

# Ti電極を用いた炭素粉末混入放電加工によるTiC被膜の形成

岡山大学 工学部 機械工学科  
講師 岡田 晃  
(平成10年度奨励研究助成AF-98022)

キーワード：炭素粉末混入放電加工，Ti電極，TiC被膜

## 1. 研究の目的と背景

近年、放電加工を利用した表面改質についての研究が盛んに行われており、いくつかの方法によって放電加工表面に硬質のTiC被膜を形成できることが明らかにされている。塚原ら<sup>1)</sup>は純チタンに対して放電加工を行うことによって灯油系加工液が熱分解して生じる炭素が加工表面に侵入し、チタン表面にTiC被膜を形成することが可能であること、および耐摩耗性、耐焼付性に効果があることを報告している。また後藤ら<sup>2) 3)</sup>は電極に純チタンやチタンの圧粉体を用いて放電加工を行うことによって、電極材質のチタンと灯油加工液の成分である炭素が結合し、超硬合金の表面に硬質のTiC被膜を形成できること、およびその処理をスローアウェイチップやエンドミルなどの切削工具に施し工具寿命が著しく改善できることを明らかにしている。しかしながら、これらの方法ではその面粗さが数ミクロン以上であり、光沢面を必要とする金型や機械部品のしゅう動面に用いるには面粗さが大きいといった問題がある。

いっぽう従来多用されている化学蒸着法(CVD法)によるTiC被膜のコーティングにおいては被膜の厚さは数 $\sim$ 10 $\mu$ mである<sup>4)</sup>。耐摩耗性の点では被膜が厚いほど有利であるといわれている<sup>5)</sup>が、CVD法によるコーティングでは膜厚が大きくなると母材から剥離しやすくなるという欠点を有する。またCVD法においては一般に素材を1000 $^{\circ}$ C以上に加熱する必要があり<sup>6)</sup>、また処理可能な素材の材質、形状が制限されるなどの問題がある。一方、放電加工により生成されるTiC被膜は研削を行っても剥離が起らないなど母材との密着性は非常に優れている<sup>2)</sup>と報告されている。以上のことから、放電加工によって面粗さが小さくかつ、厚いTiC被膜を形成できれば、より有効な表面処理法となり得ると考えられる。

そこで本研究では、これらを改善するためにチタン電極を用いた炭素粉末混入放電加工によるTiC被膜の形成を試みた。そして加工条件が被膜特性に及ぼす影響について明らかにし、新たな表面改質法の可能性について検討を行った。

## 2. TiC被膜の生成メカニズム

本方法では、図1に示すようなメカニズムで放電加工面にTiC被膜の形成が行われると考えられる。すなわち、

灯油系加工液の成分である炭素および加工液に混入した炭素粉末が電極材質のチタンと結合し、それが加工表面に被膜を形成する。放電加工は、放電の熱によって工作物材料を除去する方法であり、一般には電極消耗の小さい加工条件で加工が行われる。しかしながら本方法では、電極を積極的に消耗させることで、工作物表面にその成分を有する被膜を形成させる。またこれまで報告されている放電加工を利用したTiC被膜の生成法<sup>1) 2)</sup>では、面粗さは数 $\mu$ m以上であり、被膜厚さを大きくしようとするとそれに伴い面粗さも大きくなるため、面粗さが小さくかつ厚い被膜を得ることはできなかった。本方法では炭素粉末混入加工液を用いることで面粗さが向上するため<sup>7) 8)</sup>、被膜の厚いパルス幅の長い条件においても面粗さの比較的小さな加工面を得ることが可能であると考えられる。さらに、粉末混入によって放電が分散するため、加工表面のクラックの発生も抑制されるものと期待される<sup>9)</sup>。

## 3. 実験方法

主な加工条件を表1に示す。工作物には熱間金型鋼SKD-61を用いた。電極を積極的に消耗させるために極性は電極をマイナスとする正極性とした。また灯油系加工液には粒径30 $\mu$ m以下の炭素粉末を0 $\sim$ 15g/lの濃度で混入し、加工中は炭素粉末の沈殿を防ぐため攪拌機によって加工液の攪拌を行った。

