

小特集

高専におけるプラズマ・パルスパワーに関する
地域産業との連携Collaboration with Local Industries on Plasma and Pulsed Power
in National Institute of Technology

1. はじめに

1. Introduction

川崎 仁 晴

KAWASAKI Hiroharu

独立行政法人国立高等専門学校機構 佐世保工業高等専門学校

(原稿受付：2024年8月19日)

国立高等専門学校（高専）は1962年に設立され、全国に51校55キャンパス存在するが、組織としては1法人であるというユニークな教育機関であり、多くの「プラズマ」「パルスパワー」「放電」を専門とする研究者が教員として在籍している。設立当初から戦後の急激な工業化と高度経済成長を支える特徴的地場企業において、高度な能力を持つ即戦力技術者を育成する教育機関として期待され、その役割を果たしてきた。そのため、現在でも地域産業と密接な連携を保っており、多くの取組を行っている。この章では、本小特集の狙いと、現在行われている「プラズマ」「パルスパワー」「放電」を利用した高専と地域産業との共同研究に関して概要を述べる。

Keywords:

National Institute of Technology (KOSEN), plasma, pulse power, discharge, local industries

1.1 本小特集の概要

「奇跡」と呼ばれる戦後日本の高度成長は、質の良い工業製品を生み出す高い技術を持つ地域企業と、そこで就労する高い能力を持つ技術者によって支えられてきた。高専はそのような地域に根ざした「ものづくり」企業で、中心的な役割を担う「実践的即戦力若年技術者」を養成する理系教育機関として各地域に設置された。高校や大学とは異なる、高校生の年齢で早期に専門科目を導入したユニークな5年一環教育は、国際的に高く評価され、日本で最も成功した教育システムであるとしてOECD等で評価されている[1]。平成16年度には法人化され、日本全国に51校55キャンパスは1法人として存在する世界的にも稀な教育形態となった。

高専には法人化以前から「プラズマ」「パルスパワー」「放電」を専門とする研究者が教員として全国に散在し、地域企業と密接に関連しながら独自の共同研究を行ってきた。法人化によって、これらの教員および地域企業が結びつき、他の地域の企業や教員から新しい知見を得ることができる。さらに、

National Institute of Technology, Sasebo College Sasebo, NAGASAKI 857-1193, Japan

同じテーマを北海道から沖縄まで広域に広げることができ、これまでに大学や1つの企業ではなし得なかった新しい取り組みにつなげることができる。筆者はこれを目的として「放電プラズマネットワーク」を平成29年度に設立し、平成30年度にかけて、様々な共同研究を行った[2]。このネットワークは、新しく「パルスパワー」の研究者も加えて現在でもつながりを持っており、教員同士のつながりは保たれている。

本小特集では、このときのネットワークを活かし、現在行われている様々な地域企業との共同研究のうち、代表的な取り組みをいくつか述べる。第2章では、大分高専・上野先生の『高電圧インパルスによる殺虫に関する研究』を取り上げ、養鶏業におけるワクモ等に対する殺菌・殺虫応用とその効果を取り上げる。第3章では、石川高専・田中先生の『高電圧インパルスを利用したシイタケ収率に関する研究』を取り上げ、石川県の高級ブランド生椎茸である「のとてまり」に対する高電圧インパルスの印可効果を取り上げる。第4章では、佐世保高専・柳生先生（現九州大学大学院総合理工学研究院）の『温州みかんのプラズマ

author's e-mail: h-kawasa@sasebo.ac.jp

殺菌および農薬分解技術の研究開発と実用化の試み』を取り上げ、長崎県佐世保市の「させぼ温州」みかんのプラズマ殺菌効果について述べる。第5章では、大島商船高専・中村先生の『大気圧プラズマを用いた塗装剥離に関する研究』を取り上げ、船舶塗装の大気圧プラズマによる防汚効果について述べる。第6章では、弓削商船高専・佐久間先生の『液中プラズマを用いた船舶油分解に関する研究』を取り上げ、船舶で発生するビルジ水の油分分解処理効果に関して述べる。第7章では、小山・長野・豊田・津山高専の学生が協力して加速器を製作する「AxeLatoon」について、活動の経緯と活動内容および今後の展開について紹介する。

以上の研究成果は、いずれも高専において「プラズマ」「パルスパワー」「放電」を研究する教員と地域産業との連携によって成り立つものであり、高く評価されている。これらの取り組みを通じて、高専教員と地域産業が密に連携し、学生が一流の技術者となるための技術教育の一助となることを期待する。

参考文献

- [1] H. Newby *et al.*, OECD Reviews of Tertiary Education: Japan (2009) p.16.
- [2] 高田英治 他：プラズマ・核融合学会誌『高専における核融合および原子力に関する人材育成』 **97**, 307, (2021).



小特集 高専におけるプラズマ・パルスパワーに関する地域産業との連携

2. 高電圧インパルスによる殺虫に関する研究

2. Studies on Pest Control Effects using High-Voltage Impulse

上野 崇寿, 古川 隼士¹⁾, 八田 岳士²⁾

UENO Takahisa, FURUKAWA Takashi¹⁾ and HATTA Takeshi²⁾

大分工業高等専門学校電気電子工学科, ¹⁾ 北里大学医療衛生学部, ²⁾ 北里大学医学部

(原稿受付: 2024年12月20日)

養鶏産業における深刻な外部寄生虫であるワクモ (*Dermanyssus gallinae*) に対し, 高電圧インパルス放電を用いた物理的防除技術の開発と検証を行った. くし形電極を用いた実験では, 電極間距離1.0 mm 以下で95% 以上の高い殺虫効果を示し, 実証模擬試験では電極2枚・100 Hz の条件下で *D. gallinae* の誘引物質への移動を完全に阻止することができた. 本技術は従来の化学的防除法と比較して薬剤耐性の問題を回避しつつ, 短時間での効果的な防除の可能性を実証した.

Keywords:

dermanyssus gallinae, poultry mite, high-voltage impulse discharge, physical control, pest management

2.1 はじめに

ワクモ (*Dermanyssus gallinae*, 以下 *D. gallinae*) は, 養鶏産業に深刻な被害をもたらす外部寄生性ダニの一種である. 国内の産卵鶏農場におけるワクモの浸潤率は85.2%と非常に高く[1, 2], その被害は汚卵の発生, 産卵率の低下, 鶏の貧血や死亡など多岐にわたる[3, 4]. さらに, 管理者の嫌悪感や離職, 防除に必要な薬剤費・労力による経営圧迫など, 産業全体に大きな影響を及ぼしている[5, 6]. 例えば, 欧州における経済的損失の調査では, 年間約2億3千万ユーロに達する[7].

従来, ワクモの防除には主にピレスロイド系殺虫剤が使用され, 高い効果を示してきた[8, 9]. しかし近年, これらの薬剤に対する抵抗性の出現が報告されており[10, 11], 同一敷地内の鶏舎間でも薬剤抵抗性が異なる傾向が確認されている[1]. このような状況下で, 総合的有害生物管理(IPM)の観点から, 物理的防除法や環境制御資材の使用など, 新たな防除戦略の開発が急務となっている.

我々の先行研究[12]では, 高電圧インパルス放電によるワクモの物理的防除技術の基礎的検討を行った. その結果, 放電による殺虫メカニズムは, ワクモ体内を流れる電流によるジュール熱に起因することを明らかにした. また, 電極構造や電気的パラメータを最適化することで, 30秒以内に95%以上の高い殺虫効果が得られることを示した. さらに, 紫外線やオゾンなど他の物理的手法と比較して, より短時間で効果的な防除が可能であることを実証した. 特に, くし形電極を用いた場合における効果的な殺虫効果が得られる電気的パラメータを見出した.

しかしながら, 実用化に向けては, 実際の鶏舎環境を想定した検証が不可欠である. ワクモは鶏舎内で負の走光性

を示し, 日中は暗所に潜み, 夜間に宿主である鶏に寄生する行動特性を持つ[13, 14]. このような行動特性を考慮した防除システムの構築には, 誘引物質の利用と組み合わせた効果的な電極配置の検討が必要である.

本研究では, これまでの知見を基に, 高電圧インパルス放電を用いたワクモ防除システムの実用化をめざした検討を行った. 具体的には, 異なる電極構造(平行平板電極およびくし形電極)による殺虫効果の比較, および誘引物質と組み合わせた実証模擬試験における防除効果の検証を実施した. 特に, ワクモの行動特性を考慮した電極配置と, 誘引物質までの到達阻止効果について詳細な評価を行い, 実用性を検証することを目的とした.

2.2 実験環境

2.2.1 印加対象

本研究では, *D. gallinae*を対象として高電圧インパルス放電の効果を検証した. 供試虫は発生段階(未成熟, 成熟)に関係なく無作為に選択し, 室温25℃, 相対湿度60%, 室内照明の管理された一定条件下で実験を実施した. 供試虫の状態評価は, ビデオマイクロスコープ(倍率500)を用いて実施し, 高電圧インパルス放電の印加直後, 6時間後, 12時間後に行った. 生死判定は, ブラシによる接触刺激に対する反応の有無により判断した.

2.2.2 インパルス高電圧による *D. gallinae* の防除

本実験では, 電極構造が殺虫効果に及ぼす影響を検証するため, 平行平板電極およびくし形電極による比較実験を実施した. くし形電極の構造は, 図1に示すように, これまでの設計に基づき, 90 mm四方の銅製で2 mmの電極幅を持つ陽極と陰極を交互に配置した[12]. その動作原理

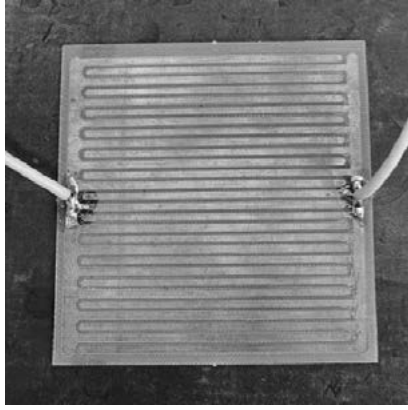


図1 くし形電極の形状 銅製の陽極・陰極（幅2 mm）を交互に配置した90 mm 四方のくし形電極の構造図。電極間には1 kΩの抵抗を介してインパルス電源が接続される。

は、供試虫が一方の電極で帯電し、対向電極に接近した際に放電が誘起されることで殺虫効果を得る。これらの電極は抵抗1 kΩを介してインパルス電源に接続された。電極は横置きとし、電極間隔を0.5 mmから10 mmまで変化させ、各試行で*D. gallinae*を35±7匹投入して評価を実施した。殺虫率は、投入した総数に対する殺虫された個体数の比率として定義した。

実験装置は平行平板電極およびガラスエポキシ基板上に設置したくし形電極に接続する電源装置で構成され、それぞれの電極に周波数100 Hz、パルス半値全幅10 μsのインパルス高電圧を印加した。電極間距離は0.5 mmから10 mmまでの8段階（0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 mm）で実施した。

印加電圧は電極間の絶縁破壊直前の最大電圧とした。平行平板電極に印加する電圧値とガラスエポキシ基板上のくし形電極に印加する電圧値を表1に示す。電極間に印加される電圧は高電圧プローブ（Ep-100K, Nissin Pulse Electronics, Japan）およびオシロスコープ（DSOX6004A, Keysight Technologies, USA）を用いて測定し、インパルス電圧の印加時間を30秒とした。

2.2.3 鶏舎を想定した実証模擬試験の試験環境

*D. gallinae*の感染経路は、主にゲージの足を伝い、養鶏に寄生する経路が一般的である。本実験では実用化を

表1 電極間距離と印加電圧の実験条件。平行平板電極では電極間隔2.0 – 10.0 mmにおいて8.65 – 28.07 kVを、ガラスエポキシ基板上くし形電極では0.5 – 10.0 mmにおいて2.81 – 20.80 kVを印加した。測定は周波数100 Hz、パルス半値全幅10 μs、印加時間30秒の条件で実施した。「－」は実験未実施を示す。

電極間距離 [mm]	平行平板 [kV]	くし形電極 [kV]
0.5	－	2.81
1.0	－	4.29
1.5	－	5.00
2.0	8.65	6.58
4.0	15.34	8.13
6.0	19.95	11.64
8.0	24.91	14.93
10.0	28.07	20.80

想定し、ビニールハウス（121.5×186×193 cm）内に誘引物質として杉抽出物質を塗布した木片を中央に配置したゲージ（85×60×70 cm）を設置した実証模擬試験を実施した。ゲージは4本の柱で支えられ、それぞれの柱に図2に示す円形電極を設置した。電極構成は1枚および2枚の条件で実施し、4.32 kVの高電圧インパルス印加、周波数は10 Hzおよび100 Hzとした。ビニールハウス内には、*D. gallinae*がコロニーを形成した段ボール片を複数箇所設置し、8時間、16時間、24時間経過後において、誘引物質を塗布した木片への誘引数および電極下部での殺虫数を計測した。

2.2.4 統計処理

統計解析にはPython 3.9と科学計算ライブラリSciPy（version 1.10.1）を使用した。データのばらつきの相対的な大きさを評価するため、標準偏差を平均値で除した百分率を変動係数として算出した。電極構造の違いによる殺虫効果の比較には一元配置分散分析を適用し、事後検定としてテューキーのHSD検定（Tukey's HSD法）による多重比較を実施した。実証模擬試験における経時変化の解析には、反復測定分散分析を適用し、事後検定にはボンフェローニ（Bonferroni）補正を適用した多重比較を実施した。これらの分散分析にはSciPyのstats.f_oneway関数を使用し、分散比を示すF値とその統計的有意性を表すp値を導出した上で、多重比較にはstatsmodels（version 0.14.0）のstats.multicomp関数を使用した。すべての検定において、有意水準は5%（ $\alpha = 0.05$ ）に設定し、データは平均値±標準誤差（Mean±SEM）で示した。回帰分析にはSciPyのstats.linregress関数を使用し、決定係数（ R^2 ）を算出した。グラフ作成にはMatplotlib（version 3.7.1）を使用した。

2.3 実験結果

2.3.1 電極構成および電極間距離がインパルス高電圧による*D. gallinae*の殺虫効果に与える影響

電極構成が異なる2つの電極を用いて、電極間距離が*D. gallinae*の殺虫効果に及ぼす影響を検討した。平行平板電極では電極間距離を0.5 mmから10 mmまで、くし形

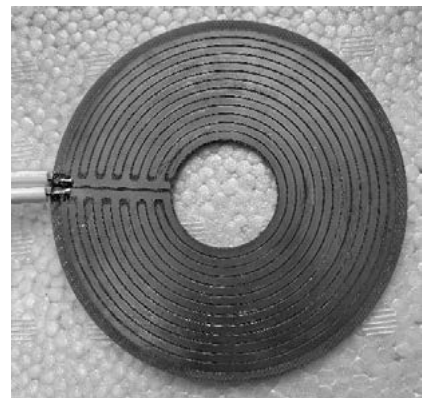


図2 養鶏ゲージを想定した実証実験用のくし形電極。ゲージ（85×60×70 cm）の4本の支柱に円形電極を1枚または2枚配置し、インパルス高電圧を印加した。

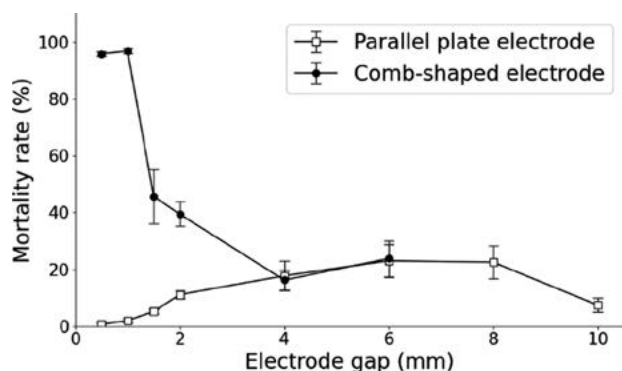


図3 インパルス高電圧による電極構成および電極間距離が *D. gallinae* の殺虫効果に与える影響

平行平板電極 (□) およびくし形電極 (●) における電極間距離と殺虫率の関係を示す。データは平均値 ± 標準誤差 (独立試行回数 $n = 5$) で表示。殺虫率は投入した供試虫の総数に対する殺虫された個体数の割合として算出。くし形電極は平行平板電極と比較して、短い電極間距離 (0.5 – 1.0 mm) において有意に高い殺虫効果を示した ($p < 0.001$)。両電極とも電極間距離の増加に伴い殺虫効果は低下したが、くし形電極では特に1.5 mm 以上での低下が顕著であった。

電極では0.5 mm から6 mm まで変化させた。その結果を図3に示す。

平行平板電極を用いた実験では、電極間距離が殺虫効果に有意な影響を与えることが確認された ($F(7, 32) = 6.14, p < 0.001$)。電極間距離0.5 mm から2 mm までの範囲では殺虫率が低く推移し (0.5 mm: $0.67 \pm 0.67\%$, 1.0 mm: $1.97 \pm 0.81\%$, 1.5 mm: $5.19 \pm 0.78\%$, 2.0 mm: $11.14 \pm 1.39\%$; 平均 ± 標準誤差), 4 mm から8 mm の範囲で最も高い殺虫効果が得られた (4.0 mm: $17.75 \pm 5.21\%$, 6.0 mm: $23.04 \pm 5.83\%$, 8.0 mm: $22.54 \pm 5.73\%$)。特に、6.0 mm での殺虫率は0.5 mm での殺虫率と比較して有意に高かった ($p < 0.01$)。しかし、電極間距離を10.0 mm まで増加させると殺虫効果は有意に低下し ($7.45 \pm 2.49\%$), 6.0 mm の条件との間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。また、全ての電極間距離において試行間のばらつきが観察され、特に4.0 mm 以上の条件で顕著であった (4.0 mm: 11.66% , 6.0 mm: 13.04% , 8.0 mm: 12.81%)。これは、電極間距離の増加に伴い、*D. gallinae* の移動経路の多様性が増加したことに起因すると考えられる。

一方、くし形電極を用いた実験では、電極間距離が殺虫効果に極めて顕著な影響を与えることが統計的に確認された ($F(5, 24) = 45.73, p < 0.0001$)。最も高い殺虫効果は電極間距離1.0 mm で得られ ($96.91 \pm 0.96\%$)、次いで0.5 mm の条件 ($95.90 \pm 0.77\%$) であった。これらの条件では変動係数も小さく (1.0 mm: 2.22%, 0.5 mm: 1.79%), 高い再現性が確認された。電極間距離1.5 mm 以上では殺虫効果が急激に低下し、1.5 mm では $45.74 \pm 9.56\%$ まで有意に減少した (vs 1.0 mm 条件: $p < 0.001$)。さらに、この条件では試行間のばらつきも大きく増加し (変動係数: 46.72%), 安定した殺虫効果が得られないことが示された。電極間距離の増加に伴う殺虫効果の低下は継続的に観察され、2.0 mm ($39.44 \pm 4.33\%$), 4.0 mm ($16.25 \pm 3.36\%$), 6.0 mm ($23.82 \pm 6.33\%$) と推移した。特に6.0 mm 条件で

