

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：55502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04944

研究課題名（和文）大気圧プラズマを応用した多層塗装における対象界面で剥離させ易くする手法の提案

研究課題名（英文）Proposal of a Method to Easily Peel at the Target Interface in Multi-layer Painting Applying Atmospheric Pressure Plasma

研究代表者

中村 翼（Nakamura, Tsubasa）

大島商船高等専門学校・電子機械工学科・准教授

研究者番号：10390501

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：船舶塗装のような多層塗装において、再塗装の工程を考慮すると任意界面での剥離が望まれる。そこで本研究は、本システムを産業応用するための課題解決を目的として実施した。3軸ロゼットゲージを用いた塗装内部応力の測定および解析シミュレーションによって、塗装が剥離し易くなるメカニズムを解明した。次に多層塗装における任意界面での剥離においては、任意界面で剥離させ易くする可能性を示すことができた。また産業応用した際の生産性に関する課題解決として、12Vの直流電源を入力とするZero Voltage Switching電源回路を設計・製作した。これにより、大容量モバイルバッテリーによる電源確保が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

産業応用した際の生産性を解決し、プラズマを応用した新たな塗装剥離手法を提案・実用化された際には、従来の塗装剥離に用いられているサンドブラスト法による船舶母材（鋼板）の減肉を防ぐことができ、また再塗装の際の凹凸も少なくすることができる。これにより、船舶表面を可能な限り平滑化することができ、船舶の航行時の推進抵抗を少なくすることができる。併せて、国連の17の持続可能な開発目標（SDGs）である、(7) エネルギー効率の改善率向上、ならびに(14) 海洋・海洋資源の保全の一助となる。

研究成果の概要（英文）：In multi-layer painting such as ship painting, peeling at optional interface is desirable in consideration of the repainting process. Therefore, this research was carried out with the goal of solving problems for the industrial application of this system. The mechanism that makes the paint easy to peel off was elucidated by measuring the internal stress of the paint using a 3-axis rosette gauge and by analytical simulation. No significant results were obtained for paint peel at optional interfaces in multi-layer painting. However, we were able to show the possibility of easily peeling at arbitrary interfaces by adjusting the atmospheric pressure plasma irradiation parameters. Finally, a Zero Voltage Switching (ZVS) power supply circuit with a 12 V DC power supply as input developed for solve productivity issues in industrial applications. This enabled power supply to be secured by a large-capacity mobile battery.

研究分野：プラズマ応用

キーワード：大気圧プラズマ ストリーマ 任意界面での塗装剥離 熱応力 残留応力 ZVS電源回路

## 1. 研究開始当初の背景

船舶における塗装は、船舶外観を良好に保つだけでなく、水棲生物の付着を防ぐ目的もあり、何層もの塗装が施されている。この多層塗装を剥離させるために、現状ではサンドブラスト法により剥離させている。しかし剥離の際に、船舶母材となる鋼板の減肉による強度低下や、塗装後の凹凸による推進効率への影響等が懸念される。そこで先行研究として、研究代表者は大気圧プラズマによる塗装剥離の基礎研究を行ってきた[1, 2]。

本研究で採用している大気圧下で生成するプラズマ(以下、プラズマと略)は、図1に示すように、その基本構造は誘電体と電極から成り、非常にシンプルな構成となっていることから、産業界への幅広い応用が期待される。

これまでの成果として、塗装表面に大気圧プラズマを照射することで、その塗装が剥離し易くなることを確認し、その原因を考察した。しかしながら、実用化に向けた課題がいくつか挙げられた。そこで本研究課題では、本システムを産業応用するための課題を解決していくことを目的とし、本課題を展開していく。

