

## 論文

## 導電性セラミックスを用いた放電被覆

鈴木岳美<sup>\*1)</sup> 山崎 実<sup>\*1)</sup> 仁平宣弘<sup>\*2)</sup> 基 昭夫<sup>\*3)</sup>

Electrical discharge coating using electroconductive ceramics

Takemi SUZUKI, Minoru YAMAZAKI, Nobuhiro NIHIRA and Akio MOTOI

**Abstract** The purpose of this study is to develop an electrical discharge coating technology used for sticking hard films on electrodes making use of electroconductive ceramics. A NC die sinking electric discharge machine is used and we varied the experimental conditions such as electrode materials and working fluids. The states of the electrodes following the experiments show that (1)the adhesion of the electrical discharge films to the electrodes were observed in all experiments; (2)all of the frictional coefficients of Cu electrodes became smaller and those of Fe electrodes became larger because of this processing; (3)the most suitable ceramics for the film adhesion are SiAlON; (4) the adhesion films stick stronger to the electrodes than those formed by other techniques and are 2-4  $\mu\text{m}$  in thickness;; (5)the technique developed in this study can be applied to bearings and sliding surfaces.

**Keywords** Electroconductive ceramics, Coating, Electrical discharge film, SiAlON

## 1. はじめに

切削工具, 金型, 機械部品等の長寿命化には摩擦係数の低減, 耐摩耗性などの摺動特性や耐食性の向上が必要である。これらの要求に対して, 現在, PVDやCVDを始めとして様々な表面処理技術が開発されているが, 何れも装置が高価で, 中小企業が簡単に導入するのは難しい状況にある。一方, 比較的安価な方法として, WCのような炭化物やTiのように油中放電によって容易に炭化しやすい物質を, 圧粉体電極とし, 高硬度, 高耐摩耗性の表面を形成する放電表面処理法がある<sup>1)2)</sup>。この方法は広く普及した放電加工機を用いるため汎用性があり, 自動化も容易である。

本研究では, 工作物側に各種導電性セラミックスを用いて放電加工を行い, 放電加工による付着現象を利用し, 電極側に硬質被膜を付着させる放電表面処理技術の開発を試みた。

## 2. 実験方法

## 2.1 放電加工

NC形彫り放電加工機(三菱電機(株)製M35S型)を用いて, 表1に示す実験条件で放電加工を行った。電

極はタフピッチ銅(C-1100B)とHRC60程度の硬さの合金工具鋼SKD11を使用し, 加工表面は加工前に#1000のエメリー研磨紙で磨き, 表面粗さを $0.02\mu\text{m}$ 一定とした。また, 加工液としては油及び水を用いたが, 水を使用する場合は, 加工による変質, 加工屑等の影響を除去するため小型の加工槽を用いて1回の加工毎に水を交換した。電気条件については, 既報の結果<sup>3)</sup>をもとに, 実験に使用した導電性セラミックスの中でホウ化チタン( $\text{TiB}_2$ )の形彫り放電加工特性から最も安定した加工速度や表面粗さが得られる加工条件を用いた。

表1 実験条件

導電性セラミックス	SiAlON, $\text{TiB}_2$ , SiC	
電極(被被覆材)	Cu, Fe(SKD11)( $10 \times 10 \times 100\text{mm}$ )	
電気条件	パルス幅(on)	$30\mu\text{s}$
	休止幅(off)	$30\mu\text{s}$
	ピーク電流(ip)	5A
	衝撃計数(Df)	50%
	電極極性	+ , -
加工液	放電加工油(動粘度: $2.2\text{mm}^2/\text{s}$ ) 水(比抵抗: $4.2 \times 10^5\text{ cm}$ )	
加工時間	10min	

## 2.2 加工面の評価

加工後の電極及び工作物は, 約5mmの厚さに切断し, アセトンによる超音波洗浄を行い, 加工液や加工屑を除

\*1)加工技術グループ, \*2)多摩中小企業振興センター,

\*3)城東地域中小企業振興センター

去した後、以下の観察、測定、試験等を行い、被膜の特性を評価した。

2.2.1 観察・測定

電極側の放電面に付着した各種の被膜を光学顕微鏡及びエネルギー分散型分光器 (EDX 分析) 付き走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察し比較検討した。