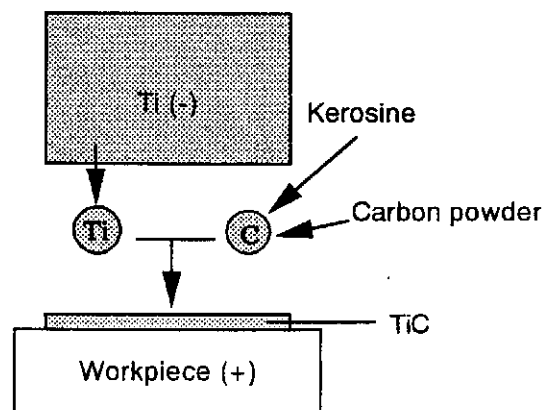


図1 TiC被膜形成メカニズム

表1 加工条件

Electrode	φ15 Titanium
Workpiece	SKD-61
Polarity	Electrode:(-)
Open circuit voltage	$u_i = 90$ [V]
Discharge current	$i_e = 3$ [A]
Discharge duration	$t_e = 2 - 200$ [ $\mu$ s]
Duty factor	$\tau = 10$ [%]
Carbon powder concentration	$C_c = 0 - 15$ [g/l]

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 再凝固層の組成

はじめに本加工法によって放電加工表面にTiC被膜を形成することが可能であるかについて検討した。図2は本加工法により得られた加工断面写真およびEPMAによるTiK $\alpha$ 像, CK $\alpha$ 像, FeK $\alpha$ 像を示す。図より明らかのように, 加工表面には白色の再凝固層が形成されている。

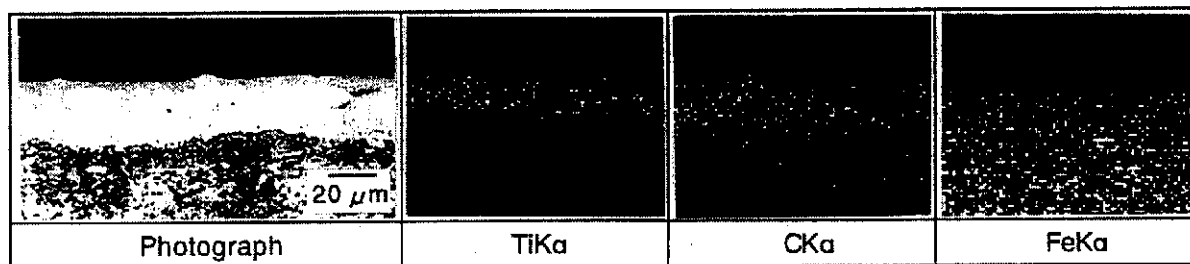
そしてその部分にはTiおよびCが多く存在していること, またFe成分は母材部分よりも若干少なくなっていることが確認できる。この結果から再凝固層部分にはTiCの存在が期待できる。

次にX線回折を用いて再凝固層部分の組成分析を行った。その結果を図3に示す。図より再凝固層にはTiCの回折線が確認され, 母材の成分以外に新たにTiCが生成されていることが明らかである。このX線回折による16.8°のTiCのピーク強度と20°におけるFe<sub>3</sub>C(網状セメントイト)のピーク強度の比のそれぞれの加工条件における値を図4に示す。これらの値は加工表面のTiCの相対的な生成量を表している<sup>1)</sup>。炭素粉末を混入しない場合( $C_c=0$ g/l)においても, 灯油系加工液の炭素成分が加工表面に侵入するためTiCが生成される。しかしながら, 加工液に炭素粉末を混入した場合( $C_c=15$ g/l)のほうがその比率は増加していることがわかる。そしてパルス幅の長い条件でTiCの生成量が最も多くなっている。