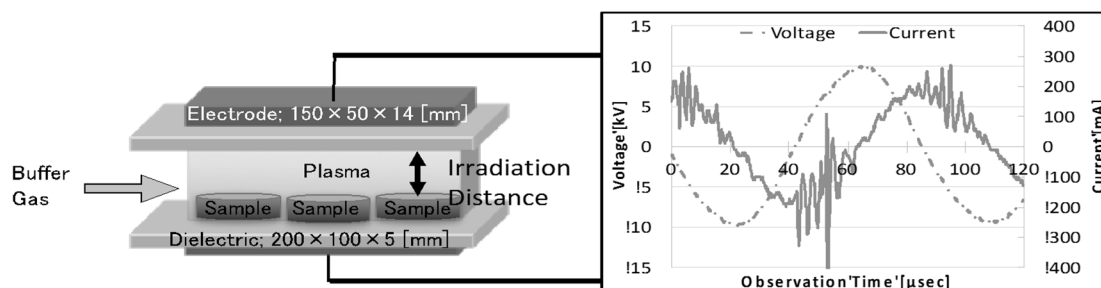


図1. 誘電体バリア放電の基本構造と先行研究で印加している電圧・電流波形例

## 2. 研究の目的

これまでの成果として、印加電圧や照射距離等をパラメータとし、発生させたプラズマを塗装した表面に照射する事で、その塗装の付着力を向上させる事や塗装内部の凝集力が起因して剥離し易くなることがわかった。しかし複数の要因が同時に生じており、剥離メカニズムの解明には至っていない。また本システムを産業応用した際の処理効率等も懸念された。

船舶塗装のような多層塗装物において、対象となる界面で剥離させ易くする手法を提案する場合、同様の効果が得られる他の簡易的な方法と比較した客観的な評価が必要となる。この客観的な評価から、本システムの有用性を確認することができる。そのためにはプラズマを塗装表面に照射する事で、その塗装が剥離し易くなるメカニズムを解明する事は極めて重要である。

また本システムの産業応用を視野に入れると、大面積に対する処理効率や、屋内外を問わず持ち運びが可能で安全な高電圧電源の製作など、生産性も懸念された。産業応用した際の生産性を解決し、プラズマを応用した新たな塗装剥離手法を提案・実用化された際には、従来の塗装剥離に用いられているサンドブラスト法による船舶母材(鋼板)の減肉を防ぐことができ、また再塗装の際の凹凸も少なくすることができる。これにより、船舶表面を可能な限り平滑化することができ、船舶の航行時の推進抵抗を少なくすることができる。併せて、国連の17の持続可能な開発目標(SDGs)である、(7) エネルギー効率の改善率向上、ならびに(14) 海洋・海洋資源の保全の一助となる。

したがって、これらの課題を解決するため、本研究課題の目的は次の2項目である。

1. 塗装が剥離し易くなるメカニズムを解明して、本システムの有用性を検証
2. 本システムを産業応用した際の生産性に対する課題を解決

## 3. 研究の方法

(1) 塗装が剥離し易くなるメカニズムを解明して、本システムの有用性を検証

一般的に塗膜の剥離現象に影響を及ぼす支配的な要因は、温度変化に起因する塗膜の熱膨張・熱収縮とされている[3,4]。そこで、ANSYS Mechanical APDL 1.9を用いて、塗装表面に熱源(ストリーマ)が生成された際の簡易的なシミュレーションを行い、発生する最大主応力を確認する。

このシミュレーションモデルを図2に示す。モデルに使用したアクリル、ニトロセルロース系の塗料の各物理的・機械的特性として、ヤング率、ポアソン比、熱膨張係数をそれぞれ、3.2 GPa, 5.0 GPa, 0.38, 0.38,  $7.00 \times 10^{-5} / K$ ,  $1.00 \times 10^{-4} / K$ とした。ストリーマ部分となるスポットの直径を約0.6 mmと仮定し、その部分に30°C, 40°C, 50°Cの温度入力を加えてシミュレーションを行う。

次に塗膜の内部応力測定法[5]を参考に塗装表面にプラズマが照射された際の内部応力を測定する。この実験概要としては、3軸口ゼットひずみゲージ(KFRPB-5-120-D22-9 L1M2S)を厚さ0.1 mmの黄銅に貼り付け、その裏