は最も大きな変動係数 (59.37%) を示し、殺虫効果の不安定性が顕著であった。

両電極構成を比較すると、くし形電極は1 mm 以下の短い電極間距離において95% 以上の安定した殺虫効果を示したのに対し、平行平板電極では最大殺虫率が23.0% に留まった。最適条件 (くし形電極, 1.0 mm) と他の条件との差は、電極間距離の増加に伴って拡大し、4.0 mm では80.66% もの顕著な効果の低下が認められた。この結果は、くし形電極の殺虫効果が1.0 mm 付近の狭い電極間距離で最適化されることを統計的に示している。全ての共通の電極間距離 (0.5 – 6.0 mm) において、くし形電極と平行平板電極の殺虫率には有意な差が認められ ($p < 0.01$)、特に0.5 mm および1.0 mm の電極間距離では、くし形電極が平行平板電極と比較して著しく高い殺虫効果を示した ($p < 0.001$)。これらの結果から、くし形電極を用いた1.0 mm 以下の電極間距離の条件が、実用的な防除システムの設計に最適であることが明らかとなった。

2.3.2 実証模擬試験における電極設置条件が *D. gallinae* の誘引阻止効果および殺虫効果に与える影響

電極設置条件および経過時間が *D. gallinae* の誘引阻止効果と殺虫効果に与える影響を評価した (図4)。対照区 (電極0枚) では、誘引物質に到達した *D. gallinae* 数が経時的に有意に増加し ($F(2, 3) = 24.86, p < 0.01$)、8時間後の 47.0 ± 2.0 匹 (平均 ± 標準誤差) から24時間後には 123.0 ± 2.0 匹まで達した。この増加率は平均38.0匹/8時間であり、直線的な増加傾向を示した ($R^2 = 0.94$)。

電極1枚での条件では、周波数によって異なる誘引阻止効果が観察された。10 Hz の条件では24時間までに 211.5 ± 30.5 匹の *D. gallinae* が殺虫されたものの、 19.0 ± 0.0 匹が電極を通過して誘引物質に到達した。一方、100 Hz では同程度の殺虫数 (215.5 ± 29.5 匹) を示しながら、誘引物質への到達数は有意に低下し (2.0 ± 1.0 匹, $p < 0.001$)、特に16時間までは完全な誘引阻止の効果が確認された。

電極2枚の条件では、さらに顕著な誘引阻止効果が認められた。10 Hz では 235.0 ± 15.0 匹の *D. gallinae* が殺虫され、誘引物質到達数は 1.5 ± 0.5 匹まで有意に抑制された (vs 1枚10 Hz: $p < 0.001$)。最も効果的であったのは100 Hz の条件下で、 209.5 ± 25.5 匹の殺虫数を維持しながら、全観察時間を通じて誘引物質への到達を完全に阻止した。

経時的な誘引数の変化率を比較すると、対照区の38.0匹/8時間に対し、電極1枚の10 Hz 条件では7.0匹/8時間、100 Hz 条件では1.0匹/8時間まで有意に低下した ($p < 0.001$)。さらに、電極2枚では10 Hz で0.25匹/8時間、100 Hz で0.0匹/8時間となり、実質的な誘引阻止効果が確認された。

24時間後の総合的な殺虫効果を比較すると、全ての電極条件において高い殺虫効果 (209.5 – 235.0 匹) が得られた。しかし、誘引物質への到達阻止という観点では、電極条件間で有意な差が認められ ($F(3, 4) = 42.3, p < 0.001$)、電極2枚の設置と100 Hz の周波数の組み合わせが最も効果的であることが統計的に示された。以上の解析により、

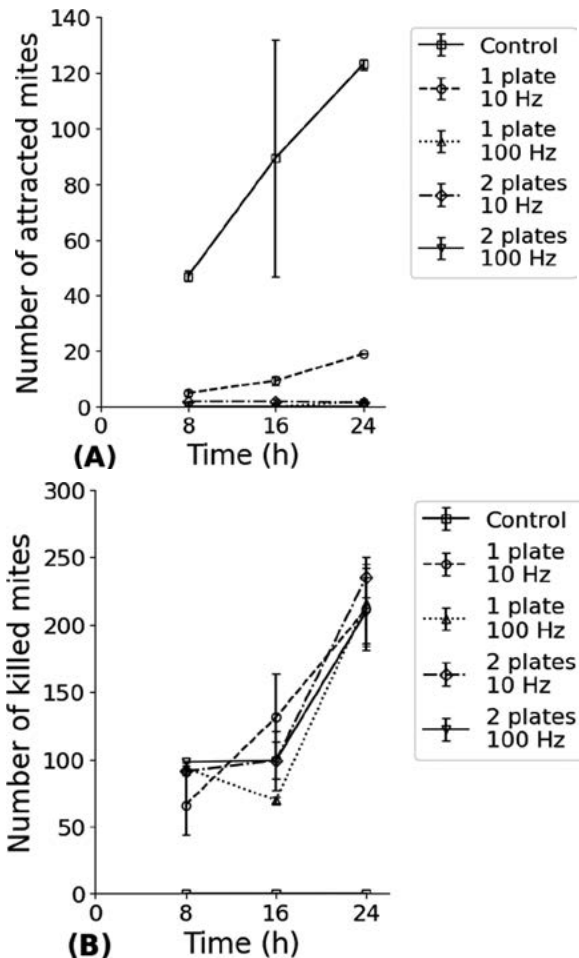


図4 実証模擬試験における電極設置条件が *D. gallinae* の誘引阻止効果および殺虫効果に与える影響
 A: 誘引物質に到達した *D. gallinae* 数の経時変化を示す。電極を設置しない対照区 (□) と比較して、電極1枚条件 (10 Hz: ○, 100 Hz: △) および電極2枚条件 (10 Hz: ◇, 100 Hz: ▽) では、有意な誘引阻止効果が確認された。特に100 Hz 条件では、電極枚数に関わらず顕著な阻止効果を示した。B: 殺虫された *D. gallinae* 数の経時変化を示す。対照区では殺虫効果は認められなかったが、全ての電極条件において経時的な殺虫数の増加が観察された。データは平均値 ± 標準誤差で表示。統計解析の結果、対照区と各電極条件間で有意差が認められた ($p < 0.001$)。

実証模擬試験における最適条件（電極2枚，100 Hz）は、高い殺虫効果と完全な誘引阻止効果を両立することが明らかとなった。この結果は、実用的な防除システムの設計指針として極めて有用である。

2.4 実用化に向けて

本研究では、実用化を目的とした高電圧インパルス放電を用いた *D. gallinae* 防除システムの開発を行った。

電極構造と殺虫効果の関係について、くし形電極は電極間距離1.0 mm以下の条件において95%以上の高い殺虫効果を示し、平行平板電極との間に統計的に有意な差が認められた ($p < 0.001$)。Tomleyらが報告した従来の化学的防除法と比較しても、この結果は遜色のない効果を示している[15]。特筆すべきは、この高い殺虫効果が30秒以内という短時間で達成され、かつ試行間の変動係数が2%未満と極めて安定した結果が得られたことである。一方、平

行平板電極では最大殺虫率が23%に留まり、くし形電極との間に顕著な差が認められた。この差異は、電極配置によるものであり、先行研究[12]の結果とも整合する。

実証模擬試験における技術的検証では、電極2枚、100 Hzの条件下で完全な誘引阻止効果が確認された。分散分析の結果、対照区と比較して有意な誘引阻止効果 ($F(3, 4) = 42.3$, $p < 0.001$) と高い殺虫効果が確認された。Coccioolaらが提唱するIPM戦略における物理的防除法としての実用可能性が強く示唆される[16, 17]。実用化に向けた重要な知見として、電極2枚構成における100 Hzの周波数が、24時間にわたって完全な誘引阻止効果を維持した点は、実用システムの設計指針として極めて重要である。特に、反復測定分散分析により、この効果の時間的安定性が統計的に示された ($F(2, 3) = 24.86$, $p < 0.01$)。

実証模擬試験で得られた知見は、長期的な殺虫効果の検証に向けた重要な基礎データとなる。この結果による電極配置の最適化は、実用的な防除システムの構築に直接的に寄与する。本システムの物理的作用による防除メカニズムは、薬剤耐性[18]や残留の問題[19, 20]を本質的に回避できる。SommerやChiricoらの報告による病原体伝播[21, 22]に対しても、予防的効果の可能性をも期待できる。

実用化に向けた経済的側面として、電極材料の選択や制御システムの最適化により、IPM戦略に適合する費用対効果の高いシステム構築が可能である[23]。従来の化学的防除法と比較して、長期的な経済的優位性が期待できる[24, 25]。

実規模の鶏舎における検証では、養鶏の行動やストレス反応との相互作用の評価が重要となる。また、電極システムの耐久性評価と、*D. gallinae*の生態学的特性[26, 27]を考慮した維持管理方法の確立が必要である。これらの要因を総合的に考慮したコスト最適化により、実用的な導入障壁の低減が可能となる。

2.5 結論

本研究では、高電圧インパルス放電を用いた *D. gallinae* 防除システムの開発を行い、以下の重要な知見が得られた。

1. 電極構造の最適化により、くし形電極を用いた1.0 mm以下の電極間距離において、95%以上の高い殺虫効果を達成した。この効果は30秒以内という短時間で得られ、試行間の変動係数が2%未満と極めて安定していた。
2. 養鶏舎を想定した実証模擬試験では、電極2枚構成と100 Hzの周波数を組み合わせた条件において、*D. gallinae*が養鶏を模した誘引物質に到達することを完全に防止できた。すなわち、ゲージの支柱に設置した電極により、24時間にわたって *D. gallinae*の養鶏への寄生を阻止し、かつ高い殺虫効果をもたらすことを示唆する。この結果は、実用的な防除システムの設計指針として極めて有用である。

3. 本システムは物理的作用による防除メカニズムを採用しており、薬剤耐性や残留の問題を本質的に回避できる特長を有する。この特性は、長期的な防除戦略において重

要な利点となる。

4. 従来の化学的防除法と比較して遜色のない効果を示すとともに、短時間での処理が可能であることから、実用的な防除手法としての優位性が確認された。

今後は、総合的な費用対効果の検証を通じて、実用的な導入障壁の低減を図る予定である。これらの課題に対する継続的な研究開発により、本システムは養鶏産業における持続可能な害虫管理手法としての展開が期待される。

謝 辞

本研究は、JSPS 科研費 (24K00877) ならびに公共財団法人 JKA の自転車等機械工業振興事業に関する補助 (2023-424) を受けて実施された。

参 考 文 献

- [1] 村野多可子 他：日本獣医師会雑誌 **68**, 509 (2015).
- [2] 村野多可子 他：鶏病研究会報 **48**, 30 (2012).
- [3] E. Circella *et al.*, Exp. Appl. Acarol. **55**, 329 (2011).
- [4] S. Knežević *et al.*, Arch. Vet. Med. **10**, 53 (2017).
- [5] T.T. Chu *et al.*, J. Vet. Med. Sci. **77**, 1397 (2015).
- [6] T. Cencek, Bull. Vet. Inst. Pulawy **47**, 465 (2003).
- [7] E. Karp-Tatham *et al.*, Front. Vet. Sci. **7** (2020).
- [8] E. Katsavou *et al.*, Pest Manag. Sci. **76**, 125 (2019).
- [9] P. Zeman and J. Železný, Exp. Appl. Acarol. **1**, 17 (1985).
- [10] Ø. Øines and S. Brännström, Med. Vet. Entomol. **25**, 402 (2011).
- [11] F. Beugnet *et al.*, Vet. Rec. **140**, 577 (1997).
- [12] T. Ueno *et al.*, Electronics **12**, 1038 (2023).
- [13] S. Schicht *et al.*, Parasitology **141**, 336 (2013).
- [14] R.Z. Abbas *et al.*, World's Poult. Sci. J. **70**, 113 (2014).
- [15] F.M. Tomley and O. Sparagano, Avian Pathol. **47**, 533 (2018).
- [16] G. Coccio *et al.*, Parasites Vectors **13** (2020).
- [17] D. Harrington *et al.*, World's Poult. Sci. J. **67**, 83 (2011).
- [18] E. Karp-Tatham *et al.*, preprint (2021).
- [19] N. Pugliese *et al.*, Avian Pathol. **48**, S35 (2019).
- [20] M. Marangi *et al.*, PLOS ONE **7**, e31795 (2012).
- [21] D. Sommer *et al.*, Tierarztl. Prax. Ausg. G. Grosstiere Nutztiere **44**, 26 (2016).
- [22] J. Chirico *et al.*, Med. Vet. Entomol. **17**, 232 (2003).
- [23] E. Decru *et al.*, Front. Vet. Sci. **7** (2020).
- [24] E. Thomas *et al.*, Parasites Vectors **10**, 457 (2017).
- [25] M.F. Mul and C.J.M. Koenraadt, Exp. Appl. Acarol. **48**, 167 (2009).
- [26] O. Kilpinen *et al.*, Br. Poult. Sci. **46**, 26 (2005).
- [27] I. Cosoroabă, Rev. Med. Vet. **1**, 89 (2001).

小特集 高専におけるプラズマ・パルスパワーに関する地域産業との連携

3. 高電圧インパルスを利用したシイタケ収率に関する研究

3. The Study on Shiitake Mushroom Yield using High-Voltage Impulses

田中 文章

TANAKA Fumiaki

石川工業高等専門学校

(原稿受付：2025年1月23日)

石川県には「のとり」とのブランド名で販売されている高級生シイタケがある。「のとり」は、原木栽培したシイタケの中で傘の大きさが8 cm 以上、肉厚3 cm 以上、巻き込み1 cm 以上の基準を満たす原木生シイタケである。この規格を満たすシイタケは、原木1本あたりの発生率が原木の直径により異なるが、約20～60%といわれている。本研究ではパルスパワーの印加により「のとり」のブランド基準に該当するシイタケの収穫量の向上を行うことができるかを調査した結果を報告する。

Keywords:

pulsed power, high voltage impulses, marx generator, shiitake mushroom, quality

3.1 はじめに

3.1.1 能登地域の現状

石川高専は能登半島の入口に近い地域にあり、能登地域からの学生も多い。そのため、能登地域の問題や地域の特産品に関する関心も高い。能登地域では、全国的に問題となっている少子化に加え、過疎化も進行しており、2020年から5年毎に10%以上減少する年が続く事が示唆されていた[1]。その折、2024年元日の能登半島地震が発生し、能登半島地震の発生以降約10ヶ月間で人口が7%以上減少するなど過疎化に拍車をかけている。また、本校の近隣の観測点でも震度5強や5弱を観測され、本校も液状化や法面の崩落などの影響を受け、体育館の建て替えが計画されている。

能登地域の主な産業は、観光と農林水産業などの1次産業である。そのため、復興には観光関連の復興と共に、農林水産業関連の復興も非常に重要である。

3.1.2 石川や能登地域の産業と農林水産物のブランド化

石川県では、農林水産物のブランド化が行われている。「加納ガニ」や「のどぐろ」等は全国的にも知名度がある。また、農産物では、初競りの価格で100万円を超える価格がついたことのある、石川県オリジナルぶどう品種「ルビーロマン」などがある。能登地域で栽培されているブランド農産物の一つに「のとり」がある。

3.1.3 能登地域の特徴と「のとり」

能登地域の特徴として、他の北陸の都市と比べ、夏はやや涼しく、冬は比較的積雪も少ない傾向にある。また日本海側の地域の特色として、夏だけではなく、冬にも冬期雷と呼ばれる雷が非常に多く発生し、冬の12月の平均気温は5.9℃である。

「のとり」は能登地域で栽培された原木栽培シイタケの中で、「傘の直径が8 cm 以上、肉厚が3 cm 以上、巻き込みの長さが1 cm 以上、形状が優れていること」などの条件を満たすもので、初競りの価格で、最高級品が30万円を超える価格がついたこともある。この「のとり」は一般的な原木栽培シイタケと栽培に用いる森290号（秋春出で、発生温度範囲：7℃～20℃）とは菌種が異なり、一般財団法人日本きのこセンターの菌興115号が使われている。この品種は、肉厚のジャンボ椎茸で品評会などでも上位を占める品種である。栽培条件は、冬・春発生で発生温度が8℃以下で5℃以下になると発生量が多くなる[2]。この特徴が能登地域の冬の気候に合致しているため、盛んに栽培されている。

また、きのこ生産において、高電圧やパルスパワー技術等を用いた電気刺激を用いた研究が、古くから行われており、1950年代には農事試験場において、シイタケの電気刺激栽培に関する実験が行われている[3]。いくつかの研究で収量が2倍～3倍の増産結果が示されている。また、その後も多くの報告がなされており、シイタケ以外にも有効なキノコ類があることが確認されており、近年では、電気刺激の際の振動に注目した研究も行われている[4-6]。

一般に「のとり」の規格を満たすシイタケは、原木直径により異なるが、原木1本あたりの発生率は約20～60%といわれている[7]。

現在、「のとり」はそのブランド価値の向上に伴い、ニーズは高まりつつあるが、地震や担い手不足などさまざまな要因で供給が不足している。また、農家の所得向上などの点においても、生産量の向上をするための手法が求められている。そのため、本研究では、高電圧インパルスに

よる雷撃による増産効果と「のとてまり」の規格を満たすシイタケの発生率の関係の調査を目的としている。この調査により、雷撃を印加した際に菌興115号でも、従来の研究と同様に収量が2～3倍となる事が期待でき、「のとてまり」の原木1本あたりの発生率が通常と同様またはそれ以上であった場合は、雷撃による増産効果により「のとてまり」の収穫できる総数が増加することが見込まれる。そのため、高級な「のとてまり」の収穫本数が増えることにより、農家の収支改善効果が期待できる。

3.2 実験方法と環境整備

3.2.1 環境（ほだ場）整備と環境

本校は、校内環境の改善・整備のために木や竹林の伐採が進んで降り、シイタケの栽培に適した木陰などが無いため、本校の学生と共に、石川県農林総合研究センターに助言をいただき、図1に示すホダ場の整備を実施した。ほだ木を組む際に周囲を1m程度、空間を空けた方が良いとの助言をいただいたため、一般的に市販されているホダ木の寸法約90cmを基準として、縦4m、横6m、高さ2mの枠組みを作成した。また、地面の雑草を防ぐために防草シートを敷設した。現在は遮光率を90%の遮光ネットを用いて遮光を行っている。また、電磁弁とスプリンクラーを用いた簡易的な自動散水システムの構築している。