以上のように本加工法によって放電加工表面にTiC被膜の形成が可能であることが明らかとなった。

##### 4.2 加工面粗さおよび被膜厚さ

まず加工時間が被膜厚さに及ぼす影響について調べ



Ti(-)/SKD61,  $i_e=3$ A,  $t_e=200$   $\mu$ s,  $C_c=15$ g/l

図2 EPMAによる再凝固層の成分分析結果

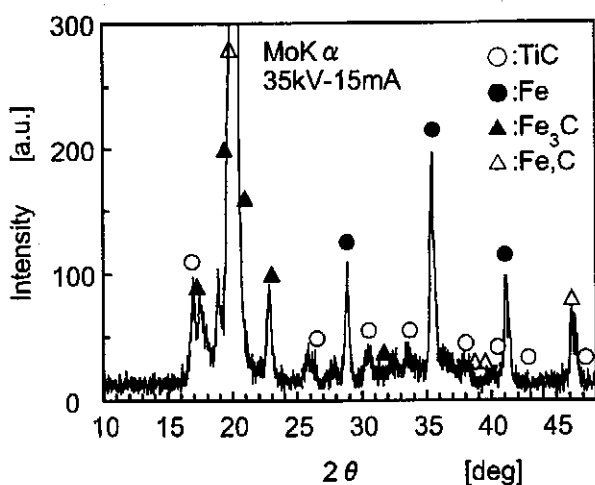


図3 X線回折による加工面の組成分析結果

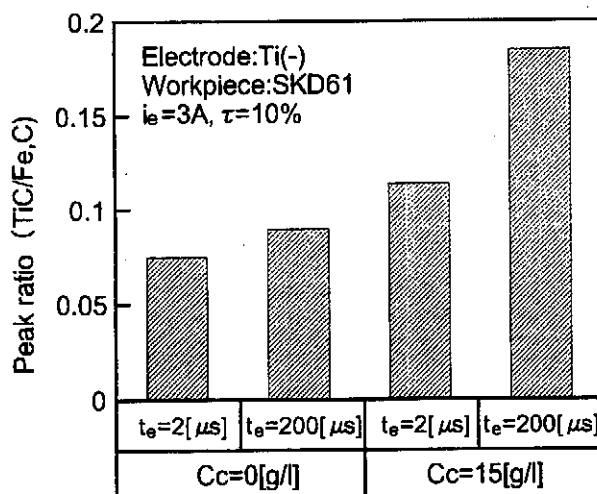


図4 加工面の組成の変化

た。図5は、パルス幅 $200\mu\text{s}$ 、炭素粉末混入濃度 $15\text{g/l}$ の条件における加工時間と被膜厚さの関係を示す。図より明らかなように、被膜厚さは加工初期に急激に増加していき、この加工条件においては加工時間約 $30\text{min}$ で被膜厚さ約 $29\mu\text{m}$ となる。そしてその後は加工時間を長くしても被膜厚さはほとんど変化せず、ある限界値が存在する。この傾向は他の加工条件においても同様であった。また、従来TiCのコーティングに多用されているCVD法においては、その成膜速度は $1\sim$ 数 $\mu\text{m}/\text{min}$ 程度であり<sup>9)</sup>、本処理法ではそれと同等の成膜速度が得られる。

次に粉末混入濃度、パルス幅の条件が面粗さおよび被膜厚さに及ぼす影響について調べた。図6は、加工液の炭素粉末混入濃度を変化させた場合の加工面粗さの変化を示す。●はパルス幅 $2\mu\text{s}$ の場合、○は $200\mu\text{s}$ の場合である。いずれのパルス幅の条件においても炭素粉末混入濃度の増加とともに加工面粗さは減少することがわかる。パルス幅 $2\mu\text{s}$ の場合、 $0\text{g/l}$ で約 $2\mu\text{m}$ の粗さが $15\text{g/l}$ では $1.3\mu\text{m}$ となる。またパルス幅 $200\mu\text{s}$ の場合には、 $15$

$\mu\text{m}$ の粗さが $10\mu\text{m}$ 程度まで減少する。なお $15\text{g/l}$ 以上の条件では炭素粉末が滞留しやすく、放電状態が不安定となり、かえって粗さは大きくなった。また図7は加工液の炭素粉末混入濃度を変化させた場合の被膜厚さの変化を示す。いずれのパルス幅の条件においても、被膜厚さは粉末混入濃度に関わらずほぼ一定となっている。パルス幅 $2\mu\text{s}$ で厚さ約 $6\mu\text{m}$ 、パルス幅 $200\mu\text{s}$ の場合に約 $30\mu\text{m}$ である。

