

回転回動工具電極を用いた金型表面に対する 機能性表面改質法に関する研究

新潟大学 教育学部 技術科教育専修
准教授 平尾 篤利

(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015041)

キーワード：表面改質，回転回動，放電加工

1. 研究目的

近年，材料表面の耐摩耗性・耐熱性などの機能性を向上させるために，様々な表面改質法が提案されている．その中でも，放電加工を応用した表面改質法は，剥離強度が高いことが知られている⁽¹⁾．毛呂らは，TiC 仮焼結体電極を用い，鋼材に対して油中放電加工を実施することで，極めて緻密で硬い表面を得ている⁽²⁾．耐久性・耐摩耗性に優れた被膜を形成し，ジェットエンジンのタービンプレードに適用されている⁽³⁾，⁽⁴⁾．一方，これら油中放電による表面改質法は，微小な極間間隙を維持するために高価な制御装置を必要とし安全な加工液の管理も欠かせない．

一方，回転電極を用いた気中放電による表面改質法は，装置の簡便さや安全な管理が可能であることから，金型の補修や工具への表面改質に広く適用されている．通常，気中放電による表面改質法は，電極と被加工物間に短絡解除放電を発生させ，その発生熱によって電極材料を被加工物へ移行堆積させる．一般的に，気中放電による表面改質は，回転電極を手動によって操作し，作業者の目視観察に基づいて行われている．このため，作業には高い熟練を要す．さらに，電極先端部は常に数百度以上の高温状態を維持する必要があり，堆積速度と表面粗さを同時に制御することは困難となる．

そこで，回転電極に正方向および逆方向の回転運動を交互に与え，この回転角を独立に制御し，両回転角の差に相当する回転角で電極全体を一方方向に回転(回転回動)させる手法を提案した．本研究では，一方方向回転および回転回動を用いた気中放電による表面改質法において，コンデンサ容量と電極の直径が表面改質・堆積におよぼす影響を調査した．

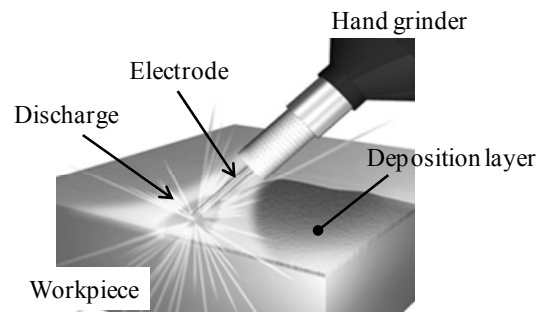
2. 一方方向回転電極による堆積特性

2.1 気中放電表面改質装置

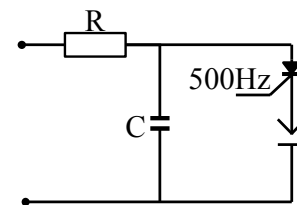
Fig. 1 (a)に実験装置の概略および(b)放電回路を示す．気中放電表面改質装置は，放電電源の RC 回路とハンドグラインダー構造の回転機構(アプリケーション)から構成されている．アプリケーションは，被加工物表面上を手動で走査する．この場合，電極と被加工物は，常に短絡状態となると考えられるが，電極の回転によって接触と解放を繰り返す．このように，本装置は極間を制御することなく，気中放電表面改質法を可能としている．また，電極の周囲へはシール

ドガスとしてアルゴンガスを供給している．

放電電源は，サイリスタによるスイッチングを行っており，連続アーク放電の発生を抑制している．Fig. 2 にコンデンサ容量とピーク電流および放電時間の関係を示す．ピーク電流および放電持続時間は，コンデンサ容量が増大するにつれて増加していることが分かる．



(a) Overview of experimental apparatus



(b) Discharge circuit

Fig. 1 Experimental apparatus for surface deposition in air gap.