次に、電極を樹脂に埋め込んだ後、放電面に対して垂直方向に切断・研磨し、マイクロSCOPEにより膜厚を測定した。さらに、同様に処理した SKD11 電極の切断面については、超微小押し込み硬さ試験機でナノインデンテーション硬さを測定し、硬さ分布を測定した。

2.2.2 分析

表面観察後、EDX 分析装置付き SEM 及び X 線回折装置で付着被膜の成分分析を行い、導電性セラミックスの主成分の付着状態を比較検討した。

2.2.3 摩擦試験

ボールオンデスク型摩擦試験機を用いて、電極側に形成された被膜の摩擦特性及び剥離状況等を調査した。表 2 に試験条件を示す。

表 2 試験条件

測定子	材質 SUJ2 の 6 mm 球体
荷重 (L)	2 N
回転半径 (r)	3 mm
回転速度 (rev)	3 1 8 . 3 1 rpm
周速度 (V)	1 0 0 mm/s
総回転数 (R)	5 3 1 5 rev
摺動距離 (D)	1 0 0 . 1 8 5 m

3 . 結果及び考察

3.1 放電加工面の観察・測定

油中で Cu 電極の極性を + 極とした場合の加工前後の放電加工面を光学顕微鏡で観察した結果を図 1 に示す。また、図 2 にはその電極の加工前後の SEM 像を示す。

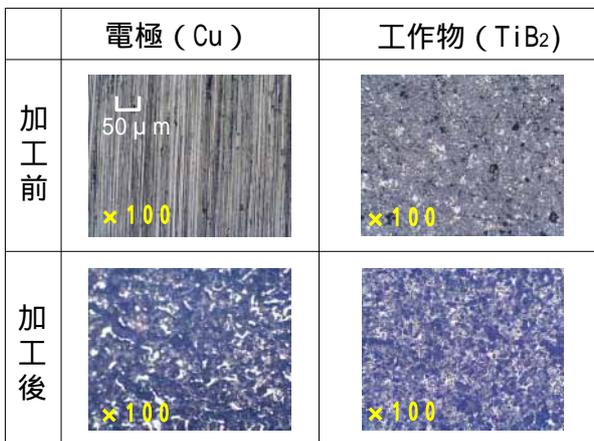
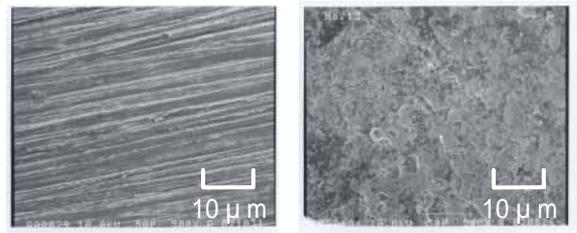


図 1 電極と工作物の加工面



(a)加工前 (b)加工後

図 2 Cu 電極の SEM 像

図 1 , 2 から、加工前の研磨紙による 5 ~ 7 μ m の條痕が、放電による放電痕へと全面変化していることが分る。図 2 (b)には加工後の表面に溶融した後が見られるが、これは放電により発生する高温で、工作物もしくは電極の一部が溶融し付着したものと考えられる。この結果は、全ての加工において同様に観察された。

工作物 (被覆材) を SiAlON とし、Cu 電極の極性を (+) としたときの電極 (被被覆材) の断面をマイクロSCOPEで観察した写真を図 3 に示す。

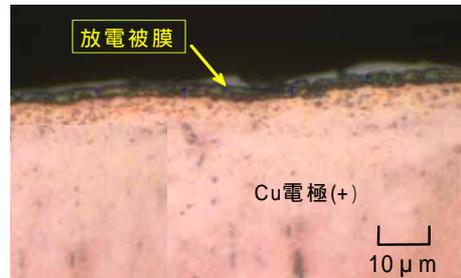


図 3 Cu 電極に形成された放電被膜

電極表面には厚さ 3 ~ 4 μ m の放電被膜が付着していることが分る。これは、放電によって導電性セラミックスが溶融飛散し、その一部が対向する電極 (Cu) 上に移行し、溶着したものと考えられる。なお、全ての電極で同様の被膜の付着が確認できた。

