研 究

放電加工面の耐食性に関する基礎的研究

岡田 晃*, 田中 智*, 三田耕司*, 宇野義幸*

Fundamental Study of Corrosion Resistance of EDMed Surfaces

Akira OKADA, Satoshi TANAKA, Koji SANDA and Yoshiyuki UNO

Abstract

Recently, the EDM finishing technique has progressed and very small surface roughness can be obtained by controlling machining conditions and/or using a metal-powder-mixed fluid. Also, hard layers such as TiC and WC can be formed on the surface. Therefore, instead of conventional surface finishing by hand in the die fabrication process, an application of EDM to the finishing process of the metal mold is expected in the near future. In this case, the lifetime of the metal mold depends on the surface characteristics of the EDMed surface. Therefore, the corrosion resistance of the EDMed surface is quantitatively evaluated by measuring the anodic polarization current in order to clarify the relationship with the EDM conditions. Also, the corrosion mechanism of the EDMed surface is discussed on the basis of experimental results. As a result, the corrosion resistance of the EDMed surface is higher than that of the ground one, because a white layer with fine structure and high resistance to corrosion covers the EDMed surface. The corrosion resistance of the EDMed surface does not depend on its surface roughness. When a silicon-powder-mixed fluid is used as a dielectric in EDM, the corrosion resistance increases with the thickness of the white layer, since an EDMed surface without microcracks can be generated.

Key words: EDM, resistance to corrosion, white layer, anodic polarization current, metal mold

1. はじめに

放電加工は、従来より金型等の高硬度難削材の複雑形状の加工に広く利用されてきた。近年の切削工具、加工機械およびCAD/CAMシステムの性能向上により高速切削による金型の加工が普及してきた^{1)~3)}が、微細複雑形状の加工や、超硬合金、PCD等の非鉄鋼系金型の加工には今なお放電加工が重要な加工手段として用いられる。

放電加工面はクレータ形状の集積した梨地であり、熱クラック等も発生するため、従来は手磨きなどの表面仕上げを施してから金型として使用されてきた。しかしながら、放電仕上げ加工や放電加工による表面改質の研究が盛んに行われ、加工

液への粉末の混入、放電エネルギー条件や電極材料の適切な選定によって、表面粗さをサブミクロンオーダーにまで低減でき^{4), 5)}、かつ工作物表面にTiCやWCといった硬質皮膜を形成できることが明らかになっている^{6)~9)}。これらを応用すれば、近い将来には放電加工が金型製作の最終加工法になるものと予測される。その場合に金型の寿命や性能に大きく影響を与えるのは放電加工面の表面特性である。そのような観点から、著者らはこれまでに主にその摩擦特性と放電加工条件の相関について基礎的な知見を得ている¹⁰⁾。

いっぽう、プラスチック射出成形用金型や鍛造金型の使用の際には離型剤や洗浄剤などが用いられる。これらは複雑形状を有する金型にはスムー

* 岡山大学工学部 (岡山市津島中 3-1-1)

ズな離型を得るために不可欠であり、成形1回～数10回毎に金型表面の塗布される¹¹⁾。しかしながら離型剤はステアリン酸等の有機酸を含有するものが多く、金型を腐食させる原因となっている。また、金型の保管における大気中水分やプラスチック成形時の熱分解ガスによる腐食も発生する。従って金型の寿命を考える上で放電加工面の耐食性について十分に把握しておく必要がある。

これまでに、通常の灯油系放電加工液を用いた金型放電加工面の耐食性については増井ら¹²⁾がプラスチック熱分解雰囲気中でのクレープ腐食試験により、一般に用いられる中仕上げ、および仕上げ条件下で調査されている。また、鈴木¹³⁾、¹⁴⁾、斉藤¹⁵⁾らによってシリコンなどの電極を使用した場合の放電加工面の耐食性、およびその後シリコン粉末添加加工液を用いた場合の耐食性についてアノード分極電流法によって、通常の灯油系加工液、電極を用いた場合と比較しながら評価され、加工面でのシリコン成分の増加および組織変化によって耐食性が向上することを明らかにしている。増井¹⁶⁾らもタングステン粉末添加液によって放電加工面でのタングステン含有量が増加し、耐食性が増加することを報告している。しかしながら、これらの報告では、パルス幅や電流ピーク値などの放電加工電気条件と耐食性の相関の詳細、そのメカニズムの違いは解明されていない。また粉末混入加工による加工面と通常放電加工面との体系的比較も行われていない。

