

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05734

研究課題名(和文) パルス放電を利用した、金属表面への絶縁性機能材料の高強度付与技術の研究

研究課題名(英文) Study on high strength imparting technology of insulating functional material to metal surface using pulsed discharge

研究代表者

後藤 昭弘 (GOTO, AKIHIRO)

静岡理科大学・理工学部・教授

研究者番号：00711558

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：絶縁材料をパルス放電により相手材料である部品表面に移動させるための電極の製造技術を開発し、電極材料移動試験を実施した。パルス放電を利用して、絶縁材料を工作物へ移動させるために、低沸点材料であるZn(亜鉛)をバインダー兼搬送媒体とした。電極・工作物間に放電を発生させ、絶縁材料を工作物へ搬送させた。Znを微細化することで、小さなエネルギーの放電パルスでも、電極材料を熔融させ、工作物表面に付着させることができた。工作物への付着物中のZnの割合は、約1%程度と少なくすることができた。機能性絶縁材料の例として、発光材料を工作物表面に付着させることに成功し、発光試験も実施した。

研究成果の概要(英文)：We developed electrode manufacturing technology to move the insulating material to the workpiece surface by pulsed discharge and carried out the electrode material movement test. Zn (zinc) which is a low boiling point material was used as a binder and carrier medium in order to move the insulating material to the workpiece. Discharge was generated between the electrode and the workpiece, and the insulating material was transported to the workpiece. By miniaturizing Zn, it was possible to melt the electrode material and adhere it to the surface of the workpiece even with a discharge pulse of small energy. The ratio of Zn in the deposit on the workpiece could be reduced to about 1%. As an example of a functional insulating material, a luminescent material was successfully deposited on the workpiece surface, and a luminescence test was also conducted.

研究分野：機械工学

キーワード：放電加工 表面処理 パルス 絶縁材料 亜鉛

### 1. 研究開始当初の背景

各種部品の表面に様々な機能を持たせ、付加価値を上げる試みは多くなされている。例えば、部品の表面に微細な溝を加工することで摩擦を制御する機能を持たせることを目指した研究がある。このように部品表面を高機能化することで、部品の機能、価値を上げるとは今後益々重要な技術になると考えられる。

本研究では、金属材料の表面に機能を持つ材料を入れ込むことで様々な機能を発揮させることを狙った。しかも剥離脱落がないように強固に入れ込むことを目指した。一方、本研究代表者らの研究で、パルス状の放電を利用して導電性の材料を金属材料に入れ込む技術を獲得しており、金型の長寿命化や航空機エンジンのタービン翼製造等の用途に使用されている(以下、放電表面処理と呼ぶ)。

### 2. 研究の目的

「放電表面処理」の概略は以下の通りである。導電性の金属やセラミックスの粉末を圧縮成形して加熱し、仮焼結状態の圧粉体を作る。この圧粉体を電極とし、皮膜を形成する部品(工作物)との間に電圧を印加してパルス状の放電を繰り返し発生させる。放電が発生した点は局部的に極めて高温になるため電極材料が熔融気化し、その爆発力で電極材料が部品側に運ばれ、熔融した部品材料と強固に溶融し合い、密着力の強い皮膜を形成する。皮膜を形成する材料としては、金属の他、TiC、WC等の導電性のセラミックス材料が挙げられる。放電が発生した部分のみに皮膜が形成されるので、部分的に皮膜を形成したい場合でもマスク処理が不要である。以上のように独特性を持つ技術であるが、大きな欠点として、絶縁材料に適用できないことがある。一方で、様々な機能を発揮させる材料の中には絶縁材料も多い。材料を強固に金属に入れ込むことができる放電表面処理の特長を生かし、その用途を絶縁材料にまで広げることで、より広範な部品に様々な機能を付与することを可能とすることが、本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

(1) 電極製造技術：絶縁材料をパルス放電を利用して相手材料へ移行させるために、低沸点材料であるZn(亜鉛)をバインダー兼搬送媒体とすることを検討する。Znにより絶縁材料に導電性を付与し放電を発生させ、絶縁材料を工作物へ搬送させる。工作物上に付着した絶縁材料の中に不純物が残らないようにしたいため、バインダーとして低沸点材料を使用する。