3.2.2 実験方法

本研究では、金沢森林組合で購入した植菌後、1年経過した標準的な長さがおおよそ90cmのコナラの原木を10本準備し、パルスパワーの印加実験を実施した。

実験環境の概略図を図2に示す。マルクス電源には、日新パルス電子株式会社 PIVG-400ACFを用いた。マルクス電源の出力を印加するためにコンクリートブロックを用いてホダ木を支える支柱を作成している。

購入した10本の植菌済のコナラの原木は2本を1グループとして、電圧を印加しないコントロールとしたグループ



図1 ホダ場の外観と内観。

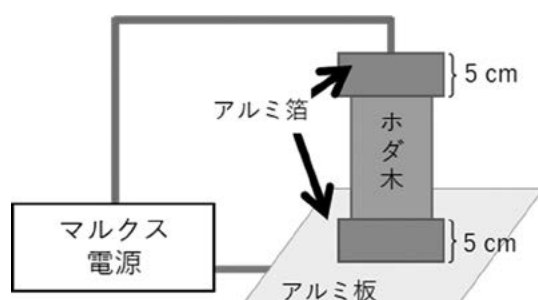


図2 パルスパワー印加の概略図。

プ、マルクス発生器の充電電圧とコンデンサの段数で決定する理論的な電圧で、90 kV、120 kV、150 kV、180 kVのパルスを1回、印加するグループに分けて実験を実施した。

電圧を印加する際には、各ホダ木の上部及び下部の5cm程度、高電圧を印加するための電極としてアルミ箔を巻き、その後、アルミ箔を取り外し、ほだ場に戻し、様子を観察した。なお、電圧を印加しないコントロールについても、電圧を印加するほだ木と同様の操作を実施している。

パルスの印加については、原基形成が終わったタイミングで実施を行った。原基形成時期は石川県では9月下旬から10月下旬といわれている。この時期から11月中旬までを目処に散水などを行うことが一般的な栽培法として推奨されているため、本研究では12月上旬にパルス印加を実施した。

3.2.3 収穫時期について

しいたけは、放置すると傘が開き、サイズは大きくなるが、本研究の主目的である、規格には合わなくなってしまう。そのため、収穫のタイミングを揃えることは非常に重要である。しいたけの収穫のタイミングについて図3に示す。しいたけの収穫の時期は裏側の膜を観察することで判断が可能となる。図3(a)は膜が切れておらず、ひだが見えないため、未熟な個体であることがわかる。図3(b)は膜が切れ、ひだが見えているため、成熟した個体で収穫のタイミングである。本研究では傘の開ききっていない、図3(b)のタイミングで収穫したしいたけの大きさの評価を行う。「のとてまり」は、この際の傘の直径が8cm以上、肉厚が3cm以上、巻き込みの長さが1cm以上である必要があるが、今回は傘の大きさの比較を実施した。

3.3 実験結果

3.3.1 マルクス発生器の出力波形

印加した電圧の典型的な例を図4に示す。これは、コンデンサ1個辺りの充電電圧が、45 kV、定格出力が180 kVの際の出力電圧波形である。最大出力電圧が約150 kV、パルス立ち上がり時間が約1 μsである。その他の条件での電圧の印加に関しては、定格出力が150 kVの最大出力電圧が約120 kV、定格出力120 kVの最大出力電圧が約100 kV、定格出力90 kVの最大出力電圧は約70 kVであった。これらの電圧について、定格出力に占める最大出力電圧の割合を計算すると、どれもおよそ0.8程度となる。そ



(a) 膜が切れていない

(b) 膜が切れている

図3 ししいたけの収穫時期の見極め。

のため、最大出力電圧の低下に関してはマルクス発生器自体の損失とほだ木の抵抗値に起因することが考えられる。また、図4に示す、電圧を印加した際のほだ木の様子を図5に示す。図5の示した写真のように、原木の表面に沿面放電が発生していることが確認できた。

3.3.2 シイタケの発生数とサイズの計測

まず、今回の実験において、定格出力180 kVを印加したほだ木の内1つが電圧を印加する前から、シイタケの生長を阻害する害菌の影響が見られていたが、パルスの印加を実施した。その後、他のほだ木から隔離して経過を観察したが、シイタケの発生は確認出来なかった。そのため、観測結果から除外している。

図6は時系列的なシイタケの収穫数の変化を示したグラフである。このグラフは各ほだ木のしいたけの発生数の平均をグラフにしたものである。グラフの破線が電圧無印加のControlの結果である。Controlの最終的なシイタケの収穫数は、平均7本で有った。パルスを印加した際の結果として、定格出力120 kVの結果を除く、90 kV、150 kV、180 kVでControlより発生量が増加した。また、それぞれの発生数の平均を比較すると、定格出力90 kVが11本、定格出力120 kVが3.5本、定格出力150 kVが10本、定格出力180 kVが害菌の発生したほだ木を除くと10本との結

果であった。

次に図7は各電圧における傘の直径を比較した結果である。Controlは傘の直径が4 cm以上のシイタケが全体の2割ほどの結果になっている。定格出力120 kV、150 kV、180 kVの結果では、シイタケの傘の直径が3.0 cm以下のシイタケが全体の約9割以上となっている。全体の傾向として定格出力を高くすると、比較的、小さいしいたけの発生数が増加している。

一方で、定格出力90 kVの結果では、傘の直径が4 cm以上のシイタケが全体の約5割となった。

3.4. 考察

3.4.1 パルス印加によるシイタケの成長への影響

図6の結果より、シイタケの発生数と時間経過の関連を見ると、90 kVの結果ではシイタケの発生数が全体的に増えている。一方で、それ以上の電圧を印加した結果はControlと比較して、シイタケ発生タイミングが全体的に遅くなっていることがわかる。

これらの結果から、パルスの印加に際して、ある一定の閾値があると推定される。この閾値を基準に、一定以上の定格出力のパルスを印加した場合は、しいたけの発生を促

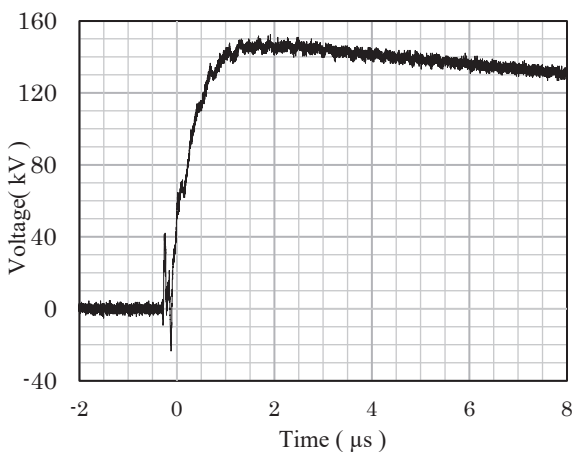


図4 典型的な出力電圧パルス波形 (180 kV).

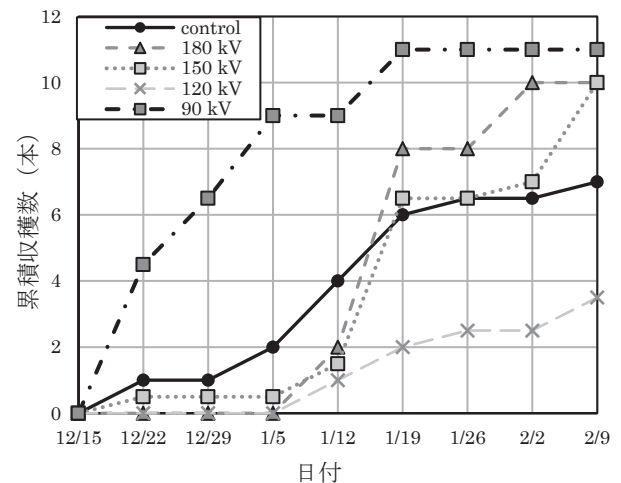


図6 時間経過による累積収穫数の変化.

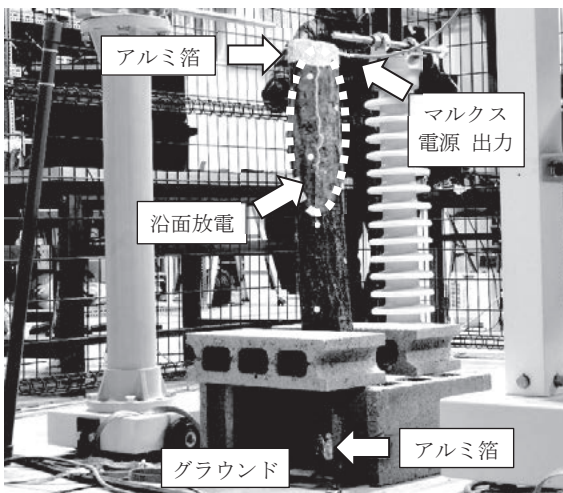


図5 ほだ木へのパルス印加の様子.

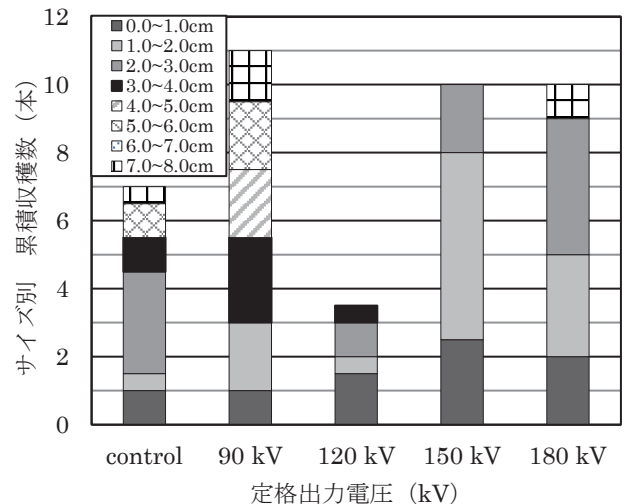


図7 印加電圧によるサイズ別の累積収穫数.

進し、閾値を超えると、発生の遅れや発生数が減少する傾向が見られた。

その上で、図7の結果を比較すると、高電圧側の実験結果は小さいシイタケが増加し、低電圧の場合は、発生数、サイズの両方が増加している。これは高電圧の成長の遅れが単に発生時期が後ろ倒しにずれるのではなく、成長に何らかの悪影響を及ぼしていることが、推測される。

これらのことから、今回の実験結果では定格出力90 kVの条件が最適であると考えられる。しかし、定格出力90 kV以下については実験が出来ていないため、この値が最適値であるかの判断はできない。そのため、より低い定格出力での実験が必要不可欠であると考えられる。

3.4.2 ほだ木のサンプル数及び栽培環境と成長の関係

今回の実験では、各実験においてサンプル数が少なすぎることは、大きな懸念点の一つである。結果として定格出力180 kVのほだ木の1本については、害菌の影響でシイタケが発生しなかった。これに関しては、さらなる追加の実験を行い、サンプル数を増やすことにより、信頼性を高める必要がある。

気候についても、本校は能登半島の付け根部分にあるため、厳密には能登地域と気候が一致しない。気象庁のデータによると、金沢の観測点と輪島（能登の代表的な地域）の観測点の平均気温を比較すると約1.2℃、本校の近隣である、かほくの観測点の平均気温と比較すると約0.3℃（かほくの観測点は標高42 mとやや高地にあるため考慮が必要である）ほど輪島の方が平均気温は低い。また、実際の栽培環境は、山の近くなどであるため、これら観測点の平均気温より低温であることが推測される。

また、ほだ木に害菌が発生し、シイタケが発生しなかった原木がある点などを考慮しても、気温、温度、湿度、日射量や明るさ、など栽培環境を見直す必要がある。

3.4.3 まとめ

今回は「のとてまり」のブランド規格を満たすシイタケの発生数増加を目標として、パルス印加の影響の調査を行った。その結果、「のとてまり」の規格を満たすシイタケの栽培を行う事は出来なかった。また、やみくもに高電圧を印加した場合、ブランドの規格を満たすしいたけの発生が難しくなったことから、印加パルスの最適値が存在す

る可能性があることが示唆された。

一方で、今回の実験結果を通して、本校に作成したほだ場と能登地域との気象条件的な違いに関しては当初、想定していた以上の影響があるように感じている。また、それに加え、近年の猛暑や暖冬の影響なども考慮すると年ごとに気象状況が大きく変化し、複数年度の結果の比較が非常に困難になっているように感じる。そのため、気象観測の実施なども合わせて必要であると考えられる。

近年、高電圧やプラズマについて興味を持つ学生は本校でも一定数、存在はするものの、情報やロボットなどの制御などの分野と比較するとその数は少ない。その中で石川県においての「のとてまり」の認知率は高く、学生が高電圧やプラズマに興味・関心を持つための入り口としては、非常に良いテーマであると考えている。今回の結果より、気象観測や低い定格出力での実験、サンプル数の増加など実施すべき課題も多いため、継続した調査を進めると共に、高電圧やプラズマの分野に興味を持つ人材の育成を進めていきたいと考えている。また、本研究テーマを通して、より、効率的な「のとてまり」の栽培手法を確立することを通して能登地域の復興や観光などの振興などの一助になることが出来ればと思う。

参考文献

- [1] 石川県県民文化スポーツ部統計情報室：石川県の将来推計人口，石川県県民文化スポーツ部女性活躍・県民協働課統計情報室経済産業グループ，2024.
- [2] 菌興椎茸協同組合：菌興号菌種 原木キノコ栽培の総合カタログ 2024年改訂・きのこ種菌.
- [3] 塚本俊介 他：キノコ栽培へのパルス高電圧の利用，プラズマ・核融合学会誌 **79**, 39 (2003).
- [4] 高木浩一：パルスパワー・プラズマの農業・食品分野への応用，電気学会論文誌 A **130**, 963 (2010).
- [5] 高木浩一 他：食用きのこ増産用パルス高電圧発生装置の開発とその効果の検証，農業機械学会誌 **74**, 483 (2012).
- [6] 清水博幸 他：雷撃刺激がシイタケの発生に及ぼす影響，日本きのこ学会誌 **28**, 134 (2020).
- [7] 石川県農林総合研究センター：のとてまり栽培の手引 第4版 (2022).

小特集 高専におけるプラズマ・パルスパワーに関する地域産業との連携

4. 温州みかんのプラズマ殺菌および農薬分解技術の研究開発と実用化の試み

4. Development of a Novel Plasma Device for Practical Application of Disinfection and Pesticide Decomposition on Citrus Unshiu

柳生義人, 作道章一¹⁾, 三沢達也²⁾, 西岡輝美³⁾, 高井雄一郎³⁾

YAGYU Yoshihito, SAKUDO Akikazu¹⁾, MISAWA Tatsuya²⁾, NISHIOKA Terumi³⁾ and TAKAI Yuichiro³⁾

佐世保工業高等専門学校 (現 九州大学大学院総合理工学研究院), ¹⁾ 岡山理科大学獣医学部,

²⁾ 佐賀大学大学院工学系研究科, ³⁾ 大阪府立環境農林水産総合研究所 食と農の研究部

(原稿受付: 2025年1月20日)

長崎県佐世保市で栽培される「させぼ温州」は、その品質の高さから全国的に高い評価を得ている。柑橘類は、緑かび病菌などの微生物による腐敗性病害が問題となっているが、未だに決定的な解決策はない。佐世保高専では、地域の重要な産業である農業において、プラズマ技術による農作物の高度殺菌・残留農薬分解に関する研究に取り組んできた。本章では、誘電体バリア放電プラズマを温州みかんに直接照射することで得られる高い殺菌効果と実用的なプラズマ殺菌装置の研究開発に焦点を当てて紹介する。

Keywords:

plasma disinfection, *citrus unshiu*, green mold spore, pesticide decomposition

4.1 はじめに

長崎県は、全国のみかん収穫量第5位の産地である。特に佐世保市で育成された品種である「させぼ温州」は、長崎県の特産品として知られ、その栽培技術の確立等への取り組みは、平成28年度(第55回)農林水産祭で天皇杯を受賞するなど、非常に高い評価を得ている。一方、農作物が収穫から消費者の手に渡るまでに生じる損失のほとんどが、微生物による腐敗性病害に起因すると言われている。温州みかんでは、緑かび病や青かび病が被害の主体であり、腐敗果の多くは、貯蔵初期から出荷後に発生する。これら病原菌による果実の腐敗は、市場価値の低下や減収などの悪影響を及ぼすため、乾燥予措や温湿度管理などの対策が講じられるが、決定的な解決策には至っていない。農作物の病害の抑制を目的として、収穫前に殺菌剤や防黴剤などの農薬を散布する対策がとられることがあるが、その残留農薬濃度や収穫後の農薬散布(ポストハーベスト)は、国内外問わず厳しく規制されている。

我々はこれまでに農産物や種子、食品をターゲットとして、プラズマを基盤技術とした実用的な高度殺菌・残留農薬分解法に関する研究開発を遂行してきた[1-11]。本章では、緑かび病に対して、温州みかん果皮に大気圧バリア放電プラズマを直接生成したときの殺菌特性および農薬分解特性について紹介する。また、長期貯蔵・長距離輸送にも耐えうる競争力のある柑橘の供給をめざし、現場への導入を想定したコンベア型プラズマ殺菌装置の研究開発につい

て紹介する。

本研究に取り組むにあたり、佐世保市内のみかん農家の方々やJAながさき西海みかん選果所にご協力いただき、温州みかんの選果工程を高専生らとともに見学した。選果場では、果実のハンドリングや光センサーによる酸度、糖度の非接触センシング、カメラを用いた画像処理検査による大きさや色合い、傷や腐敗の確認など、選果システムは、多くの工学的要素から構成されており、高速で選別される様子に、学生達は興味を示していた。一見すると工学とは一線を画す分野に思えるが、普段の講義や学生実験で耳にする技術が導入されている現場から、多くの気づきや学びがあったようである。

また、微生物を取り扱う上で必要な知識や手技に加えて、無菌操作が必要なバイオ実験に欠かせない機器の使用法などは、佐世保高専物質工学科 生物コースの先生方に教えて頂きながら習得した。学科間の垣根が低く、風通しの良い雰囲気醸成されており、気軽に融合領域研究に取り組めるのは、高専の魅力の一つであると感じる。

4.2 温州みかんのプラズマ殺菌

4.2.1 プラズマ直接照射による温州みかんの殺菌

温州みかん (*Citrus unshiu*) 果皮にプラズマ状態のガスを直接照射するため、金属板をシリコン素材の誘電体シートで被覆した誘電体バリア放電電極を作製した(図1)。緑かび病菌胞子 (*Penicillium digitatum*) を散

Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, Kasuga, FUKUOKA 816-8580, Japan

Corresponding author's e-mail: yagy.yoshihito.215@m.kyushu-u.ac.jp



(a)側面.