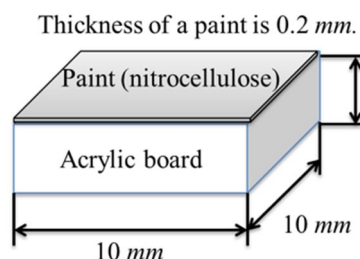


図2. シミュレーションモデル

面から塗装し塗装面にプラズマを照射後、得られたひずみから塗膜の内部応力[6]を算出する。

(2) 多層塗装における任意界面での剥離

これまでの成果を踏まえ、プラズマ照射時のパラメータを調整することで、塗装の付着・剥離性を調整でき、多層塗装における対象となる界面での剥離が容易となる手法を提案できると考えた。これまでの研究成果の一例を図3に示す。これは塗装した表面にプラズマを照射した時、塗装の剥離に要した荷重と、塗装と素地界面の剥離率を表した結果である。一般的に付着力の弱い部分で剥離することを念頭に、塗装を剥離させる必要な荷重に着目するとプラズマ照射時の印加電圧によって、剥離に必要な荷重も増減し、剥離し易くもなるし、剥離し難しくもなる。

そこでプラズマ照射時のパラメータを調整することで、塗装の付着・剥離性を調整でき、多層塗装における対象界面での剥離が容易となる手法[7]を提案した。

船舶の母材と同じ鋼材(φ20 mm)を使用し、その表面に2層の塗装(1層目を青色, 2層目を白色)を施す。それぞれの塗装表面に対し、プラズマを照射する。主な実験パラメータを表1に示す。1層目の塗装(青色)には付着性を向上させるパラメータでプラズマを照射し、2層目(白色)は剥離率が良いパラメータを採用した。なお塗料と素地の付着性を評価するため、JIS K-5600-5-7(プルオフ法)に則って試験アセンブリを製作した後、引っ張り試験(AY-300S ; (株)東京試験機)を行った。その後、素地と塗料の界面で剥離した部分を剥離率と定義し、簡易的な画像処理を施し、その割合を算出した。

(3) 本システムを産業応用した際の生産性に対する課題を解決

産業応用するにあたり、12 Vの直流電源からZVS(Zero Voltage Switching)による電源回路を設計・製作する。ZVSとはソフトスイッチング方式ともいい、LC共振回路の電圧が0Vの時にIGBTのスイッチングが行われることを示す。そのため、原理的には電圧及び電流の過渡交差が起らず、スイッチング時の損失がなく動作を行えるメリットがある。そのため、高速でスイッチングを行うパルスパワー技術において導入が注目されている。これにより、屋外で大気圧プラズマを照射する際に、コードリールを引いて交流電源を確保する必要がなくなり、大容量モバイルバッテリーによる電源確保が可能となる。IGBT(IXYS, IXGH32N170)を用いたZVS電源回路図を図4に示す。

回路図を用いてZVS電源回路の動作原理について説明する。まず、 $V_{cc}$ から電圧が印加されると、IGBTの個体差によりいずれかのIGBTが先にターンオンし、変圧器の1次側自己インダクタンスと $C_1$ からなるLC共振回路に共振電流が流れる。IGBT<sub>1</sub>が先にターンオンした場合、IGBT<sub>1</sub>のコレクタ・エミッタ間が導通になり、 $D_1$ のアノード側よりカソード側の電位が低くなるため、 $D_1$ がターンオンする。 $D_2$ は、カソード側の電位が高いため、ターンオフとなる。共振によって $V_{C1}$ が変化するため、 $D_2$ のカソード側の電位が変化し、電位がアノード側より低くなった時、 $D_2$ はターンオンし、IGBT<sub>1</sub>のゲート電圧が0VになることでIGBT<sub>1</sub>がターンオフする。IGBT<sub>1</sub>がターンオフすると、IGBT<sub>1</sub>のドレイン・ソース間が導通でなくなり、 $D_1$ のカソード側の電位が共振によって上昇し、 $D_1$ がターンオフする。 $D_1$ がターンオフすることで、IGBT<sub>2</sub>にベース電圧が発生し、IGBT<sub>2</sub>がターンオンする。これを繰り返すことでLC共振が維持される。一次側にLC共振回路の電圧が出力され、その電圧が変圧器により昇圧されることによって、2次側には巻数に応じた出力電圧が発生し、出力側に交流電圧が発生する仕組みになっている。