次に、工作物として SiAlON を用いて、SKD11 電極の極性を (+) としたときの放電被膜のナノインデンテーション硬さを測定した場合の押し込み荷重と変位との関係を図 4 に示す。

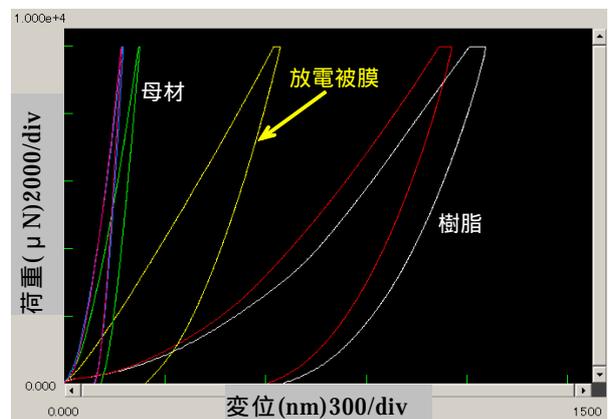


図 4 SKD11 電極断面の硬さ分布

放電被膜は加えた荷重に対して変位量が母材(SKD11)より大きく、硬さが小さいことが分る。これは、被膜が放電によって形成された微細な粒子の堆積により形成されるため、気孔やマイクロクラックの存在、各放電粒子の密着不足等により、母材よりも硬さが小さくなったものと考えられる。この傾向は他の加工条件についても同様であった。

### 3.2 放電加工面の成分分析

加工後の電極加工面についてEDX分析した例として、工作物(被覆材)が導電性SiCで、油中、(+)極で加工したときのCu電極表面に付着した被膜の分析結果を図5に示す。図より、Si, Cu, Cなどが検出されているが、図中の最も大きいピーク値(付着量)は、SiCの主成分であるSiを示している。分析結果を元に、電極の主成分(Cu)に対する導電性セラミックスの主成分Si(ピーク値)との比を図6に示す。

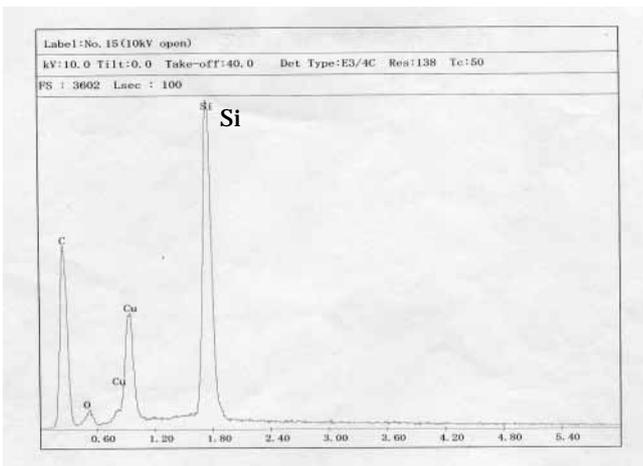


図5 付着被膜のEDX分析

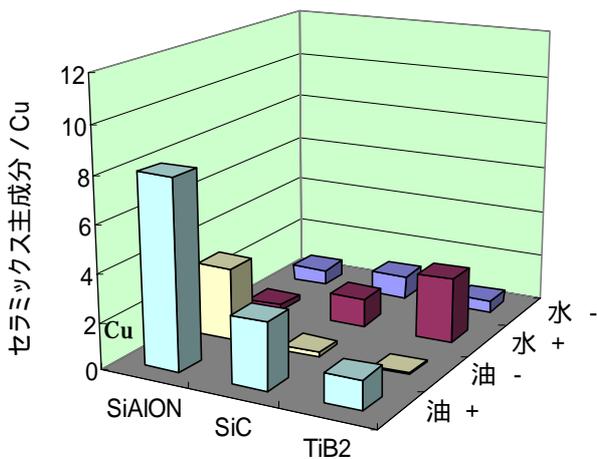


図6 放電被膜のセラミックスの主成分比(Cu電極)