さらに図8は、パルス幅を変化させた場合の加工面粗さおよび被膜厚さの変化を示す。図中●および○は面粗さ、▲および△は被膜厚さの変化を表す。いずれの粉末混入濃度の場合もパルス幅の増加とともに加工面粗さは増加する。また被膜厚さもパルス幅の増加とともに増加する。そして粉末混入加工の場合には、粗さ $1.3\mu\text{mRz}$ で被膜厚さ約 $6\mu\text{m}$ の加工面を形成することも可能である。以上のようにパルス幅、粉末混入濃度によって面粗さおよび被膜厚さは変化し、これらの加工条件の選定によってTiC被膜の厚さ、粗さを制御できることがわかる。

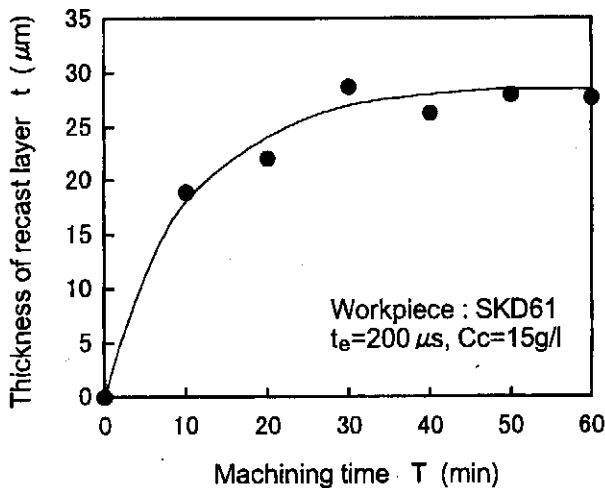


図5 被膜厚さと加工時間の関係

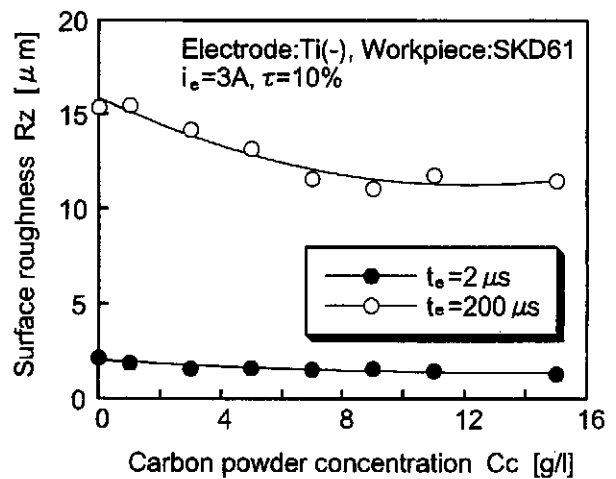


図6 加工面粗さと炭素粉末混入濃度の関係

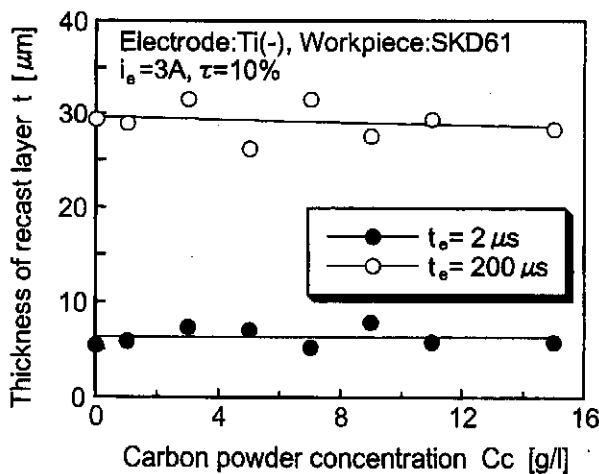


図7 被膜厚さと炭素粉末混入濃度の関係