表1. 主な実験パラメータ

Applied Voltage [kV]	6 (1st layer) 10 (2nd layer)
frequency[kHz]	10
Buffer gas	helium
gas flow [L/min]	10 (1st layer) 7.5 (2nd layer)
Irradiation distance	20
irradiation time [sec]	10, 30, 60

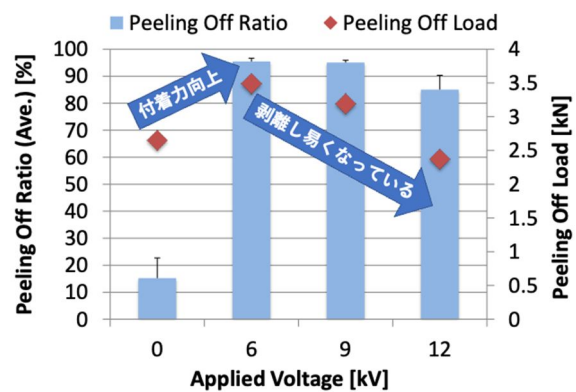


図3. 剥離荷重と剥離率の関係(一例)  
(プラズマ照射距離 10 mm 時)

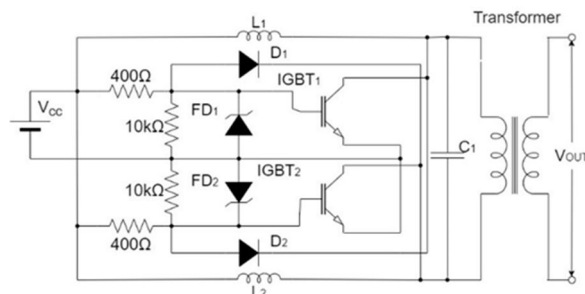


図4. ZVS 電源回路

#### 4. 研究成果

##### (1) 塗装が剥離し易くなるメカニズムを解明して、本システムの有用性を検証

解析結果の一例として、ストリーマ部分となるスポット(φ約 0.6 mm)を熱源として、そこに 40 °C 入力した時の結果を図 5 に示す。結果から、一部分に最大主応力が発生しており、その値は最大約 11.9 MPa の応力が発生していることが分かった。また、これまでの剥離実験の結果から、剥離に必要な荷重は 1.78 ~ 3 kN 必要ことが分かっている。一様に荷重がかかっていると仮定して、応力に換算すると約 5.7 ~ 9.6 MPa となる。このことから、ストリーマが発生している箇所、その部分の熱入力 40 °C あれば、塗装が部分的に剥離するのに十分な主応力が生じている。

次に 3 軸口ゼットひずみゲージを用いた塗装の内部応力の変化について報告する。印加電圧の違いによる、プラズマ照射時間と内部応力の変化のグラフを図 6 に示す。この結果から、大気圧プラズマを塗装表面に照射することで、内部応力が増減していることが分かる。

一般に塗装が剥離する要因として、熱による膨張と冷却による収縮を繰り返すことが挙げられる[3, 4]。しかしグラフより、この増減は周期的な変化ではなく、ランダムに発生している。

この結果と図 5 に示したシミュレーション結果を踏まえ、塗装表面にプラズマを照射したことで、その塗装が剥離し易くなる要因を考察する。プラズマを塗装表面に照射したことによる熱エネルギーが起因して、熱応力が発生し内部応力が増加する。その後、材料の線(熱)膨張係数の違いにより、塗膜と母材界面の微小区間で剥離が生じた[8]ことで、塗膜と母材の界面での残留応力が解放される。この微小区間での剥離により、アクリルと塗膜界面での収縮応力が消失し、塗膜の内部応力が減少する。その後、別の個所において内部応力が増加する。これらの現象が繰り返されているため、塗膜の膨張と収縮がランダムに生じているような実験結果が得られた。

以上をまとめると、プラズマを照射したことによる熱エネルギーが起因して、塗膜内での架橋反応により、膨張または収縮が生じる。その後、材料の線(熱)膨張係数の違いにより、塗膜と母材界面の微小区間で剥離が生じたことで、残留応力が解放されることで収縮または膨張に転じる。この微小区間での剥離が生じたことで、塗装が剥離し易くなったと考えられる。