そこで本研究では、アノード分極電流法により放電加工面の耐食性を定量的に評価しながら、放電加工条件および加工面の性状と耐食性、腐食のメカニズムについて体系的に考察を行った。また、粉末混入放電加工面との比較も行い、耐食性に優れた放電加工面を得るための最適条件を検討した。

2. 実験方法

Fig.1 は、実験装置を模式的に示す。トランジスタスイッチング式放電回路の NC 放電加工機（ソディック社製 MARK XIB）を用い、放電加工面を作成した。加工液には灯油系加工液（KHS 社製 VITOL2）、およびこの加工液に粒径 10 μ m 以下のシリコン粉末を混入したもの（10g/l）を用

いた。この際、シリコン粉末の沈殿を防ぐために攪拌機（新東科学社製 BL1200）により加工液を攪拌した。電極には直径 15mm の円柱状銅電極を使用した。工作物には冷間金型材料として広く用いられる合金工具鋼 SKD11 を使用した（調質硬度：58HRC）。Table 1 にその化学成分を示す。

Table 2 に加工条件を示す。様々な加工条件で作成した放電面の耐食性を評価するために、電流値を 2～60A と変化させ、パルス幅もそれぞれの電流条件で広範囲に変化させた。この際デューティーファクタおよび、その他の加工パラメータは安定した放電状態となるよう適宜調整した。また、通常に行われているように、灯油系加工液を用いて加工を行う場合は逆極性加工（電極極性：+）、シリコン粉末混入加工液の場合には正極性加工（電極極性：-）¹⁷⁾とした。比較に用いた研削加工面は仕上げ研削後、SiC 耐水研磨紙により表面を 100～200 μ m 除去し、表面に変質層が極力残らないように用意した。

放電加工面の耐食性を定量的に評価するために用いた電気化学測定器（北斗電工社製

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Chemical composition of SKD11

Material	C	Si	V	Cr	Mn	Mo	Fe
SKD11	1.45	0.24	0.24	11.95	0.40	0.83	Bal.

Table 2 EDM conditions

Discharge current i_e (A)	Discharge duration t_e (μ s)
2	1, 12
10	1, 12, 50
40	6, 12, 20, 50, 100, 200
60	50, 100, 200

HAG-5001)をFig.2に模式的に示す。電解液には、取り扱いが容易であり、腐食現象を比較的単純に把握するためによく用いられる代表的な電解液であるNaCl水溶液を濃度3%で用いた。また、電解液中に酸素が多く溶存している場合には正確な測定ができないため、電解液に窒素を約10分間流し溶存酸素を除いてから試験を行った¹⁸⁾。対極には電極自身の抵抗が小さく、分極しにくい白金を用い、また、参照電極は測定中に外的な因子によって電位変動がほとんど起こらないとされる銀一塩化銀電極を使用した¹³⁾。ポテンシostatにより、参照電極に対する作用電極の電位を自然電位から1Vまで一定の電圧掃引速度(20mV/min)で電圧を上げながらアノード分極電流値を測定した。また、試料の腐食面積を100mm²(□10mm)として測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 放電加工面の耐食性

腐食面の粗さが大きいと実表面積が増加し、腐食特性が変化することが予測されるが、仕上げ条件下の放電加工面で一般に得られる10μmRz以下の粗さについてはその影響が不明である。そこで、まずその表面粗さが腐食特性に影響するのかを調べるために、様々な表面粗さの研削加工面を用いて腐食試験を行った。Fig.3は試験面粗さに対する電位0.4Vにおけるアノード分極電流密度を示している。図より明らかなように、今回の粗さの範囲内では試験面粗さの違いによる電流密度の変化は少ない。いずれの電位においてもその差はほとんどないことを確認しており、試験面の表面粗さは耐食性に影響がないと判断できる。

次に研削加工面と放電加工面の耐食性の違いについて検討を行った。なお、試験面の条件を揃えるために、測定には表面粗さのほぼ等しい放電加工面と研削加工面を用いて試験を行った。Fig.4はその結果を示している。いずれの場合も電圧の増加とともに電流密度は増加するが、放電加工面の電流密度が研削加工面の電流密度を常に大きく下回っていることがわかる。すなわち、放電加工面のほうが明らかに耐食性が高いことが分かる。これは放電加工面には母材とは異なる緻密な組織