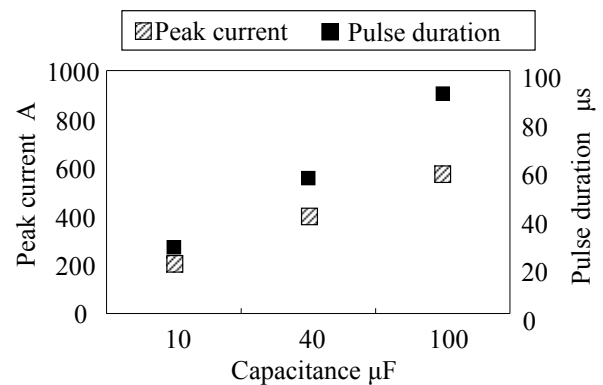


Fig. 2 Peak current and pulse duration for three capacitance levels.

Table 1 Experimental conditions.

Electro-spark machine	MicroDepo (TechnoCoat Co., Ltd)
Electrode	Ni-based alloy φ1.6, 2.4, 3.2 (polarity:+)
Workpiece	Steel (S45C, S50C)
Open circuit voltage, E	150 V
Capacitance, C	10 μ F, 40 μ F, 100 μ F
Frequency	500 Hz
Atmosphere	Ar (0.005 MPa)

Table 2 Ni-based alloy composition.

Element	Ni	Cr	Fe	Mo	other
wt%	48.85	21.60	18.85	8.36	2.34
Mechanical characteristics					
0.2 % Proof stress				415 MPa	
Tensile strength				753 MPa	

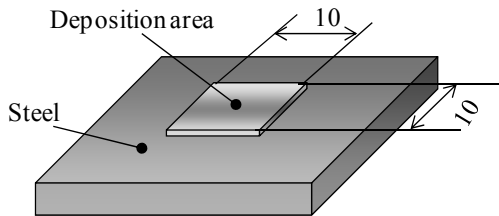


Fig. 3 Deposition area in this experiment (all dimensions are in mm).

実験に用いた気中放電表面改質条件を Table 1 に示す。電極にニッケル基合金を、被加工物に鋼材を用いた。Table 2 にニッケル基合金の組成および機械的特性を示す。ニッケル基合金は、耐食性・耐摩耗性が高いことから、金型などの補修や表面改質に広く用いられている⁽⁶⁾。Fig. 3 には、鋼材に対して表面改質（堆積）を実施した領域を示す。堆積は、被加工物の表面 10 mm×10 mm の領域に対して実行する。Table 1 に示した条件で堆積を行い、各種加工条件下での堆積量を評価する。

2.2 堆積速度および堆積特徴

Fig. 4 に電極を一方向回転させた場合の電極直径と堆積速度の関係を示す。電極直径は、φ1.6 mm, φ2.4 mm, φ3.2 mm の 3 種類を用いた。一方向回転において、コンデンサ容量 10 μ F および 40 μ F を用いた堆積速度は、電極直径の違いによる大きな違いはなかった。一方、コンデンサ容量 100 μ F において、電極直径による堆積速度に大きな違いが確認された。電極直径 φ 1.6mm の場合、堆積速度が最大になった。

Fig. 5 (a), (b), (c) に、100 μ F のコンデンサを用いた放電表面改質加工によって得られた被加工物の断面結果を示す。(a)電極直径 φ1.6 mm は堆積層状態が悪く、大きな凹凸面が形成されている。直径が細い電極は、堆積速度において優れてはいるものの、堆積状態が悪いことがわかる。加工初期における堆積速度は、電極直径が細くても

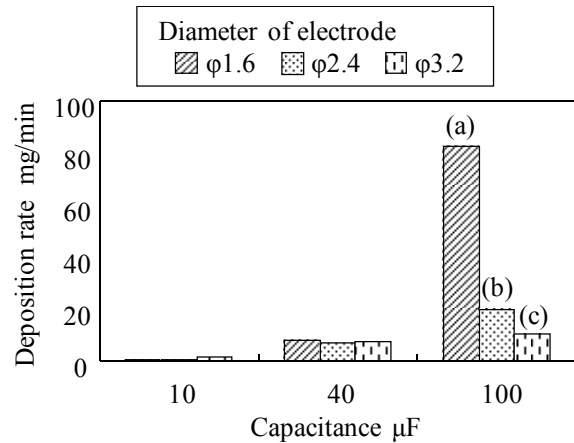


Fig. 4 Relation between capacitance and deposition rate for three electrode diameters.