##### (2) 多層塗装における任意界面での剥離

多層塗装における剥離の状況を確認した実験結果の一例を図 7 に示す。この結果は一層目の塗装表面でのプラズマ照射時間を 60 秒に固定し、二層目の塗装表面に対してプラズマ照射時間を変化させたときの結果である。縦軸は剥離面の残留割合を表しており、素地をグレー、それ以外の色は各層における塗料の色を表している。一層目と二層目の界面での剥離を目標としているため、白色の割合が小さくなるほど、ターゲット界面での剥離が生じていることを表す。

この結果から、プラズマを照射していない時の二層目の残留割合が約 35% に対し、プラズマを照射することで二層目の残留割合が約 25% から 28% となっており一定の効果は得られている。特に、二層目へのプラズマ照射時間が 60 秒の時、素地も含めた残留割合を見ると、任意界面で剥離させるプラズマ照射の効果は得られ

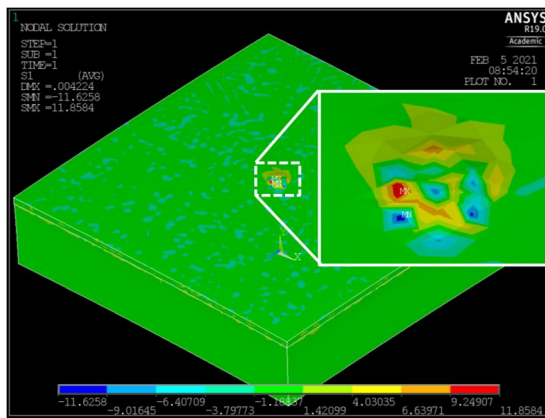


図 5. 熱膨張係数の違いによる解析結果の一例

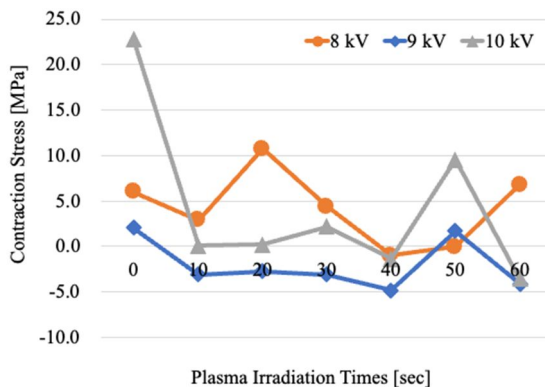


図 6. プラズマ照射時間による内部応力の変化

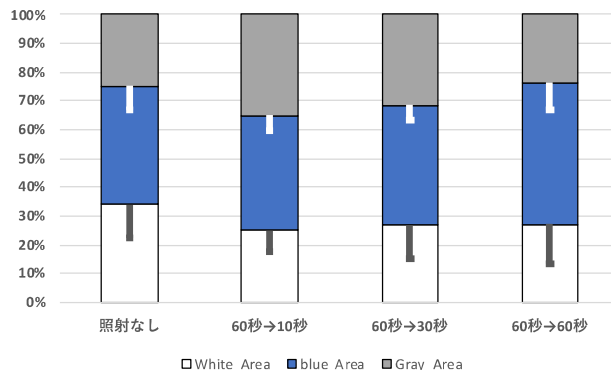


図 7. 多層表面でのプラズマ照射時間の違いによる剥離率の変化

ている。しかしながら、一定の効果に留まった。この理由としては、母材が鋼材ということもあり、プラズマが任意のヶ所に集中して照射したためだと考えられる。

顕著な成果は得られなかったが、多層塗装における任意界面での剥離について、プラズマ照射パラメータを調整することにより、任意界面で剥離させ易くする可能性を示すことができた。