(2) Znにより導電性を確保した電極を用いて、放電試験を実施する。基礎的な実験を実施するため、パルス状の放電を繰り返し発生させることができる装置を使用する。放電により、電極中の絶縁材料が相手工作物に移行する

こと、また、Znが相手材料に付着しないこと、あるいは、付着した場合にはその量を調べる。(3) パルス放電の条件により、絶縁材料が工作物へ運ばれる量、Znが工作物へ運ばれる量、Znが蒸発する量、工作物の溶融の仕方、絶縁材料と工作物の密着の仕方、等が決まる。絶縁材料を効率的に、しかも、密着力強く工作物に入れ込み、さらには、Znを工作物に残さないような条件を検討する。

(4) 生成された皮膜の評価を行う。材料の密着強度、面粗さ等の基本的な評価に加え、工作物に入れ込みたい絶縁材料がどのような状態で工作物に付着しているかを調べる。また、機能性材料が付着することを確認する。(5) 皮膜中のZnを極力少なくするための方法を検討する。

### 4. 研究成果

(1) まず、従来不可能だった絶縁材料を付着させることを目指した。絶縁材料をパルス放電により相手材料である部品表面に移動させるための電極の製造技術を開発し、電極材料移動試験を実施した。パルス放電を利用して、絶縁材料を工作物へ移動させるために、低沸点材料であるZn(亜鉛)をバインダー兼搬送媒体とすることを検討した。工作物上に付着した絶縁材料の中に不純物が残らないようにすることを狙い、低沸点材料であるZnをバインダーとした(図1)。絶縁材料とZnとを混合した粉末を圧縮成形し、その後加熱処理して電極とした。電極・工作物間に放電を発生させ、絶縁材料を工作物へ搬送させた。その結果、電極の加熱温度が高い方が、皮膜中の絶縁材料と比べたZnの割合が少ないことがわかった。これは、電極の加熱温度が高くなると、Znの結合強度が高まり、電極が崩れにくくなり、放電の熱が電極のより狭い部分に集中することになりZnを蒸発させやすくなるためであると推測できる。また、放電パルスのエネルギーが大きいほど、Znの割合が少ないこともわかった。以上の結果から、Znを皮膜中になるべく残さず絶縁材料を強固に工作物に付着させるためには、電極中のZnを電極に導電性が良好に得られる範囲でZnの量を減らし、電極を適度に強固に作り、

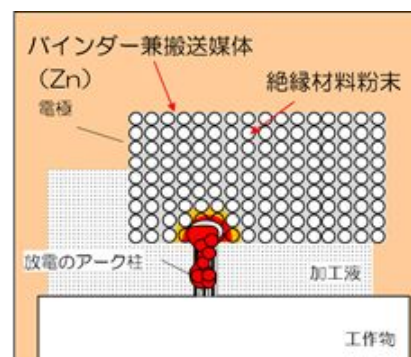


図1 絶縁材料搬送の手法

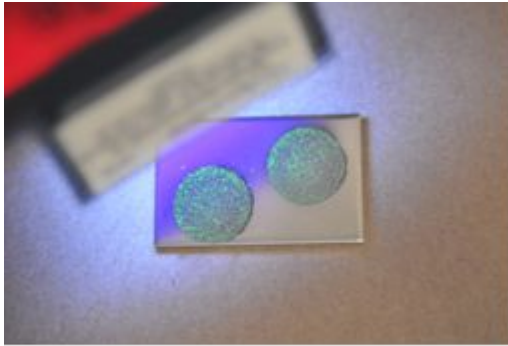


図2 傾向材料の膜形成

放電の際には、電極の狭い部分に熱が集中するような電気条件を選ぶことが必要であると考えられる。

そこで次に、少ない Zn 量で導電性のある強固な電極を製作する方法を検討した。絶縁材料と Zn 粉末を混合し、気体雰囲気中で加熱することで、Zn 粉末からウィスカが伸び、それが接触しあうことで電極に導電性が付与されることがわかった。また、Zn 粉末に比べて粒径の大きい絶縁材料を用いることで、少ない Zn の割合でも電極に導電性を付与し易いことがわかった。これにより、電極成分である絶縁材料をこれまでよりも強固に付着させることができた。さらに、電極の結合強度の評価方法として、電極の電気抵抗を測定する方法を検討し、絶縁材料が主成分の電極においても、電気抵抗で電極の強度を評価できることを示した。