(b)底面.

図1 温州みかん果皮に生成した誘電体バリア放電プラズマの様子[1].

布した温州みかんを殺菌対象とし、電圧を印加すると温州みかん果皮と電極間にプラズマの生成を確認した。出力電圧10 kV、周波数 約10 kHz (LHV-13AC, ロジー電子株式会社), 照射時間0~5秒, シリコンシートの厚さ0.05~5 mmの条件で、プラズマ照射部分の効果を評価したところ、緑かび病菌胞子は、プラズマ照射時間に依存して殺菌される傾向を示した(図2)。シリコンシートの厚さが5 mmおよび3 mmではプラズマが生成され難いが、1 mm以下では、プラズマ照射による殺菌効果が得られた。シリコンシートの厚さが0.3 mmのとき、1秒間のプラズマ照射で約1/10, 3秒間のプラズマ照射で約1/100に減少した。なお、本試験では、生存している菌が培地上に形成するコロニー(集落)から菌数を評価するコロニーカウント法を採用した。図2の縦軸の単位「CFU (Colony Forming Unit)/mL」は、1 mLあたりの生菌数を表している。

緑かび病菌胞子の殺菌因子には、プラズマ中の活性酸素種(Reactive Oxygen Species; ROS)が考えられ[2], ヒドロキシラジカル, 酸素ラジカルや一重項酸素などの寄与が強く示唆されている。一方、プラズマ殺菌効果は、プラズマが生成された部分およびその周辺のみであり、本技術を実用化するうえで、温州みかん全体を処理する方法を考える必要がある。

4.2.2 ローラーコンベア型プラズマ殺菌装置の研究開発

収穫された温州みかんの多くは、選別のために選果場に運び込まれる。一般的な選果機には、搬送用のローラーコンベアやベルトコンベアが用いられていることから、コンベア型プラズマ殺菌装置を着想した[3, 4]。ローラーコンベア型の電極は、樹脂製ローラー上に設置した金属製

電極をシリコン素材で被覆し、搬送用のローラーとプラズマ生成用の電極を一体化したものである(図3(a))。高電圧電極と接地電極とを交互に配置することで、温州みかんや電極の接触面に誘電体バリア放電プラズマが発生する仕組みとなっている(図3(b))。佐世保高専の学生らと協力し、丸ベルト型ローラーコンベア(特MMC-DR-42-1000L-300W-1000H±50, 株式会社マキテック)を改良して、ローラーコンベア型プラズマ装置を試作した。高電圧電源(LHV-10AC, ロジー電子株式会社)を電極に接続し、電圧10 kVを印加すると、ローラーコンベア上で温州みか

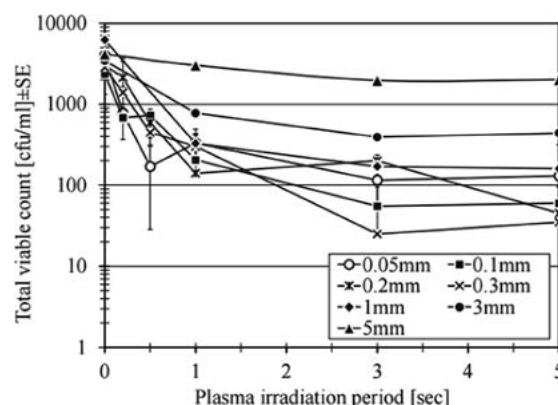
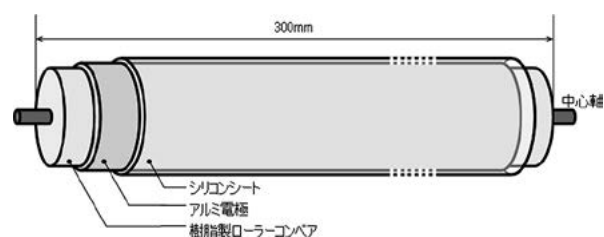
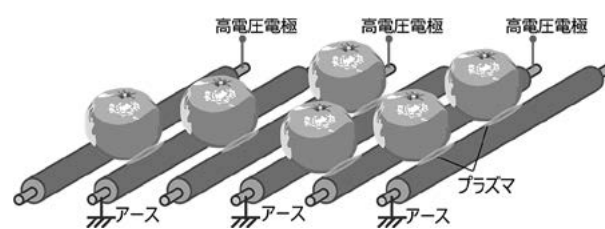


図2 緑かび病菌胞子に対するプラズマ直接照射による殺菌特性[1].



(a) ローラーコンベア型電極の構成.



(b) ローラーコンベア型電極のイメージ.



(c) 温州みかん果皮に生成したプラズマの様子.

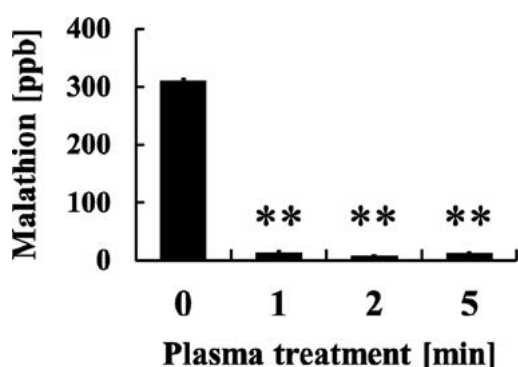
図3 ローラーコンベア型プラズマ処理装置.

んが回転しつつ、その接触面にプラズマの発生を確認した（図3(c)）。一方、初期菌数（1000 cfu/ml）が、約1/10に到達するまでにかかる殺菌時間は、約30分であり、更なる効率化が必要であることが改善点として浮上した。

次にローラーコンベア型プラズマ処理装置の農薬分解への影響を検証した。ここでは、有機リン系殺虫剤のマラチオン（別名 マラソン）および農薬混合標準液PL-14-2に対してプラズマ処理した事例を紹介する。

マラチオン（2.6 mg/mL：AccuStandard, Inc.）を10%メタノールで希釈し、アルミニウム板に20 ml スポットして、37℃のホットプレート（HP-4530, アズワン株式会社）上で風乾させた。この試料をローラーコンベア型プラズマ処理装置の電極に置き、0, 1, 2, 5 分間に渡りプラズマ処理した。ただし、ローラーコンベアは回転させず、常に試料にプラズマが照射される条件で処理した。プラズマ処理後、10%メタノールで回収し、SmartAssay Malathion Test Kit（株式会社堀場製作所）を用いて、マラチオンの濃度を競合ELISA法によって分析した。その結果、マラチオンの濃度は、プラズマ処理後1分以内に著しく減少することが明らかとなった（図4）。具体的には、マラチオンの初期濃度 310.8 ± 2.4 ppbから、プラズマ処理1分後に 13.7 ± 2.1 ppb、2分後に 8.0 ± 0.4 ppb、5分後に 12.5 ± 0.8 ppbに減少した。

また、複数種類の農薬に対するプラズマ照射の影響を調べるために、アセトニトリルで希釈した農薬混合標準液PL-14-2をアルミニウム板にスポットし、37℃のホットプレート（HP-4530, アズワン株式会社）上で風乾させたものを試料とした。マラチオンに対するプラズマ処理方法と同様にローラーは回転させず、常に試料がプラズマ処理される条件で0分および5分間処理した。プラズマ処理後、農薬混合標準液PL-14-2をアセトニトリル200 mlで回収し、ACQuity Ultra Performance LCとTQ MS Xevo™（Waters Corporation, Milford, MA）を結合させ、多重反応モニタリング（MRM）モードでLC-MS/MS分析を行った。このとき、LCカラムはACQuity UPLC BEH C18（100 mm 2.1 mm inner diameter, 1.7 mm particle size; Waters Corporation）を使用した。カラムオープン温度は40℃に維持し、移動相は水と5 mM 酢酸アンモニウムを含むメタノールで構成した。LC-MS/MS分析した結果



**：コントロールに比べて有意差あり（ $p < 0.01$ ）

図4 プラズマ処理時間に対するマラチオン濃度の減少[5].

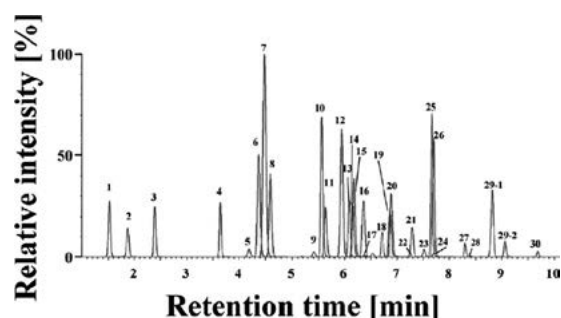
を図5に示す。未処理のときに検出されたPL-14-2中の農薬成分（図5(a)）に対し、プラズマ処理5分後では、各種ピークの減少を確認した（図5(b)）。さらに、プラズマ処理前後のMRMクロマトグラフィーによるピーク面積分析において、農薬混合標準液PL-14-2に含まれるそれぞれの農薬のピーク面積比は、5分間のプラズマ処理後に有意に減少した。未処理を100%とすると、5分間のプラズマ照射で9.5%~61.9%に低下することが示された。

以上より、ローラーコンベア型プラズマ処理装置によるマラチオンおよび農薬混合標準液への農薬分解効果を確認した。プラズマ照射は、農産物の殺菌と残留農薬処理を同時に行える可能性がある。

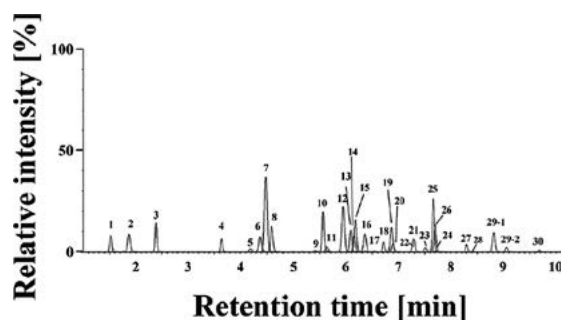
4.2.3 シート状フレキシブル電極を用いたプラズマ殺菌装置の研究開発

ローラーコンベア型プラズマ処理装置による殺菌や農薬分解効果が明らかになった一方、プラズマ発生面積が小さいため、初期菌数の約1/10に到達するのに30分近くもかかってしまう。そこで、我々は、プラズマ処理面積を拡大するために、処理対象の形状に応じて電極の形が柔軟に変化するシート状の電極を考案した。本電極は、柔らかい金属箔を誘電体であるシリコンシートで覆う構造になっており、それをアレイ状に配置することで、処理の効率化をめざした（図6(a)）。

搬送用コンベアに置いた温州みかんにシート状フレキシブル電極を適用すると、その形状に応じて柔軟に変形しており、交流高電圧（10 kVpp, 約10 kHz: LHV-10AC, ロジエ電子株式会社）をシート状フレキシブル電極に印加すると、ローラーコンベア型電極と比較して、広い面積にプラズマの生成を確認した（図6(b)）。また、初期菌数の約1/10に到達するのに必要な時間は約8分となり、殺菌効率を改善

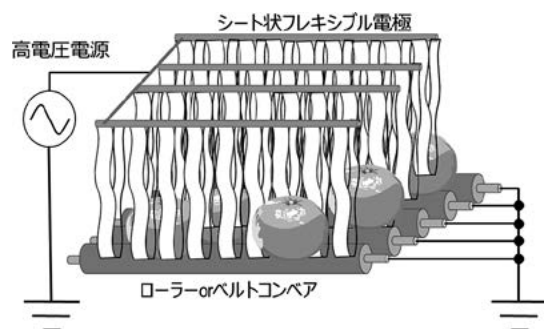


(a) 未処理.



(b) プラズマ処理5分後.

図5 農薬混合標準液PL-14-2に対するプラズマ処理の影響[5].



(a) シート状フレキシブル電極と搬送系の構成。



(b) シート状フレキシブル電極により温州みかん果皮に生成したプラズマの様子。

図6 シート状フレキシブル電極を用いたプラズマ殺菌装置。

することができた。シート状フレキシブル電極は、ローラー型プラズマ殺菌装置と同じく、その電極構成は誘電体バリア放電のため、処理対象物が電極に接触した部分にのみプラズマが生成される。プラズマジェットなど、空間にプラズマを生成する方法と比べると、殺菌処理に必要な消費電力を抑えることができるため、効率的なプラズマ生成法といえる。本電極形態は、プラズマ発生部と搬送系が分離しているため、様々な搬送系に導入し易いことから、他の農産物への応用が見込める。現在、選果場での利用をめざして、企業と共同でプラズマ殺菌装置の開発に取り組んでいる。

4.3 まとめ

温暖な気候と豊かな自然環境に恵まれた長崎県佐世保市は、高品質で評価の高い「させぼ温州」の主産地である。本研究開発は、地域産業としての農業への貢献を目指して、佐世保市内のみかん農家の方々や農業協同組合にご協力頂きながら進められてきた。温州みかんの代表的な腐敗性病害の緑かび病菌の胞子に対して、プラズマ直接照射による高い殺菌能を明らかにするとともに、農薬成分の分解効果を明らかにした。以上より、温州みかんにプラズマを

直接照射することで、果皮を損傷せずに殺菌と残留農薬処理を同時に行える可能性があることを示した。現在は、実用化に向けて、ローラーコンベア型やシート状フレキシブル電極を用いたプラズマ処理装置の研究開発を進め、プラズマ技術による農作物の高度殺菌・残留農薬除去システムの構築に取り組んでいる。

佐世保高専では、地域社会との連携を重視しており、地域産業の課題解決だけでなく、地域の子供達へのSTEAM教育強化の一環として、理科離れ対策や女性理工系人材（リケジョ）の育成にも積極的に取り組んできた（出前授業：年間40件以上、地域公開イベント「おもしろ実験大公開」：参加者2000名以上など）。特に近年は、佐世保高専生を主体とした学生団体「高専エバンジェリスト」を結成し、地域の子供たちに理科や工学の知識・技術を分かりやすく教える活動を展開している。小学校や放課後児童クラブ（学童保育）、米海軍基地内アメリカンスクールなどにおいて、プラズマ教育や理科実験に関するワークショップを開催してきた。高専生自らがロールモデルになることで、子供達の理工系分野への興味関心を育み、科学的リテラシーの向上を目指している。今後も、地域に根差した高専として、地域社会との連携・協働を更に深化させ、地域産業の発展と次世代の理工系人材の育成に貢献し続けることを強く期待している。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、佐世保市内のみかん農家の方々やJAながさき西海みかん選果所にご協力を頂いた。また、微生物を扱う上で必要な手技や装置の取扱いは、佐世保高専物質工学科 山崎隆志先生、越村匡博先生、森山幸祐先生、嘉悦勝博先生にご指導頂いた。本研究の一部は、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業26015Aおよび科研費24108009の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Y. Yagyu *et al.*, Trans. Mat. Res. Soc. Japan **41**, 127 (2016).
- [2] Y. Toyokawa *et al.*, Food Control **72**, 62 (2017).
- [3] 柳生義人, 三沢達也: 作道章一: プラズマ殺菌装置, 日本国特許第6810938号 (WO2017/073641), 2020.
- [4] 柳生義人, 林 信哉: プラズマ殺菌装置, 日本国特許第6270032号, 2018.
- [5] Y. Toyokawa *et al.*, Food Control **87**, 211 (2018).
- [6] A. Sakudo *et al.*, Food Control **73**, 619 (2017).
- [7] 林 信哉, 柳生義人: 電気学会 **136**, 798 (2016).
- [8] A. Sakudo and Y. Yagyu, AMB Express **11**, 16 (2021).
- [9] A. Sakudo and Y. Yagyu, Int. J. Mol. Sci. **23**, 3684 (2022).
- [10] A. Sakudo and Y. Yagyu, Int. J. Mol. Sci. **22**, 5441 (2021).
- [11] A. Sakudo and Y. Yagyu, Int. J. Mol. Sci. **25**, 5986 (2024).