### (3) 本システムを産業応用した際の生産性に対する課題を解決

図4に示す回路において、電源電圧  $V_{cc} = 12\text{ V}$ 、負荷抵抗  $170\text{ k}$  インダクタ  $L_1 = L_2 = 125\text{ mH}$ 、コンデンサ  $C_1 = 10\text{ }\mu\text{F}$  に設定した。このとき、変圧器の条件を (1) 変圧器 1 台、一次側 8 回巻き(図8) (2) 変圧器 2 台直列接続、一次側 8 回巻き(図9), (3) 変圧器 2 台並列接続、一次側 4 回巻きの 3 種類を用意した。この時の出力電圧波形を図10, 11に示す。変圧器 1 台の場合の最大電圧が  $9.8\text{ kV}$ 、変圧器 2 台直列接続の場合が  $4.9\text{ kV}$ 、変圧器 2 台並列接続の場合が  $2.4\text{ kV}$  と、変圧器 1 台の場合が最も電圧が高くなった。

図4の回路において、上記と同条件のもと、負荷抵抗を  $20\text{ k}$  から  $500\text{ k}$  まで可変し出力電圧を測定した。この時の出力電圧を図12に示す。抵抗値を上げるほど出力電圧が上昇していったが、 $200\text{ k}$  以上になると上昇率が低下し、 $400\text{ k}$  以上において  $11.5\text{ kV}$  で一定となった。

産業応用するにあたり、 $12\text{ V}$  の直流電源から ZVS (Zero Voltage Switching) による電源回路を設計・製作した。これにより、プラズマを発生させるのに必要な高電圧が確保でき、かつ屋外でプラズマを照射する際に、コードリールを引いて交流電源を確保する必要がなくなり、大容量モバイルバッテリーによる電源確保が可能となった。

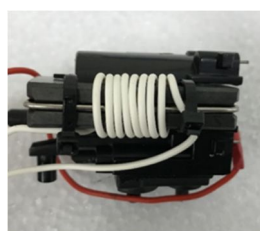


図 8. 変圧器 1 台  
(1 次側 8 回巻き)

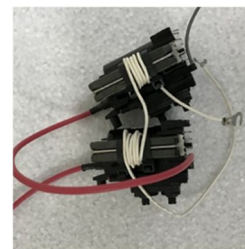


図 9. 変圧器 2 台直列  
(1 次側 8 回巻き)

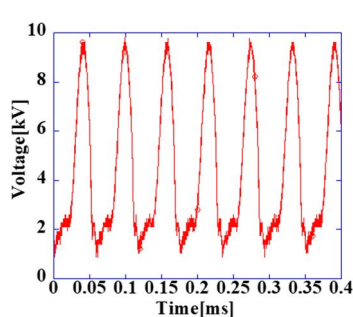


図 10. 変圧器 1 台  
(1 次側 8 回巻き)

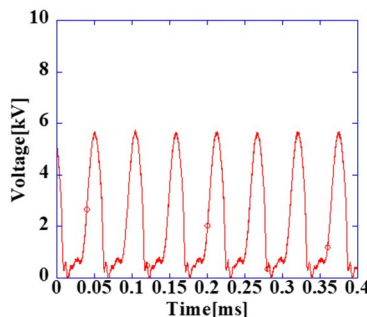


図 11. 変圧器 2 台直列接続  
(1 次側 8 回巻き)