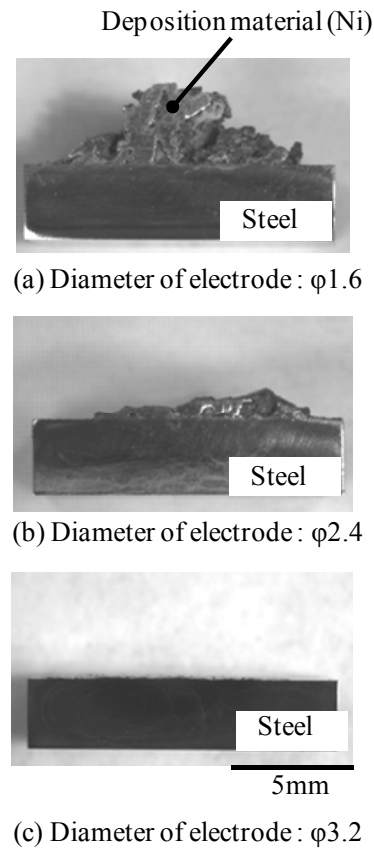


Fig. 5 Cross sections of deposition layers for three electrode diameters.

速くはない。なぜなら、堆積加工を継続することで、電極は赤熱状態にまで加熱され、この赤熱状態時に堆積速度が増大するためである。電極直径が小さいと、熱容量が小さくなり、電極が赤熱状態になり易い。したがって、容易に電極が赤熱状態に達するため、堆積速度が増加するものと考えられる。

電極の赤熱状態および表面凹凸の成形過程を高速度カメラ（キーエンス社製：VW-6000，フレームレート：250 fps）を用いて観察した。電気条件は、電極直径 φ1.6mm，コン

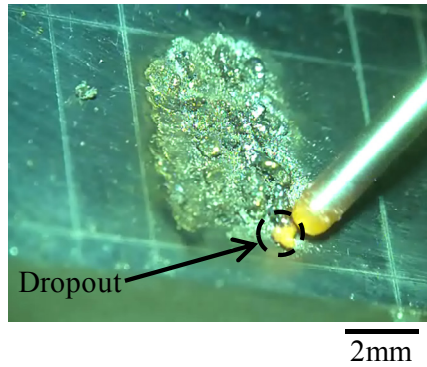


Fig. 6 Observation of electrode drop-out process by high-speed camera.

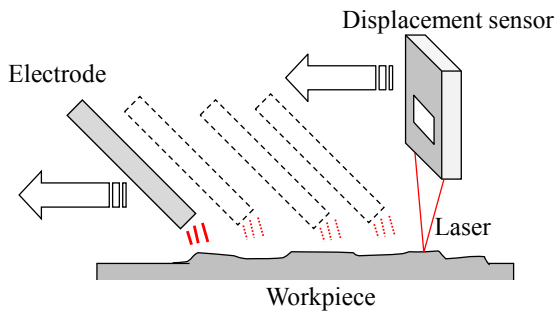


Fig. 7 Measurement of deposit profile by laser displacement sensor

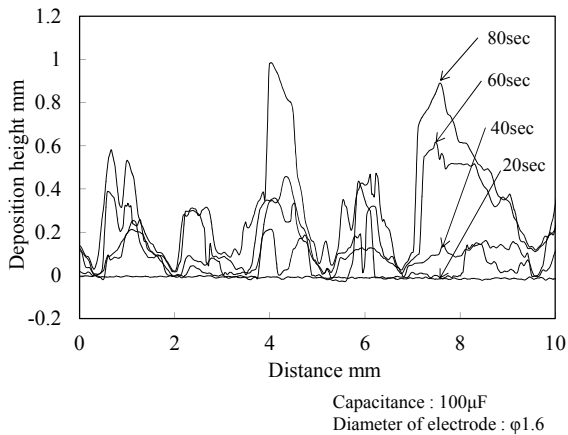


Fig. 8 Measurement of deposition processes.