小特集 高専におけるプラズマ・パルスパワーに関する地域産業との連携

5. 大気圧プラズマを用いた塗装剥離に関する研究

5. Research on Paint Peeling Off by Atmospheric Pressure Plasma

中村 翼

NAKAMURA Tsubasa

独立行政法人国立高等専門学校機構 大島商船高等専門学校

(原稿受付：2024年12月4日)

船舶塗装の表層部には、水棲生物の付着を防ぐための防汚成分が含まれている。しかしながら、船舶の推進や経年により、その成分が減少し、十分な防汚効果が望めなくなる。それを補うために、定期的に船渠（通称ドック）と呼ばれる船を建造や修理、係留するための施設で再塗装を行っている。その工程は重ね塗り、剥離作業後に再塗装の2つに分けられる。塗装完工後の船舶表面は、前者が凹凸であるのに対し、後者は平滑化されている。後者において、塗装を剥離する際に造船所等では研削材をコンプレッサーで吹き付けるサンドブラスト法が用いられている。この時、研削材を噴出する圧力によっては、船舶母材に損傷等を及ぼす可能性がある。そこで筆者が大気圧プラズマを用いて塗装の付着性を向上させる研究を展開していたところ、その塗装が剥離し易くなる傾向を得られた。本章では、大気圧プラズマを塗装面に照射することで、その塗装における内部応力の変化から、素地との界面に及ぼす効果について報告する。

Keywords:

atmospheric pressure plasma, strain gauge, internal stress of paint, contraction stress, residual stress of release

5.1 はじめに

塗装の目的とは、建物の外観を保護したり腐食を防いだりすることである。また船舶塗装は多層構造であり、表層に用いられる塗料としては、水生生物の付着を防ぐ目的もある。その塗装の種類としては2つに大別でき、水和分解型と加水分解型がある。水和分解型は、塗装の表面に含まれる防汚成分が徐々に水中に溶けていくことで防汚成分を発揮する。加水分解型は、海水の弱アルカリ成分と化学反応することで塗装表面の樹脂が融解していき塗装表面に防汚成分を保つ。このように両者とも塗料に防汚成分を含んでいる。

しかし、その防汚成分が少なくなると十分な防汚効果が望めなくなるため、再塗装を施す必要がある。図1に船舶再塗装後の様子を示す。再塗装の工程は、同図上段に示す、重ね塗り、中段の剥離塗装に大きく分けられる。重ね塗りでは、現状の塗装を剥離する作業を行わず、上から塗り重ねるため表面に凹凸ができる。他方の剥離塗装では、ブラスト処理など処理工程に多くの時間を要するが、多層塗装完工後はその表面が平滑化され、塗装後の状態としては良好となる。しかし、この塗装剥離作業は造船所などで、塗装表面に研削剤と呼ばれる細かいスラグをコンプレッサーで吹き付けるサンドブラスト法が用いられている。この方法では研削材を噴出する圧力が強すぎると、母材である船舶鋼板が減肉（損傷）する恐れがある。

一般的に塗装を剥離させる方法として、水溶液系および

溶剤系を用いる化学的方法、ヘラや研磨剤を用いる物理的・機械的方法、塗装を熱分解する熱的方法の3つに大別される[1]。化学的方法を例にとるとこの方法は対象物の化学的耐性によって使用の制限が生じる。

このように塗装を剥離させる際には、対象物の用途によって最適な剥離方法を選択する必要がある。それらと比

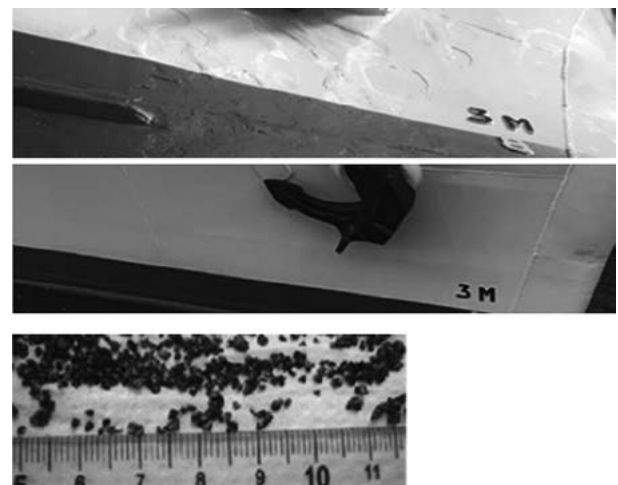


図1 船舶塗装の様子。
上段：剥離作業を行わず、上から重ね塗り。表面に凹凸ができる。
中段：処理工程に多くの時間を要するが、多層塗装完工後は平滑化。
下段：剥離作業に用いられるスラグ。

較して、本研究課題の優位性は、処理対象物の材質等に制限されることなく、大気圧プラズマ（以下、プラズマ）を用いた、水溶液系や溶剤系を用いず乾燥工程を必要としないドライ洗浄で塗装を剥離させる技術が確立されるとあらゆる塗装の剥離に適応でき、再塗装等の作業効率化につながると考えた。

以上の経緯を踏まえ、筆者らはプラズマを用いて塗装を施す素地とその塗装の付着性を向上させる研究を行ってきた[2-4]。その過程で、塗装した試料の塗装面にプラズマを照射すると、塗装が剥離し易くなる傾向[5]が得られたため、プラズマを塗装表面に照射することで塗装と素地の界面に及ぼす影響について報告する。

5.2 実験内容

5.2.1 誘電体バリア放電と実験の概要

本研究ではプラズマを塗装したサンプルに照射した際の熱による損傷を考慮し、熱非平衡プラズマを採用している。大気圧下でプラズマを生成する方法は数多くあるが、ドライ洗浄や表面処理に応用されており、最も簡単に安定したプラズマを生成できる誘電体バリア放電（DBD; Dielectric Barrier Discharge）を採用した。

誘電体バリア放電は、単にバリア放電や無声放電とも言われている。このバリア放電の優位性は、ガス温度が低く、常圧でも生成可能であり、熱非平衡プラズマであるという点である。またバリア放電は図2に示すように平行平板内の平等電界下でプラズマを生成するため、均一表面処理に非常に適しており、電極面積を大きくするなどして、大面積への拡張も可能となっている。またその構造は同図に示すように、2つの電極の片側もしくは両側を誘電体で遮蔽することで構成され、電極間に交流電圧を印加すると誘電体間のギャップ間にプラズマが発生する。なお電極間に印加した電圧・電流の波形例も図2に示しており、商用電源からボルトスライダー（S-130-10、山菱電機株式会社）で一次側入力電圧を調整した後、ネオントランス（CR-N16、小寺電子製作所）を用いて電極間に12.5 kHzの交流高電圧を印加している。

このプラズマが生成される部分をリアクタと呼ぶ。放電空間に誘電体を挿入することで放電電流を制限できるため、アーク放電への移行を防ぐことができる。なお本研究では誘電体にアルミナを使用している。

誘電体バリア放電の特徴はストリーマ形式の絶縁破壊が生じることで、直径約100 μm のフィラメント状のプラズマが時間・空間的にランダムに形成され、電極間の広い範

囲を電離する[6]。ストリーマが進展する速度は、外部電界の大きさによって決まる電子のドリフト速度の約10倍に達する[10⁸~10⁹ cm/s][7]。そのため、図2の印加電圧・電流波形の一例に示すように、スパイク状の電流パルスが電圧波形の半周期に観察される。個々のストリーマが非平衡プラズマ源に相当しており、オゾン生成、エキシマランプ、排ガス処理、有害物質の分解、除菌・殺菌、燃料改質など、気相反応を中心に幅広く応用が検討されている[8]。

個々のストリーマにおける電子密度は10¹²~10¹³ cm⁻³、電子エネルギーは最大で1~10 eVと言われているが[9]、原料ガスと誘電体を含むリアクタ構成でストリーマ1本あたりの電気的、化学的性質が決まれば、プロセス全体の性能は概ね把握することができる。ストリーマの本数[数密度：本/cm²/時間]を変えるためには、周波数、印加電圧波形などの外部パラメータを制御することで可能であるが、ストリーマ自身の電子数密度や電子エネルギーまで制御するには至らないことが多い[7]。

電極（リアクタ）間に印加する電圧の違いが塗膜の内部応力や塗装と素地の界面に及ぼす影響を考察するため、表1に示すパラメータで実験を行った。次節で記述する塗膜の内部応力測定では、3軸ロゼットひずみゲージ（KFRPB-5-120-D22-9 L1M2S）を用いてブリッジ回路によりひずみ測定をすることを1回とし、合計6回（60秒間）照射した。また照射距離とは、上部誘電体と塗装されたサンプル表面までの距離を示す。

バッファガス（ヘリウム）を採用している理由は、大気圧下でプラズマを安定かつ均一に生成させるためである。ヘリウムのイオン化エネルギーは24.5 eVと全ての気体中で最も高いエネルギーを持つが、そのすぐ下に約20 eVの

表1 実験パラメータ。

印加電圧[kV]	8, 9, 10
プロセスガスの種類と流量[L/min]	Helium, 5
プラズマ照射距離[mm]	8
照射時間の間隔[sec]	10 (total 60)
電源周波数[kHz]	12.5
電源容量[VA]	182

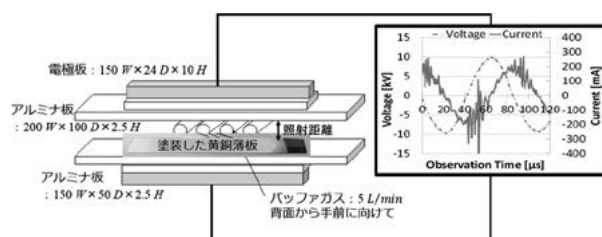


図2 印加電圧・電流の波形例とリアクタの構成。

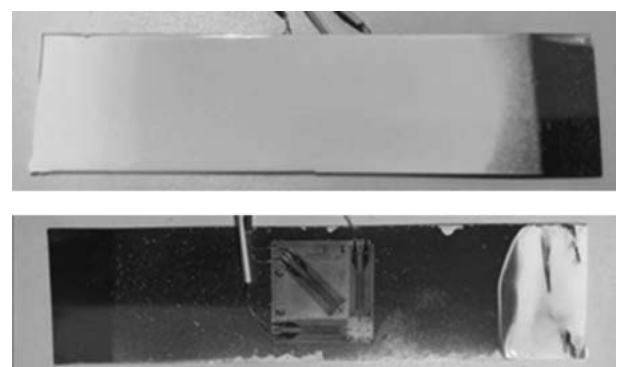


図3 塗装したサンプル。
上段：黄銅薄板（ $h_1 = 0.1$ [mm], $E_1 = 103$ [GPa]）の表面に塗装。
下段：黄銅薄板の裏面に3軸ロゼットひずみゲージを貼り付け。

長寿命準安定状態があるため、持続放電中においては実質上のイオン化にはその差、約4 eVしか必要としない、そのため大気圧中の放電開始電圧が4 kV/cmと、全ての気体中で最も低い値を示すことが知られている[10]。

5.2.2 塗膜の内部応力測定法[11]

前述のリアクタでのプラズマ照射領域を考慮し、板厚0.1 mmの黄銅薄板(C2680, ヤング率103 GPa)を100×25 mmの大きさに切り出した。その後、図3に示すように、その裏面中央部に3軸ロゼットひずみゲージを貼り付け、表面にニトロセルローズ系のラッカースプレーで塗装し、これを内部応力測定用試験片とした。

内部応力の算出方法は試験片に貼り付けられたひずみゲージより測定されたひずみ ε を式(1)の曲率半径[11] r に換算し、そこから井上・小畠氏[12]が導いた式(2)に代入して収縮応力 P を求めた。

$$r = \frac{(1+\varepsilon)h_1}{2\varepsilon} \quad (1)$$

$$P = \frac{(E_1 h_1)}{12r} \cdot \frac{2}{\frac{h_2}{h_1} \left(\frac{h_2}{h_1} + 1 \right)} \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{h_1}{h_1 + h_2} \right)^3 \right] \quad (2)$$

ここで、 E_1 は黄銅板のヤング率、 h_1 は黄銅薄板の板厚、 h_2 は塗膜厚である。なおマイクロメータ(Digimatic Micrometer, MDC-25MX, MITUTOYO)を用いて、塗装後48時間経過した試験片試料の塗膜を測定(3サンプル、ひずみゲージの周囲5ヶ所、計15ヶ所)したところ、 $h_2 = 120 \pm 59.3 \mu\text{m}$ であった。

5.3 実験結果および考察

5.3.1 塗膜の内部応力測定法

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を図4に示す。縦軸は収縮応力[MPa]、横軸はプラズマを照射した積算時間[sec]を表している。また黄銅薄板の裏面に3軸ロゼットひずみゲージを貼り付けた時(塗装前)の収縮応力を0 MPaとしているため、プラズマ照射0秒では、黄銅薄板表面を塗装・乾燥した影響で収縮応力が発生している。

印加電圧8 kVの時はプラズマ照射時間20秒で収縮応力が約7 MPa減少、すなわち塗膜が膨張している。その後、

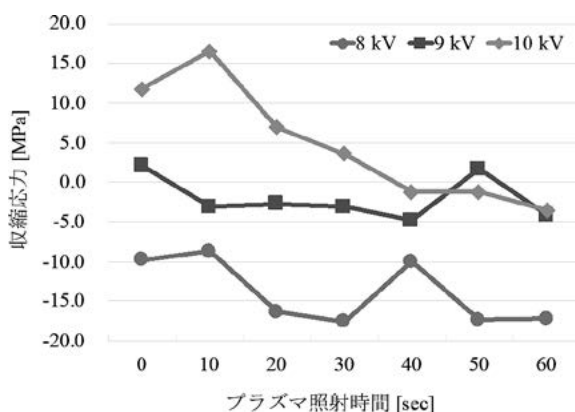


図4 印加電圧による塗膜の内部応力変化。

40秒照射すると収縮応力が約7 MPa増加、すなわち塗膜が収縮している。印加電圧9 kVでもプラズマ照射時間40秒から60秒の間で同じ状況が生じた。

印加電圧10 kVでは、プラズマ照射時間10秒で約5 MPaほど収縮応力が増加した後、その後は減少し、再び増加に転じることはなかった。

これらの結果から共通して言えることは、規則性や周期性はないが、プラズマを断続的に照射することで、収縮応力が増減、すなわち膨張と収縮が発生していることである。

参考までに、これまで実施してきた研究成果より、剥離に必要な荷重から応力を算出したところ、5.7~9.6 MPaであり、今回計測した収縮・膨張する応力でも剥離するのに十分であると考えられる。

5.3.2 プラズマ照射が塗装と素地の界面に及ぼす影響

塗装が剥離する一般的な環境要因として、次の4つが挙げられる。

1. 熱(日中・夜間の温度差)
2. 水分
3. 溶剤
4. 紫外線

これらの内、2と3については、水分を吸収できる環境下で実験を行っていないことと、塗装して48時間経過した試験片試料を使用していることなどを踏まえると、今回の塗装剥離の主な要因からは除外できると考える。

一般的に塗装が剥離する要因として、熱(温度差)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[13, 14]。船舶を例にとると、気温以外にも海水によるものや、バラストタンクなどへの注水排水で生じる温度差もあり、塗膜乾燥時の気化熱による温度差もある。また、今回使用したラッカースプレーには溶剤としてシンナーを含んでおり、この溶剤が蒸発する過程においても、塗膜内部が収縮することで内部応力が発生する。

これら以外にも、熱による線膨張係数の差によって生じるひずみの影響もある。今回使用したサンプルの線膨張係数は、黄銅が $18 \sim 23 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、ラッカースプレーは $1 \times 10^{-4}/\text{K}$ とその差が大きいため、それぞれのひずみの差も大きくなり、その差がせん断応力として塗装と塗膜の界面に生じていることが想定される。

4の紫外線については、図5に示す大気圧プラズマの発光分光計測の結果より、波長が400 nm以下の紫外線領域

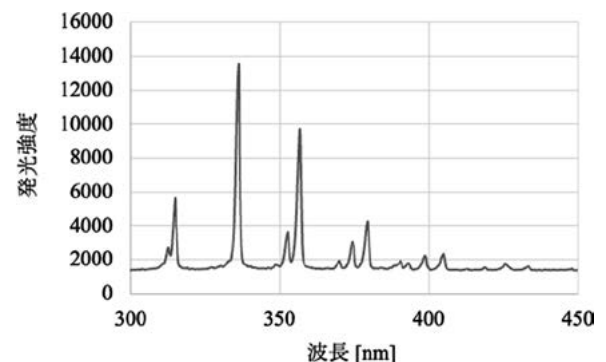


図5 印加電圧12 kV時の発光スペクトル。

の波長が観測されていることから、紫外線が原因で内部応力に変化[15]が生じた可能性もある。なお、この分光計測を行ったパラメータは表1の印加電圧が12 kVであること以外同じであるが、プラズマ照射時に収縮応力測定用の試験片を挿入していない。

また塗料メーカーに確認したところ、以下の理由で紫外線が塗膜の内部応力に影響を与えると考えられる、とのことであった。

- 塗膜に含まれる樹脂の主鎖（共有結合部分）の切断を引き起こす。
- エポキシ樹脂は比較的、この紫外線に弱く主鎖の切断が起こりやすいと言われている。
- エポキシ樹脂はアミンにより架橋された塗膜であるため、主鎖の切断が起こると樹脂の3次元架橋構造が崩れる。

以上を踏まえると、プラズマを塗装表面に照射することで、その熱エネルギーが起因して母材である黄銅薄板が膨張・収縮する。その後、黄銅薄板と塗膜の線膨張係数の差によって生じるせん断応力の影響で、その界面の微小区間で剥離が生じる。この微小区間の剥離が起こることで、塗膜-素地界面で残留応力が解放され、収縮応力の増加につながる。併せて、紫外線照射による影響として、樹脂の主鎖（共有結合部分）の切断が生じて、3次元架橋構造が崩れ剥離し易い状況になる。

また塗膜の剥離に必要な荷重を計測した結果[16]から、プラズマ照射距離等を一定とし、印加電圧をパラメータとした場合、印加電圧が6 kVの時に剥離に必要な荷重が約3.5 kNに対し、10 kVでは約2.4 kNに減少している。このことから、印加電圧が低い場合、塗膜剥離に必要な荷重が大きいと、前述の界面における微小区間での剥離よりも塗膜の収縮応力に影響を与えていると考えられる。その結果、塗膜が剥離し難くなっている。

以上より、この成果の応用として、プラズマ照射時のパラメータを調整することで、塗装と素地界面における微小区間での剥離や塗装自体の収縮応力に影響を与えることができ、その結果として塗装を剥離し易くも、剥離し難くもできる可能性を示すことができた。

5.4 まとめ

船舶の塗料には水生生物の付着を防ぐ役割もあり、その再塗装工程に着目した。筆者は船舶母材に塗布する防錆塗料と母材の付着性を向上させる研究を展開している過程

で、塗装が剥離し易くなる傾向を確認した。そこで、プラズマを塗装表面に照射することで、その塗装と素地の界面に及ぼす影響について検証を行った。

3軸ロゼットひずみゲージを用いて、塗膜の収縮応力を計測したところ、その塗装が収縮および膨張している結果が得られた。この理由として、塗装した表面にプラズマを照射することで、塗膜と素地界面の微小区間での剥離が生じ、残留応力が解放されたためと考察された。またプラズマ照射時のパラメータを調整することで、塗膜の収縮応力に影響を与え、塗装の付着性・剥離性を調整できる可能性を示すことができた。

最後に、本研究課題はJSPS科研費JP 17K14885とJP 20K04944の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 佐藤弘三：塗装の付着-そのメカニズムの理論と解説-（株式会社理工出版社，1981）。
- [2] 中村 翼 他：マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集 84th Page.157-158 (2014)。
- [3] 小野匡棋 他：電気学会新エネルギー・環境研究会資料，Vol. FTE-08 No.1-10 Page.31-35 (2008)。
- [4] T. Nakamura *et al.*, Collect Tech Pap 38th AIAA Plasmadynamics Laser Conf Vol 2 2007, Page.789-794 (2007)。
- [5] T. Nakamura *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. **44**, 3135 (2016)。
- [6] 野崎智洋 他：プラズマ・核融合学会誌 **83**, 942 (2007)。
- [7] 野崎智洋：プラズマ・核融合学会誌 **85**, 46 (2009)。
- [8] U. Kogelschatz, Plasma Chem. Plasma Process. **23**, 1 (2003)。
- [9] B. Eliasson *et al.*, I J. Phys. D: Appl. Phys. **20**, 1421, (1987)。
- [10] 小駒益弘：大気圧プラズマの生成制御と応用技術（サイエンス & テクノロジー株式会社，2008）。
- [11] 牛尾清治 他：色材 **44**, 262 (1971)。
- [12] 小島陽之助、井上幸彦：工業化学雑誌 **61**, 43 (1958)。
- [13] 清水悠平 他：DNT コーティング技報 No.19, p.3-12 (2019)。
- [14] 西森修次 他：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 (2019)。
- [15] 越智光一 他：高分子論文集 (Kobunshi Ronbunshu) vol. 47, No. 7, pp.559-567 (1990)。
- [16] 森戸健太 他：電気学会研究会資料 新エネルギー・環境研究会資料，Vol. FTE-16-44(39-52) Page. 31-36, (2016)。