(2)機能性絶縁材料の例として、発光材料を工作物表面に付着させることに成功し、発光試験も実施した。本研究の方法により金属表面に付着させた発光材料が発光することを確認した(図2)。これは、当初心配していた、機能性絶縁材料が放電の熱により分解してしまい、機能性の表面を作れないのではないかと懸念を払拭する成果である。

(3)初めの計画では、放電電流波形を変化させてその影響を調べ、最適な電流波形を見つける計画であったが、電流波形を変化させても皮膜から Zn をなくすことができなかったため、皮膜として付着している電極成分である機能性の絶縁材料がどのように工作物表面に付着しているかを調査することと、機能性絶縁材料である発光材料を本方法で付着させる技術の試行を優先した。(電極材料が工作物表面に付着した)皮膜中にバインダー兼搬送媒体である Zn が残存しているということは、工作物に強固に付着させたい絶縁材料が、Zn に混ざって移動しているだけで強固に付着していない懸念がある。そこで、EPMA(電子線マイクロアナライザ)による元素マッピングとカソードルミネッセンス像を利用して絶縁材料の付着の様子を観察した。絶縁材料としては、発光材料である Eu(ユーロピウム)をドープした SiAlON(サイアロン)を用いた。放電による皮膜形成直後の様子と、

処理後に工作物表面の Zn を希塩酸で除去した状態の様子とを観察したところ、Zn を除去しても、SiAlON の付着量はほぼ変わらず、SiAlON が Zn に混ざって移動しているだけではなく、直接工作物に付着していることが明らかとなった。

(4)機能性絶縁材料の付着の試みとして、蛍光材料と本技術の相性について検討した。その結果、比較的低融点の蛍光材料である  $Zn_2SiO_4:Mn^{2+}$  を用いた場合には、発光が確認できなかったが、高融点材料である Eu をドープした SiAlON を用いた場合には、発光を確認できた。

(5)低沸点材料である Zn(亜鉛)をバインダー兼搬送媒体とした理由は、放電の熱により、低沸点材料である Zn が蒸発し、絶縁材料のみが付着することを狙ったためである。ところが、絶縁材料を工作物に移動させることはできたが、付着物中に大量の Zn も残っていた。付着物中の Zn の割合を減らすために、様々な方法を試みたが、最終的には、電極の成分として混入する Zn を微細化し、均等に分散させるために、遊星ボールミルを使用することが有効であることがわかった。これまで、重量比で Zn:絶縁材料=8:2 程度の Zn を混合する必要があったが、新しい方法では、3:7 程度でも良好な導電性を得られることがわかった。また、Zn が微細化され、全体に均等に分散できるようになった(図3)。また、粉碎時間を4時間程度以上になると、急激に電極の抵抗値が下がることがわかった。

試作した電極を用いて、放電による電極材料の付着試験を実施した。Zn が微細化されているため、小さなエネルギーの放電パルスでも、電極材料を溶融させ、工作物表面に付着させることができた。工作物への付着物中の Zn の割合は、約 1%程度と大幅に低減することができた。これは、Zn を微細化することで、放電の熱により、これまでよりも容易に蒸発するようになったためであると考えている。