Fig.2 Electrochemical analysis system for measuring anodic polarization current

Fig.3 Relationship between anodic current density and surface roughness (0.4V)

Fig.4 Anodic polarization current curves of ground surface and EDMed surface

の再凝固層(白層)が形成され、一般に母材よりも耐食性が高いためといえる¹³⁾。

放電加工面の耐食性向上が白層の存在によるものであれば、放電加工条件を変えて白層の性状を変化させた場合に、耐食性に変化が現れること

が推測される。そこで放電加工条件が耐食性に及ぼす影響について検討した。Fig.5 にその結果を示す。図より試験後半部分（電圧約 0.5V 以上）において電流密度が大きく変動していることが分かる。この場合電解溶出現象がかなり激しくなることで、白層が放電面から剥離してしまう現象を確認しており、不安定な反応を示す原因と考えられる。また、このグラフでは、放電加工条件による耐食性の違いを把握しにくいので、電圧 0.1V、および反応が不安定になる直前の電圧 0.4V における電流密度を用いて比較することにした。

Fig.6 は電解作用の小さい電圧 0.1V における電流密度と白層厚さの関係を示す。前述の結果より放電加工面の耐食性はその表面粗さよりも白層の性状に大きく影響すると推測されるため、横軸は白層厚さとした。図より、白層が薄くなるような放電エネルギーの小さい条件では電流密度が非常に高く、耐食性が低いことが分かる。また、白層が厚くなるにしたがって耐食性が向上する傾向があることも確認できる。

この原因を調べるために、電圧 0.1V まで腐食させた試料の断面観察を行った。Fig.7 は各加工条

Fig.5 Anodic polarization current curves of EDMed surface

Fig.6 Relationship between anodic current density and thickness of white layer (0.1V)

Fig.7 Cross sections of EDMed surface before and after corrosion test (0.1V)

件における腐食試験前後の断面であり、その組織を明確にするためナイトール液によるエッチングを行っている。各加工条件で試験前後の白層の状態を比較してみると、放電エネルギーの小さい $i_e=2A$, $t_e=12\mu s$ の条件においては、試験後加工面には白層は見られない。また $i_e=10A$, $t_e=1\mu s$ においては、白層の下部の母材が侵食された形跡がみられ、白層が剥離しつつあることが分かる。そのため、これら放電エネルギーが小さく、白層厚さが小さい条件では耐食性が低くなったものと考えられる。いっぽうその他の加工条件では試験面上に白層が残っていることから、試験片母材の腐食もほとんど進行していない。このことから、ある程度の厚さの白層（本腐食実験条件では約 $10\mu m$ ）が形成されていれば試験面の耐食性は向上し、また厚い白層が形成される条件ほど耐食性が高くなると考えられる。

次に、電解作用の大きい電圧 $0.4V$ におけるアノード電解電流密度についても同様の比較を行ったところ Fig.8 のようになった。図より明らかに、白層が薄い条件では耐食性が最も低く、白層が厚くなると一度耐食性が向上し、再び耐食性が低下するという傾向になっている。すなわち、白層の厚い条件下では、電圧 $0.1V$ の場合と異なる結果が得られた。

この要因について検討するために、放電エネルギーの大きい条件で作成した放電面でのみ、 $0.4V$ までの腐食試験を行い、断面観察を行った。Fig.9 はその結果を示す。腐食試験前の場合これらの加工条件では比較的厚い白層が形成されていることが観察できるが、その表面には Fig.10 に示すようにクラックが多く存在している。 $0.4V$ の場合放電面に白層は残っているがその下の母材部分が掘られたように腐食した部分が明確に見られる。そのような視点で Fig.7 の $0.1V$ の断面を見ると母材が腐食しはじめている部分があるようにも見える。これらの観察結果から、放電加工面を覆う白層は母材よりも耐食性が高いものの、クラックやピンホールの欠陥から電解液が浸入し、試験片母材を直接腐食したといえる。そしてこのような欠陥が存在する放電加工面では、結果的に耐食性は向上しないために、Fig.8 に示すように耐食性が変化する