小特集 高専におけるプラズマ・パルスパワーに関する地域産業との連携

6. 液中プラズマを用いた船舶油分解に関する研究

6. Study on Ship Oil Cracking using Underwater Discharge Plasma

佐久間 一行

SAKUMA Ikko

弓削商船高等専門学校 商船学科

(原稿受付：2024年12月20日)

弓削商船高等専門学校における船員の労務負担軽減をめざした船舶廃油処理手法の開発について紹介する。船舶における廃油処理において特に乳化ビルジ（油水混合物）の処理が問題となっており、液中プラズマによる新しい処理方法を提案する。液中プラズマ実験装置では、アルゴンガスに両極性パルス印加し放電によってプラズマを生成し、デカンや模擬ビルジ試験体に対する分解実験を実施した。ここでは、デカン分解実験によって時間あたり0.002–0.004 g/hの分解量を確認し、プラズマ表面積拡大による処理効率向上の可能性を見出した研究について紹介する。

Keywords:

in-liquid plasma, atmospheric plasma, emulsified bilge, under water pulsed discharge plasma,

6.1 はじめに

6.1.1 船員の労務と船舶油処理について

海洋立国である日本では、貿易量の99.6%（トン数ベース）[1]を海上輸送が占めており、その担い手である船舶職員の多くは海技士と呼ばれる国家資格を有する。著者が所属する弓削商船高等専門学校商船学科は高等専門学校であるため、中学校を卒業した者を新入生として迎え入れており、学生は5年半の課程を修了して卒業すると口述試験のみで無資格から3級海技士資格取得することができる。こうした商船学科をもつ高専は商船系高専と称し全国に5校あり、これらは国土交通省から海技従事者を養成するための施設認定（第1種養成施設）を受けている。

こうした制度がある一方で、各業界同様に海運業界においても船舶職員の担い手の確保に苦慮しており、人材確保に向けた取り組みとして、新造船の建造や国土交通省所管の養成機関では養成定員の増加などの方策を行っている[1]。商船系高専も新造船の建造が認められ、弓削商船高専も2024（令和6）年に新造船が竣工し学生の実習などに運用されている。

船員の業務は、国際的な条約（MLC2006[2]）に基づく船員法などで労働時間が制限されるなど一定の制限があり、運航にあたる職員や船舶会社は効率的な業務負担の軽減に苦慮している。

船舶機関部において、時間を要する業務の一つに廃油処理がある。船舶内では燃料油をはじめ多種多様な油類を使用するためそれらの一部が廃油として生じる。この中でも、船底に様々な経路を通じて溜まる水、油や洗剤などの

混合物をビルジと称し、汲み取ってビルジタンクに貯め、油水分離された後に油分は廃油として処理される。廃油は、船内に焼却設備がある場合、濃度に応じて固形物を取り除いた後に焼却処理が可能であるが、ビルジは洗剤などに由来する界面活性剤が混入することがありこれによって乳化するため、油水分離器では分離ができず別途フィルタ処理によって油分を分離する必要がある。このため、現在の船舶では国際海事機構によって、乳化ビルジの油水分離処理が可能な設備の搭載が求められている。

そこで、本研究ではこうした背景を踏まえて、船員の労務負担軽減のために焼却処理すべき廃油の発生を抑制する技術として、水中で発生させるプラズマをビルジ水に適用し、油分を分解する手法の実現に向けた基礎的な実験を実施してきた。既存の処理フローおよび提案手法の流れを図1に示す。ビルジはビルジタンクから、油水分離されたのちに焼却される。一方で、乳化している場合には、フィルタなどによってビルジを解乳化して油分を濃縮したのちに焼却される。そこで、ビルジタンク内で稼働するプラズマ処理装置を提案し模擬実験に取り組んできた内容を紹介したい。

6.1.2 液中プラズマによる分解実験

大気圧プラズマの応用である液中プラズマ[3]は、近年注目されており、広くは気液の界面で生じるプラズマが液中プラズマや水中プラズマに相当するが、ここでは、より狭義に捉えて、液相中の気泡内にプラズマを生成する現象を指す。気泡の形成には、溶液の沸騰などによる気泡形成のほか、アルゴンガスなどの希ガスを外部より導入して、

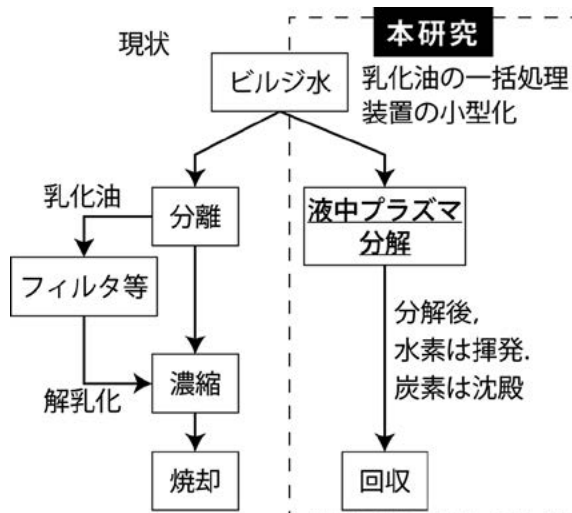


図1 液中プラズマ装置によるビルジ処理工程の概略図[4].

希ガスによる大気圧プラズマ環境を液体中に再現する方法があり、本研究ではこの後者にあたる方法を用いた。これにより、気泡内でのプラズマ生成条件などは概ね外部より導入する希ガスによる影響を受けると考えられる。

液中プラズマを用いた油水分解実験は、先に述べた通り乳化ビルジ中の油分の分離処理が追加されることによって処理が煩雑になることに問題があるため、乳化ビルジを直接処理することを目的としている。そこで、本研究では、乳化ビルジを模擬した乳化ビルジ試験体に対する液中プラズマ放電実験による油分処理を実施した。また、この実験に先駆けて、液中プラズマ実験装置の油分処理性能評価として炭化水素であるデカン分解実験などの各種放電実験を実施した。

6.2 液中プラズマによる油分分解実験

6.2.1 液中プラズマ実験装置

図2に実験装置の概略図を示す[4]。反応容器はホウケイ酸ガラス製の円筒管で直径30 mm、内径26 mmである。電極は、ガラス管に開けた左右の穴からシリコン栓で蓋をしつつ挿入する。電極はタングステン棒 ($\phi 1$ mm, ニラコ社製) 材料を使用し、その外側を絶縁用のセラミック管

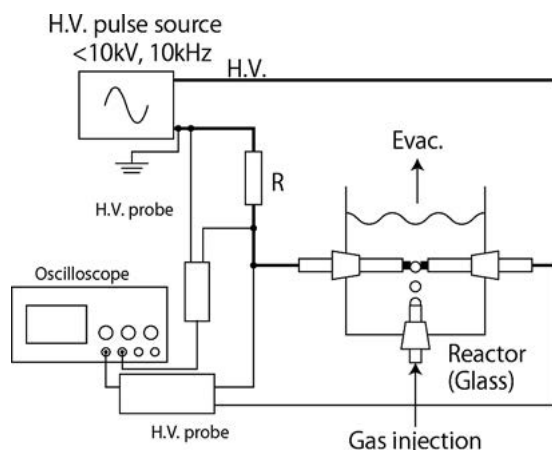


図2 液中プラズマ実験装置概略図[4].

(外径2 mm, 内径1 mm, アルミナ, ニラコ社製) で覆っており、水中にはタングステン棒の先端0.5 mmのみを露出させている。電極間距離は0.5–2 mm程度で可変であり、気泡注入のガラス管はセラミック管に接するように配置されている。これはガラス管から導入される気泡が電極を避けて浮上して放電が生じないことを避けるためである。また、下方からガラス管を通じてアルゴン (Ar) ガスが液相中に注入される。

電源は両極性パルス電源 (玉置電子工業株式会社製, TE-HVP1010K300-NP(C), 最大印加電圧 V_{pp} : 10 kV, パルス半値幅: $\sim 5 \mu\text{s}$, 周波数: 10 kHz) を用いた。また、電源回路は長時間放電による焼損や加熱を抑えるため図2に示すように、電流制限用のホーロー抵抗器 (OHMITE社製, L100J10KE, 10000 Ω , 100 W) を接続した。電圧計測は高電圧プローブ (Pintek社製 DP-22Kpro, $< 7.8 \text{ kVrms}$ および Instek社製 GDP-050, $< 2.3 \text{ kVrms}$) を用いて計測し、回路の電流は電流センサ (URD社製, CTL-6-P-Z, 検出抵抗100 Ω) を用いて計測してそれぞれオシロスコープ (RIGOL社製, DS1054) に接続して波形を取得した。放電が無い状態の水中での電極間電圧電流波形を図3に示す。電極間に印加される高電圧パルスは一つのパルスが5 μs 程度の半値幅をもちパルス波が数回両極で繰り返す。

このパルスが10 kHzの繰り返し周波数で電極間に印加される。

実験中の計測として、十分な発光が目視できるため可視分光計測を実施した。放電する電極間を正面に捉えて、平面凸レンズ (シグマ光機社製, SLSQ-20-30P) を通して光ファイバに集光して彩光し、分光器 (Avantes社製, AvaSpec ULS3648-USB2, 計測波長: 200–1100 nm, 波長分解能: 0.6–0.7 nm) に導いてプラズマからの発光分光計測を行った。典型的なAr放電時の分光計測結果を図4に示す。露光時間は400 msで3回平均によって取得しており、電極間距離を1, 1.5 mmと変化させている。スペクトルは主に水由来の H_{α} (656.28 nm), OHラジカルバンド (309 nm) および微弱だが H_{β} (486.13 nm), Ar由来のAr I (810.36 nm他) が観測された。また, O I (777.19 nm) も観測された。

6.2.2 デカン分解実験について

液中プラズマ実験装置による分解性能を調査するために

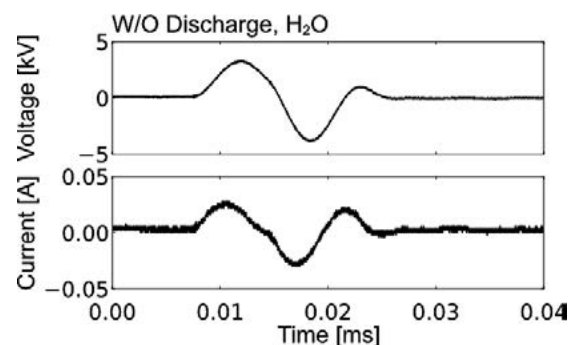


図3 放電前の典型的な高電圧バイポーラ電源電圧電流波形[4].

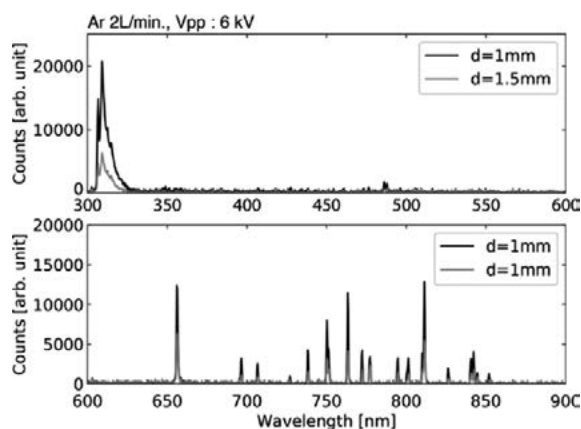


図4 典型的な液中 Ar プラズマ放電時の分光計測結果[5].

ビルジを模擬した油水を用いて放電実験を実施した。油分の模擬としてデカン ($C_{10}H_{22}$) を用いており、デカン混合水 (デカン 15 ml, 水 35 ml) に対して放電実験を実施した。また、乳化したビルジでは界面活性剤が混入するため、界面活性剤 (直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウム (LAS)) を溶解させた水溶液中での放電試験も実施した。図5に放電中の分光計測結果を示す。図5(a)はデカン混合水の実験結果を示しており、最も強く発行しているバンドが C_2 Swan 帯[6]と考えられ、炭素2個の分子が励起されることによって生じるものとされ、炭化水素の燃焼時などに観測されるとされるが、ここではAr プラズマによる熱などでデカンが分解して C_2 分子が形成されたため、発光が生じていると考えられる。また、水におけるAr プラ

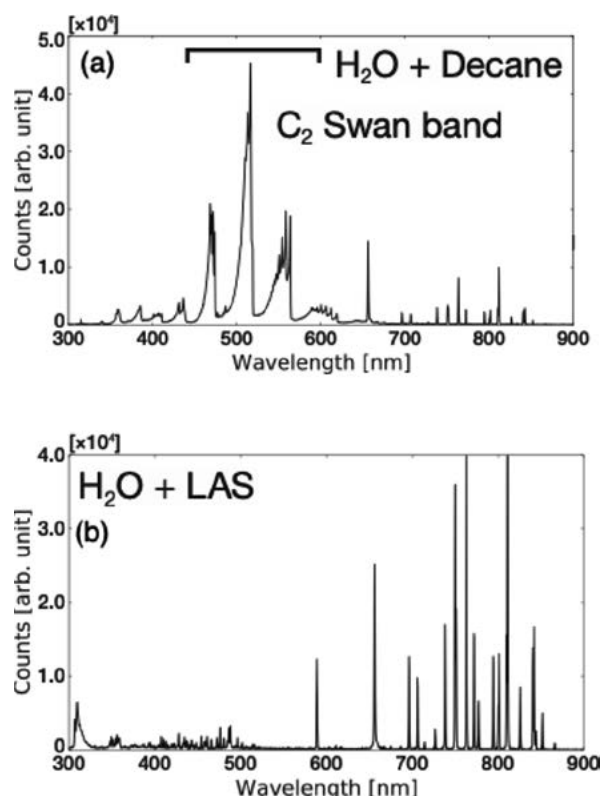


図5 混合水への放電実験時の分光計測結果：(a) デカン混合水中での放電時、(b) LAS 水溶液中での放電時。

ズマ同様 $H\alpha$ (656.28 nm) や Ar I (810.36 nm 他) が観測されているが、OH ラジカルは極めて微弱なスペクトルとなっている。図5(b)では、界面活性剤であるLASのみを溶かしたLAS水溶液中でのAr プラズマ放電中の分光計測結果を示しており、LASを構成する物質の一つであるナトリウムに由来と考えられるNa I (589.0 nm) の発光が観測された。したがって、LAS水溶液においても液中プラズマを生成することができ、また、LASが分解されている可能性があることから、乳化したビルジ中においても放電により液中プラズマを形成し油分や界面活性剤を直接分解できることが期待される。

デカン混合水の分解実験では、デカンはプラズマの熱などによって分解されると考えられるが、分解後は残渣が沈澱し、これは結晶構造などを持たない不定形炭素の集合体であることが顕微ラマン分光計測によって明らかとなった。

この実験をもとに、デカン (30 ml) のみに対する放電実験を実施し、沈殿物の生成量を調査した。図6に沈殿物の生成量を示す[4]。ここでは放電電圧 V_{pp} を5 kVに設定して放電時間を変化させて析出する炭素の質量を調査した。ここから時間あたりの分解量は0.002–0.004 g/hであると考えられる。拡大解釈ではあるが、気泡の界面で分解反応が生じているため、プラズマの表面積を 1 m^2 まで拡大させると分解量は1.3–2.5 kg/hと考えられる。実用上は、これを確認するためにも、プラズマの表面積変化による実験データの取得に勤めたい。

6.2.3 ビルジ模擬試験体分解実験について

船舶ビルジを対象とした分解実験について、実機のビルジは成分が不確かであることや変化することから、模擬サンプルを使用した実験を紹介する。本研究では、参考文献[7]に基づき乳化ビルジ試験体を作製した。放電実験は、電源電圧 V_{pp} は5 kVに設定し、試験体は十分に攪拌させたものを合計で30.0 g使用した。放電時間は2–4時間でデカン単体での実験や混合水に比べて油分濃度が低く5 wt%程度の条件での分解実験の実施となった。ビルジ試験体は乳白色をしており、分光計測は光が透過しないため計測できなかったが、放電時の様子はデカン分解時同様の青緑の

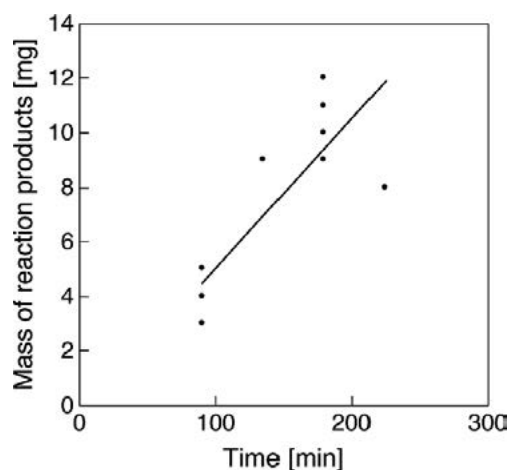


図6 デカン分解実験時の実験時間-分解生成物特性。

発光が肉眼で観測できたため、油分が分解され C_2 Swan band の発光が生じていることが推測される。

実験後は、分解による残渣が生じたが、デカンとは異なり、ビルジ試験体が極めて粘性の高い状態となり、正確に残渣を取り出して質量を計測することができなかった。しかしながら、一部採取した残渣から鉄粉とは異なる物質の生成が確認された。

6.3 まとめ

ここでは、船舶の労務負荷軽減を目的として、ビルジに含まれる廃油の新しい処理方法の提案をめざした初期実験について報告した。従来、ビルジは油水分離後に焼却処理されるが、界面活性剤による乳化が処理を複雑にするという課題があった。

そこで本研究では、液中プラズマを用いた水中での一括処理方法を提案した。電源に高電圧パルス電源を使用し、電極間の放電によって液中プラズマを生成する実験装置を構築した。基礎実験としてデカン ($C_{10}H_{22}$) の分解実験を実施し、その結果、分解過程で C_2 Swan 帯の発光が観測

され、デカンが熱分解されて不定形炭素として沈殿することが確認された。時間当たりの分解量は $0.002-0.004$ g/h で、プラズマ表面積を 1 m^2 まで拡大すると理論的には $1.3-2.5$ kg/h の処理が可能と推測される。

さらに実際の応用を想定し、乳化ビルジを模擬した試験体による実験も実施した。同様の分解反応が確認され、この手法の実用化可能性が示唆された。ただし、残渣の正確な質量測定には課題が残されている。

参考文献

- [1] 国土交通省：海事レポート2024 (2024).
- [2] International Labour Organization, Maritime Labour Convention (2006).
- [3] S. Nomura *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. **20**, 034012 (2011).
- [4] 佐久間一行：弓削商船高等専門学校紀要 **45**, 6 (2023).
- [5] 佐久間一行：弓削商船高等専門学校紀要 **41**, 7 (2022).
- [6] 白井紘行 他：日本航空宇宙学会誌 **34**, 135 (1986).
- [7] 日本造船研究協会：油の排出管理機器に関する調査研究成果報告書, RR-E201 (2003).