以上のように、パルス放電を用いて、絶縁性の材料を工作物表面に付着させる技術の基本的な部分を確立することができた。

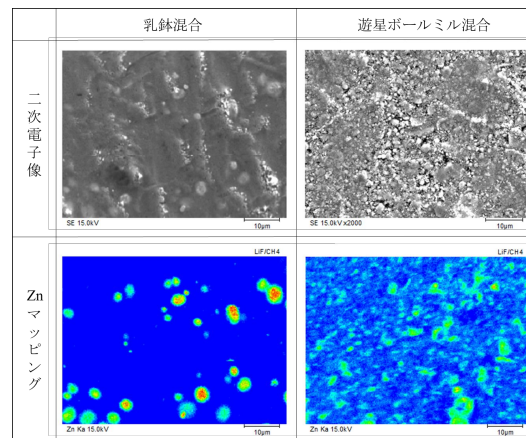


図3 混合方法の違いによる電極の差

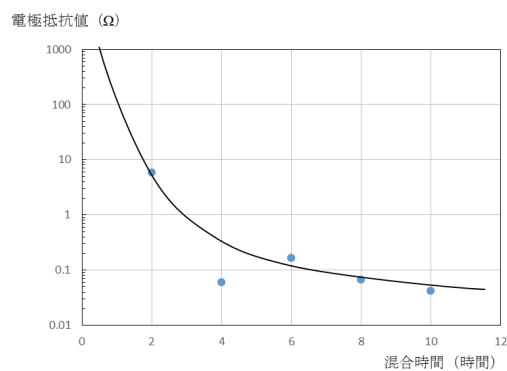


図4 粉碎混合時間と電極抵抗値との関係

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

Makoto Hattori, Yuya Suzuki, Akihiro Goto, Minoru Dohi : Preparation of Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>:Mn<sup>2+</sup> films by electrical discharge pulse method, Phys. Status Solidi C 14, No. 6, 1600179(2017) , 査読有

後藤昭弘, 土肥稔, 藤原弘 : パルス放電による絶縁材料移送の研究, 電気加工学会誌, Vol.52, No.130(2018), 査読有

吉田昌史, 鈴木佑亮, 奥田凌, 後藤昭弘 : 液中放電による窒化物の合成, 電気加工技術, Vol.39, No.123, (2015)1-5, 査読無

森亮太, 鈴木優弥, 平野貴之, 後藤昭弘, 吉田昌史, 土肥稔 : パルス放電による絶縁材料付着の研究 - 電極への導電性付与 -, 電気加工技術, Vol.39, No.123, (2015)12-18, 査読無

後藤昭弘 : 放電加工の技術を用いた表面処理技術, 型技術, 2017年3月臨時増刊号, 1冊でまるわかり! 放電加工技術の最前線 2017, (2017)022-025, 査読無

〔学会発表〕(計9件)

Minoru Dohi, Makoto Hattori, Hidehito Takahashi, Masahiro Matsushita, Kouhei Kondou, Mamoru Sugita, Seiya Yamanaka and Akihiro Goto : Preparation of SiAlON phosphor films by electrical discharge pulse method, 20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-20), 2016.9.6.

Makoto Hattori, Yuya Suzuki, Akihiro Goto, Minoru Dohi : Preparation of Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>:Mn<sup>2+</sup> films by electrical discharge pulse method, 20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds

(ICTMC-20), 2016.9.8

鈴木優弥, 森亮太, 平野貴之, 後藤昭弘, 吉田昌史, 土肥稔 : パルス放電による絶縁材料移送の研究 - 電極への導電性付与の方法 -, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2015)3-4

吉田昌史, 鈴木亮介, 奥田凌, 後藤昭弘 : 液体窒素中放電によるアルミニウム表面への窒化アルミニウム皮膜の生成, 日本金属学会 2015 年秋季講演大会, (2015)

松下真大, 鈴木優弥, 平野貴之, 後藤昭弘, 吉田昌史, 土肥稔 : パルス放電による絶縁材料移送の研究 - 電極の構造 -, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2016)

高橋秀仁, 松下真大, 後藤昭弘, 土肥稔 : パルス放電による発光材料付着の研究, 電気加工学会全国大会 2016 講演論文集, (2016)5-6

服部誠, 鈴木優弥, 後藤昭弘, 土肥稔 : パルス放電を利用した Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>:Mn<sup>2+</sup> 蛍光体薄膜の作製, 応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会, (2016.12.9)

高橋秀仁, 後藤昭弘, 土肥稔 : パルス放電による発光材料付着の研究 - 発光材料付着の様子の観察 -, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2017)

岡本真那斗, 水島永雅, 後藤昭弘, 藤原弘, 土肥稔 : パルス放電による絶縁材料移送の研究 - 被膜中の Zn 低減の方法 -, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2018)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sist.ac.jp/me/goto/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

後藤 昭弘 (GOTO, Akihiro)

静岡理科大学・理工学部機械工学科・教授

研究者番号：00711558

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

土肥 稔 (DOHI, Minoru)

静岡理科大学・理工学部電気電子工学科・教授

研究者番号：80247577

吉田 昌史 (YOSHIDA, Masashi)  
大同大学・工学部機械システム工学科・准  
教授

研究者番号：40460612

(4)研究協力者

なし