Fig.8 Relationship between anodic current density and thickness of white layer ($0.4V$)

Fig.9 Cross sections of surface EDMed under large energy condition before and after corrosion test

Fig.10 Micro-cracks and pin-holes on EDMed surface

ることになる。

3.2 Si 粉末混入放電加工面の耐食性

次に放電加工面のクラックの発生を抑制できる Si 粉末混入放電加工²⁰⁾を行った場合の加工面の耐食性について検討を行った。Fig.11 は電圧 $0.1V$ でのアノード分極電流密度と白層の厚さの関係を示

Fig.11 Variation of anodic current density of EDMed surface using Si powder mixed fluid (0.1V)

Fig.12 Variation of anodic current density of EDMed surface using Si powder mixed fluid (0.4V)

す。図より明らかなように、Si 粉末混入加工液 (Silicon Powder Mixed Fluid; SPMF) を用いた場合にも、通常の灯油系加工液を用いた場合と同様に白層が厚くなる条件ほど耐食性が向上する傾向があることが分かる。

Fig.12 は電解作用の大きい電圧 0.4V の場合の電流密度と白層の厚さの関係を示す。Si 粉末混入加工液を用いた場合は、電圧 0.4V においても 0.1V と同様に、白層が厚い条件ほど耐食性が向上することが分かる。この傾向は前述の白層の厚い場合に耐食性が低下する通常の灯油系加工液を用いた場合とは異なる結果である。すなわち、Si 粉末混入加工液を用いた場合は、放電加工面上にクラックがほとんど存在しないため¹⁹⁾、高い耐食性を維持できたと考えられる。

Si 粉末混入放電加工によって作成した試料の腐食試験後の断面観察の結果を Fig.13 に示す。0.1V においては、試験前の状態とほとんど差がない。また、電解作用の大きい 0.4V においては若干母材部分の侵食がみられるが、前述の通常の灯油系加工液を用いて作成した放電加工面と比較すると、その侵食はほとんど進行していない。Fig.14 に示すように、腐食試験前のシリコン粉末混入加工液を用いた放電加工面にはクラックはほとんど確認できない。したがって、Si 粉末混入放電加工面では白層が厚い条件ほど耐食性が高くなる傾向が得られたといえる。

Fig.15 は、通常の灯油系加工液、およびシリコン粉末混入加工液を用いて作成した放電加工面の

Fig.13 Cross sections of surface EDMed with Si powder mixed fluid before and after corrosion test

Fig.14 SEM image of EDMed surface with Si powder mixed fluid before corrosion test

腐食試験の結果を比較したものであり、電圧 0.1V における電流密度と白層の厚さの関係を示してい

Fig. 15 Comparison of anodic polarization current densities of EDM with kerosene and Si powder mixed fluid (0.1V)

Fig. 16 Comparison of anodic polarization current densities of EDM with kerosene and Si powder mixed fluid (0.4V)

る。図より明らかなように、加工液が異なっても、白層の厚さが等しければ電流密度がほぼ同じ値を示しており、耐食性に差は認められない。すなわち、これまでシリコン粉末混入加工では、クラック等の欠陥が生じないこと、および白層のシリコン成分の増加が耐食性を増加させるためと考えられていた¹³⁾が、この結果より白層にクラック等の欠陥が存在しないことが放電加工面の耐食性により大きく影響していることと考えられる。

また、Fig. 16は電圧 0.4V における比較である。白層厚さが十数 μm 形成されるような条件では、通常の灯油系加工液を用いた加工面にもほとんどクラックが形成されておらず、結果的として、いずれの加工液でも電流密度がほぼ同じ値を示し、同等の耐食性を示す。白層の厚さが大きい場合には、これまで議論してきたように、灯油系加工液の場合には加工面に多数のクラックが生じており、両者の耐食性に大きな差が生じる。

以上の結果から、放電加工面の耐食性は加工面のクラックの有無に大きく影響しており、その耐食性を向上させるためには、まず、加工面にクラックの生成しない加工条件や Si 粉末混入加工液を用いて加工を行い、かつ厚い白層が形成されるような加工条件が望ましい。