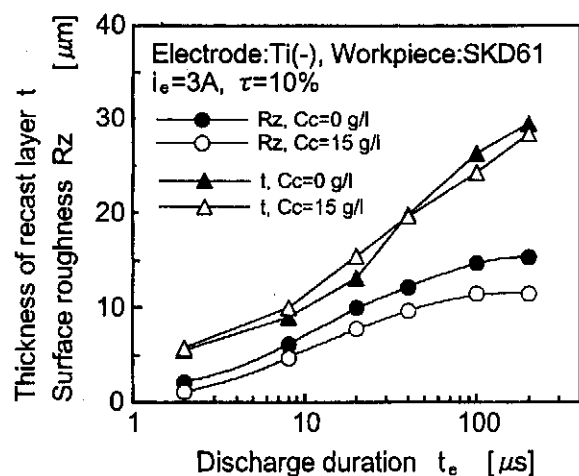


図8 加工面粗さおよび被膜厚さとパルス幅の関係

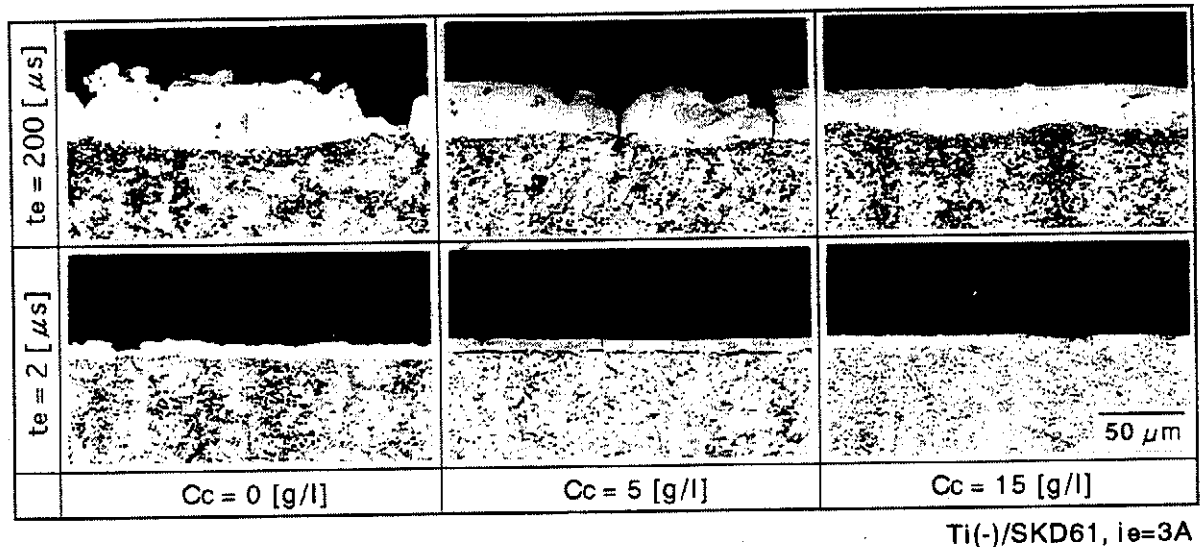


図9 被膜の断面写真

図9は被膜の断面写真である。加工表面に白く見えるのが被膜部分であるが、前述のようにいずれのパルス幅においても、粉末混入濃度による厚みの変化はほとんどない。しかし、未混入の場合(0g/l)にはその厚みには場所によってかなりばらつきがあり、表面の凹凸が激しくなっている。これに対して、粉末を混入した場合にはその厚さが均一であり、同時に表面の凹凸も小さくなっている。粉末を混入することによって、放電が分散し被膜厚さを均一化するとともに、面粗さを向上させたといえる。しかし、混入率が小さい場合には、被膜表面にはクラックの発生や空孔部分が確認できる。これに対し粉末混入濃度の大きい15g/lの場合にはそれらはほとんど見られず、優れた被膜が得られていることがわかる。