図6から、全ての加工において導電性セラミックスを主成分とした被膜の付着が認められるが、3種のセラミックスの中では、SiAlONが最も良く付着することが分る。また、その中で最も多く付着したのは油中において+極で加工したときである。加工液としては、水より油を使用した場合の方が良く付着し、極性では電極を+極性とした方が良く付着する。

同様に、SKD電極表面に付着した被膜の成分分析を行い、各加工条件における電極の主成分(Fe)と導電性

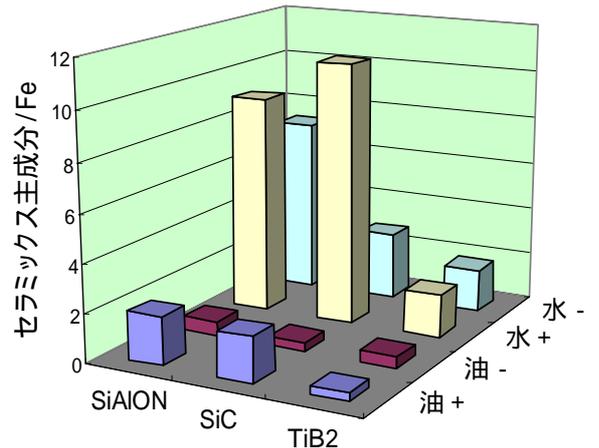


図7 付着被膜のセラミックス主成分比(SKD11電極)

セラミックスの主成分(ピーク値)との比を図7に示す。

図7から、Cu電極と同様、全ての加工において導電性セラミックスを主成分とした被膜の付着が認められる。また、セラミックスの種類ではSiAlONが付着し易く、電極極性では+極、加工液では水の方がそれぞれ良く付着することが分る。しかし、水での加工は放電被膜の表面粗さが大きくなり、また、電極全面に均一な付着が得られなかった。従って、表面処理としては油中での加工の方が良い結果が得られることが分った。

次に、Cu電極を使用して比較的安定した加工表面が得られたときの加工条件における放電被膜をX線回折装置で成分を分析した結果を表3に示す。

表3 付着被膜元素分析(Cu電極)

加工条件	含有元素
SiAlON, 油, +極	Si, C, Ti, Al, N, O, Cu
SiAlON, 油, -極	Si, C, Ti, Al, N, O, Cu
TiB <sub>2</sub> , 油, +極	C, Ti, Cu, O, Al, Si, Ca, Cr
TiB <sub>2</sub> , 水, +極	C, Ti, Cu, O, Al, Si, Ca, Cr
SiC, 油, +極	Si, C, Cu, O

表からも、電極表面には導電性セラミックスの主成分が検出されたことから、各加工条件において電極には導

電性セラミックスの被膜の付着が認められる。

図8には、工作物(被覆材)としてSiAlONを用いて、油中での極性を(-)として放電加工したときの電極表面に付着した被膜をEDX面分析した結果を示す。

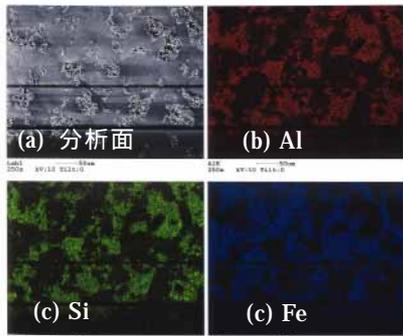


図8 EDX面分析(SKD11電極)

図8(a)の分析面に対して、(b)、(c)からSiAlONの主成分であるAlとSiが放電痕と同じ形状で面全体に検出されているのが分る。SKD11電極においても、Cu電極と同様に、各加工条件において導電性セラミックスの被膜の付着が確認できる。

### 3.3 摩擦試験

Cu電極に付着した放電被膜の摩擦試験結果を図9に示す。加工前すなわち未処理のCuの摩擦係数は、試験開始と共に急激に大きくなり、その後大きな変動を繰り返している。一方、被膜付着後の摩擦係数は加工前に比べ全て小さくなり、試験開始後早い時点で一定の値に収束することが分る。特に、TiB<sub>2</sub>油中、+極の条件のとき最小となったが、TiB<sub>2</sub>は使用した導電性セラミックスの中で最も硬い材質であることから、その硬さが影響したものと考えられる。さらに、摩擦試験後の表面を光学顕微鏡により観察した結果、付着した被膜は剥離しないことも確認された。これらの結果から、電極表面には母材よりも硬く、密着力の大きい被膜が付着形成されることが明らかとなった。