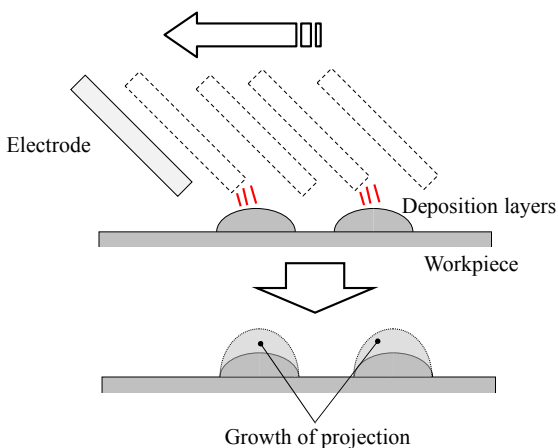


Fig. 9 Model of projection growth.

デンサ容量 $100 \mu\text{F}$ とした. Fig. 6 に表面へ堆積している様子を示す. 電極端部全体が赤熱状態に加熱され, その加熱領域の中心から熔融し, 赤熱部分が被加工物に堆積されていることが観察される. 電極直径 $\phi 2.4 \text{ mm}$ においても, 同じ現象が観察された. このように, 赤熱部分から熔融して堆積された場合, 表面は非常に粗くなる.

2.3 一方向回転電極の堆積過程

レーザ変位計を用いて堆積過程を観察した. Fig. 7 に気中放電表面改質後の走査領域の対してレーザ変位計のセンサヘッドを同じ経路に沿って走査した測定方法を示す. 最初, 20 秒間の電極走査を繰り返し, その後, レーザ変位計によって表面の堆積状態を測定した. これを 40, 60 および 80 秒で繰り返し実行した. Fig. 8 に, 20, 40, 60 および 80 秒後の断面状態を示す. Fig. 8 の結果から, ある特定箇所に堆積が発生した場合, 次の走査放電によって, 先の堆積した場所に対して堆積が進行することが分かった. 放電は極間距離の小さい場所で発生するため, 堆積された突起部に対して, より選択的に堆積が成形されるものと考えられる.

Fig. 9 に, Fig. 8 の結果から考察した堆積モデルの概略を示す. 一方向の回転電極を被加工物表面上で走査して堆積処理を行おうとすると加工初期に生じた小さな凹凸が成長し一様な被加工物表面を得ることが難しい⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾. この現象は, 一定の圧力および速度の条件下でも観察された⁽⁶⁾. 従って, この堆積方法では不安定であり, 自動化の面で問題を引き起こすと予想される.

3. 回転回動機構を用いた堆積

3.1 回転回動機構の原理

Fig. 10 に, 従来型の(a)一方向回転および提案する(b)回転回動機構を用いた気中放電による表面改質法の電極先端の概要を示す. (a)一方向回転の電極を用いた場合, 電極先端部は周方向全域にわたって高温になっているために, 電極の回転に伴って常に被加工物側の突起部近傍に放電が集中する傾向がある. 放電表面改質法の場合, 必要とする高温部は放電点近傍の限られた領域で十分である.

そこで, 実質的な対向面を回動変位量 (=回動角度振幅 \times 電極半径) に対応させることで, 加熱領域をこの範囲に限定する方法を提案する. Fig. 11 に回転回動の概念を示す.

