min、ならびに加工電圧 120V と 0V を用いた。研削回数は 1 個の試料に 48 回研削を行い、試料は 3 個用意した。従って総研削回数は 144 回である。

図 17 に最初の 108 回だけ電圧を印加せずに研削を行い 109 回目から最終回迄電圧を印加して加工を行った。途中 48 回目と 96 回目で被削材を交換した。研削動力は研削回数が増す毎に増す、その値は 30 W 程度である。この様な状態で研削物を交換すると、研削動力は約 20 W も一気に減少する。動力減少の原因は研削回数の増加にともなって砥石側面と研削物側面間で発生した摩擦が一挙に除去されるためと考えられる。それ以外で研削動力が増す原因は、砥石の目つまり及び目つぶれがある。これは 1 本目の

Difference of electro-discharge position

- (a) Between workpiece and wheel surface
- (b) Between electrolyte and wheel surface

Fig.16 Relation between grinding power and grinding times

研削物に比べて2本目の研削物の方が、また2本目の研削物に比べて3本目の研削物の方が全体的に研削動力が大きい点から、目つぶれ、目つまりが徐々に進行しているものと推論される。

109回目から最終回迄120Vの電圧を印加すると、研削動力は電圧を印加してからしばらく(15回程度)は上昇したが其の後急速に低下した。この原因は砥石と研削物との間で放電が発生し、その放電によって砥石が目立てされ、目つまり現象が除去されたものと推論される。またこの現象は比較的变化速度の遅い現象である。

本研究を始めた当初、被削材が放電によって軟化し、研削抵抗が減少するのではないかと予測したが、図17の実験からも解る様に放電によって瞬時に研削動力が低下するのではなく、放電してから徐々に効

Fig.17 Relation between grinding power and grinding times

Workpiece ; ZrO_2
Set depth ; 0.3mm

Fig.18 Profiles of grinding wheel

果が表われる点から予測は否定されるとの結論に達した。

図18及び図19に砥石損耗の結果を示す。図18は放電電圧を印加しない場合、図19は放電電圧を印加した場合である。放電電圧を印加しない場合、砥石の形状は研削前、48回目、96回目ともに殆ど変化しない。放電電圧を印加した場合、研削前に比べて48回目で約 $10\mu\text{m}$ 、96回目で約 $30\mu\text{m}$ の損耗が認められた。この際の砥石損耗比は0.1%程度である。放電によるわずかの砥石損耗は砥石の切れ味を保つ上からも必要最小限程度の損耗であると云える。また砥石の損耗量 30μ はダイヤモンド砥粒の平均粒径(約 $80\mu\text{m}$)から云っても小さい値である点から、放電ドレッシングはダイヤモンドを脱落させる程度のものではない事も解った。

B-7) 放電研削複合加工中の電圧電流波形

図7の様に12本の放射状電極を植込んだ砥石を放電させながら研削を行った場合の電圧、電流ならびにリサーチ図形を図20～図21に示す。電流は放射状電極が研削物を通過するごとに変動し、その都度放電が発生している。しかしながら印加電圧波形が50Hzの全波整流波形であるため、電極間の電流

Fig.19 Profiles of grinding wheel

Fig.20 Wave forms of grinding time

は電極の通過毎に放電して通り過ぎ、その後電導（電解）の状態に回復するものと考えられる。従って電極に電圧が印加されている時の電流は完全に零とはならない。

6. 結 言

以上述べた様に本研究では放電研削複合加工の諸特性を明らかにした。得られた結論は各項目毎に論述したが、結言では前述しなかった結論を示す。

1. 放電研削複合加工は切込の大きな研削の場合に有効であり、カット時には放電により自動目立てが行われる事が解った。

2. 切込みが小さい場合、特にアルミナの研削の様な研削動力の小さい場合には放電をさせてもその効果が表われない場合がある。

3. 研削砥石の切れ味は放電をしてもしなくても長時間加工するとだんだん切れ味が落ちる事はいなめない。この現象を回復し切れ味を向上させるにはドレッシング以外に方法はない。従って放電研削複合加工を用いなくても、ドレッシングを手まめに行えば切れ味の確保は十分であるとの見解も成立つ。

4. 放電研削複合加工を用いても、研削液は従来の研削どおり十分掛ける必要がある事が解った。

5. 本複合加工で発生する火花は放電によるものであり、電解は加工に対してほとんど関係しない。

6. 放電の効果は主として砥石側に働く。

7. 本複合研削を用いると、センダスト等を研削物とした場合、チップングを防止する等の効果を期待する意見もあるが、本研究ではこの現象を直接確認する迄には至らなかった。（1988. 1. 10 受付）

参 考 文 献

- 1) 黒松彰雄：電解放電によるセラミックスの高能率、高精度研削，1983 工作機械関連技術者会議資料，A 4-3-1.
- 2) 久保田護：放電を用いた研削加工，電気加工技術，第 116 回電気加工研究会資料，Vol.8，No. 23，(1985)，p.13.
- 3) 戸倉和，吉川昌範：針工具を用いたセラミック材料の放電研削複合加工に関する一考察，精密機械，Vol.53，No. 2，(1987)，p.295.

Electrode	;	12
Thickness	;	1mm
Specimen	;	Al ₂ O ₃
Electrolyte	;	5% NaOH aq
Conductivity	;	0.21 S/cm
Voltage	;	120V

Fig.21 Lissajous' figure