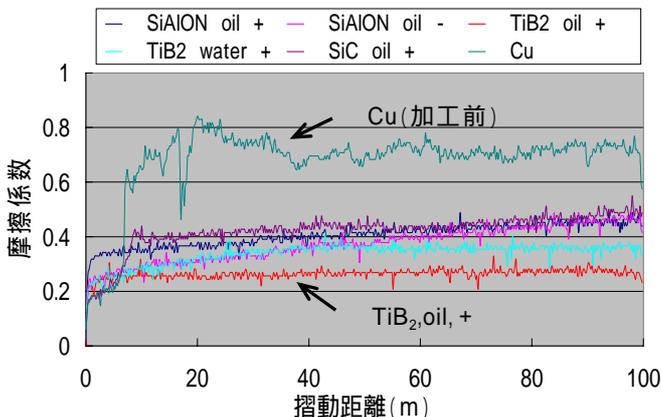


図9 Cu電極の摩擦試験

図10にはSKD11電極の放電被膜の摩擦試験結果を示す。図より、摩擦係数は加工前に比べ被膜付着後は全て大きくなり、一定の値に収束することが分る。これは、加工前の電極表面粗さが0.02μm(Ra)であったものが、放電痕の堆積により2~3μm(Ra)へと大きくなったためと考えられる。また、Cu電極とSKD11電極の被膜では摩擦係数が異なるが、これは、母材と形成被膜の硬さ等の物性の相異が反映したものであると考えられる。

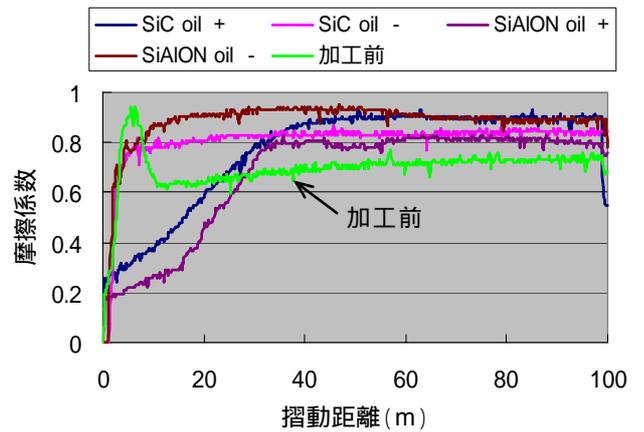


図10 SKD11電極の摩擦試験

### 4. まとめ

各種導電性セラミックスを工作物側に用いて放電加工を行い、電極放電面に付着した被膜の成分分析や摩擦試験等を行った結果、次のことが明らかになった。

- (1) セラミックスの種類、加工液及び極性の組み合わせによりその量は異なるが、全ての放電加工において、電極への放電被膜の付着が認められ、付着した被膜の厚さは2~4μmである。
- (2) 加工後の摩擦係数は、SKD11電極は大きく、Cu電極では全て小さくなる。とくにCu電極でTiB<sub>2</sub>、油中、+極のとき最小となる。
- (3) 被膜の付着特性に優れているセラミックスは、SiAlONであった。
- (4) 軟質材(Cu)へ放電被膜を付着させることで、軸受けや摺動面への適用に期待が持てる。

### 参考文献

- 1) 塚原秀和, 南久, 増井清徳, 出水敬, 曾根匠: 電気加工学会誌, 33, 74, 9(1999).
- 2) 毛呂俊夫, 後藤昭弘, 齋藤長男, 毛利尚武: 塑性と加工, 41-476, 3-8(2000).
- 3) 山崎実, 森紀年, 武藤一夫, 渡辺隆史, 佐々木武三: 東京都立産業技術研究所研究報告, 2, 29-32(1999).

(原稿受付 平成16年8月6日)