小特集 高専におけるプラズマ・パルスパワーに関する地域産業との連携

7. 高専における加速器製作の取り組み

7. Making Accelerators at Colleges of Technology (KOSEN)

大谷 将士, 熊谷 勇喜¹⁾, 谷 敷 怜 空¹⁾, 斎 藤 栄 輔²⁾, 岡 本 恵 太²⁾,
柳 澤 有²⁾, 佐 々 井 祐 二³⁾, 三 宅 望 々 香⁴⁾, 長 尾 和 樹⁵⁾, 平 野 進 —⁵⁾
OTANI Masashi, KUMAGAI Yuki¹⁾, YASHIKI Riku¹⁾, SAITO Eisuke²⁾, OKAMOTO Keita²⁾,
YANAGISAWA Yu²⁾, SASAI Yuji³⁾, MIYAKE Momoka⁴⁾, NAGAO Kazuki⁵⁾ and HIRANO Shin'ichi⁵⁾

高エネルギー加速器研究機構, ¹⁾ 豊田工業高等専門学校, ²⁾ 長野工業高等専門学校,

³⁾ 岡山商科大学, ⁴⁾ 津山工業高等専門学校, ⁵⁾ 小山工業高等専門学校

(原稿受付: 2024年11月29日)

プラズマ・核融合分野をはじめとした様々な分野の基盤技術として, 利用・進化し続けている加速器技術だが, 加速器に対する世間の認知度は高いとは言えず, 高等教育課程において関連する技術や科学に実際に触れる機会も多くない. このような現状で, 持続可能な加速器科学の発展には, 次世代を担う人材の育成・発掘をめざしたプログラムの樹立が急務である. そこで, 高等専門学校(高専)スタッフと加速器分野の研究者が協力し, 高専で学生自らによる加速器製作を中心とした活動「AxeLatoon」が数年前に発足し, 現在, 4高専約40名の高専生が活動を行っている. 本記事では, 小山・長野・豊田・津山高専で実施している活動内容を紹介する.

Keywords:

accelerator, cyclotron, outreach, college of technology (KOSEN)

7.1 はじめに

20世紀初頭から現在に至る加速器科学の発展は種々の量子ビームの利用を可能にし, ヒッグス粒子の発見や量子線治療など人類の叡智を切り拓いてきた. 現在においても, 先端技術として基礎科学から様々な社会的問題の解決まで加速器技術は進化するとともに, プラズマ・核融合分野をはじめとした様々な分野の基盤技術として, その利用は拡大し続けている. 一方で, 加速器に対する世間の認知度は高いとは言えず, また, 高等教育課程において関連する技術や科学に実際に触れる機会も多くない. 持続可能な加速器科学の発展には, 加速器科学の次世代を担う人材の育成・発掘を目指した教育・アウトリーチプログラムの樹立が急務である.

そこで我々は, 高等専門学校(以下, 高専)において学生自らによる加速器製作を中心とした活動「AxeLatoon(アクセラトゥーン)」を開始した(図1は本活動のロゴマーク. 本活動メンバーについてHP[1]参照). 本プログラムでは, KEKや理研, 名古屋大学などの研究所・大学のスタッフが高専と協力して, 加速器分野の人材育成と加速器の知名度向上をめざして活動している.

本章の構成は以下の通りである. まず, AxeLatoonプログラムの構想と高専での加速器製作までの経緯を7.2節で述べる. 続いて, 7.3節では各高専での活動を紹介する. 最後に, 今後の展望とまとめをそれぞれ7.4節, 7.5節で述べる.

7.2 AxeLatoonの設立と活動準備

2019年度末に, 高専とKEKや理研の研究者からなるAxeLatoonコラボレーションを結成した. 我々は, 高専で高専生自らの手による加速器製作活動を通じて, 加速器分野の次世代を担う技術者・研究者の発掘・育成することを目的としている. 最終的には, 加速器製作活動を全国の高専に展開し, 高専生が作った加速器を競うコンテストを

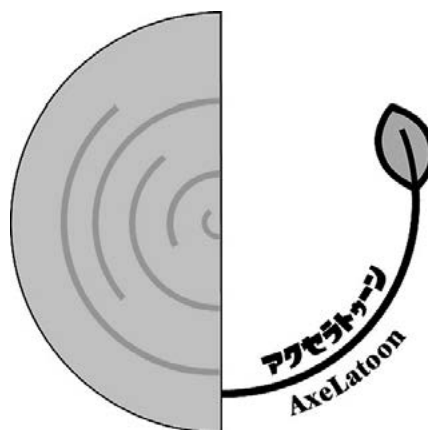


図1 AxeLatoonのロゴマーク. AxeLatoonという名前はAccelerator(加速器)とRatoon(新芽)に由来する. ロゴはこの名に基づいており, 高専で製作しているサイクロトロンデーター電極と, サイクロトロン粒子軌道を模したものになっている.

開催することをめざしている。

高専は高校1年次から現場指向の高度な教育を行っており、これまでも様々な分野の優秀な技術者・研究者を輩出している。加速器科学は高周波や真空、機械工学、制御など様々な分野の技術が必要となる総合科学であり単科の教育でカバー仕切れない広い技術が要求されるが、電気や機械などの学科を有する高専生・高専スタッフが協力することで、加速器製作を行うことができると考えた。また、前述の通り加速器自体が総合科学であるとともに、その利用まで含めると素粒子原子核から化学や生物なども含めた全ての科学技術分野をカバーしていることから、本活動を通じて高専生が多様なキャリアパスを考える良いきっかけになると考えられる。さらに、本活動を通じて高専とKEKなどの研究所との連携を深め、加速器製作を通じて高専型のPBL (Project Based Learning) を加速し、高専における教育の質をさらに高めることができると考えられる。

また、高専生が作った小型の加速器を用いたワークショップ開催も検討している。高専生が作ったテーブルトップサイズの小型加速器を用いたワークショップを展開することで、世界的にもユニークな実際に加速器に触って遊べるアウトリーチ活動を実現する。また、各高専が各地域でワークショップを展開して地域との連携を深めることで、人材育成の循環を生むとともに、高専の地域での存在感を高めることができると考えている。

活動を開始するにあたって、当初からコラボレーションに参加し、加速器を専門とするスタッフのいる茨城高専で活動の準備を始めた。2020年度に入ってからすぐに茨城高専で加速器製作を進める予定であったが、COVID-19の影響で前期は現地での活動中止を余儀なくされた。そこで、2020年度前期は今後の高専での加速器製作手順の検討を行った。

加速器製作手順を確立するにあたって、数ある加速器スキームの中でサイクロトロン加速器を試作することにした。これは、サイクロトロン加速器が高校物理の範囲内で理解可能で大学入試問題にも度々用いられる良い教材である事と、既にコラボレーションメンバーの一人が自宅で小型サイクロトロン加速器を製作し[2]、スタッフ間で製作手順がある程度共有できていたことが理由である。

2020年度後期には、茨城高専において加速器製作活動や加速器の原理・利用などを紹介する説明会を計4回行った。本科・専攻科の学生30名程度が参加し、当時の本科生3年生が中心となって2021年度には加速器製作活動を開始した。残念ながら、主要メンバーが就職活動などで多忙になった2022年度後半から活動を停止しており、メンバーの世代交代は今後の他高専における持続的な活動においても課題であることが明らかとなった。

茨城高専での活動と継続して、様々な高専で本活動の説明会を実施し、いくつかの高専で活動を開始した。2021年6月には小山高専で本科1年生を対象にした説明会を開催し、それをきっかけに7名の学生で活動を開始した。長野高専でも2021年12月に現地説明会を行い、それがきっかけ

となって2022年には同好会が設立した。津山高専でも2022年4月に説明会を行い、2023年度から加速器をテーマにした授業[3]で学生による加速器製作活動が行われている。他の高専が部活動・同好会形式で放課後に活動を行っているのに対し、津山高専では授業で加速器製作を行っているのが特徴的である。2022年度末には活動HPを見て興味を持った豊田高専生から問い合わせがあり、リモートで説明会を実施し、2023年度には豊田高専でも活動を開始した。各高専で製作している加速器はいずれも手のひらサイズであり、小電流で加速エネルギーも低いことから放射線も発生することなく安全が確保されている一方で、高周波や高電圧も扱うので、学生が思わぬ事故や怪我に遭遇する可能性はある。製作活動においては「(修理費は痛い) 操作ミスで機器が壊れるのも経験のうち」としてなるべく学生の自主性に任せつつも、怪我の無いように常にスタッフ・教員が注意を払い進めている。

次節で、各高専での活動の詳細を紹介する。

7.3 各高専での活動

7.3.1 小山高専

小山高専における本プロジェクトは、2021年7月から始まった。当時1年生の本科生12名(機械/電気電子/物質材料工学科)がAxeLattoonスタッフの協力を得て、サイクロトロン加速器製作に向けた設計を開始した。3D電磁界解析ソフトCST Studioによる磁場分布シミュレーションや粒子軌道計算を行い、製作に向けてチャンバーの設計を進めた。2022年春からは加速器のチャンバー本体の製作を開始し、それと並行してフィラメントやその駆動回路、水素ガスなど、周辺機器の準備も進め、7月頃から真空ポンプやRF発振器をチャンバーに接続、真空引き試験やRFチューニングを確認、2023年1月に稼働を開始した。図2に加速器チャンバー内部の様子と関連機器の全体像を示す。加速器の運転実験を繰り返し、チャンバー内部のディテクタが何らかの粒子をキャッチして電流として計測できはじめてきたが、所望のイオンビーム初観測にはまだまだ微調整と時間が必要ではあるが、確実に進んでいる状態である。

本校では2021年に活動を開始し、放課後に有志メンバーが集まって活動していたが、2023年10月には正式な愛好会として発足し、2024年度からは本活動に興味を持ってくれた多くの1年生も加わり一緒に活動を行っている。学生は3Dプリンタを用いて細かな部品を製作するなど、柔軟なアイディアで製作を行っている。また、本校のプロジェクト経費の支援(2023/2024年度)を得て、3DプリンタとLEDで視覚的にサイクロトロン加速器を理解できる教材や、様々な粒子加速の原理をあそびながら理解できる教育教材の開発も学生主体で並行して取り組んでいる(図3)。

これらの活動の成果は物理学会Jr.セッション(2021/2022/2023年)や国際会議STI-Gigaku 2023(ベストポスター賞受賞)での発表を行ってきたほか、KEK dayにおける活動紹介や、Maker Fair Tokyo (2022/2024年)

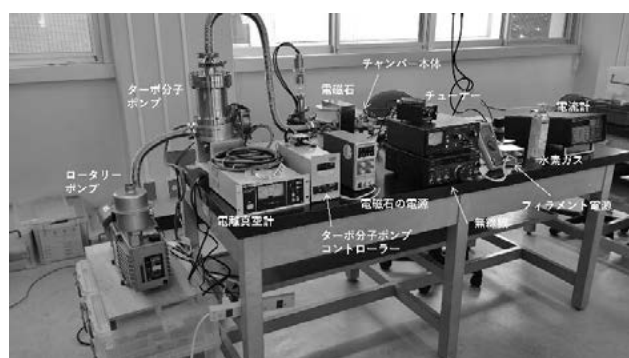
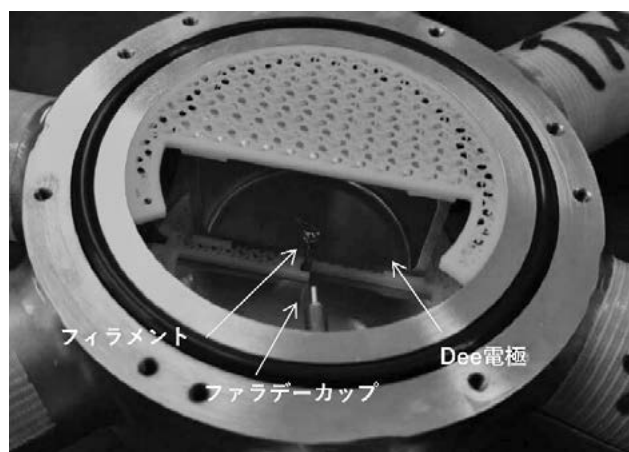


図2 小山高専で製作中のサイクロトロン加速器の(上)チャンパー内部の様子、(下)全体写真。3Dプリンタでディー電極上下のメッシュ状の板を作製し、その板で電極とフィラメントを固定していたが、加速電界の加わり方を考慮して、今は別の形にしている。



図3 ガウス加速器を利用したボーリングゲームの様子。2024年のKEK施設公開で展示した。小さな子ども達に好評であった。

への出展（2024年は長野高専のかそ☆けんと合同で出展）など積極的に校外へ広くアピールしている。これらの活動の成果もあり、2024年10月には愛好会から同好会へ昇格、ロボコン/プロコンと並び、本高専を象徴する学生活動として校内での認知が広まってきた。また中学生を対象とした高専説明会やオープンキャンパスでは本活動紹介で興味を持ってくれる中学生も多く（保護者も）、中には「この活動をやりたいから頑張って勉強して高専に入学する」と言う中学生も数名いた。さらに、東北大や東大の物理サークルの見学や、民間企業からの興味関心も高く、製品開発に使えないかと相談も複数件あった。

本活動は加速器製作を通じて技術者としての作り能力を向上させる一方、目の前の現象の物理を純粋に“楽し

む”という側面もある。それだけでなく、講義の学修単位の導入や講義内容の圧縮（いわゆるスリム化）が進む高専教育において、“予期せぬ失敗”や“意図せぬ成功”を学生が経験できる数少ない機会であると感じている。実際に起こった“予期せぬ失敗”の一例を挙げると、「大気中でフィラメントに通電するとどうなるのか」があった。チャンパー内の真空が引けていないのに、フィラメントに通電してしまったために生じた。この時フィラメントは非常に強い光を放ち、わずか1.5秒程の短い時間で燃え尽きてしまうわけだが（図4）、学生らには強烈な記憶として残っている。普段の講義や実験では体験できない（体験させられない）、予期せぬ失敗と成功を通じて様々な経験を深く積むことができ、技術者教育として有益な活動となっていると言えるだろう。

7.3.2 長野高専

2022年7月に加速器研究同好会を結成し、現在は実働12～14名程度で活動している。新入部員の1年生2名も加わり、継続的な活動をめざすことができている。最近の活動内容は、1)長野高専オリジナルの加速器真空チャンバをCADでデザインしながら、2)どのような部品をいかに組み合わせて製作するかについて議論し、3)実現可能と考えられるサイクロトロン加速器の粒子軌道を計算したり、Geant4を用いた一様磁場中での電子の円運動についてのシミュレーションをしたりしている。活動進捗について毎年文化祭でアピールするなど、活動をさらに活発化し、より多くの部員を入部させたいと考えている。

つぎに最近の長野高専の活動についてハード面とソフト面に分けて報告する。

(1) ハードウェア開発について

機材については電磁石、ターボ分子ポンプ、ロータリー真空ポンプなどがそろっており、あとは高周波電源とチャンパー本体、真空計などがそろえば実験を始められる状態である。現在は真空チャンバーとDee電極をCADにて設計しており、厚さを薄くする、パイプの位置を考える、などの工夫をしながら設計している。この工夫によって出力や作業性の向上をめざしている。

また、電磁石やターボ分子ポンプ、ロータリー真空ポン

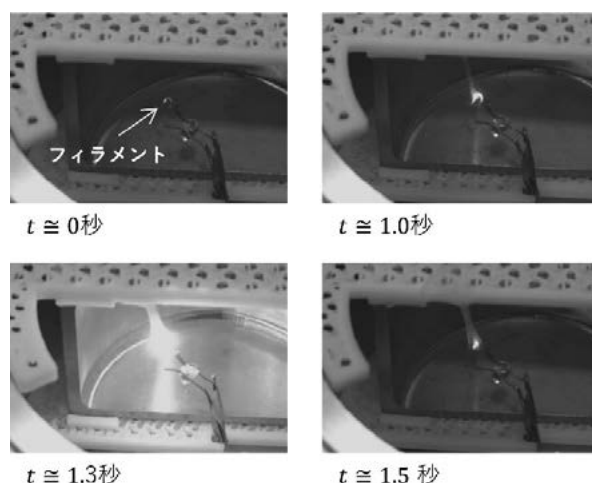


図4 大気中でフィラメントが燃焼する様子。

プなどの動作確認を2024年度内に行い、機器が十分に動作しているか確認する予定である。動作確認をした後は一部機材を製作した真空チャンバーや回路構成と合うように改造する予定である。2025年始めには実験を行えるようにしたいと考えている。

(2) ソフトウェア開発について

サイクロトロン加速器の設計のためのシミュレーション班を結成し、Geant4を用いたシミュレーション環境を作成している。これまでのGeant4シミュレーションにより、一様磁場および時間変化する高周波電場を通過する陽子の加速運動を確認することができた(図5)。現在はこの陽子の平均自由行程を求めるためのデータ解析の方法を考案して作成している。

7.3.3 津山高専

津山高専では2023年度から授業として卓上静電型加速器の実現へ向けた活動を進めている。2023年度の3年自発的学習科目「全系横断演習Ⅰ」では、先進科学系の学生3名が週1時間半ずつ演習テーマ「津山高専で加速器を作っちゃおう」に取り組み、調査・設計(電子回路・電界シミュレーション)・製作・真空中試験を行った[3]。この3名は、引き続き2024年度4年前期の自発的学習科目「全系横断演習Ⅱ」において、検出器検討・ビーム観測をめざした活動を行った。

電界シミュレーションの結果、加速部としてアクリルパイプは長さ35 cm・外径56 mm・厚さ3 mmとし、電極は銅テープ(厚さ0.035 mm)2巻きを9本、電極間を高電圧用5 GΩの抵抗8個で繋いだ。加速電源としては、安価に入手できる400kV出力のテスラコイルを利用することとした。当初は検出器として既存の霧箱の利用を考えていた。

2024年1月17日より、真空ポンプで空気引きを始め、空気漏れ箇所の特定と接着剤の補填を行った。3月7日には 1.58×10^{-2} Paに減圧し、豆電球フィラメントに電圧3 Vを印加させ、図6のように安定的な発光を観察した。