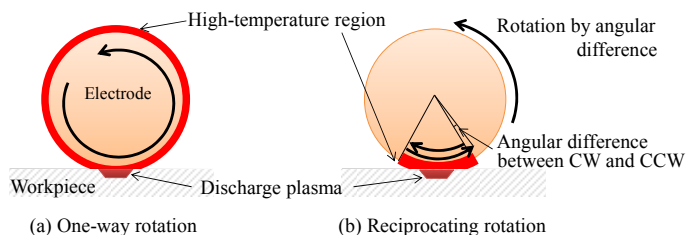


Fig. 10 Schematic view of reciprocating rotation.

回転回動は、正方向回転角と負方向回転角の差（往復振幅の差）に比例して回転移動する。これにより、被加工物の表面に対向する電極表面領域を任意に限定し所望の温度状態に保つことが可能になる。しかも電極表面の低温領域が回転移動することにより、被加工物の高温突起部位を電極の高硬度部位によって擦過し、平坦化することも期待される。また、一方向回転では、電極が被加工物に接触した時、回転方向に電極が弾かれるため、その操作が困難であるのに対し、回転回動は常に狙った場所に堆積できる特徴を有する。

3.2 堆積特性の比較

回転回動電極を用いた表面改質法を実施した。Table 1 に示した放電条件を用い、 $\phi 1.6$ mm, $\phi 2.4$ mm, $\phi 3.2$ mm の電極直径を用いた。また、電極は一方向回転の実験と同様に手動によって走査している。Table 3 に回転回動の仕様を示す。回転回動は、回動の駆動周波数を 10 kHz（回転数 600 rpm に相当）とし、回転角を 36° とした。電極は、3 rpm とゆっくりと回転する。

Fig. 12 に電極を回転回動させた場合の電極直径と堆積速度の関係を示す。電極直径は、一方向回転させた場合と同様に、 $\phi 1.6$ mm, $\phi 2.4$ mm, $\phi 3.2$ mm の 3 種類を用いた。グラフには一方向回転させた場合の結果 ((a) $\phi 1.6$ mm) を併せて示している。コンデンサ容量 $10 \mu\text{F}$ の堆積速度は、一方向回転と同様小さいことがわかる。コンデンサ容量 $40 \mu\text{F}$ および $100 \mu\text{F}$ を用いた堆積速度には大きな違いはなかった。Fig. 13 に、回転回動を用いた Fig. 12 (a)' の堆積断面を示す。堆積断面から、堆積量が小さいことがうかがえる。

Fig. 14 に、光学顕微鏡を用いて観察された(a)一方向回転および(b)回転回動によって得られた改質表面を示す。回転回動によって得られた表面は、一方向回転によって得られた表面より良好であることが分かる。

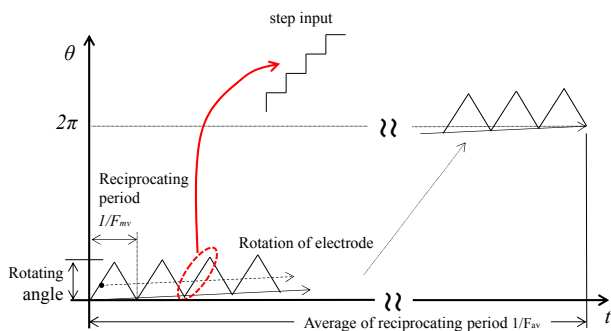


Fig. 11 Reciprocating rotation method.

Table 3 Reciprocating rotation conditions.

Rotating angle	CW	36°
	CCW	35.64°
Angular difference	CW-CCW	0.36°
Reciprocating rotation		600 min^{-1}
Rotation of electrode		3 min^{-1}

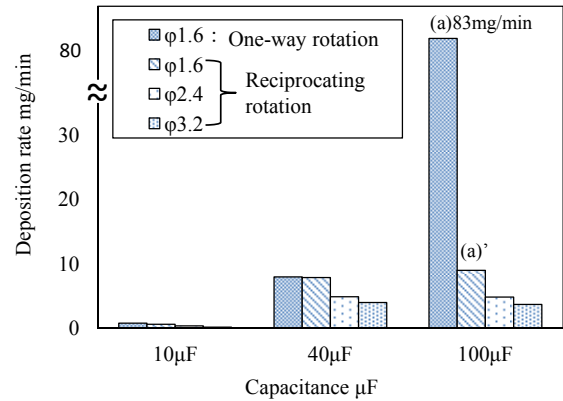


Fig. 12 Relation between capacitance and deposition rate with reciprocating rotation.