以上のことから、粉末混入放電加工により被膜が厚く、面粗さの比較的小さな加工面を得られることが明らかとなった。

#### 4・3 被膜の硬度

図10は、パルス幅および炭素粉末混入濃度を变化させた場合の加工表面のビッカース硬度の変化を示す。母材のSKD-61の硬度は約400であるが、放電加工面のほうが硬度が高いことがわかる。またその値はパルス幅が長いほど、粉末混入濃度が大きいほど大きくなっており、15g/lの場合にはいずれのパルス幅の条件においても2000以上の高い硬度を示す。図3で述べたように、パルス幅が長いほど、また炭素粉末混入濃度が大きいほどTiCの生成量が多くなるわけであるが、その結果とよく対応している。TiCの本来の硬度3200と比較すると本加工法における加工面の硬度は低いが、母材と比較するとかなり高くなっており、表面改質の効果は十分得られている。

また図11はパルス幅200 μs、粉末濃度15g/lの条件で加工を行った場合の加工断面の硬さ分布を示している。図

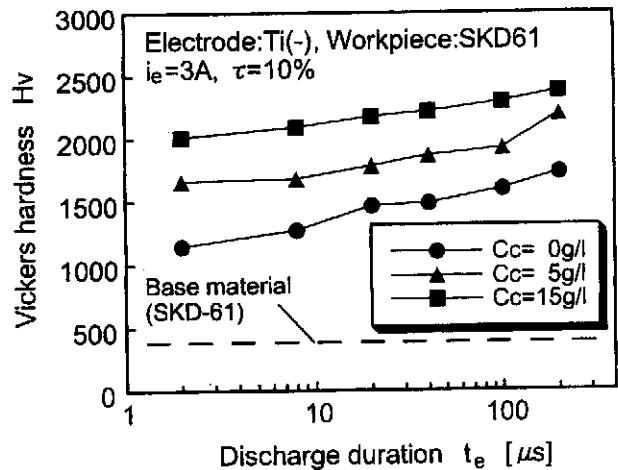


図10 加工表面硬度と炭素粉末濃度およびパルス幅の関係

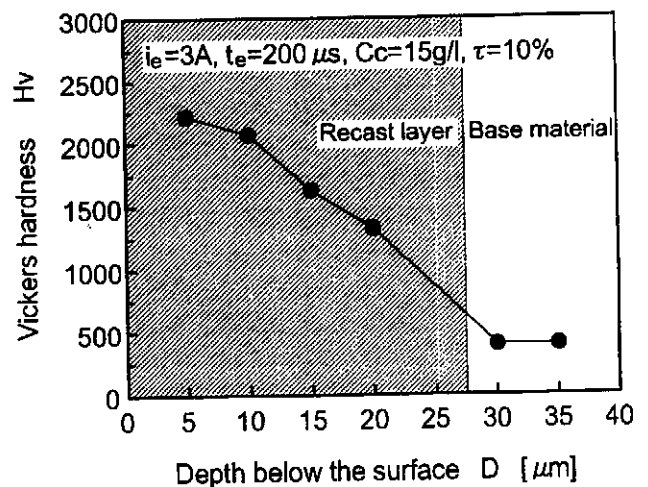


図11 加工断面の硬さ分布

中ハッチング部分が被膜部分であるが、被膜部分でも表面のほうが硬度が高く、母材に近い部分ほど硬度が低いことがわかる。このことから加工表面に近いほどTiCの生成量が多いものと推測される。

#### 4・4 被膜の耐摩耗性

次に得られた加工面の耐摩耗性について検討を行った。図12は試験に用いた往復しゅう動型の摩擦摩耗試験機の模式図である。この試験は試料表面上を一定荷重で接触させたボールを往復摺動させ、その際の摩擦係数、摩耗量を測定するものである。試験条件を表2に示す。大気中、無潤滑、室温の雰囲気、相手材には直径10mmの軸受鋼球SUJ2を用いた。

図13は摩耗試験後の摩耗痕の最大深さを示す。母材の研磨面と比較した場合、放電加工面はかなり摩耗が小さいことがわかる。また、炭素粉末混入濃度の増加とともに摩耗深さは減少している。これは濃度の増加とともに表面の硬度が増加したために摩耗が減少したものと考えられる。