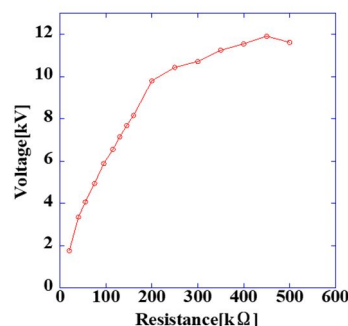


図 12. 負荷変更による  
出力電圧の変化

### <引用文献>

- [1] Tsubasa Nakamura et al., Basic Study of the Peeling Off of Paint Using Irradiation by Atmospheric Pressure Plasma, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, pp.3135-3139, 2016.12 ( 査読有り )
- [2] Tsubasa Nakamura et al., Influence of Atmospheric-Pressure Plasma on the Peeling of Paint, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, pp.1051-1056, 2019.2 ( 査読有り )
- [3] 清水悠平, 松本剛司, 宮下剛” 耐はく離性を向上させた防食塗料の開発”, DNT コーティング技報 No.19, p.3-12
- [4] 西森修次, 大捕秀基, 坂口聡彦, ”塗膜剥離を抑制する新型変性エポキシ樹脂の開発～線膨張係数に着目した塗料設計の今後の展望～”, 日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会第 22 回技術発表大会予稿集
- [5] 牛尼清治, 中根新一, 植木憲二, 塗膜の内部応力測定法(Measurement of the Inner-stress and Application of a Strain Meter), 262-267, 色材 44.6 (1971)
- [6] 小島陽之助, 井上幸彦, 引張荷重下の接着層における応力分布, 43-45, 工業化学雑誌 61.1 (1958)
- [7] Ryouhei Shimizu, Tsubasa Nakamura et al., Effect of Thermal Stress on Paint Peeling Caused by Atmospheric Plasma Irradiation, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE 49(1), pp.77-82, 2021.1 ( 査読有り )
- [8] Kaya Yoshihara, Tsubasa Nakamura, Takahisa Ueno, Ayumu Inagaki, Shinji Takeshita, Takao Ota, Toyohisa Asaji, Effect of Atmospheric Pressure Plasma Irradiation on the Interface between Paint and Base Material -Verification for application to paint peeling on ships-, the 12th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology, O18-6, Dec. 11 (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shimizu Ryohei, Nakamura Tsubasa, Sasaoka Hideki, Ota Takao, Asaji Toyohisa, Furuse Muneo	4. 巻 49
2. 論文標題 Effect of Thermal Stress on Paint Peeling Caused by Atmospheric Plasma Irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 77～82
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPS.2020.3041027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kaya YOSHIHARA, Yuki ABE, Syunsei TSUNEMORI, Masaya TSUBAKI, Tsubasa NAKAMURA, Kosei NOZAWA, Tomoki TSURUMIYA, Atsushi UCHIDA, Ayumu INAGAKI, Mitsuhiro TANIWAKI, Toyohisa ASAJI, Kazumasa TAKAHASHI, Toru SASAKI, Takashi KIKUCHI
2. 発表標題 Design and Production of Reactor for Atmospheric Pressure Plasma Generation Without use of Helium
3. 学会等名 The 6th International Conference on “Science of Technology Innovation”（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaya TSUBAKI, Yuki ABE, Syunsei TSUNEMORI, Kaya YOSHIHARA, Tsubasa NAKAMURA, Kosei NOZAWA, Tomoki TSURUMIYA, Atsushi UCHIDA, Ayumu INAGAKI, Toyohisa ASAJI, Kazumasa TAKAHASHI, Toru SASAKI, Takashi KIKUCHI
2. 発表標題 Plasma Generation and Diagnosis for Practical Application of Paint Peeling off System using Atmospheric Pressure Plasma
3. 学会等名 The 6th International Conference on “Science of Technology Innovation”（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaya Yoshihara, Tsubasa Nakamura, Takahisa Ueno, Ayumu Inagaki, Shinji Takeshita, Takao Ota, Toyohisa Asaji
2. 発表標題 Effect of Atmospheric Pressure Plasma Irradiation on the Interface between Paint and Base Material -Verification for application to paint peeling on ships-
3. 学会等名 the 12th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 結哉, 中村 翼, 上野 崇寿
2. 発表標題 大容量インパルス電源開発を目的としたZVS回路の評価
3. 学会等名 令和3年度(第12回) 電気学会九州支部高専研究講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土師 孝典, 中村 翼, 佐久川 貴志, 上野 崇寿
2. 発表標題 ZVS 型パルスパワー電源の開発
3. 学会等名 令和2年度(第11回) 電気学会九州支部高専研究講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	上野 崇寿  (Ueno Takahisa)  (30508867)	大分工業高等専門学校・電気電子工学科・准教授   (57501)	
研究 分担者	竹下 慎二  (Takeshita Shinji)  (30616800)	和歌山工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授   (54701)	
研究 分担者	稲垣 歩  (Inagaki Ayumu)  (50633400)	大分工業高等専門学校・機械工学科・准教授   (57501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	浅地 豊久  (Asaji Toyohisa)  (70574565)	新居浜工業高等専門学校・機械工学科・教授    (56301)	
研究分担者	太田 孝雄  (Ota Takao)  (80353267)	奈良工業高等専門学校・機械工学科・准教授    (54601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関