4. 結 言

本研究では様々な加工条件で作成した放電加工面を用いて腐食試験を行い、加工面の性状が耐

食性に与える影響について実験的検討を行った。また、試験面の観察を行うことにより腐食現象のメカニズムを考察した。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 放電加工面の耐食性はその表面粗さよりも白層の性状に大きく依存する。
- (2) 放電加工面に形成される白層は一般に母材よりも耐食性が高いため、表面が白層で覆われた放電加工面のほうが研削加工面よりも耐食性が高くなる。
- (3) 通常の灯油系加工液を用いた場合、放電エネルギーの大きい加工条件下では加工面にクラックが形成され、そのクラックから浸入した電解液が母材を腐食するために耐食性は向上しない。
- (4) Si 粉末混入加工液を用いた場合は、クラックの形成を抑えることができるため、放電エネルギーの大きい加工条件でも加工面の耐食性は高くなる。
- (5) クラックなどが放電加工面になければ、その耐食性は白層の厚さに大きく依存し、白層が厚いほど放電面の耐食性は高くなる。

謝 辞

本研究の遂行にご協力いただきました(株)ソディック、ならびに腐食試験についてご教授いただきました北斗電工(株)に謝意を表します。

参考文献

- 1) 若岡俊介: 21 世紀の金型加工技術の幕開け, 型技術, 16, 2, 32-33(2001)
- 2) 西山為裕: 高速・高精度加工のさらなる追求, 型技術, 16, 2, 38-39(2001)
- 3) 牟田芳喜: 金型の高速・高精度加工とCAEシステム, 精密工学会誌, 67, 3, 394-398(2001)
- 4) 毛利尚武, 齋藤長男: 表面改質放電加工, 精密加工学会誌, 64, 12, 1715-1718(1998)
- 5) 齋藤長男, 毛利尚武, 高鷲民生, 古谷政典: 放電加工技術 - 基礎から将来展望まで: 日刊工業新聞社, 84-99(1997)
- 6) 後藤昭弘, 真柄卓司, 今井祥人, 三宅英孝, 齋藤長男, 毛利尚武: 放電加工による硬質皮膜の形成, 電気加工学会誌, 31, 68, 26(1997)
- 7) 岡田 晃, 宇野義幸, 平尾和久, 高木俊: チタン電極を用いた炭素粉末混入放電加工による表面改質, 電気加工学会誌, 33, 73, 31-37(1999).
- 8) 薩田寿隆, 平井清人, 吉澤宗晴: 粉末混入放電加工法を用いた表面改質, 電気加工学会誌, 34, 75, 22-29(2000)
- 9) 塚原秀和, 南 久, 増井清徳, 出水 敬, 曾根匠: 放電加工によるチタンの表面改質, 電気加工学会誌, 33, 74, 9-15(1999)
- 10) 岡田 晃, 中島洋平, 宇野義幸: 放電加工面の摩擦特性に関する基礎的研究, 電気加工学会誌, 37, 85, 24-31(2003)
- 11) 接着科学委員会: 接着理論と応用, 丸善, 550(1995)
- 12) 増井清徳, 佐藤幸弘, 曾根 匠, 出水 敬: 放電加工面の耐食性とその改善, 電気加工技術, 14, 44, 12-16(1990)
- 13) 鈴木正彦, 毛利尚武, 齋藤長男: 放電加工による金属表面の改質, 精密工学会誌, 53, 2, 243-249(1987)
- 14) 公開特許; 昭 62-24961
- 15) N.Saito, N.Mohri, T.Takawashi, T.Magara, A.Goto, K.Watanabe and M.Suzuki: Conductive Ceramics Coating Technology Using EDM on Metal Surface, Proc. of 12th ISEM 455-463(1998)
- 16) 増井清徳, 出水 敬, 曾根 匠, 佐藤幸弘: 放電加工による表面の合金化処理, 型技術, 9, 7, 34-35(1994)
- 17) 佐野利一, 毛利尚武, 齋藤長男, 大竹廣定: 放電加工による鏡面仕上げ, 精密工学会春季大会講演論文集, 565-566(1988)
- 18) 電気化学会: 電気化学測定マニュアル基礎編, 丸善, 46-48, 27-30(2002)
- 19) 河津秀俊, 毛利尚武, 齋藤長男, 小林和彦, 石川倫康, 成宮久喜: 粉末混入放電加工における加工現象, 精密工学会秋季大会講演論文集, 501-502(1989)

(2005 年 5 月 12 日受付)