以上のように、チタン電極を用いた炭素粉末混入放電加工により得られた加工面は硬度が高く、優れた耐摩耗性を有することが明らかである。

### 5. 結論

本研究では、チタン電極を用いた炭素粉末混入放電加工によるTiC被膜の形成について実験的検討を行った。本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) チタン電極を用いた炭素粉末混入放電加工によって加工表面にTiC被膜を形成することが可能である。
- (2) 粉末混入放電加工によって、面粗さが比較的小さくかつ厚いTiC被膜を得ることが可能である。また、クラックの発生も抑制できる。
- (3) 本方法によって加工表面に生成されるTiC被膜は、硬度Hv2000以上であり、優れた耐摩耗性を有する。

#### 参考文献

- 1) 塚原秀和, 南久, 増井清徳, 出水敬, 曾根匠: 放電加工による高融点金属の表面改質, 電気加工学会全国大会(1996)講演論文集, 115-118.
- 2) 後藤昭弘, 真柄卓司, 今井祥人, 三宅英孝, 斎藤長男, 毛利尚武: 放電加工による硬質被膜の形成, 電気加工学会誌, 31-68(1997), 26.
- 3) H.Miyake, Y.Imai, A.Goto, T.Magara, N.Saito, N. Mohri: Improvement of Tool Life through Surface Modification by Electrical Discharge Machining, Proc. of 12th ISEM(1998), 261-270.
- 4) 小林正樹: 硬質膜の加工工具への応用, 精密加工学会誌, 59-3(1993), 9-12.
- 5) 中島利勝, 鳴瀧則彦: 機械加工学, コロナ社, (1983), 74.

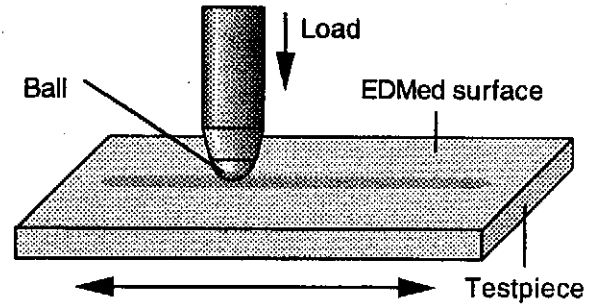


図12 往復しゅう動型摩擦摩耗試験

表2 試験条件

Load	100 [gf]
Ball material	φ10 SUJ2 (Hv800)
Sliding stroke length	4 [mm]
Sliding speed	32 [mm/s]
Time	60 [min]

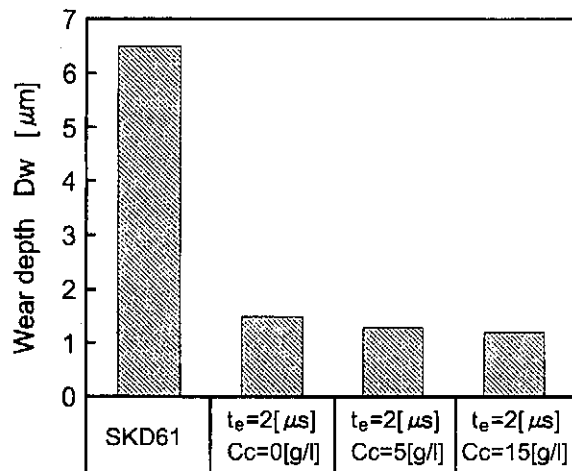


図13 摩耗試験後の摩耗痕の最大深さ

- 6) 佐藤敏一: 特殊加工, 養賢堂, (1991), 186.
- 7) 斎藤長男, 毛利尚武: 大面積放電加工における仕上げ面粗さの向上, 精密工学会誌, 57-6(1991), 954.
- 8) 宇野義幸, 岡田晃, 亀川出: 粉末混入放電加工における表面生成機構の研究, 電気加工学会誌, 29-62(1995), 9-17.
- 9) 毛利尚武, 斎藤長男, 成宮久喜, 河津秀俊, 尾崎好雄, 小林和彦, 恒川好樹: 粉末混入加工液による放電仕上げ加工, 電気加工学会誌, 25-49(1991), 47.