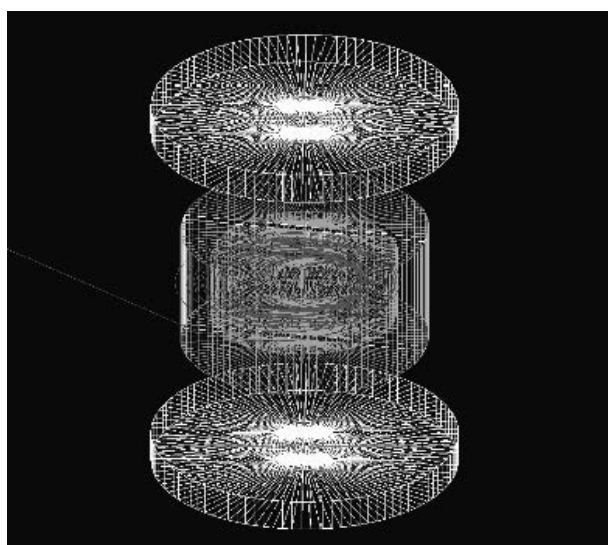


図5 Geant4を用いた陽子のサイクロトロン加速のシミュレーション(青線:陽子の軌道)。

加速電圧次第であろうが、 β 線が出口アクリル板と霧箱チャンバーを通過するという確証がなかった。そこで β 線も観察可能な秋吉式ベルチェ霧箱導入の他に、クルックス管類似で電子ビームをガラス板に照射する蛍光観察を考えた。加速電圧が10 kV程度までであればX線の影響は少ない。そこで、アクリル板内側に貼ったガラス面の半分に硫化亜鉛ZnSを主成分とする夜光蓄光顔料を塗布した検出用ZnSショートフランジ(図7)も製作した。

使用予定のテスラコイルのパルス出力が交流であることが6月18日にわかった。そこで6月24日に 1.74×10^{-2} Paまで減圧し、1.5 Vで豆電球フィラメントを弱く発光させ、ナリカ社高圧発生BOX WMS-001にてDC5 kVを加速部に印加したが、検出用ZnSショートフランジの蛍光の有無は分からなかった。使用した蓄光顔料の蓄光効果が大きく、フィラメントからの光が影響した可能性がある。

今後は、蓄光顔料の種類および冷陰極を検討し、検出用ZnSショートフランジによる蛍光の観察、直流出力テスラコイルあるいはコッククロフト・ウォルトン回路により高電圧で加速した高エネルギー電子線を真空窓経由で秋吉式ベルチェ霧箱に入射させ、X線に留意しながら β 線の観察をめざしたい。

7.3.4 豊田高専

豊田高専では、2023年3月からAxeLatoonの活動に参加している。機械工学科、電気・電子システム工学科、情報工学科の学生からなる7人のメンバーが、同好会の形で放課後に課外活動として週に2回程度活動している。この活動を始めた経緯は、当時高専2年生の学生が本活動のHPを見て、サイクロトロン加速器や真空装置、高周波電



図6 豆電球フィラメント点灯実験の様子。

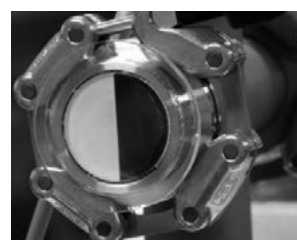


図7 ZnS ショートフランジ。

磁場などの普通の高専生活では見慣れない、魅力的で心躍る世界に惹かれ参加してみたいと思い、友人や教員を巻き込んで開始した、という学生主体の活動である。

開始した2023年当初は、メンバー全員が加速器の原理や用途について学ぶため、豊田高専近隣の加速器施設の見学を行った。あいちシンクロtron光センターと、名古屋大学のダイナミトロン加速器施設を訪問し、それぞれ研究者から説明を受けた。メンバーの一部は加速器に関する知識がほとんどなく活動を始めたため、実物の加速器を見てその巨大な施設の運用やエネルギーの大きさ、超高真空、応用研究について知り、加速器のイメージを持つことは、この活動には不可欠な経験であった。

次に製作活動について述べる。KEKから小型真空チェンバー、ロータリーポンプ、ターボ分子ポンプなどの真空系や、電磁石、テスラメータ、無線発信機、ベクトルネットワークアナライザなど磁場、電場を発生する機器を借用し、一つ一つの役割を勉強し特性を調べた。参照した資料は参考書やWebの他、先行して活動している他高専のアドバイスも得ながら学んでいった。特に高周波電場のチューニングについては、小山高専のメンバーが詳細な手順書を作成しており、それに沿って調整すれば反射波が0にできる。また真空系の全体設計についてKEKや大学、他高専の研究者より助言を受けながら進め、必要な配管等を手配し製作した。現状では、例えば到達真空度については約1時間で 1.9×10^{-2} Paまで真空引きすることができている。

次に、加速器としては異色ではあるが、部員勧誘用の実験装置の製作について述べる。新入部員を勧誘するため見栄えの良い実験装置を新しく製作することにした。見た目のインパクトを重視し、光を発することと、身近な道具を使うこととした。調理用のステンレス鍋を真空容器として使い、その中にタングステンのフィラメントと加速電極、そしてLEDを設置する。LEDの陽極側はGND電位に接続する一方、陰極側は電氣的に浮かせておく。フィラメントに電流を流し熱電子放出で飛び出した電子を電極間で加速させ、LEDの陰極に電子を衝突させることでLEDに電子電流を流し発光させるというものである。鍋と真空系配管との接続は、溶接するのは難しいため、浴室用コーキング材でシールすることを検討した。実験した様子を図8に示す。この実験により、到達真空度は 2.4×10^{-2} Paに到達することが確認できた。このときの平均自由行程は約27 cmであり、フィラメントとLEDの間隔をこれ以下にすれば真空度は十分である。現在、製作進行中であり、鍋に配管を接続した様子を図9に示す。このように真空用の専用部品ではなく身近な道具を用いるため学生の創意工夫の余地があり、興味深い実験テーマである。文化祭などの公開の機会に、フィラメントからの電子放出と、LED発光を実演できるよう今後も実験と製作を続けていく。

7.4 今後の展望

これまで述べた通り、4つの高専で既に加速器製作活動が進んでいる。また、各高専間の交流も活発に行われてお

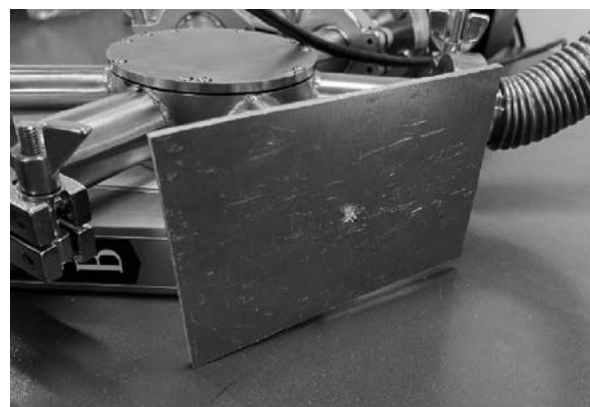


図8 浴室用コーキング材を用いて、どこまで真空封止できるか検証した実験。アルミ板に直径2 mmの穴を開け、直径1.5 mmの銅の棒を挿入し、隙間をコーキング材で埋め、真空引きした。



図9 ステンレス鍋に穴あけ加工し、真空配管を接続した様子。

り、2023年2月には小山高専に当時の活動校である小山・長野高専の活動メンバーが集まって報告会を実施した。さらに翌年の2024年2月には小山・長野に加え豊田高専も加わって小山高専で報告会を実施、2024年7月にはオンラインでの報告会を実施した。オンライン報告会には、並行して説明会を実施し活動に興味を持った沖縄・呉・群馬高専の先生・学生が参加し、沖縄高専では具体的な活動準

備が進んでいる。本活動は全国の高専の先生が意見交換を行う KOSEN フォーラムでも活動を報告しており[4]、全国展開に向けた準備を進めている。将来的に各高専で自主的に高専生が加速器について学べるように、星野進学ゼミの佐藤徳弥氏と協力して「高1 から始めるサイクロトロン」動画資料を作成している[5]。

本活動は加速器関係の企業関係者からも注目されており、住重加速器サービスと活動協力を検討している。既に、香川高専・新居浜高専では、2024年2～3月に、医療用加速器などの製造を手掛けている住友重機械工業株式会社新居浜工場・西条工場の見学会を実施した。2024年度も同時期に工場見学を予定しており、既に香川高専で住友重機械工業株式会社の加速器技術担当者による加速器に関する講義が行われた。

2022年12月にオンラインで行われた国際会議 CYC2022 において我々の活動を報告した際、コーブルク大学（ドイツ）で教育用小型サイクロトロン COLUMBUS を製作し高校生に向けたワークショップを行っておられる C. Wolf 先生に強い関心を持っていただいた。この縁で、AxeLatoon コラボレーションメンバーの一人が2023年5月にコーブルク大学を訪問し、COLUMBUS グループとの意見交換を行った。日本とドイツで教育システムの違いなど若干の障壁があるものの、これを足がかりとして、より具体的なコラボレーションの検討を開始した。また、COLUMBUS グループによる教育用サイクロトロンの教科書[6]の日本語訳についても快諾を得ており、出版に向けての準備を進めている。今後の展望として、高専生のコーブルク大学訪問、ドイツからの訪問受け入れ等による

相互交流の発展を計り、本活動を通して技術や知見を身につけた高専生たちが、さらには国際的な人材へと成長できる環境を整備していく。

7.5 まとめ

次世代の加速器技術者・研究者の育成をめざした高専での加速器製作活動を2019年度から開始し、茨城・小山・長野・豊田・津山高専で活動を行い、更なる全国展開に向けた準備も進んでいる。持続可能な活動と最終的な加速器コンテストの開催には、高専、大学、研究所、企業と産学を巻き込んだ活動展開が必要不可欠であり、企業との連携を準備している。

もし本原稿を読んで興味を持っていただければ、本活動のパンフレットとロゴマークのステッカーを送付するので、お気軽に大谷までご連絡いただきたい。本報告を通じて、加速器製作のメンターなど一緒に活動していただける仲間が増えることを願っている。

参考文献

- [1] <https://www2.kek.jp/axltn/about/>
- [2] https://makezine.jp/blog/2019/08/mft2019_report_01.html
- [3] <https://www.tsuyama-ct.ac.jp/images/oshirase/ren-raku/zenkeioudan/2023/s-sasai.pdf>
- [4] 服部綾佳 他, 「茨城高専における加速器製作プロジェクト」, 令和2年度 KOSEN フォーラム2021年3月3日.
- [5] <https://www2.kek.jp/axltn/videos/>
- [6] M. Prechtel and C. Wolf, *Das Lehr-Zyklotron COLUMBUS* (Springer Spektrum, 2020).



小特集 高専におけるプラズマ・パルスパワーに関する地域産業との連携

8. おわりに

8. Conclusion

岡本 征晃

OKAMOTO Masaaki

石川工業高等専門学校

(原稿受付：2025年1月30日)

全国に51校55キャンパスある高専では、各地域において様々な分野で特色ある産学連携の活動を行い、地域社会や産業界との連携を図っている。高専の特色として実践的なモノづくり教育が挙げられ、地域と密接に連携しながら課題解決型の応用研究が数多く実施されている。近年は、成長著しく注目されているAI・データサイエンス、サイバーセキュリティ、ロボット、IoT、半導体の分野において、企業および産業団体からのニーズに応え、将来を見据えた高専教育に直結する産学連携活動に注力している。プラズマやパルスパワーの分野は、現代社会の産業応用に広く展開されており、高専でもこれまでに様々な研究活動が行われてきた。本小特集では、各高専で実施されてきたプラズマやパルスパワーを用いた研究の中で、地域産業との連携をめざした研究活動を紹介している。

2～4章で紹介した農業や畜産業でのプラズマやパルスパワーの利用は、高専の学生にとっては目新しく、興味を惹かれるテーマであるため、高専教育で培った知識や技術を駆使して積極的に研究活動している姿が思い浮かばれる。2章の鶏舎への設置を想定して殺虫用の電極構造を設計・製作することや4章のみかんを搬送するローラーコンベアを電極に改造することは地元企業との距離が近く、実用化に向けて学生が課題解決に取り組める実践的な機会として貴重であると考えられる。3章のブランドしいたけ「のとてまり」の研究は、初期実験段階で一定の成果が見られ、今後の実用化への期待が持てる研究内容である。3つの高専すべて、地域と密接に連携しながら研究を進めている様子が伺える。

5, 6章では、高専で5校と数少ない商船高専で行われているプラズマ研究を紹介した。商船・海事分野の専門教育が特色である商船高専で実施しているプラズマ関連研究に個人的に興味があったため、5章では船舶塗装の剥離を、6章では船舶の廃油処理のプラズマ利用について紹介して貰った。実用化を見据えて活動を続けており、船舶でのプラズマ利用の可能性が期待される研究内容である。船舶関係の課題解決にもプラズマが利用できる可能性が示されているので、改めてプラズマの応用力の高さを認識した。

7章では、2019年から始まった加速器の制作活動のこれまでの成果を紹介した。高専教育の特色であるモノづくりを主體的に活動できる学生の知識や技術を十分に発揮しており、4つの高専のそれぞれで学生が活躍している姿が見受けられる。加速器関連の企業との協力や海外活動も積極的に行われており、今後参加する高専も増えることが期待される。高専ではロボコン、プロコン、デザコンなど各種のコンテストが開催されているが、最終目標に掲げている加速器製作コンテストが開催できる状況まで発展することを期待する。

以上のように、プラズマおよびパルスパワーに関する研究活動の一端を紹介したが、これらに限らず、高専では多岐にわたるプラズマ関連の研究が進められている。本小特集が契機となり、高専におけるプラズマ関連研究の一層の発展が促進されるとともに、地域産業との連携が強化され、ひいては地域社会の発展に寄与すること期待して、ここに筆を擱く。

小特集執筆者紹介

かわさき ひろ はる
川崎 仁晴

1993年長崎大学大学院博士課程修了(博士(工学))。現在、佐世保工業高等専門学校勤務。主として、粉体ターゲットを用いたプラズマプロセスによる機能性薄膜の作製とその成長機構の解明に関する研究に従事。数年後の定年退職後の楽しい生活を夢見るも、マンションのローン返済のため、妻に「70まで働け!」と釘を刺され、意気阻喪。右肩腱板断裂、ヘルニア再発、右足首捻挫と満身創痍ながら再就職先を調査中。

うえ の たか ひさ
上野 崇寿

2009年 熊本大学大学院年次短縮修了。博士(工学)。大分工業高等専門学校電気電子工学科准教授。主な研究分野は高電圧インパルス電源の開発。高電圧による殺菌や殺虫。JR九州での社会人ドクター経験を経て母校に教員として帰還。現在は学生に自由な発想と実験重視の指導を行う傍ら、愛犬のヨーキー(6歳)との散歩がアイデア創出のひらめきタイム。ペットケア分野への技術応用も構想中。

た な か ふみ あき
田中 文章

石川工業高等専門学校 電気工学科 准教授。2012年 熊本大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。高電圧発生回路の作成やその応用や授業では高電圧や計測などを担当している。現在、シイタケのほだ木が増えてきており、シイタケのサイズの測定には苦慮している。温暖化の影響かは不明だが年により収穫の日時や量が結構、異なるため、気温などの環境条件やサイズ計測の自動化・省力化の手法を検討しています。

やぎ ゆう よし ひと
柳生 義人

九州大学大学院総合理工学研究院・エネルギー科学部門・准教授。2024年9月より現職。主な研究は、プラズマの医療、農業、環境分野での新規応用技術の研究開発に加え、水稻の苗を食害する厄介(厄具!?)なジャンボタニシの工学的防除技術の研究開発に従事。自宅では、道端で保護したアカハライモリ、長女が見つけたオタマジャクシ(今はアマガエル)に加え、ミミズコンポストのシマミミズ達の飼育係に従事。

なか むら つばさ
中村 翼

大島商船高等専門学校 電子機械工学科 研究キーワードである「大気圧プラズマ」を、所属している「商船」という環境に応用する研究をしています。またプラズマや高電圧に関係する教育教材の作成も少しずつ進めていますので、ご興味のある方、ご連絡をお待ちしています。

おお たに まさ し
大谷 将士

高エネルギー加速器研究機構准教授。新しい量子ビームの実現で人類の英知を切り拓くという信念で研究をしてきた(…ことにしている)。2013年にミュオン加速の研究を始め、世界で初めてミュオン加速に成功、2021年C.N. Yang賞、令和5年度文部科学大臣表彰・若手科学者賞を受賞。ようや

くゲームとアニメが好きな自分を認められるようになってきたが、そのポジションはすでに3人の子ども達に奪われつつある。

くま がい ゆう き
熊谷 勇喜

豊田工業高等専門学校 電気・電子システム工学科 准教授。主な研究分野は半導体デバイスの信頼性、ノイズ起源について。加速器との関わりはSPRING-8での軟X線を使ったXPS分析に10年以上前に携わって以来で、学生とともに勉強中です。

や し き り く
谷 敷 怜 空

豊田工業高等専門学校電気・電子システム工学科。北海道出身。2021年豊田高専入学。1年間のスイス留学ののち現在4年。天文学における装置開発に強い興味があり、普段はアマチュア無線機器を用いた簡易電波望遠鏡の製作、普及に取り組んでいます。

さ さ い ゆう じ
佐々井 祐二

岡山商科大学経営学部経営学科専任教員。2025年4月に津山高専から異動しました。格子ゲージ理論に基づく大規模数値計算、天文分野を中心とする科学教育などを手掛けてきました。担当している情報系科目もカバーするような研究内容を模索しています。課題である体形改善も気にしつつ、しばらく頑張りたいと考えています。

み やけ も も か
三宅 望々香

津山工業高等専門学校 総合理工学 先進科学系5年。卒業研究は生物分野でイベリアトゲイモリについての研究を行っています。趣味はピアノや編み物、剣道、スノーボードなど幅広く楽しんでいます。実家にトイプードルが2匹おり、犬が大好きです。

なが お かず き
長尾 和樹

小山工業高等専門学校電気電子創造工学科准教授。半導体を用いたパルス電源の開発と応用研究、相対論的パルス大電流ビームによるマイクロ波発生について研究を行っている。大学院では加速器を使って研究を行ってきたが、まさか学生と一緒に加速器を作るようになるとは思っていなかった。学生に振り回されつつ(ときには振り回しつつ?), 楽しみながら活動している。

ひら の しん いち
平野 進一

小山工業高等専門学校一般科准教授。重力理論・宇宙論の理論物理学者であり、初期宇宙のインフレーションや後期加速膨張を担うダークエネルギーの研究を主に行っている。ものづくりとは無縁の生活を送ってきたが、小山高専に着任し、ものづくりのための教育に当たっている。ちなみに、ついこの前まではんだ付けができなかった。