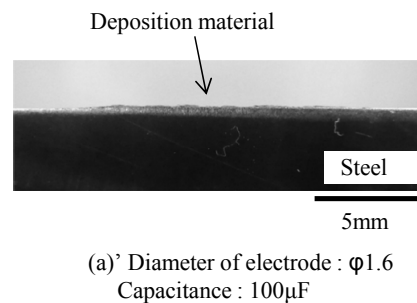


Fig. 13 Cross section of deposition layer with reciprocating rotation.

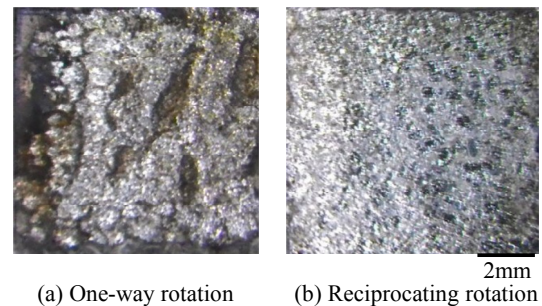


Fig. 14 Optical photomicrograph

3.3 堆積層の断面観察

堆積物表面から $20 \mu\text{m}$ 鏡面研磨し、その表面観察結果 (SEM 像) を Fig. 15 に示す。堆積に用いた条件は、電極直径 $\phi 1.6$ mm, コンデンサ容量 $100 \mu\text{F}$ である。(a)一方向回転によって得られた堆積表面には、多数の巣と見られる空隙が観察される。また、放電痕の形にそった巣の形成が確認できる。一方、(b)回転回動によって得られた表面に巣はほとんど観察されなかった。そのため、回転回動を用いた堆積加工では、巣など欠陥の少ない表面を得られるため、一方向回転を用いた堆積面より材料特性が優れていると考えられる。

Fig. 16 に、堆積層の断面に対する SEM 像および EDS 分析 (エネルギー分散型 X 線分光法) 結果を示す。(a)SEM 像からは、堆積断面の境界は明瞭ではないが、Fig. 16 (b)Ni

成分および(c)Fe 成分から、表面にニッケルが堆積されていることが確認できる。堆積されたニッケル層の厚さは、EDS 分析から約 30 μm である。また、被加工物 Fe と堆積層 Ni は強固に密着していることが予想される。これらの事実は、溶融点近傍にある材料の攪拌効果も予想される⁽⁹⁾。

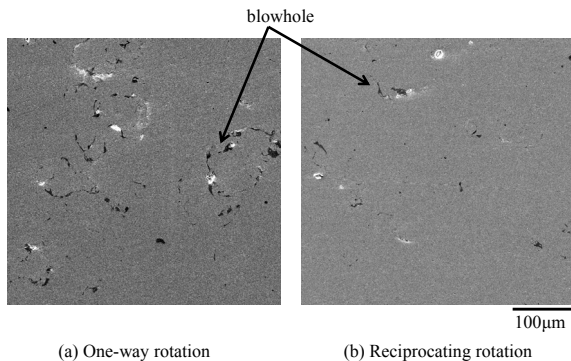


Fig. 15 SEM photos of inner surface of workpiece.

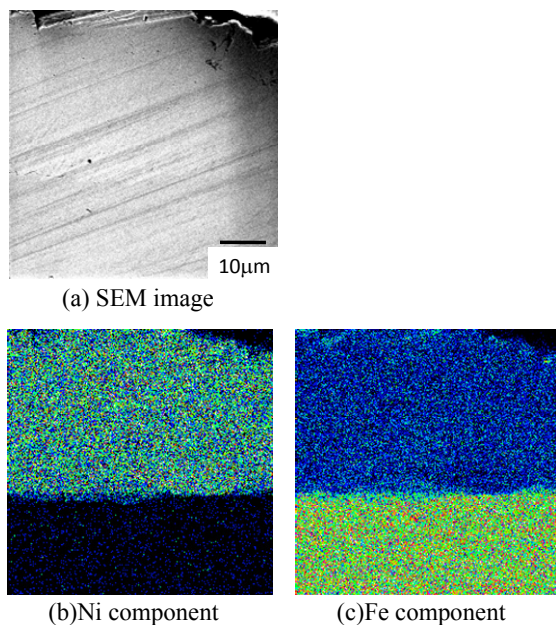


Fig. 16 SEM observation of cross section of de-position layer and analysis of Ni and Fe components.

4. 結言

本研究では、気中放電を用いた表面改質法による、新たな電極の制御方法を提案した。従来型の一方向回転および回転回動方法を用いた堆積特性を調査し、以下に結果を要約する。

- (1) 一方向回転電極を用いた場合、堆積速度はコンデンサ容量と電極直径に大きく依存する。コンデンサ容量 100 μF 、電極直径(a) $\phi 1.6 \text{ mm}$ を用いた場合、堆積速度は最大となった。
- (2) 一方向回転電極を用いた場合、特定の部分に堆積され易い傾向がある。さらに、この部分に堆積が進行するため、突起がより高く成形される。

- (3) 鏡面研磨加工後の堆積層表面を観察した結果、一方向回転によって得られた堆積表面は、多数の巣が確認された。一方、回転回動によって得られた堆積表面には、巣はほとんど認められなかった。
- (4) 堆積断面を EDS 分析した結果、被加工物 Fe に対して堆積層 Ni が強固に密着していることが予想される。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人天田財団の平成 27 年度一般研究開発助成 (AF-2015041) を受けて行われた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 毛利尚武, 齋藤長男: 表面改質放電加工, 精密工学会誌, 64, 12(1998)pp1715-1718.
- (2) 毛呂俊夫, 後藤昭弘, 毛利尚武, 齋藤長男, 松川公映, 三宅英孝: TiC 焼結体電極による放電表面改質膜の研究, 精密工学会誌, 67, 1(2001)pp114-119.
- (3) 落合宏行, 渡邊光敏, 荒井幹也, 吉澤廣喜, 齋藤吉之: 放電を利用した革新的なコーティングおよび肉盛技術 MSCoation の開発, 石川島播磨技報, 45, 2(2005)pp72-79.
- (4) 後藤昭弘, 湯澤隆: 最近の放電加工技術の開発, 電気加工技術, Vol. 37, No. 116 (2013) pp9-18.
- (5) 古川直治, 林忠夫: 定電位電解法による銅-ニッケルクロムメッキの耐食性の評価, 材料, 17, 179(1968)pp743-748.
- (6) 桑原吉英, 齋治男, 谷貴幸, 後藤啓光, 毛利尚武, 齋藤長男: 気中放電堆積加工における短絡の影響, 2008 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (2008) pp653-654.
- (7) 谷貴幸, 後藤啓光, 桑原吉英, 毛利尚武, 齋治男: 気中走査放電加工による表面改質, 電気加工学会全国大会(2008)講演論文集, pp79-80.
- (8) Takayuki Tani, Hiromitsu Gotoh, Yoshihide Kuwabara, Shoju Aoshima, Atsutoshi Hirao, Naotake Mohri: Surface Modification Using Electrical Discharge in Air Gap, Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEMX VI) (2010)pp159-162.
- (9) 岡村久宣, 青田欣也, 高井英夫, 江角昌邦: 摩擦攪拌接合 (FSW) の開発状況と適用上の課題, 溶接学会誌, 72, 5(2003), pp436-444.